

## 광섬유 복합 소자를 위한 열확장코어 광섬유\*

김진하 · 김병운

한국과학기술원 물리학과

(1994년 2월 22일 받음)

광섬유내에 첨가되어 있는  $\text{GeO}_2$  등의 물질을 열확산시켜서 만드는 열확장코어 광섬유는 광섬유 복합 소자에서 회절에 의한 손실을 줄여주는 역할을 함으로써 시준과 집광을 위한 렌즈가 필요없게 된다. 광섬유의 열처리를 위하여 전기로를 제작하였으며  $1.3 \mu\text{m}$  단일 모드 광섬유를  $1250^\circ\text{C}$  에서 10시간동안 열처리한 결과 모드 크기가 27% 확장되었음을 확인할 수 있었다.

### 1. 서 론

광통신, 광섬유 센서 등의 광섬유 시스템에서 광섬유만의 장점을 최대한 살리기 위해서는 기존의 bulk optics에서 사용되던 광학 소자들을 광섬유내에서 빛을 꺼내지 않고 구현하는 인라인(in-line) 소자가 필요하다. 최근들어 광섬유 사이에 얇은 미세 광학 소자-편광기, 변조기, isolator 등-를 삽입하는 광섬유 복합 소자<sup>[1-9]</sup>에 대한 개발이 일본 등지에서 활발하게 진행되고 있다. 만일 이것을 기존의 bulk optics 소자를 이용하여 제작할 경우 시준과 집광을 위한 렌즈가 필요하게 되고 부피가 커지게 되며 정렬에 많은 노력이 필요하게 되므로(그림 1(a)) 실용화에는 많은 어려움이 따른다. 그러나 미세 광학 소자를 이용한 광섬유 복합 소자에서는 빛이 광섬유를 빠져 나왔다 다시 들어가기까지의 거리가 짧아서 (<수백  $\mu\text{m}$ ) 회절에 의한 손실이 그다지 크지 않으므로 렌즈없이, 아주 작고 안정적으로 동작하는 소자가 가능하다.(그림 1(b))

열확장코어 광섬유는 광섬유를 고온에서 열처리하여 광섬유에 첨가된  $\text{GeO}_2$  등의 물질을 확산시킴으로써 광섬유의 V값에는 변화를 주지 않으면서 코어 크기를 확장시킨 것으로서, 이렇게 하면 광섬유를 진행하는 빛의 모드 크기가 커지게 되고, 따라서 광섬유 끝에서 빛이 빠져나갈 때 회절이 줄어들므로 빛살이 잘 퍼지지 않게 된다. 이러한 광섬유는 광섬유 복합 소자에서 회절에 의한 손실을 결정적으로 줄여주는 역할을 한다.<sup>[1-9]</sup> (그림

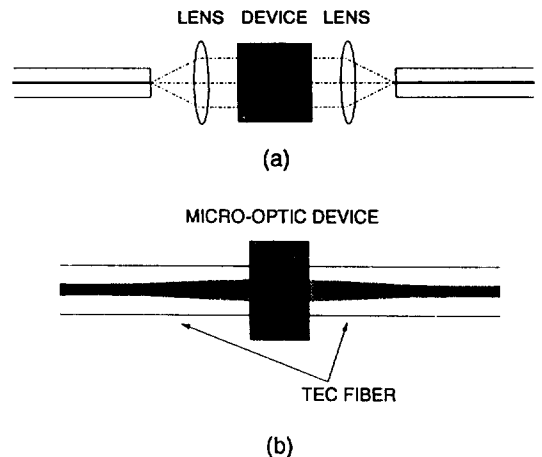


그림 1. (a) Bulk-optics 소자를 이용한 기존의 광섬유 소자. (b) 열확장코어 광섬유 사이에 미세 광학 소자를 삽입한 광섬유 복합 소자.

2)는 광섬유 사이의 간격에 따른 손실을 몇가지 모드 크기(spot size)에 대하여 계산한 것이다. 모드 크기란 모드의 전자기장 분포의 폭을 의미하는데 정량적으로는 spot size로써 정의한다. 가우시안 빔의 spot size의 정의에 대하여 뒤에 언급한다.

