광섬유의 선형복굴절 보상에 따른 170 kV GIS용 전류 센서의 출력 특성

論 文
54C-2-3

The Output Property of Optical CT for the 170 kV GIS Owing to the Compensation of Linear Birefringence at Optical Fibers

鄭 在 容† · 金 炳 泰*
(Jae-Yong Jeong · Byung-Tai Kim)

Abstract - The optical CT was developed to use twisted fibers for 170 kV GIS. The fiber sensor optimized on the optical CT was wound 3 turns and twisted 4 times per a turn at the pipe with a diameter of 130 mm. The measurement error for the linearity which was satisfied the criterion of 'IEC Class-1.0' was less than ± 0.44 % at the transmission type and ± 0.82 % at the reflection type to 2,000 A. At a low current to 200 A, the measurement error was ± 0.69% at the transmission type and ± 1.38 % at the reflection type.

Key Words : Optical Current Transformer, Fiber Sensor, 광섬유 전류센서, 선형복굴절, Twisted Fiber

1. 서 론

최근 전력계통이 초고압화가 되어감에 따라 기존의 CT(current transformer)는 규모가 커지게 되고 제작비가 많이 소요되며, 내진에 대한 성능 확보 등의 많은 어려움이 예상된다. 또한 기존의 방식은 전자파 간섭(EMI)의 영향을 받기 쉬워 측정파형의 왜곡 문제가 발생될 수 있다. 이러한 문제의 해결 방안으로 전력설비의 고장 검출이나 전류 측정 기술과 비용면에서 경쟁력이 있는 광 CT의 이용이 광범위하게 검토되고 있다. 광 CT는 광학 매질 내로 전파하는 선편광된 빛의 편광면이 전류에 의해 발생된 자장에 비례하여 회전하는 패러데이 효과를 이용한 것으로 센서의 종류에 따라 광섬유를 이용한 광섬유형과 TGG, YIG의 결정 등을 블록형태로 하는 벌크형, 그리고 위상 변조 등을 이용하는 하이브리드형으로 나누어진다. 광섬유형은 자유로운 형태로 센서를 구성할 수 있고, 입력과 출력단을 광섬유로 연결하기 때문에 보다 소형으로 신뢰성 높은 광 CT를 제작할 수 있을 것으로 기대하고 있다.[1][2]

광 CT는 기존 방식에 비해 응답속도가 빨라 순간적인 과도 전류의 오류를 감지할 수 있으며, 전자파 간섭의 영향을 받지 않고 소형으로 제작이 가능하다는 장점을 갖는다. 반면 광섬유를 이용한 광 CT의 경우 선형복굴절 영향과 외부의 온도 변화와 진동에 의한 센서의 감도변화 등을 해결해야 한다. 이 중에서 광섬유의 선형복굴절이 가장 큰 문제점이며, 이러한 선형복굴절은 편광 상태를 변화시켜 전류 측정의 정확도를 떨어뜨리게 되므로 광섬유에 생기는 선형복굴절의 영향을 제거하는 것이 가장 중요하다.

선형복굴절의 영향을 줄이기 위한 방법으로 광섬유를 비틀어서 원형복굴절을 유도하는 방법, 반사거울을 사용하여 자장의 영향을 두배로 받게 하는 방법, 센서부의 형태로 두 개의 원형 틀을 90도가 되게 제작하여 광섬유를 번갈아 가면서 감아 서로 상쇄시키는 방법, 그리고 광섬유를 코일 형태로 감은 뒤 아닐링을 하여 응력을 제거하는 방법 등이 있다. 보다 효과적으로 패러데이 회전 거울을 사용하는 방법이 있는데, 이는 센서부에 출력된 편광을 입사편광에 수직으로 회전하여 반사시켜 선형복굴절의 영향을 상쇄시키는 것이다. 그러나, 패러데이 회전 거울은 고가의 부품이므로 상품화하기에는 적합하지 않을 것으로 생각된다. 본 연구에서는 선형복굴절의 영향을 줄이기 위해 광섬유를 비트는 방법과 반사에 의해 자장의 영향을 두배로 받게 하는 방법을 사용하였다.[2][3]

본 연구에서는 170 kV GIS용으로 내부의 3상 도체에 각각 한 개씩 장착될 수 있도록 직경 130 mm 인 전류센서를 제작하였으며, 선형복굴절 영향을 줄이기 위하여 광섬유를 비트는 방법을 채택하였다. 이에 광섬유를 비틈에 따른 선형복굴절의 변화와 전류 인가시 출력 특성을 토대로 광섬유를 이용한 전류 센서의 최적화에 대해서 기술한다.

2. 광섬유의 복굴절 특성

2.1 광섬유의 복굴절

선형복굴절은 광섬유 제작시 완전히 등방적으로 만들지 못하기 때문에 생기는 광섬유 자체에 내재된 것과 광섬유를 센서로 제작할 때 구부림이나 장력(tension) 등에 의한 외부적인 것이 있다. 선형복굴절은 광섬유를 이용한 전류센서의 측정감도에 가장 큰 영향을 주므로 실제 센서구성에서는 얼마나 선형복굴절의 영향을 최소화 하느냐가 가장 중요하다

† 교신저자, 正會員 : 청주대학교 물리광학과 석사
E-mail : optjjy@hanmir.com
* 正 會 員 : 청주대학교 레이저광정보 공학과 교수
接受日字 : 2004年 6月 15日
最終完了 : 2004年 12月 13日

고 할 수 있다.

