

# 집적광소자용 고분자 소재의 개발동향 및 전망

김동욱

## 1. 서론

2002년 세계적인 IT 산업 버블 붕괴에 따라 급격한 침체를 겪었던 광통신 소자 및 부품산업은 2006년부터 본격적으로 도입되기 시작한 광가입자망(fiber-to-the-home: FTTH)의 확산과 고화질 디지털 TV, IPTV 등의 보급으로 점차적으로 회복세를 보이고 있으며 메트로망 및 가입자망 분야로 투자 부분이 확대되고 있다. 최근에 국내외적으로 보급이 확산되고 있는 인터넷결합 TV, 인터넷 전화, 스마트폰 서비스, 와이브로 서비스 등에서와 같이 인터넷을 기반으로 하는 데이터, 음성, 영상 등의 다양한 형태의 정보통신에 대한 수요는 인터넷 트래픽의 급증을 초래하고, 관련 기능성 광소자 보급의 확대를 불러오고 있다.<sup>1-3</sup> 이에 따라 CIR 시장보고서에 따르면 광소자 부품 시장은 2006년을 기점으로 2011년까지 연평균 28%이상 증가가 예상되고 있는데 2011년에 6,500 M\$에 이를 것으로 전망되고 있다(그림 1).<sup>4</sup> 특히 광통신이 기간망 중심에서 각 도시의 메트로망 및 각 가정까지의 가입자망으로 확대 보급됨에 따라 광소자 시장에서의 요구사항이 고성능, 고신뢰성 확보에서 고집적화 및 저소모 전력화, 저가의 대량생산화로 변화하고 있다.

실리카 기반의 유리 광섬유는 수십에서 수백킬로미터에 달하는 장거리까지 안정적으로 대량의 데이터를 전송하는 이점을 지니고 있어 오늘날 통상적으로 고속 데이터 전송을 위한 기간망에 사용되고 있다. 실

리카 섬유는 1550 nm에서 전송손실이 0.1 dB/km에 불과할 정도로 광손실이 매우 낮다. 현재 대량의 데이터 포트를 요구하는 메트로망 및 광가입자망이 점차적으로 확산됨에 따라, 집적광소자는 점차적으로 핵심적인 광소자 부품으로 자리매김하고 있다. 그러나 실리카 광섬유는 충격에 약하고 가공이 어려우며 고집적광소자의 제작을 위해서는 고온 공정 등이 수반되어 저가 대량생산하는 데 한계가 있다. 표 1에 집적광소자에 사용할 수 있는 여러 소재들의 특성을 실리카와 비교하였다.<sup>5</sup> 가장 널리 사용되는 광소자 부품은 silica-on-silicon 형태로 제작되며, 이에 따라 실리카는 고온에서 화학기상증착법(CVD)으로 실리콘 웨이퍼위에서 성장시킨다. 실온으로 냉각되면 실리카와 실리콘 기판 간의 열팽창특성의 차이에 의하여 유발된 스트레스는 높은 복굴절률 및 광산란을 유발한다. 기판에 형성된 뒤틀림에 의하여 광섬유와 연결할 때 높은 커플링 손실이 일어나기도 한다. 또한, 실리카 기반 집적광소자의 굴절률 편차비(refractive index contrast)는 단지 1.5%에 불과하기 때문에 고집적화에 제약이 따른다. 실리카 외에도 고분자, 실리콘, 실리콘 옥시나이트리드, 리튬니오베이트, 갈륨아제나이드 등이 집적광소자로의 응용을 위하여 연구개발되고 있다.

이중 고분자 소재는 용이한 가공성 및 대량생산에 의한 저가화, 구조 변경에 의한 용이한 특성 변화, 35%에 달하는 높은 굴절률 편차비, 실리카보다 30-40배 높은 열광학특성, 낮은 복굴절률 등의 우수한 특성을 지니고 있어 집적광소자에 매우 적합한 소재로 부각되고 있다. 현재와 같이 대량의 데이터포트가 요구되는 광가입자망의 증가에 따라 고집적화된 광소자의 저가 대량생산이 매우 큰 이슈로 부각되고 있어, 고분자 광소자는 이러한 시장의 요구사항에 가장 부합되는 소자 가운데

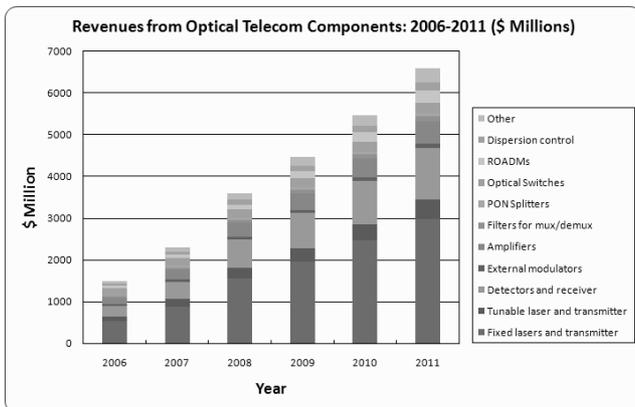


그림 1. 광통신 소자 및 부품 산업 세계시장 전망: 2006-2011(출처: CIR 시장보고서, 2006년).



김동욱

1991 서울대학교 섬유공학과 (학사)  
 1993 서울대학교 섬유고분자공학과 (석사)  
 1993~ 서울대학교 섬유고분자공학과 (박사)  
 1998 한국과학기술연구원 위촉연구원  
 1998~ 1999 한국과학기술연구원 위촉연구원  
 1999~ 2002 Univ. Mass. Lowell 방문연구원  
 2002~ 2007 한국화학연구원 화학소재연구단 선임연구원  
 2008~ 현재 한국화학연구원 화학소재연구단 책임연구원

### Development and Prospect of Polymeric Materials for Integrated Optical Devices

한국화학연구원 화학소재연구단(Dong Wook Kim, Advanced Materials Division, Korea Research Institute of Chemical Technology, 100 Jang-dong, Yusung-ku, Daejeon 305-600, Korea) e-mail: dongwook@kriect.re.kr

표 1. 광통신 부품소자에 사용되는 여러 재료들의 특성 비교(T/O=thermo-optic, E/O=electro-optic)

