

論文

직조구조차이와 적층각의 변화에 따른 섬유강화복합재료의 압축특성

유성환*, 박석원*, 장승환***

Compressive Characteristics of Composites According to the Micro-structure and Stacking angle

Seong-Hwan Yoo*, Seok-Won Park*, Seung-Hwan Chang***

ABSTRACT

In this paper, static compressive test and compression-compression fatigue test of carbon/epoxy composites which have different micro-structures were carried out with respect to the bias angle. In order to find out the effect of the micro-structure of the fabric composite on compressive characteristics the specimens made of UD carbon/epoxy composite comprising the same fiber and matrix system as the fabric composite were also prepared. The compressive strength and modulus were measured and these values were used to develop a semi-empirical formula for predicting compressive strength of the fabric composite with bias angles. The fatigue behavior of the fabric composite with respect to the bias angle variation was also investigated.

초 록

본 논문에서는 편향각을 갖는 직물 복합재료 시편을 제작하여 정적 압축실험과 피로실험을 수행하고 그 결과를 비교하였다. 직물구조의 차이에 따른 압축거동을 평가하기 위해 동일한 섬유와 기지로 구성된 일방향 복합재료와 평직 복합재료의 적층순서를 동일하게 조절한 시편을 준비하였다. 정적 압축실험을 통해 편향각을 갖는 시편의 강성과 강도를 측정하였고, 측정된 강도를 바탕으로 압축강도 예측식을 제안하였다. 피로실험을 통해 복합재료의 직물 구조의 차이에 의한 피로수명의 변화를 관찰하였으며, 편향각의 변화와 하중조건에 따른 피로수명의 차이를 비교하였다.

Key Words : 직물 복합재료(Fabric composites), 편향각(Bias angle), 정적 압축실험(Static compressive test), 피로실험(Fatigue test)

1. 서 론

높은 비강성과 비강도 특성을 갖는 섬유강화복합재료는 일반적으로 우수한 기계적 특성을 갖고 있어서 건축물에서부터 자동차, 항공 산업에 이르기까지 여러 분야에 사용되고 있다 [1-4].

특히 직물 복합재료를 이용하여 제품성형을 할 경우 국부적 물성을 예측하기 위해서는 드레이핑 공정 중 발생하는 재료의 변형과 그에 따른 미소 토우구조의 변형이 물질의 특성

에 미치는 영향을 규명하는 것은 필수적이다[5]. 또한 미소 토우구조의 변화가 복합재료로 제작된 제품의 압축특성에 많은 영향을 끼치기 때문에 다양한 압축실험이 필요하다. 하지만 재료의 압축실험은 압축 시 좌굴 발생의 문제 등을 극복해야 하기 때문에 인장실험과는 다른 특별한 지그와 실험방법이 필요하다. 따라서 압축실험 시 발생할 수 있는 좌굴을 방지하기 위한 다양한 실험법과 지그가 고안되었다. Tan[6]은 전형적인 압축실험 방법인 Celanese와 IITRI 지그를 이용한 복합재료의 압축실험을 실시하여 유한요소 해석방법에 의한 해석결과

* 중앙대학교 기계공학부

*** 중앙대학교 기계공학부, 교신저자(E-mail:phigs4@cau.ac.kr)

와 비교하였다. Haberle 등[7]은 CRAG, IITRI, ASTM(D695), BI, BAe, ICSTM의 다양한 압축지그를 사용한 여러 복합재료의 압축실험을 실시하여 시편의 크기와 압축강도를 비교하였다. Hosur 등[8]은 스티치(Stitched) 혹은 스티치가 되지 않은 탄소섬유/에폭시 직물 복합재료의 고 변형률 환경 하에서의 압축강도를 실험적으로 구하였으며, 동적 압축하중과 정적 압축하중 조건에서의 결과를 비교하였다. Fleck[9]은 여러 가지 복합재료의 압축 특성에 대한 실험과 이론적 수식을 정립하였으며, 하중 조건 및 재료에 따른 파괴모드를 규명하고, 이러한 거동을 예측할 수 있는 수식을 제안하였다.

