

## CFRP 사교적층판의 핀 베어링강도에 관한 연구

전진탁\* · 박기호 · 김엄기\*\* · 고성위

\*주문진실업고등학교 · \*\*공주대학교 · 부경대학교

(1998년 3월 11일 접수)

### A Study on the Pin Bearing Strength of Angle Ply CFRP Composites

Jin-Tak Jeon\*, Ki-Ho Park, Amkee Kim\*\* and Sung-Wi Koh

\*Chumunjin Technical & Commercial High School, \*\*Kongju National University, Pukyong National University

(Received March 11, 1998)

#### Abstract

The purpose of this paper is to investigate the effect of the specimen geometries on the pin bearing strength of the angle ply carbon fiber reinforced composites. The effect of the edge distance and the specimen width on the pin bearing strength of angle ply CFRP composites are experimentally investigated in this paper. As results, the failure mode and pin bearing strength of mechanical joints turned out to depends on the stacking sequence and specimen geometries such as the edge distance and the specimen width. The higher pin bearing strength obtained for the angle ply CFRP composites is attributed to a combination of debonding, pull out, buckling and breakage of fiber and also the matrix cracking.

#### 서 론

대부분의 구조물은 많은 부품들이 서로 결합되어 원하는 기능을 발휘할 수 있도록 제작되는데, 고분자 복합재료는 일반 금속재료의 결합에 많이 이용되는 용접 등의 방법은 이용할 수 없고 일반적으로 볼트, 리벳 또는 핀으로 결합하는 기계적 결합(mechanical joint)과 접착제를 사용하여 결합하는 접착결합(bonded joint)이 주로 사용되고 있다<sup>1)</sup>. 그러나 이러한 결합방법으로 제작된 구조물에 있어서 결합부는 가장 취약한 부분이며 또한 항복에 의한 국부적인 높은 응력의 재분산이 어려우므로 결합부 설계는 복합재의 응용상 매우 중요

한 문제로 대두되고 있다. 접착결합은 한번의 결합으로 영구결합이 되므로 분해 및 결합이 자주 예상되는 부분에는 사용이 곤란하며 접착부의 품질 상태를 검사하기 어려운 점, 열 및 습기에 따른 접착제의 성능 저하를 가져올 가능성 등으로 기계적 결합 방법에 비해 신뢰도가 떨어지므로 하중을 많이 받는 구조물에의 사용에는 주의를 요한다. 그러나 접착결합은 이러한 단점에도 불구하고 시공상의 간편함으로 최근 그 이용이 증가하는 추세에 있으며 신뢰도를 높이기 위한 연구가 많이 진행되고 있는데, 기계적 결합을 함께 사용함으로써 안전성을 향상시킬 수 있을 것이다<sup>2),3)</sup>.

기계적 결합부의 강도 평가에 많이 이용되는 핀

베어링강도는 시험편 형상, 재료 및 제조 방법 등에 의해 영향을 받는데 이 분야의 연구로서 지금까지의 보고된 연구결과는 파괴기구<sup>4)</sup>, 적층순서 (stacking sequence)<sup>5),6)</sup>, 매트릭스의 재료<sup>7)</sup>, 핀 구멍의 압입<sup>8)</sup>, 피로하중<sup>9)</sup>, 시험편 치수<sup>10),11)</sup> 등에 관하여 다수 연구되었으나 CFRP 복합재료의 핀 베어링강도에 영향을 주는 인자에 대한 종합적인 고찰이 미흡함을 알 수 있다. 또한 국산 CFRP 복합재료에 대한 핀 베어링 강도에 관한 연구결과는 매우 희박한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 CFRP 복합재료의 응용상의 중요한 설계변수의 기초적인 자료를 제공하기 위하여, 핀 베어링강도에 관한 종합적인 연구의 일환으로 전 보<sup>11)</sup>에 이어서 우선 국산인 탄소섬유강화 복합재료에 대하여 섬유방향과 시험편 형상의 영향을 고찰하였다. 섬유방향은 [0/90]<sub>6s</sub> 및 [0/±45/90]<sub>3s</sub>의 2종류, 시험편의 기하학적 형상은 끝단거리와 폭을 각각 4종류로 변화시켜 핀 베어링 인장강도 및 파괴모드를 상호 비교·검토하였고, 또한 파괴기구를 SEM에 의하여 고찰하였다.

