

Sagnac 간섭계형 광섬유 광전류센서의 안정화 방법

正會員 강 현 서*, 이 종 훈*, 송 정 태*, 이 경 식*, 김 철 중*

Stabilization of a Sagnac interferometric optical fiber current sensor

Hyun Seo Kang*, Jong Hun Lee*, Jung Tae Song*, Kyung Shik Lee*,
and Cheol Jung Kim* *Regular Members*

※본 연구는 한국원자력연구소의 지원에 의하여 수행되었음(과제번호: 96C-079)

요 약

본 논문에서는 Sagnac 광섬유 광전류센서를 구성하여 전류센서의 출력을 항상 최대로 유지하여 안정성을 높일 수 있는 새로운 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 Sagnac 광전류센서의 감지부에 부착된 광섬유를 비틀림함으로써 원형복굴절에 의한 회전각을 $(m+1/2)\pi-2\Psi$ 만큼 야기시켜 선형복굴절의 영향을 없애줄 수 있으며 따라서 광전류센서의 출력을 안정화 시킬 수 있다. AC 전류신호 300Arms에서 실험해본 결과 안정화 방법을 적용하지 않았을 때는 광전류센서의 출력변화율은 $\pm 27\%$ 였지만 안정화 방법을 적용했을 때는 출력변화율이 $\pm 2.3\%$ 로 10배 이상 안정화 되는 것을 알 수 있었다.

ABSTRACT

A new method of stabilizing a Sagnac optical fiber current sensor is presented. This method is characterized by creating a proper amount of circular birefringence the fiber Sagnac, whose corresponding value of rotation angle is $(m+1/2)\pi-2\Psi$, removes the effect of linear birefringence and leads to achieve good stability. Using the technique the stability of the current sensor was improved more than 10 times to within $\pm 2.3\%$ at 300Arms.

I. 서 론

자기광학 효과의 하나인 파라데이 효과(Faraday effect) [1]를 이용하여 전류를 측정할 수 있는 광섬유 광전류센서의 개발이 꾸준히 연구 되어지고 있다. 광섬유 광전류센서는 광섬유를 사용하므로 저손실, 무유도성 특성과 더불어 전자기 간섭을 받지 않을 뿐만 아니라 고전압선의 전류측정시 야기되는 절연 문제를

*성균관대학교 전자공학과
論文番號: 97125-0404
接受日字: 1997년 4월 4일

쉽게 해결할 수 있다. 이러한 잇점 때문에 광전류센서는 여러가지 방법으로 다양하게 연구 되어지고 있다.

Sagnac 광섬유 광전류센서[2, 3]는 가격면에서 저렴한 광섬유를 이용함으로써 소형, 경량화 및 동작범위(dynamic range)가 넓은 장점을 지니고 있다. 그러나 Sagnac 광섬유 광전류센서는 광섬유 자체의 복굴절과 광섬유의 구부림이나 비틀림[4, 5]에 의해서 발생된 복굴절이 존재한다.

또한 온도 변화와 진동 등의 주위환경 변화에 의한 복굴절 변화가 야기된다. 이러한 복굴절 변화는 광섬유 광전류센서의 성능을 저하시키는 원인이 된다. 따라서 기존의 성능을 개선할 수 있는 안정화 방법으로 편광 유지 광섬유(PMF)와 같은 특수 광섬유를 이용하였을 뿐만 아니라 열처리 방법을 이용하여 복굴절의 영향을 제거시킴으로써 안정화 할 수 있었다[6].

본 논문에서는 Sagnac 광섬유 광전류센서에서 광섬유의 구부림이나 비틀림에 의해 야기되는 선형복굴절과 원형복굴절이 광전류센서의 성능에 미치는 영향을 살펴본다. 또한 Sagnac 광섬유 광전류센서에서 출력을 항상 최대로 유지하여 안정성을 높일 수 있는 새로운 방법을 제안한다. 본 논문에서 제안한 방법은 다음과 같다. 광전류센서의 감지부에 부착된 광섬유를 비틀림함으로써 원형복굴절을 조절하여 선형복굴절의 영향을 제거시키는 안정화 방법을 제안한다. 그리고 실험을 통해서 복굴절에 대한 안정화 방법 및 광섬유 광전류센서의 동작 특성에 대해서 살펴본다.

