

Fiber Bragg Grating Temperature Sensor by the Wavelength Tuning Using the Temperature Dependence of VCSEL

Chung-Ki Lee^{1†} and Sung-Moon Kim²

¹Research and Development Fivetech Co., Ltd., 302, Techno 2-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34028, Korea

²Dept. of Electronics Engineering, Pusan National University, Busandaehak-ro 63bun-gil 2, Geumjung-gu, Busan 46241, Korea

(Received September 29, 2018; Revised October 11, 2018; Accepted October 11, 2018)

In this paper, a low-cost optical temperature sensor is implemented, using a fiber Bragg grating (FBG) as the temperature probe and a low-cost VCSEL with temperature-dependent output wavelength as the light source. To analyze the wavelength of the reflected light from the FBG, an interrogation was applied using a method of referring to the internal temperature according to the output wavelength of the VCSEL. When the temperature of the VCSEL was adjusted from 14 to 52.2°C, the output wavelength varied from 1519.90 to 1524.25 nm. The degree of wavelength tuning according to temperature was 0.114 nm/°C. The variable wavelength repeatability error according to temperature was ±0.003 nm, and the temperature measurement error was ±0.18°C. As a result of measuring the temperatures from 22.3 to 194.2°C, the value of the internal temperature change of the light source according to the applied temperature ΔT was 0.146°C/ ΔT , the change in reflected wavelength of the temperature probe according to applied temperature ΔT was measured at 16.64 pm/°C. and the temperature measurement error of the sensor was ±1°C.

Keywords: Fiber-optic temperature sensor, Fiber Bragg grating, Vertical cavity surface emitting laser

OCIS codes: (060.2310) Fiber optics; (060.2370) Fiber optics sensors; (060.3735) Fiber Bragg gratings; (140.3600) Lasers, tunable

빅셀(VCSEL)의 온도 의존성을 이용한 파장 가변 형 광섬유 격자 온도센서

이충기^{1†} · 김성문²

¹파이브테크 기술연구소

☎ 34028 대전시 유성구 테크노2로 302

²부산대학교 전자전기공학과

☎ 46241 부산광역시 금정구 부산대학로63번길 2

(2018년 9월 29일 받음, 2018년 10월 11일 수정본 받음, 2018년 10월 11일 게재 확정)

본 논문에서는 광섬유 브래그 격자(FBG)를 이용한 광온도센서를 제작하였으며 광원은 출력 파장의 온도 의존성을 가지는 저가형 VCSEL이 사용되며 FBG에서 반사되는 빛의 파장을 분석하는 interrogator는 VCSEL에서 변화되는 출력 파장을 VCSEL의 내부 온도로 확인하는 방법을 적용하여 저가격의 광온도센서를 구현하였다. VCSEL의 내부온도를 52.2°C에서 14°C까지 조절하면서 출력 파장을 1519.90 nm에서 1524.25 nm까지 총 4.35 nm 파장을 변화시켰으며 온도 조절에 따른 파장 변화 반복도 오차는 ±0.003 nm이며 온도 측정 오차는 ±0.18°C로 측정되었다. 광온도센서를 사용하여 22.3~194.2°C의 온도를 측정한 결과 인가한 온도 ΔT 에 따른 광원 내부 온도 변화 값은 0.146°C/ ΔT 이고 인가한 온도 ΔT 에 따른 온도 프로브 반사 파장 변화 값($\Delta\lambda_B/\Delta T$)은 16.64 pm/°C로 측정되었으며 센서의 측정 오차는 ±1°C로 나타났다. VCSEL의 출력 파장은 온도에 의존성을 가지고 있어 좁은 범위의 출력 파장을 변화시키기 위한 광원으로 사용하기에 매우 적합하다.

Keywords: 광섬유 온도센서, 광섬유 브래그 격자, 빅셀

OCIS codes: (060.2310) Fiber optics; (060.2370) Fiber optics sensors; (060.3735) Fiber Bragg gratings; (140.3600) Lasers, tunable

