

論文

경사기능재료 사각평판의 열적거동 해석

민준식*, 강호식*, 정남희*, 송오섭**

Analysis of Thermal Response of Rectangular Plates Made of Functionally Graded Materials

Jun Sik Min*, Ho-Shik Kang*, Nam-Heui Jeong*, Ohseop Song**

ABSTRACT

In this paper, a study of thermal response of two types of functionally graded materials (FGM) plates composed of Al_2O_3 and Ti-6Al-4V is presented. The material properties of the functionally graded plates are assumed to vary continuously through the thickness of the plate according to a power law distribution of the volume fraction of the constituents. It is supposed that the top and bottom surfaces of the plate are heated and kept as constant thermal boundary conditions. The fundamental equations for rectangular plates of FGM are obtained using Hamilton's variational principles. The solution is obtained in terms of Navier Solution. The influence of volume fraction and temperature is studied on the static deflection and natural frequency of FGM plate.

초 록

본 연구에서는 Al_2O_3 와 Ti-6Al-4V로 이루어진 두 가지 유형의 경사기능재료 평판에 대한 열적 거동을 조사하였다. 경사기능 평판의 재료 물성치는 체적비의 멱지수 값에 따라 두께방향으로 연속적으로 변화하고, 평판의 윗면과 아랫면에 열하중이 가해지며 일정한 온도 조건을 유지한다고 가정하였다. FGM 사각 평판의 운동방정식은 해밀턴 변분 원리로 구하였으며, 나비에 기법으로 수치해를 얻었다. 체적비와 온도 변화에 대한 FGM 평판의 정적처짐과 고유진동수의 영향에 대하여 고찰하였다.

Key Words: 경사기능재료(FGM), 체적비(volume fraction), 열적 거동(thermal response), 자유진동(free vibration)

1. 서 론

경사기능재료는 열 차단재로 제안된 신소재로서, 성질로서 다른 두 가지 이상의 재료를 단순히 접합하지 않고 재료의 조성이나 조직을 연속적으로 변화시킴으로써 균일한 소재보다 특성이 우수한 또는 전혀 다른 특성을 갖도록 개발된 새로운 개념의 복합재료이다[1]. 즉, 재료에 발생하는 열응력과 기타 기능을 적극적으로 제어하도록 시도한 재료로서, 어

러 분야에서 우수성 및 활용가능성이 보고 되고 있으며, 우주항공용 단열차폐재료, 원자로의 내벽, 터빈 블레이드, 공구재료 등 여러 분야에서의 응용이 기대되며 경사기능재료를 다양한 구조물에 적용하기 위한 연구가 수행되고 있다[2].

Oh 등[3]은 박판보로 이루어진 로터블레이드를 경사기능재료를 이용하여 모델링하고, 블레이드 상·하부에 온도구배가 존재할 때의 동특성을 연구하였다. Pradhan 등[4]은 경사기능재료를 원통에 적용하여 동특성을 연구하였으며, 경계조건

* 충남대학교 기계공학과 대학원

** 충남대학교 기계공학과, 교신저자(E-mail:songos@cnu.ac.kr)

화 및 경사기능재료의 특성인 체적비의 변화에 따른 고유진동수의 변화를 고찰하였다. He 등[5]은 경사기능재료 판에 센서와 액추에이터를 부착한 일체형 판을 모델로 경사기능재료의 특성에 따른 자유진동해석 및 능동제어를 통한 동특성 값의 변화에 대해 고찰을 하였고, Almajid 등[6]은 경사기능 피에조 복합재료 평판의 변형과 응력에 관한 연구를 하였다.

국내에서는 최근 들어 몇몇 대학 및 연구소에서 경사기능재료에 대한 연구를 진행하고 있다. Na and Kim[7]은 3차원 경사기능재료 구조물의 열적 좌굴에 대한 해석 등을 하였으며, 김귀섭[8]은 Green 함수를 이용한 경사기능재료 사각 판 및 원통의 응력 해석과 최적설계에 관한 연구 등을 수행하였다.

