

굽힘 하중을 받는 알루미늄 하니컴 샌드위치 복합재료의 강도 및 변형 특성

김 형구* · 최 낙삼**

Characteristics of Strength and Deformation of Aluminum Honeycomb Sandwich Composites Under Bending Loading

Hyoung-Gu Kim*, Nak-Sam Choi**

Abstract

The strength characteristics as well as deformation behaviors of honeycomb sandwich composite (HSC) structures were investigated under bending in consideration of various failure modes such as skin layer yielding, interface-delamination, core shear deformation and local buckling. Deformation behaviors of honeycomb sandwich plates were observed with various types of aluminum honeycomb core and skin layer. Their finite-element analysis simulation with a real model of honeycomb core was performed to analyze stresses and deformation behaviors of honeycomb sandwich plates. Its results were very comparable to the experimental ones. Consequently, the increase in skin layer thickness and in cell size of honeycomb core had dominant effects on the strength and deformation behaviors of honeycomb sandwich composites.

Key Words: 하니컴 샌드위치 복합재료(honeycomb sandwich composite), 층간 분리(interfacial delamination), 국부 좌굴(local buckling), 파괴 거동(fracture behavior)

1. 서론

섬유 강화 복합재료인 CFRP 혹은 GFRP를 외피층으로하고 하니컴 코어를 심재로 하는 하니컴 샌드위치 복합재료(honeycomb sandwich composites, HSC)적층판은 요구되는 구조물의 강도와 강성을 유지하면서 효율적인 경량화를 이룰 수 있는 고강도 및 고강성 구조 재료로써 항공·우주산업, 군수 산업 등 다양한 산업분야에서 광범위하게 적용되고 있다.

하니컴 코어를 심재로 한 하니컴 샌드위치 복합재료 적층판은 기계적 하중 작용 시에 외피층 항복(skin layer yielding), 외피층 파손(skin layer fracture), 국부적인 코어 좌굴(local core buckling)과 같은 다양한 변형 및 파손 형태를 가지게 되며 실험을 통해 연구하였지만[1,2] 다양한 변형거동의 예측 및 모사는 이루어지지 않았다.

굽힘 하중 시에 발생하는 다양한 파손 거동은

코어 재료의 기계적 물성값과 샌드위치 적층판의 길이 및 두께에 좌우되며 간단한 이론식을 적용하여 파손 하중을 예측하고자 하는 실험적 연구 [3]가 진행되었으나, 유한요소 해석을 도입하는 과정에서 하니컴 코어의 등가 물성값과 솔리드 요소(solid element)를 사용한 등가 플레이트 모델링을 이용하였기 때문에 하니컴 코어의 변형 거동의 정확한 모사는 매우 어려웠다.

저자들[4]은 알루미늄 하니컴 샌드위치 복합재료의 인장특성에 대한 실험과 유한요소 수치해석을 통해 초기 층간분리가 존재하는 경우에도 적층판의 강성과 인장강도에는 거의 영향을 주지 않으며 코어의 셀벽 두께가 증가할수록, 셀 크기가 감소할수록 층간분리를 야기 시키는 전단응력 값이 증가함을 알았다. 이로 인해 외피층과 코어 층 사이의 접착층에서 항복이 발생하여 국부적인 층간분리가 일어나 최종적으로 외피층이 파단하는 것임을 알 수 있었다.

본 연구에서는 알루미늄 하니컴 샌드위치 복합

* 한양대학교 대학원 기계설계학과

** 한양대학교 기계공학과

재료 적층판을 대상으로 3점 굽힘 실험을 수행하여 하니컴 코어의 셀 크기 및 외피층 두께 변화에 따른 굽힘 강성(탄성계수) 및 강도를 측정하고 변형 및 파손 과정을 파악하고자 한다. 또한 하니컴 코어의 실제 형상을 모델링하는 방법으로 3점굽힘 실험의 유한요소 시뮬레이션을 수행하고 변형 거동특성과 각 층간의 응력 분포를 구하고자 한다.

2. 실험

2.1 하니컴 샌드위치 복합재료 및 시험편 제작

Fig. 1(a)와 같이 외피층과 하니컴 코어층 사이에 접착 필름을 삽입한 완전접착 시험편(perfect bonding specimen)과 Fig. 1(b)와 같이 시험편 중앙부의 외피층과 하니컴 코어층 사이에 테프론 필름(teflon film)을 30mm×30mm의 면적으로 삽입한 층간분리 시험편(interface delamination specimen)을 제작하였다. 하니컴 샌드위치 복합재료(HSC) 적층판의 외피층(skin layer)재료는 glass fabric/epoxy prepreg(두께: 0.125mm)를 각각 4장(두께: 0.5mm)과 8장 적층(두께: 1mm)한 것이며, 하니컴 코어층의 재료로는 Showa Aircraft Industry Co., Ltd.사에서 제작한 것으로 하니컴 두께는 0.196"(5mm), 셀벽 두께(0.0015")(0.038mm)이면서 셀 크기가 1/8"(3.175mm)와 1/4"(6.35mm)인 두 종류의 알루미늄 하니컴 AL1/8"-5052-0015", AL1/4"-5052-0015" 재료를 사용하였다.

