

수직원형틀을 이용한 광섬유전류센서의 동작특성

이명래 · 이용희

한국과학기술원 물리학과

김 만 식

LG 전선 연구소

(1996년 6월 14일 받음)

광섬유전류센서에서 온도변화에 따른 감도변화를 제거하기 위한 연구를 하였다. 센서헤드로는 두개의 원형틀을 수직으로 결합하고 여기에 광섬유를 번갈아 감아서 사용하였다. 이 경우 수직한 원형틀은 광섬유의 고유편광축을 상호수직하게 하므로 감겨진 광섬유에 발생된 선형복굴절량을 상쇄하여 최소화할 수 있었다. 이렇게 제작된 전류센서는 온도에 대해 보다 안정된 성능을 보였다. 센서헤드부의 온도는 약 1시간 40분동안 20~45°C의 느린 변화를 주었다. 이때의 전체적인 센서 오차는 $\pm 1.2\%$ 정도였고, 500 A에서 3시간동안 안정성 측정을 했을 경우 $\pm 1\%$ 미만의 변화를 보였다. 센서의 헤드부 전후단의 광섬유에 의해서 신호의 요동이 생기는 것을 방지하기 위한 방법으로 센서헤드부에 편광기와 편광분할기를 놓고 리드부와 분리를 했다. 광원으로서의 두개의 레이저 다이오드를 편광이 수직이 되게 배열함으로써 무편광 광원으로서의 효과를 내었다. 신호처리는 각 채널별로 분리를 하여 기계적인 부분에 의한 광손실의 영향을 배제하였다.

I. 서 론

Smith^[1]와 Papp, *et al.*^[2,4]에 의해서 광섬유로써 전류를 측정할 수 있다는 사실이 발표된 이래로 이를 이용한 광섬유 전류센서에 대한 많은 연구가 진행되어 오고 있다. 광섬유전류센서는 광자기효과의 하나인 Faraday rotation을 이용한 것으로, 이는 광섬유와 그 주위의 전류에 의해서 발생된 자기장과의 상호작용에 의한 것이다. 광섬유의 Verdet 상수는 광섬유의 재료인 용융유리가 반자성의 특성을 갖고 있어서 4.68 μ rad/A 정도의 적은 값을 갖는다. 그러므로 감도가 낮기 때문에 주로 큰전류측정에 적합하고, 현재에는 발전소의 송전선이나 공장 등의 고전류를 사용하는 장치에서 전류감시용으로 사용될 수 있다^[5,8].

광섬유 전류센서는 광섬유를 사용하기 때문에 여러가지 잇점이 있다. 고전류를 측정할 수 있는 전류계중 기존의 Rogowski coil이나 변압기를 이용하는 여타의 전류측정기가 고가인 동시에 부피가 크고 무거우며 또 가스나 기름 등으로 절연을 해야 하는 불편함이 있다. 반면에 광섬유 전류센서는 절연의 불편함이 없을 뿐만 아니라, 측정주파수폭이 아주 넓기 때문에(반응시간이 약 10^{-9} sec 정도이다) 순간적인 과도전류에 의한 오류 등을

감지할 수 있고,^[9] 광섬유내에서만 빛이 진행하므로 전자기적 간섭(Electro-Magnetic Interferences, EMI)을 받지 않으며, 경량이고 소형이므로 가격면에서도 저렴해질 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서는 광섬유 전류센서에서 몇가지의 문제점을 발견하고 이를 해결하는 데 중점을 두었다. 먼저 주된 문제점으로서 주위의 온도변화에 따라 센서헤드부의 복굴절변화가 생기면 센서감도에 변화를 주게 된다. 이를 해결하기 위한 방법으로 수직의 원형틀에^[2] 광섬유를 번갈아 감아 센서헤드부에 존재하는 전체적인 선형복굴절의 양을 최소화시켰고 감도가 안정됨을 보였다. 다음으로 온도나 진동등에 의해 센서전후단부의 광섬유에 존재하는 복굴절의 변화가 생기고 이는 센서의 감도변화를 초래하는데 이를 해결하였다. 이러한 생각을 바탕으로 광섬유전류센서의 프로토타입을 구성하고 센서의 선형성, 온도에 대한 안정성, 그리고 장시간에 걸친 안정성등을 테스트 하였다.

II. 이 론

1. 광섬유전류센서의 기본원리

광학적으로 전류를 측정하는 방법으로서 Faraday ro-

tation을 주로 이용한다. 이는 전류에 의해 발생된 자기장과 선편광된 빛과의 상호작용에 의해서 선편광의 편광면이 자기장의 크기에 비례해서 회전하는 현상이다. 즉 자기장에 의해서 원형복굴절이 유도되어 두 수직한 원편광상태에 대해 위상차를 주므로 선편광이 회전하게 된다.

선편광된 빛이 길이 l 인 투명매질을 통과하고 이때 자기장 H 가 존재한다고 하면 입사 선편광의 편광면의 회전이 일어나게 된다. 이 회전각을 θ_F 라 하면

$$\theta_F = V \int_l H \cdot dl$$

로 표현된다. 여기서 V 는 물질의 자기적 특성을 나타내는 양으로 Verdet상수를 나타낸다. 반자성(diamagnetic) 물질의 경우 이 값은 상당히 적지만 온도에 의한 변화가 적으며, 반대로 상자성(paramagnetic) 물질이나 강자성(ferromagnetic) 물질인 경우에는 반자성물질에 비해 값은 크지만 온도에 대한 의존성을 갖고 있다.

