

## The Optimization of Optical Current Transformer owing to Incident Polarization

金 德 來<sup>\*</sup> · 金 炳 泰<sup>\*</sup>  
(Duck-Lae Kim · Byung-Tai Kim)

**Abstract** - The optical current transformer was developed for 170 kV GIS using optical fiber. The sensor optimized on the optical CT was wound 3 turns and twisted 4 times per a turn at the pipe with a diameter of 130 mm. To optimize the optical CT, the output signal was measured according to the setting angle of polarizer and analyzer. The asymmetry and distortion of the output signals were improved when the parallel polarized light was incident to the fiber sensor and under the angle of analyzer was 45°. The measurement error for the linearity was only  $\pm 0.42\%$  to 1,000 A in the case of reflection type.

**Key Words** : Fiber Sensors, Optical Current Transformer

### 1. 서 론

최근 전력 계통의 전압 상승과 측정 정밀도에 대한 요구가 증대됨에 따라 전력 설비의 고장 검출 및 측정 분야의 기술, 그리고 비용면에서도 경쟁력을 갖춘 광을 이용한 고전압 대전류 측정이 주목받고 있다.

광을 이용한 전류 측정기는 강한 자장의 영향을 받는 매질에 선편광된 광이 전파하게 되면 편광면이 회전하는 패러데이 효과를 응용한 것으로 기존의 변류기(current transformer : CT)와 비교하였을 때 입력과 출력단을 광섬유로 연결하기 때문에 소형화 및 경량화가 가능하다. 광 CT의 센서로 사용되는 광섬유는 유전체이기 때문에 높은 송전압에 대해서 절연 효과를 가지며, 기존의 변류기에서 측정되는 포화 현상 및 고전압과 대전류에 의해서 유도되는 잡음으로부터 자유롭다. 그리고 넓은 주파수 대역에 대해서 높은 선형 응답을 가지며, 빠른 속도의 신호에 대해서도 측정이 가능하다. 기존의 변류기를 대체할 수 있는 고성능 광 CT를 만들기 위해서 여러 형태의 광학적인 전류 측정 열개와 광섬유, 벌크 글라스 및 YIG(yttrium iron garnet) 등과 같은 다양한 매질 개발에 중점을 두고 있다.[1,2,3]

광섬유를 이용한 광 CT에서 가장 문제점이 되는 것은 선형복굴절이다. 이것은 광섬유 제작시 코어와 클래딩이 완전한 원형으로 제작되지 않았기 때문에 발생하거나, 광섬유를 센서로 제작할 때 구부러져 사용할 때 나타나 광 CT의 감도 및 측정 정확도를 저하시킨다. 본 실험에서는 선형복굴

절을 보상하기 위해 센서의 구성이 자유롭고 실용성이 큰 광섬유를 비틀어 감고, 광섬유에 전반사 코팅한 어댑터를 장착하는 방법을 채택하였다.[4,5]

일반적으로 광 CT에서 전류 인가에 따른 패러데이 회전 측정시 자장에 의한 변조는 편광자를 투과하여 광섬유에 입사하는 선편광과 검광자 사이의 각도가 0도나 90도보다 45도일 때 더 크게 나타나게 되므로 대부분의 광 CT에서는 향상된 출력을 얻기 위해 입사편광을 45도로 적용하고 있다.[6,7] 입사편광을 45도로 고정된 상태에서 광섬유의 선형복굴절을 보상하기 위해 광섬유를 비틀어 사용하게 되면 광섬유에 원형복굴절이 유도되어 입사된 선편광은 회전하여 출력되어 입사광과 검광자 사이의 각도는 45도를 유지하지 못하게 된다. 그러나 광섬유 끝에 반사 거울을 장착하면 광섬유를 비틀더라도 입사편광과 같은 편광으로 유지되어 출력되므로 원형복굴절의 영향을 보상시킬 수 있다. 반사 거울을 사용하면 광섬유를 전파하는 광은 패러데이 회전을 두 번 겪기 때문에 신호 크기는 투과형에 비해 두 배 향상되지만, 선형복굴절이 보상되지 않은 광섬유에 패러데이 회전거울이 아닌 반사 거울을 사용하면 선형복굴절에 의한 리타레이션이 증가되어 측정 오차가 커지는 요인으로 작용할 수 있다.

본 연구에서는 170 kV GIS용으로 내부의 3상 도체에 각각 개씩 장착될 수 있도록 직경이 130 mm인 광섬유형 전류 센서를 제작하였다. 광섬유 센서 끝에 전반사 코팅한 광섬유를 반사경으로 장착하여 광센서의 입사편광이 45도 또는 수평에 따라 반사되어 되돌아온 출력 신호 및 측정 오차를 측정된 광섬유형 광 CT의 최적화에 대해 기술한다.

