

그래핀 나노판 보강 다공 코어 샌드위치 판의 열 진동 해석

Thermal Vibration Analysis of Porous Cored Sandwich Plates Reinforced with Graphene Nanoplatelets

김 영 완[†]
 Young-Wann Kim[†]

(Received February 12, 2026 ; Revised April 6, 2026 ; Accepted April 15, 2026)

Key Words : Graphene Nanoplatelet(그래핀 나노판), Porous Core(다공 코어), Refined Shear Deformation Theory (정제 전단 변형이론), Thermal Vibration(열 진동)

ABSTRACT

In this study, the thermal free vibration behavior of sandwich plates featuring a functionally graded porous core reinforced with graphene nanoplatelets (GNPs) is analyzed by subjecting the plate to a nonlinear thermal gradient across its thickness. Based on a refined shear deformation theory, the free vibration analysis is developed for plates with a closed-cell foam core characterized by a functionally graded porosity distribution and uniform GNP reinforcement. Four distinct porosity distribution patterns are considered. The nonlinear temperature field is derived by solving the one-dimensional steady-state heat conduction equation. After validating the proposed model against existing literature, it is examined how porosity influences temperature distribution, and consequently, the vibration response. In addition, the effects of temperature variation, GNP weight fraction, and porosity parameters on the thermal vibration characteristics are systematically analyzed.

1. 서 론

금속 폼과 같은 다공 재료는 경량이면서 어느 정도의 강성을 유지할 수 있으며, 우수한 에너지 흡수 능력 때문에 기계, 토목, 자동차, 항공/우주, 해양/조선 등 광범위한 분야에서 이용되고 있다. 최근 첨단 산업의 급속한 발전은 구조물의 고성능 및 경량을 동시에 요구하고 있다. 이와 같이 고성능을 추구하기 위해 무게 증가 없이 강성을 향상시킬 수 있는 방법이 모색되고 있다. 이들 방법 중에서 고강도, 저밀도이며 높은 열전도도 등의 우수한 기계적, 열적 특성을 가진 그래핀 나노판(graphene nanoplatelet, GNP)이 다공

재료의 보강재로 이용되고 있으며, 이를 통해 무게 증가 없이 큰 보강 효과를 얻을 수 있다. 또한 보다 우수한 기계적 특성을 얻기 위해 기공 분포를 두께 방향으로 변화시킨 GNP로 보강된 경사 기능 다공(GNPs reinforced functionally graded porous, GNPs-FGP) 구조 요소에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다. 특히 이들 재료는 고온 환경의 항공우주 구조, 전자 부품, 내열 장비 등에 사용될 수 있다. 고온 환경에서 GNPs-FGP 구조의 안전성을 보장하기 위해 고유진동수 등 기계적 특성을 분석하여야 한다. 이를 위해 온도 변화를 고려한 GNPs-FGP 구조 요소에 대한 진동 특성 등의 구조 특성에 대한 연구가 진행되고 있다⁽¹⁻⁹⁾. 이들 연구에서 고려된 온도 분포는 두께 방향으로 균

[†] Corresponding Author ; Member, Department of Mechanical Design Engineering, Chonnam National University, Professor
 E-mail : wannkim@jnu.ac.kr

[‡] Recommended by Editor Seung Hun Back
 © The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

일하거나 선형인 경우가 대부분이다⁽¹⁻⁶⁾. 그러나 기공이 두께 방향으로 비선형적으로 분포될 경우 재료의 열전도 계수가 달라지기 때문에 온도 역시 비선형적으로 분포하게 된다. 따라서 기공 분포의 영향을 포함한 열전도 계수를 고려하여 온도 분포를 해석한 다음 이 온도 결과를 해석에 적용하여야 한다⁽⁷⁻⁹⁾. 일부 연구는 열전도 계수에서 기공의 영향을 고려하지 못하였으며⁽⁷⁾, 다공 코어의 열전도에서 기공의 영향을 고려한 연구는 매우 드물다^(8,9). Chen et al.은 1차 전단변형이론을 기초로 한 전달함수법을 이용하여 빔에 대해 열 진동 해석을 수행하였다⁽⁸⁾. Liu et al.은 Reddy의 3차 전단변형이론을 변형한 정제 판이론을 이용하여 판에 대해 비선형 열-구조 연성해석을 수행하였으나 온도환경에서의 진동해석 결과에 대해 많은 정보를 제공하지 못하고 있다⁽⁹⁾.

이와 같이 열전도에 의한 비선형 온도 분포를 고려한 연구는 그다지 많지 않다. 따라서 이 연구에서는 먼저 GNPs-FGP 재료의 열전도를 고려한 온도해석을 수행하였다. 온도 해석 결과에서 얻은 불균일 온도 분포를 고려하여 GNPs-FGP 판에 대해 정제 전단 변형이론(refined shear deformation theory, RSDT)을 적용하여 진동 특성을 분석하였다⁽¹⁰⁾. 해석에서 GNP는 모든 방향에 대해 균일하게 분포되고, 폐쇄형 폼의 기공은 두께 방향으로만 연속적으로 변한다고 가정하였다. 해의 타당성을 검증하기 위해 기존 문헌의 결과와 비교/검토하였다. 또한 온도변화, GNP의 무게비, 기공의 양 및 기공의 두께 방향 분포 패턴 등이 열 진동 특성에 미치는 영향을 검토하였다.

