

일방향 CFRP 복합재료의 핀 베어링강도에 관한 시험편 치수의 영향

전진탁* · 김재동** · 고성위

*주문진수산공업고등학교 · **경상대학교 · 부경대학교

(1997년 8월 30일 접수)

Effect of Specimen Geometries on the Pin Bearing Strength of Unidirectional CFRP Composites

Jin-Tak Jeon, Jae-Dong Kim and Sung-Wi Koh

*Chumunjin Fishery Technical High School · **Kyongsang National University ·
Pukyong National University

(Received August, 30, 1997)

Abstract

The pin bearing strength is one of the most important design parameters for mechanical joints composed of fiber reinforced composites. Thus the effect of the edge distance and the width of specimen on the pin-bearing strength of unidirectional CFRP composites were experimentally investigated in this paper. As results, the failure modes and the pin bearing strength of mechanical joints turned out to depend on the edge distance and also the width of specimen. The failure of specimen with low ratio of width to hole diameter was caused by the net tension from the hole boundary, on the other hand, the failure of specimen with low ratio of edge distance to hole diameter was caused by the shear-out. The bearing strength in case of the failure by shear-out was quite lower than that in case of failure by net tension.

서 론

복합재료는 방향성을 이용하여 우수한 기계적 성질을 얻을 수 있으며, 요구되는 조건에 따라 재료의 물성을 재단(tailoring)하여 새로운 재료설계 개념을 실현시킬 수 있는 첨단 신소재로 그 응용의 범위가 날로 확대되고 있다^{1,2)}. 복합재료를 단순히 기존의 재료에 대한 대체재료로서가 아니라 이방성 재료의 특이한 물성을 응용한 구조물의 주재료로 사용하기 위해서는 복합재료 여러분야에서의 이론 연구 및 실험자료의 축적이 필요하다³⁾.

섬유강화 플라스틱복합재료(FRP)를 결합하는 방법 중 볼트, 리벳, 핀 등을 이용하는 기계적 결합 방법은 비교적 오랜 역사를 가지고 있는 방법으로, 부품의 분해 결합 및 보수가 쉽고 결합부의 검사가 용이하며 접착결합과는 달리 열 및 습기 등의 영향이 큰 문제가 되지 않으나 볼트, 핀, 리벳 등으로 인한 기계 구조물의 무게 증가를 초래하며 드릴 구멍으로의 응력집중이 일어나 파손의 원인이 되는 단점이 있다. 복합재료에서 기계적 결합부의 파손 형태는 금속 재료의 경우와는 달리 여러 형태로 나타나며, 적층의 섬유방향 및 시험편

의 형상 등에 따라 순수 인장파손(net tension failure), 전단파손(shear-out failure) 및 베어링 파손(bearing failure) 등과 같은 복잡한 양상을 보인다⁴⁾. 기계적 결합부의 파괴를 다룬 보고는 여러 논문^{5)~11)}에서 볼 수 있다.

기계적 결합부의 강도 평가에 많이 이용되는 핀 베어링강도에 관한 연구결과들을 고려하여 보면 시험편 폭과 구멍이 있는 부분에서의 끝단거리의 변화 그리고 섬유방향에 따른 핀 베어링강도에 대하여 단편적인 연구결과는 있으나 종합적인 고찰이 미흡한 실정이다. 또한 국산 CFRP 복합재료에 대한 핀 베어링강도에 관한 연구결과는 거의 찾아보기 힘들다.

따라서 본 연구에서는 CFRP 복합재료의 응용상의 중요한 설계변수의 기초적인 자료를 제공하기 위하여, 핀 베어링강도에 관한 종합적인 연구의 일환으로 우선 국산 일방향 탄소섬유강화 에폭시 복합재료에 대하여 시험편 폭과 구멍이 있는 부분에서의 끝단거리를 각각 4종류로 변화시켜 인장실험을 행하여 강도를 측정 한 후 핀 베어링 인장강도 및 파괴모드를 상호 비교·검토하였고, 또한 파면을 SEM 관찰하여 이들에 의한 파괴기구를 고찰하였다.

재료 및 실험방법

1. 재료 및 시험편

실험에 사용한 재료는 국산(H사) CF/EP 프리프레그를 [0]_{12S}로 24플라이 적층·성형하였으며, 프리프레그의 기계적 성질은 Table 1과 같다. 복합판의 성형시 일정 섬유함유율($v_f=64\%$)의 유지와 제품치수의 변동을 억제하기 위하여 금형(250mm×250mm)을 사용하였으며, 성형온도는 130℃, 압력은 3.7MPa, 유지시간은 90분으로 하였다.