이 Verdet 상수는 사용하는 빛의 파장에도 의존성을 가지고 있다. 광섬유의 주재료인 용융유리(fused silica)의 경우 상용으로 구하기 쉽고 많이 사용되는 몇가지 광원의 파장에 대한 값을 보면

$$\begin{aligned} V_{0.63\mu m} &= 4.68 \times 10^{-6} \text{ ra/A,} \\ V_{0.78\mu m} &= 3.07 \times 10^{-6} \text{ ra/A,} \\ V_{0.83\mu m} &= 2.34 \times 10^{-6} \text{ ra/A.} \end{aligned}$$

로 파장이 커짐에 따라 값이 작아짐을 알 수 있다.

여기에 한가지 더 고려해야 할 것은 물질의 흡수율이다. 파장이 $\lambda \leq 0.5 \mu m$ 인 경우에 대해서 물질의 흡수율은 매우 빨리 증가하지만, $0.55 \mu m \leq 0.9 \mu m$ 정도의 범위에서는 충분한 신호대잡음비(signal to noise ratio, SNR)를 얻을 만큼 작다. 현재의 광섬유 제조기술은 흡수, 산란등에 의한 손실을 최소화하기에 이르렀고 광원으로 서도 반도체레이저를 저렴한 가격에 구입할 수가 있게 되었다. 위의 조건을 만족하는 광원으로 레이저 다이오드(LD, 830 nm)를 사용하였으며, 광원의 수명과 부피, 가격등을 고려할 때 센서연구의 초창기에 많이 사용되던 헬륨-네온 레이저에 비해 레이저 다이오드가 더 유리하므로 이를 사용하였다.

Verdet 상수가 큰 상자성이나 강자성물질을 자기광학적 전류측정에 사용했을 경우에는 이 상수의 온도에 대한 변화가 크므로 정밀한 온도측정에 의한 보정이 필요로 하게 된다. 따라서 Verdet 상수의 온도의존성이 적은 반자성물질을 사용하는 것이 온도변화에 대해서는 유리하다. 발표된 바에 의하면 광섬유를 구성하는 주재

료인 용융유리(fused silica)의 경우 반자성이므로 Verdet

$$\text{상수의 온도에 대한 변화는 } \frac{1}{V} \left(\frac{dV}{dT} \right) = (0.69 \pm 0.03) \times$$

$10^{-4}/K$ 정도로 매우 적다.^[10] 온도에 대해서는 안정하지만 적은 Verdet 상수 때문에 충분한 Faraday rotation을 얻기 위해서는 빛이 지나는 경로 l 이 길어야 한다. 광섬유의 경우 충분한 길이 l 을 만들어 줄 수 있으므로 전류센서에 적격이라고 하겠다.

광섬유 전류센서의 기본적인 개념은 다음과 같다. 전류가 흐르는 도선 주위에 광섬유를 여러바퀴를 감아서 전류에 의해 발생된 자기장에 의해 광섬유를 지나는 빛의 편광면이 Faraday 효과에 의해 회전하도록 한 것이다. 이 경우 광섬유를 감아놓은 부분을 센서헤드라고 하고, 이 센서헤드부의 광섬유에는 구부림(bending)에 의한 선형복굴절(linear birefringence) ρ 와 Faraday 효과에 의해 발생된 원형복굴절(circular birefringence) θ_F 가 동시에 존재하게 된다. 그러므로 단순히 θ_F 만 존재할 경우와는 달리 계산을 해야 한다. 광섬유에 두가지의 복굴절 즉 선형복굴절과 원형복굴절이 동시에 존재하므로 중첩이 된 경우를 생각해야 되며, 이를 나타내는 Jones matrix는^[11]

$$\begin{pmatrix} A & -B \\ B & A^* \end{pmatrix}$$

여기서 $A = \cos(\phi/2) + j \cos \chi \sin(\phi/2)$

$$B = \sin \chi \sin(\phi/2)$$

$$\phi^2 = \rho^2 + (2\theta_F)^2$$

$$\tan \chi = \frac{2\theta_F}{\rho}$$

로 주어진다. 광섬유의 고유축을 x - y 좌표로 잡으면, x 축에 대해 θ 의 각도로 입사하는 광은

$$\begin{pmatrix} E_{xi} \\ E_{yi} \end{pmatrix} = E_0 \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix}$$

로 표현되어 진다. 또 광섬유를 지나온 빛을 검광기로 x 축에 대해 θ_1 의 위치에서 측정했을 때 출력광 (E'_x, E'_y) 은 Jones matrix 계산에 의해

$$\begin{pmatrix} E'_x \\ E'_y \end{pmatrix} = E_0 \begin{pmatrix} \cos^2 \theta_1 & \cos \theta_1 \sin \theta_1 \\ \sin \theta_1 \cos \theta_1 & \sin^2 \theta_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A-B \\ BA^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix}$$

으로 표현된다. 오른쪽의 식 중 첫번째 행렬식은 수평 방향으로 위치한 편광기를 수평방향에 대해서 θ_1 만큼 회전한 편광기에 대한 좌표축변환이 된 일반적인 식이다.^[12] 이 때 검광기의 각 θ_1 이 $+45^\circ, -45^\circ$ 이고, $\theta=0$

