

편광회전 반사간섭계를 이용한 광전류센서

장지향 · 추우성 · 김 훈 · 서준규 · 김경조 · 김준휘 · 오민철[†]

부산대학교 전자공학과
☎ 609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지

(2010년 5월 3일 받음, 2010년 7월 21일 수정본 받음, 2010년 7월 22일 게재 확정)

폴리머 광도파로를 기반으로 제작된 편광유지 3-dB 방향성 광분배기, 편광기, 위상 변조기 등의 광부품들을 이용하여 편광 회전 반사 간섭계형 광섬유 전류 센서를 제작하였다. 광섬유 전류센서를 위해 필요한 상기 광부품들을 개별적으로 설계 및 제작하여 특성을 확인하였으며, 전류 측정을 위해 사용되는 광섬유 센서 코일에서 발생하는 스트레인에 의한 복굴절을 제거하기 위하여 850°C의 온도에서 24시간 동안 열처리를 실시하였다. 완성된 반사 간섭계형 광섬유 전류 센서를 이용하여 전선에 흐르는 전류의 크기를 측정하는 실험을 수행하였으며 전류의 양에 비례하는 안정적인 응답 특성을 확인하였다.

Optical Current Sensors Based on Polarization Rotated Reflection Interferometry

Ji-Hyang Jang, Woo-Sung Chu, Hoon Kim, Jun-Kyu Seo, Kyung-Jo Kim,
Jun-Whee Kim, and Min-Cheol Oh

*School of Electrical Engineering, Pusan National University,
30 Jangjeon-dong, Geumjeong-gu, Pusan (Busan) 609-735, Korea*

(Received May 3, 2010; Revised manuscript July 21, 2010; Accepted July 22, 2010)

Fiber optic current sensors based on polarization-rotated reflection interferometry are demonstrated by incorporating them into polymeric optical waveguide components, including polarization-maintaining 3-dB couplers, TE-pass waveguide polarizers, and thermo-optic phase modulators. To remove the bending induced birefringence, optical fiber coil is annealed at 850°C for 24 hours. The reflection interferometry comprising polymer waveguide devices exhibit a highly stable output signal corresponding to the flowing current.

Keywords: Current sensors, Polymer waveguide, Optical sensors, Optical waveguides

OCIS codes: (230.7370) Waveguides; (250.5460) Polymer waveguides-fibers; (060.2370) Fiber optics sensors; (230.2240) Faraday effect

I. 서 론

전류 측정을 위하여 널리 사용되고 있는 전자기식 전류측정기(current transformer, CT)는 철심코어 주위에 전선을 감아서 1차 권선에 흐르는 전류로 인해 발생하는 자기장으로 인해 2차 권선에 유도전류를 발생시켜서 그 크기를 측정하는 방식이다. 하지만 이 방식을 이용하여 대전류를 측정할 때에는 누설전류나 자기포화 현상이 발생하여 측정의 정확성이 떨어진다. Hall 효과를 이용하여 전류에 비례하는 자기장을 검출하는 CT도 널리 사용되고 있으나 주변 자기장의 영향으로 인해 측정신호의 정확도가 떨어지는 문제점을 지

니고 있으며 순간적으로 급격히 변화하는 전류를 감지하기에는 응답속도가 부족한 단점도 지니고 있다. 이러한 전자기식 CT 나 Hall 센서의 성능을 뛰어넘기 위하여 실리카 광섬유의 Faraday 효과를 이용한 광섬유 전류 센서의 연구가 시작되었다^[1,2]. 광섬유 전류 센서는 본질적으로 그것을 이루는 구성요소가 부도체이므로 자연적인 절연특성을 가지며 광센서의 특성상 외부 전자기파의 영향을 받지 않으므로 대전류 고정밀 측정용으로 사용하기에 적합하다. 광섬유 전류 센서는 크기가 작고 무게가 가벼우며 높은 민감도와 정밀도를 지니고 있으며 신호 응답속도가 매우 빠르다. 또한 광섬유 전류 센서는 측정해야 할 전류 신호원과 무관한 광을 이용하여

[†]E-mail: mincheoloh@pusan.ac.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

전류를 측정하게 되므로 전력차단 없이도 설치가 가능하고 독립적인 센서회로를 가지는 장점도 있다.

기본적인 구조의 광섬유 전류 센서는 실리카 광섬유를 전선의 주변에 감아서 전류로 인해 발생하는 자기장의 방향을 따라 빛이 진행하도록 만들어 준 뒤 자기장의 세기에 비례하여 나타나는 광섬유의 원형복굴절 (circular birefringence)로 인하여 발생하는 도파광의 편광변화를 정밀하게 측정하는 구조이다. 하지만 이러한 기본 구성 형태의 광섬유 전류 센서는 단일모드광섬유를 통하여 광섬유 센서까지 신호를 전달하는 과정에서 발생할 수 있는 광신호의 위상, 편광 안정성을 보장할 수 없다는 치명적인 문제점을 지니고 있으며 광섬유 전류 센서의 응용범위를 매우 좁게 한정시키는 단점을 지닌다.

