

# 풍력발전기 로터 블레이드의 공력탄성학적 현상

배재성\*, 황재혁\*\*, 주영철\*\*\*

\*한국항공대학교 항공우주및기계공학부(jsbae@kau.ac.kr),  
 \*\*한국항공대학교 항공우주및기계공학부(jhhwang@kau.ac.kr),  
 \*\*\*한국항공대학교 대학원 항공우주및기계공학과(ycju@kier.re.kr)

## Aeroelastic Phenomena of a Wind Turbine Rotor Blade

Bae, Jae-Sung\*, Hwang, Jai-Hyuk\*\*, Ju, Young-Chul\*\*\*

\*School of Aerospace and Mechanical Engineering, Kora Aerospace University(jsbae@kau.ac.kr),  
 \*\*School of Aerospace and Mechanical Engineering, Kora Aerospace University(jhhwang@kau.ac.kr)  
 \*\*\*Dept. of Aerospace and Mech. Eng., Graduate School, Korea Aerospace University(ycju@kier.re.kr)

### Abstract

Aeroelastic phenomena of a wind turbine include stall-induced vibrations and classical flutters. The classical flutter occurs due to coalescence between bending mode and torsion mode. It is typically the aeroelastic instability of an aircraft wing. Different from the classical flutter, the stall-induced vibration is the instability in lead-lag mode due to negative aerodynamic dampings. In the present study, the three degree of freedom aeroelastic model of a wind turbine blade is introduced to characterize and analyze its aeroelastic phenomena. The numerical results show that the aeroelastic stability of flap-lag motion is more unstable than that of flap-pitch motion and the aeroelastic characteristics of lead-lag motion can become unstable as wind speed increases.

Keywords : 풍력에너지(Wind energy), 풍력터빈(Wind turbine), 공력탄성학(Aeroelasticity), 플러터(flutter), Stall-induced flutter

### 1. 서론

최근 들어 풍력발전 시스템은 급등하는 유가상승 및 전 세계적으로 환경에 대한 관심이 증가하고 있고, 국제적으로 공해물질을 규제해 나가는 시대적인 분위기에서 새로운 천연, 무공해 대체에너지로서 크게 각광받고

있다. 이러한 풍력발전은 대기의 바람, 즉 공기의 유동이 가진 운동에너지를 공기역학적 특성을 이용하여 로터 블레이드를 회전시켜 기계적 에너지로 변환시키고, 발전기를 통해 로터의 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환시키는 것을 의미한다. 풍력 발전은 무한정의 청정에너지인 바람을 이용하는 장점이 외에 다른 발전방식에 비해 구조나 설치가

접수일자 : 2007년 12월 03일, 심사완료일자:2008년 02월 19일  
 교신저자 : 배재성(jsbae@kau.ac.kr)

상대적으로 간단하여 운영 및 관리가 쉬우며, 무인화/자동화 운전이 가능하다는 장점이 있다.

