

# 내열 POF 재료와 응용

진 문 영 · 박 기 홍 · 정 훈 기

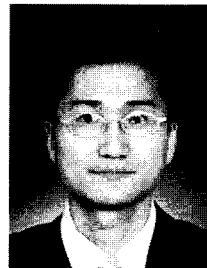
## 1. 서 론

전자제어를 근간으로 하는 정보통신망은 crosstalk, 다중화, 해상력, 정보처리 용량 등에서 조만간 한계를 드러내게 될 것이기 때문에, 2007년 후에는 이미 적용되고 있는 광섬유를 이용한 광통신 또는 광통신과 연계된 무선통신에 의해 거의 모든 정보교환이 이루어 질 것으로 예상되고 있다.<sup>1,2</sup>

광섬유 (Optical Fiber)는 이제까지 근, 원거리 통신 케이블망의 주류를 차지하던 전자를 대체로 한 구리선 cable에 의한 통신기술과 비교할 경우 1) EMI 전자파 발생 및 영향을 받지 않으며, 2) Core 재료비가 저렴하고 3) 광을 정보전달 매체로 사용하기 때문에 정보 전달량이 많다는 장점이 있다. 일반적으로 광섬유라고 알려진 유리광섬유 (GOF; Glass Optical Fiber)는 매우 우수한 광학적 특성,

특히 1,300 nm와 1,550 nm 영역에서의 우수한 특성을 지니고 있기 때문에 장거리 통신망과 기간망에 주로 사용되고 있지만, core의 내경이 6~8  $\mu\text{m}$ 이기 때문에 분지 접속이 용이하지 못하고, 재료의 특성상 꺾임에 약하여 큰 굴곡반경을 요구하기 때문에 포설, 접속, 보수비용이 많이 드는 단점이 있다.

반면, 플라스틱 광섬유 (POF; Plastic Optical



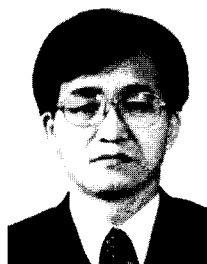
박기홍

1985 한양대학교 섬유공학과 (학사)  
 1987 한양대학교 섬유공학과 (석사)  
 1990 한국과학기술연구원 교분자 연구부 연구원  
 1994 Tokyo Inst. of Tech. 유기재료 공학과 (박사)  
 1998~ Kent State Univ. 화학과  
 1999 방문연구원  
 1996~ 한국과학기술연구원 재료연구부 선임연구원



진문영

1980 한양대학교 공업화학과 (학사)  
 1982 한국과학기술원 화학과 (석사)  
 1991 Univ. of North Carolina 화학과 (박사)  
 1982~ 한국화학연구원 화학소재연구부 현재 책임연구원



정훈기

1977 한양대학교 화학공학과 (공학사)  
 1987 한국과학기술원 화학공학과 (공학석사)  
 1978~ (주)코오롱 기술연구소 선임부장 현재

### Heat Resistant POF and Its Application

한국화학연구원 화학소재연구부 (Moon Young Jin, Advanced Materials Division, Korea Research Institute of Chemical Technology, P.O. Box 107, Yusong, Taejeon 305-600, Korea)

한국과학기술연구원 재료연구부 (Kihong Park, Electronic Materials and Devices Research Center, KIST, P.O. Box 131, Cheongryang, Seoul 130-650, Korea)

(주)코오롱 기술연구소 (Hoon Ki Chung, R&D Center, Kolon Industries, Inc., 212, Gongdan-Dong, Kumi-City 730-030, Korea)