광섬유를 센서로 제작하기 위해 구부림으로서 유도되는 선형복굴절은 광섬유의 탄성 광학 계수들로부터

$$\delta_l = \frac{2\pi}{\lambda}\frac{n_{co}^3(p_{11}-p_{12})(1+\sigma)}{4}\frac{b^2}{R^2} \quad (1)$$

로 계산할 수 있다.[3] 이 식에 표현된 계수들은 Table 1의 광섬유 물성과 같고, b는 광섬유 클래딩 반경이며, R은 광섬유를 감은 틀의 반경이다. 선형복굴절은 광섬유를 감은 반경에 반비례하여 나타나며, 장력이나 응력 등에 의해서도 발생된다.

표 1 광섬유의 매질상수

Table 1 Material constants of optical fibers

	Value	$\lambda[\mu m]$
Young's modulus (Y)	$7.6\times10^{10}[N/m^2]$	
Poisson ratio(σ)	0.17	
Index (n_{co})	1.46	0.633
Photoelastic constant (p_{11})	0.12	0.633
Photoelastic constant (p_{12})	0.27	0.633
Verdet constant (V)	$4.68\times10^{-6}[rad/A]$	0.633

광섬유를 이용한 전류 측정 장치는 패러데이 회전을 이용한 것이다. 등방성 매질에 강한 자장을 걸어 주었을 때 매질에는 패러데이 회전에 의해 원형복굴절이 발생한다. 이러한 원형복굴절은 등방성 유전체를 자장 근처에 놓았을 때 편광면이 회전하게 되는 것과 광섬유를 비틀었을 경우에 유도되는 것이 있다. 전자는 패러데이 회전에 의한 것으로 자장에 의해 유도되며, 후자는 탄성 광학 효과(elasto-optic effect)에 의한 것으로 광섬유 비틀림(twist rate)에 비례하여 나타나게 된다.[1,4,5,6,7] 광섬유를 이용한 전류 측정 장치에서 원형복굴절의 축을 중심으로 편광이 회전하게 되면 선편광 상태를 유지할 수 있기 때문에 보다 정확한 전류 측정을 기대할 수 있다.

광섬유를 비트는 경우에 비틀림에 비례한 원형복굴절이 유도되고, 그 양은

$$\beta_r-\beta_l = \frac{n_{co}^2(p_{11}-p_{12})}{2}\frac{\Theta}{l} \quad (2)$$

로 계산할 수 있다.[3] 여기서 l는 광섬유의 길이이며 Θ, 는 광섬유를 원통형 틀에 한바퀴 감은 길이 당 비틀어진 각이다. 이 식에 각 계수를 대입하여 계산하면 광섬유를 비틀어서 발생하는 원형 리타데이션은

$$\delta_c = (\beta_r-\beta_l) = -0.16\Theta \quad (3)$$

로 표현하게 된다. 원형 리타데이션 δ_c는 두 개의 수직한 원편광간의 위상차로 생각할 수 있으므로 매질에 입사한 선편광은 $-\delta_c/2$의 각으로 회전하게 된다. 즉, 광섬유를 비틀어 사용함에 따라 선편광이 0.08Θ만큼 회전한다. 광섬유를 1회 비틀었을 경우 $\delta_c = -0.16\times360^\circ = 57.6^\circ$의 원형 리타데이션이 발생하며, 입사한 선편광은 28.8도로 회전한다.[3] 광섬유를 비틈에 따른 편광 회전각의 비율은 광섬유를 비튼 각 τ에 대한 편광 회전각 α로 구할 수 있으며, 측정값에서 계산된 편광 회전각의 비율 ς는

$$\varsigma = \frac{\alpha}{\tau} = \frac{26.275^\circ}{360^\circ} \approx 0.073 \quad (4)$$

가 된다. 이와 같이 비틀어서 유도되는 원형복굴절은 전류센서의 측정감도를 높이는데 중요한 요소가 된다.

광섬유 자체에 내재되어 있는 선형복굴절과 광섬유를 센서로 제작하기 위해 구부림으로서 유도되는 선형복굴절의 영향이 자장에 의해서 발생된 원형복굴절보다 크게 되면 선형복굴절의 축을 중심으로 편광이 회전하게 되므로 선편광 상태를 유지할 수 없게 되고 패러데이 회전이 잘 나타나지 않게 된다.[2] 광섬유를 비틀어 주게 되면 원형복굴절이 상대적으로 증가하게 되고 이 축을 중심으로 편광이 회전하여 선편광 상태를 유지할 수 있다. 결과적으로 선형복굴절에 비해 원형복굴절이 상대적으로 커지게 되므로 선형복굴절에 의한 영향을 줄일 수 있어 전류센서의 측정감도를 높일 수 있게 되는 것이다.

2.2 광섬유 비틈에 따른 선형복굴절의 변화

선형복굴절의 영향을 줄이기 위한 방법으로 광섬유를 비틈에 따른 특성 변화에 대해 알아보자. 광섬유를 비틀었을 때 광섬유 차체의 편광 특성 Matrix는

$$F=\begin{bmatrix} cos\delta l+i(\delta\beta/\delta)sin\delta l & ((k-w_b)/\delta)sin\delta l \\ -((k-w_b)/\delta)sin\delta l & cos\delta l-i(\delta\beta/\delta)sin\delta l \end{bmatrix} \quad (5)$$

로 표현할 수 있다.[4][6] 여기서 l은 광섬유의 길이이며, 복굴절 함수 δ는

$$\delta = (\delta\beta^2+(w_b-k)^2)^{1/2} \quad (6)$$

이다. 여기에 $\delta\beta$는 광섬유에 내재된 선형복굴절과 구부림으로서 유도되는 선형복굴절을 모두 포함한 값이다. w_b는 광섬유에 내재된 원형복굴절 양이며, k는 광섬유를 비틈에 따라 유도되는 원형복굴절양이다. 복굴절 함수 δ에서 광섬유에 비틀림을 크게 하였을 경우 원형복굴절 k의 영향이 증가하게 되므로 상대적으로 선형복굴절 $\delta\beta$의 영향을 줄일 수 있다. 따라서 원형복굴절을 중심으로 편광면이 회전하게 되므로 선편광 상태가 유지된다.[4][5][6]

