

# Faraday효과를 이용한 광CT 기술 개발 연구

(The Study on The Skill Development of Optical CT Using Faraday Effects)

전재일\* · 안미경 · 박원주 · 이광식 · 김정배 · 김민수

(Jea-il Jeon · Mi-Kyoung Ahn · Won-Zoo Park · Kwang-Sik Lee · Jung-Bae Kim · Min-Soo Kim)

## 요 약

본 논문에서는 초고압 전력설비에서의 대전류 측정을 위한 광CT(optical current transformer)개발을 목적으로한 기초 연구를 하였다. 자기장에 의해서 광신호의 편광특성이 변화되는 Faraday 효과를 기본 이론으로 하며, 1310[nm] Laser Diode를 광원으로 사용하고 5[m], 10[m], 20[m]의 길이가 서로 다른 광섬유로 센싱부를 구성하였다. 전류의 측정은 400[A]에서 1300[A]까지의 범위에서 측정하였으며 센싱부를 구성한 광섬유의 길이에 따른 출력 특성을 파악하기 위한 실험을 하였다. 동일한 실험환경하에서 각각의 출력의 크기 및 선형성은 인가 전류 및 광섬유의 길이에 비례하여 증가하였으며, 5[m]광섬유를 센싱부로 사용한 경우 최대 -11.1%의 오차율을, 10[m], 20[m]의 경우 각각 최대 -3.5%, 1.7%의 오차율을 나타냈다.

## Abstract

In this paper, we took the basic experiment in order to explore the optical CT(optical current transformer) for measuring high current in a superhigh voltage condition.

It is based on the faraday effect that changes the polarization characteristic of optical signals by the magnetic field. We used 1310[nm] laser diode for a light source and comprised a sensing part with the optical fiber of 5[m], 10[m], 20[m] length each.

The range of current was from 400[A] to 1300[A]. We observed the characteristic of output that changes according to the length of the optical fiber composing the sensing part.

The optical fiber of 5[m] length used for the sensing part had -11.1% of the maximum ratio of error and 10[m] and 20[m] length had -3.5% and 1.7% each. This means that the power and linearity of output increase in proportion to the length of optical fiber and applied current in the same experimental condition.

Key Words : optical CT, faraday effect, laser diode, optical fiber

## 1. 서 론

GIS(Gas Insulated Switchgear)에서의 대전류 측정을 위한 기존의 철심형 CT(Current Transformer)의 문제점이었던 절연문제, 과도특성 및 포화 등의 문제들을 해결하기 위한 방안으로 laser를 광원으로,

\* 주저자 : 구미기능대학 전기계측제어공학과 부교수  
Tel : 054-468-5210, Fax : 054-461-9961

E-mail : jjael@kopo.or.kr  
접수일자 : 2003년 12월 22일  
1차심사 : 2003년 12월 26일  
심사완료 : 2004년 2월 23일

## Faraday 효과를 이용한 광CT 기술 개발 연구

광섬유를 센서부로 이용한 광CT(Optical Current Transformer)[1]~[5]로의 교체하기 위한 연구가 전세계적으로 활발히 진행되고 있다.

기존의 CT를 광학적 방법을 이용한 광CT로 대체함으로써 얻을 수 있는 이점으로는 광범위한 측정영역과 소형·경량화 구조로 경제적 절감효과를 얻을 수 있으며, 자기포화나 잔류자기 등에 의한 영향이 없어 과전류에 의한 주회로의 사고발생이 없다는 것이다. 그리고, 계통보호제어 시스템의 신속성 향상 및 디지털 계전 시스템과의 높은 호환성으로 자동화를 통한 무인화시스템을 실현시킬 수 있다[6]. 특히 광CT와 같은 광을 이용한 센서는 저손실, 고절연성, 무유도성, 경량성, 보수의 용이성 등의 장점을 가지고 있으며 전자소자 대신에 빛을 이용해 측정하고 측정신호의 전달 역시 빛이라는 특성을 가지고 있다.

