

논문 2017-54-5-3

## 반사형 간섭계를 이용하여 신뢰성을 향상시킨 광전류센서

(Optical Current Sensors with Improved Reliability  
using an Integrated-Optic Reflective Interferometer)

김 성 문\*, 추 우 성\*, 오 민 철\*\*

(Sung-Moon Kim, Woo-Sung Chu, and Min-Cheol Oh<sup>©</sup>)

## 요 약

광전류센서는 전자기파 간섭에 영향을 받지 않으며 뛰어난 절연특성을 가지고 있어 발전소와 같은 고전압 대전류 환경에서 운용하기에 적합하다. 하지만, 온도변화와 진동과 같은 외부의 환경변화가 큰 상황에서 운용해야 하므로 센서의 높은 신뢰성이 요구된다. 그 때문에 안정성과 관련된 연구가 활발히 이루어지고 있다. 본 논문에서는 폴리머 광집적회로를 이용한 편광회전반사간섭계를 이용하여 신뢰성을 향상시킨 광전류센서를 제안한다. 여러 가지 독립적인 광소자들을 하나의 칩 상에 집적하여 안정성을 향상시키고 대량생산을 통한 저가격의 광전류센서 제작 가능성을 높였으며, 이를 이용하여 실제 현장에 적용하기 위한 특성평가를 수행하였다. 대전력 공급원을 이용하여 0.3 kA~36 kA 범위의 전류를 광센서에 인가하였을 때 선형적인 동작특성을 볼 수 있었고 센서의 오차는  $\pm 0.5\%$  이내로 나타났다. 장시간 동작시에도 센서의 오차범위는  $\pm 0.5\%$  이내로 유지되었다. 또한, 60 Hz~10 kHz 범위에 걸친 주파수 응답 특성 측정 결과 제안된 OCT의 3-dB 주파수 대역은 10kHz를 훨씬 넘는 것으로 확인되었다.

## Abstract

Optical current sensors are suitable for operation in high voltage and high current environments such as power plants due to they are not affected by electromagnetic interference and have excellent insulation characteristics. However, as they operate in a harsh environment such as large temperature fluctuation and mechanical vibration, high reliability of the sensor is required. Therefore, many groups have been working on enhancing the reliability. In this work, an integrated optical current sensor incorporating polarization-rotated reflection interferometer is proposed. By integrating various optical components on a single chip, the sensor exhibits enhanced stability as well as the solution for low-cost optical sensors. Using this, we performed the characterization for the actual field application. By using a large power source, the current of 0.3 kA~36 kA was applied to the photosensor and the linear operation characteristics were observed. The error of the sensor was within  $\pm 0.5\%$ . Even when operating for a long time, the error range of the sensor was kept within  $\pm 0.5\%$ . In addition, the measurement of the frequency response over the range of 60 Hz to 10 kHz has confirmed that the 3-dB frequency band of the proposed OCT is well over 10 kHz.

**Keywords :** Integrated optics devices, Optical sensing and sensors, Polymer waveguides

\* 학생회원, \*\* 정회원, 부산대학교 전자공학과  
(Pusan National University)

© Corresponding Author(E-mail : mincheoloh@pusan.ac.kr)

※ 이 연구는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 수행되었습니다.

Received ; November 11, 2016 Revised ; April 3, 2017

Accepted ; April 11, 2017

## I. 서 론

최근 발전 설비에서 생성된 전력은 수백 메가와트에 이르며 이를 몇 단계에 걸쳐서 나누어서 송전 하게 되는데 전송선에서의 손실을 줄이기 위하여 345 kV 이상의 고압으로 전송하게 되며 전류량도 수 kA 이상이다.

이러한 고전압, 대전류를 측정하기 위한 기존의 전기식 측정 장비들은 절연을 위해 오일이나 가스를 채워야 하며, copper, ceramic, iron 등의 재료로 구성되어 큰 부피와 무게로 인해 설치 및 유지 보수가 어렵고 환경오염이 심하며, 철심 포화로 인해 측정대역폭이 좁으며 발열로 인해 화재 발생 가능성이 매우 높다<sup>[1~3]</sup>. 그리고 고전압 환경에서 매우 강한 전자기파 간섭(Electro-Magnetic Interference: EMI) 때문에 일반적인 전기적 계측기의 기능에 심각한 영향을 미치게 되어 측정 결과에 대한 오차를 증폭시키는 문제를 가진다.

