

<학술논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2017.41.4.313>

ISSN 1226-4873(Print)  
2288-5226(Online)

## 주기적인 반복 열하중이 패키징된 FBG 센서 신호 특성에 미치는 영향

김 현 영<sup>\*,\*\*</sup> · 강 동 훈<sup>\*†</sup>

\* 한국철도기술연구원 첨단소재연구팀, \*\* 연세대학교 기계공학과

### Effects of Cyclic Thermal Load on the Signal Characteristics of FBG Sensors Packaged with Epoxy Adhesives

Heonyoung Kim<sup>\*,\*\*</sup> and Donghoon Kang<sup>\*†</sup>

\* Advanced Materials Research Team, Korea Railroad Research Institute,

\*\* School of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.

(Received September 8, 2016 ; Revised October 27, 2016 ; Accepted December 9, 2016)

**Key Words:** Fiber Bragg Grating(광섬유 브래그 격자), Signal Characteristics(신호 특성), Fiber Optic Sensor(광섬유 센서), Cyclic Thermal Load(반복 열하중), Adhesives(접착제)

**초록:** 광섬유 센서는 전자기 간섭에 독립적이고 원거리 측정이 가능하여 다양한 분야에 적용되고 있다. 특히, 광섬유 브래그 격자(FBG) 센서는 다중화, 절대측정이 가능하여 구조 건전성 모니터링(SHM)을 위해 널리 사용되고 있다. 일반적으로, FBG 센서는 에폭시와 같은 접착제를 이용하여 구조물에 직접 부착 및 모듈 제작을 통해 적용한다. 하지만, 에폭시로 부착된 FBG 센서 기반의 장시간 모니터링 과정에서 신호 변화가 발생하여 보정이 요구된다. 이는 계절적 요인으로써 장시간 온도 변화 환경에 노출되어 센서의 접착구조 변형에 의한 결과이며, 센서 접착제의 열경화 과정에 대한 규명이 필요하다. 본 연구에서는, 패키징 방식 4가지 경우의 FBG 센서 시편을 제작하고, 반복 열하중 시험을 수행하였다. 시험 결과, 상온경화 과정에서 미소한 잔류 압축 변형률이 발생하였고, 반복 열하중 초기단계에서 수백  $\mu\epsilon$ 의 압축 변형률이 인가되어 유지되었다. 이를 통해 FBG를 이용한 장시간 SHM을 위해서는 FBG 센서의 신호에 대한 안정화 과정이 필요함을 확인하였다.

**Abstract:** Fiber optics sensors that have been mainly applied to aerospace areas are now finding applicability in other areas, such as transportation, including railways. Among the sensors, the fiber Bragg grating (FBG) sensors have led to a steep increase due to their properties of absolute measurement and multiplexing capability. Generally, the FBG sensors adhere to structures and sensing modules using adhesives such as an epoxy. However, the measurement errors that occurred when the FBG sensors were used in a long-term application, where they were exposed to environmental thermal load, required calibration. For this reason, the thermal curing of adhesives needs to be investigated to enhance the reliability of the FBG sensor system. This can be done at room temperature through cyclic thermal load tests using four types of specimens. From the test results, it is confirmed that residual compressive strain occurs to the FBG sensors due to an initial cyclic thermal load. In conclusion, signals of the FBG sensors need to be stabilized for applying them to a long-term SHM.

- 기호설명 -

$\lambda_B$  : 브래그 파장(nm)

$\epsilon$  : 변형률

$p_e$  : 광탄성 상수

$\alpha_f$  : 열팽창 계수( $1/^\circ\text{C}$ )

$\xi_f$  : 열광학 계수( $1/^\circ\text{C}$ )

$T$  : 온도( $^\circ\text{C}$ )

