

일 방향 탄소섬유 강화 알루미늄 적층 복합재료의 전단물성치 측정에 관한 연구

백운철* · 조맹효† · 황재석**
(2002년 3월 9일 접수, 2002년 8월 1일 심사완료)

Inplane Shear Material Properties of Unidirectional Carbon Fiber Reinforced Aluminum Laminate Composites

Un-Cheol Baek, Maenghyo Cho and Jai-Sug Hawong

Key Words: Carbon Fiber Reinforced Aluminum Laminate composites(탄소 섬유 강화 알루미늄 적층 복합재료), In-plane Shear Material Properties(면내 전단 물성치), Off-axis Tension Test(Off-axis 인장시험), Iosipescu Shear Test(Iosipescu 전단시험), Oblique Tabs(경사탭).

Abstract

In order to study the effects of oblique tabs on the in-plane shear properties of unidirectional carbon fiber reinforced aluminum laminate composites, the 10° off-axis tensile test, the 45° off-axis tensile test and Iosipescu shear test were performed to determine the shear properties. Off-axis tension test was studied by using new oblique-shaped tabs proposed by Sun and Chung.⁽⁷⁾ Iosipescu shear test was studied by using modified Wyoming test fixture. The oblique tabs reduced remarkably end-constraint effects of off-axis specimens with a aspect ratio of about eight. The experimental results show that there is no significant difference between off-axis test results and those of Iosipescu shear test. The 45° off-axis tensile tests are recommended for the determination of the shear properties of unidirectional carbon fiber reinforced aluminum laminated composites.

1. 서 론

일 방향 섬유 강화 알루미늄 적층 복합재료의 면내 전단 반응의 평가는 아직 정리되어 있지 않다. 이 재료는 최근에 개발되었을 뿐만 아니라,⁽¹⁾ 복합재료에서 실험적으로 순수하고 균일한 전단 응력을 발생시키기가 어렵기 때문이다. 이상적인 전단시험법은 시편제작과 실험하기가 쉬우며 소요량이 적고, 그리고 전단계수와 전단강도를 동

시에 측정할 수 있어야 한다.⁽²⁾ 이러한 조건을 만족하는 시험법은 10° 및 $\pm 45^\circ$ off-axis 인장시험과 Iosipescu 전단시험이다. Pindera와 Choksi 등⁽³⁾은 일 방향 복합재료의 전단계수의 결정을 위하여 45° off-axis 인장시험을 제안하고, 전단강도 결정을 위하여 0° Iosipescu 전단시험을 제안하였다. Chamis와 Sinclair⁽⁴⁾가 10° off-axis 인장시험을 제안한 후, off-axis 인장시험은 복합재료의 역학적 반응을 특성화하기 위한 중요 시험법이 되어 왔다.

Fig. 1과 같이, 강화섬유가 하중방향에 대하여 어떤 각도(θ)를 갖는 재료는 복합 응력-파괴 조건으로부터 결정되는 전단에 의하여 거의 파괴되

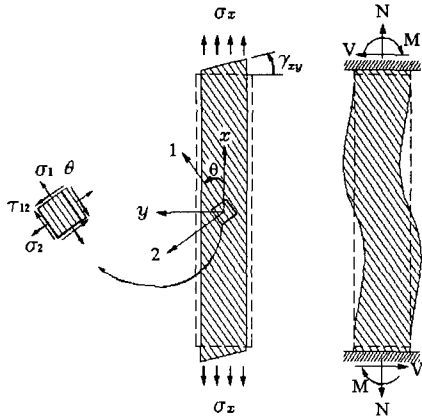
* 서울대학교 기계항공공학부 BK21 박사후연구원

† 책임저자, 회원, 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : mhcho@snu.ac.kr

TEL : (02)880-1693 FAX : (02)883-1513

** 회원, 영남대학교 기계공학부



(a) Uniform state of stress (b) Clamped ends
Fig. 1 End constraint effect of off-axis tension

는 응력상태가 된다. Fig. 1은 시편의 끝 구속(end constraint) 효과를 설명하는 것으로서, 단축(uniaxial) off-axis 인장하중(N)을 받는 시편의 끝이 구속되어 있지 않다면, Fig. 1(a)와 같이 평행 사변형으로 변형된다. 만약, 클램핑 장치에 의하여 시편의 면내회전이 구속되면, Fig. 1(b)와 같이, 이방성 때문에 시편을 S자형으로 비틀리게 하는 전단력(V)과 굽힘 모멘트(M)가 발생된다.⁽⁵⁾ 이 효과는 시험 시편에 불균일한 응력상태를 발생시켜서 정확한 데이터를 얻지 못하게 한다.