광섬유가 비틀어진 상태에서의 편광특성은 식 (5)와 편광자(P), 검광자(A) 및 반사거울(M)에 대한 행렬을 이용하여

$$\text{투과형} : \begin{bmatrix} E'_x \\ E'_y \end{bmatrix} = A \cdot F \cdot P \cdot E_{in}$$

$$\text{반사형} : \begin{bmatrix} E'_x \\ E'_y \end{bmatrix} = A \cdot F \cdot M \cdot F \cdot P \cdot E_{in} \quad (7)$$

와 같이 투과형과 반사형에 대해 간단하게 표현할 수 있다.

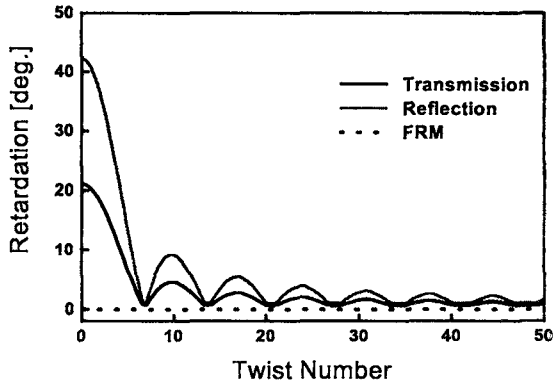


그림 1. 광섬유를 비트는 횟수에 따른 리타데이션의 변화
Fig. 1. Variation of retardation owing to numbers twisting the optical fiber

Fig. 1은 광섬유를 직경 130 mm인 원형 틀에 감았을 경우 광섬유를 비트는 횟수에 따른 선형복굴절에 의한 리타데이션(retardation)을 식 (7)를 사용하여 계산한 결과이다. Fig. 1에서 투과형(transmission)은 센서용 광섬유로 바로 출력되는 경우의 리타데이션이며, 반사형(reflection)은 센서용 광섬유 끝에 거울을 사용하여 반사시킨 경우의 리타데이션이다. Fig. 1에 나타나 있는 것과 같이 투과형과 반사형의 리타데이션 값이 광섬유를 비트는 횟수에 따라 일정한 주기를 가지며, sinc 함수의 형태로 줄어들며 수렴하게 된다. FRM은 패러데이 회전 거울을 사용한 경우로서 광 센서부에 출력되는 편광을 입사편광에 수직으로 회전하여 반사되기 때문에 지나간 경로를 되돌아오게 되면 수직한 두편광이 같은 복굴절을 겪기 때문에 광섬유의 선형복굴절 영향이 상쇄된다.[1] 따라서 비트는 횟수와 무관하게 리타데이션 값은 0이 된다. 이는 투과된 두 수직한 전장성분의 편광이 패러데이 회전 거울에 의해 90도로 회전하여 반사되므로 선형복굴절에 의한 위상차가 상쇄되기 때문이다. 그러나 패러데이 회전 거울은 고가이므로 광섬유를 이용한 실용적인 전류센서의 제작에 사용하기에는 적당하지 못하다고 생각된다. 일반 거울을 사용하여 광섬유를 비트는 횟수에 따른 리타데이션의 변화 주기를 찾아 최소가 되는 값으로 광섬유를 비틀어 주게 되면 패러데이 회전 거울을 사용하지 않더라도 광섬유를 이용한 전류센서 제작에서 보다 효과적으로 선형복굴절의 영향을 줄일 수 있게 된다.

전류 인가시 광섬유가 비틀어진 상태에서의 출력 특성 계산은 식 (5)와 (6)에 패러데이 회전항 Φ_F 를 첨가하여

$$F = \begin{bmatrix} cos\delta l + i(\delta\beta/\delta)sin\delta l & ((k+\Phi_F - w_b)/\delta)sin\delta l \\ -((k+\Phi_F - w_b)/\delta)sin\delta l & cos\delta l - i(\delta\beta/\delta)sin\delta l \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\delta = (\delta\beta^2 + (w_b - k + \Phi_F)^2)^{1/2} \quad (10)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 Φ_F는 인가된 전류에 따라서 발생된 자장에 비례하여 나타나는 패러데이 회전항을 의미한다.

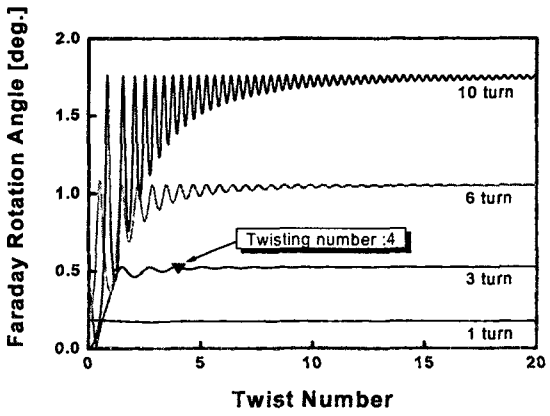


그림 2. 직경 130 mm 원형 틀에 광섬유를 감은 수와 비트는 횟수에 따른 패러데이 회전각의 변화
Fig. 2. Variation of faraday rotation angle owing to turned and twisted number of optical fibers at the pipe with a diameter of 130 mm

