

한계 제로 네트워크: 한계 없는 네트워크를 위한 초연결 포토닉스 기술 동향

Limit-Zero Network: Trends of Hyper-Connected Photonics Technology for Limitless Network

김광준 (K. Kim, kjk@etri.re.kr)	광네트워크연구그룹 책임연구원
박 혁 (H. Park, parkh@etri.re.kr)	광네트워크연구그룹 책임연구원
정환석 (H.S. Chung, chung@etri.re.kr)	광네트워크연구그룹 책임연구원/PL
조승현 (S.H. Cho, shc@etri.re.kr)	광네트워크연구그룹 책임연구원
이정찬 (J.C. Lee, jcllee@etri.re.kr)	광네트워크연구그룹 책임연구원/PL
송종태 (J.T. Song, jsong@etri.re.kr)	광네트워크연구그룹 책임연구원
장순혁 (S.H. Chang, shchang@etri.re.kr)	광네트워크연구그룹 책임연구원
이준기 (J.K. Lee, juneki@etri.re.kr)	광네트워크연구그룹 책임연구원/그룹장

The prosperity of modern society is heavily depending on communication technology. Communication is now expanding its roles from personal convenience to social/industrial functioning. Photonics was first introduced to communication in long-distance transmission area since it provided wide bandwidth cost-effectively. However, nowadays, photonics is not only a harmonious collaborator with electronics, but has its own exclusive playgrounds in various parts of communication. Limit-zero network pursues a network that can provide abundant capacity and efficiency using very limited resources. Photonics is the most promising candidate to accomplish the goal. In this article, we review the current status and predict the future contributions of photonics to limit-zero network.

* DOI: 10.22648/ETRI.2019.J.340105



본 저작물은 공공누리 제4유형
출처표시+상업적이용금지+변경금지 조건에 따라 이용할 수 있습니다.

최신 네트워크 기술 동향 특집

- I. 머리말
- II. 유무선 광액세스망
- III. 데이터센터 네트워크
- IV. 페타급 광통신 및 전광
신호처리
- V. 맺음말

I. 머리말

현대 사회에서 통신이 차지하는 역할은 점점 커져가고 있다. 통신 자체의 기능도 다양해지고 있을 뿐 아니라 실질적으로 사회를 구성하는 거의 모든 분야 서비스들이 통신에 의존하여 수행되고 있다. 현대 통신에서 정보의 이동과 처리 수단으로 전기장치가 주로 사용되어 왔다. 그러나 광섬유를 통해 레이저 신호를 보내는 광전송이 1970년대에 실용화되기 시작하여 통신의 용량 증대에 획기적인 기여를 하면서 광통신의 역할이 시작되었다.

통신의 빠른 발전은 통신을 이용한 많은 서비스가 개발되고 확장되도록 하였으며 이는 다시 통신 수요 증대로 이어지는 선순환이 계속되고 있다. 이러한 추세를 유지하기 위해서는 끝없는 기술 혁신이 이뤄져야 한다.

광기술은 기왕에 전송 분야를 선도하는 기술로 자리매김을 한데 더하여 스위칭 및 신호처리 분야에서도 전기 기술과 상호 보완적으로 발전해 나가고 있다. 본 고에서는 통신 네트워크 발전을 견인해가는 다양한 광 기술의 현황을 소개하고 기술 발전의 방향을 조망한다.

II. 유무선 광액세스망

1. 광액세스망 환경의 변화

5G의 도래, 사물인터넷의 폭발적 증가, 빅데이터 중요성 증대 등으로 향후 정보 소통량은 빠르게 증가할 전망이다. 또한, 가상현실과 증강현실 서비스, 4K/8K UHD 미디어 도입과 확산, 가상 세계와 현실세계를 넘나드는 사회로의 진입에 따라 그 접점에 있는 광액세스망은 새로운 전기를 맞고 있다. 모바일 서비스가 5G를 거쳐 발전할수록 무선 캐리어 주파수가 증가하며 무선 구간의 거리가 짧아지므로 광액세스망은 점점 더 사용자 가까이 들어가고, 사용범위가 확대될 것이다.

5G에선 20Gbps급 peak rate와 사용자당 100Mbps 보장을 위해 필연적으로 4G 대비 셀의 크기가 줄어들어야

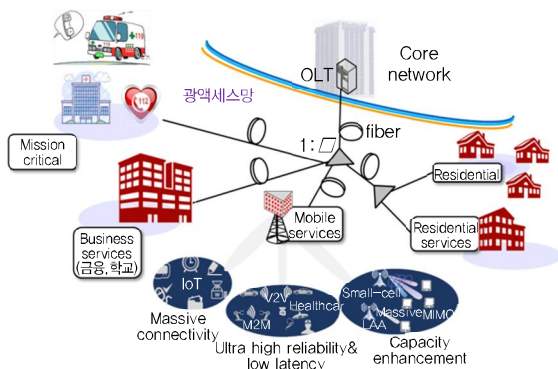
하고, 이러한 경향은 계속 심화될 것이다. 또한, 비용 절감 및 에너지 효율 제고를 위하여 C-RAN 구조로 진화하며[1], 이로 인하여 무선 기지국과 셀 사이트 간을 연결하는 프론트홀/백홀 및 PON을 포함하는 광액세스망의 트래픽이 수십 기가 이상으로 급격히 증가하고 있다[2].

광액세스망이 전례 없는 모바일 트래픽 급증과 새로운 미디어의 확산에 대비하려면 대역폭 확대와 함께 질적인 변화도 수반되어야 한다. 인터넷 트래픽은 2017~2022년 사이에 매년 30%의 증가율을 보이며, 특히 비디오 트래픽 비율은 현재 전체 트래픽의 3%에서 2022년에는 22%로 연간증가율이 47%에 이른다[3]. 비디오 트래픽이 광액세스 네트워크의 대역폭 증가를 이끈다면, 질적인 변화를 요구하는 것은 사물인터넷과 초실감형 미디어이다. 인간의 오감을 전달하는 초실감형 미디어에서 촉각의 전달을 위해서는 1msec 이내의 지연이 요구된다[4]. 공장 자동화에서 로봇들이 충돌 없이 적절히 협업하려면 지연이 거의 없는 네트워크가 필요하며, 다자가 참여하는 게임에서도 실시간성은 중요하다[5]. 또한, 데이터 패킷의 망실로 인해 물리세계에서 심각한 오류, 심지어 인명 피해가 발생할 가능성도 배제할 수 없으므로 이에 대비한 통신 네트워크 구조 확보가 절실하다.