## 재료 및 실험방법

### 1. 재료 및 시험편

실험에 사용한 재료는 전 보<sup>11)</sup>에서와 동일하게 국산(H사) CF/EP 프리프레그를 [0/90]<sub>6s</sub> 및 [0/±45/90]<sub>3s</sub>의 두 조건으로 섬유방향을 달리하여 각각 24프라이로 적층·성형하였다. 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 적층판을 사용하여 시험편 가공은 전 보<sup>11)</sup>와 동일하게 하였으며, 가공된 시험편은 핀 구멍 지름 5mm, 시험편 길이 120mm, 시험편 두께 2.7mm는 일정하게 유지하고, 구멍의 지름에 대한 시험편 폭의 비, w/d가 일정한 상태에서 구멍의 지름에 대한 끝단거리의 비, e/d를 1에서 4로 4종류로 변화시키고 또한, e/d가 일정한 상태에서 w/d를 2에서 5로 4종류로 각각 변화시켜 가공하

였다.

## 2. 실험 방법

실험방법은 전 보<sup>11)</sup>에 상세히 기술되어 있고 모든 조건이 가능한 동일 상태가 되도록 하였으며, 본 보에서는 간략하게 설명한다. 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. 시험기는 용량 5ton의 만능시험기(Instron 4204)를 사용하였고, 이때 크로스헤드 속도는 2mm/mm에서 행하였으며, 하중-하중선 변위선도는 X-Y기록계를 이용하여 실험결과를 얻었다. 가공된 시험편은 각각의 시험편 형상 조건에 대하여 최소 5개씩을 사용하여 실험하였다.

한편 핀 베어링강도는 실제적인 설계에 있어서 대개 구멍의 횡단면에 대해 일정하게 작용하는 평균 설계응력으로 표현되는 식으로 계산하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 시험편 치수의 영향

#### 1.1. 하중-하중선 변위선도

Fig.1은 [0/90]<sub>6s</sub>인 적층판에서 구멍의 지름에 대한 끝단거리의 비, e/d=4, 구멍의 지름에 대한 시험편 폭의 비, w/d=4일 때 하중-하중선 변위선도를 나타낸 것이다. 초기 파괴 개시까지의 하중과 핀 구멍의 신장은 선형적으로 증가하여 일방향 적층판의 형태로 진행되고 초기 파괴에 의한 팝-인(pop-in)현상 이후 하중을 지탱하는 단면적의 축소로 일시적으로 하중이 떨어진 후 다시 2차, 3차의 파괴가 연속적으로 일어난 다음 최종 파단에도달함을 알 수 있다.

Fig.2는 적층순서가 [0/±45/90]<sub>3s</sub>인 사교적층판에서 e/d와 w/d가 각각 4일 때 하중-하중선 변위선도를 나타낸 것이다. [0/90]<sub>6s</sub>인 적층재와 비교하여 보면, 45°층의 삽입으로 섬유방향이 다른 이웃면에서의 파괴에 의한 팝-인과 하중 지탱하는 단면

적의 축소에 의한 일시적인 하중 감소가 연속적으로 일어나고, 핀 구멍은 높은 결합강도를 감당하기 때문에 더욱 신연되고 그후 최종 파단하는 복잡한 하중-하중선 변위선도를 보이고 있다. 위의 결과를 전 보<sup>11)</sup>의 결과와 비교해보면  $[0/90]_{6s}$  및  $[0/\pm 45/90]_{3s}$  적층판은 일방향인  $[0]_{12s}$  적층판에 비해 각각 1.8에서 1.9배 정도 높은 핀 베어링강도를 나타낸다.

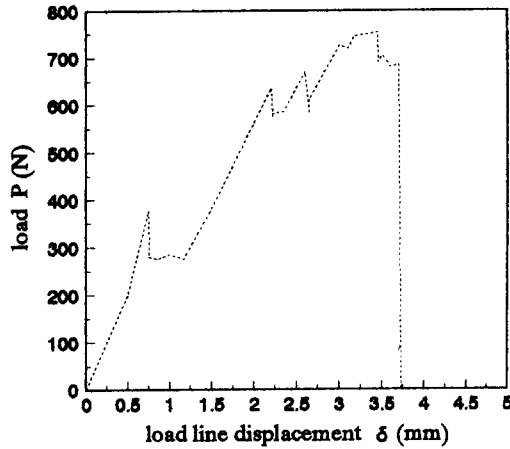


Fig.1 P- $\delta$  curve of  $[0/90]_{6s}$  laminates( $e/d=4$ ,  $w/d=4$ ).

