



탄소섬유강화 복합적층판의 핀 체결부 파괴 거동

김재동 · 김영식*

경상대학교(교수) · *부경대학교(교수)

Failure Behavior of Pin-jointed CFRP Laminates

Jae-Dong KIM · Yeong-Sik KIM†

Gyeongsang National University(professor) · *Pukyong National University(professor)

Abstract

The bearing strengths and failure behaviors of the pin-jointed carbon fiber reinforced plastic laminates were investigated by the pin loading test. 3 types of CFRP laminates which have different fiber direction were fabricated by the hot press forming and various type of specimens were prepared to consider the effect of specimens shape on the pin bearing strength and failure mode. The pin bearing strengths were increased in as the ratio of edge distance to hole diameter increase. Cross ply laminates indicated 2~3 times of bearing strength compared to unidirectional laminates in all of the ratio of edge distance to hole diameter. On the other hand, The strengths of angle and cross ply laminates were increased in as the ratio of width to hole diameter increase whereas unidirectional laminates revealed constant bearing strengths regardless the ratio of width to hole diameter. And, angle and cross ply laminates show constant bearing strength when the ratio of width to hole diameter is exceed 4.

Key words : Carbon fiber reinforced plastic, Pin-joint, Bearing strength, Specimen shape

I. 서론

섬유강화 복합재료는 섬유방향에 따라 이방성인 특징이 있으므로 섬유방향을 조절함으로 강도나 강성을 조절할 수 있다. 섬유강화 복합재료의 특성인 이방성을 잘 활용하면 경량성을 장점으로 내세운 기존 재료에 대한 대체재료로서의 활용뿐만 아니라 하중을 받는 구조물의 주재료에 섬유강화 복합재료가 다양하게 사용될 수 있다 (Eisenmann, 1981).

대부분의 구조물은 많은 부품이 서로 결합되어 원하는 기능을 발휘할 수 있도록 설계·제작된다. 금속재료는 주로 용접에 의해 결합되어 지나 복합재료는 용접이 불가능하므로 볼트 또는 핀으로

결합하는 기계적 결합과 접착제를 사용하는 접착 결합에 의해 결합되어 진다. 기계적 또는 접착에 결합된 구조물에 있어서 결합부는 큰 응력집중이 일어나고 항복에 의한 국부적인 높은 응력의 발생으로 인한 구조물의 파괴가 발생된다. 그러므로 섬유강화 복합재료의 구조재료의 응용에 있어서 결합부의 설계는 매우 중요하다(Kim, 2016).

섬유강화 복합재료 연결부에 대한 연구는 유한요소법 등을 사용한 해석적 연구와 재료 내부에 발생하는 변형에 의한 탄성파를 감지하여 신호를 분석하는 음향방출법 등을 적용한 실험적 연구가 많이 이루어지고 있다. 해석적 연구로서는 직교 이방성과 등방성판의 핀 연결부에 대한 응력해석

† Corresponding author : 051-629-6155, yeongsik@pknu.ac.kr

(Jung, 1977), 핀과 홀의 마찰력을 고려한 3D 비선형 해석(Xiao et al., 2000), ANSYS를 사용한 핀 연결부의 clearance와 간섭효과 해석(Scaler et al., 1998), subset simulation을 이용한 핀 체결부의 강도 해석(Li et al., 2014) 등의 연구가 수행되어 졌다. 실험적 방법에 의한 연구로는 섬유강화 복합 적층판의 핀 체결부 베어링 강도에 대한 연구(Mallick et al., 1985), 음향방출법을 이용한 원통형 복합재의 핀 체결부 파괴 거동(Yoon et al., 2012), 핀 베어링 강도에 미치는 온도와 습도의 영향(Kim et al., 1976), 유리섬유/알루미늄 적층재의 핀 베어링 강도(Caprino, 2005) 등의 연구가 있다.

