

論文97-34D-4-13

Sagnac 간섭계형 광섬유 전류센서의 안정화 연구

(A study on stabilization of a fiber-optic current sensor using Sagnac interferometer)

丁來聲*, 姜賢緒*, 李鍾勳*, 宋玪台*, 李景植*

(Rae Sung Jung, Hyun Seo Kang, Jong Hun Lee, Jung Tae Song, and Kyung Shik Lee)

요 약

Sagnac 광섬유 간섭계에 존재하는 복굴절에 의해서 생기는 출력 불안정을 안정화 시킬수 있는 새로운 방법을 제안한다. 제안하는 안정화 방법은 변조신호성분과 전류신호성분을 신호처리함으로써 구현될 수 있다. 2시간 동안 AC 전류신호 800Arms에서 실험해 본 결과 제안하는 안정화 방법에 의해서 광섬유 전류센서의 출력이 4.5배 이상 안정화되는 것을 알 수 있었다. 그리고 광섬유 전류센서에 대한 선형성 실험 결과 센서의 출력이 인가 AC 전류 신호~1000Arms까지 선형적으로 증가함을 알 수 있었다.

Abstract

A new method of stabilizing the Sagnac interferometric fiber optic current sensor in the presence of birefringences and phase noise is presented. This method is realized by dividing the output of the ac current signal with the modulation signal output. Using the technique the stability of the current sensor was improved more than 4.5 times at 800Arms for 2 hours. The current sensor also shows good linearity up to 1000Arms.

I. 서 론

최근 전력 수요의 증대와 함께 기존의 전자식 전류센서의 단점을 보완할 수 있는 광전류센서의 개발이 꾸준히 연구되어져 왔다. 광전류센서의 잇점은 경량, 소형이며 전자파 간섭이 없고 계측이 신속 정확하며 특히 고전압선의 전류측정시 절연문제를 쉽게 해결할 수 있다. 지금까지 광전류센서는 polarimetric 방법과 interferometric 방법 등이 연구 되어왔다. Polarimetric 방법은 편광자와 자기광학결정 등을 사용함으

로써 시스템의 가격이 비싸다는 단점이 있다. Interferometric 방법인 Sagnac 광섬유 간섭계를 이용한 광전류센서¹¹⁾는 자기광학결정 대신 저렴한 광섬유 코일을 이용하여 간단하게 시스템을 구성할 수 있으며, 동작 범위(dynamic range)가 크다는 장점이 있다.

파라데이 효과를 이용한 polarimetric 광전류센서에 대한 연구는 그동안 수많은 연구가에 의해서 상당히 많이 이루어져 왔다. 그러나 Sagnac 간섭계형 광전류센서에 대한 연구는 최근에 몇몇 연구가에 의해서만이 이루어져온 실정이다^{12 41)}. Sagnac 간섭계형 광섬유 광전류센서의 문제점으로 파라데이 효과에 의한 위상 변화는 매우 작기 때문에 광섬유 자체의 복굴절이나 외부 환경 변화에 따라서 야기되는 복굴절의 변동 등에 민감하게 영향을 받는다는 단점이 있다. 그런데 복굴절의 크기는 외부환경변화 특히 온도변화에 따라서 크게 영향을 받기 때문에 복굴절이 센서에 주는 영향

* 正會員, 成均館大學校 電子工學科

(Department of Electronic Engineering, Sung Kyun Kwan University)

※ 본 연구는 한국원자력연구소의 지원에 의하여 수행되었음 (과제번호 : 95C 086).

接受日字:1996年9月17日, 수정완료일:1997年3月31日

을 없애기 위해서 그동안 여러가지 방법이 제안되어 왔다. 이들 방법에는 광섬유의 구부림에 의한 선형복굴절을 제거하기 위한 열처리 방법^[5], 특수 광섬유 (twist 광섬유, spun 광섬유)을 이용하는 방법^[6] 및 보상 방법^[7] 등이 제안 되었다.

본 논문에서는 Sagnac 간섭계 루프내의 선형복굴절과 원형복굴절에 의한 Sagnac 간섭계의 출력 변동을 안정화 시켜줄 수 있는 새로운 안정화 방법을 제안 하였다. 제안하는 안정화 방법은 원치 않는 위상 변화에 따른 잡음을 제거해 줄 수 있을 뿐만 아니라 광원의 출력 변동에 대해서도 보상해 줄 수 있는 방법이다. 여기서 제안하는 방법을 적용하여 Sagnac 간섭계형 광섬유 전류센서를 구현해 보았으며 어떻게 동작하는지를 실험을 통해서 살펴 보았다.

