

## 프리즘과 광섬유-평면도파로의 소산장 결합을 이용한 자외선 센서

조강민 · 윤정현 · 김응수\* · 이승하\*\* · 강신원\*\*†

### UV Sensor using Evanescent Field Coupling of Prism and Fiber-to-Planar Waveguide Coupler

Kang-Min Cho, Jung-Hyun Yun, Eung-Soo Kim\*, Seung-Ha Lee\*\*, and Shin-Won Kang\*\*†

#### Abstract

A novel UV sensor was manufactured and characterized using the evanescent field coupling between fiber-planar waveguide (PWG) coupler and prism. A spiroxazine dye was chosen as planar waveguide because its photochromic isomerization induced by UV irradiation. A novel UV sensor was proposed to measure the variation of refractive index and absorption coefficient simultaneously. The wavelength responses of these sensors by UV exposure times were measured 0.48 nm/sec, 0.757 nm/sec, and ATR output power variations were measured  $-0.424 \mu\text{W}/\text{sec}$  and  $-0.62 \mu\text{W}/\text{sec}$  when UV exposure power were 3 mW and 5 mW, respectively.

**Key Words** : side-polished fiber, fiber-to-planar waveguide coupler

## 1. 서 론

광섬유형 센서는 전자기적 간섭에 강하고 높은 감도와 원거리 측정 등의 장점뿐만 아니라 낮은 삽입손실, 높은 기계적인 신뢰성, 원거리 측정과 같은 이점을 가지고 있어 광통신기술뿐 아니라 기초과학 및 응용 과학 분야의 계측에 활발히 이용되고 있다<sup>[1]</sup>.

자외선 감지는 대기 및 천체관측<sup>[2]</sup>, 화재감시, 핵발전소, 의료분야, 기상관측분야<sup>[3]</sup>, 생물학분야<sup>[4]</sup> 등 다양한 연구분야 및 산업응用に 관해 관심이 집중되고 있다. 반면에, 인체나 각종 생체조직에 조사될 경우에 피부암, 백내장, 면역체계의 악화 등을 촉진시키는 원인이 되기도 한다. 이처럼 유해성과 효용성으로부터 자외선의 효과적인 감지 기술에 대한 연구가 필수적으로 요구되고 있다.

기존의 자외선 감지기로는 광 이온화 감지기, 광다

이오드나 광전자 증배관과 같은 광전자 방출형 감지기와 CCD와 같은 고체형 감지기 등으로 나뉘는데, 주로 무기재료로 만들어지는 이러한 형태의 자외선 감지소는 열적, 화학적 안정성을 갖는 장점이 있으나, 제작공정이 복잡할 뿐만 아니라 이로 인한 부대 장비의 추가 요구로 인해 많은 비용이 드는 단점이 있다. 또한 광 변색성 색소를 이용한 카드형의 유기계열의 센서도 있으나 단지 지시계로 이용되고 있다.

자외선량 측정에 있어서 정밀도와 우수한 감도, 그리고 빠른 응답특성 및 원거리 감지기능 등을 가지며, 낮은 가격으로 용이하게 제작하고 동시에 진보된 광학적 방법을 이용한 자외선 센서에 관한 연구는 매우 미비한 실정이다.

본 논문은 광섬유-평면도파로 결합기와 프리즘을 결합한 측면 연마된 광섬유를 이용한 새로운 개념의 자외선 센서에 관한 연구이다. 또한 측면 연마된 광섬유와 광변색성 유기 재료가 혼합된 고분자 평면도파로 결합기 위에 프리즘 결합한 센서 소자를 제안하였다.

## 2. 동작 원리

측면 연마된 광섬유와 평면도파로 결합기를 이용한 센서는 두 가지 방법으로 결과를 분석한다. 첫 번째는

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

\*부산외국어대학교 디지털정보공학부(Div. Digital Information Engineering Pusan University of Foreign Studies)

\*\*경북대학교 전자전기공학부(School Electronic and Electrical Engineering, Kyungpook National University)

†Corresponding author: swkang@knu.ac.kr

(Received : July 23, 2003, Accepted : June 29, 2004)

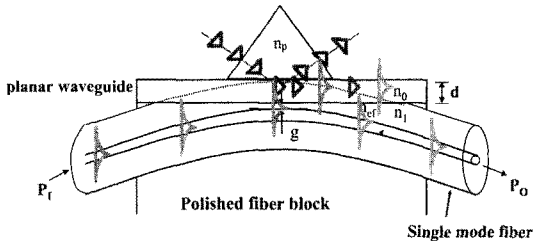


그림 1. 프리즘과 광섬유-평면도파로 결합기의 구조  
Fig. 1. Structure of prism & fiber-to-planar waveguide coupler.

