

하이브리드 복합재료의 전단 물성치 측정에 관한 연구

백운철* · 조맹효** · 황재석***

A study of the shear properties for hybrid composites

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

Key Words : Shear Properties, Off-axis Tension Test, Iosipescu Shear Test, Oblique Tabs

ABSTRACT

In order to determine the in-plane shear properties of unidirectional carbon fiber reinforced aluminum laminate composites, a new Iosipescu shear test fixture was developed, by using a fixture undergoing tensile force for the specimen edge to be subjected to compressive loads assumption, under plane stress. Also, to compare the results, Iosipescu shear test method by the modified Wyoming fixture and the off-axis tensile test were performed to determine the shear properties. Off-axis tension test was performed by using new oblique-shaped tabs proposed by Sun and Chung.[5] The oblique tabs reduced remarkably end-constraint effects of off-axis specimens with a aspect ratio of about eight. It is observed through the experimental results show that there is no significant difference between off-axis test results and those of Iosipescu shear test.

1. 서 론

복합재료의 중요 전단시험은 10° 및 45° off-axis 인장시험과 Iosipescu 전단시험이 있다. 이들 시험법을 많이 사용하는 이유는 시편제작과 시험기술이 상대적으로 쉽고, 제작비용이 저렴하고, 그리고 전단강도 값의 정확성 때문이다. Iosipescu 전단시험은 1967년 Iosipescu가 제안하였고, 1993년 ASTM 표준(ASTM D 5379-93)이 되었다. 그렇지만, Slepetz 등[1]은 Fig.1(a)와 같은 Iosipescu 전단시험의 하중작용법을 변형시킨 비대칭 4점 굽힘시험(asymmetrical four point bending, AFPB)을 제안하였고, Walrath와 Adams[2]는 Fig.1(b)와 같은 복합재료 시편에 변

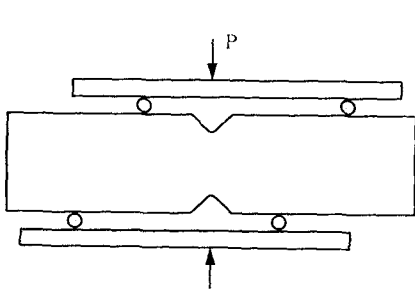
위하중을 가하여 순수전단상태를 얻기 위한 장치를 제안하였다. 이장치는 변형된 Wyoming 장치(A&W)라고 불린다. 최근 Tew 등[3]은 ASTM Iosipescu 전단시험에서 시편의 하중을 받는 부분의 압괴(crush)현상을 완화하기 위하여 Iosipescu 전단시험 장치를 개조하였다. Walrath와 Adams[2]는 하중작용점을 정확히 위치시킬 수 있다면 AFPB로부터 정확한 전단 물성치를 결정할 수 있다는 것을 확인하였다. A&W 장치는 치구제작비용이 상대적으로 많이 든다. 그래서 본 연구는 두꺼운 복합재료에 대한 전단시험[4]에 비하여 상대적으로 크기가 작은 하중을 필요로 하는 평면응력 조건에서 전단시험을 쉽게 하고, 하중작용점을 정확히 위치시키기 위하여 AFPB를 개선하여 Iosipescu 전단시험장치를 개조하여 전단물성치와 전단 강도를 측정하였다. 또한, Iosipescu 전단시험으로부터 구한 복합재료의 물성치를 비교하기 위하여 10° 및 45° off-axis 인장시험을 행하였다. off-axis 인장시험은 시편의 클램핑 장치의

* 서울대학교 기계항공공학부 BK21 박사후과정

** 서울대학교 기계항공공학부

*** 영남대학교 기계공학부

구속 때문에 발생하는 전단과 휨의 효과를 완화하기 위하여 Sun 과 Chung[5]이 제시한, Fig.2 와 같은, 경사 단 탭(oblique end tabs)을 사용하여 전단탄성계수와 전단 강도를 측정하였다. Fig.2 는 off-axis 시편의 형상과 치수이고, ASTM D3518-76 을 참고하였다. Fig.2 에서 θ 는 강화섬유의 방향 각이고, ϕ 는 탭의 경사 각도이다. 경사탭은 약 1mm 두께의 탄소섬유 적층판(carbon tab)이고 시편제작이 끝난 후 에폭시 접착제로 시편에 부착하였다. 10° off-axis 시편의 탭의 경사각도는 약 20° 이고, 45° off-axis 시편의 탭의 경사각도는 약 60° 이다. 이때 ϕ 는 전단 연성비($\overline{S}_{16}/\overline{S}_{11}$)를 사용하여 결정하였다.[5]



