

Faraday Rotator Glass 광섬유 전류센서

(Fiber-Optic Current Sensor Using a Faraday Rotator Glass Fiber Sensor Coil)

김기혁* · 송민호

(Kee-Hyuck Kim · Minho Song)

요 약

전력계통 시스템의 대전류 측정용으로 편광 분석형 광섬유 전류센서를 제작하였다. 선형복굴절에 의한 출력의 왜곡을 최소화하기 위하여 FRG 광섬유를 센서코일로 사용하였으며, 다양한 광원을 이용하여 광원에 따른 출력 노이즈 비교분석을 수행하였다. FRG 광섬유 센서코일에 기계적 변형을 인가한 경우 $\pm 0.4\%$ 이내의 출력안정도를 얻었으며, ASE 광폭 광원을 사용할 경우 단일모드 레이저에 비해 23[dB] 정도의 노이즈 감쇄 효과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

Abstract

We developed a fiber-optic CT for large current monitoring in power systems. We used a FRG fiber sensor coil to suppress CT output degradation caused by linear birefringence, and different optical sources were used to compare their noise characteristics. From the experiments, we obtained output variation less than $\pm 0.4\%$ when the sensor coil suffered mechanical perturbations, and the ASE source showed ~ 23 [dB] less noise in the output than singlemode laser diode.

Key Words : Fiber-optic CT, Faraday Rotator Glass, Flint glass fiber, ASE BBS, Linear birefringence

1. 서 론

최근 전력설비의 안정적인 운용을 위한 보호계전 시스템에서 광학적 방식의 CT(Current Transformer)가 많은 관심을 받고 있다. 광학 매질의 전기적 무유도성, 절연성이 초고전압, 대전류 계측에 있어서 신뢰성, 안정성, 경제성 등의 많은 장점을 가지고 있기 때문이다[1]. 철심 코어를 사용하는 기존 전자기 유도식 CT는 계통의 고전압화에 따라 규모가

큰 절연설비가 필요하며 그에 따른 유지, 보수 비용이 증가하고 절연 오일이나 SF6 가스 등에 의한 환경오염의 가능성을 가진다. 또한, 철심 코어의 사용으로 인한 자기포화나 잔류자속 등에 의하여 사고발생 시 출력이 왜곡될 수 있다. 이에 비하여 광 CT는 전류원에 의해 발생된 자기장의 세기에 비례하여 빛의 편광축이 회전하는 Faraday 효과를 이용하는 것으로, 자기포화나 잔류자속이 없고 소형경량 구조가 가능하며 2차 개방 등의 위험이 없어 초고압 시스템의 전류측정에 매우 좋은 특성을 가진다. 광 CT는 센서 매질에 따라 광섬유를 이용하는 광섬유형과 강자성체인 YIG, RIG 결정 등을 이용하는 벌크형으로 구분되며, 측정 방법에 따라서는 편광축 회전정도를 분석하는 편광분석형과[3] 서로 반대 방향으로 진행

* 주저자 : 전북대학교 전자정보공학부 석사과정

Tel : 063-270-4285, Fax : 063-270-2394

E-mail : kkh0775@hanmail.net

접수일자 : 2004년 7월 7일

1차심사 : 2004년 7월 7일

심사완료 : 2004년 7월 8일

하는 두 신호의 위상 차이를 분석하는 간섭계형이 있다[2]. 간섭계법은 측정 정밀도가 높으나 구성이 복잡하고 비용이 큰 반면 편광분석법은 구성이 간단하고 저렴하여 보호계전 시스템의 대전류 측정용 CT에 적합하다. 본 논문에서는 광섬유를 센서코일로 이용하는 광섬유형 편광분석법으로 광 전류센서를 구성하였다.