II. Sagnac 간섭계형 전류센서의 원리

Sagnac 광섬유 간섭계를 이용한 광전류센서는 광섬유내에서 서로 반대방향으로 진행하는 빔 사이의 비가역적 효과인 파라데이 효과를 이용하여 전류를 측정한다. 광섬유 코일(sensing fiber)에 원형편광된 빔이 진행할때 전류 A가 흐르는 도체 주위에 베타상수 값이 V' 인 광섬유를 N번 감았을 경우 파라데이 효과에 의해 위상변화가 야기된다.

Sagnac 간섭계형 광섬유 광전류센서의 출력단의 빔의 세기 I 는 아래와 같다.

$$I = P_0 [1 + \cos(\Delta\phi_m)] \quad (1)$$

여기서 P_0 는 비례상수이며 $\Delta\phi_m$ 는 비가역 효과에 의한 위상변화이고 $2V' NA$ 와 같다.^[8] 그런데 Sagnac 간섭계의 광섬유 루프내에 흔히 선형복굴절과 원형복굴절이 존재한다. 이 복굴절들은 간섭계 제작 과정에서 구부러짐이나 비틀림등으로 생길 수가 있는데 온도 변화에 민감하게 변하는 특성을 갖고 있다. 만일 Sagnac 광섬유 간섭계에 선형복굴절과 원형복굴절이 존재할 때 Sagnac 광섬유 간섭계의 출력단의 빔의 세기는 다음과 같이 표시된다.^[9]

$$I = P_0 [1 + V \cos(\Delta\phi_m)] \quad (2)$$

$$V = \frac{1 + \cos \delta}{2 + \cos(2\alpha - 4\psi) - \cos(2\alpha - 4\psi) \cos \delta}$$

여기서 V는 간섭계의 visibility이며 δ 는 선형복굴절

$$B_L = \begin{bmatrix} \cos \frac{\delta}{2} - i \sin \frac{\delta}{2} \cos 2\psi & i \sin \frac{\delta}{2} \sin 2\psi \\ i \sin \frac{\delta}{2} \sin 2\psi & \cos \frac{\delta}{2} + i \sin \frac{\delta}{2} \cos 2\psi \end{bmatrix},$$

ψ : azimuth angle)에 의한 위상지연이고 α 는 원형복굴절 $B_C = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}$ 에 의한 회전각이다. 식

(2)로부터 Sagnac 광섬유 간섭계의 출력이 V에 따라서 변화하고 V는 또한 복굴절에 의존한다는 것을 알 수 있다. 그런데 외부 환경 변화에 따라서 복굴절의 크기가 민감하게 변화하기 때문에 외부 환경 변화에 따라서 Sagnac 간섭계의 출력이 크게 불안정하게 될 수 있다는 것을 알 수 있다.

식(2)에서 $\Delta\phi_m = n\pi$ ($n=0, \pm 1, \dots$) 근처에서는 신호 성분을 검출하기가 어려우므로 위상 바이어스를 걸어 주어야 한다. Sagnac 광섬유 간섭계의 위상 바이어스 방법은 간섭계 루프내의 광섬유 한쪽 끝에 위상 변조기(PZT)를 부착하여 변조 신호를 인가한다. 이때 서로 반대 방향으로 진행되는 두 빔의 시간차에 의한 비가역 효과에 의해 위상 바이어스를 해결 수 있다.

위상 변조기에 변조신호를 그리고 도체에 전류신호를 인가 했을 때 야기되는 위상 신호는 각각 $\phi_m(t) = \phi_m \sin \omega_m t$ 과 $\phi_s(t) = \phi_s \sin \omega_s t$ 와 같다. 이 경우 간섭계 출력단의 빔의 세기는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I = P_0 \left\{ 1 + V \cos \left[2\phi_m \sin \frac{\omega_m \tau}{2} \cos \omega_m t + \phi_s \sin \omega_s t + \phi_d \right] \right\} \quad (3)$$