접착 필름(adhesive film)은 (주)한국 화이바의 Bondex206을 사용하였다. 외피층과 접착필름 및 하니컴 코어층을 적층한 뒤 오토 클레이브를 사용하여 진공 백(vacuum bag)성형 방법으로 동시 경화(co-curing)하여 경화된 HSC 평판을 다이아몬드 휠 커터로 절단하여 Fig. 1과 같은 시험편을 제작하였다.

2.2 3점 굽힘 실험

Fig. 2와 같이 Zwick사의 만능시험기를 이용하여 3점굽힘 실험을 수행하였다. 인덴터와 두 지지부의 단면은 반경 4mm의 반원 형태로 가공 제작되었으며 지지부 사이의 거리는 250mm, 하중 속도는 2mm/min로 하였고 실험 시에 비디오 광학 현미경(video microscope system)을 이용하여 인덴터와 접촉하는 시험편 중앙부에서의 외피층 및 하니컴 코어층의 변형 거동을 관찰하였다.

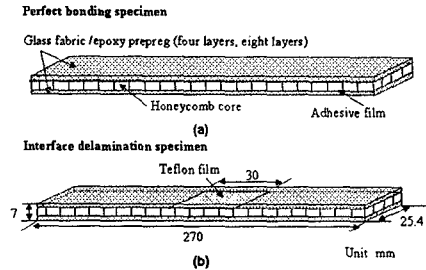


Fig. 1 Schematic of perfect bonding specimen(a) and interface delamination specimen(b)

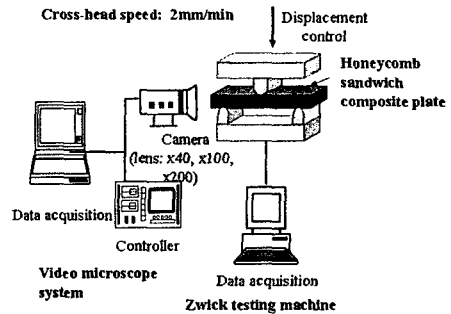


Fig. 2 Schematic diagram of three-point bending test

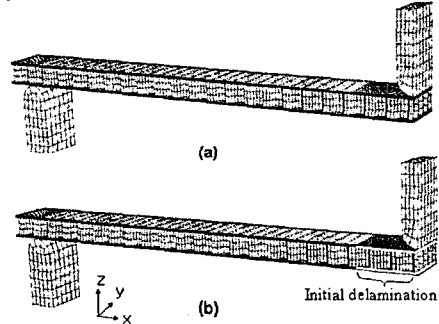


Fig. 3 Analysis model for FEA simulation: (a)perfect bonding model, (b)interface delamination model

3. 유한요소 해석

굽힘 하중 작용 시 알루미늄 하니컴 샌드위치 복합재료 시험편의 각 층의 응력 분포와 하니컴 코어의 변형 거동을 해석하기 위하여 상용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS 6.4-1을 이용하였다. 복합재료 외피층(composite skin layer)과 접착층(adhesive layer)은 8절점 솔리드 요소(eight node solid element)와 하니컴 코어(honeycomb core)는 4절점 쉘 요소(four nodes shell element)를 이용한 3점 굽힘 실험의 4분의 1 모델링을 통해 시험편과 동일한 경계조건을 주어 유한요소 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 3(a)는 접착 필름이 삽입된 완전접착 모델

Table 1 Material properties of components

Material	Young's Modulus(GPa)	Poisson's Ratio(v)	Yield Stress(MPa)
Composite skin layer	23.5	0.17	424±12.6
Adhesive layer	3.4	0.34	28.2
Core layer	1.69×10 ³	0.99	0.7±0.3
Al material	70	0.33	190

이며, Fig. 3(b)는 복합재료 외피층(composite skin layer)과 하니컴 코어층(honeycomb core layer) 사이에 초기 층간분리(initial delamination)영역을 30mm×30mm의 면적으로 주어진 층간분리 모델이다. 위의 두 가지 모델에서 하니컴 코어는 실제 형상(real geometry)에 따라 모사하였다.

또한 외피층과 하니컴 코어층 사이의 접착층(adhesive layer)은 완전소성거동으로 가정하여 0.1mm의 두께로 모사하였다.