광섬유형 CT는 벌크형에 비하여 페루프를 구성하기가 용이하여 출력이 안정적이며 민감도와 측정 범위 조절이 용이한 장점을 가지지만 광섬유에 잔존하는 선형복굴절에 의한 센서 출력의 왜곡이 실용화의 큰 어려움이다[4]. 선형복굴절 영향을 최소화하기 위한 방법으로 twisted 광섬유[5], annealed 광섬유[6], low-birefringence 광섬유 등 특수한 광섬유를 이용하는 방법들이 제시되어 왔으며 본 논문에서는 광섬유에 납을 첨가하여 광탄성 계수(photo-elastic coefficient)를 매우 작게 만든 FRG(Faraday Rotator Glass) 광섬유를 센서코일로 사용하여 선형 복굴절의 영향을 최소화 하고자 하였다[7][8]. FRG 광섬유의 낮은 광탄성 계수에 따른 선형복굴절 감쇄효과를 확인하기 위하여 FRG 광섬유와 단일모드 광섬유로 센서코일을 구성한 후 기계적인 변형을 가하면서 센서출력에 미치는 영향을 비교분석하였다. 실험결과로부터 FRG 광섬유가 단일모드 광섬유에 비하여 매우 높은 출력 안정성과 민감도를 보여 센서코일로서 우수한 특성을 가짐을 확인할 수 있었다. 또한, 광원의 코히어런스(coherence) 정도에 따른 센서 출력의 노이즈 특성을 비교하기 위하여 광폭 광원(broadband source, BBS)과 단일모드, 다중모드 레이저 등을 광원으로 사용하여 출력의 안정화 정도를 비교 분석하였다.

2. 편광 분석법

그림 1과 같이 편광기를 거친 선형 편광이 광섬유를 지날 때 자기장의 세기에 비례하여 선형 편광축이 회전하며 출력단에 검광기를 두어 편광축의 회전각(ρ)을 분석하고 이로부터 전류의 세기를 측정하는 것이 편광 분석형 전류측정 방법이다. Faraday 회전각과 전류의 관계는 아래 식과 같이 표현된다.

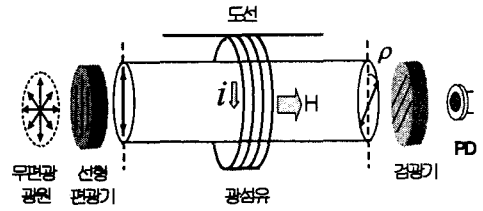


그림 1. 편광 분석법을 이용한 전류측정
Fig. 1. Current measurement using polarimetric analysis

$$\rho = u_0 V \oint H \cdot dl = VNI \quad (1)$$

(u_0 : Faraday 매질의 유전율, V : Verdet 상수, H : 자기장의 세기, N : 광섬유의 감은 수, I : 전류)

Faraday 회전각(ρ)은 식 (1)과 같이 광학 매질이 자기장에 반응하여 Faraday 효과를 일으키는 정도를 나타내는 값인 Verdet 상수 u_0V (rad/A)와 자기장의 세기(H)에 비례하는 함수로 표현되며 센서코일을 폐회로로 구성한 경우 Verdet 상수, 광섬유의 감은수 (N), 도선에 흐르는 전류의 세기(I)에 비례하는 함수로 정리할 수 있다.

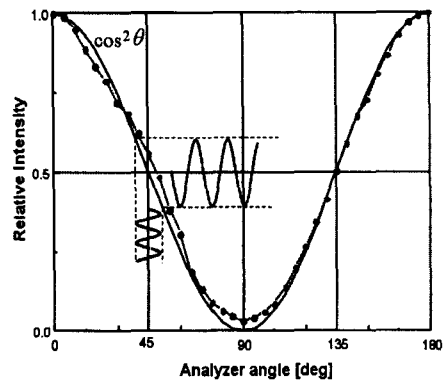


그림 2. 검광기의 상대각도에 따른 출력의 민감도
(실선 : 이론 값, 포인트 : 측정 값)
Fig. 2. Sensitivity according to analyzer angle

선형 편광기(linear polarizer)와 검광기(analyzer) 사이의 각(θ)에 따라 PD(photo detector)로 검출되는 출력은 그림 2와 같이 $\cos^2\theta$ 의 비선형적 특성을 갖지만 45° 에서는 작은 크기의 편광각 변화에 대해

서 거의 선형적이며 민감도가 큰 출력을 얻을 수 있으므로 이 각도에 동작점을 두어 출력을 얻게 된다.

