

광 파이버의 패러데이 효과를 이용한 전류측정용 프로브 설계

강 항식 · 김 철주

서울시립대학교 전자공학과

Design of Current Probe Using Faraday Effect of Optical Fiber

(Hwang-sik Kang · Chul-ju Kim)

Dept. of Electronic Engineering, Seoul City University

Abstract - A probe type fiber-optic sensing technique for electric current measurement is applied in this paper. The technique is based on the Faraday effect which meaning is that polarization state of light is rotated by magnetic field. In experiment, test wire is located at inside and outside of the probe to be measured. The experimental results prove not only linear property, but also polarization rotation property according to the distance from outside of probe.

된다. 피측정용 도선 주위에 유기된 자계가 도선으로부터의 거리에 따라 다른 크기를 가지므로 프로브의 광파이버는 회전 방향에 따라 각각 다른 자계를 받더라도 편류 변화에 따른 편광 상태의 변화가 생기게 된다. 이때 선택되어 생긴 편광 변화는 프로브를 이루는 광파이버의 권선수와 광파이버의 특성 및 자계 크기에 비례한다. 이러한 편광각이 변화한 광파는 광파이버에서 사출되어 검파기(analyser)를 통하여 편광 상태가 다른 두 광파로 분리되어 각각의 광감지기(photo detector)를 통해 전기적 신호로 변환되며 이를 통해 전류의 측정이 가능하다.

1. 서 론

광 파이버는 저손실, 대용량등의 우수한 전송 특성뿐만 아니라 소형, 경량, 펄스등의 기계적 성질, 절연성, 무유도성등의 전기적 성질, 내화, 내수, 내부식성등의 화학적 성질 등의 많은 장점을 가지고 있다. 유전체 선로인 광파이버가 갖는 이러한 특성과 이를 통해 전송되는 광의 성질을 이용하여 계측 분야에 광범위하게 사용될 수 있다.¹⁾²⁾ 센서로서의 이용에 주요 장점으로는 우선 센서에 전원 공급이 필요하지 않아 기존 계측용 센서보다 가격이 저렴하고, 강한 전자파가 발생되거나 전기 신호의 사용이 위험한 장소에서도 사용이 가능하며 전송 손실이 적어 원격 측정이 가능하다. 또한 광을 사용하므로 비접촉적이며 비파괴적인 측정이 가능하며, 광 파이버의 기계적 특성을 이용하여 센서를 소형화할 수 있고 각종 유연한 형태의 구조를 융통성 있게 만들 수 있다.

본 연구에서는 광 파이버를 이용한 다양한 센서중 하나로써 전류 측정용을 위한 광 파이버 자기 프로브(magnetic probe)를 설계했으며, 이의 측정은 패러데이 효과를 이용한다. 패러데이 효과란, 광파이버를 통하여 선형 편광된 광파가 진행할 때, 광파의 진행 방향과 같은 방향으로 자계가 존재하면 광의 편광 상태가 회전하는 것을 말한다. 이러한 편광의 회전각을 측정함으로써 자계 및 이에 상응하는 전류의 측정이 가능하다. 즉, 편광기(polarizer)를 통하여 선형 편광된 광파는 원형으로 감긴 광파이버에 도파되며 이 때의 광파이버 프로브내의 광파의 편광각은 전류에 의해 유기된 자계에 따라 변화하게

2. 패러데이 효과 및 전류 측정 원리

직선 편광파가 광 파이버와 같은 투명한 매체를 따라 도파될 때, 그 광파의 진행방향으로 자계 H 가 존재하면 광의 편파면이 회전한다. 이러한 현상은 패러데이 효과(Faraday effect)³⁾라하며, 좌회전 또는 우회전하는 원형 편광파가 자계에 대해 굴절률에 따라 다른 방향성이 일어나는 것에 기인하고 있다. 이 때의 편파면의 회전각 θ_F 는 다음과 같다.

$$\theta_F = V_r H L \cos \theta = V_r I N \cos \theta \quad (1)$$

위 식에서 V_r 은 베르디 정수로서 패러데이 효과의 크기를 나타내는 물질 고유의 정수이며 SF-6 flint-glass계 광파이버의 경우 He-Ne 레이저 파장에 대해 $9 \times 10^{-6} \text{ rad/A} [\approx 0.04 \text{ min/Oe} \cdot \text{cm}^{-1}]$ 의 수치를 나타낸다. L 과 N 은 각각 광 파이버의 길이와 권선수로서 $N=300$ 이며, θ 는 광파의 진행 방향과 자계의 방향과의 사이각이다.

