EMC 최근 기술 동향

광 인터커넥터 기술 동향

이 명 현 · 김 민 수*
성균관대학교 ·
*한국전자통신연구원

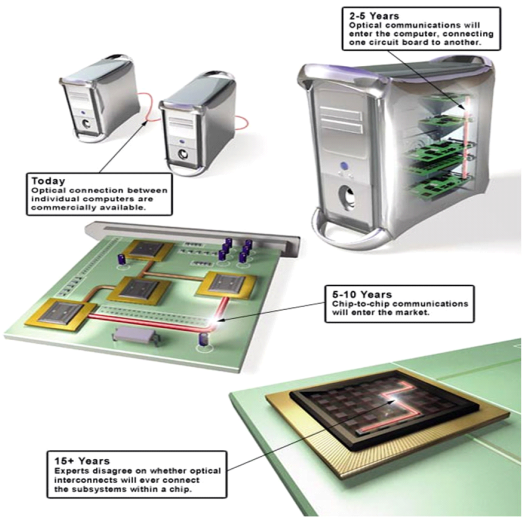
Ⅰ. 서 론

21세기에 진입하면서 연간 40～50 %로 증가하는 인터넷 트래픽, 고품위(high-definition) 비디오, 고속 광대역의 소비자 IP 트래픽, 3D 컨텐츠 및 클라우드 컴퓨팅 서비스, 고화소 휴대 단말기를 이용한 디지털 카메라, 캠코더, 전자사전, 영상통화, DMB, GPS, 모바일 인터넷에 이르기까지, 이에 부응하기 위해 요구되는 전송 용량과 대역폭은 매우 크며, 급격히 증가되고 있다. 또한, 망 트래픽은 18개월 만에 2배로 증가하는 반면, 하드웨어의 I/O 서버는 24개월 만에 2배로 증가하여 망과 단말기 사이에서 발생하는 차이로 인하여 많은 병목 현상이 발생하고 있다[1]. 이러한 문제점을 해결하기 위해 구리선을 이용한 배선은 저속의 전기 신호 전송 라인을 통해 대용량의 전기 신호를 전달하기 위해서, 하나의 채널의 전송 속도를 높이는 방식과 함께 수십 개의 전기 신호 채널을 병렬적으로 배열한 다층 전기 배선이 폭넓게 적용되어 왔다. 그러나 RLC 지연 등의 문제로 인한 단위 채널의 속도 증가에 한계에 부딪치고 있고, 채널의 증가에 따른 전기 배선 구조의 복잡화, 이웃한 전기 신호 채널들 간의 간섭 및 누화(crosstalk), 다층 구조 전기 배선 모듈의 두께 증가 등의 문제점들이 나타나고 있다. 또한 집적도가 높아짐에 따라 필연적으로 전력 소모량과 비용 등도 고려해야만 되는 상황이다. 여기에 대한 대안으로 떠오른 기술이 광 인터커넥터(Optical Interconnect)이다. 광 인터커넥터 기술은 광통신 기술의 한 방법으로, 단위 채널당 속도가 10～100 Gbps로 매우 큰 대역폭을 갖는다. 그리고 광의 가지고 있는 고유의 기술인 파장 분할 다중(WDM: Wavelength Division Multiplexing)을 적용하면, 하나의 광케이블로써 채널 간 간섭 없이 전송 용량을 선형적으로 증가시킬 수 있다. 한편, 광케이블을 이용한 통신 기술은 해저 광케이블로부터 시작해 국가 기간망과 메트로망을 거쳐 최근의 FTTH로 대변되는 가입자망에 이르기까지 초장거리 전송에서 단거리 전송으로 꾸준히 적용 영역을 넓혀 왔다. 초기 적용영역으로부터도 알 수 있듯이, 광통신은 전기 신호 기반의 유선 통신에 비해 장거리 대용량 신호 전송 조건에서 특히 장점을 갖는 것으로 평가받고 있으며, 전자기 장애에 강한 특성으로 인해 가혹한 환경에서의 신호 전송 수단으로서도 주목을 받아왔다.

