센서 형태에 따른 광전류센서의 출력 특성

(Characteristic of Optical Current Sensors Output by Sensor design)

김영민 · 박정환 · 이광식 · 김정배* · 박원주
(Young-Min Kim, Jung-Hwan Park, Kwang-Sik Lee, Jung-Bae Kim*, Won-Zoo Park)

영남대학교 · 효성중공업*

요 약

본 연구에서는 광섬유형(Fiber Optic Current Sensor) 광전류센서 구성 시 발생하는 선형복굴절(Linear Birefringence)의 보상에 용이한 수직원형틀(Orthogonal Loop Type) 센서헤드(Sensor Heads)를 개선하여 1 Cross 수직원형틀(1 Cross Orthogonal Loop Type)을 제시하였다. 그리고 기존의 페루프형 원형틀(Closed Loop Type), 수직원형틀 그리고 1 Cross 수직원형틀의 편광상태를 비교하였다.

그 결과 편광상태 측정 시 페루프 원형틀을 수직원형틀로 교체할 경우 15.3%, 1 Cross 수직원형틀로 교체할 경우 33.8%의 선형복굴절 감소 효과가 나타났다.

이에 1 Cross 수직원형틀을 광전류센서에 적용할 경우 안정된 편광특성으로 고신뢰성 광전류센서 개발 가능성을 높게 할 것이다.

1. 서 론

최근 급증하고 있는 전력수요를 충족시키기 위해 공급 전압의 초고압화와 설치규모의 대형화되고 있는 추세이다. 이런 배경에서 전류변류기(Current Transformer. ; CT)의 초고압설비에의 장착은 더욱 증가되고 있다. 그러나 중량, 잔류자기 및 자기포화에 따른 출력신호 왜곡 등의 단점이 있는 기존의 CT를 극복하기 위해 고절연성, 저 손실, 무유도성, 안정성 등의 장점이 있는 Laser를 이용한 광전류센서의 필요성이 증대되고 있다.

광전류센서에는 벌크(Bulk)형과 광섬유형으로 나눌 수 있다. 벌크형의 경우에는 자기광학상수인 Verdet 상수가 큰 크리스털(Crystal)을 이용하여 광전류센서를 구현함으로써 높은 민감도를 나타내지만, 광학소자의 오정렬 및 온도 드리프트를 겪기 쉬운 반면, 광섬유형의 경우에는 낮은 Verdet 상수를 갖는 광섬유를 이용하기 때문에 대전류 측정에 유리하다. 또, 광섬유를 이용하기 때문에 도선주위에 여러 번 감음으로서 민감도를 향상시킬 수 있다.[1]

하지만, 광섬유형 광전류센서의 문제점으로는 광섬유를 이용한 센서헤드 구성으로 두 개의 수직한 선형편광에 대해서 위상차가 생기는 선형복굴절이 발생하여 센서의 선형성, 민감도 및 출력에 영향을 미치게 된다.

광섬유의 선형복굴절을 보상하는 방법으로는 광섬유를 비틀거나 스펀 광섬유(Spun High-birefringence Fiber)를 사용하는 방법, 광섬유 끝단에 페러데이 미러(Mirror)를 장착하여 반사를 이용한 보상방법, 광섬유를 센서부에 감은 상태에서 어닐링(Fiber Annealing)하는 방법, 센서부의 형태를 수직으로 배치하여 선형복굴절을 상쇄하는 방법 등이 있다.[2]~[5]

이에 본 연구에서는 선형복굴절 보상을 위해 고가의 장비가 필요 없는 수직원형틀을 이용한 보상방법의 단점을 개선하여 1 Cross 수직원형틀을 제시하였고, 기존의 페루프형 원형틀과 수직원형틀, 1 Cross 수직원형틀의 편광도를 비교하였다.

