

논문 2000-9-1-03

열광학 폴리머 평면도파로의 소산장결합을 이용한 광섬유형 온도센서

김 시홍, 정 응규*, 김 광택**, 송 재원**, 강 신원***

Fiber optic temperature sensor using evanescent field coupling
of the thermo-optic polymer planar waveguideSi-Hong Kim, Woong-Gyu Jung*, Kwang-Tack Kim**, Jae-Won Song**
and Shin-Won Kang***

요 약

단일모드 광섬유와 평면도파로 결합기의 열에 의하여 공진파장이 이동하는 현상을 이용한 광섬유형 온도센서를 구현하였다. 평면도파로는 열에 의한 굴절률 변화가 큰 열광학폴리머를 사용하였다. 광섬유 연마과정 등의 소자제작 공정을 소개하고, 편광에 무관하게 동작하는 광소자 구조를 실험으로 검증하였다. 제작된 소자의 편광에 따른 공진파장의 차이는 2nm 이하였다. 실온(24°C)에서 90°C까지의 온도변화에 의한 공진파장의 변화는 -0.54nm/°C, -3nm/°C의 특성을 보였다.

Abstract

Optical fiber temperature sensor, using resonance wavelength shifting of single mode fiber-to-planar waveguide coupler by heat, was fabricated. Thermo-optic polymers, have large change of refractive index due to heat, were used for planar waveguide. The device fabrication procedure including fiber polishing steps was illustrated and the device structure with independent polarization was demonstrated experimentally. The resonance wavelength difference of fabricated device was less than 2nm. The resonance wavelength shifting owing to temperature variation, from room temperature(24°C) to 90°C, was showed -0.54nm/°C, -3nm/°C.

1. 서론

기존에 보고된 온도센서에는 써미스터^{[1][2]}, 열전대^[3], 초전형^[4], 내장형(P-N접합형)^[5], 광섬유형^{[6][7][8][9]}이 있으며, 최근에는 기계적 안정성, 고감도, 원거리 측정, 전자기파의 영향에 무관 등의 장점^[10]으로 광섬유형 온

도센서가 많이 연구되고 있다. 본 논문은 측면 연마된 광섬유와 평면도파로 결합기의 온도변화에 따른 공진파장의 변화 현상을 이용한 광섬유형 온도센서에 관한 연구이다. 적절한 곡률반경과 연마깊이가 고려된 실리콘 V홈을 이용하여 측면 연마된 광섬유 블록(block)을 제작하고 스피닝 공정을 통해 열광학 폴리머 평면도파로를 형성하였다. 광섬유 연마방법과 평면도파로 형성과정이 자세히 소개되었다. 편광 상태에 민감하지 않는 광섬유형 온도센서 구조를 제안하고 실험으로 검증하였다. 제작된 소자의 특성을 측정하는 방법으로 백색광을 소자에 입력하여 스펙트럼 분석기로 온도변화에

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

** 경북대학교 전자전기공학부(School of Electronic and Electric, Kyungpook National University)

*** 경북대학교 센서기술연구소(Sensor Technology Research Center, Kyungpook National University)

<접수일자 : 1999년 10월 1일>

다른 공진파장의 이동 현상을 관측하였다. 폴리머는 일반적으로 실리카 계열 물질보다 열광학 계수가 1차수 높기 때문에 열에 의해 높은 민감도를 가지는 광학소자의 재료에 많이 이용되며, 본 논문에서 제안된 광섬유형 온도센서도 폴리머 물질이 열에 의해 굴절률이 변화하는 현상에 기초한 소자이다. 이와 같은 구조를 가지는 광섬유형 온도센서는 아직까지 보고된바 없으며, 흐르는 용액의 온도변화를 측정하거나, 임의 물체의 표면온도를 감지하는 소자로 응용할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 동작 원리

그림 1의 구조와 같이 측면이 코어 가까이 연마된 단일모드 광섬유와 다중모드를 가지는 평면도파로의 소산장 결합(evanescent field coupling)이 형성되면 두 광경로 사이에 광에너지 교환이 발생할 수 있다.