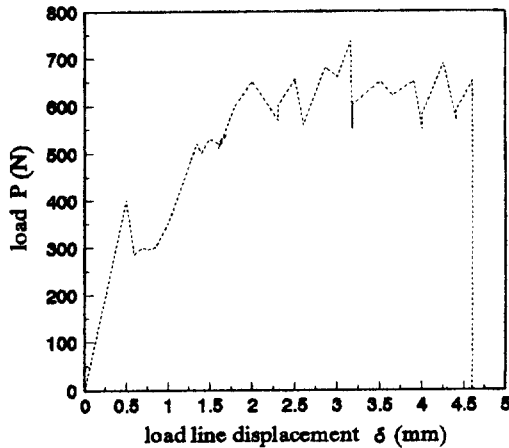


Fig.2 P- $\delta$  curve of  $[0/\pm 45/90]_{3s}$  laminates( $e/d=4$ ,  $w/d=4$ ).

### 1.2. 끝단거리의 영향

Fig.3 및 4는 섬유방향이 각각  $[0/90]_{6s}$ ,  $[0/\pm 45/90]_{3s}$ 인 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 베어링강도를 나타낸 것이다.

Fig.3은 구멍의 지름에 대한 시험편 폭의 비,  $w/d=4$ 일 때  $[0/90]_{6s}$ 인 적층재의 시험편에서 끝단거리의 변화에 따른 핀 베어링강도의 변화를 나타낸 것이다.  $e/d$ 가 1, 2, 3, 4로 변화함에 따라 핀 베어링강도는 16.5, 35.0, 43.4, 56.3 MPa로 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 그러나,  $[0/\pm 45/90]_{3s}$ 인 사교적층판에서는 Fig.4에 나타낸 바와 같이  $e/d$ 가 1, 2, 3, 4로 증가함에 따라 15.6, 46.5,

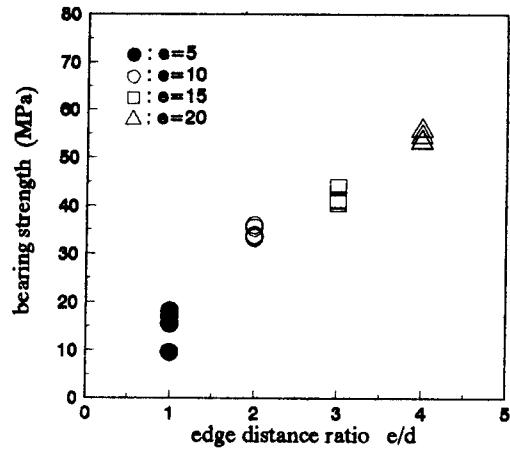


Fig.3 Variation of pin bearing strength of  $[0/90]_{6s}$  laminates( $e/d=1$  to 4, with  $w/d=4$ ).

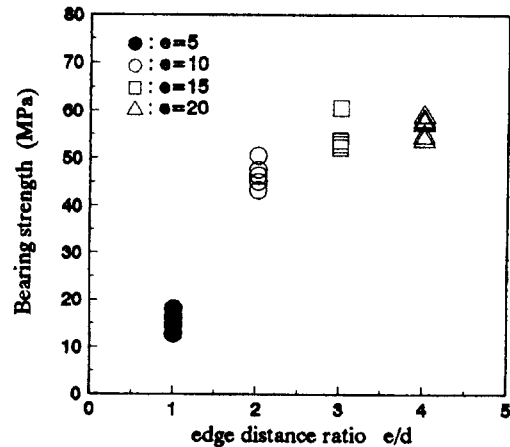


Fig.4 Variation of pin bearing strength of  $[0/\pm 45/90]_{3s}$  laminates( $e/d=1$  to 4, with  $w/d=4$ ).

54.5, 56.4 MPa로 e/d의 값이 낮을 때 급격히 증가한 후 완만하게 증가함을 알 수 있다.