(a) asymmetrical four-point bending(AFPB)

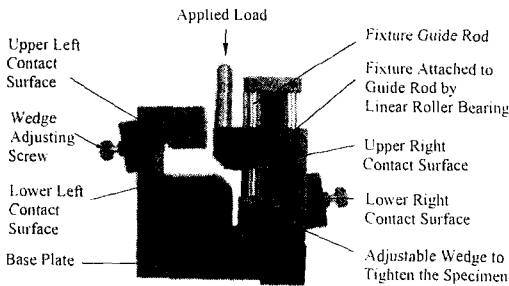


Fig. 1 Iosipescu shear test

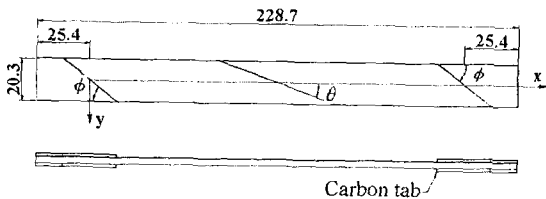


Fig. 2 Off-axis specimens with oblique tabs(mm)

2. 시편제작 및 실험

2.1 시편제작

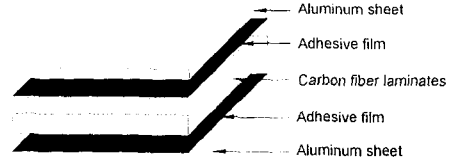


Fig. 3 Carbon fiber reinforced aluminum composites

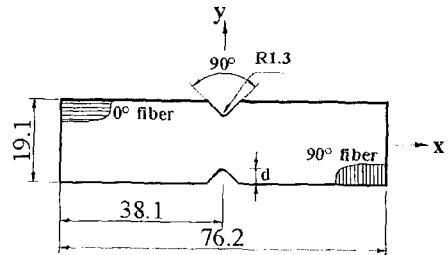


Fig. 4 Specimen configuration(dimensions in mm)

Fig. 3 과 같이, 8ply 의 일 방향 탄소섬유 적층 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Laminate composites)과 알루미늄 박판을 사용하여 오토클레이브에서 하이브리드 복합재료 CFRALL(Carbon Fiber Reinforced Aluminum Laminate composites)시료를 제작하였고, 시편 제작은 다이아몬드 휠(diamond wheel)가공하였다. 시편제작을 위하여 사용된 알루미늄은 7대 한 알루미늄의 Al5052(두께 0.5mm)이고, 탄소섬유 프리프레그는 두께가 0.12mm 인 USN200A(SK chemicals 사)이다. 접착 필름은 0.13mm 두께의 AF126(3M 사)를 사용하였다. 알루미늄 박판(sheet)은 H_2SO_4 30% + 나트륨 중크롬산염(Sodium dichromate) 5% 에칭용액으로 표면처리 되었다.[6]

Iosipescu 전단시편의 형상과 치수는 Fig. 4 와 같다. Fig. 4 에서 0° 및 90° 는 섬유 배향각이 0° 및 90° 인 Iosipescu 전단시편을 의미한다.

2.2 실험

Fig.5 는 평면응력 조건에서 실험을 간편하게 하기 위하여 본 연구에서 개조한 Iosipescu 전단시험 장치이다. 이 변형된 장치는 인장하중을 받는 장치에 의하여 시편은 전단압축하중을 받도록 설계되었다는 점에서 Fig.1(a)의 AFPB 와는 다르고, 가볍고 다루기가 쉽다는 점에서 변형된 Wyoming 장치

(A&W)와는 다르다. 또한 환봉으로 하중을 작용(cylindrical loading)시킬 때 하중작용점을 정확히 위치시키기가 어려운 AFPB 장치의 단점은 하중바(loading bar)를 적절히 설계하여 해결했다. Fig.2 와 Fig.4 와 같이 제작된 하이브리드 복합재료 시편에 스트레인 게이지를 부착하여, 시편의 크래핑을 유압시스템에 의하여 행하는 MTS, 809 Axial/Torsional Test System 에서 off-axis 인장시험 및 Iosipescu 전단시험을 수행하였고, 하중속도는 1mm/min 로 하였다.