off-axis 인장시험에서 정확한 전단 탄성계수를 얻는 방법은 두 가지가 있다. 첫째 방법은 시편에 부착한 스트레인 게이지로부터 얻은 데이터를 적절히 보정하는 보정계수(correction factor) 사용하는 방법이다.⁽⁶⁾ 그러나 이 방법은 게이지 길이가 짧은 시편은 직사각 탭 근처에 발생하는 응력 집중으로 인한 예기치 않는 파괴가 일어나고, 직사각형 탭으로 인하여 발생하는 전단응력은 탭으로부터 떨어진 큰 영역에서 아주 높게 나타나기 때문에 정확한 값을 얻기가 어렵다. 한편, Sun과 Chung⁽⁷⁾은 off-axis 시편에서 균일한 응력상태를 얻기 위한 경사-형상의 끝 탭(oblique-shaped end-tab)의 사용을 제안하였고, Pierron과 Vautrin⁽⁸⁾은 경사탭 사용의 유효성을 확인 하였다. Kawai와 Morishita 등⁽⁹⁾은 off-axis 인장의 종횡비(aspect ratio)가 4인 시편에 경사탭을 사용하면, 끝 구속의 영향이 현저하게 감소하는 것을 확인하였다. 이와 같이 경사탭을 사용하면 off-axis 인장시험에서 좋은 결과를 얻게 된다는 것을 알 수 있다.

10° off-axis 인장시험은 아직 ASTM 표준에 규정되지 않았지만, 일반적으로 ASTM D3518-76을 복합재료의 off-axis 표준 시험법으로 한다. Swanson 등⁽¹⁰⁾은 Graphite/Epoxy로 제작된 얇은 두께의 일 방향 튜브에서 수행된 비틀림시험과 Iosipescu 전단시험으로부터 얻은 전단물성치(G_{12})의 평균값의 차이는 단지 1%라는 것을 확인하였다. 이것은 off-axis 시험으로부터 얻은 G_{12} 는 Iosipescu 전단시험 값과 비교하여 유효성을 확인할 수 있음을 알 수 있다. 그러므로 본 연구의 목적은 경사탭을 사용한 off-axis 인장시험으로부터 탄소섬유 강화된 알루미늄 적층 복합재료의 전단물성치를 측정하는 것이다. 측정된 물성치의 유효성은 Iosipescu 전단시험으로부터 얻은 값과 비교하여 확인하였다.

1993년에 ASTM 표준(ASTM D5379/D5379M-93)이 된 Iosipescu 전단시험장치는 여러 가지 변형된 장치가 있고, Adams와 Walrath⁽¹¹⁾에 의하여 일 방향 복합재료의 전단시험에 사용되었다. 이들에 의하여 변형된 Iosipescu 전단시험장치는 변위하중을 가하는 장치이다(A&W장치). A&W장치는 Wyoming 장치를 변형시킨 Iosipescu 전단시험 장치이다.⁽¹²⁾ 본 연구에서 Iosipescu 전단시험은 변형된 Wyoming장치를 사용하였다.⁽¹³⁾

2. 기본이론

2.1 off-axis 인장

단축응력($\sigma_x = \sigma_0, \sigma_y = \tau_{xy} = 0$)을 받는 off-axis 복합재료 시편의 변형상태는 식 (1)과 같이 변형률에 의하여 주어진다.

$$\epsilon_x = \overline{S}_{11}\sigma_0 \tag{1a}$$

$$\epsilon_y = \overline{S}_{12}\sigma_0 \tag{1b}$$

$$\gamma_{xy} = \overline{S}_{16}\sigma_0 \tag{1c}$$

식 (1c)는, Fig. 1(a)와 같이, 균일한 수직응력 σ_0 가 작용하는 시편에서 발생하는 전단변형률(γ_{xy})이다. 이때 \overline{S}_{16} 는 전단 연성 커플라이언스(shear coupling compliance)이고, 이것은 시편이

평행 사변형 모양으로 찌그러지게 하는 원인이 된다. Fig. 1과 같은 하중조건에서, 변형률은 중심선($x, h/2$; h 는 시편의 폭)을 따라 적용하중의 크기에 비례하고 일정하다⁽⁶⁾는 경계조건과 변형률-변위 관계식으로부터, 식 (2)와 같은 수직 변위(u_0) 성분을 얻을 수 있다.

$$u_0 = (\overline{S_{11}}x + \overline{S_{16}}y)\sigma_0 \quad (2)$$

식 (2)로 이루어지는 직선은 식 (3)과 같이 x 축에 관하여 ϕ 의 경사각도를 갖게 된다.

