

논문 2004-41SD-10-8

단일모드 광섬유의 소산장을 이용한 전류센서

(Current sensor using an evanescent field of single-mode optical fiber)

손 경 략*, 김 형 표**

(Kyung-Rak Sohn and Hyung-Pyo Kim)

요 약

단일 모드 광섬유의 측면을 일부분 연마하여 연마된 상부에 열 광학 폴리머 층과 금속열선을 형성한 광섬유형 전류센서를 보고한다. 금속 열선에 인가된 전류에 의해서 발생하는 저항열은 폴리머 층의 굴절률을 변화시키고 광섬유의 소산장을 통한 광 감쇄를 유도하게 된다. 두 가지 유형의 센서구조를 제안하였고 전류센서로서의 특징을 조사하였다.

Abstract

We report the fiber-optic current sensors composed of a side-polished single-mode fiber with the thermo-optic polymer layer and the metal wire as a heater. The index change of polymer layers caused by the resistant heat of the metal wires induces the optical attenuation through the evanescent field of the side-polished single-mode fiber. Two types of the sensors are proposed and their characteristics as a current sensor are investigated.

Keywords : side-polished fiber, current sensor, evanescent field, thermo-optic effect

I. 서 론

최근 전력설비의 전류를 측정하기 위한 광전류 센서의 개발이 활발히 진행되고 있다. 현재까지 주로 연구된 광전류 센서는 자장에 의해서 유기된 복굴절 또는 광섬유 간섭계에 의한 Faraday 효과를 이용하고 있다.^[1] ²⁾ 본 논문에서는 송전선의 저항에 의해서 발생하는 전선의 열을 이용하여 전류를 측정할 수 있는 새로운 형태의 광섬유 전류 센서를 제안한다.

가설된 송전선은 전선에 따라 저항열에 의한 발열을 고려하여 허용 전류를 제한하고 있으며, 경동연선이나 강심 알루미늄 연속은 최대 허용 온도를 100°C 로 하고 있다.^[3] 송전선에 측면이 일부분 연마된 단일모드 광섬유를 열 광학 폴리머로 결합하면 송전선의 저항열에 의한 폴

리머의 굴절률 변화가 일어나서 광섬유의 소산장에 의한 광 전력 감쇄를 유도하므로 전류의 변동 또는 전선의 단락 등을 감시할 수 있다. 그러나 광섬유에서 소산장(evanescent field)은 클래딩과 코어의 경계에 존재하므로 외부 섭동에 영향을 받을 수 있게 하기 위해서는 광섬유 클래딩의 일부를 제거하여 연마된 표면으로 노출되게 하여야 한다. 이때 광섬유의 측면을 일부분 연마하여 클래딩을 제거하는 측면연마 방법이 많이 이용되고 있다.^[4-8] 이 방법은 비교적 간단하게 소자를 제작할 수 있으므로 광통신용 소자 개발이나 광 특성을 관찰하기 위한 다양한 응용분야에 적용되고 있다. 특히 침수여부^[4], 온도^[5], 굴절률^[6], 금속 박막의 두께^[7], 습도^[8] 등의 측정을 위한 센서에 활용하기 위한 연구결과가 최근까지 발표되고 있다.

본 논문에서는 측면 연마된 광섬유 상부에 광섬유의 코어보다 굴절률이 높은 물질을 도포하여 광 감쇄를 유도하는 구조와 상부층을 평면 도파로로 형성하여 광섬유 도파로와 광 결합을 유도하는 두 가지 유형의 구조를 제안하였으며 동작원리와 특징을 비교하였다. 또한, 전류 변화에 대한 출력 광의 민감도를 비교함으로써 전

* 정희원, 한국해양대학교 전파정보통신공학부
(Division of Radio and Information communication Eng., Korea Maritime University)

** 정희원, 상주대학교 전자전기공학부
(Division of Electronic and Electrical Eng., Sangju National University)

접수일자: 2004년3월31일, 수정완료일: 2004년9월24일

류의 변화 범위에 대응하는 적합한 구조를 선택적으로 설계할 수 있음을 보였다.

