

論文

탄소/탄소 브레이크 디스크의 기계적 특성에 관한 연구

유재석* · 김정석* · 김천곤** · 홍창선** · 김광수*** · 윤병일****

Mechanical Characteristics of Carbon/Carbon Composite for Aircraft Brake Disk

BJ. S. Yoo*, J. S. Kim*, C. G. Kim**, C. S. Hong**, K. S. Kim*** and B. I. Yoon****

ABSTRACT

The mechanical properties of the newly developed carbon/carbon composite material are measured for the design and analysis of carbon/carbon brake disks. The measured properties are the strength and stiffness for tensile, compressive, and shear loading in each desired direction. The interlaminar tensile test was performed by self-aligned test fixture for aligning the specimen with loading direction. Since there is no reinforcement in the thickness direction, the interlaminar tensile and shear strengths of the carbon/carbon brake disk are significantly lower than its interlaminar compressive strength. Major fracture mechanism is delamination due to free edge stress, so significant design factor is concluded to decrease free edge stress.

초 록

탄소/탄소 브레이크 디스크의 설계와 해석을 위해 탄소/탄소 복합재의 물성치를 새롭게 측정하였다. 인장, 압축, 전단하중에 대해 각 방향에서의 인장, 압축, 전단 강성과 강도를 측정하였다. 두께방향 인장시험에서는 제한된 시편 크기 때문에 새롭게 제작된 자동맞춤 시험 지그를 제작하여 층간인장강도를 측정하였다. 인장 전단시험에서 두께방향으로는 보강재가 없기 때문에 평면방향의 인장 전단 강성보다 현저하게 낮게 측정되었다. 두께방향의 작은 강성 때문에 브레이크 디스크의 자유표면에서 시작된 기지파손에 이은 층간분리가 주요한 파손경향으로 나타났고, 이러한 자유표면의 응력을 감소시키는 것이 중요한 설계변수로 나타났다.

1. 서 론

탄소/탄소 복합재는 기존의 많이 이용되어 금속 브레이크 디스크에 비해 고온에서 우수한 열적, 구조적 안정성과 높은 비강도, 비강성등의 우수한 특성을 가지

고 있어 항공기용 브레이크 디스크에 많이 사용된다. 최근 들어 초음속 항공기와 F-16, MIG-29와 같은 고성능 전투기에 적용되어 제동장치의 무게 절감과 성능 향상을 가져왔다.

항공기용 브레이크 디스크 시스템은 활주중인 항공

*한국과학기술원 항공우주공학과 박사과정

**정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

***대우중공업

****국방과학연구소

기의 운동에너지를 열에너지로 변환시켜 항공기를 정지시키는 장치이다. 항공기용 브레이크 시스템은 디스크 형태의 압력판(pressure plate), 정지판(stator), 회전판(rotor) 및 끝판(end plate)이 겹쳐진 다판구조로 구성되어 있다. 항공기를 정지시키기 위해서는 압력판에 압력을 가하여 회전판을 정지시켜야 한다. 이때 회전판과 정지판의 마찰로 인하여 시스템은 정지된다. 여기서의 압력은 정지판 축에 걸리는 토오크(torque) 값을 일정하게 하기 위해 시간에 따라 변하게 된다. 따라서 바퀴드럼과 연결되어 있는 클립핀 홀에 걸리는 반력은 바퀴축의 토오크와 평형을 이룬 상태에서 일정 감속도로 시스템은 정지하게 된다. 이상과 같은 메카니즘에 의해 항공기가 정지하게 되고 이 과정에서 디스크는 유압에 의해 가해진 압력과 디스크 사이의 마찰 열에 의해 큰 열하중을 받게 된다. 이와 같은 브레이크 디스크의 열탄성 현상을 이해하고 제동장치의 설계를 위한 자료를 확보하기 위하여 디스크 재료의 물성치 규명은 필수적이다.

탄소/탄소 복합재의 시험법 및 특성에 관한 연구로, Copp[1] 등은 탄소/탄소 복합재의 터빈적용에 있어 발생하는 파손모드와 접촉응력을 관찰하기 위해 3점굽힘 시험을 수행하였다. 이와 같은 연구는 3점굽힘 시험을 통하여 woven uncoated 탄소/탄소 복합적층판에 대한 파손 메카니즘과 초기 손상을 결정하는데 초점이 맞춰져 있다. Davies[2-3] 등은 저밀도 2차원 무작위(random) 탄소/탄소 복합재의 기계적 물성치를 3점굽힘 시험과 인장 시험으로 결정하고, 미세구조와 연관시켰다. 기계적 물성치는 평면상에서 등방성이고 두께방향 물성에 비하여 훨씬 크다. Roy[4] 등은 2차원 탄소/탄소 적층판의 층간 인장 시험은 시험치구와 시편을 하중 방향에 일치하도록 접착하는데 특별한 주의가 요구되는 점을 고려하여 자동으로 하중방향에 치구와 시편을 일치시키는 self-aligned 치구를 설계하였다. 이와 같은 시험치구는 층간 인장물성과 두께가 얇은 탄소/탄소 시편의 강도를 측정하는데 쉽게 사용될 수 있다.

Domnanovich[5] 등은 이방성의 탄소/탄소 적층판에 대해 세 가지 다른 온도에서 열처리하여 공명보(resonant beam)의 방법으로 탄성계수, 층간강성 및 층간전단강성 등을 측정하였다. 흑연화(graphitization) 온도가 증가할수록 적층면 방향 탄성계수가 증가하고 층간전단강도의 감소가 나타났다. Rahhal[6] 등은 탄소/탄소 복합재료에 대해 수정된 짧은 보 전단 시험을 수행하였다. 시험결과 탄소/탄소 심재에서 층간전

단 파손이 쉽게 발견되었다.

제조환경이 외국과 다른 국내에서 생산하는 항공기용 탄소/탄소 브레이크 디스크는 아직까지 생산 초기 단계에 있어 정확한 물성치 및 기계적 파손특성의 규명이 이루어지지 못했다. 기계적 파손특성을 이해하는 데는 각 방향의 물성치 규명이 필수적이다. 그러나 항공기용 디스크에서 모든 방향의 물성치, 특히 파손강도를 측정하기 위한 시스템은 아직까지 개발되지 못했다. 따라서 본 연구에서는 실제 항공기용 브레이크 디스크 기계적 파손특성을 이해하기 위해 각 방향에 대한 기계적 물성치 측정하였다. 본 연구에 사용한 브레이크 디스크는 두께 방향으로 무작위 적층되어 있어 준등방성 평면특성을 나타낸다. 이에 적층면 방향의 임의의 위치에서 시편을 가공하여 적층면 방향 인장, 압축, 전단강도 및 강성을 측정하였다. 또한 시험시편은 디스크에서 직접 채취하므로 두께방향에 대해 시편크기에 제한을 받는다. 따라서 self-aligned 치구[4]를 이용하여 두께방향인장 강도를 측정하였다. 또한 Arcan 치구를 이용하여 두께방향 전단 강도를 측정하였고, 두께방향 압축강도 및 강성을 측정하였다. 본 연구에서 수행한 시험방법으로는 문헌에서 제시된 시험법과 ASTM에 제시된 기본적인 시험법[7-10]으로 시험을 수행하였다. 이와 같은 물성치는 브레이크 디스크의 파손관점에서 강도에 중점을 두어 측정하였다.

2. 탄소/탄소 브레이크 디스크의 물성치 시험

본 시험에서 사용된 탄소/탄소 복합재 시편은 대우 중공업에서 제작되었고, 또한 시편의 단면구성은 Fig. 1에서 보듯이 양쪽 바깥면에 각각 두께 3mm정도가 마찰재인 단섬유층(chopped-mat)으로 구성되며, 이 단섬유층은 브레이크가 정지할 때 마찰면의 열을 빨리 밖으로 방출하는 역할을 한다. 또한 Fig. 1에서 보듯이 양쪽면을 제외한 중앙부 약 10mm정도는 하중지지부인 직조적층(fabric)으로 브레이크가 작동할 때 하중을 지지하는 부분이다. 본 시험디스크의 2차원 직조섬유 24층은 무작위로 적층된 준등방성 평면을 이룬다. 따라서 Fig. 1에서의 x-y평면인 적층면 방향의 임의의 위치에서 시편을 채취하여 인장, 전단강도 및 강성, 압축강도를 측정하였다. 또한 두께방향 인장강도, 두께방향 압축강도 및 강성, 횡방향 전단강도, 굽힘 강도 및 강성과 층간전단강도를 측정하였다.