† Corresponding Author, dhkang@krri.re.kr

© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

## 1. 서론

최근, 관련 요소기술의 발달에 힘입어 사물 인터넷(Internet of Things, IoT)을 비롯하여 무인 자동차 개발 및 스마트 구조물(smart structures)에 대한 연구가 전 세계적으로 활발히 진행 중이다.<sup>(1,2)</sup> 이처럼 다양한 구조물의 스마트화를 위해서는 통신 기술 및 알고리즘과 신개념 센서가 요구된다. 기계 및 우주항공 분야에서는 스마트 구조물의 실현을 위해 센서, 시스템, 분석기법 등 다양한 주제에 대한 연구가 진행되었다. 통상적으로는 초음파와 전자기적 방법을 이용하여 결함 계측과 같은 비파괴검사(non-destructive testing, NDT)가 수행되고 있으며,<sup>(3,4)</sup> 자동화 기술 적용을 위한 연구로 확대되고 있다. 비파괴검사를 위한 신개념 솔루션으로 구조 건전성 모니터링(structural health monitoring, SHM)에 대한 연구가 진행되고 있다.<sup>(5,6)</sup> 구조 건전성 모니터링을 위해서는 감지계 및 감지 시스템의 높은 적용성이 요구되어 스트레인게이지와 압전소자 등 상용화되어 있는 전기식 센서를 이용한 기법이 제공되고 있다. 하지만, 장시간 운용되는 구조물에 적용하기 위해서는 외부 환경에 대한 높은 내구성과 신뢰성이 요구되며, 이를 위해 기존의 전기식 센서를 대체해 광학 기반의 광섬유 센서가 적용 영역을 확대하고 있다.

광섬유 센서는 전기식 센서에 비해 전자기 간섭(electromagnetic interference, EMI)과 같은 외란의 영향이 없고, 습기에 의한 부식(corrosion)으로부터 안전하며 적은 손실로 원거리 계측이 가능한 큰 장점을 가지고 있다. 특히, 첨단 복합소재의 적용 확대와 함께 타 센서에 비해 복합재 내부에 삽입(embedding)이 상대적으로 용이한 광섬유 센서는 스마트 구조물에 가장 적합한 센서로 각광받고 있다.<sup>(7,8)</sup>

여러 광섬유 센서 중에서 다중화(multiplexing), 절대측정(absolute measurement), 대량생산(mass production)에 유리한 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating, FBG) 센서는 스마트 구조물을 위해 가장 적합한 센서로 많은 연구 및 적용 노력이 진행되고 있다.<sup>(9,10)</sup> 뿐만 아니라, FBG 센서는 변형률, 온도의 두 물리량에 대해서 선형적인 특성을 가지므로 높은 사용자 편의성을 바탕으로 보다 쉽게 시스템 구축이 가능하다. 그리고, FBG

센서는 기본적으로 변형률과 온도만의 함수로 물리량을 측정할 수 있어 다양한 형태의 패키징을 통해 가속도, 변위 등 다양한 물리량을 측정할 수 있는 수준으로 개발 및 상용화가 진행된 상태이다.

한편, FBG 센서를 이용한 구조건전성 모니터링을 위해서는 외부 환경에서의 장기 계측 수행이 필수적으로 요구되며 이를 위한 신뢰성 및 적용성에 대한 규명이 필요하다. 특히, 외부에서 장기적으로 적용시 계절적 기후 변화에 의해 유발되는 온도변화(~수십℃)는 스마트 구조물의 감지계에 열피로가 인가되며, 이는 센서의 신뢰성에 영향을 미치는 요인이 될 수 있다. 이를 위해 다양한 신뢰성 관련 항목 중에서 센서의 강도 및 신호 안정성은 센서의 수명 및 사용범위, 그리고 센서의 측정 오차 등과 직접적으로 관련되므로 이에 대한 연구가 수행되었다. 특히, 극한 환경인 초고온(900℃) 또는 극저온(-150℃) 환경에서 FBG 센서의 신호특성에 대한 연구와 반복 열하중에 노출된 FBG 센서의 기계적 강도 변화에 대한 연구가 수행되었다.<sup>(11,12)</sup> 그리고, 센서 패키징 방법과 소재(base materials) 및 접착제(adhesives) 종류에 따라 반복 열하중에 의해 유발되는 신호안정성 영향에 대한 연구가 수행된 바 있다.<sup>(13-15)</sup> 선행연구에서, 패키징 방법은 센서를 기준으로 양단을 접착하는 방법(Type I)과 센서부를 완전 접착하는 방법(Type II)으로 나뉘며, 반복 열하중에 대한 신호 안정성 영향에 대한 신뢰성 평가가 수행되었다. Type I 접착 방법의 경우 반복 열하중에 대한 신호 변화가 거의 발현되지 않아 실제 적용함에 있어 신뢰성이 높음을 확인하였지만, Type II의 경우 반복 열하중이 50 사이클 진행된 시점에서 일정량의 압축 변형이 발생하였으며 이후 300 사이클까지 일정하게 유지되는 경향을 보였다. 따라서, 센서부 완전 부착방식인 Type II의 경우 선행연구에서의 시험조건(50, 100, 150, 200, 300 사이클)에 의해 50 사이클 단위로 시험이 수행된 결과로, 50 사이클 이내의 범위에 대해서는 면밀한 분석이 진행되지 못한 한계가 있었다.

