

셀 크기와 셀벽 두께를 고려한 하니컴 재료의 탄성 해석

김 형구* · 최 낙삼**

Elastic Analysis of Honeycomb Materials Considering Cell Size and Cell Wall Thickness

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

Key Words : Honeycomb, Mechanical Properties, Effective Young's Modulus

ABSTRACT

Honeycomb sandwich composite structures have been widely used in aircraft and military industry because of light weight and high stiffness. Accurate mechanical properties of honeycomb materials are needed for analysis of sandwich composites. In this study, theoretical formula for elastic modulus of honeycomb materials was established considering bending and axial deformations of their walls. Finite-element analysis results were compared with theoretical ones of the longitudinal and transverse moduli of honeycomb materials. Consequently, the mechanical properties of honeycomb materials could be analytically predicted.

1. 서 론

탄소섬유/에폭시(carbon fiber/epoxy) 등의 복합재료를 외피(skin)로 하고 노맥스(Nomax)나 알루미늄 하니콤(honeycomb), 또는 폼(foam)을 심재로 하는 하니컴 샌드위치 복합재료(honeycomb Sandwich composites)는 무게 감소가 중요한 비용절감 요소인 항공 우주 산업에서 항공기의 동체 및 날개, 헬리콥터의 로터 블레이드 등에 그 응용이 급격히 확대되고 있다. 이는 구조물의 무게를 감소시키면서 높은 굽힘 강도 및 강성을 얻고 최적화 설계를 달성하면서도 흡진 효과, 단열 및 방음 효과, 내화 효과, 단위 체적 당 보강재의 다양한 조절 특성 등을 효과적으로 활용할 수 있기 때문이다. 그러나 하니컴 재료의 기하학적 형상은 육각형 셀 요소를 가진 3 차원 벌집 구조이므로 재료의 기계적 물성이 각 방향에 따라 판이하게 달라지게 된다. 이러한 기하학적 특성은 두께 방향으로 큰 압축 강도 및 강성을 갖지만 길이방향으로는 상대적으로 매우 작은 전단 강도를 가지게 되며 셀의 크기와 셀벽 두께는 기계적 강도 특성을 좌우하는

요인이 된다[1]. Gibson[2~3]은 빔이론(*beam theory*)을 바탕으로 탄성변형의 가정 하에 하니컴 재료의 기하학적 형상에 따른 기계적 물성을 유도하였고, 3 점 굽힘 실험으로 구한 물성 값과 유한요소 모사 해석 결과를 비교하였다. 그러나 모사 해석 결과는 실제 변형 거동과 상당한 차이를 보였다.

Hassani[4], Schonberg[5]는 이러한 하니컴 재료를 이용한 하니컴 샌드위치 복합재료의 정·동적 실험과 유한요소해석을 수행하였으나 하니컴 재료를 솔리드 요소로 모델링 함으로써 실제 하니컴 재료의 변형거동과는 차이를 보였다.

따라서 본 연구에서는 알루미늄 하니컴 재료에 대해서 굽힘 및 전단변형을 고려한 탄성 이론식을 유도하여 셀의 크기와 셀벽 두께 변화에 따른 축방향 하중 및 변위 곡선, 기계적 물성 값을 구하고 유한요소해석프로그램인 ABAQUS 6.3-1 을 이용한 결과와 비교하였다.

2. 이론과 유한 요소 해석

2.1 에너지 법을 이용한 2 차원 처짐 이론식

Fig.1 과 같이 하니컴 재료의 단위 셀을 정의하고 경계조건을 가정하여 n 개의 셀이 있는 경우 종방향 및 횡방향 변형량을 탄성변형률 에너지법을 이용하여 계산하였다. 횡 방향의 경우(I-model)