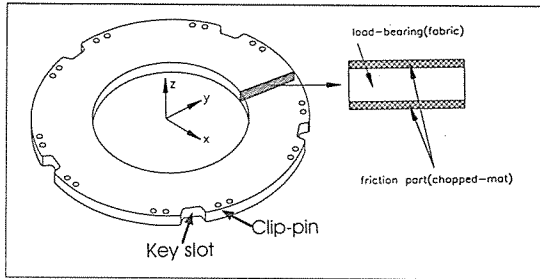


Fig. 1. Shape and cross sectional view of C/C B/D

본 시험에서는 회전판(rotor)과 정지판(stator) 모두에서 시편을 채취하였고, 시편제작 시기가 다른 1차 디스크와 2차 디스크에서 직조적층으로만 구성된 시편과 단섬유층과 직조적층이 혼합된 시편에 대해 물성치 시험을 수행하였다.

2.1 적층면 방향 인장시험(In-plane tension test)

인장시험은 탄소/탄소 브레이크 디스크의 적층면 방

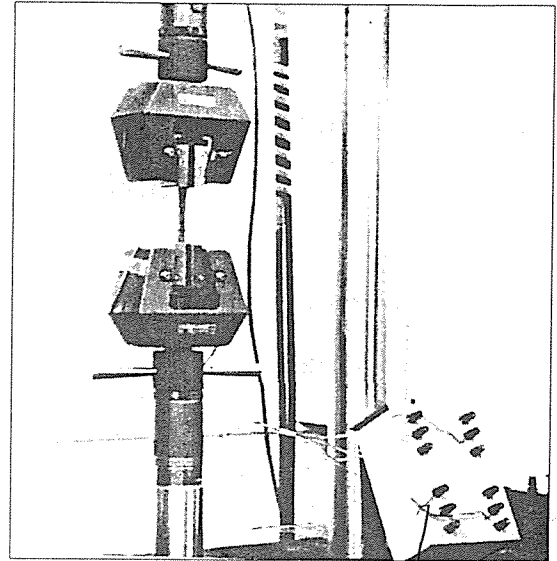
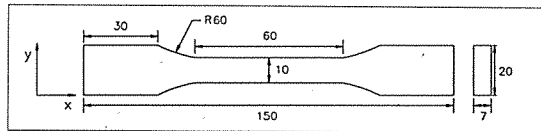
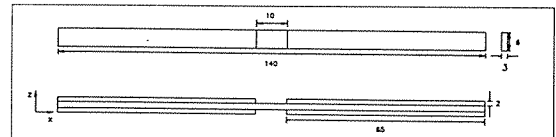


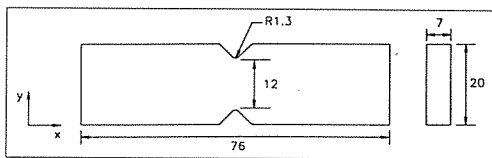
Fig. 2. In-plane tension testing system



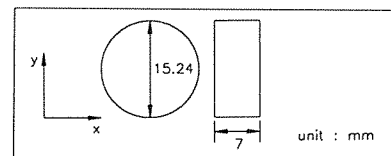
(a) In-plane tension specimen



(b) In-plane compression specimen

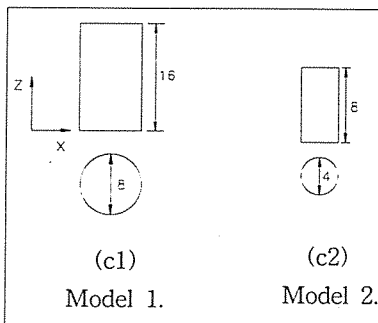


(c) In-plane shear specimen

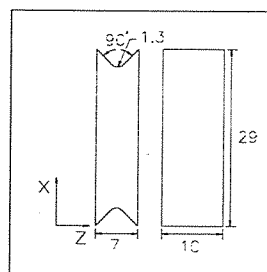


(d) Out of plane tension specimen

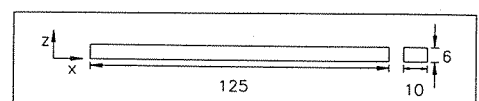
Fig. 3. Dimensions of test specimen(1)



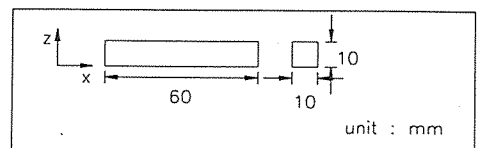
(a) Out of plane compression specimen



(b) Transverse shear specimen



(c) 4-point bending specimen



(d) 3-point bending specimen

Fig. 4. Dimensions of test specimen(2)

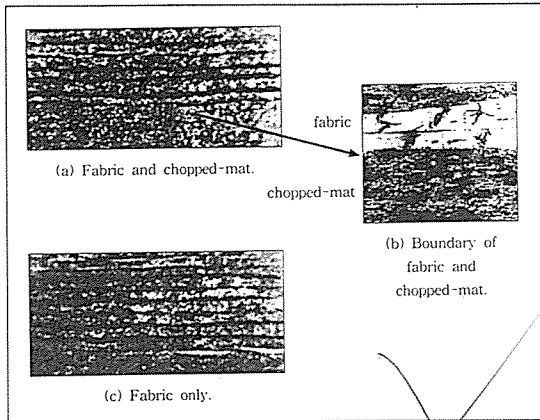


Fig. 5. Cross sectional view of in-plane tension specimen

항 인장강도(tensile strength)와 강성(tensile modulus)을 구하기 위한 시험이다. 본 시험에서 이용된 시험장치 셋업(setup)은 Fig. 2와 같다. 이 시험에 이용된 시편의 두께, 폭 및 길이는 Fig. 3(a)에 나타내었다. 이 시험에는 총 9개의 시편이 시험되어졌다. 이들 중 6개는 Fig. 5(a)에서 볼 수 있듯이 혼합시편으로 단섬유층과 직조적층이 4대6 정도로 혼합되어 있고, 나머지 3개의 시편은 Fig. 5(c)에서 볼 수 있듯이 균일시편으로 순수 직조적층으로 구성되어 있다. 본 시험에서 측정된 강도와 강성은 아래의 식에 의해서 계산하였다.

$$E_x = (\Delta P / \Delta \epsilon) (1 / (bd)) \dots \dots \dots (1)$$

$$X_T = P / (bd) \dots \dots \dots (2)$$

- E_x = 인장강성
 X_T = 최대인장강도(MPa)
 $\Delta P / \Delta \epsilon$ = 하중-변형도 곡선의 선형부분의 기울기
 P = 최대하중(N)
 b = 시편폭(mm)
 d = 시편두께(mm)

시험결과를 고찰해보면 시험에서 구해진 응력-변형도 곡선은 Fig. 6(a)와 같다. 본 시험에서 구해진 인장시편의 인장강성, 인장강도는 Table 1과 같다.

