

샌드위치형 판 구조물의 코어형상에 따른 보강효과에 관한 연구

한근조(동아대 기계공학과), 안성찬(동아대 대학원 기계공학과), 심재준(동아대 대학원
기계공학과), 김진영*(동아대 대학원 기계공학과)

Study of reinforcement effect of sandwich plate structure according to core shape

G. J. Han(Mech. Eng. Dept., Dong-A Univ.), S. C. Ahn(Mech. Eng. Dept., Dong-A Univ.), J. J. Shim(Mech.
Eng. Dept., Dong-A Univ.), J. Y. Kim(Mech. Eng. Dept., Dong-A Univ.)

ABSTRACT

Sandwich structure is widely used in various fields of industry due to its excellent strength and stiffness compared with weight. We studied the sandwich structure which has honeycomb core type. We are concerned about its buckling and bending stress with respect to its side length, thickness and the height ratio of its unit core. After obtaining the buckling critical load of unit core, we applied it to the sandwich structure to observe the bending behavior. When we compared the buckling with bending stress under buckling critical load, we observed that models of which length ratio of unit honeycomb core, A , is lower than 0.04 and the thickness of core, t , is thicker than 0.09 mm, is subjected to the ultimate stress by bending before buckling.

Key Words Sandwich structure(샌드위치 구조물), Honeycomb(육각형), Core(코어), Buckling(좌굴), Critical load (임계하중), Bending stress(굽힘응력)

1. 서론

각종 구조물이나 기계, 항공기, 우주선, 선박, 열차등의 특수한 분야에서 적층 구조(laminated structure)의 활용이 증대되고 있으며 앞으로도 그 쓰임새와 적용분야는 더욱 확대될 것으로 보인다. 이러한 예측의 근거는 적층 구조물의 우수한 강도와 가벼운 무게의 특성에 기인한다. 강도 또는 강성도의 손실을 방지하며 경량화를 기하기 위해 트러스 코어(truss core)형의 샌드위치 구조가 일반적으로 널리 사용된다.

샌드위치 구조는 무게에 비해 뛰어난 굽힘 강성과 강도 때문에 가벼우면서도 견고한 구조물에 많이 사용되는데 대부분의 경우 샌드위치 구조는 상판, 하판 그리고 중간의 코어로 구성되며 이들은 구조적 형태를 유지하면서 서로 접합이 되어 있다. 이러한 구조물은 우수한 방음성과 단열성을 가지고, 무게에 비해 월등한 강도가 큰 장점이 있으나 제작 및 가공상의 어려움이 단점으로 지적된다.

보강 구조물의 특성에 대해 Kim(1998) 등은 보강 구조에서 다양한 형태의 방정식에 대해 연구를 하였고,⁽¹⁾ 하니콤 구조에서 면에 평행한 방향의 하중에 대한 압축 특성에 대한 연구가 Zhu(2000) 등에 의해 수행되었다.⁽²⁾ 하지만 판 구조자체의 강화 효과에 대한 통합적인 연구와 내부 코어의 형태와 경계조건에 따른 구조물 전체의 강성 증가에 관한 연구는 아직 되어지지 않았고, 셀 구조의 특성을 판 이론에 따라 구해야 하나 이러한 방식은 매우 복잡하고 비효율적이므로 경험적인 방법에 따라 설계함에 의한 구조의 취약화 또는 과중량을 유발할 수 있다.

본 연구에서는 샌드위치형 구조물에서 가장 널리 사용되는 하니콤형의 코어에 대해 치수를 변화시키면서 단일 코어의 좌굴 임계하중을 구하고, 여기서 구한 좌굴하중을 샌드위치 구조물에 분포하중으로 변환하여 가힘으로 굽힘의 양상을 파악하고자 한다. 이를 통해 하니콤형의 코어가 사용되는 샌드위치 구조물에서 좌굴과 굽힘에 대해 안전한 치수 형상을 구하고자 한다.

2. 좌굴과 굽힘의 이론식 및 해석

2.1 이론식 전개

2.1.1 하니콤의 좌굴식 도입

하니콤 코어에 대한 좌굴응력은 다음 식에 의해 구해질 수 있다.⁽¹⁾ (Fig. 1)

$$\sigma_{cr} = \beta_n \frac{E_m}{1 - \nu_m^2} c^3 \quad (1)$$

이 식에서 E_m , ν_m 은 재료의 탄성계수와 포와송 비이며, c 는 $2t/\sqrt{3}a$ 로서 코어의 길이와 두께에 대한 비이다. β_n 의 값은 하니콤 코어의 형상과 경계조건에 따른 값으로 Table 1로부터 얻을 수 있다.