* 한양대학교 대학원 기계설계학과

** 한양대학교 기계공학과

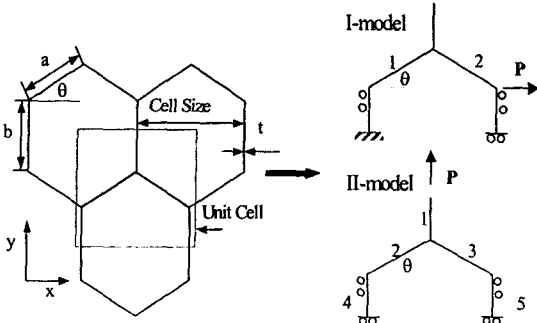


Fig. 1 Unit cell of honeycomb & boundary Conditions

는 1, 2번 셀 벽에 축방향 및 굽힘과 전단에 의한 변형을 하게 되며 전체 변형률 에너지의 합은 식(1)과 같으며 종방향(II-model)의 경우, 1, 4, 5번 셀 벽은 축방향 변형을 하며 2, 3번 셀 벽은 축방향 변형 및 굽힘에 의한 변형 그리고 전단 변형을 하게 된다. 따라서 전체 변형률 에너지의 합은 식(2)와 같다.

$$U_{x-total} = 2n \left(\int_0^a \frac{(P \cos \theta)^2}{EA} dx + \int_0^{a/2} \frac{(P \sin \theta x)^2}{EI} dx + \int_0^a f_s \frac{2(1+\nu)(P \sin \theta)^2}{EA} dx \right) \quad (1)$$

$$U_{y-total} = n \left(\int_0^{a/2} \frac{(P/n)^2}{2EA} dx + 2 \int_0^{a/2} \frac{(\frac{P}{2n} \sin \theta)^2}{2EA} dx + 2 \int_0^{a/2} \frac{(\frac{P}{2n} \cos \theta x)^2}{EI} dx + 2 \int_0^a f_s \frac{2(1+\nu)(\frac{P}{2n} \cos \theta)^2}{2EA} dx + 2 \int_0^{a/2} \frac{(\frac{P}{2n})^2}{2EA} dx \right) \quad (2)$$

여기서, $n = \text{number of cell}$
 $f_s = 1.2$ (전단형상계수)

따라서 변형량 $\Delta_{x-total}$ 과 $\Delta_{y-total}$ 은 각각 I-model 과 II-model 에서 식(3)으로 구할 수 있으며 식(4)와 식(5)를 통해 종방향 및 횡방향의 하니컴 재료의 유효 탄성계수(E_{eff})를 식(6)과 식(7)로 구할 수 있다.

$$\Delta = \frac{\partial U}{\partial P} \quad (3)$$

$$\Delta_{x-total} = \frac{2anP}{E} \left(\frac{\cos^2 \theta}{A} + \frac{a^2 \sin^2 \theta}{12I} + f_s \frac{2(1+\nu) \sin^2 \theta}{A} \right) \quad (4)$$

$$\Delta_{y-total} = \frac{2aP}{nE} \left(\frac{\sin^2 \theta}{4A} + \frac{a^2 \cos^2 \theta}{48I} + f_s \frac{(1+\nu) \cos^2 \theta}{2A} \right) + \frac{bP}{EA} \quad (5)$$

$$E_{x,eff} = \frac{\sigma_x}{\epsilon_x} = \frac{P / [(b + a \sin \theta) \cdot h]}{\Delta_{x-total} / (2a \cos \theta)} \quad (6)$$

$$E_{y,eff} = \frac{\sigma_y}{\epsilon_y} = \frac{P / (2a \cos \theta \cdot h)}{\Delta_{y-total} / (b + a \sin \theta)} \quad (7)$$

여기서, $h = \text{cell depth}$

또한 포아송 비(poisson's ratio) ν_{xy} 는 I-model 의 단위 셀에서 횡방향 변형률(ϵ_x)과 그때의 종방향 변형률(ϵ_y)의 비로 구할 수 있으며 식(8)과 같이 표현된다.

$$\nu_{xy} = - \frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} \quad (8)$$

여기서, $\epsilon_x = \frac{\Delta_x}{2a \cos \theta}$, $\epsilon_y = \frac{\Delta_y}{b + a \sin \theta}$

$$\Delta_y = - \frac{aP}{E} \sin \theta \cdot \cos \theta \left(\frac{1}{A} + \frac{a^2}{12I} + f_s \frac{2(1+\nu)}{A} \right)$$