본 시험에서 사용한 시편의 단면사진은 Fig. 6(b)에 나타내었다. 각 시편의 파단경향은 Fig. 6(b)에서 알 수 있듯이 순수 직조적층으로 구성된 시편과 단섬유층과 직조적층이 혼합된 시편의 파손양상이 다른 것을

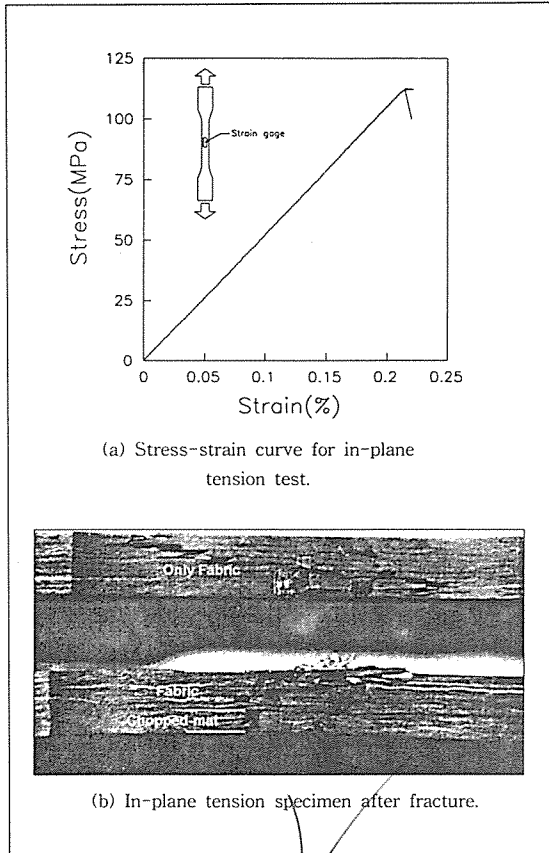


Fig. 6. Result of in-plane tension test

알 수 있다. Fig. 6(b)의 위쪽 시편은 순수 직조적층(fabric)으로 구성된 시편의 파손양상을 나타낸 것이다. 여기서 알 수 있듯이 층간분리와 섬유파단이 발생했으며 파손이 하중방향에 대해 45도 기울어져 전파하고 있음을 보여준다. 이것은 시험에 사용된 시편의 두께가 두껍기 때문에 두께방향 전단의 영향이 지배적으로 작용했기 때문으로 추정된다. Fig. 6(b)의 아래쪽 시편은 단섬유층(chopped-mat)과 직조적층이 혼합된 시편의 파손 양상을 나타낸 것이다. 여기서 알 수 있듯이 직조적층 부분의 파손양상은 이전과 유사하지만 단섬유층 부분에서는 하중방향에 수직하게 파손이 발생한 것을 볼 수 있다. 이것은 단섬유층부분이 적층면 방향으로 보강재가 없어 하중방향의 힘을 견디지 못하고 하중방향인장에 의해 파손된 것을 나타낸다. 또한 직조적층만 있는 시편의 물성치가 하중지지부의 물성을 잘 나타내었고, 혼합시편의 경우는 마찰제로 작용하는 단

Table 1. In-plane tensile strength and modulus

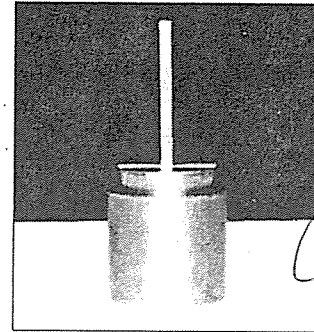
	Test No.	Strength (XT, MPa)	Modulus (Ex, GPa)
Mixed specimen	1	66.0	45.3
	2	92.9	55.2
	3	72.0	32.3
	4	83.0	55.4
	5	96.0	48.3
	mean std dev.	82.0 13.0	47.3 9.5
Only fabric layer(1st)	1	111.9	77.0
	2	121.0	52.6
	3	122.7	71.0
Only fabric layer(2nd)	1	112.0	60.9
	2	102.7	71.6
	3	105.5	56.9
	4	68.0	40.5
	5	70.6	48.6
	6	113.5	60.4
	mean(1st+2nd) std dev.(1st+2nd)	103.1 20.2	59.9 11.8

섬유층부분이 시편의 물성을 저하시키는 것으로 나타났다. 또한 Table 1의 2차 추가시편 중 1, 2, 3번 시편이 같은 방향에서 채취한 것이고, 4, 5번 시편이 같은 방향에서 채취한 시편이기 때문에 4, 5번 시편의 강도가 다른 시편에 비해 낮게 나타나는데 이것은 적층면이 약간의 방향성이 있는 것을 보여 주는 결과이다.

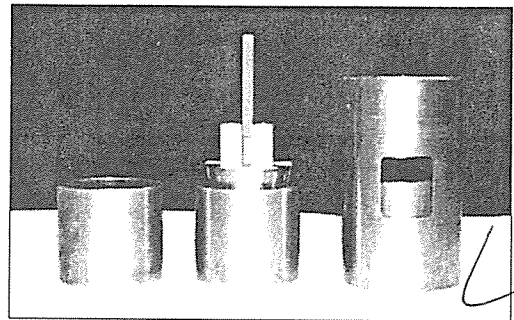
2.2 적층면 방향 압축시험(In-plane compression test)

압축시험은 탄소/탄소 브레이크 디스크의 적층면 방향 압축강도(compressive strength) 및 강성(compressive modulus)을 구하기 위한 시험이다. 본 시험에서 이용된 시편과 시험장치 셋업은 Fig. 7과 같다. 이 시험에 이용된 시편의 두께, 폭 및 길이는 Fig. 3(b)에 나타내었다. 시편은 모두 직조적층부분으로만 이루어졌다. 또한 시편의 탭을 가공하기 위해 glass/epoxy를 다이아몬드커터로 시편보다 약간 크게 하여 절단한 후 접착필름(adhesive film)을 이용하여 시편에 접착하고 오븐에 넣어 130℃에서 약 1시간정도 경화시켰다. 경화된 시편을 꺼내어 시편의 원형이 손상하지 않는 범위에서 연마기로 탭을 갈아내었다.

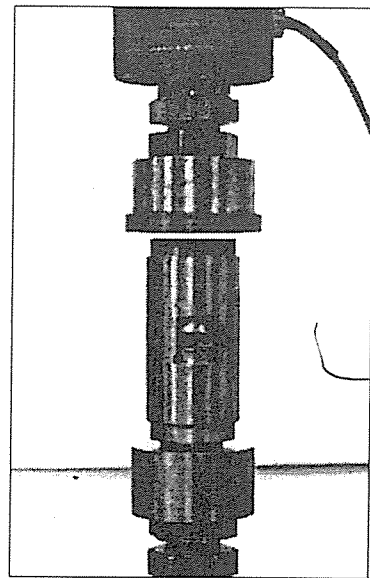
시험결과를 고찰해보면 적층면 방향 압축시험에서는 압축강도만을 얻기 위한 시험을 수행하였다. 시험시편 중에서 탭 부위에서 파단이 일어난 시편 2개를 제외한 5개의 시편에 대해 강도를 계산하였다. 계산된 압축강



(a) In-plane compression test jig(1)



(b) In-plane compression test jig(2)



(c) In-plane compression test jig(3)

Fig. 7. In-plane compression testing system

도는 Table 2에 나타나 있고, 시험을 통해 얻은 시편의 파단형상은 Fig. 8에 나타나 있다.

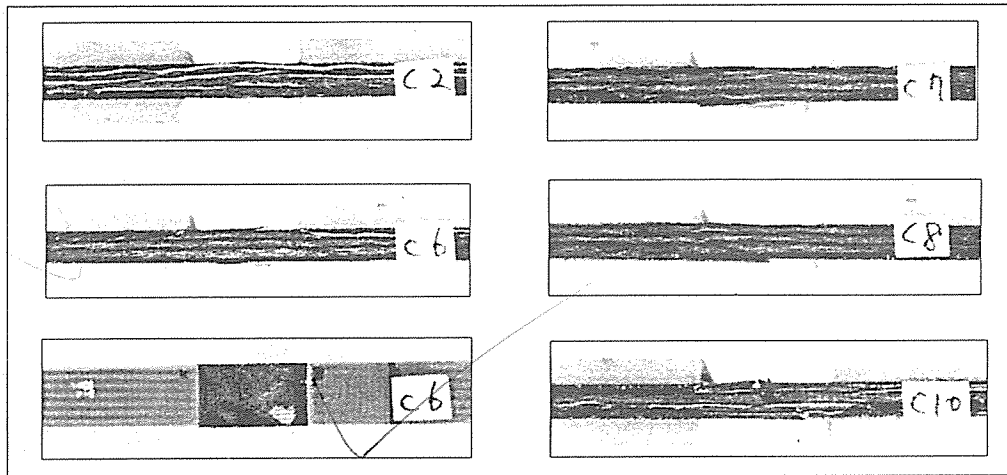


Fig. 8. In-plane compression specimens after fracture

Fig. 8에서 알 수 있듯이 여러 가지 파손경향을 보이고 있고 시험 구역내(test section)에서 파손이 일어남을 알 수 있다. 파손경향을 5가지로 구분하면