$$\cot \phi = -\frac{\overline{S_{16}}}{\overline{S_{11}}} \quad (3)$$

식 (3)의 ϕ 는 하중과 섬유방향 사이의 off-axis 각 θ 의 함수로서 Sun과 Chung⁽⁷⁾이 제안한 새로운 경사 형상의 끝 탭의 경사각(ϕ)의 설계에 사용되고, Fig. 4에 ϕ 를 나타내었다. 또한 식 (3)의 우변 $\overline{S_{16}}/\overline{S_{11}}$ 는 전단 커플링 비($\gamma_{xy}/\epsilon_{xy}$)이다.

그러므로 off-axis 복합재료 시편이 종방향의 단순인장하중을 받으면, 시편의 길이 방향에 대하여 각도 ϕ 를 갖는 직선을 따라 종 변형률이 선형적으로 발생하게 된다. 그래서 경사각도(ϕ)를 보완하는 탭을 사용함으로써 보다 정확한 물성치를 측정할 수 있다.

2.2 Iosipescu 전단시험

Iosipescu 전단시편은, Fig. 2와 같이, 비대칭하중이 작용할 때, 시편의 환경은 V-노치의 뿌리 ㉔와 ㉕를 연결하는 축을 따라서 0 모우멘트를 발생시키는 보이다. Iosipescu 전단시편은 V-노치의 뿌리 축을 따라서 근사적으로 균일한 전단응력상태가 되게 한다. 그리고 V-노치사이에서 발생하는 평균 전단응력은 식 (4)와 같다.

$$\tau_{xy} = \frac{P}{wt} \quad (4)$$

식 (4)에서 w 는 노치뿌리 사이의 거리, t 는 시편의 두께이다. 전단변형률은 스트레인 게이지의

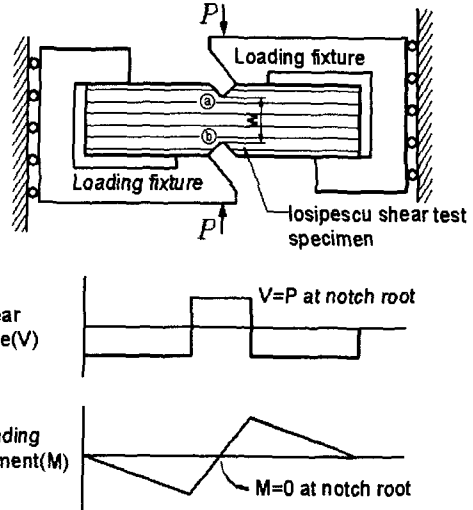


Fig. 2 Shear force and bending moment diagrams for Iosipescu shear fixtures

출력 값을 사용하여 식 (5)로부터 계산된다.

$$\gamma_{12} = \epsilon_{+45} - \epsilon_{-45} \quad (5)$$

3. 시편제작 및 실험방법

Fig. 3과 같이, 8ply의 일 방향 탄소섬유 적층 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Laminate composites)과 알루미늄 박판을 사용하여 하이브리드 적층 복합재료 CFRALL(Carbon Fiber Reinforced Aluminum Laminate composites) 시편을 제작하였다. 사용된 알루미늄과 탄소섬유 적층 복합재료에 대한 물성치와 강도는 Table 1에 나타내었다. Table 1의 X는 시편의 섬유방향 인장강도, Y는 섬유의 수직 방향의 강도, E_{11} 과 E_{22} 는 시편의 주방향 물성치, 그리고 ν_{12} 는 푸아송 비를 나타내고, G_{12} 는 전단 탄성계수이다. 비록 시편의 바깥에 등방성체인 알루미늄이 접착될지라도 내부에 적층된 탄소섬유의 강한 이방성 때문에 재료는 이방성이 된다. Table 1에서 보듯이 순수 탄소섬유 복합재료(CFRP)의 이방성 비(E_{11}/E_{22})는 약 16.43이다. 시편제작을 위하여 사용된 알루미늄은 쥘대한 알루미늄의 A15052(두께 0.5mm)이고, 탄소섬유 프리프레그는 두께가

