

고분자 광도파로가 내장된 광 백플레인 기술

윤근병

1. 서론

통신 및 네트워킹 시스템을 위한 광전송 기술이 단거리 칩간 통신 솔루션으로 주목 받고 있다. 전기신호와 비교하여 광 신호들은 손실 문제가 거의 발생하지 않아 대용량의 정보를 처리할 수 있으며, EMI에 의한 영향도 없다. 스큐, 반사, 혼선 등에 대한 측정수단을 사용하지 않고도 10 Gbps 이상의 전송속도를 구현할 수 있기 때문이다.

광전송 기술 중에서 PCB 기판 상에서 광신호를 통해 칩으로 데이터를 전송할 때 가장 중요한 문제는 전기적 연결 방식에서 가능한 수준보다 훨씬 빠른 속도로 데이터를 전송할 수 있어야 한다. 현재 이러한 문제는 광전송 기술에서 구현이 가능하지만, 앞으로는 부품 비용의 감소, 실장비용 절감, 장비 크기의 축소 등의 문제가 새로운 과제로 부각되고 있다. 이러한 해결 방법으로는 광 신호의 전송경로로 광섬유, 광도파로 등을 PCB 기판내에 embedding시킨 광 백플레인 기술이 있다. 광 백플레인 기술은 전송경로에 따라 1, 2, 3세대 기술로 구분하는데, 현재는 공존하여 발전하고 있다. 제1세대 광 백플레인은 광섬유를 사용하여 motherboard와 daughter-card와 링크시키는 시스템을 말하며, 제2세대는 광섬유를 고분자 필름에 결합한 flexfoil을 이용한 시스템을 말한다. 제3세대 광 백플레인은 광섬유 또는 광도파로를 PCB 기판 내에 내장한 embedding 시스템으로 전기적 신호를 광신호로 변환하여 전송하는 하이브리드 시스템으로 가장 많은 연구가 진행되고 있으며, 향후 대부분의 시장을 제3세대 기술이 점유할 것으로 예상된다.

본 고에서는 주로 제3세대 광 백플레인 기술에 대해 살펴보고, 적용되는 고분자소재, 산업체의 기술 동향과 향후 시장 동향에 대해 살펴보고자 한다.

2. 광 백플레인 기술 동향

전기 백플레인은 전송속도의 한계(~2.5 Gbps), 전기배선간의 누화 및 실장밀도(50 Signal Line/inch)의 제약, EMI/EMC 등의 영향으로 고속 대용량 전송에 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위한 솔루션으로 전기적 신호를 광신호로 전환하여 전달하는 광 백플

레인이 등장하게 되었다.

광 백플레인의 제1, 2세대는 광섬유와 커넥터로 구성된 point-to-point 연결로서 실장 밀도가 낮고, 각종 광소자를 실장시키고 광섬유를 수동으로 진행시켜야 하기 때문에 상당히 높은 제조비용이 소모된다. 그래서 광도파로를 embedding한 제3세대 광 백플레인이 제안되어 현재 많은 연구가 진행되고 있다. 이러한 광 백플레인은 순수한 optical layer로 이루어진 것이 아닌 optical layer와 electrical layer가 PCB 기판에 적층으로 구성된 hybrid 구조가 주류를 이루고 있다(그림 1).

본 장에서는 제 3세대 광 백플레인의 개발 동향을 개발이 이루어지고 있는 시제품을 중심으로 살펴보고자 한다.

2.1 Embedded Polymer Waveguide 광 백플레인 기술

실리카를 소재로 한 평면 광도파로는 널리 사용되고 있으며, WDM 통신으로 설계된 AWG 등의 상용화가 진행되고 있지만 제조시 생산원가는 상당히 높다. 광도파로의 가격을 낮추기 위해 폴리이미드, 에폭시, 아크릴레이트 등과 같은 고분자의 활용에 대한 연구도 상당히 진행되고 있다. 고분자 광도파로의 손실은 0.1에서 수 dB/cm 수준으로 상당히 높은 손실 특성을 보이지만 PCB 상에서 초단거리 광도파로로 활용하기에는 적합하다.