Fig. 2는 광 CT에 1,000 A의 전류 인가시 광섬유를 감은 수와 비트는 횟수에 따른 패러데이 회전각을 식 (8)과 (9)를 식 (7)에 적용하여 계산한 결과이다. Fig. 2에 표시된 값은 직경 130 mm의 원통형 틀에 광섬유를 10회, 6회, 3회 및 1회 감았을 경우 비트는 횟수에 따른 패러데이 회전각을 나타낸 것이다. Fig. 2에서 보여주듯이 광섬유를 틀에 많이 감았을 경우 광섬유를 비틈에 따라 패러데이 회전각의 변화량이 큰 것을 볼 수 있는데 이는 선형복굴절의 영향이 증가되었기 때문이며, 따라서 광섬유 감는 횟수를 많이 하는 것이 좋은 것만은 아니다는 것을 보여준다. 감은 수당 패러데이 회전각은 광섬유를 비트는 횟수에 따라서 주기적으로 감소하고 있는데 이것은 광섬유를 비틈에 따른 선형복굴절 변화와 유사한 경향을 보이는 것이다. 패러데이 회전각이 주기를 갖고 증가되는 이유는 광섬유를 비틈에 따라 선형복굴절이 보상되었기 때문이며, 비튼 횟수가 적은 부근에서 패러데이 회전각의 변화가 큰 이유는 선형복굴절이 완전히 보상되지 않았기 때문이다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 광섬유에 비트는 횟수를 10회 이상으로 하여 최적의 패러데이 회전각을 얻을 수도 있지만, 비튼 횟수 5회 이하에서도 패러데이 회전각이 주기적으로 증가되는 지점을 찾아 비틀어 주게 되면 같은 결과를 얻을 수 있을 것이다. 즉, 광섬유를 무리하게 많이 비틀지 않더라도 광섬유를 이용한 전류센서에 최적의 패러데이 회전각을 얻을 수 있다고 판단된다.

3. 광 CT의 측정결과 및 평가

3.1 전류 측정 장치 제작

본 연구에서는 170 kV GIS용으로 내부의 3상 도체에 각 한 개씩 장착될 수 있도록 직경 130 mm인 원통형 광 CT를 설계 · 제작하고 제특성을 분석하였다. 광섬유를 이용한 전류 측정 장치를 Fig. 3과 같이 구성하였다. 반도체 레이저에서 출력된 광은 광소자부의 편광자에 의해 수평편광으로 되어 직경이 130 mm인 원통형 틀에 감긴 저복굴절 광섬유 센서에 입사하게 된다. 광원으로는 센서용 광섬유의 베르데 상수, 물질의 흡수율, 수명 및 크기 등을 고려하여 파장 780 nm인 반도체 레이저(Sanyo : DL4140-001)를 단일모드 광섬유에 pigtail하여 사용하였다. 광소자부는 입사광의 편광 상태를 편광자의 조작에 의해 수평, 수직 및 45도 편광으로 임의로 제어할 수 있도록 하였고, 반사 거울을 통해 센서용 광섬유로 되돌아 나온 광을 편광에 따라 다중모드 광섬유를 사용하여 광검출기로 전달할 수 있도록 하였다. 또한 일본 Toshiba의 광 CT 개발팀의 의견을 참고하여[12] 진동 등의 영향을 최소화 할 수 있고, 온도에 대한 민감성을 억제할 수 있으며, 실제 전류 측정 장치 제작시 센서부에 일체형으로 부착이 가능하도록 가능한 소형으로 하였다. 본 연구에서 가장 중요한 센서에는 광섬유 코어가 비교적 등방적으로 제작되어 광섬유 자체에 선형복굴절을 적게 한 코아 직경이 5 μm 인 단일모드의 저복굴절 광섬유를 사용하였다. 센서부의 형태는 170 kV GIS용 규격으로 직경이 130 mm인 원통형 틀을 제작하여 광섬유를 감아서 고정시키는 방법으로 제작하였다.

투과형 실험의 경우 센서용 광섬유에서 출력된 광을 빛살가르개(PBS)를 사용하여 수평편광과 수직편광으로 나누어서 측정하였으며, 반사형 실험은 센서부 끝단에 전반사 코팅된 광섬유를 연결하여 센서부를 통해 되돌아 나온 광을 광소자부의 PBS를 통해 수평편광과 수직편광으로 나누어서 전류에 따른 신호를 측정하였다.

센서용 광섬유에 선형복굴절을 줄이기 위한 방법으로는 앞서 기술한 봐와 같이 광섬유를 비틀어서 원형복굴절을 상대적으로 크게 하는 방법과 반사 거울을 사용하여 두 배의 자장 영향을 받도록 하는 방법을 채택하였다.[1][8] 본 연구에서는 패러데이 회전 거울을 사용하지 않고, 약 10 cm 가량의 단일모드 광섬유에 유전체 박막으로 전반사 코팅한 광섬유를 FC 커넥터로 센서부에 부착할 수 있도록 하여 반사형에 대한 실험을 하였다.