광전류센서는 전류가 흐르는 도선에 감긴 광섬유 코일을 따라 진행하는 두 편광된 빛들 사이에 발생하는 위상 차이를 검출하여 전류량을 측정하게 된다<sup>[4~6]</sup>. 광전류센서는 넓은 측정 범위와 높은 정확도, DC 및 고주파의 AC 전류량 측정, 소형 및 경량, 서지 전류로 인한 파손 위험이 없는 높은 안전성, 절연을 위한 가스 및 절연유를 사용하지 않으므로 친환경적인 특성 등 다양한 장점들을 가진다<sup>[7~8]</sup>. 또한, 측정을 위해 사용된 광파는 전자기파와 독립적으로 전파될 수 있는 특성이 있기 때문에 EMI가 심한 환경에서도 전류량을 정확하게 측정할 수 있다<sup>[9~10]</sup>. 또한, 광통신 기술의 성장과 함께 발전해온 광소자 기술의 진보로 인해 광센서 소자에 대한 상용화 가능성은 어느 때보다 높은 단계이다. 따라서 기존에 널리 사용되고 있는 전기식 전류측정 장치에 비해 다양한 장점들이 있는 광전류센서는 현재 전력산업에서 매우 큰 관심을 받고 있다<sup>[11~12]</sup>.

전력 계측과 설비진단용으로 사용되는 광전류센서는 측정된 신호로 다양한 전력설비를 제어 및 운전해야 하므로 주변 온도 및 진동 등의 외부환경이 변화하더라도 우수한 측정 정밀도와 신뢰도가 확보되어야 한다. 최근 광전류센서를 개발하는 그룹들은 안정된 동작 특성을 가지는 광전류센서를 개발하기 위해 서로 직교하는 두 개의 편광을 이용한 반사형 편광회전 간섭계 구조를 적용한 연구를 많이 하고 있다<sup>[4, 13~14]</sup>. 두 개의 수직인 편광이 센서 끝부분의 미러에서 반사되어 돌아오는 과정에서 외부환경변화에 의한 위상차가 보상되어 외부 교란에 대해 우수한 안정성을 가지므로 넓은 온도 범위( $-40^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$ )에 걸쳐 대전류( $\sim 500\text{ kA}$ )를 안정적으로 측정할 수 있으며 높은 정확도를 가진다<sup>[8]</sup>. 그러나 기존의 편광회전 반사형 간섭계를 기반으로 한 광전류센서는 다양한 편광유지 광섬유 소자들과 고속(수십 kHz 이상) 위상변조기 등의 고가의 광소자들로 복잡하게 구성되어 있어 제한된 분야에만 적용되는 한계를 가지고

있다.

이전 연구에서 폴리머 광도파로를 기반으로 다양한 기능성 광소자들을 집적한 칩과 측정부위의 온도변화로 인한 오차를 줄이기 위해 광결정 광섬유를 이용한 센서헤드를 이용하여 편광회전 반사형 간섭계 구조를 완성하고, 이를 통해 전류량에 비례하여 광섬유 코일에서 발생하는 위상 신호를 측정할 수 있는 광전류센서를 구현하였다. 편광회전 반사간섭계를 구성하는 여러 가지 광소자들을 하나의 칩 형태로 집적하여 대량생산이 용이하고 저가격으로 광전류센서를 제작할 가능성을 높였다. 또한, 집적화로 인해 광 경로를 짧게 구성할 수 있어 광섬유 소자로 구성된 광전류센서보다 외부환경 변화에 대하여 더욱 안정적인 특성을 보인다<sup>[15~16]</sup>. 본 연구에서는 이를 이용하여 실제 산업현장에 적용하기 위해 필요한 특성측정평가를 수행하였다. 한국표준연구원의 설비를 이용하여 30 kArms 이상의 대전류를 발생시켜서 센서에 인가하여 이전과 달리 실질적인 대전류에 의한 센서 특성을 확인하였으며, 고주파수 전류원을 이용하여 센서의 응답 속도를 확인하였으며, 장시간 안정적인 동작이 가능한가를 확인하는 등 광전류센서의 실용적인 특성확인을 수행하였다.

## II. 본 론

### 1. 광전류센서의 구조 및 원리

편광회전 반사형 간섭계를 기반으로 한 광전류센서는 그림 1과 같이 전류를 센싱하는 센서 헤드 부와 인가 전류량에 비례하여 발생하는 두 편광 간의 위상차를 측정하는 간섭계, 광원, 포토디텍터로 구성된 광회로 부로 나누어진다.