II. 소자설계 및 제작

1. 소자설계

제안된 광섬유형 전류센서의 개략도를 그림 1에서 보여주고 있다. 그림 1(a)는 센서의 전체적인 구성도이다. 측면 연마된 단일모드 광섬유를 포함하는 블록, 그 상부에 형성된 상부층, 전류를 흘리기 위한 금속 열선으로 구성되어 있다. 정 전류원을 이용하여 금속열선으로 전류가 흐르도록 하고 광섬유 각각의 끝단에 광원과 광 검출기(또는 계측기)를 설치하여 소자의 응답 특성을 측정할 수 있게 하였다. 금속열선에 의한 광섬유 블록 상부층의 굴절률 변화를 유도하는 방법에 따라 다음의 두 가지 유형으로 설계하였다.

가. 상부층으로 벌크형 폴리머가 형성된 전류센서

제안된 센서의 구조는 그림 1(b) 와 같다. 측면 연마된 광섬유의 표면에 굴절률 n_{ex} 를 가지는 물질을 도포하게 되면 공기중에 노출되어 있을 때와 비교하여 출력 광 세기의 변화가 일어난다. 즉, 소산장에 의하여 연마된 광섬유의 표면에 형성된 매질로 광 전력의 일부가 산란되므로 광 감쇄가 발생한다. 이때 광섬유의 광 감쇄(α)는 다음의 식으로부터 계산되어진다.^[9]

$$\alpha [dB] = 10 \cdot \log_{10}(e) \cdot \sqrt{\pi R a} \cdot \frac{4\beta_0}{n_d^2 k_0^2} \left[\frac{u}{a V K_1^2(w)} \right]^2 \cdot \frac{V_{ex}^2 - w^2}{V_{ex}^2} \cdot \int_0^1 \left[\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{[(V_{ex}^2 - w^2)\xi^2 + w^2]^{1/4}} \cdot \exp\left(\frac{-2d}{a} \sqrt{(V_{ex}^2 - w^2)^2 + w^2}\right) \right] d\xi \quad (1)$$

여기서 $a, K_1, k_0, \beta_0, u, w, V, V_{ex}$ 는 각각 광섬유 코어의 반지름, 1차 제2종 변형 Bessel 함수, 광원의 자유 공간 파수, 광섬유의 전파상수, 정규화된 광섬유의 코어와 클래딩의 횡방향 전파상수, 광섬유의 정규화 주파수, 상부층 매질의 정규화 주파수를 나타낸다.

계산에 사용된 단일 모드 광섬유는 4.2 μ m의 코어 반경, 1.444 클래딩의 굴절률, 0.004 비 굴절률차를 갖는다. 연마 후 남은 클래딩의 두께(s_0)에 대하여 상부층의 굴절률 변화가 일어났을 때 측면연마 광섬유의 광 손실