### 1.3. 시험편 폭의 영향

Fig. 5와 6은 핀 베어링강도에 관한 시험편 폭의 영향을 고찰하기 위하여 구멍의 지름에 대한 끝단 거리의 비, e/d=4일 때(e=20mm) 각각의 적층재에 대하여 w/d의 값을 2에서 5까지 변화시켰을 때의 핀 베어링강도를 나타낸 것이다. Fig.5는 [0/90]<sub>6s</sub>인 적층판에서 w/d가 2, 3, 4, 5로 변화함에 따라 핀 베어링강도는 27.6, 44.5, 54.6, 54.1 MPa로 되어 w/d=4일 때 최대가 됨을 알 수 있다. 이

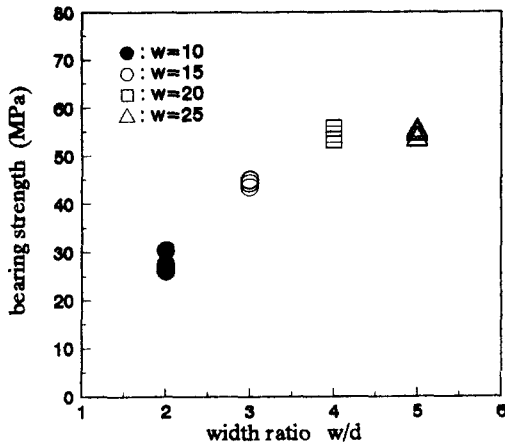


Fig.5 Variation of pin bearing strength of [0/90]<sub>6s</sub> laminates(w/d=2 to 5, with e/d=4).

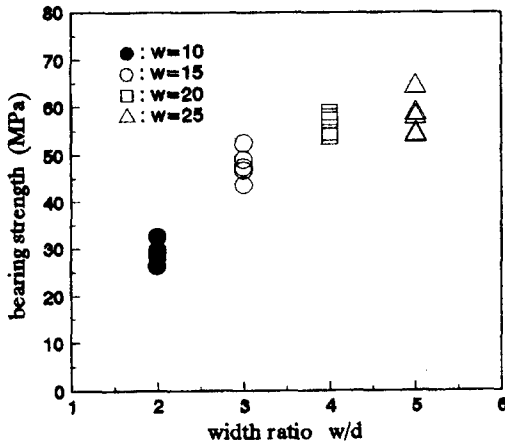


Fig.6 Variation of pin bearing strength of [0/±45/90]<sub>3s</sub> laminates(w/d=2 to 5, with e/d=4).

와 같은 결과는 Fig.6에서 알 수 있는 바와 같이 [0/±45/90]<sub>3s</sub>인 사교적층판에서도 w/d가 2, 3, 4, 5로 변화함에 따라 핀 베어링강도는 29.2, 48.5, 58.1, 57.3 MPa로 되어 w/d=4일 때 최대가 되어 [0/90]<sub>6s</sub>인 적층판의 결과와 유사한 경향을 얻었다.

### 2. 섬유방향의 영향

본 절에서는 핀 베어링강도에 영향을 주는 인자 중에서 섬유 방향에 대하여 고찰 하고자 한다. 우선 시험편 폭, 끝단거리와 같은 시험편 형상이 동일할 때 섬유방향이 하중-하중선 변위선도에 어떠한 영향을 미치는가를 살펴본다. [0/90]<sub>6s</sub> 적층재의 경우에는 하중-하중선 변위선도에 팝-인(pop-in) 현상이 발생하고 변위량이 일방향 적층재에 비하여 매우 많다. 또한, 하중-하중선 변위선도하의 면적도 일방향 적층재에 비교하여 수 배 이상으로 매우 크고 이것으로 인하여 파단에 대한 저항이 심하다는 것을 알 수 있다(Fig.1 참조). 이러한 경향은 [0/±45/90]<sub>3s</sub> 적층재의 경우에 하중-하중선 변위선도의 경향은 [0/90]<sub>6s</sub> 적층재와 유사하다는 것을 알 수 있다(Fig.2 참조). 파단 하중은 [0/90]<sub>6s</sub>와 [0/±45/90]<sub>3s</sub>의 적층재에 따라서 0.74 그리고 0.76kN으로, [0/±45/90]<sub>3s</sub>적층재의 경우가 파단 하중이 가장 높았다. 또한 다음절에 고찰하였듯이 [0/90]<sub>6s</sub> 적층재의 경우는 파단 양상이 전단 파괴 혹은 베어링 파괴이지만 [0/±45/90]<sub>3s</sub> 적층재의 경우에는 파단 양상이 모두 베어링 파괴이다.

