

굽힘 하중을 받는 복합재 기계적 체결부의 강도예측에 관한 연구

백설* · 강경탁* · 이진아* · 전흥재*†

A Study on Strength Prediction of Mechanical Joint of Composite under Bending Load

Seol Baek*, Kyung-Tak Kang*, Jina Lee*, Heung-Jae Chun*†

ABSTRACT: This paper predicted the strength of mechanical joint of composites under bending load by means of the characteristic curve method. The method has been employed only for tensile and compression load conditions, but in this study, this method was extended to the bending load condition. For the finite element analysis (FEA), the non-linear analysis was conducted considering the contact and friction effects between composite material and pin. The failure strength and mode on characteristic curve were evaluate with Tsai-Wu failure theory. To validate the results of FEA, the experiments were conducted to find out the failure load by applying bending moment on the composite specimens. The results showed reasonable agreements with theoretical results. These results lead to a conclusion that the characteristic curve method can be applied to predict the bending strength of mechanical joint of composites.

초 록: 본 논문에서는 특성길이 및 특성 곡선 방법을 굽힘 하중 상태의 복합재 기계적 체결부에 적용하여 강도를 예측하는 연구를 수행하였다. 선행 연구들이 특성길이 및 특성 곡선 방법을 인장과 압축 하중에만 적용한 것과 달리 본 연구에서는 굽힘 하중에 적용하고 그 가능성을 확인했다. 체결부 파손 해석을 위해 ABAQUS를 사용하여 핀과 모재의 접촉 및 마찰을 고려한 비선형 해석을 수행하였다. 해석결과를 이용하여 얻은 특성 곡선상에서 Tsai-Wu 이론을 적용하여 파손 및 파단 양상을 예측하였다. 또한 복합재 시편에 굽힘 하중을 가해 파손하중을 알아보는 실험을 통해 검증한 결과 해석으로 얻은 복합재 체결부의 파손하중이 실험 결과와 매우 잘 일치함을 확인하였다. 결론적으로 특성길이 및 특성 곡선 방법이 굽힘 하중 상태의 복합재 기계적 체결부의 강도를 비교적 잘 예측할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

Key Words: 복합재료(Composite materials), 특성길이(Characteristic length), 강도예측(Prediction of strength), 굽힘하중(Bending load)

1. 서 론

복합재료는 우수한 내피로와 충격특성, 진동 감쇠 등의 우수한 기계적 특성과 경량화를 도모할 수 있다는 장점으로 그 사용이 증가하고 적용범위가 넓어지고 있다[1]. 복합재 사용량이 많아짐에 따라 당면하는 문제점 중 하나로 체

결 방법을 꼽을 수 있다. 복합재 구조물의 경우 대부분 체결부에서 취약함이 나타나게 되는데 이 체결부의 취약함이 전체 복합재 구조물의 안정성에 영향을 주게 된다. 이러한 이유로 복합재료 체결부 설계에 대한 연구의 중요성이 대두되고 있다. 복합재료 구조물의 체결방법은 크게 기계적 체결[2]과 접착에 의한 체결[3]로 나눌 수 있다. 기계적

Received 12 December 2014, accepted 26 December 2014

*School of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.

*†School of Mechanical Engineering, Yonsei Univ, Corresponding author (E-mail: hjchun@yonsei.ac.kr)

