

논문 2001-10-3-02

측면연마된 단일모드 광섬유와 폴리머 평면도파로 결합기를 이용한 압력 센서

윤종국*, 정웅규**, 김상우**, 김응수***, 이승하****, 강신원****

Pressure sensor using the side polished single mode fiber and polymer planar waveguide coupler

Jong-Kuk Yoon*, Woong-Gyu Jung**, Sang-Woo Kim**
Eung-Soo Kim***, Seung-Ha Lee**** and Shin-Won Kang****

요 약

단일모드 광섬유와 평면도파로 결합기의 공진파장이 이동하는 현상을 이용한 새로운 형태의 압력 센서를 구현하였다. 압력변화에 따른 폴리머 유효굴절률의 변화로 공진파장이 이동함을 관찰할 수 있었고 평면도파로 물질에 따라 센서의 감도를 조절할 수 있었다. 대칭적 구조의 평면도파로를 형성하여 광섬유의 측면연마 공정시 생기는 편광의존성을 제거하였다. 평면도파로 물질로는 AZ4562, AZ1512 그리고 THB-30이 사용되었으며 압력에 의한 공진파장의 이동은 각각 $-0.008\text{nm}/\text{bar}$, $0.033\text{nm}/\text{bar}$, $0.16\text{nm}/\text{bar}$ 로 나타났다.

Abstract

Novel pressure sensor using the resonance wavelength shift of single mode fiber-to-planar waveguide coupler, was demonstrated. It is found that the resonance wavelength shift due to refractive index variation of polymers by pressure occurs and its sensitivity depends on materials. We adopted symmetric structure of planar waveguide and remove the polarization dependence which is inevitable with side-polished fiber. AZ4562, AZ1512 and THB-30 are used as planar waveguide materials and the resonance wavelength shifting by pressure was shown $-0.008\text{nm}/\text{bar}$, $0.033\text{nm}/\text{bar}$ and $0.16\text{nm}/\text{bar}$, respectively.

1. 서 론

광학소자를 구현하는 방법 중 광섬유를 이용하는 방법은 낮은 삽입손실, 높은 기계적 신뢰성, 원거리 측정등의 장점을 가지고 있다. 이러한 광

섬유형 센서는 일반적으로 외부의 변화를 소자자체나 광학계의 물리량 변화로 감지하기때문에 감도면에서 구조적인 한계를 가지는 경우가 많으며 이러한 문제점을 개선하기 위하여 많은 연구가 시도되고 있다^{1,2,3}.

현재까지 연구되고 있는 압력센서는 반도체 타입의 압저항형과 FBG(Fiber Bragg Grating)형 그리고 광섬유 자체가 트랜스듀서로 작용하는 간섭형(interferometric) 압력센서가 가장 일반적이었다⁴. 그러나 높은 신뢰성과 넓은 범위의 압력 측정 그리고 용이한 원거리 측정 등을 동시에 만족시키지는 못하는 단점을 가지고 있었다.

본 논문은 광섬유와 평면도파로 사이의 소산장 결합기의 공진파장 변화현상을 이용한 압력센서에 관한 연구이다. 구조가 서로 다른 두 도파로

* 성덕대학 정보통신계열 (Dept. of Information and Telecommunication, Sungduk College)

** 경북대학교 센서공학과 (Dept. of Sensor Engineering, Kyungpook National University)

*** 부산외국어대학교 컴퓨터전자공학부 (Division of Electronic & Computer Engineering, Pusan University of Foreign Studies)

**** 경북대학교 전자전기공학부(School of Electronic and Electrical Eng., Kyungpook National University)

<접수일자 : 2001년 2월 1일>

사이에서 발생하는 높은 파장 선택성 결합을 이용하였고 감도를 높이기 위하여 압력광학 효과를 갖는 여러 폴리머를 평면도파로로 사용하였다. 평면도파로와 광섬유의 광결합시 인가된 압력에 따라 공진파장이 이동하게 되고 이를 이용하여 외부의 물리량 변화를 감지하게 된다. 본 센서는 외부의 변화를 평면도파로의 광학적 성질에 의존하기 때문에 도파로 물질의 변화에 따라 다양한 감도조절과 분해능을 가지는 센서의 구현이 가능하다. 또한 편광에 무관한 소자의 구조를 제안하고 이를 실험을 통해 검증하였다.