외부변화에 대한 공명파장의 이동을 통한 분석(wavelength based method)이고, 두 번째는 외부변화에 대한 단 파장(laser)의 transmission 변화를 통한 분석(intensity based method)을 통하여 센서로 연구되고 있다<sup>15)</sup>.

본 논문에서는 위와 같은 두 가지 분석방법을 동시에 해석하면서 또 다른 감지 메카니즘을 새롭게 도입시키기 위해서 평면도파로 상단에 프리즘을 결합시킨 새로운 형태의 센서를 연구하였다.

그림 1은 위와 같은 두 가지 분석방법을 동시에 해석하기 위하여 평면도파로 상단에 프리즘을 결합시킨 새로운 형태의 센서구조를 나타낸다. 제작된 센서 지지대의 하단부에서 자외선이 조사되면 광섬유와 평면도파로(spiroxazine 색소가 분산된 폴리머)의 위상정합으로 인하여 특정파장 에서 광결합이 발생하게 되고 굴절률의 변화가 일어나면서 공진파장이 이동하게 된다. 또한 자외선 조사에 의한 평면도파로의 흡수계수 변화로 인하여 ATR의 출력 광강도의 변화가 나타난다.

프리즘을 이용한 구조는 기존의 측면 연마형 광섬유 센서에서 단순히 박막만을 바꾸어 가며 신소재에 의한 재료적인 부분 중심의 연구에 대한 개선과 광섬유와 평면도파로간의 모드 결합 시 생기는 공명파장의 이동을 중심으로 연구되고 있어 구조적인 한계의 극복과 감지영역의 제한으로 인한 감도의 개선을 이루고자 제시된 것이다. 이 구조는 wavelength 및 intensity based method를 동시에 구현하며, 또한 평면도파로의 굴절률 변화에 의한 감지에서 흡수계수라는 센서의 새로운 메카니즘을 더함으로써 보다 정확한 센서로서 이용될 수 있다. 또한 프리즘을 이용함으로써 집적광학에의 접근과 다양한 센서(surface plasmon resonance : SPR, optical waveguide 등)에의 적용이 가능할 것으로 기대된다.

측면 연마된 광섬유와 평면도파로 결합기에서, 측면이 코어 가까이 연마된 단일모드 광섬유 위에 다중모드를 가지는 평면도파로층이 형성되면 두 광 경로 사이에 소산장 결합(evanescent field coupling)이 형성되

어 광에너지 교환이 발생하게 된다<sup>6,7)</sup>.

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<sup>18)</sup>.

$$\frac{2\pi d_0}{\lambda} (n_o^2 - n_{eo}^2)^{1/2} = m\pi + \phi_1 + \phi_2 \tag{1}$$

m : 모드의 차수(정수), λ: 광의 파장  
d<sub>o</sub> : PWG 코어층 두께, n<sub>o</sub> : PWG 코어 굴절률  
n<sub>eo</sub> : m번째 고차모드 유효 굴절률

광섬유-평면도파로 결합기가 광결합을 일으키기 위해서는 광섬유의 유효굴절률(n<sub>ef</sub>)과 평면도파로의 유효굴절률(n<sub>eo</sub>)이 일치해야 한다. 평면도파로의 최고차 모드가 가장 작은 유효굴절률을 가지기 때문에 광섬유의 유효굴절률과 가장 근접하게 되고 식(1)에 n<sub>eo</sub> = n<sub>ef</sub>을 대입하면 평면도파로 m차 모드에서 공진하는 파장(λ<sub>m</sub>)을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\lambda_m = \frac{2d\pi(n_o^2 - n_{ef}^2)^{1/2}}{m\pi + \phi_1 + \phi_2} \tag{2}$$

광섬유-평면도파로 결합기는 센서 응용시 TE응답과 TM응답 중 한쪽 편광만을 관측함으로써 자외선량의 변화에 따른 파장응답을 관측할 수 있다.