2. 유무선 광액세스망 기술

유무선 광액세스망은 (그림 1)과 같이 서비스 제공자와 이용자를 광섬유로 연결하여 유무선 트래픽을 수용하는 20km 이내의 광네트워크이다. 광대역이나 실시간성 전달 보장이 필요한 트래픽이 혼재하는 환경에 대응하기 위해 광액세스망에는 대역폭 확장과 더불어 데이터 전달시간을 보장하며 광액세스 인프라를 가상화하고 서비스 맞춤형으로 제공하는 슬라이싱 기술이 요구되고 있다.

모바일 신호 수용을 위한 프론트홀 광액세스 기술은 CPRI, CPRI압축을 거쳐서 function split와 eCPRI 구조가 고려되고 있다. 그런데 프론트홀 구간의 전송 용량을



(그림 1) 유무선 광액세스망 구성도

감소시키기 위한 압축 기술은 데이터 저감율이 50% 정도로 제한되어, 이대로라면 5G 용량 수용을 위해 고가의 파장당 100기가급 광송수신기가 사용되어야 하는 문제가 있다. 따라서, 전송비용 문제 해결을 위해 디지털 유닛 기능을 분리하여 MAC 계층이나 PHY 계층의 일부 기능을 원격지로 보내는 function split 구조에 대한 표준화가 3GPP에서 이루어지고 있다[6].

1:N 연결구조를 갖는 수동형 광액세스망(PON)의 대역폭 확장은 꾸준히 계속되어왔다. ITU-T에서는 양방향 10Gbps를 제공하는 XGS-PON 기술과 4개의 파장을 사용하여 트렁크 구간의 용량을 40Gbps까지 증가시킨 NG-PON2 기술을 표준화하였고 이는 상용화를 앞두고 있다[7]. IEEE에서는 10Gbps급 10G EPON을 거쳐, 파장당 25Gbps인 두 개의 파장을 사용하는 50Gbps 용량 NG-EPON 표준화가 진행되고 있다. 10Gbps급까지는 PON 기술들이 하나의 파장만 사용하며 속도를 높이는 단순한 접근법을 사용하여 온 반면, 최근의 PON 기술들은 대역폭의 확대를 위하여 WDM 기술을 도입하고 있다.

Latency와 용량 확장에 대한 적극적인 고려가 시작된 것은 최근의 일이다. 기존의 광액세스망에서는 상향 전송 버스트의 최대값 만을 제어하기 때문에 latency를 보장할 수 없었다. 따라서 MAC 계층에서 대역폭 할당 (Bandwidth Allocation)에 대한 다른 접근법이 필요하다. 그중 하나로 일정한 주기마다 각 ONU가 대역할당

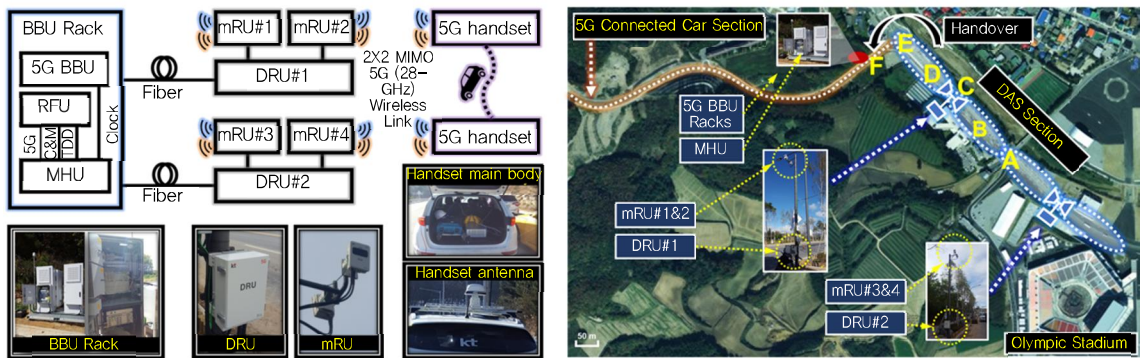
을 요청할 수 있게 하고, WDM 기술의 도입으로 다수의 lane이 존재하는 PON 시스템에서 lane들을 엮어서 (Channel bonding) 하나의 채널로 만드는 기술을 결합한 MAC 기술이 제안되어 성공적으로 구현된 바 있다 [8], [9].

미래의 광액세스망에서 또 하나의 주요한 가치는 유연성이다. 기존의 광액세스망은 서로 다른 인터페이스를 가지는 벤더의 제품이 혼재되어 있어 다양한 특성을 가지는 신규 서비스 도입에 한계가 있다. 이러한 문제는 SDN(Software-Defined Networking)과 슬라이싱 기술을 통해 해결 가능하다. 하드웨어와 제어 평면 사이에 호환 가능한 표준 인터페이스를 가지게 되면 하드웨어의 종류에 관계없이 제어 평면을 구성할 수 있다. 더 나아가, 하드웨어에 종속됐던 광액세스 기능을 추상화하고 이들을 서비스별로 선택된 광액세스 기능과 종류별로 구성하는 슬라이싱 개념은 광액세스망의 유연성을 한층 더 높일 것이다[6].

인터넷 트래픽이 지속적으로 증가하고 있고, 사물인터넷과 특히 UHD 비디오 트래픽 비중이 계속 증가하고 있으므로 현재 실용화가 논의되고 있는 50Gbps PON 이후에도 대역폭의 확대가 계속될 것이며 대략 10년 후에는 100Gbps 용량을 넘어서는 광액세스망이 필요하게 될 것이다. 실시간성에 대한 요구도 공장자동화, 자율주행차, 자율 주행 드론 등의 실용화와 초실감 미디어의 발전에 따라 지속될 것으로 예상된다. 우리가 살아가는 물리세계가 사이버세계에 더 많이 의존할수록 둘 사이를 연결하는 서비스는 더욱 많아지고, 광액세스망과 그 유연성에 대한 요구도 계속 커지게 될 것이다.

3. RoF 기반 Indoor DAS 네트워크

모바일 트래픽의 80%가 발생하는 indoor 환경에서 음역지역을 해소하고 원활한 이동통신 환경을 제공할 필요성이 증대되고 있다. 특히, 이동통신기술이 밀리미터 파 기반 5G로 진화하면서 기지국당 최대 20Gbps를 제



(그림 2) 평창올림픽에서 시연된 Indoor DAS 네트워크 구조 (좌) 및 네트워크 포설 현황(우)

[출처] Reprinted from M. Sung et al., "Demonstration of 5G Trial Service in 28 GHz Millimeter Wave using IPoF-based Analog Distributed Antenna System," *Photon, Conf.*, Pyeongchang, Rep. of Korea, Sept. 2018, 2018, pp. F1A-1-3:298-299,

공하기 위해 광섬유 구간의 전송용량이 수백Gbps에 이르러 구축 비용이 증가하고 있다. 이의 대안으로 아날로그 RoF 기반의 Indoor DAS 네트워크는 무선 통신 기저대역 신호의 대역폭에 해당되는 파형만을 전송함으로써 전송 수요를 획기적으로 줄일 수 있어 설치 및 운용 비용 절감을 위해 세계적으로 연구·개발이 진행 중에 있다 [10].

