

ISSN1016-9288

제52권 9호

2025년 9월호

전자공학회지

The Magazine of the IEIE

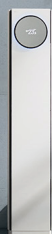
vol.52. no.9

양자컴퓨팅 및 통신 기술 동향

- 하이브리드 컴퓨팅 기반 변분법 양자 알고리즘(VQA) 연구 동향 및 그 전망
- 풀 스택 양자컴퓨팅 시대를 위한 양자 근사 최적화 알고리즘 연구 동향
- 양자강화학습 기반 자율이동체 제어 연구
- 양자컴퓨팅 알고리즘 연구 개발 동향
- 양자암호와 양자통신을 잇는 응용 프로토콜 연구 동향
- 양자통신을 준비하는 산업계의 개발 동향과 전망



LG전자 구독 — 좋아요.



전문가가
에어컨 속까지
싹-청소해 주니까



케어매니저님이
새것처럼 깨끗하게
관리해 주니까



구독만 하면
쓰는 내내
관리받으니까



손많이가는
청소기 관리,
알아서 다 해주니까

가전도 이제 전문케어 받는 시대

LG전자 구독 **subscribe**



LG전자 베스트샵 또는 LGE.COM에서 원하는 가전을 구독해 보세요

* 제품별 계약조건에 따라 구독기간은 상이하며, 총 계약기간 동안 제품의 소유권은 회사에게 있음. 계약기간이 3년 이하 상품은 계약만료 후 소유권이 고객에게 이전되지 않으며, 재구독/반납/인수(비용 추가)여부를 필수로 선택 가능. 4년~6년인 상품은 계약만료 후 제품 소유권이 고객에게 이전됨.

ICCE-Asia

2025

The 10th International
Conference on Consumer
Electronics (ICCE) Asia

10. 27^(Mon) - 10. 29^(Wed), 2025

Westin Josun Busan Hotel, South Korea

Presentation Guidelines

The conference will be held with face-to-face presentations of papers at the conference site at Busan, South Korea. Organized by the IEEE Consumer Technology Society and the Institute of Electronics and Information Engineers, ICCE-Asia 2025 which will be held in the Busan, South Korea is an event open to researchers and engineers from industry, research centres, and academia to exchange information and results related to consumer electronics (CE). The conference will feature outstanding keynote speakers, high quality tutorials, special sessions and peer-reviewed papers. It hopes to attract a global audience from industry and academia. It is a perfect opportunity to promote affiliated company/organization to an audience of world-class researchers in the CE industry.

TOPICS OF IEEE/IEIE ICCE-ASIA 2025

- Artificial Intelligence and Machine Learning for CE Applications (AIM)
- Robotics, Drones, Automation Technologies and Interfaces (RDA)
- Security and Privacy of CE Hardware and Software Systems (SPC)
- Energy Management of CE Hardware and Software Systems (EMC)
- Application-Specific CE for Smart Cities (SMC)
- RF, Wireless, and Network Technologies (WNT)
- Internet of Things and Internet of Everywhere (IoT)
- Entertainment, Gaming, and Virtual and Augmented Reality (EGV)
- AV Systems, Image and Video, and Cameras and Acquisition (AVS)
- Automotive CE Applications (CEA)
- CE Sensors and MEMS (CSM)
- Consumer Healthcare Systems (CHS)
- Enabling and HCI Technologies (HCI)
- Smartphone and Mobile Device Technologies (MDT)
- Semiconductor Devices for Consumer Electronics (SCE)
- Other Technologies Related with CE (MIS)

SPECIAL SESSIONS

Special session proposals are invited to IEEE/IEIE ICCE-Asia 2025, and inquiries regarding submission should be directed to the Special Session Chair.

BEST PAPER AWARDS

The authors of the best papers will be presented Gold, Silver, and Bronze awards. Selected top quality papers will be recommended to be published in the Journal of Semiconductor Technology and Science (JSTS) or a special issue of IEIE Transactions on Smart Processing and Computing.

PAPER SUBMISSION

Prospective authors can submit their papers by following the guidelines posted on the conference webpage (<http://www.icce-asia2025.org>).

Accepted papers will be submitted for inclusion into IEEE Xplore subject to meeting IEEE Xplore's scope and quality requirements.

AUTHOR'S SCHEDULE

- Full Paper Submission / Special Session Proposals: **August 22nd, 2025**
- Notification of Acceptance: **September 19th, 2025**
- Submission of Final ver. Paper: **September 30th, 2025**

CONTACT POINT

- Secretariat : inter@theieie.org
- <https://icce-asia2025.org/>



2025 추계학술대회

곤지암리조트 EW빌리지
(경기도 광주)

11. 28(금) ~ 29(토)

| 최우수/일반/학부생 논문 논문제출 : 10월 20일(월)
심사통보 : 10월 27일(월)
사전등록 : 11월 17일(월)

| 정기총회 곤지암리조트 EW빌리지
2025년 11월 28일(금)

| 발표분야(학회 6개 소사이어티)

소사이어티	연구회
통신 (Communication)	통신, 미래지능형네트워크, 마이크로파 및 전파전파, ITS, 군사 전자, 무선PAN/BAN
반도체 (Semiconductor)	반도체소자 및 재료, 광파 및 양자전자공학, SoC 설계, RF 집적회로, PCB & Package, 정보보안시스템, 내방사선 반도체 설계 및 소자, ESD/EOS & Latchup, 인 메모리 컴퓨팅, 이미지센서
컴퓨터(Computer)	멀티미디어, 휴먼CT, 융합컴퓨팅, 인공지능/신경망/퍼지, M2M/IoT, 증강휴먼, 인공지능 및 보안, AI 응용, 블록체인
인공지능 신호처리 (AI Signal Processing)	음향 및 음성신호처리, 영상이해, 영상처리, 바이오영상신호처리, 딥러닝, 로봇지능
시스템 및 제어 (System and Control)	제어계측, 의용전자 및 생체공학, 지능로봇, 회로 및 시스템, 국방정보 및 제어, 자동차전자, 의료영상시스템, 인공지능 전환(AX), 스마트 미터링
산업전자 (Industry Electronics)	산업전자제어, 임베디드시스템, 유비쿼터스 센서네트워크, 디지털통신시스템
New Emerging Area	의료, 에너지, Software, 기타





ICEIC 2026

International Conference on Electronics,
Information, and Communication 2026

January 18^(SUN) - 21^(WED) 2026

MGM Cotai, MACAU, CHINA

IMPORTANT DATES

Paper Submission Begin:
September 1, 2025

Paper Submission Deadline:
October 10, 2025

Notification of Acceptance:
November 10, 2025

Camera-Ready Paper
Submission Deadline:
November 21, 2025

Registration Deadline:
December 5, 2025

CALL FOR PAPERS

The 25th International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC 2026) is a forum open to all the participants who are willing to broaden professional contacts and to discuss the state-of-the-art technical topics.

Regular sessions of ICEIC 2026 will include more than 400 oral and poster presentations. In addition, the conference will offer special sessions, invited talks, keynote speeches, and tutorials to cover a broad spectrum of topics on electronics, information, and communication technologies.

CONFERENCE THEME

“Beyond Intelligence: Bridging Semiconductors, Systems, and Signals”

TOPIC

Semiconductor and Devices

Analog/Digital Circuits & Systems, RF Integrated Circuits, Computer Aided Design & Modeling, SoC Design & Applications, Semiconductors, Materials and Components, Lightwave and Quantum Electronics, PCB & Packaging, Solar Cell & Semiconductor Devices

Computer and Information

Computer Systems & Applications, Software for Smart Systems, Human Computer Interaction (HCI), Convergence Computing, Multimedia, Graphics, Ubiquitous System, Information Security, Artificial Intelligence, Neural Networks, Machine Learning

System and Control

Vehicular Electronics, Instrumentation and Control, Power Electronics & Circuits

Signal Processing

Computer Vision, Digital Signal Processing, Digital Image/Video Processing, Audio, Speech & Acoustic Signal Processing

Communications

Communication & Information Theories, Communication Networks & Systems, Microwave & Optics, Switching and Routing, Microwave, Antennas and Propagation, Intelligent Transportation System (ITS), Wireless PAN/BAN, Future Networks

Emerging Technologies

Biomedical Electronics and Bioengineering, Bio-electronics, IT Convergence, Renewable Energy, Car & Aviation IT

CONTACT POINT

• E-mail : inter@theieie.org
• <https://iceic.org/>

• Tel : +82-2-553-0255(Ext. 4)



전자공학회논문지

단편논문 신설 안내

전자공학회논문지에서 단편논문을 신설하여 투고를 받습니다. 기존의 정규논문과 함께 단편논문을 신설하여, 투고 논문 형식의 다변화와 함께 신속한 논문심사 및 게재를 추진하고자 합니다.

논문투고시스템 투고구분 선택

☞ 정규논문(기존) : 긴급 / 일반 중 택일

▶ 단편논문(신설) : 특급

단편논문 양식

☞ 투고규정 : https://www.theieie.org/pages_journal/journal_info.vm

☞ 논문양식 : <https://www.theieie.org/board/?ncode=a008>

* 심사본 : 3쪽 이내, 최종본 : 4쪽 이내

단편논문 심사비 : 10만원/편당

단편논문 게재료 : 게재논문 면당 5만원, 최대 4쪽 이내

☞ 지원 문구 추가 시 10만원 추가

☞ 교신저자가 비회원인 경우 산정된 게재료의 150% 부과

단편논문 심사 기간 : 2주 이내 1차 심사를 원칙으로 함

시 행 : 2022년 10월 이후



SAE MOBILUS™에서 세계 최고 Automotive Engineering 정보를 만나보세요.

SAE International은 국제 자동차 공학자 협회 (Society of Automotive Engineers)로 자동차, 비행기 및 기타 내연기관 관련 산업의 과학과 기술을 선도하는 학회입니다.

SAE MOBILUS™는 207,000건 이상의 특허 기록 문서, 기술 자료집, 그리고 eBooks과 간행물 자료를 제공합니다. SAE MOBILUS™은 기업의 산업 현장, 학교, 그리고 연구소의 사용자들이 필요한 자료를 이용하실 수 있도록 다양한 구독 옵션을 함께 제공합니다.

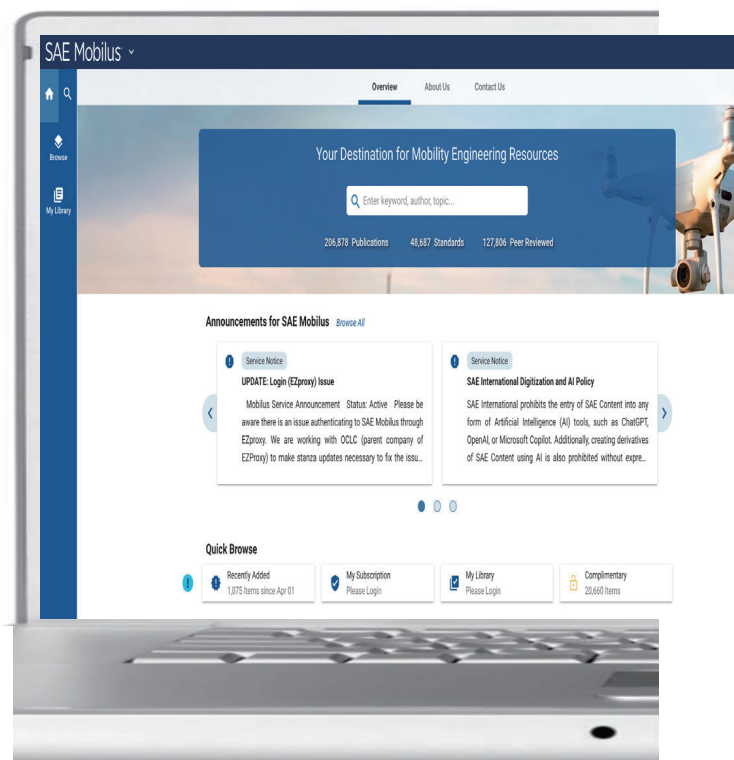
SAE MOBILUS™에서 다음과 같은 다양한 주제 분야에 대한 자료를 확인할 수 있습니다.

- Noise, Vibration, and Harshness (NVH)
- Parts and Components
- Vehicle and Performance
- Quality, Reliability, and Durability
- Maintenance and Aftermarket
- Design Engineering and Styling
- Chassis
- Bodies and Structures
- Safety
- Manufacturing
- Power and Propulsion
- Interiors, Cabins, and Cockpits
- Human Factors and Ergonomics
- Materials
- Fuels and Energy Sources
- Environment
- Electrical, Electronics, and Avionics
- Tests and Testing
- Management and Organization
- Transportation Systems

SAE MOBILOUS™에서 항공 우주 분야 R&D에 필요한 표준 및 규격 그리고 다양한 자료를 검색 및 이용할 수 있습니다.

- +9,300 SAE Ground Vehicle Standards (J-reports)
 - +15,500 SAE Aerospace Standards(AS,ARP, AIR, and 2D/3D Configurator Parts)
 - +18,200 SAE Aerospace Material Specification (AMS)
 - +3,600 SAE ITC Engine & Airframes Standard
 - SAE Historical Standards
 - Composite Materials Handbook(CMH-17)
- 복합 재료에서 최종 품목을 설계하고 제작하는 데 필요한 정보와 지침을 제공

<http://saemobilus.sae.org>



IEEE OPEN

The Trusted Solution for Open Access Publishing

우리나라 대학, 연구소, 그리고 기업의 연구 성과를
세계에 널리 알리는 기회



IEEE는 저자 연구 성과가 전세계 모든 IEEE 사용자들에게 빠르게 전달될 수 있도록
다양한 Open Access(OA) Program을 제공합니다.

- Fully Open Access Publishing (GOLD) Topical Journals - Open Access Article로 구성된
IEEE Open Journal (2024년 기준 34종)
- Multidisciplinary Open Access Journal - IEEE Access (IEEE의 다양한 Society로 구성된 Open Access 타이틀)
- Hybrid Journals - 기존 저널 타이틀 중 Open Access 아티클을 허용하는 저널이며,
기존 저널의 Impact Factor를 적용 (2024년 기준 180종 이상)
- IEEE Magazine - Open Access Article

등재된 아티클은 IEEE Xplore Digital Library에서 검색 및 이용할 수 있어 연구 성과를
전세계에 빠르게 알릴 수 있습니다.

*IEEE 한국 공인 딜러 KITIS는 기관의 Open Access Article 등재 건수에 따라 최대 40% 할인 번들 옵션을 제공합니다.
자세한 문의는 KITIS로 문의 부탁드립니다.



IEEE

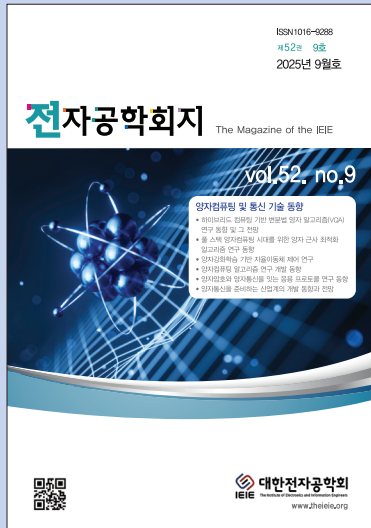
Authorized
Dealer



키티스 産學研情報(株)
KITIS Info. & Co., Ltd.

CONTENTS

제52권 9호 (2025년 9월)



※ 학회지 9월호 표지 (vol 52, No 9)

회지편집위원회

- 위 원 장 황 원 준 (아주대학교 교수)
- 부위원장 선 우 경 (서울대학교 교수)
- 위 원 김 영 성 (인하대학교 교수)
- 이 철 (동국대학교 교수)
- 정 희 철 (경북대학교 교수)
- 최 욱 (인천대학교 교수)
- 한 동 윤 (네이버 리더)
- 허 용 석 (아주대학교 교수)
- 사무국 편집담당 이 안 순 부장
- TEL : (02)553-0255(내선 6)
- FAX : (02)562-4753
- 학회 홈페이지 <http://www.theieie.org>

IEIE 프리즘

- 12 AI 융합 시대, 학회의 역할을 생각한다 /
김종옥 수석부회장(고려대학교 전기전자공학부 교수)

학회소식

- 13 학회소식 / 편집부

특집 : 양자컴퓨팅 및 통신 기술 동향

- 16 특집편집기 / 박수현
- 17 하이브리드 컴퓨팅 기반 변분법 양자 알고리즘(VQA) 연구 동향 및 그 전망 / 김영민, 이창현, 김형석, 노원우
- 27 풀 스택 양자 컴퓨팅 시대를 위한 양자 근사 최적화 알고리즘 연구 동향 / 장은혁, 최승우, 노원우
- 37 양자강화학습기반 자율이동체 제어 연구 / 김중현
- 47 양자 컴퓨팅 알고리즘 연구 개발 동향 / 배은옥
- 59 양자암호와 양자통신을 잇는 응용 프로토콜 연구 동향 / 손일권, 송우영, 배광일, 이원혁
- 70 양자통신을 준비하는 산업계의 개발 동향과 전망 / 노광석

회원광장

- 79 논문지 논문목차

정보교차로

- 81 국내외 학술행사 안내 / 편집부
- 98 특별회원사 및 후원사 명단

2025년도 임원 및 각 위원회 위원

회 수 석 부 회 장 고 문	장	백 광 현 (중앙대학교 교수)
	김 종 옥 (고려대학교 교수) - 총괄 / ITC-CSCC	
	권 오 경 (한양대학교 석좌교수)	
감 부 회 장	김 진 상 (경희대학교 총장)	
	방 승 찬 (한국전자통신연구원 원장)	
	신 희 동 (한국전자기술연구원 원장)	
소 사 이 어 티 회 장	오 상 록 (한국과학기술연구원 원장)	
	천 경 준 (씨젠 회장)	
	이 재 훈 (유정시스템 대표이사)	
협 동 부 회 장	강 문 식 (강릉원주대학교 교수) - 지부 / 교육 총괄 / 표준화	
	권 호 열 (강원대학교 교수) - 대외협력 / 기술정책	
	김 훈 (인천대학교 교수) - 하계 / 추계 / 국문논문	
소 사 이 어 티 회 장	노 태 문 (한국전자통신연구원 연구전문위원) - 산학연	
	송 병 철 (인하대학교 교수) - ICBC / ITC-CSCC / ICCE-Asia / SPC	
	이 승 호 (한밭대학교 교수) - 학술대회	
협 동 부 회 장	정 영 모 (한성대학교 교수) - 홍보 · 정보화 / 회지편집	
	고 병 철 (계명대학교 교수) - 인공지능신호처리소사이어티	
	신 오 순 (숭실대학교 교수) - 통신소사이어티	
소 사 이 어 티 회 장	이 덕 진 (전북대학교 교수) - 시스템및제어소사이어티	
	강 성 원 (한국전자통신연구원 부원장)	
	김 동 식 (인하공업전문대학 교수)	
소 사 이 어 티 회 장	노 승 원 (LG0노텍 CTO)	
	심 동 규 (광운대학교 교수)	
	오 윤 제 (정보통신기획평가원 PM)	
소 사 이 어 티 회 장	유 창 동 (KAIST 교수)	
	이 병 선 (김포대학교 교수)	
	이 서 규 (픽셀플러스 대표이사)	
소 사 이 어 티 회 장	이 장 규 (텔레칩스 대표이사)	
	전 선 익 (파이낸셜뉴스 부회장)	
	조 진 우 (한국전자기술연구원 부원장)	
소 사 이 어 티 회 장	강 명 곤 (서울시립대학교 교수) - 하계 총괄 1	
	강 태 옥 (성균관대학교 교수) - 사업	
	구 민 석 (서울시립대학교 교수) - 국제협력	
소 사 이 어 티 회 장	김 윤 (서울시립대학교 교수) - 총무	
	김 현 (서울과학기술대학교 교수) - 하계 총괄 2	
	김 민 휘 (중앙대학교 교수) - 차세대 리더육성	
소 사 이 어 티 회 장	김 수 연 (동국대학교 교수) - 회원, 여성	
	김 용 신 (고려대학교 교수) - 홍보 · 정보화 총괄 / 신기술	
	김 원 준 (간국대학교 교수) - SPC	
소 사 이 어 티 회 장	김 태 인 (인하대학교 교수) - 회원, 여성	
	동 성 수 (웅인예술과학대학교 교수) - 교육	
	변 대 석 (삼성전자 마스터) - 추계 총괄 2	
소 사 이 어 티 회 장	서 병 석 (상지대학교 교수) - 추계	
	손 교 민 (삼성전자 마스터) - 사업	
	신 창 환 (고려대학교 교수) - 하계	
소 사 이 어 티 회 장	유 찬 세 (한국전자기술연구원 수석연구원) - 사업 총괄	
	이 형 민 (고려대학교 교수) - 추계	
	임 흥 기 (인하대학교 교수) - ICCE-Asia	
소 사 이 어 티 회 장	전 세 영 (서울대학교 교수) - 기획, 대외협력	
	정 일 권 (한국전자통신연구원 본부장) - 사업	
	조 성 현 (한양대학교 교수) - 추계 총괄 1	
소 사 이 어 티 회 장	최 우 영 (서울대학교 교수) - JSTS	
	추 민 성 (한양대학교 교수) - 차세대 리더육성	
	황 원 준 (고려대학교 교수) - 회지편집 총괄	
소 사 이 어 티 회 장	고 용 남 (전, 하나마이크론 CTO)	
	김 현 수 (삼성전자 상무)	
	우 정 호 (비전넥스트 대표이사)	
소 사 이 어 티 회 장	이 도 훈 (국가보안기술연구소 연구위원)	
	김 기 남 (한국공학한림원 회장)	
	박 성 옥 (차세대지능형반도체사업단 이사장)	
소 사 이 어 티 회 장	선우명훈 (아주대학교 교수 / IEEE CASS 회장)	
	안 승 권 (연암공과대학교 총장)	
	전 영 현 (삼성전자 부회장)	
소 사 이 어 티 회 장	최 창 식 (DB하이텍 부회장)	
	전 병 우 (성균관대학교 교수)	
	구 본 태 (한국전자통신연구원 본부장) - 산학연	
소 사 이 어 티 회 장	김 병 훈 (LG전자 부사장/CTO) - 산업체	
	노 원 우 (연세대학교 교수) - 신기술 / 차세대 리더육성	
	류 수 정 (서울대학교 교수) - 회원, 여성 총괄	
소 사 이 어 티 회 장	이 강 윤 (성균관대학교 교수) - 사업 / 기술워크숍 / 대외협력	
	인 치 호 (세명대학교 교수) - 대외협력	
	황 인 철 (강원대학교 교수) - 소사이어티 네트워크 협력	
소 사 이 어 티 회 장	고 정 환 (인하공업전문대학 교수) - 산업전자소사이어티	
	이 덕 기 (연암공과대학교 교수) - 컴퓨터소사이어티	
	장 성 진 (와이씨 대표이사) - 반도체소사이어티	
소 사 이 어 티 회 장	김 강 태 (삼성전자 부사장)	
	김 형 준 (한국과학기술연구원 소장)	
	배 순 민 (케이티 LAB장)	
소 사 이 어 티 회 장	엄 낙 웅 (한국전자통신연구원 연구전문위원)	
	원 제 형 (도쿄일렉트론코리아 대표이사)	
	이 광 영 (서경대학교 교수)	
소 사 이 어 티 회 장	이 상 훈 (웨이브피아 대표이사)	
	이 용 옥 (한화시스템 부사장)	
	이 재 관 (한국자동차연구원 소장)	
소 사 이 어 티 회 장	정 준 (솔리드 대표이사)	
	최 병 호 (한국전자기술연구원 소장)	
	강 석 주 (서강대학교 교수) - 기획, 대외협력 총괄 / ITC-CSCC	
소 사 이 어 티 회 장	고 형 호 (충남대학교 교수) - 기획, 대외협력	
	권 혁 인 (중앙대학교 교수) - 총무	
	김 혁 (서울시립대학교 교수) - 교육	
소 사 이 어 티 회 장	김 동 현 (연세대학교 교수) - 바이오메디컬연구회	
	김 성 우 (서울대학교 교수) - 신기술 / 홍보 · 정보화	
	김 영 로 (명지전문대학 교수) - 사업	
소 사 이 어 티 회 장	김 원 중 (한국전자통신연구원 책임연구원) - 표준화	
	김 익 균 (한국전자통신연구원 부장) - 하계	
	김 학 구 (중앙대학교 교수) - 추계	
소 사 이 어 티 회 장	박 철 수 (광운대학교 교수) - SPC 총괄	
	변 영 재 (UNIST 교수) - 사업	
	선 우 경 (서울대학교 교수) - 회지편집	
소 사 이 어 티 회 장	송 준 영 (인천대학교 교수) - 하계	
	연 규 봉 (한국자동차연구원 수석연구원) - 하계	
	이 채 은 (한양대학교 교수) - 사업	
소 사 이 어 티 회 장	이 후 진 (한성대학교 교수) - 논문편집	
	장 익 중 (경희대학교 교수) - 논문편집 총괄	
	정 성 영 (고려대학교 교수) - 차세대 리더육성	
소 사 이 어 티 회 장	조 성 재 (이화여자대학교 교수) - 신기술 총괄 / 홍보 · 정보화	
	최 강 선 (한국기술교육대학교 교수) - 논문편집	
	최 재 혁 (서울대학교 교수) - ICCE-Asia 총괄	
소 사 이 어 티 회 장	한 재 호 (고려대학교 교수) - 재무	
	김 동 현 (ICTK 대표이사)	
	오 의 열 (LG디스플레이 연구위원)	
소 사 이 어 티 회 장	윤 영 권 (삼성전자 마스터)	
	이 수 민 (한국전자연구소 대표이사)	

이 사

이 수 인 (텔레칩스 상무)
 조 영 민 (SkyMirr CEO)
 최 성 민 (해치텍 대표이사)
 함 철 희 (삼성전자 마스터)
 궁 재 하 (고려대학교 교수) - 홍보 · 정보화
 권 기 룡 (부경대학교 교수) - 산학연
 김 동 순 (세종대학교 교수) - 하계
 김 병 수 (한국전자기술연구원 센터장) - 하계 / ICCE-Asia
 김 선 욱 (고려대학교 교수) - 교육
 김 소 영 (성균관대학교 교수) - JSTS
 김 재 욱 (한국과학기술연구원 선임연구원) - 하계
 김 지 훈 (한양대학교 교수) - ICCE-Asia
 류 현 석 (서울대학교 교수) - 교육
 박 재 영 (광운대학교 교수) - 표준화
 서 민 재 (서울시립대학교 교수) - 기획 / 차세대리더 / 하계 / ICCE-Asia
 안 광 호 (한국전자기술연구원 본부장) - 대외협력
 안 성 수 (명지전문대학 교수) - 회원
 양 현 중 (서울대학교 교수) - ICCE-Asia
 유 담 (서울대학교 교수) - 하계
 윤 명 국 (이화여자대학교 교수) - 신기술
 윤 종 윤 (파두 사장) - 교육
 이 상 만 (고려대학교 교수) - 산학연
 이 철 호 (서울대학교 교수) - 신기술
 임 기 택 (한국산업기술기획평가원 PD) - 대외협력
 전 동 석 (서울대학교 교수) - 하계 / 국문논문
 정 희 철 (경북대학교 교수) - 학회지
 조 성 인 (서강대학교 교수) - 하계
 최 광 성 (한국전자통신연구원 실장) - 대외협력
 최 정 욱 (한양대학교 교수) - 국문논문
 하 태 준 (광운대학교 교수) - 추계
 한 태 희 (성균관대학교 교수) - 국문논문
 허 재 두 (한국전자통신연구원 연구전문위원) - 사업
 황 태 호 (한국전자기술연구원 본부장) - 하계
 권 경 하 (KAIST 교수) - 사업
 김 가 인 (DGIST 교수) - ICCE-Asia / 차세대리더
 김 기 현 (전북대학교 교수) - 전북지부
 김 대 영 (순천향대학교 교수) - 호서지부
 김 성 준 (동국대학교 교수) - 국제협력
 김 영 성 (인하대학교 교수) - 학회지
 김 형 진 (한양대학교 교수) - 하계 / ITC-CSCC
 민 경 식 (국민대학교 교수) - 하계 / JSTS
 박 의 준 (중부대학교 교수) - 회원/여성
 박 해 림 (서울과학기술대학교 교수) - 회원/여성
 배 준 호 (가천대학교 교수) - 표준화
 송 의 현 (한양대학교 교수) - 국제협력
 신 세 운 (UNIST 교수) - 사업
 심 원 보 (서울과학기술대학교 교수) - 하계
 유 동 훈 (디사이로 CRO) - 회원 · 여성
 이 권 형 (LG전자 책임연구원) - 하계
 이 상 현 (아주대학교 교수) - 홍보 · 정보화
 이 재 규 (삼성전자 마스터) - 산학연
 이 철 (동국대학교 교수) - 학회지
 임 영 현 (경희대학교 교수) - 국문논문
 정 소 이 (아주대학교 교수) - 하계
 정 이 품 (연세대학교 교수) - 차세대 리더
 진 경 환 (고려대학교 교수) - 기획
 채 주 형 (광운대학교 교수) - ICCE-Asia / 차세대리더
 함 범 섭 (연세대학교 교수) - 추계

협 동 이 사

정 민 수 (라운텍 CTO)
 천 이 우 (넥스트칩 연구소장)
 한 은 혜 (에스에스앤씨 대표이사)
 홍 국 태 (LX세미콘 연구위원)
 권 구 덕 (강원대학교 교수) - 기획
 권 기 원 (성균관대학교 교수) - 표준화
 김 민 규 (LG0이노텍 상무) - 산학연
 김 상 완 (서강대학교 교수) - 기획
 김 성 동 (서울과학기술대학교 교수) - 표준화
 김 유 철 (LG SI연구원 부문장) - 신기술
 김 중 현 (고려대학교 교수) - 사업
 류 은 석 (성균관대학교 교수) - 사업
 박 동 욱 (서울시립대학교 교수) - 하계
 배 현 철 (한국전자통신연구원 책임연구원) - 산학연
 심 용 (중앙대학교 교수) - 국제협력
 안 상 철 (한국과학기술연구원 책임연구원) - 신기술
 안 호 군 (한국전자통신연구원 책임연구원) - 사업
 오 윤 호 (고려대학교 교수) - 신기술
 유 현 우 (성균관대학교 교수) - 홍보 · 정보화
 윤 상 훈 (한국산업기술기획평가원 PD) - 산학연
 이 구 순 (파이낸셜뉴스 이사) - 홍보 · 정보화
 이 정 원 (서울대학교 교수) - 회원/여성
 이 태 동 (국제대학교 교수) - 홍보 · 정보화
 장 성 준 (한국전자기술연구원 센터장) - 하계
 정 해 준 (경희대학교 교수) - 국문논문
 제 민 규 (KAIST 교수) - 사업
 채 관 엽 (삼성전자 마스터) - 대외협력
 최 재 욱 (가천대학교 교수) - 국문논문
 하 정 우 (네이버 센터장) - 신기술
 한 동 윤 (네이버 리더) - 학회지
 허 용 석 (아주대학교 교수) - 학회지
 황 진 영 (한국항공대학교 교수) - 국제협력
 권 중 원 (한국산업기술시험원 센터장) - 추계
 김 건 우 (목포대학교 교수) - 광주·전남지부
 김 다 완 (한국교통대학교 교수)
 김 도 훈 (한국전자통신연구원 박사) - 표준화
 김 승 환 (한국전자통신연구원 책임연구원) - 산학연
 김 정 석 (가천대학교 교수) - 홍보 · 정보화
 류 성 주 (서강대학교 교수) - 하계
 박 관 서 (연세대학교 교수) - ICCE-Asia / 차세대리더 / 기획
 박 정 환 (경희대학교 교수) - 국문논문
 배 준 성 (강원대학교 교수) - 국제협력
 백 지 선 (부산대학교 교수) - ICCE-Asia
 송 철 (DGIST 교수) - 바이오메디컬연구회
 신 재 영 (한국교통대학교 교수) - 교육
 유 경 창 (삼성전자 수석연구원) - 회원
 이 규 호 (연세대학교 교수) - 차세대 리더 / 하계
 이 명 재 (연세대학교 교수) - 신기술
 이 신 형 (서울시립대학교 교수) - 회원 · 여성
 이 정 석 (인하공업전문대학 교수) - 학회지
 임 매 순 (한국과학기술연구원 책임연구원) - 사업
 정 동 윤 (한국전자통신연구원 센터장) - 산학연
 정 완 영 (KAIST 교수) - 홍보 · 정보화
 정 한 울 (광운대학교 교수) - 신기술
 차 철 웅 (한국전자기술연구원 센터장) - 표준화
 최 욱 (인천대학교 교수) - 학회지
 홍 성 완 (서강대학교 교수) - 하계 / 대외협력

지부장 명단

강 원 지 부
 대구·경북지부
 부산·경남·울산지부
 제 주 지 부
 호 서 지 부
 미 국

강 문 식 (강릉원주대학교 교수)
 이 찬 수 (영남대학교 교수)
 김 현 철 (울산대학교 교수)
 고 석 준 (제주대학교 교수)
 강 윤 희 (백석대학교 교수)
 최 명 준 (텔레다인 박사)

광주·전남지부
 대전·충남지부
 전 북 지 부
 충 북 지 부
 일 본
 러 시 아 지 부

최 수 일 (전남대학교 교수)
 이 병 희 (한밭대학교 교수)
 이 지 훈 (전북대학교 교수)
 조 문 규 (한국교통대학교 교수)
 강 유 선 (Tokyo Polytechnic University 교수)
 Prof. Edis B. TEN (National University of Science and Technology)

위원회 명단

자문위원회

위원장	박성한 (한양대학교 명예교수)
부위원장	이진구 (동국대학교 명예교수)
위원	고성재 (고려대학교 명예교수)
	김도현 (국민대학교 명예교수)
	김재희 (연세대학교 명예교수)
	박규태 (연세대학교 명예교수)
	백준기 (중앙대학교 교수)
	이문기 (연세대학교 명예교수)
	이충용 (연세대학교 교수)
	전국진 (서울대학교 명예교수)
	천경준 (씨젠 회장)

공준진 (웨이브피아 CSO)
김성대 (KAIST 명예교수)
나정웅 (KAIST 명예교수)
박진옥 (육군사관학교 명예교수)
서승우 (서울대학교 교수)
이상설 (한양대학교 명예교수)
이혁재 (서울대학교 교수)
전홍태 (중앙대학교 명예교수)
홍대식 (연세대학교 교수)

구용서 (단국대학교 석좌교수)
김수중 (경북대학교 명예교수)
문영식 (한림성심대학교 총장)
박항구 (소암시스템 회장)
성광모 (서울대학교 명예교수)
이재홍 (서울대학교 명예교수)
임혜숙 (이화여자대학교 교수)
정정화 (한양대학교 명예교수)
홍승홍 (인하대학교 명예교수)

기획위원회

위원장	강석주 (서강대학교 교수)
부위원장	전세영 (서울대학교 교수)
위원	권구덕 (강원대학교 교수)
	서민재 (서울시립대학교 교수)

고형호 (충남대학교 교수)
김상완 (서강대학교 교수)
진경환 (고려대학교 교수)

박관서 (연세대학교 교수)

학술연구위원회 - 하계

위원장	강명곤 (서울시립대학교 교수)
TPC위원장	김현 (서울과학기술대학교 교수)
위원	김동순 (세종대학교 교수)
	김형진 (한양대학교 교수)
	서경원 (서울과학기술대학교 교수)
	송준영 (인천대학교 교수)
	연규봉 (한국자동차연구원 수석연구원)
	이권형 (LG전자 책임연구원)
	정소이 (아주대학교 교수)
	홍성완 (서강대학교 교수)

김병수 (한국전자기술연구원 센터장)
민경식 (국민대학교 교수)
서민재 (서울시립대학교 교수)
신창환 (고려대학교 교수)
유담 (서울대학교 교수)
이승호 (한밭대학교 교수)
조성인 (서강대학교 교수)

김익균 (한국전자통신연구원 부장)
박동욱 (서울시립대학교 교수)
서승호 (고려대학교 교수)
심원보 (서울과학기술대학교 교수)
이규호 (연세대학교 교수)
인지호 (세명대학교 교수)
최승규 (경희대학교 교수)

학술연구위원회 - 추계

위원장	조성현 (한양대학교 교수)
TPC위원장	변대석 (삼성전자 마스터)
위원	강문식 (강릉원주대학교 교수)
	김중현 (고려대학교 교수)
	서병석 (상지대학교 교수)
	추민성 (한양대학교 교수)
	황인철 (강원대학교 교수)

구분태 (한국전자통신연구원 본부장)
김학구 (중앙대학교 교수)
이승호 (한밭대학교 교수)
하태준 (광운대학교 교수)

권종원 (한국산업기술시험원 센터장)
노태문 (한국전자통신연구원 연구전문위원)
이형민 (고려대학교 교수)
함범섭 (연세대학교 교수)

논문편집위원회

위원장	장익준 (경희대학교 교수)
위원	박정환 (경희대학교 교수)
	전동석 (서울대학교 교수)
	최재용 (가천대학교 교수)

이후진 (한성대학교 교수)
정해준 (경희대학교 교수)
최정욱 (한양대학교 교수)

임영현 (경희대학교 교수)
최강선 (한국기술교육대학교 교수)
한태희 (성균관대학교 교수)

국제협력위원회

위원장	구민석 (서울시립대학교 교수)
위원	김성준 (동국대학교 교수)
	심용 (중앙대학교 교수)

배준성 (강원대학교 교수)
황진영 (한국항공대학교 교수)

송익현 (한양대학교 교수)

회원관리위원회

위원장	류수정 (서울대학교 교수)
위원	김수연 (동국대학교 교수)
	박혜림 (서울과학기술대학교 교수)
	유동훈 (디사일로 CRO)
	이정원 (서울대학교 교수)

김태인 (인하대학교 교수)
안성수 (명지전문대학 교수)
이신형 (서울시립대학교 교수)
임정연 (SK텔레콤 담당)

박익준 (중부대학교 교수)
유경창 (삼성전자 수석연구원)
이정아 (AURA CEO)

회지편집위원회

위원장	황원준 (고려대학교 교수)		
부위원장	선우경 (서울대학교 교수)		
위원	김영성 (인하대학교 교수)	이철 (동국대학교 교수)	정희철 (경북대학교 교수)
	최욱 (인천대학교 교수)	한동윤 (네이버 리더)	허용석 (아주대학교 교수)

사업위원회

위원장	유찬세 (한국전자기술연구원 수석연구원)		
위원	감익균 (한국전자통신연구원 본부장)	강태욱 (성균관대학교 교수)	권경하 (KAIST 교수)
	김영로 (명지전문대학 교수)	김중헌 (고려대학교 교수)	류은석 (성균관대학교 교수)
	변영재 (UNIST 교수)	선우명훈 (아주대학교 교수)	손교민 (삼성전자 마스터)
	신세운 (UNIST 교수)	안호균 (한국전자통신연구원 책임연구원)	이채은 (한양대학교 교수)
	임매순 (한국과학기술연구원 책임연구원)	정일권 (한국전자통신연구원 본부장)	제민규 (KAIST 교수)
	허재두 (한국전자통신연구원 연구전문위원)		

교육연구위원회

위원장	강문식 (강릉원주대학교 교수)		
위원	김혁 (서울시립대학교 교수)	동성수 (용인예술과학대학교 교수)	류현석 (서울대학교 교수)
	박영우 (TEL 부사장)	박혜림 (서울과학기술대학교 교수)	변대석 (삼성전자 교수)
	변영재 (UNIST 교수)	신재영 (한국교통대학교 교수)	윤종윤 (Fadu 사장)
	이신형 (서울시립대학교 교수)	이영택 (ASML 전문)	이후진 (한성대학교 교수)
	정성엽 (고려대학교 교수)	정용규 (을지대학교 교수)	

홍보/정보화위원회

위원장	김용신 (고려대학교 교수)		
위원	궁재하 (고려대학교 교수)	김성우 (서울대학교 교수)	김정석 (가천대학교 교수)
	유현우 (성균관대학교 교수)	이상현 (아주대학교 교수)	

표준화위원회

위원장	김원종 (한국전자통신연구원 책임연구원)		
부위원장	연구봉 (한국자동차연구원 수석연구원)		
위원	김도훈 (한국전자통신연구원 박사)	권기원 (성균관대학교 교수)	김성동 (서울과학기술대학교 교수)
	박재영 (광운대학교 교수)	배준호 (가천대학교 교수)	차철웅 (한국전자기술연구원 센터장)

신기술위원회

위원장	노원우 (연세대학교 교수)		
부위원장	김용신 (고려대학교 교수)	조성재 (이화여자대학교 교수)	
위원	김성우 (서울대학교 교수)	이철호 (서울대학교 교수)	오윤호 (고려대학교 교수)
	윤명국 (이화여자대학교 교수)	이명재 (연세대학교 교수)	정한울 (광운대학교 교수)

선거관리위원회

위원장	전홍태 (중앙대학교 교수)		
위원	강명곤 (서울시립대학교 교수)	강석주 (서강대학교 교수)	권혁인 (중앙대학교 교수)
	김윤 (서울시립대학교 교수)	류수정 (서울대학교 교수)	한재호 (고려대학교 교수)

포상위원회

위원장	공준진 (웨이브피아 CSO)		
위원	강석주 (서강대학교 교수)	강명곤 (서울시립대학교 교수)	김종욱 (고려대학교 교수)
	장익준 (경희대학교 교수)	한재호 (고려대학교 교수)	
위원 및 간사겸임	권혁인 (중앙대학교 교수)		

인사위원회

위원장	백광현 (중앙대학교 교수)		
위원	김종욱 (고려대학교 교수)	강석주 (서강대학교 교수)	권혁인 (중앙대학교 교수)
	조성재 (이화여자대학교 교수)	한재호 (고려대학교 교수)	

차세대 리더육성위원회

위원장	노원우 (연세대학교 교수)		
부위원장	김민휘 (중앙대학교 교수)	정성엽 (고려대학교 교수)	추민성 (한양대학교 교수)
위원	김가인 (DGIST 교수)	박관서 (연세대학교 교수)	서민재 (서울시립대학교 교수)
	이규호 (연세대학교 교수)	정이품 (연세대학교 교수)	채주형 (광운대학교 교수)

JSTS 편집위원회

위원장	최우영 (서울대학교 교수)		
위원	강명곤 (서울시립대학교 교수)	강인만 (경북대학교 교수)	권혁인 (중앙대학교 교수)
	김상범 (서울대학교 교수)	김상완 (서강대학교 교수)	김소영 (성균관대학교 교수)
	김윤 (서울시립대학교 교수)	김재준 (서울대학교 교수)	김지훈 (한양대학교 교수)
	남일구 (부산대학교 교수)	민경식 (국민대학교 교수)	박찬형 (광운대학교 교수)
	백광현 (중앙대학교 교수)	서문교 (성균관대학교 교수)	신민철 (KAIST 교수)
	오정우 (연세대학교 교수)	윤상원 (서울대학교 교수)	이가원 (충남대학교 교수)
	이강윤 (성균관대학교 교수)	이철호 (서울대학교 교수)	이형민 (고려대학교 교수)
	전동석 (서울대학교 교수)	정규원 (서울대학교 교수)	정재경 (한양대학교 교수)
	조성재 (이화여자대학교 교수)	조일환 (명지대학교 교수)	차호영 (홍익대학교 교수)
	최우석 (서울대학교 교수)	한재덕 (한양대학교 교수)	

SPC위원회

위원장	송병철 (인하대학교 교수)	박철수 (광운대학교 교수)	김원준 (건국대학교 교수)
자문위원	김선욱 (고려대학교 교수)	김창수 (고려대학교 교수)	백광현 (중앙대학교 교수)
	백준기 (중앙대학교 교수)	심동규 (광운대학교 교수)	이강윤 (성균관대학교 교수)
	이혁재 (서울대학교 교수)	임혜숙 (이화여자대학교 교수)	전병우 (성균관대학교 교수)
	조남익 (서울대학교 교수)	조민호 (고려대학교 교수)	
운영위원	공경보 (부산대학교 교수)	조성인 (서강대학교 교수)	홍승혁 (수원대학교 교수)
편집위원	강석주 (서강대학교 교수)	권건우 (홍익대학교 교수)	권순재 (가톨릭대학교 교수)
	권준석 (중앙대학교 교수)	김민준 (한국외국어대학교 교수)	김병서 (홍익대학교 교수)
	김영민 (홍익대학교 교수)	김영빈 (중앙대학교 교수)	김용태 (경북대학교 교수)
	김원중 (한국전자통신연구원 책임연구원)	김재곤 (한국항공대학교 교수)	김진솔 (전남대학교 교수)
	김태석 (광운대학교 교수)	김태환 (한국항공대학교 교수)	김현 (서울과학기술대학교 교수)
	남일구 (부산대학교 교수)	민경식 (수원대학교 교수)	민문식 (경북대학교 교수)
	박은병 (성균관대학교 교수)	백성웅 (한양대학교 교수)	서영호 (광운대학교 교수)
	신영주 (고려대학교 교수)	신오순 (송실대학교 교수)	신지태 (성균관대학교 교수)
	엄찬호 (중앙대학교 교수)	오지형 (중앙대학교 교수)	오태현 (POSTECH 교수)
	오현우 (쓰리웨이스프리트 교수)	우성민 (한국기술교육대학교 교수)	유지현 (광운대학교 교수)
	이덕우 (계명대학교 교수)	이재훈 (고려대학교 교수)	이채은 (한양대학교 교수)
	이철 (동국대학교 교수)	이후진 (한성대학교 교수)	이훈 (UNIST 교수)
	임성훈 (DGIST 교수)	장민혜 (한국전기연구원 박사)	장승진 (한밭대학교 교수)
	장주웅 (광운대학교 교수)	장훈석 (한국전자기술연구원 선임연구원)	장희선 (평택대학교 교수)
	정승원 (고려대학교 교수)	조성현 (한양대학교 교수)	진훈 (안양대학교 교수)
	차은주 (숙명여자대학교 교수)	최상호 (광운대학교 교수)	황성운 (가천대학교 교수)
	황원준 (고려대학교 교수)	황인철 (강원대학교 교수)	

바이오-메디컬연구회

전문위원장	김동현 (연세대학교 교수)	박형원 (성균관대학교 교수)	변경민 (경희대학교 교수)
전문위원	김경환 (연세대학교 교수)	송철 (DGIST 교수)	송윤규 (서울대학교 교수)
	서정목 (연세대학교 교수)	전상범 (이화여자대학교 교수)	최종률 (대구경북첨단의료산업진흥재단 책임연구원)
	이정훈 (광운대학교 교수)		

Society 명단

통신사이터티

회 부 회 장	신기진 (숭실대학교 교수)	김재현 (아주대학교 교수)	김진영 (광운대학교 교수)
	김기원 (건국대학교 교수)	김진주 (ATNS 대표이사)	이성우 (단국대학교 교수)
	이원식 (인천대학교 교수)	이준호 (숭실대학교 교수)	이우 (중양대학교 교수)
간 협 동 부 회 장	최유진 (고려대학교 교수)	홍노익 (단국대학교 교수)	
	김민석 (숭실대학교 교수)	김민준 (광주과학기술원 교수)	
	이재민 (에이스테크놀로지 연구소장)	이찬수 (브로던 대표이사)	김영환 (숭실대학교 교수)
	조성호 (탑스 대표이사)	김승현 (한국전자통신연구원 원장)	정현규 (LGT 상무)
	김정호 (에이스테크놀로지 박사)	장병찬 (이노벨류네트웍스 부사장)	정현규 (한국전자통신연구원 부장)
이 사	김정호 (연세대학교 교수)	김성훈 (한국전자통신연구원 박사)	김호진 (이화여자대학교 교수)
	김정호 (한국공과대학교 교수)	김성훈 (숭실대학교 교수)	김진 (서강대학교 교수)
	김정호 (동국대학교 교수)	김성훈 (금오공과대학교 교수)	신안 (숭실대학교 교수)
	김정호 (한국항공대학교 교수)	김성훈 (서울과학기술대학교 교수)	이예진 (서울과학기술대학교 교수)
	김정호 (동국대학교 교수)	김성훈 (숭실대학교 교수)	이호경 (홍익대학교 교수)
	김정호 (홍익대학교 교수)	김성훈 (건국대학교 교수)	조재성 (중양대학교 교수)
	김정호 (한양대학교 교수)	김성훈 (대구경북과학기술원 교수)	최진성 (한양대학교 교수)
	김정호 (충남대학교 교수)	김성훈 (경희대학교 교수)	황승 (동국대학교 교수)
	김정호 (전남대학교 교수)		
	김정호 (고려대학교 교수)	정소이 (아주대학교 교수)	
	김정호 (고려대학교 교수) - 통신	윤상민 (국민대학교 교수) - 지능형네트워크	
	김정호 (연세대학교 교수) - 마이크로파 및 전파전파	이철기 (아주대학교 교수) - ITS	
	김정호 (경북대학교 교수) - 군사전자	허재두 (한국전자통신연구원 연구전문위원) - 무선 PAN/BAN	

반도체사이터티

회 자 문 위 원	정준호 (와이씨 대표이사)	권오경 (한양대학교 교수, 반소전임회장)	김영환 (POSTECH 교수)
	김진주 (웨이브피아 CSO, 본회명예회장)	김진주 (경희대학교 총장, 반소전임회장)	김진주 (청주대학교 교수)
	김진주 (연세대학교 교수)	김진주 (아주대학교 교수, 반소전임회장)	소경신 (Synopsis 사장)
	김진주 (POSTECH 교수)	김진주 (반소전임회장)	신철환 (한양대학교 교수, 반소전임회장)
	김진주 (반소전임회장)	김진주 (서강대학교 교수)	이정현 (KAIST 교수)
	김진주 (서강대학교 교수)	김진주 (반소전임회장)	전영환 (삼성전자 부회장, 반소전임회장)
	김진주 (경희대학교 교수)	김진주 (전북대학교 교수)	조영준 (한국외국어대학교 교수)
	김진주 (울산대학교 교수)	김진주 (이천대학교 교수, 반소전임회장)	최기영 (서울대학교 교수)
	김진주 (벨랑 대표)	김진주 (실리콘마이터스 회장)	
	김진주 (성균관대학교 교수)	김진주 (서강대학교 교수)	박영우 (EXICON 사장)
	김진주 (LX세미론 연구소장)	김진주 (한양대학교 교수)	이희덕 (충남대학교 교수)
	김진주 (한국반도체산업협회 전무)	김진주 (인하대학교 교수)	
	김진주 (서울시립대학교 교수, 수석부회장)	김진주 (삼성전자 부사장)	김지훈 (한양대학교 교수)
	김진주 (서울시립대학교 교수)	김진주 (충남대학교 교수)	박종선 (고려대학교 교수)
	김진주 (서울과학기술대학교 교수)	김진주 (서울대학교 교수)	추민상 (한양대학교 교수)
	김진주 (삼성전자 부사장)	김진주 (삼성전자 마스터)	조성재 (이화여자대학교 교수)
	김진주 (한양대학교 교수)	김진주 (삼성전자 부사장)	
	김진주 (성균관대학교 교수)	김진주 (고려대학교 교수)	범진욱 (서강대학교 교수)
	김진주 (인하대학교 교수)	김진주 (UNIST 교수)	이병훈 (POSTECH 교수)
	김진주 (UNIST 교수)	김진주 (한양대학교 교수)	이희덕 (충남대학교 교수)
	김진주 (세명대학교 교수)	김진주 (전북대학교 교수)	차호영 (홍익대학교 교수)
	김진주 (연세대학교 교수)	김진주 (한양대학교 교수)	
	김진주 (삼성전자 마스터)	김진주 (성균관대학교 교수)	공정택 (성균관대학교 교수)
	김진주 (세종대학교 교수)	김진주 (성균관대학교 교수)	김시훈 (연세대학교 교수)
	김진주 (성균관대학교 교수)	김진주 (한국전자통신연구원 책임연구원)	김종선 (홍익대학교 교수)
	김진주 (LX세미론 상무)	김진주 (중앙대학교 교수)	변대식 (삼성전자 마스터)
	김진주 (삼성전자 마스터)	김진주 (삼성전자 부사장)	변대식 (한국전자통신연구원 연구위원)
	김진주 (연세대학교 교수)	김진주 (웨이브피아 대표)	조태제 (DGIST 교수)
	김진주 (서울대학교 교수)	김진주 (한국전자기술연구원 본부장)	최영균 (고려대학교 교수)
	김진주 (경북대학교 교수)		
	김진주 (성균관대학교 교수)	이성수 (숭실대학교 교수)	김보은 (라온텍 사장)
	김진주 (넥스트칩 대표)	김민준 (CTK 사장)	손재철 (가천대학교 교수)
	김진주 (ADT 사장)	김민준 (실리콘웍스 전무)	오민욱 (삼성전자 부사장)
	김진주 (휴인스 사장)	신영석 (케이더스코리아 사장)	
	김진주 (온도레인 사장)	이장구 (텔레칩스 대표)	
	김진주 (연세대학교 교수)	문영 (숭실대학교 교수)	
	김진주 (명지대학교 교수) - 반도체사 및 재료	김상인 (아주대학교 교수) - 광파 및 양자전자	
	김진주 (성균관대학교 교수) - SoC 설계	황인철 (강원대학교 교수) - RF 집적회로	
	김진주 (강원공업 본부장) - PCB&Package	김의균 (한국전자통신연구원 부장) - 정보보안시스템	
	김진주 (경희대학교 교수) - 내방사선 반도체 설계 및 소자	김한구 (EESOP 대표) - ESD/EOS & Latchup	
	김진주 (연세대학교 교수) - 인 메모리 컴퓨팅	송민규 (동국대학교 교수) - 이미지센서	
	김진주 (POSTECH 교수)	권재하 (고려대학교 교수)	권구덕 (강원대학교 교수)
	김진주 (한국전자통신연구원 책임연구원)	김민준 (한국외국어대학교 교수)	김병수 (한국전자기술연구원 센터장)
	김진주 (동국대학교 교수)	김민준 (홍익대학교 교수)	김재욱 (한국과학기술연구원 그룹장)
	김진주 (한국항공대학교 교수)	류성주 (서강대학교 교수)	류시강 (한국항공대학교 교수)
	김진주 (연세대학교 교수)	박성진 (건국대학교 교수)	박인호 (인하대학교 교수)
	김진주 (성균관대학교 교수)	박성진 (문택 대표)	백지선 (부산대학교 교수)
	김진주 (서울시립대학교 교수)	박성진 (인하대학교 교수)	백지선 (연세대학교 교수)
	김진주 (성균관대학교 교수)	박성진 (충남대학교 교수)	양성우 (이화여자대학교 교수)
	김진주 (POSTECH 교수)	박성진 (중앙대학교 교수)	양성우 (성균관대학교 교수)
	김진주 (가천대학교 교수)	박성진 (고려대학교 교수)	이재민 (한국외국어대학교 교수)
	김진주 (서울대학교 교수)	박성진 (삼성전자 상무)	이재민 (인하대학교 교수)
	김진주 (단국대학교 교수)	박성진 (SK 사피온 CTO)	정재홍 (한국항공대학교 교수)
	김진주 (KAIST 교수)	박성진 (충남대학교 교수)	정재홍 (광운대학교 교수)
	김진주 (건국대학교 교수)	박성진 (서울대학교 교수)	최재홍 (서울대학교 교수)
	김진주 (성균관대학교 교수)	박성진 (충남대학교 교수)	

박상우 (명지대학교 교수)	박성훈 (KAIST 교수)	박현진 (성균관대학교 교수)
박정호 (광운대학교 교수)	배성호 (경희대학교 교수)	서영호 (광운대학교 교수)
서정호 (한국전자통신연구원 연구원)	서진근 (연세대학교 교수)	손영훈 (연세대학교 교수)
송진호 (연세대학교 교수)	신재섭 (픽스트리 대표이사)	신지태 (성균관대학교 교수)
신성환 (캐논메디칼시스템즈코리아 박사)	안현중 (UNIST 교수)	어영정 (연세대학교 교수)
신성환 (부산대학교 교수)	오세웅 (한국외국어대학교 교수)	오태원 (POSTECH 교수)
한민호 (인텔리빅스 대표이사)	유양모 (서강대학교 교수)	윤국진 (KAIST 교수)
한민호 (한국외국어대학교 교수)	이기승 (건국대학교 교수)	이상근 (중앙대학교 교수)
이성준 (연세대학교 교수)	이상진 (DGIST 교수)	이상훈 (연세대학교 교수)
이성준 (POSTECH 교수)	이연정 (경북대학교 교수)	이인진 (서울과학기술대학교 교수)
이성준 (한국항공대학교 교수)	이재성 (서울대학교 교수)	이준석 (연세대학교 교수)
이성준 (한국전자기술연구원 책임연구원)	이종하 (계명대학교 교수)	이재원 (계명대학교 교수)
이성준 (성균관대학교 교수)	이창우 (카톨릭대학교 교수)	임재열 (한국기술교육대학교 교수)
이성준 (제주대학교 교수)	임종우 (한양대학교 교수)	장세진 (한국전자기술연구원 센터장)
이성준 (제주하라대학교 교수)	장인수 (한국전자통신연구원 연구원)	장기원 (국가수리과학연구소 박사)
이성준 (광주과학기술원 교수)	장미라 (계명대학교 교수)	정원기 (고려대학교 교수)
이성준 (한밭대학교 교수)	정훈기 (한국교통대학교 교수)	정호열 (영남대학교 교수)
이성준 (HDXMILL 박사)	조승룡 (KAIST 교수)	조홍열 (네이버 연구원)
이성준 (제주대학교 교수)	최승호 (서울과학기술대학교 교수)	최유진 (연세대학교 교수)
이성준 (이화여자대학교 교수)	최주원 (서울대학교 교수)	최철현 (영남대학교 교수)
이성준 (세종대학교 교수)	홍성식 (아주대학교 교수)	최홍성 (전남대학교 교수)
이성준 (연세대학교 교수)	홍상주 (KAIST 교수)	홍영배 (충북대학교 교수)
이성준 (고려대학교 교수) - 딥러닝	강제원 (이화여자대학교 교수) - 영상처리	
이성준 (경북대학교 교수) - 음향 및 음성신호처리	이덕우 (계명대학교 교수) - 영상이해	
이성준 (서울대학교 교수) - 바이오영상신호처리	김상우 (서울대학교 교수) - 로봇지능	

