

고분자 광도파로 소자용 열경화성 Fluorinated Poly(ether ketone)의 물성 및 광학적 특성

이형종[†] · 이명현 · 오민철 · 안주현 · 한선규

한국전자통신연구원, 원천기술연구본부

(1999년 1월 11일 접수)

Physical and Optical Properties of Crosslinkable Fluorinated Poly(ether ketone) for Polymeric Optical Waveguide Devices

Hyung-Jong Lee[†], Myung-Hyun Lee, Min-Cheol Oh, Joo-Heon Ahn, and Seon Gyu Han

Electronics and Telecommunications Research Institute, 161 Kajong-Dong, Yusong-Gu, Taejeon 305-600, Korea

[†]e-mail: hjl@etri.re.kr

(Received January 11, 1999)

요약: 고분자 광도파로 소자 제작을 위하여 열경화성 에티닐 페놀기를 가진 불소 치환 폴리(에테르 케톤 (FPEK-EP))을 합성하였다. 합성된 고분자의 분자량과 분자량 분포는 각각 $M_n=6700$ g/mol과 $M_w/M_n=1.76$ 이다. FPEK-EP의 경화 특성을 FT-IR 및 DSC로 관찰하였다. 회전도포와 250 °C에서 2시간 동안의 열경화에 의해 얻어진 필름은 우수한 내화학성과 480 °C까지의 높은 열 안정성을 보여주었다. 경화온도에 따른 굴절률 및 복굴절 변화를 측정하였으며, 단일모드 광도파로를 제작하여 측정된 광도파손실은 1.55 μm 의 파장에서 0.5 dB/cm 이하였다.

ABSTRACT: Fluorinated poly(ether ketone) bearing crosslinkable ethynyl group (FPEK-EP) has been investigated for low-loss polymeric optical waveguide devices. The molecular weight (M_n) and polydispersity of the polymer are determined as 6700 g/mol and 1.76, respectively. Using a FT-IR and a DSC, curing properties of FPEK-EP are investigated. The film obtained by spin coating and then followed by thermal crosslinking at 250 °C for 2 h shows a good chemical resistance and a high thermal stability up to 480 °C under nitrogen. For the various curing conditions, the refractive indices and birefringence of the films are measured. The propagation loss of the single-mode channel waveguide is estimated to be less than 0.5 dB/cm at 1.55 μm .

Keywords: fluorinated poly(ether ketone), ethynyl phenol, polymeric optical waveguide.

서 론

최근 광통신에 있어 대용량 정보의 통신을 위하여 광의 초고속성 뿐만 아니라 병렬성을 이용하여 동시에 여러 개의 파장에 각각의 정보를 실어 전송하거나 신호 처리를 하는 파장분할다중 (wavelength division multiplexing, WDM)¹ 방식이 각광을 받으면서 이에 필요한 가변파장필터 (tunable wavelength filter), arrayed waveguide grating (AWG) 파장 다중/역

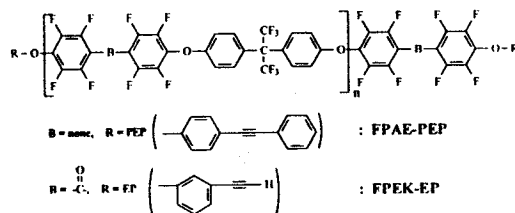
다중 소자, 라우터 (router) 등의 WDM 광소자에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^{2,3} 이러한 WDM 광소자에 있어서 기본적인 요소가 되는 것은 저손실 단일모드 도파 특성을 갖는 광도파로 소자의 개발이다. 광도파로 소자에는 실리카, 반도체, LiNbO₃, 그리고 고분자 등의 다양한 재료가 개발되어 소자 제작에 사용되어 왔다. 특히, 유리 광섬유 (GOF) 재료인 실리카를 이용한 광도파로 소자는 0.01 dB/cm 이하의 낮은 광도파손실과 높은 안정성 때문에 많은 연구가

