

플라스틱 광섬유의 특성과 기술 동향

이 태 형 · 김 진 한

1. 서 론

석영을 기초로 하는 고순도 유리는 그 자체의 뛰어난 광학 특성, 환경 안정성, 내열성 때문에 기존의 광학 부품의 기본 재료로 많이 사용되어 왔다. 그러나, 광학 유리는 깨지기 쉽고 형상 가공이 어려우며 일정크기 이상의 형태를 조성함에 있어 생산성의 문제가 있기 때문에 투명 고분자 재료를 사용한 광학 재료의 대체가 급속하게 이루어지고 있다. 이러한 고분자 광학 재료의 용도 중 가장 각광을 받고 있는 소재 중의 하나가 plastic optical fiber라고 총칭되는 플라스틱 광섬유(이하 POF)이다.

1968년, 미국의 DuPont사에서 poly(methyl methacrylate)(이하 PMMA)를 기본으로 하는 POF의 기초 연구 및 개발에 대한 발표를 하였고¹ 1972년에 최초로 상용화된 이후 20여년이 경과하는 동안, 특히 1980년대 후반에 들어서, POF에 대한 저손실성, 고내열성 및 양산성 등의 생산 기술의 개발이 Mitsubishi Rayon, Toray, Asahi Chemical 등의 일본 기업들에 의하여 주도적으로 진척되어 왔다.² 현재, 전세계 POF 공급의 80% 이상이 일본기업에 의해 이루어지고 있으며, 지속적으로 활용 범위가 크게 확대되고 있다.

개발 초기에는, PMMA보다 향상된 광 투명성을 갖는 고분자 소재의 발굴에 한계가 있기 때문에, 상용화된 POF의 전송 손실은 1000 dB/km를 상회하였고, 따라서 통신용으로의 사용은 불가능 하였으며, 다만 조명, 장식, display 또는 내시경의 image guide 용도의 목적으로 주로 사용되었다. 그 이후, 주로 가전 제품이나 자동차의 전자·전기 배선을 대체하는 신호 전달 목적에 주로 응용되어 왔으며, 향후 데이터통신 분야로 응용 범위가 확대되는 추세이다.³ 데이터통신 용도로는, 기존의 석영광

섬유(glass optical fiber : 이하 GOF)와 비교할 때, 전송 손실이 크고, 내열성 등이 뒤떨어지기 때문에, 장거리 전송 매체로는 적합하지 않고, 빌딩이나 공장 등 건물 내부의 통신 및 자동차, 선박, 비행기, 열차 등 이동체의 내부 통신 매체로의 응용을 기대하고 있다. 그 가운데에서도 시장이 큰 자동차 및 건물내의 응용을 위하여 내열성의 향상 및 전송 손실 감소 등을 위하여 많은 노력이 이루어지고 있으며, POF의 전송 손실 감소와 관련하여 많은 진보를 이루고 있다.⁴

POF에 대한 수요의 확대 예상은 GOF로는 극복할 수



이태형

- 1987 University of Tennessee 화학과(B.Chem)
- 1989 Rensselaer Polytechnic Institute 화학과(M.S.)
- 1994 Rensselaer Polytechnic Institute 화학과(Ph.D.)
- 1994~ 현재 삼성전자 선임연구원



김진한

- 1982 부산대학교 전기공학과(B.S.)
- 1988 경북대학교 전자재료공학과(M.S.)
- 1983~ 현재 삼성전자 부장

Characteristics and Technologies of Plastic Optical Fibers

삼성전자 연구소(Tae Hyung Rhee, Telecommunications R & D Center, Samsung Electronics Co.,LTD. Suwon P. O. Box 105, Kyungki-Do, 440-600, Korea, Jin Han Kim, Optical Fiber & Cable Department, Samsung Electronics Co.,LTD. Gumi-City, Kyung Buk, 730-030, Korea)

없었던 저가격화를 배경으로 한다. 실질적으로 전송손실 0.3 dB/km(1300 nm) 및 대역특성 10 GHz · km의 전송 특성을 갖는 GOF와 비교할 때 POF의 전송 특성은 매우 미흡하다. 그러나, POF의 장점으로는 대구경 코어를 저가격으로 용이하게 얻을 수 있고, numerical aperture (이하 NA)가 높으며, bending 특성도 뛰어나기 때문에 광통신망 설치에서는 필수적이며 많은 비용을 요구하는 절단, 연마, 접속 등이 매우 용이하다.⁵ 코어부가 대구경이고 NA가 높기 때문에, 광섬유 연결 시 접속 효율이 높으므로 고정밀도를 지닌 고가격의 광코넥터가 불필요하고,⁶ 또한 주위 부품과의 정밀 접속이 불필요하기 때문에 발광 소자에 저가의 light emitting diode(이하 LED)를 사용할 수 있는 등 주변 부품의 저가화가 가능하다.⁷ 단면 처리도 금속 거울면의 hot-plate를 사용하여 처리하는 등⁸ 기존의 GOF에서는 필수적인 고가격의 단면 연마가 불필요하며, 뛰어난 bending 특성 때문에 외부 충격에도 안전하다. 이러한 특성으로 인하여 POF는 저가의 광통신 전송 매체로서 많은 관심을 받아왔다.

조명용도의 목적으로는, 일반적으로 POF를 묶어 bundle의 형태로 사용되며 여러 각도에서의 조명이 가능한 실내 조명에 사용된다. 미국의 General Electric사는 한 개의 광원에서 여러 개의 광섬유 bundle을 연결하여 조명이 필요한 여러 장소에 빛을 공급하는 시스템을 개발하고 있다.⁹ 또한 특수한 용도로 전용할 수 있는 플라스틱 광섬유로는 내시경 또는 현미경 용도의 image bundle 광섬유, facsimile이나 scanner 등에 사용할 수 있는 image scanning sensor 용도의 bundle 광섬유 또는 GRIN 로드렌즈 등이 오랫동안 사용되어 왔다.¹⁰ 단거리 통신 용도로는 수십m의 범위 이내의 정보전달 매체로, 디지털 신호를 사용하는 오디오 기기, 개인 컴퓨터를 프린터나 기억장치로 연결하는 인터페이스 케이블 등으로 사용할 수 있다. 또한 전기 절연성이 뛰어나고 전차 유도를 받지 않아 잡음이 적고 오동작이 없어 안전도가 높은 센서의 용도로 사용이 가능하다. 최근에는 display 용도의 대형 동화상 스크린의 응용도 주목받고 있다.¹¹ 자동차 용도에서는, dashboard상의 display, 차폭등, 엔진 주위의 제어 sensor, 오디오 기기나 자동 항법장치 등의 정보 전달의 매체로써 POF의 사용이 중요시 되고 있다.¹² 또한 종래의 전기 배선에 따른 수십kg의 무게를 가벼운 POF의 사용으로 줄일 수 있다.

현재까지 POF의 이용은 전송 거리 100 m, 전송 속도 150 Mbps 내외의 제한적인 용도에서 사용되어 왔으나 Graded-Index형의 플라스틱 광섬유(이하 GI-POF)가 개발되어 수km 이내의 고속 정보 전달에 요구되는 고신뢰성, 저손실 광섬유로서도 주목받고 있다. 1990년에 일본에서 개발된 GI-POF는 전송대역의 측면에서도 Graded-Index형 석영 광섬유(이하 GI-GOF)를 능가하는 성

능이 확인되었으며¹³ 고속 멀티미디어 시대의 LAN 등 정보 전달의 단말 부분에 대하여 저가의 설치로 일시에 대량의 정보를 전송 하는 전달 매체로서의 응용에 관심이 높아지고 있다.^{14~19} 또한, 다양한 용도에 따른 광섬유의 전송 거리 및 전송 속도와의 관계가 연구되었고, POF의 특성 향상에 따라 조만간 대용량 장거리 전송분야로의 응용을 예상하고 있다(그림 1).²⁰ 특히, 대용량의 초고속 전송을 기본으로 하는 멀티미디어 Infra 구축을 위한 미국의 "Information Super-Highway" 및 2010년까지 모든 가정에 광섬유망(Fiber-To-The-Home : 이하 FTTH)의 구축계획인 일본의 "신사회 간접자본" 계획 등의 발표에 뒤이어 우리나라도 2015년까지 FTTH를 구축하는 "초고속 정보통신망" 계획을 발표하였다. 따라서, 향후 공중 고속통신망의 단말인 FTTH의 구축에 의하여 가입자, 특히 사무실이나 건물내부의 고속 멀티미디어의 서비스를 위한 광통신망의 전송 매체로서 저가격화가 가능한 POF가 주목을 받고 있다.

POF는 아직 그 활용 분야는 제한되어 있지만, 가격과 성능, 양면의 개선에 의하여 향후 광통신망의 중요 전송 매체로 사용될 것으로 기대가 되는 소재이다. 미국에서는, GI-POF를 이용한 고속 통신망의 개발 · 사업화를 위한 High Speed Plastic Network Consortium이 1994년에 결성되었다. 일본에서도 POF 제조 회사 및 user의 입장인 자동차 · 전자 · 통신 회사 등 약 50여 개의 기업이 POF의 새로운 시장 개발을 위한 연합체를 1994년에 결성하였다.²¹ 그림 2에서 보여주는 바와 같이 POF의 전체 시장의 규모가 2001년까지 500% 이상의 증가를 예상하고 있고, 그 중에서도 데이터 통신 분야의 성장률은 약 9배의 증가가 예상되고 있다.²²

본 글에서는 POF의 일반적인 특성 및 응용에 관하여 간략한 소개를 하고자 한다. 특히, 재료 측면에서 쉽게 접근할 수 있는 내열성 POF의 응용에 대한 소개와 향후 많은 잠재력을 지닌 데이터통신 분야로의 응용에 대해서, 그 시스템적 의의를 소개하는 동시에, 최근 빠른 진전을 보이고 있는 고속 멀티미디어 시대의 도래를 겨냥한 고속

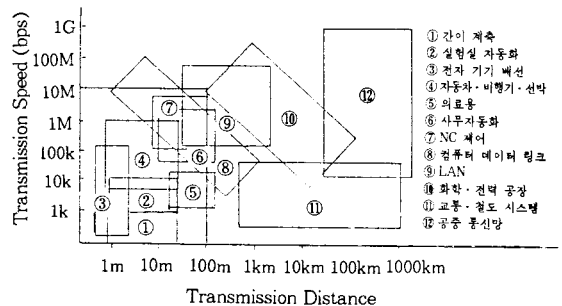


그림 1. POF의 용도에 따른 전송 거리와 전송 속도의 관계.