II. 광섬유 광전류센서의 기본 원리

Sagnac 광섬유 광전류센서 구성도는 그림 1과 같다. 전류가 흐르는 도체 주위에 베타상수 값이 V 인 광섬유를 N 번 감았을 경우 비가역적인 파라데이 효과에 의해서 광섬유 내를 진행하는 빔의 편광면이 $\theta = VNI$ 만큼 회전하게 된다. 따라서 Sagnac 광섬유 광전류센서는 광섬유 내를 서로 반대 방향으로 진행하는 두 빔 사이의 파라데이 효과에 의한 회전각을 측정함으로써 전류를 측정할 수 있다[7].

그러나 Sagnac 광섬유 광전류센서는 도체 주위에 광섬유를 감음으로써 광섬유의 구부림이나 비틀림 등에 의해서 발생된 복굴절과 외부 온도변화, 진동

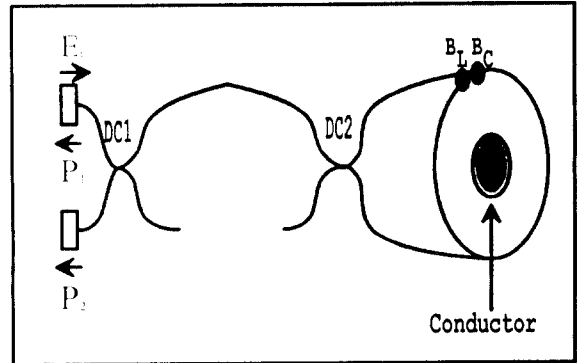


Fig. 1. Configuration of a Sagnac interferometric fiber optic current sensor

등에 의한 복굴절 변화가 야기된다. 따라서 광전류센서내에 존재하는 복굴절 즉, 선형복굴절과 원형복굴절에 따라서 광전류센서의 출력변화가 야기된다. 광섬유 광전류센서에 존재하는 선형 및 원형복굴절의 Jones matrix B_L, B_C 는 다음과 같다[8].

$$B_{Lcw}(\delta, \Psi) = \begin{bmatrix} \cos \frac{\delta}{2} + i \sin \frac{\delta}{2} \cos 2\Psi & i \sin \frac{\delta}{2} \sin 2\Psi \\ i \sin \frac{\delta}{2} \sin 2\Psi & \cos \frac{\delta}{2} - i \sin \frac{\delta}{2} \cos 2\Psi \end{bmatrix}$$

$$= B_{Lcw}(\delta - \Psi)$$

$$B_C(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}$$

여기서 $\delta (= B_L k_0 l)$ 는 slow axis와 fast axis 사이의 위상지연이며 Ψ 는 실험실의 기준축과 복굴절축의 fast axis와의 azimuth angle 그리고 $\alpha (= B_C k_0 l)$ 는 원형복굴절에 의한 회전각이다. 또한 파라데이 효과에 의한 Jones matrix $F_{cw}(\theta)$ 는 $\begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$ 이다. 여기서 $\theta = VNI$ 이다.

Sagnac 광섬유 광전류센서의 두 출력단에서의 전체 E_1, E_2 를 구하면 다음과 같다.

$$E_1 = k_{11} k_{2c} F_{cw} B_C B_{Lcw} k_{2t} k_{1t} E_0 + k_{11} k_{2t} B_{Lccw} B_C F_{ccw} k_{2c} k_{1t} E_0, \tag{1a}$$

$$E_2 = k_{1c} k_{2c} F_{cw} B_C B_{Lcw} k_{2t} k_{1t} E_0 + k_{1c} k_{2t} B_{Lccw} B_C F_{ccw} k_{2c} k_{1t} E_0. \quad (1b)$$

여기서 방향성 결합기의 결합계수는 $k_{m,t} = \frac{1}{\sqrt{2}}$, $k_{m,c} = \frac{i}{\sqrt{2}}$ 이고, E_0 는 입사 빔의 편광상태이다. 또한 전류센서의 두 출력단에서의 visibility V_0 와 빔의 세기 $P_{1,2}$ 는 각각 다음과 같이 유도된다[8].

$$P_{1,2} \propto P_0(1 + V_0 \cos 2\theta) \quad (2)$$

여기서,

$$P_0 = \frac{1}{16} [2 + \cos(2\alpha + 4\Psi) - \cos(2\alpha + 4\Psi) \cos \delta], \quad (3)$$

$$V_0 = \frac{1 + \cos \delta}{2 + \cos(2\alpha + 4\Psi) - \cos(2\alpha + 4\Psi) \cos \delta}.$$

위 식으로부터 Sagnac 광섬유 광전류센서의 출력단의 빔의 세기는 V_0 에 따라 변화하고, V_0 는 또한 광섬유 광전류센서의 감지부에 존재하는 복굴절에 따라 달라짐을 알 수 있다. 이러한 복굴절의 변화로 인해서 Sagnac 광섬유 광전류센서 출력이 크게 불안정하게 될 수 있다.