2002년 Neil Savage는 IEEE SPECTRUM 잡지에 기고한 'Linking with Light' 글에서 [그림 1]과 같이 2002년에는 각각의 컴퓨터 간(between individual computers)의 연결에 있어서 상업적으로 광 인터커넥터가 사용되고 있으며, 2004～2007년 사이에는 하나의 컴퓨터 내에 보드와 보드(board-to-board)사이에 광 인터커넥터를 사용함으로써 광통신 기술이 도입될 것이라 예측했고, 2007～2012년 사이에 하나의 보드 내에서 칩과 칩(chip-to-chip) 사이에 광 인터커넥터

가 도입되어 데이터를 전달 및 처리, 그리고 2017년 이후에는 칩 내(intrachip) 신호의 전달 및 처리를 광 인터커넥터를 통해 할 것이라 예측하였다.[2] 그러나 이러한 광 인터커넥터는 기술은 낮은 소모 전력과 초고속 대용의의 신호의 처리가 필요한 고품위 컴퓨팅(HPC, High-Performance Computing)을 위한 저비용의 기술로 발전해 오고 있다. 한편, 휴대 단말 장비 내에서 전자 회로 및 부품들의 소형화·집적화 기술과 동시에 고속, 고용량, 넓은 대역폭의 신호 처리가 필요한 부분에 광 인터커넥터 기술이 적용되어 발전해 왔다.

대부분의 광 인터커넥터 기술이 광의 내부 전반사(TIR, Total Internal Reflection) 원리를 이용한 광섬유 및 유전체 도파로, 특히 플렉시블한 폴리머 도파로를 사용해 광의 신호를 전달한다. 최근, 한국전자통신연구원(ETRI)에서 TIR의 원리가 아닌 단일 모드의 장거리(LR, Long-range) 표면 플라즈몬 폴라리톤(SPP, Surface Plasmon Polariton)을 이용한 금속 도파로를 이용하여 플렉시블한 광 인터커넥터를 연구개발하였다.



[그림 1] 광 인터커넥터에 관한 예상되는 도래 시기[2]

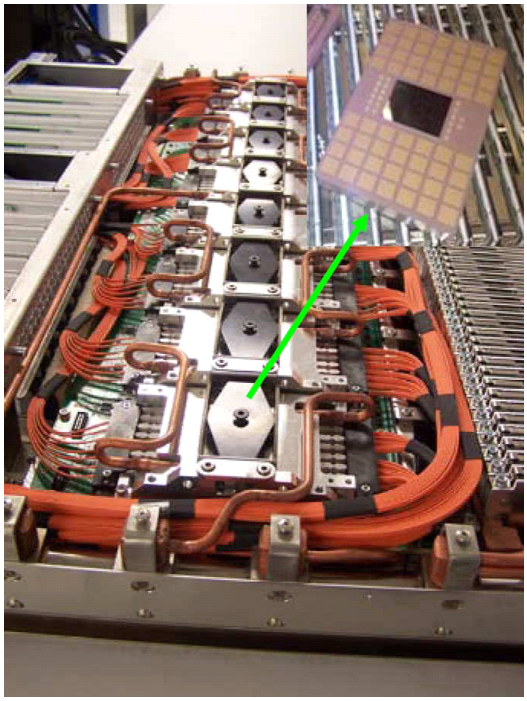
본 고에서는 현재 IBM 등에서 진행되고 있는 HPC를 위한 광 인터커넥터 기술을 간단히 설명한다. 그리고 휴대 단말기용 플렉시블 광 인터커넥터와 관련한 일반적 기술 동향을 간단히 정리 설명한 후, ETRI에서 새롭게 개발된 휴대 단말기용 SPP을 이용한 광 인터커넥터 기술에 관해서 최근의 성과와 함께 이 기술에 관해서 간략히 논한다.

