한국소음진동공학회 2010년 추계학술대회논문집, pp.118~119

풍력 터빈 블레이드의 동적 안정성 해석

Dynamic Stability Analysis of Wind Turbine Blades

정강일*·유홍희†

Kang-Il Jung and Hong-Hee Yoo

1. 서 론

최근 세계적으로 그린에너지에 대한 관심이 점증함에 따라 풍력 터빈을 이용하는 발전기에 대한 관심과 연구가 널리 이루어지고 있으며, 풍력 발전기술의 진보에 따라 발전기당 전력 생산량 또한 10MW 급까지 등장하고 있다. 이러한 변화는 필연적으로 풍력 터빈 블레이드의 크기와 중량의 증가를 가져올 수밖에 없었다. 그런데 풍력 터빈 블레이드는 그 회전 평면이 중력방향과 평행하므로 중력의 영향이 고려되어야 하며 아울러 중량이 매우 크므로 고유진동수가 낮고 회전수도 비교적 낮아 그 영향이 함께 고려되어야 한다.

풍력 터빈 블레이드의 안정성 해석에 대해 aeroelastic 적 방법에 의한 접근으로 여러 연구들이 진행되어왔다. 하지만 이러한 방법은 공기역학적 특성이 고려되었다는 장점이 있지만 정확한 동적 모델링이 포함되지 않았다는 한계를 가진다. 또한 회전하는 블레이드의 경우 회전에 의한 원심력이 발생하여 시스템의 강성이 증가하고 그에 따라 고유진동수들이 증가하게 된다. 따라서 본 연구에서는 회전하는 블레이드를 대상으로 정확한 보 모델링 방법을 사용하여 모델링 하는 것에 초점을 두고 안정성 해석을 수행하려 한다. 이를 위해 설계 시 이용이 용이하고, Parametric Study 가 가능한 수학적 해석 모델을 제시하기 위해 블레이드를 단면 테이퍼 비와 장착각 그리고 비틀림각을 갖는 형태로 가정하여 운동방정식을 유도하였으며, 유도된 운동방정식을 통하여 블레이드의 형상 및 회전 각속도가 안정성에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 운동방정식

본 연구에서는 3차원 운동을 하는 블레이드를 해석 대상으로 삼았다. Fig. 1은 허브 A에 고정되어 있는 변형된 블레이드의 형상을 보여주고, 장착각과 초기 비틀림각, 그리고 테이퍼 비는 Fig. 2를 통해 나타내었다. 여기서, θ_0 는

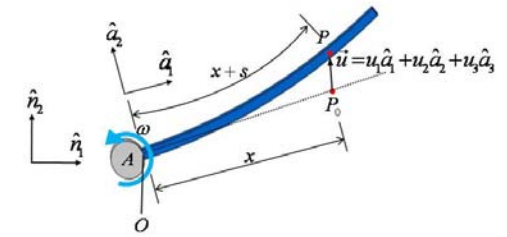

Fig. 1 Coordinate systems and a deformation vector

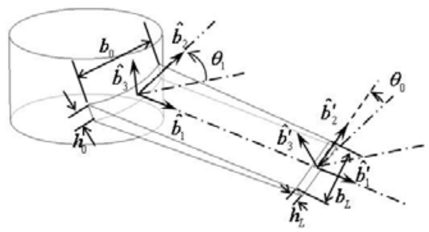

Fig. 2 Configuration of a blade having pre-twisted angle, setting angle and cross section taper

초기 비틀림각, θ_1은 장착각이고, 테이퍼비는 식 (1), (2)와 같이 정의된다. Kane이 제안한 모델링 방법에 의하여 구한 면 내 굽힘 방향, 면 외 굽힘 방향 운동방정식은 각각 식 (3), (4)와 같고, 행렬들은 식 (5~9)와 같이 정의 된다.

