《연구논문》 Korean Journal of Optics and Photonics, Vol. 30, No. 6, December 2019, pp. 249-254
DOI: https://doi.org/10.3807/KJOP.2019.30.6.249
ISSN : 1225-6285(Print)
ISSN : 2287-321X(Online)

Improvement of Thermal Stability of Optical Current Sensors Based on Polymeric Optical Integrated Circuits for Quadrature Phase Interferometry

Kwon-Wook Chun, Sung-Moon Kim, Tae-Hyun Park, Eun-Su Lee, and Min-Cheol Oh†

Department of Electronics Engineering, Pusan National University, 2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea

(Received November 9, 2019; Revised November 16, 2019; Accepted November 21, 2019)

An optical current sensor device that measures electric current by the principle of the Faraday effect was designed and fabricated. The polarization-rotated reflection interferometer and the quadrature phase interferometer were introduced so as to improve the operational stability. Complex structures containing diverse optical components were integrated in a polymeric optical integrated circuit and manufactured in a small size. This structure allows sensing operation without extra bias feedback control, and reduces the phase change due to environmental temperature changes and vibration. However, the Verdet constant, which determines the Faraday effect, still exhibits an inherent temperature dependence. In this work, we tried to eliminate the residual temperature dependence of the optical current sensor based on polarization-rotated reflection interferometry. By varying the length of the fiber-optic wave plate, which is one of the optical components of the interferometer, we could compensate for the temperature dependence of the Verdet constant. The proposed optical current sensor exhibited measurement errors maintained within 0.2% over a temperature range, from 25°C to 85°C.

Keywords: Optical current sensor, Polymer waveguide, Photonic integrated circuit
OCIS codes: (250.5460) Polymer waveguides; (230.3120) Integrated optics devices; (280.4788) Optical sensing and sensors

사분파장 위상 간섭계 폴리머 광집적회로 기반 광전류센서의 온도 안정성 향상 연구

천권욱 · 김성문 · 박태현 · 이은수 · 오민철†

부산대학교 전자전기컴퓨터공학과
㉾ 46241 부산광역시 금정구 부산대학로63번길 2

(2019년 11월 9일 받음, 2019년 11월 16일 수정본 받음, 2019년 11월 21일 게재 확정)

광섬유가 지니는 패러데이 효과를 이용하여 전류의 세기를 측정하는 광전류 센서 소자를 설계 및 제작하였다. 센서 소자의 동작 안정성을 향상시키기 위하여 편광회전 반사 간섭계와 사분 파장 위상 간섭계 구조를 도입하였다. 이 복잡한 구조를 구성하는 다양한 광소자들은 하나의 폴리머 광집적회로로 구성하여 작은 크기로 제작되었다. 본 구조를 이용하면 외부에서 별도의 바이어스 피드백 제어가 필요 없는 상태에서 전류를 측정하는 센싱 동작을 수행할 수 있다. 또한 온도변화나 외부진동으로 인한 광센서 특성 변화를 제거하여 안정적인 특성을 유지하는 광전류센서를 구현할 수 있다. 그러나 패러데이 효과를 결정짓는 베르데 상수는 온도에 따라 미소한 값의 변화를 가지고 있다. 본 연구에서는 이 변화로 인한 광전류센서의 온도의존성을 극복하기 위한 연구를 수행하였다. 편광회전 반사 간섭계의 부품인 광섬유 사분 파장판의 길이를 최적값으로부터 벗어나는 상태로 맞추어 줌으로써 베르데 상수의 온도의존성에 의해 나타나는 광전류센서의 스케일 팩터 변화를 보상해줄 수 있었다. 온도변화를 보상한 광전류센서는 주변 온도를 상온에서 85°C로 올리는 동안, 센서 측정 신호의 온도 의존성이 0.2% 이내로 유지되는 것을 확인했다.