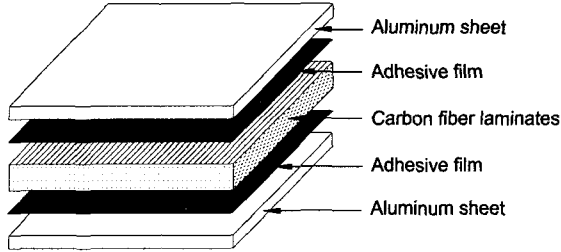


Fig. 3 Carbon fiber reinforced aluminum composites

Table 1 Mechanical strength and material properties

	Material Properties			Material Strength	
	USN 200A	Al5052		USN 200A	Al5052
E_{11}	120 GPa	65.5 GPa	X	2,100 MPa	220 MPa
E_{22}	7.3 GPa	-	Y	27 MPa	-
G_{12}	3.2 GPa	26 GPa	S	100 MPa	-
ν_{12}	0.31	0.34		-	-

0.12mm인 USN200A(SK chemicals 사)이다. 접착 필름은 0.13mm 두께의 AF126(3M사)를 사용하였다. 알루미늄 박판(sheet)은 H_2SO_4 30% + 나트륨 중크롬산염(Sodium dichromate) 5% 에칭용액을 70°C로 유지시키고, 준비된 알루미늄 박판을 용액에 1시간 동안 침지시켜서 세척한 후 온도 85°C인 건조대에서 건조하여 사용하였다.⁽¹⁴⁾ 표면처리된 알루미늄 박판은 오토클레이브에서 시료를 제작하기 위하여 적층하기 전에 표면을 다시 세척 및 탈지를 하였다. 탈지된 알루미늄 박판을 적정크기로 절단된 탄소섬유 프리프레그(prepreg)와 적층하여 오토클레이브에서 시료를 성형하였다. 시편 제작은 다이아몬드 휠(diamond wheel)가공하였으며, 절단면의 노치에 의한 응력 집중을 방지하기 위하여 시편의 가공면을 다시 연마하였다. 시료 제작시 두께 변화는 2% 이내가 되도록 하였다. 시편의 두께와 폭은 상중하 3 곳을 측정하여 평균한 값을 사용하였다. 10° 및 45°off-axis 시편의 형상과 치수는 Fig. 4와 같고, ASTM D3518-76을 참고하여 제작하였다. Fig. 4에서 θ 는 강화섬유의 방향각이고, ϕ 는 탭의 경사

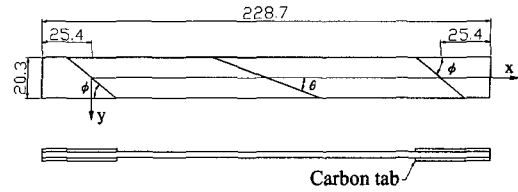


Fig. 4 Off-axis specimens with oblique tabs

각도이다. 경사탭은 약 1mm 두께의 탄소섬유 적층판(carbon tab)이고 시편제작이 끝 난후 에폭시 접착재로 시편에 부착하였다. 10°off-axis 시편의 탭의 경사각도는 약 20°이고, 45°off-axis 시편의 탭의 경사각도는 약 60°이다.

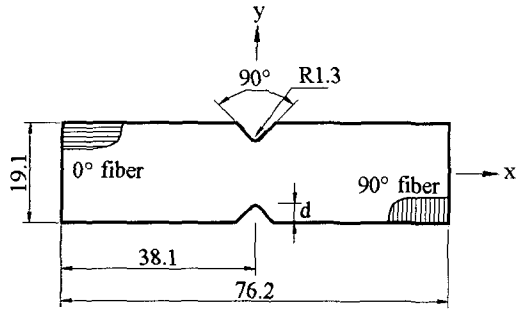
off-axis 인장시험으로부터 시편의 종, 측방향 변형률($\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$)을 측정하기 위하여, 10° off-axis 시편에서는 시편의 중앙에 2축 게이지(KFG-2-120 D-11, KYOWA)를 부착하였고, 45°방향의 게이지가 섬유를 가로지르는 방향이 되도록 부착하였다.

45°off-axis 인장시험의 모든 시편들은 0/90의 2축 게이지(KFG-2-120 D-11, KYOWA)가 시편의 중앙에 설치되었다.

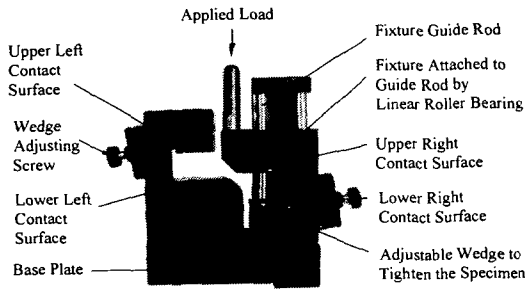
시편의 크래핑을 유압시스템에 의하여 행하는 MTS, 809 Axial/Torsional Test System에서 off-axis 인장시험 및 Iosipescu 전단시험을 수행하였고, 하중속도는 1mm/min으로 하였다.