체결은 원공을 가공한 복합재를 볼트나 리벳 등을 이용해 결합하는 방식이고, 접착 체결은 접착제를 이용해 접합시키는 방식이다. 접착 체결의 경우, 구조적 신뢰성이 부족하다는 큰 단점을 내포하고 있기 때문에 하중을 전달하는 경로에 있는 구조물에서는 접착 체결을 사용하는 것에 큰 위험 부담이 따르게 된다. 이러한 이유로 접착 체결보다는 기계적 체결이 일반적으로 쓰이고 있다. 기계적 체결의 경우 분해결합이 쉽고 수리가 용이하다는 장점이 있으나, 원공 체결부 주위에 응력 집중이 발생하여 복합재의 강도가 저하된다는 단점 또한 갖고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 기계적으로 체결된 복합재 체결부의 파손 강도를 예측하는 방법에 대해서 많은 연구들이 진행되고 있다. 복합재 체결부의 파단은 적층판의 구성, 양식, 강화재와 모재의 특성, 체결부의 기하학 형상 등 많은 설계 요소들에 의해 영향을 받기 때문에 그 매커니즘을 정립하기에 어려움이 있다. 이에 Whitney 등[4]은 파손 평가식과 평균 응력을 통한 특성길이방법을 제시하였다. 특성길이방법은 복잡한 계산 없이 체결부의 파손강도나 파손양상 등을 쉽고 정확하게 예측할 수 있는 방법이다. Chang 등[5]은 인장특성길이와 압축특성길이를 조합한 특성곡선을 제안하였으며, Yamada-Sun 등의 파손식과 함께 적용하여 복합재 체결부의 파손 강도와 파손 양상을 예측하였다. 이외에 많은 선행연구들이 인장 시험과 압축 시험을 통해 특성길이 및 특성곡선을 구하였고, In-plane 하중상태에서의 체결부 강도 평가 연구를 진행하였다. 하지만 복합재의 적용범위가 넓어지고 체결부가 받는 하중이 다양한 혼합하중인 만큼 In-plane 하중상태 뿐만 아니라 Out-of-plane 하중상태에서의 복합재 체결에 관한 연구가 매우 중요한 실정이다. 그러나 기존 연구들이 대부분 인장이나 압축인 In-plane 하중을 받을 때의 복합재 체결에 관한 연구이기 때문에 굽힘 하중 등으로 인한 Out-of-plane 하중 상태에서의 체결 연구가 매우 부족하다. 이런 이유로 본 연구에서는 특성 길이 및 특성 곡선의 개념을 이용하여 Out-of-plane 하중 상태에서의 강도를 예측하고자 하였다. 유한요소해석을 통해 특성 곡선과 Tsai-Wu 파손식을 적용한 인장 및 굽힘 하중 하에서의 파손 양상을 비교 분석하여 굽힘 하중 상태에서의 특성 길이 및 특성 곡선 적용 가능성을 연구하고자 하였다. 또한 실험을 통해 해석 결과를 검증하여 굽힘 하중에서의 특성 길이 개념 적용 가능성과 그 정확성을 알아보았다.

2. 이 론

2.1 특성 길이 방법의 기본 개념

복합재료 적층판은 파단 강도 및 이방성 강도 등이 파단 양상과 밀접한 관계를 갖는다. 특히 기계적 체결로 인해 원공이나 노치 등을 갖는 복합재료 적층판의 경우 파단 강도 예측을 위해 특성 길이의 개념을 사용한다. 특성 길이 방법

은 실험과 해석적인 기법을 결합한 것으로 실험으로 얻은 특성 길이를 해석적 방법으로 파손 하중을 결정할 때 적용하는 방법이다. 특성 길이는 압축 특성 길이와 인장 특성 길이가 있다. 압축 하중에 대한 특성 길이는 다음과 같은 방법으로 구한다. bearing 실험에서 구한 bearing 하중을 사용하여 유한요소해석을 수행한다. 해석 결과 원공 전방부에서 압축 응력의 크기와 실험으로 얻은 bearing 강도가 동일한 값을 갖는 원공 전방부의 위치를 도출한다. 이 때, 원공으로부터 그 위치까지의 거리를 압축 특성 길이로 정의한다. 인장 하중에 대한 특성 길이는 실험을 통해 원공이 없는 시편의 인장 강도를 구하고 그 값이 유한요소해석으로부터 계산된 두께방향 평균인장응력과 동일한 값을 갖게 되는 위치와 원공사이의 거리로 정의된다.