고분자 평면 광도파로를 이용한 광 백플레인에 대한 연구는 유럽의 C-LAB(Siemens), Daimler Chrysler Research, Fraunhofer IZM 등을 중심으로 개발이 진행되고 있다. 이러한 연구는 VCSEL을 사용한 multimode 기술을 적용하고 있으며, VCSEL과 PCB 내에 내장된 고분자 광도파로를 연결하는 방식에 따라 그림 2에 나타난 것 같이 direct coupling과 beam deflection 방법이 있는데, 최근의 문헌이나 특허 등에서는 후자의 방법에 대한 연구가 많이 진행



윤근병

- 1992 경북대학교 고분자공학과(학사)
- 1994 경북대학교 고분자공학과(석사)
- 1997 경북대학교 고분자공학과(박사)
- 1997~2001 삼성종합기술원 e-Polymer Lab 책임연구원
- 2002~2004 한국전자통신연구원 기반기술연구소 선임연구원
- 2005~현재 경북대학교 고분자공학과 조교수

Development of Polymeric Waveguide Embedded Optical Backplane

경북대학교 고분자공학과 (Keun-Byoung Yoon, Department of Polymer Science, Kyungpook National University, 1370 Sangeok-dong, Buk-gu, Daegu 702-701, Korea) e-mail: kbyoon@knu.ac.kr

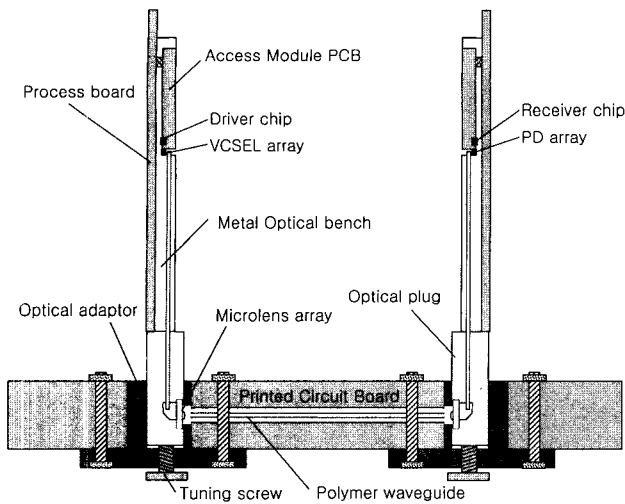


그림 1. Architecture of embedded waveguide optical backplane.

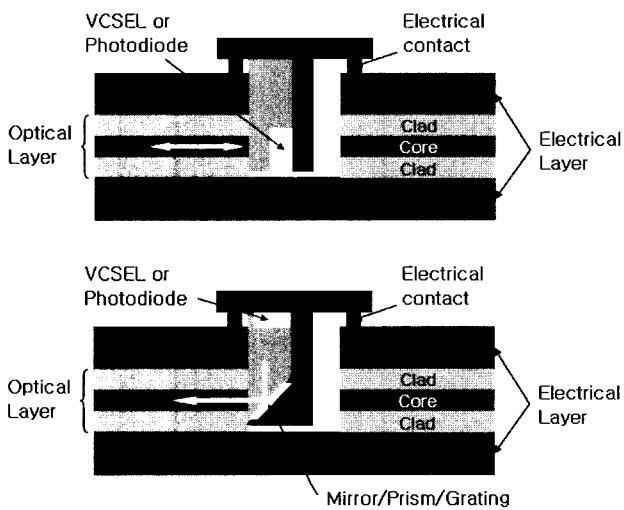


그림 2. Direct coupling method and beam deflection method.

되고 있다.

고분자 소재를 이용한 평면 광도파로는 치수가 $50 \times 50 \mu\text{m}$ 이상의 multimode 광도파로 제작에 용이하며, 반도체 공정에 사용하는 photolithography 공정과 hot embossing (micro-molding), direct laser writing, micro-contact printing 등 다양한 방법으로 광도파로의 제작이 가능하다.

