탄소섬유/에폭시 복합적층판에 대한 저온에서의 기계적특성 실험평가

허남일, 사정우, 조승연, 도철진, 오영국, 최창호, 권면, 이경수, 이상연*, 김재훈*
한국기초과학지원연구원, 충남대학교*

Experimental Evaluation of Mechanical Properties for the Carbon/Epoxy Composite Laminates at Low Temperature

N.I. Her, J.W. Sa, S. Cho, C.J. Do, Y.K. Oh, C.H. Choi, M. Kwon, G.S. Lee, S.Y. Lee*, J.H. Kim*

Korea Basic Science Institute, Chungnam National University*

hni@comp.kbsi.re.kr

Abstract - Mechanical test of the Carbon Fiber Reinforced Plastics(CFRP) composite specimen was performed based on the ASTM code at the ambient and low temperature. Tension, compression, in-plane shear, and inter-laminar shear properties of the composite laminates were evaluated experimentally using the Universal Testing Machine(UTM) system at the temperature of 24℃, -76℃, and -196℃. From the test results it was found that the CFRP chosen for the Korea Superconducting Tokamak Advanced Research(KSTAR) magnet supporting post had smaller tensile strength and larger compressive strength at the low temperature than those of the ambient temperature because of material ductility.

1. 서 론

CFRP 복합재료는 GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastics)에 비해 높은 기계적 강도와 극저온에서 낮은 열전도 특성을 지니고 있으며, 이 때문에 항공구조물 외에 큰 하중이 작용되는 극저온구조물의 지지구조물 구조재료로 사용되고 있다[1]. 이러한 지지구조물 설계에서는 구조강도증가와 단열이라는 서로 대립되는 설계요구조건들로 인하여 최적의 재료선택이 어려울 수 있다.

특히, 본 연구에서 다루고 있는 CFRP 복합재료의 경우는 재료의 제작 공정에 따라 재료특성이 달라질 수 있으며, 극저온에서의 기초적인 기계적, 전기적, 열적 재료특성에 대한 연구가 극히 제한적으로 진행되어 왔다[2].

Fig. 1은 KSTAR 핵융합 실험장치의 초전도자석 지지각을 나타낸 것이다. 8개의 지지각(supporting post)에 의해 초전도자석구조물이 상온의 cryostat base에 고정되며, 이 지지각은 액체헬륨 온도로 운전되는 초전도자석의 열손실을 최소화시키고, 초전도자석의 극저온 수축에 의한 열변형을 흡수하고, 약 320 ton에 이르는 초전도자석의 자중과 수백톤의 plasma disruptions load를 지지해야 한다[3]. 이러한 설계요구조건을 고려하여 Stainless Steel(S.S) 316LN 재료와 극저온에서 단열 및 구조강도 특성이 우수한 CFRP가 사용되었다.

본 연구에서는 KSTAR 핵융합 실험장치의 초전도자석구조물 지지각 설계에 적용된 CFRP 복합재료의 상온 및 극저온에서 기계적 물성특성을 인장시험, 압축시험, In-plane shear 시험, Inter-laminar shear 시험을 통하여 고찰하였다.