2.2 특성 곡선 기본 개념 및 파단 양상

기계적으로 체결된 체결부에 하중이 부과될 때 항상 인장이나 압축에 의해서만 파손에 발생하지는 않을 것이다. 현실적으로 많은 경우 원공의 전방이나 좌우 가장자리가 아닌 임의의 중간 위치에서 파손이 발생한다. 따라서 특성 길이 방법의 개념을 확장하여 특성 곡선의 개념을 도입한다. 특성 곡선은 Fig. 1과 같이 인장특성길이(R_{ot})와 압축특성길이(R_{oc})를 기준으로 추정된 가상의 곡선으로 혼합하중에 의한 파손의 경우에도 이 곡선 상에서의 응력값으로 파손여부를 판정할 수 있다. 체결부의 형상이나 적층 등에 따라 특성 곡선의 정의가 조금씩 달라질 수 있지만 식 (1)에 나타나 있는 Chang 등[5]의 특성 곡선 식이 주로 사용된다. 보통의 경우 식 (1)과 같이 특성 곡선위의 임의의 점에서 파단조건식의 좌변이 1에 도달하는 하중값을 파단 하중으로 정의하고, 그때의 위치로 파단 양상을 정의한다. 식 (1)과 Fig. 2에서 확인할 수 있듯이 보통 θ_f 가 0°에서 15° 사이에 위치할 경우, 순수 압축에 의한 파손인 베어링 파손으로 평가한다. θ_f 가 30에서 60까지, 약 45 근처일 경우에는 전단에 의한 파손으로 판단하고 θ_f 가 75 이상일 때는 순수 인장에 의한 파손인 인장 파손으로 본다. 본 연구에서는 Tsai-Wu 이론 식 (2)을 파단 조건식으로 선정하여 연구를 수행하였다.

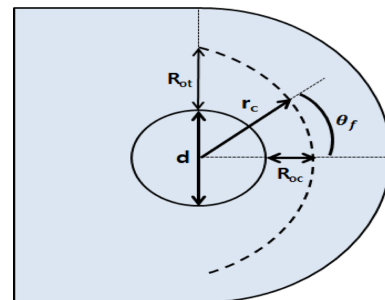


Fig. 1. Characteristic curve

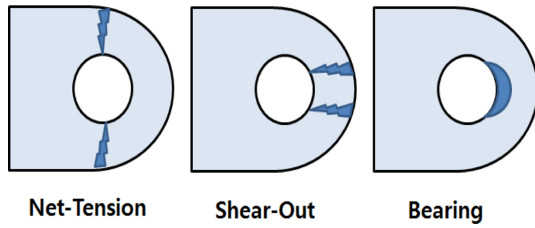


Fig. 2. Failure modes of mechanical joints

$$r_c(\theta) = \frac{d}{2} + R_{ot} + (R_{oc} - R_{ot})\cos\theta \quad (1)$$

$0^\circ \leq \theta_f \leq 15^\circ$: Bearing mode

$30^\circ \leq \theta_f \leq 60^\circ$: Shear out mode

$75^\circ \leq \theta_f \leq 90^\circ$: Net-tension mode

$$f_1\sigma_1 + f_2(\sigma_2 + \sigma_3) + f_{11}\sigma_1^2 + f_{22}(\sigma_2^2 + \sigma_3^2) + f_{44}\tau_4^2 + f_{66}(\tau_5^2 + \tau_6^2) + 2f_{12}(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_1\sigma_3) + 2f_{23}\sigma_2\sigma_3 = 1 \quad (2)$$

3. 시편 제작 및 체결부 시험

본 연구의 시험에서는 인장 하중 및 굽힘 하중의 체결부 시험 평가 및 비교를 통해 특성길이 및 특성 곡선의 굽힘 하중에의 적용 가능성을 파악하고, 이로써 Out-of-plane 방향으로의 파손 및 파단 양상을 알아보고자 하였다.

3.1 시편 제작

복합재료 기계적 체결부의 강도를 평가하기 위해서 복합재 기계적 체결부 시편을 제작하여 파손강도 및 파단 양상 실험을 수행하였다. 시편은 SK사의 USN 125 carbon/epoxy 일방향 프리프레그를 사용하여 제작하였으며 물성 값은 Table 1에 나타나 있다.

