

비대칭 복합적층판의 성형시 및 성형후 광섬유 센서를 이용한 변형률 및 온도의 동시 측정

강현규, 강동훈*, 김대현, 방형준, 홍창선, 김천곤

Simultaneous Measurement of Strain and Temperature During and After Cure of Unsymmetric Composite Laminate Using Fiber Optic Sensors

Hyun-Kyu Kang, Dong-Hoon Kang*, Dae-Hyun Kim, Hyung-Joon Bang, Chang-Sun Hong, and Chun-Gon Kim

Key Words: cure monitoring, fabrication strain, temperature, fiber optic sensor, unsymmetric cross-ply composite laminate, residual stress.

Abstract

In this paper, we present the simultaneous measurement of the fabrication strain and temperature during and after cure of unsymmetric composite laminate using fiber optic sensors. Fiber Bragg grating/extrinsic Fabry-Perot interferometric (FBG/EFPI) hybrid sensors are used to measure those measurands. The characteristic matrix of sensor is analytically derived and measurements can be done without sensor calibration. A wavelength-swept fiber laser is utilized as a light source. FBG/EFPI sensors are embedded in a graphite/epoxy unsymmetric cross-ply composite laminate at different direction and different location. We perform the real time measurement of fabrication strains and temperatures at two points of the composite laminate during cure process in an autoclave. Also, the thermal strains and temperatures of the fabricated laminate are measured in thermal chamber. Through these experiments, we can provide a basis for the efficient smart processing of composite and know the thermal behavior of unsymmetric cross-ply composite laminate.

1. 서론

최근 복합재료는 항공기, 건축물, 컨테이너 등 많은 구조물의 재료로서 사용이 증가하고 있다. 여러 가지 복합재료 성형 방법중에서 진공백 오토클레이브 성형법은 고품질의 항공우주 구조물 제작을 위해 많이 사용된다. 성형동안 발생하는 성형변형률은 warpage, spring-back과 같이 복합재료 구조물의 조립을 어렵게 하는 문제를 발생시킬 수 있다. 또한 냉각단계에서 보강 섬유와 모재간의 열팽창 계수 차이에 의해 발생하는 잔류응력은 압축/좌굴강도, 파괴인성, 파괴강도 등과 같은 복합재 구조물의 기계적 물성에 큰 영향을 주게 된다. 잔류변형률에 의한 warping의 영향은 비대칭

복합적층판에서 쉽게 볼 수 있다. 비대칭 적층판의 상온에서의 형상은 고전적층판이론(classical laminate theory)의 예측을 항상 따르지 않는다는 것은 잘 알려져 있으며 성형후의 비대칭 복합적층판의 형상을 해석적으로 예측하기 위한 연구들이 수행되어 왔다[1-3].

최종 제작된 복합재료 부재의 품질은 성형시간, 성형온도, 성형압력과 같은 성형조건들에 의해 직접적으로 영향을 받는다. 따라서, 성형되고 있는 복합재료 내부의 온도, 잔류응력의 발생, 점성, 성형도 등과 같은 정보들이 성형과정 동안 적층판 내부의 시간과 위치에 대한 함수로서 정량화될 필요가 있다[4]. 성형과정에 대한 지식은 더 낮은 비용으로 고품질의 복합재료 구조물을 제작하는데 도움을 주므로 최적의 성형조건을 결정하는 것은 매우 중요하다. 그러므로 구조물의 표면으로부터 떨어진 지점에서 실시간으로 성형과정을 모니터링할 수 있는 센서가 요구된다.

한국과학기술원 항공우주공학과

복합재료에 쉽게 삽입될 수 있는 광섬유 센서는 복합재료의 성형 모니터링을 위한 가장 알맞은 센서이다. 광섬유 센서는 크기가 작아 복합재료의 기계적 물성에 거의 영향을 주지 않으면서 프리프레그 내부에 원하는 방향과 위치로 적용될 수 있다. 또한 전기저항식 방법과 유전기법 등과 같은 다른 성형 모니터링 기법과 비교하여 광섬유 센서를 이용한 방법의 장점은 전자기 간섭의 영향을 거의 받지 않는다는 것이다. 그러므로 광섬유 센서는 성형과정 동안 성형변형률과 온도 등과 같은 여러 가지 파라미터들을 모니터링하는데 이용될 수 있으며 성형후 구조물의 운용중에는 구조물의 건전성을 평가하는데 이용될 수 있다.

