FBG 센서를 삽입한 3차원 브레이드 하이브리드 복합재료의 잔류변형률 및 내부변형률 측정

정경호*·김돈건*·강태진*

Measurement of Residual and Internal Strain of 3-D Braided Hybrid Composite using Embedded FBG Sensor

Kyungho Jung, Don Gun Kim and Tae Jin Kang

Abstract

Three dimensional circular braided Glass/Aramid hybrid fabric/epoxy resin composite was fabricated. FBG sensor was embedded along the braid yarn in order to monitor the internal dimensional changes of the 3-D braid composite. The amount of cure and thermal shrinkage of epoxy resin was also determined using FBG sensor system. FBG sensors with different grating length were embedded and their response were compared. The thermo-optic coefficient of FBG sensor was measured by several preliminary experiments. The internal strain that measured by FBG sensor and electric strain gauge was compared during compressive test. The released residual strain of the fabricated tubular composite was estimated using cutting method. The internal strain of the composite was estimated using FBG sensor system, and the result was compared with the value from electric strain gauge. It was found that FBG sensor system is a very useful technique to investigate inside region of complicated structure.

Key Words: FBG sensor, braid, residual strain, internal strain.

1. 서 론

광섬유 센서는 작은 크기, 전자기장의 간섭으로부터 자유로운 점, 광섬유 자체가 측정과 신호 전달까지 동시에 수행함으로써 단순한 구조를 가지는 점, 유리이기 때문에 부식에 강한 점, 장거리 전송에서도 신호의 왜곡이나 손실이 극히 적은 점 등 수많은 장점을 갖고 있는 소자로써 전 세계적으로 다양한 연구가 이루어지고 있다. 대표적으로 건축·토목 분야에서 고층건물, 교량, 터널, 댐, 해저용 파일(pile) 등 다양한 구조물의 구조안전성 감시에 적용되어 왔으며(1), 적층 복합재료의 경화 모니터링과 사용 중에 있는 복합재료의 구조 안정성 감시에 적용한 연구가 다수 소개되고 있다(2). 광섬유 센서가 삽입되더라도 복합재료의 기계적 특성에 미치는 영향은 무시할 수 있을 정도로 작다는 사실도 많은 연구진에 의해 증명된 바 있다(3).

Melz 등이 FBG(Fiber Bragg Grating) 센서를 제작하는 간단한 방법(4)을 소개하면서 국부 측정과 다중점 측정의 장점을 가지는 FBG 센서를 이용한 연구가 활발해졌고 복합재료에 삽입하여 경화 모니터링과 구조 안정성 감시에 적용하는 연구도 다양하게 시도되어 왔다. 이러한 연구의 대부분은 삽입이 용이한 적층복합재료에 관련된 것이거나, 광섬유 센서를 제조된 복합재료의 표면에 부착하는 방법을 사용한 경우도 많았다.

적층복합재료는 두께 방향의 보강사가 없어 기계적 및 열적 충격에 의해 층간 분리 현상이 쉽게 발생한다는 단점이 있는데 3차원 구조의 프리폼을 도입하면 이를 보완할 수 있다. 3차원 브레이딩 기법을 이용하면 다양한 형태의 프리폼을

* 서울대학교 재료공학부

쉽게 구현할 수 있고 프리폼 전체를 단일 구조로 제조할 수 있는 장점이 있다. 3차원 브레이드 구조는 적층 구조에 비해 훨씬 복잡하고 제조도 상대적으로 어렵지만 최근 국내외에서 기하학적 구조와 물성해석에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(5). FBG 센서를 비롯한 광섬유 센서는 복잡한 3차원 브레이드 구조 내부의 변형률 측정에 매우 유용하게 적용될 수 있으나 국내외적으로 소수의 연구 논문이 발표되고 있을 뿐이다. Rao 등(6)은 광섬유 센서를 이용하여 3차원 브레이드 구조 복합재료의 변형률 및 온도 변화를 측정하였으나 광섬유 센서를 단순히 복합재료 표면에 접착하여 실험하였고, Shenfang 등(7)은 광섬유 센서를 3차원 브레이드 구조에 삽입하였으나 섬유방향이 아니라 브레이드 축 방향으로 직선적으로 삽입하는 데에 그쳤다.