RoF 기반 아날로그 광전송 기술을 활용한 Indoor DAS 네트워크 기술은 미국의 Corning, Commscope, GIT, 중국의 Huawei, 일본의 NICT 및 KDDI 등이 주축이 되어 개발 중에 있다. 2015년에 Huawei는 LTE 기반 64-QAM 변조된 기저대역신호 48개를 아날로그 IF 신호로 변환하여 5km 광섬유 전송시 EVM 8% 미만을 확보하였음을 발표하였고 2017년에 GIT는 building 간 음영지역을 커버하기 위한 밀리미터파 기반 Fiber-wireless relay 구조를 제안하였다[11], [12].

국내에서는 분산안테나 시스템 관련 대표 장비업체인 (주)솔리드, (주)에치에프알, (주)에프알텍 등이 LTE 신호를 수용하는 디지털 및 아날로그 방식의 5~6 밴드 지원이 가능한 Indoor DAS 네트워크 상용 제품을 판매 중에 있다.

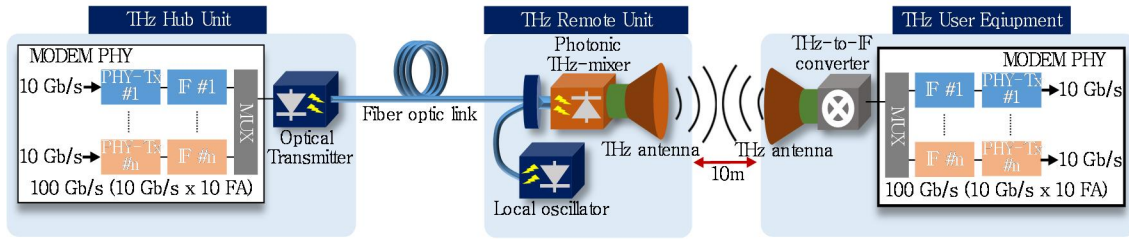
2018년 2월 평창동계올림픽에서 (주) KT, (주)에프알텍, ETRI 등이 공동으로 28GHz 밀리미터파를 지원하는 5G 이동통신시스템을 위한 Indoor DAS 네트워크를 구축하

고 자율자동차 서비스 시연을 성공적으로 수행하였다. (그림 2)에는 평창올림픽 기간 동안 구축된 DAS 네트워크 구조와 서비스 시연을 위해 구축된 실제 네트워크 포설 현황을 지도상에 표시하였다[13]. 2018년 12월에는 상기 3개 기관이 협력하여 세계 최초로 4×4 MIMO 안테나 시스템을 지원하는 5G용 Indoor DAS 네트워크 PoC를 완료하였고, 2020년 상반기를 목표로 8×8 MIMO 지원이 가능한 28GHz mmWave를 캐리어 주파수로 활용하는 Indoor DAS 상용 시스템을 준비 중이다.

4. 근거리용 포토닉스 기반 THz 전송 기술

이동통신시스템이 4G에서 5G를 거쳐 진화함에 따라 미래 신규 서비스 도입을 위한 신규 전파 자원의 발굴이 절실한 상황이다. 또한, 가까운 미래에 100기가급의 근거리 무선 데이터 서비스가 요구될 것으로 예상되는 바, 이를 해결할 방안으로 초광대역 대역폭 활용이 가능한 THz 무선 전송 기술이 대두되었다.

전세계적으로 THz 무선 전송 기술의 구현을 위해 기존의 일렉트로닉스 기술을 활용하는 방안과 포토닉스 기술을 활용하는 방안이 검토되고 있으며, 소형화, 저전력화 및 저가화가 궁극적으로 시장 진입의 열쇠이다. (그림 3)은 포토닉스 기반 THz 전송 구현 방안의 한 사례를 보여준다. 포토닉스 기술을 활용하여 THz 파를 생



(그림 3) 근거리용 포토닉스 기반 THz 전송 기술 개념도

성하는 경우 기존의 성숙된 광통신 기술을 활용해 효율적으로 서비스를 제공할 수 있는 장점이 있다. 반면에 일렉트로닉스 기술을 활용하면 IC 형태의 소형화가 가능하지만 높은 주파수 대역에서 전자 회로를 동작시키는데 따른 전력 소비와 효율 문제를 해결해야 한다[14].

2015년 일본의 Osaka University는 300GHz 주파수 채널을 통해 30Gbps의 신호를 20m 무선 전송 하는 데 성공하였고, 2016년 스웨덴 Acreo 등은 6채널의 무선 신호를 FDM 방식으로 다중화하여 400GHz 주파수 채널을 통해 260Gbps의 신호를 50cm 무선 전송한 결과를 보고하였으며, 2017년 독일 University of Duisburg-Essen과 미국 Corning은 코히어런트 광전송 기술을 이용하여 325GHz 주파수 채널에서 64-QAM-OFDM 신호 (59Gbps)를 5cm 무선 전송한 결과를 보고하였다[15]-[17]. 2018년 중국의 Zhejiang University와 스웨덴의 Royal Institute of Technology 등은 성능이 개선된 유니트래블링 포토다이오드 기반 포토믹서를 이용하여 350GHz 주파수 채널을 통해 100Gbps 신호 2m 무선 전송에 성공하였다[18].

ETRI의 포토닉스 기반 THz 연속파 생성 기술은 국제적으로 인정받고 있다. 특히 2017년에 자체 개발한 광통신용 반도체 디바이스에 기반한 비팅 광원과 포토다이오드 기반 포토믹서를 사용, 270GHz 대역 10Gbps 신호를 0.4m 거리에서 error-free 전송하여 FHD급 실시간 동영상 전송 시험에 성공했다[19].

2019년부터 ETRI는 국내 일부 대학들과 공동으로 근거리 THz 전송에서 전송 속도 및 전송 거리를 각각

100Gb/s, 10m 수준으로 증가시켜나갈 계획이다. THz 파 전송 거리 증대를 위해 어레이형 THz 생성 및 복원 장치, THz 저잡음/고출력 증폭기 및 파면 제어 기반 THz 전송 거리 증대 기술 등에 대한 집중적 연구 개발이 이뤄질 것이다. 또한, THz 부품의 소형화/저전력화를 위해 실리콘 플랫폼 기반 THz 생성 및 복원 장치 설계 및 제작 그리고 초소형 THz 프론트엔드 기술에 대한 연구 개발을 추진할 것이다.