광계측 분야에서 많은 연구실적을 가지고 있는 일본에서는 송전 및 배전계통, 전력기기등 전반적인 전력분야에 적용하기 위한 연구 개발이 활발히 이루어지고 있으며, 미국에서는 광자계 센서에 대한 연구가 진행중이다[7].

광CT에 관한 연구는 국내에서도 10여년간 연구를 수행한 예를 찾을 수 있다. 그러나 광CT의 상용화는 아직 초기 단계이며 현재 구체적인 시장규모와 생산업체를 파악하기는 어렵다[8].

따라서 본 연구에서는 광CT의 실용화를 목표로 두고 있으며 광원으로서 1310[nm] Laser Diode를 사용한 광CT의 기초 실험을 하였다.

## 2. Faraday 효과

자기장이 가해진 어떤 매질 내에 선형 편광된 빛이 통과하게 되면 그 빛의 편광면은 회전하게 되는데 이를 Faraday effect라고 하며, 편광면의 회전각  $\theta$ 는 매질에 가해진 자계의 세기  $H$ 에 비례하고 그 매질의 길이  $L$ 에 비례하여

$$\theta = V \cdot H \cdot L \cdot \cos\phi \quad (\text{식 1})$$

$$= V \cdot H \cdot L \quad (\text{식 2})$$

$V$  : Verdet 상수 [rad/A]

$H$  : 자계의 세기[A/m]

$L$  : Faraday 소자의 길이(광경로 길이)[m]

$\phi$  : 빛의 진행방향과 자기장 사이의 각

이라는 관계를 만족시킨다. 이때  $V$ 는 verdet 상수라 하며 물질의 특성을 결정하는 상수이다.

본 연구에서는 single mode unjacked fiber를 Faraday 소자로 이용하였으며, 자기장이 형성된 공간에 자기장의 진행방향과 평행한 방향으로 광섬유를 원형으로 감아 센서부를 구성하였다. 이 경우 선형 편광된 빛의 편광면의 회전각  $\theta$ 를 (식 2)와 같이 표현할 수 있다. 그리고 이와 같은 구성에서 회전각  $\theta$ 는 인가 전류 및 광섬유의 감은 회수에 비례하게 되며 (식 2)는 Stokes 정리에서

$$\theta = Vn \oint H \cdot dl = VnI \quad (\text{식 3})$$

$n$  : 광섬유를 감은 회수

$I$  : 인가전류

와 같이 나타낼 수 있으며, Faraday 효과에 의한 선형편광면의 회전각은 인가한 전류의 크기 즉, 자계의 세기에 비례하며, 회전각을 측정함으로써 전류의 크기를 측정할 수 있다. 이 때 광신호의 크기는 Photo Detector로 측정할 수 있으며 PBS(Polarization Beam Splitter)에 의해 두 개의 편광모드로 분리된 광신호는 (식 4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{out\ 1,2} = P_{in} (1 \pm \sin 2\theta)$$

$$\rightarrow \text{출력신호} S = \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} = \sin 2\theta \approx 2\theta \quad (\text{식 4})$$

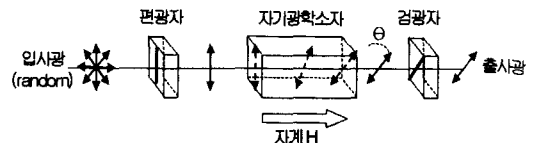


그림 1. Faraday 효과 개념도

Fig. 1. Schematic diagram of Faraday effect

### 3. 실험장치 및 방법

실험장치는 크게 세 부분으로 나뉘어진다. 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 인가된 자계에 따라서 편광면이 회전하게 되고 회전각  $\theta$ 는 검출기로 광강도가 변조되어 수광소자로 전달된다. 그림 2는 실험장치의 개략도를 나타낸다.