### 2. 실험장치

광 CT는 센서의 구성이 자유롭고 소형화가 가능하며, 신

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 단국대 의학레이저협동과정 박사과정

E-mail : duckiboy@hanmail.net

<sup>\*</sup> 正會員 : 청주대 레이저광정보공학과 교수

接受日字 : 2005年 6月 7日

最終完了 : 2005年 7月 25日

뢰성이 높은 광섬유형을 이용하였다. 광 CT의 광학 소자부는 센서부에 붙여 사용할 수 있도록 가능한 한 소형으로, 진동에도 광축이 어긋나지 않고 편광 특성이 잘 유지 될 수 있도록 설계·제작하였다.[8] 그림 1에 광섬유형 광 CT의 실험장치 개략도를 나타내었다. 광원으로는 센서용 광섬유의 베르데(Verdet) 상수, 물질에서의 흡수율, 수명 및 크기를 고려하여 파장이 785 nm인 레이저 다이오드(Sanyo : DL4140-001)를 단일 모드 광섬유에 pigtail하여 사용하였다. 레이저 다이오드에서 출력된 광은 편광자에 의해 1,000 : 1로 선편광되어 코어 직경이 5 μm이고, 클래드 직경이 125 μm인 전류센서용 저복굴절 광섬유에 입사된다. 센서부는 실제 170 kV GIS(Gas Insulated Switchgear)용으로 내부의 3상 도체에 각 한 개씩 장착될 수 있도록 직경이 130 mm인 원통형 틀에 전류센서용 저복굴절 광섬유를 감아 사용하였다. 교류 전류원은 1,200 A 용량의 허부하 시험기를 사용하였다. 투과형의 경우 광센서에서 출력된 광을 PBS(빛살가르개)를 이용하여 수평 성분(S1)과 수직 성분(S2)으로 나누어 측정하였고, 반사형은 전반사 코팅한 어댑터를 광센서 끝에 장착하고 반사되어 되돌아온 출력 신호를 광검출기로 측정하였다. 광검출기는 Si pin 포토다이오드(THORLABS : DET110)를 오실로스코프(Hewlett packard : 54542A)에 연결하여 사용하였다.

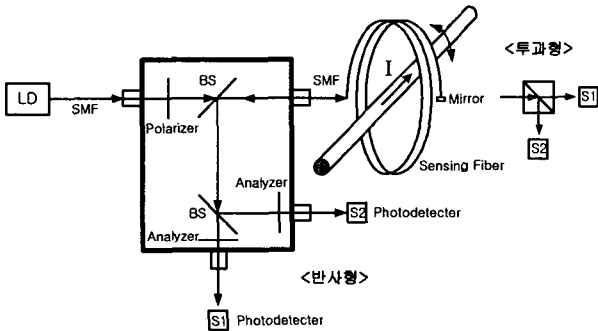


그림 1 광섬유형 광 CT의 실험장치 개략도  
Fig. 1 Schematic diagram of the optical current transformer using fiber

본 연구에서 광섬유의 선형복굴절을 보상하기 위한 최적의 광섬유 비트는 횡수는 다음과 같은 방법으로 결정하였다. 광섬유의 복굴절 특성 실험으로 광섬유에 내제된 선형복굴절과 센서로 구성하기 위해 구부림으로 발생하는 선형복굴절, 그리고 광섬유를 비틀어 주면서 발생하는 원형복굴절의 실험 결과를 토대로 실험값이 되먹여진 이론값을 얻어내었다. 이 이론값을 적용하여 원통형 틀에 감긴 광섬유의 비틀림에 따른 선형복굴절과 전류 인가시 광섬유가 비틀어짐에 따른 패러데이 회전각을 계산한 결과 선형복굴절에 의한 리타레이션은 광섬유를 비틀어주면 sinc 함수 형태로 감소하고 있다. 패러데이 회전각 또한 리타레이션이 감소하는 것과 유사한 경향을 나타내며 광섬유가 비틀어짐에 따라 증가하였다[9]. 이론값은 다음의 식 (1)을 이용하여 계산하였다.

$$\begin{aligned} \text{투과형 : } \begin{bmatrix} E'_x \\ E'_y \end{bmatrix} &= A \cdot F \cdot P \cdot E_{in} \\ \text{반사형 : } \begin{bmatrix} E'_x \\ E'_y \end{bmatrix} &= A \cdot F \cdot M \cdot F \cdot P \cdot E_{in} \end{aligned} \quad (1)$$

$$F = \begin{bmatrix} \cos \delta l + i \left( \frac{\delta \beta}{\delta} \right) \sin \delta l & \left( \frac{k + \theta_F - \omega_b}{\delta} \right) \sin \delta l \\ - \left( \frac{k + \theta_F - \omega_b}{\delta} \right) \sin \delta l & \cos \delta l - i \left( \frac{\delta \beta}{\delta} \right) \sin \delta l \end{bmatrix}$$

$$\delta = (\delta \beta^2 + (\omega_b + \theta_F - k)^2)^{1/2}, \quad k = \tau \zeta, \quad \theta_F = VIN$$

여기서  $E_i$ 는 입력 편광,  $M$ 은 반사 거울,  $P$ 와  $A$ 는 각각 편광자와 검광자, 그리고  $F$ 는 광섬유의 편광 투과 특성을 나타낸 존스 행렬이다.  $l$ 은 광섬유의 길이,  $V$ 는 베르데 상수,  $I$ 는 인가 전류, 그리고  $N$ 은 광섬유를 감은 횡수이다.  $\delta \beta$ 는 선형복굴절에 의한 리타레이션으로 실험값이 되먹여진 이론값을 적용하였다.  $\omega_b$ 는 내제된 원형복굴절 양으로 그 크기가 매우 작아 계산에서는 제외하였다.  $k$ 는 광섬유를 비틀어줌으로서 유도되는 리타레이션으로 광섬유의 단위 길이당 비튼 각도  $\tau$ 와 원형복굴절 측정 실험에서 얻어진 광섬유 비튼 횡수에 따른 편광 회전각의 비율  $\zeta$ 의 곱으로 표현된다.  $\theta_F$ 는 광섬유에서 인가된 전류에 의해 유도되는 패러데이 회전각이다. 광섬유를 비틀은 횡수는 원통형 틀에 광섬유를 한 바퀴 감은 길이당 비튼 횡수이다.

