

열환경에 있는 회전 원통셸의 진동특성

Vibration Characteristics of Rotating Cylindrical Shells in Thermal Environment

김영완[†] · 위은중* · 박경조** · 배용채***

Young-Wann Kim, Kyung-Jo Park, Eun-Jung Wi and Yong-Chae Bae

1. 서 론

회전축은 일반적으로 증실 또는 증공 단면을 가지므로 해석에서 축을 보로 취급하는 경우가 많다. 그러나 증공 단면축의 경우 두께가 얇은 경우에는 보로 취급하지 않고 두꺼운 셸로 취급하여 해석에 적용하는 것이 타당하다 할 수 있다. 한편 회전하는 원통셸이 어느 온도환경에 노출될 경우 그 진동특성은 온도에 의한 사전변형이나 물성저하 등으로 인하여 실온에서의 거동과 다른 특징을 보이게 된다. 따라서 본 연구에서는 열환경에 있고, 회전하는 두꺼운 원통셸에 대한 진동특성을 1차 전단변형 이론을 기초로 한 이론적 방법을 이용하여 분석하고자 한다.

2. 수 식 화

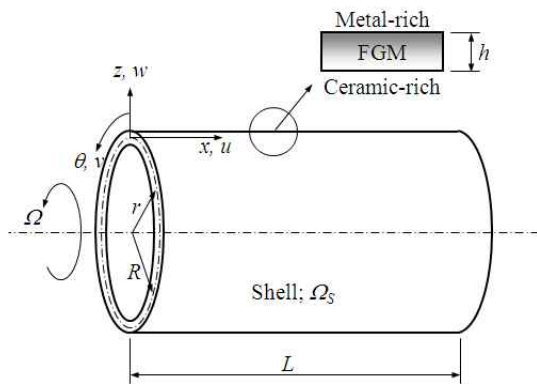


Fig. 1 Geometry and coordinate system

경사기능재료(FGM) 원통셸에 대한 기하형상을 Fig. 1에 나타냈다. FGM 원통셸의 내면($z = -h/2$)은 세라믹으로 외면($z = h/2$)은 금속재료로 조성되며, 경사기능재료의 재료 특성 P 가 두께 방향으로 연속적으로 변화도록 혼합법칙을

이용하여 다음과 같이 표현하였다.

$$P(z) = (P_M - P_C) \left(\frac{2z+h}{2h} \right)^p + P_C \quad (1)$$

지수 p 는 세라믹의 양을 조절하는 값으로 체적비 지수라 한다. 또한 재료는 온도에 대해 종속인 것을 고려하였다.

셸의 중립면에 대한 각 방향변위를 u_0, v_0 및 w_0 그리고 θ , x 축에 대한 회전을 ϕ_x 와 ϕ_θ 라 하면, 1차 전단변형이론으로부터 원통셸의 변위장을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$u = u_0 + z\phi_x; \quad v = v_0 + z\phi_\theta; \quad w = w_0 \quad (3)$$

고려한 온도환경은 두께방향으로 선형으로 변하는 온도 분포를 갖는다. 식에서 T_0 는 상온을 나타내며, 상온에서는 응력자유(stress free)상태이다.

$$T(z) = T_0 + \Delta T(z) \quad (4)$$

회전하는 셸에 대한 변형 및 운동에너지는 다음과 같다.

$$U_S = \frac{1}{2} \int_{\Omega_S} \{\sigma\}^T \{\epsilon\} d\Omega_S \quad (5)$$

$$T_S = \frac{1}{2} \int_{\Omega_S} \rho(z) \left[\dot{u}^2 + (\dot{v} + R\Omega + w\Omega)^2 + (\dot{w} - v\Omega)^2 \right] d\Omega_S \quad (6)$$

온도변화 및 회전에 의해 발생하는 초기인장력에 의한 항일은 다음과 같다.

$$W_T = \frac{1}{2} \int_{\Omega_S} \sigma^T \epsilon^{NL} d\Omega_S; \quad W_R = \frac{1}{2} \int_{\Omega_S} N_{\theta\theta}^R \epsilon_0^{NL} d\Omega_S \quad (7)$$

원통셸에 저장된 총 에너지는 다음과 같다.

$$\Pi = U_S + W_R - W_T - T_S \quad (8)$$

식 (8)에 Rayleigh-Ritz법을 적용하면 다음과 같은 회전 및 온도를 고려한 원통셸의 운동방정식을 얻는다.

$$\begin{aligned} [M\ddot{\eta} + C\dot{\eta} + K\eta] \{d\} &= 0 \\ M &= M_S, \quad K = K_S - K_T + K_R - \bar{M}_R \end{aligned} \quad (9)$$

3. 수치결과 및 토의

본 연구에서는 금속재료로는 스테인레스강(SUS304), 세라믹으로는 실리콘 나이트 라이드(Si_3N_4)를 고려하였다. 이들 재료로 구성된 상온($T=300K$)에서의 FGM 셸에 대해 회전속

[†] 전남대학교 기계자동차공학부

E-mail : wannkim@jnu.ac.kr

Tel : (061) 659-3285, Fax : (061) 659-3280

* 전남대학교 기계설계공학과 대학원

** 전남대학교 기계자동차공학부

*** 전력연구원

도에 따른 진동수거동을 그림 2에 제시하였다. 그림에서 사용한 진동수 매개변수는 다음과 같이 정의되었다.

$$\omega^* = \omega R \sqrt{(1 - v_M)^2 \rho_M / E_M}$$

여기서 사용된 재료특성은 상온에서의 금속재에 대한 것이다. 그림에서처럼 $n=2$ 에서 가장 작은 진동수가 형성되는 것을 볼 수 있으며, 작은 원주방향 파수(n)일수록 회전속도에 의한 진동수변화가 보다 크게 나타나고 있다. 즉, $n=1$ 에서 회전속도에 대해 진동수가 증가 또는 감소변화가 보다 큰 것을 알 수 있다. 회전속도에 따라 후향 진동수는 감소를 전향 진동수는 증가를 하지만 $n=3$ 모드의 경우 후향 진동수가 회전속도가 증가함에 따라 감소를 하다가 미세하나마 다시 증가하는 현상을 보이고 있다.

