

## 복굴절 광섬유를 이용한 전류측정에 관한 연구

### A Study on the Current Measurement Using birefringence Fiber

장 남 영\*, 최 평 석\*, 은 재 정\*

Nam-Young Jang\*, Pyung-Suk Choi\*, Jae-Jeong Eun\*

#### 요 약

광섬유 전류 센서 특히, 단방향 편광형 광섬유 전류센서(PFOCS)에서 측정전류 정밀도는 센싱 광섬유상의 외부 환경적 변화요인 즉, 음향 진동의 변화와 전류 도체 주위에 감긴 센싱 광섬유 팬딩과 같은 내부적 변화요인에 의해 악영향을 받는다. 이와 같은 변화 요인들은 센서 헤드를 구성하는 센싱 광섬유의 복굴절 특성에 영향을 주어 결국 오전류 측정의 원인이 되고, 따라서, 단방향 PFOCS에 대한 보상 기술인 가역적 PFCOS를 이용하여, 이와 같은 복굴절 변화요인들을 억제할 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 가역적 PFOCS의 성능해석을 위해 센싱 광섬유 상에 존재하는 외부 환경적 요인과 내부 요인으로 인한 편광도 오차와 오전류를 수치해석 하였다. 또한, 가역적 PFOCS 구조에서 일반 반사경과 faraday 회전경(FRM)의 사용으로 인한 효과 및 서로 다른 광원의 파장에 대한 효과를 비교하였다. 그 결과, 편광도 오차는 633nm에서, 일반 반사경 및 FRM을 사용했을 때, 각각 2.3%와 0.0196%로 계산되었고, 1300nm에서 편광도 오차는 각각 9.87%, 0.0196%로 계산되었다. 또한, 단방향 PFOCS와 비교한 오전류 수치해석 결과, 일반 반사경 및 FRM을 사용한 경우에 각각  $9.82 \times 10^{-9} A$ ,  $1.4 \times 10^{-17} A$ 로 단방향 PFOCS의 경우보다 외부 환경변화 및 내부 변화요인에 강인한 센서 구조임이 확인되었다.

#### Abstract

Accuracy of current measurement in fiber optic current sensor(FOCS), especially, unidirectional polarimetric fiber optic current sensor(PFOCS) is affected by the environmental perturbations such as acoustic vibrations changes to the sensing fiber, and intrinsic perturbations such as the bending fiber that the sensing fiber wound around a current carrying wire. The perturbations affect the birefringence properties of sensing fiber in sensor head and cause false current readings. Thus, using compensation technique, reciprocal PFOCS, for unidirectional PFOCS, the perturbations are suppressed.

In this paper, we carried out the numerical analysis of performance in reciprocal PFOCS including the degree of polarization error, and false current of environmental and intrinsic perturbations on the sensing fiber. Also, we compared the effect of mirror with the faraday rotation mirror(FRM) in reciprocal PFOCS configuration. And, the different optical source's wavelengths, 633nm and 1300nm is used. In the results, at 633nm, using mirror and FRM, the degree of polarization error is calculated to 2.3% and 0.0196%, respectively. At 1300nm, using mirror and FRM, the degree of polarization error is calculated to 9.87% and 0.0196%, respectively. Also, compared with false current, the results is calculated to  $9.82 \times 10^{-9} A$  and  $1.4 \times 10^{-17} A$ , respectively, and show that the reciprocal PFOCS is more robust configuration than unidirectional PFOCS for environmental and intrinsic perturbations.

**Key words** : unidirectional Polarimetric Fiber Optic Current Sensor(PFOCS), reciprocal PFOCS, environmental and intrinsic perturbations, birefringence, degree of polarization error, false current

#### I. 서 론

Faraday 자기광학 효과와 Ampere 법칙에 기초한 전류 측정

\*창원대학교 전자공학과

접수 일자 : 2005. 1. 11      수정 완료 : 2005. 4. 19

논문 번호 : 2005-1-3

※본 연구는 교육인적자원부와 산업자원부의 출연금 및 보조금으로 수행한 산학협력중심대학육성사업과 2003년도 창원대학교 연구비에 의하여 연구되었습니다.

방식에 대한 연구는 지난 수십여 년에 걸쳐 전력산업에 적용되고 있는 철심형 CT(current Transformer)를 대체할 수 있는 방안으로 발전해왔다. 철심형 CT를 대체할 수 있는 전류측정 방식은 bulk 광학 소자를 이용한 방식과 광섬유를 이용한 방식으로 구분되며, 이러한 광학 소자들을 이용함으로써 철심형 CT가 지니고 있던 단점들, 즉 포화 특성 및 철공진 현상으로 인한 전력공급의 불안정, 대형화로 인한 무게 증가 및 장착의 어려움

interference)에 무관한 시스템 구현이 가능하고 넓은 대역폭 응답 특성 및 넓은 선형 동적 범위를 가지며 칩형 CT에 비해 저가라는 장점을 가진다[1-5].

이와 같은 광학 소자들을 이용한 광 전류 센서(Optical Current Sensor : OCS)는 세 가지 형태로 세분화하여 구분할 수 있으며, 이는 bulk 광학 소자를 이용한 OCS[2], 광섬유 간섭법을 이용한 OCS(Interferometric Fiber Optic Current Sensor : IFOCS)[3], 광섬유 편광측정법을 이용한 OCS(Polarimetric Fiber Optic Current Sensor : PFOCS)[4,5]가 있다. bulk 광학 소자를 이용한 OCS의 경우에는 큰 Verdet 상수를 갖는 크리стал을 이용하는 경우로 높은 민감도를 갖지만, 광학계의 정렬이 어렵고 온도 드리프트를 겪기 쉬우며 광섬유를 이용한 OCS에 비해 작은 선형 동적 범위의 단점을 가지고 있다. 이에 비해, IFOCS의 대표적인 구조인 Sagnac 간섭계의 경우에는 고정밀도의 비가역적 위상 천이를 측정하여 정밀한 전류측정이 가능하며 넓은 동적 범위를 가지지만 외부환경 변화 특히, 외부 진동에 아주 민감하다는 단점을 가진다. 또한, PFOCS는 선편광된 입사광의 편광 회전을 측정함으로써 전류측정이 가능하지만, 정확한 편광 회전을 측정하기가 어렵다는 단점이 있다. 이와 같이 광학 소자를 이용한 OCS의 단점들은 외부 환경적인 요인에 의해 영향을 받으며, 특히 FOCES의 경우에는 외부 환경적인 요인인 진동 및 온도변화 뿐만 아니라 광섬유 밴딩에 의한 내부적 요인에 의해서도 영향을 받는다.

