

K-LIGHT

광학과 기술 | JANUARY 2026 | Vol.9, No.1

POLICY

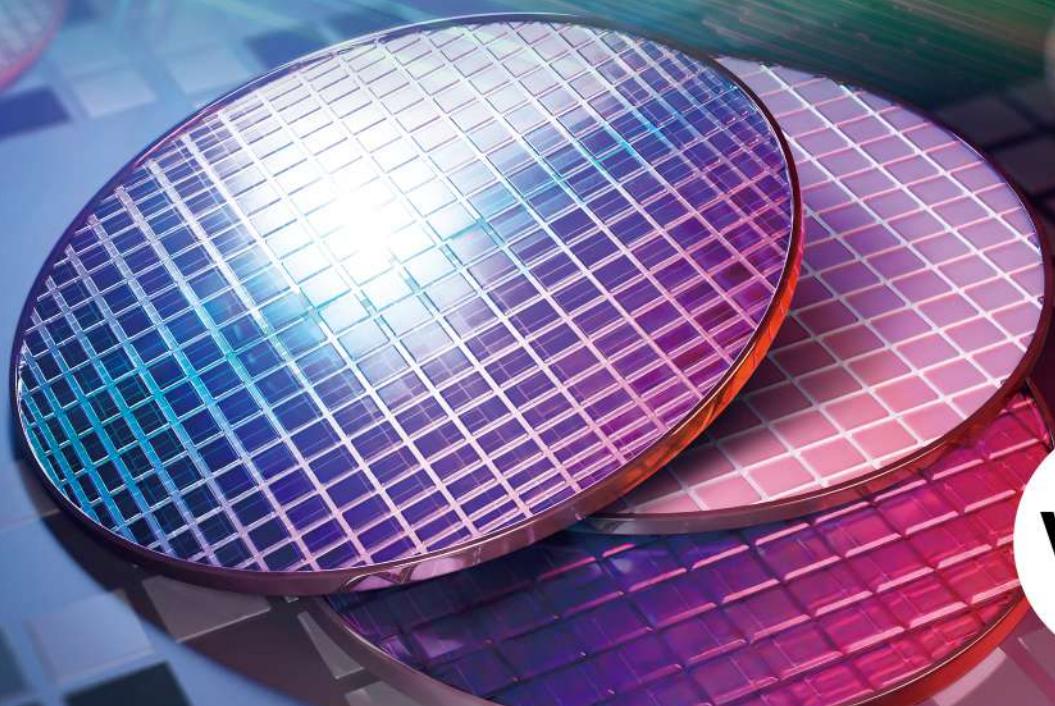
글로벌 이슈 및 기술트렌드로 살펴보는 광융합기술의 발전 방향

LIGHT PULSE

광학 생성 모델(Optical Generative Models)을 통한
초고속·저전력 이미지 합성 기술의 구현

TECHNOLOGY

차세대 Co-packaged Optics용 유리 기판 위 실리콘 나이트라이드 집적 광학
단거리 고속통신을 위한 실리콘 포토닉스 활용



JANUARY 2025

Vol.9
No.1

9 772586 511003
ISSN 2586-5110


제37회
한국광학회 정기총회 및

2026 동계학술발표회

OptoWin 2026 광산업전시회

2.03 Tue ~ 06 Fri

부산 BEXCO
컨벤션홀





CONTENTS

편집위원장
엄태중 부산대학교

편집부위원장
박정선 한국광융합산업진흥회
배인호 한국표준과학연구원

책임편집위원
최은서 조선대학교
장우석 한국광융합산업진흥회
황성환 한국광기술원

편집위원
박경덕 포항공과대학교
안재성 한국광기술원
이창열 고등광기술연구소
한상운 대구경북과학기술
주기남 조선대학교
송영민 광주과학기술원
오은정 한국광학회

인사말

- 005 한국광학회 회장 인사말
006 편집장의 편지

POLICY

- 007 글로벌 이슈 및 기술트렌드로 살펴보는 광융합기술의 발전 방향

Newsclick in K-LIGHT

- 014 (주)셀리안츠, 교환형 ESS 기반 스마트 에너지 플랫폼으로 글로벌 시장 진출 확대
016 적외선 카메라와 내·외부 환경센서, DVR 제어를 통한 통합 사물인터넷(IOT)
플랫폼 모니터링 시스템 구축

LIGHT PULSE

- 018 광학 생성 모델(Optical Generative Models)을 통한 초고속·저전력 이미지
합성 기술의 구현

NEWS BREAK

- 021 KAIST 최경철 교수팀·KBRI 공동연구팀,
'적색 40 Hz OLED 빛'의 알츠하이默 개선 효과 규명
023 고려대 김태근 교수, 마이크로 LED 한계 극복한 신개념 회로 개발
025 다양한 페로브스카이트 태양전지 구조에 적용 가능한 양극성 계면 신소재 개발
027 엑스선 자유전자 레이저로 규명한 나노입자 에너지 흐름의 선택적 제어
029 한국외대 임주원 교수, 차세대 광전화학 전지용 고효율 광전극 개발



TECHNOLOGY

- 030 차세대 Co-packaged Optics용 유리 기판 위 실리콘 나이트라이드 집적 광학
041 단거리 고속통신을 위한 실리콘 포토닉스 활용

MISCELLANY

도서 발간

- 052 우주용 광학계 개발을 위한『광학 시험 및 평가』
054 한국의학레이저임상시험원(주) : 비임상 동물실험을 '의사결정의 언어'로 만드는 여정

기관소식

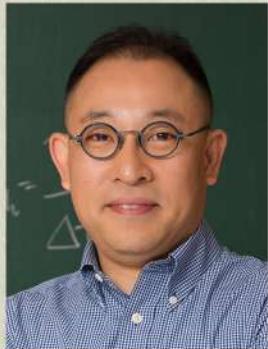
- 058 학회동정
062 학술지 논문발간 일람
074 회원동정
077 국내외 학술대회 개최일정



2026년 1월호 Vol. 9, No.1 | 판형 205x267mm | 발행일 2026년 1월 21일
등록일 2018년 1월 15일 | 발행인 이상민·정철동 | 편집인 엄태중
발행처 한국광학회, 한국광융합산업진흥회 | 주소 서울 마포구 독막로 320, 태영데시앙 1610호
전화 02-3452-6560 | 팩스 02-3452-6563 | 디자인·인쇄 한국학술정보(주)-북토리

- K-LIGHT는 한국도서잡지윤리위원회의 실천요강을 준수합니다.
- 본지 게재기사 내용은 한국광학회와 한국광융합산업진흥회의 공식 견해와 다를 수도 있습니다.
- 본지에 실린 글과 이미지는 K-LIGHT의 허락없이 전체 또는 일부를 무단으로 전재할 수 없습니다.
- K-Light는 정부 지원금을 받아 한국광학회와 한국광융합산업진흥회가 공동발행하고 있습니다.

**한국광학회 회장
인사말**



한국광학회 회장
이상민

K-LIGHT 독자 여러분께,

다사다난했던 2025년을 보내고, 이제 2026년 병오년(丙午年) 새해를 맞이하였습니다.

새해를 맞아 새로운 각오로 연구실과 산업 현장에서 최선을 다하고 계시는 회원 여러분께 먼저 축복의 마음을 전합니다. 무척 추위진 이 시기에 무엇보다 건강과 평안을 잘 지켜 나가시기를 기원합니다.

지난 2025년은 한국광학회가 외형적 성장뿐 아니라 내실을 다지는 전환점의 해였습니다. 급변하는 연구 환경과 불확실한 정책 여건 속에서도 학회는 학술의 본질과 공동체의 가치를 다시 한번 확인하는 의미 있는 한 해를 만들어 왔습니다. 동계 및 하계 학술대회는 연구 주제의 다양성과 깊이를 한층 확장하며 활발한 토론의 장으로 자리매김하였고, 분과 중심의 자발적인 국내외 학술 교류 또한 더욱 활성화되었습니다. 내용 및 규모가 함께 성장하며 학회의 방향성이 한층 분명해진 한 해였다고 할 수 있습니다.

특히 국제 협력과 차세대 연구자 참여 확대는 2025년의 중요한 성과 중 하나였습니다. 해외 학회 및 연구 그룹과의 연계 프로그램이 점차 안정적으로 정착되었고, 젊은 연구자와 학생 회원들이 학회 활동의 중심으로 자연스럽게 유입되는 변화도 두렷하게 나타났습니다. 이러한 흐름 속에서 한국광학회는 단순한 학술 교류의장을 넘어 연구자와 산업, 국제화와 세대를 잇는 플랫폼으로서의 역할을 더욱 분명히 해 나가고 있습니다.

이러한 변화의 과정에서, K-LIGHT는 학회의 기록이자 소통의 창으로서 그 역할을 충실히 수행해 왔습니다. 학술 성과와 산업 동향은 물론 우리 공동체의 고민과 비전을 담아내며, 한 걸음 앞을 내다보는 시선을 독자 여러분과 공유하고자 하였습니다.

그동안 헌신적으로 K-LIGHT를 이끌어 주신 엄태중 편집위원장님과 편집위원 여러분께 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 아울러 실리콘 포토닉스 특집을 통해 새로운 연구 흐름을 조명해 주신 1월호의 필진 여러분께도 진심으로 감사드립니다. 또한 한국광융합산업진흥회의 지속적인 관심과 지원은 K-LIGHT가 흔들림 없이 나아갈 수 있는 든든한 기반이 되고 있습니다. K-LIGHT는 국가 산업과 학문의 균간을 이루는 레이저·광기술의 현재를 기록하고, 미래를 비추는 등대로서 그 역할을 지속해 나갈 것이며, 회원 여러분의 참여와 응원에 힘입어 그 빛이 더 멀리 퍼져 나갈 것입니다.

앞으로도 한국광학회와 K-LIGHT에 변함없는 관심과 성원을 부탁드리며, 여러분 모두에게 2026년이 새로운 가능성과 도약의 해가 되기를 진심으로 기원합니다.

감사합니다.

한국광학회 회장

이상민

편집장의 편지



엄태종

K-Light 편집위원장

저와 K-LIGHT와의 인연은 한국광학회, 한국광학기기산업협회, 한국광산업진흥회가 통합 광학매거진 창간을 위해 출범하였던 2017년 4월 준비위원회부터 시작되었습니다. 당시 부산대학교 문한섭 교수님께서 1대 편집위원장을 맡으셨고, 산업계와 학계, 연구계는 물론 광학과 레이저 기술에 관심이 있는 일반 대중도 이해할 수 있도록 다채로운 내용을 담고자 노력하신 끝에 K-LIGHT가 세상에 나올 수 있었습니다.

그 뒤 제가 편집장을 이어받으며, 산업계에서 관심을 가지는 학술적이고 전문적인 내용의 review 혹은 tutorial 원고를 Technology 세션에 담고, 광학 분야의 연구방향 및 산업계 지원 방향을 논하는 정책 칼럼을 꾸준히 실어서 연구자들이 전반적인 과학기술과 광학 기술의 정책 방향을 확인할 수 있도록 하였습니다. 또한 광학 및 포토닉스 전문기업의 연구 및 사업 분야를 학생들에게 소개하는 코너와, 연구 결과의 사업화를 장려하는 차원에서 스타트업 기업의 창업 노하우와 경험을 공유하는 코너를 개설하기도 하였고, 언론에 기 보도된 연구성과를 보다 전문성을 가진 용어로 상세히 소개할 수 있는 기회를 기업 회원께 드리는 취지의 news break 코너도 많은 의뢰와 함께 지속되었습니다.

매 호 발행을 진행하면서 아쉬움이 많았지만, K-LIGHT가 다루었던 내용들이 이번 2026년 SPIE Photonics West에서도 어김없이 중요하게 다뤄지는 것을 보면서 편집위원님들과 코너를 작성해 주시는 분들의 고민과 노력을 느끼고 재차 감사하였습니다. 이번 1월호에서는 현재 가장 뜨거운 이슈인 생성형 AI의 연산속도를 책임질 유리기판과 실리콘 포토닉스를 Technology 코너에서, 2025년 글로벌 기술

트렌드의 상위 키워드 중 광융합기술 관련 분야를 중심으로 한 시사점을 Policy 코너에서 들여다보실 수 있습니다. 또한 이번 호에서는 KRISS의 이윤우, 양호순 박사님께서 오랜 시간의 경험과 축적하신 기술을 널리 공유하시고자 최근에 출판하신 “우주용 광학계 개발을 위한 광학 시험 및 평가”라는 책을 소개해 드리고자 합니다. 이 책을 통해 저자의 초정밀 우주 광학계의 연구와 개발 경험에서 비롯된 광학 이론, 전문적 기술이 연구자들에게 전달되기를 바라는 마음을 책 곳곳에서 느끼실 수 있을 것입니다. 한편 한국의학레이저임상시험원(주)의 창업스토리와 창업자의 철학은 놀라움을 금할 수 없습니다. 창업자도 익히 경험한, 바이오포토닉스 분야의 기업과 연구자가 겪고 있는 체계화와 객관성의 문제점을 문제-해결의 과정을 사장시키지 않고 적극적으로 사업의 아이템으로 삼았으니, 꼭 읽어 보시기를 권합니다.

K-LIGHT는 우리나라의 광학 및 광기술 소식을 깊이 있고 빠르게 전해드리고자 노력하고 있습니다. 지난 10년 동안, 창간 준비위원회에서 시작하여 편집위원, 편집위원장으로서 일할 수 있도록 함께 애써 주신 한국광산업진흥회와 편집위원님들, 그리고 광학회 사무국에 감사의 말씀을 전합니다. 광학 전문 매거진 K-LIGHT가 앞으로도 꾸준히 새로운 방법과 내용으로 독자 여러분에게 다가갈 수 있도록 많은 관심과 애정을 부탁드립니다.

K-Light 편집위원장

엄태종

글로벌 이슈 및 기술트렌드로 살펴보는 광융합기술의 발전 방향

WRITER_ 한국광기술원 기획정책실 나은주, 전략기획본부장 황성환

오늘날 세계는 기술의 급속한 발전과 함께 글로벌 경제의 불확실성, 인공지능과 디지털 전환의 가속화, 기후변화와 지정학적 갈등 등 복합적인 요인들이 맞물리며 급격한 변화를 겪고 있다. 이러한 격변의 시대 속에서 기술은 단순한 혁신의 수단을 넘어, 경제 성장과 사회 변화, 글로벌 경쟁력은 물론 인간의 생존 전략을 좌우하는 핵심 축으로 부상하고 있다.

따라서 이번 호에서는 글로벌 전문기관이 제시한 글로벌 이슈와 기술적 트렌드를 종합 분석함으로써, 불확실하고 빠르게 변화하는 환경 속에서 광융합기술의 역할과 발전 방향을 모색해 보고자 한다.



글로벌 이슈

세계경제포럼(World Economic Forum, WEF)은 전 세계가 직면한 현재 및 미래의 단기·장기 위험 요인을 분석한 「Global Risks 2025」 보고서를 발간하였다. 해당 보고서는 매년 전 세계 약 1,000명의 전문가를 대상으로 글로벌 리스크 인식 조사(global risk perception survey)를 실시하여, 현재(1년), 단기(2년 이내), 장기(10년 이내) 기준으로 경제, 환경, 사회, 기술, 지정학 등 5개 분야의 33가지 글로벌 위험을 비교·분석하고 있다. 본 고에서는 「Global Risks 2025」에서 제시된 현재와 단기·장기 위험 요인 중 상위 10개 항목에서 과학기술 분야와 밀접하게 연관된 경제, 기술, 환경 분야의 주요 이슈를 중심으로 살펴보자 한다.

경제 분야를 살펴보면, 전년 대비 경기 침체와 인플레이션 등 경제 리스크는 약화된 것으로 보인다. 현재 및 단기·

장기 기간의 상위 10위권 내에 포함된 경제 관련 위험 요인은 '경기 침체' 단 하나에 불과하다. 이는 글로벌 리스크 인식이 기술, 환경, 지정학 등 장기적이고 구조적인 위협 요인에 집중되면서, 단기적인 경제 불안보다 시스템 회복력과 지속 가능성에 대한 우려가 더 크게 부각된 결과로 해석된다.

반면 지정학 분야에서 '국가 간 무력 충돌'이 전년도 8위에서 올해 1위로 급상승하며 현재 가장 시급한 글로벌 리스크로 평가되었다. 이는 미·중 간 기술 패권 경쟁, 우크라이나 전쟁의 장기화, 중동 및 수단 지역의 분쟁 격화 등이 원인으로 작용한 것으로 보인다. 이러한 무력 충돌 리스크는 국제 무역의 분절화, 글로벌 공급망 재편, 투자 위축 등 경제 전반에 심각한 영향을 미칠 수 있는 만큼 각별한 주의가 필요하다.

기술 분야에서는 최근 인공지능(AI)의 급속한 발전과 확산이 글로벌 리스크 전반에 중대한 영향을 크게



↓ [표 1] 2025년 현재와 단기·장기 글로벌 위기 요인과 순위(상위 10위)^[1,2]

구분	현재의 글로벌 위기 요인 순위	향후 2년 내 직면할 글로벌 위기 요인 순위	향후 10년 내 직면할 글로벌 위기 요인 순위
요약	지정학적 위험과 경제적 긴장 고조, 기술 발전 및 양극화 이슈		환경오염, 생명공학 기술 통제력 상실, 초고령화 사회 위기 주목
경제	경기침체 (6위(-))		
지정학	국가 간 무력 충돌 (1위($\Delta 7$)) 지리적·경제적 대립 (3위(N)) AI 역정보 및 허위정보 (4위($\nabla 2$))	국가 간 무력 충돌 (3위($\Delta 2$)) 지리적·경제적 대립 (9위(N)) AI 역정보 및 허위정보 (1위(-))	AI 역정보 및 허위정보 (5위(-))
기술		사이버 위협 (5위($\nabla 2$))	AI 기술의 부작용 (6위(-)) 사이버 위협 (9위($\nabla 1$))
	극한기상현상 (2위($\nabla 1$))	극한기상현상 (2위(-))	극한기상현상 (1위(-))
환경	지구환경의 중대한 변화 (7위(N))	지구오염 (6위($\Delta 4$))	생물다양성 손실 및 생태계 붕괴 (2위($\Delta 1$)) 급격한 지구 시스템 변화 (3위($\nabla 1$)) 천연자원 부족 (4위(-)) 지구오염 (10위(-))
	AI 역정보 및 허위정보 (4위($\nabla 2$)) 경제적 기회 부족 또는 실업 (8위(N)) 인권 또는 시민 자유 억압 (9위(N)) 불평등 (10위(N))	사회적 양극화 (4위($\nabla 1$)) 불평등 (7위($\nabla 1$)) 비자발적 이주 (8위(-)) 인권 또는 시민 자유 억압 (10위(N))	불평등 (7위(N)) 사회적 양극화 (8위($\Delta 1$))

미치고 있다. 특히 'AI 기반 역정보 및 허위정보'는 전년도에 이어 단기 리스크 1위를 유지하고 있으며, 현재 및 장기 관점에서도 최상위권에 해당한다. 이는 생성형 AI 기술의 확산이 딥페이크, 허위 정보 유포, 여론 조작 등 사회적 신뢰를 훼손할 수 있는 위협으로 인식되고 있기 때문이다. 이와 함께 '사이버 위협'도 디지털화의 가속화에 따라 지속적으로 높은 위험 요인으로 평가되고 있다. 특히 국가·산업 차원의 정보 보안과 핵심 인프라 보호 문제는 단기적 이슈를 넘어 지속적인 정책적 대응이 필요하다.

환경 분야는 여전히 전 기간에 걸쳐 가장 심각한 리스크로 평가되고 있다. 특히 '극한 기상 현상'은 현재(2위), 단기(2위), 장기(1위) 모두에서 상위권에 해당하며, 이는 기후 위기가 실질적인 물리적 위협으로 전환되고 있음을 보여준다. 2024년이 관측 이래 가장 더운 해로 기록되는 등 현재 폭염, 홍수, 가뭄, 산불과 같은 기상이변이 심화되고 있으며, 이는 인명 피해뿐만 아니라 사회기반시설, 에너지, 공급망 전반에도 심각한 영향을 미칠 수 있는 요인으로 지목되고 있다. WEF는 이러한 극단적인 기후 현상이 생물 다양성 감소, 식량 위기, 오염 등의 또 다른 리스크를 낳을 것이라고 내다보았으며, 이는 기후·환경 문제로 인한 위기 요인이 장기 리스크 1위부터 4위까지 모두 자리매김하는데 영향을 미쳤다. 해당 요인은 단기간 내 해결이 어렵고, 장기적으로는 인류의 생존 기반에 영향을 미칠 수 있는 문제라는 점에서 그 심각성이 크다.

글로벌 전문기관별 기술 트렌드 전망

전 세계 주요 전문기관은 매년 기술 변화의 흐름을 다각도로 분석하고, 그 해 주목해야 할 주요 기술 트렌드를 발표하고 있다. 각 기관은 고유한 전문성과 관점을 바탕으로 글로벌 이슈, 기술의 발전 속도, 산업별 파급력 등을 종합적으로 고려해 기술 트렌드를 정의하며, 이를 통해 산업·기술의 미래 방향을 사회 전반에 제시하고 있다. 본 장에서는 세계 경제포럼을 비롯하여 글로벌 컨설팅기업, 유력 언론매체 및 매거진, 과학기술 전문기관 등 총 11개 국내외 기관의 2025년 주요 기술 트렌드를 종합적으로 살펴보고, 광융합산업 발전을 위한 시사점을 도출해 보고자 한다.

2024년 주요 기술 트렌드의 상위 3개 키워드는 인공지능, 디지털 전환, 사이버 보안이었다. 이는 코로나 팬데믹 이후 인공지능의 도입과 디지털 전환의 가속화에 따라 사이버 보안 이슈가 전 산업으로 확산한 결과로 보인다.



한편 2025년의 글로벌 기술 트렌드 핵심 키워드는 인공지능, 지속 가능성(sustainability), 생명공학이었다. 인공지능은 전년도에 이어 여전히 최우선 핵심기술로 자리하고 있으며, 지속 가능성과 생명공학은 전년도에 비해 급부상한 것으로 나타났다. 2025년에 이르러 인공지능은 우리 일상과 업무를 새롭게 설계하였고, 이로 인해 시대는 디지털 전환(DX)을 넘어 인공지능 전환(AX)의 시대로 변화하고 있다. 생성형 AI의 도입과 함께 AI 활용의 범위가 확대되고, 있다.

이로써 인공지능은 산업 구조와 기업 혁신을 주도하는 핵심 전략 기술로서 부상하고 있다. '지속 가능성'은 앞에서 살펴본 바와 같이 기후변화·환경오염 등 지구 환경 문제가 국제 사회 전반에서 심각한 장기적 해결 과제로 주목받고 있는 배경에서, '생명공학'은 초고령 사회 진입에 따른 유전자 치료·바이오 신약·디지털 헬스케어의 발전이 가속화되면서 상위 키워드로 상승한 것으로 보인다. 이외에도 '로봇·제조' 분야의 키워드 비중이 작년 대비 증가했다. AI의 확산 및

↓ [표 2] 2025년 주요 글로벌 기관별 기술 트렌드 전망

구분	세계경제포럼 (10대) ^[3]	가트너 (10대) ^[4]	딜로이트 (6대) ^[5]	포브스 (5대) ^[6]	Technology Magazine(10대) ^[7]
인공지능	• 생성형 워터마킹	• 에이전틱 AI • AI 거버넌스 플랫폼 • 앰비언트 인비저블 인텔리전스 • 하이브리드 컴퓨팅	• 소형언어모델로 진화 • 하드웨어 시대 도래 • AI의 확대(agent AI) • AI 중심으로 시스템 변화(agent AI)	• 기계와 인간 지능의 융합	• 생성형 AI 통합
지속가능성	• 삼투압 발전 시스템 • 차세대 원자력 기술 • 녹색 질소 고정	• 에너지 효율적 컴퓨팅		• 기후기술 챌린지	• 지속 가능한 기술 및 친환경 IT
생명공학	• 엔지니어드 생체 치료 • GLP-1 기반 신경치료 • 자율 생화학 센싱 • 나노 자임	• 신경학적 강화		• 바이오테크 혁명	
메타버스		• 공간 컴퓨팅	• 공간 컴퓨팅의 부상		• 몰입형 업무 환경
사이버보안		• 허위 정보 보안 • 포스트 양자 암호화(PQC)		• 글로벌 규모 사이버 보안	• AI 기반 사이버 보안 • 제로 트러스트 보안
로봇·제조		• 다기능 로봇			
모빌리티	• 구조 복합 배터리 • 협력 감지 시스템				
통신					• 엣지컴퓨팅 및 5G 기반 서비스
양자		• 양자 시대의 암호 문제 해결	• 컴퓨팅 파워에서 양자 도약		• 양자컴퓨팅 준비
반도체					
기타					• 디지털 공급망 혁신 • 로우코드/노코드 개발 플랫폼 • 하이브리드 클라우드 최적화

저출산, 인력난 등의 이슈가 지속해서 대두되면서 자율제조 (autonomous manufacturing) 분야가 급부상하고, 인간 노동을 대체하는 휴머노이드 로봇 도입이 본격화되고 있기 때문이다. 특히 CES 2025에서는 디지털 헬스를 3대 핵심 테마로 지정하였으며, 국제전시회 전반에서 다양한 휴머노이드 로봇 제품이 대거 등장하며 큰 주목을 받았다.



MIT 테크놀로지 리뷰(10대) ^[9]	Trendforce (10대) ^[9]	워싱턴 포스트 (5대) ^[10]	KIAT (10대) ^[11]	IITP (10대) ^[12]	NIA (12대) ^[13]
<ul style="list-style-type: none"> • 소형언어모델 • 생성형 AI 검색 	<ul style="list-style-type: none"> • AI 노트북 보급 • AI 서버의 급성장과 HBM의 발전 • 양날의 검으로서의 AI 	<ul style="list-style-type: none"> • 일상 속 AI의 확산 	<ul style="list-style-type: none"> • AI 헬스케어 산업 • 대형 멀티모달(LMM) AI산업 • 온디바이스 AI 산업 	<ul style="list-style-type: none"> • AI 에이전트 • AI 데이터 • AI 사이언티스트 • AI 안전/안보 	<ul style="list-style-type: none"> • 에이전트 AI • AI 대체 감정 노동 • 엣지컴퓨팅과 온디바이스 AI • AI 거버넌스 • 디지털 르네상스
<ul style="list-style-type: none"> • 청정 제트연료 • 녹색 철강 			<ul style="list-style-type: none"> • 그린 디지털(GX)산업 • 순환 소재 산업 		
<ul style="list-style-type: none"> • 장기지속형 HIV 예방제 • 소 트림 감소제 • 효과적인 줄기세포 치료 					
	<ul style="list-style-type: none"> • AMOLED 중형 애플리케이션 확장 • 비전프로 	<ul style="list-style-type: none"> • 메타버스에서 공간컴퓨팅으로의 전환 	<ul style="list-style-type: none"> • 폼팩터 디스플레이 산업 • 디지털 휴먼 산업 	<ul style="list-style-type: none"> • 공간컴퓨팅 	<ul style="list-style-type: none"> • 사이버 보안 • AI 보안 • 디지털 신뢰
<ul style="list-style-type: none"> • 고속학습 로봇 	<ul style="list-style-type: none"> • 휴머노이드 및 서비스 로봇 		<ul style="list-style-type: none"> • 지능형 자율제조 산업 	<ul style="list-style-type: none"> • 휴머노이드 	<ul style="list-style-type: none"> • 다중 작업 로봇 • 제조업 디지털트윈
<ul style="list-style-type: none"> • 로보 택시 	<ul style="list-style-type: none"> • 모듈형 엔드 투 엔드 모델 • EV와 AI 데이터 센터의 에너지 저장 • 큐브 위성과 글로벌 통신 		<ul style="list-style-type: none"> • 융합형 자율주행차(C-AV) 산업 		<ul style="list-style-type: none"> • AI 주도 자율주행
				<ul style="list-style-type: none"> • 차세대 지능형 네트워크 	<ul style="list-style-type: none"> • 초고속 초지연 네트워크
				<ul style="list-style-type: none"> • 양자 기술 	
			<ul style="list-style-type: none"> • 고급 프로세스와 AI 반도체 혁신 	<ul style="list-style-type: none"> • 전력반도체 산업 	<ul style="list-style-type: none"> • AI 반도체 • AI 헤게모니 경쟁 '반도체 패권'
<ul style="list-style-type: none"> • 베라 루빈 천문대 		<ul style="list-style-type: none"> • 기술 정책의 파급력 확대 • 인터넷 생태계 분절화 • 아동보호와 기술윤리 			

2024년

생성형AI의 확대로 인공지능, 디지털전환, 사이버보안이 기술 트렌드 상위 키워드로 선정

2025년

인공지능은 여전히 최우선 핵심기술이며, 지속가능성과 생명공학이 상위 키워드로 급부상

2025년 주요 글로벌 기관별 기술 트렌드 종합

시사점

앞에서 살펴본 바를 바탕으로, 본 고에서는 2025년 글로벌 기술 트렌드의 상위 키워드 중 광융합기술 관련 분야를 중심으로 한 시사점을 도출해 보고자 한다.

먼저 '인공지능'은 여전히 기술 혁신의 중심에 있으며, 특정 산업을 넘어 사회 전반으로 빠르게 확산하고 있다. 2024년에는 '생성형 AI (generative AI)'가 주목받았다면, 2025년에는 사용자 지시 없이 자율적인 의사결정을 수행하는 '에이전틱 AI (agentic AI)'로의 진화가 핵심 이슈로 떠오르고 있다. 또한 모바일, 엣지 환경에서 AI 활용을 가능하게 하는 소형언어모델(small language models, SLM) 및 사이버 위협, 데이터 보호 등을 위한 사이버 보안 관련 기술에 관한 관심도 빠르게 확대되고 있다. 이처럼 인공지능의 고도화로 대규모 데이터 센터에 대한 수요가 폭증함에 따라, 빛 기반의 초고속·초집적·저전력 구현이 가능한 광반도체(photonics IC) 기술의 중요성은 더욱 커지는 중이다. 또 한 강력한 디지털 보안 및 데이터 보호를 위한 양자암호통신(quantum key distribution) 기술 역시 광융합 기반의 핵심 기술로 떠오르고 있다.

'지속 가능성' 측면에서는 1절에서 살펴본 바와 같이 기후변화와 환경오염 문제를 더 이상 선택이 아닌 필수 장기적 해결 과제로 간주하며, 국제 사회는 이에 따라 탄소배출 저감과 자원 효율화를 위한 기술 혁신을 가속하고 있다. 그 중에서도 특히 태양광, 광센서, 광통신 등의 광융합기술은 청정에너지 확보와 에너지 효율화를 위한 지능형 인프라 구축 등의 분야에서 활용이 크게 확대될 전망이다.

최근 메타버스(metaverse)에서 공간컴퓨팅(spatial computing)으로의 전환이 주목된다. 초기 메타버스가 가상 공간 내의 몰입형 콘텐츠에 초점을 맞췄다면, 공간컴퓨팅은 현실 공간을 정밀하게 인식하고 이를 디지털화하여, 현실과 가상 간 실시간 상호작용이 가능한 환경을 구축하는 기술로 진화하고 있다. 공간컴퓨팅의 구현에는 AR/VR 등 초실감 디스플레이 기술, 센서 기반 공간 인식 기술, 디지털 트윈 등 다양한 광기술이 활용되며, 향후 이 분야는 제조, 의료, 스마트시티 등 다양한 산업 분야에서 혁신적인 변화를 이끌어 낼 것으로 기대된다.

로봇·제조 분야에서는 휴머노이드 기술 및 지능형 자율제조(AI in Manufacturing)가 핵심 키워드로 부상하고 있다. 사람과 유사한 외형과 동작, 그리고 인간과 자연스러운



상호작용 능력을 갖춘 휴머노이드 로봇은 제조·물류·서비스 등의 현장에서 활용이 점차 확대될 것으로 기대된다. 이러한 로봇 기술의 고도화에는 초정밀 라이다(LiDAR) 및 광센서, 3D 카메라, 초고속 광통신 등 다양한 광융합기술이 핵심 역할을 한다. 이들 기술은 로봇이 주변 환경을 고정밀도로 인식하고, 대량의 데이터를 실시간으로 처리하며, 안정적인 통신 기반 위에서 자율적으로 판단하고 동작할 수

있도록 지원한다. 이로써 로봇의 자율성·정밀성·상호작용 능력을 크게 향상시키고, 고도화된 스마트 제조 생태계 구축에 기여할 것이다.

이처럼 광융합기술은 글로벌 기술 트렌드를 중심으로 다양한 산업을 연결하고 융합을 촉진하는 전략 기술로서, 미래 첨단기술의 고도화를 실현하며 산업 전반의 융합적 혁신을 견인할 것으로 기대된다.

BIBLIOGRAPHY

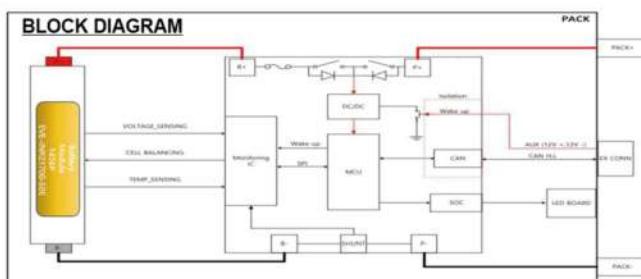
- 1 World Economic Forum, "Global Risks Report 2024," (World Economic Forum, Published date: Jan. 10, 2024), <https://www.weforum.org/publications/global-risks-report-2024/> (Accessed date: Nov. 21. 2025).
- 2 World Economic Forum, "Global Risks Report 2025," (World Economic Forum, Published date: Jan. 15, 2025), <https://www.weforum.org/publications/global-risks-report-2025/> (Accessed date: Nov. 21. 2025).
- 3 World Economic Forum, "Top 10 Strategic Technology Trends of 2025," (World Economic Forum, Published date: Jun. 24, 2025), <https://www.weforum.org/publications/top-10-emerging-technologies-of-2025/> (Accessed date: Nov. 21. 2025).
- 4 Gartner, "Top 10 Strategic Technology Trends of 2025," (Gartner, Published date: Oct. 21, 2024), <https://www.gartner.com/en/articles/top-technology-trends-2025> (Accessed date: Nov. 21. 2025).
- 5 Deloitte, "Tech trends 2025," (Deloitte, Published date: Feb. 2025), <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/tech-trends.html> (Accessed date: Nov. 21. 2025).
- 6 Forbes, "The 5 Biggest Technology Trends for 2025," (Forbes, Published date: Feb. 3, 2025), <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2024/09/23/the-5-biggest-technology-trends-for-2025-everyone-must-be-ready-for-now/> (Accessed date: Nov. 21. 2025).
- 7 Technology Magazine, "Top 10: Technology Trends of 2025," (Technology Magazine, Published date: Dec. 18, 2024), <https://technologymagazine.com/top10/top-10-technology-trends-of-2024> (Accessed date: Nov. 21. 2025).
- 8 MIT Technology, "10 Breakthrough Technologies 2025," (MIT Technology, Published date: Jan. 16, 2025), https://www.technologyreview.com/2025/01/03/1109178/10-breakthrough-technologies-2025/?utm_campaign=site_visitor.unpaid_engagement&utm_source=Twitter&utm_medium=tr_social (Accessed date: Nov. 21. 2025).
- 9 TrendForce, "Unveiling New Opportunities in Tech Innovation for 2025," (TrendForce, Published date: Nov. 21, 2024), <https://www.trendforce.com/presscenter/news/20241121-12374.html> (Accessed date: Nov. 21. 2025).
- 10 The Washington Post, "The tech trends you'll have to live with in 2025," (The Washington Post, Published date: Jan. 6, 2025), <https://www.washingtonpost.com/technology/2025/01/06/technology-trends-tech-predictions-2025-ces/> (Accessed date: Nov. 21. 2025).
- 11 한국산업기술진흥원, "인공지능 3.1 시대, 2025년 KIAT 10대 유망 산업 보고서," (한국산업기술진흥원, Published date: Feb. 2025), https://kiat.or.kr/front/board/boardContentsView.do?board_id=71&contents_id=976724f8d2674ae0992080867f88078c (Accessed date: Nov. 21. 2025).
- 12 정보통신기획평가원, "2025년 ICT 10대 이슈," (정보통신기획평가원, Published date: Jan. 24, 2025), <https://www.iitp.kr/web/lay1/program/S1T62C69/itfind/view.do?seq=02-001-250124-000006&cpage=1&rows=10&searchTarget=all> (Accessed date: Nov. 21. 2025).
- 13 한국지능정보사회진흥원, "NIA가 전망한 2025년 12대 디지털 트렌드: IT & Future Strategy 2024-6," (한국지능정보사회진흥원, Published date: Dec. 31, 2024), https://www.nia.or.kr/site/nia_kor/ex/bbs/View.do?cbIdx=25932&bclIdx=27606&parentSeq=27606 (Accessed date: Nov. 21. 2025).