본 연구에서는 3차원 브레이딩 기기를 사용하여 유리/아라미드 섬유를 하이브리드화한 원통형의 프리폼을 제조한 후 구성 섬유의 경로를 따라 FBG 센서를 삽입하였다. 수지이송성형(Resin Transfer Molding, RTM)법을 이용하여 에폭시 기지재를 갖는 복합재료를 성형하였다. 경화가 완료되기까지의 전 과정에 걸쳐 삽입된 FBG 센서 및 열전대로부터 얻어지는 신호를 모니터링하였다. 에폭시 수지만을 별도로 경화하면서 수축률을 측정하는 연구도 수행하였다. 이 때에도 FBG 센서를 이용하여 경화 전 과정에 걸쳐 발생하는 팽창 및 수축 정보를 획득하였다. 완성된 원형 튜브형 복합재료에 축방향, 원주방향, 섬유방향으로 스트레인 게이지를 부착하고 부분적으로 절단을 가하면서 완화되는 잔류변형률을 측정하였다. 이 때 발생하는 광섬유 센서로부터의 신호 변화도 함께 측정하여 비교분석하였다.

2. 실험

2.1 3차원 브레이드 복합재료의 제조

2.1.1 3차원 브레이드 프리폼의 제조

수직형의 3차원 브레이딩 기기를 사용하여 원통형의 프리폼을 제작하였다. 캐리어는 공압 피스톤을 이용하여 반지름 방향과 원주 방향으로 움직이도록 설계되었다. 캐리어 수는 반지름 방향으로 13개, 원주방향으로 144개 씩, 총 1872개이다. 본 연구에서는 이 중 7X48 개의 캐리어에 S2 Glass 섬유를 걸어 7 layer 하이브리드 프리폼을 제조하였다. 외부표면층(Outer surface layer)에는 캐리어의 움직임과 상관없이 항상 고정되어 축 방향으로 보강되도록 아라미드 섬유를 48가닥 걸어 프리폼을 하이브리드화하였다.

2.1.2 3차원 브레이드 복합재료의 제조

3차원 구조의 하이브리드 프리폼을 금형에 위치시키고 수지이송성형법(RTM)을 사용하여 에폭시 수지를 함침시켰다. 수지 주입구와 토출구를 금형의 반대방향에 각각 네 개씩 위치시켰다. 유동해석을 통해 유동선단(flow front)의 움직임을 예측함으로써 air trap의 발생을 최소화할 수 있도록 수지 주입구와 토출구를 배치하였다.

2.2 경화 모니터링

2.2.1 FBG 센서 시스템의 작동 원리

광섬유 코어에 주기적인 굴절계수의 변화를 도입하면 식(1)의 브래그 조건을 만족하는 특정 파장의 빛만을 반사시키고 나머지는 통과시키는 FBG(Fiber Bragg Grating) 센서를 제작할 수 있다. FBG 센서의 코어에 광대역의 빛을 입사시킬 때 반사되는 파장(λ_B)을 브래그 파장(Bragg wavelength)이라 한다. 여기에서 Λ는 격자의 간격, n_{eff}는 광섬유 코어의 유효 굴절율을 나타낸다.

$$\lambda_B = 2\, n_{eff}\, \Lambda \tag{1}$$

브래그 파장의 변화와 온도 및 변형률 변화의 관계는 식 (2)와 같다.

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B\{(\alpha+\xi)\Delta T + (1-p_e)\Delta\varepsilon\} \tag{2}$$

식 (2)에서 α는 실리카 유리의 열팽창 계수, ξ는 thermo-optic coefficient(열광학 계수), p_e는 photo-elastic constant를 나타낸다. 이 중 FBG를 제작하는 환경에 따라 약간의 변화를 보이는 것으로 알려진 열광학 계수는 실험을 통하여 얻은 값을 사용하였다.

2.2.2 수지 경화 모니터링

에폭시 수지만을 몰드에 주입하고 경화하면서 삽입한 FBG 센서를 이용하여 발생한 변형률을 기록하였다. 강동훈 등의 연구자들이 발표한 바 있는 연구(8)와 같이 서로 다른 격자 길이를 갖는 FBG 센서 두 가지(30mm, 2mm)를 함께 삽입하여

복굴절 등의 영향에 따른 피크의 갈라짐 현상의 차이도 함께 관찰하였다.

