

SF-4 Flint Glass를 이용한 磁氣光學的 電流測定시스템에 관한 研究

(A Study on the Magneto-optic Current Measurement System Using SF-4 Flint Glass)

趙寅植*, 金恩洙*, 楊仁應*

(In Sik Cho, Eun Soo Kim and In Eung Young)

要約

본 논문에서는 SF-4 flint glass를 이용한 fiber-optic 전류센서의 가능성을 처음으로 제시하였고 이를 실현하기 위하여 Jones matrix에 의한 이론적 분석과 실험을 하였다. 전류측정센서의 감도를 결정하는 SF-4 flint glass의 verdet 상수는 측정결과 0.0606[$\text{min/G}\cdot\text{cm}$]로 현재 연구 보고된 전류센서용 파라데이 회전자인 FR-5, SF-6 flint glass 및 YIG보다 비교적 작은 값으로 나타났다.

그리고, 이론모델을 토대로 전류측정 시스템을 구성하여 100~600[A]의 상용전류 및 100~500[G]의 자계를 변화 시킴에 따라 검출기 출력을 측정한 결과 선형적으로 나타났다. 이는 이론적 결과와도 일치함이 분석 되므로써 본 논문에서는 SF-4 flint glass가 전류센서로서의 응용 가능성을 제시 하였다.

Abstract

This paper describes fiber-optic current sensor using SF-4 flint glass for the first time, and the flint glass has been theoretically analyzed by Jones matrix and experimentally verified.

Verdet constant of SF-4 flint glass, which determines the sensitivity of current sensor, has been experimentally found as 0.0606 ($\text{min/g}\cdot\text{cm}$). It is relatively lower value than currently used Faraday rotators such as FR-5, SF-6 flint glasses and YIG.

The fiber-optic current sensor system was established and the current measurement was performed in the range of 100 - 600 (A) and 100 - 500 (G). It has been shown by the experimental results that the detector output linearly increased in proportion to the current.

Since these experimental results were in good agreement with theoretical results, it has been shown that SF-4 flint glass can be used for the magneto-optic current sensor.

I. 序 論

일반적으로 전류 측정시 고전압인 경우 전류의 대소에 관계없이 측정장치를 고압회로로 부터 절연 시켜

야 하므로 전력계통 또는 산업용 전력설비에서 현재 사용되는 변류기(current transformer)는 그 만큼 절연의 강화, 중량의 증대, 높은 제작비 등의 문제점이 있으며, 철심을 사용하는 변류기의 포화현상을 피할 수가 없다. 이를 해결하기 위해 최근 광학적 방법에 의한 전류측정 시스템의 연구가 활발히 진행되고 있다.^{1),2)} fiber-optic 전류센서는 고압으로 부터의 차폐가 불필요 하며 철심 변류기의 결점인 포화현상이 없음은 물

*正會員, 光云大學校 電子工學科
(Dept. of Electronic Eng., Kwang Woon Univ.)
接受日字: 1984年 12月 1日

론 소형, 경량으로 경제적인 장치의 구성이 가능하다. 또한 이 방식은 대전력 계통에서 문제가 되는 보호계전 방식 혁신의 선행조건으로 주목되고 있다.

지금까지 fiber-optic 센서는 주로 단일모드 광섬유의 파라데이 효과를 이용한 방식이 연구되어 왔으나^{1,2,3)}, 온도나 압력같은 주위환경 변화에 민감하고, 전류측정 시스템의 여러가지 성능조건을 만족 시키지 못하고 있어 최근에는 파라데이 회전자를 이용한 전류측정 방식이 연구되고 있다.⁴⁻⁷⁾ 이러한 시스템은 광섬유를 전류센서가 아닌 광전송로로 사용하고 전류센서로서 비교적 verdet 상수가 큰 자기광학 물질을 이용한 시스템이다. 자기광학 물질을 이용한 전류측정 방식은 1982⁶⁾, 1983⁷⁾년 K.kyuma 등의 실험결과 전류측정에서 감도가 좋고, 원거리, 비접점 측정으로 안전한 측정을 할 수 있으며 광섬유가 센서가 아닌 단지 광전송로로 사용 됨으로서 온도나 압력 등의 외부영향을 적게 받아 출력이 보다 안정화 되고 선형화 된 방식으로 그 응용이 기대되고 있다. 따라서 본 연구에서는 파라데이 회전자로서 처음으로 SF-4 flint glass를 이용한 전류측정 시스템을 구성하고 그 실험 결과에 대하여 논 하고자 한다.