	Propagation Loss (dB/cm)	Pigtail Loss (dB/chip)	Refractive Index (n)	Index Contrast Range in Waveguide ( $\Delta n$ )	Birefringence ( $n_{TE} - n_{TM}$ )	T/O Coef. $dn/dT$ ( $K^{-1}$ )	Maximum Modulation Frequency	Passive / Active
Silica [SiO <sub>2</sub> ]	0.1	0.5	1.5	0-1.5% (Channel)	$10^{-4}$ - $10^{-2}$	$10^{-5}$	1 kHz (T/O)	Y/Y
Silicon [Si]	0.1	1.0	3.5	70% [range=0] (Silicon on Insulator Rib)	$10^{-4}$ - $10^{-2}$	$1.8 \times 10^{-4}$	1 kHz (T/O)	Y/N
Silicon Oxynitride [SiO <sub>x</sub> N <sub>y</sub> ]	0.1	1.0	SiO <sub>2</sub> :1.5 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> :2.0	0-30% [30%: Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> core] (Channel, SiO <sub>2</sub> clad)	$10^{-3}$ - $5 \times 10^{-6}$	$10^{-5}$	1 kHz (T/O)	Y/N
Sol-Gels	0.1	0.5	1.2-1.5	0-1.5% (Channel)	$10^{-4}$ - $10^{-2}$	$10^{-5}$	1 kHz (T/O)	Y/Y
Polymers	0.1	0.5	1.3-1.7	0-35% (Channel)	$10^{-6}$ - $10^{-2}$	$-1 \rightarrow -4 \times 10^{-4}$	>100 GHz (E/O) 1 kHz (T/O)	Y/Y
Lithium Niobate [LiNbO <sub>3</sub> ]	0.5	2.0	2.2	0-0.5% (Channel)	$10^{-2}$ - $10^{-1}$	$10^{-5}$	40 GHz (E/O)	Y/Y
Indium Phosphide [InP]	3	10	3.1	0-3% (Channel)	$10^{-3}$	$0.8 \times 10^{-4}$	40 GHz (E/O)	Y/Y
Gallium Arsenide [GaAs]	0.5	2.0	3.4	0-14% [14%: AlAs clad] (Rib)	$10^{-3}$	$2.5 \times 10^{-4}$	20 GHz (E/O)	Y/Y

하나로 연구 개발되고 있다. 유기 고분자는 실리카(SiO<sub>2</sub>), 반도체, 단결정 무기재료에 비하여 10배 이상 높은 열광제어특성을 지니므로 가변 광 감쇠기, 광스위치 등의 가변제어 광소자의 전력소모를 대폭 절감할 수 있다. 고분자는 분자화학에 의하여 물질의 성능을 쉽게 제어 합성할 수 있고 소자 제작 공정이 단순한 장비를 사용하여 저온에서 이루어지므로 저가 대량생산이 가능하다. 집적화가 어려운 MEMS 광소자에 비하여 우수한 가공성을 기반으로 집적화가 가능하여 다채널 집적광소자 제작이 용이하므로 높은 가격 경쟁력 및 성능을 확보할 수 있다.<sup>6-8</sup> 유기 고분자를 기반으로 하는 광소자부품의 상용화는 2000년대에 들어서 시작되었으며, 실리카 등 다른 재료에 비하여 약점으로 지적되었던 광손실 등의 광학특성 및 안정성 문제가 상당부분 해결된 우수한 고분자 재료들이 세계적인 선도기업에서 속속 개발되어 시장에 진출하고 있다. 본 고에서는 집적광소자에 응용할 수 있는 고분자 재료의 개발동향 및 전망에 대하여 논하고자 한다.

## 2. 집적광소자용 고분자 소재의 요구특성

고분자 재료는 능동소자 및 수동소자 등 다양한 광통신 부품소자에 적용이 가능하다. 2000년대 초반부터 세계의 여러 광소자기업들은 폴리이미드, 아크릴레이트, 폴리카보네이트, 올레핀 계열 등의 고분자 재료를 가변광감쇠기(variable optical attenuator: VOA), 광스위치, 파장 가변필터, 파장가변레이저 등의 집적광소자에 적용하고 있다(표 2). 폴리이미드, 폴리카보네이트 등은 감광성수지를 사용한 포토팩터닝 및 RIE(reactive ion etching) 공정으로 소자로 제작된다. 한편, 감광특성을 지니도록 설계된 고분자 소재의 경우에는 훨씬 더 공정을 단축시킬 수 있어 높은 생산성으로 소자 제작이 가능하다. 이러한 광통신 부품소자에 적용하기 위한 고분자 재료에는 여러 다양한 특성이 요구된다. 1) 광통신 파장대역에서의 0.1 dB/cm 이하의 낮은 광손실, 2)  $10^{-4}$  이하의 낮은 복굴절률(arrayed waveguide grating(AWG)에는  $10^{-5}$  이하가 요구됨), 3) 가변제어를 위한 높은 열광학특성, 4) 내구성을 위한 높은 열안정성 및 기계적 안정성, 5) 기판

에의 접착성, 6) 공정 중에 수반되는 여러 용매에 견디는 내화학성 등이 일반적으로 요구되는 중요한 특성들이다.

### 2.1 광진행손실(Optical Propagation Loss)

집적광소자용 고분자 소재가 지녀야 할 가장 중요한 특성으로서 광통신 대역에서의 높은 광투명성 즉 낮은 광진행손실을 들 수 있다. 840, 1310, 1550 nm 파장대역이 광통신에서 사용되며, 특히 매우 활용도가 높은 파장대역은 광섬유용 실리카의 광손실이 가장 낮은 1530-1565 nm(C-대역)이다. 최근에는 점차 늘어나는 인터넷 트래픽을 수용하고자 L-대역(1565-1610 nm)을 비롯하여 S-대역(1460-1530 nm)으로까지 광전송대역을 확장하려는 연구가 진행되고 있다(그림 2). 이러한 추세에 맞추어 관련 광소자에 적용되는 고분자 소재도 기존의 C-대역뿐 아니라 L-대역, 그리고 향후 S-대역을 포함하는 광대역에서 낮은 광손실을 지니는 연구가 함께 병행되고 있다.

