<Original Paper>

Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 36, No. 6: 443-450, 2016
ISSN 1225-7842 / eISSN 2287-402X http://dx.doi.org/10.7779/JKSNT.2016.36.6.443

광섬유 브래그 격자 센서가 있는 광섬유 라인에 라만 OTDR을 이용한 분포 온도 및 변형률 측정 가능성에 대한 연구

Measurement of Distributed Temperature and Strain Using Raman OTDR with a Fiber Line Including Fiber Bragg Grating Sensors

권일범*†, 변종현**, 전민용***

Il-Bum Kwon*†, Jong-Hyun Byeon** and Min-Yong Jeon***

초 록 한 개의 감지 광섬유 라인으로 분포 온도와 몇 개의 변형률을 측정할 수 있는 새로운 광섬유 센서 연구를 수행하였다. 분포 온도는 감지 광섬유의 라만 안티-스토크스 산란광을 시간영역 반사계(OTDR: optical time domain reflectometry)로 측정하고, 변형률은 광섬유 브래그 격자(FBG: fiber Bragg grating)를 사용하여 측정하였다. 분포 온도는 4 km의 단일 모드 광섬유의 감지 광섬유로부터 안티-스토크스 후방 산란광을 양방향에서 취득하고 새로이 고안된 수식으로 온도를 계산하였다. 온도 실험은 감지 광섬유의 중간쯤에서 약 50 m의 광섬유 부분의 온도를 30℃부터 70℃까지 10℃ 간격으로 변화시키면서 실험한 결과 온도 측정 오차 범위는 0.50℃이하로 확인되었다. 또한 감지 광섬유에 설치된 FBG는 변위 스테이지로 변형시키고 파장 변화를 광학 스펙트럼 분석기로 측정한 결과 각각 0.10 nm, 0.17 nm, 0.29 nm, and 0.00 nm를 얻었다. 이러한 파장 이동은 각각 85.76 $\mu\epsilon$, 145.55 $\mu\epsilon$, 247.86 $\mu\epsilon$, 0.00 $\mu\epsilon$에 해당되었다.

주요용어: 광섬유 센서, 시간영역 반사계, 분포 온도, 변형률, FBG, 안티-스토크스 라만 산란광

Abstract In this study, we propose a novel fiber optic sensor to show the measurement feasibility of distributed temperature and strains in a single sensing fiber line. Distributed temperature can be measured using optical time domain reflectometry (OTDR) with a Raman anti-Stokes light in the sensing fiber line. Moreover, the strain can be measured by fiber Bragg gratings (FBGs) in the same sensing fiber line. The anti-Stokes Raman back-scattering lights from both ends of the sensing fiber, which consists of a 4 km single mode optical fiber, are acquired and inserted into a newly formulated equation to calculate the temperature. Furthermore, the center wavelengths from the FBGs in the sensing fiber are detected by an optical spectrum analyzer; these are converted to strain values. The initial wavelengths of the FBGs are selected to avoid a cross-talk with the wavelength of the Raman pulsed pump light. Wavelength shifts from a tension test were found to be 0.1 nm, 0.17 nm, 0.29 nm, and 0.00 nm, with corresponding strain values of 85.76 $\mu\epsilon$, 145.55 $\mu\epsilon$, 247.86 $\mu\epsilon$, and 0.00 $\mu\epsilon$, respectively. In addition, a 50 m portion of the sensing fiber from 30℃ to 70℃ at 10℃ intervals was used to measure the distributed temperature. In all tests, the temperature measurement accuracy of the proposed sensor was less than 0.50℃.

Keywords: Fiber Optic Sensor, Optical Time Domain Reflectometry, Distributed Temperature, Strain, FBG, Anti-Stokes Raman Scattered Light

1. 서 론

터널과 교량 등의 대형 구조물은 그 건전성을 감지하기 위해서는 여러 부위에 적용되는 많은 센서를 사용할 필요가 있다. 또한 통과 차량에 의한 진동과 날씨 등의 외부 환경 변화에 따라서 재래식 전기 센서에는 신호 잡음 및 센서 내구성이 문제가 되기도 한다. 이러한 문제점을 해결하

[Received: July 15, 2016, Revised: August 22, 2016, November 15, 2016, Accepted: November 15, 2016] *한국표준과학연구원 안전측정센터, **파이버프로 기술연구소, ***충남대학교 물리학과, †Corresponding Author: Center for Safety Measurement, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 34113, Korea (E-mail: ibkwon@kriss.re.kr)
ⓒ 2016, Korean Society for Nondestructive Testing