여기서 ϕ_d 는 원하지 않는 위상 변화에 의한 잡음 성분이며 ω_m 은 변조 신호의 변조 주파수이다. τ 는 PZT에서 광섬유 결합기에 도달하는 빛의 진행 시간이고 ω_s 는 도체에 가해주는 전류 신호 주파수이다. 베셀 함수를 이용하여 식(3)을 전개하면 다음과 같이 된다.

$$I = P_0 \left\{ 1 + V \left[J_0(\phi_m') + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(\phi_m') \cos 2n \omega_m t \right] \times \left[\cos \phi_d J_0(\phi_s) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(\phi_s) \cos 2n' \omega_s t - \sin \phi_d \left(2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(\phi_s) \sin(2n'+1) \omega_s t \right) - \left[2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(\phi_m') \cos(2n-1) \omega_m t \right] \times \left[\sin \phi_d J_0(\phi_s) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(\phi_s) \cos 2n' \omega_s t + \cos \phi_d \left(2 \sum_{n=0}^{\infty} J_{2n+1}(\phi_s) \sin(2n'+1) \omega_s t \right) \right] \right] \right\} \quad (4)$$

여기서 $\phi_m' = 2\phi_m \sin \frac{\omega_m \tau}{2}$ 이다. 이때 ω_m 성분의 크기와 ω_s 성분의 크기는 아래와 같다.

$$I(\omega_m) = P_0 V [2J_1(\phi_m') J_0(\phi_s) \sin(\phi_d)] \quad (5)$$

$$I(\omega_s) = P_0 V [2J_0(\phi_m') J_1(\phi_s) \sin(\phi_d)]$$

이 두 성분을 서로 나눠주면 다음과 같다.

$$\frac{I(\omega_s)}{I(\omega_m)} = \frac{[J_0(\phi_m')J_1(\phi_s)]}{[J_1(\phi_m')J_0(\phi_s)]} \quad (6)$$

식(6)으로부터 두 성분의 비를 취하게 되면 식(5)의 공통부분 $P_0 V \sin \phi_d$ 가 사라지게 됨을 알 수 있다. 이것은 Sagnac 광섬유 간섭계를 이용하여 전류를 측정하고자 할 때 ω_m 성분과 ω_s 성분의 비를 이용하게 되면 광원의 출력변동에 따른 P_0 의 변화, 외부 환경 변화에 따른 V 의 변동과 외부 위상 잡음에 의한 전류센서의 출력 불안정성을 크게 줄여 줄 수 있다는 것을 말해주는 것이다. 한편, 파라데이 효과에 의한 위상변화 ϕ_s 는 매우 작으므로 $J_0(\phi_s) \approx 1$, $J_1(\phi_s) \approx \frac{\phi_s}{2}$ 로 근사화할 경우 전류 신호에 의한 위상변화의 크기 ϕ_s 는 아래와 같다.

$$\phi_s = \frac{2J_1(\phi_m')I(\omega_s)}{J_0(\phi_m')I(\omega_m)} \quad (7)$$

이때 ω_m 성분 즉, $J_1(\phi_m')$ 이 최대가 되도록 한다면 $J_1(\phi_m')/J_0(\phi_m') \approx 1.71$ 이 성립하며, 최종적으로 두 성분의 비로 간단하게 나타낼 수 있는 전류 신호에 의한 위상변화에 대한 식 $\phi_s \approx 3.42I(\omega_s)/I(\omega_m)$ 이 얻어진다. 따라서 ω_m 과 ω_s 의 성분을 측정할 후 적당히 신호처리 하면 외부 환경 변화와 광원의 출력 변화 및 간섭계 내의 복굴절의 영향에도 불구하고 안정되게 동작할 수 있는 Sagnac 간섭계형 광섬유 전류센서가 구현될 수 있겠다.

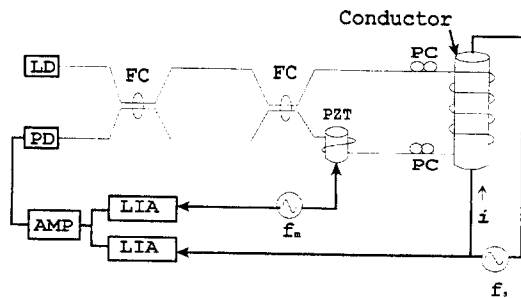


그림 1. 실험 구성도; LD, 레이저 다이오드; FC, 광섬유 커플러; PD, 광 검출기; LIA, 록인 앰프

Fig. 1. The schematic of the experimental set up: LD, laser diode; FC, fiber coupler; PD, photo detector; LIA, Lock-In Amplifier.

