

## 다단 굴절률을 갖는 다층 필름의 광 투과 특성

김효갑 · 강호종<sup>†</sup>

광 에너지 소재 연구센터, 단국대학교 고분자공학과  
(2014년 9월 5일 접수, 2014년 10월 21일 수정, 2014년 10월 22일 채택)

### Optical Transmission Characteristics of Multi-layer Films Having Step Refractive Index

Hyogap Kim and Ho-Jong Kang<sup>†</sup>

Center for Photofunctional Energy Materials, Dept. of Polymer Science and Engineering, Dankook University,  
126 Jukjeon-dong Sugi-ku, Yongin-si Gyeonggi-do 448-160, Korea

(Received September 5, 2014; Revised October 21, 2014; Accepted October 22, 2014)

**초록:** 메틸메타아크릴레이트(MMA)와 트리플로우로에틸메타아크릴레이트(TFEMA)를 사용하여 굴절률이 다른 MMA/TFEMA 공중합체를 합성하고 이를 이용한 다단 굴절률(SI) 다층 필름을 제조 후, 이들의 광 투과 특성을 살펴보았다. 특히, 다층 필름의 계면 접착력이 광 투과 특성에 미치는 영향을 중점적으로 살펴보았다. 계면 접착력이 증가됨에 따라 SI 다층 필름이 경사 굴절률(GI)을 갖는 다층 필름과 유사한 광 투과 특성을 가짐을 알 수 있었다. 이러한 특성은 층간 굴절률이 작은 SI 다층 필름에서 두드러지며 이는 접착력 증가에 따른 계면에서의 분자 확산에 의하여 층간 굴절률 경사화(gradient)가 형성됨에 기인된 것으로 생각된다. 계면 접착력 최적화는 층간 굴절률 변화가 적은 SI 다층 필름의 mode dispersion 감소, bandwidth 증가 그리고 광 손실을 최소화할 수 있어 공압출과 라미네이션 가공을 이용한 SI 광 데이터 전송소자 제조 시 전송 효율 향상에 효과적인 가공 변수가 될 수 있을 것으로 판단된다.

**Abstract:** Step refractive index (SI) multi-layer films were made using synthesized MMA/TFEMA copolymers having different refractive indices, and the effect of adhesion strength at the interface on the optical transmittance characteristics was investigated. It was found that SI multi-layer film having higher interfacial adhesion strength has similar optical transmittance characteristics as gradient index (GI) multi-layer films. This characteristic was predominant in SI multi-layer film having less refractive index difference between layers, and it was understood that the gradient refractive index has been developed by the molecular interpenetrating to the interface due to the increase of adhesion strength. As a result, the decrease of mode dispersion, the increase of bandwidth and less optical loss were found in SI multi-layer film having less refractive index difference. The control of adhesion strength might be an effective processing parameter to make high efficiency optical data transmittance device by using co-extrusion and lamination.

**Keywords:** step index multi-layer film, MMA/TFEMA copolymer, adhesion strength, optical transmittance.

## 서 론

광 통신은 전자 신호로 데이터화된 다양하고 방대한 정보를 빠르고 정확하게 전송하는 기술로 이를 위하여 광섬유가 전송 매체로 널리 사용되고 있다.<sup>1-3</sup> 광섬유는 사용 재질에 따라 유리 광섬유와 플라스틱 광섬유(POF)로 구분되며 POF는 유리 광섬유와 비교하여 가격 경쟁성 및 유연성이 우수한 반면, 유기재료가 갖는 상대적으로 높은 광 손실이 문제점으로 지적되고 있다.<sup>4,5</sup> 이를 해결하기 위하여 다양한 광섬유용 고

분자 소재 개발과,<sup>6-8</sup> 광섬유 코어 구조 연구가<sup>9-13</sup> 함께 진행되고 있다. 불소고분자의 개발과 함께 보다 높은 효율을 위하여 단일 파장만을 전송하던 single mode optical fiber에서 다양한 파장을 전송하여 동일 시간대 데이터 전송량을 높이는 gradient index(GI) POF와<sup>9-11</sup> step index(SI) POF가<sup>12,13</sup> 연구 개발되었다.