풍력발전 시스템은 그림 1과 같이 바람이

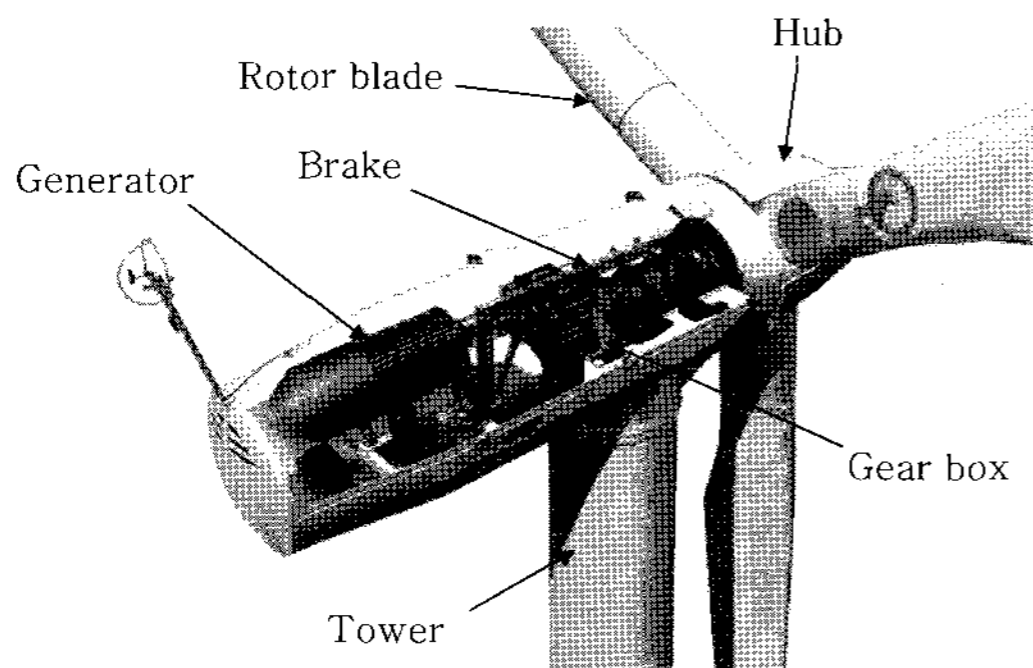


그림 1. 풍력발전 시스템의 구성요소

가진 에너지를 흡수하여 변환하는 운동량 변환장치, 동력전달장치, 동력변환장치, 전력변환장치, 타워, 감시 및 제어장치 등으로 구성되며 각각의 구성요소들은 유기적인 상호작용으로 기능을 수행하여야 한다. 현재 세계적으로 널리 운영되고 있는 풍력발전 시스템은 크게 수평축 풍력터빈(HAWT, Horizontal Axis Wind Turbine)과 수직축 풍력터빈(VAWT, Vertical axis wind turbine)으로 구분할 수 있는데, 보통 중대형 풍력 터빈의 경우에는 성능 및 구조적 효율성 때문에 수평축 형태가 사용되고 있다. 풍력발전기의 외형은 회전하는 로터 블레이드(rotor blade), 낫셀(nacelle), 타워(tower)로 구성되며, 주요 구성요소는 블레이드와 블레이드가 고정되어 있는 허브, 회전축, 로터의 회전을 증속시키는 증속기(gear box), 발전기, 제어기, 유압 브레이크, 전력제어장치 및 기타 주변장치들이다. 특히 수평축 풍력터빈의 구성물 중 바람의 힘을 기계적 힘으로 변환시키는 부분이 회전날개(rotor blade)인데, 이는 풍력터빈의 핵심부품으로 시스템의 출력특성 및 연간 전력에너지 생산량과 가동률 외에 시스템의 경제성에도 직접적인 영향을 미치

는 중요한 인자이고, 풍력발전 시스템의 설계 및 해석, 성능의 시발점이 되는 핵심요소 부품이며, 블레이드의 설계에 따라 풍력발전기의 용량과 효율이 결정된다. 따라서 날개의 설계에 의해 성능이 결정되는 항공기와 마찬가지로 풍력 발전기의 블레이드 설계 및 제작은 풍력 발전기 개발에 있어서 가장 높은 중요도를 가지는 핵심기술이다.

본 연구에서는 풍력발전기 블레이드의 3자유도 (3 DOF) 공탄성 모델을 소개하고, 이를 이용하여 풍력발전기 블레이드에서 발생할 수 있는 공력탄성학적 현상에 대해 설명하고자 한다. 이를 위해 블레이드 단면의 2차원 모델에 대한 공탄성 방정식과 정상 공기력을 이용하여 플랩-리드래그 및 플랩-피치 모드의 공력탄성학적 불안정성 및 특성을 조사하였고, 풍력발전기 블레이드에서 발생할 수 있는 공탄성 현상을 소개하였다.