Table 1. Material properties of USN-125

Property	Symbol	Value
Elastic modulus in fiber-direction	E_1	131 GPa
Elastic modulus in transverse direction	E_2, E_3	8.2 GPa
Shear modulus in 1-2 and 1-3 planes	G_{12}, G_{13}	4.5 GPa
Shear modulus in 2-3 planes	G_{23}	3.5 GPa
Poisson's ratio	ν_{12}, ν_{13}	0.281
	ν_{23}	0.47
Tensile strength in fiber-direction	X^T	2000 MPa
Tensile strength in transverse direction	Y^T	61 MPa
Compression strength in fiber-direction	X^C	1400 MPa
Compression strength in transverse direction	Y^C	130 MPa
Shear strength in 1-2 and 1-3 planes	S_{12}, S_{13}	70 MPa
Shear strength in 2-3 plane	S_{23}	40 MPa

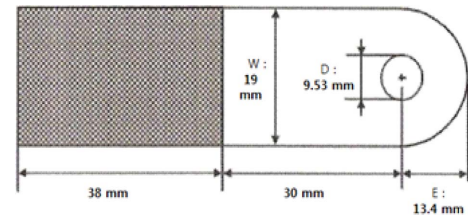


Fig. 3. Geometry of model

Table 2. Geometry dimensions for the Specimens

	Specimen
Diameter	9.53 mm
Width	19.00 mm
Edge-distance	13.40 mm
W/D	2.0
E/D	1.4

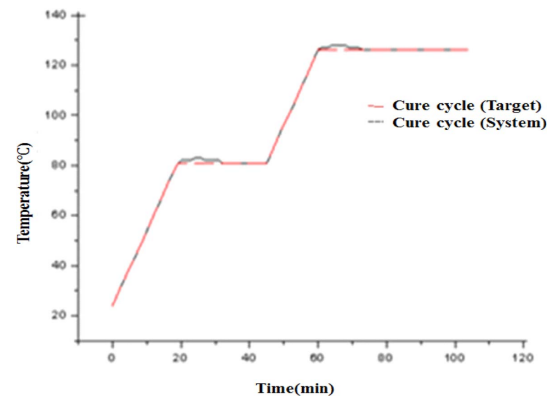


Fig. 4. Cure cycle of composites

체결부의 기본형상은 Fig. 3과 같으며 Fig. 3의 형상에서 복합재의 너비 Width와 원공의 지름 Diameter의 비를 W/D로 표현하고 원공까지의 거리와 원공의 지름 Diameter의 비를 E/D로 표현한다. 형상에 대한 치수는 Table 2와 같다. 시편의 적층각은 $[(\pm 45)_3/90/(\pm 45)_2/0_4/90/0_4/(45)_2/90/(\pm 45)_3]$ 를 선정하였다.

시편은 Heating system이 연결된 평판 성형용 몰드를 통해 Mini-autoclave 성형 방법으로 제작되어 기계적 성질을 우수하게 하였다. 시편 제작에 적용된 경화 사이클은 Fig. 4와 같다. 시편의 절단 및 원공 가공은 다이아몬드 커터와 다이아몬드 드릴을 이용하였고 원공의 가공 시 발생하는 층간분리를 최소화 하기 위해 드릴링 작업 시 복합재 적층판 아래에 얇은 금속판을 받쳐서 가공하였다.