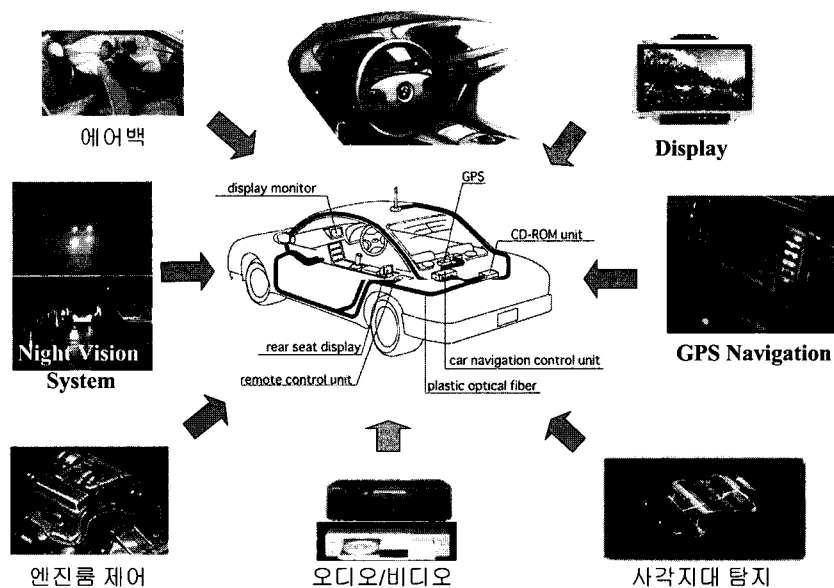


그림 1. 자동차에 내장되는 장비와 POF System.

Fiber)의 장점으로는 플라스틱의 뛰어난 bending 특성 때문에 좁은 공간내의 설치가 가능하고 유연하기 때문에 외부 충격에도 안전하다는 점과, 1,000  $\mu\text{m}$ 의 대구경 코어를 가지고 있어 광섬유 연결 시 접속 효율이 높으므로 고정밀도를 지닌 고가격의 광커넥터가 불필요할 뿐 아니라, 주위 부품과의 정밀 접속도 불필요하기 때문에 발광 소자에 저가의 LED (Light Emitting Diode) 또는 VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser)를 사용할 수 있는 등, 주변 부품 및 운영비용의 저가화가 가능하다. 따라서 가입자망인 가정, 사무실 등의 근거리 통신망을 중심으로 한 사용의 확대가 기대되고 있다.<sup>1</sup>

광통신을 이용할 경우에는 전자파 발생이 없으며 EMI에 대한 영향도 전혀 받지 않는다는 장점 때문에 전자파 문제로 인한 오작동의 경우 인체에 치명적인 위험이 발생할 수 있는 자동차 내부의 audio/video communication, navigation 시스템운용 및 각종차량 제어 신호전송, 선박 내 및 엔진과 통제실 통신신호 전송, 항공기내의 각 A/V 정보 신호 전달 등이 필요한 장소에서의 통신 배선을 자유롭게 할 수 있다는 점에서 특히 관심이 높다. 특히 최근의 IT분야의 발전에 동반하여 움직이는 차량내에서의 정보의 통신과 관련된 업무가 증가되고 있고, 그림 1에 나타난 것과 같은 차량 내에 탑재된 각종 안전장치, 오디오/비디오 등 다양한 장비들의

운영 및 제어가 필요하다. 이와 같이 telematic devices (12 Mbps), infotainment (100 Mbps) 등과 같은 신조어로 지칭되는 새로운 정보통신 산업 영역이 이미 창출되어 있으며, 자동차 주변에서 일어나는 상황을 실시간으로 운전자에게 전달하는 video based driving assistance (600 Mbps)의 장비 또한 자동차 회사를 중심으로 본격적인 적용을 검토하고 있다.<sup>3,4</sup> 이러한 고용량의 정보를 각각 운전석의 중앙 통제시스템과 ‘전자파 장애가 없는 방법’이 서로 연결되어 있어야 하기 때문에 차량내부에서의 POF 사용량증가는 기하급수적으로 증가될 것으로 예상되고 있다. 미국 최대의 자동차 부품회사인 Delphi Packard Electric System에 의하면 자동차 1대 당 30개 이상의 POF 링크가 요구되며 이를 전체 자동차 생산량의 20%에 대한 사용량으로 환산하면 10억개의 광커넥터가 사용될 것으로 예측되며, 100만 km의 POF 및 각각 2,000만개 이상의 분기기 등 링크에 들어가는 부품이 필요할 것으로 예측하였다.<sup>1</sup>