Iosipescu 전단시편은 섬유 배향각이 0°과 90°인 시편을 Fig. 5(a)와 같이 제작하였다. Fig. 5(a)의 d는 V-노치의 깊이를 나타낸다. Gage length가 1mm인 0/90로젤트(KFG-1-120 D-11, KYOWA) 게이지는 시편의 종축에 대하여 ±45°방향으로 시편의 중앙에 부착하였다. 게이지의 중앙으로부터 시편의 중앙까지 수평 및 수직거리는 결코 0.3mm를 초과하지 않도록 부착하였다. 스트레인 게이지로부터 나오는 신호는 NEC사의 변형 증폭기(Strain Amplifier)를 사용하여 처리 하였다.

일반적으로 Fig. 5(a)에서 보듯이 V-노치의 깊이 d는 시편높이의 20%로서 약 3.8mm가 된다. 그러나 방향성이 강한 일 방향 복합재료의 0° Iosipescu 시편의 전단파괴는 굉장히 어렵다. 섬유를 가로질러서 전단 파괴시키는 것이 쉽지 않기 때문이다. 그래서 V-노치의 깊이(d)를 증가시켜서



(a) Specimen configuration(dimensions in mm)



(b) Modified Wyoming test fixture

Fig. 5 Iosipescu shear test

순수 전단면적을 감소시킴으로서, 0°Iosipescu 시편의 전단 파괴강도를 구하고자 하였다. 그래서 본 연구에서는 V-노치의 깊이(d)를 시편높이(19.1mm)에 대하여 20%(또는 3.8mm), 25%(또는 4.7mm), 30%(또는 5.7mm)로 증가시켜서 연구하였다. Fig. 5(b)는 Iosipescu 전단 시편에 전단하중을 작용시키기 위하여 사용한 변형된 Wyoming 전단시험장치이다.

4. 실험결과 및 해석

4.1 실험 결과 및 관찰

Fig. 6은 중횡비가 약 8인 10° 및 45°off-axis 인장시험에 의하여 파괴된 시편의 사진이다. 특히, 10°off-axis 시편들은 파단전에 알루미늄 박판의 층간분리가 먼저 발생하는 것을 쉽게 관찰할 수 있었다. 경사탭 사용에 의하여 파단 위치는 시편의 중앙은 아니지만 탭 부위에서는 파괴되지 않았다. 이것은 경사탭의 사용에 의하



Fig. 6 Failed 10° and 45° off-axis specimens



Fig. 7 Failed Iosipescu specimens

여 탭부위의 응력집중을 완화시키고, 이로 말미암아 시편의 시험부에서 상당한 정도의 고른 응력 분포가 발생한다는 것을 알 수 있다. Fig. 6에서 점선은 각각 10° 및 45° off-axis 시편의 탄소 섬유적층의 파괴된 방향을 나타낸다. 10°off-axis 시편의 탄소섬유 적층의 파괴위치는 시편의 중앙에서부터 탭 근처까지 길게 뻗어 있다. 이것은 섬유의 배향각이 10°라는 특성 때문이다. 10° 및 45° off-axis 시편의 바깥에 접촉된 알루미늄 박판은 둘 다 거의 45°방향으로 파괴되었다. 10° off-axis 시편의 알루미늄의 박판도 최대 전단응력이 발생하는 평면을 따라 전단 파괴되었지만 단순하게 파단된 45°off-axis인장시편보다는 좀더 많은 소성 변형 등이 포함되었음을 보여 주고 있다.

Fig. 7은 0° 및 90°Iosipescu 시편의 전단파괴양상을 보여주고 있다. Fig. 7의 왼쪽의 휘어진 두 시편은 0°Iosipescu 전단시편이고, 오른쪽의 파단된 세 개의 시편은 파단된 90°Iosipescu 전단시편을 나타낸다. 여기서 0°Iosipescu 전단시편은, Fig. 5(a)에서 보는 것처럼, 섬유의 배향 각도가 0°인 것을 의미하고, 90°Iosipescu 전단시편은 섬유의 배향 각도가 90°을 의미한다. 90°Iosipescu 전단시편은 시편의 중앙에 마주하고 있는 V-노치의 깊이에 관계없이 수직으로 분할(splits) 파단된 것을 볼 수 있다. 0°Iosipescu 시편의 순수 전단 반응을 구하기 위하여 Fig. 5(a)의 V-노치 깊이(d)