다음은 시험편 형상 중에서 변화구멍의 지름에 대한 시험편 폭의 비가 일정할 때, [0/90]<sub>6s</sub>인 적층재의 시험편에서 끝단거리의 변화에 따른 핀 베어링강도는 e/d가 증가함에 따라 핀 베어링강도는 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 그러나, [0/±45/90]<sub>3s</sub>인 사교적층판에서는 e/d가 증가함에 따라 e/d의 값이 낮을 때 급격히 증가한 후 완만하게 증가함을 알 수 있다(Fig. 3, 4 참조). 또한 시험편 형상 중에서 구멍의 지름에 대한 시험편 폭의 비가 증가함에 따라 섬유방향에 따라 핀 베어링강도는 유사한 결과를 얻었다. [0/90]<sub>6s</sub> 및 [0/90]<sub>6s</sub> 적층재 두 가지의 경우 모두 w/d의 값이 증가함에 따라 핀 베어링강도는 증가하다가 w/d=4 부근에서 최고 값이 된 후 약간 감소하는 경향이 됨을 알 수 있

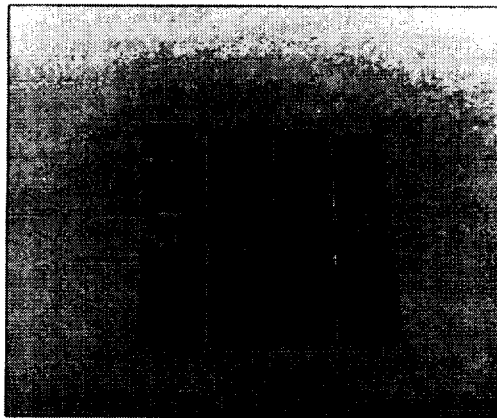
다(Fig.5, 6 참조).

### 3. 파면 해석

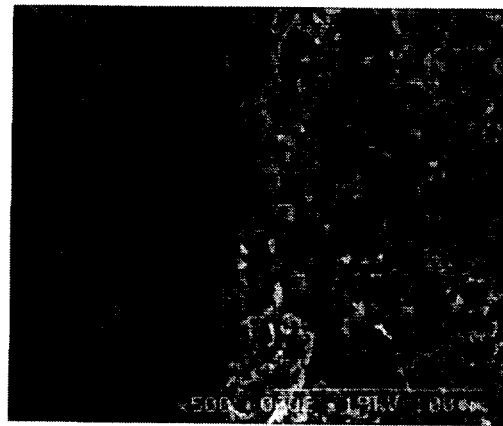
Fig.7은 각각의 적층재에서 핀 베어링강도 실험을 행한 파단 시험편을 나타낸 것이다. Fig.7(a)는  $[0/90]_{6s}$  적층판의 경우에 끝단거리의 변화에 따른 파단 시험편을 나타낸 것이다.  $e/d$ 가 작을 때는 전단파괴 양상을 보이지만  $e/d \geq 3$ 일 경우에는 베어링파괴 양상을 보이고 있다. 한편  $[0/\pm 45/90]_{3s}$ 인 시험편의 경우에는 끝단거리의 대소에 관계없이 베어링파괴 양상을 보이고 있음을 Fig.7(b)를 통하여 알 수 있다.

Fig.8 및 9는 핀 베어링부의 파면을 SEM관찰한

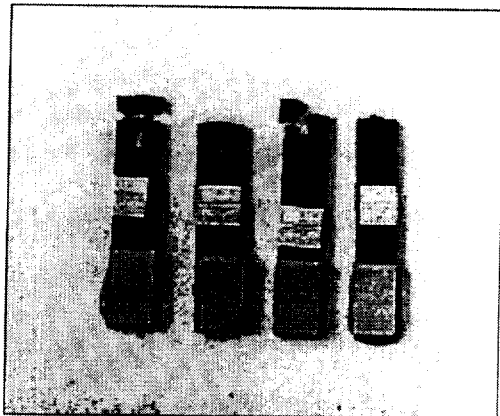
것으로 (a)는 압축 하중을 받는 핀 베어링 상부 접촉면을, (b)는 핀 구멍 상부에서 끝단 방향으로 조금 떨어진 부분의 파면을 각각 나타내고 있다. 모든 적층판의 경우에 압축하중을 받는 핀 베어링 상부는 섬유와 매트릭스의 손상 및 파괴 정도가 심하다는 것을 알 수 있다. Fig.8(a)는 섬유적층방향을  $[0/90]_{6s}$ 로 달리한 경우 구멍주위의 SEM사진으로서 하중을 직접 받는 구멍주위는  $90^\circ$  층에서 섬유와 매트릭스의 디본딩(debonding), 섬유파단(fiber breakage) 등이 심한 상태를 보이며,  $0^\circ$  층에서는 섬유 매트릭스의 디본딩으로 인한 매트릭스의 균열이 매우 심한 것이 관찰된다. 반면에 구멍에서 떨어진 곳에서는  $90^\circ$  층에서 섬유의 풀-