전술한 바와 같이 섬유강화 복합재료의 기계적 결합부 특히, 핀에 의한 체결부에 대한 강도 및 파괴 거동에 대한 해석적 또는 실험적 연구는 다양하게 이루어 졌으나 섬유방향과 시험편 형상을 함께 변화시켜 실험적으로 연구한 예는 그리 많지 않았다. 그러므로 본 연구는 CFRP 적층판의 핀 체결부에서의 강도와 파괴거동에 대한 실험적 결과를 얻어 응용상 중요한 설계변수에 대한 기초자료를 제공하기 위해 섬유방향을 달리한 3 종류의 적층판을 제작하고 다양하게 시험편의 형상을 변화시켜 실험을 행하였다. 본 실험의 결과는 해석적으로 고찰한 연구와 비교하여 평가됨으로서 적층판 체결부의 결합에 대한 유용한 자료로 이용되어질 수 있을 것이다.

II. 시편 제작 및 실험방법

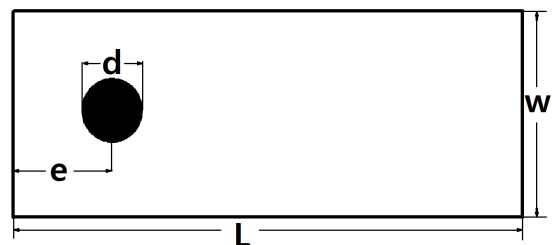
1. 시편 제작

CFRP 복합재료는 <Table 1>과 같은 물성을 갖는 CF/EP 프리프레그를 24층 적층·성형하여 제작하였다. 핫프레스에 스테인레스 금형을 사용하여 적층·성형하였고 성형온도는 130℃, 성형압력은 3.7MPa, 유지시간은 90분으로 하여 섬유방향을 달리 하는 3가지의 형태 즉, 일방향, [0/90]6s 및

[0/±45/90]3s의 CFRP 적층판을 제작하였다. 성형된 적층판은 다이아몬드 커터로 자르고 드릴로 핀 구멍을 만들어 [Fig. 1]과 같은 모양의 시험편으로 가공하였다. 이때 시험편의 길이(L)는 120mm, 핀 구멍의 지름(d)은 5mm, 두께(t)는 2.7mm로 고정하고 끝단거리(e)와 폭(w)을 변화시켜, 끝단거리비(d/e)가 다른 4종류의 시험편과 판폭비(w/d)가 다른 4종류의 시험편으로 가공하였다.

<Table 1> Mechanical properties of CFRP laminates

property	Unit	Carbon fiber	Prepreg
Tensile strength	GPa	3.6	1.8
Tensile modulus	GPa	343	135
Elongation	%	1.0	-
Density	g/cm ³	1.77	-
Yield(tex)		360	-
Filament diameter	μm	6.2	-
Resin content	wt%	-	36±2%

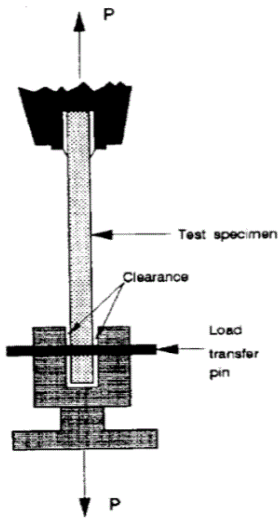


[Fig. 1] Configuration of specimen
(L=120mm, d=5mm)

2. 실험방법

CFRP 적층판의 베어링 강도시험은 [Fig.2]와 같은 장치를 사용하여 실험하였다. 시험편의 한쪽 편은 그립부에서 파손되는 것을 방지하기 위해 에폭시 접착제를 사용하여 알루미늄 탭을 붙여 위 지그에 직접 물리고 다른 한쪽 편은 시험편을 물릴 수 있도록 자체 제작한 지그를 사용하여 고정하였다. 시험편 구멍에 사용한 핀은 스테인리스강을 사용하였다. 실험은 용량 5ton의 만능시험기(Instron 4204)를 사용하여 실행하였으며,

이때 크로스헤드 속도는 2mm/min로 하였고, 하중-변위 선도는 X-Y기록계로 부터 얻었다. 실험의 결과는 각각의 시험편 형상 조건에 대하여 5번의 시험치를 평균하여 사용하였다. [Fig.2]는 시험편이 지그에 물린 것을 보여주는 실험장치의 개략도이다.