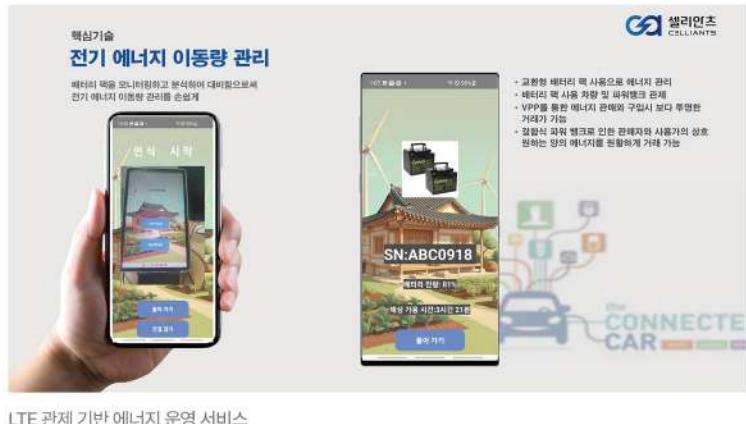
(주)셀리안츠, 교환형 ESS 기반 스마트 에너지 플랫폼으로 글로벌 시장 진출 확대

WRITER_한국광융합산업진흥회 장우석 책임연구원
자료제공_(주)셀리안츠

스마트 배터리 시스템 전문기업 셀리안츠(CELLIANTS, 대표 정우근)는 국가표준 KS R-6100 기반 교환형 배터리팩과 자체 개발한 LTE 통신형 마스터보드를 결합하여, 소형·이동형 ESS(에너지저장장치) 시장의 새로운 기준을 제시하였다. 셀리안츠는 배터리팩 제조 기술뿐 아니라 교환형 전력 인프라, IoT 기반 에너지 관제, 모빌리티 전동화 기술까지 아우르는 에너지 플랫폼 기업으로, 국내는 물론 동남아시아 시장에서 빠르게 주목받고 있다.



셀리안츠 마스터 보드



LTE 관제 기반 에너지 운영 서비스

셀리안츠는 교환형 배터리 충전 스테이션, 전기이륜차·전동카트 전원 시스템, 이동형 ESS 모듈 등 다양한 제품군을 상용화하며 스마트 에너지 운영 기술을 핵심 역량으로 삼고 있는 기업이다. 2025년 이후 ESS 시장은 고정형 중심에서 모듈형·교환형·이동형 중심으로 전환되는 흐름이 뚜렷해지고 있다. 즉 배터리를 충전하는 것이 아니라 교환하는 시대가 열리고 있으며, 이러한 변화 속에서 셀리안츠는 배터리를 단순한 저장장치가 아니라 네트워크에 연결된 지능형 에너지 디바이스로 정의하고, 배터리팩, 마스터보드, 통신 플랫폼을 통합한 스마트 ESS 생태계를 구축하여 차별화하였다.

셀리안츠(CELLIANTS)는 국가표준 KS R-6100 기반의 교환형 배터리팩과 자체 개발한 LTE 통신 마스터보드를 결합한 소형 및 이동형 ESS 기술을 개발하였으며, 설치형에 머물렀던 기존 ESS 개념을 넘어 에너지가 이동하고 연결되고 관리되는 시스템으로 확장시키며 시장의 주목을 받고 있다.

셀리안츠의 독자 기술인 마스터보드(master board)는 단순 배터리 보호회로를 넘어 제어·통신·안전·관제 기능을 통합한 지능형 에너지 플랫폼으로, 기존 ESS 및 배터리 시스템이 “현장

기능	설명
독립 전원 공급 시스템	4V 셀 3개 기반 상시전원 설계, 외부 배터리 없이도 동작 지속
LTE 원격 관제 모듈 내장	서버 및 모바일 앱과 실시간 연결, 위치·상태 정보 모니터링
자동 충전 제어	트랜지스터 기반 알고리즘으로 과충전·과전류 방지 및 충전 효율 최적화
교환형 배터리 프로토콜 지원	KS R-6100 국가표준 완전 대응, 다수 배터리팩 통합 운영 가능
플러그&플레이 모듈 설계	소형 ESS·이동형 ESS·모빌리티 전원 등 다양한 형태로 확장 가능
긴급전원 및 백업 기능	배터리 중간 틸거에도 시스템 무중단 유지
통합 보안 및 안전 관리	BMS-관제 연동을 통한 과열, 단락, 충격, 잔존용량 보호 시스템

↑ [표 1] 마스터 보드의 주요 기능 및 기술적 차별성

에서만 확인 가능한 장치”였던 것과 달리 통합 운영되는 클라우드 기반이다. 또한 4V 셀 기반 자체 전원을 사용하여 외부 배터리가 제거되어도 시스템이 정상적으로 동작하는 구조를 택해 ESS 운용의 신뢰성과 안전성을 크게 높였다.

셀리안츠는 에너지 저장장치가 고정형 설비라는 기존 전제를 깨고, 전력 운용의 이동성·유연성·지능화를 구현하고자 한다. 차세대 전력 서비스 플랫폼으로서 발돋움하고 있는 LTE 마스터보드와 교환형 배터리 시스템에서 더 나아가 소형 전력 공급, 산업현장 보조전력, 재난대응 전원, 교환형 모빌리티 전력 등 다양한 영역에서 기술을 확장하며 사업 범위를 넓히고자 하고 있으며, 그 노력의 일환으로 최근 베트남에 진출한 바 있다.

▶ 셀리안츠 기술의 주요 적용 분야는 소형 및 이동형 ESS, 교환식 충전소 및 배터리 대여 플랫폼, 전기이륜차, 전동카, 산업용 카트 물류 로봇, 농업, 건설, 군사용 특수 장비 전원, 지역 독립형 전력망과 태양광 연계 ESS 시스템 구축 등이다.



(주)셀리안츠의 기술 적용 모델

기능 특징

원격 관제 기능	실시간 SOC / SOH / 온도 / 전압 / 사이클 조회 배터리 교환 이력 및 위치 기반 운용 ESS 운영 데이터 자동 저장 및 분석 PC·모바일 전용 대시보드 제공 원격 고장 진단 및 유지보수 외부 EMS·스마트그리드 플랫폼 연동 지원 BMS-관제 연동을 통한 과열, 단락, 충격, 잔존용량 보호 시스템
----------	---

↑ [표 2] 마스터 보드의 원격 관제 기능 특징





적외선 카메라와 내·외부 환경센서, DVR 제어를 통한 통합 사물인터넷(IOT) 플랫폼 모니터링 시스템 구축

WRITER_ 한국광융합산업진흥회 장우석 책임연구원

자료제공_ 주식회사 로그인서광

주식회사 로그인서광은 4차 산업 활성화에 따른 사물인터넷(IOT) 시장을 목표로 ICT 기반의 농업융합솔루션, 환경 IOT플랫폼, 에너지 전력거래 플랫폼 등을 개발하는 회사로서 2021년 한국농업기술원 스마트팜 ICT 기자재 우수사례 기업으로 선정된 바 있다. 광학영상 장비인 적외선 카메라 와 내·외부 환경센서의 집약체로 알려진 스마트 팜,

스마트 축사를 주력으로 삼고 있으며, 시설원예분야를 비롯하여 스마트 축사 통합관리 시스템, 농가 전염병 예방을 위한 입출입 방역시스템, 인공지능 분야 제품군, 에너지 모니터링 시스템, 스마트 팩토리 솔루션 제공 등 다양한 솔루션을 개발하고, 관련 제품들을 생산한다.

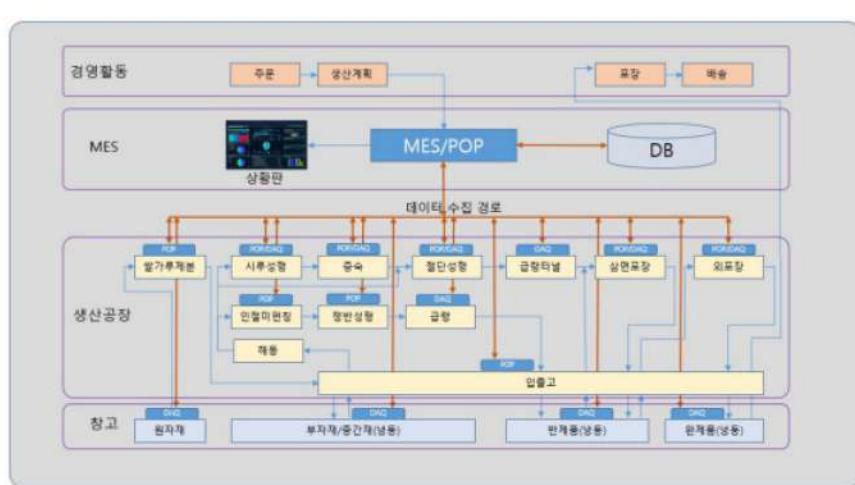
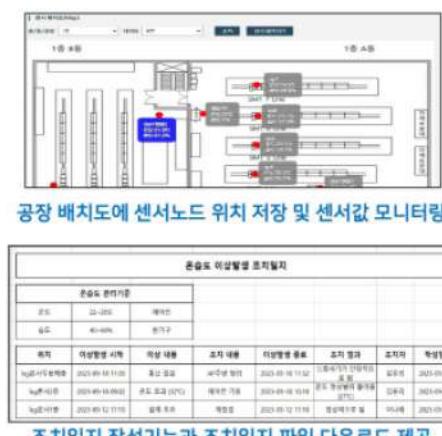




- 내부측정센서 2개소
- 센서노드 2개
- 제어장치 업그레이드
- 게이트웨이
- 휴대폰 App

통합제어장치

- 냉방
- 난방
- 송환통기
- 유동팬
- 안개분무기
- 천장개폐기
- 차광커튼
- 축창개폐기
- 양액공급기
- CO₂발생기



스마트 팩토리 분야 ICT 모니터링 최적화 시스템

주식회사 로그인서광에서 개발한 ICT 기술을 적용한 스마트팩토리는 공장 환경 관리용 환경센서와 모니터링 플랫폼 서비스 등이 탑재된 스마트 관리 시스템을 제공한다. 시스템에 탑재된 환경센서로는 사료 일일섭취량, 고온·정전·침입·화재 등 감시, 자외선 살균 소독, 온습도 조절 등을 감지하며, 이를 바탕으로 알림 서비스를 제공하여 어디에서건 원격으로 제어 가능하다. 모니터링 플랫폼으로는 생산공정 데이터 수집, 제조설비 가동 상황 모니터링이 가능하며, 장애 발생시 호출 버튼을 눌러 장애조치를 요청할 수 있다. 또한 본 시스템에는 냉동/냉장 창고 등 급랭 시설의 실시간 온도 관리 기능과 증숙 품질 관리용 스팀 압력 측정 기능, 제품을 대량 입출고 할 때 필요한 제품 입출고 관리 시스템까지 통합하여 수록되어 있다.

(주)로그인 서광은 빠르게 변화하는 경영 환경 속에서 지속적인 연구개발을 통해 정보 기술의 변화에 대응하고, “환경, 에너지, 스마트 팜 플랫폼 개발 전문기업”으로 지속적인 발전을 꾀하고 있다.

광학 생성 모델(Optical Generative Models)을 통한 초고속 저전력 이미지 합성 기술의 구현

WRITER_ 대구경북과학기술원 한상윤

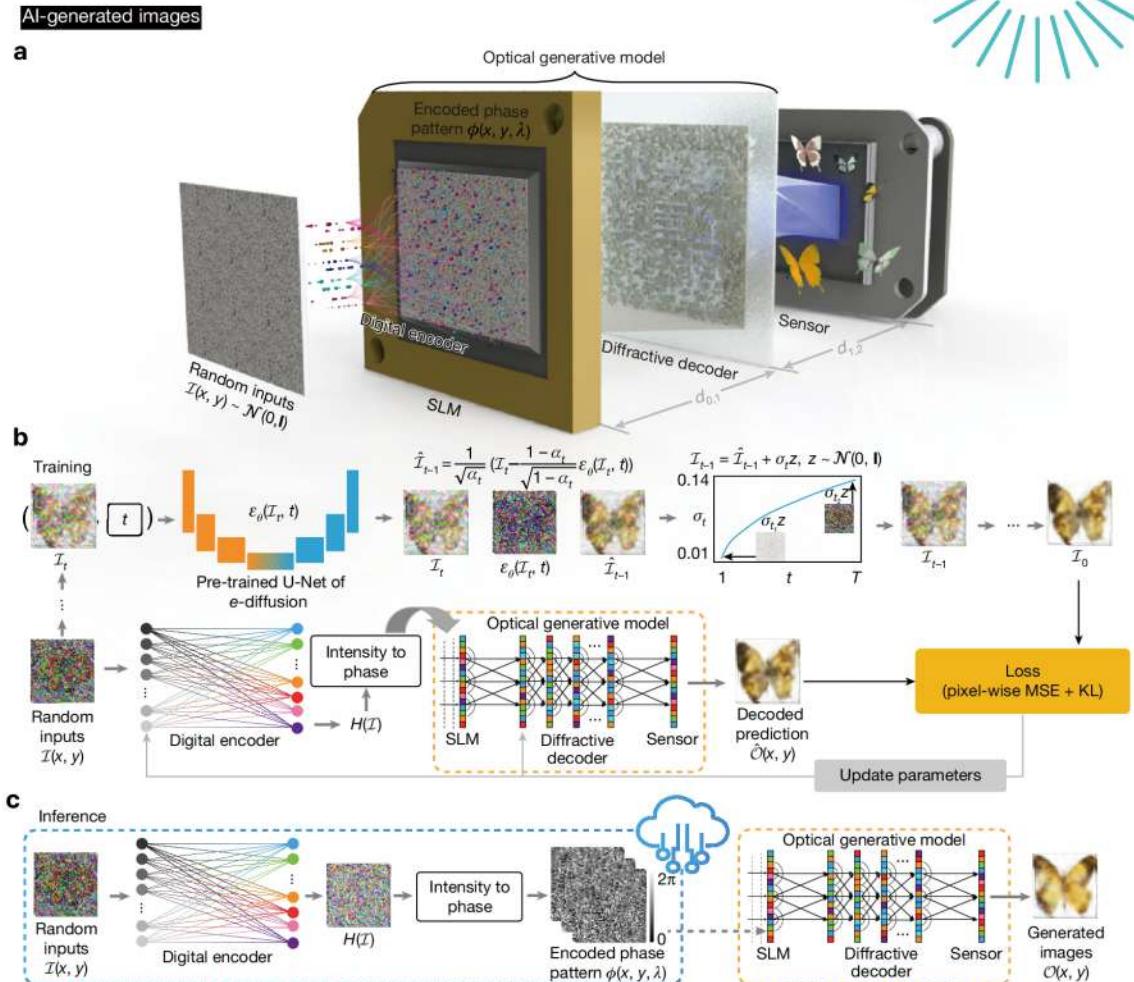


2025년 8월 Nature 誌에 게재된 논문 “Optical generative models”^[1]은 생성형 AI의 핵심인 디퓨전 모델(diffusion model)의 원리를 광학 시스템에 이식하여 연산 전력의 추가 소모 없이 이미지를 생성할 수 있음을 실증한 연구이다. 이는 디지털 GPU 기반 생성 모델이 직면한 막대한 에너지 소비 문제를 해결하고, 빛의 속도로 이미지를 합성하는 차세대 시각 정보 처리 플랫폼의 가능성을 제시했다는 점에서 큰 의미를 갖는다.

기존의 디지털 생성 모델은 고해상도 이미지를 생성하기 위해 수십억 개의 매개변수를 반복적으로 계산해야 하므로 연산 자원과 시간이 많이 소요된다. 반면 본 고에서 소개하는 논문의 연구팀(UCLA Aydogan Ozcan 교수팀 등)은 무작위 노이즈를 위상 패턴(phase patterns)으로 변환하는 얇은 디지털 인코더와, 이를 빛의 회절을 이용해 물리적으로 처리하는 재구성 가능한 광학 디코더(reconfigurable optical decoder)를 결합한 하이브리드 구조를 제안하였다. 기술적 구조를 살펴보면, 제안된 시스템은 자유 공간(Free-space) 기반의

다층 회절 레이어로 구성되어 있으며, 디지털 인코더가 생성한 광학 시드(seed)가 이 레이어들을 통과하면서 광학적으로 디코딩되어 최종 이미지 데이터를 형성하는 구조이다. 이 과정에서 조명 광원과 초기 시드 생성을 제외하면 이미지 합성 자체에 소요되는 계산 전력은 사실상 0에 가깝다.

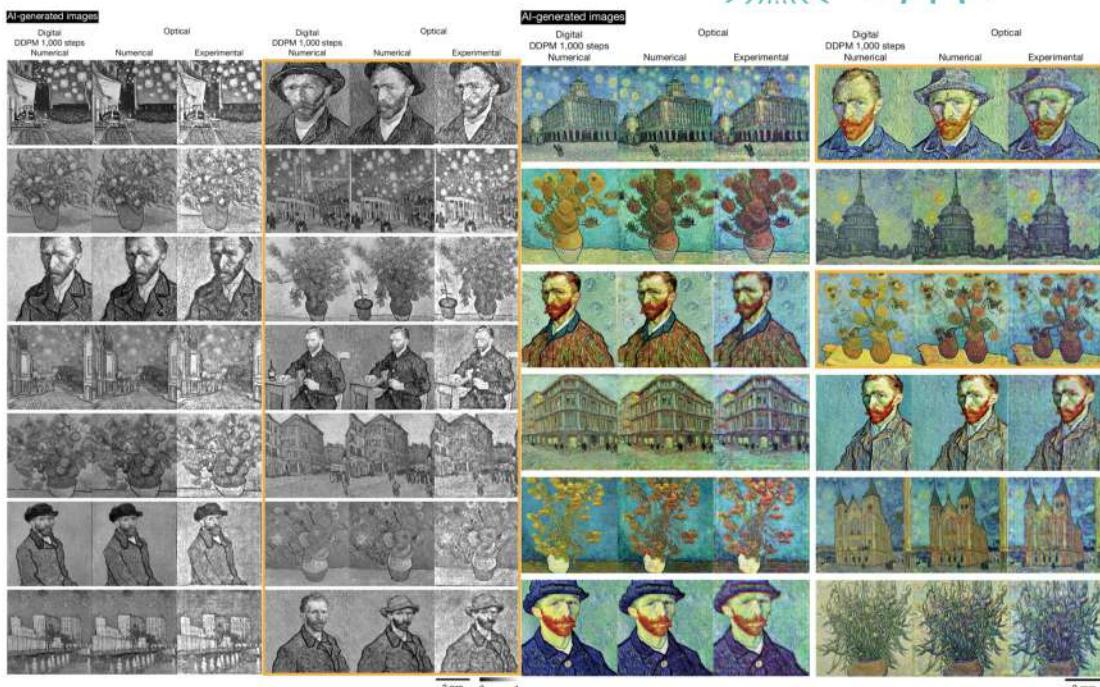
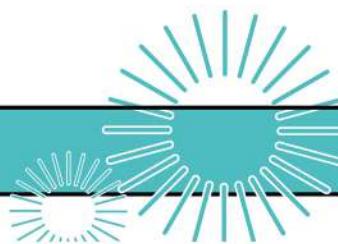
연구팀은 이 모델을 통해 MNIST (숫자), Fashion-MNIST (의류), Celeb-A (얼굴), 그리고 반 고흐의 화풍을 담은 예술 작품 등 다양한 데이터 분포를 학습시켰다. 실험 결과, 광학 생성 모델은 단순한 데이터 암기가 아닌 학습 데이터의 확률 분포를 이해하여 이전에 본 적 없는 새로운 고품질의 흑백 및 컬러 이미지를 합성하는데 성공하였다. 성능 측면에서 본 광학 시스템은 디지털 하드웨어가 가진 구조적 한계를 뛰어넘는다고 평할 수 있다. 연산 속도는 빛이 광학 레이어를 통과하는 시간(수 피코초에서 나노초 사이)에 의해 결정되므로, 본 시스템은 초당 수조 개의 픽셀을 생성할 수 있는 압도적인 대역폭을 제공한다. 또한 파장 다중화(wavelength



↑ [그림 1] (a) 스냅샷 광학 생성 모델의 구성도. 가우시안 노이즈 기반의 무작위 입력 데이터가 같은 디지털 인코더에 의해 수많은 광학 생성 시드(optical generative seeds)로 인코딩되는 과정. 이 시드들은 공간 광 변조기(spatial light modulator, SLM)에 위상 패턴 형태로 로드되며, 일정한 평면파 조명 하에 전파된다. 변조된 광학 필드는 해당 데이터 분포에 최적화된 고정형 회절 디코더(diffractive decoder)를 통과하고, 최종적으로 센서 어레이에서 타겟 분포를 따르는 이미지로 기록된다. 회절 디코더를 통한 물리적 빛의 전파 연산은 초고속(1 ns 미만)으로 이루어지며, 전체 생성 속도는 SLM의 리프레시 속도에 의해 결정된다. (b) 학습 알고리즘 및 절차. 제안된 모델은 학습된 디퓨전 모델(denoising diffusion probabilistic models, DDPM)의 지도를 받는 '교사-학생' 구조로 학습되는데, 먼저 타겟 데이터 분포를 학습한 디지털 DDPM이 고정된 교사 모델로서 노이즈-이미지 쌍을 생성한다. 같은 디지털 위상 인코더와 광학 회절 디코더는 이 데이터 쌍을 기아드로 삼아 공동 최적화(joint training)되며, 이를 통해 단순한 물리적 구조만으로도 복잡한 데이터 분포를 효율적으로 학습할 수 있다. 손실 함수는 출력 이미지와 타겟 이미지 간의 픽셀 단위 평균 제곱 오차(MSE)와 데이터 분포의 일치성을 평가하는 KL 벌산(Kullback-Leibler divergence)을 결합하여 파라미터를 업데이트한다.

multiplexing) 기술을 적용하여 단일 광학 경로 내에서 적색, 녹색, 청색(RGB) 채널을 동시에 처리하고, 고해상도 컬러 이미지를 생성하는 확장성까지 입증하였다.

이번 연구는 특히 광학 컴퓨팅이 단순히 선형 연산 가속기에 머무는 것이 아니라, 생성형 AI와 같은 복잡한 확률론적 모델링까지 수행할 수 있음을 보여주었다. 비록 초기 시드 생성 단계에서 디지털 프로세서의



↑ [그림 2] 5억 8,000만 개의 파라미터를 가진 디지털 인코더와 최적화된 회절 레이어를 결합하여 반 고흐의 화풍을 광학적으로 합성한 결과. 520 nm 단일 파장 이용한 흑백 이미지와 RGB 파장 다중화(450, 520, 638 nm)를 통해 컬러 이미지가 모두 성공적으로 생성되었으며, 이는 1,000 단계의 반복 연산을 거치는 디지털 DDPM(교사 모델)의 결과와 시각적·통계적으로 매우 일치한다. 특히 주황색 박스로 강조된 결과물들은 광학 모델이 단순히 기준 이미지를 복제하는 수준을 넘어, 학습된 데이터 분포 내에서 고유한 잡재 공간 탐색을 통해 창의적인 변이를 생성해낼 수 있음을 입증한다. 하단의 결과는 '건축물', '식물', '인물' 등 입력된 텍스트 조건에 따른 의미적 일관성을 유지하면서도, 빛의 회절만을 이용해 초고속·저전력으로 고해상도 예술 작품을 합성할 수 있는 본 시스템의 강력한 성능을 뒷받침한다. (스케일 바: 2 mm). Refrined from S. Chen et al. Nature 2025; 644: 903–911. Copyright © 2025, S. Chen et al. [1].

도움을 받지만, 병목 현상이 심한 디코딩 과정을 물리적 빛의 산란과 회절로 대체함으로써 전체 시스템의 에너지 효율을 획기적으로 개선했다. 이 연구는 대규모 언어 모델(LLM)이나 고해상도 비디오 생성 등 극심한 에너지 소모가 발생하는 현대 생성 AI 분야에

새로운 돌파구를 제시한다. 광학 생성 모델은 향후 홀로그래피, 초고속 머신 비전, 스마트 카메라 센서 등에 통합되어 실시간으로 정보를 생성하고 처리하는 '엣지 AI' 기술의 이정표가 될 것으로 평가된다.

NEWS BREAK

KAIST 최경철 교수팀·KBRI 공동연구팀, ‘적색 40 Hz OLED 빛’의 알츠하이머 개선 효과 규명

KAIST 전기및전자공학부 최경철 교수와 한국뇌연 구원(KBRI) 구자욱 박사 연구팀, 허향숙 박사 연구팀이 공동연구를 통해 조도가 균일한 3가지 색깔의 OLED 자극 기술을 개발하고, 청색, 녹색, 적색 중에서 적색 40 Hz 빛이 알츠하이머 병리와 기억 기능을 개선할 수 있다는 사실을 확인했다고 밝혔다.

광 자극 기반 전자약은 약 대신 ‘빛 신호’로 뇌의 신경 회로를 조절하는 치료 기술이다. 그런데 기존 LED 기반의 광자극 연구는 동물의 위치나 움직임에 따라 자극이 고르지 않게 전달되는 문제가 있었다. 그리고 사람에게 사용할 시 열이 나거나 눈에 부담을 줄 위험도 제기되었다.

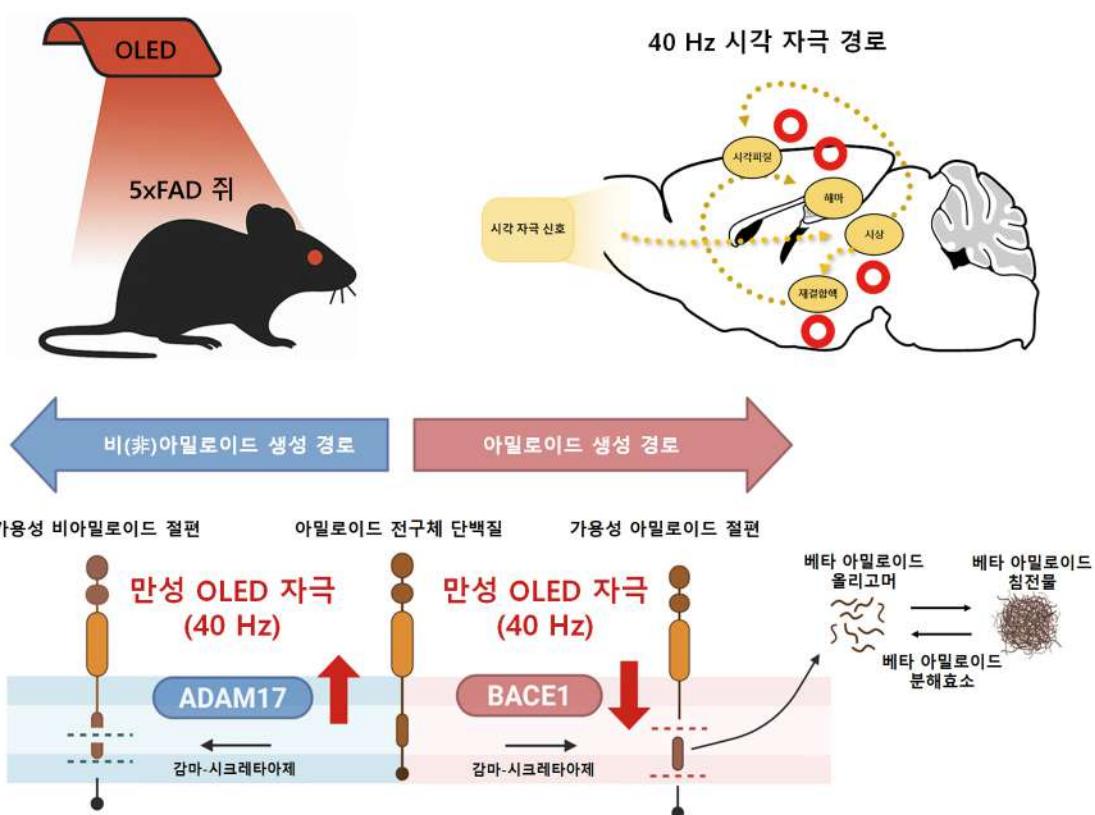
연구진은 OLED를 사용하여 기존 광 치료의 고질적인 문제였던 밝기 불균형을 해결하고, “과연 어떤 색의 빛이 기억력과 병리 지표 개선에 가장 효과적인가?”를 규명하는 데 집중했다. 이를 위해 백색, 적색, 녹색, 청색 등 다양한 색상의 빛을 동일한 주파수(40 Hz)와 밝기, 노출 시간으로 통제하여 비교 실험을 진행했다. 그 결과, 붉은색(red) OLED 빛이 아밀로이드 베타를 감소시키고 기억력을 증진하는 데 탁월한 효과가 있음을 확인했다.

연구팀은 알츠하이머 생쥐 모델을 병기별로 나누어 실험을 진행했는데, 초기 병기(3개월령)에서는 단 2일 동안 하루 1시간 자극만으로도 백색과 적색 빛 모두에서 기억력 향상과 아밀로이드 베타 플라크 감소 효과가 나타났다. 특히 적색 빛은 뇌 염증을 일으키는 사이토카인(IL-1 β)이 확연히 줄어든 것이 확인되어, 기억력 향상이 염증 감소와 함께 나타난다는 점이 드러났다. 병기가 진행된 중기 단계(6개월령) 실험 결과는 빛의 색상에 따른 차이를 더욱 명확히 보여주었다. 2주간의 장기 치료에서 백색과 적색 빛 모두 기억력을 개선시켜 주었으나, 실질적인 플라크 감소 효과는 오직 적색 빛에 서만 관찰되었다. 이는 적색 빛이 플라크를 제거하는 효소(ADAM17)는 활성화하고, 생성하는 효소(BACE1)는 억제하는 효과가 동시에 나타났기 때문으로, 백색 빛은 주로 BACE1만 줄였기에 적색 빛에 비해 효과가 제한적이었다. 이로써 연구팀은 빛의 색이 실제 치료 효과를 좌우한다는 사실을 입증하였다.

나아가 연구진은 1회(1시간) 빛 자극 후의 c-Fos 유전자 발현을 분석하여, 빛 자극이 시각피질에서 시상, 해마로 이어지는 뇌 회로 전체를 활성화한다는 사실을 확인했다. 이는 시각 자극이 뇌 회로를 깨워 해마 기능을 높이고 기억력 향상을 유도한다는 치료 기전을 입증한 것이다. 특히 균일한 조도의 OLED를 사용함으로써 동물의 움직임에 구애받지 않고 실험 재현성을 크게 높일 수 있었다.

최경철 교수는 “균일 조도 OLED 플랫폼은 기존 LED 장치의 구조적 한계를 넘어, 후속 연구에서 재현성 높은 다기관 검증과 안전성 평가를 가능케 할 것”이라며 “알츠하이머병 개선을 위한 의약품으로서 일상 생활을 하면서도 치료 가능한 웨어러블 RED OLED 전자 약이 새로운 패러다임을 제시할 것으로 기대된다”고 덧붙였다.

이번 연구는 과학기술정보통신부의 한국연구재단 및 국가정보산업진흥원, 그리고 한국뇌연구원 기초 연구 프로그램 지원을 받아 수행되었다.



↑ [그림 1] 적색 OLED로 신경 세포를 자극하여 알츠하이머 실험용 쥐의 아밀로이드 베타 플라크를 감소시키는 기전

BIBLIOGRAPHY

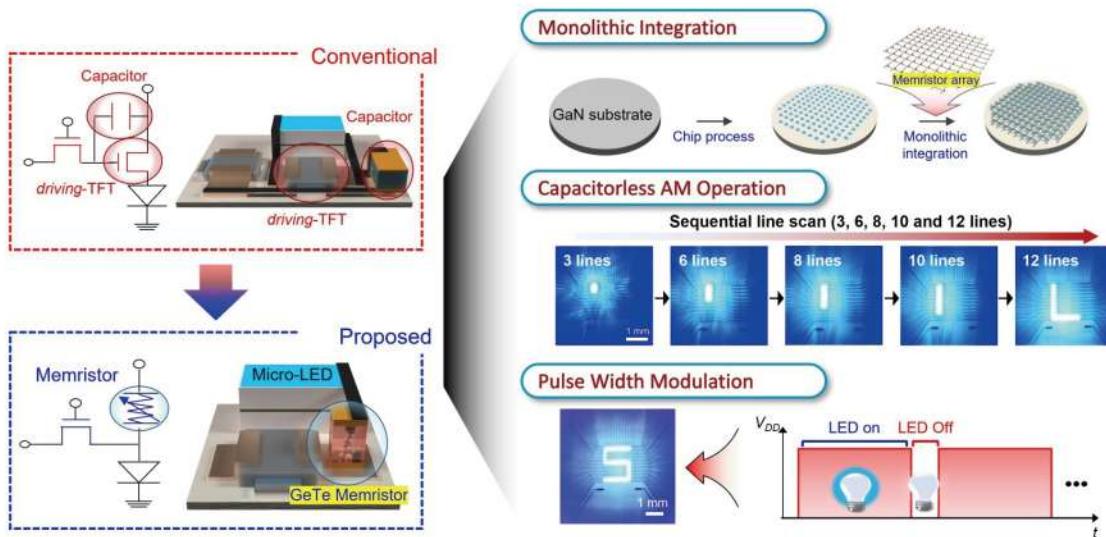
- KAIST 홍보팀, “최경철 교수팀, ‘적색 40Hz OLED 빛’의 알츠하이머 개선 효과 규명,” (KAIST, Published date: Dec. 8, 2025), <https://ee.kaist.ac.kr/research-achieve/%EC%B5%9C%EA%B2%BD%EC%B2%A0-%EA%B5%90%EC%88%98%ED%8C%80-%EC%A0%81%EC%83%89-40hz-oled-%EB%B9%9B%EC%9D%98-%EC%95%8C%EC%B8%A0%ED%95%98%EC%9D%B4%EB%A8%B8-%EA%B0%9C%EC%84%A0-%ED%9A%A8/> (Accessed date: Dec. 12, 2025).
- B. Noh, H.-J. Lee, J. Lee, J.-E. Lee, B. Joo, Y.-H. Jung, M. Park, S. Kang, S. Oh, J.-W. Hwang, D.-S. Kang, Y. Jeon, S.-M. Lee, H. S. Hoe, J. W. Koo, and K. C. Choi, “Color dependence of OLED phototherapy for cognitive function and beta-amyloid reduction through ADAM17 and BACE1,” ACS Biomater. Sci. Eng. **11**, 6710–6726 (2025).

