

論文

대퇴골 골 간단 부 골절치료용 복합재료 고정판의 국부적 거동 예측을 위한 기초 연구

유성환*, 손대성*, 장승환**

A basic study on the prediction of local material behavior of composite bone plate for metaphyseal femur fractures

Seong-Hwan Yoo*, Dae-Sung Son*, and Seung-Hwan Chang**

ABSTRACT

This paper presents an estimating method for local property changes and failure prediction of composite materials experiencing large shear deformation during draping process. The bone plate for the metaphyseal femur fracture was chosen to apply the presented method because it has complex geometry. The local property changes due to macro-/microscopic deformations of fabric composites during draping process were evaluated by various tests and the result was applied to predict static/fatigue behaviors of the bone plate. This paper was expected to present useful information on the design of composite structures with complex geometry and their performance evaluation.

초 록

본 논문은 복잡한 형상으로 드레이핑 성형된 직물 복합재료 구조의 국부적 물성 변화 및 재료거동 예측을 위한 방법을 제시하였다. 제안된 방법을 적용하기 위해 대퇴골 골 간단 부 골절치료용 고정판을 대상으로 선정하였다. 드레이핑 공정 중 발생하는 재료의 거시적/미시적 변형에 의한 국부적 재료물성 변화를 다양한 실험을 통해 검증하고, 그 결과를 복잡한 형상을 가지는 고정판의 정적/피로 거동 예측에 활용하였다. 본 논문은 복잡한 형상을 가지는 복합재료 구조물의 설계 및 성능평가에 유용한 정보와 해석방법을 제시할 것으로 기대된다.

Key Words : 전단변형(Shear deformation), 드레이핑(Draping), 골 간단부(Metaphysis), 압축강도(Compressive strength), 피로 실험(Fatigue tests)

1. 서 론

섬유강화 복합재료는 우수한 비강도 및 비강성 등 우수한 기계적 특성으로 인해 기존 금속 재료를 대체하여 자동차, 항공우주 산업 분야 및 의료용 기구에까지 널리 이용되고 있다[1-3]. 특히 직물 복합재료의 경우 취급이 용이하고 유연성이 높기 때문에 복잡한 형상의 구조물을 성형하기에 적합하

다. 이러한 장점 때문에 이중 곡률을 가지는 자동차 차체, 반구형 구조물 등의 성형에 적합한 재료로 알려져 있다[4-5]. 이러한 직물 복합재료의 활용분야는 기존 산업분야에만 한정되지 않고 인골의 효율적인 치료와 재생분야에 이르기 까지 그 활용범위를 넓히고 있다[6-7]. 기존에 연구되어 온 복합재료 고정판은 주로 골간 골절 (Diaphyseal fractures)에 적용되는 단순한 형태의 구조를 가지기 때문에 복합재료 고정판의

* 중앙대학교 기계공학부 대학원

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

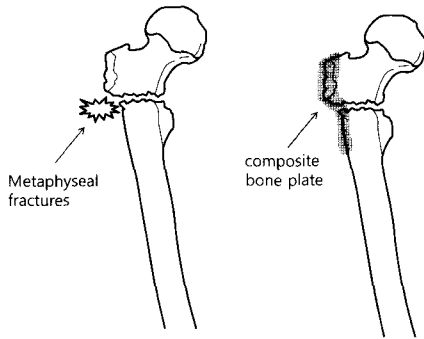


Fig. 1 The metaphyseal femur fractures and bone plate application.

성형 시 섬유 배열과 미세구조가 성형 전후에 걸쳐 변화량이 무시할 수 있을 정도로 매우 작다. 따라서 이러한 단순한 형태의 복합재료 고정판을 설계하기 위한 유한요소해석에 사용되어 온 재료물성은 단순한 인장/압축실험을 통해 얻은 물성을 그대로 사용하였다[8]. 그러나 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 본 연구에서 다루고 있는 골 간단 골절 (Metaphysis fractures) 치료용 고정판의 경우 전자부 (Trochanter)의 불규칙한 형상을 고려해야 하기 때문에 직물 복합재료가 복잡한 형상에 적용될 때 발생하는 재료의 거시적 전단변형 및 그로 인한 미세구조의 변화에 따른 물성변화를 고려한 설계가 필요하다.

