Polymer (Korea) Vol. 26, No. 2, pp 253 259 (2002)

광도파로용 Fluorinated Poly(maleimide-*co*-methacrylate)s의 합성과 특성

김원래、한학수*、한관수、장웅상、이철주、박기홍†
한국과학기술연구원 정보재료소자연구센터, *연세대학교 화학공학과
(2001년 9월 13일 접수, 2002년 3월 11일 채택)

Synthesis and Characterization of Fluorinated Poly (maleimide-*co*-methacrylate)s for Optical Waveguiding Materials

W. L. Kim, H. S. Han*, K. S. Han, W. S. Jahng, C. J. Lee, and K. H. Park†
Electronic Materials and Devices Research Center, KIST, Seoul 136-791, Korea
**Division of Chemical Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea*
† e-mail : khopark@kist.re.kr
(Received September13, 2001;accepted March 11, 2002)

요 약: 본 연구는 내열성, 저광학손실 광도파로용 고분자재료를 합성하고 그 물성을 조사한 것이다. 열안정성을 높이고 광학손실을 줄이기 위한 pentafluorophenylmaleimide와 복굴절률을 낮추기 위한 두가지 methacrylate 유도체와 가교제 역할을 하는 glycidylmethacrylate를 삼원 공중합하여 광가교가 가능한 poly(maleimide-*co*-methacrylate)를 합성하였다. 합성된 고분자들은 높은 열안정성을 나타내었고, 열처리에 의해서 가교가 됨을 확인하였다. 고분자의 굴절율은 공중합 비율에 의해서 조절가능하였고, 1.45 1.49 범위의 고분자가 합성되었다. 복굴절은 6×10^{-4} $<1\times10^{-4}$ 범위의 낮은 값을 나타내었다. 이 고분자와 광개시제를 사용하여 접촉 인쇄 방식에 의한 노광과 습식 현상을 통해 깨끗한 광도파로 패턴을 얻을 수 있었다.

ABSTRACT : The objective of this study is to obtain thermally stable and low optical loss polymers for optical waveguiding materials. The crosslinkable poly(maleimide-*co*-methacrylate)s were synthesized using a pentafluorophenylmaleimide (an optical loss reducer), two methacrylate derivatives (refractive index controllers), and a glycidylmethacrylate (a crosslinker). These copolymers exhibited good thermal stability and could be thermally crosslinked by heat treatment. The refractive indexes of the copolymers could be precisely controlled by the variation of comonomer feed ratio, which was in the range of 1.45 1.49. These copolymers had very low birefringence of 6×10^{-4} $<1\times10^{-4}$. These copolymers were crosslinked by contact printing and then developed by wet etching to obtain high quality waveguide pattern.

Keywords : *polymeric optical waveguide, maleimide, methylmethacrylate, fluorinated polymers, thermal stability.*

서 론

현대 사회는 폭발적으로 증가하는 인터넷의 보급으로 급속하게 변화하고 있다. 이러한 인터넷 보급은 전세계를 유기적으로 연결시켜 음성, 데이터, 문서, 영상, 동화상, CATV 및 HDTV 등의 다양한 형태의 정보를 하나의 통신망으로 통합, 제공할 수 있게 되었으며, 이를 위한 광대역 초고속 정보망이 속속 구축되고 있다. 대용량의 광통신 및 정보기록과 정보처리의 초고속화를 구현하기 위해서는 신 개념의 광소자 및 부품들의 개발이 되어야만 한다. 왜냐 하면, 현재 사용되는 광소자 재료들은 형태의 변형이 어렵고 제한된 분자구조 때문에 목표 성능을 나타내도록 구조를 조절하기 매우 힘들어 거의 한계 성능을 보이고

