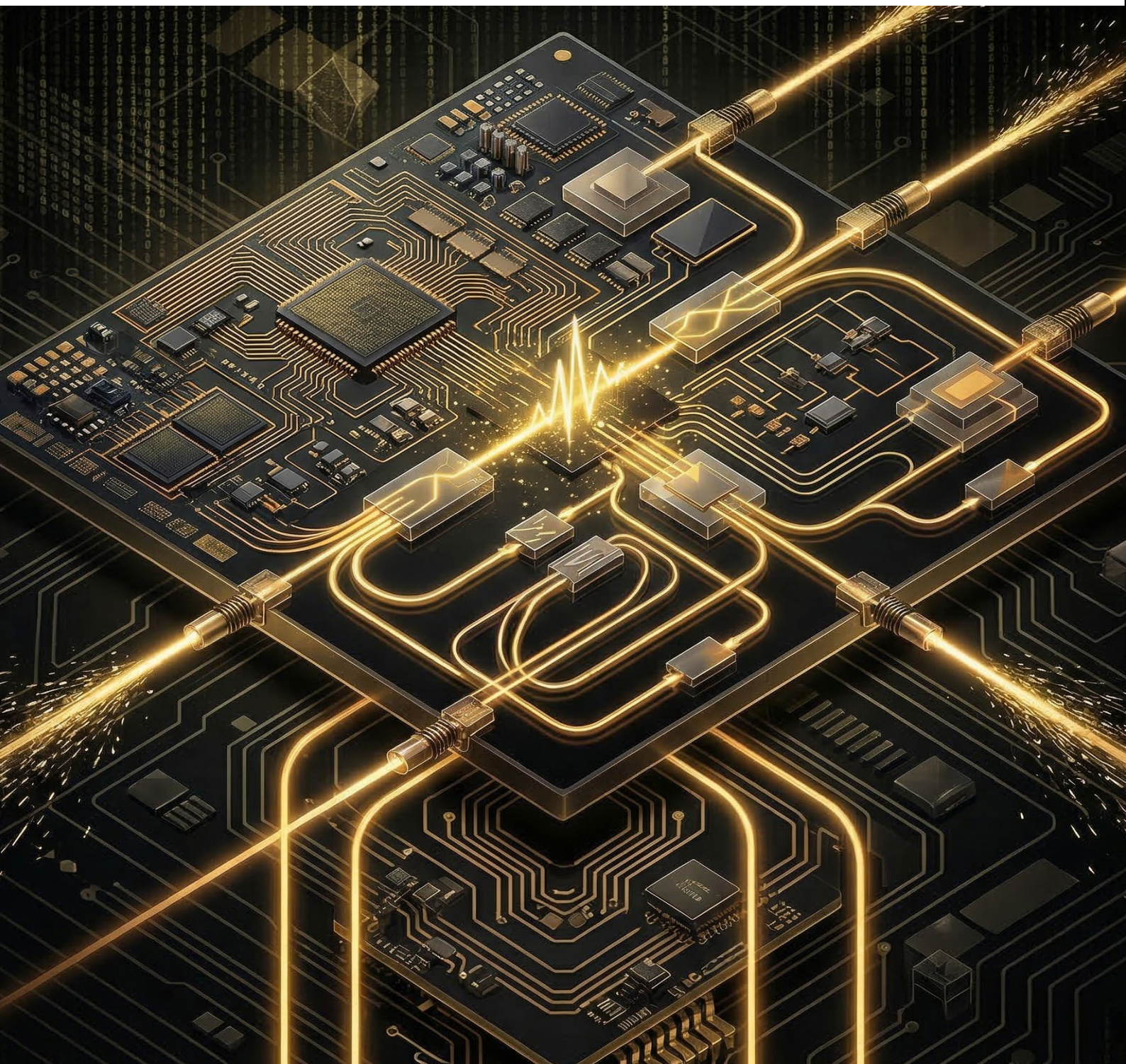


전기전자 (비중확대/매수)

OFC 2026 참관기: NEXT AI 병목은 나야, OPTICS

박준서

park.junseo@miraeasset.com



CONTENTS

I. Executive Summary	3
넥스트 병목 해결은 광통신	3
OFC 2026: 광학 논문 최신 지표	5
II. 왜 지금 광(Optics)인가? AI 시대, 메모리 다음 병목은 인터커넥트	6
1. 전력의 벽: HBM 이후 인터커넥트가 최대 전력 소비원	6
2. 구리의 벽: 200Gbps/lane 이상에서 물리적 한계 도달	8
3. 대역폭(Bandwidth)가 강제하는 광 전환	9
4. 광의 등장: 메모리→인터커넥트로 이어지는 AI 밸류체인 확장	14
III. CPO(Co-Packaged Optics): 칩 위에 광(빛)을 올린다	15
1. CPO란?	15
2. Broadcom Tomahawk 6 CPO 시연 - OFC 2026 핵심 성과	16
3. 핵심 기술 요소 심층 분석	17
IV. Scale-out 서버 간 연결의 광학 전환	20
1. 데이터 속도 로드맵: 800G → 1.6T → 3.2T	21
2. HCF(Hollow-Core Fiber): 광섬유의 게임체인저	22
3. 공간 분할 다중화(SDM)와 다중 코어 파이버	23
4. 광 증폭 기술과 AI 분산 훈련	24
V. Scale-up: 칩과 칩 사이를 빛으로 연결	25
1. 실리콘 포토닉스 변조기의 성능 도약	26
2. THz 인터커넥트: 구리와 광의 중간지대	27
3. 고속 광검출기의 진화	28
4. VCSEL 기술 혁신과 열 관리	28
VI. Scale-Across: 데이터센터를 넘어서	29
VII. 핵심 병목 종합 분석과 기술 로드맵 전망	31
VIII. 시사점과 투자포인트	32
IX. 시장 전망 및 투자 결론	33
부록: OFC 2026 사진	36
부록: 핵심 용어 해설	38

I. Executive Summary

넥스트 병목 해결은 광통신

AI 인프라 투자 사이클은 병목을 해소하는 방향으로 진화하고 있으며, 현재 가장 중요한 병목은 전력과 인터커넥트다. 초기 AI 확산 국면에서는 연산 성능 확보가 핵심이었고, 이에 따라 GPU 중심의 투자가 집중되었다. 이후 AI 모델의 규모 확대와 클러스터 확장으로 전력 소모가 급증하면서 전력 인프라가 두 번째 병목으로 부상했고, 동시에 추론 수요 증가에 대응하기 위한 고대역폭 메모리(HBM)의 중요성이 부각되었다. 이제 AI 인프라는 연산(GPU) → 메모리(HBM) → 네트워크(인터커넥트)로 병목이 이동하는 전형적인 구조를 보이고 있다.

현재 시점에서 가장 구조적인 제약은 인터커넥트이며, 이는 단순한 기술 전환이 아니라 물리적 한계에서 비롯된 필연적 변화다. 기존 전기식 인터커넥트는 전력 효율(pJ/bit)과 대역폭 측면에서 이미 한계에 도달하고 있으며, AI 클러스터가 수백~수천 GPU 단위로 확장되면서 병목이 더욱 심화되고 있다. 이러한 환경에서 광(Optics)은 전력과 네트워크 병목의 교집합을 동시에 해결할 수 있는 유일한 솔루션으로 부상하고 있으며, CPO를 중심으로 한 광학 인터커넥트 전환은 선택이 아닌 필수 국면에 진입했다.

OFC 2026 컨퍼런스 시사점

특히 이번 OFC 2026에서 확인된 점은, 산업 전반의 실행 속도가 예상 대비 훨씬 빠르다는 것이다. 주요 빅테크와 반도체 업체들은 이미 전기 인터커넥트의 한계를 명확히 인지하고 있으며, CPO, 실리콘 포토닉스, HCF 등 차세대 광학 기술을 중심으로 대규모 투자를 집행 중이다. 이는 단순한 기술 검증 단계를 넘어, 양산과 표준화, 공급망 구축이 동시에 진행되는 국면에 진입했음을 의미한다. 결과적으로 Scale-Out을 넘어 Scale-Up 영역까지 광 칩 투자가 예상보다 빠르게 확대될 가능성이 높다.

결론적으로 AI 밸류체인이 세 번째 투자 사이클이 본격적으로 시작되었다고 판단한다. GPU(2023)와 HBM(2024)에 이어, 2025년 이후는 광학 인터커넥트가 가장 빠르게 성장하는 핵심 세그먼트가 될 전망이다. 2027~2028년은 CPO 상용화, 1.6T 표준 확립, Scale-Up 광 전환이 맞물리는 변곡점으로, 관련 산업의 TAM이 구조적으로 확대되는 시기다. 따라서 광학 부품 및 장비 기업들은 단기 이벤트가 아닌 중장기 성장 사이클에 진입했으며, AI 인프라 투자 확대의 가장 직접적인 수혜 영역으로 판단한다.

AI 인프라의 병목은 명확하게 인터커넥트로 이동했으며, 이에 따라 광학 중심의 3번째 투자 사이클이 본격화되고 있다. GPU(연산)와 HBM(메모리)에 이어 네트워크가 성능 확장의 결정적 제약 요인으로 부상했고, 특히 대규모 GPU 클러스터(72 → 256노드 이상) 환경에서는 전기식 인터커넥트의 전력 효율(10+ pJ/bit)과 대역폭 한계(200Gbps/레인)가 시스템 확장을 제한하고 있다. 이는 과거 메모리 병목을 HBM이 해소했던 것과 동일한 구조이며, 향후 투자 수혜는 인터커넥트 병목을 해결하는 광학 기술과 관련 기업에 집중될 가능성이 높다. 주요 빅테크(Meta, NVIDIA, Broadcom) 역시 전기 인터커넥트 한계를 AI 스케일링의 핵심 장애 요인으로 공통 지적하고 있다.

동시에 CPO(Co-Packaged Optics)는 기술 검증 단계를 넘어 양산 진입이 가시화되며, 광학 부품 산업의 실적 가시성을 구조적으로 높이고 있다. Broadcom의 102.4Tbps CPO 스위치 출시와 Meta의 3,600만 디바이스-시간 신뢰성 검증은 상용화 준비가 완료된 수준임을 의미한다. 기존 플러거블 대비 약 65% 전력 절감 효과가 확인되었고, 실제로 2026년 3월부터 양산 제품이 출하되고 있다. 이는 광학 인터커넥트가 더 이상 '미래 기술'이 아니라, 실제 데이터센터 아키텍처에 채택되는 초기 상용화 국면에 진입했음을 시사한다.

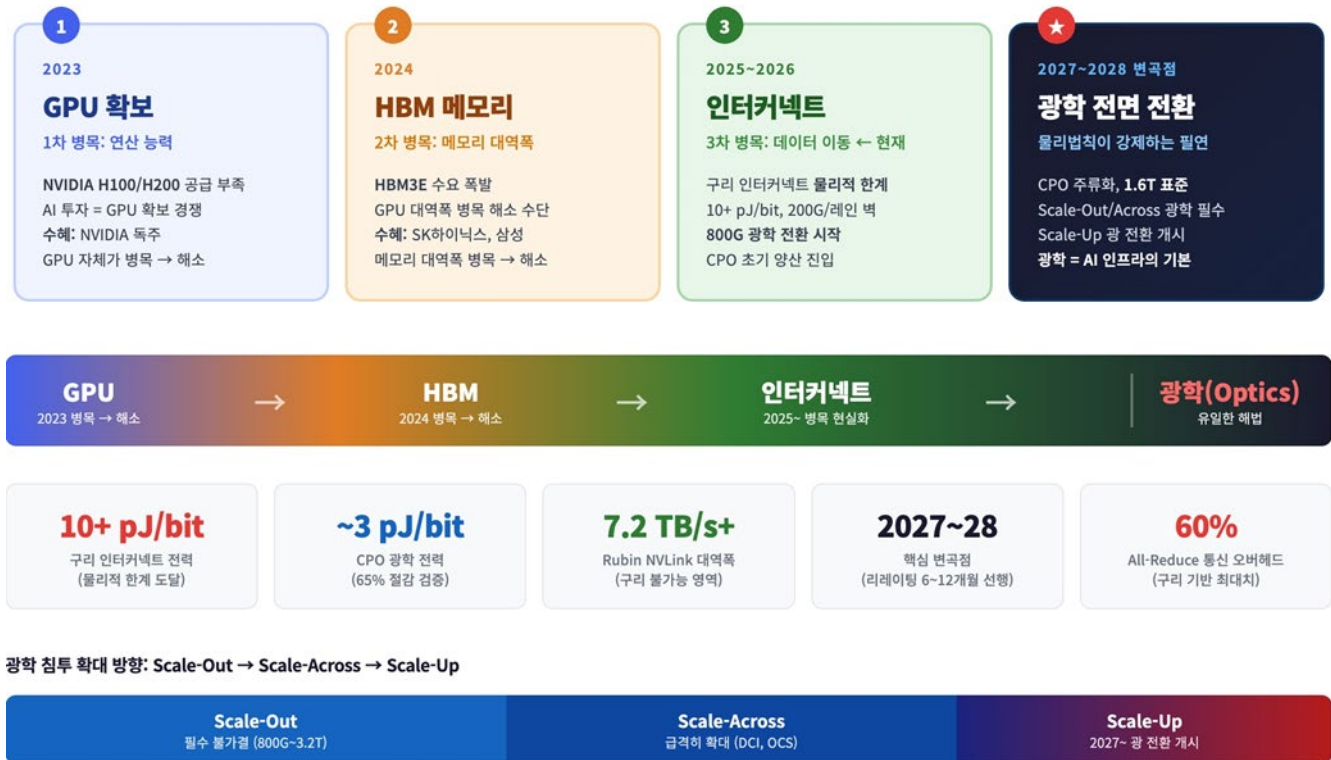
네트워크 속도 로드맵 역시 광학 중심으로 빠르게 상향되고 있으며, 이에 따른 TAM 확장이 구조적으로 진행될 전망이다. Scale-Out 영역에서는 800G가 2025~2026년 본격 확산되고, 1.6T(2027~2028), 3.2T(2029~)로 이어지는 업그레이드 사이클이 명확하게 형성되어 있다. 특히 Hollow-Core Fiber(HCF)는 감쇠율을 기존 대비 절반 수준으로 낮추고 증폭 전력을 35~40% 절감하는 혁신 기술로, 장거리·대규모 AI 클러스터 환경에서 핵심 인프라로 부상하고 있다. 이는 단순 속도 증가를 넘어, 전력 효율 개선과 네트워크 확장성 확보라는 두 가지 요구를 동시에 충족시키는 방향이다.

더 중요한 변화는 광학 기술이 Scale-Out을 넘어 Scale-Up 영역으로 침투하기 시작했다는 점이다. 실리콘 포토닉스 기반 변조기는 이미 256~448Gbps PAM4 수준에 도달했고, THz 인터커넥트는 50~100m 구간에서 3 pJ/bit 이하의 효율을 달성하며 서버 내부 영역에서도 광 전환 가능성을 입증하고 있다. 이는 기존에 구리의 영역으로 인식되던 칩 간 인터커넥트까지 광학이 확장되고 있음을 의미하며, 중장기적으로 패키지 구조 자체의 변화를 유도할 가능성이 높다.

결론적으로 2027~2028년은 광학 인터커넥트 산업의 구조적 변곡점이다. CPO의 주류 채택, 1.6T 표준화, Scale-Up 광 전환이 동시에 진행되며 수요와 비용 구조가 교차하는 시기다. 300mm 기반 실리콘 포토닉스 양산을 통한 비용 하락과 AI 클러스터 확장에 따른 수요 증가가 맞물리면서, 광학 부품 및 장비 시장은 현재 대비 3~5배 확대될 가능성이 높다. 특히 광학 침투는 Scale-Out → Scale-Across → Scale-Up 순으로 확장되며, 서버 간·데이터센터 간·칩 간 전 영역에서 구조적 성장이 동시에 발생할 전망이다.