Keywords: 광전류센서, 폴리머 광소자, 광 집적 회로
OCIS codes: (250.5460) Polymer waveguides; (230.3120) Integrated optics devices; (280.4788) Optical sensing and sensors

†E-mail: mincheoloh@pusan.ac.kr, ORCID: 0000-0002-0849-2121
Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

I. 서 론

대규모 발전 및 배전 시스템에서 안정적인 전력 모니터링을 수행하기 위해서는 광섬유를 통해 전류 및 전압을 측정하는 광전류센서를 사용하는 것이 효과적이다[1,2]. 금속도체가 없이 절연체만으로 구성된 광전류센서는 써지 전류(surge current)로 인한 발열이나 폭발의 위험이 없으므로 전력시스템 운용상의 안정성을 향상시킨다[3]. 전류에 의해 발생된 자계(magnetic field)는 광섬유에 즉각적인 원형 복굴절을 유도하고, 광간섭계를 통하여 광파의 위상 변화를 측정하여 전류값을 얻게 된다[4]. 자계의 세기에 비례하여 굴절률 값이 변화하는 패러데이 효과(Faraday effect)는 광섬유에 원형 복굴절을 아주 미소하게 발생시키게 되며, 이러한 미소 변화를 검출하는 광전류 센서는 넓은 입력 전류의 세기 범위에 걸쳐서 포화현상 없이 선형적인 반응을 보이며 넓은 dynamic range를 지니게 된다[5]. 또한, 광신호는 외란으로 인가되는 전자기 간섭(electromagnetic interference, EMI)에 의한 영향을 받지 않기 때문에 고전력을 발생시키는 시설에서 잡음이 억제된 센싱 신호를 얻을 수 있다. 광전류센서는 기존의 전기식 전류센서 보다 작고 가볍기 때문에 설치에 용이하고 유지보수 비용이 적게 든다. 또한 광전류센서는 절연 물질로 제작되므로 가스 및 절연유가 필요하지 않다[6].

위와 같은 장점에도 불구하고 광전류센서는 고가의 광부품을 사용함으로 인해 제품의 가격이 전기식 전류센서에 비하여 높게 되고, 온도변화나 주변진동에 민감한 특성으로 인해 본격적으로 시장에 채용되고 있지는 못한 상황이다. 광전류센서의 동작 안정성을 향상시키기 위한 방법으로는 편광회전 반사 간섭계(polarization-rotated reflection interferometry, PRRI) 구조가 제안되었다[7]. 두 개의 직교한 편광성분을 이용하여 광섬유 코일에 인가되는 미소한 원형 복굴절을 측정하는 방법으로서 외란의 영향을 두 개의 편광이 왕복하는 경로를 통하여 서로 상쇄시키는 효과를 이용한다[8,9]. 그러나 PRRI형 광전류센서에서는 다양한 종류의 광부품을 필요로 하기 때문에 이들을 단일 기판상에 집적화시켜서 제작할 수 있는 광집적회로 기술을 본 연구실에서 제안하였다[10-12]. 여기에서 더 나아가 간섭계의 동작점을 4분파장 위치에 유지시켜 주기 위한 외부 피드백 제어 회로를 필요로 하지 않고 90° 위상차이를 가지는 두 개의 동작특성곡선을 이용하는 사분파장 위상 간섭계(quadrature phase interferometer)를 제안하였다[13,14].

사분파장 위상 간섭계 구조를 이용하여 외부 온도나 진동이 간섭계에 미치는 영향을 최소화할 수 있으나 여전히 실리카 광섬유 본연의 온도 의존성은 극복해야 할 과제로 남아 있다. 실리카 광섬유에서 패러데이 효과는 베르데 상수(Verdet constant)로 표현이 되는데 이 값은 미소한 온도 의존성을 가진다. 이로 인해 입력 전류에 비례하여 발생하는 광전류센서 출력신호의 비율을 나타내는 스케일 팩터(scale factor)가 변하게 된다. 이로 인한 온도 의존성을 극복하기 위한 방법으로 편광회전 반사 간섭계형 광전류센서의 부품 중 하나인 사분 파장판(quarter wave plate, QWP)의 길이를 미세하게 조절하여 베르데 상수의 온도의존성을 상쇄시킬 수 있다. 본 논문에서는 폴리머 광IC (photonic integrated circuit, PIC) 광전류센서 모듈이 지니고 있는 온도의존성을 확인하고 이를 극복하기 위한 기술을 연구하였다. 편광유지 광섬유가 지닌 복굴절을 이용하여 사분 파장판을 완성하는 기술을 개발하고, 비교적 복굴절이 작은 타원 코어 광섬유의 길이를 정밀하게 조절하여 전류센서 광섬유 코일이 지닌 온도 의존성을 보상하기 위한 실험을 수행하였다. 위상 지연 정도를 최적화한 편광유지 광섬유를 사용한 실험에서 동작온도를 85°C까지 올리더라도 광전류 센서의 스케일 팩터 오차가 0.2% 미만으로 유지됨을 확인하였다.