있기 때문이다. 유기고분자 소재는 무기재료와 반도체에 비하여 분자 화학에 의해서 물질의 성능을 제어할 수 있는 합성을 쉽게 할 수 있고, 저렴한 가격으로 경제성이 아주 좋으며, 광신호에 대한 응답속도가 빠르고, 광 대역폭이 수십 내지 수백 테라비트/초 정도로 매우 높으며, 소자 제작을 저온에서 단순하게 할 수 있고, 가공성이 좋고 집적화가 매우 유리하다는 장점이 있다. 또한, 광의 병렬성을 이용하여 동시에 여러 개의 파장에 각각의 정보를 실어 전송하거나 신호처리를 하는 파장 분할 다중 처리 방식 (wavelength division multiplexing : WDM)이 각광을 받게 됨에 따라 다른 재료들에 비해 대역폭이 큰 고분자 광도파로 소재의 개발이 절대적으로 필요하게 되었다.[1-3] 이러한 이유로 유기 고분자 소재가 광정보 재료의 새로운 후보물질로서 지대한 관심의 대상이 되었으며, 첨단 연구대상으로 각광을 받고 있다. 광도파로용 재료로는 $LiNbO_3$와 같은 무기결정, 반도체 물질, 광섬유의 원료인 Silica,[4,5] 고분자 재료 등이 있다. 일반적으로 많이 연구되어지고 있는 고분자 재료는 poly(methyl methacrylate),[6-8] poly(organosiloxane),[9,10] polyimide[11-13] 및 기타 광학 고분자 재료를[14-16] 들 수 있다. 고분자 재료는 기존의 무기재료에 비하여 제조공정이 단순하여 저가의 광소자를 제작할 수 있는 반면, 광학 손실이 크고 온도변화에 민감한 단점이 있다. 따라서 광도파로용 재료에서는 광학 손실을 줄이기 위하여 불소 치환된 고분자가 주로 사용되고 있고, 신뢰성을 위하여 열안정성 고분자가 주로 연구개발되고 있다.

본 연구실에서는 고분자 광학 재료의 취약한 열안정성을 개선하기 위하여 maleimide기 혹은 glycidyl methacrylate기를 주로 이용하여 왔다.[17,18] 특히 glycidyl methacrylate는 가교속도는 느리지만 가교제 없이 자기 가교되는 일성분계이기 때문에 공정상 아주 유리한 점이 있다. 본 논문에서는 고분자 광도파로 재료로 요구되고 있는 열안정성과 광학손실을 동시에 개선시키기 위하여 불소치환된 *N*-perfluorophenylmaleimide기를 도입시키고, 기타 굴절율 조절 및 복굴절률 저하를 위하여 지방족 methacrylate유도체들을, 그리고 가교 가능성을 고려한 glycidylmethacrylate 유도체들을 공중합한 poly(maleimide-*co*-methacrylate) series를 합성하였다. 본 연구에서는 그들의 열적 특성 및 광학 특성에 대하여 조사하였다.

실 험

시 약. Maleic anhydride (MA), 2,3,4,5,6-pentafluoroaniline (PFA), *tert*-butyl methacrylate (*t*-BMA), butyl methacrylate (BMA), glycidyl methacrylate (GMA), 1,1,2,2-tetrachloroethane (TCE), phosphorus pentoxide, triethylamine (TEA)는 Aldrich사에서 구입하여 사용하였다. *t*-BMA, BMA, TCE는 진공 증류하여 정제하였고, MA는 재결정하였으며 PFA, phosphorus pentoxide, TEA는 정제 없이 그대로 사용하였다. 2,2'-Azobis(2,4-dimethylvaleronitrile) (ADMVN)은 Wako사에서 구입하여 재결정 후 사용하였다. Chloroform과 *N,N*-dimethylformamide(DMF)는 Junsei사에서 EP급 시약을 구입하였고, sulfuric acid는 Baker사에서 EP급 시약을 구입하여 정제 없이 사용하였다.

1-(2,3,4,5,6-Pentafluorophenyl)-2,5-dihydro-1H-2,5-pyrroledione (PFM) 합성. MA 25 g (254.49 mmol)과 PFA 25 g (136.55 mmol)을 250 mL 2구 플라스크에 넣고 DMF 50 mL를 넣어 상온에서 교반하여 용해시켰다. 그리고, 100 mL 비이커에 7.45 g (52.49 mmol)의 phosphorus pentoxide와 3.23 g (32.93 mmol)의 sulfuric acid를 10 mL의 DMF에 녹였다. 이 용액을 플라스크에 넣고 상온에서 2시간 정도 교반 후 110 ℃에서 1시간 동안 반응시켰다. 과량의 물에 반응물을 쏟아 부어 고체 생성물을 얻고, 감압여과하여 분리하고 30 ℃ 진공오븐에서 24시간 동안 건조시켰다. 건조된 고체 생성물을 에탄올로 재결정하여 백색의 pentafluorophenyl maleimide (PFM) 결정을 얻었다. Yield : 65%, m.p. : 107 ℃ (by DSC); ^{1}H-NMR (DMSO-d_6): 7.4 ppm (CH=CH).