시스템 및 제어사이터티

이덕진 (전북대학교 교수)	김희식 (서울시립대학교 교수)	박종국 (경희대학교 교수)
김도원 (연세대학교 교수)	오상록 (한국과학기술연구원 원장)	오승록 (단국대학교 교수)
김인환 (고려대학교 교수)	유정봉 (공주대학교 교수)	장길도 (전북대학교 교수)
오주호 (한국기술교육대학교 교수)	허경무 (단국대학교 교수)	
김영준 (한국산업기술시험원 센터장)	김영철 (군산대학교 교수)	
김진진 (한국산업기술시험원 수석연구원)	서영석 (영남대학교 교수)	이왕상 (경상대학교 교수)
김진진 (한국산업기술시험원 선임연구원)	박덕우 (한국기계전기전자시험연구원 센터장)	최현택 (한국해양과학기술원 책임연구원)
김진진 (한국산업기술시험원 수석연구원)	문태주 (부일하우징 대표)	신대현 (대연씨앤아이 대표)
김진진 (한국산업기술시험원 선임연구원)		
김진진 (B&P인스트루먼트 연구소장)	김수찬 (한경대학교 교수)	김종만 (전남도립대학교 교수)
김진진 (소울아이티 전무)	남기창 (동국대학교 교수)	류지형 (한국전자통신연구원 박사)
김진진 (현대전기 대표)	박명진 (경희대학교 교수)	박재병 (전북대학교 교수)
김진진 (충북대학교 교수)	송철규 (전북대학교 교수)	여희수 (대전대학교 교수)
김진진 (울지대학교 교수)	이수열 (경희대학교 교수)	이윤규 (한국전자통신연구원 책임연구원)
김진진 (강릉원주대학교 교수)	이학성 (세종대학교 교수)	정재훈 (동국대학교 교수)
김진진 (UNIST 교수)	최우영 (전북대학교 교수)	한아 (한국산업기술시험원 선임연구원)
김진진 (한경대학교 교수)	남기창 (동국대학교 교수) - 의료전자 및 생체공학	
김진진 (전북대학교 교수)	오창현 (고려대학교 교수) - 의료영상시스템	
김진진 (한국과학기술정보연구원 연구원)	이성준 (한양대학교 교수) - 회로 및 시스템	
김진진 (한국산업기술시험원 센터장) - 인공지능 전환(AI)	정재훈 (동국대학교 교수) - 지능로봇	
김진진 (한국자동차연구원 수석연구원) - 자동차전자	김원중 (한국전자통신연구원 책임연구원) - 산업안전시스템연구회	
김진진 (대구보건대학교 교수) - 국방정보및제어		
김진진 (서울과학기술대학교 교수) - 스마트미터링		
김진진 (POSTECH 교수) - 제어계측		

산업전자사이터티

고정환 (인하공업전문대학 교수)	원영진 (부천대학교 교수)	윤기방 (인천대학교 명예교수)
김대환 (한국정보기술 대표이사)	이원석 (동양미래대학교 명예교수)	조규남 (로봇신문사 대표이사)
이상희 (동서울대학교 교수)		
한성준 (대흥정보 고문)		
한성준 (용인예술과학대학교 교수)	김상범 (한국폴리텍대학 교수)	김영로 (명지전문대학 교수)
한성준 (인하공업전문대학 교수)	서병석 (성지대학교 교수)	서준원 (K-MV지능정보기술 대표이사)
한성준 (명지전문대학 교수)	윤종현 (조선이공대학교 교수)	이정석 (인하공업전문대학 교수)
한성준 (국제대학교 교수)	조도현 (인하공업전문대학 교수)	
한성준 (로보월드코리아 대표이사)	권오병 (진인프라 전무이사)	김재중 (SJ정보통신 이사)
한성준 (대흥정보 상무이사)	김정석 (오디에이테크놀로지 대표이사)	김철마 (엠티데이터 상무이사)
한성준 (청파이엔티 대표이사)	김현영 (진우에이티에스 전무이사)	서봉상 (명화지리정보 대표이사)
한성준 (글로벌텔레콤 대표이사)	상재용 (오픈링크시스템 대표이사)	송관식 (아이씨티웨이 상무이사)
한성준 (복두컴퍼니 대표이사)	송치웅 (웨이버스 대표이사)	유정철 (쌍용정보통신 상무이사)
한성준 (투비콤 대표이사)	장대현 (LG U+ 상무이사)	전한수 (세림TSG 전무이사)
한성준 (태진티엔에스 대표이사)	조한일 (하이제이컨설팅 대표이사)	최석우 (대보정보통신 상무이사)
한성준 (여주대학교 교수)	권오상 (경기과학기술대학교 교수)	권윤중 (세명대학교 교수)
한성준 (부천대학교 교수)	김남선 (서일대학교 교수)	김대수 (전주비전대학교 교수)
한성준 (강릉원주대학교 교수)	김진성 (충청대학교 교수)	김대원 (상지대학교 교수)
한성준 (조선이공대학교 교수)	김성호 (부천대학교 교수)	안대원 (동양미래대학교 교수)
한성준 (인하공업전문대학 교수)	우찬일 (서일대학교 교수)	원우재 (한국폴리텍대학 교수)
한성준 (김포대학교 교수)	이상철 (인천재능대학교 교수)	이성재 (대림대학교 교수)
한성준 (동서울대학교 교수)	이영구 (한림성심대학교 교수)	이주연 (전주비전대학교 교수)
한성준 (동양미래대학교 교수)	최의선 (한국폴리텍대학 교수)	
한성준 (이지테크 대표이사)	최의선 (한국정보기술 이사)	김은연 (인터그래픽 대표이사)
한성준 (UG 책임연구원)	변영필 (진인프라 전무이사)	신동희 (엠티데이터 상무이사)
한성준 (시티랩스 이사)	오재근 (한국정보기술 상무이사)	이강태 (동해중환기기술상 상무이사)
한성준 (엔클라우드 상무이사)	이승민 (투시스템 대표이사)	이승태 (하나텍시스템 이사)
한성준 (쌍용정보통신 상무이사)	이지학 (송안시스템 대표이사)	임준현 (대진정보통신 차장)
한성준 (나비스코에이 부장)	장철현 (우송정보기술 대표이사)	정민우 (한국정보기술 상무이사)
한성준 (롯데정보통신 선임)	한찬석 (동해중환기기술상 부사장)	
한성준 (인하공업전문대학 교수)	김영선 (대림대학교 교수)	

제25대 평의원 명단

강 동 구 (한국전자연구원 센터장)
 강 석 주 (서강대학교 교수)
 강 성 원 (한국전자통신연구원 부원장)
 강 태 옥 (성균관대학교 교수)
 고 성 제 (고려대학교 명예교수)
 고 진 환 (경상대학교 교수)
 공 준 진 (웨이브피아 CSO)
 구 본 태 (한국전자통신연구원 본부장)
 권 건 우 (홍익대학교 교수)
 권 기 룡 (부경대학교 교수)
 권 태 수 (서울과학기술대학교 교수)
 김 가 인 (DGST 교수)
 김 광 순 (연세대학교 교수)
 김 도 현 (제주대학교 교수)
 김 동 순 (세종대학교 교수)
 김 동 현 (연세대학교 교수)
 김 병 서 (홍익대학교 교수)
 김 상 완 (서강대학교 교수)
 김 선 옥 (고려대학교 교수)
 김 소 영 (성균관대학교 교수)
 김 승 천 (한성대학교 교수)
 김 영 로 (명지전문대학 교수)
 김 용 신 (고려대학교 교수)
 김 윤 (서울시립대학교 교수)
 김 재 준 (서울대학교 교수)
 김 정 옥 (아주대학교 교수)
 김 중 현 (고려대학교 교수)
 김 진 영 (광운대학교 교수)
 김 태 인 (인하대학교 교수)
 김 혁 (서울시립대학교 교수)
 김 현 수 (삼성전자 상무)
 김 형 탁 (홍익대학교 교수)
 남 광 희 (포항공과대학교 교수)
 노 승 원 (LGI노텍 CTO)
 노 태 문 (한국전자통신연구원 연구전문위원)
 류 수 정 (서울대학교 교수)
 류 현 석 (서울대학교 교수)
 민 경 식 (국민대학교 교수)
 박 규 태 (연세대학교 명예교수)
 박 성 옥 (강릉원주대학교 교수)
 박 수 현 (국민대학교 교수)
 박 인 호 (인하대학교 교수)
 박 준 은 (성균관대학교 교수)
 박 항 구 (소암시스템 회장)
 배 준 성 (강원대학교 교수)
 백 상 현 (고려대학교 교수)
 변 대 석 (삼성전자 마스터)
 서 병 석 (상지대학교 교수)
 서 지 원 (연세대학교 교수)
 성 광 모 (서울대학교 명예교수)
 송 민 규 (동국대학교 교수)
 송 준 영 (인천대학교 교수)
 신 창 환 (고려대학교 교수)
 심 규 성 (한경대학교 교수)
 심 재 원 (고려대학교 교수)
 안 상 철 (한국과학기술연구원 책임연구원)
 엄 낙 응 (한국전자통신연구원 연구전문위원)

강 명 곤 (서울시립대학교 교수)
 강 석 판 (LG전자 상무)
 강 윤 희 (백석대학교 교수)
 고 병 철 (계명대학교 교수)
 고 용 남 (하나미크론 전무)
 고 형 호 (충남대학교 교수)
 광 진 태 (고려대학교 교수)
 구 용 서 (단국대학교 석좌교수)
 권 경 하 (한국과학기술원 교수)
 권 기 원 (성균관대학교 교수)
 권 혁 인 (중앙대학교 교수)
 김 강 태 (삼성전자 부사장)
 김 기 연 (한국산업기술시험원 선임연구원)
 김 도 훈 (한국전자통신연구원 박사)
 김 동 식 (인하공업전문대학 교수)
 김 명 선 (한성대학교 교수)
 김 병 수 (한국전자기술연구원 센터장)
 김 상 태 (전남테크노파크 본부장)
 김 성 대 (한국과학기술원 명예교수)
 김 수 연 (동국대학교 교수)
 김 시 호 (연세대학교 교수)
 김 영 선 (대림대학교 교수)
 김 원 중 (한국전자통신연구원 책임연구원)
 김 은 원 (대림대학교 교수)
 김 재 현 (아주대학교 교수)
 김 중 선 (홍익대학교 교수)
 김 지 훈 (한양대학교 교수)
 김 진 태 (건국대학교 교수)
 김 학 구 (중앙대학교 교수)
 김 현 (서울과학기술대학교 교수)
 김 형 준 (한국과학기술연구원 소장)
 김 훈 (인천대학교 교수)
 남 기 창 (동국대학교 교수)
 노 원 우 (연세대학교 교수)
 동 성 수 (용인예술과학대학교 교수)
 류 승 탁 (한국과학기술원 교수)
 문 영 식 (한림성심대학교 총장)
 민 동 보 (이화여자대학교 교수)
 박 동 옥 (서울시립대학교 교수)
 박 성 정 (건국대학교 교수)
 박 영 훈 (숙명여자대학교 교수)
 박 중 선 (고려대학교 교수)
 박 진 옥 (육군사관학교 명예교수)
 방 승 찬 (한국전자통신연구원 원장)
 배 현 철 (한국전자통신연구원 책임연구원)
 백 준 기 (중앙대학교 교수)
 변 영 재 (울산과학기술원 교수)
 서 승 우 (서울대학교 교수)
 서 철 현 (숭실대학교 교수)
 손 교 민 (삼성전자 마스터)
 송 병 철 (인하대학교 교수)
 신 오 순 (숭실대학교 교수)
 신 현 철 (광운대학교 교수)
 심 동 규 (광운대학교 교수)
 안 광 호 (한국전자기술연구원 본부장)
 안 성 수 (명지전문대학 교수)
 연 규 봉 (한국자동차연구원 수석연구원)

강 문 식 (강릉원주대학교 교수)
 강 석 형 (포항공과대학교 교수)
 강 제 원 (이화여자대학교 교수)
 고 석 준 (제주대학교 교수)
 고 정 환 (인하공업전문대학 교수)
 공 배 선 (성균관대학교 교수)
 구 민 석 (서울시립대학교 교수)
 궁 재 하 (고려대학교 교수)
 권 구 덕 (강원대학교 교수)
 권 종 원 (한국산업기술시험원 센터장)
 권 호 열 (강원대학교 교수)
 김 경 기 (대구대학교 교수)
 김 도 현 (국민대학교 명예교수)
 김 동 규 (한양대학교 교수)
 김 동 현 (ICTK 대표이사)
 김 민 휘 (중앙대학교 교수)
 김 상 범 (한국폴리텍대학 교수)
 김 선 용 (건국대학교 교수)
 김 성 우 (서울대학교 교수)
 김 수 중 (경북대학교 명예교수)
 김 영 권 (후례대학교 명예총장)
 김 영 한 (UC San Diego/가우스랩스 대표이사)
 김 원 준 (건국대학교 교수)
 김 익 군 (한국전자통신연구원 부장)
 김 재 희 (연세대학교 명예교수)
 김 중 옥 (고려대학교 교수)
 김 진 상 (경희대학교 총장)
 김 태 옥 (연세대학교 교수)
 김 한 구 (EESOP 대표)
 김 현 (부천대학교 교수)
 김 형 진 (한양대학교 교수)
 나 정 웅 (한국과학기술원 명예교수)
 남 일 구 (부산대학교 교수)
 노 정 진 (한양대학교 교수)
 류 성 주 (서강대학교 교수)
 류 은 석 (성균관대학교 교수)
 문 용 (숭실대학교 교수)
 박 관 서 (연세대학교 교수)
 박 성 옥 (차세대지능형반도체사업단 이사장)
 박 성 한 (한양대학교 명예교수)
 박 인 규 (인하대학교 교수)
 박 중 일 (한양대학교 교수)
 박 철 수 (광운대학교 교수)
 배 순 민 (케이티 LAB장)
 백 광 현 (중앙대학교 교수)
 범 진 옥 (서강대학교 교수)
 서 민 재 (서울시립대학교 교수)
 서 종 모 (서울대학교 교수)
 선 우 경 (서울대학교 교수)
 송 문 섭 (삼척 회장)
 송 익 현 (한양대학교 교수)
 신 요 안 (숭실대학교 교수)
 신 희 동 (한국전자기술연구원 원장)
 심 용 (중앙대학교 교수)
 안 병 구 (홍익대학교 교수)
 안 현 식 (동명대학교 교수)
 오 윤 제 (정보통신기획평가원 PM)

오 윤 호 (고려대학교 교수)
 우 윤 택 (한국과학기술원 교수)
 유 담 (서울대학교 교수)
 유 찬 세 (한국전자기술연구원 수석연구원)
 윤 명 국 (이화여자대학교 교수)
 윤 종 용 (삼성전자 비상임고문)
 이 광 엽 (서경대학교 교수)
 이 규 북 (한국전자기술연구원 석좌연구원)
 이 덕 진 (전북대학교 교수)
 이 민 호 (경북대학교 교수)
 이 상 훈 (웨이브피아 대표이사)
 이 성 호 (한국전자기술연구원 센터장)
 이 승 호 (한밭대학교 교수)
 이 윤 구 (광운대학교 교수)
 이 재 관 (한국자동차연구원 소장)
 이 재 훈 (서울대학교 명예교수)
 이 정 원 (서울대학교 교수)
 이 주 연 (전주비전대학교 교수)
 이 채 은 (한양대학교 교수)
 이 태 동 (국제대학교 교수)
 이 형 민 (고려대학교 교수)
 이 희 덕 (충남대학교 교수)
 임 성 훈 (대구경북과학기술원 교수)
 임 혜 숙 (이화여자대학교 교수)
 장 성 진 (주와이씨 대표이사)
 전 동 석 (서울대학교 교수)
 전 세 영 (서울대학교 교수)
 전 흥 태 (중앙대학교 명예교수)
 정 성 엽 (고려대학교 교수)
 정 영 모 (한성대학교 교수)
 정 은 성 (홍익대학교 교수)
 정 일 권 (한국전자통신연구원 본부장)
 정 한 울 (광운대학교 교수)
 조 도 현 (인하공업전문대학 교수)
 조 성 현 (한양대학교 교수)
 조 진 우 (한국전자기술연구원 부원장)
 진 훈 (안양대학교 교수)
 채 주 형 (광운대학교 교수)
 최 병 호 (한국전자기술연구원 연구소장)
 최 용 수 (신한대학교 교수)
 최 재 혁 (서울대학교 교수)
 최 창 식 (DB하이텍 부회장)
 한 동 석 (경북대학교 교수)
 한 진 호 (한국전자통신연구원 책임연구원)
 함 범 섭 (연세대학교 교수)
 허 준 (고려대학교 교수)
 홍 성 원 (서강대학교 교수)
 황 성 운 (가천대학교 교수)
 황 인 태 (전남대학교 교수)

오 태 현 (포항공과대학교 교수)
 우 정 호 (비전넥스트 대표이사)
 유 명 식 (송실대학교 교수)
 유 창 동 (한국과학기술원 교수)
 윤 석 현 (단국대학교 교수)
 윤 종 윤 (주파두 사장)
 이 권 형 (LG전자 책임연구원)
 이 규 호 (연세대학교 교수)
 이 동 규 (카카오모빌리티 부사장)
 이 병 희 (한밭대학교 교수)
 이 서 규 (한국매향산업협회 회장)
 이 수 민 (한국센서연구소 대표이사)
 이 신 형 (서울시립대학교 교수)
 이 인 규 (고려대학교 교수)
 이 재 규 (삼성전자주) 마스터)
 이 재 훈 (유정시스템 대표이사)
 이 종 호(S) (서울대학교 교수)
 이 진 구 (동국대학교 석좌교수)
 이 천 희 (전주주대학교 교수)
 이 한 호 (인하대학교 교수)
 이 후 진 (한성대학교 교수)
 인 치 호 (세명대학교 교수)
 임 완 수 (성균관대학교 교수)
 임 흥 기 (인하대학교 교수)
 장 익 준 (경희대학교 교수)
 전 병 우 (성균관대학교 교수)
 전 영 현 (삼성전자주) 부회장)
 정 방 철 (충남대학교 교수)
 정 소 이 (아주대학교 교수)
 정 완 영 (한국과학기술원 교수)
 정 은 승 (삼성전자 고문)
 정 정 화 (한양대학교 석좌교수)
 제 민 규 (한국과학기술원 교수)
 조 문 규 (한국교통대학교 교수)
 조 영 민 (SkyMirr CEO)
 주 영 복 (한국기술교육대학교 교수)
 채 관 엽 (삼성전자 마스터)
 최 강 선 (한국기술교육대학교 교수)
 최 성 민 (해치텍 대표이사)
 최 우 영 (서울대학교 교수)
 최 준 림 (경북대학교 교수)
 최 천 원 (단국대학교 교수)
 한 은 혜 (에스에스앤씨 대표이사)
 한 태 화 (연세대의료원 팀장)
 함 철 희 (삼성전자 마스터)
 홍 국 태 (LX세미콘 연구위원)
 홍 승 홍 (인하대학교 명예교수)
 황 원 준 (고려대학교 교수)
 황 진 영 (한국항공대학교 교수)

우 성 민 (한국기술교육대학교 교수)
 원 제 형 (도쿄일렉트론코리아 대표이사)
 유 재 준 (울산과학기술원 교수)
 유 창 식 (삼성전자 부사장)
 윤 영 권 (삼성전자 마스터)
 이 강 윤 (성균관대학교 교수)
 이 규 대 (공주대학교 교수)
 이 덕 기 (연암공과대학교 교수)
 이 문 기 (연세대학교 명예교수)
 이 상 설 (한양대학교 명예교수)
 이 성 준 (한양대학교 교수)
 이 수 인 (텔레칩스 상무)
 이 우 주 (중앙대학교 교수)
 이 장 규 (텔레칩스 대표이사)
 이 재 진 (송실대학교 교수)
 이 정 우 (중앙대학교 교수)
 이 종 호(B) (서울대학교 교수)
 이 찬 수 (영남대학교 교수)
 이 총 용 (연세대학교 교수)
 이 혁 재 (서울대학교 교수)
 이 흥 노 (광주과학기술원 교수)
 임 대 영 (한국산업기술시험원 박사)
 임 제 탁 (한양대학교 명예교수)
 장 길 진 (경북대학교 교수)
 전 국 진 (서울대학교 명예교수)
 전 선 익 (파이낸셜뉴스 부회장)
 전 재 욱 (성균관대학교 교수)
 정 범 진 (서울과학기술대학교 교수)
 정 승 원 (고려대학교 교수)
 정 원 영 (강원공업 본부장)
 정 이 품 (연세대학교 교수)
 정 준 (솔리드 대표이사)
 조 남 익 (서울대학교 교수)
 조 성 재 (이화여자대학교 교수)
 조 일 환 (명지대학교 교수)
 진 경 환 (고려대학교 교수)
 채 영 철 (연세대학교 교수)
 최 광 성 (한국전자통신연구원 실장)
 최 수 일 (전남대학교 교수)
 최 우 영 (연세대학교 교수)
 최 중 호 (서울시립대학교 교수)
 추 민 성 (한양대학교 교수)
 한 재 호 (고려대학교 교수)
 한 태 희 (성균관대학교 교수)
 허 재 두 (한국전자통신연구원 연구전문위원)
 홍 대 식 (연세대학교 교수)
 홍 인 기 (경희대학교 교수)
 황 인 철 (강원대학교 교수)
 황 태 호 (한국전자기술연구원 본부장)

사무국 직원 명단

송기원 국장 - 산학연관 협력, 신규 사업, 저문/서울IT포럼, 지부, 인사, 규정, 회장단 관련, 총회 등 사무국 총괄
 이안순 부장 - 학회지, 추계학술대회, 이사회/평의원회, 총무업무(선거, 공문, 임원관련, 송년회, 포상 및 Wiset 등), 산업전자소사이터티
 배지영 부장 - 국제학술대회(ICCE-Asia), 하계종합학술대회, 신기술(총괄), 차세대리더육성, 시스템 및 제어소사이터티
 배기동 부장 - 사업행사(기술워크숍 등), 국문논문, 표준화, 용역업무, 인공지능신호처리소사이터티
 이소진 서기 - 국제학술대회(ITC-CSCC, ICEIC, ICCE-Asia), 외국 기관과 국제협력(Joint Award 등), JSTS 및 SPC 발간, 컴퓨터소사이터티
 김예빈 서기 - 정보화(홈페이지 관리 및 디지털 업무지원, 장비관리), 교육, 홍보, 신기술(담당), 차세대리더육성, 기타 지원업무, 반도체소사이터티
 박새롬 서기 - 본회/소사이터티/연구회 재무, 회원관리(개인회원 및 특별회원), 기획, 통신소사이터티

AI 융합 시대, 학회의 역할을 생각한다



김 종 옥 수석부회장
고려대학교 전기전자공학부 교수

4차 산업혁명과 함께 AI는 산업, 사회, 문화 등 전 영역에서 핵심 기술로 자리매김하고 있다. 특히 AI는 단독 기술로서뿐만 아니라 다양한 분야와 융합되어 혁신을 이끄는 기술로 진화하고 있다. 학제 간 융합 연구가 촉진되어, AI는 의료, 농업, 제조, 교육, 예술 등 다양한 분야와 융합하며 새로운 가치를 창출할 것이다. 이에 따라 AI 학술 단체는 융합 연구개발의 플랫폼을 제공하고 관련 분야 간의 협업을 유도하는 등 사회적 역할 또한 중요해지고 있다.

아프리카 마다가스카르의 메마른 사바나 대지에서 자라는 바오밥 나무는 굵고 물병처럼 부푼 줄기 안에 수천 리터의 물을 저장하고 있다. 이 거대한 물탱크는 동물들과 지역 주민들의 생명을 지탱해주는 귀중한 보고이다. 건조한 기후에서 물 순환의 중심 역할을 하며 바오밥 근처에는 생물의 다양성이 상대적으로 높다. 이 나무는 다양한 동물들에게 먹이와 쉼터를 제공하기도 한다. 원숭이, 새, 초식 동물에게 열매와 잎을 먹이로서 공급하며, 속이 비어 있는 큰 줄기 내부에는 새, 박쥐, 곤충, 파충류 등의 편안한 은신처가 되고 있다. 마다가스카르의 바오밥 나무는 단순히 한 종의 나무를 넘어, 건조한 지역 생태계의 핵심 축으로서 생존의 아이콘이자 자연 및 생물 간 상호작용의 생태계 허브이다.

최근, 단순히 디지털 전환(DX)을 넘어 인공지능 전환(AX)이 회자되고 있다. DX는 디지털 기술을 활용하여 제조, 유통, 농업, 행정, 교육 등의 프로세스를 혁신하는 것이다. 이 세상이 아날로그의 물리 세계와 디지털의 가상 세계로 구성되어 있다고 본다면, DX는 가상 세계의 영토를 넓히는 작업이며, 우리 전자공학 연구자는 디지털 영토를 확장하는 최전선의 전사이다. AX도 마찬가지이다. DX에서 디지털 기술을 도입하여 자동화 및 효율화를 도모했다면, AX는 인공지능 기술을 사회 전반에 전파하여 지능적이고 창의적 프로세스로 혁신하는 과정이다.

대한전자공학회에는 인공지능 기술의 다양한 세부학문분야 연구자들이 함께 모여 학술활동을 하고 있다. AI 알고리즘을 개발하는 인공지능 신호처리 및 컴퓨터 소사이어티, 알고리즘을 실제 시스템에서 구현하는 반도체 소사이어티를 포괄하고 있다. 즉, AI 기술의 이론과 구현을 담당하는 연구자가 모두 활동하는 학술단체이다. AX는 새로운 생태계를 구축하는 것이다. AI 융합 생태계는 다양한 산업과 기술을 연결하고 서로 자극하며, 소통을 통해 모두가 함께 성장하는 유기적 시스템이다. 마다가스카르의 바오밥 나무가 건조한 사바나 지역의 생태계 허브로서 생명의 중심 역할을 하듯이, 우리 전자공학회는 AI 융합 생태계를 구축하고 확장하는 융합 플랫폼으로서의 역할에 충실해야 할 것이다. 학회는 기술과 사회를 연결하는 가교이자, 첨단 기술을 개척하는 첨병이기 때문이다.

학회소식

IC Packaging 세미나 & 응용 예제 실습

대한전자공학회 반도체소사이어티(장성진 회장)와 반도체공학회(신현철 회장)가 공동으로 “IC Packaging 세미나 & 응용 예제 실습”을 8월 18일(월)부터 19일(화)까지 나인플러스IT 아카데미 203호에서 개최하였다. 본 행사는 단순 발표 중심의 프로그램을 넘어, 석·박사 과정의 학생 및 실무 초기 인재들이 실제 EDA Tool을 사용해 패키징 설계 및 레이아웃을 직접 실습할 수 있는 실용 중심 워크숍으로 기획되었다. 실습은 20명 규모의 그룹 단위로 진행되었고, 산업계 전문가들이 멘토로 함께 참여하여 현실적인 피드백을 제공하였다. 이를 통해 단순한 지식 전달을 넘어, 미래 패키징 전문가로 성장할 수 있는 실질적인 발판을 마련할 수 있었다.



강의실 전경

2025년도 SoC 워크숍 및 산학교류회

SoC설계연구회[위원장: 이강윤 교수(성균관대)]에서는 8월 28일(목)부터 29일(금)까지 강원도 웰리힐리파크에서 “2025년도 Soc워크숍 및 산학교류회”를 개최하였다. 본 워크숍은 글로벌 반도체 경쟁이 치열해지는 가운데, 우리나라 시스템 반도체 산업이 나아가야 할 방향을 모색하고 AI 시대를 선도할 핵심 기술들을 심도 있게 논의하였다. 정보통신기획평가원 오윤제 PM과 한국전자기술연구원 최병호 소장의 기조 발표를 시작으로, 반도체산업협회와 팹리스협회 전문가들이 업계 현황과 전망을 심도 있게 소개하였다. 또한 온디바이스 AI 구현을 위한 HW/SW 통합 솔루션, 초거대 언어모델 시대에 대응하는 저정밀도 딥러닝 가속기 설계, 그리고 차세대 고속 집적회로 설계 기술까지 최신 연구 성과를 공유했다. 이 워크숍에는 60여명이 참석하였다.



워크숍 전경



참석자 단체사진

신규회원 가입현황

기간 : 2025년 6월 1일 - 8월 31일

〈정회원〉

조용철(ETR), 서지훈(강남대학교), 박세영, 이정훈(광운대학교), 김홍정(국립중앙과학관), 신하늘(상록아이엔씨), 김태완, 유 담(서울대학교), 서정화(서울시립대학교), 고종환, 이상현(성균관대학교), 김효정(세종대학교), 김선경(센트디아), 엄기원(아이디퀀티크), 이준원(아티랩), 김한나(에어패스), 진성훈(인천대학교), 이규태(인하대학교), 문경민(중앙대학교병원), 박준민(충남대학교), 이억재(한국과학기술연구원), 박민우(한국기계전기전자시험연구원), 심호성(한국오픈소스협회), 이선희(한국이콜랩), 김린우(한국전자기술연구원), 최지혁(한국지질자원연구원), 신상훈, 이병훈(한양대학교), 임한국(호서대학교)

이상 29명

〈평생회원〉

황태호(ETRI), 김용태(경북대학교), 이정협(대구경북과학기술원), 우균(부산대학교), 조건희(성균관대학교), 신세운(포항공과대학교)

이상 6명

〈학생회원〉

김동준, 이규원, 이재준(강릉원주대학교), 강승현, 최주원(강원대학교), 김도균, 김찬원, 송민수, 최미진(경기과학기술대학교), 박광민(경희대학교), 손영직, 황지영(고려대학교), 김소진(과학기술연합대학원대학교), 이아린(광운대학교), 김수중, 김환진, 이하늘, 정현욱, 최유빈(국민대학교), 이승현(대구가톨릭대학교), 박윤서(동국대학교), 김상균(동서울대학교), 김세린(명지대학교), 백창우(부산대학교), 김기민(북일고등학교), 김민걸, 오동석, 이찬형, 정제혁, 조성주(서강대학교), 황원준(서울과학기술대학교), 이범기(서울대학교), 최 수(서울종합과학기술대학원대학교), 박성환, 성호경, 윤재준, 탁지수(성균관대학교), 이승훈(송실대학교), 박세현, 이하림(아주대학교), 이신호(연세대학교), 김명관, 윤강민, 최준우(울산대학교), 유제희, 이주은(이화여자대학교), 김수빈, 김용범, 박재현, 박진수, 윤신호, 이동훈, 지민우, 최재혁(인하공업전문대학교), 김지민(전북대학교), 이형민(제주대학교), 김대용, 윤경근, 이준서, 최우솔(조선이공대학교), 정현석, 주상현, 홍예내(중앙대학교), 양유림(한국과학기술연구원), 김승현, 남 건, 오유빈(한국폴리텍대학교), 이승재, 이준영, 황훈순(한성대학교), 고경보, 권준석, 김미지, 김소희, 노수민, 원동언, 유영원(한양대학교), 권한샘(협성대학교)

이상 78명

학회일지

www.theieie.org

THE INSTITUTE OF
ELECTRONICS AND INFORMATION
ENGINEERS

(2025년 8월 16일 ~ 9월 15일)

1. 회의 개최

회의 명칭	일시	장소	주요 안건
제5차 ICCE-Asia 2025 조직위원회	8.22 (12:30)	온라인	- 프로그램 구성 논의 등
제2차 ICEIC 2026 조직위원회	8.27 (15:00)	온라인	- 논문모집 및 프로그램 구성 논의

2. 행사 개최

구분	행사명	기간	장소
반도체소사이어티	IC Packaging 세미나 & 응용 예제 실습	8.18~8.19	나인플러스 아카데미(서울)
미래지능형네트워크연구회	CONNECTIVE AI WORKSHOP 2025 : AI 융합기술워크숍	8.19~8.20	KIST연수원(강릉)
SoC설계연구회	2025년도 SoC 워크숍 및 산학교류회	8.28~8.29	웰리힐리파크(강원도)

양자컴퓨팅 및 통신 기술 동향



박수현 편집위원
(숙명여자대학교)

양자역학에 기반한 범용 양자 튜링 머신 이론과 쇼어 알고리즘을 통해 양자 컴퓨터의 잠재력이 증명된 이후, 2019년 53큐비트 양자 컴퓨터 시카모어(Sycamore)를 통해 구글이 양자 우위를 달성함을 발표함으로써 양자 기술에 대한 세계적인 관심과 투자가 급격히 증가하며 본격적인 '양자 시대'

가 시작되었다. 양자 컴퓨팅, 양자 통신, 양자 보안 등을 포괄적으로 포함하는 양자 정보 과학 및 기술 (QIST)은 기존의 ICT 기술과 융합하여 NISQ(Noisy Intermediate-Scale Quantum) 시대에 맞춰 양자 생태계를 구성하고 있다. 본 특집호는 현재 우리가 직면하고 있는 NISQ 시대에서 필요한 양자 기술의 현황과 응용 사례, 앞으로의 전망에 대해 소개하고자 학계 및 산업계 전문가들의 기고문 6편으로 구성하였다.

첫째, "하이브리드 컴퓨팅 기반 변분법 양자 알고리즘 (VQA) 연구 동향 및 그 전망(김영민 외)"에서는 양자회로와 고전최적화기를 결합한 VQA에서 목적함수 최적화를 위한 양자회로 파라미터 학습 방법을 소개한다. 둘째, "풀 스택 양자 컴퓨팅 시대를 위한 양자 근사 최적화 알고리즘 연구 동향(장은혁 외)"는 VQA 패러다임을 조합 최적화 문제에 적용한 양자 근사 최적화 알고리즘(QAOA)을 양자 컴퓨팅을 실제로 실행하고 응용하기 위해 필요한 모든 계층 관점에서

성능 최적화 하는 방법을 소개한다. 셋째, "양자강화학습 기반 자율이동체 제어 연구(김중헌)"는 VQA를 신경망 형태로 적용한 양자 인공신경망(QNN) 기반의 양자 강화학습과 이를 자율이동체 제어 문제에서 활용한 최근 연구 동향을 소개하고 이를 미래 자율시스템으로 확장할 수 있는 방향을 제시하며, 넷째, "양자 컴퓨팅 알고리즘 연구 개발 동향(배은옥)"에서는 양자 하드웨어 발전 단계 관점에서 알고리즘 연구 흐름을 소개하고 NISQ, Early-FTQC, 그리고 FTQC로 구분되는 각 시대의 장점, 한계, 향후 연구 방향을 제시한다. 다섯째, "양자암호와 양자통신을 잇는 응용 프로토콜 연구 동향(손일권 외)"에서는 양자 컴퓨터의 위협에 대응하는 양자 암호 및 통신 기술의 최신 동향과 함께 양자 키 분배(QKD)의 한계를 극복하고 실제 통신 환경에 적용할 수 있는 새로운 응용 프로토콜을 소개한다. 마지막으로 "양자통신을 준비하는 산업계의 개발 동향과 전망(노광석)"은 QKD 기술의 확장과 상용화, 통신망 적용 현황, 그리고 양자 상태 전송을 위한 양자통신 기술과 양자 네트워크 인프라에 대한 연구 동향을 국내외 사례 중심으로 소개한다.

이처럼 본 특집호는 양자 컴퓨팅부터 양자 통신에 이르기까지 NISQ 시대의 핵심 기술 현황과 응용 사례를 포괄적으로 다루고 있다. 본 특집호에 귀한 논문을 실어주신 모든 집필진 여러분께 감사드리며, 본 특집호가 양자 기술 발전을 모색하는 모든 연구자와 관계자분들께 의미 있는 지침을 제공하고, 양자 시대의 기술 경쟁력 강화에 기여할 수 있기를 바란다.

하이브리드 컴퓨팅 기반 변분법 양자 알고리즘(VQA) 연구 동향 및 그 전망



김 영 민
연세대학교



이 창 현
연세대학교



김 형 석
연세대학교



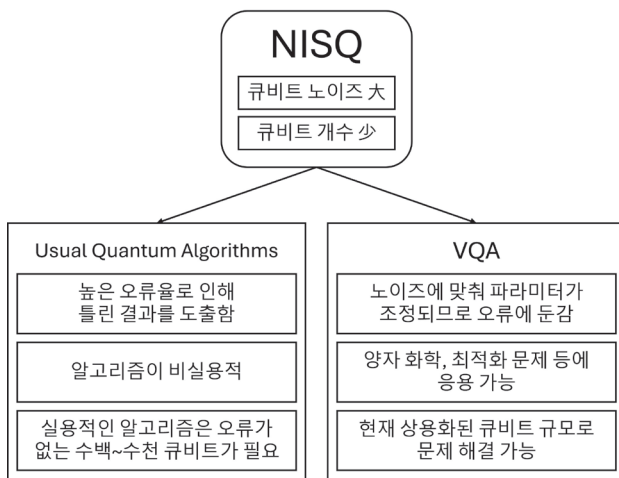
노 원 우
연세대학교

I. 서론

1994년 Peter Shor가 소인수분해 문제를 다항식 시간 내에 해결할 수 있는 Shor 알고리즘을 발표하였다^[1]. 이 알고리즘은 큰 수의 소인수 분해에 기반한 RSA 암호 체계의 안전성을 위협할 수 있을 정도로 실제적인 문제 해결 가능성을 보여주었고, 양자컴퓨팅의 중요성을 대중에게 각인시켰다. 그러나 Shor 알고리즘을 실행하려면 수천 개 이상의 안정적인 큐비트와 완벽한 오류 정정 기능이 필요하다는 점에서, 현재 기술로는 실제로 구현하기 어렵다는 한계가 분명하다. 현재의 양자 하드웨어는 큐비트 수나 안정성 면에서 Shor 알고리즘을 실용적으로 동작 시키기에는 충분하지 않다.

이러한 상황에서, NISQ(Nosiy Intermediate-Scale Quantum)^[2] 수준의 제한된 양자컴퓨터로도 의미 있는 계산을 수행할 수 있는 방법을 모색하려는 연구가 활발히 이루어지고 있다^{[3][4][5]}. 특히 현재 기술로 구성할 수 있는 적은 수의 큐비트와 높은 노이즈 환경을 고려했을 때, 양자컴퓨터와 고전컴퓨터가 상호 보완적으로 협력하는 하이브리드 알고리즘 구조가 주목받게 되었다. 대표적인 사례가 변분법 양자 알고리즘(Variational Quantum Algorithms, VQA)이다^[6]. VQA는 파라미터화된 양자회로를 사용해 양자 상태를 만들고, 고전컴퓨터가 그 상태의 기대값을 평가하여 파라미터를 조정하는 과정을 반복한다. 이를 통해 NISQ 기기 수준에서도 양자컴퓨터의 계산 역량을 활용할 수 있으며, 현재와 같은 제한된 하드웨어 환경에서도 실질적 문제 해결에 접근할 수 있는 방법으로 평가되고 있다.

또한 VQA는 NISQ 환경에 최적화되어 있다는 특징에도 불구하고, 향후 오류 정정이 가능한 완전한 양자컴퓨터(Fault-Tolerant Quantum Computer, FTQC) 환경에서도 충분히 활용될 수 있는 가능성이 크다.



〈그림 1〉 NISQ 시대에서의 기존 양자 알고리즘과
변분법 양자 알고리즘(VQA)의 비교

안정적이고 더 긴 양자회로를 구현할 수 있는 FTQC 시대가 오면, 보다 복잡한 구조의 양자회로 설계가 가능해져 VQA의 계산 정확도와 표현력을 한층 향상시킬 수 있다. 이를 통해 양자 화학, 최적화, 머신러닝 등 다양한 분야의 복잡한 문제를 보다 정밀하게 해결할 수 있을 것으로 기대된다. 따라서 VQA는 단기적으로는 NISQ 기기에서, 장기적으로는 FTQC 환경에서도 꾸준히 발전하며 양자 알고리즘의 중요한 축으로 자리할 가능성이 크다.

II. 변분법 양자 알고리즘(VQA)

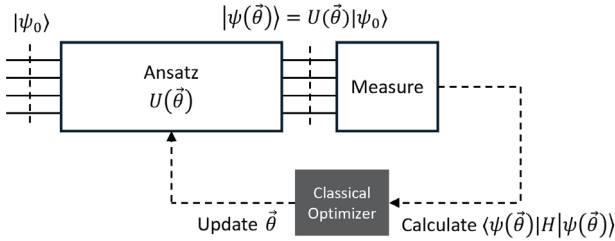
변분법 양자 알고리즘(Variational Quantum Algorithms, VQA)은 양자컴퓨터와 고전컴퓨터가 함께 동작해 문제를 해결하는 양자-고전 하이브리드 형태의 알고리즘이다^[6]. 양자컴퓨터는 양자 상태를 생성하는 데 사용되고, 고전컴퓨터는 결과를 분석하고 파라미터를 최적화한다. 이러한 구조는 최적화 문제나 양자 시스템 시뮬레이션과 같이 계산이 복잡한 문제에서 효과적이다^[7]. NISQ 시대의 양자컴퓨터는 큐비트 개수의 한계와 노이즈로 인해 안정적인 오류 정정이 어려운 상황이다. 이와 달리 VQA는 비교적 얇은 깊이의 양자회로도 계산을 수행할 수 있어, 현재의 하드웨어 수준에서도 실험적으로 구현하고 응용할 수 있다는 장점이 있다. 이런 특성 덕분에 VQA는 실제 문제 해결에 양자컴퓨팅을 적용할 수 있

는 현실적인 접근법으로 평가된다.

VQA의 핵심 원리는 파라미터가 포함된 양자회로를 구성하고, 해당 회로의 출력 상태에서 특정 기대값을 측정하는 것이다. 이후 측정값을 바탕으로 고전적 최적화 기법을 사용해 파라미터를 반복적으로 조정하면서 목적 함수(cost function)의 값을 줄이거나 늘리도록 한다. 이 과정을 통해 목적 함수를 최소화하거나 최대화하는 최적의 파라미터를 탐색한다. 일반적으로 이러한 최적화 문제는 $\vec{\theta}^* = \arg \min_{\vec{\theta}} C(\vec{\theta})$ 형태로 표현된다. 이때 $C(\vec{\theta})$ 는 목적 함수로 문제에 따라 정의되며, 예컨대 양자 화학에서는 분자의 에너지를 나타내는 해밀토니안 기대값을, 최적화 문제에서는 비용 함수를 목적 함수로 사용할 수 있다.

VQA에서 가장 중요한 구성 요소 중 하나는 안자츠(ansatz)이다. Ansatz는 파라미터화된 양자회로의 구조를 의미하며, 문제 특성과 양자 하드웨어의 제약을 함께 고려해 설계된다. Ansatz의 설계는 양자회로가 표현할 수 있는 상태 공간을 결정하기 때문에 VQA의 성능을 좌우하는 핵심 요소로 꼽힌다. 예를 들어 VQE에서는 분자의 전자 상호작용을 반영할 수 있는 UCCSD(Unitary Coupled Cluster Singles and Doubles) 형태의 회로가 널리 사용되며, QAOA에서는 문제 해밀토니안과 탐색용 해밀토니안을 교대로 적용하는 구조가 일반적이다. Ansatz는 너무 단순하면 충분한 표현력을 가지지 못해 좋은 해를 찾기 어렵고, 반대로 너무 복잡하면 불모의 고원(barren plateau) 현상으로 인한 매개변수 기울기 소실이 발생해 최적화가 어렵다는 문제가 있다^[8]. 따라서 문제 유형과 하드웨어 상황을 모두 반영해 적절한 복잡도를 가진 ansatz를 설계하는 것이 VQA 연구의 과제 중 하나다.

VQA는 양자 상태를 생성할 수 있는 양자컴퓨터의 장점과 고전컴퓨터의 효율적인 최적화 기능을 결합하여 양자-고전 반복 루프를 형성한다. 초기 파라미터를 설정한 후 양자회로를 실행해 목적 함수를 계산하고, 그 결과를 고전컴퓨터로 넘겨 최적화 알고리즘이 파라미터를 갱신한다. 이후 갱신된 파라미터로 다시 양자회로를 실행하며, 이 과정을 반복하면서 파라미터가 일정 수준으로 수렴할 때까지 최적 해를 탐색한다. 이러한 양자-고전 루



〈그림 2〉 변분 양자 고유값 해법(VQE) 양자-고전 루프

프 구조는 변분 양자 고유값 해법(VQE)^[9], 양자 근사 최적화 알고리즘(QAOA)^[10] 등 다양한 변분형 알고리즘에 공통적으로 활용된다.

VQA에서는 파라미터를 고정된 회로 구조 안에서 조정한다는 점이 중요한 특징이다. 이로 인해 얇은 회로 깊이만으로도 일정 수준의 계산 성능을 확보할 수 있으며, 이는 큐비트의 오류율이 높은 NISQ 기기 환경에서도 적합하게 작동할 수 있는 이유 중 하나다. 예를 들어 QAOA의 경우 적은 수의 레이어만으로도 일정 수준의 근사 해를 구할 수 있어, 복잡한 회로 설계를 요구하지 않는 상황에서 유리하다. 반면, 깊은 회로를 요구하는 알고리즘은 여러 누적과 노이즈로 인해 현존 하드웨어에서는 실행하기 어렵다.

또한 VQA의 전체적인 성능은 회로의 깊이, 큐비트 간 상호작용 방식, 파라미터의 개수 등 다양한 요소에 의해 좌우된다. 이러한 설계 요소들은 문제의 특성과 하드웨어 상황을 함께 고려해야 하며, 설계가 너무 단순하면 충분한 해를 표현할 수 없고, 반대로 너무 복잡하면 기울기 소실 현상 등이 발생해 최적화가 어려워질 수 있다. 따라서 효과적인 회로 설계는 VQA 연구와 실제 응용을 위해 반드시 해결해야 할 중요한 과제다^[23].

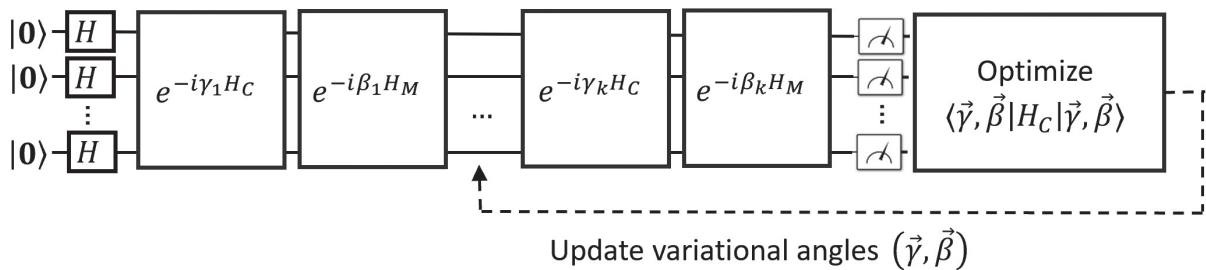
III. VQA의 대표적 알고리즘

1. 변분 양자 고유값 해법 (Variational Quantum Eigensolver, VQE)

VQE는 VQA 계열의 대표적인 알고리즘으로, 특정 해밀토니안 H 의 최저 고유값, 즉 바닥 상태 에너지를 근사적으로 구하는 데 사용된다^[9]. 이 알고리즘은 양자화학, 재료과학, 최적화 문제 등에서 분자나 결정 구조의 기저 상태 에너지를 계산하는 데 획기적인 방법으로 활용되고 있다^[7]. 변분 원리에 따르면 파라미터화된 양자 상태 $|\psi(\vec{\theta})\rangle$ 의 기댓값 $\langle\psi(\vec{\theta})|H|\psi(\vec{\theta})\rangle$ 은 실제 기저 상태 에너지 이상으로 평가되며, 이 기대값을 최소화할 수 있는 파라미터 $\vec{\theta}$ 를 찾으면 기저 상태에 근접한 해를 얻을 수 있다.

해밀토니안(Hamiltonian)은 양자계의 전체 에너지를 나타내는 연산자로, 시스템의 고유 상태와 해당 에너지를 결정하는 핵심 역할을 한다^[11]. 해밀토니안은 물리적 상호작용과 포텐셜을 반영하여 시스템의 동역학을 기술하며, 고유값 λ_i 는 측정 가능한 에너지 준위를, 고유상태 $|\psi_i\rangle$ 는 그에 상응하는 양자 상태를 의미한다. 해밀토니안은 슈뢰딩거 방정식 $\hat{H}|\psi(t)\rangle = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi(t)\rangle$ 에 따라 양자 상태의 시간에 따른 변화를 결정짓는다. VQE는 이러한 해밀토니안의 바닥 상태를 찾기 위해 양자회로에서 생성한 상태의 에너지를 측정하고, 측정값을 고전 최적화로 피드백해 파라미터를 갱신하는 방식으로 동작한다.

VQE 알고리즘은 파라미터화된 회로 $U(\vec{\theta})$ 를 사용해 상태 $|\psi(\vec{\theta})\rangle$ 를 생성한 뒤, 해당 상태에서부터 해밀토니안의 기대값을 측정한다. 측정값은 고전 컴퓨터로 전송되



〈그림 3〉 양자 근사 최적화 알고리즘(QAOA) 양자-고전 루프

어 최적화기가 파라미터를 갱신하고, 이를 반복함으로써 기대값을 점차 낮춰 바닥 상태에 근접한 해를 도출한다. VQE는 고전 계산으로는 지수적으로 메모리가 필요한 전자구조 문제를 양자컴퓨터의 큐비트로 다룰 수 있어 계산 리소스를 대폭 절감할 수 있다. 예를 들어 $N \times N$ 크기의 해밀토니안 행렬은 고전적으로 $O(N^2)$ 의 메모리를 요구하지만, 양자컴퓨터는 $O(\log N)$ 큐비트로 같은 정보를 표현할 수 있다.

VQE는 화학 반응 에너지 차이 예측, 다양한 화합물의 안정성 비교, 분자 구조 최적화, 반도체나 절연체의 밴드갭 계산 등 실제적인 양자화학 및 재료과학 문제에 널리 응용되고 있다. 이러한 이유로 VQE는 NISQ 기기 수준에서도 실질적 활용 가능성이 높은 핵심 알고리즘으로 평가된다.

2. 양자 근사 최적화 알고리즘 (Quantum Approximate Optimization Algorithm, QAOA)

QAOA는 양자컴퓨터의 변분적 기법을 활용해 다양한 이산 최적화 문제를 근사적으로 해결할 수 있도록 설계된 알고리즘이다^[10]. 이 알고리즘은 최적화하려는 문제의 비용함수를 양자 시스템의 에너지로 매핑한 문제 해밀토니안(problem Hamiltonian)과, 해 공간의 다양한 상태로 전이를 가능하게 하는 믹서 해밀토니안(mixer Hamiltonian)을 교차적으로 적용하는 구조로 이루어진다. 두 해밀토니안은 교대로 유니타리 변환 형태로 작용하며, 이 과정을 반복하면서 양자 상태는 점차 최적해를 포함할 가능성이 높은 상태로 수렴하게 된다. 이러한 교차 적용의 반복 횟수는 p-level이라고 불리며, p는 성능과 하드웨어 적합성 간의 균형을 조절하는 하이퍼파라미터 역할을 한다.

QAOA가 적용할 수 있는 대표적 문제 형태로는 2차 비제약 이진 최적화(Quadratic Unconstrained Binary Optimization, QUBO)가 있다^[12]. QUBO는 이진 벡터 x 에 대해 2차 비용함수를 최소화하는 해 x^* 를 찾는 문제로, 수식으로는 $x^* = \arg \min_x x^T Q x$ 로 표현된다. 여기서 Q 는 비용 행렬로, 문제 특유의 비용 구조를 담고 있다. QUBO는 Max-Cut, 최소 정점 커버, 스케줄링 문제

등 다양한 조합 최적화 문제로 변환될 수 있어 QAOA의 응용 가능성을 넓혀준다.

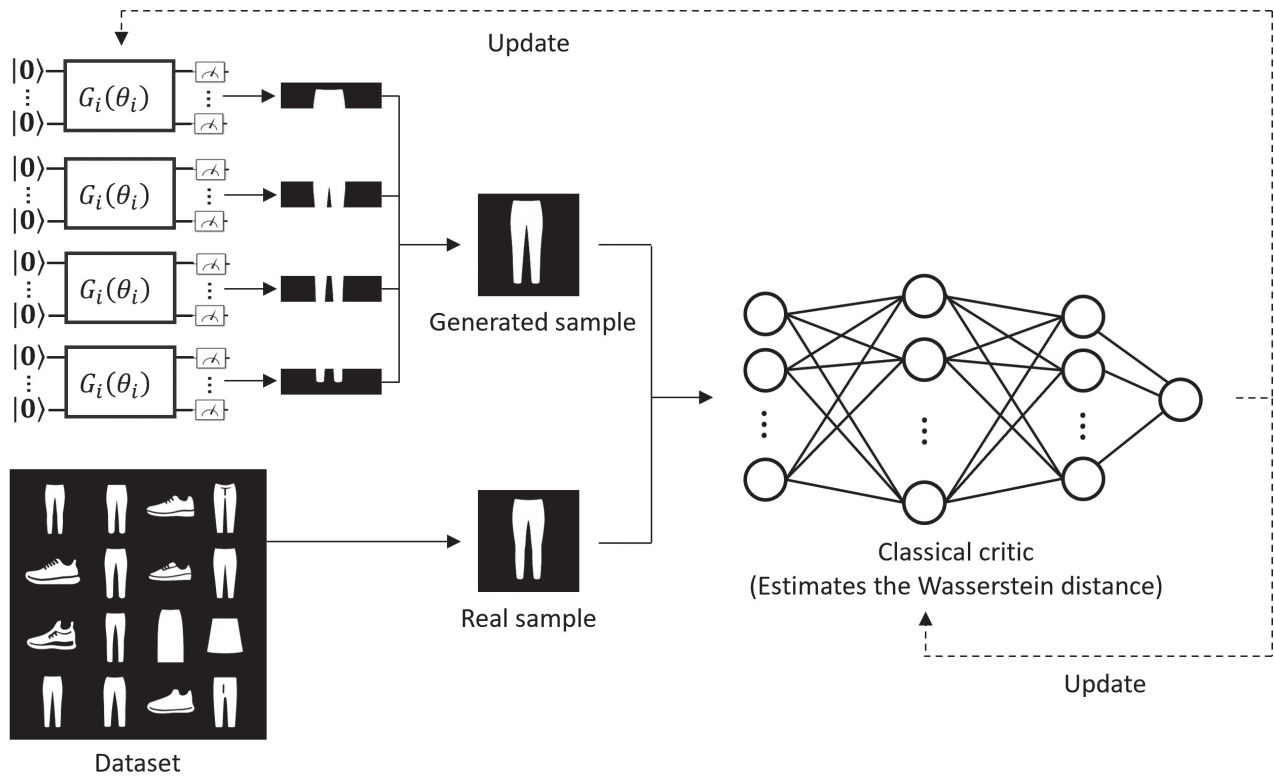
문제 해밀토니안 H_C 는 비용함수를 양자 시스템의 에너지로 표현하며, 예컨대 Max-Cut 문제의 경우 연결된 노드 쌍에 따라 상태별로 에너지를 설정해 그래프의 컷 크기를 최적화할 수 있도록 한다. 믹서 해밀토니안 H_M 는 보통 $H_M = \sum_i \sigma_i^x$ 형태로 구성되어, 큐비트 상태를 섞어 해 공간 전역을 탐색할 수 있게 한다. QAOA는 이 두 해밀토니안을 각 단계에서 파라미터 $(\vec{\beta}, \vec{\gamma})$ 에 따라 교차적으로 작용시키며 $U(\vec{\beta}, \vec{\gamma}) = \prod_k [\exp(-i\beta_k H_M) \exp(-i\gamma_k H_C)]$ 와 같이 ansatz가 구성된다. 파라미터는 고전 최적화 알고리즘으로 반복적으로 조정되며, 최종적으로 측정된 비트스트링 중 최적해에 대응되는 결과의 확률을 극대화하는 파라미터를 탐색한다.

QAOA 알고리즘의 특징 중 하나는 비교적 적은 p-level(교차 반복 단계 수)만으로도 고전적 휴리스틱 알고리즘과 유사하거나 그 이상의 성능을 보일 수 있다는 점이다. 예컨대 p=1~3 정도의 얇은 반복 횟수로도 양자적 효과를 활용해 문제 해에 대한 근사도가 크게 향상되는 사례가 보고되었다. QAOA는 p를 늘릴수록 더 복잡하고 정밀한 근사를 수행할 수 있지만, 동시에 양자회로의 길이가 증가해 오류 누적과 노이즈의 영향을 받을 수 있다는 트레이드오프가 존재한다.

QAOA는 조합 최적화에 널리 적용할 수 있어, 물류 네트워크의 비용 최적화, 금융 포트폴리오 구성, 에너지 그리드 설계, 배차 문제 등 실제 산업에서 해결이 필요한 다양한 문제를 효율적으로 풀 수 있는 가능성이 주목받고 있다. 이러한 이유로 QAOA는 NISQ 기기의 한계를 고려하면서도 양자컴퓨터의 잠재력을 활용할 수 있는 유력한 알고리즘으로 평가된다.

3. 그 외 VQA 응용 알고리즘

양자머신러닝 분야에서는 VQA의 구조를 기반으로 양자 분류기(Variational Quantum Classifier, VQC)나 양자 생성 모델(Quantum GAN)과 같은 다양한 응용 알고리즘이 개발되고 있다. VQC는 고전 데이터를 양자 상태



〈그림 4〉 양자 생성 모델(Quantum GAN) 양자-고전 루프^[16]

로 인코딩한 뒤, 파라미터가 포함된 양자회로를 통해 데이터를 분류한다^[13]. 이때 양자회로 내 파라미터는 고전 최적화 방법으로 조정되며, 목적 함수는 주로 분류 정확도를 평가할 수 있는 손실 함수로 정의된다. VQC는 고전적인 신경망에서의 활성화 함수와 유사하게 양자 게이트의 파라미터를 조절함으로써 데이터 구분을 학습한다는 점에서, 양자컴퓨터를 이용한 뉴럴 네트워크 모델로 볼 수 있다. 이러한 VQC는 선형적으로 구분할 수 없는 복잡한 데이터를 양자 얽힘과 중첩을 활용해 고차원 힐베르트 공간으로 사상하여, 더 복잡한 분류 경계를 학습할 수 있는 가능성을 보여준다^[15].