GI POF는 코어층의 굴절률이 중심축에서부터 외부 방향으로 Gaussian 분포를 가지면서 낮아지며 중심축에 모든 입사광의 모드들이 교차하면서 진행되는 방식이며 SI POF는 계단형의 굴절 분포를 가지며 입사광이 클래드 층에서 전반사되어 진행되는 방식이다. 이중 GI POF는 모드 분산이 없어 전송 대역폭이 넓고 전송속도가 높은 장점을 가지고 있으나

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: hjkang@dankook.ac.kr  
©2015 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

반면 제조공정이 어려워 상대적으로 높은 단가를 가지는 단점이 있다. SI POF는 공압출 방법으로 제조되어 제조가 상대적으로 용이한 반면 입사단을 동시에 출발하여 진행하는 빛의 각각의 모드들이 일정한 진행 거리 후에 진행 속도가 달라짐에 따라 출력 단에서 검출된 각 모드가 넓게 분산, 중첩되어 정보 검출이 어려운 문제점이 있다. 최근 공압출을 이용하여 SI POF의 장점을 살려 코어층 굴절률을 달리한 multi-layer multi step index POF(MSI POF)를 제조하여 GI POF를 대체하고자 하는 연구가 진행되고 있다.<sup>14-16</sup>

본 연구에서는 공압출을 이용한 SI POF의 제조 시 각 층의 계면 접착력이 광통신 특성에 미치는 영향을 확인하기 위하여 다양한 굴절률을 갖는 공중합체를 제조하고 이를 층간 접착력이 다른 SI 다층 필름으로 압축 성형하여 이들의 광투과 특성을 확인하여 보았다.

## 실 험

**다층 필름 제조 및 계면 접착력 측정.** 실험에 사용한 메틸메타아크릴레이트(MMA)와 트리플로우로에틸메타아크릴레이트(TFEMA)는 각각 LG화학과 Aldrich사에서 공급받아 사용하였다. MMA/TFEMA 공중합체는 무게 비로 100/0-0/100 범위에서 혼합한 후 아조비스이소부틸로나이트릴(AIBN) 0.01 wt%를 첨가하고 100 °C에서 10시간동안 벌크 중합한 후 이를 클로로포름(Duksan Chem.)으로 녹여 미반응 잔류 단량체를 glass filter로 제거한 후 얻었다. 합성된 공중합체는 *N,N*-dimethyl formamide(Duksan Chem.)를 사용하여 용액 캐스팅하여 두께가 0.3 mm의 필름을 제조하였다. 제조된 필름은 압축 성형기를 이용하여 MMA/TFEMA 조성비에 따라 굴절률이 서로 다른 2-3장의 필름을 80 kg/cm<sup>3</sup>의 압력 하에 온도를 100~180 °C로 변화시켜 계면 접착력이 다른 SI 다층 필름을 제조하였다. 제조된 각각의 필름은 ASTM D1876에 의하여 필름 층간의 계면 접착력을 측정하였다. 이와 함께 광 손실을 측정하기 위하여 제조된 다층 필름에 합성된 폴리트리플로우로에틸메타아크릴레이트(PTFEMA)(굴절률:1.43)를 전반사 클래딩 층으로 라미네이션하여 측정 시료로 사용하였다.

**굴절률 측정.** 제조된 MMA/TFEMA 공중합체 필름과 이를 이용한 다층 필름의 굴절률과 굴절각은 전보에서<sup>17</sup> 언급한 바와 같이 광산이란 장치를 이용하여 632.8 nm를 가지는 He-Ne laser를 이용하여 샘플에 빛을 투과시키고 스크린에 나타난 투과된 빛과 중심축간의 거리를 CCD camera를 이용하여 측정한 후 이를 통해 굴절각을 계산하고 가해진 입사각(42.25°)을 이용하여 Snell's 법칙에 의하여 굴절률을 계산하였다.

