Microbending 효과를 이용한 다점 압력계측시스템의 설계

(Design of multipoint FOS pressure measurement system using microbending effect)

강기호, 김명식, 김형곤, 오명환

(KAIST, 계측소자연구실)

I. 서 론

Microbending 주기에 따른 다중모드 광섬유의 광손실 변화에 대한 이론은 1973년 D. Marcuse에[1] 의해 제시되었다. 여기서, 광섬유의 도파광손실 정도는 광섬유 축 방향에 가해지는 압력에 의한 광섬유 변위의 주기와 변위의 크기에 의해 정해지며 이때 변위 정도는 광섬유의 재질과 코아 반경, 클래드 반경, 광섬유에 가해지는 외부 작용힘에 의해 결정된다.

본 고에서는 Marcuse 이론을 토대로 Graded 굴절률 분포 다중모드 광섬유(GI)가 주기적으로 microbending될 때 유기되는 도파 광손실 정도를 computer simulation을 통해 계산하고, 그 결과를 이용해 압력센서로서의 최적치를 설정한 다음, 2 점 압력 계측 시스템을 설계하였다. 센서 array는 TDM 을 하기위해 ladder type 으로 구성하고 신호처리를 위해서는 computer (IBM-PC/AT)와의 접속을 위해 A/D board (DT사 DT2821) 를 사용하였다.

II. 이론적 검토 및 계산 모델

1. 변위함수의 유도

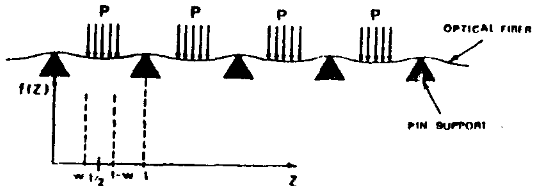
Microbending에 의한 parabolic-index profile 다중모드 광섬유의 광손실 이론[1] 에서 광섬유가 X 축과, Z 축 방향으로 f(z)로 변위되며 인접한 모드간의 coupling이 다른 모드간의 coupling보다 클 때 (p ,q) 모드와 (p±1, q) 모드간의 wave coupling 계수 R 은 다음과 같다.

*본 발표 논문은 과학기술처 특정연구 개발과제와 관련입니다.

$$\hat{R}_{p,q;p\pm1,q} = \sqrt{2}\left(\frac{n_1 k_0 \sqrt{\Delta}}{a}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{\sqrt{\vec{p}\cdot\Delta}}{a} \cdot \frac{df(z)/dz}{(\beta_{p,q} - \beta_{p\pm1,q})} \qquad (1)$$

여기서, a 는 광섬유 코아반경, n_1는 코아중심 굴절률, n_2는 클래드의 굴절률, $\beta_{p,q}$ 는 (p , q) 모드의 전파상수, K_0 는 진공중 빛의 전파 상수 , $\vec{P}$ 는 모드들에 의해 전송되는 power, $\Delta = (n_1^2 - n_2^2)/2n_1^2$ 이다.

광섬유가 주기 l 간격으로 외부힘에 의한 변위식 f(z)는 (과대 처짐이 없을 경우 [2]) 다음과 같다.



(The width of Press P = (l - 2w))

< 그림 1. 광섬유에 압력 p가 수직 방향으로 가해질 때 생기는 광섬유 변위 >

그림 1과 같이 압력 p 가 광섬유에 주기적으로 가해지는 경우 하나의 보(beam)에서 광섬유 변위를 구하면 다른 보에서의 변위 함수는 동일하게 표시된다. 하나의 보에 대하여 임의 z 점에서의 변위 f(z)의 곡률 방정식 [3-5]은

$$-EI\frac{d^2f(z)}{dz^2}=M(z) \qquad (2)$$

여기서 E는 Young 률, I는 광섬유의 관성 모멘텀, M(z)는 z점에서 광섬유의 bending 모멘텀이다. F는 외부에서 광섬유에 작용하는 전체 힘, L은 microbending을 받는 전체 광섬유 길이라고 하면 압력은 다음 식으로 표시된다.