또한 Quantum GAN (Generative Adversarial Network) 영역에서도 VQA 구조는 중요한 역할을 하고 있다. 이 분야에서는 파라미터화된 양자회로를 양자 생성자(generator)로 설계하여 다양한 양자 상태를 만들고 고전 판별자(discriminator)는 생성된 상태와 실제 데이터를 구분한다^[16]. 이러한 양자 GAN 방식은 데이터 생성, 이상치 탐지, 데이터 증강 등의 용도로 활용될 가능성이

있으며, 초기 연구 결과에 따르면 고전 GAN보다 적은 파라미터로 복잡한 데이터 분포를 효과적으로 표현할 수 있는 잠재력이 관찰되고 있다^[14].

양자 시뮬레이션 분야에서도 VQA는 기존 고전적 방식으로는 계산이 어려운 양자계의 동역학이나 상전이 현상을 근사적으로 묘사하는 데 활용된다. 예를 들어 특정 해밀토니안을 바탕으로 양자 상태의 시간 변화를 근사적으로 구현하거나, 복잡한 고체 물질의 상전이 다이어그램을 예측하는 데 적용될 수 있다. 이때 VQA는 시뮬레이션 대상의 해밀토니안 기대값을 목적 함수로 설정하고, 적합한 양자회로 구조를 설계해 실험적으로 시스템의 거동을 재현한다. VQA를 활용하면 기존 고전 시뮬레이션으로는 불가능한 고차원 양자 시스템을 비교적 적은 자원으로 묘사할 수 있는 가능성을 제공한다.

이처럼 VQA는 기본 구조의 범용성과 유연성을 바탕으로, 기존의 VQE나 QAOA를 넘어 양자머신러닝, 시뮬레이션 등 다양한 분야로 응용 영역을 넓혀가고 있다. 이러한 확장은 NISQ 기기 환경에서 양자컴퓨팅을 상용화하

는 데 필요한 실질적 응용 사례를 제공하며, 앞으로 문제 특화형 회로 설계와 목적 함수의 정교화, 최적화 알고리즘의 고도화 등을 통해 여러 산업 분야에서 양자 우위를 실현할 가능성을 높이고 있다.

IV. 연구 동향

최근 VQA의 효율성과 안정성을 향상시키기 위한 다양한 연구들이 진행되고 있으며 주요 연구들을 중심으로 동향을 정리하면 다음과 같다^[27].

1. 회로 구조 최적화: 효율적 ansatz 구성

VQE와 같은 알고리즘에서 사용되는 대표적인 ansatz인 UCCSD는 분자의 전자 상호작용을 정밀하게 반영할 수 있지만, 그 회로는 수많은 파울리 항(Pauli string)으로 구성되어 매우 복잡하다.

파울리 항이란 Pauli-X, Y, Z 연산자를 여러 큐비트에 곱한 항들을 의미하며, 일반적으로 해밀토니안이나 ansatz 회로의 표현에서 사용된다. 예를 들어 $X_0X_1Y_2Z_3I_4$ 와 같은 형태는 다섯 개 큐비트 중 네 개에 연산을 적용한 하나의 파울리 항이다. UCCSD에서는 이러한 항이 수천 개에서 수만 개까지 존재할 수 있으며, 각 항마다 별도의 서브 회로가 필요하다.

최근 연구에서는 파울리 항 간의 유사성을 활용하여 중복되는 게이트 연산을 제거하거나, 회로 합성을 보다 구조적으로 최적화하려는 시도가 이뤄지고 있다^[17]. 특히 2 큐비트 게이트(CNOT)의 삽입을 최소화하는 전략은 회로

의 깊이를 줄이고 에러 누적을 억제하는 데 효과적이다^[18]. 이러한 방식은 단순히 회로 길이를 줄이는 것에 그치지 않고, 궁극적으로 VQA가 실제 하드웨어에서 더 안정적으로 실행될 수 있도록 돕는다.

2. 컴파일러 수준 최적화: 하드웨어 구조를 고려한 회로 배치 및 변환

VQA 회로를 실제 양자 하드웨어에서 실행하기 위해서는 하드웨어의 물리적 제약에 맞게 회로를 변환하는 컴파일 과정이 필요하다. 특히 초전도 기반의 양자 장치에서는 대부분의 큐비트가 이웃한 큐비트와만 직접 상호작용할 수 있기 때문에, 원래의 회로를 하드웨어 토폴로지(topology)에 맞춰 다시 배치해야 한다.

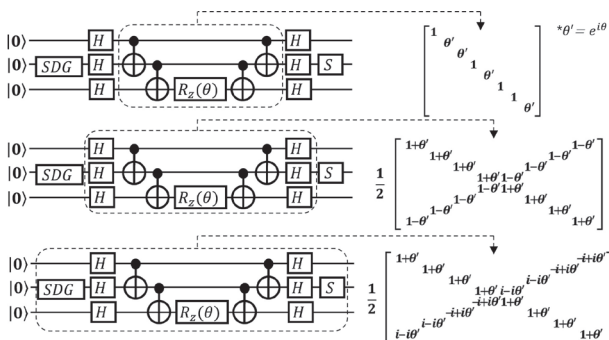
이때 서로 떨어진 큐비트를 연결하기 위해 삽입되는 SWAP 게이트는 회로를 길게 만들고, 그만큼 에러 발생 가능성도 증가시킨다. SWAP 게이트는 세 개의 CNOT 게이트로 구현되기 때문에 회로의 복잡도와 에러율에 큰 영향을 미친다. 따라서 컴파일러는 이러한 SWAP 삽입을 최소화하면서도 원래 회로의 논리를 유지해야 하며, 이를 위해 큐비트 매핑과 게이트 순서 최적화 등의 기법이 활용된다^[19].

이와 같은 최적화는 단순히 회로를 줄이는 차원을 넘어서, 하드웨어의 물리적 연결 구조(예: 직선형, 격자형, 혹은 IBM의 heavy-hex 토폴로지 등)와 각 큐비트의 오류 특성까지 고려하여 회로의 신뢰도를 높이는 데 목적이 있다. 특히 QAOA에서는 게이트 간 교환 가능(commutativity)이라는 특성을 활용해 보다 유연한 회로 재배열이 가능하며, 이는 전용 최적화 기법이 활발히 연구되는 배경이 된다.

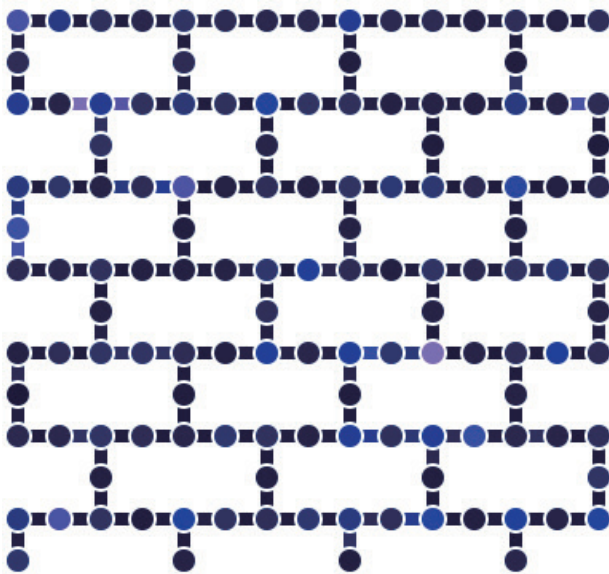
3. 회로 축소 기반의 파라미터 최적화 가속

QAOA의 성능은 초기 파라미터 설정이나 최적화 경로에 크게 영향을 받는다. 최근에는 복잡한 문제에 대해 전체 회로를 직접 최적화하는 대신, 문제를 간소화한 구조로 변환하여 먼저 파라미터를 찾고, 이후 이를 원래 문제로 다시 확장하는 방식이 제안되고 있다.

이러한 방식은 복잡한 회로를 직접 다루는 데 따른 노



〈그림 5〉 양자 시뮬레이션 속도를 높이기 위한 파울리 항 내에서의 게이트 합성 예시^[17]



〈그림 6〉 양자 하드웨어 heavy-hex 토폴로지 (IBM Torino)

이즈 민감성을 낮추는 동시에, 반복 최적화 과정의 효율도 향상시킬 수 있다. 핵심 아이디어는 특정 조건을 만족하는 두 문제 인스턴스가 매우 유사한 에너지 지형을 가진다는 점에 착안하여, 간소화된 문제에서 찾은 파라미터가 원래 문제에도 적용 가능하다는 것이다. 이를 통해 초기 최적화 단계를 훨씬 가볍게 수행할 수 있으며, 결과적으로 더 빠르고 안정적인 수렴을 달성할 수 있다^[20].

4. VQA의 하드웨어 적응력 향상: 초기화 및 구조 최적화

VQA에서 파라미터 초기값은 최적화 성능에 직접적인 영향을 미친다. 단순한 무작위 초기화보다 문제 특성이나 과거 학습 정보를 활용한 초기화 전략은 더 빠른 수렴과 높은 품질의 결과를 이끌어낼 수 있다^[21]. 최근에는 고전적인 머신러닝에서 사용하는 전이학습(Transfer learning) 개념을 적용해, 유사한 문제로부터 얻은 최적 파라미터를 새로운 문제에 활용하거나, 특정 문제 유형에 적합한 초기값을 학습 기반으로 자동 생성하는 기법도 제안되고 있다^[22].

이와 더불어, 하드웨어의 물리적 특성(예: 큐비트 간 연결도, 에러율, 결맞음 시간 등)을 고려한 회로 구조 설계 역시 VQA 성능 향상에 중요하다. 단순히 알고리즘만 설계하는 것이 아니라, 실행될 하드웨어의 제약 조건을

미리 반영한 ansatz 구성이나 게이트 배치 전략이 필요하며, 이는 실제 양자 하드웨어 상에서 에러 누적을 줄이고 회로 실행 신뢰도를 높이는 데 핵심적인 역할을 한다^{[23][24]}.

또한, 최근에는 하나의 양자처리장치(QPU) 대신 여러 QPU를 동시에 활용해 VQA를 분산 실행하는 방식도 제안되고 있다^[25]. 이러한 방법은 각 장치의 성능 차이와 노이즈 수준을 동적으로 반영하여, 상대적으로 신뢰도 높은 장치에 더 큰 학습 가중치를 부여하고 전체 학습 효율을 높이는 데 목적이 있다. 이처럼 시스템 전체의 물리적 제약과 실시간 실행 환경까지 고려한 전략은, 단순한 회로 최적화를 넘어서 VQA의 실질적 하드웨어 적응력을 향상시키는 중요한 방향으로 주목받고 있다^[26].

이처럼 VQA는 알고리즘 내부의 회로 설계에서부터 컴파일러 최적화, 하드웨어 특성 고려, 그리고 초기화 전략 등 다양한 측면에서 최적화를 요구하는 복합적인 연구 주제다. 최근 연구들은 이러한 요소들을 개별적으로 개선하거나 서로 결합하여 VQA의 전반적인 실행 효율과 안정성을 향상시키는 데 주력하고 있다. 향후에는 문제 특성에 따라 자동으로 회로를 설계하고, 하드웨어에 최적화된 형태로 배치하며, 효율적인 초기화를 통해 빠르게 수렴하는 end-to-end 방식의 VQA 실행 체계가 더욱 중요해질 것으로 보인다.

V. 결론 및 전망

변분법 양자 알고리즘(VQA)은 현존하는 NISQ 수준의 양자컴퓨터로도 실행 가능한 유망한 알고리즘 패러다임으로, 고전컴퓨터로는 다루기 어려운 양자화학, 최적화, 머신러닝 문제를 보다 효율적으로 풀 수 있는 가능성을 열어주었다. 특히 VQE는 분자의 바닥 상태 에너지 계산을 통해 신약 개발, 배터리 소재 설계 등에서 실질적 응용 가능성을 보이고 있으며, QAOA는 다양한 NP-hard 문제를 QUBO 형태로 맵핑해 산업 최적화 분야에서 잠재력을 입증하고 있다. 이를 통해 VQA는 양자컴퓨팅의 초기 상업적 활용을 견인할 핵심 기술로 자리잡고 있다.

이러한 VQA의 가능성을 실현하기 위해 최근 연구들은

알고리즘 구조와 실행 환경 전반에 걸쳐 다양한 개선 방향을 모색하고 있다. 특히 복잡한 회로 구조를 단순화하여 실행 효율을 높이는 방안, 양자 하드웨어의 연결 구조나 에러 특성을 고려한 회로 재배치 및 게이트 최적화, 초기 파라미터 설정의 정교화, 그리고 양자 회로의 실행을 여러 장치에 분산하여 수행하는 전략 등이 활발히 연구되고 있다. 또한, 문제를 간소화한 형태에서 먼저 최적화한 파라미터를 원래 문제에 적용하는 방식이나, 과거 학습 결과를 활용한 전이 학습 방식 등도 제안되고 있다. 이처럼 회로 수준, 컴파일러 수준, 파라미터 최적화 수준, 하드웨어 적응 수준에서 이루어지는 다양한 접근은 VQA의 실행 신뢰도와 성능을 동시에 향상시키며, 제한된 NISQ 환경에서도 의미 있는 계산을 가능하게 만드는 기반이 되고 있다.

그러나 VQA는 NISQ 기기의 한계를 극복하기 위해 여러 과제가 남아있다. 첫째, 큐비트 수와 양자 게이트의 오류율, 측정 잡음 등 하드웨어의 제약으로 인해 깊은 양자회로를 필요로 하는 문제에서 barren plateau와 같은 기울기 소실 현상이 발생하기 쉽다. 이로 인해 최적화 알고리즘이 파라미터 갱신 과정에서 효과적으로 학습하지 못하고 수렴하지 않는 문제가 빈번히 발생한다. 이러한 한계를 극복하기 위해 얇은 회로 구조 설계(shallow ansatz), 문제의 물리적 특성을 반영한 가설 회로(problem-informed ansatz), 양자 회로 층별 학습(layerwise training) 등 다양한 기법이 활발히 연구되고 있다.

둘째, 고전 최적화 알고리즘과 양자 측정의 결합을 개선할 필요가 있다. 양자회로의 기대값 계산을 위해 다수의 측정 샷을 수행해야 하는데, 샷 수가 늘어날수록 계산 비용이 기하급수적으로 증가한다. 따라서 샷 효율성을 극대화하는 샘플링 전략, 교환 가능 연산자 그룹화(commuting grouping), 적응형 측정 기법(adaptive measurement scheme) 등이 중요한 연구 주제로 부상하고 있다. 또한, 고전 최적화 알고리즘으로는 SPSA (Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation), ADAM (Adaptive Moment Estimation), Quantum Natural Gradient 등 다양한

기법이 제안되어 있으며, 이들의 성능을 특정 문제에 맞게 조합하고 향상하는 방안도 필수적이다.

셋째, VQA의 상용화를 위해서는 다양한 실제 문제의 적용 가능성을 검증하고, 산업적 수요에 맞는 문제를 발굴하는 과정이 필요하다. 현재 양자 화학 문제뿐만 아니라 물류, 금융, 제조 등 고전 알고리즘으로 풀기 어려운 조합 최적화 문제가 양자컴퓨팅과 결합할 수 있는 가능성이 활발히 모색되고 있다. 예를 들어 복잡한 물류 네트워크에서 비용을 최소화하거나, 금융 포트폴리오의 위험-수익 비율을 최적화하는 문제는 QAOA와 QUBO 모델을 활용해 효율적 해를 모색할 수 있다.

한편, 양자컴퓨팅 하드웨어의 발전과 함께 VQA의 성능도 점차 향상될 것으로 기대된다. 초전도 큐비트, 이온 트랩, 광학 기반 플랫폼 등 다양한 양자 하드웨어 기술이 지속적으로 발전하고 있으며, 게이트 정밀도와 큐비트 간 결합도 개선으로 VQA가 다룰 수 있는 문제의 스케일이 커지고 있다. 하드웨어 발전과 알고리즘 연구가 함께 이루어질 때, VQA는 기존 고전 알고리즘을 뛰어넘는 양자 우위를 실현할 수 있을 것이다.

종합하면, VQA는 제한적인 NISQ 기기 환경에서도 양자컴퓨팅의 잠재력을 구체적으로 실현할 수 있는 가장 현실적이고 유연한 접근법이다. 향후 양자 알고리즘과 하드웨어 기술의 지속적인 발전, 그리고 실질적 문제 해결을 위한 ansatz 설계와 최적화 기법의 고도화가 맞물려 진행된다면, VQA는 양자컴퓨팅의 상업적 활용을 가속화하고, 다양한 산업 분야에 혁신을 불러올 중요한 촉매 역할을 수행할 것이다.

참고 문헌

- [1] Peter W. Shor. 1999. Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer. SIAM review 41, 2 (1999), 303–332.
- [2] John Preskill. 2018. Quantum Computing in the NISQ era and beyond. Quantum 2 (2018), 79.
- [3] Kitaev, A. Yu. "Fault-tolerant quantum computation by anyone." Annals of physics 303,1 (2003): 2–30.
- [4] Acharya, Rajeev, et al. "Quantum error correction below the

- surface code threshold.” *Nature* (2024).
- [5] Kim, Hyungseok, et al. “QR-Map: A Map-Based Approach to Quantum Circuit Abstraction for Qubit Reuse Optimization,” *Proceedings of the 52nd Annual International Symposium on Computer Architecture*, 2025.
- [6] Cerezo, Marco, et al. “Variational quantum algorithms,” *Nature Reviews Physics* 3,9 (2021): 625–644.
- [7] Aspuru-Guzik, Alán, et al. “Simulated quantum computation of molecular energies,” *Science* 309,5741 (2005): 1704–1707.
- [8] McClean, Jarrod R., et al. “Barren plateaus in quantum neural network training landscapes,” *Nature communications* 9,1 (2018): 4812.
- [9] Peruzzo, Alberto, et al. “A variational eigenvalue solver on a photonic quantum processor,” *Nature communications* 5,1 (2014): 4213.
- [10] Farhi, Edward, Jeffrey Goldstone, and Sam Gutmann. “A quantum approximate optimization algorithm,” *arXiv preprint arXiv:1411.4028* (2014).
- [11] Eisberg, Robert, and Robert Resnick. *Quantum physics of atoms, molecules, solids, nuclei, and particles*. 1985.
- [12] Kochenberger, Gary, et al. “The unconstrained binary quadratic programming problem: a survey,” *Journal of combinatorial optimization* 28 (2014): 58–81.
- [13] Farhi, Edward, and Hartmut Neven. “Classification with quantum neural networks on near term processors,” *arXiv preprint arXiv:1802.06002* (2018).
- [14] Zoufal, Christa, Aurélien Lucchi, and Stefan Woerner. “Quantum generative adversarial networks for learning and loading random distributions,” *npj Quantum Information* 5,1 (2019): 103.
- [15] Ranjan, Aditya, et al. “Proximl: Building machine learning classifiers for photonic quantum computing,” *Proceedings of the 29th ACM International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems*, Volume 3, 2024.
- [16] Tsang, Shu Lok, et al. “Hybrid quantum–classical generative adversarial network for high–resolution image generation,” *IEEE Transactions on Quantum Engineering* 4 (2023): 1–19.
- [17] Choi, Seungwoo, et al. “MOSQ: Accelerating Classical Simulation of UCCSD Ansatz Circuits using Merged Operation,” *2024 IEEE 42nd International Conference on Computer Design (ICCD)*, IEEE, 2024.
- [18] Jin, Yuwei, et al. “Tetris: A compilation framework for vqa applications in quantum computing,” *2024 ACM/IEEE 51st Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA)*, IEEE, 2024.
- [19] Zhu, Yuchen, et al. “Compiler Optimizations for QAOA,” *Proceedings of the 43rd IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design*, 2024.
- [20] Wang, Meng, et al. “Red-qaoa: Efficient variational optimization through circuit reduction,” *Proceedings of the 29th ACM International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems*, Volume 2, 2024.
- [21] Ravi, Gokul Subramanian, et al. “CAFQA: A classical simulation bootstrap for variational quantum algorithms,” *Proceedings of the 28th ACM International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems*, Volume 1, 2022.
- [22] Montanez-Barrera, J. A., Dennis Willsch, and Kristel Michielsen. “Transfer learning of optimal QAOA parameters in combinatorial optimization,” *Quantum Information Processing* 24,5 (2025): 1–18.
- [23] Jang, Enhyeok, et al. “Recompiling QAOA Circuits on Various Rotational Directions,” *Proceedings of the 2024 International Conference on Parallel Architectures and Compilation Techniques*, 2024.
- [24] Buonaiuto, Giuseppe, et al. “The effects of quantum hardware properties on the performances of variational quantum learning algorithms,” *Quantum Machine Intelligence* 6,1 (2024): 9.
- [25] Stein, Samuel, et al. “Eqc: ensembled quantum computing for variational quantum algorithms,” *Proceedings of the 49th annual international symposium on computer architecture*.



2022.

[26] Kim, Youngmin, et al. "Distribution-Adaptive Dynamic Shot Optimization for Variational Quantum Algorithms." arXiv preprint arXiv:2412.17485 (2024).

[27] Bonet-Monroig, Xavier, et al. "Performance comparison of optimization methods on variational quantum algorithms." Physical Review A 107.3 (2023): 032407.



김 영 민

- 2024년 2월 연세대학교 전기전자공학부 학사
- 2024년 3월 ~ 현재 연세대학교 전기전자공학과 석박사통합과정

〈관심 분야〉
양자 컴퓨팅, VQA 최적화



이 창 현

- 2025년 2월 연세대학교 물리학과, 전기전자공학부 복수전공 학사
- 2025년 3월 ~ 현재 연세대학교 전기전자공학과 석박사통합과정

〈관심 분야〉
양자 컴퓨팅, 양자 알고리즘



김 형 석

- 2025년 2월 연세대학교 전기전자공학부, 경제학과 복수전공 학사
- 2025년 3월 ~ 현재 연세대학교 전기전자공학과 석사과정

〈관심 분야〉
양자 컴파일러, 양자 알고리즘



노 원 우

- 1996년 연세대학교 전기공학과 학사
- 1999년 Univ. of Southern California 전기공학과 석사
- 2004년 Univ. of Southern California 전기공학과 박사
- 2007년 ~ 현재 연세대학교 전기전자공학부 교수

〈관심 분야〉
고성능 프로세서 구조, GPU 구조, 병렬 프로그래밍, 양자 컴퓨팅

풀 스택 양자 컴퓨팅 시대를 위한 양자 근사 최적화 알고리즘 연구 동향

I. 서론

양자 컴퓨터는 양자역학에서의 고유한 원리인 중첩(superposition)과 얽힘(entanglement)을 연산에 활용함으로써 기존 고전 컴퓨터가 처리하기 어려운 문제를 보다 효율적으로 해결할 잠재력을 지닌 기술이다^{[1][2]}. 고전 컴퓨터가 0 또는 1로 이루어진 이진 논리인 비트(bit)를 기반으로 데이터를 처리하는 반면에, 양자 컴퓨터는 큐비트(qubit)를 계산 단위로 활용하며, 지수적으로 증가하는 중첩되거나 얽힌 상태를 표현할 수 있다. 다시 말하자면, n 개의 큐비트는 동시에 최대 2^n 개의 상태를 표현할 수 있기에, 특정 문제에 대해 고전 컴퓨터 대비 큰 계산 자원 절감이 기대된다.

그러나 현재의 양자 컴퓨팅 기술은 NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum) 시대라고 불리는 과도기적 상태에 있다^[3]. 이는 오류 정정을 위한 자원이 충분하지 않아 연산 도중 발생하는 오류를 충분히 제어할 수 없는 한계를 가지는 수십에서 수백 개 정도의 큐비트로 이루어진 양자 컴퓨팅 단계를 의미한다. 즉, NISQ 수준에서 실용적인 양자 알고리즘 개발을 위해서는 제한된 하드웨어 성능과 높은 연산 오류율을 고려하면서도 의미 있는 결과를 얻을 수 있어야 한다.

초기의 대표적인 양자 알고리즘 중 하나인 쇼어(Shor) 알고리즘은 소 인수분해 문제를 다항식 시간 내에 해결하여 RSA (Rivest-Shamir-Adleman) 암호 체계의 안전성을 위협할 수 있다는 점에서 양자 우위 또는 이점의 가능성을 보여주었다^[4]. 그러나 쇼어 알고리즘이 현실적으로 현대의 보안 체계에 해당하는 RSA-2048 수준의 암호를 풀 수 있는 규모로 구현하기 위해서는 오류 정정을 통해 충분히 낮은 오류율을 갖는 수천 개 이상의 논리 큐비트가 요구되므로, 현재의 하드웨어로는 현실적으로 실현하기 어렵다.



장은혁
연세대학교



최승우
연세대학교



노원우
연세대학교



이러한 배경 속에서, 최근 상당한 관심을 받는 것이 바로 변분법 양자 알고리즘(Variational Quantum Algorithm, VQA)의 일종인 양자 근사 최적화 알고리즘(QAOA)이다^{[5][6]}. QAOA는 고전 컴퓨팅 자원과 양자 컴퓨팅 자원이 서로 협력하는 복합형 형태의 알고리즘으로써, 조합 최적화(Combinatorial Optimization) 문제를 푸는 데 특화되어 있다^[7].

특히 QAOA는 다른 양자 알고리즘과 비교했을 때 상대적으로 얇은 회로 깊이만으로도 유의미한 최적화 성능을 달성할 수 있는 특징이 있다. 이는 오류가 누적되기 쉬운 NISQ 장치에서 현실적으로 실행할 수 있는 알고리즘으로 평가받는 주된 이유이다. 예를 들어, QAOA는 최대 컷(Max-Cut), 최소 정점 커버(Minimum Vertex Cover), 스케줄링 문제 등 다양한 NP-hard 문제를 해결할 가능성을 입증하고 있으며, 이는 항공, 물류 분야 등 수많은 경우의 수를 고려해 비용을 최소화해야 하는 산업들에서 의미가 있다.

이러한 가능성에도 불구하고, QAOA의 실제 적용을 위해서는 물리적 양자 하드웨어에서 발생하는 다양한 현실적인 제약을 고려한 최적화가 필수적이다. 본 원고에서는 QAOA 연구 동향 중에서도 QAOA 알고리즘의 특성과 물리적 하드웨어의 특성을 모두 고려하여 효율적으로 실행하는 방법론에 대해서 다룬다. QAOA 애플리케이션의 실행 효율이 저하될 수 있는 영역은 다양한데, 이전까지는 일반적으로 QAOA 알고리즘과 양자 하드웨어 연구가 각각 독립적으로 집중되어 수행되었기에 이 두 영역을 연결(bridging)하는 연구들이 상대적으로 늦게 수행되었기 때문이다. 그러나 최근에는 양자 컴퓨팅을 효율적으로 다루기 위해서 양자 알고리즘과 하드웨어를 연결하는 중간 계층에 관한 연구가 폭발적으로 증가하고 있으며, 이는 고전 컴퓨터 역사에서 소프트웨어 스택이 복합적으로 발달하게 된 역사를 고스란히 따르리라고 쉽게 예상할 수 있다.

이러한 맥락에서, 본 원고에서는 미래에 양자 컴퓨터를 구성하는 소프트웨어 및 하드웨어가 복합적으로 연결되고 발전한 풀 스택(full-stack) 양자 컴퓨팅 시대를 대비하여 QAOA를 주 애플리케이션으로 하는 최신 중간 계층 수준의 연구를 자세히 살펴볼 것이다.

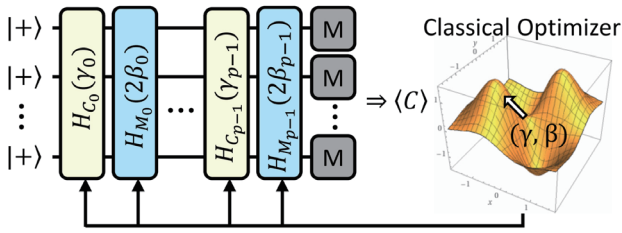
QAOA 회로가 고수준 추상화로 표현된 후 물리 하드웨어가 실제로 실행할 수 있는 한정된 고유한 네이티브 게이트들의 조합으로 변환 및 번역되는 과정에서 발생하는 실행 오버헤드, 큐비트의 열 이완으로 인해 특정 판독 결과에 확률적으로 편향이 생기는 문제, 그리고 신호 하드웨어가 개발되었을 때 이전에 지배적인 하드웨어에 효율적이었던 프로그램 구조가 새 하드웨어에서는 그렇지 않아 실행 효율성이 저하될 수 있는 문제가 대표적으로 주요한 도전 과제로 부상하고 있다.

본 원고에서는 이러한 문제의식 아래, QAOA 실행의 실효성을 높이기 위한 최근 연구 동향 중 세 가지 대표적인 방법론에 대해 논의하는 것에 집중한다. 첫째, QAOA 회로가 실행하는 양자 상태의 회전축 조합을 각 물리적 양자 장치에 보다 효율적으로 맞추기 위한 네이티브 게이트 최적화 기술인 게이트-인식형 컴파일러 연구^[8], 둘째, 측정 과정에서 발생하는 비대칭 확률 편향 문제를 완화하는 대칭성 기반 오류 보정 기법^[9], 셋째, 최근 주목받고 있는 중성 원자 기반 구역화된 양자 아키텍처에서 QAOA 회로 실행을 안정화하기 위한 인터리빙 완화 및 재작성 전략^[10]이 그것이다. 이들 세 연구는 각각 서로 다른 시스템 수준(컴파일러, 판독 오류, 하드웨어 아키텍처)에서 QAOA 실행 신뢰성을 향상하는 대표적 사례로, QAOA를 실제 장치에서 신뢰할 수 있게 실행하는 문제에 대해 초점을 맞추고 있다는 점에 공통점이 있다.

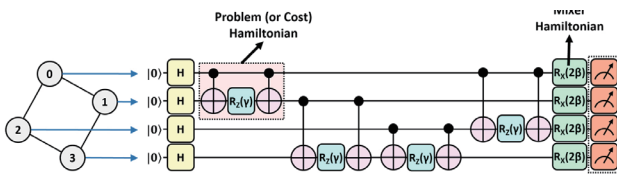
II. 양자 근사 최적화 알고리즘

QAOA를 실현하는 회로는 <그림 1>에서 설명된 바와 같이 주어진 조합 최적화 문제의 비용 함수(Cost Function)를 양자 시스템의 에너지로 매핑하는 비용 해밀토니안(Cost Hamiltonian) H_C 과 비용 해밀토니안에 의해 변경된 위상 정보를 진폭 정보로 전이하는 믹서 해밀토니안(Mixer Hamiltonian) H_M 을 번갈아 적용하는 방식을 따른다. 이를 수식으로 나타내면, QAOA의 최종 양자 상태는 다음 수식과 같이 표현될 수 있다:

$$|\psi(\gamma, \beta)\rangle = \left(\prod_{k=1}^p e^{-i\beta_k H_M} e^{-i\gamma_k H_C} \right) |+\rangle \otimes |+\rangle$$



〈그림 1〉 QAOA 애플리케이션 프로세스의 개요



〈그림 2〉 타겟 그래프 및 상응하는 QAOA 회로의 예

여기서, $|+\rangle$ 는 준비 상태로써, 최초에 $|0\rangle$ 으로 초기화된 큐비트 상태에 하다마드(Hadamard) 게이트를 적용한 뒤 얻어지는 위상 차이 없이 균등한 중첩 상태를 의미하며, p 는 비용 및 믹서 해밀토니안 각 1쌍으로 구성된 층(layer)수를 나타내는 파라미터이다. 각 층은 해밀토니안에 따라 파라미터 γ , 2β 로 제어되는 회로로 구성되며, 이 파라미터들은 고전적인 최적화기(Classical Optimizer)를 통해 반복적으로 조정된다.

QAOA 회로에서, 각 큐비트는 최적화하고자 하는 타겟 그래프(target graph)의 정점, 즉 노드(node)에 해당하게 된다. 비용 해밀토니안은 일반적으로 ZZ 상호작용 회전 게이트로 구현되며, 〈그림 2〉에서 보여지는 바와 같이 목표 그래프의 간선, 즉 에지(edge) 정보를 반영한다. 즉, 한 층의 문제 해밀토니안은 그래프의 간선의 수만큼의 ZZ 상호작용 게이트로 구성되는 것이다. 마찬가지로, 한 층의 믹서 해밀토니안은 각 큐비트에 X축 회전 게이트를 1회씩 적용하여 구현될 수 있다.

III. QAOA 연구 동향

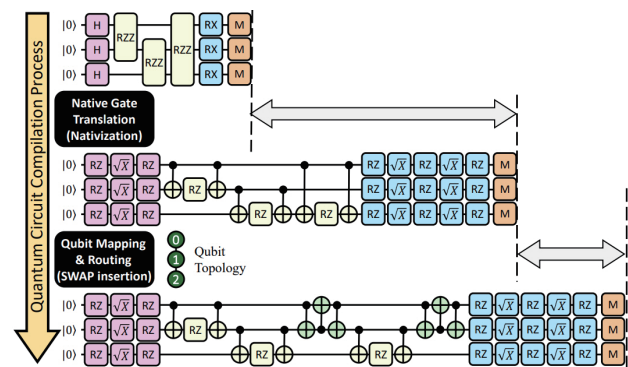
1. 네이티브 게이트-인식형 컴파일 기술 [8]

최근 QAOA의 실행 성능은 이미 충분히 성숙한 고전 컴퓨팅의 연산 부분보다는 양자 컴퓨터의 노이즈와 제한된 연산 부분으로부터 기인하는 성능 저하로 인해 많은

제약을 받고 있다. 특히 상위 소프트웨어 수준에서 작성된 QAOA 회로가 양자 장치가 실제로 구현 가능한 펄스의 조합을 의미하는 네이티브 게이트(native gate)로 번역될 때, 게이트의 수와 회로의 깊이가 증가하여 〈그림 3〉에서 보여지는 바와 같이 실행 비용이 급격히 상승하는 문제를 초래한다. 이러한 문제가 발생하는 이유는 상위 소프트웨어 수준에서 작성된 양자 게이트를 실제 물리적 장치가 그대로 실행하기 사실상 현실적으로 어렵기 때문이다. 물론, 실제 양자 장치의 큐비트는 적절한 펄스 조합을 활용한다면 임의의 양자 게이트를 실행할 수 있다. 그러나 IBM Quantum System과 같은 실제 양자 장치에서 큐비트는 극도로 민감하여 외부 온도 또는 압력 변화, 전자기 간섭 등에 의하여 양자 상태가 드리프트 되고, 하루 1~2회의 실시간 교정을 통해 큐비트의 상태를 보정 및 교정한다.

이러한 상황에서 양자 시스템 사용자가 작성한 상위 수준 프로그램을 개별 커스터마이징(customizing)된 펄스로 변환하는 것은 연산 오버헤드가 너무 높기 때문에, 몇 가지 간단한 네이티브 게이트를 정의하고, 입력된 상위 수준 프로그램을 이러한 네이티브 게이트의 조합으로 구현하는 방법을 채택하는 것이다. 이러한 배경 속에서 해당 연구는 QAOA 회로의 네이티브 게이트 번역 과정에서 발생하는 오버헤드를 줄이기 위해 각 하드웨어가 효율적으로 실행 가능한 큐비트의 회전 방향의 특성을 고려한 컴파일 기술을 제안하였다.

해당 논문에서는 먼저 QAOA 회로가 일반적으로 각각 비용 해밀토니안은 2-큐비트 ZZ 회전 연산으로, 믹서 해밀



〈그림 3〉 QAOA 회로 컴파일 프로세스 (IBM 팔콘)

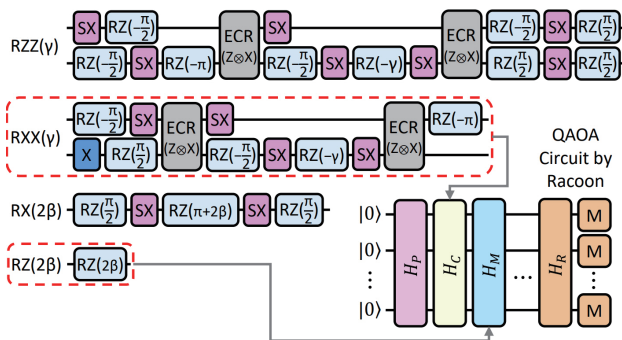
토니안은 단일-큐비트 X 회전 연산으로 구현됨에 주목하였다. 해당 논문은 기존의 표준 QAOA 회로가 사용하는 특정 축 방향에 대한 회전 조합이 실제 각기 다른 양자 프로세서에서 항상 최적의 조합은 아닐 수 있다는 중요한 관찰을 제시한다. 즉, 회전 게이트의 회전 방향에 따라 분해(decomposition)되는 네이티브 게이트의 수가 달라지며, 특정 프로세서에 따라 최적의 회전 방향이 다를 수 있다는 점을 밝혔다.

예를 들어, <그림 4>에서 보여지는 바와 같이, ECR (Echoed Cross-Resonance) 게이트를 기본 네이티브 게이트로써 지원하는 IBM 이글 프로세서의 경우, RZZ (Rotation ZZ) 양자 게이트는 RXX (Rotation XX) 양자 게이트보다 더 많은 네이티브 게이트 수를 요구하는 것을 볼 수 있다. 이러한 차이를 보이는 이유는 게이트를 합성하는 방법의 차이에 기인하는데, 우선 RZZ 게이트는 ECR 게이트를 바탕으로 구성된 두 CX (Controlled-NOT) 게이트와 그 두 CX 게이트 사이에 단일-큐비트 RZ (Rotation Z)를 적용하여 만들 수 있다. 반면에, RXX 게

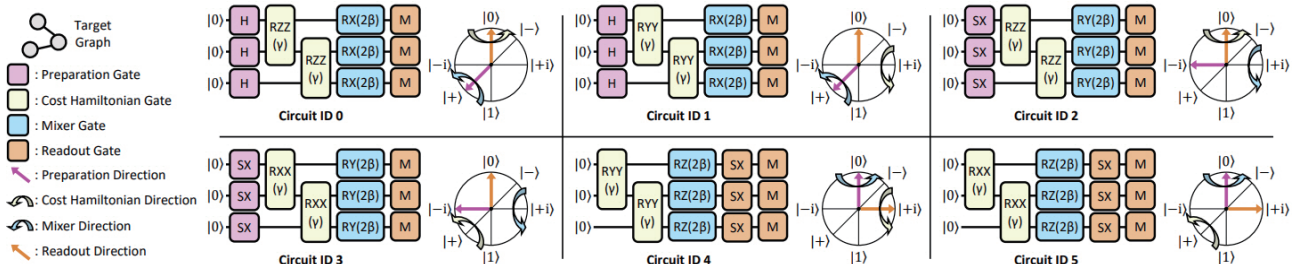
이트의 경우 앞서 설명한 RZZ 게이트를 대변하는 네이티브 게이트 그룹의 양변에 하다마드 게이트를 각 큐비트에 적용하여 구현할 수 있다. 이때, 하다마드 게이트를 대변하는 네이티브 게이트들과 RZZ를 대변하는 네이티브 게이트 사이에서 게이트 취소가 발생하여, 결론적으로 RXX 게이트를 실행하는데 요구되는 네이티브 게이트 수가 RZZ 게이트 대비 상대적으로 적어지게 되는 것이다.

마찬가지 원리로, 믹서 해밀토니안의 경우 일반적으로 단일-큐비트 RX (Rotation X) 게이트를 각 큐비트에 적용하는 것으로 구현되는데, IBM 이글 프로세서에서는 RX 게이트를 자체적인 네이티브 게이트로써 지원하지 않기 때문에, RZ 게이트와 SX (Square Root of X)의 조합으로 실행해야 한다. 그러나 만약 믹서 해밀토니안의 구현을 RZ 연산을 바탕으로 구현할 수 있다면, 믹서 게이트를 해당 양자 하드웨어가 지원하는 단일 네이티브 게이트로 직접 구현할 수 있으므로, QAOA 회로 실행 비용을 줄일 수 있게 되는 것이다.

그렇다면 표준 QAOA 회로 모델과 동등한 훈련 가능성을 가지면서 다른 회전 조합을 구성하려면 어떻게 해야 하는가? 해당 논문에서는 기존 표준 QAOA 회로 모델과 동등한 회로의 표현력(expressibility)을 가지면서 다른 회전 조합을 갖기 위해 아래와 같이 3가지 조건을 만족해야 한다고 명시하고 있다. (i) 초기 상태 준비된 기저와 비용 해밀토니안의 회전축은 서로 수직이어야 한다. 예를 들어, 초기 상태 준비를 $|0\rangle$ 으로 하였다면 비용 해밀토니안은 RXX 또는 RYY 게이트를 채택할 수 있다. (ii) 초기 상태 준비된 기저와 믹서 해밀토니안의 회전축은 서로 평행해야 한다. 예를 들어, 초기 상태 준비를 $|+\rangle$ 로 하였



<그림 4> IBM 이글 프로세서에서 회전 게이트 번역



<그림 5> QAOA 회로 후보의 예, 각 회로의 오른쪽 블로흐 구면은 각 양자 상태가 경험한 회전 방향을 의미하며, 직관적인 이해를 위해 2-큐비트 상호작용 게이트의 회전은 1Q 회전처럼 표시됨.

Vendor	IBM			Quantinuum	IonQ
Processor	Eagle	Falcon	Heron	Model H1	Harmony
Technology	Superconductor			Trapped Ion	
2Q gate	ECR	CX	CZ	RZZ	MS
1Q gates	SX, X, RZ			U1q, RZ	GPI, GPI2, RZ

〈그림 6〉 다양한 네이티브 게이트를 가진 프로세서

다면 믹서 해밀토니안은 RX로 구성되어야 한다. 또한 앞선 조건에 의해 비용 해밀토니안과 믹서 해밀토니안의 회전축이 서로 수직을 유지함을 알 수 있다. (iii) 초기 상태 준비된 기저와 측정(measurement) 프로세스를 위한 기저는 서로 수직이어야 한다. 표준 QAOA 회로의 경우 초기 상태를 $|+\rangle$ 기저로 준비하고 있으며, 일반적으로 양자 컴퓨터는 측정을 0 또는 1의 결과로 판독하는 Z축 기저를 바탕으로 하고 있다. 그러므로 이러한 환경에서 판독을 위한 별도의 기저 변환은 필요가 없다. 초기 상태를 $|0\rangle$ 에서 준비시키는 경우, 별다른 게이트를 판독 직전에 인가하지 않으면 조건을 만족시키지 않으므로 하다마드 게이트나 SX 게이트 등을 통해 측정 기저를 초기 기저와 수직이 되도록 맞춰줘야 한다.

해당 논문에서는 〈그림 5〉에서 설명된 바와 같이 위에서 언급한 표준 QAOA 회로 모델과 동등한 표현력을 가지면서 서로 다른 회전 축으로 구성된 대표적인 회로 후보군 6가지를 제시한다. 각 실제 양자 프로세서마다 이 6가지 회로 후보군의 실행 비용을 비교하고 가장 적은 네이티브 게이트를 제공하는 후보를 선택하는 방식이다. 네이티브 게이트 수가 적어지면 게이트 오류가 줄어들 뿐만 아니라, 회로 깊이가 얕아져 일관성 오류(Coherence Error)에도 상대적으로 더 강성(robust)해지며, 결과적으로, QAOA 회로 훈련을 더 빠르고 정확하게 수행할 수 있게 되는 것이다.

해당 연구에서는 〈그림 6〉에서 설명된 바와 같이 IBM, Quantinuum (구 Honeywell), IonQ 사에서 개발된 6가지 서로 다른 양자 프로세서를 평가에 활용하였다. 양자 프로세서마다 네이티브 게이트의 종류가 서로 다르기 때문에, 효율적으로 실행 가능한 QAOA 회로의 회전 조합이 서로 달라지게 된다. 예를 들어, IBM 이글 프로세서의 경우, 〈그림 4〉에서 언급한 바와 같이 ZZ 및 X 회전의 조합을 바탕으로 하는 표준 QAOA 회로보다 XX 및 Z 회전의 조합을 바탕으로 하는 다른 후보, 즉, 〈그림 5〉에서

회로 ID 5번에 해당하는 경우가 더 적은 네이티브 게이트 수만으로 실행될 수 있다. 또 다른 예로써, IonQ의 pMS (부분-얽힘 Mølmer-Sørensen) 게이트를 네이티브로 지원하는 양자 프로세서의 경우, pMS 게이트 자체를 임의의 각도 YY 게이트로 취급하여 비용 해밀토니안 연산자를 단일 네이티브 게이트로 직접 구현할 수 있다. 즉, 〈그림 5〉의 회로 ID 4번처럼 구현한다면 표준 QAOA 회로 대비 총 게이트 수를 79% 줄일 수 있다.

이러한 맥락에서, 해당 연구에서는 알고리즘과 하드웨어를 동시에 고려한 공동 설계 접근법인 Racoon (Rotational Space Virtualization for QAOA Ansatz)을 제안하였다. 위에서 설명한 바와 같이, Racoon은 QAOA 회로의 합성 조건을 재검토하고 동일한 표현력을 가진 서로 다른 양자 상태 축 방향의 회전을 활용할 수 있는 새로운 회로 후보들을 제시한다.

종합적인 실험적 평가 결과, 본 연구에서는 IBM, Quantinuum, IonQ 등 프로세서 6종에 대한 분석을 통해 Racoon을 적용한 Sherrington-Kirkpatrick (SK) 모델을 타겟 그래프로 하는 6-큐비트 QAOA 회로가 표준 회전 조합 대비 네이티브 게이트 수를 평균적으로 23%, 최대 79% 줄일 수 있음을 보여준다.

또한 Racoon의 네이티브 게이트 수 절감 효과는 훈련 에포크(epoch) 횟수를 평균 43% 감소시키고 실제 장치 에너지 소비를 41% 낮추며, 추론 성능(최종 비용 함수)을 평균적으로 6% 향상시킨다. 특히 회로의 깊이는 큐비트와 레이어 수가 증가할수록 더 큰 폭으로 감소하여 최근 제안된 Depth First Search (DFS) 기반 방법 대비 123배 더 높은 회로 깊이 감소를 보여준다. 나아가 Racoon은 변형된 안자츠(Ansatz)를 사용하는 최첨단 QAOA 회로 및 Variational Quantum Eigensolver (VQE) 같은 다른 변분 알고리즘에도 확장 적용 가능성을 확인하였다.

2. 대칭성 활용 QAOA 회로 오류 완화^[9]

QAOA는 상대적으로 얇은 회로 깊이를 갖고 있고 양자-고전 하이브리드 학습 구조를 통해 NISQ 시대에서 활용 가능성이 높은 양자 알고리즘으로 주목받고 있다. 그럼에도 불구하고, 여전히 실제 하드웨어 실행에서

는 큐비트의 열 이완(thermal relaxation)으로 인한 비대칭 측정 오류(asymmetric measurement error)로 인해 QAOA 회로로부터 정확한 솔루션을 추론하는 것에 어려움을 겪고 있다. 특히 충분히 학습된 QAOA는 결과 확률 분포에서 일부 해의 확률이 높게 집중되는 특성이 있어, 작은 측정 편향도 해석에 큰 영향을 미칠 수 있어 실행 신뢰성이 중요한 상황이다.

그렇다면, 실제 장치에서 큐비트의 열 이완이란 무엇이고 왜 생기는가? 열 이완은 양자 시스템이 주위 환경과 상호작용하면서 에너지가 낮은 바닥 상태로 자발적으로 시간에 따라 지수적인 스케일로 붕괴하는 현상으로, 초전도 큐비트나 이온 큐비트와 같이 특정 에너지 준위를 기반으로 정보를 정의하는 장치에서 흔히 관찰할 수 있다. 이러한 양자 장치의 큐비트에서는 $|1\rangle$ 상태가 시간이 지남에 따라 에너지 손실을 통해 $|0\rangle$ 상태로 자연스럽게 전이하는 감쇠 현상이 발생한다. 이로 인해, 양자 회로의 실행 도중 또는 측정 직전에 상태가 바뀌는 오류가 발생하게 되며, 이는 회로 실행 막바지에서의 고전적인 이진 측정 결과에 비대칭적인 확률 편향을 유발할 수 있다. 해당 연구는 이러한 오류가 단순히 무작위적으로 일어나는 것이 아닌 특정 방향성을 가지고 있다는 점과,

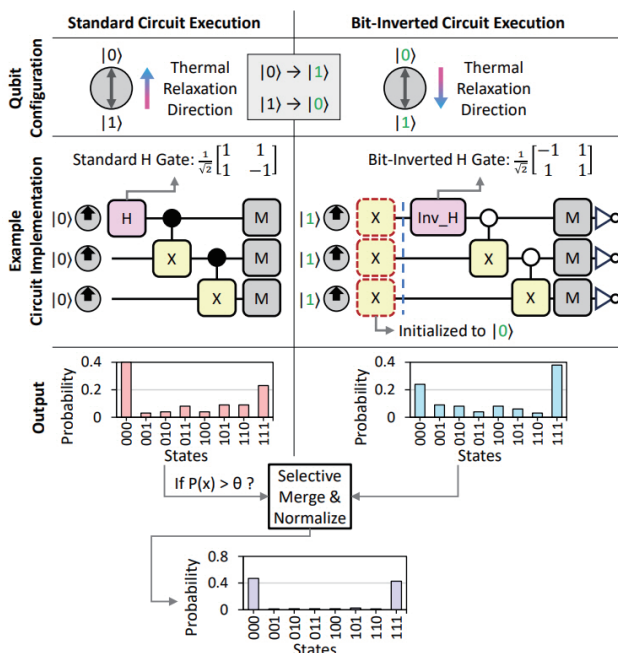
QAOA처럼 매개변수 학습에 의해 정답 해에 대한 출력 확률이 정교하게 조정되는 알고리즘에서는 이와 같은 측정 왜곡이 해석과 성능에 치명적 영향을 미칠 수 있다는 점에 주목한다.

이러한 맥락에서, Barber (Balancing readout Results using Bit-inverted circuits)는 바로 이 양자 회로 실행에 대한 신뢰도 문제에 착안하여 제안된 대칭성 활용 기반 오류 완화 기법이다. Barber는 양자 회로(대표적으로 QAOA 회로)에서 발생하는 비대칭 측정 오류를 상쇄하기 위해, <그림 7>에서 설명된 바와 같이 표준 회로(standard circuit) 및 그것과 동일한 양자 회로의 논리적 비트 기저(bit basis)를 반전시킨 비트 반전 회로(bit-inverted circuit)를 함께 실행한다. 이 반전 회로는 각 게이트 양 측에 Pauli-X 게이트를 삽입하여 $|0\rangle$ 과 $|1\rangle$ 의 의미를 뒤집고, 동일한 연산을 반대 논리 방향에서 실행함으로써 역방향으로의 열 완화를 경험하도록 하는 회로 실행을 수행한다. 이후, 두 회로 실행 결과를 고전적으로 병합함으로써, Barber는 열 이완으로 인한 확률 분포 왜곡을 효과적으로 보정할 수 있도록 설계되었다.

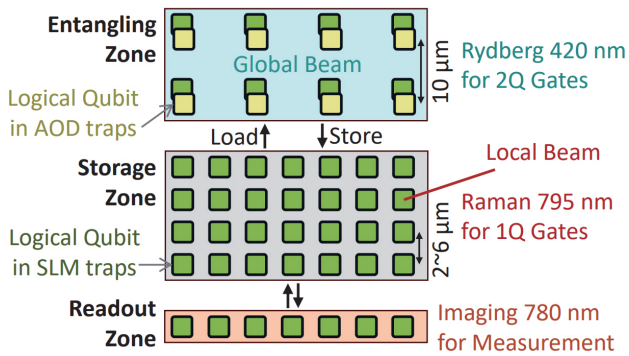
성능 평가에서는 Max-Cut 문제를 위한 QAOA 회로를 포함하는 다양한 양자 프로그램 벤치마크에 대해 Barber의 효과를 분석하였다. 그 결과, 표준 회로만 사용하는 경우와 비교해 정답 해들 간의 확률 편차가 평균적으로 86% 감소하였으며, 성공적으로 정답 해를 얻을 확률(PST)은 72% 향상되었다. 또한, 노이즈 없는 이상적인 분포와의 유사도를 나타내는 Hellinger 거리도 평균 60% 낮아졌다. 회로 깊이 증가에 대한 부담은 게이트 가지치기(gate pruning) 기술로 최소화하였다. Barber는 QAOA와 같이 출력 확률의 정밀성이 중요한 애플리케이션에서 실행 신뢰성을 향상시킬 수 있는 실용적인 프레임워크로, 열 이완이 발생할 수 있는 모든 종류의 양자 컴퓨터에 적용될 수 있다.

3. 중성원자 기반 배열을 위한 QAOA^[10]

중성 원자 기반 양자 컴퓨터는 큐비트를 구성하는 원자들을 자유롭게 이동시킬 수 있으며, 양자 상태를 비교적 장시간 유지할 수 있기 때문에 최근 내결함성 양자 컴퓨



<그림 7> 3-큐비트 예시 회로에 대한 Barber 적용 개요



〈그림 8〉 중성 원자 기반 구역화된 아키텍처 개요

팅 시대에 적합한 하드웨어 플랫폼으로 급부상하고 있다. 특히 중성원자는 재배열 가능한 광학 트랩을 활용하여 수백 또는 수천 개의 큐비트를 동적으로 구성할 수 있어, 대규모 조합 최적화 문제를 다루는 QAOA와 같은 프로그램을 실행하는데 적합한 구조를 제공할 것으로 기대되고 있다. 해당 논문에서는 최근 중성 원자 기반 양자 하드웨어 플랫폼 중에서 가장 뛰어난 연산 신뢰도를 보여주는 구역화된 아키텍처(zoned architecture)를 연구 대상으로 한다^[11].

중성 원자 기반 큐비트로 구성된 구역화된 아키텍처는 〈그림 8〉에 보여지는 바와 같이 얽힘(2-큐비트 게이트 실행용), 저장(1-큐비트 게이트 실행 및 큐비트의 장기 보관용), 판독(측정용)의 세 가지 구역(zone)으로 구성된다. 저장 구역 내의 일부 큐비트는 공간 광 변조기(Spatial Light Modulator, SLM)에 의해 생성된 정적 광 핀셋 배열에 저장된다. 다른 일부 큐비트는 2차원 음향 광학 편향기(Acousto-Optic Deflector, AOD)에 의해 생성된 이동식 핀셋 배열에 존재할 수 있다. Load (불러오기) 명령은 AOD에 의해 갇힌 논리적 큐비트가 저장에서 얽힘 구역으로 이동하는 것을 의미하며, Store (저장하기) 명령이란 얽힘 구역에서 저장 구역으로 이동하는 것을 의미한다.

얽힘 구역은 전역 리드버그 레이저(420nm 파장 사용)를 통해 2-큐비트 게이트를 수행할 수 있는 영역으로, QAOA 회로의 예를 들면 비용 해밀토니안 실행을 위한 얽힘 연산이 이루어지는 공간이다. 저장 구역은 SLM 기반 트랩을 이용하여 높은 밀도로 큐비트를 유지하며, 라

만 레이저(795nm 파장 사용)를 통한 1-큐비트 연산이 가능하다. 마지막 Readout Zone은 780nm 파장의 이미징 레이저를 통해 큐비트 상태를 측정하는 전용 구역이다. Load/Store 명령을 통해 한 구역에서 다른 구역으로 큐비트를 이동시킬 수 있다.

이와 같은 구역화된 아키텍처는 얽힘 연산과 간단한 단일-큐비트 회전 연산을 수행하는 공간을 분리하고, 적용될 레이저의 주파수를 서로 분리함으로써, 기존에 상식으로 여겨졌던 단일 구조(monolithic) 아키텍처보다 훨씬 더 높은 연산 신뢰성을 달성할 수 있게 된 것이다. 다시 말해, 구역화된 아키텍처는 단일 구조에서 모든 연산을 수행할 때 발생할 수 있는 광 간섭, 열 노이즈, 원자 손실 문제를 효과적으로 억제할 수 있다.

이렇듯 단일 구조 아키텍처 대비 구역화된 아키텍처의 뛰어난 신뢰성 개선을 보여줄 수 있는 잠재력을 가지고 있음에도 불구하고, 해당 연구에서는 구역화된 아키텍처가 단일-큐비트 게이트와 2-큐비트 얽힘 게이트의 실행 공간을 분리함에 따른 실행 효율 저하 문제에 대해 주목하였다. 해당 논문에서는 QAOA 회로와 같은 대표적인 NISQ 애플리케이션에서 단일-큐비트 게이트와 2-큐비트 게이트 게이트가 서로 자주 번갈아 배치되는 인터리빙(interleaving) 특성을 가지고 있다는 사실에 주목한다. 또 다른 중요한 문제는 중성 원자 아키텍처에서는 기존 초전도 기반 아키텍처와 달리 연산을 위해 원자가 직접 움직여야 하지만, 반데르발스 힘에 의한 광 레이저 인력으로 원자를 이동시키기 때문에 움직일 수 있는 속도가 제한되고, 앞서 설명한 인터리빙된 게이트들을 구역화된 아키텍처에서 실행하기 위해 구역 간 이동 오버헤드가 전체 실행 시간에 대부분을 차지할 수 있는 잠재적 우려가 있다는 것이다.

실제로 해당 논문에서는 다양한 양자 벤치마크에 대해 시뮬레이션한 결과, 구역 간 이동 오버헤드가 평균 78% 및 최대 89%에 이를 수 있다고 보고하고 있다. 결론적으로, 구역화된 아키텍처의 성능을 잘 활용하기 위해서는 구역 간 이동 오버헤드를 최소화하도록 양자 프로그램을 재작성하는 방법 개발이 요구되는 것이다.