II. 理 論

일반적으로 파라데이 효과는⁸⁾ 이미 잘 알려진 광학 현상으로 광의 진행방향과 평행하게 자계가 인가되면 입사광의 편파방향이 회전하여 출력측에 나타나는 현상이다. 즉, 자계에 의해 직선 편광된 빛의 회전량(ϕ)은 인가된 자계(H)와 파라데이 회전자의 verdet 상수(v') 및 자계의 영향을 받는 파라데이 회전자의 광경로(l)에 선형적으로 비례한다.

즉,

$$\phi = v' \int_0^l H \cdot dl \tag{1}$$

이 된다.

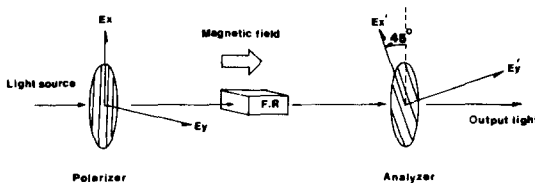


그림 1. 파라데이 회전의 상호관계
Fig. 1. Mutual relation of faraday rotation.

그림 1은 파라데이 효과의 상호관계를 해석하기 위한 모델이다. 즉, 편광상태가

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_0 \exp(j\omega t) \\ 0 \end{pmatrix} \tag{2}$$

인 입력편광이, 자계가 인가된 자기광학 물질에 입사된 경우 자계의 세기에 따라 편광 상태가 변하고, 이러한 편광변화는 입력 polarizer와 45° 각을 이루고 있는 analyzer로 분석 하므로서 상대적인 자계의 세기를 알 수 있다. 따라서, Jones matrix를 사용하여 입출력 전계성분의 관계를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} E_x' \\ E_y' \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} E_0 \exp(j\omega t)$$

윗식을 간단히 정리하면

$$\begin{pmatrix} E_x' \\ E_y' \end{pmatrix} = \frac{E_0}{2} \begin{pmatrix} \cos \phi + \sin \phi \\ \cos \phi + \sin \phi \end{pmatrix} \exp(j\omega t) \tag{4}$$

이 된다. 이 출력전계는 analyzer에 의해

$$E_x' = E_y' = \frac{E_0}{2} (\cos \phi + \sin \phi) \exp(j\omega t) \tag{5}$$

와 같이 주어지며 광검출기로 검출되는 것은 전계의 intensity이므로⁶⁾

$$|E_x'|^2 = |E_y'|^2 = \left(\frac{E_0}{2}\right)^2 (1 + \sin 2\phi) \tag{6}$$

로 주어진다. 윗식에서 E_x, E_y 는 polarizer의 x, y방향으로 편광된 전계성분 이며 E_x', E_y' 는 analyzer의 x', y'방향으로 편광된 전계성분이고, E_0 는 polarizer에 입사한 빛의 전계세기 이다.

일반적으로 실제 전류측정시 파라데이 회전각은 상당히 작으므로 sine함수의 성질을 이용하여 근사화 하던 최종출력은

$$|E_x'|^2 = |E_y'|^2 \cong \left(\frac{E_0}{2}\right)^2 (1 + 2\phi) \tag{7}$$

과 같이 주어진다.

일반적으로 $\sin 2\phi = 2\phi$ 로 근사화하면 $2\phi < 14^\circ$ 일때 1% 이내의 오차를 갖는다. 그리고 본 실험에서는 최대 자계 500[G]를 인가했을 때의 편광회전각이 약 0.6°이므로 그 오차는 0.04%이내 이므로 CT에서 요구하는 측정오차인 $\pm 1\%$ 의 요구조건에 비해 무시할 수 있다.¹¹⁾

따라서 검출기 출력은 파라데이 효과에 의한 편광회전량에 선형적으로 비례하고 편광회전량은 전류의 세기에 비례하므로, 적절한 검출시스템의 구성으로 상대적인 전류측정이 가능함을 알 수 있다.