II. 광전류센서 구조 및 온도 의존성 보상을 위한 방법

본 연구에서 제안한 편광회전 반사 파동을 이용한 사분파장 위상 간섭계는 다양한 광부품들을 집적화시킨 광IC 부품과 광섬유 센싱 코일과 신호처리부로 구성된다. 그림 1에 보인 바와 같이 SLED 광원으로부터 TE 편광의 빛을 광IC에 입사시키면 광축이 22.5°만큼 틀어진 채로 광도파로에 끼워져 있는 이분 파장판(half-wave plate, HWP)을 통과하면서 TE, TM 편광이 반반씩 생성되고, 이후 3-dB 커플러를 통과한 후 광IC 출력부에 연결된 편광유지 광섬유에 장단축 방향의 편광성분으로 입사된다. 편광유지 광섬유는 센싱을 하기 위한 광섬유 코일로 연결이 되는데, 센싱 코일의 직전에 위치한 광섬유 QWP를 통과하면서 두 종류의 원편광 성분이 생성된다. 두 원편광은 센싱 광섬유 코일을 통과한 후 끝단에서 반사되어 돌아오게 되는데 이 과정에서 패러데이 효과로 인해 두 원편광 간의 위상 차이가 발생하게 된다. 이후 복귀 경로에서 광섬유 QWP는 반사된 빛을 원편광에서 다시 선편광으로 변환시킨다. 빛이 광집적회로로 다시 입력되면, 3-dB 커플러를 통과하여 아래쪽으로 진행하는 빛이 발생하게 되는데 이 빛은 Y-branch를 지난 후 나뉘어져서 각각 반파장판 HWP와 QWP를 거친 후에 광도파로 편광기를 지나서 PD_1, PD_2에 들어간다. 이 과정에서 두 개의 디텍터에서 검출되는 간섭신호는 $\lambda/4$만큼의 상대적인 위상 차이를 유지하게 되며, 광센서의 동작점이 변화하더라도 두 개의 간섭신

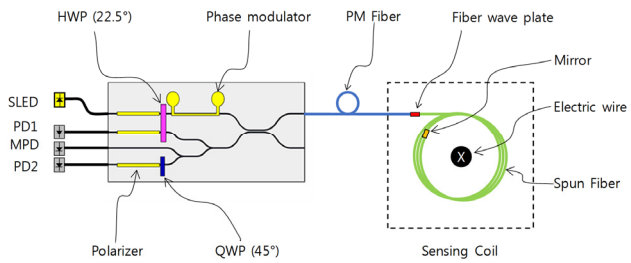

Fig. 1. Configuration of the integrated optic current sensor consisting of a phase modulator, waveplates, polarizers and a 3-dB coupler. The sensing coil is connected to the sensor chip through a PM fiber and a fiber-optic QWP.

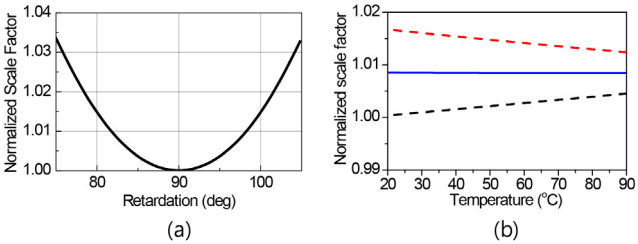

Fig. 2. (a) Normalized scale factor as a function of the fiber-optic QWP retardation. (b) Temperature dependence of the Verdet constant, temperature dependent scale factor, and a resultant total temperature dependence of the optical current sensor, in which the temperature compensation is achieved.

호를 서로 비교하여 계산하면 패러데이 효과에 의해 발생한 위상차를 구할 수 있고, 이를 통해 도선에 흐르는 전류량을 알아낼 수 있다. 제안된 광IC 구조에서는 편광기를 통과하지 않고 출력되는 신호도 구할 수 있도록 소자 구조를 설계하였으며 이를 통하여 전반적인 경로를 통과해온 광신호의 세기 변화에 대한 영향을 상쇄시킬 수 있다.

제안된 광전류센서가 외란의 영향을 극복할 수 있는 구조임에도 불구하고 광섬유 센싱 코일의 패러데이 효과를 나타내는 베르데 상수가 지니는 온도의존성은 미세하게나마 남아있게 된다. 이로 인한 온도의존성을 극복하기 위하여 센싱용 광섬유 코일과 PM 광섬유가 연결되는 부분에 위치한 QWP가 지니고 있는 온도의존성을 적절히 조절하여 베르데 상수의 온도의존성을 상쇄시킬 수 있는 방법이 있다[7]. 광섬유 파장판의 위상 지연 정도(δ)에 따른 광전류센서의 측정신호 변화는 존스 행렬을 이용해 센서의 응답특성 스케일 팩터를 계산하여 구할 수 있다[15].