시뮬레이션에 필요한 각 층의 기계적 물성값은 Table 1에 나타낸다[4].

4. 결과 및 고찰

4.1 완전 접착 시험편의 3점 굽힘 실험 및 유한요소 해석

Fig. 4는 실험 및 유한 요소 해석을 통해 얻은 코어의 셀 크기가 1/8"이고 외피층 두께가 각각 0.5mm, 1mm인 HSC 적층판의 하중-변위 곡선이다. 굽힘 강성(굽힘 탄성계수, 그림에서 기울기에 해당) 및 최대 하중은 유한요소 해석 결과가 미소하게 큰 값이지만 실험결과와 거의 일치하였다.

또한 외피층의 두께가 0.5mm에서 1mm로 증가함에 따라 굽힘 강성은 약 2.3배 커졌다. 이는 HSC의 유효 굽힘 강성은 적층이론에 따라 외피층과 코어층의 탄성계수 및 두께에 의존하므로 외피층의 두께가 증가할수록 굽힘강성은 증가하게 된다.

Fig. 5(a)와 (b)는 셀 크기 증가에 따른 변형 및 파손 거동을 실험과 유한요소 해석으로 구한 결과이며 셀 크기가 1/8"인 경우, 코어층의 국부적인 좌굴이나 변형이 상대적으로 적게 일어났으며 최종적으로 외피층의 파손이 발생하였다. 반면에, 셀크기가 1/4"인 경우에는 하중 증가 초기부터 코어층의 국부적인 좌굴현상이 크게 발생하며 최종적으로 외피층의 붕괴현상이 발생했으며 유한요소 해석 결과로 구한 Von-mises 응력분포(그림에서 어두운 부분)와 코어의 변형 거동을 통해 실험 결과의 예측이 가능하였다.

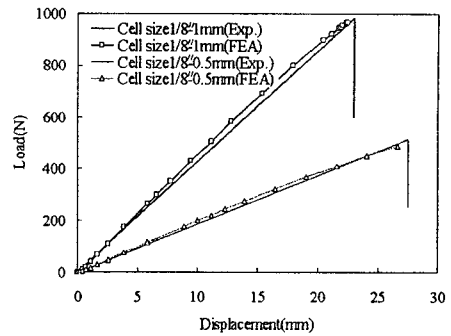


Fig. 4 Load-displacement curves of HSC with cell size 1/8" obtained by experiment and FEA

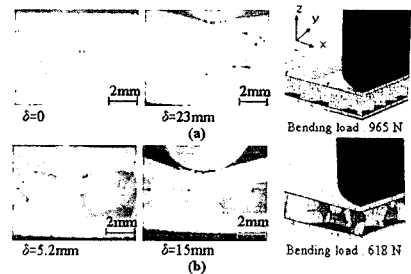


Fig. 5 Local deformation behavior of HSC with the skin layer of 1mm thickness for cell size 1/8"(a) and 1/4"(b) obtained by experiment and FEA

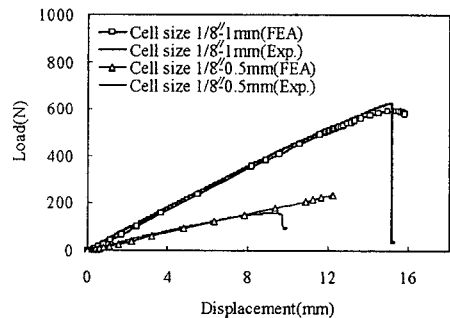


Fig. 6 Load-displacement curves of HSC with initial delamination for cell size 1/8" obtained by experiment and FEA

4.2 층간 분리 시험편의 3점 굽힘 실험 및 유한요소 해석

Fig. 6은 실험과 유한요소 해석을 통해 구한 층간분리 시험편의 하중-변위 곡선이다. 시험편에 초기 층간분리가 존재하는 경우에도 굽힘 강성은 큰 변화가 없음을 알 수 있다.

반면에, Fig. 7(b)의 외피층 두께가 0.5mm인 경우의 최대 하중값은 외피층 두께 1mm인 경우(Fig. 7(a))와 달리 실험과 유한요소 해석 결과가 다소 큰 차이를 보이고 있는데, 이는 굽힘 하중이

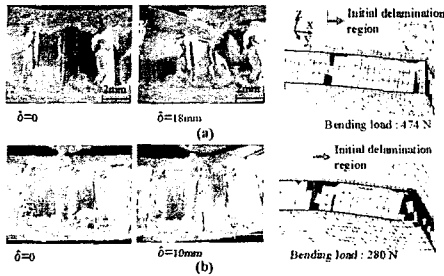


Fig. 7 Local deformation behavior of HSC with initial delamination of 1mm thickness of skin layer for cell size 1/8"(a) and 1/4"(b) obtained by experiment and FEA

