

굽힘에 민감한 광섬유를 이용한 광섬유 센서

준희원 이동호*, 정희원 권광희**, 이철희***, 송 재원****, 박 재희*****

Fiber-Optic Sensor Using Bending-Sensitive Fiber

Dong-ho Lee* Associate Member

Kwang-Hee Kwon**, Cherlhee Lee***, Jae-Won Song****, Jaehee park***** Regular Members

요 약

가변 광 감쇄기에 사용한 굽힘에 민감한 특수 광섬유 (BSF: bending-sensitive fiber)를 이용하여 굽힘에 따라 물리적인 변화를 감지해 내는 광섬유 센서(FOS: fiber-optic sensor)를 제작하였다. BSF를 이용한 FOS의 제작 가능성을 알아보기 위해 BSF의 굽힘 손실을 3차원 유한차분 빔 전파기법을 이용하여 전산모의 하였고 전산모의 결과를 실제 제작된 BSF를 이용한 FOS의 실험 결과와 비교하였다. 특히 제작된 FOS는 센서 상층부에 가해진 압력이 0 MPa에서 0.005 MPa 로 변할 때 광 에너지는 -1 dB에서 -20 dB 까지 감쇄하였다. 반면에 단일모드 광섬유(SMF: single mode fiber)를 이용하여 동일한 구조로 제작된 FOS는 광 에너지의 변화를 보이지 않았다.

Key Words : FD-BPM, optical fiber, bending loss, fiber-optic sensor, fabrication

ABSTRACT

Fiber-optic sensor (FOS) using bending-sensitive fiber (BSF) which detects physical variables according to the variation of fiber-bending is proposed. BSF is already used in variable optical attenuator. Three-dimensional finite difference beam propagation method (3D FD-BPM) is used to investigate the bending loss of BSF. Then, the results of bending experiment with FOS consisting of BSF is compared to numerical results of 3D FD-BPM. In particular, the optical power of fabricated FOS with BSF varies from -1dB to -20dB when pressure given to the upper side of FOS changes from 0 MPa to 0.005 MPa, while the FOS consists of SMF shows no change of optical power at the same condition.

I. 서 론

광 통신망의 발달에 따라 광섬유가 널리 설치되어 있고 이러한 광섬유의 굽힘에 의한 손실은 이미 널리 알려져 있으므로[1] 광섬유의 굽힘을 이용하여 압력, 인장, 그리고 유속 같은 물리적인 변위를 감지해 내는 FOS가 널리 보고되어진다[2-3]. 그러나 이러한 FOS는 물리적인 변위를 탐지해 내기 위하여 대부분 광섬유에 직접적인 물리적인 힘을 가함으로써 FOS에 포함된 광섬유가 쉽게 손상될 수 있으며 다소 복잡한 구조가 필요하다[4]. 만약 FOS를

단일 모드 광섬유(SMF: single mode fiber)와 물리적인 힘에 의해 SMF에 손상을 거의 주지 않는 국부적인 굽힘을 가하는 단순한 형태의 FOS로 제작한다면 SMF의 굽힘 손실의 제한으로 인해 굽힘의 임계치까지는 광 에너지 감쇄가 거의 일어나지 않다가 굽힘 범위가 임계치를 벗어나면 급격한 광 에너지 감쇄를 보인다. 따라서 본 논문에서는 광섬유에 가해지는 굽힘 변화에 따라 적절한 굽힘 손실 변화를 가지는 BSF[5]를 이용하여 복잡한 구조 대신 단순한 형태로 동작하는 FOS를 제안 하였다. BSF를 이용한 단순한 구조의 FOS의 적용 가능성

* 경북대학교 공과대학 전자공학과 박사과정 (dhlee922@palgong.knu.ac.kr), ** LG 전선 안양연구소 책임연구원

*** 경북대학교 공과대학 전자공학과 박사과정, **** 경북대학교 공과대학 전자공학과 교수, ***** 계명대학교 전자공학과 교수

논문번호 : KICS2004-08-005, 접수일자 : 2004년 8월 5일

※ 본 연구는 과학기술부를 통한 경북대학교 첨단 진단·예측 의료기술 클러스터 사업단 지원금에 의한 것입니다.