센싱 코일을 구성하는 실리카 광섬유의 베르데 상수(V)는 1550 nm 파장에 대해서 상온일 때, 0.5 rad/T · m이고, 온도의존성은 1/V(dV/dT) 식으로 주어지며 0.7×10^{-4} °C^{-1}의 값을 가진다[16]. 실험에 사용한 타원 코어 광섬유의 위상 지연 정도(δ)는 1/δ(dδ/dT) = -2.2×10^{-4} °C^{-1}의 온도 의존성을 가진다[7]. QWP 길이에 따른 위상지연 정도의 변화에 대하여 광전류센서의 스케일 팩터가 변화하는 것을 계산하여 그림 2(a)에서 보이고 있다. 90° 이상의 광섬유 파장판을 이용하는 경우 온도가 증가함에 따라 스케일 팩터가 감소하게 되는데 100.4°의 광섬유 파장판을 이용하는 경우 그 기울기가 베르데 상수의 온도 의존성을 상쇄시킬 수 있는 크기가 된다. 베르데 상수의 온도 의존성과 100.4° 광섬유 파장판의 온도 의존성에 의한 스케일 팩터 변화를 그림 2(b)에서 같이 나타냈으며, 서로 같은 크기의 기울기를 가지는 것을 확인하여 온도 의존성을 상쇄시킬 수 있는 것을 확인하였다.

III. 폴리머 광IC 소자 및 센싱 코일 제작

제안된 광전류 센서를 구성하는 핵심 중요부품인 광IC 소자는 폴리머 광도파로를 이용하여 제작되었다. 켐옵틱스 회사의 ZPU폴리머 중에서 굴절률이 1.4375, 1.4300인 재료를 각각 코어와 클래딩 재료로 사용하였다. 단일모드로 동작하는 광도파로를 얻기 위하여 유효 굴절률 계산을 수행하였으며 6.0 μm 너비와 5.0 μm 두께를 가지는 채널 광도파로 구조를 선택하였다. 실리콘 기판 위에 폴리머 재료를 스핀 코팅 하고 UV를 조사하여 경화하는 간단한 공정으로 폴리머 필름을 형성할 수 있었으며, 포토 리소그라피, 건식 식각, 금속 증착 등의 일반적인 반도체 공정을 통해 열광학 위상 변조기와 편광기를 제작할 수 있었다[15]. 편광변환을 위한 파장판은 고온에서 폴리이미드 재료에 스트레인을 인가하여 복굴절을 띄도록 만들어진 15 μm 두께의 얇은 플라스틱 필름 형태의 QWP, HWP들을 NTT사에서 구입하여 사용하였다. 다이싱 장비를 이용하여 30 μm 폭의 홈을 광도파로를 가로지르게 형성한 후 폴리이미드 필름을 삽입하고 UV 경화 폴리머를 채워 넣어서 고정시키게 된다. 완성된 폴리머 소자는 열전소자(thermoelectric cooler, TEC)와 함께 패키징하여, 상온으로 항상 유지시킨다. 광IC 소자의 제작 공정에 대한 자세한 설명은 저자들의 이전 논문을 참조하면 된다[11,17].

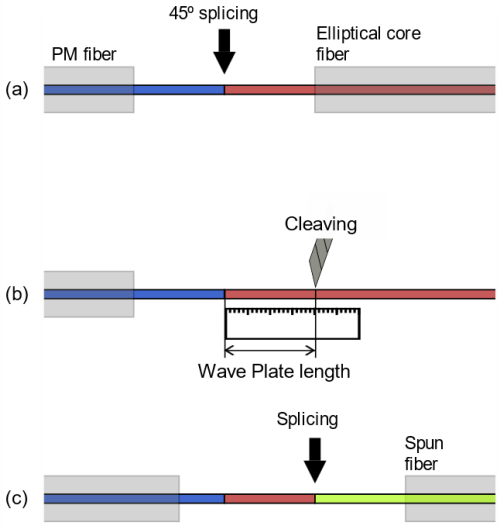

Fig. 3. Fabrication procedure of the sensing coil. (a) Splicing a panda PM fiber to an elliptical core fiber to have an optic axis angle difference by 45°. (b) Cleaving the elliptical core fiber to have a length of wave plate. (c) Splicing the elliptical core fiber to a spun fiber used for the sensing coil.