$$\alpha \equiv \frac{b_L}{b_0} \tag{1}$$

$$\beta \equiv \frac{h_L}{h_0} \tag{2}$$

$$\sum_{j=1}^{\mu_2}\left[m_{ij}^{22}\ddot{q}_{2j} + \begin{pmatrix} k_{ij}^{B2} - \omega^2 m_{ij}^{22} \\ (r\omega^2 - g\sin\omega t)k_{ij}^{GA2} + \omega^2 k_{ij}^{GB2} \end{pmatrix} q_{2j} \right] + \sum_{j=1}^{\mu_3}(k_{ij}^{B23} + s_1 c_1 \omega^2 m_{ij}^{23})q_{3j} + g\cos\omega t P_{2i} = 0 \quad (i = 1,....,\mu_2) \tag{3}$$

$$\sum_{j=1}^{\mu_3}\left[m_{ij}^{33}\ddot{q}_{3j} + \begin{pmatrix} k_{ij}^{B3} - \omega^2 m_{ij}^{33} \\ (r\omega^2 - g\sin\omega t)k_{ij}^{GA3} + \omega^2 k_{ij}^{GB3} \end{pmatrix} q_{3j} \right] + \sum_{j=1}^{\mu_2}(k_{ij}^{B32} + s_1 c_1 \omega^2 m_{ij}^{32})q_{2j} = 0 \quad (i = 1,....,\mu_2) \tag{4}$$

† 교신저자; 정회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : hhyoo@hanyang.ac.kr

Tel: (02)2220-0446, Fax:(02)2293-5070

* 한양대학교 대학원 기계공학과

$$m_{ij}^{\alpha\beta} \equiv \int_0^l \rho_0 A_0 \left(1+(\alpha-1)\frac{x}{l}\right)\left(1+(\beta-1)\frac{x}{l}\right)\phi_{ai}\phi_{bi}dx \tag{5}$$

$$k_{ij}^{B\alpha\beta} \equiv \int_0^l EI_{\alpha\beta}(x)\phi''_{\alpha i}\phi''_{\beta j}dx \tag{6}$$

$$P_{\alpha i} \equiv \int_0^L \rho\phi_{\alpha i}dx \tag{7}$$

$$\begin{aligned} k_{ij}^{GAa} = \int_0^l \rho_0 A_0 \Bigg(& (\alpha\beta-\alpha-\beta+1)\frac{x^3}{3l^2}+(\alpha+\beta-2)\frac{x^2}{2l} \\ & +x-\frac{(2\alpha\beta+\alpha+\beta+2)l}{6}\Bigg)\phi'_{ai}\phi'_{aj}dx \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned} k_{ij}^{GBa} = \int_0^l \rho_0 A_0 \Bigg(& (\alpha\beta-\alpha-\beta+1)\frac{x^4}{4l^2}+(\alpha+\beta-2)\frac{x^3}{3l} \\ & +\frac{x^2}{2}-\frac{(1+\alpha+\beta+3\alpha\beta)l^2}{12}\Bigg)\phi'_{ai}\phi'_{aj}dx \end{aligned} \tag{9}$$

여기서,

$$I_2(x) = \frac{I_2^*(x)+I_3^*(x)}{2}+\frac{I_2^*(x)-I_3^*(x)}{2}\cos(2\theta) \tag{10}$$

$$I_3(x) = \frac{I_2^*(x)+I_3^*(x)}{2}-\frac{I_2^*(x)-I_3^*(x)}{2}\cos(2\theta) \tag{11}$$