Poly(pentafluorophenyl maleimide-*co*-butyl methacrylate-*co*-glycidyl methacrylate)의 중합. 중합 앰플에 PFM을 3.5 g (13.3 mmol) 넣고 BMA를 0.95 g (6.65 mmol) 넣고 GMA 0.32 g (2.22 mmol) 넣은 후 TCE에 용해시켰다. 단량체 총 몰수 합에 대한 0.1 mol%의 ADMVN (0.005 g)을 넣은 후 freeze-vacuum-thaw 방식을 이용하여 앰플 내부에 있는 산소 등을 제거하고 40 ℃에서 중합했다. 중합후 중합

액을 메탄올에 침전시켜 백색의 고분자를 얻어내었다.

FT-IR. 단량체의 합성 여부를 확인하기 위해 FT-IR spectrophotometer (Perkin Elmer 16F PC)를 사용하였다. 400~4000 cm^{-1}의 주파수범위에서 측정하였으며 해상도는 0.2 cm^{-1}, 스캔 회수는 20회로 하였다.

^{1}H-NMR. 제조한 단량체 및 고분자들의 합성 여부를 확인하기 위해서 ^{1}H-NMR(Varian Gemini 200 MHz)을 사용하였다. 시료는 chloroform-d 혹은 DMSO-d_6 (dimethyl sulfoxide-d_6)에 녹여서 측정하였다.

GPC. 중합한 공중합체의 분자량을 알아보기 위해서 GPC (gel permeation chromatography) (Waters HPLC system : model 510 pump, model 410 differential refractometer, PL Gel columns (HR2, HR4, HR5E)로 분석하였다. 시료는 THF (HPLC grade)에 녹여 측정하였다.

용해도 실험. 중합한 고분자들은 소자 제작을 위해 일정 두께의 막으로 만들어야 한다. 고분자 막 형성 방법에는 스핀코팅, 캐스팅, 라미네이션 등이 있다. 이 가운데 스핀코팅이 균일한 막을 얻는 데는 가장 효과적이며 스핀코팅을 하기 위해서는 고분자가 용제에 용해가 잘 되어야 한다. 이를 확인하기 위해 THF, DMF, *N*-methyl-2-pyrrolidinone (NMP), chloroform, 1,4-dioxane 등의 유기 용매에 대한 용해도를 상온에서 확인하였다. 또한 가교전과 가교후의 용해도를 동일 유기 용매에 대해 비교하였다.

열분석. TGA와 DSC를 통해 고분자의 열안정성을 확인하였다. TGA (Du Pont TGA 2950 thermogravimetric analyzer) 측정은 질소 분위기하에서 10 ℃/min의 승온 속도로 50~600 ℃ 범위에서 측정하여 고분자의 분해온도를 확인하였다. DSC (Du Pont DSC 2910 differential scanning calorimeter) 측정은 질소 분위기에서 10 ℃/min의 승온 속도로 50~250 ℃ 범위를 측정하여 나타나는 흡열 및 발열 피크를 관찰하였다. 또한 DSC를 통해 고분자의 열가교 온도를 확인하였다.

굴절률 및 복굴절률 측정. 고분자를 chlorobenzene에 25 wt%로 녹인 다음, 0.45 ㎛ PTFE 필터로 여과하여 slide glass 위에 도포, 회전시켜 박막으로 제조하였다. 굴절률 및 복굴절률은 642.8 nm 파장의 He-Ne laser를 사용하여 Prism Coupler (Model 2010, Metricon)로 측정하였다. Transverse electric(TE)와 transverse magnetic(TM) 두 mode의 굴절률을 측정하였는데, TE mode에서는 필름 평면 방향의 굴절률을 TM mode에서는 필름 두께 방향의 굴절률을 측정하였고 그 굴절률의 차이로 복굴절률을 계산하였다.

