

열변형 해석을 위한 허니컴 샌드위치 평판의 열 및 탄성 물성치 예측에 관한 연구

홍석민* · 이장일* · 변재기* · 최영돈**

* 고려대학교 기계공학부

Prediction of Thermal and Elastic Properties of Honeycomb Sandwich Plate for Analysis of Thermal Deformation

Seok Min Hong*, Jang Il Lee*, Jae Ki Byun* and Young Don Choi**

* Dept. of Mechanical Engineering, Korea Univ.

(Received December 9, 2013 ; Revised December 31, 2013 ; Accepted January 19, 2014)

Key Words: Honeycomb(허니컴), Sandwich(샌드위치), Composite(복합재), Heat Transfer(열전달), Thermal Deformation(열변형), Thermal Conductivity(열전도계수), Coefficient of Thermal Expansion(열팽창계수), Elastic Properties(탄성 물성치), Thermal Properties(열 물성치), Anisotropy(이방성)

초록: 전자장치들의 소형화 및 박형화가 됨에 따라 전자장치의 수명과 직결되는 열적문제가 중요해지고 있다. 열적문제를 해결하기 위해 열확산과 단열을 통한 열적 안정성 연구가 필요하다. 허니컴 샌드위치 평판은 이방성의 열전도계수를 갖는다. 허니컴 샌드위치 평판이 적용된 시스템에 대해 온도분포와 열변형을 해석하기 위하여 열 및 탄성 물성치가 필요하다. 본 연구에서는 허니컴 코어의 크기, 두께 그리고 구성된 재료에 따라 허니컴 샌드위치 평판의 물성치가 변하기 때문에 허니컴 샌드위치 평판의 열전도계수, 열팽창계수, 탄성계수, 전단탄성계수, 푸아송비와 같은 열 및 탄성 물성치를 예측하였다.

Abstract: Thermal problems that are directly related to the lifetime of an electronic device are becoming increasingly important owing to the miniaturization of electronic devices. To solve thermal problems, it is essential to study thermal stability through thermal diffusion and insulation. A honeycomb sandwich plate has anisotropic thermal conductivity. To analyze the thermal deformation and temperature distribution of a system that employs a honeycomb sandwich plate, the thermal and elastic properties need to be determined. In this study, the thermal and elastic properties of a honeycomb sandwich plate, such as thermal conductivity, coefficient of thermal expansion, elastic modulus, Poisson's ratio, and shear modulus, are predicted. The properties of a honeycomb sandwich plate vary according to the hexagon size, thickness, and material properties.

- 기호설명 -

k : 열전도계수(W/mK)
 k_c : 허니컴 코어 구성재료 열전도계수(W/mK)
 k_x : x 방향 등가 열전도계수(W/mK)
 k_y : y 방향 등가 열전도계수(W/mK)
 k_z : z 방향 등가 열전도계수(W/mK)
 k^* : 복합 열전도율(W/mK)

E : 탄성계수(Pa)
 G : 전단탄성계수(Pa)
 ν : 푸아송비
 κ : 강성행렬
 Φ : 체적분율
 α : 열팽창계수($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
 ϵ : 하위영역의 열팽창계수($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
 s : 시트 두께(m)
 c : 허니컴 코어층 두께(m)
 a : 허니컴 코어 크기(m)
 t : 허니컴 코어 두께(m)

* Corresponding Author, ydchoi@korea.ac.kr

- l : 허니컴 코어 한 변의 길이(m)
- A : 접착제의 활성화면적(m²)
- β : 허니컴 코어 길이와 두께의 비(t/l)

1. 서론

최근 전자장비들이 박형화 및 소형화 되면서 내부에서 발생하는 열의 밀도가 높아지고 발생한 열이 원활히 외부로 방출되지 못하여 장비 내에 쌓이게 된다. 따라서 열로 인한 문제가 발생을 하고 이는 전자장비의 수명과 직결된다. 따라서 전자장비에 대한 방열 연구가 필수적이다. 또한 밀폐된 구조로 변하는 추세이기 때문에 대류에 영향보다 전도의 영향을 중요시 되고 있다. 고온과 불균일한 온도분포로 인해 많은 문제점이 발생한다.⁽¹⁾ 전자장치의 열 중첩현상을 방지하고 균일한 온도분포를 갖기 위해서 열을 확산시키고, 전자부품에서 발생하는 열을 차단해야 하므로 열확산과 단열을 통하여 열적 안정성을 유지시켜야 한다.⁽²⁾ 확산과 단열의 성질을 동시에 갖는 이방성 재료가 필요하게 된다. 허니컴 샌드위치 평판의 경우 허니컴 코어의 형상에 따른 두께 및 길이의 비에 의존하여 구조적 복합열전달 특성을 갖기 때문에 이방성의 열전달 성능을 갖는다. 확산과 단열의 성질을 동시에 갖게 되면 평판의 양면의 온도차이가 발생을 하게 되어 열팽창으로 인한 변형이 발생되거나 이종재료의 재료를 적층할 경우 열팽창 성질의 차이로 변형이 발생하기 때문에 열해석 뿐만 아니라 열에 인한 변형도 고려해야한다. 열 및 변형해석을 위해 재료의 물성치가 필요하지만 허니컴 코어의 형상에 따라 허니컴 샌드위치 평판의 물성치가 변화하기 때문에 물성치를 예측하는 연구가 필요하다.