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 물성의 변화가 다른 두 가지 Types의 경사기능재료 사각평판을 모델링하고 해밀턴 원리를 이용하여 운동방정식을 유도하였고, Navier solution 기법을 이용하여 정현파 형태의 분포하중이 주어졌을 때의 정적해석 및 자유진동해석을 수행하였다. 경사기능재료 사각평판의 설계 시 중요한 시스템 변수인 온도의 변화, 체적비의 변화에 따른 정적 처짐 및 동특성의 변화를 고찰하였으며, Fig. 1에 보인 두 가지 Types의 경사기능재료 사각평판에 대하여 결과를 비교 고찰하였다.

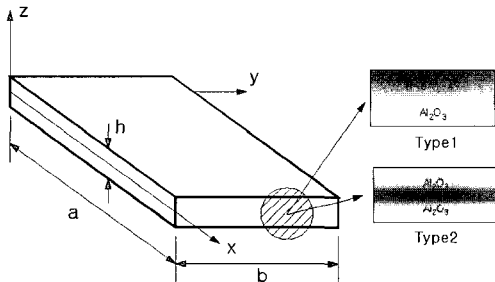


Fig. 1 Configuration of a FGM plate.

2. 경사기능재료의 특성

경사기능재료의 물성치는 다음과 같이 온도에 관한 함수로 표현될 수 있으며, 평판에서 존재하는 3차원적 열적 온도구배에 의한 영향은 고려하지 않았다.

$$P = P_0(P_{-1}T^{-1} + 1 + P_1T + P_2T^2 + P_3T^3) \quad (1)$$

여기서, $P_0, P_{-1}, P_1, P_2, P_3$ 는 온도에 관한 계수로 구성물질 고유의 값이다. 본 연구에서는 경사기능재료 판의 구성물질로 내열 성능이 뛰어난 Al_2O_3 , 기계적 성능이 뛰어난 Ti-6Al-4V를 사용하였다. 또한, 경사기능재료는 두께방향을 통해 재료의 조성이 변하므로, 결과적으로 다음과 같이 온도와 위치에 관한 함수로 물성을 표현할 수 있다.

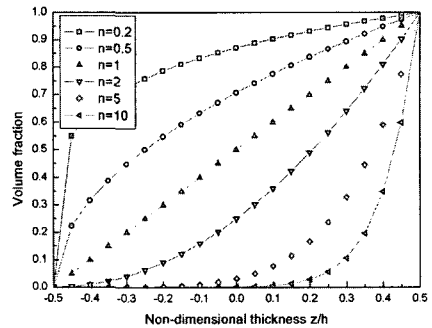


Fig. 2 Variation of volume fraction of Ti-6Al-4V with z/h .

$$P(T, z) = P_T(T)V_T(z) + P_A(T)(1 - V_T(z)) \quad (2)$$

2.1 Type 1

윗면은 Ti-6Al-4V이고 밑면은 Al_2O_3 이 되도록 재료의 조성이 변하는 기능재료 형태로서 한 쪽 면에서만 열을 받는 구조물, 즉 우주왕복선의 내열타일, 원자로의 내벽 등에 응용될 수 있다. Ti-6Al-4V의 체적비는 다음과 같다.

$$V_T = \left(\frac{2z+h}{2h}\right)^n \quad (3)$$

여기서 n 은 체적비의 멱지수(power law exponent)로 n 값에 따라 Ti-6Al-4V의 체적비가 Fig. 2와 같이 변한다.

