

저온과 고온 환경 하에서 카본/에폭시 복합재의 기계적 물성 평가

임재문* · 신광복**† · 황태경***

* 한밭대학교 기계설계공학과, ** 한밭대학교 기계공학과, *** 국방과학연구소

Evaluation of Mechanical Properties of Carbon/Epoxy Composites Under In situ Low- and High-Temperature Environments

JaeMoon Im*, KwangBok Shin**† and Taekyung Hwang***

* Graduate School of Mechanical Design Engineering, Hanbat Nat'l Univ.,

** Dept. of Mechanical Engineering, Hanbat Nat'l Univ.,

*** Agency for Defense Development

(Received December 22, 2014 ; Revised March 20, 2015 ; Accepted April 1, 2015)

Key Words: Carbon/Epoxy Laminate Composite(카본/에폭시 적층 복합재), Low and High Temperature Environments(저온 및 고온환경), Mechanical Property(기계적 물성)

초록: 본 논문은 저온과 고온 환경 하에서 카본/에폭시 복합재의 기계적 물성 변화를 평가하는데 목적을 두고 있다. 기계적 물성 변화 평가는 환경 챔버와 전기로를 이용하여 -40℃에서 220℃까지의 온도에 대해 섬유방향과 섬유 직각방향의 인장 물성, 면내 전단 물성 그리고 층간전단강도에 대해 평가를 수행하였다. -40℃ 저온환경에서의 기계적 물성은 상온에서의 물성보다 증가하는 것을 확인하였다. 섬유방향 물성은 온도가 증가함에 따라 물성저하가 서서히 발생하였으나, 섬유직각방향 물성, 면내전단 물성 그리고 층간전단강도는 140℃ 이상의 온도에서 수지의 유리전이로 인해 급격한 물성저하가 발생하는 것을 확인하였다. 100℃ 환경에서 섬유 직각방향 인장물성 증가의 직접적인 원인은 수지의 후경화로 인한 현상으로 판단된다.

Abstract: This paper aims to evaluate the variation in the mechanical properties of carbon/epoxy composites under in situ low- and high-temperature environments. In situ low- and high-temperature environments were simulated with temperature ranging from -40℃ to 220℃ using an environmental chamber and furnace. The variation in the mechanical properties of the composites was measured for longitudinal and transverse tensile properties, in-plane shear properties and interlaminar shear strength. Under the low temperature of -40℃, all mechanical properties increased moderately compared to the baseline properties measured at room temperature. The changes in the longitudinal tensile properties decreased moderately with increasing temperature. However, transverse tensile properties, in-plane shear properties and interlaminar shear strength each showed a significant drop due to the glass transition behavior of the matrix after 140℃. Notably, the tensile property value near 100℃ increased compared to baseline property value, which was an unusual occurrence. This behavior was a direct result of post-curing of the epoxy resin due to its exposure to high temperature.

- 기호설명 -

Tg : 유리전이온도

SGM : Splitting, Gage, Middle 파손모드

XGM : eXplosive, Gage, Middle 파손모드

AGM : Angled, Gage, Middle 파손모드

ϵ_l : 리드와이어의 열출력

r : 리드와이어의 단위길이당 저항

L : 리드와이어의 길이

α : 저항온도계수

† Corresponding Author, shin955@hanbat.ac.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

- ΔT : 온도 변화량
 K : 게이지율(gauge factor)
 R : 게이지 저항

1. 서론

항공우주 및 방산 분야 기술이 발전함에 따라 초고속 비행체, 미사일 그리고 발사체가 개발되고 있다. 이러한 초고속 비행체와 미사일 등은 비행속도와 비거리 향상을 위해 구조 경량화가 필수적이다. 이때 구조물을 경량화하는 방안은 많으나, 경량소재를 적용하는 방법이 가장 보편적이고 현실적인 방안으로 제시되고 있다. 특히, 복합재는 기존의 금속재료에 비해 비강도 및 비강성이 높고 우수한 기계적 특성을 가져 항공우주 및 방산 분야에 적용이 증가하고 있는 추세이다.⁽¹⁾ 그러나 저온 및 고온 환경에서 운영되는 항공우주 및 방산 분야용 복합재 구조물은 온도 변화에 따른 복합재의 기계적 특성을 설계에 반영해야 복합재 구조물의 구조 안전성 확보할 수 있게 된다.⁽²⁾ 이에, 길형배 등⁽³⁾은 복합재의 고온 특성 평가를 위한 시험 기법 연구를 수행하여 130°C 부근에서 수지의 탄성계수가 급격히 감소함을 확인하였고, 양인영 등⁽⁴⁾은 고온 환경하에서 탄소섬유강화 복합재 적층판의 충격손상에 대해 연구를 수행하여 온도가 높아짐에 따라 박리면적이 커짐을 확인하였다. Ahmet Cavdar⁽⁵⁾는 고온 환경이 섬유강화 복합재의 기계적 물성에 미치는 영향의 연구를 수행하여 고온에서 복합재의 강도가 감소하는 것을 확인하였다. A.G. Gibson 등⁽⁶⁾은 고온 및 화재환경 하에서의 유리섬유/폴리프로필렌 적층 복합재의 기계적 물성변화를 연구하여 온도가 상승함에 따라 유리섬유/폴리프로필렌 적층 복합재의 물성이 점진적으로 감소함을 확인하였다.