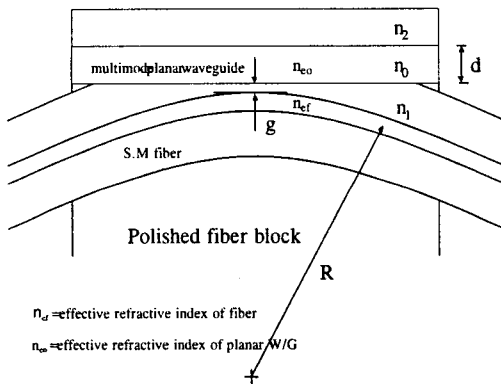


그림 1. 측면연마된 단일모드 광섬유와 평면도파로의 소산장 결합을 이용한 광센서 구조

Fig. 1. structure of optical sensor using evanescent field coupling between side polished optical fiber and planar waveguide.

평면도파로는 여러 모드를 가질 수 있으며 이중에 광섬유 모드와 위상정합(phase matching) 조건을 만족하는 모드가 효과적인 광 결합을 일으킨다. 평면도파로의 코어층과 클래딩의 굴절률 차이를 크게 하면 매우 높은 분산특성을 가지게 된다. 여기서 분산특성이란 평면도파로의 유효굴절률이 파장에 따라 크게 달라지는 현상을 의미한다. 따라서 광섬유와 평면도파로의 유효굴절률은 특정한 파장과 모드에서 일치하게 되며 이때

광섬유로부터 입사된 광전력은 평면도파로로 이동하게 된다. 여기서 위상정합을 만족하는 광의 파장을 편의상 공진파장으로 정의하기로 한다. 단일모드 광섬유의 코어층과 클래딩층의 굴절률 차이는 0.01~0.001 정도로서 매우 작으며 이것의 유효굴절률은 클래딩층보다 크고 코어보다 작은 범위 안에 있다. 따라서 광섬유의 파장에 대한 유효굴절률의 변화는 매우 미약하다. 그림 1에서 평면도파로의 분산특성을 크게 할수록 광 필터의 파장선택도는 높아진다. 이때 두 광경로 사이에 위상정합이 존재하기 위해선 평면도파로의 상부클래딩 물질은 광섬유 클래딩 물질의 굴절률보다 같거나 작아야 한다. 다중모드를 가지는 평면도파로의 m번째 모드의 유효굴절률을 찾기 위한 고유치 방정식은 다음과 같다^[11].

$$\frac{2\pi d}{\lambda} (n_o^2 - n_{eo}^2)^{1/2} = m\pi + \phi_1 + \phi_2 \quad (1)$$

여기서 m은 모드의 차수를 나타내는 정수, λ는 광의 파장, d는 평면도파로의 코어층 두께, n_o는 평면도파로의 코어 굴절률 그리고 n_{eo}는 m번째 고차모드의 유효굴절률이다. φ₁과 φ₂는 평면도파로의 코어층과 클래딩층의 경계에서 발생하는 위상천이로서 다음과 같이 주어진다^[11].

$$\phi_i (i=1 \text{ or } 2) = \tan^{-1} \zeta \frac{(n_{eo}^2 - n_i^2)^{1/2}}{(n_o^2 - n_{eo}^2)^{1/2}} \quad (2)$$

여기서 TE편광 대해선 ζ=1, TM편광에 대해선 ζ=n_o²/n₂²을 대입하면 된다. n₁은 광섬유의 클래딩층의 굴절률인 동시에 평면도파로의 하부클래딩층의 굴절률이다. n₂는 평면도파로의 상부클래딩층의 굴절률이다. 평면도파로의 최고차 모드가 가장 작은 유효굴절률(n_{eo})을 가지기 때문에 광섬유의 유효굴절률(n_{ef})과 가장 근접하게 된다. 식(1)에서 φ_i가 편광에 따라서 다른 값을 가지므로 유효굴절률이 편광에 따라 다소 차이가 발생할 수 있다.

