

전단하중하의 복합재료 모서리의 파괴강도

이재광* · 황병선* · 박승범* · 윤한기** · 박인서***

Failure strength of machined composite edges under shear load

J.K. Lee*, B.S. Hwang*, S.B. Park*, I.S. Park** and H.K. Yoon***

ABSTRACT

Strength and manufacturing characteristics were evaluated in this paper. It depends on lay-up type and fiber direction when the fiber/resin composites have specific notch shapes. Unique jig and fixture were designed and used to test laminated specimens with notches. From the result of uni-direction specimen test we try to predict strength of multi-direction specimen by FEA.

초 록

장섬유/고분자 복합재료가 얇은 판재형태가 아닌 일정형상을 이룰 때 발생하는 제조상의 특성과 적층방향, 섬유배열에 따른 강도특성을 조사하였다. 기존시험과는 다른 전용시편을 제작, 압축전단 시험을 실시하였다. 얻어진 결과를 바탕으로 다중방향 적층판 강도를 구조해석을 통해 예측해 보았다. 시편제작과 시험을 위해 전용 치공구를 설계, 제작하였다.

1. 서 론

경량화로 대표되는 복합재료의 적용은 수많은 적용대상물의 성능을 향상시켜 왔다. 스포츠 레저용품에서부터 항공, 우주산업에 이르는 폭넓은 분야에서 사용되고 개발 중에 있는데 그러한 예들을 살펴보면 복합재료가 적용되는 경향이 나타난다. 즉, 복합재료가 사용된 부분의 형상은 대체로 곡률이 크고 전체가 하중을 지지하는 역할을 하고 있다는 것이다. 그것은 섬유/고분자가 주종을 이루는 복합재료의 특성상 국소 부위가 힘을 전달하는 곳이나 균열이 전파되는 부분에는 적용하는 것이 힘들기 때문이다. 이러한 점은 복합재료 응용분야의 확대를 위해서 반드시 극복되어야 할 부분이며 현재 선진국에서는 이러한 난제를 해결하여 실제로 적용한 예를 찾아 볼 수 있다. 미육군은 걸프전에서 기존에 사용

되어왔던 알루미늄을 대신하여 탄소/에폭시 복합재료를 이용한 날개안정 철갑탄¹⁾(APFSDS-T)을 사용하였다. 이와 같이 복합재료의 응용분야가 확대될 때는 기존에 요구되던 것과는 형태를 달리하는 물성이 필요하게 된다. 따라서 본 논문은 그러한 목적물의 요구특성을 만족시킬 수 있는 물성을 규명하고자 노력하였다.

*한국기계연구원(KIMM, Composite materials group)

**동의대학교 기계산업시스템공학부(DongEui Univ.)

***국방과학연구소(Agency for Defence Development)

2. 실험

2.1 시편제작

본 연구에서는 기존에 연구된 내용²⁾을 토대로 재료와 성형방법을 선택하였다. 따라서, 재료는 국내에서 확보가 가능한 SK Chemicals(주)의 Carbon/Epoxy unidirection prepreg USN 175BX를 선정하였고, 성형방법은 유압프레스를 이용한 압축성형으로 하였다. 또 단일방향과 다중방향 적층의 압축전단강도를 조사하기 위해 아래와 같이 시편을 제작, 시험하였다.

2.1.1 경화조건과 평판제작

prepreg 제작사에서 제시된 경화사이클은 120℃ 이하에서 약 90분간의 경화를 제시하고 있으나, 본 연구에서는 유전기법(dielectrometry)으로 경화 사이클을 구하였다. dielectrometer는 Micromet Instruments 사의 Eumetric 100A 를 사용하였으며, 유전센서는 IDEX sensor를, 수지 경화용 oven은 Korea CHINO 사의 KP1130B000 model 을, 수지는 prepreg에서 직접 채취한 것을 사용하였다. 우선, 전체적인 수지의 경화반응을 살펴 보기 위해서 상온에서 280℃까지 2℃/min의 속도로 승온시키면서 관찰하였고, 10Hz~100kHz 영역 내에서 데이터를 산출하였다. Fig. 1과 Fig. 2는 시험을 통해 얻어진 그래프이다.

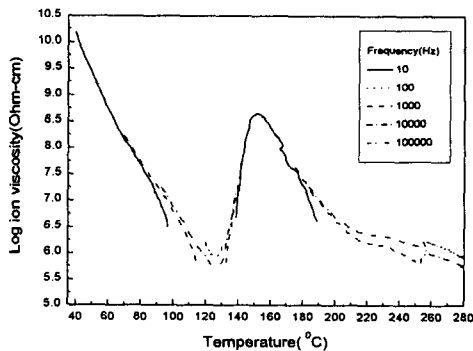


Fig. 1 Log ion viscosity of dynamic thermal test

Fig. 1과 2는 수지의 이온점도(log ion viscosity)를 나타낸 것인데, 이것은 물리적인 점도(Pa·s)가 아니라 식 (1)과 같은 이온 전도성을 바탕으로 산출된 값으로, 물리적인 점도와 아주 유사한 경향을 보임으로 점도로 채용할 수 있다. 따라서 본 연구에서의 점도는 이온 점도(log ion

viscosity)를 가리킨다.

$$\sigma = u[C]q \quad (1)$$

여기서,

σ = ion conductivity 이고,

u = ion mobility,

$[C]$ = ion concentration,

q = charge of an electron 이다.