본 연구에서는 허니컴 코어의 형상에 따라 물성치의 변화를 예측하는 연구를 수행하였다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이 허니컴 샌드위치 평판은 내부에 육각형 모양의 허니컴 코어가 있고 양면으로 얇은 금속시트가 접착되어 있는 구조로 허니컴 코어안에 공기로 채워져 있기 때문에 평면의 수직 방향으로 단열 효과를 얻을 수 있고, 금속시트는 열전도성이 좋은 재료를 결합시켜 평면 방향으로는 확산 효과를 얻을 수 있는 재료이다. 육각형의 모양, 크기, 두께, 재질에 따라 열 및 탄성 특성이 변화하기 때문에 조건에 따라 물성치의 변화를 예측하는 연구가 필요하다. 따라서 허니컴 코어 형상에 따라 변화하는 허니컴 샌드위치 평판의 열전도계수, 열팽창계수, 탄성 물성치를 계산하는 연구를 수행하였다.

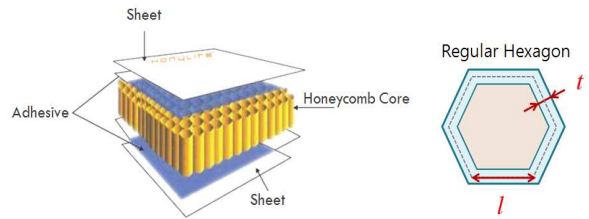


Fig. 1 Honeycomb sandwich plate structure

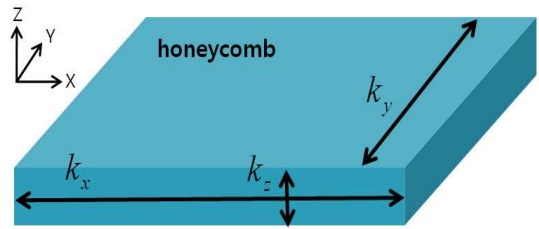


Fig. 2 The thermal conductivity of honeycomb plate in cartesian coordinates

2. 본론

2.1 허니컴 샌드위치 평판의 구조

Fig. 1은 본 연구에서 해석한 허니컴 샌드위치 평판의 구조를 나타낸다. 알루미늄 시트사이 에 정육각형 구조를 갖는 허니컴 코어가 접착되어 있는 샌드위치 구조이고, 그 내부가 공기로 채워져 있다.

2.2 열전도계수

평판의 열전도계수는 방향에 따라 다르므로 x, y, z 방향을 Fig. 2와 같이 나타내고 정육각형 한 변의 평균길이 l , 한 변의 두께 t 를 변수로 하여 해석을 수행하였다.

2.2.1 지배방정식

본 연구에서는 허니컴 코어에 대한 직교좌표 x, y, z 방향의 열전도계수를 해석하였다. 해석을 위한 열전도 방정식은 다음과 같다.

$$\vec{q} = -kA\vec{\nabla}T \tag{1}$$

허니컴 코어를 통한 열전도만을 고려하고 공기를 통한 열전도는 상대적으로 미미하므로 공기의 열전도는 무시된다고 가정하였다.

2.2.2 x 방향 열전도계수

Fig. 3은 공기를 제외한 허니컴 코어만을 통하는 x 방향의 열전도 실제 경로와 평판 전체가

열전도가 될 때를 묘사한 등가열전달 개념도를 나타낸다. 경로가 반복되는 형태이므로 x 방향으로 $1.5l$, y 방향으로 $\sqrt{3}l$ 의 면적을 단위면적으로 가정하고 단위면적에 대해서 열전도 해석을 수행하였다. ΔT_1 의 온도차를 갖고 x 축 방향으로 코어의 한 변을 따라 열이 전도되는 영역을 ΔT_1 영역, ΔT_2 의 온도차를 갖고 x 축에서 $\pm 30^\circ$ 방향으로 코어의 한 변을 따라 열이 전도되는 영역을 ΔT_2 영역이라고 하면 ΔT_1 영역을 통해 전달된 열전달량이 ΔT_2 영역에서 2방향으로 나누어 전도되기 때문에 ΔT_1 영역에서 열전달량은 ΔT_2 영역에서 열전달량의 2배가 된다. 따라서 실제 열전도 경로에서 열전도 방정식을 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$q = k_c(t) \frac{\Delta T_1}{l} = 2k_c(t) \frac{\Delta T_2}{l} \quad (2)$$

여기서, ΔT 는 다음과 같다.

$$\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 \quad (3)$$

등가열전도에 대한 방정식은 다음과 같다.