2. GNP 보강 및 다공성 코어 재료의 물성

고려된 직사각판의 길이, 폭 및 두께는 Fig. 1과 같이 각각 a , b 및 $h = h_c + 2h_f$ 이며, 여기서 h_c , h_f 는

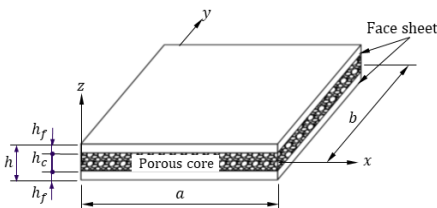


Fig. 1 A sandwich plate with GNP-reinforced porous

샌드위치 판의 코어 두께, 각 외피의 두께이다. GNP를 판의 평면에 대해서는 무작위 방향으로, 두께 방향으로는 균일하게 분포시켜 보강하였으며, 코어는 기공을 갖는다.

기공이 없는 GNP 보강 복합재료의 유효 탄성계수(E_1)는 수정된 Halpin-Tsai 모델에 따라 식 (1)과 같다⁽¹¹⁾. 또한 밀도(ρ_1), 푸아송 비(ν_1) 및 열팽창계수(α_1)는 혼합법칙에 따라 식 (2)에 의해 결정된다.

$$E_1 = \frac{3}{8} \frac{1 + \xi_L \eta_L V_G}{1 - \eta_L V_G} E_M + \frac{5}{8} \frac{1 + \xi_T \eta_T V_G}{1 - \eta_T V_G} E_M \quad (1)$$

$$\Phi_{GM} = \Phi_G V_G + \Phi_M (1 - V_G), \Phi_{GM} = \rho_1, \nu_1, \alpha_1 \quad (2)$$

식 (1)에서 E_M , E_G 는 기저 재료 및 GNP의 탄성계수, $\xi_L = 2a_G/t_G$, $\xi_T = 2b_G/t_G$ 로 a_G , b_G 및 t_G 은 GNP의 길이, 폭 및 두께이다. 매개변수 η_L , η_T 및 GNP의 부피 비 V_G 는 식 (3), 식 (4)와 같다.

$$\eta_L = \frac{E_G/E_M - 1}{E_G/E_M + \xi_L} \quad \eta_T = \frac{E_G/E_M - 1}{E_G/E_M + \xi_T} \quad (3)$$

$$V_G = \frac{w_G}{w_G + (\rho_G/\rho_M)(1 - w_G)} \quad (4)$$

여기서, w_G 는 GNP의 무게 비, ρ_G 및 ρ_M 은 GNP 및 기저 재료의 밀도이다.

GNP 보강 복합재료의 열전도 계수 k_{GM} 은 식 (5)로부터 얻을 수 있다⁽¹²⁾.

$$k_{GM} = k_M \left[1 + \frac{V_G}{3} \left(\frac{2}{H + 1/(k_x/k_M - 1)} + \frac{1}{(1 - H)/2 + 1/(k_z/k_M - 1)} \right) \right] \quad (5)$$

식 (5)에서 계수 k_x , k_z , H 는 식 (6)과 같다.

$$k_x = \frac{k_G}{2R_k k_G/a_G + 1}, k_z = \frac{k_G}{2R_k k_G/t_G + 1} \quad (6)$$

$$H = \frac{\ln[p_G + \sqrt{p_G^2 - 1}] p_G}{\sqrt{(p_G^2 - 1)^3}}$$

여기서, k_M , k_G 는 기저 재료 및 GNP의 열전도 계

수, R_k 는 GNP와 기저 재료 간의 계면 열 저항 계수이며, $p_G = a_G/t_G$ 이다.

고려된 코어는 기공이 두께 방향으로 연속적으로 변하는 폐쇄형 셀을 고려하였다. Fig. 2처럼 기공 분포 패턴은 판의 중앙면을 기준으로 기공이 대칭으로 분포되는 것(PU, PX)과 비대칭으로 분포되는 것(PVO, PVI)을 고려하였다^(2,5). PU는 기공이 전체에 걸쳐 균일하게 분포되며, PX는 중앙면을 기준으로 기공이 커진다. PVO는 기공이 상부 면으로 갈수록 작아지며, PVI는 PVO와는 역전된 분포를 갖는다. 그림에서 E_1, ρ_1 은 기공이 없는 지점, E_2, ρ_2 는 기공이 가장 많은 지점에서의 GNPs-FGP 판의 탄성계수 및 밀도이다. 두께 방향으로의 기공 분포 패턴은 식 (7)에 따라 결정된다.

$$\phi(z) = \begin{cases} \lambda & \text{for PU} \\ \cos\left(\frac{\pi z}{h_c}\right) & \text{for PX} \\ \cos\left(\frac{\pi z}{2h_c} + \frac{\pi}{4}\right) & \text{for PVO} \\ \cos\left(\frac{\pi z}{2h_c} - \frac{\pi}{4}\right) & \text{for PVI} \end{cases} \quad (7)$$

모든 기공 분포에 대해 코어의 총 질량(M_t)은 동일하다. 따라서 PU분포에 대한 분포 계수 λ 는 식 (8)과 같다.

$$\lambda = \frac{1}{e_0} \left[1 - \left(\frac{M_t / (\rho_1 h_c) + 0.121}{1.121} \right)^{2.3} \right] \quad (8)$$

다공 재료의 유효 재료물성은 식 (9)~식 (12)와 같다⁽¹³⁾.