Daniel 등[10]은 일방향 탄소섬유/에폭시 복합재료의 압축실험을 통해 응력과 꼬임각(Kink Angle)에 따른 꼬임밴드(Kink Band)의 증가에 대해 연구하였다. Reifsnider 등[11]은 주자직 직물 복합재료의 압축실험을 실시하여 노치의 유무에 따른 압축강도와 파괴모드를 비교하였다. 김성집 등[12]은 탄소섬유/에폭시 복합재료의 압축실험을 통하여 편향각과 전단각에 따른 재료의 압축특성과 강도 예측식을 제시하였고, 현미경 관찰을 통해 미소 토우구조의 변화를 정량화 하였다. 복합재료를 이용한 피로실험에 관한 선행연구도 많이 진행되었는데, Pastor 등[13]은 알루미늄 소재에 복합재료를 보강한 시편으로 피로실험을 실시하여 복합재료가 보강된 시편의 피로수명이 늘어남을 확인하였고, 시편의 절단방법을 달리하여 시편처리 방법에 따른 피로특성도 확인하였다. Demers[14]는 유리섬유와 탄소섬유를 이용한 인장-인장 실험을 통해 섬유와 함침된 수지의 차이 및 여러 적층각에 따른 피로특성을 규명하였다. Jen 등[15]은 일방향 복합재료를 이용하여 각도에 따른 인장 및 압축실험을 수행하였으며, 그 결과를 Tsai-Hill 파손이론으로 유도한 식으로 강도를 예측하여 실험값과 비교하였고, 인장-인장 피로실험과 압축-압축 피로실험을 수행하여 S-N 선도를 얻고 멱법칙을 이용하여 복합재료의 수명을 예측하는 식을 제안하였다. 본 논문에서는 복합재료를 이용한 구조물 설계 시 정/동적 압축하중이 재료의 파괴에 미치는 영향을 파악하기 위해 정적 압축실험과 피로실험을 실시하여 재료의 미세 직조구조와 하중조건의 차이에 의한 재료의 압축거동을 실험을 통해 파악하였다.

2. 시 편

본 실험에서는 직조구조의 차이에 의한 압축 특성을 확인하기 위해서 동일한 섬유와 기지를 갖는 2가지 재료를 사용하였다. 재료는 평직 탄소섬유/에폭시 프리프레그(WSN3k)와 일방향 탄소섬유/에폭시(USN125) 프리프레그로 각각의 물성은

Table 1과 같으며, 시편의 미세구조는 Fig. 1과 같다.

Table 1 Material properties of the cured preregs under compression

| Type | WSN3k (Plain weave) | USN125 (UD) |
|-----------------------------|------------------------|----------------|
| E_1 (GPa) | 55.0 | 123.5 |
| E_2 (GPa) | 55.0 | 8.5 |
| G_{12} (GPa) | 4.75 | 4.37 |
| ν_{12} | 0.13 | 0.28 |
| Ply Thickness(mm) | 0.227 | 0.129 |
| Density(kg/m ³) | 1474 | 1373 |



Fig. 1 Unit cell geometry; (a) WSN 3k (plain weave), (b) USN125 (UD).

정적 압축실험을 위한 시편을 만들기 위해 300×400mm² 크기의 직물 프리프레그를 [0]_{mT}로 적층한 평판을 제작하였다. 평판의 적층수는 복합재료 압축실험에 대해 규정한 ASTM D3410을 고려하여 결정하였다. 평판의 경화 중 잉여레진의 흡수와 고른 표면을 위해 나일론 재질의 필플라이를 덧댄 뒤, 양면을 3mm 두께의 스테인레스 평판으로 덮어 오토클레이브 진공백 성형법을 이용하여 125℃에서 4시간 동안 성형하였다.

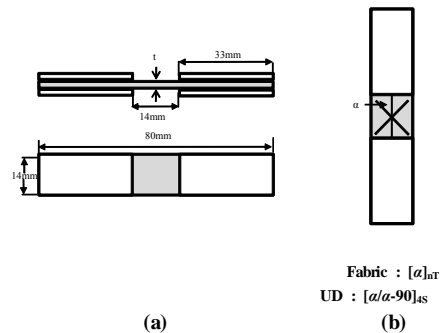


Fig. 2 Specimens for the compression test; (a) shape and dimensions of the specimen, (b) bias specimen.

