

삽입되어진 광섬유 센서를 이용한 일방향 적층 복합재료의 열적 거동 연구

김승택* · 전흥재** · 최흥섭***

Study on Thermal Behavior of Unidirectional Composite Materials using Embedded Optical Fiber Sensors

Seung Taek Kim, Heoung Jae Chun and Heung Soap Choi

Key Words: Optical fiber(광섬유), Composite material(복합재료), Smart structure(지능형 구조물),
C. T. E.(열팽창 계수), FBG(브래그 그레이팅 광섬유), Thermal strain(열 변형률)

Abstract

Smart structure that contains sensors, which are either embedded in a composite material or attached to a structure, is currently receiving considerable attention. Fiber Bragg grating sensor, one of the optical fiber sensors, has been widely used to sense strain and temperature for smart structures since both parameters change the resonant frequency of the grating. In this paper, according to the various heating and cooling conditions the thermal behavior of unidirectional composite material was monitored by embedding the fiber Bragg grating sensors in the longitudinal and transverse directions of unidirectional composites. The thermal behavior of unidirectional composite material was monitored for various heating and cooling rates and applied pressure. It was found that the thermal behavior was unaffected by pressure variations and heating and cooling rates applied to the composites. The thermal strains were measured by considering the shift in Bragg wavelength that was generated by the thermal expansion of composite specimen. The longitudinal and transverse C.T.E.'s were also obtained from the corresponding temperature-thermal strain curves.

기호설명

λ_B : FBG 센서의 출력 파장

Λ : 격자 무늬의 주기적인 간격

n : 광섬유 코어의 유효 굴절률

ΔT : 온도 변화

α_S : 광섬유 코어의 열팽창 계수

ζ_S : 열광학 계수

$\epsilon_{thermal}$: 복합재료 시편의 열변형률

ϵ_{ax} : 광섬유 코어의 축방향 변형률

ϵ_r : 광섬유 코어의 반경방향 변형률

P_{11}, P_{12} : Silica의 광탄성 상수

ν_S : Silica의 포아송비

P_e : 유효 광탄성 계수

1. 서론

항공우주 산업분야, 군수 산업분야를 비롯한
댐, 교량과 같은 공공목적 산업 분야에서 구조물
의 경량화와 더불어 외부의 극한 환경 조건에 대
해 매우 강건한 구조물 시스템을 설계하고 제어
하는 것이 필요하게 되었다. 이러한 기술의 일환
으로 구조물 자체가 내부 변형상태 및 손상 등을
실시간으로 감지, 진단하여 스스로 적응제어

* 연세대학교 대학원 기계공학과

** 연세대학교 기계전자공학부

*** 대한항공 한국항공기술연구원

(adaptive control) 할 수 있는 지능형 구조물(smart structure)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 지능형 구조물은 외부 자극으로 인한 구조물의 변형 및 손상을 검출하는 감지소재(sensing material)와 구조물이 외부자극에 대해 일정한 반응 동작을 하게 하는 작동소재(actuating material), 그리고 감지소재로부터 검출된 변형과 손상 등의 양을 계산하고 작동 소재가 그에 대응하는 동작을 수행하도록 제어하는 지능소재(intelligence material)로 구분할 수 있다. 광섬유 센서(optical fiber sensor)는 지능형 구조물을 구성하는 감지소재로서 현재까지 개발된 센서 중 가장 적합하다고 평가되는 센서로서 기존의 센서에 비하여 전자기장의 영향을 받지 않으며 무게 및 크기가 경량, 소형이고 다량의 정보 수송 능력이 있어서 복합재 구조물에 가장 적합하다. 또한 동일한 센서로, 제작시의 경화 감시 기능(cure monitoring)과 제작된 구조물의 운용시 안전성을 파악하는 건전성 감시 기능(health monitoring)에 함께 사용할 수 있으며 센서가 광섬유 자체의 강도를 거의 유지하므로 강도나 피로 특성이 우수하다[7]. 반면에 센서의 리드(lead)부위가 매우 취약하며 광섬유간의 연결이 까다롭고 일반적으로 관련 장비가 고가이고 대형이라는 단점이 있다.

