

근거리 고속 통신용 플라스틱 광섬유의 개발

신부건 · 김장주

광주과학기술원 신소재공학과

bluesea@geguri.kjist.ac.kr

1. 머리말

정보화 사회의 도래와 인터넷의 폭발적인 보급으로 우리 사회가 필요로 하는 정보통신 데이터의 양은 기하급수적으로 증가하고 있으며, 이미 동화상 이미지의 전송과 같은 대용량의 정보전송이 요구되고 있다. 2010년경에는 디지털 TV와 화상 전자상거래 등의 고 정보량 서비스가 일반화 될 것이며, 이러한 고 정보량 데이터통신은 각 가구 당 1Gbps이상의 데이터 통신속도를 요구할 것으로 예상된다. 이와 같은 고속 전송에는 지금까지 널리 사용되어온 구리선을 전송매체로 사용하는 통신 시스템을 이용할 수 없다. 구리선을 기초로 한 케이블들은 전자파 장애 등의 이유로 수십 Mbps 이상의 신호전송이 불가능하다. 이에 따라 초고속정보통신망 구축이 국가적인 사업으로 추진되고 있다. 초고속정보통신망이 일반화 되면 기간통신망 뿐만 아니라 각 사무실과 가정에까지 광섬유가 사용되게 될 것이다.

현재 상용화된 광섬유는 석영으로 만들어진 유리 광섬유로 광 투과도가 높고 열적 안정성과 내환경성이 뛰어나 장거리 통신에 널리 사용되고 있다. 하지만 유리광섬유는 가격이 비싸며 깨지기 쉽고 연결이 어렵기 때문에 굴곡이 많고, 많은 접속이 필요한 가정이나 건물에서는(access network 또는 fiber-in-the-home) 적합하지 않다.

이와 같은 구리선의 낮은 전송속도와 유리광섬유의 높은 생산 및 포설 비용의 단점을 효과적으로 극복할 수 있는 새로운 소재에 대한 연구가 끊임없이 되어왔으며 플라스틱 광섬유는 이와 같은 요구를 만족하는 새로운 통신매체로 각광 받고 있다. 이런 이유로 수백 m 이하의 커넥터가 많이 요구되는 단거리 통신시스템에 광학적으로 투명한 플라스틱을 이용하려는 연구가 많이 진행되어지고 있다.^{1,2)}

플라스틱 광섬유용 고분자는 유리광섬유를 만드는데 사용되는 고순도 광학용 석영 원가의 30% 정도 비용이면 생산이 가능하다. 또한 플라스틱 광섬유는 코어 직경이 62.5 μ m인 통신용 멀티모드 유리광섬유에 비하여 0.5mm에서 1.5mm 정도로 코어 직경이 커 쉽게 접속 할 수 있으므로 광 커넥터 등의 접

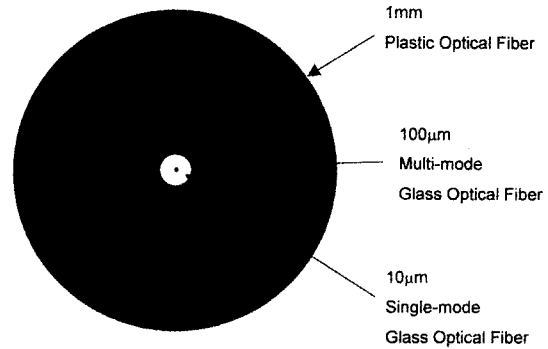


그림 1. 광섬유의 상대적인 크기 비교 1mm 플라스틱 광섬유, 100 μ m, 멀티모드 유리 광섬유 and 10 μ m, 단일모드 유리 광섬유.

속 부품들도 값싼 사출 성형품을 이용할 수 있다.³⁾ 그림 1에 10 μ m 단일모드 유리광섬유와 100 μ m 크기의 멀티모드 유리광섬유 그리고 1mm의 섬유 직경을 가지는 플라스틱 광섬유의 크기를 비교하였다. 플라스틱 광섬유는 유리 광섬유 접속에 소요되는 시간의 1/10이면 접속이 가능하기 때문에 케이블 시공에 관련되는 비용을 약 30% 절감할 수 있다. 또한 플라스틱 광섬유의 큰 코어 직경 때문에 커넥터 외에도 저렴한 광원이나 수광 소자를 사용할 수 있는 장점이 있다.⁴⁾

이 같은 장점들을 고려해보면 플라스틱 광섬유는 구리선의 느린 전송속도와 유리 광섬유의 비싼 제조 비용 및 접속 비용을 보완하고 구리선과 같이 포설 및 접속이 쉬워 양쪽의 장점을 모두 가진 형태라 할 수 있다. 이러한 장점 때문에 커넥터가 많은 단거리 통신망에는 플라스틱 광섬유를 사용하는 것이 유리하다.

현재 플라스틱 광섬유는 단거리 통신망 뿐만 아니라 CD 플레이어나 앰프와 같은 고품질 디지털 음향기기간의 데이터 통신에도 사용되고 있다. 일본에서는 이미 Electronic Industries Association of Japan(EIAJ)을 통하여 디지털 음향기기용 플라스틱 광섬유의 규격을 정한 상태이며, 마르세데츠 벤츠사에서 1998년부터 시판된 고급 차종에 7m의 길이에 12 Mbps의 전송속도를 가지는 음향기기 간 통신용 D2B™ POF 광 네트워크를 사용하고 있다. 독일의 경우 Serial Realtime Communi-

cation System(SERCOS) interface에서 2 Mbps의 POF를 이용한 장치간 연결을 규격화 하고있다.

앞으로 수 년 내에 플라스틱 광섬유를 이용한 디지털 오디오/비디오 네트워크 규격인 IEEE 1394를 따르는 장치들이 일반화 될 예정이며 IEEE 1394는 주로 캠코더와 디지털 TV, 컴퓨터, 스캐너, 프린터, 전화 등 가정 내에 쓰이는 장치간 연결에 POF를 규격화 하고 있다.[5]

2. 플라스틱 광섬유란 무엇인가?