평면도파로와 프리즘 결합기에서, 상단부에 코팅된 평면도파로 위의 프리즘에 입사광이 전반사 될 때 발생하는 소산파가 자외선 조사시 평면도파로의 흡수계수의 변화(attenuated total reflection : ATR)로 인하여 반사되어 나오는 광세기의 변화가 발생한다<sup>9)</sup>.

ATR은 고굴절을 프리즘에서의 광의 전반사를 이용하는 것이다. 이때, 전반사면의 바깥에 밀착시킨 시료층 안으로 소산파(evanescent wave)가 형성되는데, 이 소산파는 시료층의 종류 및 농도에 따라 흡수량이 변화하며, 이에 따른 전반사 광 강도의 변화를 측정하는 방법이다.

감쇄계수(attenuation coefficient)는 흡수계수(absorption coefficient)와 산란계수(scattering coefficient)의 합으로, 매질 내에서 단위 거리당 산란과 흡수되는 빛의 손실로 나타내어진다. 특히 ATR과 관련되는 흡수계수는 매질을 통해 진행함에 따른 에너지의 흡수에 의해 야기되는 빛의 감쇄량을 나타낸다. 단위 거리당 흡수되는 빛으로 나타내며, 거리에 반비례된다.

이에 따른 흡수도(absorbance) A와 흡수계수 α는

다음과 같이 정의된다.

$$A = \log\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (3)$$

$$\frac{I_0}{I} = \exp(-\alpha x) \quad (4)$$

이들과 관련해 중요한 Beer-Lambert 법칙이 있으며, 다음의 식으로 표현할 수 있다<sup>[10]</sup>.

$$A_\lambda = \log\frac{I_0}{I} = \alpha x C = \epsilon x C \quad (5)$$

여기서,  $A_\lambda$ :  $\lambda$ 에서의 흡광도,  $x$ : 시료 길이[cm]  
 $C$ : 샘플 농도,  $\alpha$ : 흡수계수  
 $\epsilon$ : 몰당 흡수계수

이러한 물질의 흡수계수의 측정은 여러 가지 생화학 종의 성질 및 농도를 측정하는 기본 원리로써 분광분석법, 전반사법을 이용한 다양한 형태의 광도파로형 센서를 이용해 측정이 가능하다.

평면도파로는 광변색성 색소인 spiroxazine이 분산되어 있는 니트로셀룰로오즈(model : op#12, (주)한국케믹스)를 사용하였으며, 평면도파로의 굴절률은 Abbe 굴절계로 측정된 결과 1.501로 나타났다. 본 실험에서 사용된 평면도파로는 자외선 조사시 굴절률의 변화를 통한 공명파장 이동의 변화에 대한 측정과 색 변화로 인한 흡수계수의 변화에 대한 측정을 극대화하기 위해 spiroxazine이라는 광변색성 물질을 선택하였다.

광변색성(photochromism)은 외부의 광에너지를 흡수하여 흡수파장이 다른 새로운 물질을 생성하고, 다시 광에너지나 열에 의해 처음 물질 상태로 돌아가는 현상을 말한다.

그림 2는 본 실험에서 평면도파로로 사용된 광변색성 색소 spiroxazine의 분자구조를 나타낸다. A상태(무색)에 광( $h\nu$ )를 인가하면, 여기상태를 거쳐 열역학적으로

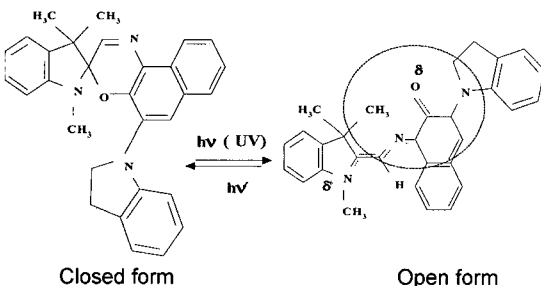


그림 2. Spiroxazine의 분자구조  
 Fig. 2. Molecular structure of spiroxazine.