이에 따라 투자 전략은 영역별로 차별화된 접근이 필요하다. Scale-Out/Across에서는 광트랜시버 및 광케이블 중심의 볼륨 성장, Scale-Up에서는 CPO 기반의 고부가 부품·장비 생태계 확대가 핵심이다. 국내에서는 광케이블 수직계열화 기업과 광트랜시버 업체가 초기 수혜를 받고 있으며, 중장기적으로는 CPO 장비, 마이크로 렌즈, 레이저 등 핵심 부품 업체들이 가장 큰 구조적 업사이드를 확보할 것으로 판단한다.

그림 1. AI 밸류체인 투자 사이클: GPU > HBM > Interconnect: 광학 전면 투자 사이클로 전환



자료: 미래에셋증권 리서치센터

OFC 2026: 광학 논문 최신 지표

표 1. OFC2026에서 공개된 핵심 지표

영역	핵심 지표	수치	의미
전력	CPO 전력 절감률	65%	- 플러거블 대비 pJ/bit 기준 효율적
전력	HCF 증폭 전력 절감	35~40%	- SSMF 대비 Tbps당 기준
전력	THz 인터커넥트 효율	<3 pJ/bit	- 50~100m 거리 기준
속도	현재 최고 레인 속도	448 Gbps PAM4	- 실리콘 포토닉스 변조기
속도	Scale-Out 현행	800G	- 2025~2026년 본격 배치
속도	Scale-Out 차세대	1.6T → 3.2T	- 2027~2028년 공개
거리	HCF 감쇠율	0.1 dB/km	- SSMF(0.2)의 절반
거리	AI 분산 훈련 시연	600 km	- LLM 클러스터 분산 훈련
신뢰성	CPO 스트레스 테스트	36M 디바이스-시간	- Meta 검증 완료
비용	SiPh 파운드리	300mm 양산	- imec, GlobalFoundries 시작
표준	OIF CPO 프레임워크	표준화 완료	- ELSFP IA 발표

자료: OFC 2026, 미래에셋증권 리서치센터

II. 왜 지금 광(Optics)인가? AI 시대, 메모리 다음 병목은 인터커넥트

AI 반도체 밸류체인에서 HBM(고대역폭 메모리)이 병목이었다면, 다음 병목은 인터커넥트다. GPU 간, 서버 간, 데이터센터 간 데이터 이동에서 전력·대역폭·열의 한계가 동시에 발생하고 있으며, 이를 해결할 유일한 대안이 광학(Optics)이다.

AI 반도체 투자의 흐름을 되짚어보자. 2023~2024년에는 GPU 자체가 병목이었다. NVIDIA H100/H200이 공급 부족이었고, AI 투자의 핵심은 GPU 확보였다. 2024~2025년에는 메모리가 부각되었다. SK하이닉스, 삼성의 HBM3E가 GPU의 대역폭 병목을 해결하며 AI 밸류체인의 2번째 수혜주로 부상했다. 이제 2026년, 3번째 병목이 명확해지고 있다: 바로 인터커넥트(Interconnect)다. GPU와 메모리가 아무리 빨라져도, 이들을 연결하는 '도로'가 좁으면 전체 시스템 성능이 제약된다. AI 클러스터가 72노드에서 256노드, 나아가 100,000 GPU 이상으로 확장되면서, 구리 기반 전기 인터커넥트의 물리적 한계가 현실화되고 있다.

1. 전력의 벽: HBM 이후 인터커넥트가 최대 전력 소비원

AI 반도체 밸류체인에서 GPU→HBM 다음으로 전력 병목이 가장 심한 곳이 인터커넥트다. 전기적 트랜시버는 10+ pJ/bit을 소모하며, AI 클러스터 확장에 따라 인터커넥트가 전체 시스템 전력의 30~40%를 차지하는 수준까지 올라갈 전망이다.

AI 모델을 훈련시키려면 수십~수백 개의 GPU를 하나의 클러스터로 묶어야 한다. 예를 들어, NVIDIA DGX SuperPOD은 72개 이상의 GPU 노드를 연결하며, 차세대 아키텍처는 256노드 이상으로 확장될 예정이다. 이 모든 GPU가 동시에 작업하려면, GPU와 GPU 사이에 초고속 데이터 전송이 필요하다.

문제는 이 데이터 전송에 엄청난 전력이 소모된다는 것이다. 현재의 전기적 트랜시버(데이터를 전기 신호로 변환해서 보내는 장치)는 1비트의 데이터를 보내는 데 10피코줄(pJ) 이상의 에너지를 사용한다. 이 숫자가 작아 보일 수 있지만, 초당 수 테라비트(Tbps)의 데이터를 보내야 하므로 합산하면 어마어마한 전력이 된다.

전기 신호는 구리선을 통해 이동하는데, 거리가 멀어질수록 신호가 약해진다(감쇠). 약해진 신호를 다시 증폭하고, 잡음을 제거하고, 원래 데이터를 복원하는 과정에서 막대한 전력이 소모된다. 속도가 빨라질수록 이 과정이 더 복잡해지고, 전력 소모는 기하급수적으로 증가한다.

표 2. OFC2026에서 공개된 핵심 지표

항목	현재 수치	물리적 한계	설명
전기적 트랜시버	10+ pJ/bit	~5 pJ/bit	거리와 속도에 따라 급증
ASIC 전력 밀도	350~400 W/cm ²	~500 W/cm ²	에어쿨링 한계에 근접
랙 전력 밀도	50~100+ kW/랙	냉각 인프라 제약	기존 DC 설계 초과
인터커넥트 비중	전체 DC 전력의 30~40%	-	연산 외 가장 큰 소모원
GPU 노드 수	72+ 노드/클러스터	256+ 노드 예정	Scale-Up I/O 2 TBps 요구

자료: OFC 2026, 미래에셋증권 리서치센터

현재 데이터센터에서 사용되는 전기적 인터커넥트의 핵심 기술 표준들 —100G 이더넷 (IEEE 802.3bm), PAM4 변조방식, NRZ SerDes, 구리 DAC 규격 — 은 대부분 2013~2015년에 설계·표준화되었다. 당시의 설계 목표는 클라우드 컴퓨팅과 4K 스트리밍이었지, 수만 개의 GPU가 동시에 통신하는 AI 워크로드는 상정하지 않았다. 10년이 지난 지금, 이 기술의 물리적 한계가 동시에 가시화되고 있다.

핵심은 이 기술들이 모두 거의 같은 시기(2013~2016년)에 설계되었다는 점이다. 따라서 한계도 동시에 온다. 마치 같은 해에 건설된 도로, 다리, 터널이 동시에 수명을 다하는 것과 같다. AI의 폭발적 성장이 이 '동시 만료'를 10년 만에 가시화시킨 것이다.

결론적으로, 전력 효율 격차의 확대는 광학 전환의 경제적 당위성을 매년 강화시킨다. 2015년 설계의 전기 인터커넥트가 '설계 수명'을 다한 지금, 광학으로의 전환은 기술적 선택이 아니라 경제적 필연이며, 이 전환기에 포지셔닝된 기업들이 AI 밸류체인 3번째 수혜 사이클을 이끌 것이다.

광학 인터커넥트는 동일한 데이터 전송에 1~3 pJ/bit만 소모한다. 이는 전기적 방식의 1/3~1/10 수준이다. 빛은 광섬유를 통해 거의 손실 없이 이동하므로 중간 증폭이 불필요하거나 훨씬 적게 필요하다. 이것이 광학 전환이 '필수'가 된 가장 근본적인 이유이다.

표 3. 과거 인터커넥트 기술의 한계

기술 표준	설계/표준화 시기	원래 설계 목표	현재 AI 환경에서의 한계
100G 이더넷 (IEEE 802.3bm)	2013~2015년	클라우드 서버 간	AI는 800G~1.6T 필요
		100Gbps 연결	8~16배 초과
PAM4 변조 (100G/레인)	2014~2016년	단일 레인 50~100Gbps	200G/레인 필요 시
		구리/광 겸용	SNR 열화로 전력 2~3배 증가
NRZ SerDes (28Gbps/레인)	2012~2014년	서버 내부	112G PAM4 SerDes 필요
		25~28Gbps 직렬 통신	DSP 전력만 5+ pJ/bit
구리 DAC (QSFP28/DD)	2014~2016년	랙 내 5~7m 연결	400G+ 시 2~3m로 단축
		100G 기준 설계	AI 클러스터 거리 부족
리타이머/리드라이버 (선형 등화기)	2013~2015년	신호 보상으로	56G+ 에서 전력 급증
		구리 연장	리타이머 자체가 7~15W 소모

자료: OFC 2026, 미래에셋증권 리서치센터

표 4. 빨라지는 광학 인터커넥터

(pJ/bit)

세대	시기	전기 인터커넥트	광학 인터커넥트	효율 격차	투자 시사점
100G	2015~2020	15~20	5~8	3배	광학은 장거리에 한정 투자 매력 제한적
400G	2020~2024	12~15	3~5	4배	DCI에서 광학 필수화 Ciena 등 수혜 시작
800G	2024~2026	10~12	2~3	5배	CPO 상용화 시작 루멘텍, Coherent 등 수혜
1.6T	2027~2028	10+ (개선 한계)	1~2	7~10배	광학 전면 전환 밸류체인 전체 수혜
3.2T	2029~	구리 불가능 영역	<1	광장히 높음	구리 완전 대체 광학이 기본 인프라

자료: OFC 2026, 미래에셋증권 리서치센터

2. 구리의 벽: 200Gbps/lane 이상에서 물리적 한계 도달

구리선으로 데이터를 보내는 것은 본질적으로 전자를 이동시키는 것이다. 전자가 이동하면 열이 발생하고, 주변 도선과 전자기 간섭(EMI)이 생기며, 거리가 멀어지면 신호가 약해진다. 이 세 가지 문제는 물리법칙에 의한 것이므로 기술 개발로 극복할 수 없다.

주파수가 높아질수록 문제가 심각해진다. 데이터를 빠르게 보내려면 높은 주파수의 신호를 사용해야 하는데, 높은 주파수일수록 구리선에서의 감쇠가 더 크다. 이를 '스킨 이펙트(skin effect)'라고 하는데, 고주파 신호일수록 도체의 표면만 사용하여 실질적인 도체 면적이 줄어들기 때문이다. 현재 데이터센터에서 서버 간 연결에 사용되는 구리 DAC(Direct Attach Cable) 케이블은 다음과 같은 거리 제한이 있다.

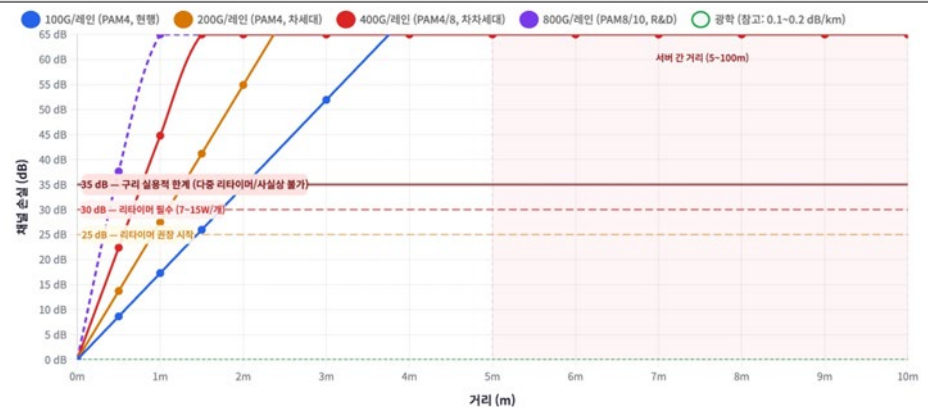
이것이 의미하는 바는 명확하다. 현재 세대(100G/레인)에서도 이미 5~7미터가 한계이며, 차세대(200G/레인)에서는 구리로 할 수 있는 거리가 2~3미터로 줄어든다. 데이터센터에서 서버 간 거리가 보통 5~100미터인 점을 고려하면, 구리는 이미 역할을 다한 것이다.

표 5. 구리의 물리적 한계

데이터 속도	구리 최대 거리	필요 전력/레인	문제점
100G/레인	5~7미터	~5 pJ/bit	현재 세대, 한계 도달
200G/레인	2~3미터	~10 pJ/bit	등화기 복잡도 급증
400G/레인	<1미터	15+ pJ/bit	사실상 불가능
800G/레인	불가능	-	물리적으로 구현 불가

자료: OFC 2026, 미래에셋증권 리서치센터

그림 2. 구리 DAC(Direct Attach Cable) 감쇠 Vs. 거리



비선형 감쇠의 핵심

속도 2배 → 전력 **3~4배**
주파수의 제곱에 비례하는 스킨 이펙트 + 유전체 손실이 원인

200G/레인의 벽

DAC 최대 거리 **2~3m**
서버 간 5~100m 거리에서 구리는 역할 수행 불가

리타이어 전력 폭탄

30dB 초과 시 리타이어 필수, 1개당 **7~15W**
35dB 초과 → 다중 리타이어 → 사실상 불가능

광학의 해답

동일 거리에서 **1~3** pJ/bit
감쇠율 0.1~0.2 dB/km → 구리 대비 100,000배 우위

레인 속도	변조 방식	1m 손실	3m 손실	5m 손실	7m 손실	10m 손실	최대 DAC 거리	전력 (pJ/bit)	실용성
100G	PAM4	-5 dB	-14 dB	-22 dB	-28 dB	-35 dB	5~7m	~5	한계 도달
200G	PAM4	-8 dB	-22 dB	-35 dB	-45 dB	-58 dB	2~3m	~10	실질적 한계
400G	PAM4/8	-14 dB	-38 dB	-58 dB	-	-	<1m	15+	사실상 불가능
800G	PAM8/10	-22 dB	-	-	-	-	불가능	-	물리적 불가

주: OFC2026 'Co-Design of Electronic and Photonic Systems for Future, LPO, NPO, and CPO' 논문 참조

자료: 미래에셋증권 리서치센터

가장 심각한 문제는 구리의 대역폭-전력 관계가 선형이 아니라 기하급수적이라는 점이다. 데이터 속도를 2배로 올리면 전력은 2배가 아니라 3~4배로 증가한다. 이는 고속에서 필요한 복잡한 등화기(equalizer), CDR(Clock Data Recovery), 리타이머(retimer) 때문이다.

비유하자면, 자동차가 시속 100km에서 200km로 빨라지면 연료 소모가 2배가 아니라 4배 이상 증가하는 것과 같다. 공기저항이 속도의 제곱에 비례하듯이, 구리에서의 신호 손실도 주파수의 제곱에 비례한다.

구리선이 촘촘하게 배치될수록 인접 선로 간 전자기 간섭이 심해진다. 고밀도 데이터센터에서는 수백 개의 구리 케이블이 좁은 공간에 밀집하므로, 크로스토크(crosstalk)가 심각한 문제가 된다. 광섬유는 파장 간 간섭이 제로이므로, 이 문제가 근본적으로 존재하지 않는다.