주변 환경 변화에 따른 영향을 받지 않고 안정적으로 동작하는 광섬유 전류 센서는 편광유지광섬유를 이용한 반사형 간섭계 구조를 이용하여 구현 가능하다^{3,4)}. 캐나다의 NxtPhase사에서 개발한 광섬유 전류 센서는 안정적인 동작을 보장하며 캐나다 전역의 송배전 시설에 포설하고 있다⁵⁾. 일본에서도 Power Supply Systems사에서 안정적으로 동작하는 광섬유 전류 센서를 개발하여 신칸센 철도망의 crossover switch에서 발생하는 과도전류를 측정하기 위한 목적으로 채용을 하였다⁶⁾. 다국적 전력산업업체인 ABB사는 반사형 간섭계 구조를 이용하여 구현한 광섬유 전류 센서를 제품으로 개발하였다^{7,8)}. 그러나 안정적인 특성에도 불구하고 광섬유 광분배기, 광섬유 편광기, 위상 변조기, 광섬유 위상 지연기 등의 다양한 광부품을 필요로 하게 됨으로써 센서의 가격을 인상시키고 적용 범위를 한정 짓게 하는 단점이 있다. 또한 위상 변조기의 경우 광원에서부터 광섬유 코일에 입사하는 빛과 반사되어 돌아오는 빛의 위상을 서로 다르게 변조시킬 수 있어야 하며 이를 위하여 긴 길이의 광섬유 지연선을 사용하고 고속의 위상 변조기를 이용해야 한다. 이러한 위상 변조방식을 non-reciprocal phase modulation (NRPM) 이라고 하는데, 고속 위상 변조가 필수적이므로 고가의 리튬나이오베이트 (LiNbO3) 전기광학 위상 변조기나 고속 piezo-electric 위상 변조기를 사용해야만 한다.

본 논문에서는 편광 회전 반사 간섭계형 광섬유 전류 센서에 필요한 다양한 광부품들을 폴리머 광도파로형 소자를 이용하여 제작하였고 이들을 광섬유 코일과 함께 연결하여 광섬유 전류 센서를 완성하였다. 또한 NRPM 이 필요 없는 광섬유 전류 센서의 구조를 제안하고, 폴리머 열광학 위상 변조기를 이용하여 센서 동작점을 제어할 수 있도록 하였다. 이와 같은 광도파로 소자들은 궁극적으로 하나의 칩 상에 집적화시켜서 제작이 가능하며 고성능 저가격 광섬유 전류 센서의 실현을 가능하게 할 것이다.

II. 편광 회전 반사 간섭계형 광섬유 전류 센서의 동작 원리

본 논문에서 제안하는 편광 회전 반사 간섭계형 광섬유 전

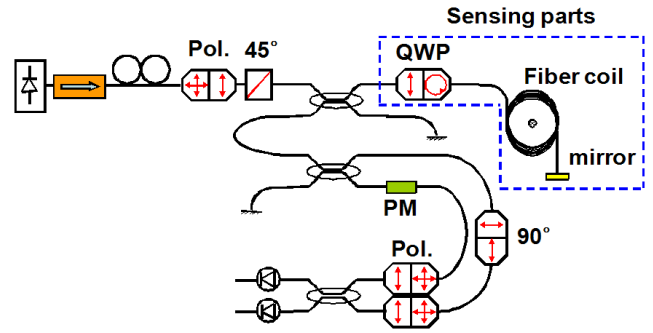


FIG. 1. Structure of the optical current sensors based on polarization rotated reflection interferometry consisting of light source, sensing part, and polarization analyzer part.

류 센서의 구조는 그림 1과 같다. 광원에서 나오는 입력광을 편광조절기와 편광기를 이용하여 선편광으로 만들어 준 후, 편광유지광섬유의 광축에 45°로 입사시켜 편광유지광섬유의 fast 축과 slow 축 방향으로 편광되어 진행되는 빛이 각각 동일한 크기만큼 존재하게 한다. 이 빛은 코일의 바로 앞에 연결된 $\lambda/4$ 파장판 (quarter wave plate: QWP) 에 의해서 좌원편광된 빛과 우원편광된 빛으로 변환되어 광섬유센서코일을 따라 진행하게 된다. 이 때 전선에 전류가 흐르게 되면 Faraday 효과에 의해서 좌원편광과 우원편광 간에 복굴절이 발생하게 되며 두 빛의 위상 차이를 일으키게 된다. 이후 코일의 끝부분에 위치한 미러에 의해 반사된 빛은 좌원편광과 우원편광이 서로 뒤바뀌게 되며 광파의 진행방향이 바뀌어서 전류로 인한 자계의 방향과 역방향이 됨으로써 두 개의 원편광이 겪게 되는 위상 차이는 입사할 때와 동일한 크기만큼 커지게 된다. 광섬유 센서 코일을 빠져 나온 빛은 QWP에 의해 각각의 선편광된 빛으로 변환되어 편광 유지 광섬유의 fast, slow축 방향의 편광상태를 가지면서 되돌아오게 된다. 이렇게 반사되어 돌아온 두 개의 선편광 상태를 가진 빛은 첫 번째 3-dB 방향성 광분배기에서 출력부로 분기를 시키고 두 번째 3-dB 방향성 광분배기에서 반반씩 나뉘어진다. 나뉘어진 빛 중 상부 광섬유를 따라 진행하는 빛은 90° 틀어져서 연결된 편광유지광섬유를 통과하여 편광상태가 서로 뒤바뀌게 되며, 다음 단계에 연결된 TE-pass 편광기를 거치게 되면 코일에서 반사되어 돌아온 편광 중에서 fast 축에 평행한 편광 성분만 살아남게 된다. 두 번째 3-dB 방향성 광분배기에서 나뉘어져서 아래쪽 광섬유를 따라 진행하는 빛은 위상 변조기를 지나게 되며 편광기를 통과하면서 slow 축에 평행한 편광 성분만 남게 된다. 이로 인해 세 번째 3-dB 방향성 광분배기에서 만나서 간섭을 일으키는 빛은 광섬유센서코일에서 반사된 slow 축 성분과 fast 축 성분이 되며, 두 성분 간의 위상 차이가 존재하게 되면 간섭에 의해 광파위의 변화를 일으키게 된다. 이 때 위상 변조기는 두 편광 성분이 갖게 되는 초기 위상 차이를 보상하고 출력신호 응답 특성이 최대가 되는 동작점을 잡기 위해서 이용된다.