III. 데이터센터 네트워크

1. 중단거리 광전송 기술

1973년 Xerox사의 Bob Metcalf가 세계 최초 LAN (2.94Mbps)을 발표한 것을 시작으로, 1980년 10Mbps, 1992~95년 100Mbps, 1996~98년 1Gbps의 표준화를 진행한 이더넷은 중단거리 데이터 전송의 중심이 되었다. 실질적으로 중단거리 광전송 시장을 주도하고 있는 데이터센터 내부 네트워크(intra-DCN, intra-Datacenter Network)와 데이터센터 간을 연결하는 네트워크(inter-DCN)가 빠르게 성장함에 따라 이 전송 수요를 충족시키기 위해 IEEE의 이더넷 표준 활동도 다양화 되고 있다. 특히 에너지 효율, 상면적, 설치 및 운용 비용 등을 고려하며 테라급에 이르는 고속 전송을 달성하기 위하여 신호의 병렬 처리 및 심볼당 여러 비트를 수용하는 기술들이 적용되고 있다[20].

〈표 1〉은 현재까지 표준화된 이더넷 광신호 인터페이스들을 보여준다[21]. 광/전, 전/광 변환 기능을 갖는 광

〈표 1〉 이더넷 전송 규격: 다양한 광신호 인터페이스

Capacity	Designation	Modulation	Band rate (Gbaud)	Reach (km)	Lanes of λ	Standard
50GbE	50GABE-FR	PAM4	26,5625	2	1	IEEE 802.3cd
	50GABE-LR	PAM4	26,5625	10		
	50GABE-ER	PAM4	26,5625	30~40		IEEE B10K 5G
100GbE	100GBASE-LR4	NRZ	25,78125	10	4	IEEE 802.3ba
	100GBASE-ER4	NRZ	25,78125	30~40		
	100GBASE-DR	PAM4	53,125	0.5	1	IEEE 802.3cd
	100G-FR	PAM4	53,125	2	1	
	100G-LR	PAM4	53,125	10	1	
200GbE	200GBASE-DR4	PAM4	26,5625	0.5	4	IEEE 802.3bs
	200GBASE-FR4	PAM4	26,5625	2		
	200GBASE-LR4	PAM4	26,5625	10		
	200GBASE-ER4	PAM4	26,5625	30~40		IEEE B10K 5G
400GbE	400GBASE-DR4	PAM4	53,125	0.5	4	IEEE802.3bs
	400GBASE-FR8	PAM4	26,5625	2	8	
	400GBASE-LR8	PAM4	26,5625	10		
	400GBASE-ER8	PAM4	26,5625	30~40	8	
	400G-FR4	PAM4	53,125	2	4	100G Lambda MSA

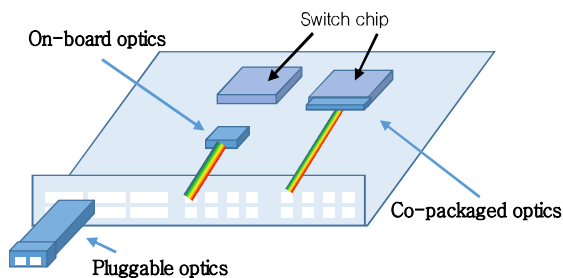
[출처] WIKIPEDIA, "To Terabit Speeds," 2018, available from https://en.wikipedia.org/wiki/Terabit_Ethernet, CC BY-SA 3.0.

트랜시버는 실질적으로 주요 제작회사 간의 MSA(Multi-Source Agreement)를 통해 규격이 결정된다. 광트랜시버들은 고속 전송을 구현하면서도 소형화, 집적화, 저전력화하는 추세이다.

2. 중단거리 광트랜시버 발전 방향

20세기에는 광트랜시버가 주로 랙 안의 보드 위에서 넓은 면적을 차지하고 있었으나 최근에는 광트랜시버가 보드 전면판에 실장되어 전원을 권 채로 신탈장이 가능한 (그림 4)의 Pluggable optics 형태를 갖게 되었다. 예를 들어 400Gbps급 광트랜시버는 CFP8 MSA, OSFP MSA, QSFP-DD MSA 등의 규격이 있 [22]-[24]. 그러나 스위치 등 핵심 모듈들의 입출력 용량은 빠르게 늘어 수십Tbps 수준에 이르고 있는 반면 보드 전면판 면적은 제한되어 결과적으로 광트랜시버가 전체 시스템 용량 증가의 걸림돌이 되어가고 있다.

이를 해결할 방법으로 (그림 4)의 On-board optics 광트랜시버가 제안되었다. 이 경우 광/전 변환은 보드

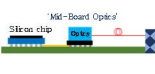


(그림 4) 광트랜시버 고집적화 방향

위에서 일어나며 전면판은 광섬유 다발의 입출력만 관여하므로 보드당 송수신 용량을 획기적으로 늘릴 수 있다. On-board optics 형태의 국제 산업 표준으로 CISCO와 Microsoft가 주도하여 제안한 COBO MSA가 있다[25], [26]. 이는 AVAGO의 MicroPOD, Reflex Photonics의 LightABLE, TEconnectivity의 Coolbit, Samtec의 Firefly 등으로 구현 중이다[25].

한편, On-board optics 구조가 더 진화하면 스위치 칩 등과 광/전 변환 기능이 직접 결합하는 Co-packaged optics 구조가 출현할 것으로 예상된다[27], [28]. 전자 소자인 고속 대용량 칩과 광소자인 광트랜시

〈표 2〉 광트랜시버 기술 로드맵

2019년	2020년	2021년~2024년	2025년~2028년
메트로급 200G 광트랜시버 기술	데이터센터 400G 광트랜시버 기술	실리콘 기반 800G 광인터커넥션 기술 (μ-packaged optics)	실리콘 기반 1.6T 광인터커넥션 기술 (Co-packaged Optics)
			

버가 함께 집적되는 Co-packaged optics는 이 분야 기술 발전의 한 획을 긋는 기술이 될 것이다. 〈표 2〉에 광트랜시버 기술 로드맵을 제시하였다.