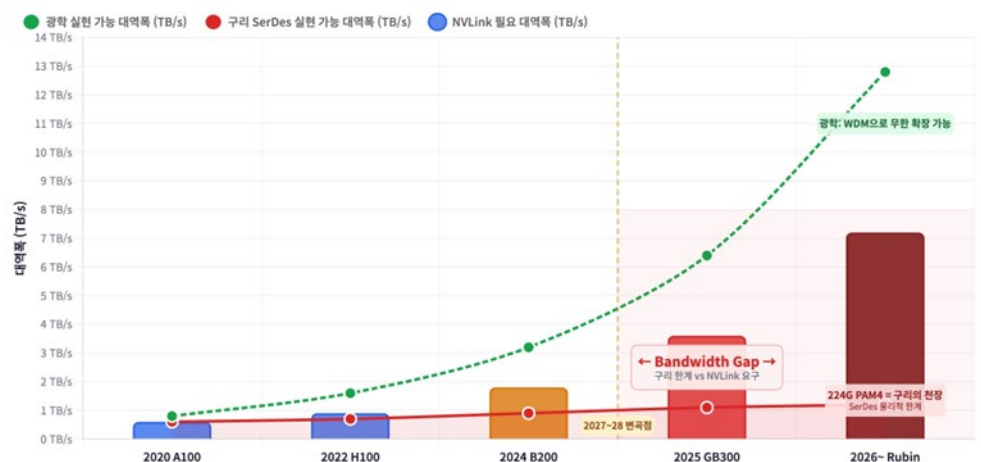
3. 대역폭(Bandwidth)가 강제하는 광 전환

AI 가속기의 I/O 대역폭은 세대마다 2배씩 증가하지만, 구리 인터커넥트의 대역폭 확장은 물리적 한계에 봉착했다. 이 '대역폭 격차(Bandwidth Gap)'가 구리→광 전환을 불가피하게 만드는 가장 근본적인 이유이며, Scale-Out은 이미 광 전환이 필수 불가결하고, Scale-Across(데이터 센터-데이터 센터 간)는 최근 급격히 확대 중이며, **Scale-Up은 단기적으로 구리가 유지되나 대역폭 증가에 따른 손실로 궁극적으로 광 전환이 불가피하다.**

AI 가속기의 연산 성능(FLOPS)은 매년 50~70%씩 성장하고 있으며, 이에 따라 칩 간 데이터 이동 대역폭도 동일한 속도로 증가해야 한다. 그러나 구리 인터커넥트의 레인당 속도는 물리적 한계로 인해 10~15%/년 수준의 증가에 그치고 있다. 이 구조적 격차가 세대를 거듭할수록 기하급수적으로 확대되며, 이것이 광 전환을 강제하는 가장 근본적인 물리법칙이다.

NVIDIA NVLink 대역폭이 600 GB/s(A100) → 900 GB/s(H100) → 1.8 TB/s(B200) → 3.6 TB/s(GB300)로 세대마다 2배 증가. OFC 2026 세션에서 Meta는 ORW(Open Rack Wide) 아키텍처에서 2 Pbps 이상의 Scale-Up 네트워크 I/O 대역폭이 필요하다고 제시했다. 구리 SerDes는 112 Gbps PAM4가 사실상 한계이며, 224 Gbps PAM4는 전력이 2배 이상 증가하여 비실용적이기 때문이다.

그림 3. 대역폭의 한계에 도달



자료: OFC 2026, 미래에셋증권 리서치센터

구리 인터커넥트의 대역폭을 결정하는 핵심 기술은 SerDes(Serializer-Deserializer)이다. SerDes의 레인당 속도가 곧 구리 인터커넥트의 속도 상한을 결정하는데, 현재 이 기술은 명확한 물리적 벽에 도달했다.

112G PAM4에서 224G PAM4로의 전환은 단순히 속도를 2배로 올리는 것이 아니다. 채널 손실이 비선형적으로 증가하고, 이를 보상하기 위한 DSP의 복잡도와 전력이 2배 이상으로 급증한다. OFC 2026의 컨센서스는 '224G PAM4가 구리의 마지막 세대'라는 것이다. 그 이후는 구리로는 물리적으로 불가능한 영역이다.

표 6. SerDes 세대별 실용성 평가

SerDes 세대	레인 속도	변조 방식	채널 손실	전력 효율	실용성 평가
56G (현행)	56 Gbps	PAM4	~25 dB (NRZ)	3~5 pJ/bit	성숙, 양산 중
112G (현행+)	112 Gbps	PAM4	~30 dB	5~8 pJ/bit	양산 초기
224G (차세대)	224 Gbps	PAM4	~35 dB+	10~15+ pJ/bit	실용적 한계
448G (R&D)	448 Gbps	PAM8/10	~40 dB+	20+ pJ/bit	사실상 불가능

자료: OFC 2026, 미래에셋증권 리서치센터

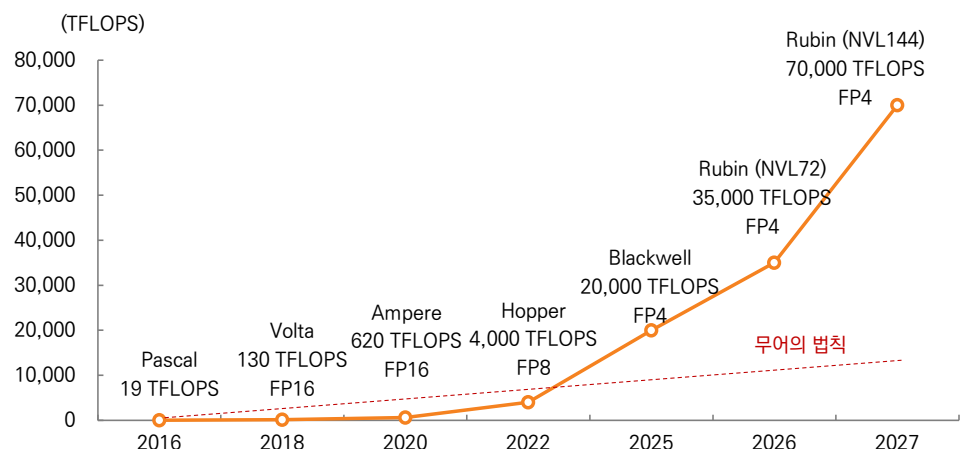
Scale-Out 광학 기업은 이미 수혜 구간에 진입했다. Scale-Across의 급격한 확대는 OCS, DCI 코히어런트, HCF 기업에 새로운 성장 동력을 제공한다. Scale-Up은 2027~2028년부터 실리콘 포토닉스와 THz 기업의 수혜가 본격화될 전망이다. 양산 단계는 상황을 지켜봐야 한다고 OFC 2026에서 밸류체인 업체들의 엔지니어들은 얘기한다.

표 7. Scale-Out, Scale-Across, Scale-up 전환 타임라인 종합

영역	현재 상태	2027~2028	2029~	광 전환 동인
Scale-Out	광 전환 필수 불가결	1.6T CPO 주류화	3.2T 전면 광학화	대역폭+거리 한계
Scale-Across	급격히 확대 중	OCS+HCF 80km 상용	100K+ GPU 분산 클러스터	전력/부지 한계
Scale-Up	구리 지배 (한계 근접)	THz 하이브리드 도입	SiPh 광학 I/O 필수 대	역폭 손실 급증

자료: OFC 2026, 미래에셋증권 리서치센터

그림 4. GPU의 성능은 무어의 법칙을 거스르면서 성장



자료: 미래에셋증권 리서치센터

Scale-Out: 광 전환 필수 불가결

AI 클러스터의 인터커넥트를 거리에 따라 세 가지 영역으로 분류하면, 각 영역에서 대역폭 증가가 광 전환을 강제하는 메커니즘이 명확해진다. Scale-Out(서버 간, 5~수백 m)은 구리에서 광으로의 전환이 이미 진행 중이며, 현 시점에서 필수 불가결하다. 핵심 근거는

1) 대역폭 요구가 구리의 물리적 한계를 초과했다. 800G 이더넷은 라인당 100G × 8레인 또는 200G × 4레인으로 구성되는데, 200G/레인에서 구리 DAC의 최대 도달 거리는 2~3m에 불과하다. 서버 간 거리가 통상 5~100m인 데이터센터에서 이는 완전히 부족하다. 1.6T(2027~2028)와 3.2T(2029~) 세대로 가면 구리는 물리적으로 역할을 수행할 수 없다.

2) AI 분산 훈련의 All-Reduce 통신 오버헤드가 핵심 병목이다. OFC 2026 데이터에 따르면, Meta 프로덕션 네트워크에서 DNN 훈련 시 통신이 전체 이터레이션 시간의 최대 60%를 차지하는 경우가 관측되었다. 이는 대역폭 부족이 GPU 활용률을 40%까지 떨어뜨릴 수 있다는 의미이다. 광학 인터커넥트로 전환하면 All-Reduce 오버헤드를 1~5% 수준으로 낮출 수 있다.

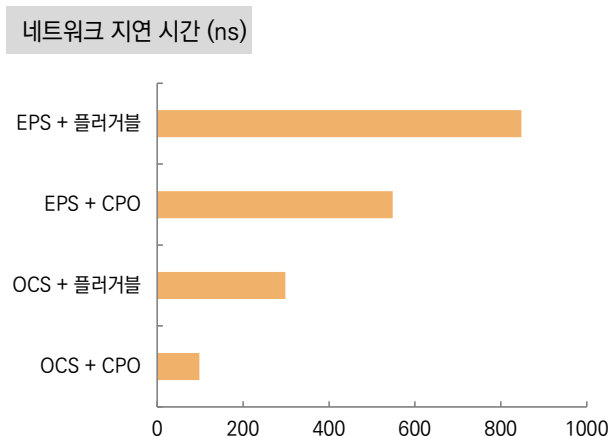
3) OCS(Optical Circuit Switching) 기반 Scale-Out 네트워크가 전기 패킷 스위치(EPS) 대비 압도적인 성능 개선을 보였다. OFC 2026에서 발표된 RON(Reconfigurable Optical Network) 아키텍처는 전기 스위치 대비 통신 시간을 656.7% 개선했고, 65,000 GPU 규모에서는 1,049.3%의 개선을 달성했다. 이는 Scale-Out에서 광학이 단순히 더 나은 대안이 아니라 유일하게 작동하는 솔루션임을 입증한다.

표 8. Scale Out 스펙 비교

Scale-Out 메트릭	구리 (현재)	광학 (OFC 2026)	개선 효과
최대 링크 속도	800G (한계 근접)	800G → 1.6T → 3.2T	로드맵 확보
All-Reduce 오버헤드	40~60% (이터레이션)	1~5% (목표)	10배+ 개선
도달 거리 (200G/레인)	2~3m	수십 km	1,000배+
10K+ GPU 클러스터	병목 심각	RON 1,049% 개선	대규모 필수
전력 효율	10+ pJ/bit	1~3 pJ/bit	3~10배

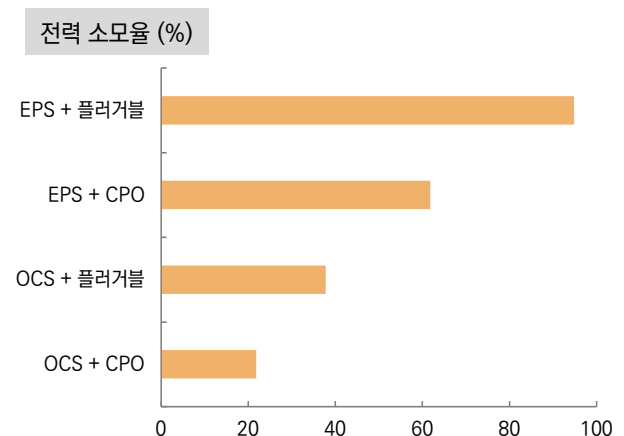
자료: OFC 2026, 미래에셋증권 리서치센터

그림 5. 네트워크 지연 시간 비교



자료: OFC 2026, 미래에셋증권 리서치센터

그림 6. 전력 소모율 비교



자료: OFC 2026, 미래에셋증권 리서치센터

Scale-Across: 최근 급격히 확대 중 - 데이터센터 간 광학 네트워크의 부상

Scale-Across(데이터센터 간, 수 km~80 km)는 최근 가장 빠르게 광 침투가 확대되고 있는 영역이다. 그 배경에는 AI 클러스터의 물리적 한계가 있다.

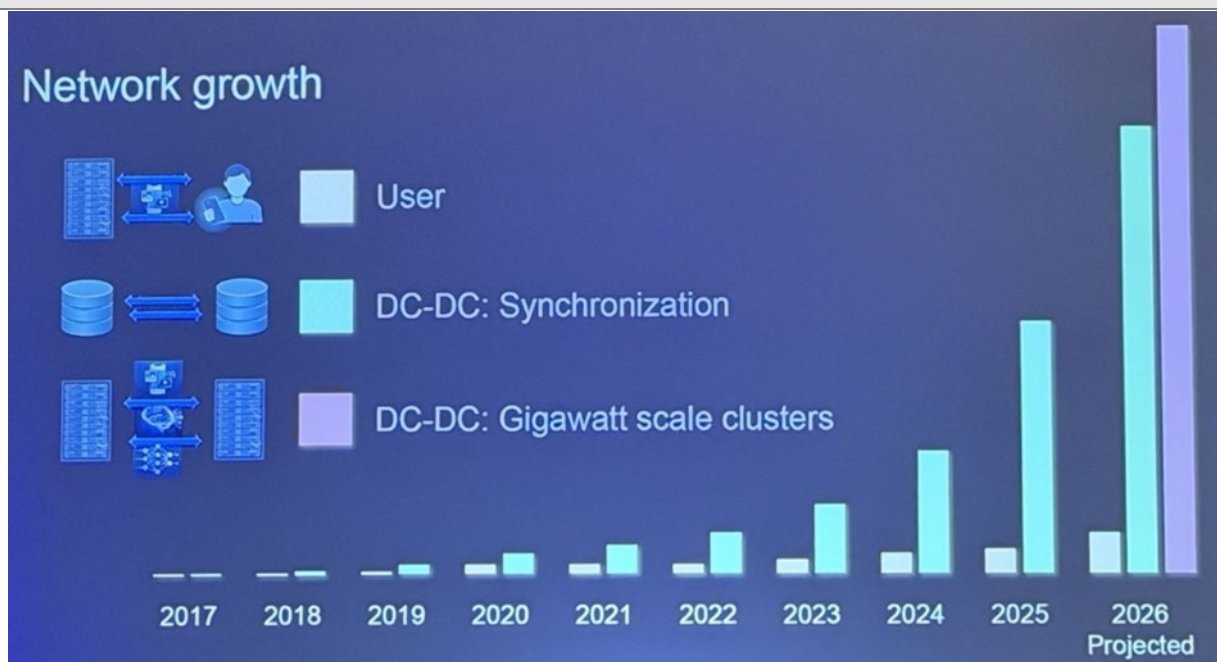
1) 단일 데이터센터의 전력 용량 한계이다. AI 훈련에 필요한 GPU 수가 10,000개를 넘어 100,000개 이상으로 확장되면서, 한 건물에 모든 GPU를 수용할 수 없게 되었다. 1GW급 데이터센터도 전력이 부족하여, 물리적으로 분산된 여러 데이터센터를 하나의 AI 클러스터로 연결해야 한다.

2) OFC 2026에서 발표된 OCS(Optical Circuit Switching) 기반 Scale-Across 아키텍처가 실질적 성능을 입증했다. ZR(Zero-dispersion Region) 모듈을 활용하면 최대 80km 거리에서 400Gbps 링크가 가능하며, 30km 이내에서는 AI 훈련 작업 완료 시간에 사실상 영향을 주지 않는 것이 검증되었다. 이는 같은 도시 내 분산된 데이터센터들을 하나의 논리적 클러스터로 묶을 수 있다는 혁명적 의미를 갖는다.

3) 600km LLM 분산 훈련이 OFC 2026에서 시연되었다. HCF(Hollow-Core Fiber)를 활용하면 RTT(왕복 지연시간)를 33% 줄여, 장거리에서도 분산 훈련의 효율 손실을 5% 미만으로 억제할 수 있다. 서울~부산 거리의 데이터센터를 하나의 AI 클러스터로 운영하는 것이 기술적으로 가능해진 것이다.

4) OCS 기반 Scale-Across 네트워크의 전력 및 확장성 이점이 극적이다. OFC 2026에서 발표된 OCS-DRP 아키텍처는 기존 ROFT 방식 대비 16배 더 많은 GPU를 연결하면서 전력 소비는 40% 절감하는 성과를 보였다.