## 2. 내열 POF의 필요성

표 1에 산업용에 사용될 광섬유가 겪어야 할 환경인자를 나타내었으며, 표 2에 자동차내의 환경을

표 1. Typical Industrial Requirements of POF

Stress Parameter	Maximum Intensity/Substance
Temperature	-20 °C ~ +70 °C
Cyclic Bending	104 cycles (±90°) bend radius 40 mm 105 cycles (±90°) bend radius 100 mm
Compressive Load	200 N/cm (short-term) 30 N/cm (long-term)
Tension	60 N (short-term) 5 N (long-term)
Chemicals	Solvents Hydraulic oil, Lubricants Cutting fluid

표 2. Typical Automotive Stress Intensities and Requirements of POF

Stress Parameter	Interior	Dashboard	Underhood
Temperature	-40 °C 84 °C	-40 °C 113 °C	-40 °C > 130 °C
Humidity	80% RH (+66 °C)	98%RH (+38 °C)	-
Mechanical	Vibration, Shock (driving and collision, etc), Rough repair procedure		
Chemicals	Water, Cleaning solution or Chemicals (Oil, Grease, Gasoline)		
Interference	Electro-Magnetic Interference, Radio-Frequency Interference		
Maintenance	Installation by unskilled worker, Narrow installation space, Very low Cost		
Reliability	Most Important, Failure is not acceptable in any situation.		
Data Communication Rate	Telematic devices: 12 Mbps Infotainment: 100 Mbps Video based driving assistance: 600 Mbps		

나타내었다.<sup>4</sup> 두 표를 비교하면 알 수 있는 바와 같이 자동차와 같은 운송수단 내에 사용되어질 광통신 소재는 자동차의 운전 중 또는 수리과정에서 발생하는 진동 및 충격에 견딜 수 있어야 하며, 좁은 공간 내에서 설치/보수가 가능할 정도의 굴곡특성이 우수하여야 함을 알 수 있다. 또한, 일본 자동차기술회 (JASO)의 규격에 의하면 120 °C의 고온 방치 시험을 만족하여야 하는데, 이는 자동차 내부의 온도가 여름날의 경우 84 °C까지 상승하며 대시보드 (113 °C)나 엔진룸 (150 °C)의 온도는 이보다도 더 높기 때문이다. 따라서 내열온도가 80 °C 정도인 PMMA ( $T_g$ : 105 °C) 및 polystyrene ( $T_g$ : 100 °C) 등과 같은 일반적인 고분자는 내열 POF의 core재료로 사용할 수 없고 내열성이 보다 우수한

재료가 필요함을 알 수 있다. 기간망의 광통신에서는 1,300 nm 또는 1,550 nm의 영역의 광원을 사용하고 있으나, 일반적인 고분자는 이 영역에서의 C-H overtone band에 의한 광흡수가 심하기 때문에 불소화 고분자 등을 사용하여야 한다.<sup>1,5,6</sup> 그러나 이들 소재의 가격과 1,300 nm 또는 1,550 nm의 영역을 발생시키는 광원의 고가격의 원인으로 인해 자동차와 같은 저가 부품이 요구되는 분야에서의 채택에는 많은 시간이 소요될 것으로 사료된다. 자동차 배선을 대형차를 기준으로 하면 20~30 m 정도의 전송이 필요하고, POF에서 허용되는 손실은 12~15 dB로 되어 있기 때문에 660 nm LED광원에서 최소한 600 dB/km 이하의 투광성을 필요로 한다. 열 및 광특성 외에도 자동차 내부의 높은 습도와, 자동차 배기가스 및 그리스, 엔진오일, 그리고 각종 세차용 세제 등에 대한 내화학성도 반드시 고려되어야 한다. 자동차가 13,000개 이상의 부속이 결합되어 조립되는 복잡한 공정의 산물이며 일상생활에서의 필수적인 운송수단임을 고려하면, 광섬유 자체의 가격뿐만 아니라 분지접속이 용이하여, 설치 보수 유지비가 저렴하여야 함은 물론이다. 지금까지의 논의를 종합하여 보면 이러한 제반 특성을 만족시킬 수 있는 재료는 POF가 가장 적합하다.