를 시편높이(19.1mm)에 대하여 20%에서 30%로 변화시켰다. V-노치의 깊이를 시편높이에 대하여 20%에서 30%로 증가시켜도 파단은 어려웠다. Fig. 7의 왼쪽의 0°Iosipescu 시편은 하중이 증가하면서 미끄러지기 시작하였고, 결국 시편은, Fig. 5(b)에서 보듯이, 시편에 전단하중을 가하기 위한 치구의 오른쪽의 상부 접촉면(upper right contact surface)의 끝에 있는 치구의 경사면에 의하여 시편의 V-노치의 경사면과 접하게 되어 시편의 파괴는 불가능하였다. 이렇게 파괴시키고자 한 이유는 일 방향 복합재료의 전단 물성치나 전단강도에 대한 Iosipescu 전단시험은 0°Iosipescu 전단시험이 강조 되기 때문이고, 전단하중을 받는 동안 V-노치 사이에 발생하는 축 분할(axial split)을 관찰하여 전단강도를 결정하기 때문이다. 본 연구와 같이 알루미늄 박판이 접착된 재료는 축 분할을 발견하기가 쉽지 않다. 그래서 0° Iosipescu 전단시험에 의한 전단 강도 결정을 위하여 좀더 많은 실험이 필요하다. 그러나 0° Iosipescu 전단시험은 순수 전단 파괴 강도는 구할 수 없었지만 초기의 선형 탄성영역에서 전단 탄성계수는 유효하게 구할 수 있었다.

Fig. 8에서, 실선과 2점 쇄선은 일 방향 섬유 강화 알루미늄 적층 복합재료(CFRALL)와 일 방향 탄소섬유 적층(CFRP)를 연속체로 가정하여, Tsai-Hill의 파괴기준⁽¹⁵⁾을 적용함으로써 각각 예측한 인장파괴강도(σ_x)를 섬유 배향각(θ)의 함수로 나타낸 것이다. 기호 ○는 off-axis 인장시험의 실험값을 나타내고, 0°, 10°, 45°, 그리고 90° off-axis 인장시험에 대한 실험값은 각각 1177.71MPa, 327.24MPa, 121.08MPa, 그리고 95MPa이다. 10°off-axis 인장강도가 45°off-axis 인장강도보다 약 2.7배 크다.

비교를 위하여 표면 처리후 측정된 알루미늄 박판의 항복강도(160MPa)와 극한 인장강도(186MPa)를 각각 대시기호와 점선으로 나타내었다. 알루미늄합금과 비교하면, CFRALL의 인장파괴강도($X=1177.21MPa$)는 섬유 방향으로 상당히 강화되었다. CFRALL의 횡인장파괴 강도($Y=95MPa$)는 알루미늄 합금 강도의 약 41%이고 CFRP의 횡인장강도(27MPa)보다는 크다(Table 1 및 Table 2). 이것은 CFRALL의 횡 물성치는 알루미늄의 물성치에 의하여 지배되고, 섬유-모재의

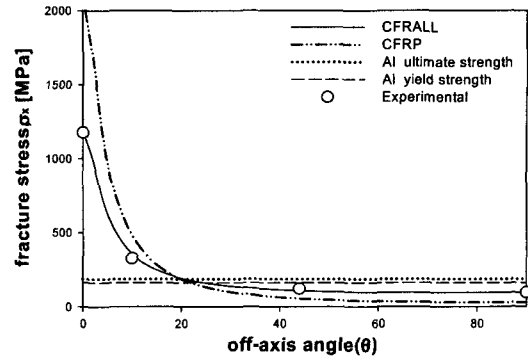


Fig. 8 Fracture stress as a function of off-axis angle

접착특성은 CFRALL의 횡강도에 크게 영향을 주지 않음을 의미한다. Fig. 8에서 $\theta \geq 20^\circ$ 이면, CFRALL의 인장파괴강도가 CFRP의 인장파괴강도보다 크다. 즉, CFRP는 CFRALL가 완전 파괴하기 전에 강성을 잃게 되고 모재(matrix)의 균열과 섬유-모재의 분리(debonding) 등과 같은 국부 손상이 먼저 진행된다. 그래서 Fig. 6과 같이 10° off-axis 시편과 45°off-axis 시편의 알루미늄 박판의 파단 양상이 약간 다른 것을 볼 수 있다.

Fig. 8에서 보여준 Tsai-Hill파괴기준의 예측은 90°Iosipescu 시편의 전단강도를 사용하여 예측한 것으로서 실험 결과들과 잘 일치한다. 그러므로 비교적 이방성비가 강한 재료에 대하여 본 연구에서 사용한 중형비가 약 8인 10° 및 45°off-axis 시편에 의한 면내 전단 강도 평가는 유효하다는 것을 알 수 있다.