2. 관련이론

2.1 페러데이 효과

광을 이용한 전류의 측정은 광신호가 자성체 매질의 내부를 진행하는 경우 자기장의 영향에 의하여 편광(Polarization)의 축이 회전하는 현상인 페러데이 효과(Faraday Effect)를 이용한다. 선형편광(Linear

Polarization)된 광신호가 Faraday소자를 통과할 때 편광의 진동축은 자기장의 세기만큼 회전하게 된다. 광섬유를 Faraday소자로 사용하여 도체 주위에 페루프형 원형틀 센서헤드를 구성할 경우 암페르의 전류법칙(Ampere's Circuit Law)에 의해 코일의 형태, 센서코일과 도체와의 거리 등에 무관하게 일정한 값을 가지고 측정도체 이외의 인근 신호원에 영향을 받지 않는 식(1)를 얻을 수 있다. 이와 같은 구성에서 회전각 Φ_F는 인가전류 및 광섬유의 감은 회수에 비례하게 된다.[1]

$$\Phi_F = Vn\oint H \cdot dl = VnI \qquad (1)$$

여기서, V : Verdet constant, n : 광섬유를 감은 횟수, I : 인가전류

2.2 선형복굴절 측정방법

광섬유에 내재되어 있는 선형복굴절을 계산하기 위해서 광섬유를 하나의 위상 지연기(Linear Retarder)라고 생각할 수 있다. 위상지연기의 리타데이션 δ (Retardation)을 측정하게 된다면 광섬유의 선형복굴절을 알 수 있을 것이다.

입사 전기장 요소($E_x E_y$)는 위상 지연기에 의해 ($E'_x E'_y$)로 나타난다. 그 관계를 존스행렬(Jones Matrix)로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} E'_x \\ E'_y \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \exp(j\delta/2) & 0 \\ 0 & \exp(-j\delta/2) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} \qquad (2)$$

만약, 위상지연기에 진폭이 $E_0\exp(jwt)$인 선형 편광으로 입사하고, 검광기(Analyzer)가 $x-y$좌표축에 대해 θ_1의 각도로 위치해 있다면, 출력광은 원래의 좌표계에 대해서 θ_1만큼 회전된 좌표계에서의 값이 되며, 이것을 E_{out}이라고 정의하였다. 편광기에 의해서 선형 편광된 광이 광섬유와 검광기를 통과한 광은 식(3)과 같이 존스행렬로 나타낼 수 있다.

$$E_{out} = \begin{pmatrix} E_X \\ E_Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_1 & \sin\theta_1 \\ -\sin\theta_1 & \cos\theta_1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \exp(j\delta/2) & 0 \\ 0 & \exp(-j\delta/2) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_0 \\ \sin\theta_0 \end{pmatrix} E_0\exp(jwt) \qquad (3)$$

광섬유를 통과한 광의 편광 상태Γ는

$$\Gamma = \frac{(|E_X|^2 - |E_Y|^2)}{(|E_X|^2 + |E_Y|^2)} = \cos 2\theta_1 \cos 2\theta_0 + \sin 2\theta_1 \sin 2\theta_0 \cos\delta \qquad (4)$$

로 나타낼 수 있으며, θ_0는 입사 편광의 각도이다. 식(4)에서 θ_0와 θ_1에 대한 관계를 알아보면. 입사광의 θ_0를 고정하고 θ_1의 변화에 대한 Γ값에서, $\partial\Gamma/\partial\theta_1 = 0$의 조건으로부터 식(4)가

$$\tan 2\theta_1 = \tan 2\theta_0 \cos\delta \qquad (5)$$

의 관계를 만족할 경우, Γ는 최대값을 갖는다. 이때의 최대값을 P라고 놓으면 다음과 같다.

$$P = (\cos^2 2\theta_0 + \sin^2 2\theta_0 \cos^2\delta)^{1/2} \qquad (6)$$

P의 최대값, 최소값은 다음 조건으로부터 주어진다.[6]

$$MAX: P = 1 \text{ for } \theta_0 = m(\pi/2),\ m = integer$$
$$MIN: P = |\cos\delta| \text{ for } \theta_0 = (2m+1)(\pi/4) \qquad (7)$$

여기서, 입사되는 광의 θ_0이 고정된 상태에서 검광기의 회전을 통해 측정된 광량 중 최대값과 최소값을 식(4)에 대입하여 Γ의 최대값 즉, P를 구할 수 있다. 이를 반복하여 θ_0를 0°부터 90° 까지 회전시켜가면서 구한 P값 중에서 P의 최소값은 식(7)에 따라 구하고자하는 리타데이션 δ이 된다.