3. 선형복굴절의 영향과 극복

기술한 바와 같이 광학적 전류 측정방식은 이론적으로는 간단하지만 실제로는 여러 가지 원인으로 야기된 선형복굴절이 센서의 출력을 왜곡시키는 문제점이 있다. 선형복굴절의 주원인은 광섬유 두 축의 비등방성으로 인한 내부의 선형 복굴절과 센서코일을 제작할 때 구부림이나 당겨짐 등에 의한 구조적 복굴절, 또한 온도, 진동 등에 의한 외부 환경적 복굴절이 있다. 이러한 선형 복굴절의 영향을 간단히 식으로 정리해보면 다음 식과 같다.

$$I(\theta = 45^\circ) = \frac{E_{x,in}^2}{2} (1 + \sin \phi \sin \chi) \quad (2)$$

$$\sin \phi \sin \chi = 2\rho \frac{\sin \phi}{\phi}, \phi = \sqrt{\delta^2 + (2\rho)^2} \quad (3)$$

(δ : 선형 복굴절, ρ : Faraday 효과에 의한 원형 복굴절)

선형복굴절 δ 의 값이 0인 경우가 이상적이지만 δ 가 Faraday 회전각 ρ 보다 클 경우 즉, $\delta \gg 2\rho$ 라면 출력이 그림 3과 같이 sinc 함수 형태로 감소된다[4]. 선형 복굴절 δ 를 최소화 하는 방법으로는 높은 원형 복굴절을 유도하여 상대적으로 선형 복굴절의 영향을 감소시킨 twisted 광섬유, 센서코일에 열처리하여 선형복굴절을 제거한 annealed 광섬유, 광섬유 제조 시 두 축이 등방성을 갖게 하여 구조적인 선형 복굴절을 제거한 저복굴절 광섬유를 사용하는 방법이 제안되었으며, 본 논문에서는 광섬유에 납을 첨가하여 광탄성(photo-elastic) 계수를 매우 작게 하여 선형복굴절 유도를 최소화하고 Verdet 상수가 단일 모드 광섬유에 비하여 약 5배 이상 큰 FRG 광섬유를 사용하여 센서코일로 제작하였다[7][8]. 사용된 FRG 광섬유(Hoya LBF-1550)의 제원은 표 1과 같다.

위의 특성을 가진 FRG 광섬유를 이용하여 선형 복굴절 δ 를 최소화하고, 큰 Verdet 상수에 따라 Faraday 회전각 ρ 를 크게 하면, 즉 $\delta \ll 2\rho$ 경우 센

서 출력은 식(4)와 같이 간략화 된다.

$$S = \sin 2\rho \approx 2\rho \quad (4)$$

표 1. FRG 광섬유의 제원(@ 1550(nm))
Table 1. The specification of a FRG fiber

광탄성 계수 [m2/kg]	0.45×10 ⁻¹³
Verdet상수 [urad/A]	3.75 (silica glass의 5배)
내부 복굴절	2.0 [°/m]
투과 손실	1.5 [dB/m]
Bending loss	≤0.1 [dB] (직경 ≤100 [mm])

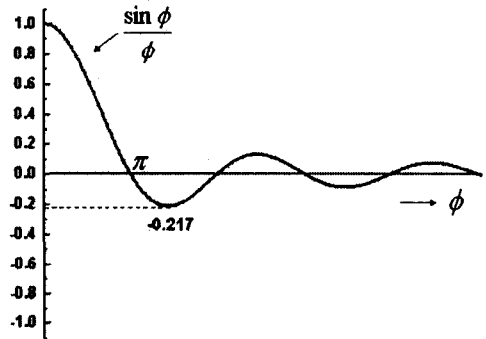


그림 3. 선형 복굴절에 따른 출력의 감소
Fig. 3. Output reduction according to linear birefringence

FRG 광섬유의 복굴절 특성이 일반 광섬유에 비하여 매우 우수하지만 이를 완전히 제거할 수는 없으므로 그림 4와 같이 FRG 광섬유 센서코일의 끝단에 반사경을 부착하여 선형 복굴절의 영향을 효과적으로 억제하고자 하였다. 외부 온도나 진동에 의한 환경적 문제나 물리적인 원인으로 추가되는 선형복굴절은 식(5)와 같이 빛의 진행방향에 따라 그 효과가 상쇄되는 가역적(reciprocal) 특성인 반면, Faraday 효과는 빛의 진행 방향에 관계없이 그 효과가 누적되는 비가역적(non-reciprocal) 특성이므로 반사형 구조를 사용할 경우 잔존 선형복굴절을 제거 하면서 동시에 전류의 민감도를 2배로 향상시키는 효과를 얻을 수 있다.