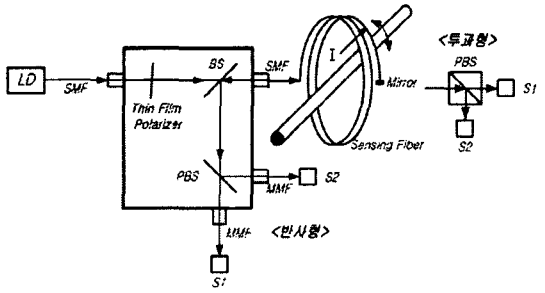


그림 3. 광섬유를 이용한 전류 측정 장치의 개략도
Fig. 3. Current transformer plan using the optical fiber

3.2 광섬유 비틈에 따른 출력 특성

광섬유 자체의 선형복굴절은 코어가 완전히 등방적이지 못하기 때문에 발생된다. 광섬유에 비틀림을 주는 것은 물성적으로 비등방적인 코어를 등방적인 코어로 만들어 주는 것이며, 이는 원형복굴절을 유도함으로써 선형복굴절의 영향을 줄여주는 것이다. 이에 광섬유를 이용한 전류센서의 제작에 선형복굴절 보상방법으로 가장 효과적이라고 판단되는 광섬유를 비틀어서 그 영향을 줄이는 방법을 채택하였고, 광섬유를 비틀어서 사용하는데 있어서 기본적인 특성과 전류 인가시 출력 특성을 실험하였다.

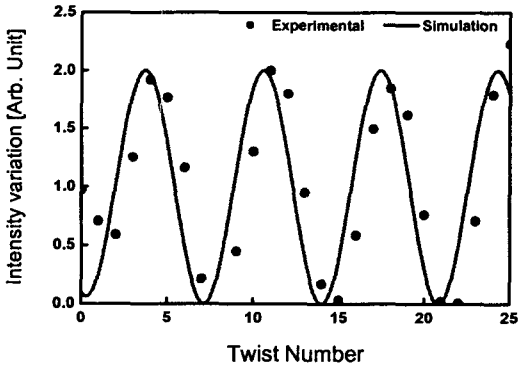


그림 4. 광섬유를 비트는 횟수에 따른 편광 투과 특성
Fig. 4. Transmission property for polarization owing to numbers twisting the optical fiber

Fig. 4는 광섬유를 원형 틀에 한 바퀴 감은 경우 광섬유를 비트는 횟수에 따른 투과형의 편광 특성 변화를 측정한 결과이다. 전류가 인가되지 않은 상태에서 입사되는 레이저광의 편광을 수평편광으로 하여 광섬유가 직선상태에서의 출력되는 편광 상태를 측정한 뒤 원형 틀에 감아 1회씩 25회까지 비틀어 가면서 편광 상태의 변화를 측정하였다. 이렇게 비틀어진 광섬유는, 물리적으로, 비틀지 않았을 때인 본래의 상태로 되돌아가려는 성질이 있으므로 원형 틀에 감긴 앞쪽과 뒷부분을 고정시켜서 사용하였다. 광섬유를 비트는 횟수에 따라서 식 (7)를 사용하여 계산한 이론값과 실험결과가 유사한 경향으로 주기적인 형태를 가지고 변화하는 것을 볼 수 있다. 이것은 광섬유를 비틈에 따라 최적의 상태가 되는 지점이 있다는 것을 나타내는 결과이다. 광섬유 비튼 횟수 4회, 11회, 18회 및 25회가 선형복굴절의 영향이 가장 적절하게 보상된 지점이 되어 입사광의 편광 상태를 잘 보전한 것으로 해석할 수 있다.

Fig. 5는 광섬유를 원형 틀에 2회, 3회 및 5회 감아 광CT에 1,000 A의 전류 인가하고 광섬유를 비틀어 주면서 출력 특성을 측정한 결과이다. 원형 틀에 광섬유를 3회 감은 경우의 출력 특성 변화가 광섬유 감은 수 2회 및 5회와는 다르게 Fig. 4의 광섬유 비틈에 따른 편광 특성 변화와 유사한 경향을 가지고 변화됨을 확인할 수 있다. 또한 감은 수당 광섬유를 16회까지 비틀어서 최대 출력값을 비교한 결과 3회의 경우 3.54 V, 5회에서는 4.50 V로 측정되어 약 79%에 가까운 출력값을 나타내었다. 즉 선형복굴절을 적절하게 보상해 줄 수 있고, 광섬유 비틈에 따른 편광 특성 변화와 주

기와 맞는다면 굳이 감은 수를 많이 할 필요가 없다고 사료되며, 이러한 결과는 광섬유를 원형 틀에 3회 감은 경우가 광섬유 비틈에 따라서 선형복굴절이 가장 적절하게 보상됨을 보여주는 것이다. 이에 본 연구에서는 170 kV GIS용으로 직경 130 mm인 전류센서의 제작에 광섬유 감은 수 3회가 가장 적절하다고 판단하였다.

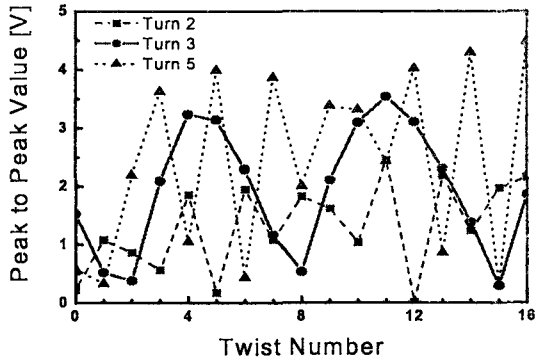


그림 5. 광섬유를 2회, 3회, 5회 감은 후 1,000 A의 전류 인가시 감은 수당 비트는 횟수에 따른 출력 특성 변화

Fig. 5. Variation for output property owing to twisting number per turned number when supplied to current of 1,000 A(2,3,5 turn times)