광손실(optical loss)은 입사광 강도( $P_{in}$ )와 출력광의 강도( $P_{out}$ )의 비의 로그값에 -10을 곱하여 계산한다(식 1).

$$\text{Optical Loss (dB)} = -10 \log(P_{out}/P_{in}) \quad (1)$$

고분자 광소자에서 광손실이 발생하는 원인으로 광흡수, 산란, 분극 의존, 반사, 섬유접합 등을 들 수 있으며, 고분자 재료 측면에서 가장 중요한 광손실의 원인은 C-H 결합의 고차 조화진동에 의한 흡수이다. 이를 극복하기 위하여 고분자 재료의 분자구조에서 흔히 존재하는 C-H 결합을 C-F 등으로 치환하여 광흡수를 최소화하는 것이 일반적인 방법이다.<sup>9</sup> 한편, 재료의 수소함량지수(content of hydrogen,  $C_H$ )를 수소원자 수( $N_H$ ), 밀도( $\rho$ ), 분자량( $M_w$ )으로부터 식 (2)와 같이 계산하여 개별 재료의 대략적인 광손실 정도를 예측하는데 활용하기도 한다. 일반적으로 수소함량지수가 낮은 재료일수록 광흡수손실이 낮아진다고 알려져 있다.

$$C_H = \frac{N_H \times \rho \times 1,000}{M_w} \quad (2)$$

표 2. Key Properties of Optical Polymers Developed Globally

Manufacturer	Polymer Type [Trade Name]	Patterning Techniques	Propagation Loss, Single-Mode Waveguide, dB/cm [wavelength, nm]	Other Properties [wavelength, nm]
Amoco	Fluorinated polyimide [Ultradel™]	Photoexposure / wet etch	0.4 [1300] 1.0 [1550]	Birefringence: 0.025 Crosslinked, Thermally stable
Corning (formerly AlliedSignal)	Acrylate	Photoexposure / wet etch, RIE, laser ablation	0.02 [840] 0.3 [1300] 0.8 [1550]	Birefringence: 0.0002 [1550] Crosslinked, T <sub>g</sub> : 25°C Environmentally stable
	Halogenated acrylate	Photoexposure / wet etch, RIE, laser ablation	<0.01 [840] 0.06 [1300] 0.2 [1550]	Birefringence: <0.000001 [1550] Crosslinked, T <sub>g</sub> : -50°C Environmentally stable
Dow Chemical	Benzocyclobutene [Cyclotene™]	RIE	0.8 [1300] 1.5 [1550]	T <sub>g</sub> : > 350°C
	Perfluorocyclobutene [XU 35121]	Photoexposure / wet etch	0.25 [1300] 0.25 [1550]	T <sub>g</sub> : 400°C
Gemfire	[Gemfire]	Photoexposure / wet etch	1.0 [1550]	Birefringence: 0.0002 [1550] Crosslinked
General Electric	Polyetherimide [Ultem™]	RIE, laser ablation	0.24 [830]	Thermally stable
Hitachi	Fluorinated polyimide	Photoexposure / wet etch	TE: 0.5, TM: 0.6 [1300]	Birefringence: 0.009 [1300] PDL: 0.1 dB/cm [1300] T <sub>g</sub> : 310°C, Thermally stable
Hoechst Celanese	PMMA copolymer [P2ANS]	Photobleaching	1.0 [1300]	NLO polymer
Iptek	Poly(methylmethacrylate) with CLD-1 chromophore [PMMA-CLD-1]	RIE	5.0 [1300]	NLO polymer r <sub>33</sub> = 60 pm/V [1300] Pigtail loss = 3.5 dB / facet
JDS Uniphase (formerly Akzo Nobel)	Polycarbonate [BeamBox™]	RIE	0.6 [1550]	Thermally stable
K-JIST	Fluorinated poly(arylene ether sulfide) [FPAES]	RIE	TE: 0.42, TM: 0.4 [1550]	PDL: 0.02 dB/cm [1550] Birefringence: 0.0003 [1550] Crosslinked, Thermally stable
Lumera	Polyurethane with FTC chromophore [PU-FTC]	RIE	2.0 [1300]	NLO polymer r <sub>33</sub> = 25 pm/V [1310] Pigtail loss = 5 dB / facet
NTT	Halogenated acrylate	RIE	0.02 [830] 0.07 [1310] 1.7 [1550]	Birefringence: 0.000006 [1310] T <sub>g</sub> : 110°C
	Deuterated polysiloxane	RIE	0.17 [1310] 0.43 [1550]	Environmentally stable
	Fluorinated polyimide	RIE	TE: 0.3, TM: 0.7 [1310]	PDL: 0.4 dB/cm [1310] Environmentally stable
Optical Crosslinks (formerly Dupont and Polymer Photonics)	Acrylate [Polyguide™]	Diffusion	0.18 [800] 0.2 [1300] 0.6 [1550]	Laminated sheets Excimer laser machinable
PacificWave	Polycarbonate with CLD-1 chromophore [PC-CLD-1]	RIE	1.8 [1550]	NLO polymer r <sub>33</sub> = 70 pm/V [1310] Pigtail loss = 1.5 dB / facet
Redfern	Inorganic polymer glass [IPG™]	RIE		Environmentally stable
Telephotonics	[OASIC™]	Photoexposure / wet etch, RIE, laser ablation	<0.01 [840] 0.03 [1300] 0.1 [1550]	Environmentally stable

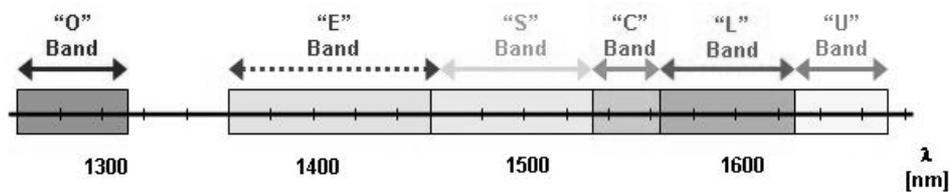


그림 2. 광통신 파장대역.

그림 3은 수소함량지수가 107인 헥산(C<sub>6</sub>H<sub>13</sub>)과 수소함량지수가 0인 과불소화헥산(C<sub>6</sub>F<sub>13</sub>)의 광손실을 NIR 분광흡수기로 측정할 실험결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 수소함량지수가 0인 경우 광흡수손실이 거의 0에 가깝게 낮아짐을 알 수 있다. 이러한 수소함량지수는 광흡수손실이 낮은 분자구조를 지니도록 분자설계하는데 유용하게 활용할 수 있다.

### 2.2 복굴절률(Birefringence)

재료에 입사된 광의 TE 모드와 TM 모드에서 나타내는 굴절률의 차를 복굴절률이라고 하며, 이는 광소자의 성능을 좌우하는 매우 중요한 특성이다. 특히, 40채널 이상의 여러 파장들을 다중화(multiplexing)하고 역다중(demultiplexing) 하는데 필수적으로 쓰이는 집적광소자인 AWG(arrayed waveguide grating)에서 복굴절률은 매우 중요한 광

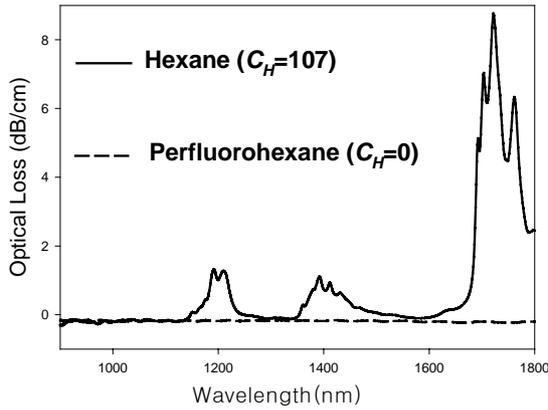


그림 3. Optical loss of hexane and perfluorohexane measured by NIR spectroscopy.