NEWS BREAK

고려대 김태근 교수, マイクロ LED 한계 극복한 신개념 회로 개발

가상 현실, 메타버스, 차량용 디스플레이 등 차세대 디스플레이는 초고집적도, 고휘도, 초저전력, 경량화를 요구하며, 이를 위해 높은 개구율 기반의 픽셀 고집적화가 필수적이다. 그러나 기존 2T-1C AM 구동 회로는 집적도 증가에 따른 회로 및 배선 복잡화, 개구율 저하, 휘도 손실, 커패시터 재충전에 따른 전력 증가 등 구조적 한계를 가진다. 이러한 문제를 근본적으로 해결하기 위해서는 여러 문제들을 동시에 개선하는 혁신적인 AM 구동 백플레이인이 필요하다.

고려대 김태근 교수 연구팀은 기존 능동 매트릭스 기반의 구동 회로에서 사용되는 구동 TFT와 커패시터를 멤리스터로 대체하는 새로운 방식의 디스플레이 구동회로를 제안하였다. 이때 사용된 GeTe 기반의 멤리스터가 가지는 비휘발성 특성은 1프레임 동안 발광을 유지하기 위해 사용되는 커패시터를 대체하는 동시에 10^5 이상의 높은 on/off 비율 특성은 LED on/off를 제어하는 구동 박막 트랜지스터를 대체할 수 있다.

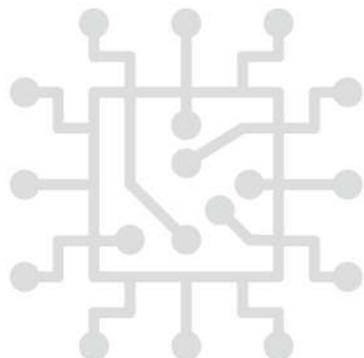


↑ [그림 1] 디스플레이 구동 회로의 개략도 및 멤리스터 기반 마이크로-LED 어레이를 통해 구현한 디스플레이의 데모 이미지.

멤리스터 구동 시 상·하부 전극에 전압을 인가하여 멤리스터를 동작시키는데, 이 과정에서 CC*를 제어함으로써 멤리스터의 저항 상태를 조절할 수 있다. 이때 CC 레벨을 조절하면 멤리스터 내부의 필라멘트 두께를 제어할 수 있으며, 최종적으로는 마이크로 LED에 인가되는 전류량을 조절할 수 있다.

연구팀은 제안한 구조를 기반으로 단일소자 수준에서 마이크로 LED의 밝기 제어 원리를 먼저 검증하였으며, 멤리스터의 저항 상태에 따라 명확한 밝기 차이를 확인하였다. 이후 이 동작 원리를 어레이 구조로 확장하여 FPGA*를 통해 구동하였으며, 멤리스터의 on/off 상태 제어만으로 디스플레이 패턴을 구현하고, 저항 상태 차이에 따라 각 픽셀의 발광 세기를 조절할 수 있음을 확인하였다. 연구팀은 제안한 멤리스터 기반의 커패시터 프리 AM 구동 회로를 활용하여 12×12 마이크로 LED 어레이를 구현하였다. 특히 커패시터 없이 1프레임 동안 안정적인 디스플레이 구동을 확인하였으며, 멤리스터 동작 시 CC를 조절하여 마이크로 LED의 밝기를 제어하여 디스플레이 구동회로로서의 타당성을 검증하였다.

김태근 교수는 “멤리스터를 활용한 구동부 간소화, 비휘발성 기반의 다중저항 상태를 도입함으로써 고집적, 저전력, 고해상도를 요구하는 차세대 디스플레이의 핵심 요구를 동시에 달성할 수 있는 기술적 경로를 열 수 있을 것으로 기대한다”고 소감을 밝혔다. 본 논문은 2025년도 과학기술정보통신부의 재원으로 과학기술사업화진흥원의 지원을 받아 수행되었다. 논문은 국제 저명 학술지 International Journal of Extreme Manufacturing에 11월 20일 온라인 게재되었다.



*FPGA: Field programmable gate array. 사용자가 원하는 대로 내부 회로를 프로그래밍하여 재구성할 수 있는 반도체 칩.

*CC: Compliance current. 흐르는 전류를 일정 이상 흐르지 않게 억제하여 멤리스터에 과전류가 흐르지 않게 보호하는 역할을 한다.

BIBLIOGRAPHY

- 1 고대뉴스, “마이크로 LED 한계 극복한 신개념 회로 선보여... 멤리스터 하나로 구현,” (고려대학교, Published date: Nov. 17, 2025), <https://www.korea.ac.kr/ko/552/subview.do?enc=Zm5jdDF8QEB8JTJGdG9yeSUyRmtvJTGYX-J0Y2xWaWV3LmRvJTNGYXJ0Y2xTZXEIM0QyODExNiUyNg%3D%3D> (Accessed date: Dec. 19, 2025).
- 2 H. J. Lee, S. H. Hong, K. R. Son, S. H. Yuk, S. K. Choi, T. D. Dongale, and T. G. Kim, “Monolithic integration of sub-volt memristor-driven pixels for capacitorless active-matrix micro-LED displays,” Int. J. Extrem. Manuf. **8**, 025501 (2025).

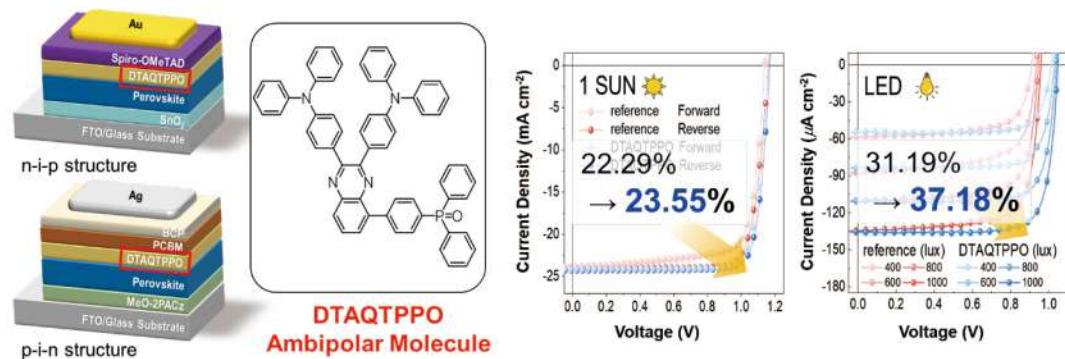
NEWS BREAK

다양한 페로브스카이트 태양전지 구조에 적용 가능한 양극성 계면 신소재 개발

페로브스카이트 소재는 우수한 광전기적 특성과 용액 공정을 통한 대면적 필름 생산의 장점 덕분에 실리콘 태양전지를 대체할 차세대 후보로 주목받고 있다. 하지만 용액 공정 과정에서 발생하는 결함은 전하의 원활한 이동을 방해하여 태양전지의 에너지 변환 효율을 떨어뜨리는 주된 원인이 된다. 이러한 한계를 극복하기 위해 아주대학교 김종현 교수 연구팀은 부경대 장재원 교수, 윤재성 호주 뉴사우스웨일즈대학 및 영국 서리대학 박사 연구팀과 협력하여 다양한 태양전지 구조에 적용 가능한 새로운 계면소재 'DTAQTPPO'를 개발하였다.

김 교수팀이 개발한 신규 계면소재는 페로브스카이트와 직접 결합하여 표면에 형성된 결함을 효과적으로 제거할 뿐만 아니라, 양극성(ambipolar)이라는 특별한 특성을 지녀 전자 및 정공 모두를 빠르게 이동 시킬 수 있다. 이 소재는 실외의 강한 태양광 환경뿐만

아니라, 실내의 조명 환경에서도 에너지 변환효율을 각각 22.29%에서 23.55%, 31.19%에서 37.18%로 극대화했다. 더불어 정구조, 역구조, 다양한 페로브스카이트 조성에 폭넓게 적용 가능하여 보편적인 기술임을 증명했으며, 태양전지의 장기적인 안정성까지 크게 개선했다. 특히 캘빈 프로브 현미경(KPFM) 측정을 통해 신규 계면소재를 적용한 페로브스카이트 필름이 기저 전하 수송층의 종류($\text{MeO}-2\text{PACz}$ 또는 SnO_2)에 관계없이 균일한 전하 분포를 유도하는 것을 관찰하였다. 또한 빛을 조사하고 끈 후에 깊은 트랩에 갇힌 전하로 인해 CPD가 원래 상태로 즉시 회복되지 않는 기존 소자와 달리, 신규 계면소재를 적용한 소자는 CPD가 더 빠르게 회복되었다. 이는 신규 계면소재가 페로브스카이트의 깊은 에너지 준위의 결함을 더 효과적으로 억제하는 것을 의미한다.



↑ [그림 1] 양극성 계면 신소재 및 다양한 광원에서의 페로브스카이트 태양전지 효율

김종현 교수 연구팀은 “다양한 구조와 광환경에서 고효율을 실현할 수 있는 기술을 확보한 만큼, 태양 전지는 물론 디스플레이나 광센서 같은 광전소자 전반에 적용 가능할 것”이라고 말했다. 본 연구는 2025년 4월 세계적인 에너지 분야 학술지 Advanced Energy Materials에 표지논문으로 게재됐다. 연구는 한국연구 재단의 해외 우수 연구기관 협력 허브 구축사업의 지원을 받아 수행됐으며, 제안된 기술은 특허로도 등록됐다.



BIBLIOGRAPHY

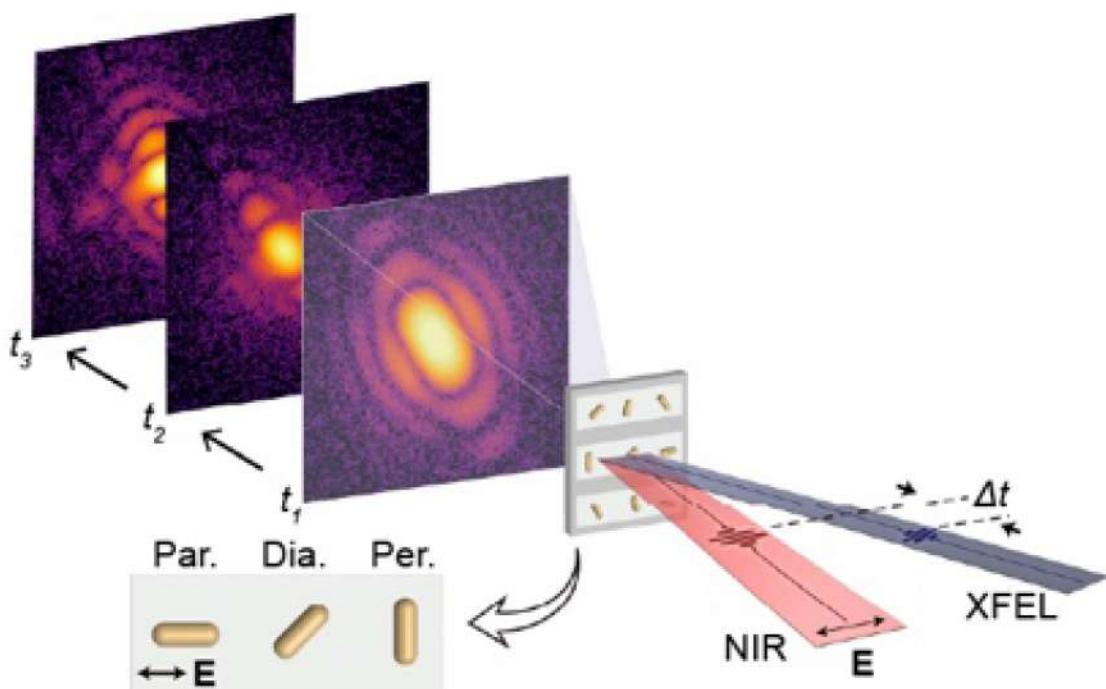
- 1 아주뉴스, “효율성 극대화한 차세대 태양전지 소재 개발, 김종현 교수팀,” (아주대학교, Published date: Jul. 31, 2025), <https://www.ajou.ac.kr/kr/ajou/news.do?mode=view&articleNo=352266> (Accessed date: Dec. 19, 2025).
- 2 M. J. Choi, S. W. Lee, H. Shim, S. J. Shin, H. W. Chun, S. E. Yoon, J. A. Prayogo, J. Seidel, J. S. Yun, D. W. Chang, and J. H. Kim, “Ambipolar Interfacial Molecule for Enhancing Performances of Perovskite Solar Cells with Versatile Architectures Under Various Illumination Environments,” *Adv. Energy Mater.* **15**, 2570115 (2025).

NEWS BREAK

엑스선 자유전자 레이저로 규명한 나노입자 에너지 흐름의 선택적 제어

POSTECH 물리학과 송창용 교수 연구팀은 포항 가속기연구소의 엑스선 자유전자 레이저(PAL-XFEL)를 이용하여, 금속 나노입자 내부의 에너지 전달 경로를 빛의 세기 조절만으로 선택적으로 제어할 수 있음을 규명했다. 이는 나노물질의 에너지 흐름이 수동적인 반응이 아니라 외부 제어가 가능한 영역임을 입증한 것으로, 향후 초고속 광 스위칭 소자, 나노 열 제어, 차세대 에너지 소자 설계에 중요한 물리적 기반을 제공한다.

일반적으로 금속 나노입자에 빛을 조사하면 국소 표면 플라스몬에 의해 빛 에너지가 격자로 전달된다. 기존에는 이 과정이 단순히 빛의 세기에 비례하여 반응의 크기만 증가하는 수동적인 현상으로 해석되었다. 그러나 연구팀은 빛의 세기를 조절하여 특정 플라스몬 모드를 선택적으로 여기시킴으로써 나노물질 내부에서 에너지가 흐르는 경로 자체를 바꿀 수 있다는 사실을 밝혀냈다.



↑ [그림 1] 단일입자 시분해 엑스선 회절 이미징 실험 모식도. 멨토초 레이저(펌프)와 엑스선 자유전자 레이저(프로브)를 이용해 무작위로 배향된 금 나노로드의 구조 변화를 실시간으로 포착한다.

연구팀은 지름 50 nm, 길이 145 nm의 단일 금 나노로드를 대상으로 펨토초 레이저를 조사한 후, 수조 분의 1초(ps) 단위로 일어나는 비평형 동역학을 단일 펄스 시분해 결맞는 엑스선 회절 이미징 기법 (single-pulse time-resolved coherent diffraction imaging)으로 포착했다. 기존의 앙상블(ensemble) 실험은 수많은 입자의 신호를 평균화하기 때문에 개별 입자의 고유한 반응 특성이 소실된다는 한계가 있었으나, 연구팀은 단일 입자의 구조 변화를 실시간으로 시각화하여 이러한 한계를 극복하고 제어 메커니즘을 규명했다.

실험 결과, 펨프 레이저의 유효 전기장 세기에 따라 에너지 완화 경로가 두 가지 상이한 모드로 분기됨이 관측됐다. 낮은 유효 전기장($<1.7 \times 10^2$ V/nm) 조건에서는 나노로드의 짧은 축을 따라 진동하는 횡방향 플라스몬 모드(transverse LSP mode)가 우세하게 여기되었다. 이때 입자는 약 42 GHz의 주파수로 진동하며 타원형으로 팽창하는 변형 특성을 보였다. 반면, 높은 유효 전기장($\geq 1.7 \times 10^2$ V/nm) 조건에서는 긴 축을 따라 진동하는 종방향 플라스몬 모드(longitudinal LSP mode)가 지배적으로 나타났다. 입자는 51.6 GHz의 주파수로 진동하며, 내부 전자 밀도가 마치 아령처럼 양 끝단으로 분리되었다가 다시 합쳐지는 상이한 변형 과정을 보였다.

이는 빛의 세기와 입자의 배향이 유효 전기장의 세기를 결정하고, 이에 따라 선택된 플라스몬 진동 모드가 격자 내 국소 응력장의 분포를 형성한다는 것을 의미한다. 즉, 입자의 플라스몬 모드가 단순한 가열원이 아니라 물질의 반응 경로를 통제하는 능동적인 제어 변수로 작용함을 시사한다. 연구팀은 시뮬레이션 분석을 통해, 여기된 플라스몬 모드의 전하 분포로 인해 인가된 음향 진동이 만든 국소 응력장이 실험에서 관측된 나노 입자의 전자 밀도 변형 형태와 일치함을 입증했다. 이는 플라스몬이 유도하는 국소적인 힘의 분포가 비평형 상태에서의 에너지 흐름과 구조적 변형 경로를 결정짓는 핵심 기제임을 규명한 것이다.

송창용 교수는 “이번 연구는 빛의 세기를 조절함으로써 나노 물질 내부의 에너지 흐름 방향을 선택적으로 조절할 수 있음을 시각적으로 입증한 것”이라며 연구의 의의를 설명했다. 연구결과는 국제 학술지 *Nature Communications*에 2025년 11월 10일 게재되었으며, *Nature Communications*가 선정한 올해의 분야별 대표 연구 50선에 선정 되었다.

BIBLIOGRAPHY

- POSTECH 연구성과, “물리 송창용 교수팀, 빛으로 나노공간의 에너지 흐름 ‘방향’ 바꾼다,” (POSTECH, Published date: Nov. 28), <https://postech.ac.kr/kor/research-industry-academia/research-results.do?mode=view&articleNo=42686> (Accessed date: Dec. 19, 2025).
- E. Park, C. Jung, J. Hwang, J. Shin, S. Y. Lee, H. Lee, S.-P. Heo, D. Nam, S. Kim, M. S. Kim, K. S. Kim, I. T. Eom, Y. Ihm, D. Y. Noh, and C. Song, “Surface-plasmon control of ultrafast energy-relaxation modes in photoexcited Au nanorods probed by time-resolved single-particle X-ray imaging,” *Nat. Commun.* **16**, 9876 (2025).

NEWS BREAK

한국외대 임주원 교수, 차세대 광전화학 전지용 고효율 광전극 개발

한국외국어대학교 임주원 교수(공과대학 반도체 전자공학부) 연구팀이 중국 Northeast Petroleum University Huan Wang 교수팀과의 공동 연구를 통해 차세대 친환경 에너지 변환 기술인 광전화학(Photoelectrochemical, PEC) 전지의 성능을 획기적으로 향상시킨 광전극(photoanode)을 개발했다.

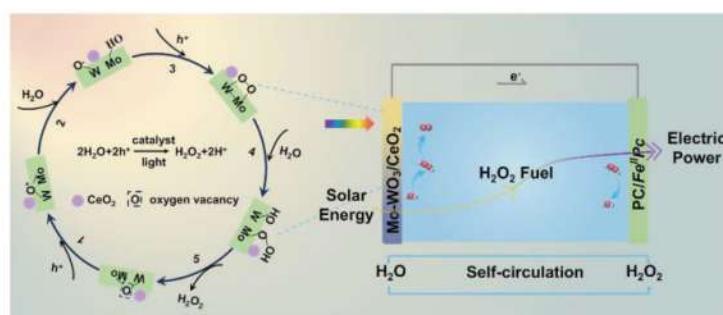
이번 연구에서 임 교수팀은 몰리브덴 도핑 텐스텐 산화물($\text{Mo}-\text{WO}_3$)과 세륨 산화물(CeO_2)을 결합하여 S-scheme 이종접합(hetero-junction) 구조를 구현했다. 이를 통해 광전자와 정공의 분리 효율을 극대화하고, 기존 광전극에서 문제가 되었던 전하 재결합 손실(recombination loss)을 획기적으로 억제할 수 있었다.

특히 이번에 개발된 $\text{Mo}-\text{WO}_3/\text{CeO}_2\text{-S-scheme}$ 광전극은 과산화수소(H_2O_2) PEC 전지에 적용되어 기존 WO_3 기반 전극 대비 H_2O_2 생성 효율 4배, 전력 밀도 2.55 배 향상(5.79 mW/cm^2)을 달성했다. 또한 초고용량 커파시턴스(capacitance)를 보여 12 시간 동안 54% 용량 유지율을 기록, 광에너지 변환과 동시에

에너지 저장 및 전력 공급 기능까지 수행할 수 있는 올인원(all-in-one) 에너지 시스템 가능성을 제시했다.

이번 연구 성과는 반도체 밴드 구조 제어와 결합 공학(defect engineering) 개념을 광전화학 시스템에 융합한 대표적 사례로 평가된다. 임 교수는 “태양광 발전·연료 저장·전력 생산을 하나의 시스템에서 통합 구현한 혁신적인 접근”이라며, 향후 반도체 기반 수소 생산, 자가발전형 센서, 광촉매 반응 소자 등 다양한 응용 연구로 확장될 것이라고 밝혔다.

해당 연구는 국제 저명 학술지 *Journal of Materials Science & Technology*에 게재되었으며, 광학·반도체·재료 과학을 접목한 광전극 설계 기술의 진일보로서 차세대 친환경 에너지 소자 개발에 중요한 이정표가 될 전망이다.



↑ [그림 1] $\text{Mo}-\text{WO}_3/\text{CeO}_2$ S-scheme 이종접합을 이용한 과산화수소 매개 광전화학 전지의 구조도

BIBLIOGRAPHY

- 한국외대 전략홍보팀, “반도체전자공학부 임주원 교수 연구팀, 이종접합 반도체 광전극 개발로 차세대 광전화학 전지 성능 획기적 향상,” (한국외국어대학교, Published date: Nov. 17, 2025), <https://dep.hufs.ac.kr/hufs/11404/subview.do?enc=Zm5jdDF8QEB-8JTJGYmJzJTJGaHVmcUyRjlxODglMkYyNDl4MzUIMkZhcnRjbFZpZXcuZG8lM0Y%3D> (Accessed date: Dec. 19, 2025).
- Y. Liu, Y. Guan, X. Han, Y. Zhao, H. Song, J. W. Lim, and H. Wang, “S-scheme $\text{Mo}-\text{WO}_3/\text{CeO}_2$ microspheres photoanode enabling high-efficiency power generation in H_2O_2 photoelectrochemical cell,” *J. Mater. Sci. Technol.* **257**, 26-33 (2026).

WRITER_진태원, 정희윤, 김영현

1

차세대 Co-packaged Optics용 유리 기판 위 실리콘 나이트라이드 집적 광학



진태원 한양대학교 ERICA 석박통합과정

E-mail: xodnjs3124@hanyang.ac.kr

한양대학교 ERICA에서 학사(2022),

석사(2024) 학위 취득 후 박사과정으로 재학 중이다.

석사 과정에서 강유전체를 메모리 소자로 응용하는 연구를 수행하였으며, 박사 과정에서는 co-packaged optics와 관련된 다양한 소자의 연구를 진행 중이다.

정희윤 한양대학교 ERICA 석박통합과정

E-mail: oriole1002@hanyang.ac.kr

한양대학교 ERICA에서 학사 학위를 취득(2025년) 후,

동 대학에서 석박통합과정 1년차 재학 중이다.

현재 고대역폭 co-packaged optics 시스템을 위한
유리 기판 기반 격자 결합기에 관한 연구를 진행하고 있다.

김영현 한양대학교 ERICA 부교수

E-mail: younghyunkim@hanyang.ac.kr

Web: <https://yh2424.github.io>

도쿄대학교 전기전자공학과에서 실리콘 포토닉스

광변조기 소자 연구로 석사(2012년)와 박사(2015년)

학위를 취득한 후, 서울바이오시스와 연세대학교에서

전문연구원으로 병역 이행과 각각 첨단 광소자 패키징과

광I/O 회로 연구경력을 쌓았다. 이후 2018년부터 벨기에

IMEC에서 R&D 연구원으로 실리콘 포토닉스 기반 III-V

이종 집적 기술 및 초고속 광변조기 연구를 수행했으며,

2020년부터 한양대학교 ERICA 나노광전자학과에 임용되어

현재 부교수로 재직 중이다. 유리기판 상의 광전자 소자

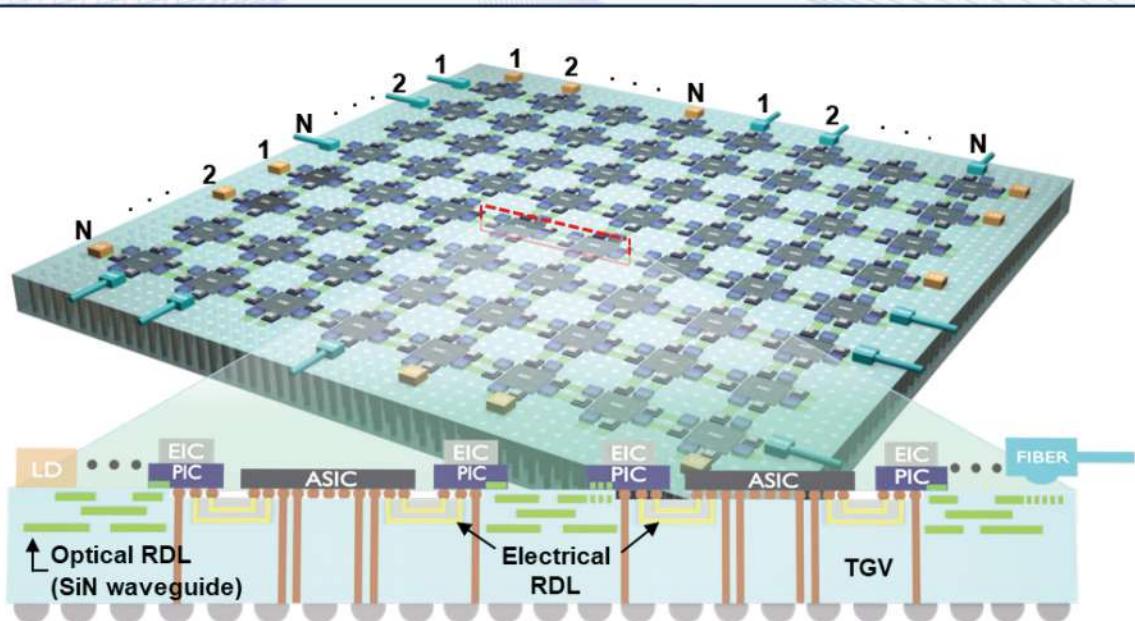
집적 및 첨단 광패키징에 관한 연구를 활발히 수행하고 있다.

I. 서론

인공지능 기술의 발전으로 인해 대규모 연산을 뒷받침하는 데이터의 이동량이 급격히 커지면서, 전기 배선만으로는 대역폭과 전력 효율을 동시에 만족시키기 점점 어려워지고 있다^[1-3]. 이에 따라 광 I/O를 패키지에 직접 포함시키는 co-packaged optics (CPO)가 대안으로 부상했고, 더 나아가 웨이퍼/패널 규모에서 광 신호를 재배선하는 광 재배선층(optical redistribution layer, optical RDL) 구상도 현실적인 로드맵으로 다뤄지고 있다^[4,5]. 이러한 배경 아래 CPO 구현을 위한 다양한 플랫폼들이 제시되고 있으며, 그 중에서도 특히 기계적 안정성과 패널 공정 호환성을 바탕으로 대규모 공정 확장 가능성이 클 것으로 점쳐지고 있는 유리 기판은 차세대 패키징 소재로서 주목받고 있다^[6,7].

이에 따라 유리 기판을 기반으로 한 광 플랫폼들도 활발히 제안되었으며 그 대표적인 사례로서 유리 기판에 도파로를 직접 형성하는 레이저 직접 쓰기(laser-direct writing, LDW) 방식이나 이온교환(ion-exchange, IOX) 방식이 시연된 바 있으나^[8-12], 이러한 유리 도파로는 굴절률 대비가 낮아 모드가 커지고 굽힘 손실이 증가하기 쉬워 고집적 라우팅 측면에서 제약이 존재한다. 특히 차세대 CPO가 칩-레벨 단위를 넘어 웨이퍼 스케일로 확장되는 방향을 고려하면, 높은 집적성과 고효율 광 입출력을 동시에 만족시키는 플랫폼의 개발은 필수이다. 현재 제시되고 있는 유리 기판 도파로 기술들은 제작 용이성과 우수한 광 입출력 특성 측면에서 강점을 가지고 있지만, 제한적인 굴절률 대비로 인해 소형 굽힘 반경 구현이 어렵고 결과적으로 라우팅 집적도 확보에 불리한 측면이 있다. 따라서 웨이퍼 스케일 광 배선층을 실용적으로 구현하기 위해서는 고집적 라우팅 특성과 패키지 환경에 적합한 고효율 광 입출력 구조를 동시에 만족시키는 통합 플랫폼이 필요하다.

본 글에서는 이러한 요구를 바탕으로 유리 기판 위 실리콘 나이트라이드(silicon nitride on glass, SING) 플랫폼을 통해 고집적 광 배선층을 구성하고, 동시에 금속 반사판을 이용한 고효율 그레이팅 커플러(grating coupler, GC) 설계를 플랫폼에 통합함으로써 유리 기판 기반 optical RDL



↑ [Fig. 1] CPO용 SING 플랫폼 및 이를 기반으로 하는 Optical RDL 층의 개념도. Reprinted with permission from^[13] © 2025, Optica Publishing Group.

에서 필요한 집적성과 입출력 효율을 함께 달성할 수 있는 방향을 제시하고자 한다.

II. 유리 기판 위 SiN 기반 플랫폼의 고 효율 광 결합 문제와 커플러 선택

2.1. 엣지 커플러와 그레이팅 커플러의 특성

패키징 과정에서 외부 광섬유 또는 광엔진을 칩이나 기판 상의 도파로와 연결하는 방식은 크게 엣지 커플러(edge coupler, EC)와 GC로 구분된다. EC는 일반적으로 높은 결합 효율과 넓은 대역폭을 확보할 수 있다는 장점이 있으나, 실제 패키지 적용 시 단면 가공 및 정렬 공차 요구가 커질수록 조립 난이도가 급격히 증가한다^[14]. 또한 사용되는 플랫폼 재료에 따라 EC의 구현 난이도는 크게 달라진다. 예를 들어 LDW 또는 IOX 기반 유리 도파로는 광섬유와 굴절률이 비교적 유사해 모드 크기가 크고, 결합이 상대적으로 자연스러운 반면, SiN 도파로는 굴절률 대비가 커 모드 크기가 작아진다. 이로 인해 광섬유와 도파로 간 모드 크기 불일치가 증가하기 때문에 EC에서 높은 결합 효율을 확보하기 위해

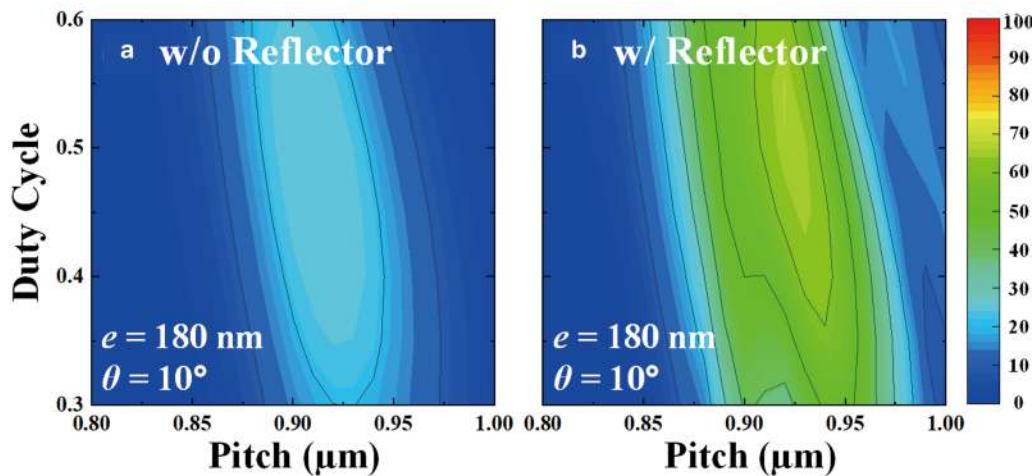
서는 spot size converter (SSC)와 같은 추가적인 모드 변환 구조가 필요하다. 이러한 구조는 공정 복잡도를 증가시키고, 정렬 및 수율 측면에서 부담으로 작용할 수 있다.

반면 GC는 상부에서 수직 또는 기울임이 작은 방향으로 광결합이 이루어지기 때문에 웨이퍼 또는 패널 상태에서의 광 테스트가 용이하며, 어레이 형태의 다채널 I/O 구조를 구성하기에도 유리하다^[15, 16]. 특히 대면적 환경에서 다수의 채널을 신속하게 검사하고 조립해야 하는 경우, GC가 제공하는 넓은 정렬 허용오차와 우수한 검사성은 큰 장점으로 작용한다. 이러한 특성은 패키징 공정의 검사 단계에서 매우 중요하게 고려되며, 특히 CPO 환경에서는 다수의 광 채널을 동시에 정렬 · 검사 · 조립해야 하므로 GC는 시스템 비용과 수율 측면에서 EC보다 현실적인 선택지가 될 수 있다.