2.2 Type 2

윗면과 밑면은 Al_2O_3 이고, 판의 가운데가 Ti-6Al-4V가 되도록 재료를 조성한 형태로, 양쪽 면에서 열하중을 받는 구조물인 터빈블레이드 등에 응용될 수 있다. 판이 두 개의 layer로 이루어졌다고 가정하면, 각 layer의 체적비를 달리하여 물성치를 표현할 수 있으며, 상부 및 하부 layer에서 Ti-6Al-4V의 체적비는 각각 다음과 같다.

$$V_T = \left(\frac{-2z+h}{h}\right)^n \quad (4a)$$

$$V_T = \left(\frac{2z+h}{h}\right)^n \quad (4b)$$

식(4)의 Ti-6Al-4V의 체적비를 이용하면 식(2)의 물성치는 $z=h/2, z=-h/2$ 일 때, Al_2O_3 의 물성치를 가지며 $z=0$ 일 때는 Ti-6Al-4V의 물성치를 가진다. n 값의 변화에 따른 식(4a)에 의한 체적비 변화는 z/h 의 증가에 따라 체적비가 감소하여 Fig. 2와는 반대의 경향을 보이며, 식(4b)에 의한 체적비 변화는 Fig. 2와 같은 경향을 보인다.

다음의 표는 본 연구에서 사용된 구성물질의 온도에 따른 계수를 나타낸다[5].

Table 1 Material constants of Al₂O₃

Material constants	Al ₂ O ₃		
	$E (N/m^2)$	ν	$\rho (kg/m^3)$
P ₀	349.55×10^9	0.2600	3750
P ₋₁	0	0	0
P ₁	-3.853×10^{-4}	0	0
P ₂	4.027×10^{-7}	0	0
P ₃	-1.673×10^{-10}	0	0

Table 2 Material constants of Ti-6Al-4V

Material constants	Ti-6Al-4V		
	$E (N/m^2)$	ν	$\rho (kg/m^3)$
P ₀	122.56×10^9	0.2884	4429
P ₋₁	0	0	0
P ₁	-4.568×10^{-4}	1.121×10^{-4}	0
P ₂	0	0	0
P ₃	0	0	0

3. 운동방정식

3.1 변형률-변위 관계식

사각평판 내의 임의의 한 점에서의 x, y, z 방향의 변위는 각각 다음과 같다[9].

$$\begin{aligned} u(x, y, z) &= u_0(x, y) - z \frac{\partial w_0(x, y)}{\partial x} \\ v(x, y, z) &= v_0(x, y) - z \frac{\partial w_0(x, y)}{\partial y} \\ w(x, y) &= w_0(x, y) \end{aligned} \quad (5)$$

변형률-변위 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{pmatrix} + z \begin{pmatrix} \kappa_{xx} \\ \kappa_{yy} \\ \kappa_{xy} \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\varepsilon_{xx}^0 = \frac{\partial u_0}{\partial x}, \quad \varepsilon_{yy}^0 = \frac{\partial v_0}{\partial y}, \quad \gamma_{xy}^0 = \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x}$$

$$\kappa_{xx} = -\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2}, \quad \kappa_{yy} = -\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2}, \quad \kappa_{xy} = -2 \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y}$$

3.2 구성 방정식

평면응력(inplane stress)만을 고려한 2차원 구성방정식을 두께방향을 따라서 적분한 합 응력과 합 모멘트는 다음과

같은 구성방정식을 만족한다.

$$\begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon^0 \\ \kappa \end{bmatrix} \quad (7)$$

Type 1;

$$\begin{bmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} dz, \quad \begin{bmatrix} M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} z dz$$

$$(A_{ij}, B_{ij}, D_{ij}) \equiv \int_{-h/2}^{h/2} [Q_{ij}] (1, z, z^2) dz$$

Type 2;

$$\begin{bmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^2 \int_{z_k}^{z_{k+1}} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}^k dz,$$

$$\begin{bmatrix} M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^2 \int_{z_k}^{z_{k+1}} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}^k z dz$$

$$(A_{ij}, B_{ij}, D_{ij}) \equiv \sum_{k=1}^2 \int_{z_k}^{z_{k+1}} [Q_{ij}]^k (1, z, z^2) dz$$

3.3 운동 방정식

운동방정식을 유도하기 위하여 다음과 같은 확장된 헤밀턴 변분원리[10]를 이용한다.