첫째, 두께방향 전단파손(out of plane shear failure mode)과 둘째, 횡방향 인장파손(transverse tensile failure mode)과 셋째, 팽창모드에 의한 섬유미소좌굴(fiber microbuckling in extensional mode)과 넷째, 전단모드에 의한 섬유미소좌굴(fiber microbuckling in shear mode)과 다섯째, 적층면 방향 전단파손(in-plane shear failure mode)등 다섯 가지로 구분된다. 이 파손모드 중에서 Fig. 8에서도 보듯이 본 시험에서 나타난 파손경향은 두께 및 적층면 방향 전단파손과 팽창모드하에서의 섬유미소좌굴모드와 횡방향 인장파손등이 나타남을 알 수 있었다. 그러나 본 시험에서 사용되는 브레이크 디스크는 하중지지부분이 7-10mm 정도의 두께를 가지는 무작위 적층 평판이므로 압축시험의 두께가 두꺼워질수록 디스크의 무작위성이 증가하여 디

스크의 압축물성을 더 잘 나타낼 것이라 생각된다. 또한 적층면 방향 압축물성은 Fig. 1에서 나타낸 키홈(key slot)주위의 강도에 가장 큰 영향을 미치는 인자가 된다.

2.3 적층면 방향 전단시험(In-plane shear test)

본 시험에 이용된 시험편은 디스크 자체에서 채취한 것이기 때문에 크기 제한을 받는다. ASTM D5379를 바탕으로 한 V-Notched Beam시험을 수행하였다. 시험장치 구성은 Fig. 9에 나타내었다. 시험형상은 Fig. 3(c)에 나타내었다.

본 시험의 적층면 방향 전단강성과 강도는 아래의 식으로 계산되었다.

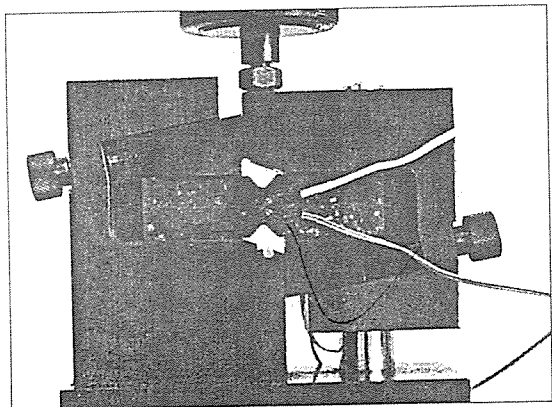


Fig. 9 In-plane shear testing system

Table 2. In-plane compressive strength

Specimen No.	Strength(X_C , MPa)
2	91.3
6	82.5
7	79.0
8	83.6
10	113.9
mean	90.1
std dev.	14.1

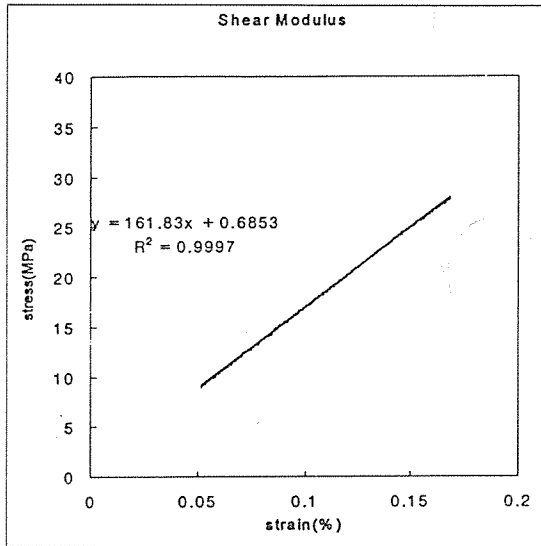


Fig. 10. Stress-strain curve for in-plane shear test

$$F_U = P_{\max}/A \dots\dots\dots(3)$$

$$G_{\text{chord}} = \Delta\tau / \Delta\gamma \dots\dots\dots(4)$$

$$\Delta\gamma = |\epsilon_{+45}| + |\epsilon_{-45}|$$

F_U = 최대전단강도, (MPa)

G_{chord} = 전단강성, (GPa)

P_{\max} = 최대하중(N)

A = v-notch의 단면적(mm²)

$\Delta\tau$ = 두점 사이의 전단응력

$\Delta\gamma$ = 두 점 사이의 변형률

시험결과를 고찰해보면 응력-변형도 곡선은 Fig. 10과 같다. 여기서의 전단강성은 변형률이 0.6%이하므로 ASTM에서 규정한 0.05-0.15% 사이의 변형률과 전단응력으로 계산하였다. 또한 시험편양쪽에 중심 수평선 기준으로 +45와 -45로 2축 스트레인게이지를 부착하였다. 전형적인 파손경향은 파단사진 Fig. 11(a)와 Fig.11(b)에 나타나 있다. 적층면방향 전단강도와 강성은 Table 3과 같다. Table 3에서 6-sf의 파단사진은 Fig. 11(a)이고 나머지는 Fig. 11(b)이다. Fig. 11(a)는 전단응력에 의해서 적층면 방향의 섬유가 판단된 사진으로 전형적인 파손형태가 된다. 그러나 나머지 시험편에서는 Fig. 11(b)에서와 같이 접촉점에서 유발된 기지파손에 의한 층간분리로 파손이 일어남을 알 수 있었고 바람직한 파손모드가 아니다. 따라서 본 Table

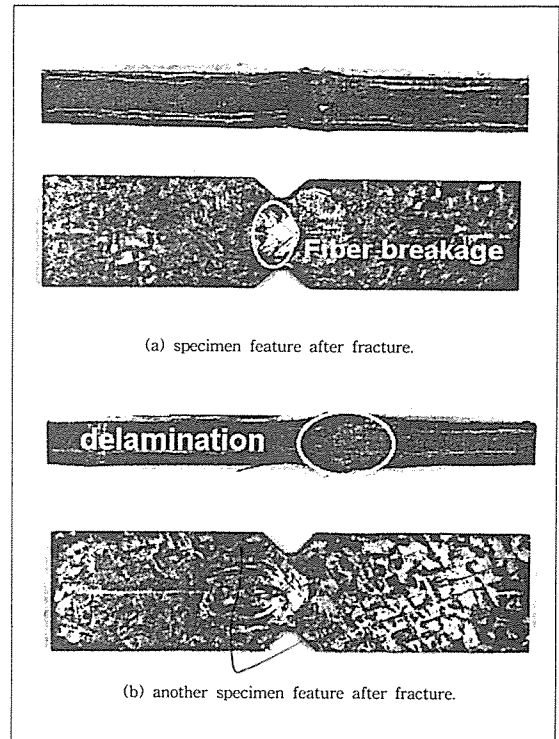


Fig. 11. In-plane shear specimens after fracture

Table 3. In-plane shear strength and modulus

Test No.	Strength (S_{xy} , MPa)	Modulus (G_{xy} , GPa)
1	56.7	16.5
2	51.5	16.2
3	57.2	23.4
4	56.2	16.4
5	49.6	17.7
6-sf	57.7	8.1
7	49.5	11.2
8	53.9	22.4
9	52.0	24.9
mean	53.7	17.4
std dev.	3.4	5.5

3의 평균 전단강도 보다는 실제의 전단강도가 더 높을 것이라 생각된다. 이와 같은 층간분리 현상은 브레이크 디스크가 2-D로 구성된 Woven Fabric층이 랜덤하게 적층되어서 적층면방향의 상당히 높은 전단강도가 나타나서 섬유파손이 일어나기 전에 상대적으로 취약한