2.2 유한 요소 해석

SHOWA AIRCRAFT INDUSTRY CO., LTD.에서 제작한 셀 크기(1/8, 1/4, 3/4, 단위: inch)와 셀벽 두께(0.0015, 0.003, 단위: inch)가 각각 다른 알루미늄 하니컴(AL1/8-5052-0015, AL1/4-5052-0015, AL1/4-5052-003, AL3/4-5052-003) 재료에 대하여 에너지 법을 통해 유도된 2 차원 처짐 이론식의 타당성을 검증하기 위하여 상용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS 6.3-1 의 2 차원 빔(beam)엘리먼트를 사용하여 단위 셀을 정의하고 종방향 및 횡방향 변형량과 하중-변위선도 및 유효 탄성계수(E_{eff})를 구하였다. 해석 시에는 하니컴 재료인 알루미늄의 기본 물성 값으로 탄성계수(E)=70GPa, 포아송비(ν)=0.33 를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 하니컴 재료의 변형

Fig.2는 3 개의 단위 셀의 종방향 및 횡방향

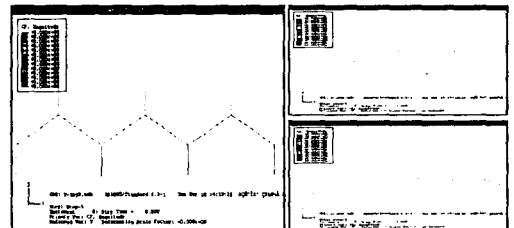


Fig. 2 Longitudinal and transverse deformation of unit cell simulated by theoretical analysis

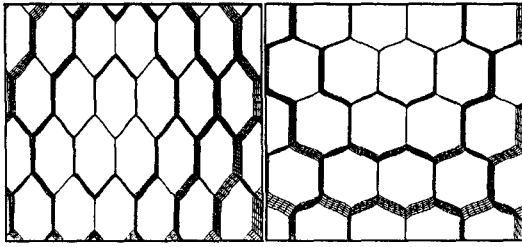


Fig. 3 Deformation configuration of honeycomb materials in the longitudinal and transverse directions simulated by FEM

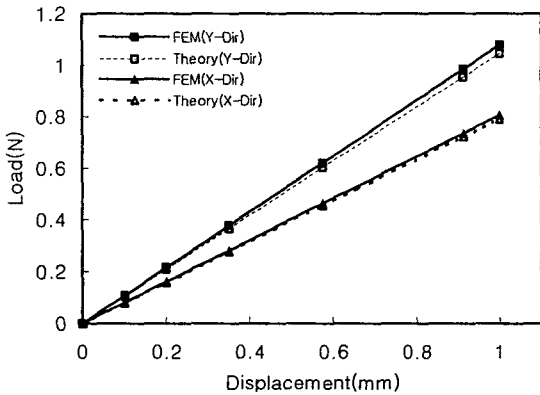


Fig. 4 Load-displacement curve for AL1/4-5052-0015

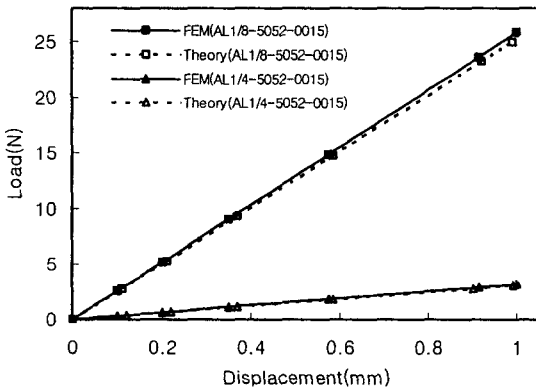


Fig. 5 Load-displacement for longitudinal direction in AL1/8-5052-0015 and AL1/4-5052-0015

변형을 보여주고 있다. 또한 Fig.3 와 같이 기하학적 형상으로 인해 종방향 및 횡방향의 변형 거동이 서로 다르게 된다. 따라서 하중-변위 선도 결과도 다르게 나타난다. Fig. 4 는 에너지 법을 이용한 처짐 이론식과 유한 요소 해석을 통해 얻은 AL1/4-5052-0015 의 단위 셀에 대한 종방향 및 횡방향의 하중-변위 선도이다.