따라서, 본 연구에서는 선행 연구<sup>(14)</sup>에서 완벽하게 규명되지 못하고 후속연구로 제시된 Type II의 패키징 방식으로 제작된 FBG 센서에 대한 반복 열하중 시험을 수행하였다. 센서부에 에폭시를 도포하여 초기 경화되는 순간부터 반복 열

하중이 가해지는 초기 전 과정에 대해 매 사이클 별로 FBG 센서의 신호특성 변화를 모니터링 하였다.

## 2. 광섬유 브래그 격자 센서

많은 연구가 수행된 FBG 센서의 원리 등은 선행 문헌을 통해 확인 가능하다.<sup>(14,15)</sup> 간략히 요약 하면, FBG는 광섬유 코어에 주기적인 굴절률 변화를 갖는 격자를 의미하며, 식 (1)과 같이 해당 격자가 변형률, 온도와 같은 외란에 노출될 경우 브래그 파장( $\lambda_B$ )이 변하게 되어 원하는 물리량 측정이 가능하다.

$$\Delta \lambda_B = \lambda_B [(\alpha_f + \xi_f) \Delta T + (1 - p_e) \varepsilon] \quad (1)$$

여기서,  $p_e$ 는 광탄성 상수(photoelastic constant)로 실리카계(germanosilicate glass) 광섬유의 경우 대략 0.22의 값을 가진다. 그리고,  $\alpha_f$ 는 광섬유의 열팽창계수( $0.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ )이고  $\xi_f$ 는 열광학계수( $6 \times 10^{-6} \sim 11 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ )이며 광섬유 소재의 상수값이다.

FBG 센서는 변형률( $\varepsilon$ )과 온도변화( $\Delta T$ )에 대해 브래그파장의 변화( $\Delta \lambda_B$ )가 발현되는 센서이지만 센서 헤드부의 다양한 패키징을 통해 위 두 물리량으로부터 가속도, 변위, 압력 등 다양한 물리량의 측정도 가능하게 된다.

## 3. 열경화 시험

본 연구에서는 FBG 센서 기반의 장기 구조 건전성 모니터링을 위해 반복 열하중 환경에 노출된 모재 및 에폭시의 초기 열경화 시험을 수행하였다. 구조물에 접착된 에폭시가 경화되어 반복적인 열하중을 받을 때 FBG 센서에 미치는 영향을 평가하기 위해 가속 노화(accelerated aging) 시험을 수행하였다. 모재 및 접착제의 종류는 상용 FBG의 패키징에 많이 활용되는 금속 2종(stainless steel, titanium)과 상온 5분 경화 에폭시 2종(araldite rapid, permapoxy rapid)을 선정하였다. 시험은 우선 에폭시 도포 후 72시간 동안의 상온 경화 과정을 거쳤으며 이후 국내 계절적 요인인 반영된  $-20^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ 의 온도변화로 항온시험기에서 주기적인 반복 열하중에 의한 가속 노화시험을 진행하였다. 50 사이클 단위로 300 사이클까지

진행된 선행 연구<sup>(14,15)</sup>와 달리 본 연구에서는 가속노화 시작 후 매 사이클마다 신호 변화를 측정하는 방식으로 시험을 진행하였다.