$$E_e(z) = E_1 [1 - e_0 \phi(z)] \quad (9)$$

$$\alpha_e(z) = E \alpha_1 [1 - e_0 \phi(z)] \quad (10)$$

$$\rho_e(z) = \rho_1 [1 - e_m \phi(z)] \quad (11)$$

$$\nu_e(z) = 0.221p + \nu_1(0.342p^2 - 1.21p + 1) \quad (12)$$

식 (12)에서의 p 는 식 (14)에 정의되었으며, e_0 은 기공 계수, e_m 은 밀도 계수로 식 (13), 식 (14)와 같다.

$$e_0 = 1 - \frac{E_1}{E_2}, \quad 0 \leq e_0 < 1 \quad (13)$$

$$e_m = \frac{p(=1.121[1 - 2.3\sqrt{1 - e_0 \phi(z)}])}{\phi(z)} \quad (14)$$

3. 샌드위치판의 수식화

사각판의 윗면 및 아랫면의 온도 변화량 ΔT_U 및 ΔT_L 사이의 온도 차 때문에 발생하는 열전도로부터 두께 방향으로만 온도가 변한다고 가정하였다. 따라서, 식 (15)와 같은 1차원 열전도 문제로부터 두께 방향으로의 온도분포 $T(z)$ 를 구할 수 있다.

$$- [k(z) T(z),_z],_z = 0 \quad (15)$$

식 (15)에서 (,)는 뒤에 따르는 하첨자에 대한 미분을 의미한다. $T(-\frac{h}{2}) = \Delta T_L$ 및 $T(\frac{h}{2}) = \Delta T_U$ 의 온도 조건에 대해 위 방정식의 해는 식 (16)과 같다⁽¹⁴⁾.

$$T(z) = \Delta T_L + (\Delta T_U - \Delta T_L) \frac{\int_{-h/2}^z dz/k(z)}{\int_{-h/2}^{h/2} dz/k(z)} \quad (16)$$

여기서, $k(z)$ 는 GNPs-FGP 판의 열전도 계수로 두께 방향으로 식 (17)과 같이 변한다.

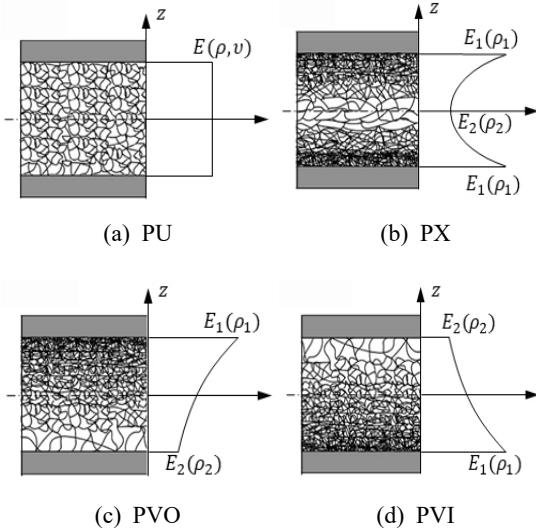


Fig. 2 Diagram of porosity distribution of porous core through thickness

$$k(z) = k_{GM} \begin{cases} 1 & -h/2 \leq z \leq -h_c/2 \\ k_V(z) & -h_c/2 \leq z \leq h_c/2 \\ 1 & h_c/2 \leq z \leq h/2 \end{cases} \quad (17)$$

식 (18)의 $k_V(z)$ 는 GNP 보강 다공 코어의 유효 열전도 계수⁽⁹⁾, $k_a = 0.02 \text{ W/mK}$ 는 공기의 열전도 계수이다.

$$k_V(z) = \frac{k_a + 2k_{GM} + 2e_0\phi(z)(k_a - k_{GM})}{k_a + 2k_{GM} - e_0\phi(z)(k_a - k_{GM})} \quad (18)$$

해석에서는 횡전단변형을 고려하면서 기존의 전단 변형이론에 비해 변수가 적은 RSDT를 적용하였다⁽¹⁰⁾. RSDT로부터 변위장 u , v 및 w 는 식 (19)와 같다.

$$\begin{aligned} u &= u_0 - zw_{b,x} - f(z)w_{s,x} \\ v &= v_0 - zw_{b,y} - f(z)w_{s,y} \\ w &= w_b + w_s \end{aligned} \quad (19)$$

여기서, u_0 , v_0 및 w 는 중립면에서의 각 방향 변위이며, 수직 변위 w 를 굽힘 및 전단 요소 w_b , w_s 의 합으로 나타냈다. $f(z)$ 는 쉘의 두께 방향 횡전단 변형을 정의하는 함수로 식 (20)과 같다.

$$f(z) = z - \frac{\sqrt{15}h}{3\pi} \sin\left(\frac{\pi z}{h}\right) \quad (20)$$

변형률은 내평면 변형률(ϵ_{xx} , ϵ_{yy} , γ_{xy}) 및 횡전단 변형률(γ_{yz} , γ_{zy})로 구성되며 식 (21)과 같다.

$$\begin{aligned} \{\epsilon\}^T &= \{\epsilon_{xx} \ \epsilon_{yy} \ \gamma_{xy} \ \gamma_{yz} \ \gamma_{zy}\}^T \\ &= \{u_{,x} \ v_{,y} \ u_{,y} + v_{,x} \ v_{,z} + w_{,y} \ u_{,z} + w_{,x}\}^T \end{aligned} \quad (21)$$

응력(σ)과 변형률(ϵ) 관계는 식 (22), 식 (23)과 같이 축약 강성도 행렬 $[Q]$ 를 이용하여 표현할 수 있다.

$$\{\sigma\} = \{\sigma_{xx} \ \sigma_{yy} \ \sigma_{xy} \ \sigma_{yz} \ \sigma_{xz}\}^T = [Q] \{\epsilon\} \quad (22)$$

$$[Q] = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (23)$$

판은 온도변화에 의해 사전 변형을 하게 되며, 이로 인한 사전 응력은 식 (24)와 같이 정의된다.

$$\{\sigma^T\} = \{\sigma_{xx}^T \ \sigma_{yy}^T\}^T = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu \\ \nu & 1 \end{bmatrix} \alpha \Delta T(z) \quad (24)$$

여기서, $\Delta T(z) = T(z) - T_0$ 로 $T_0 (= 300 \text{ K})$ 는 기준 온도를 나타낸다.

