

논문 2004-41SD-6-7

측면연마 광섬유형 자외선센서의 광강도 변화에 따른 감도특성

(Sensitivity Characteristics of Side-Polished Fiber Optic UV Sensor with Optical Intensity Variation)

이 동 록*, 서 규 원**, 윤 중 국**, 조 강 민**, 강 신 원***

(Dong-Rok Lee, Gyoo-Won Seo, Jong-Kuk Yoon, Kang-Min Cho, and Shin-Won Kang)

요 약

광기능성 색소가 분산된 평면도파로 결합기와 측면연마된 광섬유를 이용한 자외선 센서를 제작하여 광강도 변화에 따른 감도특성을 측정하였다. 광변색성 색소인 스피록사진이 분산된 폴리머를 평면도파로로 사용하였다. 조사되는 자외선의 강도와 시간에 의해 유효굴절률이 변화하는 성질을 이용하였다. 자외선 조사시간을 3 초와 5 초로 고정된 상태에서 자외선 조사강도를 점차 증가시켰을 때 센서감도가 각각 $1.21\mu\text{W}/\text{mW}$ 와 $2.75\mu\text{W}/\text{mW}$ 로 나타났다. 자외선 조사 강도에 따른 출력 광강도의 변화를 측정한 결과 자외선 강도가 클수록 출력 광강도도 증가하고 포화시간은 단축됨을 알 수 있었다.

Abstract

A novel UV sensor was manufactured and characterized using evanescent field coupling between photochromic dye dispersed polymer waveguide and side polished fiber. The spiroxazine (photochromic dye) dispersed polymer was used as planar waveguides. The resonant wavelength was shifted owing to refractive index variation of planar waveguide on exposed UV because of its photo-functional properties. The sensitivities are $1.21\mu\text{W}/\text{mW}$ and $2.75\mu\text{W}/\text{mW}$ when UV intensities increased after exposure times were fixed at 3 seconds and 5 seconds, respectively. Output optical power according to UV intensity increases and saturation time decreases as the intensity of UV radiations increases.

1. 서 론

광섬유형 센서는 전기적 간섭에 강하고 높은 감도와 원거리 측정 등의 장점이 있어 이에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 광학소자를 구현하는 방법 중 광섬유를 이용하는 방법은 낮은 삽입손실, 높은 기계적 인 신뢰성, 원거리 측정과 같은 장점을 가지고 있어 광통신기술 뿐 아니라 기초과학 및 응용과학분야의 계측에 활발히 이용되고 있다^[1]. 자외선 감지는 대기 및 천

체관측^[2], 화재감시, 핵발전소, 그리고 기상관측^[3]과 의료분야^[4] 등 다양한 연구 분야 및 산업응用に 관한 관심이 집중되고 있다. 그러나 자외선의 유용성과 유해성을 고려하여, 자외선량 측정에 있어서의 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 광섬유와 평면도파로 사이의 소산장 결합에 의해 출력 광 강도의 변화를 이용한 UV센서에 관한 연구이다. 구조가 서로 다른 두 도파로 사이에서 발생하는 높은 파장 선택성 결합을 이용하였고 감도를 높이기 위하여 광변색성 유기재료가 혼합된 고분자를 평면도파로로 사용하였다. 그러므로 본 센서는 외부의 변화를 평면도파로의 광학적 성질에 의존하는 광섬유형 센서소자의 이점을 활용하며, 기존의 자외선 센서인 광이온화 감지기(gas-photoionization detectors), 광다이오드

* 정회원, 경북대학교 전자공학과
(Department of Electronic Engineering, Kyungpook National University)

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

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

접수일자: 2002년9월22일, 수정완료일: 2004년5월20일

나 광전자증배관과 같은 광전자 방출형 감지기(photoelectric emission detectors)와 CCD와 같은 고체형 감지기(solid state detectors) 등의 무기재료로 만들어지는 형태의 자외선 감지소자는 열적, 화학적 안정성을 갖는 장점이 있으나 제작 공정이 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.