Ⅱ. HPC를 위한 광 인터커넥터 기술

고품위 컴퓨팅(HPC) 기술은 클락(clock) 속도 및 데이터 전송 속도의 증가와 함께 비트(bit)당 소모 전력의 감소를 요구하고 있다[3]. 현재의 구리선을 이용한 전기 인터커넥터로는 해결해야 하는 많은 문제점을 가지고 있어, 이 문제점을 해결할 대안으로 광통신 기술을 차용한 광 인터커넥터 기술이 이미 10년 전부터 연구되기 시작하였다. 전기 인터커넥터 기술의 대안으로 광 인터커넥터 기술은 랙과 랙(Rack-to-Rack), 카드와 백플레인(Card-to-Backplane), 보드와 보드(board-to-board), 보드 내(Intra-board), 칩과 칩(Chip-to-Chip), 그리고 칩 내(Intra-chip)에 적용에 관한 연구가 진행되었거나 되고 있다[4].

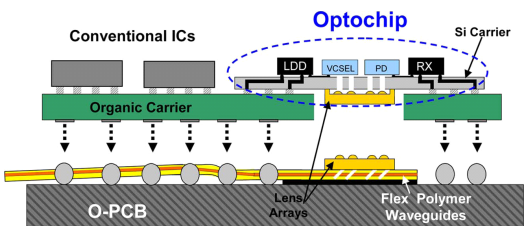
IBM에서는 이미 1990년에 컴퓨터로부터 스토리지 랙에 연결하는 부분에 광케이블을 이용한 광 인터커넥터 기술이 사용되었으며, 2005년 Rack-to-Rack 클러스터 링크를 위하여 전기 배선 대신에 광 인터커넥터로써 광케이블이 사용되었다. 그리고 랙과 랙뿐만 아니라 랙 안의 백플레인에도 광케이블을 사용하였다([그림 2]) [4].

그러나 현재의 HPC 컴퓨터는 신호 처리 속도 및 용량뿐만 아니라, 소모 전력, 밀도, 그리고 비용의 3가지 요소도 고려하며 최적화 시켜야 한다. 고밀도, 낮은 소모 전력, 고속 및 고용량의 신호처리를 위하여 고 집적화된 다채널 병렬 폴리머 도파로형 인터커넥터를 이용한 IBM Terabus/DARPA C2OI 프로그



[그림 2] 광케이블로 연결된 8개의 칩 모듈을 갖고 있는 IBM Power 775 시스템[3]

램을 진행시켰다[5]. 이를 구현한 대표적인 기술로써 [그림 3]에서와 같이 광 PCB(Optical-Printed Circuit Board) 위에 전통적인 IC 칩과 광 칩(Optochip)을 다채널 병렬로 어셈블리하여 구성하였다. 이러한 기술을 이용하여, 현재 병렬로 구성된 24개의 채널과 채널당 15 Gbps의 처리 속도로 360 Gbps의 양 방향 대역폭을 가지며, 소비효율은 9.7 pJ/bit/link인 HPC를



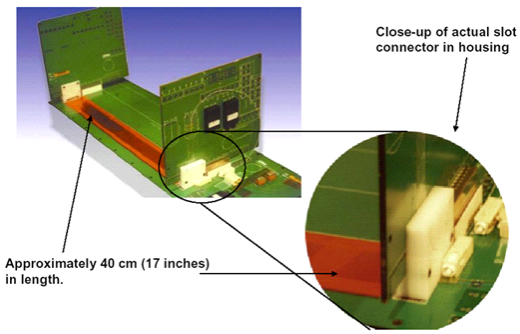
[그림 3] O-PCB 위에 IC와 Optochip으로 구성된 Tera-bus 버전의 개략도[4]

상업적으로 이용할 수 있다. 현재 HPC를 위해 실리콘 광학(Si Photonics) 기술을 광 인터커넥터에 접목하는 연구도 인텔, IBM 등에서 연구가 진행되고 있어, Tbps급 대역폭의 대용량 HPC도 조만간에 구현될 것으로 예측된다.