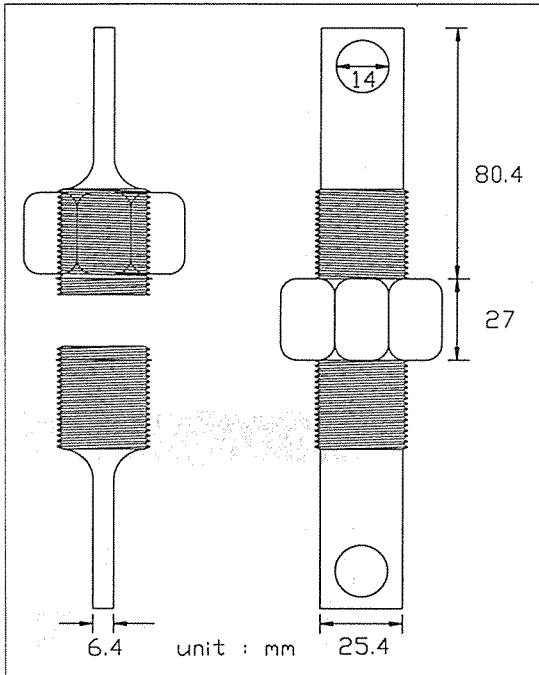


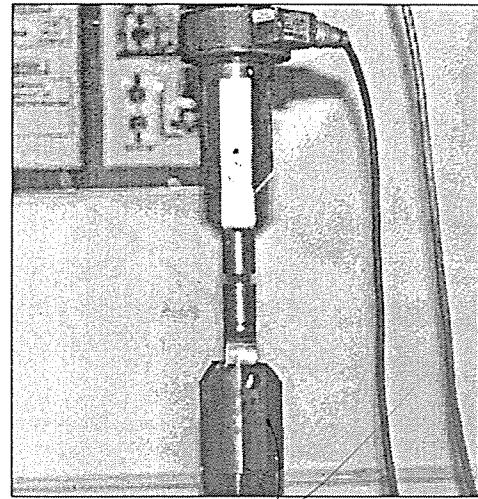
Fig. 12. Out of plane tension jig

층간에서 파손이 일어난 것이다. 이와 같은 현상이 Fig. 1의 브레이크 디스크 키홈(Key slot)에서도 나타나므로 키홈 주위에 클립핀을 끼워서 층간분리를 억제시켜 디스크 강도를 증가시킬 수 있다. 또한 Table 3에서 1과 2, 4와 5, 6과 7, 8과 9등은 각기 같은 적층면 방향에서 채취한 시편이므로 1과 2의 강성은 비슷하지만 각 그룹간에는 약간의 차이가 나타남을 알 수 있었고, 이는 디스크 적층면 방향으로 어느 정도의 방향성이 있다는 것을 나타내는 것이다.

2.4 두께방향 인장시험(Out of plane tension test)

본 시험에 이용된 시편은 두께가 정해진 회전판 또는 정지판에서 채취한 것이기 때문에 두께방향으로 시편의 크기가 제한된다. 본 시험에서 이용된 시편의 두께는 전체두께가 16mm인 회전판에서 단섬유층을 제거한 7mm이다.

따라서 시편의 형상적 제한 때문에 일반적인 인장시험법으로는 시험이 불가능하여 본 시험에서는 Fig. 12에서와 같은 시편의 시험에 적합한 치구를 제작하여



(a) Out of plane tension testing system

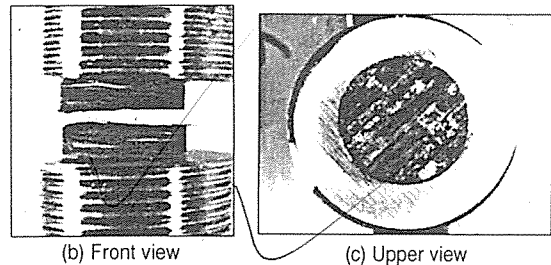


Fig. 13. Out of plane tension testing system and specimen after fracture

시험을 수행하였다. 시험장치 구성은 Fig. 13(a)에 나타내었다. 시편형상은 Fig. 3(d)에 나타내었다. Fig. 12에서 알 수 있듯이 상하치구는 볼트와 너트로 연결되어 시편을 치구에 부착시 치구의 축이 항상 하중방향과 일치하도록 고안되었다[4]. 시편과 치구는 접착필름으로 고정하였다. 본 시험에서는 두께방향 인장강도만을 측정하고 계산식은 아래와 같다.

$$Z_T = P/A \dots \dots \dots (5)$$

Z_T = 시편의 인장강도 (MPa)

P = 최대하중(N)

$A = \pi D^2/4$ 시편의 게이지 부분(gage section)에서의 단면적(mm²)

시험결과를 고찰해보면 두께방향 인장강도는 Table 4와 같다. 파손경향은 파단사진 Fig. 13(b)과 Fig.

Table 4. Out of plane tensile strength

Test No.	Strength(Z_T , MPa)
1	3.7
2	2.7
3	2.5
4	3.2
5	3.0
mean	3.0
std dev.	0.5

13(c)에 나타나 있다. Fig. 13(b)과 Fig. 13(c)에서 볼 수 있듯이 파손경향은 하중축의 수직방향으로 시편중앙에서 층간(interlaminar)의 기지부분이 파손된 것을 볼 수 있다. 두께방향 인장시험은 층간인장강도를 측정하는 것으로 직조적층사이의 물성이 측정되었다. 접착부위의 강도가 시편의 층간강도보다 높기 때문에 접착부위에서 파손은 발생하지 않았다. 측정된 층간인장강도는 다른 물성에 비해 현저하게 낮은 강도를 갖는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 직조적층사이의 기지부분이 취약하다는 것을 나타낸다.

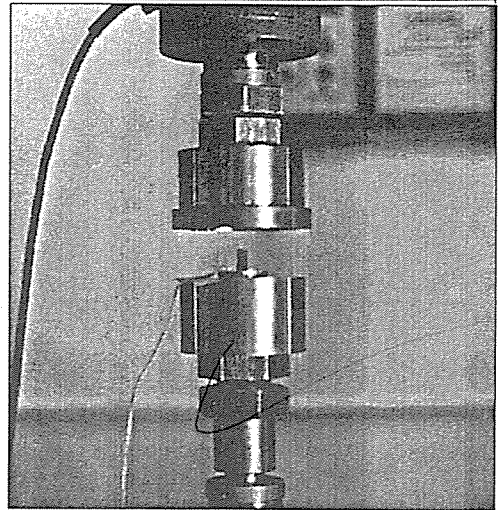
2.5 두께방향 압축시험(Out of plane compression test)

압축시험은 탄소/탄소 브레이크 디스크의 두께방향 압축강성 및 강도를 구하기 위한 시험이다. 본 시험에서 이용된 시험장치 셋업(setup)은 Fig. 14(a)와 같다. 시편의 형상은 Fig. 4(a)와 같다. 시험시편은 Fig. 14(b-c)와 같이 브레이크 디스크의 전체두께에서 채취한 시편 8개(model 1)와 단섬유층 부분을 제외한 나머지 부분에서 채취한 시편 5개(model 2)이다. 본 시험은 ASTM C695-91에 근거하여 수행하였다. 압축강도와 강성은 아래의 식에 의해 계산되었다.