III. 實 驗 및 結 果

1. Verdet 상수 測定

본 논문에서는 이론적 분석모델인 그림 1을 토대로 전류측정 시스템을 구성하고 파라데이 회전자로서 SF-4 flint glass를 사용 하였으며, 이 자기광학 물질의

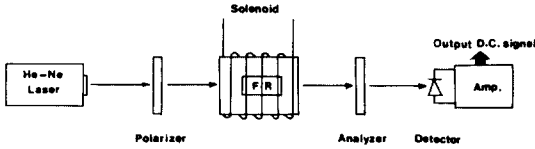


그림 2. Verdet 상수 측정 시스템도
Fig. 2. Block diagram of the verdet constant measurement system.

verdet 상수 값을 측정하기 위해 그림 2와 같은 시스템을 구성하여 실험하였다. 실험에서 광원으로 파장이 6328[Å] 출력이 5[mW]인 He-Ne 레이저를 사용하였으며, polarizer는 직경 30[mm], analyzer는 직경 350[mm]인 것을 사용 하였다. 파라데이 회전자인 SF-4 flint glass는 길이가 1.15[cm]인 것을 사용 하였고, 빔의 손실을 막기위하여 양면을 polishing 하였으며 검출기로는 실리콘 p-i-n 광검출기를 사용하였다. 그리고 자계를 인가 해주기 위한 장치로 솔레노이드를 제작 하였다. 그림 2에서 polarizer와 analyzer를 상호 90°로 고정시켜 광이 전혀 통과하지 않는 상태에서 빔의 진행방향으로 평행하게 솔레노이드에 의한 직류자계가 인가 되었을 때 파라데이 회전자 내에서는 polarizer를 통해 선형 편광된 빔이 인가된 자계에 비례하여 회전하게 된다. 따라서 회전한 각 만큼의 광 intensity가 analyzer를 통해 광검출기로 검출이 되었을 때 analyzer를 회전시켜 광량이 최소인 점을 찾아 회전한 각을 측정 한 결과, 솔레노이드에 의해 인가된 자계의 세기가 1720[G]일 때 2°의 회전각을 구하였다. 따라서 이러한 실험결과로부터 단위자계 및 cm당 0.0606[min]의 편광회전각으로 계산되어 본 실험에 사용된 파라데이 회전자인 SF-4 flint glass의 verdet 상수는

$$v' = 0.0606[\text{min}/\text{G}\cdot\text{cm}] \quad (8)$$

으로 주어지고 자계에 의한 편광회전감도는

$$\frac{\phi}{H} = 0.0697[\text{min}/\text{G}] \quad (9)$$

로 나타났다.

따라서, 현재 연구 보고된 파라데이 회전자인 SF-6 flint glass(반자성체)의¹¹⁾ 경우 verdet 상수는 0.0996 [min/G·cm]이고 FR-5 flint glass(상자성체)는¹⁰⁾ 0.25[min/G·cm]이며, YIG(강자성체)⁴⁾는 20.43[min/G·cm]으로 본 연구에서 사용한 파라데이 회전자인 SF-4 flint glass(반자성체)의 verdet 상수는 이러한 기존 파라데이 회전자들 보다 비교적 작은 값으로 나타났다. 일반적으로 전류센서를 실제사용시는 몇가지 요구조건이 있는데 그중 특히 동작온도 범위에서(-20 ~ +80℃)에서 온도에 따른 출력변동율이 ±1% 이

내의 높은 안정도를 요구한다. 그러나 K. Kyuma⁶⁾의 실험 결과에 의하면 강자성체인 YIG와 상자성체인 FR-5의 경우는 전류측정 감도를 결정하는 verdet 상수가 큰 반면 온도변화(-25~+80℃)에 따른 출력변동율이 각각 25%, 30%로 크게 나타나 실제응용이 어려운 난점을 가지고 있고, 반자성체인 SF-6 flint glass는 온도에 따른 출력 변동율이 ±0.5%이내로 나타나 최근에는 파라데이 회전자로서 SF-6 flint glass, BGO¹⁷⁾등과 같은 반자성체에 대한 연구가 진행되고 있다.