Ⅲ. 휴대 단말기용 플렉시블 광 인터커넥터 기술

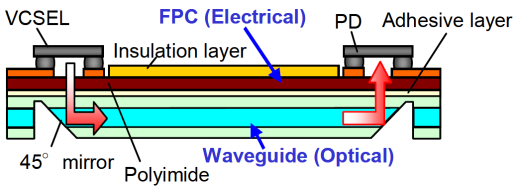
2000년 전후 시기의 광 인터커넥터 연구는 주로 [그림 4]와 같은 백플레인(backplane)과 PCB 간의 고속 광 인터커넥터에 집중되어, 기존의 다층 경성(rigid) PCB의 표면 또는 내부에 광 도파로층을 추가하고, 보드들을 상호 연결하는 구조가 주류를 이루었다. 그리고 2005년을 전후로 휴대 단말기 등에서 사용될 플렉시블 PCB의 개발도 활기를 띄면서, 광 인터커넥터에 적용되는 광 도파로로는 폴리머 다중 모드 광 도파로를 채택하는 것이 일반적인 기술 경향이 되었다. 이러한 플렉시블 광 PCB의 핵심은 유연한 소재 개발이며, Omron, Hitachi Chemical, Toshiba, 그리고 한국의 ㈜ 뉴플렉스, ㈜ SKC 등에서 연구 개발 중에 있다. 플렉시블 광 PCB용 유연한 소재 개발에 대한 자세한 내용은 참고문헌 [6]을 참조하기 바란다.

[그림 5]는 광 인터커넥터와 관련하여 폴리머 광 도파로를 적용하는 일반적인 기술 동향에 따른 전형적 플렉시블 모듈 구조를 보여준다[7], [8]. 세부적인 구



[그림 4] 광 백플레인 기술 구현 사례

성에서는 연구 그룹에 따라 다양한 차이들이 나타나지만, 그림에서 드러나는 바와 같이 전원 및 저속 전기 신호의 전달을 위한 플렉시블 전기 연결 구조에, 코어 층 및 상·하부 클래딩 층으로 구성되는 약 100 mm 높이의 플렉시블 폴리머 기반 다중 모드 광 도파로층을 추가하고, VCSEL(Vertical Cavity Surface Emitting Laser)과 면 PD(PhotoDiode)를 각각 발광 및 수광소자로 사용하여, 45° 거울 구조를 통해 발광/수광소자와 광 도파로를 결합하는 구도가 일반적이다. [그림 6]은 몇몇 업체들에서 제작한 폴리머 다중 모드 광 도파로 기반 플렉시블 광 인터커넥터 모듈의 실질적인 구현 형태를 보여준다. Toshiba와 삼성전자에서 제작한 유연성 광연결 모듈은 발광/수광소자와 구동 IC 소자들을 광연결 모듈 표면에 실장하여 반대편에 위치한 광 도파로와 45° 거울면을 통해 결합

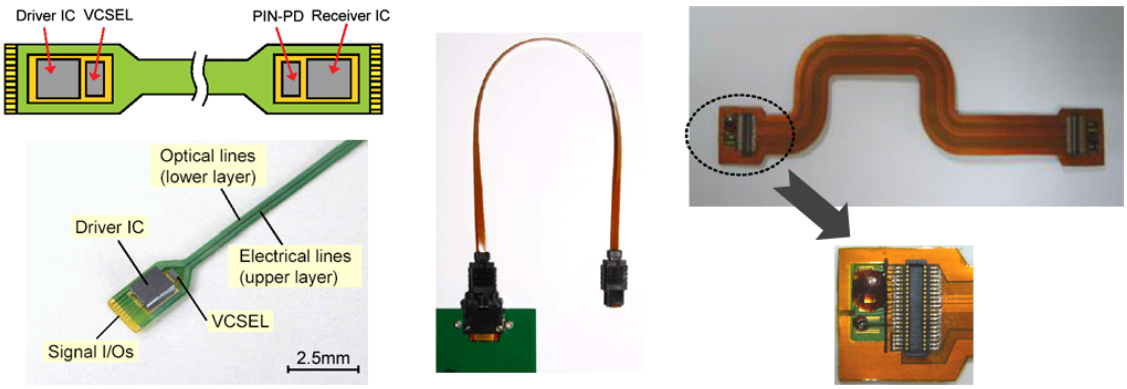


[그림 5] 플렉시블 광 인터커넥터 모듈의 전형적인 구성 형태[7]

시킨 구조이며, IBM 연구 그룹의 유연성 광연결 모듈은 발광/수광소자 및 구동 IC 소자들을 별도의 광 PCB 기판에 수직 실장하여 배치하고, 유연성 광 모듈에는 광 도파로와 전기 배선 만을 포함하여 커넥터를 이용하여 광 PCB와 연결하는 구조로 제작되었다.

