

광도파로 소자용 선형/열 광학 고분자 소재의  
최근 동향 및 전망

한남대학교  
교수 김환규

## 광도파로 소자용 선형/열 광학 고분자 소재의 최근 동향 및 전망

### <요약>

최근에는 광통신에 있어 대용량 정보의 통신을 위하여 광의 초고속성 뿐만 아니라 병렬성을 이용하여 동시에 여러 개의 파장에 각각의 정보를 실어 전송하거나 신호 처리를 하는 파장분할 다중 (wavelength division multiplexing, WDM) 방식이 각광을 받으면서 이에 필요한 가변파장필터(tunable wavelength filter), Arrayed Waveguide Grating (AWG) 파장 다중/역다중 소자 등의 WDM 광소자에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 WDM 광소자에 있어서 핵심 요소가 되는 것은 저손실 단일 모드 도파 특성을 갖는 선형/열 광학 소재의 개발이다. 이제까지 대용량의 광통신 및 정보기록과 정보처리의 초고속화 구현에 필요한 광소자 및 부품들은 반도체 재료와 무기 재료를 근간으로 발전되어 왔다. 그러나 이러한 광소자 및 부품들의 성능이 거의 재료의 한계 성능에 도달했다. 최근에는 이 물질들의 한계를 극복하기 위해 유기고분자 소재 연구가 미래의 광정보 재료로서 관심의 대상이 되고 있으며, 가장 각광 받을 첨단소재 연구분야이다. 유기고분자 소재의 가장 큰 장점은 무기 재료와 반도체 재료에 비하여 분자 화학에 의해서 물질의 성능을 쉽게 제어할 수 있고, 가격이 저렴하고, 응답속도가 빠르고, 광대역 폭이 높으며, 소자 제작공정이 저온에서 매우 단순하고, 가공성이 좋고, 집적화가 매우 유리하기 때문이다. 이러한 선형/열광 소자를 제작할 수 있는 기본 소재인 선형/열 광학 고분자 물질에 대한 연구는 최근에 미국 JDS의 광부품 판매회사, Akzo Nobel회사의 고분자 광소자, Allied Signal 회사의 선형 및 열 광학 소재가 서로 기술 제휴 또는 합병하여 이 분야의 시장을 독점하려는 추세에 있다. 국내에서도 이 분야 소재에 많은 관심과 연구를 수행하여 성공적인 신 개념의 신 기능 소재의 개발과 이에 따른 광전자소자 개발 등으로 정보 소재 및 광소자의 획기적인 발전을 도모하여, 지금까지 제한적인 유기 고분자 재료의 초고속 정보·통신 산업에의 응용성을 무한하게 할 수 있다

### I. 서론

다가오는 21세기 고도 정보·통신 사회에 대응하는 고품질의 화상 서비스, 원격 진료, 화상회의, 실감 영상 전달 등의 차세대 서비스를 내포하는 대용량의 광통신 및 정보기록과 정보처리의 초고속화를 실현하기 위하여서는 현재의 전자 기술만으로는 한계에 도달하여 광전자/광자 기술 도입이 필연적이며 정보 통신 분야의 광전자/광자 기술 산업이 다른 모든 산업을 주도할 것으로 예상된다. 궁극적으로 광섬유를 이용하여 광대역 특성을 갖는 빛을 매체로 한 광대한 양의 정보 전달 (신문, 방송, 영화, 상품구매 등의 정보 서비스와 고품질의 화상 서비스, 원격 진료, 화상회의, 실감 영상 전달 등의 통신 서비스)을 일상화시키는 것이 목적이랄 수 있을 것이다. 이러한 광대역 종합 통신망 구축이 성공하려면 현재의 전자

기술에 바탕을 둔 현재의 정보 통신 시스템에 비해 빛이 갖는 특성에서 초래되는 광신호의 비간섭성, 광대역성, 그리고 병렬처리 능력 등을 활용하여 통신 시스템에 적용하면 현재의 전자 기술에 의한 정보 처리 능력의 한계를 극복할 수 있기 때문에 광전자/광자 기술의 개발이 시작되었다. 광대역 종합 통신을 구현하기 위한 가장 핵심 요소 소자는 광을 발생시키는 발광소자, 광을 검출하는 수광소자, 광신호 처리하는 광신호 처리소자, 광을 전달하는 수동소자로 나눌 수 있다. 이러한 핵심 소자에 사용되는 재료로는 무기 재료, 반도체 재료 및 고분자 재료 등이 있다. 이제까지 대용량의 광통신 및 정보기록과 정보처리의 초고속화 구현에 필요한 광소자 및 부품들은 반도체재료와 무기재료를 근간으로 발전되어 왔다. 그러나 이러한 광소자 및 부품들의 성능이 거의 재료의 한계 성능에 도달했으며, 생산가격도 매우 높다. 특히 앞으로 초고속 정보 통신 사회를 조속히 실현하려면 물질들의 한계를 극복하고 더욱 발전시키기 위해 신소재의 개발이 시급히 요구되고 있다.

이러한 일환으로 최근에는 유기고분자 소재 연구가 미래의 광정보 재료로서 관심의 대상이 되고 있으며, 가장 각광 받을 첨단소재 연구분야이다. 유기고분자 소재의 가장 큰 장점은 무기 재료와 반도체 재료에 비하여 분자 화학에 의해서 물질의 성능을 쉽게 제어할 수 있고, 가격이 저렴하고, 응답속도가 빠르고, 광대역 폭이 높으며, 소자 제작공정이 저온에서 매우 단순하고, 가공성이 좋고, 집적화가 매우 유리하기 때문이다. 유기고분자 소재는 저속 및 고속 공간 분할 광소자 등과, 필터 소자, 광교환소자 등에 사용될 수 있으므로, 미국의 IBM, AT&T를 비롯한 기업체 연구소뿐만 아니라 DARPA와 같은 국방연구지원기구에서도 관심을 가지고 연구 지원을 계속하고 있으며, 유럽의 경우는 영국, 프랑스, 독일, 네덜란드, 등 구미 여러 나라에서 차세대 통신 및 컴퓨터 인터커넥션에 필요한 광교환 소자의 제작을 위한 컨소시움을 결성하여 비선형 광학 고분자 소재 및 소자의 개발을 유럽 공동체의 RACE 연구과제로 추진하였으며, 그 후 RACE 연구과제 후속 거대연구과제인 ACTS에서는 열에 의해 광굴절률의 변화를 이용하는 실용성이 강한 열광 고분자 재료 및 소자 개발에 대한 연구가 매우 활발하다.<sup>1</sup>

최근에는 광통신에 있어 대용량 정보의 통신을 위하여 광의 초고속성 뿐만 아니라 병렬성을 이용하여 동시에 여러 개의 파장에 각각의 정보를 실어 전송하거나 신호 처리를 하는 파장분할 다중 (wavelength division multiplexing, WDM)

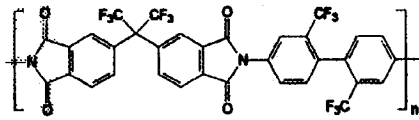
방식이 각광을 받으면서 이에 필요한 가변파장필터(tunable wavelength filter), Arrayed Waveguide Grating (AWG) 파장 다중/역다중 소자, 라우터 (router) 등의 WDM 광소자에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>2-5</sup> 이러한 WDM 광소자에 있어서 기본적인 요소가 되는 것은 저손실 단일 모드 도파 특성을 갖는 광도파로 소재의 개발이다. 광도파로 소재에는 실리카, 반도체, LiNbO<sub>3</sub>, 그리고 고분자 소재 등의 다양한 재료가 개발되어 다양한 소자 제작에 사용되어왔다. 특히, 유리 광섬유 (GOF) 광섬유 재료인 실리카를 이용한 광도파로 소자는 0.01 dB/cm이하의 낮은 광도파로 손실과 높은 안정성 때문에 많은 연구가 진행되어 다양한 광소자가 상용화 되고 있다.<sup>6,7</sup> 그러나, 실리카를 이용해 광도파로를 제작하려면 1,000 °C 이상의 고온 제작 공정과 고가 제조 장비가 필요하다. 또한 실리카는 광도파로 소자를 제작하려면 1,000 °C 이상의 고온의 공정을 거치므로 실리콘 기판과 실리카 간에 열팽창계수의 차이로 오는 열스트레스에 의한 편광으로 복굴절률 (birefringence)이 달라지게 된다.<sup>8</sup> 그러므로 실리카를 이용한 광도파로 소자는 도파 시키고자 하는 광의 편광에 의존하게 되므로 이러한 편광 의존성을 낮추기 위해, 고분자 quarter wave plate의 기능 소자를 삽입하여 사용한다. 그리고 또한 고분자에 비해 1/10정도의 낮은 열광학 효과로 인해 열광학 소자의 구동을 위해 높은 소비 전력이 필요하다. 최근에 들어서는 저손실 선형 광학 고분자 소재 또는 저손실 고분자 광도파로 소재 (low-loss polymeric optical waveguides, LLPOW)가 속속들이 개발되어 이들의 낮은 광도파로손실, 높은 열광학 효과, 편리한 가공성을 이용한 다양한 광소자 연구가 진행되고 있다.<sup>9-11</sup> LLPOW 재료는 WDM 광소자 뿐만 아니라 광상호 연결 소자 (optical interconnector), power splitter 및 combiner, 및 polarizer와 같은 수동소자, 열에 의한 광신호를 제어 하는 열광학 스위치, 가변 감쇄기 (tunable attenuator) 등의 열광학 소자에 사용된다.<sup>12</sup>