일반적으로 복합재의 온도에 따른 기계적 특성은 복합재를 구성하고 있는 요소 중 화학적 접착제인 수지의 열적특성에 크게 영향을 받는다. 섬유는 온도에 대해 상대적으로 적은 물성변화가 나타나기 때문에 복합재의 온도에 따른 기계적 물성은 수지의 유리전이온도(T_g , glass transition temperature)와 섬유의 적층방향에 큰 영향을 받게 된다.⁽⁷⁻¹¹⁾

본 논문에서는 우주항공 및 방산 분야에 주로 활용되는 T700 계열의 카본/에폭시 적층 복합재의 온도 변화에 따른 기계적 특성 변화를 평가하고 예측하는 데 목적을 두고 있다. 이때 기계적

물성 평가는 복합재의 기본 물성인 섬유방향(0°)과 섬유직각방향(90°) 인장물성, 면내 전단물성과 층간 전단 물성에 대해 수행하였으며 온도 변화는 항공우주 및 방산용 구조물이 운영 또는 보관되는 환경을 모사하기 위해 -40°C의 저온 환경, 상온 환경 그리고 100°C, 140°C, 170°C, 200°C, 220°C의 5가지 고온 환경에 대해 고려하였다. 모든 시험 결과는 온도별로 5~7개의 시편에 대해 수행하여 평균값을 취하였다.

2. 시편 제작

시험에 사용된 시편은 섬유방향(0°)과 섬유직각방향(90°)의 일방향 인장시편, $\pm 45^\circ$ 의 면내 전단 시편 그리고 층간전단강도 시편, 총 4가지 종류이며, 0.142mm의 층두께(ply thickness)를 갖는 (주)한국카본의 CU150NS 단일방향 프리프레그를 손적층(hand lay-up)방식으로 적층하여 제작하였다. 이때 CU150NS 프리프레그는 섬유 150gr/m², 수지 64gr/m²으로 구성되어 있고, 수지의 유리전이온도는 137°C를 갖는다.

인장시편은 ASTM D3039 규정에 의거하여 제작하였다. 이때, 섬유방향(0°)의 인장 시편은 10장의 프리프레그를 적층하여 약 1.5mm의 두께로 제작하였으며, 섬유직각방향(90°)의 인장 시편은 14장의 프리프레그를 적층하여 약 2mm의 두께로 제작하였다. $\pm 45^\circ$ 의 면내 전단시편은 ASTM D3518 규정에 의거하여 16장의 프리프레그를 두께방향으로 적층 각도가 대칭되도록 적층하여 약 2.5mm의 두께로 제작하였고, 층간전단 시편은 ASTM D2344 규정에 의거하여 40장의 프리프레그를 적층하여 약 6mm의 두께로 제작하였다.⁽¹²⁻¹⁴⁾ 적층된 프리프레그는 오토클레이브를 사용하여 Fig. 1과 같은 온도와 압력 경화조건(cure condition)에 따라 성형하였다.