노광 실험. 공중합체(PFM : BMA : GMA = 4 : 5 : 1)와 광개시제 (cyracure photoinitiator uvi-6974, Union Carbide)를 chlorobenzene에 25 wt%로 용해시킨 후 0.45 μm PTFE 필터로 여과하여 Si wafer 위에 도포, 회전시켜 박막으로 만든 후, UV (365 nm, 20 mW) 노광기로 5분간 조사한 후 acetone으로 비 노광부를 제거하여 pattern을 현상하였다. 만들어진 pattern은 광학 현미경으로 확인하였다.

결과 및 고찰

단량체의 합성. PFM 단량체의 합성과정을 Figure 1에 나타내었다. PFM의 ^{1}H-NMR 스펙트럼을 보면 7.4 ppm에서 maleimide (CH=CH)에 있는 2개의 수소만이 관찰되었다. IR에서는 1734, 1530, 1362 cm^{-1} 에서 C=O, C=C (aromatic), C-N 흡수 피크를 확인함으로써 PFM의 합성을 확인할 수 있었다.

고분자의 중합. 합성한 PFM 단량체와 두 가지 methacrylate (MA) 유도체들, 그리고 glycidyl methacrylate (GMA)을 2,2'-azobis(2,4-dimethylvaleronitrile)의 저온개시제를 사용하여 라디칼 용액공중합하였다. Figure 2에 중합한 고분자의 화학 구조를 나타내었고 Table 1에 각 조성별 고분자 중합 조건을 나타내었다. Table 2에 나타낸 바와 같이 GPC로

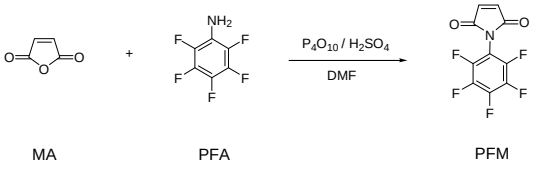

Figure 1. Synthesis of pentafluorophenyl methacrylate(1-(2,3,4,5,6-pentafluorophenyl)-2,5-dihydro-^{1}H-2,5,-pyrroledione).

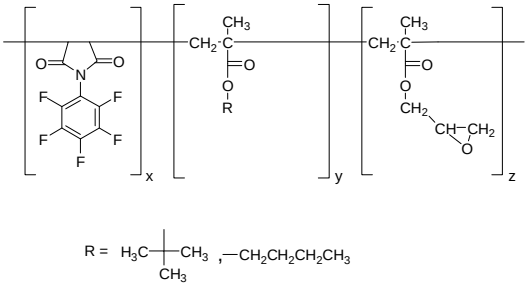

Figure 2. Structures of copolymer series.

Table 1. The Polymerization Conditions [a]

feed ratio (%)			initiator	rxn time	rxn temp.
PFM	MA derivatives	GMA		(hr)	(℃)
0	90	10			
20	70	10			
40	50	10	ADMVN	20	40
60	30	10			
90	0	10			

[a] These copolymers were synthesized by radical polymerization using 0.1 mol% of 2,2'-azobis(2,4-dimethylvaleronitrile)(ADMVN) as an initiator and tetrachloroethane as a solvent.

Table 2. Physical Properties of the Polymers

	feed ratio(%)			$T_{d,5wt\%}$ [a]	M_n [b]	PD [c]
	PFM	MA derivatives	GMA	(℃)		
	90	0	10	317	58000	5.90
	60	30	10	215	190000	1.73
t-BMA	40	50	10	218	210000	1.86
series	20	70	10	230	180000	1.76
	0	90	10	225	140000	1.78
	60	30	10	363	160000	3.49
BMA	40	50	10	354	220000	2.78
series	20	70	10	340	260000	2.69
	0	90	10	247	340,000	2.42

[a] T_d : 5 wt% decomposition temperature determined by TGA.
[b] M_n : Number-average molecular weights determined by GPC.
[c] PD : Polydispersity.

고분자의 분자량을 측정한 결과 PFM을 90% 넣은 조성을 제외한 모든 조성에서 140000 340000이상의 수평균 분자량을 갖는 고분자가 합성되었다. 이와 같이 합성된 고분자가 높은 분자량을 갖는다는 것은 추후 고분자 필름 형성시 역학적 물성에 유리하게 작용하리라고 생각되었다. PFM 90% 조성의 고분자가 매우 낮은 중합도를 보이는데 이는 methacrylate 유도체의 반응성에 비하여 PFM 단량체의 낮은 반응성 때문이라고 생각된다.