성형이 끝난 적층판은 다이아몬드 커터를 사용하여 가공하였고, 시험편의 핀 구멍은 드릴가공하였으며 드릴가공시 핀 구멍의 정밀한 가공을 위하여 보조 철판을 시험편의 양면에 맞물려 가공하였다. 시험편은 그림부에서 파손되는 것을 방지하기 위하여 알루미늄 탭을 시험편의 한쪽 단에 에폭시

접착제를 사용하여 접착시켰으며, 가공된 시험편의 형상은 Fig. 1과 같다.

시험편은 핀 구멍 지름 5mm, 시험편 길이 120mm, 시험편 두께 2.7mm는 일정하게 유지하고, w/d가 일정한 상태에서 e/d를 1에서 4로 4종류, e/d가 일정한 상태에서 w/d를 2에서 5로 4종류로 각각 변화시켜 가공하였다.

Table 1 Mechanical properties of carbon fiber and prepreg

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	-
Filament count		12,000	-
Yield(tex)		360	-
Filament diameter	μm	6.2	-
Resin content	wt%	-	36±2%

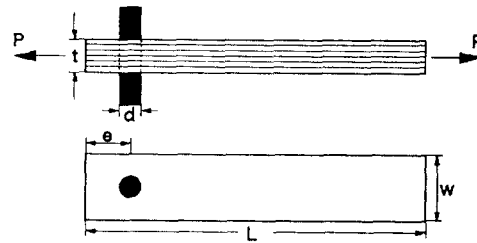


Fig.1 Specimen geometries. (d=5mm, t=2.7mm, L=120mm)

2. 실험 방법

핀 베어링강도(6b)는 Fig.1과 같은 핀 구멍이 있는 시험편을 시험편의 한쪽 끝은 조오에 직접 물리고 다른 한쪽 끝은 시험편을 물릴 수 있도록 자체 설계·제작한 지그를 사용하여 설치한 후 실험하였으며, 시험편 구멍에 사용한 핀은 하중을 충분히 견딜 수 있는 강도를 가진 스테인리스강을 사용하였다. Fig.2는 시험편이 핀과 지그에 물린 상태의 개략도이다.

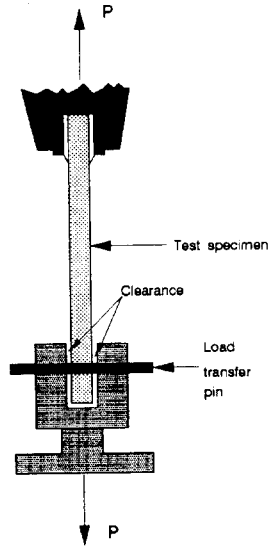


Fig.2 Schematic representation of pin-bearing testing apparatus.

시험기는 용량 5ton의 만능시험기(Instron 4204)를 사용하였고, 이때 크로스헤드 속도 2mm/min의 조건에서 행하였으며, 하중-하중선 변위선도는 X-Y기록계를 이용하여 실험결과를 얻었다. 가공된 시험편은 각각의 시험편 형상 조건에 대하여 최소 5개씩을 사용하여 실험하였다.

일반적인 재료에 있어서 구멍의 순단면(net section)의 파괴를 위해 요구되는 인장하중은 구멍이 없는 전체단면(gross section)에 걸리는 하중에 비하여 작다.

구멍이 있는 경우 파괴응력 σ_N 은 식(1)과 같고, 구멍이 없는 경우의 전체단면에서의 파괴응력 σ_G 는 식(2)와 같다.

$$\sigma_N = \frac{P}{(w-d)t} \quad (1)$$

$$\sigma_G = \frac{P}{wt} \quad (2)$$

여기서 P는 파괴하중, w는 시험편 폭, d는 핀 구멍의 지름, t는 시험편의 두께이다.

이들 단면에서 작용한 인장강도 효율을 순단면 혹은 전체단면에서의 응력집중의 평균 형태로 표현하면 다음 두 식과 같다.

$$K_N = \frac{\sigma_\infty}{\sigma_N} \quad (3)$$

$$K_G = \frac{\sigma_\infty}{\sigma_G} \quad (4)$$

여기서 K_N 은 순단면의 인장강도 효율, K_G 는 전체단면의 인장강도 효율이고, σ_∞ 는 재료의 이론적 인장강도이다.