Table 2는 시편의 섬유방향 인장강도(X)와 섬유를 가로지르는 방향의 강도(Y) 및 시편의 주방향 물성치 E_{11} 과 E_{22} , 그리고 푸아송 비(ν_{12})를 나타내고, Table 3은 10° 및 45°off-axis인장시험과 90°Iosipescu 전단시험으로부터 구한 전단강도(S)와 전단 탄성계수(G_{12})를 표시하고 있다.

Table 3으로부터 10° 및 45°off-axis인장시험과 0°Iosipescu 전단시험 및 90° Iosipescu 전단시험으로부터 구한 전단 탄성계수는 거의 비슷하고, 전단강도는 0°Iosipescu 전단시험을 제외한 다른 시험의 값들은 거의 유사한 값을 나타내고 있다. 한편, Tsai-Hill의 조건에 의한 off-axis시험

Table 2 Strength and material properties of carbon fiber reinforced aluminum composites

Material Properties		Material Strength	
E_{11}	95.24 GPa	X	1177.21 MPa
E_{22}	20.0 GPa	Y	95.0 MPa
ν_{12}	0.41	S	-

Table 3 Shear strength and Properties of carbon fiber reinforced aluminum composites

	off-axis		0°Iosipescu	90°Iosipescu	
	10°	45°	V-notch depth(mm)		
			3.8	3.8	4.7
G_{12} (GPa)	11.65	10.97	10.39	11.45	10.46
S (MPa)	58.0	60.54	-	61.10	63.97

의 전단강도는 약 65MPa이다. 이 값은 Table 3에 나타난 10° 및 45° off-axis 시험과 90° Iosipescu 전단시험으로부터 구한 전단강도 값과 유사하다. 이러한 결과로부터 본 연구에서 사용한 표면처리 방법이 상당히 유효함을 알 수 있고, 시편의 양 측면에 등방성체인 알루미늄 박판이 접착된 복합재료에 대하여도 off-axis인장시험에서 경사탭의 사용은 유효하다는 것을 알 수 있다.

4.2 해석

Fig. 9는 off-axis 시험으로부터 얻은 데이터를 나타낸 것이다. 10° off-axis 시험으로부터의 값보다 45° off-axis인장시험으로부터 얻은 데이터가 초기 선형 탄성영역에서 더 선형적임을 알 수 있다. 전체 응력-변형률 관계는 유사하다. Fig. 10은 0° 및 90° Iosipescu 전단시험으로부터 구한 데이터를 나타낸 것이다. 90° Iosipescu 전단시험의 V-노치의 깊이(d)가 4.7mm(25%)일지라도 응력-변형률선도는 거의 유사한 경향을 보이고 있다. 그러나 0° 및 90° Iosipescu 전단시험으로부터 구한 초기의 변형률 값들은 난잡하지만, 하중이 증가하면서 변형률 값들은 일정하게 증가하였다.

Fig. 9와 Fig. 10으로부터 선형탄성영역에서,

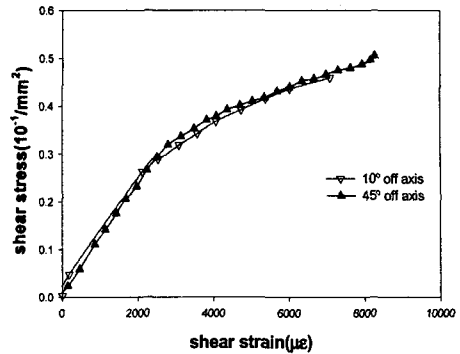


Fig. 9 Shear stress and shear strain from off-axis test

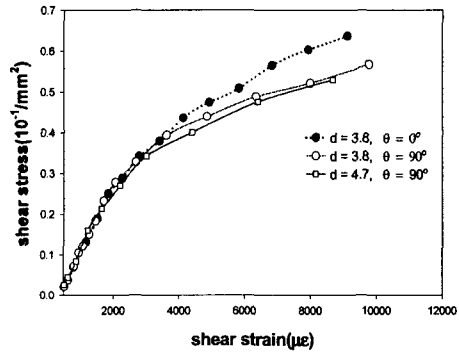


Fig. 10 Shear stress and shear strain from Iosipescu shear test

10° 및 45° off-axis인장시험 값과 Iosipescu 전단시험의 값들은 거의 일치하고, 재료의 비선형을 나타내는 항복위치도 거의 일치하는 것을 보이고 있다. 또한 45° off-axis인장시험의 값이 가장 선형적임을 알 수 있다.