## II. 선형/열 광학 고분자 소재로 요구 되는 특성

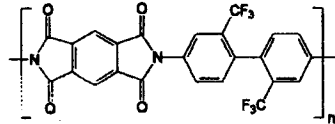
저손실 선형 광학 고분자 소재 또는 저손실 고분자 광도파로 소재 (low-loss polymeric optical waveguides, LLPOW)로 요구 되는 특성은 높은 열적 및 환경 안정성, 1.3  $\mu\text{m}$  이나 1.55  $\mu\text{m}$  파장에서의 저 광진행 손실, 미세한 굴절률 조절성, 다양한 기판의 사용 가능한 접착성, 다층 적층성, 치수 안정성 및 유연성, 연결성, 미세 광부품과의 집적화 용이성, 가격이 저렴성 등이다.<sup>13</sup> 또한 최근 다양

OPI series by NTT.

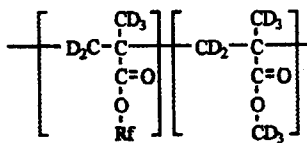
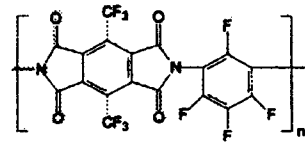
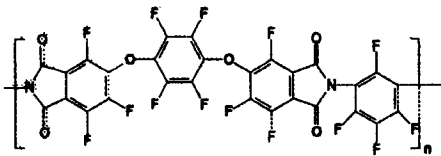
Fluorinated Polyimides for Optical Devices.



6FDA/TFDB



PMDA/TFDB



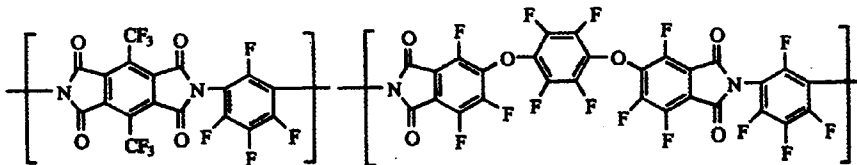
R<sub>f</sub>: Perfluoroalkyl

PFMA

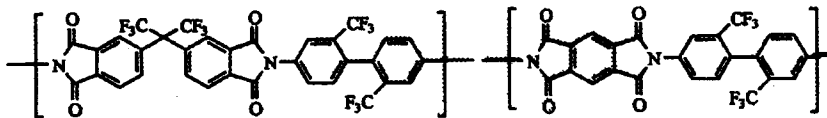


R = deuterated phenyl PhCl<sub>3</sub>

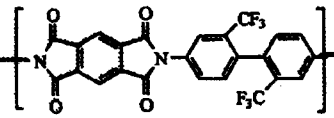
Deuterated polysiloxane.  
Phenylsilsesquioxane (PPSQ)



10FEDA/4FMPD

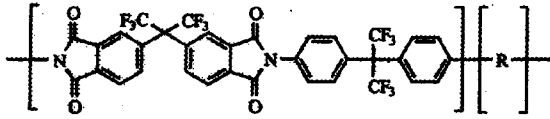


6FDA/TFDB



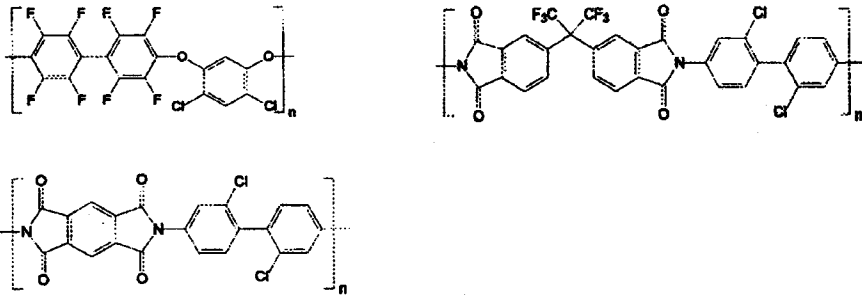
PMDA/TFDB

Ultradel 9000 series at Amoco Chemical.

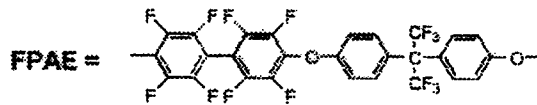
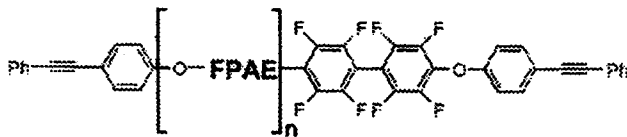


Ultradel 9020D  
 Ultradel 9120D  
 R: alkylated  
 photocrosslinking group

Chloro-fluorinated polymers at Samsung.

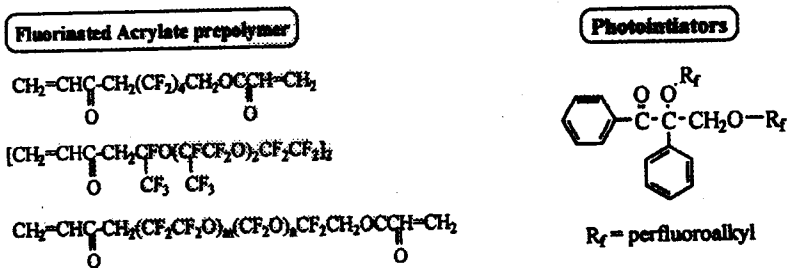


FPAE-PET at ETRI

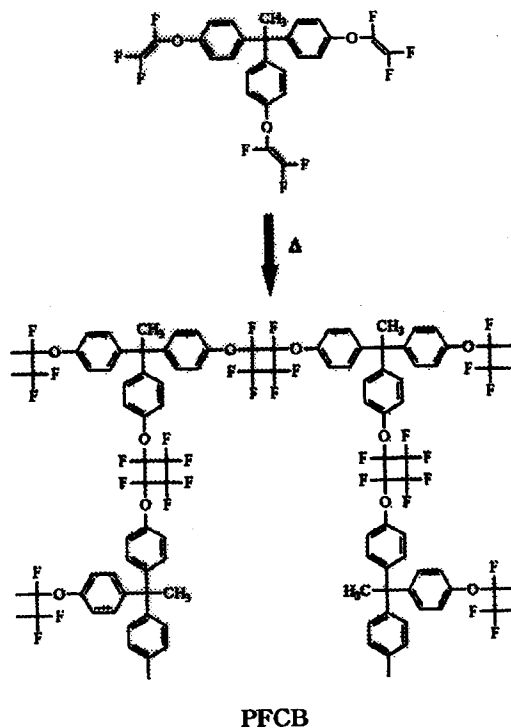


Thermally cured FPAE

UV-curable fluorinate acrylate at Allied Signal.



PFCB at DOW CHEMICAL.



Scheme 1. 저손실 고분자 소재의 화학적 구조.