본 논문에서는 골 간단 부 골절 치료용 고정판의 성형 시 드레이핑 과정 (Draping process)에서 발생하는 재료의 국부적 물성치 변화를 파악하기 위해 재료의 전단 변형량 및 주름각 (Crimp angle)에 따른 재료물성 변화를 고려하여 압축 실험 및 압축-압축 피로실험을 수행하였다. 실험을 통해 얻은 압축 및 피로실험 데이터를 이용하여 대퇴골에 드레이핑된 고정판의 전단변형에 의한 전단각 (Shear angle)을 측정된 후 고정판의 국부적 물성치와 피로 수명을 평가하였다. 본 결과는 복잡한 형상을 가지는 복합재료 고정판의 보다 정확한 해석을 위한 기초 데이터를 제공할 것으로 기대된다.

2. 시편

2.1 사진틀 지그를 이용한 전단변형 실험

본 실험에 사용된 재료는 평직 탄소섬유/에폭시 프리프레그 (WSN, 3k, SK Chemicals, Korea)이며, 재료의 물성은 Table 1과 같다. 탄소섬유/에폭시 복합재료는 골절부 고정용 보철구로서의 생체적합성이 검증되어 생체조직 내부에 이식이 가능하며[9], 비교적 성형이 쉬운 장점을 가지고 있다.

전단각 (Shear angle)을 갖는 시편을 제작하기 위해서 10장의 프리프레그를 290×290 mm²의 크기로 재단하여 45°의 각도로 적층한 뒤 Fig. 2와 같이 적층된 프리프레그를 사진틀 지그에 고정 시킨 후 만능시험기에 체결하여 인위적으로

Table 1 Material properties of carbon/epoxy prepregs

Plain weave		
Modulus[GPa]	Longitudinal (0°)	70
	Transverse (90°)	70
Ply thickness[mm]		0.23
Fiber volume fraction		0.6

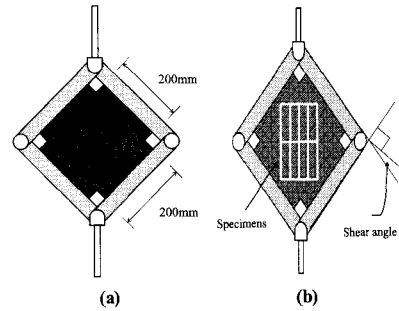


Fig. 2 Picture frame test for prepreg deformation; (a) before shear deformation, (b) after shear deformation.

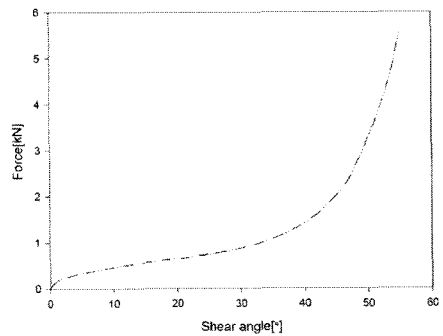


Fig. 3 Force-shear angle curve of the fabric prepregs during the picture frame test.

전단변형을 부가하였다. 사진틀 인장실험의 속도는 1mm/s이다. 사진틀 지그에 가해지는 하중과 프리프레그의 전단각과의 관계는 Fig. 3과 같이 전형적인 편향각 인장실험 곡선[10]을 가지는 것으로 나타났으며, 전단변형 중 시편의 미끄러짐이나 정렬 불일치 각 (Mis-aligned angle)으로 인한 섬유 인장 현상은 발생하지 않았다. 본 실험에서는 재료의 압축실험에 필요한 전단각을 가지도록 사진틀 인장 변형량을 조절하였다.

2.2 시편 제작

전단변형된 프리프레그는 오토클레이브 진공백 성형법으로 경화 시켰으며, Fig. 2(b)와 같이 전단변형이 균일한 시편 내부를 웨터젯을 이용하여 절취하여 정적 압축 및 피로실험용 시편을 제작하였다. 웨터젯 가공 시 발생하는 절단면의 미세한 균열은 낮은 강도에서의 파괴를 유발할 수 있기 때문에 모든 시편은 최종 크기를 얻기 위해 #400의 사포를 사용하여

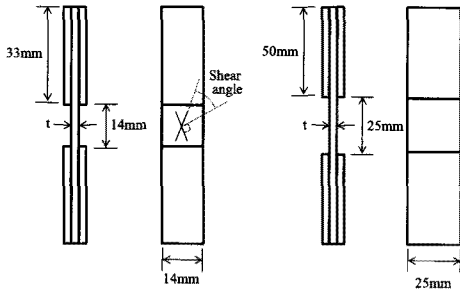


Fig. 4 Fabric composite specimens; (a) static compression test, (b) fatigue test.