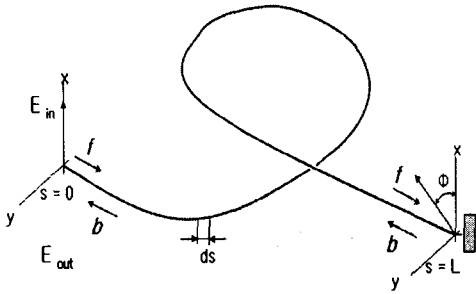


그림 4. 선형 복굴절 제거에 효과적인 반사형 구조
 Fig. 4. The reflection type sensor coil to remove linear birefringence effect

$$\begin{aligned} \Phi &= \Phi_{\text{for ward}} + \Phi_{\text{backward}} \\ &= \int_0^L \delta(s) ds + \int_L^0 \delta(s) ds = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

4. 실험 및 결과

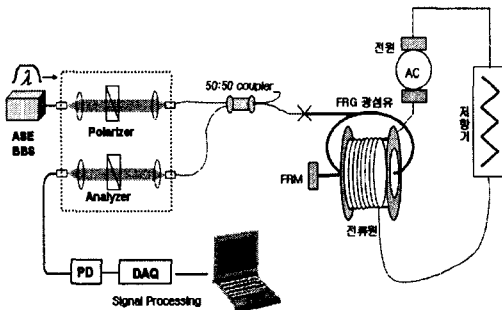


그림 5. 편광분석형 FRG 광섬유 전류센서의 개략도
 Fig. 5. Configuration of polarimetric FRG fiber-optic current sensor

1[m] 길이의 FRG 광섬유 센서코일을 도선에 2회 감고 그 끝단에 FRM(Faraday Rotator Mirror) 반사경을 부착하였으며 광원으로는 광폭 광원인 ASE BBS(Amplified Spontaneous Emission Broadband Source)를 사용하여 편광 분석형 광섬유 전류센서를 그림 5와 같이 구성하였다. 전류원은 도선을 약 300회 감고 AC 슬라이드스와 저항기를 이용하여 최대 1500 [AT]의 실효치 전류를 발생하도록 구성하였다. 기계적 변형에 따른 선형복굴절 영향을 비교하기 위하여 단일모드 광섬유와 FRG 광섬유 센서코일 끝단

에 각각 단순거울과 FRM을 부착하여 센서 출력의 변동율을 비교하였다.

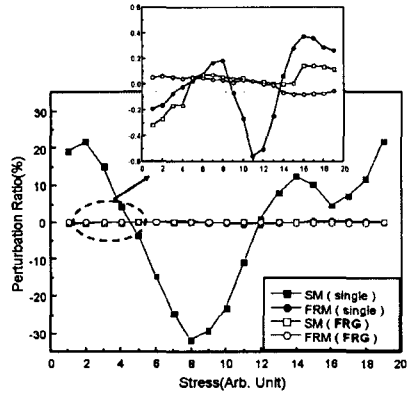


그림 6. 단순거울(SM)과 FRM을 부착하고 기계적 변형을 가한 경우의 출력 변동율 비교
 Fig. 6. The comparison of output variations according to mechanical deformation when single mode fiber and FRG fiber coils are attached to simple mirror and FRM

그림 6에서 FRG 광섬유 센서코일에 반사경을 부착한 경우 반사경의 특성에 관계없이 ± 0.4[%] 이내의 출력 안정도를 보임을 알 수 있다. 그러나 단일모드 광섬유 센서코일은 FRM을 부착한 경우에는 ± 0.6[%] 이내의 비교적 안정된 출력을 보인 반면, 단순거울의 경우는 ± 30[%] 범위의 불안정한 출력변화를 보였다. 이 결과로부터 FRG 광섬유 센서코일의 잔존 복굴절이 단일모드 광섬유에 비하여 매우 작아서 기계적 변형에 보다 안정한 것을 알 수 있다. 또한 FRM 반사경이 단순거울보다 선형복굴절 영향을 효과적으로 제거하고 있음을 확인할 수 있었다 [8][9]. FRG 광섬유의 Verdet 상수는 일반 단일모드 광섬유에 비하여 5배 이상 크므로 적은 턴 수로도 효과적인 출력을 얻을 수 있다. 각 센서코일의 전류에 대한 민감도를 측정하기 위해 도선에 단일모드 광섬유를 50회 감고 FRG 광섬유를 2회 감아서 출력의 스펙트럼을 비교하였다. 그림 7로부터 결과 두 출력 신호가 약 6 [dB] (4배) 이상의 차이가 있음을 알 수 있으며 출력의 결과를 표 2에 같이 정리하였다. 실험 결과에서 단일 모드 광섬유의 출력이 FRG 광섬유에

