특 집

플라스틱 광섬유의 광학특성 분석

신 부 건·박 정 호·김 장 주

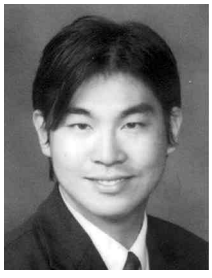
1. 서 론

고속 광통신의 보급과 함께 근거리 광통신 매체로서 플라스틱 광섬유에 대한 관심이 높아지고 있다. 굴곡이 많고 단말과 광섬유 그리고 광섬유간의 연결이 많이 요구되는 사무실 및 가정 내에서의 광통신을 위해서는 코어의 직경이 크고 가공이 용이하며 가격이 저렴한 전송매체가 요구된다. 현재 장거리 광통신에 사용되고 있는 유리 광섬유는 직경이 커질 경우 쉽게 부러지며 생산원가가 증가하므로 이러한 요구를 만족하지 못한다. 이러한 이유로 1 mm 이상의 직경에서도 쉽게 구부려지고 가공이 용이하며 가격이 비교적 저렴한 플라스틱 광섬유가 사무실이나 가정 내에서의 광통신 매체로서 각광받고 있다.

그러나 이러한 관심의 증가에도 불구하고 현재까지 플라스틱 광섬유의 특성들을 평가하기 위하여 상용화된 장비는 거의 없는 실정이다. 본 논고에서는 기존의 유리 광섬유 측정 장치들의 원리를 이용하여 플라스틱 광섬유의 광특성을 측정할 수 있는 측정 장치에 관해 논하고자 한다. 플라스틱 광섬유의 손실 측정장치, 산란 손실의 측정장치, 모재의 굴절률 분포 측정 장치, 플라스틱 광섬유의 굴절률 측정장치와 대역폭 측정장치에 대한 이론적인 배경과 장치의 구성, 그리고 그 성능에 대해 다루도록 하겠다.

2. 플라스틱 광섬유의 광손실 측정

신부건
1998 부산대학교 고분자공학과 (학사)
2000 광주과학기술원 신소재공학과 (석사)
2000 현재 광주과학기술원 신소재공학과 (박사과정)



박정호
2000 부산대학교 화학공학과 (학사)
2002 광주과학기술원 신소재공학과 (석사)
2002 현재 광주과학기술원 신소재공학과 (박사과정)

김장주
1977 서울대학교 화학공학과 (학사)
1980 서울대학교 화학공학과 (석사)
1987 Stanford Univ. (박사)
1996 전자통신연구원 책임연구원
1997 현재 광주과학기술원 신소재공학과 교수

Characterization of Plastic Optical Fiber

광주과학기술원 신소재공학과 (Bu - Gon Shin, Jeong - Ho Park, and Jang - Joo Kim, Dep. of Materials Science and Engineering, K - JIST, 1 Oryong - dong Buk - gu, Kangju 500 - 712, Korea)

광손실은 광섬유의 가장 기본적인 특성으로 신호를 전송할 수 있는 거리와 관계가 있다. 광섬유의 광손실은 주로 dB/km의 단위로 나타내며 입사된 빛의 강도와 광섬유를 빠져 나오는 빛의 강도의 비를 나타낸다.

광섬유의 광손실은 일반적으로 cut - back 방법으로 측정한다. Cut - back 방법은 광섬유를 일정한 길이로 잘라내어 자르기 전과 후의 빛의 강도의 변화량을 통하여 광손실을 측정하는 방법이다. 광원에서 나온 빛이 광섬유에 입사될 때 일부는 광섬유 끝에서 반사되기도 하며 입사된 광의 일부는 도파조건에 맞지 않아 도파되지 않고 광섬유를 빠져 나오게 된다. 이러한 이유로 발생하는 빛의 손실을 삽입손실이라고 하며 광섬유 끝단의 처리, 광원과 광섬유의 배열상태, 입사되는 빛의 개구수 등에 의해 삽입손실이 바뀌게 된다. Cut - back 방법이 광섬유의 손실 측정에 주로 사용되는 이유는 광섬유 자체의 변화량만을 측정하므로 삽입손실에 차이가 있어도 광섬유 자체의 손실만을 측정할 수 있기 때문이다.

광섬유의 광손실은 아래와 같은 식에 의해 계산되며

$$\text{loss (dB)} = -10 \log \left(\frac{I}{I_0}\right)$$

이때 I 는 광섬유를 빠져 나온 빛의 강도이며, I_0 는 입사된 빛의 강도이다. 길이가 L_1일 때 빛의 강도를 I_1 이라 하고, 길이가 L_2일 때 빛의 강도를 I_2 라 하면 각각의 길이에서의 손실은

$$\text{loss}_1 \text{ (dB)} = -10 \log \left(\frac{I_1}{I_0}\right)$$

$$\text{loss}_2 \text{ (dB)} = -10 \log \left(\frac{I_2}{I_0}\right)$$

이며, 단위길이당 손실은 $(\text{loss}_1 - \text{loss}_2)/(L_1 - L_2)$로 나타나므로

$$\text{단위길이 손실} = -\frac{10}{(L_1 - L_2)} \left[\log \left(\frac{I_1}{I_0}\right) - \log \left(\frac{I_2}{I_0}\right)\right]$$

$$= -\frac{10}{(L_1 - L_2)} \left[\log \left(\frac{I_1}{I_2}\right)\right]$$

이 된다. 즉 처음 광섬유에 입사된 빛의 강도 I_0에 상관없이 단위길이에 대한 광섬유의 손실을 측정할 수 있다.