$$\int_{t_0}^{t_1} (\delta U + \delta W - \delta T) dt = 0 \quad (8)$$

탄성체의 변형에너지는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} U &= \int_{\tau} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} d\tau \\ &= \int_A \int_{-h/2}^{h/2} (\sigma_{xx} \varepsilon_{xx} + \sigma_{yy} \varepsilon_{yy} + 2\sigma_{xy} \varepsilon_{xy}) dz dA \end{aligned} \quad (9)$$

탄성체의 운동에너지는 다음과 같이 정의된다.

$$T = \frac{1}{2} \int_{\tau} \rho \dot{u}_i \dot{u}_i d\tau \quad (10)$$

운동에너지 식(10)에서 회전관성을 무시하고, 변분을 한 후 적분을 취하면 결과적으로 다음과 같은 운동에너지의 변분 값을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \int_{t_0}^{t_1} \delta T dt &= - \int_{t_0}^{t_1} \left[\int_A \rho \left(\frac{\partial^2 u_0}{\partial t^2} \delta u_0 + \frac{\partial^2 v_0}{\partial t^2} \delta v_0 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{\partial^2 w_0}{\partial t^2} \delta w_0 \right) dA \right] dt \end{aligned} \quad (11)$$

$$\rho = \sum_{k=1}^2 \int_{z_k}^{z_{k+1}} \rho^k dz$$

외력에 의한 일은 다음과 같이 정의된다.

$$W = \int_V \rho H_i u_i dV + \int_A \bar{\sigma}_i u_i dA \tag{12}$$

여기서 H_i 는 체적력, $\bar{\sigma}_i$ 는 외부표면력을 나타낸다. 체적력은 무시하고 판의 상·하부에 작용하는 외부표면력만 고려하면 분포외력 $q(x, y, t)$ 에 의한 가상일은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\delta W = - \int_A q \delta w_0 dA \tag{13}$$

변형에너지, 운동에너지, 외력에 의한 일에 대한 변분값을 식(8)에 대입하여 유도된 사각평판의 운동방정식은 식(14)와 같으며, 경계조건은 식(15)와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \delta u_0 : \frac{\partial N_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial y} &= \rho \frac{\partial^2 u_0}{\partial t^2} \\ \delta v_0 : \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial N_{yy}}{\partial y} &= \rho \frac{\partial^2 v_0}{\partial t^2} \\ \delta w_0 : \frac{\partial M_{xx}^2}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_{yy}}{\partial y^2} + q &= \rho \frac{\partial^2 w_0}{\partial t^2} \end{aligned} \tag{14}$$

$$\text{at } x=0 \text{ and } x=a ; v_0 = w_0 = \frac{\partial w_0}{\partial y} = 0, N_{xx} = M_{xx} = 0$$

$$\text{at } y=0 \text{ and } y=b ; u_0 = w_0 = \frac{\partial w_0}{\partial x} = 0, N_{yy} = M_{yy} = 0 \tag{15}$$

Navier solution 기법을 이용하여 수치 해를 구하기 위한 이산운동 방정식을 유도하였다. 변위변수와 하중변수를 다음과 같이 이중 푸리에 급수로 가정한다. 이 때, 각 변수는 경계조건을 만족한다.

$$\begin{aligned} u_0(x, y, t) &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} U_{mn}(t) \cos \alpha x \sin \beta y \\ v_0(x, y, t) &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} V_{mn}(t) \sin \alpha x \cos \beta y \\ w_0(x, y, t) &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} W_{mn}(t) \sin \alpha x \sin \beta y \\ p(x, y, t) &= \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} P_{mn}(t) \sin \alpha x \sin \beta y \end{aligned} \tag{16}$$

식(16)에서 m 은 x 축 방향의 모드를 의미하며, n 은 y 축 방향의 모드를 의미한다. 식(16)을 운동방정식(14)에 대입하

여 정리하면 다음과 같은 행렬식을 얻을 수 있다.

$$[M]\{\ddot{q}\} + [K]\{q\} = \{f\} \tag{17}$$

여기서 $[M]$, $[K]$, $\{f\}$, $\{q\}$ 는 각각 질량행렬, 강성행렬, 하중벡터, 변위벡터를 나타낸다.