광학적인 방법 특히 광섬유를 이용한 센서는 광소자의 기본적인 장점인 고속, 고감도, 높은 기계적 신뢰성, 전기적 무유도성, 원거리측정 등의 장점을 가지고 있어 광통신기술 뿐 아니라, 기초과학 및 응용과학분야의 계측에 활발히 이용되고 있다. 본 연구에서는 광섬유를 이용한 새로운 개념의 자외선 센서를 제안하고자 한다.

II. 동작 원리

본 연구에서 제작된 센서는 그림 1과 같다. 측면이 코어 가까이 연마된 단일모드 광섬유 위에 다중모드를 가지는 평면 도파로층이 형성되면 두 광 경로 사이에 소산장 결합(evanescent field coupling)이 형성되어 광 에너지 교환이 발생하게 된다^[5,6]

이러한 광섬유-평면도파로 결합기는 방향성 결합기 구조를 가지기 때문에 결합모드이론에 기초하여 동작원리를 설명할 수 있다. 가장 효과적인 광결합은 광섬유의 모드와 평면도파로의 도파모드 사이에 위상정합 조건을 만족할 때 발생한다. 표준 단일모드 광섬유의 코어층과 클래드층의 굴절률 차이는 매우 작으므로 광섬유의 분산(파장에 따른 유효굴절률의 변화)은 매우 미약합니다. 하지만 평면도파로의 분산은 도파로의 코어굴절률과 클래드층의 굴절률로 제어가 가능합니다. 평면도파로의 코어층과 클래드층의 굴절률 차를 크게 하면 높은 분산특성이 얻어지며 특정한 파장에서 위상정합조건, 즉 광섬유 모드의 유효굴절률과 평면도파로의 유효굴절률이 일치하는 조건을 만족하게 됩니다. 위상정합 조건을 만족하는 파장에서 광섬유 모드는 평면도파로 모드에 에너지를 전달하게 되며 광섬유 출력단에서 특정한 파장이 소멸로 나타납니다.

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

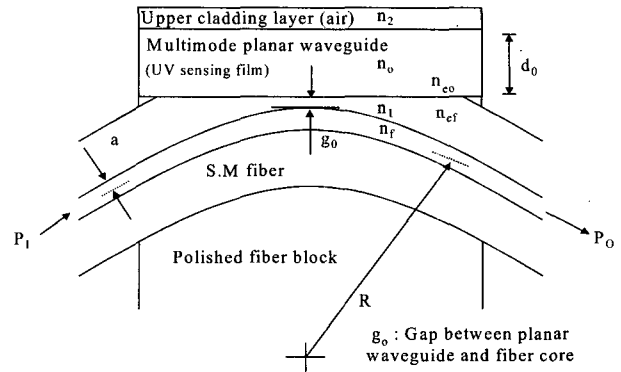


그림 1. 광섬유-평면도파로 결합기의 구조
Fig. 1. Structure of the fiber-to-planar waveguide coupler.

위한 고유치 방정식은 다음과 같다^[7].

$$\frac{2\pi d_0}{\lambda} (n_o^2 - n_{eo}^2)^{1/2} = m\pi + \psi_1 + \psi_2 \tag{1}$$

여기서 m은 모드의 차수를 나타내는 정수, λ는 광의 파장, d₀는 평면도파로의 코어층 두께, n₀는 평면도파로의 코어 굴절률 그리고 n_{eo}는 m번째 고차모드의 유효 굴절률이다. ψ₁과 ψ₂는 평면도파로의 코어층과 클래드층의 경계에서 발생하는 모드의 위상차이로서 다음과 같이 주어진다.