**다층 필름의 빛 경로 예측.** 필름 구성 성분과 서로 다른 계면 접착력에 따라 달라진 굴절률 변화에 의하여 다른 SI 굴절률을 갖는 다층 필름의 빛의 경로를 Maxwell 방정식을

이용하여 필름의 두께(0.9 mm)에 따른 빛의 방향 변화를 예측하였고 이를 5<sup>th</sup>-order Cash-Karp Runge-Kutta Method를 사용해서 적분함으로써 필름 안에서의 빛의 경로(light path)를 예측하였다.<sup>18</sup> 이때 사용한 다층 필름의 구조는 MMA/TFEMA의 비가 100/0-75/25-50/50-0/100의 상대적으로 층간 굴절률의 변화가 큰 SI 다층 필름과 100/90-90/10-80/20-0/100의 굴절률의 변화가 작은 SI 다층 필름을 사용하였다. 이때 조성비가 0/100인 MMA/TFEMA 필름(PTFEMA)은 전반사 클래딩 층으로 적용하였다.

**광통신 특성 예측 및 측정.** 예측된 빛의 경로로 얻어진 정보를 사용하여 각 다층 필름의 전송대역(bandwidth)을 식 (1)과 (2)를 통하여 계산하였다.

$$\Delta\tau_c = \frac{L}{c} \Delta n_c \quad (1)$$

$$BW \times L = \frac{L}{\Delta\tau_c} = \frac{c}{\Delta n_c} \quad (2)$$

여기서,  $\Delta\tau_c$ 는 불균일형 지연 차,  $\Delta n_c$ 는 굴절률 차,  $L$ 은 진행 거리,  $c$ 는 진공 하에서의 빛의 속도,  $BW$ 는 전송대역이다. 이때 빛의 입사각은 15~50°로 변화시켜 계산하였다.

모드분산(mode dispersion)은 앞서 계산된, 빛의 경로를 바탕으로 동일한 입사광을 가질 때 GI POF의 빛의 경로와 제조된 다층 필름 시편의 빛의 경로 차이를 이용하여 식 (3)에 의하여 상대적으로 계산하였다

$$\text{모드분산} = \frac{(\text{시편의 light path} - \text{GI POF의 light path})}{\text{GI POF의 light path}} \times 100 \quad (3)$$

제조된 전반사층이 부착된 3층 다층 필름의 광손실(optical loss)은 optical time domain reflectometer(ODTR; Yokohama-T4)을 이용하여 측정하였으며 이때 다층 필름의 두께는 0.9 mm였다.

## 결과 및 토론

**다층 필름 계면 접착력에 따른 굴절각의 변화.** Table 1에 MMA/TFEMA 공중합체의 TFEMA 함량에 따른 굴절률 변화를 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 불소기를 갖는 TFEMA의 양이 증가될수록 굴절률이 감소됨을 확인할 수 있었으며 순수 PMMA와 PTFEMA의 굴절률 차이는 0.05 정도임을 알 수 있었다. 각기 다른 TFEMA 함량을 갖는 즉, 굴절률이 다른 각각 2 종류의 필름(100/0-90/10, 90/10-80/20, 100/0-75/25, 75/25-50/50)을 압축 라미네이션하여 42.25°에서 빛을 입사시켜 층간 굴절률 변화에 따른 빛의 회절각을 Snell's 법칙을 이용하여 계산하고 이를 다층 필름의 층간 굴절률 차

**Table 1. Refractive Indices of Synthesized MMA/TFEMA Copolymers**

Copolymer (MMA/TFEMA)	Refractive index (n)
100/0	1.4816
90/10	1.4769
80/20	1.4702
75/25	1.4670
50/50	1.4548
25/75	1.4483
0/100	1.4321