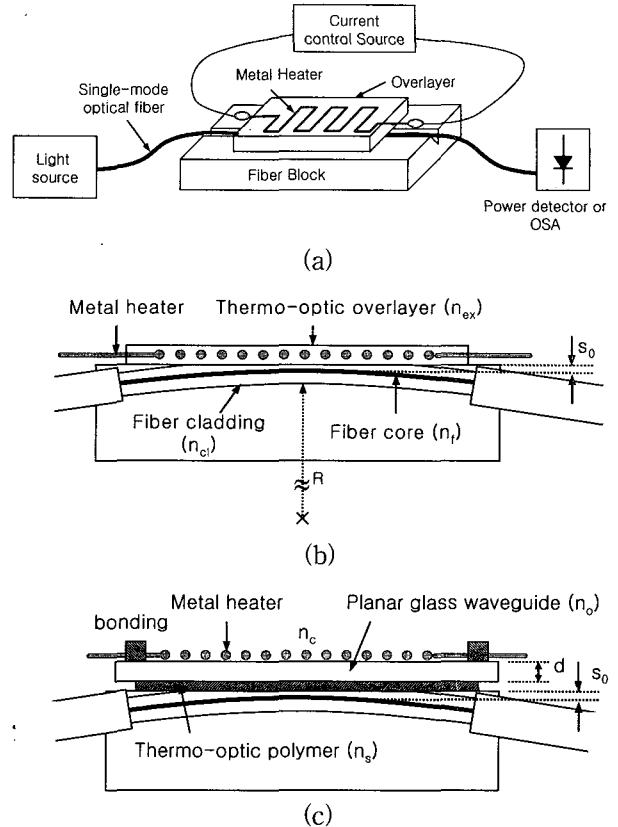


그림 1. 단일모드 광섬유형 전류센서 : (a) 제안된 전류센서 개략도, (b) 벌크형 폴리머 층을 가진 센서의 단면도, (c) 유리 평면도파로를 가지는 센서의 단면도

Fig. 1. Current sensor based on a single-mode optical fiber : (a) Schematic of the proposed current sensor, (b) Longitudinal section view of the sensor with thermo-optic layer, and (c) Longitudinal section view of the sensor with planar glass waveguide.

특성은 그림 2와 같다. 상부층 매질의 굴절률이 감소하거나 클래딩의 두께가 얇아질수록 광 감쇄량이 증가한다. 상부층 매질의 굴절률이 광섬유 코어의 유효굴절률과 같아지는 조건에서는 광 감쇄가 최대로 나타나고 있으며 연마된 깊이에 따라 달라짐을 알 수 있다. 그러므로 소자의 삽입 손실을 고려하여 적절한 s_0 를 선택한다면 금속열선의 저항열에 의한 상부층의 굴절률 변화를 유도하여 전류센서로 응용할 수 있다.

나. 유리 평면도파로가 상부층에 형성된 전류센서

제안된 센서의 구조는 그림 1(c) 와 같다. 측면 연마된 광섬유의 상부에 평면 도파로를 형성하게 되면 광섬유 코어의 LP₀₁ 모드는 유효 굴절률이 일치하는 평면 도파로 모드와 광 결합을 하게 된다. 상부층이 다중 모드 도

파로일 경우 주기적인 광 결합이 일어나는 필터 특성을 얻을 수 있으며 광 결합 파장은 다음의 식으로부터 구할 수 있다.^[10]

$$\frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{n_o^2 - n_{eo}^2} = m\pi + \tan^{-1}\xi \sqrt{\frac{n_{eo}^2 - n_c^2}{n_o^2 - n_{eo}^2}} + \tan^{-1}\xi \sqrt{\frac{n_{eo}^2 - n_s^2}{n_o^2 - n_{eo}^2}} \quad (2)$$

여기서 λ 는 광 결합이 일어나는 파장, n_o, n_{eo} 는 상부 평면 도파로의 굴절률과 유효 굴절률, n_c, n_s 는 평면 도파로의 상부와 하부 클래딩 굴절률, d 는 평면도파로의 두께, m 은 모드차수, ξ 는 편광 의존성을 나타내는 항이다. 식 (2)로부터 평면 도파로의 상·하부 클래딩의 굴절률 변화에 따른 광 결합 파장의 이동정도를 구해낼 수 있으며 식 (3)으로 표현된다.

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_0^2(\phi_i - \phi'_i)}{2\pi d(\sqrt{n_o^2 - n_{ef}^2} - \lambda_0(\phi_i - \phi'_i))}, \quad i = c, s \quad (3)$$

여기서 ϕ_i 는 평면 도파로의 상하부 클래딩의 굴절률이 n_i 인 조건에서의 위상 천이량, ϕ'_i 은 평면 도파로의 상하부 클래딩의 굴절률이 n'_i 으로 변했을 때의 위상 천이량을 의미하며 다음 식으로 표현된다.

$$\phi_i - \phi'_i = \tan^{-1}\left(\xi \sqrt{\frac{n_{eo}^2 - n_i^2}{n_o^2 - n_{eo}^2}}\right) - \tan^{-1}\left(\xi \sqrt{\frac{n_{eo}^2 - (n'_i)^2}{n_o^2 - n_{eo}^2}}\right) \quad (4)$$

상부 평면 도파로의 상·하부 클래딩의 굴절률 변화에 의한 도파로 경계면에서의 위상 천이 차만큼 결합 파장이 이동하게 된다. 그러므로 그림 1 (c)와 같이 평면도파로 상부에 위치한 금속 열선의 저항열로 하부 클래딩의 굴절률을 제어한다면 전류 센서로 응용할 수 있다.