4. 수치해석

4.1 정적처짐 해석

하중변수의 계수는 함수의 Orthogonality 관계를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{mn} = \frac{4}{ab} \int_0^a \int_0^b p(x, y) \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} dx dy \tag{18}$$

Fig. 3과 같은 정현파분포하중(sinusoidally distributed load)이 판에 작용한다면, 정현분포하중은 식(19)와 같다.

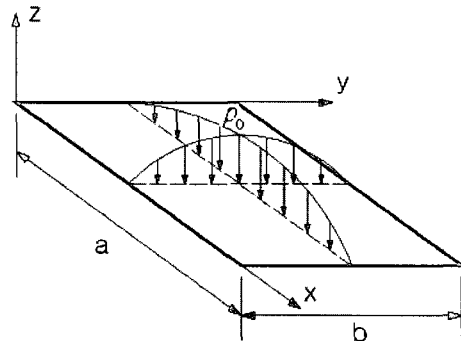


Fig. 3 Configuration of a rectangular plate subjected to sinusoidally distributed load.

$$p(x, y) = p_0 \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b} \tag{19}$$

식(19)를 식(18)에 대입하고 정리하면 하중의 계수는 다음과 같다.

$$P_{mn} = p_0 \tag{20}$$

그리고, 이산화 된 운동방정식(17)에서 가속도 항을 0으로 놓으면 정적평형 방정식은 다음과 같다.

$$[K]\{q\} = \{f\} \tag{21}$$

Table 3 Comparison of natural frequency(Hz) of simply supported FGM plates for the two special cases

Mode no.	n=0 (Ti-6Al-4V)		n=2000 (Al ₂ O ₃)	
	Present	Bishop[11]	Present	Bishop[11]
1	145.04	145.04	271.23	271.23
2	362.61	362.61	678.06	678.06
3	362.61	362.61	678.06	678.06
4	580.18	580.18	1084.90	1084.90
5	725.22	725.22	1356.13	1356.10
6	725.22	725.22	1356.13	1356.10
7	942.79	942.79	1763.96	1763.00
8	942.79	942.79	1763.96	1763.00
9	1233.00	1233.00	2305.40	2305.40

식(21)에서 구한 변위의 계수 W_{mn} 과 하중의 계수 P_{mn} 을 식(16)에 대입하면 굽힘에 의한 판의 처짐을 구할 수 있다.

4.2 자유진동 해석

고유치 문제의 해를 구하기 위해 변위변수를 아래와 같이 위치와 시간에 대한 함수의 곱으로 가정한다.

$$\begin{aligned} U_{mn}(t) &= U_{mn}^0 e^{\lambda t} \\ V_{mn}(t) &= V_{mn}^0 e^{\lambda t} \\ W_{mn}(t) &= W_{mn}^0 e^{\lambda t} \end{aligned} \quad (22)$$

식(22)를 운동방정식 (17)에 대입하고 우변을 0으로 놓으면, 고유치 문제를 얻을 수 있으며, 여기에서 변위벡터 $\{q\}$ 가 무용근을 갖지 않기 위해서는 다음의 조건을 만족해야 한다.

$$\det([K] + \lambda^2[M]) = 0 \quad (23)$$

위의 식(23)에서 구해지는 특성방정식을 만족하는 λ 의 값들이 고유진동수가 되고, 각각의 고유진동수에 대한 계수 벡터 값들이 모드 형상이 된다.

5. 결과 및 고찰

5.1 참고문헌과의 비교

본 연구의 신뢰도를 확인하기 위하여 동일한 물성치 및 경계조건하에서 수행된 Bishop[11]의 자유진동 해석결과와 본 연구의 결과를 비교하였다. 종횡비(aspect ratio)는 1로 하였고, 비교결과는 다음에 제시하고 있는 표와 같으며, 동일한 결과를 얻음을 확인할 수 있었다. 이를 근거로 수치해석

의 타당성이 검증되었으며, 평판에 정현파분포하중이 작용하는 경우에 대한 정적해석과 동적해석을 수행하였다.