기 위하여 단일 지점만을 감지하는 센서가 아닌 선형으로 이상현상을 감지하는 시스템이 필요하다[1]. 분포형 광섬유 센서는 주로 광섬유에서 발생하는 산란을 이용하는데 라만 산란(Raman scattering)은 강한 온도 의존성이 있기 때문에 온도 측정용 센서로 사용할 수 있다[2-4]. 분포형 광섬유 센서는 하나의 광섬유를 따라 모든 부분에서 측정이 가능하므로 연속적인 측정량 분포를 얻을 수 있고, 측정영역의 크기 또한 수십 km 정도로 크기 때문에 철도, 도로, 터널, 가스관 등의 대형 구조물의 감시에 사용될 수 있다[5-8]. 한편, 광섬유 브래그 격자는 광섬유 내부에 흐르는 빛의 특정 파장을 반사시키는 특징이 있는데 반사되는 파장이 광섬유에 적용되는 변형률에 따라 선형으로 변하는 특징이 있어서 변형률을 측정하는 센서로 적합하다[9,10]. 실제로 터널이나 유류 저장시설 등은 화재가 발생하면 분포 온도를 측정하여 화재 영향 범위를 알아내야 하고, 구조물 주요 부재의 응력 변화를 평가해야 하므로 분포 온도와 변형률을 한 개의 광섬유 라인으로 측정해야 할 필요성이 있다.

광섬유 브래그 격자와 라만 산란을 이용한 분포 온도와 변형률의 동시 측정 연구는 이탈리아의 Sant' Anna 고등기술원의 Farhan Zaidi가 하나의 광원과 단일모드 광섬유에 새겨진 광섬유 브래그 격자 센서와 다중모드 광섬유를 이용해 두 개의 센서 채널로 이루어진 동시 측정 기술을 보였다[11]. 국내에서는 한국표준과학연구원에서 단일모드 광섬유를 사용해 라만 산란광을 이용한 분포형 계측을 위한 광섬유 분포 온도 센서 시스템 연구가 보고된 바 있다[12].

본 연구에서는 분포 온도와 변형률을 한 개의 감지 광섬유 라인으로 측정할 수 있는 한 개의 광원과 광 수신부로 구성된 새로운 광섬유 센서를 고안하였다. 또한 온도가 변화하는 지점을 정확히 찾아내기 위하여 라만 안티-스토크스 후방 산란광을 감지 광섬유의 양방향에서 OTDR 방식으로 취득하여 분포 온도를 측정하였고, 변형률은 동일한 감지 광섬유에 설치된 광섬유 브래그 격자를 이용하여 측정하도록 하였다.

2. FBG가 있는 라만 OTDR 센서의 원리

분포 온도 및 변형률을 한 개의 감지 광섬유를 사용하여 동시에 측정하기 위한 광섬유 센서는 라만 OTDR과 FBG 센서 원리를 통합하여 사용하는데 그 각각의 센서 원리는 다음과 같다.

2.1. 광섬유 라만 OTDR의 원리

라만 산란광을 수신해 온도 분포를 측정하는 라만 OTDR은 일반적으로 파장이 길어지는 스토크스 산란광과 파장이 짧아지는 안티 스토크스 산란광을 각각 광 수신기로 받아서 온도 정보를 얻는 과정은 다음과 같다[13~18]. 광섬유의 특정 지점 z지점에서 측정되는 안티 스토크스 산란광의 크기는 식(1)으로 나타낼 수 있고 스토크스 산란광은 식(2)로 나타낼 수 있다.

$$I_{as}(z,T) = P_0 A_{as}(T)\exp[-\int_0^z \alpha_p(z)dz - \int_0^z \alpha_{as}(z)dz] + C \quad (1)$$

$$I_s(z,T) = P_0 A_s(T)\exp[-\int_0^z \alpha_p(z)dz - \int_0^z \alpha_s(z)dz] + D \quad (2)$$

여기서 P_0는 입사광의 크기, A_{as}, A_s는 각각 안티 스토크스 산란광과 스토크스 산란광의 산란계수, α_p, α_{as}, α_s는 각각 펌프광과 안티 스토크스 산란광, 스토크스 산란광의 주어진 위치에서의 미소 감쇠계수이다. I_{as}와 I_s의 비율이 온도 측정에 필요한 변수이므로 안티 스토크스 산란광과 스토크스 산란광의 비율을 이용하면 식(3)처럼 표현이 가능하고 온도 정보를 구할 수 있다.

$$R(z) = \frac{I_{as}-C}{I_s-D} = \frac{A_{as}(T)\exp[-\int_0^z \alpha_p(z)dz - \int_0^z \alpha_{as}(z)dz]}{A_s(T)\exp[-\int_0^z \alpha_p(z)dz - \int_0^z \alpha_s(z)dz]} \quad (3)$$