### 3.1 시편 제작

선행 연구<sup>(14)</sup>와 마찬가지로 주기적인 반복 열하중 시험을 위해 Fig. 1과 같이 각각의 모재 및 접착제로 단일 FBG 센서를 시편에 직접 부착하는 방법(Type II)으로 시험 시편을 제작하였다. 구체적으로, 모재는 패키징된 FBG 센서의 제작에 일반적으로 많이 활용되는 스테인리스강(stainless steel 316)과 티타늄(pure titanium grade 2)을 사용하였다. 모재의 크기는 주기적인 반복 열하중 시험을 위한 항온시험기의 내부 크기를 고려하여  $50\text{mm} \times 40\text{mm} \times 5\text{mm}$ 로 가공하였다. 접착제는 상온경화가 가능한 상용접착제로 사용 빈도가 높은 Araldite rapid(HUNTSMAN Co.)와 Permapoxy rapid(Permatex Co.) 제품을 사용하였다. FBG 센서는 피복(coating)과 클래딩(cladding) 사이의 미끄럼(slipping)에 의한 영향을 배제하기 위해 피복이 제거된 형태로 사용하였다. 시험에 사용된 FBG 센서(FBGKOREA Co.)의 상온에서의 브래그 파장은 Table 1과 같으며, 모두 반사율 70%(6dB), 계

Table 1 Specifications of an FBG sensor

Base materials and adhesives	Bragg wavelength
Stainless steel + araldite	1550.6 nm
Stainless steel + permapoxy	1562.2 nm
Pure titanium + araldite	1571.4 nm
Pure titanium + permapoxy	1580.1 nm

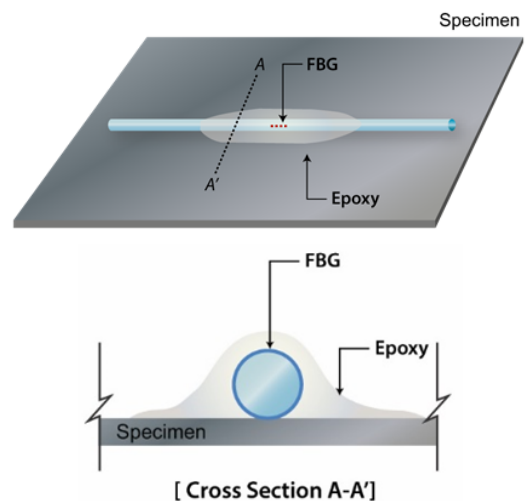


Fig. 1 Configuration of test specimens<sup>(14)</sup>

이 지 길이 10mm의 센서를 사용하였다.

3.2 시험 방법

FBG 센서가 부착된 시편의 반복 열하중 시험을 위한 장치 구성은 Fig. 2와 같다. 구체적으로, 금속 시편 중앙에 FBG 센서를 위치시키고 테이프를 광섬유 양단을 고정한 후 브래그 격자 부분에 에폭시를 고르게 도포한다. 에폭시 도포 후에는 72시간의 상온 경화 과정을 거쳤으며, 이후 항온습기(TH-KE, JEIOTECH Co.)를 이용하여 Fig. 2의 그래프와 같이 -20°C~60°C의 온도주기로 총 5 사이클 동안 경화를 진행하였다. 외부 환경적인 영향에 따른 측정 오차를 제거하기 위해 제작된 4종의 시편은 모두 동시에 실험을 진행하였다. 또한, 온도 사이클은 선행 연구<sup>(14)</sup>에서와 마찬가지로 조건으로 Table 2와 같이 총 95분/사이클로 인가하였다. 구체적으로는, 상온(25°C)에서 10분 동안 60°C까지 상승시킨 후 70분 동안 -20°C까지 냉각시키고 다시 15분 동안 상온(25°C)으로 상승시키게 되며 총 95분에 걸쳐 한 사이클이 완성된다. 이와 같은 과정을 계속 반복하며 최종 5 사이클까지 반복 열하중 시험을 진행하였다. 한편, 시험은 광대역 광원(83437A, Agilent Co.)과 광 스펙트럼 분석기(MS9740A, Anritsu Co.)를 이용하여 반복 열하중에 따른 FBG 센서의 피크 신

호 특성 변화를 분석하는 방법으로 진행하였다. 그리고, 4개 시편에 대해 빠른 신호 측정을 위해 광 스위치(optical switch)를 이용하여 채널을 변경하는 방법으로 측정 시간을 단축하였다. 신호 측정은 상온경화 과정에서 시간별로 선정된 5개 구간과 반복 열하중 시험동안 매 사이클에서의 일정 온도(25°C)에서 측정하였다. 즉, 반복 열하중 시험에서는 매 사이클마다 같은 온도에서 신호 특성 변화를 관찰하는 방법으로 온도 변화에 따른 신호 특성 영향을 제거하였다.