압축시편은 성형이 완료된 평판에서 워터젯으로 절단하여 제작하였으며, 탭과 시편의 접착은 에폭시 접착제(DP-460, 3M)를 사용하였다. 편향각을 갖는 직물 복합재료 시편의 적층각도는 [α]_{10T}이며 Fig. 2에서 보이는 바와 같은 형상으로 제작하였으며 시편의 무게는 4.16g이다. 또한 직조형태의 차이가 압축거동에 미치는 영향을 관찰하기 위해 직물 복합재료와 동일한 섬유와 기지로 구성된, 일방향 탄소섬유/에폭시 프리프레그(USN125)로 시편을 제작하였다.

동일한 적층각을 갖도록 $[\alpha/\alpha-90]_{4S}$ 로 Fig. 2(b)와 같이 제작하였으며, 시편의 무게는 3.75g이다. Fig. 2는 본 연구에 사용된 정적 압축시편의 구체적인 모양과 치수이며, 게이지 길이와 폭은 모두 14mm이다.

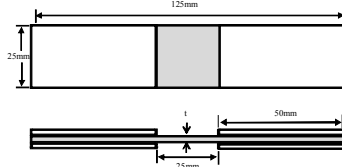


Fig. 3 Specimens for the compression-compression fatigue test.

압축-압축 피로실험을 위한 시편을 제작하기 위해 평직 탄소섬유/에폭시의 경우 적층각을 $[0]_{10T}$, $[15]_{10T}$, $[30]_{10T}$, $[45]_{10T}$ 로 정하였으며, 시편의 무게는 10.08g이다. 일방향 탄소섬유/에폭시의 경우 적층각은 $[0/90]_{4S}$, $[15/-75]_{4S}$, $[30/-60]_{4S}$, $[\pm 45]_{4S}$ 이며 시편의 무게는 8.98g이다. 또한 워터젯 가공 시 발생하는 절단 표면의 미세한 균열은 낮은 강도에서의 파괴를 유발할 수 있기 때문에 #400의 사포를 사용하여 연마 하였으며, 피로시편의 최종 크기는 Fig. 3과 같다.

3. 실험방법

본 연구에서는 모든 정적 압축실험을 ASTM D695에 따라 실시하였으며, Fig. 4에서 보이는 항 좌굴 지그를 사용하여 1.3mm/min의 속도로 시편을 압축하였다. 항 좌굴 지그는 상, 하의 평판이 시편을 직접 압축하며 실험 중에 두께방향으로의 조임쇠가 시편을 지지하도록 설계되었다. 시편의 측정부분에는 변형률 측정기(Extensometer)를 장착하여 압축 변형률을 측정하였다. 사용된 변형률 측정기는 4개의 탐침이 있어서 두 쌍의 탐침으로 측정된 하중방향으로의 변형률을 각각 측정하여 산술 평균하는 방법을 사용하였다.

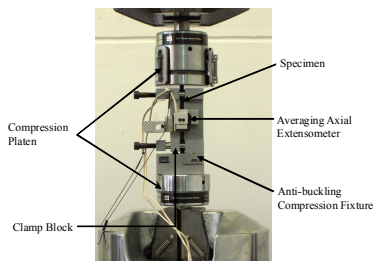


Fig. 4 Anti-buckling compression fixture and averaging axial extensometer.

Table 2 Compressive test results of carbon/epoxy bias specimens

| Specimens $[\alpha]_{10T}$ | WSN3k | | Specimens $[\alpha/\alpha-90]_{4S}$ | USN125 | |
|-------------------------------|------------------|-------------------|--|------------------|-------------------|
| | Modulus (GPa) | Strength (MPa) | | Modulus (GPa) | Strength (MPa) |
| $[0]_{10T}$ | 55.0 | 591.2 | $[0/90]_{4S}$ | 66.3 | 720.9 |
| $[3]_{10T}$ | 55.1 | 509.8 | $[3/-87]_{4S}$ | 59.3 | 628.3 |
| $[6]_{10T}$ | 51.6 | 452.4 | $[6/-84]_{4S}$ | 54.9 | 509.3 |
| $[9]_{10T}$ | 45.1 | 371.0 | $[9/-81]_{4S}$ | 49.9 | 432.2 |
| $[12]_{10T}$ | 41.9 | 331.7 | $[12/-78]_{4S}$ | 43.4 | 349.8 |
| $[15]_{10T}$ | 33.0 | 285.6 | $[15/-75]_{4S}$ | 40.9 | 304.1 |
| $[30]_{10T}$ | 22.0 | 189.0 | $[30/-60]_{4S}$ | 23.4 | 199.4 |
| $[45]_{10T}$ | 18.2 | 173.3 | $[\pm 45]_{4S}$ | 21.5 | 190.4 |

