

FBG 센서를 삽입한 3차원 브레이드 섬유강화 복합재료의 성형공정 연구 및 비파괴 검사

정경호*·한문희*·윤용훈*·강태진*

Process and Health Monitoring of FBG Sensor Embedded 3-D Braid Fabric Reinforced Composite

Kyungho Jung, Moon Heui Hahn, Yong Hoon Yoon and Tae Jin Kang

Abstract

Epoxy composite reinforced with 3-D braided Glass/Aramid hybrid fabric was fabricated. FBG sensor was embedded along the braid yarn in order to monitor the changes of the complicated inner region of the 3-D braid structure. The good linearity between Bragg wavelength and temperature was verified by several preliminary experiments. The strain inside 3-D braided beam was estimated using FBG sensor system, and the result was compared with the calculated value. It was found that FBG sensor system is very useful technique to investigate inside region of complicated structure.

Key Words: 3-D braid, hybrid composite, FBG sensor system

1. 서 론

섬유 강화 복합재료의 물성은 강화재인 섬유의 물성과 기지재의 물성, 강화재의 조직 및 강화재와 기지재간의 계면 조건 등에 많은 영향을 받는데, 적층 복합재료의 경우 두께 방향으로의 보강 섬유가 없기 때문에 층간의 결합력이 섬유와 기지재간의 약한 결합력에 의존하게 된다.

항공우주 분야를 비롯하여 다양한 산업분야에서 적용되고 있는 적층복합재료는 기계적 및 열적 충격에 의해 발생하는 층간 분리 현상이 재료의 물성을 저하시키는 주요 원인으로 지적되어 왔다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 3차원 구조의 프리폼을 도입할 수 있다. 3차원 브레이딩 기기를 사용하면 맨드럴의 모양에 따라 다양한 형태의 프리폼을 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 기학적 구조와 물성해석에 대한 연구가

활발히 진행되고 있다.

한편, 광섬유 센서를 이용한 복합재료의 성형 공정 연구나 구조 건전성 감시에 대한 연구도 최근 매우 활발히 진행되고 있다. 광섬유 센서는 소형이어서 복합재료 내부에 삽입이 용이하며, 전자기장의 영향을 받지 않는 고유한 장점으로 인해 지능형 복합재료를 구성하기 위한 여러 접근 중 가장 대중적이고 활발한 연구 분야가 되어 가고 있다.

특히, 내부에 삽입된 광섬유 센서가 복합재료의 기계적 성질을 거의 저하시키지 않는다는 사실은 많은 연구자들에 의해 확인된 바 있다(1). 이러한 특징을 활용하면 3차원 다축섬유구조 복합재료와 같이 구조의 표면과 내부에 따라 강화재의 배향이 다른 복잡한 구조의 복합재료에 대해 내부에서 발생하는 변화를 관찰하는 데에 광섬유 센서를 매우 유용하게 사용할 수 있다. Y.J.Rao 등은 EFPI 및 FBG 타입의 광섬유 센서를 연결하여 하나의 센서로 구성한 시스템을 이용하여 3차원 브레이드 복합재료의 인장률을 측정하는 연구를 하였다(2). 그러나 광섬유 센서를

삽입하지 않고 시편의 표면에 접촉하는 방법을 사용했기 때문에 엄밀한 뜻에서 광섬유 센서를 3차원 섬유구조 복합재료에 적용한 예라고 보기 힘들다.

본 연구에서는 원통형 3차원 브레이드 프리폼을 제작할 수 있는 브레이딩 기기를 사용하여 유리/아라미드 섬유를 하이브리드화한 프리폼을 제조한 후 구성 섬유의 경로를 따라 FBG 센서를 삽입하였다. 수지이송성형(Resin Transfer Molding, RTM)법을 이용하여 에폭시 기지재를 갖는 복합재료를 성형하였다. 금형을 결합하는 단계에서부터 경화가 완료되기까지의 전 과정에 걸쳐 삽입된 FBG 센서 및 열전대로부터 얻어지는 신호를 모니터링하였다.

완성된 복합재료의 굽힘시험을 수행하면서 삽입된 FBG 센서의 신호를 획득하고 스트레인 게이지에 의해 얻어진 결과와 비교분석하였다.