2. 동작 원리

본 연구에서 제작된 센서의 구조는 그림 1.과 같다. 측면이 코어 가까이 연마된 단일모드 광섬유와 다중모드를 가지는 평면도파로의 소산장 결합(evanescent field coupling)이 형성되면 두 광경로 사이에 광에너지 교환이 발생할 수 있다.

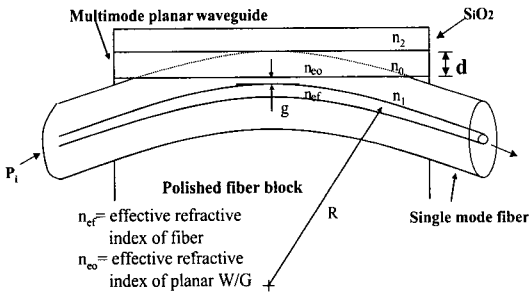


그림. 1. 압력센서로 활용하기 위한 광섬유-평면도파로 결합기 구조.

Fig. 1. Schematic configuration of fiber-to-planar waveguide coupler for applying as a pressure sensor.

평면도파로는 여러 모드를 가질 수 있으며 이 중에 광섬유 모드와 위상정합(phase matching) 조건을 만족하는 모드가 효과적인 광 결합을 일으킨다. 다중모드를 가지는 평면도파로의 m번째 모드의 유효굴절률을 찾기 위한 고유치 방정식은 다음과 같다^[5].

$$\frac{2\pi d}{\lambda} (n_o^2 - n_{eo}^2)^{1/2} = m\pi + \varphi_1 + \varphi_2 \quad (1)$$

여기서 m은 모드의 차수를 나타내는 정수, λ

는 광의 파장, d는 평면 도파로의 코어층 두께, n_o 는 평면 도파로의 코어 굴절률 그리고 n_{eo} 는 m번째 고차모드의 유효 굴절률이다. φ_1 과 φ_2 는 평면도파로의 코어층과 클래딩층의 경계에서 발생하는 모드의 위상천이를 나타내며 편광에 따라서 다른 값을 가지므로 평면도파로의 유효굴절률이 편광상태에 따라 차이가 발생할 수 있다.

광소자의 특성으로 응용하고자 하면 편광에 의존하지 않는 성질이 필요한데 이 편광의존성을 줄이는 방법으로 φ_1 과 φ_2 를 최소화하는 기법이 도입되었다. 이를 위하여 평면도파로의 상부 클래딩 물질로 광섬유의 클래딩과 같은 물질을 사용하는 방법을 이용하였다. 평면도파로가 편광의존성이 없는 대칭적 구조일 때 정성적 해석을 위해서 식(1)의 오른쪽 φ_1 항을 무시하면 아래와 같은 간단한 식이 유도된다.

$$\lambda_m = \frac{2d\sqrt{n_o^2 - n_{eo}^2}}{m} \quad (2)$$

본 논문에서는 (2)식을 성립시키기 위한 편광의존성을 없애기 위하여 상부도파로 물질을 광섬유 클래딩의 굴절률과 동일한 SiO₂를 사용하였다. 이때 공진파장 λ_m 은 평면도파로의 굴절률(n_o)과 두께등에 따라 결정된다. 평면도파로의 굴절률(n_o)에 대한 공진파장의 변화($\frac{d\lambda_m}{dn_o}$)는 편광의존성이 없다고 가정할 때 즉, φ_1 과 φ_2 를 무시할 수 있을 때 쉽게 구할 수 있다. 이러한 센서에 압력을 가하면 평면도파로 폴리머의 압력광학특성($\frac{dn}{dP}$)에 의해 유효굴절률이 변화한다. 폴리머에 압축응력을 인가하였을 경우 인가응력에 대한 굴절률차를 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta n = C \cdot \sigma \quad (3)$$

위 식에서 C는 stress optical coefficient이고 주로 재료의 화학구조(chemical structure)에 의존한다^[6]. 즉, 평면도파로의 유효굴절률 변화로 인하여 공진파장의 이동이 나타나며 이를 이용하여 압력의 변화를 감지하게 된다. 본 연구에서는 다양한 세 폴리머를 평면도파로로 사용하여 압력 센서로서의 소자특성을 비교하여 보았다.