광섬유형 온도센서의 특성으로 편광상태에 의존하지 않는 성질이 필요하다. 만일 광섬유형 온도센서 소자가 편광상태에 의존하는 특성을 가지면, 편광을 제어하는 소자가 추가로 필요해지기 때문이다. 그림 1과 같은 광섬유형 온도센서 소자의 편광의존성을 줄이는 방법으로 φ_i의 절대치를 최소화시키는 기법이 유용하다. 이를 위하여 평면도파로의 상부클래딩 물질로 광섬유의 클래딩과 같은 물질을 사용하는 방법이 이용될 수 있

다. 위상정합시 $n_{co}=n_{ef}$ 를 만족하고, 광섬유의 코어와 클래딩간의 굴절률 차이가 작기 때문에 $n_{ef} \approx n_i$ 를 식(2)에 대입하면 평면도파로의 상하부의 계면에서 발생하는 위상차이는 매우 작아진다. 그리고 모드의 차수(m)가 높을수록 ψ_i 가 식(1)에서 상대적으로 작아지기 때문에 편광에 따른 중심파장의 차이가 줄어든다. 이때 사용된 물질은 광학적 등방성으로 가정하였다. 평면도파로가 대칭적 구조일 때 정성적 해석을 위해 식(1)에서 오른쪽항의 ψ_i 를 무시하여 아래와 같은 간단한 식을 유도하였다.

$$2d(n_o^2 - n_{ef}^2)^{1/2} \approx m\lambda_0 \quad (3)$$

여기서 λ_0 는 평면도파로의 m차 모드와 광섬유 모드의 사이의 위상정합을 만족하는 파장이다. 공진파장은 식(3)으로부터 평면도파로의 두께(d)와 굴절률(n_o)에 의해 결정된다. 그리고 광섬유의 유효굴절률(n_{ef})은 광섬유의 구조와 파장에 의해 계산될 수 있는 수치이다. 여기서 m은 λ_0 에서 가질 수 있는 모드의 차수 중에 최고차이다. 그 이유는 평면도파로의 모드중 최고차 모드의 유효굴절률이 광섬유의 유효굴절률과 가장 근접해 있기 때문이다.

식 (2)에서는 평면도파로의 상부층의 굴절률이 하부 클래딩층의 굴절률($n=1.4440$)에 가까워 질수록 TE, TM편광의존성이 작아짐을 알 수가 있다. 식(3)에서는 공진파장 λ_0 는 평면도파로의 두께와 굴절률(n_o)에 의해 결정되므로 열광학 효과가 우수한 폴리머를 평면도파로의 코어층으로 사용하면 주위온도에 의하여 굴절률이 바뀌며 이는 결국 공진파장이 이동하는 결과를 가져온다. 따라서 광섬유-평면도파로 결합기를 공진파장의 온도 의존성을 이용한 온도센서에 적용할 수 있는 것이다.

3. 소자 제작

앞서 이론적 연구를 실험적으로 검증하기 위하여 광섬유형 온도센서를 제작하였다. 평면도파로의 굴절률을 제어하는 방법으로 폴리머의 열광학 효과를 이용하였다. 제안된 광섬유형 온도센서를 제작하기 위해서는 광섬유의 한쪽 측면을 코어 가까이 연마하는 공정이 필요하다. 광섬유는 그 두께가 너무 작아서 광섬유 지지대로 실리콘 V홈을 이용하는 방법^[12]과 퀴츠(Quartz)

를 이용하는 방법^[13]이 잘 알려져 있다. 본 논문에서는 전자의 방법을 이용하였다. 실리콘 이방성 식각으로 광섬유를 고정하기 위한 V홈을 제작 할 수 있다. 설계된 광섬유 곡률반경(R)은 15cm 이고 연마 후 남은 클래딩의 두께(g)는 연마과정에서 조절하였다. 그림 2는 설계된 광섬유 블록의 정면, 윗면 그리고 측면에서 본 개략적 구조이다. 그림 2에서 광섬유 클래딩의 반경 $b=6.25 \mu m$, 두 <111> 면 사이각은(70.52°)이다. 실리콘 V홈의 폭(W)과 식각깊이(g)와의 관계는 식(4)와 같이 주어진다^[12].

