일반총설

광통신용 불소계 고분자

서 동 학·정 우 영·김 종 규·유 영 만

1. 서 론

정보화시대를 이끌어가는 각종 멀티미디어 및 첨단산업의 비약적인 발달로 인해, 이의 기반이 되는 정보통신산업이 최근 더욱 더 부각되고 있다. 컴퓨터와 통신 및 인터넷 기술의 급속한 발전에 따라 사회가 요구하는 정보량은 폭발적으로 증가하고 있으며, 이러한 요구에 효과적으로 대처하기 위하여 최근 세계 각국에서는 자국의 국가 경쟁력 증대의 차원에서 초고속 정보 통신망의 구축을 핵심적인 국가 사업으로 지원하고 있다. AT&T에서는 매년 12% 이상의 전송속도 증가를 예측하고 있으며, 국내에서도 2015년에 이르면 현재의 통신량보다 100배 이상의 통신량 증가를 예측하고 있다. 요구되어지는 초고속 통신 network의 형성과, 기하급수적으로 증가하는 통신량을 처리하기 위한 수단으로 차세대 정보전송 매개체로서의 광섬유에 대한 관심 역시 이를 바탕으로 고조되고 있다. 1966년 발표된 실리카 유리를 시작으로 틀을 마련하게 된 유리 광섬유(glass optical fiber, GOF)는, 넓은 광

서동학
1982 한양대학교 공업화학과 (학사)
1984 한국과학기술원 화학과 (석사)
1991 Rensselaer Polytechnic Institute (박사)
1992 Rensselaer Polytechnic Institute (Research Fellow)
1992 – 1997 한국화학연구소 선임연구원
1997 – 현재 한양대학교 응용화학공학부 교수

정우영
2000 한양대학교 응용화학공학부 (학사)
2000 – 현재 한양대학교 화학공학과 석사과정

김종규
2001 한양대학교 응용화학공학부 (학사)
2001 – 현재 한양대학교 화학공학과 석사과정

유영만
2001 한양대학교 응용화학공학부 (학사)
2001 – 현재 한양대학교 화학공학과 석사과정

Fluorinated Polymer in Optical Communication

한양대학교 공과대학 응용화학공학부(Dong Hack Suh, Woo Young Chung, Jong Kyu Kim, and Young Man Yoo, Division of Chemical Technology, Hanyang University, Seoul 133 - 791, Korea)

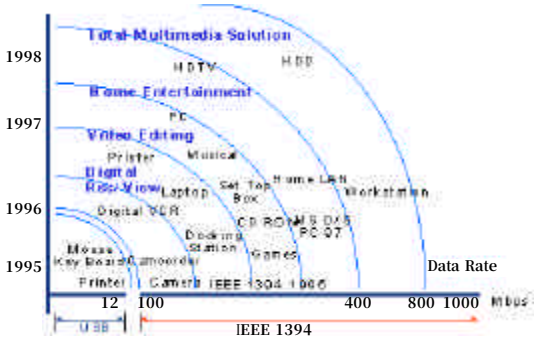


그림 1. Multimedia 산업성장에 따른 정보 처리 사용량의 증가 추세.

대역폭, 저감쇠율이라는 큰 장점으로 인해 인간의 머리카락 정도의 굵기에 수백 Tera Bit급의 신호를 처리할 수 있고, 이러한 정보 처리 속도는 일반적인 구리선의 약 수십만 배 이상의 처리 능력을 가지고 있다. 보다 더 짧은 시간을 요구하는 초고속 통신에서 광섬유의 도입은 기존 구리선에 의한 전송량의 한계를 초월하게 되어 더욱 정보화시대의 급속한 발전을 이루게 하고 있다.

세계적으로 진행되고 있는 광섬유 network를 가정 및 office까지 직접 연결하여 고속화하려는 계획(fiber to the home, FTTH)에 발맞추어, 유리 광섬유의 도입은 기간망에 있어서 통신의 bot-tle-neck을 다소간 해소시킨 상태이다. 지금까지 적용된 주된 정보 통신망 매개체로서의 유리광섬유는 기존 구리선에 비해 전송량이 많고 전송속도도 빠른 장점이 있으나, 상대되는 단점으로는 외부 충격에 쉽게 절손이 일어나며, 코어(core)의 직경이 작아 통신기기와의 연결이 용이하지 않고 또한 이를 위해 고가의 연결부품을 사용해야 하므로 local area network를 구성하는 데에는 아직까지 많은 문제점을 가지고 있다. 우리나라와 같이 아파트 중심의 주거형태에 유리 광섬유 network를 적용하거나, 근거리 광통신망 시스템 설치시 좁은 구간에서의 office LAN 및 network 분야에서의 유리 광섬유의 적용은 더욱 더 문제점들이 지적되고 있다. 유리 광섬유가 가지는 위와 같은 문제점으로 인해 새로운 소재에 대한 연구가 끊임없이 되어왔으며 이와 같은 요구를 만족하는 정보전달 매체로서 점차 플라스틱 광섬유(plastic optical fiber, POF)가 부각되어지고 있는 현실이다.[1-5]

2. 플라스틱 광섬유(POF)