진행되어 다양한 광소자가 상용화되고 있다.^{4,5} 그러나, 실리카를 이용해 광도파로를 제작하려면 1000 °C 이상의 고온 제작 공정과 고가 제조 장비가 필요하다. 또한 고분자에 비해 1/10 정도의 낮은 열광학 효과로 인해 열광학 소자의 구동을 위해 높은 소비 전력을 필요로 한다. 최근에 들어서는 저손실 고분자 광도파로 (low-loss polymeric optical waveguide, LLPOW) 재료가 속속 개발되어 이들의 낮은 광도파 손실, 높은 열광학 효과, 편리한 가공성을 이용한 다양한 광소자 연구가 활발히 진행되고 있다.⁶⁻⁸ LLPOW 재료는 WDM 광소자 뿐만 아니라 optical interconnects, power splitters, combiners, 및 polarizer와 같은 수동소자, 열에 의해 광신호를 제어하는 열광학 스위치, 가변 감쇄기 (tunable attenuator) 등의 열광학 소자에 사용된다.⁹ 고분자 광도파로 소자 재료로 deuterated fluoro methacrylate,⁶ curable deuterated silicone resin,⁷ 다양한 종류의 perfluorinated polyimides,⁸ UV-curable fluorinated acrylate,¹⁰ crosslinkable fluorinated poly(arylene ether) (FPAE-PEP),¹¹ 그리고 chloro-fluorinated poly(arylene ether)¹² 등이 합성되었으며 이들을 이용한 다양한 광소자가 발표되었다.

본 논문에서는 저손실 고분자 광도파로 소자 제작을 위하여 합성된 fluorinated poly(ether ketone) (FPEK-EP) 고분자의 열경화 특성, 열안정성 및 광학적 특성에 관해서 논하고자 한다.

실 험

재 료. 실험에서 사용한 고분자 FPEK-EP는 decafluorobenzophenone (Aldrich Chemical Co.) 과 4,4'-(hexafluoroisopropylidene)-diphenol (Central glass Co.)를 K₂CO₃ 존재하에서 120 °C에서 반응하여 얻어진 고분자의 말단에 ethynyl phenol을 치환하여 합성하였다. 얻어진 고분자 전구체의 분자량과 분자량 분포는 각각 M_n=6,700과 M_w/M_n=1.76로 단량체의 몰비에 의해 분자량을 조절하였다. Scheme 1은 FPEK-EP와 FPAE-PEP의 화학 구조이며 상세한 고분자 합성은 참고 문헌에 기술되었다.^{11,13} 측정에 사용된 고분자 용액은 FPEK-EP 분말을 cyclohexanone에 35 wt%로 녹인 다음, 0.2 μm



Scheme 1. Chemical structures of the FPAE-PEP and FPEK-EP.

테프론 필터로 여과하여 사용하였다.

적외선 분광 분석 (FT-IR). FT-IR은 Nicolet Magna IR 560을 사용하였으며, 시료는 FPEK-EP 용액을 32 mm NaCl disk에 회전 도포하고 150 °C에서 10분간 건조하였다. 이 시료를 heater mounted cell에 장착하여 각각의 경화 온도로 올리고 그 온도에서 일정 시간 유지하면서 동시에 FT-IR을 측정하였다.

열분석. 시료의 경화 온도는 질소 분위기 하에서 DuPont 2200 DSC analyser를 이용하여 분당 10 °C의 상승 속도로 측정하였으며, 또한 열안정성은 DuPont 2200 TGA를 이용하여 분당 20 °C의 상승 속도로 800 °C까지 측정되었다.

유전상수 측정. 유전상수 (ε) 측정을 위하여 ITO 유리 기판에 FPEK-EP 용액을 회전 도포한 후 250 °C에서 2시간 열경화하였다. 고분자 필름 위에 지름 10 mm의 금 전극을 약 700 Å 두께로 열증착하여 Au-고분자-ITO 구조의 capacitance (C_p)를 0.1-20 kHz 구간 주파수와 1 V_{rms}에서 HP4276A LCZ meter를 이용하여 측정하였다. Fig. 1은 상온에서 C_p 측정 setup이다. 필름의 두께는 surface profiler (Tencor instruments, μ-step 200)을 이용하여 측정하였다.

굴절률 측정. FPEK-EP 용액을 3 μm 두께의 SiO₂ 버퍼층을 가진 Si wafer 기판에 회전 도포하여 박막을 제조하였다. 제조된 박막은 열판 위에서 열경화하여, 각각의 파장에서 transverse electric (TE)와 transverse magnetic (TM) 모드의 굴절률을 각각 측정하였다. 굴절률은 프리즘 커플링 방법에 의하여 측정되었으며, 사용된 프리즘은 Gadolinium Gallium Garnet (GGG) 단결정이다. Fig. 2는 각 파장에서의 굴절률 측정을 위한 setup이다.

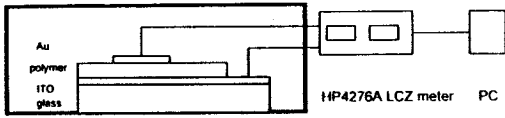


Figure 1. Schematic experiment setup of the capacitance measurement using on LCZ meter.

