

# Faraday 효과를 이용한 광섬유 전류센서에 관한 연구

## The Study of the Optical Fiber Current Sensor Using Faraday Effect

이정수\* · 송시준 · 전재일 · 박원주 · 이광식 · 김정배\* · 송원표\*

(Jung-Soo Lee · Si-Joon Song · Jea-il Jeon · Won-Zoo Park · Kwang-Sik Lee · Jung-Bae Kim · Won-Pyo Song)  
Yeungnam University, Hyosung Corporation\*

### Abstract

In this paper, we described the laboratory layout of the optical CT in connection with the measurement of large current for the GIS. The aim of this study is the development and application of optical CT based on Faraday effect. It was used He-Ne laser for light source (633nm) and was used PIN-Photodiode for light receiver. The laser source passes through optical fiber in single mode. We used the polarizer to polarize the light source and the beam splitter to divide the output light, and the optical fiber is connected for the measuring the angle polarized in the magnetic field.

## 1. 서론

최근 산업의 발달과 인구의 고밀집화 추세에 따라 향후 예상되어지고 있는 전력수요의 증가에 따른 송전전압의 초고압화와 대규모 설비에 의한 부지확보의 어려움, 기존 CT(Current Transformer)의 보수 및 가격, 정확성등의 문제점들의 해결방안으로 광원인 레이저와 에너지 손실이 적은 광섬유를 중심으로 하는 광센서 기술을 응용함으로써 신뢰성이 높은 광계측 시스템을 개발하여 고전압 대전류 측정을 보다 효과적인 방법으로 진단함으로써 전력계통에 이용하고 광CT[1~14]의 국산화에 따른 수입대체 효과와 외국제품과의 경쟁력을 향상시켜야 할 필요성이 있다. 광CT에 대한 실용화 연구는 신뢰성향상과 경제성추구라는 두가지 측면에서 진행되어, 신뢰성향상에 관해서는 전계해석기술의 고도화 및 절연성능진단법의 확립, 경제성에 관해서는 소형축소화를 기본으로하는 기기구성의 간소화가 요구된다. 특히, 현대에는 한정된 자원과 인력을 효율적으로 사용하여 생산을 극대화시키는 것이 경쟁력의 근본이다. 따라서 설비보수의 빈도를 줄이는 방안과 아울러 무정전의 높은 신뢰성 확보는 극히 중요하다.

이러한 이유로 본 논문에서는 Optical Fiber Sensor기술을 응용하고, Faraday 효과의 편광면 회전량을 수광부에서 검출하여 100[A]에서 1000[A]까지의 전류측정을 위한 광 CT의 동작특성과 센서의 선형성등에 대한 연구를 행하였다.

## 2. 관련이론

### 2.1. Faraday 효과

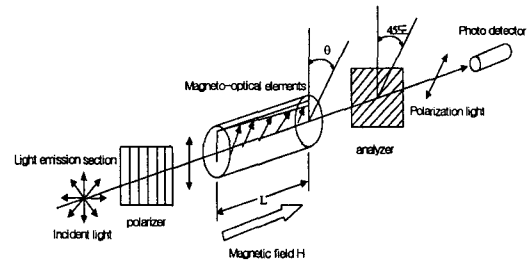


그림 1. Faraday효과 개념도

최근 방전 메커니즘의 해석 및 고전압현상과 관련된 고전압, 대전류, 전자계 등 전기적 물리량의 측정에 광계측의 적용이 급속도로 진전되고 있다. 광계측의 적용 중에서 Faraday효과, Voigt효과 등과 같은 자기광학효과(Magneto-optical effect)를 이용하여 대전류를 측정할 수 있고, Pockels효과, Kerr효과 등과 같은 전기광학효과(Electro-optical effect)를 이용하여 고전압을 측정할 수 있다.

납유리와 같은 투명한 물질에 선형 편광된 광을 입사시킬 때, 그 진행방향에 대해 평행한 자기장을 걸어주면 광파의 편파면이 회전하게 되는데 이러한 광학적 현상을 Faraday 효과라고 한다. 즉, 그림 1과 같이 어떤 결정에 가해지는 자계의 방향과 평행하도록 Polarizer로 직선편광된 빛을 투과시키

면 자계의 세기에 비례하여 광의 편광면이 회전하게 되고, 이 빛은 수광부에서 검출하게 되는데 이러한 광학적 현상을 자기광학효과(MagnetoOptical Effect 또는 Faraday 효과)라고 한다. Faraday 효과를 가지는 자성체 소자를 Faraday 소자라고 하며, 납유리, BGO, BSO, ZnSe, YIG 등이 있다. Faraday 효과에 의한 회전각  $\theta$ 는, 빛의 진행방향에 가해진 자계 H, Faraday 소자에서의 광학경로길이 L, 그리고 Verdet정수 V에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta = VHL \quad (1)$$