유리광섬유와 마찬가지로 플라스틱 광섬유는 클래딩으로 둘러 쌓인 코어와 코어보다 굴절률이 약간 낮은 클래딩으로 구성된다. 광섬유는 일반적으로 단일모드 광섬유와 멀티모드 광섬유의 두 가지 형태로 나뉘어진다. 단일모드 광섬유는 코어의 직경이 약 $6\sim 10\mu\text{m}$ 정도로 매우 작다. 단일모드 광섬유를 통해 진행되는 빛은 광섬유의 광 축에 평행한 단 1개의 모드만이 도파되므로 모드간의 신호 왜곡이 없어 장거리 고속 전송이 가능하나 코어의 크기가 매우 작으므로 광 접속이 매우 어렵고 접속 손실이 매우 크다. 지금까지 단일모드 광섬유는 모두 유리 광섬유이며 고속 장거리 기간망 등에 널리 사용되고 있다.

플라스틱 광섬유는 전체 외경이 1mm 내외인 멀티모드 광섬유이며 코어부분의 굴절률 분포가 균일한 스텝 인덱스(SI형) 광섬유와 분포를 가지는 그라디드 인덱스(GI형) 광섬유로 나눌 수 있다. 그림 2에 SI형 멀티모드 광섬유와 GI형 멀티모드 광섬유에서 빛이 도파되는 것을 나타내었다. 코어부분의 굴절률이 균일한 SI형 광섬유에서 광섬유 내부의 빛은 코어와 클래딩의 계면에서의 전반사에 의하여 광섬유의 반대쪽 끝으로 도파된다. 광섬유 내부로 입사된 빛은 광섬유의 구조와 빛의 파장에 의해 결정되는 모드라고 불리는 서로 다른 광로를 따라

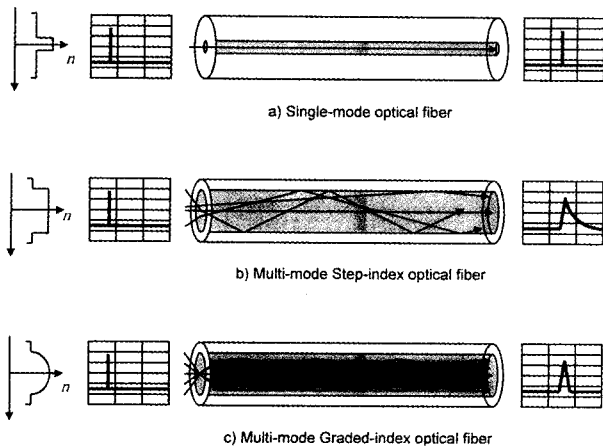


그림 2. 광섬유의 3가지 형태. a) 단일 모드 광섬유, b) 멀티 모드 SI형 광섬유, c) 멀티 모드 GI형 광섬유.

표 1. SI형 플라스틱 광섬유와 GI형 플라스틱 광섬유의 비교

	SI형 플라스틱 광섬유	GI형 플라스틱 광섬유
제조공정	연속공정	모재 인출
제조원가	싸다	비싸다
굴절률 분포	분포 없음($\alpha=\infty$)	$\alpha \approx 2$
전송속도	수백 Mbps	수 Gbps
사용 용도	조명, 장식, 데이터 통신	데이터 통신

진행한다. 이때 광로마다 길이가 다르므로 각 광로마다 광섬유를 통과하는 시간 차이가 발생된다. 이 시간차이에 의해 발생하는 모드 분산이 플라스틱 광섬유의 전송 대역폭을 결정하는 주요한 원인이 된다.

GI형 플라스틱 광섬유는 코어부분의 굴절률이 중심에서부터 바깥쪽으로 가면서 점차로 낮아지는 Gaussian 분포를 가지며 이 굴절률 분포에 의해 각 광로들의 시간차이가 줄어들어 SI-POF에 비하여 전송속도를 높일 수 있다.^[6] 그러므로 단거리 고속 전송용 플라스틱 광섬유는 이 GI형 플라스틱 광섬유가 사용될 것이 유력하다. 표 1에 SI형 플라스틱 광섬유와 GI형 광섬유의 장단점을 비교하였다.

3. 플라스틱 광섬유의 역사

플라스틱 광섬유의 발전사를 표 2에 나타내었다.^[7] 플라스틱 광섬유는 1964년 DuPont에서 처음으로 발표 되었으며, 이후 1978년에 DuPont의 광섬유에 관한 특허와 관련정보를 일본의 Mitsubishi Rayon에 기술 이전했다. 그 이후로 플라스틱 광섬유에 관련된 대부분의 연구가 주로 일본에서 이루어지게 되었다. 1978년부터 플라스틱 광섬유의 연구를 본격적으로 시작한 Mitsubishi Rayon은 이후 1983년 ESKA라는 상품명으로 PMMA를 코어물질로 사용한 SI형 플라스틱 광섬유를 상업화 하였다. 늘어가는 데이터 요구량은 SI형 플라스틱 광섬유의 전송속도 한계를 넘어 설 수 있는 새로운 형태의 광섬유를 필요로 했고, 1990년 Keio 대학의 Koike 교수는 PMMA 공중합체를 이용하여 3 Gbps/km의 전송속도를 가지는 GI형 플라스틱 광섬유를 개발하였다.^[8] 2년 후인 1992년 Koike 팀은 다시 100m 이상의 거리에서 2.5 Gbps의 전송속도를 가지는 GI-POF를 발표했다. 또한 PMMA 계열의 플라스틱 광섬유의 전송 거리 한계를 극복하기 위하여 많은 연구가 이루어졌으며, 현재 Asahi Glass에서는 Cytop이라는 완전한 불소계 고분자를 이용하여 850~1300nm 영역에서 50 dB/km 이하의 광 손실을 가지는 GI-POF를 개발, 상용화 하고 있다.^[9]