III. 실험결과

Sagnac 간섭계형 광섬유 광전류센서의 실험 구성도는 그림 1과 같다. 광원으로는 파장 1300nm인 반도체 레이저(FLD 3C2PJ)를 사용했고 광섬유 결합기는 2×2 단일모드 방향성 결합기(E-Teck)를 사용하였다. 위상변조를 위해서 PZT (EC-70, EDO사)를 간섭계 loop내의 한쪽 끝에 부착하였다. 사용한 광섬유는 삼성 전자에서 제작된 코어 직경 $10 \mu\text{m}$, 클래딩 직경 $120 \mu\text{m}$, 그리고 동작 파장 $1.3 \mu\text{m}$ 인 일반 광통신용 단일모드 광섬유이다. Sagnac 간섭계 loop 내의 광섬유 총 길이는 1.3km 정도이다. 이때 PZT에 광섬유를 100번 정도 감았고 직경 15cm인 도체에는 광섬유를 200번 정도 감았다. 또한 광섬유 코일(sensing fiber)에 입사되는 빔의 편광 상태를 원형편광상태로 유지하기 위해서 광섬유 코일 입출력단에 편광 조절기(polarization controller : PC)를 부착하여 편광상태를 조절해 주었다.

위상변조기에 가해주는 변조신호는 $\omega_m \tau = \pi$ 의 관계로부터 변조주파수 $f_m = 78.5\text{kHz}$ 로 위상변조 하였으며 진폭을 조절하여 $J_1(\phi_m')$ 이 최대가 되도록 하였다. 도체에 주파수 $f_s = 60\text{Hz}$ 인 AC 전류 신호를 인가하였다. 전류 신호에 의한 위상 변화는 식 (7)에서 알 수 있듯이 $I(\omega_m)$, $I(\omega_s)$ 성분에 대한 LIA(Lock-In Amplifier) 출력을 신호처리함으로써 알 수 있다.

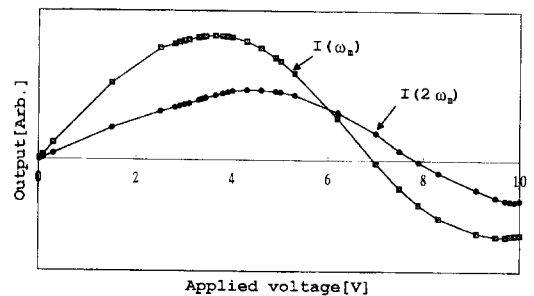


그림 2. Sagnac 간섭계형 광전류 센서에서 위상 잡음 특성 ($f_m = 78.5\text{KHz}$)

Fig. 2. The characteristic of the phase noise in a Sagnac interferometric current sensor ($f_m = 78.5\text{KHz}$).

그림 2는 시스템의 위상잡음 특성을 보여준다. 전류 신호를 인가하지 않고 위상변조기에 변조신호($f_m = 78.5\text{kHz}$)를 인가한 후 $I(\omega_m)$, $I(2\omega_m)$ 성분에 대한

간섭계의 출력 특성을 보여주고 있다. 위상변조기에 인가하는 전압에 따라서 $I(\omega_m)$ 성분은 베셀함수 $J_1(\phi_m)$ 에 비례하고 $I(2\omega_m)$ 성분은 베셀함수 $J_2(\phi_m)$ 에 비례하는 출력특성이 나타남을 알 수 있다.

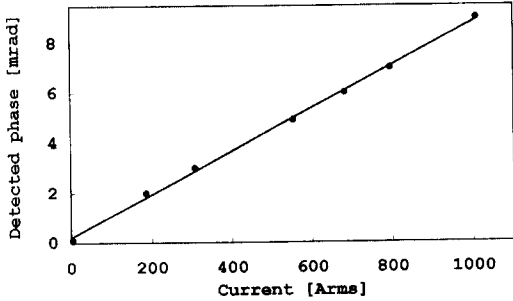


그림 3. 인가 AC 전류 신호에 대한 출력값($f_s=60\text{Hz}$).

Fig. 3. The phase response as a function of the AC current($f_s=60\text{Hz}$). The data were fitted to the function.

