

휴대 단말기용 표면 플라즈몬 기반 유연성 광연결

김민수 · 박승구 · 김진태 · 주정진

1. 서론

휴대 단말기 제작기술과 전자 회로 및 부품들의 소형화·집적화 기술이 동반하여 발전함에 따라, 최근의 휴대폰들은 고화소 디지털 카메라, 캠코더, 전자사전, 영상통화, DMB, GPS, 모바일 인터넷에 이르기까지 다양한 기능들을 하나의 소형 단말장비 내에 포함하는 형태로 발전해 왔다. 이러한 경향은 이미 휴대폰과 PDA의 구분을 무의미하게 만들었고, 노트북과의 경계도 갈수록 모호해질 것으로 예상된다. 소형 휴대 단말기의 고성능화가 지속되면서 휴대 단말기 내부의 신호 전송 및 처리 속도는 급속도로 증가해 왔고, 저속의 전기신호 전송라인을 통해 대용량의 전기신호를 전달하기 위해서 수십 개의 전기신호 채널을 병렬적으로 배열한 다층 플렉시블 전기배선 모듈이 휴대 단말기에 폭넓게 적용되어 왔다. 그러나 채널의 증가에 따른 전기배선 구조의 복잡화, 이웃한 전기신호 채널들 간의 간섭 및 누화(crosstalk), 다층 구조 전기배선 모듈의 두께 증가와 내굴곡성 약화 등의 문제점들이 있어, 기존의 다채널 병렬 전기신호 전송 방식이 최근에는 고속의 직렬 전기신호 전송 방식으로 대체되는 추세를 보이고 있다.

휴대 단말기 내부 전송용량의 지속적인 증가는 고속 직렬 전기신호 전송 방식에도 다양한 새로운 문제점들을 발생시킨다. 단말기 내부의 고속 전기신호 전송물이 CDMA나 GSM은 물론, Wi-Fi와 DMB에 이르기까지 다양한 무선 송수신 주파수 대역에 근접함에 따라 외부 무선신호들과의 상호간섭이 심각한 전기신호 왜곡 문제를 야기하게 된다. 이의 해소를 위해서는 전자파 간섭 영향을 최소화하기 위한 소자 및 회로 배치의 변경과 더불어, 차동 쌍(differential pair)으로 구성된 전송 라인의 도입과 기존에 비해 훨씬 복잡한 전자기 간섭 차폐기술 적용 등의 보완 및 개선이 필요하다. 뿐만 아니라, 고주파 전기신호 전송에서 훨씬 심각하게 발생하는 기판에 의한 전송손실의 증가를 막기 위해서는 고가의 기판재료 사용이 불가피하게 된다. 단말기 가격증가 요인을 감수하고 이러한 문제들을 모두 기술적으로 해결하고 넘어선다 하더라도, 대용량 전기신호 전송으로 인한 높은 전력소비는 여전히 심각한 문제로 남아 휴대 단말기의 활용성을 심각하게 제한하는 요인으로 작용할 것으로 보인다.

한편, 광통신 기술은 해저 광케이블로부터 시작해 국가 기간망과 메트로망을 거쳐 최근의 FTTH로 대변되는 가입자망에 이르기까지 초



김민수
1993 한국과학기술원 물리학과(학사)
1995 한국과학기술원 물리학과(석사)
2002 한국과학기술원 물리학과(박사)
2002~ 한국전자통신연구원 융합부품소재연구부문
현재 선임연구원



김진태
1996 인천대학교 물리학과(학사)
1998 고려대학교 물리학과(석사)
2007~ KAIST 전기및전자공학과 박사과정
현재
2000~ 한국전자통신연구원 융합부품소재연구부문
현재 선임연구원



박승구
1986 서울대학교 섬유공학과(학사)
1993 서울대학교 섬유공학과(석사)
1997 서울대학교 섬유고분자공학과(박사)
1997~ Polymer Science & Engineering
2000 Department, University of Massa-
chusetts Amherst(박사후 연구원)
2000~ 한국전자통신연구원 융합부품소재연구부문
현재 책임연구원



주정진
1990 부산대학교 물리학과(학사)
1992 부산대학교 물리학과(석사)
1997 부산대학교 물리학과(박사)
1998 한국표준과학연구원(박사후 연구원)
1999~ 포항공과대학교(박사후 연구원)
2000
2000~ 한국전자통신연구원 융합부품소재연구부문
현재 책임연구원

Flexible Optical Interconnects Based on Surface Plasmon for Hand-Held Devices

한국전자통신연구원 융합부품·소재연구부문 (Min-su Kim, Seung Koo Park, Jin Tae Kim, and Jung Jin Ju, Electronics and Telecommunications Research Institute, 161 Gajeong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-700, Korea)
e-mail: kimms@etri.re.kr

장거리 전송에서 단거리 전송으로 꾸준히 적용영역을 넓혀 왔다. 초기 적용영역으로부터도 알 수 있듯이, 광통신은 전기신호 기반의 유선 통신에 비해 장거리 대용량 신호전송 조건에서 특히 장점을 갖는 것으로 평가받고 있으며, 전자기 장애에 강한 특성으로 인해 가혹한 환경에서의 신호전송 수단으로서도 주목을 받아왔다. 최근에는 초고성능 컴퓨팅 시스템의 장비 및 보드간 신호전달을 위해 광연결(optical interconnection) 기술의 적용이 확대되고 있다. 또한, PC 및 휴대 단말기 내부와 같은 아주 짧은 전송거리에서도 전기신호 전송 기술의 전송용량 한계가 문제로 부각됨에 따라, 초고속 신호전송에서 전기연결에 비해 가격과 전력소비 측면에서 경쟁력을 갖는 광연결의 적용 연구가 미국, 일본, 유럽을 중심으로 활발하게 진행되고 있다.^{1,2}