그림 7. 추론 시장 급격한 개화. DC(데이터 센터)-DC 간에 클러스터 중요도가 굉장히 부각되고 있음



자료: OFC 2026, 미래에셋증권 리서치센터

Scale-Across의 급격한 확대는 AI 산업의 구조적 변화를 반영한다. 하나의 거대한 데이터 센터에서 여러 데이터센터를 광학으로 연결한 분산 AI 클러스터로의 패러다임 전환이 진행 중이며, 이 전환의 핵심이 바로 광학 인터커넥트이다. 여러 논문에서 비춰보듯이, 여러 선행 기술들(OCS, ZR 모듈, HCF)의 조합이 이를 가능하게 만들고 있다.

Scale-Up: 단기 구리 → 장기 광 전환의 마지막 프론티어

Scale-Up(칩 간, 수cm~ 수m)은 현재 구리가 여전히 지배하는 영역이다. NVLink 4(H100)는 900 GB/s를 구리 기반으로 달성하고 있으며, 짧은 거리(수 cm)에서 구리는 여전히 비용 효율적이다. 그러나 대역폭 증가가 계속되면, 여기서도 광 전환이 필수가 되는 시점이 반드시 온다.

대역폭 증가에 따른 구리의 손실 급증이 핵심 메커니즘이다. NVLink 대역폭이 세대마다 2배씩 증가하면서, 구리 기반으로 이를 구현하기 위해 필요한 SerDes 레인 수와 레인당 속도가 동시에 증가해야 한다. 문제는 레인당 속도가 올라갈수록 구리에서의 감쇠(loss)가 비선형적으로 급증한다는 것이다.

표 9. NVLink 세대별 대역폭 및 구현 방식 전망

NVLink 세대	대역폭	구현 방식	구리 손실	광 전환 시점
NVLink 3 (A100)	600 GB/s	구리 (50G PAM4)	낮음 (<20 dB)	불필요
NVLink 4 (H100)	900 GB/s	구리 (100G PAM4)	관리 가능 (25 dB)	불필요
NVLink 5 (B200)	1.8 TB/s	구리+리타이머	높음 (30+ dB)	검토 시작
차세대 (GB300)	3.6 TB/s	구리 한계 + THz 대안	매우 높음 (35+ dB)	부분적 광 전환
Rubin 세대	7.2 TB/s+	광학 필요성 증가	높은 구리 개선 필요	광 전환 필요성 증가

자료: 미래에셋증권 리서치센터

구리에서의 감쇠가 30 dB를 넘으면 리타이머 없이는 신호 전달이 불가능하고, 리타이머 자체가 7~15W의 전력을 소모하며 지연시간을 추가한다. 35 dB를 넘으면 다중 리타이머가 필요하거나 사실상 구리로는 구현이 불가능해진다.

NVIDIA가 OFC 2026에서 자체 실리콘 포토닉스 마이크로링 변조기(MRM)를 발표한 것은, Scale-Up에서도 광 전환이 불가피하다는 판단을 GPU 최대 제조사가 내렸다는 강력한 시그널이다. NVIDIA MRM은 기존 대비 5배의 전력 효율 개선과 10배의 내구성 향상을 달성했으며, 이는 NVLink의 광학 버전을 준비하고 있음을 시사한다.

또한 THz 인터커넥트(<3 pJ/bit, 50~100m)가 구리와 광의 중간 영역에서 새로운 대안으로 부상하고 있다. 표준 ASIC 공정으로 제조 가능하면서 광학 수준의 전력 효율을 달성하므로, Scale-Up에서 구리→광 전환의 가교 역할을 할 것으로 예상된다.

단기(2025~2027)에는 1.8 TB/s까지 구리 기반이 유지될 것이나, 3.6 TB/s(2027~2028)부터 THz 하이브리드가 도입되고, 7.2 TB/s+(2029~)에서는 실리콘 포토닉스 기반 광학 Scale-Up이 필수가 된다. 결국 구리의 마지막 보루인 Scale-Up도 대역폭 증가가 물리적 손실 한계를 넘는 순간, 광으로의 전환은 시간 문제일 뿐이다. 다만, 기술 개발이 선행이 되어도 경제성을 고려하여 양산 단계의 선택은 지연될 가능성도 존재한다.

4. 광의 등장: 메모리→인터커넥트로 이어지는 AI 밸류체인 확장

광학 인터커넥트는 전력(1/10), 거리(수십km 이상), 간섭(제로), 밀도(WDM으로 단일 파이버 다채널)에서 구리를 압도한다. 이는 물리법칙에 기반한 근본적 우위이다.

광학 인터커넥트는 데이터를 전기 신호가 아닌 빛(레이저)으로 변환하여 광섬유를 통해 전송하는 기술이다. 원리를 간단히 설명하면 다음과 같다:

1단계 송신: 레이저 광원에서 빛을 만들고, 변조기(modulator)가 데이터에 따라 빛의 밝기나 위상을 변화시킨다.

2단계 전송: 변조된 빛이 광섬유를 따라 이동한다. 빛은 유리 속에서 거의 손실 없이 수십 km를 이동할 수 있다.

3단계 수신: 광검출기(photodetector)가 빛을 다시 전기 신호로 변환한다.

거리별 최적 인터커넥트 기술

OFC 2026에서 형성된 컨센서스는, 하나의 기술이 모든 거리를 커버하는 것이 아니라 거리에 따라 최적의 기술이 다르다는 것이다.

과거에는 '장거리 = 광학, 단거리 = 구리'라는 단순한 구분이었지만, AI 시대에는 그 경계가 급격히 광학 쪽으로 이동하고 있다. 5미터 이상이면 이미 광학이 유리하고, THz 인터커넥트의 등장으로 1~5미터 영역도 잠식당하고 있다.

광학 전환은 처음이 아니다. 과거에도 장거리 통신(해저 케이블)에서 구리가 광섬유로 대체되었고, 이후 메트로(도시 간) 네트워크, 그리고 액세스(가정까지) 네트워크로 광학이 확대되어 왔다. 이번에 **OFC 2026에서 확인된 것은, 이 광학 침투가 이제 데이터센터 내부까지, 나아가 칩과 칩 사이까지 확대되고 있다는 것이다.** 이는 '광학의 마지막 마일'이라 할 수 있다. 장거리에서 시작된 광학 전환이 점점 짧은 거리로 내려와, 마침내 칩 수준에 도달한 것이다.

표 10. 현재 거리간 최적 기술

거리	최적 기술	핵심 이유	해당 영역
<1m	구리 (PCB 트레이스)	가장 저비용, 충분한 성능	칩-to-칩 (보드 내)
1~5m	구리 DAC / THz 하이브리드	구리 한계 근접, THz 대안 등장	서버 내부
5~100m	THz 인터커넥트 / 광학	<3 pJ/bit, 구리 불가 영역	랙 간 연결
100m~2km	광학 (IM/DD)	구리 불가, 광학 필수	데이터센터 내
2~80km	광학 (코히어런트)	장거리 전송	캠퍼스/메트로
80km+	광학 (장거리 코히어런트)	해저/대륙간	DCI/장거리

자료: OFC 2026, 미래에셋증권 리서치센터

III. CPO(Co-Packaged Optics): 칩 위에 광(빛)을 올린다

1. CPO란?

현재 데이터센터의 스위치는 '플러그블(pluggable)' 방식으로 광학 모듈을 사용한다. 이를 쉽게 비유하면 다음과 같다: USB 메모리를 컴퓨터에 꽂아서 사용하는 것처럼, 광학 모듈(QSFP-DD, OSFP 등)을 스위치에 '꽂아서' 사용한다. 이 모듈 안에는 레이저, 변조기, 드라이버 등 데이터를 빛으로 바꾸는 모든 부품이 들어있다.

이 방식의 장점은 모듈을 쉽게 교체할 수 있다는 것이다. 하나가 고장나면 뽑고 새것을 꽂으면 된다. 하지만 치명적인 단점이 있다:

1) 전력 낭비: 스위치 칩(ASIC)에서 나온 전기 신호가 긴 PCB 트레이스를 따라 모듈까지 이동해야 한다. 이 거리가 10~30cm이며, 이 과정에서 상당한 전력이 낭비된다.

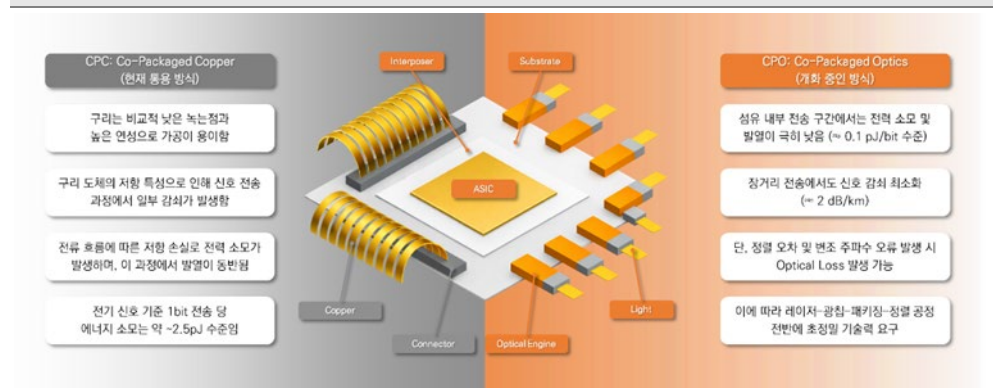
2) 밀도 한계: PCB 트레이스를 통한 고속 전기 신호 전송에 한계가 있어, 포트 수를 늘리는 데 물리적 제약이 있다.

3) 지연시간: 전기 신호가 긴 경로를 이동하면서 지연이 발생한다.

CPO는 다르다. CPO는 이 광학 모듈을 스위치 칩의 기판(substrate) 위에 직접 올리는 것이다. 비유하자면, USB 메모리를 컴퓨터에 꽂는 것이 아니라, 메모리 칩을 컴퓨터의 메인 보드에 직접 납땜하는 것과 같다.

이렇게 하면 스위치 칩에서 광학 엔진까지의 거리가 수 mm로 줄어든다. 기존 10~30cm의 PCB 트레이스가 불필요해지므로, 전력이 크게 절감되고 지연시간도 최소화된다.

그림 8. CPO-CPC 구조 비교



자료: 미래에셋증권 리서치센터

표 11. 플러거블 Vs. CPO 비교

비교 항목	플러거블 (현재)	CPO	개선 효과
광학 모듈 위치	스위치 전면 패널에 꼽음	칩 기판 위에 직접 부착	전기 경로 대폭 축소
ASIC-광학 거리	10~30 cm (PCB 트레이스)	수 mm (기판 위)	전력 65% 절감
전력 소모	10+ pJ/bit	~3.5 pJ/bit	3배 절감
포트 밀도	전면 패널 물리적 제한	기판 면적 최적 활용	크게 향상
지연시간	다단계 전기→광 변환	최소 경로 직접 변환	최소화
교체 용이성	핫플러그 (바로 교체)	필드 교체 PLS	약간 불리
열 관리	모듈별 개별 냉각	통합 냉각 필요	설계 복잡도 증가
표준화 단계	성숙 (MSA 확립)	OIF 프레임워크 발표	빠르게 진행 중

자료: 미래에셋증권 리서치센터

왜 65%나 절감되는가?

- 1) SerDes/리타이머 제거 (~40%): 기존에 ASIC에서 모듈까지 10~30cm의 PCB 트레이스를 통해 고속 전기 신호를 전송할 때 필요한 리타이머, CDR, 이퀄라이저가 불필요해진다. 이것만으로 전체 전력의 약 40%가 절감된다.
- 2) 드라이버 전력 감소 (~15%): 짧은 전기 경로는 더 낮은 전압의 드라이버로도 충분하다. 구동 전압이 낮아지면 전력은 전압의 제곱에 비례하여 감소한다.
- 3) DSP 간소화 (~10%): 신호 품질이 좋아져 복잡한 DSP 처리가 줄어들고, 이에 따른 전력 절감 효과가 추가된다.

2. Broadcom Tomahawk 6 CPO 시연 - OFC 2026 핵심 성과

OFC 2026에서 가장 주목받은 발표 중 하나는 Broadcom의 Tomahawk 6 기반 CPO 스위치 시연이다. 이 시연이 중요한 이유는, CPO가 더 이상 '실험실 데모'가 아니라 실제 데이터센터에서 사용할 수 있는 수준에 도달했음을 보여주기 때문이다. Meta가 3,600만 디바이스-시간이라는 대규모 스트레스 테스트를 수행한 것은, 하이퍼스케일 데이터센터 운영자가 CPO를 진지하게 검토하고 있다는 신호이다.

표 12. Tomahawk 6 CPO 시연 데이터

항목	사양	설명
스위치 ASIC	Tomahawk 6	Broadcom의 최신 스위칭 칩
총 스위칭 용량	102.4 Tbps	현존 최고 수준
광학 엔진	16개 × 6.4 Tbps	실리콘 포토닉스 기반
포트 구성	256 × 400G FR4	FR4 = 2km 도달 거리
전력 절감	~65%	기존 플러거블 대비
신뢰성 테스트	36M 디바이스-시간	Meta에서 수행
표준	OIF CPO 프레임워크	ELSFP IA 포함

자료: Broadcom, 미래에셋증권 리서치센터

이 시연이 중요한 이유는, CPO가 더 이상 '실험실 데모'가 아니라 실제 데이터센터에서 사용할 수 있는 수준에 도달했음을 보여주기 때문이다. **Meta가 3,600만 디바이스-시간이라는 대규모 스트레스 테스트를 수행한 것은, 하이퍼스케일 데이터센터 운영자가 CPO를 진지하게 검토하고 있다는 신호이다.**

3. 핵심 기술 요소 심층 분석

CPO가 실제로 작동하려면 여러 핵심 기술이 동시에 성숙해야 한다. OFC 2026에서는 이 기술들의 괄목할 만한 진전이 확인되었다.

외부 레이저 소스(External Laser Source, ELS)

레이저는 빛을 만들어내는 장치인데, 작동할 때 상당한 열을 발생시킨다. 만약 레이저를 스위치 칩 바로 옆에 두면, 칩의 열과 레이저의 열이 합쳐져 열 관리가 극도로 어려워진다. 따라서 CPO에서는 레이저를 외부에 별도로 배치하고, 광섬유를 통해 빛만 전달한다.

이 외부 레이저 소스를 '현장에서 교체할 수 있는 모듈'로 만든 것이 ELSFP(External Laser Small Form-Factor Pluggable)이다. 기존 플러그블 방식의 교체 편의성을 레이저 부분에만 적용한 셈이다.

접합 온도 65°C 미만 유지가 핵심인 이유는, 반도체 레이저의 수명이 온도에 지수적으로 의존하기 때문이다. 온도가 10°C 올라갈 때마다 레이저 수명이 절반으로 줄어드는 것으로 알려져 있다. 따라서 CPO 환경에서 열 관리는 기술적 성패를 가르는 핵심 요소이다.