[†]E-mail: peter@fivetech.co.kr, ORCID: 0000-0002-8603-8629

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

I. 서 론

최근 산업발전으로 인해 발전설비에서 생성된 전력은 수백 메가 와트에 이르며 이를 몇 단계에 걸쳐서 나누어서 송전하게 되는데 전송선의 손실을 줄이기 위하여 345 kV 이상의 고압으로 전송하게 되며 전류의 크기도 수 kA 이상이다. 이러한 발전설비에 사용되는 전력변환기(transformer), GIS (gas insulated switchgear), 전력공급 케이블 등이 고전류나 고전압으로 인해 발생하는 과열로 절연 파괴 및 화재 발생이 빈번하게 발생하고 있으며 화재 발생시 전력공급이 중단되어 산업현장에 막대한 피해를 주게 된다^[1]. 이러한 문제를 해결하기 위해 각 발전설비마다 절연 파괴 보호 및 과열 방지를 위해 온도를 모니터링하기 위한 센서가 매우 중요하게 두각되고 있다. 현재에 발전설비에 사용되는 온도센서는 온도변화에 따른 저항 변화나 전기적인 신호를 측정하는 것으로서 수백 kV 이상의 고압 환경에서 동작하므로 발전설비에서 발생하는 강한 전자기파간섭(electromagnetic interference, EMI) 때문에 일반적인 전기적인 계측기의 기능에 심각한 영향을 미치게 되어 측정결과에 대한 오차를 매우 크게 만드는 문제를 가지며 또한 전도성 파트를 가지고 있어 절연환경이 요구되는 지점의 온도측정이 매우 어렵다는 단점을 가지고 있다. 그러나 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating, FBG)를 이용한 광온도센서는 광섬유라는 절연 물질을 통해 빛의 파장변화를 이용하여 온도를 측정하므로 EMI와 센서로 인해 절연이 파괴되는 문제를 모두 해결할 수 있다는 장점을 가지고 있다^[2,3].

이러한 다양한 장점들로 인해 기존에 다양한 형태의 FBG를 이용한 광온도센서는 많은 연구 개발로 인해 상용화되어 왔다. FBG를 이용한 광온도센서는 측정되는 온도에 따라 FBG에서 반사되는 빛의 파장변화를 측정하는 원리로 넓은 대역의 파장을 출력하는 광원과 FBG에서 반사되는 빛의 파장을 측정하기 위한 interrogator 등의 광소자들이 필수적으로 구성된다^[4,5]. 광대역 파장을 출력하는 광원을 SLD (superluminescent diode)로 적용하고 interrogator를 long-period grating PCF 파장 필터로 적용하여 구성하거나^[6], 광원을 ELED (edge light emitting diode)로 적용하고 FBG에서 반사되는 파장을 확인하기 위한 interrogator로 Fabry-Perot tunable filter를 적용하였다^[7]. 최근에는 단파장 형태로 출력되는 광원을 사용하여 넓은 대역의 파장 범위를 스캔할 수 있게 다양한 형태로 tuning하기 위한 tunable laser를 광대역 파장출력 광원 대신 적용하고 있다. 광대역 파장을 출력하는 광원에 Fabry-Perot tunable filter를 연결하거나^[2], DFB laser내의 Bragg grating 주기를 바꿔 파장을 변화시키는 wavelength tunable DFB laser를 광원으로 사용한다^[8]. 위에서 소개한 광온도센서에 사용되는 광원들과 FBG에서 반사되는 빛의 파장을 분석하기 위한 interrogator 모두 고가의 광소자로서 FBG를 이용한 광온도센서 시장이 제한적이었다.

본 논문에서는 고가격으로 인해 제한된 시장을 확대하기 위해 광온도센서의 광원을 광통신에서 활발히 사용되는 저

가의 VCSEL (vertical cavity surface emitting laser)을 적용하였다. VCSEL은 내부 온도에 따라 출력 파장이 변화되는 특성을 가진다. 그 이유는 온도에 따라 빅셀을 구성하고 있는 cavity material의 굴절율이 변화하기 때문이며 일반적으로 VCSEL의 내부 온도가 올라감에 따라 출력 파장은 비례하여 길어지며 온도 변화에 따른 출력 파장 변화는 $0.1 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 이다^[9]. VCSEL 내부에 온도를 제어하기 위한 TEC (thermoelectric cooler)를 컨트롤하여 파장을 변화시켰으며 온도에 따라 FBG에서 반사되는 파장을 측정하기 위해 VCSEL의 내부의 thermistor를 이용하여 온도 변화 시 측정되는 온도 값과 FBG에서 반사되는 빛의 파워를 photodetector로 측정하고 두 측정 값을 동기화시키게 되면 VCSEL의 내부 온도 값만으로 FBG에서 반사되는 파장을 확인할 수 있게 된다. 기존에 온도 의존특성을 이용한 VCSEL의 파장 가변 방식은 패키지 내부와 외부에 TEC를 부착하여 온도 오차에 따른 출력 파장 변화 오차를 최소화하였지만 본 센서의 광원은 VCSEL 내부에 부착된 thermistor를 이용하여 온도 값을 확인하는 피드백 시스템을 적용하여 저가의 VCSEL을 적용하였다. FBG에서 반사되는 파장을 분석하기 위한 복잡하고 고가인 interrogator를 VCSEL의 내부 온도 값 측정으로 대체하였다.