표 1. POF의 주요 개발 동향 : P5F3DSt : Pentafluorotrideuterostyrene; MMA co VPAc : Copolymer of MMA and Vinyl Phenyl Acetate; MMA co VB : Copolymer of MMA and Vinyl Benzoate

Organization	Core Material	Cladding Material	Classification	Minimum Attenuation (dB/km)	Wavelength	Year	Comment	
DuPont	PMMA	Fluoro-Polymer	SI	500	650	1968	For Near-IR	
Toray	PS	PMMA	SI	1100	670	1972		
DuPont	PMMA-d8		SI	180	790	1977		
Mitsubishi Rayon	PMMA	Fluoro-Polymer	SI	300	650	1978		
NTT	PMMA	Fluoro-Polymer	SI	55	568	1982		
NTT	PS		SI	114	670	1982		
Keio University	MMA co VPAc	PMMA	GI	1070	670	1982		
NTT	PMMA-d8		SI	20	650	1983		
Mitsubishi Rayon	PMMA	Fluoro-Polymer	SI	110	570	1983		
Asahi Chemical	PMMA	Fluoro-Polymer	SI	80	570	1985		
Fujitas	PC	Poly-Olefic	SI	450	770	1986		Highly Thermal Resistant
NTT	P(5F3DSt)	Fluoro-Polymer	SI	178	850	1986		For Near-IR
Hitachi	Thermoset Resin	Fluoro-Polymer	SI	600	650	1987		Highly Thermal Resistant
Keio University	MMS co VB	PMMA	GI	130	650	1990		
Hoechst Celanese	PMMA	Fluoro-Polymer	SI	130	650	1991		
Keio University	PMMS-d8	PMMA-d8	GI	56	688	1992	High Bandwidth(2GHZ · km)	
Bridgeston	Silicon	Silicon	SI	800	650	1993		

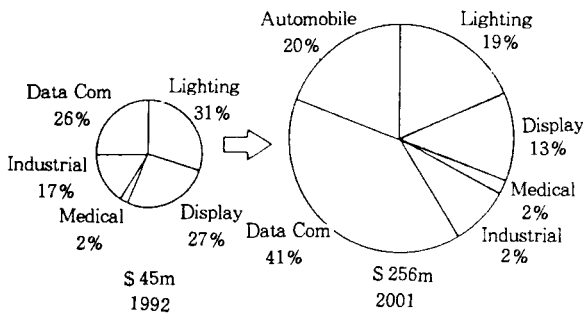


그림 2. POF의 시장 동향 예측.

POF 데이터 링크의 연구 개발 동향에 대해서 GI-POF를 중심으로 전송 특성 및 광증폭 등 최근의 기술 동향을 제한된 범위 내에서 소개한다.

2. 플라스틱 광섬유의 종류 및 특성

POF의 개발은 초기에 미국에서 시작하여 일본에서 중점적으로 연구되어 왔다(표 1).¹⁷ POF 개발의 시작은 1968년에 미국의 DuPont사에서 발표한 PMMA를 사용한 step index형(이하 SI) 광섬유이다.¹ 이후, 1970년대에 일본의 Nippon Telegraph and Telephone사(이하 NTT)와 Mitsubishi Rayon 등의 일본 기업들을 중심으로 SI-POF의 전송 손실을 낮추려는 연구가 계속되어 왔다. 1983년에는 Deuterated PMMA(PMMA-d8)을 사용하여 650 nm에서 20 dB/km의 적은 전송 손실을 갖는 광섬유가 NTT에 의하여 개발되어 플라스틱 광섬유에 의

한 단거리 광전송의 가능성을 보여주었으나 상용화 되지는 못했다.²³ 그 이후, SI-POF의 개발은, 1980년대 말 이후로, polycarbonates(이하 PC)나 silicon polymer를 사용하여 POF의 내열성 측면을 중요시 하였으나 최저 전송 손실이 가시광 영역에서 400 dB/km 이상으로 높고 내열성도 크게 만족하지 못하였으나, 최근에는 Japan Synthetic Rubber사에서 내열성 광섬유로 사용할 수 있는 소재인 "ARTON"을 발표하여 많은 관심을 일으켰다.²⁰ 고속 전송용 GI-POF의 개발은 일본의 Keio대를 중심으로 1982년 이후에 활성화되기 시작하였고, 최근 가시광 영역 및 적외선 통신 영역에서 전송 손실 50 dB/km 이하를 가지는 내열성 GI-POF의 개발을 발표하였다.³⁵

2.1 플라스틱 광섬유의 전송 원리

광섬유에 의한 전송은 기존의 동선을 통한 전자 신호의 전달 개념을 광섬유를 통한 광자 신호의 전달 개념으로 전환한 것이다. 광섬유로 대표되는 광전송 매체는, 일반적으로 빛이 진행하는 코어부와 진행하는 빛을 코어부 내에 지속적으로 진행을 유도하는 클래드부로 구성되며, 크게 나누어 단일 모드형과 멀티 모드형의 두 종류로 구분된다. 단일모드 광섬유는 대부분 장거리 전송용으로 사용되며 GOF이다. 중·단거리 전송에 이용되는 멀티모드 광섬유는 50 μm 또는 62.5 μm의 코어 직경을 갖는 GOF와 대부분의 POF가 해당된다. 현재까지 개발된 POF는 코어부의 높은 굴절률과 클래드부의 낮은 굴절률이 굴절률의 불연속 계면 상에서 빛이 전반사하며 진행되는 SI형과 코어부의 굴절률이 중심 축에서 외부 방향으로 Gaussian 분포를 가지면서 낮아지는 구조에서, 빛이 높은 굴절률 내에서 진행하는 원리를 이용하여, 광축에 모

Refractive-Index distributions

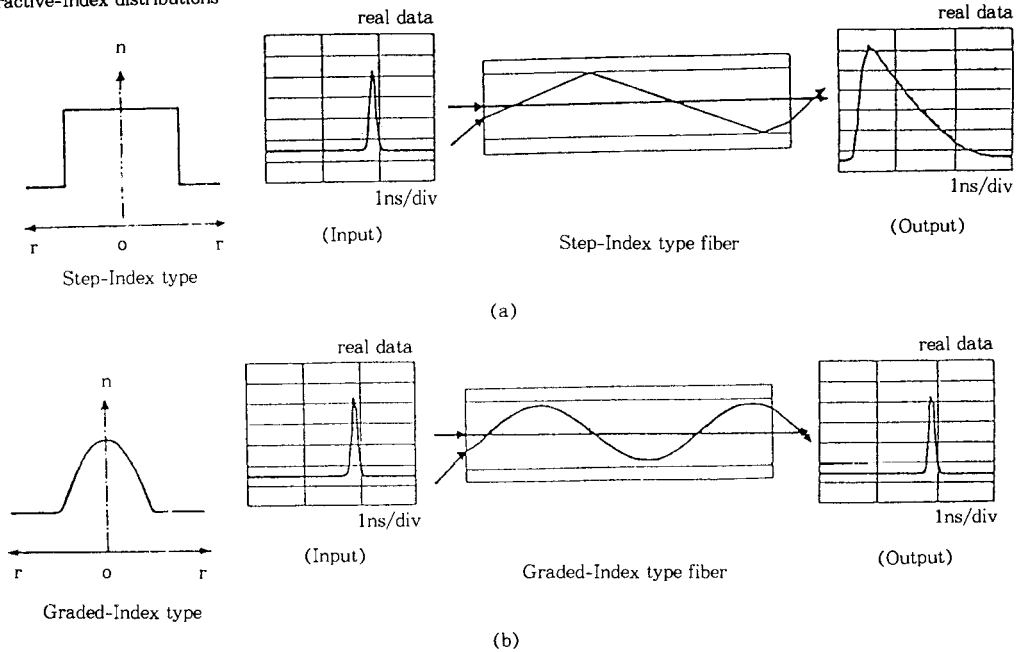


그림 3. SI-POF와 GI-POF의 굴절률 분포와 전송 원리 : (a) SI-POF, (b) GI-POF.

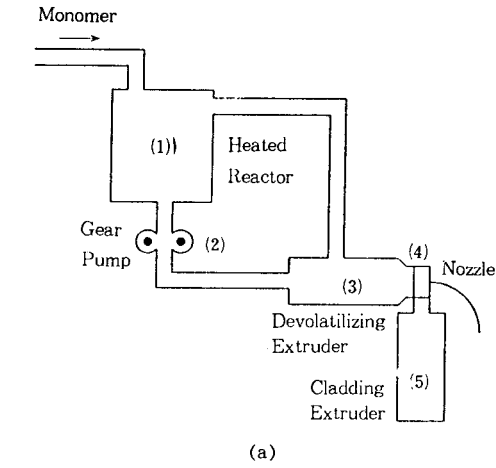
은 입사광의 모드들이 교차하면서 진행되는 Graded-Index 형(GI)의 두 종류가 있다. 그림 3은 SI- 및 GI-POF의 전송 원리와 15m 전송후의 검출된 신호를 비교하여 두 가지 POF에 대한 특성을 비교하였다. 그림 (a)에서 보여주듯이 SI-POF에서는 광섬유의 입사단을 동시에 출발하여 진행되는 빛의 각각의 모드들이 일정한 진행 거리 후에 진행 속도가 달라짐에 따라 출력단에서 검출된 각 모드의 신호가 넓게 분산, 중첩되어 결과적으로 정확한 정보의 검출이 어려워진다. 따라서 SI-POF의 경우는 저속, 저용량의 단거리 전송, 조명 및 image guide 등에 적합하다. 또한 현재 시판되는 POF의 대부분은 PMMA를 기본으로 하는 SI형 멀티 모드 광섬유이다. 반면에 GI-POF는 광섬유 축을 중심으로 진행되는 빛의 각 모드들의 전송 시간이 진행 거리와 관계없이 일치하기 때문에, 출력단에서 각 모드들의 신호가 분산이 없이 검출된다. 따라서, GI-POF는 전송 대역폭이 넓고 전송량이 큰 중·단거리 고속 전송에 적합하기 때문에 향후의 폭넓은 응용이 기대되고 있다.