지금까지 형성되어 있는 통신 network의 대부분을 차지하는 전자를 매체로 한 구리선은, 부수적으로 전자파 발생이 유도되며 상대적인 큰 손실로 인해 정보 전달량이 적다는 단점을 가지고 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 도입된 석영계 유리 광섬유는 광투과도가 높고 열적 안정성과 내환경성이 뛰어나 장거리 통신용으로 널리 사용되고 있다. 그러나 석영계 유리 광섬유는 물질 자체가 가지는 저굴곡성으로 인해 외부충격에 깨지기 쉽고, 원하는 형태로 형성 가공이 어려우며, 또한 코어의 내경이 6-8 μm로 numerical aperture가 적기 때문에 각 기기들 사이의 연결이 쉽지 않아 많은 접속이 필요한 가정이나 사무실의 network 형성 등에는 적합하지 않다. 이러한 문제점의 해결방안으로 등장한 것이 단거리 통신용 플라스틱 광섬유이다. 정보전달 매체로서의 POF, 깨지기 쉽고 고

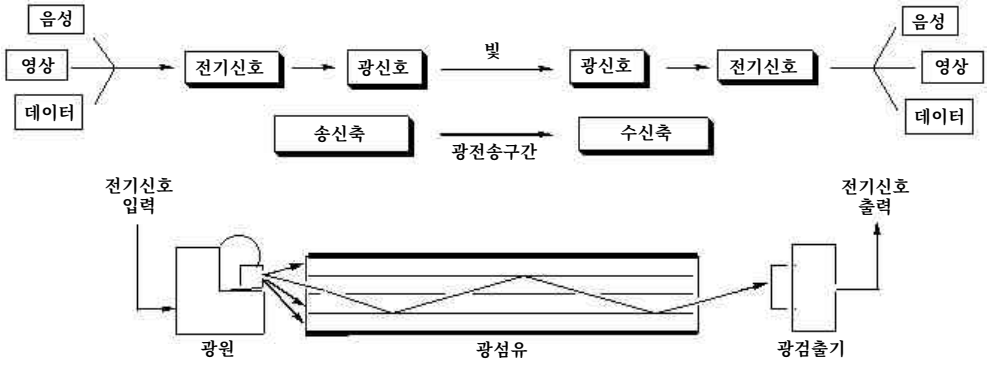


그림 2. Multimedia 매체에서의 광섬유의 정보전달 방법.

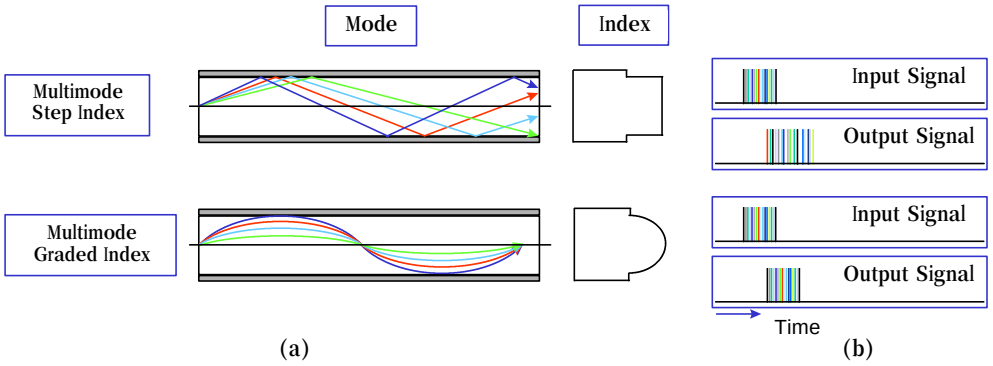


그림 3. SI 플라스틱 광섬유와 GI 플라스틱 광섬유의 정보전달방법.

표 1. 유리 광섬유와 플라스틱 광섬유의 일반적 특성 비교

특성	유리 광섬유	플라스틱 광섬유
전송손실	낮다(>0.2 dB/km)	높다(>20 dB/km)
대역특성	10 MHz·km	10 GHz·km
기계적 물성	가공, 제작 어려움	가공, 제작 쉬움
원재료 가격	높음	낮음
시스템 가격	높음	낮음

가인 유리 광섬유의 단점을 보완함과 동시에, 낮은 전송속도와 전자기파 장애로부터 자유롭지 못한 구리선의 단점을 제거한 형태이다. 플라스틱 광섬유는 고정밀도를 가지는 고가격의 광 커넥터가 필요한 유리 광섬유에 비하여 1000 μm의 대구경 코어를 가져 연결시 접속효율이 높으며, 발광 소자에 저가의 LED 등을 사용할 수 있는 장점을 가지게 된다.[6,7] 또한 물질 자체와 주변 부품들의 저가격화가 가능해지는 점과 뛰어난 bending특성으로 인해 좁은 공간에서의 설치 및 외부충격에도 강한 장점 역시 가지게 된다.