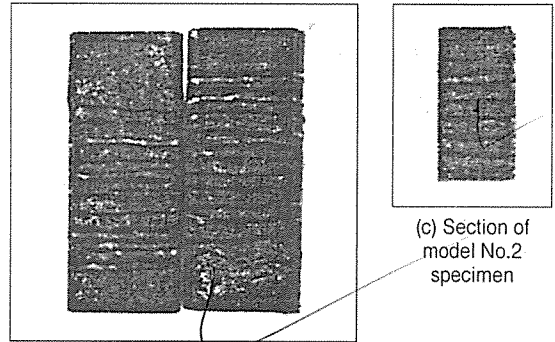
$$E_c = (\Delta P / \Delta \epsilon) (1 / (\pi D^2 / 4)) \dots \dots \dots (6)$$

$$Z_c = P / A \dots \dots \dots (7)$$

- E_c = 시편의 압축강성(GPa)
- Z_c = 시편의 압축강도 (MPa)
- D = 시편의 직경(mm)
- P = 최대하중(N)
- A = $\pi D^2 / 4$ 시편의 게이지 부분(gage section)에서의 단면적(mm²)



(a) Out of plane compression testing system

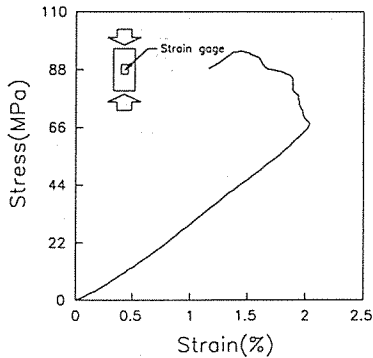


(b) Section of model No.1 specimen

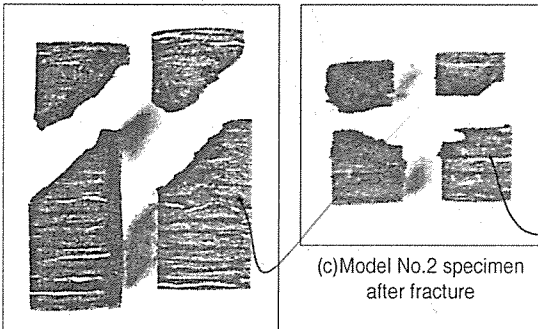
(c) Section of model No.2 specimen

Fig. 14. Out of plane compression testing system and cross sectional view

시험결과를 고찰해보면 시험에서 구해진 전형적인 응력-변형도 곡선은 Fig. 15(a)와 같다. 또한 시험에서 구해진 압축시편의 압축강성과 강도는 Table 5와 같다. 두께가 16mm(full thickness)인 시편의 파단면은 Fig. 15(b)에 나타내었고 순수 직조적층부분의 파단면은 Fig. 15(c)에 나타내었다. 시편의 파단현상은 하중축의 45° 방향으로 파손이 일어났고, 이는 두께방향 전단력에 의한 파손(shear failure)이 지배적인 것을 알 수 있었다. 또한 압축력에 의해 시편의 일부분(기지부분)이 돌출하는 현상이 발생하였다. 이 현상 때문에 변형률을 측정하기 위해 부착된 스트레인 게이지가 떨어져 일부시편에서 강성을 측정할 수 없었다. Fig. 15(a)에서와 같이 스트레인 게이지 신호의 선형



(a) Stress-strain curve for out of plane compression specimen



(b) Model No.1 specimen after fracture

(c) Model No.2 specimen after fracture

Fig. 15. Results of out of plane compression test

증가가 끝난 부분에서의 변형을 감소는 스트레인 게이지가 시편의 기지파손(matrix failure)에 의해 떨어져서 생긴 신호로, 전체적인 파손은 하중이 감소하기 전의 응력으로 강도를 계산하였다. 이는 부분적인 기지의 파손보다는 시편의 전체적인 파손에 비중을 두어 측정한 값이다.

2.6 횡방향 전단시험(Transverse shear test)

횡방향 전단시험 역시 두께방향 인장시험과 마찬가지로 두께가 7mm로 제한되어 있기 때문에 Arcan 치구를 이용하여 시험을 수행하였다. 시험장치 구성은 Fig. 16에 나타내었고, 시편형상은 Fig. 4(b)에 나타내었다. 전단 강도는 아래의 식에 의해 계산되었다.

$$S_{xz} = P/A \dots\dots\dots (8)$$

S_{xz} = 시편의 전단강도 (MPa)

P = 최대하중(N)

A = 파단면의 단면적(mm²)

Table 5. Out of plane compressive strength and modulus

Model No. 1(t=16mm, d=8mm)		
Test No.	Strength (Z _C , MPa)	Modulus (E _z , GPa)
1	108.4	3.72
2	127.3	—
3	119.7	3.55
4	120.0	4.15
5	126.9	3.04
6	114.0	3.09
7	95.7	3.27
mean	116.0	3.47
std dev.	11.2	0.42

Model No. 2(t=8mm, d=4mm)	
Test No	Strength(Z _C , MPa)
8	128.4
9	107.7
10	123.2
11	121.1
12	119.2
mean	119.9
std dev.	7.7

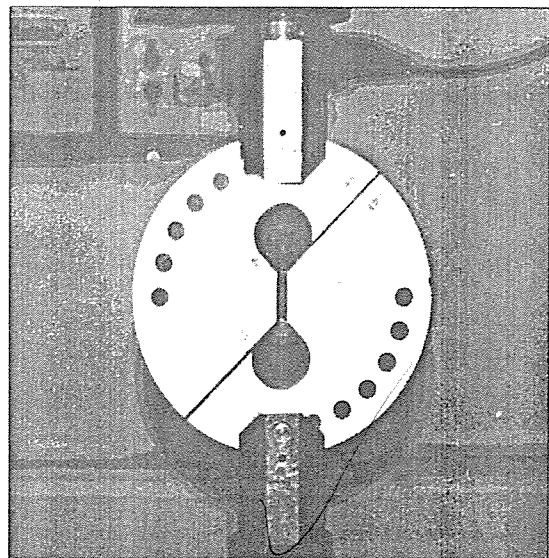
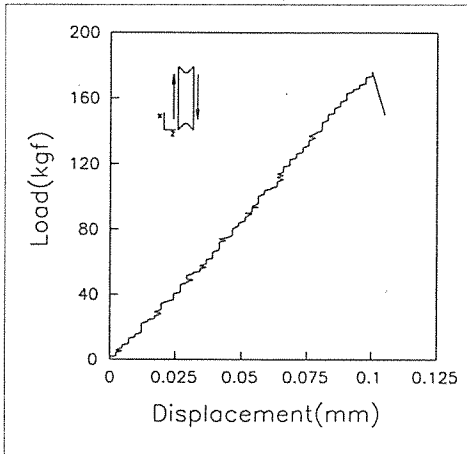


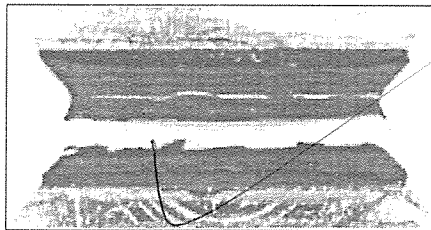
Fig. 16. Transverse shear testing system

Table 6. Transverse shear strength

Test No.	Strength(S_{xz} , MPa)
1	4.27
2	5.84
3	6.43
4	6.72
5	6.67
6	4.25
7	5.85
mean	5.72
std dev.	1.06



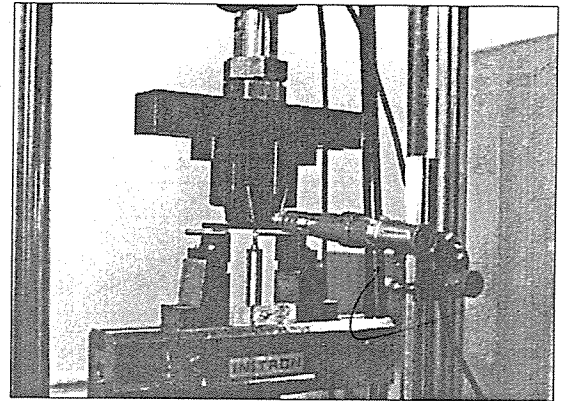
(a) Load-displacement curve for transverse shear test



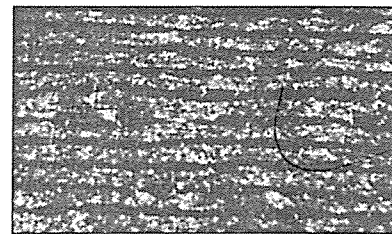
(b) Transverse shear specimen after fracture

Fig. 17. Result of transverse shear test

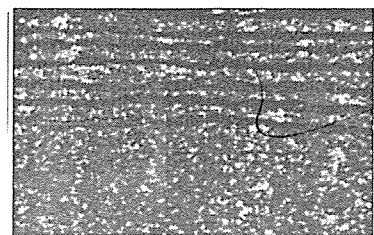
시험의 결과를 고찰해보면 횡방향 전단강도는 Table 6과 같다. 하중-변위선도는 Fig. 17(a)에 나타나 있다. 이 시험에서도 두께방향 인장시험과 마찬가지로 치구와 시편을 집착필립으로 고정하였으며 집착부위에서는 파손이 발생하지 않았다. 파손경향은 파단사진 Fig. 17(b)에서와 같이 전단 파손은 중앙에서 좌우로 분포되어 있고, 두께방향 인장시험과 마찬가지로 직조



(a) 4-point bending test



(b) Fabric only



(c) Fabric and chopped-mat

Fig. 18. 4-point bending testing system and cross sectional view

적층사이의 기지부분에서 파손이 발생함을 알 수 있었다.