2000년 전후 시기의 광연결 연구는 주로 그림 1과 같은 백플레인(backplane)과 PCB(printed circuit board) 간의 고속 광연결에 집중되어, 기존의 다층 경성(rigid) PCB의 표면 또는 내부에 광도파로층을 추가하고 보드들을 상호 연결하는 구조가 주류를 이루었다. 그림 2와 같은 유연성 전기연결을 대체하기 위한 유연성 광연결에 대한 연구개발은 2005년을 전후로 유기 소재에 대한 기술 기반이 강한 일본 업체들에 의해서 주도적으로 진행되어 이미 상당한 수준의 성과에 도달하였으며,³⁻⁶ 한국과^{7,8} 대만의^{9,10} 몇몇 연구그룹들도 관련 연구에서의 의미 있는 성과를 보여주고 있다. 유연성 광연결에 적용되는 광도파로로는 폴리머 다중모드 광도파로를 채택하는 것이 일반적인 기술 경향이나, 본 연구그룹의 경우는 예외적으로 단일모드의 장거리 표면 플라즈몬 기반 광도파로를 채택한 유연성 광연결 기술을 선보여 왔다.¹¹⁻¹⁶

유연성 광연결과 관련한 기술 영역은 크게 유연성 광소재 기술, 광도파로 기술, 광전 복합모듈 기술, 발광/수광소자 결합 기술로 분류할 수 있다. 본 기고에서는 먼저 폴리머 다중모드 광도파로에 기반한 유연성 광연결과 관련하여 기술 영역별로 일반적 기술 동향을 개괄적으로 정리한 후, 표면 플라즈몬 광도파로에 대한 기본적인 설명과 함께 본 연구그룹에서 수행해 온 표면 플라즈몬 광도파로 기반 유연성 광

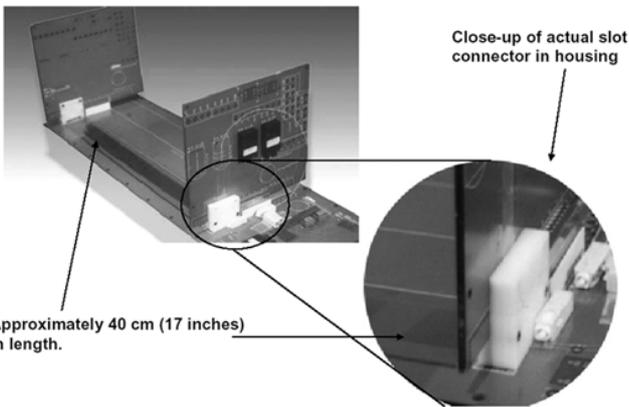


그림 1. 광백플레인 기술 구현 사례.

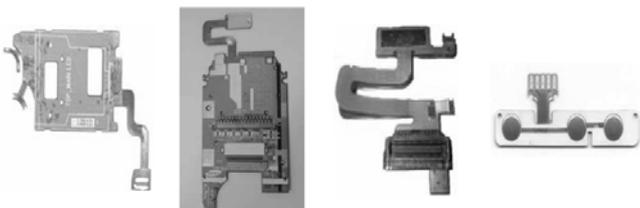


그림 2. 다양한 형태의 휴대 단말기용 유연성 전기연결 모듈.

연결 기술개발의 여러 성과들을 소개하고자 한다.

2. 폴리머 다중모드 광도파로 기반 유연성 광연결 기술의 동향

그림 3은 유연성 광연결과 관련하여 폴리머 광도파로를 적용하는 일반적인 기술 동향에 따른 전형적 모듈 구조를 보여준다. 세부적인 구성에서는 연구그룹에 따라 다양한 차이들이 나타나지만, 그림에서 드러나는 바와 같이 전원 및 저속 전기신호의 전달을 위한 유연성 전기연결 구조에, 코어층 및 상·하부 클래딩층으로 구성되는 약 100 μm 높이의 유연성 폴리머 기반 다중모드 광도파로층을 추가하고, VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser)과 면PD(PhotoDiode)를 각각 발광 및 수광소자로 사용하여, 45° 거울 구조를 통해 발광/수광소자와 광도파로를 결합하는 구조가 일반적이다.

그러나 이러한 구조를 채택할 경우, 두꺼운 광도파로층과 45° 거울면 구조로 인해 제작 공정이 매우 복잡해지고, 또한 발광 및 수광소자와의 정렬 어려움으로 상용화 단계에서의 수율 개선에도 분명한 한계가 존재한다.¹⁷ 그 결과, 기존 전기연결과의 단가 경쟁에서 쉽게 유리한 위치를 차지하지 못하여 시장 조기진입에 어려움이 따를 것으로 전망된다. 한편, 전체 광연결 모듈의 두께도 광도파로층의 두께에 따라 두꺼워질 수 밖에 없어, 반복적인 구부림 상황에서 유연성 및 기계적 내굴곡성에 부정적 영향이 발생할 것으로 예상된다. 그러나 이러한 기술적 문제들을 넘어, 소재 및 기본 구조에 있어 일본에 대한 기술적 종속성이 대단히 클 수 밖에 없다는 점이 세계시장 경쟁력 및 지배력 강화와 지속적인 이윤확보를 기대하는 한국의 소재·부품 산업과 휴대 단말기 제조회사에게 커다란 장애 요인으로 작용하게 될 것이다.