본 연구에서는 가열 및 냉각 환경을 달리하여 일방향 적층 복합재료의 열적 거동을 감시하였으며, 복합재료에 삽입되어진 센서로 브래그 그레이팅 광섬유 센서(fiber Bragg grating sensor)를 사용하였는데 브래그 그레이팅 광섬유 센서는 비교적 최근에 개발된 센서로서 기존의 광섬유 센서에 비하여 변조된 신호가 빛의 파장값으로 나타나므로 절대량의 측정이 가능하며, 광원의 변화나 광섬유 연결 시에 발생하기 쉬운 광 손실 등에 영향을 받지 않고, 센서의 출력이 온도 및 변형률에 대하여 선형적인 특징을 지니고 있다. 그리고 한 개의 광원과 광 검출기를 갖는 시스템에서 광섬유 한 가닥에 여러 개의 센서를 구성하여 감지할 수 있는 다점측정(multiplexing)이 가능하여 복잡한 구조물이나 대형 구조물의 센서체계에 적용될 경우 전체 센서 시스템의 소형 경량화를 이룩할 수 있기 때문에 현재 활발히 연구가 진행중인 센서이다.

한편, TMA(Thermo-Mechanical Analysis), 스트

레인 게이지, 레이저 등을 이용하여 일방향 적층 복합재료의 열적 거동을 감지할 수 있으나, 광섬유 센서를 적용할 경우, 구조물이나 시편에 내장이 가능하므로 측정 온도 범위나 시편에 구속조건이 가해진 경우 등에 있어서 유리한 이점이 있다.[1, 2, 3].

2. 이론적 배경

2.1 브래그 그레이팅 광섬유 센서를 이용한 열 변형률 측정

브래그 그레이팅을 최초로 보고한 것은 1978년 Kawasaki[4] 등이 아르곤 이온 레이저의 간섭 무늬를 이용하여 격자를 만든 것이 처음이었으며, 그 후 1989년에 Melltz [5]등이 자외선 간섭 무늬로 광섬유에 브래그 그레이팅을 이식하였고, Morey[6]등이 이를 센서로 사용할 것을 제안하였다. 광섬유상의 브래그 그레이팅이란 광섬유 코아 상에 새겨진 굴절률이 주기적으로 변동하는 격자 무늬를 말하며, 이 격자 무늬는 광섬유를 통과하는 입사광 중 특정한 파장의 광만을 반사해내는 필터의 특성을 가지고 있다. 이때 반사되는 반사광의 파장 λ_B 는 격자무늬의 주기적인 간격 Λ 와 광섬유 코아의 유효 굴절률 n 의 함수로서 다음과 같은 간단한 관계식으로 표현된다[6].

$$\lambda_B = 2\Lambda \cdot n \quad (1)$$

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{\Delta n}{n} + \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} \quad (2)$$

광섬유 상에 이식된 브래그 그레이팅은 필터, 광섬유 레이저, 센서 등으로 응용할 수 있으며 이를 센서로 사용할 때 보통 브래그 그레이팅 광섬유 센서라 한다. FBG센서는 격자 그 자체만으로도 바로 온도와 변형률을 측정하는 센서로 사용되며, 센서 부위에 특별한 코팅을 함으로써 다른 물리량을 측정할 수도 있다[7].

본 연구에서는 열변형률에 의해 발생하는 일방향 복합재료의 길이변화가 복합재료 안에 삽입된

광섬유 센서의 길이변화에 영향을 주어 광섬유 코어의 굴절률을 변화시킴을 확인하고, 이때 반사되는 반사광의 파장을 검출하여 일방향 복합재료의 열변형률을 측정하였다.