즉 x 편광이 입사한다고 가정하자. 이 조건은 센서의 감도가 제일 좋은 위치로 이렇게 광정렬을 하는 것은 매우 중요하다. 이 경우 검광기에서의 출력강도 P_1 과 P_2 는 θ 이 -45° , $+45^\circ$ 일 때 각각

$$P_1 = \frac{E_0^2}{2} |A - B|^2 = \frac{P_0}{2} (1 - \sin\chi \sin\phi)$$

$$P_2 = \frac{E_0^2}{2} |A + B|^2 = \frac{P_0}{2} (1 + \sin\chi \sin\phi)$$

이 된다. 또 입사광의 강도 P_0 에 무관한 양으로서 S (degree of polarization)을 도입하면 정의에 의해서

$$S = \frac{(P_1 - P_2)}{(P_1 + P_2)} = \frac{2\theta_f}{\phi} \sin\phi$$

를 얻을 수 있다. 이 S 는 입사광의 강도에 무관하게 규격화되었을 뿐만 아니라, 또한 차를 구함으로써 전자적인 신호처리중 진동 등의 다른 영향에 의해 신호에 포함될 수 있는 공통모우드(common mode)의 신호를 효과적으로 제거할 수 있다는 장점이 있다.

보통의 경우 센서헤드부에 광섬유를 감을때 반경을 크게 하므로 구부림에 의하여 발생하는 선형복굴절이 적어서 $\rho \ll 1$ 인 경우를 가정할 수 있다. 이 경우에 대해서 보면 $\phi \approx 2\theta_f$ 가 되므로 $S = \sin(2\theta_f)$ 가 된다. 전류에 의해 발생하는 Faraday 회전이 $\theta_f \ll 1$ 인 경우에는 S 를 $2\theta_f$ 로 근사할 수 있으며 θ_f 는 광섬유가 도선을 둘러싸서 폐곡면을 형성하므로 Ampere의 법칙에 의해서 내부를 흐르는 전류와 감은 수에 비례하게 되므로 $2NVI$ (N 은 광섬유를 감은 횟수)가 된다. 그러므로 S 가 전류 I 에 직접 비례하는 양이 된다. $\theta_f \ll 1$ 로 근사할 수 있는 경우는 전류 I 가 10 kA 정도 이하의 경우로서 이정도 영역에서는 좋은 선형성을 보인다. S 는 아날로그 전자회로로써 쉽게 구할 수가 있다.

2. 센서헤드부의 복굴절 보상원리

앞의 경우는 선형복굴절 ρ 가 없는 경우를 말했지만 실제의 경우는 ρ 가 광섬유 자체에도 있으며 또한 광섬유를 구부렸을 경우에도 발생하므로 ρ 를 완전히 없애는 것은 실제적으로 불가능하다. ρ 가 0이 아니므로 S 의 값은 같은 전류에 대해서 $\rho=0$ 인 경우보다 적은 값을 갖게 된다. 즉 ρ 가 존재함으로써 센서의 감도가 떨어지게 되고 또한 온도등에 의해서 감도변화가 생기므로 ρ 에 대한 영향을 최소화하는 것이 광섬유 전류센서를 실용화하는데 있어서 중요하다.

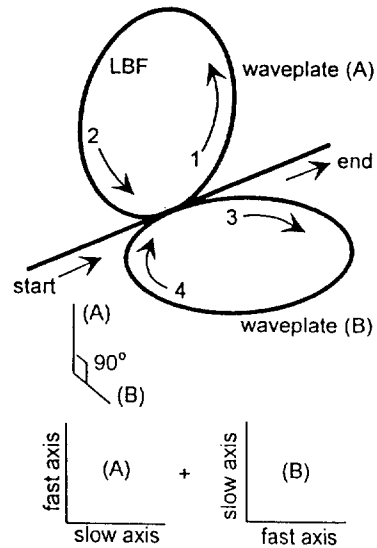


그림 1. 광섬유전류센서의 센서헤드부의 선형복굴절상쇄원리. 두개의 같은 파장판을 수직으로 놓은 경우, 두 수직한 편광간의 위상차는 없다.

ρ 에 대한 영향을 최소화하는 방법으로 본 연구에서는 제작이 용이할 뿐만 아니라 다른 부품을 필요로 하지 않고 광섬유를 감는 기하학적인 모양에 의해서 선형복굴절을 최소화할 수 있는 방법을 사용했다. 이는 두개의 원통을 수직하게 결합하고 여기에 광섬유를 번갈아 가며 감아서 센서헤드부를 구성하는 방법이다.

이것의 원리를 그림 1에 나타내었고 다음과 같이 이해할 수 있다. 광섬유를 원형으로 구부린 것을 하나의 파장판(waveplate)로 가정하자. 한가닥의 광섬유로 광섬유 loop를 동일하게 두 개를 감아서 수직으로 배치했을 경우 두 개의 파장판은 서로 고유축이 수직하게 된 경우가 된다. 즉 빠른축(fast axis)와 느린축(slow axis)가 서로 바뀐 상황이 되어 이 광섬유에 입사하는 편광은 빠른축과 느린축을 한번씩 겪게 되므로 두 축을 통과하는 편광간의 전체적인 위상차는 생기지 않게 된다. 그러므로 구부림에 의해 발생한 선형복굴절의 영향을 배제할 수 있게 된다. 그림 2에는 이렇게 감은 센서헤드부의 선형복굴절을 선형복굴절모델(linear retarder model)^[1]에 의해 측정된 결과를 보였다. 그림 2에서 실선은 이론적으로 계산한 식이고 점은 측정치를 나타낸다. 복굴절측정은 입사선편광에 대한 센서헤드부 출력편광의 편광도(degree of polarization)를 측정하였다. 센서헤드부에 입사하는 선편광의 각을 θ 라 하고 출력광의 편광도를 P 라 하면 편광도는 $P = (\cos^2 2\theta + \sin^2 2\theta \cos\delta)^{1/2}$ 가 된다. 여기