표 13. 외부레이저 소스(ELS) 달성 사양

기술 요소	달성 사양	의미
채널 수	8ch TOSA / 16ch ELSFP	다채널 집적 완성
채널당 광출력	+20 dBm (100 mW)	충분한 파워 버짓
접합 온도	<65°C 유지	장기 신뢰성 확보
파장 안정성	CWDM4 사양 충족	표준 호환
수명	100,000시간+ 목표	데이터센터 운영 기준

자료: OFC 2026, 미래에셋증권 리서치센터

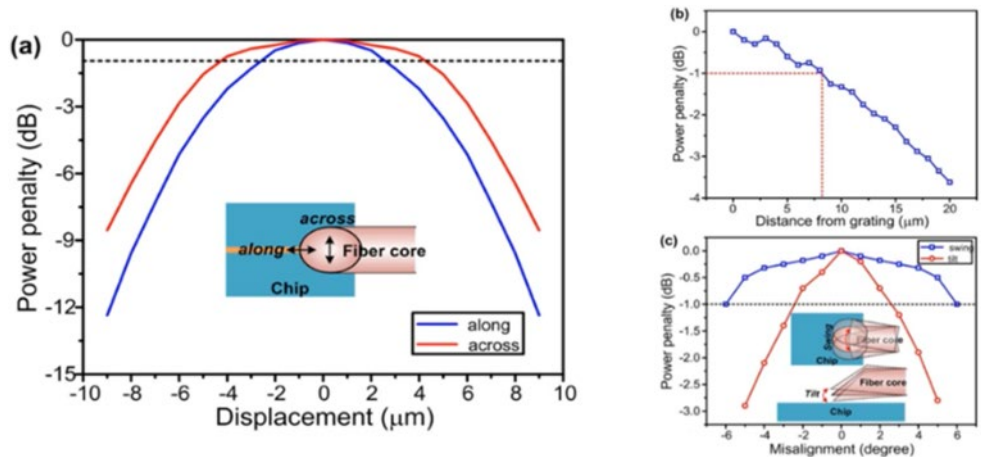
수직 광 결합 테이퍼(Vertical Optical Coupling)

광학 시스템에서 가장 어려운 부분 중 하나는 '빛을 정확히 원하는 곳에 보내는 것'이다. 쉽게 말해, 광섬유에서 나오는 빛을 칩 위의 광검출기에 정확히 맞춰야 하는데, 이때 정렬(alignment) 정밀도가 매우 중요하다. Polleux 연구팀은 멀티모드 파이버에서 고속 광검출기로의 수직 광 결합 테이퍼를 시연했다. 핵심 성과는 다음과 같다:

- 1) **결합 효율**: 95% 이상의 결합 효율 달성 — 빛의 손실이 5% 미만이라는 의미
- 2) **정렬 허용**: $\pm 25\mu\text{m}$ 이상의 정렬 허용 범위 — 조립 공정의 실용성 대폭 향상
- 3) **소형화**: 15~30 μm 광학 개구부, <10 μm 하부 폭으로 소형화

이 수치가 왜 중요한지 설명하면, $\pm 25\mu\text{m}$ 는 사람 머리카락 두께의 약 절반이다. 기존에는 $\pm 5\mu\text{m}$ 이하의 정밀도가 필요했는데, 이를 5배 이상 완화한 것이다. 이는 대량 생산에서 수율(양품률)을 크게 높이고 비용을 낮추는 핵심 요소이다.

그림 9. 조금의 Displacement(광섬유와 칩 위치의 불일치)에도 엄청난 광손실이 초래됨



자료: University of Florida, 미래에셋증권 리서치센터

표준화 진전

OIF(Optical Internetworking Forum)는 OFC 2026에서 두 가지 핵심 문서를 발표했다:

- 1) Co-Packaging Framework Document:** CPO 생태계 전반의 인터페이스, 열 관리, 전기/광학 사양을 정의. 여러 벤더의 부품을 조합할 수 있는 기반 마련
- 2) ELSFP Implementation Agreement:** 외부 레이저 소스 모듈의 폼팩터, 전기/광학 인터페이스 표준. 현장 교체(field-replaceable) 가능한 PLS(Pluggable Laser Source)의 규격 정의

표준화가 완료되었다는 것은 산업계가 CPO 도입을 위한 생태계 구축에 본격적으로 합의했다는 의미이다. 과거 플러거블 광학 모듈이 MSA(Multi-Source Agreement) 표준화를 거쳐 대량 보급된 것과 같은 경로를 CPO도 밟고 있다.

표 14. CPO 도입의 단계적 로드맵

단계	시기	주요 이벤트	핵심 업체
기술 실증	2023~2024	CPO 데모 시연, 초기 표준화 논의	Broadcom, Intel
표준화 완료	2025	OIF 프레임워크, ELSFP IA 발표	OIF, IEEE
초기 양산	2025~2026	51.2T CPO 스위치 출하 시작	Broadcom, Meta
확대 채택	2027~2028	차세대 라우터 표준 아키텍처	대부분의 스위치 벤더
주류화	2029~	102.4T CPO, NPO 2세대	전체 생태계

자료: OFC 2026, 미래에셋증권 리서치센터

SerDes/리타이머 제거 (~40%): 기존에 ASIC에서 모듈까지 10~30cm의 PCB 트레이스를 통해 고속 전기 신호를 전송할 때 필요한 리타이머, CDR, 이퀄라이저가 불필요해진다. 이것만으로 전체 전력의 약 40%가 절감된다.

- 드라이버 전력 감소 (~15%): 짧은 전기 경로는 더 낮은 전압의 드라이버로도 충분하다. 구동 전압이 낮아지면 전력은 전압의 제곱에 비례하여 감소한다.
- DSP 간소화 (~10%): 신호 품질이 좋아져 복잡한 DSP 처리가 줄어들고, 이에 따른 전력 절감 효과가 추가된다.

핵심 업체별 포지션

Broadcom – CPO 스위칭 플랫폼 리더

Tomahawk 시리즈에 CPO를 통합한 최초의 상용 수준 제품을 시연. 차세대 102.4 Tbps 스위치에서도 CPO 아키텍처를 계승할 것으로 예상. 스위치 ASIC과 광학 엔진의 수직 통합이 경쟁 우위.

Meta/하이퍼스케일러 – 최대 수요자이자 기술 검증자

3,600만 디바이스-시간의 대규모 신뢰성 테스트를 수행하여, CPO가 하이퍼스케일 환경에서 실제로 작동함을 검증. 이는 다른 데이터센터 운영자들의 도입 의사결정에 결정적 영향을 미칠 것. Google, Microsoft 등도 유사한 평가를 진행 중으로 추정.

Intel – 실리콘 포토닉스 통합 프로그램

자체 실리콘 포토닉스 기술을 보유하고 있으며, CPU/GPU와의 광학 I/O 통합을 추진 중. 장기적으로 칩-레벨의 광학 I/O 집적이 목표. FPGA(현 Altera)에도 광학 인터페이스 통합을 검토.

NTT 포토닉스/Furukawa – 광 컴포넌트 핵심 공급자

고출력 외부 레이저 소스(ELS), 8/16채널 TOSA 개발. 접합 온도 65°C 미만 유지 기술로 CPO 환경에서의 레이저 신뢰성 확보. 일본 광 부품 생태계의 핵심 축.

imec/GlobalFoundries – 실리콘 포토닉스 파운드리

300mm 웨이퍼 기반 실리콘 포토닉스 공정을 제공하여, 광학 칩의 대량 생산을 가능하게 한다. 반도체와 동일한 제조 라인에서 광학 소자를 만들 수 있다는 점이 비용 절감의 핵심. CMOS 호환 공정으로 기존 반도체 제조 인프라를 그대로 활용 가능.

IV. Scale-out 서버 간 연결의 광학 전환

Scale-Out 인터커넥트는 광 전환이 필수 불가결한 영역이다. 800G가 2025~2026년에 본격 배치되고, 1.6T(2027~2028), 3.2T(2029~)로 진화하는데, 이 모든 세대에서 구리는 거리와 대역폭 한계로 역할을 수행할 수 없다. HCF는 35~40% 증폭 전력 절감과 30% 지연 시간 감소를 달성하는 게임체인저이며, OCS 기반 광학 네트워크는 전기 패킷 스위치 대비 최대 1,049% 성능 개선을 입증했다.

10,000+ GPU를 연결하는 AI 클러스터에서 Scale-Out 네트워크는 All-Reduce, All-to-All 등의 집합 통신(collective communication)을 수행한다. OFC 2026에서 발표된 데이터에 따르면, Meta 프로덕션 환경에서 DNN 훈련 시 통신 오버헤드가 이터레이션 시간의 최대 60%를 차지하는 경우가 관측되었다. 이는 구리 기반 Scale-Out 네트워크의 대역폭이 GPU 연산 속도를 따라가지 못한다는 직접적 증거이다.

OCS(Optical Circuit Switching) 기반 Scale-Out 네트워크는 이 문제를 근본적으로 해결한다. OFC 2026의 RON(Reconfigurable Optical Network) 연구에서, 광학 네트워크는 전기 패킷 스위치 대비 All-Reduce 통신 시간을 656.7% 단축했고, 65,000 GPU 규모에서는 1,049.3%의 개선을 달성했다. 이는 대규모 AI 클러스터에서 광학이 “더 나은 선택”이 아니라 “유일한 선택”임을 의미한다.

Scale-Out이란?

Scale-Out은 서로 다른 서버(또는 랙) 사이를 연결하는 네트워크를 의미한다. AI 훈련에서 여러 대의 서버가 협력하여 하나의 모델을 훈련시키는데, 이때 서버 간에 기울기(gradient) 데이터를 교환해야 한다. Scale-Out 네트워크의 속도가 느리면, GPU들이 서로 기다리느라 실제 연산 시간보다 통신 대기 시간이 더 길어질 수 있다.

비유하자면, Scale-Out은 여러 개의 공장이 부품을 주고받는 '물류 도로'에 해당한다. 이 도로가 좁으면 아무리 공장이 빠르게 만들어도, 부품 전달이 늦어져 전체 생산성이 떨어진다.

1. 데이터 속도 로드맵: 800G → 1.6T → 3.2T

800G가 현재 배치 중이며, 1.6T는 2027~2028년 주류화, 3.2T는 2029년 이후 도래할 전망이다. 레인당 속도는 100G → 200G → 400G+로 진화하며, 변조 방식도 PAM4에서 PAM8/10으로 고도화된다.

표 15. 세대별 상세 로드맵

세대	총 속도	레인 속도	레인 수	변조 방식	도입 시기	핵심 기술
현행	400G	100G	4	PAM4	2023~2024	400ZR 코히어런트
현행+	800G	100G	8	PAM4	2025~2026	IM/DD, DSP 고도화
차세대	1.6T	200G	8	PAM4	2027~2028	1600ZR+, CPO
차세대	3.2T	400G	8	PAM8/10	2029~	SiPh 고급 변조

자료: OFC 2026, 미래에셋증권 리서치센터

1) 800G 세대 (2025~2026)

800G는 레인당 100G × 8레인 또는 200G × 4레인으로 구성된다. 기존 400G 대비 대역폭이 2배 증가하며, 데이터센터 내 Spine-Leaf 토폴로지에서도 대규모 배치가 시작되고 있다. 핵심 과제는 800G 모듈의 비용 절감과 전력 효율화이며, LPO(Linear Pluggable Optics)가 DSP 전력을 줄이는 대안으로 부상했다.

OFC 2026에서 Alibaba가 102.4 Tbps 스위치 기반 LPO vs CPO 비교를 발표했고 BER 1E-9~1E-13 범위에서 LPO의 DSP-less 아키텍처가 전력 절감 효과 입증했다.

2) 1.6T 세대 (2027~2028)

1.6T는 레인당 200G × 8레인으로 구성되며, 이 세대에서 CPO와 코히어런트 기술이 본격 결합된다. 1600ZR+는 장거리에서 1.6T를 코히어런트 방식으로 전송하는 표준이다. 이 세대가 '핵심 변곡점'인 이유는, 레인당 200G에서 구리의 한계가 명확해지기 때문이다. 200G/레인인 구리 DAC으로 2~3미터가 최대이며, 이는 랙 간 연결에 전혀 부족하다.

3) 3.2T 세대 (2029~)

3.2T는 레인당 400G 이상을 요구하며, PAM4를 넘어 PAM8이나 PAM10 등 고도 변조 방식이 필요하다. 이는 실리콘 포토닉스 변조기의 성능이 핵심이며, 현재 OFC 2026에서 448 Gbps PAM4까지 시연된 상태이다. 이 세대에서는 CPO가 사실상 필수 아키텍처가 되며, 플러거블 방식으로는 전력/밀도 한계를 감당할 수 없다.

Broadcom-Micas: Mach-Zehnder 채택했고 공랭식으로 이미 양산 중이다.

Nvidia: Microring 채택했고, 액체냉각 방식으로 26년 양산 예정이다.

Nvidia Quantum-X(InfiniBand)·Spectrum-X(Ethernet) 이원화 전략을 구사하고 있고, 11개 파트너와 공동 최적화하고 있어, 생태계르 만들고 있다. Microring은 면적 효율 우수하나 온도 민감도 높아 열 제어 난이도 상승 → 기술 진입장벽이 존재한다.

현재 차세대 확장 방향은 Lithium Niobate·Indium Phosphide 이중 소재 통합하거나 광 인터커넥트의 GPU 패키지 내 확장하는 방식으로 접근한다. (Ayar Labs, Lightmatter 등)

2. HCF(Hollow-Core Fiber): 광섬유의 게임체인저

기존 광섬유는 유리로 된 코어(core)에 빛을 가두어 전송한다. 빛이 유리 속을 이동하면서 약간의 흡수와 산란이 발생하여 손실(감쇠)이 생긴다. HCF(Hollow-Core Fiber)는 이름 그대로 코어가 비어 있는(hollow) 광섬유이다. 빛이 유리가 아닌 공기(또는 진공) 속을 이동한다.

왜 이것이 혁명적인가? 빛은 유리보다 공기에서 더 빠르고 더 적은 손실로 이동한다. 유리에서의 빛의 속도는 공기의 약 2/3이므로, HCF에서는 빛이 약 1.5배 빠르게 이동한다(정확히는 유리의 굴절률 차이만큼).

표 16. HCF 성능 지표

성능 지표	기존 SSMF	HCF	개선율	의미
감쇠율 (@1550nm)	0.2 dB/km	0.1 dB/km	50% 감소	증폭 간격 2배 확대
지연시간	~4.9 μ s/km	~3.3 μ s/km	30% 감소	AI 훈련 동기화 개선
비선형성	기준값	~1000배 감소	극적 개선	고출력 전송 가능
C+L+S대역	C+L대역만	동시 전송 가능	대역 확대	용량 대폭 증가
증폭 전력/Tbps	기준값	35~40% 절감	대폭 절감	운영비 절감

자료: OFC 2026, 미래에셋증권 리서치센터

감쇠율이 0.2에서 0.1 dB/km로 줄어드는 것은 단순히 '두 배 더 멀리 보낼 수 있다'는 것 이상의 의미가 있다. 장거리 광통신에서는 감쇠된 신호를 증폭하기 위해 일정 간격으로 증폭기(EDFA)를 설치하는데, 감쇠율이 절반으로 줄면 증폭기 간격을 2배로 늘릴 수 있다. 이는 다음을 의미한다:

- 1) 비용 절감:** 증폭기 수가 절반으로 줄어들어 설치/유지 비용 감소
- 2) 전력 절감:** 각 증폭기가 소모하는 전력이 절약됨 (Tbps당 35~40%)
- 3) 성능 향상:** 비선형 왜곡이 줄어들어 더 높은 변조 차수 사용 가능
- 4) 지연 감소:** 지연시간이 30% 감소하여 AI 분산 훈련의 동기화 효율 향상

HCF의 가장 큰 과제는 제조 비용이다. 기존 SSMF는 수십 년의 양산 경험과 규모의 경제를 통해 km당 비용이 매우 낮다. HCF는 아직 양산 초기 단계이므로 비용이 높지만, 생산 규모가 확대됨에 따라 빠르게 하락할 것으로 예상된다. 또한 기존 SSMF 인프라와의 접속(splice) 기술이 필요한데, OFC 2026에서 이에 대한 진전도 보고되었다.

3. 공간 분할 다중화(SDM)와 다중 코어 파이버

MCF(Multi-Core Fiber)는 단일 파이버 내 복수 코어를 배치하여 전송 용량을 배가하는 기술이다. 8코어 MCF가 $<-40\text{dB/km}$ 크로스토크를 달성하여 데이터센터 파이버 밀도를 혁신적으로 높일 수 있다.

SDM이란?