학특성이다. 일반적으로 AWG 소자의 안정적인 구동을 위하여  $10^{-5}$  이하의 복굴절률이 요구된다. 복굴절률이 유발되는 이유는 광이 통과하는 재료의 광학이방성에 기인한다. 특히 실리콘 웨이퍼 위에 실리카를 고온에서 성장하는 공정은 필연적으로 기판과의 스트레스에 의하여 광학 이방성이 생성되므로, 실리카기반 집적광소자는 높은 광학이방성을 지니며 따라서 복굴절률이 높다. 이에 반하여 실리카 혹은 무기재료에 비하여 저온 공정이 가능한 고분자 소재는 비교적 낮은 복굴절률을 지니도록 제어하기가 용이하다. 특히 방향족 대신에 열안정성 및 물리적 안정성을 위하여 가교 구조를 도입하고, 지방족 과불소화폴리에테르 구조를 주로 함유하는 고분자 재료의 경우는 복굴절률을  $10^{-4}$  이하로 낮추는 것이 가능하다. 한편, 폴리아미드, 폴리아릴레이트와 같은 방향족 고분자는 열적, 기계적 특성은 충분히 확보되는 반면, 필름 제조공정시에 필름평면 방향으로 배향하는 특성이 높기 때문에 광학 이방성이 크게 나타나며, 복굴절률이  $10^{-2}$  이상에 이를 만큼 매우 높은 편이다. 재료의 기계적 안정성, 내구성 등의 물성 향상을 위해서는 방향족 환을 도입하는 것이 유리하지만, 지나치게 많은 방향족 환은 복굴절률에 나쁜 영향을 주므로 적절한 분자구조 설계를 통한 trade-off가 필요하다.

### 2.3 열광학계수(Thermo-Optic Coefficient)

열광학계수( $dn/dT$ )는 열에 의한 재료의 굴절률의 변화량으로서 굴절률( $n$ ), 온도( $T$ ), 밀도( $\rho$ ), 열팽창계수( $\alpha$ )로부터 식 (3)과 같이 구할 수 있다.<sup>10</sup>

$$\frac{dn}{dT} = -\left(\frac{\rho \partial n}{\partial \rho}\right)_T \alpha + \left(\frac{\partial n}{\partial T}\right)_\rho \quad (3)$$

실리카의 경우  $\left(\frac{\rho \partial n}{\partial \rho}\right)_T$ 의 값이 대략 0.3이고 열팽창계수가  $10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 인데 비하여  $\left(\frac{\partial n}{\partial T}\right)_\rho$ 의 값이 대략  $10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 이므로, 실리카의 열광학계수는 두 번째 항인  $\left(\frac{\partial n}{\partial T}\right)_\rho$ 에 의하여 결정되며 대략  $10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 이다. 이에 비하여 유기고분자는 두 번째 항  $\left(\frac{\partial n}{\partial T}\right)_\rho$ 이  $10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 인데 비하여,  $\left(\frac{\rho \partial n}{\partial \rho}\right)_T$ 의 값이 대략 0.5이고 열팽창계수가 약  $2 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 이므로, 고분자의 열광학계수는 음의 값을 지니며 대략  $10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 이다. 즉, 고분자의 열광학계수는 무기소재인 실리카에 비하여 10배 이상 큰 값을 지니게 된다. 표 3에 여러 고분자 재료들의 열팽창계수와 열광학

표 3. 여러 고분자 재료의 열광학계수와 열팽창계수

고분자 종류	재료 상태	열광학계수 ( $dn/dT \times 10^4 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ )	열팽창계수 ( $\alpha \times 10^4 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ )
에폭시	유리	-1.0	1.7
폴리메틸메타크릴레이트	유리	-1.3	2.2
실리콘 고무	고무	-3.1	5.9
폴리카보네이트	유리	-0.9	1.7
폴리스티렌	유리	-1.2	2.2
우레탄 아크릴레이트 고무	고무	-4.2	7.2

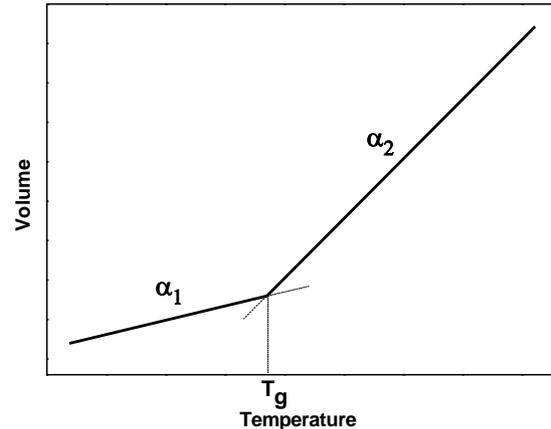


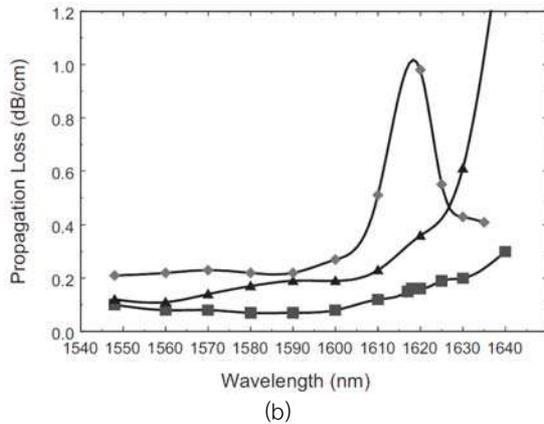
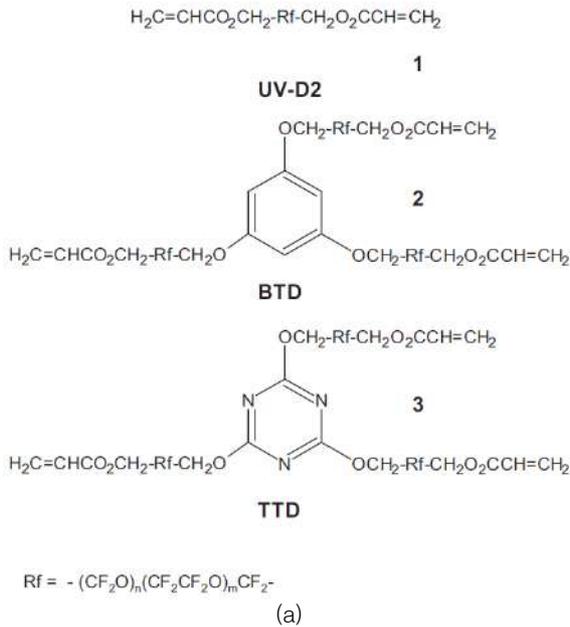
그림 4. Schematic diagram showing the relationship between thermal expansion coefficient and second transition temperature in polymeric materials.