2. 소자제작

단일모드 광섬유의 측면 일부분만 연마하기 위하여 직육면체의 유리블록(2.5×1.0×0.5[cm])에 25cm의 곡률 반경을 가지는 홈을 만든 후 피복이 일부분 제거된 광섬유를 홈 내부에 위치시키고 UV 경화 폴리머를 이용하

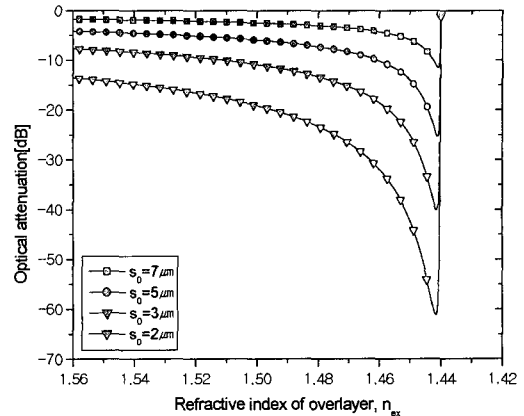


그림 2. 상부층의 굴절률 변화에 따른 광 전력 손실 (계산치)

Fig. 2. Optical power loss according to the index change of the overlayer. (calculated)

여 고정시킨다. 광섬유는 그림 1 (b) 또는 (c)와 같이 가운데 부분이 볼록한 구조가 되고 이 부분의 클래딩이 연마에 의해서 먼저 제거되기 시작하므로 광섬유 클래딩의 일부분만 효과적으로 연마할 수 있다. 연마 후 남은 클래딩의 두께는 소자의 삽입손실과 민감도에 영향을 미치게 된다. 클래딩의 두께를 얇게 한다면 광섬유 코어의 소산장이 상부층의 굴절률 변화에 민감하게 변하지만 소자의 삽입 손실이 커진다. 한편 삽입손실을 줄이기 위하여 클래딩의 두께를 두껍게 남기면 민감도가 떨어지므로 소자 설계 및 제작시 고려되어야 한다. 본 논문에서는 남은 클래딩의 두께가 2-3μm 정도로 유지되게 제작하였는데, 삽입손실을 최소화하면서 전류 센서로서 사용할 수 있는 민감도를 얻을 수 있음을 그림 2의 계산된 결과로부터 알 수 있다. 센서제작은 상부층의 구조에 따라 다음의 두 가지 형태로 제작하였다. 첫 번째 제작된 소자는 그림 1(b)와 같이 열 광학 폴리머를 연마된 광섬유 볼록 상부에 벌크형으로 도포한 후 금속 열선을 도포된 폴리머 내부에 고정시킨 형태이다. 열 광학 폴리머는 굴절률이 1.542 (@1310nm)이고 열 광학 계수가 $\sim -2 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ 인 광 집착체를 사용하였고, 금속열선은 0.5mm 직경의 니켈-크롬 합금 열선(도체 저항 5.7Ω/m)을 사용하였다. 두 번째 소자는 그림 1(c)와 같이 연마된 광섬유의 상부에 평면 유리 도파로를 결합시키고 두 도파로 사이에 존재하는 공기층을 열 광학 폴리머로 채워 UV 경화시켜 제작하였다. 평면 유리 도파로는 170μm 두께의 현미경용 덮개 유리를 사용하였고 열 광학 폴리머와 금속 열선은 위와 동일한 종류를 사용하였다.