2. 실험

2.1 3차원 브레이드 복합재료의 제조

2.1.1 3차원 브레이드 프리폼의 제조

공압 피스톤에 의해 캐리어 베드를 움직이도록 제작된 3차원 브레이딩 기기를 사용하여 원통형의 프리폼을 제작하였다. 캐리어 수는 반지름 방향으로 13개, 원주방향으로 144개 씩, 총 1872개

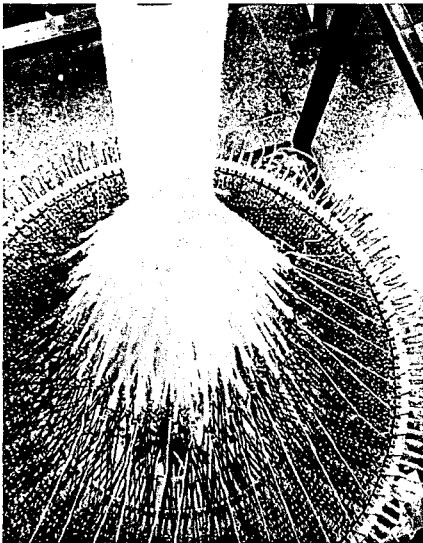


그림 1. 3-D circular braiding machine

이다. 본 연구에서는 이 중 7X48 개의 캐리어에 S2 Glass 섬유를 걸어 7 layer 프리폼을 제조하였다. 외부표면층(Outer surface layer)에는 캐리어의 움직임과 상관없이 항상 고정되어 축 방향으로 보강되도록 아라미드 섬유를 48가닥 걸어 프리폼을 하이브리드화하였다. 프리폼 제작 과정 중의 모습은 그림 1. 과 같다.

2.1.2 3차원 브레이드 복합재료의 제조

3차원 구조의 강화재에 기지재를 도입하는 방법으로 RTM법을 사용하였다. 수지를 주입하는 곳과 진공구를 금형의 반대방향에 위치시켜 수지가 금형 전체에 잘 함침되도록 하였다. 수지 주입구를 강화재의 단면에 90° 간격으로 네 군데에 위치시켜 유동선단(flow front)이 균일하게 진행하도록 함으로써 air trap의 발생을 최소화하였다.

2.2 복합재료 경화 모니터링

2.2.1 FBG 센서 시스템의 작동 원리

격자 마스크를 이용하여 광섬유 코어에 주기적인 굴절계수의 변화를 도입하면 식(1)을 만족하는 특정 파장의 빛만을 반사시키고 나머지는 통과시키게 되는데 이때 반사되는 파장(λ_B)을 브래그 파장(Bragg wavelength)이라 하고, 이런 특성을 타나내도록 만들어진 광섬유 센서를 FBG sensor라 한다. 여기에서 Λ 는 격자의 간격, n_{eff} 는 광섬유 코어의 유효 굴절율을 나타낸다.

$$\lambda_B = 2 n_{eff} \Lambda \quad (1)$$

인장력, 온도변화 등에 의해 Bragg grating의 간격이 변하면 그에 따라 반사되는 파장이 달라지므로 이 현상을 이용하여 FBG sensor의 길이 방향으로 발생한 변화를 측정하는 방법을 사용한다.

2.2.2 FBG 센서 시스템을 사용한 경화 모니터링

브레이드 프리폼을 구성하는 실의 경로를 따라 FBG 센서를 삽입하고 RTM 공정의 시작 전부터 경화 후 금형을 분리해낸 후까지 브래그 파장의 변화를 관찰하였다. RTM 공정은 금형 내부를 진공상태를 만들거나 때에 따라서 대기압 이상의 압력을 가하면서 진행되므로 금형을 완전히 밀착하여 체결해야 한다. 이 때, 광섬유가 금형 사이

에서 눌러지게 되어 신호의 손실은 불가피하며 심지어는 완전히 파손되어 사용할 수 없게 되기도 한다. 광섬유를 보호하고 경화중의 온도 상승에 견디며 금형에서 잘 분리되도록 하기 위해 실리콘 튜브에 광섬유를 통과시켜 사용하였다.