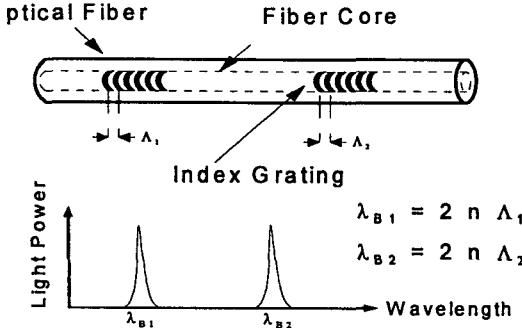


Fig. 1 FBG sensor array patterned into the optical fiber

광섬유에서 온도 변화에 따른 열 팽창 계수와 굴절률 및 반사된 파장과와의 관계식은 식 (2)로부터 다음과 같이 구할 수 있다[8].

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \epsilon_{ax} - \frac{n^2}{2} [\epsilon_r(P_{11} + P_{12}) + P_{12}\epsilon_{ax}] + (\alpha_s + \zeta_s)\Delta T \quad (3)$$

여기서 ΔT 는 온도 변화를, α_s 는 광섬유 코어의 열팽창계수를 나타내고, 광섬유 재료인 silica의 경우에 $0.55 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 이다. ζ_s 는 열광학계수로서 $8.3 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 이다. ϵ_{ax} 와 ϵ_r 은 각각 광섬유 코어의 축방향과 반경방향 변형률을 나타내고, P_{11} 과 P_{12} 는 silica의 광탄성 상수로 0.113과 0.252의 값을 나타낸다[9].

$$\epsilon_r = -\nu_s \epsilon_{ax} \quad (4)$$

ν_s 는 silica의 포아송 비로 0.17의 값을 갖는다. 식(4)에 의하여 식(3)은 다음과 같다[6].

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\epsilon_{ax} + (\alpha_s + \zeta_s)\Delta T \quad (5)$$

여기서 P_e 는 유효 광탄성 계수(effective photoelastic constant)로서 0.22의 값을 갖고 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$P_e = (n^2/2)[P_{12} - \nu_s(P_{11} + P_{12})] \quad (6)$$

FBG센서를 복합재료에 내장하였을 경우에 식(5)는 다음과 같다[9].

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\epsilon_{ax} + (\alpha_s + \zeta_s)\Delta T + (1 - P_e)(\epsilon_{thermal} - \alpha_s\Delta T) \quad (7)$$

FBG센서를 복합재 적층판에 내장하였을 경우에, 적층판에 비하여 광섬유가 차지하는 단면적이 매우 작으므로 온도에 의한 길이 변화가 적층판의 길이변화에 의존하고, 또한 센서 외피부의 거동에 미끄러짐이 없다고 가정하면, 복합재료의 열변형률 $\epsilon_{thermal}$ 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\epsilon_{thermal} = \left[\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} - (\alpha_s + \zeta_s)\Delta T \right] / (1 - P_e) + \alpha_s\Delta T \quad (8)$$

광원으로부터 입사된 빛은 광섬유 센서부위에서 특정한 파장의 값이 반사되고, 그 파장 값 변화, $\Delta\lambda_B$,는 복합재료 시편의 길이변화와 온도변화에 의존한다. 특히 일방향 탄소/에폭시 복합재료는 방향에 따라 열변형률이 다르므로 브래그 그레이팅 광섬유 센서의 출력값은 광섬유의 센서부위가 복합재료 내에 삽입되어진 방향에 따라 다른 값을 갖는다.

2.2 Strain gage를 이용한 열변형률 측정

광섬유 센서를 이용한 실험을 통해 복합재료 시편의 온도에 대한 열변형률 그래프를 얻을 수 있었으며, 이 결과를 재확인하기 위해 동일시편을 사용하여 스트레인 게이지를 이용한 열변형률

측정실험을 실시하였다.

복합재료 시편의 열변형률을 스트레인 게이지로 측정하는데 적용되어진 실험 관계식은 다음과 같다.