SLED에서 출력된 선편광 상태의 빛은 광집적회로를 거친 후 서로 수직인 두 개의 선편광 성분으로 나누어져 센서 헤드 부로 입력된다. 센서 헤드 부의 앞부분에는 PM(polarization maintaining) 광섬유로 제작된 사분파장판(QWP)이 부착되어 선편광 성분을 원편광으로 변환시킨다. 광섬유 코일을 따라 진행하는 두 개의 원편광은 각각 독립적인 모드(eigenmode)이며, 전류에 의한 자기광학 효과를 겪으며 서로 간의 위상차를 가지게 된다. 미러에 반사된 후 돌아오는 두 개의 원편광은 입력될 때와 반대 방향으로 광섬유 코일과 QWP를 통과하게 되면서 다시 선편광으로 변환된다. 되돌아온 빛은 전류 세기에 비례하는 위상 차이값을 지니고 광집적회로부의 간섭계로 입력된다. 간섭계 구조의 광도파로

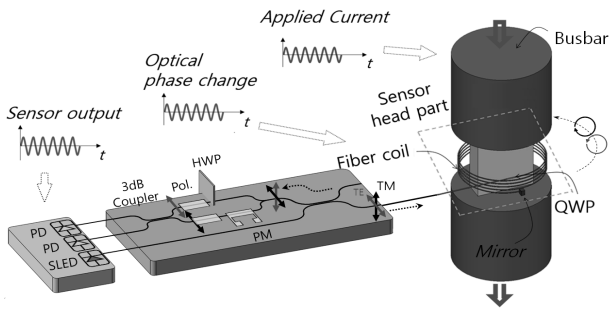


그림 1. 편광회전반사형 간섭계 구조를 이용한 광전류센서  
Fig. 1. Configuration of the optical current sensors based on integrated optical polarization rotated reflection interferometry.

방향으로 입력된 빛은 다시 두 개의 경로로 나누어져 반파장판(HWP)과 phase modulator를 각각 통과하게 된다. HWP를 통과하는 경로에서는 TM/TE 편광 변환이 발생하고, phase modulator를 통과하는 경로에서는 추가적인 위상변화를 인가하게 된다. 두 경로를 지나온 빛은 모두다 polarizer를 지나게 되어 있으며, 이때 TM 성분들이 제거된 TE 성분들만이 살아남게 되어 3-dB coupler를 지나면서 간섭을 일으키게 된다<sup>[15]</sup>.

전류 세기에 비례하는 광 위상 변화 값(Faraday effect)은  $\theta_f = VN/I$ 로 나타낼 수 있다. 여기서 N은 광섬유 코일 턴 수, I는 인가전류, 그리고 V는 Verdet 상수이다. 편광회전 반사형 간섭계 광전류센서에서 반파장판으로 인해 변화된 두 원 편광 RHCP (right handed circular polarization)와 LHCP (left handed circular polarization)는 광섬유 코일을 지나면서 전류에 의해 생기는 자기장의 세기에 비례하는 서로 간의 위상차 (Faraday effect)를 가지게 된다. 이후 두 원 편광은 미러(reflector)에 의해 반사되어 한 번 더 위상 차를 겪게 된다. 따라서 Faraday effect로 인해 발생한 두 원 편광의 위상차는  $\Phi_{tot} = 4\theta_f$ 로 나타낼 수 있다.

## 2. 광 IC 및 센서 헤드 부 제작 공정

Faraday effect에 비례하는 간섭신호를 만들기 위해 사용되는 집적형 광소자는 폴리머 광도파로 기술을 기반으로 그림 2와 같이 제작된다.

광도파로의 코어와 클래딩 층을 형성하기 위해 굴절률이 1.440과 1.430인 불소치환된 저 손실 폴리머 (ZPU, ChemOptics, Co.)를 사용하였다. 광도파로의 코어 치수는  $6.0 \times 5.8 \mu\text{m}^2$  이며 inverted rib 구조이다. 표면 플라즈몬 흡수현상을 이용하여 TM 편광을 흡수하는 TE-pass polarizer를 삽입하기 위해 1.8  $\mu\text{m}$ 의 두께를 가지는 첫