광섬유의 열처리를 위해서는 전기로를 사용하는 방법<sup>[4]</sup>, 토치 불꽃으로 가열하는 방법<sup>[7,10]</sup>, arc 방전을 이용하는 방법<sup>[11]</sup> 등이 있는데 본 연구에서는 전기로를 사용하여 가열하는 방법을 중점적으로 연구하였다. 한편 광섬유의 모드 크기를 자동으로 정확하고 신속하게 측

\* 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (91-01-00-02)의 연구비 지원으로 수행되었음.

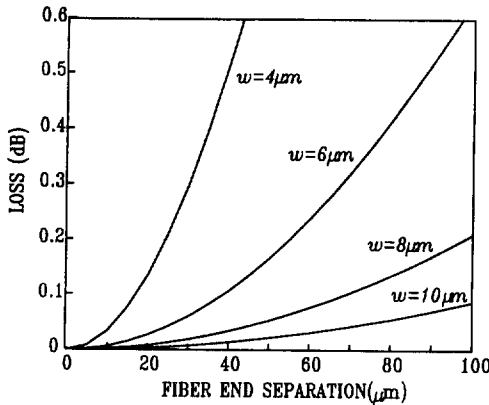


그림 2. 광섬유의 종방향 간격에 따른 splice loss.  $\lambda=1.3 \mu\text{m}$ . 광섬유의 양 끝 사이의 매질의 굴절률 1.45. Spot size  $w$ 가 커지면 손실이 줄어든다.

정하기 위하여 far-field scanner를 제작하였다. 실험에 사용한 광섬유는 파장  $1.3 \mu\text{m}$ 에서 단일 모드인 통신용 광섬유이고, 광원으로는  $1.3 \mu\text{m}$ 의 Nd:YAG 레이저를 사용하였다.

### II. 광섬유의 열처리에 의한 모드 크기 확장

광섬유의 주된 재질은 대개 석영유리( $\text{SiO}_2$ )인데 여기에 코어의 굴절율을 높여주기 위하여  $\text{GeO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  등이 첨가되어 있고 클래딩의 굴절율을 낮추주기 위하여  $\text{F}$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$  등이 첨가되어 있는 경우도 있다. 코어에 첨가하는  $\text{GeO}_2$  등의 물질을 줄이고 클래딩에 순수한  $\text{SiO}_2$  대신 Fluorine을 첨가한 석영유리를 쓰는 것은 주로 산란에 의한 손실을 줄이기 위함이다. 광섬유에 첨가되어 있는 이러한 물질들이 고온에서 확산된다는 사실은 과거 수차례 보고된 바 있으며<sup>[12,13]</sup> 이것은 적절한 열처리에 의하여 열확장 코어 광섬유 (TEC fiber, Thermally Expanded Core fiber)의 제조가 가능함을 보여준다. 이렇게 만들어진 TEC fiber는 광섬유 복합 소자에서 뿐만 아니라 모드 크기가 서로 다른 두 광섬유를 splicing할 때에도 손실을 줄이는 역할을 함으로써<sup>[11]</sup> 유용하게 쓰일 수 있다.

광섬유를 첨가된 물질이 확산될 수 있는 온도 이상으로 가열해 주면 확산이 이루어짐에 따라 코어의 크기는 커지고 반대로 상대 굴절율 차이  $\Delta = (n_1^2 - n_2^2) / 2n_1^2$ 는 줄어드는 결과를 가져온다. 여기서 상대 굴절율 차이  $\Delta$ 가 코어에 첨가된 물질의 밀도에 비례한다고 가정하고 광섬유가 step index를 유지한다고 가정하면 첨가된 물질의

총량은 일정하므로  $\Delta$ 는 코어의 단면적에 반비례하게 된다. 즉

$$\Delta \propto 1/a^2 \quad (1)$$

이다. 여기서  $a$ 는 코어의 반지름이다. 한편 normalized frequency,  $V$ 는

$$V \propto a\sqrt{\Delta} \quad (2)$$

이므로 결국  $V$ 값은 변하지 않는다.<sup>[4]</sup> 이때 광섬유를 진행하는 모드의 spot size,  $w_G$ 를 가우시안 근사를 사용하여 구해보면 다음과 같이 주어진다.<sup>[14]</sup>

$$w_G = a(0.65 + 1.619/V^{1.5} + 2.879/V^6) \quad (3)$$

그러므로 모드의 크기는 코어의 반지름  $a$ 가 커짐에 따라 그에 비례하여 커지게 됨을 알 수 있다.