그림 2는 직경이 130 mm인 원통형 틀에 한 바퀴 감은 광섬유를 비트는 횡수에 따라 편광 투과 특성을 조사한 결과이다. 전류가 인가되지 않은 상태에서 직선으로 놓인 광섬유에 수평편광을 입사시켜 출력되는 편광 상태를 측정 후 광섬유를 원통형 틀에 감아 1회씩 25회까지 비틀어 가면서 편광 상태의 변화를 측정하였다. 그 결과는 식 (1)로부터 계산한 이론값과 유사한 경향을 갖으며 주기적인 형태로 변화하는 것을 볼 수 있다. 광섬유 비튼 횡수 4회, 11회, 18회 및 25회가 선형복굴절의 영향이 가장 적절하게 보상된 지점으로 입사편광이 잘 보존되어 출력된 것으로 해석할 수 있다. 이 결과를 근거로 광섬유를 비틀어 준다면 선형복굴절이 적절히 보상되어 전류 인가에 따른 출력 신호의 크기가 향상될 것으로 예상하였다. 최적의 광섬유 감은 횡수를 결정하기 위하여 원통형 틀에 광섬유를 2회, 3회 및 5회 감은 광센서를 이용하였다. 각각의 광센서를 광섬유 비튼 횡수에 따라 전류를 인가하여 광 CT의 출력 특성을 측정하였다. 2회, 3회 및 5회 감은 광센서의 출력 특성 중에서 3회 감은 것이 광섬유 비틀림에 따른 편광 투과 특성과 가장 유사한 경향을 나타내었다. 이러한 결과들을 바탕으로 광섬유 비틀림에 따른 편광 투과 특성과 유사한 경향을 갖으며, 3회 감은 광센서가 광 CT 제작에 가장 적합하다고 판단하였다. 원통형 틀에 광섬유를 3회 감은 후 순차적으로 비틀어가면서 전류를 인가한 결과 광섬유를 한 바퀴 감은 길이당 4회와 11회 비틀었을 때 예상대로 신호의 크기가 향상되었다. 각각의 신호 크기 및 선형성에 대한 오차는 큰 차이를 나타내지 않

았다. 이와 같은 실험값과 계산값을 비교·검토한 결과 광섬유를 많이 비틀지 않더라도 효과적으로 선형복굴절이 보상이 되어 광 CT의 감도가 향상된 광섬유를 4회 비틀어 3회 감은 광센서가 가장 최적화된 상태로 판단되었다.[9]

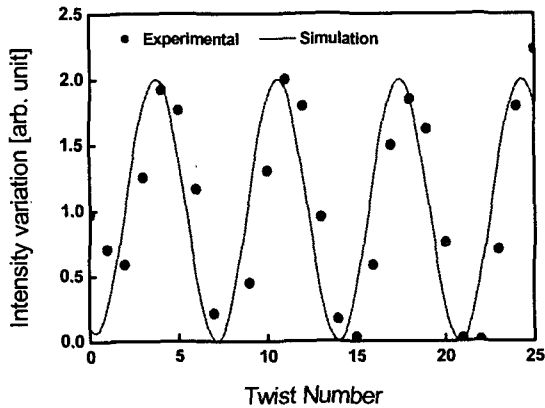


그림 2 광섬유를 비틀는 횟수에 따른 편광 투과 특성  
 Fig. 2 Transmission properties of polarization according to the twisted numbers of optical fibers

반사형 실험에서 통상적으로 이용되는 패러데이 회전거울 (faraday rotation mirror)을 광섬유 끝에 장착하면 광섬유에서 투과된 편광의 각도가 90도만큼 더 회전되어 광섬유에 입사하여 광이 지나간 경로를 되돌아오기 때문에 광섬유의 전체적인 선형복굴절을 효과적으로 보상시킬 수 있다.[10,11] 패러데이 회전거울 대신에 반사 거울을 사용하면 광섬유를 전파하면서 받은 선형복굴절과 반사 거울에 의해 위상이 반전되어 되돌아오며 겪은 선형복굴절이 누적되어 선형복굴절에 의한 리타레이션은 두 배로 증가된다. 그러나 광섬유의 선형복굴절이 적절히 보상될 수 있도록 비틀어 사용한다면 고가의 패러데이 회전거울을 사용하지 않고 반사 거울을 사용하더라도 선형복굴절의 영향을 크게 받지 않을 것으로 판단하였다. 패러데이 회전거울 대신 반사 거울의 역할을 할 수 있도록 광섬유에 전반사 코팅한 어댑터를 장착시켜 센서부를 구성하였다.

실험은 실제 170 kV GIS용으로 내부의 3상 도체에 각각 개씩 장착될 수 있도록 직경이 130 mm인 원통형 틀에 전류 센서용 저복굴절 광섬유를 4회 비틀어 3회 감은 광센서를 이용하여 투과형과 반사형으로 나누어서 하였다.

### 3. 실험결과 및 토의

입사편광에 따른 광 CT의 출력 특성을 알아보기 위해 지면에 대해 45도 기울어진 편광과 수평편광을 광섬유에 입사시켜 광 CT의 출력 특성을 측정하여 비교·분석하였다. 선편광이 전파하는 광섬유 주위에 자장을 걸어주면 광섬유에서는 원형복굴절이 발생하여 광섬유를 전파하는 선편광의 편광면은 패러데이 회전각  $\theta_F$ 만큼 회전되어 출력된다. 이

자장에 의한 변조는 입사편광이 45도인 경우  $1 - \sin 2\theta_F$ 에 비례하고, 수평인 경우는  $\cos^2 \theta_F$ 에 비례하여 출력되므로 입사편광이 45도일 때 변조가 더 크게 일어나는 것으로 알려져 있다. 따라서 대부분의 광 CT에서는 광센서에 45도로 입사시킨다.