플라스틱 광섬유는 크게 Step Index(SI형) 광섬유와 Graded Index(GI형) 광섬유로 나눌 수 있다. 코어부의 높은 굴절률과 클래드부의 낮은 굴절률을 가지는 SI 플라스틱 광섬유는 굴절률의 불연속 계면 상에서 빛이 전반사하면서 진행하기 때문에 저속, 저용량의 단거리 전송, 조명 및 image guide 등에 응용되고 있으며, 코어부의 굴절률이 중심 축에서 외부방향으로 Gaussian 분포를 가지면서 낮아지는 구조를 가지는 GI 플라스틱 광섬유는 빛이 높은 굴절률 내에서 진행하는 원리에 따라 광축에 모든 입사광의 모드들이 교차하면서 진행하기 때문에 전송대역폭이 넓고 대용량 고속 전송에 적합하다. 두 가지 전송방식 중에 GI 플라스틱 광섬유가 널리 사용되고 연구되어지는 이유로는 전송 Mode에 따라 다른 전파속도의 차이와 함께, 동일한 광원을 이용해 같은 정보량을 전송하더라도 GI 플라스틱 광섬유는 modal dispersion이 없어 입력신호를 전송후 광섬유를 거친 출력부에서도 입력신호 그대로 출력해내는 특성을 가지게 되어 근거리 통신용으로는 GI 플라스틱 광섬유가 중점적으로 연구되고 있다.[8,9]

3. 플라스틱 광섬유의 개발현황

1963년도에 polystyrene을 이용하여 개발된 플라스틱 광섬유를 시작으로 1968년 미국 DuPont 사에서 poly(methyl methacrylate)(PMMA)를 기본으로 하는 플라스틱 광섬유가 개발되었다.[10] 1972년 최초로 상용화된 이후 30여년 동안 저전송손실과 고내열성의 개선을 중심으로 한 플라스틱 광섬유에 대한 연구와 양산 기술의 발전이 Mitsubishi Rayon, Toray, Asahi Chemical 등의 일본 기업들에 의하여 주도적으로 진척되어 왔다.[11] 현재 상용화된 플라스틱 광섬유의 80% 이상이 일본기업에 의해 이루어지고 있으며, 그 주된 구조는 90% 이상이 PMMA계 플라스틱 광섬유로 추정되어지고 있다.

개발 초기 단계에는 저전송손실을 갖는 고분자 소재의 발굴에 한계가 있어 통신용으로는 사용이 불가능하였으며, 단지 조명, 장식, display 또는 내시경의 image guide 용도에 주로 사용되었다. 그 이후 가시광 발광소자를 이용한 통신용 플라스틱 광섬유가 개발되었으나, 저전송손실 파장(580 nm 및

650 nm)에 적합한 송수신모듈의 전송속도의 상한이 수 Mbps로 제한되어 저속 통신용도로만 제한이 되어왔다. 그러나 Hewlett Packard사에서 125 Mbps의 플라스틱 광섬유 링크를 발표하여 가시광 발광소자에 의한 수백 Mbps급의 전송이 가능해지면서 플라스틱 광섬유의 용도가 고속 단거리 데이터 통신용 매체로서 주목받게 되었다. 또한, 재료 자체의 광신호 흡수에 의한 전송손실 및 늘어나는 데이터 요구량을 처리하기 위해, 기존의 PMMA를 기본으로 한 SI 플라스틱 광섬유의 한계를 넘어설 수 있는 새로운 형태의 플라스틱 광섬유 역시 단계적으로 개발이 이루어졌다. 1977년 DuPont사 및 1983년 일본 NTT사에서 중수소 치환 PMMA의 개발을 시작으로[12] 1991년 Keio대학의 Koike교수 연구팀은 PMMA 공중합체를 이용하여 3 Gbps/km의 전송속도를 갖는 GI 플라스틱 광섬유를 발표하였고[13] 그 이후 GI 플라스틱 광섬유의 새로운 제조법과 광 전송 대역폭을 현격하게 향상시켰다.[14-18] 또한 이러한 Koike교수 연구팀의 경사굴절률 부여 기술과 Asahi Glass의 전불소화 투명 고분자가 결합하여, 2000년에는 전불소화 고분자 코어 플라스틱 광섬유 (Lucina^{TM})가 개발되어 상용화까지 이르게 되었다.

구리선과 유리 광섬유의 단점들을 보완하여 개발된 저전송손실을 가지며 다양한 파장에서 전송능력이 우수한 플라스틱 광섬유는 다가올 고속 멀티미디어 사회의 조기실현을 이끌고 있다.[19] 국내에서는 석영계 유리 광섬유 및 이와 관련된 광통신 소자 등의 연구가 활발히 진행되고 있으나, 저전송손실을 갖는 GI 플라스틱 광섬유의 합성 및 제조기술은 아직 기초 수준에 머물러 있다. 표 2는 플라스틱 광섬유의 주요 개발 현황을 연도별로 요약하였다.

표 2. POF의 주요 개발 현황

Organization	Core	Cladding	Class	Attenuation (dB/km)	Wavelength	Year
DuPont	PMMA	Fluoropolymer	SI	500	650	1968
Toray	PS	PMMA	SI	1100	670	1972
DuPont	PMMA - d8		SI	180	790	1977
Mitsubishi Rayon	PMMA	Fluoropolymer	SI 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
Mitsubishi Rayon	PMMA	Fluoropolymer	SI	110	570	1983
Asahi Chemical	PMMA	Fluoropolymer	SI	80	570	1985
Fujitsu	PC	Polyolefin	SI	450	770	1986
NTT	P(5F3DSt)	Fluoropolymer	SI	178	850	1986
Hitachi	Thermoset resins	Fluoropolymer	SI	600	650	1987
Keio University	P(MMA - VB)	PMMA	GI	130	650	1990
Hoechst Celanese	PMMA	Fluoropolymer	SI	130	650	1991
Keio University	PMMA - d8	PMMA - d8	GI	56	688	1992
Keio University	Cytop		GI	40	1310	1996
Keio University	Cytop		GI	8	1310	1999
Lucent	Cytop		GI		1310	2000

P(MMA - VPAc) : Copolymer of MMA & Vinyl Phenyl Acetate.
P(5F3DSt) : Pentafluorotrideuterostylene Polymer.
P(MMA - VB) : Copolymer of MMA & Vinyl Benzoate.