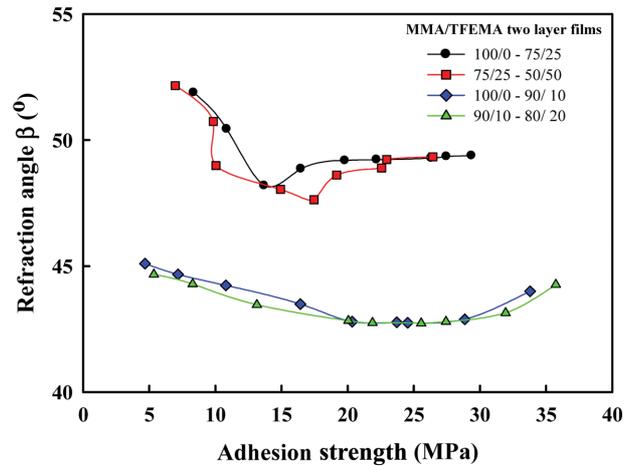
**Table 2. Refraction Angles and Refractive Index Differences in the Layer of MMA/TFEMA Copolymer Multi-layer Films (Incident Angle is 42.25°)**

Multi-layer film (MMA/TFEMA)	Refraction angle (°)	Refractive index difference
100/0-90/10	42.085	0.0047
90/10-80/20	42.014	0.0067
100/0-75/25	41.739	0.0146
75/25-50/50	41.819	0.0122

와 함께 Table 2에 나타내었다. 굴절각은 굴절률 차이가 큰 조합인 100/0-75/25, 75/25-50/50 다층 필름에서 더 급격히 변화됨을 알 수 있다. 이는 빛이 굴절률 차이가 큰 매질을 통과할 때 회절현상이 더 급격히 일어남에 기인된다.

다층 필름 계면 접착 강도가 계면에서 일어나는 회절 각도의 변화에 미치는 영향을 확인하기 위하여 필름 라미네이션 시 압축온도를 100-180 °C 내외에서 다르게 하여 시편을 제조 후 이들의 박리강도를 측정하고 빛을 42.25°로 입사시켜 계면에서의 측정된 굴절각을 Figure 1에 함께 나타내었다. Table 2의 계면 접착력이 굴절각에 전혀 영향을 주지 않는다는 가정하에 Snell's 법칙에 의하여 계산된 굴절각에 비하여 굴절각이 매우 큼을 알 수 있으며 상대적으로 층간 굴절률 변화가 큰 100/0-75/25와 75/25-50/50 필름이 더 큰 차이를 가짐을 확인할 수 있었다. 계면 접착력이 증가됨에 따라 굴절각은 이론 굴절각에 가까워지나 일정 계면 접착력을 넘어서면 이론적 굴절각과의 차이가 다시 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 결과는 적층 혹은 공압출에서 형성된 SI 다층 필름의 구조와 접착 계면 강도가 계면에서의 굴절각에 영향을 미침을 의미한다.

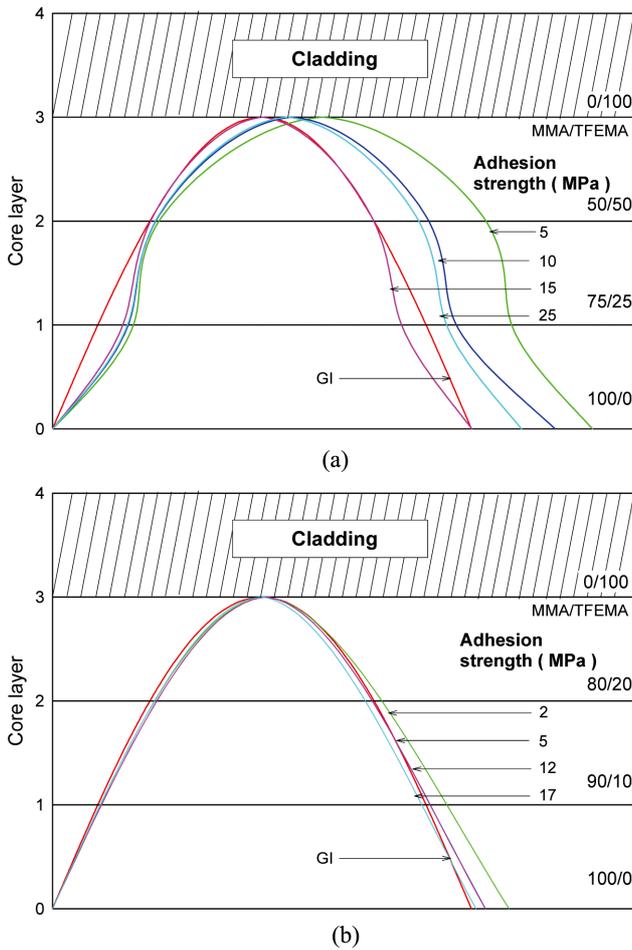
계면 접착력이 낮다는 것은 두 계면이 완벽하게 접착하지 못함을 의미하고 따라서 두 계면 사이에 미세한 간격 혹은 void가 존재함을 의미한다. 따라서 이러한 구조에서 입사된 빛이 회절을 일으키며 따라서 계면 굴절각의 변화를 유발함