그림 3은 인가 AC 전류 신호에 대한 출력값을 보여주고 있다. 주파수가 60Hz인 AC 전류를 1000Arms까지 가해 주었을때 위상변화는 9mrad까지 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 그림 3에 나타난 직선은 curve fitting 결과이며 기울기는 감도를 나타낸다. 여기서 감도는 $\sim 8.6 \text{ mrad/Arms}$ 이다.

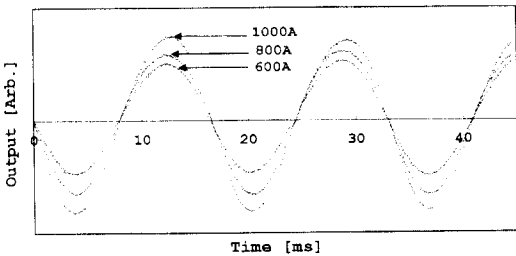


그림 4. Sagnac 간섭계형 광전류 센서에서 출력 신호 파형($f_s=60\text{Hz}$)

Fig. 4. The output signal waveform of a Sagnac interferometric current sensor ($f_s=60\text{Hz}$).

그림 4는 광전류센서의 출력특성을 오실로스코프(HP 54602B) 파형을 통해서 보여주는 그림이다. 오실로스코프의 파형은 컴퓨터를 통해서 신호처리 하였다. 인가 AC 전류신호 600, 800, 1000Arms에 비례하여 신호의 크기가 증가함을 알 수 있다.

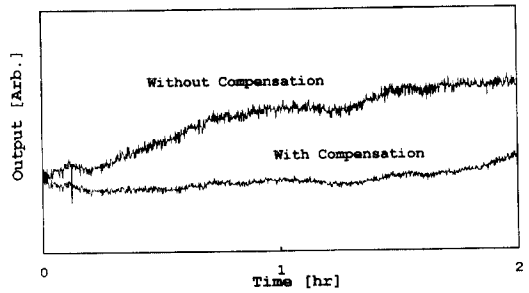


그림 5. Sagnac 간섭계형 광전류 센서에서 보상 해주었을 때와 보상 해주지 않았을 때의 출력 특성

Fig. 5. The output fluctuation of a Sagnac interferometric current sensor with and without compensation.

그림 5는 보상을 해 주지 않았을 때의 Sagnac 간섭계형 광전류센서의 출력 즉, $I(\omega_s)$ 성분의 출력과 여기서 제안하는 보상방법을 적용했을 때의 Sagnac 간섭계형 광전류센서의 출력 즉, 비가역적 파라데이 효과에 의한 위상변이 ϕ_s 가 시간에 따라서 어떻게 변하는지를 보여주는 그림이다. 이때 위상변조기에 변조주파수 $f_m=78.5\text{kHz}$ 인 신호를 가해 주었으며 도체에는 주파수 $f_s=60\text{Hz}$ 이며 크기가 800Arms 인 AC 전류신호를 인가하였다. $I(\omega_m)$ 값과 $I(\omega_s)$ 값은 LIA 출력을 시정수 0.3s에 세팅해 놓고 약 2 시간 동안 컴퓨터로 동시에 관련 데이터를 받은 다음 신호처리하여 구했다. 그림 5로부터 Sagnac 간섭계형 광전류 센서의 출력 $I(\omega_s)$ 가 보상을 해 주지 않았을 때는 $\pm 8.8\%$ ($33.6 \sim 40.1 \text{ mV}$)정도 변화하였으나, 여기서 제안하는 방법으로 보상을 해 주었을 때는 출력 위상변이 ϕ_s 가 $\pm 1.9\%$ ($6.75 \sim 7.02 \text{ mrad}$)로써 변화하여 훨씬 안정됨을 알 수 있었다.