특성을 측정할 실험 결과를 나타내고 있다.<sup>11</sup> 에폭시, 아크릴레이트 수지 등은 약  $2 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 의 낮은 열팽창계수를 지니는데 비하여 실리콘 고무, 우레탄 고무 등은  $6 \sim 7 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 의 높은 열팽창계수를 지닌다. 실험 결과에 따르면, 고분자 재료의 열광학계수는 열팽창계수에 비례하며, 이에 따라 고무계 수지가 에폭시계 수지에 비하여 3배 정도 높은 값을 보임을 알 수 있다. 이와 같은 여러 고분자 재료들의 열팽창계수와 열광학계수간의 상관관계를 그래프로 나타내면 거의 선형적인 비례관계를 나타내었다.

한편, 그림 4에 도식적으로 나타낸 바와 같이 고분자 재료의 열팽창계수는 이차전이온도( $T_g$ ) 전후로 큰 변화를 나타낸다. 즉, 이차전이온도보다 높은 온도에서의 열팽창계수는 이차전이온도보다 낮은 온도에서의 값보다 2~3배 가량 증가된다. 그러므로 소자 구동 온도보다 낮은 온도에서 이차전이온도를 지니도록 고분자 재료를 설계 합성한다면 열팽창계수를 증가시킬 수 있으며 따라서 열광학특성을 향상시킬 수 있다. 다만, 낮은 이차전이온도를 지니는 재료는 일반적으로 기계적 물성이 떨어지므로 이를 개선하기 위하여 기계적 특성이 우수한 물질의 배합과 적절한 정도의 가교결합의 도입 등이 필요하다.

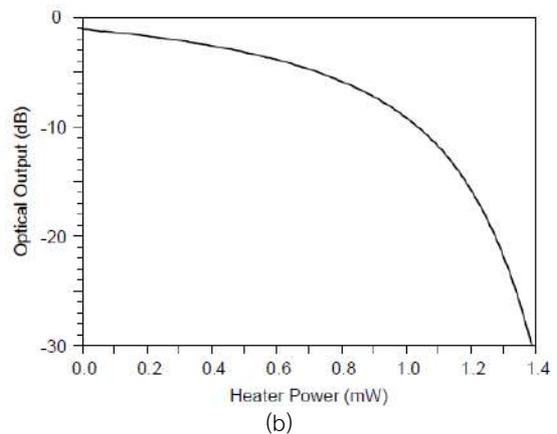
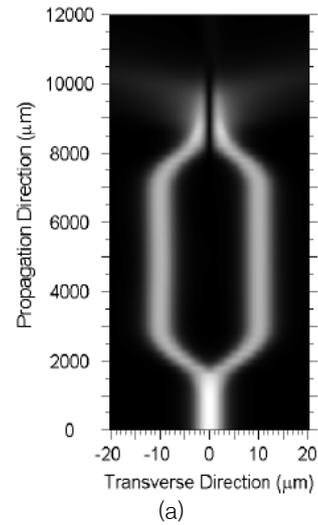
## 3. 집적광소자용 고분자 소재의 연구동향

저손실 광소자용 고분자 소재에 관한 연구는 1980년대부터 학계 및 산업계에서 수행하였으며 2000년대 들어 저손실 고분자를 이용한 광소자의 신뢰성이 확보되면서 광통신 시스템에 적용, 상업화되었다. 이들 고분자들 중 대표적인 재료들은 중수소화 혹은 할로젠화된



**그림 5.** (a) 얼라이드시그널사에서 개발한 광통신 소자용 고분자 소재의 구조와 (b) 단일모드 광도파로에서 측정한 파장대별 광전행손실 데이터(◆:FA1, ▲:FA2, ■:FA3).

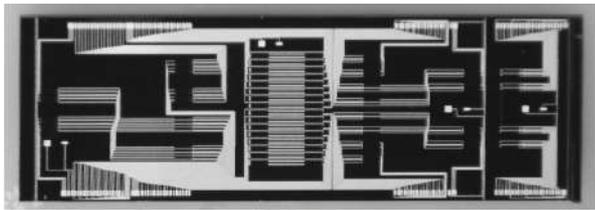
폴리아크릴레이트계, 불소화 폴리이미드계, 피플루오로사이클로부탄 (PFCB)계 고분자 등이 있다. 중수소화 혹은 할로겐화된 폴리아크릴레이트계 고분자들은 주로 얼라이드시그널(코닝), NTT, 듀폰 등에 의하여 집중적으로 연구 개발되었다. 얼라이드시그널사는 광가교가 가능한 다관능성 할로겐화 아크릴레이트계 단량체 및 올리고머를 다수 합성하여 여러 첨가제와 함께 섞어 광투명성이 우수한 저손실 고분자 재료를 개발하였다. 이들 단량체 및 올리고머, 첨가제 들은 액상으로서 용매 사용없이 필름 캐스팅이 가능하고 광경화시 매우 낮은 수축률을 보이는 장점을 지니고 있다. 또한, 이들 고분자 재료들은 산란에 의한 광손실이 매우 낮고 복굴절률을  $10^{-4}$  이하로 제어할 수 있는 특징을 지니고 있다. 제조된 고분자 재료는 350 °C 이상의 열안정성을 보이며 1550 nm 파장대역에서 광손실이 0.1 dB/cm 이하의 값을 나타내었다. 특히 **그림 5(a)**에 나타난 다관능성 트리아진 아크릴레이트 TTD를 주성분으로 하는 고분자 재료 FA3는 BTD 혹은 UV-D2를 주성분으로 하는 FA2 혹은 FA1보다 훨씬 우수한 광투명성을 나타냄을 확인하여 TTD가 유망한 재료임을 보여주고 있다



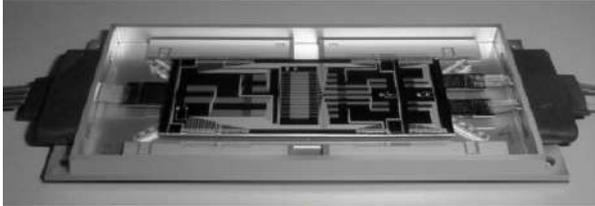
**그림 6.** (a) Computer simulation of polymer-based VOA developed by Du Pont, where heat is used to induce a  $\pi$  phase difference between the interferometer arms for high attenuation, and (b) experimental attenuation curve.