$$P=\frac{F}{L(1-2W/l)} \qquad (3)$$

M(z)는 다음과 같다.

i) $0<z<W$: $M(z)=\bar{p} \quad -M_o$

ii) $W<z<$: $\bar{p}\cdot z-M_o-P(z-W)^2/2 \qquad (4)$

여기서 $\bar{p}=p(l/2-W)$

M_o 는 $Z=0$ 점에서 광섬유에 가해지는 bending 모멘텀이다. (4) 식의 결과를 (2) 에 대입하고 $z=0$ 와 $W, l/2$ 에서의 경계조건들을 사용하면 $f(Z)\sim(l,F)$ 인데, 이를 l 의 함수로서 Fourier series로 전개하면

$$f(z)=d_o+\sum_{n=1}^{\infty} dn\cdot\cos\left(\frac{2\pi n}{l}\cdot z\right)$$

여기서 $dn=\frac{(-1)^{n+1}\cdot P}{E\cdot I}\cdot\left(1-\frac{2-\sin(2\pi\cdot n/2)}{\pi\cdot n}\right)\cdot\left(\frac{l}{2\pi n}\right)^4$ 이 되었다.

따라서

$$\frac{df(z)}{dz}=\frac{2\pi}{l}\sum_{n=1}^{\infty}d_n\cdot n\cdot\sin\left(\frac{2\pi n}{l}\cdot z\right) \qquad (6)$$

2. 평균 광손실 계수의 유도

시(1) 에서

$\hat{R}_{p,q;p\pm1,q} \equiv R_{p,q;p\pm1,q}\cdot\frac{df(z)}{dz}$ 로 두면 power coupling 계수

h 는 다음의 관계로 표현된다. [6]

$$h_{p,q;p\pm1,q} = |R_{p,q;p\pm1,q}|^2 < |F(\beta_{p,q} - \beta_{p\pm1,q})|^2 > \qquad (7)$$

여기서

$$F(\beta_{p,q} - \beta_{p\pm1,q}) = \left| \frac{1}{\sqrt{L}} \int_0^L \frac{df(z)}{dz} \cdot exp\{-i(\beta_{p,q} - \beta_{p\pm1,q}) \cdot z\} dz \right|$$

식(7) 에서 (p,q) 모드에서 (p 1, q) 모드로의 coupled power 방정식은

$$\frac{d\vec{P}_{p,q}}{dz} = -\alpha_{p,q} \vec{P}_{p,q} + \sum_{\nu=1}^{n} h_{p,q;p\pm1,q} (\vec{P}_{p\pm\nu,q} - \vec{P}_{p,q}) \qquad (8)$$

로 표시된다. ($\alpha_{p,q}$ 는 자체 모드의 normal 광손실 계수)

식(8) 의 해는

$$\vec{P}_{p,q} = \vec{P}_{0\,p,q}\, e^{-(\alpha_{p,q} + \sigma_{p,q}) \cdot z} \qquad (9)$$ 이다.

평균 광손실 계수는 다음과 같다. [7]

$$\bar{\sigma} = \frac{2.9}{a^2} F(\Delta\beta)$$

($\Delta\beta$ = 근접 모드간의 광섬유 전파 상수 차이)

$$= \frac{2.9\pi^2 L}{a^2 \cdot \ell^2} \left\{ \left[\sum_{n=1}^{\infty} n \cdot d_n \left(\frac{1-\cos(2\pi(N/\ell + 1/\lambda_c)L)}{2\pi \cdot (N/\ell + 1/\lambda_c)} + \frac{1-\cos(2\pi \cdot (N/\ell - 1/\lambda_c)L)}{2\pi(N/\ell - 1/\lambda_c)} \right) \right]^2 + \left[\sum_{n=1}^{\infty} n \cdot d_n \left(\frac{\sin(2\pi \cdot (N/\ell + 1/\lambda_c)L}{2\pi \cdot (N/\ell + 1/\lambda_c)} - \frac{\sin(2\pi \cdot (N/\ell - 1/\lambda_c)L}{2\pi \cdot (N/\ell - 1/\lambda_c)} \right) \right]^2 \right\}$$