연마하였다. 압축시편의 모양과 치수는 Fig. 4와 같다. 최종적으로 얻어진 시편의 전단각은 16°, 26°, 34°, 46°이다.

2.3 고정판의 드레이핑 실험

대퇴골에 드레이핑 된 시편을 제작하기 위해 40×150mm²의 면적을 갖는 프리프레그를 [45]ior로 적층한 후 골 표면에 드레이핑 공정을 수행 하였다. 3차원 구조를 가지는 골 간단 부에 드레이핑 된 복합재료의 국부적인 전단변형의 관찰을 용이하게 하기 위해 Fig. 5(a)와 같이 드레이핑 공전 전 프리프레그 표면에 10mm 간격의 흰색 선으로 직교하는 섬유 방향을 표시하였다.

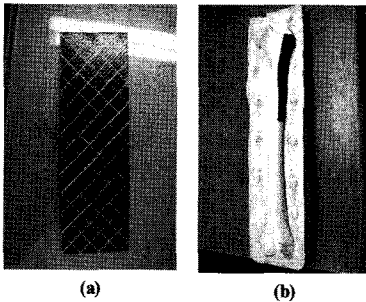


Fig. 5 Draping of preregs on the bone surface; (a) orthogonal grid lines, (b) draping and molding.

대퇴골에 프리프레그를 드레이핑 한 후 Fig. 5(b)와 같이 실리콘 재질의 외부 금형에 드레이핑 된 대퇴골을 삽입하여 오토클레이브 진공백 성형법을 이용하여 경화시켰다. 실리콘 외부 금형의 낮은 열전도로 인해 열전달이 효과적으로 발생하지 않는 점을 고려하여 해당 복합재료 (WSN3k)의 정식 성형 공정의 최대 온도 (125°C) 유지시간을 2시간 더 길게 설정하여 성형을 하였다.

3. 압축실험

3.1 정적 압축실험

고정판의 주요 기능은 골절된 골의 안정화와 하중전달이며, 체결된 고정판은 보행 시 주로 체중에 의한 압축하중 및 굽힘 모멘트를 지지하는 역할을 수행하게 된다.

쿠편 형태의 압축시편은 실험 중 좌굴이 발생할 가능성이 크기 때문에 좌굴방지 압축지그를 사용하여 ASTM D695[11]에 따라 정적 압축실험을 수행하였다. 실험에 사용된 변형률 속도는 1.3mm/min이다. 압축 실험 결과 전단각이 커질수록 섬유가 하중방향으로 배열되기 때문에 영계수와 압축강도가 증가하는 것을 확인하였다 (Fig. 6 참조). 실험결과 영계수의 경우 고전적층판 이론 (CLPT)에 의한 계산결과와 유사한 결과를 얻음을 확인하였으나, 압축강도의 경우 예측된 강도보다 낮은 강도를 가지는 것을 확인하였으며, 이는 전단변형을 겪은 직물 복합재료의 미세구조 변형에 기인한 것으로 알려져 있다[12].

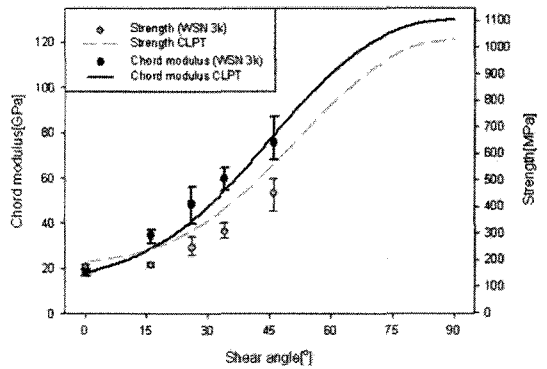


Fig. 6 Chord modulus and compressive strength of the sheared specimens.