(**그림 5**).<sup>12</sup> 얼라이드시그널의 고분자 광소자 사업부는 코닝, 듀폰을 거쳐 최근에는 Enablence사에서 더욱 개량된 재료를 이용하여 VOA, ROADM 모듈 등의 광소자에 적용, 상업화하고 있다. **그림 6**에 듀폰사에 개발하여 시판하고 있는 가변광감쇠기의 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 광감쇠 특성 평가 결과를 보여주고 있다. WDM (wavelength division multiplexing) 시스템의 고도화에 따라 내구성이 우수하고 가격이 저렴한 가변광감쇠기의 수요량이 점점 커지고 있다. **그림 6**에 나타난 것은 마하-젠더형의 광간섭 방식에 의한 가변광감쇠기이다. 한 쪽 전극에 열을 가하여 반파장 만큼의 상변이를 유도함에 의하여 광감쇠를 구현하는 방식이다. 듀폰사에서 개발한 8채널 가변광감쇠기는 1.4 mW의 매우 낮은 소모전력으로 30 dB의 광감쇠를 구현하였다. **그림 7**은 듀폰사에서 개발한 8채널 지능형 optical cross-connect(OXC)의 칩 상태 및 패키징 상태를 보여주고 있다.<sup>13-15</sup>

1990년대 초 일본의 통신회사인 NTT에서는 중수소화 폴리메틸메타크릴레이트와 중수소 및 불소가 함께 치환된 폴리메틸메타크릴레이트를 개발하여 광손실이 1300 nm에서 0.08 dB/cm를 나타내는 저손실 고분자 광소자를 구현하였다(**그림 8**). 또한, NTT는 아크릴레이트계 고분자의 낮은 열안정성을 극복하기 위하여 열경화성 중수소화 폴리실록산의 개발도 시도하였다. 이 재료는 열분해 온도가 400 °C



(a)



(b)



(c)

그림 7. An 8×8 iOXC at three production stages: (a) chip, (b) unsealed package, and (c) sealed package on control PCB.

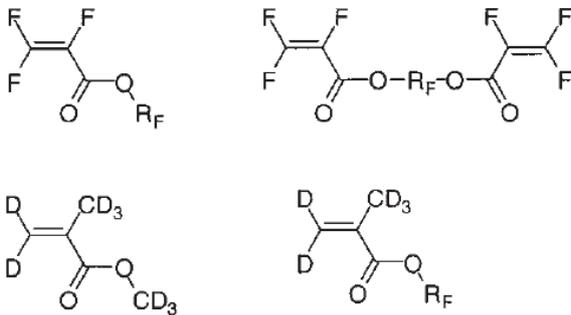
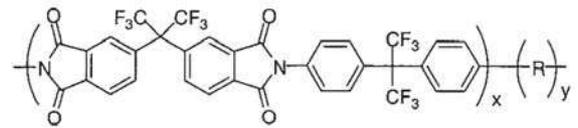


그림 8. Structures of deuterated and fluorinated acrylate monomers developed by NTT.

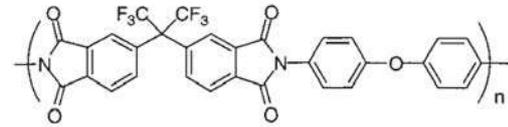
이상으로 매우 높고 광손실이 1550 nm에서 0.43 dB/cm으로 비교적 우수하고 복굴절이 10<sup>-5</sup> 이하로 매우 우수한 특성을 나타내었다.

한편, 폴리이미드계 고분자 재료는 대표적인 내열성 고분자로서 아크릴레이트계 고분자에 비하여 월등히 높은 열안정성을 보인다. 폴리이미드의 우수한 열안정성에 광투명성을 도입하기 위하여 불소화된 폴리이미드계 고분자의 개발이 시작되었으며, NTT, 히타치, GE, 전자통신연구원, 화학연구원 등 여러 연구 그룹에서 연구 개발을 수행하였다. 그림 9에 대표적인 불소화 폴리이미드계 고분자를 나타내었다. 이들 고분자 재료들은 830 nm 부근에서 우수한 광투명성을 나타내었으며 넓은 범위의 굴절률 제어가 가능하고 높은 열안정성을 보였다. Amoco에서는 Ultradel이라는 이름으로, GE에서는 Uitem이라는 상품명으로 개발하였다. 폴리이미드는 방향족 환을 다량 함유하고 배향성이 우수하다. 이러한 특성에 의하여 광학이방성을 나타내기 쉬워 복굴



R: alkylated photocrosslinking group

Ultradel 9020D



Amoco 4212

그림 9. 광통신 소자용 불소화 폴리이미드계 고분자 재료.

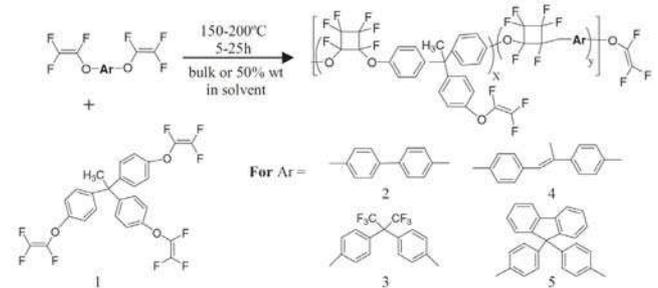


그림 10. 퍼플루오로사이클로부탄계 고분자 재료.

절률이 높고 광손실을 유발할 수 있다. 이미드화 과정에서 용매의 증발 혹은 생성된 부산물인 물의 증발에 의한 핀홀의 발생 등에 의하여 광산란 등을 유발할 수 있다.