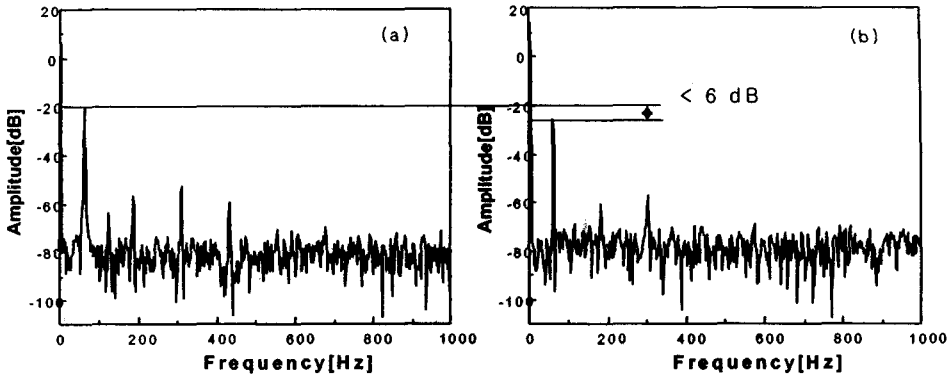


그림 7. 출력 민감도 비교 (a) 단일모드 광섬유 50회 (b) FRG 광섬유 2회
 Fig. 7. The comparison of output sensitivity (a) singlemode fiber 50 turns (b) FRG fiber 2 turns

비해 4배 크기만 50회와 2회의 광섬유 페루프 구성을 감안하면 FRG 광섬유를 센서코일로 사용하는 것이 유리함을 알 수 있다. 표 2와 같이 이론적인 결과와 실험의 결과가 차이가 나는 이유는 일반 단일모드 광섬유를 많은 턴 수로 감을 때 발생하는 선형복굴절에 의하여 출력이 감소하였을 것으로 예상할 수 있다[7].

다양한 광원에 따른 노이즈 특성비교를 위하여 EDF(erbium doped fiber)를 980 [nm] LD로 펌핑하여 구성한 ASE BBS, F-P(Fabry-Perot) 다중모드 LD, DFB(distributed feedback) 단일모드 LD 등을 이용한 경우의 센서출력 스펙트럼을 비교하였다.

표 2. 단일모드 광섬유와 FRG 광섬유를 사용한 경우 출력 민감도 비교
 Table 2. The comparison of output sensitivity between singlemode and FRG fiber sensor coil

	Verdet 상수 비	센서코일 감은 수	예상 결과	실제 결과
SM fiber	1 배	50 회	5 배	4 배
FRG fiber	5 배	2 회	1 배	1 배

그림 8과 같이 BBS를 사용한 경우 60 Hz 전류신

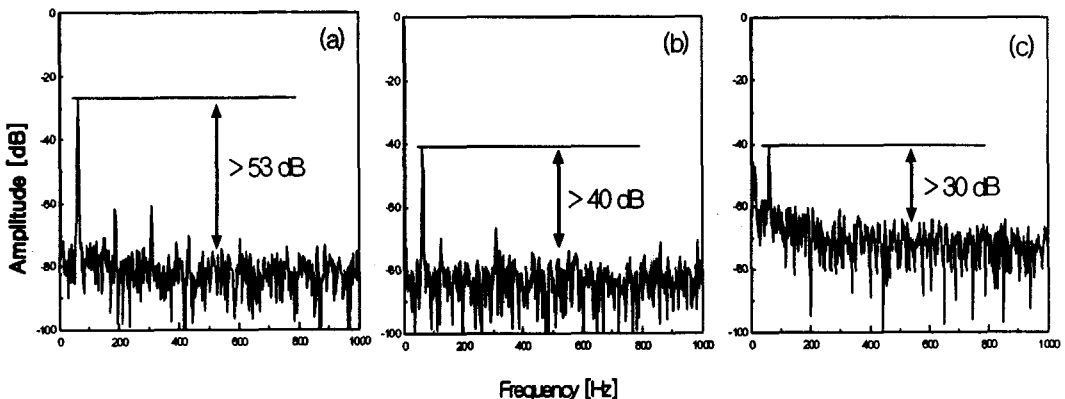


그림 8. 광원에 따른 전류센서의 출력 주파수 스펙트럼, 광원으로 (a) BBS (b) F-P 다중모드 레이저 (c) DFB 단일모드 레이저 사용
 Fig. 8. The frequency spectrum of current sensor outputs with different light sources (a) BBS (b) F-P multimode laser diode (c) DFB singlemode laser diode