## 2. 공력탄성학적 현상

### 2.1 고전적 플러터

일반적으로 대기 중을 비행하는 항공기 날개는 공기력과 구조물의 상호작용으로 인하여 공력탄성학적(aeroelastic) 현상을 직면하게 된다. 공력탄성학적 문제로는 정적 불안정 현상인 다이버전스(divergence), 동적 불안정 현상인 플러터(flutter), 돌풍에 대한 응답 등이 있다(그림 2). 공력탄성학적 현상들은 구조물의 파괴와 직접적으로 연관되므로 설계시 많은 고려가 필요하다<sup>1)2)</sup>. 특히, 최근의 항공기 구조물의 경량화에 따라 공력탄성학적 현상에 대한 연구의 중요성이 커지고 있다.

가로세로비가 상대적으로 작은 항공기 날개의 경우, 날개의 수직방향 변위가 중요하게 되므로, 리드 래그 운동과 같은 in-plane의 운동은 고려하지 않는다. 이러한 형태의 공력탄성학적 불안정성은 고전적 플러터(classical flutter)가 있다. 플러터는 불안정

한 진동현상을 의미하며, 외란에 의해 발생한 진동의 진폭이 지수 함수적으로 증가하여 구조물의 파괴를 유발하는 매우 위험한 현상이다. 날개의 첫 번째 out-of-plane의 굽힘

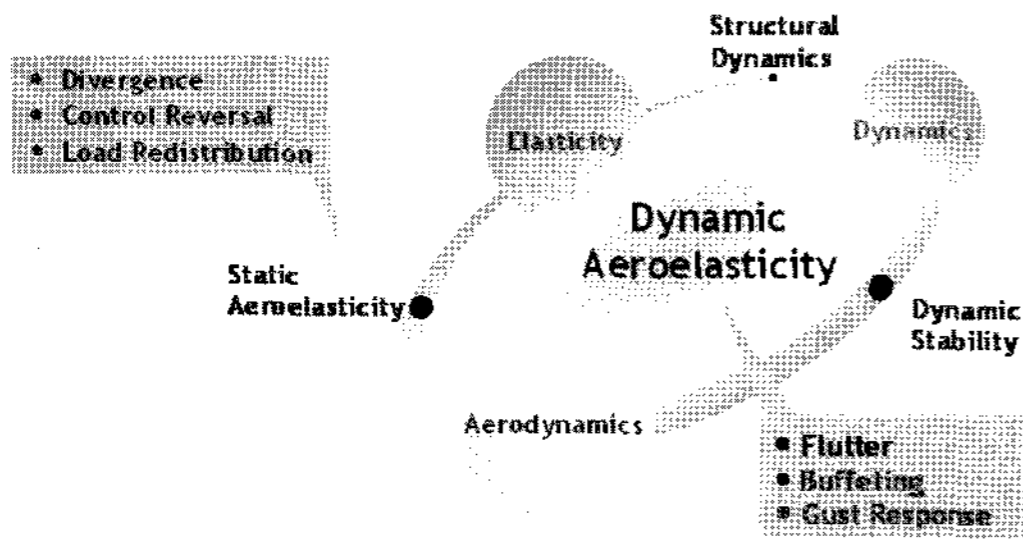
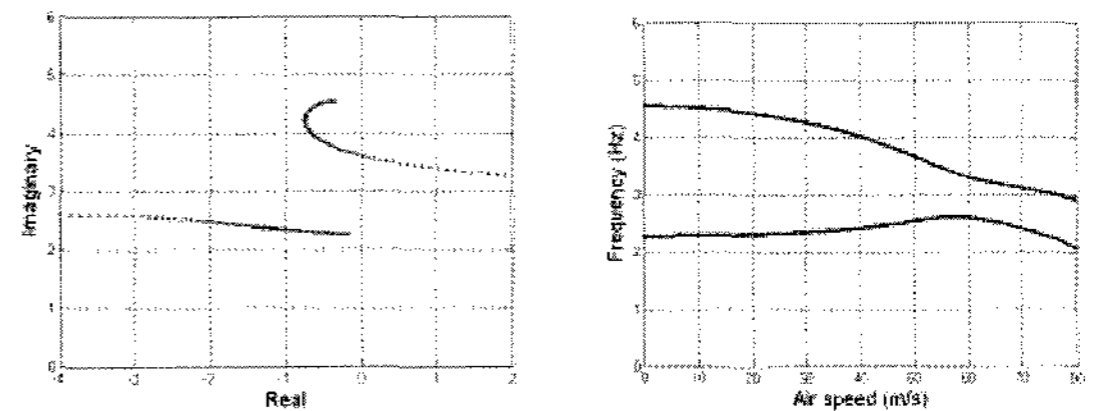