3.3 시험 결과

총 4종류의 시편에 대해 데이터 측정 구간인 10개 구간(상온경화 5개 구간, 5 사이클까지 5개 구간)에 대한 브래그 파장 변화를 측정한 결과 Figs. 3, 4와 같이 4종류 모두 값의 차이는 있으나 모두 유사한 경향을 보였다. 사이클이 진행되기 전 상온 경화 과정에서의 파장값에 비해 사이클이 1회 진행되면서 일정 크기의 압축변형이 발생하였다. 이후 사이클이 더 진행되더라도 일부 값의 차이는 나타나지만 큰 변화는 없이 대체로 유지되는 경향을 보였다. 시편에 발생하는 압축 변형의 정도는 모재와 에폭시의 조합에 따라 최대 약 3배 차이를 보이며 각기 다르게 나타났다. 한편, 식 (1)을 통해 계산된 압축 잔류 변형률을 계산한 결과(Fig. 5)의 경우, 상온 경화 과정에서는 11~30µε의 비교적 적은 양의 압축 잔류 변형률이 발생하였고 열하중 시험에서는 130~370µε의 압축 잔류 변형률이 발생하였다. Fig. 6에서와 같이 동일한 모재에서 Permapoxy 에폭시의 경우 Araldite 에폭시에 비해 높은 잔류 변형률을 보였고, 스테인리스강에서 가장 큰 변형률 값을 나타

Table 2 Cyclic thermal load imposed to specimens

Thermal Cycle Step	Elapsed time [min.]
RT(25°C) → 60°C	10
60°C → -20°C	70
-20°C → RT(25°C)	15
Total	95