서 δ 가 측정하고자하는 복굴절에 해당하고, 또 그림에서 최소값은 복굴절 δ 와 $\cos\delta$ 의 관계를 가지고 있다. 측정치를 이론식으로 맞추고 이로부터 복굴절에 해당하는 양을 계산하였다. 센서헤드부는 광섬유를 수직원형틀에 번갈아가며 4바퀴씩 총 8바퀴를 감았다. 수직으로 배치하지 않았을 경우 이론적으로 계산된 선형복굴절의 크기는 광섬유를 감은 반경을 5cm로 하고 빛의 파장을 830 nm으로 했을 때 $\delta=4.86$ rad이고 이로부터 $\cos\delta=0.147$ 이 되어 광섬유를 나온 빛은 거의 원편광이 되므로 센서감도가 최소가 되지만, 수직으로 배치한 경우에는 $\cos\delta=0.94$ 가 되는 δ 값을 가지므로 거의 선편광이 유지되어 나오므로 감도가 최대가 되는 것을 알 수 있다.

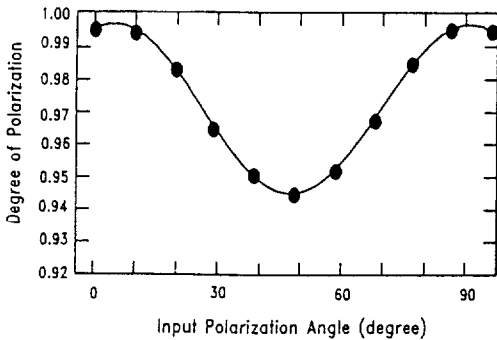


그림 2. 센서헤드부의 선형복굴절 측정결과. 입사된 선편광의 편광도가 거의 그대로 유지된다.

또한 온도에 대한 센서헤드부의 변화에 대해서도 단일원형틀의 경우보다 안정되어 있을 것이라는 것을 추측할 수 있다. 단일원형틀의 경우 온도변화에 따른 복굴절 변화가 나타나게 되고 복굴절 고유축간의 위상차가 발생되므로 입사편광과 같은 편광상태를 유지하지 못하게 된다. 즉 센서를 구성했을 때 감도의 변화를 초래하게 된다.

그러나, 두 개의 원형틀이 수직하게 배치된 경우 온도가 변화하더라도 수직한 두 개의 원형틀이 같은 양의 복굴절 변화를 겪게 되지만 두 개가 서로 수직하므로 서로 상쇄된다. 즉 전체적인 복굴절의 두 고유축간의 상대적인 위상차는 없다. 그러므로 입사편광이 편광상태를 그대로 유지하고 나오게 되므로 감도가 하나의 원형틀의 경우보다는 안정되게 된다.

3. 센서 전후단부 광섬유에 의한 감도변화의 제거

앞의 경우는 한가닥으로 전류센서의 모든 부분을 구성한 경우이다. 이러한 센서구성의 경우 빛이 광섬유를 빠져나오지 않고 광섬유 내에서만 진행하므로 광학적 정렬의 번거로움이 없다. 하지만 센서헤드로 빛을 유도하는 광섬유(리드부)가 입력과 출력의 두 곳에 있기 때문에 센서부는 제외하더라도 리드부의 복굴절 변화를 피할 길이 없다. 즉 초기에 입사한 편광이 센서헤드에 도달했을 때 계속 같은 선편광상태임을 보장할 수가 없게 된다. 본 논문에서는 위와는 달리 광섬유 리드부와 센서부를 분리하는 방법을 사용하였는데 이는 센서부의

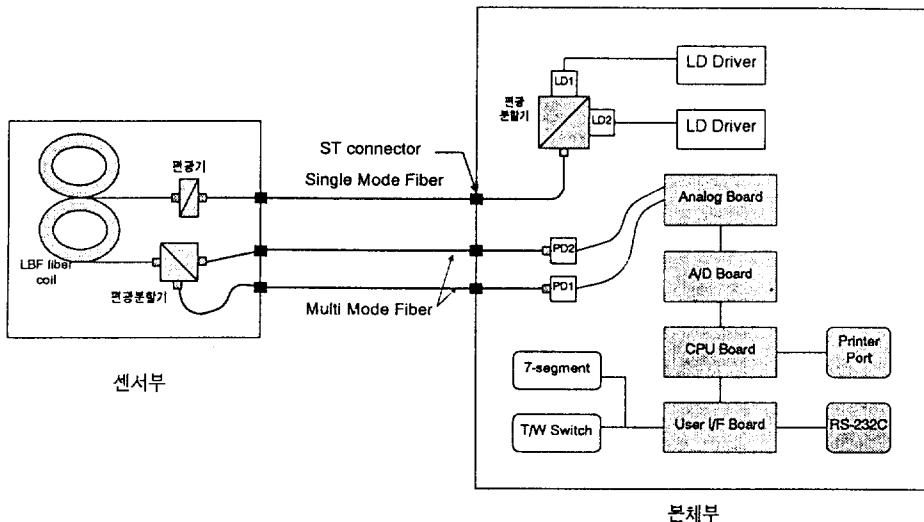


그림 3. 광섬유전류센서의 구성도. 센서부와 신호처리를 하는 본체부로 구성.