현재 보편적으로 사용하는 방법은 photolithography 공정과 hot embossing 공정이다. Photolithography 공정은 다양한 형태의 고분자 소재의 적용이 가능하지만, RIE (reactive ion etching) 과정을 거쳐야 하는 등 공정이 복잡한 단점이 있다. 최근 독일을 중심으로 발전되기 시작한 hot embossing 기술은 공정이 단순하고 다양한 형태의 평면 광도파로의 제작이 용이하여 활발히 연구가 진행 중이다. Hot embossing 기술은 광도파로의 표면 특성이 우수하며, 공정이 단순하여 다른 공정에 비해 경제적인 장점을 지니고 있지만, 6인치 이상의 대면적 광도파로 제작이 어려운 단점도 있다.

고분자 광도파로를 이용한 광 백플레인 시제품의 성능을 표 1에 나타내었다.

현재 광 백플레인의 광손실은 0.1 dB/cm 수준으로 발전하였

표 1. 광 백플레인 시제품 성능 비교

	Optical Loss (dB/cm)	Transmission Rate	Board Size (cm)	Transmission Distance	Process of Waveguide
C-LAB (Siemens)	0.1	2.5 Gbps	50×50	1~2 m	Hot Embossing Photolithography
Daimler Chrysler	0.2	2.5 Gbps	50×50	1 m	Photolithography
Fraunhofer IZM	0.3	2.5 Gbps	25×25	-	Hot Embossing Photolithography
ETRI (Korea)	0.1	2.5 Gbps	25×50	0.5m	Hot Embossing

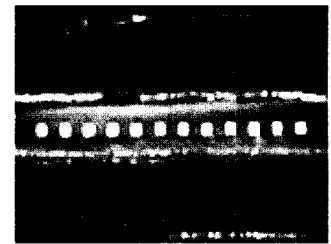
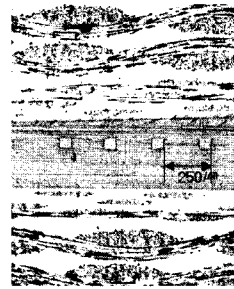


그림 3. Structure of embedded polymer waveguide prepared with hot embossing process.

고 0.05 dB/cm를 목표로 연구가 진행되고 있으며, 전송속도는 2.5 Gbps 수준에서 5 Gbps 이상, 2 m 이상의 전송거리를 확보하기 위하여 지속적인 연구가 진행되고 있다.

광 백플레인에 적용하기 위한 고분자 광도파로는 일반적인 PCB 적층 공정에서 embedding 시켜야 함으로 높은 열안정성이 요구되기 때문에 고내열성 고분자 재료의 개발도 병행되어야 한다. 고분자 광도파로가 PCB내에 적층된 구조를 그림 3에 나타내었다.

그림 3과 같이 embedded polymer waveguide 광 백플레인은 기존의 다층 PCB 제조시와 동일한 공정을 적용하는 것이 일반적이다. 일반적인 다층 PCB 제조시 170 °C에서 1시간 이상의 lamination 공정과 230 °C에서 10초 이상의 soldering 공정이 필요하다. 고분자 광도파로의 안정성을 확보하기 위해서는 고분자 재료는 적어도 180 °C 이상의 열안정성을 가져야 한다.

Embedded 광 백플레인의 평면 광도파로 재료로는 glass, 고분자 등이 주로 사용되고 있으며, 저손실, 열안정성이 우수한 고분자 재료의 개발에도 많은 연구가 진행되고 있다. 대표적인 고분자 재료로는 deuterated polysiloxane, fluorinated polyimide, acrylate polymer, fluorinated PMMA, fluorinated polyarylene ether, PFCB, cycloolefin copolymer, polynorbornene 등이 있다. 최근에는 실록산과 고분자를 혼합하여 졸-겔 방법으로 제조한 유/무기 복합재료로서 Lumenon사의 PHASIC과 Fraunhofer ISC에서 ORMORCER라는 제품을 개발하였다. 이들 재료는 실리콘 웨이퍼 상과의 접착력을 개선하고, 후막을 형성시 용이한 것으로 photolithography 공정에 의해 광도파로를 제작할 수 있다. 특히 Photon-X사에서는 플루오르를 치환한 고분자를 이용하여 손실이 0.05 dB/cm인 광도파로를 제작하여 백플레인 뿐만 아니라 다양한 광소자제작을 발표하였다. 대표적인 고분자 광도파로의 손실 특성