을 알아보기 위해 3차원 유한 차분 빔 전파 기법 (3D FD-BPM: three-dimensional finite difference beam propagation method)을 이용하여 BSF의 미세 굽힘에 대한 광 에너지 감쇄를 전산모의하였으며 제작된 BSF로 구성된 FOS를 이용하여 미세 압력에 의해 조정되는 미세 굽힘에 따른 미세 굽힘 손실을 실험적으로 측정하였고 이 결과를 3D FD-BPM을 이용한 전산 모의 결과와 비교해 보았다 [6-7].

II. BSF의 미세굽힘에 대한 전산모의

종전에 보고 되었던 BSF의 굴절률 분포구조는 그림 1과 같다.

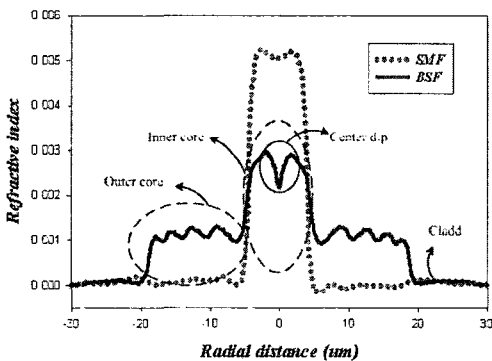


그림 1. BSF의 굴절률 분포 구조

그림 1에 따르면 BSF는 SMF의 코어와 같은 내부코어, 클래드, 그리고 클래드와 외부코어 사이에 있는 외부코어로 나누어 진다. BSF의 내부코어와 외부코어 사이의 굴절률 차이는 SMF의 코어와 클래드의 굴절률 차이의 0.64배에 해당하며 BSF의 외부코어와 클래드의 굴절률 차이는 내부코어와 클래드 굴절률차의 0.5배이다. 외부코어의 반지름은 내부코어 반지름의 4배이다. 이러한 굴절률 분포구조를 가지는 BSF의 미세 굽힘에 대한 굽힘 손실을 3D FD-BPM을 이용하여 수치 해석하기 위해 전산 모의에 적합한 BSF의 굴절률 분포 등가모델을 그림 2와 같이 만들었다.

그림 2에 나타난 변수는 각각 내부 코어와 클래드 사이의 굴절률 차: $n_h=0.0035$, 클래드의 굴절률: $n_0=1.4560$, 그리고 내부 코어의 반지름: $r=5 \mu\text{m}$ 로 정하였다. 3D FD-BPM의 해석영역은 유한 영역으로 차분 하였고 해석영역 범위는 $x=125 \mu\text{m}$, $y=350$

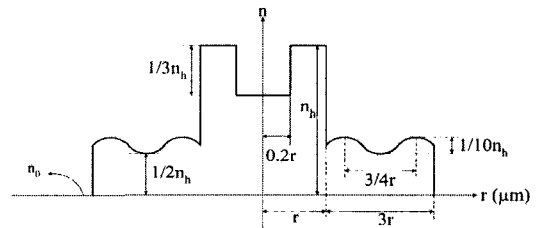
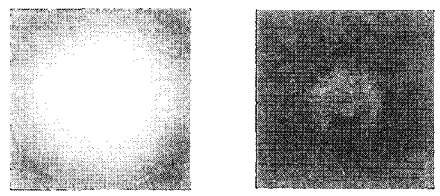