PFOCS의 경우, 외부 환경적인 요인 및 내부적 요인들로 인한 센싱 광섬유 내의 선복굴절 변화는 가역적 현상으로, 비가역적 현상인 Faraday 효과로 인한 원복굴절 변화에 대한 편광 회전에 더해져 실제 측정하고자 하는 전류에 대한 편광 회전을 정확히 측정할 수 없도록 한다. 따라서 외부 환경적인 요인 및 내부적 요인에 의한 영향을 최소화 할 수 있는 FOCES의 구조에 대한 연구가 활발히 진행되어 오고 있으며, 특히, PFOCS의 경우, 단방향 구조에서 가역적 구조인 양방향 구조를 갖는 FOCES가 제안되었다[6].

단방향 구조의 PFOCS는 Faraday 효과를 이용하여 전류에 의해 발생된 자기장으로 인한 편광 회전을 출력 광의 강도 변화를 검출함으로써 편광 회전을 측정하고 이를 통해 전류를 측정하는 기술이다. 이러한 단방향 구조의 PFOCS는 센싱 광섬유에 가해지는 외부 환경적 변화 요인인 온도 변화와 기계적 진동 및 음향 진동으로 인한 선복굴절 변화로 측정 전류의 오차를 유발하게 되고 측정 정밀도에 큰 영향을 미치게 된다. 이에 반해, 가역적 구조인 양방향 구조는 외부 환경적 요인 및 내부 요인으로 인한 센싱 광섬유 내의 선복굴절 변화를 서로 상쇄시키는 역할을 함으로써 오전류 측정을 줄일 수 있으며, 비가역적 현상인 Faraday 회전 즉 편광 회전은 그 감도를 2배로 증가시킬 수 있기 때문에 보다 정밀한 전류 측정을 가능하게 한다.

따라서 본 논문에서는 가역적 구조를 갖는 PFOCS의 측정 전류 정밀도에 대한 연구를 위해 편광도(Degree of Polarization)를 외부 환경적 요인 및 내부적 요인으로 인한

선복굴절 변화에 대하여 수치해석 하였고, 측정 전류 정밀도에 미치는 영향에 대하여 분석하였다. 본 논문의 II장에서는 PFOCS의 전류 측정원리에 대하여 설명하고 III장에서는 가역적 PFOCS의 구조 및 출력 편광 상태에 대하여 논의한다. IV장에서는 외부 환경적 요인 및 내부 요인에 의한 선복굴절 변화에 따른 편광도 변화를 수치해석하고 그 결과를 분석한 후, V장에서 결론을 맺는다.

## II. PFOCS의 전류 측정 원리

전류가 흐르는 도선 주위에 감긴 광섬유 내로 빛이 전파될 때, 유도 자기장은 Faraday 자기 광학 효과에 의해 선편광된 입사광에 대하여 편광 회전을 발생시킨다. 이와 같은 편광 회전  $\theta_F$ 는 다음으로 주어진다.

$$\theta_F = V \oint \bar{H} \cdot d\bar{l} \quad (1)$$

여기서  $V$ 는 광섬유의 매질 특성을 나타내는 Verdet 상수이고  $\bar{H}$ 는 빛의 전파 방향에 따른 자기장의 세기 그리고  $\bar{l}$ 은 광섬유 루프에 따른 광 경로이다. Ampere 법칙으로부터, 도선 주위의 자기장에 대한 페루프 적분은 도선을 통해 흐르는 전류  $I$ 에 비례하고 다음으로 나타낼 수 있다.

$$I = \oint \bar{H} \cdot d\bar{l} \quad (2)$$

따라서 PFOCS의 편광 회전  $\theta_F$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_F = VNI \quad (3)$$

여기서  $N$ 은 전류가 흐르는 도선 주위에 감은 광섬유의 권선수이고 Verdet 상수  $V$ 는 사용 광원의 파장과 온도 ( $T_A$ )에 의존하는 매질 상수로서 Faraday 회전에 영향을 미치며, 온도에 의한 Verdet 상수의 변화는 다음으로 주어진다.

$$\frac{1}{V} \left( \frac{dV}{dT_A} \right) = (0.69 \pm 0.03) \times 10^{-4} / K \quad (4)$$

여기서 파장에 대한 Verdet 상수의 변화는  $1.875/\lambda^2$ 에 비례한다. 파장에 대한 Verdet 상수의 변화는 그림 1에 나타내고 있으며, 예를 들어, 인가 전류 1A를 기준으로 광원의 파장이 633nm이면, Verdet 상수는 4.68  $\mu\text{rad}/\text{A}$ 가 되고 광원의 파장이 1300nm이면, 1.109  $\mu\text{rad}/\text{A}$ 가 된다.

이와 같은 Verdet 상수의 값이 작기 때문에 충분한 Faraday 회전을 얻기 위해서는 빛이 진행하는 경로를 길게 해야만 하며, 이는 센싱 광섬유의 권선수  $N$ 을 증가시킴으로써 쉽게 얻을 수 있다. 따라서 Faraday 회전을 측정함으로써 (3)식을 통해 인가된 전류  $I$ 을 측정할 수 있다.

하지만, 단방향 구조의 PFOCS의 편광 회전  $\theta_F$ 에 영향을 미치는 센싱 광섬유상의 복굴절 변화는 외부 환경적인 요인과 내부 요인으로 나눌 수 있다. 외부 환경적인 요인 즉, 온도 변화 및 기계적 진동, 음향 진동은 센싱 광섬유 내에 선복굴절 변화를 야기 시키며 동시에 센싱 광섬유의 구조적 문제로 발생하는 내부적 요인 즉 밴딩으로 인한 선복굴절 변화 또한 편광 회전에 악영향을 미친다. 따라서 오전류 발생의 원인이 되는 선복굴절 변화에 대하여, 특수 광섬유인 spun형 고 복굴절 광섬유나 twist한 저 복굴절 광섬유를 사용하여 상대적으로 선복굴절의 효과를 억제하기 위한 내부 원복굴절을 증가시키는 것이 요구되며, 또한 선복굴절을 최소화할 수 있는 FOCS 구조가 필요하며, 이는 다음 장에 설명하였다.