2. 電流測定

SF-4 flint glass의 verdet 상수 측정에 이어 실제 상용전류를 흘려, 전류측정 실험을 하기 위해 그림 3과 같이 전류원을 구성하였다. 60[Hz], 100[V]의 상용전압을 스라이 탁스로 강하시킨 후 변류기로 전류를 600[A]까지 상승 시켰다. 변류기의 2차 측에는 600[A]의 용량에 견딜 수 있는 직경 1.5[cm]의 도체를 감았고, 부하는 그 만큼의 전류에 견딜 수 있는 것을 사용하여 시스템을 구성 하였다. 그리고 도체와 전류 센서인 SF-4 flint glass 중심간 거리를 d로 하여, 거리에 따른 검출기 출력변화를 측정할 수 있도록 고정 시켰다.

그림 4는 SF-4 flint glass를 사용한 전류측정 시스템의 기본 구성도이다. 전류 센서부의 구성은 N. A (Numerical Aperture)가 0.2, core와 cladding의 직경이 각각 50[μm], 125[μm]인 다중모드 광섬유와 배

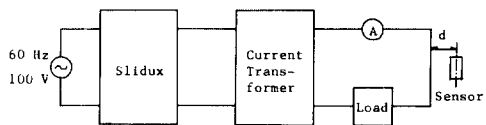


그림 3. 실험에 사용된 전류원 구성도
Fig. 3. Block diagram of the current source.

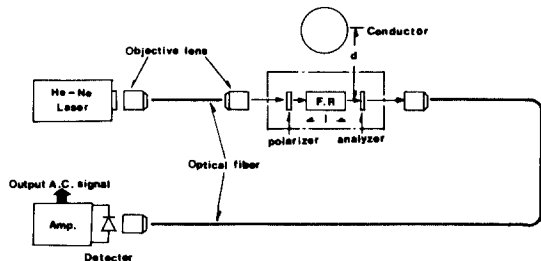


그림 4. 파라데이 회전자를 이용한 전류측정 시스템도
Fig. 4. Block diagram of the current measurement system using faraday rotator.

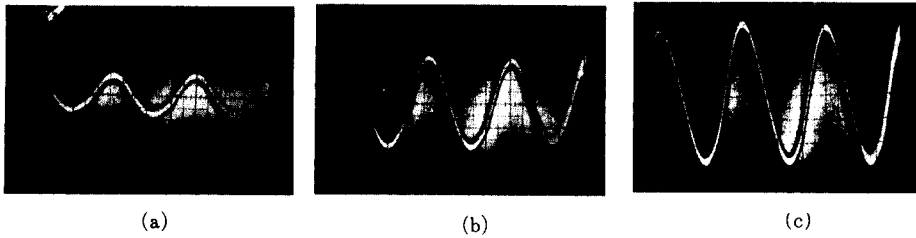


그림 5. 전류를 인가 하였을 때 출력파형

Fig. 5. Output waveform against the current.

- a) 200[A]를 흘렸을 때 출력파형(10mV/div, 5ms/div).
- b) 400[A]를 흘렸을 때 출력파형(10mV/div, 5ms/div).
- c) 600[A]를 흘렸을 때 출력파형(10mV/div, 5ms/div).

율이 10배인 두개의 대물렌즈, polarizer, 파라데이 회전자, analyzer로 되어있고 polarizer와 analyzer는 최대감도와 광범위한 선형성을 얻기 위해 45°의 optical bias로 서로 고정시켜 놓았다.¹⁶⁾ 전류측정 시스템의 동작은 레이저 빔이 다중모드 광섬유에 의해 전송되어 대물렌즈로 집속된 후 센서부로 입사하게 된다. 센서부에 입사된 빔은 polarizer에 의해 선형적으로 편광된 후 파라데이 회전자인 SF-4 flint glass 에서 도체에 흐르는 60[Hz]의 상용전류에 의해 유기된 자계의 세기에 따라 편광변조(polarization modulation)되고 analyzer를 통과 하므로써 intensity 변조로 나타나게 된다. intensity 변조된 빔은 다시 대물렌즈에 의해 광섬유로 집속되어 전송된 광검출기에 의해 intensity 변조신호가 검출 된다. 이 때 전류가 흐르는 도체와 파라데이 회전자 중심간 거리를 d로 하여 각

각 7.6[mm], 15[mm], 30[mm]일 때에 전류변화에 따른 검출기 출력을 측정 하였다. 그림 5는 d가 7.6[mm]일 때 상용전류 200[A], 400[A], 600[A]를 각각 인가했을 때의 검출기 출력파형을 나타낸 것이다. 그림에서 주파수는 60[Hz]로 일정하고 amplitude가 전류크기에 따라 선형적으로 변화함을 알 수 있으며 이는 이론적 분석과도 일치 한다.