투과형 실험에 대한 자세한 내용은 이미 발표된 논문[9]에 기술되었으므로 비교를 위하여 그 결과만 간단히 소개한다. 광센서에 45도 기울어진 편광을 입사시키고, 전류를 0 A에서 1,000 A까지 인가시 측정 오차는 S1이  $\pm 0.49\%$ , S2는  $\pm 0.94\%$ 이며, 수평편광이 입사된 경우 S1은  $\pm 0.49\%$ , S2는  $\pm 0.62\%$ 이다. 특히, 수평편광 입사 후 2,000 A까지 전류 인가시 측정 오차는  $\pm 0.44\%$  이내로 매우 좋은 출력 특성을 나타내었다. 투과형 출력 신호는 45도 편광과 수평편광을 광센서에 입사시켰을 때 두 경우 모두 신호 왜곡이 전혀 나타나지 않았다.

그림 3은 입사편광 각도를 지면에 대해 45도로 고정하고, 지면에 대해 검광자의 각도가 0도, 45도, 90도인 경우 1,000 A 전류 인가시 반사형 출력 신호를 오실로스코프로 측정된 파형이다. 여기서 c1, c2 및 c3는 각각 0도, 45도 및 90도에서 측정된 출력 파형이고, c4는 도체에 분류기 (YOKOGAWA : Model 2217)를 연결하여 측정된 인가 전류의 파형이다. 지면에 대해 45도 기울어진 편광을 광섬유에 입사시키면 광섬유에 전반사 코팅한 어댑터에 의해 반사되어 되돌아온 출력편광은 45도가 된다. 이 출력편광에 대해 검광자가 동일한 각도 또는 수직으로 기울어져 있으면 출력 신호의 크기는 작아지며 왜곡도 발생할 것이고, 출력편광에 대해 검광자가  $\pm 45$ 도로 기울어져 있으면 왜곡 없는 큰 출력 신호를 얻을 수 있다. 이와 같은 내용은 일반적으로 알려져 있다. 따라서 실험에서 검광자가 45도일 때 발생한 신호 왜곡은 0도와 90도에서 개선될 것으로 예상하였으나, 실험 결과 왜곡된 신호는 개선되지 않고 여전히 나타났다. 이런 신호의 왜곡은 측정 오차를 크게 하는 주요인으로 작용하는 것으로 판명되었다. 위 결과는 후에 기술할 수평편광 입사시 반사형 실험과는 대조적이다.

그림 4는 반사형에서 그림 3의 상태인 45도 편광 입사 후 1,000 A까지 전류 인가에 따른 출력 특성을 나타낸 것이다. 광섬유에 전반사 코팅한 어댑터에 의해 반사되어 되돌아온 출력 신호를 검광자가 0도, 45도 및 90도인 상태에서 출력 파형과 첨두값을 측정하였다. 검광자의 각도가 0도인 경우 첨두값은 1.36 mV, 45도는 1.15 mV, 그리고 90도에서는 2.40 mV로 측정되었다. 3회 실험하여 얻은 측정값을 평균한 후 각각의 전류에 대한 오차값을 평균한 결과 측정 오차는 0도, 45도 및 90도에서 각각  $\pm 2.15\%$ ,  $\pm 3.12\%$  및  $\pm 2.39\%$ 를 나타내었다. 일반적으로 입사편광에 대해 검광자의 각도가 45도를 이루었을 때 신호 크기가 가장 크다고 알려져 있다[6,7]. 따라서 입사편광을 45도로 입사시켰을 경우 검광자가 45도일 때보다 0도와 90도에서 신호 크기와 측정 오차가 개선될 것으로 예상하였다. 실험 결과 90도에서의 첨두값은 45도보다 약 2배 향상되었으나, 0도는 45도에서의 첨두값과 거의 유사하게 측정되었다. 측정 오차는 45도에서 가장 크게 나타났고, 0도와 90도에서 약간 개선되었다. 이와 같은 결과의 첫 번째 원인은 45도 기울어진 입사 편광이 광

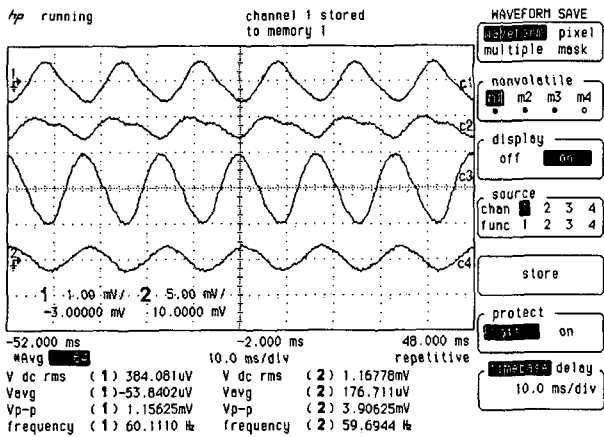


그림 3 반사형 CT에서 45도 편광 입사 후 1,000 A 인가시 검광자 각도에 따른 출력 파형

Fig. 3 Output signals of oscilloscope according to the angle of analyzer under a current of 1,000 A and the 45 degrees incidence of the polarized light at the reflection type