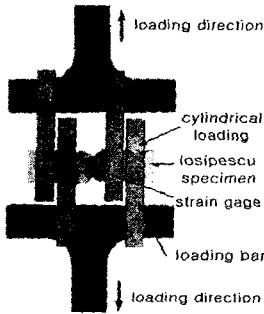


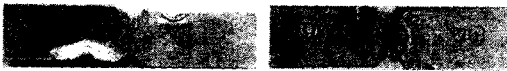
Fig.5 Tensile Iosipescu shear test

3. 실험결과 및 해석

3.1 실험결과



(a) 10° and 45° off-axis specimens



(b) tension load



(c) compression load

Fig.6 Failed Iosipescu shear specimens

Fig.6(a)는 중횡비가 약 8 인 10° 및 45° off-axis 인장시험 시편의 파괴사진이다. 시편의 파단 위치가 중앙은 아니지만 탭 부위에서는 파괴되지 않았다. 이것은 경사탭의 사용은 탭부위의 응력집중을 완화시키고, 이로 말미암아 시편의 시험부(gage section)에서 상당히 고른 응력 분포가 발생한다는 것을 알 수 있다. Fig.6(b)는 본 연구에서 제시한

Fig.5 와 같이 개조된 Iosipescu 전단장치로부터 얻은 Iosipescu 시편의 전단파괴 양상을 보여주고 있다. Fig.6(c)는 Fig.1(b)와 같은 변형된 Wyoming Iosipescu 전단시험장치(A&W)로부터 얻었다. Fig.6 의 (b)와 (c)에서 왼쪽의 시편은 섬유 배향각이 0° 인 0° Iosipescu 전단시편이고, 오른쪽의 시편은 섬유 배향각이 90° 인 90° Iosipescu 전단시편을 각각 의미한다. 90° Iosipescu 전단시편은 시험 방법에 관계없이 수직으로 분할(splits) 파단된 것을 볼 수 있다.

3.2 해석

Fig.3 과 같은 하이브리드 복합재료 시편을 사용하여 주방향 물성치와 강도를 각각 $E_{11} = 95.24$ GPa, $E_{22} = 20.0$ GPa, $\nu_{12} = 0.41$, $X = 1177.21$ MPa, $Y = 95.0$ MPa 으로 얻었다. 그리고 Table 1 은 전단탄성계수(G_{12})와 전단강도(S)을 나타내고 있다. off-axis 인장시험과 압축 및 인장에 의한 Iosipescu 전단시험으로부터 구한 전단 탄성계수와 전단강도는 거의 유사한 값을 나타내고 있다. 한편, Tsai-Hill 의 조건에 의한 off-axis 시편의 전단강도는 약 65MPa 으로서, Table 1 에 나타난 전단강도 값과 유사하다. 즉, 본 연구에서 제시한 인장에 의한 Iosipescu 전단시험법은 상당히 유효함을 알 수 있다.

Table 1 Shear strength and Properties of carbon fiber reinforced aluminum composites

	Off-axis		Iosipescu shear test			
	10°	45°	A&W		Tensile	
			0°	90°	0°	90°
G_{12} GPa	11.65	10.9	10.39	11.45	10.5	11.2
S(MPa)	58.0	60.5	-	61.10	-	63.71

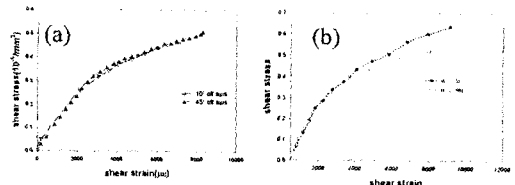


Fig.7 Shear stress and shear strain

- (a) 10° and 45° off-axis
- (b) modified Wyoming test
- (c) Tensile Iosipescu shear

Fig. 7 은 10° 및 45° off-axis 시험과 압축 및 인장에 의한 Iosipescu 전단시험으로부터 구한 전단응력-변형을 선도이다. 전체 응력-변형률 관계는 선형탄성영역에서 전단시험의 값들은 거의 유사하고, 재료의 비선형을 나타내는 항복위저도 거의 일치하는 것을 보이고 있다.