열적 특성. 제조한 고분자의 열적 안정성을 알아보기 위하여 TGA를 측정하여 Figure 3과 5에 나타내었다. MA 유도체만의 고분자는 분해온도가 300 ℃를 넘지 못하나 PFM이 공단량체로 첨가하게 되면 *t*-BMA series를 제외한 모든 series에서 분해온도가 300 ℃ 이상으로 증가하였다. 또한 PFM이 함량이 증가할수록 분해온도는 조금씩 증가하였다. 이런 사실로부터 열에 안정한 강직한 구조를 갖는 PFM의 도입이 고분자의 열 안정성을 크게 향상시킴을 확인할 수 있었다. Figure 3에서 보면 *t*-BMA series의 고분자는 두 번의 열분해가 일어남을 관찰할 수 있었다. 그 현상은 *t*-BMA의 곁사슬에 결합된 *t*-butyl기가 250 ℃ 부근에서 먼저 분해되어 isobutene기가 떨어져 나감으로써 중량감소가 된 것으로 추측된다. 즉 Figure 3에서 보는 바와 같이 *t*-BMA의 함량이 증가할수록 중량감소는 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 초기 중량 감소 후 형성된 methacrylic acid 공중합체의 두 번째의 열분해가 일어난다는 것을 알 수 있었다. 하지만 *t*-BMA의 함량이 증가할수록 두 번째의 중량감소가 더딘 것은 Figure 4에 나타낸 바와 같이 형성된 카르복실기와 에폭시가 반응하여 가교반응이 더 많이 일어났기 때문으로 생각된다. Figure 5의 BMA series는 일반적인 한번의 중량감소 곡선을 나타내었다. DSC분석을 통해서는 이 고분자가 열가교가 일어나는지 확인하였다. Figure 6에서 보는

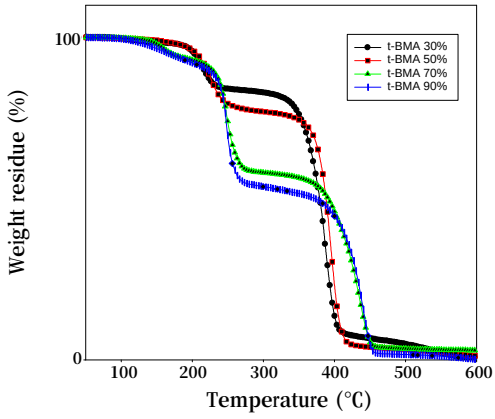

Figure 3. TGA curves of *t*-BMA series copolymers.

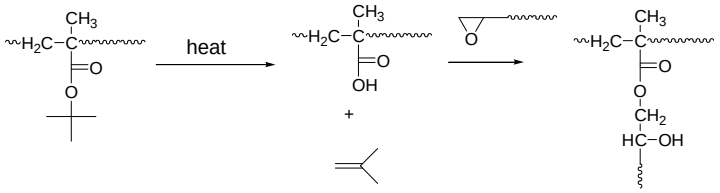

Figure 4. A possible mechanism for 1*st* degradation and 2*nd* crosslinking reaction of *t*-BMA copolymers.

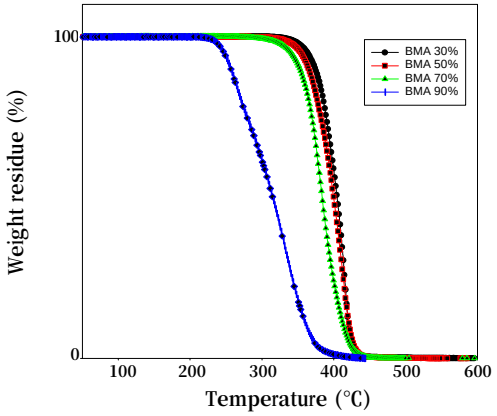

Figure 5. TGA curves of BMA series copolymers.