광섬유 센서를 이용한 복합재료 성형 모니터링에 관련된 대부분의 연구들에서는 광섬유 외부 패브리-페로 간섭(EFPI) 센서[5]와 광섬유 브래그 격자(FBG) 센서[6] 등을 이용하여 단지 성형변형률만을 측정하였다. 그러나 최근 광섬유 센서를 이용하여 동시에 변형률과 온도를 측정하는 기법들에 대한 연구들이 수행되어 왔다[7]. 따라서 이러한 기법들을 이용함으로써 복합재료 성형시 발생하는 성형변형률과 온도 변화를 측정할 수 있다.

본 논문에서는 광섬유 FBG/EFPI 센서를 이용하여 Gr/Ep 비대칭 직교적층 복합재료 적층판(unsymmetric cross-ply composite laminate)의 성형과정 동안 성형 변형률과 온도를 동시에 측정하였다. 센서의 특성행렬은 수치적으로 유도되어 센서의 보정실험없이 측정이 수행되었다. 비대칭 직교 적층판에 두 개의 FBG/EFPI 센서를 삽입하여 성형시 발생하는 성형변형률과 온도를 실시간으로 측정하였다. 또한 성형된 비대칭 직교 적층판을 열침버에 넣고 온도를 높이면서 형상 변화에 따른 변형률을 측정하였다.

2. FBG/EFPI 센서 특성 행렬의 유도

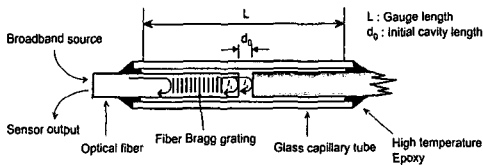


Fig. 1 FBG/EFPI hybrid sensor.

FBG/EFPI 센서의 형상은 Fig. 1과 같다. FBG를 외부 변형률로부터 격리시키기 위해 유리 모세관에 삽입한다. EFPI의 공진 간극(cavity)은 유리 모세관에 삽입된 FBG와 가까운 광섬유의 끝단면과 모세관 반대쪽에

삽입된 광섬유의 수직 절단면에 의해 형성된다. 유리 튜브에 의해 외부와 격리된 FBG는 변형률을 받지 않는 상태가 되며 모세관 내부의 온도 변화에 의해서만 영향을 받는다. 반면에, 유리 모세관과 두 광섬유 반사면으로 구성된 EFPI는 구조물에 모세관이 접촉되므로 센서에 가해진 열변형률과 기계적 변형률에 모두 영향을 받는다.

FBG는 UV레이저를 이용하여 광섬유의 코어 부분에 굴절률이 주기적으로 변하도록 제작된 광학 격자이며 광대역 광원을 FBG에 입사시키면 브래그 조건에 의해 결정된 파장 성분(브래그 파장)만을 반사시킨다. FBG는 변형률, 온도와 같은 외란을 받게 되면 브래그 파장이 이동하게 되며, FBG를 변형률로부터 격리시켰을 경우 브래그 파장 이동량으로부터 다음 식(3)과 같이 온도를 측정할 수 있다.

$$\Delta T = \frac{1}{\alpha_f + \xi_f} \cdot \frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} \quad (1)$$

여기서 α_f 와 ξ_f 는 각각 광섬유의 열팽창계수와 열광학계수이며 λ_B 는 브래그 파장이다.