4. 플라스틱 광섬유의 요구 물성

4.1 플라스틱 광섬유의 손실조건

플라스틱 광섬유는 고분자가 갖는 구조내의 원자나 원자단이 광을 흡수하는 성질에 의한 광손실이 크므로 전송손실이 유리 광섬유에 비해 매우 크다. 플라스틱 광섬유에서 광손실의 주요한 원인은 크게 내적손실과 외적손실로 대표된다.

표 3에서 기술한 바와 같이 외적손실은 불순물이나 구조의 결함에 의한 손실 및 제조공정 상에서

표 3. 광섬유에서 광손실의 주요한 원인

외적 손실	흡수 손실	- 전이금속 불순물 - 유기불순물 - 수분	
	산란 손실	불순물 (먼지,기포)	섬유 구조의 불안정성 - 코어/클래딩 계면 부정 - 코어직경의 진원성 변동 - 배향 굴절률
내적 손실	흡수 손실	- 자외전자전이흡수 C = O (n → π*) & (π → π*) PMMA : Loss < 1 dB/km at 500 nm PS : Loss < 10 dB/km at 500 nm Loss < 7 dB/km at 600 nm - 적외진동흡수 C - H bond (Harmonic Overtone) PMMA : Loss < 70 dB/km at 570 nm PMMA - d8 : Loss < 20 dB/km at 650 nm Loss < 160 dB/km at 750 nm C - H : 2000 dB/km C - D : 80 dB/km C - F : 5 10 dB/km	
	산란 손실	- 밀도, 농도, 요동에 의한 Rayleigh 산란	

발생한 결함에 의한 산란손실 등이 해당되며, 이는 정제기술이나 인출기술 등에 의하여 최소화할 수 있다. 플라스틱 광섬유의 주된 내적손실은 재료에 따른 전송손실로, 전자전이 흡수 손실과 적외선 진동손실로 크게 분류된다. 일반적으로 고분자는 적외선 영역에서 분자 구조 내의 진동에 의한 고유의 흡수영역을 갖고 있고 자외선 영역에서는 전자전이에 의한 고유의 흡수영역을 갖고 있다. 이러한 흡수영역들의 영향은 가시영역 대에서 harmonic overtone으로 나타나며 플라스틱 광섬유의 전송손실의 중요한 요인이 된다.[20]

플라스틱 광섬유의 고분자 구조에서 전자전이 흡수에 의한 손실은 이중결합이 관여하는 것으로 carbon-carbon 이중결합(C=C)의 $\pi \rightarrow \pi^*$ 전이와 carbon-oxygen 이중결합(C=O)의 $n \rightarrow \pi^*$ 전이에 따른 흡수이다. PMMA의 경우 C=O 결합에 의한 전자 전이 흡수손실은 500 nm의 파장 대에서 1 dB/km, 600 nm의 파장 대에서 7 dB/km 정도를 나타낸다. 현재 광통신용으로 사용되고 있는 파장은 근적외선 영역으로 전자 전이에 의한 흡수손실은 다른 손실과 비교하여 무시될 수 있을 정도로 작다.

또한 C-H 결합에 의한 적외진동 흡수손실은 대부분의 고분자가 갖고 있는 특징이다. 고분자의 C-H 결합에 의한 적외선 영역의 흡수손실은 C-H 결합의 진동세기에 의존한다. 식 (1)은 일반적인 화학결합의 진동수를 나타낸 것이다.

$$\nu_f = 1/2\pi (K/\mu)^{1/2} \qquad (1)$$

K: Restoring force constant,

μ : Reduced mass = $M_C M_H / (M_C + M_H)$

위 식(1)에서 본 바와 같이 환산 질량을 증가시키면 화학결합의 진동수가 감소함을 알 수 있다.[12] 이러한 C-H 결합의 harmonic overtone에서 기인한 흡수손실 문제를 해결하기 위하여 C-H 결합을 C-D 또는 C-F 등의 무거운 원소로 대체하면, C-H 결합의 적외선 영역의 흡수가 장파장쪽으로 이동하게 되는데, 이를 이용해 그에 대한 전송손실을 줄이는 연구가 활발히 진행되어져 오고 있다. 플라스틱 광섬유의 고분자 구조에서 광 손실에 관한 손실계수와 광투과도의 관계식 (2) 및 광손실에 따른 광투과도를 표 4에 나타내었다.