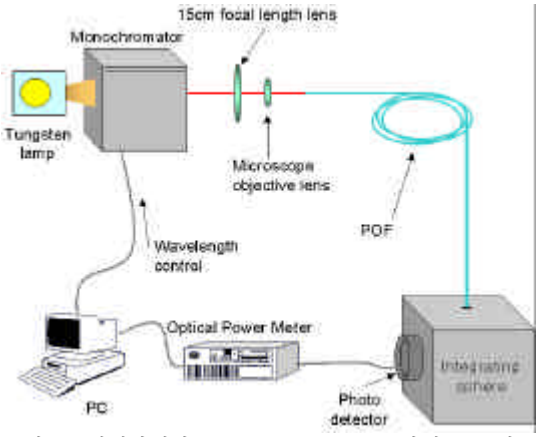


그림 1. 백색광원과 monochromator를 광원으로 사용한 광손실 측정장치.

플라스틱 광섬유의 손실 측정에 필요한 장치들은 원하는 파장의 빛을 발생시킬 수 있는 광원, 광원에서 나온 빛을 플라스틱 광섬유에 입사시키는 광섬유 배열기, 광섬유에서 빠져 나온 빛의 밝기를 측정하는 광 검출기로 구성된다. 그림 1에 플라스틱 광섬유 손실 측정 장치의 개략도를 보였다.

플라스틱 광섬유의 광손실을 측정하기 위해서는 두 가지 다른 형태의 광원이 이용 가능하다. 그 중 하나는 PMMA의 흡수가 최소인 650 nm 파장의 레이저이며, 또 다른 광원은 파장을 바꿔가면서 측정이 가능한 텅스텐 램프와 monochromator를 조합함으로써 얻을 수 있다. 텅스텐 백색광원을 사용한 측정은 넓은 파장 대역에 대한 광손실을 측정할 수 있으나, 백색 광원에서 나오는 빛을 monochromator를 이용하여 원하는 파장만 걸러내어 사용하므로 레이저를 광원으로 사용한 경우보다 빛의 강도가 작다. 즉 같은 플라스틱 광섬유를 측정하여도 광검출기의 검출능력이 한계 때문에 laser를 광원으로 사용할 때보다 백색광과 monochromator로 측정할 경우 측정에 사용되는 플라스틱 광섬유의 길이가 더 짧아야 한다.

그림 2는 Toray 사에서 판매하는 1 mm 외경의 플라스틱 광섬유 (TORAY PFO FB1000S)의 손실 측정 결과이며 이 광섬유는 150 dB/km 이하의 광손실을 가지는 것으로 알려져 있다. 측정된 광섬유는 20 m를 최초 길이로 사용하였으며 4 m씩 잘라서 4번에 걸쳐 측정하였다.

그림 3은 동일한 광섬유를 가지고 파장에 따른 광손실을 측정한 결과이다. 길이 12 m의 플라스틱

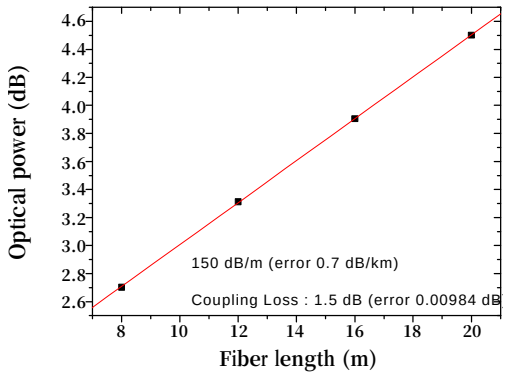


그림 2. Toray 사에서 판매하는 1 mm 외경의 플라스틱 광섬유 (TORAY PFO FB1000S)의 손실 측정 결과.

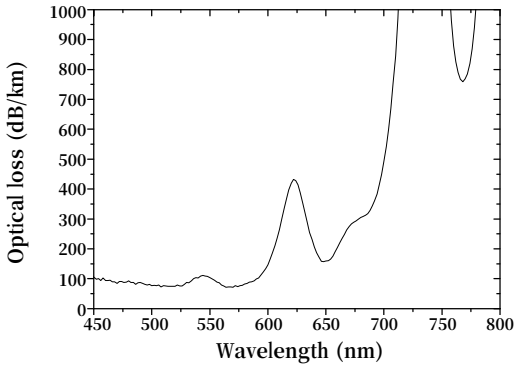


그림 3. Toray 사의 상용 플라스틱 광섬유 (TORAY PFO FB1000S)의 파장별 광손실.

광섬유를 이용하여 손실 측정을 하였으며, 3 m씩 두 번 잘라내어 측정한 후 평균값을 표시하였다.

3. 광산란 측정

플라스틱 광섬유의 광 산란에 대한 손실은 물질 자체가 고분자라는 점을 고려하면 흡수 손실 못지 않게 중요한 부분이다. PMMA도 중합 조건에 따라 작게는 10 dB/km에서 크게는 600 dB/km 정도의 차이를 보이므로 고유한 흡수 손실 못지 않게 제조 공정에 따른 산란 손실도 매우 중요하다.[1-3]

물질의 고유한 Rayleigh 산란은 광섬유의 코어 내의 구조적 불균일성에 기인하는 것으로 파장의 10분의 1 혹은 그 이하의 정도의 물리적 크기의 불균일한 일종의 입자들이 산란의 중심으로 작용한다. PMMA의 경우는 물질의 밀도 요동에 의한 Rayleigh 산란이 지배적이다. 제조 공정에 의해 발생 가능한 광산란 손실은 광섬유의 코어 내에 존재하는 불순물 입자(dust)나 미세한 공극(microvoid) 그리고 광섬유 코어의 직경 요동(fluctuation of core diameter), 인출공정에 의한 배향복굴절(orientational birefringence), 코어-클래딩간 계면결함(core-cladding boundary imperfection) 등이 있다.[5-7] I_0의 세기를 갖는 빛이 거리 y를 통과한 후 단지 산란에 의해 I로 감소하는 것으로 이것을 흐림도 t(turbidity)로 정의한다.