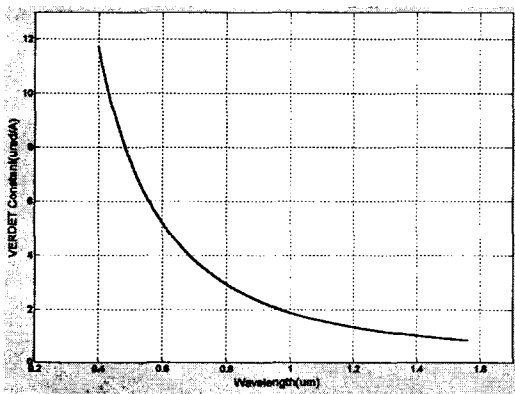


그림 1. 광원의 파장에 따른 Verdet 상수  
Fig. 1. Verdet constant on the wavelength of light source

### III. 가역적 PFOCS 구조 및 출력 편광 특성

그림 2는 센싱 광섬유의 외부 환경적 요인이나 내부적 요인으로 인해 발생하는 선복굴절을 억제하고 최소화하기 위한 가역적 PFOCS 구조를 나타낸 것으로 단방향 구조가 아닌 양방향 구조를 갖는다. 따라서 센싱 광섬유 상에 밴딩이나 진동 등에 의해 발생한 선복굴절( $\rho$ )과 센싱 광섬유를 twist함으로써 선복굴절 효과를 억제하기 위한 내부 원복굴절( $T$ )이 동시에 존재하게 된다. 하지만, 가역적 PFOCS 구조에 의해, 센싱 광섬유 상에서 발생할 수 있는 선복굴절 및 내부 원복굴절은 가역적 현상이기 때문에, 이와 같은 복굴절들로 인한 가역적 회전은 빛이 센싱 광섬유 내로 전파된 후 다시 거울에 의해 반사되어 되돌아 올 때, 서로 상쇄되어 사라지게 되며, 비가역적 현상인

Faraday 자기 광학 효과에 의한 Faraday 회전( $\theta_F$ )만이 서로 중첩되어 두 배가 된다. 따라서 그림 2의 가역적 PFOCS 구조는 단방향 구조의 오전류 발생 원인이 되는 선복굴절을 최소화시키는 장점을 가진다[6,7].

또한, 그림 2의 가역적 PFOCS를 구성하고 있는 광학 소자들은 bulk 소자 대신에 전 광섬유 소자로 구성되며 이는 bulk 소자를 이용할 경우 발생하는 광학계 정렬의 어려움과 그로 인한 광 손실은 측정 전류의 오차로 나타나기 때문에, 광 손실을 최소화하기 위해 전 광섬유 소자를 이용한 가역적 PFOCS를 고려하였다.

가역적 PFOCS 구조에서 선복굴절 효과를 보다 개선하기

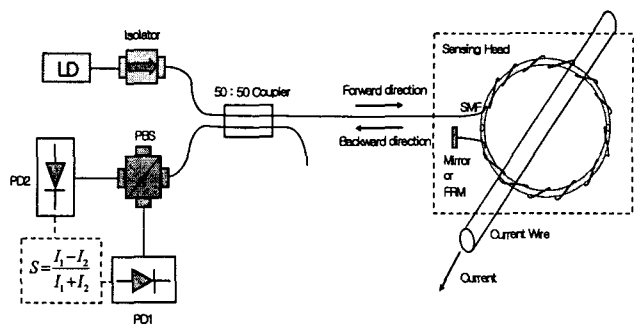


그림 2. 가역적 PFOCS의 구조  
Fig. 2. The configuration of reciprocal PFOCS

위해 일반 반사경 대신 Faraday 회전경(Faraday Rotator Mirror : FRM)을 사용함으로써, 가역적인 선복굴절 변화에 따른 편광 변화를 보상할 수 있다. 일반적으로 FRM의 구조는 Faraday rotator와 일반 반사경으로 구성되며, Faraday rotator는 입력 광이 한번 통과할 때 마다 입사 편광을  $45^\circ$ 로 회전시키며 여기서, 편광 회전은 Faraday 자기 광학 효과로 발생하는 비가역적 현상이므로 다시 반사경에 반사되어 Faraday rotator를 통과함으로써 실제 입사 편광에 대하여  $90^\circ$ 의 위상차를 가지게 되며, 가역적 PFOCS 상에서 발생할 수 있는 가역적 복굴절 변화에 의한 편광 변화는 FRM을 통해 나올 때 보상되게 된다.

가역적 PFOCS의 출력 편광 상태는 Jones 행렬 계산을 이용하여 구할 수 있으며 다음으로 표현할 수 있다.

$$E_{out} = \frac{1}{2} F_{backward} \cdot M \cdot F_{forward} \cdot E_{in} \quad (5)$$

여기서,  $E_{in}$ 은 선편광된 입력 광을 나타내고  $F_{forward}$ 는 센싱 광섬유로 입사된 입력 광이 전방으로 진행할 때의 센싱 광섬유 행렬,  $M$ 은 일반적인 반사경의 Jones 행렬을 나타내며,  $F_{backward}$ 는 센싱 광섬유로 입사된 입력 광이 후방으로 반사되어 나올 때의 센싱 광섬유 행렬을 나타낸다. 또한,  $F_{forward}$ 는 다음으로 표현할 수 있다.[8]

$$F_{forward} = \begin{bmatrix} A & -B \\ B & A^* \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$A = \cos(\phi_f/2) + j\cos\chi_f \sin(\phi_f/2) \quad (7)$$

$$B = \sin\chi_f \sin(\phi_f/2) \quad (8)$$

$$\phi_f^2 = \rho^2 + 4(\theta_F + T)^2 \quad (9)$$

$$\tan\chi_f = 2(\theta_F + T)/\rho \quad (10)$$

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서,  $\theta_F$ 는 전류에 의해 유도된 Faraday 회전이고  $T$ 는 센싱 광섬유를 twist 함으로서 얻어진 내부 원복굴절,  $\rho$ 는 외부 환경적 요인(특히, 음향 진동)과 내부적 요인인 센싱 광섬유의 밴딩으로 인한 전체 선복굴절을 나타낸다. 여기서, 전체 선복굴절 및 원복굴절은 센싱 광섬유에 균일하게 분포된 경우를 고려하였다.