$$q = k_x(\sqrt{3}l) \frac{\Delta T}{1.5l} \quad (4)$$

식 (2) ~ (4)로부터 ΔT 를 소거하여 정리하면 x 방향 열전도계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k_x = k_l \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{t}{l} = k_l \frac{1}{\sqrt{3}} \beta \quad (5)$$

여기서 β 는 정육각형 한 변의 평균길이와 두께의 비로 다음과 같이 표현된다.

$$\beta = \frac{t}{l} \quad (6)$$

2.2.3 y 방향 열전도계수

Fig. 4는 y 방향의 열전도 실제 경로와 평판 전체가 열전도가 될 때를 묘사한 등가열전달 개념도를 나타낸다. x 방향 $1.5l$, y 방향 $\sqrt{3}l/2$ 의 면적을 단위면적으로 가정하고 단위면적에 대해서 열전도 해석을 수행하였다. 실제경로의 열전도 방정식은 식 (7)과 같고, 등가열전달의 열전도 방정식은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

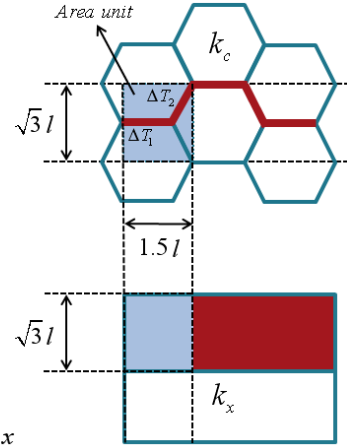


Fig. 3 Actual and equivalent heat conduction path in the direction of x

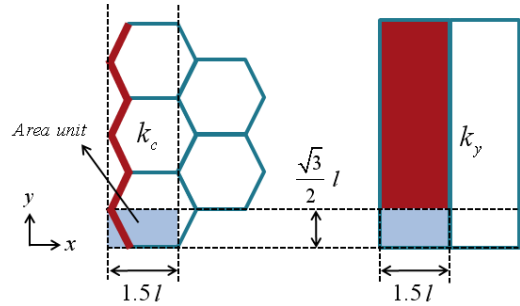


Fig. 4 Actual and equivalent heat conduction path in the direction of y

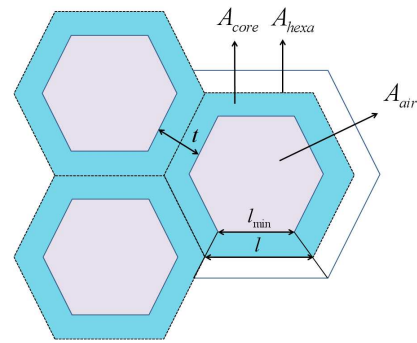


Fig. 5 Schematic diagram of honeycomb core

$$q = k_c(t) \frac{\Delta T}{l} \quad (7)$$

$$q = k_y(1.5l) \frac{\Delta T}{\frac{\sqrt{3}}{2}l} \quad (8)$$

위 두 식들로부터 y 방향 열전도계수는 다음과 같다.

$$k_y = k_c \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{t}{l} = k_c \frac{1}{\sqrt{3}} \beta \quad (9)$$

2.2.4 z 방향 열전도계수

전체 허니컴 코어층 면적 중 공기의 면적을 제외한 허니컴 코어가 차지하는 면적의 비율을 α 라 하면, z 방향의 열전도계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k_z = k_c \alpha \quad (10)$$

여기서 α 는 Fig. 5 에서 나타낸 정육각형의 기하학적 형상을 이용하여 식 (11)에 β 의 함수로 나타낼 수 있고 열전도계수는 식 (12)과 같다.

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{A_{core}}{A_{hexa}} = 1 - \left(\frac{l_{min}}{l}\right)^2 = 1 - \left(1 - \frac{t}{\tan 60^\circ l}\right)^2 \\ &= 1 - \left(1 - \frac{1}{\tan 60^\circ} \beta\right)^2 \end{aligned} \quad (11)$$

$$k_z = k_c \left(1 - \left(1 - \frac{1}{\tan 60^\circ} \beta\right)^2\right) \quad (12)$$

2.3 열팽창계수

2.3.1 해석방법

연성해석(FSI; Fluid-Structure Interaction)을 수행하여 변형을 해석하기 위해서는 재료의 열팽창계수가 필요하기 때문에 허니컴 샌드위치 평판의 열팽창계수를 계산하였다. Marshetti and Morganti의 유한요소법⁽³⁾을 이용하여 열팽창계수를 계산하였다. Fig. 6은 열팽창계수를 계산하기 위하여 나타낸 개념도이다. 단위 면적을 이용하여 반복되는 육각형 형상에 대하여 해석을 수행하고 허니컴 코어를 3개의 영역으로 나누어 해석한다.

Fig. 7은 해석영역을 3개의 영역으로 나누어 나타내었고 허니컴 코어가 정육각형이기 때문에 첫 번째 영역과 세 번째 영역을 같은 영역으로 고려하여 2개의 영역으로 나누어 해석하였다.