패러데이 효과를 통하여 자계의 세기를 일차적으로 검출하게 되는 광섬유 센싱 코일은 입력부에 광섬유 QWP를 연결되고 말단에는 반사판이 부착되어야 한다. 본 실험에서는 복굴절이 상대적으로 작은 타원 코어 PM 광섬유를 이용하여 광섬유 QWP를 제작하는 방법을 개발하였으며 그림 3에서 보인 과정을 통하여 QWP를 완성한다. 먼저 광IC와 연결하기 위하여 이용하는 판다 PM 광섬유(Panda PM fiber)에 타원 코어 광섬유의 광축이 45°만큼 기울어진 상태에서 부착을 시킨다. 다음으로 타원 코어 광섬유의 길이를 정확히 측정한 후 원하는 만큼의 위상차이를 얻을 수 있는 길이를 남겨둔

채 자르게 된다. 여기에 광섬유 센싱 코일로 사용할 스펀 광섬유(spun fiber)를 연결하면 광섬유 QWP가 완성된다. 이와 같이 세 종류의 광섬유를 연결하여 광섬유 QWP를 완성하게 되는데 광섬유가 서로 연결된 부분과 광섬유의 단면 사진들을 그림 4에서 보이고 있다. 스펀 광섬유는 코일 형태로 감겨지더라도 추가적인 복굴절이 발생하지 않는 특성을 가지고 있다. 광섬유 코일의 말단에는 금속 증착을 통하여 거울을 형성하여 줌으로써 코일 끝에 도달한 빛을 반사시킬 수 있도록 하였다.

본 연구에서는 QWP의 길이를 정확히 맞추어서 베르데 상수가 지니고 있는 온도 의존성을 상쇄시키는 것이 목적이다. 이를 위하여 QWP의 길이 변화에 따라 나타나는 두 편광간의 위상차이를 정확히 측정하는 실험을 수행하였다. 타원 코어 광섬유의 길이를 미세하게 변화시켜 가면서 QWP를 제작하였으며 입력부에 연결된 판다형 광섬유에 선편광을 입사할 때 제작된 QWP를 통과한 빛의 편광상태를 편광기를 통하여 확인하였다. 이상적인 λ/4만큼의 위상차이를 일으키는

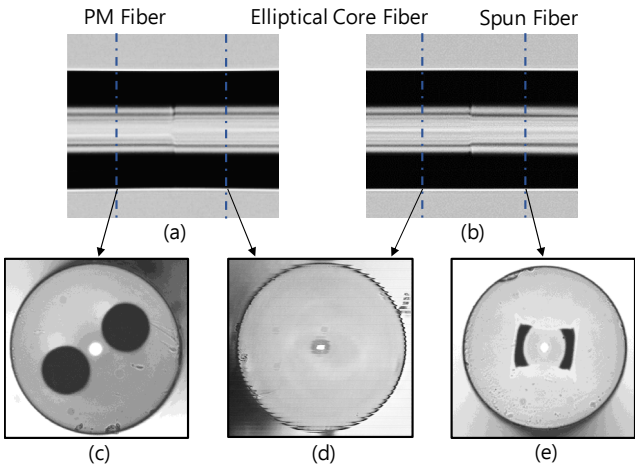

Fig. 4. Microphotographs of the fiber-optic QWP: (a) Splicing point between the panda PM fiber and the elliptical core fiber, (b) Splicing point between elliptical core fiber and the spun fiber, (c) Cross-section of the panda PM fiber, (d) Cross-section of the elliptical core fiber, (e) Cross-section of the spun fiber.

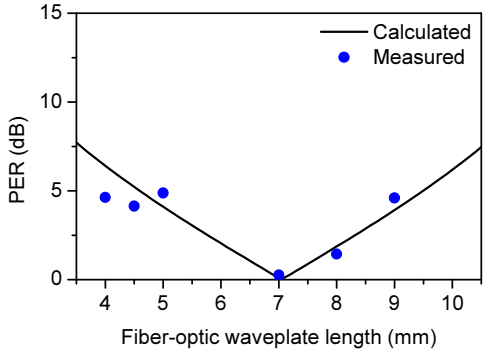

Fig. 5. QWP characteristics measured by the polarization extinction ratio for many devices with different lengths.