이들과 같은 운송수단내부의 통신 배선 이외에도, 열이 많이 발생하는 화학, 금속, 제철, 기계산업의 공장 자동화분야, 산업용 기계 등이 최소한의 공간 활용을 위한 패널, 공정의 자동화를 위한 장비와 통제실간의 신속한 신호전달 및 자동 monitoring 등의 용도와 군사적인 용도에는 내열성을 가진 POF의 개발이 필요하다. 또한 의료용, light guide의 할로겐 광원에 접속하는 용도에는 광원 자체에서 고열이 발생하기 때문에 PMMA 및 polystyrene 등과 같은 재료보다는 고내열 POF의 필요성이 증가하고 있다.

### 3. 내열 POF용 재료

광통신용으로 사용되기 위해서는 광학 손실의 원인이 되는 광흡수의 제거 및 굴절률의 변화나 산란을 최소화하는 기술을 단량체의 설계 및 정제 과정에서부터 고려하여야 함은 기본적인 사항이다. 즉, 광흡수를 최소화시키는 단량체의 설계, 외부환경 및 중합과정에서 입자나 불순물의 혼입을 최소화할 수

있는 단량체 및 중합체 정제, 중합시의 국부적인 분자량 증가에 의한 굴절률의 변화 방지, 잔류 미반응 단량체 및 첨가제의 최소화, 균일한 분자량 제어기술 등이 필요하다.

광손실률이 가장 낮다고 알려진 불소계 고분자인 CYTOP ( $T_g$ : 108 °C 광손실율: 30 dB/km)과 일반용 투명 광학재료인 PMMA ( $T_g$ : 105 °C, 광손실률: 130 dB/km) 등과 같은 core재료는 내열성이 약 80 °C로서 자동차 및 산업용에는 사용이 곤란하기 때문에 새로운 내열 POF용 고분자에 대한 연구가 진행되고 있다. 현재는 광손실을 최소한 낮추기 위한 연구와 함께 내열성 증대를 위하여 변성 폴리카보네이트수지, 내열 아크릴수지, 불소화 수지, 노르보넨 수지 등을 소재로 한 연구가 수행되고 있다. 각 재료별 특성을 정리하면 아래와 같다.

### 3.1 Polycarbonate계 POF

투명성이 우수하고 비교적 높은 유리전이온도 (145 °C)를 갖는 폴리카보네이트(PC)는 내열성 POF로의 채용이 오래 동안 검토되었다. PC는 PMMA에 비하여 내열성뿐만 아니라 내충격성, 내흡습성, 기계적 특성이 우수하지만, POF로서의 광손실은 660 nm에서 428 dB/km, 764 nm에서 413 dB/km로서 비교적 높은 광손실률을 나타낸다. 이는 PC의 제조공정이 일관 공정화하기 힘들기 때문에 외부 이물질의 혼입을 제어하기가 어렵기 때문이라고 사료된다. 또한 화학적 내열성 즉 내산화성은 비교적 낮아 고온하에서 방치하면 황변색하여 투과율의 저하가 발생하고, 특히 단파장 가시광영역에서 전송손실이 심하게 증가하는 단점이 있다. 이러한 일반 PC의 문제들을 개선하기 위해, 분자 설계적인 측면에서 높은 유리전이온도, 우수한 내산화 특성을 고려하여, PC의 장파장영역의 흡수대가 작은 구조를 갖는 변성 PC를 개발하고 있다.