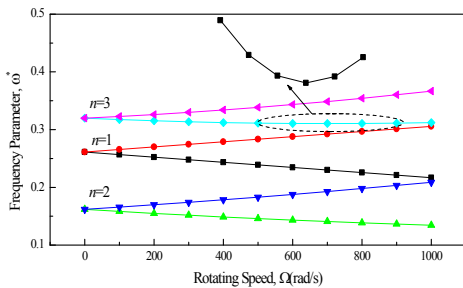


Fig. 2 Frequency variation with rotating speed ($L/R=5$, $h/R=0.1$, $p=1$, $m=1$)

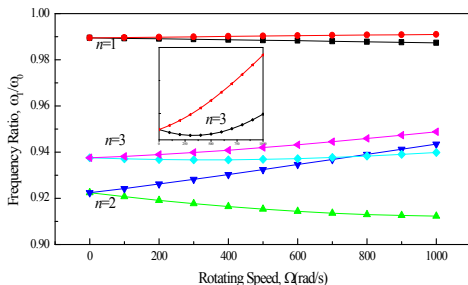


Fig. 3 Frequency ratio variation due to temperature change with rotating speed ($L/R=5$, $h/R=0.1$, $p=1$, $m=1$, $\Delta T=100K$)

그림 3은 온도변화량이 원통셀의 내면은 100K, 외부는 0K일 때 진동수비의 변화를 나타낸 것이다. 이 때 진동수비는 온도환경에서의 진동수(ω_T)를 상온에서의 진동수(ω_0)로 나눈 값이다. 그림에서처럼 온도변화에 의해 진동수는 감소(진동수비 <1)를 한다. 회전속도에 따라 진동수가 감소하는 양은 후향 진동수에서 증가를 하며, 전향 진동수에서는 줄어드는 것을 나타내고 있다. 그 감소량은 기본진동수가 나타나는 원주방향 파수($n=2$)의 후향 진동수에서 가장 크게 나타나고 있다. 또한 회전속도가 커질수록 온도영향도 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. $n=3$ 모드의 후향 진동수의 경우 회전속도의 증가에 따라 진동수비가 작아지다가 다시

증가하는 것을 볼 수 있다.

그림 4는 체적비 지수에 따른 진동수 거동을 나타낸 것으로 지수의 증가, 즉 세라믹의 양이 증가할수록 진동수는 증가한다. 여기서 지수 p 가 0에 가까울수록 금속재로 구성된 셸이 되고 p 가 무한대에 가까울수록 세라믹만으로 구성된 셸이 된다. 한편 그림 5는 온도변화(100K)에 따른 진동수변화를 나타낸 것으로 100K 온도환경에서의 진동수(ω_T)를 상온에서의 진동수(ω_0)로 나눈 진동수 비를 이용하였다. 그림에서처럼 가장 작은 진동수를 나타내는 $n=2$ 모드에서 가장 큰 온도의 영향을 보이고 있다. 특히 금속재의 양이 많을수록(세라믹의 양이 적을수록) 온도의 영향은 크게 나타나고 있다.

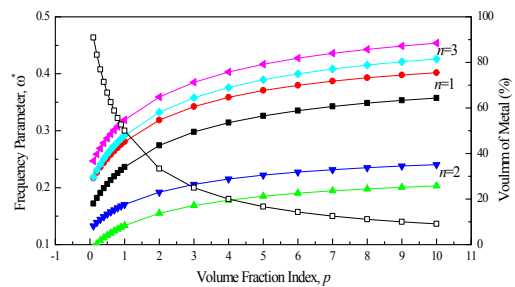


Fig. 4 Frequency variation with volume fraction index ($L/R=5$, $h/R=0.1$, $m=1$, $\Delta T=100K$, $\Omega=500rad/s$)

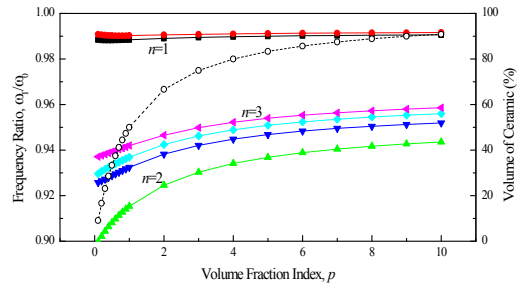


Fig. 5 Frequency ratio variation due to temperature change with volume fraction index ($L/R=5$, $h/R=0.1$, $m=1$, $\Delta T=100K$, $\Omega=500rad/s$)

4. 결 론

경사기능재료로 구성된 원통셀에 대해 1차 전단변형을 고려한 이론적인 방법을 이용하여 회전속도 및 온도변화가 진동수에 미치는 영향을 알아보았다. 일반적으로 회전속도는 원주방향 반파수가 1인 경우 가장 큰 영향을 주고, 온도 변화는 기본 진동수에 가장 큰 영향을 준다.

후 기

본 연구는 2009년도 한국전력 전력산업연구개발사업의 일부 지원에 의해 수행되었음을 밝힙니다.