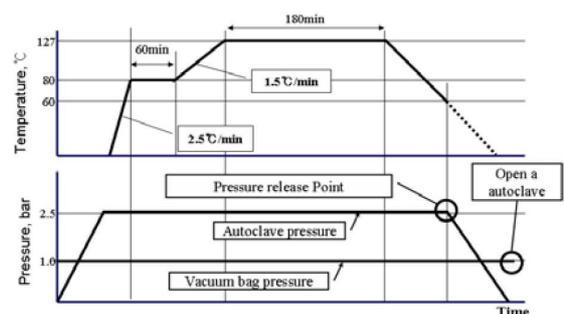


Fig. 1 Curing cycles of autoclave

이때, 시편의 열변형을 최소화하기 위해 상온까지 자연 냉각된 후 오토클레이브를 열어 시편을 꺼내었다. 1차 성형이 완료된 카본/에폭시 적층판은 항공용 접착 필름인 FM73을 사용하여 탭을 접착하기 위한 2차 성형을 수행하였다. 섬유방향(0°)의 인장 시편의 경우, 약 1.5mm의 두께를 갖는 유리섬유/에폭시 적층판 탭(Tab)을 접착하였으며, 섬유직각방향(90°)의 인장 시편과 면내 전단시편의 경우, Deerfos사의 KA161 #80 사포로 탭을 제작하여 2차 성형을 통해 접착하였다. 2차 성형이 완료된 시편은 다이아몬드 커터를 이용하여 ASTM 규정에 맞는 시편 형상으로 절단하는 방법으로 시편을 제작하였다. 이때 시편의 치수들은 Table 1과 같다.

상온 인장시험에서는 재료의 푸아송 비(Poisson's ratio)를 측정하기 위해 시편 중앙에 2축 스트레인 게이지를 부착하였으며, 저온과 고온시험의 경우에는 각각 저온용 1축 스트레인 게이지와 고온용 1축 스트레인 게이지를 부착하였다. 시편의 온도를 측정하기 위해 스트레인 게이지 부착 반대면에 K-type 열전대(thermocouple)를 부착하였다. 이때 저온 및 상온 스트레인 게이지는 M-Bond 200을 사용해 부착하였으며 고온 스트레인 게이지는 고온 스트레인 게이지 전용 접착제인 NP-50의 주체와 경화제를 4% 농도로 혼합하여 상온에서 약 10kg의 하중을 가해 24시간을 경화해 부착하였다. K-type 열전대는 내열 에폭시인 SE-400을 이용하여 24시간 동안 경화하여 부착하였다.

3. 저온 및 고온 환경하에서의 물성평가

3.1 평가 방법

카본/에폭시 복합재료의 저온 및 고온 환경하에서의 기계적 물성 변화를 평가하기 위해, -40°C의 저온 환경, 상온 환경(20°C) 그리고 100°C, 140°C, 170°C, 200°C, 220°C의 5가지 고온 환경을 고려하여 수행하였다. 이때, 기계적 물성은 섬유방향(0°)과 섬유직각방향(90°) 인장물성, 면내 전단물성과

층간 전단 물성에 대해 수행하였고, 모든 시험 결과는 온도별로 5~7개의 시편에 대해 수행하여 평균값을 취하였다. 저온과 고온 시험에서는 각각 저온용, 고온용 스트레인 게이지를 사용하였으며 이때 게이지율은 식 (1), (2)와 같이 제조사에서 제공하는 온도에 따른 게이지율 산출식에 따라 계산하여 적용하였다.

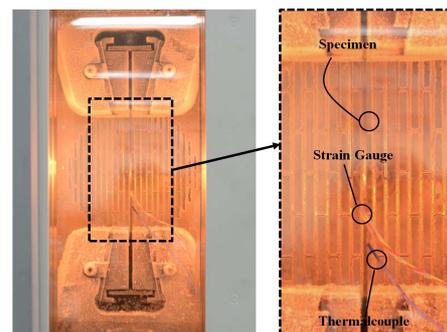
$$\epsilon l = \frac{rL\alpha\Delta T}{K(R+rl)} \tag{1}$$

$$K_0 = \frac{R}{R + \frac{rL}{2}} K \tag{2}$$

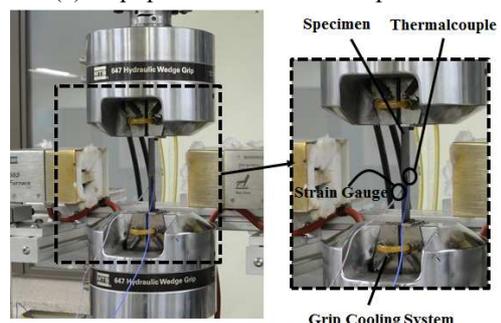
-40°C의 저온 시험의 경우, 10ton 용량의 만능재료 시험기 Instron 5982와 -50°C~350°C의 분위기 온도를 조성할 수 있는 Instron 3119-407 챔버에 액화질소를 사용하여 시험을 수행하였다. 상온 및 고온 시험은 10ton 용량의 만능재료시험기 MTS 810을 사용하여 수행하였으며, 고온 시험은 시편의 게이지 부분을 가열할 수 있도록 MTS 653 Furnace를 이용해 시편을 가열하여 시험을 수행하였다. 이때, 고온 환경 시험을 수행하는 과정에서 탭 부분의 접착제가 녹아 미끄러지는 현상을 방지하기 위해 지그의 그립부를 냉각하며 시험을 수행하였으며 1500psi의 압력으로 시편을 고정하여 시험을 수행하였다. Fig. 2(a)는 저온 시험용 환경챔버 내에 시편, 스트레인 게이지 그리고 K-type 열전대가 부착된 모습을 보여주고 있으며, Fig. 2(b)