$$g = \frac{w}{2} \cot \frac{\theta}{2} - b * \csc \frac{\theta}{2} - a \quad (4)$$

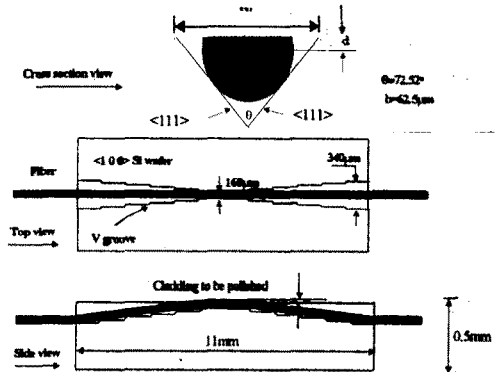


그림 2. 측면 연마된 광섬유 블록(block)의 구조
Fig. 2. Block diagram of side polished optical fiber.

여기서 a 는 광섬유 코어의 반경이다. V홈을 제작하기 위하여 두께가 0.5mm인 (100) 실리콘 기판을 120 $^\circ C$ 에서 2시간 습식산화시켜 약 8000 \AA 정도의 산화막을 증착하고 포토리소그래피 공정으로 실리콘 산화막위에 V홈 패턴을 형성하였다. 즉 V홈이 형성될 부분만 산화막이 제거되는 형태를 지니게 된다. 산화막은 6:1 BHF에 20 $^\circ C$ 에서 16분 정도 담구면 제작된다. KOH와 H $_2$ O를 44:100의 부피 비율로 섞고 이를 83 $^\circ C$ 로 유지하여 (100)실리콘 이방성 식각액을 준비한다, 실리콘 식각용액에 준비한 시료를 약 3시간 동안 담구면 V홈이 완성된다. 약 1m 길이 정도로 단일모드 광섬유를 준비하고 중간부위에 피복을 1.1cm 제거한 후 에폭시 접착제를 코팅하고 이를 실리콘 V홈에 삽입한다. 에폭시 접착제가 완전히 경화 될 때까지 광섬유를

V홀에 고정시켜 유지한다. 경화가 끝나면 광섬유의 상부 클래딩이 3~4 μm 정도 남을 때까지 연마를 통해 제거해야 한다. 이를 구현하는 방법으로 연마중간에 He-Ne 레이저로 광섬유에 빛을 입사하여 산란된 빛이 보일 때까지 12 μm 연마필름으로 연마하고, 그 후부터는 3, 1, 0.3 μm 순으로 연마를 마무리한다.

다중모드 평면도파로 막을 제작하기 위해 굴절률이 1.6인 AZ4562, 1.52인 NOA65를 스펀코팅 공정을 통해 각각 2500RPM, 3500RPM으로 열광학 폴리머 평면도파로층을 형성하였다. 평면도파로의 두께에 의해서 공진파장이 결정되므로 폴리머 도파로의 두께를 제어하는 공정이 소자제작에 매우 중요한 과정이다. 스펀코팅으로 폴리머 평면도파로 제작시 RPM(분당회전속도)을 조절하여 다양한 두께를 가지는 평면도파로를 제작할 수 있다. α -step으로 평면도파로의 두께를 측정하였다. 폴리머를 스펀코팅후 AZ4562는 140 $^{\circ}\text{C}$ 에서 10분간, NOA65는 UV를 10분간 쬐서 경화시켰다.

4. 특성측정 및 분석

제작된 소자의 특성을 측정하기 위한 장치도는 그림 3과 같다.

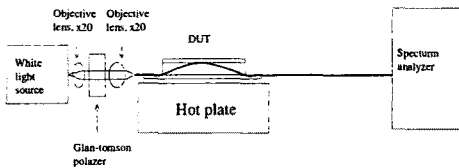


그림 3. 측정 장치도

Fig. 3. Block diagram of measurement system.