$$I_{23}(x) = \frac{I_2^*(x)-I_3^*(x)}{2}\sin(2\theta) \tag{12}$$

3. 안정성 해석

식 (3)에서 볼 수 있는 것과 같이, 이 시스템의 운동방정식에는 초기 비틀림각과 장착각으로 인한 연성효과와 중력의 영향으로 인한 비 제차항이 포함되어 있다. 본 연구의 운동방정식을 일반적인 Floquet 이론을 통하여 해석할 경우 안정하다고 판단된 영역에서도 동적 반응이 발산하지는 않지만 매우 큰 값을 갖는 영역이 존재하게 된다. 따라서 운동방정식이 비 제차 방정식인 경우에 대해서 추가적인 안정성 판단 척도가 필요한 것을 알 수 있다. 비 제차 방정식을 풀어 구한 변위 값이 주기적 함수 형태로 나타나기 때문에 변위의 최대값을 블레이드의 길이로 나누어 정규화시키고, 블레이드의 길이와 회전 각속도를 변화시켜가면서 정규화된 최대 변위를 구하여 Contour Graph를 구하였다. 정규화된 진폭의 범위에 따라 11 단계로 나누어 표현하였다

4. 수치해석 결과

구해진 운동방정식을 이용하여 모드 해석을 수행한 결과를 참고문헌(2)와 비교하여 운동방정식을 검증하였다. 또한 안정성 해석을 수행한 결과 단면 테이퍼비는 안정성에 큰 영향을 미치지 못하며, 장착각의 크기가 안정성에 큰 영향을 미치는 것으로 파악되었다. 장착각이 0°일 때의 안정성 해석 결과를 Fig. 3 으로, 60°일 때의 결과를 Fig. 4 로 나타내었다.

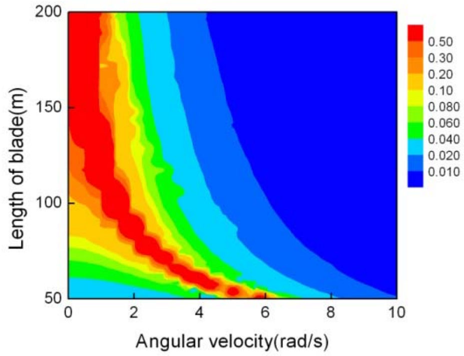

Fig. 3 Stability contour graph ($\theta_0=0^\circ, \theta_1=0^\circ, \alpha=1, \beta=1$)

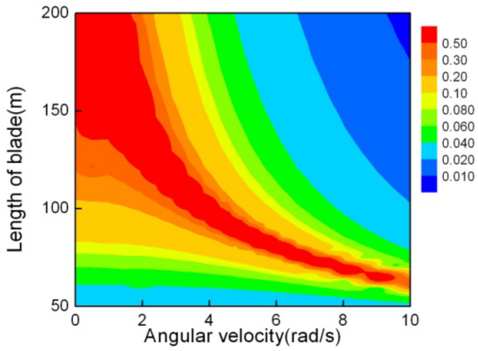

Fig. 4 Stability contour graph ($\theta_0=0^\circ, \theta_1=60^\circ, \alpha=1, \beta=1$)

5. 결 론

이 논문에서는 단면 테이퍼 비, 초기 비틀림각, 장착각을 갖는 형태의 풍력 터빈 블레이드의 중력의 영향이 고려된 운동방정식이 유도되었고 이를 바탕으로 동적 안정성 해석이 수행되었다. 유도된 운동방정식은 비 제차 미분방정식이기 때문에, 정규화된 최대변위를 사용하여 안정성을 판단하는 Contour graph 를 구하였다. 첫 번째 고유진동수인 ω_1 와 첫 번째의 1.1 배, 두 번째 고유진동수 합의 반인 $(\omega_1+\omega_2)/2$ 의 1.1 배의 크기로 회전할 때 매우 불안정한 것으로 판단되었으며 1.1 배 큰 값에서 불안정한 것은 회전의 영향으로 인해 강성항의 값이 변하였기 때문이다. 또한 단면 테이퍼 비, 초기 비틀림각과 장착각을 변화시켜가며 안정성 해석을 수행한 결과 장착각의 변화가 안정성에 큰 영향을 미치는 것으로 파악되었다.

6. 후 기

이 논문은 2010 년도 2 단계 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었음.