Spot size,  $w_G$ 는 광섬유를 진행하는 모드가 가우시안 함수로 근사될 때 그 전자기장의 진폭(amplitude)이 최대값의  $1/e$ 로 떨어지는 지점까지의 광축으로부터의 수직 거리이다. 문헌에 따라서는 진폭 대신 빛의 세기(intensity)가  $1/e$ 로 떨어지는 지점까지의 거리로 정의하기도 한다. 만일 가우시안 근사가 통용되지 않는 경우라면 이러한 정의는 적합하지 않을 수도 있으며 경우에 따라 다양한 정의가 존재한다.  $V$ 값이 2.0~2.4 근방인 보통의 단일 모드 광섬유에서는 가우시안 근사가 유효하다.<sup>[145]</sup>

### III. 전기로 제작 방법

광섬유를 열처리하는 방법으로는 전기로를 사용하는 것 뿐만이 아니라 토치 불꽃으로 가열하는 방법, arc 방전으로 가열하는 방법 등이 시도되었다. 그러나 토치 불꽃은 불꽃내에서의 위치가 1 mm 정도만 움직여도 그 온도가 약  $100^\circ\text{C}$  정도는 쉽게 오르내리며 대단히 제어하기 어렵다. 뿐만 아니라 광섬유에 조금이라도 힘이 가해지고 있을 시에는 광섬유가 구부러지게 되므로, 자체 중량이나 불꽃의 압력에 의하여 쉽게 형태가 망가진다. 그리고 arc 방전으로 가열하는 방법도 fusion splicer를 사용하여 시도하여 보았지만, 그 결과 모드 크기를 키울 수는 있었으나 역시 광섬유의 변형이 문제가 되고, 또 가열되는 영역이 약 1 mm 정도로 대단히 짧기 때문에 급격한 spot size 변화에 따른 손실이<sup>[4]</sup> 문제가 된다. 이와같은 난점들을 본 연구에서 실험적으로 확인하였으며 결론적으로 전기로를 사용한 가열 방법에 대하여 중점적으로 연구하게 되었다.

대개의 광섬유들은 주로 코어에  $\text{GeO}_2$ 를 첨가하여 굴

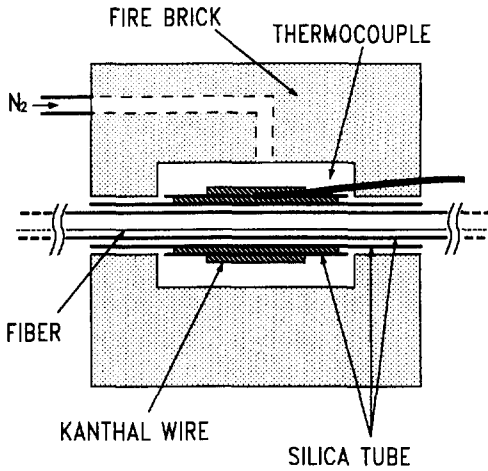


그림 3. 광섬유의 열처리를 위하여 제작한 로의 개략도.

절차를 조절하므로 Ge 원자들이 잘 확산하는 온도인 1200°C 이상으로 광섬유를 가열하여야 한다. 이러한 온도 영역에서 사용할 수 있는 발열체로서 널리 쓰이는 것으로는 SiC 히터가 있다. 그러나 최적의 로 형태를 결정하기 전에 실험적으로 제작해보기 위하여 대용으로 Kanthal 열선을 사용하였다. 사용한 Kanthal 열선의 저항은 2.88 Ω/m이다.

온도를 측정하기 위해서는 type K (Chromel-Alumel)의 thermocouple을 사용하였다. Type K thermocouple은 1260°C 까지의 온도 범위에서 사용 가능하나 그보다 높은 온도에서는 오차의 한계가 보장되지 않는다.<sup>[15]</sup> 또한 이러한 고온에서는 쉽게 산화되는 단점을 가지고 있다. 그래서 히터선과 thermocouple의 산화를 막기 위하여 로 내부에 질소 가스를 천천히 순환시켜 줌으로써 inert한 환경을 만들어 주었다. 제작된 로의 형태는 (그림 3)과 같다. 로의 크기는 115 mm(*l*)×100 mm(*w*)×100 mm(*h*)이고 히터부분의 길이는 60 mm, 히터의 내경은 9 mm이다. 원통형 히터의 경우 길이를 *L*, 내경을 *D*라고 하면 등온 구간의 길이 *U*는 히터의 양끝에서 각각 2.5*D*만큼의 거리를 제한 중심부, 즉