퍼플루오로사이클로부탄(PFCB)계 고분자는 단량체 구조에서 보는 바와 같이 트리플루오로비닐에테르 구조가 약 150~200 °C의 열에 의하여 2+2 cyclo addition 반응으로 사이클로부탄 환을 형성함으로써 만들어진다(그림 10).<sup>16</sup> 다우케미컬에서 최초로 개발된 이 고분자는 높은 열안정성( $T_g=400$  °C), 광통신 파장대역에서 비교적 우수한 광손실 특성(0.4 dB/cm) 및 0.002~0.0008로 비교적 낮은 복굴절률의 특성을 보여 세계 여러 연구 그룹의 주목을 받았다. 하지만 이 고분자는 박막 자체의 특성은 우수하나 기판에의 접착력이 떨어지고 다양한 유도체의 부재로 정밀한 굴절률 조절이 불가능하여 초기에 주로 코아 또는 클래드층 한 부분만 담당하는 한계를 가지고 있었다. 그럼에도 불구하고 기본 PFCB 구조가 지니는 저손실, 고온 안정성, 저흡수성 및 우수한 박막 특성과 같은 장점으로 인하여 광중과과학기술원을 비롯한 많은 국내외 연구진에 의하여 다양한 유도체들이 발표되고 있으며, 특히 중앙의 tri-phenol에 다양한 유도체를 만들어 경화 특성, 굴절률 변화 등을 시도하는 연구가 이루어지고 있다.

미국의 Gemfire사는 이차전이온도가 아주 낮은 폴리실록산계 재료를 개발하여 8채널 가변광감쇠기 소자에 적용하였다. 이 고분자 광소자의 성능은 MEMS 기술로 제작한 VOA와 거의 유사한 성능을 보임을 발표하였다. 최근에는 독일의 Microresistor사, 후주의 Redfun 등에서는 졸-겔을 이용한 재료의 개발이 발표되고 있다. 과거에는 졸-겔 재료가 재현성 문제와 완전한 겔화 공정의 어려움 등으로 광손실이 커서 실용화에 문제가 많았지만 최근에는 이러한 문제를 해결한 제품이

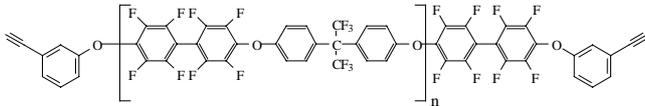


그림 11. 전자통신연구원에서 개발한 불소화 폴리아릴렌에테르계 고분자 재료.

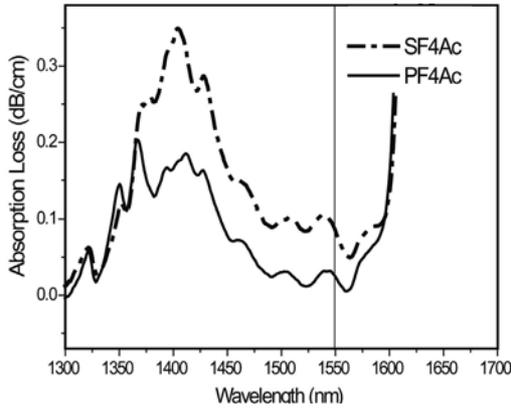


그림 12. Optical loss of SF4Ac and PF4Ac measured by NIR spectroscopy.

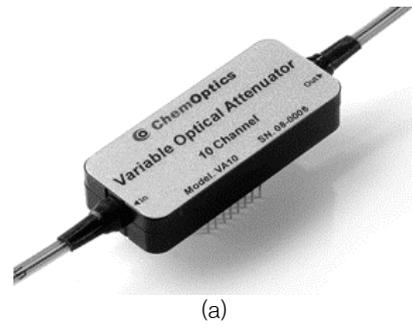
표 4. Optical properties of fluorinated polymers measured by prism coupler at 1550 nm ( $C_H$ =content of hydrogen, RI=refractive index, TO=thermo-optic)

Materials	$C_H$	RI	Birefringence	TO Coeff.	Loss(dB/cm)
SF4Ac	46	1.3804	0.0002	$-1.59 \times 10^{-4}$	0.121
PF4Ac	25	1.3589	0.0007	$-0.73 \times 10^{-4}$	0.074
CF4St	21	1.4083	0.0007	$-1.60 \times 10^{-4}$	0.069

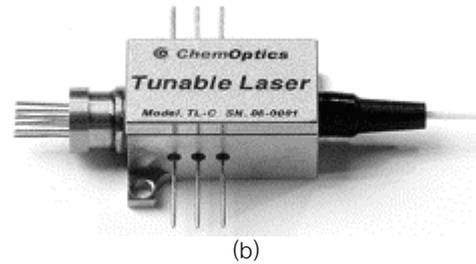
선보이고 있다.

한국전자통신연구원에서는 열에 의해 가교화된 불소화 폴리아릴렌에테르를 개발하였으며, 이 고분자는 우수한 열안정성과 내화확성을 나타냄을 확인하였다(그림 11). 이 재료는 단량체의 변화로 굴절률 조절이 용이하며, 불소 치환율을 높여 1550 nm 파장대역에서 0.28 dB/cm의 광손실을 나타내었으며, 복굴절률이 0.0045 정도로 편광이존성이 낮은 특성을 나타내었다. 또한, 이 고분자는 말단의 아세틸렌기가 고온에서 서로 반응하여 가교 구조를 형성할 수 있어 가교를 위한 촉매가 필요없고 휘발성 부산물의 발생이 전혀 없는 장점이 있다.

한국화학연구원에서는 광가교형 저손실 고분자 재료 개발을 수행하여 star-shaped 환형 실록산계(SF4Ac), 포스페이트계(PF4Ac), 트리아진계(CF4St)를 중심구조로 하는 과불소화 아크릴레이트 혹은 스티렌 재료를 개발하였다. 그림 12는 환형실록산계(SF4Ac)와 포스페이트계(PF4Ac) 재료의 NIR 흡수스펙트럼으로 측정된 광흡수손실 결과를 보여주고 있다. 수소함량지수가 46인 SF4Ac의 광손실이 0.088 dB/cm로 측정된 반면에 수소함량지수가 25인 PF4Ac의 광손실은 0.028 dB/cm로 매우 개선된 값을 보임을 확인하였다. 이들 재료의 광중합을 통하여 얻어진 고분자 수지를 프리즘커플러 방식으로 평가한 광손실, 굴절률, 복굴절률, 열광학특성 결과를 표 4에 나타내었다. 광손실의 경우 수소함량지수가 낮은 재료일수록 낮은 광손실을 나타냄을 확인하였다. 즉, 수소함량지수가 21인 트리아진계 수지가 수소함량지수 45인 실록산계 수지에 비하여 2배 낮은 광손실을 나타



(a)



(b)

그림 13. 캠옵틱스에서 개발한 고분자 광소자.