2.3.2 열팽창계수의 예측

허니컴 샌드위치 평판의 구조는 허니컴 코어에 접착제가 도포되어 있고 양면으로 금속시트가 결합되어 있기 때문에 접착제, 시트를 동시에 고려해야 한다. 따라서 2개의 영역, 3가지 재료에 대

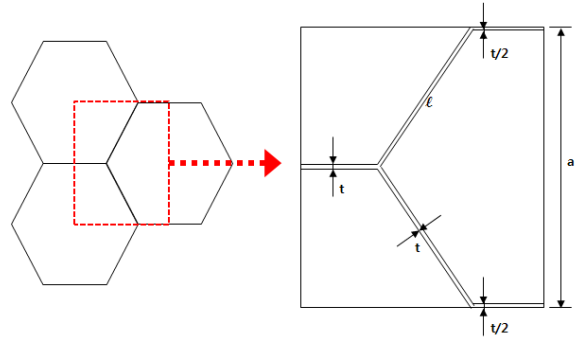


Fig. 6 Element considered for mathematical schematization

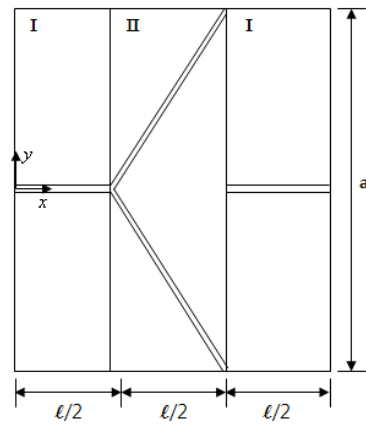


Fig. 7 Identification of the sub-elements⁽³⁾

하여 강성행렬을 구하고 관계식을 유도하여 열팽창계수를 예측하였다.

I 영역 강성행렬은 각각 다음과 같다.

금속시트의 강성행렬 :

$$\kappa_{1S} = \frac{E_S a s}{1 - \nu_s^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu_s \\ \frac{\sqrt{3}}{6} \nu_s & \frac{\sqrt{3}}{6} \end{bmatrix} \quad (13a)$$

허니컴 코어의 강성행렬 :

$$\kappa_{1H} = 2ct E_H \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13b)$$

접착제의 강성행렬 :

$$\kappa_{1A} = E_A A \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13c)$$

II 영역 강성행렬은 각각 다음과 같다.

금속시트의 강성행렬 :

$$\kappa_{2S} = \frac{E_S a s}{1 - \nu_s^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu_s \\ \frac{\sqrt{3}}{6} \nu_s & \frac{\sqrt{3}}{6} \end{bmatrix} \quad (14a)$$

허니컴 코어의 강성행렬 :

$$\kappa_{2H} = ct E_H \begin{bmatrix} \frac{1}{4} & \frac{3}{4} \\ \frac{\sqrt{3}}{8} & \frac{3\sqrt{3}}{8} \end{bmatrix} \quad (14b)$$

접착제의 강성행렬 :

$$\kappa_{2A} = E_A A \begin{bmatrix} \frac{1}{4} & \frac{3}{4} \\ \frac{\sqrt{3}}{8} & \frac{3\sqrt{3}}{8} \end{bmatrix} \quad (14c)$$

I 영역, II 영역에서의 관계식은 다음과 같다.

$$\kappa_{1m} (\alpha_m + \epsilon_{1m}) = \kappa_{1m} \epsilon_1 \quad (15a)$$

$$\kappa_{2m} (\alpha_m + \epsilon_{2m}) = \kappa_{2m} \epsilon_2 \quad (15b)$$

여기서 하첨자 m 은 구성 재료를 의미하고 시트 ($m = S$), 허니컴 코어 ($m = H$), 접착제 ($m = A$)를 나타낸다.

각 영역에 대한 힘의 평형을 고려할 때 관계식은 다음과 같다.

$$\kappa_{1S} \epsilon_{1S} + \kappa_{1H} \epsilon_{1H} + \kappa_{1A} \epsilon_{1A} = 0 \quad (16a)$$

$$\kappa_{2S} \epsilon_{2S} + \kappa_{2H} \epsilon_{2H} + \kappa_{2A} \epsilon_{2A} = 0 \quad (16b)$$

따라서, 식 (16)을 이용하여 식 (15)의 관계식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \kappa_{1S} \alpha_S + \kappa_{1H} \alpha_H + \kappa_{1A} \alpha_A \\ = (\kappa_{1S} + \kappa_{1H} + \kappa_{1A}) \epsilon_1 \end{aligned} \quad (17a)$$

$$\begin{aligned} \kappa_{2S} \alpha_S + \kappa_{2H} \alpha_H + \kappa_{2A} \alpha_A \\ = (\kappa_{2S} + \kappa_{2H} + \kappa_{2A}) \epsilon_2 \end{aligned} \quad (17b)$$