5.2 정적해석 결과

평판에 작용하는 정현파분포하중의 최대값은 $100N/m^2$ 으로 적용하였으며, 사각평판의 종횡비는 2로 하였다. 즉, x축의 길이 $a=0.8m$, y축의 길이 $b=0.4m$ 이다. 그리고 두께는 $0.005m$ 이며, 판의 중앙에서의 무차원 처짐(w/a)을 관찰하였다.

Fig. 4는 체적비의 역지수 n의 변화에 따른 Type 1과 Type 2의 처짐을 나타내고 있다. 이에 의하면 두 가지 유형 모두 n 값이 증가함에 따라 처짐이 감소하는 것을 알 수 있다. n=0일 때에는 연성인 100% Ti-6Al-4V의 물성을 가지므로 처짐량의 변화폭이 큰 반면 n=∞일 때는 경도가 높은 100% Al₂O₃의 물성을 가지므로 처짐의 변화폭이 작아짐을 의미한다. 처짐량의 경우 Type 1이 Type 2보다 크게 나타났다. Type 1은 n 값이 0에서 1로 변화에 따라 급격히 감소하며, 그 이후로는 서서히 감소하는 경향을 보인다. Type 2는 Type 1과 마찬가지로 n 값이 0에서 1로 변화에 따라 급격히 감소하며, 일정한 값에 수렴하게 된다. 이는 n 값이 증가함에 따라 강성이 커지는 것을 의미한다. Fig. 5와 6은 온도변화에 따른 Type 1과 Type 2의 굽힘에 의한 처짐을 보여주고 있다. 2가지 경우 모두 온도가 증가함에 따라 처짐도 증가함을 보여주고 있다. 이 경우 온도의 가열에 따른 초기 열 변형률은 고려하지 않았다.

Type 1에서는 n값의 변화에 따라 처짐량이 비교적 서서히 감소한 반면에, Type 2에서는 n값의 변화에 따른 처짐량이 급격히 감소해 n=5 이상에서는 Al₂O₃와 같은 처짐량을 가짐을 확인할 수 있었으며, 이는 Type 2가 Type 1에 비하여 물성의 변화가 크기 때문이라 사료된다.

두 가지 유형의 경사기능재료 사각평판의 체적비의 역지수, 온도변화에 따른 정적해석을 통하여 Ti-6Al-4V 만으로 이루어진 판보다 처짐이 모두 작음을 알 수 있었다.

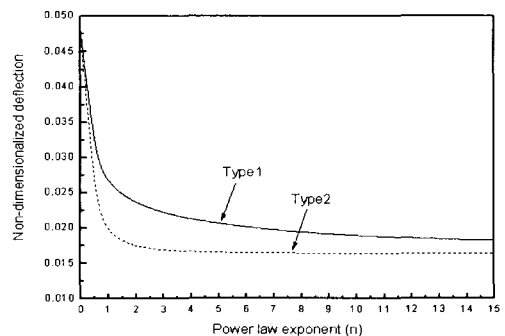


Fig. 4 Variation of static deflection with power law exponent.

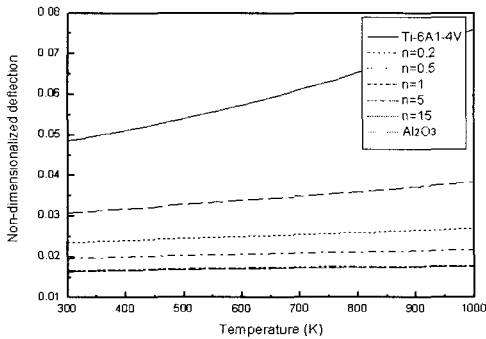


Fig. 5 Variation of static deflection with temperature for Type 1.