백색광원의 출력이 배율 10인 대물렌즈를 통하여 평행광이 되면, 글렌 틸트 편광기에 의해서 연마된 광섬유면에 대하여 TE혹은 TM으로 편광된다. 배율 20인 대물렌즈를 통하여 광섬유의 한쪽 단면에 백색광이 결합된다. 측정파장 범위는 1.2~1.6 μm 이며 편광기를 통과하지 않고 5nm 해상도를 가지고 측정하며 평균 광전력은 -59.5~60dbm로서 최대 측정범위는 20dB 나타났다. $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 의 정확도를 가지는 온도 제어기는 제작된 광섬유형 온도센서의 온도특성을 측정하기 위하여 사용되었다.

온도는 실온(24 $^{\circ}\text{C}$)에서 40 $^{\circ}\text{C}$, 40 $^{\circ}\text{C}$ ~50 $^{\circ}\text{C}$, 50 $^{\circ}\text{C}$ ~60 $^{\circ}\text{C}$, 60 $^{\circ}\text{C}$ ~70 $^{\circ}\text{C}$, 70 $^{\circ}\text{C}$ ~80 $^{\circ}\text{C}$, 80 $^{\circ}\text{C}$ ~90 $^{\circ}\text{C}$ 순으로 온도조절기로 온도를 올려가면서 공진파장이 이동하는 현상을 순간순간 확인 하였으며 실제 데이터 출력은 24, 40, 50, 60, 70, 80, 90 $^{\circ}\text{C}$ 에서 각각 출력하였다. 그림 4는 폴리머 계열인 AZ4562를 평면도파로 코어층으로 사용한 소자의 TE, TM 편광된 공진파장을 보여주고 있다.

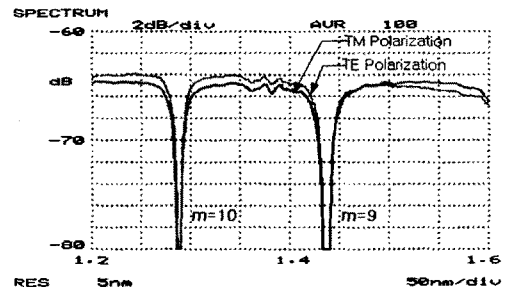


그림 4. 제작된 소자의 파장응답 측정

(폴리머층 두께: 9.44 μm)

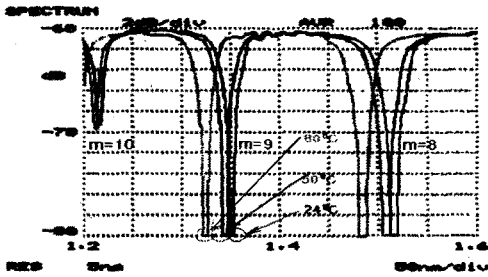
Fig. 4. The wavelength response measurement of fabricated device.

(polymer layer thickness: 9.44 μm)

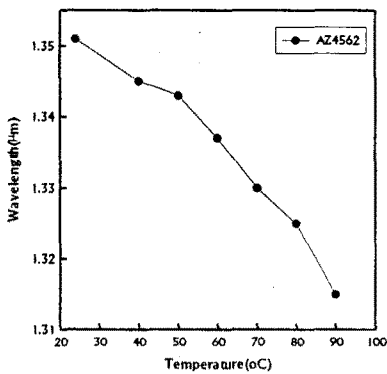
그림 4에서와 같이 평면도파로의 상부 클래드층 굴절률($n=1.4440$)이 하부 클래드층 굴절률($n=1.4440$)과 같은 경우 편광의존성이 감소함을 실험을 통해 알 수가 있었으며, 그 때의 TE, TM 편광된 공진파장의 차이는 이론적 예측과 마찬가지로 2nm 이하였다. 그리고 삽입 손실은 0.5dB 이하로 관측되었다. 대칭형 평면도파로를 이용하여 편광의존성이 기존의 연구 결과보다^{[11][14]} 줄어든 결과를 보였다.

폴리머 계열인 AZ4562 와 NOA65를 평면도파로 코어층으로 사용한 두 개의 소자를 제작하였고, 그 특성을 측정하여 그림 5와 그림 6에 나타내었다.