안티 스토크스 성분과 스토크스 성분을 솔리드 앵글의 미분단면(differential cross section)으로 일반화하면 각각의 온도 의존성이 식(4)로 전개된다.

$$\frac{d\sigma_{as}}{d\Omega}(z) \cong \frac{1}{\lambda_{as}^4}\frac{1}{\exp[\frac{hc\triangle\nu}{k_\beta T(z)}]-1} \quad (4)$$

여기서 $d\sigma_{as}/d\Omega$는 안티 스토크스 성분, $d\sigma_s/d\Omega$는 스토크스 성분의 미분단면이며 λ_{as}는

안티 스토크스 성분의 중심파장 λ_s는 스토크스 성분의 중심파장, h는 플랑크 상수, c는 진공 중에서 빛의 속도, k_β는 볼츠만 상수, Δv는 주파수의 변화량, $T(z)$는 위치 z에서의 온도이다. 식(3)에서 안티 스토크스 산란광과 스토크스 산란광의 감쇠계수가 같다고 가정하면 식(5)로 표현이 가능하다.

$$R(z) \approx \frac{A_{as}(T)}{A_s(T)} = \frac{d\sigma_{as}}{d\Omega}(z) / \frac{d\sigma_s}{d\Omega}(z) = \frac{\lambda_s^4}{\lambda_{as}^4} exp[-\frac{hc\Delta\nu}{k_\beta T(z)}] \quad (5)$$

식(5)를 이용해서 특정 위치 z_0에서의 온도 $T(z_0)$와 그 때의 산란광의 비율 $R(z_0)$를 안다면 분포온도는 식(6)으로 계산할 수 있다.

$$T(z) = [\frac{k_\beta}{hc\Delta\nu} log[\frac{R(z_0)}{R(z)} + \frac{1}{T(z_0)}]]^{-1} \quad (6)$$

2.2. 양방향 라만 산란광에 의한 온도 측정

일반적인 라만 OTDR에서 안티 스토크스 산란광과 스토크스 산란광의 온도 오차로 인해 발생하는 오류를 제거하기 위하여 본 연구에서는 온도 측정 방법을 Fig. 1과 같은 새로운 방법을 제안하였다.

여기서 P_0는 입사광의 세기, I^+는 정상적인 방향으로 입사된 광으로부터 l거리에서 산란되어 돌아오는 후방 산란광의 세기, I^-는 반대 방향에서 입사된 광으로부터 $L-l$거리에서 산란되어 돌아오는 후방 산란광의 세기이다. 여기서 I^+, I^-은 모두 안티 스토크스 산란광을 의미하고 I^+와 I^-는 위치에 따른 감쇠계수 $\alpha_p(z)$, $\alpha_{as}(z)$의 함수로 나타낼 수 있다.

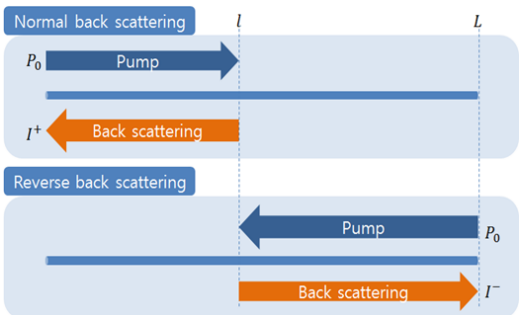


Fig. 1 Temperature measurement method using the anti-Stokes Raman scattering

$$I^+(l) = P_0 A_{as}(l,T) \exp[-\int_0^l \alpha_p(z)dz - \int_0^l \alpha_{as}(z)dz]$$
$$I^-(l) = P_0 A_{as}(l,T) \exp[\int_L^l \alpha_p(z)dz + \int_L^l \alpha_{as}(z)dz] \quad (7)$$

식(7)에서 구한 I^+와 I^-을 곱한 값에 양수의 제곱근을 구해 새로운 I_n을 정의한다.

$$\sqrt{I^+(l)I^-(l)} = P_0 A_{as}(l,T) \exp[-\frac{1}{2}\int_0^l \alpha_p(z)dz - \frac{1}{2}\int_0^l \alpha_{as}(z)dz] \quad (8)$$

$$I_n(l) = \sqrt{I^+(l)I^-(l)}$$
$$M = \exp[-\frac{1}{2}\int_0^l \alpha_p(z)dz - \frac{1}{2}\int_0^l \alpha_{as}(z)dz] \quad (9)$$