바로 앞단에 선편광기를 위치시키고 광원으로부터 리드부의 광섬유를 통해 빛을 단지 전송만하는 방법이다. 이렇게 전송된 빛은 선편광기를 통해 센서헤드부의 바로 앞에서 선편광이 되어지고 센서헤드로 입사하게 된다. 마찬가지로 센서헤드에서 나오는 출력단 바로 가까이 편광분할기를 출력편광방향에 대해서 $\pm 45^\circ$ 로 위치시키고 편광을 분리한 다음 다시 다중모드 광섬유를 통해 검광기까지 빛을 전송하는 것이다. 그림 3에 광섬유전류센서의 실험도를 나타내었다. 이러한 센서 구성에서는 리드부는 단지 빛을 센서부까지 전송하는 역할만을 하므로 감도에서 리드부의 복굴절 변화의 영향을 배제할 수가 있게 된다.

여기서 한가지 중요한 점은 광원으로는 편광이 안된 것을 사용해야 한다는 점이다. 만약 편광이 된 광원을 사용했다면 센서헤드부까지 빛을 전송하는 리드부의 복굴절 변화에 의해서 빛이 센서헤드부 전단에 있는 선편광기에 대해 수직한 편광상태가 된다면 센서부에는 빛이 하나도 입사할 수가 없게 되기 때문이다.

레이저 다이오드(LD)를 사용할 경우, 시중에서 상용으로 구할 수 있는 LD로는 측면발광(edge emitting)이고 선편광이 되어 있으므로 이를 이용하면 앞에서의 문제가 발생하게 된다. 이 문제를 해결하기 위해서 그림4에서 보듯이 두개의 LD를 수직으로 배열하고 편광분할기로 두 빛을 합해서 두개의 수직한 편광이 동시에 존재하도록 함으로써 무편광 광원의 효과를 얻도록 했다. 이렇게 하면 두개의 편광성분 중 어느 경우라도 하나는 센서부로 입사하게 되므로 신호가 없어지는 경우는 생기지 않는다.

4. 신호처리

전류센서의 신호처리는 대개 op-amp를 사용한 아날로그회로를 이용해서 실현한다. 그림3에서와 같이 편광분할기를 통해 나온 빛을 두가닥의 다중모드 광섬유를

사용해서 검광기 PD1과 PD2까지 전송하면 광신호는 전기적인 신호로 바뀌게 되고 이를 전치증폭기(pre-amp)를 통해 적당한 크기로 증폭한 후 합과 차를 구하고 이를 나누기 기능을 가진 아날로그 계산기(AD534)에 넣어서 S를 구한다. 이 S는 광강도에 대해서 무관한 양이다. 이렇게 구한 S로부터 측정하고자 하는 전류값을 얻을 수 있다.

본 연구에서는 신호의 보다 정밀한 측정을 위해 검광기로 받은 신호를 각각 규격화하는 방법을 택했다. 이렇게 한 이유는 사용된 광부품(주로 connector)마다 발생하는 광손실이 다르므로 이 신호를 바로 더하거나 빼다면 광커넥터에서의 광손실에 의한 오차가 발생하게 된다. 이를 고찰하기 위해 편광분할기에서 투과하는 편광을 P_1 이라 하고 반사하는 편광을 P_2 라 하자. 편광분할기를 지난 빛은 서로 수직한 편광이 되고 다시 광커넥터를 통해서 다중모드 광섬유로 입사하게 된다. 이때의 광손실을 각각 A_1, A_2 라 하면 P_1 과 P_2 는

$$P_1 = A_1 \frac{P_o}{2} \{1 - \sin(2\theta_p)\} = ac_1 + dc_1$$

$$P_2 = A_2 \frac{P_o}{2} \{1 + \sin(2\theta_p)\} = ac_2 + dc_2$$

가 된다. 이 신호를 바로 더하고 빼서 나누는 신호처리 방법을 사용한다면 A_1 과 A_2 의 영향으로 정확한 신호처리가 되지 않는다. 즉 S를 구하면 A_1 과 A_2 의 의존성이 남아있게 된다. 이의 영향을 제거하기 위해 각각의 검광기에서의 신호를 광강도에 비례하는 dc와 측정전류에 비례하는 ac로 분리하고 ac를 dc로 나눔으로써 규격화를 하였다. 이는 본 광섬유전류센서가 직류가 아닌 교류전류를 측정하는 용도에 목표를 두고 연구를 했기 때문에 가능하다. 이렇게 하면 각 부품마다 광손실이 다르더라도 이 손실에 의한 영향은 나누기 과정에서 각각 약분이 되므로 배제할 수 있게 된다.

III. 광섬유 전류센서의 제작 및 특성평가

1. 광섬유 전류센서의 구성

앞서 실행한 실험들로부터 광섬유를 이용한 전류센서를 제작하였다. 전류센서는 저복굴절 광섬유(Low Birefringence Fiber)를 포함한 광학계와 광신호를 전기적 신호로 바꾸어 신호를 처리하는 신호처리부, 그리고 계산과 측정기의 주변장치를 제어하는 하드웨어와 소프트웨어, 그리고 케이스로 구성된다. 그림 5는 제작된 전류센서의 센서부 내부의 사진이다.