5. 결론

일 방향 섬유 강화 알루미늄 적층 복합재료의 10° 및 45° off-axis 인장시험과 Iosipescu 전단시험으로부터 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 중횡비가 8인 10° 및 45° off-axis 인장시험으로부터 초기 전단계수의 값을 얻을 때에 경사탭의 사용은 유효하다는 것을 확인하였다.
- (2) 90° Iosipescu 전단시험으로부터 구한 전단

강도를 적용한 Tsai-Hill의 기준의 인장강도 예측 값은 off-axis 인장시험 결과와 잘 일치하였고, 또한 off-axis 각 $\theta \geq 20^\circ$ 이면 CFRALL의 인장파괴강도가 CFRP의 인장파괴강도보다 크다. 이것은 off-axis 각 $\theta \geq 20^\circ$ 이면 CFRALL 알루미늄박판의 물성치에 상당히 의존한다는 것을 의미한다.

(3) 이방성이 강한 재료에 대한 본 연구는 전단 탄성계수의 결정에 있어서 45° off-axis 인장시험으로부터 가장 좋은 결과를 얻었다.

후 기

이 논문은 2001년도 두뇌한국21 사업에 의하여 지원되었습니다.

참고문헌

- (1) Lin, C.T. and Kao, P.W., 1996, "Fatigue Delamination Growth in Carbon Fibre-reinforced Aluminum Laminates," *Composites, A*, Vol. 27A, pp. 9~15.
- (2) Lee, S. and Munro, M., 1986, "Evaluation of In-plane Shear Test Methods for Composite Materials by the Decision Analysis Technique," *Composites*, Vol. 17, No. 1, pp. 13~22.
- (3) Pindera, M.J., Choksi, G., Hidde, J. S. and Herakovich, C.T., 1987, "A Methodology for Accurate Shear Characterization of Unidirectional Composites," *Journal of Composite Materials*, Vol. 21, pp. 14~1184.
- (4) Chamis, C. C. and Sinclair, J. H., 1977, "Ten-deg Off-axis Test for Shear Properties in Fiber Composites," *Experimental Mechanics*, Vol. 17, No. 9, pp. 339~346.
- (5) Pagano, N. J. and Halpin, J. C., 1968, "Influence of End Constraint in the Testing of Anisotropic Bodies," *Journal of Composite Materials*, Vol. 2, No. 1, pp. 18~31.
- (6) Pindera, M. J. and Herakovich, C. T., 1986, "Shear Characterization of Unidirectional Composites with the Off-axis Tension Test," *Experimental Mechanics*, Vol. 26, pp. 103~112.
- (7) Sun, C. T. and Chung, I., 1993, "An Oblique End-tab Design for Testing Off-axis Composite Specimens," *Composites*, Vol. 24, pp. 619~623.
- (8) Pierron, F. and Vautrin, A., 1996, "The 10° Off-axis Tensile Test: a Critical Approach," *Composites Science and Technology*, Vol. 56, pp. 483~488.
- (9) Kawai, M., Morishita, M., Satoh, and H Tomura, 1997, "Effect of End-tab Shape on Strain Field of Unidirectional Carbon/Epoxy Composite Specimens Subjected to Off-axis Tension," *Composites, A*, Vol. 28A, pp. 267~275.
- (10) Swanson, S.R., Messick, M. and Toombes, G.R., 1985, "Comparison of Torsion Tube and Iosipescu In-plane Shear Test Results for a Carbon Fibre-Reinforced Epoxy Composite," *Composites, A*, Vol. 16, No. 3, pp. 220~224.
- (11) Walrath, D.E. and Adams, D.F., 1983, "The Iosipescu Shear Test as Applied to Composite Materials," *Experimental Mechanics*, Vol. 23, No. 1, pp. 105~110.
- (12) Walrath, D.E. and Adams, D.F., "Verification and Application of the Iosipescu Shear Test Method," Report UWME-DR-103-1, Department of Mech. Eng., University of Wyoming, Laramie, WY(June 1984).
- (13) Lee, D.J. and Jeong, T.H., 1996, "Effective Longitudinal Shear Modulus of Continuous Fiber-Reinforced 2-Phase Composites," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 20, No. 9, pp. 2770~2781.
- (14) Yoon, H.K., Cheng, H.Y., Park, W.J., and Hue, C.W., 1995, "The Behavior of Crack Growth Rate for APAL and CPAL Patched with FRP Laminate in Aluminum Alloy Plate," *Transactions of the KSME*, Vol. 19, No. 4, pp. 1013~1022.
- (15) Hull, D., 1981, *An Introduction to Composite Materials*, Cambridge University Press.