

論文

광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 고온용 복합재료의 물성 측정

강동훈*, 박상욱*, 김수현*, 김천곤**, 홍창선*

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

Dong-Hoon Kang*, Sang-Wuk Park*, Soo-Hyun Kim*, Chun-Gon Kim**, Chang-Sun Hong*

ABSTRACT

Composites are widely used for aircraft, satellite and other structures due to its good mechanical and thermal characteristics such as low coefficient of thermal expansion(CTE), heat-resistance, high specific stiffness and specific strength. In order to use composites under condition of high temperature, however, material properties of composites at high temperatures must be measured and verified. In this paper, material properties of T700/Epoxy were measured through tension tests of composite specimens with an embedded FBG sensor in the thermal chamber at the temperatures of RT, 100°C, 200°C, 300°C, 400°C. Through the pre-test of an embedded optical fiber, we confirmed the embedding effects of an optical fiber on material properties of the composites. Two kinds of specimens of which stacking sequences are $[0/\{0\}/0]_T$ and $[90_2/\{0\}/90_2]_T$ were fabricated. From the experimental results, material property changes of composites were successfully shown according to temperatures and we confirmed that fiber Bragg grating sensor is very appropriate to strain measurement of composites under high temperature.

초 록

복합재료는 비강성, 비강도가 높고 열팽창 계수가 낮으며 우수한 내열특성 등 기계적, 열적 특성이 좋아 항공기, 인공위성을 비롯하여 여러 다른 구조물에 폭넓게 사용되고 있다. 하지만, 복합재료를 고온 환경에 사용하기 위해서는 고온 환경에서의 물성에 대한 검증이 필요하다. 본 연구에서는 FBG 센서가 삽입된 T700/Epoxy 복합재료 시편에 대해 온도에 따른 물성을 측정하였다. 실험은 열챔버 내에서 수행하였고 온도 범위는 상온, 100°C, 200°C, 300°C, 400°C이다. 삽입된 광섬유의 예비 시험을 통해, 광섬유 센서의 삽입이 물성값에 미치는 영향을 확인하였다. 시험에는 $[0/\{0\}/0]_T$, $[90_2/\{0\}/90_2]_T$ 와 같은 적층각을 갖는 두 종류의 시편을 사용하였다. 실험 결과로부터, 온도에 따른 복합재료의 물성 변화를 성공적으로 측정하였으며 FBG 센서가 고온 환경의 변형률 측정 센서로 매우 적합함을 확인하였다.

Key Words : 광섬유 브래그 격자 센서(FBG sensor), 물성(material properties), 고온(high temperature), 복합재료(composite material),

1. 서론

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

* 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공

** 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공, 교신저자(E-mail:cgkim@kaist.ac.kr)

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 상온에서 사용되는 복합재료가 아닌 고온용 복합재료를 사용한 구조물의 제작이 많이 이루어지고 있다[1,2]. 상온용 복합재료에 비해 온도가 강한 소재로 이루어진 고온용 복합재료 역시 온도가 증가하게 되면 기계적 물성에 영향을 받기 때문에 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 부착성에 문제가 발생할 수 있으며 온도 효과 보상을 해야 하는 등 기계적 물성을 측정하는데 많은 제약이 따른다. 반면, 광섬유 센서는 센서의 크기가 매우 작아 구조물에 삽입이 가능하고 사용 온도 범위가 넓으며 전자기파의 영향을 받지 않고 부식에도 강하다는 많은 장점을 가지고 있다. 여러 광섬유 센서 중에서도 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating, FBG) 센서는 다른 여러 광섬유 센서에 비해 센서의 다중화(multiplexing)가 더욱 용이하다는 장점으로 인해 변형률 측정에 대한 연구뿐만 아니라[3] 온도가 변하는 환경에서의 적용 연구 또한 활발히 진행되고 있다[4,5]. 이런 장점들로 인해 광섬유 센서는 고온 환경 하에서 복합재료의 물성 측정과 같은 영역의 연구에 적합한 센서로 그 사용 영역이 점차 확대되고 있다.