2.1 유연성 광소재 기술 및 광도파로 기술

광도파로용 유기소재는 1970년대 폴리메타크릴레이트, 폴리카보네이트, 폴리스티렌, 폴리우레탄과 같은 범용 고분자를 중심으로 개발되기 시작했다. 그 이후로 광손실, 복굴절, 열광학 특성, 광전 특성, 내화학성, 내습성, 내열성, 소자제작 편이성 등의 다양한 요구 특성에 따라 화학구조적 분자설계가 이루어져 수많은 종류의 광도파로 유기소재가 출현하였다.¹⁸ 일반적으로 광도파로 소자는 실리콘 웨이퍼 기반 위에서 제작되어 기판과 함께 사용되는 경우가 많아 기계적 강도 등은 그리 중요한 요구 특성으로 고려되지 않았다. 하지만 유연성 광연결의 용도로 활용되는 경우에는 광도파로에 구부림이나 꺾임 등이 직접적으로 발생할 수 있으므로 기존 광도파로용 유기소재의 사용이 곤란하며, 여타의 광도파로 성능 지표의 심각한 저하 없이 유연성과 내구성 등의 다양한 기계적 특성을 보완해야 할 필요성이 발생한다. 또한, 기존 전기PCB 기술과의 효과적인 연동을 위해서는 기존 PCB 제작공정에 대한 적용 적합성과 대면적 제조 용이성이 추가로 확보되어야 한다.¹⁹

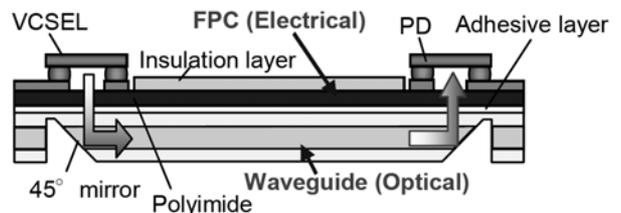


그림 3. 유연성 광연결 모듈의 전형적인 구성 형태.³

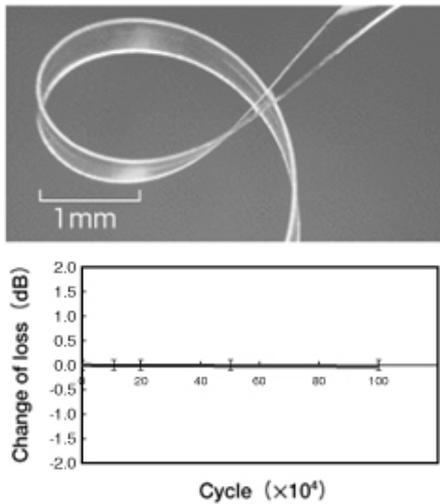


그림 4. (상) Omron사에서 개발한 유연성 광도파로; (하) 굴곡반경 1 mm 조건에서 내굴곡성 테스트 결과.

유연성 광연결에 적용하기 위한 광도파로 소재의 광학적, 기계적 특성은 아직 별도로 표준화되어 있지 않다. 기존의 유연성 전기연결에 대한 표준을 준용하여 MIT 테스트 1,000회 이상과 2 mm 굴곡반경에서 내굴곡성 테스트(flexural test) 120,000회 이상 등의 기준을 시제품에 적용하여 평가하는 것이 일반적인 추세이다.

유연성 광소재 기술과 관련해서는 일본 업체들이 단연 앞선 기술적 성과들을 선보이고 있으나, 광소재의 화학적 구조에 대해서는 일반적으로 알려지지 않고 있다. 다만, 참고문헌 17에 정리된 내용으로부터 각 업체들이 사용하는 물질의 기본적 조성에 대한 정보를 확인할 수 있을 뿐이다. 기계적 특성에 대해서는 좀 더 많은 결과들이 발표되었는데, Hitachi Chemical의 경우 1,000회의 온도 사이클 테스트와 1,000시간의 고온고습 테스트의 통과는 물론, 2 mm의 굴곡반경 조건에서 광도파로와 광연결 모듈에 대해 각각 100만회와 50만회의 내굴곡성 테스트 통과결과를 보고하였다.³ Omron의 경우 500시간의 고온고습 테스트 통과와 1 mm의 굴곡반경 조건에서 광도파로 기준 100만회의 내굴곡성 테스트 통과결과를 보고하였으며(그림 4),^{5,6} Toshiba는 같은 조건에서 광도파로에 대해 50만회, 광연결 모듈에 대해 10만회의 테스트 통과결과를 보고하였다.⁴ 광도파로의 제작 방법으로는 Hitachi Chemical과 Toshiba는 두꺼운 광도파로층을 보다 효율적으로 형성시키기 위한 방법으로서 lamination 공정을 채택한 반면,^{3,4} Omron은 자체적으로 SPICA(Stacked Polymer optical IC/Advanced)라 명명한 replication 방법을 활용하고 있다고 한다.⁵

국내에서는 (주)뉴플렉스와 한국광기술원의 공동연구 그룹이 스피코팅과 자외선 광경화 방법을 통해 제작한 광도파로로 광연결 모듈을 구성하여, 굴곡반경 4 mm의 폴더 타입 내굴곡성 테스트 10만회와 온도 사이클 테스트 100회를 통과하였다는 결과가 보고되었다.⁷ 그밖에 (주)SKC에서 기재필름 위에 몰투몰 공정을 이용하여 제작한 광경화 유기소재 광도파로를, 인하대에서 기재필름 위에 소프트 리소그래피 공정을 이용하여 제작한 광경화 유기 하이브리드 소재 광도파로를,²⁰ 또한 KAIST에서 기재필름이 없는 광경화 유기 하이브리드 소재 광도파로²¹ 유연성 광연결 관련 연구성과로 각각 발표하였으나, 이들 보고에서는 유연성 광도파로의 기계적 특성에 대한 구체적인 데이터는 드러나지 않는다.

