

Faraday 효과를 이용한 클램프형 광-전류 변류기의 특성 및 분석

김수길[†]

호서대학교 전기정보통신공학부

Ⓣ 336-795 충남 아산시 배방면 세출리 산 29-1

이용욱 · 이병호

서울대학교 전기공학부

Ⓣ 151-744 서울 관악구 신림동 산 56-1번지

송민호

전북대학교 전자정보공학부

Ⓣ 561-756 전북 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14

임용훈

전력연구원 전력계통연구실

Ⓣ 305-380 대전시 유성구 문지동 103-16

(2003년 5월 13일 받음, 2003년 7월 25일 수정본 받음)

FD10 유리를 이용한 클램프형 광전류 센서를 제작하였다. 대칭형 구조로 이루어진 2조각의 FD10유리를 이용하여 제작하였으며, 센서헤드 내부에서 반사시에 위상차가 발생하는 것을 방지하기 위해 정확히 임계각으로 광이 진행하도록 구조를 설계하였다. 제작한 광-전류 변류기 헤드를 이용하여, 0-1,000 AT 까지의 전류를 측정하고, 빛의 입사각에 따른 광의 손실, 입사광의 편광회전에 따른 광출력변화, 온도에 따른 출력의 변화 및 장시간 전류 측정 등에 대한 실험결과를 제시하고 이에 대한 분석을 통해 제작된 광전류 변류기 헤드의 전류계로서의 가능성을 입증하였다.

주제어 : optical current transformer, faraday effect, FD10 glass, bulk-type, clamp-type.

I. 서 론

최근 전력설비의 대용량화로 인하여 양질의 전력을 안정적으로 공급하기 위해서 전력 계통의 운용 중에 발생하는 사고를 신속히 감지, 판별하여 사고부분을 신속히 분리시킬 수 있는 보호계전 시스템의 역할이 더욱 중요시되고 있다. 현재 주로 사용되고 있는 전자기장식 전류변류기(Current Transformer, 이하 CT)는 도체 주변에 전류가 흐르게 되면 생기는 자기장을 이용, 도체 주변의 철심을 흐르는 전류를 측정함으로써 전류를 측정할 수 있었다.^[1] 하지만 이 방식은 공진 현상과 자기 포화에 의하여 결과에 왜곡이 생길 수 있다. 또한 외부에서 발생한 자기장에 의해서도 결과에 오류가 생길 수 있으며, 더욱이 송배전 전압의 초고압화에 따른 절연장치의 규모가 커질수록 절연 비용이 많이 들고 취급 등에 어려움이 많은 실정이다.

그래서 개발된 것이 광-전류변류기(Optical Current Transformer, 이하 OCT)이다. OCT는 기본적인 개념이 제안된 것은 매우 오래되었고 1980년대 이후 국내외적으로 활발한 연구가 이루어진 분야이다. 하지만 30여 년간의 이론적 발전에 비하여 그 기술적 완성도나 여건이 아직은 실용화 단계에 미치지 못하고

있다. 이는 OCT 시스템에 사용되는 광소자의 품질과 제조기술, 가격경쟁력, 그리고 기술인력의 확보 등 기반조건이 취약하였고, 실제 플랜트에 적용할 경우 겪게 되는 여러 가지 환경적 외란에 의한 노이즈와 안정성의 문제 등을 효율적으로 해결할 수 있는 최적 설계가 이루어지지 않았기 때문이다. 그러나 최근 광통신 산업의 발달에 힘입어 관련소자의 품질과 가격경쟁력이 향상되었고 유용한 기술인력의 수가 늘어남에 따라 과거 어느 때보다도 실용화의 가능성이 고조되고 있는 시점이다. OCT의 장점으로는 절연성이 뛰어나며 또 광의 방향과 전류에 의해 생기는 자기장의 방향이 일치해야만 광의 성질에 변화가 생기므로 외부 자기장에 의해 결과가 왜곡이 되지 않는다는 것이다.

OCT의 종류에는 먼저 광 루프를 광섬유(optical fiber)를 사용하여 만드는 광섬유형과 어떤 매질을 하나의 덩어리 형태로 만들어 광 폐루프를 만드는 형태인 벌크(bulk)형으로 나눌 수 있으며, 벌크형 광전류 센서는 전류를 측정하기 위한 센서 헤드가 유리이므로 절연성이 좋으며, 광경로가 폐루프를 형성하므로 주변 도체에 흐르는 전류에 의한 영향이 제거된다.^[2-4] 광섬유형 OCT는 광섬유 내부에 존재하는 선형 복굴절(linear birefringence)과 광섬유를 휘 때 만들어지는 복굴절의 영향을 해결해야 하는 어려움이 있다. 그에 반해 벌크형 OCT는 광을

[†]E-mail: sgkim@office.hoseo.ac.kr

여러 번 반사를 시켜야 하므로 광 정렬(optical alignment)이 어렵고 센서 헤드(sensor head)를 설치할 때 전류가 흐르는 도체를 파괴하지 않고서는 설치를 할 수 없다는 단점이 있다. 이런 단점을 보완하기 위해서 클램프형 광 전류 변환기(Clamp-type Optical Current Transformer, COCT)가 제안되었다.^[5]

본 논문에서는 클램프형 구조의 센서 헤드 설계시에 고려해야 할 조건을 이론적으로 해석하고, 이를 토대로 한 클램프형 센서헤드를 제작하여, 도선에 흐르는 전류, 광의 입사각, 광원의 입사편광, 온도에 따른 광출력의 변화 및 장시간에 걸친 광출력 측정을 수행함으로써 제작된 변류기헤드의 특성을 분석하였다.