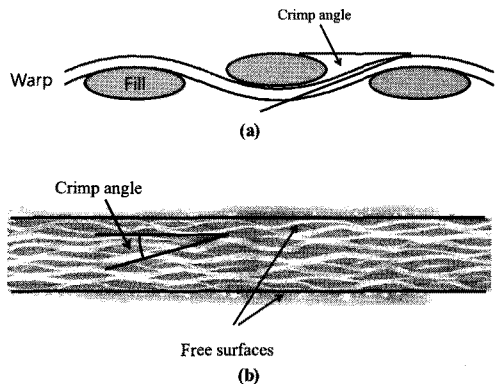


Fig. 7 Meso-structure of the fabric prepreg; (a) unit tow cell (b) micrograph of the tow structure.

주름각 (Crimp angle)은 복합재료를 구성하는 섬유들의 굴곡각이며 (Fig. 7(a) 참조), 복합재료가 압축응력을 받는 경우 복합재료의 물성에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[13]. 전 단각에 따른 주름각의 크기 변화를 측정하기 위해 전단 변형된 복합재료 적층판을 종방향 또는 횡방향 토우를 따라 절단

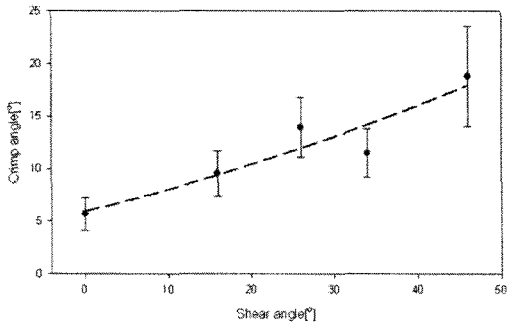


Fig. 8 The correlation of crimp angle and shear angle.

하여 단면을 관찰하였으며, 시편의 자유표면 (상/하의 편평한 면; Fig. 7(b))을 기준으로 주름각을 측정하였다. 시편 단면에서 관찰된 종방향 토우의 골극부 10곳을 무작위로 선택하여 주름각을 측정 후 산술평균하여 전단각과의 상관관계를 Fig. 8에 제시하였다. 전단변형 된 시편의 단면 관찰결과 전단각이 증가할수록 주름각이 선형적으로 증가함을 확인하였다.

3.2 압축-압축 피로실험

압축-압축 피로실험은 시편을 유압 썩기 그립에 장착하여 실험하였다. 상/하부 썩기에는 시편 정렬용 가이드(Alignment guide)가 있어 시편을 하중 방향으로 정렬시켜 장착할 수 있으며, 이때 시편을 잡는 압력은 10MPa이다. 피로실험을 위한 하중이력 및 응력비에 대한 정보는 Fig. 9에 나타내었다.

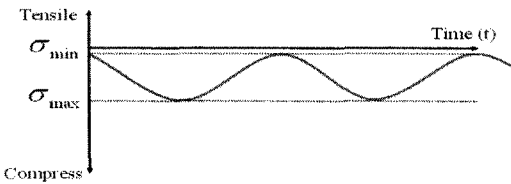


Fig. 9 Loading cycle for fatigue tests.

피로실험은 하중제어방식으로 실시하였으며, 적용된 최소응력과 최대응력의 비(R: minimum stress/maximum stress)는 5로 설정하였다. 적용 하중의 파형은 사인파이며, 빠른 실험을 위해 장비의 허용 최대 주파수인 8Hz로 실험을 실시하였다. 시편에 적용하는 하중은 시편의 단면적을 측정 후 시편의 압축강도와 적용하려는 응력비율 (r: Normalized maximum stress)을 곱하여 결정하였다 (식 (1) 참조).

$$r = \frac{\sigma_{min}}{S_c} \tag{1}$$

여기서 σ_{min} 는 실험에 적용하는 최소 압축응력이며, S_c 는

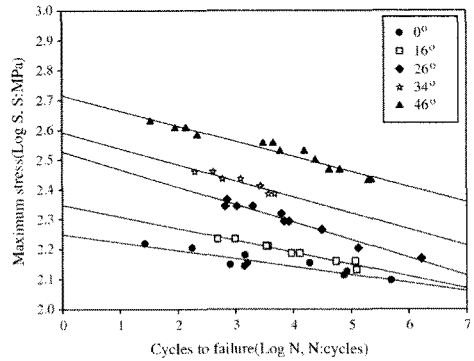


Fig. 10 Fatigue life of the sheared fabric specimens according to the shear angle.