본 연구에서는 필라멘트 와인딩 압력탱크의 제작[6]에 사용되는 T700/Epoxy 고온용 복합재료에 대해 온도가 10 0℃, 200℃, 300℃, 400℃로 증가함에 따른 복합재료의 물성 변화를 FBG 센서를 이용하여 측정하였다. 중심면에 FBG 센서가 삽입된 일방향 적층 시편과 수직 방향 적층 시편을 각각 제작하였으며 열하중이 가해진 상태에서 시편이 인장을 받는 동안의 강성, 강도 변화를 측정하였다.

2. FBG 센서의 변형률 감지 원리

광섬유 브래그 격자는 광대역 스펙트럼을 갖는 광원을 광섬유에 입사시킬 경우, 다음과 같은

$$\lambda_B = 2 n_e \Lambda \tag{1}$$

브래그 조건(Bragg condition)에 의해 결정된 파장 성분만이 브래그 격자 부분에서 반사되며 나머지 파장 성분은 통과하게 된다. Fig. 1은 이 과정을 나타내고 있다.

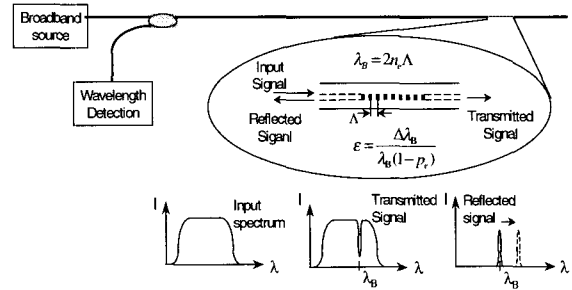


Fig. 1 FBG sensor encoding operation.

식 (1)에서 n_e 는 광섬유 격자의 유효 굴절률이고 Λ 는 광섬유 코어에 새겨진 격자의 간격이다. 그러므로, 격자에서 반사되는 브래그 파장은 유효 굴절률과 격자 간격의 함수이며, 광섬유 격자에 온도나 변형률 등의 외란이 가해지면 이들 값이 변하여 브래그 파장은 달라진다. 변화된 브래그 파장을 정밀하게 측정한다면 광섬유 격자에 가해진 온도나 변형률 등의 물리량을 식 (2)를 통하여 계산해 낼 수 있으며, 이것이 바로 광섬유 브래그 격자가 센서로 사용될 수 있는 기본 원리이다.

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

$$p_e = \left(\frac{n^2}{2} \right) [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \tag{3}$$

여기서, p_e 는 광탄성 상수이고 p_{11} 과 p_{12} 는 변형률 광학 텐서(strain-optic tensor)의 성분이며 n 은 코어의 굴절률, ν 는 광섬유의 프와송 비이다. 본 연구에서와 같이 주위 온도의 급격한 변화가 없고 센서의 온도차가 없는 상태에서 구조물의 변형을 측정한다면 식 (2)에서 $\Delta T=0$ 으로 가정할 수 있으므로 식 (2)는 식 (4)와 같이 되어, 구조물의 변형률은 브래그 반사 파장의 변화량만 측정하면 쉽게 구해진다.

$$\varepsilon = \frac{1}{(1 - p_e)} \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \tag{4}$$

또한, 브래그 반사파장이 서로 다른 광섬유 격자들은 서로 영향을 받지 않는 파장 분할 다중화의 특성으로 인해 하나의 광섬유 선에 여러 개의 브래그 격자 센서를 배열할 수 있으므로 동시에 여러 지점의 변형률 측정이 가능하다.