3. 소자 제작

광섬유의 측면을 연마하기 위해서는 공정의 용이함을 위해 광섬유 연마지지대를 필요로 한다. 측면연마 방법은 석영(Quartz)이나 실리콘 등의 연마지지대를 이용하거나^[7,8] 광섬유 자체를 식각 용액을 이용하여 화학반응에 의해 식각하는 방법^[9]이 소개 되었지만 본 연구에서는 실리콘 웨이퍼를 반도체 이방성 식각공정을 이용하여 연마지지대를 형성한 후 연마하는 방법을 선택하였다. 그림 2.에 소자의 제작공정을 나타내었다. 이러한 방법은 공정시간이 길어지는 단점이 있으나 보다 정확한 곡률의 지지대형성이 가능하기 때문에 본 연구에서는 이러한 방법을 사용하였다.

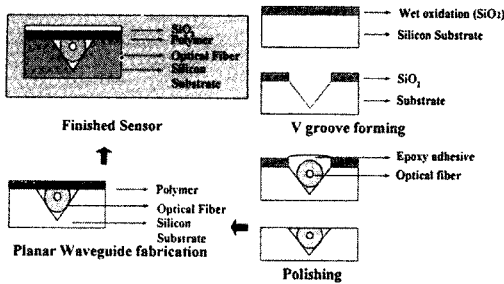


그림 2. 센서의 제작공정.
Fig. 2. Fabrication procedure of the sensor.

실리콘 V홈 제작에 사용된 식각 용액은 KOH이며 식각 조건은 84°C에서 2시간 정도 식각을 하였다. 제작된 센서는 적절한 곡률반경과 연마 깊이가 고려된 실리콘 V홈을 이용하여 광섬유 지지대를 제작하고 광섬유를 에폭시 수지로 접착한 후 연마하였다. 여기서 곡률반경은 15cm로 유지하였다. 광섬유의 연마 방법은 연마가루와 연마패드를 동시에 이용하였다. 연마가루와 연마패드는 입도가 다른 3종류를 사용하였으며 입자수가 거친면부터 순차적으로 사용하였다. 스핀코팅된 평면도파로 위에 RF sputter로 실리콘 산화막을 형성시켜 센서의 제작을 마무리하였다. 평면도파로의 물질로는 AZ4562, AZ1512, THB-30의 폴리머를 사용하였으며 상부클래딩인 SiO₂의 두께는 0.5μm정도였다.

4. 측정 및 특성

본 실험에 앞서 평면도파로의 상부층의 재료에

따른 결합기의 편광의존성을 측정하였다. 그림 3.은 굴절률이 서로 다른 평면도파로의 상부클래딩층 재료를 사용한 경우의 편광의존성을 측정한 결과이다.