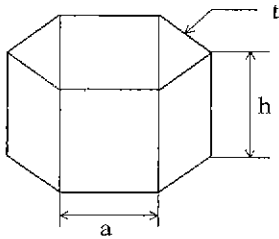


Fig. 1 Shape of honeycomb core

a / h	β_n	
	Simply supported	Built-in
0.2	2.467	4.509
0.25	2.467	4.495
0.33	2.467	4.543
0.5	2.467	4.495
1.0	2.467	4.935

Table 1 Values of β_n depending on the boundary conditions and dimensions of the cell wall

2.1.2 굽힘 이론

일반적으로 판에 수직하중이 작용하면 처짐이 발생하며 이 때의 처짐량은 최소 포텐셜 에너지 이론에 의해 구할 수 있다. 분포하중 p_0 가 작용할 때 판에 한 일은

$$W = \int \int_A w p_0 dx dy \quad (2)$$

판의 변형 에너지는

$$U = \frac{D}{2} \int \int_A \left\{ \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 - 2(1 - \nu) \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] \right\} dx dy \quad (3)$$

전체 포텐셜 에너지는 $\Pi = U - W$ 이므로

$$\Pi = \frac{D}{2} \int \int_A \left\{ \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 - w(1 - \nu) \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] - wq \right\} dx dy \quad (4)$$

완전고정인 경계조건을 적용하면(Fig. 2)

$$w = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \quad (x = 0, x = a) \quad (5)$$

$$w = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial y} = 0 \quad (y = 0, y = a) \quad (6)$$

처짐 형상을 Fig. 2와 같이 가정하면, 처짐식은 다음과 같고, 이 식은 경계조건을 만족해야 한다.

$$w = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} a_{mn} \left(1 - \cos \frac{2m\pi x}{a} \right) \left(1 - \cos \frac{2n\pi y}{a} \right) \quad (7)$$

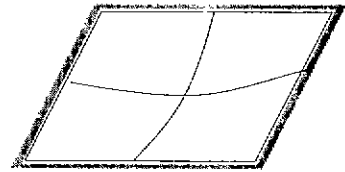


Fig. 2 Deflected shape of built-in edge

(5)(6)식을 (4)식에 대입하고 Rayleigh Ritz method에 의해 $\partial \Pi / \partial a_{mn} = 0$ 을 적용하면,

$$w_{\max} = 0.00128 \frac{p_0 a^4}{D} \quad (8)$$

여기서 D 는 강성계수이며, $Et^3/12(1 - \nu^2)$ 이다(3) 굽힘에 의한 응력은 이 식을 통한 처짐식을 이용하여 다음 식과 같은 처짐과 응력에 관한 식에 대입하여 얻을 수 있다.

$$\sigma_x = \frac{-Ex}{1 - \nu^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad (9)$$

2.2 유한요소해석

2.2.1 해석모델

본 연구에서 사용한 모델은 정방형의 보강 구조물로 내부 코어는 하니콤을 사용하였다. 좌굴 해석과 굽힘 해석을 위해 두 가지 모델을 설정한다 먼저 하나의 단위 코어에 대한 좌굴 임계하중을 구하기 위해 Fig 1과 같은 하니콤 기둥을 생성하여 임계 하중을 각 코어의 두께와 높이에 대해 식(1)을 이용하여 구하고, 여기서 구한 임계 하중을 Fig. 4의 샌드위치 구조물에 적용하여 나타나는 굽힘 강도를 살펴본다. 물성치와 구조물의 치수는 Table 2와 Table 3에 나타내었으며 재료는 STS 304를 사용하였다.

모델링 및 해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS 5.6을 사용하였고 4절점 쉘(shell) 요소를 선택하였으며 각 요소는 6자유도(Ux, Uy, Uz, Rotx, Roty, Rotz)를 가진다. 사용된 요소는 632 ~ 6,347개이며, 총 절점은 458 ~ 4,746개이다.