II. 본 론

2.1. 기본 원리

일반적으로 OCT는 패러데이 효과(Faraday Effect)를 이용하여 어떤 도체에 흐르는 전류의 양을 측정한다. 어떤 도체에 전류가 흐르게 되면 그 주변에는 오른 나사의 방향으로 자기장이 생기게 된다. 그림 1에서 알 수 있듯이 자기장의 방향과 같은 방향으로 선형 편광된 빛이 입사되면 이 빛의 편광면은 자기장의 세기에 비례하여 회전하게 된다.

$$\theta_F = VHL \tag{1}$$

θ_F : Faraday 회전각

V : Verdet 상수

H : 자기장의 크기

L : Faraday cell의 길이

여기서, 전류의 법칙에 의해 자기장 H 가 영향을 미치는 길이, 즉 Faraday cell의 길이만큼 선적분을 해주면 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \theta_F &= V \cdot \oint H \cdot dL \\ &= V \cdot I \end{aligned} \tag{2}$$

식 (2)에서 보는 바와 같이 패러데이(Faraday) 회전각 θ_F 는 전류에 비례하게 되므로, 회전각에 따른 광세기를 광검출기로 측

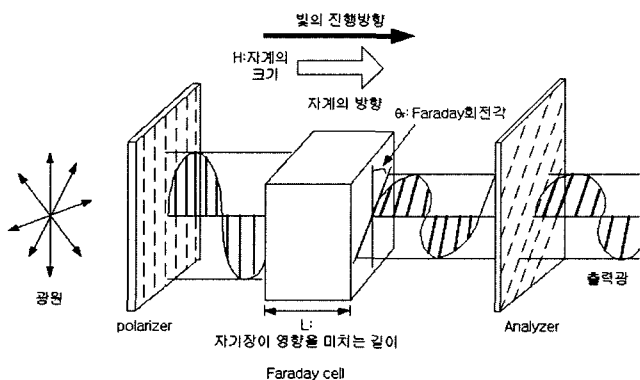


그림 1. 광-전류 변류기의 기본원리.

정함으로써 도체에 흐르는 전류를 측정하는 것이 가능하다.

2.2. 광-전류 변류기 헤드의 구조 및 반사와 위상의 관계

2.2.1 벌크형 광-전류 변류기의 진행파에 대한 Jones vector 표현

본 논문에서는 벌크형의 동작원리를 기준으로 내용을 전개한다. 그림 1에서와 같이 레이저나 LED로부터의 입력광신호는 선형편광기를 거쳐 선형편광(linear polarization)형태로 센서부에 입사한다. 도체에 흐르는 전류에 의하여 발생한 자기장은 변류기 헤드물질 내부에 원형복굴절(n_+ , n_-)의 변화를 야기시켜 Faraday cell을 통과하는 원형편광모드(+는 right circular polarization, -는 left circular polarization)는 각각 c_+/n_+ , c_-/n_- 와 같이 서로 다른 위상속도를 가지므로 일정한 길이를 통과한 후 두 원형편광모드의 상대위상차는 식 (3)과 같다.

$$\Delta\varphi = \varphi_- - \varphi_+ = \frac{2\pi(n_- - n_+)l}{\lambda_0} \tag{3}$$

입의 편광을 가지는 입사파의 경우 Jones vector는 다음 식과 같이 표현된다.^[6]

$$J = \begin{pmatrix} A_x e^{i\delta_x} \\ A_y e^{i\delta_y} \end{pmatrix} = A_x \begin{pmatrix} e^{i\delta_x} \\ \frac{A_y}{A_x} e^{i\delta_y} \end{pmatrix} = A_x \begin{pmatrix} e^{i\delta_x} \\ \tan\theta e^{i\delta_y} \end{pmatrix} = A_x \frac{e^{i\delta_x}}{\cos\theta} \begin{pmatrix} \cos\theta \\ e^{i\delta} \sin\theta \end{pmatrix} \tag{4}$$

여기서, $\delta = \delta_y - \delta_x$ 이며, δ_x , δ_y 는 각각 전계의 x축과 y축 성분의 위상을 나타낸다. 식 (4)에서 입사파의 두 성분의 위상차가 0이고 행벡터를 제외한 나머지 성분이 편광상태에 영향을 미치지 못한다는 것을 감안하면, 입사파는 식 (5)와 같이 단순화할 수 있다.

$$J = \begin{pmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{pmatrix} \tag{5}$$

시스템을 통과하는 편광의 변화과정은 Jones Vector를 이용하여 표현할 수 있는데 원형복굴절에 의한 영향을 해석하기 위하여 변류기 헤드에 입사한 선형편광을 아래와 같이 두 원형 편광성분의 합으로 표시한다(θ 는 시스템을 임의의 직교좌표로 표현하였을 때 선형편광이 x축과 이루는 각이다).

$$J = \begin{pmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{pmatrix} = \frac{1}{2} e^{-i\theta} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} + \frac{1}{2} e^{-i\theta} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} \tag{6}$$