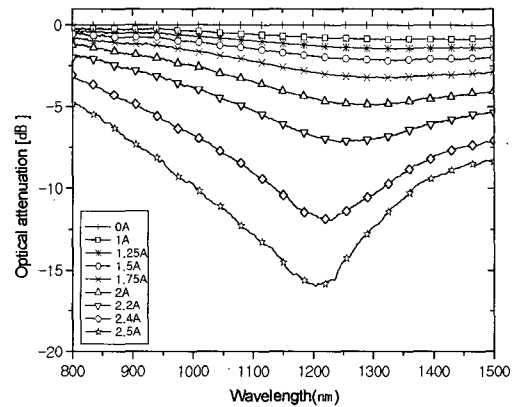
III. 실험 및 고찰

그림 1(b) 와 1 (c)의 두 가지 형태의 소자 구조에 대한 전류센서로서의 특징을 비교하였다. 그림 3은 벌크형 상부 폴리머 층을 가진 센서의 인가전류에 대한 광손실 측정 결과이다. 인가전류의 증가에 따라 금속 열선의 저항열이 증가함으로서 음의 열 광학 계수를 가지는 폴리머 층의 굴절률은 감소한다. 따라서 광섬유의 연마된 영역에서 상부층으로 산란되는 광 전력이 많아져서 광섬유의 출력단에 검출되는 광 전력은 감소한다. 상부층으로 사용된 폴리머의 굴절률 분산식은 다음과 같이 주어지며 파장의 함수임을 알 수 있다.^[11]

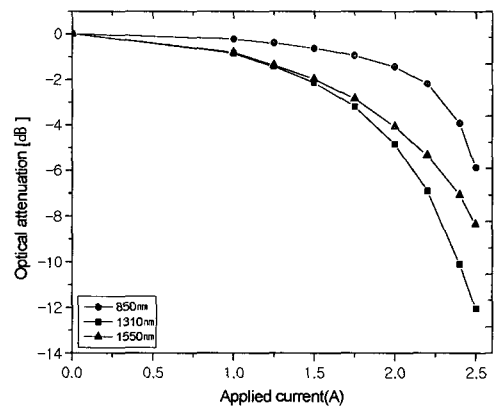
$$n_{25^\circ\text{C}} = 1.5375 + \frac{8290.4}{\lambda^2} - \frac{2.11046 \times 10^8}{\lambda^4} \quad (5)$$

폴리머의 재료분산으로 인하여 광 투과 스펙트럼은 그림 3 (a)과 같이 파장에 따라 광 손실 정도가 달라진다. 그리고 전류가 증가함에 따라 폴리머의 굴절률이 감소하여 광 감쇄가 증가함을 알 수 있다. 통신용 광원의 세 가지 파장 영역인 850, 1310, 1550nm의 파장에 대한 전류변화 측정 민감도를 그림 3(b)에 나타내었다. 1310nm 파장에서 민감도가 좋은 전류 센서를 구현할 수 있다. 그러나 그림 2의 계산된 결과로부터 인가전류가 일정 수준이하인 영역에서는 굴절률 변화에 대한 광 감쇄가 많이 발생하지 않음을 알 수 있다. 본 실험에서는 1A이하의 인가 전류에 대해 광 출력 변화가 크지 않았으며, 1A이상의 전류에 대해서는 ~0.6dB/100mA의 민감도를 가졌고 계산된 결과와 유사한 경향을 보임을 알 수 있다. 그러므로 저 전류를 측정하기 위한 센서보다는 고 전류 측정을 위한 센서로 활용할 수 있다.

그림 4 는 유리 평면 도파로를 상부층에 구현한 전류 센서의 출력 특성을 보여준다. 170 μm 두께의 유리 평면 도파로의 분산 특성으로 1310nm 파장영역에서 광섬유 코어의 유효 굴절률과 일치하는 모드차수(m)는 100차 이상의 고차모드들이다.^[4] 그림 4 (a)와 같이 평면 도파로의 각각의 모드들이 광섬유의 LP₀₁모드와 결합하므로 주기적으로 반복되는 필터 특성을 보인다. 결합 파장에서 광섬유의 광 전력은 상부 도파로로 전달되며 스펙트럼상에서 골로 나타난다. 지그 재그형 금속 열선에 전류를 인가하면 저항열이 발생하고 유리 평면 도파로와 광섬유 블록 사이에 형성된 열 광학 폴리머 층에 전달된다. 일반적으로 유리의 열 광학 계수는 $\sim 10^{-5}$ 이상이며 양의 값을 가지므로 출력 특성에 미치는 굴절률 변



(a)