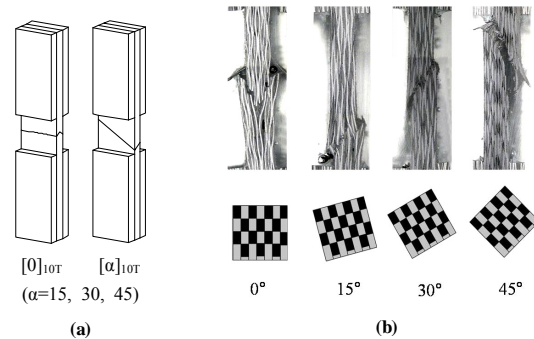


Fig. 5 Failure mode; (a) failure pattern, (b) micrograph.

압축-압축 피로실험은 시편을 유압 췌기 그룹에 장착하여 실험하였다. 상, 하부 췌기에는 시편을 하중방향으로 정렬 시켜주는 가이드를 장착하였다. 이때 시편을 잡는 압력은 10MPa이며, 실험은 하중제어 방식으로 실시하였다. 실험 시 적용된 최소응력과 최대응력의 비(R: minimum stress/maximum stress)는 5로 설정하였다. 적용하중의 파형은 사인파이며, 8Hz의 주파수로 실험을 실시하였다. 시편에 적용하는 하중은 시편의 압축강도에 적용하려는 응력의 비율(r: Normalized maximum stress= maximum stress/strength)을 곱하여 결정하였다.

4. 실험 결과

4.1 압축실험

편향각이 증가할수록 시편의 섬유방향과 하중방향이 이루는 각도가 증가하기 때문에 Table 2와 같이 정적 압축강성과 강도가 감소하는 경향을 나타내었으며, 동일한 섬유와 기지로 구성되어 있지만, 굴곡진 미소 토우구조(Fig. 1)를 가지는 평직 탄소섬유/에폭시 시편이 일방향 시편보다 더 낮은 강도와 영 계수(Young's modulus)를 가짐을 알 수 있었다. 이는 직물 복합재료시편이 갖

고 있는 미소 토우구조에 기인한 미세 좌굴 현상에 의한 현상으로 판단된다. 그 이유로는 시편의 편향각이 증가함에 따라 두 가지 재료의 압축강도 차이는 감소하는 경향을 나타내었기 때문이다. 또한 편향각이 증가함에 따라 재료의 파괴모드(Fig. 5)가 섬유 파단모드에서 전단모드로 바뀌면서 시편의 미소 토우구조(Fig. 1)의 영향이 점차 감소하기 때문으로 판단된다.

4.2 피로실험

복합재료 시편의 압축-압축 피로실험을 실시하여 편향각과 미소 토우구조가 피로수명에 미치는 영향을 관찰하였다. Fig. 6에서 보이는 바와 같이 최대 적용응력-피로수명 그래프에서 적용응력 비율(r)이 작아짐에 따라 피로수명이 증가하는 경향을 보인다. 0°로 적층된 일방향 적층시편의 적층두께([0]_{ss})가 다른 피로시편과 다른 이유는 [0]_{4s}로 적층했을 때 압축-압축 피로실험 시 좌굴이 발생하여 시편의 두께를 증가시켰기 때문이다.

Fig. 6(a)에서 보이는 바와 같이 0° 시편의 경우 두 가지 복합재료의 피로특성이 비교적 큰 차이를 보임을 알 수 있다. 이는 비교적 높은 적용응력 비율($r > 0.8$)이 부가된 평직 탄소섬유/에폭시 시편에 대해서 직조 구조의 차이에 의해 미세 토우구조로 인해 발생된 미세 좌굴 현상이 피로수명을 단축시킨 결과로 판단되며, 적용응력 비율이 낮아질수록 미세 토우구조가 피로수명에 끼치는 영향이 줄어들어 판된다. 또한 부가된 하중의 방향이 직물구조에 미치는 영향을 극대화 하는 방향(섬유파단)이기 때문에 다른 적층각을 갖는 시편과 큰 차이를 보인다고 판단된다.