한 기능을 하나의 기판에 집적화한 광집적 소자가 요구 되고 있으며, 광집적화에 필요한 기본 요소는 일단 물질 자체의 광손실이 작아야 되고, 외부 환경에 의한 변화가 작은 안정된 소자가 꾸밀 수 있어야 하며, 가격 경쟁력도 높아야만 된다. 이런 특성에 가장 적합한 재료로 실리카 보다 더 고분자 소재를 이용한 평면 도파로형 광소자, 광 상호 연결, 및 광전 집적 회로(optoelectronic integrated circuit) 응용에 중요한 모든 특성을 갖추고 있다.

### III. 선형 광학 고분자 소재

선형 광학 소재를 이용한 평면 도파로형 광소자의 초기 연구는 주로 기존의 PMMA를 사용하여 제작하였다.<sup>14</sup> 그러나 PMMA는 Near IR 영역에서의 광손실이 1 dB/cm 이상으로 크기 때문에 이의 개선을 위하여 일본의 NTT에서는 이중수소 치환된 (deuterated) MMA와 deuterated, perfluoro MA 단량체를 여러 조성비로 공중합하여 굴절율이 잘 조절 된 물질을 클래딩 및 코어로 이용하여 광손실이 1.3  $\mu\text{m}$ 에서 0.08 dB/cm로 아주 우수한 저손실 광소자를 구현하였다.<sup>15</sup> 그러나 PMMA 계는 Tg가 100  $^{\circ}\text{C}$  정도로 열 안정성이 떨어진다. 이의 문제점을 해결하고자 NTT에서 열분해 온도가 400  $^{\circ}\text{C}$  이상인 열경화 deuterated polysiloxane을 개발하였다.<sup>16</sup> 또한 내열성, 가공성이 뛰어난 다양한 종류의 perfluorinated polyimides를 개발하여 발표하였다.<sup>17-18</sup> Perfluorinated polyimides의 경우 물질 자체의 큰 복굴절율로 인한 편광 독립이 어려우며, 비교적 큰 흡수성으로 인한 광손실이 매우 높다.<sup>19</sup> 미국의 Amoco Chemicals사에서 광소자용으로 개발하여 상용화한 fluorinated polyimides (Ultradel 9000D series)는 광손실이 1.3  $\mu\text{m}$ 이나 1.55 $\mu\text{m}$ 에서 각각 0.5, 0.9 dB/cm로 비교적 크고, 복굴절이 큰 단점이 있으나, photo-crosslinking 되도록 분자설계되어 photolithography에 의한 보다 더 단순한 제작 공정으로 쉽게 광소자를 제작할 수 있어 많은 연구가 이루어졌다.<sup>20</sup> 최근 미국의 Allied Signal사에서 UV-curable fluorinated acrylate를 이용한 광소자 개발을 발표하였다.<sup>121</sup> 이 개발한 물질은 acrylate의 photo-crosslinking 특성을 이용하여 350  $^{\circ}\text{C}$  이상의 열안정성을 확보했을 뿐 아니라, 기존의 photolithography나 laser direct-writing 공정으로 쉽게 소자 제작이 가능하여 소자 제작 단가를 낮출 수 있었다. 또한 1.3  $\mu\text{m}$  또는 1.55  $\mu\text{m}$ 에서의 광손실이 각각 0.03, 0.05 dB/cm로 거의 실리카( $\text{SiO}_2$ )에 대등한 수준에 이르렀으며, 굴절률을 1.3에서 1.6까지 단계적으로 조절 가능하며, 이의



복굴절률이 0.0008 정도로 편광 무의존성이 매우 높았다. 그 외에도 최근 선형 광학 고분자 광소자에 관한 중요성이 증가됨에 따라 물질의 요구 특성이 비슷한 기존의 플라스틱 광섬유(plastic optical fiber)용 물질 및 반도체용 저유전상수 고분자 물질 등의 화학적 구조의 변화를 통한 선형 광학 고분자 소재 개발 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>8(a),22</sup> 현재까지 발표된 1.3  $\mu\text{m}$  또는 1.55  $\mu\text{m}$ 에서의 저손실용 고분자 소재의 화학적 구조를 Scheme 1에 나타내었고, Table 1에 물성을 요약하였다.

광도파로용 선형 광학 소재의 요구되고 있는 많은 물질 특성중에서도 1.3  $\mu\text{m}$  또는 1.55  $\mu\text{m}$ 에서의 낮은 광진행 손실이 가장 중요한 특성이다. 광도파로의 전체 광손실 ( $L_{\text{waveguide}}$ )은 물질 고유의 광흡수( $L_{\text{absorption}}$ ), 고유 광산란 ( $L_{\text{scattering}}$ ), 그리고 외부 요인 ( $L_{\text{extrinsic}}$ ) (먼지, 공정상에서 야기되는 부정확성, voids, crack, impurities 등)에 기인한다.<sup>1,23</sup> 즉,

$$L_{\text{waveguide}} = L_{\text{absorption}} + L_{\text{scattering}} + L_{\text{extrinsic}} \quad (1)$$

고분자 물질에서의 광산란에 의한 손실은 주로 Rayleigh 산란에 의해 일어난다.<sup>24</sup>

$$\alpha_i = \frac{8}{3} \pi^3 \frac{\kappa T}{\lambda^4} \beta \left[ \frac{(n^2 - 1)(n^2 + 1)}{3} \right] \quad (2)$$

$\alpha_i$ 는 내부 산란에 의한 광손실이고,  $\beta$ 는 isothermal compressibility이다. 일반적으로 고분자의 광통신 영역에서의  $\alpha_i = 10^{-5}$  dB/cm 정도이며, 등방성 고분자 물질의 Rayleigh 산란 손실은 상온에서 1.3  $\mu\text{m}$ 에서 약  $10^{-5}$  dB/cm로 광손실에 큰 영향이 없다. 그리고 외부 요인에 의한 광손실은 공정 최소화를 통해 최소화 할 수 있다. 그러므로, 저손실 고분자 합성을 위해서는 분자 설계 단계에서부터  $L_{\text{absorption}}$ 에 의한 고분자 물질 고유의 흡수를 최소화할 수 있도록 해야한다. 고분자 물질 고유의 광손실은 전자전이 흡수 (electronic transition absorption)과 적외선 진동 흡수 (infrared vibrational absorption)에 의한 것이다. 고분자에서 전자전이 흡수 손실은 주로 C=C 이중 결합의  $\pi - \pi^*$  전이와 C=O 결합의  $n - \pi^*$  전이에 따른 흡수로

Table 1. 저손실용 고분자 소재의 특성

Institute	Materials	Thermal stability (°C)	Birefringence	Optical Loss (dB/cm) (material)
AlliedSignal	UV-curable	Td > 350	$\Delta n = 0.0008$	0.03 @1.3
	Fluorinated acrylate	TGA	@543.5nm	0.05 @1.55
NTT	Deuterated fluorino methacrylate	Tg = 100 DSC	Very small	0.084 @1.3
	Deuterated polysiloxane	Td > 400	Very small	0.17 @1.3
	Perfluorinated Polyimides	TGA Tg = 309 DSC	$\Delta n > 0.04$	0.43 @1.55
Akzo Nobel	Halogenated polymer	Td > 150	Very small	0.25 < @1.55
Dow Chem.	Perfluorocyclobutane (PFCB)	Tg = 400	$\Delta n = 0.0008$	0.25 @1.3 0.20 @1.55
	Thermal curable FPAAE-PEP	Td > 500	$\Delta n < 0.007$	0.20 < @1.55
ETRI	Thermal curable FPEK-EP	Td > 400	$\Delta n < 0.003$	0.20 < @1.55
	Fluoro chlorinated poly(arylene ether) (FCPAE)	Td > 400	-	0.20 < @1.55
Samsung	Fluoro chlorinated Polyimides	Td > 400	-	-
	Fluoro chlorinated Polyimides	Td > 400	-	-
Hannam univ.	Fluorinated polyimides	Td > 400	-	-