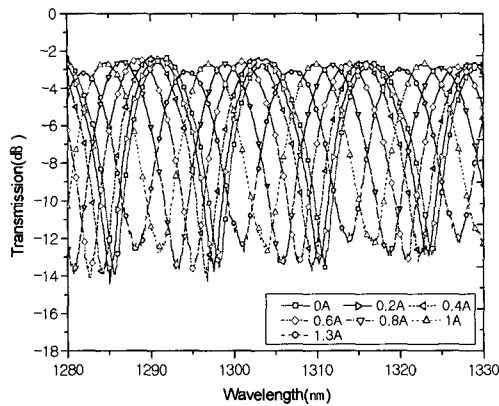
(b)

그림 3. 벌크형 상부 폴리머층을 가진 전류 센서의 광 응답 특성 (주위온도: 20 $^\circ\text{C}$) : (a) 전류 변화에 대한 광 손실 스펙트럼, (b) 광원의 파장에 따른 전류 센서의 민감도

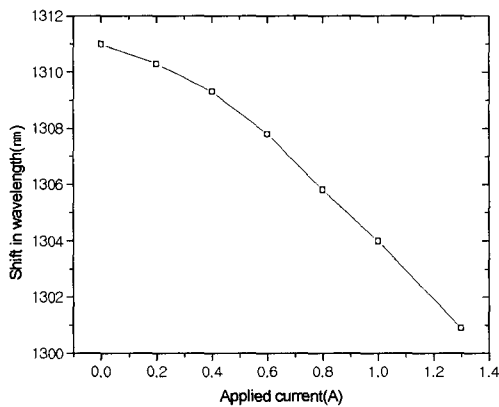
Fig. 3. Measured optical loss of the current sensor with a bulky polymer overlayer (ambient temp.: 20 $^\circ\text{C}$) : (a) Optical loss for the applied current variation and (b) Sensitivity of the current sensor for the wavelength of the light source.

화는 무시할 수 있는 수준이다. 금속 열선의 전류량에 따른 결합파장의 이동은 열 광학 폴리머의 굴절률 변화에 의존하게 되므로 음의 열광학 계수에 의해 단파장으로 이동한다. 결합파장의 이동 정도는 전류의 양에 비례함을 그림 4(b)에서 보여준다. 1A 미만의 전류에 대하여 0.77nm/100mA의 민감도를 가며 선형적으로 변하는 특징을 가진다. 그림 1(b)의 구조를 가지는 센서의 출력 특성과 비교하였을 때 저 전류 측정이 가능한 소자로 응용할 수 있다.

본 논문에서 사용한 도체저항인 니켈-크롬 합금선은 2A 정도의 전류에서 100 $^\circ\text{C}$ 이상의 열이 발생하였다. 제



(a)



(b)

그림 4. 평면 유리 도파로 층을 가진 전류 센서의 광 응답 특성 (주위온도: 20°C) : (a) 인가전류에 대한 파장 응답 특성, (b) 인가전류에 대한 결합 파장의 이동

Fig. 4. Measured optical response of the current sensor with a planar glass overlayer (ambient temp.: 20°C): (a) Wavelength response for the applied current and (b) Shift in coupling wavelength for the applied current.

작된 소자의 동작 온도는 폴리머의 동작 온도에 의해서 결정되며 최고 125°C 정도이다. 그러므로 실제로 가설된 송전선에서도 폴리머 동작 온도범위내의 발열이 존재하는 곳에 설치한다면 효과적으로 전류량이나 전류변동 여부를 관측할 수 있을 것이다.

IV. 결 론

측면 연마된 단일모드 광섬유를 이용한 전류센서를 설계하고 제작하였으며, 금속 열선에서 발생하는 저항 열과 열 광학 효과가 큰 폴리머 물질을 이용하여 전류

센서로 활용할 수 있음을 보였다. 전류 센서는 연마된 광섬유 블록의 상부층에 형성된 구조에 따라 두 가지로 제작하였으며 출력 특성을 비교하였다. 상부층을 열 광학 폴리머를 이용하여 벌크형으로 제작한 경우 폴리머의 굴절률 변화에 대한 광섬유의 광 감쇄 정도로부터 전류를 측정할 수 있었으며 고 전류에 대해 민감도가 우수하게 측정되었다. 유리 평면 도파로를 상부층에 형성한 경우 두 도파로 사이의 광 결합으로 인하여 주기적으로 반복되는 필터 특성을 얻었으며, 금속열선의 저항열에 의한 광 결합파장의 이동으로부터 전류를 측정할 수 있었고 저 전류에서도 높은 민감도를 보였다.