QWP인 경우에는 출력부에서 편광기의 각도를 바꾸더라도 통과된 빛의 세기가 변하지 않는 원편광 상태가 된다. 1550 nm 파장과 25 dB 이상의 입력 편광 소멸비를 가지는 DFB 레이저를 광원으로 이용하여 길이를 변화시켜 가면서 제작된 여러 개의 광섬유 QWP의 편광 소멸비를 측정한 결과를 그림 5에서 보이고 있다. 타원 코어 광섬유 길이가 7 mm일 때 편광 소멸비가 최소값이 되었으며 이로부터 타원 코어 광섬유의 복굴절은 0.55×10^{-4}이 되었다. 또한 베르데 상수가 지닌 온도의존성을 상쇄시키기 위한 100.4도의 위상 지연을 가지는 광섬유 파장판의 길이는 7.8 mm가 되었다.

광섬유 파장판과 스펀 광섬유를 접합할 때 발생하는 아크방전에 의한 스트레스 때문에 광섬유 파장판의 유효 길이가 짧아지고, 그 때문에 위상이 지연되는 정도가 변화한다. 이전 논문에서는 정확한 위상 지연 정도를 측정하기 위해, 짧은 길이의 단일모드 광섬유(single mode fiber, SMF)를 접합하고, 편광 유지 광섬유에 선편광을 입력하여 편광 소멸비를 측정한 후에 스펀 광섬유를 접합하게 된다[17]. 하지만 이번 실험에서 사용한 타원 코어 광섬유는, 이상적인 QWP 길이가 이전에 사용한 photonic crystal fiber (PCF)의 0.9 mm보다 약 8배 증가한 약 7.0 mm이다. 이로 인해 광섬유 파장판 접합시 아크방전에 의한 유효 길이 변화가 QWP 특성 변화에 미치는 영향이 작게 된다. 실험을 통해 확인한 결과 아크방전에 의한 편광 소멸비의 변화는 0.3 dB 이내로 나온 것을 확인했다.

IV. 광전류 센서 동작 특성 측정 및 온도의존성 실험 결과

제작된 광전류 센서의 특성측정을 위하여 1550 nm SLD 광원을 광IC 소자에 연결하고, 광섬유 코일에 인가되는 자계의 세기를 증폭시키기 위해 토로이드 형태의 전류루프를 이용하여 60 Hz 교류신호를 인가하였다. 사용가능한 전류원의 최대 전류값이 80 Arms에 불과하여 전류로 인한 자계를 증

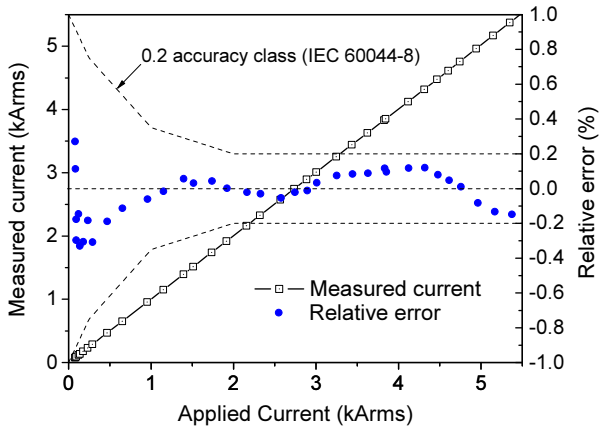

Fig. 6. Output response of the optical current sensor whose retardation of fiber wave plate is 100.7°, which exhibits the error satisfying the standard of 0.2 accuracy class (IEC 60044-8).