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{\Delta T} = (\beta - \alpha)S_g \Delta T + \gamma \Delta T \quad (9)$$

여기서 $\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{\Delta T}$ 는 온도에 따른 게이지 저항의 변화를 나타내고, α 는 게이지의 열팽창계수 값을, β 는 재료의 열팽창계수 값을, γ 는 게이지 저항의 온도계수(temperature coefficient of resistivity of gage material)를, 그리고 S_g 는 게이지 인자(gage factor)를 나타낸다. 식(9)에 의하여 복합재료와 참조재료에서 각각 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$(\epsilon_{thermal} - \alpha \Delta T)S_g + \gamma \Delta T = S_g \epsilon_{as} \quad (10)$$

$$(\beta_r - \alpha)S_g \Delta T + \gamma \Delta T = S_g \epsilon_{ar} \quad (11)$$

ϵ_{as} 과 ϵ_{ar} 는 보정되지 않은 시편과 참조재료(reference)의 변형률을 의미하고 실험에 사용된 참조재료는 β_r 값이 $0.03 \mu\epsilon / ^\circ\text{C}$ 인 티타늄 실리케이트(titanium silicate)를 사용하였다. 식(10)과 식(11)에서 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$S_g(\epsilon_{thermal} - \beta_r \Delta T) = S_g(\epsilon_{as} - \epsilon_{ar}) \quad (12)$$

$$\therefore \epsilon_{thermal} = \epsilon_{as} - \epsilon_{ar} + \beta_r \Delta T \quad (13)$$

여기서 $\epsilon_{thermal}$ 은 복합재료 시편의 열변형률을 나타낸다.

3. 복합재료의 열적 거동 측정 실험

일방향 적층 복합재료의 열적 거동을 측정하기 위한 실험 장치의 구성은 Fig. 2와 같다. 광섬유

센서는 3M사에서 제작한 것으로 gage length가 6~10 mm이고, FWHM (Full Width at Half Maximum)이 0.2 nm이며 센서부에서 입사광을 반사하는 반사율이 약 70%인 브래그 그레이팅을 이식한 모델이다. 광원은 1300 nm 대역에서 약 60 nm 대역폭(band width)을 갖는 MAS-TECH사의 OE362G-010 LED를 사용하였다. 광분석기는 일본 ADVANTEST사의 OSA(Optical Spectrum Analyzer) Q8381A이다. LED에서 조사된 광은 복합재료에 삽입되어진 브래그 그레이팅 광섬유 센서에서 변조되어 반사되고, 2×2 커플러(coupler) 및 광분석기를 통하여 스펙트럼으로 분해된 후 PC에 저장된다. 격자 파장(Bragg wavelength) λ_B 는 PC에서 스펙트럼을 분석하여 처리된다.

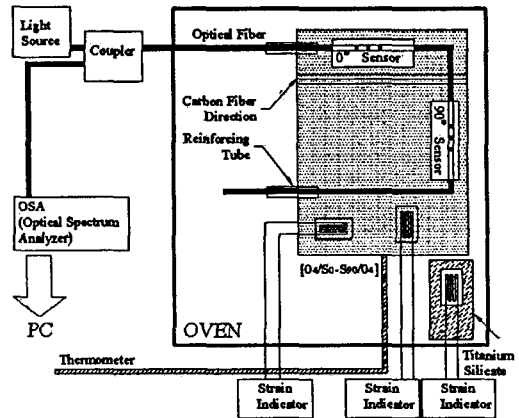


Fig. 2 Experimental set-up for measuring thermal strains of a composite specimen

복합재료 시편의 온도변화 측정은 오븐(oven)의 온도와는 별도로 Strawberry Tree사의 데이터 취득 시스템(data acquisition system)을 PC에 연결하여 시편의 온도를 측정하였다.

실험은 상온에서 180 °C에 이르는 온도 범위에서 일방향 적층 복합재료의 보강재 길이방향과 수직방향으로 삽입되어진 브래그 그레이팅 광섬유 센서를 통해 복합재료시편의 열적 거동을 관찰할 수 있었으며, 가열 및 냉각에 따른 복합재료 시편의 거동 비교뿐만 아니라 가열속도 및 냉

각 속도를 0.56, 2.78, 5.56, 11.11 °C/min Heating and Cooling 4가지로 구분하여 이에 따른 시편의 거동을 비교, 분석하였다.