2.2 플라스틱 광섬유의 제조

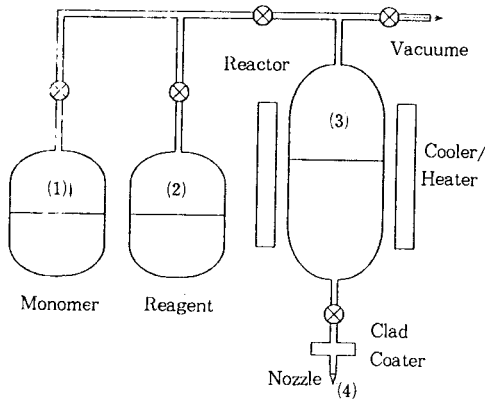
POF의 제조는 광섬유 자체의 전송 손실과 직접적인 관계가 있다. POF의 제조 중에 나타날 수 있는 전송 손실로는 고분자 재료의 중합이나 정제 중에 예상되는 불순물의 유입이나 공정 미흡으로 인한 광섬유 구조의 변형 등에 의한 손실이다. 구조의 변형으로는 코어부와 클래드부의 동심도 변형과 코어와 클래드의 경계면에 공간이 형성

되는 점을 들 수 있다. 이러한 손실은 생산성에도 직접적인 영향을 미친다. 그러므로 POF의 제조 시에 전송 손실과 관련된 외부 요인을 차단 할 수 있는 제조방법이 필요하다. POF의 손실에 관련된 항목은 GI-POF와 연결하여 뒷장에서 다루고 본장에서는 POF의 일반적인 제조 방법에 대해서 간략히 다루기로 한다. 일반적으로 POF의 제조에는 연속 압출법(continuous extrusion), 단위 압출법(batch extrusion) 및 모재 인출법(preform-drawing; heat-drawing) 등이 있다(그림 4). 앞의 두 방법은 단분자의 중합 또는 고분자 재료의 준비에서부터 광섬유의 제조까지 모든 공정이 밀폐된 연속적인 공정에 의해서 이루어지는데 반해서 마지막 방법은 미리 준비된 모재로부터 광섬유를 인출하는 방법이다.

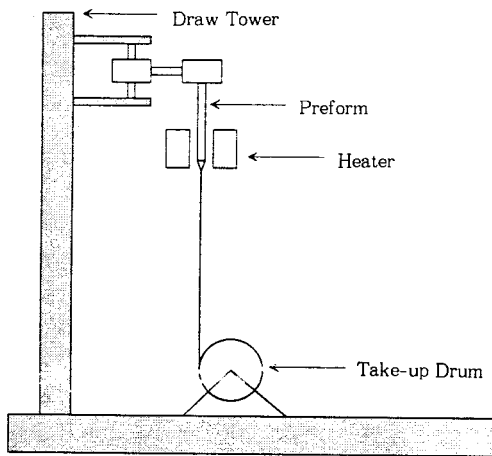
연속 압출법은 밀폐된 교열의 반응기 (1)속에 코어용의 단분자를 연속적으로 공급하면서 중합 반응을 지속적으로 행한다. 중합이 끝난 반응기속의 고분자와 미반응 단분자의 액체 혼합물은 밀폐된 관을 따라 연속적 (2)으로 분리기로 전달되고 분리기에서는 저압 하에서 미반응 단분자를 증류 분리한 후 정제된 고분자를 압출단 (3)에서 압출한다. 동시에 추가의 압출기 (5)에서 클래드 재료를 압출하는 방법으로, 하나의 이중 구조의 nozzle (4)에서 코어부와 클래드부를 동시에 제조한다. 이 방법은 생산 속도의 측면에서 큰 장점이 있으나 설비가 복잡하고 열에 의한 고분자 degradation에 기인한 재료의 손실이 많은 단점이 있다.²⁵



(a)



(b)



(c)

그림 4. POF의 제조 방법 : (a) 연속 압출법, (b) 단위 압출법, (c) 모재 인출법.

단위 압출법은 밀폐된 시스템 속에서 단분자(1, 2) 등의 반응물질을 직접 증류, 정제 하여 반응기(3)속으로 모은 후에 고분자 중합을 시키고 고온 액체 상태에서 증류하여 정제한 후 남은 순수한 코어용 고분자를 압출한다. 압출하는 방법은 연속 압출법과 비슷하다. 이 방법은 고순도의 고분자를 만들 수 있는 장점이 있으나 생산 속도가 느린 단점이 있다.²⁶

모재 인출법은 일반 GOF 인출 시 사용하는 가장 보편적인 방법이다. 일반적으로 tube 내에 정제된 단분자를 채우고 그 상태로 중합시켜 고분자 모재를 형성한 후 인출 타워에서 수직으로 모재를 달아서 모재 하단부를 가열하여 take-up drum으로부터 회전애 의해 인출한다. 인출 중간 부위에서 크래드부를 코팅하거나 모재 제작용 tube 자체를 클래드로 사용할 수 있다. 이방법은 여러 가지 특성의 POF, 특히 GI-POF를 제작할 수 있는 장점이 있다.¹⁷

2.3 플라스틱 광섬유의 저가격성

일반적으로 빛을 정보 신호로 사용하는 광통신 시스템은 초고속 정보통신망 구축의 필수 불가결한 요소이지만, 정보망 구축에 있어서의 필요한 부품과 설치의 저가격화가 선행되어야 한다. 현재 광통신망 구축의 최대 난점은 이러한 부대 비용의 원가 부담이 기존의 동선을 기본으로 하는 전자 통신에 비하여 매우 높다는 점일 것이다. 특히 광통신망 구성에서 단말 전송로(LAN)의 도입에 대한 비용은 사용자나 가입자가 대부분 부담해야 하기 때문에 저가격화의 측면이 매우 중요하다. 이러한 점에서 POF의 저가격성은 광통신 시장의 중요한 변수로 그 중요도가 계속 증대되고 있다.

POF의 저가격성은 여러 가지 특징의 융합에 의하여 실현되고 있다. 일반적인 GOF와 비교하여 POF의 저가격성의 핵심은 넓은 단면적의 코어부(대구경)를 쉽게 제작할 수 있는 점이다. POF는 코어의 직경이 약 0.5 mm ~ 1.0 mm 정도로, 통신용 GOF의 코어 직경(6 μm ~ 62.5 μm)과 비교하여 대단히 크다. 먼저 고분자 재료 그 자체의 가격이 고순도 석영에 비교하여 대단히 싸다. 예로, 광학용으로 많이 사용되는 고분자 재료인 PMMA는 일반적으로 사용하는 PMMA에 비하여 상당한 고가이지만, 광학용 고순도 석영과 비교하면 단위 중량당의 가격은 30분의1 이하이다. 따라서 재료 자체의 원가에 대한 부담이 없이 대구경의 광섬유를 제작할 수 있다. 이러한 POF 코어의 대구경화는, 광섬유 사이나 광원과의 결합에 있어서 접속 점에서 요구하는 광축의 미세 조정 정밀도를 대폭적으로 완화시킬 수 있다. 이러한 정밀도의 완화에 의하여 광코넥터 등의 접속 부품을 값싼 사출 성형으로 50분의1 ~ 100분의1 이하의 비용으로 제작할 수 있고, 또한, 광모듈 등의 구성 시 패키지가 용이하고 소요되는 비용을 대폭 감소할 수 있다(그림 5).²⁷ 실제로, 사

3. 내열성 플라스틱 광섬유의 응용

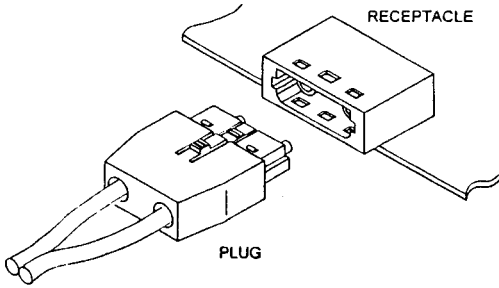


그림 5. 사출 성형으로 제작된 POF용 광코넥터의 구조도.

출 성형으로 제조된 광모듈 패키지 내에 고가의 laser diode(이하 LD) 대신 저가의 LED, photodiode(이하 PD)등으로 구성된, POF 용 광송·수신기 모듈이 저가로 제조되어지는 실정이다.

대구경 POF는 광섬유 설치에 있어서도 뛰어난 접속 작업성으로 저가격성이 발휘된다. plastic 재료의 특성상 절단면의 연마 처리가 쉽기 때문에, POF는 전문 작업 훈련을 전혀 받지 않은 초심자도 간이 기구를 이용하여 간단하게 절단 및 접속 작업을 할 수 있다. 이점은 GOF에 비하여 설치 비용을 현격하게 저가화하는 의미이며, 특히 접속점이 많은 옥내 배선 설치에 있어서 보다 유리하다.²⁸ 광케이블 제조 및 포설을 고려함에 있어서도 POF는 저가격성을 예상할 수 있다. 일반적으로 광케이블의 포설 시 50 kg 이상의 장력을 요구하기 때문에 GOF 케이블의 경우는 광섬유의 파단을 막기 위하여 비싼 tension 멤버를 사용하여 케이블을 제조한다. 이것에 비해 POF는 고분자 재료 자체의 유연성과 toughness 등 기계적 특성상 일반적인 장력에서도 비교적 파단이 대부분 일어나지 않기 때문에, 보다 저가격의 tension 멤버를 이용해 케이블을 제조할 수 있다.

저가격의 정보통신 선로로는 기존의 동축 unshielded twisted pair(이하 UTP)가 많이 보급되어 있다. 기존의 전화나 PBX에서 사용되어 온 저가의 UTP 케이블은 100 Mbps이상의 고속의 신호를 10 m 이상 전송 시키는 경우에는 electromagnetic interference(이하 EMI) 등에 의한 손실을 줄이기 위하여 고가의 추가적인 부품의 사용이 필수적이기 때문에 결과적으로 저가화가 어려운 반면, 광통신 매체에서는 EMI에 의한 문제가 무시되기 때문에 POF의 경우 추가적인 부품의 사용이 요구되지 않는다. 이상 기술한 특성들이 융합한 결과, POF에 의하여 단말 전송로의 부품부터 케이블 포설 공사 및 운용에 이르기까지 GOF에 소요되는 비용을 크게 밀돌릴 아니라, 동축인 UTP선과도 가격 경쟁을 할 수 있는 수준에 이를 것으로 예상된다.