UV-visible 영역에서 일어나기 때문에, 광통신 파장 영역인 1.3  $\mu\text{m}$  또는 1.55  $\mu\text{m}$ 에서의 전자 전이에 의한 흡수는 무시된다. 그러나 일반적으로 고분자 소재는 적외선 영역에서 분자 구조 내의 진동에 의한 고유의 흡수 영역을 가지고 있다. 특히, C-H (또는 O-H, N-H) 결합에 의한 근적외선 영역의 진동 흡수 손실은 2차 및 3차 배수 harmonic overtones에 기인하는 것이 광손실의 주된 원인이다 (그림 1). 이러한 광손실 문제를 해결하기 위하여 C-H 결합을 중수소나 불소로 치환한, 즉 C-D 혹은 C-F 결합으로 치환하여 환산 질량을 증가시켜, harmonic overtones을 장파장으로 이동시켜 원하는 파장 대에서의 흡수를 최소화 할 수 있다. Hoechst Celanese 사의 모델 용매 들의 고유 흡수 실험 결과에 따르면 aliphatic C-H bond에 의한 흡수 손실이 aromatic C-H bond에 의한 흡수 손실에 비해 1.3  $\mu\text{m}$  또는 1.55  $\mu\text{m}$ 에서는 각각 3배, 5배 크다. 또한, 중수소로 치환했을 경우 1.3  $\mu\text{m}$ 에서는 현저히 흡수세기의 감소가 있으나, 1.55  $\mu\text{m}$ 에서는 아직 약간의 흡수가 있으며 특히 1.53  $\mu\text{m}$ 에서 강한 harmonic overtones 흡수 피크가 있다. 그러나 불소로 치환했을 때에 1.1 ~ 1.7  $\mu\text{m}$ 에 걸쳐 거의 흡수에 의한 손실이 나타나지 않는다(그림 2).<sup>25</sup> 그림 3은 단량체 MMA, d-MMA 및 d-FMA의 파장에 따른 광손실을 보여 주고 있다.<sup>9,26,27</sup> 이 그림 3에서 볼 수 있듯이 C-H 대신에 C-D나 C-F로 치환했을 때, 가시광선영역에서의 흡수는 감소하고, 흡수 파장대가 장파장으로 이동함을 보여 주고 있다. d-MMA 및 d-FMA의 두 단량체는 MMA보다도 1.3  $\mu\text{m}$ 에서도 낮은 광전송 손실을 보여 주고 있다. 그리고 또한, 1.55  $\mu\text{m}$ 에서는 d-FMA의 단량체가 d-MMA의 단량체 보다도 낮은 광전송 손실을 보여 주고 있다. 또한 그림 4에서는 d-PMMA 및 PMMA에 대한 같은 경향의 광전송 손실 결과를 보여 주고 있다. 다시 정리하면, 1.3  $\mu\text{m}$ 에서는 C-H 대신에 C-D나 C-F로 치환하면 광전송 손실을 줄일 수 있으나, 1.55  $\mu\text{m}$ 에서는 C-H 대신에 C-F로 치환해야 광전송 손실을 현저히 줄일 수 있다. 광도파로 소자 제작을 위해 코어 층과 클래딩 층의 굴절률 조절이 매우 중요하다. 이를 위해 고분자 소재의 광굴절률은 공중합을 이용하면 쉽게 조절 할 수 있다. 그의 한 예를, 그림 5에서 d-MMA 및 d-FMA의 두 단량체의 조성비를 달리하면서 공중합시켜 얻어진 공중합체에 대한 불소 함유량에 대비한 굴절률 변화를 나타내었다. 그림 5에서 알 수 있듯이 불소 함유량이 증가하면 굴절률이 감소함을 보여 주고 있으며, 이 공중합을 이용하면 굴절률의 차를 0.0001까지 조절 할 수 있다.

또한 중요한 인자는 복굴절률이 없는 물질을 개발하는 것이다. 광소자가 편광에 의존하지 않고 안정되게 작동되려면, TE 모드와 TM 모드 사이의 굴절률의 차 (복굴절률)가  $(\lambda_{TE} - \lambda_{TM}) < (1/10)\Delta\lambda$ 를 만족해야 한다.<sup>1</sup> PMMA이나 실리콘 레진 등과 같은 등방성 비정질 물질의 복굴절율( $\Delta n = C_{60} \cdot \sigma$ )은 주로 공정상의 열스트레스( $\sigma$ )에 의해 나타나는데,  $C_{60}$ 는 스트레스 광학계수, 이것을 줄이려면 고분자의 경우 복굴절률이 반대로 나타나게 공중합과정을 시키거나, 다른 고분자를 blending하여 사용하면 된다. 그러나, 폴리머드와 같은 비등방성 비정질 고분자는 구조 자체가 비등방성 특성을 가지고 있어 복굴절률이 아주 큰 것이 단점으로 지적되고 있고, 이를 줄이는 분자 설계를 통한 등방성 특성을 가지는 소재 개발이 절대적으로 필요하다.

국내에서는 저손실 선형 광학 소재 분야는 한국전자통신연구원에서 시험하는 수준이고, 최근에는 폴리머 선형 광학 소자의 경제적인 잠재 시장성을 인식하여 국내의 삼성, LG 전자의 기업연구소 및 한남대, 광주과학기술원 등에서 상당한 연구 개발 단계에 있다.

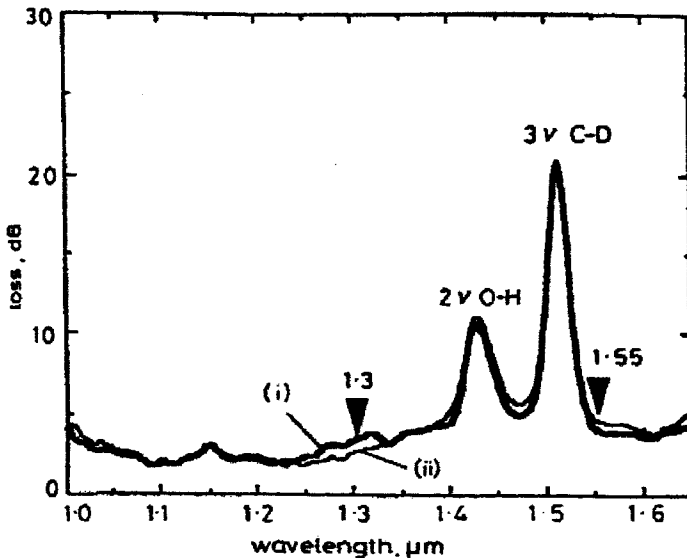


그림 1. Propagation loss dependence on wavelength for straight waveguides  
 (i) before heating  
 (ii) after heating at 120°C for 10h

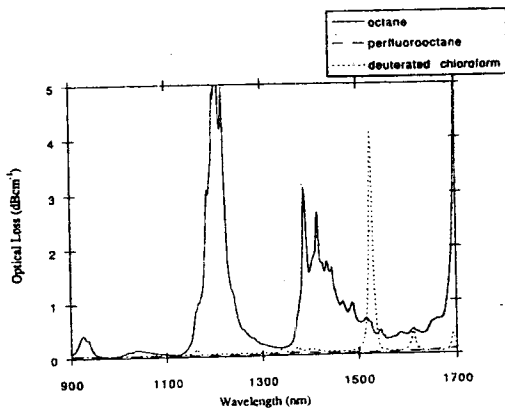


그림 2. Optical loss in the near infrared of solvents octane, perfluorooctane, and deuterated chloroform.

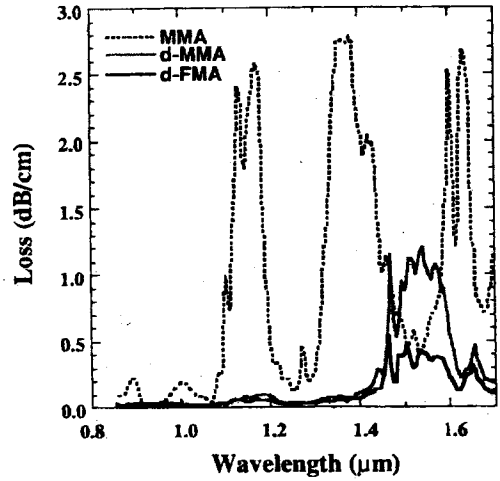


그림 3. Loss spectra of d-MMA and d-FMA compared to that of MMA.

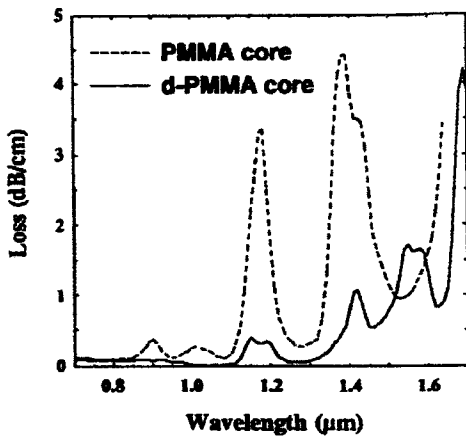


그림 4. Loss spectra of a d-PMMA core single-mode waveguide compared to that of a PMMA core waveguide.