반면에 Fig. 6(b)에서 보이는 바와 같이 15° 시편의 경우 일방향 복합재료와 직물 복합재료 모두 피로파괴를 일으키는 응력의 비율은 유사한 경향을 나타내고 있다. 이는 편향각이 15°로 변화함에 따라 섬유파단에 대한 영향이 줄어들고 전단파괴의 영향이 커졌음을 의미한다. 전단파괴의 영향이 더욱 커지는 30° (Fig. 6(c))와 45° (Fig. 6(d)) 시편의 경우에도 피로파괴를 일으키는 응력의 비율이 매우 유사함을 확인할 수 있었다. 또한 적용응력 비율(r)이 0.6이하의 경우에는 두 재료 모두 피로수명이 10⁶ cycles 이상인 것을 확인할 수 있었다. 일방향 복합재료와 직물 복합재료의 추세선을 비교해보면 추세선의 기울기가 0°를 제외한 시편에서 유사한 경향을 나타냈다. 이는 정적 압축실험과 마찬가지로 편향각이 증가함에 따라 섬유방향과 하중방향이 이루는 각도가 증가하기 때문에 미소 토우구조의 영향이 감소하여 시편의 직조구조 차이에도 불구하고 유사한 경향이 나타난 것으로 판단된다.

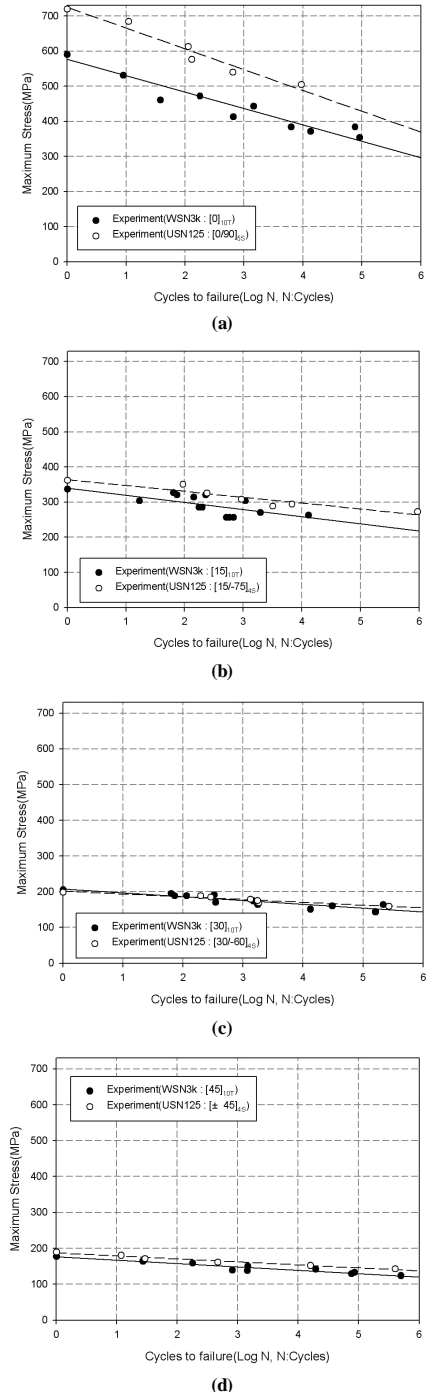


Fig. 6 The relation between normalized maximum stress and cycles to failure for the specimen.

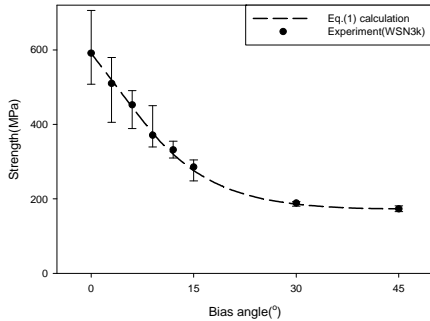


Fig. 7 Compressive strength of bias specimens for carbon/epoxy composites.