3. 광스위치 기반 데이터 센터 네트워크 기술

데이터센터 트래픽의 증가는 전송 분야뿐 아니라 스위칭 기술에도 새로운 도전을 불러오고 있다. 폭증하는 트래픽을 감당하기 위해 스위칭 용량도 빠르게 늘어나야 한다. 그러나 스위치 소자를 구현하는 전자 소자 기술은 거의 물리적 한계에 근접하여 트래픽 증가를 따라가기 어려운 상황이다. 따라서 용량 확보를 위해서는 스위치 칩 숫자를 늘려야 하는데 이에 따라 냉각 등의 문제가 발생해 데이터센터의 전기스위치가 전력 과소비의 주요 원인이 되고 있다.

통신에서 광 기술은 주로 전송 분야에 사용되었으나 한편으로 광스위치도 꾸준히 연구되고 있다. 광스위치는 대용량화가 쉽고 특히 에너지 절감에 유리하기 때문에 전기 스위치를 대체하거나 아니면 적절히 역할 분담을 하여 DCN의 효율을 높여줄 것으로 기대된다.

미국은 클라우드 센터의 에너지 문제를 해결하기 위한 광스위칭 솔루션을 국가 전략차원으로 추진하기 위해 에너지고등과학원(ARPA-e)을 중심으로 Enlited 연구 프로그램을 진행하고 있다. 여기에는 주요 기업 및 대학이 참여하고 있으며 9개의 연구과제가 광인터페이스, 광스위치패브릭, 네트워크 구조 측면에서 진행되고 있다.

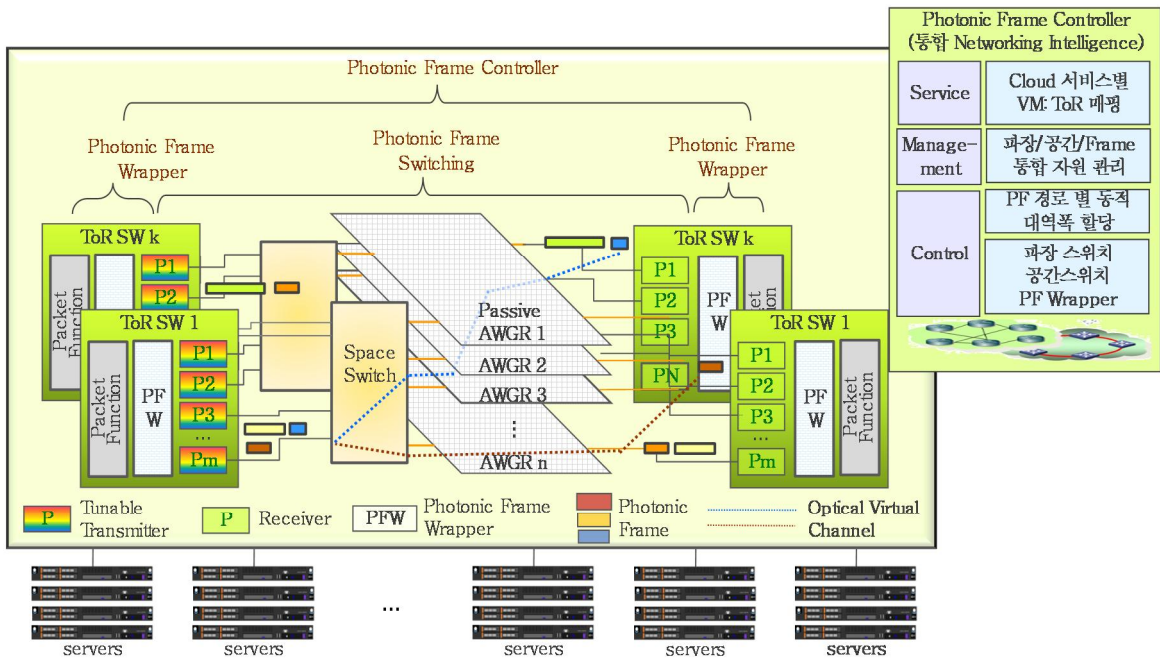
유럽의 경우 FP7과 HN2020 프로젝트를 통해 지속적

으로 광스위치 기반 데이터센터 네트워킹 기술을 연구하고 있다. EU의 FP7에서 진행된 LIGHTNESS 프로젝트에서는 혁신적인 광스위칭 및 전송 솔루션을 사용한 데이터센터용 고성능 네트워크 인프라를 설계, 구현, 실험 검증하였다. 제안된 구조에서는 SDN 기반 제어플레인을 통해 TOR 스위치와 광회선스위치(Optical Circuit Switch)를 연계하여 데이터센터를 제어/관리하고 있다 [29].

2016년 말까지 진행된 HN2020의 COSIGN 프로젝트에서는 광스위칭 네트워크 기술과 SDN 기반 네트워크 제어 기술을 적용한 Flat DCN 구조 구현을 목표로 하였다. DCN 데이터 평면에서 랙내 및 랙간, 서버 간 경로를 완전 광으로 연결하기 위해 대규모 TOR 광스위치, 초 대용량 및 저지연 접속, 고밀도 포트 및 새로운 광섬유 기술(multicore fiber 등)을 지원하고 있다. DC 제어 관리에서, SDN 구축 및 기능 확장, 데이터 센터용 통합 망 및 IT 가상화 기능 제공이 가능하다.

일본의 경우 고등과학기술원(AIST)에서 광스위치 패브릭, 광링크, 네트워크 구조 및 알고리즘을 연구하는 VICTORIES 연구그룹을 설립하여 2008년부터 지속적인 연구를 수행하고 있다. 광전 스위치 시스템 기술, 광링크 기술, 광스위치패브릭 기술을 NEC, Fujitsu 등의 기업체와 공동으로 연구 중이다.

현재 제안되고 있는 대부분의 광스위칭 기반 데이터센터 네트워크 구조는 short duration 트래픽은 전기스위치로, long duration 트래픽은 광스위치로 처리하는 전기스위치/광스위치 Hybrid 구조이다. 그러나 실용화를 추구하는 MS와 IBM 등에서는 소위 elephant 트래픽(long flow)과 mouse 트래픽(short flow) 구분이 어렵고 두 개의 별도의 네트워크를 관리하는데 따른 네트워크의 복잡성을 hybrid 구조의 한계로 인식하여 전기 스위치 없이 광스위치만으로 구성된 DCN 구현을 목표로 연구를 진행하고 있다[30]. 이를 위해서는 sub-μsec 수준의 고속 광스위칭과 고속 CDR 등 핵심 기술 확보가



(그림 5) ETRI의 PSON 시스템 구조도

[출처] 유연철 외, “초저지연 인프라 기술,” 전자통신동향분석, 제32권 1호, 2017, pp. 13-24, 공공누리 제4유형

필요하다[31].