$F_{backward}$ 는 다음으로 표현할 수 있다.

$$F_{backward} = \begin{bmatrix} C & -D \\ D & C^* \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$C = \cos(\phi_b/2) + j\cos\chi_b \sin(\phi_b/2) \quad (13)$$

$$D = \sin\chi_b \sin(\phi_b/2) \quad (14)$$

$$\phi_b^2 = \rho^2 + 4(\theta_F - T)^2 \quad (15)$$

$$\tan\chi_b = 2(\theta_F - T)/\rho \quad (16)$$

이제, (5)식 - (16)식을 이용함으로써 센싱 광섬유의 출력을 나타내는  $E_{out}$ 은 다음 식으로 표현할 수 있고, 이때, 입력 광  $E_{in}$ 은 센싱 광섬유의 고속 복굴절 축에 대하여 평행한 입력 편광 즉, x-편광된 입력 광을 가진다고 가정하였으며,  $E_0 = 1$ 로 가정하였다.

$$E_{out} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} C & -D \\ D & C^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & -B \\ B & A^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(AC - BD) \\ \frac{1}{2}(AD + BC^*) \end{bmatrix} \quad (17)$$

또한, 그림 2에서 보는 바와 같이 센싱 광섬유 끝의 복굴절 축에 대하여  $\theta = \pm 45^\circ$ 로 정렬된 편광 빔 분할기(PBS)에 의해 각각의 광 검출기에서 검출되는 출력 광의 세기는 다음으로 표현할 수 있다.

$\theta = +45^\circ$  일 때,

$$\begin{bmatrix} E'_x \\ E'_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \cos\theta\sin\theta \\ \cos\theta\sin\theta & \cos^2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(AC - BD) \\ \frac{1}{2}(AD + BC^*) \end{bmatrix}$$

$$= \frac{1}{4} \begin{bmatrix} AC - BD + AD + BC^* \\ AC - BD + AD + BC^* \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$I_{M1} = |E'_x + E'_y|^2 = \frac{1}{4}|AC - BD + AD + BC^*|^2 \quad (19)$$

$\theta = -45^\circ$  일 때,

$$\begin{bmatrix} E'_x \\ E'_y \end{bmatrix} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} AC - BD - AD - BC^* \\ -(AC - BD - AD - BC^*) \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$I_{M2} = |E'_x - E'_y|^2 = \frac{1}{4}|AC - BD - AD - BC^*|^2 \quad (21)$$

따라서 최종 출력 광의 편광 특성을 나타내는 편광도(Degree of Polarization)  $S_M$ 는 다음으로 나타낼 수 있다.

$$S_M = \left| \frac{I_{M1} - I_{M2}}{I_{M1} + I_{M2}} \right| \\ = \sin\phi_f \cos\phi_b \sin\chi_f + \frac{1}{2} \sin\phi_b [\sin(2\chi_f - \chi_b)(\cos\phi_f - 1) \\ + \sin\chi_b(\cos\phi_f + 1)] \quad (22)$$

만약 그림 2의 가역적 PFOCS 센싱부의 반사경 대신 FRM을 적용할 경우, FRM에 대한 Jones 행렬은 입사편광을  $90^\circ$ 로 회전시키는 역할을 하기 때문에 회전행렬로 생각할 수 있고 따라서, (23)식으로 나타낼 수 있다.

$$FRM = \begin{bmatrix} \cos 2r & \sin 2r \\ -\sin 2r & \cos 2r \end{bmatrix}_{r=45^\circ} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

그리고 앞에서 설명한 과정을 반복하면, 최종 출력 광의 편광 특성을 나타내는 편광도  $S_{FRM}$ 을 다음으로 구할 수 있다.

$$S_{FRM} = \left| \frac{I_{FRM1} - I_{FRM2}}{I_{FRM1} + I_{FRM2}} \right| \\ = \frac{1}{2} \sin\phi_b [\sin(2\chi_f + \chi_b)(\cos\phi_f - 1) - \sin\chi_b(\cos\phi_f + 1) \\ - \sin\phi_f \cos\phi_b \sin\chi_f] \quad (24)$$

만약 그림 2에 나타낸 가역적 PFOCS에 대하여 외부 환경적 요인 및 내부 요인으로 인한 복굴절 변화가 없고 센싱 광섬유를 twist하지 않았을 경우를 가정했을 때, 즉, 선복굴절( $\rho$ )과 내부 원복굴절( $T$ )이 영일 때, (9), (10)식 및 (15), (16)식의  $\phi_f = \phi_b = 2\theta_F$ ,  $\chi_f = \chi_b = \pi/2$ 을 가지게 되고 따라서, 이상적인 가역적 PFOCS의 출력 편광도  $S_{M,ideal}$  및  $S_{FRM,ideal}$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$S_{M,ideal} = S_{FRM,ideal} = \sin(4\theta_F) \quad (25)$$

여기서,  $\theta_F$ 는 Faraday 자기 광학 효과에 의한 Faraday 회전

으로 단지 전류에 의한 편광 회전이 발생하게 되고 이때,  $\theta_F$ 는 아주 작은 값을 가지기 때문에 (25)식은 다음으로 근사화 할 수 있다.

$$S_{M, ideal} = S_{FRM, ideal} = 4\theta_F \quad (26)$$

(26)식은 센싱 광섬유 상에 발생하는 선복굴절( $\rho$ ) 및 원복굴절( $T$ )에는 무관한 값이지만, 실제 가역적 PFOCS의 경우, 출력 광의 편광도를 나타내는 식에 선 및 원복굴절 항들이 포함되어 있다. 따라서 높은 내부 원복굴절을 갖는 특수 광섬유(spun형 고 복굴절 광섬유)의 사용이나 그림 2의 센싱 광섬유처럼 광섬유를 twist함으로서 선복굴절의 영향을 억제할 수 있으며, 이는  $\rho/2T \ll 1$ ,  $\theta_F \ll \rho \ll T$ 인 조건을 만족해야 한다[6]. 따라서 본 논문에서는  $\rho/2T \ll 1$ ,  $\theta_F \ll \rho \ll T$  조건을 만족시키기 위해, 참고문헌[6],[9]에서 제안한 센싱 광섬유의 기하학적 구조 및 음향진동으로 인해 발생된 실제 선복굴절 및 원복굴절 값을 고려하였고, 고려된 값들을 다음 장의 수치해석 파라메타로 사용하였다.