그림 5와 그림 6에서 온도가 올라가면 광소자의 공진파장이 짧아지는 현상이 관측되었다. 폴리머는 일반적으로 실리카 계열 물질보다 열광학 계수가 1차수 더 크기 때문에 온도가 올라감에 따라 폴리머 도파로의 굴절률이 감소하는데 이 때문에 공진파장이 감소한 것으로 분석된다. 온도변화에 의한 공진파장의 변화는 AZ4562는 -0.54nm/ $^{\circ}\text{C}$, NOA65는 -3nm/ $^{\circ}\text{C}$ 의 변화를 보였다. 물질의 열광학 계수, 굴절률, 소자구조 등을 조절하여 다양한 특성을 가진 소자제작이 가능할 것으로 보인다.



(a)



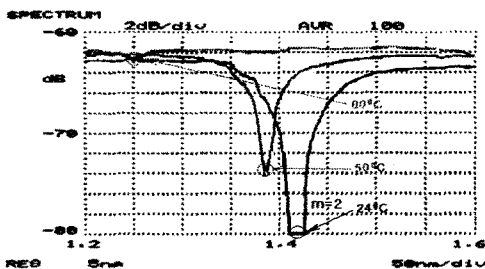
(b)

그림 5. (a) AZ4562(n=1.6)의 온도변화에 따른 파장응답 특성 (폴리머층 두께: 8.86 μm)

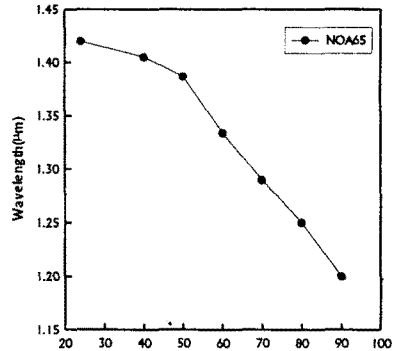
(b) AZ4562(n=1.6)의 온도변화에 따른 파장응답 특성 그래프

Fig. 5. (a) wavelength response characteristic of AZ4562(n=1.6) by temperature variation. (polymer layer thickness : 8.86 μm)

(b) Graph of wavelength response characteristic of AZ4562(n=1.6) by mperature variation.



(a)



(b)

그림 6. (a) NOA65(n=1.52)의 온도변화에 따른 파장응답 특성 (폴리머층 두께: 9.44 μm)

(b) NOA65(n=1.52)의 온도변화에 따른 파장응답 특성 그래프

Fig. 6. (a) wavelength response characteristic of NOA65(n=1.52) by temperature variation. (polymer layer thickness : 9.44 μm)

(b) Graph of wavelength response characteristic of NOA65(n=1.52) by temperature variation.

5. 결론

측면 연마된 단일모드 광섬유와 다중모드 열광학 폴리머 평면도파로 결합기의 공진파장이 온도에 따라 이동하는 현상을 이용한 광섬유형 센서를 구현하여 그 특성을 측정하였다. 실리콘 V홈을 이용한 측면 연마된 광섬유 블록 제작과정 및 폴리머 도파로 제작과정을 소개하였다. 대칭형 평면도파로를 이용하여 편광의존성을 개선하였으며, 편광에 따른 공진파장의 차이는 2nm 이하였다. 실온(24 $^{\circ}\text{C}$)에서 90 $^{\circ}\text{C}$ 의 온도 변화에 의한 공진파장의 변화는 AZ4562는 $-0.54\text{nm}/^{\circ}\text{C}$, NOA65는 $-3\text{nm}/^{\circ}\text{C}$ 의 변화를 보였다. 본 연구에서 제작된 광섬유형 온도센서는 흐르는 용액의 온도변화를 측정하거나, 박막형으로 제작하면 임의 물체의 표면온도를 감지하는 소자로 응용할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] C. C. Wang, S. A. Akbar, W. Chen, J. R.