2.7 4점 굽힘 시험(4-Point bending test)

4점 굽힘 시험은 탄소/탄소 브레이크 디스크의 굽힘 강도 및 강성을 구하기 위한 시험이다. 본 시험에서 이용된 시험장치 셋업(setup)은 Fig. 18(a)와 같고 시편의 길이와 두께비는 20.8이다. 시험시 지지경간(support span)은 96mm이고 하중경간(load span)은 32mm, 지지봉(support head)의 직경은 7mm, 하중봉(loading head)의 직경은 6.4mm이다. 본 시험은 ASTM D790M-86에 근거하여 수행하였다. 이 시험

에 이용된 시편의 두께, 폭 및 길이는 Fig. 4(c)에 나타내었다. 또한 시편의 중앙에서의 변위를 측정하기 위하여 LVDT를 사용하였다. 굽힘강도와 강성은 아래의 식에 의해 계산되었다.

$$S_B = PL/bd^2 \dots\dots\dots (9)$$

$$E_b = 0.21L^3m/bd^3 \dots\dots\dots (10)$$

- S_B = 하중경간내에서 바깥 면에 작용하는 굽힘강도(MPa)
 P = 최대하중(N)
 E_b = 굽힘강성(MPa)
 L = 지지경간(mm)
 b = 시편폭(mm)
 d = 시편두께(mm)
 m = 하중과 변위선도에서의 선형부분의 초기 기울기(MPa)

시험의 결과를 고찰에 보면 시험에서 구해진 전형적인 하중-변위 곡선은 Fig. 19와 같다. 또한 시험에서 구해진 4점 굽힘시편의 굽힘강도와 강성은 Table 7과 같다. 탄소/탄소 브레이크 디스크의 제작시기가 먼저인 1차 시험에 이용된 시편은 개수는 총 6개이고, 2차 시험에서 이용된 시편은 4개이다. 1차 시험중 5개의 시편은 Fig. 18(c)에서 볼 수 있듯이 단섬유층과 직조적층이 5대5정도 섞여 있는 혼합시편(디스크 표면에서부

터 두께방향으로 6mm로 잘라낸 한쪽면 만이 단섬유층으로 구성, 전체 디스크 두께 16mm)이고, 나머지 시편은 Fig. 18(b)에서 볼 수 있듯이 직조적층으로만 구성된 균일시편이다. 혼합시편중 2개는 단섬유층 부분이 인장을 받게 하고 나머지 시편은 모두 직조적층면이 인장을 받게 하여 시험을 수행하였다. 또한 이상의 시험에서 파손은 항상 인장면에서 발생하였고, 단섬유층부분이 인장을 받게 되는 시편이 직조적층이 인장을 받게되는 시편에 비해 굽힘강도가 낮은 것으로 나타났다. 단섬유층과 직조적층이 혼합된 시편중 직조적층부분이 인장을 받게되는 시편에서는 굽힘하중을 받는 동안 단섬유층부분은 압축을 받게되어 파손이 발생하지 않았고 인장을 받는 직조적층부분에서 파손이 발생했기 때문에 직조적층으로만 이루어진 1차시편의 강도 및 강성과 크게 차이 나지 않음을 알 수 있었다. 따라서 직조적층이 인장을 받게 되는 혼합시편의 굽힘강도와 강성이 직조적층만의 굽힘강도와 강성을 나타내는 데 큰 무리가 없고, 시험결과 역시 큰 편차 없이 서로 잘 일치됨을 알 수 있었다.

2.8 3점 굽힘 시험(3-Point bending test)

3점 굽힘 시험은 탄소/탄소 브레이크 디스크의 층간 전단 강도(interlaminar shear strength)를 구하기 위한 시험이다. 본 시험에서 이용된 시험장치 셋업은 Fig. 20(a)과 같고 시편의 길이와 두께비는 6이다. 시험시 지지경간은 40mm이고 지지봉의 직경은 3mm, 하중봉

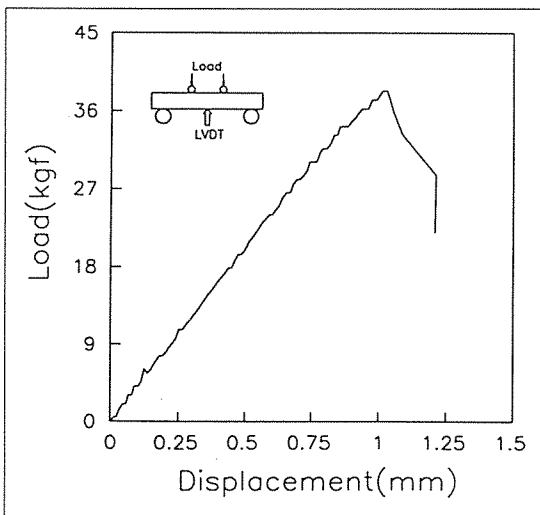
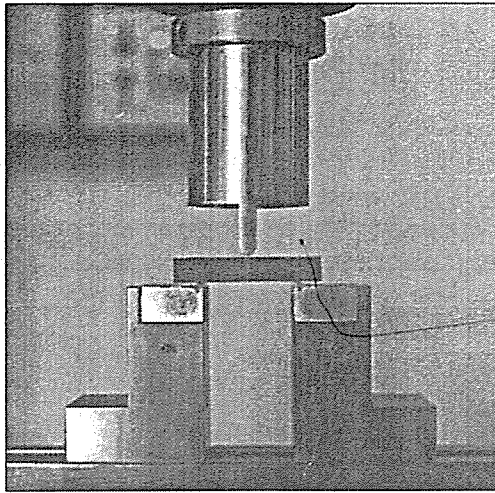


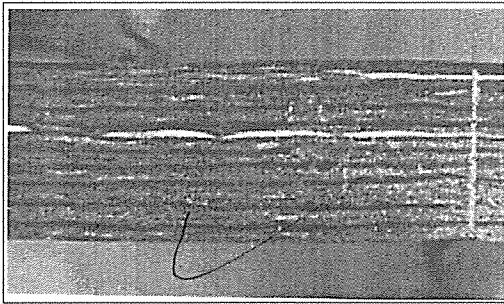
Fig. 19. Load-displacement curve for 4-point bending test

Table 7. 4-point bending strength and modulus

	Test No.	Strength (MPa)	Modulus (GPa)
1st test	1	114.7	35.6
	2	100.2	32.9
	3	147.7	34.5
	4	132.3	31.2
	mean	123.7	33.6
	std dev.	20.6	1.9
2nd test	5	129.0	48.0
	6	100.5	34.4
	7	104.6	34.8
	8	103.1	37.0
	mean	109.3	38.5
	std dev.	13.2	6.4



(a) 3-point bending test system



(b) 3-point bending specimen after fracture

Fig. 20. 3-point bending test

의 직경은 6.4mm이다. 본 시험은 ASTM D2344에 근거하여 수행하였다. 이 시험에 이용된 시편의 두께, 폭 및 길이는 Fig. 4(d)에 나타내었다. 4점 굽힘시험과 같이 탄소/탄소 브레이크 디스크의 제작시기가 다른 1차와 2차에 걸친 시험에서 총 13개의 시편이 시험되어졌다. 또한 본 시험에서는 하중을 가하는 하중봉에서의 파손과 인장을 받는 부분에서의 굽힘에 의한 파손(flexural failure)이 발생하지 않도록 주의 해야한다. 층간전단강도는 아래의 식에 의해 계산되었다.