피측정용 전류선이 프로브의 내부에 위치할 때, 편파의 회전각 $[\theta_F]_{in}$ 은 다음과 같다.

$$[\theta_F]_{in} = V_r I N = 2.7 \times 10^{-3} I [\text{rad}] \quad (2)$$

피측정용 전류선이 프로브의 외부에 위치할 때, 프로브의 위치에 따라 자계의 크기 및 방향이 변화한다. 따라서 반경 r ($=0.95 \text{ mm}$)을 가지는 프로브의 중심으로부터 거리 D 에 피측정용 전류선이 위치할 때의 편파면의 회전각은 그림 1과 같은 공간적 해석을 통해 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

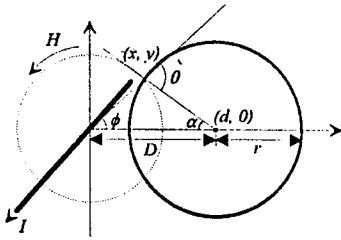


그림 1 프로브(광 파이버 코일) 외부의 피측정용 전류선
Fig. 1 Measured wire at outside of probe(fiber coil)

$$\begin{aligned}
 [\theta_r]_{\text{out}} &= NV_r \int_0^{2\pi} \frac{I \hat{\phi}}{2\pi r} \cdot \cos \theta \cdot \hat{\phi} dl \\
 &= 2NV_r \int_{D-r}^{D+r} \frac{I}{2\pi \sqrt{x^2+y^2}} \cdot \frac{Dx-x^2-y^2}{r\sqrt{x^2+y^2}} dx \\
 &= \frac{NV_r I}{\pi r} \int_{D-r}^{D+r} \frac{D^2-y^2-Dx}{2Dx+r^2-D^2} dx \quad (3)
 \end{aligned}$$

즉,

$$[\theta_r]_{\text{out}} = \begin{cases} \frac{0.284 I}{\pi} \left[-0.0095 + \frac{(D-r)(D+r)}{2D} \cdot \log \left(\frac{D+r}{D-r} \right) \right] & \text{for } D > r \\ -\frac{2.7 \times 10^{-3} I}{\pi} & \text{for } D = r \quad (r=0.0095 \text{ m}) \end{cases} \quad (4)$$

그림 2는 피측정용 전류선이 프로브의 외부에 위치할 때, 측정거리 D에 따른 편파면의 회전각의 크기로서 식 (4)를 나타낸다.

이러한 편파의 회전각의 크기는 검파기를 통하여 편광 상태가 다른 두 광파로 분리하여 전기적 신호로 변환하여 측정한다. 식 (5)는 편파면이 회전한 광파의 수광 전력을 보이고 있다.

$$P = P_0(1 + \sin \theta_F) \quad (5)$$

여기서 P_0 는 자체가 가해지지 않았을 때의 수광 전력이다.

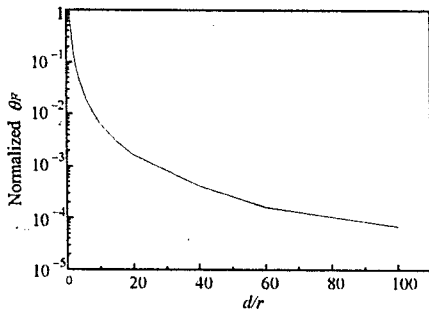
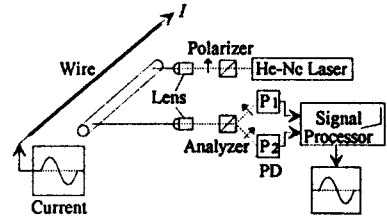


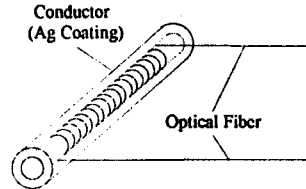
그림 2 전류선으로부터의 거리에 따른 편파면의 회전각
Fig. 2 Rotation angle of polarization according to distance

3. 실험 방법 및 측정

그림 3은 실험 구조도 및 실험상의 제작된 프로브를 보이고 있다.



(a)



(b)

그림 3 (a) 전류 측정을 위한 실험 구조도 (b) 제작된 광 파이버 프로브의 구조. PD : 광 감지기

Fig. 3 (a) Experimental setup for current measurement (b) Schematic of manufactured optical fiber probe. PD : Photo Detector

사용된 광원으로는 632.8nm의 He-Ne 레이저가 사용되었으며, 레이저는 편광기(polarizer)를 포함한 상태로 광파는 선형 편광되어 사출되어 프로브에 감긴 파이버에 도파된다. 제작된 프로브는 SF-6 flint-glass 단일 모드 광파이버를 이용하여 권선수 300의 코일 형태로 감아 은(silver) 코팅을 하였다. 프로브의 내부에 감긴 광파이버는 도선에 흐르는 전류 I에 의해 유기된 자계 II에 따라 광파의 편파면이 회전하게 되며, 편파면이 변화된 광파는 파이버에서 사출되어 검파기로 도파된다. 실험상의 피측정용 도선의 위치는 각각 프로브 내부와 프로브부터 0mm, 10mm, 20mm로 설정하였다. 이는 그 이상의 거리에 위치할 경우 편파면의 회전각이 미세하기 때문이다.

검파기를 통과한 광파는 편광 상태가 다른 두 광파로 분리되어 GRIN 렌즈를 통과하여 각각의 광 감지기를 통해 전기적 신호로 변환된다.(식 (5))⁴⁾ 사용된 광 감지기는 PIN 광 감지기로서 수신단은 증폭기를 조합하여 제작하였으며, 증폭기의 이득은 100~5000이다. 이러한 전기적 신호를 측정하여 피측정용 도선에 흐르는 전류 및 유기된 자계를 검출한다.