$$(\lambda_c = 2\pi a / \sqrt{2\Delta})$$

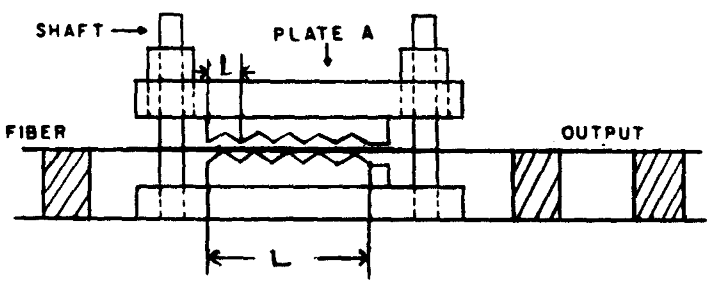
따라서 Transmission Power Loss

$$TPL = \left(1 - \frac{\text{power in bended fiber}}{\text{power in nobended fiber}} \right) \times 100 = (1 - e^{-\bar{\sigma} \cdot L}) \times 100(\%)$$

III. Computer Simulation

1. 광섬유의 명세 (금성전선 제품)
   - 코아 중심 / 클래드 굴절률 = 1.473046/1.458
   - 코아/ 클래드직경 = 50/125 [um]
   - Coating material : polyvinyl
   - Young 률 = 6.23 X 10 [N/m]

2. 제작된 마이크로 디포머의 명세



< 그림 2. 제작된 마이크로 디포머 >

* l=0.1 - 10 (mm)
* L=2.4 (cm)

3. 계산결과

정확한 결과는 현재 수행중이나, F[N]을 매개변수로 하고 l 을 변수로 했을때 TPL 은 주기성을 보이고 있고 (여기서, 민감도가 좋은 디모머의 설계치 설정이 가능함), l 을 매개변수로 하고 F 를 변수로 했을때 TPL 은 F 의 어느 범위내에서 [2] 10 [N] 정도의 정밀도를 갖고 있음을 볼 수 있다.

IV. 검토 및 결론

정확한 시뮬레이션 결과는 현재 수행중이지만, 다중모드 광섬유, Micro-bending 효과를 이용한 압력계는 그정밀도나 신뢰성 및 가격 등에서 유리한 점이 많을 것으로 사료된다. 현재 제작 및 구성중인 2 점 압력 계측시스템에 직접 이용하여 그 가능성을 보이게 될 것이다.

< 참고문헌 >

[1] D. Marcuse, "Losses & impulse response of a parabolic index fiber with random bends, "B.S.T.J., vol.52, no.12,pp.1423-1437, Oct.1973

[2] Kyung Mog Lee et al., "A study of the power loss in the multimode optical fiber microbended into arbitrary shape", J. of KITE, pp.149-153, vol.24, Jul.1987

[3] A.C.Ugural, "Advanced Strength & Applied Elasticity", D.Van Nostrand, N.Y., 1975

[4] Crandall, Dahl, Lardener, "An introduction to the mechanics of solids", Mc Graw-Hill, 1972

[5] S.P.Timoshenko, James M. Gere, "Mechanics of Materials" D. Van Nostrand, NY, 1972

[6] J.N.Fields, "Attenuation of a parabolic index fiber with periodic bends", Appl. Phs. Lett., vol.36, no.10, pp.799-801, May 1980.

[7] D.Gloge & E.A.J. Harcatili, "Multimode theory of Graded-core fibers", B.S.T.J., vol.52, no.9, pp.1563-1578, Nov. 1973