I 영역과 II 영역에 대하여 ϵ_1 과 ϵ_2 를 열팽창계수, κ_1 과 κ_2 를 강성행렬, N_1 과 N_2 를 총 열적 힘 (total thermal force)라고 정의하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N_1 = \kappa_1 \epsilon_1 \quad (18a)$$

$$N_2 = \kappa_2 \epsilon_2 \quad (18b)$$

따라서, 힘의 평형 관계식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\kappa_1 (\epsilon_1 + A \bar{\epsilon}_1) = \kappa_1 \alpha_1 \quad (19a)$$

$$\kappa_2 (\epsilon_2 + B \bar{\epsilon}_2) = \kappa_2 \alpha_2 \quad (19b)$$

여기서 A와 B행렬은

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -\nu_{1xy} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (20a)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & -\nu_{2xy} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (20b)$$

이고, $\bar{\epsilon}$ 는 α 와 ϵ 의 연결 요소이다.

2차원 요소 α_1 , α_2 와 $\bar{\epsilon}_1$, $\bar{\epsilon}_2$ 의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} \alpha_{1x} \\ \alpha_{1y} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \epsilon_{1x} \\ \epsilon_{1y} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} -\nu_{1xy} \bar{\epsilon}_{1y} \\ \bar{\epsilon}_{1y} \end{Bmatrix} \quad (21a)$$

$$\begin{Bmatrix} \alpha_{2x} \\ \alpha_{2y} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \epsilon_{2x} \\ \epsilon_{2y} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} -\nu_{2xy} \bar{\epsilon}_{2y} \\ \bar{\epsilon}_{2y} \end{Bmatrix} \quad (21b)$$

I 영역, II 영역의 경계면에서 y 방향으로 열팽창계수가 일치하고 x 방향으로 어떠한 힘의 교환도 이루어지지 않는다는 가정 하에서 x 방향의 요소들이 y 방향의 변위에 의한 푸아송 효과로 표현될 수 있다. y 방향으로 일치조건인 α_{1y} 와 α_{2y} 가 같다면 다음과 같이 표현된다.

$$\epsilon_{1y} + \bar{\epsilon}_{1y} = \epsilon_{2y} + \bar{\epsilon}_{2y} \quad (22)$$

또는

$$\bar{\epsilon}_{1y} - \bar{\epsilon}_{2y} = \epsilon_{2y} - \epsilon_{1y} = \Delta \epsilon_y \quad (23)$$

전체영역인 I+II+I에 대한 힘의 평형은 다음과 같다.

$$2\kappa_1 A \bar{\epsilon}_1 + \kappa_2 B \bar{\epsilon}_2 = 0 \quad (24)$$

행렬의 요소들을 전개시키면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} 2(-\kappa_{1aa} \nu_{1xy} + \kappa_{1ab}) \bar{\epsilon}_{1y} \\ + (-\kappa_{2aa} \nu_{2xy} + \kappa_{2ab}) \bar{\epsilon}_{2y} = 0 \end{aligned} \quad (25a)$$

$$\begin{aligned} 2(-\kappa_{1ba} \nu_{1xy} + \kappa_{1bb}) \bar{\epsilon}_{1y} \\ + (-\kappa_{2ba} \nu_{2xy} + \kappa_{2bb}) \bar{\epsilon}_{2y} = 0 \end{aligned} \quad (25b)$$

식 (25a)에서 0이 되려면 좌변의 첫 번째 항과 두 번째 항이 0이 되어야하기 때문에 푸아송비는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nu_{1xy} = \frac{\kappa_{1ab}}{\kappa_{1aa}} \quad (26a)$$

$$\nu_{2xy} = \frac{\kappa_{2ab}}{\kappa_{2aa}} \quad (26b)$$

식 (26)을 이용하여 식 (25b)를 나타내면 다음과 같다.

$$2(-\kappa_{1ba} \frac{\kappa_{1ab}}{\kappa_{1aa}} + \kappa_{1bb})\overline{\epsilon_{1y}} + (-\kappa_{2ba} \frac{\kappa_{2ab}}{\kappa_{2aa}} + \kappa_{2bb})\overline{\epsilon_{2y}} = 0 \quad (27)$$

κ_1 과 κ_2 행렬의 행렬식(determinant)을 Δ_1 과 Δ_2 라 하면 식 (27)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$2\frac{\Delta_1}{\kappa_{1aa}}\overline{\epsilon_{1y}} + \frac{\Delta_2}{\kappa_{2aa}}\overline{\epsilon_{2y}} = 0 \quad (28)$$

식 (23)과 (28)로 부터 미지수 변형률 $\overline{\epsilon_1}$ 과 $\overline{\epsilon_2}$ 계산할 수 있다. $\overline{\epsilon_1}$ 과 $\overline{\epsilon_2}$ 은 각각 다음과 같다.

$$\overline{\epsilon_{1y}} = \frac{\Delta\epsilon_y}{2\frac{\Delta_1}{\Delta_2}\frac{\kappa_{2aa}}{\kappa_{1aa}} + 1} = \frac{\Delta\epsilon_y}{2q+1} \quad (29a)$$

$$\overline{\epsilon_{2y}} = -2\frac{\Delta_1}{\Delta_2}\frac{\kappa_{2aa}}{\kappa_{1aa}}\overline{\epsilon_{1y}} = -2q\overline{\epsilon_{1y}} \quad (29b)$$

여기서,

$$q = \frac{\Delta_1}{\Delta_2}\frac{\kappa_{2aa}}{\kappa_{1aa}} \quad (30)$$

이다.