판의 각 단이 가질 수 있는 경계조건은 고정, 단순 지지, 자유 등의 조합으로 표현할 수 있다. 이들 중에서 이 연구에서는 식 (25)와 같이 모든 단이 단순 지지된 경계조건을 고려하였다.

$$\begin{aligned} v_0 &= w = w_{,xx} = 0 \text{ at } x = 0, a \\ u_0 &= w = w_{,yy} = 0 \text{ at } y = 0, b \end{aligned} \quad (25)$$

경계조건을 만족하는 판의 중립면에 대한 변위를 식 (26)과 같이 2중 급수로 표현하였다.

$$\begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ w_b \\ w_s \end{bmatrix} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \begin{bmatrix} U_{mn} \cos(\alpha_m x) \cos(\beta_n y) \\ V_{mn} \sin(\alpha_m x) \cos(\beta_n y) \\ W_{mn}^b \sin(\alpha_m x) \sin(\beta_n y) \\ W_{mn}^s \sin(\alpha_m x) \sin(\beta_n y) \end{bmatrix} e^{i\omega_{mn} t} \quad (26)$$

식 (26)에서 U_{mn} , V_{mn} , W_{mn}^b , W_{mn}^s 는 미지수로 결정해야 할 계수이며, $\alpha_m = m\pi/a$, $\beta_n = n\pi/b$ 이다. 그리고 ω_{mn} 은 고유모드(m, n)에서의 고유 각 진동수이다.

온도변화에 의한 사전 변형을 고려한 판의 변형 에너지 U 와 운동 에너지 T 는 각각 식 (27)~식 (29)와 같다.

$$U = \frac{1}{2} \int \left[\{\sigma\}^T \{\epsilon\} + \{\sigma^T\}^T \{\epsilon_{NL}\} \right] dV \quad (27)$$

$$T = \frac{1}{2} \iint \rho_c(z) (u_t^2 + v_t^2 + w_t^2) dV \quad (28)$$

$$\{\epsilon_{NL}\}^T = \{u_{,x}^2 + v_{,x}^2 + w_{,x}^2, u_{,y}^2 + v_{,y}^2 + w_{,y}^2\}^T \quad (29)$$

식에서 가정된 변위식 (26)을 에너지식 (27), 에너지식 (28)에 대입하고 각 영역에 대해 적분한 후 식 (30)과 같이 Rayleigh-Ritz 정리를 적용하면, 식 (31)과 같은 고유진동수 및 고유 모드를 구할 수 있는 고유치 문제가 된다.

$$\frac{\partial}{\partial X_{mn}}(U+T)=0, \tag{30}$$

$$X_{mn}=U_{mn}, V_{mn}, W_{mn}^b, W_{mn}^s$$
$$[\mathbf{K}-\omega^2\mathbf{M}][\mathbf{d}]=0 \tag{31}$$

여기서, **K**, **M**은 강성 및 질량 행렬이며, **d**는 구하
여야 할 계수 행렬로 진동 형상을 결정한다.

4. 수치 결과 및 토의

연구에서 고려한 알루미늄, 구리 및 GNP에 대한
물성을 Table 1에 제시하였다. 또한 GNP의 크기는
 $a_G=2.5\text{ }\mu\text{m}$, $b_G=1.5\text{ }\mu\text{m}$, $t_G=1.5\text{ nm}$ 이다⁽⁹⁾. Table 2
에서는 이 연구의 타당성을 검증하기 위해 PU 분포
알루미늄판에 대한 고유진동수를 참고문헌과 비교하
였다⁽⁹⁾. 이때 다공 코어($e_0=0.5$)만 GNP($w_G=0.1\%$)
로 보강되었다. Table 2에 나타난 것처럼 고려된 모든
모드에 대해 진동수의 차이가 최대 0.5 % 미만으로
매우 잘 일치한다.

또한 온도 변화에 따른 진동수를 비교하기 위해
3차 전단변형이론을 이용한 참고문헌의 균일 온도분
포를 받는 경사기능재료판(SUS304/Si₃N₄)에 대한 진

동수 매개변수를 Table 3에 제시하였다⁽¹⁴⁾. 자세한 재료
물성은 참고문헌에 제시되어 있다. Table 3에서처럼 고
려된 모든 온도변화에 대해 진동수가 매우 잘 일치하는
것을 확인할 수 있으며 최대 차이는 약 1 % 내외이다.