IV. 결 론

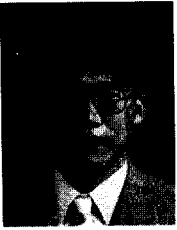
본 논문에서는 파라데이 효과를 이용한 Sagnac 간섭계형 광전류센서를 구성하여 전류신호에 의한 위상변화를 측정하였다. 광전류 복굴절에 의한 간섭계 출력단의 visibility 변화와 위상잡음을 제거시킨 안정화된 신호처리 방법을 제안하였다. 제안 방법은 ω_m 성분과 ω_s 성분의 크기를 측정하여 신호처리함으로써 비가역적 파라데이 효과에 의한 위상변화를 측정할 수 있었다. 실험결과 $I(\omega_s)$ 성분의 출력변화율은 $\pm 8.8\%$

이지만 파라데이 효과에 의한 위상변화 ϕ_s 의 출력 변화율은 $\pm 1.9\%$ 로써 매우 안정됨을 알 수 있었다. Sagnac 간섭계형 광섬유 광전류센서의 선형성 실험결과 AC 인가 전류신호의 크기(~ 1000 Arms)에 따라 출력값이 9mrad까지 선형적으로 증가함을 알 수 있었다. 그리고 실험 결과를 통해서 측정된 감도는 8.6 nrad/Arms였다.

참 고 문 헌

- [1] Shin-Chun Lin and Thomas G. Giallorenzi, "Sensitivity analysis of the Sagnac-effect optical-fiber ring interferometer," *Applied Optics*, vol. 18, no. 6, pp. 915, 1979.
- [2] K. B. Rochford, G. W. Day and P. R. Forman, "Polarization dependence of response functions in 3×3 sagnac optical fiber current sensors," *J. Lightwave Tech.*, vol. 12, no. 8, pp. 1504, 1994.
- [3] R. T. de Carvalho and J. Blake, "Simultaneous Measurement of Electric and Fields using a Sagnac Interferometer," *10th Optical Fiber Sensors Con.*, pp. 411, 1994.
- [4] J. Blake, P. Tantaswadi and R. T. de Carvalho, "In-line Sagnac Interferometer for Magnetic Field Sensing," *10th Optical Fiber Sensors Con.*, pp. 419, 1994.
- [5] Ding ding tang, A. H. Rose, G. W. Day and Shelley 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.
- [6] K. Bohnert, H. Brandle and G. Frosio, "FIELD TEST OF INTERFEROMETRIC OPTICAL FIBER HIGH-VOLTAGE AND CURRENT SENSORS," *10th Optical Fiber Sensors Con.*, pp. 16, 1994.
- [7] Kyung S. Lee, "New Compensation Method for Bulk Optical Sensors with Multiple Birefringence," *Applied Optics*, vol. 28, no. 11, pp. 2001, 1989.
- [8] P. A. Nicati and Ph. Robert, "Stabilized Sagnac optical fiber current using one phase and two amplitude modulations," *8th Con. Optical Fiber Sensors*, pp. 402 1992.
- [9] H. S. kang, R. S. Jung, K. S. Lee, C. J. Kim, "The Optium Design for a Sagnac Fiber Current Sensor Possessing Birefringence," *17th Congress of the International Commission for Optics*, Korea, pp. 1155, 1996.

저 자 소 개



丁來聲(正會員)

1969년 3월 16일생. 1995년 2월 성균관대학교 전자공학과 졸업. 1997년 2월 성균관대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1997년 현재 삼성전자 연구원



姜賢緒(正會員)

1968년 7월 16일생. 1994년 2월 성균관대학교 전자공학과 졸업. 1996년 2월 성균관대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1997년 현재 성균관대학교 대학원 전자공학과 박사과정 재학중



李鍾勳(正會員)

1974년 1월 18일생. 1996년 2월 성균관대학교 전자공학과 졸업. 1997년 현재, 성균관대학교 대학원 전자공학과 석사과정 재학중



宋汀台(正會員)

1958년 5월 26일생. 1982년 한국항공대 통신공학과 졸업. 1984년 2월 연세대 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1983년 12월 ~ 1993년 2월 LG전선(주) 광 시스템 연구실 선임 연구원. 1993년 3월 ~ 현재 대우공업전문대 전자과 전임강사



李景植(正會員)

1979년 성균관대학교 전자공학과 졸업. 1978년 ~ 1980년 한국통신기술연구소(현재 전자통신연구소) 광통신 연구실 근무. 1982년 University of Colorado 전기전자 공학석사. 1985년 University of Colorado 전기전자공학박사(Electrical Eng. dept.). 1985년 ~ 1988년 미국주립표준연구소(NIST) 근무. 1990년 ~ 1994년 미 TACAN Corp. 근무. 1990년 ~ 1994년 성균관대학교 전자공학과 조교수. 1994년 4월 ~ 현재 성균관대학교 전자공학과 조교수. 1994년 4월 ~ 현재 성균관대학교 전자공학과 부교수