광원에서 입력된 빛은 PM 광섬유를 거쳐 광섬유 코일의 전단부에 위치한 QWP를 가장 먼저 통과하게 된다. QWP의

Jones matrix 형태는 다음과 같이 주어진다.

$$M_{QWP} = R(45^\circ) \cdot \begin{pmatrix} e^{i(\pi/4)} & 0 \\ 0 & e^{-i(\pi/4)} \end{pmatrix} \cdot R(-45^\circ) = \begin{pmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

센서코일에 자기장이 영향을 미치게 되면 Faraday rotation 이 일어나서 편광 성분이 회전을 겪게 되는데 이는 다음과 같은 편광 회전 행렬로 표현된다.

$$M_{FR} = R(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (2)$$

이후 광섬유 코일의 후미에 부착된 반사거울에서 반사되어 반대로 진행하게 된 빛은 다시 한번 Faraday rotation을 겪게 되는데 거울에 의해 회전 방향이 뒤집힌 원편광 성분은 진행 방향이 뒤집어 짐으로 인해 결론적으로 입사할 때와 동일한 방향의 편광회전을 겪게 된다. 이와 같이 편광 회전된 빛은 다시금 QWP를 지나게 되는데 이 때 광축의 방향은 입사할 때와는 반대가 되며 이를 표현하기 위한 Jones matrix는

$$M'_{QWP} = \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

으로 나타내진다. 이와 같은 과정을 거치면서 센서 코일을 통과한 뒤 반사되어 되돌아온 파동 E_1 의 편광 상태는 입력파 동 E_0 와 다음과 같은 관계를 가지게 된다.

$$E_1 = \begin{pmatrix} E_{1x} \\ E_{1y} \end{pmatrix} = M'_{QWP} \cdot M_{FR} \cdot M_m \cdot M_{FR} \cdot M_{QWP} \cdot \begin{pmatrix} E_{0x} \\ E_{0y} \end{pmatrix} \quad (4)$$

자계에 의해 위상 변조된 광은 다양한 편광제어 부품으로 구성된 위상 검출부에 도달하게 되며, 두 방향으로 나누어진 빛은 각각 서로 다른 광부품을 지나게 된다. 두 가지 경로를 거쳐 나온 빛의 전계를 각각 E_2, E_3 라고 정의하면 다음과 같은 Jones matrix로 표현된다.

$$E_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} M_{Pol} \cdot M_{PM} \cdot E_1 \quad (5)$$

$$E_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} M_{Pol} \cdot M_{HWP} \cdot E_1 \quad (6)$$

PM광섬유를 90도 돌려서 연결한 형태의 편광변환기의 Jones matrix는 half-wave plate의 Jones matrix, M_{HWP} 와 동일하며 열광학 위상변조기와 편광기에 대한 Jones matrix, M_{PM}, M_{Pol} 에 대한 정의는 다음과 같다.

$$M_{HWP} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$M_{PM} = \begin{pmatrix} e^{i\phi} & 0 \\ 0 & e^{i\phi} \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$M_{Pol} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

마지막으로 E_2, E_3 파동이 최종적인 3-dB coupler에서 서로 만나서 간섭을 일으키게 되며 방향성 결합기에서 crossover state로 넘어가는 파동의 위상 변화 90도를 반영하여 두 파동을 더하여 주면 최종적인 광출력 E_4 를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$E_4 = \frac{1}{\sqrt{2}} (E_2 \pm iE_3) \quad (10)$$

III. 광섬유 전류 센서 구성을 위한 광부품 설계 및 제작

편광 회전 반사 간섭계형 광섬유 전류 센서에 필요한 3-dB 방향성 광분배기, 편광기, 위상 변조기를 설계하고 폴리머 광도파로를 이용하여 각 소자를 제작하였다. 폴리머 광도파로 소자의 코어층과 클래드층은 굴절률이 각각 1.440과 1.430인 ZPU series (ChemOptics)를 이용하여 제작하였다. 제작된 폴리머 광도파로 소자는 polishing 과정과 편광유지광섬유 pigtail 과정을 거쳐 광섬유 전류 센서에 적용이 가능한 형태로 완성하였다.