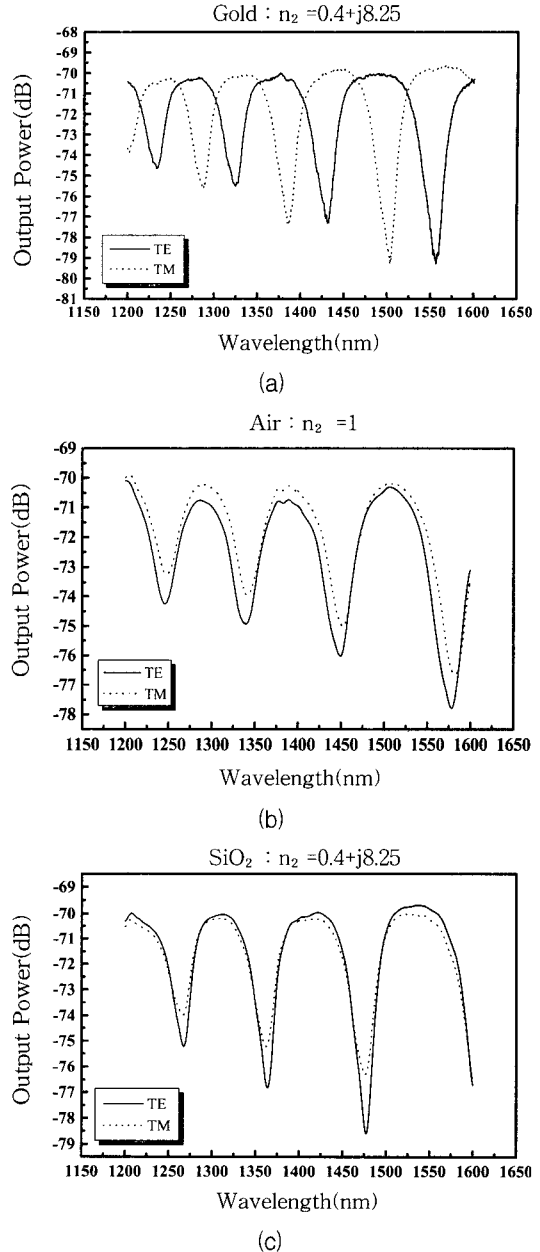


그림 3. 서로 다른 클래딩 물질에 따른 편광응답 (a) 금(Au) $n_2=0.4+j8.25$ (b) 공기 $n_2=1.0$ (c) SiO₂ $n_2=1.444$.
Fig. 3. Polarizing response for different cladding materials (a) Gold(Au) $n_2=0.4+j8.25$ (b) Air $n_2=1.0$ (c) SiO₂ $n_2=1.444$.

복소굴절률을 가지는 금과 공기 그리고 SiO₂를 상부 클래드로 형성하였다. 측정결과 상부 SiO₂층이 없는 금과 공기상태인 경우에 소자는 편광 의존성이 나타난 반면 SiO₂를 사용하였을 때에는 편광 의존성이 감소함을 알 수가 있었다. 이는 광섬유 클래딩의 굴절률과 동일한 SiO₂를 사용하였을 때 평면도파로의 상하부의 계면에서 발생하는 위상천이가 매우 작아지므로 편광상태에 따른 중심파장의 차이가 줄어들기 때문이다. SiO₂를 사용하였을 때의 TE, TM 편광된 공진 파장의 차이는 2nm 이하였으며 삽입 손실은 0.5 dB이하로 관측되었다. 이러한 성질을 고려하여 측면 연마시 생기는 편광 의존성을 대칭형 평면도파로를 이용함으로써 구조적으로 해결하였다^[10].

그림 4.는 사용한 폴리머 중 AZ4562를 사용한 평면 도파로의 결합 간격에 따른 파장응답 특성이다.

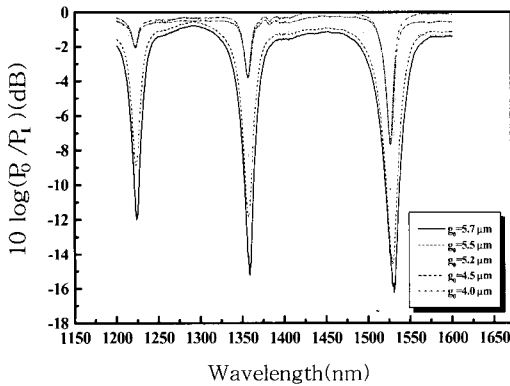


그림 4. 결합간격(g_0)에 따른 투과스펙트럼, 평면도파로 물질: AZ4562, 상부클래드 물질: SiO₂.

Fig. 4. Transmittance spectrum with coupling gap(g_0), Planar waveguide material: AZ4562, Upper clad material: SiO₂.

광섬유 측면연마 후 남은 광섬유 클래드의 두께에 따른 투과 스펙트럼을 측정하였다. 결합 간격(g_0)이 서로 다른 다섯 개의 광섬유 블록을 제작하여 여과 특성을 비교하였으며 AZ4562를 이용하여 동일한 두께의 평면도파로를 형성시켰다. 남은 광섬유 클래드의 두께는 제작된 광섬유 블록 위에 광섬유 코어와 동일한 굴절률을 가진 정합액을 도포하여 손실을 계산한 결과 각각 5.7, 5.5, 5.2, 4.5, 4.0 μm 였다. 이렇게 제작된 광섬유 위에 동일한 두께를 가지는 폴리머 평면도파로를 결합시켜 그 파장특성을 측정하여 보았다. 그림

4.에서 나타난 것과 같이 평면 도파로의 두께가 같고 연마 후 남은 광섬유 클래드의 두께가 다른 다섯개 결합기의 공진파장은 동일하였으며 연마 후 남아있는 클래드가 적을 수록 광결합 반치폭이 커짐을 알 수 있다. 따라서 센서적용시 광결합 반치폭이 작으면 측정에 용이하므로 광결합이 일어날수 있는 범위에서 최대한 연마를 적게하여 센서를 제작하였다.