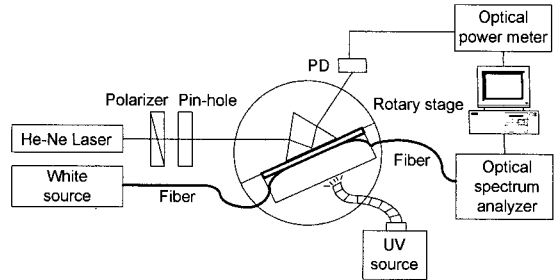


그림 3. 측정장치도  
 Fig. 3. Experimental setup.

로 불안정한 B상태(유색)가 되며 B는 다른 파장의 광( $h\nu'$ )이나 열에너지 등에 의해 가역적으로 다시 A상태로 돌아갈 수 있다<sup>[11,12]</sup>.

본 연구에서는 광변색성 색소가 분산된 폴리머를 평면도파로로 이용하여, 광변색성 색소의 분자구조 변화에 의해 평면도파로의 굴절률과 이에 따른 흡수계수가 변하는 현상을 통해서 공명파장의 변화와 출력 광강도의 변화를 동시에 측정하였다.

### 3. 측정 및 특성

본 연구에서 제안한 자외선 센서의 특성측정을 위한 장치도는 그림 3과 같다.

광섬유 클래드층의 측면을 연마하기 위해서는 광섬유 연마지대<sup>[13]</sup>를 필요로 한다. 측면연마 방법은 석영(quartz)이나 실리콘(Si)등의 연마지대를 이용하여 연마하거나 광섬유자체를 식각용액을 사용하여 화학적 반응을 통해 식각하는 방법<sup>[14]</sup>등이 소개되어 있지만 본 연구에서는 석영블록의 연마 지대대를 이용해 연마하는 방법을 사용하였다. 광섬유-평면도파로 결합기의 effective interaction length는 1~2 mm이며, 광섬유의 결합간격(g)은 4.5  $\mu\text{m}$ 로 연마된 소자를 사용하였다. 백색광원(ANDO 社, model : AQ-4303B)과 광 스펙트럼 분석기(optical spectrum analyzer, Hewlett Packard社, mode : 86140A)를 이용하여 자외선에 의한 공진 파장의 변화를, 그리고 He-Ne Laser(633 nm)와 광검출기(AQ-1135E, ANDO 社)를 이용하여 자외선(ANDO 社, model : SP-V, deep UV lamp)에 의한 ATR의 광 출력 강도의 변화를 측정하였다.

그림 4에서와 같이 센서소자에 자외선 조사강도를 3 mW로 고정하고 자외선의 조사시간을 증가시킬 경우에는 평면도파로의 굴절률 변화로 인한 공명파장의 이동에 대해 0.48 nm/sec의 파장응답을 보였으며, 그림 5에서는 센서의 소자에 자외선 조사강도를 3 mW로 고

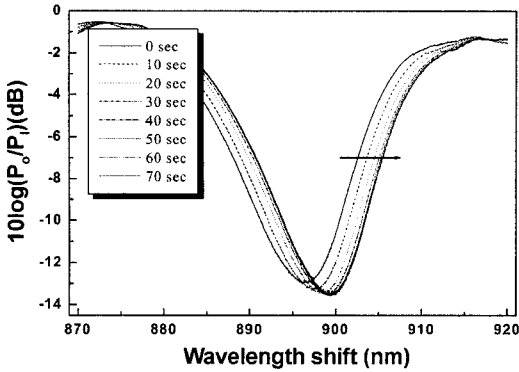


그림 4. 자외선 조사시간의 증가에 따른 투과스펙트럼 (자외선 조사강도 : 3 mW)  
 Fig. 4. Transmittance spectrum by the increase of UV exposure time (UV exposure power : 3 mW).

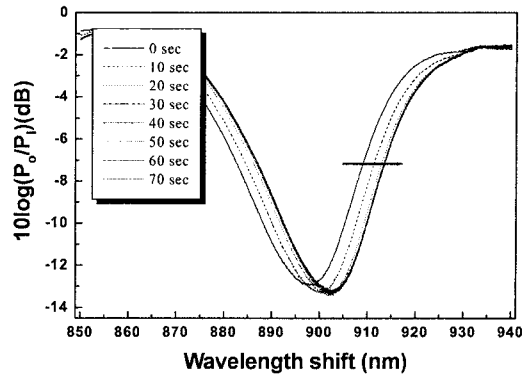


그림 6. 자외선 조사시간의 증가에 따른 투과스펙트럼 (자외선 조사강도 : 5 mW)  
 Fig. 6. Transmittance spectrum by the increase of UV exposure time (UV exposure power : 5 mW).