불소계 고분자가 사용되고는 있지만 현재까지 상업적으로

표 2. 플라스틱 광섬유의 발전

Organization	Core Material	Cladding Material	Class	Minimum Attenuation (dB/km)	Wavelength (nm)	Year	Comment
DuPont	PMMA	Fluoropolymer	SI	500	650	1968	
Tory	PS	PMMA	SI	1100	670	1972	
DuPont	PMMA-d8		SI	180	790	1977	
Mitsubishi Rayon	PMMA	Fluoropolymer	SI	300	650	1978	
NTT	PMMA	Fluoropolymer	SI	55	568	1982	
NTT	PS		SI	114	670	1982	
Keio University	P(MMA-VPAC)	PMMA	GI	1070	670	1982	
NTT	PMMA-d8		SI	20	650	1983	
Hitachi	Thermoset Resin	Fluoropolymer	SI	130	650	1987	
Keio University	P(MMA-VB)	PMMA	GI	130	650	1990	
Hoechst Celanese	PMMA	Fluoropolymer	SI	56	650	1991	High Bandwidth
Keio University	PMMA-d8	PMMA-d8	GI	800	688	1992	(2GHz-km)
Bridgeston	Silicon	Silicon	SI	50	650	1993	
Keio University	Perfluoropolymer		GI	40	1310	1995	For Near-IR
Keio University	Cytop		GI		1310	1996	For Near-IR
Fujitsu	Perfluoropolymer		GI		1300	1997	2.5 Gbps 200m
Eindh. Univ	Perfluoropolymer		GI		1310	1998	2.5 Gbps 550m
Lucent	Perfluoropolymer		GI		1300	1999	11 Gbps 100m

제조, 판매되고 있는 플라스틱 광섬유는 PMMA를 주 원료로 하는 멀티모드 SI-POF가 주종을 이룬다. 특히 Mitsubishi Rayon, Toray, Asahi Chemical 등의 일본 업체가 생산의 대부분을 차지하고 있으며 Boston Optical Fiber 등의 미국과 유럽의 업체들도 플라스틱 광섬유를 개발, 판매하고 있다.

또한 플라스틱 광섬유는 정보 통신용 수동 광도와 뿐만 아니라 광증폭기^[10-13]나 비선형 플라스틱 광섬유^[14], 광 커플러^[15-17] 등의 용도로도 많이 연구되고 있다.

4. 플라스틱 광섬유의 제작 방법

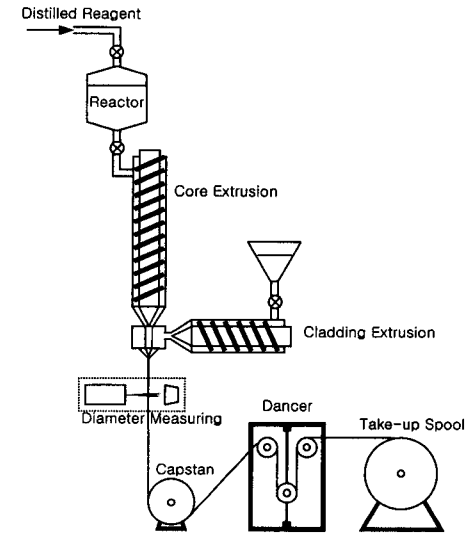
SI형 플라스틱 광섬유는 연속 압출법(continuous extrusion)이나 회분 압출법(batch extrusion) 등의 방법으로 제작된다. GI형 플라스틱 광섬유는 모재를 연신하여 만드는 방법이 주로 이용된다. 그림 3에 각각의 형태에 따른 일반적인 광섬유 제작 장치를 간단히 나타내었다.

연속압출법은 개시제와 연쇄이동제 그리고 단량체의 공급, 단량체 혼합물의 중합, 광섬유로 연신하는 모든 공정이 동시에 일어난다. 모든 공정이 동시에 일어나므로 빠르고 경제적이거나 반응기 내에서 충분한 중합도를 얻지 못하면 연신이 불가능한 단점이 있다. 회분 압출법은 단량체와 개시제 연쇄이동제를 반

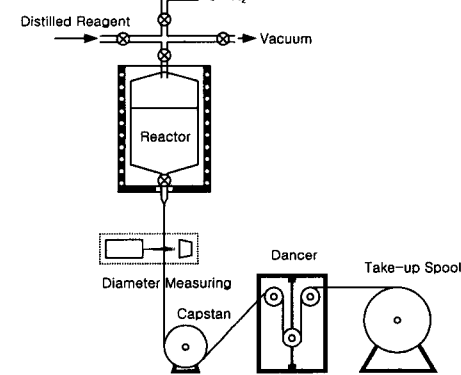
응기에 넣고 먼저 중합시키고, 중합이 완전히 끝나면 반응기에 연결된 다이를 통하여 플라스틱 광섬유를 제조하는 방법이다.

GI형 플라스틱 광섬유는 코어 부분이 굴절률 분포를 가져야 하므로, SI형 플라스틱 광섬유처럼 연속공정을 통하여 제조하기가 힘들다. GI형 플라스틱 광섬유는 주로 굴절률 분포를 가지고 있는 모재에 열을 이용한 연신공정을 통하여 플라스틱 광섬유의 형태로 가공한다. 현재까지 굴절률 분포를 가지는 플라스틱 광섬유의 모재 개발에 대한 많은 연구가 이루어졌다.

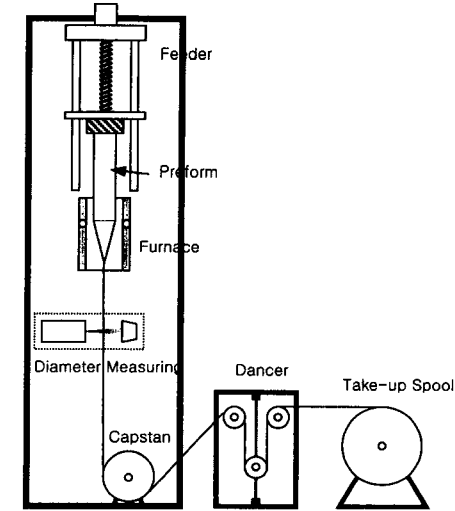
1980년대 초 일본의 Y. Koike 교수가 공중합체를 이용하여 GI형의 플라스틱 렌즈를 만드는 방법을 최초로 고안한 이후 많은 연구자들이 GI형의 플라스틱 렌즈와 광섬유를 만드는 방법을 연구해왔다. GI형의 플라스틱 광섬유 제조 기술은 다층막 광섬유 형성법, 확산법, 화학증착법, 계면 겔 중합법, 비중과 굴절률의 차이를 이용하는 방법들이 개발되었고 논문과 특허의 형태로 발표되었다. Koike 교수가 1980년대 초에 발표한 GI형 플라스틱 광섬유 제작 방법은 고분자의 표면이 단량체에 의해 젖혀 되면 이 겔 상 내에서 단량체의 중합속도가 빠른 현상을 이용하여 공중합체의 조성을 코어의 바깥부분부터 점차로 중심으로 조절하는 방법이다. 그러나 이 계면 겔 공중합법(interfacial gel copolymerization)은 공중합체를 이루는 두 가지 이상의 단량체가 서로 공중합 반응 속도비의 차가 커야 하



a) 연속 압출을 통한 SI형 광섬유 제작 장치



b) 회분 압출을 통한 SI형 광섬유 제작 장치



c) 모재 인출을 통한 GI형 광섬유 제작 장치

그림 3. 광섬유 제작장치.