광도파로 제작. 유효굴절률 (effective refractive index) 법으로 단일 모드가 도파되도록 설계한 후 광도파로를 제작하였다. 3인치 Si 기판에 상하부 클래딩층 및 코어층을 회전 도포하여 형성하였다. 상하부 클래딩층은 Dow Chem.에서 제공받은 perfluorocyclobutane (PFCB),¹⁴ 코어층으로는 FPEK-EP를 각각 사용하였다. 도파로 패턴 형성은 일반적인 photolithography 기술과 활성 이온 식각 기술 (reactive ion etching, RIE)을 이용하여 제작되었다.²

결과 및 고찰

광도파로용 고분자 재료. 광도파로 소자용 고분자 재료는 기본적으로 광통신 영역인 1.3 및 1.55 μm 근처의 파장 대역에서 광도파손실이 낮고, 제작 공정 및 사용 온도에서 높은 열안정성이 요구되며, 또한 굴절률 조절이 용이하고, 복굴절성이 작아야 한다. 그리고 Si wafer 기판 위에 클래딩/코어/클래딩 3층 구조의 도파로 제작을 위하여 뛰어난 박막 특성과 두께 조절이 용이해야 하며, 다층 박막 및 식각 공정을 위한 내화학성, 그리고 기판과의 강한 접착성이 있어야

한다.¹⁵ 반도체 절연용 저유전 물질로 개발된 불소 치환 폴리아릴렌에테르 (fluorinated poly(arylene ethers), FPAE)는 높은 불소 치환율, 우수한 열적·기계적 특성, 저흡수성 등으로 인하여 잠재적인 우수한 광소자 응용 가능성을 가지고 있으나 내화학성이 아주 약하여 다층 박막에 의한 광소자 제작이 불가능하다.¹⁶ 이전의 연구에서 FPAE 말단에 phenyl ethynyl phenol (PEP)기를 도입한 FPAE-PEP를 합성하여 열경화를 통해 FPAE 자체의 물성과 더불어 우수한 내화학성을 얻었다.¹¹ 고분자 말단에 PEP기의 도입은 합성이 용이하며, 심각한 광손실을 일으키는 지방족 C-H 결합이 없고, 열경화 반응에 촉매가 필요없고 휘발성 부산물이 생기지 않으며, 접착력을 강화시키는 장점이 있다.¹⁷ 그러나 FPAE-PEP의 경우 강직쇄 구조에 의한 복굴절성이 크며, 320 $^{\circ}\text{C}$ 이상의 높은 PEP의 경화온도로 인한 공정의 어려움이 있다. 본 연구에서는 Scheme 1에서 보듯이 고분자 주쇄에 격임을 유도하기 위한 케톤기를 가지며, 말단에 메타 위치의 ethynyl phenol (EP)을 도입한 새로운 고분자인 fluorinated poly(ether ketone) (FPEK-EP)를 합성하여 열경화 특성 및 열안정성을 살펴보고, 물질의 유전 상수 및 경화온도에 따른 굴절률 변화, 광도파손실을 측정하였다.

열경화 특성 및 열안정성. FPEK-EP 필름의 온도에 따른 화학 구조의 변화 및 경화 속도를 heater mounted FT-IR을 이용하여 측정하였다. Fig. 3은 경화 전과 각각의 온도 및 시간에서 경화한 후의

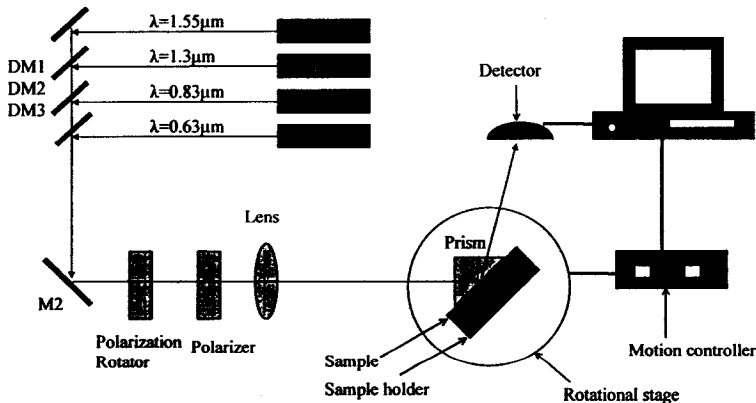


Figure 2. Optical configuration of a prism-coupling method for measuring the refractive index.