ETRI에서는 2016년부터 Photonic Frame 기반 패킷 스위칭이 가능한 데이터 센터 광네트워킹 핵심 기술 개발을 수행하여 (그림 5)[32]의 DCN용 광스위칭 네트워크 구조를 제시하고 관련 주요 기술을 확보하였다. 또한, 이를 기반으로 edge cloud에 적용이 가능한 광에지 클라우드 네트워킹 기술 연구를 2019년부터 진행 중이다.

4. 데이터센터 Disaggregation 기술

고정된 비율의 CPU, memory, storage를 사용하는 전통적인 서버 박스 중심 데이터센터에서는 서버별 자원 이용률이나 작업량이 크게 다르고 그 결과 고가의 구성 요소들의 이용 효율이 낮아진다. 이를 해결하기 위해 다양한 computing resource를 pool에 모아 태스크 별로 필요한 만큼 CPU, memory, storage들을 사용하도록 하여 전체 이용효율을 높이도록 하는 것이 disaggregation 기술이다.

이미 storage와 accelerator의 경우 전기스위치를 이용해 disaggregation을 구현하고 있다. Storage의 경우 실제 high-end 서버에 설치된 CPU와 storage 간 지연 요구 사항은 10~50μsec 수준이어서 전기 스위치로 충분히 구현 가능하다. FPGA나 GPU와 같은 다양한 accelerator의 경우도 Ethernet 스위치로 분리하였을 때 PCIe에 접속된 FPGA와 비교하여 각각 10배, 48배의 지연 및 성능 개선이 있다[33].

가장 도전적인 기술은 memory disaggregation이다. 여기서 memory는 byte 단위의 address accessibility를 지원하는 기억장치를 의미한다. 그런데 DRAM의 경우 75nsec의 지연시간과 920Gbps의 대역폭을 요구하고 있어 기존의 전기스위치 기술로는 지원이 불가능하다. 이렇듯 힘든 요구사항을 가진 memory 수준까지 disaggregation을 하는 이유는 (1) 자원의 이용 효율 개선과 (2) CPU와 Memory의 성능 격차 극복에 있다.

Google 데이터센터의 기존 서버기반 시스템에서

CPU와 memory의 사용비율을 분석한 결과 작업의 성격에 따라 memory와 CPU 이용률이 최대 1,000배까지 차이가 나는 것이 보고되어 있다[34]. 한편 CPU의 경우 멀티코어 기술을 사용하여 동일 칩 안에 여러 개의 코어가 구현 가능해지면서 2012년 대비 8배의 성능 향상이 이루어지고 있으나 메모리 대역폭은 같은 기간 2배 향상에 그쳐 성능의 제약요소로 작용하고 있다[35].

그러나 memory disaggregation의 경우 지연시간이 매우 중요하여 전기 스위치보다 지연 시간이 획기적으로 짧은 광스위치만 지원이 가능하다[36]. 광 기반 disaggregation 기술 연구는 세계적으로 초기단계이며, EU의 dRedBox 과제에서 intra-rack 스위칭 시간을 sub- μ sec 수준으로 구현한 사례가 있다[33]. 이 분야가 발전을 하면 향후 multi-rack 기반으로 disaggregation을 확장할 수 있을 것으로 예상된다.

IV. 페타급 광통신 및 전광 신호처리

정보화 사회가 도래하고 트래픽이 증가하며 새로운 서비스들이 등장하면서 광통신 및 신호 처리 기술의 속도, 용량, 에너지, 집적도 등은 계속 도전을 받고 있다. 이는 포토닉스 기술이 그간의 성과를 통해 신뢰를 받고 있다는 뜻이기도 하고 또한, 물리적 한계에 다다라 Moore의 법칙을 지탱하기 어려울 정도로 발전 속도가 느려진 일렉트로닉스 기술을 대체/보완할 유력한 후보로 포토닉스 기술이 지목되고 있다는 뜻이기도 하다.

우선 전송 분야를 보면 파장 분할 방식(WDM), 시간 분할 방식(TDM), 고차 변복조 등의 기술을 집약하여 단일 모드 광섬유 전송 용량이 10Tbps에 이르렀다[37]. 그렇지만 계속 증가하는 트래픽을 수용하려면 다시 기하학적인 용량 확대가 이뤄져야 하는데 장차 광선로당 페타급 전송을 실현하기 위한 유력한 방안으로 공간 분할 방식(SDM)이 제시되고 있다.

최근 일본, 유럽의 공동 펀딩으로 SAFARI 프로젝트

에서 페타급 광 네트워크 구현을 위한 SDM 기술 연구가 진행되었다[38], [39]. 또한, 일본에서는 NICT의 주도로 EXAT initiative를 통하여 광전송 기술 한계를 확장하고 차세대 광통신 인프라 구조 연구를 선도하기 위한 시도를 지속하고 있다[40]. 국내에서는 ETRI와 KAIST를 중심으로 ‘멀티 모드를 이용한 공간 분할 다중 광전송 기술’ 연구가 진행되었으며, 모드 멀티플렉서와 SDM 광전송 기반 기술을 확보하고 있다[41], [42].

CPU, GPU, 스위치 등의 전자 칩의 용량이 크게 증가하고 있는 반면, 전자 IC 칩의 I/O 인터페이스 용량과 속도는 물리적 한계에 직면하고 있다. 또한, 폭증하는 트래픽을 처리하기 위해 서버, 스위치, 통신 장비 등이 급격히 증설되고 있어 전력 과소비 및 상면적 부족 문제가 발생하고 있다. 기존의 전자 IC 및 전기 선로 기술로는 대역폭, 소모 전력, 고밀도 문제 등을 해결할 수 없으며 근본적으로 대용량, 저전력의 특성을 가지는 포토닉스 기술의 활용이 요구된다.

이에 따라 다양한 능동, 수동 광소자를 전자 IC 수준으로 집적화시키고 궁극적으로 광학적, 전기적 기능을 하나의 칩에 집적화하기 위한 포토닉 집적회로 기술 연구가 이루어지고 있으며, 멀티 칩 간 저전력 광/전 변환 기술과 저손실 병렬 광연결 기술을 이용한 3D 고집적 병렬 광연결 연구가 활발히 진행되고 있다.

미국은 포토닉 집적 소자 개발을 위해 AIM Photonics를 설립하고 정부와 민간을 통해 5년간 6.1억 달러를 투자하고 있으며, 유럽에서는 21세기를 ‘photon century’로 규정하고 Horizon 2020 프로그램을 통해 연간 1억 유로씩 투자하여, 다양한 포토닉 집적회로 및 고집적 병렬 광연결에 대한 연구 프로그램을 진행 중에 있다[43].