[Fig. 2] Configuration of pin bearing test fixture

핀 베어링강도 (σ_b)는 핀 하중 인장시험을 통해 얻은 파단 하중(P)을 식(1)에 대입하여 구하였다(ASTM D-953, 1987).

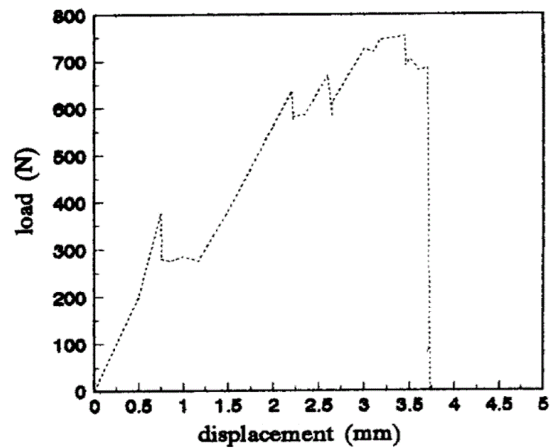
$$\sigma_b = \frac{P}{dt} \quad (1)$$

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 하중-변위 선도

[Fig. 3]은 섬유 방향이 [0/90]6s 로 적층된 CFRP laminates의 핀 하중에 대한 하중-변위 곡선을 나타내고 있다. 초기 파괴 개시점까지는 하중-변위가 일방향 적층재의 하중-변위 변화 양상

과 같은 모양으로 선형적으로 증가하였다. 이후 초기 파괴 개시점 후에는 하중을 지탱하는 단면적이 일시적으로 축소하여 하중이 순간적으로 급격히 저하했다가 다시 상승하는 팝인(pop-in)현상이 일어나고 있음을 볼 수 있다. 1차 팝인 이후에는 파괴에 이르는 변위의 거의 중간에 이를 때까지 하중과 변위는 선형적으로 증가하였고, 이후 추가적인 2~3회의 팝인 현상 후에 파괴에 이르는 것을 알 수 있다.



[Fig. 3] Load-displacement curve of pin-loaded [0/90]6s CFRP laminates

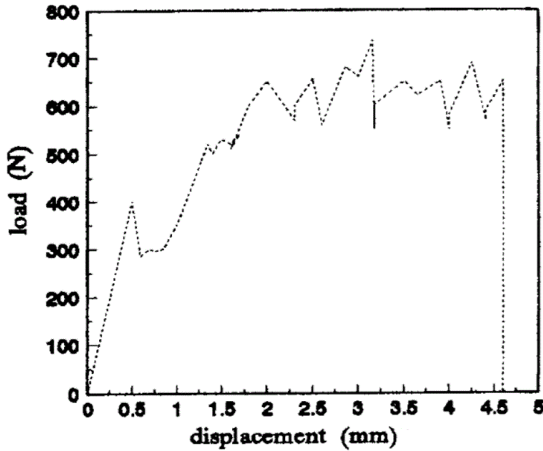
[Fig. 4]는 섬유의 방향이 [0/±45/90]3s 로 적층된 CFRP laminates의 하중-변위 곡선을 나타내고 있다. 45° 층의 삽입으로 하중-변위 곡선은 더욱 복잡한 양상을 보이고 있는데, 섬유방향이 다른 이웃면에서의 하중 지탱과 이어지는 파괴가 계속적으로 반복되고 여러 번의 팝인 과정을 거치면서 변위가 신장된 후에 최종 파단에 이르는 것을 알 수 있다.