향 후 본 논문에서 제안한 측면 연마 광섬유형 전류 센서를 송전 및 변전 시스템의 전선에 직접 설치하여 전류변동이나 단선 등의 감시에 적용할 수 있는 연구를 수행할 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] A. H. Rose, S. M. Etzel, and K. B. Rochford, "Optical fiber current sensors in high electric field environments," *J. Lightwave Technol.*, vol. 17, no. 6, pp. 1042-1048, 1999.
- [2] D. Tang, A. H. Rose, G. W. Day, and S. M. Etzel, "Annealing of linear birefringence in single-mode fiber coils: application to optical fiber current sensors," *J. Lightwave Technol.*, vol. 9, no. 8, pp. 1031-1037, 1991.
- [3] 송길영, *송배전공학*, 동일출판사, p.46, 1999.
- [4] K. R. Sohn, K. T. Kim, and J. W. Song, "Optical fiber sensor for water detection using a side-polished fiber coupler with a planar glass-overlay-waveguide," *Sensors and Actuators A*, 101, pp. 137-142, 2002.
- [5] W. G. Jung, S. W. Kim, K. T. Kim, E. S. Kim, and S. W. Kang, "High-sensitivity temperature sensor using a side-polished single-mode fiber covered with the polymer planar waveguide," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 13, pp. 1209-1211, 2001.
- [6] K. R. Sohn, J. W. Song, and H. P. Kim, "Polarization insensitive fiber-optic refractometer based on a side-polished fiber coupler with a thick glass waveguide", *J. Opt. Soc. Korea*, vol. 6, no. 3, pp. 117-122, 2002.
- [7] K. T. Kim, J. H. Hwang, J. O. Lee, J. P. Mah, C. H. Kim, and S. Hwangbo, "Investigation on the optical properties of side-polished fiber contacted with planar waveguide including a thin metal film," *Opt. Eng.*, vol. 42, no. 3, pp.

- 675-681, 2003.
- [8] F. P. Corera, A. Gaston, and J. Sevilla, "Relative humidity sensor based on side-polished fiber optic," *Pro. of IEEE IMTC*, vol. 1, pp. 17-22, 2000.
- [9] S. -P. Ma and S. -M. Tseng, "High-performance side-polished fibers and applications as liquid crystal clad fiber polarizers," *J. Lightwave Tech-nol.*, vol. 15, no. 8, pp. 1554-1558, 1997.
- [10] D. G. Moodie and W. Johnstone, "Wavelength tu-nability of components based on the evanescent coupling from a side-polished fiber to a high-index-overlay waveguide," *Opt. Lett.*, vol. 18, no. 12, pp. 1025-1027, 1993.
- [11] <http://www.gentec.be/noa61.htm>

 저 자 소 개



손 경 락(정회원)

 1992년 경북대학교 전자공학과
 학사 졸업.

 1995년 경북대학교 전자공학과
 석사 졸업.

 2002년 경북대학교 전자공학과
 박사 졸업.

1992년~1993년 현대전자 산업전자연구소

1995년~1999년 현대자동차 울산연구소

 2003년~현재 한국해양대학교 공과대학 전파정보
 통신공학부 전임강사

<주관심분야: 광통신소자, 광섬유센서>



김 형 표(정회원)

 1992년 경북대학교 전기공학과
 학사 졸업.

 1994년 경북대학교 전기공학과
 석사 졸업.

 1998년 경북대학교 전기공학과
 박사 졸업.

1996년 보국전기공업(주) 기술연구소

 1998년~현재 상주대학교 공과대학 전자전기
 공학부 부교수

<주관심분야: 센서, 디스플레이>