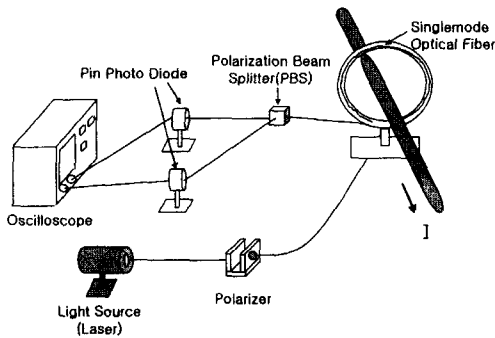


그림 2. 광CT 구성도  
Fig. 2. Schematic diagram of the optical CT

일반적으로 광통신에 Laser Diode가 많이 사용되고 있으므로 본 실험에서도 광원으로써 약 25[mW]의 출력을 가지는 Laser Diode (1310[nm])를 광원으로 사용하였다. 광원을 편광시켜주기 위한 장치로 편광기를 사용하였으며, Laser Diode의 구동 드라이버에서 최초 출사될 때의 빛의 편광도가 낮기 때문에 결과의 정밀도를 높이기 위해 일반적으로 사용하는 파장판을 사용하지 않고 OZ-Optics사의 각도 조절이 자유로운 편광기를 사용하였다. 센싱부로 사용한 single mode fiber는 5[m], 10[m], 20[m]를 각각 사용하였으며, 각각의 광섬유는 미터 당 약 10회 꼬았다. 그리고, 인가한 전류는 400[A]이하에서는 센싱부와 전류가 인가된 도체와의 거리가 먼 관계로 자기장도가 약해서 측정이 어려워 400[A]에서 1300[A]까지 100[A]씩 증가시켜 측정하였다.

실험을 위한 센싱부는 GIS(Gas Insulated Switchgear)스페이스 연결 부분에 부착가능하도록 알루미늄

재질로서 제작 하였으며 그 크기는 직경 310[mm], 폭 40[mm]의 것으로 사용하였다.

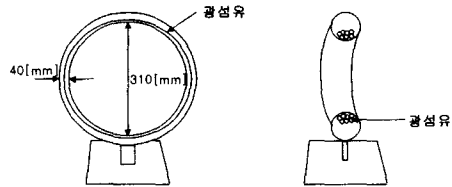


그림 3. 광 CT 센싱부  
Fig. 3. sensing of the optical CT

### 4. 실험 결과 및 고찰

본 연구에서는 전류 발생 장치를 사용하여 400[A]에서 1300[A]까지 변화시켰을 때의 출력값을 오실로스코프로 측정하였다.

그림 4는 400~1300[A]전류 인가시 5[m]와 10[m], 20[m] 길이의 광섬유를 센싱부로 사용한 결과를 각각 5회 측정하여 평균한 값을 나타낸 것이며, 길이의 변화에 비례하여 출력값이 증가함을 알 수 있다.

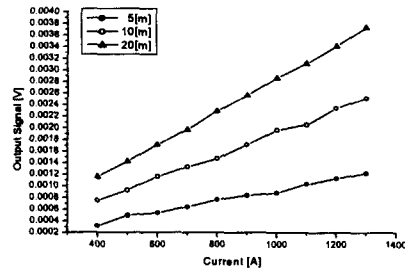


그림 4. 400~1300[A] 인가시 5(m), 10(m), 20(m) 길이의 광섬유 측정 결과  
Fig. 4. results of 5(m), 10(m), 20(m) length optical fiber at 400~1300[A]

그림 5와 그림 6, 그림 7은 5[m], 10[m], 20[m] 길이에 대한 각각의 출력신호의 선형성을 비교한 그림이다. 5[m]길이에서의 경우 reference값과 비교했을 때 400~1300[A] 값에서 최대 오차는 -11.1[%]로 비교적 큰 오차를 보였으며 10[m], 20[m]길이의 경우에 대해서 각각 최대 오차는 -3.5[%], 1.7[%]의 오차를 보였다.