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-ty)$$

흐림도 t는 전체 방향에서 산란된 모든 빛의 합과 관계되어지며 다음 식으로 정의된다

$$t = p\int_o^p (V_V + V_H + H_V + H_H)\ \sin q\, dq$$

여기서 기호 V와 H는 각각 수직 그리고 수평 방향의 편광을 가리킨다. 그리고 A_B라고 표기에서 A는 산란된 빛의 편광방향의 종류를 나타내며 아래 첨자 B는 입사되는 빛의 편광방향의 종류를 의미한다. q는 입사광의 방향으로부터의 산란각으로 정의된다.

측정은 그림 4와 같은 장치를 이용하여 이루어진다. 광원인 헬륨-네온(He-Ne) 레이저(λ=633 nm) 빔이 편광기(polarizer)를 거쳐 샘플(광섬유 모재 혹은 원통형 PMMA 중합체) 내로 들어간다. 샘플은 원통형 석영관의 중앙에 놓이고 샘플과 원통형 유리 사이는 index matching oil로 채운다. 샘플로부터 산란된 빛은 그림 4에서처럼 핀홀 A(1mm Dia.)에서 평행하게 산란되어 특정각에서 산란되어

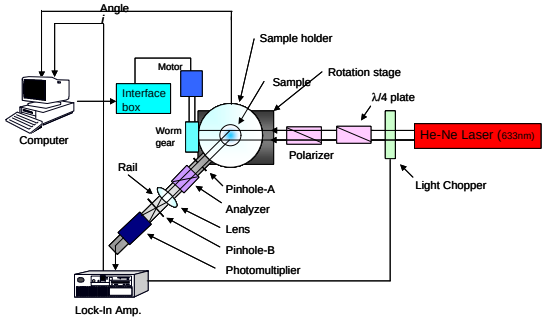


그림 4. 광산란 손실 측정 장치의 모식도.

진 빛을 다시 편광기를 통과시켜 편광 시키거나 비편광시킨 다음 핀홀 B (100 mm Dia.)를 거쳐 PMT (Photomutiplier tube)로 산란광의 세기를 측정하는데 PMT에서 감지된 산란 세기는 전기 신호로 바뀌고 이때 얻어지는 신호를 컴퓨터로 보내 데이터를 얻는다. 즉 광원의 편광방향이 원평광이라고 할 때 polarizer과 analyzer를 이용해 각각의 입사되는 빛과 산란되는 빛의 편광방향에 따른 산란 세기를 측정하는 것이다. 이때 산란 측정 장치에서 수광 (detection) 소자 부분은 광학 레일 (rail) 위에 위치하게 되는데 이 수광 부분에서 rotation stage로 산란각에 따른 산란 세기를 측정한다.[1,2,9]

핀홀 B가 렌즈의 초점거리에 위치하므로 샘플 중앙으로부터 거의 평행하게 산란된 빛만이 감지된다. 이는 샘플과 핀홀 A 사이의 거리의 변화 (5 30 cm)에 대한 PMT 측정 세기의 변화가 없음을 확인할 수 있다. 평행하게 입사된 빔과 그에 따른 평행 산란 빔만을 고려할 때 PMT로부터 관찰되어지는 산란 부피는 $\sin\theta$에 반비례한다. 따라서 관측된 세기는 $\sin\theta$를 곱하여 V_V (polarized)와 H_V (depolarized)의 산란비를 얻는다. 각각의 산란 세기 항을 측정을 통해 구하고 이를 전체 방향으로 적분한 뒤 전체 흐림도를 다음 식을 이용하여 손실 단위로 바꾸면 산란 손실 a_t을 구할 수 있다.

$$a(\mathrm{dB/km}) = 4.32\times10^5\, t(\mathrm{cm}^{-1})$$

산란 손실 a_t는 a_1^{iso}, a_2^{iso}, a^{aniso}의 다음의 세 가지 항으로 나뉘어 질 수 있다.

$$a_t = a_1^{iso} + a_2^{iso} + a^{aniso}$$

여기서 a^{aniso}는 H_V 값에 의해 얻어지는 비등방성 산란 손실로 산란 세기가 산란각에 따라 변하지 않는 값으로 매질의 고유한 전자 밀도의 방향성에 의해 결정되어지는 값이다. 그리고 등방성 광산란 손실 a^{iso}은 a_1^{iso}과 a_2^{iso}의 합으로 나눌 수 있는데 a_1^{iso}은 산란각 의존성이 없는 즉, 산란각에 따라 산란 세기의 변화가 없이 열에 의한 매질 내의 밀도 요동 (thermally induced density fluctuation)에 의한 등방성 광산란에 의한 산란 손실이며 a_2^{iso}는 등방성 산란 손실 중 매질 내의 비균일성에 의해 발생되어지는 값으로 산란각에 따라 산란 세기가 변하는 값이다.

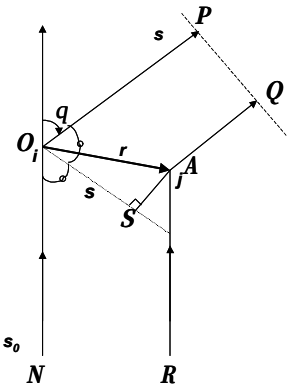


그림 5. i 점과 j 점에서 산란된 빔의 기하학적 모식도.