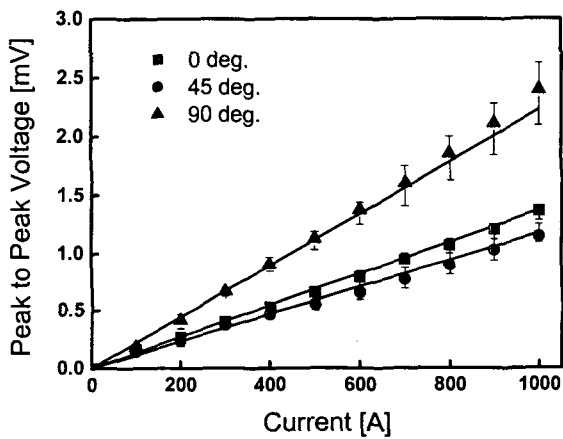


그림 4 반사형 CT에서 45도 편광 입사 후 1,000 A까지 전류 인가시 검광자 각도에 따른 출력 특성

Fig. 4 Output properties according to the angle of analyzer to a current of 1,000 A and the 45 degrees incidence of the polarized light at the reflection type

센서에 잔존해 있는 선형복굴절 영향을 수평편광보다 더 크게 받아 45도 기울어진 선편광으로 되돌아오지 못한 것이며, 두 번째는 광센서를 투과한 광과 광섬유에 전반사 코팅한 어댑터에 의해 반사된 광이 광센서와 광 CT를 구성하고 있는 광학 소자 사이의 연결부위에서 간섭이 일어났기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 출력 신호가 인가 전류와 같은 sine 형태로 나타나지 않고, 그림 4와 같이 파형의 비대칭성 뿐만 아니라 침두 부분이 찌그러지는 현상이 나타났다.

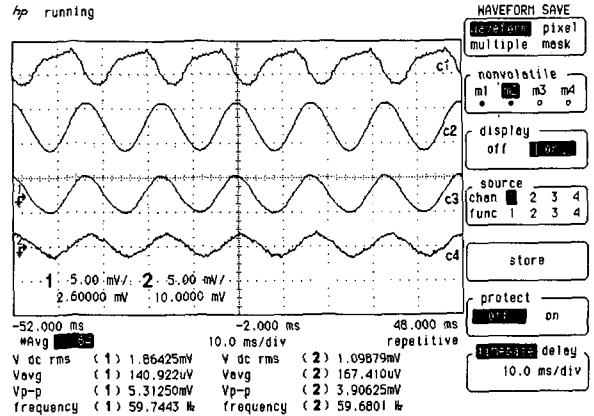


그림 5 반사형 CT에서 수평 편광 입사 후 1,000 A 인가시 검광자 각도에 따른 출력 파형

Fig. 5 Output signals of oscilloscope according to the angle of analyzer under a current of 1,000 A and the parallel polarized light incidence at the reflection type

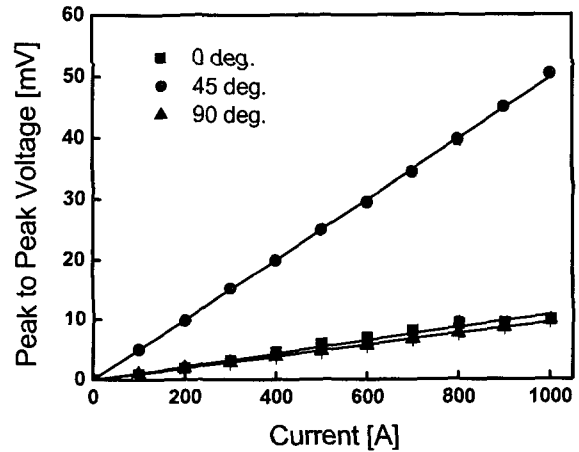


그림 6 반사형 CT에서 수평편광 입사 후 1,000 A까지 전류 인가시 검광자 각도에 따른 출력 특성

Fig. 6 Output properties according to the angle of analyzer to a current of 1,000 A and the parallel polarized light incidence at the reflection type

그림 5는 수평편광 입사시 지면에 대해 검광자 각도를 각각 0도(c1), 45도(c2), 90도(c3)로 한 경우 출력 파형과 인가 전류(c4)의 오실로스코프 파형이다. 여기서 c1, c2, c4는 5 mV/div에서 측정하였으며, c3는 파형의 크기가 커서 20 mV/div으로 측정하였다. 실험에서 오실로스코프로 연결된 광검출기의 측정값이 출력광에 대해 포화현상을 나타내어 광검출기 앞에 광 감쇠용 ND(Neutral Density) 필터를 끼워 측정하였다. 입사편광이 지면에 대해 45도인 경우 검광자의

각도 변화에 대해서 모두 신호 왜곡이 발생한 것과 대조적으로 수평편광 입사시 검광자가 0도일 때 발생한 신호 왜곡은 45도로 설정함으로써 개선되었으며, 신호 크기도 향상되었다. 90도에서는 왜곡이 발생하지 않았으나 신호 크기가 0도일 때와 유사하게 나타났다.