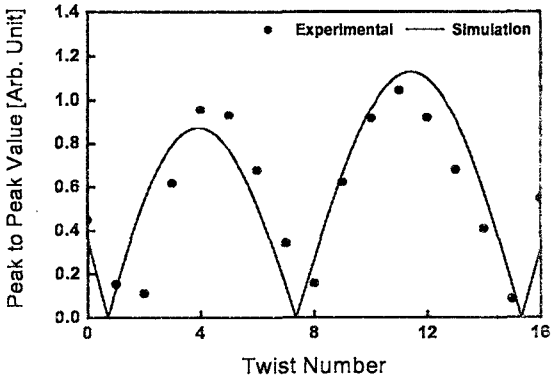


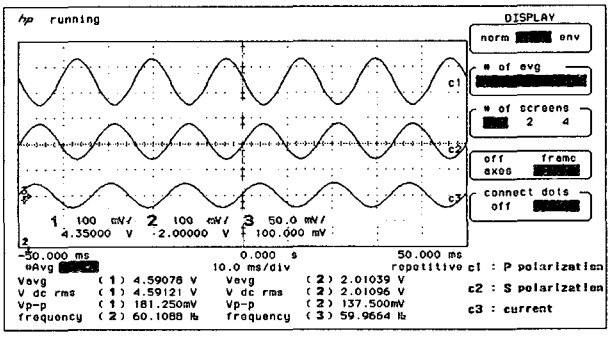
그림 6. 광섬유 3회 감은 후 1,000 A의 전류 인가시 비트는 횟수에 따른 출력 특성 변화

Fig. 6. Variation for output property owing to twisting number when supplied to current of 1,000 A after the optical fiber was wound 3 turns

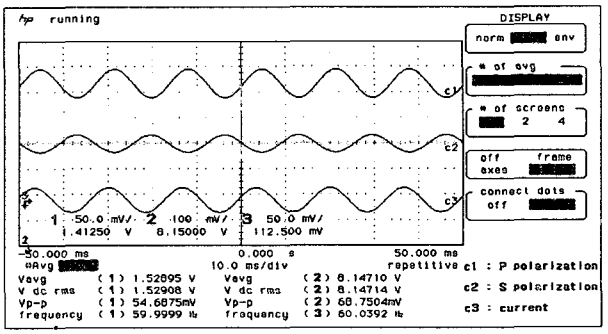
Fig. 6은 광섬유를 3회 감은 후 1,000 A의 전류를 인가하였을 때 광섬유를 비트는 횟수에 따른 출력 변화를 측정한 결과이다. 센서용 광섬유를 비틀지 않고 130 mm의 원형 틀에 감은 뒤 1,000 A의 전류를 인가하였을 때 광검출기로 측정한 출력값을 기준으로 하여 광섬유를 1회씩 16회까지 비틀어 가면서 측정하였다. Fig. 6의 가로축은 광섬유를 한 바퀴 감은 길이당 비튼 횟수이며, 세로축은 1,000 A의 전류 인가시 측정된 출력값이다. 이 실험결과는 앞서 측정된 광섬유를 비트는 횟수에 따른 편광 특성 변화와 유사한 경향을 보인다. 또한 출력값 변화가 광섬유를 비트는 횟수에 따라서 이론값과 실험결과가 유사한 경향으로 변화하고 있다. 광섬유를 비틀지 않은 경우보다 광섬유를 4회와 11회 비틀었을 경우의 출력값이 약 2배 이상 증가함을 보였다. 이러한 출력값 변화는 광섬유를 비틀어 주는 것이 선형복굴절의 영향을 개선시키고 있다는 것을 보여 주고 있으며, 비튼 횟수 4회와 11회가 선형복굴절의 영향이 적절하게 보상된 지점이라 할 수 있다. 또한 비튼 횟수 4회에서의 출력값이 3.24 V, 11회에서의 출력값이 3.54 V로 거의 비슷하게 측정되었다. 이는 광섬유의 비트는 횟수를 많이 하지 않더라도 적절한 지점을 찾아 비틀어 주게 되면 선형복굴절의 영향을 보상하게 되어 전류 측정에 대한 감도가 향상될 수 있음을 보여준다.

실용화의 관점에서 볼 경우 센서의 제작이 용이하여야 한다. 광섬유를 많이 비틀었을 경우 응력의 분배가 고르지 못하게 되면 광섬유가 끊어지게 된다. 또한 광섬유의 감는 횟수를 많이 하였을 경우에는 선형복굴절의 영향을 줄이기 위하여 비트는 횟수도 많아져야 한다. 따라서 광섬유를 센서로 제작하기 위해서는 감는 수와 비트는 횟수를 적게 하는 것이 바람직하다고 판단된다. Fig. 6의 결과에서 볼 수 있듯이 비튼 횟수 4회와 11회의 출력값이 거의 차이가 없기 때문에 굳이 광섬유를 11회까지 비틀 필요가 없는 것이다.

본 연구에서는 광섬유를 비틈에 따른 편광 특성 변화와 출력 특성 변화를 토대로 170 kV GIS용으로 직경이 130 mm인 광섬유 전류센서의 제작에서 한 바퀴당 4회 비틀어 3회 감았을 경우가 가장 최적의 상태로 판단하였다.