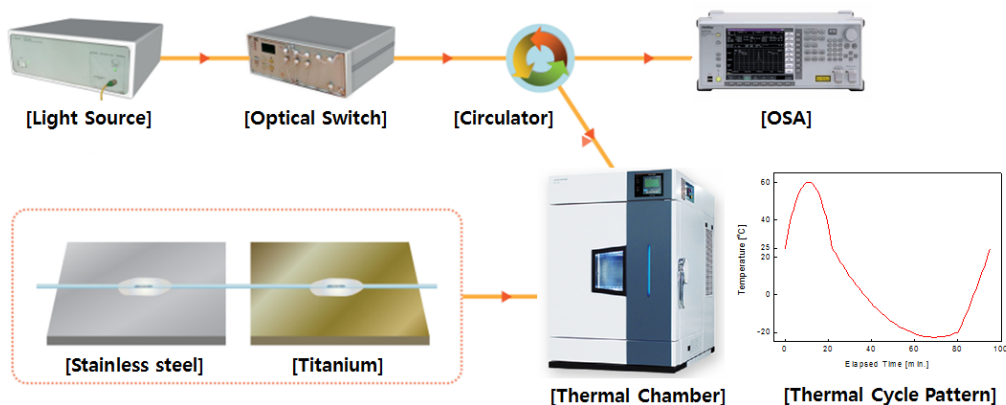


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup

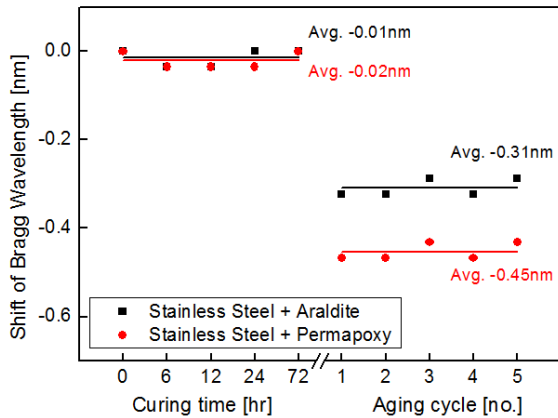


Fig. 3 Shift of Bragg wavelength on stainless steel with adhesives

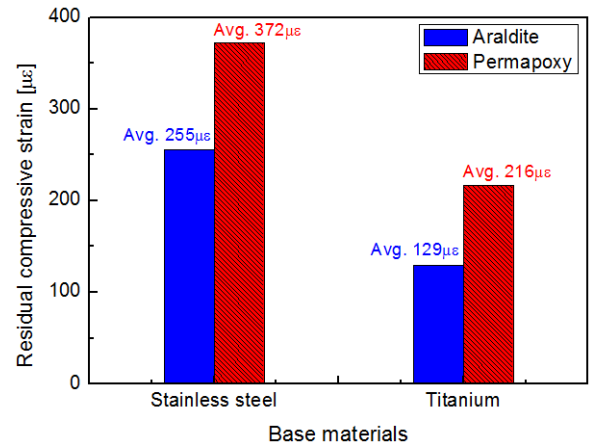


Fig. 6 Residual compressive strain with base materials and adhesives

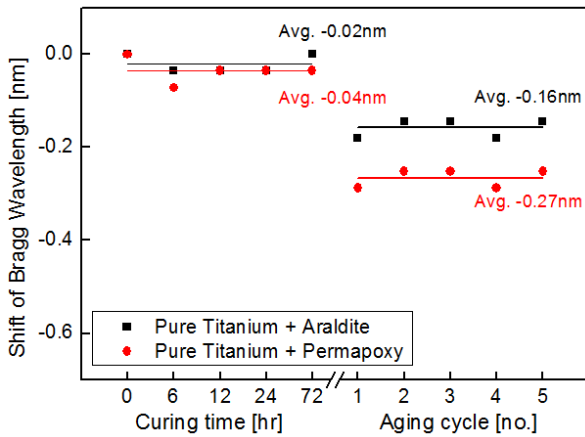


Fig. 4 Shift of Bragg wavelength on titanium with adhesives

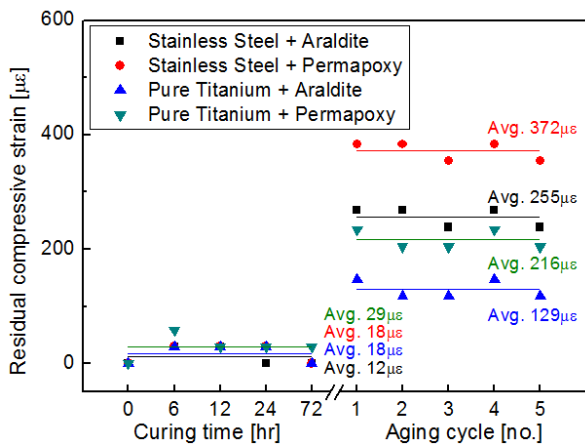
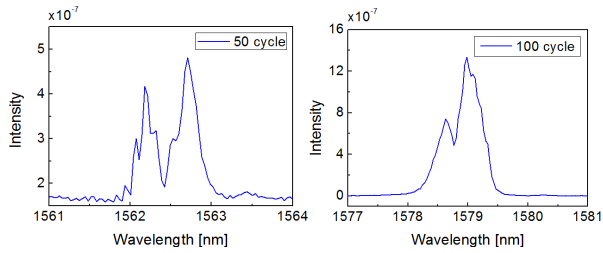
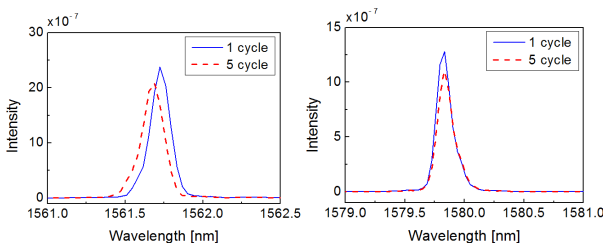


Fig. 5 Residual compressive strain of test specimens

났다. 즉, 잔류 변형률의 측면으로만 판단할 때 Titanium + Araldite 조합이 가장 적은 잔류 변형률을 나타내 FBG 센서의 패키징을 위한 조합