그림 6은 반사형에서 그림 5의 상태인 수평편광 입사 후 1,000 A까지 전류 인가시 검광자 각도에 따른 출력 특성이다. 1,000 A 인가시 검광자 각도 0도에서의 출력값은 9.97 mV, 45도는 50.48 mV 및 90도는 9.79 mV로 나타났다. 수평편광 입사시 검광자를 45도로 설정하였을 때 신호는 0도와 90도에의 측정값보다 약 5배 증가하였다. 이 값은 45도 편광 입사시 반사형에서 측정된 최대값보다도 21배 정도나 큰 것이다. 그림 5의 오실로스코프 파형에서도 확인할 수 있듯이 검광자가 0도일 때 발생한 신호 왜곡은 45도로 설정함으로써 개선되었다. 측정 오차는 신호 왜곡이 나타난 0도에서  $\pm 3.38\%$ 로 가장 컸으며, 45도로 설정함으로써  $\pm 0.42\%$ 로 크게 개선되었고, 90도에서도 45도보다는 약 2배 더 크나 0도보다는 작은  $\pm 0.78\%$ 로 측정되었다. 수평편광 입사시 검광자가 45도인 경우 측정 오차는 반사형에서 45도 편광 입사시 가장 작은 측정 오차와 비교해도 5배 정도 향상되었다. 이와 같은 결과는 입사된 수평편광이 광섬유에 전 반사 코팅한 어댑터에 의해서 반사될 때 광센서의 선형복굴절 및 간섭의 영향을 받지 않고 수평편광으로 출력되었기 때문으로 판단된다.

입사 편광이 지면에 대해 45도인 경우 출력값도 작게 측정되었으며, 파형의 왜곡도 발생하였다. 이 신호를 전자회로 부에서 증폭시킨다면 1,000 A보다 큰 전류 인가시 측정 오차는 더 증가되어 출력 신호의 선형성은 보장되지 못할 것이다. 결과적으로 광센서에 45도 기울어진 편광보다 수평편광을 입사시키는 것이 더 좋은 출력 특성을 나타낼 수 있으며, 수평편광 입사 후 검광자를 지면에 대해 45도로 고정함으로써 더 안정된 측정값을 얻게 된다.

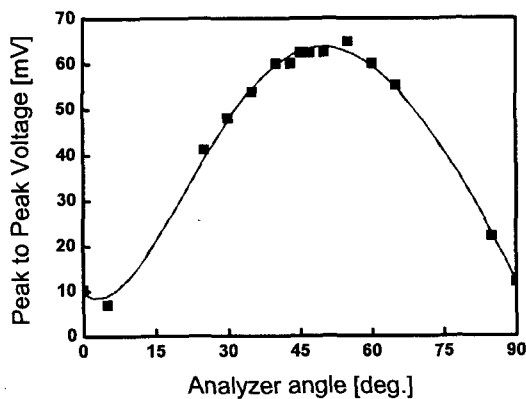


그림 7 수평편광 입사 후 1,000 A 인가시 검광자 각도에 따른 반사형 출력 특성  
 Fig. 7 Output properties according to the angle of analyzer under a current of 1,000 A and the parallel polarized light incidence at the reflection type

그림 7은 실제 광 CT 제작시 검광자가 정확한 각도로 장착되지 못하였을 경우를 가정하여 출력값의 변동폭을 알아보기 위한 실험 결과이다. 지금까지의 실험 결과를 바탕으로 입사편광을 수평편광으로 결정하고 광센서에 1,000 A 인가시 검광자 각도에 따른 반사형 출력 특성을 나타낸 것이다. 여기서 ■은 측정값이며, 실선은 피팅한 값이다. 검광자 각도가 지면에 대해 45도로 설정된 상태에서  $\pm 5$ 도 변화에 대한 출력값의 변동폭은  $\pm 1.93\%$ 로 매우 작게 나타났다. 이는 광 CT 제작시 검광자가 최적값과 약간의 오차를 갖고 장착되더라도 출력값은 기준값에 대해서 크게 벗어나지 않는다는 것을 나타낸다. 그러나 검광자를 지면에 대해 0도 또는 90도로 설정할 경우  $\pm 5$ 도의 검광자 각도 변화에 대한 출력값은 각각  $\pm 50\%$ 와  $\pm 86.8\%$ 로 심한 변동폭을 나타내었다. 0도 또는 90도로 설치할 경우 검광자가 최적 설계값으로부터 미세하게 벗어나더라도 출력값의 변동폭이 매우 크기 때문에 이 각도는 광 CT에 적용하기 어렵다는 것을 시사한다. 결과적으로 수평편광 입사에 검광자를 지면에 대해 45도로 장착할 경우, 광 CT 제작시 검광자 각도의 초기 설정값이 정확히 장착되지 않았을 경우 발생하는 출력값의 변동폭을 최소로 줄일 수 있기 때문에 이 각도가 광 CT 제작에 용이할 것으로 판단된다.

그림 8에서 m1, m2, m3, m4, m5 및 m6은 검광자 각도를 지면에 대해 0도, 30도, 45도, 60도, 90도인 경우와 인가 전류의 파형을 나타낸 것이다. 검광자 0도에서 측정된 파형의 크기는  $\mu V$ 로 매우 작으며, 파형의 왜곡도 생기는 것을 볼 수 있다. 45도에서 측정된 파형 m3는 왜곡이 전혀 발생하지 않았다. 30도와 60도에서 측정된 파형 m2와 m4는 상하측이 비대칭으로 나타났으나 0도에서 측정된 파형 왜곡과 같이 측정 오차에 큰 영향을 미칠 정도는 아니라고 판단된다. 이 각도 사이에서 검광자가 45도로 설정되었을 때 광 CT의 감도가 가장 좋으며, 안정된 출력을 갖는다. m5는 90도일 때 측정된 파형으로 왜곡은 발생하지 않았지만, 그 크기가 0도에서 측정된 것과 유사하게  $\mu V$ 로 매우 작다. 전류 파형인