기존 광섬유는 하나의 코어(빛이 지나가는 통로)를 가지고 있다. 더 많은 데이터를 보내려면 더 많은 광섬유를 설치해야 한다. SDM은 하나의 광섬유 안에 여러 개의 코어를 넣는 기술이다. 비유하자면, 기존 광섬유가 1차선 도로라면, MCF는 8차선 고속도로를 하나의 케이블에 넣는 것이다. 물리적으로 같은 공간에 8배의 데이터를 보낼 수 있다.

표 17. SDM 핵심 성과

기술 요소	달성 성과	의미
코어 수	8코어 (트렌치 보조)	용량 8배 증가 잠재력
크로스토크	$<-40\text{ dB/km}$	코어 간 간섭 극소
복굴절	SMF 수준 (비트 길이 $>10\text{m}$)	편광 다중화 가능
전송 거리	수십 km 이상	데이터센터 간 연결 가능
결합기	Fan-in/Fan-out 개발 완료	기존 장비와 호환 가능

자료: OFC 2026, 미래에셋증권 리서치센터

AI 데이터센터의 규모가 커지면서, 서버 간 연결에 필요한 광섬유 수가 폭발적으로 증가하고 있다. 예를 들어 10,000대의 서버를 Fat-Tree 토폴로지로 연결하면 수만 가닥의 광섬유가 필요하다. 이 광섬유들이 케이블 트레이를 가득 채우면 냉각 공기의 흐름을 방해하고, 케이블 관리가 극도로 복잡해진다.

MCF를 사용하면 8가닥의 광섬유가 하나로 대체되므로, 케이블 수가 1/8로 줄어든다. 이는 데이터센터 설계와 운영에 혁명적인 변화를 가져올 수 있다.

4. 광 증폭 기술과 AI 분산 훈련

다중코어 EDFA가 C+L 대역에서 22.1~26.4 dBm 출력을 달성하고, 600km LLM 분산 훈련이 시연되어 광학 인터커넥트의 AI 적용 가능성이 검증되었다.

광 증폭기의 역할

광섬유를 통해 데이터를 보내면 거리가 멀어질수록 빛이 약해진다(감쇠). 중간에 약해진 빛을 다시 강하게 만들어주는 장치가 광 증폭기이다. EDFA(Erbium-Doped Fiber Amplifier)는 에르븀이 첨가된 특수 광섬유에 펌프 레이저를 쏘아 빛을 증폭한다. 전기로 변환하지 않고 빛 상태 그대로 증폭하므로 속도 저하가 없다.

OFC 2026에서 600km 거리에서의 LLM(대규모 언어 모델) 분산 훈련이 시연되었다. 이것이 왜 중요한가? 현재 AI 훈련은 하나의 데이터센터 내에서 이루어지는 것이 일반적이다. 하지만 데이터센터의 전력 용량 한계, 부지 확보 어려움, 재해 복구 필요성 등으로 인해 여러 지역에 분산된 데이터센터를 연결하여 훈련하는 수요가 증가하고 있다.

600km는 서울~부산 거리에 해당한다. 이 정도 거리에서 AI 훈련이 가능하다는 것은, 서울과 부산의 데이터센터를 하나의 AI 클러스터로 운영할 수 있다는 의미이다. 이는 전력과 부지 제약을 극복하는 핵심 수단이 될 수 있다.

표 18. 광 증폭 기술 중요 발표 내용

기술	성과	응용
4코어 EDFA	C: 22.1dBm, L: 26.4dBm	SDM 네트워크
E+S+C대역 증폭기	20dB 게인, 27dBm, 166nm BW	초광대역 전송
3차 분산 라만 증폭	200km+ SMF 효과적 증폭	장거리 DCI
600km LLM 분산 훈련	분산 AI 훈련 성공	AI 클러스터 분산

자료: OFC 2026, 미래에셋증권 리서치센터

OFC 2026에서 600km 거리에서의 LLM(대규모 언어 모델) 분산 훈련이 시연되었다. 이것이 왜 중요한가? 현재 AI 훈련은 하나의 데이터센터 내에서 이루어지는 것이 일반적이다. 하지만 데이터센터의 전력 용량 한계, 부지 확보 어려움, 재해 복구 필요성 등으로 인해 여러 지역에 분산된 데이터센터를 연결하여 훈련하는 수요가 증가하고 있다.

600km는 서울~부산 거리에 해당한다. 이 정도 거리에서 AI 훈련이 가능하다는 것은, 서울과 부산의 데이터센터를 하나의 AI 클러스터로 운영할 수 있다는 의미이다. 이는 전력과 부지 제약을 극복하는 핵심 수단이 될 수 있다.

물론 600km 거리에서의 지연시간은 약 2~3ms이며, 이는 로컬 연결(수 μ s) 대비 1,000배 이상 크다. 따라서 모든 AI 워크로드가 아닌, 지연시간에 상대적으로 덜 민감한 데이터 병렬 훈련이나 파이프라인 병렬 훈련에 적합하다.

V. Scale-up: 칩과 칩 사이를 빛으로 연결

Scale-Up 인터커넥트는 현재 구리가 지배하는 마지막 영역이지만, 대역폭 증가에 따른 구리 손실(loss) 급증으로 광 전환이 불가피한 시점이 다가오고 있다. NVLink 대역폭이 900 GB/s(H100) → 1.8 TB/s(B200) → 3.6 TB/s(GB300) → 7.2 TB/s+(Rubin)로 세대마다 2배씩 증가하는 과정에서, 구리 SerDes의 레인당 속도 한계(224G PAM4)와 감쇠 급증이 물리적 벽이 된다.

실리콘 포토닉스 변조기가 448 Gbps PAM4를 달성했고, THz 인터커넥트(<3 pJ/bit, 50~100m)가 구리→광 전환의 가교 역할로 부상했다. 단거리(수 cm)에서는 당분간 구리가 유지되나, 대역폭이 3.6 TB/s를 넘어서면 Scale-Up에서도 광 전환은 필수가 된다.

Scale-Up에서의 구리→광 전환 로직: 대역폭이 손실을 강제하는 구조

Scale-Up의 핵심 딜레마는 이렇다. 거리는 짧아서(수 cm~수 m) 구리가 유리하지만, 대역폭 요구가 세대마다 2배씩 증가하면서 레인당 속도를 높여야 하고, 레인당 속도가 올라갈수록 구리에서의 감쇠가 비선형적으로 급증한다. 예를 들어, 100G PAM4 레인은 수 미터 거리에서 25 dB 손실이지만, 224G PAM4는 동일 거리에서 35 dB 이상으로 급증한다. 이 10 dB 차이는 전력이 10배 증가해야 한다는 의미이다. 따라서 대역폭이 7.2 TB/s+를 요구하는 Rubin 세대에서는, 아무리 짧은 거리라도 구리의 전력 효율이 광학에 비해 크게 열위하게 되는 교차점에 도달한다.

Scale-Up은 하나의 서버(또는 노드) 내에서 칩과 칩 사이를 연결하는 인터커넥트를 의미한다. GPU와 GPU, GPU와 메모리, GPU와 네트워크 칩 사이의 초고속 데이터 전송이 여기에 해당한다.

비유하자면, Scale-Out이 공장과 공장 사이의 '고속도로'라면, Scale-Up은 하나의 공장 내부에서 조립 라인과 조립 라인 사이의 '컨베이어 벨트'에 해당한다. 이 컨베이어 벨트가 느리면, 아무리 각 조립 라인이 빨라도 전체 생산성이 떨어진다.

Scale-Up은 거리가 짧지만(통상 수 cm ~ 수 m), 대역폭 요구가 극히 높다. 차세대 GPU 아키텍처는 단일 노드에서 2 TBps 규모의 Scale-Up I/O를 요구하며, 이는 현재 구리 인터커넥트로는 전력 효율적으로 달성하기 어렵다.

Scale-up을 위한 4가지 핵심 기술에 대한 필요성이 있다. 1) 실리콘 포토닉스, 2) THz 인터커넥트, 3) 고속 광검출기, 4) VCSEL 기술 혁신과 열관리이다.

1. 실리콘 포토닉스 변조기의 성능 요약

O 대역 실리콘 마이크로링 변조기가 256 Gbps PAM4(3 THz FSR)를 달성했고, T-코일 인덕티브 피킹으로 448 Gbps PAM4까지 시연되었다. 이는 Scale-Up 광학 I/O의 실용화를 위한 핵심 이정표이다.

실리콘 포토닉스는 기존 반도체(실리콘) 제조 공정을 이용하여 광학 소자(빛을 다루는 부품)를 만드는 기술이다. = 기존에 광학 소자는 인듐인(InP), 갈륨비소(GaAs) 등 특수 재료로 소량 생산되었다. 실리콘 포토닉스를 사용하면 TSMC나 삼성 등의 기존 반도체 팹에서 대량 생산이 가능해져, 비용이 획기적으로 줄어든다.

그 중에서도 '변조기(modulator)'는 전기 신호를 빛 신호로 변환하는 핵심 소자이다. 변조기의 속도가 곧 데이터 전송 속도의 상한이 된다.

표 19. 핵심 변조기 종류 및 비교표

변조기 유형	달성 속도	핵심 기술	의미
Si MRM (O대역)	256 Gbps PAM4	오일러 곡선 설계	3 THz FSR 확보
Si MRM + T-coil	448 Gbps PAM4	T-코일 인덕티브 피킹	레인딩 최고 속도
Si MRM	416 Gbps PAM4	1 Vpp 구동	저전압 구동 달성
LT-on-FS MZM	437 Gbit/s OOK	사행 세그먼트 설계	192 Gbaud
LT-on-FS MZM	67 GHz BW	1.14 V·cm 효율	초광대역

자료: OFC 2026, 미래에셋증권 리서치센터

448 Gbps PAM4 변조기가 의미하는 것은, 단일 레이저 파장에서 단일 변조기로 448 Gbps의 데이터를 보낼 수 있다는 것이다. 이를 **WDM(파장 분할 다중화)으로 8개 파장으로 확장하면, 하나의 광학 엔진이 3.584 Tbps를 전송할 수 있다.** 이는 차세대 GPU의 Scale-Up I/O 요구(2 Tbps)를 충분히 충족하는 수준이다.

특히 1 Vpp(1볼트 피크투피크) 구동은 매우 중요하다. 구동 전압이 낮을수록 드라이버의 전력 소모가 줄어들기 때문이다. 전력은 전압의 제곱에 비례하므로, 2V에서 1V로 줄이면 전력이 75% 감소한다.

NVIDIA의 마이크로링 변조기 발표

OFC 2026에서 NVIDIA는 자체 실리콘 마이크로링 변조기(MRM) 결과를 발표했다(Day1 M2A.7). 핵심 성과는 기존 대비 5배의 전력 효율 개선과 10배의 내구성(resiliency) 향상이다. NVIDIA가 직접 실리콘 포토닉스를 개발하고 있다는 것은, GPU 최대 제조사가 광학 I/O를 GPU에 통합하는 것을 전략적으로 추진하고 있음을 시사한다.

2. THz 인터커넥트: 구리와 광의 중간지대

THz 인터커넥트는 224~448 Gbps PAM4, 50~100m 도달, <3 pJ/bit의 효율로, 구리와 광학 사이의 '빈틈'을 채우는 새로운 기술이다. 표준 ASIC 공정으로 제조 가능하여 비용 경쟁력이 있다.

THz 인터커넥트란 전자기파의 주파수 스펙트럼에서, 마이크로파(GHz)와 적외선(광학) 사이에 테라헤르츠(THz) 대역을 말한다. 이 대역은 전파와 빛의 중간 특성을 가지며, 구리보다 먼 거리를 낮은 전력으로 전송할 수 있으면서도, 광학처럼 레이저나 광섬유가 필요하지 않다. 구리가 '자동차', 광학이 '비행기'라면, THz 인터커넥트는 '고속철도'에 해당한다. 자동차(구리)로는 멀리 못 가고, 비행기(광학)를 띄우기에는 인프라가 과한 중간 거리에서 최적의 선택이 된다.

표 20. Welch & Laskar 발표 내용

사양	수치	비교 (구리)	비교 (광학)
데이터 속도	224~448 Gbps PAM4	유사	유사
도달 거리	50~100 m	2~7 m	수 km+
에너지 효율	<3 pJ/bit	10+ pJ/bit	1~3 pJ/bit
제조 공정	표준 ASIC	표준 PCB	특수 SiPh 팹
매체	유전체 도파관	구리 트레이스/케이블	광섬유
레이저 필요	불필요	해당없음	필수
인터페이스 밀도	>2 dB/mm	~10 Tbps/mm ² 한계	높음

자료: OFC 2026, 미래에셋증권 리서치센터

Scale-Up 환경에서는 칩 간 거리가 보통 수 cm ~ 수 m이다. 이 거리는 구리로는 200G+ 속도에서 한계이고, 광학을 사용하기에는 레이저, 변조기, 광섬유 등의 인프라가 과하다. THz 인터커넥트는 정확히 이 '빈틈'을 채운다:

- 1) 제조 용이성:** 표준 ASIC 공정으로 제조 가능 → 기존 반도체 팹 활용, 추가 투자 최소화
- 2) 단순한 구조:** 레이저나 광학 정렬이 불필요 → 조립 공정 단순, 수율 높음
- 3) 전력 효율:** 50~100m 거리에서 <3 pJ/bit → 구리의 1/3, 광학과 동등 수준
- 4) 간섭 내성:** 유전체 도파관은 EMI에 강하고, 밀도를 높일 수 있음

3. 고속 광검출기의 진화

Ge-Si 통합 광검출기가 224 Gbps PAM4/67 GHz를 달성했고, Ge-on-Si APD는 360 Gbps(180 Gbaud PAM4)로 레인당 400G 목표에 근접했다. 210 GHz InGaAs/InP PD는 200+ Gbaud 수신이 가능하다.

광검출기(photodetector)는 빛을 전기로 바꾸는 소자이다. 광학 인터커넥트의 수신 측에서 사용되며, '얼마나 빠르게 빛의 변화를 감지할 수 있는가'가 핵심 성능 지표이다. 광검출기의 대역폭이 변조기의 속도를 따라가지 못하면, 아무리 빠르게 데이터를 보내도 수신 측에서 읽을 수 없다.

APD(Avalanche Photodiode)는 일반 광검출기 대비 10~100배의 내부 이득(gain)을 가진다. 이는 약한 빛도 큰 전기 신호로 변환할 수 있다는 의미이며, 더 먼 거리에서 더 빠른 속도의 데이터를 수신할 수 있게 한다. Ge-on-Si APD가 O대역과 C대역 모두에서 360 Gbps를 달성한 것은, 실리콘 포토닉스 플랫폼 위에서 고성능 광검출기를 구현할 수 있음을 의미한다.

표 21. 고속 광검출기 종류 및 특징

소자 유형	달성 속도	대역폭	응답성
Ge-Si 도파관 PD	224 Gbps PAM4	67 GHz	0.8 A/W
Ge-on-Si APD	360 Gbps (180Gbaud)	70~100 GHz	1.5~2 A/W (O)
InGaAs/InP PD	200+ Gbaud	210 GHz	0.55 A/W
SiGe 테이퍼 PD	400 Gbps PAM-8	-	-

자료: OFC 2026, 미래에셋증권 리서치센터

4. VCSEL 기술 혁신과 열 관리

VCSEL(Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser)은 칩 표면에서 수직으로 레이저를 발사하는 반도체 레이저이다. 데이터센터 내부의 짧은 거리(~수백 m) 통신에서 널리 사용되며, 비용이 저렴하고 대량 생산이 용이하다. VCSEL의 문제는 작동 시 발생하는 열인데, 이 열이 레이저의 성능과 수명을 저하시킨다.