2. 파괴 모드

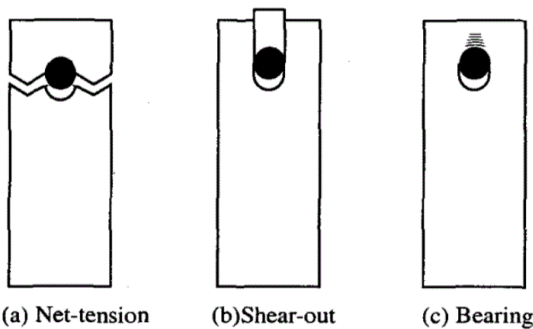
복합재료를 핀으로 결합하는(pinned-joint) 연결부에서의 파손 형태는 [Fig. 5]와 같이 순수 인장(net-tension), 전단(shear-out) 및 베어링(bearing)의 3가지 기본 모드와 인장과 전단이 복합적으로 일

어나는 벽계 인장(cleavage-tension) 모드 등이 있다. 그림에서 (a)와 (b) 모드는 인장 및 전단응력을 초과하는 연결부의 완전 파단을 보이고 있으며, (c)는 핀 구멍 둘레의 절반에서 압축 하중을 받는 압축 파손의 형태를 나타내고 있다.

본 실험의 결과 일방향 적층재의 경우는 대부분의 시험편에서 전단파괴 형태의 모양을 보였으며, $[0/\pm 45/90]_3s$ 적층재의 시험편에서는 베어링 파괴 모드가 주로 관찰됐다. 한편 $[0/90]_6s$ 적층재의 경우는 양 시험편의 파괴모드가 혼합되어 나타났다. 즉 일부의 시험편에서는 전단파괴를 보였고 일부에서는 베어링파괴 양상을 나타냈다.



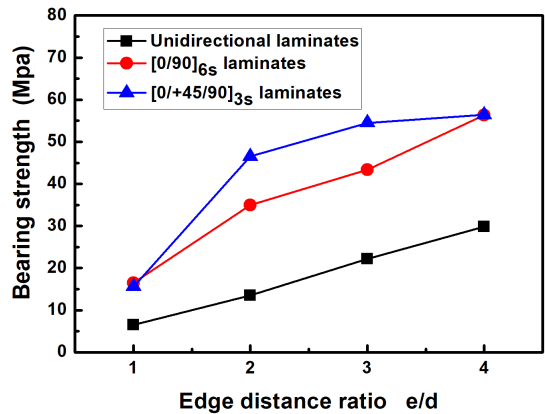
[Fig. 4] Load-displacement curve of pin-loaded $[0/\pm 45/90]_3s$ CFRP laminates



[Fig. 5] Failure mode of pin-loaded laminates

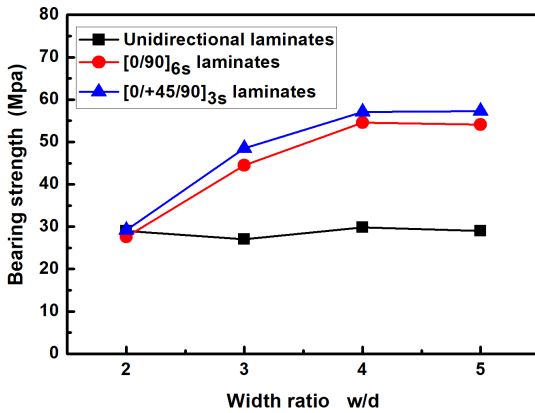
3. 시험편 형상의 영향

[Fig. 6]은 여러 가지 섬유방향을 가진 CFRP 적층재에 있어서 핀 베어링 강도에 미치는 끝단거리(e)의 영향을 나타낸 것이다. 핀 베어링 강도는 일방향, $[0/90]_6s$, $[0/\pm 45/90]_3s$ 적층재 순으로 증가하는 것으로 나타났다. 또한 시험편의 형상에 관계없이 끝단거리(e)가 증가함에 따라 핀 베어링 강도는 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 다만 $[0/\pm 45/90]_3s$ 사교적층판의 경우, 끝단거리 비(e/d)가 1 이나 4의 경우 즉, 작거나 아주 클 경우에는 $[0/90]_6s$ 적층재와 비슷한 강도를 나타냈으나, 끝단거리 비가 중간범위인 2나 3의 경우에는 $[0/90]_6s$ 적층재 보다 핀 베어링 강도가 증가하는 경향을 나타냈다.