외파가 없는 다공판에 대해 판의 아랫면 및 윗면에
서의 온도변화가 각각 $\Delta T_L=0\text{ K}$, $\Delta T_U=300\text{ K}$ 일
때 기공 계수에 따른 두께 방향으로의 온도 분포 해
석 결과를 Fig. 3에 제시하였다. 기공이 없거나 PU 분
포인 경우 온도는 선형적으로 변하지만 기타 PX, PVO,
PVI 등의 비선형 기공 분포에 대해서는 비선형적인 온
도변화를 한다. 특히 기공 계수가 클수록 비선형성은

Table 3 Comparison of frequency parameters for FGM
plate ($a/b=1$, $a/h=10$)

ΔT	Source	Mode sequence			
		1	2	3	4
0 K	Kim	4.1165	7.9696	11.2198	13.1060
	Present	4.1442	8.0078	11.3017	13.1929
	Devi. [%]	0.6684	0.4770	0.7247	0.6587
300 K	Kim	3.6593	7.3098	10.4021	12.1982
	Present	3.6883	7.3439	10.4853	12.2944
	Devi. [%]	0.7863	0.4643	0.7935	0.7825
500 K	Kim	3.2147	6.6561	9.5761	11.2708
	Present	3.2451	6.6951	9.6605	11.3759
	Devi. [%]	0.9368	0.5825	0.8737	0.9239

Table 1 Material properties

Property	Al	Cu	GNP
E [GPa]	70	105	1010
ν	0.3	0.35	0.186
ρ [kg/m ³]	2707	8900	1062.5
α [10 ⁻⁶ /K]	23	17.2	5
k [W/m]	204	342	2000
R_K [10 ⁻⁹ Km/W]	-	1	-

Table 2 Comparison of the natural frequencies (rad/s)
($a/b=1$, $a/h=200$, $h_f=0.1h$, $\Delta T=0\text{ K}$)

Mode	Liu et al.	Present	Devi. [%]
1	160.6333	159.9589	0.41984
5	802.8845	799.4962	0.42202
11	1444.6142	1438.5571	0.41929
21	2727.1186	2715.2539	0.43506

Devi. = |Ref.-Present|/ Ref. × 100 %

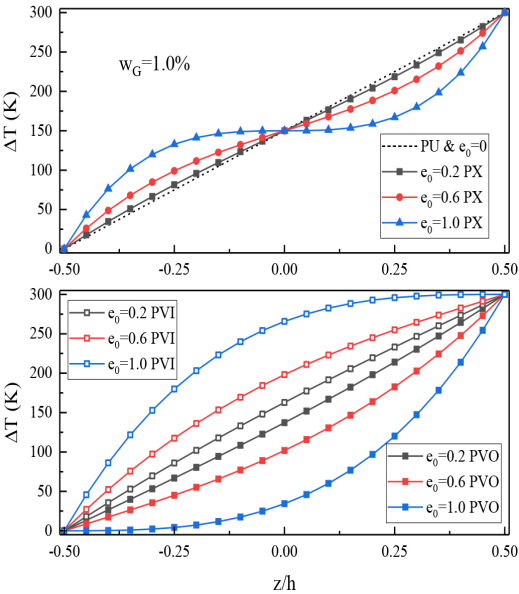


Fig. 3 Temperature distributions through the thickness

더욱 커져 온도변화가 크게 나타나고 있다. PX 분포인 경우 온도가 상하면에서 보다 급격히 변하며, PVO인 경우 아랫면 부근에서는 완만한, 윗면에서는 급격한 온도변화를 보이고 있다. 그리고 PVI는 PVO와 반대 경향을 갖는다.

앞으로 제시될 수치 예에서 판의 기하 형상은 $a/b = 1$, $a/h = 10$, $h_f = h/10$ 를 기초로 하였다. 기저 재료는 구리이며, 고유진동수를 식 (32)와 같이 무차원화하였다.

$$\Omega = \omega a \sqrt{\rho_M (1 - \nu_M^2) / E_M} \tag{32}$$

PX 분포를 갖는 판($e_0 = 0.5$, $w_G = 1.0\%$)에 대해 아

랫면 및 윗면의 온도변화 $\Delta T_L = \Delta T_U = 0\text{ K}$ 및 200 K 일 때 무차원 진동수와 함께 진동형상의 변화를 Fig. 4에 제시하였다. 온도 변화량이 클수록 진동수에서는 작아지는 것을 볼 수 있으나 진동형상에서는 변화가 나타나지 않는다. 정사각 판의 경우 진동형상 $(m, n) = (1, 2)$ 및 $(2, 1)$ 에서는 같은 진동수를 보이며 마찬가지로 $(1, 3)$ 및 $(3, 1)$ 도 같은 진동수를 갖기 때문에 별도로 제시하지는 않았다. 그림에서처럼 이 연구방법을 이용하여 진동수뿐만 아니라 진동형상도 잘 구현할 수 있다. 가장 작은 진동수인 기본 진동수는 $(m, n) = (1, 1)$ 에서 나타나며 구조물의 거동에 가장 큰 영향을 미치기 때문에