표 4. 광섬유에서 광손실의 따른 광투과도

Loss (dB/km)	0.1	1	3	10	20	40
Transparency(%)	98	79	50	10	1	0.01

$$a(\text{손실계수}) = -\frac{1}{L} 10 \log_{10} \frac{P(L)}{P(0)} \qquad (2)$$

$\frac{P(L)}{P(0)}$: 전력전송비(P)

L : 광섬유의 길이

표 5. Comparison of Overtone C-H, C-D, C-F

	C-H		C-D		C-F	
	Wavelength	Absorption	Wavelength	Absorption	Wavelength	Absorption
v1	3390	1	4484	1	8000	1
v2	1729	7.7x10-2	2276	6.0 x 10-2	4016	1.6x10-2
v3	1176	6.8x10-3	1541	4.1 x 10-3	2688	2.9x10-4
v4	901	7.2x10-4	1174	3.3 x 10-4	2024	6.3x10-6
v5	736	9.1x10-5	954	3.2 x 10-5	1626	1.6x10-7
v6	627	1.4x10-5			1361	4.7x10-9
v7	549	2.3x10-6			1171	1.6x10-10
v8	494	4.6x10-7			1029	5.9x10-12

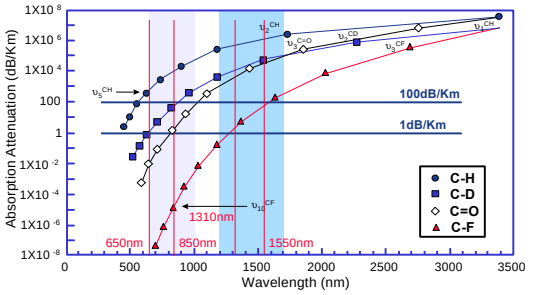


그림 4. C-H, C-D 및 C-F 결합에 대한 적외진동 흡수도 및 흡수영역.

표 5와 그림 4는 각각 C-H, C-D 및 C-F 결합의 overtone wavelength에 따른 absoption ratio 및 absoption attenuation을 도표화한 것이다. 미국의 DuPont사와 일본의 NTT사에서 수소가 완전히 중수소로 치환된 PMMA-d_8 을 이용하여 각각 750 nm영역에서 180 dB/km와 650 nm 영역에서 20 dB/km의 전송손실을 보고하였다. 그 후부터 C-F 결합을 도입함으로 얻어지는 저전송손실 가능성에 대한 결과가 알려지면서 불소화 수지를 사용하여 플라스틱 광섬유의 전송손실을 최소

화하는 개발 방향이 정립되었다.

4.2 플라스틱 광섬유의 내열조건

일반적으로 고분자는 유리전이온도 근방에서 분자운동이 활발해지며, 이로 인한 빛의 산란에 의해서 플라스틱 광섬유의 경우 전송손실이 증가되게 된다. 광전자 산업에 고분자를 적용하기 위해서는 multimedia 산업에서 필수불가결한 integrated circuit과 multichip module을 제작하는데 필요한 200 ℃ 이상의 soldering 온도에서 안정한 물성을 가져야하는 조건이 전제된다. 또한 이들을 연결하는 전송매체 역시 상당히 높은 온도에서의 열적 안정성이 요구되어진다. 기존 1세대의 PMMA 계열의 플라스틱 광섬유 재료는 유리전이온도가 100 ℃ 이하였다. 이는 플라스틱 광섬유의 주요 응용 분야인 자동차의 엔진 compartment와 고속 데이터 통신에서 요구되는 유리전이온도에 못 미치게 되어, 보다 고내열성의 재료가 요구되었고 이에 대한 보완의 노력으로 제 2세대인 폴리카보네이트가 등장하였다.[21] 하지만 폴리카보네이트는 중합 후에 필연적으로 발생하는 불순물을 제거해야 하고, PMMA와 같이 중합부터 광섬유 인출까지 밀폐된 연속공정이 힘들다는 단점을 가진다. 또한 구조자체가 가지는 특성으로 인해 전송손실이 PMMA 보다 높은 경향을 보인다. 고분자의 유리전이온도를 요구물성 이상으로 높이며, 이와 동시에 낮은 전송손실을 가지는 구조가 되도록, 많은 연구들이 이와 같은 고분자를 합성하려는 방향으로 진행되어왔다. 이로부터 연구되어지고 있는 하나의 방법이 고분자 주쇄에 고리구조를 도입하는 것이다. 이렇듯 많은 분자구조적 제약속에서도 합성이 이루어져 보고된 대표적인 예로는 DuPont사의 Teflon® AF와 Asahi Glass의 Cytop®이라는 고리구조를 갖는 전 불소계 고분자가 있다. Teflon® AF는 단량체의 공중합 비율에 따라 원하는 유리전이온도를 조절할 수 있으며, Cytop®의 경우 유리전이온도는 100 ℃ 근방으로 보고되고 있다.[22] 그림 5는 Teflon® AF의 dioxole 조성비에 따른 유리전이온도 변화를 나타내고 있다.

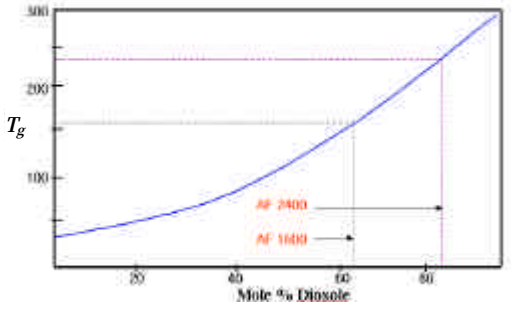


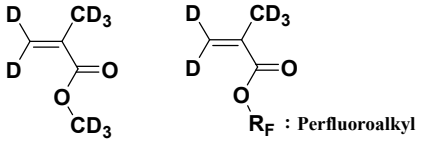
그림 5. Mol % Dioxole vs. T_g for Teflon® AF.