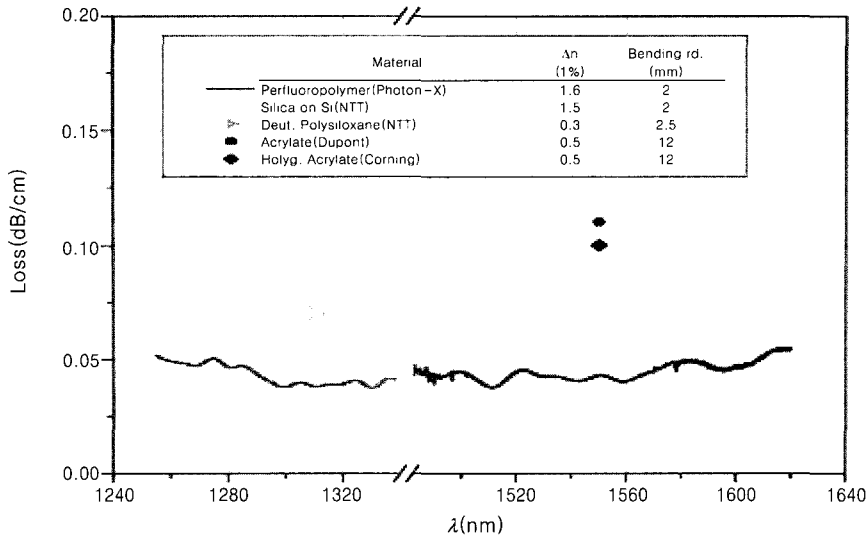


그림 4. Propagation loss of various polymeric waveguides.

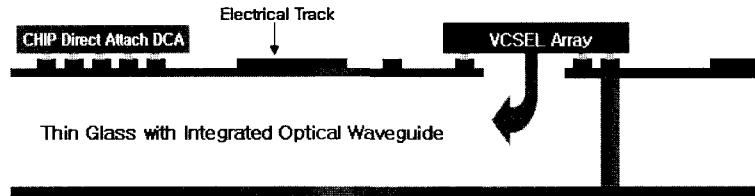


그림 5. Schematic diagram of OPTOBOARD™ technology.

을 그림 4에 나타내었다.

그림 4에서 보듯이 다양한 소재를 이용한 고분자 광도파로의 도 파손실이 0.1 dB/cm 이하로 백플레인에 적용이 가능한 재료가 개발되고 있다. 하지만 PCB 제작공정에서의 고온과 고압에서도 안정한 열안정성이 우수한 고분자 재료 확보와 VCSEL/PD와 광도파로 간의 광결합 기술의 개발도 여전히 숙제로 남아 있다.

2.2 Embedded Glass Sheet 광 백플레인 기술

현재 광 백플레인으로 적용은 되지 않고 있지만, 향후 광범위한 응용이 기대되는 glass sheet를 embedding한 광 백플레인 기술은 스위스의 PPC를 중심으로 EU 공동 프로젝트로 스위스의 PPC 이외에 Imec(벨기에), Leti(프랑스), Alcatel(벨기에), Helix(스위스), Avalon(스위스) 등이 참여하여 개발하고 있다. 2001년도에 PPC에서 발표한 glass sheet를 사용한 OPTOBOARD™ 기술의 개념도를 그림 5에 나타내었다.

Embedded polymer waveguide 광 백플레인과 동일한 beam deflection 방법으로 제작하였고 광도파로의 소재를 고분자 대신에 glass sheet를 사용하였다. Embedded glass sheet 광 백플레인은 고분자에 비해 광손실 특성이 우수하며, 대면적의 광 백플레인 제작이 가능하다는 장점이 있다. 또한 glass의 열팽창계수가 반도체 디바이스나 VCSEL과 비슷하기 때문에 고분자 광도파로에 비해 정렬이 용이하다는 장점도 가진다.

Glass waveguide를 제조하는 공정은 Ion implantation, UV laser ablation, chemical etching, hot embossing 등이 있다. PPC는 ion implantation 공정을 적용하고 있으며, glass waveguide의 광손실은 0.1 dB/cm 정도이며 표면조도는 100 nm 수준이다. 현

재 2.5 Gbps 전송속도로 1.5 m 전송거리의 광 백플레인 시제품을 개발하였으며, 향후 3.3~5 Gbps 전송속도의 광 백플레인을 개발 예정이다.