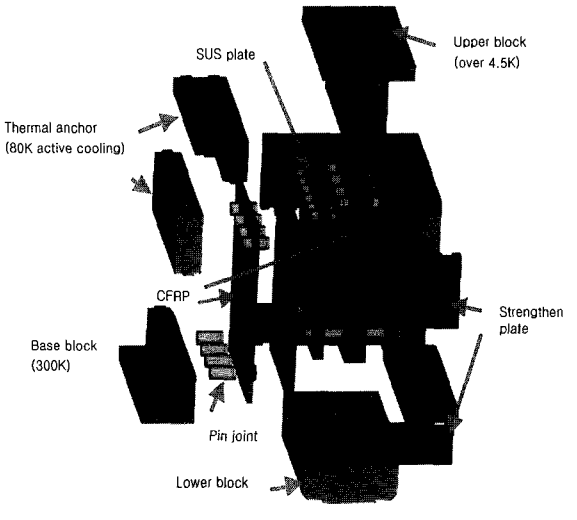


Fig. 1. Configuration of supporting post

2. 시편제작 시험방법

2.1 시편제작

본 연구에서 사용된 CFRP 복합재료는 (주) 한국화이바에서 제작되고 있는 두께는 0.27mm의 HPW193/RS3232이며, Table 1과 같은 적층특성을 갖고 있다. ASTM 규격에 따라 인장, 압축, In-plane shear와 Inter-laminar shear 시험편이 각 실험온도(24℃, -76℃, -196℃)에 대하여 각각 5개씩 제작되었다. Fig.2는 시험편 성형에 사용된 오토클레이브의에서 환경조건이며, 시험편을 온도 350°F와 압력 100Psi에서 2시간동안 유지시킨 후 냉각시켜 제작되었다.

Table 1. Lay-up pattern of specimen

Test conditions	Lay-up pattern	Layer quantity
Tensile test	(0/90)	12
Compressive test	(0/90)	14
In-plane shear test	±45	12
Inter-laminar shear test	(0/90)	34

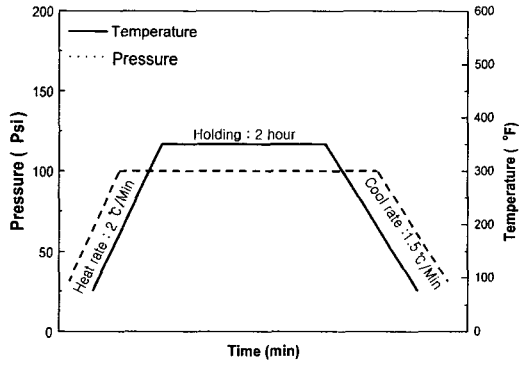


Fig. 2. Curing cycle of specimen manufacturing

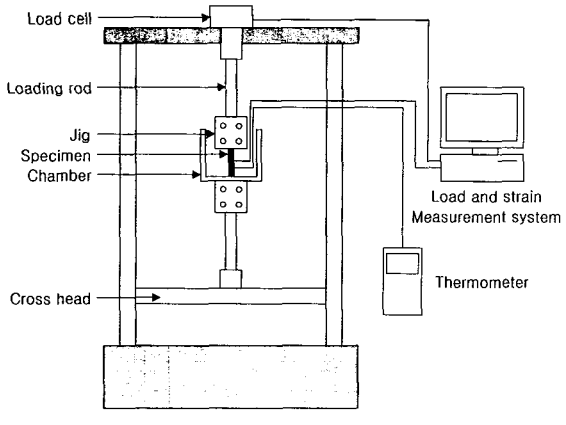


Fig. 3. Schematic diagram of test system

2.2 실험장치

Fig. 3은 본 시험에서 구성한 실험장치 개념도이다. 사용된 시험기는 SCR 속도제어방식의 만능재료시험기(Toyo Baldwin Co., Model UTM 1-10000C)이며, 10 ton용량의 로드셀을 이용하였다. 로드셀에서 나온 하중 신호와 스트레인 게이지에서 나온 변형률 신호가 하중/변형률 측정장치(CAS Co, AI 1600)에 입력되었고, 동시에 온도측정기(OMEGA Co, HH23)에 연결된 K-type thermocouple로부터 실험용기의 온도를 확인하였다.

2.3 스트레인 게이지 부착

스트레인 게이지는 Micro Measurement Group(MM사)의 2축 스트레인 게이지(WA-06-060WT-120)와 단축 스트레인 게이지(EA-09-031DE-120)로서 -196℃까지 변형률 측정 가능한 것을 사용하였다. 스트레인 게이지를 시험편에 접착하기 위하여 저온용으로 상온 경화가 가능한 MM사의 AE-10을 사용하였으며, 부착 후, 135kN/m^{2}의 압력에서 12시간동안 경화시켰다. 접착 부위는 액체질소나 에틸알콜의 영향을 배제하기 위해서 같은 회사제품인 M-COAT B를 사용하여 코팅하였다.