4 실험 결과 및 고찰

측정을 위한 광 파이버 프로브의 위치는 프로브 내부와 외부로 설정하였으며, 실질적인 프로브의 동작은 프로브의 외부에 피측정용 도선이 위치할 때이다.

그림 4는 도선이 광 파이버 프로브의 내부에 위치하였을 때의 결과를 보이고 있다. 정규화된 출력은 피측정

전류의 변화에 따라 선형적인 결과를 얻었다.

피측정용 도선이 프로브의 외부에 위치하였을 때, 정규화된 출력은 감소하게 되며, '프로브와의 위치가 멀어질수록 그 값은 감소한다. 그림 5와 그림 6은 도선이 프로브로부터 각각 0mm와 10mm, 20mm일 때의 결과를 보이고 있다. 프로브로부터의 위치가 0mm일 경우 정규화된 출력은 선형적인 결과를 보이고 있으나 그림 6과 같이 프로브로부터의 위치가 10mm와 20mm일 경우는 그 오차가 큼을 알 수 있다. 이는 프로브로부터의 위치가 커질수록 그 이득을 높임으로서 얻어지는 증폭기 왜곡으로 해석될 수 있다.

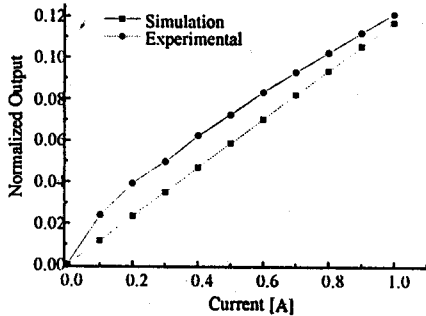


그림 4 광 파이버 프로브의 내부에서의 피측정 전류에 대한 정규화된 출력

Fig. 4 The normalized output versus test current at inside of probe

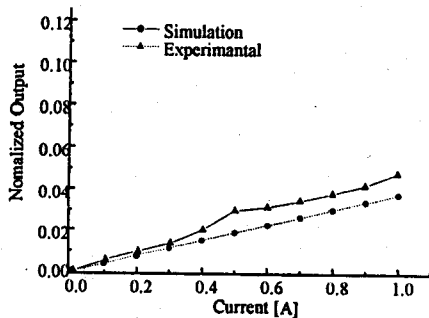


그림 5 광 파이버 프로브의 외부 0mm에서의 피측정 전류에 대한 정규화된 출력

Fig. 5 The normalized output versus test current at distance 0mm from outside of probe

5 결 론

패러데이 효과를 이용한 전류 측정용 광 파이버 프로브를 설계 및 제작하였으며, 이를 이용하여 피측정용 전류의 변화에 상응하는 선형적인 결과를 얻었다. 그러나 피측정용 도선이 프로브로부터의 거리가 멀어질수록 측정용 출력은 감소하게 되며 이에 따른 오차를 또한 커지게 된다.

일반적으로 전류 측정시 고전압인 경우 전류의 대소에 관계없이 측정장치를 고압 회로로부터 절연시켜야 하

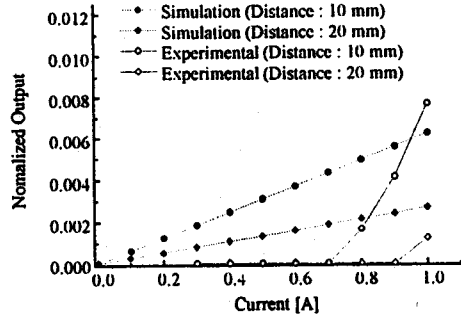


그림 6 광 파이버 프로브의 외부 10mm 및 20 mm에서의 피측정 전류에 대한 정규화된 출력

Fig. 6 The normalized output versus test current at distance 10mm and 20mm from outside of probe

므로 전력계통 또는 산업 전력 설비에서 현재 사용되는 변류기(current transformer)는 그만큼 절연의 강화, 중량의 증대, 높은 제작비등의 문제점이 있다. 따라서 광 파이버 프로브를 사용할 경우 이러한 문제의 해결이 가능하다. 또한 광 파이버 프로브는 그 원리가 자체를 측정하여 전류를 산출하는 것이므로 자체 측정용으로의 변환이 가능하다.

참 고 문 헌

- [1] 정 신일, "광섬유를 이용한 센서," 전자공학회지, 제 13권 제 1호, pp. 77-85, 2월 1986년.
- [2] T. G. Giallorenzi et al, "Optical fiber sensor technology," *IEEE Transaction on Microwave Theory and techniques*, vol. MTT-30, no. 4, pp. 472-511, april 1982.
- [3] A. M. Smith, "Polarization and magneto-optic properties of single mode optical fiber," *Appl. Opt.*, vol 17, pp. 52, 1978.
- [4] 신 영식, 홍 완희 외, "헤테로다인 광통신 시스템을 위한 편광제어기 설계," 제 1회 광전자공학 학술회의 논문집, pp 129-133, 3월 1994년