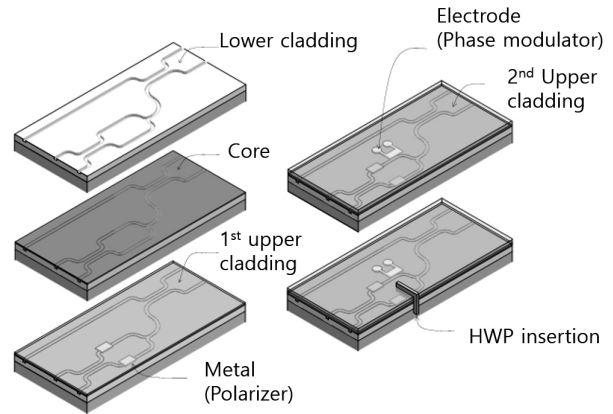


그림 2. 폴리머 광도파로를 이용한 광집적회로의 제작 과정  
Fig. 2. Schematic procedures for fabricating the optical integrated circuit made of polymer waveguide.

번째 상부 클래딩 위에 길이 9 mm의 Cr-Au 금속 패턴을 제작하였다. 두 번째 상부 클래딩 형성 이후 제작된 전극 패턴은 열 광학 효과를 이용한 위상변조기이다<sup>[15-16]</sup>. 20  $\mu\text{m}$ 의 두께를 가지는 폴리이미드 반파장판을 삽입하기 위해 다이싱 소구를 이용하여 폭 30  $\mu\text{m}$ 인 groove line을 형성하였다. 이후 반파장판을 groove line에 삽입하고 UV 경화용 에폭시를 사용하여 고정했다<sup>[17]</sup>. 마지막으로, 집적형 광소자의 입출력 단면에 광축이 정렬된 PM 광섬유 어레이를 부착하여 패키징을 하게 된다. 광섬유 센서의 일종으로 가장 널리 사용되는 광섬유 자이로와 같은 간섭계에서는 수 mdeg/h의 미세한 측정을 위해 정밀한 축 정렬이 요구된다. 하지만, 본 연구에서 구성된 광전류 센서에서는 인가되는 전류의 세기가 상당히 높기 때문에 신호대 잡음비가 높게 확보되므로 PM 광섬유의 각도 오차는 큰 문제가 되지 않는다. 본 연구에서는 silicon V-groove 상에 광축을  $\pm 3^\circ$ 의 오차 이내로 정렬하여 제작된 PM 광섬유 어레이를 사용하여 그림 3과 같이 패키징을 하였다.

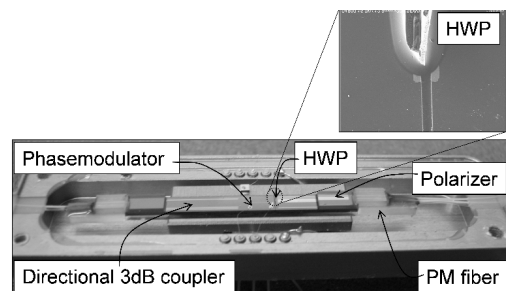


그림 3. 제작된 광집적회로와 삽입된 HWP 사진  
Fig. 3. A photograph of the optical integrated circuit and the inserted HWP (half wave plate).

실제 전류가 흐르는 도선에 설치되어 전류를 센싱하는 센서 헤드 부는 사분파장판(QWP), 광섬유 코일, 그리고 광섬유 미러로 구성된다. QWP는 편광유지 photonic crystal fiber (PCF)의 복굴절 특성을 이용하여 제작된다. 광회로 부에 연결된 PM fiber (PMF)의 광축과 45도의 각도를 가지도록 PCF를 splicing 한 후 1/4 파장의 위상 지연이 발생하도록 정확한 길이로 PCF를 절단한다. QWP 특성이 나타나는 PCF의 길이는 1.00 mm이다. 광섬유 미러는 길이 2 cm 정도의 단일모드 광섬유 끝부분에 Cr, Au를 열 증착하여 제작된다. 이후 광섬유 코일로 사용되는 Hi-Bi spun fiber 양 끝 단에 QWP와 광섬유 미러를 각각 splicing 하여 그림 4와 같이 센서 헤드 부를 제작하였다<sup>[15]</sup>. 완성된 센서 헤드 부의 무게는 500 g 미만이다.

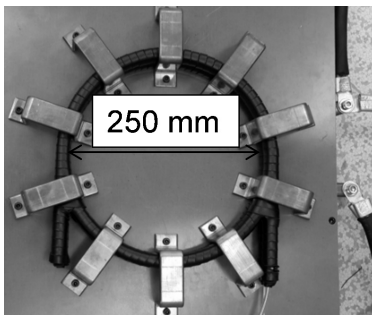


그림 4. 전류에 의한 자기장의 세기를 증폭시키기 위한 토로이드 형태의 전류 루프와 센서 헤드 사진

Fig. 4. A photograph of the sensor head part and the toroid-type current loop to amplify the magnetic field.