이론식의 결과는 전단변형이 고려되어 유한요소

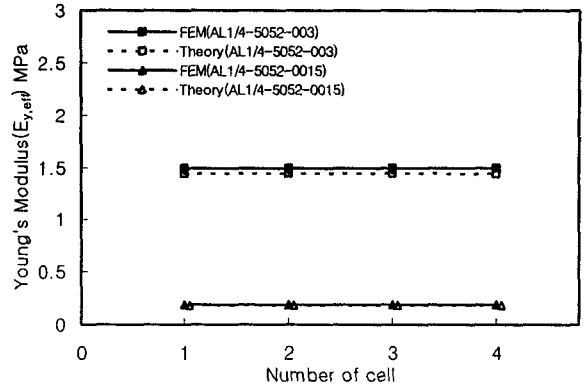


Fig. 6 Longitudinal effective Young's modulus(E_{eff}) increasing number of cell

Table. 1 Results of mechanical properties calculated by theory and FEM.

Mechanical Property Material	Effective Young's Modulus(E_e) MPa		Effective Young's Modulus(E_e) MPa		Poisson's ratio(ν) $\nu_{12} = \nu_{21}$	
	FEM	Theory	FEM	Theory	FEM	Theory
AL1/8-5052-0015	1.491	1.453	1.488	1.454	0.996	0.997
AL1/4-5052-0015	0.186	0.182	0.186	0.180	0.996	0.999
AL1/4-5052-003	1.488	1.453	1.491	1.443	0.994	0.997
AL3/4-5052-003	0.0537	0.0538	0.0541	0.0537	0.998	0.999

해석 결과와 비교하여 근소한 차이를 보이며 일치하고 있음을 알 수 있다. Fig.5 는 AL1/8-5052-0015 와 AL1/4-5052-0015 의 3 개의 단위 셀에 대한 종방향의 하중-변위 선도를 이론식과 유한요소해석으로 구한 결과를 보여주고 있다. 셀 크기와 셀벽 두께가 각각 다른 네가지의 하니컴 재료 n 개의 단위 셀에 대하여 처짐 이론식을 적용한 결과와 유한 요소 해석과 잘 일치 하였다.

3.2 하니컴 재료의 기본 물성 예측

셀 크기와 셀벽 두께가 각각 다른 네 종류의 알루미늄 하니컴 재료에 대하여 이론식과 유한요소 해석을 통해 하중-변위 선도에서 종방향 및 횡방향 변형에 작용하는 하중에 대하여 단위면적 당 작용하는 하중에 대한 변형률을 계산하여 종방향 및 횡방향 유효 탄성계수(E_{eff})와 각 방향 변형률의 비로서 구한 포아송 비를 구하였다. Fig. 6 은 앞서 단위 셀 수가 증가함에 따라 얻어진. AL1/4-5052-0015 와 AL1/4-5052-003 의 하중변위곡선에서 각 방향 유효탄성 계수를 구한 결과이다. 유효 탄성계수는 단위 셀의 개수가 증가 하여도 단위 면적당 작용하는 하중과 변형률이 비례하여 증가하기 때문에 동일한 값을 가짐을 알 수 있다.