2.2. 하부 금속 반사기를 활용한 그레이팅 커플러의 결합 효율 개선

GC는 정렬 허용오차가 넓다는 장점을 가진 반면 EC와 비교할 때 결합 효율이 상대적으로 낮다는 한계를 가진다. 특히 유리 기판은 굴절률이 낮고 광 투명성이 높아, 격자를 통해 결합된 광의 상당 부분이 기판 아래로 소실되어 결합 효율 저하로 이어진다. 이로 인해 유리 기판 GC에서는

차세대 Co-packaged Optics용 유리 기판 위 실리콘 나이트라이드 집적 광학

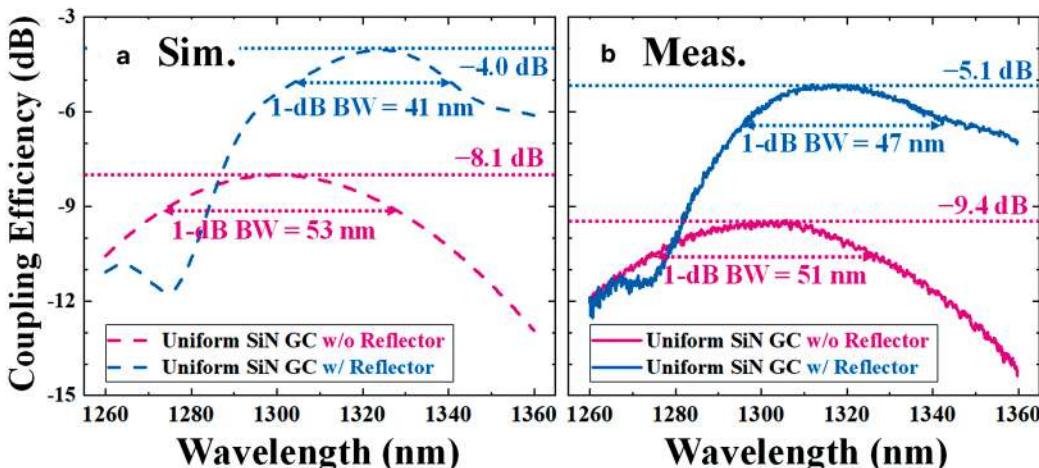


↑ [Fig. 2] 단일 SiN GC의 반사기 유무에 따른 결합 효율 시뮬레이션 결과. Reprinted with permission from H. Jung et al. IEEE Photon. Technol. Lett. 2025; 38: pp. 341-344. Copyright © 2026, IEEE [17].

기판 아래로 소실되는 광을 다시 유효하게 활용할 수 있는 구조적 보완이 필요하다. 유리 기판에서 GC의 결합 효율을 향상시키는 가장 직관적인 방법은 하부 금속 반사기를 통해 기판 아래로 소실되는 광을 다시 상부로 반사시켜 도파로로 재결합시키는 것이다. 기존의 SOI 플랫폼과 달리, 유리 기판에서는 단순한 박막 공정을 통해 하부 금속 반사기를 형성할 수 있어 반사 구조를 추가하더라도 공정 복잡도가 크게 증가하지 않는다는 장점이 있다.

이러한 하부 금속 반사기의 효과를 정량적으로 분석하기 위해 유한차분 시간영역법(finite-difference time-

domain, FDTD) 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 2에 나타난 바와 같이 반사기를 적용한 단일 SiN GC는 -1.73 dB 의 결합 효율을 보여, 반사기가 없는 구조에서의 결합 효율 -5.74 dB 대비 약 4 dB 가량 결합 효율이 개선되었다. 이 결과는 하부 금속 반사기가 유리 기판 기반 단일 SiN GC의 주 손실 요인인 기판 하부 광 소실을 효과적으로 보완할 수 있음을 보여준다. 이러한 설계 결과를 바탕으로 제작된 소자의 측정 결과는 그림 3에 나타난 바와 같이 -5.1 dB 의 결합 효율을 보였으며, 시뮬레이션 결과와의 차이는 약 1 dB 수준으로 관측되었다. 이와 같은 차이는 공정 최적화 한계에



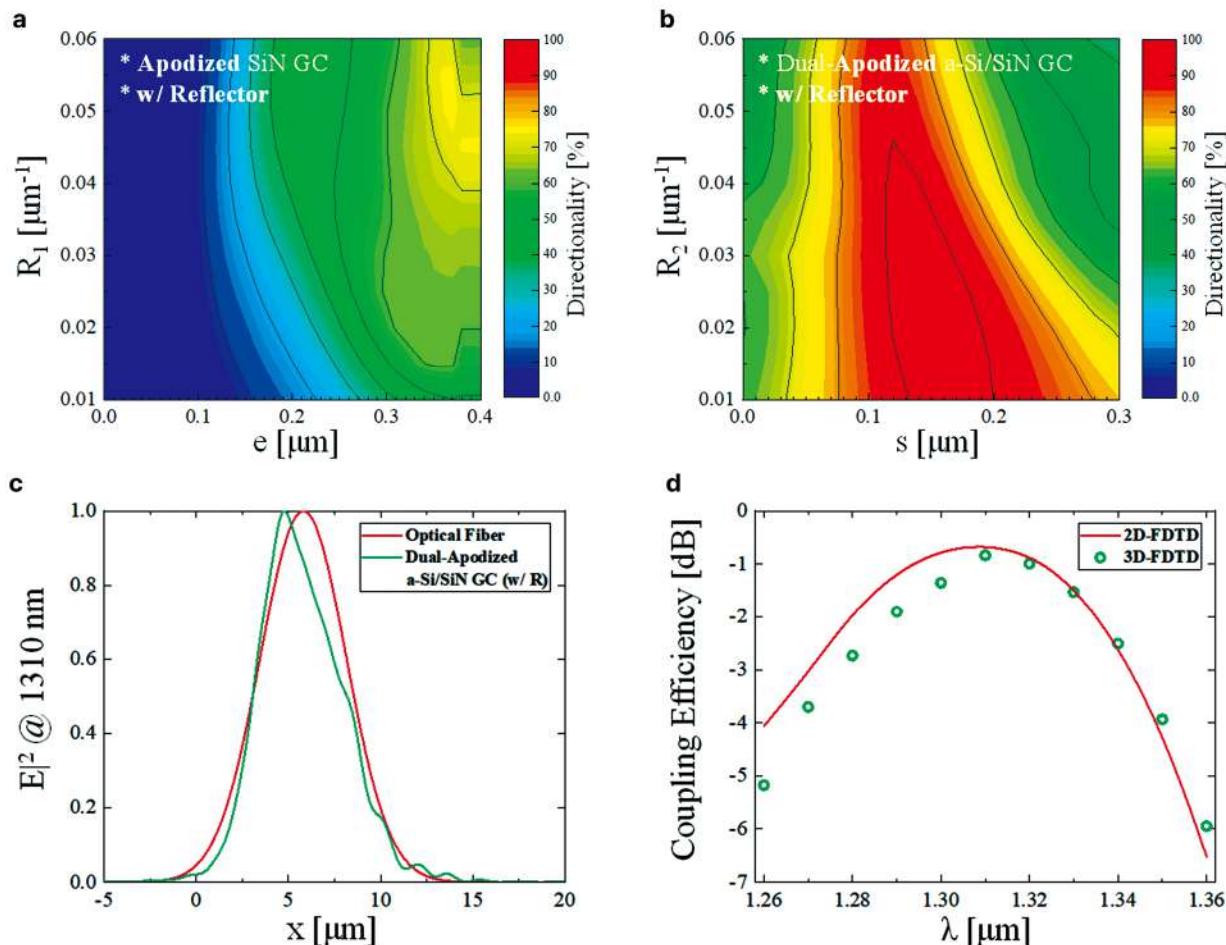
↑ [Fig. 3] 단일 SiN GC의 반사기 유무에 따른 시뮬레이션 및 측정된 결합 효율 파장 스펙트럼의 비교. Reprinted with permission from H. Jung et al. IEEE Photon. Technol. Lett. 2025; 38: pp. 341-344. Copyright © 2026, IEEE [17].

기인한 것으로 판단되며, 이러한 한계에도 불구하고 하부 금 속 반사기를 통한 결합 효율 향상 효과는 실측 성능 지표를 통해 명확히 제시되었다.

2.3. 이중 아포다이즈드 기술과 a-Si 적층 기술을 적용한 고효율 그레이팅 커플러

하부 금 속 반사기를 도입함으로써 단일 SiN GC의 결합 효율은 크게 개선되었으나, 여전히 EC의 성능과 비교하면 결합 효율 측면에서 한계가 존재한다. 이러한 효율 격차를 극복하기 위해 GC에서 발산되는 모드와 외부 광섬유 모드 간의 정합을 보다 정밀하게 제어하려는 다양한 연구들이 진행되어 왔다. 그중 가장 대표적인 접근법이 격자

구조를 위치에 따라 점진적으로 변화시키는 아포다이즈드 (apodized) 기술과 격자 상부에 고굴절률 재료를 적층하는 a-Si 적층 기술이다. 아포다이즈드 기술은 격자 영역을 따라 방사 세기를 조절함으로써 외부 광섬유 모드와의 중첩을 효과적으로 향상시킬 수 있으며, a-Si 적층 기술은 격자의 수직 대칭성을 깨트려 방향성을 크게 향상시킬 수 있다. 이러한 아포다이즈드 기술과 a-Si 적층 기술을 적용함으로써 결합 효율은 -0.8 dB 수준까지 향상될 수 있으며(그림 4 참조), 이는 기존 EC의 결합 효율과 비교해도 손색없는 고효율 커플러 성능에 해당한다. 따라서 해당 기술 조합은 유리 기판 기반 SING 플랫폼에서도 EC에 필적하는 고효율 광 결합을 구현할 수 있는 유력한 방안으로 평가될 수 있다.



↑ [Fig. 4] 하부 금 속 반사기가 적용된 이중 아포다이즈드 a-Si/SiN GC의 방향성, 모드 중첩 및 결합 효율 파장 스펙트럼에 대한 시뮬레이션 결과. Reprinted from H. Jung et al. Jpn. J. Appl. Phys. 2025; 64; 092001. Copyright © 2025, H. Jung et al. [18].

III. 유리 기판 위 SiN 기반 플랫폼의 고집적성 분석

3.1. CPO 적용을 위한 고집적용 SiN 도파로 구조 설계 및 분석

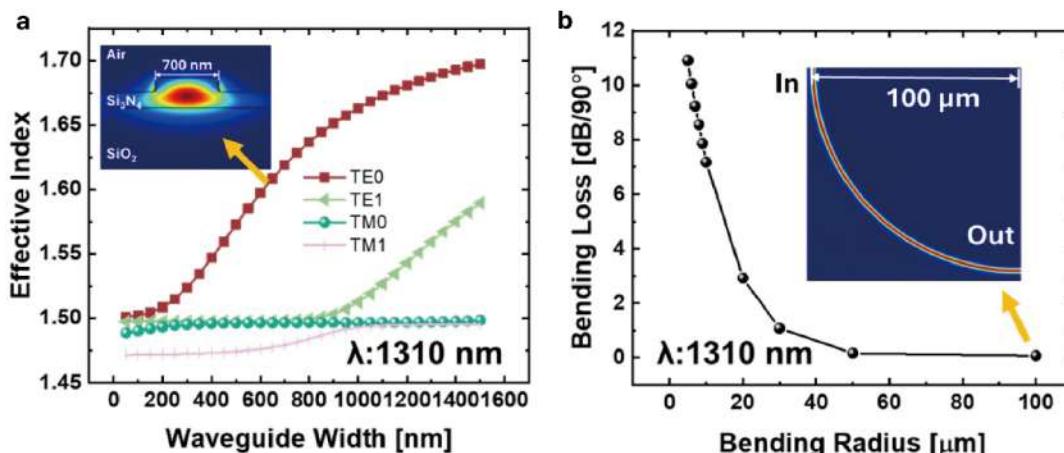
고집적 라우팅을 위해서는 도파로의 폭과 두께를 줄여 모드를 강하게 구속하는 것이 유리하지만, 도파로가 지나치게 작아지면 측벽 거칠기에 민감해져 산란이 증가하고 전파 손실이 커질 수 있다. 굽힘 반경을 줄이는 과정에서도 같은 문제가 반복된다. 즉 배선 밀도를 높이기 위한 목적으로 도파로 크기와 굽힘 반경을 동시에 줄이기 위해서는 전파 손실과 굽힘 손실을 함께 고려한 설계 기준을 먼저 확립해야 한다. SiN은 LDW/IOX 기반 유리 도파로보다 굴절률이 높아 더 작은 모드를 만들 수 있지만, 실리콘만큼 높지는 않기 때문에 기존 실리콘 포토닉스에서 사용하던 설계 규칙을 그대로 적용하기 어렵고, 유리 기판 환경에 맞춘 단면과 굽힘 조건을 새롭게 정의할 필요가 있다.

본 고에서 제시한 플랫폼에서는 단일 모드 조건과 굽힘 손실을 동시에 만족시키는 방향으로 단면을 설계하였다. 우선 폭 변화에 따른 유효 굴절률 비교를 통해 고차 TE 모드가 나타날 수 있는 구간을 피하고, 안정적인 단일 모드 동작을 위해 폭 700 nm를 표준값으로 선택하였다. 표준 단면은 SiN 총 두께 400 nm, 슬랩 220 nm의 Rib 구조로 정의되며,

이는 모드 구속뿐 아니라 이후 GC와 다양한 수동 소자를 동일 공정에서 구현할 수 있도록 공정성을 고려한 선택이기도 하다. 또한 유리 기판 공정의 열 예산을 고려해 SiN (400 nm)을 300 °C PECVD로 증착하는 저온 공정을 채택하였고, 이 공정 흐름은 금속 반사층을 포함한 구조와도 양립 가능하다는 장점을 가진다. 최소 굽힘 반경은 배선 밀도를 결정하므로 고집적 라우팅을 전제로 반경을 설정하고, 해당 조건에서 손실을 확인하는 과정이 필요하다. 본 고에서는 반경 10–100 μm 영역의 분석을 통해 반경 크기 100 μm를 실용적인 설계 기준으로 제시하였으며, 이를 기준으로 시뮬레이션 상에서 약 0.07 dB/90°의 값을 획득하였다.

3.2. 고집적성의 정량화를 위한 FOM 제시 및 LDW/IOX와의 비교

소자 측정 결과 굽힘 손실은 반경이 100 μm일 때 ~0.237 dB/90°인 것으로 측정되었다. 위에서 언급하였듯, 굽힘 반경과 관련하여 고집적성을 논할 때에는 단순히 곡률 반경을 축소할 수 있는 한계치뿐만 아니라, 그에 따른 전파 손실을 함께 고려하여 정량적으로 평가할 필요가 있다. 이를 위해 굽힘 반경과 굽힘 손실을 함께 반영하는 FOM을 제시하고 LDW/IOX 기반 유리 도파로와 비교해 본 결과, SiN 기반 플랫폼은 훨씬 작은 반경에서도 라우팅이 가능하며, 고집적 라우팅에 유리함을 논증하였다. 이는 유리 기반 도파로



↑ [Fig. 5] CPO용 SiN 도파로의 구조 설계. (a) TE 고차모드를 배제한 너비 결정, (b) 굽힘 반경에 따른 예상 굽힘 손실의 시뮬레이션 결과. Reprinted with permission from Copyright [13] © 2025, Optica Publishing Group.

Waveguide (W × H [μm])	Bend Loss (dB/cm)	FOM [Loss × R]
LDW (10 × 10) [8]	1 ($R = 8.5$ mm)	8.5
IOX (8 × 3) [11, 12]	3 ($R = 5$ mm)	15
SING (0.7 × 0.4)	15 ($R = 0.1$ mm)	1.5

↑ [표 1] LDW, IOX, SING의 도파로 종류(크기), 굽힘 손실, 굽힘 손실과 굽힘 반경의 곱으로 정의한 FOM의 비교. Reprinted with permission from Copyright [13] © 2025, Optica Publishing Group.

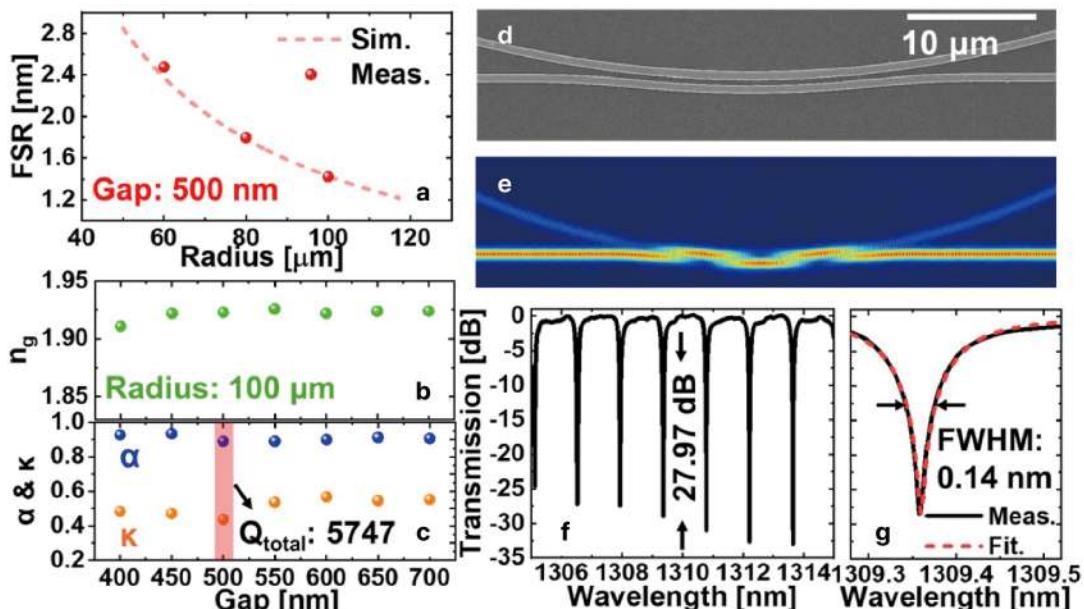
대비 더 높은 배선 밀도를 기대할 수 있음을 의미하며, 웨이퍼/패널 스케일 배선층을 전제로 할 때 SiN을 사용해야 하는 중요한 설계 근거가 된다. 다만 전파 손실은 약 -4.81 dB/cm로 상당히 높아 플랫폼 고도화를 위해 반드시 개선되어야 하는 항목으로 평가되었다. 전파 손실이 높아지는 주요 원인으로는 리소그래피 및 식각 공정에서 유래하는 측벽 거칠기에 따른 산란 손실 증가와, PECVD 공정에서 발생하는 결함에 따른 산란 증가 등이 제시될 수 있다. 이를 극복하기 위한 저감 방안으로는 단일 모드 조건을 유지하는 범위 내에서 폭 최적화를 통해 측면 거칠기로 인한 산란 민감도를 낮추는 방안, 공정 조건 최적화, 표면 거칠기 저감을 위한 공정 개선, 저온 조건에서 적용 가능한 수소 분위기 어닐링 등의

전략이 고려될 수 있다^[19,20]. 전파 손실 저감은 신호 품질을 결정하는 패키징 내부의 또 다른 핵심 지표이므로 언급한 전략을 통한 개선이 반드시 필요하다.

3.3. 광 라우팅용 링 공진기(필터)와 MMI기반

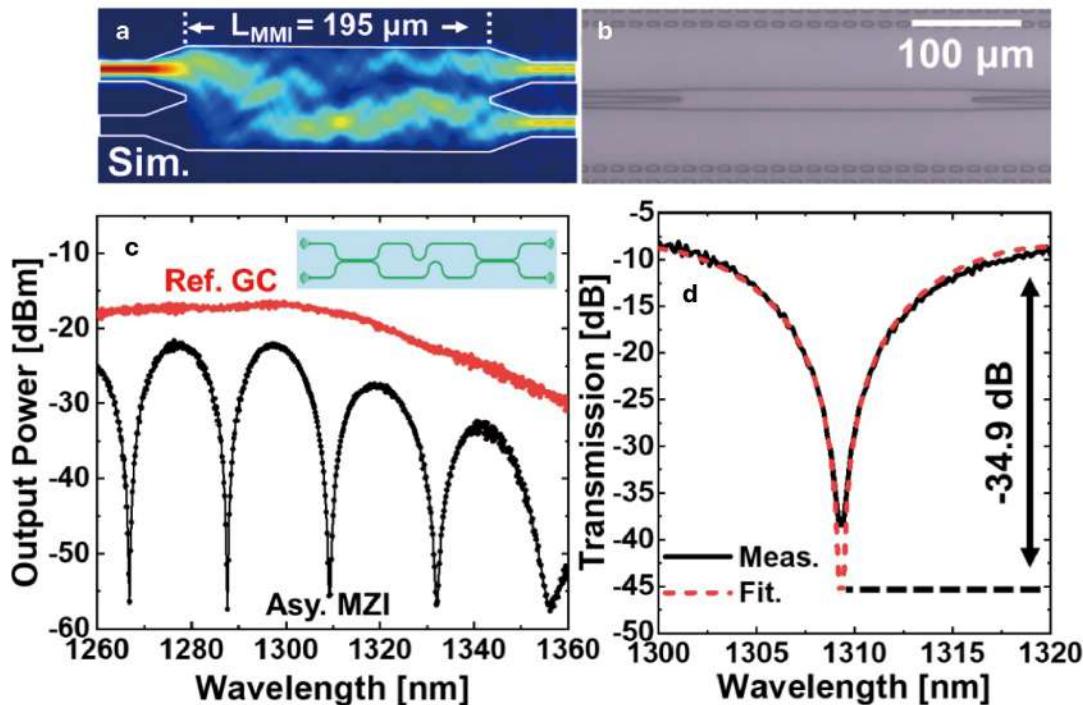
비대칭 MZI의 설계 및 분석

CPO를 위한 optical RDL 플랫폼의 성능에 영향을 미치는 요소로 도파로 외에도 배선층 위에서 동작 가능한 수동 소자를 들 수 있다. 링 공진기와 다중모드 간섭(multi-mode interference, MMI) 결합기 기반 비대칭 마흐-젠더 간섭기(asymmetric Mach-Zehnder interferometer, AMZI)는 플랫폼의 광 신호의 변조 및 경로 변경에 자주 사용되는 대표



↑ [Fig. 6] SiN 플랫폼 기반 링 공진기의 성능. (a) FSR-반경 측정 및 시뮬레이션 결과, (b) n_g , (c) a -, k -Gap 측정 결과, (d) 링 공진기 결합 부분 SEM 사진, (e) 링 공진기 결합부분 시뮬레이션 결과, (f) 링 공진기의 퍼포먼스에 따른 투과 그래프, (g) 1310 nm 근방의 링 공진기 성능. Reprinted with permission from Copyright [13] © 2025, Optica Publishing Group.

차세대 Co-packaged Optics용 유리 기판 위 실리콘 나이트라이드 집적 광학



↑ [Fig. 7] SING 플랫폼 기반 AZMI의 성능. (a) 3 dB 2×2 MMI의 시뮬레이션 결과, (b) OM으로 측정된 제작된 AMZI의 3 dB 2×2 MMI 부분, (c) AMZI의 파장에 따른 아웃풋 파워 그래프, (d) 1310 nm 근방의 AMZI 성능. Reprinted with permission from Copyright [13] © 2025, Optica Publishing Group.

소자이다. 본 고에서 소개하는 연구에서는 두 가지 수동 소자의 SING 플랫폼 결합 여부 및 해당 소자들을 설계하는 데 필요한 기본적인 지표들을 제시하고, 제작하였다.

연구에 따르면 링 공진기 결합부의 갭은 결합계수에 영향을 미치며, 이는 공진 스펙트럼의 소광비, 선풋, Q 인자 등으로 나타날 수 있다. 연구에서는 이를 고려하여 varFDTD를 이용해 파장 1,310 nm에서 공진하는 조건의 링을 설계하고, 링 공진기의 내부 Q 값과 외부 Q 값을 일치시킴으로써 크리티컬 커플링을 일으킬 수 있게끔 제작하였다. 이후 결합 갭 조건에 따른 스펙트럼을 측정하고, 이를 모델로 피팅하여 결합 및 손실 파라미터를 추출함으로써 제작 소자가 설계와 잘 일치하는지 여부를 확인하였다. 그 결과 27.97 dB 수준의 높은 소광계수를 확보하였다. 다만 실제 설계에서는 공정 과정에서 발생하는 미세한 오차로 인해 1,310 nm로 설계된 공진 피크가 약 1,309.35 nm로 소폭 벗어남이 관찰되었다.

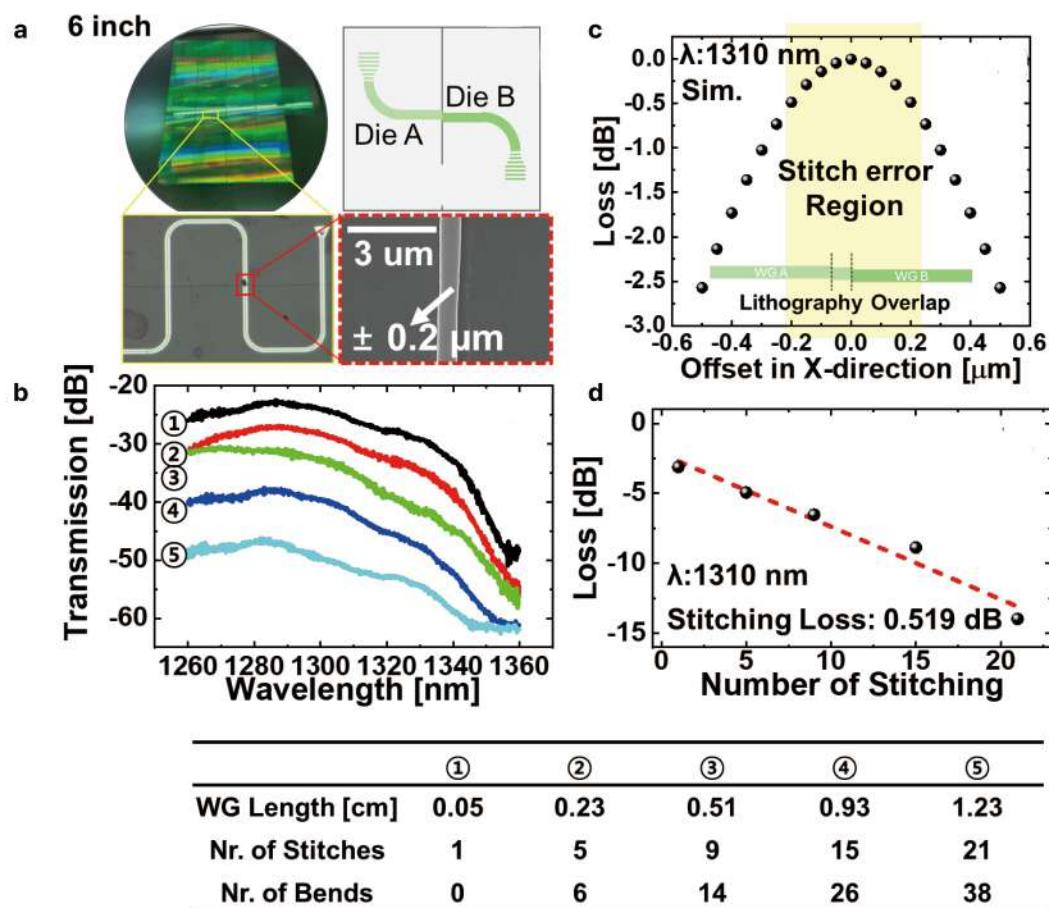
본 연구에서 제시한 링 공진기는 단순한 성능 시연을 넘어 향후 WDM 필터링이나 파장 선택 기능의 기반 소자로 활용될 수 있는 가능성을 갖추고 있어, optical RDL은 물론

들어오는 빛을 처리할 액티브 소자의 기본 구조 설계로서도 의미가 크다.

AMZI는 3 dB 분배기 역할을 하는 2×2 MMI의 분배 성능이 균등하도록 설계되어야 한다. 분배기에 의해 정확히 50%로 나뉜 두 빛은 서로 다른 경로의 두 팔을 지나는 과정에서 위상 차가 발생하고, 이로 인한 간섭 현상은 공진 피크를 야기한다. 연구에서는 3 dB 2×2 MMI를 FDTD를 통해 설계함으로써 파장 범위 1,310 nm에서 동작하는 AMZI를 제작하였다. 제작된 AMZI의 소자는 34.9 dB의 높은 소광비를 가지고 있었으며, 이로 미루어 보아 MMI 3dB 광분기 가 설계대로 잘 동작하고 있음을 알 수 있었다. 또한 이를 기반으로 AMZI의 간섭 패턴도 관찰할 수 있었다.

3.4. 웨이퍼 스케일로의 확장을 위한 스티칭 손실 분석

서론에서 언급하였듯이 최근 병렬로 사용하는 XPU의 수가 크게 증가함에 따라 패키징 기판 상에서의 die-to-die 또는 chiplet-to-chiplet 연결을 염두에 둔 광배선이 제안되고 있는 추세이다. 이러한 웨이퍼/패널 크기의 배선에서는



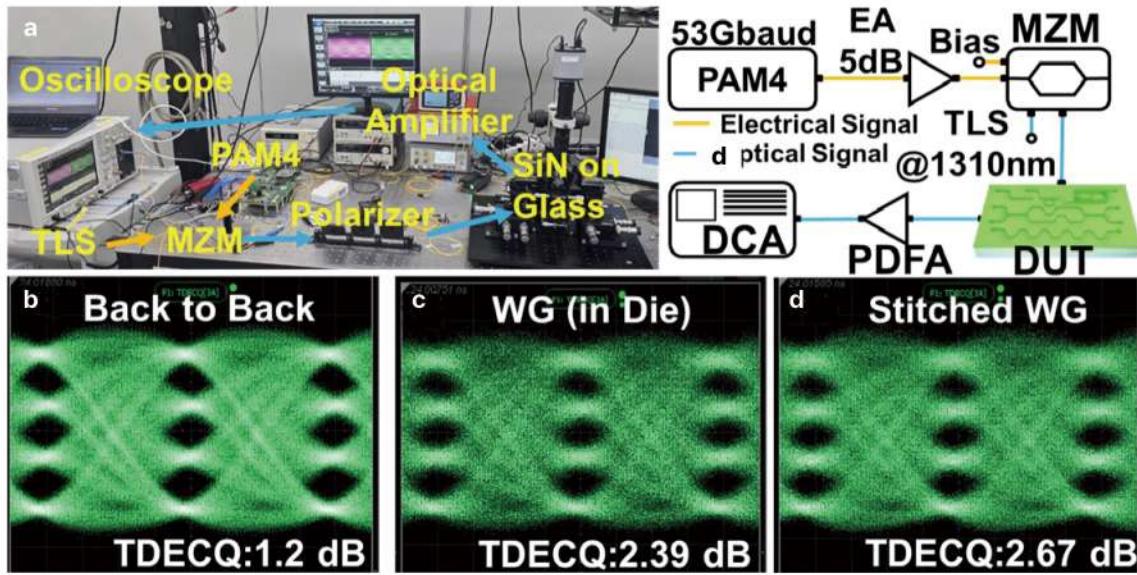
↑ [Fig. 8] I-line 스티퍼를 사용한 SING 플랫폼의 스티칭 에러 분석. (a) 웨이퍼-Shot-스티칭 부분 모식도 및 OM, SEM 사진, (b) 정렬 오차에 따른 스티칭 손실 시뮬레이션 결과, (c) 스티칭 개수, 파장에 따른 투과율 측정 그래프, (d) 스티칭 개수에 따른 손실 값 측정 및 피팅. Reprinted with permission from Copyright [13] © 2025, Optica Publishing Group.

칩 수준의 배선에서는 고려되지 않았던 문제인 스티칭 에러가 등장하게 된다. 소자 제작의 필수 공정인 노광 과정에서는 스테퍼라는 장비가 사용되는데, 이때 스테퍼의 기계적 정렬 오차 한계로 인해 한 샷과 그 옆의 샷 사이에 미세한 정렬 오차가 발생한다. 스티칭은 이러한 샷 간 오정렬을 의미하는 용어로, 광 도파로에서는 틀어진 도파로로 인한 모드 불일치 손실이 발생할 수 있기 때문에 웨이퍼 스케일 optical RDL 을 논할 때 반드시 평가되어야 하는 항목이다.

본 고에서 소개하는 연구에서는 흔히 쓰이는 I-line 스테퍼를 기준으로 이러한 스티칭 에러가 어느 정도의 손실을 불러오는지를 분석하고, 이를 해결할 방법을 고찰하였다. 우선 스티칭으로 야기된 광의 모드 불일치로 인한 손실 값을 구체적으로 확인하기 위해 FDE를 사용하여 스티칭 에러의 예상

범위를 도출하였다. 이후 실제 측정으로 얻어낸 값과 시뮬레이션 값이 각각 -0.5 dB , -0.519 dB 수준으로 매우 잘 일치함을 확인하였다. 이때 단일 스티칭 에러 자체는 크지 않지만, 제안하는 SING 플랫폼이 스케일 확장을 시도할 시 스티칭 에러의 수가 누적되면서 중요한 해결 과제로 탈바꿈하게 된다. 예를 들어, 웨이퍼 내 장거리 라우팅 과정에서 스티칭이 10회 발생한다고 가정하면 총 누적 손실은 약 5 dB 에 이르며, 이는 70% 이상의 광 파워가 소실되는 수준에 해당한다. 따라서 스티칭 에러 억제는 플랫폼 전체의 손실을 줄이기 위해 중요한 과제이다. 스티칭 에러를 감소시키기 위한 대표적인 방법으로는 스티칭 구간을 테이퍼로 설계함으로써^[21] 구간에서의 광 모드 크기를 키우고, 상대적인 정렬오차 민감도를 줄여 최종적으로 손실을 낮추는 방법을 제시할 수 있다.

차세대 Co-packaged Optics용 유리 기판 위 실리콘 나이트라이드 집적 광학



↑ [Fig. 9] CPO용 SING 플랫폼의 106 Gbps 고속 신호 전송 테스트. (a) 테스트 환경 구축 사진 및 흐름도, (b) Back-to-back 신호 아이 디어그램, (c) 샷 내부 도파로 전송 신호 아이 디어그램, (d) 스티칭된 도파로 전송 신호 아이 디어그램. Reprinted with permission from Copyright [13] © 2025, Optica Publishing Group.

3.5. 106 Gbps 고속 전송 신호 품질 시험

광 패키징 플랫폼의 주 해결 과제로 앞서 언급하였던 높은 광결합 효율, 고 집적도, 낮은 손실 등이 제시된 바 있다. 다만 최종적으로는 이들을 통해 전달되는 고속 신호 전송 품질의 유지 가능성성이 가장 중요하다. 소개된 연구에서는 이를 위해 PAM-4 106 Gbps 조건에서 back-to-back, 기판 내(in-shot) 경로, 스티칭 경로를 비교하고, 아이 디어그램(eye diagram)과 TDECQ를 기반으로 신호 품질을 정량적으로 평가하였다. 그 결과 스티칭을 포함한 경로에서도 TDECQ가 3 dB 이하로 유지됨을 확인하였다. 이는 SING 플랫폼의 광 배선층이 웨이퍼 스케일로 확장되더라도 스티칭과 배선 과정이 106 Gbps PAM-4 신호를 시스템적으로 제한하지 않아 적정 신호 품질을 확보할 수 있음을 의미한다. 또한 플랫폼의 향후 개선 방향(전파 손실 저감, 커플러 결합 효율 향상 등)을 고려하면 신호 품질과 시스템 여유도를 추가로 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

VI. 맺음말

인공지능 기술의 발전과 함께 데이터 이동량이 기하급수적으로 증가함에 따라 전기 배선 중심의 패키징 구조는 대역폭과 전력 효율 측면에서 한계에 직면하고 있으며, 이에 대한 대안으로 CPO 및 웨이퍼/패널 스케일 optical RDL이 차세대 패키징 로드맵의 핵심 요소로 부상하고 있다. 본 글에서는 유리 기판 위 SiN 기반 SING 플랫폼을 통해 고집적 광 배선층을 구현하고, 하부 금속 반사판을 적용한 고효율 그레이팅 커플러를 통합함으로써 유리 기판 기반 optical RDL을 실질적인 패키지 인프라 계층으로 확장할 수 있는 가능성을 제시하였다.