반면, EFPI는 구조물에 가해진 기계적 변형률뿐만 아니라 열변형률에 의해서도 영향을 받는다. 어떤 측정 시점에서의 EFPI의 간극 길이 d_i 는 식 (2)와 같이 반사 스펙트럼의 봉우리(peak)들의 파장들로부터 구할 수 있다.

$$d_i = \frac{m\lambda_1\lambda_2}{2(\lambda_2 - \lambda_1)} \quad i=0,1,2,\dots \quad (2)$$

여기서 λ_1, λ_2 는 $2m\pi$ 의 위상 차이를 갖는 두 파장이며 m 은 정수, 그리고 i 는 측정 시점의 순서를 나타낸다. EFPI의 게이지 길이가 L 이라면, 가해진 변형률은 다음 식과 같다.

$$\epsilon = \frac{d_n - d_0}{L} = \frac{\Delta d}{L} \quad (3)$$

d_0, d_n 은 각각 변형을 가하기 전후의 간극 길이, 그리고 Δd 은 변형 전후의 간극 길이의 차이이다. 광섬유 센서가 기계적 변형률만을 받으면 식 (3)에 의해 변형률을 측정할 수 있지만, 센서에 열이 가해지면 내부 광섬유도 열팽창계수에 따라 길이가 늘어나게 되므로 간극 길이를 감소시키게 된다. 따라서 구조물의 총변형률을 구하기 위해서는 식 (4)와 같이 EFPI 센서 신호로부터 구한 변형률에 모세관 내부 광섬유의 열변

형률에 의한 항을 더해줘야 한다.

$$\begin{aligned}\epsilon_{tot} &= \frac{\Delta d}{L} + \epsilon_{f,T} \\ &= \frac{\Delta d}{L} + \frac{L-d_0}{L} \cdot \alpha_f \cdot \Delta T\end{aligned}\quad (4)$$

ϵ_{tot} 는 구조물에 가해진 총변형률이며, $\epsilon_{f,T}$ 는 모세관 내부 광섬유들의 열변형률이다. 식 (4)에서 온도 변화에 관한 항을 소거하기 위하여 식 (1)을 식 (4)에 대입하면 다음과 같다.

$$\epsilon_{tot} = \frac{\Delta d}{L} + \frac{L-d_0}{L} \frac{\alpha_f}{\alpha_f + \xi_f} \frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B}\quad (5)$$

온도에 관련된 식 (1)과 변형률에 관계된 식 (5)를 결합하면, 변형률과 온도 변화에 대한 센서 출력의 관계식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}\begin{Bmatrix} \epsilon \\ \Delta T \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & \frac{L-d_0}{L} \frac{\alpha_f}{\alpha_f + \xi_f} \frac{1}{\lambda_B} \\ 0 & \frac{1}{\alpha_f + \xi_f} \frac{1}{\lambda_B} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta d \\ \Delta \lambda_B \end{Bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} P_{1\epsilon} & P_{2\epsilon} \\ P_{1T} & P_{2T} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta d \\ \Delta \lambda_B \end{Bmatrix}\end{aligned}\quad (6)$$

식 (6)으로부터 센서의 특성 행렬은 센서의 게이지 길이, FBG의 브래그 파장, 그리고 광섬유의 열팽창계수 및 열광학계수와 같은 센서의 사양에 따라 변한다는 것을 알 수 있다. 기존의 행렬 역변환 방법에서는 사양이 다른 모든 센서에 대해 실제 적용에 앞서 센서의 특성 행렬을 구하기 위해 보정실험을 수행하여야 한다. 그러나 식 (6)을 사용함으로써 센서의 알고 있는 사양들로 특성 행렬을 쉽게 구할 수 있고 변형률과 온도를 보정실험 없이 직접 동시에 측정할 수 있다.

3. 비대칭 복합적층판의 성형 모니터링

3.1 광섬유 센서를 삽입한 복합재료 적층판의 제작 및 실험방법

실험에 사용된 FBG/EFPI 센서의 유리 모세관 내부에 삽입된 FBG의 게이지 길이는 10 mm이며 사용된 센서들의 사양은 Table 1과 같다. 또한 Table 1과 같은 센서의 사양을 식 (6)에 대입하면 Table 2와 같이 각

센서들에 대한 특성행렬의 계수들을 구할 수 있다.