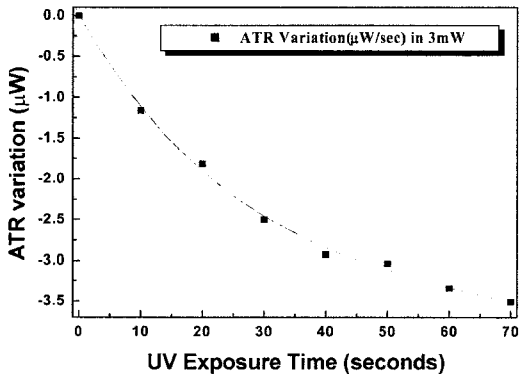


그림 5. 자외선 조사시간의 증가에 따른 출력광강도 특성 (자외선 강도 : 3 mW)  
 Fig. 5. Characteristic of output power by the increase of UV exposure time (UV power : 3 mW).

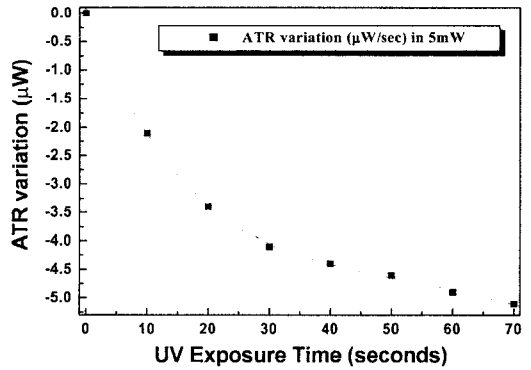


그림 7. 자외선 조사시간의 증가에 따른 출력광강도 특성 (자외선 강도 : 5 mW)  
 Fig. 7. Characteristic of output power by the increase of UV exposure time (UV power : 5 mW).

정하고 자외선 조사시간을 증가시킬 경우 평면도파로의 흡수계수의 변화에 따른 ATR에 의한 출력되는 광 강도의 변화는  $-0.424 \mu\text{W}/\text{sec}$ 의 감도를 얻을 수 있었다.

그림 6은 자외선 조사강도를 5 mW로 고정하고 자외선 조사시간을 증가시킬 경우에 공명파장의 이동은  $0.757 \text{ nm}/\text{sec}$ 의 파장응답을 보였으며, 그림 7에서는 자외선 조사강도를 5 mW로 고정하고 자외선 조사시간을 증가시킬 경우 ATR에 의한 출력되는 광 강도의 변화는  $-0.62 \mu\text{W}/\text{sec}$ 의 감도를 얻을 수 있었다.

그림 8에 나타난 바와 같이 센서에 조사되는 자외선의 강도가 3 mW일 때와 5 mW일 때 자외선 조사시간의 증가에 따른 공명파장의 이동을 비교하여 나타내었다.

두 경우 모두 50초 후에 자외선을 받은 부분이 광적 평형상태(photo-stationary state)에 도달함을 관측할 수

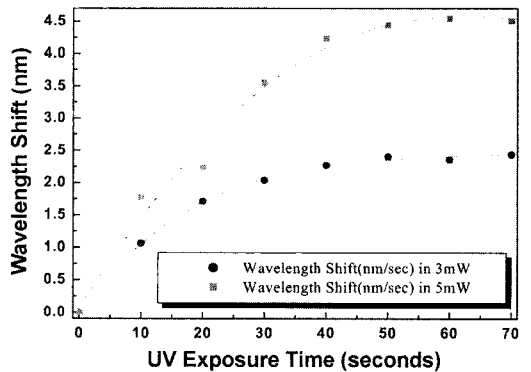


그림 8. 자외선 조사시간의 증가에 따른 공명파장의 변화  
 Fig. 8. Wavelength-shift variation by the increase of UV exposure time.