Ⅳ. 표면 플라즈몬 기반 플렉시블 광 인터커넥터 기술

폴리머 다중 모드 광 도파로 기반 플렉시블 광 인터커넥터 기술은 광 도파로의 제작공정이 복잡하고 광 결합의 측면에서도 비효율적인 문제들이 있어, ETRI에서는 대체 기술로서 표면 플라즈몬 광 도파로를 플렉시블 광 인터커넥터 기술에 적용하는 연구를 수행하여 상당한 수준의 성과를 거두었다. ETRI에서 개발한 표면 플라즈몬 광 도파로는 10 nm 정도 두께의 금속 띠를 코어 구조로 사용하고 있어 반도체 공정에서 흔히 사용되는 금속 lift-off 공정을 이용하여 습식 식각 방식으로 간편하게 제작할 수 있으며, 단일 모드 도파 조건에서 광 도파 모드의 크기를 수 내지 수십 μm의 범위에서 손쉽게 조절할 수 있다는 장점을 갖고 있다. 또한 45° 광 결합이 필요 없는 모듈구조를 자체적으로 개발하여 적용함으로써 모듈



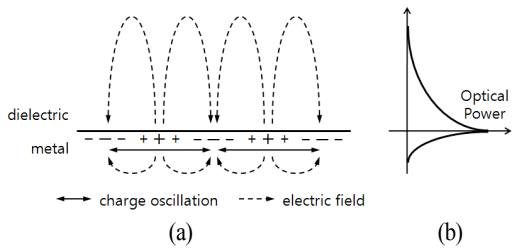
(a) Toshiba (b) 스위스 IBM (c) 삼성전자

[그림 6] 폴리머 다중 모드 광 도파로 기반 플렉시블 광 인터커넥터 모듈 시제품

구성에 있어서도 여타의 기술에 비해 경쟁력을 갖는 것으로 평가된다. 이하의 내용에서는 표면 플라즈몬 도파로에 대한 간략한 소개와 개별 요소기술별 성과들을 살펴보기로 한다.

4-1 표면 플라즈몬 광 도파로

표면 플라즈몬(surface plasmon)은 빛 또는 전자 빔을 금속에 쬐였을 때 금속 표면을 따라 발생되는 전자 밀도의 종적인 진동을 의미하며, 표면 플라즈몬과 결합되어 상호 유도 과정을 통해 금속과 유전체의 경계면을 따라 진행하는 전자기파를 표면 플라즈몬 폴라리톤(surface plasmon polariton, SPP)이라 한다[8], [9]. [그림 7]은 표면 플라즈몬과 표면 플라즈몬 폴라리톤의 관계 및 이들 간의 상호 유도를 통해 전달되는 광 출력의 분포를 보여준다. 빛에 의해 여기된 표면 플라즈몬 폴라리톤은 일반적 환경에서는 전송 손실이 매우 커서 전송 가능한 거리가 수십 내지 수백 마이크로미터로 제한된다. 그러나 전자기파의 침투 깊이(skin depth)에 비해 두께가 훨씬 얇은 금속 박막의 경우에는 금속 박막 양쪽 면에서 발생되는 표면 플라즈몬 폴라리톤이 결합하여 수 밀리미터 내지 수 센티미터의 장거리 전송이 가능한 수퍼 모드를 얻을 수 있으며, 이러한 모드를 장거리 표면 플라즈몬 폴라리톤(long-range surface plasmon polariton, LRSPP)이라 한다[9].