$$U = L - 2 \times 2.5D \quad (4)$$

로 결정된다(그림 4(a)). 그러므로 제작된 로의 등온 구간은 중심부의 15 mm 정도이다. 제작된 로의 내부 온도 분포가 (그림 4(b))에 나타나 있다. 이것은 중심부의 최고 온도가 1200°C 일 때의 온도 분포인데 온도가 1190°C 이상인 구간은 약 10 mm 정도인 것으로 측정되었다. 실제 실험중에는 로의 중심부에 thermocouple을 넣어서

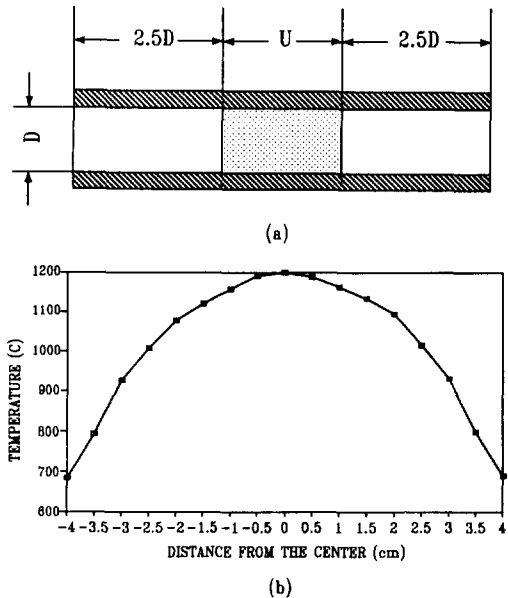


그림 4. 로의 온도 특성. (a) *U*는 등온 구간의 길이, (b) 온도 분포 측정 결과.

온도를 측정할 수가 없으므로 (그림 3)에 표시되어 있는 것처럼 이중으로 감은 히터선 사이에 thermocouple을 장치하여 온도를 측정한다. 따라서 로 중심부에서 측정된 온도와 이 온도와는 차이가 난다. 중심부의 온도가 1200°C 일 때 히터선에 고정된 thermocouple에서 측정된 온도는 1165°C 였다. 이것은 중심부의 최고 온도에 비해 30°C 이상 낮은 값인데 온도를 더 올림에 따라 이 차이도 늘어나게 된다. 두 온도의 상관 관계는 온도에 따라 측정하여서 광섬유 가열시 로 중심부 온도를 정확히 추정하는데 이용하였다.

#### IV. 열처리 과정과 결과

열처리를 위한 광섬유는 먼저 중간부분의 자켓을 140 mm 가량 벗겨낸다. 이 과정에서 광섬유에 흠집이 나면 열처리 과정에서 큰 균열로 확대되어 광섬유가 몹시 약해질 수 있으므로, 자켓을 벗겨낼 부분의 양끝 부분만 조금 stripper로 벗겨낸 후 염화메틸렌으로 나머지 부분을 녹여낸다.

이렇게 준비한 광섬유를 (그림 3)과 같이 로에 넣어서 가열한다. 여기서 발생하는 문제점이 몇가지 있다.

첫번째로 광섬유의 오염을 들 수 있다. 광섬유는 석영관에 넣어져서 가열되는데 1250°C 이상의 고온에서는 주변의 오염물질과 대단히 잘 반응을 하게 되고, 다른

오염물질이 없는 상태라도 공기중의 산소와 반응하게 되어 심각한 손상을 입는다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 광섬유를 inert한 환경에서 열처리해야만 한다. 석영관을 진공으로 만든 후 양끝을 완전히 녹여서 밀폐하는 방법이 있으나 그렇게 할 경우 열처리시 가열되는 부분이 쭈그러들 염려가 있기 때문에 열처리시의 고온에서 대기압과 평형을 이루게 되는 압력으로 inert gas를 채워주어야 한다. 본 연구에서는 이러한 방법 대신 석영관에 질소를 채운 후 한쪽 끝은 밸브로, 다른 한쪽 끝은 유연한 고무 풍선으로 밀봉하는 방법을 고안하였다. 그러나 이 방법은 완벽한 inert 환경을 만들어 주기에는 미흡하다.