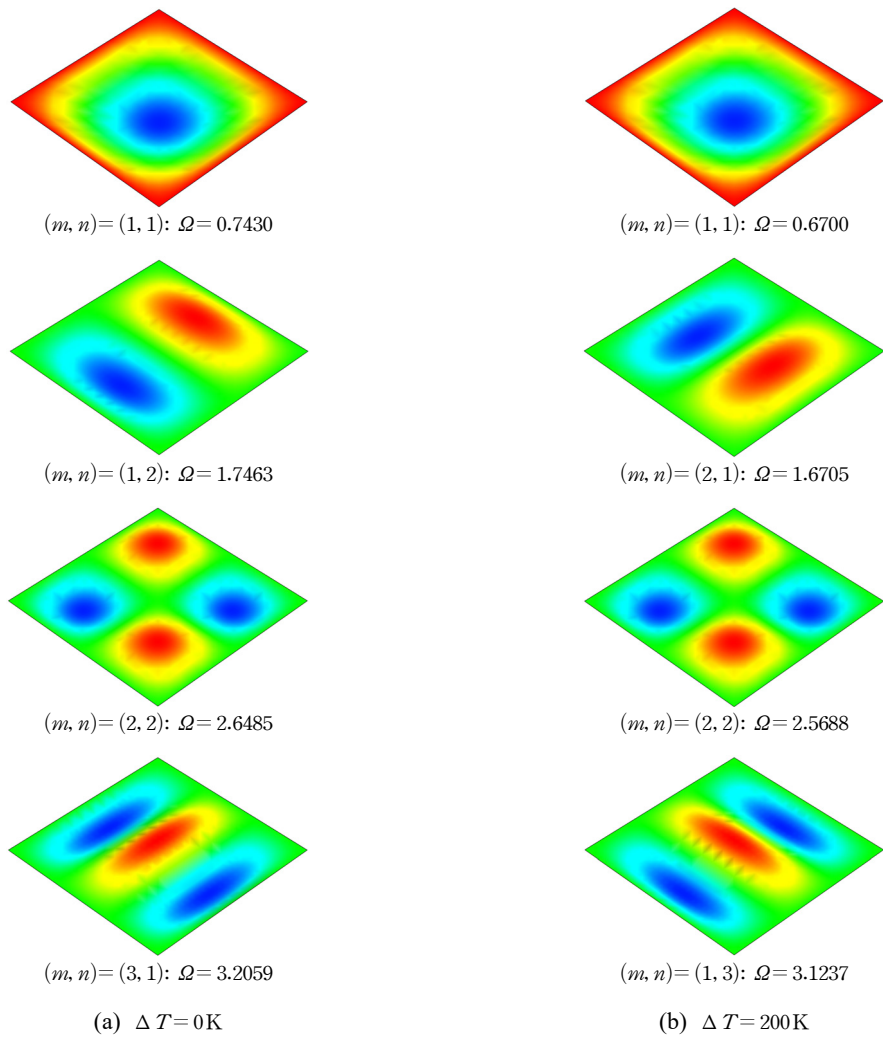


Fig. 4 Vibration mode shapes of plate with PX

앞으로 제시되는 결과는 기본진동수를 바탕으로 설명되었다.

Fig. 5에서는 아랫면의 온도변화 $\Delta T_L = 0\text{K}$ 일 때 윗면의 온도 변화 (ΔT_U)에 따른 무차원 진동수 변화를 진동수 비 (Ω/Ω_0)와 함께 나타냈다. 여기서, Ω_0 는 $\Delta T_L = \Delta T_U = 0\text{K}$ 에서의 진동수이다. 고려된 모든 판에 대해 진동수는 온도 증가와 함께 감소하는 거동을 한다. PX 기공 분포를 갖는 판은 모든 온도변화에 대해 기공 계수가 커짐($e_0 = 0.4 \rightarrow 0.8$)에 따라 진동수가 증가를 한다. 그러나 다른 기공 분포(PU, PVO, PVI)를 갖는 판의 경우 작은 온도변화에서는 기공 계수가 커짐에 따라 진동수는 감소를 하지만, 큰 온도변화를 받는 경우에는 반대로 진동수가 증가를 한다. 온도 변화에 따라 진동수 감소 정도를 나타내는 진동수 비를 나타낸 그림으로부터 모든 기공 분포에 대해 기공 계수가 작을 때 온도의 영향이 크게 받아 진동수가 보다 많이 감소하는 것을 볼 수 있다. 특히 기공이 없는 경우(점선) 온도 영향이 커 온도변화에 대해 기공을 갖는 판에 비해 진동수가 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다(최대 11% 감소). 불균일 기공 분포를 갖는 PVO 및 PVI 중 온도변화를 받는

면에 기공이 많게 분포하는 PVI가 반대 기공 분포를 갖는 PVO 분포보다 온도의 영향을 적게 받는 것을 볼 수 있다. 같은 기공 계수에 대해 기공 분포 패턴에 관계없이 온도 영향은 거의 유사하다.

보다 자세한 기공 계수의 영향을 알아보기 위해 Fig. 6이 제시되었다. PX 기공 분포를 갖는 판의 경우 진동수는 e_0 가 커짐에 따라 증가를 하지만 다른 기공 분포에 대해서는 초기에 진동수가 감소하다가 다시 증가하는 거동을 한다. 일반적으로 기공이 존재함으로써 질량뿐만 아니라 강성도 줄어들기 때문에 진동수는 감소한다. 그러나 PX 분포의 경우 기공이 판의 중심부에 많이 존재하여 재료는 중립면에 멀리 분포되어 강성 감소가 질량 감소보다 적게 나타나기 때문에 진동수는 오히려 증가하게 된다. 또한 기공 계수가 커짐에 따라 각 온도에서의 진동수 차이가 줄어든다. 이는 Fig. 5에서 나타난 것처럼 기공 계수가 작을수록 온도 영향이 커 진동수 간의 차이가 크게 나타나며, 기공 계수가 클수록 온도의 영향이 적어 진동수 차이가 작게 나타난다. 이상에서처럼 기공 계수의 증가는 항상 진동수 감소를 유발하는 것이 아니라, 경우에 따라서는 진동수를 증가시킬 수 있다. 주로 기공 계수보다는 기공 분포 패턴이 진동수에 보다 큰 영향을 준다.