3.1. 폴리머 광도파로형 편광유지 3-dB 방향성 광분배기

방향성 광분배기의 경우 커플링 되는 직선 광도파로의 길이와 광도파로의 폭에 의해 광파워 분기가 다르게 나타난다. 3-dB 광 파워 분기를 정확하게 설계하기 위하여 2차원 Beam Propagation Method (BPM) 시뮬레이션을 이용하였다. 시뮬레이션은 코어층의 굴절률을 1.4364, 클래드층의 굴절률을 1.4314로 두고 6 μm 너비의 광도파로 조건에서 실시하였고, 커플링되는 직선 광도파로의 길이를 0 μm 에서 5400 μm 로 변화시켜 광 파워의 분기를 살펴보았으며 직선 광도파로의 길이가 1200 μm 일 때와 4800 μm 일 때 3-dB 광 파워 분기를 얻을 수 있었다. 여기서 광도파로 사이의 간격은 방향성 결합기의 결합 길이를 결정짓게 되며 간격이 멀어지면 결합 길이는 급격히 늘어나게 된다. 반대로 간격이 너무 좁아지게 되면 제작 공정상의 작은 오차로 인해 특성 변화가 심하게 발생하게 된다. 이러한 점을 고려하여 본 연구에서는 6 μm 간격을 가지는 방향성 결합기를 설계하게 되었다.

폴리머 3-dB 방향성 광분배기의 구조를 그림 2에 나타내

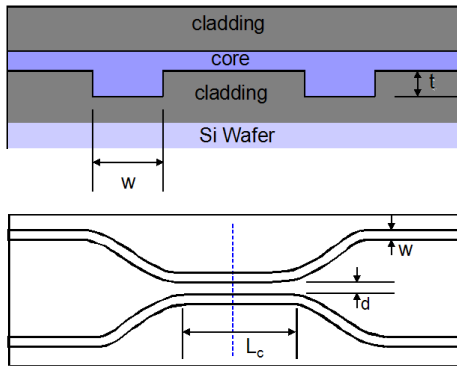


FIG. 2. Schematic diagram of polarization maintaining 3-dB directional couplers based on polymer waveguide.

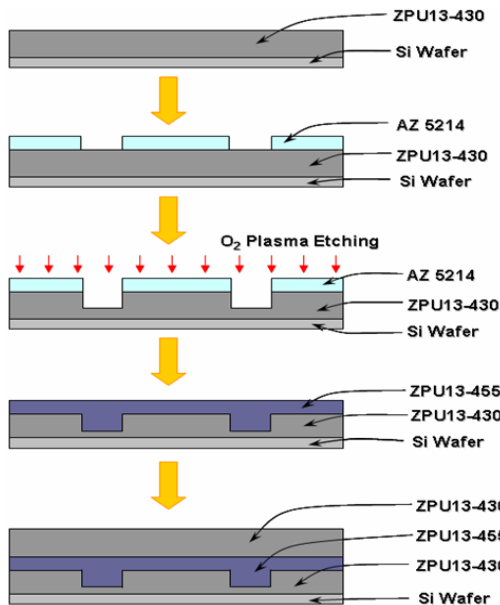


FIG. 3. Schematic fabrication procedures for the polymeric 3-dB directional couplers.

었다. 광도파로는 inverted rib 구조로 설계 하였으며, 코어층과 클래드층의 굴절률 차이가 크므로 단일모드 조건을 유지하기 위해서 oversized rib 형태를 도입하였다. 그림 3은 폴리머 3-dB 방향성 광분배기 제작 공정 과정을 나타낸 것이다. Si wafer 상에 ZPU 폴리머를 스핀 코팅한 후 UV를 조사하여 클래드층과 코어층을 형성한다. 광도파로는 AZ5214 포토레지스트를 이용한 포토리소그라피 공정 후 O₂ plasma 식각을 통하여 너비와 두께를 각각 $w = 6 \mu\text{m}$, $t = 3.3 \mu\text{m}$ 로, 두 광도파로 사이의 거리를 $d = 6 \mu\text{m}$ 로 가지는 inverted rib 구조를 제작하였다. 그림 4는 1550 nm의 파장을 가지는 광원을 사용하여 직선 광도파로의 길이에 따른 분기되는 빛의 양을 광파워미터기로 측정하고 BPM 시뮬레이션 값과 비교한 그래프이다. 광도파로의 길이가 1200 μm 와 4800 μm 일 때 광 파워의 분기가 시뮬레이션과 유사한 값인 52 : 48, 47 : 53으로 나타나는 것을 알 수 있었다. TE/TM 편광에 대하여 출력 광 파워의 변화가 0.3 dB 이하로 나타났다.