식(8)을 새롭게 정의한 $I_n(l)$과 M으로 정리하면 식(10)으로 정리된다.

$$I_n(l) = P_0 A_{as}(l,T) M \quad (10)$$

계산된 산란계수는 기존의 산란계수의 식과 같으므로 다음 식(11)과 같이 쓸 수 있다.

$$A_{as}(z,T) = \frac{I_n(z)}{P_0 M}(z) = \frac{S}{\lambda_{as}^4} \frac{1}{\exp[\frac{hc\Delta\nu}{k_\beta T(z)} - 1]} \quad (11)$$

식(11)에서 z_0지점과 z지점에 대한 식으로 표현한 후 비례식을 이용해 다른 요인들을 제거하고, 온도에 관한 식으로 정리할 수 있다.

$$\frac{I_n(z)}{P_0 M}(z) = \frac{S}{\lambda_{as}^4} \frac{1}{\exp[\frac{hc\Delta\nu}{k_\beta T(z)} - 1]} \quad (12)$$

$$\frac{I_n(z_0)}{P_0 M}(z) = \frac{S}{\lambda_{as}^4} \frac{1}{\exp[\frac{hc\Delta\nu}{k_\beta T(z_0)} - 1]}$$
$$T(z) = [\frac{k_\beta}{hc\Delta\nu} log[\frac{I_n(z_0)}{I_n(z)} \left\{\exp[\frac{hc\Delta\nu}{k_\beta T(z_0)} - 1\right\} + 1]]^{-1} \quad (13)$$

여기서 S는 산란계수이다. z 지점에서의 온도를 구하는 식(13)을 보면 z_0지점의 온도를 알고 z_0지점과 z지점의 안티 스토크스 산란광의 세기만을 이용해서 z지점의 온도를 구할 수 있다.

2.3. 광섬유 FBG 센서의 원리

광섬유 브래그 격자(FBG: fiber Bragg grating)는 광섬유의 코어 부분에 자외선(UV: ultra violet rays)을 일정 간격으로 투사시켜 코어의 굴절률을 주기적으로 다르게 만들어서 브래그 반사조건을 성립하게 만든 광섬유 소자로 구조는 Fig. 2와 같다.

Λ는 격자 사이의 간격을 나타내고 n_0는 공기의 굴절률, n_1은 광섬유의 클래딩의 굴절률, n_2는 광섬유 코어의 굴절률, n_3는 자외선에 의해 굴절률이 바뀐 코어 부분의 굴절률이다. 브래그 반사조건은 격자 사이의 간격인 Λ에 의해 결정이 되고 특정 파장이 처음 광원이 들어온 방향으로 반사되고 나머지 파장은 투과되는 스펙트럼 특성을 Fig. 3을 보면 알 수 있다. 반사되는 파장은 Λ의 간격에 따라 결정이 되는데 Λ의 간격이 넓어지면 반사되는 파장이 길어지고 Λ가 짧아지면 반사되는 파장이 짧아진다.

식(14)에 반사되는 파장과 간격에 관한 식을 알 수 있다.

$$\triangle\lambda = 2n\triangle d \tag{14}$$

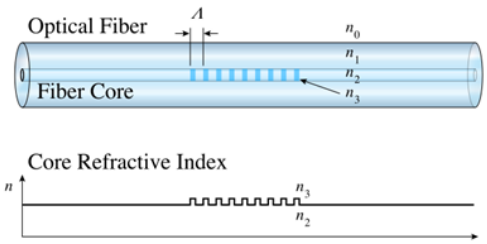


Fig. 2 Structure of FBG

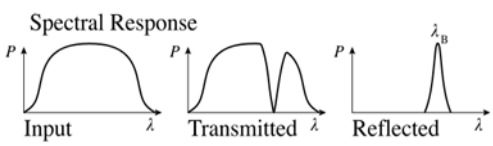


Fig. 3 Reflected and transmitted spectra from FBG

$\triangle\lambda$는 파장의 변화량을 의미하고 $\triangle d$는 격자의 간격 변화량을 의미한다. 즉 격자 간격의 변화량에 따라 반사되는 파장의 길이가 짧아지거나 길어진다. 파장의 변화를 확인하면 이것은 역으로 광섬유 브래그 격자에 얼마나 변형이 발생했는지를 구할 수 있다. 변형률 상수 C_ϵ을 이용해서 구하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\epsilon = \triangle\lambda / C_\epsilon = \triangle\lambda / (1.13 \times 1500/\lambda_B) \tag{15}$$

여기서 ϵ은 변형률을 의미하고 1500 nm 파장 대역의 광원을 사용할 경우 변형률 상수 C_ϵ의 값은 1.13 $pm/\mu\epsilon$이다[13]. 일반적으로 변형률 상수는 브래그 파장, λ_B에 역비례하므로 다른 파장 대역의 브래그 격자는 식(15)처럼 환산하여 사용한다.