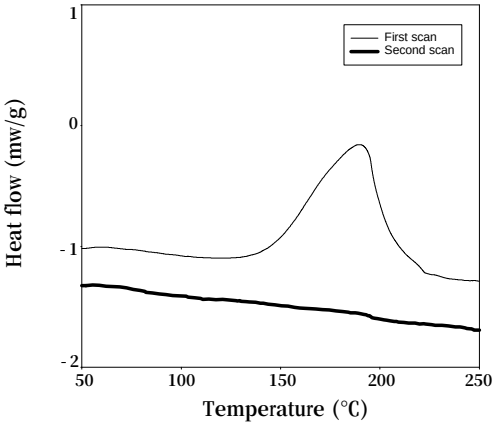

Figure 6. DSC curves of the polymer with 50 mol% of BMA.

바와 같이 BMA공중합체를 10 ℃/min의 승온속도로 250 ℃까지 1차 및 2차스캔을 진행한 결과 1차스캔에서는 약 150~220 ℃에 걸쳐서 발열 피크가 나타났는데, 이것은 에폭시가 열에 의해 가교되면서 나타나는 발열반응으로 생각된다. 2차스캔에서는 아무런 피크가 나타나지 않아 1차스캔시 가교가 거의 일어났음을 알 수 있었다. 가교전과 가교후의 유리전이온도(T_g)는 관찰되지 않았다. TGA와 DSC 결과를 통해서 *t*-BMA series 제외한 합성된 고분자는 우수한 열안정성을 보임을 확인하였다. 하지만 *t*-BMA series도 초기의 isobutene에 의한 중량감소를 보였을 뿐, 열처리를 하여 가교시킨 후의 열안정성은 우수하였다.

광학 특성. 중합한 고분자들의 TE, TM mode 굴절률을 He-Ne laser light source(632.8 nm)를 이용, prism coupler로 측정하여 조성 및 조성비 변화에 따른 굴절률 변화 및 복굴절률의 변화를 측정하였다. Figure 7과 8은 *t*-BMA, BMA series의 각 조성비에 따른 굴절률 변화를 나타낸 것이고 Table 3은 각 성분 및 조성비에 따른 복굴절률의 변화를 나타낸 것이다. 각 고분자의 굴절률을 측정한 결과, 공중합비율이 달라짐에 따라 굴절률이 선형적으로 변화함을 알 수 있었다. 이로써 각 단량체의 조성비 변화만으로 미세한 굴절률 조절이 가능하다는 것을 알 수 있었다. BMA series는 PFM 함량이 증가할수록, 즉 불소함량이 증가할수록 굴절률이 선형적으로 감소하였으나 *t*-BMA series는 PFM 함량이 증가할수록 굴절률이 선형적으로 증가함을 보인다. 일반적으로 불소함량이 증가하면 굴절률은 감소하는 것이 일반적인 현상이었다. 그러나 이 *t*-BMA series의 경우와 같이, 즉 PFM함량이 증가할수록 굴절률이 커지는 현상은 PFM이 불소를 함유한 물질이긴 하지만 굴절률이 큰 benzene 고리의 영향으로 생각된다. 즉 불소가 치환되어 있지 않은 *t*-BMA보다 *N*-phenylmale-imide의 굴절률이 더 크기 때문이라고 생각되어 진다. 실제로 methacrylate 유도체만의 굴절률을 비교해보면 BMA(1.4230) > *t*-BMA(1.4150)이고, 이것으로 유추해 볼 때 PFM의 굴절률이 BMA와 *t*-BMA 사이

에 있을 것으로 추측할 수 있다. Table 3에서 각 성분별, 조성비별로 복굴절률을 비교하였다. PFM 함량이 클수록 복굴절이 커짐을 알 수 있다. 이는 강직하고 평면성을 가진 방향족을 가진 구조가 있으면 복굴절률을 크게 한다는 이론에 잘 부합되는 결과이다. 그런데, PFM이 90%인 고분자의 복굴절률이 PFM이 60%인 고분자의 복굴절률과 차이가 없거나 오히려 작게 나타나는 결과는 예상과 다른 결과이었다. 이는 PFM이 중합 반응성이 낮아 상대적으로 적게 중합에 참여하여 복굴절률이 PFM보다 낮은 GMA의 함량이 많아져서 나타난 결과로 보인다. 같은 조성 고분자로 BMA계와 *t*-BMA계를 비교해보면 BMA의 복굴절이 *t*-BMA보다 조금 큰 것으로 나타났다. 단순한 선형사슬을 가진 BMA계 공중합체는 입체장애가 큰 *t*-BMA계 공중합체에 비해 한 방향으로 배향이 될 가능성이 크기 때문에 복굴절률이 큰 것으로 생각된다.