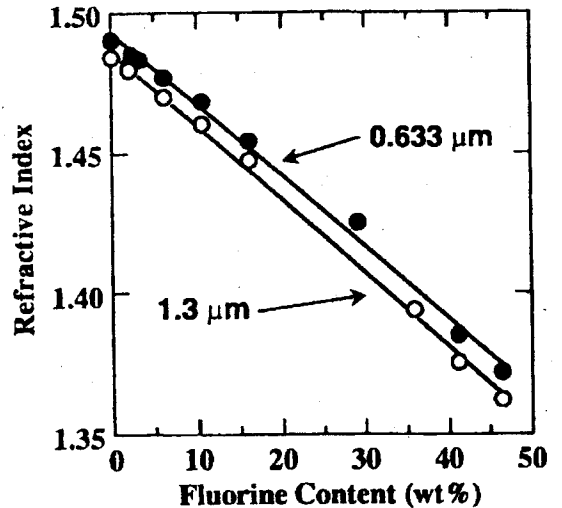


그림 5. Relationship between the d-PMMA fluorine content and refractive index. Refractive index werw measured at both 0.633 and 1.3 $\mu$ m.

#### IV. 열광학 고분자 소재

현재의 광통신 시스템은 시간다중분할 방식 (TDM)과, 파장 분할 방식 (WDM) 등의 광대역화를 꾀하고 있으며, 이에 필요한 광신호의 발생은 반도체 레이저를 직접 구동시키는 직접 변조 방식을 사용하고 있으나 보다 높은 해상력과 고속정보 처리가 필요한 화상회의, 양질의 HDTV, 영상화면의 전송등과 같은 고도의 종합통신망에서는 비선형광학 물질을 사용하는 수십 Gbps이상의 처리능력을 갖는 Mach-Zender interferometer (MZI) type의 간접구동 방식이 사용될 전망이다. 이들이 바로 전기적 신호를 광신호로 변환시키거나, 신호진행 방향을 조정하는 스위칭 등으로 대별되는 전기광학(EO) 소자들이다. 이들 전기광학 소자들을 이용할 경우 nano second ( $10^{-9}$ sec) 이하의 짧은 시간에 정보처리가 가능하다는 장점 때문에 prototype의 EO소자들이 미국, 일본, 독일 등에서 이미 발표되어 있으며 조만간 상업화 될 것으로 기대된다. 국내에서도 비록 외국의 비선형광학 물질을 사용하였지만, 1995년에 한국전자통신연구에서 구동 특성등이 매우 우수한 EO 소자를 개발하여 외국의 전자박람회출품하여 호평을 받았다. 이에 따라 국내의 삼성 및 LG 전자회사에서도 이에 큰 관심을 가지고 연구를 수행하고 있다.

반면에 이러한 고속 통신용 WDM 광네트워크 속에 있는 단말기 (port)를 약 10ms이하의 짧은 시간에 연결하여 주면서도 전기광학 소자의 단점인 편광의존성, 장기 신뢰성 (시간 및 온도에 따른 구동 performance)의 감소, 광손실 등의 일반적인 문제를 해결할 수 있는 새로운 광소자의 개발이 필요하다. 이는 각 광소자의 사용분야에 따라 분류될 수 있는데, 경우에 따라서는 편광무의존성 (polarization insensitivity)이 고속 스위칭 속도보다 더욱 중요할 필요가 있는 TV수상기, CATV의 튜너, 광정보 통신망의 우회선 확보, 단거리 LAN용 회선 다양화, 회선 신호의 배분 및 AWG 파장분할형 소자 등에서는 이러한 요구가 더욱 필요하며, 이들 새로운 방식의 소자들은 우리의 일반생활에 더욱 친밀한 용도 (예: 가전 제품)로 사용될 것으로 기대되기 때문에 전기광학 소자보다 훨씬 시장성이 크다고 할 수 있다. 이와 같은 특성을 가지는 가장 유력한 대체 소자가 바로 열광학 소자이다. 더욱이 전자산업에서의 회로기판에 비유될 수 있는 광도파회로 (photonic lightwavecircuit : PLC) 또는 광집적회로 (intergrated Optical circuit)의 구성에서는 이 열광 소자의 필요성이 더욱 중요하며 이러한 광소자 기술들은 머지 않은 장래에 고속 광통신망의 필수 소자로 사용될 것으로 추정되고 있다. 열광학 소자

의 작동원리는 전기광학 소자의 원리와 같이 광도파로내의 굴절률 변화를 응용한 것으로서 전기광학 소자에서의 전기적인 광신호을 열 (heater)로 바꾸어 놓은 것으로서 그림 6과 같은 구조를 가진다.<sup>28-30</sup>

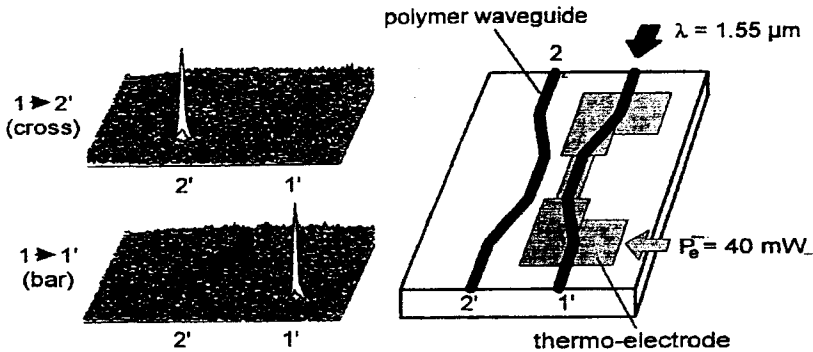


그림 6. Schematic layout and near fields of the switching states of an asymmetric polymer-based TO-(2x2)-DC-type switch( $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ ).

즉 열에 의해 코어층의 광굴절률이 변화하고, 이에 따라 도파로내의 광신호 진행 방향이 바뀌게 되어 스위칭 역할을 하게 되는 것이다. 이 열광 소자는 고분자계 전기광학 소자에 사용되는 전기광학 특성 부여를 위한 비선형광학 물질, 즉 polar한 화합물인 chromophore의 사용이 요구되지 않고, 또한 poling이라는 noncentrosymmetry 구조제작 공정이 필요하지 않기 때문에 광도파로 및 스위칭의 제작이 매우 단순하다는 장점과 함께 시간에 따른 performance의 감소 (temporal stability 문제), 극성물질 존재관련 optic loss의 감소 등과 같은 비선형 광학 소자에서 발생하는 제반 문제가 거의 없다는 큰 장점이 있다. 즉 thermo optic switch에는 열에 의해 굴절률변화 ( $dn/dT$ )가 있는 모든 물질들, 예를 들면 무기물 (silica,  $\text{LiNbO}_3$ ), 및 유기 고분자이 사용될 수 있다.

최초로 제안된 TO 스위치는 1982년 M. Haruna 등에 의해 제작된 silica를 이용한 것이며 이후 여러 가지 무기물, 그리고 고분자 물질들을 이용할 수 있음이 발표되고 있다.<sup>31</sup> 무기물과 고분자 물질들의 차이는 아래 Table 2에 나타난 바와 같이 무기물의  $dn/dT$ 의 값이 고분자의 그것에 비해 작기 때문에 구동소비전력이

매우 커 열광학용 소재로서는 부적합하다. 다만 TO의 특성연구나 prototype의 구조조사 연구 등에서는 아직도 많은 연구가 진행되고 있다.<sup>29</sup>

반면 고분자의 열에 의한 굴절률 변화는 온도에 따른 밀도변화 즉 열팽창 계수와 밀접한 상관관계를 가지고 있으며,  $dn/dT$ 의 값은 무기물에 비해 10배 이상 커 전력손실을 크게 줄일 수 있다. 일반적인 고분자의 측정 또는 추정(계산된)  $dn/dT$ 값을 Table 3에 나타내었다.<sup>32</sup> 고분자의  $dn/dT$ 값은  $1.0 \sim 3.0 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$  범위로서 TO소자로서의 요구특성범위에 잘 일치하고 있다.