2.4 시험온도

본 연구의 실험들은 온도 24℃, -76℃, -196℃에서 수행되었다. 실험용기의 열 손실을 줄이기 위해 스티로폴을 단열재로 사용하였으며, 냉매의 누수 방지를 위하여 비닐용기를 사용하였다. 실험온도 -76℃는 드라이 아이스와 99%의 에틸 알콜을 혼합하여 만들었으며 -196℃는 액체질소(LN_2)를 사용하여 실험환경을 만들었다. 실험온도는 K-type thermocouple을 사용하여 측정하였고, 시험편 전체가 실험온도로 열적평형을 이루도록 시험편을 10분 정도 냉매에 완전히 담근 후 시험하였다.

2.5 시험방법

2.5.1 인장시험

Fig. 4(a)와 같이 ASTM D3039 규격에 따라 제작된 시험편에 시험하중속도는 2mm/min로 인장하중을 가하였다. 3가지 실험온도에서 각각 실험이 이루어졌으며, 정적 인장강도 이외에 포와송비와 탄성계수가 시편에 부착된 2축 스트레인 게이지로부터 얻어진 하중방향의 변형률과 횡방향 변형률로부터 산출되었다.

2.5.2 압축시험

Fig. 4(b)와 같이 ASTM D695 규격에 따라 제작된 시험편에 시험하중속도는 1.5mm/min로 압축하중을 가하였다. 3가지 실험온도에 대해 각각 실험이 이루어졌으며, 압축강도 이외에 압축탄성계수가 단축 스트레인 게이지의 변형률로부터 산출되었다.

2.5.3 In-plane shear test

Fig. 4(c)와 같이 ASTM D3518 규격에 따라 제작된 시험편에 시험하중속도는 2.0mm/min로 인장하중을 가하였다. 실험온도 및 부착된 스트레인 게이지는 인장시험의 경우와 같으며, 하중방향의 변형률과 횡방향의 변형률을 측정하여 전단탄성계수를 산출하였다.

2.5.4 Inter-laminar shear test

Fig. 4(d)와 같이 ASTM D2344 규격에 따라 제작된 시험편에 시험하중속도는 1.5mm/min로 굽힘하중을 가하였다. 각 온도에서 실험이 이루어졌으며, 측정된 하중-변위선도의 최대 파단하중으로부터 Inter-laminar shear strength를 구하였다.

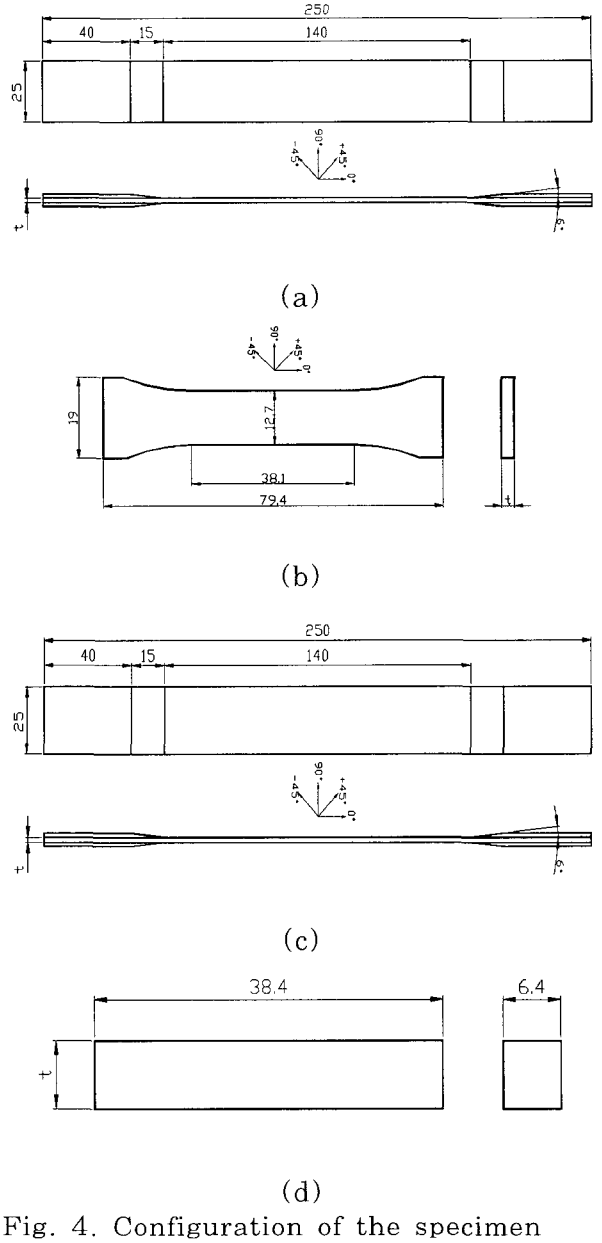


Fig. 4. Configuration of the specimen
(a) tensile test, (b) compressive test
(c) in-plane shear test,
(d) inter-laminar shear test specimen