냄을 확인하였다.<sup>17</sup>

캠옵틱스(주)는 과불소화 아크릴레이트계 단량체를 기반으로 자외선 가교형 폴리아크릴레이트를 개발 시판하고 있다. 이 재료는 얼라이드시그널사에서 개발한 단량체들과 유사한 아크릴레이트계 단량체를 기본 구조로 개발되었으며, 현재 광스위치, 가변 광감쇠기 등의 광소자에 적용되어 광통신망에 공급되고 있다. 최근에 개발된 LFR series는 보다 성능이 향상되어 광손실 0.06 dB/cm, 복굴절률  $10^{-5}$ , 2-3배 높은 열광학계수 등 여러 우수한 성능을 지니고 있다. 그림 13에 캠옵틱스에서 개발하여 시판중인 10채널 가변광감쇠기와 가변파장레이저를 나타내고있다. 가변광감쇠기(VOA)는 15 mW의 낮은 소모전력으로 30 dB의 광감쇠를 실현하였다. 가변파장레이저는 26 nm 이상 파장 가변이 가능하여 C-밴드와 L-밴드까지 커버가 가능하고 1.25 Gb/s의 성능을 나타내었다.<sup>18,19</sup>

#### 4. 맺음말

광통신 부품산업은 2000년대 초반의 침체기를 벗어나 FTTH의 보급 및 확산, 고화질 디지털 TV의 보급, IPTV의 시장 진입 등의 요인에 기인하여 점차적으로 빠른 회복세를 보이고 있다. 초고속광통신 시스템과 무관하지 않은 무선 통신의 눈부신 발전이 이루어지고 있으며 또한 3세대 이동통신인 IMT2000(W-CDMA) 서비스, 방송과 통신이 융합된 DMB(digital multimedia broadcasting) 사업, 초고속 무선 인터넷 서비스인 Wibro 등의 사업이 현실화되었고 보다 편리하고 빠른 통신서비스를 위한 소비자의 요구를 감안하면 관련 시장은 더욱 확대되리라 예측된다. 국내 IT산업은 인프라가 잘 구축되어 있어 관련 광부품의 국산화 효율성이 높다. 그 중 통신 서비스 세계 시장은 2006년의 1조 2,164억 달러 규모에서 2010년까지 연평균 3.2%의 성장률을 보이면서 1조 3,595억 달러에 이를 전망이어서 광부품의 확실한 수출시장이 존재한다. 또한, 70년대 초 시작된 중화학공업의 육성정책의 결과로 화학소재 관련 R&D 수준이 매우 높다.

## 참고문헌

그러나 최종 기능을 증시하는 조립 중심의 국내산업은 핵심 부품의 대부분을 수입하고 있어 국내 부품산업의 개발환경이 열악하다. 부품소재 공급기업은 혁신역량이 부족한 영세기업의 비중이 높아 세계 시장을 선점할 수 있는 신제품 개발능력이 취약하며, 수요기업의 경우 안정적 납품선 확보에 주력하여 부품소재기업을 견인할 수 있는 선도기업이 많지 않다. 그리고 재료개발, 공정개발, 상용화 등 일련의 체계적인 연구가 부족하며 화학소재를 기반으로 하는 부품 연구 관련 인력이 절대적으로 부족하여 화학소재의 특성을 부품에 이용할 수 있는 가능성이 제한된다. 이러한 약점을 극복하기 위해서는 광부품 관점에서 소재연구를 관리할 수 있는 연구 흐름이 필요하며 또한 장기적인 안목에서 핵심소재 및 관련 부품 개발에 대한 범정부차원의 대규모의 연구지원도 필수적이다.

고분자 재료는 관련 광소자의 핵심 경쟁력을 좌우하므로 세계 각 기업들이 자체 개발 등으로 광소자 제작을 수행하고 있으며 관련 화학소재 구조 등에 대한 공개가 전혀 이루어지지 않고 있다. 따라서, 유기 및 고분자 광소자의 국산화를 위해서는 핵심 화학 소재 기술의 자체 확보가 필수적이다. 정보기기내의 광신호 전달용 광전모듈개발은 국내외적으로 활성화되어 있으나 부품간 관련 광도파로 소재 개발 현황은 국내를 포함하여 전세계적으로 아직 미미하므로 미래 재료시장을 겨냥하여 집중적으로 연구 개발에 힘쓴다면 향후 형성될 수 있는 거대 광통신 부품 시장을 선점할 수 있는 좋은 기회를 만들 수 있으리라 본다.

1. 김관중, 유제훈, *전자통신동향분석*, **22**, 130 (2007).
2. 백용순, *광학과학기술*, **2**, 13 (2008).
3. 윤근병, *고분자과학기술*, **18**, 167 (2007).
4. CIR 시장보고서, “광통신 부품 세계시장 전망: 2006-2011” (2006).
5. L. Eldada, *Proceedings of SPIE*, **4642**, 11 (2002).
6. 하승규, 권오식, *고분자과학기술*, **16**, 239 (2006).
7. (a) L. Eldada, *et.al.*, *IEEE J. Select. Top. Quant. Electron.*, **6**, 54 (2000). (b) L. Eldada, *Proc. SPIE*, **5225**, 49 (2003). (c) L. Eldada, *Proc. SPIE*, **5931**, F1-F12 (2005).
8. S. K. Park, S. Park, J. J. Ju, M.-S. Kim, J. T. Kim, and M. -H. Lee, *Polym. Sci. Technol.*, **18**, 153 (2007).
9. H. Ma, A. K.-Y. Jen, and L.R. Dalton, *Adv. Mater.*, **14**, 1339 (2002).
10. M. B. J. Diemer, *Opt. Mater.*, **9**, 192 (1998).
11. Z. Zhang, P. Zhao, P. Lin, and F. Sun, *Polymer*, **47**, 4893 (2006).
12. L. W. Shacklette, R. Blomquist, J. M. Deng, P. M. Ferm, M. Maxfield, J. Mato, and H. Zou, *Adv. Func. Mater.*, **13**, 453 (2003).
13. <http://www.enablence.com>.
14. L. Eldada, *Proc. SPIE*, **6351**, 63510Y-1 (2006).
15. L. Eldada, *et.al.*, “Intelligent Optical Cross-Connect Sub-system on a chip”, *Proc. OFC/NFOEC* (2005).
16. D. W. Smith, S. Chen, S. M. Kumar, J. Ballato, C. Topping, H. V. Shah, and S. H. Foulger, *Adv. Mater.*, **14**, 1585 (2002).
17. 김동욱, 주현경, 강영구, 이창진, unpublished data.
18. 이형중, *고분자과학기술*, **18**, 159 (2007).
19. <http://www.chemoptics.co.kr>.