5. 압축강도와 피로수명

5.1 편향각을 갖는 시편의 정적 압축강도

편향각을 갖는 직물 복합재료 시편의 압축강도를 예측 하기 위해 김성집 등[12]은 두 가지 변수를 가지는 식 (1)을 제안하였다.

$$\sigma_c = \frac{E_\alpha}{E_0} S_0 (1-n) + \frac{E_\alpha}{E_{45}} S_{45} n^2 \quad (1)$$

식 (1)에서 제시한 두 가지 변수 중 하나는 강성비로 E_α/E_0 는 편향각이 0°에 가까운 시편의 강도가 섬유방향 물성의 영향을 받는 것을 반영하며, E_α/E_{45} 는 편향각이 45°에 가까운 시편의 강도가 재료의 전단물성의 영향을 받는 것을 반영하는 것이다. 다른 하나는 조화함수(n)로 편향각(a)의 변화를 강도에 반영하기 위해서이다. 여기에서 S_0 와 S_{45} 는 각각 [0]_{IT}시편의 압축강도와 [45]_{IT}시편의 압축강도이다. E_α 는 [a]_{IT}시편의 압축강성으로 CLPT로 계산된 값이며, n 은 $\sin 2a$ 이다. Fig. 7은 편향각을 갖는 직물 복합재료의 압축실험으로 얻은 강도와 식 (1)로 계산된 강도를 편향각에 따라 나타낸 것이다. 평직 탄소섬유/에폭시 복합재료의 강도 실험값과 식 (1)로 계산한 강도값의 최대 오차는 [12]_{IT}시편에서 4.3%로 식 (1)로 계산한 강도가 실제 실험값과 거의 차이가 없는 것을 확인할 수 있었다.

5.2 피로실험

피로실험으로부터 재료의 피로수명을 계산하기 위해 Jen 등[15]은 식 (2)와 같은 식을 제안하였으며, 이를 멱급수로 나타내면 식 (3)과 같다.

$$\log S = k - m \log N \quad (2)$$

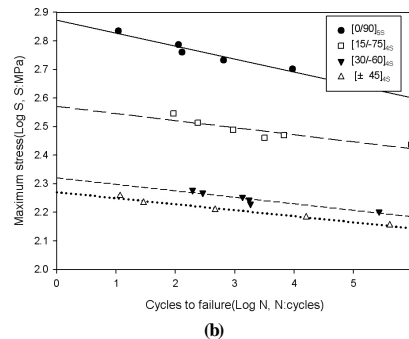
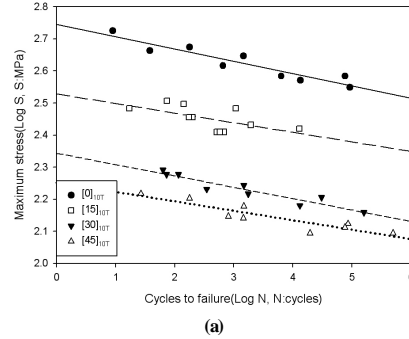


Fig. 8 Experimental data and the curve-fitting line of logS-logN for composites; (a) Fabric specimens, (b) UD specimens

Table 3 The values of k, m fabric bias specimens

| Specimens | | k | | m | |
|---------------------|------------------------|--------|-------|--------|--------|
| Fabric | UD | Fabric | UD | Fabric | UD |
| [0] _{10T} | [0/90] _{SS} | 2.746 | 2.873 | 0.0377 | 0.0455 |
| [15] _{10T} | [15/-75] _{4S} | 2.521 | 2.571 | 0.0251 | 0.0247 |
| [30] _{10T} | [30/-60] _{4S} | 2.343 | 2.321 | 0.0336 | 0.0273 |
| [45] _{10T} | [±45] _{4S} | 2.253 | 2.271 | 0.0296 | 0.0211 |

$$S = 10^k \times N^{-m} \quad (3)$$

여기에서 S는 적용되는 피로응력, N은 피로수명이며, k와 m은 재료의 logS - logN 그래프에서 구할 수 있는 변수이다. 압축-압축 피로실험 결과로부터 직물 복합재료의 피로수명을 예측하기 위해 logS - logN 그래프를 그리면 Fig. 8과 같다. 편향각이 증가함에 따라 압축강도가 감소하기 때문에 실험에 적용한 응력비율이 동일하여도 [0]_{10T} 시편의 데이터가 그래프의 최상부에 위치하며, 순서대로 [15]_{10T}, [30]_{10T}, [45]_{10T} 시편의 데이터가 위치하고 있다. Fig. 8로부터 편향각에 따른 k와 m을 구하면 Table 3과 같다.