식 (21)과 (26)을 이용하여 I+II+I 영역의 x 방향의 열팽창계수를 구하면 2개의 I 영역과 1개의 II영역으로 동일한 면적이므로 평균하여 나타내면 다음과 같다.

$$\alpha_x = \frac{2\alpha_{1x} + \alpha_{2x}}{3} = \frac{2\epsilon_{1x} + \epsilon_{2x}}{3} - \frac{2\nu_{1xy}\overline{\epsilon_{1y}} + \nu_{2xy}\overline{\epsilon_{2y}}}{3} \quad (31)$$

식 (31)에 식 (29)를 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\alpha_x = \frac{2\epsilon_{1x} + \epsilon_{2x}}{3} - \frac{2}{3}p\Delta\epsilon_y \quad (32)$$

여기서

$$p = \frac{\Delta_2\kappa_{1ab} - \Delta_1\kappa_{2ab}}{2\Delta_1\kappa_{2aa} + \Delta_2\kappa_{1aa}} \quad (33)$$

이다. y 방향 열팽창계수 $\alpha_y, \alpha_{1y}, \alpha_{2y}$ 가 모두 동일하므로 식 (21b), 식 (29)를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha_y = \epsilon_{2y} + \overline{\epsilon_{2y}} = \epsilon_{2y} - 2q\frac{\Delta\epsilon_y}{2q+1} \quad (34)$$

여기서 $\Delta\epsilon_y$ 을 식 (23)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\alpha_y = \frac{\epsilon_{2y} + 2q\epsilon_{1y}}{2q+1} \quad (35)$$

2.4 탄성 물성치

2.4.1 허니컴 코어층

허니컴 샌드위치 평판의 탄성계수를 구하기 위해서 먼저 양면의 시트를 제외한 허니컴 코어층에 대한 물성부터 알아야 한다. 탄성계수는 Chen의 해석 방법⁽⁴⁾을 통하여 구할 수 있고 코어 한 변의 길이, 두께에 따라 변하며 정육각형일 경우 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E_x = \frac{\cos\theta}{\sin^2\theta(1+\sin\theta)}\left(\frac{t}{l}\right)^3 E_s \quad (36a)$$

$$E_y = \frac{1+\sin\theta}{\cos^3\theta}\left(\frac{t}{l}\right)^3 E_s \quad (36b)$$

$$E_z = \frac{1+h/l}{(h/l+\sin\theta)\cos\theta}\left(\frac{t}{l}\right) E_s \quad (36c)$$

여기서 θ 는 정육각형이므로 $\theta = 30^\circ$ 이다. 정육각형의 경우 x, y 방향의 탄성계수가 같다.

푸아송비는 여러 가지 방법을 구할 수 있는 Chen의 해석 방법⁽⁴⁾을 통하여 구하면 $\nu = 0.99$ 로 전산해석에 적용할 수 없으므로 유한요소법을 이용하여 구할 수 있고 허니컴 코어층의 푸아송비는 다음과 같다.⁽⁵⁾

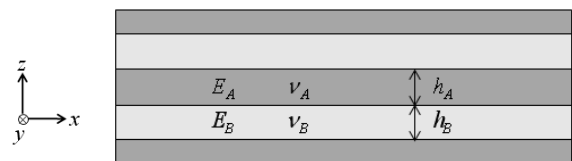


Fig. 8 A schematic diagram of a layer composite⁽⁶⁾

$$\nu_{xy} = \nu_{yz} = \nu_{xz} = 0.1 \quad (37)$$

2.4.2 허니컴 샌드위치 평판의 유효물성치

허니컴 샌드위치 평판은 허니컴 코어층과 양면에 시트가 적층 되어있는 구조이다. 양면에 적용된 시트 두께가 같으면 Fig. 8과 같이 대칭구조로 구성된 적층평판 구조형태로 유효탄성계수를 구할 수 있다.⁽⁶⁾

$$E_{x,y}^{eff} = (\Phi_A E_A + \Phi_B E_B) + \frac{\Phi_A \Phi_B E_A E_B (\nu_A - \nu_B)^2}{\Phi_A E_A (1 - \nu_B^2) + \Phi_B E_B (1 - \nu_A^2)} \quad (38a)$$

$$E_z^{eff} = \frac{E_A E_B}{\Phi_A E_B + \Phi_B E_A - \frac{2\Phi_A \Phi_B (\nu_A E_B - \nu_B E_A)^2}{(1 - \nu_A) \Phi_B E_B + (1 - \nu_B) \Phi_A E_A}} \quad (38b)$$