3. 광섬유 삽입으로 인한 물성 영향 평가

고온에서의 인장 시험에 앞서 예비 시험으로, 시편에 FBG 센서를 삽입할 경우 광섬유 센서의 삽입과 시편 끝단에서의 보강 등이 시편의 물성에 미칠 수 있는 영향에 대한 검증은 위해 Fig. 2와 같은 세 가지 형태의 시편을 제작하였다. 물성값의 기준이 될 광섬유 센서를 삽입하지 않은 시편(Fig. 2(a)), 그리고 광섬유의 ingress/egress 형태를 결정하기 위해 Fig. 2(b), Fig. 2(c)와 같이 직경 0.6 mm의 스테인리스 튜브(stainless tube)와 PVC(polyvinyl chloride) 피복을 이용한 두 가지 형태의 시편을 각각 제작하였다. 시험에 사용한 시편은 (주)한국화이바의 Graphite/Epoxy CU-125NS 프리프레그 테이프를 [0]₈T, [90]₁₆T 같은 적층을 갖도록 ASTM D 3039/D 3039M을 통해 제작하였다.

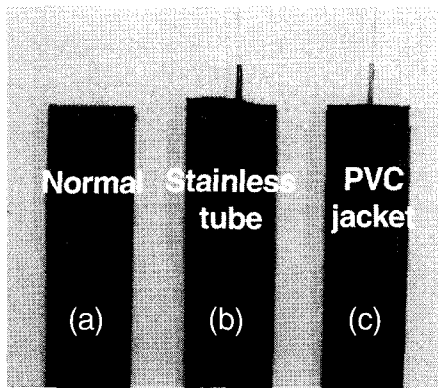


Fig. 2 Verification test specimens of the sensor embedding affection.

우선, 제작된 시편의 외관을 통해 시편제작에 적합한 ingress/egress 방법을 결정하였다. 시편의 끝단에 스테인리스 튜브를 사용할 경우 튜브 자체의 크기로 인해 제작된 시편의 표면에 요철(irregularities)이 발생하기 때문에 탭을 붙이는 과정에서 탭 표면에 흠을 만들어야 하며 이 경우 탭과 시편의 접착 강도에 영향을 주어 인장 시험동안 탭이 떨어지는 경우가 발생하였다. 하지만, PVC 피복을 사용한 경우는 PVC 피복이 복합재료의 성형과정동안 재료와 잘 동화(assimilation)하여 시편 제작 후 표면에 요철이 생기지 않으며 끝단 보강효과를 얻을 수 있었다. 두 경우 모두 끝단처리로 인한 센서 신호 크기의 감소 정도는 비슷한 수치를 보였다. 위 세 가지 시편에 대한 인장 시험은 시편의 표면에 부착한 일방향 변형률 게이지(FLA-5-11-1L, TML)를 이용하여 수행하였으며 시험 결과는 Table 1과 같다.

결과로부터 PVC 피복을 이용하여 끝단 보강을 하는 방법이 물성적이지 없이 시편의 제작성도 고려한 최적의 삽입 방법임을 확인하였다.

Table 1 The results of verification test of sensor embedding

[0] ₈ T	Stiffness [GPa]		Strength [MPa]		[90] ₁₆ T	Stiffness [GPa]		Strength [MPa]	
	Avg.	Stdev.	Avg.	Stdev.		Avg.	Stdev.	Avg.	Stdev.
Normal	132.3	1.35	2145	43.7	Normal	8.75	0.18	44.4	1.40
PVC jacket	132.8	1.21	2214	40.0	PVC jacket	8.56	0.21	44.6	1.85
Stainless tube	131.9	2.02	2199	45.4	Stainless tube	8.64	0.24	45.4	2.67

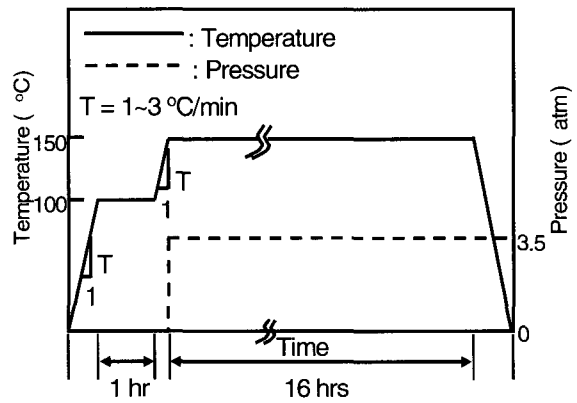


Fig. 3 Curing cycle of T700/Epoxy specimen.