본 원고에서는 이러한 아키텍처 하에서 QAOA 실행을

위한 핵심 구성 요소인 RZZ 상호작용 연산을 어떻게 구현하는지를 자세히 다룬다. 왜냐하면 비용 해밀토니안을 제외하면 QAOA 회로는 단일 큐비트 게이트로 구성되어 있어 게이트 연산 중에는 별도의 추가 구역 간을 이동이 요구되지 않기 때문이다. <그림 9>의 (a)는 이러한 비용 해밀토니안을 구성하는 4-큐비트 경로형 타겟 그래프에 대한 RZZ 게이트의 배치 예를 보여주고 있다. 구역화된 아키텍처가 제공하는 2-큐비트 네이티브 게이트는 리더버그 원자가 용이하게 실행할 수 있는 CZ (Controlled-Z) 게이트이다. 그렇기 때문에 구역화된 아키텍처는 CX 게이트를 직접적으로 실행시킬 수 없으며, <그림 9>의 (b)에서 보여지는 바와 같이 번역하여 실행시킬 수 있다. 해당 논문에서는 이러한 기존 게이트 번역이 1-큐비트 게이트와 2-큐비트 게이트가 자주 번갈아 적용되도록 하며, 그로 인해 구역화된 아키텍처에서 구역 간 이동을 자주 유발할 수 있으므로 실행 효율성이 떨어질 수도 있음에 주목한다.

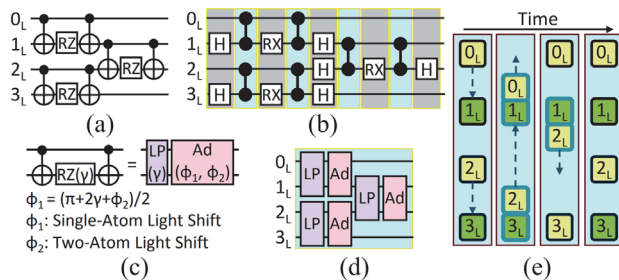
해당 논문에서 제안하는 Mantra는 이를 개선하기 위해 위해 별도의 1-큐비트 게이트 없이, 두 원자 사이에 직접적으로 임의의 ZZ 상호작용을 구현할 수 있는 ZZ 상호작용 연산 프로토콜을 도입하였다. 이 방식의 기본 원리는 <그림 9>의 (c)에서 보여지는 바와 같이 중성 원자 기반 큐비트가 실행 할 수 있는 더 다양한 방식의 리더버그 매개 네이티브 게이트를 활용하는 것이다. 다시 RZZ 게이트 연산이 실현하는 양자 상태 변화가 무엇인지 되짚어보자. 전역 위상을 무시하면 RZZ 연산은 2-큐비트 양자계에서 $|01\rangle$ 상태와 $|10\rangle$ 상태에 특정 위상을 축적시키는 연산이다. 한편 최근 제안된 LP (Levine-Pichler) 게이트는 $|01\rangle$ 및 $|10\rangle$ 상태에 특정 위상을 축적 시키는 동안, $|11\rangle$ 상태에 해당 축적된 위상값의 두 배에 π 를 더해준 만큼 위상을 축적시키는 연산이다. 그렇다면 LP 게이트를 적용한 뒤 제어된 Z축 연산을 추가로 적용하여 $|11\rangle$ 상태에 축적된 위상의 합이 0이 되도록 보정 해준다면, 단일-큐비트 게이트를 인가하지 않고도 2-큐비트 게이트만으로 RZZ 연산을 실현할 수 있게 되는 것이다. 해당 논문에서는 이러한 보상 연산을 각각 단열 (Adiabatic) 게이트와 시간 최적(time-optimal) CPhase (제어된 위상) 게이트 예시를 통해 설명했다.

해당 연구에서는 <그림 9>의 (d)에서 보여지는 바와 같이 RZZ 연산을 기존 CNOT 기반 게이트 분해 없이 LP 게이트와 단열 게이트만을 사용하여 구현하여 별도의 저장 구역(그림에서 회색)으로 이동할 필요 없이 얽힘 구역(그림에서 하늘색) 내부에서만 연산을 처리할 수 있도록 설계하였다. <그림 9>의 (e)에서는 별도의 원자 간의 광학 트랩 환승 프로세스 없이 (a)에서 보여지는 RZZ 연산을 처리하는 예를 보여준다.

V. 전망과 결론

QAOA는 근미래 양자 컴퓨팅 활용 시대에 현실적으로 실행 가능한 대표적인 변분 양자 알고리즘으로써, 향후 다양한 항공 및 물류 산업 및 과학적 문제에 대해 양자 우위를 제공할 핵심 워크로드로 기대받고 있다. 그러나 이러한 실용성은 알고리즘 자체의 설계뿐만 아니라, 이를 뒷받침하는 하드웨어 아키텍처 구조와 시스템 소프트웨어 기술의 효율성에도 또한 의존할 수 있다. 본 원고에서 소개한 세 가지 연구 동향은 QAOA의 실제 실행 신뢰성과 효율성을 높이기 위한 서로 상이한 컴퓨터 시스템 계층의 기술적 접근을 보여준다.

첫째, QAOA 회로를 양자 하드웨어의 네이티브 게이트 집합에 맞추어 효율적으로 변환하는 컴파일러 최적화는 실행 깊이와 게이트 수를 줄여 하드웨어 노이즈에 대한 민감도를 낮춘다. 둘째, 대칭성을 활용한 오류 보정 기법은 측정 단계에서 발생하는 비대칭 확률 왜곡 문제를 완화하여, QAOA가 생성한 결과 분포를 더 신뢰할 수 있게 만든다. 셋째, 구역화된 아키텍처에서 회로를 재작성하여



<그림 9> 구역화된 아키텍처를 위한 RZZ 연산 개요

단일-큐비트 게이트와 2-큐비트 게이트의 인터리빙을 완화하는 전략은 하드웨어 구조적 제약을 고려한 효율적인 회로 실행을 가능케 한다.

본 작업에서 자세히 논의하지 않았지만 최근 다양한 양자 하드웨어 플랫폼에서는 회로 연산 중간에 일부 큐비트를 측정하고 다시 초기화시킴으로써 큐비트를 재사용하는 기술이 주목받고 있다. QAOA 회로는 상대적으로 회로 깊이가 얇고 문제 해밀토니안의 얽힘 게이트 구조가 단순할 경우 상당한 양의 큐비트를 재사용할 수 있을 것으로 기대되며, 하드웨어 플랫폼이 제공하는 큐비트 리소스보다 더 큰 규모의 QAOA 애플리케이션들을 실행할 수 있는 잠재력이 있다^[12].

앞으로는 이런 하드웨어나 시스템 수준의 기술뿐 아니라, 양자 알고리즘 실행을 도와주는 소프트웨어 전반에서도 더 많은 연구가 필요할 것으로 보인다. 예를 들어 QAOA는 매개변수(변수 조절 값)를 조금씩 바꿔가며 회로를 반복 실행해 답을 찾는 방식인데, 이 과정에서 양자 회로를 여러 번 실행하고, 측정 결과를 받아서 고전 컴퓨터에서 분석하고, 다음 실행을 준비하는 흐름이 계속 반복된다. 그렇기 때문에, QAOA 회로 실행 결과로 얻어진 출력 분포에 대한 통계적 특징을 분석함으로써 측정 샷수를 절약하는 종류의 최적화 연구들이 앞으로 더 중요해질 것으로 기대된다^[13].

참 고 문 헌

- [1] Nielsen, Michael A., and Isaac L. Chuang. Quantum computation and quantum information. Cambridge university press, 2010.
- [2] Feynman, Richard P. "Simulating physics with computers," Feynman and computation. cRc Press, 2018. 133–153.
- [3] John Preskill. 2018. Quantum Computing in the NISQ era and beyond. Quantum 2 (2018), 79.
- [4] Peter W. Shor. 1999. Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer. SIAM review 41, 2 (1999), 303–332.
- [5] Peruzzo, Alberto, et al. "A variational eigenvalue solver on a photonic quantum processor." Nature communications 5,1 (2014): 4213.
- [6] Farhi, Edward, Jeffrey Goldstone, and Sam Gutmann. "A quantum approximate optimization algorithm." arXiv preprint arXiv:1411.4028 (2014).
- [7] Choi, Jaeho, and Joongheon Kim. "A tutorial on quantum approximate optimization algorithm (QAOA): Fundamentals and applications." 2019 international conference on information and communication technology convergence (ICTC). IEEE, 2019.
- [8] Jang, Enhyeok, et al. "Recompiling QAOA Circuits on Various Rotational Directions." Proceedings of the 2024 International Conference on Parallel Architectures and Compilation Techniques, 2024.
- [9] Jang, Enhyeok, et al. "Barber: Balancing Thermal Relaxation Deviations of NISQ Programs by Exploiting Bit-Inverted Circuits." Proceedings of the 43rd IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design, 2024.
- [10] Jang, Enhyeok, et al. "Qubit Movement-Optimized Program Generation on Zoned Neutral Atom Processors." Proceedings of the 23rd ACM/IEEE International Symposium on Code Generation and Optimization, 2025.
- [11] Bluvstein, Dolev, et al. "Logical quantum processor based on reconfigurable atom arrays." Nature 626,7997 (2024): 58–65.
- [12] Kim, Hyungseok, et al. "QR-Map: A Map-Based Approach to Quantum Circuit Abstraction for Qubit Reuse Optimization." Proceedings of the 52nd Annual International Symposium on Computer Architecture, 2025.
- [13] Kim, Youngmin, et al. "Distribution-Adaptive Dynamic Shot Optimization for Variational Quantum Algorithms." arXiv preprint arXiv:2412.17485 (2024).



장은혁

- 2021년 8월 경북대학교 전자공학과 학사
- 2022년 3월 ~ 현재 연세대학교 전기전자공학과 석박사통합과정

〈관심 분야〉
양자 컴퓨팅, 컴퓨터 구조



최승우

- 2022년 2월 연세대학교 전기전자공학부 학사
- 2022년 3월 ~ 현재 연세대학교 전기전자공학과 석박사통합과정

〈관심 분야〉
양자 컴퓨팅, 양자 회로 시뮬레이터



노원우

- 1996년 연세대학교 전기공학과 학사
- 1999년 Univ. of Southern California 전기공학과 석사
- 2004년 Univ. of Southern California 전기공학과 박사
- 2007년 ~ 현재 연세대학교 전기전자공학부 교수

〈관심 분야〉
고성능 프로세서 구조, GPU 구조, 병렬 프로그래밍, 양자 컴퓨팅

양자강화학습기반 자율이동체 제어 연구

I. 서론

드론, 자율주행자동차, 그리고 자율로봇 등으로 대표되는 자율이동체(Autonomous Mobile Systems)는 물류, 국방, 탐사, 교통 등 다양한 사회 분야에서 핵심적인 역할을 수행하고 있으며, 최근 인공지능(AI) 기술의 비약적인 발전과 함께 고도화되고 지능적인 의사결정 및 제어 능력을 보유하고 있다^[1-5]. 이러한 활용가능한 다양한 인공지능 기술들 중에서 강화학습(Reinforcement Learning (RL))은 자율이동체가 환경과의 상호작용을 통해 최적의 정책을 학습하도록 하는 기법으로, 복잡한 동적 환경에서의 경로 계획, 장애물 회피, 에너지 효율적 이동 전략 수립 등에 널리 활용되고 있다^[6]. 그러나 기존의 고전적 강화학습 기법들은 고차원 상태공간과 대규모 행동공간에서 학습 속도와 자원 소모 측면에서 한계를 보인다. 이러한 문제는 특히 실시간 의사결정이 요구되고, 센서 데이터가 대규모로 다양하게 유입되고 제어해야 할 기기의 수가 응용 분야에 맞게 증가하는 자율이동체 제어 분야에서 더욱 두드러진다.

이러한 기존의 고전적인 강화학습의 한계를 극복하기 위해 최근 주목받는 기술이 양자강화학습(Quantum Reinforcement Learning (QRL))이다. 양자강화학습은 양자컴퓨팅의 중첩성(Superposition)과 얽힘(Entanglement) 특성을 활용하여 강화학습의 상태 및 행동 탐색 효율성을 획기적으로 개선하는 접근법이다. 양자 회로 기반의 정책 탐색, 양상블 양자상태를 통한 가치함수 근사, 그리고 양자 게이트 연산에 기반한 확률적 행동 선택 등은 기존 강화학습에서 병목으로 작용하던 학습 시간과 탐색 효율 문제를 완화할 수 있는 잠재력을 지닌다. 특히, 양자상태의 고차원 표현력은 복잡한 센서 융합 데이터(예: 멀티모달 데이터)나 비선형 동역학이 지배하는 이동체 환경에서도 효과적인



김 중 현
고려대학교



정책 학습을 가능하게 한다.

현재 양자컴퓨터 하드웨어는 노이즈가 존재하는 Noisy Intermediate-Scale Quantum (NISQ) 단계에 머물러 있지만, 이미 다양한 양자강화학습 알고리즘이 시뮬레이션 환경 및 하이브리드 양자-고전 프레임워크에서 실험적으로 검증되고 있다. 예를 들어, 양자 Q-러닝(Quantum Q-learning), 양자 정책경사법(Quantum Policy Gradient), 양자 몬테카를로 트리 탐색(Quantum Monte Carlo Tree Search (Quantum MCTS)) 등이 제안되었으며, 일부 연구에서는 기존 강화학습 알고리즘 대비 학습 속도 및 수렴 특성에서 우위를 확인하였다. 이러한 성과는 향후 양자하드웨어 성능이 개선됨에 따라 자율이동체 제어 분야에서 양자강화학습 알고리즘들이 실질적인 이점을 제공할 수 있음을 시사한다.

자율이동체 제어 분야에서 양자강화학습 알고리즘을 적용하는 핵심 연구 방향은 크게 세 가지로 나눌 수 있다.

첫째, 경로 계획(Path Planning)과 충돌 회피(Collision Avoidance) 문제에서의 고차원 탐색 최적화이다. 양자강화학습은 경로 후보군을 양자중첩 상태로 표현하여 병렬적으로 평가함으로써 탐색 효율성을 크게 향상시킬 수 있다.

둘째, 다중자율이동체 협력 제어(Multi-Agent Coordination) 분야에서의 분산 학습 최적화이다. 얽힘을 이용한 양자정보 공유는 다중 에이전트 간의 정책 동기화를 가속화할 수 있다.

셋째, 동적 환경 적응성 강화이다. 실시간 환경 변화에 대응하는 적응형 제어 정책을 양자강화학습으로 학습하면, 전통적 강화학습을 기반으로 한 알고리즘 대비 더 빠른 정책 업데이트가 가능하다.

본 원고에서는 이러한 배경을 바탕으로, 양자강화학습 기반 자율이동체 제어의 개념, 이론적 기반, 알고리즘 설계 원리, 시뮬레이션 및 실험 사례, 그리고 향후 연구 방향을 종합적으로 다룬다. 특히, NISQ 시대에서 구현 가능한 하이브리드 양자-고전 제어 구조를 중심으로, 자율이동체의 의사결정 성능과 자원 효율성을 동시에 향상시키는 방법론을 제시한다. 이를 통해 양자컴퓨팅과 지능형 자율이동체 기술 간의 융합이 가져올 새로운 패러다임과

응용 가능성을 논의하고자 한다.

II. 양자컴퓨팅 및 양자강화학습 개요

1. 양자알고리즘 개요

큐бит은 양자정보의 기본 단위로, 고전적 비트가 0 또는 1의 이진 값으로 제한되는 것과 달리 두 기저 상태가 동시에 존재하는 중첩 상태를 가질 수 있다. 단일 큐бит은 계산 기저(Computational Basis) 상태인 $|0\rangle$ 와 $|1\rangle$ 의 선형 결합으로 기술되며, 이때 복소수 확률 진폭 α 와 β 는 정규화 조건을 만족해야 한다. 이는 진폭 크기의 제곱합이 1이 되도록 하여 큐бит을 측정할 경우 $|0\rangle$ 혹은 $|1\rangle$ 로 관측될 전체 확률이 항상 1이 되도록 보장한다. 이러한 수학적 구조는 양자 시스템의 중첩 원리를 반영하며, 고전적 시스템과 구별되는 특성을 제공한다. 더불어, 중첩은 양자 시스템이 복수의 계산 경로를 동시에 탐색할 수 있게 함으로써 특정 양자 알고리즘에서 지수적 확장성(Exponential Scalability)을 구현할 수 있게 한다. 예를 들어, n 개의 큐비트로 구성된 시스템은 중첩을 통해 2^n 개의 기저 상태를 동시에 표현할 수 있다. 또 다른 핵심 현상은 얽힘으로써 이는 두 개 이상의 큐비트 사이에서 발생하는 비분리적 상관관계로, 얽힘된 큐비트는 독립적으로 기술될 수 없으며 전체 상태를 통해서만 정의된다. 대표적인 예시는 벨 상태(Bell State)로, 두 큐비트가 $|0\rangle$ 상태와 $|1\rangle$ 상태의 중첩으로 결합된 형태이다. 이 경우 한 큐비트를 측정하면 공간적 거리에 무관하게 다른 큐비트의 상태가 즉시 결정된다. 이러한 비고전적 상관관계는 양자 텔레포테이션(Quantum Teleportation) 등과 같은 고도 정보 처리 기법을 가능하게 하며, 다수의 양자기계학습(Quantum Machine Learning (QML)) 모델의 이론적 기반을 제공한다.

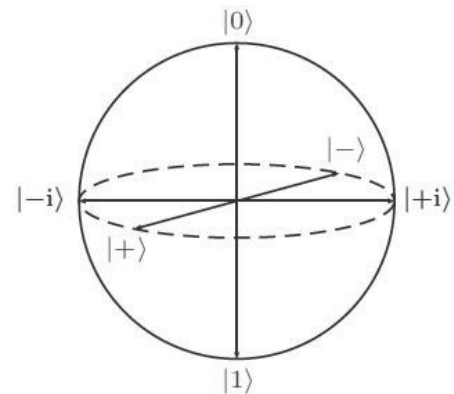
본 고에서는 가장 먼저 2장에서 양자신경망을 소개하고 이를 기반으로 하여 양자강화학습 기술의 개요에 대해서 설명한다. 그 후에 3장에서는 해당 양자강화학습 알고리즘의 자율이동체 제어로의 확장에 대해서 논한다. 4장에서는 향후 연구방향성에 대해서 다양한 관점에서 논하고, 마지막으로 5장에서는 본 고를 마무리한다.

2. 양자신경망 개요

양자신경망(Quantum Neural Network (QNN))은 양자컴퓨팅의 원리를 고전적 신경망(Neural Network (NN)) 구조에 접목한 양자 강화 모델이다. 일반적인 양자신경망의 구조는 세 가지 단계, 즉 상태 인코딩(State Encoding), 매개변수화된 양자회로(Parameterized Quantum Circuit (PQC)), 그리고 측정(Measurement)으로 다음의 <그림 1>과 같이 구성된다.

첫 번째 단계인 상태 인코딩에서는 고전적 입력 데이터를 양자 상태로 매핑한다. 이때 다양한 인코딩 기법이 활용된다. 각도 인코딩(Angle Encoding)은 입력 벡터의 각 성분을 회전 각도로 해석하여 단일 큐비트 게이트에 적용하며, 보통 블로흐 구(Bloch Sphere)의 x, y, z축을 중심으로 하는 회전에 구현된다. 진폭 인코딩(Amplitude Encoding)은 입력 벡터를 정규화한 뒤, 이를 양자 중첩 상태의 진폭으로 사용하여 각 기저 상태가 입력의 특정 성분과 대응되도록 한다. 기저 인코딩(Basis Encoding)은 이와 달리, 이진 입력 값을 수정 없이 직접 양자 기저 상태에 대응시킨다. 인코딩 기법의 선택은 양자신경망이 데이터의 구조와 복잡성을 효과적으로 반영하는 데 있어 핵심적인 역할을 수행한다.

인코딩 이후, 양자 상태는 매개변수화된 양자회로(PQC)를 거쳐 변환된다. PQC는 조정 가능한 매개변수를 갖는 양자 게이트들로 구성되며, 이는 고전적 인공지능망에서 가중치에 해당한다. 일반적으로 단일 큐비트 회전 게이트가 포함되며, 각 회전은 조정 가능한 매개변수에 의해 제어되고 해당 큐비트의 회전 각도를 결정한다. 이러한 회전은 블로흐 구의 특정 축을 중심으로 수행되며, 회로



<그림 2> 블로흐 구

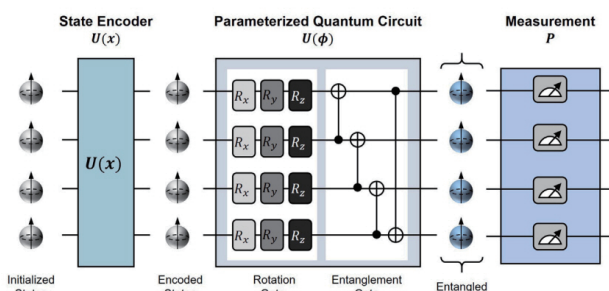
내 학습 가능한 변동성을 도입하는 데 필수적이다. 블로흐 구의 시각적인 표현은 다음의 <그림 2>와 같다.

또한, Control-NOT (CNOT) 게이트와 같은 얽힘 게이트가 활용되어 큐비트 간의 상관관계(얽힘)를 형성한다. 회전 게이트와 얽힘 게이트의 결합을 통해 PQC는 모델의 표현력을 강화한다. 전체 변환은 일반적으로 매개변수 벡터에 의해 제어되며, 이에 따른 양자 상태의 변환은 블로흐 구에서 시각화할 수 있다. 중첩과 얽힘의 결합을 통해 PQC는 고전적으로 모델링하기 어려운 고차 비선형 함수를 표현할 수 있다.

마지막으로, 측정 단계에서는 선택된 관측가능량 (예: 파울리-Z 연산자)의 기댓값을 계산함으로써 양자 상태가 고전적 정보로 투영된다. 이 기댓값은 보통 양자 시스템의 반복적 샘플링을 통해 추정된다. 측정 결과는 모델의 출력으로 사용되며, 회귀(Regression)와 같은 후속 작업에 활용될 수 있다. 이러한 구조는 양자신경망이 양자계산의 이점을 활용하는 동시에 기존 기계학습 패러다임과의 호환성을 유지할 수 있게 한다. 특히 고전적 인공지능망이 비선형성을 활성화 함수에 의존하는 것과 달리, 양자신경망은 양자 게이트와 얽힘을 통해 비선형 변환을 구현한다.

3. 양자강화학습

강화학습은 동적이며 상호작용적인 환경에서 순차적 의사결정(Sequential Decision-Making)을 다룬다는 점에서 구별되는 기계학습의 주요 분야를 형성한다. 강화학



<그림 1> 양자신경망 기본 구조 [7]

습의 핵심은 에이전트가 환경과의 반복적 상호작용을 통해 시행착오(Trial-and-Error)를 경험하면서 보상 신호를 극대화하는 행동을 학습하는 데 있다. 이러한 적응적이고 자율적인 의사결정 능력은, 항공기가 급격히 변화하는 동역학, 환경 교란 및 예기치 못한 상황에 직면하는 항공 제어 응용에서 특히 유용하다. 기존의 제어 설계는 특정 운용 조건에서는 효과적이지만, 급작스러운 편차를 유연하게 수용하는 데에는 한계가 있다. 반면, 강화학습 기반 제어기는 실시간 상호작용을 통해 정책을 온라인으로 적응시켜 성능을 유지한다. 이에 따라, 다수의 연구에서는 강화학습 기반 비행 제어 시스템이 항공기의 복원력과 안정성을 향상시켜 보다 안전하고 효율적인 항공 운항에 기여할 수 있음을 입증하였다^[6].

그럼에도 불구하고, 강화학습 기반 비행 제어기의 훈련은 복잡한 상태-행동 공간에서 여전히 어려움을 수반하며, 또한 상당한 수의 학습 매개변수를 요구한다는 한계가 존재한다. 이러한 한계를 극복하기 위해 양자강화학습 기반 비행 제어기는 고전적 인공신경망 대신 양자신경망을 활용한다. 언급한 바와 같이, 양자신경망은 세 가지 단계, 즉 i) 상태 인코딩(State Encoding), ii) 매개변수화된 양자회로(PQC), iii) 측정(Measurement)으로 구성된다. 양자강화학습 기반 비행 제어기는 PQC에서 생성된 양자 상태의 위상(Phase)과 크기(Magnitude)를 최적화한다. 이렇게 변환된 양자 상태는 측정 단계로 전달되어, 양자 정보가 다시 고전적 표현으로 환원된다. 이러한 양자 측정 메커니즘은 디코딩 과정으로 기능하며, 양자 연산을 고전적 계산과 호환 가능한 형식으로 변환한다. 이 디코딩 단계는 고전적 데이터로부터 인코딩된 양자 상태에서 의미 있는 정보를 추출하기 위해 필수적이며, 에이전트의 행동 또한 해석을 위해 반드시 고전 데이터로 환원되어야 하므로 양자강화학습 기반 비행 제어기에서 핵심적인 역할을 수행한다. 이와 같은 세 단계는 양자강화학습과 기존의 고전적인 강화학습 기반 제어를 구분하는 주요 차별점이라 할 수 있다.

기존 고전적인 강화학습 기반 비행 제어기에서 고전적 인공신경망은 함수 근사기로 작동하며, 원시 상태 벡터를 이용 가능한 행동들에 대한 확률 분포로 매핑한

다. 과정은 상태 층(State Layer, 즉 입력층)에서 시작되며, 환경 관측값이 수치 벡터로 인코딩된다. 이 벡터들은 하나 이상의 은닉층(Hidden Layers)을 거치면서 비선형 활성화 함수를 통해 주요 특징을 추출한다. 고전적 인공신경망이 각 은닉층 노드의 가중치와 편향을 역전파(Backpropagation)를 통해 조정하는 것과 달리, 양자신경망은 양자 위상과 크기 매개변수를 최적화한다. 최종적으로 도출된 특징 표현은 행동 층(Action Layer, 즉 출력층)으로 전달되며, 소프트맥스(softmax) 활성화 함수를 통해 최종 행동 확률이 계산된다. 이를 통하여 전체적인 연산의 구조를 완성한다.

III. 양자강화학습의 자율이동체 응용

본 장에서는 다양한 환경에서의 양자강화학습 알고리즘의 활용에 대해서 논한다.

1. 다양한 무인자율이동체 환경에서 양자강화학습 활용 방향

무인자율이동체(Unmanned Aerial Vehicle (UAV))는 차세대 통신 및 네트워크 인프라에서 중요한 역할을 맡고 있다. 특히 우주-공중-지상 통합 네트워크(Space-Air-Ground Integrated Network (SAGIN)) 환경에서는 저궤도 위성(Low Earth Orbit (LEO)), 무인자율이동체, 지상 기지국이 협력하여 통신 자원을 효율적으로 배분하고, 사용자 단말의 이동성을 보장해야 한다^[8-11]. 그러나 이러한 SAGIN은 네트워크 이질성(Heterogeneity), 자원 제한(Resource Scarcity), 다중 사용자 요구(Multi-User Demand)와 같은 복잡성을 내포하고 있어 전통적인 제어 기법만으로는 효율적 운영이 어렵다. 본 원고는 이러한 문제를 해결하기 위해 양자강화학습을 도입하여 무인자율이동체를 비롯한 무인자율이동체의 협력적 제어를 제안한다. 양자컴퓨팅의 병렬 탐색 능력과 양자얽힘 기반 상태 표현을 활용함으로써, 무인자율이동체가 다중 사용자 접속 환경에서 더 빠르고 안정적으로 학습할 수 있음을 보였다.

더불어, 무인자율이동체는 군사 정찰, 재난 구조, 물

류 운송, 농업 감시 등 다양한 응용 분야에서 활용도가 급격히 확대되고 있다. 무인자율이동체의 자율 운용을 위해서는 경로 탐색(Path Planning), 안정적 비행 제어(Stability Control), 자원 최적화(Resource Allocation)와 같은 고차원적 의사결정 문제가 핵심 과제로 대두된다. 기존의 강화학습은 무인자율이동체 제어에 유망한 접근법으로 자리 잡았으나, 상태-행동 공간의 폭발적 증가, 환경 불확실성, 다중 에이전트 협력 문제에서 학습 효율성과 수렴 속도에 한계를 드러내고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 양자강화학습의 활용은 최근 많이 제안되고 있는 연구분야 중에 하나이다.

따라서, 양자강화학습은 무인자율이동체 제어에서 다음과 같은 혁신적 장점을 제공한다.

1) 양자상태 기반 탐색: 무인자율이동체의 상태와 행동을 양자 상태로 인코딩하면, 고전적 방법보다 훨씬 많은 경로 후보를 동시에 고려할 수 있다. 예를 들어, 무인자율이동체의 이동 경로를 양자중첩으로 표현하여, 여러 후보를 병렬적으로 탐색하고 최적 경로를 빠르게 도출할 수 있다.

2) 탐색-활용 균형 개선: 전통적 강화학습 알고리즘들은 탐색(Exploration)과 활용(Exploitation)의 균형을 맞추는 데 어려움이 있지만, 양자강화학습 알고리즘들은 양자 측정(Measurement)을 통해 더 효율적인 확률적 정책을 구현할 수 있다. 이를 통해 무인자율이동체는 미지의 환경에서 탐색 속도를 높이면서도 빠르게 안정적 행동 정책을 학습할 수 있다.

3) 다중 무인자율이동체 간 협력 제어: 양자얽힘을 활용하면 무인자율이동체 간 상태를 상호 연관 지을 수 있다. 예컨대, 다수 무인자율이동체가 협력 정찰을 수행할 때, 얽힘 기반, 양자강화학습 알고리즘들은 개별 무인자율이동체의 행동 선택이 다른 무인자율이동체의 정책에 반영되므로, 더 효율적인 자원 분배와 임무 수행이 가능하다.

4) 동적 환경 적응: 양자강화학습은 환경 변화에 따른 정책 갱신 속도가 고전적 강화학습 알고리즘들보다 빠르다. 무인자율이동체가 산발적 기상 변화나 전파 간섭에 직면했을 때, 양자전이 모델을 기반으로 정책을 즉각적으로

로 보정하여 안정적 비행을 유지할 수 있다.

결과적으로 양자강화학습은 무인자율이동체 제어 문제에서 기존 강화학습의 한계를 극복할 수 있는 새로운 가능성을 제시한다. 양자강화학습 알고리즘들은 빠른 경로 탐색, 효율적인 다중 무인자율이동체 협력, 동적 환경 적응에서 특히 강점을 보인다. 비록 현재는 시뮬레이션과 개념적 검증 단계에 머물러 있으나, 양자컴퓨팅 하드웨어가 발전함에 따라 무인자율이동체의 실시간 제어 및 네트워크 운용에 점차 적용될 것으로 전망하다. 궁극적으로 양자강화학습 알고리즘들은 무인자율이동체를 단순한 비행체 제어 수준을 넘어, 지능형 의사결정 에이전트로 진화시키는 핵심 기술로 자리매김할 가능성이 크다. 이는 미래의 군사, 재난 대응, 스마트 시티, 6G 네트워크 등 다양한 응용 분야에서 무인자율이동체의 역할을 혁신적으로 확장시킬 것으로 예상한다.

2. 위성 라우팅을 위한 양자강화학습 활용

차세대 위성 통신 네트워크는 저궤도 위성을 중심으로 한 대규모 Constellation 형태로 구축되고 있다. 이러한 네트워크는 지구 전역에 광역 커버리지를 제공하며, 우주-공중-지상 통합 네트워크(SAGIN)의 핵심 인프라로 자리매김하고 있다. 특히, 위성 간 라우팅(Inter-Satellite Routing)은 전 세계 단말 사용자의 데이터가 빠르고 안정적으로 전달되도록 보장하는 필수 요소이다^[12].

그러나 LEO 위성망은 위성의 고속 이동성, 네트워크 토폴로지의 동적 변화, 통신 지연(Latency)과 링크 불안정성 등 고전적 라우팅 알고리즘이 처리하기 어려운 문제를 내포한다. 전통적인 최단 경로 탐색 기반 라우팅은 네트워크 변화에 실시간 대응하기 어렵고, 강화학습을 적용하더라도 상태공간이 지나치게 커져 학습 효율이 떨어진 다^[12].

이에 대한 대안으로 양자강화학습이 제시되고 있다. 양자강화학습은 양자컴퓨팅의 중첩과 얽힘을 활용해 방대한 상태공간을 병렬적으로 탐색할 수 있으며, 위성 네트워크와 같이 변화가 빠르고 복잡한 환경에서 효율적인 라우팅을 가능하게 한다.

위와 같은 인공위성 네트워크의 라우팅 문제는 다음과



같은 특성을 가진다.

1) 동적 토폴로지(Dynamic Topology): 위성은 초속 수 km의 속도로 지구 궤도를 공전하므로, 위성 간 링크(Inter-Satellite Link (ISL))가 지속적으로 형성되고 단절된다.

2) 대규모 상태공간: 수천 기 이상의 위성이 존재하는 경우, 각 위성의 위치·링크 상태·사용자 수요를 모두 고려하면 상태공간이 기하급수적으로 증가한다.

3) Quality-of-Service (QoS) 제약: 데이터 전달은 지연 최소화, 신뢰성 보장, 에너지 효율성 등 다양한 QoS 목표를 동시에 만족해야 한다.

전통적인 강화학습 기반 라우팅은 환경과 상호작용하며 최적 정책을 학습할 수 있으나, 수렴 속도가 느리고 탐색 효율이 낮다는 한계가 있다. 특히 지연 민감한 위성 통신에서는 강화학습 기반 알고리즘들의 학습 속도 부족이 큰 제약으로 작용한다.

이에 대응하여 양자강화학습 기반 인공위성 라우팅은 다음과 같은 핵심 아이디어에 기반한다.

1) 양자상태 기반 경로 탐색: 전송 가능한 경로 후보를 양자중첩으로 표현하여 다수의 경로를 동시에 고려한다. 양자 측정을 통해 가장 효율적인 경로를 선택함으로써, 고전적 Q-Learning보다 탐색 시간이 크게 단축된다.

2) 양자정책 업데이트(Quantum Policy Update): 사용하는 강화학습 알고리즘들의 정책(Policy)을 업데이트할 때 양자 게이트 연산을 활용하여, 상태-행동 공간을 압축적으로 표현한다. 이로써 라우팅 정책이 빠르게 수렴하고, 실시간 적응성이 향상된다.

3) 양자얽힘 기반 다중 위성 협력: 위성 간 얽힘을 활용하면 각 위성이 독립적으로 학습하지 않고, 공동으로 학습 효과를 공유할 수 있다. 예컨대, 특정 링크의 혼잡 상황을 한 위성이 감지하면, 얽힘된 다른 위성의 정책에도 즉시 반영되어 라우팅 효율성이 높아진다.

IV. 향후 연구 방향

무인자율이동체는 군사 정찰, 물류 운송, 재난 구조, 스마트 시티 모니터링 등 다양한 응용에서 핵심 기술로

부상하고 있다. 이러한 무인자율이동체의 자율성은 경로 탐색, 다중 에이전트 협력, 환경 적응과 같은 고난도의 제어 문제에 의해 결정된다. 기존 강화학습 알고리즘들은 무인자율이동체 제어에서 유망한 성과를 보여왔으나, 학습 효율성 부족, 실시간 대응 한계, 확장성 문제와 같은 약점을 지닌다.

양자강화학습은 전술한 바와 같이 양자컴퓨팅의 중첩과 얽힘 특성을 활용하여, 기존 강화학습이 직면한 한계를 극복할 수 있는 잠재력을 제시한다. 하지만 현재 연구는 초기 단계에 머물러 있으며, 무인자율이동체 제어의 실제 응용을 위해서는 다양한 후속 연구가 필요하다. 본 장에서는 양자강화학습 기반 무인자율이동체 제어의 향후 연구 방향과 고려해야 할 연구 방향을 다양한 측면에서 논한다.

1. 탐색공간 효율적 탐색을 통한 실시간

무인자율이동체 제어

현재 NISQ 시대의 양자컴퓨터는 큐비트 오류율과 회로 깊이 제약 때문에 단독으로 무인자율이동체 제어를 수행하기 어렵다. 따라서 단기적으로는 양자-고전 하이브리드 구조가 필수적이다. 상태공간 탐색은 양자 알고리즘(예: 양자 서치, Quantum Approximate Optimization Algorithm (QAOA))으로 수행하여 탐색 속도를 향상시키고, 정책 업데이트 및 학습 최적화는 고전적 강화학습으로 처리하여 안정성을 확보하는 방식이다. 향후 연구는 무인자율이동체의 실시간 제어 요구(밀리초 단위)를 만족할 수 있는 하이브리드 양자-고전 강화학습 프레임워크 설계에 집중해야 한다.

2. 다중 무인자율이동체 협력 제어를 위한 양자

멀티에이전트 강화학습 확장

향후 무인자율이동체 응용은 개별 운용보다 편대(Fleet) 단위 협력이 중요해질 것이다. 예컨대, 다수 무인자율이동체가 협력하여 재난 지역을 탐사하거나, 대규모 물류 배송을 수행하는 시나리오에서는 다중에이전트 강화학습(Multi-Agent Reinforcement Learning (MARL))이 필요하다. 양자강화학습은 양자얽힘을 통한

상태 공유를 통해 무인자율이동체 간 협력적 학습을 가능하게 한다. 앞으로의 연구는 무인자율이동체 수가 수십~수백 대로 증가하는 상황에서도 학습이 안정적으로 수렴하는 확장성 확보, 무인자율이동체 간 제한된 통신 자원을 고려한 양자 얽힘 기반 분산 학습 구조 설계, 안전한 임무 수행을 위한 분산 양자멀티에이전트 강화학습 보안 메커니즘 개발에 초점이 맞춰져야 한다. 더불어 이와 같은 양자멀티에이전트 강화학습은 Actor-Critic Networks을 기반으로 설계되는 것이 대표적인 설계 기법이며 그에 대한 기술적인 발전 역시 병렬적으로 수행되어야 한다^[13-17].

3. 동적 환경 적응 및 안정성 보장

무인자율이동체는 바람, 전파 간섭, 기상 변화 등 예측 불가능한 환경 변수에 직면한다. 양자강화학습은 빠른 상태 전이 학습을 통해 동적 환경에 적응할 수 있으나, 안전성 보장(Safety Guarantee) 문제는 아직 해결되지 않았다. 향후 연구에서는 안전 제약 조건 강화학습 기능(Safe Reinforcement Learning)을 포함한 양자강화학습 알고리즘 개발, 환경 변화에 따른 정책 안정성을 이론적으로 검증하는 수렴성 분석, 돌발 상황(예: 무인자율이동체 간 충돌, 배터리 부족)에 대한 실시간 복원력(Resilience) 확보가 요구된다^[18]. 특히 안전성 검증 가능한 양자강화학습 프레임워크는 무인자율이동체가 인프라와 인간 사회 속에서 신뢰성 있게 운용되기 위한 필수 요소로 각광받고 있다.

4. 응용 시나리오 기반 양자강화학습 연구

무인자율이동체 제어에서 양자강화학습의 실제 적용 가치를 높이기 위해서는 응용 시나리오 기반 연구가 필요하다^[16]. 예를 들어, 재난 구조 양자강화학습 기반 무인자율이동체 편대가 신속하게 경로를 탐색하고, 실시간 피해 지역 통신망을 복구, (군사 작전 무인자율이동체간 협력적 정찰 및 정보 수집에서 양자강화학습이 제공하는 빠른 적응성과 협력성이 강점으로 작용), 스마트 물류 네트워크 (무인자율이동체와 지상 물류 시스템을 통합하는 자율 배송 환경에서, 양자강화학습이 자원 배분과 충돌 회피를

동시에 최적화)등이 대표적인 예이다. 향후 연구는 이러한 응용 사례를 중심으로 성능 검증 시뮬레이션 환경 구축과 실험적 프로토타입 개발을 수행해야 할 것이다.

5. 하이브리드 양자-고전 알고리즘의 양자강화학습 발전 방향과 무인이동체 제어 응용

양자강화학습은 양자컴퓨팅의 병렬 탐색 능력과 얽힘 특성을 활용하여 기존 강화학습의 학습 효율성을 극적으로 향상시킬 잠재력을 가진다. 그러나 현재 가용한 양자 하드웨어는 NISQ 제약이 존재하는 단계로, 큐비트 수와 게이트 오류율의 한계로 인해 대규모 문제를 직접 해결하기 어렵다. 이러한 제약 속에서 하이브리드 양자-고전 알고리즘은 실질적인 대안으로 주목받고 있다. 하이브리드 구조는 양자연산과 고전연산을 결합하여, 양자의 장점을 살리면서도 고전적 안정성을 유지하는 방식으로 무인자율이동체 제어에 응용될 수 있다.

하이브리드 양자-고전 강화학습연구의 핵심은 양자 회로를 통한 상태공간 압축적 표현 및 탐색과 고전적 연산을 통한 정책 업데이트와 최적화의 분업적 구조에 있다. 이러한 관점에 근거하여 해당 연구분야의 발전 방향은 다음과 같이 요약된다.

변분적 양자 알고리즘 기반 양자강화학습: 파라미터화된 양자회로를 이용하여 무인자율이동체 제어의 상태-행동 공간을 표현하고, 고전적 옵티마이저로 학습하는 방식이 주류가 될 전망이다.

양자 샘플링 기반 탐색 강화: 무인자율이동체의 경로 탐색이나 회피 기동 시, 양자 샘플링을 활용해 빠른 확률적 행동 선택을 가능하게 하여 탐색-활용 균형을 개선할 수 있다.

잡음 내성 및 에러 완화 기술 결합: 무인자율이동체 제어는 실시간성이 요구되므로, 양자 회로에서 발생하는 오류를 보정하기 위한 에러 완화(Error Mitigation) 전략과 하이브리드 구조의 결합 연구가 필요하다.

더불어 하이브리드 양자-고전 강화학습은 무인이동체 제어에서 다음과 같은 응용 가능성을 지닌다.

실시간 경로 최적화: 무인자율이동체가 복잡한 도시 환경에서 장애물을 회피하며 최단 경로를 찾을 때, 양자 탐



색으로 후보 경로를 병렬적으로 고려하고, 고전적 강화학습으로 안정적인 정책을 업데이트할 수 있다.

다중 무인자율이동체 협력 제어: 무인자율이동체가 편대비행을 하며 협력적 임무를 수행할 때, 얽힘 기반 양자 표현을 통해 상호의존성을 모델링하고, 고전적 멀티에이전트 강화학습 구조와 결합하여 효율적 자원 분배를 지원한다.

동적 환경 적응: 기상 변화나 신호 간섭과 같은 동적 환경 요소에 대해, 양자전이모델을 활용하여 신속히 정책을 재구성하고 고전 알고리즘으로 안정성을 보장할 수 있다.

결론적으로 하이브리드 양자-고전 양자강화학습은 무인자율이동체 제어의 학습 효율성, 협력성, 실시간성을 동시에 확보할 수 있는 유망한 연구 방향이다. 단독 양자 알고리즘의 한계를 극복하고, 고전적 제어 프레임워크와의 융합을 통해 양자강화학습은 무인이동체를 지능형 자율 에이전트로 진화시키는 핵심 기술로 많은 연구가 진행될 것으로 예상된다.

6. 고전 기기와 양자 기기가 혼재된 상황에서의 무인이동체 제어 응용

무인자율이동체를 실제 전개하는 상황에서 일부 무인자율이동체는 고전적인 강화학습 알고리즘을 기반으로 동작하고 그 외의 무인자율이동체는 양자강화학습 알고리즘을 기반으로 기동하는 경우가 존재한다. 이 경우에 이기종 무인자율이동체들을 통합적으로 제어하고 기동하는 알고리즘이 필요하다. 이러한 경우 외에도 시간을 두고 고전 기기들을 양자 기기들로 대체해 가는 경우에도 그러한 대체하는 과정의 시간을 고려하여 중간단계에서는 둘 간의 자원할당, 통합기동, 스케줄링을 위한 알고리즘이 실질적으로 필요하다^[19].

V. 결론

본고에서 서술한 바와 같이 양자강화학습은 무인자율이동체 제어 분야에서 기존 강화학습이 직면한 상태-행동 공간의 복잡성, 학습 효율성 부족, 실시간 적응 한계를 극복할 수 있는 차세대 접근법으로 주목받고 있다. 최근

연구들은 양자강화학습 알고리즘들이 경로 탐색 최적화, 다중 무인자율이동체 협력 제어, 동적 환경 적응에서 고전적 방법 대비 유의미한 성능 향상을 달성할 수 있음을 보여주고 있다. 특히 양자중첩과 얽힘을 활용한 병렬 탐색 능력은 대규모 상태공간 문제 해결에 강점을 보이며, 무인자율이동체 편대 운용과 같은 협력적이고 동적인 시나리오에서 높은 활용가능성을 확인할 수 있다^[20].

그러나 이러한 양자강화학습 기반 알고리즘들의 실제 적용은 아직 초기 단계로, NISQ 시대의 양자 하드웨어 제약, 양자-고전 하이브리드 구조 필요성, 안전성 보장 이슈와 같은 과제가 남아 있다. 향후 연구는 하이브리드 양자-고전 강화학습 알고리즘들의 실시간성 확보, (2) 확장 가능한 다양한 효율적인 양자 멀티에이전트 강화학습 알고리즘 구조 설계, (3) 실험적 검증 환경 구축을 통해 응용 가능성을 단계적으로 확장해 나아가야 한다^[21].

최종적으로는 양자강화학습 알고리즘들은 무인이동체를 단순한 이동체 제어 대상에서 벗어나, 지능형 자율 의사결정 주체로 진화시키는 기반 기술이 될 것으로 기대된다. 이는 군사·재난 구조·스마트 시티·6G 네트워크 등 다양한 응용 분야에서 무인자율이동체의 역할을 혁신적으로 확장시키며, 미래 자율시스템의 근간을 이루는 주요한 알고리즘으로 활용될 것이다.

사사문구

This work was supported by Institute of Information & Communications Technology Planning W& Evaluation (IITP) grant funded by the Korea government[MSIT (Ministry of Science and ICT (Information and Communications Technology))] (RS-2024-00439803, SW Star Lab) for Quantum AI Empowered Second-Life Platform Technology; and also by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (RS-2025-00561377) and also by the IITP-ITRC(Information Technology Research Center) grant funded by the Korea government(Ministry of Science and ICT) (IITP-2025-RS-2024-00436887).

(Corresponding Author: Joongheon Kim).

참고 문헌

- [1] C. Shen, T. -H. Chang, J. Gong, Y. Zeng and R. Zhang, "Multi-UAV Interference Coordination via Joint Trajectory and Power Control," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 68, pp. 843–858, 2020.
- [2] T. Samad, J. S. Bay and D. Godbole, "Network-Centric Systems for Military Operations in Urban Terrain: The Role of UAVs," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 1, pp. 92–107, January 2007.
- [3] S. Javaid et al., "Communication and Control in Collaborative UAVs: Recent Advances and Future Trends," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 24, no. 6, pp. 5719–5739, June 2023.
- [4] W. J. Yun, S. Park, J. Kim, M. Shin, S. Jung, D. Mohaisen, and J.-H. Kim, "Cooperative Multiagent Deep Reinforcement Learning for Reliable Surveillance via Autonomous Multi-UAV Control," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 18(10):7086–7096, October 2022.
- [5] C. Park, G. S. Kim, S. Park, S. Jung and J. Kim, "Multi-Agent Reinforcement Learning for Cooperative Air Transportation Services in City-Wide Autonomous Urban Air Mobility," *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, vol. 8, no. 8, pp. 4016–4030, August 2023.
- [6] S. Govinda, B. Brik and S. Harous, "A Survey on Deep Reinforcement Learning Applications in Autonomous Systems: Applications, Open Challenges, and Future Directions," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 26, no. 7, pp. 11088–11113, July 2025.
- [7] S. Park, H. Lee, S. B. Son, S. Jung, and J. Kim, "Quantum Federated Learning with Pole-Angle Quantum Local Training and Trainable Measurement," *Neural Networks (Elsevier)*, 187:107301, July 2025.
- [8] G. S. Kim, Y. Cho, S. Park, S. Jung, and J. Kim, "Quantum Multi-Agent Reinforcement Learning for Joint Cube-Satellites and High-Altitude Long-Endurance Aerial Vehicles in SAGIN," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 61, no. 4, August 2025.
- [9] P. V. Trinh, S. Sugiura, C. Xu and L. Hanzo, "Toward Quantum SAGINs Harnessing Optical RISs: Applications, Advances, and the Road Ahead," *IEEE Network*, vol. 39, no. 3, pp. 215–222, May 2025, doi: 10.1109/MNET.2025.3536848.
- [10] H. Li, K. Ota and M. Dong, "AI in SAGIN: Building Deep Learning Service-Oriented Space-Air-Ground Integrated Networks," *IEEE Network*, vol. 37, no. 2, pp. 154–159, March/April 2023, doi: 10.1109/MNET.001.2000512.
- [11] S. Yao, J. Guan, Y. Wu, K. Xu and M. Xu, "Toward Secure and Lightweight Access Authentication in SAGINs," *IEEE Wireless Communications*, vol. 27, no. 6, pp. 75–81, December 2020, doi: 10.1109/MWC.001.2000132.
- [12] S. Park, G. S. Kim, Z. Han, and J. Kim, "Quantum Multi-Agent Reinforcement Learning is All You Need: Coordinated Global Access in Integrated TN/NTN Cube-Satellite Networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 62, no. 10, pp. 86–92, October 2024.
- [13] G. S. Kim, S. Lee, I.-S. Cho, S. Park, and J. Kim, "Quantum Reinforcement Learning for Lightweight LEO Satellite Routing," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 12, no. 14, pp. 28986–29004, July 2025.
- [14] G. Wu et al., "Combining Lyapunov Optimization With Actor-Critic Networks for Privacy-Aware IIoT Computation Offloading," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 11, no. 10, pp. 17437–17452, 15 May 15, 2024, doi: 10.1109/JIOT.2024.3357110.
- [15] L. Chen, S. -L. Dai and C. Dong, "Adaptive Optimal Tracking Control of an Underactuated Surface Vessel Using Actor-Critic Reinforcement Learning," *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, vol. 35, no. 6, pp. 7520–7533, June 2024, doi: 10.1109/TNNLS.2022.3214681.
- [16] C. Park, W. J. Yun, J. P. Kim, T. K. Rodrigues, S. Park, S. Jung, and J. Kim, "Quantum Multiagent Actor-Critic Networks for Cooperative Mobile Access in Multi-UAV Systems," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 10, no. 22, pp. 20033–20048,



November 2023.

- [17] W. J. Yun, J. P. Kim, S. Jung, J.-H. Kim, and J. Kim, "Quantum Multiagent Actor-Critic Neural Networks for Internet-Connected Multirobot Coordination in Smart Factory Management," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 10, no. 11, pp. 9942–9952, June 2023.
- [18] Z. Zhou, O. S. Oguz, M. Leibold and M. Buss, "Learning a Low-Dimensional Representation of a Safe Region for Safe Reinforcement Learning on Dynamical Systems," *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, vol. 34, no. 5, pp. 2513–2527, May 2023, doi: 10.1109/TNNLS.2021.3106818.
- [19] S. Park, G. S. Kim, and J. Kim, "Joint Quantum Reinforcement Learning and Neural Myerson Auction for High-Quality Digital-Twin Services in Multitier Networks," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 12, no. 13, pp. 23722–23735, July 2025.
- [20] S. Park and J. Kim, "Trends in Quantum Reinforcement Learning: State-of-the-Arts and the Road Ahead," *Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI) Journal*, vol. 46, no. 5, pp. 748–758, October 2024.
- [21] S. Park, J. P. Kim, C. Park, S. Jung, and J. Kim, "Quantum Multi-Agent Reinforcement Learning for Autonomous Mobility Cooperation," *IEEE Communications Magazine*, vol. 62, no. 6, pp. 106–112, June 2024.



김중현

- 2004년 2월 고려대학교 컴퓨터학과 학사
- 2006년 2월 고려대학교 컴퓨터학과 석사
- 2006년 1월 ~ 2009년 8월 LG전자 주임연구원
- 2014년 8월 University of Southern California, Computer Science 박사
- 2013년 9월 ~ 2016년 2월 미국 인텔 본사연구소 Systems Engineer
- 2016년 3월 ~ 2019년 8월 중앙대학교 소프트웨어대학 조교수
- 2019년 9월 ~ 현재 고려대학교 전기전자공학부 부교수

〈관심 분야〉

딥러닝기반 모빌리티 제어, 딥러닝기반 차세대컴퓨팅, 쿼텀 인공지능, 생성망기반 강화학습, 자율이동체제어, 에너지 효율적인 네트워크 시스템

양자 컴퓨팅 알고리즘 연구 개발 동향

I. 서론

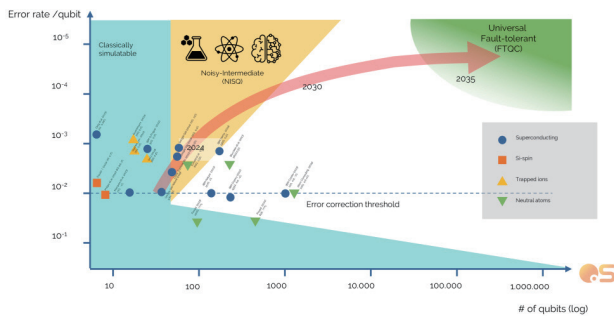
양자 컴퓨팅 알고리즘은 고전 컴퓨터로는 처리하기 어려운 문제들을 새로운 방식으로 해결할 수 있는 가능성을 제시하며 지난 수십년간 활발한 연구가 이어져 왔다. 양자역학의 주요 현상인 중첩(superposition), 얽힘(entanglement), 간섭(interference) 현상은 양자 병렬성과 확률 진폭의 제어를 가능하게 하고, 이를 바탕으로 고전 컴퓨터의 계산 복잡도 한계를 넘어서는 알고리즘들이 제안되었다.

대표적인 예로 쇼어(Shor)의 소인수분해 알고리즘^[1]은 다항 시간안에 큰 수의 합성수를 소인수로 분해하는 문제를 해결하는 양자 알고리즘이다. 현재까지도 고전 컴퓨터로는 다항 시간에 소인수분해 문제를 풀 수 있는 알고리즘이 알려지지 않았고, 이러한 소인수분해의 어려움에 기반하여 설계된 RSA 암호화 체계의 안전성을 양자 컴퓨터로 공격할 수 있다는 가능성을 시사한다. 그로버(Grover)의 탐색 알고리즘^[2]은 비정렬 데이터베이스에서 특정 원소를 찾는 문제를 해결하는 알고리즘으로, 고전 컴퓨터에 비해 제곱근 수준의 속도 향상을 제공하는 것으로 잘 알려져 있다. 또한, 양자 위상 추정(Quantum Phase Estimation, QPE) 알고리즘^[3]은 지수적 계산 자원이 필요한 고유값 추정을 다항 시간 내에 수행할 수 있어, 양자 화학 및 물리 시스템 시뮬레이션에서 잠재적 양자 이득을 제공하는 알고리즘으로 알려져 있다.

양자 계산 우위를 보여주는 핵심 알고리즘들은 모두 완전한 양자 오류정정(Quantum Error Correction, QEC) 환경을 가정한 결함허용 양자컴퓨팅(Fault-Tolerant Quantum Computing, FTQC) 모델에서 실행될 것을 전제로 한다. 따라서 FTQC 알고리즘 연구는 이론적으로 가장 강력한 계산 우위를 제시하면서, 장기적으로 양자 컴퓨팅이 달성해야 할 최종 목표를 규정하였다.



배은옥
한국전자통신연구원

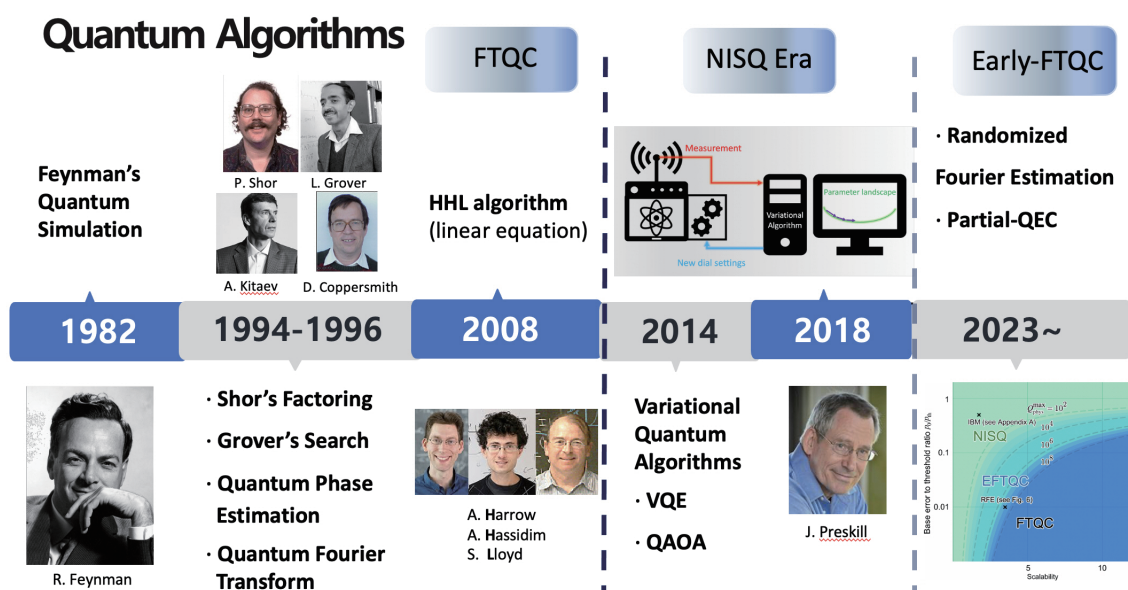


〈그림 1〉 2024년 12월까지 최첨단 큐비트를 보유한 연구자 및 회사가 달성한 결과 요약

그러나 이러한 이상적 모델은 현재의 하드웨어 수준과는 큰 간극을 가진다. 양자 컴퓨팅에서 정보를 저장하고 처리하는 기본 단위인 큐비트(qubit)는 주변 환경과의 상호작용에 매우 민감하여 짧은 결어긋남 시간(decoherence time)과 게이트 오류를 피하기 어렵다. 2020년대 초반까지의 양자 장치는 수십에서 수백 개의 물리 큐비트 규모에 머물러 있으며, 이는 아직 완전한 오류정정에 필요한 수천~수백만 큐비트에는 미치지 못한다. 이러한 상황에서 프레스킬(Preskill)은 2018년 논문에서 현재를 NISQ(Noisy Intermediate-Scale Quantum) 시대로 정의하였다^[4]. 그는 이 시기를 ‘완전한 오류정정 이전 단계이지만, 제한된 규모에서도 특정 문제

에서 의미 있는 계산 결과를 보여줄 수 있는 가능성의 창(window of opportunity)’으로 규정하였다. 이후 NISQ 알고리즘 연구는 변분 양자 고유값 추정(Variational Quantum Eigensolver, VQE)^[5], 양자 근사 최적화 알고리즘(Quantum Approximate Optimization Algorithm, QAOA)^[6], 양자 커널 기법(Quantum Kernel Methods)^[7,8] 등 양자-고전 하이브리드적 방법론에 집중되었다. 이러한 방법들은 얇은 회로 깊이와 고전적 최적화 과정을 결합하여 현재의 잡음이 많은 NISQ 장치에서도 실행 가능성을 확보하고 있다.