2.3 Embedded Fiber 광 백플레인 기술

유럽을 중심으로 embedded polymer 및 glass waveguide 광 백플레인 이외에도 북미 지역과 일본에서도 광 백플레인 개발에 많은 회사들이 참여하고 있다. 북미 지역에서는 대부분 embedded fiber 광 백플레인 기술을 바탕으로 개발하고 있으며, 그 참여 기업은 Litton Interconnect Technologies, Teradyne Connection Systems, Tyco, Coretec 등이 있다.

일본에서도 embedded fiber 광 백플레인 기술을 이용한 시제품을 발표하고 있으며, Fuji Xerox, NEC, NTT, Hitachi Chemical, Asahi Glass Co., 등의 기업과 18개 업체가 참여한 ASET(association of super advanced electronics technologies)이라는 공동 프로젝트를 수행하고 있다. ASET에서 발표한 embedded fiber 광 백플레인의 구조를 그림 6에 나타내었다.

ASET의 광 백플레인은 6U subrack을 128 fiber 연결되어 있는 구조이고, optical fiber board, optical right angled connector 및 electrical cable connector로 구성되어 있으며 광손실은 0.01 dB/cm 이하의 특성을 나타낸다.

이러한 embedded fiber 광백플레인은 embedded waveguide 광백플레인에 비해 광손실이 낮은 장점을 가지고 있어 저손실의 광특성이 요구되는 시스템에 적용 될 것이다.

2.4 Technology Roadmap

광 백플레인 기술에서 광손실은 가장 중요한 요소로서 광백플레

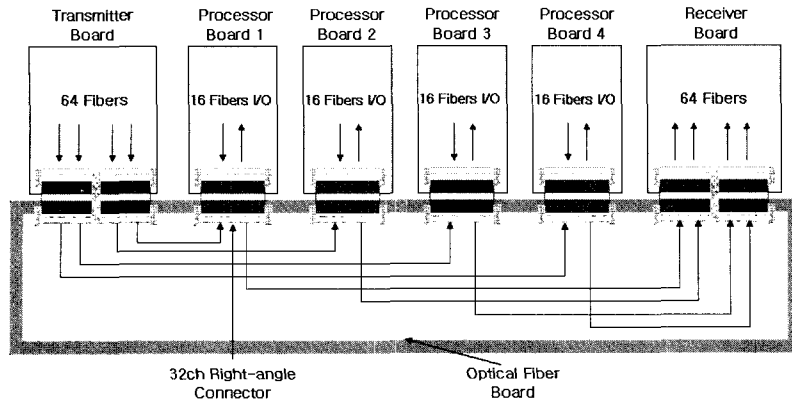


그림 6. Structure of embedded fiber optical backplane.

표 2. Technology Roadmap of Propagation Loss for Optical Back-plane

Technology (dB/cm)	2000	2008	2015
Embedded polymer waveguide	0.1	0.05	0.01
Embedded glass sheet	> 1.0	0.05	0.0005
Embedded fiber	< 0.0005	0.0001	< 0.0001
Polymer on film (Overlaid)	0.1	0.05	0.007

인의 설계 및 응용에 고려되어야 할 기본 항목이다. Embedded 광 백플레인에서 polymer waveguide, glass sheet, fiber, polymer on film 등 도파로의 종류에 따라 광손실 특성 technology roadmap을 표 2에 나타내었다.

Embedded 광 백플레인에서 도파로의 종류에 따라 그 응용 범위 및 요구 광특성이 다르다. 열안정성 및 신뢰성이 요구되는 통신 장비, 항공 통신분야, 이동통신 기지국 등에는 embedded glass waveguide 또는 embedded fiber 등이 적용될 것이다. 최종 소비자에 가까운 정보통신 스위치, 컴퓨터 서버, 컴퓨터 주변장치 등에는 embedded polymer waveguide 또는 polymer on film(overlaid) 등이 적용될 것으로 예상된다.

현재 embedded fiber 광 백플레인이 우주항공 통신 분야에 적용되고 있는 정도이고, 그 외 광 백플레인은 2008년 이후에 본격적으로 적용 될 것으로 예상하고 있다.