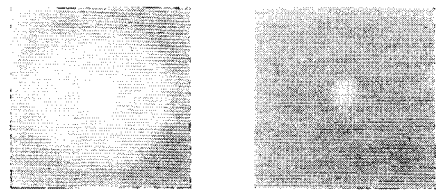
그림 2. 3D FD-BPM 해석을 위한 BSF의 굴절률 등가 모델

μm , $z=3000 \mu\text{m}$ 로 두었으며 각 축의 차분 격자의 최대 크기는 $\Delta x=0.5 \mu\text{m}$, $\Delta y=0.5 \mu\text{m}$ 그리고 $\Delta z=0.5 \mu\text{m}$ 로 하였다. 또한 해석시 계산영역의 제한으로 인한 계산영역 경계면에서의 반사를 줄이기 위해 흡수체를 완전 정합 영역(PML: perfect matched layer)안에 두었다. BSF 자체에 가한 굽힘에 의한 광 에너지 감쇄 특성을 밝혀내기 위해 광섬유의 굽혀진 모양을 가우시안 함수 형태라 가정 하였고 $f(z) = a_0 e^{-\{(z-z_0)/w\}^2}$ 의 관계식을 이용하여 등가화 하였다. 여기서 z_0 는 최대 굽힘 지점이며, a_0 는 BSF에 가해지는 최대 굽힘의 높이, w 는 굽힘의 폭을 나타내는데 3D FD-BPM 해석시 요구되는 수직 입사조건을 만족하기 위해 $w=450 \mu\text{m}$ 로 두었다. 이상과 같은 조건을 가지고 그림 3에서 BSF의 출력 단면에서 3D FD-BPM을 이용한 필드 분포와 실제 제작한 BSF의 실험 측정치를 서



(a) $a_0=0 \mu\text{m}$ 일 때 (b) $a_0 \gg 64 \mu\text{m}$ 일 때

3-1. 3D FD-BPM 결과



(a) 굽힘이 없을 때 (b) 굽혀진 굽힘을 주었을 때

3-2 실제 제작된 BSF의 출력단면

그림 3. BSF의 출력단에서의 필드 분포

로 비교하였다. 3D FD-BPM을 사용하여 구한 모드 분포는 굽힘을 주지 않았을 때 굴절을 하강 영역과 외부 코어 영역이 환의 형태로 내부 코어영역과 구분되는 것을 보여 주는데 이는 실제 실험 측정치와 동일한 특성을 나타내 주고 있다. 또한 굽힘을 주었을 때 유한 차분 빔 전파기법을 사용하여 구한 모드 분포를 살펴보면 내부코어에 있던 대부분의 광 에너지가 도파되지 않고 클래드 층으로 빠져 나가는데 이 역시 실제 제작한 BSF에 급격한 굽힘을 주어 측정한 실험치와 동일한 경향을 나타낸다. 미세 굽힘에 따른 광 에너지 감쇄 특성을 전산 모의하였고 그 결과를 그림 4에 나타 내었다.

그림 4의 전산 모의 결과에 따르면 미세 굽힘 영역으로 정의될 수 있는 굽힘 높이 (0~12 μm)의 범위에서 SMF는 광에너지 감쇄가 없지만 BSF는 약 -2 dB의 광에너지 감쇄 변화를 보였으며 굽힘 높이가 52 μm 일때 BSF는 SMF 광에너지 감쇄량 보다 5배의 광 에너지 감쇄량을 나타내고 있다. 따라서 BSF는 광섬유에 가해지는 미세 굽힘에 대하여 적절한 광에너지 감쇄값을 가지며 BSF에 가해지는 미세 굽힘의 변화에 따라 광 에너지 감쇄 변화가 급격하지 않고 서서히 변화하므로 광섬유에 생길 수 있는 굽힘에 의한 손상을 방지하며 단순한 구조를 가지는 FOS 제작에 적합할 것이라 판단된다.

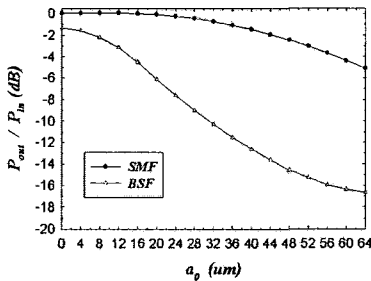


그림 4. 굽힘의 높이 변화에 따른 광 에너지 감쇄 특성

III. BSF를 이용한 FOS 제작

전산 모의 결과를 바탕으로 BSF와 국부적인 미세 굽힘을 가할 수 있는 단순한 구조로 이루어진 FOS를 그림 5와 같이 제작하였다.