3. 분포 온도 및 변형률의 측정 실험

3.1. FBG가 있는 라만 OTDR 센서의 구성

분포 온도와 변형률을 측정하기 위한 감지 광섬유는 일반 단일모드 광섬유에 FBG가 연결되어 있는 형태로 구성된다. 이러한 감지 광섬유는 양방향 라만 산란광을 측정하여 작동되는 OTDR과 FBG 반사 파장을 취득하고 파장 이동을 확인하기 위한 부분이 통합된 형태로 Fig. 4와 같이 구성된다. 펄스 발생기에서 50 ns의 펄스를 발생하면 1540 nm ~ 1560 nm의 파장 대역에서 발진하는 레이저 모듈에서는 동일한 펄스광을 생성하고, 이 빛은 EDFA(erbium-doped fiber amplifier)에서 23 dBm 이상으로 증폭시킨 후 감지 광섬유에

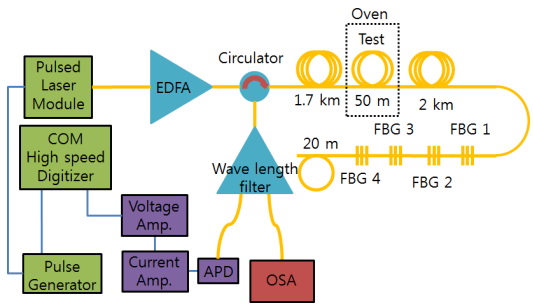


Fig. 4 Block diagram of the experimental setup for simultaneous measurement of temperature and strain distribution

서 23 dBm 이상으로 증폭시킨 후 감지 광섬유에 입사된다. 감지 광섬유의 양 끝단에 각각 이 펄스광을 넣어서 2번 측정해 온도를 구하는 방식으로 정확한 분포 온도와 광섬유 브래그 격자를 이용한 변형률을 동시 측정하도록 하였다. 입사 펄스광이 감지 광섬유를 지나면서 발생하는 후방 산란된 안티 스토크스 라만 산란광과 광섬유 브래그 격자에 의해 반사되는 파장을 파장 필터를 이용해 안티 스토크스 라만 산란광과 반사광으로 나누어 수신하였다. 광섬유 브래그 격자의 반사 파장이 라만 산란광에 영향을 끼치지 않도록 펄스 광원의 중심 파장과 라만 산란광에 해당하는 파장 대역이 아닌 파장을 사용하였으며 각각 1547.65 nm, 1550.06 nm, 1552.45 nm, 1555.08 nm를 사용하여 광섬유 브래그 격자에 반사된 파장이 주변 노이즈보다 20 dB 이상 큰 값으로 충분히 구분 가능한 값을 얻었다.

4 km 감지 광섬유를 앞서 구성한 라만 OTDR에 연결하였고, 분포 온도 측정을 위해 안티 스토크스 산란광은 광 수신기를 통해 수신하였다. 광섬유 브래그 격자를 이용한 변형률을 측정하기 위해 광 스펙트럼 분석기로 FBG 중심 파장을 구하였다. 실험 광섬유는 온도 실험을 위한 50 m 광섬유를 따로 중간에 뽑아서 오븐에 넣었으며 변형률 측정을 위한 광섬유 브래그 격자 4개를 감지 광섬유 중간에 넣어 변형을 가해 실험했다. 각각의 FBG는 변형률 인가를 위하여 고정단과 이송장치 사이에 고정되었다. 레이저 광을 양 방향으로 넣어 측정해야 하기 때문에 오븐에 넣는 50 m 앞단과 광섬유 브래그 격자의 다음 단에 각각 1.7 km, 20 m의 여유 광섬유를 넣어 실험하였다.

3.2. 분포 온도 및 변형률 측정 실험 결과

감지 광섬유의 정방향과 역방향의 안티 스토크스 라만 산란광을 수신하여 Fig. 5에 보였다. 우측 하단 방향으로 감쇠하는 선은 정방향으로 측정한 안티 스토크스 라만 산란광이고, 오른쪽 위 방향으로 진행하는 선이 역방향으로 측정한 안티 스토크스 산란광을 보인다. 이 그림에서 2000 m 부근의 변화 부분은 온도 챔버에 감지 광섬유가 들어가 있는 부분으로 온도 변화가 주어져 있음을 볼 수 있다.