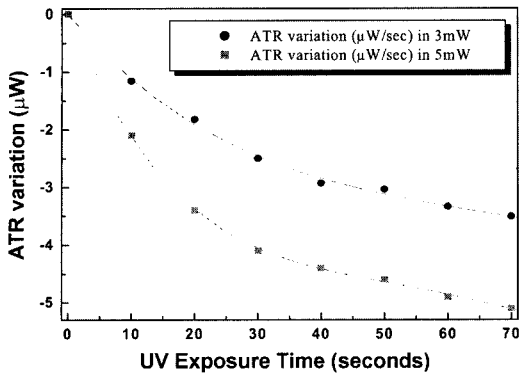


그림 9. 자외선 조사시간의 증가에 따른 ATR출력광 강도의 변화

Fig. 9. ATR output power variation by the increase of UV exposure time.

있었다. 그림 8을 통해 자외선의 조사시간이 같은 경우에는 조사강도가 클수록 공명파장의 변화율도 더욱 증가함을 알 수 있다.

그림 9는 센서에 조사되는 자외선의 강도가 3 mW 일 때와 5 mW일 때 자외선 조사시간의 증가에 따른 ATR에 의한 광 출력 세기의 변화를 비교하여 나타내었다.

두 경우 모두 공명파장이 50 sec 이후에는 광적 평형상태(PSS)에 도달하는 것과는 달리 계속 광 출력의 세기 변화가 관측됨을 확인할 수 있다. 이 그림을 통해 자외선의 조사시간이 같을 경우 조사강도가 클수록 ATR에 의한 광 출력 세기의 변화율도 더욱 증가함을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 측면 연마된 광섬유와 광기능성 색소가 분산된 평면도파로 결합기와 프리즘을 결합하는 새로운 형태의 자외선 센서를 제작하고 그 특성을 측정하였다.

프리즘을 이용한 구조는 기존의 측면 연마형 광섬유 센서의 구조의 개선과 wavelength 및 intensity based method를 동시에 관측해 냄으로써 측정방법의 개선을 이루고자 제시된 구조이다. 평면도파로의 굴절률 변화에 의한 감지에서 의해 이루어지던 센서의 구조가 흡수계수라는 새로운 메카니즘을 더함으로써 보다 정확하고 섬세한 센서로서 적용될 수 있다.

제작된 센서에 대해 자외선 조사강도가 3 mW, 5 mW 인 경우 자외선 조사시간의 변화에 따른 공명파장의 이동과 ATR에 의한 광 출력 세기의 변화를 동시에 측

정해 보았다. 이때 센서의 감도는 파장이동의 변화에 대해서 0.48 nm/sec, 0.757 nm/sec이고, 출력 광강도의 변화에 대해서는  $-0.424 \mu\text{W}/\text{sec}$ ,  $-0.62 \mu\text{W}/\text{sec}$ 로 나타나 동시에 두 가지 변수로 센서의 감도를 얻을 수 있었다. 또한 파장변화의 경우는 모두 50 sec 이후에는 광적 평형상태(PSS)에 도달하는 것을 확인할 수 있었으며, 출력 광 강도에 대해서는 측정되는 범위의 조사시간에 대해 변화됨을 관측할 수 있었다.

기존 측면 연마된 광섬유 자외선센서가 가지는 구조적인 한계를 평면도파로 위에 프리즘의 결합을 통하여 기존 센서가 가지는 좁은 감지영역에서의 동작 범위(dynamics range)를 개선하였으며, 또한 제한된 센서를 이용하여 생화학물질 검출에 가장 대표적 소자인 SPR형 화학/바이오센서로의 적용 가능성을 제시하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음.

#### 참고 문헌

- [1] J. K. Yoon *et al.*, "Side-polished fiber optic pressure sensor based on stress optical property of polymer planar wave-guide", *Sensor & Materials*, vol. 1764, pp. 94 (1993).
- [2] J. M. Topaz *et al.*, "TAUVEX: UV space telescope", *Ultraviolet Technology IV, Robert E. Huffman Editor, Proc. SPIE*, vol. 1764, pp. 94 (1993).
- [3] R. Hillton Biggs *et al.*, Editor, "Stratospheric ozone depletion/UV-B radiation in the biosphere", *NATO ASI Series I*, vol. 18, pp. 3 (1994).
- [4] John Jagger, "Solar-UV actions on living cells", *Praeger Publisher* (1985).
- [5] K. M. Cho and S. W. Kang *et al.*, "A fiber temperature sensor using prism & thermo-chromic planar waveguide materials", *OSK Summer Meeting 2003*, pp. 196-197 (2003).
- [6] D. Marcuse, "Investigation of coupling between a fiber and an infinite slab", *OSA Optics Lett. J.*, vol. 22, no. 8, pp. 567-5669 (1997).
- [7] K. P. Panajotove and Andreev Tz. Andreev, "Distributed coupling between a singlemode fiber and a planar waveguide", *J. of Opt. Soc. Am. B*, vol. 11, no. 5, pp. 826-834, May (1994).
- [8] W. G. Jung, S. W. Kang *et al.*, "High-sensitivity temperature sensor using a side-polished single-mode fiber covered with the polymer planar