이때 a_2^{iso}는 산란 세기가 산란각의 함수로 측정된 값에서 산란각에 의존하는 항만을 분리해서 얻을 수 있어야 한다. 그림 5에서와 같이 근접한 두 개의 평행한 빔이 각각 i점과 j에서 같은 방향으로 산란될 때 이 빔들간의 위상차를 고려하여 Debye와 Buche에 정리된 이론을 바탕으로 다음의 상관함수를 이용해 얻을 수 있다.[9,10]

$$g(r) = \frac{<h(r_i)\cdot h(r_j)>_r}{<h^2>} = \exp(-r/a)$$

여기서 $h(r_i)$과 $h(r_j)$는 거리 r만큼 떨어진 i점과 j점에서의 유전상수의 요동 (fluctuations of dielectric constants)을 나타내며 $<h^2>$는 모든 유전상수들에 대한 일종의 평균값이다.

제안된 상관함수는 r 즉 i점과 j점 사이의 거리가 r->0일 때 $g(r)$=1이며, r->∞일 때, 그리고 $g(r)$=0일 때 상관함수 값은 $r(0)$=1을 만족한다. 즉 $g(r)$의 r에 대한 감소 정도는 계의 균일성의 척도로 그 정도가 클수록 계는 균일하다고 할 수 있다. 또한 a는 상관 길이 (correlation length)라고 하는데, 이는 비균일도 (heterogeneities) 크기의 척도가 된다.

a_1^{iso}와 a_2^{iso} 그리고 a^{aniso}는 모두 아래 식과 같이 정리될 수 있다.

$$a_1^{iso} = 10\ \log\ ep\ \int_0^p (1+\cos^2 q)\, V_{V_1}^{iso} \sin q dq = \frac{80}{3}\log\ ep\ V_{V_1}^{iso}$$

$$a_2^{iso} = 10\ \log\ ep\ \int_0^p (1+\cos^2 q)\, V_{V_2}^{iso}\ \sin q dq$$

$$= \frac{320\log e a^3 <h> p^4}{l_0^4}\left\{\frac{(b+2)^2}{b^2(b+1)} - \frac{2(b+2)}{b^3}\ln(b+1)\right\} b = 4k^2a^2$$

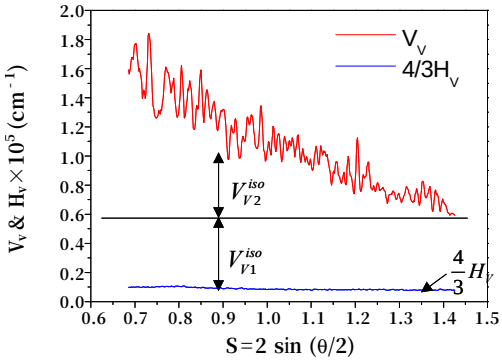


그림 6. 측정된 PMMA 중합체의 V_V와 H_V를 산란 세기.

$$a^{aniso} = 10 \log ep \int_0^p \frac{(13+\cos^2 q)}{H_V} \sin q dq = \frac{800}{9} \log ep \; H_V$$

그림 6은 측정된 산란각에 따른 PMMA의 산란 세기 V_V와 H_V를 Rayleigh 비로 환산한 결과이다. 이 결과를 바탕으로 전체 산란 손실을 다음과 같이 구할 수 있다. $a = a_1^{iso} + a_2^{iso} + a^{aniso}$ =38.69 dB/km로 측정되었다.

4. 플라스틱 광섬유 모재의 굴절률 분포

광섬유 모재의 굴절률 분포는 광섬유 모재의 측면으로 입사된 빛이 모재 내부에서 어떠한 궤적을 그리는지를 관찰함으로써 측정이 가능하다.[12] He - Ne laser와 chopper를 이용한 vertical scan 방식의 모재 굴절률 측정 장치를 제작하여 dynamic spatial - filtering 방법으로 플라스틱 광섬유 모재의 굴절률 분포를 측정한다. Spatial - filtering 방법은 원래 광섬유 모재를 지나온 평행광선이 렌즈의 초점거리에 놓여있는 knife - edge filter를 통과하면서 생기는 그림자의 형태를 이용하여 모재의 굴절률 분포를 측정하는 방법이다. Spatial - filtering 방법의 개략도를 그림 7에 나타내었다.

광섬유 모재의 굴절률 분포를 측정하는 다른 방법으로 spatial filtering 방법을 응용한 dynamic spatial filtering 방법이 있다. Index matching oil에 담겨져 있는 플라스틱 광섬유 모재를 지나가는 빛은 그림 8에 나타낸 것과 같은 경로를 움직인다. 이와 같은 빛의 경로를 측정하여 광섬유 모재의 굴절률을 측정할 수 있다. 입사광이 모재에 입사되는 위치를 t라고 하고 모재를 통과한 광이 관측면과

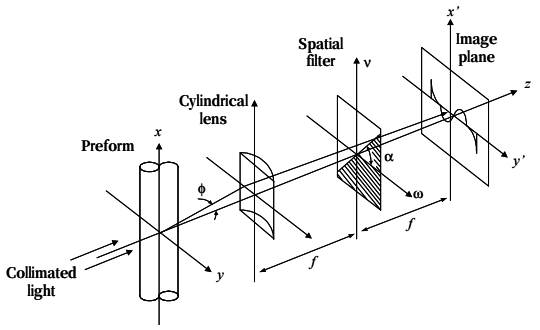


그림 7. Spatial filtering을 통한 광섬유 모재의 굴절률 분포 측정.