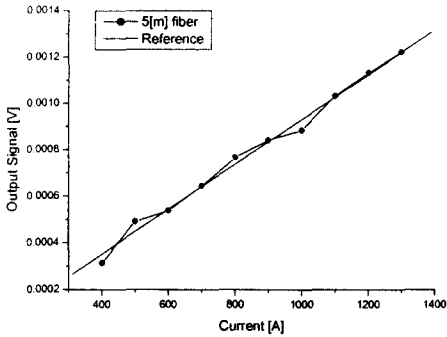


그림 5. 5(m) 길이 광섬유의 선형성 비교  
Fig. 5. Comparison with 5(m) optical fiber signal and reference

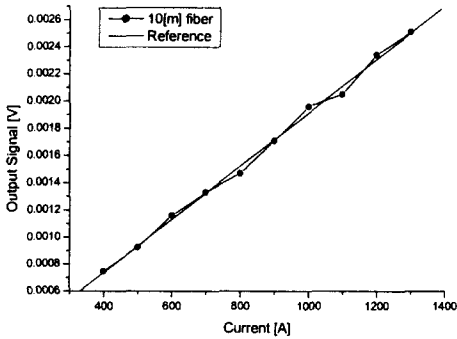


그림 6. 10(m) 길이 광섬유의 선형성 비교  
Fig. 6. Comparison with 10(m) optical fiber signal and reference

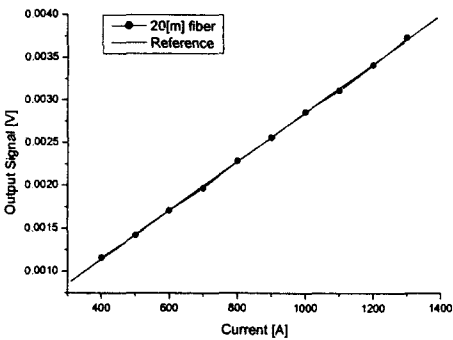
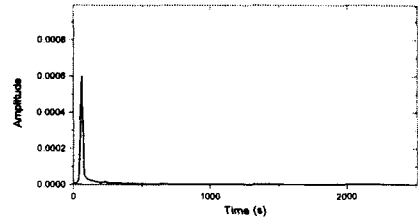
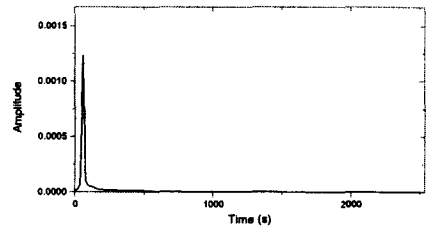


그림 7. 20(m) 길이 광섬유의 선형성 비교  
Fig. 7. Comparison with 20(m) optical fiber signal and reference

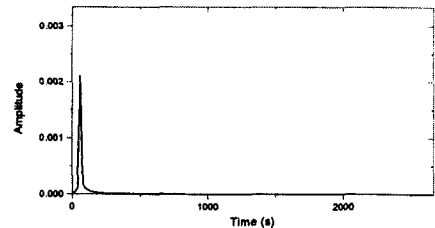
아래의 그림 8의 (a)와 (b), (c)는 각각의 광섬유로부터의 FFT spectrum을 나타내며 각각 인가한 전류값과 동일한 위상(60Hz 대역)을 나타냄을 알 수 있다. 그리고, 그 강도에 있어서 센싱부로 사용한 광섬유의 길이에 거의 비례한다는 것을 알 수 있다.



(a) 5(m)길이의 광섬유



(b) 10(m)길이의 광섬유



(c) 20(m)길이의 광섬유

그림 8. FFT spectrum  
Fig. 8. FFT spectrum of 5(m), 10(m), 20(m) length optical fiber

## 5. 결 론

본 연구에서는 Faraday 효과를 이용한 광전류 센서를 설계·제작하여 전류인가시 센싱 파이버, PBS를 거쳐 포토다이오드로 출력되어 나오는 신호강도를 reference 값에 따른 출력의 오차율과 센싱부의

광섬유의 길이 따라 나타나는 신호강도를 측정하였다.

본 논문에서 나타낸 실험 결과는 다음과 같다.