Table 1 Dimensions of specimens

		Thickness	Width	Gage Length
Tension	0°	1.462mm	14.902mm	139.883mm
	90°	2.112mm	25.114mm	139.391mm
In-Plane Shear		2.622mm	25.168mm	138.549mm
Interlaminar Shear		6.946mm	12.044mm	-



(a) Equipments for low temperature



(b) Equipments for high temperature

Fig. 2 Test equipments

는 고온 시험에 사용된 만능재료시험기 MTS 810와 MTS 653 Furnace, 그림부의 냉각장치를 보여준다.

3.2 인장 물성평가

인장 물성평가는 ASTM D3039 규정에 의거하여 수행하였으며 저온 및 고온 시험의 시편 중앙 부위에 부착한 K-type 열전대에 의해 측정된 시편의 표면온도가 시험온도에 도달한 뒤 온도가 시편 전체에 균일하게 유지되도록 5분 경과 후 시험을 수행하였다.

섬유방향(0°) 인장 시편의 경우, -40°C 저온 환경에서 온도 변화에 의해 탄성계수와 인장강도의 값이 다소 높아지는 경향을 보이고 있다. 이는 저온에서 재료의 수축으로 인해 발생하는 압축응력 때문인 것으로 판단된다. 시험동안 -40°C에 의해 발생하는 온도 차이에 의한 압축응력이 인장 하중 하에서 물성 증가에 기여를 하기 때문이다. -40°C에서의 물성은 상온과 비교하여 탄성계수와 인장강도가 각각 16%, 13% 증가함을 확인하였다. 100°C와 140°C의 고온 환경에서는 온도에 따른 물성의 변화가 상온의 결과와 비교하여 차이가 미비한 것으로 확인되었다. 이는 섬유방향(0°) 시편의 경우 섬유 지배물성으로 탄소 섬유가 시험 온도(100°C와 140°C)에서는 큰 영향을 받지 않기 때문으로 판단된다. 파손모드 역시 상온 시험에서 발생하는 전형적인 쪼갬 파손모드(SGM failure mode)가 100°C와 140°C에서도 발생함을 확인할 수 있다. 그러나, 170°C 이상의 온도에서는 섬유에 미치는 영향은 적으나, 수지의 유리전이온도(137°C)를 넘어 수지의 상변화와 열 손실(heat loss)로 인장 강도가 저하되었으며 파손모드 또한 상온 및 100°C와 140°C의 온도 환경과는 달리 폭발 파손모드(XGM failure mode)가 발생하였다. 이때, 폭발 파손시 유리전이온도 부근에서 수지가 유리전이 되어 취성파손모드가 발생하는 것을 확인하였다. 그러나, 탄성계수의 경우 인장강도에 비해 수지 손실에 의한 영향이 적어 현저한 물성 저하가 발생하지 않는 것으로 확인되었다. Fig. 3은 온도 변화에 따른 섬유방향(0°) 인장시편의 물성 변화와 파손모드를 보여주고 있다.

섬유직각방향(90°) 인장 시편의 경우, -40°C 저온 환경에서 섬유방향(0°) 인장 시편의 결과와 비슷하게 재료의 수축으로 인해 탄성계수와 인장강도가 상온의 결과에 비해 높아지는 경향을 보이