#### IV. 가역적 PFOCS의 편광 특성 수치해석 및 분석

이번 장에서는 III장에서 설명한 가역적 PFOCS에서 외부 환경적인 요인으로 인한 선복굴절 변화가 편광도에 미치는 영향을 해석하기 위해 편광도 오차를 수치해석 하였으며, 편광도 오차  $S_{Dev}$ 는 다음으로 나타낼 수 있다.

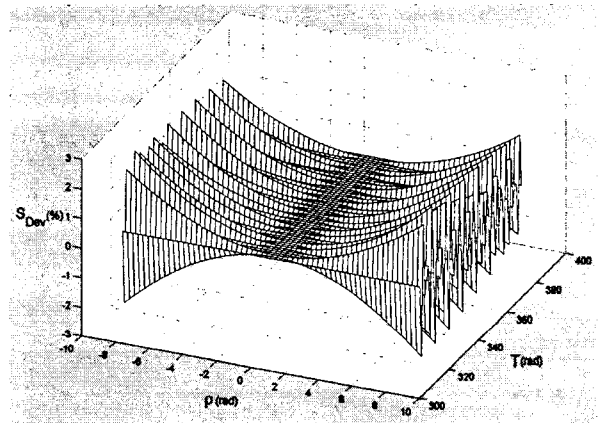
$$S_{Dev} = \frac{S - S_{ideal}}{S_{ideal}} \times 100(\%) \quad (27)$$

여기서,  $S$ 는 가역적 PFOCS의 출력 편광도를 나타낸 것이고  $S_{ideal}$ 은 이상적인 경우의 편광도를 나타낸다. 또한, 가역적 PFOCS의 광원의 파장으로 633nm와 1300nm를 사용했을 때, 편광도 오차의 변화는 거울을 사용했을 경우( $S_M$ )와 FRM을 사용했을 경우( $S_{FRM}$ )에 대하여 비교·분석하였다. 또한, 선복굴절 변화에 따른 측정전류의 오차를 분석하였으며, 가역적 PFOCS에 의한 측정전류 오차는 단방향 PFOCS의 결과[9]와 비교하였다.

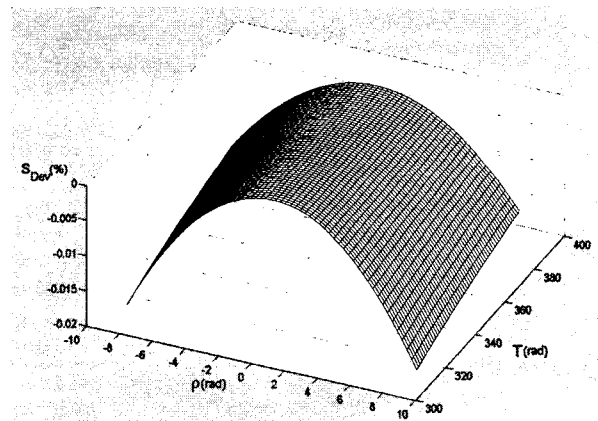
참고문헌[6],[9]에서 제안한 실제 센싱 광섬유의 기하학적 구조 및 음향진동 그리고 밴딩을 고려한 최대 총 선복굴절  $\rho = 2.8\pi$ 이고 최대 원복굴절  $T = 122\pi$  이다. 따라서 본 논문에서는 선복굴절 변화에 따른 편광도 오차를 수치해석 하기 위해  $\rho$ 의 범위를  $[-2.8\pi, 2.8\pi]$ ,  $T$ 의 범위를  $[100\pi, 122\pi]$ 로 가정하여 사용하였다. 또한, 광원의 파장이 각각 633nm, 1300nm인 경우에 대하여 인가전류  $I = 1000A$ , 권선수  $N=1$ 로 가정하여 각각  $4.68 \times 10^{-3}rad$ ,  $1.109 \times 10^{-3}rad$ 의 Faraday 회전  $\theta_F$ 를 사용하였다.

그림 3은 선복굴절 및 원복굴절 변화에 따른 편광도 오차를

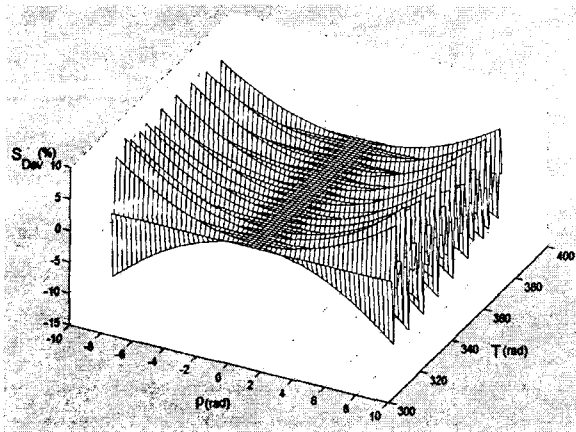
수치 해석한 결과로 가역적 PFOCS 구조에서 광원의 파장과 적용된 반사경을 달리했을 경우의 결과를 나타내고 있다. 그림 3(a)는 광원으로 633nm인 파장과 일반 반사경을 사용했을 경우에 이상적인 편광도에 대한 실제 편광도의 오차는 선복굴절의 변화 범위가  $[-2.8\pi, 2.8\pi]$ , 원복굴절의 범위가  $[100\pi, 122\pi]$ 일 때, 최대 2.3% 까지 다소 높게 나타났으나 그림 3(b)에서는 FRM을 사용하여 보상된 경우로 최대 편광도 오차가 0.0196% 으로 거의 영이 됨을 알 수 있다. 또한, 광원의 파장이 1300nm인 경우, 일반 거울을 사용했을 때의 최대 편광도 오차는 633nm의 광원을 사용했을 경우에 비해 증가할 것으로 예상되며, 이는 편광도 오차를 나타내는 (24)식의 분모 즉,  $\sin(4\theta_F)$ 의 값이 광원의 파장 증가로 인해 감소하기 때문이다. 이는 Faraday 회전에 영향을 주는 Verdet 상수값이 파장의 제곱에 비례하여 감소하기 때문이다. 그림 3(c)는 1300nm 파장과 일반 반사경을 사용했을 경우의 편광도 오차를 나타낸 것으로, 최대 편광도 오차는 예상했던 것처럼, 633nm에 비해 9.87% 까지 증가했지만, FRM을 사용했을 경우, 최대 편광도 오차는 0.0196% 로 633nm 에서와 같이 거의 영이 됨을 확인할 수 있다.