Table 1. Specifications of sensors

Spec.	Symbol	Unit	Sensor 1	Sensor 2
Gage length	L	mm	29.6	25.3
Bragg wavelength	λ_B	nm	1536.595	1536.579
Initial cavity length	d_0	μm	551.21	600.31
CTE of optical fiber	α_f	ppm/ $^{\circ}\text{C}$	0.5	
Thermo-optic coefficient	ξ_f	ppm/ $^{\circ}\text{C}$	6.2	

Table 2. Components of characteristic matrix of sensors

Components	Unit	Sensor 1	Sensor 2
$P_{1\epsilon}$	$\mu\epsilon/\mu\text{m}$	33.78	39.53
$P_{2\epsilon}$	$\mu\epsilon/\text{nm}$	47.66	47.41
P_{1T}	$^{\circ}\text{C}/\mu\text{m}$	0	0
P_{2T}	$^{\circ}\text{C}/\text{nm}$	97.13	97.13

Fig. 2는 FBG/EFPI 센서들과 열전대를 비대칭 적층 복합적층판에 삽입한 방향과 위치를 나타낸다. 사용된 복합재료 프리프레그는 한국화이버(주)의 CU-125NS이며 복합재료 프리프레그의 적층순서는 $[0_6/(0)/0_6/90_6/(90)/90_6]_T$ 이다. 여기서 'I'는 광섬유 센서의 삽입 방향과 위치를 나타낸다. 두 광섬유 센서 모두 복합재료 보강섬유와 같은 방향으로 삽입하였다. 그리고 오토클레이브 작동시 온도 제어와 기준 온도 측정을 위해 K-type의 열전대를 삽입하였다.

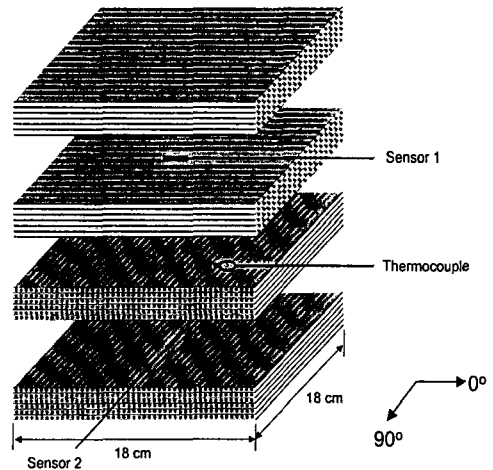


Fig. 2 Direction and locations of the fiber optic sensors embedded in laminate.

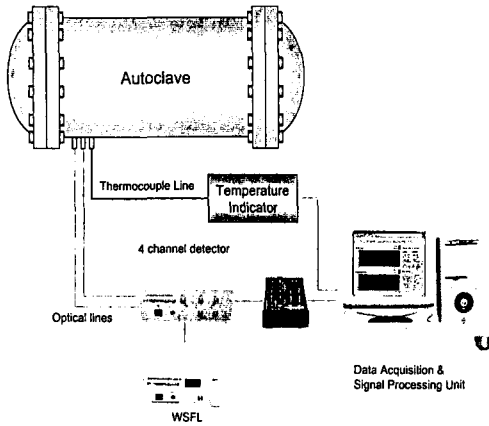


Fig. 3 Experimental set-up for cure monitoring.

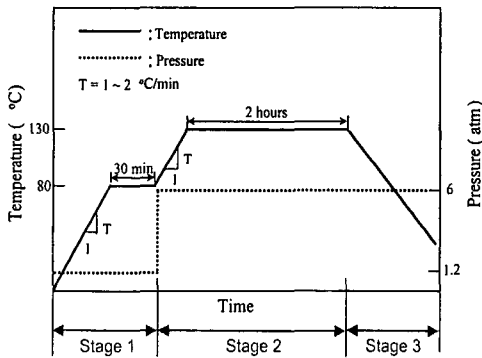


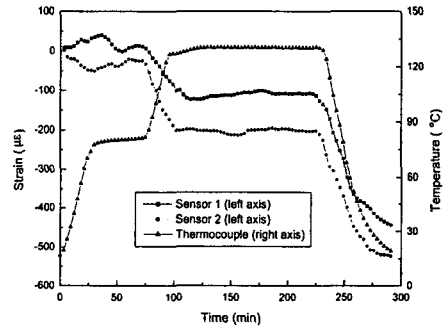
Fig. 4 Curing cycle of Gr/Ep composite in the autoclave moding.