III. 복굴절 보상을 위한 안정화 방법

Sagnac 광섬유 광전류센서는 광섬유 자체의 복굴절과 광섬유의 구부림이나 비틀림에 의해서 발생된 복굴절 뿐만 아니라 온도 변화, 진동 등의 주위 환경 변화에 의한 복굴절 변화가 야기된다. 이러한 복굴절 변화는 광섬유 광전류센서의 성능을 낮추는 원인이 되고 있다. 따라서 안정화된 Sagnac 광섬유 광전류센서를 구현하기 위해서는 전류센서의 감지부에 존재하는 복굴절과 주위 환경 변화에 의해 발생하는 복굴절 변화를 최소화하는 방법이 필요하다. 본 논문에서 제안하는 Sagnac 광섬유 광전류센서의 안정화 방법은 식(3)을 이용하여 원형복굴절에 의해 야기된 회전각을 $(m + 1/2)\pi - 2\Psi$ 로 맞추어줌으로써 선형복굴절의 영향을 제거시키는 방법을 사용한다. 즉, Sagnac 광전류센서의 감지부에 부착된 광섬유를 일정한 비틀림율(twist rate)로 비틀림(twist)함으로써 원형복굴

절을 야기시킨다. 이러한 비틀림에 의해서 유도된 원형복굴절은 순수한 탄성광학효과(elasto-optic effect)에 의한 것으로 비틀림율(twist rate)에 비례한다[9, 10]. 따라서 원형복굴절은 감지부인 도체 주위에 감겨 있는 광섬유의 비틀림율에 따라 조절할 수 있다.

길이 l 인 광섬유를 비틀림율 ξ 로 비틀림 시켰을 때 편광면이 $\alpha(=g'\xi l)$ 만큼 회전하며 이에 해당되는 원형복굴절 α_r 은 다음과 같다[9].

$$\alpha_r = g\xi \quad (4)$$

여기서 $g(=2g')$ 은 비례상수이다.

식(3)에서 알 수 있듯이 원형복굴절에 의한 회전각 α 가 $(m + 1/2)\pi - 2\Psi$ 일 경우 visibility는 항상 최대가 되어 출력단의 빔의 세기는 다음과 같다.

$$P = P_0(1 + \cos 2\theta) \quad (5)$$

여기서 θ 는 파라데이 효과에 의한 회전각이며 VNI 와 같다.

도체에 전류 신호 $I_1 \sin(\omega_s t)$ 를 인가했을 경우 Sagnac 간섭계형 광전류센서의 출력단의 빔의 세기는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$P = P_0[1 + \cos(2VNI_1 \sin \omega_s t)] \quad (6)$$

베셀함수를 이용하여 식(6)을 전개하면 다음과 같다.

$$P = P_0[1 + J_0(2VNI_1) + 2J_2(2VNI_1) \cos(2\omega_s t) + \dots] \quad (7)$$

이때 dc성분의 크기 P_{dc} 와 $2\omega_s$ 성분의 크기 $P(2\omega_s)$ 는 아래와 같다.

$$P_{dc} = P_0[1 + J_0(2VNI_1)] \quad (8)$$

$$P(2\omega_s) = P_0[2J_2(2VNI_1)]$$

$2\omega_s$ 성분의 크기와 dc성분의 크기의 비를 M (변조지수)이라 정의하면 다음과 같이 근사화시킬 수 있다.

$$M = \frac{P(2\omega_s)}{P_{dc}} \approx \frac{1}{2} (VNI_1)^2 \quad (9)$$

따라서 측정된 변조지수로부터 파라데이 회전각인 θ 가 구해진다.

$$\theta^2 = 2M \tag{10}$$

위식에서 알 수 있듯이 도체에 인가한 전류신호는 간섭계의 출력단에서 $P(2\omega_s)$ 성분의 크기와 P_{dc} 성분의 크기를 측정함으로써 알 수 있다.