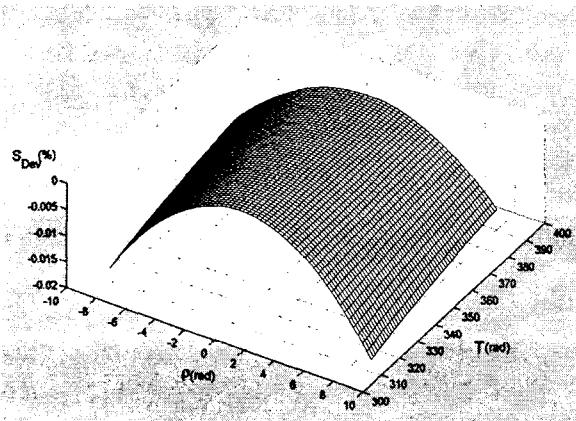
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 3. 선복굴절 및 원복굴절 변화에 따른 가역적 PFOCS의 편광도 오차  $S_{Dev}$ 의 수치해석 : (a) 광원의 파장  $\lambda = 633nm$ , 일반 반사경 M을 사용했을 경우의 편광도 오차  $S_{Dev}$ , (b) 광원의 파장  $\lambda = 633nm$ , FRM을 사용했을 경우의 편광도 오차  $S_{Dev}$ , (c) 광원의 파장  $\lambda = 1300nm$ , 일반 반사경 M을 사용했을 경우의 편광도 오차  $S_{Dev}$ , (d) 광원의 파장  $\lambda = 1300nm$ , FRM을 사용했을 경우의 편광도 오차  $S_{Dev}$ .

Fig. 3. Numerical analysis of Degree of Polarization error  $S_{Dev}$  on the variable linear and circular birefringence in reciprocal PFOCS : (a) Using the wavelength of optical source,  $\lambda = 633nm$ , and general mirror M, Degree of Polarization error  $S_{Dev}$ , (b) Using the wavelength of optical source,  $\lambda = 633nm$ , and FRM, Degree of Polarization error  $S_{Dev}$ , (c) Using the wavelength of optical source,  $\lambda = 1300nm$ , and general mirror M, Degree of Polarization error  $S_{Dev}$ , (d) Using the wavelength of optical source,  $\lambda = 1300nm$ , and FRM, Degree of Polarization error  $S_{Dev}$ .

그림 4는 그림 3에서 수치 해석한 편광도 오차를 보다 정확히 분석하기 위해 참고문헌[6],[9]에서 제시했던 파라메타 값을 고려하여 2차원 그래프로 나타낸 것으로, 이는 광원의 파장이 633nm와 1300nm를 사용했을 경우, 각각의 Faraday 회전  $\theta_F$ 가  $4.68 \times 10^{-3}rad, 1.109 \times 10^{-3}rad$ 을 갖고 원복굴절  $T = 122\pi$ 를 가질 때,  $[-2.8\pi, 2.8\pi]$  범위의 선복굴절 변화에 대한 편광도 오차를 나타내었다.

그림 4에서 보는 바와 같이 4가지 경우에 대한 편광도 오차는 선복굴절  $\rho$ 의 범위가  $[-2.8\pi, 2.8\pi]$ 일 때, 모두 0.00136% 이하로 계산되었으며, 이는 본 논문에서 고려한 가역적 PFOCS 구조가 외부 환경적 요인 및 내부 요인으로 인한 측정전류 오차를 거의 발생시키지 않음을 보여주고 있다. 이는 수치해석에 사용된  $\rho/T = 2\%$ 로  $\rho/2T \ll 1, \theta_F \ll \rho \ll T$ 의 조건을 만족하기 때문이다. 하지만,  $\rho/T$ 의 비가 아주 작은 값을 가지지 않는다면, 가역적 PFOCS의

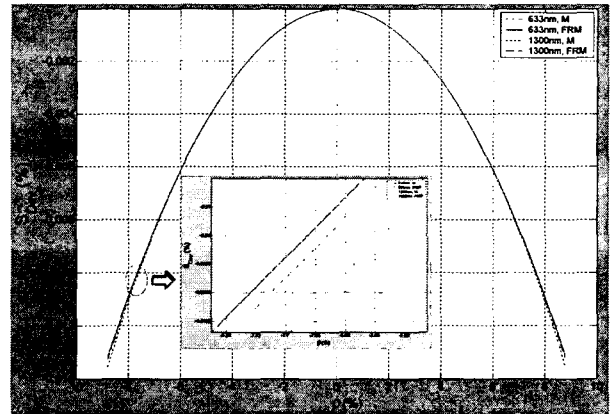


그림 4. 선복굴절 변화에 따른 편광도 오차 (633nm에서  $\theta_F = 4.68 \times 10^{-3}rad$ , 1300nm에서  $\theta_F = 1.109 \times 10^{-3}rad, T = 122\pi$ )

Fig. 4. Degree of Polarization error on the variable linear birefringence

(At 633nm and 1300nm,  $\theta_F = 4.68 \times 10^{-3}rad, \theta_F = 1.109 \times 10^{-3}rad$ , respectively and  $T = 122\pi$ )

편광 특성은 변화할 것이고 이를 그림 5에 나타내었다. 여기서,  $\rho$ 의 범위는  $[-2.8\pi, 2.8\pi]$ ,  $T = 5.6\pi$ , 즉  $\rho/T = 50\%$ 로 가정하였다.