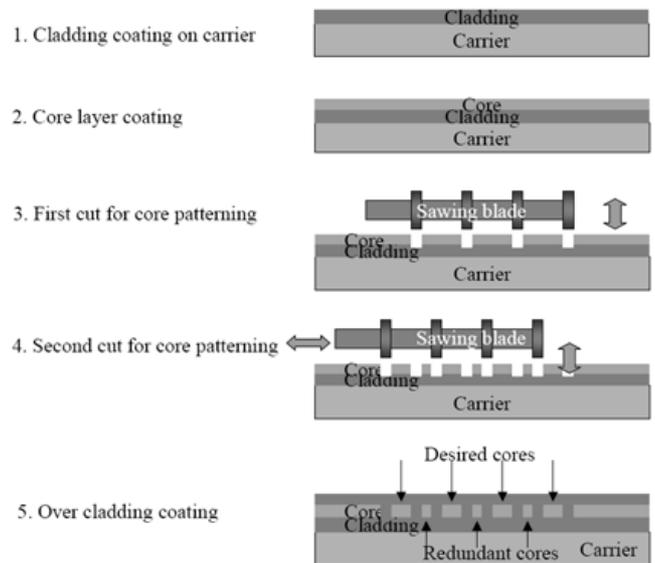


그림 5. 대만 그룹에서 광도파로 제작 공정에 활용하고 있는 sawing 기술.

한편, 대만의 연구그룹은 유기 하이브리드 소재를 적용한 광도파로에 대한 연구를 수행하고 있는데, 포토리소그래피 공정 없이 여러 채널의 광도파로 코어를 한꺼번에 효율적으로 제작하기 위한 방법으로 그림 5와 같이 wafer sawing 장비에 다수의 날을 장착하여 코어 패턴을 형성하는 특징적인 기술을 도입하여 활용하고 있다. 대만 그룹에서 제작된 광도파로의 경우에도 기계적 특성이 문헌에 구체적으로 드러나지는 않는데, 관련 정보를 기준으로 유추해 볼 때 굴곡반경은 수 cm 수준에 머무르는 것으로 생각된다.⁸

2.2 광전 복합모듈 기술 및 발광/수광소자 결합 기술

앞서 설명한 바와 같이 발광 및 수광소자와 광도파로의 결합을 위해서는 45° 거울면을 활용하는 것이 일반적이지만, 기술적 구현 방식은 매우 다양하게 드러난다. 가장 일반적으로 볼 수 있는 구조는 그림 3과 같이 광도파로층과 발광/수광소자가 유연성 전기연결 구조의 반대편에 위치하고 광도파로 코어층에 형성된 45° 거울면을 통해 이들 사이의 결합을 이루는 형태인데, 경우에 따라서는 거울면의 반사율을 높이기 위해 경사면에 금속 코팅을 하는 경우도 있다. 이러한 구조에서는 광도파로층과 발광/수광소자 사이의 거리가 불가피하게 멀어지므로, 이로 인해 발생하는 결합효율의 저하를 막기 위해 발광/수광소자나 전기연결층의 표면에 렌즈 어레이를 배치하기도 한다.

결합 기술로 45° 거울면을 활용할 경우 광전 복합모듈의 제조 과정이 복잡해지고 광도파로층과 발광/수광소자 사이의 결합효율도 높지 않아, 이를 위한 몇 가지 대체기술들이 소개되었다. 국내 ICU의 연구그룹은 끝단이 45°의 경사면을 갖는 광커넥션 rod와 90°로 구부린 광섬유 번들 커넥터를 제작하여 발광 및 수광소자 바로 아래쪽에 삽입함으로써 광도파로와의 결합을 이루는 방식을 제안하였다.^{22,23} 또한, 독일의 Fraunhofer 연구그룹은 VCSEL과 PD를 광전 복합모듈에 수직으로 삽입 실장하여 광도파로와 곧바로 결합되는 구조를 제안한 바 있다.²⁴ 한편, ETRI에서는 광PCB의 결합효율 개선을 위한 방법으로 광학벤치 위에 VCSEL과 PD를 윗면을 향하도록 실장하고 이들의 위쪽에 45° 경사면을 갖는 광도파로를 엮는 구조를 제안하기도 하였다.²⁵

그림 6은 몇몇 업체들에서 제작한 폴리머 다중모드 광도파로 기반 유연성 광연결 모듈의 실질적인 구현 형태를 보여준다. Toshiba와 삼성

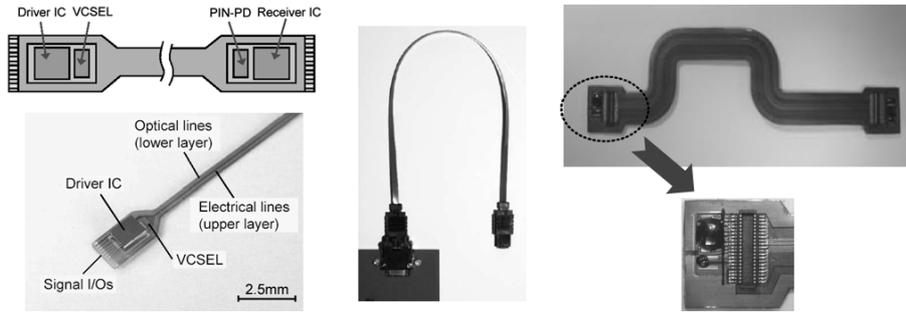


그림 6. 폴리머 다중모드 광도파로 기반 유연성 광연결 모듈 시제품: (좌) Toshiba, (중) 스위스 IBM, (우) 삼성전자.