V : Verdet 정수[rad/A]

H : 자계강도[A/m]

L : Faraday 소자에서의 광학경로길이[m]

Faraday 효과에 의한 편광축의 회전각은 측정전류에 비례하므로 광섬유센서를 통과한 광신호를 입력편광에 대하여  $\theta$  방향으로 정렬된 검광자(Polarization analyzer)를 통과시켜 그 회전각을 분석하여 전류를 측정할 수 있다. Verdet정수는 Faraday 효과의 크기를 나타내는 물질정수이다. Verdet정수는 Faraday 소자의 자기적 특성에 따라 달라진다. 반자성체(diamagnetic materials)는 Verdet정수가 작지만 온도의 영향을 받지 않는다. 이에 반해, 상자성체(paramagnetic materials) 또는 강자성체(ferromagnetic materials)는 Verdet정수 값이 좀 더 크긴 하지만 항상 온도의 영향을 받는다[1]. 그러므로, 상자성체나 강자성체를 소자로서 이용하게 되면, 원하는 정밀도를 가진 측정값을 구하기 위해 매우 정확한 온도 측정 및 보정이 필요하다. 따라서 자기광학 변류기의 센서소자로서 이용하는 데는 반자성체가 적합하다고 할 수 있다[2].

또한, Verdet정수는 광의 파장 의존성이 강한 점을 들 수 있다. 따라서, 좁은 스펙트럼 대역을 가지는 레이저(예를 들어 He-Ne laser, laser diode 등)를 광원으로 사용하여 이용하는 것이 측정결과에 대한 신뢰성을 향상시킬 수 있다.

편광면이 회전하는 각도는 (1)식에서처럼 자기장의 방향에 관계되는 vector 값이므로 자성체 소자를 사용할 경우 측정하기가 매우 곤란해진다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 Faraday 소자를 대신해 광섬유로 도체 주위에 페루프형 센싱부를 구성함으로써 코일의 형태나 센서코일과 도체와의 거리 등에 무관하게 일정한 값을 가지고 측정도체 이외의 인근 신호원에 영향을 받지 않는 Ampere

의 법칙(Ampere's circuit law)을 적용시킬 수 있다.[3]

광섬유를 도체주위에 감아서 센싱부를 구성할 경우 편광면의 회전각도는 다음 식 (2)와 같이 바꿀 수 있다.

$$\theta = Vn \oint H \cdot dl = VnI \quad (2)$$

여기서 n은 광섬유의 turn수이고, I는 전류의 크기를 나타낸다.

Faraday 효과를 나타내는 (2)식을 이용해서 전류 변화에 대한  $\theta$ 의 변화를 그림 2에 나타내었다. 실험에 사용된 633[nm]파장대의 He-Ne laser의 Verdet상수 값은 약  $4.68 \times 10^{-6}$  rad/A이고, 광섬유의 길이 L은 10[m]로 25turn 하였다. 그림 2에서 알 수 있듯이 전류 1000[A]일 때의 편광면의 회전각은 약 7[deg]정도이므로 충분한 Faraday rotation을 얻기 위해서는 센싱부의 광섬유의 턴수를 늘여줌으로써 보상받을 수 있다.

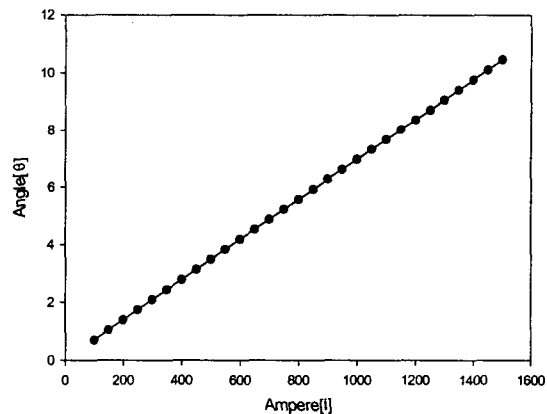


그림 2. 전류변화에 따른 Polarization Rotation

## 2.2. 실험장치 및 방법

실험장치는 크게 3부분으로 나누어진다. 원하는 빛을 발생시키기 위한 발광부(E/O변환기)와 변화된 빛의 특성을 검지하기 위한 검출부(O/E변환기) 그리고 발생된 빛의 특성을 변화시키는 센싱부로 나눌 수 있다. 광원에서 나온 빛은 광파이버를 지나 센싱부까지 전송된다. 전송된 빛은 인가자계에 따라서 편광면이 회전하게 되고 회전각  $\theta$ 는 검출기로 광강도가 변조되어 수광소자로 전달된다. 그림 3은 실험장치의 개략도를 나타낸다.