3.2 실험 장치 및 실험

체결부 인장 시험 및 굽힘 시험의 지그 그림은 Fig. 5와 Fig. 6을 통해 확인할 수 있다. 인장 시험은 Fig. 5와 같이 핀으로

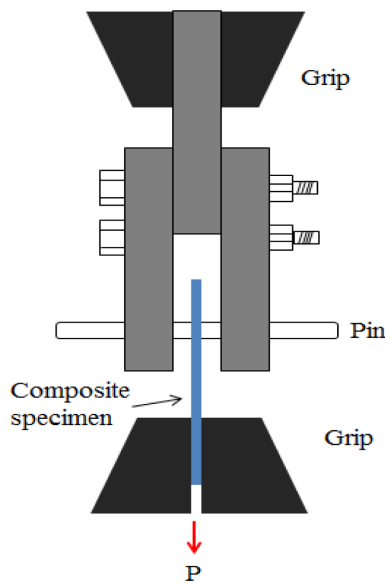


Fig. 5. Schematic drawing of tension test fixture

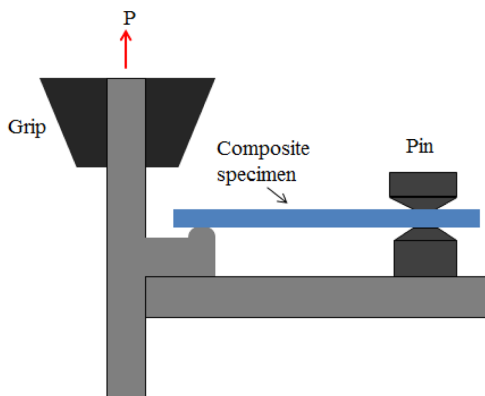


Fig. 6. Schematic drawing of bending test fixture

고정된 복합재 시편이 파손될 때까지 하중 P 를 가한다. 이 때 시편이 파손될 때의 하중값 P 를 파손 하중인 Failure load P 로 정의한다. 굽힘 시험도 마찬가지로 복합재 시편의 끝단에 모멘트가 가해지도록 지그에 하중 P 를 주고 시편이 파손될 때 파손 하중을 Failure load P 로 정의한다. 또한 굽힘 시험의 경우, 볼트 체결시 볼트의 머리부로 인한 조기 파손을 방지하고 원공 부분에서 파손이 일어나도록 체결부 그립 지그에 경사를 주어 볼트 체결부를 모사하였다. 실험 기로는 MTS(Material Test System) 810을 사용하였다. 하중은 변위제어를 통해 2 mm/min의 속도를 적용하였다. 평균적인 값을 도출하기 위해 총 3번의 반복시험을 수행하였다.

3.2 실험 결과

인장 하중에 대한 실험 결과는 다음 Fig. 7과 같다. Fig. 7은 Force와 Displacement의 값을 나타낸 그래프이며, 파손이 일어날 때의 하중값인 Failure load P 가 5.62 kN로 도출되

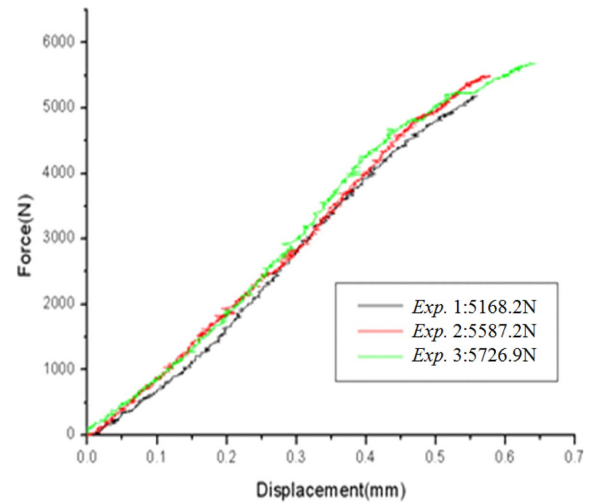


Fig. 7. Tensile force-displacement curves

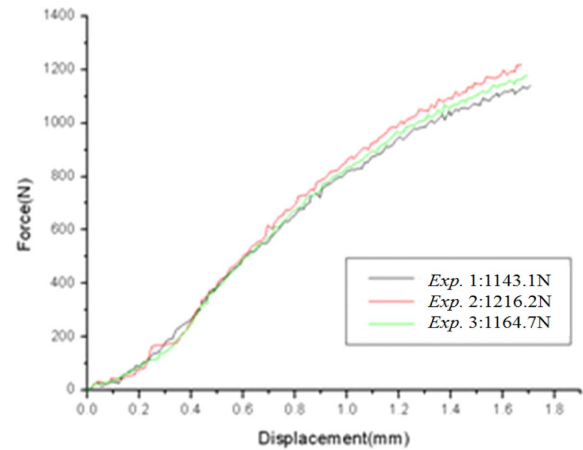


Fig. 8. Bending force-displacement curves

었다. 굽힘 하중에 대한 실험 결과는 Fig. 8과 같고, Fig. 6과 같이 복합재 시편의 끝단에 하중을 가하여 모멘트를 주고 시편의 파손이 일어날 때의 하중 P 값을 도출한다. 시편의 파손이 일어날 때 Failure load P 값은 1.174 kN이다. 실험을 통해 얻은 Failure load P 값과 특성곡선 개념을 이용해 수행한 해석의 값 비교를 통해 연구 목표의 가능성을 확인한다.