광 백플레인의 응용분야에 대한 technology roadmap을 그림 7에 나타내었다.

3. 광 백플레인 시장 동향

전기 백플레인 시장에서 순수한 bare 기판의 시장은 전세계적으로 2000년에는 14억불 정도였으며, 2008년에는 20억불로 성장할 것으로 예상된다. 현재 전기 백플레인 시장의 74%를 컴퓨터와 통신분야에 적용되고 있다. 광 백플레인을 구성하는 능동/수동 소자, 커넥터 등의 광소자를 제외한 광 백플레인에서 bare 기판은 전체 백플레인 시장의 1% 정도에서 서서히 성장하여 2008년에는 약 7.7%의 시장 점유율로 약 1.6억불에 달할 것으로 예상된다. 현재 대부분의 embedded 광 백플레인 기술은 개발 초기 단계에 있으며, 양산이 아닌 시제품 제작 수준이다.

3.1 기술별 시장 동향

2000년에 embedded 광 백플레인 bare 기판의 시장은 2.2백만불 정도로 초기 단계이며 embedded fiber형의 광 백플레인이 55% 시장 점유율을 나타내고 있으며, Tyco, Alcatel, Siemens, NTT 등에서 소규모로 제작하고 있다. 일부에서는 embedded polymer 광 백플레인과도 시제품으로 발표하고 있다.

2008년에 이르면 embedded glass sheet 광 백플레인 기술이 급성장하여 약 38%의 시장 점유율을 나타낼 것으로 예상되며, embedded polymer waveguide 광 백플레인과도 성장하여 28%의 점유를 예상하지만, embedded fiber 광 백플레인은 18% 정도로 감소할 것으로 예상된다.

현재 embedded 광 백플레인의 시장은 2.2백만불로 미미한 수준이지만, embedded waveguide 기술의 보편화 시기로 예상되는 2008년에 이르면 약 1.6억불에 이를 것으로 전망하고 있다. 저손실 특성이 요구되는 특정 분야에서는 embedded fiber 광 백플레인이 지속적으로 사용될 것이지만, waveguide 재료 개발과 hot embossing과 photolithography 공정이 보편화되고, glass ion implantation, laser ablation과 같은 공정이 개발되는 2008년에 이르면 embedded polymer 광 백플레인과 embedded glass sheet 광 백플레인의 수요는 급격히 성장할 것으로 예상된다(그림 8).

3.2 지역별 시장 동향

현재는 광 백플레인은 유럽 지역에서 수요가 가장 많으며 활발한 연구가 진행되고 있다. 유럽에서의 광 백플레인 시장은 embedded polymer 기술과 embedded fiber 기술이 공존하고 있으며, PPC를 중심으로 embedded glass sheet에 대한 연구도 활발히 진행 중이다. 광 백플레인 시장의 규모가 두 번째로 큰 지역이 일본이다. 일본에서는 Fuji Xerox, ASET과 NTT를 중심으로 embedded plastic sheet 광 백플레인 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 북미 지역에서는 embedded fiber 광 백플레인을 중심으로 발전되어 가고 있다.

향후 5년 후에는 광 백플레인은 전세계적으로 광범위하게 사용이 확대될 것이고, 북미 지역이 가장 큰 시장으로 성장이 예상된다. 북미, 유럽, 일본을 중심으로 embedded glass sheet 기술과 embedded polymer 광 백플레인의 급격한 성장이 예상되며, 일본을 제외한 아시아 지역에서도 2008년에 이르면 약 7%의 시장 점유율을 보일 전망이다. 현재 광 백플레인은 극히 제한된 범위에서 적용이 되지만, 2008년 이후에는 컴퓨터 주변장치, 정보통신 및 전자통신 영역에 대부분 응용될 것으로 기대된다.

System Application	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Telecom Switches									
Telecom Transmission Equipment									
High End Datacom Switches and Routers									
Aerospace & Avionic Communications									
UTMS Mobile Telephone Basestations									
High End Enterprise Computer Servers									
Mainframe/Super Computers									
High End Computer Media Engines									

Embedded Glass Sheet	—————	Polymer on Film (Overlaid)	- - - - -	Embedded Fiber	- · - · -
Embedded Polymer	·····	Embedded Plastic Sheet	- - - - -		

그림 7. Technology roadmap of embedded optical backplane.