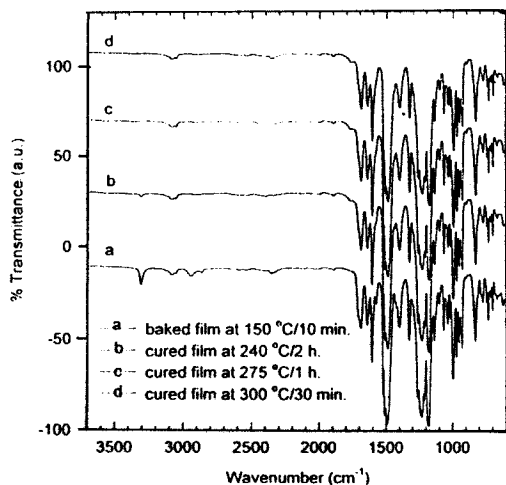


Figure 3. FT-IR spectra of the FPEK-EP films at various curing conditions.

FT-IR 스펙트럼이다. Fig. 3(a)는 150 °C에서 10 분간 건조한 FPEK-EP 필름으로 3308 cm^{-1} 에서 고분자 말단의 acetylenic C-H stretching peak가 잘 보인다. 2950 cm^{-1} 근처에서 cyclohexanone 용매에 의한 aliphatic C-H 피크가 보이나 온도가 올라가면 용매의 완전한 증발로 사라진다. 1692 cm^{-1} 에서 고분자 주쇄의 C=O stretching peak가 나타나며, 1100과 1200 cm^{-1} 에서 각각 aromatic C-F 및 aliphatic C-F 피크가 잘 보인다. 240 °C에서 2시간 경화한 후에 Fig. 3(b)에서 보듯이 약간의 미반응 acetylenic C-H stretching peak가 보인다. 그러나 275 °C 이상의 온도에서는 완전히 사라짐을 알 수 있다. 한편, 300 °C에서 경화한 경우에도 acetylenic C-H stretching peak이 사라진 것 외에는 IR 스펙트럼이 전혀 변화가 없는 것으로 보아 경화에 따른 고분자 주쇄의 변화가 없음을 알 수 있다. Fig. 4는 온도에 따른 경화 속도를 관찰하기 위하여 heater mounted cell에 NaCl disc에 코팅한 FPEK-EP 필름을 장착하여 각각의 온도에서 시간의 경과에 따른 acetylenic C-H stretching peak의 면적 감소를 측정하였다. 275 °C 이상의 온도에서는 1시간 안에 거의 사라졌고, 240 °C와 250 °C에서는 2시간 경과 후에도 각각 20%, 15% 정도 남아 있었다. 그러나, 240 °C와 250 °C에서 각각 2시간 경화한 필름도 내 화학성 실험 결과 일반 유기 용매에서 전혀 용해되지

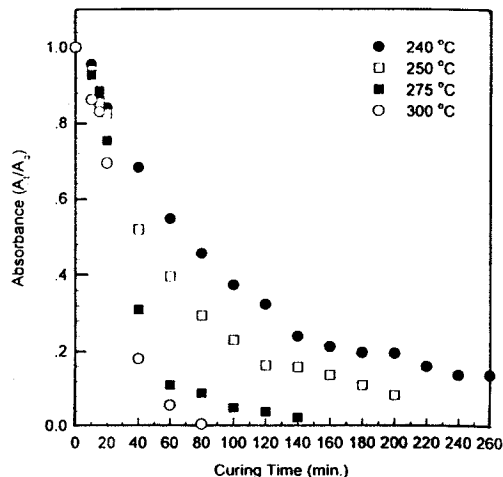


Figure 4. Normalized absorbance of an acetylenic C-H peak of the FPEK-EP films.

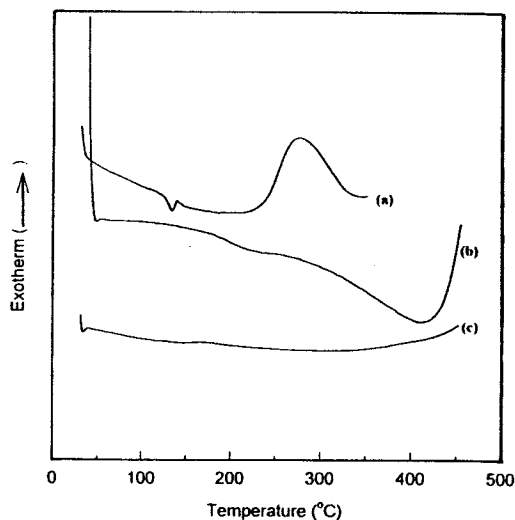


Figure 5. DSC thermogram of the FPEK-EP: (a) first run, (b) second run, and (c) first run of the cured film.