반사가 일어나기전까지 진행한 거리를 l 이라고 하면, 이 거리를 진행한 후의 진행파는 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$J = \frac{1}{2} e^{-i\theta} e^{-i\varphi_+} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} + \frac{1}{2} e^{-i\theta} e^{-i\varphi_-} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} = e^{-i\varphi_0} \begin{pmatrix} \cos\left(\theta - \frac{\Delta\varphi}{2}\right) \\ \sin\left(\theta - \frac{\Delta\varphi}{2}\right) \end{pmatrix} \tag{7}$$

여기서, $\varphi_0 = \frac{1}{2}(\varphi_+ + \varphi_-)$ 는 두 모드간의 평균위상지연이고 편광의 상태와는 무관한 항목이므로 결국 원형복굴절이 선형편광에 미치는 영향은 선형편광의 진동축을 $\Delta\varphi/2$ 만큼 회전시키는 편광회전자(polarization rotator)의 역할이다. 반사가 일어

난 후의 출력파는 식 (8)과 같이 표현된다.

$$J = e^{-i\varphi_0} \begin{pmatrix} e^{i\delta_{||}} \cos\left(\theta - \frac{\Delta\varphi}{2}\right) \\ e^{i\delta_{\perp}} \sin\left(\theta - \frac{\Delta\varphi}{2}\right) \end{pmatrix} = e^{-i\varphi_0} e^{i\delta_{||}} \begin{pmatrix} \cos\left(\theta - \frac{\Delta\varphi}{2}\right) \\ e^{i\delta} \sin\left(\theta - \frac{\Delta\varphi}{2}\right) \end{pmatrix} \quad (8)$$

식 (8)에서 알 수 있는 바와 같이 Glass COCT의 경우에 반사가 한번 일어나면 일반적으로 타원편광이 된다는 것을 알 수 있다. 따라서 출력파에서의 모드간의 위상차 δ 를 제거하면 순수하게 원형 복굴절에 의한 편광의 회전만을 얻을 수 있기 때문에 모드간의 위상차를 제거해야 함을 알 수 있다.

2.2.2 입사파의 경계면에서의 굴절 및 반사

두 개의 매질(homogeneous and isotropic)은 0의 전도도를 가지고 있어서 투명하다고 가정하자. 이 경우에 두 매질의 투사율은 1로 볼 수 있다. 그러면 두 개의 매질의 경계면에서 생기는 입사면에 평행한 편파와 수직인 편파에 대해 입사파와 반사파간의 관계는 식 (9)-(10)까지의 Fresnel 공식으로 표현된다.^[7]

$$R_{||} = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} A_{||} \quad (9)$$

$$R_{\perp} = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} A_{\perp} \quad (10)$$

여기서, θ_i 는 입사각, n_1 과 n_2 는 각각 공기와 공기와 접하고 있는 물질의 굴절률을 나타낸다. $R_{||}$ 은 입사면에 평행하며 한 매질에서 동일한 매질로 전파되어지는 반사파이며, R_{\perp} 은 입사면에 수직하며 한 매질에서 동일한 매질로 전파되는 반사파이다. 마찬가지로 $A_{||}$ 은 입사면에 평행한 입사파를 A_{\perp} 은 입사면에 수직인 입사파를 나타내며, 이러한 관계는 그림 2에 나타내었다.

Fresnel 식을 이용하여 반사파에 있어서 모드간의 위상차에 대한 식을 유도할 수 있다. 입사면에 수직인 편파와 평행한 편파사이의 위상차를 식 (11)과 같이 표현하면,

$$\delta = \delta_{\perp} - \delta_{||} \quad (11)$$

반사파에 있어서 모드간의 위상차에 대한 관계식은 식 (12)와 같이 표현된다.^[7]

$$\begin{aligned} \tan \frac{\delta}{2} &= \frac{\tan \frac{\delta_{\perp}}{2} - \tan \frac{\delta_{||}}{2}}{1 + \tan \frac{\delta_{\perp}}{2} \tan \frac{\delta_{||}}{2}} \\ &= \left(\frac{1}{n^2} - 1\right) \frac{\sqrt{\sin^2 \theta_i - n^2}}{\cos \theta_i} \\ &\quad \frac{1 + \frac{\sin^2 \theta_i - n^2}{n^2 \cos \theta_i}}{\cos \theta_i \sqrt{\sin^2 \theta_i - n^2}} \\ &= \frac{\cos \theta_i \sqrt{\sin^2 \theta_i - n^2}}{\sin^2 \theta_i} \end{aligned} \quad (12)$$

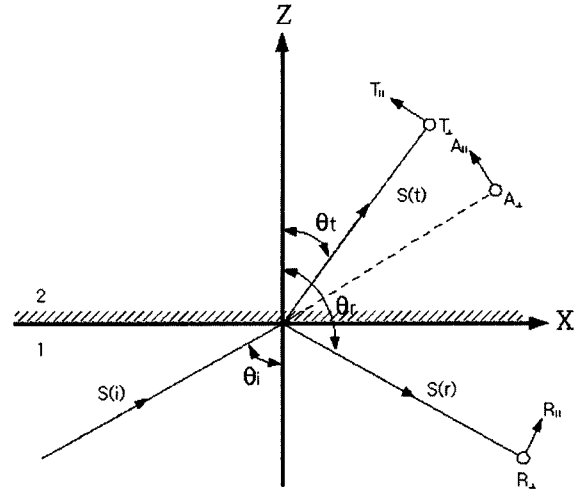


그림 2. 평면파의 굴절과 반사.

여기서, n 은 n_2/n_1 을 나타낸다.