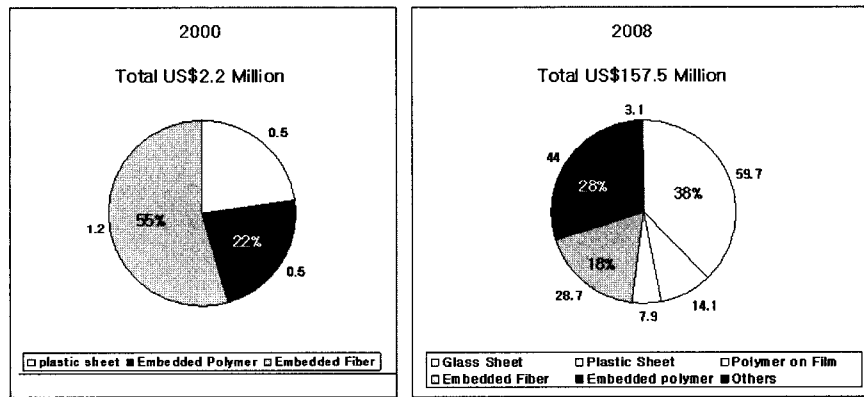


그림 8. Embedded 광백플레인의 도파재료에 따른 시장 전망.

3.3 응용 분야별 기술 동향

현재 embedded 광 백플레인의 전체 소비는 보드 면적으로 518 m²에 이르고 있으며, 2008년에는 120배 정도로 급격히 성장하여 62,222 m²에 달할 것으로 예상된다. 2000년에는 embedded 광 백플레인의 수요 중에서 항공 및 군수용 통신 영역에 65% 정도 적용되었으며, 전자통신 분야 시장은 25% 정도 밖에 차지하지 않았다. 2008년에는 일반 전자통신 분야의 수요가 급격히 증가하여 전체 시장의 65%를 점유할 것으로 예상되며, 항공 및 군수 분야는 19%의 점유율을 나타낼 것으로 예상된다.

Embedded 광 백플레인의 가격은 현재 평방미터당 4247달러이지만, 광백플레인의 시장이 성숙되는 2008년에는 평방미터당 약 2500달러로 낮아져 가격 경쟁력도 있을 것으로 예상된다.

장 기술 등의 많은 숙제를 가지고 있다. 또한 전기 백플레인에 비해 가격이 높은 것도 향후 시장 진입에 큰 문제가 되고 있다. 광 백플레인의 활발한 연구개발이 이루어지고 있는 시점에서 embedded waveguide 재료 개발, 경제성있는 공정 개발과 광접속 기술의 발전이 함께 이루어진다면, 고속 대용량의 정보 전달을 위한 솔루션으로 광 백플레인의 수요는 급격히 증가할 것으로 예상된다.

또한 광 백플레인의 발전은 광전자 컨버터용 발광 디바이스, 광 신호의 전송경로, 광접속 기술, 에미터와 디텍터를 통합한 IC 기술 등의 발전이 동반되어야 한다. 대부분의 전자통신, 정보통신 및 컴퓨터 시스템 업체는 차세대 시스템에 적용될 솔루션의 유일한 대안으로 광백플레인이 될 것이라고 평가하고 있다.

4. 맺는 말

전기 백플레인이 갖고 있는 정보 처리속도 한계, EMI/EMC, Crosstalk 등의 문제점을 보완하여 영상, 초고속 데이터 등 대용량의 원하는 정보를 지금보다 수십, 수백배 신속히 확보할 수 있는 솔루션은 광 백플레인이다. 이러한 광 백플레인은, 향후 5년 동안은 특화된 기술로서 광범위한 적용을 위해서는 소재개발, 광결합 기술, 실

참고문헌

1. F. Mederer, R. Jager, H. J. Unold, R. Michalzik, J. J. Ebeling, S. Lehmacher, A. Neyer, and E. Griese. *IEEE Photonics Tech Letters*, **13**, 1032 (2001).
2. E. Griese, *IEEE Trans. Adv. Packaging*, **24**, 375 (2001).
3. M. Sato, M. Horie, N. Kitano, K. Ohtomo, and H. Okano. *Hitachi Cable Review*, **20**, 19 (2001).