4. 고온용 복합재료 시편 제작

본 연구에 사용된 복합재료는 (주)한국화이바의 모델명 MY0510 수지를 사용한 T700/Epoxy 고온용 복합재료이며 필라멘트 와인딩 공정으로 수지(resin)가 함침된 섬유를 맨드릴(mandrel)에 후프(hoop) 와인딩 한 후 실린더 부분을 잘라 고르게 펴고 오븐에서 B-stage 경화를 통해 최종적으로 프리프레그 테이프를 제작하였다.

제작된 프리프레그 테이프는 [0/{0}/0]_T, [90₂{0}/90₂]_T의 적층각으로 FBG 센서를 삽입하여 적층 하였으며 오토클레이브에서 Fig. 3과 같은 성형 사이클로 성형하여(ASTM D 3039/D 3039M) 인장시험 시편을 제작하였다. 여기서, '{}'는 FBG 센서가 삽입된 층을 나타내며 내부의 숫자는 센서가 삽입된 방향을 나타낸다. FBG 센서는 제작 후 격자 부분을 보호하기 위해 리코팅(recoating)을 하였으며 FBG 센서의 삽입시 센서의 끝단은 3 장의 결과를 토대로 PVC 피복을 이용하여 보강하였다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 고온용 복합재료의 성형 사이클은 일반적인 상온 복합재료의 성형 사이클에 비해 1st holding, 2nd holding 온도가 높고 유지 시간 또한 상대적으로 매우 긴 특징을 가지고 있다.

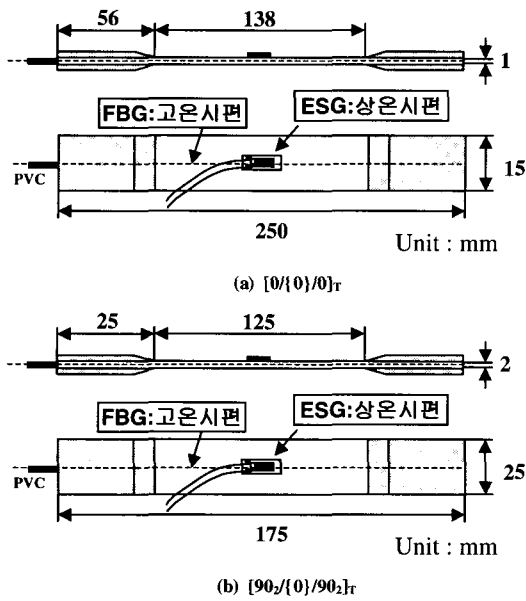


Fig. 4 Configurations of the test specimens.

시편은 물성값의 기준이 될 상온 시편, 그리고 100℃, 200℃, 300℃, 400℃의 고온 시편의 두 종류가 있으며 제작 과정에 의한 오차를 제거하기 위해 같은 적층판에서 시편을 추출하여 각 온도구간에 대해 각각 2개의 시편을 제작하였다.

시편의 형상과 크기, 변형률 게이지 부착 위치, FBG 센서의 삽입 위치는 Fig. 4와 같다. 상온 시편의 물성값은 시편의 표면에 부착한 변형률 게이지를 이용해 측정하였으며 고온 시편은 시편에 삽입된 FBG 센서를 이용하여 측정하였다. 본 연구에 사용된 광섬유 센서의 신호 취득은 기존의 광원보다 큰 출력을 갖는 광대역 광원인 파장 이동 광섬유 레이저 (wavelength-swept fiber laser, WSFL)[7]를 사용하여 본 연구실에서 직접 제작한 FBG 센서 시스템과 LabVIEW[®]로 제작한 신호처리 프로그램을 사용하여 수행하였다[8].