자동차나 비행기내에 내장되어 광섬유 등의 고온 환경 하에서 사용되는 광섬유들은 고온 환경에서도 변하지 않는 전송 손실이 요구된다. 일반적으로 고분자는 T_g 근방에서 분자운동이 활발해지며 빛의 산란에 의하여 손실이 증가된다. 따라서, 고온 환경 하에서 사용되는 POF는 일정 수준의 내열성이 요구된다. 단순하게, POF의 재료 측면에서 보면 PMMA는 T_g 가 100 °C 정도이고, PC의 T_g 는 140 °C 정도이나, 실질적으로 T_g 에서 10~20 °C 정도 낮은 온도에서 변형이 시작하기 때문에 재료 특성적으로 내열 온도는 각각 80 °C와 125 °C로 알려져 있다.

총래의 내열 온도가 80 °C 정도인 PMMA나 polystyrene(이하 PS)를 기본으로 하는 POF들은 향후 대량 소비를 예상하는 있는 자동차 엔진 룸 내의 정보 전달이나, 할로겐 광원 등의 고온의 광원에 접근해 사용해야하는 조명이나 image guide 등의 내열 특성이 요구되는 용도에는 사용 할 수 없었다. 이러한 문제를 해결하기 위해서, 125 °C의 내열성과, bending 특성이나 내충격성에 뛰어난 PC 계열의 POF가 출현했다.²⁹ 그러나 전송 손실이, 특히 단과장 가시광영역에서, PMMA에 비교해 매우 뒤떨어지고, 조명 용도 등에 사용 시 완전한 백색광을 얻을 수 없었다. 또한, 자동차의 엔진 룸에서는 150 °C의 내열성을 요구하기 때문에 사용의 제한을 받았다. 현재까지, 150 °C 이상의 내열성을 갖는 POF들이 개발되었으나 전송 손실이 높은 단점이 있다. 그후, 150 °C의 내열성을 겨냥한 열경화성 silicone polymer 계열과³⁰ ester 수지 계열을³¹ 이용한 POF들이 최근 개발되었으나, 이 POF들은 인출과정에서 열경화 과정을 필요로 하기 때문에 양산성이 뒤떨어져 POF의 장점인 저가격화에 한계가 있다. 최근, 양산성에 뛰어난 열가소성의 norbornene계 수지, 변성 PC 수지, MMA와 *N*-*i*-propylmaleimide의 공중합체를³² 사용한 고내열성 POF가 잇따라 발표되었다. 일반적으로 내열성과 전송 손실은 상관 관계에 있다. 그림 6에서 지금까지 발표된 POF의 내열 온도와 전송 손실 관계를 보여 준다.⁴

3.1 내열성 플라스틱 광섬유의 개발 동향

실제로 판매되고 있는 대부분의 내열성 POF는 PC 계열이 대부분을 차지하고 있다. PC는 자체의 기계적인 특성 측면에서는 이상적인 POF 소재라 말할 수 있다. 그러나, PC는 중합 방법상, 중합 후에 필연적으로 발생하는 불순물을 제거해야 하고, PMMA나 PS 같이 중합부터 광섬유 인출까지 밀폐된 연속 공정이 힘들기 때문에 불연속 공정에서 정제된 PC로부터 광섬유 인출 과정을 거쳐야 한다. 따라서, 불순물의 침입이나 오염을 완벽하게 방지할 수 없는 결점이 있다. 또한 광섬유 인출 후에 복굴절 등의 현상이 생기는 문제가 있다. PC는 이미

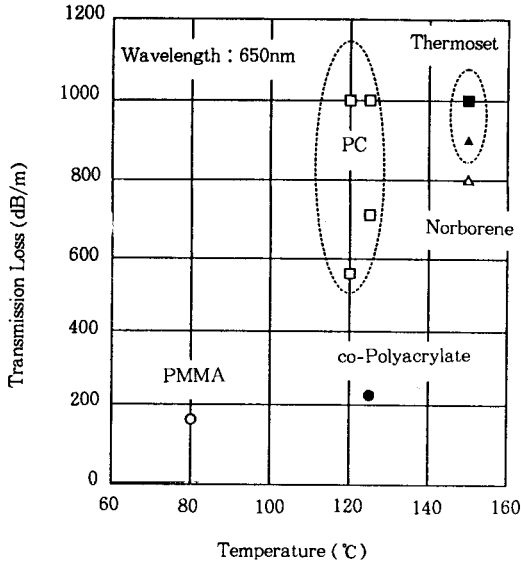


그림 6. 내열성 POF의 전송 손실과 내열 온도의 관계.

compact disc(이하 CD)의 코팅 재료로써 채택된 이후에, CD의 신호 재생 품질을 악화하는 불순물의 유입을 방지하기 위한 공정 및 품질관리가 제조 라인에서 철저하게 행해진 경우에, 전송 손실이 1.0 dB/m이하가 되는 고순도의 광학용 PC가 제조되어 약 20 m 정도의 광전송이 가능할 정도의 실용화에 도달했다. 그림 7은 PMMA와 비교한 PC의 전송 손실의 과장 의존성을 가리킨다. PC는 700 nm 이하의 가시광영역에서는 PMMA 보다도 전송 손실이 매우 크지만, 780 nm이나 950 nm 부근의 근적외 영역에서는 손실이 적어, CD용의 고속 반도체 LD를 사용하거나, 광센서등에 널리 이용되고 있는 값싼 LED를 사용할 수 있다. PC가 단과장에서 급격하게 전송 손실이 증대하는 원인은, 불순물의 제거가 철저하지 못하거나 물질 자체의 흡수에 기인한다.⁴

Japan Synthetic Rubber사와 Fujitsu사에서 공동 개발한 norborene계 수지 "ARTON"은 PMMA보통의 광학 특성, 내열성을 동시에 가지며, 무기물이나 유기물과의 접착성에 뛰어난 이상적인 광학 재료로써, 광디스크나 광학 렌즈, 투명 필름으로써 이미 상품화 되고 있으며 더욱 폭넓은 응용이 예상된다. 또한, POF의 재료로도 T_g 가 171 °C로 고내열성이고, 단과장 영역의 투과성이 뛰어나고 양산성이 용이하기 때문에 기존의 PC 계열의 POF에서는 얻을 수 없었던 새로운 특성을 기대할 수 있다. 그림 8에서 보여주는 바와 같이, 최저 손실 영역은 680 nm 부근에 존재하기 때문에²⁰ 저가의 통신용 적색 LED의 660 nm 발광 과장을 사용할 수 있는 장점이 있다. 또, 전송 손실의 최저 손실값은 0.7 dB/m이고, 500 nm~700 nm의 넓은 과장 범위에서 흡수가 작기 때

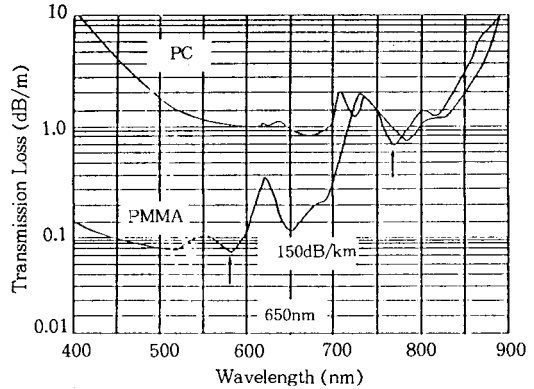


그림 7. Polycarbonate-POF와 PMMA-POF의 전송 손실 비교.

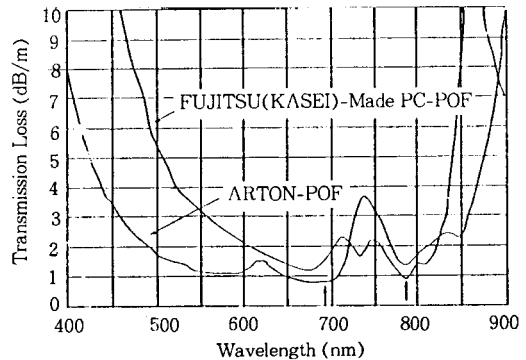


그림 8. PC-POF와 "ARTON"-POF의 전송 손실 비교.

문에 자연광에 가까운 빛이 얻어진다. Bulk 상태의 "ARTON" 광섬유의 내열 특성을 150 °C에서 660 nm 과장의 LED로 측정할 경우, 1,000시간까지 온도에 의한 광특성이 거의 일정함을 보여준다.

열가소성의 변성 PC 수지를 사용한 145 °C의 내열성을 가지는 POF의 전송 손실은 LED광원에서, 660 nm 과장에서 0.42 dB/m, 760 nm에서 0.38 dB/m이고, 적외 영역에 폭넓은 저손실 영역을 가지고 있기 때문에, 저가의 고속 CD용 LD를 사용할 수 있다. 특히, 145 °C의 고온에서 300일 후의 손실 증가는 0.5 dB/m정도이며, 80 °C, 습도 95%의 aging 시험 결과, 500시간 후의 전송 손실은 0.1 dB/m 이하로 환경 안정성을 가지고 있기 때문에 고속 전송용 POF로서도 기대가 된다.³³

PMMA와 같은 투과성을 갖게하기 위하여 *N*-isopropylmaleimide를 MMA등과의 공중합에 의하여, 내열성의 향상한 POF가 Toray에 의하여 발표되었다. T_g 는 약 230 °C로 높으며, 투명성이 매우 높고, 내열성과 기계적 특성도 매우 좋다. POF의 전송 손실은 660 nm의 과장에서 218 dB/km로 저손실이고, 또한 125 °C, 1,000시간후의 내열 시험으로부터의 손실 증가는 4 dB/km로 지

극히 열안정성이 뛰어난 POF로 보고되고 있다. 더욱이, 자동차의 엔진 룸에 장착하여 실제로 측정된 전송손실도 안정성을 보이고 있는 것으로 보고되었다.³²

3.2 내열성 플라스틱 광섬유의 응용

전송 거리가 짧고, 고분자의 기계적 성질을 살릴 수 있는 자동차 분야로의 응용은 내열성 POF의 큰 시장으로 예측되고 있다. 엔진 룸 내의 고온의 영향을 받는 장소로부터의 전자·전기 배선을 자유롭게 할 수 있고 bending 특성 및 flexibility 등이 좋기 때문에 자동차내의 모든 장소에서 자유롭게 사용이 가능하다. 자동차 한 대당 약 80 m 이상의 POF가 필요할 것으로 생각되며, 현재의 전세계의 연간 자동차 총 생산량인 약 4,000만대에 대하여, 약 30억m의 잠재 시장을 예상하고 있다. 실질적으로 2001년에는 전체 자동차들 중에 65% 이상이 POF를 사용할 것으로 자동차 업계에서는 예측하고 있다.