한편 구멍에서의 핀 베어링은 구멍 둘레의 절반에서 하중을 받으며 하중을 받는 부분에서는 압축응력이 발생한다. 그러므로 실제적인 설계에 있어서 핀 베어링강도(σ_b)는 대개 구멍의 횡단면에 대해 일정하게 작용하는 평균 설계응력으로 표현하며 식(5)와 같다.

$$\sigma_b = \frac{P}{dt} \quad (5)$$

결과 및 고찰

1. 시험편 형상의 영향

Fig.3은 $[0]_{12s}$ 즉 일방향 적층재의 경우에 하중-하중선 변위선도를 나타낸 것이다. 이때 구멍의 지름에 대한 끝단거리의 비, e/d 는 4, 구멍의 지름에 대한 시험편 폭의 비, w/d 가 4일 때 시험한 결과이다. 하중은 최대하중까지 선형적으로 증가하다가 최대하중에 도달하면 즉시 파괴가 발생하는 양상을 보였다. 이것은 일방향 적층재이므로 구멍 부근에서 하중에 대한 저항치가 낮아 전단파괴가

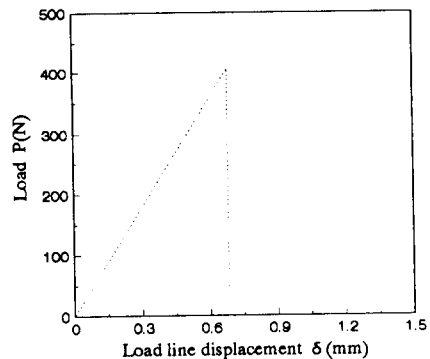


Fig.3 P- δ curve of unidirectional laminate. ($e/d=4, w/d=4$)

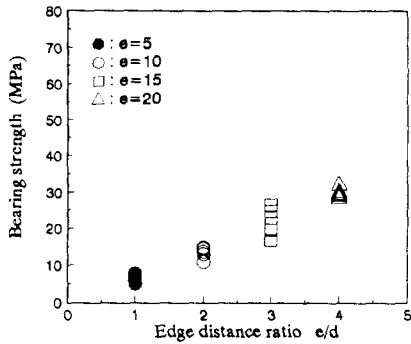


Fig.4 Variation of pin-bearing strength of unidirectional laminates.($e/d=1$ to 4, with $w/d=4$)

발생하기 때문이다.

Fig.4는 일방향 CFRP 복합재료의 시험편에서 구멍의 지름에 대한 시험편 폭의 비, $w/d=4$ 일 때 ($w=20\text{mm}$) 구멍의 지름에 대한 끝단거리의 비, e/d 를 1에서 4까지 변화시켰을 경우의 핀 베어링 강도를 나타낸 것이다. e/d 가 1, 2, 3, 4로 변화함에 따라 핀 베어링강도는 6.5, 13.5, 22.2, 29.8MPa로 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

Fig. 5는 일방향 탄소섬유강화 복합재료에서 핀 베어링강도에 관한 시험편 폭의 영향을 고찰하기 위하여 구멍의 지름에 대한 끝단거리의 비, $e/d=4$ 일 때($e=20\text{mm}$) 각각의 적층재에 대하여 w/d 의 값을 2에서 5까지 변화시켰을 때의 핀 베어링강도

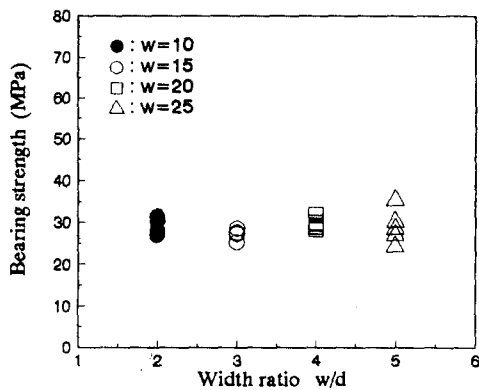
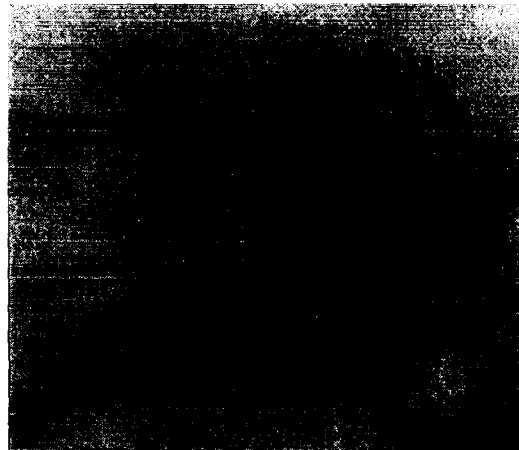