두번째로 광섬유의 오염 문제가 해결되더라도 남은 문제가 있다. 광섬유의 가열되는 부위를 공중에 띄울 경우 자체 증량으로 인하여 늘어지게 된다. 때문에 석영관 바닥에 접촉시켜 놓을 수 밖에 없는데 대략 1250°C 이상으로 가열하면 바닥에 녹아붙게 된다. 확산이 효과적으로 일어나려면 1300°C 이상에서 열처리되어야만 하는데 그러려면 광섬유와 석영관이 달라붙지 않게 하는 대책이 필요하다. 광섬유와 재질이 다른 알루미늄관을 사용해 보았으나 이것은 광섬유와 심하게 반응을 일으켜서 광섬유의 손상을 유발하였다. 또 한가지 대책으로는 광섬유에 탄소 코팅을 하는 방법이 있다. 이렇게 하면 광섬유가 석영관과 접촉하지 않을 뿐더러, 광섬유가 적외선 영역에서 투명하기 때문에 히터로부터의 복사열을 잘 받아들이지 않는 성질도 보완<sup>[4]</sup>할 수 있는 일석이조의 효과가 기대된다. 그러나 실제로는 진공에서 아크 방전에 의한 방법으로 광섬유에 100Å 두께의 탄소 코팅을 해 보았으나 열처리시 모두 증발하였다. 이것은 석영관내에 잔류하는 산소와 반응하여 일어난 현상으로 보인다.

여러가지 문제점에도 불구하고 다소 낮은 온도에서 열처리를 함으로써 열확장코어 광섬유를 제작할 수 있었다. (그림 5)는 열처리 전후의 far-field를 측정하여 비교한 것이다. 이것은 1.3 μm의 단일 모우드 광섬유를 1250°C로 10시간 가열한 것이다. 열처리 전(a)보다 후(b)의 far-field spot size가 작음을 알 수 있다. 실선은 data point를 가우시안 함수로 맞추한 것이다. far-field의 spot size로부터 계산한 near-field의 spot size는 열처리 전(a)가 4.97 μm, 열처리 후 (b)가 6.29 μm로서 약 27%가 증가되었다.

앞서 언급한 여러가지 문제점들 때문에 현재까지의 방법으로는 모드 크기를 키우는 것이 이 정도에서 한계에 부딪힌다. 이것은 기존에 일본 등지에서 발표된 바(모드 크기 2~3배 확장)에 비하면 대단히 미흡한 결과

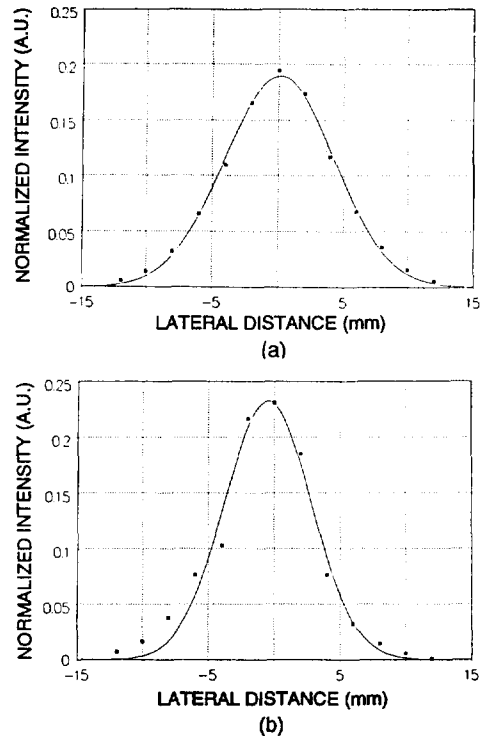


그림 5. 열처리 전후의 광섬유의 far-field radiation pattern. 열처리 전(a)보다 열처리 후(b)의 spot size가 작다. Near-field spot size는 (a)가 4.97 μm, (b)가 6.29 μm로 약 27% 확장되었다.

이며, 단지 광섬유의 열처리에 의한 모드 크기 확장을 확인한 것에 불과하다. 그러나 향후 탄소 코팅된 광섬유로 보다 완벽한 inert 환경에서 열처리를 한다거나 로를 열로 세워서 광섬유가 석영관과 접촉하지 않도록 하는 방법, 또는 광섬유를 처음부터 substrate 위에 올리고 열처리를 하여 열처리 후 아예 substrate 위에 응착되게 하는 방법 등 다각도로 연구를 진행한다면 모드 크기를 2~3배까지 키울 수 있는 가능성은 충분하다고 보여진다.