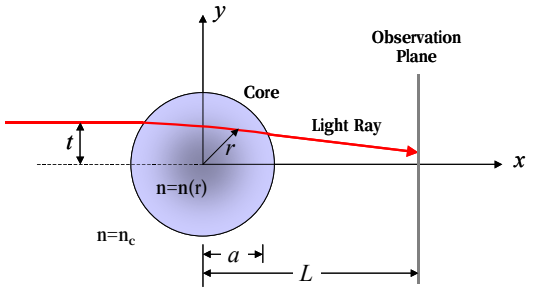


그림 8. 플라스틱 광섬유 모재의 굴절률 분포 측정 원리.

만나는 위치를 y라고 하면 y는 t의 함수로 표현이 될 수 있다. 이 $y(t)$와 t의 관계는 다음 식으로 표현 가능하다.[15]

$$y(t) = t + \frac{2Lt}{n_c} \int_t^a \frac{\partial n}{\partial r} \frac{dr}{(r^2 - t^2)^{1/2}}$$

식에서 L은 모재의 중심에서 관측면까지의 거리이고, n_c는 모재를 둘러싸고 있는 굴절률 오일의 굴절률이며, 모재의 굴절률 n은 반경 r의 함수로만 나타난다고 가정한다. 실제 구해야 하는 값은 모재를 빠져 나오는 빛이 모재를 통과하는 동안 얼마나 휘어지는 정도를 나타내며 이 값은 관측면까지의 길이 L과 관측면 위에서 움직인 거리 $y(t)$에 의해 계산할 수 있다. 이 식을 굴절률에 관해 다시 써보면 다음 식과 같다.

$$n(r) - n_c = \frac{n_c}{pL} \int_r^a \frac{t - y(t)}{(t^2 - r^2)^{1/2}} dt$$

이 식은 모재에 빛이 입사되는 위치 t와 모재를 통과하여 나온 빛이 관측면과 만나는 위치 $y(t)$만

을 측정하면 모재 내부의 굴절률 분포 $n(r)$을 계산해 낼 수 있음을 의미한다. 측정을 통하여 얻어진 $y(t)$ 값은 수치해석을 통하여 굴절률 값으로 계산되어 진다.

He - Ne 레이저와 chopper 그리고 Lock - in Amp.을 조합으로써 플라스틱 광섬유 모재의 굴절률 분포의 측정이 가능하다. 레이저 광원으로부터 나온 빛은 정확도를 높이기 위해서 핀홀을 통과시킨다. 핀홀을 통과한 빛은 렌즈를 통과한 후 모재의 굴절률 분포를 측정하기 위해 제작된 모재 holder에 입사된다. 모재 홀더는 양쪽에 fused silica 유리 두 장이 있고 이 유리 두 장 사이에 굴절률을 맞추어 주기 위한 액체가 채워져 있으며 그 중앙에 측정하고자 하는 모재가 고정된다.

Holder를 통과한 빛은 모재를 지나면서 경로가 휘어지게 되며 휘어진 빛은 holder 앞에 놓여있는 chopper의 날에 닫게 된다. Chopper 날은 빠른 속도로 회전하면서 Lock - in Amp.로 reference 신호를 보낸다. Chopper 날을 통과한 빛은 렌즈로 집광되어 광검출기에 의해 검출된다. 광검출기에 의해 광신호가 전기신호로 바뀌어 Lock - in Amp.의 신호단으로 입력되면 이 신호단의 전기신호와 chopper의 reference 신호의 위상차를 측정한다. Chopper 날을 통과한 빛과 reference 신호를 이용하여 플라스틱 광섬유 모재를 통과한 빛이 얼마나 휘어져 있는지를 측정할 수 있다. 스테이지에 고정되어 있는 모재 홀더의 위치와 chopper 날을 통과한 빛의 위상차가 측정되며, 측정된 값들은 식 (2)에 의해 플라스틱 광섬유 모재의 굴절률로 계산된다.

그림 9는 직경 30 mm, 길이 200 mm 의 원기둥 모양의 PMMA 막대의 굴절률 분포를 측정한 결과이다. 그림 9 (a)는 광원에서 나온 빛이 PMMA 막대를 통과한 후 광검출기에 검출된 신호와 chopper의 reference 신호와의 위상차를 나타낸 것이다. 제작된 PMMA 막대는 원형이므로 모재의 바깥쪽으로 갈수록 휘어지는 각도가 커지게 되며, 그 결과 chopper 위에서의 변위가 커지고 reference 신호와 광신호간의 위상차가 커지게 된다.

이와 같이 측정된 위상차는 간단한 계산을 통하여 chopper 날 위에서 움직인 변위로 바뀌게 되고 이 움직인 거리로부터 휘어진 각도와 모재의 굴절률을 각각 구할 수 있다. Chopper 날 위의 변위와 PMMA 막대의 굴절률 분포의 측정 결과를 그림 9 (b)와 그림 9 (c)에 각각 나타내었다. 측정 결과