### 3.2 공중합 아크릴계 POF

PMMA (내열온도가 80 °C,  $T_g$ : 105 °C)의 우수한 광학특성을 유지하면서 내열온도의 향상을 위해서는 비교적 경직한 구조인 고리화합물과 MMA를 공중합시킴으로써 어느 정도 가능하다. Toray에서는 MMA에 지방족 말레이미드를 공중합함으로써 유리전이온도가 130 °C이며, 660 nm 광원에서 300 dB/km 이하의 MMA와 isopropylmaleimide (IPMI)와의 공중합체를 개발하였다.<sup>7</sup> 그림 2에 반응을 나타내었다. IPMI를 공단량체로 사용한 이유는 방향족 말레이미드를 사용하는 경우와는 달리 얻어진

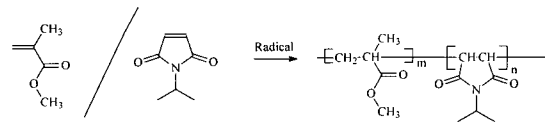


그림 2. 변성 아크릴레이트의 제조와 구조.

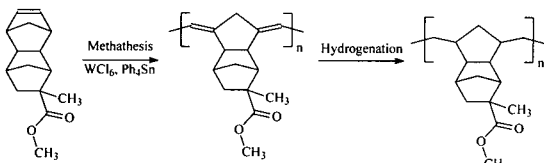
공중합체가 무색 투명하며, IPMI가 녹는점과 끓는점이 낮아 진공중류로 쉽게 정제가 가능하며 MMA와의 용해성이 뛰어나다는 점 등이다.<sup>8</sup> 그러나 두 단량체간의 반응성의 차이가 매우 커 공중합 전환률에 따른 공중합체 내의 조성의 불균일로 인한 광손실이 발생할 것으로 예상되며, 내열성이 그다지 높지 않다는 점이 지적되고 있다. 이러한 문제점에도 불구하고 라디칼 중합에의 이해가 높고 일관공정화가 가능하여 외부이물질의 혼입의 방지가 가능하며, 비교적 쉽게 우수한 광특성의 POF의 상업화가 가능하다는 이유 때문에 많은 연구팀에서의 연구가 진행되고 있다.

### 3.3 노르보넨계 내열성 POF

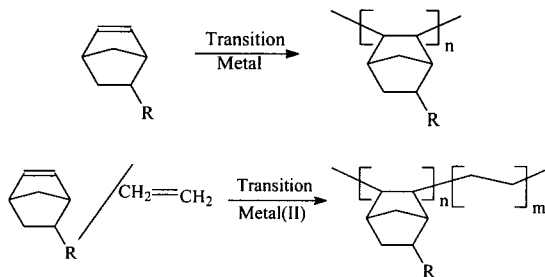
Norbornene계의 고분자들은<sup>9</sup> 이들 고분자의 높은 유리전이온도와 비결정성으로 인해 우수한 광특성을 나타내고 있기 때문에 POF용 재료로서 많은 관심의 대상이 되고 있다. 그림 3에 나타난 Japan Synthetic Rubber (JSR)사와 Fujitsu사에서 공동 개발한 norbornene계 수지 “ARTON”은 자동차용 POF로 응용할 수 있는 광학 특성, 내열성을 동시에 가지며, 무기물이나 유기물과의 접착성에 뛰어난 이상적인 광학 재료로서, 광디스크나 광학 렌즈, 투명 필름으로서 이미 상품화되고 있으며 더욱 폭넓은 응용이 예상되고 있다.<sup>10</sup> 특징으로는 유리전이온도가 171 °C로 현재까지 개발된 광학용 투명수지로는 가장 높고, 가시광 영역에서 광선 투과율이 매우 높고, 광탄성 계수가 작아 복굴절이 안정되어 있고, 사출 및 압출 성형이 용이한 점을 들 수 있다. 광특성을 설명하면 최저 손실창은 680 nm이고, 660 nm에서의 광손실은 700 dB/km 정도로 다소 높은 값을 나타내고 있다. 이는 meta-thesis 중합에 사용하는 촉매인 잔존 전이금속(예: 텅스텐과 알루미늄)의 양이 비교적 많아 이로 인한 광흡수가 높기 때문이다. 따라서 초 고활성의 신규 촉매의 개발과 함께 잔존 촉매량을 최소화할 수 있는 연구들이 진행되고 있다.<sup>11</sup> 뿐만 아니라, 그림 3에 나타난 바와 같이 개환중합 (ROMP) 후 이중결합의 제거를 위해 금속촉매 존재 하에서 수소첨가

반응이라는 또 다른 반응경로를 거치기 때문에 일관공정화가 어려워, 외부로부터의 이물질 혼입의 가능성이 많기 때문이라고 사료된다.