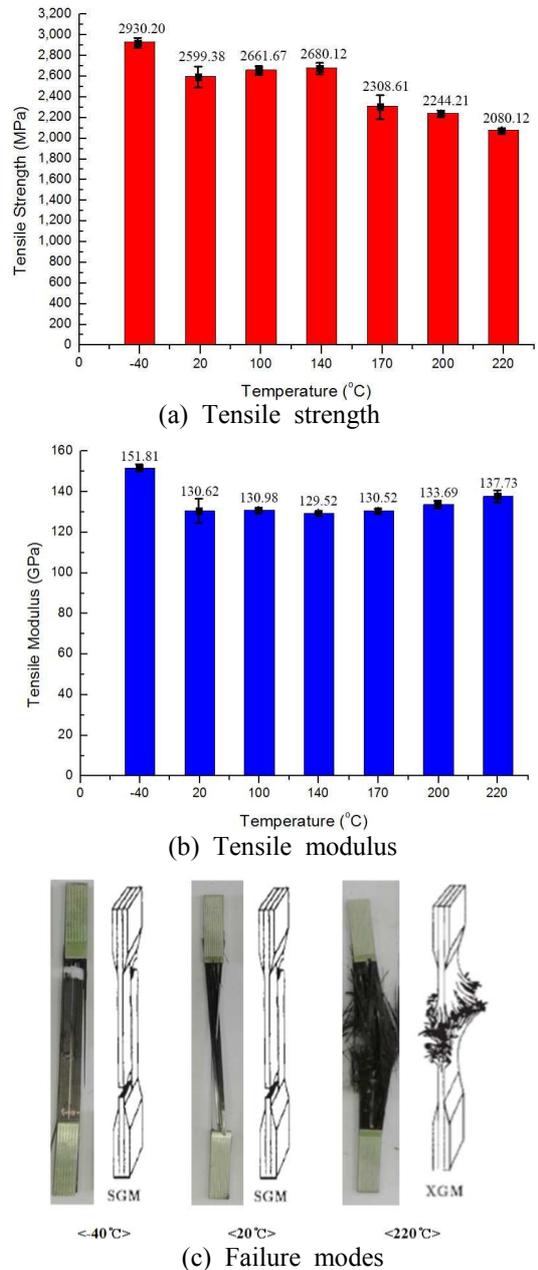
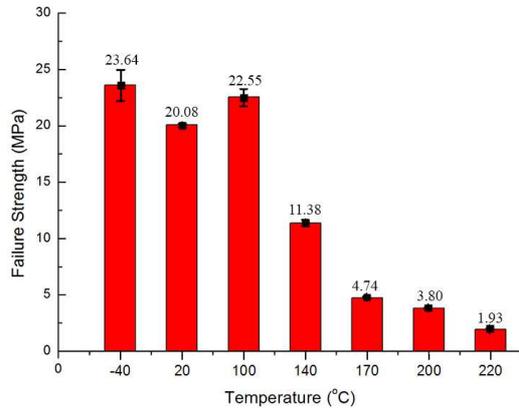


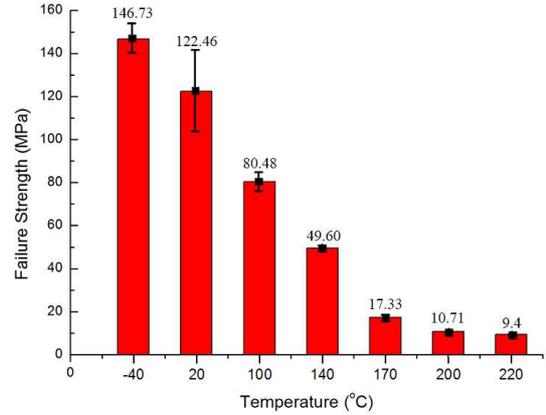
Fig. 3 Test results for 0° tensile specimens due to temperature variations

고 있다. 100°C의 환경에서는 상온보다 약 3.8% 높은 인장강도를 확인하였는데 이는 수지가 유리전이온도보다 낮은 온도에서 시편 성형 후 후경화 되는 경향이 있어 섬유직각방향(90°) 시편과 같이 수지 지배물성의 경우 종종 인장강도가 일시적으로 상승하는 거동을 보이기 때문이다.⁽¹⁵⁾

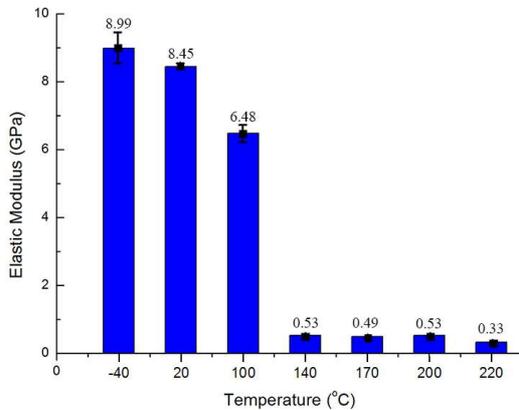
수지의 유리전이온도인 137°C 이상의 고온 환경에서는 수지의 유리전이와 열 손실로 인해 인장강도와 탄성계수가 모두 급격히 저하되는 경향