협소한 실장 공간으로 인하여 급격한 bending을 요구하거나 고밀도 실장이 필요한 전화교환기, 오디오 기기, 텔레비전 등의 전자 기기 내부 배선으로도 POF가 적합하다. 특히, scanner, printer, 복사기 등 고온의 광원이나 작동 원리상 고온을 발생하는 전원 주변의 배선에 내열성 POF의 응용이 필요하다. 또한, 공장안의 자동화 기기나 내열성이 필요한 sensor 기기간의 정보 전달 등에도 응용할 수 있다. 일반적으로 한대의 기기에 필요한 POF의 수요는 약 30 m 정도로 예측되기 때문에 큰 잠재수요를 예상한다.²⁰

옥내의 조명은 물론 옥외의 구축물의 조명의 수요가 증가되고, 조명 광원으로 할로겐 램프 등의 고온 광원을 이용하는 경우가 많기 때문에 조명용으로 사용하는 POF에도 내열성이 요구하는 추세이다.³⁴ 또한 image guide의 경우에도 내열성의 POF를 사용한다. 실례로 의료용의 내시경등에 사용을 위하여서는 살균을 위한 고온하의 소독이 필요하기 때문에 일정수준의 내열성과 bending 특성이 요구된다. 기존의 내시경에 사용하는 image 광섬유는 GOF의 bundle을 가열하여 가늘게 늘려서 단위 면적 당 해상도를 증가시키는 방법으로 제작 하였으나 저가격화하기가 어려웠다. 최근에는 의료용 해상도인 6000화소 정도의 POF bundle이 저가격에 시판되고 있다.³⁵ 특히, NA를 쉽게 높일 수 있기 때문에 GOF와 비교하여 수m의 근거리에서 더욱 밝은 image를 전달할 수 있다.

4. 고속 통신용 플라스틱 광섬유의 개발 동향

멀티미디어 시대의 도래는, LAN의 보급을 크게 촉진시키고 있다. 지금까지 무관심한 일반 가입자들도 저가격의 LAN 시스템의 도입에 대한 관심이 높아지고있다. 최

근의 퍼스컴 LAN의 고속화 움직임은 CPU의 처리 속도 향상과 저가격의 퍼스컴 단말에서 용이하게 동화상 및 음성 등을 처리할 수 있는 주변 기기의 성능 향상과 네트워크의 고속화 요청도 높아지고 있다. 이른바 멀티 미디어 화에 따라 많은 정보량을 처리할 수 있는 hardware 및 software의 기술이 요구되고 있다.

기존의 LAN에서는 비용 측면에서 유리한 공유 매체형의 망구성이 사용되어 왔다. 이것은 한 개의 전송로를 많은 단말에서 공유하는 것이고, 한 단말 당 전송로 설치의 비용을 매우 절감할 수 있는 장점이 있다. 그 반면, 단말의 이용이 급속도로 증가함에 따라, 단말의 증설이 필요하고 따라서 기본망 전체에 정보처리의 병목현상이 심화되어 고속의 신호를 처리하기가 곤란하다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서 등장한 것이 스타형의 망구성법이다. 각 Desktop LAN에는 다른 Work Group의 LAN과 상호 접속하고 고속의 Backbone LAN에의 중간 역할을 하기 위한 hub가 설치되어 있고 hub부터 각 단말까지는 1대1로 연결되는 스타형의 전송로가 사용된다. 현재 Desktop LAN의 주류로 되어 있는 Ethernet (10BaseT)도 물리적으로는 이러한 스타형의 망 형태를 구성하고 있다. 이 구성을 이용하면 향후 보급이 예상되는 고속 스위칭 hub를 용이하게 도입 할 수 있는 장점이 있다. 또한 ATM LAN의 도입은 Backbone LAN의 속도를 향상시키는 동시에, Desktop LAN과의 사이에 논리적으로 병목현상을 극복할 수 있다.²²

기존의 Desktop LAN에서 사용되어 온 데이터 링크는 전송 거리 100 m까지의 UTP에 의한 것이었다. UTP는 매체 자체의 저가격성, 뛰어난 설치 공사, PBX나 아날로그 통신으로의 사용 실적이 좋아 널리 보급되고 있으며, 세계적으로 LAN에 사용되는 UTP 데이터 링크 만으로도 1996년에 수 백억 달러 이상의 시장 규모가 예상된다. 그러나, 기존의 10 Mbps의 Ethernet의 속도는 요구되는 대량 정보의 고속 처리가 불충분하다. 이 UTP에 100 Mbps이상의 고속 데이터의 신호를 전송하려면 EMI에 의한 잡음 등 여러 가지 문제가 생기고, 저속의 정보 전송에 사용되었던 때와 비교해 데이터 링크의 설계도 복잡하며 고가의 여러 가지 주변 부품이 필요로 하기 때문에 단말 구성의 저가격화는 근본적으로 불가능하다. 이와같은 배경에서, 최근 들어서 광통신망 구축에 대한 관심이 급속하게 증대되면서 고속 신호 전송 분야에서 POF의 응용을 확대하기 위한 움직임이 활발해져 왔다. 따라서 POF 데이터 링크를 이용하면, 실제의 기기 가격은 10 Mbps에 있어서도 UTP 링크보다 저렴하고 100Mbps의 경우 가격이 더욱 낮아진다. 그러므로 UTP 시장을 대체하기 위한 POF와 POF 주변 부품의 신규 개발 및 고성능화 등의 움직임이 미국과 일본에 의해서 활발히 진행되어 오고 있다. 또, ATM forum 등에서

NEC, AMP 등 십여 개 회사에서 POF 데이터 링크를 저가가격의 가입자용 멀티미디어 주변 부품으로써 제안을 하고 있어 향후의 주목받는다.²⁷ 그림 9에서는 UTP나 Coax 케이블 등 기존의 동축 케이블의 전송 속도에 따른 전송거리를 GI-POF와 비교하였다. UTP나 Coax는 10 Mbps의 전송 속도로 1000 m의 거리를 전송함에 이미 한계가 있고 다심화하면 EMI에 의한 전송 손실과 부피의 증가로 인한 고밀도 실장이 곤란하다. 차세대 전송 개념인 SHD등의 도입은 물론 고품질의 CATV 등의 화상 전송에 따른 가입자의 요구를 수행하기 위하여서는 EMI등이 제거된 고가의 Coax와 추가의 modulation 및 filtering 등의 부가 장치가 요구된다. 현재의 GI-POF의 경우는 약 500 Mbps의 속도를 요구하는 CATV의 화상을 약 1000 m까지 전송할 수 있고 향후 초고속 단말 전송을 위한 많은 잠재력을 가지고 있다.

기존의 SI-POF를 사용한 전송 속도는 수10 Mbps~100 Mbps, 대역폭은 5 MHz·km정도이며 최대 전송 거리인 100 m부근에서는 50 MHz 이내이다. Mitsubishi Rayon은 POF의 전송 대역폭을 향상시키기 위하여 2종류의 광대역 POF를 개발했다. 한 종류는 굴절률 분포를 광섬유에 부여하여 대역폭을 향상한 GI-POF(Eska G)이고, 다른 한 종류는 기존의 SI-POF의 NA를 감소시켜 대역폭을 향상한 SI-POF(Eska M)이다. Eska M의 경우, 기존의 POF에서 0.5 정도이던 NA를 0.3으로 변경하여 높은 NA에 의한 빛의 모드 분산을 최소화 하여 100 m의 전송거리에서 100 MHz이상의 대역폭을 실행하였다. NA의 감소에 의하여 bending 손실 및 결합 효율의 저하가 예상되었지만, 실질적으로 기존의 POF와 비교하여 큰 변화가 없었기 때문에 주변 부품에 대하여 저가격화를 할 수 있다. 또, NEC사는 이 광섬유와 자체 개발한 650 nm의 고속 LED를 이용해 100 m-156 Mbps의 고속 전송 실험에 성공했다. 이 LED는 전극 구조의 최적화와 광섬유와의 결합을 용이하게 하기 위한 내부 설계(Ring LED)로 인하여 단일 모드의 Eska M 광섬유와의 결합 효율과 전송 손실을 현격하게 향상시키고 있다.³⁶

최근 각광을 받고 있는 GI-POF의 개발은 이미 기술한 바와같이 일본의 Keio 대학의 연구진에 의하여 많은 발전을 해왔다. 특히 Keio 대학의 연구진에 의한 GI-POF의 새로운 제조법이 발표되고, 광전송 대역폭을 현격하게 향상 시켰다.^{15~19} 본 장에서는 POF의 고속 장거리화의 시도로써 GI-POF를 중심으로 한 개발 동향과 고속 전송 실험에 대해서 소개한다.

4.1 Graded-Index 플라스틱 광섬유의 제작

최근에 Keio대학의 연구진들에 의하여 개발된 SSD (swelling and selective diffusion)제조법은¹³ 지금까지 불가능하다고 생각되었던 GI-POF의 저손실화와 광대역

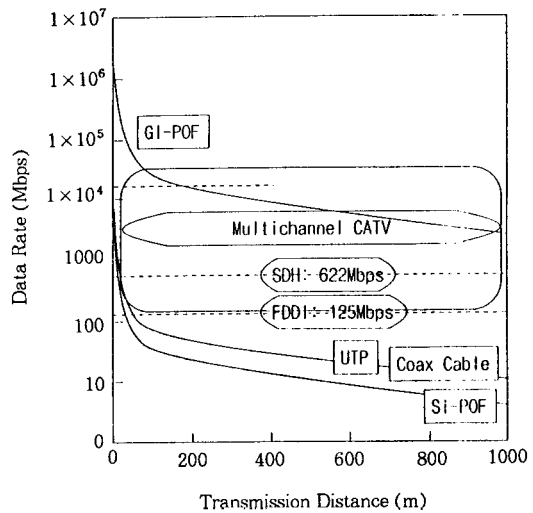


그림 9. UTP, Coax 및 POF 링크의 전송 속도에 따른 전송 거리의 비교.