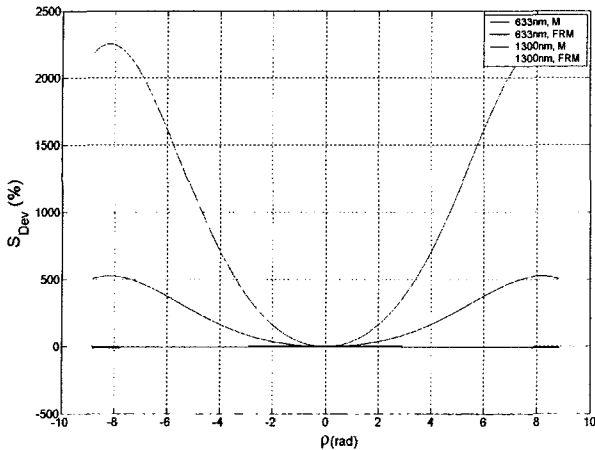


그림 5. 선복굴절과 원복굴절의 비가 작은 값을 갖지 않을 때( $\rho/T = 50\%$ ), 편광도 오차의 수치해석

Fig. 5. When the ratio of  $\rho$  to  $T$  is not small( $\rho/T = 50\%$ ), numerical analysis of Degree of Polarization error  $S_{Dev}$

그림 5는  $\rho/T$ 의 비가 작지 않을 경우, 즉 선복굴절을 억제하는 효과를 가지는 원복굴절이 선복굴절에 비해 아주 크지 못한 경우로 가역적 PFOCS에서 일반 반사경을 사용한 구조의 편광도 오차는 급격히 증가함을 알 수 있지만, 일반 반사경 대신 FRM을 사용한 구조는 파장에 관계없이 거의 영의 편광도 오차를 가진다. 따라서 가역적 PFOCS의 경우, 반사경을 사용한 구조에서는 선복굴절을 억제하기 위해 상대적으로 아주 큰 원복굴절을 갖도록 하는 것이 필요하지만, FRM을 사용한 구조에서는 선복굴절에 대하여 아주 큰 원복굴절이 필요치 않음을 알 수 있다. 따라서 전류 측정 센서로서 가역적 PFOCS의 경우, FRM을 사용한 구조가 보다 바람직한 것으로 평가된다.

그림 6과 그림 7은 참고문헌[9]에 나타나 있는 음향 진동에 의한 선복굴절 변화에 따른 오전류 계산 결과를 나타낸 것이다. 참고문헌[9]에서는 단방향 PFOCS에 대하여  $3g_{pp}$ (최대 피크가 약  $0.15\pi rad$ )의 음향 진동을 가했을 때, 계산된 오전류가 약  $400A$  정도임을 보여주고 있으며, 이러한 오전류를 없애기 위해 spun형 고 복굴절 광섬유를 사용하여 거의 영의 결과를 얻었다. 따라서 참고문헌[9]의 결과와 본 논문에서 고려한 양방향 구조인 가역적 PFOCS의 출력 전류 특성 비교를 위해, 본 논문에서 사용한 수치해석 파라메타는 spun 형 고 복굴절 광섬유를 사용하는 대신, 이와 동일한 원복굴절 효과를 갖도록 한 참고문헌[6]의 센싱 광섬유 구조를 적용하여 원복굴절  $T = 122\pi$ , 밴딩으로 인한 선복굴절  $\rho_{dc} = 2.64\pi$ , 음향 진동으로 인한 선복굴절  $\rho_v = 0.15\pi \cos(400\pi t)$ 을 이용하였다. 여기서, 총 선복굴절  $\rho = \rho_{dc} + \rho_v$ 는 센싱 광섬유에 균일하게 분포된다고 가정하였고,  $\rho_{dc}$ 는 dc 바이어스 항으로 고려될 수 있다. 또한, 인가 전류를 영으로 두어 Faraday 회전  $\theta_F = 0$ 으로 가정하였다.

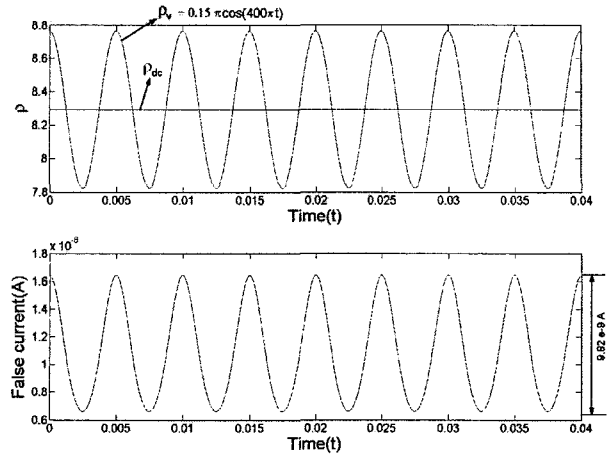


그림 6. 음향 진동으로 인한 선복굴절  $\rho_v$ 가 포함된 총 복굴절  $\rho$ 의 변화에 대한 오전류 수치해석(일반 반사경 사용)

Fig. 6. Numerical analysis of False current on the variation of total linear birefringence  $\rho$  included linear birefringence  $\rho_v$  due to the acoustic vibration(using the mirror)

그림 6과 7에서 보는 바와 같이 가역적 PFOCS에서 일반 반사경을 사용한 경우나, FRM을 사용한 경우 모두 총 선복굴절에 의한 오전류는 각각  $9.82 \times 10^{-9}A$ ,  $1.4 \times 10^{-17}A$ 으로

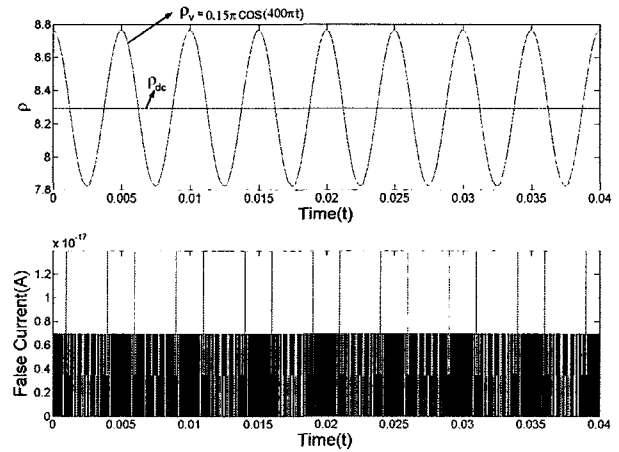


그림 7. 음향 진동으로 인한 선복굴절  $\rho_v$ 가 포함된 총 복굴절  $\rho$ 의 변화에 대한 오전류 수치해석(FRM 사용)