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

ζ는 편광상태에 의존하는 상수로서 TE편광에 대해선 ζ=1, TM편광에 대해선 ζ를 대입하면 된다. n₁은 광섬유의 클래드층의 굴절률인 ζ= n_o²/n_i² 동시에 평면도파로의 하부클래드층의 굴절률이다. 광섬유-평면도파로 결합기가 광결합을 일으키기 위해서는 광섬유의 유효굴절률(n_{ef})과 평면도파로의 유효굴절률(n_{eo})이 일치해야 한다. 평면도파로의 최고차 모드가 가장 작은 유효굴절률을 가지기 때문에 광섬유의 유효굴절률과 가장 근접하게 되고 식(1)에 n_{eo}=n_{ef}을 대입하면 평면도파로 m차 모드에서 공진하는 파장(λ_m)을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\lambda_m = \frac{2 d_0 \pi (n_o^2 - n_{ef}^2)^{1/2}}{m\pi + \psi_1 + \psi_2} \tag{3}$$

한편 광섬유-평면도파로 결합기는 평면도파로의 상,

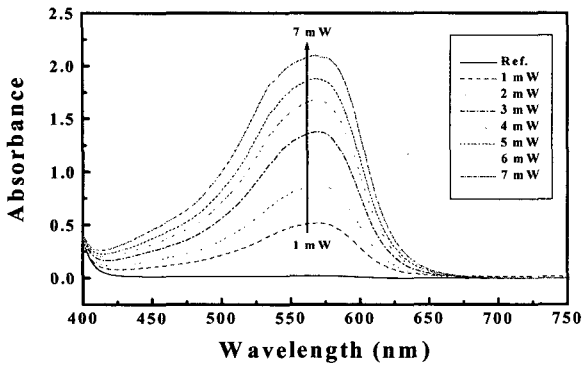


그림 2. 자외선 조사강도에 따른 자외선 감지막의 흡수 스펙트럼

Fig. 2. Absorption spectrum of UV sensing film by UV exposure power.

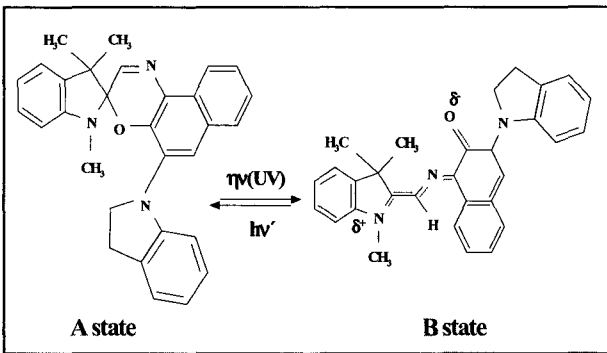


그림 3. Spiroxazine 의 분자구조

Fig. 3. Molecular structure of spiroxazine.

하부 경계에서 TE와 TM모드의 위상차이량이 서로 다르기 때문에 편광의존성이 유발된다. 결합기의 센서응용시 TE응답과 TM응답 중 한쪽 편광만을 관측함으로써 자외선량의 변화에 따른 파장응답을 관측할 수 있다. 광변색성(photochromism)이라 함은 외부의 광에너지를 흡수하여 흡수파장이 다른 새로운 물질을 생성하고, 다시 광에너지나 열에 의해 처음 물질 상태로 돌아가는 현상을 말한다. 대표적인 광변색성 물질로는 Spiropyran, Spiroxazine, Chromene, Fulgide, Diarylethene 등이 알려져 있다. 이러한 광변색성 물질 중에서 Spiroxazine은 이온 계열에 의한 광변색성을 나타내는 대표적인 화합물로 알려져 있으며, 자외선 조사에 의해 중앙 Spiro환이 개환되면서 발색하는 성질을 가지고 있다. 특히 Spiroxazine은 다른 광변색성 물질에 비해 내광성이 우수할 뿐만 아니라 빠른 광 응답 특성을 나타낸다 [8].

본 연구에 사용된 자외선 감지막을 측정용 셀에 스펙트로스코피하여 박막상태로 제작한 후, UV-visible spectro-

photometer(SHIMADZU社, UV-1601)를 이용하여 흡광도의 변화를 측정하였으며, 다음과 같이 흡광도의 변화특성을 나타내었다.