식 (12)로부터 입사면에 수직인 편파와 수평인 편파를 가지는 입사파가 반사된 후에 두 모드간의 위상차가 발생하지 않기 위해서는 입사파가 경계면에 평행하게 입사하거나 임계각으로 입사($\sin \theta_c = n$)해야 한다는 것을 알 수 있다. Faraday 효과를 이용하는 폐로형 OCT 내부에서는 반사가 일어나는데, 앞에서 언급한 조건이 충족되지 않을 때는 두 모드간에 위상차가 발생하여 선형편파의 입사파는 반사가 일어난 후에는 타원편파로 변환되는 현상이 발생한다. 선형편파의 회전된 정도를 이용하여 전류를 측정하는 폐로형 OCT 센서에서 이러한 문제는 측정전류값에 오차를 유발하므로 측정의 정확도를 떨어뜨리는 역할을 하며, 심한 경우에는 측정값에 대하여 신뢰할 수 없는 결과를 발생시킬 수도 있다. 따라서, 측정전류의 오차를 줄이기 위해서는 입사파가 반사면에 임계각으로 입사하도록 해야 한다.

2.2.3 임계각을 고려하여 설계된 클램프형 광 CT센서 구조

COCT 헤드를 설계할 때 고려해야 할 사항은 광원에서 나온 빛이 매질로 입사하여 반사할 때 전반사가 일어나도록 설계해야 하며, 반사에 의한 위상차가 발생하지 않도록 빛이 반사하는 부분에서의 입사각이 임계각이 되도록 하여야 한다. 전반사가 일어나는 임계각은 다음식과 같이 정의된다.

$$\theta_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1} \quad (13)$$

여기서, n_1 과 n_2 는 각각 매질과 공기의 굴절률을 나타낸다. 그림 3은 반사시에 위상차가 일어나지 않도록 식 (13)의 조건을 만족하는 임계각을 가진, 두개의 동일한 bulk-glass의 조각을 사용하여 설계한 COCT 헤드이며, 재질은 반자성체 도핑 유리인 FD10이며 광원에서 나온 빛의 편광면을 전류의 세기에 따라 회전시키는 Faraday 소자이다. FD10의 굴절률은 1.799이다. 633 nm의 파장에서 버데트(Verdet)상수는 2.23×10^{-5} rad/A이며, 이 조건에 맞는 임계각은 33.774도이다. 임계각을 고려하여 설계하는 경우에 경사각은 아주 정밀하게 가공되어

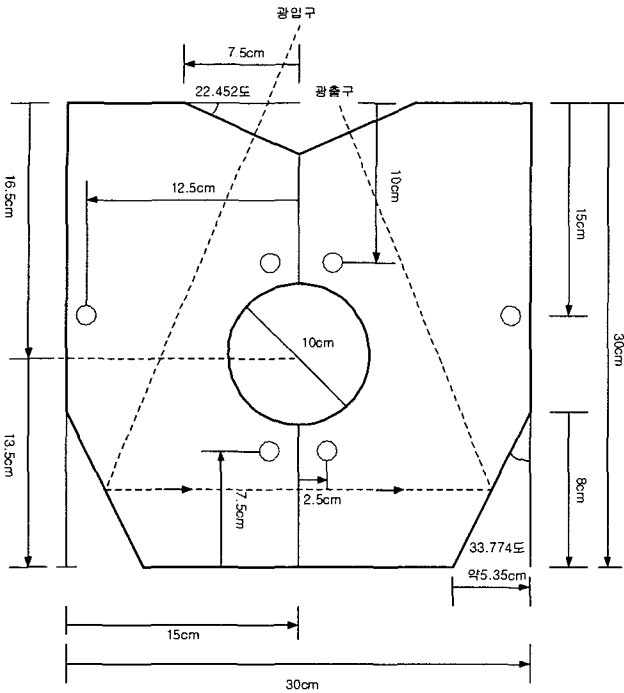


그림 3. 설계된 COCT 헤드.

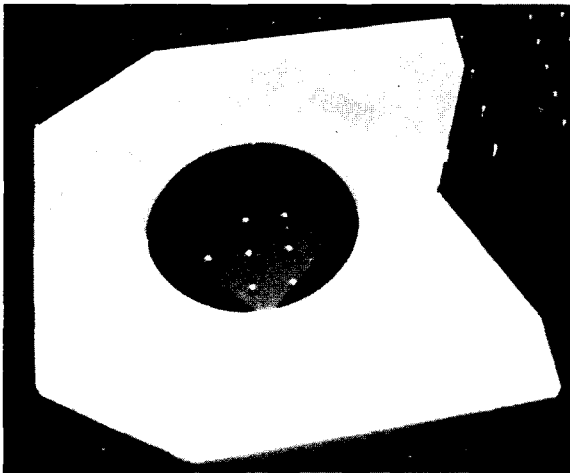


그림 4. 제작된 COCT 헤드.

야 하는데, 이는 국내회사들의 기술수준에 비추어 보았을 때 고정밀도로 가공하는 것은 불가능하여, 실제 제작된 변류기 헤드의 임계각은 33.7도였으며, 크기는 가로 30 cm, 세로 30 cm, 두께 1 cm였다. 그리고, 변류기 헤드의 광입구와 두조각의 FD10 유리의 접촉부분은 광손실을 줄이기 위하여 AR(Anti-reflection) 코팅을 하였다. 그림 4는 실제 제작된 변류기 헤드의 사진이다.