**Table 2.** 열광학소자 (Thermo-optic Device)의 비교.

	실리카 (SiO <sub>2</sub> )	폴리머
열광학계수 ( $dn/dT$ )	낮다 ( $-1.4 \times 10^{-5} / \text{K}$ )	높다 ( $-14 \times 10^{-5} / \text{K}$ )
열전도성	높다 (1.4 W/m K)	매우 낮다 (0.05~0.2 W/m K)
소비전력	높다 (~ 500 mW)	매우 낮다 (5~ 50 mW)
소자구조	interferometric (Mach-Zehmder)	interferometric/digital (MZ, DC/X, Y-switch)
광손실 (통신파장 영역)	매우 낮다 (0.04 dB/cm)	낮다 (<0.3 dB/cm)
속도	1ms 정도	1ms 정도
편광의존성	낮다 (<1dB)	매우 낮다 (<0.3dB)
가격	저렴	저렴
대표 소자	※ Power splitter ※ AWG DWDM demultiplexer	※ Thermo-optic switch

단, rubbery state의  $dn/dT$  값은 glassy state의  $dn/dT$ 보다 약 2~3배 큰 값을 나타내고 있지만 낮은  $T_g$ 의 고분자를 사용할 경우에는 광도파로 제작, electrode 제작, 그리고 순간적인 온도급상승에 견딜 수 있어야 하기 때문에 높은  $T_g$ 를 가진 고분자의 사용이 필요하다.

열광 소자는 전기광학 소자에 반하여 편광무의존도, 시간에 따른 성능의 안정성, 그리고 저손실 등의 장점 때문에 전화/통신회사들인 NTT(일본), AKZO Nobel(네덜란드) 등의 선진 우수기업들을 중심으로 주도적으로 연구되고 있으며, prototype의 실험소자들인 (2×2), (4×4), (8×8) 열광 소자용 스위치들의 개발을



**Table 3.** 일반적인 고분자의  $dn/dT$  값 및 특성.

Polymer	refractive index (n)	TCE		$dn/dT$ ( $-1 \times 10^{-4}K$ )		Tg(°C)	remark
		( $\alpha$ ) ( $10^{-4}/^{\circ}K$ )	( $\beta$ ) ( $10^{-6}/^{\circ}K$ )	measure d	calc.		
PAN	1.518	1.4		0.98	0.863	87-103	
Polychloroprene	1.558	6.0		3.6	4.056	-45	rubbery
Polyisoprene	1.5191	6.7		-	4.141	-72	rubbery
PMMA	1.492	2.55		1.1	1.476	100	
PET	1.5760	1.71		-	1.203	67	crystal
PP	1.49	2.04	68×3	-	1.17	-18	crystal
PS	1.59-1.60	1.71-2.10		1.42	1.24-1.556	100	
Teflon	1.376	2.97	99×3	-	1.25	126	
PVC	1.541	2.07		1.11	1.346	81	
PC	1.586	2.05	3.8 in / in °F × 10 <sup>-5</sup> × 3 × 1.8	1.43	1.474		
PS-co-PMMA	1.562	1.944	3.6 in / in °F × 10 <sup>-5</sup> × 3 × 1.8	1.40	1.326		
PS	1.590	1.89	3.5 in / in °F × 10 <sup>-5</sup> × 3 × 1.8	1.20	1.371	100	
PMMA	1.491	1.944	3.6 in / in °F × 10 <sup>-5</sup> × 3 × 1.8	0.85	1.22	100	
Polytetrafluoroethylene (PTFE)	1.35	3.0	100		1.164	-133/127	
Tetrafluoro / Hexafluoro propylene (PFEP)	1.338	2.4	100		0.895	-	
Polycarbonate (PC)	1.5850	1.8/2.1	60/70	1.43	1.292/1.507	145	
PET	1.5750	2.1	70		1.474	69	
PBT		1.8	60			-	
Polysulfone	1.663	1.62	54		1.286	-	
PPS	-	1.65	55		-	-	
Polyarylsulfone	-	1.41	47		-	-	
Polyaryl phthalate	1.571	0.3/1.05	10/35		0.201/0.73	-	
Epoxy		0.3/1.05	10/35		0.200/0.700	-	
PU (thermoset)	1.5-1.6	0.3/0.6	10/20		0.199/0.398	variable	G/R
PU (thermoplastic)	1.5-1.6	4.5	150		2.987	variable	G/R
PU (linear)	1.5-1.6	6.3	210		4.183	variable	G/R
Cellulose acetate	1.48-1.50	3.6	120		2.073	variable	glassy
Cellulose acetate/propionate	1.47	3.3/3.9	110/130		1.807/20136	variable	glassy
Cellulose acetate/butyate	1.46-1.49	3.6	120		1.972	variable	glassy
LDPE	1.51	7.5	250		4.536	-125	rubbery

최근에 발표하였다. 열광학 스위칭소자의 기본적인 개념자체는 1982년 M. Haruna 에 의해 제작된 silica물질을 이용한 무기계 소자에서부터 출발되었으며,<sup>31</sup> 1989년 에 이르러서 네덜란드의 Diemeer 등에 의해, 매우 단순한 고분자이며 Tg를 가진 polyurethane과 PMMA를 사용한 열광학 스위칭소자를 He/Ne laser에서 구동 시킴으로서 고분자에 대한 관심이 높아졌다.<sup>28</sup>

1.3 $\mu$ m의 광원을 사용한 본격적인 광통신용 고분자계 열광학 스위칭소자는 1993년에, NTT의 Hida 등에 의해 발표된 (2 $\times$ 2) 스위칭소자로서 deuterated 또는 deuterated fluoro methacrylate를 열광학 스위칭소자의 core물질로 사용한 것이다.<sup>34</sup> 이들 연구팀은 1994년 내열성이 우수한 deuterated 방향족 siloxane을 사용한 광도파로의 제작, PMMA계 고분자를 사용한 AWG 파장분할형 소자 (arrayed-wave guide multiplexer)를 발표하는 등 활발한 연구활동을 계속하고 있다.<sup>10,33</sup>

이들과는 별도로 독일의 Heinrich-Hertz Institut (HHI)의 Strebel등은 광경화성 고분자인 BDK/PMMA를 사용한 도파로 제작방법을 사용하여 1ms의 응답시간 과 편광의존도가 0.5dB보다 작은 우수한 특성의 (4 $\times$ 4) 열광학 스위칭소자를 제작 발표 하였으며 구동소자 제작 및 광도파로 설계 등의 시뮬레이션을 통해 소자 제작에 필요한 중요한 연구들을 발표하였다.<sup>14,29</sup> 최근에는 네덜란드 AKZO Nobel 회사에서는 자세한 화학적인 구조가 전혀 밝혀지지 않은 "감광성고분자"를 사용한 (1 $\times$ 2) 스위치를 개발하였는데 이 소자의 특성으로서는 3.6 dB의 insertion loss, 1ms의 스위칭시간, 그리고 편광의존성은 거의 없다고 발표하였다. 이 AKZO Nobel에서는 개발된 (1 $\times$ 2) 스위치를 prototype으로하는 열광학 스위칭소자를 Beam Box<sup>®</sup> 이라는 상품명으로 판매하기에 이르렀다 (그림 7).

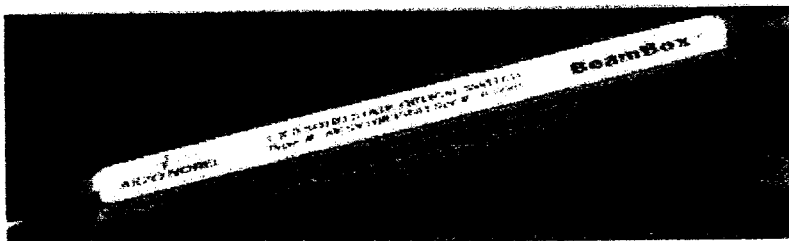


그림 7. 시판되고 있는 AKZO Nobel회사의 Beam Box<sup>®</sup>.