II. VCSEL의 온도 의존성을 이용한 파장 가변 형 광온도센서 구조

본 논문에서 제안하는 VCSEL의 온도 의존성을 이용한 파장 가변 형 광온도센서의 구조는 그림 1(a)와 같이 센서의 광원인 VCSEL, isolator, 광원의 파워를 모니터링하기 위한 모니터링 PD (photodetector), 온도를 측정하기 위한 FBG, FBG에서 반사되는 빛의 파워를 측정하기 위한 수광부 PD, 그리고 두 개의 3-dB coupler로 구성된다. 광원에서 출력된 빛은 3-dB coupler를 통해 모니터링 PD와 두 번째 3-dB coupler에 나눠져 입력되고 3-dB coupler를 통과한 빛은 온도 프로브인 FBG에 입력되고 아래의 식 (1)과 같이 grating period Λ 가 맞는 Bragg wavelength λ_B 만 반사되어 다시 두 번째 3-dB coupler를 거쳐 수광부인 PD에 입력된다.

$$\lambda_B = 2n\Lambda, \Delta\lambda_B = \lambda_B(1 + \xi)\Delta T \quad (1)$$

이때 $\Delta\lambda_B$ 는 Bragg wavelength shift이며 ξ 는 FBG의 thermo-optic coefficient이고 ΔT 는 온도 변화 값이다^[4].

본 센서에 사용된 광원(RC32xxx1-Ft from RayCan company)은 그림 1(b)와 같이 VCSEL chip, 내부 온도를 변경하기 위한 TEC, 그리고 내부 온도 값을 측정하기 위한 thermistor로 구성되며 광원의 출력 파장을 변화시키기 위해 내부 온도를 변화시키면서 온도를 측정함과 동시에 FBG에서 반사된 빛과 광원에서 출력되는 빛의 파워를 두 개의 PD를 통해 동시에 측정한다. 그 결과 그림 1(c)의 그래프와 같이 광원의 내부 온도에 따라 온도 프로브인 FBG에서 반사된 빛의 파워를 측정하는 PD에서 신호가 출력되는 것을 확인할 수 있다. 온도