[그림 7] (a) 금속과 유전체 경계면에서 발생되는 전자 밀도의 진동과 표면 플라즈몬 폴라리톤의 형성, (b) 경계면을 따라 전달되는 광 출력의 분포

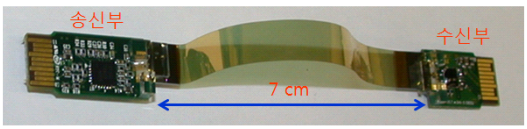
4-2 표면 플라즈몬 기반 플렉시블 광 도파로의 개발

LRSPP 모드의 발견으로 전송거리가 획기적으로 늘어났음에도 불구하고, LRSPP 광 도파로가 여전히 일반 유전체 광 도파로에 비해 수십 배 이상 높은 광 전송 손실을 갖는 것으로 보고되어, 보편적인 용도의 광 도파로 소자로 활용하기에는 적합하지 않은 것으로 평가받아 왔다. 최근에 ETRI에서 10 nm 정도의 두께에서도 꽤 균일한 금속 띠 코어를 형성할 수 있는 기술을 확보함에 따라, LRSPP 광 도파로에서도 1.31 mm의 파장 대역에서 1 dB/cm 이하의 광 전송 손실을 얻는 것이 가능하게 되었다[10]. 제작 공정도 비교적 간단하여 진공 조건에서 진행해야 하는 건식 식각 과정이 단 한 번도 포함되지 않는다. 그러나 이러한 저손실 LRSPP 도파로의 경우 전송 모드가 상당히 크고, 광 구속 계수(optical confinement factor)가 매우 낮아 약간의 구부림에도 심각한 구부림 손실이 발생되어 플렉시블 광 인터커넥터에는 적합하지 않은 특성을 보인다. 일반적 LRSPP 광 도파로가 갖는 구부림 손실에 대한 취약성을 보완하기 위해서 ETRI에서는 시뮬레이션 과정을 거쳐 이중 클래딩 즉 내부 클래딩과 외부 클래딩을 두고, 내부 클래딩이 외부 클래딩에 비해 높은 굴절률을 가지는 구조의 LRSPP 광 도파로를 설계하고 제작하였다. 이중 클래딩의 도입으로 수직 방향의 구부림에 의해 발생되는 손실 문제가 상당히 완화되어, 2 mm 이상의 곡률 반경에서 구부림에 의한 추가 손실이 0.2 dB 이내로 거의 일정하게 유지됨을 확인할 수 있다. 또한 플렉시블 광 인터커넥터에 적용되는 광 도파로용 유기 소재는 낮은 광손실, 내화학성, 내열성, 소자제작 편이성 등의 조건을 기본적으로 만족하고, 이에 더해 플렉시블 광 인터커넥터에 사용할 수 있는 수준의 고유연성과 내구성 등의 특성을 함께 갖추어야 한다. 이러한 다양한 특성들을 동시에 만족시키기 위해 ETRI에서는 방향족 및 지방족 그룹이 적절한

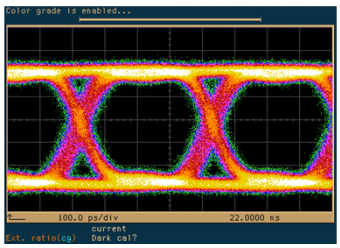
비율을 갖도록 설계된 분자량 2,000 이상의 액상 프리폴리머를 개발하여 플렉시블 광 인터커넥터 제작에서 적용하였다[11].

4-3 플렉시블 광 인터커넥터 모듈의 제작 및 시연

표면 플라즈몬 도파로를 적용한 플렉시블 광 인터커넥터 모듈은 ㈜테라디안과의 공동 연구를 통해 구현하였다. [그림 5]에서 설명한 일반적인 발광 및 수광 소자의 45° 광 결합 구조와 달리, 45° 광 결합이 필요 없는 독특한 구조의 2.5 Gbps급 VCSEL과 PD를 적용하여 광 도파로와 송・수신부를 직접 연결하였으며, 송・수신부는 별도의 전기 배선 기판에 커넥터를 통해 연결하여 사용하는 구조로 제작되었다. [그림 8]은 실제로 제작된 광 인터커넥터 모듈의 사진과 2.5 Gbps의 광신호 전송 조건에서 얻은 아이 패턴(eye pattern)을 보여준다. 아이 패턴에서 볼 수 있는 바와 같이 디지털 신호의 '0' 레벨과 '1' 레벨을 뚜렷이 구별할 수 있어 무오류 전송(error-free transmission)도 가능한 것으로 확인되었다. 별도의 실험을 통해 확인한 결과, 표면 플라즈몬 광 도파로 자체의 성능은 10 Gbps 및 40 Gbps의 초고속 신호 전송 조건에서도 문제를 보이지 않았으므로[12], [13], 송・수신부의 성능 개선에 따라 표면 플라즈몬 광 도파로 기반 플렉시블 광 모듈의 신호 전송 성능도 얼마든지 개선될 수 있다.