실험에 사용된 재료는 Hexcel사에서 제작된 178 °C 경화 구조용 일방향 탄소/에폭시 프리프레그로, 가열 및 냉각 사이클별 실험에 사용되어진 시편의 Lay-ups은 $[0_{10}/S_{90}/0_{10}]$ 이고 열팽창 계수 측정 시험에 사용되어진 시편의 제원은 Table 1에서 보이고 있다.

한편, 실험에 사용되어진 스트레인 게이지는 Measurement group, Inc. 에서 제작 판매하는 EA-06-120LZ-120 모델을 사용하였고, 열응력에 의한 복합재료 시편의 굽힘 효과를 상쇄하기 위해 두 개의 게이지를 복합재료 양면 같은 위치에 부착하였으며, 참조 재료로 사용된 티타늄 실리 게이트($\beta_r = 0.03\mu\epsilon/^\circ\text{C}$) 상부에도 부착하였다.

Table 1 Composite material specimen for measuring CTE

Materials	DMS2224, Type1, Class T, Grade2, Hexcel Co.
Cure cycle	5F/min heating, 2hr hold at 350F, 5F/min cooling, Autoclave cure
Usage	CTE measurement
Lay-ups	$[0_4/S_0 - S_{90}/0_4]$
Curing size	20cm x 20cm
Cutting size	Hand trimming
Remarks	Sensors 0°, 90°

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 일방향 적층 복합재료 내에 브래그 그레이팅 광섬유 센서를 길이방향과 수직방향으로 내장하여 하나의 광섬유로 두 가지 방향의 열변형을 및 열팽창계수를 측정하는 실험을 수행하였으며, 복합재료 시편의 온도변화에서 가열 및 냉각 속도를 달리하여 이에 대한 열적 거동을 비교하였다.

이 실험을 통하여 브래그 그레이팅 광섬유 센서의 출력 값과 시편의 열적 거동을 관찰할 수 있었으며, 실험의 결과는 Fig. 3, Fig. 4 및 Table

2에 나타내었다.

Fig. 3에서는 온도가 증가함에 따라 복합재료 시편의 길이가 각 방향으로 변화하고 이 영향으로 인하여 복합재료 내부에 삽입된 브래그 그레이팅 광섬유 센서에서 반사되는 빛의 특성파장 값이 선형적으로 변함을 보이고 있다.

Table 2에서는 본 실험에서 측정된 일방향 탄소/에폭시 적층 복합재료의 열팽창 계수 값을 보이고 있으며, 길이 방향 열팽창 계수는 $-2 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 정도의 값을 갖고, 수직방향 열팽창계수는 $35 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 정도의 값을 나타내고 있다.

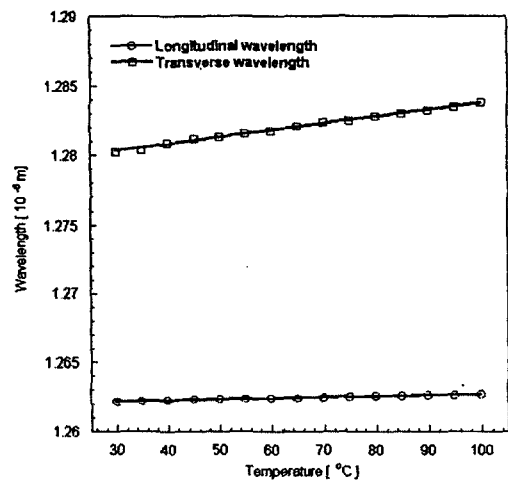


Fig. 3 Shift in bragg wavelength with temperature

Table 2. Longitudinal and transverse CTE's of composites

Sensor	CTE(Longitudinal) [10 ⁻⁶ /°C]	CTE(Transverse) [10 ⁻⁶ /°C]
FBG	-2.8	36.6
Strain gage	-1.7	34.9