4. "High-Speed Serial/Parallel Backplane and PCB Board Design considerations", *Lucent Technologies, Application Note* (2001).
5. B. Layet and J. F. Snowdon, *Optics Commun.*, **189**, 39(2001).
6. W. H. Wong, J. Zhou, and E. Y. Pun, *Appl. Phys. Letters*, **78**, 2110 (2001).
7. I. K. Cho, K. B. Yoon, S. H. Ahn, H. K. Sung, S. W. Ha, Y. U. Heo, and H. H. Park, *Optics Letters*, **30**, 1635 (2005).
8. W. S. Kim, K. S. Kim, Y. J. Eo, K. B. Yoon, and B. S. Bae, *J. Mater. Chem.*, **15**, 465 (2005).
9. K. B. Yoon, *Macromol. Res.*, **12**, 474 (2004).
10. K. B. Yoon, *Macromol. Res.*, **12**, 437 (2004).
11. K. B. Yoon, C. G. Choi, and S. P. Han, *Jap. J. Appl. Phys.*, **43**, 3450 (2004).
12. S. H. Ahn, I. K. Cho, S. P. Han, K. B. Yoon, and M. S. Lee, *Optic. Eng.*, **45**, 085401 (2006).
13. K. B. Yoon, B. S. Bae, and M. Popall, *J. Nonlinear Optic. Phys. Mater.*, **14**, 399 (2005).
14. J. T. Kim, K. B. Yoon, and C. G. Choi, *IEEE Photon. Tech. Lett.*, **16**, 1664 (2004).
15. K. B. Yoon, I. K. Cho, S. H. Ahn, J. M. Jeong, Y. U. Heo, B. S. Noh, H. H. Park, and B. H. Lee, *IEEE J. Lightwave Tech.*, **22**, 2119 (2004).
16. K. B. Yoon, I. K. Cho, and S. H. Ahn, *IEEE Photon. Tech. Lett.*, **16**, 5147 (2004).
17. K. B. Yoon, I. K. Cho, S. H. Ahn, M. Y. Jeong, B. S. Noh, and H. H. Park, *IEEE Photon. Tech. Lett.*, **16**, 1754 (2004).
18. R. J. Winfield, M. Meister, G. M. Paineau, *Mater. Sci. Semiconductor Processing*, **3**, 481 (2000).
19. H. D. Bauer, W. Ehrfeld, M. Harder, T. Paatzsch, M. Popp, and I. Smaglinski, *Synthetic Metals*, **115**, 13 (2000).
20. K. Schmieder and K. -J. Wolter, *Proc. IEEE, 2000ECTC*, p 749 (2000).
21. M. Rode, J. Moisel, O. Krumpholz, and O. Schickl, *Proc. IEE, ECOC'97*, p 228 (1997).
22. G. Khanarian, *Opt. Eng.*, **40**, 1024 (2001).
23. D. Krabe, F. Ebling, N. Arndt-Staufenbiel, G. Lang, and W. Scheel, *Proc. IEEE, 2000ECTC*, p 970 (2000).
24. F. Mederer, R. Jager, J. Joss, M. Kicherer, R. King, R. Michalzik, M. Riedl, M. Unold, and K. J. Ebeling, *Proc. IEEE, 2000ECTC* (2000).
25. S. Lehmacher and A. Neyer, *Electronics Letters*, **36**, 1052 (2000).
26. A. Neyer, B. Wittmann, and M. Johnck, *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, **5**, 193 (1999).
27. D. Fisher and E. Voges, *Electronics Letters*, **33**, 626 (1997).
28. M. Tormen, T. Borzenko, G. Schmit, J. Liu, and L. W. Molenkamp, *Electronics Letters*, **36**, 983 (2000).
29. M. Kobayashi, T. Yoshida, S. Asakawa, S. Iwano, R. Nagase, S. Sumida, and S. Mitachi, *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, **5**, 271 (1999).
30. B. Lunitz, J. Gutmann, H.-P. Huber, J. Moisel, and M. Rode, *Electronics Letters*, **37**, 1079 (2001).
31. S. Kiani and M. Khusid, *Proc. IEEE, 2000ECTC*, p 432 (2000).