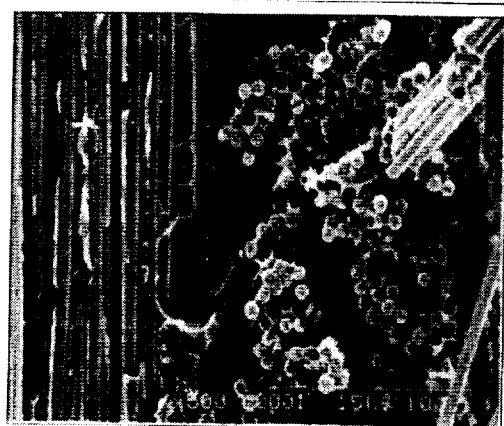
(a)  $[0/90]_{6s}$  specimens



(a) hole boundary



(b)  $[0/\pm 45/90]_{3s}$  specimens



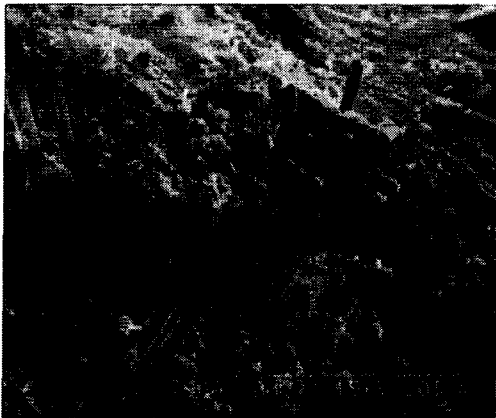
(b) fracture surface of hole outside

**Fig.7** Fracture modes of bearing test for CFRP composites.

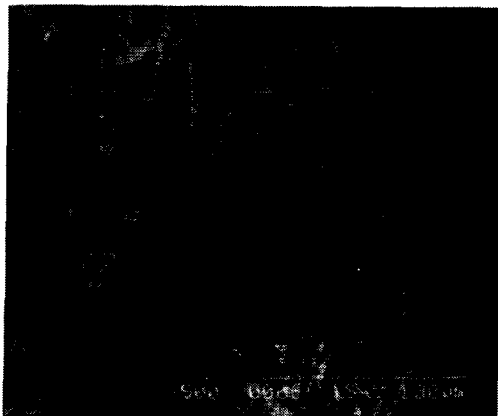
**Fig.8** SEM micrographs of fracture surfaces  $[0/90]_{6s}$  CFRP composites.

웃(pull-out)과 디본딩 및 섬유 파단을 볼 수가 있다(Fig.8(b) 참조).

Fig.9(a)는 섬유적층방향을  $[0/\pm 45/90]_{3s}$ 로 달린 경우 구멍주위의 SEM사진으로서 섬유와 매트릭스의 파괴가 대단히 심하고 복잡한 양상을 나타낸다. 구멍으로부터 조금 떨어진 부분의 파단면에서는  $0^\circ$  층 섬유의 디본딩, 좌굴(buckling) 그리고 파단, 특히  $45^\circ$  와  $90^\circ$  층에서는 섬유의 파단과 풀-아웃이 선명하게 관찰된다(Fig.9(b) 참조). 이와 같이 섬유방향을 달리한 각 적층판의 SEM사진을 관찰한 결과, 특히 가장 큰 핀 베어링강도를 가지는  $[0/\pm 45/90]_{3s}$ 적층 시험편의 베어링 파괴면이 매우 복잡한 양상을 보여주고 있다.



(a) hole boundary



(b) fracture surface of hole outside

Fig.9 SEM micrographs of fracture surfaces  $[0/\pm 45/90]_{3s}$  CFRP composites.