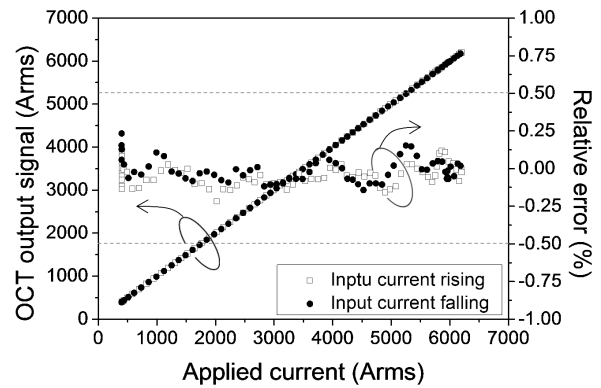
3. 광전류센서의 선형성, 정확도, 안정성, 주파수 응답, 그리고 측정 범위 확인

광전류센서의 전류량에 따른 선형성 및 정확도를 확인하기 위해 광섬유 코일은 Hi-Bi spun fiber를 지름 250 mm로 5.5 턴을 감아 제작되었으며, 전류 소스인 슬라이닥스에서 출력되는 전류량을 증폭시키기 위해 센서 헤드 부에 전류가 흐르는 도선을 10바퀴 감았으며, 광전류센서의 광원은 중심파장이 1550 nm인 SLED (superluminescent light-emitting diodes)를 사용하였다. 60 Hz, 300 Arms ~ 6.5 kArms 범위로 입력전류를 변화시켜가며 광전류센서의 상대오차를 확인하여 그림 5(a)와 같이 나타내었다. 상대오차는 광전류센서의 측정값과 전력원에서 공급되는 전류량의 차이로 나타낼 수 있다. 이때 전력원의 전류값은 유도전류 측정 방식의 전기식 CT를 이용하게 된다. 광CT에서 측정한 전류를

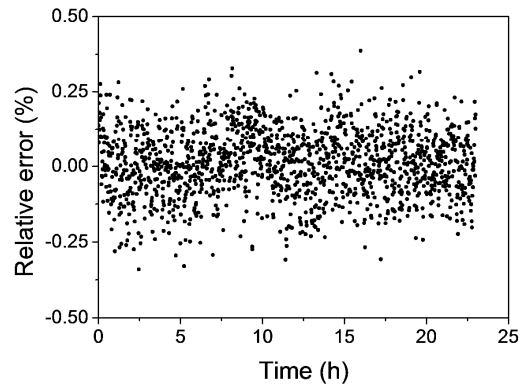
IOCT라고 하고, 전기 CT에서 측정한 전류를 IECT라고 하면 상대오차는 다음과 같이 표현된다.

$$Relative\ error(\%) = \frac{I_{OCT} - I_{ECT}}{I_{ECT}} \times 100 \quad (1)$$

검은색과 빈 점들은 인가 전류량이 증가할 때와 감소할 때 측정된 값들을 나타낸 것이다. 이때의 상대오차는 ±0.5% 이내이고, 이 결과는 0.5s accuracy class (IEC 60044-8)에서 기준으로 제시된 조건을 만족한다. 인가전류를 1.5 kArms로 유지 시킨 상태에서 23시간 동안 장시간 측정실험에서도 센서의 출력의 상대 오차가 ±0.5%인 것을 그림 5(b)와 같이 확인하였다.



(a)



(b)

그림 5. ±0.5% 오차범위 이내 (IEC 60044-8 0.5s Accuracy class)로 측정되는 광전류센서의 성능 확인 (a) 입력전류량의 변화에 따른 광전류센서의 측정값 (b) 장시간 측정시 안정성 확인(입력 전류량: 1.5 kArms)

Fig. 5. Output responses of the optical current sensor are shown, which the sensing errors are within ±0.5% and satisfies the standard of 0.5s accuracy class (IEC 60044-8). (a) Output responses of the optical current sensor according to applied current, (b) Stability of optical current sensor for a long time (applied current : kArm)