III. 실험 결과

본 연구에서 제작된 변류기 헤드가 앞에서 이론적으로 언급된 것처럼 도체에 흐르는 전류를 측정할 수 있는지를 검증하기 위해 그림 5와 같은 실험시스템을 구축하였다.

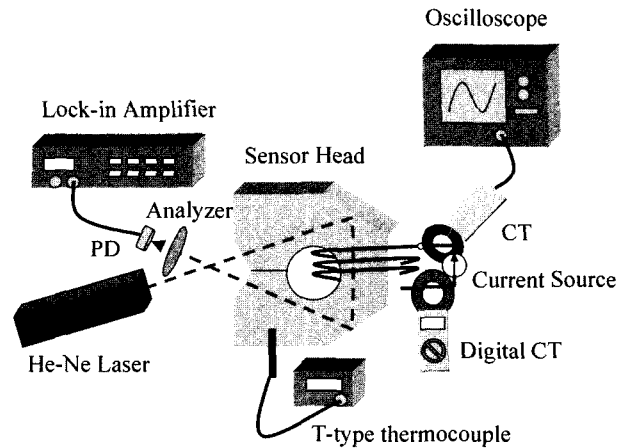


그림 5. COCT를 이용한 전류 측정장치 구성도.

그림 5에서 약 86 A가 흐르는 도체를 20번 감아 최대 약 1,700 AT까지 흐를 수 있도록 만들었다. 전류값은 전자기장식 Digital CT(모델 380926, Extech)로 확인할 수 있도록 하였다. 변류기 헤드에 입사되는 광원은 출력이 35 mW인 633 nm He-Ne 레이저(모델 1144P, JDS Uniphase)를 사용하였다. He-Ne 레이저에서 입사된 빛은 변류기 헤드의 임계각으로 반사되도록 정렬되었고, 변류기 헤드에서 나온 빛은 검광기(모델 03FPG007, Melles Griot)를 지난 후에 광세기를 광 검출기(모델 818-SL, Newport)에서 측정할 수 있도록 실험장치를 구성하였다. 광검출기는 Lock-in Amp.(모델 SR830, Stanford Research Systems)에 연결되어 광출력값을 알 수 있도록 하였으며, 전자기장식 CT(모델 A621, Tektronix)는 오실로스코프에 연결되어 OCT의 광출력과 비교를 할 수 있도록 시스템을 구성하였다. 그리고 변류기 헤드의 온도는 T-형 열전대(모델 5111, Fluke)를 이용하여 측정하였다.

도체에 흐르는 전류값을 0 A에서부터 1,600 AT까지 실험하였으며, 그림 6은 오실로스코프(LC534AM, LeCroy)로 400 AT와 1,600 AT를 측정한 파형을 보여주는 그림이다.

전류파형은 그림에서 도시되어 있지 않지만 그림 6에서의 파형의 주기와 일치하는 결과를 보여주었으며, 전류값이 클수록 측정된 전류파형이 깨끗하였으며, 전류의 크기가 커지면 파크값도 커지는 것을 볼 수 있다. 실험에 사용하는 전류원은 상용 주파수 전류를 트랜스를 거쳐 증폭시켜 얻어낸 값이므로 상용 교류 전류의 주파수 60 Hz가 광 전류변류기의 파형에 나타나야 한다. 그림 6에서 전류파형의 주기는 약 16000 μsec 이므로 주파수는 1/16000 μsec ≈ 60 Hz로써 입력 전류의 주파수를 나타냄을 알 수 있다.

그림 7의 (a)와 (b)는 각각 0-100 AT 범위에 대하여 5 A씩, 그리고 50 AT~1,000 AT 범위에 50 A씩 변화시켜며 도선의 전류를 5회 측정하고, 측정된 전압 파형의 실효치에 대한 5회 평균치를 나타낸 그래프이다.

그림 7에서 (a)의 회귀곡선(fitted curve)은 $y = 0.03065 + 0.00966x$ 이며, 이 회귀곡선에 대하여 측정값의 최대오차는 1.6%로 관측되었으며, (b)의 회귀곡선은 $y = 0.00286 + 0.001x$ 이며, 이 회귀곡선에 대하여 측정값의 최대오차는 1.52%로 관측되었다.

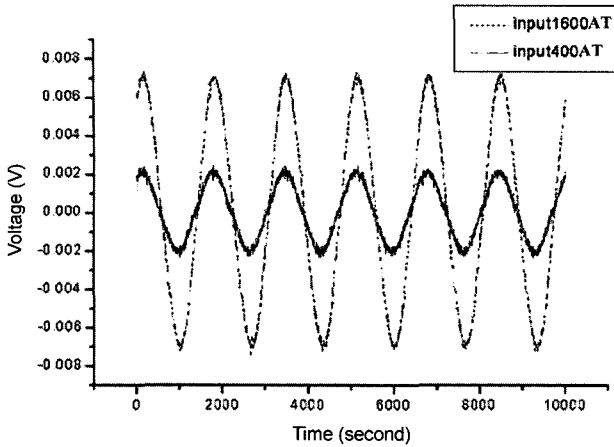


그림 6. 입력 전류가 400 AT와 1,600 AT일 때 광검출기의 출력전압.