① 1310[nm] Laser Diode를 광원으로 사용한 광전류센서의 출력신호를 측정된 결과 도체에 흐르는 전류가 커질수록 출력신호가 비례하여 커지는 것을 알 수 있다.

② 인가한 전류의 세기 즉, 자장의 세기에 따른 광전류센서의 출력신호를 refernce값과 비교했을 때 5[m]길이의 광섬유의 경우 400~1300[A]값에서 최대 -11.1[%]의 비교적 큰 오차율을 나타냈으며 10[m], 20[m]길이의 경우에 대해서 각각 최대 -3.5[%], 1.7[%]의 오차율을 나타냈다. 즉, 전류의 값이 클수록, 센싱부의 광섬유의 길이가 길수록 오차가 현저히 줄어든다는 것을 알 수 있다.

③ 각각의 광섬유로부터의 FFT spectrum 결과는 각각 인가한 전류값과 동일한 위상(60[Hz 대역]을 나타냄을 알 수 있었다. 그리고, 그 강도에 있어서 센싱부로 사용한 광섬유의 길이에 거의 비례한다는 것을 알 수 있다.

실험을 위해 구성된 시스템은 광을 이용한 페루프형 센서이므로 측정대상도체 이외의 다른 전자기적 신호에 의해 영향을 받지 않으며, 센싱부의 광섬유의 길이 즉, 감은 수의 조정과 신호처리 과정의 최적화를 통해서 보다 정밀한 전류측정도 가능하리라 예상된다. 그리고 시제품 개발을 위해 추후 정밀도 개선과 현장 실험 등을 통해 광계측법을 이용한 대전류 측정기술을 확립·발전시킬 수 있을 것이다.

이 연구는 (주)효성의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 이에 감사 드립니다.

### References

[1] 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.  
 [2] 齋藤成文, et al., "レーザを利用した無接触超高壓変流器", J.I.E.E.J.8/68, Vol. 88-8, No. 959 JANUARY 1990.  
 [3] George I. Chandler and Franz C. Jahoda, "Current measurements by Faraday rotation in single-mode

optical fiber", Rev. Sci. Instrum. 56(5), May 1985.  
 [4] 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.  
 [5] T. Sawa, et al., "Development Of Optical Instrument Transformers", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 2, April 1990.  
 [6] 이정수 "가스절연개폐장치용 optical CT를 이용한 대전류 측정" 영남대학교, 2002.02 석사학위논문 p01.  
 [7] 김영수 "광전류·전압센서의 적용사례조사연구" 대한전기학회 전기물성·응용부문회 추계학술대회논문집, 2002.11.9.  
 [8] 송민호 "광CT를 이용한 전류 측정" 한국조명전기설비학회, 제17권, 제4호, 2003.8.

### ◇저자소개◇

#### 전재일 (全在一)

1955년 11월 20일생. 1998년 영남대 산업기술대학원 졸업(석사). 2003년 8월 영남대학교 대학원 전기공학과 박사 수료. 현재 구미기능대학 전기계측제어공학과 부교수.

#### 안미경 (安美卿)

1979년 2월 24일생. 2003년 영남대학교 전기공학과 졸업. 2003년~현재 영남대학교 석사 과정.

#### 박원주 (朴元柱)

1954년 3월 14일생. 1978년 영남대학교 전기공학과 졸업. 1982년 일본 큐우슈대학 대학원 졸업(박사). 현재 영남대학교 전자정보공학부 교수.

#### 이광식 (李廣植)

1948년 10월 20일생. 1971년 영남대학교 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 졸업(박사). 1988~1989년 Nagoya Institute of Technology 초빙교수. 현재 한국조명·설비학회 부회장. 현재 영남대학교 전자공학부 교수.

#### 김정배 (金正培)

1966년 10월 12일생. 1989년 한양대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 일본 큐우슈대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1991~현재 효성중공업 연구소 창원분소 수석연구원.

#### 김민수 (金敏秀)

1971년 1월 24일생. 1997년 한양대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년~현재 효성중공업 연구소 창원분소 선임연구원.