정적 압축실험으로 측정된 재료의 압축강도이다. 피로실험으로 응력비율 r 과 피로수명 $\log N$ 의 관계를 구하고, 앞선 실험으로 구한 전단각에 대한 압축강도 값을 이용하면 최종적으로 Fig. 10과 같이 $\log S - \log N$ 의 그래프를 얻을 수 있다. 여기서 S 는 적용되는 피로응력, N 은 피로수명이다. 본 피로수명 그래프는 실제 고정판 구조에 걸리는 응력수준에 대한 피로수명을 예측하는데 사용된다.

4. 고정판의 국부적 물성예측

4.1 고정판의 국부적 변형

드레이핑 후 성형된 고정판의 변형량을 측정하기 위해 고정판의 국부적 위치에 따른 전단각을 측정하였다. 고정판의 위치에 따라 변형량이 다르기 때문에 비교적 형상이 복잡한 곳을 기준으로 전단각을 측정하였다. 전단각의 측정 위치를 Fig. 11에 표시하였으며, 각 위치별 전단각은 Table 2에 정리하였다. 측정결과 이종 골극이 심한 골두부 (A~D, 1~3, a~c in Fig. 11)에 높은 전단각이 집중되어있으며, 상대적으로 형상이 단순한 골간부 (Diaphysis)는 원통형상에 가까운 구조에 의해 전단변형이 거의 발생하지 않는 것을 알 수 있다.

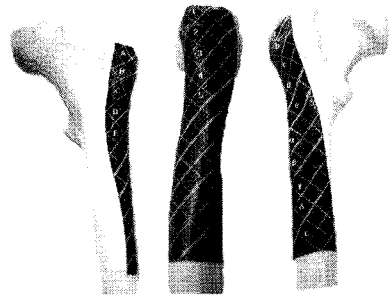


Fig. 11 Shear deformation map.

Table 2 Shear angles of each position

position	Shear angle(°)	position	Shear angle(°)
A	3	a	4
B	5	b	6
C	10	c	3
D	8	d	1
E	2	e	2
1	11	α	2
2	5	β	5
3	6	γ	5
4	1	δ	4
5	1	ε	4

4.2 고정판의 국부적 물성치 및 피로수명 예측

전단변형을 받은 복합재료 시편의 단면 관찰결과를 통해서 전단각 (θ)과 주름각 (ρ)과의 관계(Fig. 8)를 아래 식 (2)와 같이 제시하였다.

$$\theta = 3.84\rho - 21.43 \quad (2)$$

이러한 미세구조의 변형에 의한 압축강도의 실험결과를 이용하여 전단각을 갖는 평직 복합재료 시편의 압축 강도를 예측할 수 있는 식 (3)을 얻을 수 있다[13].

$$S_{sheared} = \frac{E_\beta}{E_0} S_0 m^2 + \frac{E_\beta}{E_{45}} S_{45} (1 - m) - (8.17\rho - 25.76) \quad (3)$$

식 (3)에서 S_0 와 S_{45} 는 각각 [0]_{16T} 시편의 압축강도와 [±45]_{4S} 시편의 압축강도이며, E_0 와 E_{45} 는 각각 [0]_{16T} 시편의 압축강성과 [±45]_{4S} 시편의 압축강성이다. E_β 는 [±β]_{4S} 시편의 압축강성으로 CLPT로 계산된 값이며, m 은 $\cos 2\beta$ 이다.

이상에서 구한 실험 값과 관련 수식을 바탕으로 고정판의 국부적 위치에 따른 직물 복합재료의 압축방향 물성을 계산하여 아래의 Table 3에 나타내었다. 이 값들을 전단변형을 겪지 않은 기준상태와 비교하였다. 이러한 결과를 통하여 3차원 입체형상을 갖는 구조에서 국부적인 전단 변형의 정도를 Fig. 12와 같이 도식화하여 각 부분에서의 압축강도, 강성 등의 물성치의 변화를 시각화하였다. 여기서 제시한 영계수와 압축강도는 고정판의 지지하중 형태 (횡방향 굽힘하중)를 고려하여 모두 대퇴골의 종방향 물성에 한정하였다.