Fig. 4은 브래그 그레이팅 광섬유 센서를 사용하여 온도 변화에 따른 복합재료의 열변형을 값 변화를 보이고 있으며, 이에 따른 복합재료의 길이방향 변형률과 수직방향 변형률을 스트레인 게

이지와 브래그 그레이팅 광섬유 센서로 구하여 각각 비교할 수 있도록 나타낸 것이다. 스트레인 게이지로 측정된 복합재료의 열변형을 값은 브래그 그레이팅 광섬유 센서로 측정된 값과 거의 일치하였으며 스트레인 게이지로 측정된 열변형을 이 광섬유 센서로 얻어진 값보다 다소 완만한 기울기를 보여주고 있다.

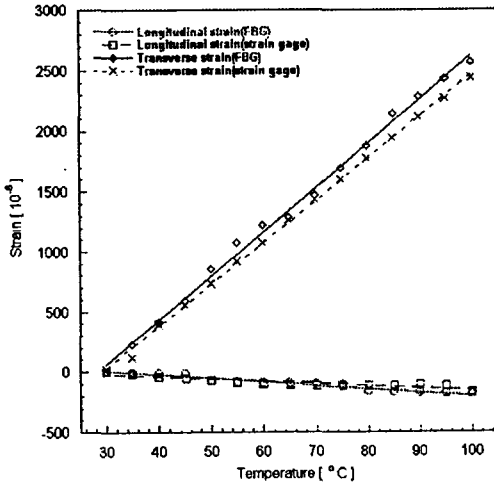


Fig. 4 The Comparison of the results of FBG's and Strain gages

복합재료 시편의 열팽창계수값은 온도에 대한 열변형을 그래프에서 기울기로 나타나고 얻어진 결과는 구조물 운용시 열적 거동감시에 활용될 수 있다. 복합재 구조물의 다양한 환경 변화에 대하여 그 거동을 예측하고 구조물의 건전성을 진단, 감지하는 기능을 수행할 수 있도록, 가열 및 냉각 과정 시, 일정 압력(45psi)을 가한 경우와 단지 온도변화만 있는 경우에 대한 비교 실험결과를 Fig. 5 에서 나타내고 있다. 복합재료 시편에 대한 실험을 통해 120 °C 이하의 온도범위에서 가열 및 냉각 과정에 적용된 일정 압력이 온도에 대한 열변형률의 변화에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 측정되었다. 한편, Fig. 6은 가열 및 냉각 속도의 영향을 고찰하기 위하여, 동일 시편에 대하여 4가지 온도 사이클이 가해진 결과이고, 이를 통해 가열 및 냉각 속도의 차이에 따른 복합재료 시편의 열적 거동에 큰 차이가 없음을

확인할 수 있었다.

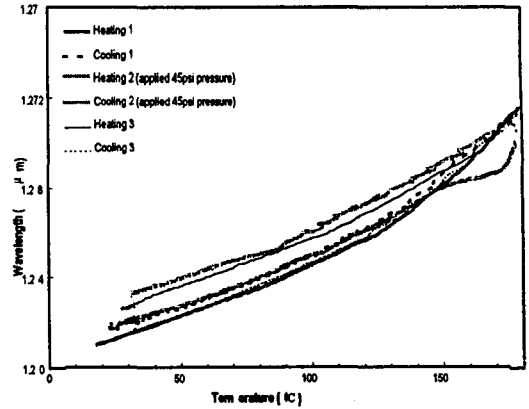


Fig. 5 Effect of pressure on the thermal behaviors of unidirectional composite material

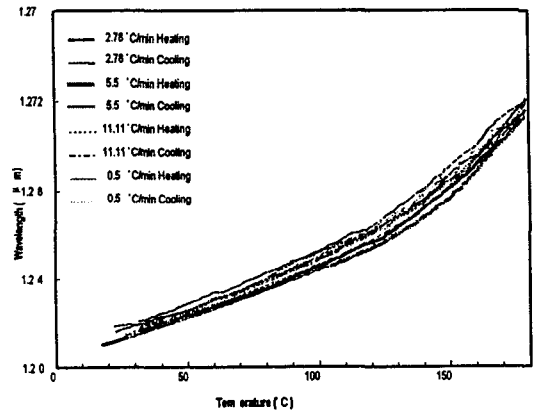


Fig. 6 Effect of heating and cooling rates on the thermal behaviors of unidirectional composite material