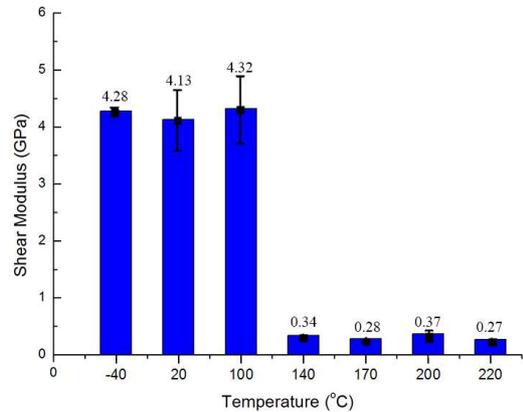
(a) Tensile strength



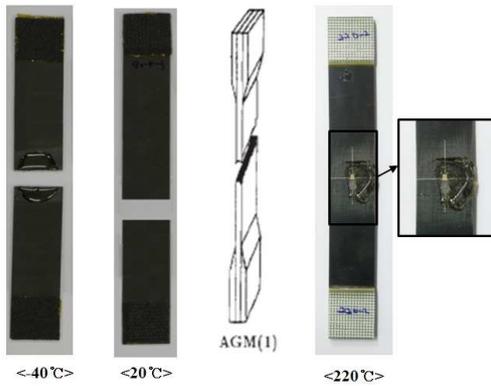
(a) Shear strength



(b) Tensile modulus



(b) Shear modulus



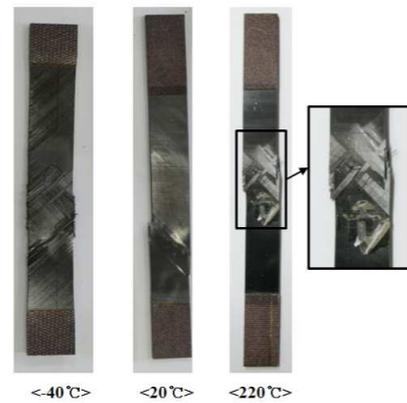
(c) Failure modes

Fig. 4 Test results for 90° tensile specimens due to temperature variations

을 보이고 있다. 섬유직각방향(90°) 인장 시편의 경우, 수지의 연화로 인해 게이지 중앙부분이 둘로 나뉘는 파손되는 현상(AGM failure mode)이 지배적으로 발생하였다. Fig. 4는 온도 변화에 따른 섬유직각방향(90°) 인장시편의 물성 변화와 파손모드를 보여준다.

3.3 면내 전단 물성평가

면내 전단시험은 인장시험과 동일한 시험장비



(c) Failure modes

Fig. 5 Test results for in-plane shear specimens due to temperature variations

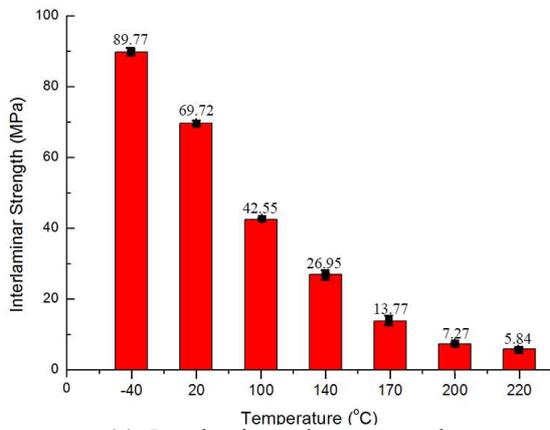
와 온도조건에서 수행하였다. 스트레인게이지 또한 인장시험과 동일하게 저온 및 고온 시편에 각각 저온, 고온용 1축 스트레인 게이지를 부착하였으며 상온 시편에는 2축 스트레인 게이지를 부착하였다. 면내 전단 물성평가는 ASTM D3518에 의거하여 수행하였으며, 저온 및 고온 시험의 경우 시편 중앙부위에 부착한 K-type 열전대에 의해 측정된 시편의 표면온도가 시험온도에 도달한 뒤 5분 경과 후 시험

을 수행하였다. -40°C 의 저온 환경에서, 전단강성은 상온과 비슷하나, 전단강도가 증가되는 경향을 보이고 있다. 이는 인장 시편의 시험 결과와 비슷하게 -40°C 의 저온 환경에서 재료의 수축으로 인해 물성 값이 감소되지 않는 것으로 판단된다. 수지의 유리전이온도인 137°C 이상의 온도에서는 수지의 유리전이와 열 손실로 인해 급격한 물성저하가 발생하는 것을 확인하였다.