동시에, 양자 오류정정 기술은 완전한 FTQC 시대로 향하는 과정에서 점진적으로 성과를 내기 시작했다. 〈그림 1〉에서 보듯이 기업들, 연구 및 기술 기관들 그리고 학계 연구 그룹들은 결합허용 양자 컴퓨터를 향해 나아가기 위해 서로 다른 방법들을 활용하고 있다^[9]. 그중 주목할 만한 성과로는, 구글 연구팀이 2022년 거리-5 표면 코드(surface code)에서 코드 거리 증가가 실제로 논리 오류율을 낮추는 ‘스케일링 이득(scaling advantage)’을 실험적으로 입증한 것이 있다^[10]. 이어 2024년 더 긴 거리-7 코드와 실시간 디코딩으로 논리 오류율을 임계값 이하로 낮추는 데 성공하였다^[11]. 이와 같은 진전은 완전한 오류정정 이전에 Early-FTQC 시대라는 새로운 국면이 존재



〈그림 2〉 양자 컴퓨터 개발의 필요성이 제기된 이후 등장한 대표적 양자 컴퓨팅 알고리즘들

할 수 있음을 보여준다. Early-FTQC 시대는 제한된 수의 논리 큐비트와 짧은 코드 거리에서, 일부 FTQC 알고리즘의 축소 실행을 하거나 부분적 오류정정된 회로를 활용하여 NISQ 알고리즘의 정확도 개선을 가능하게 하는 과도기적 시대로 정의된다.

따라서, 양자 컴퓨팅 알고리즘 연구는 단일한 패러다임으로 이해하기 보다는 FTQC, NISQ, Early-FTQC의 세 기술적 시대가 상호작용하며 진화하는 연속체로 이해될 필요가 있다(〈그림 2〉 참고). FTQC 알고리즘 구현은 달성하고자 하는 최종 목표이자 이론적 토대를 제공하고, NISQ 알고리즘은 현재 하드웨어의 한계 속에서 실험적 유용성을 검증하며, Early-FTQC 알고리즘은 두 단계 사이의 교량적 역할을 하는 중요한 단계이다. 본 원고는 이 세 시대의 연구 개발 동향을 구현 관점에서 NISQ, Early-FTQC, FTQC 순서로 통합적으로 고찰하며, 각 시대에서 제시되는 알고리즘적 특징과 한계 그리고 향후 연구 방향까지 함께 논의한다.

II. NISQ 시대

NISQ 시대의 알고리즘 연구는 제한된 큐비트 수, 얇은 회로 깊이, 높은 잡음이라는 제약을 극복하면서도 실제 응용 가능한 문제를 해결하기 위해 변분적 하이브리드 구조를 중심으로 발전해 왔다.

〈그림 3〉과 같이 변분적 양자-고전 하이브리드 구조에서 양자 회로는 얇은 깊이로 매개변수화된 양자 상태를 생성(이런 양자 회로를 안자츠(Ansatz)라고 함)를 하고 측정(measurement) 값을 고전 컴퓨터에게 넘

겨주면, 고전 컴퓨터는 그 매개변수를 최적화(new dial settings)한다. 대표적인 알고리즘으로는 2014년에 나란히 등장한 VQE 와 QAOA 등이 있고, 이러한 변분적 양자-고전 하이브리드 구조를 갖는 알고리즘을 변분 양자 알고리즘 (Variational Quantum Algorithm, VQA)이라 통칭한다.

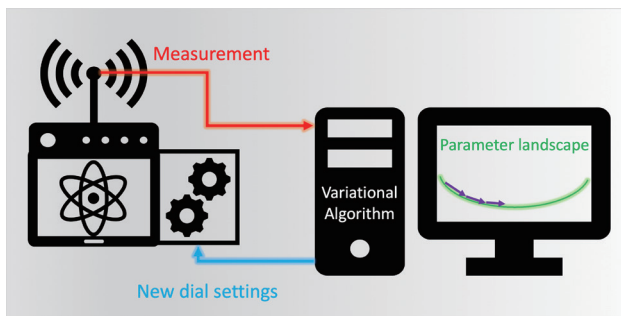
1. 변분 양자 고유값 추정 (VQE)

VQE는 NISQ 시대를 대표하는 변분적 하이브리드 알고리즘으로, 특히 화학 및 재료 과학 분야에서 중요한 전자구조 계산 문제를 해결하기 위해 제안되었다^[4]. VQE는 변분 원리(variational principle)에 기반한 알고리즘이다. 변분 원리란, 어떤 변수화된 상태 $|\psi(\theta)\rangle$ 에 대해 주어진 해밀토니안 (Hamiltonian) H 에 대한 에너지 기댓값 $\langle\psi(\theta)|H|\psi(\theta)\rangle$ 은 항상 해밀토니안의 바닥상태 에너지 값 이상이라는 원리이다. 따라서, 최적의 변수 θ^* 를 찾아 이 기댓값을 최소화하면 바닥상태 에너지에 근사할 수 있다.

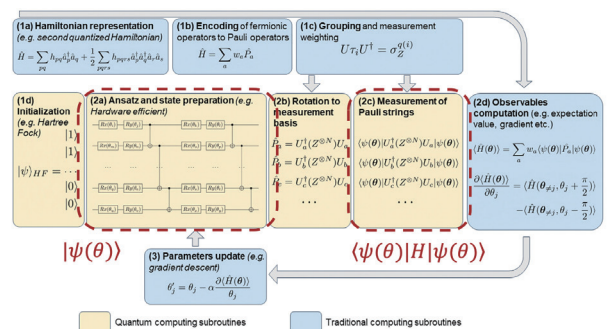
구체적인 VQE 알고리즘은 〈그림 4〉에서처럼 도식화할 수 있고, 알고리즘의 구성은 다음과 같다.

1. 초기 상태 준비 및 양자 회로를 이용해 매개변수화된 양자 상태 $|\psi(\theta)\rangle$ 를 생성.
2. 매개변수화된 양자 상태에 대한 해밀토니안 H 의 기댓값 $\langle\psi(\theta)|H|\psi(\theta)\rangle$ 을 측정.
3. 고전 최적화기(optimizer)를 이용하여 에너지 값 (H 의 기댓값)을 작아지게 하는 다음 변수

$$\theta' = \theta - \alpha \frac{\partial \langle\psi(\theta)|H|\psi(\theta)\rangle}{\partial \theta}$$



〈그림 3〉 변분 양자 알고리즘의 기본 구조



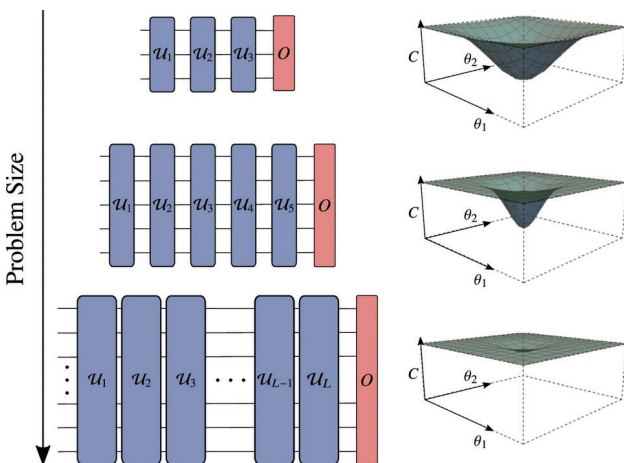
〈그림 4〉 VQE 알고리즘 도식화^[12]

을 설정.

- 1-3 과정을 에너지 값이 더 이상 작아지지 않을 때까지 반복 수행하고, 그 결과 값으로 H 의 최소 고유 값을 추정.

이러한 변분적 접근법은 제한된 회로 깊이로도 실행 가능하다는 점에서 잡음이 많은 중규모 양자 장치를 활용하기에 적합하다. 실제로 VQE는 광자 기반 양자 프로세서에서 H2 분자의 바닥상태 에너지를 근사하는 실험을 통해 처음 검증되었으며^[5], 이후 초전도 큐비트를 이용해서 BeH2 등 더 복잡한 분자의 전자구조 계산이 구현되었다^[13]. 또한 이온 트랩 플랫폼에서도 VQE가 구현되어 H2와 LiH 분자 시뮬레이션에 성공하였다^[14].

VQE는 처음 제안된 이후 다양한 플랫폼에서 실험적으로 검증되면서, 최근 연구 동향은 주로 회로 구조 최적화, 고전 최적화 방법 개선, 오류 완화 기법 결합, 응용 확장 등의 방향으로 발전하고 있다. 우선, 불필요하게 깊은 회로를 줄이기 위해 연산자를 점진적으로 추가하는 ADAPT-VQE가 제안되었고^[15], 변분 양자 알고리즘에서 변수 공간이 커질수록 목적 함수의 기울기가 지수적으로 소실되어 최적화가 불가능해지는 현상인 Barren plateau 문제(〈그림 5〉 참고)를 완화하기 위한 방법으로 양자 자연 경사 하강(Quantum natural gradient descent) 방법^[16], 양자 허수 시간 진화(Quantum Imaginary Time Evolution) 기법^[17] 등이 제안되어 안정적 수렴을 가능하게 하였다.



〈그림 5〉 Barren Plateau 문제는 VQA가 확장될수록 더 심각해 짐.

또한, 오류 완화(error mitigation) 방법과 결합하여 잡음 환경에서도 더 큰 분자 시스템을 안정적으로 다룰 수 있음이 실험적으로 입증되었다^[18]. 이와 함께 응용 범위도 전자구조 계산을 넘어 스핀계 해밀토니안, 양자 자성체 시뮬레이션, 화학 반응 경로 및 신소재 탐색 등으로 확장되고 있으며^[19], 머신러닝 분야에도 응용이 시도되고 있다. 이러한 흐름은 VQE가 NISQ 시대의 대표적 알고리즘으로서, 제한된 하드웨어 환경에서도 실직적 계산 가능성을 탐색하는 중요한 알고리즘임을 시사한다.

2. 양자 근사 최적화 알고리즘 (QAOA)

QAOA는 조합최적화 문제(Combinatorial Optimization problem)를 풀기 위해 고안된 또 하나의 대표적 변분 양자 알고리즘이다^[5]. QAOA의 전체적인 알고리즘 프레임워크는 VQE와 매우 유사하지만, 고전적인 조합최적화 문제에 대응하는 해밀토니안을 준비하는 방법과 매개변수화된 양자 상태를 생성하는 방법(QAOA 안자츠)이 특징되어 있다.

조합최적화 문제는 이산적인 해 공간 $\mathcal{X}$ 위에서 주어진 목적 함수 $C(z)$ 를 최소화 (또는 최대화)하는 해를 찾는 문제로 정의되며, 수학적으로는 다음과 같이 표현된다.

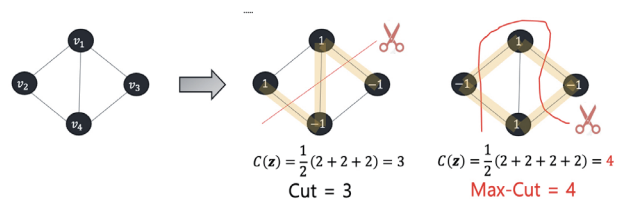
$$z^* = \arg \min_{z \in \mathcal{X}} C(z).$$

대표적인 조합최적화 문제의 예로 최대컷(Max-Cut) 문제가 있다. 최대컷 문제는 〈그림 6〉에서 보듯이, 그래프 $G = (V, E)$ 를 두 부분으로 분할하여 절단된 변(edge)의 수를 최대화하는 것이 목표이며, 그 목적 함수는

$$C(z) = \sum_{(i,j) \in E} \frac{1}{2} (1 - z_i z_j), \quad z_i \in \{-1, 1\}$$

으로 주어진다.

이 문제를 QAOA에 적용하기 위해서 문제 해밀토니안(problem Hamiltonian) H_C 는



〈그림 6〉 최대컷 문제 예시

$$H_C = \sum_{(i,j) \in E} \frac{1}{2} (1 - Z_i Z_j)$$

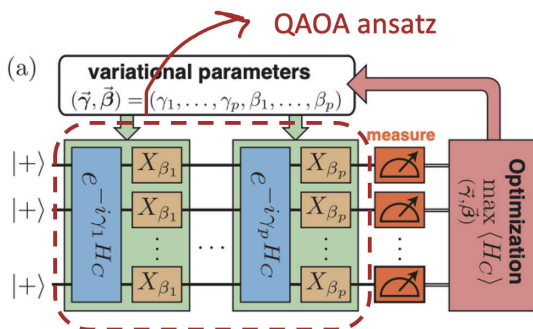
으로 설정한다. 여기서, Z_i 는 i 번째 큐비트에만 작용하는 파울리 Z 연산자이다. 혼합 해밀토니안(mixer Hamiltonian) H_B 는 일반적으로

$$H_B = \prod_{i=1}^{|V|} X_i$$

으로 설정한다. 여기서, X_i 는 i 번째 큐비트에만 작용하는 파울리 X 연산자이다. 이 경우 초기 상태로 H_B 의 고유 상태인, 모든 큐비트가 $|+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$ 상태로 준비되며, 혼합 해밀토니안은 가능한 해 공간 전체를 균등하게 탐색한다.

〈그림 7〉에서 보듯이, QAOA는 두 가지 연산자-문제 해밀토니안과 혼합 해밀토니안-에 대응하는 유니타리 연산을 교대로 적용하여 얇은 깊이의 매개변수화된 회로, QAOA 안자츠를 구성한다. 이후 고전 최적화기를 통해 변수를 조정하여 최적 혹은 근사적인 해를 탐색한다. 자세한 알고리즘 구성은 다음과 같다.

1. 초기 상태를 혼합 해밀토니안의 고유벡터로 준비하고 양자 회로를 이용해 매개변수화된 양자 상태 $|\psi_p(\gamma, \beta)\rangle = e^{-i\beta_p H_B} e^{-i\gamma_p H_C} \dots e^{-i\beta_1 H_B} e^{-i\gamma_1 H_C} |+\rangle^{\otimes n}$ 를 생성.
2. 매개변수화된 양자 상태에 대한 문제 해밀토니안 H_C 의 기댓값 $F_p(\gamma, \beta) = \langle \psi_p(\gamma, \beta) | H_C | \psi_p(\gamma, \beta) \rangle$ 을 측정.
3. 고전 최적화기(optimizer)를 이용하여 에너지 값(H 의 기댓값)을 작아지게 하는 다음 변수(γ', β') 설정.
4. 1-3 과정을 에너지 값이 더 이상 작아지지 않을 때

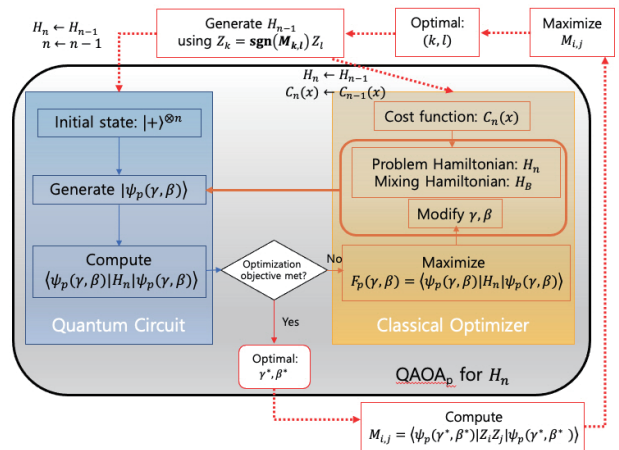


〈그림 7〉 QAOA 도식화^[20]

까지 반복 수행하고, 그 결과 값으로 H_C 의 최소고유값을 추정.

이러한 QAOA의 구조는 최대컷, 스케줄링, 포트폴리오 최적화 등 다양한 NP-난해(NP-hard) 문제에 적용 가능하다는 점에서 큰 주목을 받아 왔다. 특히, 양자 단열 이론(quantum adiabatic theorem)에 따르면 QAOA 안자츠 회로 깊이 p 를 늘릴수록 최적해에 점진적으로 가까워질 수 있으며, 이러한 이론적 배경은 제한된 NISQ 장치에서도 단계적인 성능 향상을 기대할 수 있게 한다.

QAOA 관련 최근 연구 동향은 크게 네 가지 축으로 전개되고 있는데 첫 번째는 변수 최적화 전략 개선이다. QAOA는 회로 깊이가 증가할수록 이론적으로는 해의 품질이 좋아지지만 실제 하드웨어에서 실행할 때 Barren plateau 문제에 취약한데, 이를 완화하기 위해 warm-start QAOA^[21]가 제안되었으며, 고전적 근사해를 초기 값으로 활용해 학습 안정성과 수렴 속도를 높이는데 성공하였다. 두 번째는 문제 특화 안자츠 설계 연구이다. 예를 들어, 제약 조건을 자연스럽게 반영하는 혼합 해밀토니안을 설계하거나 문제 구조에 맞춘 변분 회로를 설계해 얇은 깊이에서도 더 나은 근사해를 도출하는 시도가 이어지고 있다^[20]. 세 번째는 얇은 회로의 QAOA를 서브루틴으로 사용하여 그래프를 작은 크기로 축소하여 완벽히 문제를 풀고, 축소할 때의 제약 조건을 활용하여 처음 그래프의 해로 복원하는 양자 수축(quantum shrinking) 기법이다(〈그림 8〉참고).



〈그림 8〉 재귀적 양자 근사 최적화 알고리즘 도식화

재귀적 양자 근사 최적화 알고리즘(Recursive QAOA)으로도 알려진 이 방법은 회로 깊이 1인 QAOA를 사용하는 경우에도 기존 QAOA 성능을 능가하거나 특정 경우에는 가장 좋은 고전 알고리즘의 성능보다 좋아지는 경우도 발견되었다^[22-25]. 마지막으로 실험적 구현과 응용 확장이다. 초전도 큐비트 및 이온트랩 기반 장치에서 수십 큐비트 규모의 QAOA를 적용하여 최대컷 및 네트워크 문제 해결 성능을 입증했으며^[26], 오류 완화 기법과 결합해 잡음 환경에서도 신뢰할 수 있는 최적화 결과를 도출할 수 있음이 보고되었다^[27]. 이와 함께 응용 분야는 물류 최적화, 에너지 관리, 금융 포트폴리오 설계 등 실제 산업적 문제로 확장되고 있다^[28].

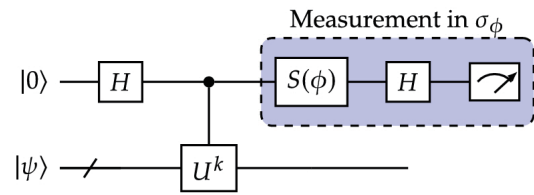
III. Early-FTQC 시대

NISQ 시대 이후의 중간 단계로 제안된 Early-FTQC 시대는 본격적인 결함허용 양자컴퓨터로 넘어가기 전에, 제한적이거나 오류정정 코드를 적용하여 안정적으로 연산을 수행할 수 있는 과도기적 시대로 이해된다^[29]. 이 시대에는 수천에서 수만 개 수준의 물리 큐비트를 활용하여 수십~수백 개의 논리 큐비트를 구현하고, 오류정정의 비용을 줄인 상태에서 특정 문제 영역에 특화된 양자 알고리즘을 실행하는 것을 목표로 한다. 대표적인 알고리즘으로는 전통적 양자 위상 추정 알고리즘의 긴 회로 깊이와 오류 취약성을 극복하기 위해 제안된 랜덤 푸리에 추정(Randomized Fourier Estimation, RFE) 알고리즘^[30]과 오류정정 비용이 낮은 회로의 일부분만을 완전한 오류정정 하에 수행하는 전략인 부분 오류정정(Partial-QEC) 기반 알고리즘^[31]이 있다.

1. 랜덤 푸리에 추정 (RFE)

랜덤 푸리에 추정은 깊은 회로를 갖는 기존의 양자 위상 추정 알고리즘을 여러 개의 얇은 회로와 확률적 샘플링 및 고전적 푸리에 해석으로 바꾸어 실행하는 Early-FTQC 시대 대표적 알고리즘이다^[30].

〈그림 9〉에서 볼 수 있듯이, 기본 아이디어는 유니타리 연산자 U 의 고유 상태 $|\psi\rangle$ 에 대해 무작위로 선



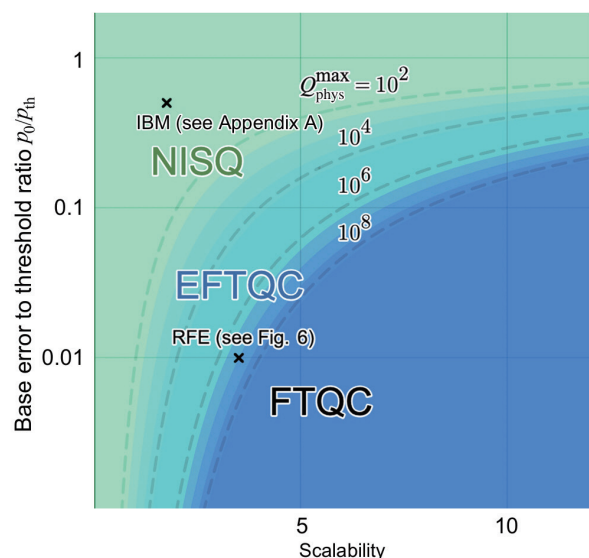
〈그림 9〉 Early-FTQC 알고리즘에서 사용되는 전형적인 회로 템플릿^[30]

택한 지수 k 에 대한 controlled- U^k 연산을 적용하고, Hadamard test를 수행하여 기댓값

$$g(k) = \langle \psi | U^k | \psi \rangle = e^{ik\theta}$$

를 추정하는 것이다. 이렇게 얻어진 데이터는 복소 지수 함수의 샘플로 해석되며, 이산 푸리에 변환(Discrete Fourier Transform, DFT) 또는 고전적 스펙트럼 분석 기법을 통해 고유 위상 θ 를 복원할 수 있다.

이 방법은 회로 깊이를 줄이는 대신 샘플 수 k 를 늘려 정밀도를 보상하는 구조를 가지고 있어, 제한된 논리 큐비트와 낮은 코드 거리로 구성된 Early-FTQC 장치에서도 실행이 가능하다^[32]. 특히, 물리 오류율이 임계값 이하일 경우 반복 횟수를 증가시켜 원하는 정확도에 수렴할 수 있음이 이론적으로 보장된다는 점에서, Early-FTQC 장치의 계산 능력을 ‘짧은 회로 + 반복 샘플’의 전략으로 확장할 수 있다는 장점을 가진다. 최근 연구에서는 RFE가 제한된 논리 큐비트 환경에서 화학적 에너지 준위 추



〈그림 10〉 확장성 (scalability)에 따라 NISQ, EFTQC, FTQC 영역을 대략적으로 구분한 그림^[32]

정이나 스펙트럼 계산과 같은 정밀 위상 추정 문제에 적용 가능함을 실험적 및 이론적으로 제시하였다^[32].

〈그림 10〉에서 보듯이, NISQ에서 Early-FTQC (EFTQC) 로의 전환 오류 내성 비 클리포드 연산을 구현할 수 있을만큼 충분한 큐비트를 확보하는 것으로 특징지어지며, EFTQC에서 FTQC로의 전환은 매우 큰 문제 인스턴스 (예를 들어, 10^4 개의 논리적 큐비트를 10^9 개의 물리적 큐비트로 인코딩)를 수용할 수 있는 능력으로 특징지어진다.

요약하자면, RFE 알고리즘은 잡음이 누적될 수 있는 깊은 회로를 피하고 얇은 회로를 무작위 반복 실행한 후, 이산 푸리에 변환으로 위상을 복원하는 방법으로 정의할 수 있으며, Early-FTQC 시대에 가장 적합한 위상 추정 알고리즘 중 하나로 자리잡고 있다.

2. 부분 오류정정 (Partial-QEC)

양자 게이트는 크게 클리포드 게이트(Clifford gate)와 비 클리포드 게이트(non-Clifford gate)로 구분된다

Operator	Gate(s)	Matrix
Pauli-X (X)	 $\oplus$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$
Pauli-Y (Y)		$\begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix}$
Pauli-Z (Z)		$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$
Hadamard (H)		$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$
Phase (S, P)		$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix}$
$\pi/8$ (T)		$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\pi/4} \end{bmatrix}$
Controlled Not (CNOT, CX)		$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$
Controlled Z (CZ)		$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$
SWAP		$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
Toffoli (CCNOT, CCX, TOFF)		$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

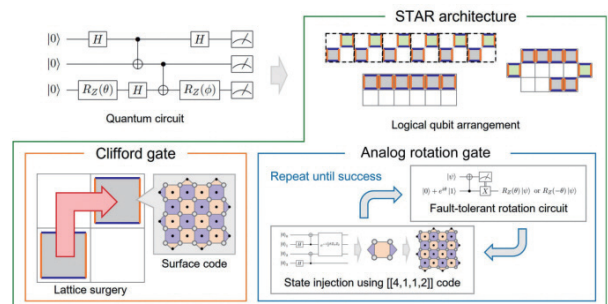
〈그림 11〉 연산자 이름, 회로 형태 및 유니타리 행렬별 대표적 양자 논리 게이트

(대표적 양자 게이트 회로 형태 및 유니타리 행렬은 〈그림 11〉 참고).

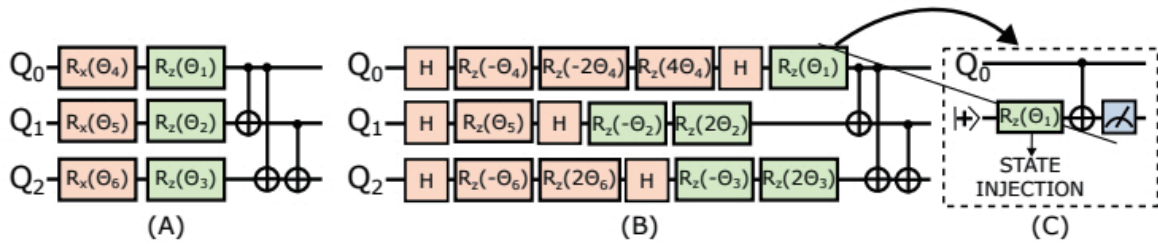
클리포드 게이트(Hadamard, CNOT, Phase 게이트 등)는 안정자 형식(stabilizer formalism) 내에서 닫혀있어, 오류가 발생하더라도 해당 오류가 파울리 연산으로 단순히 추적 가능하므로 오류 전파 분석과 오류정정이 비교적 용이하다^[33]. 반면 비 클리포드 게이트(T 게이트, Toffoli 게이트 등)는 안정자 형식 밖에 위치하기 때문에, 오류가 전파되면 파울리 연산으로 단순히 기술할 수 없다. 비 클리포드 게이트는 클리포드 게이트만으로는 달성할 수 없는 ‘보편적 양자 계산(universal quantum computation)’을 가능하게 해주는 핵심 연산이지만, 안정적으로 구현하기 위해서는 T-state 정제(distillation)와 같은 자원 집약적인 절차가 필요하므로 오류정정 비용이 크게 증가한다^[34].

이러한 차이로 인해 완전한 오류정정보다는, 클리포드 연산만을 보호하고 비 클리포드 연산은 다른 방식으로 처리하는 부분 오류정정 기법이 2023년에 제안되었다^[31]. 이 방법에서는 클리포드 게이트는 표면코드 기반의 안정적인 오류정정을 통해 보호하고, 오류정정 비용이 큰 비 클리포드 게이트는 오류정정 없이 보조 기법들^[34]을 통해 처리한다.

대표적인 보조 기법들은 다음과 같다. 보조 상태 주입(state injection)은 외부에서 준비된 특수한 비 클리포드 상태 (예를 들면, T-state)를 회로에 삽입하여 원하는 연산을 간접적으로 구현하는 방법이다. 후선택(post-selection)은 특정 측정 결과가 얻어졌을 때만 연산을 유효하게 받아들이는 방식으로, 실패 확률을 폐기로 보상하는



〈그림 12〉 부분 오류정정 기법의 대표적인 예로 제안된 STAR 구조^[31]



〈그림 13〉 (A) 전형적인 VQA 회로 (B) 실행 시 유효 회로 (보조 큐비트는 이해를 돕기 위해 생략됨)
(C) 회전 게이트 $R_z(\theta_1)$ 를 구현하기 위한 회로. $|+\rangle$ 상태로 초기화된 보조 큐비트에 마법 상태 (magic state)가 주입되며, 이후 데이터 큐비트가 이를 소모하려 논리적 회전 게이트를 구현.^[36]

기법이다. 마지막으로 RUS(Repeat - Until - Success) 회로^[35]는 원하는 게이트가 확률적으로 성공할 때까지 회로를 반복 실행하여, 성공 시점에 해당 연산을 효과적으로 얻는 방법이다. 이와 같은 기법들은 완전한 오류정정 보다는 자원 소모가 적으면서도 보편적 계산에 필요한 비클리포드 게이트를 구현할 수 있게 해준다.

대표적인 예로 제안된 STAR (Surface - code with Teleportation and Analog Rotations) 아키텍처는 〈그림 12〉에서 볼 수 있듯이, 클리포드 연산은 격자 수술 (lattice surgery) 기반의 논리 게이트로 오류정정 하에 수행하면서, 비 클리포드 회전 게이트는 정제없이 아날로그 방식으로 주입하는 구조를 갖는다. 참고 문헌에 따르면, 물리 큐비트 10^4 , 오류율 $p = 10^{-4}$ 수준에서 약 64개의 논리 큐비트를 확보할 수 있으며, 수천만 개 규모의 클리포드 게이트와 수만 개 규모의 아날로그 회전을 신뢰성 있게 실행할 수 있음이 보고되었다^[31].

최근 연구에서는 이러한 부분 오류정정 전략을 변분 양자 알고리즘에 적용하는 EFT-VQA(Early - FT VQA) 프레임워크가 새롭게 제안되었다^[36] (〈그림 13〉 참고). 실험 결과, EFT-VQA는 표준적인 완전 오류정정 방식 대비 최대 9배 이상의 출력 충실도(output fidelity) 향상과 약 두 배 가까운 대기 시간(latency) 단축을 달성할 수 있음을 보였다. 이는 Early-FTQC 시대의 제한된 자원 하에서 실질적으로 의미 있는 계산 성능을 구현할 수 있음을 의미한다.

종합적으로 볼 때, 부분 오류정정 알고리즘은 Early-FTQC 시대에서 모든 연산을 동일하게 보호하는 완전 오류정정에서 벗어나, 계산 자원의 효율성을 극대화하기 위

해 선택적으로 오류정정을 적용하는 실용적 전략으로 자리매김하고 있다. 이는 Early-FTQC 시대가 단순한 과도기적 단계가 아니라, 자체적으로 새로운 알고리즘적 패러다임을 형성할 수 있음을 시사한다.

IV. FTQC 시대

FTQC 시대는 완전한 오류정정을 전제로 한 계산 환경에서 보편적 양자 컴퓨터가 동작하는 단계로, 아직 실험적으로는 도달하지 못했지만 이론적 양자 알고리즘 연구는 여전히 활발하게 진행되고 있다. 특히, FTQC 알고리즘 연구는 단순히 계산 복잡도 측면에서의 양자 우위를 논하는 것을 넘어서, 오류정정으로 인한 자원 소모를 고려하여 실제로 구현 가능한 알고리즘을 설계하는 데 초점이 맞추어져 있다. 다시 말해, FTQC 시대의 양자 알고리즘 연구는 이론적 효율성과 구현을 위한 실용적 자원 최적화를 동시에 지향한다. 본 장에서는 FTQC 알고리즘 연구의 주요 흐름을 네 가지 측면에서 살펴본다. 먼저 해밀토니안 시뮬레이션과 양자 선행 시스템 해법을 통해 과학·공학적 문제 해결을 위한 기초 알고리즘을 다루고, 이어서 양자 머신러닝과 수학 및 암호학적 문제에서의 확장을 살펴본다. 마지막으로 이러한 연구가 오류정정 기술 발전과 어떻게 결합되는지에 대해 논의한다.

1. 해밀토니안 시뮬레이션

해밀토니안 시뮬레이션은 양자 컴퓨터의 가장 대표적인 응용 중 하나로, 물리·화학·재료과학 등에서 양자 시스템의 동역학을 모사하는 문제를 포함한다. 해밀토니

안 시뮬레이션의 목표는 초기 상태 $|\psi(0)\rangle$ 가 주어진 해밀토니안 H 에 따라 시간 t 만큼 진화한 최종 상태

$$|\psi(t)\rangle = e^{-iHt} |\psi(0)\rangle$$

를 효율적으로 계산하는 것이다.

초기 연구는 Trotter-Suzuki 분해를 활용하여 해밀토니안의 시간 진화를 근사했으나, 이 방법은 높은 정확도를 위해서 게이트 수가 급격히 증가한다는 단점이 있었다. 최근에는 해밀토니안을 블록 인코딩(block-encoding) 하여 보다 구조적인 방식으로 접근하는 Qubitization^[37] 방법 및 다항식 근사를 통해 특정 유니타리 연산을 최적화된 방식으로 구현하는 양자 신호 처리(Quantum Signal Processing, QSP) 기법^[38]이 도입되면서, FTQC 환경에서 자원 효율적으로 시뮬레이션을 수행할 수 있는 가능성이 열렸다. 이러한 알고리즘들은 특히 T 게이트 복잡도를 최적화하여, 오류정정이 적용된 논리적 큐비트 환경에서 실행 비용을 크게 줄일 수 있다.

2. 양자 특이값 변환 (QSVT)

해로우(Harrow), 하시딤(Hassidim), 로이드(Lloyd)가 제안한 HHL 알고리즘^[39]은 양자 컴퓨터를 이용하여 선형 연립 방정식 $A\mathbf{x} = \mathbf{b}$ 를 푸는 알고리즘으로, 고전적 방법보다 지수적인 속도 향상이 있음을 보인 주요 기본 양자 알고리즘 중 하나이다. 그러나 HHL 알고리즘은 조건수(condition number) 의존성과 상태 준비 비용 등으로 인해 실제 응용에는 한계가 있었다. FTQC 시대의 최근 연구는 블록 인코딩 및 양자 특이값 변환(Quantum Singular Value Transformation, QSVT)^[40]을 도입하여 이러한 한계를 극복하고 있다. 이 방법은 주어진 행렬 A 의 특이값(singular values)에 대해 원하는 다항식 $p(\cdot)$ 을 적용하는 것을 가능하게 하는 기법으로, 먼저 A 를 유니타리 연산자 U 의 일부 블록으로 포함시키는 블록 인코딩을 다음과 같이 구성한다.

$$U = \begin{bmatrix} A/\alpha & \cdot \\ \cdot & \cdot \end{bmatrix}$$

여기서, α 는 정규화 상수(normalizing constant)이다. QSVT는 이러한 블록 코딩을 기반으로, 위상 편이 연산자(phase factors)와 클리포드 계열 회로를 반복 적

용함으로써 A 의 특이값 분해 $A = \sum_i \sigma_i |u_i\rangle\langle v_i|$ 에서 $\sigma_i \mapsto p(\sigma_i)$ 로 변환할 수 있다. 즉, QSVT는 양자 회로가 A 의 특이값에 다항식 변환을 가하도록 설계할 수 있는 범용적 프레임워크이다. 이 접근은 기존의 Trotter-Suzuki 분해 기반 시뮬레이션이나 HHL 알고리즘보다 자원 효율성이 높다. 예를 들어, 행렬 역연산 문제에서 $p(\sigma) \approx 1/\sigma$ 를 근사하는 다항식을 구성하면, HHL 알고리즘에서 요구했던 복잡한 조건수 및 정밀도 의존성을 줄이고 보다 안정적이고 일반화된 양자 선형시스템 알고리즘을 구현할 수 있다^[41].

QSVT의 장점은 단순한 선형시스템 문제를 넘어 다양한 분야로 확장된다는 점이다. 해밀토니안 시뮬레이션, 다항식 필터링, 그리고 양자 머신러닝 알고리즘의 커널·특징 변환까지 QSVT가 핵심 연산 도구로 활용되고 있다. 다만 실제 구현에서는 QSVT 다항식의 위상 변수 설계가 수치적으로 불안정해 질 수 있다는 문제가 지적되었으며, 이를 보완하기 위해 Recursive QSVT와 같은 안정화 기법이 2024년 이후 제안되었다^[42].

아울러 QSVT 기반 양자 선형시스템 해법 연구는 단순 복잡도 분석을 넘어 자원 추정과 오류정정과 결함의 핵심 과제로 부상하고 있다. 예를 들어, T 게이트 비용 최적화, 클리포드 게이트 활용 극대화, 전처리(preconditioning) 기법과 혼합정밀도(mixed-precision) 접근의 도입은 QEC 오버헤드를 줄이면서도 실질적 구현 가능성을 높이는데 기여하고 있다^[43].

3. 수학 및 암호학적 문제

양자 알고리즘 연구에서 수학 및 암호학적 문제는 FTQC 시대의 잠재력을 가장 직접적으로 보여주는 분야 중 하나이다. 소인수분해 문제와 이산 로그 문제를 다항 시간 내 해결할 수 있는 쇼어의 알고리즘은 그 대표적인 예로, 현재 널리 사용되는 RSA와 ECC 기반 암호 체계를 근본적으로 위협한다. 최근 연구에서는 양자 공격에도 안전한 양자 내성 암호(Post-Quantum Crypto, PQC) 체계와 양자 알고리즘 연구가 동시에 진행되고 있다. 예를 들어, 격자 기반 암호는 현재 미국 NIST 표준화 과정에서 가장 유력한 후보군으로 평가되지만, 이에 대해서도

양자 알고리즘적 접근이 일부 시도되고 있다^[44]. 특히, 오류를 통한 학습(Learning With Errors, LWE)^[45]에 대한 양자 알고리즘의 효율성은 아직 고전적 방법에 비해 확실한 양자 우위를 보이지는 못했지만, 부분적으로 양자 선형 시스템 해법이나 QSVT 기반 접근이 활용될 가능성이 탐구되기도 했다^[41].

이처럼 수학 및 암호학적 문제 영역에서의 양자 알고리즘 연구는 단순히 계산 복잡도의 관점뿐 아니라, 정보 보안 패러다임 전체를 재편하는 방향으로 이어지고 있다. FTQC 시대의 발전은 기존 암호 인프라의 붕괴 가능성을 의미하는 동시에, 양자 내성을 갖춘 새로운 보안 체계의 등장을 촉진하는 양날의 검이 될 것이다.

V. 전망과 결론

향후 양자 알고리즘 연구는 하드웨어 발전과 밀접하게 얽혀 진화할 것으로 보인다. 단기적으로는 NISQ 및 Early-FTQC 시대를 겨냥한 양자-고전 하이브리드 알고리즘이 계속해서 주목받으며, 고전적 전처리, 저잡음 회로 설계, 부분 오류정정 기법 등이 실험적 구현의 가교 역할을 수행할 것이다. 중기적으로는 RFE와 같은 부분적 오류정정 시스템에서의 랜덤화 알고리즘과 안정적 위상 추정법이 확장되며, 점진적으로 FTQC 체계에 가까워지는 응용 사례가 늘어날 것으로 기대된다. 장기적으로는 완전한 오류정정 기반 FTQC 환경에서 QSVT, Qubitization, 해밀토니안 시뮬레이션 기법이 고도화되어, 양자 화학, 재료 과학, 금융, 수학 및 암호학 문제에 있어 고전적 컴퓨터 계산 대비 양자 우위를 실현할 가능성이 높다.

특히, 양자 오류정정의 발전은 양자 알고리즘의 실질적 성능을 결정짓는 핵심 요소로 여겨진다. 클리포드 및 비 클리포드 게이트의 차이에 따른 오류정정 비용, T 게이트 최적화, 보조 상태 주입 기법의 고도화 등은 FTQC 시대 알고리즘의 구현 가능성을 좌우할 것이다. 또한, 암호학적으로 쇼어와 그로버 알고리즘이 제시한 위협 이후, 격자 기반 문제와 같은 양자 내성 암호 체계가 안정적으로 자리 잡을 것으로 보인다. 결국, 양자 알고리즘 연구는

계산 복잡도 이론과 실험적 하드웨어 발전 간의 상호작용 속에서 점진적으로 실질적 우위를 확보해 나갈 것으로 기대한다.

본 원고는 양자 컴퓨팅 알고리즘 연구 개발 동향을 NISQ, Early-FTQC, FTQC 세 시대로 구분하여 고찰하였다. NISQ 시대에는 VQE, QAOA와 같은 변분적 접근이 소규모 실험에서 검증되었으나, 최적화 난제와 잡음 환경의 제약으로 확장성이 제한적임이 확인되기도 했다. Early-FTQC 시대에는 부분 오류정정 및 랜덤화 기법을 바탕으로 QPE와 같은 기본 양자 알고리즘의 점진적 구현 가능성이 논의되었으며, FTQC 시대에는 QSVT, Qubitization을 활용한 최적화된 알고리즘이 다양한 응용 분야에 활용될 가능성을 살펴보았다. 이러한 분석을 통해 양자 알고리즘 연구는 단순히 계산 속도 향상을 넘어, 계산 패러다임과 보안 체계의 변화를 이끌 잠재력을 지니고 있음을 시사한다.

향후 양자 컴퓨팅 알고리즘 연구는 오류정정 자원의 절감, 양자-고전 하이브리드 알고리즘의 실험적 확증, 응용 특화형 알고리즘 개발의 세 축을 중심으로 발전할 것이며, FTQC 실현에 이르는 긴 여정 속에서 하드웨어 발전과 수학적 이론의 상호 보완적 진보에 의해 가속될 것으로 기대한다.

참고 문헌

- [1] Shor, P. W. Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring. FOCS (1994)
- [2] Grover, L. K. A fast quantum mechanical algorithm for database search. STOC (1996)
- [3] Kitaev, A.Yu. Quantum measurements and the Abelian Stabilizer Problem. arXiv:quant-ph/9511026 (1995)
- [4] Preskill, J. Quantum Computing in the NISQ era and beyond. Quantum 2, 79 (2018)
- [5] Peruzzo, A. et al. A variational eigenvalue solver on a photonic quantum processor. Nature Communications 5, 4213 (2014)
- [6] Farhi, E. et al. Quantum Approximate Optimization Algorithm. arXiv:1411.4028 (2014)
- [7] Havlíček, V. et al. Supervised learning with quantum-

- enhanced feature spaces, *Nature* 567, 209–212 (2019)
- [8] Schuld, M., Killoran, N. Quantum Machine Learning in Feature Hilbert Spaces, *Phys. Rev. Lett.* 122, 040504 (2019)
- [9] https://orangeqs.com/news/quantum_industry_roadmaps_2024/ (2024)
- [10] Acharya, R. et al. (Google) Suppressing quantum errors by scaling a surface code logical qubit, *Nature* (2022)
- [11] Google Quantum AI, Quantum error correction below the surface code threshold, *Nature* 610, 43–50 (2024)
- [12] J. Tilly et al. The Variational Quantum Eigensolver: A review of methods and best practices, *Physics Reports* 986 1–128 (2022)
- [13] Kandala, A. et al. Hardware-efficient variational quantum eigensolver for small molecules and quantum magnets. *Nature*, 549, 242–246 (2017)
- [14] Hempel, C. et al., Quantum chemistry calculations on a trapped-ion quantum simulator, *Physical Review X*, 8, 031022 (2018)
- [15] Grimsley, H. R. et al. An adaptive variational algorithm for exact molecular simulations on a quantum computer, *Nature Communications*, 10, 3007 (2019)
- [16] Stokes, J. et al. Quantum natural gradient, *Quantum*, 4, 269 (2020)
- [17] Motta, M. et al. Determining eigenstates and thermal states on a quantum computer using quantum imaginary time evolution, *Nature Physics*, 16(2), 205–210 (2020)
- [18] Kandala, A. et al. Error mitigation extends the computational reach of a noisy quantum processor. *Nature*, 567, 491–495 (2019)
- [19] Cao, Y. et al. Quantum chemistry in the age of quantum computing. *Chemical Reviews*, 119(19), 10856–10915 (2019)
- [20] Zhou, L. et al. Quantum approximate optimization algorithm: Performance, mechanism, and implementation on near-term devices, *Physical Review X*, 10(2), 021067 (2020)
- [21] Egger, D. J. et al. Warm-starting quantum optimization, *Quantum*, 5, 479 (2021)
- [22] Bravyi, S. et al. Obstacles to Variational Quantum Optimization from Symmetry Protection, *Phys. Rev. Lett.* 125, 260505 (2020)
- [23] Bae, E., Lee, S. Recursive QAOA outperforms the original QAOA for the MAX-CUT problem on complete graphs. *Quantum Inf Process* 23, 78 (2024)
- [24] Vijendran, V. et al. Near-Optimal Parameter tuning of Level-1 QAOA of Ising Models, *arXiv:2501.16419* (2025)
- [25] Bae, E. et al. Modified Recursive QAOA for Exact Max-Cut Solutions on Bipartite Graphs: Closing the Gap Beyond QAOA Limit, *arXiv:2408.13207* (2024)
- [26] Harrigan, M. P. et al. Quantum approximate optimization of non-planar graph problems on a planar superconducting processor, *Nature Physics*, 17, 332–336 (2021)
- [27] Wurtz, J. et al. Error mitigation for variational quantum algorithms through mid-circuit measurements, *Physical Review A*, 103(4), 042612 (2021)
- [28] Blekos, K. et al. A review on Quantum Approximate Optimization Algorithm and its variants, *Phys. Rep.* 1068 (2024)
- [29] Katabarwa, A. et al. Early Fault-Tolerant Quantum Computing, *PRX Quantum*, 5 020101 (2023)
- [30] Kshirsagar, R. et al. On proving the robustness of algorithms for early fault-tolerant quantum computers, *arXiv:2207.08826*, (2022)
- [31] Akahoshi, Y., et al. Partially Fault-Tolerant Quantum Computing Architecture: STAR – Surface-Code with Teleportation and Analog Rotations, *PRX Quantum*, 4(4), 040329 (2023)
- [32] Hadad, Y., et al. Modeling the Performance of Early Fault-Tolerant Quantum Algorithms, *arXiv:2305.03764* (2023)
- [33] Gottesman, D. Stabilizer codes and quantum error correction, *arXiv:quant-ph/9705052* (1997)
- [34] Bravyi, S., Kitaev, A. Universal quantum computation with ideal Clifford gates and noisy ancillas, *Phys. Rev. A*, 71(2), 022316 (2005)
- [35] Paetznick, A., Svore, K. M., Repeat-Until-Success: Non-



deterministic decomposition of single-qubit unitaries. Quantum Information & Computation, 14(15-16), 1277-1301 (2014)

- [36] Dangwal, S., et al. Variational Quantum Algorithms in the Era of Early Fault Tolerance. Proceedings of ISCA 2025 (in press)
- [37] Low, G. H. et al. Hamiltonian Simulation by Qubitization, Quantum 3, 163 (2019).
- [38] Childs, A. M. et al. Toward the first quantum simulation with quantum speedup. PNAS, 115(38), 9456-9461 (2018)
- [39] Harrow, A. W. et al. Quantum algorithm for solving linear systems of equations. Phys. Rev. Lett. 103 150502 (2009)
- [40] Gilyen, A. et al. Quantum singular value transformation and beyond: exponential improvements for quantum matrix arithmetics. STOC 193-204 (2019)
- [41] Childs, A. M. et al. Quantum algorithm for systems of linear equations with exponentially improved dependence on precision. SIAM J. Comput., 46(6), 1920-1950 (2017)
- [42] Mizuta, K., Fujii, K. Recursive Quantum Eigenvalue/Singular-Value Transformation: Analytic Construction of Matrix Sign Function by Newton Iteration. arXiv:2304.13330 (2023)
- [43] Koska, O. et al. A mixed-precision quantum-classical algorithm for solving linear systems. arXiv:2502.02212 (2025)
- [44] Biassé, J. F. et al. Quantum algorithms for attacking hardness assumptions in classical and post-quantum cryptography. IET Inf. Secur. 17(2) 171-209 (2023)
- [45] Regev, O. On lattices, learning with errors, random linear codes, and cryptography. Journal of the ACM, 56(6):1-40 (2009)



배은옥

- 2009년 2월 경희대학교 이과대학 수학과 학사
- 2013년 7월 ~ 2014년 8월 캘거리대학 방문 연구원
- 2019년 9월 ~ 2020년 2월 Texas A&M 방문 연구원
- 2021년 8월 경희대학교 이과대학 수학과 박사
- 2021년 9월 ~ 2023년 2월 한양대학교 박사후 연구원
- 2023년 3월 ~ 2024년 12월 고등과학원 연구원
- 2025년 1월 ~ 현재 한국전자통신연구원 선임연구원

〈관심 분야〉

Quantum algorithms, Quantum optimization, Combinatorial optimization problems, QAOA, MaxCut

양자암호와 양자통신을 잇는 응용 프로토콜 연구 동향



손 일 권
한국과학기술정보연구원



송 우 영
한국과학기술정보연구원



배 광 일
한국과학기술정보연구원



이 원 혁
한국과학기술정보연구원

I. 서론

인터넷의 발전은 일상생활의 거의 모든 기기를 통신망에 연결하였고, 이는 곧 접근 가능한 정보의 폭발적인 증가로 이어졌다. 이러한 초연결 환경에서 정보의 유출, 변조, 삭제와 같은 비인가된 접근을 막는 정보 보호 기술의 중요성은 더욱 커졌다. 특히, 국가의 주요 기반 시설과 연결된 공공 통신망에서는 잠재적 정보 유출이 국가 차원의 심각한 피해를 야기할 수 있기에, 한층 더 엄격한 수준의 보안이 요구된다.

이러한 위협에 대응하여 인터넷 프로토콜의 취약점을 보완하는 다양한 보안 기술들이 개발되었으나, 양자 알고리즘과 양자 컴퓨터의 등장은 기존의 계산 복잡도 근간의 암호 체계를 흔드는 새로운 위협이 되었다. 양자 컴퓨터는 쇼어 알고리즘^[1]을 통해 RSA, 타원곡선 암호 등 현재 공개키 기반 암호 시스템의 핵심 프로토콜들을 다항시간 내에 해독할 수 있을 것으로 예측된다. 이러한 양자컴퓨터의 위협에 대응하기 위한 기술로, 양자역학 원리를 이용해 정보이론적 보안성을 제공하는 양자 키 분배(Quantum Key Distribution, QKD) 프로토콜이 개발되었다^[2]. 여기서 더 나아가 양자 상태 자체를 전송하는 양자통신 또한 다양한 목적을 가지고 연구되고 있다.

따라서 최근 연구는 초기 QKD의 한계를 넘어, 보다 실용적이고 확장된 개념의 응용 프로토콜로 발전하고 있다. 본 고에서는 이처럼 양자 암호 기술을 실제 통신 환경에 적용하고 그 기능을 확장하는 최신 응용 프로토콜들의 연구 동향을 분석하고자 한다. 첫번째로 QKD 기술을 응용하여 권한 있는 학습자만이 유의미한 결과를 얻을 수 있도록 양자 라벨 인코딩을 활용한 보안 학습 프로토콜을^[3], 두번째로 디바이스-독립적 신뢰성을 확보하기 위한 고차원 벨 부등식 일반화 및 검증 기법을^[4], 마지막으로 QKD를 넘어서 실제 양자 상태를 안전하게 전송하기 위한

정정할 수 없는 오류 주입 기반의 보안 양자 상태 전송 기술을^[5] 차례로 정리한다. 이를 통해 양자암호와 양자통신을 통합하는 실용적 응용 프로토콜 동향과 전망을 제시하고자 한다.

II. 양자통신의 특성을 활용한 기계학습에서의 학습 보안성

본 장에서는 양자통신에서 보안성을 제공하는 양자적 특성을 기계학습에 응용해, 기계학습에서 학습 데이터의 유출 및 변조를 감지함으로 학습의 보안성을 보장하는 방법에 대해 다룰 것이다.

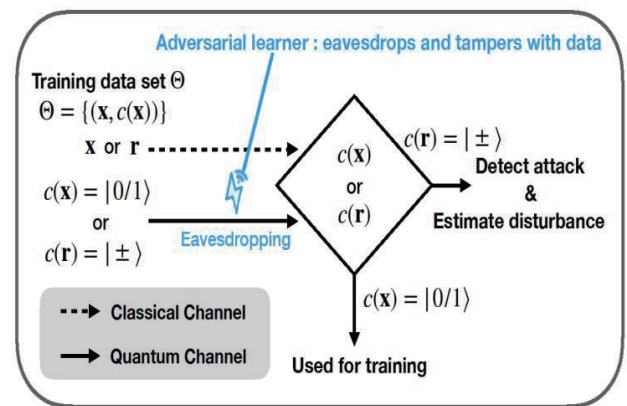
오늘날 기계학습은 단순히 연구실에서의 실증 수준을 넘어 우리의 실생활 속으로 급격하게 스며들어오고, 특히 그 활용 범위가 자율 주행과 의료 진단, 금융 분야와 같은 보안 취약성이 치명적인 결과를 초래할 수 있는 영역으로도 확장되고 있다. 기계학습에 대한 공격은 다양한 방식으로 수행될 수 있는데, 학습 데이터를 변조함으로 결정 경계(decision boundary)를 원하는 방향으로 변화시키려는 poisoning attack, 결정 경계를 변화시키지 않으면서 잘못된 결정을 내리도록 하는 evasion attack 등이 흔히 다루어지며, 학습이나 검증을 위해 전달되는 데이터를 탈취하는 시나리오 또한 존재한다. 기계학습은 원리상 수많은 학습 데이터에서 경향성을 찾아서 학습에 사용되지 않은 일반적인 데이터에 관해서도 결정을 내릴 수 있는 기계를 구축하는 방법이다. 따라서, 기계학습의 성능은 결정의 근간이 되는 학습 데이터의 변조에 민감하고, 이러한 특성이 민감 정보를 다루는 분야의 학습 데이터의 보호에 대한 수요와 더불어 학습에서의 보안을 고려해야 할 주요한 동기가 된다.

이러한 상황은 기계학습에서의 데이터 보안에 대한 수요를 증가시키고 있으며, 보안 기계학습 (Secure machine learning) 또는 적대적 기계학습 (Adversarial machine learning) 이라 불리는 기계학습 연구의 하위 분야를 만들어냈다. 이는 학습을 위한 훈련 데이터, 검증 데이터, 나아가 머신 자체의 하이퍼 파라미터에 대한 공격 및 변조가 존재할 때 학습 성능을 보장하는 방법, 데이

터의 유출을 방지하는 방법 등 다양한 공격 하에 유효한 학습을 수행하는 방법에 대해 다루는 분야이며, 앞서 언급한 민감한 정보를 다루는 영역에서 다양한 활용 가능성이 있다.

이러한, 학습의 보안성을 목적으로 양자 기술을 활용하려는 연구의 다양한 시도들 또한 존재하며, 이를 양자 보안 학습이라 한다. 학습에 활용되는 데이터셋을 양자 정보에 인코딩함으로, 양자통신에서 흔히 활용되는 양자 상태의 특성인 ‘복제 불가능성’과 측정에 의한 상태의 붕괴와 같은 성질을 활용해 학습 데이터의 유출을 감지 및 방지할 수 있을 것이라 기대할 수 있다. 이러한 특성에 기반해 학습 데이터의 유출을 감지하고 방지할 수 있는 다양한 연구가 수행되고 있으며, 양자적 특성을 활용해 학습 데이터에서의 감지가 어려운 작은 변조에는 큰 영향을 받지 않고 학습을 수행하는 방법^[6], 나아가 양자 기계학습 알고리즘을 활용한 보안 학습 알고리즘 등이 연구되고 있다^[7].

최근 KISTI에서 수행된 연구 또한 양자통신의 특성을 응용하여 학습 데이터의 변조나 탈취를 감지하여 외부로 민감한 정보가 빠져나가는 것을 방지하는 방법을 제안했다. 특히, 해당 프로토콜을 활용하면 외부 공격자(adversarial learner)가 학습 데이터를 탈취하더라도, 탈취한 학습 데이터를 기반으로 공격자가 자신의 학습을 수행하려 할 때 양자 정보처리의 기본 원리로부터 학습 성능에 제한이 존재함을 증명하고 시뮬레이션을 통해 검증



〈그림 1〉 학습 데이터를 탈취 및 변조하는 외부 공격자 (Adversarial learner) 가 존재하는 상황 하에 수행되는 보안 학습 프로토콜의 모식도.