5. 고온용 복합재료 시편의 물성 측정

5.1 일방향 물성측정

고온에서의 물성 변화에 대한 기준값으로 사용될 상온에서의 인장 시험을 수행하였다. 시험은 앞서 제작된 시편의 표면에 부착한 일방향 변형률 게이지(FLA-5-11-1L, TML)를 이용해 수행하였고, 100℃, 200℃, 300℃, 400℃에서의 시험은 시편의 내부에 삽입한 FBG 센서를 이용하여

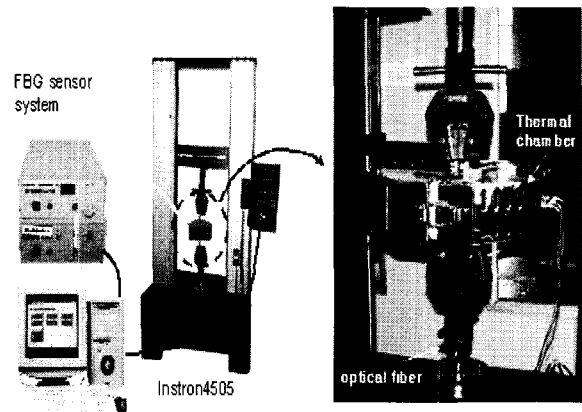


Fig. 5 Experimental setup of tension test at high temperatures.

Table 2 Material properties of [0]₂r at high temperatures

[0] ₂ r	RT		100℃		200℃		300℃		400℃	
	Avg.	Stdev.	Avg.	Stdev.	Avg.	Stdev.	Avg.	Stdev.	Avg.	Stdev.
Stiffness [GPa]	141.6	6.74	142.8	1.91	146.2	0.35	117.4	2.33	84.5	29.49
Strength [MPa]	1930	148.5	1760	84.9	1731	73.5	1724	31.3	1420	155.3

Fig. 5와 같이 열챔버가 장착된 만능시험기(instron 4505)에서 수행하였다. 이전의 여러 논문을 통해 알려진 것처럼 FBG 센서로 측정된 변형률값은 변형률 게이지의 값과 잘 일치하므로[9] 본 연구에서는 FBG 센서만으로 고온에서의 변형률 값을 측정하였다. 시험조건은 1 mm/min의 변위 제어로 인장을 가하였다.

시험 방법은 다음과 같다. 우선, Fig. 5에서와 같이 인장 시편을 만능시험기의 그립(grip)에 장착하고 열챔버의 온도를 시험에서 수행하고자 하는 온도까지 증가시킨다. 열챔버의 온도가 일정해지면 상온 시편과 마찬가지로 1 mm/min의 변위 제어로 인장을 가하면서 FBG 센서로부터 변형률 값을 취득하였다. 시험을 통해 얻어진 결과는 Table 2와 같고 온도에 따른 물성 변화의 경향을 알아보기 위해 Table 2를 그래프로 나타내면 Fig. 6과 같다.

강성의 경우 상온에서 200℃까지는 변화 없이 유지되며 200℃에서 400℃까지는 지속적인 감소현상을 나타냈다. 한편, 강도의 경우는 상온에서 100℃까지는 감소, 100℃에서 300℃까지는 값이 유지되며 300℃ 이후의 온도에서는 다시 감소하는 경향을 보였다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 섬유 물성이 지배적인 일방향 시편의 경우 강성과 강도는 온도에 따라 서로 다른 경향을 보였다.