계산결과, 적용 하중에 대한 피로수명을 나타내는 기울기 m 의 값이 0° 적층조건일 경우 가장 컸다. 이는 하중방향과 시편의 적층방향의 일치에 의한 섬유파괴 모드에 기인한 것으로 판단되며, 적층각이 증가함에 따라 하중방향과 적층방향의 불일치로 인해 파괴모드가 전단파괴로 전환됨에 따라 피로수명이 증가한 결과이다. 이는 미세구조가 다른 일방향 탄소섬유/에폭시 시편의 경우에도 같은 결과를 보였다.

6. 결론

본 연구에서는 동일한 적층조건을 가지면서 직조구조 차이에 의해 미세구조가 서로 다른 평직 탄소섬유/에폭시와 일방향 탄소섬유/에폭시로 제작한 복합재료시편을 이용하여 재료의 미세구조와 편향각에 따른 압축특성을 확인하였다. 실험에 사용된 모든 시편은 오토클레이브 진공성형방법을 이용하여 제작하였으며, 편향각의 변화에 따른 강성과 강도를 평가하기 위해 각각의 조건에 알맞은 시편을 제작하였다.

실험을 통해 동일한 섬유와 기지로 구성된 평직 탄소섬유/에폭시(WSN3k)와 일방향 탄소섬유/에폭시(USN125)의 기계적 물성 차이는 재료의 미세구조의 차이에 의해 유발됨을 확인하였다. 가장 높은 강도를 갖는 0° 시편의 경우 하중방향과 적층방향이 일치하여 섬유파괴가 일어남을 확인하였다. 편향각이 증가함에 따라 전단파괴의 영향이 증가하여 0° 시편의 경우 일방향 탄소섬유/에폭시 시편이 강성과 강도가 각각 11.3GPa와 129.7MPa 더 높은 값을 나타내었으나 45° 시편의 경우 강성과 강도의 차이가 각각 3.3GPa와 17.1MPa로 감소하여 두 재료간의 기계적 물성차이가 점차 감소함을 확인할 수 있었다.

일방향 탄소섬유/에폭시 복합재료와 평직 탄소섬유/에폭시 복합재료의 압축-압축 피로시험을 통해 시편에 적용되는 응력에 따라 변화하는 피로수명을 관찰하고 편향각의 변화에 따른 피로수명을 관찰하였다. 그 결과 일방향 탄소섬유/에폭시의 경우 $[0/90]_{SS}$ 로 적층된 피로시편이 응력의 변화에 따라 피로수명의 변화를 나타내는 그래프의 기울기 값이 가장 크게 나타났다. 이는 다른 시편에 비해 적용응력 비율에 따른 피로수명의 변화가 상대적으로 적기 때문에 나타난 결과로 설계자료로 활용 시 더욱 정밀한 설계가 가능할 것으로 판단된다. 또한 동일한 0° 적층조건을 갖는 평직 탄소섬유/에폭시 시편의 경우 일방향 탄소섬유/에폭시 시편의 기울기 보다 18% 낮은 수치를 기록하였다. 이는 적용응력 비율이 높은 경우($r > 0.8$)에 평직 탄소섬유/에폭시 시

편의 피로수명이 일방향 탄소섬유/에폭시 시편에 비해 짧은 경향을 나타내었으나, 응력비율이 낮아질수록 다른 적층각을 갖는 시편과 유사하게 피로수명이 증가하는 경향으로 인해 나타난 결과이다. 이러한 현상은 높은 하중조건을 갖는 경우, 직물 복합재료 시편이 갖는 미소 토우구조 때문에 나타나는 미세 좌굴현상에 의한 파괴가 평직 탄소섬유/에폭시 시편의 피로수명에 영향을 끼친 결과로 판단된다. 그러나 0° 적층 시편을 제외한 다른 시편의 경우에는 하중조건에 대한 피로수명의 변화가 0° 적층시편에 비해 크게 나타났는데 이는 정적 압축실험과 마찬가지로 편향각이 증가함에 따라 시편의 파괴모드가 전단파괴로 변화하여 재료의 미세구조의 영향을 감소시켰기 때문에 판단된다.