[Fig. 6] Effect of edge distance ratio on bearing strength for various type CFRP laminates

[Fig. 7]은 여러 가지 섬유방향을 가진 CFRP 적층재에 있어서 핀 베어링 강도에 미치는 판 폭(w)의 영향을 나타낸 것이다. 일방향 적층재는 판 폭에 관계없이 거의 일정한 핀 베어링 강도를 나타냈다. 한편 $[0/90]_6s$ 적층재 및 $[0/\pm 45/90]_3s$ 적층재의 경우는 판폭이 증가함에 따라 핀 베어링 강도가 증가하다가 판폭비가 4 이상으로 커지면서 더 이상 강도는 증가하지 않고 일정한 수준으로 유지됨을 알 수 있다.



[Fig. 7] Effect of width ratio on bearing strength for various type CFRP laminates

IV. 결론

섬유방향을 달리 하는 3가지 형태의 CFRP 적층판을 제작하고, 핀의 위치 즉, 끝단거리와 판폭의 변화에 따른 핀 체결부의 파괴거동을 실험적으로 고찰하여 다음의 결론을 얻었다.

1. 모든 적층재에서 끝단거리가 커짐에 따라 핀 베어링 강도는 증가하였으며, 일방향 적층재, [0/90]_{6s} 적층재, [0/±45/90]_{3s} 적층재 순으로 강도가 증가하였다.

2. 일방향 적층재는 판폭에 관계없이 거의 일정한 핀 베어링 강도를 나타냈고, [0/90]_{6s} 적층재 및 [0/±45/90]_{3s} 적층재의 경우는 판폭이 증가함에 따라 핀 베어링 강도가 증가하지만 판폭비가 4 이상으로 커지면 강도는 더 이상 증가하지 않고 일정한 수준으로 유지되었다.

3. 일방향 적층재의 경우는 전단파괴 형태의 모양을 보였으며, [0/±45/90]_{3s} 적층재의 시험편에서는 베어링 파괴 모드가 주로 관찰됐다. 한편 [0/90]_{6s} 적층재의 경우는 양 시험편의 혼합된 파괴모드가 나타났다.

References

- ASTM D-953(1987). Standard Test Methode for Bearing Strength of Plastic Properties, 301~305.
- Caprino G(2005). Pin and bolt bearing strength of fibreglass/aluminium laminates, Composites Part A 36, 1307~1315.
- Eisenmann JR and Leonhardt JL(1981). Improving Composite Bolted Joint Efficiency by Laminate Tailoring, ASTM STP 749, 117~130.
- Jung D(1977). Stress around pin-loaded hole in elastically orthotropic of isotropic plates, J. of Composite Materials Vol. 11, 313~331.
- Kim JD(2016). Comparison of Wear Property Between Metal and Polymer Matrix Composites, J. of FMSE 29(6), 1875~1881.
- Kim RY and Whitney JM(1976). Effect of temperature and moisture of pin-bearing strength of composites, J. of Composite Materials Vol. 10, 149~155.
- Li HS, Xia S and Luo DM(2014). A probabilistic analysis for pin joint bearing strength in composite laminates using Subset Simulation, Composites Part B 56, 780~789.
- Mallick PK and Little RE(1985). Pin Bearing Strength of Fiber Reinforced Composite Laminates. Proceedings Advanced Composites, ASM, 750~758.
- Scaler FL, Cloud GL and Capello F(1998). A study on the effect of clearance and interference fit in a pin-loaded cross-ply FGRP laminate, J. of Composite Materials 32(8), 782~802.
- Xiao Y, Wang WX and Takeo Y(2000). The effective friction coefficient of a laminate composite, and analysis of pin-loaded plates, J. of Composite Materials 34(1), 69~87.
- Yoon SH, Hwang YE and Kim CG(2012). Failure Behavior of Pin-jointed Cylindrical Composites Using Acoustic Emission Technique, J of KSPE 16(4), 9~15.

- Received : 21 June, 2019
- Revised : 09 July, 2019
- Accepted : 30 July, 2019