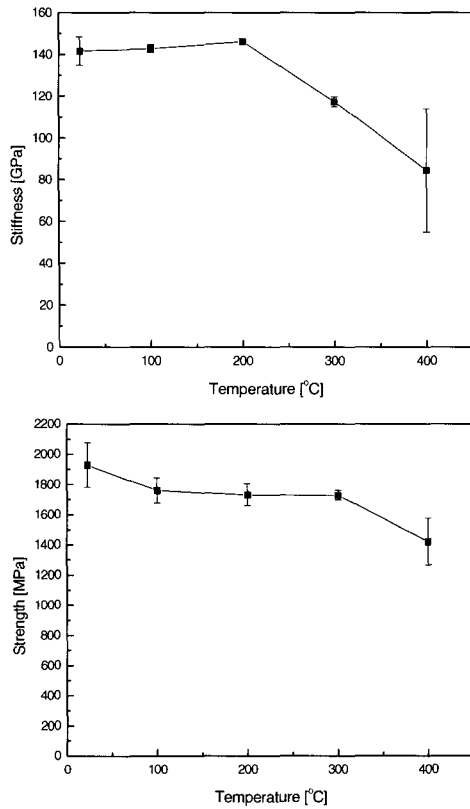


Fig. 6 Material property change of $[0_2]_T$ with temperatures.

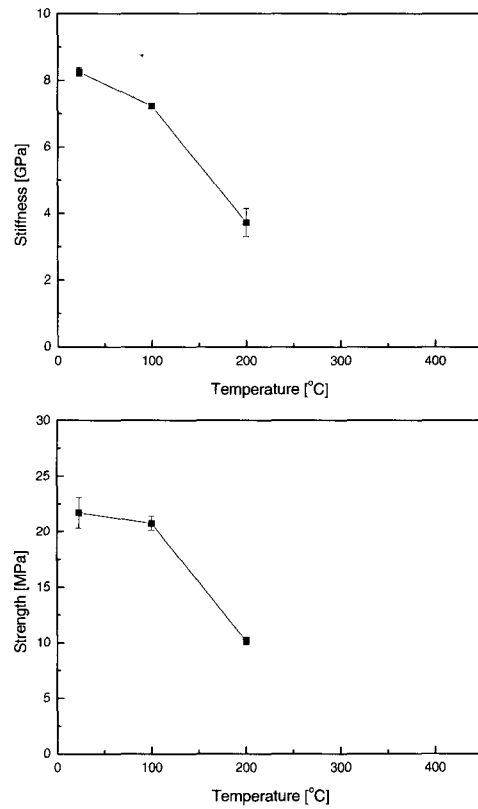


Fig. 7 Material property change of $[90_4]_T$ with temperatures.

5.2 수직방향 물성측정

고온용 복합재료 시편의 수직방향 물성 측정을 위해 5.1절의 일방향 물성 측정과 같은 방법으로 0.2 mm/min의 변위 제어로 인장을 가하였고 결과는 Table 3과 같다.

Table 3 Material properties of $[90_4]_T$ at high temperatures.

$[90_4]_T$	RT		100°C		200°C		300°C		400°C	
	Avg.	Stdev.	Avg.	Stdev.	Avg.	Stdev.	Avg.	Stdev.	Avg.	Stdev.
Stiffness [GPa]	8.26	0.13	7.23	0.08	3.73	0.42	모재연소		모재연소	
Strength [MPa]	21.7	1.37	20.75	0.64	10.16	0.34				

Table 3의 결과에서 일방향 시편과 달리 수직 방향 시편의 경우 강성과 강도는 모두 상온에서부터 온도가 증가함에 따라 지속적으로 감소하는 경향을 보였으며, 300°C 이상의 온도에서는 모재의 연소로 인해 모재가 하중을 전달하지 못해 값의 측정이 불가능하였다. 또, 온도가 증가할수록 더욱 큰 값의 감소를 보였으며 이러한 경향은 Fig. 7에 잘 나타나있다.