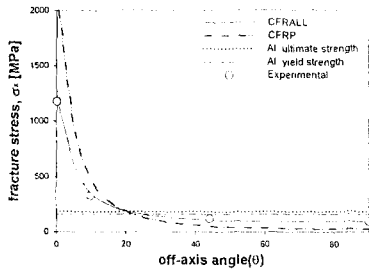


Fig. 8 Fracture stress as a function of off-axis angle

Fig. 8 은 Tsai-Hill 파괴기준[7]을 적용하여 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 95MPa 이다. 10° off-axis 인장강도가 45° off-axis 인장강도보다 약 2.7 배 크다. 비교를 위하여 표면처리후 측정된 알루미늄 박판의 항복강도(160MPa)와 극한 인장강도(186MPa)를 각각 대시 기호와 점선으로 나타내었다. 알루미늄합금과 비교하면, CFRALL의 인장파괴강도($X=1177.21$ MPa)는 섬유 방향으로 상당히 강화되었다. CFRALL의 횡인장파괴 강도($Y=95$ MPa)는 알루미늄 합금 강도의 약 41%이고 CFRP의 횡인장강도(27MPa)보다는 크다. 이것은 CFRALL의 횡 물성치는 알루미늄의 물성치에 의하여 지배되고, 섬유-모재의 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 국부손상이 먼저 진행된다. 그래서 Fig. 6(a)와 같이 10° off-axis 와 45° off-axis 시험의 알루미늄 박판의 파단 양상이 약간 다른 것을 볼 수 있다. Fig. 8에서 보여준 Tsai-Hill 파괴기준의 예측은 90° Iosipescu 시험의 전단강도를 사용하여 예측한 것으로서 실험결과들과 잘 일치한다.

4. 결론

일 방향 탄소섬유와 알루미늄 박판이 적층된 하이브리드 복합재료의 Iosipescu 전단시험 및 off-axis 인장시험으로부터 다음과 같이 결론을 얻었다.

(1) 기존의 압축하중에 의한 Iosipescu 전단시험법을 평면 응력 조건하에서 쉽게 전단시험을 할 수 있도록 하기 위하여 Iosipescu 전단시험법을 개조하였다.

(2) Iosipescu 전단시험으로부터 구한 전단강도를 적용한 Tsai-Hill의 기준의 인장강도 예측 값은 off-axis 인장시험 결과와 잘 일치하였다.

후기

본 연구는 국방과학연구소 위탁과제(과제번호: MADC-416-010749) 결과의 일부이며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Slepetz, J.M., Zagaeski, T.F., and Novello, R.F., "In-plane shear test for composite materials," Report No. AMMRC-TR-78-30, Army Materials and Mechanics Research Center, Watertown, MA, 1978.
- (2) Walrath, D.E. and Adams, D.F., "The Iosipescu shear test as applied to composite materials," *Experimental Mechanics*, Vol. 23, No. 1, 1983, pp. 105-110.
- (3) Tew, B.W., Odom, E.M., and Teel, J.D., "Composite specimen bearing failure reduction in Iosipescu shear tests," *Experimental Mechanics*, Vol. 41, No. 3, 2001, pp. 218-224.
- (4) 정광섭, 이대길, "섬유 강화 고분자 복합재료용 신 횡전단 시험법의 개발," *한국복합재료학회지*, 제 11 권, 제 4 호, 1998, pp. 32 - 42.
- (5) Sun, C. T. and Chung, I., "An oblique end-tab design for testing off-axis composite specimens," *Composites*, Vol. 24, 1993, pp. 619-623.
- (6) Yoon, H.K., Cheng, H.Y., Park, W.J., and Hue, C.W., "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, 1995, pp. 1013~1022.
- (7) Hull, D., *An Introduction to Composite Materials*, Cambridge University Press., 1981, pp. 125-173.