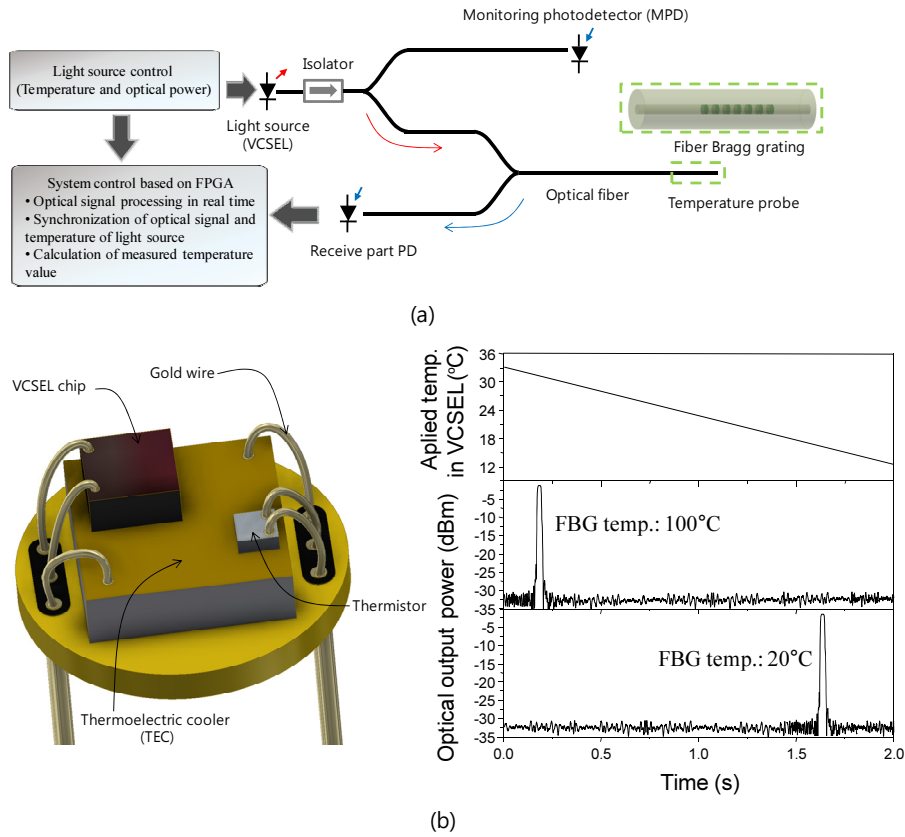


Fig. 1. (a) The construction of tunable wavelength optical temperature sensors using temperature dependence of VCSEL. (b) The structure of VCSEL package and the graph about the value of the internal temperature change of the VCSEL to tune the wavelength and the value of the measured power of the reflected light from the FBG.

프로브에 서로 다른 온도를 인가할 경우 PD에서 출력된 신호의 최대값이 서로 다른 광원 내부 온도에서 나타나는 것을 알 수 있다.

III. 적용된 VCSEL과 온도 프로브 특성 확인

광온도센서의 광원인 VCSEL의 특성을 확인하기 위해 광원 내부에 구성된 TEC를 이용하여 내부 온도를 변경하고 thermistor를 통해 내부온도 값을 측정하면서 광원에서 출력되는 파장을 OSA (optical spectrum analyzer)로 측정한 결과는 그림 2(a)와 같이 나타난다. 광원 내부의 온도 변화 범위는 14~52.2°C 이며 초기 14°C에서 2°C 단위로 온도를 증가시키면서 측정된 광원 출력 파장의 피크 변화 범위는 1519.90~1524.25 nm로 총 4.35 nm 변화하였고 온도에 따른 파장 변화 값($\Delta\lambda/\Delta T$)은 0.114 nm/°C인 것을 확인할 수 있다. VCSEL의 내부 온도에 따른 출력 파장 반복성을 확인하기 위해 광원 내부 온도를 14°C에서 52.2°C로 5회 반복하여 변경하면서 출력 파장의 피크 값을 확인한 결과는 그림 2(b)와 같이 나타나며 반복도 오차는 각각 ± 0.003 nm, ± 0.0015 nm이다. 광원에서 출력되는 빛의 3-dB bandwidth는 0.028 nm인 것을 확인할 수 있다.

온도 프로브에서 FBG의 길이는 55 mm이며 200°C까지 온

도를 측정하기 위해 버퍼가 폴리이미드로 코팅된 광섬유를 사용하였으며 알루미늄 재질의 메탈 케이스와 FBG를 고정하기 위해 FBG 영역 외의 부분에 silicone를 사용하였으며 메탈 케이스 밖으로는 광섬유를 보호하기 위해 고온에 견딜 수 있는 Teflon tube를 사용하였다. 온도 프로브는 그림 3(a)와 같이 제작되었으며 FBG에서 반사되는 빛의 3-dB bandwidth 및 중심파장을 확인하기 위해 광대역 파장을 출력하는 SLD 광원을 사용하여 circulator에 빛을 입사시킨 후 FBG에서 반사되는 빛을 OSA로 확인하였으며 온도 프로브 옆에 백금온도센서를 두어 프로브와 온도를 동시에 측정하여 그림 3(b)와 같이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 프로브의 온도가 21.17°C일 때 OSA에서 측정된 중심 파장은 1520.93 nm이며 3 dB bandwidth는 0.11 nm이다. 따라서 광원에서 출력되는 빛의 3 dB bandwidth가 0.028 nm이므로 온도에 따라 FBG에서 반사되는 파장을 정확히 측정할 수 있다는 것을 알 수 있다. 1310 nm 파장의 FBG의 경우 Bragg grating의 온도 민감계수 k_T 는 6.67°C^{-1} ^[10]로 아래의 식 (2)에 의해 온도 변화에 따른 FBG에서 반사 파장의 변화는 값($\Delta\lambda_B/\Delta T$)은 10.1 pm/°C인 것을 알 수 있다.

$$\Delta\lambda_B/\Delta T = \beta_T\lambda_B = 6.32^\circ\text{C}^{-1} \times 1520 \text{ nm} = 10.1 \text{ pm}/^\circ\text{C} \quad (2)$$