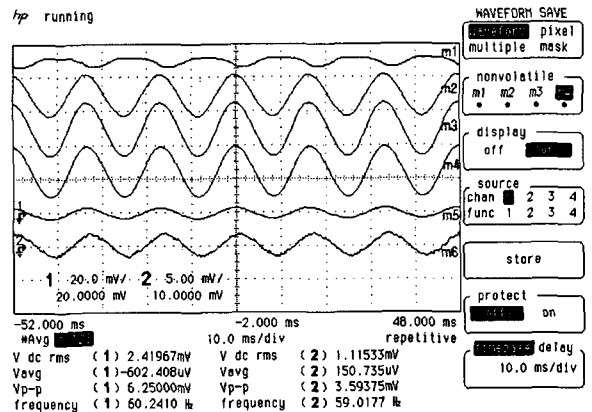


그림 8 1,000 A 인가시 검광자 각도 0도, 30도, 45도, 60도 및 90도에서 반사형 출력 파형  
 Fig. 8 Output signals of oscilloscope under analyzer angle of 0°, 30°, 45°, 60°, and 90°, and a current of 1,000 A at the reflection type

m6를 보면 파형이 약간 찌그러지는 것을 볼 수 있는데, 이것은 허부하 시험기에서 발생하는 전류에 문제가 있는 것이 아니라 전류 파형을 측정하기 위해서 분로에 연결한 프로브에 외부 노이즈의 영향이 미쳤기 때문에 나타난 것으로 생각된다. 또한 전류 파형과 측정 신호 사이에는 약간의 위상차가 있다. 이것은 전류에 의한 자장의 영향으로 광섬유에 유도된 원형복굴절과 원형복굴절이 유도된 광섬유를 전파하면서 겪은 패러데이 회전 사이에서 발생한 시간 차이라고 볼 수 있다. 따라서 인가된 전류 상태를 실시간으로 측정하기 위해서는 인가 전류와 측정 신호 사이의 위상차가 나타나지 않게 해야만 하는데 이것은 출력 신호를 처리하는 전자 회로부에서 보상이어야 할 것으로 판단된다.

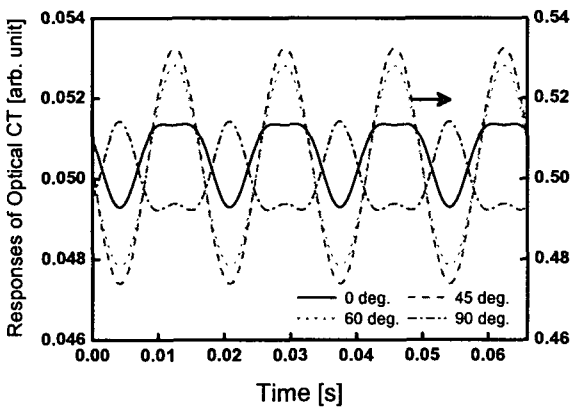


그림 9 검광자의 설정 각도 변화에 따른 출력신호 계산 결과

Fig. 9 Calculated output signals according to the angle of analyzer

그림 9는 실험에서 측정된 출력 파형의 형태 및 크기를 이론적으로 검토하기 위해 식(1)을 이용하여 지면에 대한 검광자의 설정 각도 0도, 45도, 60도 및 90도에서의 출력 신호를 계산한 결과이다. 그래프에서 검광자가 0도와 90도일 때의 계산값은 좌측 좌표축을 적용하고, 45도와 60도는 우측 좌표축을 사용한다. 계산에서는 실제 광섬유를 원통형 튜에 감았을 때 입력측과 출력측이 정확하게 동일한 축선상에 놓여 있지 않았기 때문에 전류를 인가하지 않은 상태에서 광섬유에 입사된 수평편광이 광섬유를 통과한 후에 수평편광이 아닌 임의의 각도로 회전되어 출력되는 실험적인 오차를 고려해야 했다. 실제 실험에서는 검광자로 입사되는 편광이 약 1도 정도의 오차가 있었다고 가정하고, 이론적인 계산식에 좌표축 변환을 첨가하였다. 검광자가 0도일 때 계산한 값은 그림 5와 그림 7에서의 오실로스코프 파형과 같이 왜곡이 나타났다. 검광자가 90도인 경우 계산한 값은 파형이 왜곡되었지만, 오실로스코프 파형은 그림 5와 그림 7에서 보는 것처럼 왜곡이 발생하지 않았다. 이는 광섬유로 입사된 수평편광이 광섬유를 전파한 후 출력되었을 때 출력편광에 대해서 검광자를 정확히 90도로 설정하지 못한 실험적인 오차와 광섬유의 물성에 따른 계산상의 오차에 의한 결과라고 판단

된다. 검광자 각도가 45도일 때 출력 신호의 첨두값이 가장 크며, 60도에서는 약간 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이 결과는 실험결과와도 같은 경향을 보이며, 검광자 각도가 45도일 때 광 CT의 감도가 가장 크다는 것을 시사한다. 0도에서 발생한 파형의 왜곡은 검광자를 45도로 설정함으로써 개선되었으며, 파형의 크기도 증가하였다. 이와 같은 계산 결과로부터 수평편광 입사시 반사형의 출력 특성을 이론적으로 확인할 수 있었다.