2.2.3 복합재료의 경화 모니터링

브레이드 프리폼을 구성하는 실의 경로를 따라 FBG 센서를 삽입하고 RTM 공정의 시작 전부터 경화 후 금형을 분리해낸 후까지 브레그 파장의 변화를 관찰하였다. 파형 해석을 위해 Optical Spectrum Analyser (OSA)를 사용하였다. 측정 시스템의 개념도는 그림 1과 같다.

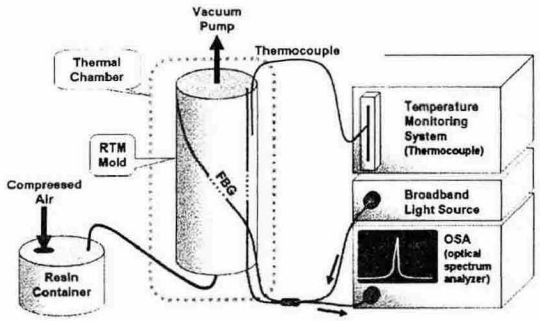

그림 1. 경화 모니터링 시스템

2.3 브레이드 복합재료의 내부변형률 측정

압축시험을 수행하면서 브레이드 섬유의 경로를 따라 삽입된 FBG 센서를 이용하여 복합재료 내부의 변형률을 측정하였다. 복합재료 표면에 브레이드 섬유와 같은 방향으로 전기저항형 strain gauge를 부착하여 검출된 변형률 값과 비교분석하였다.

2.4 브레이드 복합재료의 잔류변형률 측정

3차원 브레이드 복합재료의 일부분을 절단하면서 완화되는 잔류변형률을 측정하였다. 복합재료의 표면에 브레이드 축 방향, 브레이드 섬유 방향, 원주방향으로 strain gauge를 부착하고 복합재료를 절단하면서 FBG 센서와 strain gauge로부터 얻어지는 변형률을 비교분석하였다.

3. 결과

3.1 FBG sensor의 열광학 계수

본 연구에 사용된 모든 FBG 센서는 격자 길이가 30mm, 2mm 인 것 두 가지이며 이들을 각각 F30, F2로 표기한다. F30과 F2의 열광학 계수는 각각 $7.39X10^{-6}$, $6.13X10^{-6}$으로 측정되어 문헌값 ($8.3X10^{-6}$)과는 약간의 차이가 있었다.

3.2 수지의 경화 수축 관찰

F30과 F2를 각각 1개씩 삽입한 금형에 에폭시 수지를 주입하고 경화하면서 발생하는 변형률을 측정하였다. 온도가 최고 경화온도에 도달한 후부터 약간의 수축이 측정되기 시작하였으며 냉각시에 열수축에 의한 상대적으로 큰 변형이 측정되었다. 상온까지 냉각되었을 때 FBG 센서에 의해 측정된 변형률은 약 -1% 정도로 나타났다.

그림 2에 보인 바와 같이 F30의 반사 파형은 피크의 중간 높이에서 측정한 폭을 기준으로 1nm정도의 크기를 나타내다가 80℃ 이하로 냉각되면서 급격히 넓어지고 피크의 갈라짐 현상도 심해지는 것이 관찰되었다. 또한 반사율도 심하게 감소되는 현상을 보였다. 반면 F2에서 반사된 파형은 반사율의 감소를 보이기는 하였으나 갈라짐이나 피크의 넓어짐 현상은 매우 적었다.

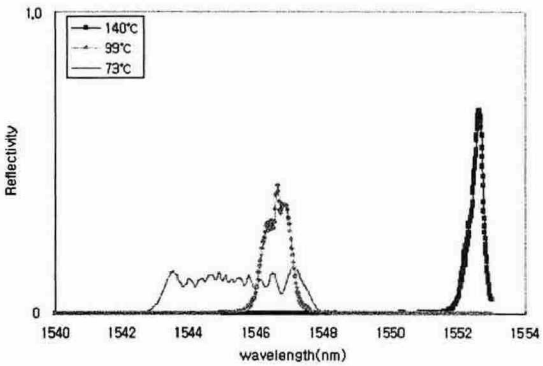

그림 2. 온도에 따른 F30의 파형 변화

3.3 복합재료의 경화 모니터링

에폭시 수지만을 경화시킬 때에 비해 경화 후의 수축이 거의 발생하지 않았다. FBG 센서의 신호를 분석한 결과 브레이딩 축 방향으로 약 0.05%, 브레이딩 섬유 방향으로 0.02~0.06%의 열수축이 발생하였다.