않고, 용매에 의한 균열이 발생하지 않아 다층 박막 형성에 문제가 없었다.

한편, 열경화 특성은 DSC에서도 잘 관찰되었다. Fig. 5는 FPEK-EP의 DSC curve이다. Fig. 5(a)는 FPEK-EP 분말의 first run으로 131 °C에서 전구체 고분자의 T_g 가 보이며, EP의 가교에 의한 강한 발열 반응이 230 °C 근처에서 시작하여, 277 °C

에서 최대값을 보여 주었다. 이것으로 보아 FPEK-EP는 100 °C 이상의 넓은 가공 영역을 가짐을 알 수 있다. (b)의 second run에서는 더 이상 EP의 가공에 의한 발열 피크가 없으며, 경화된 고분자의 T_g 가 약 205 °C에서 보인다. 그리고, (c)는 250 °C에서 2 시간 동안 열경화한 FPEK-EP필름의 DSC curve로 어떠한 발열 반응도 보이지 않아, 더 이상의 가공 반응은 일어나지 않는 것으로 판단된다. 위의 FT-IR 및 DSC 결과로부터 240 °C 이상의 온도에서 고분자 말단의 ethynyl기가 서로 반응하여 가공되어 내화확성을 향상시키는 것을 알 수 있었다.

Fig. 6(a)와 (b)는 열적 안정성을 시험하기 위해서 각각 FPEK-EP 분말과 250 °C에서 2시간 경화된 필름의 TGA 그래프이다. 두 경우 모두 480 °C 이후에 중량 감소가 생겨 520 °C에서 10 wt% 정도의 중량 손실을 보이고 있으며 그 이상의 온도에서 급격한 중량 손실을 보이고 있다. TGA 그래프는 FPEK-EP 필름이 적어도 480 °C까지 중량 손실이 없어 열적으로 안정함을 보여준다. 서론에서 언급한 고분자 광소자들은 85 °C에서의 장시간에 걸친 열안정성과 열광화 효과에 의한 구동 등으로 200 °C 정도까지의 짧은 시간의 안정성을 요구한다. 열경화된 FPEK-EP는 이러한 열안정성을 충분히 만족한다.

유전상수. FPAE-PEP와 FPEK-EP는 높은 불소 치환율로 인해 여전히 저유전 물질로의 가능성을 가지고 있다. 고분자 필름의 out-of-plane 방향의 유전상수 (ϵ_r)는 Fig. 1에서와 같이 ITO 유리기판 위에 스핀 코팅하여 열경화한 후 그 필름 위에 10 mm 직경의 Au 전극을 열증착하여 시료를 만든다. 이것을 HP4276A LCZ meter를 이용하여 capacitance (C_p)를 측정하여 아래의 식으로 구한다.

$$\epsilon_r = \frac{C_p \times d}{\epsilon_0 \times A}$$

여기서, d 는 필름의 두께, A 는 상부 전극의 면적, 그리고 ϵ_0 는 자유 공간의 electric permittivity로 8.854×10^{-12} 이다. Fig. 7(a)와 (b)는 각각 FPEK-EP와 FPAE-PEP 필름의 0.1-20 kHz 주파수 구간에서 측정된 유전상수이다. 유전상수는 고주파수로 갈수록 약간 감소하였으며, 10 kHz에서의 값이

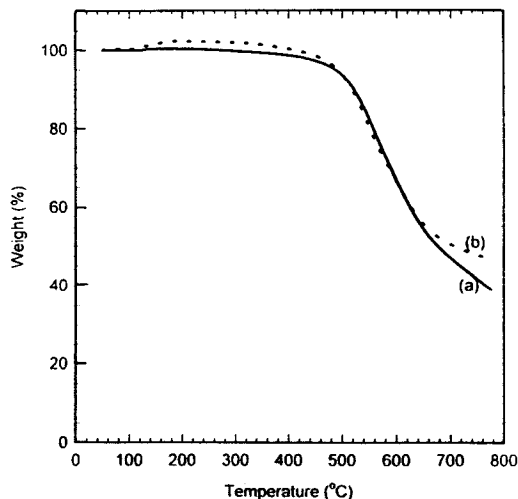


Figure 6. TGA thermogram of the FPEK-EP: (a) uncured powder and (b) cured films.