Fig. 7은 PX 분포를 갖는 판에 대해 GNP의 무게비 w_G 가 기본진동수에 미치는 영향을 알아 보기 위

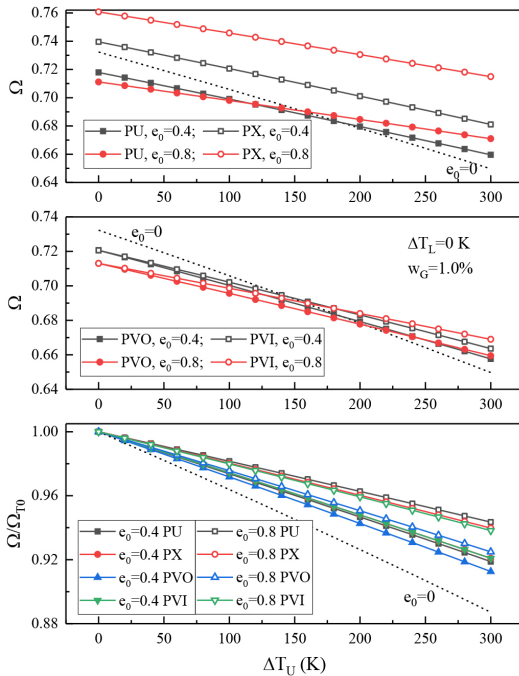


Fig. 5 Effect of temperature gradient

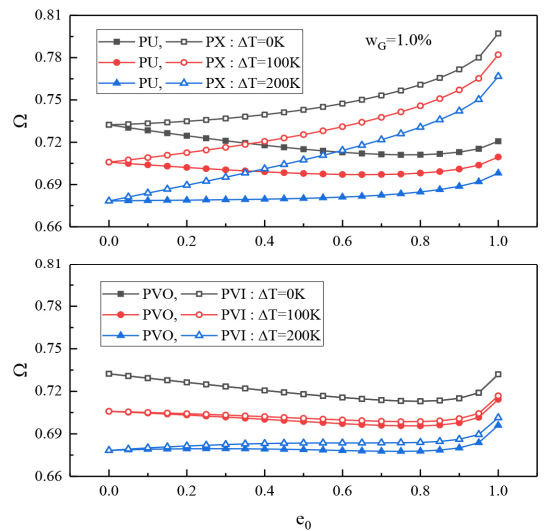


Fig. 6 Effect of porosity coefficient

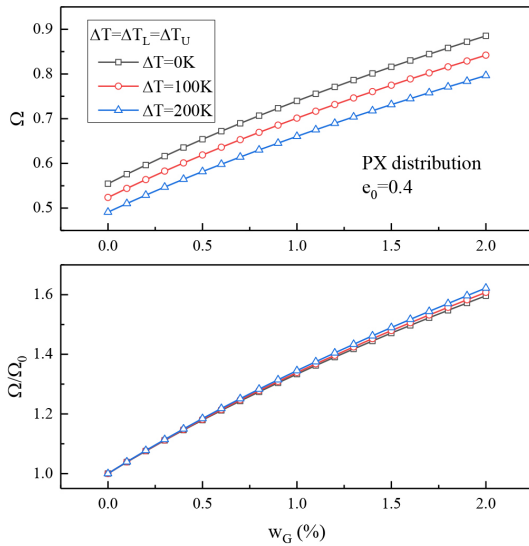


Fig. 7 Effect of GNP weight fraction

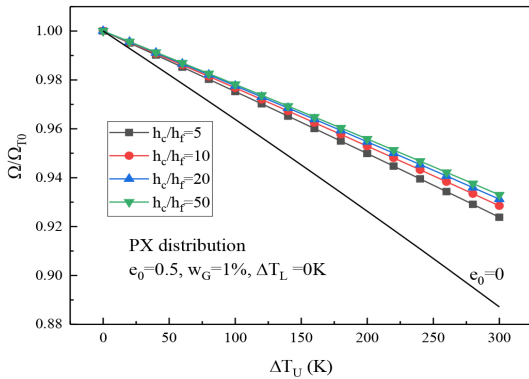


Fig. 8 Effect of core thickness to face sheet thickness ratio

한 것이다. 온도 변화는 판의 상하면에서 균일하게 작용한다($\Delta T_L = \Delta T_U = \Delta T$). 고려된 모든 온도 변화에 대해 w_G 가 증가함에 따라 진동수도 증가한다. $w_G = 1\%$ 인 경우에는 약 35%, $w_G = 2\%$ 로 증가시키면 60% 정도로 진동수가 크게 증가한다. 또한 그림에서 진동수 변화를 $w_G = 0\%$ 일 때의 진동수 Ω_0 에 대한 비(Ω/Ω_0)로 나타냈다. 온도에 따른 w_G 의 영향은 거의 없지만 고온에서 약간의 영향을 주고 있어 진동수가 약간 크게 나타난다.

Fig. 8에서는 PX 기공 분포 샌드위치판에 대해 코어 두께에 대한 외피의 두께 비(h_c/h_f)의 영향을 각

온도변화에 따라 알아보았다. 이때 $\Delta T_L = 0$ K이다. 여기서 진동수 변화를 $\Delta T_L = 0$ K에서의 진동수 Ω_{T0} 에 대한 진동수 비로 나타냈다. 두께비가 작을수록 즉, 외피의 두께가 두꺼워질수록 온도의 영향을 크게 받아 진동수가 보다 많이 감소한다. 온도 300 K에서 두께비가 5인 경우에는 진동수가 약 8%이지만, 두께비가 50인 경우에는 6%의 진동수 감소가 발생된다. 그러나 기공을 갖는 판의 경우 그 감소비는 두께비에 따라 그다지 크지 않지만 기공이 없는 경우에는 기공을 갖는 판보다 그 감소비가 큰 약 11%의 진동수 감소를 보이고 있다. 이와 같은 이유는 기공이 존재함으로써 (모든 온도변화에 대해) 강성 감소가 코어의 두께가 증가할수록 질량 감소 효과보다 적기 때문에 나타나는 현상이다.