Fig. 1에서 얻어진 결과를 바탕으로 일정온도에서의 반응관찰을 위해 경화온도로 추정되는 150℃에서 등온 시험을 실시하여 Fig. 2의 결과를 얻었다.

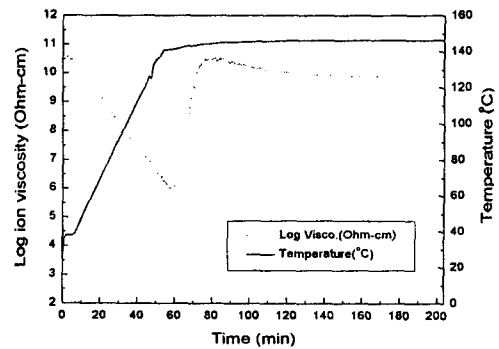


Fig. 2 Log ion viscosity depends on time and temperature

이상의 유전기법을 통한 시험에서 얻어진 경화 조건을 정리하면 아래와 같다.

첫째, 3차 가압한다. 평판금형온도가 80℃에 도달하면 유압게이지 50kg/cm²까지 1차 가압, 2차 100kg/cm², 3차 150kg/cm²까지 가압한다. 단, 90℃에서 100℃를 넘기 전에 가압완료한다. 둘째, 최종경화온도는 150℃로 한다. 셋째, 경화시간은 2시간 30분으로 한다.

시편 제작을 위한 평판은 단일방향(UD : unidirection)과 다중방향(Q : quasi-isotropic)시편을 만들기 위해 prepreg를 각도별로 재단, 적층하여 위의 경화사이클로 성형하였다.

2.1.2 시편가공

먼저, 단일방향시편에 대한 강도를 조사하기 위해 0°, -45°, 90°, 45° 평판이 제작되었고 준등방성(quasi-isotropic)인 다중방향평판을 제작하여 각각 Q1, Q2, Q3라고 명명하였다. 평판의 적층 방법을 요약하면 다음과 같다.

Q1: [0₂^o/+45₂^o/-45₂^o/90₂^o]_{2s}, 32plies

Q2: [0₂^o/+45₂^o/-45₂^o/0₂^o/+45₂^o/90₂^o/0₂^o/+45₂^o]_s, 32plies

Q3: [+45°/90°/-45°/0°/-45°/90°/+45°], 42plies

최종시편의 형상은 Fig. 3과 같으며 2개를 1조로 시험하게 된다. 섬유방향은 하중방향을 0°로 설정하여 하중의 수직방향은 90°로 하였다. 연마용 전용 치구와 다이아몬드 분말이 코팅된 연마용 휠(wheel)을 사용하여 가공, 치수정밀도를 확보하였다.

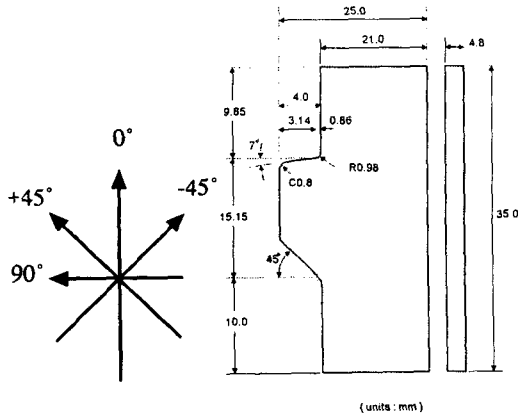


Fig. 3 Dimension of specimen

2.2 시험방법

시험은 크게 압축전단시험과 FEA로 나누어졌다. 단일방향 시편의 강도를 기초로 한 FEA를 통해서 수많은 경우의 수가 존재하는 적층 형태에서 실제 성형을 통하지 않고서도 높은 강도를 가진 적층형태를 제시하고자 하였다.

2.2.1 압축전단시험

가공된 시편을 전용치구와 펀치를 써서 압축전단 시험을 실시하였다. 시험은 Instron 4206에서 crosshead speed 1 mm/min으로 하였으며, 각 적층 당 5회씩 시험하고 작용하중과 변위 값을 기록하였고 시편이 파괴되는 순간의 최대 하중을 파괴 하중으로 정의하였다. 시편의 전단 강도는 하중을 전단면적으로 나누어 계산하였다. 시험에서 얻어진 결과를 아래의 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Result of shear test

Specimen	Maximum load (kgf/mm ²)	Shear strength (MPa)
-45°	4.74	46.44
0°	3.80	37.34
45°	6.82	66.88
90°	4.72	46.25
Q1	7.60	74.57
Q2	7.43	72.88
Q3	9.33	91.52

2.2.2 유한요소해석

본 연구에서는 상용 프로그램인 ANSYS 5.5를 이용하여 유한요소해석을 실시하였다. 적층복합재를 해석할 때 쓰이는 SHELL99 layer structural shell element를 사용하여 시편의 모양으로 모델링 한 다음 요소를 나누었다. 응력집중이 예상되는 돌출부와 곡률이 급격하게 변하는 fillet 주위, 접촉 선단 주위는 미세한 요소로 잘게 나누어 응력의 분포를 보고자 하였다. 전체 모델은 4458개의 절점과 1425개의 요소로 분할되었고, Fig. 4는 해석에 사용된 유한요소 모델과 돌출부에 부여한 하중을 나타낸 것이다.