다시 정리해보면, 열광 소자(thermo-optic switching devices)는 비선형 광학 물질을 사용한 간접구동방식 또는 반도체 레이저의 직접구동방식 등의 전기광학 소자들에 의해 발생 또는 변조된 수십 Gbps의 광신호들을 종합정보통신망의 optic network에 포함된 단말기로 10ms이하의 짧은 시간 내에 서로 연결시킬 수 있는 광소자이며, 비교적 저속이지만 기본 광회로를 구성할 수 있고, 광정보 처리 시스템에 광범위하게 상용될 전망이다. 예를 들면, 고속 스위칭속도보다도 편광무의존성이 요구되는 TV 수상기, CATV의 튜너, 광정보 통신망 우회선 및 단거리 LAN용 회상신호 분배용 광소자 및 AWG 파장분할형 소자의 제작에 활용할 수 있다.<sup>33</sup> 국내에서는 열 광학 소재 및 소자 분야는 한국전자통신연구원에서 시험하는 수준이고, 최근에는 폴리머 열광학 소자의 경제적인 잠재 시장성을 인식하여 국내의 삼성, LG 등의 기업 연구소 및 한남대 등에서 상당한 연구 개발 단계에 있다.

열광학 소자의 기본소재인 고분자용 열광학용 고분자들은 열광학 특성 발현에 적합하게 개발될 것이 아니라 일반적인 투명성 고분자를 직접 사용하거나, 1.3  $\mu\text{m}$ 이나 1.55  $\mu\text{m}$ 의 파장에서 광흡수에 의한 광손실을 낮추기 위해 일반적인 고분자를 deuteration 또는 fluorination하여 사용한 예에 지나지 않아, 내열성, 다층 박막화를 위한 내약품성, 전기적 특성, 투명성 등의 기본적인 열광학 소자용 요구 특성을 만족시키지 못한다고 판단된다. 따라서 열광학 고분자의 개발여지는 거의 미개척 분야와 다름없다.

### V. 고분자 소재를 이용한 광도파로형 소자

광도파로 소자 구조는 기본적으로 광섬유의 원리와 같이 두 클래딩 사이에 코어층인 있는 3층으로 구성되어 있고 (그림 8), 광도파로 소자 제작 공정은 그림 9에 나타낸 듯이 반도체나 실리카에 비해 매우 간단하다. 또한, 코어와 클래딩의 굴절률의 조합을 다양하게 할 수 있으므로 소자 제작에 매우 유리하다. 제작 공정은 설계에 따라,<sup>35</sup> 먼저 하부 클래딩을 스핀 코팅등에 의해 입히고 코어층을 다시 스핀 코팅으로 입힌 후 도파로 모양을 만든다. 도파로를 만드는 방법은 산소 이온을 이용한 건식 식각, 습식 식각, photoinitiator를 이용한 광표백이나, cross-linking이 이용되고, 레이저를 이용한 direct writing을 사용하기도 한다. 도파로를 만든 다음에, 윗층의 클래딩 층을 스핀 코팅에 의해 입혀 만든다. 일반적으로 소자의 전체 두께는 광섬유와 접속을 고려하여 5 ~ 20  $\mu\text{m}$  정도이다.

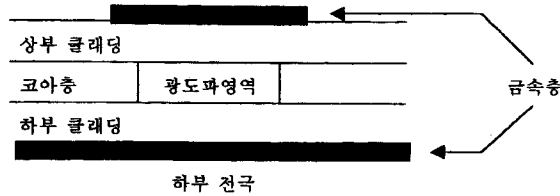


그림 8. 고분자 광도파로 소자의 개략도. (상부 전극과 하부 전극은 수동 소자일 경우에는 필요 없음. 광도파 영역의 굴절률은 상부 클래딩, 하부 클래딩 및 코어층보다 높음)

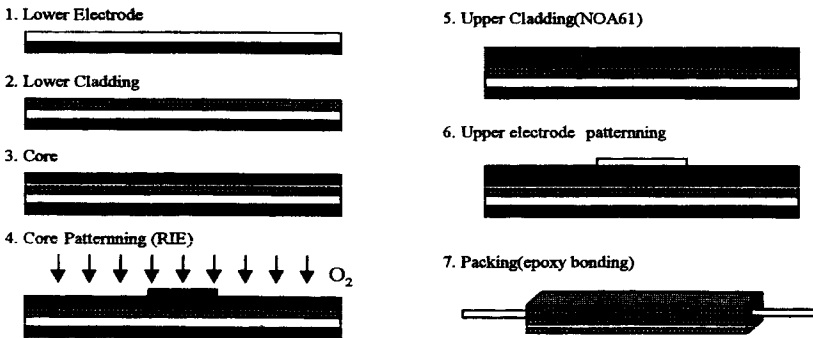


그림 9. 수동 및 열광학 소자의 공정 순서.(광도파로를 O<sub>2</sub> 식각을 이용한 경우를 나타냄. 수동 소자일 경우에는 상·하부 전극 공정이 필요 없음)

저손실 도파로를 이용하여 능동형 소자를 만들려면 고분자의 열광학 계수를 이용하여 굴절률을 온도에 의해 조절 할 수 있다. 일반적으로 고분자는 실리콘이나 반도체, 결정체 등에 의해 약 10배정도 큰 열광학 계수를 갖는다. 고분자의 굴절률의 온도에 대한 실험결과 Lorentz-Lornez식에 잘 부합되므로 고분자 열광학 계수는 팽창에 의한 것으로 판명되었다.<sup>31,36</sup>

온도에 의한 굴절률 변화는 아래 식 (3)과 (4)으로 나타내어진다.

$$\frac{dn}{dT} = -q(n)\alpha = -q(n)\left\{\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}\right\} \quad (3)$$

$$q(n) = \frac{(n^2 + 2)(n^2 - 1)}{6n} \quad (4)$$

$q(n)$  은 굴절률 국부 함수 (local function of refractive index)이고,  $\alpha$ 는 열에 의한 부피 팽창계수(thermal expansion coefficient),  $\rho$ 는 부피이다. 일반적으로 고분자의  $dn/dT$ 는 약  $10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ 이다.

광소자를 제작한 후 패키징을 하여야 하는데 이 공정은 광소자의 제작 (특히 상품화)에 매우 중요한 역할을 한다. 반도체 및 무기 결정체의 경우 상품화된 광원, 광변조기, 광스위치 등의 가격의 50~80 % 정도가 패키징의 가격이다. 광결합은 UV adhesive를 사용하여 ferrule과 칩을 붙이고, pig-tailed 칩을 brass 케이스에 붙인다. 패키징 시의 가장 문제가 되는 것은 광손실이다. 광손실의 원인은 광소자 칩과 광섬유와의 모드 불일치, Fresnel 반사, 단면 반사 등의 요인 등이 있으나, 도파되는 광의 모드와 광섬유의 모드가 서로 맞지 않는 것이 주된 원인이다. 고분자 소자의 경우 소자에 사용되는 클래딩과 코어층의 굴절률을 쉽게 조절할 수 있으므로 모드 크기의 조절이 가능하여 광패키지에 의한 광손실은 매우 작은 편이다.

광소자 패키징 후의 안정성은 습도에 의한 안정성과 온도에 의한 열적 안정성 등이 고려되어야 한다. 최근의 연구 결과들은 dry-humid ( 85 % RH, 85 °C)에서 광손실의 변화가 없는 것이 발표되고 있다. 열적 안정성은 yellowing이라고도 불리우고, 주로 partially conjugated 분자 그룹의 이중 결합에 의한 것으로 넓은 UV 영역에서의 흡수 peak와 가시광선 대의 tail에 의해 특징지어진다. 물론 이

것은 화학 조성 및 성분에 따라 달라진다. 열적 안정성의 광손실의 변화는 Arrhenius의 형태로 변한다.<sup>1</sup>

제작된 광소자는 msec 대의 공간 분할 광스위치, AWG 파장 선택 필터(그림 10) 등이 있다. 네덜란드의 Akzo사 제품의 경우 1 밀리초 스위칭 속도를 갖는 1\*2, 2\*2, 4\*4, 8\*8 등의 공간 분할 스위치 등이 상품화가 시작되었고, 습도 및 온도에 대한 안정성도 매우 좋은 것으로 발표되었다. 특히 최근에는 안정성을 증가시키기 위하여 패키징 내부를 질소나 아르곤 가스로 채워 넣고 밀봉시키는 hermetic 패키징을 하여 상품화를 하였다. WDM 시스템의 기본 요소가 될 수 있는 광필터는 주로 arrayed waveguide grating을 이용한 AWG 필터 등이 연구 중에 있다.<sup>37</sup>

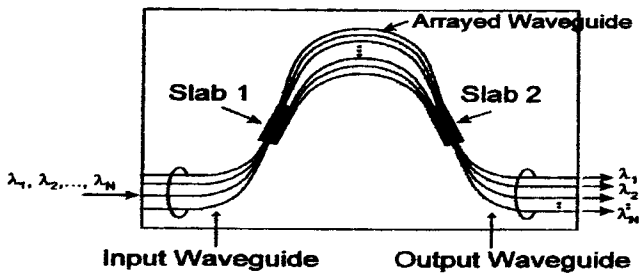


그림 10. AWG 필터의 개략도.