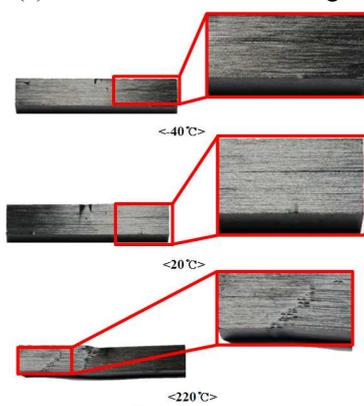
면내 전단시험의 파손모드는 온도가 고온으로 갈수록 수지의 유리전이로 인해 취성파손 모드의 경향을 보이고 있다. Fig. 5는 온도 변화에 따른 면내 전단물성 변화와 파손모드를 보여준다.

3.4 층간전단 강도평가

층간전단강도 시험은 만능재료시험기 Instron 5982와 챔버 Instron 3119-407을 사용해 시험을 수행하였다. 시편의 온도를 측정하기 위해 상부에 K-type 열전대를 부착하였으며 ASTM D2344에 의거하여 $1.0\text{mm}/\text{min}$ 의 속도와 지지부 길이를 26mm 로 선정하여 시험을 수행하였다.



(a) Interlaminar shear strength



(b) Failure modes

Fig. 6 Test results for interlaminar shear specimens due to temperature variations

층간전단 강도의 결과는 면내 전단시험 결과와 유사한 거동을 보이고 있다. -40°C 저온 환경에서 층간전단강도가 상온에 비해 높은 강도 값을 가지며, 온도가 높아짐에 따라 강도 저하가 발생함을 확인하였다. 특이한 사항은 면내 전단시험 결과와는 달리 100°C 부근에서도 급격한 층간전단 강도 저하가 발생하였는데 이는 층간전단시편의 경우 시편 성형 시 수지의 경화로 충분히 이루어져 100°C 의 온도에서도 후경화 경향이 없어 강도의 저하가 발생한 것으로 판단된다.

170°C 이상의 온도에서는 육안으로도 층간분리에 의한 파손이 관찰되어 파손의 시작을 쉽게 확인할 수 있었다. 이는 수지에 지배적인 영향을 받는 층간전단의 특성상 수지의 유리전이온도인 137°C 부근이나 이상의 온도에서 수지의 유리전이와 열 손실이 발생했기 때문으로 판단된다. Fig. 6은 온도 변화에 따른 층간전단강도 변화와 파손모드를 보여준다.

4. 결론

본 논문에서는 카본/에폭시 적층 복합재의 온도 변화에 따른 인장 및 면내전단 물성 그리고 층간전단강도 특성을 평가하였다. 이때 -40°C 의 저온 환경, 상온 환경 그리고 100°C , 140°C , 170°C , 200°C , 220°C 의 5가지 고온 환경에 대해 고려하여 다음의 결론을 얻었다.

(1) 섬유방향(0°)의 카본/에폭시 적층 복합재의 온도에 따른 인장 특성은 -40°C 저온에서 인장강성 및 강도 값이 증가되는 경향을 보였는데, 이는 저온에서 재료의 수축으로 인해 발생하는 압축응력으로 인한 것으로 판단된다. 반면, 170°C 이상의 고온 환경에서는 비록 섬유방향(0°) 인장 물성이 섬유지배물성이라도 수지의 상변화와 열 손실로 인해 인장 강도가 약 11% 이상 감소함을 확인하였다.

(2) 섬유직각방향(90°)의 카본/에폭시 적층 복합재의 인장특성은 온도가 수지의 유리전이온도 이상으로 높아질수록 수지의 유리전이로 인해 급격한 물성저하가 발생함을 확인하였다. 반면, 100°C 의 고온 환경에서는 인장물성이 증가하는 경향을 보이는 데, 이는 수지의 후경화로 인한 것으로 판단된다.

(3) 면내전단 특성은 인장 물성 변화 추이와 비슷한 경향을 보이고 있다. 저온환경에서는 수지

의 수축으로 인해 물성이 다소 증가하였으나, 온도가 높아짐에 따라 물성저하가 발생하며 수지의 유리전이온도인 137°C 이상의 온도에서는 급격한 물성저하가 발생됨을 확인하였다.