$$Q=0.75P/bd \dots\dots\dots(11)$$

Q = 전단강도(MPa)
 P = 최대하중(N)
 b =시편의 폭(mm)
 d =시편두께(mm)

Table 8. Interlaminar shear strength(3-point bending test)

	Test No.	ILSS(MPa)
1st test	1	15.3
	2	14.1
	3	15.4
	4	12.6
	5	13.6
	6	13.8
	7	15.7
	8	13.8
	mean	14.3
	std dev.	1.1
2nd test	9	11.9
	10	11.3
	11	11.5
	12	11.7
	13	10.6
	mean	11.4
	std dev.	0.49

시험결과를 고찰해 보면 시험에서 나타난 전형적인 파손경향은 Fig. 20(b)과 같다. 각 시편들의 층간분리의 위치는 중립면 근처에서 상하로 분포되어 있다. 시험된 시편중 굽힘에 의한 파손이 발생한 것을 제외한 나머지 시편의 층간분리 전단강도는 Table 8에 나타나 있다. 여기서 사용된 시편 중 1차시편 3개는 순수 직조적층으로 구성되어 있고 나머지 시편은 혼합시편으로 구성되어 있다. 본 시험에서 혼합시편중 단섬유층 부분이 인장을 받게 한 경우에는 층간전단에 의한 파손이 발생하기 이전에 단섬유층 부분이 굽힘에 의해 파손되었다. 이것은 단섬유층의 취성(brittle)한 성질 때문으로 추정되므로 시험결과에서 제외시켰다. 단섬유층과 직조적층이 혼합된 시편중 직조적층부분이 인장을 받는 경우와 순수 직조적층으로 구성된 시편의 경우에는 인장을 받는 부분이 직조적층이므로 이전과 같은 현상은 발생하지 않았다. 즉 굽힘에 의한 파손이 발생하기 이전에 층간전단에 의한 파손이 먼저 발생하였다. 파손 형태는 시편의 중앙을 중심으로 좌우에 분포하였다. 또한 단섬유층과 직조적층이 혼합된 시편의 일부는 하중이 증가함에 따라 단섬유층과 직조적층의 계면에서 층간분리가 발생하였는데 이것은 단섬유층과 직조적층의 굽힘강성의 차이에 의한 것으로 추정된다. 또한 나머지 혼합시편은 직조적층 부분에서 층간분리 현상이 관측

되었다. 결과적으로 혼합시편이든 순수 직조적층 시편이든 층간전단 강도가 큰 편차 없이 잘 일치함을 알 수 있었다.

3. 결 론

측정된 탄소/탄소 복합재 브레이크 디스크의 각 방향의 강성과 강도는 Table 9에 나타내었다. 각 시험에 대한 탄소/탄소 복합재 브레이크 디스크의 특성을 살펴보면, 적층면 방향 인장시험에서의 파손양상은 층간분리와 섬유파단이 발생했으며 두께방향 전단의 영향이 지배적으로 작용하여 파손이 하중방향에 대해 45° 기울어져 전파하였다. 적층면 방향 압축시험에서의 파손형상은 두께방향 전단파손, 횡방향 인장파손, 팽창모드에 의한 섬유의 미소좌굴 및 전단모드에 의한 미소좌굴 등 여러 가지 파손경향을 나타냈다. 또한 적층면 방향 전단시험에서의 파손경향은 한 시편을 제외하고는 섬유파단 보다는 기지파손에 의한 층간분리에 의해 파손되었고 실제의 강도는 더 높을 것으로 생각된다. 두께방향 인장시험에서는 시편과 하중방향의 일치가 용이한 self-aligned 치구를 이용하였다. 두께방향 압축시험에서의 파손양상은 압축력에 의한 전단파손(Shear

failure)이 지배적인 것으로 나타났다. 횡 방향 전단시험에서의 전단 파손은 중앙에서 좌우로 분포되어 있고 층간에서 전단 파손이 발생함을 알 수 있었다. 4점 굽힘 시험에서의 파손은 항상 인장을 받는 아랫면에서 발생하였다. 3점 굽힘시험에서의 층간전단 강도는 혼합시편과 순수 직조적층 시편의 층간전단 강도가 큰 편차 없이 잘 일치함을 알 수 있었고 또한 층간분리가 중립면 근처 아래위로 분포하였고, 마찰재(단섬유층)와 직조적층이 섞인 혼합시편에서는 경계에서 층간분리가 관찰되었다.

4. 참고문헌

1. Copp, P. D., Dendis, J. C., and Mall, S., "Failure Analysis and Damage Initiation in Carbon/Carbon Composite Materials under Three - Point Bending," J. of Composite Material, Vol. 25, 1991, pp. 593-608.
2. Davies, I. J., and Rawlings, R. D., "Mechanical Properties in Compression of Low Density Carbon/Carbon Composites," Composites, Vol. 25, No. 3, 1994, pp. 229-236.
3. Davies, I. J., and Rawlings, R. D., "Mechanical Properties in Flexure and Tension of Low Density Carbon/Carbon Composites," Carbon, Vol. 32, No. 8, 1994, pp. 1449-1456.
4. Roy, A. K., "A Self-Aligned Test Fixture for Interlaminar Tensile Testing of Two-Dimensional Carbon/Carbon Composites," J. of Composite Material, Vol. 28, No. 4, 1994, pp. 367-379.
5. Domnanovich, A., Peterlik, H., Wanner, A., and Kromp, K., "Elastic Moduli and Interlaminar Shear Strength of a Bidirectional Carbon/Carbon Composite after Heat Treatment," Composites Science and Technology, Vol. 53, 1995, pp. 7-12.
6. Rahhal, W. F., and Kotlensky, W. V., "Modified Short-Beam Shear Test," Carbon, Vol. 30, No. 3, 1992, pp. 385-389.
7. "Standard Test Method for Apparent Interlaminar Shear Strength of Parallel Fiber Composites by Short-Beam Method," ASTM Standards, Standard D 2344-84.

Table 9. Carbon/carbon brake disk properties

Properties	Symbol	Value[unit]
Elastic modulus in x-direction (ory-direction)	$E_x=E_y$	59.9[GPa] [†]
Elastic modulus in z-direction	E_z	3.47[GPa] [†]
Poisson's ratio in x-y plane	ν_{xy}	0.3[ref.12]
Poisson's ratio in x-z plane (or y-zplane)	$\nu_{xz}=\nu_{yz}$	0.2[ref.12]
Shear modulus in x-y plane	G_{xy}	17.4[GPa] [†]
Shear modulus in x-z plane (or y-zplane)	$G_{xz}=G_{yz}$	1.18[GPa][ref.12]
Tensile strength in x-y plane	$X_T=Y_T$	103.1[MPa] [†]
Compressive strength in x-y plane	$X_C=Y_C$	90.1[MPa] [†]
Tensile strength in z direction	Z_T	3.0[MPa] [†]
Compressive strength in z-direction	Z_C	118[MPa] [†]
Shear strength in x-y plane	S_{xy}	53.7[MPa] [†]
Shear strength in x-z plane (or y-zplane)	$S_{xz}=S_{yz}$	5.72[MPa] [†]

(# : measured properties)

8. "Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials," ASTM Standards, Standard D 790-86.

9. "Standard Test Method for Compressive Strength of Carbon and Graphite," ASTM Standards, Standard C 695-91.

10. "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics," ASTM Standards, Standard D 638M-93.

11. Kim, Chun-Gon, Kim, Jung-Seok, Yoo, Jae-Seok, Hong, Chang-Sun, and Yoon, Byung-Il, "Thermoelastic and 3D Failure Analyses of Carbon-Carbon Composite Brake Disks," Proceedings of ICCM 11, Vol. 1, pp. 671-678, Gold Coast, Australia, 14th-18th July 1997.

12. 유 재 석, "탄소/탄소 브레이크 디스크의 기계적 특성에 관한 연구," 한국과학기술원 석사학위논문, 1997, pp. 42.