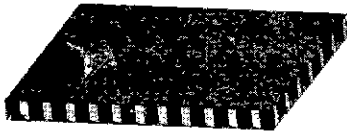


Fig. 3 Meshed shape of sandwich plate

Table 2 Material properties

Elastic modulus	E	2.14×10^5 MPa
Poisson's ratio	ν	0.29
Yield strength	σ_y	206 MPa
Tensile strength	σ_t	519 MPa

Table 3 Dimensions of structure

Length and width of structures (l)	100 mm
Thickness of upper and lower plate (t_p)	1 mm
Thickness of core (t)	0.05~0.1 mm
Length of core (a)	4~7.5 mm
Height of core (h)	4~37.5 mm

2.2.2 경계조건 및 하중조건

판의 경계조건은 완전 고정인 경우를 고려하였는데, 경계부분에서 모든 자유도를 구속하여 전단력 및 모멘트가 작용하도록 하였다. 하중은 상판에 단위 코어 좌굴 하중을 판에 대한 값으로 환산하여 분포하중을 작용시켰다. 또한 샌드위치 구조물에서 접합의 효과를 위해 각 절점들을 공유하도록 하였다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 형상에 따른 좌굴 임계하중

하나의 코어에 대해서 코어의 길이 a와 두께 t, 및 코어의 높이에 대한 높이비인 H를 각각 변화시켜 길이비 $A = 0.04 \sim 0.075$ 인 코어에 대해 좌굴 하중을 계산하였으며 그 경향은 Fig 4와 같다. 대표 값으로 $A = 0.05$ 인 경우를 Table 4에 나타내었는데 코어의 단면 두께 t가 클수록 좌굴 하중이 증가하고, 높이비 H가 증가할수록 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 높이비 H가 1인 코어 모델에서의 좌굴 하중이 2 이상인 높이비를 가지는 모델보다 훨씬 커지는 것을 볼 수 있다.

Table 4 Buckling load of unit cell ($A = 0.05$) (N)

t \ H	1	2	3	4	5
0.05	2.66	2.43	2.45	2.43	2.43
0.06	5.52	5.03	5.08	5.03	5.05
0.07	10.23	9.32	9.42	9.32	9.35
0.08	17.45	15.90	16.07	15.90	15.95
0.09	27.95	25.46	25.73	25.46	25.54
0.1	42.61	38.81	39.22	38.81	38.93

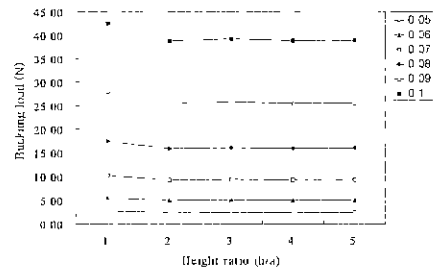


Fig. 4 Distribution of critical load with respect to height ratio and thickness ($A = 0.05$)

3.2 굽힘 응력

샌드위치 구조물에서 단위 코어가 좌굴이 되면 연속적으로 전 코어가 좌굴될 것이라는 가정하에, 각 치수형상에 따라 발생하게 되는 좌굴 하중하에서의 구조물의 굽힘응력을 살펴보기 위해 단위 코어에 대한 좌굴 하중을 전체 샌드위치 구조물에 대한 값으로 분포하중으로 적용시켰으며, 그 결과 나타나는 굽힘응력을 Table 5에 나타내었으며 전체 구조물의 길이에 대한 코어의 길이비 A의 변화에 따라 높이 및 두께에 대한 굽힘응력 분포를 다음 그래프에 나타내었다.

단위 코어에 대한 좌굴 임계하중을 전체 샌드위치 구조물에 대해 적용하였으므로 설정한 모든 모델들에 임계하중이 작용하고 있다. 본 연구에서 사용

된 STS 304의 항복강도(206 MPa)와 비교했을 때 코어의 길이 $A = 0.04$, $t = 0.09$ 이상인 모델은 굽힘에 의한 극한응력이 발생할 것으로 예상되며, $A = 0.05$ 이상인 경우, t 에 따라 차이는 있지만 좌굴 임계하중 이내의 하중조건에서는 좌굴과 굽힘에 대해 영향을 받지 않음을 볼 수 있다.