4. 특성 곡선 개념을 이용한 체결부 유한요소 해석

4.1 유한요소해석 모델

굽힘 하중을 받는 체결부에서 특성길이 및 특성 곡선 개념의 타당성을 검증하기 위해서 인장 하중과 굽힘 하중을 같은 시편에 대하여 적용한 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석을 위해 상용 프로그램인 ABAQUS 6.10을 사용하였다. 복합재료의 적층을 표현하기 위하여 3차원 적층 구조를 구현하는 Shell element를 사용하였다. 유한요소모

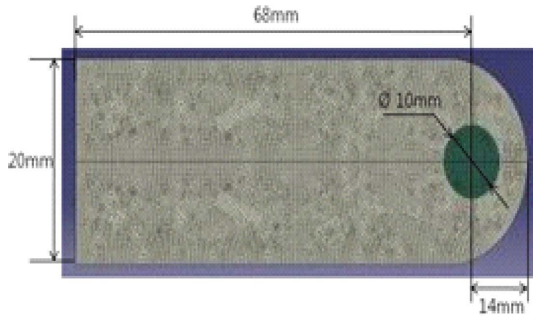


Fig. 9. Geometry and size of FEA model

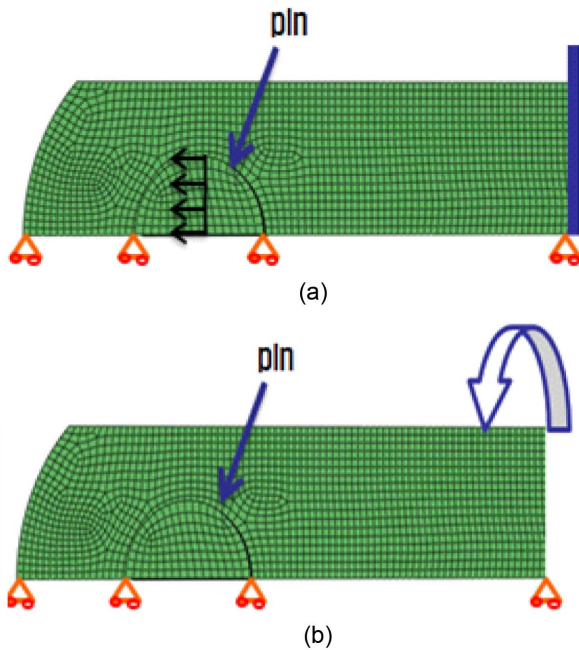


Fig. 10. (a) Loading and boundary conditions (Tension), (b) Loading and boundary conditions (Bending)

델 시편의 형상은 Fig. 9와 같고, 시편 형상의 수치는 Table 2, 복합재료의 물성은 Table 1에 나타나있다. 접촉현상을 적용하기 위하여, 체결 핀과 복합재료의 원공주변에 각각 Contact 요소를 이용하여 복합재료와 핀의 접촉현상을 이용한 구속조건을 적용하였다. Contact 시 적용된 마찰계수는 0.1이다. 모델은 1축에 대하여 대칭이므로 Fig. 10과 같이 대칭경계조건을 이용하여 해석하였고 핀은 3자유도를 구속하여 고정된 것으로 가정하였다. 핀의 재질은 물성이 $E = 210 \text{ GPa}$, $\nu = 0.3$ 인 steel을 사용하였다.

하중조건은 실험에서와 같은 형상 및 적층순서를 갖는 시편에 대해 인장 하중과 굽힘 하중을 각각 적용하였다. 같은 시편에 인장 하중과 굽힘 하중을 가해주었을 때의 체결부의 파손모드가 일치함을 확인함으로써, 본 연구에서 제시한 특성 길이, 곡선 개념을 통한 파단 및 파단 양상 예측방법이 굽힘 하중에도 적용 가능함을 확립하고자 하였다.