그림 3는 광변색성 색소의 일종인 spiroxazine의 분자구조를 나타낸다. A상태(무색)에 광($h\nu$)를 인가하면, 여기상태를 거쳐 열역학적으로 불안정한 B상태(유색)가 되며 B는 다른 파장의 광($h\nu'$)이나 열에너지 등에 의해 가역적으로 다시 A상태로 돌아갈 수 있다 [9,10].

따라서 본 연구에서는 광변색성 색소가 분산된 폴리머를 평면도파로로 이용하여, 광변색성 색소의 분자구조 변화에 의해 평면도파로의 굴절률이 변하는 현상 [11]을 통해서 특정한 파장에서의 출력 광 강도의 변화를 측정하였다.

III. 소자 제작

광섬유의 측면을 연마하기 위해서는 공정의 용이함을 위해 광섬유 연마지지대 [12]를 필요로 한다. 측면연마 방법은 석영(quartz)이나 실리콘 등의 연마 지지대를 이용하거나 광섬유자체를 식각용액을 사용하여 화학적 반응을 통해 식각하는 방법 [13] 등이 소개되어 있지만 본 연구에서는 석영블록을 이용한 연마지지대를 사용하였다. 연마지지대의 제작은 적당한 크기의 석영블록에 일정한 곡률을 갖도록 제작된 절삭기(mechanical slicer)를 이용하여 V홈을 형성하였으며, 이 연마지지대에 광섬유를 부착하여 연마하는 방법을 선택하였다. 광섬유의 연마는 적절한 곡률 반경과 연마 깊이가 고려된 석영 V홈을 이용하여 제작한 광섬유지지대 위에 광섬유를 에폭시 수지로 접착한 후 연마가루를 이용하여 광섬유의 측면을 연마하였다. 이 때의 곡률 반경은 25cm로 유지하였으며, 이 곡률은 effective interaction length를 1 - 2 mm 정도로 유도하게 된다. 광섬유의 연마 방법은 연마가루와 연마패드를 동시에 이용하였다. 연마가루만을 사용할 경우 연마된 면은 비교적 고른 편이지만 상당한 시간을 요하게 된다. 또한 연마패드만을 이용할 경우 연마시간은 줄일 수 있는 반면 연마된 면이 거칠어 평면도파로막을 형성시키기에 용이하지 않다. 따라서 본 연구에서는 연마가루와 연마패드를 동시에 이용하여 이러한 점을 절충시켰다. 연마가루와 연마패드는 입도가 다른 3종류를 사용하였으며 입도가 거친 면부터 순차적으로 사용하였다. 이 때 일차적으로 He-Ne laser를 광섬유의 한쪽에 입사시킨 뒤 연마된 부분에서 빛이

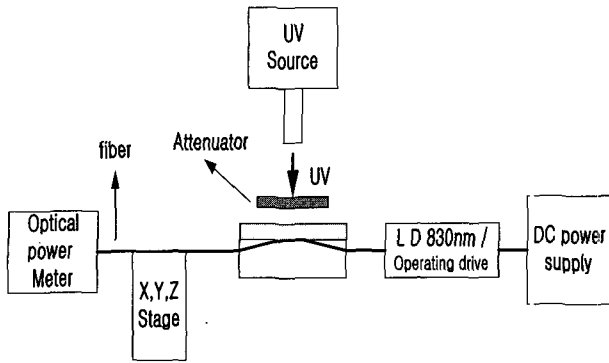


그림 4. 자외선 센서의 측정 장치도
Fig. 4. Experimental Apparatus of UV sensor.