Fig.5 Variation of pin-bearing strength of unidirectional laminates.($w/d=2$ to 5, with $e/d=4$)

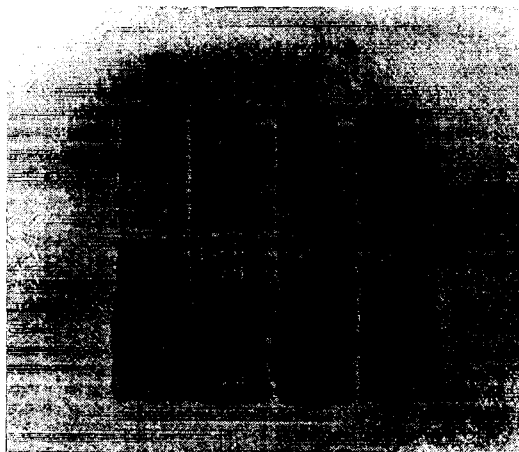
를 나타낸 것이다. 구멍의 지름에 대한 끝단거리의 비, e/d 가 변화하더라도 핀 베어링강도는 거의 일정한 값을 나타내고 있다.

2. 파면 해석

Fig.6은 일방향 CFRP 복합재료에서 핀 베어링 강도 실험을 행한 파단 시험편을 나타낸 것이다. (a)는 $[0]_{12s}$ 적층재에서 끝단거리가 동일할 때 시험편 폭의 변화에 따른 파단 시험편이고, (b)는 $[0]_{12s}$ 적층재에서 시험편 폭이 동일할 때 끝단거리의 변화에 따른 파단 시험편을 나타낸 것이다. $[0]_{12s}$ 적층재에서는 시험편 폭이나 끝단거리가 변하더라도 모두 전단파괴 양상을 보이고 있다.

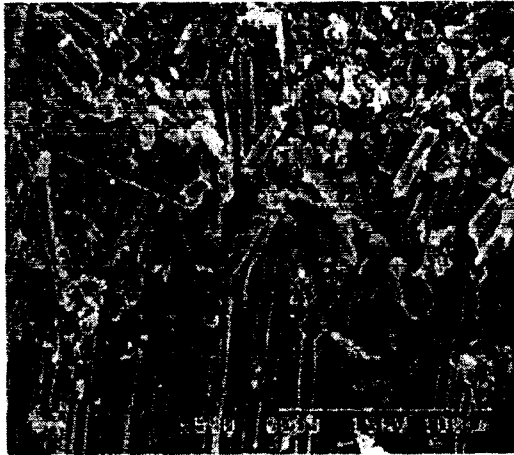


(a) $[0]_{12s}$ specimens

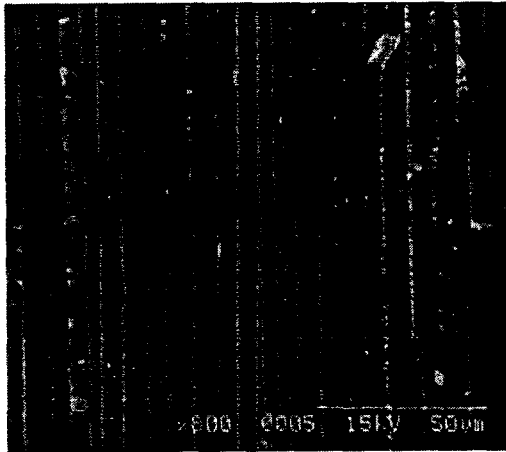


(b) $[0]_{12s}$ specimens

Fig.6 Fracture modes of bearing test for CFRP laminates.



(a) hole boundary



(b) fracture surface of hole outside

Fig.7 SEM micrographs of fracture surfaces [0]_{12s} CFRP.