Table 3. Results of failure loads

Loading condition	Failure load P
Tension	5.48 kN
Bending	1.121 kN

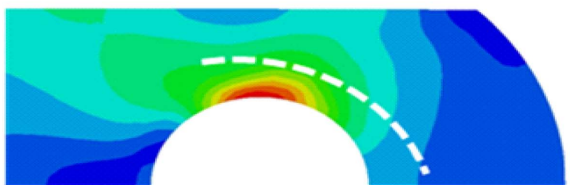
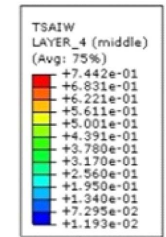
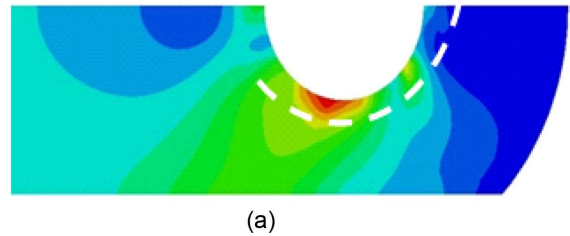
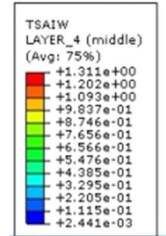


Fig. 11. (a) Net-tension failure of tension, (b) Net-tension failure of bending

4.2 해석 모델의 파손 평가

Fig. 9와 같은 형상을 갖는 유한요소모델 시편에 Fig. 10과 같이 인장하중과 굽힘 하중을 적용하여 체결에 대한 해석을 수행한 결과는 다음과 같다.

먼저 별도로 수행한 특성길이를 통해 얻은 특성 곡선 위에서 Tsai-Wu 값이 1이 될 때 시편이 갖는 최대 응력값을 파손 하중인 Failure load P라 정의하였다. 도출된 Failure load P는 Table 3과 같다. 굽힘의 경우, 시편이 파손될 때 시편의 끝단에 적용되는 하중값 P를 파손 하중으로 정의하였다.

인장 하중을 적용하여 수행한 해석 결과, Fig. 11(a)와 같이 특성 곡선에서의 Tsai-Wu 값이 1이 될 때 네번째 ply에

Table 4. Experiment and FEM Failure load P

	Failure load P		Error (%)
	Experiments	FEM	
Tension	5.62 kN	5.48 kN	-2.5
Bending	1.174 kN	1.121 kN	4.7

서 net-tension mode로 파단이 발생했다. 같은 유한요소모델 시편에 굽힘 하중이 가해진 경우의 결과, Fig. 11(b)와 같이 90의 각을 갖는 4번째 ply에서 net tension failure가 발생했다. 특성길이 및 곡선 개념을 이용해 인장하중을 가해줄 때와 굽힘 하중을 가하여 얻은 파손 모드가 같은 ply에서 같게 나오는 것으로 보아 특성길이개념을 인장이나 압축 등의 In-plane 하중 상태 뿐 아니라 굽힘 하중과 같은 Out-of-plane 하중 상태에도 적용 가능함을 알 수 있다.

4.3 실험결과를 통한 검증

유한요소해석 모델의 파손평가를 앞서 도출한 실험결과를 통해 비교 분석하여 검증하였다. 앞서 얻은 실험결과를 Fig. 7과 Fig. 8을 통해 확인할 수 있다. 실험결과로 얻은 시편의 실제 실험적 Failure load P를 평균적으로 구한 값과 해석 모델에서 얻은 Failure load P를 정리한 결과는 Table 4에 나타나 있다. Table 4를 통해 알 수 있듯이 인장 하중의 오차율은 -2.5%, 굽힘 하중의 오차율은 약 4.7%로 비교적 낮다. 따라서 굽힘 하중 상태에서의 체결부 파손강도 예측에 인장 하중 상태에서 사용하는 특성길이 및 곡선 개념이 적용 가능하다고 보여진다. 이를 토대로 Out-of-plane 하중 상태에서의 파손 및 파단 양상을 특성 길이 개념을 통해 도출할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 특성길이개념의 Out-of-plane 하중 하에서 복합재 기계적 체결부에 적용 가능성을 살펴보고자 하였다. 굽힘 하중이 적용된 복합재 기계적 체결부에 대한 유한요소해석과 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 같은 유한요소모델 시편에 대해 인장 하중과 굽힘 하중을 가하고 특성길이개념을 적용하여 얻은 파손 모드가 같은 것으로 보아, 특성길이개념이 In-plane 하중 상태에서의 파손 뿐 아니라 Out-of-plane 하중 상태에서의 파손 및 파단 양상도 예측할 수 있다는 가능성을 시사했다.