## VI. 선형/열 광학 고분자 소재의 최근 동향 및 전망

최근에는 광통신에 있어 대용량 정보의 통신을 위하여 광의 초고속성 뿐만 아니라 병렬성을 이용하여 동시에 여러 개의 파장에 각각의 정보를 실어 전송하거나 신호 처리를 하는 파장분할 다중 (wavelength division multiplexing, WDM) 방식이 각광을 받으면서 이에 필요한 가변파장필터(tunable wavelength filter), Arrayed Waveguide Grating (AWG) 파장 다중/역다중 소자, 라우터 (router) 등의 WDM 광소자에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 WDM 광소자에 있어서 기본적인 요소가 되는 것은 저손실 단일 모드 도파 특성을 갖는 광도파로 소재의 개발이다. 또한 최근 다양한 기능을 하나의 기판에 집적화한 광집적 소자가 요구되고 있으며, 광집적화에 필요한 기본 요소는 일단 물질 자체의 광손실이 작아야 되고, 외부 환경에 의한 변화가 작은 안정된 소자가 꾸밀 수 있어야 하며,

가격 경쟁력도 높아야만 된다. 이런 특성에 가장 적합한 재료로 실리카 보다 더 고분자 소재가 평면 도파로형 광소자, 광 상호 연결, 열광 소자, 및 광전 집적 회로(optoelectronic integrated circuit) 응용에 중요한 모든 특성을 갖추고 있다. 이러한 선형/열 광학 소자를 제작할 수 있는 기본소재인 고분자계 선형/열 광학 물질에 대한 연구는 외국에서도 거의 초기 단계에 있을 뿐 아니라 고분자의 화학구조 설계 개념조차도 발표되어 있지 않으며, 이 소재개발에 대한 연구의 성공 여부가 소자제작 및 상업화의 성패를 좌우할 수 있는 결정적인 요소이기 때문에 이 선형/열 광학용 고분자 소재 개발의 연구는 매우 중요하다.

최근에 일어서서 미국 JDS의 광부품 판매회사, Akzo Nobel의 고분자 광소자, Allied Signal 회사의 선형 및 열 광학 소재를 서로 기술제휴 또는 합병하여 한 회사를 설립하여 이 분야의 시장을 독점하려는 추세에 있다. 국내에서도 이 분야 소재에 많은 관심과 연구를 수행하여 성공적인 신 개념의 신 기능 소재의 개발과 이에 따른 광전자소자 개발 등으로 정보 소재 및 광소자의 획기적인 발전을 도모하여, 지금까지 제한적인 유기 고분자 재료의 초고속 정보·통신 산업에의 응용성을 무한하게 할 수 있다. 또한 신개념의 신물질과 새로운 광전자 소자의 개발이 이루어진다면, 21세기 미래 사회에 요구되는 대용량의 광통신 및 정보기록과 정보처리의 초고속화에 따른 다양한 통신 서비스 (고화질 TV와 양방향 화상, 실감 통신 등)가 값싸게 보급되어 각 가정에까지 보급하는 "Fiber to the home" 시대가 실현 될 전망이다. 또한 이는 신기술 및 새로운 광자산업 발전으로 고도의 첨단광자기술 산업 단지의 형성이 가능하며, 관련 산업의 새로운 산업이 조성될 것이다. 이에 따라 재료화학은 물론 물리, 광학, 재료공학, 전자공학 등의 발전과 정보·통신 산업 발전에 지대한 기여할 것으로 기대된다.

#### 참고문헌

1. L. Eldada, et. al., SPIE, **3006**, 344 (1996).
2. M. Renaud, et. al., IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics, **2**, 277 (1996).
3. E. Pennings, et. al., IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics, **2**, 151 (1996).
4. P. A. Perrier, et. al., OFC '96, 218 (1996).
5. M. C. Oh, et. al., Appl. Phys. Lett., **73**(18), 2543 (1998).
6. N. Tacato, et. al., IEEE J. Lightwave Technology, **16**(6), 1003 (1998).
7. Y. P. Li, et. al., IEE Proc.- Optoelectron., **143** (5), 263 (1998).

8. (a) U. Fischer, et. al., *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **5**, 785 (1993); (b) N. Takato, et. al., *IEEE*, **6(6)**, 1003 (1988).
9. R. Yoshimura, et. al., *IEEE J. Lightwave Technology*, **16(6)**, 1030 (1998).
10. T. Watanabe, et. al., *IEEE J. Lightwave Technology*, **16(6)**, 1049 (1998).
11. J. Kubayashi, et. al., *IEEE J. Lightwave Technology*, **16(6)**, 1024 (1998).
12. M. C. Oh, et. al., *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **10(6)**, 813 (1998).
13. (a) H. K. Kim, and C. K. Ober, *J. Macromolecular Sci., Pure and Appl. Chem.*, **A30(12)**, 877 (1993); (b) H. K. Kim, C. K. Ober, et. al., *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, **24**, 347-352 (1992); (c) H. K. Kim, T. Mates, G. Barclay, and C. K. Ober, US Patent No. 5, 248, 734. (1992).
14. B. Strebel, et. al., *Electron. Lett.*, **33**, 1342 (1994).
15. (a) T. Izawa, *ECOC '91, WEB6-1* (1997); (b) S. Imamura, et. al., *Electron. Lett.*, **27**, 1342 (1991).
16. T. Matsuura, et. al., *Electron. Lett.*, **29(3)**, 269 (1993).
17. T. Matsuura, et. al., *Macromolecules*, **26**, 419 (1993).
18. S. Ando, et. al., *Macromolecules*, **25**, 5858 (1992).
19. (a) K. Han, et. al., *Polym. Bull.*, **41**, 455 (1998); (b) H. K. Kim, Y. B. Song, et. al., *J. Polym. Sci. Polym. Chem. Ed.*, to be submitted.
20. (a) T. C. Kowalczyk, et. al., *J. Appl. Phys.* **76(4)**, 15 & 2505 (1994); (b) A. J. Beuhler, *IEEE Trans. on Components, Packaging, and Manufacturing Technology-Part-B*, **18**, 232 (1995).
21. L. Eldada, et. al., *J. Lightwave Technology*, **14(7)**, 1704 (1996).
22. (a) H. J. Lee, et. al., *J. Polym. Sci. Polym. Chem.*, **36**, 2887 (1998); (b) P. R. Resnick, et. al., *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, **167**, 105 (1990).
23. L. A. Hornak, "Polymers for Lightwave and Integrated Optic", Marcel Dekker Inc., New York, 1992.
24. M. Dettenmaier, et. al., *Kolloid-Zu. Z. Polym.*, **251**, 922 (1973).
25. I. McCulloch, et. al., *J. Polym. Sci. Part A: Polym. Chem. Ed.*, **33**, 1177 (1995).
26. M. Usui, et. al., *Electron. Lett.*, **30(12)**, 958 (1994).
27. M. Usui, et. al., *J. Lightwave Technology*, **14(10)**, 2338 (1996).
28. M. B. J. Diemeer, et. al., *J. Lightwave Technology*, **7(3)**, 449 (1989).
29. N. Keil, et. al., *SPIE*, **2449**, 281 (1993).
30. S. Suzuki, et. al., *Electron. Lett.*, **30(8)**, 642 (1994).
31. M. Haruna, et. al., *Appl. Opt.*, **21**, 3461 (1982).
32. (a) J. Brandrup, et. al., "Polymer Handbook", Wiley Interscience, 3rd Ed., VI-451, 1989; (b) Personal communication with Dr. M. Y. Jin at KRICT.
33. Y. Hida, et. al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **34**, 6416 (1995).
34. Y. Hida, et. al., *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **5(7)**, 782 (1993).
35. R. Soref, et. al., *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-27(8)**, 1971 (1991).
36. J. M. Cariou, et. al., *Appl. Opt.*, **25**, 334 (1986).
37. Y. Hida, et. al., *Electron. Lett.*, **30(12)**, 959 (1994).