ETRI 및 국내 대학에서 화합물 소재와 실리콘을 이용하여 광송수신 부품 집적화 개발을 수행하였으며, 데이터 센터 광연결을 위한 광송수신기 소자 및 모듈 개발이 지속되고 있다. 향후 실리콘 포토닉스 기술을 이용하고 저전력 광원 및 고감도 광검출기 등의 단위 소자 등을

하나의 칩에 집적화하는 원천 기술 연구가 이루어질 전망이다.

다른 한편으로 전자보다 대역폭과 에너지 효율에서 유리한 포토닉스 기술을 이용한 신호 처리, 연산 처리 기술 연구가 진행되고 있다. 최근 포토닉 신호처리 기술을 이용하여 기존 von Neumann 방식으로는 풀 수 없다고 알려진 NP 문제 해결에 도전한 결과가 보고되었으며, 딥 러닝 알고리즘을 적용할 수 있는 실리콘 포토닉스에 기반한 광 신경망 회로에 대한 연구 등이 활발히 이루어지고 있다[44], [45].

포토닉 신호 처리를 이용하여 현재 GPU 기반 혹은 신경모사(neuromorphic) ASIC 기반 신경망 회로에 비하여 현저히 빠른 연산 처리 속도를 구현할 수 있으며, 소모 전력에서 단위 연산 당 수천 배 이상 이득을 볼 수 있을 것으로 전망되어 향후 주목해야 할 연구 분야가 되고 있다[46].

앞에서 언급한 바와 같이 해외 선진국에서는 차세대 주력 사업으로 포토닉스 기술에 대규모 투자를 진행 중이며, 초연결 포토닉스 미래 원천 기술이 가져올 반도체 분야, 신호 처리 분야 등의 산업적 변혁을 기대하고 있다. 다양한 초연결 포토닉스 미래원천 분야에 선도적 연구 개발 투자를 지속해 나감으로써 반도체 및 통신 강국의 위치를 강화해 나갈 수 있을 것이다.

V. 맺음말

본고에서는 현재의 포토닉스 기술 수준과 향후 발전 방향을 조망함으로써 포토닉스를 통한 한계 제로 네트워크 구현의 가능성을 정리하였다. 일렉트로닉스가 거의 물리적 한계에 다다를 정도로 잘 무르익은 기술이라면 포토닉스는 아직 그 한계를 규정짓기 어려운 초창기 분야이다. 통신의 토대를 이루는 두 기술이 조화를 이뤄 한계 제로 네트워크가 구현되고 발전해 나갈 것을 기대한다.

약어 정리

AIM Photonics	American Institute of Manufacturing Integrated Photonics
ARPA-e	Advanced Research Projects Agency - Energy - U.S. Department of Energy
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
BBU	Base Band Unit
CAUI	100Gb/s Attachment Unit Interface
CDR	Clock Data Recovery
CFP	100Gb/s Form-factor Pluggable
COBO	Consortium for On-Board Optics
COSIGN	Combining Optics and SDN In next Generation data centre Networks
CPPI	Communications Port Programming Interface
CPU	Central Processing Unit
C-RAN	Centralized-Radio Access Network
DAS	Distributed Antenna System
dRedBox	Disaggregated Recursive Datacentre-in-a-Box
DSP	Digital Signal Processing
Enliteded	ENergy-efficient Light-wave Integrated Technology Enabling Networks that Enhance Datacenters
EXAT	Extremely Advanced Transmission or Exa-bit era
EVM	Error Vector Magnitude
GPU	Graphics Processing Unit
IC	Integrated Circuit
LAN	Local Area Network
LIGHTNESS	Low latency and high throughput dynamic network infrastructures for high performance data centre interconnects
LTE	Long Term Evolution
MDM	Mode Division Multiplexing
MSA	Multi-Source Agreement
NICT	National Institute of Information and Communications Technology

NP	Non-deterministic polynomial time
NRZ	Non-return-to-zero
PAM	Pulse Amplitude Modulation
PoC	Probe of Concept
PON	Passive Optical Network
PSON	Packet Switching Optical Network
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QSFP-DD	Quad Small Form Factor Pluggable Interface Double Density
RRH	Remote Radio Head
RoF	Radio over Fiber
SAFARI	Scalable and flexible optical architecture for reconfigurable infrastructure
SDM	Space Division Multiplexing
SDN	Software Defined Network
TDM	Time Division Multiplexing
TWDM	Time and Wavelength Division Multiplexing
WDM	Wavelength Division Multiplexing