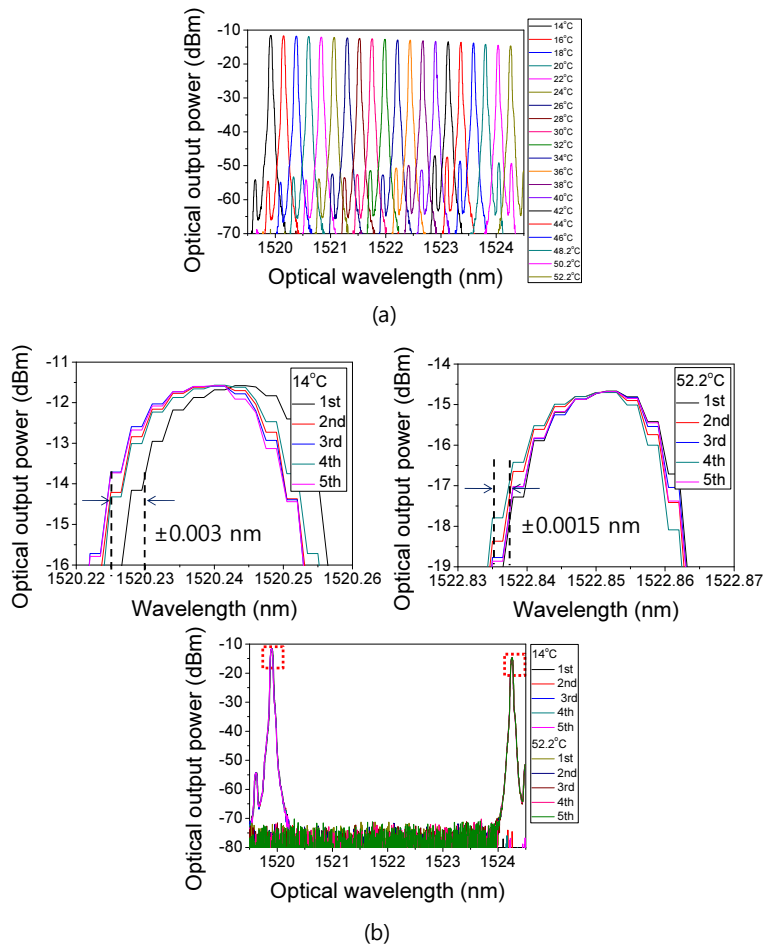


Fig. 2. (a) The graph about the output wavelength according to internal application temperature of light source (applied temperature range: 14~52.2°C, output wavelength range: 1519.90~1524.25 nm). (b) Graph about output wavelength repeatability according to internal temperature of light source (output wavelength at 14°C and 52.2°C: 1519.90 nm, 1524.25 nm, maximum repeatability error: ± 0.003 nm).

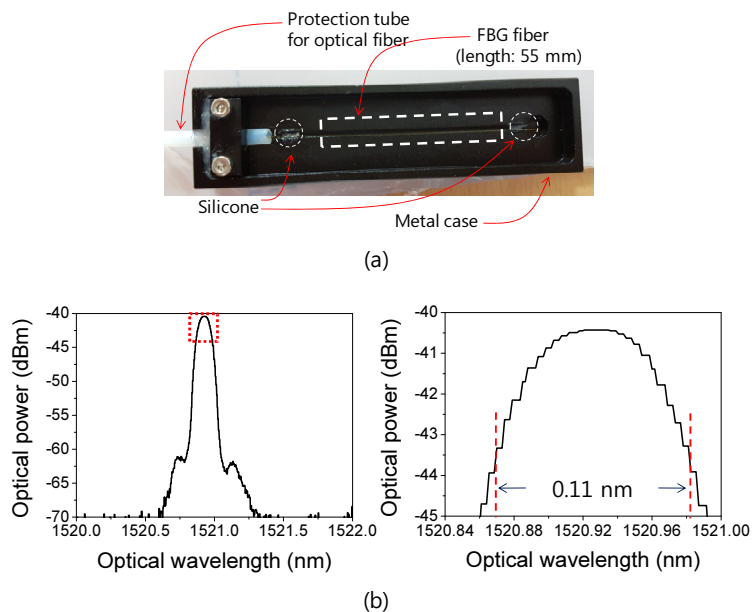


Fig. 3. (a) The photograph of fabricated temperature probe. (b) The graph about the reflection wavelength of the temperature probe (temperature of the probe: 21.17°C, the center optical wavelength: 1520.93 nm, 3-dB bandwidth: 0.11 nm).