5. 불소계 플라스틱 광섬유

일본 Keio대학의 Koike교수 연구팀, 미국의 Boston대학 연구팀, 독일의 BAM 연구소 등은 자국의 정부와 기업으로부터 연구자금을 지원 받아 플라스틱 광섬유 관련 측정기술 및 표준화된 평가기술을 개발하여 여러 대기업 및 중소기업에 제공하고 있다. 주된 연구의 방향은 불소 원자를 도입함으로써 전송손실을 낮추며, 분자구조 내에 고리구조를 도입함으로써 내열성을 증대시키고자 하는 것이다. 전송손실을 최소화하여 유리 광섬유가 가지는 낮은 손실값에 최대한 가깝도록 하며, 제작 및 사용시의 장기간 열적 안정성을 유지시키기 위해 높은 유리전이온도를 가져야 한다는 것을 커다란 축으로 하여 플라스틱 광섬유의 요구되는 손실조건과 내열성

표 6. Comparison of Physical Properties for Fluoropolymer

Physical Properties	PTFE	PFA	PMMA	Teflon®AF 1600	Cytop®	Remarks
Morphology	Crystalline	Crystalline	Amorphous	Amorphous	Amorphous	-
T_g (℃)	(130)	(75)	105 - 120	160	108	DSC
T_m (℃)	327	310	Iso 160 Syn 200	360 (Thermal stability)	Not Observed	DSC
Refractive Index	1.35	1.35	1.49	1.29 - 1.31	1.34	Abbe's Refractometer
Transmittance (%)	Opaque	Opaque	93	>95	>95	IR to UV
Water Absorptivity (%)	< 0.01	< 0.01	0.3	< 0.01	< 0.01	60 ℃ in water
Dielectric Constant	-	-	-	1.89 - 1.93	2.1	-



d-MMA d-FMA

Core Polymer	Propagation Loss (dB/km)			
	680nm	830nm	310nm	1550nm
PMMA - d_8	110	180	730	1350
PMMA	380	390	3100	8300

그림 6. Deuterated/fluorinated PMMA & propagation loss of GI multimode fibers.

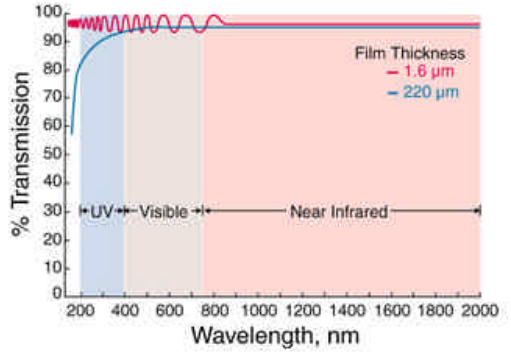


그림 7. 가시광선 및 적외선 영역에서 Teflon® AF의 광투과도.

및 여러 조건들을 만족시키는 고분자들이 제시되어 왔다. 대표적으로 PMMA, Teflon® AF, Cytop® 등이 개발되어 있다. 표 6은 대표적인 불소계 고분자들의 physical properties를 나타낸 것이다.

5.1 불소계 플라스틱 광섬유 I : 아크릴계

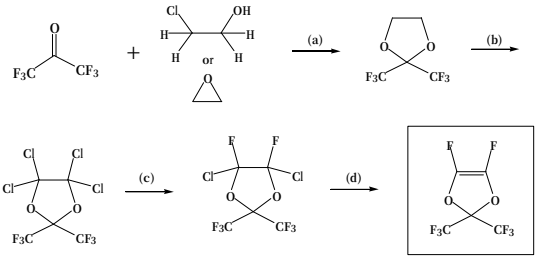
1968년 DuPont사의 PMMA를 기본으로 하는 플라스틱 광섬유의 개발을 시작으로 1972년 최초로 상용화된 이후, 80년대 후반부터 Mitsubishi Rayon사, 3M 및 프랑스의 연구그룹에서는 Methacrylate계 고분자에 불소 함유 치환기를 갖는 고분자를 플라스틱 광섬유에 이용한 연구가 있어 왔다.[23,24] 일본에서의 아크릴계 GI 플라스틱 광섬유의 개발은 Keio대학을 중심으로 1982년 이후에 보다 활성화되기 시작하였고, 현재까지 근거리 광대역 통신이 가능한 PMMA계 GI 플라스틱 광섬유의 표준화 및 응용개발이 활발히 진행되고 있다.

그림 6은 중수소화/불소화 PMMA와 각 파장대별 전송손실을 나타내고 있다.[25]

5.2 불소계 플라스틱 광섬유 II : Teflon®AF

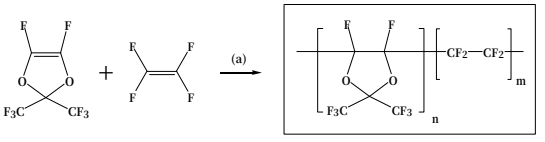
1937년 Roy Plunkett이 Teflon®을 발견한 이후 수많은 불소화 고분자가 상품화 되었다. 그 중, DuPont사에서 개발된 무정형 고분자 Teflon® AF는 tetrafluoroethylene(TFE)과 2, 2-bis-trifluoromethyl-4, 5-difluoro-1, 3-dioxle(PDD)의 공중합체로 구성되어 있으며, 조성비에 따라 AF-1600(64%)와 AF-2400(83%)으로 나누어 지며 각각 유리전이온도가 160 ℃와 240 ℃ 이다.