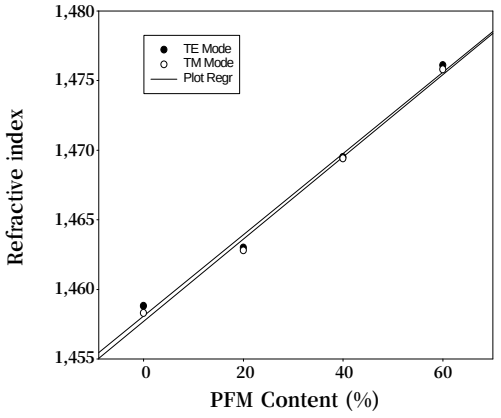

Figure 7. Refractive indices of the *t*-BMA series copolymers depending on PFM content.

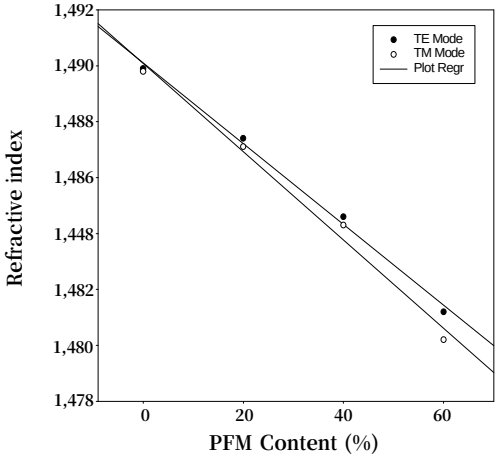

Figure 8. Refractive indices of the BMA series copolymers depending on PFM content.

Table 3. Birefringence of the Polymers

	Birefringence	
PFM contents(%)	*t*-BMA series	BMA series
90	0.0005	0.0005
60	0.0005	0.0006
40	0.0002	0.0003
20	0.0002	0.0003
0	0.0001	0.0002

용해도 실험. 가교 전 고분자와 가교 후 고분자를 THF, DMF, NMP, chloroform, 1,4-dioxane 등의 다섯 가지 유기용매에 대해 상온에서 용해도 시험을 실시하였다. 모든 성분의 고분자가 가교 전에는 모든 유기 용매에 대해 좋은 용해도를 나타냄을 알 수 있는데 이는 균일한 막을 형성할 스핀코팅 실험에 매우 유리하다. 또한 가교 후의 고분자는 모든 유기 용매에 대해 용해되지 않아 가교에 의해 화학적 내성이 생겼다는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같이 코팅시에는 아주 잘 용해되지만, 열처리에 의하여 가교가 가능하여 유기용매에 녹지 않는 특성은, core층과 cladd층의 박막을 적층할 때, 하부의 박막을 침식시키지 않기 때문에 아주 유리한 장점이다.

노광 실험. 본 실험에서 합성한 고분자가 광가교에 의하여 소자 제작에 적합한지를 알아 보기 위해 patterning 실험을 하였다. Figure 9는 광 개시제 (Cyracure photoinitiator uvi-6974)를 첨가한 PFM :

Figure 9. Y splitter pattern.

BMA : GMA=4 : 3 : 3 고분자를 실리콘 웨이퍼 위에 박막으로 만들고 자외선(365 nm)으로 노광한 후, 아세톤으로 현상한 pattern을 광학현미경으로 촬영한 사진이다. 이 사진에서 볼 수 있듯이 GMA를 가교제로 사용한 고분자 계가 깨끗한 pattern을 형성하므로 소자 제작에 적합하다는 것을 알 수 있었다.