(2) 굽힘 하중을 특성길이개념에 적용하여 얻은 유한요소해석 모델에 대한 파손 하중값을 실험으로 검증한 결과, 굽힘 실험에 의한 파손 하중값과의 오차율이 4.7%로 비교적 낮은 결과를 보였다.

(3) 파손식에 따른 체결부 강도 해석 결과, Tsai-Wu 식을

적용할 경우 실험값과 비교적 가까운 결과를 얻을 수 있었다.

(4) 모든 결과들을 종합하였을 때, 특성길이개념의 Out-of-plane 하중 상태에서의 적용 가능성과 그 정확성을 파악할 수 있었고, 특성길이개념을 이용한 Out-of-plane 하중 상태에서의 강도 예측 평가가 가능하다는 결론을 얻었다.

후 기

본 연구는 현대자동차가 지원하는 연구과제로 수행된 것이며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

REFERENCES

1. Jones, R.M., "Mechanics of Composite Materials", McGraw Hill, NY, 1975.
2. Gweon, J.H., Choi, J.H., and Chun, Y.J., "A Study on the Strength of Mechanically Fastened Composite Joint," *Journal of the Korean Society for Composite Material*, Vol. 15, 2002, pp. 9-16.
3. Kim, T.H., Sung, M.S., Gweon, J.H., and Choi, J.H., "A Parametric Study on the Strength of Single-Lap Bonded Joints of Carbon Composite and Aluminum," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 20, 2007, pp. 34-42.
4. Whitney, J.M., and Nuismer, R.J., "Stress Fracture Criteria for Laminated Composites Containing Stress Concentration," *Journal of Composite Materials*, Vol. 10, 1974, pp. 253-265.
5. Chang, F.K., and Scott, R.A., "Strength of Mechanically Fastened Composite Joints," *Journal of Composite Materials*, Vol. 16, 1982, pp. 470-494.
6. Park, N.H., Gweon, J.H., Choi, J.H., Kim, K.S., and Lee, S.K., "A study on the Mechanical Joint Analysis of Composite Laminate Using Characteristic Length," *Journal of The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, 2001, pp. 295-299.
7. Chun, Y.J., Choi, J.H., and Kweon, J.H., "A Study on the Strength of Mechanically Fastened Composite Joint Using the Failure Area Index Method," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 16, 2003, pp. 1-8.
8. Hart-smith, L.J., "Mechanically Fastened Joints for Advanced Composites - Phenomenological Considerations and Simple Analysis," *Fibrous Composite in Structural Design*. Plenum Press, 1980, pp. 543-574.
9. Whitney, J.M., and Nuismer, R.J., "Uniaxial Failure of Composite Laminated Containing Stress Concentrations," *Fracture Mechanics of Composites*, 1975, pp.117-148.
10. Hollman, K., "Failure Analysis of Bolted Composite Joints Exhibiting In-plane Failure Modes," *Journal of Composite Materials*, Vol. 30, 1996, pp. 358-383.
11. Pierron, F., and Cerisier, F., "A Numerical and Experimental Study of Composite Materials," Vol. 34, 2000, pp. 1028-1054.
12. Chang, F.K., "The Effect of Pin Load Distribution on the Strength of Pin Loaded Holes in Laminated Composites," *Journal of Composite Materials*, Vol. 20, 1986, pp. 401-408.