3.4 압축시험을 통한 내부변형률 측정

FBG 센서로부터의 반사 스펙트럼은 0.5% 변형률을 넘어서면서 피크의 폭이 넓어지고 갈라지는 현상을 나타내면서 정확한 측정이 어렵게 되었다. 0.5% 이하의 변형률 범위에서 FBG 센서와

strain gauge로부터 측정된 변형률 값은 5% 이내의 오차로 잘 일치하는 결과를 나타내었다.

3.5 완화된 잔류변형률 측정

일반적으로 반지름에 대한 두께의 비율이 큰 두꺼운 원환체에서 큰 잔류응력이 발생하는데 본 연구에서 만들어진 복합재료의 두께는 4mm 미만으로 외경 55mm에 비해 매우 작기 때문에 측정된 잔류변형률의 완화량은 극히 작은 것으로 나타났다. 브레이딩 섬유 방향으로의 변형률 완화는 FBG에 의한 값이 0.0030%, strain gauge에 의한 값이 0.0021%로 측정되었다. 이는 OSA의 분해능을 겨우 80%정도 넘어선 정도의 크기로 그 정확도에 대한 검증이 요구된다. 원주방향으로는 strain gauge에 의해서만 측정할 수 있었고 완화된 변형률 값은 0.0031%였다.

4. 결 론

3차원 브레이드 유리/케블라 섬유 강화 하이브리드 복합재료를 RTM법을 사용하여 성형하였다. 브레이드 실의 경로를 따라 삽입된 FBG 센서를 이용하여 복합재료 내부에서 발생하는 변형을 모니터링하였다. 복합재료 성형 후 압축 시험을 통해 삽입된 광섬유를 이용하여 내부 변형률을 측정할 수 있음을 확인하였다. 절단법을 통하여 완화되는 잔류응력을 측정하였다. 연구의 결과를 통해 3차원 브레이드 복합재료가 외력을 받을 때 내부에서 발생하는 변화를 관찰하는 데에 광섬유 센서가 유용하게 사용될 수 있음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 2000년 과학기술부 지정 국가지정연구실 사업의 과제 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) H. N. Li, D. S. Li, G. B. Song. Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering. Engineering Structures; 2004; 26(11): 1647-1657.

(2) V. M. Murukeshan, P. Y. Chan, L. S. Ong, L. K. Seah. Cure monitoring of smart composites using Fiber Bragg Grating based embedded sensors. Sensors and Actuators A: Physical; 2000; 79(2): 153-161.

(3) G. Zhou, L. M. Sim, P. A. Brewster and A. R. Giles. Through-the-thickness mechanical properties of smart quasi-isotropic carbon/epoxy laminates. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing; 2004; 35(7-8): 797-815.

(4) G. Meltz, W. W. Morey, W. H. Glenm. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. Optics Letters; 1989; 14:823-825.

(5) D. Bigaud, L. Dreano, P. Hamelin. Models of interactions between process, microstructure and mechanical properties of composite materials-a study of the interlock layer-to-layer braiding technique. Composite Structures; 2005; 67(1): 99-114.

(6) Y. J. Rao, S. F. Yuan, X. K. Zeng, D. K. Lian, Y. Zhu, Y. P. Wang, S. L. Huang, T. Y. Liu, G. F. Fernando, L. Zhang, I. Bennion. Simultaneous strain and temperature measurement of advanced 3-D braided composite materials using an improved EFPI/FBG system. Optics and Lasers in Engineering; 2002; 38(6):557-566.

(7) Y. Shenfang, H. Rui, L. Xianghua, L. Xiaohui. Determination of internal strain in 3-D braided composites using optic fiber strain sensors. Acta Mechanica Solida Sinica; 2004; 17(1):52-57.

(8) 강동훈, 홍창선, 김천곤. 다양한 격자 길이를 갖는 광섬유 브래그 격자 센서의 제작 기법과 격자 길이에 따른 반사 스펙트럼 특성 연구. 한국복합재료학회지; 2004; 17(4):32-39.