FBG 센서는 온도 변화와 인장력에 모두 반응하므로 사전에 별도의 실험을 통하여 금형의 구속으로부터 자유로운 상태에서 FBG 센서와 열전대(thermocouple)를 함께 chamber 내에 배치하여 복합재료에 삽입될 FBG 센서의 온도 변화에 대한 응답특성을 미리 확인하였다. 이와 같은 사전 실험을 통해 얻은 결과를 이용하여 금형에 삽입된 광섬유에 가해지는 복합적인 외부 환경 요인 중 온도에 의한 영향을 분리해 내하고자 하였다.

파형 해석을 위해 Optical Spectrum Analyser (OSA)를 사용하였다. 측정 시스템의 개념도는 그림 2. 와 같다.

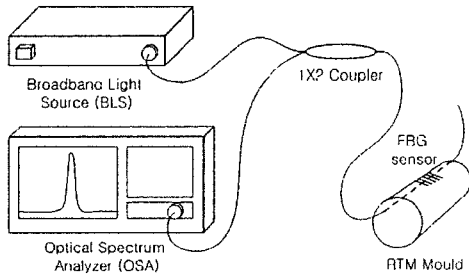


그림 2. FBG sensor system

2.3 3차원 브레이드 복합재료의 굽힘성질 평가

2.3.1 굽힘 시험

제조한 3차원 브레이드 유리/아라미드 하이브리드 에폭시 복합재료의 굽힘특성을 관찰하였다.

MTS 10/GL 인장시험기를 사용하였다. 복합재료 보에 단계적으로 일정한 변형을 가한 상태에서 FBG 및 strain gauge로부터 신호를 검출하였으며, 기하학적인 방법으로 예측한 FBG 삽입 위치의 인장률이 파장변화와 잘 일치하는지 파악하였다. ASTM D790 방법에 따라 crosshead speed는 3.0mm/min에서 3점 굽힘 시험을 수행하였다.

3. 결과

3.1 FBG sensor의 온도 응답 특성 평가

FBG sensor가 아무런 구속이 없는 상태에서 온도가 변하는 환경에 놓여 있을 때 온도 변화에 대한 브래그 파장의 변화는 매우 높은 직선성을 보임을 확인하였다. 따라서 이 실험을 통해 얻은 결과를 이용하여 복합재료가 경화될 때의 파장변화에 영향을 주는 복합적인 요인들 중 온도에 의한 요인을 분리해 내는 데에 사용할 수 있다. 본 연구에 사용된 FBG 센서들의 온도 변화에 대한 응답특성 중 대표적인 것을 그림 3.에 나타내었다.

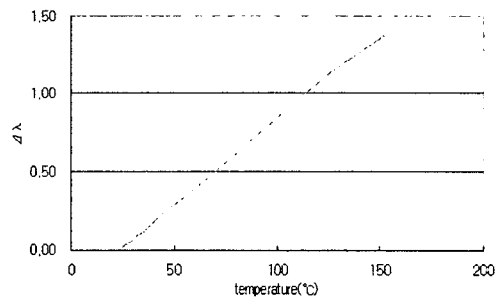


그림 3. 온도에 대한 브래그 파장의 변화

3.2 브래그 파장 및 온도 변화 관찰

금형을 체결하는 공정부터 수지이송 후 에폭시 수지를 경화하는 전 공정에 걸쳐 브래그 파장의 변화와 열전대에 의한 온도변화를 함께 관찰하여 그 결과를 그림 4.에 제시하였다.

광섬유가 금형의 결합면에 의해 횡압력을 받을 때 신호의 손실이 발생함을 확인할 수 있었다. 또한 Bragg grating 부분도 braid yarn의 굴곡에 따라 굽힘 상태에 있게 되고 금형으로부터 횡압력을 받으므로 신호가 변형되어 두 개 이상의 peak를 갖는 파형을 얻게 되므로 파장의 변화를 계산할 때 특정 peak의 파장 대신 peak의 절반 높이에서 가운데 파장을 검출하여 사용하였다.