본 논문의 실험 결과를 바탕으로 실제 170 kV GIS용 광 CT를 개발하기 위해서는 광섬유 감는 수와 광섬유 비튼 횟수에 따른 선형복굴절의 변화에 대해 연구되어야 하고, 상용화를 하기 위해서는 기본적으로 광 CT가 'IEC class 1.0 규격'에 만족되어야만 한다. 이에 대한 연구 결과는 기 발표된 논문에 기술되어 있다.[9]

#### 4. 결 론

170 kV GIS용으로 내부의 3상 도체에 각 한 개씩 장착될 수 있도록 직경이 130 mm인 원통형 튜에 광섬유를 4회 비틀어 3회 감아 선형복굴절을 보상시킨 광 CT에서 입사편광에 따른 신호 측정의 최적화에 대해 연구하였다.

일반적으로 광센서에 45도 편광을 입사시켰을 경우가 수평편광일 때보다 자장에 의한 변조가 크게 나타나는 것으로 알려져 있기 때문에 대부분 광 CT에는 입사편광을 45도 편광으로 적용하고 있다. 본 실험에서는 일반적으로 알려진 이론과 다르게 45도 편광 입사시 출력 파형은 검광자의 설정 각도와 무관하게 신호에 왜곡이 나타났으며, 이는 측정 오차를 증가시키는 요인으로 작용하였다. 입사편광이 수평인 경우 검광자 각도 0도에서의 출력값은 입사편광 45도에서 측정된 최대 출력값보다 약 4배 컸지만 신호에 왜곡이 발생하였다. 이 왜곡된 신호는 검광자를 45도로 설정함으로써 개선되었으며, 출력 신호의 크기 또한 5배 정도 향상되었다. 수평편광 입사 후 검광자가 45도인 상태에서 측정된 출력값은 입사편광 45도에서 측정된 최대 출력값보다 약 21배 크게 측정되었다. 측정 오차는 45도 편광을 입사시 ±2.15%였으나 수평편광인 경우에는 ±0.42%로 약 5배 정도 향상된 결과를 얻었다. 그리고 광 CT 제작시 검광자가 최적화된 각도로 정확히 장착되지 않았을 때를 가정하여도 출력값의 변동폭은 검광자를 45도로 설정함으로써 최소로 줄일 수 있다. 이상에서 알 수 있듯이 광섬유형 광 CT로 전류 측정시 광센서에 수평편광을 입사시키고, 검광자를 45도로 고정하였을 경우 신호 측정의 신뢰성을 확보할 수 있는 가장 최적 상태의 결과를 얻었다.

#### 참 고 문 헌

[1] K. T. V. Grattan and B. T. Meggitt, Optical Fiber Sensor Technology Volume 3 Applications and Systems, LUWER ACADEMIC PUBLISHERS, pp. 184-218, 1998.  
 [2] B. C. B. Chu, Y. N. Ning, D. A. Jackson, "Faraday current sensor that uses a triangular-shaped

bulk-optic sensing element", Opt. Lett. vol. 17, no. 16, pp. 1167-1169, 1992.

[3] A. Papp, H. Harms, "Magneto-optical current transformer 1: Principles", Appl. Opt. vol. 19, no. 22, pp. 3729-3734, 1980.

[4] Efim A. Khazanov, Oleg V. Kulagin, Sanichiro Yoshida, "Investigation of Self-Induced Depolarization of Laser Radiation in Terbium Gallium Garnet", IEEE J. Quant. Elect. vol. 35, no. 8, pp. 1116-1122, 1999.

[5] DONG Xiaopeng, CHU C B Betreace, CHIANG Kin Sen, "Twisted fibre electric current sensor with compensation for temperature and polarization perturbation", Proc. SPIE vol. 3555, pp. 18-27, 1998.

[6] H. Guerrero, R. Perez del, R. Fernandez de Caleyra, "Magnetic field biasing in Faraday effect sensor", Appl. Phys. Lett. vol. 74, pp. 3702-3704, 1999.

[7] N E Fisher and D A Jackson, "Improving the sensitivity of a Faraday current sensor by varying its operating point", Meas. Sci. Tech., pp. 1508-1518, 1995.

[8] Toshiba, "Private communication".

[9] 정재용, 김병태, "광섬유의 선형복굴절 보상에 따른 170 kV GIS용 전류 센서의 출력 특성", 대한전기학회 논문지 54C, pp. 55-62, 2005.

[10] Hermann Lin, Wu-Wen Lin, Mao-Hslung Chen, Shin-Chu Huang, "Vibration insensitive optical fiber current sensor with a modified reciprocal reflection interferometer", Opt. Eng. 38, pp. 1722-1729, 1999.

[11] Masao Takahashi, Hideki Noda, Kiyohisa Terai, "Optical Current Transformer for Gas Insulated Switchgear Using Silica Optical Fiber", IEEE Trans. Pow. Deliv. vol. 12, no. 4, pp. 1422-1427, 1997.

저 자 소 개



**김덕래 (金德來)**

1976년 5월 31일생. 2002년 청주대 광학공학과 졸업. 2004년 동 대학원 물리광학과 졸업. 2004년 9월~현재 단국대학교 의학레이저협동과정 박사과정

Tel : 011-9843-7605

E-mail : duckiboy@hanmail.net



**김병태 (金炳泰)**

1958년 5월 9일생. 1982년 한양대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업. 1990년 일본 국립 오사카대학 대학원 電磁에너지공학전공(레이저공학) 졸업(공학박사). 1984년~1985년 (주)대우중공업 중앙연구소. 1986년~1990년 오사카대학 레이저핵융합연구소 (ILE). 1990년~현재 청주대 레이저광정 보공학과 교수. 주 연구분야 : 고출력 고체 레이저 시스템 개발 및 응용

Tel : 043-229-8502

Fax : 043-229-8432

E-mail : btkim@chongju.ac.kr