제안된 SING 플랫폼은 패키지 적용 관점에서 중요한 검사성 · 조립성을 유지하면서도, 유리 기판 환경에서 지배적인 기판 방향 방사 손실을 하부 금속 반사 구조를 통해 억제함으로써 광 입출력 효율을 향상시켰으며, 이를 정량적 성능 지표로 제시하였다. 또한 유리 기판에 최적화된 SiN 도파로 단면과 굽힘 조건을 정의하고, 굽힘 손실 기반 FOM 비교를 통해 기존 LDW/IOX 기반 유리 도파로 대비 현저히 높은 배선 집적 잠재력을 가짐을 선보였다. 또한 optical RDL 플랫폼은 도파로만으로 완성되지 않기 때문에, 링 공진기와

AMZI를 배선층 위 수동 소자로 설계·제작하고 피팅을 통해 결합 및 손실 파라미터를 추출함으로써 SING 플랫폼의 적용 가능성을 실증했다. 더 나아가 웨이퍼 크기로의 확장을 위해 스티칭 손실을 시뮬레이션을 통해 분석하였으며, 측정 값과 시뮬레이션 결과가 잘 일치함을 보였고, PAM-4 106 Gbps 조건의 스티칭을 포함한 경로에서도 양질의 신호 품질을 달성하였다. 다만 현 단계에서 나타난 높은 전파 손실과 이로 인한 낮은 Q 값을 개선이 필요하며, 향후 손실 저감과 결합 효율 향상에 성공한다면 차세대 CPO 구현을 위한 SING 플랫폼의 실용성이 더욱 커질 것으로 전망한다.

SING 플랫폼의 가능성은 CPO용 optical RDL 구현에 국한되지 않는다. 유리 기판의 대면적 공정 호환성과 SiN의 넓은 투명 파장대 및 공정 유연성은 양자 광회로, FMCW LiDAR, 센싱·계측용 집적 광회로 등 다양한 응용 분야로의 확장 가능성을 제공한다. 특히 패널 레벨 제조와 결합한다면 SING 플랫폼은 고성능을 유지하면서도 가격 경쟁력을 확보할 수 있는 범용 광회로 플랫폼으로 발전할 수 있는 잠재력이 있다. 향후 전파 손실 저감, 광 입출력 구조의 추가 고도화, 액티브 소자와의 이종 집적이 더해진다면, SING 플랫폼은 CPO를 포함한 차세대 침단 광패키징 전반을 관통하는 핵심 광회로 기술 기반으로 자리매김할 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

- 1 G. E. Moore, "Cramming more components onto integrated circuits," Proc. IEEE **86**, 82–85 (1998).
- 2 G. Keeler, "Photonics in the package for extreme scalability," in Proc. 2019 DARPA Electronics Resurgence Initiative (ERI) Summit (Detroit, MI, USA, Jul. 15–17, 2019).
- 3 C. Xiang, N. Margalit, S. M. Bowers, A. Bjorlin, R. Blum, and J. E. Bowers, "Perspective on the future of silicon photonics and electronics," Appl. Phys. Lett. **118**, 220501 (2021).
- 4 K. Kennes, A. Dvoretskii, A. Podpod, P. Xu, J. He, and G. Lepage, "Collective die-to-wafer assembly process for optically interconnected system-on-wafer," in Proc. IEEE 74th Electronic Components and Technology Conference (ECTC) (Denver, CO, USA, May 28–31, 2024), pp. 1392–1397.
- 5 P. Xu, J. He, K. Kennes, A. Dvoretskii, A. Podpod, G. Lepage, N. Golshani, R. Magdziak, S. Bipul, D. Bode, P. Verheyen, M. Chakrabarti, D. Velenis, A. Miller, Y. Ban, F. Ferraro, and J. Van Campenhout, "Collective die-to-wafer bonding enabling low-loss evanescent coupling for optically interconnected system-on-wafer," in Optical Fiber Communication Conference 2024 (Optica Publishing Group, 2024), paper Tu3A.4.
- 6 V. Sukumaran, T. Bandyopadhyay, V. Sundaram, and R. Tummala, "Low-cost thin glass interposers as a superior alternative to silicon and organic interposers for packaging of 3-D ICs," IEEE Trans. Compon. Packag. Manufact. Technol. **2**, 1426–1433 (2012).
- 7 V. Sukumaran, G. Kumar, K. Ramachandran, Y. Suzuki, K. Demir, and Y. Sato, "Design, fabrication, and characterization of ultrathin 3-D glass interposers with through-package-vias at same pitch as TSVs in silicon," IEEE Trans. Compon. Packag. Manufact. Technol. **4**, 786–795 (2014).
- 8 T. Lee, Q. Sun, M. Beresna, and G. Brambilla, "Low bend loss femtosecond laser written waveguides exploiting integrated microcrack," Sci. Rep. **11**, 23770 (2021).
- 9 N. Psaila, S. Nekkanty, D. Shia, and P. Tadayon, "Detachable optical chiplet connector for co-packaged photonics," J. Lightwave Technol. **41**, 6315–6323 (2023).

차세대 Co-packaged Optics용 유리 기판 위 실리콘 나이트라이드 집적 광학

- 10 L. Brusberg, A. R. Zakharian, S. E. Kocabas, L. W. Yearym, J. R. Grenier, and C. C. Terwilliger, "Glass substrate with integrated waveguides for surface mount photonic packaging," *J. Lightwave Technol.* **39**, 912–919 (2021).
- 11 L. Brusberg, M. J. Dejneka, C. A. Okoro, D. J. McEnroe, A. R. Zakharian, and C. C. Terwilliger, "Ultra low-loss ion-exchange waveguides in optimized alkali glass for co-packaged optics," in *Proc. IEEE 74th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)* (Denver, CO, USA, May 28–31, 2024), pp. 85–89.
- 12 L. Brusberg, J. A. Holguín-Lerma, J. R. Rodrigues, B. J. Johnson, J. R. Grenier, M. Granados-Baez, R. M. Force, A. R. Zakharian, C. C. Terwilliger, and K. Rousseva, "High-density evanescent chip coupling with detachable fiber connector for co-packaged optics," in *Optical Fiber Communication Conference* (Optica Publishing Group, 2025), paper Th3H.1.
- 13 T. Jin, S. Yoon, K. Jo, H. Jung, S. Shin, J. Lee, S. Park, B. Lee, W. Choi, M. Jang, S. Jung, M. Kim, J. Lee, and Y. Kim, "Silicon nitride photonic platform on glass for scalable, high-density optical redistribution layers in panel-level packaging," *Opt. Express* **33**, 50422-50431 (2025).
- 14 R. Arefin, S. H. Ramachandra, H. Jung, W. You, S. M. N. Hasan, and H. Turski, "III-N/Si₃N₄ integrated photonics platform for blue wavelengths," *IEEE J. Quantum Electron.* **56**, 6300309 (2020).
- 15 V. Vitali, C. Lacava, T. Domínguez Bucio, F. Y. Gardes, and P. Petropoulos, "Highly efficient dual-level grating couplers for silicon nitride photonics," *Sci. Rep.* **12**, 15436 (2022).
- 16 R. Marchetti, C. Lacava, A. Khokhar, X. Chen, I. Cristiani, D. J. Richardson, G. T. Reed, P. Petropoulos, and P. Minzioni, "High-efficiency grating couplers: Demonstration of a new design strategy," *Sci. Rep.* **7**, 16670 (2017).
- 17 H. Jung, T. Jin, S. Yoon, K. Jo, S. Shin, and S. Park, "Demonstration of a SiN grating coupler with a metal reflector on a glass substrate," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **38**, 341-344 (2025).
- 18 H. Jung, M.-J. Kwack, and Y. Kim, "Simulation study of a highly efficient dual-apodized a-Si/SiN grating coupler using a metal bottom reflector on a glass substrate for co-packaged optics," *Jpn. J. Appl. Phys.* **64**, 092001 (2025).
- 19 D. Bose, M. W. Harrington, A. Isichenko, K. Liu, J. Wang, N. Chauhan, Z. L. Newman, and D. J. Blumenthal, "Anneal-free ultra-low loss silicon nitride integrated photonics," *Light: Sci. Appl.* **13**, 156 (2024).
- 20 T. D. Bucio, C. Lacava, M. Clementi, J. Faneca, I. Skandalos, and A. Baldycheva, "Silicon nitride photonics for the near-infrared," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **26**, 8200613 (2019).
- 21 P. Xu, C. Marchese, G. Lepage, N. Golshani, R. Van Eenaeeme, A. Mingardi, J. Van Ongeval, R. Magdziak, L. Halipre, D. Trivkovic, P. Verheyen, M. Chakrabarti, D. Velenis, A. Miller, F. Ferraro, Y. Ban, and J. Van Campenhout, "Low-loss, multi-reticle stitched SiN waveguides for 300 mm wafer-level optical interconnects," in *Optical Fiber Communication Conference* (Optica Publishing Group, 2024), paper M4A.3.

WRITER _ 김용범, 유경식

2

단거리 고속통신을 위한 실리콘 포토닉스 활용



김용범 KAIST 석사과정

E-mail: kyb34045@kaist.ac.kr

KAIST 전기및전자공학부 석사 재학 중이며,

현재 실리콘 포토닉스 플랫폼에서의 고속 통신과 관련된
연구를 수행하고 있다.

유경식 KAIST 석사과정

E-mail: ksyu@kaist.ac.kr

서울대학교 전기공학부에서 학사(1999년),

Stanford University, Electrical Engineering에서

박사(2004년) 학위를 취득하였다.

2010년부터 KAIST에 재직 중이며, 포토닉스 관련 연구를
수행하고 있다.

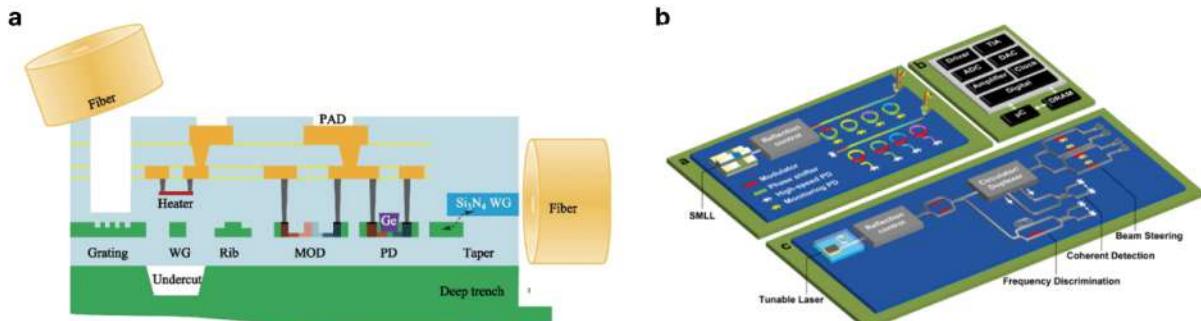
I. 서론

오늘날 정보화 사회의 흐름은 생성된 데이터를 얼마나 빠르고 효율적으로 이동시키는가에 의해 좌우된다. 특히 데이터 센터와 인공지능(*artificial intelligence, AI*) 클러스터처럼 대규모 데이터 전송 환경에서는 병목이 데이터 연산 자체가 아니라 연결에서 발생하는 경우가 많다^[1]. 전송 속도와 채널 밀도가 증가할수록 금속 배선 기반 전기 연결에서는 발열, 신호의 손실과 왜곡 문제가 심화되며, 이를 보완하기 위한 회로적 부담도 함께 증가한다. 이처럼 데이터 트래픽이 가파르게 증가하는 현 상황에서, 기존의 전기 기반 연결만으로는 확장에 한계가 드러나고 있어 대안 기술의 필요성이 커지고 있다^[2, 3].

포토닉스(*photonics*)는 빛(광자)의 생성 · 제어 · 검출 및 이를 이용한 정보 전달과 신호 처리를 다루는 기술을 말한다. 장거리 전송분야에서는 이미 광섬유 기반 통신이 표준 기술로서 자리잡았지만, 전통적인 광부품들은 대개 개별 소자로 제작되어 정렬과 패키징에 많은 비용이 들고 전자회로와의 결합도 쉽지 않다. 그 결과 빛이 가진 물리적 장점에도 불구하고, 칩/패키지/보드 수준의 초단거리처럼 비용 효율과 채널 집적도가 특히 중요한 영역에서는 포토닉스를 적용하기가 어려웠다. 이러한 한계를 넘기 위한 접근방식이 광집적회로이며, 그 대표적인 플랫폼은 실리콘 포토닉스(*silicon photonics*)라고 할 수 있다. 실리콘 포토닉스는 반도체 산업에서 축적해온 실리콘 공정 기반을 활용해 도파관을 따라 빛을 전송하고, 전기 신호로 빛을 변조하며, 필요한 파장 성분을 분리 · 결합하고, 수신단에서 다시 전기 신호로 변환하는 광전자 기능을 작은 칩 위에 집적하려는 접근방식이다(그림 1 참조). 이 방식의 핵심은 기존 CMOS 기술이 제공하는 대면적 웨이퍼, 높은 반복성, 대량 생산의 이점을 포토닉스에도 접목해 고기능의 광집적회로를 경제적으로 생산할 수 있다는 점이다^[4, 5].

본 글에서는 먼저 단거리 고속통신에서 왜 광이 다시 중요해졌는지 짚어본 뒤, 실리콘 포토닉스를 통신에 어떻게 접목할 수 있는지 소개한다. 2장에서는 단거리에서 광통신이 필요한 이유를 설명하고, 3장에서는 고속 통신을 위한 실리콘 포토닉스 기술의 현재 수준을 정리하며, 다음 단계로 도약하기 위해 필요한 조건과 주목할 지점을 제시한다.

단거리 고속통신을 위한 실리콘 포토닉스 활용



↑ [그림 1] 실리콘 포토닉스 플랫폼의 집적 예시. (a) 실리콘 포토닉스 칩 단면 개념도(변조기, 광/전기 신호 도파관 등 포함). Reprinted from M. Tan *et al.* Front. Optoelectron. 2023; **16**: 1. Copyright © 2023, M. Tan *et al.*^[7]. (b) 레이저/제어회로와 광 집적회로, 그리고 전자회로가 결합된 시스템의 구상도. Reprinted from S. Shekhar *et al.*, Nat. Commun. 2024; **15**: 751. Copyright © 2024, S. Shekhar *et al.*^[13].

II. 단거리 광통신

인터넷 트래픽은 클라우드 컴퓨팅, 비디오 스트리밍, AI, 사물인터넷(internet of things, IoT) 확장과 맞물려 빠르게 증가하고 있다^[6, 7]. 또한 트래픽의 상당 부분이 데이터센터에서 생성·처리·복제되기 때문에 데이터센터 내부(<2 km 수준) 구간에서 처리되는 트래픽이 매우 큰 비중을 차지한다^[6]. 이는 단거리에서 고속·고밀도로 정보를 옮기는 저전력 데이터 링크 기술이 왜 중요한지 단편적으로 보여준다.

2.1. 이더넷 표준의 변화 양상

현재 데이터 스트림은 전 세계에 분산된 데이터센터와 네트워크를 상호 연결하는 유선 링크를 통해 전달되며, 그 대부분은 이더넷(Ethernet) 기술을 기반으로 한다. 1970년대 등장한 이더넷은 전세계 어디에서나 사용되는 범용적인 네트워킹 기술이지만, AI 학습/스토리지와 같은 민감한 시스템에 사용되기에는 전송 지연이나 패킷 손실 면에서 문제가 되었다. 하지만 이더넷 위에서 원격 직접 메모리 액세스(remote direct memory access, RDMA)를 구현하는 RoCE(RDMA over converged Ethernet) 기술이 등장함에 따라 다시 이더넷 기반 저지연 패브릭이 확산되고 있는 추세이다^[8, 9]. NVIDIA의 'Spectrum X'처럼 AI 클러스터용 이더넷을 표방하는 플랫폼이 등장한 것도 이러한 흐름을 반영한다. 한편, IEEE 802.3을 기반으로 하는 이더넷 표준은 1980년대의 10 Mb/s급에서 시작해 200-GbE, 400-GbE로

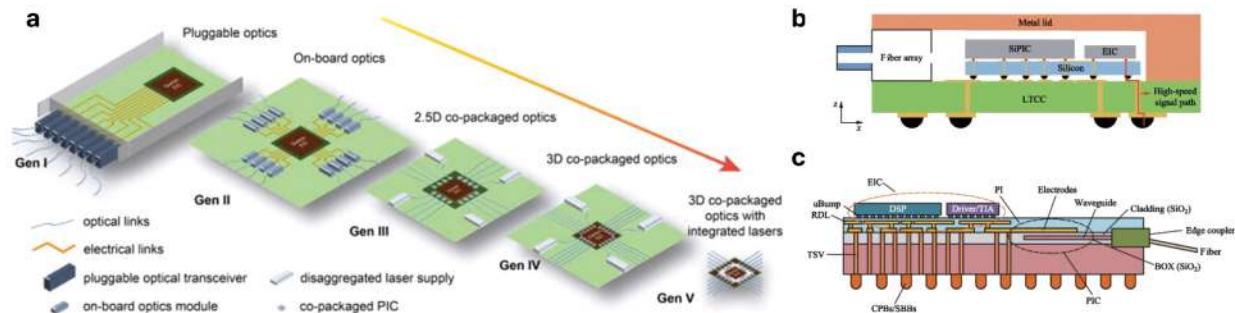
확장되었고, 800-GbE 표준(IEEE 802.3df) 역시 최근에 승인되었다. 1.6-TbE급의 후속 표준 역시 IEEE 802.3 작업 그룹에서 논의·개발이 진행 중이다.

2.2. 데이터센터와 광링크

데이터센터는 트래픽의 증가에 비례하여 늘어나는 전력 소모와 냉각 비용이 운영비로 직결되는 환경이다. 전기 배선은 전송 속도와 채널 밀도가 높아질수록 손실·왜곡·발열 부담이 커지며^[3], 데이터센터에서는 이러한 한계가 곧바로 비용 문제로 이어진다^[1, 10]. 이 때문에 랙 간·스위치 간 등 일정 거리 이상의 링크에서는 이미 광 케이블과 광 트랜시버가 널리 쓰이며, 전기 신호와 광 신호 사이의 변환이 시스템의 핵심 I/O로 자리 잡았다. 이 광 트랜시버의 핵심 광학 기능(변조·다중화·수신 등)을 집적 구현하는 플랫폼으로 실리콘 포토닉스가 부상했는데, CMOS 제조 생태계를 활용한 대량 생산 가능성, 전자 회로와의 근접 배치, 다중화 기반 용량 확장 측면에서 큰 장점을 가지고 있다. 결과적으로 실리콘 포토닉스는 기술적 견증 단계를 넘어, 비용·공정·확장성까지 포함한 관점에서 경쟁력 있는 선택지로 부상하게 되었다^[5, 11].

2.3. 패키지 경계로 들어오는 포토닉스

초고속·고밀도 통신에서 최근 중요한 흐름은 광 인터페이스를 시스템 내부로 얼마나 더 깊이 끌어들일 수 있는가라고 할 수 있다. 전통적인 플러그블 옵틱스(pluggable optics)는 레이저부터 디지털 신호 처리(digital signal



↑ [그림 2] 광 인터커넥트 배치의 진화와 공동 패키지형 광학(CPO)의 개념. (a) 스위치와 광트랜시버의 물리적 거리에 따른 구현 옵션 비교. Reprinted from N. Margalit *et al.* Appl. Phys. Lett. 2021; **118**: 22. Copyright © 2021, N. Margalit *et al.*^[1]. (b) 광 집적회로와 전자 집적회로를 하나의 패키지 내에 배치한 단면 예시. Reprinted from M. Tan *et al.*, Front. Optoelectron. 2023; **16**: 1. Copyright © 2023, M. Tan *et al.*^[2]. (c) 스위치 ASIC 근처에 광엔진과 드라이버/TIA/DSP 등을 함께 배치해 전기 채널 길이를 최소화하는 CPO 단면 개념도. Reprinted from M. Tan *et al.* Front. Optoelectron. 2023; **16**: 1. Copyright © 2023, M. Tan *et al.*^[2].

processing, DSP)까지 포함한 트랜시버 모듈을 보드 전면(front panel)에 꽂는 형태로, 전자 칩과 광학 칩이 물리적으로 분리돼 있다. 이 구조에서는 광 트랜시버와 application specific integrated circuit (ASIC) 전자 칩 사이를 전기 배선으로 연결해야 하므로 전송 용량이 커질수록 전기 구간의 손실과 전력 소모가 병목으로 작용한다^[1]. 따라서 광학 칩과 전자 칩은 점차 가까워지기 시작했으며, 최근에는 극단적으로 아예 두 칩을 결합하여 사용하는 공동 패키지형 광학(co-packaged optics, CPO) 방식을 사용하고 있다 [그림 2(a) 참조]. CPO는 ASIC 근처(혹은 같은 패키지/기판 위)에 광엔진을 배치해 전기 채널 길이를 줄이고, 대역폭 밀도와 에너지 효율을 개선하려는 접근법으로 활발히 연구·개발 및 표준화가 진행되고 있다^[7, 12]. 이는 데이터 센터 네트워크와 컴퓨팅 인터커넥트의 경계를 흐리게 하며, 광이 보드 전면의 ‘외부 포트’에만 머무르지 않고 고성능 전자 칩 패키지 경계의 핵심 I/O로 자리 잡을 가능성을 시사한다 [그림 2(b)-2(c) 참조].

III. 고속 통신을 위한 실리콘 포토닉스의 응용

통신에서 광회로를 사용하기 위해서는 고속 전기 신호를 빛으로 바꾸는 송신부(transmitter, Tx)와, 고속 광 신호를 다시 전기 신호로 바꾸는 수신부(receiver, Rx)가 함께

갖춰져야 한다. 실리콘 포토닉스는 변조기·필터·다중화기·검출기 같은 다양한 기능을 칩 위에 집적함으로써 소자 대역폭 개선, 고차 변조, 다중화라는 세 축을 동시에 활용하며 링크 용량을 확장할 수 있다.

3.1. 소자 대역폭 성능 개선

고속 이더넷 인터페이스는 일반적으로 목표 전송 속도를 달성하기 위해 여러 개의 채널을 함께 사용하는 방식으로 구현된다. 예를 들어 400-GbE를 만족하기 위해 여러 개의 50-Gb/s 또는 100-Gb/s 급의 채널을 사용하는 식이다. 다만, 향후 개발될 1.6-TbE 링크에서는 단순히 채널 수를 늘리는 것보다는 채널당 데이터 전송률을 높이는 방식이 꼭 필요하다. 이는 채널 수를 늘려 용량을 확장하는 방식은 커넥터와 케이블의 수를 증가시키고 전력 소모, 비용, 시스템 복잡도를 크게 높인다는 한계가 있기 때문이다. 따라서 단일 소자의 대역폭 성능을 개선하여 채널당 데이터 전송률을 향상시키는 접근방식의 중요성이 커지고 있다^[4, 13].

3.1.1. 변조기

광 I/O (optical input/output)에서는 빛이 정보를 운반하기 때문에, 전기 신호를 이용하여 광 신호를 변조하고 정보를 싣는 광 변조기(optical modulator)가 실리콘 포토닉스 플랫폼의 핵심 소자라고 할 수 있다. 광 변조를 위해서는 입력 전기 신호에 따라 도파관에서 전파되는 모드의 유효 굴절률(또는 흡수 계수)이 변해야 한다. 하지만 실리콘은 중심

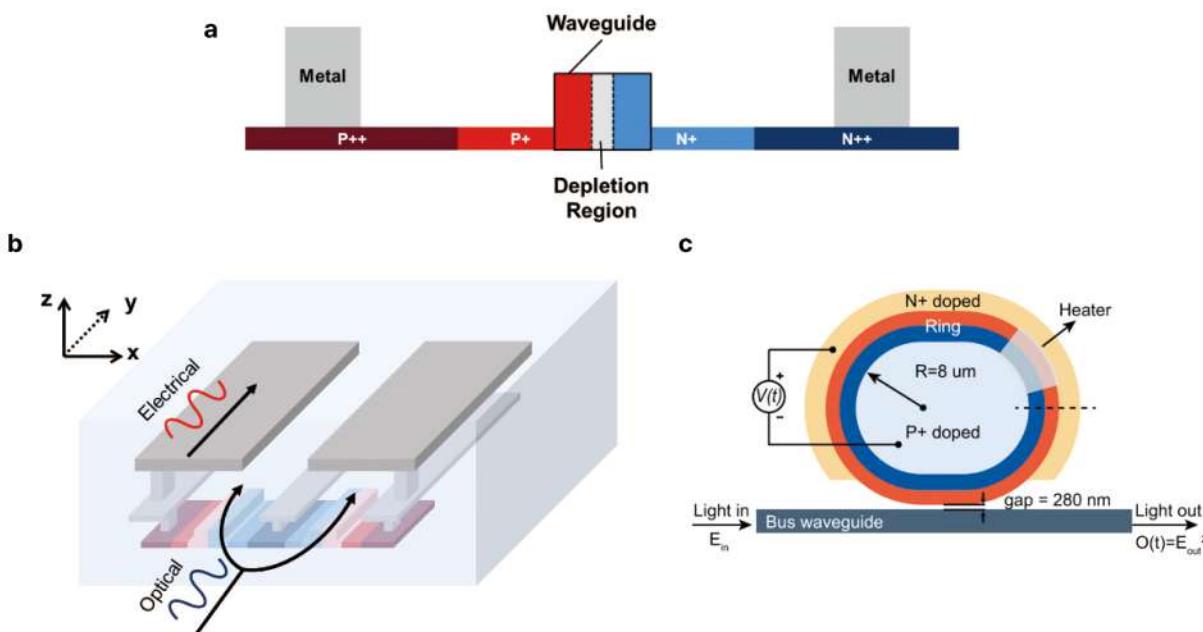
단거리 고속통신을 위한 실리콘 포토닉스 활용

대칭 결정 구조로 인해 통상적인 벌크 상태에서는 Pockels 효과(2차 비선형 전기광학 효과)를 기대하기 어렵다. 또한 실리콘 소자에서 Kerr 효과가 존재하기는 하나, 저전력 통신용 변조기에 적용하기에는 변조 효율이 제한적이며, 전기흡수형[Franz-Keldysh effect 혹은 quantum-confined stark effect (QCSE)] 변조는 주로 실리콘보다는 Ge/SiGe 또는 III-V 같은 재료를 사용할 때 강점을 보인다. 따라서 실리콘 포토닉스에서는 실리콘 도핑 구조에서 자유 캐리어 농도 변화를 이용하는 플라즈마 분산 효과(plasma dispersion effect)가 가장 널리 사용된다^[14]. 이 효과의 구현은 주로 PN 접합을 기반으로 하며, 특히 공핍(depletion) 영역을 제어하는 방식이 대표적이다. 주로 도파관 내부 광 모드 영역에 공핍층을 위치시키는 구조가 사용되며, 광학 손실이 적고 접합 축전용량도 작아 대역폭이 크기 때문에 현재 고속 광 신호 변조를 위해 가장 널리 쓰이고 있다 [그림 3(a) 참조]^[15].

이러한 원리를 사용하여 변조 과정에 가장 흔하게 사용하는 구조는 마하-젠더 간섭계(Mach-Zehnder

interferometer, MZI) 구조이다. 이는 각 경로에 PN 접합을 형성하고, 고속의 RF 전기 신호를 인가함에 따라 위상차를 조절하며, 이에 따라 발생하는 간섭 조건의 변화를 통해 출력 세기를 변조하는 방식으로서^[16-18] 광대역성과 선형성이 비교적 우수할 뿐만 아니라 단순한 구조로 인해 시스템 설계가 직관적이라는 장점이 있다. 하지만 충분한 위상차를 만들기 위해 변조기의 길이를 늘리는 방식을 이용하기 때문에 면적과 구동 전력이 문제가 될 수 있다. 또한 고속 동작을 위해 실리콘 PN 접합에서의 RC 특성 및 소자가 길어짐에 비례해 함께 길어지는 전극 구조에서의 전송선 효과를 고려해야 하며, 보통 전송선 효과에 의해 변조 효율과 대역폭이 트레이드-오프 관계를 나타낸다 [그림 3(b) 참조].

다음으로 마이크로-링 공진기(micro-ring resonator, MRR) 구조 역시 많이 사용된다. 이는 PN 접합 링 구조의 도파관을 전파하는 빛의 위상을 변조시키고, 이에 따른 공진 조건의 변화를 이용해 출력 세기를 조절하는 방식이다^[19-21]. 초소형 구조 및 저전력 고속 구동이 가능하다는 이점 때문에



↑ [그림 3] 공핍형 PN 접합 기반 실리콘 변조기 구조와 구현 예시. (a) 실리콘 광 도파관을 가로지르는 측면(lateral) PN 접합 형상과 도핑 농도 분포, 공핍(depletion) 영역의 개념. (b) 전기 신호가 전파되면서 광학 신호를 변조시키는 travelling wave 기반 MZI 변조기의 3차원 개념도. (c) 링 공진기 기반 변조기의 개념도. Adapted from F. Hu et al. Commun. Eng. 2023; 2; 67. Copyright © 2023, F. Hu et al. [21].

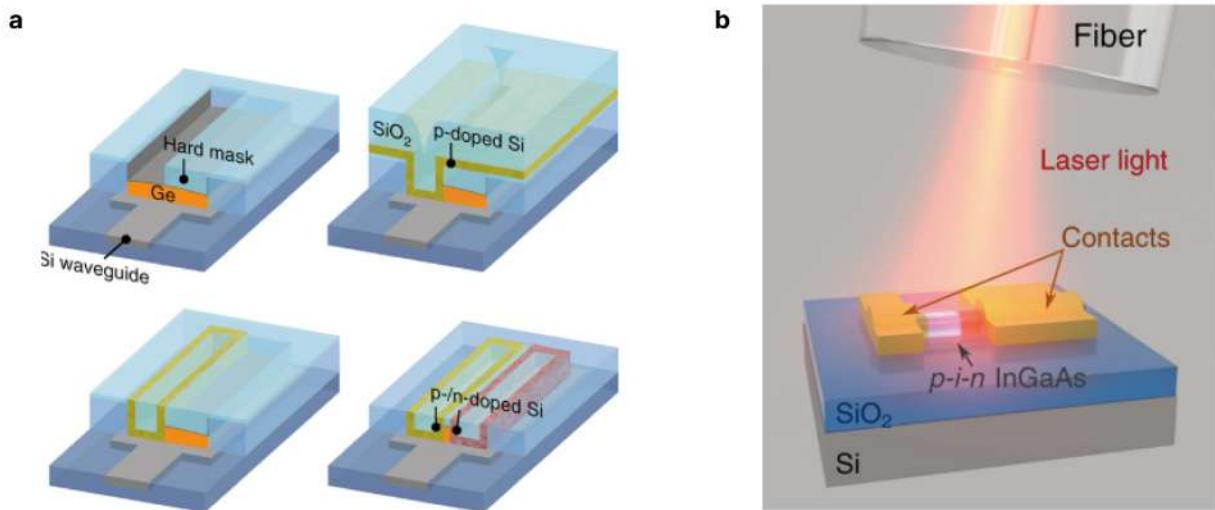
다수의 채널을 동시에 이용하는 파장 다중화 시스템에서 매력적이지만^[22, 23], 공진기의 특성상 온도와 공정 편차에 민감하여 온도 제어 및 안정화 유지를 위해 추가적인 전력 소모가 필요하다는 문제점도 있다^[24]. 또 고속 동작을 위해 MZI 구조와 마찬가지로 PN 접합에서의 RC 특성을 고려해야 하지만, 소자 길이 및 크기가 작기 때문에 전송선 효과는 고려할 필요가 없다. 하지만 링 안에서 광자가 머무는 시간이 대역폭에 영향을 주기 때문에 적절한 Q-인자 값을 가지도록 설계할 필요가 있다 [그림 3(c) 참조].

3.1.2. 광 검출기

고속의 광 신호를 전기 신호로 변환시키는 광 검출기 소자의 대역폭을 결정하는 두 가지 주요 요인은 반송파의 전송 시간과 RC 특성이다. 반송파의 전송 시간은 캐리어 이동 경로를 짧게 만들거나, 반송파의 이동도(mobility) 및 전기장의 세기를 키울수록 줄어들어 고속 동작에 유리해진다. 또 한 RC 특성은 보통 흡수 물질의 크기 및 유전 상수의 영향을 받는다. 단, 흡수 영역의 크기에 따라 반송파의 전송 시간과 RC 특성에 의한 대역폭 성능이 서로 트레이드-오프 관계를 가지기 때문에 이를 적절하게 조정할 필요가 있다^[13].

실리콘은 약 1.1 μm 이상의 파장은 흡수하지 못하므로, 근적외선 통신 파장대 검출용으로는 실리콘보다 밴드갭이 더 작은 게르마늄(Ge)을 흡수층으로 사용하는 방식이 표준적이다. Ge 기반 검출기는 빠른 속도로 동작하며, 최근에는 100 GHz를 넘는 대역폭의 달성이 보고되고 있고, 연구실 수준에서는 200 GHz대를 넘어서는 실험 결과도 있다[그림 4(a) 참조]^[25]. 다만 밴드갭이 작은 재료의 특성상 암전류, 잡음 및 열 특성에서 불리할 수 있고, 파장이 길어질수록 흡수 계수가 낮아져 동일 구조에서 효율 확보가 까다로워지는 문제가 있다.

또한 최근에는 더 나은 반도체 특성을 가진 III-V족 화합물 반도체 물질을 이용 집적하여 광 검출기로 활용하려는 시도 역시 활발하다 [그림 4(b) 참조]^[26]. 단, Ge나 III-V 물질을 사용하는 경우 이를 실리콘 칩에 효과적으로 집적할 수 있는 기술이 반드시 필요하기 때문에 이를 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 별도의 반도체 물질을 추가로 사용하지 않고 실리콘만을 활용하는 방법도 있는데, 서브 밴드갭 흡수를 기반으로 밴드갭 한계를 극복하고 통신 파장 대역에서의 광 검출을 구현하는 방식이다. 다만 앞서 소개한 방식들과 비교했을 때 검출 효율이 상대적으로 부족하기 때문에 이를 개선하는 방향으로 다양한 연구가 진행되고 있다^[27].



↑ [그림 4] 통신 파장대에서의 고속 광검출기 구현 사례. (a) 실리콘 포토닉스 칩에 Ge 흡수층을 집적하는 광검출기 제작/구조 개념도. Adapted from S. Lischke *et al.* Nat. Photonics 2021; **15**; 925–931. Copyright © 2021, S. Lischke *et al.* [25]. (b) III-V 재료(InGaAs) p-i-n 광검출기를 실리콘 위에 이종 집적하여 광 검출을 구현하는 개념도. Adapted from S. Mauthe *et al.* Nat. Commun. 2020; **11**; 4565. Copyright © 2020, S. Mauthe *et al.* [26].