2.3 센서 형태에 따른 선형복굴절 보상

수직 원형틀 센서헤드로 선형복굴절을 보상하는 방법은 그림 1에서와 같이 수직하는 원형틀에 광섬유를 한 바퀴씩 번갈아 감아 선형복굴절의 영향을 최소화하는 방법이다.

이 방법의 선형복굴절 보상원리는 다음과 같다. 원형으로 구부린 광섬유를 하나의 파장판(Waveplate)으로 가정한다면, 수직으로 배치된 원형틀은 두 개의 파장판으로 생각할 수 있다. 이 두 개의 파장판은 수직으로 배치되어 있기 때문에 빠른 축과 느린 축이 서로 뒤바뀐 상황이 된다. 두 개의 수직한 원형틀에 감긴 광섬유에 입사된 편광은 빠른 축과 느린 축을 한번 씩 겪게 되므로 선형복굴절은 발생하지 않아 광섬유를 구부림으로 인한 선형복굴절 영향을 상쇄시킬 수 있다.

그러나 수직원형틀에 번갈아 광섬유를 다수 감을 경우 교차하는 부분에서 형태를 규칙적으로 유지하기 힘들고, 그 부분에서 광섬유에 가해지는 스트레스를 무시할 수가 없다.

그리하여, 본 연구에서는 그림 1의 세 가지 광섬유 감는 방법에 따른 각 센서헤드의 특성을 비교하였다.

세 가지 방법은 ① 일반적인 페루프형 원형틀에 광섬유를 감는 방법, ② 수직하는 두 원형틀에 교차하여 감는 수직원형틀 방법, ③ 본 연구에서 고안한 한 틀에 먼저 다수를 감은 후 수직한 다른 원형틀에 같은 수를 감아 광섬유를 진행하는 빛의 방향은 앞의 수직원형틀 방법과 동일하게 하되 교차하는 부분을 한 번만 겪게 하는 1 Cross 수직원형틀 방법이 있다.

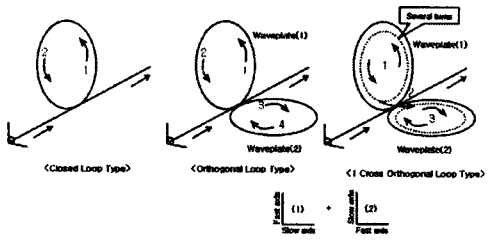

그림 2. 세 가지 센서헤드 개념도

3. 실험장치 및 방법

각 센서헤드별 선형복굴절 측정 실험 장치는 그림 2에서와 같이 나타낼 수 있다. 1310[nm], 25[mw]의 레이저 다이오드(Laser-Diode)를 광원으로 이용하였다. 센서헤드에는 단일모드 광섬유(9/125[μm])를 이용하여 페루프형 원형틀 센서헤드에는 20회, 수직원형틀, 1 Cross 수직원형틀에는 각 수직원형링 하나당에 10회씩의 광섬유 감아 구성하였다.

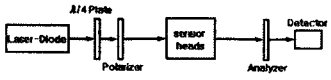

그림 3. 선형복굴절 측정 개략도

디텍터(Detector)는 빠른 응답속도(~0.2[ns])를 가진 PIN Photo-Diode(Newport사, 818-SL)를 Optical Power Meter(Newport사, 1830-C)에 연결하여 구성하였다. 각 센서헤드별 선형복굴절 측정 방법은 각 센서헤드를 장착 후 광섬유에 입사되는 편광기의 각도를 고정하고, 검광기의 각도를 회전시키면서 측정한 값 중에서 최대값과 최소값을 식(4)에 대입하여 편광상태를 계산하였다.

4. 실험결과 및 고찰

그림 1의 3가지 센서타입을 그림 2의 센서헤드부분에 장착하고 각각의 선형복굴절 측정 하였다. 입사되는 편광기의 각도θ_0는 고정하고, 검광기의 각도를 회전시키면서 측정한 값 중에서 최대값과 최소값을 식(4)에 대입하여 편광상태를 계산하였다. 이를 반복하여 θ_0를 0°부터 90° 까지 10°씩 증가하여 회전시켜가면서 실험하였다. 계산된 편광상태는 45°에서 최소값을 가진다. 이 때 편광상태의 최소값(45°)을 식(6),(7)를 이용하여 리타데이션 δ을 추정할 수 있다.