하였다^[3]. 이는 양자 정보처리의 특성 중, 양자 상태를 통해 전달되는 고전 정보가 다수의 인원에게 완벽하게 전달될 수 없음을 내포하고 있는 Holevo bound에 의한 성질로서, 적법 학습자(legitimate learner)는 공격자의 존재를 감지하는 데에 활용할 수 있으며, 감지가 어려울 정도로 작은 영향을 가하는 공격이나 데이터의 탈취로는 학습에 충분한 성능을 가져올 수 있는 유의미한 학습 데이터를 탈취할 수 없다.

〈그림 1〉의 모식도에 기반해 작동 방식에 대해 구체적으로 설명한다. 적법 학습자는 자신의 학습 데이터셋의 라벨 $c(x)$ 을 계산 기저의 양자 상태로 인코딩하고, 공격을 감지하기 위한 $(r, c(r))$ 을 학습을 위한 $(x, c(x))$ 과 함께 무작위로 섞어서 보낸다. 외부 공격자는 x 가 전송되는 고전 채널만을 도청함으로써 이에 대응되는 라벨 $c(x)$ 에 대한 정보를 얻을 수 없어, 학습을 수행할 수 없다. 이때, x 와 함께 학습에 필요한 라벨에 대한 정보는 양자 상태에 저장되어 전송되고, 외부 공격자는 탈취한 상태가 $|0/1\rangle$ 와 $|\pm\rangle$ 기저 중 어떤 기저에 있는 상태인지 구별할 수 없기에 유의미한 정보를 얻을 수 없고, 이와 더불어 도청 후에 감지됨을 방지하기 위해 임의의 상태를 준비해서 전송함으로써 이후 검증 과정에서 감지당하게 된다. 또한, 검증 과정의 반복을 통해 공격의 정도를 파악할 수 있고, 이에 기반해 프로토콜의 중지 여부를 결정할 수 있다. 이러한 성질은 양자통신에서의 양자 키 분배 프로토콜의 기본 작동 방식을 응용한 것으로, 두 기저 집합 $|0/1\rangle$ 와 $|\pm\rangle$ 이 구별 불가능하다는 특성과 임의의 양자 상태를 복제할 수 없다는 복제 불가 정리(No-Cloning Theorem)를 활용한다. 또한, 학습 데이터 전체를 양자 정보에 인코딩하기 보다는 라벨에 대한 작은 크기의 정보만을 양자 상태로 다루는데, 이는 대규모 양자 상태에 학습 데이터 전체를 인코딩하는 양자 기계학습의 일반적인 접근법과 구별된다. 이러한 방법은 대규모 학습 데이터를 양자 상태에 인코딩 하는데에 대한 어려움을 피하고, 소규모 양자 시스템만을 활용함으로써 이미 다양한 분야에서 널리 활용되며 고도로 발전된 고전 컴퓨팅 기반의 기계학습에 보다 쉽게 적용하기 위함으로, 구현 가능성의 측면에서 큰 이점을 가진다.

나아가, 해당 프로토콜을 실제 고전 기계학습 기반의 이진 분류(binary classification) 예제에 적용함으로써 앞선 양자 통신 기법의 응용 사례의 구현 가능성을 보인다. 적법 학습자와 적대 학습자 간의, 양자 상태에 인코딩된 데이터의 특성으로부터 기인하는 학습 데이터의 품질 차이 즉, 노이즈의 정도에 따른 학습 결과의 성능 차이를 확인하고, 적법 학습자는 특정 값 미만의 학습 데이터의 노이즈를 가질 때만 학습을 수행하면 적대 학습자가 충분히 높은 정확도의 학습에 성공하는 것을 방지할 수 있음을 확인했다.

이와 같이 양자 정보처리에서의 ‘복제 불가능성’과 측정 행위가 양자 상태를 붕괴시키는 등의 다루기 까다로운 성질은 양자 컴퓨팅과 같은 분야에서는 많은 어려움을 유발하지만, 보안 통신의 측면에서는 유용하게 활용될 수 있다. 양자 키 분배를 응용한 보안 학습 뿐 아니라 양자통신 분야에는 다양한 측면으로 활용될 수 있는 많은 기법들이 남아있고, 양자 얽힘 상태를 활용해 보안성을 확보하는 방법 또한 연구 중에 있다.

앞선 연구가 활용될 수 있는 예시로는 의료 영상, 환자 진단 기록 등 고도로 민감한 의료 데이터를 다루는 상황이 고려될 수 있는데, 학습 데이터의 유출로 인한 환자의 프라이버시 침해나 악의적 데이터 변조로 인한 의료적 판단의 오류를 방지할 수 있을 것이다. 이처럼 양자통신의 보안성을 학습 시스템에 적용하는 접근은 단순히 기술적 아이디어를 넘어 실생활의 응용에 직접 연결될 수 있는 실용적 가치를 지닌다. 앞으로 보안성이 중요한 산업과 공공 영역을 중심으로 고전 뿐 아니라 양자 보안 학습 기법의 수요와 활용 가능성은 점점 증대될 것으로 기대된다.

III. 양자암호에서 유용한 상태, 측정 자원 활용을 위한 벨 부등식 연구

얽힘 분배 기술이 발전해감에 따라, 분배된 얽힘을 활용하여 구현할 수 있는 얽힘 기반 양자통신, 양자암호 프로토콜에 대한 연구도 지속적으로 이루어지고 있다. 그중 벨 부등식 위배를 활용하는 기기-독립적(device

independent, DI) 양자암호 프로토콜은 얽힘 분배 기술의 중요한 응용 분야 중 하나이다. DI 양자암호 프로토콜에서는 기기의 내부 작동에 그 프로토콜의 안전성이 의존하지 않는다. 따라서 기기의 구체적 구현 상 허점에 기반한 부채널 공격에서 자유롭다. 부-채널 공격은 기존의 BB84 (Bennett-Brassard 84) 프로토콜과^[2] 같은 DI 특성을 갖지 않는 양자암호 프로토콜의 중요한 안전상의 허점으로 여겨져 왔으므로, 이를 극복하기 위하여 기기 독립적 특성을 구현하는 이론적 방법을 제안하고 이를 실증하는 연구가 2010년대 이후 활발히 이루어지고 있다.

위와 같은 DI 프로토콜은 대부분의 경우 성공적인 얽힘 분배 외에, 분배된 얽힘과 벨 부등식을 활용한 양자 비국소성 판별을 필요로 한다. 벨 부등식을 통한 양자 비국소성 판별을 기반으로 양자통신/양자암호 프로토콜을 제안할 때 보통 부등식을 최대로 위배하는 물리계를 활용한다. 이에 해당 프로토콜에서 활용하고자 하는 상태, 측정 자원에 의하여 최대 위배(maximal violation)가 주어지는 벨 부등식을 유도하고 그 위배 특성을 분석하는 것이 중요하다.

벨 부등식을 유용한 상태, 측정 자원에 대하여 유도하는 연구 흐름은 최초의 벨 부등식이 J. S. Bell에 의해 제안된 이후 지속적으로 이어져 왔다. 관련하여 2체 최대 양자 얽힘을 위한 벨 부등식이 다양한 측정 시나리오와 상태 차원을 고려하여 유도된 바 있다. 또한 각각 QKD와 QRNG (quantum random number generation)에서 중요한 의미를 갖는 양자 측정자원인 상호비편향기저(mutually unbiased basis, MUB) 측정, 대칭 정보완전 POVM (symmetric informationally complete positive operator valued measure, SIC-POVM)에 대한 벨 부등식이 제안되어오고 있다.

위와 같은 벨 부등식의 대표적인 예로, 우선 Clauser-Horne-Shimony-Holt (CHSH) 부등식은 2체 양자얽힘과 두 집합의 MUB에 의하여 최대 위배가 주어지는 벨 부등식이다. 2017년에는 고차원 최대 얽힘 상태에 의해 최대 위배가 주어지는 형태의 벨 부등식이 제안된 바 있다^[8]. 2019년에는 고차원 최대얽힘과 MUB에 의해 최대 위배가 주어지는 벨 부등식이 제안되었으며^[9], 2021년에

는 고차원 최대 얽힘과 MUB, 고차원 최대 얽힘과 SIC-POVM 각각의 경우에 의해 위배가 주어지는 두 가지 벨 부등식이 유도된 바 있다^[10].

위와 비슷한 종류의 벨 부등식 중 N. Gisin 박사가 유도한 아래의 elegant Bell inequality (EBI)^[11] 특기할 만한 위배 특성을 갖는다.

$$\begin{aligned} &E(1,1) + E(1,2) - E(1,3) - E(1,4) \\ &+ E(2,1) - E(2,2) + E(2,3) - E(2,4) \\ &+ E(3,1) + E(3,2) - E(3,3) - E(3,4) \leq 6 \end{aligned}$$

위에서 $E(i,j)$ 는 Alice가 i 번째 측정의 측정값과 Bob의 j 번째 측정의 측정값을 곱한 값의 기댓값(expectation value)이다. EBI의 국소 숨은 변수 (local hidden-variable, LHV) 이론에 의한 상한값은 위와 같이 6으로 주어진다. 이 고전이론에 의한 기대값은 양자 기대값의 최대치인 $4\sqrt{3}$ 보다 작다.

EBI의 최대 양자 위배는 2체 2차원 최대 얽힘 상태에 Alice가 MUB를 기저로 갖는 측정을 수행하고, Bob이 SIC-POVM 요소를 기저로 갖는 측정을 수행함으로써 유도할 수 있다. 즉, EBI 위배는 MIUB와 SIC-POVM을 같이 활용하는 측정 시나리오로부터 얻을 수 있는 것이다. 또한, Gisin이 EBI 유도에 활용한 Alice와 Bob의 측정은 그가 유도하고 함께 분석한 바와 같이 기하학적으로도 독특한 특성을 갖는다. EBI의 위배를 주는 Alice의 4개 측정과 Bob의 3개 측정 기저를 Bloch sphere 상에 표현해보면, 각각 정팔면체와 정육면체에 해당하게 되는 것을 알 수 있다. 위와 같은 EBI의 고유한 위배 특성을 바탕으로 해당 벨 부등식은 제안 이후 DI 양자 난수성 확인을 포함한 다양한 양자 정보 프로토콜 제안에 활용되었다.

한편, 위와 같이 다양한 양자암호 양자통신 프로토콜에 활용되어온 EBI의 위배 특성을 정보이론적으로 2차원 대비 이점을 줄 것으로 예상되는 고차원으로 일반화하는 노력은 이전까지 찾아보기 어려웠다. 본 장의 다음 부분에서는 양자암호 분야 중요 측정 자원인 MUB, SIC-POVM 정의를 살펴본 후 이를 기반으로 EBI의 위배 특성을 고차원으로 일반화한 최근 결과를 소개한다^[4].

1. MUB와 SIC-POVM

본 절에서는 양자암호 분야 중요 자원인 MUB와 SIC-POVM의 기본적인 정의에 대하여 알아본다. 덧붙여, 고차원 물리계에서 Weyl-Heisenberg (WH) 측정에 위배되는 벨 부등식 유도 연구 결과에 대한 이해를 돕기 위하여, MUB와 SIC-POVM이 고차원에서 WH와 갖는 관계를 간략히 논한다.

1.1 MUB

d 개의 기저상태로 구성된 정규화된 측정 기저 $\{|a_i\rangle\}_{i=1}^d$ 와 $\{|b_j\rangle\}_{j=1}^d$ 의 overlap이 다음 조건을 만족시킬 때, MUB라 한다.

$$|\langle a_i | b_j \rangle|^2 = \frac{1}{d} \quad \forall i, j$$

소수(prime) d 를 가정할 때, 최대 $d+1$ 개의 MUB가 존재한다는 것은 잘 알려진 사실이며, 이때, $d+1$ 개의 MUB를 MUB의 완전 집합(complete set of MUB)이라 한다. 완전 집합은 WH 측정의 고유상태를 활용하여 유도할 수 있다. 이동 연산자(shift operator) X 와 시계 연산자(clock operator) Z 로 정의되는 임의의 WH 측정 $X^p Z^q$ ($0 \leq p, q \leq d-1$)를 가정할 때, $d+1$ 개 WH 측정 $X, Z, XZ, XZ^2, \dots, XZ^{d-1}$ 의 $d+1$ 개 고유상태 집합은 $d+1$ 개 MUB 완전 집합에 각각 대응된다.

1.2 SIC-POVM

d^2 개 정규화된 상태의 집합 $\{|e_i\rangle\}_{i=0}^{d^2-1}$ 이 모든 서로다른 i, j 에 대하여 다음의 조건을 만족시키는 상황을 가정하자.

$$|\langle e_i | e_j \rangle|^2 = \frac{1}{d+1}$$

위 상태 집합을 통하여 정의된 요소 연산자 집합 $\{|e_i\rangle\langle e_i|/d\}$ 는 SIC-POVM을 정의한다. SIC-POVM은 그 측정 통계가 복소 d 차원에서 정의된 임의의 상태를 주기 때문에 그렇게 정보-완전(informationally-complete)적 특성을 갖는다. SIC-POVM은 모든 차원에서 존재하는지는 아직 증명되지는 않았으나, 모든 차원에서 존재할 것이라고 추측되고 있다. 또한, $d=193$ 차원까지 모든 연속적인 차원에서 SIC-POVM이 유도된 결

과가 알려져있다.

SIC-POVM도 MUB와 같이 WH 측정과 중요하게 연관된다. 표기를 간단히 하기 위하여 WH 측정을 하나의 연산자 $W_{(dp+q)} := X^p Z^q$ 로 표기하자. 이때, 단일 벡터 $|f\rangle$ 와 WH group $\{W_j\}_{j=0}^{d^2-1}$ 에 대하여, 상태 집합 $\{W_j|f\rangle\}_{j=0}^{d^2-1}$ 가 SIC-POVM을 정의할 때, SIC-POVM을 WH group covariant 하다고 하며, $|f\rangle$ 를 fiducial vector라 부른다. 다시 말해, fiducial vector가 알려진 특정 차원에서 SIC-POVM은 해당 벡터에 대한 서로다른 WH 측정을 수행하여 SIC-POVM을 유도할 수 있다.

2. 일반화된 EBI 상관관계

서두에 설명한 바와 같이, EBI의 위배 특성을 고차원에서 일반화한 형태의 벨 부등식 유도 결과를 소개한다. 벨 부등식 유도를 위해서는 우선, 고차원에서 일반화된 위배 특성을 정의하여야 한다. 소개하는 연구결과에서는 일반화된 위배 특성을 주는 상관관계를 ‘일반화된 EBI 상관관계(generalized EBI correlation)’라 부르고, 다음과 같은 상태와 측정 (i)-(iii)으로 부터 주어지는 상관관계로 정의한다.

$$(i) |\phi^+\rangle := \frac{1}{\sqrt{d}} \sum_{\alpha=0}^{d-1} |\alpha\alpha\rangle$$

(ii) Alice는 d^2-1 개 측정 W_i ($i \neq 0$)을 수행한다.

(iii) Bob d^2 개 측정은 각 측정마다 하나의 고유벡터를 추출한 상태 집합이 SIC-POVM을 정의하도록 정의된다.

일반화된 EBI 상관관계를 정의하는 위 조건이 어떤 방식으로 EBI를 위배하는 상태와 측정을 일반화하는 지 간단히 살펴보자. EBI가 최대 얽힘 상태, SIC-POVM에 의해 최대 위배된다는 것을 기억할 때, 조건 (i)과 (iii)은 EBI 경우에 대한 자연스러운 일반화이다. 조건 (ii)는 WH 측정을 활용하여, 그 측정들의 상태가 MUB 완전 집합을 정의하는 $d+1$ 개의 측정, $X, Z, XZ, XZ^2, \dots, XZ^{d-1}$ 를 포함하도록 정의되었다. 조건 (ii)는 EBI의 최대 위배를 주는 Alice의 3개 측정 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 를 ‘유니터리 연산자 기저’로 보아 일반화한 결과로도 해석할 수 있다^[4].

3. 일반화된 EBI 상관관계에 의해 양자 상한값이 주어지는 상관관계 함수

일반적으로 특정차원에서 한개 이상의 SIC-POVM이 존재할 수 있다. 예를 들어 $d = 3$ 인 경우 무한히 많은 수의 SIC-POVM이 연속변수를 통해 정의되는 fiducial vector를 활용하여 유도될 수 있음이 알려져있다. 소개하는 연구결과에서는 임의의 d 차원에서 SIC-POVM을 선택할 경우, 일반화된 EBI 상관관계에 의해서 항상 양자 상한값이 주어지는 특성을 갖는 상관관계 함수를 유도하고, 그 양자 상한값 역시 해석적 형태로 유도한다^[4].

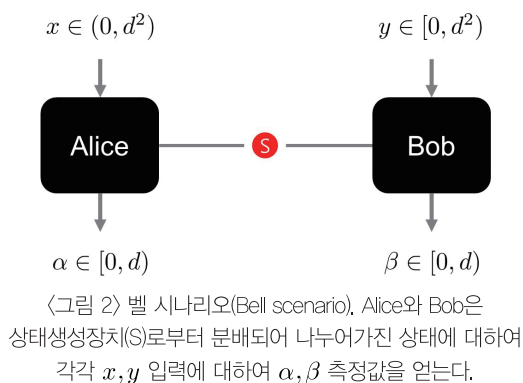
3.1 상관관계 함수

구체적인 결과를 소개하기에 앞서, 벨 부등식을 판별하기 위한 측정 시나리오를 먼저 소개한다. 공간적으로 떨어진 Alice와 Bob은 분배된 물리계에 대하여 각각 $d^2 - 1$ 개 측정 A_x ($0 < x \leq d^2 - 1$), d^2 개 측정 B_y ($0 \leq y \leq d^2 - 1$) 중 하나의 측정을 무작위하게 선택하여 측정한다. Alice와 Bob의 d 개의 가능한 측정값은 각각 $\alpha, \beta \in \{0, 1, \dots, d-1\}$ 로 표현한다.

이 경우 일반화된 상관관계 함수를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I = \sum_{x,y} f_{x,y}^n \langle A_x^n B_y^n \rangle$$

이때, $f_{x,y}^{d-n} := (f_{x,y}^n)^*$ 는 위의 함수가 실수값을 갖도록하기 위하여 만족해야하는 조건이다. SIC-POVM이 존재할 경우 항상 일반화된 EBI 상관관계에 의해 양자상한값이 주어지는 상관관계 함수는 계수가 $f_{dp+q,dr+s}^n = \omega^{-n(ps+qr)} f_{dp+q,0}^n$ 조건을 만족시키는 경우로 정의된다.



상관관계 함수를 정의하는 조건은 우변의 계수 $f_{dp+q,0}^n$ 가 주어지면 좌변의 전체 계수 즉, 전체 상관관계 함수가 결정됨을 의미한다. 여기서 좌변의 $f_{dp+q,0}^n$ 변수는 SIC-POVM 선택에 의하여 결정되며, 그 유도 방법은^[4]의 결과에 자세히 설명되어있다.

3.2 양자 상한값

위에서 정의한 상관관계 함수의 양자 상한값은 SOS 분해(sum-of-squares decomposition) 기법을 활용하여 해석적 형태로 구할 수 있다^[4]. 결과적으로 다음과 같은 형태의 상한값을 구할 수 있다.

$$Q(d) := \frac{1}{2} [\|F_n\|^2 + d^2(d-1)]$$

이때, F_n 은 상관관계 함수의 계수 $f_{x,y}^n$ 를 요소로 갖는 $(d^2-1) \times d^2$ 행렬이며, $\|\cdot\|$ 은 Frobenius norm을 표시한다. 지금까지 소개한 결과를 정리로 요약하면 다음과 같다. Bob의 구체적인 측정 형태는

정리. WH group covariant SIC-POVM이 정의된 소수 차원 d 에 대하여, 다음의 계수 $f_{dp+q,dr+s}^n = \omega^{-n(ps+qr)} f_{dp+q,0}^n$ 로 정의되는 상관관계 함수 I 의 양자 상한값 $Q(d)$ 는 항상 ‘일반화된 EBI 상관관계’에 의하여 주어진다.

4. $d = 3$ MUB, SIC-POVM를 위한 새로운 벨 부등식

SIC-POVM을 적절히 선택한 후 유도한 상관관계 함수를 고려하여 해석적으로 유도한 양자상한값과 LHV 이론에 의한 상한값을 비교하여 위배를 증명하는 방식으로 벨 부등식을 유도할 수 있다.

이와 같은 방법으로 $d = 2$ 의 경우에 Gisin 박사가 유도한 EBI를 유도할 수 있으며, $d = 3$ 의 경우에는 잘 알려진 Hesse SIC-POVM을 선택하여 아래의 벨 부등식을 유도할 수 있다.

$$\sum_{n=1}^2 \sum_{p,q,r,s} \omega^{-n(ps+qr)} f_{3p+q,0}^n \langle A_x^n B_y^n \rangle \leq 15$$

벨 상관관계의 양자 상한값은 위에서 구한 해석적 공식에 따라 $Q(3) = 18$ 이며, 위 벨 부등식을 위배함을 알 수 있다. 이때 위배 정도는 기존의 유사한 벨 부등식 즉, 같은 2체 3차원 물리계를 가정한 MUB, SIC-POVM에 최대 위배가 주어지는 벨 부등식^[9,10]에 비하여 상당한 정도

로 개선되었음^[4] 결과를 통해 분석되었다.

IV. 정정 불가능한 오류 주입 기반의 결합 허용 및 보안 장거리 양자 통신

본 장에서는 양자 키 분배 기술을 넘어서 실제 양자 상태를 안전하게 송수신할 수 있는 정정 불가능한 오류 주입 기반의 결합 허용 및 보안 장거리 양자 통신 기법에 대해 설명한다. 양자 네트워크는 물리적으로 분리된 장치 간에 양자 상태를 결합 허용 및 보안을 유지하면서 전송하는 것을 목표로 한다. 그러나 널리 사용되는 양자 텔레포테이션 방식은 여러 단계의 얽힘 교환(entanglement swapping)^[1, 2] 및 정제(entanglement purification)^[3, 4] 필요로 하여 막대한 자원 오버헤드와 운영 복잡성을 초래한다. 본 기술은 수정 불가능 오류 주입 기반의 새로운 결합 허용·보안 양자 통신 기법을 제안한다^[5]. 양자 오류 정정 부호에 기반한 양자 상태 부호화 방식을 활용하여, 전략적으로 수정 불가능 오류를 도입함으로써 보안을 강화한다. 이를 통해 얽힘 분배(entanglement distribution)를 제거하고 자원 요구량을 감소시킬 수 있다. 이제부터 제안하는 기법의 구체적 구조와 동작 원리를 살펴본다.

1. 키 생성, 상태준비

1.1 암호화 키 생성

임의의 양자 상태를 전송하기 위해, 송신자는 먼저 양자 채널의 오류율을 측정한다. 이 정보를 바탕으로 송신자는 양자 오류 정정 부호의 오류 정정 능력 t 를 결정하고 이를 바탕으로 양자 오류 정정 부호의 성능 지표 $[[n, k, d]]$ 를 결정한다. 그 후, 송신자는 네 개의 비트 문자열을 생성하여 네 개의 암호화 키 x^1, x^2, x^3, x^4 를 만든다. 이 중 x^1, x^2, x^3 는 길이가 $k-k'$ 비트이고, x^4 는 길이가 k 비트이다. 이 키들의 역할은 이후 장에서 상세히 다룬다.

1.2 상태 준비

송신자가 전송하고자 하는 양자 상태는 임의의 k' -

큐비트 데이터 $|\psi\rangle = \sum_i c_i |m_i\rangle$ 이다. 여기서 $|m_i\rangle$ 는 계산 기저 상태를, c_i 는 각 기저 상태와 연관된 복소 진폭을 나타낸다. 도청자가 전체 양자 상태를 가로채고 스푸핑된 데이터를 재전송하는 공격(즉, 가로채기-재전송 공격)을 수행하거나, 보조 상태, 유니터리 연산, 측정을 사용하여 정보를 추출하는 것을 방지하기 위해, 데이터 시퀀스에 $k-k'$ 큐비트의 더미 상태 $|D\rangle$ 를 무작위로 삽입한다. 이 더미 상태들은 두 개의 상호 무편향 기저(mutually unbiased basis, MUB) 상태 집합 $\{|0\rangle, |1\rangle\}$ 와 $|+\rangle, |-\rangle$ 에서 무작위로 선택된다. 이때 더미 상태 $|D\rangle$ 는 앞에서 생성한 x^1, x^2, x^3 을 사용하여 생성된다.

$$|D\rangle = \otimes_{i=1}^{k-k'} X^{x^1_i} Z^{x^2_i} H^{x^3_i} |0\rangle^{\otimes k-k'} = U_{MUB} |0\rangle^{\otimes k-k'}$$

여기서 $X^{x^1_i}, Z^{x^2_i}, H^{x^3_i}$ 는 각각 x^1, x^2, x^3 의 해당 비트가 1일 때 해당 연산을 적용하고, 그렇지 않은 경우 항등 연산자를 적용하는 연산자들을 나타낸다. 표기의 간결성을 위해, 결합된 연산자를 U_{MUB} 로 정의하며, 이는 보조 0 상태를 상호 무편향 기저 상태로 변환한다.

2. 부호화 및 암호화

2.1 부호화

준비된 상태는 양자 상태를 신뢰성 있게 전송하기 위해 양자 오류 정정 부호를 사용하여 부호화되어야 한다. 따라서 부호화를 위해 송신자가 준비한 n -큐비트 상태 $|\psi\rangle$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

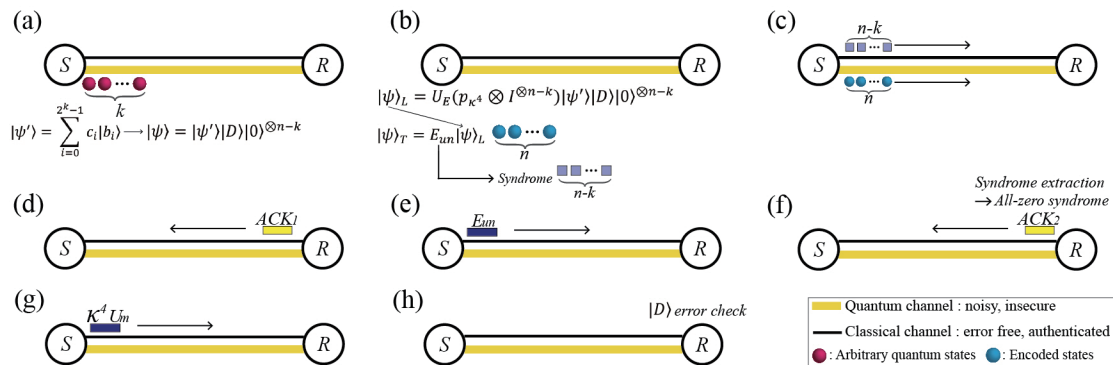
$$\begin{aligned} |\psi\rangle &= (P_{x^4} \otimes I^{\otimes n-k}) |\psi'\rangle U_{MB} |0\rangle^{\otimes k-k'} |0\rangle^{\otimes n-k} \\ &= (P_{x^4} \otimes I^{\otimes n-k}) (I^{\otimes k'} \otimes U_{MB} \otimes I^{\otimes n-k}) |\psi'\rangle |0\rangle^{\otimes n-k'} \\ &= U_L |\psi'\rangle |0\rangle^{\otimes n-k'} \end{aligned}$$

여기서 P_{x^4} 는 x^4 에서 1이 위치하는 지점에 해당하는 큐비트를 치환하는 치환 연산자이다. 송신자는 선택된 양자 오류 정정 부호와 연관된 부호화 연산자 U_E 를 사용하여 상태 $|\psi\rangle$ 를 논리 상태로 부호화한다.

$$|\psi\rangle_L = U_E |\psi\rangle$$

2.2 암호화

암호화를 수행하기 위해, 선택된 양자 오류 정정 부호가 정정할 수 없는 임의의 파울리 오류 연산자 E_m 이 부



〈그림 3〉 정정 불가능한 오류 주입 기반의 결함허용 및 보안 장거리 양자 통신 기법 개략도

호화된 논리 상태 $|\psi\rangle_L$ 에 주입된다. 정정 불가능한 오류 E_{um} 은 전송되는 상태에 주입되어, 도청자나 중간 노드가 상태에 대한 정보를 획득하는 것을 방지한다. 추가적으로, 수신자는 상태를 수신한 후 이를 사용하여 수신된 상태가 송신자가 보낸 그 결과로 부호화되고 암호화된 상태 $|\psi\rangle_E$ 는 다음과 같다.

$$|\psi\rangle_E = E_{um} |\psi\rangle_L$$

송신자는 주입된 E_{um} 의 신드롬 s 를 계산한 후, 부호화된 상태 $|\psi\rangle_E$ 는 양자 채널을 통해 전송하고 신드롬 s 는 고전 채널을 통해 수신자에게 전송한다. 양자 채널은 잡음이 있고 안전하지 않지만, 고전 채널은 오류가 없고 인증되었다고 가정한다.

3. 복호화

3.1 검증 전 신드롬 기반 오류 정정

수신자는 $|\psi\rangle_E$ 와 s 를 수신하면, $|\psi\rangle_E$ 의 신드롬을 추출하고 s 를 기반으로 오류 정정을 수행한다. 일반적으로 신드롬을 이용한 오류 정정은 오류가 없는 상태로 되돌리기 위해 모두 0인 신드롬(all-zero syndrome)을 기준으로 수행된다. 그러므로 수신한 s 와 추출한 신드롬 간의 차이가 발생한 채널 오류를 나타내므로, 신드롬 s 에 기반한 오류 정정은 채널 오류를 정정할 수 있다

3.2 E_{um} 검증

수신자는 송신자에게 $|\psi\rangle_E$ 를 수신했음을 알리기 위해 ACK_1 을 전송한다. 여기서 ACK (acknowledgment)

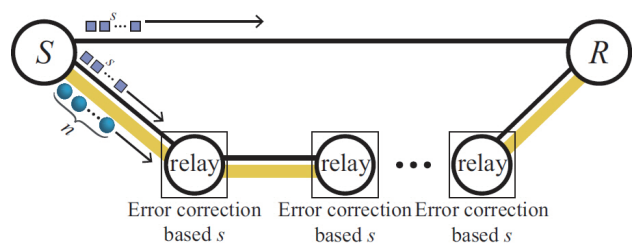
는 데이터 네트워킹에서 전송된 메시지의 성공적인 수신을 확인하는 신호를 의미한다. ACK_1 을 수신하면, 송신자는 고전 채널을 통해 수신자에게 E_{um} 을 전송한다. 수신자는 $|\psi\rangle_E$ 에 E_{um} 을 적용하고 신드롬 추출을 다시 수행하여 모두 0인 신드롬이 얻어지는지 검증한다. 신드롬이 모두 0이 아니면, 수신자는 잠재적인 도청 공격이 있었다고 가정하고 프로세스를 중단한다.

3.3 더미 상태 검증

모두 0인 신드롬이 추출되면, 수신자는 송신자에게 다시 ACK_2 를 전송하여 모두 0인 신드롬이 추출되었음을 알린다. ACK_2 를 수신하면, 송신자는 고전 채널을 통해 임의의 치환 연산자 P_x 와 U_{MUB} 를 전송한다. 그 후, 수신자는 각각의 상호 무편향 상태를 해당하는 U_{MUB} 기저로 측정하여, U_{MUB} 에 의해 부호화된 결과와 측정 결과 사이의 일관성을 검증한다. 오류가 감지되면, 도청자가 정보를 추출하려 시도했다고 가정하고 프로세스를 중단한다.

4. 거리 확장

제안하는 기법의 장점은 암호화에도 불구하고 오류 정



〈그림 4〉 제안하는 기법의 릴레이 기반 전송 거리 확장

정이 여전히 가능하여 전송 거리를 확장할 수 있다는 점이다. <그림 4>와 복호화 과정에서 수신자가 수행하는 절차와 유사하게, 중계 노드들은 s 를 기반으로 오류 정정을 수행한 후 다음 노드로 전달함으로써 결합 허용 전송 가능하게 한다. 더욱이, E_m 이 주입되었기 때문에 중계 노드는 신드롬 추출을 통해서도 양자 상태에 관한 어떠한 정보도 얻을 수 없다.

5. 보안성 분석

이 장에서는 제한하는 기법의 보안성을 분석한다. 양자 오류 정정 부호로 부호화된 양자 상태의 신드롬에 영향을 주지 않는 유일한 연산자는 안정자와 논리 연산자이다. 추가적으로, 상태 준비 과정에서 도입된 더미 상태 $|D\rangle$ 는 논리 연산자에 의해 변경될 수 있다. 따라서 만약 도청자가 특정 연산이나 논리 보조 상태를 포함하는 측정을 사용하여 정보를 추출하려 시도하면, E_m 의 신드롬 s 또는 더미 상태 $|D\rangle$ 가 손상될 수 있어 이러한 시도를 탐지할 수 있다.

다시 말해, 도청자가 계산적으로 제한이 없는 양자 공격자(quantum adversary)라고 가정하더라도, 안정자가 논리 정보를 드러낼 수 없다는 특성으로 인해 신드롬이나 더미 상태를 교란하지 않고는 어떠한 데이터도 추출할 수 없다. 따라서, 제한하는 기법의 accessible information을 분석하여 잠재적인 정보 유출 관점에서 그 보안성을 평가한다.

5.1 Accessible information

accessible information을 분석하기 위해서는 먼저 도청자가 인지할 수 있는 상태를 송신자가 보낸 양자 상태에 대해 개괄해야 한다. 도청자는 송신자가 전송하려는 데이터를 모르기 때문에, 모든 가능한 데이터가 혼합된 상태로만 인지할 수 있다. 또한, 데이터와 상호 무관한 기저(MUBs)로 정의된 무작위로 치환된 더미 상태 $|D\rangle$ 의 영향으로, E_m 은 모든 가능한 파울리 오류 패턴이 혼합된 상태로 나타난다. 따라서 데이터만 고려할 때, 상태에 적용된 정정 불가능한 오류는 실제 주입된 E_m 과 달라진다. 이는 수학적으로 다음과 같이 검증할 수 있다.

$$\begin{aligned} |\psi\rangle_E &= E_m U_E U_c |\psi'\rangle |0\rangle^{\otimes n-k'} \\ &= E_m U_c' U_E |\psi'\rangle |0\rangle^{\otimes n-k'} \end{aligned}$$

여기서 $U_c' = U_E U_c U_E^{-1}$ 이다. 따라서 도청자는 신드롬 정보 s 를 기반으로 E_m 의 후보를 좁힐 수는 있지만, $E_m U_c'$ 를 식별해야 하므로 모든 가능한 파울리 오류 패턴을 고려해야 한다. 결과적으로, 수신자의 오류 정정 과정 후 도청자가 인지하는 양자 상태 ρ_E 는 다음과 같다.

$$\rho_E = \frac{1}{2^{k'}} \frac{1}{4^n} \sum_{i=0}^{2^{k'}-1} \sum_{j,k \in \{0,1\}^n} X^j Z^k |\psi\rangle_{L,i} \langle \psi| Z^k X^j$$

여기서 $|\psi\rangle_{L,i}$ 는 $|m_i\rangle$ 의 논리 기저를 나타낸다.

접근 가능 정보는 최대 상호 정보량 $I_{acc}(M;E) = \max_A I(M;Y)$ 로 정의된다. 여기서 M 은 송신자의 메시지, E 는 도청자의 시스템, Y 는 도청자의 측정 A 으로부터 얻는 확률 변수이다. 따라서 접근 가능 정보는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} I_{acc}(M;E) &= \max_A - \sum_y p_Y(y) \log p_Y(y) \\ &+ \frac{1}{2^{k'}} \sum_{y,m} p_{YM=m}(y) \log p_{YM=m}(y) \\ &= \max_A \sum_y \mu_y \{ -\langle \phi_y | \rho_E | \phi_y \rangle \log \langle \phi_y | \rho_E | \phi_y \rangle \\ &+ \frac{1}{2^{k'}} \sum_m \langle \phi_y | \rho^m E | \phi_y \rangle \log \langle \phi_y | \rho^m E | \phi_y \rangle \} \end{aligned}$$

도청자의 관점에서 오류는 최대로 혼합된 것으로 인지된다. 따라서 유효 부호율 $R_{eff} = k'/n$ 이 높을수록, ρ_E 는 최대 혼합 상태(maximally mixed states, MMSs)에 가까워진다. matrix Chernoff bound와 마우러 경계를 적용하면, 접근 가능 정보는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$I_{acc}(M;E) \leq 2\epsilon n$$

k' 와 n 이 증가함에 따라, ρ_E 는 점근적으로 최대 혼합 상태에 접근하므로, 도청자가 얻을 수 있는 모든 접근 가능 정보는 점점 더 무작위화된다. 이는 추출된 정보를 잡음과 구별하기 어렵게 만들어 보안성을 강화한다. 그러나 전체 메시지 길이가 n 에 따라 커지므로, 유출되는 정보의 절대적인 양 또한 증가한다. 이는 제한하는 기법의 약점이라기보다는 더 큰 메시지를 부호화하는 데 따르는 본질적인 효과이며, 전체 메시지 내용 대비 유출되는 정보의 비율은 계속해서 감소한다. 따라서 제안된 기법을 사용하면 도청자에게 유출되는 정보가 충분히 무시할 수 있는

수준으로 유지되도록 보장하면서 양자 상태를 전송할 수 있다.

V. 결론

본고에서는 현재 활발하게 활용되는 양자키분배를 넘어, 양자암호화 양자통신을 잇는 최신 응용 프로토콜 연구 동향을 분석했다.

첫째, 양자 라벨 인코딩을 활용한 보안 양자 학습 프로토콜을 통해, QKD의 보안 원리가 머신러닝과 같은 고차원 응용 분야에서 데이터 접근 권한을 제어하는 데 효과적으로 사용될 수 있음을 확인했다. 둘째, 고차원 벨 부등식의 일반화 및 검증 기법을 분석하며, 통신 장비의 물리적 구현이나 제조사에 의존하지 않고 프로토콜의 신뢰성을 보장하려는 디바이스 독립적 연구의 중요성을 살펴보았다. 마지막으로, 양자 오류 정정 부호와 정정 불가능한 오류 주입 개념을 결합한 보안 양자 상태 전송 기술을 통해, 단순 키 분배를 넘어 원거리에서도 양자 데이터 자체를 안전하게 전송하려는 패러다임의 전환을 확인했다.

이러한 연구 동향들은 공통적으로, 초기 양자암호 기술이 가진 이론적이고 제한적인 측면에서 벗어나 실용적인 가치를 지향하고 있음을 보여준다. 이는 양자암호와 양자통신 기술이 더 이상 분리된 영역이 아니라, 하나의 ‘보안 양자 네트워크’라는 큰 틀 안에서 융합 연구가 필요하다는 것을 시사한다. 따라서 본 고에서 분석한 응용 프로토콜들은 미래 양자 인터넷 환경에서 단순한 보안 통신을 넘어, 분산 양자 컴퓨팅, 양자 센서 네트워크 등 새로운 양자 기술 생태계를 여는 중요한 기반이 될 것으로 전망한다.

참고 문헌

- [1] Shor, Peter W. “Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring.” Proceedings 35th annual symposium on foundations of computer science. Ieee, 1994.
- [2] Bennett, Charles H., and Gilles Brassard. “Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing.” Theoretical computer science 560 (2014): 7–11.
- [3] Bang, Jeongho, et al. “Ensuring superior learning outcomes and data security for authorized learner.” Quantum Science and Technology 10,2 (2025): 025056.
- [4] Bae, Kwangil, et al. “Designing generalized elegant Bell inequalities in high dimension from a quantum bound.” arXiv preprint arXiv:2408.11391 (2024).
- [5] Sohn, IlKwon, et al. “Uncorrectable—error—injection based reliable and secure quantum communication.” arXiv preprint arXiv:2411.14710 (2024).
- [6] Du, Yuxuan, et al.. “Quantum noise protects quantum classifier against adversaries.” Physical Review Research 3 (2021): 023153.
- [7] Lu, Sirui, et al.. “Quantum adversarial machine learning.” Physical Review Research 2 (2020): 033212.
- [8] Salavrakos Alexia, et al. “Bell Inequalities Tailored to Maximally Entangled States” Physical review letters 119, 040402 (2017)
- [9] Kaniewski, Jędrzej, et al. “Maximal nonlocality from maximal entanglement and mutually unbiased bases, and self-testing of two-qutrit quantum systems.” Quantum 3 (2019): 198.
- [10] Tavakoli, Armin, et al. “Mutually unbiased bases and symmetric informationally complete measurements in Bell experiments.” Science advances 7,7 (2021): eabc3847.
- [11] Gisin, Nicolas. “Bell inequalities: many questions, a few answers.” Quantum reality, relativistic causality, and closing the epistemic circle: essays in honour of Abner Shimony. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009, 125–138.
- [12] Zukowski, Marek, et al. “” Event-ready-detectors” Bell experiment via entanglement swapping.” Physical review letters 71.26 (1993).
- [13] Goebel, Alexander M., et al. “Multistage entanglement swapping.” Physical Review Letters 101.8 (2008): 080403.
- [14] Bennett, Charles H., et al. “Purification of noisy entanglement and faithful teleportation via noisy channels.” Physical review letters 76.5 (1996): 722.
- [15] Deutsch, David, et al. “Quantum privacy amplification and the security of quantum cryptography over noisy channels.” Physical review letters 77.13 (1996): 2818.



손 일 권

- 2011년 8월 고려대학교 공과대학 전기전자전파공학부 학사
- 2018년 8월 고려대학교 공과대학 전기전자전파공학부 박사
- 2019년 1월~11월 한국과학기술정보연구원 박사후연구원
- 2019년 11월~현재 한국과학기술정보연구원 선임연구원

〈관심 분야〉
양자암호통신, 양자컴퓨팅, 양자오류정정부호



배 광 일

- 2013년 2월 서강대학교 자연과학대학 물리학과 학사
- 2021년 2월 서강대학교 자연과학대학 물리학과 박사
- 2020년 12월 ~ 현재 한국과학기술정보연구원 선임연구원

〈관심 분야〉
양자정보과학, 양자 비국소성



송 우 영

- 2015년 2월 한양대학교 자연과학대학 물리학전공 학사
- 2021년 8월 한양대학교 물리학과 박사
- 2018년 4월~2020년 10월 고등과학원 연구조원
- 2021년 4월~2021년 8월 한국과학기술정보연구원 연구조원
- 2021년 9월~2024년 1월 한국과학기술정보연구원 박사후연구원
- 2024년 2월~현재 한국과학기술정보연구원 선임연구원

〈관심 분야〉
양자정보처리, 양자컴퓨팅, 양자오류정정



이 원 혁

- 2003년 성균관대학교 공과대학 컴퓨터공학과 석사
- 2010년 성균관대학교 공과대학 전자전기컴퓨터공학과 박사
- 2003년~현재 한국과학기술정보연구원 선임연구원

〈관심 분야〉
네트워크 관리, 망 성능측정, 양자암호기반 통신망 구축 관리기술

양자통신을 준비하는 산업계의 개발 동향과 전망

I. 서론

양자컴퓨팅의 진전은 공개키 암호체계(PKC)의 장기적 취약성이라는 ‘양자 리스크’를 부각시켰다. 양자키분배(Quantum Key Distribution, QKD)는 양자역학의 불확정성 원리와 측정 교란 원리를 기반으로 보안성 확보를 이용해 송·수신자가 도청 여부를 검출하면서 비밀키를 생성·공유하는 기술로, 정보이론적(조건부) 안전성을 지향한다. 최근 QKD는 금융, 국방, 공공기관에서 요구되는 초고도 보안 수준을 만족할 수 있는 기술로 부각되며, 연구 개발에서 벗어나 실제 장비의 상용화 단계로 진입하였다^[1].

특히 스위스의 ID Quantique, 일본의 Toshiba, 이탈리아 QTI 등은 이미 상용 QKD 장비를 출시하여 금융 기관 및 정부 통신망에 적용하고 있으며^[2], 국내에서도 KT, SKT를 중심으로 QKD 장비가 통신망에 실증 적용되고 있다^{[3][4]}.

QKD는 자체가 암호화가 아니라 키 분배기술이므로, 실제 서비스에서는 QKD로 생성한 키를 고속 대칭키 암호(AES 등)나 MACsec, IPsec 등에 공급하는 구조로 통합된다. 국제 표준화는 ITU-T Y.3800 시리즈가 네트워크 전반의 용어/아키텍처·운용절차의 틀을 제공하고, ETSI ISG-QKD와 ISO/IEC 23837 시리즈가 모듈 수준의 요구사항·평가방법을 정립하며 빠르게 진전 중이다^[5-8].

한편, QKD의 장거리 한계를 보완하기 위해 위성·무선(자유공간) 링크의 중요성이 커졌다. 위성 기반 양자암호통신은 지상국 간 장거리 QKD를 가능하게 하는 가장 유망한 방식 중 하나이다. 광섬유 전송은 수십~수백 km에서 손실이 급격히 커지지만, 우주 공간에서는 감쇠가 적어 글로벌 규모의 QKD 네트워크를 구축할 수 있다. 2016년 발사된 중국의 ‘목자(Micius)’ 위성은 1,200km 급 얽힘 분배와 위성-지상



노 광 석
주식회사 큐심플러스

간 QKD를 잇따라 시연해 글로벌 스케일 양자 네트워크의 실현 가능성을 입증했으며, 유럽(EU)도 EuroQCI 프로그램을 통해 위성-지상 연계 QKD를 추진하고 있다^[9-12]. 무선(free-space) QKD는 위성과 달리 지상국 간, 또는 이동체 간 자유공간 광 링크를 이용한 통신으로, 도심 및 전술 환경에서 활용 가능하다^[13]. 최근에는 드론·차량 등 이동체 기반의 자유공간 QKD와 주·야간 상시 운용을 겨냥한 실험들이 이어지며 ‘무선 QKD’ 영역이 빠르게 확장되는 추세다^[14].

양자통신은 QKD를 포함하여 양자 얽힘 분배, 양자 텔레포테이션, 양자 메모리·중계기 기술을 활용한 전반적 통신 기술 체계를 의미한다^[15]. 단순한 키 분배를 넘어 양자 데이터 전송 같은 양자 직접 통신(Quantum Direct Communication), 분산 양자컴퓨팅 등 양자상태 자체를 교환할 수 있는 양자 통신, 양자 네트워크 인프라로 확장하는 연구들이 학계와 연구계를 중심으로 이루어지고 있다^{[16][17]}.

II. 양자암호통신 산업계 동향

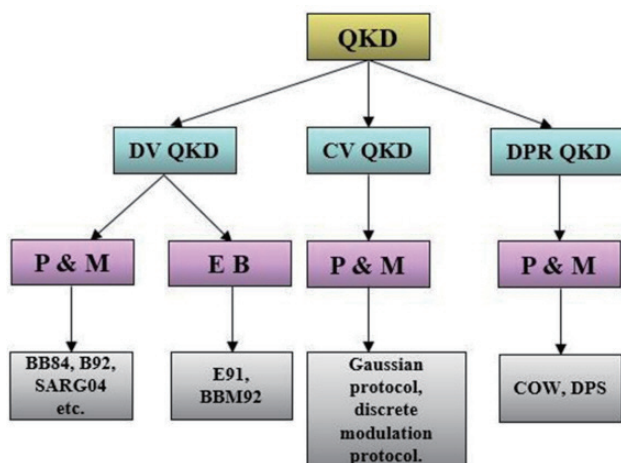
1. 양자암호통신 상용 장비 현황

QKD는 학계에서의 이론적·실험적 연구를 넘어, 최근에는 산업계에서의 상용화와 시장 진출이 빠르게 진행되고 있다. 특히 보안 통신의 필요성이 커짐에 따라 통신사업자, 장비 제조사, 스타트업 등이 QKD를 실제 네트워

크에 접목하기 위한 다양한 시도를 하고 있다.

〈그림 1〉은 QKD 프로토콜들을 체계적으로 분류한 도식으로, 크게 Prepare-and-Measure(P&M) 방식과 Entanglement-Based(EB) 방식으로 구분되며, 그 하위에 다시 세부적인 프로토콜들이 존재한다^[18]. P&M 방식은 송신자가 특정한 양자 상태를 준비(prepare)하여 수신자에게 전달하고, 수신자는 그 상태를 측정(measure)하여 키를 생성하는 구조를 가진다. 다시 세부적으로는 이산 변수(discrete variable, DV) QKD, 연속 변수(continuous variable, CV) QKD, 그리고 분산 위상 참조(distributed phase reference, DPR) QKD로 나뉜다. DV는 BB84 프로토콜이 대표적으로, 단일 광자의 특정 자유도(예: 편광, 시간, 위상 등)에 정보를 인코딩한다. 실험적으로 많이 구현되었고 보안성 증명이 확립되어 있지만, 단일 광원과 고효율 검출기 등 기술적 난제가 존재한다. CV-QKD는 단일 광자 대신 코히런트 상태의 연속 변수(전기장 진폭이나 위상)를 이용하여 정보를 인코딩한다. CV-QKD의 장점은 상용화된 광통신 부품(레이저, PIN 포토다이오드 등)을 그대로 활용할 수 있어 기술적 진입 장벽이 낮다는 것이다. 그러나 잡음에 민감하고 긴 전송 거리에서 성능 저하가 발생할 수 있다는 단점도 있다. DPR-QKD는 최근 주목받는 방식으로, 단일 광자가 아니라 약한 코히런트 펄스(Weak Coherent Pulses, WCP)를 사용하여 두 연속 펄스 사이의 위상 차이나 도착 시간을 통해 정보를 인코딩한다. 이 방식은 기존 광통신 인프라에 적용이 쉽고, 실험 구현이 상대적으로 단순하며 통신 효율이 높다. 구현의 용이성과 높은 전송 거리에서의 성능 덕분에 최근 산업적·실험적 연구가 활발히 진행되고 있다. 다만, 무조건적 보안성의 이론적 증명은 아직 완결되지 않은 상태이다^[19-21].

EB-QKD는 얽힘 상태(entangled state)를 이용하는 방식으로, 송신자와 수신자가 동일한 얽힘 쌍의 일부를 공유하여 키를 생성한다. 얽힘 상태의 특성상, 측정 결과가 자동적으로 상관되어 있기 때문에 중간에 도청자가 개입하면 반드시 교란이 발생한다. 근본적인 보안성을 보장하지만 얽힘 생성·분배 기술이 필요해 효율적인 얽힘 광원, 얽힘 분배 등이 필요하기 때문에 아직 상용 제품은 부



〈그림 1〉 QKD 프로토콜의 분류 체계^[18]

재하며, 추후 대규모 네트워크 적용을 위해 추가 기술 발전이 요구된다.

스위스의 ID Quantique(IDQ)는 상업용 QKD 장비를 가장 먼저 시장에 내놓은 기업으로, 금융·정부 기관에 공급을 확대하고 있다. 일본의 도시바(Toshiba) 역시 장거리 전송에 강점을 가진 QKD 시스템을 개발하여, 일본 내 통신망과 유럽의 테스트베드에서 실증을 진행했다. DPR 기반의 이탈리아의 QTI, MDI 프로토콜 기반의 네덜란드 Q*bird, CV-QKD 계열의 스페인의 LuxQuanta 등이 QKD 장비를 상용화하여 판매하고 있다^[22-26].

중국의 경우, 국가 주도의 대규모 양자 네트워크 구축 사업을 바탕으로, QuantumCTek, Origin Quantum, Hefei Quantum Tech 등 다수의 기업이 상용 QKD 장비를 개발하여 공급 중이다. 특히 베이징-상하이 2000 km 구간 양자통신 백본망 구축은 세계적으로 주목을 받았으며, 이는 학계 연구를 넘어 산업계에서 대규모 시스템이 구현된 대표적 사례다^[27].

한국에서도 코위버, 우리넷 등 통신 장비 업체가 QKD 장비를 자체 개발하여 상용망에 적용하고 있으며, 금융기관·국가기관을 중심으로 보급이 확대되고 있다.

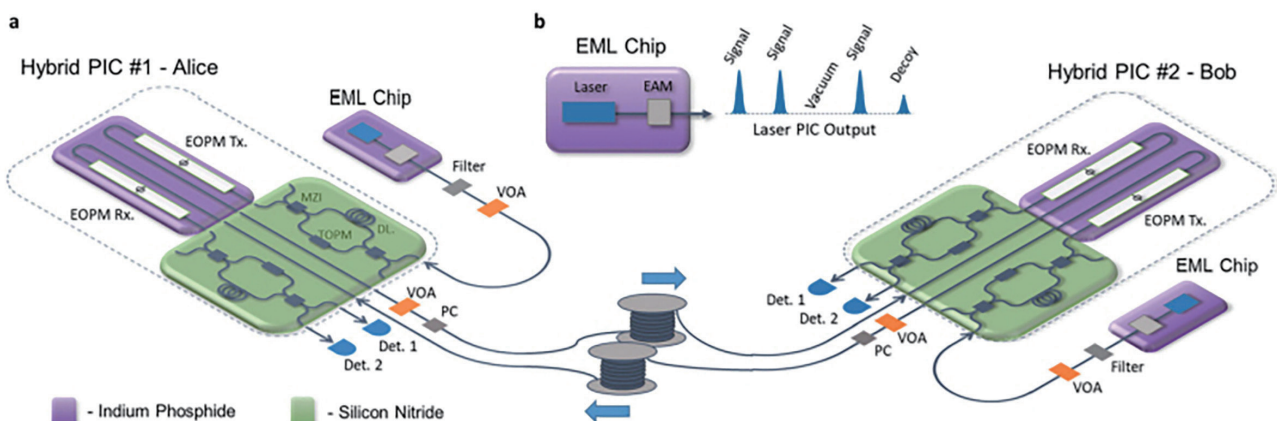
통신사들은 QKD를 기존 광통신 인프라에 접목하는 방식으로 적극 참여하고 있다. 유럽에서는 BT(British Telecom), Orange, Deutsche Telekom 등이 QKD 시범 서비스를 수행하고 있으며, 특히 유럽연합이 주도하는 EuroQCI(European Quantum Communication Infrastructure) 프로젝트를 통해 대륙 규모의 QKD 네트

워크 인프라를 구축하려는 시도가 본격화되고 있다^{[11][28]}.

중국은 China Telecom, China Mobile, China Unicom이 국가적 차원의 QKD 인프라 구축에 직접 참여하고 있으며, 이를 통해 대규모 양자통신망이 국가 기간통신망의 일부로 자리잡고 있다. 한국에서는 KT, SK Telecom이 QKD 실증망을 운영하며 보안 서비스로 상용화를 추진하고 있다.

2. 칩 기반 QKD

QKD의 상용화를 위해 가장 중요한 기술적 과제는 기존 광통신 인프라와의 공존과 소형화/집적화이다. 전통적인 QKD 장비는 수십 kg 이상의 부피와 고가의 광학 장치가 필요하기 때문에 칩 기반 QKD는 소형화, 집적화, 저비용화를 가능하게 하여 실질적인 양자통신 네트워크 구축을 위한 핵심 분야로 자리잡고 있다. 실리콘 포토닉스(Silicon Photonics) 기술을 기반으로 한 집적 광소자는 웨이퍼 스케일에서 대량 생산이 가능하고, CMOS 공정과 호환된다는 장점이 있다. 이에 따라 2016년 이후 다수의 연구그룹이 칩 기반 QKD 송수신기를 개발하였다. 최근 실험실 수준을 넘어서 산업 현장에 적용하려는 시도가 증가하고 있으며, IDQ는 제네바 대학교와의 협력으로 실리콘 포토닉스 기반 Photonic Integrated Circuit (PIC) 송신기를 개발하였고, Toshiba는 광 네트워크와 QKD 통합 분야에서 PIC를 기반으로 활발히 연구·상용화를 추진 중이며, 광섬유를 통해 데이터와 양자 키를 동시에 전송할 수 있는 플랫폼을 구현했다^{[2][29]}.



〈그림 2〉 이종 소재 PIC를 이용한 하이브리드 트랜시버 실험 구성도^[29]

3. 위성 및 무선(free-space) 양자암호통신

산업계는 광섬유 기반 QKD의 거리·인프라 제약을 보완하기 위해 위성 QKD와 지상-지상/지상-공중 간 자유공간(Free-Space) QKD를 동시에 추진하고 있다. 위성 QKD는 대륙 간 장거리 키 분배를, 무선 QKD는 도심·섬·산악 지형 등 광섬유 포설이 어렵거나 이동체(항공기·UAV) 기반 적용을 목표로 한다. 이러한 접근은 “국가 규모의 양자 보안 인프라”를 염두에 둔 하이브리드 네트워크(위성+지상)의 핵심 축으로 자리 잡는 추세다^[30].