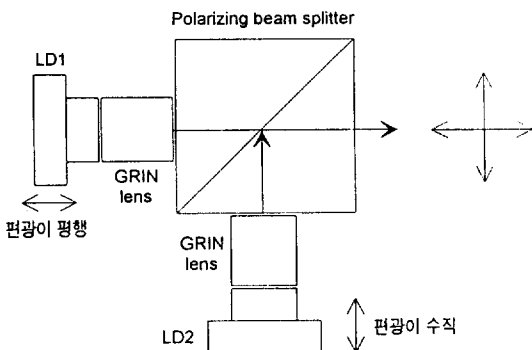


그림 4. 센서에 사용된 광원의 무편광화.

2. 광학계

전류센서의 광학계는 광섬유로 꾸민 광섬유 센서부와 편광기, 편광분할기, 그리고 광원, 광검출기, 그리고 광을 전송하는 광섬유로 구성된다. 전류센서에 사용된 광부품의 내역은 표 1과 같다. 광원으로는 2개의 830 nm의 레이저 다이오드(Hitachi 8318G)를 수직으로 조립하여 편광결합기를 이용하여 합쳐서 사용하였다. 광검출기로는 암전류(dark current)가 적은 PIN 포토다이오드를 사용하였다. 광섬유는 센서부의 입력에는 단일모드 광섬유(830 nm, core dia=5 μm)를 사용하고 2개의 출력에는 다중모드 광섬유(core/clad. dia.=50/125)를 사용

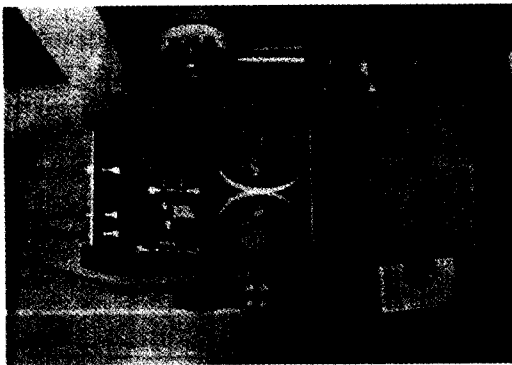


그림 5. 광섬유전류센서의 센서헤드부. 편광기와 편광분할기 그리고 커넥터로 구성됨.

하였다. 수직으로 연결된 직경 10 cm인 센서헤드에는 저복굴절 광섬유를 번갈아가며 4바퀴씩 감았다. 모든 광연결부는 ST형의 커넥터를 달아서 연결을 편리하게 했다.

3. 광섬유 전류센서의 특성평가

신뢰성을 시험하기 위하여 시험 setup을 구성하였다. 인가전류의 측정에는 후크미터(정밀도 ± 1%급)를 사용하여 측정하였고 이를 기준전류로 사용했다. 또 전류원으로는 1200A까지 교류전류를 발생시킬 수 있는 전류원을 사용했다. Faraday 회전과 인가전류는 선형적인 관계를 갖기 때문에 낮은 전류와 높은 전류의 두 점에서 직선으로 fitting 하여 전류측정을 할 수 있다. 전류의 크기를 변화시켰을 때의 전류센서의 출력 모양을 그림 6에 나타내었다.

선형성을 알아보기 위하여 100A와 800A에서 측정된 뒤 센서를 보정하고 인가 전류를 50A씩 증가시키면서 인가전류와 측정전류를 측정하였다. 그림 7의 결과와 같이 선형성이 매우 좋게 나타났다. 500A 이하에서는 오차가 1A 이내로 나타났고 500A를 지나면서 오차가 커지기 시작하여 1000A에서 12A가 되었다. 최대오차는 0~1000 A 범위에서 0~12A로 ± 1.2%의 오차를 갖는다. 이 결과로부터 저복굴절광섬유를 이용한 전류센서가 대전류를 측정하는 용도로써 선형성이 충분함을 알 수 있었다.

4. 온도특성

표 1. 광섬유전류센서 제작에 사용된 광부품 목록.

	부품명	모 델	주요 spec.	제조사
광섬유	single mode fiber	SMC-A0820B	$\lambda_c = 820 \text{ nm}$, 12 dB/km.	Engine-Bickford
	multi-mode fiber	MMF-1300	850 nm, 1300 nm, 50/125	LG전선
커넥터	ST connector	OFA-SM-PM-BS-ST	single mode용	LG전선
	편광기	FOP-01-88-830-SS	830 nm, 20 dB	OZ OPTICS
센서부	편광분할기	FOBS-12-888-SMM-830-PBS	830 nm, 50:50	OZ OPTICS
	저복굴절광섬유	LB800	830/850 nm, <5 dB/km Retardance < 1°/m	YORK
본체부	Laser Diode	HL-8318G	발진파장 830 nm 단일종모드발진	HITACHI
	편광분할기	ULBS-118-5/125-F-830-PBS	Isolation ratio 20 dB	OZ OPTICS
	PD(Photo diode)	S2386-18K	$I_d = 0.002 \text{ nA}$, $\lambda_p = 900 \text{ nm}$	兵松ホトニクス

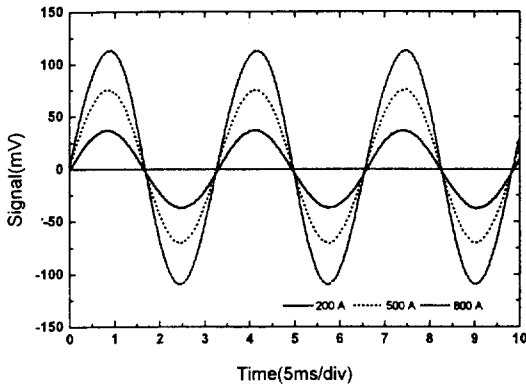


그림 6. 광섬유전류센서의 출력의 모양. 60 Hz의 교류전류에 비례하는 신호를 기록한 것임.