Fig. 7에서 고온용 복합재료의 수직방향 물성은 강성과 강도값이 온도가 증가함에 따라 거의 유사한 경향을 보였다. 또한, 300°C에서는 시편이 하중을 전달하지 못하는 것으로부터 본 연구에 사용된 수지(MY0510)의 온도 한계값, 즉 에폭시의 기화점(evaporation point)은 200~300°C 사이에 있을 것으로 생각된다.

5.3 결과 고찰

일방향 시편과 수직방향 시편에 대한 인장시험을 통해 복합재료 시편의 온도에 따른 물성 저하 정도를 FBG 센서를 이용하여 정량적으로 측정하였으며 모재의 연소로 인해 특정 온도 이상에서는 정확한 측정이 어려움을 확인하였다. 시험 결과에서 시편의 결과 값이 비교적 큰 표준편차를 보인 이유로는 프리프레그 제작 방법에서 기인하는 시편의 불균일성(irregularity) 때문으로 생각된다. 이를 확인하기 위해, 제작된 시편의 섬유 방향과 섬유 수직 방향에 대한 현미경(PME3, Olympus) 단면 사진을 통해 섬유 체적비와 실제 강화섬유와 모재의 상태를 관찰하였다. 현미경 사진으로 관찰된 시편의 단면 모습은 Fig. 8과 같다.

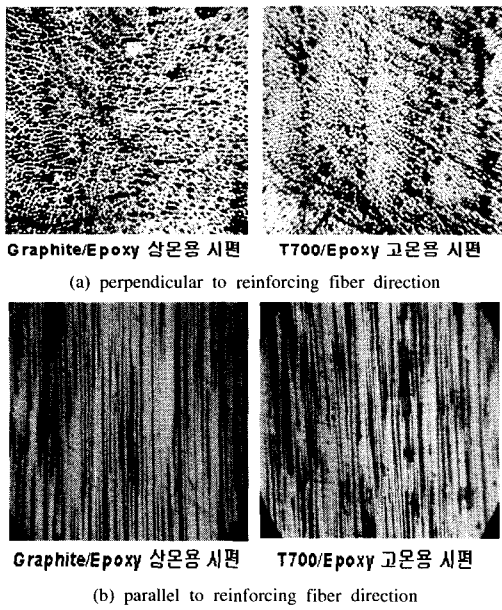


Fig. 8 The microphotographs of the cut ends.

Fig. 8의 단면 사진을 통해 일반적인 상온용 프리프레그로 제작된 복합재료 시편에 비해 본 연구에서 제작된 T700/Epoxy 고온용 복합재료 시편은 제작과정의 특성으로 인해 섬유 배열이 불규칙적임을 확인할 수 있다. 보다 정량적인 확인을 위해, 광학 현미경을 이용한 시편의 단면 사진과 이미지 프로세싱(image processing) 프로그램을 이용한 면적법으로 두 종류의 복합재료에 대한 섬유 체적비(fiber volume fraction)를 계산하였다. 시험편은 시편의 위치에 따른 오차를 줄이기 위해 세 개의 시편에 대해 각 시편에 대해서도 두 지점(section)의 섬유 체적비를 측정하여 다음 평균값을 취하였다. 측정 결과는 Table 4와 같다.

Table 4 The comparison of fiber volume fraction

V _f	시편#1		시편#2		시편#3		Avg.	Stdev.
	위치 #1	위치 #2	위치 #1	위치 #2	위치 #1	위치 #2		
상온용	51.4	51.7	51.4	52.1	54.4	55.0	52.7%	1.61
	52.4	49.0	50.3	57.0	52.9	49.6		
고온용	52.4	49.0	50.3	57.0	52.9	49.6	51.9%	2.95
	51.4	51.7	51.4	52.1	54.4	55.0		

Table 4에서 두 복합재료는 섬유 체적비의 평균값에서는 거의 같은 값을 보였다. 하지만, 측정 위치에 따른 값의 표

준편차는 약 2배 정도로 고온용 시편이 크게 나타났다. 즉, 고온용 프리프레그 테이프의 불균일성으로 인해 고온용 시편의 섬유 배열이 균일하지 못하고 섬유가 부분적으로 주름(wrinkle)진 상태로 제작되었기 때문임을 알 수 있다.