상용화를 염두에 둔 운영 모드는 (a) 위성-지상 링크(다운·업링크), (b) 위성-위성 링크(메시/중계), (c) 대륙 간 링크(인터컨티넨탈)로 나뉘며, 각각 정밀 추적·정렬, 수신기 민감도, 궤도·시분할 자원관리 등 상이한 공학 과제를 가진다. 최근 연구는 위성-지상 링크의 실현 가능성을 반복 검증했고, 위성-위성 링크는 정렬·트래킹·방사선 환경 대응 등 공정 난이도를 해결 중이다. 위성체 제작사·지상국 사업자·광학 페이로드 업체·통신 캐리어가 컨소시엄 형태로 묶여 미션 정의→탑재체 개발→지상국 구축→운영·서비스로 확장하는 산업계 밸류체인이 형성됐다. 특히 통신사는 대륙 내 광섬유 QKD 백본과 위성 링크를 연동해 “국가/지역 양자 백본+국제

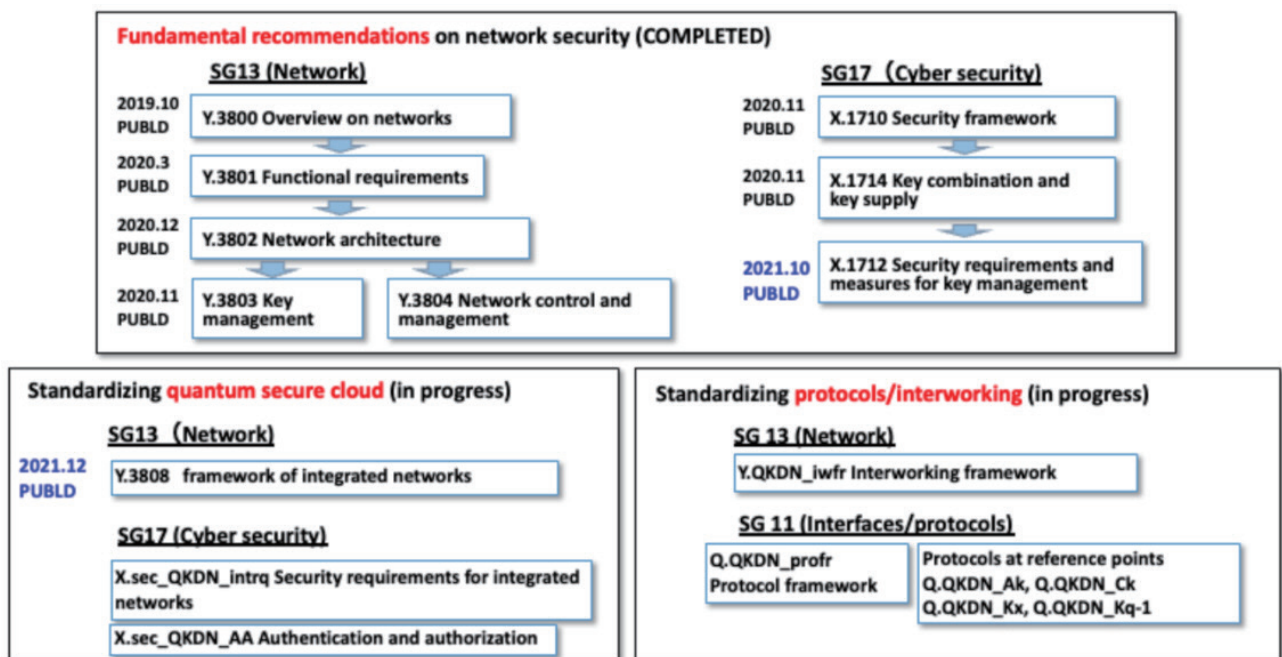
backhaul”을 목표로 한다.

무선 QKD는 도심·전술·모빌리티에 대한 수요가 많으나 장비 소형화, 정렬·추적(Pointing, Acquisition and Tracking, PAT) 기술의 부족으로 아직 활성화된 분야는 아니지만, 초고보안 단거리/중거리 링크, 임시 망 구성, 중요 시설 간 “신속 보안 연결” 수요가 커지며, 지붕-지붕, 지상-항공기/UAV, 선박-해안 등 시나리오에서 연구계를 중심으로 필드 실증이 확대되고 있다. 드론·차량 등 이동체 기반의 자유공간 QKD와 주·야간 상시 운용을 겨냥한 실험들이 이어지며 ‘무선 QKD’ 영역이 빠르게 확장되는 추세다^{[31][32]}.

III. 양자암호통신 표준화 및 인증 현황

1. 양자암호통신 표준화 현황

QKD를 중심으로 한 양자통신 표준화는 네트워크 프레임워크·아키텍처, 보안 프레임워크, 인터페이스 및 API, 평가·인증(보안 요구·시험법) 분야로 빠르게 확장되고 있다. 국제 표준화는 ITU-T, ETSI, ISO/IEC가 주도하고, IETF는 기존 인터넷 프로토콜과의 상호연동을 검토 중이다. 국내에서는 TTA가 QKD 네트워크 기능구조, 인



〈그림 3〉 QKDN을 위한 일본의 표준 활동

터페이스, 보안 요구사항 등을 제정·개정하며 국제 동향과 보조를 맞추는 중이다. 이러한 표준은 상용 QKD의 상호운용성, 보안성 검증, 운영·관리 및 기존 통신망과의 공존(coexistence) 구현에 핵심 역할을 한다^[33-36].

ITU-T Y.3800에서는 QKD 네트워크(QKDN)의 개요 및 설계·구축·운영을 위한 기준 틀을 제공한다. 이후 기능 요구(Y.3801), 기능 아키텍처(Y.3802), 키 관리(Y.3803), 제어/관리(Y.3804) 등 연계 권고가 발간되었다. ITU-T는 또한 Y.3800 시리즈 로드맵 보충문서를 통해 진화 경로를 제시했다^{[37][38]}. X.1710에서는 QKDN 보안 프레임워크로서 위협 모델, 보안 요구, 보안 조치 등을 정의하여 Y.3800 계열과 상호보완적으로 보안 기준을 제시한다^[39].

ETSI에서는 2023~2024년에 세계 최초 QKD 모듈 보호프로파일(PP)을 발표하여, 공통평가기준(CC)에 따른 QKD 모듈 보안 평가·인증의 기준점을 마련하였고^[40]^[41], ETSI ISG-QKD는 사업자망에 QKD 도입 시 상호운용성 확보와 장비 벤더 간 비교 가능성을 높이기 위해 시스템 인터페이스, 광학 특성화, 구현 보안 요구 등 상호운용·성능·보안 전반을 포괄하는 사양군을 지속 발간 중이다^[42].

ISO/IEC는 QKD 보안 요구, 시험 및 평가 방법에 대한 일반 프레임워크를 제시하고 CC(ISO/IEC 15408)와의

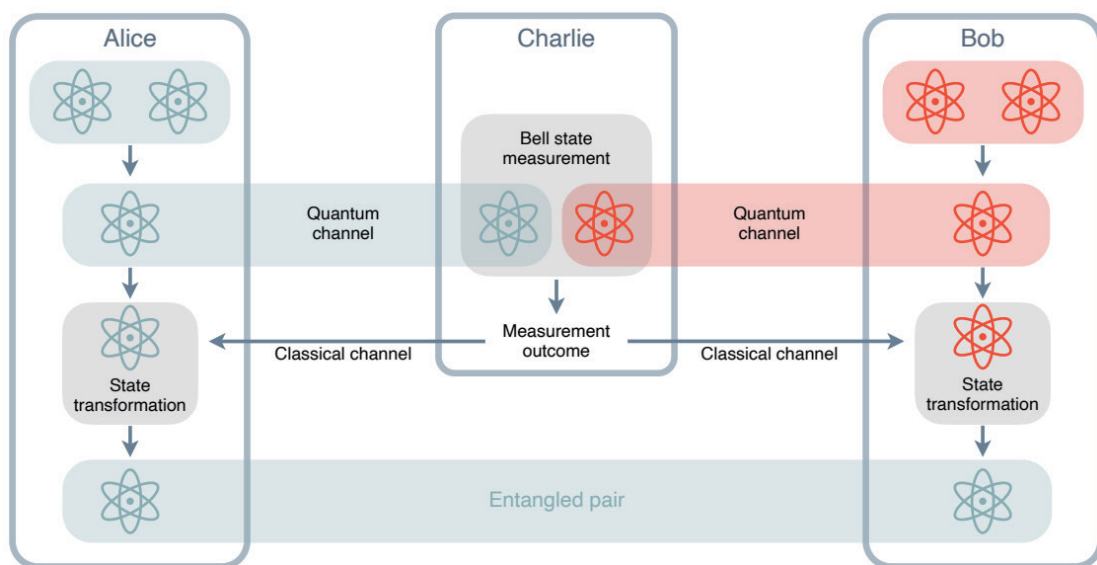
연계를 통해 모듈·시스템 수준 보안 평가를 표준화한다^{[36][43]}.

IETF에서는 ITU-T와의 공문서 교환(liaison) 등을 통해, QKD 네트워크 인터워킹(QKDNI) 시그널링 프레임워크 등 IP 기반 망에서의 운용을 염두에 둔 상호연동 주제가 공유되고 있다. 이는 라우팅/관리, 보안 프로토콜(IPsec 등)과의 연계 가능성을 열어 준다^[44].

국내 한국정보통신기술협회(TTA)는 후처리 등을 포함하는 QKD 장비의 성능평가, 키 관리/인증 등의 프로토콜 및 장비 보안 요구사항, 서로 다른 벤더의 QKD 장비 간 연동을 보장하기 위한 상호연동성을 다루는 표준을 제정하고 있다. 통신망 기술위원회(TC2) 산하 양자통신 프로젝트 그룹(PG225)을 신설하여 현재 최신 표준 기준으로 총 27종의 표준문서를 발간하였다^[45].

2. 양자암호통신 인증 현황

한국은 세계적으로도 빠른 속도로 양자암호통신 상용화 및 표준화를 추진하고 있으며, 특히 TTA를 중심으로 국내 표준 마련이 진행되고 있다. 또한 국가 기반시설 및 공공부문에서 활용될 수 있도록 보안 요구사항을 제정하여 상용 제품 검증 체계를 강화하고 있다. 국정원은 2023년 세계 최초로 국가·공공기관 도입을 위한 QKD 장비의 보안 기능 검증제도를 시행하였다. 해당 검증제도에



〈그림 4〉 위협 분산을 위한 양자 텔레포테이션 개념 ^[57]

는 QKD 장비 개발 및 검증에 필요한 ‘국가용 보안요구사항’과 ‘보안적합성 검증절차’가 포함되었다. QKD 제품군을 QKD 장비, 양자키관리 장비(QKMS), 양자통신암호화 장비(QENC) 3종으로 분류했으며, 국가·공공기관 도입을 위해 만족해야 하는 최소 보안요구사항인 ‘국가용 보안요구사항’에는 총 152개의 보안 기준이 담겨 있으며, 시험기관으로 한국정보통신기술협회(TTA), 한국전자통신연구원(ETRI), 한국표준과학연구원(KRISS)을 지정하였으며, QKD 장비 검증의 신뢰성을 확보하기 위해 QKD의 핵심 보안요소인 양자특성 시험을 한국표준과학연구원(KRISS)가 전담한다^{[46][47]}. 2025년 IDQ 및 코워버가 QKD 장비 인증을 획득하였다.

QKD 장비 개발 및 상용화에 앞선 유럽은 현재 시험·평가·인증 인프라 구축을 전제로 한 단일 국가 주도형 인증제도의 준비가 빠르게 진전되고 있다. EU는 EuroQCI 사업에서 대규모 QKD 장비·시스템의 테스트·인증 인프라 구축을 과제로 명시했고(디지털 유럽 프로그램 공고), 국가망 간 상호연결과 운용 요구를 반영한 성능·보안 적합성 평가 체계를 만들고 있다^{[48][49]}. 2024년에는 독일 BSI가 QKD 모듈용 공통평가기준(CC) 보호 프로파일을 공식 등록하여 CC 기반의 제3자 인증 경로를 마련했다^[50]. ENISA는 QKD 자체 인증을 발급하진 않지만, 유럽 차원의 암호이행·통합 가이드와 전문가 그룹 논의를 통해 보증수준·평가방법론 정합을 지원 중이다^{[51][52]}. 영국 NCSC는 QKD 도입 시 강건한 인증과 PQC 병행을 권고하며, 범용 사용에 신중론을 유지한다(공공 인증제 공식화 전 검증 강화 기조)^[53]. 독일 BSI는 적용 조건·위협모델을 명시한 입장문으로 평가 기준의 투명성을 높였고^[54], 일본은 NICT·산업계가 표준·인증 개발 로드맵을 공표하며 국제 권고(예: Y.380x 계열)와 연계한 시험·인증 프레임워크를 준비 중이다^[55].

IV. 양자 네트워크, 양자 인터넷으로의 확장

1. 양자 네트워크

양자 네트워크(Quantum Network)는 양자정보를 생

성·전송·저장·처리할 수 있는 인프라로 정의된다. 이는 단순한 QKD 링크의 확장을 넘어, 다중 노드 환경에서 양자 상태(특히 얽힘)를 분배·공유할 수 있는 시스템을 의미한다^{[56][57]}. 양자 네트워크는 크게 말단 노드(End Nodes), 중계 노드(Repeater Nodes), 전송 채널(Fiber/Free-space/Satellite), 양자 메모리, 고효율 단광자 검출기 등으로 구성된다. 핵심은 얽힘 상태를 네트워크 여러 지점에 동시에 분배하는 것이다. 이를 위해 필요한 요소는 얽힘 생성기(광원), 얽힘 분배 채널, 얽힘 교환 장치(Bell State Measurement), 양자 중계기/메모리이다. 양자 네트워크의 대표적 기능은 얽힘과 고전 채널을 이용해 원격지에 양자 상태를 전송하는 양자 텔레포테이션, 여러 양자 프로세서를 연결해 확장된 계산을 수행하는 분산 양자 컴퓨팅, 원격지에서 양자컴퓨터를 안전하게 호출하는 양자 클라우드 서비스이다. 산업적으로는 국가 단위 QKD 네트워크가 양자 네트워크 초기 단계로 간주된다. 중국은 베이징-상하이 2000 km QKD 백본망을 구축하였고, 이를 Mozi 위성과 연계하여 공간-지상 통합망을 운영한다^[58]. 유럽은 EuroQCI 프로젝트를 추진해 각국의 QKD 테스트베드를 통합하려 하고, 미국은 Q-NEXT와 같은 DOE 프로젝트를 통해 양자 네트워킹 핵심 기술(메모리, 인터커넥트)을 연구 중이다.

2. 양자 인터넷

양자 인터넷(Quantum Internet)은 여러 양자 네트워크를 연결하여 전 지구적 규모의 양자 정보 네트워크를 구현한 개념이다^[59]. 이는 단순한 보안 통신망을 넘어, “양자 정보의 인터넷 프로토콜(IP)”을 마련하는 단계라 할 수 있다. 양자 인터넷은 원거리 노드 간 온디맨드 얽힘 생성·분배를 핵심 서비스로 하며, 목표는 전 세계 어디서든 얽힘 리소스를 호출할 수 있는 “양자 자원 공유 인프라”를 만드는 것이다. 이를 통해 분산 양자컴퓨팅, 글로벌 시계 동기화, 초정밀 센싱 네트워크가 가능하다. 위성·광섬유·자유공간을 연결한 하이브리드 채널, 실용화된 메모리·교환 기술을 통해 대륙 간 링크 확장을 위한 양자 리피터 체인, 클래식 인터넷의 TCP/IP에 대응하는 “QIP(Quantum Internet Protocol)” 개발 등이 필요

하다. EU Quantum Internet Alliance (QIA)에서는 네덜란드 QuTech을 중심으로 유럽 전역을 연결하는 양자 인터넷 로드맵을 제시하고 있으며, 현재 산업계에서는 “장기적 비전”으로 간주된다^[60].

V. 전망과 결론

양자암호통신은 불과 10여 년 전만 해도 학술 연구의 영역에 머물렀으나, 현재는 산업계의 상용 장비 개발과 국가적 인프라 구축으로 빠르게 확산되고 있다. 이는 양자컴퓨팅의 발전이 불러온 공개키 암호체계의 잠재적 붕괴 위험, 즉 ‘양자 리스크’가 가시화되면서 보안 패러다임의 대전환이 필요해졌기 때문이다. QKD는 조건부 정보이론적 보안을 제공하는 몇 안 되는 기술로, 금융·국방·공공 인프라와 같이 초고도 보안이 요구되는 분야에서 이미 실증과 초기 도입이 이루어지고 있다. 따라서 향후 10년은 양자암호통신이 연구개발 단계를 넘어 국가·산업 인프라로 정착하는 결정적 시기가 될 것으로 전망된다.

PIC 기술 등 핵심 기술의 진화가 양자암호통신 상용화의 가속도를 좌우할 것이며, 이러한 산업적 확산과 글로벌 경쟁구도가 가속화되어 각국은 자국 중심의 양자 보안 네트워크를 구축하는 동시에, 국제 연결성과 상호운용성을 확보하기 위해 표준화·인증 경쟁에도 참여를 확대하고 있다. 향후에는 국가별 QKD 네트워크가 국제적 양자 백본으로 연계되는 과정에서 국제 표준과 인증 체계가 필수적 역할을 할 것으로 예상되며, QKD에서 출발한 양자 네트워크와 양자 인터넷으로의 진화는 장기적으로 정보통신 패러다임을 재편할 것으로 기대한다.

참고 문헌

- [1] 유형정, “양자정보기술,” KISTEP 브리프 21호, 2022.
- [2] ID Quantique, “Quantum Key Distribution (QKD) solutions,” 2022.
- [3] KT, “양자암호통신 공공망 실증 사업 추진,” 보도자료, 2020.
- [4] SK텔레콤, “양자암호 기반 5G 보안망 실증,” 보도자료, 2021.
- [5] ITU-T, “Overview on networks supporting quantum key

- distribution (QKD),” ITU-T Rec. Y.3800, Oct. 2019.
- [6] ITU-T, “Security framework for quantum key distribution networks,” ITU-T Rec. X.1710, Oct. 2020.
- [7] ETSI, “Quantum Key Distribution (QKD) Industry Specification Group (ISG QKD),” Committee page, accessed Aug. 2025.
- [8] ISO/IEC, “Information security—Security requirements, test and evaluation methods for quantum key distribution—Part 1: Requirements,” ISO/IEC 23837-1:2023, 2023.
- [9] J. Yin et al., “Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers,” *Science*, vol. 356, no. 6343, pp. 1140–1144, 2017.
- [10] S. Pirandola et al., “Advances in quantum cryptography,” *Adv. Opt. Photon.*, vol. 12, no. 4, pp. 1012–1236, Dec. 2020.
- [11] European Commission, “The European Quantum Communication Infrastructure (EuroQCI),” Official portal, 2022.
- [12] C. J. Pugh et al., “Airborne demonstration of a quantum key distribution receiver payload,” *Quantum Sci. Technol.*, vol. 2, no. 2, 024009, 2017.
- [13] H. Takenaka et al., “Satellite-to-ground quantum-limited communication using a 50-kg-class microsatellite,” *Nat. Photonics*, vol. 11, pp. 502–508, 2017.
- [14] Z. Tang et al., “Drone-based quantum key distribution,” *npj Quantum Inf.*, vol. 6, no. 1, 2020.
- [15] N. Gisin et al., “Quantum communication,” *Nat. Photonics*, vol. 1, no. 3, pp. 165–171, Mar. 2007.
- [16] A. Kinos et al., “Complete analysis of a realistic fiber-based quantum repeater scheme,” *Phys. Rev. Research*, accepted Aug. 2025, DOI: 10.1103/rtv-p5zy.
- [17] L. Pettersson and A. S. Sørensen, “Long-distance quantum communication using concatenated ring graph codes,” *arXiv preprint*, Mar. 2025.
- [18] P. Sharma et al., “Quantum key distribution secured optical networks: a survey,” *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 2, pp. 2049–2083, 2021.
- [19] D. Bacco et al., “Two-dimensional distributed-phase-reference protocol for quantum key distribution,” 2016.

- [20] J. González-Payo et al., "Upper security bounds for coherent-one-way quantum key distribution," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 125, no. 26, 260510, 2020.
- [21] A. Mizutani et al., "Finite-key security analysis of differential-phase-shift quantum key distribution," *Phys. Rev. Research*, vol. 5, no. 2, 023132, 2023.
- [22] ID Quantique, "Commercial QKD products and financial sector applications."
- [23] Toshiba Europe, "Long-distance QKD field trials in UK and EU testbeds."
- [24] <https://www.qticompany.com/>
- [25] <https://q-bird.com/>
- [26] <https://www.luxquanta.com/>
- [27] <https://www.quantum-info.com/English/>
- [28] <https://newsroom.bt.com/bt-and-toshiba-to-build-worlds-first-commercial-quantum-secured-metro-network-across-london/>
- [29] J. A. Dolphin et al., "A hybrid integrated quantum key distribution transceiver chip," *npj Quantum Inf.*, 2023.
- [30] Y. Zhang et al., "Recent advances in quantum key distribution and networking," *Chin. Phys. B*, vol. 32, 124207, 2023.
- [31] W. Q. Cai et al., "Free-space quantum key distribution during daylight and at night," *Optica*, vol. 11, pp. 647–652, 2024.
- [32] H. Yin et al., "All-day free-space quantum key distribution with thermal source towards quantum secure communications for unmanned vehicles," *npj Quantum Inf.*, vol. 11, no. 134, 2025.
- [33] ITU-T, "Overview on networks supporting quantum key distribution (QKD)," ITU-T Rec. Y.3800, Oct. 2019.
- [34] ITU-T, "Security framework for quantum key distribution networks," ITU-T Rec. X.1710, Oct. 2020.
- [35] ETSI, "Quantum Key Distribution (QKD) Industry Specification Group (ISG QKD)," Committee page, accessed Aug. 2025.
- [36] ISO/IEC, "Information security—Security requirements, test and evaluation methods for quantum key distribution—Part 1: Requirements," ISO/IEC 23837-1:2023, 2023.
- [37] ITU-T, "Standardization roadmap on quantum key distribution networks (Y.3800-series)," ITU-T Supplement, Mar. 2023.
- [38] ITU-T SG13, "Draft Supplement to the Y.3800-series: Applications of ML in QKDN," Liaison attachment, Jul. 2021.
- [39] ITU-T, "Security framework for quantum key distribution networks," Official PDF, Oct. 2020.
- [40] ETSI, "ISG QKD Activity Report 2023," Apr. 2023.
- [41] ETSI, "Protection Profile for QKD modules," ETSI GS QKD 016 V2.1.1, Jan. 2024.
- [42] ETSI, "Quantum Key Distribution (QKD) Industry Specification Group (ISG QKD)," 2025.
- [43] ISO/IEC, "Information security—ISO/IEC 23837-1:2023 (Online Browsing Platform)," 2023.
- [44] ITU-T SG11, "Initial baseline text of draft Rec. Q.QKDNI_profr (QKD network interworking signalling)," Liaison attachment, May 2023.
- [45] <https://www.tta.or.kr/>
- [46] <https://www.nis.go.kr/>
- [47] 국정원, "(3편) 국가용 보안요구사항 V3.0 - 양자암호통신장비," 2023.
- [48] European Commission, "Testing and evaluation infrastructure for the European Quantum Communication Infrastructure (EuroQCI)," Digital Europe call, 2024.
- [49] European Commission, "European Quantum Communication Infrastructure (EuroQCI) - policy page," 2025.
- [50] BSI, "Certification Report BSI-CC-PP-0120-2024: Protection Profile for QKD Modules," 2024.
- [51] ENISA, "Post-Quantum Cryptography - Current state and quantum mitigation," 2024.
- [52] European Policy Centre, "A quantum cybersecurity agenda for Europe," 2024.
- [53] UK NCSC, "Quantum networking technologies: Guidance and PQC migration roadmap," 2024.
- [54] BSI, "Position Paper on Quantum Key Distribution," 2024.
- [55] NICT, "Japan activities for QKD standardization and certification development," ITU-T workshop slides, 2022.
- [56] H. J. Kimble, "The quantum internet," *Nature*, vol. 453, pp.



1023–1030, 2008.

[57] H. Semenenko et al., “Quantum Communication 101,” NASA, 2024.

[58] Y. A. Chen et al., “An integrated space-to-ground quantum communication network,” *Nature*, vol. 589, pp. 214–219, 2021.

[59] S. Wehner et al., “Quantum internet: A vision for the road ahead,” *Science*, vol. 362, eaam9288, 2018.

[60] <https://quantuminternetalliance.org/>



노 광 석

- 2004년 2월 건국대학교 전자공학과 학사
- 2006년 2월 건국대학교 전자공학과 석사
- 2013년 8월 고려대학교 전자전기컴퓨터공학과 박사
- 2006년 3월 ~ 2007년 5월 삼성전자 무선사업부 연구원
- 2013년 4월 ~ 2019년 9월 LG전자 차세대표준연구소 선임연구원
- 2019년 10월 ~ 2021년 7월 고려대학교
스마트양자통신연구센터
연구교수
- 2021년 6월 ~ 현재 (주)큐심플러스 대표이사
- 2021년 8월 ~ 현재 고려대학교
초신뢰양자인터넷연구센터
연구교수
- 2024년 12월 ~ 현재 과기부 ICT연구개발사업
중합심의위원회 민간위원
- 2025년 3월 ~ 현재 양자전략위원회 실무위원회
민간위원

〈관심 분야〉

Quantum Key Distribution, Quantum Communication,
Quantum Network, Quantum Internet, Distributed
Quantum Computing

통신 분야

[통신]

- UAV-RIS 지원 비지상 네트워크에서 위치추정 성능 향상을 위한 트랜스포머 기반 학습
신승석, 문상미, 황인태

[마이크로파 및 전파전파]

- Ku-Band 광대역 소형 브랜치 라인 커플러 설계
남형식, 여수철, 박준식

컴퓨터 분야

[인공지능 및 보안]

- 연령 친화형 스마트홈 시스템을 위한 AI기반 수면 및 정서 예측 프레임워크 설계 및 평가
전명임, 강문식
- 적대적 재밍 탐지 및 대응을 위한 SVM-DBSCAN 이중 탐지 구조
박예은, 김혜리, 정종문

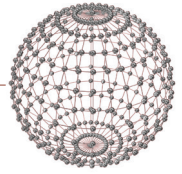
인공지능 신호처리 분야

[영상 신호처리]

- 표면 반사를 고려한 HSV 이미지 기반 파라미터 최적화 3차원 가우시안 스플래팅 모델
김경민, 송병철

[음향 및 신호처리]

- 4채널 수신 초음파 어레이를 사용한 제스처 인식
주재우, 고진환



시스템 및 제어 분야

[회로 및 시스템]

- 상보 동적 증폭기 기반 4배 인터플레이팅 플래시 아날로그-디지털 변환기
김한준, 오동렬

산업전자 분야

[컴퓨터 응용]

- 중고온수 캐스케이드 히트펌프 급탕 시스템에서 급탕 온도 유지를 위한 최적 운영 스케줄러 설계 및 구현
박용국, 이민구, 이태훈, 김태원

국 내 외 학 술 행 사 안 내

국·내외에서 개최되는 각종 학술대회/전시회를 소개합니다.

게재를 희망하시는 분은 간략한 학술대회 정보를 이메일로 보내주시면 게재하겠습니다.

연락처: ieie@theieie.org

>>2025년 10월

일 자	학술대회명	개최장소	홈페이지/연락처
10.01. - 10.03.	2025 Artificial Intelligence for Business (AIxB)	Laguna Hills, California, USA	https://www.aixb.org/
10.01. - 10.03.	2025 Artificial Intelligence x Humanities, Education, and Art (AIxHEART)	Laguna Hills, California, USA	https://www.aixheart.org/
10.01. - 10.02.	2025 2nd International Conference on Innovations in Engineering, Science and Technology for Sustainable Development (ICEST)	Male', Maldives	http://icest.mnu.edu.mv/
10.01. - 10.03.	2025 Conference on AI, Science, Engineering, and Technology (AIxSET)	Laguna Hills, California, USA	https://www.aixset.org/
10.01. - 10.03.	2025 International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)	Oulu, Finland	http://cc.oulu.fi/~ulce/icnsc2025/index.html
10.04. - 10.10.	2025 IEEE 8th Congress on Information Science and Technology (CIST)	Marrakech, Morocco	http://www.ieee-congress.org/cist25/
10.04.	2025 IEEE 15th International Conference on System Engineering and Technology (ICSET)	Kuala Lumpur, Malaysia	https://sites.google.com/view/icset-malaysia/home
10.05. - 10.08.	2025 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)	Vienna, Austria	https://www.ieeesmc2025.org/
10.05. - 10.09.	2025 9th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (AP SAR)	Matsue, Japan	https://apsar2025.ce.t.kyoto-u.ac.jp/index.php
10.05. - 10.08.	2025 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)	Vitoria, Brazil	https://cobep2025.ufes.br/
10.06. - 10.10.	2025 IEEE 6th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)	Kharkiv, Ukraine	http://khpiweek.ieee.org.ua/
10.06. - 10.10.	2025 IEEE Symposium on Visual Languages and Human-Centric Computing (VL/HCC)	Raleigh, North Carolina, USA	https://conf.researchr.org/home/vlhcc-2025
10.06. - 10.08.	2025 IEEE 22nd International Conference on Mobile Ad-Hoc and Smart Systems (MASS)	Chicago, Illinois, USA	https://ieeemass2025.github.io/ieeemass2025/
10.06. - 10.08.	2025 7th International Conference on Innovative Data Communication Technologies and Application (ICIDCA)	Coimbatore, India	https://icidca.com/2025/
10.06. - 10.10.	MILCOM 2025 - 2025 IEEE Military Communications Conference (MILCOM)	Los Angeles, California, USA	http://milcom2025.milcom.org/
10.06. - 10.08.	2025 6th International Conference on Control and Fault-Tolerant Systems (SysTol)	Ayia Napa, Cyprus	https://www.kios.ucy.ac.cy/systol25/
10.07. - 10.09.	2025 IEEE Secure Development Conference (SecDev)	Indianapolis, Indiana, USA	https://secdev.ieee.org/2024/home
10.07. - 10.11.	2025 International Semiconductor Conference (CAS)	Sinaia, Romania	https://www.imt.ro/cas/
10.08. - 10.10.	2025 IEEE 4th International Conference on Technology, Engineering, Management for Societal impact using Marketing, Entrepreneurship and Talent (TEMSMET)	New Delhi, India	https://temsmet2025.org/
10.08. - 10.10.	2025 IEEE Latin American Electron Devices Conference (LAEDC)	Guadalajara, Mexico	https://attend.ieee.org/laedc-2025/
10.08. - 10.10.	2025 Black Issues in Computing Education (BICE)	Miami, Florida, USA	https://www.bicesymposium.org/
10.09. - 10.13.	2025 IEEE 12th International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA)	Birmingham, United Kingdom	https://attend.ieee.org/dsaa-2025/
10.09. - 10.11.	2025 14th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)	Bucharest, Romania	http://www.atee.upb.ro/atee2025/

일 자	학술대회명	개최장소	홈페이지/연락처
10.09. - 10.10.	2025 66th International Scientific Conference on Information Technology and Management Science of Riga Technical University (ITMS)	Riga, Latvia	https://itms.rtu.lv/
10.10. - 10.11.	2025 2nd Asian Conference on Intelligent Technologies (ACOIT)	KOLAR, India	https://www.acoit.in/
10.10. - 10.12.	2025 Global Reliability and Prognostics and Health Management Conference (PHM-Xian)	Xian, China	https://icphm.org/
10.10. - 10.11.	2025 International Conference on Emerging Technologies in Electronics and Green Energy (ICETEG)	MYSORE, India	http://iceteg.jssstuniv.in/
10.11. - 10.12.	2025 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIIRT)	Beijing, China	https://ieee-icirt.org/2025/
10.12. - 10.15.	2025 IEEE BiCMOS and Compound Semiconductor Integrated Circuits and Technology Symposium (BCICTS)	Phoenix, Arizona, USA	https://bcicts.org/
10.12. - 10.15.	2025 IEEE 20th Nanotechnology Materials and Devices Conference (NMDC)	Delhi, India	https://ieeenmde.org/nmde-2025/
10.12. - 10.15.	2025 IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics (WASPAA)	Tahoe City, California, USA	https://wasppaa.com/
10.12. - 10.15.	2025 IEEE International Communications Energy Conference (INTELEC)	Houston, Texas, USA	https://2025.ieee-intelec.org/
10.12. - 10.14.	2025 IEEE International Symposium on Workload Characterization (IISWC)	Irvine, California, USA	https://iiswc.org/iiswc2025/
10.12. - 10.14.	2025 IEEE 30th International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)	Tempe, Arizona, USA	http://camad2025.ieee-camad.org/
10.12. - 10.15.	2025 8th International Advanced Research Workshop on Transformers (ARWtr)	BAIONA, Spain	http://arwtr2025.webs.uvigo.es/
10.12. - 10.15.	2025 IFIP/IEEE 33rd International Conference on Very Large Scale Integration (VLSI-SoC)	Puerto Varas, Chile	https://asic-chile.cl/vlsisoc/
10.12. - 10.15.	2025 30th Microoptics Conference (MOC)	Utsunomiya, Japan	https://moc2025.com/
10.13. - 10.16.	2025 IEEE 34th International Conference on Microelectronics (MIEL)	Nis, Serbia	https://miel.elfak.ni.ac.rs/
10.13. - 10.17.	2025 European Data Handling & Data Processing Conference (EDHPC)	Elche, Spain	https://atpi.eventsair.com/edhpc-2025/
10.13. - 10.17.	2025 IEEE International Carnahan Conference on Security Technology (ICCST)	San Antonio, Texas, USA	https://site.ieee.org/iccst/
10.13. - 10.16.	2025 IEEE 50th Conference on Local Computer Networks (LCN)	Sydney, Australia	https://www.ieeelcn.org/
10.13. - 10.16.	2025 Fourteenth International Conference on Image Processing, Theory, Tools & Applications (IPTA)	Istanbul, Turkiye	https://ipta-conference.com/ipta25/
10.14. - 10.17.	2025 IEEE 12th International Conference on E-Learning in Industrial Electronics (ICELIE)	Madrid, Spain	https://icelie.org/
10.14. - 10.17.	2025 7th International Conference on Blockchain Computing and Applications (BCCA)	Durbovnic, Croatia	https://bccac-conference.org/2025/
10.14. - 10.17.	2025 3rd International Conference on Intelligent Metaverse Technologies & Applications (IMETA)	Durbovnic, Croatia	https://imeta-conference.org/2025/
10.14. - 10.17.	2025 IEEE 7th Colombian Conference on Automatic Control (CCAC)	Pereira, Colombia	https://ccac2025.com/
10.14. - 10.17.	2025 3rd International Conference on Federated Learning Technologies and Applications (FLTA)	Dubrovnik, Croatia	https://flta-conference.org/flta-2025/flta-2025/
10.14. - 10.16.	2025 IEEE International Conference on Wireless for Space and Extreme Environments (WISEE)	Halifax, Nova Scotia, Canada	https://attend.ieee.org/wisee-2025/
10.14. - 10.17.	2025 16th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)	São Sebastião, Brazil	https://induscon.org/
10.14. - 10.17.	2025 IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP)	Quebec City, Quebec, Canada	https://mwp2025.org/en
10.15. - 10.22.	2025 IEEE 70th Holm Conference on Electrical Contacts (HLM)	San Antonio, Texas, USA	https://ieee-holm.org/
10.15. - 10.16.	2025 IEEE 9th International Conference on Software Engineering & Computer Systems (ICSECS)	Pekan, Pahang, Malaysia	https://icsecs.umpsa.edu.my/index.php/en/
10.15. - 10.18.	2025 IEEE 20th International Conference on Computer Science and Information Technologies (CSIT)	Lviv, Ukraine	http://csit.ieee.org.ua/

일 자	학술대회명	개최장소	홈페이지/연락처
10.15. - 10.17.	2025 International Conference on Communications, Computing, Cybersecurity, and Informatics (CCCI)	Hangzhou, China	http://ccci.udg.edu/
10.15. - 10.17.	2025 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI)	Pattaya, Thailand	http://icpei.net/2025/
10.15. - 10.17.	2025 International Symposium on Accreditation of Engineering and Computing Education (ICACIT)	Chiclayo, Peru	http://icacit.org.pe/symposium/
10.15. - 10.17.	2025 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)	Waterloo, Ontario, Canada	https://epec2025.ieee.ca/
10.15. - 10.17.	2025 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH)	Vienna, Austria	http://media-publisher.eu/conference-emctech/call-for-papers/
10.15. - 10.16.	2025 1st IEEE International Conference on Crisp & Soft Computing in AI, Modeling and Control (CSC-AIMC)	Debrecen, Hungary	https://scitope.com/control/
10.16. - 10.19.	2025 5th International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME)	Zanzibar, Tanzania	https://www.iceccme.com/
10.16. - 10.18.	2025 IEEE International Conference on Geoinformation Science and Communication Technology (GSCT)	Shanghai, China	https://www.gsctconf.com/
10.17. - 10.18.	2025 2nd International Conference on Software, Systems and Information Technology (SSITCON)	Tumkur, India	https://ssitcon.in/
10.17. - 10.19.	2025 6th International Conference on Big Data, Artificial Intelligence and Internet of Things Engineering (ICBAIE)	Shanghai, China	https://www.icbaie.net/
10.17. - 10.18.	2025 IEEE International Conference on Distributed Computing, VLSI, Electrical Circuits and Robotics (DISCOVER)	Mangalore, India	http://www.ieee-discover.org/
10.17. - 10.19.	2025 5th International Conference on Electrical Engineering and Mechatronics Technology (ICEEMT)	Shenzhen, China	https://www.iceemt.org/
10.17. - 10.19.	2025 6th International Conference on Machine Learning and Computer Application (ICMLCA)	Shenzhen, China	https://www.icmlca.org/
10.18. - 10.20.	2025 IEEE Conference on Dependable and Secure Computing (DSC)	Taipei, Taiwan	https://dsc2025.conf.nycu.edu.tw/
10.18. - 10.22.	2025 58th IEEE/ACM International Symposium on Microarchitecture (MICRO)	Seoul, Korea (South)	https://microarch.org/
10.19. - 10.23.	2025 IEEE Energy Conversion Conference Congress and Exposition (ECCE)	Philadelphia, Pennsylvania, USA	https://www.ieee-ecce.org/2025/
10.19. - 10.25.	2025 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)	Hangzhou, China	https://irmv.sjtu.edu.cn/iros2025/
10.19. - 10.22.	2025 IEEE 34th Conference on Electrical Performance of Electronic Packaging and Systems (EPEPS)	Milpitas, California, USA	https://www.epeps.org/
10.19. - 10.20.	2025 IEEE International Symposium on Emerging Metaverse (ISEMV)	Honolulu, Hawaii, USA	https://ieee-ismv.org/
10.20. - 10.23.	2025 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe)	Valletta, Malta	https://ieee-isgt-europe.org/
10.20. - 10.21.	2025 International Conference BIOMDLORE	Vilnius, Lithuania	https://www.biomdlore.lt/
10.20. - 10.22.	2025 International Conference on Intelligent Data Analytics and Sustainable Systems (IDASS)	Qingdao, China	https://idass2025.scievent.com/
10.20. - 10.22.	2025 21th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)	Marrakesh, Morocco	http://www.wimob.org/wimob2025/
10.20. - 10.22.	2025 IEEE International Conference on Technology Management, Operations and Decisions (ICTMOD)	Glasgow, United Kingdom	http://ictmod-conference.com/
10.20. - 10.22.	2025 17th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)	Bangkok, Thailand	https://icitee2025.it.kmitl.ac.th/
10.20. - 10.22.	2025 IEEE International Conference on Device Technologies for Diversified Applications (DTDA)	Sendai, Miyagi Prefecture, Japan	https://ieee-dtda.org/
10.21. - 10.24.	2025 IEEE 8th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)	Kyiv, Ukraine	https://msnmc.ieee.org.ua/
10.21. - 10.23.	2025 IEEE International Symposium on Defect and Fault Tolerance in VLSI and Nanotechnology Systems (DFT)	Barcelona, Spain	https://www.dfts.org/
10.21. - 10.24.	2025 IEEE 16th International Conference on ASIC (ASICON)	Kunming, China	http://www.asicon.org/
10.21. - 10.24.	2025 IEEE 36th International Symposium on Software Reliability Engineering (ISSRE)	São Paulo, Brazil	https://issre.github.io/2025/

일 자	학술대회명	개최장소	홈페이지/연락처
10.22. - 10.24.	2025 17th International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications (TELSIKS)	Nis, Serbia	http://www.telsiks.org.rs/
10.22. - 10.24.	2025 Asia Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC)	Singapore, Singapore	https://www.apsipa2025.org/wp/
10.22. - 10.24.	2025 22nd International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO)	Marbella, Spain	https://icinco.scitevents.org/
10.22. - 10.24.	2025 IEEE 7th International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT)	Yinchuan, China	http://www.iccasit.org/
10.22. - 10.24.	2025 International Conference on Power Engineering and Electrical Technology (PEET)	Shiga, Japan	https://icpeet.com/
10.22. - 10.24.	2025 International Conference on Electrical Systems & Automation (ICESA)	Troyes, France	http://icesa.ma/
10.24. - 10.25.	2025 International Conference on Communication, Computer, and Information Technology (IC3IT)	Mandya, India	http://mysururoyal.org/ieecon-2025/
10.24. - 10.26.	2025 9th CAA International Conference on Vehicular Control and Intelligence (CVCI)	Qingdao, China	http://www.ascl.jlu.edu.cn/vci/cvci2025/ Home.htm
10.24. - 10.26.	2025 IEEE 4th International Conference on Computing, Communication, Perception and Quantum Technology (CCPQT)	Ordos, China	https://www.ccpqt.org/
10.24. - 10.26.	2025 IEEE 6th Global Conference for Advancement in Technology (GCAT)	Bangalore, India	http://globeconf.org/
10.24. - 10.25.	2025 International Conference on Circuits, Controls and Communications (CCUBE)	Bangalore, India	https://ccube25.com/
10.24. - 10.26.	2025 International Conference on Algorithms, Data Mining, and Information Technology (ADMIT)	Chengdu, China	http://www.admit2025.net/
10.24. - 10.26.	2025 17th International Conference on Signal Processing Systems (ICSPS)	Chengdu, China	https://www.icspss.org/index.html
10.24. - 10.26.	2025 8th International Conference on Robotics, Control and Automation Engineering (RCAE)	Xi'an, China	https://www.rcae.net/
10.27. - 10.31.	2025 Annual Conference Magnetism and Magnetic Materials (MMM)	West Palm Beach, Florida, USA	https://2025-joint.magnetism.org/
10.27. - 10.30.	2025 14th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)	Vienna, Austria	http://www.icrera.org/
10.27. - 10.31.	2025 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)	Fukuoka, Japan	https://www.isap2025.org/
10.27. - 10.30.	TENCON 2025 - 2025 IEEE Region 10 Conference (TENCON)	Kota Kinabalu, Malaysia	https://ieeemy.org/tencon2025/
10.27. - 10.30.	2025 IEEE Radio and Antenna Days of the Indian Ocean (RADIO)	Flic-en-Flac, Mauritius	https://radiosociety.org/radio2025/
10.27. - 10.29.	2025 IEEE 43rd International Conference on Computer Design (ICCD)	Richardson, Texas, USA	http://www.iccd-conf.com/home.html
10.27. - 10.29.	2025 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES)	Coventry, United Kingdom	https://ieee-itss.org/conf/icves/
10.27. - 10.30.	2025 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)	Paris, France	https://www.isncc-conf.org/
10.28. - 10.31.	2025 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS)	Kyoto, Japan	https://icsos2025.ieee-icsos.org/
10.28. - 10.31.	2025 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA)	Valence, France	https://2025.ieee-rfid-ta.org/
10.28. - 10.29.	2025 IEEE Nordic Circuits and Systems Conference (NorCAS)	Riga, Latvia	https://events.tuni.fi/norcass/
10.28. - 10.30.	2025 IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)	Valparaiso, Chile	https://chilecon2025.pucv.cl/
10.28. - 10.29.	2025 Global Conference on Sustainable Energy and Net-Zero Emissions (SENZE)	Hail, Saudi Arabia	https://conferences.uoh.edu.sa/ Conference/SENZE'25
10.28. - 10.31.	2025 IEEE 37th International Symposium on Computer Architecture and High Performance Computing (SBAC-PAD)	Bonito, Mato Grosso do Sul, Brazil	https://sbac-pad2025.ufms.br/
10.28. - 10.30.	2025 10th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)	Coimbatore, India	http://icoecs.org/2025/

일 자	학술대회명	개최장소	홈페이지/연락처
10.29. - 10.31.	2025 International Conference on Electrical, Electronics, and Computer Science with Advance Power Technologies - A Future Trends (ICE2CPT)	Jamshedpur, India	https://ice2cpt.com/
10.29. - 10.31.	2025 IEEE International Workshop on Sport, Technology and Research (STAR)	Trento, Italy	https://www.ieee-star.org/
10.31. - 11.02.	2025 IEEE 4th International Conference on Mechatronics and Intelligent Transportation Engineering (ICMITE)	Wuhan, China	https://www.matconf.net/
10.31. - 11.02.	2025 6th International Conference on Computer Communication and Network Security (CCNS)	Nanjing, China	https://www.icccns.org/

>>2025년 11월

11.01. - 11.02.	2025 IEEE 7th International Conference on Cybernetics, Cognition and Machine Learning Applications (ICCCMLA)	Hamburg, Germany	https://www.intdatacon.com/
11.01. - 11.08.	2025 IEEE Nuclear Science Symposium (NSS), Medical Imaging Conference (MIC) and Room Temperature Semiconductor Detector Conference (RTSD)	Yokohama, Japan	https://nssmic.ieee.org/2025/
11.01. - 11.07.	2025 IEEE Visualization and Visual Analytics (VIS)	Vienna, Austria	https://ieevis.org/year/2025/welcome
11.02. - 11.07.	2025 Antenna Measurement Techniques Association Symposium (AMTA)	Tucson, Arizona, USA	https://2025.amta.org/
11.02. - 11.05.	2025 29th International Computer Science and Engineering Conference (ICSEC)	Chiang Mai, Thailand	https://icsec2025.org/
11.02. - 11.05.	2025 22nd International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering (JCSSE)	Chiang Mai, Thailand	https://jcsse2025.cs.science.cmu.ac.th/
11.02. - 11.05.	2025 IEEE Asian Solid-State Circuits Conference (A-SSCC)	Daejeon, Korea (South)	https://a-sscc2025.org/
11.02. - 11.05.	2025 IEEE International Conference on Quantum Artificial Intelligence (QAI)	Naples, Italy	https://qai2025.unina.it/
11.02. - 11.05.	2025 IEEE International Conference on Future Machine Learning and Data Science (FMLDS)	Los Angeles, California, USA	https://fmlds.org/
11.02. - 11.05.	2025 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE)	Nashville, Tennessee, USA	https://2025.fie-conference.org/
11.03. - 11.05.	2025 Third International Conference on Emerging Applications of Material Science and Technology (ICEAMST)	Bengaluru, India	https://iceamst.com/2025/
11.03. - 11.05.	2025 IEEE 21st International Conference on Body Sensor Networks (BSN)	Los Angeles, California, USA	https://bsn.embs.org/2025/
11.03. - 11.04.	2025 International Conference on Intelligent Computer Systems, Data Science and Applications (IC2SDA)	Blida, Algeria	https://univ-blida.dz/IC2SDA/
11.04.	2025 IEEE Online Forum on Climate Change Technologies (OFCCT)	Virtual	https://ieee-ofcct.org/
11.04. - 11.07.	2025 APWG Symposium on Electronic Crime Research (eCrime)	San Diego, California, USA	https://apwg.org/event/ecrime2025/
11.04. - 11.06.	2025 IEEE Middle East Conference on Communications and Networking (MECOM)	Cairo, Egypt	https://mecom2025.ieee-mecom.org/group/66
11.04. - 11.08.	2025 Photonics & Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS-Fall)	Chiba, Japan	https://chiba2025.piers.org/
11.04. - 11.07.	2025 25th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)	Incheon, Korea (South)	https://2025.iccas.org/
11.04. - 11.05.	2025 IEEE International Conference on Advanced Information Scientific Development (ICAISD)	Jakarta, Indonesia	https://conference.bsi.ac.id/
11.05. - 11.06.	2025 1st Future International Conference on Artificial Intelligence and Cybersecurity (FICAC)	Cairo, Egypt	https://www.fue.edu.eg/FICAC25/
11.05. - 11.07.	2025 10th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE)	Stara Zagora, Bulgaria	https://eeae-conf.uni-ruse.bg/
11.05. - 11.08.	2025 International Automatic Control Conference (CACS)	Hsinchu, Taiwan	https://cacs2025.web.nycu.edu.tw/
11.05. - 11.07.	2025 IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)	Antigua, Guatemala	https://latincom2025.ieee-latincom.org/
11.05. - 11.07.	2025 IEEE International Conference on Distributed Ledger Technologies (ICDLT)	Pune, India	https://icdlt.ieee-punesection.org/
11.05. - 11.07.	2025 IEEE Latin American Conference on Computational Intelligence (LA-CCL)	Mexico City, Mexico	https://lacci2025.org/

일 자	학술대회명	개최장소	홈페이지/연락처
11.05. - 11.08.	2025 International Conference on Fuzzy Theory and Its Applications (FUZZY)	Hsinchu, Taiwan	https://ite.mcu.edu.tw/fuzzy2025/
11.05. - 11.08.	2025 Asia Communications and Photonics Conference (ACP)	Jiangsu, China	https://acpconf.com/
11.05. - 11.07.	2025 9th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)	Coimbatore, India	https://icoeca.org/
11.05. - 11.07.	2025 Asia Meeting on Environment and Electrical Engineering (EEE-AM)	Hanoi, Vietnam	https://eeeam.net/eee-am-frontpage/eee-am-2023/
11.06. - 11.08.	2025 IEEE Women in Engineering (WIE) Forum USA East	Arlington, Virginia, USA	https://attend.ieee.org/wie-forum-usa-east/
11.06. - 11.08.	2025 IEEE International Conference on Signals and Systems (ICSigSys)	Bali, Indonesia	https://icsigsys.info/
11.06. - 11.07.	2025 International Conference on Big Data, Knowledge and Control Systems Engineering (BdKCSE)	Bankya, Bulgaria	https://conference.ott-iiict.bas.bg/
11.06. - 11.08.	2025 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence Systems (IoTals)	Bali, Indonesia	https://iotais.org/
11.06. - 11.08.	2025 International Conference on Emerging Engineering Technologies and Applications (IC-EETA)	Indore, India	https://conference.medicaps.ac.in/
11.06. - 11.08.	2025 IEEE 3rd International Symposium on Sustainable Energy, Signal Processing and Cybersecurity	Gunupur, Odisha, India	https://ieee-issc.in/
11.06. - 11.08.	2025 IEEE Asia Pacific Conference on Wireless and Mobile (APWiMob)	Bali, Indonesia	https://apwimobconf.org/
11.06. - 11.07.	2025 9th International Conference on Electrical, Telecommunication and Computer Engineering (ELTICOM)	Medan, Indonesia	https://ocs.usu.ac.id/ELTICOM/elticom2024/index
11.06. - 11.08.	2025 17th International Conference on Knowledge and System Engineering (KSE)	Da Lat, Vietnam	https://kse2025.kse-conferences.org/information/
11.07. - 11.09.	2025 International Conference on Computer Science and Artificial Intelligence Applications (CSAIA)	Changsha, China	https://www.iccsaia.org/
11.07. - 11.09.	2025 IEEE 11th International Conference on Edge Computing and Scalable Cloud (EdgeCom)	NYC, New York, USA	https://www.cloud-conf.net/cscloud/2025/ssc/index.html
11.07. - 11.09.	2025 IEEE 12th International Conference on Cyber Security and Cloud Computing (CSCloud)	NYC, New York, USA	https://www.cloud-conf.net/cscloud/2025/cscloud/index.html
11.07. - 11.09.	2025 9th IEEE International Conference on Network Intelligence and Digital Content (IC-NIDC)	Beijing, China	https://nidc2025.bupt.edu.cn/
11.07. - 11.09.	2025 10th International Conference on Control, Robotics and Cybernetics (CRC)	Shenzhen, China	https://www.iccrc.org/
11.07. - 11.09.	2025 International Conference on Computer, Internet of Things and Smart City (CIoTSC)	Suzhou, China	https://www.ciotsc.org/
11.07. - 11.09.	2025 5th International Conference on Artificial Intelligence, Robotics, and Communication (ICAIRC)	Xiamen, China	https://www.icairc.net/
11.07. - 11.09.	2025 12th International Forum on Electrical Engineering and Automation (IFEEA)	Xi'an, China	https://www.ifeea.info/
11.07. - 11.10.	2025 IEEE 3rd International Power Electronics and Application Symposium (PEAS)	Shenzhen, China	https://peas.cpss.org.cn/
11.07. - 11.09.	2025 8th International Conference on Machine Learning and Natural Language Processing (MLNLP)	Hangzhou, China	https://www.mlnlp2025.net/
11.07. - 11.08.	2025 IEEE International Conference on Intelligent Signal Processing and Effective Communication Technologies (INSPECT)	Gwalior, India	https://inspect.iitm.ac.in/
11.07. - 11.09.	2025 International Conference on Intelligent Education and Intelligent Research (IEIR)	Wuhan, China	https://ieir2025.org/
11.07. - 11.09.	2025 7th International Conference on Electronic Engineering and Informatics (EEI)	Yangzhou, China	https://www.icoeei.org/
11.07. - 11.09.	2025 International Conference on Advanced Computing and Intelligent Robotics Applications (ACIRA)	Guangzhou, China	http://icacira.com/
11.07. - 11.09.	2025 7th International Conference on Frontier Technologies of Information and Computer (ICFTIC)	Qingdao, China	https://www.icftic.org/
11.07. - 11.08.	2025 International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRM)	KOLLAM, India	https://www.amrita.edu/events/icrm/

일 자	학술대회명	개최장소	홈페이지/연락처
11.07. - 11.09.	2025 6th International Conference on Artificial Intelligence and Computer Engineering (ICAICE)	Chongqing, China	https://www.event-icaice.org/
11.07. - 11.09.	2025 8th World Symposium on Communication Engineering (WSCE)	Shenzhen, China	https://www.wsce.org/
11.07. - 11.09.	2025 5th International Conference on Digital Society and Intelligent Systems (DSInS)	Haikou, China	https://www.dsins.org/
11.07. - 11.09.	2025 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia)	Guangzhou, China	https://ieee-isgt-asia.org/
11.09. - 11.13.	2025 IEEE Photonics Conference (IPC)	Singapore, Singapore	https://ieee-ipc.org/
11.09. - 11.12.	2025 28th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)	Sofia, Bulgaria	https://wpmc-2025.tu-sofia.bg/
11.10. - 11.12.	2025 IEEE Conference on Network Function Virtualization and Software-Defined Networking (NFV-SDN)	Athens, Greece	https://nfvsdn2025.ieee-nfvsdn.org/
11.10. - 11.12.	2025 IEEE International Conference on Collaborative Advances in Software and Computing (CASCON)	Toronto, Ontario, Canada	https://conf.researchr.org/home/cascon-2025
11.10. - 11.12.	2025 IEEE 12th Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WIPDA)	Fayetteville, Arkansas, USA	https://wipda.org/
11.10. - 11.12.	2025 18th International Conference on Development in eSystem Engineering (DeSE)	Bucharest, Romania	https://dese.ai/dese-2025/
11.10. - 11.12.	2025 IEEE 43rd International Conference on Computer Design (ICCD)	Richardson, Texas, USA	https://www.iccd-conf.com/home.html
11.11. - 11.14.	2025 IEEE 1st International Conference on Application of Information Technologies in Engineering, Management and Science (ICA-TEMS)	Cosenza, Italy	https://ica-tems.vercel.app/
11.11.	2025 5th International Symposium on Materials and Electrical Engineering (ISMEE)	Bandung, Indonesia	https://ismee.id/
11.11. - 11.14.	2025 12th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering (NER)	San Diego, California, USA	https://neuro.embs.org/2025/
11.12. - 11.14.	2025 20th International Joint Symposium on Artificial Intelligence and Natural Language Processing (ISAI-NLP)	Phuket, Thailand	https://isai-nlp2025.aiat.or.th/
11.12. - 11.13.	2025 IEEE MetroCon	Hurst, Texas, USA	https://www.metrocon.org/2025/
11.12. - 11.14.	2025 IEEE 7th International Conference on Trust, Privacy and Security in Intelligent Systems, and Applications (TPS-ISA)	Pittsburgh, Pennsylvania, USA	https://www.sis.pitt.edu/lersais/conference/tps/2025/
11.12. - 11.14.	2025 IEEE 11th International Conference on Collaboration and Internet Computing (CIC)	Pittsburgh, Pennsylvania, USA	https://www.sis.pitt.edu/lersais/conference/cic/2025/
11.12. - 11.14.	2025 IEEE 7th International Conference on Cognitive Machine Intelligence (CogMI)	Pittsburgh, Pennsylvania, USA	https://www.sis.pitt.edu/lersais/conference/cogmi/2025/
11.12. - 11.13.	2025 IEEE 6th International Women in Technology Conference (WINTeCHCON)	Bengaluru, India	https://www.wintechcon.com/
11.12. - 11.15.	2025 28th International Conference on Mechatronics Technology (ICMT)	Ho Chi Minh City, Vietnam	https://icmt2025.hcmute.edu.vn/
11.12. - 11.13.	2025 15th International Conference on Information & Communication Technology and System (ICTS)	Denpasar, Indonesia	https://elib.its.ac.id/conf/icts/public/
11.12. - 11.14.	2025 IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ)	Kyoto, Japan	https://www.ieee-csj.org/
11.12. - 11.14.	2025 9th International Conference on Information Technology (InCIT)	Phuket, Thailand	https://incit2025.computing.psu.ac.th/
11.12. - 11.14.	2025 International Conference on Green Energy, Computing and Sustainable Technology (GECOST)	Virtual	https://curtin.edu.my/event/gecost/
11.13. - 11.14.	2025 E-Health and Bioengineering Conference (EHB)	IASI, Romania	https://www.ehbconference.ro/
11.13. - 11.14.	2025 IEEE Progress in Radar Research (PIRR)	Adelaide, Australia	https://www.adelaide.edu.au/radar/progress-in-radar-research-2025
11.13. - 11.14.	2025 IEEE International Conference on Knowledge Graph (ICKG)	Limassol, Cyprus	https://cyprusconferences.org/ickg2025/
11.13. - 11.16.	2025 3rd Power Electronics and Power System Conference (PEPSC)	Kuala Lumpur, Malaysia	https://pepsc.org/
11.13. - 11.14.	2025 IEEE International Biomedical Instrumentation and Technology Conference (IBITeC)	Yogyakarta, Indonesia	https://ibitec.uui.ac.id/