단거리 고속통신을 위한 실리콘 포토닉스 활용

3.2. 고차 변조와 다중화 방식

지금까지 광소자의 대역폭 성능을 높여 통신 속도를 높이는 접근 방식에 대하여 설명했다면, 지금부터는 대역폭이 제한된 광 송수신기를 사용하더라도 전송 용량을 높일 수 있는 방식인 고차 변조 및 다중화에 대한 내용을 설명하고자 한다. 특히 데이터 센터 내부 네트워크에서는 광 송수신기의 대역폭 제한으로 인한 신호의 전송 속도 한계를 극복하는 방안이 절실히 필요한데, 고차 변조 기법에 더해 여러 다중화 방식을 사용하면 단일 광섬유로 전송되는 채널의 개수를 증가시킴으로써 전송하는 신호의 총 정보량을 늘리는 것이 가능하다.

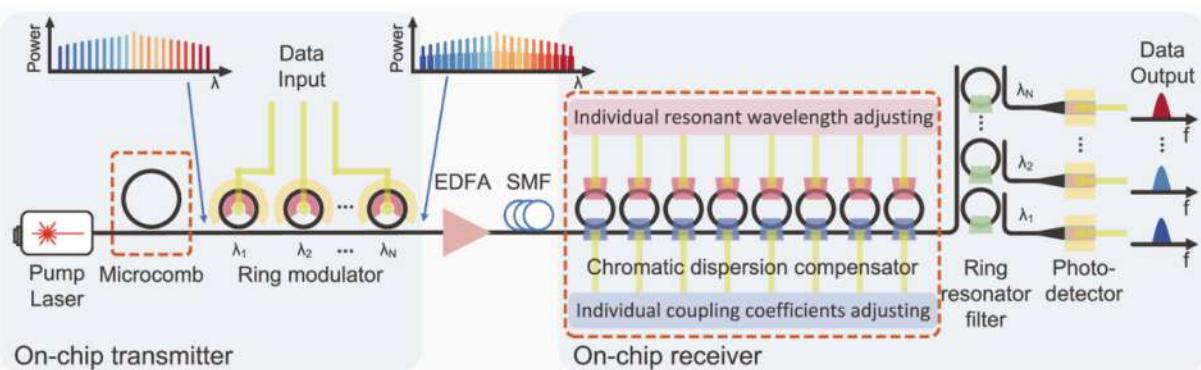
3.2.1. 고차 변조 방식

진폭 변조에서는 대표적으로 펄스 진폭 변조(pulse amplitude modulation, PAM) 방식을 활용한다. 이는 기존의 온-오프 변조(on-off keying, OOK) 방식에서 벗어나 광 신호의 세기를 2개에서 N 개의 레벨로 확장하여 세기 변조하는 방식으로서 변조 레벨을 증가시킴에 따라 심볼률이 동일할 때 전송 비트율을 $\log_2 N$ 배만큼 증가시킬 수 있는 기법이다. 레벨이 높아질수록 광 변조기에서 높은 소광비(extinction ratio, ER)가 필요하고, 색분산에 의한 신호의 파형 왜곡을 보상하기 위한 전기 등화기가 강제되는 등의 단점이 있지만, 데이터 센터 내부와 같은 단거리 전송에서는 큰 문제가 되지 않아 흔히 사용되는 기법이다.

3.2.2. 파장 분할 다중화

파장 분할 다중화(wavelength-division multiplexing, WDM)는 서로 다른 파장의 광 신호들을 각각 변조하고 합친 뒤, 단일 광섬유로 한꺼번에 전송하는 방식이다. 이론적으로는 수십에서 수백 개의 파장 채널까지도 동시에 전송할 수 있지만, 단일 채널에서의 변조 속도가 높아질수록 채널 간에 필요한 파장 간격이 커지기 때문에 결국 늘릴 수 있는 채널의 최대수량에는 제약이 있다. 현재 상용화된 제품에서는 일반적으로 4~8개의 채널을 사용한다.

일반적인 WDM 시스템은 파장 선택적이고 고속 변조가 가능한 마이크로-링 변조기(micro-ring modulator, MRM)를 직렬로 여려 개 연결한 구조로 구성된다^[22]. 이 구조에서는 운용 파장 대역 안에서 불필요하게 공진 현상이나 타나 채널 혼선이 생기지 않도록, 자유 스펙트럼 영역(free spectral range, FSR)이 WDM 운용 대역보다 충분히 크게끔 설계하는 것이 중요하다. 이를 위해 링의 반경을 줄여 FSR을 충분히 증가시키는 방식이 사용되지만, 이 방식은 변조 효율 · 손실 · 공정 민감도와의 트레이드-오프를 함께 고려해야만 한다. 또한 파장이 서로 다른 여러 개의 단일 레이저를 사용하는 기존 WDM 시스템의 복잡도를 줄이고자 단일 광원에서 링 공진기를 거칠 때 발생하는 비선형적 현상을 이용하여 여러 파장의 광 신호원을 형성하는 광학 콤(optical comb)을 WDM 시스템의 광원으로 사용하는 연구 역시 활발하다 (그림 5 참조)^[28, 29].



↑ [그림 5] 마이크로콤 기반의 WDM 송수신 시스템 개념도. Adapted from Y. Liu et al. Nat. Commun. 2024; 15: 3645. Copyright © 2024, Y. Liu et al. [28].

3.2.3. 광학 시분할 다중화

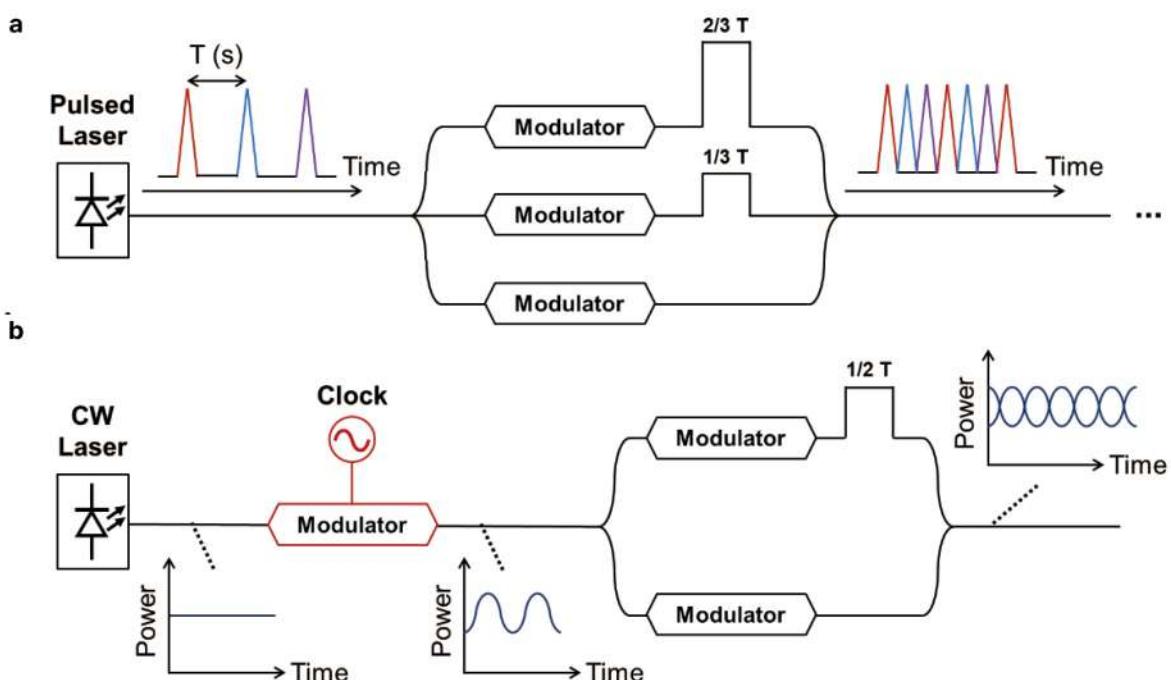
광학 시분할 다중화(optical time-division multiplexing, OTDM)는 시간 영역을 활용하여 단일 파장에서 데이터 전송률을 증가시키는 기술이다^[30]. 먼저 주기적인 짧은 광 펄스열을 여러 경로로 분기한 뒤, 각 경로에 독립적인 데이터를 변조하고, 펄스 주기의 일부에 해당하는 시간 만큼 지연시킨다. 이렇게 시간적으로 이동된 서브채널들을 다시 결합하면, 원래 채널 속도의 N 배에 해당하는 전송율을 달성할 수 있다. 그림 6(a)는 OTDM의 개념도로서 7만큼의 주기를 가진 펄스들이 서로 다른 지연을 거친 후 시간 영역에서 합쳐지는 과정을 나타낸다.

다만 전통적인 OTDM 시스템은 매우 짧은 펄스를 생성할 수 있는 모드 잠금 레이저(mode-locked laser, MLL)에 의존하는 경우가 많다^[31]. 이는 복잡한 펄스 광원과 정밀한 지연 제어가 필요하고, 레이저의 안정성과 타이밍 지터(timing jitter)가 전체 시스템 성능을 제한한다는 문제점을 야기한다. 따라서 최근에는 그림 6(b)처럼 복잡한 레이저 없이 정현파(sinusoidal)로 변조된 광 신호만을 이용하여 단순하게

OTDM 방식을 구현하는 방식이 제안되기도 하였다^[32, 33]. 이 개념을 이용하여 상용 변조기로 생성한 정현파 광 신호를 광 집적회로에 인가하고, 반 주기($T/2$) 지연을 통해 생성된 2채널 OTDM 기법으로 파장당 300-Gb/s 이상의 초고속 광신호 전송에 성공한 연구결과가 소개된 바 있다^[34].

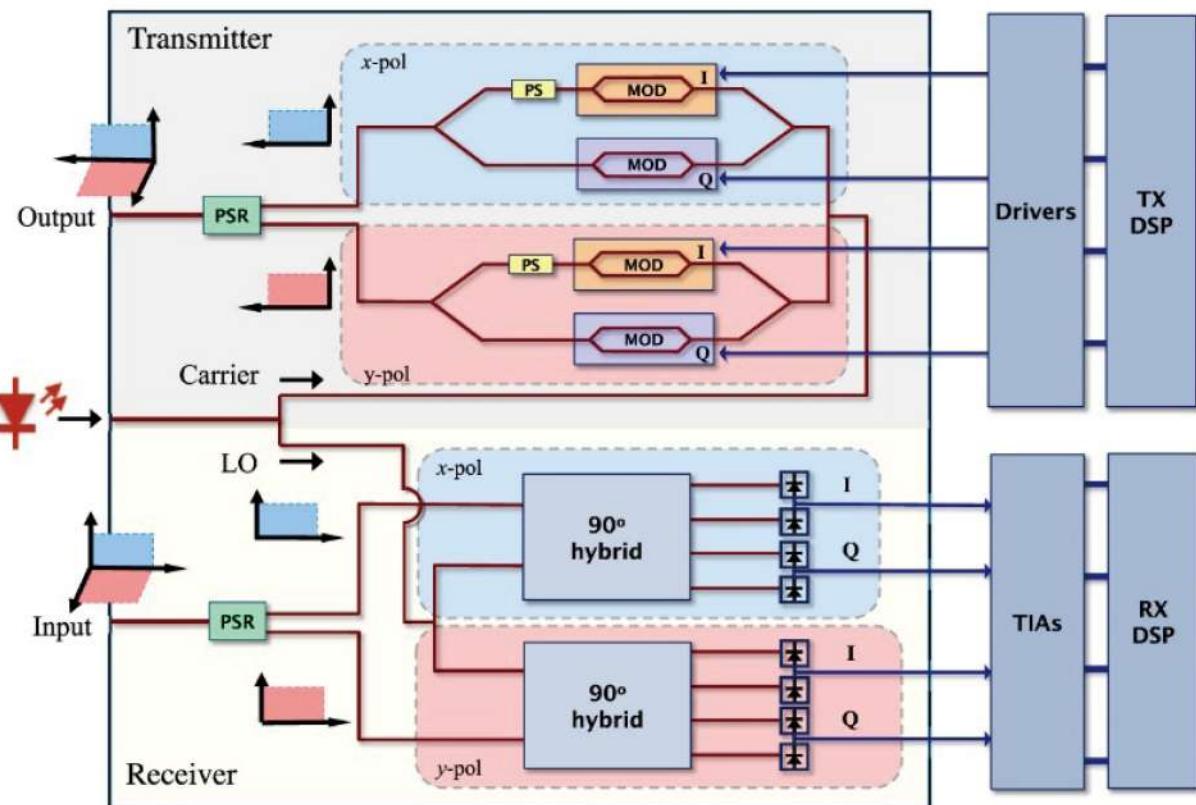
3.3. 코히어런트 방식

현재 데이터센터 내부의 단거리 구간의 광신호 변복조 방식으로는 주로 세기변조-직접검출(intensity modulation-direct detection, IM-DD) 방식이 사용된다. 전기 신호로 빛의 세기를 변조하고, 수신단에서 광 신호의 세기만 직접 검출하는 방식이기 때문에 시스템 구성이 단순하고 비용·전력 측면에서도 유리하기 때문이다. 하지만 전송 용량이 증가함에 따라 이보다 고대역폭의 상위 기술을 차용하고자 하는 시도가 늘어나고 있는데, 주로 장거리 통신에서 사용되었던 코히어런트(coherent) 방식이 대표적이라고 할 수 있다.



↑ [그림 6] 광학 시분할 다중화(OTDM) 개념 비교. (a) 짧은 펄스열을 여러 경로로 분기한 뒤 각 경로에서 독립적으로 변조하고, 서로 다른 시간 지연을 부여해 결합함으로써 전송률을 높이는 전통적 OTDM 구조. (b) 연속파(continuous wave, CW) 레이저와 클럭 구동 정현파 변조를 이용해 펄스 광원 없이 구현하는 단순화된 2채널 OTDM 구조.

단거리 고속통신을 위한 실리콘 포토닉스 활용



↑ [그림 7] 실리콘 포토닉스 기반 코히어런트(coherent) 송수신기 구성. 편광 분할 다중화(PDM) I/Q 변조 송신기와 90° 광 하이브리드 기반 코히어런트 수신기, 드라이버·TIA·송수신 DSP가 결합된 트랜시버의 모식도. Reprinted from W. Shi et al. Nanophotonics 2020; 9: 4629–4663. Copyright 2020, W. Shi et al. [36].

코히어런트 방식은 빛의 세기뿐만 아니라 위상과 편광 등의 정보를 추가로 활용해 변조 효율을 높이는 기술이다. 다만 코히어런트 방식의 수신기는 위상과 편광 성분의 수신을 위해 로컬 오실레이터(oscillator), 편광 빔 분리기, 광 커플러, 90도 하이브리드 커플러와 함께 여러 개의 고속 광 검출기로 구성된 매우 복잡한 구조이다 [그림 7 참조]^[35, 36]. 또 광섬유의 비틀림, 온도 변화 등에 의해 수신 광의 편광 상태가 끊임없이 바뀌기 때문에 편광 분할 다중화된 신호를 역다중화하기 위해 편광 회전을 추적하는 고속의 전기적 신호처리가 추가로 필요한 등, 수신기 제작이 까다롭고 비싸다는 단점이 있다^[37]. 따라서 비용에 민감한 단거리 시스템에서는 코히어런트 방식을 활용하기 어려웠지만, 실리콘 포토닉스 기반의 집적화가 진전되면서 복소 변조기, 90도 하이브리드 커플러 등 코히어런트 시스템의 구성 요소들을 통합 집적화하는 시도가 점차 늘어나고 있다^[38].

이는 데이터센터가 점차 더 높은 전송 속도를 지향하려는 경향에 의해 단거리에서도 신호의 열화·전력·포트 밀도 등의 문제가 발생하고, 이에 따라 IM-DD 방식에서도 수신·DSP 조합을 검토하고 있는 현재의 상황을 반영한 것으로 볼 수 있다. 다만 이러한 실리콘 포토닉스의 통신 응용에서 IM-DD와 코히어런트는 단순히 경쟁하는 구도가 아니라, 요구 성능·거리·전력 예산에 따라 사용 가능한 선택지의 범위가 확장되는 구조로 이해하는 편이 더 적절하다.

IV. 맺음말

실리콘 포토닉스는 CMOS 생태계를 기반으로 광 신호의 초고속 변조, 다중화, 검출이 가능한 광집적회로의 설계, 제작, 측정 부문에서 경제성과 반복성을 확보하였다. 이더넷 표준 속도의 상승과 함께 플러그블 옵틱스의 전기 구간이 새로운 병목이 되자, 광엔진을 전자 회로에 근접 배치하는 CPO와 같은 패키징 진화에 따라 결국 어디까지를 전기로, 어디까지를 광으로 분류할지 그 경계가 재정의되고 있는 상황이다. 따라서 앞으로 주목하여야 할 지점은 실리콘 포토닉스의 발전이 단일 포토닉스 소자로서의 쓰임새를 넘어 광-전자 회로 및 이종 집적 패키지에서의 전체적인 최적화를 달성하는 수준에 이르는지 여부이다. 광원이 어디에 위치하여야 하는지, 채널 속도 표준 및 공정 수준이 어떠한 수준에서 구축될지, 시장의 형성 속도가 기술의 발전을 얼마나 빠르게 따라올 수 있을지 등의 다양한 이슈가 단거리 광통신의 다음 단계를 결정할 것으로 기대된다.

REFERENCES

- 1 N. Margalit, C. Xiang, S.M. Bowers, A. Bjorlin, R. Blum, and J. E. Bowers, "Perspective on the future of silicon photonics and electronics," *Appl. Phys. Lett.* **118**, 220501 (2021).
- 2 D. A. B. Miller, "Device requirements for optical interconnects to silicon chips," *Proc. IEEE* **97**, 1166–1185 (2009).
- 3 D. A. B. Miller, "Optical interconnects to electronic chips," *Appl. Opt.* **49**, F59–F70 (2010).
- 4 D. Thomson, A. Zilkie, J. E. Bowers, T. Komljenovic, G. T. Reed, L. Vivien, D. Marris-Morini, E. Cassan, L. Virot, J.-M. Fédeli, J.-M. Hartmann, J. H. Schmid, D.-X. Xu, F. Boeuf, P. O'Brien, G. Z. Mashanovich, and M. Nedeljkovic, "Roadmap on silicon photonics," *J. Opt.* **18**, 073003 (2016).
- 5 T. Pinguet, S. Denton, S. Gloeckner, M. Mack, G. Masini, A. Mekis, S. Pang, M. Peterson, S. Sahni, and P. De Dobbelaere, "High-volume manufacturing platform for silicon photonics," *Proc. IEEE* **106**, 2281–2290 (2018).
- 6 S. Chen, Z. Liu, C. Zhao, M. Zhang, P. Li, L. Zhang, J. Luo, Z. Hu, C. Chen, X. Hua, X. Liao, Z. Zhao, and M. Tang, "Coherent optical interconnects using Fermat number transform and hollow core fibre," *Commun. Eng.* **4**, 169 (2025).
- 7 M. Tan *et al.*, "Co-packaged optics (CPO): Status, challenges, and solutions," *Front. Optoelectron.* **16**, 1 (2023).
- 8 C. Guo, C. Guo, H. Wu, Z. Deng, G. Soni, J. Ye, J. Padhye, and M. Lipshteyn, "RDMA over commodity ethernet at scale," in *Proc. 2016 ACM SIGCOMM Conference* (Florianópolis, Brazil, Aug. 22–26, 2016), pp. 202–215.
- 9 Y. Zhu, H. Eran, D. Firestone, C. Guo, M. Lipshteyn, Y. Liron, J. Padhye, S. Raindel, M. H. Yahia, and M. Zhang, "Congestion control for large-scale RDMA deployments," in *Proc. 2015 ACM SIGCOMM Conference* (London, United Kingdom, Aug. 17–21, 2015), pp. 523–536.
- 10 E. Masanet, A. Shehabi, N. Lei, S. Smith, and J. Koomey, "Recalibrating global data center energy-use estimates," *Science* **367**, 984–986 (2020).
- 11 H. Wang, H. Chai, Z. Lv, Z. Zhang, L. Meng, X. Yang, and T. Yang, "Silicon photonic transceivers for application in data centers," *J. Semicond.* **41**, 101301 (2020).

단거리 고속통신을 위한 실리콘 포토닉스 활용

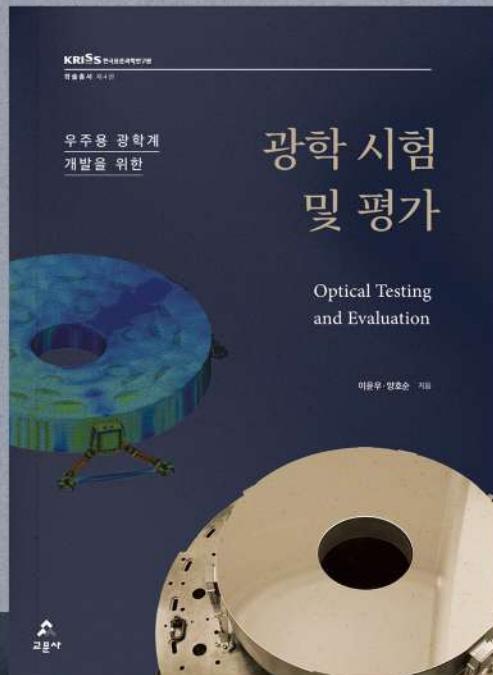
- 12 C. Minkenberg, R. Krishnaswamy, A. Zilkie, and D. Nelson, "Co-packaged datacenter optics: Opportunities and challenges," *IET Optoelectron.* **15**, 77–91 (2021).
- 13 S. Shekhar, W. Bogaerts, L. Chrostowski, J. E. Bowers, M. Hochberg, R. Soref, and B. J. Shastri, "Roadmapping the next generation of silicon photonics," *Nat. Commun.* **15**, 751 (2024).
- 14 R. Soref and B. Bennett, "Electrooptical effects in silicon," *IEEE J. Quantum Electron.* **23**, 123–129 (1987).
- 15 A. Liu, L. Liao, D. Rubin, H. Nguyen, B. Ciftcioglu, Y. Chetrit, N. Izhaky, and M. Paniccia, "High-speed optical modulation based on carrier depletion in a silicon waveguide," *Opt. Express* **15**, 660–668 (2007).
- 16 Y. Yang, Q. Fang, M. Yu, X. Tu, R. Rusli, and G.-Q. Lo, "High-efficiency Si optical modulator using Cu traveling-wave electrode," *Opt. Express* **22**, 29978–29985 (2014).
- 17 M. Li, L. Wang, X. Li, X. Xiao, and S. Yu, "Silicon intensity Mach-Zehnder modulator for single lane 100 Gb/s applications," *Photon. Res.* **6**, 109–116 (2018).
- 18 Z. Yu, D. Tu, H. Guan, L. Tian, L. Jiang, and Z. Li, "Design of silicon traveling-wave Mach-Zehnder modulators with transparent electrodes," *Opt. Express* **33**, 1237–1248 (2025).
- 19 Q. Xu, B. Schmidt, S. Pradhan, and M. Lipson, "Micrometre-scale silicon electro-optic modulator," *Nature* **435**, 325–327 (2005).
- 20 P. Dong, S. Liao, D. Feng, H. Liang, D. Zheng, R. Shafiiha, C.-C. Kung, W. Qian, G. Li, X. Zheng, A. V. Krishnamoorthy, and M. Asghari, "Low V_{pp} , ultralow-energy, compact, high-speed silicon electro-optic modulator," *Opt. Express* **17**, 22484–22490 (2009).
- 21 F. Hu, Y. Zhang, H. Zhang, Z. Li, S. Xing, J. Shi, J. Zhang, X. Xiao, N. Chi, Z. He, and S. Yu, "300-Gbps optical interconnection using neural-network based silicon microring modulator," *Commun. Eng.* **2**, 67 (2023).
- 22 Q. Xu, B. Schmidt, J. Shakya, and M. Lipson, "Cascaded silicon micro-ring modulators for WDM optical interconnection," *Opt. Express* **14**, 9431–9436 (2006).
- 23 Y. Yuan, Y. Peng, W. V. Sorin, S. Cheung, Z. Huang, D. Liang, M. Fiorentino, and R. G. Beausoleil, "A 5×200 Gbps microring modulator silicon chip empowered by two-segment Z-shape junctions," *Nat. Commun.* **15**, 918 (2024).
- 24 G. T. Reed, G. Mashanovich, F. Y. Gardes, and D. J. Thomson, "Silicon optical modulators," *Nat. Photonics* **4**, 518–526 (2010).
- 25 S. Lischke, A. Peczek, J. S. Morgan, K. Sun, D. Steckler, Y. Yamamoto, F. Korndörfer, C. Mai, S. Marschmeyer, M. Fraschke, A. Krüger, A. Beling, and L. Zimmermann, "Ultra-fast germanium photodiode with 3-dB bandwidth of 265 GHz," *Nat. Photonics* **15**, 925–931 (2021).
- 26 S. Mauthe, Y. Baumgartner, M. Sousa, Q. Ding, M. D. Rossell, A. Schenk, L. Czornomaz, and K. E. Moselund, "High-speed III-V nanowire photodetector monolithically integrated on Si," *Nat. Commun.* **11**, 4565 (2020).
- 27 Y. Yuan, W. V. Sorin, D. Liang, S. Cheung, Y. Peng, M. Jain, Z. Huang, M. Fiorentino, and R. G. Beausoleil, "Mechanisms of enhanced sub-bandgap absorption in high-speed all-silicon avalanche photodiodes," *Photon. Res.* **11**, 337–346 (2023).
- 28 Y. Liu, H. Zhang, J. Liu, L. Lu, J. Du, Y. Li, Z. He, J. Chen, L. Zhou, and A. W. Poon, "Parallel wavelength-division-multiplexed signal transmission and dispersion compensation enabled by soliton microcombs and microrings," *Nat. Commun.* **15**, 3645 (2024).
- 29 B. Corcoran, A. Mitchell, R. Morandotti, L. K. Oxenløwe, and D. J. Moss, "Optical microcombs for ultrahigh-bandwidth communications," *Nat. Photonics* **19**, 451–462 (2025).
- 30 D. M. Spirit, A. D. Ellis, and P. E. Barnsley, "Optical time division multiplexing: Systems and networks," *IEEE Commun. Mag.* **32**, 56–62 (1994).
- 31 S. A. Hamilton, B. S. Robinson, T. E. Murphy, S. J. Savage, and E. P. Ippen, "100 Gb/s optical time-division multiplexed networks," *J. Lightwave Technol.* **20**, 2086 (2002).
- 32 S. A. Bae, J. Park, S. Han, B. G. Kim, M. Kim, and K. Yu, "A cost-effective 2-channel OTDM system implemented with sinusoidally modulated light source," *IEEE Access* **8**, 157504–157509 (2020).

- 33 M. S. Kim, B. G. Kim, and Y. C. Chung, "300-Gb/s transmission using OTDM system implemented with sinusoidally modulated input light source," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **34**, 745–748 (2022).
- 34 J. Park, S. Han, Y. C. Chung, and K. Yu, "300-Gb/s/ λ IM/DD transmission using integrated SiP OTDM transmitter," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **35**, 529–532 (2023).
- 35 C. Doerr and L. Chen, "Silicon photonics in optical coherent systems," *Proc. IEEE* **106**, 2291–2301 (2018).
- 36 W. Shi, Y. Tian, and A. Gervais, "Scaling capacity of fiber-optic transmission systems via silicon photonics," *Nanophotonics* **9**, 4629–4663 (2020).
- 37 I. B. Kovacs, Md. S. Faruk, and S. J. Savory, "200 Gb/s/ λ upstream PON using polarization multiplexed PAM4 with coherent detection," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **35**, 1014–1017 (2023).
- 38 H. Guan, Y. Ma, R. Shi, X. Zhu, R. Younce, Y. Chen, J. Roman, N. Ophir, Y. Liu, R. Ding, T. Baehr-Jones, K. Bergman, and M. Hochberg, "Compact and low loss 90° optical hybrid on a silicon-on-insulator platform," *Opt. Express* **25**, 28957–28968 (2017).

도서
발간

우주용 광학계 개발을 위한 『광학 시험 및 평가』

한국표준과학연구원의 초정밀 광기술과 연구 경험



결상 광학계는 현대 과학 기술의 핵심 역할을 담당하며, 단순 이미지 형성을 넘어 우주와 미시 세계를 탐구하기 위한 중요한 도구입니다. 전통적인 카메라, 망원경, 현미경은 물론, 고해상도 위성 카메라, 초대형 천체 망원경, 우주망원경, 스마트폰 카메라 등 정밀 광학계는 이미 과학과 산업 전반을 이끄는 숨은 동력으로 자리매김하였습니다. 그 중에서도 최근 빠르게 발전하고 있는 결상 광학계는 특히 비구면 및 자 유곡면 설계, 수차 보정, 자동 정렬 기술, 우주 환경에 대응하기 위한 경량화 및 열 안정화 기술 등이 주요한 기술 동향으로 자리 잡았습니다. 이 책은 이러한 최신 기술을 반영하여 실무 적용이 가능하도록 구성되었습니다. 측정 기반의 수차 보정, 자동 정렬 기술, 그리고 우주 환경에 적합한 경량화 및 열 안정화 기술 등이 포함되어 있어 미래의 광학계 개발에 중요한 방향성을 제시하고자 합니다.

한국표준과학연구원 학술총서

한국표준과학연구원은 국가의 표준과 과학 기술 발전을 지원하기 위해 다양한 분야에서 연구를 진행하고 있으며, 그 성과를 학술총서 형태로 발간하고 있습니다. 제4권 『광학 시험 및 평가』는 그중 하나로, 측정표준과 과학에 대한 깊이 있는 정보를 다루고 있습니다. 이와 함께 제1권 『시간 눈금과 원자시계』, 제2권 『재료 열역학』, 제3권 『기본상수와 단위계』는 각각 시간 측정, 재료의 열역학적 성질, 그리고 기본 물리 상수와 단위 체계에 관한 심화 내용을 제공합니다.

광기술의 발전은 특히 초정밀 광학 부품과 광학계 개발, 측정 기술의 고도화를 통해 이루어졌으며, 이는 한국표준과학연구원(KRISS)에서 40여 년간 연구하고 있는 주제입니다. KRISS는 그동안 수행하였던 초정밀 렌즈와 거울의 개발, 고해상도 위성 카메라의 정렬 및 성능평가를 포함한 수많은 연구개발 과제를 바탕으로 축적된 실무 경험과 기술적 통찰을 『광학 시험 및 평가』라는 책으로 정리하였습니다. 이 책은 연구실과 산업 현장 간의 기술적 간극을 메우고, 실무자와 연구자들에게 초정밀 광기술의 실질적 기준점을 제시하는 것을 목표로 합니다. 특히 고해상도 AI 영상 시스템, 고집적 반도체 제조 공정, 국방 및 우주 산업의 발전을 위한 전략적 기반을 마련하는 데 중요한 역할을 하리라 기대하고 있습니다.

책의 구성과 주요 내용

『광학 시험 및 평가』는 광학계 설계에서부터 파면 및 형상 측정, 광전달 함수(MTF)를 이용한 성능평가, 우주용 광학계의 개발절차까지 초정밀 광기술의 모든 단계를 포괄적으로 다루고 있습니다. 총 여섯 장으로 구성되어 있으며, 각 장에서는 초정밀 광학계 설계, 가공, 측정, 평가의 전 과정을 체계적이고 실용적으로 설명합니다. 각 장의 주요 내용은 다음과 같습니다.

1장. 빛의 성질과 파면 개념, 광학 수차, 회절 한계 등 결상 광학의 기초 이론

이 장에서는 광학계 설계를 위한 기초적인 이론을 다룹니다. 빛의 성질, 파면의 개념, 그리고 광학 수차와 회절 한계 등 기초적인 광학 원리를 설명하며, 초정밀 광학계 설계의 기초를 다집니다.

2장. 광학 소재의 특성, 가공 기술, 정렬 및 광학 공차 등 기초 제작 기술

초정밀 광학 부품을 제작하기 위한 기술적 기초를 설명합니다. 광학 소재의 특성, 렌즈와 거울의 가공 기술, 정밀한 정렬 및 광학 공차의 중요성을 다루며, 실제 제작 과정에서 발생할 수 있는 문제들을 해결하는 방법을 제시합니다.

3장. 레이저 간섭계 및 위상이동 간섭법을 활용한 초정밀 파면 측정 기술

광학계의 정밀도를 측정하기 위한 초정밀 파면 측정 기술을 설명합니다. 레이저 간섭계와 위상이동 간섭법을 이용한 파면 측정 기술을 통해 광학계의 정확한 측정 방법을 제시합니다.

4장. CGH 널 렌즈와 바느질 간섭

비구면 형상 측정을 위한 고급 기술을 다룹니다. 컴퓨터 재생 홀로그램(CGH) 널 렌즈와 바느질 간섭계를 이용하여 비구면 형상의 초정밀 측정을 수행하는 방법을 설명합니다.

5장. 광학계 성능평가를 위한 광전달함수 이론과 측정 방법

광학계의 결상 이론과 성능평가의 핵심인 광전달함수(MTF)에 대한 이론과 측정 방법을 설명합니다. 다양한 광학계의 성능을 정량적으로 평가하는 방법들을 자세히 다룹니다.

6장. 우주용 광학계의 설계, 제작, 측정, 환경시험을 아우르는 전체 개발 절차

우주용 광학계의 개발 절차를 상세하게 설명합니다. 설계부터 제작, 측정, 그리고 환경시험까지, 우주 환경에 적합한 광학계를 개발하는 전체 프로세스를 다룹니다.

저자 소개

이윤우 박사와 양호순 박사는 오랫동안의 연구 경험을 바탕으로 KRISS에서 초정밀 우주용 광학계 개발을 이끌어온 전문가들입니다.

이윤우 박사는 KAIST에서 석사와 박사 학위를 취득하고, KRISS에서 40년간 초정밀 광학 부품 및 광학계 개발과 측정표준을 확립하였습니다. 또한 2021년 제29대 한국광학회 회장을 맡은 바 있습니다.

양호순 박사는 KAIST에서 석사 학위, 영국 University College London에서 박사 학위를 취득하고, KRISS에서 22년간 우주용 대형 거울 가공 및 측정 업무를 담당하였습니다. 현재는 SiC 소재를 이용한 우주용 거울 개발 등의 연구를 주도하고 있습니다. 2019년, 2020년에 걸쳐 한국광학회 광기술 분과의 분과위원장을 역임하였습니다.

연구자 창업 소개

한국의학레이저임상시험원(주)

비임상 동물실험을 ‘의사결정의 언어’로 만드는 여정

WRITER_ 한국의학레이저임상시험원(주) 대표이사 안진철



I. 기업 소개

1.1. 시작은 ‘검증이 멈추는 순간’을 자주 본 것에서부터

의과대학 의예과의 교수로서 한국의학레이저임상시험원(주)을 창업한 건 거창한 구호 때문이 아니었다. 현장에서 반복되는 한 장면이 늘 마음에 걸렸기 때문이었다. 의료기기나 신약을 개발하는 국내 유망한 기업들이 어렵게 시제품을 만들고도, “이게 정말 효과가 있는지”를 확인할 비임상 단계에서 멈춰 서는 순간을 자주 보았다. 아이디어가 부족해서가 아니라, 검증을 하는 데에 필요한 인프라와 시간, 그리고 비용이 동시에 발목을 잡는 경우가 많았던 것이다.