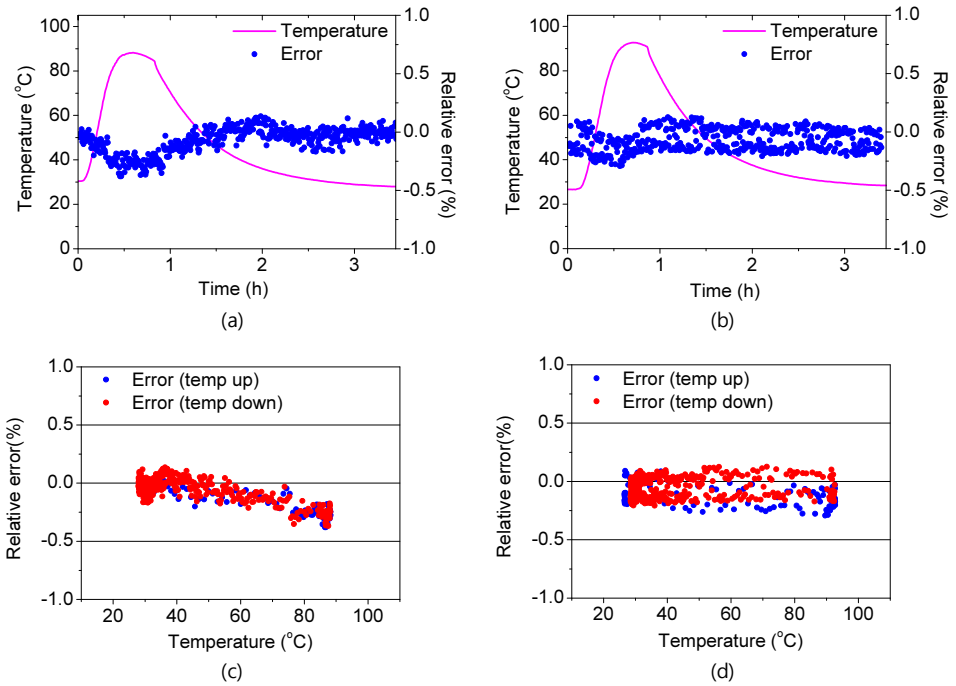

Fig. 7. (a) and (b) represent the temperature dependent errors of the sensor incorporating the QWP with a retardation of 93.43° and 100.7°, respectively. (c) and (d) show the relative errors of the sensors corresponding to (a) and (b), respectively, as a function of temperature increase and decrease.

폭시키기 위해 광전류센서의 센싱 코일에 전선을 80바퀴를 감아서 센싱 코일을 준비하였다. 광전류센서의 선형성을 확인하기 위해 전류원으로 1~70 Arms의 전류를 토로이드에 인가하였고 토로이드에서는 80배로 증폭되어 0.08~0.55 kArms에 해당하는 자기장이 광섬유 코일에 인가되도록 하였다. 측정된 전류신호는 기존 전기 CT의 출력과 비교하여 그림 6에 나타냈다. 전류 증가 후 감소시키는 과정에서 동일한 출력값이 나타남을 볼 수 있었고 상대오차는 0.5 kArms 이상에서 ±0.2% 이내로 나타났다. 본 실험 결과에서 볼 수 있듯이 광전류센서는 매우 낮은 전류값에 대해서도 오차가 작은 정확한 값을 측정할 수 있기 때문에 전력회사에서 전기요금을 책정할 때 저전력 구간에도 정확한 측정값을 바탕으로 요금을 과금할 수 있게 된다.

온도의존성을 확인하는 과정에서 준비된 광섬유 센싱 코일을 온도 제어 가능한 오븐에 넣어 온도 변화에 따른 광전류센서의 출력값을 모니터링하였다. 비교를 위하여 정확히 90° 만큼의 위상차이를 일으키는 파장판과 100.7° 만큼의 위상차이를 일으키는 파장판을 준비하여 각각 온도에 따른 특성 변화를 측정하였으며 그 결과를 그림 7에서 비교하여 보여주고 있다. 3시간 30분에 걸쳐서 상온에서부터 90°C까지 온도를 상승시켰다가 다시 상온으로 하강시키며 측정을 하였다. 상용전류센서를 이용하여 측정한 값과 비교하여 상대 오차를 나타냈으며 90도 파장판의 경우 온도에 따른 센서의 오차가 0.4% 정도 변화하는 것에 비하여 100.7도 파장판의 경우에는 오차가 0.2%로 감소하여 나타났으며 베르데 상수의 온도의존성 상쇄가 이루어졌음을 확인하였다.

V. 결 론

광IC 소자를 이용하여 구성된 사분파장 위상 편광회전 반사 간섭계 광전류센서의 온도 의존성을 최소화시키기 위한 연구를 수행하였다. 편광회전 반사 간섭계에서는 간섭계 내부 광부품들의 온도의존성은 대부분 상쇄시킬 수 있으나 패러데이 효과 자체가 지니고 있는 온도의존성은 고성능 광전류센서 개발을 위해서 마지막으로 남은 극복해야 할 문제이다. 본 연구에서는 동작점 제어가 필요 없는 폴리머 광IC를 이용한 광전류센서에서 광섬유 파장판의 위상 지연 정도에 따른 스케일 팩터를 계산하여 베르데 상수 온도의존성을 보상하기 위한 광섬유 파장판을 설계 및 제작하였다. 온도 의존성을 상쇄시키기 위한 광섬유 파장판을 사용한 센싱 코일은 상온에서부터 85°C까지의 온도 변화 범위에 대하여 온도 의존성이 0.20%로 감소하는 것을 확인했다. 상온 이하의 저온 범위로 온도를 내리게 되면 베르데 상수의 변화폭이 더 커지게 되어 센서의 온도의존성이 더 커질 것으로 예상되며 이를 극복하기 위한 추가적인 실험이 필요하다. 차세대 고정밀 광전류센서 기술은 온도의존성을 포함한 센서의 오차범위를 0.2% 이하로 만드는 것을 목표로 하고 있으며 본 연구 결과는 이를 달성하기 위하여 반드시 필요한 중요한 사안이다.