전자에서 제작한 유연성 광연결 모듈은 발광/수광소자와 구동 IC소자들이 광연결 모듈 표면에 실장하여 반대편에 위치한 광도파로와 45° 거울면을 통해 결합시킨 구조이며, IBM 연구그룹의 유연성 광연결 모듈은 발광/수광소자 및 구동 IC소자들을 별도의 광PCB 기판에 수직 실장하여 배치하고 유연성 광모듈에는 광도파로와 전기배선만을 포함하여 광PCB와 커넥터를 이용하여 PCB와 연결하는 구조로 제작되었다.

3. 표면 플라즈몬 기반 유연성 광연결 기술

폴리머 다중모드 광도파로 기반 유연성 광연결 기술은 광도파로의 제작공정이 복잡하고 광결합의 측면에서도 비효율적인 문제들이 있어, 본 그룹에서는 대체 기술로서 표면 플라즈몬 광도파로를 유연성 광연결 기술에 적용하는 연구를 수행하여 상당한 수준의 성과를 거두었다. 본 그룹에서 개발한 표면 플라즈몬 광도파로는 10 nm 정도 두께의 금속 띠를 코어 구조로 사용하고 있어 반도체 공정에서 흔히 사용되는 금속 lift-off 공정을 이용하여 습식식각 방식으로 간편하게 제작할 수 있으며, 단일모드 도파 조건에서 광도파로 모드의 크기를 수 내지 수십 μm 의 범위에서 손쉽게 조절할 수 있다는 장점을 갖고 있다. 또한, 45° 광결합이 필요 없는 모듈구조를 자체적으로 개발하여 적용함으로써 모듈 구성에 있어서도 여타의 기술에 비해 경쟁력을 갖는 것으로 평가된다. 이하의 내용에서는 표면 플라즈몬 도파로에 대한 간략한 소개와 함께 개별 요소기술별 성과들을 살펴보기로 한다.

3.1 표면 플라즈몬 광도파로

표면 플라즈몬(surface plasmon)은 빛 또는 전자빔을 금속에 쬐었을 때 금속 표면을 따라 발생하는 전자 밀도의 종적인 진동을 의미하며, 표면 플라즈몬과 결합되어 상호유도 과정을 통해 금속과 유전체의 경계면을 따라 진행하는 전자기파를 표면 플라즈몬 폴라리톤(surface plasmon polariton, SPP)이라 한다.²⁶ 그림 7은 표면 플라즈몬과 표면 플라즈몬 폴라리톤의 관계 및 이들 간의 상호유도를 통해 전달되는 광출력의 분포를 보여준다.

빛에 의해 여기된 표면 플라즈몬 폴라리톤은 일반적 환경에서는 전송손실이 매우 커서 전송가능한 거리가 수십 내지 수백 마이크로미터로 제한된다. 그러나 전자기파의 침투깊이(skin depth)에 비해 두께가 훨씬 얇은 금속 박막의 경우에는 금속 박막 양쪽 면에서 발생하는 표면 플라즈몬 폴라리톤이 결합하여 수 밀리미터 내지 수 센티미터의 장거리 전송이 가능한 수퍼모드를 얻을 수 있으며, 이러한 모드를 장거리 표면 플라즈몬 폴라리톤(long-range surface plasmon polariton, LRSP)이라 한다.²⁷ 그림 8은 LRSP 기반 광도파로의 기본

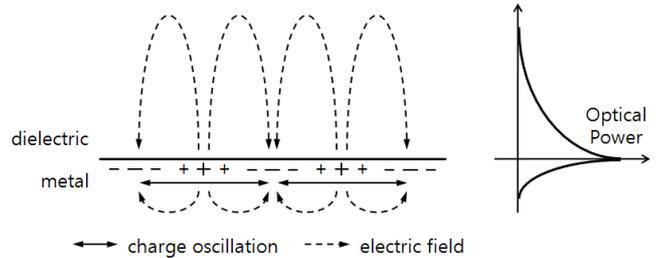


그림 7. (좌) 금속과 유전체 경계면에서 발생하는 전자 밀도의 진동과 표면 플라즈몬 폴라리톤의 형성; (우) 경계면을 따라 전달되는 광출력의 분포.

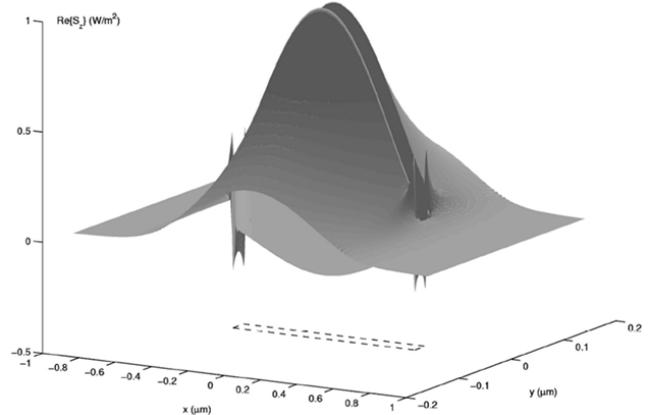
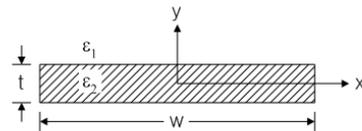


그림 8. (상) LRSP 기반 광도파로의 기본 구조; (하) 폭 1 μm , 두께 20 nm의 금속 박막 도파로에서 발생하는 LRSP 모드의 광출력 분포.

적 구조와 LRSP 모드의 전형적인 광출력 분포를 보여준다.