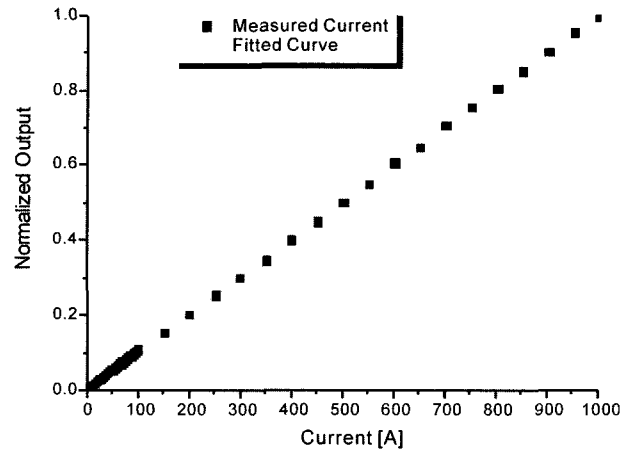


그림 8. 0~1,000 AT까지의 측정그래프.

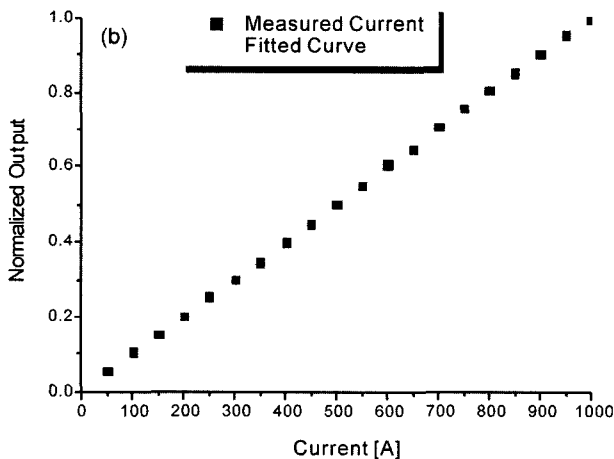
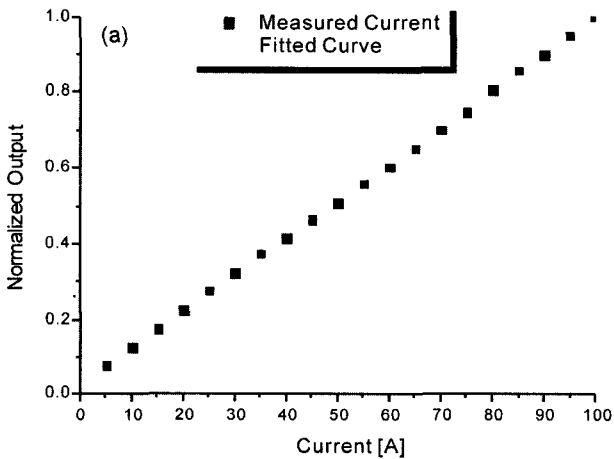


그림 7. 전류측정결과 (a) 0-100 AT범위의 측정결과 (b) 50-1,000 AT의 측정결과.

그림 8은 0~1,000 AT까지의 범위를 하나의 그래프로 만든 것이다.

0~1,000 AT까지의 전체 측정결과에 대한 회귀곡선은 $y = 0.00466 + 9.97992 \times 10^{-4}x$ 이며, 이 회귀곡선에 대하여 측정값의 최대오차는 6.8%로 관측되었다. 이는 사용된 전류원의 불안정성과 한 전선에 1,000 A를 흘리는 것이 아니라 전선을 여



그림 9. 입사각과 출력의 관계.

러번 감아서 전류를 증가시켜가며 측정하였으므로 오차가 누적되는 것으로 생각되며, 이에 따라 회귀곡선에 대한 오차가 커진 것으로 생각된다. 단일전선에 흐르는 전류를 측정할 경우에는 오차가 훨씬 작아지리라 예측된다.

그림 9는 입사각에 따른 광출력의 변화를 측정한 결과를 보여준다. 입력면에서의 입사각을 80도에서 100도까지 변화시켜가며 실험을 하였다.

그림 9에서 입사각이 90도일 때 가장 좋은 결과를 얻으며 90도에서 1도가 벗어나면 실효치가 약 0.3 mV씩 줄어들음을 알 수 있다. 또한 입사각이 90도에서 ± 10 도를 벗어나면 출력을 얻지 못함을 알 수 있는데 이는 광경로가 생기지 않기 때문이다. 제작된 변류기 헤드는 입사면에 90도로 입사할 때 반사면에서 임계각으로 입사하도록 설계된 변류기 헤드이므로, 그림 9와 같은 결과는 변류기 헤드가 정상적으로 잘 제작되었다는 것을 의미한다.

그림 10은 수직편광을 가진 입사광원을 반과장판을 이용하여 편광을 회전시킬 때의 출력변화를 측정한 예이다. 이 경우에는 전류를 흘리지 않은 경우에 대하여 측정한 결과이다.