그때마다 비슷한 질문이 남았다. “확인만 하면 다음 단계로 갈 수 있을 텐데, 왜 여기서 멈출까?” 단국대학교 천안캠퍼스 내 의학레이저연구센터에서 연구를 하며 축적해온 실험 경험과 네트워크를 돌아보면, 내가 할 수 있는 일이 분명히 보였다. 누군가에겐 너무 멀리 있는 비임상 인프라를, 개발 현장 가까이 끌고 오는 일. 그렇게 2021년 3월 31일, 한국의학레이저임상시험원(주)을 설립했다. 내가 그리고 싶었던 회사의 모습은 단순히 실험을 대신해주는 곳이 아니었다. 개발팀이 다음 의사결정을 할 수 있도록, “설득 가능한 근거”를 재현 가능한 방식으로 만들어주는 비임상 파트너였다.

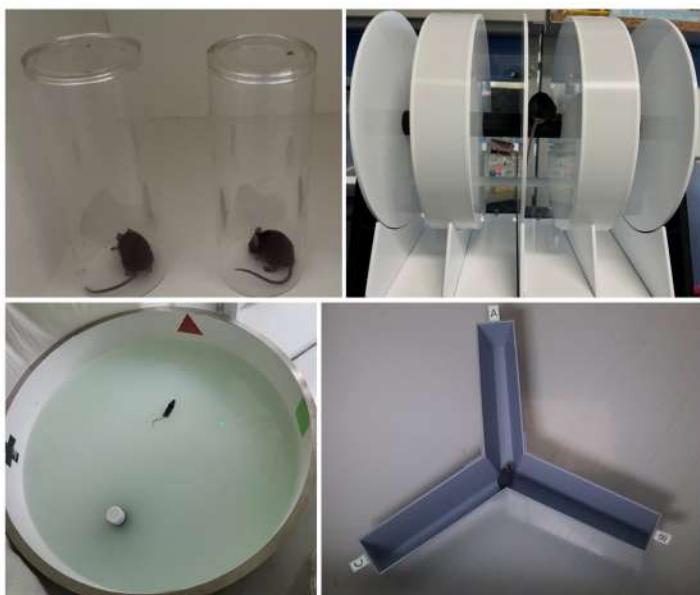


↑ [그림 1] 한국의학레이저임상시험원(주) 대표이사

1.2. 내가 하던 일: 세포에서 동물까지, 그리고 해석까지

한국의학레이저임상시험원(주)에서 하는 일은 비임상 영역에서 유효성과 안전성을 확인하는 것이다. 세포 실험은 다양한 세포주뿐만 아니라 일차 배양 세포까지 과제 성격에 맞게 설계하며, 동물 실험은 마우스·래트·미니피그 기반으로 수행한다. 업무설계에서 내가 특히 중요하게 생각했던 건 결과를 “찍어내는 것”이 아니라, 그 결과가 어떤 조건에서 어떤 지표로 얻어졌고 어떤 의미를 갖는지까지를 정리하는 일이었다.

그래서 조직학(H&E, Masson's trichrome 등) 분석, 이미징, 각종 정량 분석을 옵션이 아니라 기본으로 제공하는 구조로 설계하였다. 개발 현장에서 필요한 것은 대개 ‘가장 화려한 데이터’가 아니라 다음 단계로 넘어갈 수 있게 해주는 조건과 해석이 포함된 데이터였기 때문이다. 이러한 결정을 통해 결국 비임상은 단순한 시험이 아니라, 의사결정을 가능하게 하는 하나의 언어라는 것을 여러 차례 확인할 수 있었다.



↑ [그림 1] 동물 행동 평가 시험: 죄측 상단부터 cylinder test, rotarod test, Morris water-maze test, Y-maze test

II. 본론

2.1. 창업의 배경: 작은 기업일수록

‘빠른 검증’이 생존 전략이었다

창업을 결심하게 만든 핵심은 단순했다. 개발 초기 기업에게는 완벽한 풀패키지 검증보다, 규모가 작더라도 빠르게 결과를 확인하고 방향을 정할 수 있게끔 하는 검증이 더 절실했다. 또한 기업 내부에 비임상 인프라를 전부 갖추는 것은 현실적으로 어려웠고, 외부 의뢰는 비용과 대기 기간이 부담이 되었다. 이를 고민하는 사이 시간은 흘러갔고, 시장은 기다려주지 않았다. 그래서 나는 “빠른 검증”이 결국 생존 전략이라는 결론에 도달했다.

한국의학레이저임상시험원(주)은 처음부터 ‘대규모 분석’이 아니라 ‘실행력’을 선택했다. 과제마다 꼭 필요한 지표를 먼저 정의하고, 그 지표를 재현 가능한 방식으로 측정하며, 결과 해석까지 포함해 다음 결정을 앞당기는 구조를 만들었다. 말하자면 개발의 숨통을 트이게 하는 비임상을 하자는 것이었다.

2.2. 창업에 도움이 되었던 경험과

지원 사업: 현장의 요구를 표준으로

바꿔나갔다.

운영을 본격화하면서, 공공 지원 사업에서의 경험은 내 생각을 ‘원칙’에서 ‘체계’로 바꿔주었다. 사업을 시작한 후 첫 번째로 맡은 과제는 단국대학교의과대학부속병원이 주관하는 보건복지부 혁신의료기기 실증지원센터 과제였다. 융복합 광학기술을 응용한 진단·치료기기를 실증지원하는 틀 안에서, 한국의학레이저임상시험원(주)은 몇몇 사업체의 비임상 실험을 맡아 수행했다. 이 과정에서 나는 ‘실험을 잘하는

것'과 '실증 단계에서 통하는 데이터'를 같은 의미로 생각하면 안 된다는 것을 배웠다. 실증은 결과만이 아니라 조건 정의, endpoint 정합, 문서화 수준까지 포함하는 일이었다.

두 번째 과제는 천안시 산하 천안과학산업진흥원 실현기술개발 지원사업이었다. 이 사업에 선정된 후, 2년 동안 "광융합 헬스케어/의료기기의 비임상 CRO 수행을 위한 표준 프로토콜 지침서 개발" 연구를 수행했다. 지금 돌이켜보면 이 시간이 한국의학레이저임상시험원(주)을 더욱 단단하게 만들어 주었던 것 같다. 경험을 노하우로만 두지 않고 SOP와 지침서로 바꿔낼 수 있었기 때문이다. 이때 모델 유도부터 샘플링, 조직 처리, 정량 기준, 품질 관리까지의 흐름을 문서화하면서, 품질이 사람에 기대지 않도록 프로세스를 세우는 법을 배웠다.

2.3. 어려움과 극복: 신뢰는 결국 '재현성'으로만 쌓였다

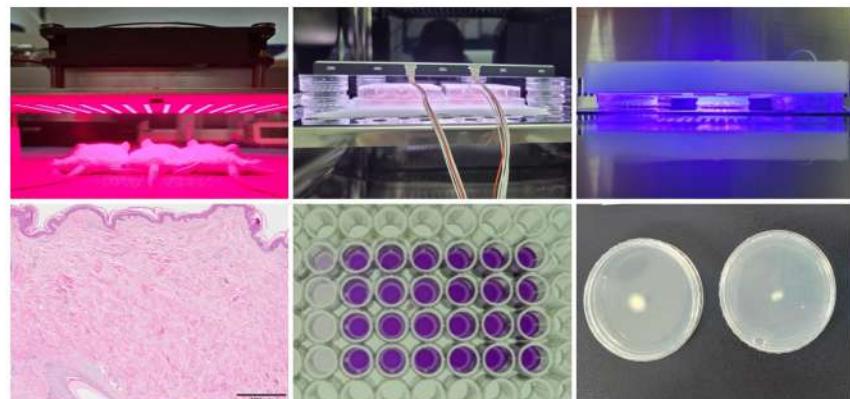
창업 초기에는 매번 시험대에 오르는 느낌이 들었다. 비임상은 한 번의 결과로 끝나지 않았다. 같은 조건에서 같은 결론이 나오는지, 일정이 흔들려도 품질을 유지하는지, 원시 데이터부터 분석까지를 전부 추적 가능 한지-이 모든 것이 신뢰의 조건이었다. 그 무게를 말로 만 설명해서 덜 수는 없었다.

그래서 나는 규모 확장보다 먼저, 재현성과 기록의 체계를 만드는 데 집중했다. SOP를 정리했고, 실험 조건과 원시 데이터 관리 방식을 통일했고, 샘플 라벨링과 보관·로그 체계를 만들었다. 윤리·규정 준수(동물실험 절차 포함) 또한 흔들림

없이 운영하고자 했다. 시간이 지나자 고객과의 대화 방식도 달라졌다. 그저 "가능하다"라는 단순한 한마디 대신, "이 조건에서 이 지표로, 이런 수준의 결론까지 갈 수 있다"라고 구체적으로 말할 수 있게 되었고, 그때부터 고객으로부터의 신뢰가 쌓이기 시작했다.

2.4. 보유 기술과 질환모델: '많다'가 아니라 '운영된다'가 강점이었다

사람들은 흔히 "어떤 기술을 갖고 있나"를 묻는다. 그러나 내가 생각하는 보유 기술의 이상향은 화려한 단일 기술이 아니었다. 설계된 질환모델-평가지표-분석 파이프라인이 실제로 운영되게끔 만드는 능력, 그것이 우리의 기술이었다. 예를 들어 피부질환 분야에서는 창상의 상처 재생, 고사한 피부의 치료, 광노화, 그리고에너지 기반 디바이스 평가(피부 탄력·주름 등)를 위해 조직학 및 구조적 지표 중심의 정량 평가 흐름을 구축하였다. 신경질환 영역에서는 퇴행성 신경질환 유도 모델에서 인지기능 손상과 회복을 평가하는 의뢰를 수행하였다. 그 외에도 안구건조, 당뇨 및 당뇨망막병증, 감염성 모델(예: 기니피그 진균 감염), 잇몸 상처 및 구강 관련 모델 등 다양한 영역에서 수행 경험을 축적해 왔다. 중요한 건 이 목록이 나열로 끝나지 않는다는 점이었다.



↑ [그림 2] 다양한 질환모델에서의 PBM 조사 및 분석. 좌측부터 창상치유 동물모델, 광노화피부세포모델, 진균감염모델

각 모델에서 무엇을 어떻게 측정해 어떤 결론으로 연결할지, 그리고 그 과정이 반복 가능하도록 축적한 데이터를 정리하였다. 나는 그 “정리됨”이야말로 비임상 현장에서 가장 큰 가치라고 보았다.

2.5. 인허가 시험: 결과보다 체계가 돌아가는 것이 핵심이었다.

이 외에도 국내 5개 기업의 의뢰를 받아 고주파(radio frequency, RF)와 고강도 집속 초음파(high-Intensity focused ultrasound, HIFU) 의료기기 8종에 대한 평가를 진행했다. 식품의약품안전처 의료기기 제조 허가를 위한 유효성·안전성 평가는 국내 인허가 기준에 맞추어 단계적으로 진행되었다. 이후, 미국 식품의약국(FDA) 인증 획득을 위한 평가 절차도 별도로 지원



하였다. 설계, 분석, 보고까지 모든 과정은 반복 가능하며 추적 가능한 체계로 관리되었다. 그 결과, 의뢰받은 의료기기 중 3종이 식품의약품안전처로부터 제조 허가를 받았고, 나머지 기기들도 동일한 기준과 절차를 기반으로 현재 인허가를 진행 중이다.

우리가 생각하는 우리의 강점은 단순히 시험을 많이 수행할 수 있는 능력을 갖추었다는 것이 아니라, 시험 과정과 체계가 실제로 작동한다는 점이었다. 이 경험을 통해, 결과의 양보다 시험 체계가 실제로 운영되는 모습을 보여주는 것이 신뢰를 만드는 기반임을 확인할 수 있었다.



↑ [그림 4] 비임상 피부 리프팅 유효성 평가 시험 모습

2.6. 앞으로의 비전: 비임상이 '개발의 언어'가 되도록

나는 비임상을 단순히 ‘시험’이라고만 보지 않았다. 나에게 비임상은 개발팀이 다음 선택을 할 수 있게 만드는 의사결정의 언어였다. 따라서 한국의학레이저임상시험원(주)이 앞으로 하고자 하는 일도 더 많은 실험을 수행하는 것에만 있지 않았다. 광융합 헬스케어/의료기기 분야에서 필요로 하는 비임상 검증을 더 많이 표준화하고, 더 빠르게, 더 많이 재현 가능하게 만드는 방향으로 역량을 확장하는 데 있다.

나는 지금까지의 지침서 개발 경험을 기반으로 SOP 체계를 더 고도화하고, 조직·이미지·행동 지표 정량을 일관되게끔 만드는 자동화·반자동화 흐름을 강화하려고 한다. 그 모든 과정을 거쳐 결국 내가 만들고 싶은 환경은 하나다. 좋은 기술이 “검증”에서 멈추지 않고, 다음 단계의 “전환”으로 이어지는 환경. 한국의학레이저임상시험원(주)은 그 전환을 앞당기는 실행 파트너로 남고자 한다.

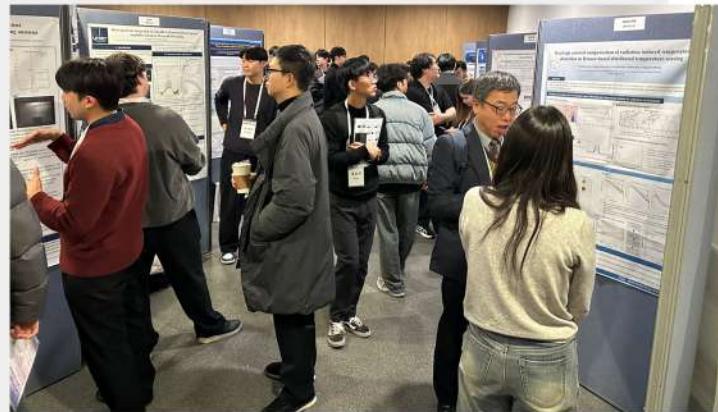
기관소식

학회
동정

제34회 광자기술 학술회의 개최 2025 Photonics Conference (PC2025)

제34회 광자기술 학술회의(2025 Photonics Conference, PC 2025)가 부산대학교 김창석 교수와 한양대학교 ERICA 김지원 교수를 조직위원장으로 하여 한국광학회 포토닉스 분과 주관 하에 2025년 11월 26일부터 11월 28일까지 3일간 강원도 휘닉스 평창에서 개최되었다.





명실공히 국내 최고의 광자 기술 및 광통신 관련 산업체, 학계, 연구기관들의 연구 성과 공유의 장으로 자리매김한 광자 기술 학술회의(Photonics Conference)는 1992년 처음 개최되어 올해로 34회를 맞았다. 금번에는 총 436명의 일반 및 학생들이 등록, 참가하고, 3편의 기조 강연, 4편의 튜토리얼, 61편의 초청 논문, 218편의 일반 논문 등 총 279편의 논문이 구두 및 포스터로 발표되었는데, 이는 근래 가장 많은 참가자와 논문 수로 관련 연구자들의 광기술에 대한 뜨거운 관심과 열정을 보여주었다. 또한 기조 강연을 맡은 이종창 교수(홍익대학교), 윤석호 마스터(삼성전자), 황홍연 연구위원 (LIG넥스원)은 각각 나노양자점 구조의 광학 및 전송 특성, AI 시대를 위한 포토닉스, 우주에서의 레이저 기술 응용을 주제로 발표하여 참가자들의 많은 관심과 호응을 받았다.

본 학술회의에는 강원도, 평창군을 포함하여 총 17개 공기관과 사기업이 후원 및 전시에 참여하여 광기술 및 본 학술발표 회의 발전을 위한 해당 기관들의 아낌없는 관심과 지원을 확인할 수 있었다. 또한 학생들의 우수한 연구 성과를 격려하기 위하여 구두와 포스터 발표를 현장 심사하여 총 19명의 학생들에게 우수논문상을 수여하였으며, 가장 많은 논문을 접수한 한양대학교 ERICA 김영현 교수 연구실(총 12편)에는 학회 기여상이 수여되기도 하였다.

본 학회는 앞으로도 광자 기술 및 광통신의 연구 협력의 장으로써 기존 연구원들의 지속적인 교류뿐만 아니라 학생 및 새로운 세대의 연구원들에게 광기술에 대한 관심을 고취할 수 있도록 다양한 지원과 노력을 이어갈 예정이다. 앞으로도 계속 연구 협력, 산업 교류, 전문인력 양성에 기여하는 생산적인 장이 되기를 다짐하며 내년 학회를 기약한다.



기관소식

**학회
동정**

제8회 양자정보학술대회 개최보고 Korea Quantum Information Science Conference

제8회 양자정보학술대회(K-QIS)가 2025년 11월 13일(목)부터 14일(금)까지 이틀간 서울 고등 과학원에서 성황리에 개최되었다. 올해 학술대회는 신진 연구자 중심의 학술 교류의 장으로 기획되어, 박사후연구원 및 학생 연구원에게 많은 발표 기회를 제공하고 활발한 학문적 교류가 이루어 질 수 있도록 하였다.

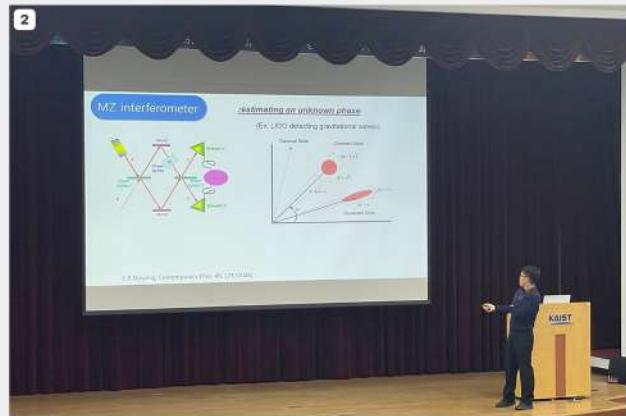


양자정보학술대회는 2018년 제1회를 시작으로 매년 꾸준히 개최되어 국내 양자정보과학 분야 연구자 및 학생들의 교류와 협력의 장이 되어왔다. 이번 학술대회에는 150여 명의 연구원이 참가하였으며, 튜토리얼 1편과 더불어 양자 컴퓨팅, 통신, 센싱 및 이론 분야별로 4편의 초청 강연이 마련되었다. 또한 신진 연구자를 중심으로 17편의 구두 발표와 34편의 포스터 발표가 이루어져 최종적으로는 총 56편의 연구 성과가 공유되었다.

이번 학회에서는 양자광학 이론 전문가인 나현철 교수 (University of Texas at El Paso)의 튜토리얼 발표를 통해 양자 계측의 기초를 소개하였으며, 권형한 박사(한국과학기술 연구원), 김제형 교수(울산과학기술원), 오상원 교수(아주대학교), 이석형 교수(성균관대학교)는 각각 컴퓨팅, 통신, 센싱, 이론 분야에서 최근 연구결과를 발표하여 참가자들의 큰 관심과 호응을 얻었다.

또한 2025년 K-QIS 행사부터 학생 우수발표상을 신설하여 신진 연구자를 독려하고자 하였으며, 제출된 초록 및 현장 평가를 통해 우수 구두발표상 2명과 우수 포스터발표상 8명을 엄정하게 선정하였다. 아울러 학생 참여를 더욱 활성화하고 즐거운 교류의 장을 만들기 위해 Quiz Time 등 다양한 참여형 프로그램도 운영하였다.

K-QIS는 양자정보과학기술 분야에 대한 학부생들의 관심을 높이고 연구에 자연스럽게 다가갈 수 있는 기회를 제공하고자 학부생 등록비는 무료로 운영하고 있다. 앞으로도 이 분야에 더 많은 젊은 연구자들이 참여할 수 있도록 다양한 지원과 노력을 지속해 나갈 예정이다.



- 1 단체사진
- 2 튜토리얼 강연
- 3 학생참여
- 4 포스터 발표

기관소식

학회
동정**한국광학회****학술지 논문발간 일람****3****한국광학회지**

(Korean Journal of Optics and Photonics / Korean J. Opt. Photon.)

2025년 2월호 (36권 1호)

페이지 1-11	논문명	광주파수빗을 이용한 타이밍 및 동기화 기술
논문종류 Invited Review Paper	저자 및 소속 기관	김정원* (KAIST)
페이지 12-19	논문명	코어 및 스트레스 로드의 도핑에 따른 편광유지 대구경 이중클래드 광섬유의 복굴절 특성 변화에 대한 수치해석적 연구
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	권서영 · 류장현 · 김성중(서울시립대) · 박가예 · 김재선(대한광통신) · 이주한* (서울시립대)
페이지 20-26	논문명	초분광 기술을 활용한 절화 백합 'Woori Tower' 수명 예측 시스템 개발
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	김주호 · 김시애 · 양주석 · 이애경* (단국대)
페이지 27-38	논문명	치환기 개질에 따른 디임모늄 염료의 물질 특성 변화 연구
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	주호연(서울대) · 정승영(KCL) · 김홍모 · 강성호* (서울대)
페이지 39-46	논문명	스마트폰 기반 안구건조증 원격 분석 시스템
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	김동영 · 한승찬(부산대) · 윤현정(전남대) · 엄태중* (부산대)
페이지 47-56	논문명	명 마이크로 패턴을 적용한 차량용 후미등 휠도 균일도 향상 방안 연구
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	양병문 · 정미숙* (한국공학대)
페이지 57-64	논문명	^{87}Rb 원자의 $5S_{1/2}-5D_{5/2}$ 전이선에서 이광자 분광의 도플러 효과
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	주경민 · 김희우 · 문한섭* (부산대)

2025년 4월호 (36권 2호)

페이지 79-84	논문명	나노라미네이션을 통한 고성능 표면 증강 라만 분광(SERS) 기판 설계
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	윤지원 · 남원일* (국립부경대)
페이지 85-93	논문명	파장가변광원 기반 광폭 선형영역 광결맞음 단층영상 시스템
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	이승석((주)아원기술) · 마혜준 · 김현성 · 최은서* (조선대)
페이지 94-102	논문명	주변 밝기에 기반한 저전력 적응형 전조등 연구
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	이창훈 · 송선빈 · 정미숙* (한국공학대)

2025년 6월호 (36권 3호)

페이지 117-126	논문명	나노 메타표면 기반 테라헤르츠 기술 응용
논문종류 Invited Review Paper	저자 및 소속 기관	노의영 · 서민아* (KIST)
페이지 127-134	논문명	넓은 공차를 가지는 고효율 무편광 유전체 다층박막 회절격자 설계
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	박재일 · 오세윤 · 문평권 · 조현주* ((주)옵토닉스)
페이지 135-145	논문명	위치 추적식 홀로그램 패턴 구현과 LiDAR 화각 조정 방법
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	윤석재* (한남대)

2025년 8월호 (36권 4호)

페이지 161-166	논문명	광대역 플라즈모닉 가열 효율 개선을 위한 실리콘 격자 구조 설계
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	유현성 · 장다혜(금오공과대) · 강 철(APRI) · 이상훈* (금오공과대)
페이지 167-175	논문명	디콘볼루션 기반 점 스캔 반사형 홀로그래피의 3차원 초해상도 복원
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	윤석찬* (부산대)
페이지 176-186	논문명	웨이퍼 검사용 DUV NA 0.8 현미경 대물렌즈의 경통 설계
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	윤조현일 · 임효중 · 박마스터영 · 채호진 · 문경상 · 변재희((주)그린광학) 정진호* (정진호 광기술연구소)

2025년 10월호 (36권 5호)

페이지 201-210	논문명	マイクロ파 투명 메타물질과 응용
논문종류 Invited Review Paper	저자 및 소속 기관	이은주 · 이지호 · 이호준 (경희대) · 전인성 ((주)케이알에스) · 김선경* (경희대)
페이지 211-220	논문명	이중 공진기 구조 레이저에서의 공간적, 시간적 출력 특성 조절
논문종류 Invited Review Paper	저자 및 소속 기관	김지원* · 김동준 · 박은지 · 노승현 · 박은경 · 오예진 (한양대 ERICA)
페이지 221-236	논문명	원자력 해체를 위한 고출력 광섬유 레이저 절단 기술: 국내 연구 현황 및 전망
논문종류 Review Paper	저자 및 소속 기관	신재성* (KAERI)
페이지 237-245	논문명	대구경 광학 측정을 위한 INTENSE 기반 실내 난류 파라미터 추정 기법 평가
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	윤혁준 · 주지용 · 이준호* (공주대) · 양호순 (KRISS)
페이지 246-254	논문명	통합광학장비와 가중치 부여 오차함수를 분광타원데이터 분석에 적용한 펠리를 박막의 광학적 물성과 두께의 정밀 평가
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	김상열* (엘립소테크놀러지)
페이지 255-262	논문명	편광 제어 기반 패턴 산란 억제 확산 레이저 암시야 현미경을 이용한 미세 결합 검출 기법
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	이희우 · 임재승 · 정진영 · 최수봉* (인천대)
페이지 263-269	논문명	반데르발스 반도체의 단일 보우타이 안테나 기반 테라헤르츠 분광 특성: 화학적 처리 및 한계
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	박하정 · 김태훈 · 이화경 · 정선경 · 배의권 (인천대) · 홍성주* (강원대) · 박영미** (인천대)
페이지 270-276	논문명	Sub-THz 시간축 분광 시스템을 이용한 D-band 대역 분광연구
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	오승재 · 이상구 (연세대) · 지영빈 · 박현상 (APRI) · 양난희 · 맹인희* (연세대)

2025년 12월호 (36권 6호)

페이지 291-303	논문명	초강력 레이저를 이용한 강력장 양자전기역학 연구
논문종류 Invited Review Paper	저자 및 소속 기관	김철민 (IBS) · 성재희* (APRI)
페이지 304-313	논문명	자유공간 광통신 기술
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	김 훈* (KAIST)

페이지 314-318	논문명	차량용 HVAC 시스템의 살균을 위한 UV-C LED 광학 모듈의 설계에 관한 연구
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	반지원 · 김종태* (부경대)
페이지 319-324	논문명	전환형 정렬 구조 기반 능동방어 시스템용 다중 파장 동축 광학계의 설계 및 구현
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	박준성* (한화시스템) · 윤진우 (GIST) · 김종완 · 윤창준 · 임재현 (한화시스템)
페이지 325-332	논문명	깊이 데이터 인코딩과 동적 스케일 보정을 적용한 다중 카메라 기반 3차원 보행 분석 시스템
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	송우섭 (계명대 동산병원) · 신인희 (KOPTI) · 이동은 · 김슬빈 ((주)인바디) · 김경태 (계명대 동산병원) · 신영훈* (KOPTI)
페이지 333-340	논문명	일체형 분광편광간섭계 채용 분광 반사도 및 분광 타원편광계수 동시 측정 시스템
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	안진환 · 김재민 · 헤리저데헌거흐 사이드 · 황국현 · 김청송 · 김대석* (전북대)
페이지 341-350	논문명	DUV 피조 간섭계의 자가보정
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	오혁진 · 최재혁* (UST) · 김학용* (KRISS)

Current Optics and Photonics (Curr. Opt. Photon.)

2025년 2월호 (9권 1호)

페이지 1-8	논문명	Recent Theoretical and Experimental Progress on Boson Sampling
논문종류 Invited Review Paper	저자 및 소속 기관	Changhun Oh* (KAIST)
페이지 19-28	논문명	Analysis and Evaluation of the Target Detection Range of Infrared Electro-optical Tracking Systems
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	Kwang-Woo Park, Sun Ho Kim, Chi-Yeon Kim (ADD) , and Sung-Chan Park* (Dankook Univ.)
페이지 29-34	논문명	Precision Two-step Alignment of a Large Optical Telescope for a Satellite Laser Ranging System
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	Han-Gyol Oh (KRISS), Kisoo Park, Eui Seung Son, Suseong Jeong (DRATRI), Sang-Yeong Park (Hanwha Systems Co., Ltd) , Pilseong Kang, Jaehyun Lee, and Hyug-Gyo Rhee* (KRISS)

페이지 35-42 논문종류 Regular research paper	논문명 저자 및 소속 기관	Enhancing the Efficiency of Stray-light Analysis Using the Corner-departure Backward Ray-tracing Method Deok Ki Hong, Ha Neul Yeon, Chan Lee, Jun Ho Lee* (Kongju National Univ.), and Kwang-Woo Park (ADD)
페이지 43-54 논문종류 Regular research paper	논문명 저자 및 소속 기관	Wideband Reconfigurable Instantaneous Microwave Multi-frequency Measurement System Based on an Optical Frequency Shifter and Optical Frequency Comb Jiahong Zhang*, Qian Ji, and Jing Zhang (Kunming University of Science and Technology)
페이지 55-64 논문종류 Regular research paper	논문명 저자 및 소속 기관	Hologram Upscaling for Viewing Angle Expansion Using Light Field Extrapolation with Object Detection Algorithm Dong-Ha Shin, Chee-Hyeok Song, and Seung-Yeol Lee* (Kyungpook National Univ.)
페이지 65-71 논문종류 Regular research paper	논문명 저자 및 소속 기관	Optimized Baffle Design for the Simultaneous Suppression of External and Internal Stray Light in an LWIR Catadioptric Optical Payload Ha Neul Yeon, Deok Ki Hong, Chan Lee, Jun Ho Lee* (Kongju National Univ.), and Kwang-Woo Park (ADD)
페이지 72-79 논문종류 Regular research paper	논문명 저자 및 소속 기관	Influence of Aberrations on Calibrating Spectral Images from a Grating-based Imaging Spectrometer in Spectroscopic Nanoscopy Ki-Hee Song* (KAERI) , Geon Lim (KIMM), and Yang Zhang (North Carolina State Univ.)

2025년 4월호 (9권 2호)

페이지 95-107 논문종류 Invited Review Paper	논문명 저자 및 소속 기관	High-harmonic Generation in van der Waals Two-dimensional Materials Dasol Kim (Pohang Univ.), Alexis Chacon (Ciudad Univ.), and Jonghwan Kim* (Pohang Univ.)*
페이지 108-119 논문종류 Regular research paper	논문명 저자 및 소속 기관	Design of Ultraviolet Molecular Doppler Lidar for Wind Measurement at Altitudes of 0.1–20 km Fahua Shen (Yancheng Teachers Univ.), Zhifeng Shu* (NUIST), Jihui Dong (Southwest Institute of Technical Physics), Liangliang Yang, Chengyun Zhu, and Hua Xu (Yancheng Teachers Univ.)

페이지 120-129	논문명	Multi-scale Dilated Attention-based Generative Adversarial Network for Infrared and Visible Image Fusion
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	Shunyuan Yang, Xiaoping Shi, Ju Huo*, Kangjian Sun (HIT), and Yu Wang (Shanghai Space Propulsion Technology Research Institute)
페이지 130-140	논문명	Design and Fabrication of Micro-binary Diffractive Optical Elements to Generate Airy Beams Using a Versatile Direct Laser Lithography Machine
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	Hieu Tran Doan Trung (UST), Young-Sik Ghim*, and Hyug-Gyo Rhee* (KRISS)
페이지 141-148	논문명	Design Method for a Freeform Mirror Based on Grid-based Sagittal Depth
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	Dong Yan, Wenbin Zhang, Caoqing Feng (Guangzhou North Second Ring Transport Technology Co., Ltd.,), and Yixuan Zhao* (HIT)
페이지 149-156	논문명	The Effects of Space Environments on an Infrared Optical System
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	Hongchul Sim, Do-Hee Yoon, Sechol Choi, and Soomin Jeong* (ADD)
페이지 157-164	논문명	Self-design of Metamaterials via a Hybrid Strategy Combining Genetic Algorithm and Reinforcement Learning
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	Minsoo Park, Seolbin Jang (Chonnam National Univ.), Woongkyu Park (KOPTI), and Joongwook Lee* (Chonnam National Univ.)
페이지 165-169	논문명	Comparison of Display Neutral Colors between See-through and Opaque Displays
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	Seonyoung Yoon, Hyunhee Park, and Youngshin Kwak* (UNIST)

2025년 6월호 (9권 3호)

페이지 185-195	논문명	MEMS Actuators for Tunable Waveguide Devices in Photonic Integrated Circuits : A Brief Review
논문종류 Invited Review Paper	저자 및 소속 기관	Dongju Choi, Young Jae Park, Man Jae Her, and Sangyoon Han* (DIGIST)
페이지 196-201	논문명	Asymmetric Guided-mode Resonance Filters for Long-wave Infrared Applications
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	Yeong Hwan Ko* (Kongju National Univ.)

페이지 202-208 논문종류 Regular research paper	논문명 저자 및 소속 기관	10 W 15 ns 300 kHz Red-emission of 650 nm Based on Third-harmonic Generation from Thulium-doped Fiber Laser at 1950 nm Jinju Kim*, Yong-Ho Cha, Woo-Sang Yu, and Kwang-Hoon Ko (KAERI)
페이지 209-216 논문종류 Regular research paper	논문명 저자 및 소속 기관	Modeling a Trivalent Dysprosium Ion-doped Fiber Laser Linhu Shen (Univ. College of London) and Chun Jiang* (Shanghai Jiao Tong Univ.)
페이지 217-223 논문종류 Regular research paper	논문명 저자 및 소속 기관	3D easySTED Nanoscopy Illumination Optics with Multiple Wave Plates for Simplified Beam Alignment Jiyoon Chung, Ilkyu Park, and Dong-Ryoung Lee* (Soongsil Univ.)
페이지 224-232 논문종류 Regular research paper	논문명 저자 및 소속 기관	Study on the Spectral Characteristics of Orange-red Sm ³⁺ Doped ScTaO ₄ Phosphor with High Thermal Stability Junfeng Wang* (Hefei Univ.), Wenpeng Liu, Shoujun Ding, Guihua Sun (Chinese Academy of Sciences), and Gang Liu (Hefei Univ.)
페이지 233-238 논문종류 Regular research paper	논문명 저자 및 소속 기관	Self-design of Metamaterials via a Hybrid Strategy Combining Genetic Algorithm and Reinforcement Learning Minsoo Park, Seolbin Jang (Chonnam National Univ.), Woongkyu Park (KOPTI), and Joongwook Lee* (Chonnam National Univ.)
페이지 239-246 논문종류 Regular research paper	논문명 저자 및 소속 기관	Optomechanical Performance of Adhesive Bonding in Airborne EO/IR Systems : A Comparative Study of Bonding Configurations Ji-Hun Bae* and Kwang-Woo Park (ADD)
페이지 247-254 논문종류 Regular research paper	논문명 저자 및 소속 기관	Pixel-matched Light-field Pickup with Amici Roof Prism for Uniform Field-of-view Acquisition Minwoo Jung and Joonku Hahn* (Kyungpook National Univ.)
페이지 255-264 논문종류 Regular research paper	논문명 저자 및 소속 기관	Equivalent Optical System Concept for Verifying the Optical Working Distance in GRIN Rod Lens Imaging Probe Jin Young Youm and Joon-Mo Yang* (UNIST)
페이지 265-269 논문종류 Regular research paper	논문명 저자 및 소속 기관	Wave-optical Analysis of the Effects of Mirror Misalignment and Aperture in a Four-mirror Ring Resonator Yong-Hoon Lee and Muhan Choi* (Kyungpook National Univ.)