일 자	학술대회명	개최장소	홈페이지/연락처
11.13. - 11.14.	2025 International Conference on Engineering & Computing Technologies (ICECT)	Islamabad, Pakistan	https://numl.edu.pk/icect/
11.13. - 11.14.	2025 International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications (ICETA)	Stary Smokovec, Slovakia	https://www.iceta.sk/
11.14. - 11.16.	2025 9th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)	Ankara, Turkiye	https://www.ismsitconf.org/
11.14. - 11.16.	2025 International Conference on Intelligent Manufacturing, Robotics and Automation (IMRA)	Zhanjiang, China	http://icimra.com/
11.14. - 11.16.	2025 5th International Conference on New Energy and Power Engineering (ICNEPE)	Guangzhou, China	https://www.icnepe.org/
11.14. - 11.15.	2025 14th International Conference on System Modeling & Advancement in Research Trends (SMART)	Moradabad, Uttar Pradesh, India	https://www.smart2025.tmu.ac.in/
11.14. - 11.16.	2025 International Conference on Power Electronics and Control Engineering (ICPECE)	Nanjing, China	https://www.icpece.com/
11.14. - 11.16.	2025 8th International Conference on Data Science and Information Technology (DSIT)	Beijing, China	https://www.dsit2025.net/
11.14. - 11.16.	2025 IEEE International Conference on Cloud Computing Technology and Science (CloudCom)	Shenzhen, China	http://www.cloudcom2025.org/
11.14. - 11.16.	2025 IEEE XVII International Scientific and Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE)	Novosibirsk, Russia	https://apeie.ieeesiberia.org/
11.15. - 11.18.	2025 IEEE/WIC International Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology (WI-IAT)	London, United Kingdom	https://www.wi-iat.com/wi-iat2025/index.html
11.16. - 11.21.	SC25: International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis	St. Louis, Missouri, USA	https://sc25.supercomputing.org/
11.16. - 11.19.	2025 28th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)	Busan, Korea (South)	https://www.icems2025.org/
11.16. - 11.23.	2025 IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference (IPCCC)	Austin, Texas, USA	https://www.ipccc.org/
11.16. - 11.20.	2025 40th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering (ASE)	Seoul, Korea (South)	https://conf.researchr.org/home/ase-2025
11.16. - 11.20.	2025 40th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering Workshops (ASEW)	Seoul, Korea (South)	https://conf.researchr.org/home/ase-2025
11.17. - 11.19.	2025 IEEE Design Methodologies Conference (DMC)	Fayetteville, Arkansas, USA	https://attend.ieee.org/dmc-2025/
11.17. - 11.19.	2025 32nd IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS)	Marrakech, Morocco	https://ieee-icecs2025.org/
11.17. - 11.20.	2025 IEEE International Conference on Smart Internet of Things (SmartIoT)	Sydney, Australia	https://ieee-smartiot.org/
11.18. - 11.21.	2025 IEEE 28th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)	Gold Coast, Australia	https://ieee-itsc.org/2025/
11.18. - 11.20.	2025 IEEE Conference on Antenna Measurements and Applications (CAMA)	Antibes Juan-les-Pins, France	http://2025ieeecama.org/
11.18. - 11.20.	2025 IEEE 25th International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI)	Budapest, Hungary	https://conf.uni-obuda.hu/cinti2025/
11.18. - 11.20.	2025 IEEE 10th International Conference on Engineering Technologies and Applied Sciences (ICETAS)	Bahrain, Bahrain	https://icetas.etssm.org/
11.18.	2025 IEEE Around-the-Clock Around-the-Globe Magnetism Conference (AtC-AtG)	Virtual	https://www.atc-atg.org/
11.18. - 11.21.	2025 21st International Symposium on Biomedical Image Processing and Analysis (SIPAIM)	Pasto, Colombia	https://www.sipaim.org/
11.18.	2025 International Conference on Computational Engineering, Sensing Technology and Management (ICCETM)	Sydney, Australia	https://www.amity.edu/ICCETM2025/
11.18. - 11.20.	2025 8th International Conference on Signal Processing and Information Security (ICSPIS)	Dubai, United Arab Emirate	https://icspis.com/
11.18. - 11.20.	2025 International Conference on Applications of Space Science and Technology, Pakistan (ICASTP)	Islamabad, Pakistan	https://icast.pk/
11.19. - 11.21.	2025 International Conference on Intelligent Computing, Information and Control Systems (ICOIICS)	Lalitpur, Nepal	https://iciics.com/

일 자	학술대회명	개최장소	홈페이지/연락처
11.19. - 11.21.	2025 23rd International Conference on ICT and Knowledge Engineering (ICT&KE)	Bangkok, Thailand	https://www.ict-ke.org/?page_id=115
11.19. - 11.21.	2025 2nd Global AI Summit - International Conference on Artificial Intelligence and Emerging Technology (AI Summit)	Noida, India	https://www.bennett.edu.in/aisummit2025
11.19. - 11.21.	2025 40th International Conference on Image and Vision Computing New Zealand (IVCNZ)	Wellington, New Zealand	https://ecs.wgtn.ac.nz/Events/IVCNZ2025/WebHome
11.19. - 11.21.	2025 IEEE International conference on Medical Artificial Intelligence (MedAI)	Wuhan, China	http://medai2025.hust.edu.cn/
11.19. - 11.21.	2025 International Future Energy Electronics Conference (IFEEC)	Bali, Indonesia	https://ifeec.ugm.ac.id/
11.20. - 11.23.	2025 International Conference on Recent Advances in Mathematics and Informatics (ICRAMI)	Sousse, Tunisia	https://icrami.sciencesconf.org/?lang=en
11.20. - 11.23.	2025 10th International Conference on Intelligent Informatics and Biomedical Sciences (ICIIBMS)	Okinawa, Japan	http://www.iciibms.org/
11.20. - 11.21.	2025 International Conference on Artificial Intelligence and Technological Solutions (ICAiTech)	Palembang, Indonesia	https://icaitech.org/
11.20. - 11.23.	2025 10th International Conference on Communication, Image and Signal Processing (CCISP)	Chengdu, China	https://www.ccisp.org/
11.20. - 11.22.	2025 IEEE International Conference on Advances in Data-Driven Analytics And Intelligent Systems (ADACIS)	Sousse, Tunisia	https://www.adacis-conf.com/
11.20. - 11.22.	2025 IEEE 8th Student Conference on Electric Machines and Systems (SCEMS)	Pusan, Korea (South)	https://scems2025.com/
11.20. - 11.21.	2025 International Conference on Sustainable Technology in Energy and Power Systems (STEPCon)	Kolkata, India	https://www.nit.ac.in/404-error.php
11.20. - 11.21.	2025 International Conference on Advances in Machine Intelligence, and Cybersecurity Technologies (AMICT)	Kota Kinabalu, Sabah, Malaysia	https://amictconf.com/
11.20. - 11.22.	2025 9th International Conference on Computational System and Information Technology for Sustainable Solutions (CSITSS)	Bangalore, India	https://csitss.ieee-rvce.org/
11.20. - 11.23.	2025 7th International Conference on System Reliability and Safety Engineering (SRSE)	Changchun, China	https://www.srse.org/
11.20. - 11.21.	2025 33rd National Conference with International Participation (TELECOM)	Sofia, Bulgaria	https://e-university.tu-sofia.bg/e-conf/?konf=177
11.20. - 11.21.	2025 International Conference on Intelligent Systems and Pioneering Innovations in Robotics and Electric Mobility (INSPIRE)	Mangalore, India	https://mite.ac.in/
11.20. - 11.23.	2025 IEEE Recent Advances in Intelligent Computational Systems (RAICS)	Cochin, India	https://www.raics2025.org/
11.21. - 11.22.	2025 8th International Conference on Emerging Technologies in Computer Engineering: Advances in Computing, Healthcare and Smart Systems (ICETCE)	Jaiour, India	https://icetce.skrit.ac.in/2025/
11.21. - 11.22.	2025 IEEE 4th Conference on Applied Signal Processing (ASPCON)	Kolkata, India	http://ieeespskolkata.org/conferences.html
11.21. - 11.22.	2025 5th International Conference on Advancement in Electronics & Communication Engineering (AECE)	Ghaziabad, India	https://aece2025.rkgitedu.in/
11.21. - 11.23.	2025 International Conference on Energy Power and Electrical Technology (CEPET)	Wenzhou, China	https://www.ic-cepel.com/
11.21. - 11.22.	2025 Second International Conference on Computing, Semiconductor, Mechatronics, Intelligent Systems and Communications (COSMIC)	Mangalore, Karnataka, India	https://cosmic.sahyadri.edu.in/
11.21. - 11.23.	2025 4th International Conference on Image Processing, Computer Vision and Machine Learning (ICICML)	Chongqing, China	https://www.icicml.org/
11.21. - 11.23.	2025 IEEE 6th International Conference on Computer, Big Data, Artificial Intelligence (ICCBD+AI)	Xiamen, China	http://www.iccbdai.org/
11.21. - 11.23.	2025 International Conference on Sensing, Measurement & Data Analytics in the era of Artificial Intelligence (ICSMD)	Guangzhou, China	https://icsmd2025.aconf.org/
11.21. - 11.23.	2025 5th International Conference on Computer Science, Electronic Information Engineering and Intelligent Control Technology (CEI)	Nanning, China	https://www.ic-cei.org/

일 자	학술대회명	개최장소	홈페이지/연락처
11.21. - 11.22.	2025 2nd International Conference on Advanced Computing and Emerging Technologies (ACET)	Ghaziabad, India	https://acet.akgec.ac.in/home
11.21. - 11.22.	2025 International Conference on Artificial Intelligence for Computing, Astronomy and Renewable Energy (AICARE)	Kolkata, India	https://aicare.uem.edu.in/
11.21. - 11.23.	2025 12th International Conference on Soft Computing & Machine Intelligence (ISCMi)	Rio de Janeiro, Brazil	https://www.iscmi.us/
11.21.	2025 2nd International Workshop on Artificial Intelligence for Neuroscience (IWAIN)	Alicante, Spain	https://iwain.lucentia.es/
11.21. - 11.22.	2025 IEEE International Conference on Advanced Technologies in Supply Chain Management (ATSCM)	Fez, Morocco	https://atscm25conf.netlify.app/html/
11.21. - 11.23.	2025 4th International Conference on Clean Energy Storage and Power Engineering (CESPE)	Xiamen, China	http://www.iccespe.com/
11.22. - 11.23.	2025 IEEE 3rd Global Conference on Wireless Computing and Networking (GCWCN)	Lonawala, Maharashtra, India	https://gcwcw.in/
11.22. - 11.23.	2025 7th International Conference on Electrical, Control and Instrumentation Engineering (ICECIE)	Pattaya City, Thailand	https://2025.icecie.com/
11.23. - 11.26.	2025 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies - Middle East (ISGT Middle East)	Dubai, United Arab Emirates	https://attend.ieee.org/isgt-me
11.24. - 11.26.	2025 IEEE 4th International Conference on Signal, Control and Communication (SCC)	Sousse, Tunisia	https://scc.ieee.tn/
11.24. - 11.27.	2025 XV Symposium on Computing Systems Engineering (SBESC)	Campinas, Brazil	https://sbesc.lisha.ufsc.br/sbesc2025/Home
11.24. - 11.26.	2025 12th International Conference on Dependable Systems and Their Applications (DSA)	Dubai, United Arab Emirates	https://dsa25.techconf.org/
11.25. - 11.27.	2025 Twelfth International Conference on Intelligent Computing and Information Systems (ICICIS)	Cairo, Egypt	https://icicis.cis.asu.edu.eg/
11.25.	2025 International Conference on Intelligent & Innovative Practices in Engineering & Management (IIPEM)	Singapore, Singapore	https://www.amity.edu/iipem2025/Default.asp
11.25. - 11.26.	2025 3rd International Conference on Computational Intelligence and Network Systems (CINS)	Dubai, United Arab Emirates	https://www.cins2025.com/Home.html
11.25. - 11.28.	2025 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)	Singapore	https://www.itec-ap2025.com/
11.25. - 11.27.	2025 12th International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM)	Riyadh, Saudi Arabia	https://www.wincom-conf.org/WINCOM_2025/
11.25. - 11.27.	2025 First International Conference on Mechanical and Electrical Engineering for Green Energy Technologies (MEEGET)	Algeria, Algeria	https://meeget.org/
11.25. - 11.28.	2025 3rd International Conference on Foundation and Large Language Models (FLLM)	Vienna, Austria	https://flm-conference.org/2025/
11.25. - 11.28.	2025 12th International Conference on Social Networks Analysis, Management and Security (SNAMS)	Vienna, Austria	https://emergingtechnet.org/SNAMS2025/index.php
11.25. - 11.28.	2025 10th International Workshop on Tracking, Telemetry and Command Systems for Space Applications (TTC)	Darmstadt, Germany	https://atpi.eventsair.com/25a07
11.26. - 11.29.	2025 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia (GTD Asia)	Bangkok, Thailand	https://ieeegtd.org/public.asp?page=index.asp
11.26. - 11.28.	2025 6th International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems (CIEES)	Ruse, Bulgaria	https://ciees.eu/
11.26. - 11.28.	2025 5th International Conference on Ubiquitous Computing and Intelligent Information Systems (ICUIS)	Erode, India	https://icuis.com/2025/
11.26. - 11.28.	2025 IEEE 43rd Central America and Panama Convention (CONCAPAN XLIII)	San Salvador, El Salvador	https://concapan2025.ieee.org.sv/
11.27. - 11.29.	2025 4th International Conference on Geographic Information and Remote Sensing Technology (GIRST)	Rome, Italy	https://www.girst.org/
11.27. - 11.28.	2025 20th International Workshop on Semantic and Social Media Adaptation and Personalization (SMAP)	Mystras, Greece	https://smap2025.uniwa.gr/
11.27. - 11.28.	2025 International Conference on Computational Intelligence and Knowledge Economy (ICCIKE)	Dubai, United Arab Emirates	https://amityuniversity.ae/ICCIKE2025/
11.27. - 11.28.	2025 2nd International Conference on Information System and Information Technology (ICISIT)	27 - 28 November 2025	http://icisit.org/

일 자	학술대회명	개최장소	홈페이지/연락처
11.27. - 11.28.	2025 5th International Conference on Internet of Things: Smart Innovation and Usages (IoT-SIU)	Dehradun, India	https://iot.srhu.edu.in/
11.27. - 11.28.	2025 New Trends in Aviation Development (NTAD)	Stary Smokovec, Slovakia	https://ntad.if.tuke.sk/
11.28. - 11.30.	2025 IEEE 7th International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA)	Greater Noida, India	https://www.iccca.co.in/
11.28. - 11.30.	2025 6th International Symposium on Computer Engineering and Intelligent Communications (ISCEIC)	Chongqing, China	https://isceic.org/
11.28. - 11.30.	2025 International Conference on Data Science and Intelligent Systems (DSIS)	Chengdu, China	https://www.dsis2025.net/
11.28. - 11.29.	2025 3rd DMIHER International Conference on Artificial Intelligence in Healthcare, Education and Industry (IDICAIHEI)	Wardha, India	https://www.dmiher.edu.in/
11.28. - 11.29.	2025 International Conference on Emerging Technologies and Innovation for Sustainability (EmergIN)	Greater Noida, India	https://www.niet.co.in/research/ieee-conference-2025
11.28. - 11.30.	2025 International Conference on Automation Technology (Automation)	Kaohsiung, Taiwan	https://automation2025.nsysu.edu.tw/
11.28. - 11.30.	2025 IEEE 8th International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering (AUTEEE)	Shenyang, China	http://www.auteee.org/
11.28. - 11.29.	2025 IEEE International Conference on Emerging Trends in Computing and Communication (ETCOM)	Mangalore, India	https://icacct.in/
11.28. - 11.30.	2025 4th International Conference on Artificial Intelligence, Human-Computer Interaction and Robotics (AIHCIR)	Ningbo, China	https://www.aihcir.org/
11.28. - 11.30.	2025 3rd International Conference on Signal Processing and Intelligent Computing (SPIC)	Guangzhou, China	http://ic-spic.com/

>>2025년 12월

12.01. - 12.03.	2025 International Conference on NexGen Networks and Cybernetics (IC2NC)	Erode, India	http://ic2nc.com/
12.01. - 12.04	2025 IEEE/ACM 18th International Conference on Utility and Cloud Computing (UCC)	Nantes, France	https://ucc2025.gitlabpages.inria.fr/web/
12.01. - 12.04	2025 15th IEEE International Conference on Pattern Recognition Systems (ICPRS)	Valparaiso, Viña del Mar, Chile	https://icprs.org/
12.01. - 12.02.	2025 International Conference on AI-Driven STEM Education and Learning Technologies (AISTEMEDU)	Al Khobar, Saudi Arabia	https://aistemedu.org/
12.01. - 12.03.	2025 18th International Conference on Sensing Technology (ICST)	Utsunomiya, Japan	https://icst.in/icst2025/index.html
12.01. - 12.04	2025 IEEE 10th Southern Power Electronics Conference (SPEC)	Johannesburg, South Africa	https://attend.ieee.org/spec-2025/
12.01. - 12.04	2025 IEEE/ACM International Conference on Big Data Computing, Applications, and Technologies (BDCAT)	Nantes, France	https://bdcatt2025.gitlabpages.inria.fr/web/
12.02. - 12.05.	2025 IEEE 27th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC)	Singapore, Singapore	https://eptc-ieee.net/
12.02. - 12.05.	2025 32nd Asia-Pacific Software Engineering Conference (APSEC)	Taipa, Macao	https://conf.researchr.org/home/apsec-2025
12.02. - 12.05.	2025 IEEE PES 17th Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)	Auckland, New Zealand	https://attend.ieee.org/appeec-2025/
12.02. - 12.05.	2025 IEEE Real-Time Systems Symposium (RTSS)	Boston, Massachusetts, USA	https://2025.rtss.org/
12.02. - 12.04.	2025 IEEE 22nd International Conference on Smart Communities: Improving Quality of Life using AI, Robotics and IoT (HONET)	Topi, District Swabi, KP, Pakistan	https://honet-ict.org/
12.03. - 12.05.	2025 International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA)	Boca Raton, Florida, USA	https://www.icmla-conference.org/icmla25/
12.03. - 12.06.	2025 IEEE/ACM Symposium on Edge Computing (SEC)	Arlington, Virginia, USA	https://acm-ieee-sec.org/2025/
12.03. - 12.05.	2025 Central and Eastern European e Dem and e Gov Days (ceeegov)	Bucharest, Romania	https://www.ocg.at/ceeegov-days
12.03. - 12.05.	2025 IEEE Annual Congress on Artificial Intelligence of Things (AIoT)	Osaka, Japan	https://www.ieee-aiot.org/
12.03. - 12.05.	2025 International Conference on Emerging Trends in Signal Processing & Computational Intelligence (ICCSPCI)	Kozhikode, India	https://www.geckkd.ac.in/ICCSPCI-2025.php

일 자	학술대회명	개최장소	홈페이지/연락처
12.04. - 12.05.	2025 IEEE International Workshop on Metrology for Sustainability (MetroSustainability)	Benevento, Italy	https://metrosustainability.org/
12.04. - 12.05.	2025 8th International Conference on Information and Communications Technology (ICOIAC)	Yogyakarta, Indonesia	https://25.icoiact.org/
12.04. - 12.06.	2025 IEEE 4th International Conference on Data, Decision and Systems (ICDDS)	Dharwad, India	https://icdds.org/
12.04. - 12.05.	2025 Optical Communication, Photonics, Telecommunications, and Intelligent Machine Applications (OPTIMA)	Tashkent, Uzbekistan	https://optima2025.tuit.uz/
12.04. - 12.06.	2025 Second International Conference on Pioneering Developments in Computer Science & Digital Technologies (IC2SDT)	Delhi, India	https://ic2sdt.nitdelhi.ac.in/
12.05. - 12.07.	2025 IEEE 7th Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC)	Chongqing, China	http://www.imcec.org/
12.05. - 12.06.	2025 6th International Conference on Communication, Computing & Industry 6.0 (C2I6)	Bengaluru, India	https://sites.google.com/cmrit.ac.in/c2i6-2025?usp=sharing
12.05. - 12.08.	2025 15th International Conference on Information Science and Technology (ICIST)	Zhanjiang, China	https://conference.cs.cityu.edu.hk/icist/
12.05. - 12.07.	2025 IEEE International Conference on Blockchain Technology and Information Security (ICBCTIS)	Haikou, China	https://www.bctis.net/
12.05. - 12.06.	2025 IEEE International Conference on Advanced Healthcare Systems (ICAHS)	Hammamet, Tunisia	https://sites.google.com/view/icahs2025/home?authuser=0
12.05. - 12.06.	2025 IEEE 1st International Conference on Recent Trends in Computing and Smart Mobility (RCSM)	Bhopal, India	https://rcsm.manit.ac.in/RCSM2025/
12.05. - 12.06.	2025 5th IEEE International Conference on Applied Electromagnetics, Signal Processing, & Communication (AESPC)	Bhubaneswar, India	https://aespc.kiit.ac.in/
12.06. - 12.10.	2025 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)	San Francisco, California, USA	https://www.ieee-iedm.org/
12.06.	2025 IEEE Signal Processing in Medicine and Biology Symposium (SPMB)	Virtual	https://www.ieeespm.org/2025/
12.06. - 12.08.	2025 International Conference on Electrical and Computer Engineering Researches (ICECER)	Antananarivo, Madagascar	https://www.icecer.com/2025/
12.06. - 12.10.	2025 IEEE Automatic Speech Recognition and Understanding Workshop (ASRU)	Honolulu, Hawaii, USA	https://attend.ieee.org/asru-2025
12.07. - 12.10.	2025 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)	Melbourne, Australia	https://www.ieem.org/public.asp?page=index.asp
12.07. - 12.10.	2025 Winter Simulation Conference (WSC)	Seattle, Washington, USA	https://meetings.informs.org/wordpress/wsc2025/
12.07. - 12.11.	2025 IEEE International Conference on Energy Technologies for Future Grids (ETFG)	Wollongong, Australia	https://attend.ieee.org/etfg-2025/
12.08. - 12.12.	GLOBECOM 2025 - 2025 IEEE Global Communications Conference	Taipei, Taiwan	https://globecom2025.ieee-globecom.org/
12.08. - 12.11.	2025 Picture Coding Symposium (PCS)	Aachen, Germany	https://2025.picturecodingsymposium.org/
12.08. - 12.12.	2025 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)	Taipei, Taiwan	https://globecom2025.ieee-globecom.org/program/workshops
12.08. - 12.10.	2025 International Symposium on Multimedia (ISM)	Naples, Italy	https://www.multimediacomputing.org/
12.08. - 12.11.	2025 IEEE International Conference on Big Data (BigData)	Macau, China	https://conferences.cis.um.edu.mo/ieeefbigdata2025/
12.09. - 12.12.	2025 IEEE 64th Conference on Decision and Control (CDC)	Rio de Janeiro, Brazil	https://cdc2025.ieeecss.org/
12.09. - 12.11.	2025 1st International Conference on Data Science and Intelligent Network Computing (ICDSINC)	Raipur, India	https://icdsinc2025.nitr.ac.in/
12.10. - 12.13.	2025 IEEE 56th Semiconductor Interface Specialists Conference (SISC)	San Diego, California, USA	https://www.ieeesisc.org/
12.10. - 12.13.	2025 IEEE 4th International Conference on Smart Technologies for Power, Energy and Control (STPEC)	Goa, India	https://nitgoa.ac.in/STPEC2025/index.html
12.10. - 12.13.	2025 IEEE India Geoscience and Remote Sensing Symposium (InGARSS)	Bhubaneswar, India	https://www.ingarss-2025.in/

일 자	학술대회명	개최장소	홈페이지/연락처
12.10. - 12.12.	2025 International Conference on Modeling, Simulation & Intelligent Computing (MoSiCom)	Dubai, United Arab Emirates	https://mosicom2025.com/
12.10.	2025 New Jersey Future Energy Transmission Conference (NJFET)	Newark, New Jersey, USA	https://wind.njit.edu/njenergyweek2025
12.10. - 12.12.	2025 International Symposium on Ocean Technology (SYMPOL)	Kochi, India	http://sympol.cusat.ac.in/
12.10. - 12.12.	2025 4th International Conference on Automation, Computing and Renewable Systems (ICACRS)	Pudukkottai, India	https://icacrs.com/2025/
12.10. - 12.12.	2025 IEEE AFRICON	Polokwane, South Africa	https://2025.ieee-africon.org/
12.10. - 12.12.	2025 6th Technology Innovation Management and Engineering Science International Conference (TIMES-ICON)	Bangkok, Thailand	https://timesicon2025.atdi.or.th/
12.11. - 12.13.	2025 International Conference on Flexible Electronics and Systems (ICFES)	Hong Kong, China	http://www.ieee-icfes.org/
12.11. - 12.13.	2025 Modern Electronics Devices and Intelligent Communication Systems (MEDCOM)	Greater Noida, India	https://www.glbitm.org/medcom-2025/
12.11. - 12.12.	2025 International Conference on Applied Artificial Intelligence, Data Engineering and Sciences (ICAIDES)	Jakarta, Indonesia	https://icaides.untar.ac.id/
12.12. - 12.13.	2025 International Conference on Data, Energy and Communication Networks (DECoN)	Bhopal, India	https://oriental.ac.in/oist-bhopal/ieee-conference
12.12. - 12.14.	2025 2nd Asia Conference on Advances in Electrical and Power Engineering (ACEPE)	Shanghai, China	http://www.acepe.net/
12.12. - 12.14.	2025 5th International Conference on Computational Modeling, Simulation and Data Analysis (CMSDA)	Qingdao, China	https://www.icmsda.com/
12.12. - 12.14.	2025 International Conference on Electronic Information, Computer and Aerospace Remote Sensing (EICARS)	Jiangmen, China	https://www.eicars.org/
12.12. - 12.14.	2025 International Symposium on AI-Driven Image Processing and Computer Vision Technology (AIPCVT)	Nanjing, China	http://ipcvt.com/
12.12. - 12.14.	2025 IEEE Pune Section International Conference (PuneCon)	Pune, India	https://punecon.ieee-punesection.org/
12.12. - 12.14.	2025 International Conference on Intelligent Computing and Next Generation Networks (ICNGN)	Singapore, Singapore	https://www.icngn.org/
12.13. - 12.14.	2025 3rd International Conference on Big Data, Information and Intelligent Engineering (BDIIE)	Wuhan, China	https://www.bdiie.com/
12.13. - 12.14.	2025 International Conference on AI, Data Science, Cyber Security and Smart Manufacturing for Sustainable Development (ICADCS)	Gwalior, India	https://icadcs.vikrantuniversity.ac.in/
12.13. - 12.17.	2025 IEEE International Symposium on Smart Electronic Systems (ISES)	Jaipur, India	https://www.ieee-ises.org/
12.13. - 12.16.	2025 IEEE 7th International Conference on Emerging Electronics (ICEE)	Bengaluru, India	http://ieee-icee.org/index.php
12.14. - 12.17.	2025 IEEE 66th Annual Symposium on Foundations of Computer Science (FOCS)	Sydney, Australia	https://focs.computer.org/2025/
12.14. - 12.18.	2025 IEEE Microwaves, Antennas, and Propagation Conference (MAPCON)	Kochi, India	https://ieemapcon.org/
12.14. - 12.17.	2025 IEEE 10th International Workshop on Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing (CAMSAP)	Punta Cana, Dominican Republic	https://camsap25.ig.umons.ac.be/
12.14. - 12.16.	2025 12th National Power Electronics Conference (NPEC)	Kozhikode, India	https://www.npec2025.com/
12.14. - 12.16.	2025 International Conference on Power Electronics and Energy (ICPEE)	Bhubaneswar, India	https://icpee.kiit.ac.in/
12.15. - 12.18.	2025 IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine (BIBM)	Wuhan, China	https://biod.whu.edu.cn/bibm2025/
12.15. - 12.17.	2025 6th International Conference on IoT Based Control Networks and Intelligent Systems (ICICNIS)	Bengaluru, India	https://icicnis.com/2025/index.html
12.15. - 12.17.	2025 International Conference on Artificial Intelligence, Embedded Systems, and Renewable Energy (AIESRE)	Tizi-Ouzou, Algeria	https://aiesre.ummtto.dz/
12.15. - 12.17.	2025 IEEE Electrical Design of Advanced Packaging and Systems (EDAPS)	Hokkaido, Japan	https://www.edaps.org/
12.15. - 12.18.	2025 IEEE 18th International Symposium on Embedded Multicore/Many-core Systems-on-Chip (MCSoc)	Singapore, Singapore	https://mcsoc-forum.org/site/

일 자	학술대회명	개최장소	홈페이지/연락처
12.15. - 12.16.	2025 International Conference on Frontiers of Information Technology (FIT)	Islamabad, Pakistan	https://fit.edu.pk/
12.15. - 12.18.	2025 IEEE 24th International Conference on Micro and Miniature Power Systems, Self-Powered Sensors and Energy Autonomous Devices (PowerMEMS)	Albuquerque, New Mexico, USA	https://powermems.org/
12.15. - 12.16.	2025 9th International Conference on Information Technology, Information Systems and Electrical Engineering (ICITISEE)	Banyumas, Indonesia	https://icitisee.amikompurwokerto.ac.id/
12.16. - 12.17.	2025 16th International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS)	Macau, China	https://www.icsess.org/
12.16.	2025 IEEE Ocean Engineering Technology and Innovation Conference: Management and Conservation for Sustainable and Resilient Marine and Coastal Resources (OETIC)	Purwokerto, Indonesia	https://r10.ieee.org/indonesia-oetem/oetic2025/
12.17. - 12.19.	2025 13th International Conference on Intelligent Systems and Embedded Design (ISED)	Raipur, India	https://2025.isedconf.org/
12.17. - 12.18.	2025 International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture and Industrial Automation (ICAMIMA)	Virtual	https://icamimia.id/
12.17. - 12.19.	2025 4th International Conference on Applied Artificial Intelligence and Computing (ICAIC)	Salem, India	https://icaic.com/
12.17. - 12.18.	2025 International Conference on Computational Intelligence, Security, and Artificial Intelligence (IntelliSecAI)	Al-Khobar, Saudi Arabia	https://intellisecai.org/
12.17. - 12.18.	2025 IEEE Asia-Pacific Conference on Geoscience, Electronics and Remote Sensing Technology (AGERS)	Purwokerto, Indonesia	https://r10.ieee.org/indonesia-grsaes/agers-2025/
12.17. - 12.20.	2025 IEEE 32nd International Conference on High Performance Computing, Data and Analytics Workshop (HiPCW)	Hyderabad, India	https://www.hipc.org/
12.17. - 12.20.	2025 IEEE 32nd International Conference on High Performance Computing, Data, and Analytics (HIPC)	Hyderabad, India	https://www.hipc.org/
12.18. - 12.21.	2025 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid, and Renewable Energy (PESGRE)	Dharwad, India	https://pesgre2025.org/
12.18. - 12.19.	2025 International Conference on Computational Innovations and Sustainable Technologies (ICCIIST)	Bangalore, India	https://www.iccist.com/
12.18. - 12.20.	2025 First International Conference on Intelligent Computing and Systems at the Edge (ICEdge)	Bangalore, India	https://icedge.iita.ac.in/
12.18. - 12.20.	2025 OITS International Conference on Information Technology (OCIT)	Bhubaneswar, India	https://oits-icit.github.io/
12.18. - 12.20.	2025 7th International Conference on Modern Educational Technology (ICMET)	Fukuoka, Japan	https://www.icmet.org/
12.18.	2025 2nd Beyond Technology Summit on Informatics International Conference (BTS-I2C)	Jember, East Java, Indonesia	https://bts.unmuhjember.ac.id/
12.19. - 12.20.	2025 1st International Conference on Smart and Intelligent Systems (SISCON)	Thiruvananthapuram, India	https://www.siscon2025.marian.ac.in/
12.19. - 12.20.	2025 10th International Conference on Research in Intelligent Computing in Engineering (RICE)	Hyderabad, India	https://www.riceconference.in/
12.19. - 12.20.	2025 IEEE International Conference on Intelligent Systems, Smart and Green Technologies (ICISSGT)	Visakhapatnam, India	https://r10.ieee.org/vizagbay/icissgt-2023-2/
12.19. - 12.20.	2025 IEEE International Conference on Recent Advances in Computing and Systems (REACS)	Gwalior, India	https://reacs2025.iitm.ac.in/
12.19. - 12.21.	2025 5th International Conference on Computer, Internet of Things and Control Engineering (CITCE)	Guangzhou, China	https://www.citce.org/
12.19. - 12.21.	2025 Conference on Digital Economy and Fintech Innovation (DEFI)	Danang, Vietnam	https://defi.vku.udn.vn/
12.19. - 12.20.	2025 International Conference on Artificial Intelligence and Quantum Computation-Based Sensor Application (ICAQSA)	Nagpur, India	https://ghrcemn.raisoni.net/ICAQSA-25/
12.20. - 12.21.	2025 IEEE 17th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN)	Goa, India	https://cicn.in/
12.20. - 12.22.	2025 26th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)	Aswan, Egypt	https://mepcon.conferences.ekb.eg/
12.20. - 12.21.	2025 Seventh International Conference on Research in Computational Intelligence and Communication Networks (ICRCICN)	Kalyani, India	https://icrcicn.in/index.html

일 자	학술대회명	개최장소	홈페이지/연락처
12.22. - 12.24.	2025 International Conference on Computer and Applications (ICCA)	Bahrain, Bahrain	https://icca-conf.info/m/login?r=%2Ficca2025
12.22. - 12.24.	2025 IEEE International Conference on Smart Power, Energy, Renewables, and Transportation (SPERT)	Surat, India	https://www.spert.in/
12.23. - 12.25.	2025 11th International Conference on Education and Training Technologies (ICETT)	Macao, China	https://www.icett.org/index.html
12.26. - 12.28.	2025 IEEE 22nd International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)	Hammamet, Tunisia	http://www.sta-tn.com/
12.26. - 12.28.	2025 International Conference on Power Systems, Smart Grid, and Artificial Intelligence (PSGAI)	Xining, China	http://icpsgai.com/
12.26. - 12.28.	2025 IEEE 4th International Conference of Safe Production and Informatization (IICSPI)	Chongqing, China	http://www.iicspi.org/
12.26. - 12.28.	2025 International Conference on Electrical, Communication, and Computing Technologies (iCONECCT)	Gwalior, India	https://iconeect.mitsgwalior.in/home.html
12.26. - 12.28.	2025 IEEE 3rd International Conference on Electrical, Automation and Computer Engineering (ICEACE)	Changchun, China	http://www.iceace.net/
12.26. - 12.28.	2025 2nd International Conference on Energy Technology and Electrical Power (ETEP)	Hengyang, China	https://www.icetep.net/

>>2026년 1월

01.02. - 01.04.	2026 International Conference on Electric Power and Renewable Energy (EPREC)	Durg, India	https://www.eprec.co.in/
01.02. - 01.03.	2026 International Conference on Smart Futuristic Technology (ICSFT)	Bengalore, India	https://icsft.in/
01.02. - 01.04.	2026 IEEE Rising Stars (Rising Stars)	Las Vegas, Nevada, USA	https://ieee-risingstars.org/2026/
01.05. - 01.06.	2026 IEEE Electrical Energy Storage Applications and Technologies Conference (EESAT)	Tucson, Arizona, USA	https://cmte.ieee.org/pes-eesat/
01.05. - 01.07.	2026 IEEE 16th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)	Las Vegas, Nevada, USA	https://ieee-ccwc.org/
01.06. - 01.09.	2026 United States National Committee of URSI National Radio Science Meeting (USNC-URSI NRSM)	Boulder, Colorado, USA	https://www.nrsm-boulder.org/
01.07. - 01.09.	2026 7th International Conference on Mobile Computing and Sustainable Informatics (ICMCSI)	Goathgaun, Nepal	https://icmcsi.com/2026/
01.09. - 01.11.	2026 International Conference on Emerging Trends and Innovations in ICT (ICEI)	Pune, India	http://icei-pict.com/
01.09. - 01.11.	2026 International Conference on Electrical Engineering, Intelligent Control and Artificial Intelligence (EEICAI)	Bangkok, Thailand	https://www.eeicai.org/
01.09. - 01.11.	2026 International Conference on Artificial Intelligence and Social Network Systems (AISNS)	Hangzhou, China	http://icaisns.com/
01.09. - 01.12.	2026 IEEE 23rd Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)	Las Vegas, Nevada, USA	https://ccnc2026.ieee-ccnc.org/group/71
01.11. - 01.14.	2026 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)	Cancun, Mexico	https://sice-si.org/SII2026/
01.12. - 01.14.	2026 International Conference on Robot Perception and Intelligent Control (RPIC)	Tokyo, Japan	https://icrpic.org/
01.15. - 01.16.	2026 International Conference on Cognitive Systems and Computer Interaction (ICoSCI)	Virtual	https://sites.google.com/uitm.edu.my/icosci2026/home
01.15. - 01.17.	2026 1st International Conference on Innovations in Information and Communication Technologies (IICT)	Jamshoro, Pakistan	http://ic-iiict.muuet.edu.pk/
01.16. - 01.17.	2026 6th Biennial International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE)	Navi Mumbai, India	https://icnte.fcrit.ac.in/
01.16. - 01.17.	2026 Symposium on Microwave, Antenna, and Propagation (SMAP)	Jakarta, Indonesia	https://smap.or.id/
01.16. - 01.18.	2026 International Conference on Embedded Systems, Mobile Communication and Computing (EMC ³)	Hong Kong, China	https://www.ic-emcc.org/
01.18. - 01.21.	2026 IEEE PES International Meeting (PES IM)	Hong Kong, Hong Kong	https://www.pes-im.org/

일 자	학술대회명	개최장소	홈페이지/연락처
01.18. - 01.21.	2026 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS)	Hollywood, California, USA	https://www.radiowirelessweek.org/
01.19. - 01.22.	2026 31st Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC)	Lantau, Hong Kong	https://www.aspdac.com/aspdac2026/
01.21. - 01.23.	2026 5th International Conference on Communication, Computing and Electronics Systems (ICCCES)	Coimbatore, India	https://icoces.com/
01.22. - 01.23.	2026 International Conference on Intelligent and Innovative Technologies in Computing, Electrical and Electronics (IITCEE)	Bangalore, India	https://iitcee2026.bnmit.in/
01.25. - 01.29.	2026 IEEE 39th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)	Salzburg, Austria	https://www.mems26.org/
01.27. - 01.29.	2026 6th International Conference on Image Processing and Capsule Networks (ICIPCN)	Dhulikhel, Nepal	https://icipcn.com/
01.28. - 01.30.	2026 IEEE International Conference on Power, Electronics and Green Energy (ICPEGE)	Shenyang, China	https://www.icpege.org/
01.28. - 01.29.	2026 IEEE International Conference on Emerging Computing and Intelligent Technologies (ICoECIT)	Hyderabad, India	https://sites.google.com/view/icecit/home
01.29. - 01.31.	2026 IEEE 6th International Conference on Power, Electronics and Computer Applications (ICEPCA)	Shenyang, China	http://www.icpeca.org/
01.29. - 01.31.	2026 IEEE 24th World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI)	Stará Lesná, Slovakia	https://conf.uni-obuda.hu/sami2026/

>>2026년 2월

02.02. - 02.04.	2026 International Conference on Artificial Intelligence x Multimedia (AIXMM)	Laguna Hills, California, USA	https://www.aixmm.org/
02.02. - 02.04.	2026 IEEE 23rd Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)	Cairo, Egypt	https://2026.ieee-melecon.org/
02.02. - 02.05.	2026 IEEE International Conference on Big Data and Smart Computing (BigComp)	Guangzhou, China	https://www.bigcomputing.org/
02.03. - 02.05.	2026 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)	Las Vegas, Nevada, USA	https://icce.org/2026/
02.03. - 02.05.	2026 International Conference on Medical Microwave Imaging Applications (ICMWIA)	Lisbon, Portugal	https://icmwia.org/
02.04. - 02.06.	2026 4th International Conference on Intelligent Data Communication Technologies and Internet of Things (IDCIoT)	Ottapalam, India	http://icoici.org/2026/
02.04. - 02.07.	2026 Joint International Conference on Digital Arts, Media and Technology with ECTI Northern Section Conference on Electrical, Electronics, Computer and Telecommunication Engineering (ECTI DAMT & NCON)	Chiang Mai, Thailand	https://ectidamtncon2026.payap.ac.th/index.html
02.05. - 02.07.	2026 International Conference on Artificial Intelligence, Computer, Data Sciences and Applications (ACDSA)	Boracay Island, Philippines	https://acda.org/
02.05. - 02.06.	2026 International Conference on Sustainable Engineering and Technology Innovations (ICSETI)	Noida, India	https://icseti-jss.netlify.app/
02.05. - 02.07.	2026 International Conference on Artificial Intelligence and Data Engineering (AIDE)	Nitte, India	https://aide-nitte.in/
02.06. - 02.07.	2026 Contemporary Computing Innovations Conference (CCIC)	Tirupati, India	https://sites.google.com/view/ccic2026
02.07. - 02.11.	2026 IEEE International Symposium on High Performance Computer Architecture (HPCA)	Sydney, Australia	https://hpc-conf.org/2026/
02.07. - 02.09.	2026 IEEE International Microwave Filter Workshop (IMFW)	Hong Kong	https://www.imfw-ieee.org/
02.07. - 02.08.	2026 International Conference on Emerging Systems and Intelligent Computing (ESIC)	Bhubaneswar, India	https://icesic.com/
02.08. - 02.11.	2026 28th International Conference on Advanced Communications Technology (ICACT)	Pyeong Chang, Korea (South)	https://icact.org/
02.09. - 02.11.	2026 3rd International Conference on Unmanned Vehicle Systems-Oman (UVS)	Muscat, Oman	https://uvsc.om/
02.09. - 02.10.	2026 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC)	College Station, Texas, USA	https://tpec.engr.tamu.edu/
02.10. - 02.12.	2026 International Conference on Sustainable Engineering and Digital Innovation (ICSEDI)	Muscat, Oman	https://icsedi.gcet.edu.om/

일 자	학술대회명	개최장소	홈페이지/연락처
02.11. - 02.13.	2026 International Conference on Electronics and Renewable Systems (ICEARS)	Tuticorin, India	https://icears.com/conf2026/
02.11. - 02.13.	2026 2nd International Conference on Advances in Intelligent Computing and Applications (AICAPS)	Kochi, India	https://aicaps2026.github.io/AICAPS2026/index.html
02.12. - 02.13.	2026 International Conference on Computing, Sciences and Communications (ICCS)	Ghaziabad, India	https://iccs.abes.ac.in/
02.12. - 02.14.	2026 2nd International Conference on Cognitive Computing in Engineering, Communications, Sciences and Biomedical Health Informatics (IC3ECSBHI)	Greater Noida, (Delhi NCR), India	https://www.ic3ecsbhi.com/
02.12. - 02.14.	2026 International Conference on Signal Analysis for Smart Systems (SIGNASS)	Kolkata, India	https://www.nit.ac.in/SIGNASS/
02.15. - 02.19.	2026 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC)	San Francisco, California, USA	https://www.isscc.org/
02.16. - 02.19.	2026 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)	Maui, Hawaii, USA	http://www.conf-icnc.org/2026/
02.17. - 02.21.	2026 IEEE 18th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)	Lviv, Ukraine	https://tcset.ieee.org.ua/
02.18. - 02.20.	2026 IEEE 5th International Conference on AI in Cybersecurity (ICAIC)	Houston, Texas, USA	https://icaic.gyancity.com/index.html
02.18. - 02.19.	2026 6th International Conference on Advanced Research in Computing (ICARC)	Belihuloya, Sri Lanka	https://icarc.lk/
02.18. - 02.20.	2026 5th International Conference on Sentiment Analysis and Deep Learning (ICSADL)	Birendranagar, Nepal	https://icsadl.com/
02.19. - 02.20.	2026 International Conference on Green Technologies and Sustainable Solutions (GTSS)	Gorakhpur, India	https://www.mmmut.ac.in/gtss2026/
02.20. - 03.15.	SoutheastCon 2026	Huntsville, Alabama, USA	https://ieeesoutheastcon.org/
02.20. - 02.21.	2026 IEEE 4th International Conference on Power Electronics & IoT Applications in Renewable Energy and its Control (PARC)	Mathura, India	https://www.gla.ac.in/parc2026/
02.20. - 02.21.	2026 4th Odisha International Conference on Electrical Power Engineering, Communication and Computing Technology (ODICON)	Bhubaneswar, India	https://www.odicon.in/
02.21. - 02.24.	2026 14th International Conference on Intelligent Control and Information Processing (ICICIP)	Chiang Mai, Thailand	https://conference.cs.cityu.edu.hk/icicip/
02.23. - 02.25.	2026 IEEE Applied Sensing Conference (APSCON)	Delhi, India	https://2026.ieee-apscon.org/
02.23. - 02.25.	2026 14th International Conference on Brain-Computer Interface (BCI)	Gangwon Province, Korea (South)	https://brain.korea.ac.kr/bci2026
02.24. - 02.28.	2026 30th International Conference on Information Technology (IT)	Zabljak, Montenegro	https://www.it.ucg.ac.me/en/index.php?skup=30
02.24. - 02.27.	2026 International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (ICAIIIC)	Tokyo, Japan	https://icaic.org/
02.24. - 02.27.	2026 IEEE 17th Latin America Symposium on Circuits and System (LASCAS)	Arequipa, Peru	https://www.ieee-lascas.org/
02.24. - 02.26.	2026 International Conference on Visual Analytics and Data Visualization (ICVADV)	Tirunelveli, India	https://icvadv.com/2026/
02.26. - 02.28.	2026 22nd Annual IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking (SECON)	Abu Dhabi, United Arab Emirates	https://secon2025.ieee-secon.org/
02.26.	2026 International Seminar on Intelligent Business and Edge-Computing Research (ISIBER)	Jakarta, Indonesia	https://isiber.unsia.ac.id/

The Magazine of the IEIE

특별회원사 명단

회원사	대표자	주 소	전 화	홈페이지
(주)디비하이텍	조기석	경기도 부천시 수도로 90(도당동)	032-680-4700	www.dbhitek.com
(주)레티널	김재혁	경기도 안양시 동안구 부림로170번지 41-10, 4층	02-6959-7007	https://letinar.com
(주)마르시스	박용규	서울시 강남구 언주로 85길 7	02-3445-3999	http://www.marusys.com
(주)세미파이브	조명현	경기도 성남시 분당구 양현로 322, 코리아디자인센터 2층		http://www.semifive.com
(주)센서위드유	이윤식	울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50, 106동 501-4호	052-912-4282	http://www.sensorwyou.com
(주)에스비솔루션	변영재	울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50, 106동 401-3호	052-217-7343	http://www.sb-solutions.co.kr
(주)와이솔	김지호	경기도 오산시 가장로 531-7	070-7837-2730	http://www.wisol.co.kr
(주)웨이브피아	이상훈	경기도 화성시 동탄기흥로 557 금강펜테리움IT타워 1301호	031-8058-3384	http://www.wavepia.com
(주)자람테크놀로지	백준현	경기도 성남시 분당구 성남대로925번길 41, 파인벤처빌딩 2층	031-776-6701	https://www.zaram.com
KT	김영섭	경기도 성남시 분당구 정자동 206	031-727-0114	http://www.kt.com
LG이노텍(주)	문혁수	서울시 강서구 마곡중앙10로 30	02-3777-1114	www.lginnotek.com
LG전자(주)	조주완	서울시 영등포구 여의도동 30	02-3777-1114	http://www.lge.co.kr
LIG넥스원	김지찬	서울시 서초구 강남대로 369(서초동, 나라빌딩)	02-1644-2005	http://www.lignex1.com
LPKF Laser&Electronics	이용상, 벤델레코츠마티아스	경기도 안양시 동안구 흥안대로 427번길	031-689-3660	www.lpkf.com/kr
SK텔레콤(주)	유영상	서울시 중구 을지로65(을지로2가) SK T-타워	02-2121-2114	http://www.sktelecom.com
SK하이닉스(주)	곽노정	경기도 이천시 부발읍 아미리 산 136-1	031-630-4114	http://www.skhynix.com
네이버(주)	최수연	경기도 성남시 분당구 불정로 6 (정자동 그린팩토리)	031-784-2560	https://www.navercorp.com
누리미디어	최순일	서울시 영등포구 선유로 63, 4층(문래동 6가)	02-710-5300	http://www.nurimedia.co.kr
대덕전자(주)	신영환	경기도 안산시 단원구 강촌로230 (목내동 475)	031-8040-8000	http://www.daeduck.com
대전테크노파크	김우연	대전시 유성구 테크로9로	042-930-4300	www.djtp.or.kr
도쿄อิเล็ก트론코리아(주)	원재형	경기도 화성시 장안면 장안공단 6길 51	031-260-5000	https://www.tel.com
(주)동인시스템	곽동달	부산광역시 해운대구 센텀북대로 60,	051-787-7288	http://www.donginsm.com
리얼테크코리아 주식회사	창형치	서울시 서초구 사임당로 18, 석오빌딩 5층	070-4120-7966	www.realtek.com
비전테크	이원복	대전 유성구 테크노2로 187, 미건테크노월드2차 1층 118호	042-934-0236	http://www.visiontechkorea.com
머플 주식회사	안수남	경기 성남시 분당구 판교로 289번길 20, 2동		http://www.murple.ai/
삼성전자(주)	전영현	서울시 서초구 서초2동 1320-10 삼성전자빌딩	02-1588-3366	https://www.samsung.com
스카이칩스	이강윤	수원시 장안구 서부로 2066, 산학협력센터 85511호	031-299-6848	http://www.skaichips.co.kr
스테코(주)	최기환	충청남도 천안시 서북구 3공단1로 20(백석동)	041-629-7480	http://www.steco.co.kr
에스에스앤씨(주)	한은혜	서울시 영등포구 당산로171, 1301	02-6925-2550	http://www.secnc.co.kr
에어스메디컬	이진구	서울시 관악구 남부순환로 1838	070-7777-3186	www.airsmmed.com
오토아이티(주)	정명환	대구시 수성구 알파시티1로 117	053-795-6303	www.auto-it.co.kr
유정시스템(주)	이재훈	서울시 구로구 디지털로26길 110	02-852-8721	www.yjsys.co.kr

회원사	대표자	주 소	전 화	홈페이지
정보통신정책연구원	배경율	충북 진천군 덕산읍 정통로 18	043-531-4389	www.kisdi.re.kr
(주)LX세미콘	이윤태	대전시 유성구 탑립동 707	042-712-7700	www.lxsemicon.com
(주)넥스틴	박태훈	경기도 화성시 동탄면 동탄산단9길 23-12	031-629-2300	http://www.nextinsol.com
(주)더즈텍	김태진	경기도 안양시 동안구 학익로 292 금강펜테리움T타워 A동 1061호	031-450-6300	http://www.doestek.co.kr
HL만도(주)	조성현	경기도 평택시 포승읍 하만호길 32	02-6244-2114	https://www.hlmando.com/
(주)빅텍	임만규	경기도 이천시 마장면 덕이로 180-31	031-631-7301	http://www.vitek.co.kr
(주)스프링클라우드	송영기	경기도 성남시 창업로 42	031-778-8328	www.aspringcloud.com
(주)시스메이트	이상만	대전시 유성구 유성대로 1184길 41	042-486-6135	http://www.sysmate.com
주식회사 뷰웍스	김후식	경기도 안양시 동안구 부림로 170번길 41-3	070-7011-6161	https://www.vieworks.com
(주)실리콘마이터스	허염	경기도 성남시 분당구 대왕판교로 660 유스페이스-1 A동 8층	1670-7665	http://www.siliconmitus.com
(주)씨이몬	정창호	경기도 성남시 분당구 별말로48(구 야탑동 272-1 케이디티빌딩)	02-480-8580	http://www.cimon.com
(주)씨인텔레콤	박영기	서울시 영등포구 경인로 775, 문래동 3가 에이스하이테크시티 1동 119호	02-3439-0033	http://www.signtelecom.com
(주)솔리드	정준, 이승희	경기도 성남시 분당구 판교역로 220 솔리드스페이스	031-627-6000	http://www.st.co.kr
(주)유니트론텍	남궁 선	서울시 강남구 영동대로 638(삼도빌딩) 9층	02-573-6800	http://unitrontech.com
(주)코클리어닷에이아이	한윤창	서울시 강남구 봉은사로 51길 26		www.cochl.ai
(주)크레셈	오상민	대전시 유성구 대덕대로 582, 4층 402호(도룡동, 옥토빌딩)	031-427-3445	http://www.cressem.com
(주)텔레칩스	이장규	서울시 송파구 올림픽로 35다길 42(신천동 한국루터화관)19~23층	02-3443-6792	www.telechips.com
(주)티에이치엔	이광연, 채승훈	대구시 달서구 갈산동 973-3	053-583-3001	http://www.th-net.co.kr
(주)티엘아이	홍세경	경기도 성남시 중원구 양현로 405번길 12 티엘아이 빌딩	031-784-6800	http://www.tli.co.kr
(주)해치텍	최성민	충북 청주시 청원구 오창읍 연구단지로 40, 스타기업관 207호	043-715-9034	http://www.haechitech.com
중소벤처기업진흥공단	강석진	경상남도 진주시 동진로 430	055-751-9380	www.kosmes.or.kr
케이케이테크(주)	김경하	경기도 안성시 대덕면 무능로132	031-678-1586	http://www.k-ktech.co.kr
코어인사이트(주)	유용훈	경기도 성남시 중원구 갈마치로 186 반포테크노피아 5층	031-750-9200	http://www.coreinsight.co.kr
하나마이크론(주)	이동철	충남 아산시 음봉면 연암울금로 77	041-423-7777	https://hanamicron.com/
한국알박(주)	김선길	경기도 평택시 청북읍 한산길5	031-683-2922	http://www.ulvackora.co.kr
한국전자기술연구원	신희동	경기도 성남시 분당구 새나리로 25 (야탑동)	031-789-7740	http://www.keti.re.kr
한국전자통신연구원	방승찬	대전시 유성구 가정로 218	042-860-6114	http://www.etri.re.kr
한화시스템(주)	김연철	서울시 중구 청계천로 86 (장교동) 한화비딩 (19,20층)	02-729-3030	http://www.hanwhasystems.com
현대로템(주)	이용배	경기도 의왕시 철도박물관로 37	031-596-9114	http://www.hyundai-rotem.co.kr
현대모비스(주)	정의선, 이규석	서울시 강남구 테헤란로 203	02-2018-5114	http://www.mobis.co.kr
현대자동차(주)	정의선, 장재훈, 이동석	경기도 화성시 장덕동 772-1	02-3464-1114	http://www.hyundai-motor.com
호리바에스텍코리아(주)	김성환 외 1명	경기도 용인시 수지구 디지털벨리로 98 호리바빌딩	031-6520-6500	http://www.horiba.com
히로세코리아(주)	이상엽	경기도 시흥시 정왕동 희망공원로 250	031-496-7000	http://www.hirose.co.kr
히타치하이테크코리아(주)	MIYOSHI KETA	경기도 성남시 분당구 정자일로 155, 엔16층(정자동, 분당두산타워)	031-725-4201	https://www.hitachi-hightech.com

박사학위 논문초록 게재 안내

본 학회에서는 전자공학회지에 국내외에서 박사학위를 취득한 회원의 학위 논문초록을 게재하고 있으니 해당 회원 여러분의 적극적인 참여를 바랍니다.(단, 박사학위 취득후 1년 이내에 제출해 주시는 것에 한함.)

성 명	(국문)	(한문)	(영문)
학위취득	학 교 명	대학교	학과
	취득년월	년 월	지도교수
현 근무처 (또는 연락처)	주 소	(우편번호 :)	
	전화번호	FAX번호	
학위논문 제목	국 문		
	영 문		
KEY WORD			

국문 초록(요약) : 1000자 이내

보내실 곳 _ 06130

서울특별시 강남구 테헤란로 7길 22(역삼동, 과학기술회관 제1관 907호)

사무국 회지담당자앞

E-mail : ieie@theieie.org

TEL : (02)553-0255(내선 6번) FAX : (02)562-4753



전자공학회지 <월간>

제52권 제9호(통권 제496호)

The Magazine of the IEIE

2025년 9월 20일 인쇄

2025년 9월 25일 발행

발행및

편집인

인쇄인

발행인

(사) 대한전자공학회

한림원(주)

사 단 법 인 대 한 전 자 공 학 회

회장 백 광 현

대표 김 흥 중

(우)06130 서울 강남구 테헤란로 7길 22(역삼동, 과학기술회관 제1관 907호)

TEL.(02)553-0255~7 FAX.(02)562-4753

E-mail : ieie@theieie.org

Homepage : http://www.theieie.org

“미래 기술 · 신산업 기술 정보의 보고” 해동일본기술정보센터, 최신 정보 한글요약 제공

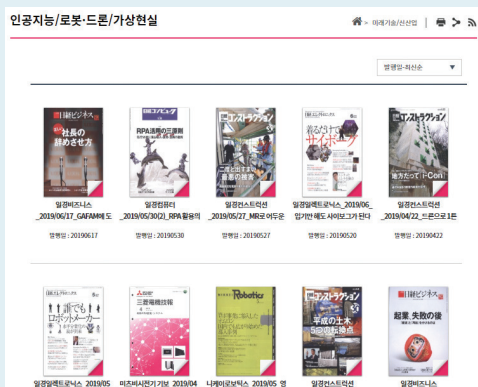


서울대학교 공과대학 해동일본기술정보센터는 대덕전자(故)김정식 회장의 열정과 지원에 의해 최신 일본 기술정보를 산업계와 학계에 널리 알리고자 2010년 3월에 설립하여 현재까지 운영해 오고 있습니다.

3천여권의 공학 및 신산업 관련 서적과 20여종의 Nikkei가 발행한 정기간행물과 40여개사의 기술보고서 등 4천여권의 도서를 통해 다양한 분야의 기술 정보를 제공하고 있습니다.

2016년부터는 소장 정보를 26개의 신산업 카테고리로 구분하여 미래기술과 신산업 관련한 정기간행물의 특집기사와 신문기사의 한글요약 제공과 함께, 주간브리핑 등을 통해 매주 새로운 정보를 메일과 SNS 등으로 배포하고 있습니다.

상세한 사항은 로그인 없이 모든 정보와 이용이 가능한 홈페이지를 참조바랍니다.



| 우리의 걸음이 길이 되도록



SK하이닉스가 만드는 AI 시대의 길

한계를 뛰어넘는 기술로

AI의 새로운 미래를 그려 갑니다

Full Stack AI Memory Provider

We Do Technology

첨단기술의 중심, 더 나은 세상을 만듭니다