새어 나올 때까지 입자가 굵은 연마가루와 연마패드로 연마한 후 백색광원과 광 스펙트럼 분석기(OSA)를 이용하여 광의 세기를 관찰하면서 입자가 가는 2종류의 연마가루와 연마패드로 연마정도를 조절하였다. 연마과정에서 남은 클래드(잔여 광섬유)의 두께를 측정하는 방법은 연마된 광섬유 표면 위에 정합액을 떨어뜨린 후 발생하는 손실로부터 계산하는 방법이 잘 알려져 있다. 이러한 방법은 기존의 논문을 통해 정량, 정성적^[14]으로 검증되었으며 본 연구에서도 이러한 방법을 사용하였다. 본 연구에서는 연마정도를 측정하기 위해 1.3 μ m 광원을 사용하였으며 연마된 광섬유 위에 정합액을 떨어뜨려 광의 세기변화를 측정하였다. 평면도파로는 광변색성 색소인 spiroxazine이 분산되어 있는 니트로셀룰로오즈(model : op#12, 한국케믹스(주))를 사용하였으며, 연마된 광섬유 위에 스핀코팅 방법으로 형성하여 자외선센서의 제작을 마무리하였다.

IV. 측정 및 특성

자외선 센서의 특성을 측정하기 위한 장치도는 그림3과 같다. 자외선을 조사하였을 때 830nm의 LD(Pmax = 2 mW)를 사용하여 출력 광강도의 변화를 측정하였으며 자외선의 조사시간을 각각 3초와 5초로 고정한 상태에서 자외선의 강도를 점진적으로 증가시키며 광파워미터로 출력광을 측정하였다. 자외선의 조사에는 UV light source(3000 mW/cm², USHIO사)를 사용하여 넓은 광역대의 자외선이 조사될 수 있도록 하였다. 자외선의 조사 강도 조절은 자외선 광원의 말단에 광감쇠기(attenuator)를 부착하여 이 감쇠기를 조절하므로 센서에 인가되는 자외선의 강도를 조절하였다. 평면도파로의 굴절률은 Abbe 굴절계로 측정한 결과 1.501로 나타났다.

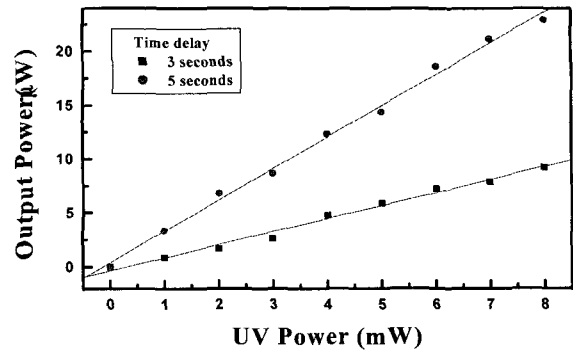


그림 5. 자외선 광강도의 증가에 따른 출력광 파워의 변화
Fig. 5. Output power variations by the increase of UV intensity.

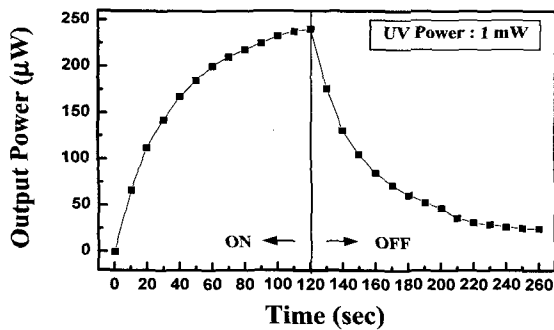
그림 5는 자외선 강도변화에 따른 출력 광파워의 변화를 나타내었다. 자외선 조사시간이 3초일 때의 자외선 센서의 감도는 1.21 μ W/mW이고 5초간 자외선을 조사했을 경우의 감도는 2.75 μ W/mW의 변화를 보였다. 감도의 상관계수(correlation coefficient)는 3초와 5초간 조사했을 경우에 각각 0.9925와 0.9878로 나타나 센서의 감도가 선형적임을 알 수가 있다. 자외선 조사시간이 길수록 센서감도가 증가하는 것은 스파이로카진 폴리머구조에서 스파이로 탄소고리의 개환이 자외선 조사에 비례하여 감응하는 것으로 사료된다.