그림 6은 센서와 도체 사이의 거리d를 파라메타로 하여 전류를 100~600[A]까지 100[A] 단위로 올려가며 인가한 전류와 검출기 출력전압의 상호관계를 그래프로 나타낸 것이다. 이들 실험치 들은 반복 측정후 평균치를 구한 r. m. s. 값이다. 0[A] 일 때의 출력전압은 optical bias에 의한 광검출기 출력이며 50[A] 이하에서는 잡음에 의한 출력신호 왜곡이 나타났으나 100[A] 이상에서는 검출기 출력이 전류에 따라 거의 선형적으로 증가함을 알 수가 있었으며, 검출기 출력 변동율은 약 ±2.5[%]로 나타났다. 일반적으로 정확한 전류 측정을 위해서는 센서부를 집적화하여 insertion loss를 줄여 출력신호를 크게하고, 특히 100[A] 이하의 저전류 측정시는 보다 정교한 검출기 구성이 요구된다. 즉, divider 회로를 구성하여 측정값을 정규화 하므로써 일정한 신호변화만을 측정하도록 하면 100[A] 이하의 저전류 측정도 가능하다.¹⁶⁾ 그리고 센서와 도체간의 거리에 따른 검출기 감도는 d가 7.6[mm]일 때 5.6×10^{-5} [V/A], 15[mm] 일 때 3.13×10^{-5} [V/A]이고, 30[mm] 일 때 1.55×10^{-5} [V/A]으로 나타나 센서와 전류가 흐르는 도체간의 거리가 가까울수록 검출기 감도가 좋음을 알 수 있다.

그리고 수천 암페어의 고전류 측정에서는 전류원 구성의 난점이 있어 0~500[G]의 자계를 인가할 수 있는 솔레노이드를 구성하여 자계에 의한 상대적인 고전류 측정을 하였다. 상용전류 측정시 최대전류인 600[A]

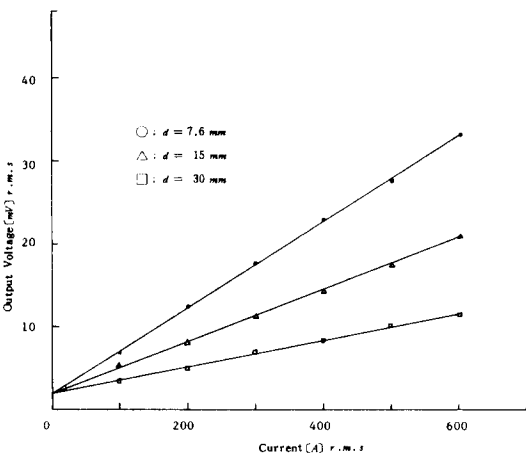


그림 6. 도체에 흐르는 전류와 출력 전압과의 관계
Fig. 6. Relationships between output voltage and electric current in the conductor.

는 측정결과 80[G] 정도로 나타나 500[G]는 3750[A]의 고전류에 해당 된다. 그림 7은 자계를 100[G] 씩 증가 시킴에 따라 측정된 검출기 출력을 나타낸 것으로 상용전류 측정시와 같이 선형적으로 나타남을 알 수 있으며, 출력변동율의 경우는 $\pm 1.5[\%]$ 로 나타나 고전류에서 전류측정 시스템이 보다 안정화 됨을 알 수 있다.