모니터링 결과로부터 두 가지 특징적인 사실을 발견할 수 있다. 승온 과정 중, 75°C와 105°C에서 각각 10분과 20분동안 온도를 일정하게 유지시켰는데 이 때 반사파의 파장이 단파장쪽으로 이동하는 현상을 볼 수 있었다. 이는 금형의 체결에 의해 발생한 압력이 서서히 완화(relaxation)되고 있는 것으로 볼 수 있다. 두 번째로 145도에서 경화를 완료한 후 냉각 중에는 온도의 감소 속도

와 파장의 감소 정도가 거의 비슷하지만 파장의 감소가 약간 더 크다는 점이다. 기지재의 경화 이후에는 광섬유가 복합재료에 물리적으로 구속되므로 온도 변화에 의한 열수축이 발생할 때 광섬유 자체의 열팽창 성질보다는 복합재료의 열팽창 성질에 의존하는 파장변화를 나타내기 때문인 것으로 보인다. 결과적으로 성형 공정 전후의 같은 온도인 상온에서 열전대에 의해 측정된 온도는 동일한 반면 FBG로부터 검출되는 반사 파장은 단파장쪽으로 약간 더 이동되어 나타났다.

경화 후의 냉각시 기지재의 수축에 의해 FBG의 peak가 여러개로 쪼개지는 현상이 심해지는데 이는 국소적으로 기지재의 수축이 차이가 나기 때문으로 보인다. 강화재의 형태가 braid 직물인데다가 높은 압력을 가하기 쉽지 않은 RTM 공정의 특성상 다른 복합재료 성형법에 비해 resin rich 영역이 발생할 가능성이 높고 이것이 FBG 주위의 수축 환경을 불균일하게 함으로써 여러 개의 peak가 나타나는 것으로 생각되며 이를 확인하기 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

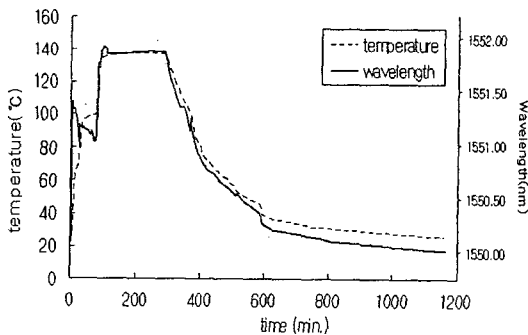


그림 4. 시간에 따른 온도 및 파장의 변화

3.3 굽힘 시험 결과

축 방향으로 배향된 아라미드 섬유와 함께 삽입한 FBG 센서를 통해 굽힘 시험 중에 braid 복합재료의 내부에 발생하는 strain을 측정하였다. 작은 변형에 대해 굽힘시험의 변형 형태를 호로 가정하고 단순하게 계산한 strain과 실제 측정값 사이에는 10% 내외의 차이가 있었다.

4. 결론

3차원 브레이드 유리/아라미드 섬유 강화 하이브리드 복합재료를 RTM법을 사용하여 성형하였다. 성형 중에 삽입된 FBG 센서를 이용하여 3차원 다축섬유구조 복합재료 내부에서 발생하는 변형을 감시하였다. 복합재료 성형 후 굽힘 실험을 통해 삽입된 광섬유로부터 보의 내부 변형을 측정해내기 위한 실험을 수행하였다. 연구의 결과를 통해 3차원 브레이드 복합재료가 외력을 받을 때 내부에서 발생하는 변화를 관찰하는 데에 광섬유 센서가 매우 유용하게 사용될 수 있음을 알 수 있었다.

후기

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

참고문헌

- (1) E.N. Barton, S.L. Ogin, A.M. Thorne, G.T.Reed, B.H. Le Page, "Interaction between optical fibre sensors and matrix cracks in cross-ply GRP laminates", *Composites Science and Technology*, Vol.61, No.13, 2001, pp. 1863-1869
- (2) Y. J. Rao, S. F. Yuanb, X. K. Zenga, D. K. Lianb, Y. Zhua, Y. P. Wanga, S. L. Huang, T. Y. Liuc, G. F. Fernandoc, L. Zhangd and 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*, Vol.38, No.6, 2002, pp.557-566