IV. 광섬유 광전류센서의 특성실험 및 결과

전류측정을 위한 Sagnac 광섬유 광전류센서의 실험구성은 그림 2와 같다. 광원으로는 파장 1300nm 인 반도체 레이저(FLD3C2PJ)를 사용했고 광섬유 결합기는 2×2 단일 모드 방향성 결합기(E-Teck)를 사용하였다. 광섬유는 단일 모드 광섬유를 이용했고 직경 13cm인 도체에는 길이 78m인 광섬유를 비틀림율 64rad/m의 비율로 190번 감았다. 또한 광섬유의 비틀림율을 조절하기 위해서 광섬유 비틀림 조절기(fiber-twist controller)를 광섬유 코일의 입력단에 부착하여 원형복굴절을 조절할 수 있도록 하였다.

그림 3은 비틀림 조절기를 이용하여 광섬유 광전류센서의 감지부인 도체 주위에 부착된 광섬유에 존재하는 원형복굴절(α_r)을 야기시켜 편광면의 회전각 α 를 $m\pi - 2\Psi$ (V_0 가 최소인 경우), $(m+1/2)\pi - 2\Psi$ (V_0 가 최대인 경우)로 고정시킨 다음 광전류센서의 시간에

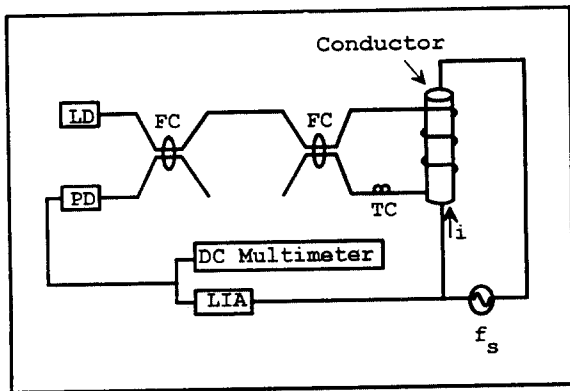


Fig. 2. The schematic of the experimental set up: LD(laser diode); FC(fiber coupler); PD(photo detector); TC (twist controller); LIA(Lock-In Amplifier).

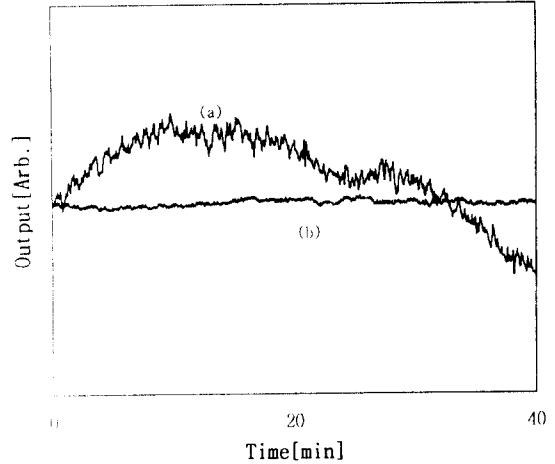


Fig. 3. The output fluctuation of the Sagnac current sensor for different twist rates : (a) $\alpha = m\pi - 2\Psi$, (b) $\alpha = (m + 1/2)\pi - 2\Psi$. This indicates that maximum stability can be achieved by setting $\alpha = (m + 1/2)\pi - 2\Psi$.

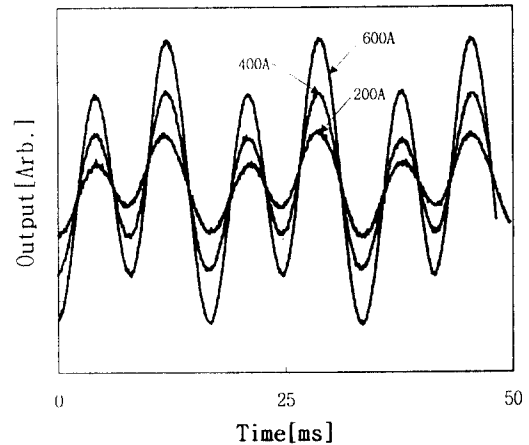


Fig. 4. Oscilloscope trace of the Sagnac optical fiber current sensor output.