**Figure 1. Effect of interfacial adhesion strength of multi-layer MMA/TFEMA copolymer films on refraction angle (Incident angle is 42.25°).**

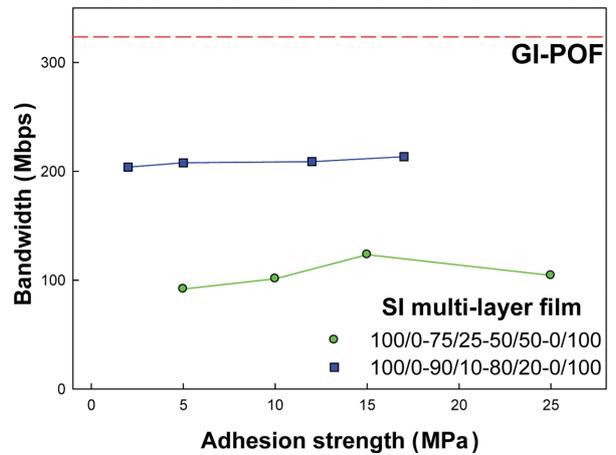
을 알 수 있다. 계면 접착력이 증가함에 따라 이러한 구조에 의한 문제점이 최소화되어 굴절각의 변화가 이론값에 가까워짐을 알 수 있다. 계면의 구조적 관점과 함께 계면 접착력에 의한 굴절률 변화를 함께 고려할 필요가 있다. 계면 접착은 계면 표면의 반응기에 따른 물리화학적 결합과 de Gennes 이론에<sup>19</sup> 따른 계면에 존재하는 분자들이 계면에 확산 침투하여 생기는 확산 결합 등을 예측할 수 있다. 이러한 확산 결합은 굴절률 또한 확산되는 결과를 초래할 것으로 판단된다. 즉, 접착력이 증가함에 따라 계면에서 SI 굴절률 변화가 GI 굴절률 변화로 바뀌며 이는 굴절각의 감소를 초래하여 빛의 경로에 영향을 미치게 될 것으로 판단된다. 상대적으로 층간 굴절률 차이가 큰 SI 다층 필름의 경우 이러한 분자 확산에 의한 굴절률의 그레이디언트화가 상대적으로 잘 이루어지지 않아 계면 접착력에 따른 굴절각 변화가 상대적으로 작음을 알 수 있다.

**접착력에 따른 빛의 경로 예측.** Figure 2는 Figure 1에서 측정된 서로 다른 층간 굴절률을 갖는 MMA/TFEMA two layer 필름의 측정된 굴절각을 이용하여 층간의 굴절률의 step index로 변화되는 100/0-90/10-80/20-0/100과 100/0-75/25-50/50-0/100 다층 필름의 빛의 경로를 예측하여 계면 접착력이 빛 경로에 미치는 영향을 나타내었다. 이와 함께 굴절률이 Gaussian 분포를 갖는 같은 두께의 GI 필름의 이론적인 빛의 경로도 함께 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 SI 다층 필름이 GI 다층 필름에 비하여 빛의 진행 경로 폭이 넓음을 알 수 있으며 이는 SI의 층간 차이가 큰 100/0-75/25-50/50-0/100 다층 필름에서 두드러짐을 알 수 있다. 이러한 경로 차이는 계면 접착력이 증가될수록 최소화됨을 알 수 있다. 이는 앞에서 언급된 바와 같이 계면 접착력의 증가는 이중 계면에서의 구조적 문제점을 최소화하여 계면 구조가 굴절각에