며^[18-21], 생성된 공중합체의 광산란 현상이 커 실제 플라스틱 광섬유 제조에 이용되기는 힘들었다. 이후 Koike 팀은 반응성이 없는 굴절률 조절제를 이용하여 공중합체의 조성비가 아니라 굴절률 조절제의 농도를 조절하여 굴절률 분포를 가지는 광

표 4. GI 형 플라스틱 광섬유 모재 제조방법

제조 방법	연구 그룹	참고문헌
Extrusion method	J.P.Hsu National Taiwan Univ.	40
Interfacial-gel copolymerization	Y.Koike Keio Univ.	18-21
Interfacial-gel polymerization	Y.Koike Keio Univ.	22-24
Coextrusion method	C.W.Park Univ. of Florida	35
Centrifugal field method	C.Bastiaansen Eindhoven	36
Out diffusing method	Y.Koike Keio Univ.	37
Swollen-gel polymerization	H.T.Liu National Cheng Kung Univ.	38
Centrifugal diffusing polymerization	Fu-Ren Tsai National Cheng Kung Univ.	39

섬유를 만드는 방법을 고안했다.^[22-24] 이 방법 역시 고분자 겔 내에서 단량체의 중합속도가 빠른 현상을 이용하나 이 경우 사용되는 굴절률 조절제는 단량체보다 큰 분자를 사용하여 고분자 겔 상 속으로 침투하는 속도를 느리게 하여 코어 중심방향으로 굴절률 조절제의 농도가 높아지도록 한 방법이다. 이 방법이 현재 플라스틱 광섬유를 제작하는데 가장 많이 알려진 방법으로 계면 겔 중합(interfacial gel polymerization)이라고 불린다. 계면 겔 중합은 단순한 공정으로 쉽게 GI형 플라스틱 광섬유를 제작 할 수 있는 장점이 있으나 벌크 중합 시 발생하는 반응열 조절이 어려워 플라스틱 광섬유 모재 내부에 미세공의 발생을 막기 힘들며, 20mm 이상의 대형 플라스틱 광섬유 모재를 생산하는데 어려움이 있다.

이와 같은 단점을 극복하기 위하여 많은 연구자들이 GI형 플라스틱 광섬유를 효율적으로 제조할 수 있는 새로운 방법들을 모색하고 있으며, 몇 가지 다른 제작 법들이 발표되었다. 표 4에 GI형 플라스틱 광섬유의 모재를 제작하는 방법들을 요약하였다.

GI형 플라스틱 광섬유를 제작할 때는 일반적으로 모재를 제조하여 이를 다시 연신하는 과정을 거치는데, 이렇게 여러 과정을 거치는 방법은 제조 경비를 높이는 이유가 된다. 제조 경비를 낮추기 위해서 연속 공축 압출을 통하여 GI형 플라스틱 광섬유를 제작하는 방법도 있다. 이 방법은 증발 가능한 굴절률 조절제를 사용하여 압출 시 플라스틱 광섬유내부에 포함되어 있는 굴절률 조절제의 증발에 의해 굴절률 분포를 조절하는 방법이다. 이 때 굴절률 조절제는 광섬유의 표면에서 증발하

로 광섬유의 바깥부분보다 중앙의 굴절률 조절제의 농도가 높아지게 된다. GI형 플라스틱 광섬유의 또 다른 제작 방법으로는 원심력을 사용하는 방법이 종종 이용되는데, 원심력 확산법이나 원심력 침전법 등이 연구되어지고 있다.[36, 39] 원심력 확산법은 계면 겔 중합법과 유사하나 계면 겔 중합의 미리 클래딩 층을 만들어야 하는 단점을 보완한 형태이다. 원심력 침전법은 일반적으로 단량체보다 중합체의 밀도가 높은 점을 이용하여 중합된 고분자가 원심력으로 인해 고속 회전하는 튜브의 벽면으로 모이게 하는 방법이다.

이 외에도 외부확산법, 광중합법, 2회 중합법, 팽윤 겔 중합법 등의 독창적인 방법들이 많이 연구되고 있다.[37-40]

5. 플라스틱 광섬유의 광손실

광섬유에서 광손실의 주요한 원인은 표 5와 같이 고유 손실(intrinsic loss)과 외인적 손실(extrinsic loss)로 나누어 고려할 수 있다. 고유 손실은 주로 원자간 진동흡수와 전자전이에 의한 흡수 그리고 Rayleigh 산란에 의하여 발생한다. 그리고 외인적 손실은 금속 불순물이나 유기물 불순물의 혼입으로 흡수가 발생하는 경우, 혹은 먼지입자가 혼입되었거나 미세 공동이 발생한 경우, 플라스틱 광섬유의 코어직경의 불균일 등으로 산란 손실이 발생할 수 있다.[25]

외인적 손실의 경우 원료물질 정제 순도의 확보, 제조 공정의 청정화로 극대화 할 수 있으나 고유 손실의 경우는 소재 자체의 고유 성질이므로 줄일 수 없다.

광섬유의 고유손실은 광 에너지의 흡수와 Rayleigh 산란에 의해 발생한다. 전자 전이에 의한 흡수는 주로 적외선 영역에서 일어나며, 원자간 진동흡수는 현재 유리광섬유의 통신 파장대인 자외선 영역에서 발생한다. 플라스틱 광섬유의 주 소재로 사용되고 있는 PMMA의 경우 그림 4의 a)와 같은 구조를 가지고 있으며 대부분의 전자 전이는 500nm 파장 영역에서

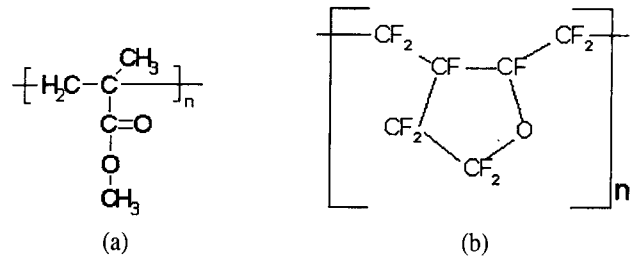


그림 4. PMMA와 Cytop의 분자 구조.