Fig. 3은 성형 모니터링 실험장치의 구성도이며 Fig. 4는 그래파이트/에폭시(Gr/EP) 복합재료의 성형 사이클이다. 일반적으로 Gr/EP 복합재료의 오토클레이브 성형법은 크게 3 단계로 구분된다. 1단계는 수지의 점성을 낮추기 위해 온도를 80 ℃까지 올려 30분간 유지한다. 2단계에서는 적층판의 온도를 최종 성형온도(130 ℃)로 올리고 약 2시간 동안 유지하여 성형시킨다. 그리고 마지막 3단계에서는 적층판의 온도를 상온으로 냉각한다. 이러한 일련의 성형과정을 거치면서 복합재료 적층판은 극심한 온도 변화를 겪게 되고 적층판 내부에 성형변형률 및 응력이 발생한다. Fig. 2와 같이 적층된 복합재료 적층판을 오토클레이브 내에 설치하고 Fig. 4의 성형 사이클에 따라 성형하였다. 광섬유 센서와 연결된 광섬유과 열전대의 선을 오토클레이브의 외부로 빼내어 광원 및 신호취득/처리 시스템에 연결하였다. 센서로부터 반사된 광대역 스펙트럼은 NI사의 LabView 소프트웨어를 이용하여 구성된 신호처리

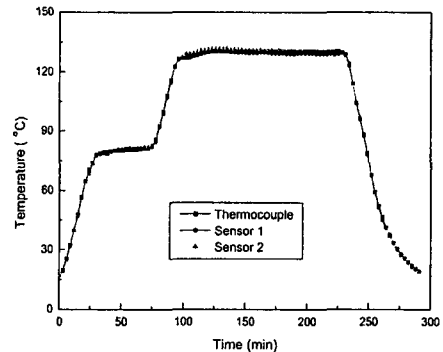
프로그램을 통해 실시간으로 변형률과 온도로 계산되어 화면에 표시되고 저장된다. 광섬유 센서를 사용하기 위한 광대역 광원으로는 파장 이동 광섬유 레이저(WSFL : wavelength-swept fiber laser)를 사용하였다 [8]. 실험은 매 3분마다 센서신호를 취득하여 처리·저장하였다.

3.2 실험결과 및 토의

Fig. 5는 적층판의 성형 동안 광섬유 센서에 의해 측정된 적층판 내부의 변형률과 온도를 나타낸다. 성형이 끝난 후 두 센서로 측정된 최종 압축변형률은 각각 약 $-440 \mu\epsilon$ 과 약 $-520 \mu\epsilon$ 이었으며 압축변형률은 2차 온도상승 구간과 냉각 구간에서 발생하였다.



(a) Strains measured by sensors.



(b) Temperatures measured by sensors.

Fig. 5 Strain and temperature measurement during cure process.

2차 온도상승 구간에서는 복합재료 수지의 교차결합

(cross-linking)에 의한 화학적 수축에 의해 압축변형률이 발생한 것으로 보이며 냉각 구간에서는 냉각에 의한 복합재료의 수축에 의해 압축변형률이 발생한 것이다. 특히 냉각 단계에서 발생한 압축변형률은 잔류변형률로서 성형된 복합재료 구조물에 잔류하게 되며 비대칭 복합적층판의 경우에는 warping이나 spring-back 등의 현상이 발생하게 된다. 또한 보강섬유와 모재와의 열팽창계수 차이와 인접층들간의 열변형률 차이에 의해 복합재료 구조물 내부에 잔류응력이 발생하게 되며 이러한 잔류응력은 제작된 복합재 구조물의 기계적 물성 및 파손 특성에 영향을 주게 된다. 광섬유 센서와 열전대로 측정된 온도는 Fig. 5(b)에서와 같이 잘 일치함을 알 수 있다.