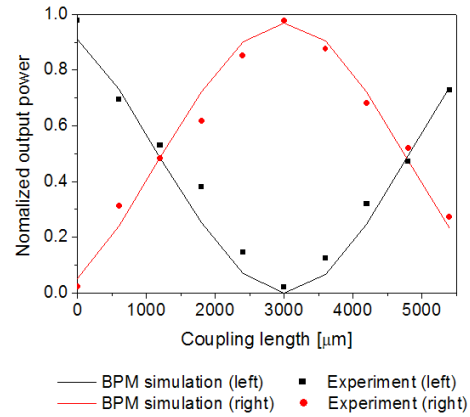


FIG. 4. Output power of the directional coupler as a function of the coupling length. The experimental results are compared to the BPM simulation results.

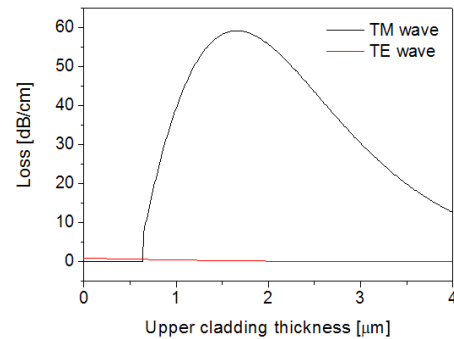


FIG. 5. Effective index calculation results of the guided mode loss propagating through the optical polarizer with a metal cladding layer for the surface Plasmon absorption of the TM mode.

3.2. 폴리머 광도파로형 편광기

폴리머 광도파로형 편광기는 상부 클래딩 위에 위치한 gold metal layer의 영향으로 도파광 중에서 TM mode의 propagation loss가 크게 일어나고 TE mode 광파의 경우 propagation loss가 거의 없는 특성을 이용한다. TM mode 광파의 loss가 큰 이유는 TM mode 광파의 evanescent field 성분이 금속 광도파로의 표면플라즈몬 모드와 결합되어 흡수되기 때문이다. Gold layer와 코어층 사이의 상부 클래딩의 두께가 너무 두꺼우면 TM mode 광파의 evanescent field와 표면플라즈몬 간의 결합 현상이 잘 일어날 수 없기 때문에 TM mode 광파의 loss가 충분히 크지 못하고, 너무 얇으면 TM mode 광파 뿐만 아니라 TE mode 광파 까지도 흡수가 커지는 문제점을 가진다. 따라서 상부 클래딩의 두께를 조절하여 편광기의 특성을 최적화시켜야 한다.

폴리머 광도파로 편광기는 유효굴절률법을 이용하여 설계하였다. 그림 5는 1550 nm 파장을 기준으로 상부 클래딩의 두께에 따른 TE mode 광파와 TM mode 광파의 loss 변화를 계산한 결과이다. 설계 결과를 바탕으로 상부 클래딩 두께가 다른 샘플을 제작하여 살펴본 결과 실험 결과에서는 상부 클래딩 두께가 2.3 μm 인 경우 가장 높은 편광소멸비를 얻을 수 있었다. 제작 공정은 폴리머 광도파로 3-dB 방향성 광분

배기와 동일하다. 폴리머 광도파로형 편광기는 그림 6와 같이 Au metal layer의 두께는 100 nm, 광도파로의 너비와 두께는 각각 $w = 6 \mu\text{m}$, $t = 3.3 \mu\text{m}$ 로 제작되었다. Au metal layer의 두께를 100 nm로 한 이유는 표면 플라즈몬이 금속 내부로 투과할 수 있는 깊이보다 충분히 두껍게 가져가기 위해서이다. TE/TM 편광간의 polarization extinction ratio는 약 18 dB 정도로 나타났다. 제작된 소자의 성능이 설계 결과에 미치지 못하는 이유는 제작공정의 오차 때문이다.

3.3. 폴리머 광도파로형 위상 변조기

폴리머 광도파로 위상 변조기는 폴리머 재료에 열을 인가하면 광학적 굴절률을 감소시킬 수 있는 열광학 효과 (thermo-optic effect)를 이용한다. 광도파로의 상부에 장착된 마이크로 히터에 전류를 인가하여 열을 발생시키면 폴리머 광도파로의 굴절률을 떨어뜨릴 수 있다. 폴리머 광도파로형 위상 변조기는 작은 인가전력으로도 2π 이상의 위상 변화를 인가할 수 있는 매우 효율적인 소자이다. 열광학 효과를 이용한 폴리머 광도파로형 위상 변조기에서 phase modulation 특성을 측정하기 위해 그림 7과 같은 Mach-Zehnder 구조의 광도파로를 제작하였다. 입사되는 빛은 광도파로의 두 개의 경로

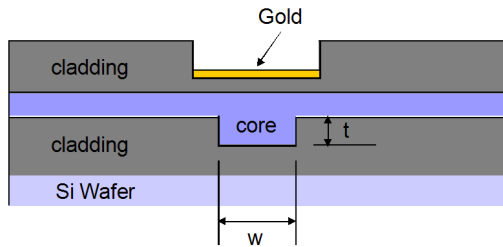


FIG. 6. Cross-sectional view of the polymeric waveguide polarizer with a metal cladding layer for the surface plasmon absorption of the TM mode.