C=O 결합의 $n \rightarrow \pi^*$ 전이에 의해 발생하고 1dB/km 정도의 손실을 나타낸다. 방향족을 포함하는 polystyrene에서의 전자 전이에 의한 흡수는 phenyl 그룹의 비편재화된 전자의 전이 흡수에 의해 500nm 파장 영역에서 100dB/km, 600nm 파장 영역에서는 7dB/km 정도의 흡수를 나타낸다. PMMA계 플라스틱 광섬유에서 대부분의 손실은 C-H 결합의 적외선 영역의 원자간 진동흡수의 조화진동 흡수에 의해서 발생한다. C-H 결합의 조화진동 흡수는 C-H 결합의 진동흡수에 의해 발생하며 장파장쪽에서 더 강하게 나타난다. 원자간 결합의 진동 흡수는 결합을 이루고 있는 원자들의 질량과 결합의 세기에 의해 결정된다. 그러므로 수소보다 무거운 중수소나 불소를 도입하여 적외선 영역의 진동 흡수를 효과적으로 줄일 수 있다. 일본의 NTT는 수소가 완전히 중수소로 치환된 d-PMMA를 이용하여 흡수 스펙트럼이 장파장쪽으로 이동하는 현상을 확인하고 파장 650nm에서 20dB/km의 손실을 가지는 광섬유를 제조하는 데 성공했다. 또한 일본의 Asahi Glass에서는 그림 4의 b)와 같은 구조를 가지는 상품명인 Cytop인 완전한 불소계 고분자를 이용하여 가시광 영역과 근적외선 영역에서 약 50dB/km의 손실을 가지는 광섬유를 제조하였다. [21]

고유 손실은 입사된 빛의 흡수 뿐만 아니라 Rayleigh 산란에 의해서도 발생한다. Rayleigh 산란은 고분자 사슬 밀도의 불균일한 분포와 같은 물질 내부의 불균일성에 의해 발생한다. 실제 광 산란은 이러한 굴절률이 불균일한 영역의 물리적 크기가 광의 파장의 1/2보다 클 때만 발생하지만, Rayleigh 산란은 광 파장의 1/10 혹은 이보다 작을 때도 발생하여 광 산란을 일으키는 원인이 된다. 완벽한 비정질의 고순도 고분자라 해도 내부의 고분자 사슬의 불균일 성과 사슬 밀도의 변화에 의한 굴절률의 미세 불균일성을 완전히 제거하는 것은 불가능하며 Rayleigh 산란을 피할 수 없다.

외인적 요인에 의한 광 손실은 플라스틱 광섬유를 제조하는 과정에서 유입되는 불순물이나 광섬유 제조시의 공정에 따른 광섬유의 불완전성에 의해 발생한다. 전이금속이나 유기물에 의한 광섬유의 오염은 추가적인 광 흡수와 산란 손실을 일으키며 작은 먼지나 미세 공극 혹은 코어 직경의 불균일 혹은 코어

표 5. 플라스틱 광섬유의 손실 원인

고유 손실	
흡수	산란
원자간 진동 흡수	Rayleigh 산란
전자전이 흡수	
외인적 손실	
흡수	산란
전이금속의 혼입	먼지와 미세공
유기물의 혼입	코어 직경의 미세변화
	연선에 의한 복굴절
	코어와 클래딩 계면의 불완전

■ Spectra Attenuation

Transmission Loss spectrum of Datacom Grade ESKA

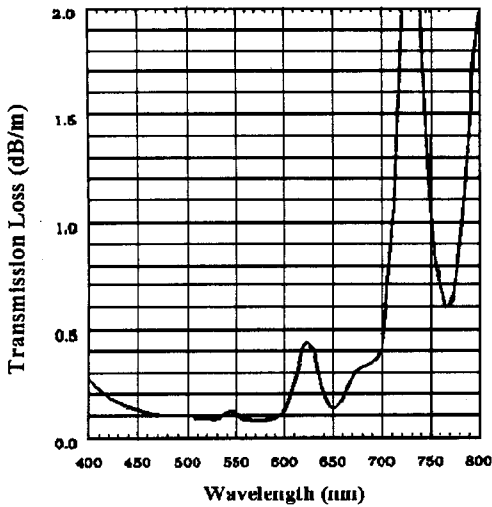


그림 5. PMMA의 광 손실.

내부의 복굴절 등도 산란 손실의 원인이 된다. 또한 광섬유의 제작과정에서 코어와 클래딩 계면의 오염이나 접착 문제에 의해서도 부가적인 산란손실이 일어난다. 이와 같은 외인적 손실 요소들은 원료물질의 정제과정과 광섬유의 제작 과정의 고도의 청정화와 광섬유 제조 공정의 연구 개발을 통하여 최소화할 수 있다.

상업적으로 가장 많이 사용되고 있는 플라스틱 광섬유 소재인 PMMA는 650nm 파장에서 이론적인 손실 한계치가 106dB/km로 약 100m 이내의 전송에는 무리가 없다.^[27] 그림 5는 PMMA의 광손실 스펙트럼을 나타낸다. PMMA에서 발생하는 광 손실의 주 원인은 C-H 결합의 원자 조화 진동 흡수에 의해 발생한다. PMMA의 전송 한계치보다 먼 거리의 전송을 가능하게 하기 위한 많은 연구들이 되어 왔으며, 손실의 주 원인인 C-H 결합의 조화 진동 흡수를 줄이기 위하여 수소를 중수소나 불소로 치환한 형태의 새로운 고분자들이 많이 합성되었다. 고분자 내에 수소보다 무거운 원자의 치환은 진동 흡수 에너지를 낮추어 광 흡수 손실을 낮추게 된다.