제작된 온도 프로브에 200°C까지 온도를 증가할 경우 FBG에서 반사되는 중심 파장은 1522.74 nm로 계산되며 광원의 내부 온도를 14~52.2°C로 변화시켰을 때 가변되는 파장 범위는 1519.90~1524.25 nm이므로 상온에서 200°C까지 온도 측정이 가능하다는 것을 알 수 있다. 광원의 온도에 따른 출력 파장 반복성 확인에서 14°C와 52.2°C의 반복도 오차의 경우 각각 ± 0.003 nm, ± 0.0015 nm이므로 광원의 반복도 오차에 따른 온도측정 오차는 최대 $\pm 0.31^\circ\text{C}$ 가 발생될 것으로 예상된다.

IV. 광온도센서 특성 측정

FBG를 사용한 광온도센서의 성능을 확인하기 위해 기준 센서로 백금온도센서를 사용하였으며, 광온도센서를 전력설비에 적용 시 고전류가 흐르는 메탈의 표면의 온도를 측정하므로 이와 같은 동일한 환경을 맞추기 위해 본 논문에서는 hot plate 표면 온도를 측정하였다. 온도 프로브와 백금온도센서를 같이 hot plate 위에 두고 온도를 변화시켰으며 인가 온도 범위는 백금온도센서 측정 기준으로 22.3~194.2°C이다.

광온도센서의 광원 출력 파장을 변화시키기 위해 광원 내부 온도를 52.2°C에서 14°C로 반복하여 변화시키면서 hot plate의 온도를 측정한 결과 그림 4(a)와 같으며 FBG에서 반사되는 빛의 전기적인 최대 신호 값이 출력되는 시간이 hot plate의 온도를 단계 별로 변화시킬 때마다 달라지는 것과 광원의 내부 온도 값 또한 다른 것을 알 수 있다. 광원의 내부 온도를 52.2°C에서 14°C까지 스캔하는데 약 1.5초 소요되며 한번 온도를 측정하는데 대략 3초 정도 소요되는 것을 확인하였다. 신호의 최대값에 대한 광원 내부의 온도 값을 확인하여 인가된 온도에 대한 광원 내부 온도 값은 그림 4(b)와 같이 나타나며 인가한 온도 ΔT 에 따른 광원 내부 온도 변화 값은 $0.146^\circ\text{C}/\Delta T$ 이고 인가한 온도 ΔT 에 따른 온도 프로브 반사 파장 변화 값($\Delta\lambda_B/\Delta T$)은 $16.64 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 로 측정된다.

인가 온도에 대한 광원 내부 온도 값을 그림 5와 같이 측정 온도 값으로 그리고 측정 값에 대한 에러를 추가하여 나타내었다. 인가 온도 범위가 22.3~194.2°C일 때 측정 오차가 $\pm 1^\circ\text{C}$ 이내인 것을 알 수 있다. 광원인 VCSEL의 내부 온도 의존성을 이용한 파장 변화 시 반복도 오차로 인한 광온도센서의 측정 오차는 $\pm 0.18^\circ\text{C}$ 이며 나머지 $\pm 0.82^\circ\text{C}$ 와 온도 프로