5. 결론

브래그 그레이팅 광섬유 센서를 이용하여 일방향 적층 복합재료의 열변형률 및 열팽창계수를 측정하였으며, 이 값은 스트레인 게이지를 사용하여 구한 값과 비교하여 검증하였다.

브래그 그레이팅 광섬유 센서가 내장된 지능형 복합재료 구조물에서 건전성 감시기능 수행의 신

뢰성과 활용성을 얻기위해 일정압력이 가해진 경우의 가열 및 냉각 실험을 비교하였으며, 동일 시편에 대해 가열 및 냉각 속도가 미치는 영향에 대한 비교실험을 실시하였다.

실험결과를 통해 복합재료 구조물에 가해지는 압력이 일정한 경우 상온에서 약 120 °C의 온도에 이르는 범위에서 열팽창계수 값은 일정한 값을 나타내었고 다양한 가열 및 냉각 속도 하에서 운용될 경우, 구조물의 열적 거동 예측 및 건전성 진단 기능 수행에 신뢰성을 얻을 수 있었다. 따라서, 본 연구를 통해 브래그 그레이팅 광섬유 센서를 지능형 구조물에 감지계로 삽입한 경우, 다양한 환경조건하에서도 구조물의 열적 거동에 대한 건전성 감시기능이 효과적으로 구현될 수 있음을 보였다.

참고문헌

- (1) 박중완, 홍창선, “광섬유센서를 이용한 복합 적층판의 변형률 측정”, 복합재료학회 춘계학술발표대회 논문집, 1994, p. 120.
- (2) 박중완, 홍창선, “광섬유 센서를 이용한 스마트 구조 연구동향”, 한국항공우주학회지, 제 25권, 제3호, 1997, pp. 163-167.
- (3) 권일범, 김조권, 김천곤, 홍창선, “삽입된 광섬유 마이켈슨 센서에 의한 복합재 보의 변형률 및 모재균열 파손의 동시 감지”, 한국복합재료학회지, 제9권, 제2호, pp. 74-84, 1996.
- (4) Kawasaki et al., Optics Letters, Vol. 3, No. 2, 1979, pp. 66-68.
- (5) Meltz et al., Optics Letters, Vol. 14, No. 15, 1989, pp. 823-825.
- (6) W. W. Morey, G. Meltz, and W. H. Glenn, Fiber Optic and Laser Sensors VII, SPIE Vol. 1169, 1989, pp. 98-107.
- (7) 하종민, 최홍섭, 정기모, 안규중, “Application of bragg grating optical fiber sensor to advanced composite”, 한국복합재료학회 추계학술발표대회 논문집, 1995, pp. 305-310.
- (8) A. D. Kersey and W. W. Morey, “Multiplexed bragg grating fibre-laser strain-sensor system with mode-locked

interrogation”, Electronics letters 7th January 1993, Vol 29, No. 1, pp. 112-113.

- (9) Sylvain Magne, Stephane Rougeault, Manuel Vilela, and Pierre Ferdinand, “State-of-strain evaluation with fiber Bragg grating rosettes: application to discrimination between strain and temperature effects in fiber sensors”, APPLIED OPTICS, Vol. 36, No. 36, 1997, pp. 9437-9447.
- (10) I. M. Daniel, O. Ishai, “Engineering mechanics of composite materials”, Oxford Univ. Press, 1994.
- (11) 하종민, 정정화, 최홍섭, 안규중, J. R. Dunphy, R. M. Rukus, “Thermo-mechanical Analyses of Composite Materials using Bragg Grating Optical Fiber Sensor Technique”, 대한기계학회 추계학술대회 논문집 A, 1996, pp. 1045-1051.