감사의 글

이 논문은 2017년 장기 해외 파견 연구년 지원사업의 일환으로 부산대학교의 지원으로 수행되었습니다.

References

1. K. Kurosawa, "Development of fiber-optic current sensing technique and its applications in electric power systems," Photon. Sens. **4**, 12-20 (2014).
2. K. Bohnert, P. Gabus, J. Nehring, H. Brandle, and M. G. Brunzel, "Fiber-optic current sensor for electrowinning of metals," J. Lightwave Technol. **25**, 3602-3609 (2007).
3. J. D. P Hrabluik, "Optical current sensors eliminate CT saturation," in *Proc. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings* (New York, USA, Jan. 2002), pp. 1478-1481.
4. Y. N. Ning, Z. P. Wang, A. W. Palmer, K. T. V. Grattan, and D. A. Jackson, "Recent progress in optical current sensing techniques," Rev. Sci. Instrum. **66**, 3097-3111 (1995).
5. K. Bohnert, P. Gabus, J. Kostovic, and H. Brändle, "Optical fiber sensors for the electric power industry," Opt. Lasers Eng. **43**, 511-526 (2005).
6. R. M. Silva, H. Martins, I. Nascimento, J. M. Baptista, A. L. Ribeiro, J. L. Santos, P. Jorge, and O. Frazão, "Optical current sensors for high power systems: a review," Appl. Sci. **2**, 602-628 (2012).
7. K. Bohnert, P. Gabus, J. Nehring, and H. Brandle, "Temperature and vibration insensitive fiber-optic current sensor," J. Lightwave Technol. **20**, 267-276 (2002).
8. A. Enokihara, M. Izutsum, and T. Sueta, "Optical fiber sensors using the method of polarization-rotated reflection," J. Lightwave Technol. **5**, 1584-1590 (1987).
9. G. Frosio and R. Dändliker, "Reciprocal reflection interferometer for a fiber-optic Faraday current sensor," Appl. Opt. **33**, 6111-6122 (1994).
10. M.-C. Oh, J.-K. Seo, K.-J. Kim, H. Kim, J.-W. Kim, and W.-S. Chu, "Optical current sensors consisting of polymeric waveguide components," J. Lightwave Technol. **28**, 1851-1857 (2010).
11. M.-C. Oh, W.-S. Chu, K.-J. Kim, and J.-W. Kim, "Polymer waveguide integrated-optic current transducers," Opt. Express **19**, 9392-9400 (2011).
12. G. M. Muler, L. Yang, A. Frank, and K. Bohnert, "Simple fiber-optic current sensor with integrated-optics polarization splitter for interrogation," in *Proc. Imaging and Applied Optics* (Seattle, USA, July. 2014), paper AM4A.3.
13. D. Stowe and T. Y. Hsu, "Demodulation of interferometric sensors using a fiber-optic passive quadrature demodulator," J. Lightwave Technol. **1**, 519-523 (1983).
14. H.-J. Park and M. Song, "Fiber grating sensor interrogation using a double-pass Mach-Zehnder interferometer," IEEE Photon. Technol. Lett. **20**, 1833-1835 (2008).
15. K. B. Svensson, "Fiber optic current sensors," M. S. *Thesis*, Chalmers University of Technology Gothenburg, Sweden (2014).
16. S.-M. Kim, T.-H. Park, G. Huang, and M.-C. Oh "Bias-free optical current sensors based on quadrature interferometric integrated optics," Opt. Express **26**, 31599-31606 (2018).
17. W.-S. Chu, S.-M. Kim, and M.-C. Oh, "Integrated optic current transducers incorporating photonic crystal fiber for reduced temperature dependence," Opt. Express **23**, 22816-22825 (2015).