화 및 기계적 특성의 개선을 일거에 해결했다. 개발된 GI-POF의 제작 방법은 매우 간단하면서도 굴절률 분포를 쉽게 가지고 갈수 있으며 코어부와 클래드부의 재료로 선택할 수 있는 고분자 재료의 선택폭을 매우 늘렸고 기존의 GOF 인출에 사용되는 모재 인출기술을 사용함으로써 요구되는 두께의 광섬유를 쉽게 제작할 수 있다. 또한, 코어 내부 굴절률의 분포를 조절하기 위하여 굴절률 dopant가 코어부의 고분자 중합과정에서 고분자의 "Gel-Effect"에 의하여 코어부의 중심으로 갈수록 분포를 더 많이 가질 수 있는 것이 특징이다. 그림 10에서는 gel-effect에 의한 POF의 모재 제작 방법을 보여주고 있다. 이렇게 제작된 POF 모재는 열을 가한 상태에서 drawing에 의하여 광섬유로 인출된다.¹⁸

4.2 플라스틱 광섬유의 전송 손실

POF의 전송 손실의 요인은 일반적으로 광섬유를 구성하는 재료 자체의 손실과 광섬유의 제조 시에 발생하는 불순물이나 구조적인 결함에 의하여 생긴다. 불순물이 구조의 결함에 의한 손실로는 주로 산란 손실이 해당하며, 정제 기술이나 인출 기술 등에 의하여 최소화할 수 있으나 재료 자체에서 발생하는 흡수 손실은 POF의 고유 손실이라고 볼 수 있다. POF의 전송 손실은 전자 천이 흡수 손실(electronic transition absorption)과 적외 진동 흡수 손실(carbon-hydrogen vibrational absorption)로 크게 분류된다.³⁷ 전자 천이 흡수 손실은 재료의 분자 구조에 따른 에너지 준위의 천이에 기인한다. 일반적으로 고분자는 적외 영역에서 분자 구조내의 진동에 의한 고유의 흡수 영역을 가지고 있고, 자외 영역에서는 전자 천이에 의한 고유의 흡수영역을 가지고 있다. 이러한 흡수영역들의 영향은 가시 영역 대에서 그 위치나 강도의 차이

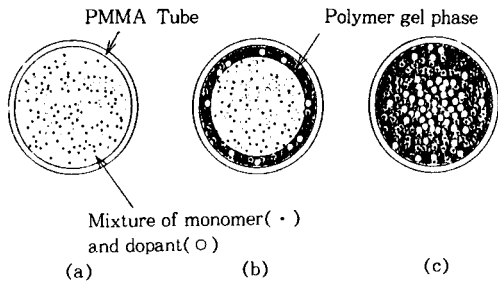


그림 10. "Gel-Effect"에 의한 GI-POF 제조 방법: (a) PMMA Tube내에 MMA와 Dopant의 혼합물을 만들. Dopant의 분자량과 굴절률은 MMA보다 커야함.; (b) PMMA Tube 내부가 MMA에 의해 Gel화 되면서 "Gel-Effect"에 의하여 Gel화된 부분부터 고분자가 형성되면서 Dopant를 주변으로 밀어냄.; (c) Tube 전체가 고분자화 되면서 Tube 중심의 굴절률이 가장 높고 외각의 굴절률이 가장 낮은 굴절률 분포를 갖게 됨.

는 있지만 harmonic overtone으로 나타나며 POF의 전송 손실의 영향이 된다.

POF의 고분자 구조에서 주된 전자 천이 흡수의 요인은 일반적으로 carbon-oxygen 이중결합의 $n \rightarrow \pi^*$ 천이와 carbon-carbon 이중결합의 $\pi \rightarrow \pi^*$ 천이에 따른 흡수이다. PMMA의 경우 carbon-oxygen 이중결합에 의한 전자 천이 흡수 손실은 500 nm 이상의 파장대에서 1 dB/km로 매우 낮고 PS의 경우 benzene 고리의 delocalization에 의하여 500 nm의 파장대에서 100 dB/km, 600 nm의 파장대에서 7 dB/km 정도의 전자 천이 흡수 손실을 나타낸다.³⁸ carbon-hydrogen 결합에 의한 적외 진동 흡수 손실은 대부분의 고분자가 가지고 있는 특성이다. 일반적으로 고분자의 carbon-hydrogen 결합에 의한 적외선 영역의 흡수에 의한 harmonic overtone에 기인하는 광흡수가 주원인을 이루기 때문에, 근적외선 영역에서 높은 흡수에 의한 전송 손실을 가진다. 그러므로 POF의 전송 손실 중 적외 영역 흡수 손실이 가장 큰 부분을 차지할 것이다. 1968년 최초로 시판된 PMMA-POF는 650 nm의 파장대에서, 전송 손실이 1,000 dB/km이던 것이, 현재에는 최저 손실 파장 570 nm에서, 이론 손실치인 34.9 dB/km에 가까운 70 dB/km 정도의 것이 시판되고 있다.³⁹ 이러한 손실 문제를 해결하기 위하여 1977년 DuPont사에서 PMMA의 Hydrogen을 중수소로 치환한(PMMA-d8) POF에 대한 전송 손실(180 dB/km-750 nm)을 보고하였으며 결과적 중수소의 치환은 harmonic overtone을 장파장으로 이동시킴으로 광원으로 쉽게 구할 수 있는 650 nm 및 750 nm 파장대에서 최저 손실을 얻을 수 있다. NTT에서도, PMMA-d8을 사용하여 최저 손실 파장 650 nm에서, 전송 손실 20 dB/km를 보고하였다.²³ 기본적으로 POF의 전송 손실 감소는 적외 진동 흡수를 최소화 할 수 있는 화학 구조를 지닌

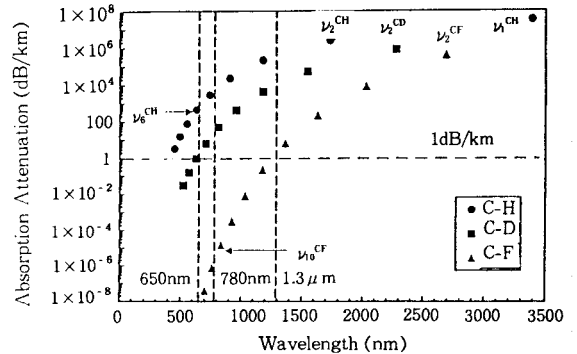


그림 11. PMMA계 POF의 C-H, C-D 및 C-F 결합에 대한 적외 진동 흡수도 및 흡수 영역.

POF를 개발 하는 것이 핵심이다. **그림 11**은, PMMA의 수소를 중수소 및 불소로 치환한 경우의 C-H, C-D 및 C-F 결합에 대한 적외 진동 흡수의 정도를 각 harmonic overtone에 대해 계산한 결과이다.¹³ CD용 LD의 발광 파장인 780 nm에서는 C-H 결합은 2000 dB/km, C-D 결합은 80 dB/km, C-F 결합은 10~5 dB/km의 흡수 손실을 갖는다. C-H 결합을 C-D 또는 C-F 등의 무거운 원소로 대체하면 C-H의 적외 영역의 흡수가 장파장 쪽으로 이동하는 원리를 응용한 것으로 가시 영역 및 근적외 영역에서의 손실을 감소시킨다. 이 결과로 보면, 불소 수지로 PMMA를 완전 치환 할 수 있으며, GOF에 가까운 전송 손실을 POF에서 얻을 수 있음을 시사하고 있다. 따라서, 최근에는 불소로 치환한 광섬유에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. 특히 1310 nm를 포함한 대부분의 가시 영역과 근적외 영역에서 50 dB/km 이하의 전송 손실을 보이는 완전히 불소로 치환된 Tefron계의 "Perfluorinated" GI-POF가 개발되어, 내열성 및 전송 거리, 대역폭의 향상에 큰 결과를 보여주었다. 그 전송 손실 특성과 perfluorinated 고분자의 구조는 **그림 12**에서 보여 준다.²⁷

4.3 플라스틱 광섬유를 이용한 2.5 Gbps-100 m 전송

기존의 일반 SI-POF의 전송대역은 5 MHz·km로 좁기 때문에, 156 Mbps의 전송 신호를 20~30 m밖에 전송 할 수 없었다. 멀티모드 광섬유의 대역폭은 광원의 입사 조건에 의하여 조절할 수 있다. 따라서 156 Mbps의 전송 속도로 100 m 정도의 전송을 하기 위해서는, POF 입력단에서 collimated input을 사용한 NA가 낮은 입사 광에 의한 불필요한 모드의 제거 등의^{36,40} 방법이 제시되었다. 최근, 일본의 Keio대에서는 PMMA를 기초로 하는 GI-POF를 통하여, NEC사에서 개발한 더블 채널 고속 적색 LD(발광 파장 650 nm)를 사용하여, 최초의 2.5 Gbps 전송 실험을 하였다.⁴¹ 전송 거리는 Desktop LAN에서 필요로 하는 100 m로 설정했다. 측정 결과로

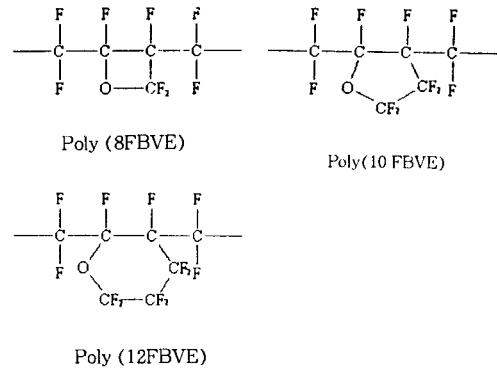
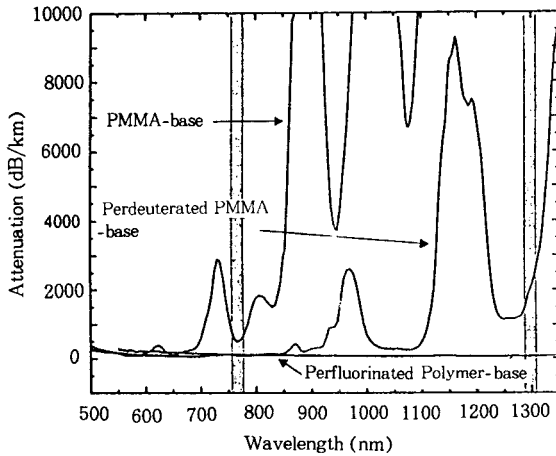


그림 12. PMMA, PMMA-d8 및 perfluorinated POF의 전송 손실 비교 및 perfluorinated 고분자의 구조.