그림 10에서 반과장판의 각이 0도일 때 최대의 출력값을 보여주고, 45도일 때 최소값을 보여준다. 따라서, 전류를 측정할 때 광원의 수직편광을 이용하는 것이 광손실이 작기 때문에

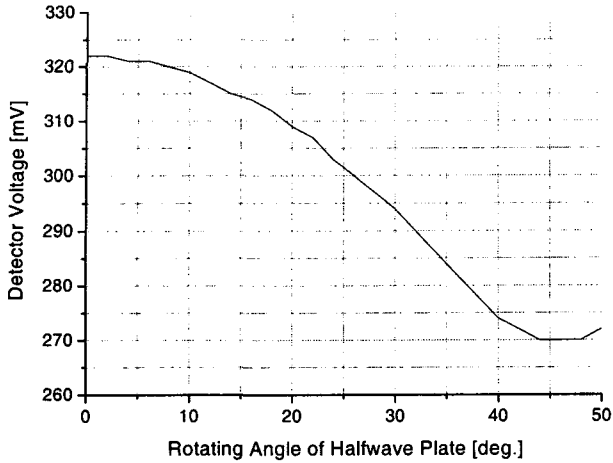


그림 10. 편광의 회전에 따른 출력변화.

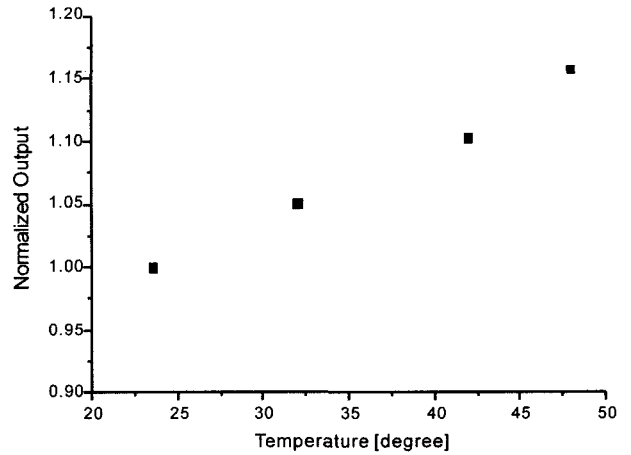


그림 11. 온도에 따른 COCT의 출력변화.

합리적이라는 것을 알 수 있다.

그림 11은 전류가 40 A일 때, 4개의 온도값에 따른 출력변화를 보여주는 측정결과이다. 측정결과 0.001 mV/°C의 변화가 있으며, 이를 %로 환산하면 0.6%/°C의 변화가 생기는 것으로 관측되었다. 결론적으로 말하면 FD10 glass를 이용한 벌크형 전류계는 측정온도에 따라서 측정값에 대한 보정이 필요하며,

이는 기준 테이블을 작성해서 사용하면 될 것으로 생각된다.

그림 12는 제작된 COCT와 전자기장식 CT를 이용하여 동시에 23.5도의 외부환경에서 400 A의 전류를 30분간 측정해 본 결과이다. COCT는 시간이 지남에 따라 측정값이 상승하는 것을 알 수 있는데, 이는 도선에서 발생하는 온도가 상승함으로써 광출력이 상승하는 것이며, 전자기장식 CT는 측정 시간동안 거의 일정한 출력값을 측정하고 있음을 알 수 있다.

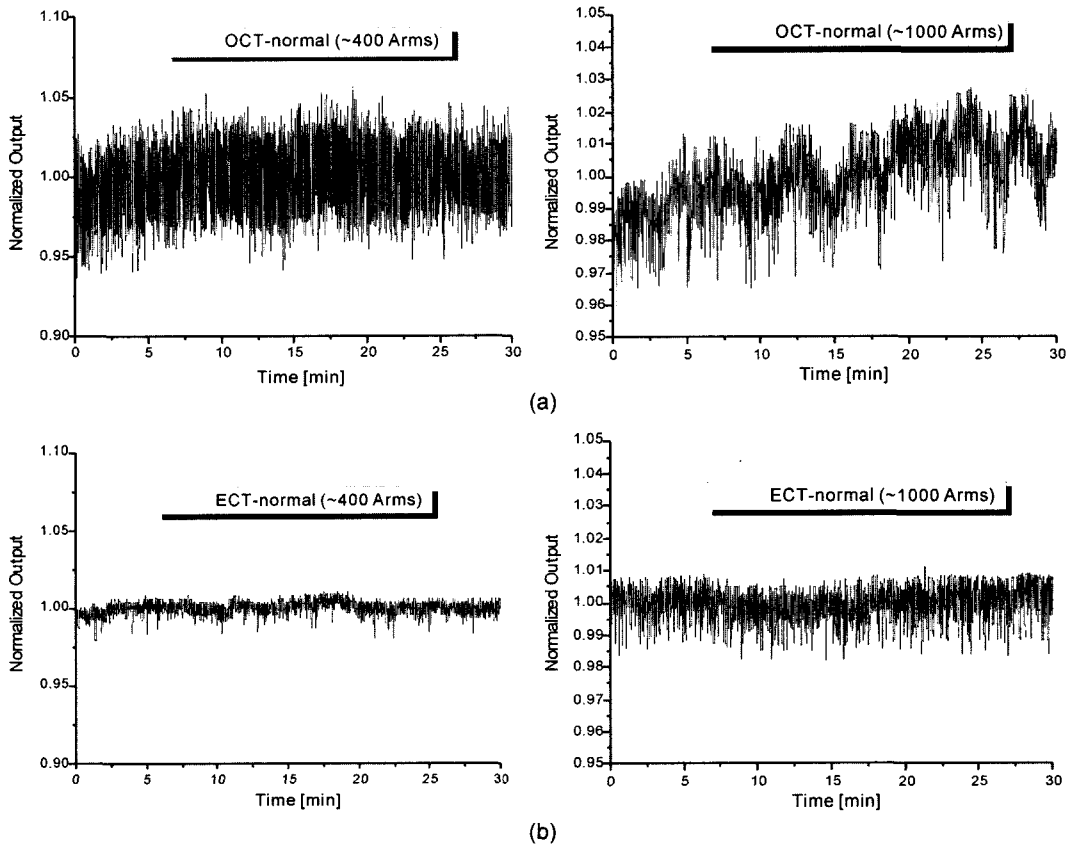


그림 12. 장시간 측정결과(a) COCT의 400 AT과 1,000 AT에 대한 30분 출력 측정결과, (b) 전자기장식 CT의 400 AT과 1,000 AT에 대한 30분 출력 측정결과.