**Figure 2.** Simulated light path in multi-layer MMA/TFEMA copolymer films: (a) high step refractive index multi-layer film (100/0-75/25-50/50-0/100); (b) low step refractive index multi-layer film (100/0-90/10-80/20-0/100).

미치는 영향을 줄여 줌에 기인된다. 이와 함께 접착력 증가가 두 층 사이의 분자들이 층간으로 확산되는 효과를 유발하여 다층 필름의 굴절률이 SI에서 GI와 유사한 경사 굴절률을 갖는 다층 필름으로 변화되기 때문이다. 계면 구조적인 문제점이 같다면 이러한 변화는 상대적으로 SI 굴절률 변화가 작은 100/0-90/10-80/20-0/100 다층 필름에서 빛의 경로에 더 확연히 영향을 미침을 알 수 있다. 또한 Sohn은<sup>19)</sup> 코어 중앙에서부터 외각까지의 굴절률 분포 차가 0.008인 경우 가장 전송대역 프로파일이 파라볼릭한 결과를 나타낸다고 하였다. 이를 통해 굴절률 차가 다른 2가지 샘플의 결과와 비교하여 굴절률 차가 0.008에 가까운 100/0-90/10-80/20-0/100 다층 필름은 더욱 GI POF에 근접하는 빛의 경로를 가지며 이는 Sohn의 결과와도 부합됨을 확인할 수 있었다. 하지만, 본 연구를 통하여 전송대역의 변화는 코어의 굴절률 차이와 함께 SI 다층 필름의 층간 계면 접착력에도 밀접한 관계를 가짐을 확인

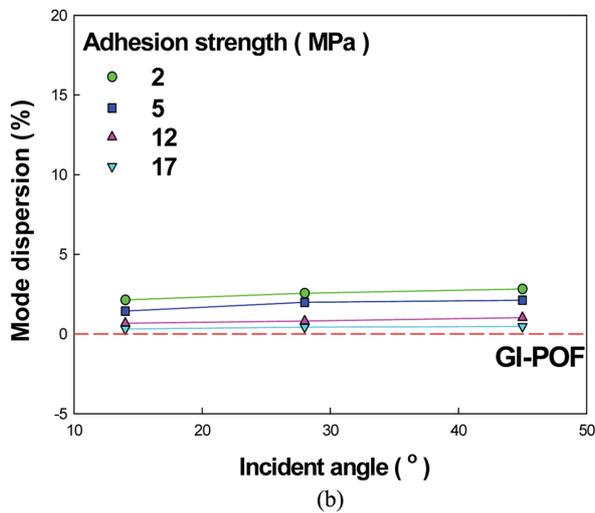
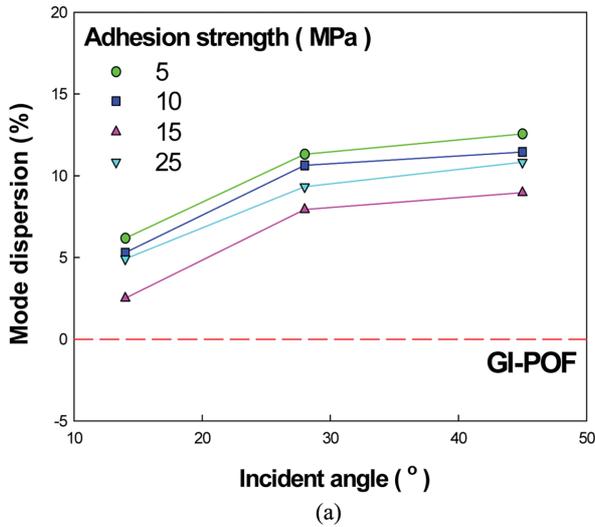


**Figure 3.** Bandwidth of multi-layer MMA/TFEMA copolymer films at 455 nm wavelength.

할 수 있다.