제작된 센서의 압력특성은 일축압축 응력시험기를 개량한 장치를 이용하여 측정하였다. 센서에 하중을 인가함에 따라 그림 5.에서 보듯이 금속링 내부에 세팅된 변위게이지의 수치도 압력에 비례하여 증가한다. 센서가 받는 하중은 인가압력에 따른 변위증가와 링의 탄성계수의 곱이므로 이 때 센서에 인가되는 압력 P는 다음 (4)식과 같이 유도된다.

$$\text{압력}(P) = \frac{\text{하중}}{\text{면적}} = \frac{C_R \times d}{A} \quad (4)$$

여기서 C_R 은 금속링의 탄성계수, d 는 변위게이지의 변위증가 그리고 A 는 센서부에 압력의 인가면적이다.

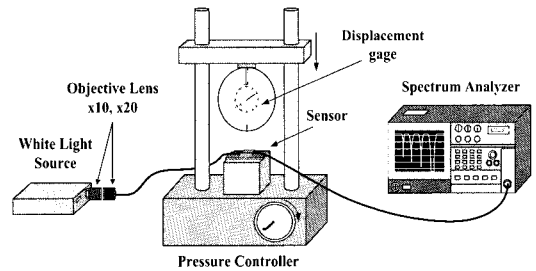


그림 5. 센서의 압력 측정장치도.

Fig. 5. Experimental setup.

압력이 인가된 센서를 백색 광원과 OSA (Optical Spectrum Analyzer)를 사용하여 압력에 의한 공진파장의 변화를 측정하였다. 그림 6.은 센서의 평면도파로로 AZ4562를 사용하였을 때의 압력에 따른 파장응답 특성이다. 인가된 압력에 따라 평면도파로의 유효굴절률이 작아짐을 알 수가 있고 $-0.008\text{nm}/\text{bar}$ 의 파장응답특성을 나타내었다. 그림 7.은 AZ1512를 평면 도파로로 사용했을 경우의 센서의 파장응답 특성이다. 압력변화에 따라 $0.033\text{nm}/\text{bar}$ 의 압력특성을 나타냄을 알 수 있다. 그림 8.은 THB-30을 평면도파로로 사용하였을 경우 센서의 파장응답특성이다. THB-

30의 경우 1.6nm/bar의 특성을 보였으며 감도가 AZ4562와 AZ1512보다 50배 이상 증가하여 가장 좋은 감도특성을 보였다.

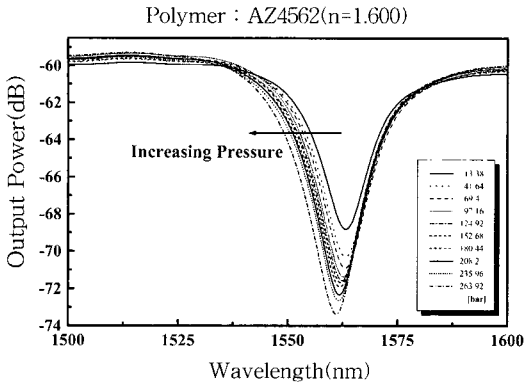


그림 6. AZ4562의 압력변화에 따른 파장 응답 특성.
Fig. 6. Wavelength response of AZ4562 by pressure.

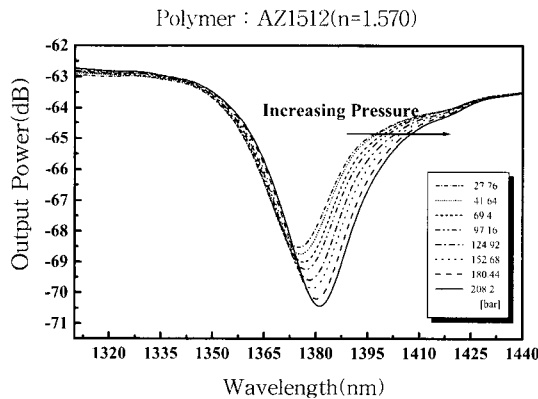


그림 7. AZ1512의 압력변화에 따른 파장 응답 특성.
Fig. 7. Wavelength response of AZ1512 by pressure.