실험결과로부터, 광섬유 센서는 복합재료 내부에서 실시간으로 성형 과정을 모니터링하기 위해 적용될 수 있음을 알 수 있었다. 또한 이러한 실험들을 통해 복합재료의 효율적인 스마트 프로세싱에 대한 기초를 얻을 수 있을 것이다.

4. 비대칭 복합적층판의 온도에 따른 열변형률 측정

4.1 실험방법

앞서 성형 모니터링 과정을 거쳐 제작된 비대칭 적층 복합적층판의 온도에 열변형률 측정하기 위한 실험을 수행하였다. 제작된 적층판의 안장(saddle)의 형상을 하고 있었다.

복합재료 성형 과정중 발생한 압축변형률에 의해 광섬유 센서들의 간극 길이가 변했으며 실험 시작 온도가 다르므로 FBG의 중심파장이 성형 모니터링시와 다르다. 따라서 간극 길이 및 FBG의 중심파장을 다시 측정하여 센서의 특성 행렬의 계수들을 재생성해야 한다. 열변형 측정 실험시에 측정된 센서들의 사양은 Table 3과 같으며 이를 통해 구한 센서 특성행렬의 계수들은 Table 4와 같다.

Table 3. Specifications of sensors.

Spec.	Symbol	Unit	Sensor 1	Sensor 2
Gage length	L	mm	29.6	25.3
Bragg wavelength	λ_B	nm	1536.691	1536.731
Initial cavity length	d_0	μm	539.28	587.53
CTE of optical fiber	α_f	ppm/ $^{\circ}\text{C}$	0.5	
Thermo-optic coefficient	ξ_f	ppm/ $^{\circ}\text{C}$	6.2	

Table 4. Components of characteristic matrix of sensors.

Components	Unit	Sensor 1	Sensor 2
$P_{1\epsilon}$	$\mu\epsilon/\mu\text{m}$	33.78	39.53
$P_{2\epsilon}$	$\mu\epsilon/\text{nm}$	47.68	47.43
P_{1T}	$^{\circ}\text{C}/\mu\text{m}$	0	0
P_{2T}	$^{\circ}\text{C}/\text{nm}$	97.13	97.12

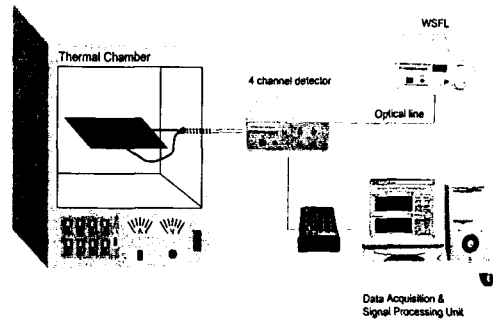


Fig. 6 Experimental set-up for thermal strain measurement.

Fig. 6은 성형 모니터링 실험장치의 구성도이다. 두 개의 FBG/EFPI 센서가 삽입되어 제작된 비대칭 복합적층판을 열챔버 내부에 설치하고 센서와 연결된 광섬유를 열챔버 외부로 빼내어 광원 및 신호취득/처리 시스템에 연결하였다. 취득된 신호는 신호처리 프로그램에 의해 실시간으로 처리되어 화면에 표시하고 저장하였다. 매 2분마다 센서의 신호를 취득하고 처리하였다.

4.2 실험결과 및 토의

Fig. 7은 열챔버 내부의 온도를 20 $^{\circ}\text{C}$ 에서 220 $^{\circ}\text{C}$ 까지 증가시키면서 광섬유 센서로 취득한 열변형률이다. 적층판의 온도는 센서 1으로 측정하였다.

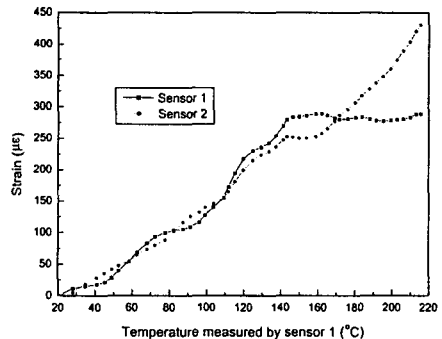


Fig. 7 Thermal strain measurement.