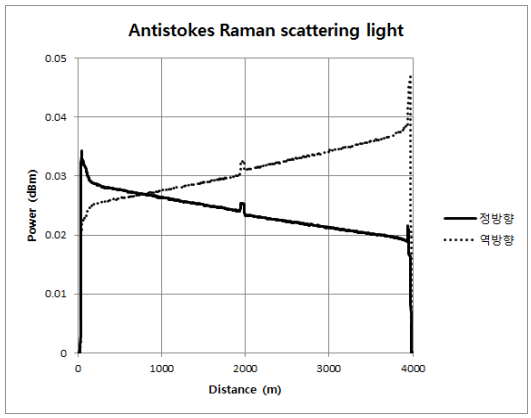
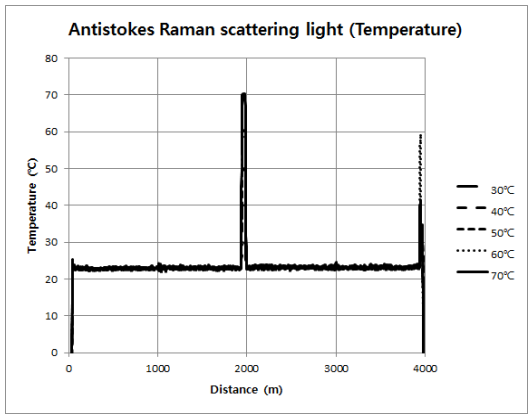
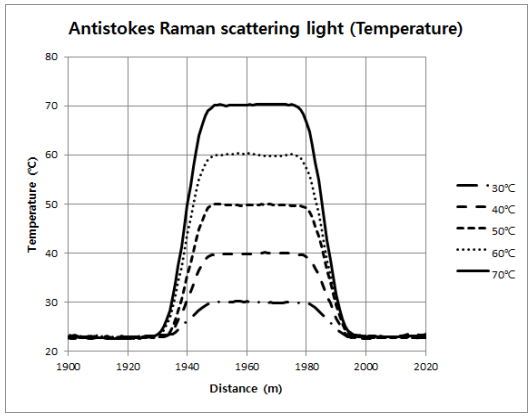


Fig. 5 Anti-Stokes Raman scattering lights from forward and reverse direction of the sensing fiber



(a)



(b)

Fig. 6 Distributed temperature measured by the sensing fiber (a) distributed temperature (0 ~ 4000 m), (b) distributed temperature (1900 ~ 2020 m)

정방향과 역방향의 안티 스토크스 산란광의 신호를 이용해 온도를 구하는 식(13)에 적용할 수 있다. 실제 적용하는 것에 있어서 z_0의 온도와 안티 스토크스 라만 산란광의 정보가 필요한데 실제 실험에서는 실험 광섬유가 오븐에 넣은 50 m를 제외하고는 상온에 있었기 때문에 상온 23℃를 적용했으며, z_0의 안티 스토크스 라만 산란광의 값은 거리 200 m에서 500 m까지 1 m 단위의 값에서 각각 산란광의 세기를 구해 평균값으로 지정했다.

식(13)을 통해 정방향과 역방향의 안티 스토크스 라만 산란광을 이용한 온도를 구하면 Fig. 6의 그래프를 얻을 수 있다. Fig. 6(a)는 광섬유 전체 길이에 대한 측정 온도 분포를 보이고 있는데 2000 m 부근의 광섬유에서만 온도 변화가 나타남을 볼 수 있다. Fig. 6 (b)는 온도 변화 부분을 확대한 그래프로 30℃부터 70℃까지 10℃씩 변화시키면서 측정한 결과를 확인할 수 있다. 각각의 온도에 따른 정확도를 Fig. 7의 그래프로 확인하면 30℃에서는 최소-최대 변동폭이 0.38℃, 50℃에서는 0.43℃, 70℃에서는 0.39℃의 오차가 나타났다. 전체적인 평균으로는 0.40℃의 온도 변동폭을 보였고 실제 오븐의 온도 정확도가 0.10℃인 것을 감안할 때 온도 정확도는 0.50℃인 것을 확인하였다.

온도 측정과 더불어 변형률 측정을 위한 실험으로 3개의 광섬유 브래그 격자에 Fig. 8과 같은 이송장치를 이용하여 각각 다른 변형을 주었다. 1개의 광섬유 브래그 격자는 기준점으로 고려하기 위하여 변형을 가하지 않고 실험을 하였다.