IV. 결 론

이론적인 해석을 바탕으로 하여 광의 반사시에 편광의 모드 간에 위상차가 발생하지 않도록 광의 입사각이 임계각이 되도록 COCT를 제작하였다. 제작된 COCT 헤드를 이용하여 전류를 0~1,000 AT까지 측정하여 전류값의 크기에 비례하는 광출력을 얻었으며, 이로부터 전류측정 광-전류 변류기로서의 가능성을 입증하였다.

COCT 헤드는 전류값에 따른 선형적인 특징을 나타내고 있으며, 오차는 전류의 값이 커질수록 작아지므로 소전류보다는 대전류를 측정하는데 적합하리라 생각된다.

광의 입사각이 입사면에 대해 90도일 때 감도는 최대가 되고, 10도 이상으로 입사각이 변할 때는 감도가 최소로 되므로 광이 COCT 헤드의 입구에서의 입사면에 수직으로 입사해야 한다는 것을 알 수 있다.

주변 온도의 변화에 대하여 0.6%/°C의 변화를 보이는 것으로 관측되었으며, 벌크형 COCT의 전류측정시에 가장 깊이 고려해야 할 부분으로 생각된다. 온도에 따른 출력변화가 생기므로 실제 COCT의 사용시에는 현장에 온도센서를 함께 부착하여 온도에 따른 광출력값의 보정이 있어야 할 것으로 생각된다. 그리고 입사광의 효율은 수직방향의 편광을 가지는 빛이 변류기 헤드로 입사할 때 가장 높으므로 실험시 수직방향의 편광을 활용하여 실험을 수행하였다. 그리고 제작된 COCT와 자성체 CT의 장시간 측정결과, 자성체 CT는 시간에 대하여 일정한 출력값을 보여주고 있는 반면에 제작된 COCT는 시간이 흐를수록 출력값이 상승하는 결과를 나타내었다. 이는 도선에 흐르는 전류에 의하여 도선주위의 온도가 시간에 따라 상승하고 이로 인하여 광출력값이 상승하였다. 그리고 도

선에 흐르는 전류가 클수록 온도상승효과가 크므로 측정전류값의 상승에 따라 장시간 측정시 시간에 따른 상승비율이 높아지는 결과가 관측되었다.

본 논문에서는 제작된 COCT의 편광의존성, 넓은 범위에 걸친 측정결과, 온도에 따른 출력의 변화, 장시간 측정결과 등을 제시하고 분석하였으며, 실제 현장적용을 하기 위해서는 앞에서 언급된 온도에 따른 영향을 차단하거나 보상을 할 수 있는 방법이 개발되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] *A Tutorial on Current measurement Methods*, Technical Reports of F. W. Bell Inc.
- [2] M. Takahashi, *et al.* "Optical current transformer for gas insulated switchgear using silica optical fiber," *IEEE Transactions on Power Delivery* vol. 12, no. 4, pp. 1422-1427, 1997.
- [3] T. Fujimoto, *et al.*, "Development of an optical current transformer for adjustable speed pumped storage systems," *IEEE Transactions on Power Delivery* vol. 12, no. 1, pp. 45-50, 1997.
- [4] B. Yi, *et al.* "New design optical electric-current sensor for sensitivity improvement," *IEEE Instrumentation and Measurement* vol. 49, no. 2, pp. 418-423, 2000.
- [5] Y. N. Ning and D. A. Jackson, "Faraday effect optical current clamp using a bulk-glass sensing element," *Opt. Lett.*, vol. 18, no. 10, pp. 835-837, 1993.
- [6] A. Yariv and P. Yeh, *Optical Waves in Crystal* (John Wiley & Sons, New York, USA, 1984) pp. 121-131.
- [7] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics* (Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1997) pp. 38-51.

Characteristics and analysis of clamp-type optical current transformer using faraday effect

Soo-Gil Kim

School of Electrical Eng., Hoseo Univ.

Yong Wook Lee and Byoung-ho Lee

School of Electrical Eng., Seoul National Univ.

Minho Song

Division of Electronics and Information Eng., Chonbuk National Univ.

Yong-Hun Lim

Power System Lab., KEPRI

(Received May 13, 2003, Revised manuscript July 25, 2003)

We manufactured a clamp-type optical current transformer (COCT) head using FD10 glass. It was manufactured of two parts of FD10 glass with symmetrical structure and was designed so that light propagates along the critical angle in order to avoid a phase difference with the light within the sensor head at reflection. Also, we measured and analyzed the current of conductor from 0 to 1,000 AT, change of optical power with incidence angle of light, temperature and polarization of light, long-term current measurement using COCT head, and demonstrated the feasibility of manufactured COCT through those experiments.

OCIS Codes : 120.4640, 230.3810.