전류센서의 성능 중 주파수 응답 특성 또한 매우 중요한 요소 중 하나이다. 대전류의 주파수 변환을 위해 신호 발생기에서 출력되는 전류 신호 크기는 전력증폭기로 전류 값을 1차로 증폭시켰으며, 센서 헤드 부에 전류가 흐르는 도선을 40턴 감는 방식으로 1차로 증폭된 전류는 2차로 110 Arms까지 증폭시켰다. 이렇게 증폭된 전류 신호를 60 Hz~10 kHz 범위에서 주파수를 변화시키며 광전류센서의 주파수 응답특성을 그림 6과 같이 확인하였다. 인가 전류 신호가 10 kHz, 110 Arms 일 때 센서의 측정오차는 2%인 것을 확인할 수 있으며 주파수가 높을수록 측정 오차가 커지는 이유는 센싱된 신호를 RMS 값으로 확인하기 위해 디지털신호로 변환하는 과정에서의 분해능이 낮기 때문이다.

광전류센서의 대전류 측정 특성 평가를 위해 한국표

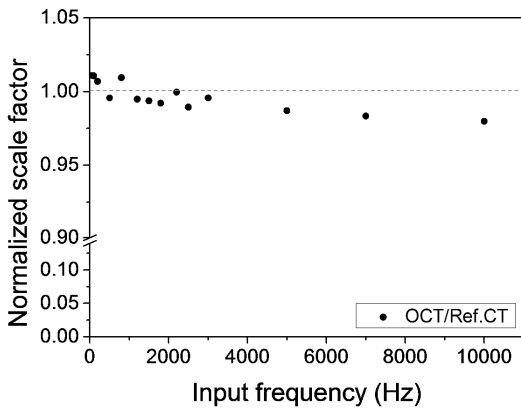


Fig. 6. 광전류센서의 주파수 응답 특성  
그림 6. Output response of optical current sensor according to frequency change of applied current.

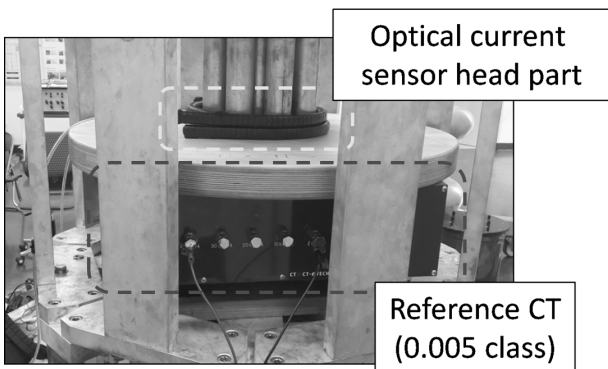
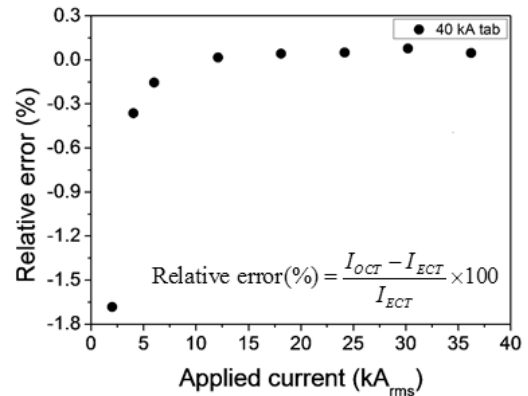


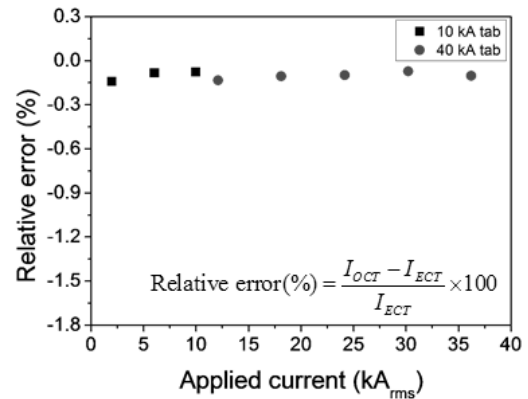
그림 7. 전기식 CT (SCT-150, 0.005Class, CTE Tech. Co.)와 광전류센서의 dynamic range 비교를 위한 테스트 셋업

Fig. 7. A photograph of the test setup for comparison of the dynamic range between the optical current sensor and the electric type current transformer (SCT-150, 0.005class, CTE Tech, Co.)