### V. 모드 크기 측정

단일 모드 광섬유의 모우드 크기를 측정하는 방법에는 다음과 같은 것들이 있다.<sup>[16]</sup> 가장 직접적인 측정 방법으로 near-field technique이 있는데, 이것은 광섬유 코어를 아주 크게 확대하여 TV vidicon에 상을 맺는 것이다. Field pattern이 원형 대칭이므로 어느 한 방향으로만 스캔하면 된다. 또다른 방법으로는 transverse

offset technique이 있다. 이것은 횡방향으로의 간격이 있을 때의 splice loss를 측정하여 spot size를 구한다. 이 밖에 far-field pattern을 측정하여 inverse Hankel transform을 통하여 near-field pattern과 굴절률 분포 등을 계산하는 방법과 가우시안 근사를 사용하여 far-field spot size로부터 near-field spot size를 간단하게 계산하는 방법이 있다. 이번에 제작한 far-field scanner는 세번째와 네번째 방법에 적용되는 것이다. Far-field를 재는 이유는 빔살 크기가 크기 때문에 near-field technique이나 transverse offset technique에서 필요로 하는  $\mu\text{m}$  이하의 정밀한 위치 조치가 필요하지 않으면서도 비교적 빠르고 정확한 측정이 가능하기 때문이다.

가우시안 beam의 이론에서 beam waist에서의 spot size를  $w_0$ 이라고 할 때  $L$ 만큼의 거리를 진행한 beam의 spot size는<sup>[17]</sup>

$$w(L) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda L}{\pi w_0^2}\right)^2} \quad (5)$$

로 주어진다. Far-field는 거리  $L$ 이 Rayleigh range  $z_R = \pi w_0^2/\lambda$  보다 매우 큰 경우이므로

$$w(L) = \frac{\lambda L}{\pi w_0} \quad (6)$$

가 된다. Far-field를 횡방향으로의 거리에 대하여 측정하는 것이 아니라 각도에 대하여 측정할 경우 far-field beam angle  $\theta_w$ 를

$$\tan\theta_w = \frac{w(L)}{L} \quad (7)$$

로 정의해 주면 near-field spot size는

$$w_0 = \frac{\lambda}{\pi \tan\theta_w} \quad (8)$$

가 된다.

측정된 far-field pattern으로부터 spot size를 구할 때 가우시안 함수로의 fitting이 필요하다. 단지 half-power angle을 재서 이 값에 가우시안 fitting을 하는 것은 오차가 매우 커질 염려가 있으므로,<sup>[18]</sup> 각도의 가우시안 함수와 측정된 data와의 overlap integral (launch efficiency integral)을 최대로 하는  $\theta_w$ 를 찾는 방법이 바람직하다.<sup>[16]</sup> 즉

$$E_G(\theta) = E_0 \exp\left(-\frac{\theta^2}{\theta_w^2}\right) \quad (9)$$

에서  $\theta_w$ 를 변화시켜서

$$\eta = \frac{\left[\int_0^{\pi/2} \theta E_G(\theta) E_M(\theta) d\theta\right]^2}{\int_0^{\pi/2} \theta E_G^2(\theta) d\theta \int_0^{\pi/2} \theta E_M^2(\theta) d\theta} \quad (10)$$

를 최대로 만들면 된다. 여기서  $E_M(\theta)$ 는 측정된 far-field data이다.

Far-field를 측정하는 방법에는 측정하고자 하는 광섬유와 광검출기를 움직이는 방법에 따라 네가지가 있을 수 있다.<sup>[19]</sup>

1. 광섬유를 고정시키고 그 끝을 중심으로 한 원주상으로 광검출기를 움직인다.
2. 광검출기를 고정시키고 광섬유의 방향을 움직인다.
3. 광섬유를 고정시키고 광검출기를 횡방향으로 움직인다.
4. 광검출기를 고정시키고 광섬유를 횡방향으로 움직인다.