3.2 표면 플라즈몬 기반 유연성 광도파로의 개발

LRSP 모드의 발견으로 전송거리가 획기적으로 늘어났음에도 불구하고 LRSP 광도파로가 여전히 일반 유전체 광도파로에 비해 수십 배 이상 높은 광전송 손실을 갖는 것으로 보고되어, 보편적인 용도의 광도파로 소자로 활용하기에는 적합하지 않은 것으로 평가받아 왔다. 최근에 본 그룹에서 10 nm 정도의 두께에서도 꽤 균일한 금속 띠 코어를 형성할 수 있는 기술을 확보함에 따라, LRSP 광도파로에서도 1.31 μm 의 파장대역에서 1 dB/cm 이하의 광전송 손실을 얻는 것이 가능하게

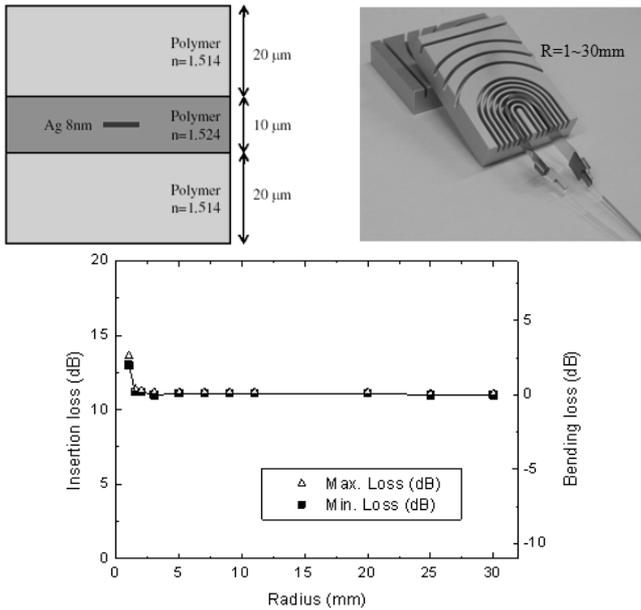


그림 9. (상) 이중 클래딩 LRSPP 광도파로의 구조와 제작된 광도파로 소자; (하) 길이 68 mm의 이중 클래딩 LRSPP 도파로에 대한 총삽입 손실 및 구부림 손실 특성.

되었다.¹³ 제작 공정도 비교적 간단하여 진공 조건에서 진행해야 하는 건식식각 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 유연성 광연결에는 적합하지 않은 특성을 보인다.

일반적 LRSPP 광도파로가 갖는 구부림 손실에 대한 취약성을 보완하기 위해서 본 그룹에서는 시뮬레이션 과정을 거쳐 이중 클래딩 구조의 LRSPP 광도파로를 설계하고 제작하였다. **그림 9**는 이중 클래딩 LRSPP 광도파로의 구조와 구부림 손실 특성을 보여준다. 이중 클래딩 중 내부 클래딩이 외부 클래딩에 비해 높은 굴절률을 가지므로 수직 방향의 구부림에 의해 발생하는 손실 문제가 상당히 완화되어, 2 mm 이상의 곡률반경에서 구부림에 의한 추가 손실이 0.2 dB 이내로 거의 일정하게 유지됨을 확인할 수 있다.¹⁴

3.3 유연성 광소재의 개발

유연성 광연결에 적용되는 광도파로용 유기소재는 낮은 광손실, 내화학성, 내열성, 소자제작 편의성 등의 조건을 기본적으로 만족하고, 이에 더해 유연성 광연결에 사용할 수 있는 수준의 고유연성과 내구성 등의 특성을 함께 갖추어야 한다. 광통신 파장 대역에서 낮은 광손실을 갖는 유기 소재를 개발하기 위해서는 분자 내의 C-H 결합을 C-F로 치환하는 방법이 일반적으로 사용되고 있으나, 불소 농도가 높아질 경우 도파로 필름이 쉽게 깨어지는 문제가 발생할 수 있다. 광도파로 제작 공정의 측면에서는 고상보다는 액상의 유기소재가 다루기에 편리한데, 액상 유기소재는 분자 내에 유연성을 갖는 지방족 그룹을 강직한 방향족 그룹보다 많이 도입함과 동시에 저분자량화를 통해서 얻을 수 있다. 또한, 내화학성은 분자 내에 가교기를 도입함으로써 삼차원 망목상 구조를 형성하여 개선할 수 있는데, 분자 내 가교기를 통한 삼차원 망목상 구조의 형성은 액상 유기소재의 필름화에 있어서도 필수적인 조건이다.

이러한 다양한 특성들을 동시에 만족시키기 위해 본 그룹에서는

표 1. 표면 플라즈몬 기반 유연성 광도파로에 대한 주요 신뢰성 평가 조건 및 결과.

테스트	조건	결과
내굴곡성 테스트	과장 : 1.31 μ m 굴곡반경 : 2 mm 굴곡 반복횟수 : 12만회	구조결함 : 없음 전후 손실변화 : +0.2 dB
온도 사이클 테스트	설정온도 : -40 $^{\circ}$ C/85 $^{\circ}$ C 반복횟수 : 30회 온도별 유지시간 : 45분	손실변화 : < \pm 0.6 dB (초기 손실증가 효과 제외)
고온고습 테스트	온도 : 85 $^{\circ}$ C \pm 2 $^{\circ}$ C 습도 : 85% \pm 3% 유지시간 : 96시간	손실변화 : < \pm 0.6 dB (초기 손실증가 효과 제외)