3. 실험 결과

3.1 인장시험

인장시험에서 얻어진 응력-변형률 선도로부터 인장강도와 인장탄성계수가 계산되었으며, 각각의 실험온도에 대한 평균값을 Table 2에 나타내었다. 인장강도의 경우 실험온도 24℃, -76℃, -196℃에 대하여 평균값이 각각 614.26 MPa, 456.95 MPa, 371.74 MPa이었으며, 실험온도 24℃를 기준으로 -76℃는 25.61%, -196℃는 39.48%가 감소하였다. 인장탄성계수의 경우 실험온도 24℃, -76℃, -196℃에 대해서 평균값이 각각 66.73 GPa, 64.15 GPa, 70.86 GPa이었고 24℃를 기준으로 -76℃는 3.86% 감소, -196℃는 6.19% 증가하였으나 대체적으로 유사한 값을 나타내고 있다.

3.2 압축시험

압축시험에서 얻어진 응력-변형률 선도로부터 압축강도와 압축탄성계수가 계산되었으며, 각각의 실험온도에 대한 평균값을 Table 2에 나타내었다. 압축강도의 경우 실험온도 24℃, -76℃, -196℃에 대하여 평균값이 각각 502.19 MPa, 676.51 MPa, 771.68 MPa이었으며, 실험온도 24℃를 기준으로 -76℃는 34.71%, -196℃는 53.66%가 증가하였다. 압축 탄성계수의 경우 실험온도 24℃, -76℃, -196℃에 대해서 평균값이 각각 54.38 GPa, 54.07 GPa, 57.07 GPa이었고 24℃를 기준으로 -76℃는 0.57% 감소, -196℃는 4.96%증가하고 있었으며 액체질소 환경에서만 약간 증가되나 전체적으로 저온에서 크게 영향을 받지 않았다.

3.3 In-plane shear 시험

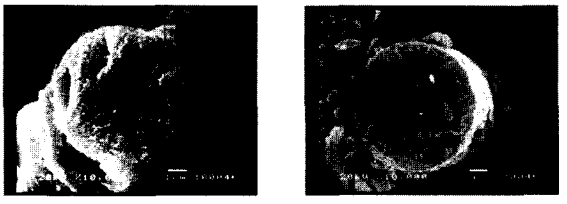
전단탄성계수는 실험 하중을 이용하여 얻어지는 전단응력 및 하중방향 변형률과 횡방향 변형률로부터 얻어진 전단변형률선도에서 계산되었다. 실험온도 24℃, -76℃, -196℃에 대해서 평균값이 각각 4.20 GPa, 5.39 GPa, 7.33 GPa이었고, 24℃를 기준으로 -76℃는 28.33 %, -196℃는 74.52% 증가하였다.

3.4 Inter-laminar shear 시험

Inter-laminar shear strength는 실험을 통해 얻어진 하중-변위 선도에서 최대 파단 하중을 ASTM D2344에 정의된 식을 이용하여 구하였다. 실험온도 24℃, -76℃, -196℃에 대하여 Inter-laminar shear 강도의 평균값은 각각 78.71 MPa, 84.97 MPa, 80.95 MPa이었고, 24℃를 기준으로 -76℃는 7.95% 증가, -196℃는 2.84% 감소하였으나 저온에서 온도변화에 따라 영향이 크지 않은 것으로 나타났다.