- Schorr, "High-temperature thermistors based on yttria and calcium zirconate", *Sensor and Actuators*, A58, pp. 237-343, 1997.
- [2] A. Dziedzic, L. J. Kozlowski, J. Kozilowski, B. W. Licznarski, K. Nitsch, "Thick-film resistive temperature sensors", *Meas. Sci. Technol*, vol.8, pp. 78-85, 1997.
- [3] D. Debey, R. Bluhm, N. Habets, H. Kurz, "Fabrication of planar thermocouples for real-time measurements of temperature profiles in polymer melts", *Sensor and Actuators*, A58, pp. 179-184, 1997.
- [4] M. Maqsood, M. Arshad, M. Zafarullah, A. Maqsood, "Low-temperature thermal conductivity measurement apparatus: design assembly, calibration and measurement on (Y123, Bi2223) superconductors", *Supercond. Sci. Technol*, vol.9, pp. 321-326, 1996.
- [5] P. C. McDonald, "Silicon diode temperature sensors for process systems", *Cryogenics*, vol.35, pp. 199-201, 1995.
- [6] A. Babnik, A. Kobe, D. Kuzman, I. Bajsic, J. Mozina, "Improved probe geometry for fluorescence-based fibre-optic temperature sensor", *Sensor and Actuators*, A57, pp. 203-207, 1996
- [7] Wei-Chong Du, Xiao-Ming Tao, Hwa-Yaw Tam, "Fiber Bragg grating cavity sensor for simultaneous measurement of strain and temperature", *IEEE Photonics Technology Letter*, vol.11, pp. 105-107, 1999
- [8] Han-Sun Choi, Herry F. Taylor, Chung E. Lee, "High-performance fiber-optic temperature sensor using low-coherence interferometry", *Optics Lett*. vol.22, pp. 1814-1816, 1994.
- [9] A. Yataghene, M. Himbert, A. Tardy, "Distributed temperature sensor using holmium-doped optical fiber and spread-spectrum techniques", *Rev. Sci. Instrum*, vol.66(7), pp. 3894-3900, 1995
- [10] F. Berghmans, F. Vos, M. Decretion, "Evaluation of three different optical fiber temperature sensor types for application in gamma radiation environments", *IEEE Transaction on Nuclear Science*, vol.45, pp. 1537-1542, 1998.
- [11] W. Johnstone, G. Fawett, L.W.K. Yim, *IEE Proc-optoelectron*, 141, 229(1994).
- [12] Shioa-Min Tseng and Chin-Lin Chen, "Side-polished fibers", *Applied Optics*, vol.31, pp. 3438, 1992.
- [13] A. Andreev, B. Pantchev, P. Danesh. B. Zafirova, E. Karakoleva, *Thin Solid Films*, 330, 150(1998).
- [14] 김 광택, 유 호종, 김 성국, 이 소영, 송 재원, 이상재, 김 시홍, 강 신원, "측면 연마된 단일모드 광섬유와 열 광학 다중모드 평면도파로를 이용한 능동형 광결합기" *한국광학회지*, vol.10, 248(1998).

 著 者 紹 介



김 시 홍

1997년 2월 경일대학교 전자공학과 (학사). 1997년 1월~11월 (주) 오성전자 정보통신팀 근무. 1998년 3월~현재 경북대학교 대학원 센서공학과 석사과정.

주관심분야 : 광섬유센서, 광필터.



정 응 규

1999년 2월 경남대학교 전자공학과 (학사). 1999년 3월 경북대학교 대학원 센서공학과 석사과정.

주관심분야 : 광통신소자, 광섬유센서.



김 광 택

1989년 2월 경북대학교 전자공학과 (학사). 1991년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 (석사). 1991년 3월~1995년 12월 포항가속기 연구소 근무. 1994년 2월~현재 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과

정. 주관심분야 : 광통신소자, 광섬유센서.

송 재 원

『센서학회지 제4권 제1호』 논문95-4-1-04 p.21 참조.
현재 경북대학교 전자전기공학부 교수

강 신 원

『센서학회지 제4권 제1호』 논문95-4-1-05 p.34 참조.
현재 경북대학교 센서기술연구소 조교수