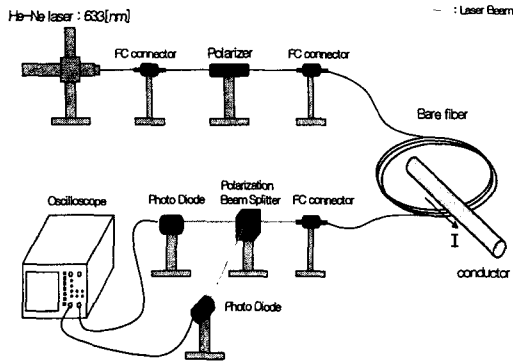


그림 3. 광 CT 시스템 개략도

본 실험에서는 광원으로써 최대 25.0[mW]의 출력을 내는 가시광 영역의 He-Ne laser (633[nm])를 광원으로 사용하였다. 센싱부의 광섬유를 감는 turn수와 전류변화에 따른 Polarization Rotation 값을 고려하였을 때, Verdet 정수값이 큰 광원으로써 He-Ne laser를 선택하게 되었다. 그림 4는 He-Ne laser의 분광스펙트럼을 나타낸다.

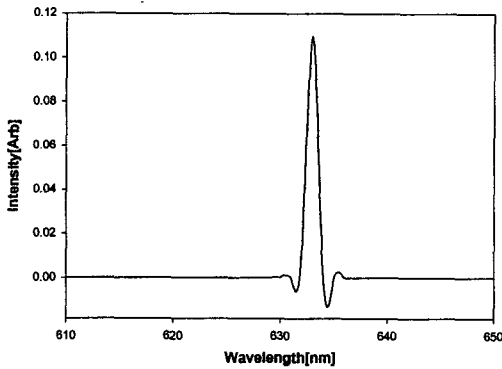


그림 4. He-Ne laser의 분광스펙트럼

He-Ne laser에서 출사된 광이 Polarizer를 지나게 되는데 본 실험에 사용된 Polarizer는 0도부터 360도까지 1도 간격으로 선형편광의 각도조절이 가능하므로 PBS(Polarization Beam Splitter)와  $\pm 45$ 도의 각을 이루도록 선형편광된 광으로 조정하였다. 이 선형편광된 광이 센싱부의 Single Mode Bare Fiber를 통과하고, 이 때 도체에 흐르는 전류에 의해서 자계가 인가되면 광의 편광면이  $\theta$  만큼 회전하게 된다. 도체에 인가되는 전류는 최대 1500[A]까지 발생되는 전류발생장치를 주문 제작하여 사용하였다. 편광면의 회전량은 검광자인 PBS에 의해 두 개의 광으로 나뉘어 O/E변환기인 수광소자로 전달된다.

일반적으로 광CT에 있어서는 빠른 응답속도( $\sim 0.2\text{ns}$ )를 가지는 PIN-PD가 많이 사용되므로 본 연구에서도 photodetector로는 PIN-PD를 사용하였다. 광원인 He-Ne laser와 광섬유를 연결시키기 위한 장치로는 FC/PC커넥터를 사용하였다. O/E변환기는 E/O변환기와는 반대로, 즉 검광자를 통해 나오는 광신호를 photodetector로 전기신호인 전압으로 변환시킨다. 이 전압을 여러 가지 방법으로 검출 가능한 적절한 크기로 증폭시켜 그 신호의 상대치를 측정함으로써 피측정전류의 크기를 측정할 수 있다.

### 3. 실험 결과

전류발생장치를 사용해서 인가전류를 0~1000[A]까지 변화시켰을 때, 광 CT의 출력파형을 오실로스코프를 통해서 관측하였다. 그림 4는 인가전류변화에 따른 출력을 0[A], 200[A], 400[A], 600[A], 800[A], 1000[A]로 나타내었다.