Table 3에서 보이는 바와 같이 고정판의 국부적 위치에 따라 전단각, 주름각 및 압축강도 등이 변화함을 알 수 있으며, 고정판의 최대 및 최소 정적 압축강도는 각각 177.3MPa과 170.0MPa임을 알 수 있다. 수술을 받은 환자가 6개월의 치료기간 동안 2Hz의 보행속도로 하루 평균 4시간씩 보행을 하는 경우를 가정하면 골절부는 총 1,296,000 Cycle의 반복하중을 받게 된다. 복합재료 피로 실험의 결과 (Fig. 10)에 따르면 치료기간 중 재료 파손이 일어나지 않기 위해서는 $\log S_f$

Table 3 Local property variation of the draped bone plate according to the position

Position	Shear angle(°)	Crimp angle(°)	Modulus (GPa)	Strength (MPa)
Ref	0	5.57	15.5	170.6
A	3	6.36	16.9	170.0
B	5	6.87	17.9	170.6
C	10	8.18	20.9	175.6
D	8	7.66	19.6	172.9
E	2	6.10	16.4	170.1
1	11	8.44	21.5	177.3
2	5	6.87	17.9	170.6
3	6	7.14	18.4	171.1
4	1	5.84	16.0	170.3
5	1	5.84	16.0	170.3
a	4	6.61	17.3	170.2
b	6	7.14	18.4	171.1
c	3	6.36	16.9	170.0
d	1	5.84	16.0	170.3
e	2	6.10	16.4	170.1
α	2	6.10	16.4	170.1
β	5	6.87	17.9	170.6
γ	5	6.87	17.9	170.6
δ	4	6.61	17.3	170.2
ε	4	6.61	17.3	170.2

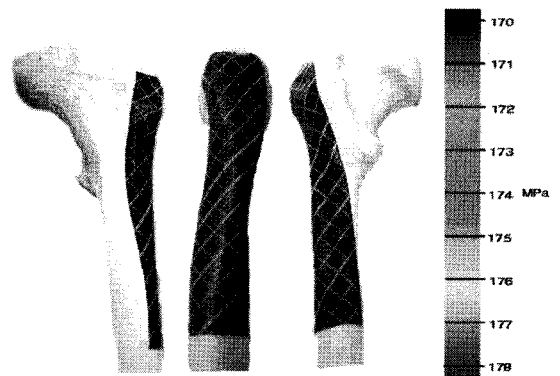


Fig. 12 Strength distribution of the bone plate.

2.1을 넘어서는 안 되기 때문에 대퇴골에 드레이핑 된 고정판은 피로응력이 약 100MPa ([45]_{16T} 기준)을 넘지 않으면 골절부의 치료기간 중 고정판의 파손을 방지할 수 있을 것으로 기대된다. 이러한 분석은 복합재료 고정판에 실제로 부가되는 하중에 의한 재료 내 응력분포의 계산을 통해 보다 정밀한 정량 평가가 이루어질 수 있을 것으로 판단된다.

상기 재료파손 평가절차는 복합재료 고정판이 체내 환경에 장기간 노출될 경우 발생할 수 있는 재료의 물성저하 현상을 고려하지 않은 결과이기 때문에 보다 정확한 피로특성 예측을 위해서는 복합재료의 환경실험 및 그에 따른 재료 물성저

하 실험을 수행하여 보다 정확한 재료물성 데이터베이스를 구축해야 한다. 또한 대상의 특성상 치료기간에 걸쳐 하중조건이 변화함 (치료 초기에는 보행이 거의 어려우며, 치료기간이 진전됨에 따라 정상보행에 근접한 보행이 가능함)에 따른 피로특성의 변화도 고려되어야 할 것으로 판단된다.