PMMA 내의 모든 수소를 중수소로 치환한 d-PMMA의 사용이나 일부 불소 치환된 아크릴계 단량체를 이용하여 플라스틱 광섬유 제조가 많이 시도 되었으며 최근에는 일본의 Asahi Glass에서 자체 개발한 Cytop이라는 상품명의 불소계 고분자를 사용하여 년 3000km의 생산능력으로 Lucina®라고 명명된 GI 형태의 플라스틱 광섬유를 생산하여 Mistubishi Rayon, Network System과 공동으로 판매하기 시작했다.

그림 6에 완전 불소치환된 고분자인 Cytop과 분자내에 C-H 결합이 존재하는 PMMA 그리고 유리광섬유의 소재인 실리카

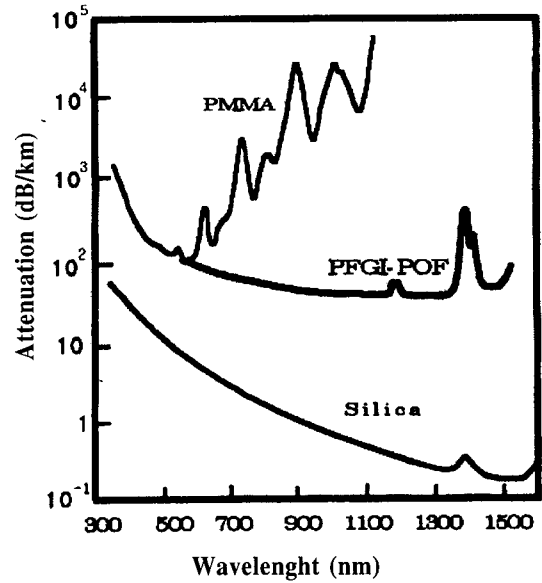


그림 6. 실리카, PMMA, Cytop의 손실 비교

의 광손실을 비교하였다. 완전 불소화된 고분자인 Cytop은 C-H 결합이 전혀 없으며 이론적인 광 손실은 1300nm 파장에서 31 dB/km로서 1 km의 전송이 가능할 것으로 보고되고 있다.

6. 플라스틱 광섬유의 전송 대역폭

1990년대 초반까지는 플라스틱 광섬유에 사용 가능한 레이저와 같은 광원이나 수광 소자에 대한 연구가 없었기 때문에 고속 전송 속도를 가지는 플라스틱 광섬유에 관한 연구가 그다지 활발하지 못했다. 그러나 1994년 Keio 대학의 Koike 교수 팀과 NEC가 공동으로 2.5Gbps의 고속 전송 능력을 가진 GI 형태의 플라스틱 광섬유를 보고하면서부터 고속 데이터 통신용 플라스틱 광섬유에 대한 관심이 커지기 시작했다. 또한 계속되는 불소계 고분자의 개발로 인한 PMMA 계통의 플라스틱 광섬유의 전송한계의 극복은 고속 통신용 플라스틱 광섬유의 개발에 전기를 마련해주었다. 최근에는 Lucent Technology에서 1.3 μ m 파장에서 100m를 11 Gbps의 속도로 전송 할 수 있는 불소계 고분자로 만들어진 플라스틱 광섬유를 보고하였다.

광섬유에서 광 신호 분산의 주 원인은 모드들의 광로차에 의해 생기는 모드 분산과 물질의 굴절률이 파장에 따라 다르기 때문에 발생하는 색 분산에 의해 발생한다.

플라스틱 광섬유에서는 코어부의 직경이 크고 큰 개구수를 가지기 때문에 도파 되는 모드의 수가 많아 모드 분산에 의한 광 분산이 지배적이다. 멀티모드 광섬유에서 모드 분산은 코어 부분의 굴절률 분포의 조절을 통하여 최소화 할 수 있다. [28,29] 많은 경우 이론적 계산의 편이를 위해서 코어 부분의

굴절률 분포는 일반적으로 지수 법칙으로 근사한다.^[30] 즉,

$$n(r) = n_1 \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{R} \right)^\alpha \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

여기서, n_1 과 n_2 는 각각 코어 중심과 클래딩에서의 굴절률이며 R 은 코어의 반경, Δ 은 굴절률 분포의 차이와 관계를 가진다. 굴절률 분포는 그림 7에서 볼 수 있듯이 지수항인 α 값에 따라 결정되며, 이 지수 함수로부터 Maxwell 방정식으로부터 유도된 파동함수를 풀 수 있다. 또 색 분산은 고분자의 굴절률의 파장 의존성을 표현하는 Sellmier 식을 이용하여 계산이 가능하며, 색 분산은 다음 식과 같이 표현 가능하다.

$$D_{mat} = - \left(\frac{\lambda \delta}{c} \right) \left(\frac{d^2 n}{d\lambda^2} \right) L$$

여기서 δ 는 광원의 root mean square spectral line width 이고 λ 는 사용 광의 파장이며, c 는 진공에서의 광속 그리고 $d^2 n/d\lambda^2$ 은 2차 분산, 그리고 L 은 광섬유의 길이를 의미한다.

광섬유의 전송속도와 굴절률 분포와의 관계는 모드 분산과 색 분산을 모두 고려하는 WKB법을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\tau = \frac{Lk}{c\beta} \left\{ \left[\int_0^a \frac{n(r)^2 (1 + D_1) - D_2}{R} dr \right] \left[\int_0^a \frac{dr}{R} \right] \right\}$$

여기서 τ 는 그룹지연, c 는 진공에서의 빛의 속도, L 은 광섬유의 길이 그리고 β 는 광섬유의 전송 상수이다.

또한

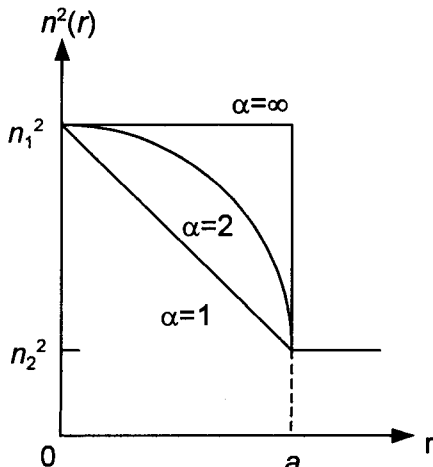


그림 7. α 값과 굴절률 분포의 관계.