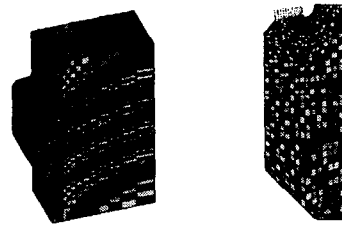


Fig. 4 Mesh of specimen and load distribution

3. 결과 및 고찰

3. 1 압축전단에 의한 하중-변위

위의 Table 1에서 나타낸 시험결과를 Fig. 5에서 적층각도와 최대전단강도의 관계를 나타내었다. 단일방향보다는 다중방향의 강도가 높음을 알 수 있다. 단일방향의 경우에는 하중이 가해질 때 섬유각도에 따라 약간 상이한 값을 보이거나 수지와 섬유사이의 계면강도만이 저항하게 되어 전체적으로 낮은 값을 나타내게 된다. 각 층별로 복잡한 양상을 띠게 되는 다중방향 적층의 경우에는 아래의 유한요소해석결과를 통해 응력분포를 미뤄 짐작할 수 있다.

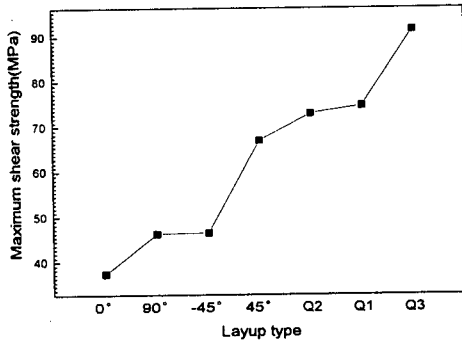


Fig. 5 Shear strength of specimen

3. 2 유한요소해석 결과

단일방향 시편의 파괴 하중을 압력으로 환산하여 부여하고 임의방향 적층시편 해석 시에는 단위 압력의 크기로 부여하였다. 파괴를 평가하기 위해 Yamada-Sun의 파괴이론을 적용하였다. 파괴판정식에서 e 값을 파괴지수(failure index)라 하고 다중방향 시편의 각 층별 결과를 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Failure index of each laminate

	-45°	0°	45°	90°
Q1	3.033	3.337	3.082	3.324
Q2	2.378	3.268	2.413	3.282
Q3	3.881	4.45	3.944	4.434

Fig. 6을 보면 낮은 강도를 나타내는 Q2의 경우에는 각 층별 파괴지수의 기복이 심하고, 높은 강도를 나타내는 Q3의 경우에는 파괴지수가 높음을 알 수 있다. 즉, 층간 파괴지수의 차이가 크지 않고 높은 파괴지수를 나타내는 시험편이 강도값이 큼을 알 수 있다.

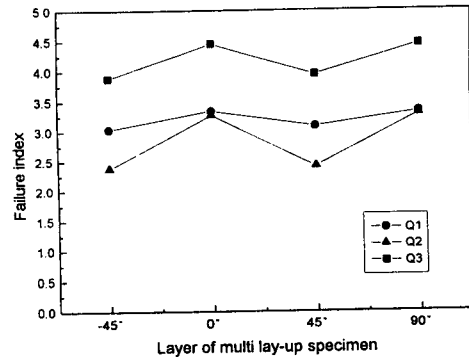


Fig. 6 Failure index of layer

4. 결론

본 연구에서 압축전단시험을 통해 다중방향 적층으로 단일방향보다 훨씬 높은 전단 강도값을 얻을 수 있다는 사실을 알았다. 단일방향에서는 +45°, -45°, 90°, 0°의 순으로, 다중방향 시편에서는 Q3, Q1, Q2의 순서로 높은 강도값을 보였다. 즉, 가장 높은 강도를 나타내는 적층은 [+45°/90°/-45°/0°/-45°/90°/+45°]였으며 유한요소해석의 결과와 일치하였다. 이는 유한요소해석을 통해서 다중방향 적층재료에서 직접 볼 수 없는 각 층의 응력분포를 확인해 볼 수 있었으며, 복잡한 공정을 통해 모든 경우에 있어서 복합재료를 제작하여 시험을 통해 확인하지 않아도 최적의 적층을 설계할 수 있음을 알았다.

참고문헌

1. B. P. BURNS, etc "An Army Perspective on Composite Materials" U. S. Army Research Laboratory, pp. 223~232
2. 황병선 외, "이탈피용 고강도 경량 고분자 복합재료 연구(III)" 한국기계연구원, 1. 2000