표 22. VSEL 기술 혁신 내용

기술	달성 성과	핵심 혁신	응용
플립칩 백에미팅 VCSEL	106 Gbps PAM4 (30m OM2)	메탈렌즈 통합	CPO 단거리
940nm VCSEL	접합 온도 40K 감소	열 관리 최적화	고온 환경 CPO
VCSEL-MMF	200 Gb/s @ 500m	100 Gb/s·km 기록	캠퍼스 연결
CPO 결합 VCSEL	>95% 결합 효율	±25μm 허용	대량 생산

자료: OFC 2026, 미래에셋증권 리서치센터

반도체 레이저의 수명은 접합 온도(junction temperature)에 지수적으로 의존한다. 일반적으로 접합 온도가 10°C 상승하면 레이저 수명이 약 절반으로 줄어든다. 따라서 40K(40°C) 감소는 레이저 수명을 약 16배(2의 4승) 늘릴 수 있다는 의미이다.

이것이 CPO에 특히 중요한 이유는, CPO 환경에서는 레이저가 고온의 ASIC 근처에 위치하기 때문이다. 플립칩 구조로 접합 온도를 40K 낮추면, CPO 환경에서도 100°C에서 동작이 가능해져, 별도의 냉각 시스템(TEC) 없이도 신뢰성을 확보할 수 있다. TEC 제거는 비용, 전력, 부피 모두를 절감한다.

VI. Scale-Across: 데이터센터를 넘어서

Scale-Across(Scale-Interconnect)는 최근 가장 급격하게 광 침투가 확대되고 있는 영역이다. AI 클러스터가 단일 데이터센터의 전력·부지 한계를 넘어서면서, 수 km~80 km 거리의 분산 데이터센터를 하나의 논리적 클러스터로 묶는 수요가 폭발하고 있다. 400ZR이 현재 표준이고 800ZR이 차세대이며, OCS 기반 Scale-Across 아키텍처는 30km 이내에서 AI 작업 완료 시간에 영향 없이 데이터센터 간 연결을 실현했다. AI 기반 네트워크 자동화가 30% 전력 절감을 달성했다.

Scale-Across가 최근 급격히 확대되는 배경에는 AI 인프라의 물리적 한계가 있다. 100,000+ GPU 클러스터를 단일 데이터센터에 수용하려면 수백 MW~1 GW의 전력이 필요한데, 이를 감당할 수 있는 부지와 전력 인프라는 극히 제한적이다. 따라서 같은 도시 또는 인근 지역에 분산된 여러 데이터센터를 광학으로 연결하여 하나의 AI 클러스터로 운영하는 Scale-Across 아키텍처가 부상하고 있다.

OFC 2026에서 발표된 OCS 기반 Scale-Across 아키텍처는 이 비전을 현실로 만들고 있다. ZR 모듈을 활용하면 최대 80km 거리에서 400 Gbps 링크가 가능하며, 30km 이내에서는 AI 훈련 작업 완료 시간에 사실상 영향을 주지 않는 것이 검증되었다. OCS-DRP 아키텍처는 기존 ROFT 방식 대비 16배 더 많은 GPU를 연결하면서 전력 소비를 40% 절감하는 성과를 보였다. 또한 HCF를 활용한 600km LLM 분산 훈련이 성공적으로 시연되어, 광역 분산 AI 클러스터의 가능성이 검증되었다.

Scale-Interconnect는 서로 다른 데이터센터를 연결하는 네트워크이다. 하나의 데이터센터 안에서의 연결(Scale-Out)을 넘어, 도시와 도시, 나아가 대륙과 대륙을 잇는 광학 네트워크가 여기에 해당한다. 클라우드 기업들은 전 세계에 분산된 데이터센터를 운영하며, 이들 사이에 대용량 데이터를 전송해야 한다.

DCI에서 코히어런트 플러거블 기술이 핵심이다. 코히어런트란 빛의 위상(phase)까지 활용하여 데이터를 실어 보내는 고급 변조 방식으로, 더 먼 거리에서 더 많은 데이터를 보낼 수 있다. Ciena의 OFC 2026 논문 발표는 코히어런트 플러거블의 진화 역사를 CFP-DCO에서 현재대까지 정리하며, 3.2T DCI까지의 로드맵을 제시했다.

표 23. DCI 로드맵

기술 세대	용량	도달 거리	폼팩터	도입 시기
400ZR	400G	~120 km (ZR)	QSFP-DD/OSFP	2023~현재
400ZR+	400G	~2,000 km	QSFP-DD/OSFP	2024~현재
800ZR	800G	~120 km	OSFP-XD	2026~2027
1600ZR+	1.6T	~1,000 km+	차세대 폼팩터	2028~2029

자료: 미래에셋증권 리서치센터

장거리 광 전송과 해저 케이블

해저 케이블 시스템에서도 광학 혁신이 진행되고 있다. HCF를 활용한 117km All-Photonics Network가 산업 환경에서 시연되었으며, 다중 스패 WDM 시스템은 111.7km에서 $\pm 15\text{ns}$ 이내의 타이밍 정확도를 달성했다.

특히 해저 케이블에서는 전력 공급이 가장 큰 제약이다. 케이블의 양 끝에서만 전력을 공급할 수 있으므로, 중간의 중계기(repeater)가 소모하는 전력이 전체 시스템의 용량을 제한한다. HCF의 35~40% 증폭 전력 절감은 해저 케이블의 총 용량을 크게 늘릴 수 있는 혁신이다.

AI가 광 네트워크 관리에 본격 적용되어, 강화학습 기반 자기 구성 SOA 네트워크가 30% 전력 절감을 달성했다. Agentic-AI가 네트워크 엣지에 배치되어 자율적 관리가 시작되고 있다. 광 네트워크 관리에서 AI는 세 가지 차원에서 활용되고 있다:

- 1) 예측적 관리: AI가 과거 데이터를 분석하여 네트워크 열화를 사전에 감지하고, 트래픽 패턴을 예측하여 자원을 최적 배분한다. 디지털 트윈 모델이 물리적 네트워크의 실시간 복제본을 유지하여 시뮬레이션 기반 의사결정을 지원한다.
- 2) 자율적 최적화: 강화학습(RL) 에이전트가 SOA(Semiconductor Optical Amplifier) 기반 메트로-엑세스 네트워크를 자동으로 구성하여 30% 전력을 절감한다. 트래픽이 적은 시간대에 자동으로 포트를 비활성화하고, 피크 시간에 다시 활성화한다.
- 3) 분산 지능: Agentic-AI가 네트워크 엣지에 배치되어, 중앙 관리 시스템의 개입 없이 로컬에서 의사결정을 수행한다. 이는 네트워크의 대규모화에 따른 관리 복잡성 문제를 해결한다.

VII. 핵심 병목 종합 분석과 기술 로드맵 전망

표 24. Optical Interconnects에게 생기는 6개 병목 문제와 해결 기술

병목	구체적 문제	심각도	해결 기술	해결 시기
전력	- 구리 E/O 변환 10+ $\mu\text{J/bit}$ - 랙당 100kW+ 전력 밀도	매우 높음	CPO (65% 절감) HCF (35% 절감) THz ($\ll 3 \mu\text{J/bit}$)	2025~2027
구리 한계	- 10 Tbps/mm ² 밀도 한계 - 200G+ 급격한 감쇠 - 5m 이상 불가 (400G)	매우 높음	CPO/NPO 직접 통합 SiPh 온칩 변환 전기경로 제거	2025~2028
열 관리	- ASIC 350~400 W/cm ² - 에어쿨링 한계 도달 - 레이저 수명 열화	높음	플립칩 VCSEL (40K ↓) TEC-less 80°C 동작 외부 레이저 분리	2025~2027
스케일	- 중앙집중 스위치 한계 - 256+ 노드 확장 요구 - 케이블 밀도 포화	높음	분산 광학 아키텍처 SDM (MCF/HCF) 다중 대역 WDM	2027~2029
지연시간	- 다단계 E/O 변환 - DSP 처리 지연 - 구리 경로 전파 지연	중간	CPO 직접 통합 LPO 아날로그 변조 경로 최적화	2025~2027
DSP 복잡도	- 고속 DSP 전력 과대 - 복잡한 등화기 필요 - 칩 면적 점유	중간	DCQ/AGCQ (27~79% ↓) LPO 아키텍처 코히어런트 최적화	2025~2028

자료: OFC 2026, 미래에셋증권 리서치센터

표 25. 통합 타임라인 전망

시기	Scale-Out	Scale-Up	CPO	Scale-Interconnect	핵심 키워드
2025~2026	800G 본격 배치 400ZR 표준화 LPO 도입 시작	256~448 Gbps SiPh 변조기 양산 THz R&D 가속	51.2T CPO 스위치 초기양산 OIF 표준 정착	400ZR 표준 800ZR 개발 HCF 시범 배치	초기 광학 전환
2027~2028	1.6T 주류화 HCF 확대 배치 SDM 시범 적용	THz 인터커넥트 초기 배치 SiPh I/O 확대	CPO 차세대 라우터 표준 102.4T 개발	800ZR 표준 DCI 전면 광화 AI 네트워크 관리	핵심 변곡점
2029~이후	3.2T 등장 PAM8/10 고도변조 Multi-Pbps	광학 I/O AI 가속기 통합 THz 주류화	NPO/CPO 2세대 칩레벨 통합	Multi-Pbps 해저케이블 자율 네트워크	전면 광학화

자료: OFC 2026, 미래에셋증권 리서치센터

표 26. 거리별 기술 전환 타임 라인 전망

거리 영역	과거 (구리)	현재 전환 중	2027~2028	2029~
장거리 (>80km)	이미 광학	코히어런트 표준	800ZR+ 주류	Multi-Pbps
메트로 (2~80km)	이미 광학	400ZR 표준	1600ZR+ 표준	완전 광학화
캠퍼스 (100m~2km)	광학 전환 중	IM/DD 800G	1.6T CPO	완전 광학화
인터랙 (5~100m)	구리/광학 혼재	800G 광학 확대	CPO 주류	THz/광학
인트라노드 (1~5m)	구리 지배	THz R&D	THz 초기 배치	THz 주류
칩간 (<1m)	구리 지배	SiPh R&D	SiPh 초기	광학 I/O 집적

자료: OFC 2026, 미래에셋증권 리서치센터

VIII. 시사점과 투자포인트

광학 인터커넥트는 AI 인프라의 필수 요소로 자리잡고 있으며, CPO, 실리콘 포토닉스, HCF, THz가 핵심 투자 영역이다. 2027~2028년의 변곡점을 앞두고, 생태계 전반에 걸친 투자 기회가 열리고 있다.

시사점 1: 광학은 더 이상 '통신'만의 기술이 아니다

과거 광학은 통신 산업의 기술로 인식되었다. 해저 케이블, 장거리 백본, 메트로 네트워크가 주요 시장이었다. OFC 2026은 이 인식이 근본적으로 바뀌고 있음을 보여주었다. AI 데이터센터가 광학 산업의 새로운 최대 수요처가 되고 있으며, '컴퓨팅 인프라'의 핵심 기술로 광학이 편입되고 있다.

시사점 2: 수직 통합의 시대가 열리고 있다

NVIDIA가 직접 실리콘 포토닉스 변조기를 개발하고, Broadcom이 스위치 ASIC에 광학 엔진을 통합하며, Meta가 대규모 CPO 테스트를 수행하는 것은, 반도체와 광학의 경계가 무너지고 있음을 의미한다. 과거에는 반도체 회사와 광학 회사가 별개의 생태계였지만, 앞으로는 두 기술을 모두 보유한 기업이 경쟁 우위를 가지게 된다.

시사점 3: 비용 곡선의 역전이 진행 중이다

300mm 실리콘 포토닉스 파운드리로 양산으로 광학 칩 비용이 하락하는 반면, 구리의 고속화에 필요한 등화기/리타이머의 비용은 증가하고 있다. HCF도 생산 규모 확대에 따라 비용이 하락 추세이다. TCO(총소유비용) 관점에서 광학의 경제적 우위가 빠르게 확대되고 있으며, 이는 비용에 민감한 엔터프라이즈 데이터센터까지 광학 채택을 가속화할 것이다.

표 27. CPO 밸류체인 정리

Laser Source	PIC Foundry	EIC, Driver IC	ELS, Optical Engine	FAU	FAU Align Tools	FAU, Engine Assembly	OSAT, Advanced Packaging	Connector, Ferrule	Fiber	E/O Testing	Switch, System	EDA
Coherent	TSMC	Broadcom	Innolight	Senko	ficonTEC	Fabrinet	ASE Technology	Senko	Corning	Keysight	NVIDIA	Synopsys
Lumentum	Global Foundries	Marvell	TFC	Sumitomo	All Ring	Hon Hai (Foxconn)	Amkor	Sumitomo	Sumitomo	Teradyne	Broadcom	Cadence
Furukawa Electric	Samsung Electronics	NVIDIA	O-Net	TFC	ADST	ASE Technology	Kyocera	US Conec	Nittobo	FormFactor	Marvell	Ansys
Yuanjie Semiconductor	Tower Semiconductor		Eoptolink	FOCI		FOCI	Powertech (PTI)	T&S		Chroma ATE	Alphabet (Google)	
Innolight Technology							Shinko Electric	Molex		Multilane		
							Fabrinet	Browave				

자료: 미래에셋증권 리서치센터

IX. 시장 전망 및 투자 결론

AI 밸류체인을 다음 투자 기회는 광학

AI 반도체 밸류체인의 투자 사이클은 명확한 패턴을 따른다: GPU(2023, NVIDIA 수혜) → HBM 메모리(2024, SK하이닉스·삼성 수혜) → 인터커넥트(2025~, 광학 기업 수혜). OFC 2026 컨퍼런스는 이 3번째 사이클의 개시를 확인시켜 준 이벤트였다. 680편 이상의 논문이 하나의 방향을 가리킨다: 전기적 인터커넥트의 물리적 한계는 이미 현실이며, 광학만이 유일한 대안이다.

1) AI 클러스터 확장은 인터커넥트 병목을 구조적으로 심화시킨다. NVIDIA GB200 NVL72 → NVL256, 나아가 100K+ GPU 클러스터로의 확장은 인터커넥트 수요를 기하급수적으로 늘린다. ASIC 전력 밀도 $350\sim 400\text{W}/\text{cm}^2$, 구리 인터커넥트 $10\text{ Tbps}/\text{mm}^2$ 한계는 현실이다. 이는 HBM의 등장 배경(GPU 메모리 대역폭 병목)과 정확히 같은 구조적 필연이다.

2) 광학 기술의 양산 성숙도가 실적 가시성을 뒷받침한다. CPO 51.2Tbps 시연, SiPh 변조기 448 Gbps PAM4, HCF 117km 현장 검증은 모두 '실현 가능성'을 의미한다. 300mm 실리콘 포토닉스 파운드리(imec, GlobalFoundries)의 양산 체제 확립은 비용 하락을 가속하여, 기존 전기적 솔루션 대비 TCO(총소유비용) 역전 시점을 2027~2028년으로 앞당기고 있다.

3) 광학 침투의 방향성이 투자 타이밍을 결정한다. 해저 케이블 → 메트로 → DCI → 데이터센터 내부 → 칩 간 연결로, 광학의 TAM(Total Addressable Market)이 단계적으로 확대되고 있다. 현재 800G DCI와 CPO가 상용화 초입이며, 2027~2028년 1.6T 전환기에 광학 부품 TAM은 현재 대비 3~5배 확대될 전망이다. THz 인터커넥트의 등장은 구리의 마지막 보루(5~100m)까지 광학 TAM에 편입시킨다.