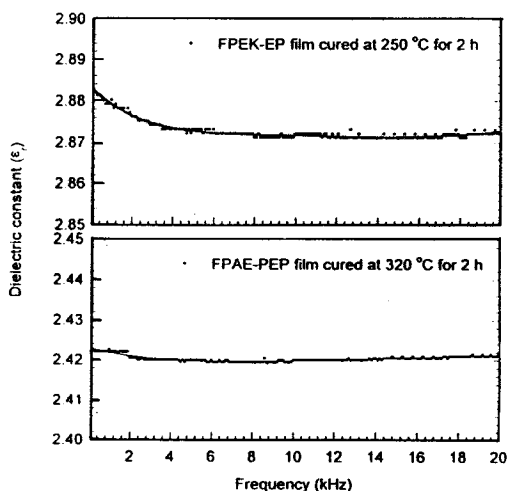


Figure 7. Dielectric constant of FPAE-PEP and FPEK-EP film.

FPAE-PEP와 FPEK-EP 경우 각각 2.42와 2.87로 이 값은 일반적인 폴리이미드의 유전상수 약 3.5보다는 아주 낮았다.¹⁷ 이것은 고분자 주쇄의 높은 불소 치환에 기인한다. 또한, Scheme 1의 화학 구조에서 보듯이 FPAE-PEP의 경우 FPEK-EP와 같은 극성의 C=O기가 없으므로 2.42의 아주 낮은 유전상수를 보였다. 특히, 열경화성 PEP기가 없는 FPAE의 유전상수도 2.4~2.6 범위로 열경화에 의한 추가적인

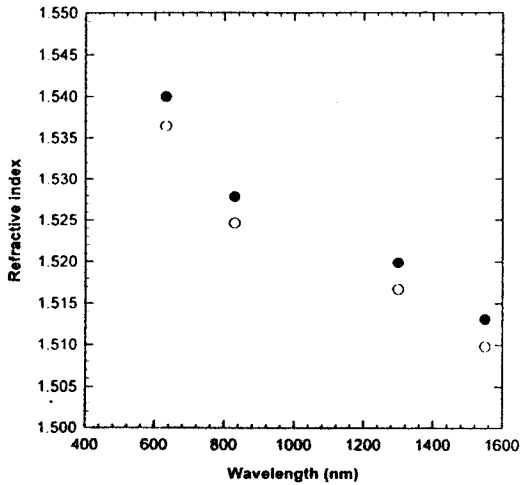


Figure 8. Measured refractive indices at various wavelengths of the cured FPEK-EP film at 250 °C for 2 h : ● ; refractive indices of TE modes, ○ ; refractive indices of TM modes.

유전상수의 증가는 없었다.

광학적 특성. 광도파로 소자에서 광의 진행에 가장 중요한 요소는 굴절률이므로 FPEK-EP 필름의 굴절률을 Fig. 2의 setup을 통하여 측정하였다. Fig. 8은 파장에 따른 굴절을 변화로 장파장으로 갈수록 지수함수적으로 감소하는 일반 재료의 전형적인 특징을 보여준다. TE, TM 편광 모드간의 광학적 굴절을 차이로 주어지는 복굴절성 (optical birefringence, $\Delta n = n_{TE} - n_{TM}$)의 크기는 파장에 거의 무관했다 (Fig. 8). 복굴절은 약 0.003 이하로 광소자용으로 개발된 fluorinated polyimide의 복굴절 0.01보다 낮다.¹⁹ 이와같은 복굴절성은 광도파로 소자에서 편광 의존적 특성을 유발시키는 원인이 되며 특히 WDM용 광소자에서는 복굴절성이 0.001 이하로 작게 되어야 한다. 경화 온도에 따른 굴절을 변화를 Fig. 9에 도시하였다. FPEK-EP 필름의 경화 온도가 높을수록 굴절률이 증가하고 복굴절은 커졌다. 이러한 현상은 경화 온도가 높을수록 경화 밀도가 증가하여 결국 필름의 밀도가 증가하여 나타난다. 또한, 250 °C에서 2시간 경화한 시편을 다시 150 °C 이하의 온도에서 1시간 동안 열처리한 후 상온으로 내려 다시 굴절률을 측정한 결과, 처음값과 전혀 변화가 없었다. 이것은 일단 경화된 필름은 150 °C 이하의 온도에서는 안정함을 의미한다.