Fig. 7에서 보듯이, 센서 1의 변형률은 약 140 $^{\circ}\text{C}$ 부터 약 280 $\mu\epsilon$ 으로 일정하게 유지되었으나 센서 2는 140 $^{\circ}\text{C}$ 에서부터 160 $^{\circ}\text{C}$ 정도까지 약 250 $\mu\epsilon$ 으로 일정한 모습을 보이다가 인장변형률을 지속적으로 받게 됨을 알 수 있다. 이러한 이유는 초기에 안장형(saddle shape)의 형태를 했던 비대칭 적층판이 온도를 가함에 따라 평평해지다가 다시 뒤집혀 원통형(cylinder shape)으로 변했기 때문으로 생각할 수 있다. 센서 1은 삽입된 방향이 원통의 축방향이 되었기 때문에 적층판의 형태가 안장형에서 원통형으로 바뀌면서 변형률을 거의 받지 않게 된 것이다. 반면에 센서 2는 삽입된 방향이 원통의 원주방향이 되었기 때문에 지속적으로 인장변형률을 받게 된다.

5. 결 론

광섬유 FBG/EFPI 센서를 이용하여 Gr/Ep 비대칭 직교적층 복합적층판의 성형 동안 발생하는 성형변형률과 온도를 모니터링하였다. 두 개의 광섬유 센서와 열전대를 적층판에 삽입하고 오토클레이브 내에서 성형하였다. 삽입된 광섬유 센서를 이용하여 복합재료 성형 동안 성형변형률과 온도를 실시간으로 측정할 수 있었으며 광섬유 센서가 복합재료 성형 모니터링에 적용될 수 있음을 알 수 있었다. 또한 삽입된 광섬유 센서를 이용하여 제작된 비대칭 직교적층판의 온도에 따른 열변형 거동을 관찰하였다. 적층판을 열챔버에 설치하고 온도를 올리면서 변형률을 측정하므로써 비대칭 적층판의 형상 변화를 예측할 수 있었다.

후 기

본 논문은 과학기술부가 지원하는 특정연구개발사업 중 중점국가연구개발사업 (기계설비요소기술개발)으로 지원되어 수행하였습니다.

참고문헌

- (1) W. J. Jun and C. S. Hong, "Cured Shape of Unsymmetric Laminates with Arbitrary Lay-Up Angles," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 11, 1992, pp.1352-1366.
- (2) M. Shlecht, K. Schulte, and M. W. Hyer, "Advanced Calculation of the Room-Temperature

Shape of Thin Unsymmetric Composite Laminates," *Composite Structures*, Vol. 32, 1995, pp.627-633.

- (3) M.-L. Dano and M. W. Hyer, "Thermally-Induced Deformation Behavior of Unsymmetric Laminates," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 35, No. 17, 1998, pp.2101-2120.
- (4) S. S. J. Roberts and R. Davidson., "Cure and Fabrication Monitoring of Composite Materials with Fibre-Optic Sensors," *Composite Science and Technology*, Vol. 49, 1993, pp. 265-276.
- (5) C. M. Lawrence, D. A. Nelson et al., "An Embedded Fiber Optic Sensor Method for Determining Residual Stresses in Fiber-Reinforced composite Materials," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 9, No. 10, 1998, pp.788-799.
- (6) V. Dewynter-Marty, P. Fernand et al., "Embedded Fiber Bragg Grating Sensors for Industrial Composite Cure Monitoring," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 9, No. 10, 1998, pp.785-787.
- (7) 강현규, 류치영, 김대현, 강동훈, 홍창선, 김천곤, "광섬유 FBG/EFPI 센서를 이용한 구조물의 변형률 및 온도의 동시 측정", *한국항공우주학회지*, 제 29권, 제3호, 2001, 게재예정.
- (8) 류치영, 구본용, 홍창선, "스마트 구조물의 변형률 모니터링을 위한 광섬유 브래그 격자 센서 시스템 개발에 관한 연구", *한국항공우주학회지*, 제28권, 제4호, 2000, pp.58-66.