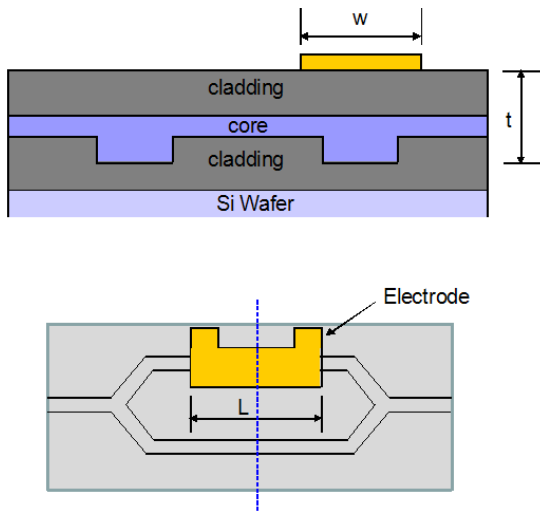


FIG. 7. Schematic diagram of the MZ modulator based on polymer waveguide with a thermo-optic phase modulator located on one arm covered with a micro heater.

로 분기되어 진행하게 되며, 두 개의 진행 경로 중 한쪽에 위치한 위상 변조기는 열광학 효과를 이용하여 광파의 위상을 조절하게 된다. 이후 출력부에서 다시 합쳐진 두 빛은 상대적인 위상 차이 값에 따라 보강, 상쇄 간섭을 일으키게 되어 출력 광세기를 변조시킬 수 있게 된다. 이 때 열광학 효과로 인한 위상 차이는 아래의 수식으로 표현이 가능하다.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \times \frac{\partial n}{\partial T} \times \Delta T_H \times L \tag{11}$$

여기서 $\partial n / \partial T$ 는 폴리머 물질의 열광학계수 (thermo-optic coefficient)를 나타내며 본 논문에서 사용한 ZPU 폴리머의 경우 $-1.8 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ 의 값을 가진다. 마이크로 히터의 온도변화는 아래 수식과 같이 히터의 너비와 길이에 의존한다^[9].

$$\Delta T_H = \frac{P_A \cdot t}{L \cdot w \cdot K_w \left(1 + 0.88 \frac{t}{w}\right)} \tag{12}$$

여기서 K_w 는 코어와 클래딩의 열 전도율 (thermal conductivity)을 나타내며, 본 설계에서 사용한 ZPU 폴리머의 열 전도율은 0.2 W/mK 이다. 히터의 너비와 길이를 각각 $w = 50 \mu\text{m}$ 와 $L = 5 \text{ mm}$ 로 설계하였고, 광도파로의 두께 t 는 $30 \mu\text{m}$ 로 설계하였다. 식 (11)에 의하면 $\Delta\phi = 2\pi$ 가 되는 온도는 3.44°C 이며, 이 때 필요한 heating power는 식 (12)에 의해 8.8 mW 가 된다.

광도파로의 제작은 폴리머 광도파로 3-dB 방향성 광분배기나 편광기의 경우와 마찬가지로 코어층과 클래드층을 ZPU 폴리머로 제작하였고, 최종적인 집적화가 가능하도록 동일한 구조의 inverted rip 광도파로를 이용하였다. 제작된 소자의 마이크로 히터 저항은 882Ω 으로 나타났으며 마이크로 히터의 양극에 silver paste를 이용하여 전선을 연결한 후 전류를 인가하였다. Phase modulation 특성의 측정을 위해 0.3 Hz의 삼각파 ($-5 \text{ V} \sim 5 \text{ V}$)를 마이크로 히터에 인가하였고, 그

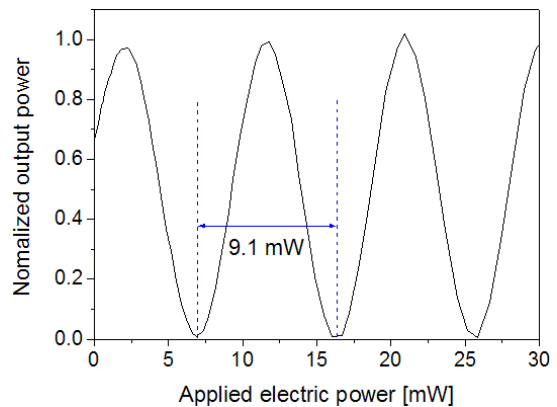


FIG. 8. Output optical intensity of thermo-optic MZ modulator as a function of applied electric power.

림 8과 같이 9 mW의 파워 변화에 대해 2π 위상 변화가 일어나는 것을 알 수 있었다. 이 때 on-off 상태의 광 파워비를 나타내는 extinction ratio는 20.6 dB가 되었으며 이로부터 Mach-Zehnder 간섭계의 Y-분기 광도파로의 uniformity가 1.9 dB 이하임을 알 수 있다. 설계에 따르면 2π 위상 변화를 일으키기 위해 필요한 heating power는 8.8 mW 이지만 제작된 소자의 경우 9.1 mW로 나타났다.

IV. 광섬유센서코일 및 QWP

광섬유센서코일은 단일모드 광섬유를 10회 감아서 제작하였고 850°C에서 열처리를 함으로써 단일모드 광섬유에 존재하는 임의의 복굴절을 제거하였다^[10]. 또한 복굴절이 제거된 감지광섬유의 끝에는 Cr/Au를 증착시킨 광섬유를 접합하여 미러를 형성하였고, 반대편 끝에는 QWP를 접합하여 센서부를 완성하였다.