Fig. 9는 각각 다른 인장력을 가한 광섬유 브래그 격자의 파장 변화를 나타낸 그래프로 각각 광섬유 브래그 격자의 반사 파장은 1547.65 nm, 1550.06 nm, 1552.45 nm에서 1547.75 nm, 1550.23 nm, 1552.74 nm로 각각 0.10 nm, 0.17 nm, 0.29 nm의 파장 변화를 나타냈다. 온도 변화를 측정할 광섬유 브래그 격자의 변화량은 1555.08 nm에서 1555.08 nm로 파장의 변화가 없어 온도 변화가 없는 것을 확인하였다. 파장 이동에 따른 변형률의 값은 브래그 파장을 고려한 변형률 상수를 사용하여 식(15)를 이용해서 계산하면 각각 85.76 $\mu\epsilon$, 145.55 $\mu\epsilon$, 247.86 $\mu\epsilon$, 0.00 $\mu\epsilon$로 결정되었다.

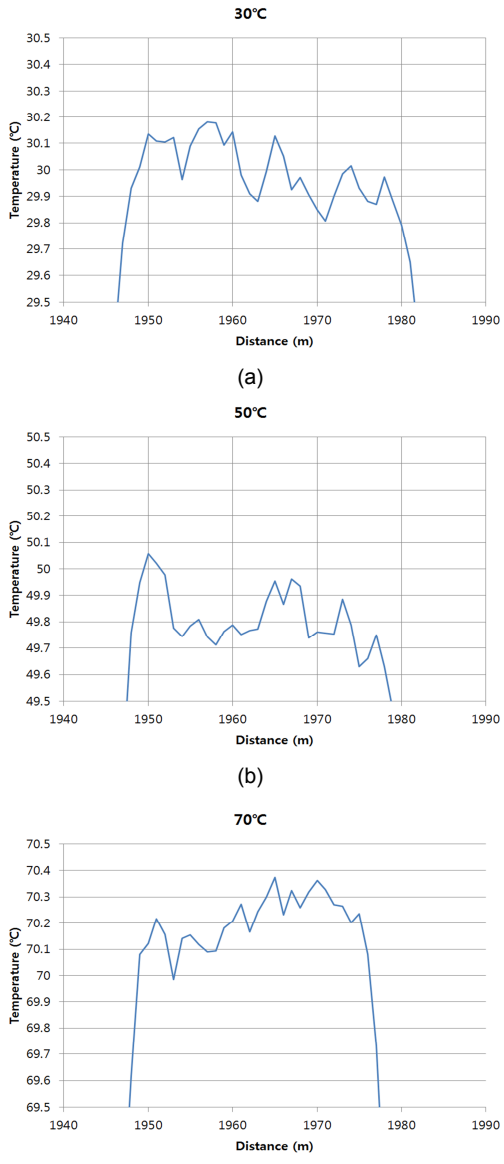


Fig. 7 Measurement error of distributed temperature on 50 fiber (a) temperature of 30℃, (b) temperature of 50℃, (c) temperature of 70℃

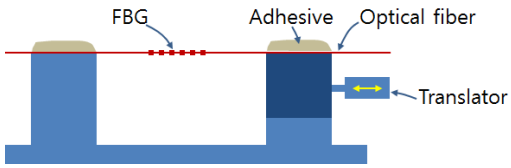


Fig. 8 Translator for inducing strain in FBG

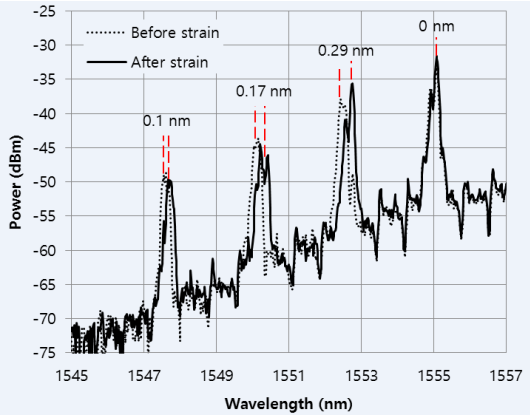


Fig. 9 Wavelength shifts of FBGs

4. 결 론

한 개의 감지 광섬유에 광섬유 브래그 격자를 통합한 라만 OTDR을 새로이 고안하고 감지 광섬유의 양단에서 라만 산란광을 취득하여 온도를 계산할 뿐만 아니라 변형률도 측정하는 새로운 방법을 도입한 센서를 구성하였다. 이 센서는 한 개의 광원과 광 수신부를 사용하여 분포 온도와 변형률을 동시에 측정할 수 있는 센서 시스템이다.

온도 변화 측정 실험으로부터 온도 측정 정확도는 0.5℃ 이내임을 알 수 있었다. 또한 변형률 측정 실험으로부터 FBG 가용 파장 범위를 약 2 nm 정도로 설정하여 라만 OTDR과 함께 작동시킬 수 있음을 확인하는데, 이러한 결과는 변형률 약 1700 마이크론의 범위를 측정할 수 있음을 의미한다.