앞서 (그림 5)에서 보여준 far-field pattern은 네번째 방법으로 측정된 것인데 이런 방법은 특별한 장치 없이도 수동으로 간단히 측정할 수 있으나 이렇게 하면 한번 측정하는데 많은 시간이 소요되고 정밀한 측정은 불가능하다. 따라서 여러번 측정을 반복하려면 자동화된 측정장치가 필수적이다. (그림 6(a))는 네번째 방법을, (그림 6(b))는 제작된 far-field scanner에서 채택한 첫번째 방법을 나타낸다.

광섬유 끝으로부터 광검출기까지의 거리  $R$ 과, 광검출기의 수광 면적을 결정하는데도 몇가지 고려가 필요하다.<sup>[19]</sup> 거리가 짧으면 빛의 세기가 세므로 광원의 세기가 약해도 되지만 대신 각분해능이 떨어진다. 반대로 거리가 길면 각분해능이 향상되므로 보다 정밀한 측정이 가능하다. 사용하는 광원의 세기가 세야 한다. 국제 표준 방식에 의하면 광섬유와 광검출기 사이의 거리는 적어도 2cm는 넘어야 하고 광검출기의 수광 면적이 0.5도 이상의 각도에 걸쳐 있으면 안된다. 만일 각분해능  $0.57^\circ (=0.01\text{rad})$ 를 얻으려면 직경이 0.01 R보다 커서는 안된다. Far-field 폭을 1% 이내의 오차로 측정하려면 광축에서의 최대값으로부터 적어도 -30 dB 이상은 측정하여야 한다.

제작된 far-field scanner의 제원은 다음과 같다. 광섬유와 광검출기까지의 거리는 10 cm이고 광검출기 앞에는 직경 1 mm의 구멍이 뚫려있다. 회전원판의 중심에 측정할 광섬유를 장착할 수 있게 해놓았고 광검출기는

VI. 결 론

광섬유 복합 소자에서 회절에 의하여 발생하는 삽입 손실은 광섬유의 모드 크기를 확장시킴으로써 감소시킬 수 있다. 따라서 연구의 주된 목표는 어떻게 하면 광섬유의 모드 크기를 확장시킬 수 있는가 하는 것이었으며, 전기로를 제작하여 광섬유를 열처리한 결과 모드 크기를 약 27% 늘릴 수 있었다. 그러나 실제 소자 제작에 응용하기 위해서는 좀 더 높은 온도에서 열처리를 하여야 하는데 이를 위해서는 해결해야만 하는 난점들이 많이 남아있으며 이런 문제들을 극복하기 위해서는 새로운 열처리 기술이 꾸준히 연구되어야 하겠다. 앞으로 광섬유에 손상을 입히지 않으면서도 모드 크기를 2~3배까지 확장시킬 수 있게 되면 이를 응용한 다양한 소자의 대량 생산이 가능하게 될 것이다.

참 고 문 헌

- [1] K. Shiraishi, Appl. Opt., **24**, 951(1985).
- [2] K. Shiraishi, S. Sugaya, K. bada and S. Kawakami, Appl. Opt., **25**, 311(1986).
- [3] H. Yanagawa, T. Ochiai, H. Hayakawa and H. Miyazawa, IEEE J. Lightwave Tech., **7**, 1646(1989).
- [4] K. Shiraishi, Y. Aizawa and S. Kawakami, IEEE J. Lightwave Tech., **8**, 1151(1990).
- [5] K. Shiraishi, T. Yanagi, Y. Aizawa and S. Kawakami, IEEE J. Lightwave Tech., **9**, 430(1991).
- [6] K. Shiraishi, T. Chuzenji and S. Kawakami, IEEE J. Lightwave Tech., **10**, 1839(1992).
- [7] T. Oguchi and H. Hanafusa, Proc. of 9th Meeting of Lightwave Sensing Tech., Jap. Soc. of Lightwave Sensing Tech., Jap. Soc. of Appl. Phys., **29**.
- [8] H. Kataoka, Proc. of 7th Meeting of Lightwave Sensing Tech., Jap. Soc. of Lightwave Sensing Tech., Jap. Soc. of Appl. Phys., **7**.
- [9] S. Kawakami, Proc. of 2nd Sendai International Conference, 79(1990).
- [10] M. Kihara, S. Tomita and M. Matsumoto, IEEE Photonics Tech. Lett. **4**, 1390(1992).
- [11] M. Hamada, M. Shigematsu, M.Nishimura, K. Osaka and Y. Asano, OEC '92 Technical Digest, 290(1992).
- [12] J. S. Harper, C. P. botham, and S. Hornung, Electron. Lett., **24**, 245(1988).
- [13] S. Kawakami, K. Shiraishi, and Y. Aizawa, Nat. Conv. Rec. IEICE, Jap., C-457 (1988).
- [14] D. Marcuse, Bell syst. Tech. J., **56**, 703(1977).