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$D_1 = - \left(\frac{\lambda}{n_1} \frac{dn_1}{d\lambda} + \frac{\lambda}{2\Delta} \frac{d\Delta}{d\lambda} \right)$$

$$D_2 = - \frac{n_1^2 \lambda}{2\Delta} \frac{d\Delta}{d\lambda}$$

$$R = \sqrt{n(r)^2 k^2 - \beta^2 - \frac{\nu^2}{r^2}}$$

이며 ν 는 다음과 같은 eigenvalue식을 만족하는 모드 번호이다.

$$\int_0^a \left[n(r)^2 k^2 - \beta^2 - \frac{\nu^2}{r^2} \right]^{\frac{1}{2}} dr = \left(\mu + \frac{1}{2} \right) \pi$$

μ : radial mode number

1997년 미국의 Garito교수가 계면 결 중합법에 의해 만들어진 GI형 플라스틱 광섬유에서 굴절률 분포가 이상적인 분포를 가지지 않음에도 불구하고 이론치보다 높은 전송 대역폭을 가짐을 확인하고 이를 mode coupling 현상 때문에 발생한다고 발표하였다.^[31-33] 하지만 1999년 Koike 교수팀은 GI형 플라스틱 광섬유가 이론치보다 높은 전송 대역폭을 가지는 이유는 모드에 따라 손실이 다르기 때문이라고 주장하였다.^[34] 아직 이 현상에 대한 완벽한 해석은 끝나지 않았지만, 굴절률 분포에서부터 이론적으로 계산된 GI형 플라스틱 광섬유의 전송 대역폭보다 실제 실험에 의해 측정된 전송 대역폭이 큰 현상은 플라스틱 광섬유가 근거리 고속 정보통신망에 이용되는데 유리할 수 있다.

7. 맺음말

정보전달 매체로서의 플라스틱 광섬유는 빛을 사용하면서도 가격이 저렴한 면에서 유리광섬유와 구리케이블의 장점을 결합한 형태이며, 동시에 깨지기 쉽고 고가인 유리광섬유의 단점과 전자기파 장애로부터 자유롭지 못한 구리선의 단점을 제거한 형태이다. 또한 설치가 쉽고 가격이 저렴하기 때문에 자동차, 공장 자동화, 컴퓨터 interconnection, 그리고 정보통신망의 access network 등에 정보전달매체로서 활용되고 있으며 점차로 그 적용 범위가 넓어지고 있으며, 전체 광통신 시장의 90% 정도를 차지할 것으로 예상되는 최종 사용자 네트워크에 적합한 소재로 주목 받고 있다.

인터넷을 이용한 전자상거래, 데이터 웨어하우스에 의한 경영관리 등 대용량 데이터 전송의 필요성이 높은 것은 필지의 사실이다. 이 때문에 LAN 배선분야의 광섬유의 수요는 급성장하고 있으며, 일본의 플라스틱 광섬유 관련 기업들의 예측에 따르면 2002년에는 세계에서 1500억엔 정도의 시장이 전망되고 있다.

국내에서도 몇 개 기업이 광통신용 플라스틱 광섬유의 개발에 박차를 가하고 있으나 이미 플라스틱 광섬유는 일본이 시장을 주도하고 있다. 이와 같은 현실을 극복하기 위해서는 긴 거리를 높은 대역폭으로 전송할 수 있는 플라스틱 광섬유를 생산하는 획기적이고 독창적인 기술을 개발하여 계면 겔 중합과 같은 기존의 기술을 넘어선 세계적인 경쟁력을 갖추어야만 할 것이다.