결 론

본 연구에서는 열안정성을 높이고 광학 손실을 낮추기 위한 PFM과 복굴절률을 낮추기 위한 methacrylate 유도체와 가교제 역할을 하는 glycidylmethacrylate를 삼원 공중합하여 poly(maleimide - *co* - methacrylate)를 합성하였고 물성 및 광학 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

합성된 고분자들은 *t* - BMA series를 제외하고는 PFM 단량체가 도입됨에 따라 300 ℃ 이상의 높은 열안정성을 보였고 특히 열처리 후에는 용해가 되지 않는 것으로 가교가 이루어짐을 확인하였다. PFM 90% 조성 고분자를 제외한 나머지 조성 고분자는 약 140000 340000이상의 수평균 분자량을 갖는 고분자가 합성되어, 박막형성 시에도 우수한 역학적 성질이 예상된다. 굴절률은 1.45 1.49의 고분자가 합성되었고, 각 단량체의 조성비 변화로 미세한 굴절률 조절이 가능하다는 것을 알 수 있었다. 이 고분자의 복굴절률은 조성비에 따라 6×10^{-4} $<1\times10^{-4}$ 범위의 아주 낮은 값을 나타내었다. 노광 실험을 통해 광도파로 pattern을 확인함으로써 이 재료를 이용한 광도파로 소자제작이 가능함을 확인하였다.

감사의 글 : 본 연구는 2001년도 한국과학재단의 지원(R01 - 200 - 00338)에 의하여 진행되었음.

참 고 문 헌

1. M. Renaud, M. Bachmann, and M. Erman, *IEEE J. Selected Topics in Quant. Electronics*, 2(2), 277 (1996).
2. E. Pennings, G. D. Khoe, M. K. Smit, and T. Staring, *IEEE J. Selected Topics in Quant. Electronics*, 2(2), 151 (1996).
3. M. C. Oh, H. J. Lee, M. H. Lee, J. H. Ahn, S. G. Han, and H. G. Kim, *Appl. Phys. Lett.*, 73(18), 2543 (1998).
4. Y. P. Li, and C. H. Henry, *IEEE Proc.-Optoelectron*, 143(5), 263 (1996).
5. N. Tacato, K. Jinguji, M. Yasu, H. Toba, and M. Kawachi, *IEEE J. Lightwave Technol.*, 6(6), 1003 (1988).
6. S. Imamura, R. Yoshimura, and T. Izawa, *Electron. Lett.*, 27(15), 1342 (1991).
7. R. Yoshimura, M. Hikita, S. Tomsru, and S. Imamura, *IEEE J. Lightwave Technology*, 16(6), 1030 (1998).
8. M. Kagami, H. Ito, T. Ichigawa, S. Kato, M. Matsuda, and N. Takahashi, *Appl. Opt.,* 34(6), 1041 (1995).
9. M. Usui, S. Imamura, S. Sugawara, S. Hayashida, H. Sato, M. Hikita, and T. Izawa, *Electronics Lett.,* 30(12), 958 (1994).
10. M. Usui, M. Hikita, T. Watanabe, M. Amano, S. Sugawara, S. Hayashida, and S. Imamura, *J. Lightwave Tech.,* 14(10), 2338 (1996).
11. K. S. Han, D. B. Kim, W. H. Jang, and T. H. Rhee, *Jpn. J. Appl. Phys.,* 38, 1249 (1999).
12. J. Kobayashi, T. Matsuura, S. Sasaki, and T. Maruno, *Applied Optics,* 37(6), 1032 (1998).
13. S. Ando, T. Matsuura, and S. Sasaki, *Chemtech.,* December, 20 (1994).
14. G. Fischbeck, R. Moosburger, C. Kostrzewa, A. Achen, and K. Petermann, *Electronics Lett.,* 33(6), 518 (1997).
15. H. J. Lee, E. M. Lee, M. H. Lee, M. C. Oh, J. H. Ahn, S. G. Han, and H. G. Kim, *J. Polym. Sci., : Part A : Polym. Chem.,* 36, 2881 (1998).
16. K. S. Han, D. H. Suh, and T. H. Lee, *Polymer Bulletin,* 41, 455 (1998).
17. K. H. Park, J. T. Lim, S, Song, M. K. Kwak, C. J. Lee, and N. Kim, *React. Func. Polym.*, 40 (2), 169 (1999).
18. K. H. Park, M. K. Kwak, Y. S. Lee, W. S. Jahng, C. J. Lee, and N. Kim, *React. Func. Polym.*, 40 (1), 41 (1999).