준연구원에서 보유하고 있는 전기식 표준 CT (SCT-150, 0.005class, CTE Tech, Co.)를 사용하여 두 측정 결과를 비교해 보았다. 측정 셋업은 그림 7과 같이 전류가 흐르는 busbar에 광전류센서의 헤드 부와 전기식 표준 CT를 같이 설치한 구조이고 60 Hz, 2~36 kArms 범위에서 인가전류에 따른 센서의 신호를 비교해 보았다. 전기식 표준 CT는 측정되는 전류 범위에 따라 10 kA, 20 kA, 30 kA, 40 kA 총 4가지 탭으로 분리되고 각 탭에 따라 2차 유도 전류가 다르게 출력된다.



(a)



(b)

그림 8. 광전류센서(OCT)와 전기식 CT(ECT)의 dynamic range 비교 (a) ECT의 40kA 탭 하나만 사용하여 OCT 측정값과 비교한 상대오차 (b) ECT의 10kA 탭을 추가로 사용하였을 때 줄어드는 상대오차 확인

Fig. 8. Comparison of the dynamic range between the optical current sensor and the electric type current transformer. (a) Relative errors between the output signals from the OCT and an ECT measured from 40 kA tap only and (b) Reduced relative errors by utilizing 10 kA output tap of the ECT.

그림 8(a)의 측정결과는 전기식 CT의 탭 중에서 40 kA 탭 하나만을 이용하여 전체 측정 범위에 걸친 출력

을 측정하여 OCT의 출력 신호와 비교하여 나타낸 것이다. 이 경우 40 kA 탭에서 2 kA 정도의 저전류를 측정할 시 오차가 크게 나타나는 것을 확인하였으며, 이러한 문제를 해소하기 위해 저전류 구간에 대해서는 전기식 CT의 10 kA 탭을 이용하여 출력을 얻은 후 광전류센서와 비교하여 보았으며 그 결과를 그림 8(b)에서 보이고 있다. 이러한 실험을 통하여 광전류 센서가 전기식 CT에 비하여 전류 측정 범위가 넓은 것을 확인할 수 있었다.

### III. 결 론

외부환경 변화에 영향을 적게 받으면서 대전류를 측정하기에 적합한 편광회전 반사간섭계형 광전류센서를 구현하였다. 광전류센서에 사용된 복잡한 구조의 간섭계는 폴리머 광도파로를 기반으로 한 광 IC로 제작하여 간소화시킬 수 있었다. 또한, 제안된 광전류센서를 통해 넓은 측정범위 (0.3 kArms~36 kArms) 측정을 수행하고, 주파수 응답특성과 장시간 동작 특성을 확인하여 제안된 광전류센서의 신뢰성을 향상시킬 수 있었다. 제작된 광전류센서는 300 Arms~6.5 kArms 범위의 인가 전류에 따른 센서의 출력의 상대 오차는  $\pm 0.5\%$  이내로 나타났으며, 이는 0.5s accuracy class (IEC 60044-8)에서 기준으로 제시된 조건을 만족하였다. 또한, 광전류센서를 최대 40 kArms 까지 측정 가능한 전기식 전류측정 장비와 2~36 kArms 범위로 인가 전류에 따른 센서의 출력 상대 오차를 비교해 본 결과, 인가한 전류량이 5 kArms 이하인 구간부터 전기식 전류측정 장비의 측정 오차가 크게 나타나며 인가한 전류량이 2 kArms일 경우에는 전류측정 오차가  $\pm 1.7\%$ 까지 증가하였으나 광전류센서는  $\pm 0.5\%$  오차범위 내에서 유지되는 것을 확인하였다.