GI-POF의 입력단과 출력 단에서의 eye pattern diagram(waveform)에서 큰 차이를 보이지 않았다 100 m의 전송 후 POF의 재질 자체에 의한 전송 손실은 650 nm 파장에서 20 dB이다. 그러나, SI-POF를 통한 250 Mbps-100 m 전송실험에서 검출된 eye pattern diagram 입력단의 신호와 출력단의 신호의 형태가 매우 다른 것을 알 수 있다(그림 13).¹⁶ 이러한 현상은 SI-POF의 전송 거리에 따른 모드 분산에 기인한다. GI-POF의

내역폭 개선 효과를 검증하기 위해서, 출력단에 모드의 분산을 보상하는 equalizer를 사용한 SI-POF를 통한 실험에서는 1 Gbps-100 m 전송이 가능하였다.⁴² 그러므로, SI-POF에서는, 이러한 고가의 부수 장비의 도움없이, 고속 전송 시에 모드의 분산이 가장 큰 문제점이다. 그림 14에서는, GI-POF의 2.5 Gbps-100 m 전송후의 bit error rate(이하 BER) diagram을 보여 준다.¹⁶ 그림에서 보듯이 GI-POF의 BER 특성은, 10^{-9} BER에서 약 0.6 dB

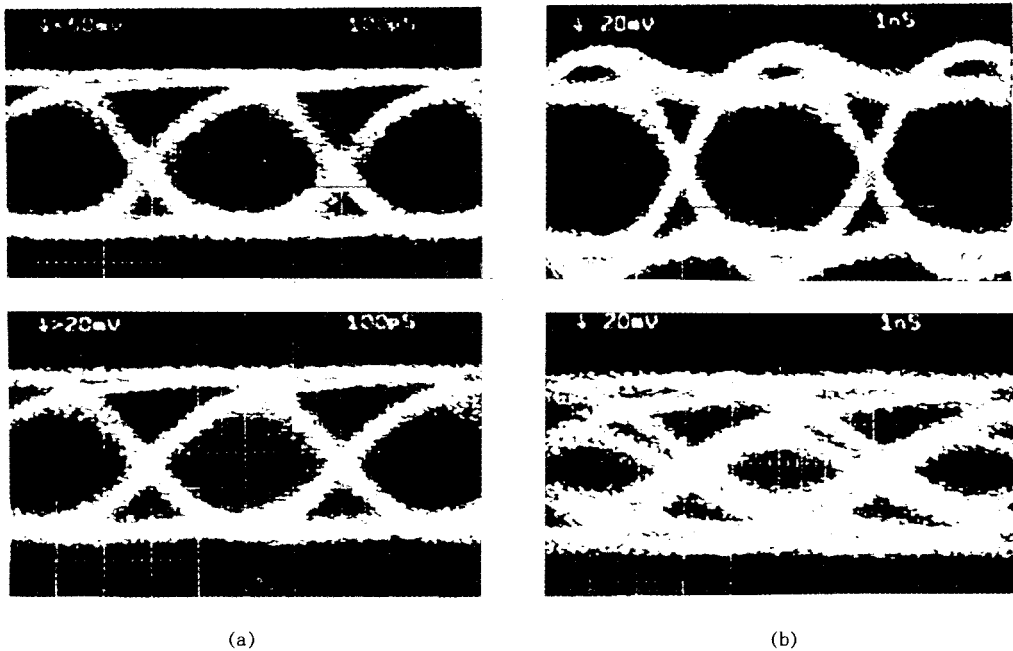


그림 13. (a) GI-POF 2.5 Gbps-100 m 전송 입력단 (상) 및 출력단 (하)에서의 Eye Pattern; (b) SI-POF 250 Mbps-100 m 전송 입력단 (상) 및 출력단 (하)에서의 eye pattern : 모드 분산에 의하여 SI-POF의 전송 실험에서는 출력단에서의 eye pattern의 형태가 일그러진 모습을 하고 있음.

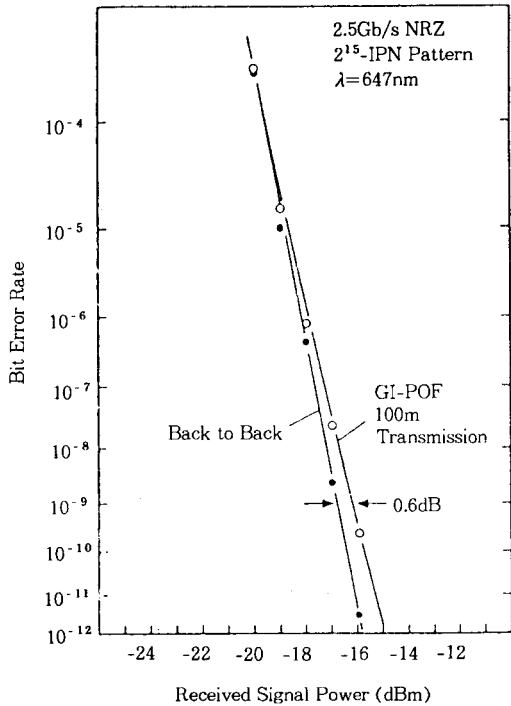


그림 14. GI-POF 2.5 Gbps-100m 전송시의 bit error rate diagram : 10^{-9} BER에서 약 0.6 dB의 수신감도가 감소됨.

의 수신감도가 감소로 좋은편이다. 이러한 수신 감도의 감소는 GI-POF의 모드 분산에 기인하며 실험에 이용된 100m의 GI-POF의 전송 속도 한계는 3 Gbps 정도이다. 그러므로 GI-POF와 650 nm 고속 LD를 사용하면, 전체 Desktop LAN의 적용 영역을 수렴하는 동시에, UTP 데이터 링크에서는 실험 불가능한 Gbps대의 초고속 전송 영역까지 POF 데이터 링크를 사용 가능하다. 이러한 실험 결과에서, POF 데이터 링크의 성능이 UTP 링크에 비하여 비약적으로 증가된 것을 확인할 수 있다.

4.4 플라스틱 광섬유용 광원 개발

GI-POF는 $1\text{GHz} \cdot \text{km}$ 을 상회하는 넓은 대역폭과 저가격성에 의하여 POF를 사용한 고속 데이터 링크로의 응용을 가능하게 하는 breakthrough를 가져왔다. 이러한 넓은 대역폭을 살린 고속 데이터 링크는, 광섬유와 같은 전송매체 뿐만 아니라, 매체에 결합되는 광원 등의 주변 광부품의 성능 향상도 요구된다. 일반적인 PMMA-POF의 저손실 파장 대인 570 nm와 650 nm에서 발광하는 적색 LD나 LED 소자가 bar-code reader나 포인터용의 광원으로서 실용화되고 있다. 그러나, 기존의 LD 소자는 LED 소자보다 고속성과 출력에서 뛰어 나지만, 변조대역에서는 200~300 MHz 정도로, GI-POF가 가지는 넓은 전송 대역을 충분하게 활용할 수 있는 정도는 아니다. 수백 Mbps 이상의 고속 장거리 전송을 위한 광

원으로는 650 nm 파장의 고속 LD가 현재의 유일의 선택이지만, 150 Mbps이하의 전송 속도에 대해서는 가격이 싼 LED가 사용되기도 한다. LED는 변조 속도가 낮고, 대역폭이 좁으며 광출력 측면에서 LD보다 제한적이지만 저속의 단거리 데이터 링크로는 충분히 사용할 수 있다. 또한 온도 변화에 민감한 LD에 비하여 출력이 안정되어 있고 작동 수명이 긴 것 또한 장점이다. 고속화에 관하여, 기존의 POF 데이터 링크에서는 광원으로 사용되는 LED의 변조 속도와 출력이 제한 요인이었다. LED의 고속화는 장파장대에서 활발한 연구가 되어 왔지만, 가시 영역의 LED에 대하여서는 125 Mbps 정도가 실용화되고 있다. 이유로는 대역폭이 $5\text{MHz} \cdot \text{km}$ 정도인 기존의 SI-POF에 사용하기 위한 고속 광원의 요구는 의미가 없기 때문이다. 그러나, 대역폭이 큰 GI-POF의 개발로 인하여 저가의 POF 링크에 사용할 수 있는 고속 광원의 필요가 요구되고 있고 최근에 GI-POF에 응용할 수 있는 저가의 고성능 광원들이 제작되었으며, 특히 이미 설명한 변조 속도가 2 Gbps 이상인 NEC의 고속 LD, Hewlett Packard의 125Mbps LED 등이 개발되었다.³⁶ GI-POF를 위한 광원의 경우, POF 자체의 전송 손실이 GOF와 비교하여 높은 것을 고려해, 일정 수준 이상의 출력이 요구된다.

4.5 옥내 통신 배선의 응용

광섬유에 의한 FTTH의 전송망 설치 이후 건물이나 가정 내부의 가입자 단말에 사용할 통신망의 구축에 대한 논의가 활발해지고 있다. 초고속 정보통신망의 주된 의의는 동화상 등의 대량 정보를 가입자 단말에서 고속으로 교환할 수 있는 저가격 통신망의 구축이다. 2.5 Gbps-100 m의 고속 전송이 가능한 GI-POF의 개발과 156 Mbps-100 m 전송이 가능한 SI-POF의 특성 향상에 따라 고속 멀티미디어 통신망의 FTTH 구축에 따른 건물이나 가옥내의 고속 디지털 신호의 전송을 위한 광통신망의 매체로서, 주변 부품의 저가격화가 가능한 POF 배선에 대한 관심이 증대되고 있다. 최근 일본의 NTT사는 건물 및 가정의 내부 통신망에 고속 전송용 GI-POF를 사용하는 "Fiber-In-The-Home"(이하 FITH)의 개념을 제안했다(그림 15).⁴³ 외부의 trunk line부터 건물의 network termination(이하 NT)까지는 단일모드의 GOF가 사용이 되고 NT부터 건물 내부의 모든 배선에 고속 전송이 가능한 GI-POF를 사용하는 제안이다.