FOS에 물리적인 힘으로 조절되는 국부적인 미세 굽힘을 만들기 위해 BSF의 상부에 지름 500 μm 의 원통형의 물체를 두었으며 BSF의 하부에 탄력성이 있는 고무를 두어 원통형 물체에 물리 적인 힘에 비례



그림 5. BSF를 이용한 FOS의 구조

하여 BSF에 원의 호에 해당하는 미세 굽힘이 생기게 하였다. BSF의 양 끝단은 SMF와 연결하였으며 BSF의 길이는 3 cm로 제작하였다. 제작된 FOS의 미세 굽힘에 대한 광에너지 감쇄를 측정하기 위하여 광원은 1550 nm 레이저를 사용하였으며 미세 굽힘을 가하는 물리적인 힘은 압력을 사용하였다. 제작된 FOS의 압력에 의한 광 에너지 감쇄는 그림 6과 같다. BSF를 이용한 FOS의 압력에 대한 광 에너지 감쇄 변화를 SMF를 이용하여 동일한 구조로 제작된 FOS의 실험 측정치와 비교 하였다. 압력을 0 ~ 0.005 MPa 의 범위에서 가했을 때 BSF로 이루어진 FOS는 압력에 대한 광 에너지 감쇄값이 급격하게 변화하지 않고 서서한 변화를 보이며 -1 dB에서 -20 dB 까지 변화였지만 SMF로 이루어진 FOS는 광 에너지가 거의 변화하지 않았다. 또한 미세 굽힘을 만들기 위해 BSF에 가해진 압력에 의해 광섬유가 손상되지 않았고 수십 차례의 반복된 실험을 통해서도 광 에너지 감쇄값이 변화하지 않는 높은 재연성을 보였다.

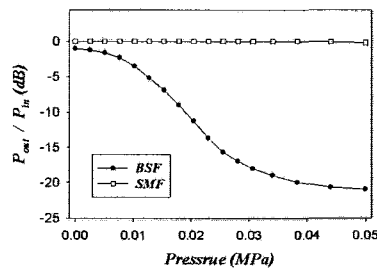


그림 6. 제작된 FOS의 압력에 따른 광 에너지 감쇄

IV. 결론

굽힘에 민감한 광섬유 (BSF)를 이용하여 여러 가지 물리적인 변위를 측정하는 광섬유 센서 (FOS)를 제작하였다. BSF의 미세 굽힘에 대한 광 에너지 감쇄 정도를 3D FD-BPM으로 전산모의 하여 BSF가 미세 굽힘의 변화에 따라 적절한 광 에너지 감쇄가 일어난다는 것을 예상할 수 있었다. 이러한 3D FD-BPM을 이용한 전산모의 결과를 바탕으로 실제

제작한 BSF를 이용하여 광섬유가 손상되지 않는 범위에서 물리적인 변위를 측정할 수 있는 간단한 구조의 FOS를 제작하였다. 제작된 FOS가 측정할 물리적인 변위로 압력을 사용하였으며 FOS의 상층부에 가해진 압력의 변화 범위 (0MPa ~ 0.005MPa)에 따라 광 에너지 감쇄가 -1 dB에서 -20 dB 까지 변화하였으며 이 값은 동일한 반복 실험에서 값이 변하지 않았다. 또한 BSF로 제작된 FOS는 각각의 미세 굽힘에 대한 광 에너지 감쇄값이 서로 구별할 수 있을 정도의 차이를 보였다. 반면에 동일한 구조로 제작된 SMF를 이용한 FOS는 상층부에 가해진 압력에 대하여 광 에너지 감쇄값이 거의 변화하지 않았다. 따라서 실제 제작한 BSF를 이용한 FOS는 3D FD-BPM을 이용한 BSF의 미세 굽힘에 따른 광 에너지 감쇄와 경향성이 동일함을 알 수 있다. 이상의 결과를 바탕으로 본 논문에서 제안한 BSF를 이용한 FOS는 굽힘에 따라 조정되는 광 에너지의 감쇄정도에 따라 침수 나 인장 같은 물리적인 변위를 측정하는 재연성이 우수한 광센서로 사용할 수 있으며 미세한 굽힘을 제어하는 물리적인 구조를 변화 시킨다면 다른 물리적인 변위도 효율적으로 측정할 수 있으리라 기대된다. 또한 BSF는 기존의 SMF를 제작하는 설비로 제작이 가능하므로 이를 이용한 광센서는 저 비용으로 대량 생산에 용이하다고 판단된다.