유효전단탄성계수는 다음과 같다.

$$G_{xy}^{eff} = \frac{1}{2(S_{11}^{eff} - S_{12}^{eff})} \quad (39a)$$

$$G_{xz}^{eff} = G_{yz}^{eff} = \frac{1}{(\Phi_A / G_A) + (\Phi_B / G_B)} \quad (39b)$$

여기서

$$S_{11}^{eff} = \frac{1}{E^{eff}} \quad (40a)$$

$$S_{12}^{eff} = \frac{\Phi_A \nu_A E_A + \Phi_B \nu_B E_B - \Phi_A \nu_A \nu_B^2 E_A - \Phi_B \nu_B \nu_A^2 E_B}{(\Phi_A \nu_B E_A + \Phi_B \nu_A E_B)^2 - (\Phi_A E_A + \Phi_B E_B)^2} \quad (40b)$$

이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 β 변화에 따른 열전도계수

Fig. 9는 앞의 2.2절 방법을 이용하여 β 의 변화에 따른 허니컴 코어층의 열전도계수 변화를 나타낸다. β 가 증가할수록 x , y , z 방향의 열전도계수는 모두 점차 증가하는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 10은 Al 시트를 포함한 허니컴 샌드위치 평판의 복합열전달계수 변화를 나타낸다. Al 시트 두께 0.2 mm, 허니컴 코어층의 두께 2.7 mm로 구성되었다. 구성 재료의 열전도계수는 Al50

계열로 $k_l = 138 \text{ W/mK}$ 로 계산하였다. β 가 0이면 z 방향 열전도계수는 0이고 x , y 방향으로 알루미늄 시트로 인해서 0이 아닌 17.8 W/mK 이 된다. β 가 1.73이면 공기부분 없이 알루미늄으로 짝 찬 형태이므로 허니컴 샌드위치 평판의 열전도계수는 알루미늄과 같이 3방향 모두 동일한 138 W/mK 이 된다.

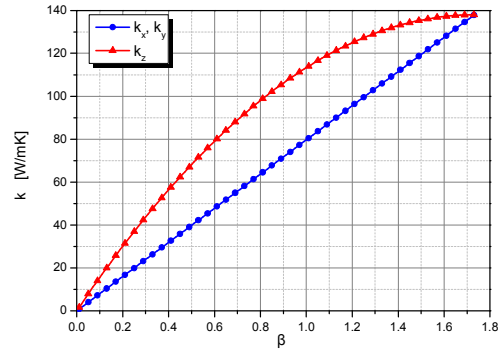


Fig. 9 The equivalent thermal conductivity changes of honeycomb plate depending on β

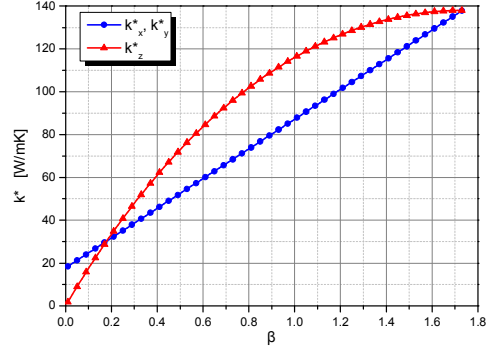


Fig. 10 The equivalent thermal conductivity changes of honeycomb sandwich plate depending on β

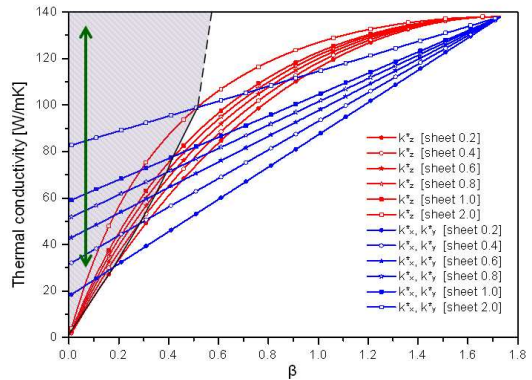


Fig. 11 The equivalent thermal conductivity changes of honeycomb sandwich plate depending on sheet thickness

Table 1 Comparison between analytical and experimental results(CFRP sheet)⁽³⁾

C.T.E. [10 ⁻⁶ °C ⁻¹]	Case A		Case B	
	Analysis	Experiment	Analysis	Experiment
α_x	0.85	0.88	1.23	1.19
α_y	1.08	1.01	1.49	1.35

Table 2 Properties of honeycomb sandwich plate

	Honeycomb Core	Sheet
Size	3/8 in	-
Core Thickness	0.06 mm	-
Thickness	1.8 mm	0.4 mm
Material	Aluminum	Aluminum
Material C.T.E.	2.38×10 ⁻⁵ [°C ⁻¹]	2.38×10 ⁻⁵ [°C ⁻¹]