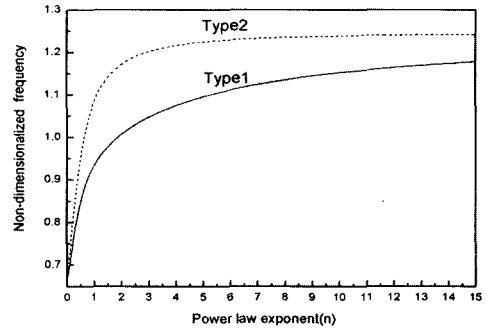


Fig. 7 Variation of natural frequency with power law exponent.

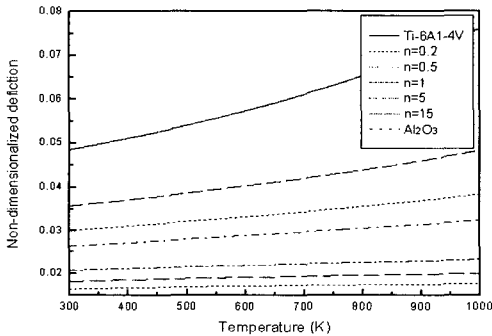


Fig. 6 Variation of static deflection with temperature for Type 2.

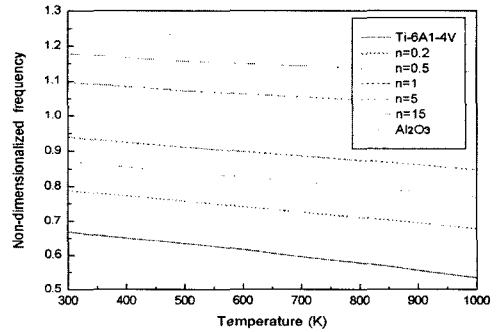


Fig. 8 Variation of natural frequency with temperature for Type 1.

5.3 동적해석 결과

사각평판의 종횡비는 2로 하였다. 즉, x축의 길이 $a=0.8m$, y축의 길이 $b=0.4m$ 로 정하고 자유진동해석을 수행하였으며, 지배차수인 1차 모드에서 무차원 고유진동수 ($\omega/\omega_{Al_2O_3}$)의 변화를 관찰하였다.

Fig. 7은 n 값의 변화에 따른 고유진동수의 변화를 나타내고 있다. 두 가지 유형 모두 체적비의 멱지수 값이 증가함에 따라 고유진동수가 증가함을 알 수 있다. 두 가지 경우 모두 n 값이 0에서 2로 변함에 따라 고유진동수가 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 특히 Type 2는 n=2 이후에는 일정한 고유진동수로 수렴하게 된다.

Fig. 8과 9는 온도증가에 따른 Type 1과 Type 2의 고유진동수의 변화를 나타내며 두 경우 모두 감소하는 경향을 보인다. 정적처짐에서의 마찬가지로 온도의 변화에 따라 n=0일 때에는 고유진동수의 변화폭이 크게 나타나며, n=∞일 때에는 고유진동수의 변화폭이 매우 작게 나타난다. 또한, n 값의 증가에 따라 온도에 대한 영향을 덜 받는다는 것을 확인할 수 있었는데, 이는 시스템이 안정해진다는 것을 의미한다. n 값이 동일한 경우 Type 2가 Type 1보다 고유진동수가 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

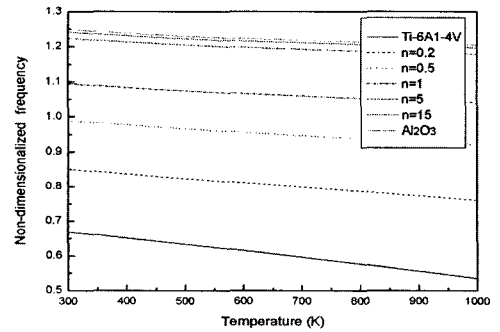


Fig. 9 Variation of natural frequency with temperature for Type 2.