참고문헌

- [1] China Mobile White Paper, "The Road Towards Green RAN," Oct. 2011
- [2] T. Yoshida et al., "Application Drivers and Trends for Future Broadband Access," *Opt. Fiber Commun. Conf. Exhibit.*, Los Angeles, CA, USA, Mar. 22-26, pp. Th3B.1:1-3.
- [3] Cisco, "Cisco Visual Networking Index: Forecast and Trends, 2017-2022," White Paper, Nov. 2018.
- [4] D. Nasset, "NG-PON2 Technology and Standards," *J. Lightw. Technol.*, vol. 33, no. 5, 2015, pp. 1136-1143.
- [5] S. Shankland, "How 5G Aims to End network latency," C|Net, Dec. 8, 2018, available from <https://www.cnet.com/news/how-5g-aims-to-end-network-latency-response-time/>
- [6] IEEE P802.3ca 50G-EPON Task Force, available from <http://www.ieee802.org/3/ca/>
- [7] 정환석, "초실감 서비스를 위한 광액세스 기술," *Opt. Photon. Congress*, 부산, 2018, 8, 27-29.
- [8] K. Kim et al., "High Speed and Low Latency Passive Optical Network for 5G Wireless Systems," *J. Lightw. Technol.*, accepted.
- [9] H.H. Lee et al., "Experimental Demonstration of 50 Gb/s (2×25 Gb/s) TDM/WDM PON over 64-Way Power Split Using O-Band Up/Down Transmission Over 20 km with Dynamic Bandwidth Allocation and SDN Control," *Opt. Express*, vol. 26, no. 19, Sept. 2018, pp. 25120-25128.
- [10] S.-H. Cho et al., "Cost-Effective Next Generation Mobile Fronthaul Architecture with Multi-IF Carrier Transmission Scheme," *Opt. Fiber Commun. (OFC) Conf.*, San Francisco, CA, USA, Mar. 2014, pp. Tu2B.6:1-3.
- [11] X. Li et al., "Real-Time Demonstrations of Over 20Gb/s V- and W-Band Wireless Transmission Capacity in One OFDM-RoF System," *Opt. Fiber Commun. (OFC) Conf.*, Los Angeles, CA, USA, Mar. 2017, pp. M3E.3:
- [12] H. Zeng et al., "Demonstration of a Real-Time FPGA-Based CPRI-Compatible Efficient Mobile Fronthaul Transceiver Supporting 53 Gb/s CPRI-Equivalent Data Rate Using," *Eur. Conf. Opt. Commun.*, Dusseldorf, Germany, Sept. 18-22, 2016, pp. 1-3.
- [13] M. Sung et al., "Demonstration of 5G Trial Service in 28 GHz Millimeter Wave Using IFoF-Based Analog Distributed Antenna System," *Photon. Conf.*, Pyeongchang, Rep. of Korea, Sept. 2018, 2018. pp. F1A-I-3:298-299.
- [14] T. Nagatsuma et al., "Recent Progress and Future Prospect of Photonics-Enabled Terahertz Communications Research," *IEICE Trans. Electron.*, vol. E98-C, no. 12, 2015, pp. 1060-1070.
- [15] M.F. Hermelo et al., "Spectral Efficient 64-QAM-OFDM Terahertz Communication Link," *Opt. Express*, vol. 25, no. 16, 2017, pp. 19360-19370.
- [16] X. Pang et al., "260 Gbit/s Photonic-Wireless Link in the THz Band," *IEEE Photon. Conf.*, Waikoloa, HI, USA, Oct. 2016, pp. 1-2.
- [17] T. Nagatsuma et al., "Advances in Terahertz Communications Accelerated by Photonics," *Nature Photon.*, vol. 10, 2016, pp. 371-379.
- [18] K. Liu et al., "100 Gbit/s THz Photonic Wireless Transmission in the 350-GHz Band With Extended Reach," *Photon. Technol. Lett.*, vol. 30, no. 11, 2018, pp. 1064-1067.
- [19] K.H. Park et al., "Semiconductor-Based Terahertz Photonics for Industrial Applications," *Opt. Fiber Commun. (OFC) Conf.*, Los Angeles, CA, USA, Mar. 2017, pp. W4B.4.
- [20] Ethernet Alliance, "To Terabit Speeds," 2018, available from <https://ethernetalliance.org/>

- [21] WIKIPEDIA, "To Terabit Speeds," 2018, available from https://en.wikipedia.org/wiki/Terabit_Ethernet
- [22] CFP8 MSA, "CFP8 Hardware Specification," 2017, available from <http://www.cfp-msa.org/>
- [23] OSFP MSA, "Specification for OSFP Octal Small Form Factor Pluggable Module," 2018, available from <https://osfpmsa.org/>
- [24] QSFP-DD MSA, "QSFP-DD Hardware Specification for QSFP Double Density 8X Pluggable Transceiver," 2018, available from <http://www.qsfp-dd.com/>
- [25] COBO MSA, "COBO 8-Lane & 16-Lane On-Board Optics Specification," 2018, available from <https://onboardoptics.org/>
- [26] FIRSTPOST, "Microsoft, Cisco, and Others Create 'Consortium for On-Board Optics'," 2015, available from <https://www.firstpost.com/business/microsoft-cisco-others-create-consortium-board-optics-2170617.html>
- [27] R. Blum, "Integrated Silicon Photonics for Future Data Center Applications," *Eur. Conf. Opt. Commun.*, Roma, Italy, Sept. 2018.
- [28] K. Schmidtke, "Open Packet Optical Architectures for Next Generation Data Centers," *Eur. Conf. Opt. Commun.*, Roma, Italy, Sept. 2018.
- [29] Deliverable D5.2 Control and Data Plane Integration, <http://www.ict-lightness.eu>
- [30] H. Ballani et al., "Bridging the Last Mile for Optical Switching in Data Centers," *Opt. Fiber Commun. Conf. Exposition*, San Diego, CA, USA, Mar. 11-15, 2018, pp. 1-3.
- [31] K. Clark et al., "Sub-Nanosecond Clock and Data Recovery in an Optically-Switched Data Centre Network," *Eur. Conf. Opt. Commun.*, Rome, Italy, 2018.
- [32] 유연철 외, "초저지연 인프라 기술", 전자통신동향분석 제32권 제1호, 2017. 2, pp. 13-24.
- [33] N. Terzenidis et al., "High-Port and Low-Latency Optical Switches for Disaggregated Data Centers: The HippoSwitch Architecture," *IEEE/OSA J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 10, no. 7, 2018, pp. B102-B116.
- [34] S. Han et al., "Network Support for Resource Disaggregation in Next-Generation Datacenters" *Proc. ACM Workshop - Hot Topics Netw.*, College Park, MD, USA, Nov. 21-22, 2013.
- [35] G. Casey, "GEN-Z: High-Performance Interconnect for the Data-Centric Future," OPC U.S. Summit, Mar. 21, 2018.
- [36] C. S. Li et al., "Composable Architecture for Rack Scale Big Data Computing," *Future Generation Comput. Syst.*, vol. 67, Feb. 2017, pp. 180-193.
- [37] D.J. Richardson, "Filling the Light Pipe," *Sci.*, vol. 330, Oct. 2010, pp. 327-328.
- [38] SAFARI, available from <http://www.ict-safari.eu/>
- [39] CORDIS, "Scalable and Flexible optical Architecture for Reconfigurable Infrastructure," 2014, available from https://cordis.europa.eu/project/rcn/196615_en.html
- [40] T. Morioka, "New Generation Optical Infrastructure Technologies: EXAT Initiative, Towards 2020 and Beyond," *OptoElectron. Commun. Conf.*, Vienna, Austria, July 13-17, 2009, pp. FT4:1-2.
- [41] S. H. Chang et al., "All-Fiber 6-Mode Multiplexers Based on Fiber Mode Selective Couplers," *Opt. Express*, vol. 25, no. 5, 2017, pp. 5734-5741.
- [42] 장순혁 외 "모드 분할 다중 광전송," *Opt. Photon. Congress*, 부산, 2018, 8. 27-29, pp. W2D-1.
- [43] AIM, available from <http://www.aimphotonics.com/>
- [44] Hewlett Packard Enterprise, available from <https://www.labs.hpe.com/next-next/light>
- [45] Y. Chen et al., "Deep Learning with Coherent Nanophotonic Circuits," *Nature Photon.*, vol. 11, 2017, pp. 441-447.
- [46] T.F. Lima et al., "Progress in Neuromorphic Photonics," *Nanophoton.*, vol. 6, 2017, pp. 577-599.