Table 3 Comparison between analytical and experimental results(Al sheet)

Temperature [°C]	C.T.E. [10 ⁻⁶ °C ⁻¹]	
	Analysis	Experiment
30	$\alpha_x = 23.87852$	24.505
40		24.563
60	$\alpha_y = 23.87912$	24.902
80		25.296

Fig. 11은 허니컴 샌드위치 평판의 금속시트 두께 변화에 따라 복합열전도계수 변화를 나타낸 결과이다. 시트두께가 증가할수록 더 높은 열전도계수를 갖고 시트의 열전도 계수에 가까워진다. β 가 매우 작을 경우 $k_x^*, k_y^* > k_z^*$ 으로 평면의 수직 방향은 단열, 수평 방향은 열확산 성질을 갖는 이방성 재료가 된다. 따라서, Fig. 11에 표시된 영역을 이용함으로써 평판 수직방향으로는 단열성능을 얻고 수평방향으로 확산성능을 얻을 수 있다. 따라서 허니컴 코어의 크기와 두께를 조절하여 필요로 하는 열전도계수를 얻을 수 있다.

3.2 열팽창계수의 예측 및 신뢰성 검증
열팽창계수의 신뢰성을 검증하기 위하여 실험값과

비교하였다. Marshetti and Morganti⁽³⁾은 시트가 CFRP인 허니컴 샌드위치 평판의 열팽창계수를 위의 방법을 통하여 유도한 값과 측정값을 비교⁽³⁾하였고 그 결과를 Table 1에 나타내었다. Case A의 α_x, α_y , Case B의 α_x, α_y 의 오차는 각각 3.5%, 6.4%, 3.2%, 9.3%로 나타났고 이방성의 열팽창계수를 만족스럽게 예측할 수 있다. 그리고 본 연구에서는 알루미늄 금속시트를 갖는 허니컴 샌드위치 평판에 대하여 열팽창계수를 유도를 하고 측정값과 비교를 하였다. 시편의 제원은 Table 2에 나타내었고 시편의 열팽창계수 측정결과를 Table 3에 나타내었다. 30°C, 40°C, 60°C, 80°C에서 측정한 값이고 해석값은 온도를 고려하지 않은 알루미늄의 열팽창계수를 상수값을 이용하였기 때문에 모두 같은 값을 갖는다. 일반적인 전자장비에서 발생할 수 있는 온도 범위 30°C ~ 80°C에서 두 값의 오차는 2.6% ~ 5.6%이므로 허니컴 샌드위치 평판의 열팽창계수 예측방법에 대하여 신뢰성을 검증하였다. 따라서 본 연구를 통하여 유도한 식 (31)과 (34)의 관계식을 이용하여 허니컴 샌드위치 평판의 열팽창계수를 간단히 계산할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 허니컴 샌드위치 평판의 열 및 탄성 물성치(열전도계수, 열팽창계수, 탄성계수, 전단탄성계수, 푸아송비)를 계산하였다. 허니컴 샌드위치 평판은 이방성 열전도 성질을 갖는 방열 재료로 사용할 수 있지만 허니컴의 크기, 두께, 재질 등에 따라 물성치가 변화되기 때문에 온도 및 열변형 해석을 수행하기 위하여 구성하고 있는 재료의 물성치가 정의되어야만 한다.

따라서, 본 연구를 에서는 허니컴 샌드위치 평판의 열 및 변형 해석을 위하여 기하학적 구조에 따라 변화하는 물성치를 예측할 수 있는 도구로써 활용이 가능할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2012년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. 20124010203250)입니다.

참고문헌
(References)

(1) Park, J. W., Shin, D. C. and Park, S. H., 2011, "Large-Area OLED Lightings and Their

- Applications," *Semicond. Sci. Technol.*, Vol. 26, No. 034002, p. 9.
- (2) Park, J. W., Lee, J. H. and Noh, Y. Y., 2012, "Optical and Thermal Properties of Large-area OLED Lightings with Metallic Grids," *Organic Electronics*, Vol. 13, pp. 184~194.
- (3) Marchetti, M. and Morganti, F., 1983, "Prediction of Thermal Expansion Coefficient of Sandwiches Using Finite Elements Methods Validated by Experimental Test Results," *Acta Astronautica*, Vol. 10, No. 5~6, pp. 409~427.
- (4) Chen, D. H., 2011, "Bending Deformation of Honeycomb Consisting of Regular Hexagonal," *Composite Structures*, Vol. 93, pp. 736~746.
- (5) Schwingshackl, C. W., Alglietti, G. S. and Cunningham, P. R., 2006, "Determination of Honeycomb Material Properties: Existing Theories and an Alternative Dynamic Approach," *Journal of Aerospace Engineering*, Vol.19, pp. 177~183.
- (6) Liu, B., Feng, X. and Zhang, S. M., 2009, "The Effective Young's Modulus of Composites Beyond the Voigt Estimation due to the Poisson Effect," *Composites Science and Technology*, Vol. 69, pp. 2198~2204.