Table 2 Flexural modulus and bending strength of perfect bonding and interface delamination specimen

	Flexural modulus(GPa)			Bending strength(MPa)		
	Perfect bonding	Initial delamination	difference (%)	Perfect bonding	Initial delamination	difference (%)
1/8"-1mm	18.2	17.0	6.5	297	204	31.3
1/4"-1mm	18.2	16.2	10.9	187	130	30.4
1/8"-0.5mm	12.0	11.4	5.0	198	70	64.6
1/4"-0.5mm	11.9	10.6	10.9	139	47	68.2

증가함에 따라 시험편의 초기 층간분리 영역이 갑작스럽게 확장되어 외피층과 코어층 전체가 완전 분리되는 파손 거동을 유한요소 해석으로 묘사하지 못하였으므로 실험으로 구한 최대 하중보다 크게 나타난 것으로 생각된다.

그러나 유한요소 해석을 통해 초기 층간분리 영역에서 큰 굽힘 변형이 발생하고 있으며 항복 응력 도달 영역은 층간분리 영역뿐만 아니라 그 이외 부분도 항복응력에 도달하고 있는 응력 분포로부터 시험편 전체의 급격한 층간분리 확장 현상을 예측할 수 있다.

4.3 굽힘 강성과 굽힘 강도 평가

실험을 통해 얻은 완전접착 시험편과 층간 분리 시험편의 굽힘 강성(탄성계수, flexural modulus)와 굽힘 강도(bending strength)를 Table 2에 정리하였다.

굽힘 탄성계수는 셀 크기에 크게 영향을 받지 않으며 외피층 두께에 의존함을 알 수 있으며 초기 층간 분리가 존재하는 경우에도 굽힘 강성은 크게 저하되지 않음을 알 수 있다.

반면에, 굽힘 강도는 초기 층간분리 및 셀 크기와 외피층 두께의 영향을 크게 받음을 알 수 있다. 동일한 외피층 두께와 코어의 셀 크기를 가지면서 초기 층간분리가 있는 경우에 굽힘 강도가 약30~68%로 크게 저하됨을 알 수 있다.

완전접착 시험편의 경우, 외피층의 두께가 1mm로 같고 셀 크기가 1/8"에서 1/4"로 증가하면 굽힘 강도가 약 30~37%정도 저하되었다. 따라서 하니컴 샌드위치 복합재료의 외피층과 코어층 사이의 계면에서 제작상의 결함인 불순물, 기공 및 층간분리는 강도 측면에서 크게 영향을 미침을 알 수 있으며 하니컴 샌드위치 복합재료 구조물의 굽힘 강도는 외피층의 두께와 하니컴 코어의 셀 크기에 따라 결정됨을 알 수 있다.

5. 결론

굽힘 하중 작용 시, 굽힘 탄성계수는 외피층의 두께 증가에 직접적인 영향을 크게 받았으며, 초기 층간분리가 존재하는 경우에도 굽힘 탄성계수는 큰 변화가 없음을 알았다.

굽힘 강도 및 파손거동은 외피층 두께의 영향보다는 하니컴 셀 크기에 따라 크게 영향을 받고 있으며 셀 크기가 작은 경우 코어층의 좌굴 거동이 거의 없는 상태에서 외피층에의 파손이 급작스럽게 발생하였다. 셀 크기가 클 경우 하중 초기 단계부터 코어층의 국부적 좌굴거동이 심화되어 외피층의 붕괴 및 파손을 일으켰다.

3점굽힘 실험과 하니컴 코어의 실제 형상을 모델링한 유한요소 시뮬레이션을 통해 굽힘 탄성계수 및 강도 평가와 각 층의 응력 분포 및 하니컴 코어의 변형 및 파손 거동 예측이 가능하였다.

참고문헌

- (1) H. S. Kim, S. T. S. Al-Hassani, "Morphological elastic model of general hexagonal columnar structures," *International Journal of mechanical Sciences*, Vol. 43, 2001, pp. 1027-1060.
- (2) A. Petras, M. P. F. Sutcliffe, "Failure mode maps for honeycomb sandwich panels," *Composite Structures*, Vol. 44, 1999, pp. 237-252.
- (3) J. K. Paik, A. K. Thayamballi, G. S. Kim, "The strength characteristics of aluminum honeycomb sandwich panels," *Thin-Walled Structures*, Vol. 35, 1999, pp. 205-231.
- (4) 김형구, 최낙삼, "하니컴코어 재료의 기계적 물성 예측과 하니컴 샌드위치 복합재료 평판의 층간응력 해석" 한국복합재료학회지, 제17권,1호, 2004, pp. 29-37.