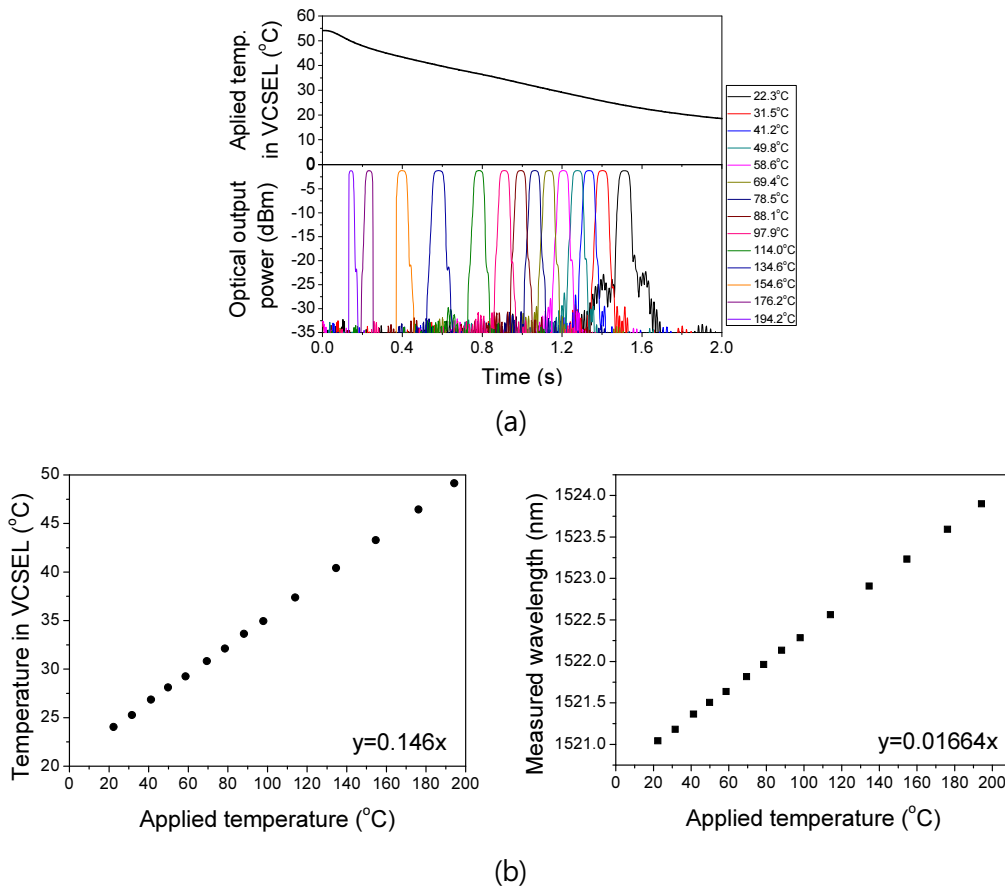


Fig. 4. (a) The graph about the measured temperature of the light source and the reflection wavelength of the probe according to the applied temperature of temperature probe (measurement temperature range: 22.3~194.2°C). (b) The graph about the measured value of internal temperature of the light source when the power of the reflected wavelength according to the applied temperature is the maximum value (The value of the reflected wavelength change of the temperature probe according to applied temperature ΔT : $16.64 \text{ pm}/^\circ\text{C}$).

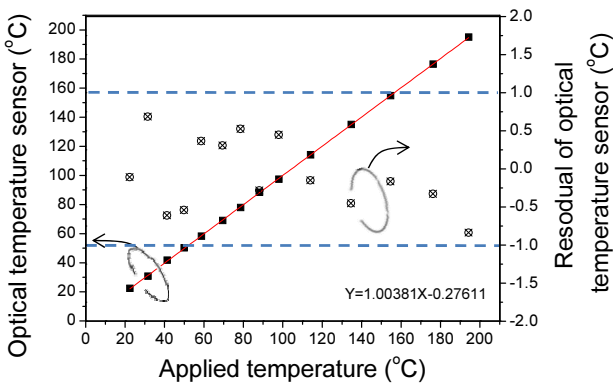


Fig. 5. The graph about the error and the measured temperature of the optical temperature sensor according to the applied temperature of temperature probe.

브에 인가한 온도 ΔT 에 따른 온도 프로브 반사 파장 변화 값($\Delta\lambda_B/\Delta T$)이 16.64 pm/°C로 크게 나타난 이유는 FBG 영역을 벗어난 양 끝단에 silicone을 사용하여 알루미늄 케이스에 고정하므로 인해 온도에 따른 FBG 파장 변화 이외에 기구적으로 FBG 파장 변화에 영향을 준 오차로 판단된다. 논문 발표 이후 기구적으로 발생하는 온도 측정 오차 값을 최소화하기 위한 온도 프로브의 구조개선 연구와 본 센서를 발전소, 공장, 고층 건물, 다세대 아파트 등 고전력이 사용되는 곳에 설치된 전압 변환기의 과열로 인해 발생하는 안전사고를 예방하기 위한 온도 모니터링 센서로 적용하기 위해 개발을 진행할 것이다.