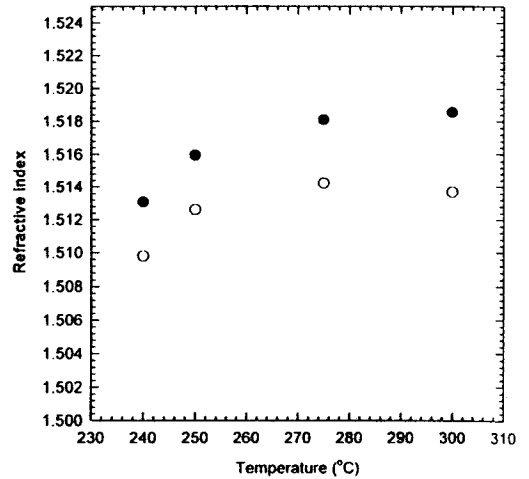


Figure 9. Measured refractive indices of the FPEK-EP film at various curing temperature at the 1.55 μm wavelength : ● ; refractive indices of TE modes, ○ ; refractive indices of TM modes.

그 이상의 온도에서 같은 실험을 한 결과 굴절률이 약간 감소하는 현상이 있었다.

광도파손실을 측정하기 위하여 실험에서 언급한 방법으로 다층 박막 및 RIE를 이용하여 5 cm 길이의 rib 형태의 광도파로를 제작하였다. Fig. 10은 제작된 광도파로 단면의 SEM 사진으로 RIE에 의한 도파로 측면 rib 형태의 패턴이 잘 형성되었으며, 상부 클래딩에 의한 gapfilling도 잘 되었음을 보여준다. 제작된 도파로를 이용하여 광진행손실을 1.55 μm 파장에서 절단법 (cut-back method)을 사용하여 측정하였다. 5 cm 길이의 광도파로를 주의깊게 절단해 가면서, 빛을 광섬유를 통해 광도파로에 커플링시켜 투과되는 광의 세기를 도파로 길이 변화에 따라 측정하면 그 기술기로부터 광도파손실을 측정할 수 있다. 측정된 광도파손실은 0.5 dB/cm 이하로 측정되었다. 절단법에 의한 광도파손실 측정은 고분자 고유의 광흡수에 의한 손실 뿐만 아니라 필름 형성시 발생하는 모폴로지의 불균일에 의한 산란손실과, 도파로 형성시 발생하는 도파로 측면과 표면의 거칠기에 의한 산란손실, 등의 모든 도파손실을 포함한다. 일반적으로 광통신 파장 영역인 근적외선 (near-InfraRed, NIR) 파장 영역에서 고분자 고유의 광학적 흡수손실은 C-H, O-H, 또는 N-H 결합의 vibrational over-

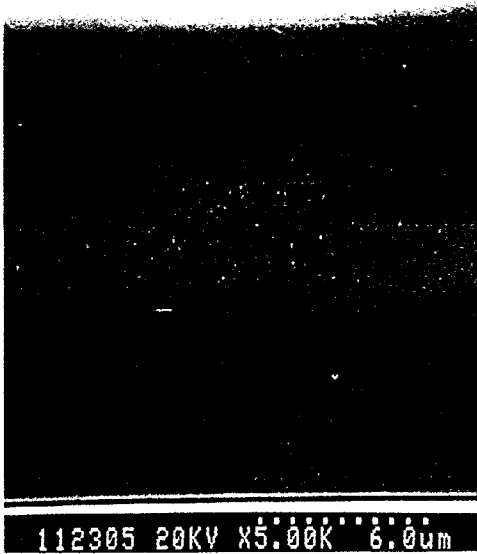


Figure 10. SEM photograph of the cross-section view of the rib type single mode waveguide.

tone에 기인한다.¹⁰ FT-IR을 이용해 NIR 근처에서 얻은 스펙트럼을 보면 1.66 μm 와 1.14 μm 근처의 영역에서 각각 제이차 및 제삼차 C-H결합의 stretching vibration에 기인한 광흡수 피크가 보이며 1.44 μm 근처의 영역에서 제이차 C-H결합의 stretching vibration (ν)과 deformation vibration (δ)의 결합에 의해 기인된 광흡수 피크가 보인다. FPEK-EP의 경우 분자 구조에서 많은 부분이 불소로 치환되어 작은 광흡수가 예상되었지만 절단법으로 측정된 광도파손실은 아직도 큰 편이다. 이것은 필름 및 도파로 제작 공정에 많은 개선점이 남아 있음을 의미한다. 필름 자체의 slab 도파에 의한 고분자 자체의 흡수와 모폴로지에 의한 손실 측정을 위하여 immersion technique에 의한 광손실 측정이 연구 중이다.²⁰ 합성된 FPEK-EP는 가변 파장 필터 및 8×8 파장 분할 역다중화기 등의 WDM 광소자 제작에 코어층으로 사용되어 우수한 소자 특성을 얻었다.