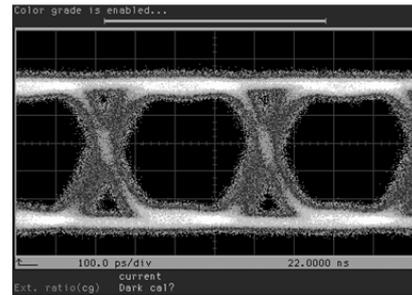
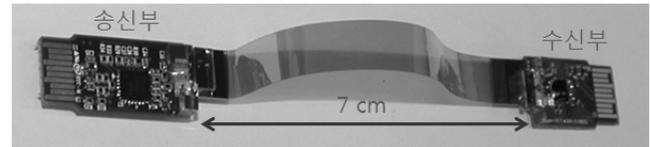


그림 10. (상) 표면 플라즈몬 광도파로를 이용하여 제작한 2.5 Gbps급 유연성 광연결 모듈; (하) 2.5 Gbps 광신호 전송 조건에서 얻은 아이패턴.

방향족 및 지방족 그룹이 적절한 비율을 갖도록 설계된 분자량 2,000 이상의 액상 프리폴리머를 개발하였다. 액상이므로 공정 과정에서 용매가 필요 없으며, 공정 후 가교과정을 통해 필름의 용해성을 감소시키고 분자량 증대 및 화학구조적 강직성을 얻을 수 있어 필름의 기계적 특성을 크게 개선할 수 있었다. 제작된 광도파로 필름의 최대인장강도 및 초기탄성계수는 각각 43.5 MPa, 1.30 GPa로 측정되어 플렉시블 전자 PCB의 기재필름으로 사용되는 폴리이미드 필름의 기계적 특성에 대비하여 1/2~1/5에 이른다.

자체 개발한 유연성 광도파로 소재를 클래딩 소재로 적용하여 표면 플라즈몬 기반 유연성 광도파로를 제작하였으며, 이를 이용하여 내굴곡성 테스트, 온도 사이클 테스트 및 고온고습 테스트를 수행하였다. 이들 각 테스트에 대한 설정 조건 및 결과는 **표 1**에 정리하였다.

3.4 유연성 광연결 모듈의 제작 및 시연

표면 플라즈몬 도파로를 적용한 유연성 광연결 모듈은 (주)테라디안과의 공동 연구를 통해 구현하였다. 앞에서 간략히 설명한 바와 같이 45 $^{\circ}$ 광결합이 필요 없는 독특한 구조의 2.5 Gbps급 VCSEL과 PD를 적용하여 광도파로와 송·수신부를 직접 연결하였으며, 송·수신부는 별도의 전기배선 기판에 커넥터를 통해 연결하여 사용하는 구조로 제작되었다. **그림 10**은 실제로 제작된 광연결 모듈의 사진과 2.5 Gbps의 광신호 전송 조건에서 얻은 아이패턴(eye pattern)을 보여준다. 아이패턴에서 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 플라

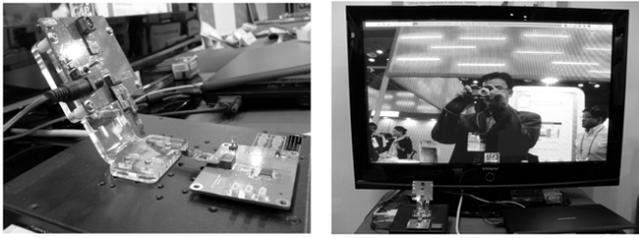


그림 11. (좌) IT융합국제전시회에 출품한 유연성 광연결 모듈의 사진; (우) 유연성 광연결 모듈을 통해 전송된 HD급 영상신호의 디스플레이 화면.

즈몬 광도파로 자체의 성능은 10 Gbps 및 40 Gbps의 초고속 신호 전송 조건에서도 문제를 보이지 않았으므로^{11,12} 송·수신부의 성능 개선에 따라 표면 플라즈몬 광도파로 기반 유연성 광모듈의 신호전송 성능도 얼마든지 개선될 수 있다.

그림 11은 지난 해 일산 KINTEX에서 개최된 IT융합국제전시회에 출품한 표면 플라즈몬 광도파로 기반 유연성 광연결 모듈과, 디지털카메라 모듈로부터 유연성 광연결 모듈을 거쳐 전달된 HD급 영상신호가 TV를 통해 정상적으로 표현되고 있는 것을 전시회 현장에서 확인하여 찍은 사진이다.

4. 결론

현대 단말기의 고사양화가 지속되면서 현대 단말기 내에서 전달되는 전기신호의 전송용량도 이미 100 Mbps급을 넘어 1 Gbps급으로 접근해 가고 있는 추세이다. 전기신호의 전송용량이 증가하면서 현대 단말기 내에서 사용되던 기존의 유연성 전기연결 방법으로는 여러 가지 기술적 한계가 발생함에 따라, 최근 일본 업체들은 유연성 광연결 기술에 대한 연구에 속도를 내고 있으며 상당한 성과를 거두고 있는 것으로 파악된다. 국내에서도 기업체를 포함한 몇몇 그룹에서 유연성 광연결에 대한 연구를 수행해 왔으나, 소재와 모듈 구도에 있어서 일본의 원천기술에 대한 종속 문제를 벗어날 수 없다. 일본 주도의 폴리머 다중모드 광도파로 기반 유연성 광연결 기술은 실용화 단계에 앞서 여전히 여러 가지 중요한 문제들의 해결이 필요하다. 본 그룹에서는 기존 기술과 완전히 다른 표면 플라즈몬 광도파로 기술을 자체적으로 확보하고, 실용화와 관련하여 표면 플라즈몬 광도파로가 안고 있는 한계들을 기술적으로 보완하여, 현대 단말기에 사용 가능한 유연성 광연결 모듈을 구현하고 그 성능을 시연해 보였다. 금속 코어를 적용한 표면 플라즈몬 광도파로는 폴리머 다중모드 광도파로에 비해 제작이 간편하고 모듈 구성 및 집적화에 유리하며, 상대적으로 광도파로층의 두께가 얇아 유연성 측면에서도 장점을 갖는 것으로 판단된다. 이러한 기술적 장점에 힘입어 현대 단말기용 유연성 광연결은 물론, 향후 보다 다양한 영역에서 기술적 적용을 확대해 갈 수 있을 것으로 예상되며, 본 그룹이 확보한 독보적인 기술들이 관련 산업분야의 국제 경쟁력 확보에도 큰 도움이 되길 기대한다.