페이지 270-278	논문명	Hybrid RIS-aided Indoor VLC System Based on Improved Particle Swarm Optimization Algorithm
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	Hanyang Shi, Gan Luo, Yan Zhao*, and Song Zhang (Hainan Univ.)
페이지 279-284	논문명	Simplified Estimation Method for Suppressing EDFA Output Signal Fluctuation in Terrestrial Free-space Optical Communication Systems
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	Chul Han Kim* (Univ. of Seoul)
페이지 285-291	논문명	Remote Sensing of Partial Discharge in Gas-insulated Switchgear (GIS) Using a 3×3 Optical Interferometer
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	Younggue Kim, Muhammad Awais (GIST), Taeil Yoon (Korea Univ.), and Byeong Ha Lee* (GIST)
페이지 292-303	논문명	Study on the Characteristics of P1 Dynamic State Generated by DM-DFBL Self-delayed Optical Feedback with an Optoelectronic Oscillation Loop
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	Nian Xie, Guang-Fu Bai*, Yuan-Fen Li, Gang Kuang, Dun-Sheng Shang, and Guang-Xin Wang (Guizhou Univ.)
페이지 304-316	논문명	Design and Verification of Small and Light Tracking Turntable for Space Laser Communication
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	Fan Fang, Xia Hou*, Yingxia Huang, Honglei Hu, Jiawei Li, Shaowen Lu, Yidi Chang, Tieqiang Song, Min Gao, and Yuan Wan* (Chinese Academy of Sciences)

2025년 8월호 (9권 4호)

페이지 331-342	논문명	Recent advances in bio-inspired optical components for energy-efficient robotic vision
논문종류 Invited Review Paper	저자 및 소속 기관	Jinyoung Jang (GIST), Sehui Chang, and Young Min Song* (KAIST)
페이지 343-353	논문명	Design, Fabrication, and Performance Analysis of Diffractive Beam Shaping Negative Square Fresnel Zone Plate
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	Munnibee Fakirmahamad Atar, Hieu Tran Doan Trung (UST), Young-Sik Ghim*, and Hyug-Gyo Rhee** (KRISS)
페이지 354-365	논문명	Design of a Compact Double-sided Telecentric Optical System with Large Field of View and High Resolution
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	Xiaogang Chen*, Youping Huang, Weilong Zhang, Renbi Zhang, and Hao Zhang** (Fujian Jiangxia Univ.)

페이지 366-371 논문종류 Regular research paper	논문명 Design of a Receiving-lens Module with Wide Field of View and Intense Light Concentration for LiDAR Applications 저자 및 소속 기관 Dong-Jin Lee and Dae Yu Kim* (Inha Univ.)
페이지 372-381 논문종류 Regular research paper	논문명 Improved Deep Learning-Based Method for Real-Time Three-Dimensional Surface Reconstruction 저자 및 소속 기관 In-Kyu Park (UST), Manh The Nguyen, Hyug-Gyo Rhee*, and Young-Sik Ghim** (KRISS)
페이지 382-386 논문종류 Regular research paper	논문명 Gain-switched Operation of an All-fiberized Yb-doped Laser with 1.6 kW Peak Power 저자 및 소속 기관 Hoon Jeong, Ju Yong Shin (KITECH), Eun Kyoung Park, In Chul Park, and Ji Won Kim* (Hanyang Univ. ERICA)
페이지 387-395 논문종류 Regular research paper	논문명 Analysis of Gaussian Beam Waist Radius and Spatial Solitary Waves in a Kerr Medium 저자 및 소속 기관 Jun Hyun Kim (Samwoo TCS Co., Ltd.), Sang Jo Lee, Jong Hoon Kim, Young Gull Joh, Jong Su Kim, and Chong Hoon Kwak* (Yeungnam Univ.)
페이지 396-401 논문종류 Regular research paper	논문명 Optimized Optical Design for Enhanced Power-Conversion Efficiency in an Organic Photovoltaic Device 저자 및 소속 기관 Zhang Liang, Seok Je Lee, Tae Won Lee, Young Kyu Hwang (Hoseo Univ.), Ji Chao Li (Jining Univ.), and Chul Gyu Jhun* (Hoseo Univ.)
페이지 402-408 논문종류 Regular research paper	논문명 High-contrast Grating-based One-port Mimicking Resonant System for Tunable Reflective Graphene Modulators 저자 및 소속 기관 Sangjun Lee, Hun Kang, and Sangin Kim* (Ajou Univ.)
페이지 409-417 논문종류 Regular research paper	논문명 Terahertz Spectroscopy of Two Perovskite Type Materials Based on Microfluidic Chip and Density Functional Theory 저자 및 소속 기관 Yuyi Cao, Xinyi Bai, Haofei Sun, Zeyu Hou, Bo Su*, and Cunlin Zhang (Capital Normal Univ.)
페이지 418-426 논문종류 Regular research paper	논문명 Analysis of Microplastic Types and Sizes Using a Fluorescence-based Optical System 저자 및 소속 기관 Sujeong Jeon, Joonseok Lee, Kyunghoon Beak, Boram Park (MachTech Co., Ltd.), and Hoonsoo Kang* (GIST)

2025년 10월호 (9권 5호)

페이지 443-458 논문종류 Invited Review Paper	논문명 저자 및 소속 기관	Quantum Technologies in the Frequency Domain: A Review Minyong Shin and Heedeuk Shin* (POSTECH)
페이지 459-467 논문종류 Regular research paper	논문명 저자 및 소속 기관	Diurnal Atmospheric Turbulence Effects on 1.57 μm Ground-to-air Illumination Laser System Performance Sung Hun Choi, Ji Yong Joo, Jun Ho Lee* (Kongju National Univ.), Byung Wan Kim, Jun Ho Jung, Yung Joong Kim (Hanwha Systems Co.), Eun Sook Yoon, and Jang Pyo Kim (ADD)
페이지 468-476 논문종류 Regular research paper	논문명 저자 및 소속 기관	One-year Turbulence Profiling Campaign at Geochang Observatory Using a SLODAR Ji Yong Joo, Jae Woo Lee, Seung Hyun Kim, Jun Ho Lee* (Kongju National Univ.), Do Hwan Jung, Young Soo Kim, Sang Yeong Park (Hanwha Systems Co.), and Timothy Butterley (Univ. of Durham)
페이지 477-483 논문종류 Regular research paper	논문명 저자 및 소속 기관	Reliable Off-axis Wavefront Aberration Measurement in Endoscopic Optical Systems Using Rotation-based On-axis Aberration Analysis Tae Yong Park, Ji Hye Song, and Mee Suk Jung* (Tech Univ. of Korea)
페이지 484-492 논문종류 Regular research paper	논문명 저자 및 소속 기관	Experimental Study of Dynamic Threshold Calibration and Trajectory Optimization for Noncoaxial Laser Alignment Junhao Xiong, Mengyao Niu, Yiting Li, and Shangjun Yang* (Henan Univ. of Technology)
페이지 493-503 논문종류 Regular research paper	논문명 저자 및 소속 기관	Angle Sensor Based on Image Region Brightness Integration Using Seven-core Fiber Wei Wang (Zhangjiakou Cigarette Factory Co. Ltd.), Xiaodong Wen, Zhenzhen Wang, Haoning Gao, Mingyang Xue, and Yan Bai* (Hebei Univ. of Architecture)
페이지 504-517 논문종류 Regular research paper	논문명 저자 및 소속 기관	Channelized Multi-frequency Measurement System Without Frequency Ambiguity Based on Dual Non-flat Optical Frequency Combs Di Ma, Jiahong Zhang*, and Peiqi Li (Kunming Univ. of Science and Technology)
페이지 518-527 논문종류 Regular research paper	논문명 저자 및 소속 기관	Three-dimensional Fourier Transform Light Scattering for Extended Angular Characterization of Individual Particles Khoi Phuong Dao (Tomocube Inc.), KyeoReh Lee (KAIST), Yuri Hong (POSTECH), Seungwoo Shin (KAIST), Sumin Lee (Tomocube, Inc.), Dong Soo Hwang (POSTECH), and YongKeun Park* (KAIST)

페이지 528-534 논문종류 Regular research paper	논문명 저자 및 소속 기관	Tolerance-robust Optical Design with Tolerance Group-based Minimization of Third-order Zernike Sensitivity Mee-Suk Jung* (Tech Univ. of Korea) and Won-Don Joo (Optico Co. Ltd.)
페이지 535-542 논문종류 Regular research paper	논문명 저자 및 소속 기관	NA 0.9 All-spherical Objective Lens with Extended Working Distance at 193 nm Ji Yong Joo, Yu Bin Jo, Jun Ho Lee* (Kongju National Univ.), Hagyong Kihm, and Ho-Soon Yang (KRISS)
페이지 543-549 논문종류 Regular research paper	논문명 저자 및 소속 기관	Reflective Narrow-band-infrared Polymer-dispersed Cholesteric Liquid Crystals for Electronic Writing Displays Zhang Liang, Shen Chen, Seok Je Lee (Hoseo Univ.), Won Sang Park (Sungkyunkwan Univ.), and Chul Gyu Jhun* (Hoseo Univ.)
페이지 550-559 논문종류 Regular research paper	논문명 저자 및 소속 기관	Experimental Comparison and Analysis of Measuring the Piston Error of a Segmented Mirror Using Optical Interferometers Ha-Lim Jang, Jae-Hyuck Choi (UST), and Hagyong Kihm* (KRISS)
페이지 560-565 논문종류 Regular research paper	논문명 저자 및 소속 기관	Numerical Analysis of Square Graded-index Optical Waveguides Kyoungyo Park, Yoonchan Jeong* (Seoul National Univ.), and Hyuntai Kim** (Hongik Univ.)

2025년 12월호 (9권 6호)

페이지 581-597 논문종류 Invited Review Paper	논문명 저자 및 소속 기관	Progress on Ultra-Relativistic Electron Acceleration from Laser wakefield acceleration Mohammad Mirzaie (IBS), Hyung Taek Kim, Chulmin Kim, and Kyung Taec Kim* (GIST)
페이지 598-607 논문종류 Regular research paper	논문명 저자 및 소속 기관	Design of Rear Passivation and Band-gap Grading for High-efficiency Cu(In,Ga)Se 2 Thin-film Solar Cells Jun Yong Kim†, Eun Jeong Jang†, and Yun Seon Do* (Kyungpook National Univ.)
페이지 608-613 논문종류 Regular research paper	논문명 저자 및 소속 기관	Deep-UV Femtosecond Source at 258 nm Through Harmonic Generation of Flat-top Beams Jomsool Kim*, Seungho Kwon, Ryon Cheong, Kilhwan Jeon, Byeong-Gu Lee (1Laser Spectronix Co. Ltd), Nam Seong Kim (Laserssel Co. Ltd), Min Yong Jeon (Chungnam National Univ.), Jinju Kim4, and Yong-Ho Cha (KAERI)

페이지 614-626	논문명	Impact of Atmospheric Layer Height Variations on the Performance of Laser Tomography Adaptive Optics
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	Seok Gi Han, Ji Yong Joo, Ha Neul Yeon, Jun Ho Le* (Kongju National Univ.), Young Soo Kim, Yongsuk Jung, Hyeon Seung Ha (Hanwha Systems Co), and Eui Seung Son (4Korea Defense Technology Center)
페이지 627-634	논문명	Field-wise Image Plane Tilt Estimation Using Zernike Defocus Terms
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	Mee Suk Jung*, Ji Hye Song, and Tae Yong Park (Tech Univ. of Korea)
페이지 635-642	논문명	Performance Assessment of a Portable Near-infrared Fluorescence Probe for Noninvasive Regional Lymph-node Detection
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	Hyeong Ju Park, Woosub Song, Sun-Hee Ahn (KOPTI), Hyeyoon Goo, Jin-Chul Ahn (Dankook Univ.), and In Hee Shin* (KOPTI)
페이지 643-654	논문명	Microlenslet-based Holographic Screen with Flat-top Beamforming to Reduce Vignetting Effects
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	Yongho Jang (Elcosis Co., Ltd), Hoonjong Kang* (Wonkwang Univ.), Donghak Shin (Elcosis Co., Ltd), Woosoon Kim (Wonkwang Univ.)
페이지 655-665	논문명	Coupling Characteristics of ZnMgO Optical Microring Resonators
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	Shuopei Jiao, Junjie Gao (North China Univ. of Technology), Haoyang Du (Shandong Univ.), Jing Zhang (North China Univ. of Technology), Lei Wang (Shandong Univ.), Xufang Zhang* (North China Univ. of Technology), Lei Meng* (Beijing Univ. of Technology)
페이지 666-671	논문명	Grain-size-Dependent Terahertz Conductivity of MAPbI ₃ Perovskite
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	Byungwoo Son (GIST), Danbi Kim, Sung Heum Park (Pukyong National Univ.), Jeong Woo Han (Chonnam National Univ.), Nan Ei Yu * (APRI), and Do-Kyeong Ko** (GIST)
페이지 672-679	논문명	Model-less NIR Through-Focus Scanning Optical Microscopy for Depth Estimation of Embedded Defects in OLED Panels
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	Ji Yong Joo, Jun Sung Lee, Ji Won Park, Se Jeong Kim, Jun Ho Lee* (Kongju National Univ.), and Oh-hyung Kwon (NEXTIN. Inc.)
페이지 680-686	논문명	NETD Performance Analysis of an Infrared Camera with an Improved Background-to-Target Photon Ratio
논문종류 Regular research paper	저자 및 소속 기관	Chan Young Park, Jung Hwan Kim, Ji Hye Kim (LIG Nex1), and Kwang-Woo Park* (ADD)

기관소식

회원
동정

연세대 김동호 명예특임교수, '벤젠 발견 200주년' 기념 2025 솔베이 워크숍 초청 연사로 선정

확장 포피린 기반
뫼비우스 방향성 규명 등
세계적 연구성과 인정

연세대학교 화학과 김동호 명예특임교수(한국광학회 정회원)가 2025년 12월 8일부터 10일까지 벨기에 브뤼셀에서 개최되는 '2025 Solvay Workshop - Aromaticity: Celebrating Benzene 200 Years'의 공식 초청 연사로 선정됐다.

솔베이 워크숍(Solvay Workshop)은 1911년 물리화학자 에르네스트 솔베이가 창설한 솔베이 회의(Solvay Conference)의 전통을 잇는 세계 최고 수준의 학술 행사다. 엄격한 초청제로 운영되며, 특정 주제를 중심으로 세계 석학들이 심층 토론을 진행하는 것으로 유명하다. 지난 110여 년간 현대 과학의 핵심 패러다임을 형성해 온 권위 있는 토론의 장으로, 초청되는 것만으로도 학자로서의 최고 명예 중 하나로 꼽힌다.

2025년 워크숍은 벤젠 발견 200주년을 기념해 'Aromaticity: Celebrating Benzene 200 Years'를 주제로 개최된다. 방향족성(aromaticity)-반방향족성(antiaromaticity)의 개념과 동역학, 기능성 소재 응용 등을 다루는 이번 행사는 화학 분야 세계적 권위자들이 참여하는 국제적 학술 이벤트로 평가된다. 올해 초청 연사에는 옥스퍼드대, 싱가포르국립대(NUS), 도쿄대, 라이스대, 웅살라대 등 세계 유수 연구기관 소속 석학 약 20명이 포함됐으며, 한국인 연구자 중에서는 김동호 연세대 교수 가 유일하게 이름을 올렸다.



김동호 교수는 확장 포피린 계열에서 나타나는 뫼비우스 방향성을 비롯해, 들뜬 상태 방향성과 3차원 방향족성·반방향족성 현상 등 독특한 전자 구조를 규명한 선도적 연구자로 평가받는다. 특히 시간 분해 초고속 분광학과 라マン 분석 기법을 활용해 확장 포피린 분자의 전자 구조와 광물리 특성을 정밀 규명한 일련의 연구는 기존 방향족성 이론의 지평을 넓힌 성과로 국제적 주목을 받아왔다. 이번 초청은 이러한 독창적이고 체계적인 연구 업적이 세계 화학계가 인정하는 최고 수준의 방향족성 연구 성과임을 보여주는 결과다.

연세대는 "이번 초청은 김동호 교수 개인의 연구 업적뿐 아니라 우리 대학의 분자과학 및 광과학 연구 역량이 세계적으로 인정받았다는 의미가 크다"며, "향후 연세대의 국제 공동 연구 협력을 강화하는 데에도 중요한 계기가 될 것"이라고 밝혔다.

BIBLIOGRAPHY

1. 연세대학교 홍보팀, "연세대 김동호 명예특임교수, '벤젠 발견 200주년' 기념 2025 솔베이 워크숍 초청 연사로 선정," (연세대학교, Published date: Dec. 15, 2025), <https://www.yonsei.ac.kr/sc/298/subview.do?enc=Zm5jdDF8QE8JTJGymJzJTJGc2MIMkY1MCUyRjk-0Mja5MSUyRmFydGNsVmldy5kbyUzRnBhZ2UIM0QxJTI2ZmluZFR5cGUIM0QIM-jZmaW5kV29yZCUzRCUyNmZpbmRDbFNlcSUzRCUyNmZpbmRPcG53cmQIM0QIM-jYz3NCZ25kZVN0ciUzRCUyNnJnc0VuZGRIU3RyJTNEJTI2cGFzc3dvcmQIM0QIM-jY%3D> (Accessed date: Dec. 19, 2025).



부산대 인지메카트로닉스공학과-프랑스 그르노블대 물리학과 공동 박사과정 첫 학위 취득자 배출

공학박사 PhD in Engineering

물리학박사 Doctorat en Physique



김광석 교수



부산대학교
PUSAN NATIONAL UNIVERSITY



이승환 박사과정생



LIPhy
Université Grenoble Alpes



오후레앙 구히에 교수



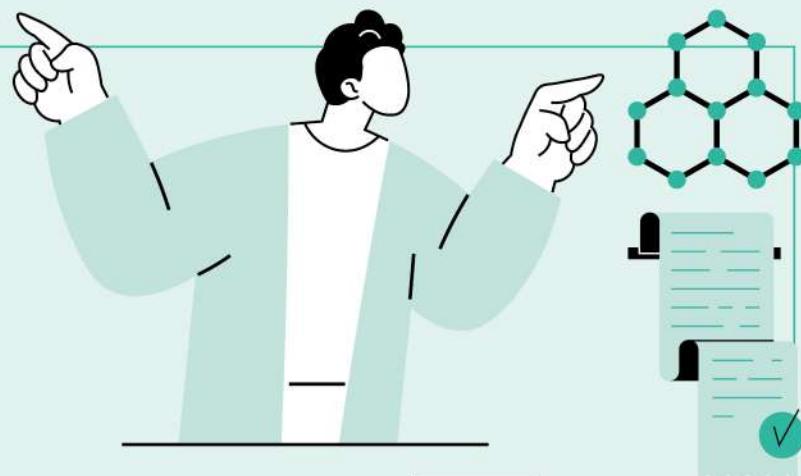
부산대학교 인지메카트로닉스공학과와 프랑스 그르노블대(UGA) 물리학과가 공동 운영하는 박사과정에서 첫 박사학위 취득자가 배출됐다.

부산대와 그르노블대는 앞서 지난 2021년 MoU를 체결해 글로벌 공동 교육과정을 구현하기 위한 4년 과정의 공동 박사과정을 구체화한 바 있다. 이에 따라 부산대 인지메카트로닉스공학과 이승환 박사과정생(한국광학회 학생회원)은 한국과 프랑스를 오가며 양 대학 지도교수(프랑스 오후레앙 구히에 교수/한국 김광석 교수, 한국광학회 정회원)의 지도로 연구를 수행했고, 교과과정 또한 양교의 수업을 절반씩 이수했다.

이 공동 박사과정은 복수학위 체제로 운영된다. 이번 박사학위 심사에 통과하면서 이승환 학생은 그르노블대로부터 물리학박사(Doctorat en Physique), 부산대로부터 공학박사(PhD in Engineering) 학위를 각각 받았으며, 프랑스 패스칼 장학금과 국내 정부의 BrainLink 사업 지원을 받았다.

수학 과정에서 이승환 학생은 인간 치아 분석이라는 미개척 분야에 광영상기법을 도입해 새로운 연구 지평을 개척했다. 비선형 레이저 영상측정 장치를 활용해 치아 내부에 분포하는 다공성 미세조직을 고분해능으로 획득하는 최적 조건과 광기술을 개발했으며, 복잡하게 얹힌 치아 미세구조의 지도를 치아 전체 영역에 확장하는 성과를 냈다.

- 1 부산대학교 홍보실, “부산대 인지메카트로닉스공학과-프랑스 그르노블대 물리학과 공동 박사과정 첫 학위 취득자 배출,” (부산대학교, Published date: Dec. 14, 2025), https://www.pusan.ac.kr/kor/CMS/Board/Board.do?mCode=mn109&mode=view&mgr_seq=12&board_seq=1506322 (Accessed date: Dec. 19, 2025).



**Elsevier,
2025년 세계 최상위 2% 연구자 발표**

한국광학회 회원 다수 포함

글로벌 학술정보 분석기업 엘스비어(Elsevier)와 스탠포드 대학 John P.A. Ioannidis 교수 연구팀이 발표한 2025년 세계 최상위 2% 연구자(Top 2% Scientists) 명단을 발표하였다.

이번 선정은 논문 인용 수, H-Index, 공동연구 기여도 등 6개 복합지표를 기반으로 산출된 권위 있는 평가 결과로, 국내 연구자들의 학문적 성과가 국제 학계에서 널리 인정받고 있음을 보여준다. 선정 기준은 연구자 커리어 전체(1960~2024)를 반영한 생애 업적(career) 데이터와 2024년 한 해의 연구 실적을 반영한 연간(single year) 데이터로 나뉘어 집계되었다.

생애 업적 기준으로 발표된 '세계 최상위 2% 연구자' 목록에는 서울시립대 ▲전자전기컴퓨터공학부 이주한 교수(한국광학회 평의원) ▲물리학과 손주혁 교수(한국광학회 평의원), 광주과학기술원 전기전자컴퓨터공학과 함병승 교수(한국광학회 평의원), 부경대학교 서효진 교수(한국광학회 정회원) 등 한국광학회 회원도 다수 포함되었다.

1 Elsevier, "World Top 2% Scientist," (Elsevier, Published date: 2025),
<https://www.elsevier.com/ko-kr/promotions/worlds-top-researchers> (Accessed date: Dec. 19, 2025)

기관소식

개최
일정

2026

국내외 학술대회 개최 예정 행사**국내학술대회**

개최일시	명칭	장소
02. 03. ~ 02. 06.	한국광학회 2026년도 동계학술발표회	부산, BEXCO
05. 06. ~ 05. 09.	제24회 첨단레이저 및 레이저응용 워크샵	제주, 서귀포 KAL 호텔
07. 03.	제11회 마이크로LED 디스플레이 써머 스쿨	서울, 한국컨퍼런스센터
07. 19. ~ 07. 22.	Optics and Photonics Congress 2026 (OPC 2026)	제주, ICC Jeju
08. 10. ~ 08. 11.	2026 Next Generation Lithography + Patterning Conference	수원, 수원컨벤션센터
10. 21. ~ 10. 23.	제26회 광인터넷 워크숍	제주, 메종글래드 제주
11. 25. ~ 11. 27.	2026 Photonics Conference (PC2026)	미정
미정	제9회 양자정보 학술대회	미정

국외학술대회

개최. 시	명칭	주최	장소
01. 27.	Optica Online Industry Meeting: Heterogeneous Integration on Silicon Photonics	OPTICA	Webina
02. 10.	Optica Online industry Meeting: Laser Beam Shaping	OPTICA	Webina
02. 15. ~ 02. 19.	SPIE Medical Imaging	SPIE	Vancouver, BC, Canada
02. 22. ~ 02. 26.	SPIE Advanced Lithography + Patterning	SPIE	San Jose, California, United States
02. 24.	Optica Online Industry Meeting: GAMA	OPTICA	Webina
03. 06. ~ 03. 08.	14th International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology	OPTICA	Marbella, SPAIN
03. 15. ~ 03. 19.	OFC: Optical Fiber Communications Conference and Exhibition	OPTICA	Los Angeles, UNITED STATES
03. 16. ~ 03. 20.	SPIE High-Power Laser Ablation	SPIE	Santa Fe, New Mexico, United States
03. 16. ~ 03. 19.	SPIE Smart Structures + Nondestructive Evaluation	SPIE	Vancouver, BC, Canada
03. 17.	Optica Online Industry Meeting: Photonics for Farming & Food	OPTICA	Webina
03. 31.	Optica Online Industry Meeting: Quantum Sensing & Atomic Clocks	OPTICA	Webina
04. 14. ~ 04. 15.	SPIE Photonics Europe	SPIE	Strasbourg, France
04. 14.	Optica Online Industry Meeting: Spectroscopy for Life Sciences	OPTICA	Webina
04. 26. ~ 04. 29.	Optica Biophotonics Congress	OPTICA	Fort Lauderdale, UNITED STATES
04. 26. ~ 04. 30.	SPIE Defense + Security	SPIE	National Harbor, Maryland, United States
06. 01. ~ 06. 04.	Optica Digital Holography and Three-Dimensional Imaging Topical Meeting	OPTICA	Taipei City, Taiwan
06. 08. ~ 06. 11.	SPIE Photonics for Quantum	SPIE	Waterloo, ON, Canada
06. 28. ~ 07. 02.	31st OptoElectronics and Communications Conference	OPTICA	Busan, Korea

한국광학회 회원가입 안내

사단법인 한국광학회 회원 구분은

일반회원(학생/정회원), 단체회원(비영리단체), 산학협력프로그램(영리단체)으로 나뉩니다.

회원 가입은 한국광학회 홈페이지(<http://osk.or.kr>)를 통해 가능합니다.

1. 일반회원

한국광학회 정회원 및 학생회원은 연회비를 납부할 시 광 전문가 활동, 회원 조회, 학술대회 등록비 할인, K-LIGHT 무료 구독 등 학회의 유용한 회원 지원 서비스를 받으실 수 있습니다.

- 학생회원 2년제 대학 이상에서 광학 및 관련 분야를 수학하고 있는 자
- 정회원 광학에 관심을 가진 개인으로 4년제 대학과정을 수료한 후 광학 및 관련 분야에서 연구 혹은 실무경력이 2년 이상인 자, 2년제 대학을 이수한 후 광학 및 관련 분야에서 연구 혹은 실무경력이 4년 이상인 자 또는 연구 혹은 실무경력이 위와 동등한 자격을 가진 것으로 이사회에서 인정되는 자

2. 단체회원

- 학교, 도서관, 연구소 기타 비영리 학술단체 또는 기관
- 연간 6회 발행되는 영문지(Current Optics and Photonics, COPP)와 광융합분야 매거진(K-LIGHT)을 무료로 보내드립니다.

3. 산학협력 프로그램(Industrial Affiliates Programs, IAP) 회원

- 일반 기업체 또는 기관 등 영리단체
- K-LIGHT 및 한국광학회 발간 학술지 1종, 한국광학회 동/하게 학술대회 등록비 할인, 회원사 홍보 기회 제공, 인재채용을 위한 기회 제공 등 각종 다양한 혜택을 제공하여 드립니다.

4. 연회비

회원구분	연회비	증신회비	구독료	
			학술지	홍보지
			영문지	K-LIGHT
정회원	6만원	90만원		
평의원	9만원	135만원		
학생회원	3만원	-	4만원	회원프로필에서 구독 신청 시 무료 발송
단체회원	15만원	-		
산학협력프로그램 회원사	사무국 문의	-		

한국광융합산업진흥회 회원사 가입안내

가입대상

한국광융합산업진흥회 설립취지와 목적 및 정관에 동의하며 현재 광산업체를 운영 중에 있거나,
광산업에 관심이 있어 본회의 회원사로 가입을 희망하시는 업체

회비

입회비

- 기업규모에 따라 차등 적용
 - 부과기준 (만원) : 대기업 200, 중기업 100, 소기업 50
 - 입회비의 납부는 회원사 가입신청서 제출 시 본회에서 납입계좌를 안내하며, 입회비는 회원사 가입시 1회만 납부

연회비 : 전년도 법인결산 결과 총매출액 규모에 따라 차등 적용

매출액 (억원)	~10 미미나	10~20 미만	20~50 미만	50~70 미만	70~100 미만	100~200 미만	200~500 미만	500~ 1,000미만	1,000~ 3,000 미만	3,000 이상
연회비 (만원)	80	100	140	200	280	350	420	600	1,200	3,400

연회비 면제 및 경감 기준

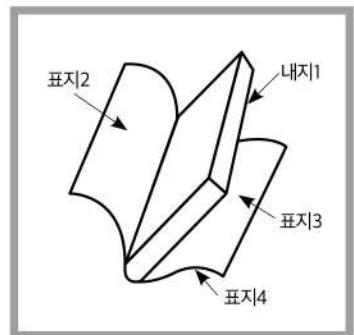
1. 기본원칙 : 총매출액 기준
2. 연회비 면제 : 광산업체를 신규로 창업한 회원사로서 매출이 없는 경우, 창업 당해년도에 한해서 면제
3. 연회비 경감
 - 연회비를 연납(일시납)할 경우 연회비 10% 감면
 - 광산업과 타업종이 혼합되어 있는 회원사 전체 매출액으로 연회비를 산정한 후 광매출액이 차지하는 비율에 의거 경감
 - 전체 매출액 중 광매출액 비율이 30% 미만인 경우 : 50% 감면
 - 전체 매출액 중 광매출액 비율이 30% 이상 50% 미만인 경우 : 30% 감면
 - 광산업체로서 총매출액이 2,000억원 이상인 회원사 중 다수의 사업자 단체에 중복하여기 회원으로 가입해 있는 회원사
 - 1~3개 협회 가입회원 : 40% 범위내 경감
 - 4개 이상 협회 가입회원 : 50% 범위내 경감
 - 매출액 비율과 타 협회 중복가입에 따른 경감 등 이중경감은 적용 배제
 - 상기 기준에 의하여 경감시, 최소 연회비 기준 이하 경감 불가

※ 회원사는 한국광융합산업진흥회 발전을 위해 회비 이외에 찬조금을 지원할 수 있습니다

가입문의 한국광융합산업진흥회 서순천 연구원 Tel. 062-605-9624 E-mail. suncheon0320@kapid.org

K-LIGHT가 한국광학회와 한국광융합산업진흥회의 공동발간으로
새롭게 태어났습니다. K-LIGHT는 국내 광학분야 전문가들로
구성된 편집위원들이 최신 기술 동향과 정책, 뉴스를 여러분께
제공하며, 한국광학회 홈페이지에서 내려받을 수 있습니다.
광고게재를 희망하시는 업체는 한국광학회로 신청하시면 됩니다.

구분	금액
표지 4	신청불가
표지 3	1,000,000원(부가세 별도)
표지 2	1,000,000원(부가세 별도)
내 지	A4 1쪽 / 800,000원(부가세 별도)



정기구독 및 광고문의

02-3452-6560

osk@osk.or.kr

Byungho Lee Best Student Paper Prize

- 매년 한국광학회 동계학술대회에서 Optica 회장/부회장이 시상합니다.
- 포상내역은 Optica가 주관하는 해외학회에 참가할 수 있는 Travel Grant입니다.
- 한국광학회의 학생회원을 수상 대상자로 하는데 예상수상일 기준 재학중인 자로 합니다.
- 수상자 선정은 1차로 지난 3년간 COPP에 주저자 논문이 1편 이상인 자를 대상으로 합니다.
- 2차 선정은 동일 기간 내에 Optica가 발행하는 학술지(저널) 및 학술대회에 게재/발표한 논문의 점수를 COPP에 게재한 총 논문의 점수와 합한 값을 기준으로 합니다. (게재확정 포함)
- SPIE Student Prize와의 중복 또는 교차 수상을 원칙적으로 금합니다.

SPIE Student Prize

- 매년 한국광학회 하계학술대회에서 SPIE 회장/부회장이 시상합니다.
- 포상내역은 SPIE가 주관하는 해외학회에 참가할 수 있는 Travel Grant입니다.
- 한국광학회의 학생회원을 수상 대상자로 하는데 예상수상일 기준 재학중인 자로 합니다.
- 수상자 선정은 1차로 지난 3년간 COPP에 주저자 논문이 1편 이상인 자를 대상으로 합니다.
- 2차 선정은 동일 기간 내에 SPIE가 발행하는 학술지(저널) 및 학술대회에 게재/발표한 논문의 점수를 COPP에 게재한 총 논문의 점수와 합한 값을 기준으로 합니다. (게재확정 포함)
- Byungho Lee Best Student Paper Prize와의 중복 또는 교차 수상을 원칙적으로 금합니다.

 **MEMO**

Current Optics and Photonics

Current Optics and Photonics(COPP) is the full-open-access, peer-reviewed journal published in English by the Optical Society of Korea (OSK).

COPP is dedicated to publish papers reporting recent advances and state-of-the-art research and development results in all aspects of optical science and technology.

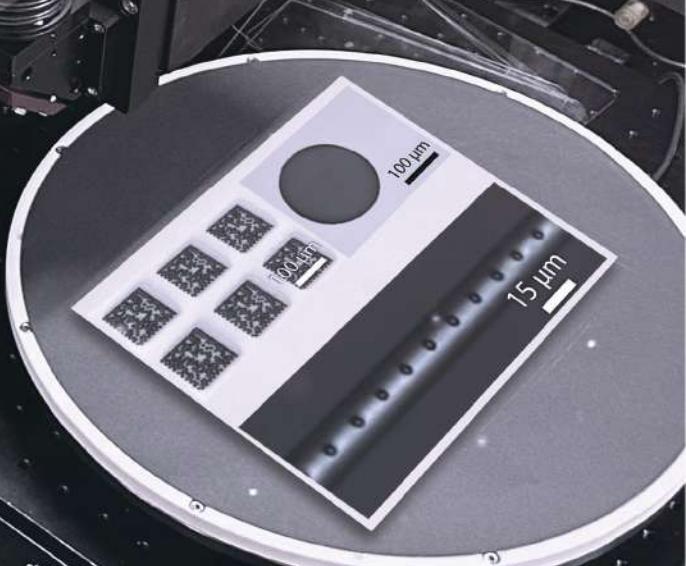
COPP is published bi-monthly with six issues a year (February, April, June, August, October, and December), and considers original research articles, short communications, invited research articles, and invited review articles. Original contributions may be categorized into nine main topics: (1) Optical Science, (2) Optical Technology, (3) Digital Holography and Information Optics, (4) Quantum Electronics, (5) Photonics, (6) Biophotonics, (7) Displays, (8) Quantum Optics and Quantum Information, and (9) Lithography/Optical Materials.

COPP started in February 2017, maintaining the tradition of the Journal of the Optical Society of Korea (JOSK) that had been published as one of the official journals of the OSK since 1997.

COPP is indexed in SCIE, SCOPUS, and KCI, and is also available via OSA Publishing in partnership with the OSA (<https://www.osapublishing.org/copp/home.cfm>).

FEMTOSECOND MICROMACHINING

초미세가공서비스
세라믹
반도체



주 소 대전광역시 유성구 테크노 2로 187 329호

홈페이지

<http://www.femtosolutions.co.kr>

전 화 042-716-3003

팩 스 042-934-7740

E-mail processing@l2k.kr