결 론

고분자 도파로형 광소자 재료로 열경화성 에틸렌 페놀기를 가진 불소 치환 폴리테트라케톤(FPEK-EP)을 합성하여 경화 특성, 열안정성, 전기적 및 광

특성을 분석하였다. FPEK-EP는 회전 도포와 열경화에 의하여 우수한 내화특성과 480 $^{\circ}\text{C}$ 까지의 높은 열안정성을 가지는 박막을 얻었다. 박막은 230 $^{\circ}\text{C}$ 이상에서 경화되었으며, 경화 속도는 온도가 증가할수록 급격히 빨라졌다. 250 $^{\circ}\text{C}$ 에서 2시간 경화된 박막의 유전상수는 2.87로 아주 낮았으며, 굴절률 및 복굴절은 1.514와 0.003 이하로 측정되었다. 단일 모드 광도파로를 제작하여 절단법으로 측정된 광의 도파손실은 1.55 μm 의 파장에서 0.5 dB/cm 이하였다. 합성된 FPEK-EP의 높은 열안정성, 낮은 광진행손실 및 우수한 소자 공정 특성은 수동 및 열광학 소자 제작에 우수한 재료로 사용되리라 예상된다.

참 고 문 헌

1. M. S. Borella, J. P. Jue, D. Banerjee, B. Ramamurthy, and B. Mukherjee, *Proceedings of the IEEE*, **85**(8), 1274 (1997).
2. 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).
3. J.-H. Ahn, H.-J. Lee, W. Y. Hwang, M.-C. Oh, M. H. Lee, S. G. Han, H. G. Kim, and J. H. Yim, *IEICE Transactions on Communications and Transactions on Electronics*, **E82-B**(2), 406 (1999).
4. N. Tacato, K. Jinguji, M. Yasu, H. Toba, and M. Kawachi, *IEEE, J. Lightwave Technol.*, **6**(6), 1003 (1988).
5. Y. P. Li and C. H. Henry, *IEE Proc.-Optoelectron*, **143**(5), 263 (1996).
6. R. Yoshimura, M. Hikita, S. Tomaru, and S. Imamura, *IEEE, J. Lightwave Technol.*, **16**(6), 1030 (1998).
7. T. Watanabe, N. Ooba, S. Hayashida, T. Kurihara, and S. Imamura, *IEEE, J. Lightwave Technol.*, **16**(6), 1049 (1998).
8. J. Kubayashi, T. Matsuura, Y. Hida, S. Sasaki, and T. Maruno, *IEEE, J. Lightwave Technol.*, **16**(6), 1024 (1998).
9. M.-C. Oh, H.-J. Lee, M. H. Lee, J.-H. Ahn, and S. G. Han, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **10**(6), 813 (1998).
10. L. Eldada, C. Xu, K. M. T. Stengel, L. W. Shacklette, and J. T. Yardley, *J. Lightwave Technol.*, **14**, 1704 (1996).
11. 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).
12. K. Han, D. H. Suh, and T. H. Rhee, *Polymer Bulletin*, **41**, 455 (1998).
13. H. -J. Lee, M. H. Lee. M. -C. Oh, J. -H. Ahn, and S. G. Han, *J. Polym. Sci.: Part A: Polym. Chem.*, to be published.
14. D. A. Babb, B. R. Ezzell, K. S. Clement, W. F. Richey, and A. P. Kennedy, *J. Polym. Sci.: Part A: Polym. Chem.*, **31**, 3477 (1993).
15. L. Eldada, L. W. Shacklette, R. A. Norwood, and J. T. Yardley, in *Organic Thin Films for Photonics Applications*, OSA Technical Digest Series, **14**, 5 (1997).
16. A. A. Goodwin, F. W. Mercer, and M. T. Mckenzie, *Macromolecules*, **30**, 2767 (1997).
17. X. Fang, D. F. Rogers, D. A. Scola, and M. P. Stevens, *J. Polym. Sci.: Part A: Polym. Chem.*, **36**, 461 (1998).
18. N. H. Hendricks and K. S. Y. Lau, *Polymer Preprints*, **37**(1), 150 (1996).
19. T. C. Kowalczyk, T. Kosc, K. D. Singer, P. A. Cahill, C. H. Seager, M. B. Meinhardt, A. J. Beuhler, and D. A. Wargowski, *J. Appl. Phys.*, **76**, 2505 (1994).
20. C. C. Teng, *Applied Optics*, **32**(7), 1051 (1993).