4.6 플라스틱 광섬유 증폭기

최근 1550 nm의 장거리 통신용 파장에서 사용되는 광증폭기가 많은 관심을 끌고 있다. 희토류계 원소인 erbium을 doping한 광섬유(이하 EDF)를 사용한 erbium doped fiber amplifier(이하 EDFA)의 경우 1550 nm 파장대의 증폭을 위하여 EDF를 통하여 980 nm 또는 1480 nm의 유도방출 광원을 pumping하여, Er의 최외

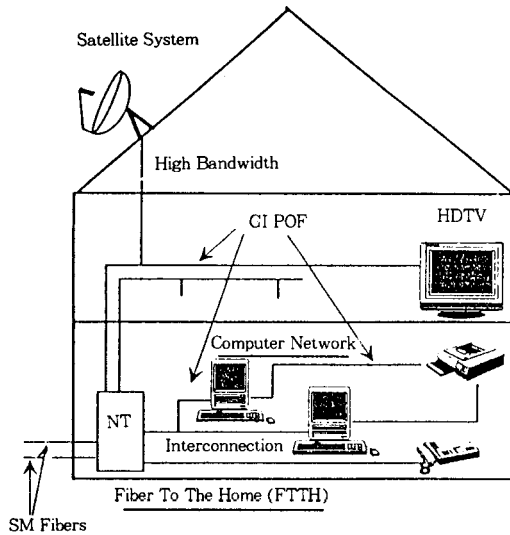


그림 15. GI-POF를 이용한 초고속 멀티미디어 단말 통신망(FITH).

각 전자가 높은 에너지 준위의 상태를 이룬 후 1550 nm 파장을 발산하면서 에너지의 준위가 원 위치로 돌아가는 특성을 이용한다. 그러나, EDFA의 구성시 사용되는 광 부품들이 9 μm 이하의 광섬유 코어 및 광축의 정밀 접속을 요구하기 때문에, 가격이 높다. 최근, 동일한 물리 화학적 원리를 이용하여, GI-POF를 사용한 저가의 광증폭기를 구현하려는 시도가 발표되었다.⁴⁴ Rhodamine B 등의 유기 dye를 doping한 GI-POF을 사용하여 광원으로서는, Nd : YAG laser의 1064 nm 파장을 KDP결정으로 파장 532 nm의 이차 고조파를 발생하게 하여, 이 빛을 571 nm 파장의 dye laser 및 증폭용 POF의 유도방출 광원으로서 이용하여 570 nm(PMMA-POF의 최저 손실 영역)의 Gain 27 dB 이상의 광증폭을 실현하였고, 최근에는 Gain 37 dB 이상의 증폭을 보고했다. 그러므로, 530 nm에서 구동하는 저가의 녹색의 LD가 개발되면 값싸고 콤팩트인 LAN 용도의 광증폭기를 실용화 할 수 있고, 고효율의 광원을 필요로 하는 의료용이나 산업용의 laser source로서의 응용도 기대된다.

5. 결 론

가입자 단말의 Desktop LAN, 고화질의 HDTV 또는 CATV를 통한 정보의 전달이 초고속 정보통신망의 구축 이후 전세계적으로 가입자 단에 필수적인 저가격 데이터 링크의 개발이 필요함에 따라 저가격 POF 링크의 응용에 대한 기대가 높아지고 있다. 특히 신규로 시스템을 도입하는 경우, 기존의 UTP를 사용하는 것보다는 POF를 이용하는 것이 가격 측면에서 더욱 유리함이 판명되고 있

다. POF는 광통신 가입자망에서 요구하는 유리 섬유의 광 투과성과 동축의 정보 전달 및 저가격성의 양 측면을 동시에 만족시킬 수 있는 소재이기 때문에 응용 및 수요를 넓혀 갈 것이다. 그리고, GI-POF를 사용하여 실질적으로 2.5 Gbps-100 m의 전송에 성공함으로써 GI-POF의 개발은 물론, POF용 광원의 개발이 활발할 것으로 예상된다. 아울러, 내열성을 지닌 1310 nm 파장 대에서 50 dB/km의 저손실을 지닌 GI-POF의 개발은 향후 POF의 장거리 통신 용도로 사용 가능성을 보여 주었으나, 다른 한편으로 옥외 등의 환경 하에서 사용할 수 있는 내열성, 내습성 등의 환경 안정성 확보에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

향후 POF의 전송거리가 2~3 km로 증가되면 현재까지 실현되고 구상되어 왔던 중·단거리의 전송에만 사용되지 않고 장거리 전송이 가능할 것이다. 또한, 우리나라의 경우에 시내 전화 가입자의 90% 이상이 전화국에서 3 km 이내에 상주하고 있기 때문에 향후 POF의 활용이 중요할 것으로 예상된다. 또한, 내열성의 측면을 같이 극복한다면 그 응용이 다목적으로 무한할 것이다.

참 고 문 헌

1. R. G. Brown and B. N. Derik, *Appl. Optics*, **1968**, 7, 1565.
2. 田中章, *Optronics*, **1994**, 116.
3. 北澤元孝, *Optronics*, **1994**, 107.
4. 田中章, *機能材料*, **1995**, 15, 5.
5. C. Emslie, *J. Mat. Sci.*, **1988**, 23, 2281.
6. Hewlett Packard Co, *Versatile Link*, Commercial Literature.
7. O. Krumpholz, K. Pressmar, and E. Schlosser, *Proc. 2nd Int. Conf. Plastic Optical Fiber and Its Applications*, **1993**, 125.
8. AMP Inc, *Connectors for POF and Application*, Commercial Literature.
9. GE Lighting, *Photonic Spectra*, **1990**, 11, 16.
10. F. Suzuki, *Proc SPIE*, **1991**, 1592, 150.
11. K. Hasegawa, M. Maraguchi, *Proc. 3rd Int. Conf. Plastic Optical Fiber and Its Applications*, **1994**, 32.
12. R. E. Steele and H. J. Schmitt, *Proc. SPIE*, **1987**, 840, 2.
13. Y. Koike, *Proc. 3rd Int. Conf. Plastic Optical Fiber and Its Applications*, **1994**, 16.
14. R. F. Service, *Science*, **1995**, 267, 1921.
15. T. Ishigure, E. Nihei, and Y. Koike, *Appl. Optics*, **1994**, 33, 4261.
16. T. Ishigure, E. Nihei, S. Yamazaki, K. Kobayashi, and Y. Koike, *Electron. Letts*, **1995**, 31, 465.
17. Y. Koike, T. Ishigure, and E. Nihei, *Journal of Lightwave Technology*, **1995**, 13, 1475.
18. T. Ishigure, A. Horibe, E. Nihei, and Y. Koike, *Journal of Lightwave Technology*, **1995**, 13, 1686.
19. T. Ishigure, E. Nihei, Y. Koike, C. E. Forbe, L. LaNieve, R. Straff, and H. A. Deckers, *IEEE Photonics Technology Letts*, **1995**, 17, 403.

20. 條原弘信, 機能材料, 1995, 15, 44.
21. P. Polishuk, Private Communication.
22. 山崎俊太郎, 小林健一, 村上哲也, 鳥養政博, *Optronics*, 1995, 159.
23. T. Kaino, K. Jinguji, and S. Nara, *Appl. Phys. Letts.*, 1983, 42, 567, 1983.
24. (a) Y. Koike, *POFIG '96 Feb 28, 1996*; (b) Y. Koike, 高分子 1995, 44, 388.
25. (a) Mitsubishi Rayon Co., *U. K. Patent 143,157, 1974*; (b) *Ibrd.*, 144,950, 1974.
26. Nippon Telegraph & Telephone, *U. K. Patent GB 2089352B* 1981.
27. *ATM Forum Document* 95-1469, Dec, 11, 1995.
28. R. E. Steele, Private Communication.
29. 田中章, *Fujitsu*, 1988, 39, 65.
30. 住友電氣工業, 特開昭 63-144307.
31. 日立製作所, 日立電線, 特開平 3-137604.
32. S. Taneichi, *Proc. 3rd Int. Conf. Plastic Optical Fiber and Its Applications*, 1994, 106.
33. S. Irie, *Proc. 3rd Int. Conf. Plastic Optical Fiber and Its Applications*, 1994, 88.
34. T. Ono, *Proc. 2nd Int. Conf. Plastic Optical Fiber and Its Applications*, 1993, 71.
35. J. F. Olma, *Proc. 5th Int. Conf. Plastic Optical Fiber and Its Applications*, 1995, 210.
36. (a) T. Nyu, M. Momona, S. Yamazaki, A. K. Dutta, and A. Suzuki, *OFC '96 Technical Digest*, 1996, 221; (b) 光新時代, 1995, 69, 16.
37. T. Kaino, M. Fujiki, and Y. Jinguji, *Rev. Electron. Commun. Lab.*, 1984, 32, 478.
38. S. Oikawa, M. Fujiki, and Y. Katayama, *Electron. Letts.*, 1984, 15, 829.
39. 戒能俊能, 高分子論文集, 1985, 42, 257.
40. S. Takahashi, K. Ichimura, *Electron. Letts.*, 1991, 27, 217.
41. Y. Koike, *Polymer*, 1991, 32, 1737.
42. S. D. Walker and R. J. S. Bates, *Proc. 2nd Int. Conf. Plastic Optical Fiber and Its Applications*, 1993, 8.
43. D. Khoe, *Proc. 3rd Int. Conf. Plastic Optical Fiber and Its Applications*, 1994, 12.
44. A. Tagaya, Y. Koike, E. Nihei, S. Teramoto, K. Fujii, T. Yamamoto, and K. Sasaki, *Appl. Optics*, 1995, 34, 988.