후 기

이 논문은 2007년도 중앙대학교 학술연구비 지원에 의한 것임.

참고문헌

- 1) 김영익, 최상민, “국내개발 항공기의 복합재료 적용사례,” *한국복합재료학회지*, Vol. 16, No. 1, 2003, pp. 68-74.
- 2) 이상진, 정종철, 오경원, 조세현, 목재균, “복합재료를 적용한 도시형 연료전지 고무차륜 Tram 시스템 및 차체 제작기술 개발,” *한국복합재료학회지*, Vol. 18, No. 2, 2005, pp. 59-64.
- 3) 권중용, 이재규, 김효철, 김재성, “새로운 생산 시스템을 이용한 복합재료 선박의 시험 건조와 성능에 관한 연구,” *대한조선학회 추계학술대회 논문집*, 2001, pp. 100-103.
- 4) 홍건호, 한복규, 김기수, “섬유 복합재료의 건설구조물 적용 기술,” *한국복합재료학회지*, Vol. 18, No. 5, 2005, pp. 40-46.
- 5) Chang, S. H., Sutcliffe, M. P. F. and Sharma, S. B., “Microscopic Investigation of Tow Geometry Changes in a Woven Prepreg Material during Draping and Consolidation,” *Composites Science and Technology*, Vol. 64, 2004, pp. 1701-1707.
- 6) Tan, S. C., “Stress Analysis and the Testing of Celanese and IITRI Compression Specimens,” *Composite Science and Technology*, Vol. 44, No. 1, 1992, pp. 57-70.
- 7) Haberle, J. G. and Matthews, F. L., “The Influence of Test Method on the Compressive Strength of Several Fiber-reinforced Plastics,” *Journal of Advanced Materials*,

- Vol. 25, No. 1, 1993, pp. 35-45.
- 8) Hosur, M. V., Adya, M., Vaidya, U. K., Mayer, A. and Jeelani, S., "Effect of stitching and weave architecture on the high strain rate compression response of affordable woven carbon/epoxy composites," *Composite Structures*, Vol. 59, 2003, pp. 507-523.
 - 9) Fleck, N. A., "Compressive Failure of Fiber Composites," *Advances in Applied Mechanics*, Vol. 33, 1997, pp. 43-117.
 - 10) Daniel, I. M., Hsiao, H. W. and Wooh, S. C., "Failure mechanisms in thick composites under compressive loading," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 27, No. 6, 1996, pp. 543-552.
 - 11) Reifsnider, K. L. and Mirzadeh, F., "Compressive strength and mode of failure of 8H Celion 3000/PMR15 woven composite material," *Journal of Composites Technology & Research*, Vol. 10, No. 4, 1998, pp. 156-164.
 - 12) 김성집, 장승환, "편향각과 전단각이 탄소섬유/에폭시 평직 복합재료의 압축특성에 미치는 영향", *대한기계학회논문집(A)*, Vol. 30, No.7, 2006, pp. 68-74.
 - 13) Marie-Laetitia Pastor, Xavier Balandraud, Michel Gre'diac, Jean-Louis Robert, "On the fatigue response of aluminium specimens reinforced with carbon - epoxy patches," *Composite Structures* Vol. 83, 2008, pp. 237-246.
 - 14) Comelia E. Demers, "Fatigue strength degradation of E-glass FRP composites and carbon FRP composites," *Construction and Building Materials* Vol. 23, 1998, pp. 311-318.
 - 15) Jen, M. H. R. and Lee, C. H., "Strength and life in thermoplastic composite laminates under static and fatigue loads. Part I: Experimental," *International journal of fatigue*, Vol. 20, No. 9, 1998, pp. 605-615.
 - 16) ASTM D 3410/3410M - 03, "Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading."
 - 17) ASTM D695 -02a, "Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics."