

광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 고온용 복합재의 물성 측정

강동훈*·박상욱*·김수현*·김천곤*·홍창선*

Measurement of Material Properties of Composites for High Temperature using Fiber Bragg Grating Sensors

D. H. Kang, S. W. Park, S. H. Kim, C. G. Kim and C. S. Hong

Key Words: FBG(Fiber Bragg Grating), Material Properties, High Temperature

Abstract

Recently, composite materials are widely used for nozzle, pressure vessel, skins of satellite and many structures under condition of high temperature due to good thermal characteristics such as low CTE, heat-resistance, etc. Fiber optic sensors, especially FBG(fiber Bragg grating) sensors, can be a good counterproposal of strain gages for the measurement of material properties of composites under high temperature. In this research, T700/Epoxy specimens with embedded FBG sensors were fabricated and tested at the Instron with thermal chamber from room temperature to 400°C. The effects of embedding optical fiber on material properties were also verified. And, the experimental results were discussed and analyzed by microphotographs of the composite specimen.

1. 서 론

최근 항공우주산업의 발전 속도가 빨라짐에 따라 관련 부품 산업 또한 비약적인 발전을 보이고 있다. 그 중에서도 항공기나 인공위성, 로켓 등의 구조체를 제작할 때 기존 알루미늄 합금을 대체하는 재료로 복합재료의 사용이 갈수록 증대되고 있는 추세이다. 복합재료는 타 재료에 비해 매우 높은 비강도, 비강성을 가질 뿐만 아니라 낮은 열팽창 계수, 우수한 내열특성을 나타낸다. 하지만, 복합재료 역시 로켓이나 인공위성과 같이 운용 중의 공력가열로 인해 국부적으로 온도가 매우 높아질 수 있는 경우에는 보통 상온에서 사용되는 복합재료가 아닌 고온용 복합재료를 사용한 구조물의 제작이 많이 이루어지고 있다[1,2]. 그

이유는, 고온용 복합재료가 상온용 복합재료에 비해 온도에 강한 모재로 이루어져 있지만 고온용 모재역시 온도가 증가하게 되면 기계적 물성에 영향을 받기 때문이다. 그러므로 고온용 복합재료의 올바른 적용을 위해서는 온도 변화에 따른 복합재료 물성 변화에 대한 연구가 반드시 선행되어야 한다.

일반적으로, 복합재료의 기계적 물성 측정에는 사용이 간편하고 가격이 저렴하다는 장점 때문에 변형률 게이지가 많이 사용되었다. 하지만, 변형률 게이지는 시편의 표면에 부착하여 사용하기 때문에 고온을 받고 있는 복합재료의 경우 시편과 변형률 게이지 사이의 부착성과 관련된 문제로 인해 기계적 물성을 측정하는데 한계가 발생한다. 반면, 광섬유 센서는 센서의 크기가 매우 작아 구조물에 삽입이 가능하고 사용 온도 범위가 넓으며 전자기파의 영향을 받지 않고 부식에

도 강하다는 많은 장점을 가지고 있다. 그 중에서도 FBG 센서는 타 광섬유 센서에 비해 센서의 다중화(multiplexing)가 더욱 용이하다는 장점으로 인해 변형률 측정에 대한 연구[3]뿐만 아니라 온도가 변하는 환경에서의 적용 연구[4,5] 또한 활발히 진행되고 있다. 이런 장점들로 인해 광섬유 센서는 고온 환경 하에서 복합재료의 물성 측정과 같이 기존의 센서로는 측정이 어려운 경우 좋은 대안으로써 그 사용이 점차 증대되고 있다.

본 연구에서는 필라멘트 와인딩 압력탱크의 제작[6]에 사용되는 T700/Epoxy 고온용 복합재료에 대해 온도가 100℃, 200℃, 300℃, 400℃로 증가함에 따른 복합재료의 물성 변화를 고찰하였다. 중심면에 FBG 센서가 삽입된 일방향 적층 시편을 제작하였으며 열하중이 가해진 상태에서 시편이 인장을 받는 동안 시편의 강성, 강도 변화를 측정하였다.

2. 고온용 복합재료 시편의 제작

본 연구에 사용된 복합재료는 (주) 한국화이바의 모델명 MY0510 수지를 사용한 T700/Epoxy 고온용 복합재료이며 필라멘트 와인딩 압력탱크의 제작에 사용될 것이므로 시편 제작을 위한 프리프레그 테이프의 제작 역시 필라멘트 와인딩 공정을 통해 제작하였다. 필라멘트 와인딩 공정으로 레진이 함침된 섬유를 맨드릴(mandrel)에 후프(hoop) 와인딩 한 후 실린더 부분을 잘라 편편하게 한 후 오븐에서 β-stage 경화를 통해 최종적으로 프리프레그 테이프를 제작 하였다. 제작 공정상의 특징으로 인해 Fig. 1에서 알 수 있듯이 일반적인 프리프레그 테이프에 비해 섬유의 배열이 상대적으로 고르지 못하게 제작되었다.

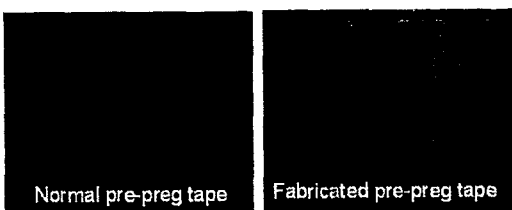


Fig. 1 The surface of fabricated pre-preg tape.

제작된 프리프레그 테이프는 ASTM D 3039/D 3039M을 통해 [02]T의 적층각을 갖도록 오토클레이브에서 Fig. 2와 같은 성형 사이클로 성형하여 일방향 인장 시편을 제작하였다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 고온용 복합재료의 경화 사이클은 1st holding, 2nd holding 온도가 높고 유지 시간 또한 상온용 복합재료에 비해 매우 긴 특징을 가지고 있다.

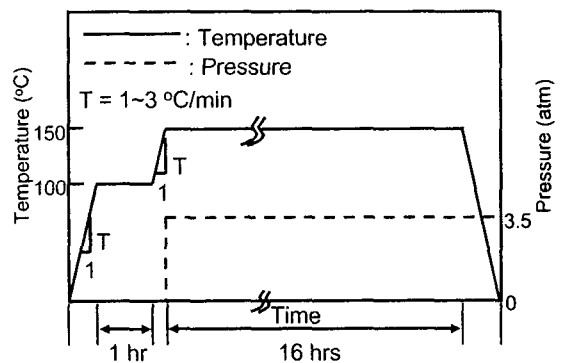


Fig. 2 Curing cycle of T700/Epoxy specimen.

시험을 위한 시편은 상온에서의 기계적 물성 측정을 위한 시편과 고온에서의 인장 시험을 위해 FBG 센서가 삽입된 시편의 두 종류로 제작하였다. 제작된 시편의 형상과 시편의 크기, 변형률 게이지 부착 위치, FBG 센서의 삽입 위치는 Fig. 3과 같다.

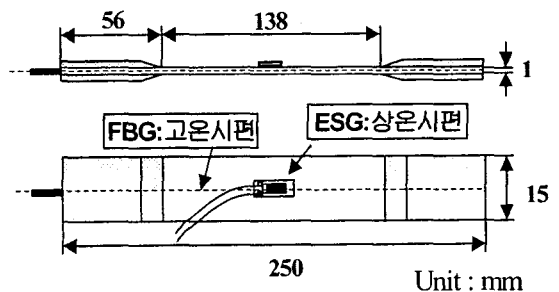


Fig. 3 Configurations of the specimen.

3. 실험 방법 및 결과

3.1 FBG 센서의 삽입 영향 검증 시험

고온에서의 인장 시험을 위해 시편에 FBG 센서를 삽입할 경우 광섬유 센서의 삽입과 시편 끝단에서의 보강 등이 시편의 물성값에 미칠 수 있는 영향에 대한 검증 시험을 수행하였다. 본 연구에 사용된 고온용 복합재료는 프리프래그 테이프가 균일하지 않으므로 시험편은 균일하게 제작되어 있는 (주) 한국화이바의 CU125-NS 그라파이트/에폭시(graphite/epoxy) 프리프래그 테이프를 사용하여 제작하였다. 시편의 크기와 형상은 Fig. 3에서와 같으며 실제 측정할 시편과 비슷한 두께를 갖도록 $[0_k]_T$ 로 적층하여 제작하였다. 또, 시편의 끝단 처리에 따른 영향을 알아보기 위해 시편의 끝단을 $\phi=0.6\text{mm}$ 의 스테인리스 튜브와 PVC(polyvinyl chloride) 피복을 사용한 두 가지 경우로 제작하여 각 경우를 비교하였다. 시편은 오토클레이브의 성형 과정에 따른 차이를 제거하기 위해 하나의 복합 적층판에서 동시에 5개씩 제작하였다. Fig. 4는 제작된 시편의 세 가지 끝단 모습을 보여주고 있다.

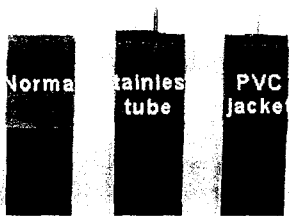


Fig. 4 Egress types of fabricated specimens.

그림에서처럼 시편의 끝단에서 스테인리스 튜브를 사용하여 광섬유 센서를 보호할 경우 튜브 자체의 크기로 인해 제작된 시편의 표면에 요철(irregularities)이 발생하기 때문에 탭을 붙이는 과정에서 탭 표면에 흠을 만들어야 함을 확인할 수 있었다. 이는 탭과 시편의 접촉 면적을 줄여 탭의 부착 강도에 영향을 줄 수 있다. 하지만, PVC 피복을 사용한 경우는 PVC 피복이 복합재료의 성형과정동안 재료와 잘 동화(assimilation)

하여 시편 제작 후 표면에 요철이 생기지 않았다.

위 세 가지 시편에 대한 인장 시험은 Fig. 3에서처럼 표면에 부착된 변형률 게이지를 이용하여 수행하였으며 시험 결과는 표 1과 같다.

Table 1. Effects of embedding fiber optic sensors on the material properties

Stiffness	시편#1	시편#2	시편#3	시편#4	시편#5	평균	표준 편차
Normal	130.2	133.7	130.9	131.5	132.3	131.7	1.35
PVC jacket	131.7	131.6	133.4	132.5	131.8	132.8	1.21
Stainless tube	130.6	129.1	134.2	133.0	132.4	131.9	2.02

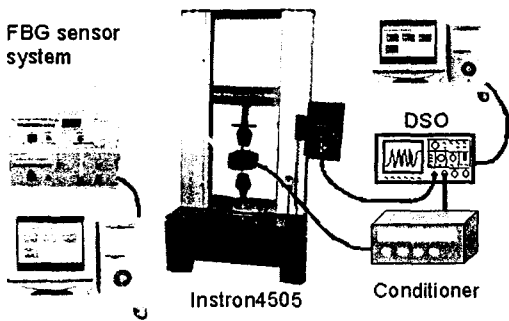
Strength	시편#1	시편#2	시편#3	시편#4	시편#5	평균	표준 편차
Normal	2205	2150	2091	2165	2113	2145	43.7
PVC jacket	2175	2273	2235	2203	2186	2214	40.0
Stainless tube	2132	2187	2256	2203	2218	2199	45.4

결과에서와 같이 복합재료의 기계적 물성 저하 없이 복합재료 내부에 광섬유 센서의 삽입이 가능함을 확인하였다. 또한, 두 가지 끝단처리 방법에 대해서도 차이가 없었으며 제작성이나 탭의 정착 강도 등을 고려할 경우 PVC 피복을 이용하는 경우가 더 적합함을 확인하였다.

3.2 상온에서의 인장 시험

고온에서의 물성 변화에 대한 기준값으로 사용될 상온에서의 인장 시험을 수행하였다. 시험은 앞서 제작된 시편의 표면에 일방향 변형률 게이지(FLA-5-11-1L, TML)를 부착하여 만능시험기에서 1 mm/min의 변위 제어로 인장을 가하였다. 시험에 사용된 시편의 개수는 5개이며 실험 장치의 모습은 Fig. 5(b)와 같다.

표 2에 나타난 시험 결과에서 알 수 있듯이 고온용 복합재료는 표 1의 일반적인 상온용 복합재료에 비해 측정된 물성값의 표준 편차가 비교적 크게 나타났다. 결과를 통해 강성은 조금 크게 나타났고 강도는 평균값은 조금 작게 나타났지만 프리프래그 테이프가 균일하게 제작이 된다면 비슷한 값을 가짐을 알 수 있었다.



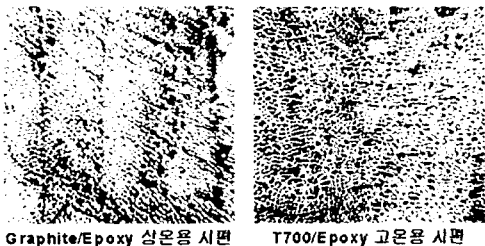
(a) 고온용 시편 (b) 상온용 시편

Fig. 5 Experimental setup.

Table 2. Material properties of T700/Epoxy at room temperature

10,1r	시편#1	시편#2	시편#3	시편#4	시편#5	평균	표준 편차
Stiffness	146.7	136.5	132.3	146.0	146.5	141.6	6.74
Strength	2150	1831	1762	1971	1938	1930	148

위의 결과에서 나타난 큰 표준 편차의 원인을 확인하기 위해 제작된 시편의 섬유 방향과 섬유 수직 방향에 대한 현미경(Olympus PME3) 단면 사진을 통해 섬유 체적비와 실제 강화섬유와 모재의 상태를 관찰하였다. 현미경 사진으로 관찰된 시편의 섬유 단면과 섬유의 정렬 상태는 Fig. 6과 같다.



(a) perpendicular to reinforcing fiber direction



(b) parallel to reinforcing fiber direction

Fig. 6 The microphotographs of the cut end.

광학 현미경을 이용한 시편의 단면 사진과 이미지 프로세싱(image processing) 프로그램을 이용한 면적법으로 두 종류의 복합재료에 대한 섬유 체적비를 계산하였다. 시편의 위치에 따른 오차를 줄이기 위해 세 개의 시편을 각 시편에 대해서도 두 지점의 섬유 체적비를 측정하여 다음 평균값을 취하였다. 결과는 표 3과 같다.

Table 3. Fiber volume fraction calculated by the area method using image processing program

V_f	시편#1		시편#2		시편#3		평균	표준 편차
	sec.1	sec.2	sec.1	sec.2	sec.1	sec.2		
Graphite/Epoxy	51.4	51.7	51.4	52.1	51.4	55.0	52.7	1.61
T700/Epoxy	52.4	49.0	50.3	57.0	52.9	49.6	51.9	2.95

표 3에서 두 복합재료는 거의 같은 섬유 체적비를 보였고 프리프레그 테이프의 불균일성으로 인해 표준편차는 고온용 복합재료가 더 크게 나타났다. 또, Fig. 6(b)에서처럼 고온용 시편은 상온용 시편에 비해 강화 섬유의 배열이 균일하지 못하고 섬유가 부분적으로 주름(wrinkle)진 상태로 제작되었기 때문에 시험 결과에서 큰 표준 편차를 보였음을 알 수 있었다.

3.3 고온에서의 인장 시험

상온에서의 인장 시험 시험과 달리 고온에서의 인장 시험은 시편이 장착되는 만능시험기의 두 그립(grip) 사이에 시편의 게이지 부분에 열하중을 가할 수 있는 챔버가 장착되어 있다. 본 연구에 사용된 챔버가 있는 Instron 4505에 시편이 장착된 모습은 Fig. 7과 같다.

고온에서의 인장 시험은 100℃, 200℃, 300℃, 400℃의 모두 네 가지 온도에서 수행하였다. 각 경우 만능 시험기에 시편을 장착하고 챔버의 온도가 측정온도로 안정화된 후 시험을 수행하였다. 시험에 사용된 시편은 3.1절의 결과를 바탕으로 PVC 피복을 이용하여 광섬유가 시편 끝단으로부터 나오는 부분을 보호하였다.

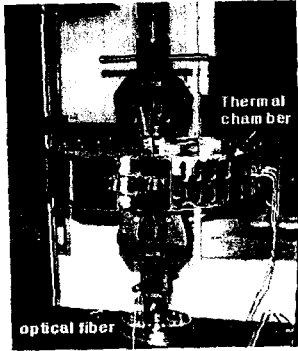


Fig. 7 Instron 4505 with thermal chamber.

시험에 사용된 광섬유 센서 신호의 취득을 위해서 기존 광원보다 큰 출력을 갖는 광대역 광원인 파장 이동 광섬유 레이저(wavelength-swept fiber laser, WSFL)[7]를 사용하여 본 연구실에서 직접 제작한 FBG 센서 시스템[8]과 LabVIEW로 제작한 신호처리 프로그램을 사용하였다. 시험을 통해 측정된 결과는 표 4와 같다.

Table 4. Material properties of T700/Epoxy at high temperatures

Material Property	Room temp.		100°C		200°C		300°C		400°C	
	Avg.	Stdev.	Avg.	Stdev.	Avg.	Stdev.	Avg.	Stdev.	Avg.	Stdev.
Stiffness	141.6	6.74	142.8	1.91	146.2	0.35	117.4	2.33	84.5	29.49
Strength	1930	148.5	1760	84.9	1731	73.5	1724	31.1	1430	156.3

표 4에서 상온의 물성값에 비해 온도가 증가함에 따라 강성은 200°C까지는 변화를 보이지 않다가 300°C에서는 약 20%의 감소를 400°C에서는 약 40%의 감소를 보였다. 한편, 강도는 100°C부터 상온 값에 비해 약 10% 정도의 감소를 보이며 300°C까지 같은 경향을 보이다가 400°C부터 약 30%의 급격한 변화를 보이는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 Fig. 8에서 보다 잘 알 수 있다. 이를 통해 강성과 강도가 온도에 대해 서로 다른 경향의 거동을 보임을 확인하였다.