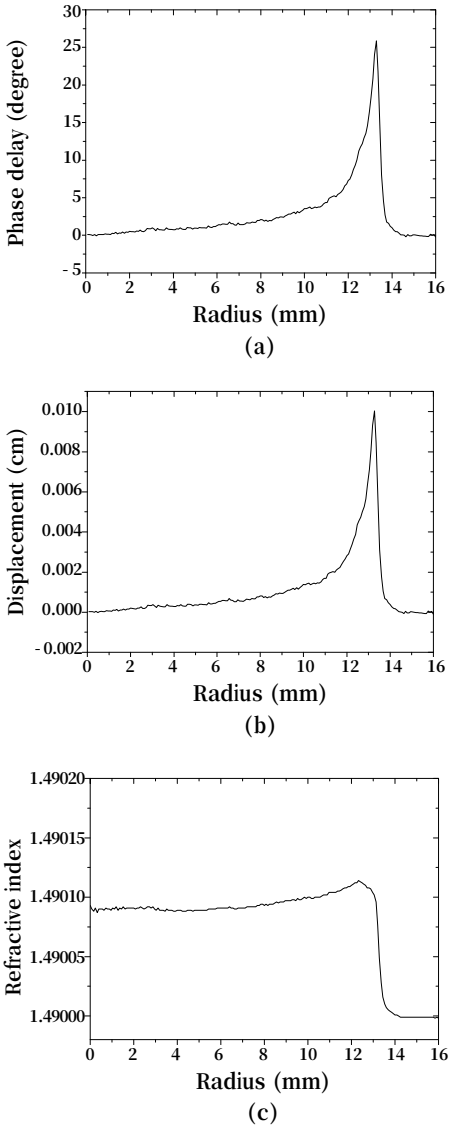


그림 9. (a) 측정된 PMMA의 위상차, (b) 계산된 chopper blade 위에서의 변위, and (c) 계산된 PMMA 모재의 굴절률.

PMMA 막대의 굴절률은 약 1.4909였으며 거의 모재 전체 영역에 대해서 비슷한 값을 나타냈다.

5. 플라스틱 광섬유의 굴절률 분포 측정

다중 광섬유에서 광섬유 내부의 굴절률 분포는 광섬유의 광전송 대역폭을 결정하는 중요한 특성 중 하나이다. 광섬유의 굴절률을 측정하는 방법에

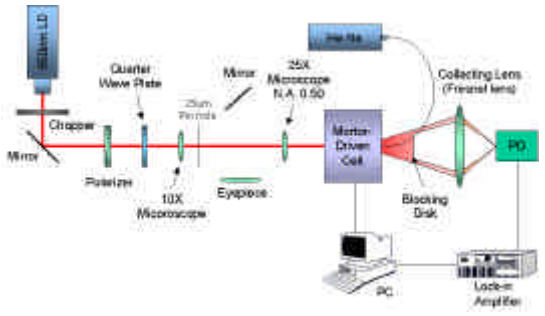


그림 10. Refracted near-field 방법을 이용한 광섬유 굴절률 분포 측정 장치.

는 transmitted near-field method, refracted near-field method, transverse interferometric method (TIM) 등이 있으며 특히 interferometric method는 Iga 등이 제안한 nondestructive method와 Yasuji Ohtsuka 등이 제안한 Interphako interference microscopy를 이용하는 방법이 주로 쓰인다. 그 외에도 light scattering method, diffraction, focusing, fast Fourier transform and refracted ray tracing과 같은 방법들이 제안되었다.[13,14]

그림 10은 refracted near-field 방법을 이용하여 광섬유의 굴절률 분포를 측정하는 방법을 개략적으로 나타내고 있다. 굴절률 오일에 완전히 잠겨 있는 광섬유로 입사된 광은 그 입사되는 위치에 따라 광섬유로 도파되지 않고 빠져 나오는 빛의 밝기가 틀리게 된다. Refracted near-field 방법은 입사 위치에 따라 빠져 나오는 빛의 밝기 차이를 측정하여 광섬유의 굴절률 분포를 측정한다.

그림 11은 Koike 연구진이 굴절률 분포 측정에 주로 사용하는 Interphako interference microscopy를 이용하는 방법을 나타낸 것이다. 이 측정 방법은 아래쪽의 빔 스플리터로 둘로 나뉘어진 빛이 위쪽의 빔 스플리터에 의해 다시 합쳐질 때 발생하는 간섭무늬를 이용한다. 만약 f 위치에 광섬유가 놓여있지 않다면 미세한 광로 차이 때문에 관찰되는 간섭무늬는 여러 개의 선으로 보이게 된다. 그러나 광섬유를 통과하게 되면 광섬유 내부의 굴절률 분포에 의해서 간섭무늬의 이동이 관찰되게 된다. 이 간섭무늬의 이동을 측정하여 플라스틱 광섬유의 굴절률 분포를 얻을 수 있다.

Transverse interferometric 방법은 Interphako interference microscopy를 이용하는 것과 유사한 구조지만 조금 다르게 굴절률 분포를 측정한다. 그

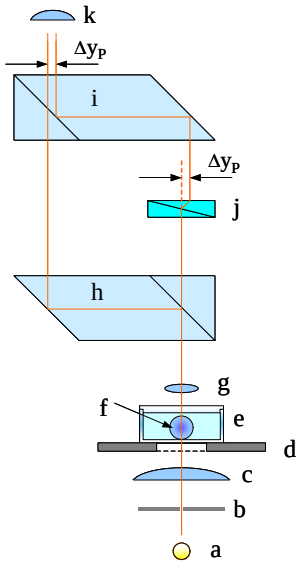


그림 11. Interphako 현미경을 이용한 광섬유 굴절률 분포 측정 방법.

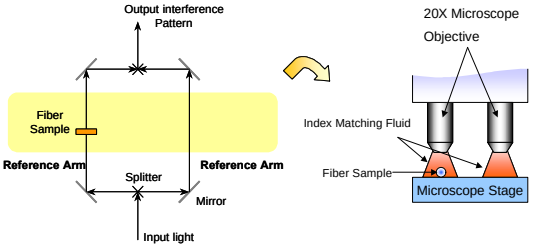


그림 12. Transverse interferometric 방법을 이용한 광섬유의 굴절률 분포 측정 방법.