핀 베어링강도를 파면해석의 결과와 비교하여 보면 사교적층판의 핀 베어링강도는 파단면에서 섬유와 매트릭스의 손상 및 파괴, 섬유의 디본딩, 섬유의 풀-아웃, 매트릭스 균열, 섬유의 좌굴, 파단 등에 의한 영향이 복합적으로 나타나서 일방향 적층재보다 높은 핀 베어링강도를 나타낸다고 할 수 있다.

## 결 론

본 연구에서는 국산 탄소섬유강화 에폭시복합재를 사용하고, 섬유방향은  $[0/90]_{6s}$ 와  $[0/\pm 45/90]_{3s}$ 의 2종류, 시험편의 기하학적 형상은 끝단거리와 폭을 각각 4종류로 변화시켜, 인장실험을 행하여 강도를 측정 한 후 핀 베어링 인장강도 및 파괴모드를 상호 비교·검토하였고, 또한 파면을 SEM관찰하여 이들에 의한 파괴기구를 고찰하였다.

실험에 의해 얻어진 결과는 다음과 같다.

- 1)  $[0/90]_{6s}$  및  $[0/\pm 45/90]_{3s}$  적층판은  $[0]_{12s}$  적층판에 비해 각각 1.8에서 1.9배 정도 높은 핀 베어링강도를 나타낸다.
- 2) 끝단거리는 핀 베어링강도에 큰 영향을 주며 끝단거리가 증가함에 따라 핀 베어링강도는 상승한다.  $[0/\pm 45/90]_{3s}$  적층판에서는 구멍의 지름에 대한 끝단거리의 비,  $e/d$ 가 3정도일 때 가장 높은 핀 베어링강도를 보인다.
- 3) 섬유방향이  $[0/90]_{6s}$  및  $[0/\pm 45/90]_{3s}$  적층판은 구멍의 지름에 대한 시험편 폭의 비,  $w/d$ 가 증가함에 따라 핀 베어링강도가 증가하고  $w/d$ 가 4보다 큰 경우 베어링강도는 일정한 값을 유지한다.
- 4) 사교적층판에서의 핀 베어링강도는 파단면에서 섬유와 매트릭스의 손상 및 파괴, 섬유의 디본딩, 섬유의 풀-아웃, 매트릭스 균열, 섬유의 좌굴, 파단 등에 의한 영향이 복합적으로 나타나서 일방향 적층재보다 높은 핀 베어링강도를 나타낸다.

## 참고문헌

- 1) Mallick, P.K.(1988) : Fiber-Reinforced Composites, Marcel Dekker, INC., pp.263-265, pp.417-429.
- 2) 홍창선(1982) : "복합구조의 결합", 대한기계학회

- 지 22(1), pp.9-14.
- 3) 이대길(1994) : 복합재료 역학 및 가공론, 성안당, pp.237-248.
  - 4) Lessard, L.B. and Shokrieh, M.M.(1995) : "Two-Dimensional Modeling of Composite Pinned-joint fracture", J. of Composite Materials 29(5), pp.671-697.
  - 5) Quinn, W.J. and Matthews, F.L.(1977) : "The Effect of Stacking Sequence on the Pin-Bearing Strength in Glass Fibre Reinforced Plastic", J. of Composite Materials 11, pp.139-145.
  - 6) Collings, T.A.(1977) : "The Strength of Bolted Joints in Multi-directional CFRP Laminates", Composites 8, pp.43-55.
  - 7) Kretsis, G. and Matthews, F.L.(1985) : "The Strength of Bolted Joints in Glass Fibre/Epoxy Laminates", Composites 16, pp.92-98.
  - 8) Stockdale, J.H. and Matthews, F.L.(1976) : "The Effect of Clamping Pressure on Bolt Bearing Loads in Glass Fibre-Reinforced Plastics", Composites 7, pp.34-38.
  - 9) Crews Jr, J.H.(1981) : "Bolt-bearing Fatigue of a Graphite/Epoxy Laminate" , Joining of Composite Materials, ASTM STP 749, pp.131-144.
  - 10) Kim, J.-K., Kim, D.-S. and Takeda, N.(1995) : "Notched Strength and Fracture Criterion in Fabric Composite Plates Containing a Circular Hole", J. of Composite Materials 29(7), pp.982-998.
  - 11) 전진탁, 김재동, 고성위(1997) : "일방향 CFRP 복합재료의 핀 베어링강도에 관한 시험편 치수의 영향", 한국어업기술학회지 33(4), pp.346-351.