### REFERENCES

- [1] R. C. d. S. B. Allil and M. M. Werneck, "Optical high-voltage sensor based on fiber bragg grating and PZT piezoelectric ceramics." IEEE Trans. Instrumentation and Measurement, Vol. 60, No. 6, pp. 2118-2125, June 2011.
- [2] P. P. Chavez, N. A. F. Jaeger, and F. Rahmatian, "Accurate voltage measurement by the quadrature method." IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 18, No. 1, pp. 14-19, Jan 2003.
- [3] P. E. Bartley and H. William, "Analysis of transformer failures." in Proc. of International Association of Engineering Insurers 36th Annual Conference, Stockholm, Sweden, September 2003.
- [4] K. Bohnert, P. Gabus, J. Nehring, and H. Brandle, "Temperature and vibration insensitive fiber-optic current sensor," J. Lightwave Technol., Vol. 20, No. 2, pp. 267-276, February 2002.
- [5] F. Rahmatian and J. N. Blake, "Applications of high-voltage fiber optic current sensors", in Proc. of IEEE PES General Meeting, pp. 1129-1135 Montreal, Quebec, July 2006.
- [6] N.-Y. Jang, P.-S. Chio, J.-J. Eun, H.-S. Park. "A Study on the Fabrication of Polarimetric Fiber Optic Current Sensor." The Institute of Electronics Engineers of Korea - Semiconductor and Devices, Vol. 41, No. 6, pp. 33-41, Jun 2004.
- [7] K. Bohnert, P. Gabus, and H. Brandle, "Fiber-optic current and voltage sensors for high-voltage substations." In Proc. of the 16th International Conf. on Optical Fiber Sensors, Vol. 1317, pp. 752-754, Nara, Japan, October 2003.
- [8] K. Bohnert, P. Gabus, J. Kostovic, and H. Brandle, "Optical fiber sensors for the electric power industry." Optics and Lasers in Engineering, Vol. 43, No. 3, pp. 511-526, July 2005.
- [9] M.-R. Lee, D.-I. Jang, S.-H. Yoon, Y.-H. Lee, B.-Y. Kim, J.-S. Park, "Polarimetric Current Sensor Using Orthogonally-Polarized Dual-Frequency Fiber Laser." The Institute of Electronics Engineers of Korea, pp. 205-206, January, 1997.
- [10] M. Hino, S. Hase, K. Ajiki, and M. Akagi, "Optical fiber current transformer applications on railway electric power supply systems," QR of RTRI, Vol. 45, No. 2, pp. 59-63, May 2004.
- [11] K. Kurosawa, "Development of fiber-optic current sensing technique and its applications in electric power systems," Photonic Sens Vol. 4, No. 1, pp. 12-20, March 2014.
- [12] R. Kondo and K. Kurosawa. "A method for improving temperature dependence of an optical fiber current sensor." IEEJ Transactions on Power and Energy, Vol. 130, No. 4, pp. 414-420 April 2010.
- [13] G. Frosio and R. Dändliker, "Reciprocal reflection interferometer for a fiber-optic Faraday current sensor," Appl. Opt., Vol. 33, No. 25, pp. 6111-6122, September 1994.
- [14] G. Mueller, A. Frank, K. Bohnert, X. Gu "Temperature compensated fiber-optic current sensor." U.S. Patent No. 2015011593, April 2015.
- [15] M.-C. Oh, W.-S. Chu, K.-J. Kim, and J.-W.

Kim, "Polymer waveguide integrated-optic current transducers," Opt. Express, Vol. 19, No. 10, pp. 9392-9400, April 2011.

- [16] W.-S. Chu, S.-M. Kim, and M.-C. Oh, "Integrated optic current transducers incorporating photonic crystal fiber for reduced temperature

dependence," Opt. Express, Vol. 23, No. 17, pp. 22816-22825, August 2015.

- [17] W.-S. Chu, S.-M. Kim, J.-W. Kim, K.-J. Kim, and M.-C. Oh, "Polarization converting waveguide devices incorporating UV-curable reactive mesogen," J. Opt. Soc. Korea, Vol. 15, No. 3, pp. 289-293, September 2011.

저 자 소 개



김 성 문(정회원)

2014년 부산대학교 전자공학과 학사 졸업.

2016년 부산대학교 전자공학과 석사 졸업.

2016년 ~ 현재 부산대학교 전자공학과 재학.

<주관심분야: 광통신, 광집적회로, 광센서>



추 우 성(정회원)

2004년 경남정보대학교 전자공학과 학사 졸업.

2008년 부산대학교 전자공학과 석사 졸업.

2015년 부산대학교 전자공학과 박사 졸업.

2015년 ~ 현재 부산대학교 전자공학과 박사후연구원  
<주관심분야: 광통신, 광집적회로, 광센서>



오 민 철(정회원)

1990년 한국과학기술원 전자공학과 학사 졸업.

1992년 한국과학기술원 전자공학과 석사 졸업.

1996년 한국과학기술원 전자공학과 박사 졸업.

1996년 ~ 1999년 한국전자통신연구원 선임연구원

1999년 ~ 2001년 Univ. of Southern California  
Research associate

2000년 ~ 현재 Univ. of Southern California adjunct  
Research Professor

2001년 ~ 2001년 Pacific wave industries, Senior  
research associate

2002년 ~ 2002년 ZenPhotonics, Director of Optical  
device division

2003년 ~ 현재 부산대학교 전자공학과, 정교수

<주관심분야: 광통신, 광집적회로, 광센서>