V. 결 론

본 논문에서는 FBG를 이용한 광온도센서를 제작 하였으며 광범위 대역 파장을 출력하거나 단일 파장을 다양한 형태로 변화시켜 출력하는 고가의 광원 대신 광통신에서 많이 사용되는 저가형 VCSEL을 적용하였다. VCSEL의 출력 파장은 온도 의존성을 가지고 있어 좁은 범위의 출력 파장을 변화시키기 위한 광원으로 사용하기에 매우 적합하다. 또한 FBG에서 반사되는 파장을 측정하기 위해 기존에는 고가의 파장 가변형 필터인 interrogator를 적용하였으나 본 센서는 VCSEL에서 변화되는 출력 파장을 VCSEL의 내부 온도로 확인하여 기존의 interrogator를 대신하였다.

본 센서에 사용된 광원은 내부 온도를 52.2°C에서 14°C까지 낮추면서 광원 출력 파장을 1519.90 nm에서 1524.25 nm까지 총 4.35 nm 파장을 변화시켰으며 온도에 따른 파장 변화 반복도 오차는 ± 0.003 nm이다. 광원의 3-dB bandwidth는 0.028 nm이다. FBG를 이용하여 제작된 온도 프로브는 21.17°C에서 1520.93 nm의 중심파장을 반사시키며 3 dB bandwidth는 0.11 nm이다. 백금온도센서를 기준온도센서로 사용하였으며 온도 프로브에 인가된 온도 범위는 22.3~194.2°C이다.

실험 결과 인가한 온도 ΔT 에 따른 광원 내부 온도 변화 값

은 0.146°C/ ΔT 이고 인가한 온도 ΔT 에 따른 온도 프로브 반사 파장 변화 값($\Delta\lambda_B/\Delta T$)은 16.64 pm/°C로 측정된다. 광원 내부 온도 값을 측정 온도 값으로 변환했을 때 센서의 측정 오차는 $\pm 1^\circ\text{C}$ 이내이며 광원인 VCSEL의 내부 온도 의존성을 이용한 파장 변화 시 반복도 오차로 인한 광온도센서의 측정 오차는 $\pm 0.18^\circ\text{C}$ 이며 나머지 약 $\pm 0.82^\circ\text{C}$ 와 온도 프로브에 인가한 온도 ΔT 에 따른 온도 프로브 반사 파장 변화 값($\Delta\lambda_B/\Delta T$)이 16.64 pm/°C로 크게 나타난 이유는 FBG 영역을 벗어난 양 끝단에 silicone을 사용하여 알루미늄 케이스에 고정하므로 인해 온도에 따른 FBG 파장 변화 이외에 기구적으로 FBG 파장 변화에 영향을 준 오차로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 경제협력개발기구 산업육성사업 지원으로 수행되었습니다.

References

1. W. H. Bartley, "Analysis of transformer failures," in *Proc. International Association of Engineering Insurers 36th Annual Conference* (2003).
2. H.-J. Park and M. Song, "Linear FBG temperature sensor interrogation with Fabry-Perot ITU multi-wavelength reference," *Sensors* **8**, 6769-6776 (2008).
3. A. D. Kersey and T. A. Berkoff, "Fiber-optic Bragg grating differential-temperature sensor," *IEEE Photon. Lett.* **4**, 1183-1185 (1992).
4. Y.-J. Rao, "In-fibre Bragg grating sensors," *Meas. Sci. Technol.* **8**, 355-375 (1997).
5. Y. Zhan, H. Cai, R. Qu, S. Xiang, Z. Fang, and X. Wang, "Fiber Bragg grating temperature sensor for multiplexed measurement with high resolution," *Opt. Eng.* **43**, 2358-2361 (2004).
6. C.-L. Zhao, M. S. Demokan, W. Jin, and L. Xiao, "A cheap and practical FBG temperature sensor utilizing a long-period grating in a photonic crystal fiber," *Opt. Commun.* **276**, 242-245 (2007).
7. N. Hirayama and Y. Sano, "Fiber Bragg grating temperature sensor for practical use," *ISA Trans.* **39**, 169-173 (2000).
8. L. S. Yan, A. Yi, W. Pan, and B. Luo, "A simple demodulation method for FBG temperature sensors using a narrow band wavelength tunable DFB Laser," *IEEE Photon. Lett.* **22**, 1391-1393 (2010).
9. M. Kondow, T. Kitatani, K. Nakahara, and T. Tanaka, "Temperature dependence of lasing wavelength in a GaInNAs laser diode," *IEEE Photon. Lett.* **12**, 777-779 (2000).
10. A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick, M. LeBlanc, K. P. Koo, C. G. Askins, M. A. Putnam, and E. J. Friebele, "Fiber grating sensors," *J. Lightw. Technol.* **13**, 1442-1463 (1997).