QWP는 편광유지광섬유를 이용하여 제작 할 수 있다. 편광유지광섬유의 광 축을 기준으로 하여 광 축에 평행한 편광을 가지는 빛과 광 축에 수직한 편광을 가지는 빛이 편광유지광섬유를 진행하면서 겪게 되는 상대적인 위상 차이는 편광유지광섬유의 길이 L 과 편광유지광섬유의 복굴절에 의해 결정된다. 이 상대적인 위상 차이가 $\pi/2$ 가 되도록 하는 편광유지광섬유의 길이를 계산하여 그 길이만큼 단일모드 광섬유의 끝에 접합한 후, 접합된 편광유지광섬유의 축과 또 다른 편광유지광섬유의 축이 서로 45°를 이루도록 조절하여 접합시키면 QWP를 완성할 수 있다. 파장판의 특성은 선편광된 빛을 입력시켜 파장판을 통과한 빛의 편광상태를 측정함으로써 알 수 있다. 입력되는 빛이 선편광 일 때 QWP를 통과하여 출력되는 빛은 ellipticity가 1 인 원편광이 된다. 제작된 파장판은 접합된 편광유지광섬유의 길이가 1.22 mm 일 때 출력되는 빛의 ellipticity가 약 0.96으로 나타났다.

V. 전류 측정 실험

전류 측정을 위한 광원으로는 광통신에서 가장 범용적으로 많이 사용하는 1550 nm 파장의 Fabry-Perot Laser Diode (FP-LD)를 사용하였으며, 편광 조절기를 이용하여 Faraday 효과에 의한 위상 차이를 검출하기 적합한 초기 편광 상태를 조절하였다. 광섬유센서코일에 전선을 10번 통과시켜 비교적 낮은 전류의 측정이 가능한 실험 장치를 준비하였으며 전류의 크기에 따른 광신호를 광검출기로 측정하였다. 편광 회전 반사 간섭계형 광섬유 전류 센서에 사용된 편광기와 3-dB 방향성 광분배기, 위상 변조기는 제작된 폴리머 개별소자를 이용하였다. 그림 9는 개별 소자들을 사용하여 편광 회전 반사 간섭계형 광섬유 전류 센서를 구성한 것이다.

본 논문에서 제안하는 그림 1에 나타난 구조는 NRPM 이 필요 없는 편광 회전 반사 간섭계형 광섬유 전류 센서의 구조이다. ABB 사에서 제안된 구조는 2 개의 3-dB 방향성 광분배기를 사용한 반면 본 논문의 구조는 3 개의 3-dB 방향성

광분배기를 사용하여 NRPM을 사용하지 않고 일반적인 위상 변조기를 이용하여 동작점을 잡았다. 이 구조는 광섬유센서코일을 통과하면서 Faraday 효과에 의해 위상 차이를 겪은 두 빛을 tapping 하여 그 위상 차이를 MZ 간섭계 구조로 측정하게 된다. 마지막 3-dB 방향성 광분배기의 양단의 출력을 광검출기로 받아 차동 증폭하여 오실로스코프를 이용하여 신호를 측정하였다. 전류의 크기가 30 A 일 때 측정된 파형을 그림 10에 나타내었다. 이 때 파형의 Vp-p 값이 시간에 따라 서서히 변하는 현상이 목격되었으며 이는 광섬유를 통하여 구성된 MZ interferometry 에서 긴 광섬유를 지나가는 광파의 위상이 외부의 온도와 진동에 의해 영향을 받기 때문이다. 전선에 흐르는 전류의 크기를 변화시켜 가면서 최종 출력된 신호 파형의 Vp-p를 측정하여 그림 11에 나타내었다. 입력 전류가 0에서 40 A 까지 변하는 범위 내에서 출력 신호의 크기가 선형적으로 비례하여 나타남을 확인하였다.

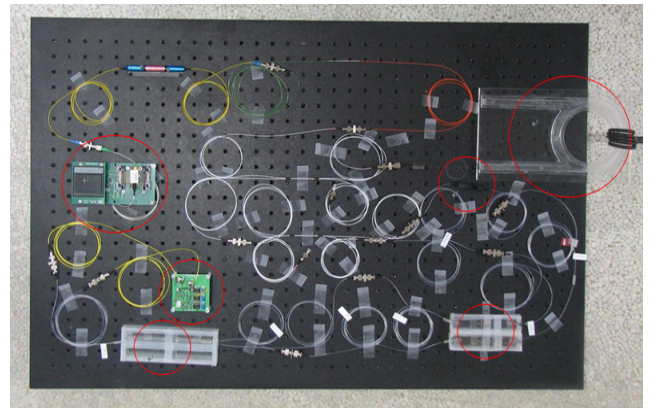


FIG. 9. Photograph of the optical current sensor based on polarization rotated reflection interferometry constructed by connecting the polymeric waveguide devices to along with the other optical components.