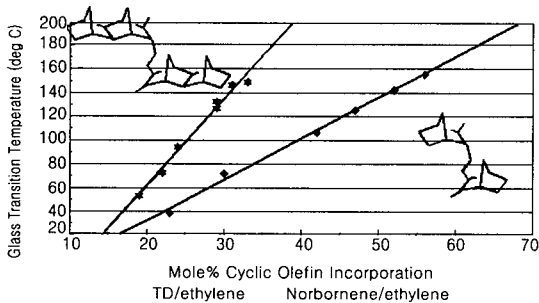
이에 비해 **그림 4**에 나타난 norbornene 화합물을 직접 부가반응하여 얻어지는 고분자는 유리전이온도가 매우 높고, **그림 5**의 제조된 공중합체의  $T_g$ 를 나타낸 바와 같이 올레핀계의 다른 단량체와의 공중합하여 가공온도의 조절이 쉽고, 광학특성이 매우 우수하기 때문에 광학부품 및 POF용 소재로 매우 중요한 후보물질이다.<sup>12,13</sup> 뿐만 아니라 중합에 사용되는 촉매량도 매우 최소화 가능하기 때문에 잔존 전이금속촉매에 의한 광흡수 또한 그다지 크지 않을 것으로 예상되어, 단량체의 종류에 따라 다양한 특성의 POF용 소재의 개발이 이루어질 것으로 예상된다.



**그림 3.** Norbornene의 ROMP형 고분자(ARTON).



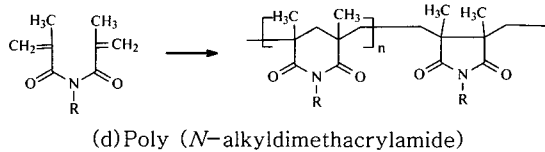
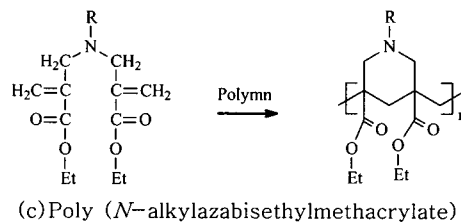
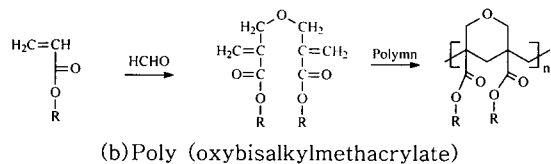
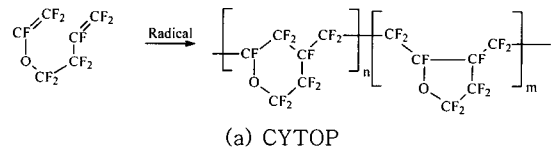
**그림 4.** 전이금속을 이용한 norbornene의 부가중합형 고분자.