Table. 1 에 네가지 종류의 알루미늄 하니컴 재료

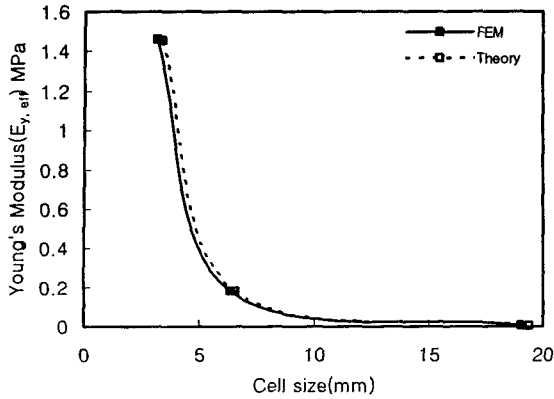


Fig. 7 Effective Young's modulus (E_{eff}) with increasing cell size

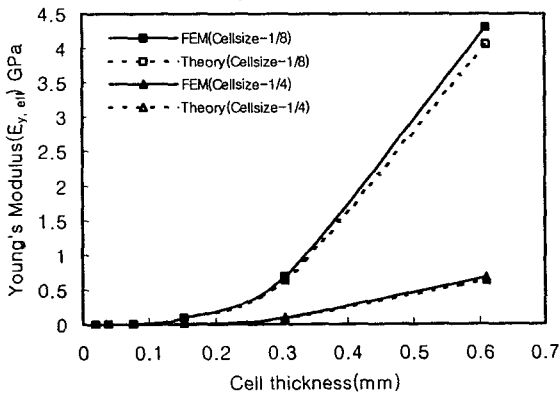


Fig. 8 Effective Young's modulus (E_{eff}) with increasing cell thickness

에 대한 종방향 및 횡방향 그리고 포아송 비를 이론식과 유한 요소 해석으로 구한 결과를 나타내었다. 이론식에 의해 구해진 결과가 유한요소 해석 결과와 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

3.3 셀 크기와 셀벽 두께에 따른 유효탄성계수의 변화

하니컴 재료의 셀크기와 셀벽 두께변화가 유효 탄성계수에 미치는 영향을 유도한 이론식과 유한 요소 해석을 통해 알아보았다.

Fig. 7은 동일한 0.0381mm 셀벽 두께에 대하여 셀 크기를 각각 3.175mm, 6.35mm, 19.05mm로 달리하여 이론식과 유한요소해석을 통해 구한 유효 탄성 계수이다. 셀 크기가 커질수록 빔 요소의 변형량이 커지고 이는 강성이 작아지는 것을 의미한다. 각 방향 유효 탄성계수가 더 작은 값을 가짐을 알 수 있다.

Fig. 8은 셀 크기가 3.17mm, 6.35mm인 경우 셀벽 두께를 0.01905mm에서 2 배씩 증가시켜 가며 구한 유효 탄성계수를 나타내었다. 셀벽 두께가 증가할수록 유효 탄성계수 값이 커짐을 알 수 있

다. 이는 셀벽 두께가 증가할수록 관성모멘트 값이 셀벽 두께의 3 승으로 비례하여 증가하므로 유효 탄성계수 값이 커지는 것으로 생각된다. 또한 이론식과 유한요소 해석 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있으며 Gibson이 제안한 이론식의 결과와 일치하였다[2~3].

4. 결론

본 연구에서는 하니컴 샌드위치 복합재료의 심재로 사용되는 알루미늄 하니컴 재료에 대한 기계적 물성값을 구할 수 있는 이론식을 유도하고 유한요소해석을 병행하여 유효 탄성계수 및 포아송 비를 구하였다. 또한 셀 크기 및 셀벽 두께 변화가 기계적 물성 값에 미치는 영향을 알아 보았다.

1. 탄성영역에서 에너지 법을 이용하여 유도한 처짐 이론식을 통해 구한 하중-변위 선도는 유한 요소 해석결과와 거의 일치하였다.
2. 하니컴 재료의 단위 셀을 정의하고 이론식을 통해 유효 탄성계수(E_{eff}) 및 포아송 비를 유한요소 해석 시에 얻은 결과와 동일하였다.
3. 하니컴 재료의 셀 크기가 작아지고 셀벽 두께가 증가 할수록 유효 탄성계수 값은 커짐을 알 수 있었다.

참고 문헌

1. J.K. Paik, A.K. Thayamballi, G.S. Kim, The strength characteristics of aluminum honeycomb sandwich panels, *Thin-walled Structures*, Vol. 35, pp. 205-231, 1999
2. C.M. Ford, L.J. Gibson, Uniaxial strength asymmetry in cellular materials an analytical model, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 40, pp. 521-531, 1998
3. P.R. Onck, E.W. Andrews, L.J. Gibson, Size effects in ductile cellular solid. Part I : Modeling, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 43, pp. 681-699, 2001
4. H.S. Kim, S.T.S. Al-Hassani, A morphological elastic model of general hexagonal columnar structures, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 43, pp. 1027-1060, 2001
5. Matt H. Triplett, William P. Schonberg, Static and dynamic finite element analysis of honeycomb sandwich structures, *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 6, No.1, pp. 95-113, 1998