으로 상대적으로 더 적합한 것으로 판단된다. 왜냐하면, 반복 열하중에 의해 발생된 잔류 변형률 값은 센서의 측정 오차로 인식되기 때문이다. 한편, Fig. 6의 결과는 선행 연구<sup>(14)</sup>에서의 결과와는 절대값 및 최적 조합(Stainless Steel + Araldite)결과와는 다소 다르게 나타났는데, 그 이유는 압축 잔류 변형률을 발생시키는 주요원인이 접착제와 모재의 열팽창계수 차이, 에폭시 도포량, 모재의 표면조도(roughness) 등 복합적으로 영향을 미치기 때문으로 판단된다. 따라서, 이 부분에 대한 보다 엄밀한 정량화를 위해서는 위 조건들이 일정하게 유지된 환경에서 추가적인 시험이 필요할 것으로 판단된다. 한편, 반복 열하중 사이클이 증가함에 따라 선행연구<sup>(15)</sup> 결과에서 Araldite 에폭시의 경우 신호 이상 현상이 발생하지 않았지만, Fig. 7(a)와 같이 Permapoxy로 접착된 시편의 경우 반복 열하중 경화과정에서 복굴절이 발생하는 신호 특성이 불안정해지는 현상이 관찰된바 있다. 하지만, 본 연구와 같이 초기 사이클 구간에서는 Fig. 7(b)와 같이 사이클 경과에 따라 복굴절 현상은 발견되지 않아 차이를 보였다.

선행연구<sup>(14,15)</sup> 결과와 본 연구로 도출된 결과를 종합해보면, 에폭시를 이용한 패키징된 FBG 센서를 제작할 경우 에폭시 경화에 의해 수십 μs 수준의 압축 잔류 변형률이 발생하고, 이후 반복적인 열하중에 가해지는 환경에 FBG 센서가 노출될 경우 한, 두 사이클과 같이 초기에 수백 μs 수준의 추가적인 압축 잔류 변형률이 발생하게 된다. 또한, 이러한 압축 잔류 변형률은 이후 반복 열하중이 지속(~300 사이클)되더라도 추가적으로

(a) Signal characteristics of FBG sensors<sup>(15)</sup>

(b) Signal characteristics of FBG sensors with change of thermal cycles

**Fig. 7** Peak signal characteristics of FBG sensors with change of thermal cycles (left: stainless steel/permapoxy, right: titanium/permapoxy)

더 증가하지는 않는다. 한편, FBG 센서의 측정 오차와 직접 관련이 있는 피크 신호의 경우 초기 사이클에서는 안정적으로 유지되지만 사이클이 경과됨에 따라 복굴절 영향에 의해 피크 갈라짐 (split)이 발생할 수 있어 주의가 요구된다. 따라서, 이러한 에폭시 특성과 FBG 센서의 사용 환경을 종합적으로 고려할 때 FBG 센서를 이용한 장기 구조건전성 모니터링을 위해서는 센서 사용 전 최소 1~2회 정도 반복 열하중에 노출시켜 신호 안정화 과정을 거치는 것이 바람직하다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 장시간 반복 열하중이 가해지는 환경에서 광섬유 센서의 패키징에 따른 영향을 확인하기 위한 연구를 수행하였으며, 선행 연구<sup>(14)</sup>에서 규명되지 못한 반복 열하중이 가해지는 환경에서 초기 사이클 경과에 따른 FBG 센서 신호특성 변화를 확인하였다.

총 4종류의 시편을 대상으로 상온 및  $-20^{\circ}\text{C}$ ~ $60^{\circ}\text{C}$ 의 반복 열하중 조건에서 5 사이클 동안 시편에 부착된 FBG 센서의 신호특성 변화를 관찰하였다. 시험결과, 상온 경화 과정에서  $11\sim 30\mu\text{e}$ 의 압축 잔류 변형률이 발현되었고, 반복 열하중 환경 하에서는  $130\sim 370\mu\text{e}$ 의 압축 잔류 변형률이

발생하였다. 선행 연구와 본 연구의 결과를 종합할 때, 장기 구조건전성 모니터링을 위해 패키징된 FBG 센서를 사용할 경우 반복 열하중에 의한 압축 잔류 변형률 영향을 고려하여 사용 전 최소 1~2회 정도 반복 열하중에 노출시켜 신호 안정화 과정을 거치는 것이 바람직함을 확인하였다.