[투과형]

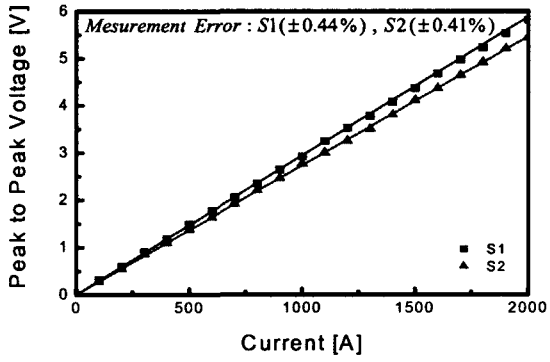


[반사형]

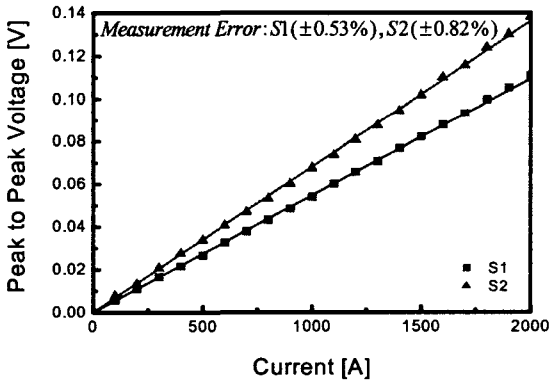
그림 7. 수평편광 입사 후 광섬유를 4회 비틀어 3회 감아 1,000 A 전류 인가시 출력파형

Fig. 7. Output oscillograph when supplied to current of 1,000 A after optical fiber was wound 3 turns and twisted 4 times per a turn

Fig. 7은 최적의 상태라고 판단된 광섬유를 4회 비틀어 3회 감은 경우 센서에 입사되는 편광을 수평편광으로 하여 광센서부에 1,000 A의 전류를 인가하였을 때 투과형과 반사형에 대한 출력 파형을 측정한 결과이다. c1과 c2는 센서에서 출력된 S1(수평편광)과 S2(수직편광)의 파형이며, c3는 인가된 전류의 파형이다. S1과 S2의 파형은 전류를 인가하였을 때 센서에서의 변조된 신호파형을 PBS를 사용하여 수직편광과 수평편광으로 나누어 검출기를 통해 오실로스코프로 측정하였고, 전류 파형은 도체에 분류기(Shunt : YOKOGAWA Model 2217)를 연결하여 측정한 것이다. 투과형 실험의 경우 오실로스코프(Hewlettpackard : 54542A)로 측정된 수치는 출력광에 대한 광검출기의 측정값이 포화현상을 보여 광검출기 앞에 광 감쇠용 ND 필터를 끼워 측정한 값이다.



[투과형]

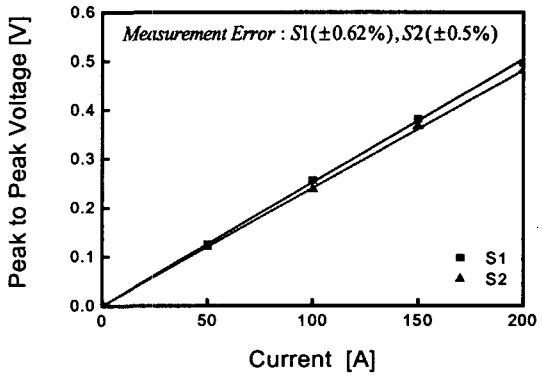


[반사형]

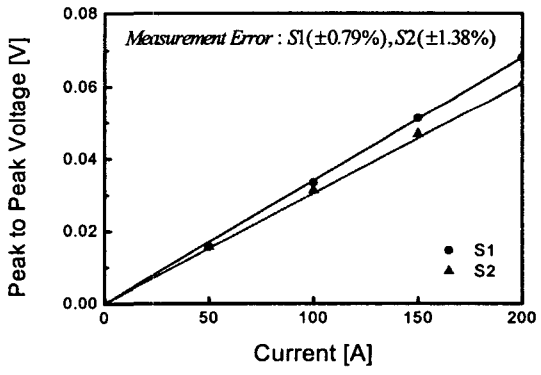
그림 8. 수평편광 입사 후 광섬유를 4회 비틀어 3회 감아 2,000 A까지 전류 인가시 출력 특성 변화

Fig. 8. Variation for output property when current is supplied to 2,000 A after optical fiber was wound 3 turns and twisted 4 times per a turn

Fig. 8은 수평편광으로 입사한 경우 광섬유를 4회 비틀어 3회 감은 후 0 A에서 2,000 A까지 100 A씩 전류를 인가하여 투과형과 반사형에 대한 출력 변화를 5회 이상 측정한 결과이다. 각각의 전류에 대한 오차값을 평균한 결과 투과형의 측정 오차가 S1은 ± 0.44 %, S2는 ± 0.41 %로 측정되었으며, 반사형의 측정 오차는 S1이 ± 0.53 %, S2가 ± 0.82 %로 측정되었다. 이 결과는 'IEC Class 1.0 규격'[10]에 규정된 정격에서 위상 오차를 배제하고 전류 측정 오차에 대해 ± 1 % 이내를 만족시킨다. 반사형의 측정 오차가 투과형 보다 더 나을 것이라고 예상했지만 그렇지 못한 이유는 반사 거울이나 광섬유를 결합할 때의 광량 손실 등에 의한 것과 진동 등에 의해 광축에 미세한 변화가 있을 경우 투과형 보다 반사형에 더 큰 영향을 주기 때문이라고 판단되며 앞으로 개선해야 할 사항이다. 전류 파형과 센서에서의 출력된 신호파형 간에 약간의 위상차가 생김을 볼 수 있다. 이는 실험실 내에서 측정이 어려워 정확한 위상 오차율을 얻지 못했으나, 전자회로를 사용한 신호처리로 보상한다면 위상차를 개선할 수 있을 것으로 판단되며 차후 실험에 적용할 예정이다.



