한국소음진동공학회 2013년 추계학술대회논문집, pp. 109~110

복합재의 입자크기와 온도를 고려한 경사기능성 회전 블레이드의 진동해석.

Temperature-dependent vibration analysis of a rotating blade made-up of functionally graded materials considering particle size effect.

이기복* · 유홍희†

Ki Bok Lee, Hong Hee Yoo

1. 서 론

세계적인 경제성장은 안정적인 성능과 지속 가능한 에너지공급원을 요구 하고 있다. 오늘날 가스 터빈은 500MW 이상의 큰 용량과 안정적인 성능을 가진 에너지 공급원으로 널리 사용되고 있다. 최근, 기술 성장으로 고효율 가스 터빈 개발이 진행 되고 있다. 가스 터빈의 효율은 터빈 입구 온도(TET)라고 불리는 운전 온도와 비례한다. 그런데 이 TET는 보통 터빈 블레이드의 금속 온도보다 높다. 그래서 복합재를 사용하여 터빈 블레이드를 제작하곤 한다. 경사기능재료(FGM)은 최근 개발된 복합재로써 극한 온도 환경을 극복하기 위해 제안 되었다. FGM 은 재료의 조성이 금속표면에서 세라믹표면까지 연속적으로 변화하는 이질재료로 특성화 될 수 있다. 여기서, 안쪽과 바깥쪽에 상이한 재료물성은 FGM 블레이드의 내부에서 복잡한 온도 분포를 야가 한다. 또한, 블레이드의 재료물성은 온도에 따라 변화 하기 때문에 이를 고려한 해석이 필요하다. 위에서 언급한 사항들은 원치 않는 진동특성의 변화를 야기하게 되고 뜻하지 않은 블레이드의 공진을 유발할 수 있다. 그러므로, 블레이드의 설계 시, 극한 온도 환경에서 운용되는 가스 터빈 블레이드의 진동특성은 정확하게 해석 되어야 한다.

본 연구에서는 복합재를 제작 할 때, 복합재의 입자크기에 따른 열 특성을 고려하고 온도에 따른 재료물성 변화를 고려한 경사기능성 회전 블레이드를 모델링 하였다. 그리고 재료의 부피분율을 조절하여 낮은 온도 분포를 나타내면서 공진을 일으키지 않는 회전주파수 영역을 보였다. 끝으로 전반적으로 회전하는 FGM 블레이드의 진동특성이 어떻게 변화하는지에 대해 연구 하였다.

† 교신저자; 정회원, 한양대학교 기계공학부
E-mail : hhyoo@hanyang.ac.kr
Tel : (02) 2220-0446 , Fax : (02) 2293-5070
* 한양대학교 대학원 기계공학부

2. 운동방정식

2.1 경사기능재료

Fig. 1 은 두께방향으로 경사기능구배가 있는 블레이드이며 보의 길이 L, 높이 h, 벽 두께 t, 그리고 각속도 W를 보여주고 있다. Fig. 2는 FGM 블레이드의 단면 형상을 보여준다. 이 복합재는 간단한 Voigh type의 혼합법칙을 따르고 멱급수 형태의 분포를 갖는다. 이를 표현한 식은 아래의 식 (1)과 같다.

$$P_f(y) = (P_c - P_m)\left(\frac{y}{h} + \frac{1}{2}\right)^n + P_m \qquad (1)$$

여기서, P_f, P_c, P_m, n 은 경사기능재료, 세라믹, 메탈의 재료물성과 멱급수 지수를 나타낸다. Fig. 3은 멱급수 지수의 변화에 따른 두께방향으로 변화하는 복합재의 재료물성이다. $n = 0$ 일 때에는 전체가 세

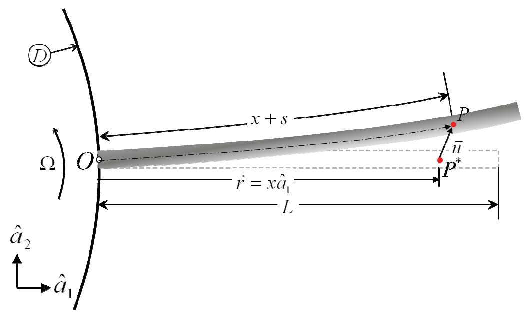

Fig. 1 Configuration of a rotating functionally graded blade

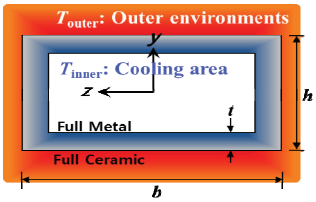

Fig. 2 Configuration of a rotating functionally graded blade cross section area

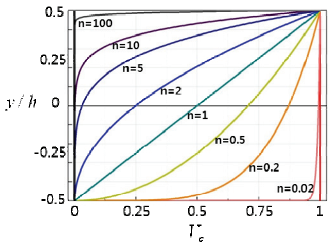

Fig. 3 Variation of the volume fraction of the ceramic constituent, V_c through the thickness of the FGbeam

라믹으고, $n=\infty$ 일 때에는 전체가 메탈인 재료물성치를 나타낸다. 온도에 따른 재료물성의 변화는 아래의 식에 따른다.