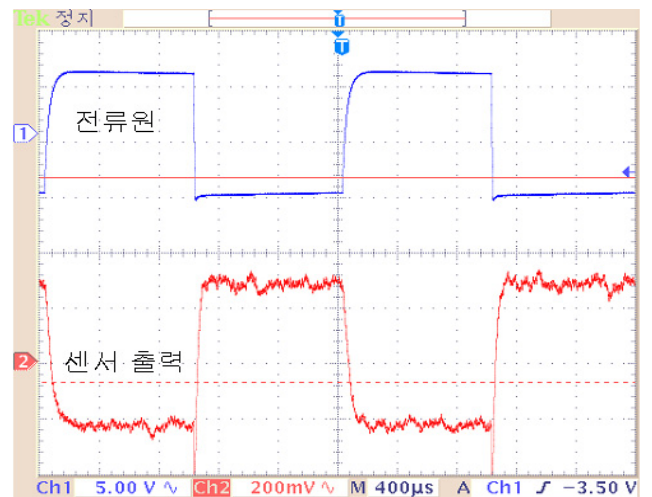


FIG. 10. Output waveform measured from current sensor after the differential amplifier for the input current with rectangular waveform of 500 Hz, 40 A.

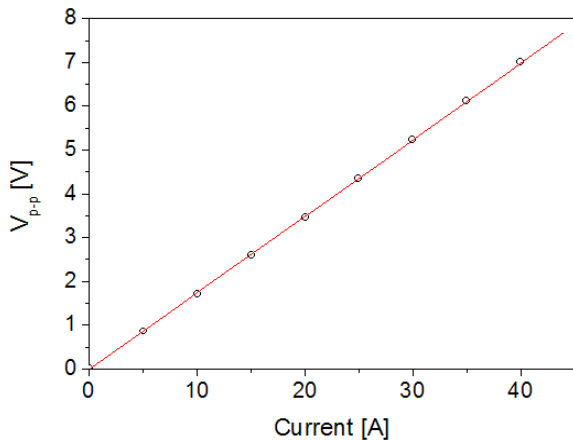


FIG. 11. Output response of the sensor, which is proportional to the electrical current up to 40 A, which is the limit imposed by the current source capacity.

VI. 결 론

폴리머 광도파로 소자를 적용한 광섬유 전류 센서의 동작을 검증하였다. 광섬유 전류 센서를 구성하는 폴리머 광도파로 소자들은 ZPU 폴리머를 이용하여 제작하였으며, polishing 과정과 편광유지광섬유 pigtail 과정을 거쳐 광섬유 전류 센서에 적용이 가능한 형태로 완성하였다. 본 연구에서 제안하는 편광 회전 반사 간섭계형 광섬유 전류 센서는 3 개의 3-dB 광결합기를 이용하여 고가의 리튬나이오베이트 (LiNbO₃) 전기광학 위상 변조기나 고속 piezo-electric 소자를 사용하지 않고 일반적인 위상 변조기를 이용하여 동작점을 제어할 수 있다. 열처리된 광섬유센서코일에 광섬유 미러와 QWP를 접합하여 광섬유센서코일을 완성하고, 40 A 정도의 구형파를 인가하여 전류에 따른 광신호를 측정하였으며 선형성이 우수한 센서특성을 확인하였다. 편광 회전 반사 간섭계형 광섬유 전류 센서는 향후 폴리머 광도파로 소자들을 하나의 광도파로 소자에 집적시키는 형태로 구현될 것이며 소형화된 고성

능의 저가격 광섬유 전류 센서 실현을 앞당기게 될 것이다.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

References

1. A. M. Smith, "Polarization and megneto-optic properties of single-mode optical fiber," *Appl. Opt.* **17**, 52-56 (1978).
2. A. Papp and H. Harms, "Magneto-optic current transformer. 1: principles," *Appl. Opt.* **19**, 3729-3734 (1980).
3. K. Bohnert, P. Gabus, J. Nehring, and H. Brandle, "Temperature and vibration insensitive fiber-optic current sensor," *IEEE J. Lightwave Technol.* **20**, 267-276 (2002).
4. Klaus Bohnert and Oberrohrdorf, "Fiber-optic current sensor," U.S. Patent 7,075,286 B2 (2006).
5. J. D. P. Hrabliuk, "Optical current sensors eliminate CT saturation," in *Proc. 2002 IEEE PES Winter Meeting* (New York, USA, Jan. 2002), pp. 1478-1481.
6. M. Hino, S. Hase, K. Ajiki, and M. Akagi, "Optical fiber current transformer applications on railway electric power supply systems," *QR of RTRI* **45**, 59-63 (2004).
7. K. Bohnert, P. Gabus, J. Nehring, H. Brandle, and M. G. Brunzel, "Fiber-optic current sensor for electrowinning of metals," *IEEE J. Lightwave Technol.* **25**, 3602-3609 (2007).
8. K. Bohnert, P. Gabus, J. Kostovic, and H. Brandle, "Optical fiber sensors for the electric power industry," *Optics and Lasers in Engineering* **43**, 511-526 (2005).
9. H. A. Schafft, "Thermal analysis of electromigration test structure," *IEEE Trans. Electron Dev.* **ED-34**, 664-672 (1987).
10. A. H. Rose, S. M. Etzel, and C. M. Wang, "Verdet constant dispersion in annealed optical fiber current sensors," *IEEE J. Lightwave Technol.* **15**, 803-807 (1997).