그림 7은 가시광선 및 적외선 영역에서 Teflon® AF의 광투과도를 나타내고 있다. Teflon® AF는 전 불소계 고리구조 공중합체로 광투과성 및 내열성이 우수하고, 불소계 용매에 용해도가 좋은 장점



(a) K_2CO_3 (b) Cl_2, hv (c) sbF_3 (d) Mg, I_2

그림 8-1. Teflon® AF 단량체 합성방법.



(a) Perfluoropropionyl peroxide, in Freon 113

그림 8-2. Teflon® AF 중합법.

을 가지고 있다. 그림 8은 Teflon® AF의 합성방법을 도식화한 그림이다.[26-33]

5.3 불소계 플라스틱 광섬유 III : Cytop®

일본 Asahi Glass사를 중심으로한 전불소계 무정형 고분자에 관한 연구 또한 주목할만한 결과를 내보이고 있다. 고리구조를 갖는 전 불소계 고분자인 Cytop®은 내열성이 우수하고 광투과도가 상당히 높아 많은 각광을 받고있다. 현재 Cytop®은 일본의 Keio대학과 미국 LUCENT사의 Bell연구소 등에서 modification에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그림 9는 가시광선 영역에서 Cytop®의 광

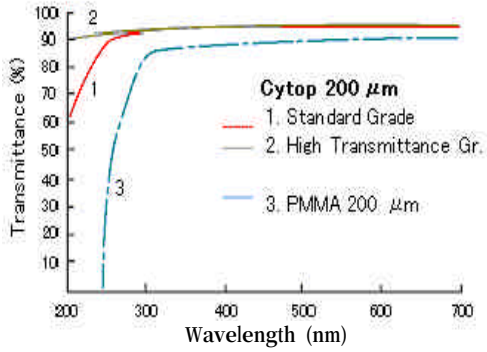


그림 9. 가시광선 영역에서 Cytop®의 광투과도.

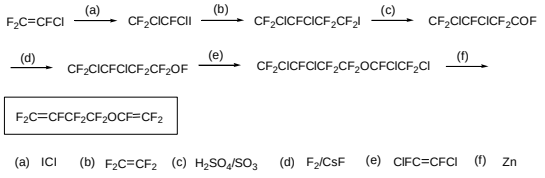


그림 10-1. Cytop® 단량체 합성방법 1.

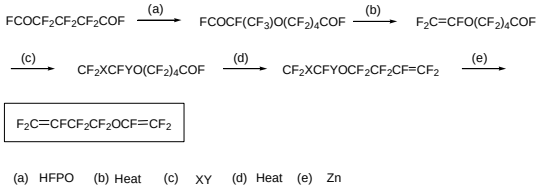


그림 10-2. Cytop® 단량체 합성방법 2.

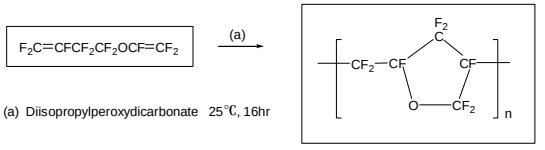


그림 10-3. Cytop® 단량체 중합방법 3.

투과도를 나타내고 있다.

Koike교수 연구팀과 일본의 Asahi Glass에서는 전불소화 플라스틱 광섬유인 Cytop®을 이용하여 Lucina™라는 상품명의 플라스틱 광섬유를 상용화하였는데, 가시광 영역과 근적외선 영역에서 약 50 dB/km 정도의 전송손실이 보고되고 있다. Attenuation 80 dB/km, bandwidth 3 Gbps/100m 수준의 우수한 광학특성을 가지는 전불소계 GI 플라스틱 광섬유인 Lucina™는 다양한 파장에서 전송능력이 매우 우수하고 내습성 역시 우수한 장점을 가진다. 하지만 장기간 사용시 굴절률 경사조절을 위하여 사용된 dopant의 diffusion이 일어나 광섬유의 굴절률 경사가 변형이 일어나 전송능력의 저하를 가져올 수 있는 단점 및 열적특성을 저하시킬 수 있는 문제점을 가지고 있다. 그림 10은 Cytop®의 합성방법을 도식화한 것이다.[34-36]

위에서 서술한 Teflon® AF 및 Cytop®은 최근 ^{19}F NMR을 통해 고분자내에서의 불소의 위치를 파악함으로써, 고리형구조가 반복단위에 존재하여 강한 입체장애 효과를 유발하여 각 사슬간의 일렬배열을 막아 무정형 특성을 나타냄이 확인되었다.[36,37]

6. 결 론

플라스틱 광섬유의 개발연구는 multimedia 분야의 여러 가지 통신소자를 비롯하여, 기간망에서 부터 각각의 home과 office에 이르는 초고속 인터넷 network 형성, 실시간 Gb 전송의 통신 화상 회의 등 차세대 정보통신분야의 기술발전 및 국내산업의 활성화에 획기적으로 기여할 것으로 예상되어 진다. 급속한 속도로 발전을 계속하고 있는 multimedia 관련산업 기술과 함께 현재 데이터 통신 산업은 3.5개월마다 데이터 사용량 및 인프라 구축이 두배로 증가되는 경향과, 매년 시장규모 역시 급격한 속도로 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이중 플라스틱 광섬유는 구부러지는 특성과 같은 고분자 특유의 기계적 특성이 잘 부각되는 통신기기와 협소한 내부의 자동차, 비행기 분야를 바탕으로 2008년 경에는 약 59억불 정도의 시장이 예측되고 있다.