6. 결론

본 논문에서는 직물 복합재료의 압축 실험 및 피로 실험을 통해 얻은 전단각의 변화에 따른 강도, 강성 등의 정보를 이용하여 복합재료 내 국부적인 전단변형에 의한 미세 구조의 변화가 재료의 물성에 미치는 영향을 실험적으로 검증하였다. 또한 실험적으로 얻은 재료의 압축거동 결과를 대퇴골에 드레이핑 된 평직 탄소섬유/에폭시 복합재료 고정판의 재료거동 평가에 적용시키기 위한 연구를 수행하였다. 이를 위하여 드레이핑 된 고정판의 주요 부분에서 전단각을 측정하였으며, 선행 연구를 통해 얻은 전단각과 주름각의 관계, 전단각에 따른 재료거동 결과를 이용하여, 각 부분의 영계수와 압축강도 및 피로수명을 평가하였다. 실험 결과, 비교적 형상이 복잡한 대퇴 골두 부분에서 높은 전단각 (최대 11°)을 가짐을 알 수 있었으며, 이러한 국부적 재료변형에 따른 영계수 및 압축강도의 변화는 변형이 발생하지 않는 경우에 비해 각각 최대 38.7%, 3.9% (Position '1' in Fig. 11)로 나타났다. 비록 강도의 변화는 비교적 미미했으나, 영계수의 변화는 매우 큰 것을 알 수 있었으며, 이러한 정보는 실제 하중상태에 노출된 복합재료 고정판의 정확한 변형거동 및 파손을 예측하는데 중요한 정보를 제공할 것으로 판단된다. 이러한 국부적 변형에 의한 물성예측 정보는 향후 복잡한 복합재료 구조물의 유한요소해석을 이용한 구조설계에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 논문은 한국연구재단 (NRF)을 통해 교육과학기술부의 중견연구지원사업 (핵심연구지원) (2010-0009372)의 재정지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) 배지명, “섬유강화복합재료”, 대한치과의사협회지, 제47권, 제1호, 2009, pp. 17-24.
- 2) 이대길, 오박균, “복합재료 자동차 부품의 설계 및 제조 방법”, 자동차공학회지, 제16권, 제2호, 1994, pp. 45-54.
- 3) 송오섭, 김근택, “CAS 복합재료 항공기 날개의 에일러론

- 역전 특성 연구”, 한국항공우주학회지, 제37권, 제12호, 2009, pp. 1192-1200.
- 4) S.B. Sharma, M.P.F. Sutcliffe, and S.H. Chang, “Characterisation of material properties for draping of dry woven composite material”, *composites: Part A*, Vol. 34, No. 12, 2003, pp. 1167-1175.
- 5) J.R. Dufloy, J. De Moor, I. Verpoest, and W. Dewulf, “Environmental impact analysis of composite use in car manufacturing”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 58, No. 1, 2009, pp. 9-12.
- 6) S.H. Kim, S. H. Chang and H.J. Jung, “The finite element analysis of a fractured tibia applied by composite bone plates considering contact conditions and time-varying properties of curing tissues”, *Composite Structures*, Vol. 92, No. 9, 2010, pp. 2109-2118.
- 7) Z. M. Huang, and K. Fujihara, “Stiffness and strength design of composite bone plates”, *Composites science and technology*, Vol. 65, No. 1, 2005, pp. 73-85.
- 8) 김주호, 장승환, “골절 치료를 위한 복합재료 고정판 기초 설계 및 특성 평가” 한국 복합재료학회지, 제20호, 제5호, 2007, pp. 7-12.
- 9) S. Ramakrishna, J. Mayer, E. Wintermantel, Kam W. Leong, “Biomedical applications of polymer-composite materials: a review”, *Composite science and technology*, Vol. 61, No.9, 2001, pp. 1189-224.
- 10) 이원오, 엄문광, 변준형, Jian Cao “편향 인장 및 트렐리스 시험에 의한 직물 복합재료의 면내 전단 물성 평가”, 한국 복합재료학회지, 제23권, 제5호, 2010, pp. 8-14.
- 11) ASTM D 695 - 02a, “Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics.”
- 12) 유성환, 박석원, 장승환, “직조구조차이와 적층각의 변화에 따른 섬유강화복합재료의 압축 특성”, 한국복합재료학회지, 제22권, 제1호, 2009, pp. 15-21.
- 13) S. H. Yoo, S. W. Park, and S. H. Chang, “An experimental study on the effect of tow variations on compressive characteristics of plain weave carbon/epoxy composites under compressions”, *Composite Structures*, Vol. 92, No. 3, 2010, pp. 736-744.