**계면 접착력에 따른 광 통신 특성.** Figure 2에서 예측된 경로를 이용하여 식 (1)-(2)로부터 각 다층 필름의 전송대역을 계산하여 Figure 3에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 경사 굴절률을 갖는 GI POF가 가장 큰 전송대역 즉, 가장 빠른 전송속도를 가짐을 알 수 있다. SI POF의 경우 층간 굴절률 차이가 상대적으로 적은 100/0-90/10-80/20-0/100 다층 필름이 100/0-75/25-50/50-0/100 다층 필름에 비하여 전송대역이 크음을 알 수 있으며 계면 접착력이 증가될수록 전송대역이 증가됨을 알 수 있으며 이러한 영향은 굴절률 차이가 큰 다층 필름에서 두드러짐을 알 수 있었다. 이러한 결과로부터 공압출 혹은 라미네이션을 이용한 SI 광통신 소자 제조 시 계면의 접착력은 전송속도에 매우 중요한 영향을 미침을 다시 한 번 확인할 수 있다.

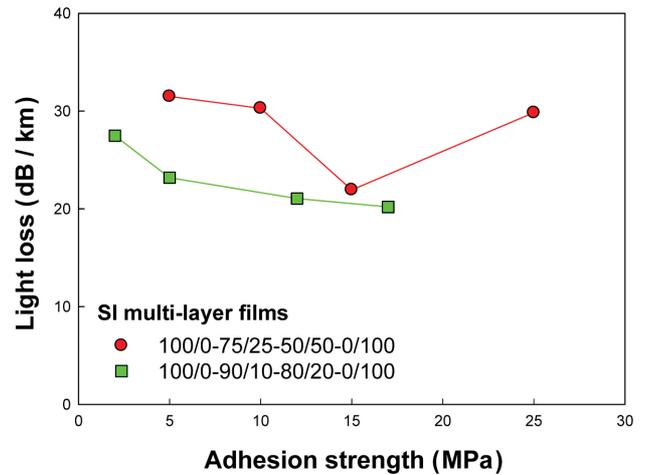
GI POF는 각기 다른 입사각을 가지는 광이 통과할 경우 모드 분산이 없어 동시에 다양한 정보를 송신할 수 있어 높은 전송량을 가진다. 그에 반해 SI POF의 경우 모드 분산 정도가 심하여 한 번에 한 가지 정보만을 송출함으로써 동일 시간 대비 전송량이 작은 단점이 있다. 따라서 모드 분산 정도는 POF의 효율과 전송속도 및 거리를 결정하는 중요한 요소가 된다. Figure 2의 빛의 경로는 광섬유의 모드 분산에 중요한 요소로 작용한다. Figure 2의 빛의 경로를 이용하여 100 m의 전송 후 모드 분산 정도를 예측하여 Figure 4에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 GI POF를 모드 분산을 기준으로 SI POF는 모드 분산이 발생하며 빛의 입사각이 증가됨에 따라 모드 분산이 증가하며 동시에 계면 접착력에 반비례함을 알 수 있다. 또한 층간 굴절률이 작은 다층 필름의 모드 분산이 GI POF와 유사해짐을 알 수 있으며 계면 접착력의 영향은 상대적으로 작아짐을 알 수 있다. 모드 분산은 데이터의 전송량과 속도에 큰 영향을 미침에 따라 SI POF의



**Figure 4.** Mode dispersion as a function of adhesion strength after 100 m light path: (a) high step refractive index multi-layer film (100/0-75/25-50/50-0/100); (b) low step refractive index multi-layer film(100/0-90/10-80/20-0/100).

단점인 모드 분산을 최소화하기 위해서는 공압출 및 라미네이션 시 층간 계면 접착력이 적절하게 유지되어야 됨을 확인할 수 있다.