Table 2. Mechanical property test results

Property	Temperature(℃)		
	24	-76	-196
Tensile strength(MPa)	614	457	372
T.Young's modulus (GPa)	67	64	71
Comp. strength(MPa)	502	677	772
C. Young's modulus(GPa)	54	54	57
In-plane shear modulus(GPa)	4.2	5.4	7.3
Inter-laminar shear strength(MPa)	79	85	81



(a) (b)

Fig. 5. SEM photographs of fiber for tensile test, (a)24℃, (b) -196℃

4. 파단면 관찰

시험 온도에 따른 인장시험편의 파손모드를 확인하기 위해서 100,000배까지 확대 가능한 Scanning Electron Microscopy(JEOL Co, JSM-5410)를 이용하였다.

온도에 따른 기지의 파손형태 관찰을 위하여 파단면 중 기지 파손 관찰이 용이한 90° 방향으로 섬유가 존재하는 영역을 선택하였다. 이 부분을 1000배 확대시킨 결과, 온도가 감소함에 따라 기지의 파면이 거칠어지며 -196℃의 파단면에서 다량의 기지 파편을 관찰 할 수 있었다. 이러한 결과로부터 기지 조직이 온도 감소에 의해서 취성파괴가 발생되고 있음을 알 수 있었다.

섬유와 기지 사이의 파손 형태를 보기 위해 0° 방향의 섬유가 존재하는 영역을 2,000배 확대하여 관찰하였다. 24℃에서 실험된 시험편의 경우 파단면에서 섬유가 파단될 때 기지 변형이 발생되었다. 반면에 -196℃ 시험편의 경우 기지에 변형이 발생되지 않았으며, 많은 기지 파편을 발견할 수 있었다. 이와 같은 현상은 섬유와 기지 사이에서도 취성 파괴가 발생되고 있음을 의미한다.

섬유의 파손 형태를 알아보기 위해 Fig. 5와 같이 섬유의 파단면을 10,000배 확대해 관찰하였다. 24℃ 시험편의 경우 섬유의 변형으로 인하여 많은 작은 돌출물이 발생되었으며, 온도가 낮아질수록 섬유의 파손 형태는 취성의 영향으로 벽개파괴현상을 보였다.

파단면 관찰을 통하여 인장 시험의 경우 온도가 낮아짐에 따라 섬유와 기지의 성질이 취성적으로 변화함을 알 수 있으며, 이로 인하여 -76℃, -196℃에서 실험된 시험편의 인장강도가 24℃에서 실험된 시험편의 인장강도 보다 감소하고 있다고 판단된다.

5. 결 론

KSTAR 핵융합 실험장치의 초전도자석 지지구조물인 supporting post에 사용되는 CFRP 복합재료의 기계적 물성 특성을 평가하였다. 인장시험, 압축시험, In-plane shear 시험, Inter-laminar shear 시험이 24℃, -76℃, -196℃의 온도에서 수행되었으며, Scanning Electron Microscopy를 이용하여 온도에 따른 파손 모드를 고찰하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 인장강도는 실온보다 -196℃의 온도에서 크게 감소하고 인장 탄성계수는 저온에서 약간의 감소는 있으나 유사한 값을 갖는다.
2. 압축강도는 실온보다 저온으로 갈수록 증가하며, -196℃에서 54%정도 증가하였다. 압축탄성계수는 LN_2 환경에서 약간 증가하며 대체적으로 저온에서 큰 영향을 받지 않는다.
3. 전단탄성계수는 실온에서 저온으로 갈수록 크게 증가되는 경향을 나타낸다. -196℃에서 74.5% 정도 증가하였다.
4. Inter-laminar shear 강도는 저온에서 약간의 변화는 있으나 유사한 값을 갖는다.
5. 파단면 관찰을 통하여 온도가 낮아짐에 따라 섬유와 기지의 성질이 취성적으로 변화함을 알 수 있었으며, 이로 인하여 인장강도가 감소하고 압축강도가 증가하였다.

본 연구는 과학기술부의 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

[1] H. Tamura, et al., "Structural and Mechanical Design of Cryogenic Support System for LHD", Fusion Technology, pp. 1019-1022, 1996

[2] T. Horiuchi, et al., "Cryogenic Properties of Composite Materials", Cryogenics, Vol. 35, No. 11, pp. 677-679, 1995

[3] 허남일, 도철진, 사정우, 조승연, 임기학, "초전도자석 지지각 설계 및 구조해석", 2000년도 한국초전도저온공학회 학술대회 논문집, pp. 115-118, 2000