**그림 5.** Norbornene의 부가중합형 고분자의  $T_g$ 의 변화.<sup>13</sup>

### 3.4 고리화 중합을 이용한 내열 POF 재료

폴리에틸렌, 폴리프로필렌과 같은 폴리올레핀들은 일관공정에 의해 제조가 가능하지만 이들 고분자는 단량체의 단순한 구조적인 특징 때문에 결정성 고분자이어서 광산란이 심하고, 유리전이온도 또한 매우 낮다. 이러한 폴리올레핀들의 내열성과 비결정성을 향상시키는 방법이 앞에서 언급한 norbornene 또는 말레이미드와 같은 지방족고리화 (alicyclic) 화합물을 단량체로 사용하는 방법과 2관능기 (2개의 2중결합)를 가진 단량체의 고리화 중합 (cyclopolymerization)을 이용하는 방법이 있다.<sup>14-16</sup> 고리화 중합을 일으키는 단량체들은 아래의 **그림 6**에 나타난 것과 같이 중합과정에서 5환 또는 6환의 고리를 형성해 나가는 중합법으로, 아크릴레이트, 아크릴아미드, 에테르 등 다양한 구조의 단량체들이 개발되어 있다. 단, 중합시 이중결합들이 완전한 고리화 중합을 이루지 못할 경우 가교반응이 일어날 가능성이 매우 많기 때문에 적절한 중합반응의 제어를 위한 연구가 필요하다. 이 고리화 중합반응을 상업화한 대표적인 예가 **그림 6**에 나타난 아사히글래스의 CYTOP이라는 레진이



**그림 6.** 고리화 중합들의 예.

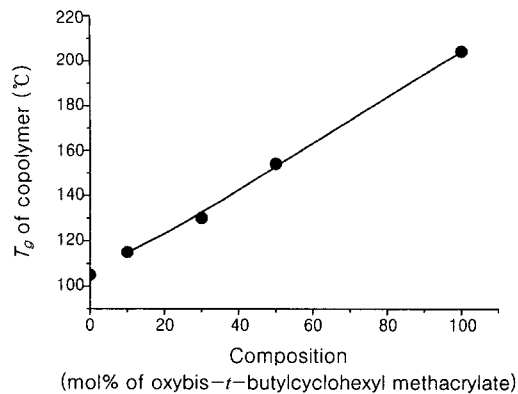


그림 7. Oxybis-*t*-butylcyclohexyl methacrylate와 MMA와의 공중합체의 T<sub>g</sub>의 변화.

며, 이를 POF에 적용한 것이 LUCINA라는 제품이다.<sup>17</sup> 고리화 반응의 경우에도 일반적인 MMA계의 고분자들과 마찬가지로 MMA와의 공중합이 가능하며, 그 예로서 그림 7에 oxybis-*t*-butylcyclohexyl methacrylate와 MMA와의 공중합체의 조성ة 따른 유리전이온도의 변화를 나타내었다.<sup>18</sup>

이상에서 살펴본 바와 같이 내열 POF의 열적 특성의 조절은 지방족 고리화 화합물의 도입과 공중합에 의한 연구가 주류를 이루고 있다. 또한 제조 공정은 광산란의 가장 큰 원인이 되는 먼지등과 같은 이물질의 혼입을 방지하기 위해 정제된 단량체로부터 밀폐된 환경하에서 섬유제조까지 일관공정화 하는 것이 POF용 고분자의 제조방법으로 적합하다고 할 수 있다. 그리고 외부 이물질에 의한 광산란 뿐만 아니라, 국부적인 발열반응에 의한 과도한 중합, 두 단량체 간의 반응성의 차이로 발생하는 random block의 생성 또는 전환률에 따른 조성의 변화, 용융점도 차이에 의한 유변학적인 굴절율의 변화, 미반응 개시제에 의한 섬유화 공정에서의 후중합, 첨가제 또는 미반응 단량체에 의한 국지적인 굴절률의 변화, 중합에 사용되어지는 전이금속의 잔존 등 여러 가지 원인에 의하여 광손실의 원인이 될 수 있기 때문에 정밀한 중합제어가 필요하다.