Fig. 7. Numerical analysis of False current on the variation of total linear birefringence  $\rho$  included linear birefringence  $\rho_v$  due to the acoustic vibration(using the FRM)

거의 영으로 계산되었다. 따라서 참고문헌[9]에서 나타내고 있는 단방향 PFOCS의 오전류를 보상할 수 있으며, 또한 spun형 고 복굴절 광섬유를 사용한 경우와 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 고가의 spun형 고 복굴절 광섬유를 사용하는

대신 가역적 PFOCS 구조와 저복굴절 광섬유를 twist한 센싱 광섬유 구조 그리고 FRM을 사용함으로써 외부 환경적 요인 특히, 음향 진동에 강인한 광섬유 전류센서를 제작할 수 있을 것으로 판단된다.

V. 결론

양방향성의 가역적 PFOCS의 편광 특성 및 성능 해석을 위해 편광도 오차와 오전류 수치해석을 수행하여, 외부 환경적 변화에 민감한 FOCs의 단점을 극복할 수 있음을 확인하였다. 또한, 편광도 오차의 수치해석을 통해 가역적 PFOCS에 사용된 일반 반사경과 FRM에 의한 영향을 분석하였을 뿐만 아니라 광원의 파장이 각각 633nm, 1300nm일 때, 그 효과를 확인하였다.

633nm의 파장에서 가역적 PFOCS에 대한 수치해석 결과는 일반 반사경을 사용했을 경우에 비해 FRM을 사용한 경우, 보다 우수한 편광도 오차 특성을 확인할 수 있었고, 편광도 오차는 각각 2.3%와 0.0196%로 계산되었다. 또한, 1300nm의 파장에서 편광도 오차는 각각 9.87%, 0.0196%로 일반 반사경을 사용한 경우에는 광원의 파장에 따른 편광도 오차의 변화를 확인할 수 있지만, FRM을 사용한 경우에는 광원의 파장에 대하여 거의 동일한 결과를 얻었다. 따라서 가역적 PFOCS 구조에 사용된 반사경은 일반 반사경의 사용 대신 FRM을 사용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

또한, 가역적 PFOCS의 성능을 확인하기 위해 본 논문에서는 단방향 PFOCS의 오전류 측정값과 비교하였다. 그 결과, 단방향 PFOCS의 경우에는 400A의 오전류가 발생했지만, 가역적 PFOCS에 대한 수치해석 결과, 일반 반사경 및 FRM을 사용한 경우에 각각  $9.82 \times 10^{-9}A$ ,  $1.4 \times 10^{-17}A$ 로 단방향 PFOCS에 비해 그 성능이 우수함을 확인하였다.

참고 문헌

[1] C. P. Yakymyshyn, M. A. Brubaker, P. M. Johnston and C. Reinbold, "Manufacturing challenges of optical current and voltage sensors for utility applications," *SPIE.*, Vol. 3201, pp. 2-19, 1997.

[2] Y. N. Ning and D. A. Jackson, "Review of optical current sensor using bulk-glass sensing elements," *Sensors and Actuators A*, Vol. 39, pp. 219-224, 1993.

[3] S. X. Short, J. U. de Arruda, A. A. Teslikov, and J. N. Blake, "Elimination of Birefringence Induced Scale Factor Errors in the In-Line Sagnac Interferometer Current Sensor," *JLT.*, Vol. 16. No. 10, pp. 1844-1850, 1998.

[4] A. M. Smith, "Birefringence induced by bends and twists in single-mode optical fiber," *Applied*

*Optics*, Vol. 19, no. 15, pp. 2606-2611, 1980.

[5] 장남영, 최평석, 은재정, 박해수, "편광측정법에 의한 광섬유 전류 센서 제작에 관한 연구," *전자공학회논문지* 제41권 SD편 제6호, pp. 443-451, 2004.

[6] A. J. Rogers, J. Xu, and J. Yao, "Vibration Immunity for Optical-Fiber," *JLT.*, Vol. 13, No. 7, pp. 1371-1377, 1995.

[7] P. Tantaswadi, "Simulation of birefringence effects in reciprocal fiber-optic polarimetric current sensor," *Proceeding of SPIE*, Vol. 4517, pp. 158-164, 2001.

[8] W. J. Tabor and F. S. Chen, "Electromagnetic Propagation through Materials Possessing both Faraday Rotation and Birefringence : Experiments with Ytterbium Orthoferrite," *J. Appl. Phys.*, Vol. 40, No. 7, pp. 2760-2765, 1969.

[9] S. X. Short, P. Tantaswadi, R. T. de Carvalho, B. D. Russell, and J. Blake, "An Experimental Study of Acoustic Vibration Effects in Optical Fiber Current Sensors," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 11, No. 4, pp. 1702-1706, 1996.



장 남 영(Nam-Young Jang)

1998년 창원대학교 전자공학과(공학사)  
2001년 창원대학교 전자공학과(공학석사)  
현재 창원대학교 전자공학과(박사과정)  
관심분야 : 광섬유센서, 광 계측, 광신호

처리, 홀로그래피



최 평 석(Pyung-Suk Choi)

1978년 성균관대학교 전자공학과(공학사)  
1980년 연세대학교 전자공학과(공학석사)  
1985년 연세대학교 전자공학과(공학박사)  
1979년~1986년 유한공업전문대학 전자과  
조교수

1979년~1986년 유한공업전문대학 전자과 조교수

1986년~현재 창원대학교 전자공학과 교수

관심분야 : 광신호처리, 광섬유센서, 홀로그래피



은 재 정(Jae-Jeong Eun)

1982년 연세대학교 전자공학과(공학사)  
1986년 연세대학교 전자공학과(공학석사)  
1994년 연세대학교 전자공학과(공학박사)  
현재 창원대학교 전자공학과 교수

관심분야 : 광섬유센서, 광계측, ESPL  
광신호처리