본 연구는 분포 변형률과 온도를 한 개의 감지 광섬유로 동시 측정하기 위한 가능성을 보이는 연구를 수행하였다. 향후 온도 및 변형률 측정을 위한 환경을 구축하여 정밀한 동시 측정 실험 연구가 수행되어야 할 것이다.

후 기

본 논문은 2013년도 한국표준과학연구원 주요사업 (안전계측기술개발)의 지원을 받아 수행한 연구입니다.

References

[1] I.-B. Kwon, "Structural health monitoring using fiber optic sensors," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 25, No. 5, pp. 400-404 (2005)

[2] G. J. Lee, S. G. Choi and D. H. Noh, "The study on the fiber optic sensor for the distributed temperature measurement," *Proceedings of the 12th KACC*, pp. 1746-1749 (1997)

[3] P. C. Wait, K. De Souza and T. P. Newson "A theoretical comparison of spontaneous Raman and Brillouin based fiber optic distributed temperature sensors", *Optical Communications*, Vol. 144, pp. 17-23 (1997)

[4] P. R. Stoddart, P. J. Cadusch, J. B. Pearce, D. Vakovic, C. R. Nagarajah and D. J. Booth "Fiber optic distributed temperature sensor with an integrated background correction function," *Measurement Science and Technology*, Vol. 16, pp. 1299-1304 (2005)

[5] G.-J. Kim, I.-B. Kwon, D.-J. Yoon, D. Hwang and Y. Chung, "Reflection signal analysis for time division multiplexing of fiber optic FBG sensors," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 30, No. 1, pp. 6-12 (2010)

[6] A. Kimura, E. Takada, K. Fujita, M. Nakazawa, H. Takahashi and S. Ichige, "Application of a Raman distributed temperature sensor to the experimental fast reactor JOYO with correction techniques," *Measurement Science and Technology*, Vol. 12, pp. 966-973 (2001)

[7] G. Yilmaz and S. E. Karlik "A distributed optical fiber sensor for temperature detection in power cables," *Sensors and Actuators A*, Vol. 125, pp. 148-155 (2006)

[8] K. Suh and C. Lee, "Auto-correction method for differential attenuation in a fiber-optic distributed-temperature sensor," *Optics Letters*, Vol. 33, pp. 1845-1847 (2008).

[9] J. H. Lee and D. H. Kim, "Cure Monitoring of Epoxy Resin by Using Fiber Bragg Grating Sensor," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 36, No. 3, pp. 211-216 (2016)

[10] H. Y. Kim, D. Kang and D. H. Kim,

"Reliability Evaluation of Fiber Optic Sensors Exposed to Cyclic Thermal Load," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 36, No. 3, pp. 225-230 (2016)

[11] F. Zaidi and T. Nannipieri, M. A. Soto, A. Signorini, G. Bolognini and F. Di Pasquale, "Integrated hybrid Raman/fiber Bragg grating interrogation scheme for distributed temperature and point dynamic strain measurements," *Applied Optics*, Vol. 51, Issue 30, pp. 7268-7275 (2012)

[12] D. Hwang, D.-J. Yoon, I.-B. Kwon, D.-C. Seo and Y. Chung, "Novel autocorrection method in a fiber-optic distributed-temperature sensor using reflected anti-Stokes Raman scattering," *Optics Express*, Vol. 18, pp. 9747-9754 (2010)

[13] J. M. Lopez-Higuera, “Handbook of Optical Fibre Sensing Technology,” Wiley, New York, (2002)

[14] J. P. Dakin, D. J. Pratt, G. W. Bibby and J. N. Ross, "Distributed optical fibre Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector," *Electronic Letters*, Vol. 21, No. 13, pp. 569-570 (1985)

[15] Derek A. Long, "The Raman Effect : A Unified Treatment of the Theory of Raman Scattering by Molecules," (2002)

[16] J-K. Min, "A Study on the Distributed Optical-Fiber Temperature Sensor using Raman Scattering", Chonbuk National University Electrical Engineering (1995)

[17] K-J. Lee, S-G. Choi, D-H. Noh, "The Study on the Fiber Optic Sensor for the Distributed Temperature Measurement", KACC 12, 1746-1749 (1997)

[18] J-K. Min, S-G. Choi, D-H. Noh, "A Study on the Distributed Temperature Sensor System using Scattering Light in Optical fiber", journal of chonbuk national university, Vol. 41, 75-80 (1996)