waveguide”, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 13, no. 11, pp. 1209-1211 (2001).

[9] N. J. Harrick, “Internal reflection spectroscopy”, *Harrick Scientific Corporation*, New York (1979).

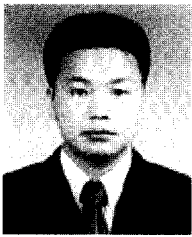
[10] M. D. De Gerandpre *et al.*, “Long path fiberoptic sensor for evanescent field absorbance measurements”, *Anal. Chem.*, vol. 60, pp. 2582-2586 (1988).

[11] J. K. Yoon, K. M. Cho, and S. W. Kang *et al.*, “Controllable in-line UV sensor using a side-polished fiber coupler with photo-functional polymer”, *Photonics Technology Letter*, vol. 15, no. 6, pp. 837-839 (2003).

[12] 김성훈, “기능성 색소”, 경북대학교 출판부 (1994).

[13] A. Andreev, Bl. Pantchev, 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 Films*, vol. 330, pp. 150-156 (1998).

[14] J. K. Yoon *et al.*, “Side-polished fiber optic pressure sensor based on stress optical property of polymer planar wave-guide”, *Sensor & Materials*, vol. 14, no. 4, pp. 219-230 (2002).



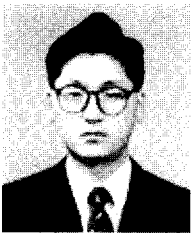
조 감 민

- 2002. 2. 경성대학교 물리학과 졸업 (이학사)
- 2002. 3. ~ 2004. 2. 경북대학교 센서공학과 졸업(공학석사)
- 2004. 1. ~ 현재 에스엔에스텍(S & S TECH.) 기술부 엔지니어
- 주관심분야 : 광섬유센서, 광통신소자, LITHOGRAPHY 반도체 재료



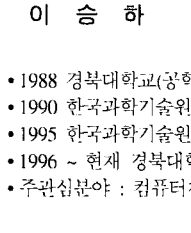
윤 정 현

- 2002. 2. 대구가톨릭대학교 메카트로닉스학과 졸업(공학사)
- 2003년 ~ 현재 경북대학교 센서 공학과 석사과정 재학중
- 주관심분야 : 광섬유형 센서, 광통신소자



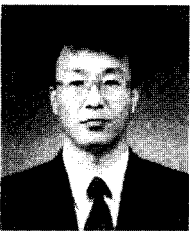
김 응 수

- 1990년 2월 경북대학교 전자공학과 (공학사)
- 1992년 2월 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
- 1996년 3월 일본 게이오대학 이공학연구소 물리과학전공(공학박사)
- 1996년 3월 ~ 1997년 3월 LG 반도체 ULSI연구소
- 2003년 1월 ~ 2003년 11월 일본 게이오대학 초빙교수
- 1997년 3월 ~ 현재 부산외국어대학교 디지털정보공학부 부교수



이 승 하

- 1988 경북대학교(공학사-전자공학)
- 1990 한국과학기술원(공학석사-전기 및 전자공학)
- 1995 한국과학기술원(공학박사-전기 및 전자공학)
- 1996 ~ 현재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 부교수
- 주관심분야 : 컴퓨터제어 및 퍼지제어



강 신 원

- 1978 경북대학교 전자공학과(공학사)
- 1980 영남대학교 전자공학과(공학석사)
- 1993 일본게이오대학교 생체의공학과 졸업(공학박사)
- 현재 경북 대학교 전자전기공학부 부교수
- 주관심분야 : 광소자 및 반도체광학센서