Table 5 Maximum bending stress ($A = 0.05$) (MPa)

$t \backslash H$	1	2	3	4	5
0.05	11.77	8.25	7.47	7.00	6.76
0.06	27.57	19.29	17.55	16.44	15.97
0.07	56.66	39.63	36.19	33.91	32.94
0.08	105.77	74.00	67.72	63.52	61.70
0.09	183.55	128.35	117.65	110.43	108.97
0.1	300.73	210.19	192.93	181.17	175.99

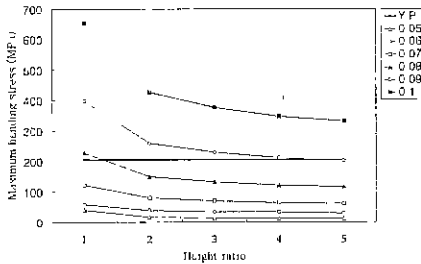


Fig. 5 Distribution of maximum bending stress ($A = 0.04$)

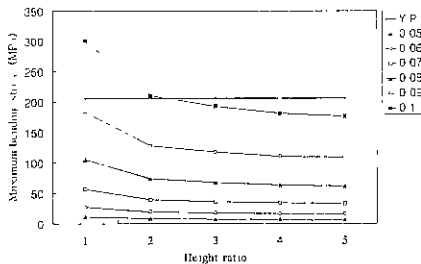


Fig. 6 Distribution of maximum bending stress ($A = 0.05$)

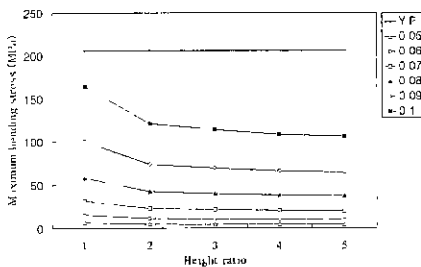


Fig. 7 Distribution of maximum bending stress ($A = 0.06$)

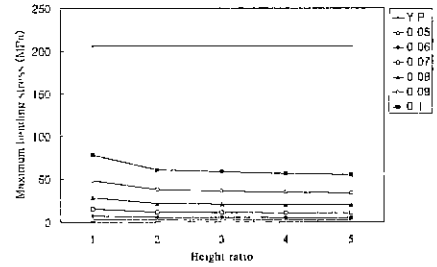


Fig. 8 Distribution of maximum bending stress ($A = 0.075$)

4. 결론

본 연구에서는 하니콤 코어로 보강된 트러스 코어형 샌드위치 구조물에 대해 좌굴과 굽힘을 기준으로 안전한 설계를 할 수 있도록 유한요소해석을 실시하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 하니콤 형상에 대한 좌굴 하중 계산 결과, 코어의 높이비 $H = 1$ 인 경우 좌굴 임계하중의 값이 크게 나타났고 굽힘응력에 있어서도 $H = 1$ 인 경우 굽힘응력이 가장 크게 나타났다.

2. 좌굴 임계하중을 샌드위치 구조물에 적용하였을 시, 굽힘에 대해 코어 길이비 $A = 0.05$ 이며, $t = 0.09$ mm 이상의 경우들에서 굽힘에 대해 취약하였으나, $A = 0.06$ 이상인 경우 재료의 허용응력 내에서 굽힘응력이 발생하였다.

3. 하니콤 코어를 가지는 샌드위치 구조에 대해 좌굴 임계하중 작용시의 굽힘응력을 비교한 결과, $A = 0.04$ 이하, $t = 0.09$ 이상인 모델들이 좌굴 이전에 굽힘에 의한 극한 응력을 받게 되는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Beomkeun Kim, Richard M. Christensen, "Basic two-dimension core types for sandwich structure", International Journal of Mechanical Science, Vol 42, pp. 657-676, 2000
2. H. X. Zhu, N. J Mills. "The in-plane non-linear compression of regular honeycombs," Journal of Solid and Structure, Vol. 37, pp. 1931-1949. 2000
3. A. C Ugral. "Stresses in plates and shells", Mcgraw-Hill Co., pp 90-95, 1981.
4. S. P. Timoshenko, J M. Gere, "Theory of elastic stability" Mcgraw-Hill Co., pp. 348-439, 1961.
5. Z. P. Bazant, Luigi Cedolin, "Stability of Structures", Oxford Uni. Press, pp 431-440, 1991