참고문헌

1. P. Pepeljugoski, M. Ritter, J. A. Kash, F. Doany, C. Schow, Y. Kwarik, L. Shan, D. Kam, X. Gu, and C. Baks, *Proc. SPIE*, **6897**,

68970I (2008).
 2. 전자부품연구원 기술정책실, *광 PCB* (2008).
 3. T. Shibata and A. Takahashi, *58th Electronic Components and Technology Conference*, 261 (2008).
 4. H. Uemura, H. Hamasaki, H. Furuyama, H. Numata, C. Takubo, and H. Shibata, *59th Electronic Components and Technology Conference*, 2101 (2009).
 5. Y. Terakawa and H. Hosokawa, *Proc. SPIE*, **6389**, 63890H (2006).
 6. <http://www.omron.com/ecb/products/opt/1/film.html>.
 7. J.-W. Seo, S.-M. Seo, Y.-K. Oh, and D.-H. Jang, *Proc. SPIE*, **6593**, 65931C (2007).
 8. B. S. Rho, W.-J. Lee, J. W. Lim, K. Y. Jung, K. S. Cha, and S. H. Hwang, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **20**, 964 (2008).
 9. L.-C. Shen, W.-C. Lo, H.-H. Chang, H.-C. Fu, Y.-C. Lee, S.-M. Chang, Y.-C. Chen, and W.-Y. Chen, *55th Electronic Components and Technology Conference*, 1039 (2005).
 10. S.-G. Lee, C.-H. Lee, C. C. Lu, F.-Y. Cheng, K.-Y. Shen, S.-H. Huang, L.-C. Shen, S.-M. Chang, H.-H. Chang, H.-C. Fu, P. Tien, M.-T. Chu, and Y.-J. Chan, *6th International Conference on Polymers and Adhesives in Microelectronics and Photonics (Polytronic)*, 179 (2007).
 11. J. J. Ju, M.-s. Kim, S. Park, J. T. Kim, S. K. Park, and M.-H. Lee, *ETRI J.*, **29**, 808 (2007).
 12. J. J. Ju, S. Park, M.-s. Kim, J. T. Kim, S. K. Park, Y. J. Park, and M.-H. Lee, *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 171117 (2007).
 13. S. Park, J. J. Ju, J. T. Kim, M.-s. Kim, S. K. Park, J.-M. Lee, W.-J. Lee, and M.-H. Lee, *Opt. Express*, **17**, 697 (2009).
 14. J.-M. Lee, S. Park, M.-s. Kim, S. K. Park, J. T. Kim, J.-S. Choe, W.-J. Lee, M.-H. Lee, and J. J. Ju, *Opt. Express*, **17**, 228 (2009).
 15. J. T. Kim, J. J. Ju, S. Park, M.-s. Kim, S. K. Park, and M.-H. Lee, *Opt. Express*, **16**, 13133 (2008).
 16. J.-S. Choe, K. Kim, S. Park, J. T. Kim, J.-M. Lee, M.-s. Kim, S. K. Park, and J. J. Ju, *Semicond. Sci. Technol.*, **25**, 035003 (2010).
 17. T. Shioda, *6th International Conference on Polymers and Adhesives in Microelectronics and Photonics (Polytronic)*, 167 (2007).
 18. H. Ma, A. K.-Y. Jen, and L. R. Dalton, *Adv. Mater.*, **14**, 1339 (2002).
 19. R. Dangel, C. Berger, R. Beyeler, L. Dellmann, M. Gmür, R. Hamelin, F. Horst, T. Lamprecht, T. Morf, S. Oggioni, M. Spreafico, and B. J. Offrein, *IEEE. Trans. Adv. Packag.*, **31**, 759 (2008).
 20. Y. K. Kwon, J. K. Han, J. M. Lee, Y. S. Ko, J. H. Oh, H.-S. Lee, and E.-H. Lee, *J. Mater. Chem.*, **18**, 579 (2008).
 21. 배병수, 김우수, 강동준, 한국특허 0705758.
 22. B. S. Rho, S. Kang, H. S. Cho, H.-H. Park, S.-W. Ha, and B.-H. Rhee, *J. Lightwave Technol.*, **22**, 2128 (2004).
 23. M. H. Cho, H. S. Cho, S. H. Hwang, H.-H. Park, K. R. Kim, and J. Lee, *55th Electronic Components and Technology Conference*, 1830 (2005).
 24. H. Schröder, J. Bauer, F. Ebling, and W. Scheel, *1st International Conference on Polymers and Adhesives in Microelectronics and Photonics (Polytronic)*, 337 (2001).
 25. K. B. Yoon, I.-K. Cho, S.-H. Ahn, and J. T. Kim, *Proc. SPIE*, **5523**, 344 (2004).
 26. H. Raether, *Surface Plasmon*, Springer, Berlin, 1988.
 27. P. Berini, *Phys. Rev. B*, **61**, 10484 (2000).