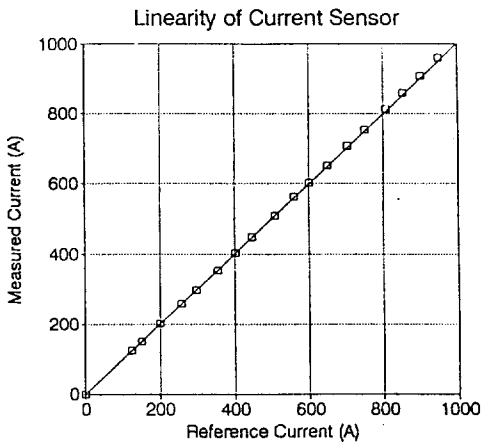


그림 7. 광섬유전류센서의 선형성 측정결과.

광섬유전류센서는 광섬유의 Verdet 상수와 탄성광학 상수가 온도에 대해서 낮은 의존성을 가지기 때문에 안정할 것이라고 생각되나, 실제로 센서를 구성하였을 경우 센서감도가 온도에 대해서 변화하는 것을 보았다. 이의 주된 원인으로서는 센서헤드부에 작용하는 온도의 분포가 불균일하게 되어서 수직원형틀에 감겨있는 광섬유에 생기는 복굴절의 양을 다르게 함으로써 복굴절이 보상이 되지 않은 경우라고 생각된다.

보다 더 정밀한 실험을 하기 위해서 센서부를 가열한 후 천천히 식히면서 같은 실험을 수행하였다. 이를 그림 8에 보였고 센서헤드를 원형틀 하나로 해서 구성한 경우보다 더 안정된 결과를 얻었다. 실험시에는 수직원형틀방법과 단일원형틀방법을 모두 실험하여 보았으나 후자의 경우 온도변화에 대해 많은 영향을 받았고 심지어는 온도가 원상태로 되돌아 왔을 경우에도 센서의 신호는

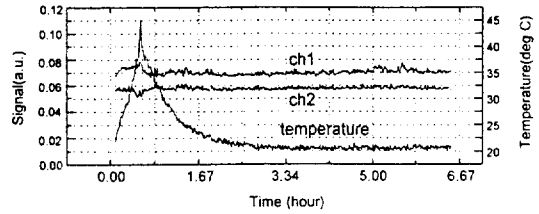


그림 8. 광섬유전류센서의 온도특성 측정결과. ch1: PD1의 신호, ch2: PD2의 신호.

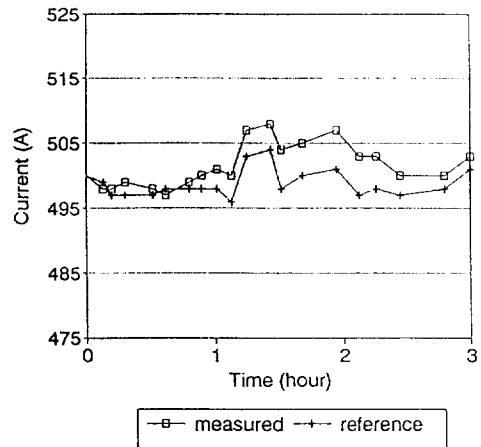


그림 9. 광섬유전류센서의 안정성 측정결과. 500A의 전류에 대해 3시간동안 센서의 안정성 관찰.

원래의 값으로 되돌아 오지 않는 양상을 보였다. 본 실험에서 단일원형틀방법에 비해 수직원형틀방법이 얼마나 개선되었는지를 비교하여 보여주는 것이 바람직하나 단일원형틀방법이 너무 많은 편차를 보였고(20% 이상) 또 실험시마다 다른 양상을 보였기 때문에 수치적으로 비교할 수는 없었다.

출력신호는 규격화를 한 뒤 두 개를 합해서 사용하므로 그림 8에서의 ch1과 ch2의 평균에 해당된다. 평균값을 구해서 보면 온도에 대해 변화가 적은 신호를 얻을 수 있었다. 그러나 아직도 조금의 온도에 대한 변화를 볼 수 있으며, 이는 센서부의 광섬유와 편광기, 편광분할기, 그리고 이를 연결하는 커넥터등의 변화에 기인한 것으로 여겨진다.

5. 안정성

장시간동안의 계측기의 안정성을 시험하기 위하여 완성된 계측기를 설치하고 3시간동안 전류를 관측하였다. 그림9는 500A에서의 측정그래프이고, 전류발생기의 전류값은 후크메타로 측정을 하여 기준값으로 삼았다. 실제

실험하는 동안 전류발생기의 큰 전류 때문에 도선이 가열되어서 열이 많이 났고 이에 따라 전류값이 조금씩 변화했으므로 이 값을 일정한 시간간격으로 계속 측정하여 보였다. 최대 오차는 500A에서 $\pm 1\%$ 로 안정된 결과를 보였다.