결론

본 연구에서는, 두 가지 유형의 경사기능재료 판의 모델에 대하여, 경사기능재료 구조물의 설계 시 가장 중요한 변수인 체적비의 멱지수와 온도의 변화를 시스템 변수로 정적해석 및 자유진동 해석을 수행하였으며, 이로부터 판의 중앙에서의 처짐 및 고유진동수의 변화를 관찰하였다. 또한 두 가지 유형의 경사기능재료 판의 해석결과를 비교

하였다. 이러한 결과들로부터 경사기능재료의 특징을 확인할 수 있었으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

경험과분포하중을 경사기능재료 판에 인가한 경우 정적 처짐량은 두 가지 유형 모두 체적비의 먹지수 n 값의 증가에 따라 감소함을 확인하였고, n 값의 증가는 경질인 Al_2O_3 성분의 증가를 의미한다. 1000K의 외부온도 조건에서 $n=0$ 인 경우에 비해 $n=\infty$ 일 때의 처짐량이 25% 정도로 줄어들게 되며, 300K에서 1000K로의 온도변화에 대한 처짐량의 비도 $n=0$ 인 경우 1.5배 정도 증가하게 되나, $n=\infty$ 인 경우는 처짐량이 거의 일정함을 확인하였다. 이는 정적처짐에 대해 n 값의 증가에 따라 견고한 구조물이 된다는 것을 의미한다.

자유진동 해석의 경우 두 가지 유형 모두 n 값의 증가에 따라 경질인 Al_2O_3 성분이 많아져 1차 고유진동수가 높게 나타나게 된다. 그러나, 300K에서 1000K로의 온도변화에 $n=0$ 인 경우 15% 정도 고유진동수의 변화가 나타나지만, $n=\infty$ 인 경우 거의 변화가 발생하지 않으며, 이는 온도 변화에 대하여 둔감해지는 재료로 변화됨을 의미한다.

- 8) 김귀섭, "경사기능재료 사각 판의 열 탄성 변형과 응력 해석," 한국항공우주학회지, Vol. 31, No. 1, 2003, pp. 34-41.
- 9) K. Y. Lam and T. Y. Ng, "Active control of composite plates with integrated piezoelectric sensors and actuators under various dynamic loading conditions," *Smart Material Structures*, Vol. 8, 1999, pp. 223-237.
- 10) 송오섭, 주경수, "적층 복합재료 얇은 벽 보의 강제진동특성에 관한 연구," 한국복합재료학회, Vol. 10, No. 2, 1997, pp. 13-24.
- 11) R. E. D. Bishop, *The Mechanics of Vibration*, Cambridge University Press, New York, 1979.

참고문헌

- 1) S. Suresh and A. Mortensen, *Fundamentals of Functionally Graded Materials*, IOM Communication Ltd., 1998.
- 2) K. Ichikawa, *Functionally Graded Materials in the 21st Century*, Kluwer Academic Publishers, 2001.
- 3) S. Y. Oh, L. Librescu and O. Song, "Thermoelastic Modeling and Vibration of Functionally Graded Turbomachinery Thin-Walled Rotating Blades," *AIAA Journal*, Vol. 41, 2003, pp. 2051-2061.
- 4) S. C. Pradhan and C. T. Loy, "Vibration characteristics of functionally graded cylindrical shells under various boundary conditions," *Applied Acoustics*, Vol. 61, 2000, pp. 111-129.
- 5) X. Q. He, T. Y. Ng, S. Sivashanker and K. M. Liew, "Active control of FGM plates with integrated piezoelectric sensors and actuators," *Int. J. of Solids and Structures*, Vol. 38, 2001, pp. 1641-1655.
- 6) A. Almajid, M. Taya and S. Hudnut, "Analysis of out-of-plane displacement and stress field in a piezocomposite plate with functionally graded microstructure," *Int. J. of Solids and Structures*, Vol. 38, 2001, pp. 3377-3391.
- 7) K. S. Na and J. H. Kim, "Three-dimensional thermal buckling analysis of functionally graded materials," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 35, No. 5, 2004, pp. 429-437.