Fig. 8에서 400°C의 경우 강성과 강도 모두 큰 편차를 보였으며 그 이유는 시험을 위해 시편을 그립에 장착하고 챔버의 온도를 증가시키는데 걸리는 시간이 각 시험마다 일정치 않았기 때문으로 생각된다.

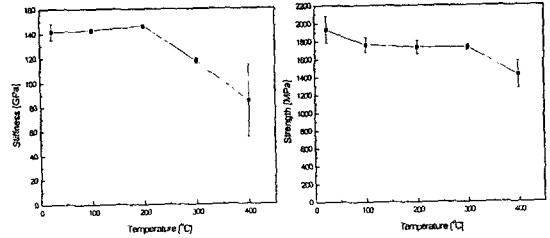


Fig. 8 The results of material property change with temperatures.

시험 결과로부터 강성과 강도는 작용하는 온도 이외에도 온도가 작용된 시간 또한 중요한 함수임을 확인할 수 있었다. 또, 보다 정확한 시험을 위해 시험에 사용된 시편은 같은 복합 적층판에서 제작하였기 때문에 상온을 제외한 각 온도에서의 시험 시편수가 2개로 제한되어 각 온도에서의 적은 시험편 개수로 인해 통계처리에 다소 어려움이 있었다.

4. 결론

본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 광섬유 센서를 이용한 복합재료의 기계적 물성 측정을 위해 센서의 삽입이 물성의 저하에 미치는 영향에 대해 알아보고 시편의 끝단에서 광섬유를 안전에게 보호 하는 방법에 대해 고찰하였다.
2. 고온용 복합재의 상온에서의 기계적 물성은 시편 표면에 부착된 일방향 변형률 게이지를 이용하여 측정하였다. 강성은 매우 적은 편차를 보이며 균일하게 측정되었지만 강도는 프리프레그 테이프의 불균일성으로 인해 비교적 큰 편차를 보였다.
3. 시편의 섬유방향과 섬유 수직방향에 대한 단면의 현미경 사진을 통해 상온에서의 결과값에 대한 원인을 분석하였다.
4. 온도에 따른 고온용 복합재의 기계적 물성 변

화를 시편 내부에 삽입된 FBG 센서를 이용하여 측정하였다. 온도는 100°C, 200°C, 300°C, 400°C의 네 구간으로 나누어 수행하였고 시험 결과 강성과 강도가 온도에 따라 서로 다른 경향의 거동을 보임을 확인하였다.

5. 시험을 통해 고온에서 복합재료의 기계적 물성 측정과 같이 기존 센서로는 측정이 어려운 경우 FBG 센서가 좋은 대안이 될 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소 위탁연구과제의 일환으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) J. Rosler and M. Baker, "A Theoretical Concept for the Design of High-Temperature Materials by Dual-Scale Particle Strengthening," Acta metallurgica Inc., 2000.
- (2) S. T. Mileiko and V. I. Glushko, "Fabrication and Properties of New Oxide-Based Composite Fibres (MIGL) and Heat-Resistant Materials Reinforced with Them," Composites Science and Technology, 1997, p1497-1507.
- (3) H. K. Kang, J. S. Park, D. H. Kang, C. U. Kim, C. S. Hong and C. G. Kim, "Strain Monitoring of Filament Wound Composite Tank Using Fiber Optic Sensors," Smart Materials and Structures, Vol. 11, No. 6, 2002, pp. 848-853.
- (4) H. K. Kang, D. H. Kang, H. J. Bang, C. S. Hong and C. G. Kim, "Cure Monitoring of Composite Laminates Using Fiber Optic Sensors," Smart Materials and Structures, Vol. 11, No. 2, 2002, pp. 279-287.
- (5) 강동훈, 강현규, 류치영, 홍창선, 김천곤, "광섬유 센서를 이용한 구조물의 열변형 및 온도 측정," 한국항공우주학회지, 제28권, 제8호, 2000, pp. 61-68.
- (6) M. Lossie, "Production Oriented Design of Filament Wound Composites," K. U. Leuven, Ph.D Thesis, April, 1990.
- (7) S. H. Yun, D. J. Richardson and B. Y. Kim, "Interrogation of Fiber Grating Sensor Arrays with a Wavelength-Swept Fiber Laser," Optics Letters, Vol. 23, No. 11, 1998, pp. 843-845.
- (8) C. Y. Ryu, C. S. Hong, "Development of Fiber Bragg Grating Sensor System Using Wavelength-Swept Fiber Laser," Smart Materials and Structures, Vol. 11, No. 3, 2002, pp. 468-473.