Figure 5는 광손실 측정 장비인 ODTR을 이용하여 SI 다층 필름의 광 손실 정도를 측정 한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 층간 굴절률 차가 적은 다층 필름의 광 손실이 상대적으로 작음을 알 수 있으며 계면 접착력이 증가됨에 따라 굴절률의 급격한 변화가 분자 확산에 의하여 최소화되며 동시에 층간에 존재하는 구조적인 문제점이 감소되어 광 손실이 최소화됨을 알 수 있다. 이는 앞에서 확인된 계면 접착력 증가에 따른 전송대역 증가와 모드 분산의 감소와 밀접한 관계가 있을 것으로 판단된다.



**Figure 5.** Experimental light loss of multi-layer MMA/TFEMA copolymer films.

### 결론

본 연구에서는 다단(SI) 굴절률 변화를 갖는 다층 필름의 층간 계면 접착력이 광 투과 특성에 미치는 영향을 살펴본 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

다층 필름의 층간의 접착력은 빛이 이들 계면을 통과할 때 굴절각을 변화시켜 광 투과 특성에 영향을 미침을 확인할 수 있었다. 계면 접착력의 증가에 의하여 계면의 분자가 계면을 확산 침투하여 층간의 SI의 굴절률 변화를 GI의 굴절률 변화로 바꾸어 줌에 따라 GI 다층 필름과 유사한 광투과 특성을 가짐을 알 수 있었다. 그 결과, 분산 모드의 감소, 전송대역의 증가, 그리고 광 손실의 감소를 초래하여 계면 접착력의 조절이 광 데이터 전송에 효과적인 요소임을 확인할 수 있었다.

**감사의 글:** 본 연구는 2013학년도 단국대학교 대학연구비 지원으로 연구되었으며 이에 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. S. C. Gupta, *Textbook on Optical Fiber Communication and Its Applications*, PHI Learning Private Limited, New Delhi, 2012.
2. E. J. Park, M. J. Jung, J. B. Kim, M. S. Lee, and M. Park, *J. Korean Fiber Society*, **41**, 2 (2004).
3. E. A. Lacy, *Fiber Optics*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1982.
4. T. Kaino, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **24**, 1661 (1985).
5. S. Fujimoto, *SPIE Proc.*, **799**, 139 (1987).
6. Y. Koike, T. Ishigure, and E. Nihei, *J. Lightwave Technol.*, **13**, 1475 (1995).

7. M. Sato, T. Ishigure, and Y. Koike, *J. Lightwave Technol.*, **18**, 952 (2000).
8. T. Kaino, *Polymer Optical Fibers*, Dekker, New York, 1992.
9. T. Ishigure, M. Sato, O. Takanashi, E. Nihei, T. Kyu, S. Yamazaki, and Y. Koike, *J. Lightwave Technol.*, **15**, 2095 (1997).
10. T. Ishigure, M. Kano, and Y. Koike, *J. Lightwave Technol.*, **18**, 7 (2000).
11. T. Ishigure, Y. Koike, and J. W. Fleming, *J. Lightwave Technol.*, **18**, 178 (2000).
12. J. Meier, W. Liebert, W. Heinlein, W. Groh, P. Herbrechtsmeier, and J. Thies, *Electron Lett.*, **23**, 1208 (1987).
13. G. Jiang, R. F. Shi, and A. F. Garito, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **23**, 1208 (1987).
14. B. T. Liu, M. Y. Hsieh, W. C. Chen, and J. P. Hsu, *Polym. J.*, **31**, 233 (1999).
15. I. S. Sohn and C. W. Park, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **40**, 3740 (2001).
16. I. S. Sohn and C. W. Park, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **41**, 2418 (2001).
17. H. Kim and H. J. Kang, *SPE ANTEC Tech. Paper*, 304 (2007).
18. S. Lee, U. C. Paek, and Y. Chung, *Microw. Opt. Techn. Lett.*, **39**, 2 (2003).
19. P. G. de Gennes, *J. Chem. Phys.*, **55**, 572 (1971).