IV. 결 론

광섬유를 이용하여 광섬유 전류센서를 구성하고 이의 특성에 대해서 연구하였다. 이 광섬유 전류센서는 자기장에 의한 빛의 편광의 회전현상(Faraday Rotation)을 응용한 것으로 선형성이 매우 뛰어나며 전체적인 오차가 $\pm 1.2\%$ 이내였다.

광섬유전류센서는 온도변화에 의해서 감도변화를 보였는데 이는 센서헤드부에 존재하는 선형복굴절질의 변화에 의한 것으로 센서헤드부의 적절한 디자인에 의해 이를 해결할 수가 있었다. 센서의 헤드부는 광섬유를 감을수 있는 원형틀 두개를 수직으로 결합하여 거기에 광섬유를 번갈아가며 감아서 복굴절량을 줄임으로써 구부림(bending)에 의한 선형복굴절질의 온도의존성을 최소화하였다.

외부의 영향에 의한 리드광섬유의 복굴절변화에 의해 발생하는 감도변화를 없애기 위한 방법으로는 센서부의 전후단에 편광기와 편광분할기를 두고 리드부와 분리시켜서 감도변화를 줄였다.

광원으로서의 레이저다이오드의 편광된 광을 서로 수직으로 결합하여 사용함으로써 광원의 편광 영향을 배제하였다. 또한 신호처리에서는 각채널 별로 나누기회로를 사용하여 광원의 강도변화, 광 손실의 변화, 광학계 정렬의 변화 등에 의한 광량변화에 대하여도 안정되게 전류를 측정할 수 있게 하였다.

실험의 결과로서는 교류전류측정의 오차는 0-1000A 범위에서 $\pm 1.2\%$ 정도의 값을 보였으며, 500A에서 3시간동안 안정성 측정을 했을 때 1% 미만의 변화를 보였다. 온도특성에서는 조금의 변화를 볼수 있었는데 이는 주로 커넥터 등의 기계적인 부분, 신호처리용 전자회로계, 컴퓨터로 데이터를 받는 A/D 변환과정에서 주로 발생한 것으로 생각되며 이러한 부분이 보완된다면 대용량의 전류를 측정하는 광섬유전류센서로서의 기능을 할 수

있으리라 생각된다.

V. 감사의 글

본 연구는 상공자원부에서 시행한 공업기반기술 개발사업의 기술개발결과로 LG전선의 지원으로 수행되었다. 본 연구를 위해 도움을 주신 한국과학기술원 물리학과 김병운 교수님과 LG전선연구소(안양)의 계광희, 양길호, 송우성씨께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] A. M. Smith, Appl. Opt., **17**(1), 52(1978).
- [2] A. Papp and H. Harms, Appl. Opt., **19**(22), 3729 (1980).
- [3] H. Aulich, W. Beck, N. Douklias, H. Harms, A. Papp, and H. Schneider, Appl. Opt., **19**(22), 3735 (1980).
- [4] H. Harms and A. Papp, Appl. Opt., **19**(22), 3741 (1980).
- [5] G. I. Chandler, P. R. Forman, F. C. Jahoda, and K. A. Klare, Appl. Opt., **25**(11), 1770(1986).
- [6] H. S. Lassing, W. J. Mastop, A. F. G. van der Meer, and A. A. M. Oomens, Appl. Opt., **26**(12), (1987).
- [7] G. I. Chandler, P. R. Forman, and F. C. Jahoda, SPIE **566**, Fiber and Laser Sensors III, 206(1985).
- [8] M. Kanoi, G. Takahashi, T. Sato, M. Higaki, E. Mori, K. Okumura, IEEE Trans. on Pow. Deliv., **PWRD-1**(1), 91(1986).
- [9] H. S. Lassing, A. A. M. Oomens, R. Woltjer, P. C. T. van der Laan, and G. G. Wolzak, Rev. Sci. Instrum., **57**, 851(1986).
- [10] D. Tang, A. H. Rose, G. W. Day and S. M. Etzel, J. Lightwave Technol., **9**(8), (1991).
- [11] C. H. Tsao, J. Opt. Soc. Am. A, **4**(8), 1047(1987).
- [12] A. Yariv and P. Yeh, Optical Waves in Crystals, John Wiley & Sons, Inc (1984), 125.

Characteristics of Fiber-Optic Current Sensors Using Perpendicular Coil Formers

Myung-Lae Lee and Yong-Hee Lee

Department of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejon 305-701, Korea

Man-Sik Kim

Fiber Optics and Telecom Research Lab., LG Cable Co., Anyang, Kyungki, 430-080, Korea

(Received: June 14, 1996)

Thermally-stabilized fiber-optic current sensors are proposed and demonstrated. The sensor head is made of two coil formers combined perpendicularly. In this sensor head, bending-induced birefringences can be reduced to the level much smaller than those of the single former type because the eigen-axes of the two perpendicular coil formers are made orthogonal to each other. Moreover, thermal variation of the birefringence is also expected to be minimized by the orthogonality of the two polarization eigen-axes. We changed the temperature slowly in the range of 20~45°C during 100 minutes. The overall linearity of the sensor is better than 1.2% in the range of 0~1000A. The long-term fluctuation of the sensor is less than 1% when measured for 3 hours at 500A and room temperature. Two orthogonally-polarized laser diodes are combined together to make the incident beam unpolarized. In the signal processing, the signals are separated by two parts and normalized respectively, which minimize the effects of optical fluctuations coming from sources, connectors, etc.