림 12에 transverse interferometric 방법으로 광섬유 굴절률 분포를 측정 방법을 나타내었다. Interphako interference microscopy의 경우에는 광섬유를 통과한 빛이 빔 스플리터로 둘로 나뉘어진 후 j의 wedge를 통과하는 과정에서 광로차가 발생하지만, transverse interferometric 방법에서는 먼저 빔 스플리터로 나뉘어진 빛 중 한쪽만 광섬유를 통과한 후 다시 합쳐진 빛의 간섭무늬를 이용하여 굴절률 분포를 측정하게 된다.[15]

이러한 장치를 이용하여 굴절률 분포를 측정할 때 예측되는 결과를 그림 13에 나타내었다. Interphako 현미경 방법과 마찬가지로 transverse interferometric 방법에서도 광섬유가 존재하지 않을 경우 미세한 경로 차에 의해 간섭무늬는 선형으로만 나타나지만, 광섬유가 한쪽 광로 사이에 들어가게 되면 광섬유의 굴절률 분포에 따라 위상이 지연되

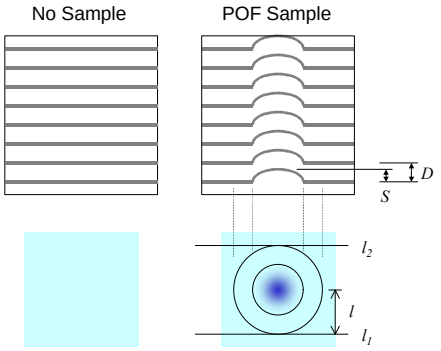


그림 13. Transverse interferometric 방법을 이용하여 얻어지는 간섭무늬의 이동.

어 간섭무늬가 이동하는 현상이 관찰될 것이다.

간섭무늬가 이동하는 정도는 다음 식과 같다.

$$\Delta f = k \int_{l_1}^{l_2} n(l) - n_L \, dl$$

여기서 $k=2\pi/\lambda$ 이고, $n(l)$은 광로 l 상의 굴절률이다. 또한

$$\frac{S}{D} = \frac{\Delta f}{2p}$$

와 같은 관계에 있다.

이때, D 는 간섭 무늬 사이의 간격이고, S는 간섭무늬가 이동한 거리이다. 광섬유에 의해 형성된 간섭무늬의 이동은 CCD를 이용하여 측정되고 컴퓨터 프로그램을 통해 분석한 다음 광섬유 굴절률 분포 측정용으로 제작된 프로그램을 이용하여 계산된다.

6. 플라스틱 광섬유의 대역폭

전송 손실과 더불어 대역폭은 광섬유의 가장 중요한 특성이다. 광섬유를 통과하는 광신호는 여러 가지 이유에 의하여 신호 분산이 발생하며 이 신호 분산 때문에 광섬유의 대역폭이 결정된다. 광섬유 내부에서 광신호의 분산은 크게 광섬유 내부의 모드들간의 경로차에 의해 발생하는 모드 분산과 파장에 따라 물질의 굴절률이 틀리기 때문에 발생하는 색분산에 의해 발생한다. 모드 분산과 색 분산에 의해 발생하는 광신호의 분산에 대한 개략도를 그림 14에 나타내었다. 모드 분산은 다중 모드 광섬유에서 발생하며 각 모드간의 경로가 다르고 각 경로마다 걸리는 시간이 차이가 있기 때문에 발생한다. 저차 모드보다 고차 모드일수록 경로는 더 길어지므로 시간적으로 늦게 광섬유를 빠져 나오게 된다. 색 분산은 매질의 굴절률이 파장에 따라 다르기 때문에 발생하며 광원의 단색성과도 밀접하게 관계된다.

광섬유의 전송 대역폭은 시간 영역에서 짧은 펄스 신호의 분산정도를 측정하는 방법과 주파수 영역에서 주파수 변화에 따른 광신호의 분산을 측정하는 방법으로 나누어 볼 수 있다. 시간 영역에서 펄스의 분산을 측정하는 방법을 일반적으로 Pulse distortion method라 하고 주파수 변화에 따른 측정을 Frequency domain method라고 한다.

펄스 분산을 통해 광섬유의 대역폭을 측정하는 장치의 구성을 그림 15에 나타내었다. 대역폭 측정은 수십 피코초 이하의 짧은 펄스를 발생하는 광원과 이렇게 시간적으로 짧은 광신호를 측정할 수 있는 광검출기, 그리고 이 신호를 처리할 수 있는 오실로스코프로 구성된다. 광원에서 발생한 신호는 광섬유로 입사되며, 광섬유에서 빠져나오는 빛은 광검출기를 통하여 검출되어 오실로스코프에 표시된다.

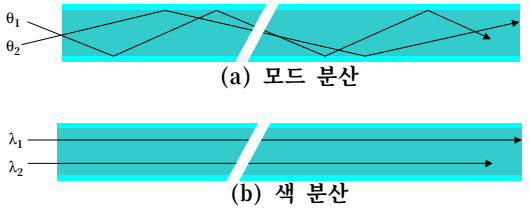


그림 14. 광섬유 내부에서 발생하는 신호분산.