5. 결 론

이 연구에서는 횡전단 변형효과를 고려할 수 있는 정제 전단 변형 이론을 적용하여 그래핀 나노판으로 보강된 다공 코어를 갖는 샌드위치판에 대해 고온 환경에서의 진동 특성을 연구하였다. 기존 자료와 비교/검토를 하여 해의 신뢰성 및 정확성을 확보하였으며, 제안된 이론해석 방법을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 기공계수가 클수록 다공 재료 내부의 두께 방향으로의 온도변화에 큰 영향을 준다.

(2) 판의 진동수는 온도 증가와 함께 감소를 한다. 기공계수가 작을수록 온도의 영향을 적게 받으며, 기공이 없는 경우 온도 영향이 가장 크다.

(3) PX 기공 분포를 갖는 판은 모든 온도 변화에 대해 기공계수가 커짐에 따라 진동수가 증가하지만, 다른 기공 분포를 갖는 경우에는 진동수는 감소 또는 증가를 한다.

(4) 진동수 변화에 미치는 기공의 영향은 기공계수 보다는 기공 분포 패턴에 큰 영향을 받는다.

(5) 불균일 기공 분포를 갖는 PVO 및 PVI 중 온도 변화를 받는 면에 기공이 많이 분포하는 PVI가 반대 기공 분포를 갖는 PVO 분포 보다 온도의 영향을 적게 받는다.

(6) 모든 온도환경에서 GNP 양이 많아질수록 진동수는 증가하며 그 영향은 거의 일정하다.

(7) 다공 코어의 두께가 두꺼워질수록 진동수에 미

치는 온도의 영향은 적어지지만 두께에 따른 온도의 영향은 미미하다.

References

- (1) Li, Q., Wu, D., Chen, X., Liu, L., Yu, Y. et al., 2018, Nonlinear Vibration and Dynamic Buckling Analyses of Sandwich Functionally Graded Porous Plate with Graphene Platelet Reinforcement Resting on Winkler-pasternak Elastic Foundation, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 148, pp. 596~610.
- (2) Yang, X., Liu, H. and Ma, J., 2020, Thermo-mechanical Vibration of FG Curved Nanobeam Containing Porosities and Reinforced by Graphene Platelets, Microsystem Technology, Vol. 26, pp. 2535~2551.
- (3) Yas, M. H. and Rahimi, S., 2020, Thermal Vibration of Functionally Graded Porous Nanocomposite Beams Reinforced by Graphene Platelets, Applied Mathematics and Mechanics, Vol. 41, pp. 1209~1226.
- (4) Mohd, F. and Talha, M., 2022, Effect of Graphene Platelets Reinforcement on Vibration Behavior of Functionally Graded Porous Arches under Thermal Environment, Materials Today: Proceedings, Vol. 61, pp. 103~109.
- (5) Fang, J., Yin, B., Li, L. and Zhang, D., 2023, Thermal Buckling and Vibration Analysis of Rotating Porous FG GNPs-reinforced Reddy Microplates, Aerospace Science and Technology, Vol. 137, 108298.
- (6) Chen, X., Shen, H. S. and Li, C., 2023, Re-examination of Nonlinear Vibration, Nonlinear Bending and Thermal Postbuckling of Porous Sandwich Beams Reinforced by Graphene Platelets, Composite Structure, Vol. 322, 117392.
- (7) Shi, X., Li, J. and Habibi, M., 2022, On the Statics and Dynamics of an Electro-thermo-mechanically Porous GPLRC Nanoshell Conveying Fluid Flow, Mechanics Based Design of Structures and Machines, Vol. 50, No. 6, pp. 2147~2183.
- (8) Chen, C., Li, D., Zhou, X. and Zhou, L., 2023, Thermal Vibration Analysis of Functionally Graded Graphene Platelets-reinforced Porous Beams using the Transfer Function Method, Engineering Structures, Vol. 284, 115963.
- (9) Liu, T., Sun, X., Hu, W., Wang, L., Zhang, S. et al., 2024, Nonlinear Thermal-mechanical Coupled Isogeometric Analysis for GPLs Reinforced Functionally Graded Porous Plates, Engineering Structures, Vol. 319, 118827.
- (10) Kim, Y. W., 2025, Vibration Analysis of Partially Fluid-filled Graphene-nanoplatelet-reinforced Sandwich Cylindrical Shells with Porous Core, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 35, No. 4, pp. 433~440.
- (11) Rafiee, M. A., Rafiee, J., Wang, Z., Song, H., Yu, Z. Z. et al., 2009, Enhanced Mechanical Properties of Nanocomposites at Low Graphene Content, ACS Nano, Vol. 3, No. 12, pp. 3884~3890.
- (12) Chu, K., Jia, C. and Li, W., 2012, Effective Thermal Conductivity of Graphene-based Composites, Applied Physics Letters, Vol. 101, No. 12, 121916.
- (13) Roberts, A. P. and Garboczi, E. J., 2001, Elastic Moduli of Model Random Three-dimensional Closed-cell Cellular Solids, Acta Materialia, Vol. 49, No. 2, pp. 189~197.
- (14) Kim, Y. W., 2005, Temperature Dependent Vibration Analysis of Functionally Graded Rectangular Plates, Journal of Sound and Vibration, Vol. 284, No. 3~5, pp. 531~549.