Fig.7은 핀 베어링부의 파면을 SEM 사진촬영하여 관찰한 것으로 (a)는 압축 하중을 받는 핀 베어링 상부 접촉면을, (b)는 핀 구멍 상부에서 끝단 방향으로 조금 떨어진 부분의 파면을 각각 나타내고 있다. 이 사진으로부터 압축하중을 받는 핀 베어링 상부는 섬유와 매트릭스의 손상 및 파괴 정도가 심하다는 것을 알 수 있다. 핀에 의해 압축력을 직접 받는 구멍주위의 섬유와 매트릭스는 계면분리(debonding), 심한 좌굴(buckling), 그리고 섬유파단 및 브루밍(brooming)을 관찰할 수 있다. 그러나 구멍에서 약간 떨어진 부분에서는 섬유 매트릭스의 계면분리가 일시에 일어나면서 매트릭스의 소성변형이 거의 없이 전단파괴 되었다.

릭스의 계면분리가 일시에 일어나면서 매트릭스의 소성변형이 거의 없이 전단파괴 되었음을 알 수 있다.

결 론

본 연구에서는 국산 일방향 탄소섬유강화 에폭시복합재료(CF/EP)를 사용하고, 시험편의 기하학적 형상은 끝단거리와 폭을 각각 4종류로 변화시켜, 인장실험을 행하여 강도를 측정 후 핀 베어링강도 및 파괴모드를 비교·검토하였고, 또한 파면을 SEM관찰하여 이들에 의한 파괴기구를 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 끝단거리는 핀 베어링강도에 큰 영향을 주며 끝단거리가 증가함에 따라 핀 베어링강도는 상승한다. 그러나 시험편 폭이 변함에 따라 핀 베어링강도는 거의 일정하여 시험편 폭의 영향이 매우 적음을 알 수 있다.

2) [0]_{12s} 적층판의 경우의 인장시험시 파단양상은 시험편 폭이나 끝단거리가 변하더라도 모두 전단파괴 양상을 보이고 있다

3) 핀에 의해 압축력을 직접 받는 구멍주위의 섬유와 매트릭스는 계면분리(debonding), 심한 좌굴(buckling), 그리고 섬유파단 및 브루밍(brooming)을 관찰할 수 있다. 그러나 구멍에서 약간 떨어진 부분에서는 섬유 매트릭스의 계면분리가 일시에 일어나면서 매트릭스의 소성변형이 거의 없이 전단파괴 되었다.

참고문헌

- 1) Eisenmann, J.R. and Leonhardt, J.L.(1981) : Improving Composite Bolted Joint Efficiency by Laminate Tailoring. ASTM STP 749, 117-130.
- 2) Bailie, J.A., Duggan, M.F., Bradshaw, N.C. and McKenzie, T.G.(1981) : Design Data for Graphite Cloth Epoxy Bolted Joint at Temperature up to 450K. ASTM STP 749, 165-180.
- 3) Wu, H.F. and Slagter, W.J.(1994) : An Investigation on the Bearing Test Procedure for Fiber-Reinforced Aluminium Laminates. J. of Materials Science 29, 4592-4603.

일방향 CFRP 복합재료의 핀 베어링강도에 관한 시험편 치수의 영향

- 4) Mallick, P.K.(1988) : Fiber-Reinforced Composites. Marcel Dekker. INC., 263-265, 417-429.
- 5) Lessard, L.B. and Shokrieh, M.M.(1995) : Two-Dimensional Modeling of Composite Pinned-joint Fracture. *J. of Composite Materials* 29(5), 671-697.
- 6) Dreger, D.R.(1980) : Joining Advanced Composites. *Machine Design*, 156-159.
- 7) Mallick, P.K. and Little, R.E.(1985) : Pin Bearing Strength of Fiber Reinforced Composite Laminates. *Proceedings Advanced Composites*, ASM, 750-758.
- 8) Agarwal, B.L.(1980) : Static Strength Prediction of Bolted Joints in Composite Materials. *AIAA Journal* 11, 1371-1375.
- 9) ASTM D-953(1987) : Standard Test Methode for Bearing Strength of Plastic Properties. 301-305.
- 10) ASTM E-238(1984) : Standard Test Method for Pin-Type Bearing Test of Metallic Materials. 394-399.
- 11) Zinkham, R.E. and Parsons, C.E.(1982) : Pin Bearing Testing, *Metal Handbook*. ASM 8, 59-61.