표 28. 타임 라인 전망

시점	핵심 이벤트	산업 영향
2025~2026	CPO 초기 양산, 800G 본격 배치	광학 전환 시작, 초기 투자 기회
2027~2028	CPO 주류화, 1.6T 표준, THz 초기배치	핵심 변곡점, 생태계 전면 재편
2029-이후	3.2T, 칩레벨 광학 I/O, NPO 2세대	전면 광학화, 구리→광 전환 완성

자료: 미래에셋증권 리서치센터

AI 인프라 투자의 3번째 사이클이 시작되었다. GPU → HBM에 이어, 광학 인터커넥트는 AI 밸류체인에서 가장 빠르게 성장하는 세그먼트가 될 것이다. 핵심은 Scale-Out에서 Scale-Across, 나아가 Scale-Up으로 광학 침투가 확대될수록, 필요한 부품과 장비의 종류와 수량이 기하급수적으로 증가한다는 점이다. 이는 다양한 업체들의 신규 진입 기회를 열어주며, 특히 광학 부품(렌즈, 레이저, 변조기, 광검출기)과 장비(정렬·패키징·검사) 영역에서 구조적 성장이 기대된다.

[Scale-Across 영역: 광 전환 진행 중. 광케이블·광트랜시버·OCS]

Scale-Out(서버 간, 5~수백 m)은 이미 광학 전환이 본격화된 영역이다. 800G → 1.6T → 3.2T로 세대가 진화하면서, 광케이블, 광트랜시버(광모듈), 코히어런트 DSP, OCS(Optical Circuit Switching) 장비의 수요가 폭발적으로 증가하고 있다.

표 29. 글로벌 밸류체인

밸류체인 영역	글로벌 주요 업체	사업 특징
CPO ASIC	Broadcom, Marvell	스위치+광학 수직 통합, 51.2T→102.4T
광 트랜시버/모듈	Coherent, Lumentum, InnoLight	800G/1.6T 전 세대 커버, ELS 레이저
DSP/PAM4 칩	Marvell, Broadcom	800G/1.6T 핵심 신호처리
코히어런트 DCI	Ciena, Nokia	400ZR→800ZR, 장거리 AI 분산훈련
OCS 장비	iPronics (비상장), Polatis(비상장)	대규모 GPU 클러스터 광학 스위칭

자료: 미래에셋증권 리서치센터

[Scale-Across 영역: 급격히 확대 중 - 장거리 광통신 인프라]

AI 추론(Inference) 시대가 도래하면서, Scale-Across의 중요성이 급부상하고 있다. AI 추론은 학습과 달리 다양한 지역에 분산된 데이터센터에서 실시간으로 수행되어야 하며, 이를 위해 데이터센터 간 대규모 병렬 계산을 지원하는 고속·대용량 광통신 라인이 필수적이다

100,000+ GPU 클러스터를 단일 데이터센터에 수용할 수 없는 전력·부지 한계로 인해, 도시 내(30km) 또는 광역(80km+) 분산 데이터센터를 OCS+ZR 모듈로 연결하는 Scale-Across 아키텍처가 급격히 확산되고 있다. 이는 대규모 광케이블 인프라, DCI(Data Center Interconnect) 코히어런트 장비, 광 증폭기(EDFA), 그리고 차세대 HCF(Hollow-Core Fiber)에 대한 구조적 수요를 창출한다.

표 30. Scale-Across 밸류체인

밸류체인 영역	글로벌 주요 업체	사업 특징
광케이블/광섬유	Corning, Prysmian, Furukawa	AI DC 증설로 광섬유 수요 5배+ 증가
HCF(중공 광섬유)	Lumenisity(MS 인수), OFS	감쇠 50% ↓, 지연 30% ↓, 증폭 전력 35~40% ↓
DCI 코히어런트	Ciena, Nokia, Huawei	400ZR→800ZR→1600ZR+ 장거리 전송
광 증폭기(EDFA)	Lumentum, Coherent	다중 스패 장거리 증폭 수요
OCS 게이트웨이	KDDI, 신규 진입 기대	DC 간 광학 스위칭 인프라

자료: OFC 2026, 미래에셋증권 리서치센터

[Scale-Up 영역: 구리 → 광 전환의 마지막 프론티어 - 부품·장비 다변화]

Scale-Up(칩 간, 수 cm~수 m)은 현재 구리가 지배하지만, NVLink 대역폭이 3.6 TB/s(GB300)를 넘어서는 2027~2028년부터 광학 전환이 시작된다. 이 영역이야말로 가장 다양한 업체들의 신규 진입이 기대되는 곳이다. CPO 패키지에는 레이저 광원, 실리콘 포토닉스 변조기, 광검출기, 마이크로 렌즈, 광 정렬 장비, 테스트 소켓 등 수십 종의 부품과 장비가 필요하며, 이 생태계가 300mm 파운드리 양산과 함께 급격히 확대될 전망이다.

표 31. Scale-up 밸류체인

밸류체인 영역	글로벌 주요 업체	사업 특징
SiPh 파운드리	imec, GlobalFoundries, TSMC	300mm 양산, CMOS 호환 → 원가 하락
실리콘 포토닉스 변조기	NVIDIA(자체 MRM), Intel	GPU 온칩 광학 I/O 통합
ELS(외부 레이저 소스)	NTT, Furukawa, Lumentum, Coherent	PO 핵심 광원, 고출력 반도체 레이저
마이크로 렌즈/광학계	신규 업체 진입 확대	광 결합, 패키징 정밀도 핵심 소자
THz 인터커넥트	R&D 단계	<3 pJ/bit, 구리→광 가교 역할
CPO 테스트/장비	신규 업체 진입 확대	CPO 양산에 필수적 검사·정렬 장비

자료: OFC 2026, 미래에셋증권 리서치센터

국내 수혜 기업 분석: 광학 밸류체인의 한국 기회

표 32. 국내 수혜 기업 종합 포지셔닝 전망

영역	핵심 수혜 기업	성장 드라이버
Scale-Out (진행 중)	옵티코어(800G 광트랜시버) 대한광통신(광케이블)	800G→1.6T 광모듈 수요 폭발 AI/DC 내부 광케이블 수요 5배+
Scale-Across (확대)	대한광통신(장거리 광섬유) 솔리드(네트워크 장비)	AI 추론 분산 DC 간 광통신 인프라 DCI 장거리 코히어런트 수요
Scale-Up (2027~)	ADST(CPO 장비, 비상장) MPNICS(마이크로 렌즈, 비상장) RF머트리얼즈(레이저 부품)	CPO 양산 확대 → 장비/부품 수요 광 결합 핵심 소자, 글로벌 납품 레이저 다이오드 국산화 → CPO 확장

자료: OFC 2026, 미래에셋증권 리서치센터

표 33. 기타 국내 수혜 기업

기업	포지션	사업 특징
켈리타스반도체	고속 SerDes IP	CPO 데이터 링크용 SerDes 설계 기술
티에프이	CPO 테스트 소켓	CPO/SiPh 테스트 소켓 실 공급 중
라이팩(비상장)	CPO SiPh 설계	국내 CPO 스타트업, 기술력 인정

자료: OFC 2026, 미래에셋증권 리서치센터

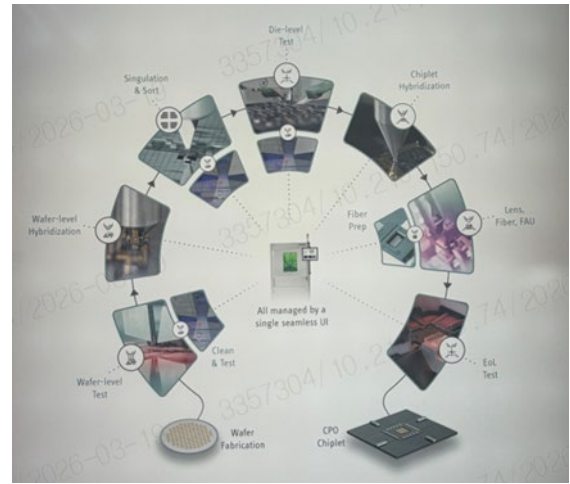
부록: OFC 2026 사진

그림 10. Ficontec(Active Alignment 장비 회사)



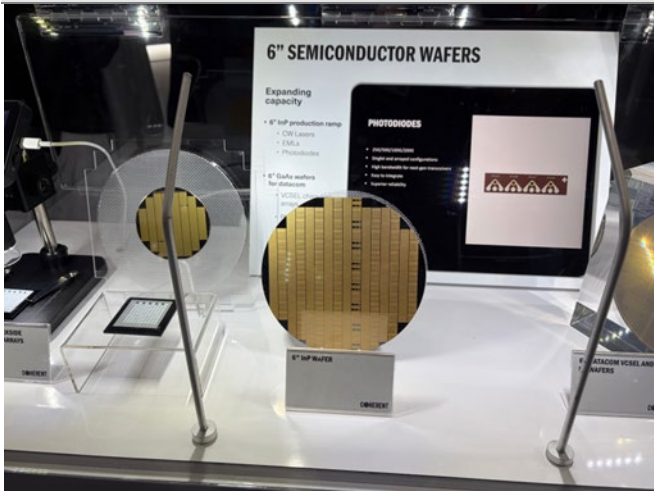
자료: OFC 2026, 미래에셋증권 리서치센터

그림 11. Ficontec: 최근 고객사들의 턴키 요구에 대응중



자료: OFC 2026, 미래에셋증권 리서치센터

그림 12. Coherent: 6인치 InP Wafer



자료: OFC 2026, 미래에셋증권 리서치센터

그림 13. Coherent: 12.8T dr8 XPO Transceiver



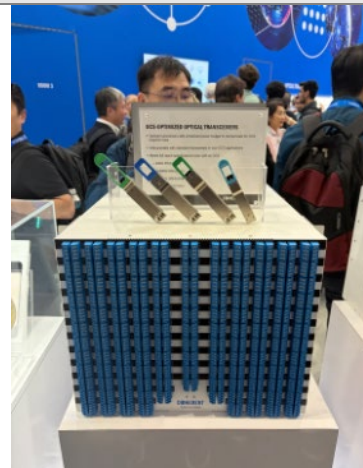
자료: OFC 2026, 미래에셋증권 리서치센터

그림 14. Coherent: 6.4T CPO/NPO 200G



자료: OFC 2026, 미래에셋증권 리서치센터

그림 15. Coherent: OCS-Optimized Optical Transceivers



자료: OFC 2026, 미래에셋증권 리서치센터

그림 16. Samtec: Co-packaged Optical channel(PAM4 224G)



자료: OFC 2026, 미래에셋증권 리서치센터

그림 17. Coherent: OCS Ports



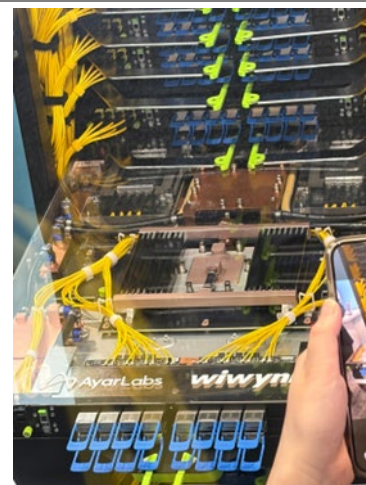
자료: OFC 2026, 미래에셋증권 리서치센터

그림 18. Amphenol: 다양한 커넥터 부품



자료: OFC 2026, 미래에셋증권 리서치센터

그림 19. Ayar Labs: Scale-up CPO 시현 중



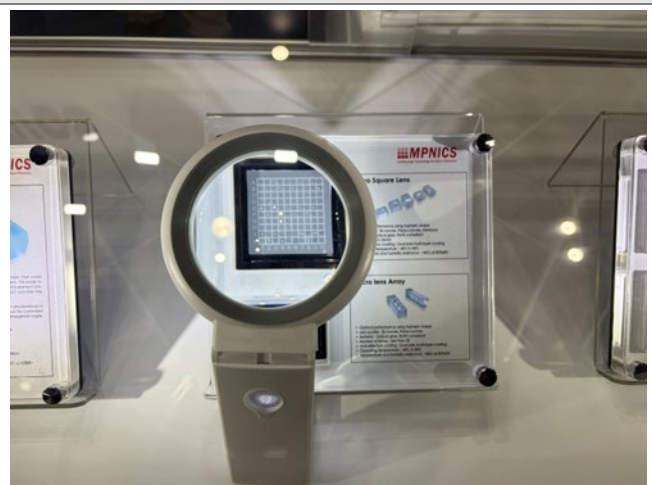
자료: OFC 2026, 미래에셋증권 리서치센터

그림 20. Nexustest: XPO BER TESTER



자료: OFC 2026, 미래에셋증권 리서치센터

그림 21. MPNICS: 초소형 레이저용 Square 렌즈



자료: OFC 2026, 미래에셋증권 리서치센터

부록: 핵심 용어 해설

CPO (Co-Packaged Optics): 광학 트랜시버를 스위치 칩 기판 위에 직접 통합하는 기술. 기존 플러거블 방식의 전력과 밀도 한계를 해결한다.

Scale-Out: 서로 다른 서버(랙) 간의 연결. AI 훈련에서 GPU 간 데이터 교환에 사용되며, 거리는 통상 5~수백 미터.

Scale-Up: 하나의 서버 내에서 칩과 칩 사이의 연결. GPU-GPU, GPU-메모리 간 초고속 전송이 해당.

Scale-Across: 데이터센터 간 연결(DCI) 및 메트로/장거리 네트워크. 수십 km ~ 수천 km 거리.

실리콘 포토닉스: 실리콘 반도체 공정으로 광학 소자를 제조하는 기술. 기존 반도체 패브리케이션으로 대량 생산/비용 절감이 가능.

HCF (Hollow-Core Fiber): 코어가 비어 있는 광섬유. 빛이 공기 속을 이동하여 감쇠율 50% 감소, 지연시간 30% 감소.

PAM4 (Pulse Amplitude Modulation 4-level): 4 개 진폭 레벨로 데이터를 인코딩하는 변조 방식. 한 심볼에 2 비트 전송.

WDM (Wavelength Division Multiplexing): 서로 다른 파장의 빛을 하나의 광섬유에 동시 전송하는 다중화 기술.

EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier): 에르븀 첨가 광섬유를 이용한 광 증폭기. 전기 변환 없이 빛 상태로 직접 증폭.

THz 인터커넥트: 테라헤르츠 대역을 이용한 중간 거리(50~100m) 데이터 전송 기술. 레이저 불필요, <3 pJ/bit.

VCSEL: 칩 표면에서 수직으로 레이저를 발사하는 반도체 레이저. 짧은 거리 통신에 사용, 저비용.

pJ/bit (피코줄/비트): 1 비트의 데이터를 전송하는 데 필요한 에너지. 숫자가 작을수록 효율적.

DSP (Digital Signal Processor): 디지털 신호 처리 장치. 고속 전송에서 신호 왜곡을 보정하지만 전력을 많이 소모.

LPO (Linear Pluggable Optics): DSP 없이 아날로그 방식으로 직접 광 변조하는 기술. 전력과 지연시간 절감.

Compliance Notice

- 당사는 자료 작성일 현재 조사분석 대상법인과 관련하여 특별한 이해관계가 없음을 확인합니다.
- 당사는 본 자료를 제3자에게 사전 제공한 사실이 없습니다.
- 본 자료를 작성한 애널리스트 박준서은(는) 자료작성일 현재 루멘텀 홀딩스 7주 보유하고 있습니다.
- 본 자료는 외부의 부당한 압력이나 간섭없이 애널리스트의 의견이 정확하게 반영되었음을 확인합니다.

본 조사분석자료는 당사의 리서치센터가 신뢰할 수 있는 자료 및 정보로부터 얻은 것이나, 당사가 그 정확성이나 완전성을 보장할 수 없으므로 투자자 자신의 판단과 책임하에 종목 선택이나 투자시기에 대한 최종 결정을 하시기 바랍니다. 따라서 본 조사분석자료는 어떠한 경우에도 고객의 증권투자 결과에 대한 법적 책임소재의 증빙자료로 사용될 수 없습니다. 본 조사분석자료의 지적재산권은 당사에 있으므로 당사의 허락 없이 무단 복제 및 배포할 수 없습니다.