플라스틱 광섬유에 대한 연구는 internet network의 세계적 형성과, 실시간 데이터 전송량의 대용량화 및 일반가전기기와 정보통신이 결합된 통합 multimedia 사회의 형성에 기반이 되는 광통신망을 형성시키는 역할을 수행함으로써 국가 기술경쟁력 확보에 크게 기여할 것으로 예상된다. 일본은 정부와 기업으로부터 주도가 된 플라스틱 광섬유 컨소시엄으로부터 이미 상당수준의 결과를 보여주고 있고, 미국 역시 DAPRA를 중심으로 수행된 고속 플라스틱 네트워크(HSPN : high speed plastic network) project를 기반으로 하여 7백만불 규모의 PAVNET(plastic advanced VCSEL

network) project가 진행되고 있다. 우리나라 역시 앞으로 저가격성, 저전송손실, 고내열성, 경사굴절률 조절 및 제조/가공용이 등의 특성을 갖는 불소계 고리구조 고분자 소재 개발 및 GI 플라스틱 광섬유 제조 기술의 발달이 시급할 것으로 보인다.

참 고 문 헌

1. T. Ishigure, E. Nihei, and Y. Koike, *Appl. Optics*, 33, 4261 (1994).
2. T. Ishigure, E. Nihei, S. Yamazaki, K. Kobayashi, and Y. Koike, *Electron. Letts*, 31, 465. (1995).
3. Y. Koike, T. Ishigure, and E. Nihei, *Journal of Lightwave Technology*, 13, 1475 (1995).
4. T. Ishigure, A. Horibe, E. Nihei, and Y. Koike, *Journal of Lightwave Technology*, 13, 1686 (1995).
5. T. Ishigure, E. Nihei, Y. Koike, C. E. Forbe, L. LaNieve, R. Straff, and H. A. Deckers, *IEEE Photonics Technology Letts*, l7, 403 (1995).
6. C. Emslie, *J. Mat. Sci.*, 23, 2281 (1988).
7. O. Krumpholz, K. Pressmar, and E. Schlosser, *Proc. 2nd Int. Conf. Plastic Optical Fiber and Its Applications*, 125 (1993).
8. 北澤元孝, *Optronics*, 107 (1994).
9. 田中章, 機能材料, 15, 5 (1995).
10. R. G. Brown and B. N. Derik, *Appl. Optics*, 7, 1565 (1968).
11. 田中章, *Optronics*, 116 (1994).
12. T. Kaino, K. Jinguji, and S. Nara, *Appl. Phys. Letts*, 42, 567 (1983).
13. Y. Koike, *Polymer*, 32, 1737, (1991).
14. T. Ishigure, E. Nihei, and Y. Koike, *Appl. Optics*, 33, 4261 (1994).
15. T. Ishigure, E. Nihei, S. Yamazaki, K. Kobayashi, and Y. Koike, *Electron. Letts*, 31, 465 (1995).
16. T. Ishigure, E. Nihei, and Y. Koike, *Journal of Lightwave Technology*, 13, 1475 (1995).
17. T. Ishigure, E. Nihei, A. Horibe, and Y. Koike, *Journal of Lightwave Technology*, 13, 1686 (1995).
18. T. Ishigure, E. Nihei, Y. Koike, C. E. Forbe, L. Lanieve, R. Straff, and H. A. Deckers, *IEEE Photonics Technology Letts*, 17, 403 (1995).
19. US Patent No. US05080508.
20. T. Kaino, "Plastic Optical Fiber", 1996.
21. 田中章, *fujitsu*, 39, 65 (1998).
22. G. Maier, *Polym. Sci.*, 26, 3 (2001).
22. B. Boutevin, A. Rousseau, and D. Bosc, *J. Polym. Sci.*, 30, 1279 (1992).
23. US Patent No. US6018008.
24. R. Toshimura, M. Hikita, S. Tomaru, and S. Imamura, *J. Lightwave. Tech.*, 16, 1030 (1998).
25. US Patent No. US2925424.
26. WO9103472.
27. European Patent No. EP80187.
28. US Patent No. US3865845.
29. US Patent No. US4393227.
30. US Patent No. US4409393.
31. US Patent No. US4908461.
32. US Patent No. US3978030.
33. 日本國特許 JP2 - 311436.
34. 日本國特許 JP2 - 311438.
35. European Patent No. EP303298.
36. G. Legeau, *Eur. Polym. J.*, 34, 1457 (1998).
37. S. Ando, R. K. Harris, J. Hischinger, S. A. Reinsberg, and U. Scheler, *Macromolecules*, 34, 66 (2001).