#### 4. 맺 음 말

초고속 정보화사회, 지식기반사회라고 지칭되는 현대사회에서는 가입자들이 위치하고 있는 장소에

관계없이 초고속통신망에 접속이 가능하여야 한다. 따라서 광통신이라는 분야에서의 POF는 그 자체의 산업적인 가치보다는 POF로 인한 전반적인 경제, 문제 및 사회적인 파급 효과에 대한 가치로 인식되어야 한다. 즉, 기간 광통신망의 구축은 신뢰성과 안정성이 우수한 고가의 실리카 소재를 사용해야 하지만, 가입자망의 구축은 저렴하면서도, 분지, 접속이 용이하여 범용화가 가능한 고분자소재를 이용해야만 국민 개인에게까지 연결되는 초고속 광통신망의 구축이 가능하다는 것이다. 그리고 자동차, 항공기와 같은 EMI에 민감하면서도 내열성이 요구되는 분야에서는 내열 투명고분자를 사용하는 POF의 사용이 필수적이다. 이러한 이유로 Delphi Packard Electric System, Daimler Chrysler, BMW 등의 자동차 및 부품회사에서는 차량용 POF 및 POF 광통신망의 구축에 대한 본격적인 연구가 진행중에 있다. 실제로 PMMA 광섬유를 사용한 D2B 광통신 링이 이미 1998년에 Mercedes Benz S-class에 장착되어 각종 Telematic 시스템을 운용하고 있고, 2001년에는 BMW의 air-bag 시스템의 제어에 POF를 사용하고 있다. 그리고 이들 회사를 중심으로 차세대용으로 개발되고 있는 Media Oriented System Transport (MOST) 등에 대한 적용을 서두르고 있다. 이에 따라 국내에서도 자동차 및 근거리 통신용 광섬유 시장에 대해 관심을 가지고 있고, 출연연구소 및 고분자 제조기업들을 중심으로 연구개발을 시작하고 있다. 본격적인 POF의 개발과는 무관하게, 국내에서의 투명고분자 연구로서는, 광학용 안경, 미소렌즈, LCD용 도광판, DVD용의 투명광학고분자 등 다양한 연구 개발이 진행되어 상업화가 이루어지고 있다. 비내열 POF의 경우에도 최근 PMMA를 사용하는 Grade index형 POF (GI-POF)기술 개발에 상당한 진척이 있는 것으로 알려져 있기 때문에 연구기반의 조성은 상당히 이루어져 있다고 볼 수 있다. 다만, 수요가 급격히 증가할 내열용 POF에 대한 연구는 아직 초기 단계이기 때문에 우수한 내열특성과 광특성을 겸비한 내열 POF용 재료의 개발이 시급할 것으로 보인다.

#### 참 고 문 헌

1. T. H. Rhee and J. H. Kim, *Polymer Sci. & Tech.*, **7**, 179 (1996).

2. 김정안 등, “플라스틱 광섬유에 관한 기술개발 기획보고서”, 산업자원부 (2000).
3. E. Zeeb, *Proceeding of 27th European Conference on Optical Communication*, 70 (2001).
4. W. Daum, *Proceeding of 27th European Conference on Optical Communication*, 68 (2001).
5. D. H. Suh, W. Y. Chung, J. K. Kim, and Y. M. Yoo, *Polymer Sci. & Tech.*, **12**, 823 (2001).
6. O. Ziemann, *Proceeding of 27th European Conference on Optical Communication*, 22 (2001).
7. 일본국 특허 JP 63-089806.
8. Y. Kita, K. Kishino, and K. Nakagawa, *Appl. Polym. Sci.*, **63**, 1055 (1997).
9. R. Madan, A. Srivastava, R. A. Anand, and I. K. Varma, *Prog. Polym. Sci.* **23**, 663 (1998).
10. 일본국 특허 JP 07-196779.
11. T. M. Trinka and R. H. Grubbs, *Acc. Chem. Res.*, **34**, 18 (2001).
12. H. Cherdron, M. J. Brekner, and F. Osan, *Angew. Makromol. Chem.*, **223**, 121 (1994).
13. G. M. Benedikt, B. L. Goodall, N. S. Marchant, and L. F. Rhodes, *Proceeding of Metcon '94*, p.1-16, May (1994).
14. T. Kodaira, *Prog. Polym. Sci.*, **25**, 627 (2000)
15. G. B. Butler, *J. Polym. Sci., Part A: Polym. Chem. Ed.*, **38**, 3451 (2000).
16. T. Tsuda and L. J. Mathias, *Polymer*, **35**, 3317 (1994).
17. 일본국 특허 JP 02-311438.
18. 일본국 특허 JP 2000-178317.