(a)



(b)

[그림 8] (a) 표면 플라즈몬 광 도파로를 이용하여 제작한 2.5 Gbps급 플렉시블 광 인터커넥터 모듈, (b) 2.5 Gpbs 광신호 전송 조건에서 얻은 아이 패턴

Ⅴ. 결 론

인터넷 및 무선 통신의 급격한 발달로 현재 엄청난 양의 정보를 처리해야 하는 시대가 도래했다. 전기적인 연결 방법으로는 RLC 지연 문제 등으로 처리속도 및 전송 용량의 증가에 적절히 대처하기에는 여러 가지 기술적 한계가 발생한다. 이러한 전기적인 연결 방법의 대안으로 광통신 기술을 이용한 광 인터커넥터를 도입함으로써 이 문제점을 해결하고 있다.

21세기가 시작되면서, 이미 IBM 등에서 HPC를 위하여 전기 배선 대신에 광케이블을 이용해 전기 배선에서 일어나는 신호 처리의 지연 현상을 해결했고, 지금은 소모 전력, 밀도, 비용 등을 고려하여 WDM 형태의 광 도파로와 광 송수신소자와의 집적, 그리고 CMOS 및 IC 등의 전자소자와 집적된 광전 PCB 등이 사용되어 HPC의 전송 용량 및 밀도를 획기적으로 증대시키고 있으며, 단위 비트 당 소모 전력을 낮추고 있다. 그리고 더 많은 전송 용량, 초고밀도, 더 낮은 소모 전력과 비용을 위해 Si Photonics 기술 등을 적용 연구하고 있다.

또한, 휴대 단말기의 고사양화가 지속되면서 휴대 단말기 내에서 전달되는 전기 신호의 전송 용량도 이미 100 Mbps 급을 넘어 1 Gbps 급으로 접근해 가고 있는 추세이다. 전기 신호의 전송 용량이 증가하면서 휴대 단말기 내에서 사용되던 기존의 플렉시블 전기 배선 방법으로는 여러 가지 기술적 한계가 발생함에 따라, 최근 일본 업체들은 플렉시블 광 인터

커넥터 기술에 대한 연구에 속도를 내고 있으며, 상당한 성과를 거두고 있다. 국내에서도 기업체를 포함한 몇몇 그룹에서 플렉시블 광 인터커넥터에 대한 연구를 수행해 왔으나, 소재와 모듈 구도에 있어서 일본의 원천 기술에 대한 종속 문제를 빗겨가기 힘들다. ETRI에서는 기존 기술과 완전히 다른 표면 플라즈몬 광 도파로 기술을 자체적으로 확보하고[14], 실용화와 관련하여 표면 플라즈몬 광 도파로가 안고 있는 한계들을 기술적으로 보완하여, 휴대 단말기에 사용 가능한 플렉시블 광 인터커넥터 모듈을 구현하고 그 성능을 시연해 보였다. 금속 코어를 적용한 표면 플라즈몬 광 도파로는 폴리머 다중 모드 광 도파로에 비해 제작이 간편하고 모듈 구성 및 집적화에 유리하며, 상대적으로 광 도파로층의 두께가 얇아 플렉시블 측면에서도 장점을 갖는 것으로 판단된다. 이러한 기술적 장점에 힘입어 휴대 단말기용 플렉시블 광 인터커넥터는 물론, 향후 보다 다양한 영역에서 기술적 적용을 확대해 갈 수 있을 것으로 예상되며, 이 기술들이 관련 산업분야의 국제 경쟁력 확보에도 큰 도움이 되길 기대한다.