다른 LIA(Lock-In Amplifier) 출력변화를 보여주는 그림이다. 이때 각각의 원형복굴절량은 측정되어진 값이 아니라 LIA 출력값의 크기에 비례하는 이론적인 값이다. 여기서 도체에 주파수 $f_s = 60\text{Hz}$ 인 AC 전류 300Arms를 인가하였다. 각각의 경우 LIA 출력을 시정수 0.3sec에 세팅해 놓고 약 40분 동안 컴퓨터로 처리하였고, 각각의 실험치는 절대적인 값이 아니라

상대적인 비교치를 보여주고 있다. 그림 3으로부터 원형복굴절에 의한 회전각 $\alpha = m\pi - 2\Psi$ 일 경우 광섬유 광전류센서의 출력변화가 $\pm 27\%$ 이지만 α 가 $(m+1/2)\pi - 2\Psi$ 가 될때 출력변화는 $\pm 2.3\%$ 이다. 따라서 본 논문에서 제안한 보상방법이 10배 이상 안정됨을 알 수 있다.

전류의 크기를 변화시켜 가면서 광전류센서의 LIA에서 검출한 출력신호파형을 오실로스코프를 이용하여 그림 4에 나타내었다. 출력은 오실로스코프(HP 54602B)와 컴퓨터를 이용하여 신호처리 하였다. 이때 주파수 $f_s = 60\text{Hz}$ 에서 인가한 AC 전류신호의 크기는 각각 200, 400, 600Arms이다. 그림 4에서 알 수 있듯이 인가 AC전류에 따라 출력이 증가함을 알 수 있고, 또한 식(8)에서 유도한 바와 같이 2차성분(second harmonic)이 검출됨을 보여주고 있다.

그림 5는 광전류센서에 인가한 AC전류에 대한 LIA, DC multimeter에서 검출된 $2\omega_s$ 성분의 크기 및 dc성분의 크기의 비를 나타내는 M(변조지수)의 값을 보여 주고 있다. 직선은 curve fitting 결과이며 dot는 실험 결과이다. 이때 광섬유 광전류센서의 회전각 α 를 $(m+1/2)\pi - 2\Psi$ 로 고정시키고 주파수 $f_s = 60\text{Hz}$ 에서 AC 전류를 0~900Arms까지 인가해 주었다. 실험결과 식(8), (9)에서 유도한 바와 같이 출력이 인가한

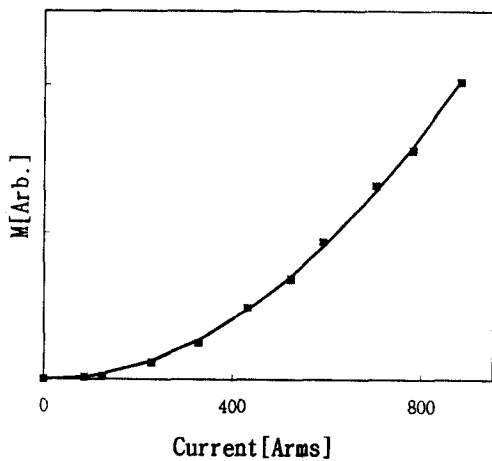


Fig. 5. The ratio M of the amplitude of $2\omega_s$ -component P ($2\omega_s$) to the amplitude of dc-component P_{dc} as a function of the AC current ($f_s = 60\text{Hz}$). The data were fitted to the function.

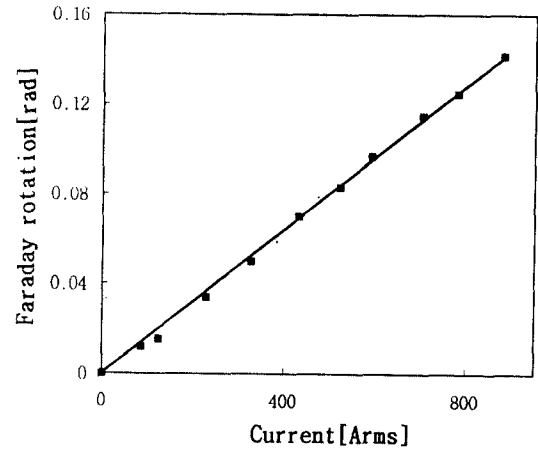


Fig. 6. Faraday rotation as a function of the AC current ($f_s = 60\text{Hz}$). The data were fitted to the function.

AC 전류의 제곱에 비례한다는 사실을 확인할 수 있었다.