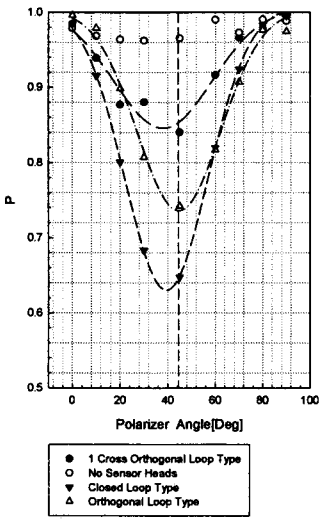

그림 4. 각 센서별 선형 복굴절 비교 그래프

먼저, 그림 3의 그래프에서 보여 주듯이 센서가 없을 경우에도 광섬유 내에 내재된 비등방성 구조로 15.1[deg]의 리타데이션이 존재하는 것을 보여준다. 그리고 페루프형 원형틀인 경우 49.6[deg], 1 Cross 수직원형틀인 경우는 32.8[deg], 수직원형틀일 때는 42.0[deg]로 측정되었다. 이것은 센서구성 시 발생하는 리타데이션에 광섬유내의 내재된 리타데이션을 포함한 것이다. 이러한 결과는 수직원형틀 센서헤드는 일반적인 원통형 모양을 가진 페루프형 원형틀보다 리타데이션이 감소하여 편광도가 증가하였지만, 1 Cross 수직원형틀보다는 낮은 편광도를 보인다.

이것은 번갈아 감는 과정에서 한 번의 교차점을 가진 1 Cross 수직원형틀 보다는 수직원형틀이 다 수의 교차점을 겪게 되어 광섬유의 스트레스 발생하는 것으로 생각된다.

5. 결 론

본 연구에서는 선형복굴절 보상을 위한 수직원형틀 센서헤드 보상방법의 단점을 개선하여 1 Cross 수직원형틀을 제시하였고, 기존의 페루프형 원형틀과 수직원형틀, 1 Cross 수직원형틀의 편광도와 출력특성을 비교하였다.

그 결과 3가지 센서헤드의 편광도를 비교하였을 때 1 Cross 수직원형틀이 가장 높은 편광도를 보였으며, 기존의 페루프형 원형틀에서 선형복굴절 보상을 위해 수직원형틀로 교체할 경우 15.3%의 리타데이션 감소 효과를 보였고, 1 Cross 수직원형틀로 교체할 경우 33.8%의 리타데이션 감소를 보였다.

이것은 수직원형틀에 광섬유를 두 수직원형링을 번갈아 가면서 감을 때 교차점에서 광섬유에 스트레스를 주는 요인이 작용한 것으로 생각된다.

그러므로, 1 Cross 수직원형틀을 광전류센서 적용할 경우 기존의 경우보다 안정된 편광특성으로 높은 출력과 안정된 오차율이 기대된다. 이에 고신뢰성 광전류 센서 개발 가능성을 높게 할 것이다.

이 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

[1] G. D'Antona, M. Lazzaroni, R. Ottoboni, C. Svelto," AC current-to-voltage transducer for industrial application", IMTC '03. Proceedings of the 20th IEEE, Vol.2, 20-22, May 2003

[2] R. Ulrich and A. Simon, "Polarization optics of twisted single-mode fibers", Appl. opt, vol. 18, No. 13, pp. 2241-2251, 1979.

[3] D. Tang, A. H. Rose, G. W. Day, and S. M. Etzel, "Annealing of linear birefringence in single-mode fiber coils: application to optical fiber current sensors", J. Lightwave Technol.,vol. 9, no. 8, pp.1031-1037, 1991.

[4] N. C. Pistoni and M. Martinelli, "Polarization noise suppression in retracing optical fiber circuits", Opt. Lett., vol. 16, no.10, pp. 711-713, 1991.

[5] A. Papp and H. Harms, "Magnetooptical current transformer 2 :Components", Appl. Opt., vol. 19, no. 22, pp. 3729, 1980.

[6] A. M. Smith, "Polarization and magnetooptic properties of single-mode optical fiber", Appl. Opt.,vol. 17, No.1, 1978