참 고 문 헌

[1] Katsumi Morishita, Yasuyuki Kondoh, and Nobuaki Kumagai, "On the accuracy of scalar approximation technique in optical fiber analysis," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. MTT-28, No. 1, pp. 33-36, 1980.

[2] Wojtek J. Bock, Tinko A. Eftimov, and Andrew Hyett, "Wide-range fiber-optic strain sensor based on LP01 mode evanescence," *Instrumentation and Measurement Technology Conference, IEEE*, Vol. 2, pp. 1158 - 1161, 1998.

[3] John W. Berthold III, "Historical review of microbend fiber-optic sensors," *J. of Lightwave Technology*, Vol. 13, No. 7, pp. 1193 - 1199, 1995.

[4] Nicholas Lagakos, W. J. Trott, T. R.

Hickman, James H. Cole, and Joseph A. Bucaro, "Microbend fiber-optic sensor as extended hydrophone," *IEEE J. of Quantum Electronics*, Vol. QE-18, No. 10, pp. 1633 - 1638, 1982.

[5] 이동호, 권광희, 송재원, 박재희, "굽힘에 민감한 광섬유를 이용한 가변 광 감쇄기," *한국통신학회지 제 29권 제 5A호*, pp. 566-573, 2004.

[6] W. P. Huang, C. L. Xu, W. Lui, and K. Yokoyana, "The perfectly matched layer (PML) boundary condition for the beam propagation method," *IEEE Photon, Technol. Lett.*, vol. 8, pp. 649-651, May 1996.

[7] 권광희, 송재원, 이동호, "3차원 FD-BPM을 이용한 측면 연마된 광섬유와 완전 도체면 아래의 유전체 사이에서의 결합과 전파 특성의 해석," *한국통신학회지 제 28권 제 9A호*, pp. 754-762, 2003.

이 동 호 (Dong-Ho Lee)

준회원



1997년 2월 : 경북대학교 전자공학과(공학사)
1999년 3월 : 경북대학교 전자공학과(공학석사)
2002년3월~현재:경북대학교 전자공학과(박사과정)

<관심분야> 광소자 및 통신 시스템, 광파 및 전자파 수치해석

권 광 희 (Kwang-Hee Kwon)

정회원



1995년 2월 : 경북대학교 전자공학과(공학사)
1997년 2월 : 경북대학교 전자공학과(공학석사)
2003년 2월 : 경북대학교 전자공학과(박사)
2004년 현재 LG 안양연구소

책임 연구원

<관심분야> 광소자 및 통신 시스템, 광파 및 전자파 수치해석

이 철 희 (Cherl-Hee Lee)

정회원



1995년 2월 : 경북대학교 전자공
학과(공학사)
1997년 2월 : 경북대학교 전자공
학과(공학석사)
2003년 2월 : 경북대학교 전자공
학과(박사과정)

<관심분야> 광소자 및 통신 시스템, 광파 및 전자
파 수치해석

송 재 원 (Jae-Won Song)

정회원



1978년 2월 : 경북대학교 전자
공학과(공학사)
1980년 2월 : 한국과학기술원
전기 및 전자공학과(공학석
사)
1984년 2월 : 한국과학기술원
전기 및 전자공학과(공학박

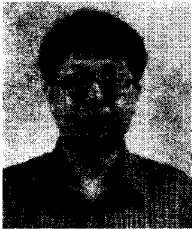
사)

1984년 8월~현재 : 현재 경북대학교 전자전기컴퓨
터학부 교수

<관심분야> 광소자 제작, 이드넷 네트워크 및 통신
시스템, 광파 및 전자파 수치해석

박 재 희 (Jaehae Park)

정회원



1984. 2. 경북대학교 전자공학
과 (학사)
1992. 8. Texas A&M 전자공
학과(석사)
1995. 8. Texas A&M 전자공
학과(박사)
1984. 3. ~ 1990. 3 국방과

학연구소

1995. 10 ~ 1997. 2. 삼성전기 주식회사

1997. 2 ~ 현재 계명대학교 전자공학과

<관심분야> 광통신 부품, 광센서, 광 신호처리