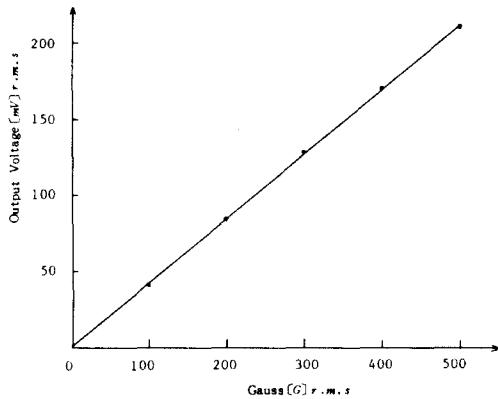


그림 7. 자계와 출력전압과의 관계

Fig. 7. Relationships between output voltage and magnetic field.

따라서 SF-4 flint glass가 전류측정용센서로 사용 가능하며 보다 출력이 안정화된 시스템을 구성하기 위해서는 센서부의 집적화 및 정교한 검출기 구성이 필요하다.⁽⁸⁾

IV. 結 論

본 논문에서는 자기광학 물질인 SF-4 flint glass를 이용한 fiberoptic 전류센서의 가능성을 처음으로 제시하였고, 이를 실현하기 위해 Jones matrix에 의한 이론적 해석과 실험을 하였다. 이론 분석결과 전류 측정 시스템의 검출기 출력은 도체전류에 의한 편광 회전각에 선형적으로 비례함이 해석 되었다.

그리고 SF-4 flint glass의 verdet 상수는 측정결과 0.0606[$\text{min}/\text{G}\cdot\text{cm}$]로 나타났으며, 자계에 의한 편광회전각도 ϕ/H 는 0.0697[min/G]가 되었다.

그리고 SF-4 flint glass를 이용한 측정시스템을 구성하여 상용전류(100~600[A] 및 자계(100~500[G]) 변화에 따른 검출기 출력을 측정된 결과 선형적으로 나타나 이론적인 결과와 일치 하였으며 출력 변동율은 각각 $\pm 2.5[\%]$, $\pm 1.5[\%]$ 로 나타났다.

따라서 본 논문에서는 SF-4 flint glass가 전류측정용 센서로서 사용 가능성을 제시 하였으며, 앞으로 보다 출력이 안정화된 시스템을 구성하기 위해서는 센서부의 집적화 및 정교한 검출기 구성이 요구 된다.

參 考 文 獻

- [1] Giallorenzi, T.G. et al., "Optical fiber sensor technology," *IEEE J. Quantum Electronics*, vol. QE-18, no. 4, pp. 626-665, 1982.
- [2] A. Papp and H. Harms, "Magneto-optical current transformer 1: principle," *Appl. Opt.*, vol. 19, no. 22, pp. 3729-3734, 1980.
- [3] J.A. Wuderlich and L.G. DeShazer, "Visible optical isolator using ZnSe," *Appl. Opt.*, vol. 16, no. 6, pp. 1584-1587, 1977.
- [4] H. Harms and A. Papp, "Magneto-optical current transformer, 3: measurements," *Appl. Opt.*, vol. 19, no. 22, pp. 3741-3745, 1980.
- [5] T. Yoshino, "Compact and highly efficient faraday rotators using relatively low verdet constant faraday materials," *Japan, J. Appl. Phys.*, vol. 19, no. 4, pp. 745-749, 1980.
- [6] K. Kyuma, S. Tai, et al., "Fiber optic measuring system for electric current by using a magneto-optic sensor," *J. of Quantum Electronics*, vol. QE-18, no. 10, pp. 1619-1623, 1982.
- [7] K. Kyuma, S. Tai, et al., "Fiber-optic current and voltage sensors using A Bi₁₂GeO₂₀ single crystal," *J. of Lightwave Tech.*, vol. LT-1, no. 1, pp. 93-97, 1983.
- [8] J.F. Nye, *Physical Properties of Crystals*. Oxford, London, 1964.
- [9] A.M. Smith, *Optical fibers for Current Measurement Applications*. Opt. Laser Technology, pp. 25-29, 1980.
- [10] A. Davis and R.M. Bunch, "Temperature dependence of the faraday rotation of Hoya FR-5 glass," *Appl. Opt.*, vol. 23, no. 4, pp. 633-636, 1984.
- [11] A.M. Smith, "Polarization and Magneto-optic properties of Single Mode Optical Fiber," *Appl. Opt.*, vol. 17, no. 1, pp. 52-56, 1978.