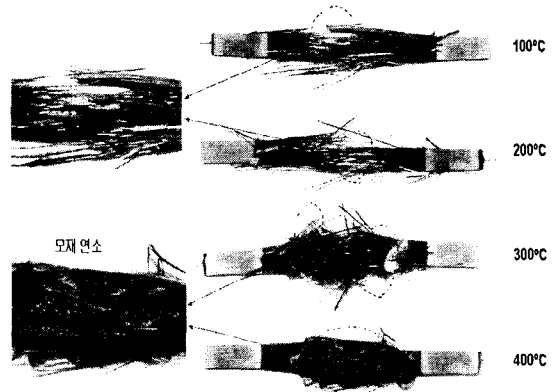


Fig. 9 Failure shapes of specimens at each temperature.

한편, Fig. 6의 강성 결과에서 일반적으로 섬유 물성 지배적이며 온도에 따라 큰 변화가 없는 것으로 알려진 일방향 시편의 강성값이 300°C 이상의 온도에서 급격한 변화를 보인 것은, 5.2절에서의 결과에서와 같이 300°C 이상의 온도에서 모재의 연소로 인해 FBG 센서에 열변형률이나 미끄러짐(slippage)이 발생해 측정오차로 작용했기 때문으로 생각된다. 또한, 이러한 열변형률은 시편을 그림에 장착하고 시편의 온도가 포화(saturation)되기까지의 시간과도 관계가 있음을 시험을 통해 확인할 수 있었다. 이와 같은 본 연구의 결과 값으로부터 300°C 이상의 온도에 대한 결과 값은 신뢰도가 떨어지며 물성 값의 측정을 위해 FBG 센서는 복합재의 모재가 연소되는 온도 이하에서 사용해야 함을 확인하였다. Fig. 9에서 300°C 이상의 온도에서 시편에 발생한 모재의 연소를 잘 확인할 수 있다. Fig. 9에서 100°C와 200°C의 경우에는 전형적인 일방향 시편의 파손 형상은 보이는데 반해, 300°C와 400°C의 경우는 정도의 차이는 있지만 두 경우 모두 높은 온도로 인해 모재가 연소된 형태를 나타냈다.

결론

본 연구에서는 광섬유 브래그 격자 센서를 이용하여 필라멘트 와인딩으로 제작된 연소관에 사용되는 고온용 복합재료의 온도에 따른 물성 변화를 측정하였으며 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 광섬유 센서의 삽입과 광섬유의 끝단 부분이 복합재료의 물성에 미치는 영향을 평가함으로써 물성의 저하없이 제작성을 고려한 광섬유 센서 삽입 기법을 결정하였다.
- 2) 상온에서부터 100℃, 200℃, 300℃, 400℃에 대한 일방향 시편의 인장시험을 통해 강성과 강도가 온도에 따라 다른 경향으로 감소하며 결과에서 나타난 큰 편차에 대한 원인에 대해 고찰하였다.
- 3) 일방향 시편과 달리 수직방향 시편의 경우 강성과 강도가 온도에 따라 거의 유사한 경향으로 감소하며 시험을 통해 기화점의 존재를 확인하였다.

이로써 FBG 센서는 복합재료의 모재 연소가 발생하기 이전의 온도에서 복합재료의 물성 저하 없이 삽입되어 고온 환경에서도 재료의 물성 측정에 성공적으로 이용될 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소에서 지원하는 위탁연구과제로 수행한 것이며 지원에 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.
- 9) 류치영, 박중완, 강현규, 김대현, 구분용, 홍창선, 김천곤, "광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 복합재 구조물의 변형률 측정에 관한 연구," 한국항공우주학회지, 제28권, 제5호, 2000, pp. 44-52.