한편, 본 연구에서 발견된 각 시편별 구체적 정량 수치의 차이 문제는 에폭시 도포량 및 모재의 표면조도(roughness) 등이 조절된 환경에서의 추가 시험을 통해 규명이 가능할 것으로 판단된다.

#### 후기

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌 (References)

- (1) Chung, W. and Kang, D., 2008, "Full-scale Test of a Concrete Box Girder using FBG Sensing System," *Engineering Structures*, Vol. 30, No. 3, pp. 643~652.
- (2) Kang, D., Kim, D. H. and Jang, S., 2014, "Design and Development of Structural Health Monitoring System for Smart Railroad-gauge-facility using FBG Sensors," *Experimental Techniques*, Vol. 38, No. 5, pp. 39~47.
- (3) Ihn, J. B. and Chang, F. K., 2008, "Pitch-catch Active Sensing Methods in Structural Health Monitoring for Aircraft Structures," *Structural Health Monitoring*, Vol. 7, No. 1, pp. 5~19.
- (4) Lee, J. H., Kim, D. H. and Park, I. K., 2014, "Application of a Fiber Fabry-Perot Interferometer Sensor for Receiving SH-EMAT Signals," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 34, No. 2, pp. 165~170.
- (5) Kim, D. H. and Feng, M. Q., 2007, "Real-time Structural Health Monitoring using a Novel Fiber-optic Accelerometer System," *IEEE Sensors Journal*, Vol. 7, No. 4, pp. 536~543.
- (6) Kim, H. Y. and Kim, D. H., 2015, "Sensor System for Multi-Point Monitoring Using Bending Loss of Single Mode Optical Fiber," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 35, No. 1, pp. 39~45.
- (7) Grillet, A., Kinet, D., Witt, J., Schukar, M., Krebber, K., Pirotte, F. and Depré, A., 2008, "Optical Fiber Sensors Embedded into Medical

- Textiles for Healthcare Monitoring," *IEEE Sensors Journal*, Vol. 8, No. 7, pp. 1215~1222.
- (8) Kang, D. H., Kim, C. U. and Kim, C. G., 2006, "The Embedment of Fiber Bragg Grating Sensors into Filament Wound Pressure Tanks Considering Multiplexing," *NDT&E International*, Vol. 39, pp. 109~116.
- (9) Chung, W. and Kang, D., 2012, "Application of FBG Sensors for Monitoring of Railroad Bridge," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 24, No. 3, pp. 25~28.
- (10) Rao, Y. J., Webb, D. J., Jackson, D. A., Zhang, L. and Bennion, I., 1997, "In-fiber Bragg-grating Temperature Sensor System for Medical Applications," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 15, No. 5, pp. 779~785.
- (11) Kang, D., Kim, H. Y. and Kim, D. H., 2014, "Enhancing Thermal Reliability of Fiber-optic sensors for Bio-inspired Applications at Ultra-high Temperatures," *Smart Materials and Structures*, Vol. 23, No. 7, p. 074012.
- (12) Kang, D., Kim, H. Y., Kim, D. H. and Park, S., 2016, "Thermal Characteristics of FBG Sensors at Cryogenic Temperatures for Structural Health Monitoring," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 17, No. 1, pp. 5~9.
- (13) Kang, D., Park, S. O., Hong, C. S. and Kim, C. G., 2005, "The Signal Characteristics of Reflected Spectra of Fiber Bragg Grating Sensors with Strain Gradients and Grating Lengths," *NDT&E International*, Vol. 38, No. 8, pp. 712~718.
- (14) Kim, H. Y., Kang, D. and Kim, D. H., 2016, "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.
- (15) Kang, D., Kim, H. Y. and Kim, D. H., 2016, "Evaluation of Signal Stability of Fiber Optic Sensors with respect to Sensor Packaging Methods in Long-Term Monitoring," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 36, No. 4, pp. 281~287.