참 고 문 헌

[1] Sources : Cisco Visual Networking Index - Forecast and Methodology 2007-2012, IEEE 802.3 100G Copper BP TF; Optical Interconnecting Forum(OIF).

[2] S. Savage, "Linking with light", *IEEE Spectrum*, 32, Aug. 2002.

[3] X. Lin, A. Hosseini, X. Dou, H. Subbaraman, and R. T. Chen, "Low-cost board-to-board optical interconnects using molded polymer waveguide with 45 degree mirrors and inkjet-printed micro-lenses as proximity vertical coupler", *Opt. Express*, 21, 60, 2013.

[4] M. A. Taubenblatt, "Optical interconnects for high-performance computing", *J. Lightwave. Technol.,* vol. 30, 448, 2012.

[5] F. E. Doany, C. L. Schow, B. G. Lee, R. A. Budd, C. W. Baks, C. K. Tsang, J. U. Knickerbocker, R. Dangel, B. Chan, H. Lin, C. Carver, J. Huang, J. Berry, D. Bajkowski, F. Libsch, and J. A. Kash, "Terabit/s-Class optical PCB links incorporating 360-Gb/s bidirectional 850 nm parallel optical transceivers", *J., Lightwave. Technol.,* vol. 30, 560, 2012.

[6] T. Shioda, *6th International Conference on Polymers and Adhesives in Microelectronics and Photonics (Polytronic)*, 167, 2007.

[7] T. Shibata, A. Takahashi, *58th Electronic Components and Technology Conference*, 261, 2008.

[8] M.-s. Kim, S. K. Park, J. T. Kim and J. J., Ju, "휴대 단말기용 표면 플라즈몬 기반 유연성 광연결", *Polymer Science and Technology*, vol. 21, 10, 2010.

[9] H. Raether, *Surface Plasmons,* Springer, Berlin, 1988.

[10] S. Park, J. J. Ju, J. T. Kim, M.-s. Kim, S. K. Park, J.-M. Lee, W.-J. Lee, and M.-H. Lee, "Sub-dB/cm propagation loss in silver stripe waveguides", *Opt. Express*, 17, 697, 2009.

[11] S. K. Park, J.-M. Lee, S. Park, J. T. Kim, M.-s. Kim, M.-H. Lee, and J. J. Ju, "Highly fluorinated and photocrosslinkable liquid prepolymers for flexible optical waveguides", *J. Mater. Chem.*, 21, 1755, 2011.

[12] J. J. Ju, M.-s. Kim, S. Park, J. T. Kim, S. K. Park, and M.-H. Lee, "10 Gbps optical signal transmission via long-range surface plasmon polariton waveguide", *ETRI J.*, 29, 808, 2007.

[13] J. J. Ju, S. Park, M.-s. Kim, J. T. Kim, S. K. Park, Y. J. Park, and M.-H. Lee, "40 Gbit/s light signal

transmission in long-range surface plasmon waveguides", *Appl. Phys. Lett.* 91, 171117, 2007.

[14] M.-H. Lee, J. J. Ju, S. Park, J. T. Kim, M.-s. Kim, and S. K. Park, United State Patent, US 8,139,906 B2, 등록일 : 2012.3.20 ; 대한민국특허, 10-0783361, 등록일 : 2007.12.03.

≡ 필자소개 ≡

이 명 현

1985년: 서울대학교 금속공학과 (공학사)
1987년: 서울대학교 금속공학과 (공학석사)
1993년: Oxford대학교 재료 및 전자공학과 (공학박사)
1993년~2007년: 한국전자통신연구원 책임연구원
2007년~현재: 성균관대학교 전자전기공학부 교수

김 민 수

1993년: 한국과학기술원 물리학과 (이학사)
1995년: 한국과학기술원 물리학과 (이학석사)
2002년: 한국과학기술원 물리학과 (이학박사)
2002년~현재: 한국전자통신연구원 부품소재연구부문 책임연구원