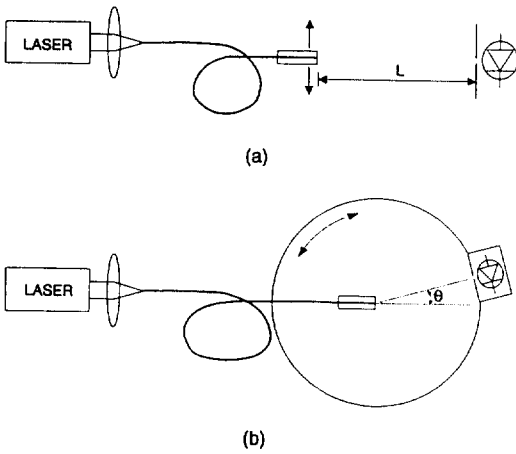


그림 6. Far-field pattern 측정 방법. (a) 광검출기를 고정시키고 광섬유를 횡방향으로 움직인다. (b) 광섬유를 고정시키고 광검출기를 원주상으로 회전시킨다.

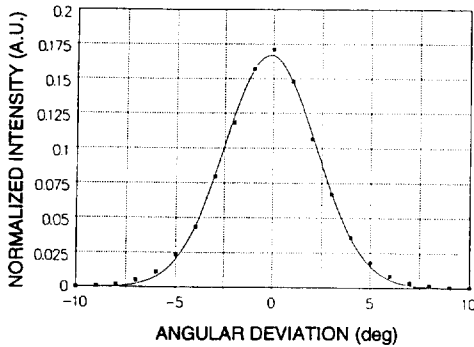


그림 7. Far-field scanner로 측정된 1.3  $\mu\text{m}$  단일모드 광섬유의 far-field pattern. Near-field spot size는 5.02  $\mu\text{m}$ .

회전원판의 원주에 장착되어 광섬유 끝을 중심으로 회전한다. 회전원판은 스테핑 모터와 웜 기어를 통하여 연결되어 있는데 기어비가 180:1 이어서 모터가 한 바퀴 회전하면 원판이 2° 돌아가게끔 되어있다. 스테핑 모터 구동 회로와 광검출기에 연결된 optical power meter는 컴퓨터에 인터페이스되어서 자동으로 신속하게 측정과 data processing을 할 수 있다.

제작된 far-field scanner로 1.3  $\mu\text{m}$  단일 모드 광섬유의 far-field pattern을 측정된 결과를 (그림 7)에 보였다. 계산된 near-field spot size는 5.02  $\mu\text{m}$ 로서 앞서 네번째 방법으로 측정된 결과 4.97  $\mu\text{m}$ 와 1% 밖에 차이가 나지 않는다.

- [15] Manual On The Use Of Thermocouples In Temperature Measurement, American Soc. for Testing and Materials, (1979).
- [16] W. T. Anderson, and D. L. Philen, IEEE J. Light-wave Tech., **LT-1**, 20(1983).
- [17] H. Kogelnik, and T. Li, Proc. IEEE 54, 1312 and Appl. Opt. **5**, 1550(1966).
- [18] J. Streckert, and E. Brinkmeyer, Appl. Opt., **21**, 1910(1982).
- [19] E. G. Neumann, *Single-Mode Fibers*, 372 (Springer-Verlag, 1988).

### Thermally Expanded Core Fibers for Hybrid Fiber Components

Jin Ha Kim and Byoung Yoon Kim

*Department of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology  
Taejon 305-701, Korea*

(Received: February 22, 1994)

The use of thermally expanded core (TEC) fibers fabricated by thermal diffusion of dopants such as GeO<sub>2</sub> in hybrid fiber components has an advantage of eliminating lenses for collimation and focusing. An electric furnace is fabricated to heat the fibers locally for the core expansion. We observed an expansion of the mode size at 1.3  $\mu\text{m}$  wavelength by 27% after treating a section of single mode optical fiber at 1250°C for 10 hours.