(4) 층간전단강도는 수지 지배 물성이므로 온도가 높아짐에 따라 층간전단 강도가 낮아지는 거동을 보였다. 특히, 170°C 이상의 온도에서는 각 층이 분리되어 열리는 파손 현상이 육안으로 관찰되어 파손의 시작을 쉽게 확인할 수 있었다.

(5) 저온과 고온에서 운영되는 복합재 구조물의 경우, 온도 변화에 따라 기계적 물성이 변화될 수 있으므로 이를 고려한 구조 안전성 설계가 필요하다. 특히, 수지의 유리전이온도 이상에서 장기간 운영되는 구조물의 경우 수지의 상변화와 열손실을 최소화할 수 있는 고온 차폐 설계가 반드시 고려되어야 한다.

참고문헌 (References)

- (1) Oh, J. O., Yoon, S. H., Lee, S. W., Ahn, C. W. and Hwang, T. K., 2012, "Prediction of High Temperature Tensile Strengths for Carbon Fiber/Epoxy Composite," *Fall Conference of The Korean Society of Propulsion Engineers*, pp. 665~667.
- (2) Song, M. G., Kweon, J. H., Choi, J. H., Kim, H. J., Song, M. H., Shin, S. J. and Byun, J. H., 2010, "Hygrothermal Effect on the Strength of Carbon/Epoxy Composite Single-Lap Bonded Joints," *The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 38, No. 2, pp. 119~128.
- (3) Kil, H. B. and Yoon, S. H., 2012, "Test Method for Composites Material Properties under High Temperature(I)," *Spring Conference of The Korean Society of Propulsion Engineers*, pp. 259~261.
- (4) Yang, I. Y. and Park, C. S., 1994, "A Study on the Impact Damage and Residual Bending Strength of CF/EPOXY Composite Laminate Plates under High Temperature," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng.*, Vol. 18, No. 8, pp. 1930~1938.
- (5) Cavdar, A., 2012, "A Study on the Effects of High Temperature on Mechanical Properties of Fiber Reinforced Cementitious Composites," *Composites: Part B, Vol. 43*, pp. 2452~2463.
- (6) Gibson, A. G., Otheguy Torres, M. E., Browne, T. N. A., Feih, S. and Mouritz, A. P., 2010, "High Temperature and Fire Behaviour of Continuous Glass Fibre/Polypropylene Laminates," *Composites : Part A, Vol. 41*, pp. 1219~1231.
- (7) Hinz, S., Omoori, T., Hoio, M. and Schulte, K., 2009, "Damage Characterisation of Fiber Metal Laminates under Interlaminar Shear Load," *Composites: Part A, Vol. 40*, pp. 925~931.
- (8) Ogihara, S., Takeda, N., Kobayashi, S. and Kobayashi, A., 1999, "Effects of Stacking Sequence on Microscopic Fatigue Damage Development in Quasi-Isotropic CFRP Laminates with Interlaminar-Toughened Layers," *Composite Science and Technology*, Vol. 59, pp. 1387~1398.
- (9) Buxton, A. and Baillie, C., 1994, "A Study of the Influence of the Environment on the Measurement of Interfacial Properties of Carbon Fiber/Epoxy Resin Composites," *Composites*, Vol. 25, No. 7, pp. 604~608.
- (10) Huh, Y. H., Kim, J. I., Kim, D. J. and Lee, G. C., 2012, "Temperature-Dependency of Tensile Properties of GFRP Composite for Wind Turbine Blades," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 36, No. 9, pp. 1053~1057.
- (11) Hwang, T. K., Park, J. B., Lee, S. Y., Kim, H. G., Park, B. Y. and Doh, Y. D., 2005, "Evaluation of Thermal Degradation of CFRP Flexural Strength at Elevated Temperature," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 18, No. 2, pp. 20~29.
- (12) ASTM International, 2000, "Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials," ASTM D3039.
- (13) ASTM International, 2000, "Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates," ASTM D2344.
- (14) ASTM International, 2001, "Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a $\pm 45^\circ$ Laminates," ASTM D3518.
- (15) Kim, D. J., Choi, N. S. and Yun, Y. J., 2007, "Degradation Characteristics of Filament-Winding-Laminated Composites Under Accelerated Environmental Test," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 31, No. 3, pp. 295~303.