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

여기서 $P_{-1}, P_0, P_1, P_2, P_3$ 은 실험결과에서 얻은 상수이고 T는 절대 온도이다. 본 연구에서 사용된 금속재료는 SUS304이고 세라믹 재료는 Si_3N_4를 사용했다.

2.2 운동방정식 유도

Fig. 1은 경사기능성 블레이드를 보여준다. 이 블레이드는 O 점을 중심으로 $\hat{a}_3$ 방향으로 Ω 만큼 회전하는 강체 운동을 하는 허브에 부착되어 있다. 허브의 각속도와 임의의 점에서의 속도는 다음과 같다.

$$\vec{\omega}_3=\Omega\hat{a}_3 \qquad (3)$$

$$\begin{aligned}\vec{v}^{P}&=\vec{v}^{O}+\frac{{}^{N}d}{dt}(\vec{r}+\vec{u})\\&=\left[\dot{u}_1-\Omega u_2\right]\hat{a}_1+\left[\Omega\left(r+x+u_1\right)+\dot{u}_2\right]\hat{a}_2\end{aligned} \qquad (4)$$

Kane의 방법에 의해 외팔보 임의의 점에서의 속도, 가속도, 탄성에너지를 다음의 식에 적용하여 운동 방정식을 구한다.

$$\int_0^L\rho\left(\frac{\partial\vec{v}^P}{\partial\dot{q}_i}\right)\cdot\left(\frac{d\vec{v}^P}{dt}\right)dx+\frac{\partial U}{\partial q_i}=0 \qquad (5)$$

여기서 U 는 탄성에너지이며 q_i 는 일반좌표를 나타낸다. 최종적으로 굽힘 방향, 단면관성 방향에 대한 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}&\sum_{j=1}^{\mu_2}\int_0^L Z\phi'_{2i}\phi'_{2j}dxq_{2j}+\sum_{j=1}^{\mu_6}\int_0^L Z\phi'_{2i}\phi_{6j}dxq_{6j}+\sum_{j=1}^{\mu_2}m_{ij}^{22}\ddot{q}_{2j}\\&+2\Omega\sum_{j=1}^{\mu_1}m_{ij}^{21}\dot{q}_{1j}+\dot{\Omega}\sum_{j=1}^{\mu_1}m_{ij}^{21}q_{1j}-\Omega^2\sum_{j=1}^{\mu_2}m_{ij}^{22}q_{2j}\\&+\frac{1}{2}\Omega^2\sum_{j=1}^{\mu_2}k_{ij}^{G2}q_{2j}+\Omega^2\sum_{j=1}^{\mu_2}k_{ij}^{G1}q_{2j}\\&=-r\dot{\Omega}P_{2i}-\dot{\Omega}Q_{2i}\quad(i=1,2,.......,\mu_2)\end{aligned} \qquad (6)$$

$$\begin{aligned}&\sum_{j=1}^{\mu_6}\int_0^L I_{33}\phi_{6i}\phi_{6j}dx\ddot{q}_{6j}+\sum_{j=1}^{\mu_1}\int_0^L B\phi'_{6i}\phi'_{1j}dxq_{1j}\\&+\sum_{j=1}^{\mu_6}\int_0^L D\phi'_{6i}\phi'_{6j}dxq_{6j}+\sum_{j=1}^{\mu_6}\int_0^L Z\phi_{6i}\phi_{6j}dxq_{6j}\\&+\sum_{j=1}^{\mu_2}\int_0^L Z\phi_{6i}\phi'_{2j}dxq_{2j}\\&=-\dot{\Omega}\int_0^L I_{33}\phi_{6i}dx\qquad(i=1,2,.......,\mu_6)\end{aligned} \qquad (7)$$

여기서 A, B, D, Z, I_{33} 는 각각 인장강성, 인장-굽힘 연성된 강성, 전단 강성 그리고 단면 미소요소의 단위 길이당 질량관성모멘트을 의미하며 다음의 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned}&\begin{bmatrix}A & B & D\end{bmatrix}=b\int_{-h/2}^{h/2}E(y,T)\begin{bmatrix}1 & y & y^2\end{bmatrix}dy,\\&Z=b\int_{-h/2}^{h/2}G(y,T)dy,\ I_{33}=\frac{\rho}{S}I_3\end{aligned} \qquad (8)$$

구성된 운동방정식으로 진동방정식을 세우고 진동해석을 수행했다.

3. 결 론

모델링 된 시스템은 입자크기와 온도에 따른 재료물성 변화를 고려하여 진동해석을 사행하였다. 해당 시스템은 재료물성 구배에 따라서 위험속도를 판단 할 수 있었다.

후 기

본 연구는 2012년도 국방과학연구소 생존성 기술특화연구센터의 사업으로 지원받아 연구되었음.