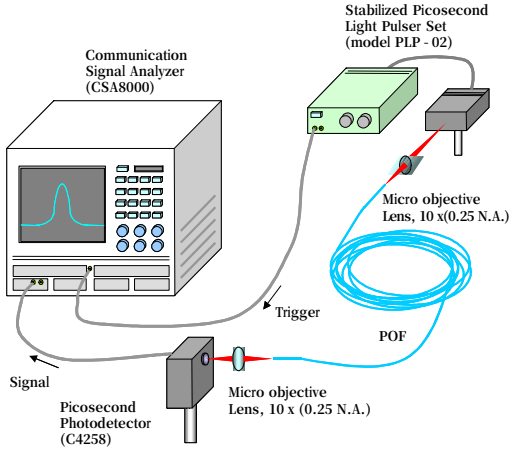
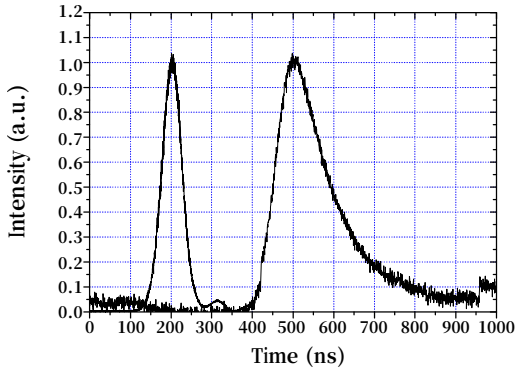


그림 15. 대역폭 측정 장치의 구성.



B.W.=0.44×10^{12}×(707.52 - 2852) - 1/2×0.20=135 Mbps

그림 16. PFO FB1000S의 대역폭 측정 결과.

일정한 길이를 통과하는 동안 발생하는 광신호의 변화를 통해서 단위 길이 당 대역폭이 결정된다. 광섬유를 통과한 신호는 Fourier transform을 통하여 주파수 대역에서 입력신호 대 출력신호 비가 0.5 이상인 최소점을 대역폭으로 정의되고 입, 출력 신호 모두 Gaussian 분포와 유사한 형태를 가지고 있을 때는 다음 식으로 간단히 대역폭이 계산된다.[15]

$$\text{Bandwidth} = \frac{0.44}{(t_1^2 - t_2^2)^{1/2}} \times L$$

여기서 t_1은 출력신호의 FWHM을 t_2은 입력신호의 FWHM, 그리고 L은 광섬유의 길이를 의미한다.

그림 16은 TORAY 사의 PFO FB1000S의 전송 대역폭을 측정한 결과이다. 1 m 길이의 플라스틱 광섬유를 통과한 빛을 광검출기를 통해 측정한 결과와 21 m 길이의 플라스틱 광섬유를 빠져나온 광신호를 함께 나타낸 것이다. 측정 결과 21 m 길이를 통과하였을 때의 FWHM은 2852 피코초이며 1 m 길이를 통과하였을 때의 FWHM은 707.52 피코초이다. 측정결과 광섬유는 100 m 길이에서 135 Mbps의 대역폭을 보였다.

7. 맺 음 말

플라스틱 광섬유의 대표적인 광특성에 대한 측정을 위해 cut-back 방법을 이용한 광섬유의 손실 측정법, 광섬유의 산란 손실만을 측정할 수 있는 광산란 측정법, dynamic spatial filtering을 이용한 모재의 굴절률 측정법, transverse interferometric을 이용한 광섬유의 굴절률 분포 측정법, 그리고 impulse response를 이용한 광섬유의 전송 대역폭 측정방법의 간단한 원리와 장치의 구조에 대해 알아보았다.

논의된 모재와 광섬유의 특성 평가 기술을 기존의 상업화된 광섬유에 실제로 적용하여 보았고, 기존의 알려진 데이터와 비교하여 그 성능을 확인하였다. 본 연구실에 설치한 플라스틱 광섬유 모재 및 광섬유의 특성 평가 기술은 향후 플라스틱 광섬유 연구에 실제로 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글 : 모재의 굴절률 분포 측정과 광섬유의 대역폭 측정에 아낌없는 관심과 조언을 주신 광주과학기술원 정보통신공학과 오경환 교수님과 신우진, 최상수 학생에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Y. Koike, N. Tanio, and Y. Ohtsuka, *Macromolecules*, 22, 1367 (1989).
2. Y. Koike, s. Matsuoka, and E. Bair Harvey, *Macromolecules*, 25, 4807 (1992).
3. N. Tanio and Y. Koike, *JPN. J. Appl. Phys*., 36, 743 (1997).
4. H. Lee, *Polymer (Korea),* 8, 147 (1984).
5. N. Tanio and Y. Koike, *Polymer Journal*, 32, 43 (2000).
6. M. F. Bkshtein, *Opt. Spectrosc*, 51, 601 (1981).
7. P. Fujiki, T. Kaino, and S. Oikawa, *Polymer Journal*, 15, 693 (1983).
8. P. Debye and M. Buche, *Journal of Chem. Phys*., 18, 1423 (1950).
9. M. Kerker, "The Scattering of Light and Other Electromagnetic Radiation", Academic Press, New York, 1972.
10. P. Dye and H. R. Anderson, *J. of Appl. Phys*., 28, 679 (1957).
11. E. R. Pike, W. R. M. Pomeroy, and J. M. Vaughan, *J. Chem. Phys*., 62, 3188 (1975).
12. D. Marcuse, *Applied Optics*, 18, 9 (1979).
13. Yasuji Ohtsuka and Yutaka Shimizu, *Applied Optics*, 16, 1050 (1977).
14. Yasuji Ohtsuka and Yasuhiro Koike, *Applied Optics*, 19, 2866 (1980).
15. C. Koeppen, R. F. Shi, W. D. Chen, and A. F. Garito, *J. Opt. Soc. Am. B*, 15, 727 (1998).