호는 약 53 [dB] 이상의 SNR을 가지며 F-P 다중모드 레이저와 DFB 단일모드 레이저를 사용한 경우는 각각 40 [dB], 30 [dB] 정도로 SNR이 저하되어, 스펙트럼의 폭이 넓어 코히어런스가 낮은 광폭 광원일 수록 간섭노이즈나 후방산란이 적어 전류센서의 안정화에 도움이 됨을 확인할 수 있다.

5. 결 론

광섬유 전류센서의 센서코일로 FRG 광섬유를 사용하면 낮은 선형 복굴절 유도로 반사 거울의 특성에 관계없이 $\pm 0.4\%$ 의 출력 안정도를 보였고 단일 모드 광섬유를 센서코일로 사용한 경우는 단순 거울보다 FRM을 사용하는 것이 선형 복굴절 제거에 효과적이었다. 또한, FRG 광섬유를 센서코일로 사용하면 높은 Verdet 상수로 인하여 도선에 2회 감은 출력이 단일 모드 광섬유 센서코일을 10회 이상 감은 효과를 보였으며, ASE 광폭 광원을 사용할 경우 F-P LD와 DFB LD 등의 좁은 파장대역을 가지는 레이저 광원을 사용한 것보다 각각 13 [dB], 23 [dB] 이상 SNR이 개선됨을 확인할 수 있었다. 편광 빔가르개를 이용하여 두 개의 광신호를 PD로 검출하여 신호처리할 경우 보다 안정화된 출력을 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원 (R-2003-B-276) 주관으로 수행된 과제임.

References

- [1] A. J. Rogers, "Optical-fibre current measurement," *Int. J. Optoelectronics*, vol. 3, pp. 391-407, 1988.
- [2] J. Blake, P. Tantaswadi, R. T. de Carvalho, "In-Line Sagnac Interferometer Current Sensor," *IEEE Transaction on power Delivery*, Vol. 11, No. 1, pp. 116-121, 1996.
- [3] F. Briffod, L. Thevenaz, P.-A. Nicati, A. Kung, p. A. Robert, "Polarimetric current sensor using an in-line Faraday rotator," *IECE Trans. Electron*, Vol. E83-C, No. 3, pp. 331-335, 2000.
- [4] G. W. Day, K. B. Rochford, A. H. Rose, "Fundamentals and problems of fiber current sensors," *Tech. Digest, 11th OFS Conf.*, Sapporo, Japan, pp. 124-129, 1996.
- [5] R. Ulrich and A. Simon, "Polarization optics of twisted single-mode fibers," *Appl. opt.*, vol. 18, No. 13, pp. 2241-2251, 1979.
- [6] 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.
- [7] K. Kurosawa and I. Masuda, "Faraday effect current sensor using flint glass fiber for the sensing element," *Proc. of OFS*, 1993.
- [8] K. Kurosawa, S. Yoshida, and K. Sakamoto, "Polarization properties of the flint glass fiber," *J. Lightwave Technol.*, vol. 13, no. 7, pp. 1378-1384, 1995.
- [9] N. C. Pistoni and M. Martinelli, "Vibration insensitive fiber-optic current sensor," *Opt. Lett.*, Vol. 18, No. 4, pp. 314-316, 1993.

◇ 저자소개 ◇

김기혁 (金基赫)

1980년 2월 7일생. 2003년 전북대 전자정보공학부 졸업. 현재 전북대학교 전자정보공학부 석사과정.

송민호 (宋民鎬)

1968년 8월 26일생. 1990년, 1992년 서울대학교 전기공학과에서 공학사, 공학석사를 취득. 1997년 서울대학교 전기공학부 공학박사학위 취득. 1997~2000년 Pennsylvania 주립대학 Post-Doctor. 2000년 9월~현재 전북대학교 전자정보공학부 조교수.