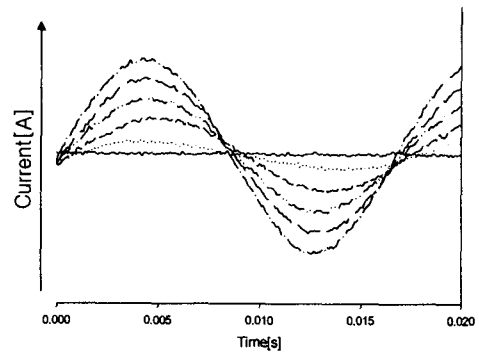


그림 5. 전류변화에 따른 광 CT 출력

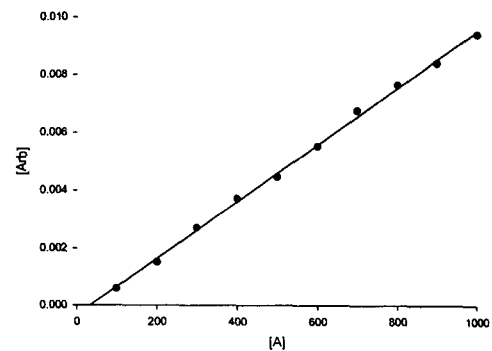


그림 6. 광섬유전류센서의 선형성 측정결과

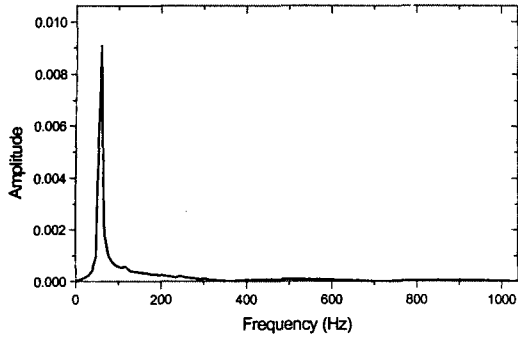


그림 7. FFT Spectrum

그림 6은 100A에서 1000A까지의 reference 전류 값과 광CT 출력파형과의 선형성 측정결과이며, 인가된 전류가 점차 증가함에 따라서 출력도 거의 선형적으로 증가하는데 약  $\pm 7\%$ 의 선형성 오차를 보이고 있는 것을 알 수 있었다. 그림 7은 1000[A] 일 때의 광 CT 출력파형을 FFT(Fast Fourier Transform) 스펙트럼으로 표시한 것인데, 교류성분의 60[Hz]의 신호만이 나타나는 것을 볼 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 Faraday 효과에 의한 편광축의 회전각은 도체에 인가된 전류에 비례하므로 광섬유 센서를 통과한 광신호를 입력편광에 대하여  $\theta$  방향으로 정렬된 검광자를 통과시켜 그 회전각을 분석하여 100[A]에서 1000[A]까지의 60[Hz] 교류전류측정을 위한 광 CT의 동작특성과 센서의 선형성 등에 대한 연구를 행하였다.

실험을 위해 구성된 시스템은 페루프형 센서이므로 측정대상도체 이외의 신호원에 의해서는 영향을 받지 않으며, 센싱부의 광섬유 turn수를 조정함으로써 보다 정밀한 전류측정도 가능하게 되었다.

이 후 수광부의 신호처리 개선과 현장실험 및 문제점 보완등을 통하여 광계측법을 이용한 고전압·대전류 측정기술을 확립·발전시킬수 있을 것이다.

#### 참고 문헌

[1] A. J. Rogers, "Optical technique for measurement of current at high voltage", Proc. IEE, Vol. 120, No. 2, Feb. 1973  
 [2] A. Papp, H.Harms, "Magneto current transformer", Applied Optics, Vol.19, No. 22, 15 Nov. 1980  
 [3] 송민호, 양창순, 안성준, 박병석, 이병호, "과전류 보

호계전기용 광섬유 전류센서", 비파괴검사학회지, Vol. 21, No. 5, October 2001

[4] George I. Chandler and Franz C. Jahoda, "Current measurements by Faraday rotation in single-mode optical fiber", Rev. Sci. Instrum. 56(5), May 1985

[5] M. Kanoi, et al., "Optical Voltage And Current Measuring System For Electric Power Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-1, No. 1, January 1986

[6] G. Degli Esposti, et al., "Current Measurements On A High Voltage Apparatus Using A Fiberoptic Sensor", Fifth International Symposium On High Voltage Engineering, August 1987

[7] 齋藤成文, et al., "レーザを利用した無接触超高圧変流器", J.I.E.E.J.8/68, Vol. 88-8, No. 959 JANUARY 1990

[8] T. Sawa, et al., "Development Of Optical Instrument Transformers", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 2, April 1990

[9] Y. Yamagata, "Development of Optical Transformers and Application to Fault Systems for Substations", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 8, No. 3, July 1990

[10] Atsushi Okahara, "Development of Optical Current Transformer and Optical Potential Device for GIS", 高岳 レビュー-Vol 37 No. 3 AUGUST 1990

[11] S. Kobayashi, et al., "Development And Field Test Evaluation Of Optical Current And Voltage Transformers For Gas Insulated Switchgear", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 7, No. 2, April 1992

[12] T. Fujimoto et al., "Development of an Optical Current Transformer for Adjustable Speed Pumped Storage System", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 12, No. 1, January 1997

[13] K. Kawashima et al., "Development of an Optical Current Transformer for adjustable Speed Pumped Storage System", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 1, January 1997

[14] Masao Takahashi et al., "Optical Current Transformer for Gas Insulated Switchgear Using Silica Optical Fiber", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 4, October 1997

[15] A. Schnettler, et al., "Experiences With Optical Instrument Transformer", CIGRE, 1998