[투과형]



[반사형]

그림 9. 광섬유를 4회 비틀어 3회 감은 후 200 A까지 전류 인가시 출력 특성 변화

Fig. 9. Variation for output property when current is supplied to 200 A after optical was wound 3 turns and twisted 4 times per a turn

전류 측정 장치는 기본적으로 'IEC class 1.0 규격'에서 만족시켜야만 상용화가 될 수 있다.[10] 규정에서는 정격의 20 % 이내 저전류에서 ± 3.0 % 이내의 측정 오차율을 만족시켜야 한다는 조건이 있다. 따라서 광섬유를 4회 비틀어 3회 감은 후 저전류에서의 측정 실험을 하였다. Fig. 9는 200 A까지 50 A씩 전류를 인가하여 저전류에서의 투과형과 반사

형에 대한 출력변화를 측정한 결과이다. 측정 오차가 투과형의 경우 S1이 ± 0.69 %, S2는 ± 0.5 %로 측정되었으며, 반사형의 경우 S1이 ± 0.79 %, S2는 ± 1.38 %로 측정되어 규정된 저전류에서 ± 3.0 % 이내의 전류 측정 오차를 만족시키고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 170 kV GIS용으로 내부의 3상 도체에 각한 개씩 장착될 수 있도록 직경 130 mm 인 전류센서를 제작하였습니다. 광섬유를 이용한 전류 측정 장치의 제작에 가장 큰 문제인 선형복굴절의 영향을 줄이기 위하여 광섬유를 비트는 방법을 채택하였고, 전류를 2,000 A까지 인가하여 투과형과 반사형에 대한 출력 특성을 측정하였다. 반사형 실험의 경우에는 패러데이 회전 거울을 사용하지 않고, 약 10 cm 가량의 단일모드 광섬유에 유전체 박막으로 전반사 코팅한 광섬유를 FC 커넥터로 센서부에 부착할 수 있도록 하였다. 광섬유 비틈에 따른 편광 특성 변화와 전류 인가에 따른 출력 특성을 측정한 결과 유사한 주기를 가지고 변화되었으며, 계산된 이론값과 실험결과도 유사한 경향으로 변화되었다. 이에 광섬유를 3회 감아 4회 비튼 지점이 선형복굴절이 가장 적절하게 보상된 지점이라고 사료되며, 전류센서 제작에 가장 최적의 상태라고 판단하였다. 이러한 방법으로 제작된 광 CT에 전류를 인가하여 실험한 결과 'IEC Class-1.0 규격'에서 규정된 측정 오차율을 만족시켰다. 자장의 영향을 두배로 받기 때문에 반사형의 측정 오차가 투과형보다 더 나을 것이라고 예상했지만 반사 거울이나 광섬유를 결합할 때의 광량 손실 등에 의한 영향으로 오히려 반사형의 측정 정확도가 떨어졌으며 제품화를 목적으로 전류센서를 제작한다면 투과형이 더 나을 것으로 사료된다, 결과적으로 광섬유를 무리하게 비틀지 않더라도 적절히 비트는 횟수를 찾아 이를 이용한다면 보다 정확한 전류 측정이 가능하며, 광섬유를 이용한 전류 측정 장치의 제작에 용이하게 적용시킬 수 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2004년도 LG 산전 연구소의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] 김병태, "광을 이용한 대전류 측정 장치 개발에 대한 연구 보고서", LG 산전, 2002.

[2] Myung Lae Lee, "Passive and Active Fiber-Optic Current Sensor", Ph.d. Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology. pp.5-33, 1998.

[3] Chin-Lin Chen, "Optoelectronics & Fiber Optics", Richard D. Irwin, a Times Higher Education Group Inc, pp.533-578, 1996.

[4] X P Dong, B C B Chu and K S Chiang, "An electric-current sensor employing twisted fiber with compensation for temperature and polarization fluctuations", Meas. Sci. Technol, 1997.

[5] S. Ezekiel. H. J. Arditty, "Fiber-Optic Rotation Sensors", springer, pp.67,(1982)

[6] Huang, Hung-chia, "Microwave approach to highly irregular fiber optics" John Wiley & Son, Inc, pp.31-129, 1998.

[7] X. P. Dong, "Twist fiber and its application in electric current sensor with compensation of arbitrary bias phase varying", University of Science and Technology of China, Anhui 230027.

[8] H. Guerrero, R. Perez del, R. Fernandez de Caleya, "Magnetic field biasing in Faraday effect sensor", American Institute of Physics, 1999.

[9] Hecht, "OPTICS", By Addison-Wesley Publishing Company, Inc. in Canada, PP.452-478, 1987.

[10] IEC, "International Standard ; Electronic Current Transformers", Switzerland, part 8, 2002

[11] Stive. Dolling, "NxtPhase Brings Light To Precision Current & Voltage Measurement", Electrical Line, January/Febuary, 2002

[12] Toshiba, 'Private communication'

[13] P. S. Theocaris, E. E. Gdoutos, "Matrix Theory of Photoelasticity", Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York , pp.6-44, 1997.

[14] D. K. Kahaner, "Optical Fiber Sensors", OFS'96, Sapporo, Japan, May 20-28, 1996.

[15] Toshihiko, Yoshino, Kosuke Minegishi and Masatoshi Nitta, "A very sensitive Faraday effect current sensor using a YIG/ring-core transformer in a transverse configuration", Meas. Sci. Technol, 12. 2001.

저 자 소 개

정 재 용 (鄭 在 容)

1975년 11월 16일생. 2001년 청주대 광학공학과 졸업. 2004년 동 대학원 물리광학과 졸업(공학석사)

Tel : 02-2108-2254

Fax : 02-2108-2260

E-mail : optjjy@hanmir.com

김 병 태 (金 恲 泰)

1958년 5월 9일생. 1982년 한양대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1990년 일본 오사카(Osaka)대학 電磁에너지공학전공 (공학박사) 1990년～현재 청주대 레이저광정보공학과 교수

Tel : 043-229-8502

Fax : 043-229-8432

E-mail : btkim@chongju.ac.kr