그림 6은 광전류센서에 인가한 AC 전류에 대한 파라데이 회전각의 변화를 나타낸 것이다. 실험결과 파라데이 회전각이 인가한 AC 전류에 비교적 선형적으로 비례함을 알 수 있었다.

V. 결 론

본 논문에서는 전류측정을 위한 Sagnac 광섬유 광전류센서를 구성하여 전류센서의 visibility를 항상 최대로 유지하여 광섬유 광전류센서의 안정성을 높일 수 있는 새로운 방법을 제안했다. 이는 Sagnac 광전류센서의 감지부에 부착하는 광섬유를 비틀림 함으로써 원형복굴절에 의한 회전각을 $(m+1/2)\pi - 2\Psi$ 로 야기시켜 선형복굴절의 영향을 제거하여 광전류센서의 출력을 안정화 시킬 수 있었다. 실험결과 $\alpha = m\pi - 2\Psi$ 일 경우 전류센서의 출력변화율은 $\pm 27\%$ 였지만, $\alpha = (m+1/2)\pi - 2\Psi$ 로 하여 안정화시켜 주었을 때의 출력변화율은 $\pm 2.3\%$ 로 10배 이상 안정됨을 알 수 있었다. 또한 광섬유 광전류센서의 파라데이 회전각이 인가한 AC 전류의 크기($\sim 900\text{Arms}$)에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

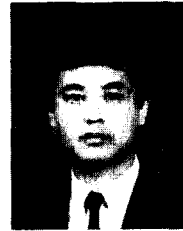
1. G. Frosio and R. Dandliker, "Reciprocal reflection interferometer for a fiber-optic Faraday current sensor," *Applied Optics*, Vol.33, No.25, pp.6111, (1994).
2. P. A. Leilabady, A. P. Wayte, M. Berwick, J. D. C. Jones and D. A. Jackson, *Optics Communications*, Vol.59, No.3, pp.173, (1986).
3. X. Fang, "Fiber-optic distributed sensing by a two-loop Sagnac interferometer," *Optics Letters*, Vol.21, No.6, pp.444, (1996).
4. R. Ulich, S. C. Rashleigh and W. Eickhoff, "Bending-induced birefringence in single-mode fibers," *Optics Letters*, Vol.5, No.6, pp.273, (1980).
5. A. D. Kersey, M. A. Davis and M. J. Marrone, "Statistical properties of Fiber-Birefringence Models," *8th Optical Fiber Conference*, pp.141, (1992).
6. D. 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 Tech.*, Vol.9, No.8, pp.1031, (1991).
7. A. J. Rogers, J. Xu and J. Yao, "Vibration immunity for optical-fibre current measurement," *10th Optical Fibre Sensors Conference*, pp.40, (1994).
8. H. S. Kang, R. S. Jung, K. S. Lee and C. J. Kim, "The Optimum design for a Sagnac fiber current sensor possessing birefringence," *17th Congress of the International Commission for Optics*, pp.1155, (1996).
9. S. C. Rashleigh and R. Ulrich, "Magneto-optic current sensing with birefringence fibers," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.34, No.11, pp.768, (1979).
10. N. C. piston and M. Martinelli, "Vibration-insensitive fiber-optic current sensor," *Optics Letters*, Vol.18, No.4, pp.314, (1993).



강 현 서(Hyun Seo Kang) 정회원
 1968년 7월 16일생
 1884년 2월 : 성균관대학교 전자공학과 졸업
 1996년 2월 : 성균관대학교 대학원 전자공학과 졸업 (공학석사)
 1996년~현재 : 성균관대학교 대학원 전자공학과 박사과정 재학중



이 중 훈(Jong Hun Lee) 정회원
 1974년 1월 18일생
 1996년 2월 : 성균관대학교 전자공학과 졸업
 1996년~현재 : 성균관대학교 대학원 전자공학과 석사과정 재학중



송 정 태(Jung Tae Song) 정회원
 1958년 5월 25일생
 1982년 : 한국항공대학교 통신공학과 졸업
 1984년 2월 : 연세대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
 1983년 12월~1993년 2월 : LG전선(주) 광 시스템 연구실 선임 연구원
 1993년 3월~현재 : 대유공업 전문대 전자과 전임강사
 1996년 8월~현재 : 성균관대학교 대학원 박사과정 재학중

이 경 식(Kyung Shik Lee) 정회원
 현재 : 성균관대학교 전자공학과 부교수
 제21권 제10호 참조