그림 6, 7, 8은 평면도파로의 재료가 달라짐에 따라 각 고분자 도파로의 응력-광학계수와 같은 압력광학 효과의 증감이 다르고 압력이 가해질수록 광결합력이 증가하여 공진파장의 깊이가 깊어짐을 알 수 있다.

그림 9는 서로 다른 세가지 폴리머인 AZ4562, AZ1512 그리고 THB-30을 평면도파로로 사용한 각각의 센서 감도를 비교하였다. 세가지 센서가 공통적으로 비교적 선형성을 보였으며 물질에 따른 감도의 차이가 있어 AZ4562와 AZ1512의 경우보다 THB-30을 사용한 압력센서의 경우가 센서의 감도(sensitivity)가 우수한 것을 알 수 있다.

이는 본 논문에서 제안된 센서의 경우 평면도파로의 물질에 따라 센서의 감도를 변화시킬 수 있다는 장점을 가짐을 알 수 있다. 또한, 어떤 물질의 굴절률을 알 경우 공진파장의 이동으로 응력-광학계수 (stress optical coefficient) 및 굴절률을 간접적으로 측정할 수 있는 방법으로도 이용이 가능함을 알 수 있다.

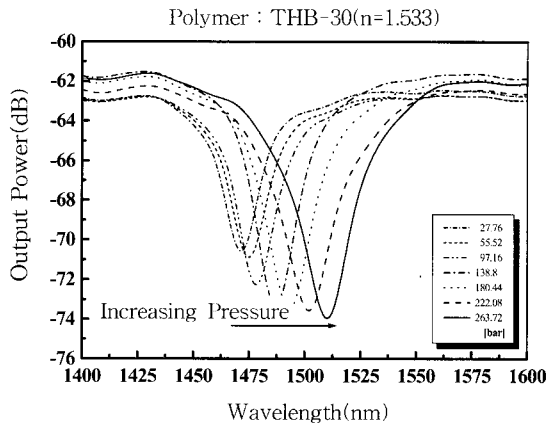


그림 8. THB-30의 압력변화에 따른 파장 응답 특성.
Fig. 8. Wavelength response of THB-30 by pressure.

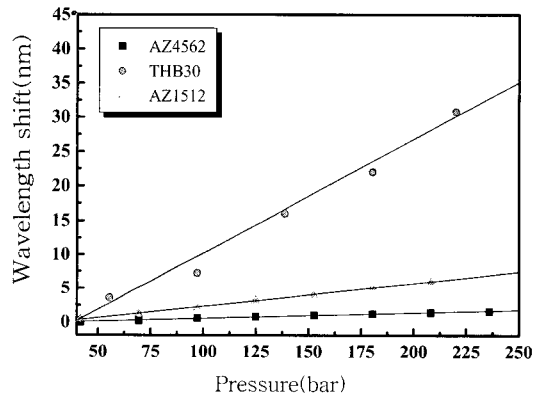


그림 9. 평면도파로 재료에 따른 센서의 감도변화.
Fig. 9. Sensitivity variation of sensor by planar wave-guide material.