참고문헌

- Mahayoshi Kamiya, Yuji Hamamatsu, Hiroaki Ikeda, Shigenobu Shinohara, and Hirofumi Yoshida "Temperature Data Transmission via Plastic Optical Fiber in Environmental Test Setup", Proceedings of ISIE'97, IEEE, pp. 972-977, 1997
- Masayoshi Kamiya and Hiroaki Ikeda "Simultaneous Transmission of Vibration Sensor Position Control Data and Measured Vibration Data in Opposite Directions Through Single Plastic Optical Fiber", IEEE, pp 82-86, 1996
- Jim Cirillo "Automotive Applications Overview Fiber Optics", Compilation of POF Presentations made at OFC-97, 1997
- James Cirillo "High Speed Plastic Networks(HSPN): A New Technology for Today's Applications", IEEE AES Systems Magazine, pp. 10-13, October, 1996
- Proceedings of POF World 2000, 2000.
- Christopher Emslie "Review, Polymer optical fibres", Chapman and Hall Ltd., pp. 2281-2293, 1988
- 이태형 "플라스틱 광섬유 기술 동향 및 응용", 제 3회 고분자기술 심포지움, pp. 169-188, 1999
- Yasuhiro Koike "High-bandwidth graded-index polymer optical fibre", Polymer, Vol. 32, No. 10, pp. 1737-1745, 1991
- US Patent No. US05080508
- Akihiro Tagaya, Yasuhiro Koike, Eisuke Nihei, Shigehiro Teramoto, Kazuhito Fujii, Tsuyoshi Yamamoto, and Keisuke Sasaki "Basic performance of an organic dye-doped polymer optical fiber amplifier", Applied Optics, Vol. 34, No. 6, pp 988-992, 1995
- Akihiro Yagaya, Shigehiro Teramoto, Tsuyoshi Yamamoto, Kazuhito Fujii, Eisuke Nihei, Yasuhiro Koike, and Keisuke Sasaki "Theoretical and Experimental Investigation of Rhodamine B-Doped Polymer Optical Fiber Amplifiers", IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 31, No. 12, pp. 2215-2220, 1995
- Gang Ding Peng, Pak L. Chu, Zhengjun Xiong, Trevor W. Whitbread, and Rod P. Chaplin "Dye-Doped Step-Index Polymer Optical Fiber for Broadband Optical Amplification", Journal of Lightwave Technology, Vol. 14, No. 10, pp 2215-2223, 1996
- C. Koeppen, S. Yamada, G. Jiang, and A. F. Garito "Rare-earth organic complexes for application in polymer optical fibers and waveguides", J. Opt. Soc. Am. B, Vol. 14, No. 1, pp 155-162
- D.W. Garvey, K. Zimmerman, P. Young, J. Tostenrude, J. S. Townsend, Z. Zhou, M. Lobel, M. Dayton, R. Wittorf, and M. G. Kuzyl, "Single-mode nonlinear-optical polymer fibers", J. Opt. Soc. Am. B, Vol. 13, No. 9, pp. 2017-2023, 1996
- Yao Li and Ting Wang "Distribution of Light Power and Optical Signals Using Embedded Mirrors Inside Polymer Optical Fibers", IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 8, No. 10, pp. 1352-1354, 1996
- Yao Li, Ting Wang, and K. Fasanella "4X16 Polymer Optical Array Couplers", IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 8, No. 12, pp. 1650-1652, 1996
- Yao Li, Ting Wang and Kenneth Fasanella "Cost-Effective Side-Coupling Polymer Fiber Optics for Optical Interconnections", Journal of Lightwave Technology, Vol. 16, No. 5, pp. 892-901, 1998
- Yasuji Ohtsuka and Yasuhiro Koike "Studies on the light-focusing plastic rod. 16: Mechanism of gradient-index formation in photocopolymerization of multiple monomer systems", Applied Optics, Vol. 23, No. 11, pp. 1774-1778, 1984
- Yasuhiro Koike, Hideyuki Hatanaka, and yasuji Ohtsuka "Studies on the light-focusing plastic rod. 17: Plastic GRIN rod lens prepared by photopolymerization of a ternary monomer system", Applied Optics, Vol. 23, No. 11, pp. 1779-1783, 1984
- Yasuji Ohtsuka and Yasuhiro Koike "Studies on the light-focusing plastic rod. 18: Control of refractive-index distribution of plastic radial gradient-index rod by photocopolymerization", Applied Optics, Vol. 24, No. 24, pp. 4316-4320, 1985
- Yasuhiro Koike, Eisuke Nihei, Norihisa Tanio, and Yasuji Ohtsuka "Graded-index plastic optical fiber composed of methyl methacrylate and vinyl phenylacetate copolymers", Applied Optics, Vol. 29, No. 18, pp. 2686-2691, 1990
- Yasuhiro Koike, Yoshitaka Takezawa, and Yasuji Ohtsuka "New interfacial-gel copolymerization technique for steric GRIN polymer optical waveguides and lens arrays", Applied Optics, Vol. 27, No. 3, pp. 486-491, 1988
- Takaaki Ishigure, Akihiro Horibe, Eisuke Nihei, and yasuhiro Koike "High-bandwidth, High-Numerical Aperture Graded-Index Polymer Optical Fiber", Journal of Lightwave Technology, Vol. 13, No. 8, pp. 1686-1691, 1995
- Yasuhiro Koike, Takaaki Ishigure, and Eisuke Nihei "High-Bandwidth Graded-Index Polymer Optical Fiber" Journal of Lightwave Technology, Vol. 13, No. 7, pp. 1475-1489, 1995
- Toshikuni Kaino "Plastic Optical Fiber", 1996
- H. Murofushi "Low loss perfluorinated POF" Papers presented at POF '96, the Fifth International Conference on Plastic Optical Fibers & Applications, Paris, pp. 17-23, 1996
- W. Li, G. D. Khoe, H.P.A. v.d. Boom, G. Yabre, H. de Waardt, Y. Koike, M. Naritomi and N. Yoshihara "Record 2.5 Gbit/s 550m

- GI-POF Transmission Experiments at 840 and 1310 nm Wavelength”, Papers presented at POF '99, the 8th International POF Conference, pp. 60-63, 1999
28. Takaaki Ishigure, Eisuke Nihei, Yasuhiro Koike, Charles E. Forbes, Leslie LaNieve, Rich Straff, and Hellmuth A. Dechkers “Large-Core, High-Bandwidth Polymer Optical Fiber for Near Infrared Use”, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 7, No. 4, pp. 403-405, 1995
 29. Takaaki Ishigure, Eisuke Nihei, and Yasuhiro Koike “Optimum refractive-index profile of the graded-index polymer optical fiber, toward gigabit data links”, Applied Optics, Vol. 35, No. 12, pp. 2048-2053, 1996
 30. Ajoy Ghatak and K. Thyagarajan “Introduction to Fiber Optics”, Cambridge University Press, 1998.
 31. R. F. Shi, C. Koeppen, G. Jiang, J. Wang, and A. F. Garito “Origin of high bandwidth performance of graded-index plastic optical fibers”, Appl. Phys. Lett., Vol. 71, No. 25, pp. 3625-3627, 1997
 32. G. Jiang, R. F. Shi, and A. F. Garito “Mode Coupling and Equilibrium Mode Distribution Condition in Plastic Optical Fibers”, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 9, No. 8, pp. 1128-1130, 1997
 33. A. F. Garito, J. Wang, R. Gao “Effects of Random Perturbations in Plastic Optical Fibers”, SCIENCE, Vol. 281, pp. 962-967, 1998
 34. Takaaki Ishigure, Mariko Kano, and Yasuhiro Koike “Propagating Mode Attenuation and Coupling Characteristics of Graded-Index POF”, Papers presented at POF '99, the 8th International POF Conference, pp. 106-109, 1999
 35. U.S. Patent Application Series No. 89 929 161, 1997
 36. Frank van Duijnhoven and Cees Bastiaansen, “Gradient Refractive Index Polymers Produced in a Centrifugal Field” Adv. Mater. Vol. 11, No. 7, pp. 567-570, 1999
 37. U.S. Patent 5 783 636
 38. Jui-Hsiang Liu, Hung-Tsai Liu, “Preparation of gradient refractive index rods using methyl methacrylate and benzyl salicylate”, Macromol. Chem. Phys. Vol. 198, pp. 3285-3292, 1997
 39. Jui-Hsiang Liu, Jiunn-Lang Chen, Hung-Yu Wang, Fu-Ren Tsai “Fabrication of a gradient refractive index (GRIN) plastic rod using the novel process of centrifugal diffusing polymerization”, Macromol. Chem. Phys. Vol. 201, No. 1, pp. 126-131, 2000
 40. Bo-Tau Liu, Wen-Chang Chen, Jyh-Ping Hsu, “Mathematical modeling of a co-extrusion process for preparing gradient-index polymer optical fibers”, Polymer, Vol. 40, pp. 1451-1457, 1999