기존의 발표된 광섬유-평면도파로의 결합기를 이용한 센서의 경우 파장가변형 센서로 광스펙트럼 분석기를 이용하여 감도를 측정하였는데^[15] 이는 더 많은 비용을 요구하므로 본 실험의 측정방법은 적은 비용의 소모로 개선된 센서 감도를 구현하는 장점이 있다.

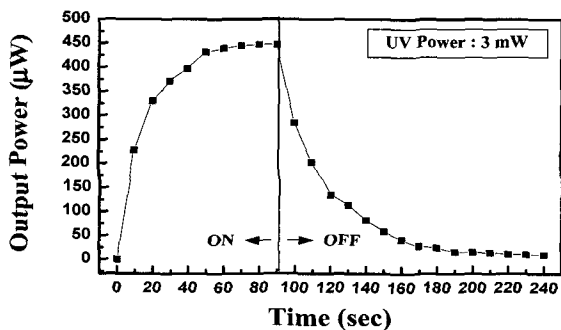
그림 6은 자외선을 1 mW와 3 mW의 조사강도로 조사하여 출력 광파워가 일정하게 포화될 때까지 시간을 측정한 후 조사된 자외선을 제거하여 출력파워가 회복되는 시간을 측정하였다. 그림 6(a)는 자외선 조사강도가 1 mW인 경우 포화시간은 120초인 반면에 그림 6(b)의 3 mW의 자외선이 조사되었을 경우에는 포화시간이 90초로 나타나 UV조사 강도가 증가함에 따라 반응시간이 빨라짐을 알 수 있다. 또한 자외선 조사강도가 증가함에 따라 출력 광파워의 강도도 비례하여 증가하였다. 본 센서는 자외선이 1 mW이하에 대해서는 감지는 가능하나 선형적인 결과를 얻기 위해서 추가 연구가 요구된다.

V. 결론

측면 연마된 광섬유와 광기능성 폴리머 색소가 분산



(a) 자외선 조사강도 : 1mW
(a) UV intensity : 1 mW



(b) 자외선 조사강도 : 3 mW
(b) UV intensity : 3 mW

그림 6. 자외선 조사전후의 포화시간 및 회복시간
(자외선 조사강도 : (a) 1 mW, (b) 3 mW)
Fig. 6. Saturation Time and Recovery Time.
(UV intensity : (a) 1 mW, (b) 3 mW)

된 평면도파로 결합기를 이용하여 새로운 형태의 자외선 센서를 제작하고 그 특성을 측정하였다. 제작된 자외선 센서는 광변색성 색소인 스파이록사린이 분산된 폴리머를 평면도파로로 사용하였다. 이 평면도파로의 굴절률은 1.501로 나타났다. 자외선 조사시간을 3 초와 5 초로 고정한 상태에서 자외선 조사강도를 점차 증가시켰을 때 센서감도가 각각 1.21 μW/mW와 2.75 μW/mW로 나타났고 간도의 상관계수도 0.99 이상의 매우 선형적인 결과를 보였다. 자외선 조사강도를 1 mW와 3 mW로 고정하여 조사한 경우의 포화시간은 각각 120초와 90 초로 나타났다. recovery time은 150초 경과 후 초기상태로 두 경우 모두 복구되었다.

본 논문에서 제안된 센서는 광 파워미터의 광강도 내에서 센서의 특성이 선형적이며 평면도파로의 광학적 성질에 크게 의존하므로 이를 변화할 경우 센서의 감도와 측정범위를 조절할 수 있는 장점이 있어 환경, 의료

및 각종 산업계로의 다양한 응용이 가능하다.