5. 결 론

본 연구에서는 측면연마된 광섬유와 평면도파로 결합기를 이용한 새로운 압력센서를 구현하였다. 측면연마시 생기는 편광의존성을 평면도파로

의 대칭적 구조로 해결하였으며 이를 실험적으로 검증하였다. 본 센서는 압력의 감지를 평면도파로의 광학적 성질에 의존하기 때문에 물질의 변화에 따라 다양한 압력감도를 제어할 수 있고 약 400bar 이상의 광범위한 동작범위(high pressure sensing capability)를 가지는 센서의 구현이 가능하다. 실제로 사용한 3가지 평면도파로 물질에 따라 각각 다른 감도특성을 나타내어 압력변화에 대해 50배 이상의 감도차이를 확인할 수 있었다. 또한 이는 어떤 물질의 굴절률을 알 경우 공진파장의 이동으로 응력-광학계수(stress optical coefficient)의 근사적인 측정에도 이용이 가능할 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] Jaehoon Jung, Hui Nam, Byoung-ho Lee, Jaehoon Byun, Namseong Kim, "Fiber Bragg grating temperature sensor with controllable sensitivity", *Applied Optics*, Vol. 38, No. 13, pp. 2752-2754, 1999.
- [2] A. Gloag, N. Langford, K. McCallion and W. Johnstone, "Tunable Erbium fiber laser using a novel overlay bandpass filter", *Optic Letters* Vol. 11, pp.801-803, 1994.
- [3] S. G. Lee, J. P. Sokoloff, B. P. McGinnis, and H. Sasabe, "Fabrication of a side-polished fiber polarizer with a birefringent polymer overlay", *Optics Lett.* Vol. 22, No. 9, pp. 606-608, May, 1997.
- [4] D. A. Krohn, "Fiber Optic Sensors, 2nd Edition", Instrument Society of America, 1992
- [5] W. Johnstone, G. Fawcett, L.W.K. Yim, "In-line fiber-optic refractometry using index-sensitive resonance positions in single-mode fiber-to-planar polymer waveguide coupler" *IEE Proc-optoelectron*, Vol. 141, No. 5, pp. 229-302, Oct. 1994.
- [6] D. W. Van Krevelin, *Properties of Polymers*, 3rd Edition, Elsevier Sci, New York, 1990.
- [7] A. Andreev, B.I. Pantchev, P. Danesh, B. Zafirova and E. Karakoleva, "a-Si:H film on side-polished fiber as optical polarizer and narrow-band filter", *Thin Solid Film*, Vol. 330, pp. 150-156, 1998.
- [8] S. M. Tseng and C. L. Chen, "Sided-polished Fiber", *Applied Optics*, Vol. 31, No. 18, pp. 3438-3447, June 1992.
- [9] Tien-jung Chen and Shu-hsia Chen, "Propagation of lower-order modes in a radially anisotropic cylindrical waveguide with liquid crystal cladding", *IEEE J. of Lightwave Tech*, Vol. 13, No. 8, pp. 1698-1705, 1995
- [10] KwangTaek Kim, JaeWon Song, SangJae Lee, WoongGyu Jung, ShinWon Kang, "Polarizing properties of optical coupler composed of single mode sided-polished fiber and multimode metal-clad planar waveguide", *Optics communications*, Vol. 180, pp. 37-42, 2000.

 著 者 紹 介

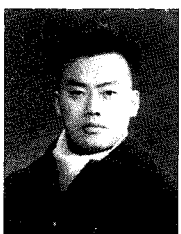
**윤 중 국**

1966년 6월 14일생
 1993.2 충남대학교 재료공학과 졸업(공학사)
 1995.2 충남대학교 재료공학과 졸업(공학석사)

2001.2 경북대학교 센서공학과 박사수료
 1995.1 ~ 1996.12 Motorola (RFM), Process engineer
 1997.3 ~ 현재 성덕대학 정보통신계열 전임강사
 주관심분야 : 광섬유센서, 광통신소자(WDM).

정 응 규

1999.2 경남대학교 전자공학과 졸업(공학사)
 2001.2 경북대학교 센서공학과 졸업(공학석사)
 주관심분야 : 광통신소자, 광섬유센서

**김 상 우**

1973년 10월 16일생
 2000.2 동아대학교 물리학과 졸업(이학사)
 2000.3 ~ 현재 경북대학교 센서공학과 석사과정

주관심분야 : 광섬유센서, 광통신소자

김 응 수

1990년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사)
 1992년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학석사)
 1996년 일본 게이오대학교 물질과학과 졸업(공학박사)
 1996년~1997년 LG 반도체주식회사 ULSI 연구소 선임연구원
 1997년~현재 부산외국어대학교 컴퓨터전자공학부 교수
 주관심분야 : 광센서, 광통신, 비선형광학.

이 승 하

1966년 7월 30일생
 1988년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사)
 1990년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학석사)
 1995년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박사)
 1996년~현재 : 경북대학교 전자전기공학부 부교수

강 신 원

1955년 3월 12일생
 1978년 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사)
 1980년 영남대학교 전자공학과 졸업(공학석사)
 1993년 일본 게이오대학교 생체의공학과 졸업(공학박사)
 현재 경북대학교 전자전기공학부 부교수