참고 문헌

- [1] J.K.Yoon, S.W.Kim, G.W.Seo, Yun-Sik Yu, Dae-Hyuk Kwon, and S.W.Kang "Side-Polished Fiber Optic Pressure Sensor based on Stress Optical Property of olymer Planar Waveguide", Sensors and Materials, Vol.14, No.4, pp.219-230, 2002.
- [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] D. Marcuse, "Investigation of coupling between a fiber and an infinite slab," IEEE J. of Lightwave Tech, Vol. 7, No. 1, pp. 122-130, Jan. 1989.
- [6] K. P. Panajotove and Andreev Tz. Andreev, "Distributed coupling between a single-mode fiber and a planar waveguide," J. of Opt. Soc. Am. B, Vol. 11, No. 5, pp. 826-834, May 1994.
- [7] W. Johnstone, G. Thursby, D. Moodie, and K. Mc Callion, "Fiber-optic refractometer that utilizes multimode waveguide overlay devices," Optics Lett. Vol 17. No. 21, pp. 1538-1540, Nov. 1992
- [8] 김상우, "광기능성 폴리머 박막 광도파로의 소산장 결합을 이용한 측면연마형 광섬유 자외선 센서", 경북대학교 대학원 센서공학과 석사학위논문, 2002.
- [9] 이상민, "광변색성 Spiroxazine 색소 박막의 광학특성", 경북대학교 대학원 염색공학과 석사학위논문, 1999.
- [10] 김성훈, "기능성 색소", 경북대학교 출판부, 1994.
- [11] J. C. Crano, R. J. Gugliemetti, "Organic Photochromic and Thermochromic Compounds," Plenum Press. New York, Vol. 1, pp. 85-109, 1999.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Ssu-pin Ma and Shiao-min Tseng, "High-performance side-polished fiber and application as

liquid crystal clad fiber polarizers," J. Lightwave Technol., Vol. 15, No. 8, pp. 1554-1558, Aug. 1997.

[15] S.W.Kim, G.W.Seo, J.K.Yoon, K.J.Lee, Y.S.Yu, and S.W.Kang, "Novel UV Sensor Using a Side Polished Single Mode Fiber and Active Planar Waveguide Coupler", Proceedings of the International Sensor Conference 2001, pp.145-146, 2001.

— 저 자 소 개 —



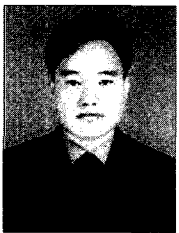
이 동 록(정회원)
1986년 경북대학교 전자공학과 (공학사).
1991년 경북대학교 전자공학과 (공학석사).
1996년 경북대학교 전자전기 공학부 박사 과정 수료.

현재 포항1대학 정보통신과 부교수.
<주관심분야: 광소자및반도체광학센서>



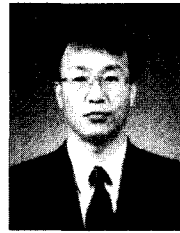
조 강 민(정회원)
2002년 2월 경성대학교 물리학과 졸업(이학사).
2004년 2월 경북대학교 센서공학과 졸업(공학석사).
2004년 1월~현재 에스엔에스텍 기술부 엔지니어

<주관심분야: 광섬유센서, 광통신소자, MEMS>



서 규 원(정회원)
2001년 경일대학교 전자공학과 (공학사).
2003년 경북대학교 센서공학과 (공학석사).

현재 (주)디엠에스 근무
<주관심분야: 광소자 및 광 센서>



강 신 원(정회원)
1978년 경북대학교 전자공학과 (공학사)
1980년 영남대학교 전자공학과 (공학석사)
1993년 일본 게이오 대학교 생체 의공학과 졸업(공학박사)

현재 경북대학교 전자전기공학부 부교수.
<주관심분야: 광소자 및 반도체광학센서>



윤 종 국(정회원)
1993년 2월 충남대학교 재료 공학과 (공학사).
1995년 2월 충남대학교 재료 공학과 2(공학석사).
2002년 8월 경북대학교 센서 공학과(공학박사).

1995년 1월 ~ 1996년 12월 Motorola Korea. Process Engineer.
1997년 3월 ~ 2003년 2월 성덕대학 전자공학과 전임강사
2003년 3월 ~ 현재 코오롱중앙기술원, e-Polymers 연구실 선임연구원.
<주관심분야: 광섬유 광학센서 / Optical MEMS / LCD Color Filter용 유기소재>