그림 2. 공력탄성학적 현상

(bending) 모드와 첫 번째 비틀림(torsion)모드의 근접(coalescence)에 의해 일어나는 급격한 불안정 현상(instability)이다<sup>3)</sup>. 그림 3은 굽힘-비틀림 모우드가 연계되어 발생하는 고전적 플러터의 근궤적과 유동속도-주파수 선도를 보여준다. 근궤적에서 실수부가 양이 되는 영역이 불안정한 영역이며, V-f선도로부터 두 모우드의 근접이 발생함을 알 수 있다. 그림 4는 고전적 플러터의 응답과 모우드 모양을 보여준다.

가지 중요한 공력탄성학적 문제가 존재한다. 항공기날개의 플러터 현상과 달리, 스톨-플러터는 유동이 블레이드 표면에서 떨어지는 박리(separation)에 의해 일어나는 공력탄성학적 현상이다. 그림 5는 블레이드의 스톨-



(a) root-loci (b) V-f plot

그림 3. Bending-Torsion flutter

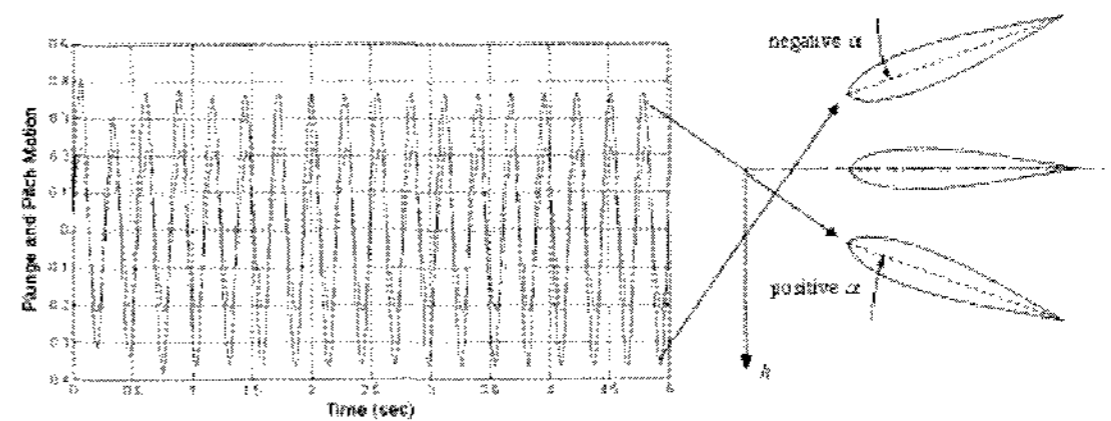


그림 4. Classical flutter characteristics

## 2.2 풍력발전기 블레이드의 공탄성 현상

항공기와 마찬가지로 본 연구의 관심분야인 풍력발전기의 로터 블레이드도 공기력과 탄성력의 상호작용으로 인한 공력탄성학적 현상을 겪게 된다. 최근의 풍력발전기 대형화와 복합재료 사용으로 인한 경량화로 인해 풍력발전기 로터 블레이드의 공력특성, 구조변형 뿐만 아니라 공력탄성학적 현상이 중요하게 되었다. 따라서 풍력발전기의 공력탄성학적 안정성 및 특성파악이 풍력발전기 블레이드 설계에 있어서 중요한 설계변수가 되고 있다.

풍력발전기에 있어 고전적 플러터(classical flutter)와 스톨-플러터(stall-flutter) 혹은 스톨-유발 진동(stall induced vibration)의 두

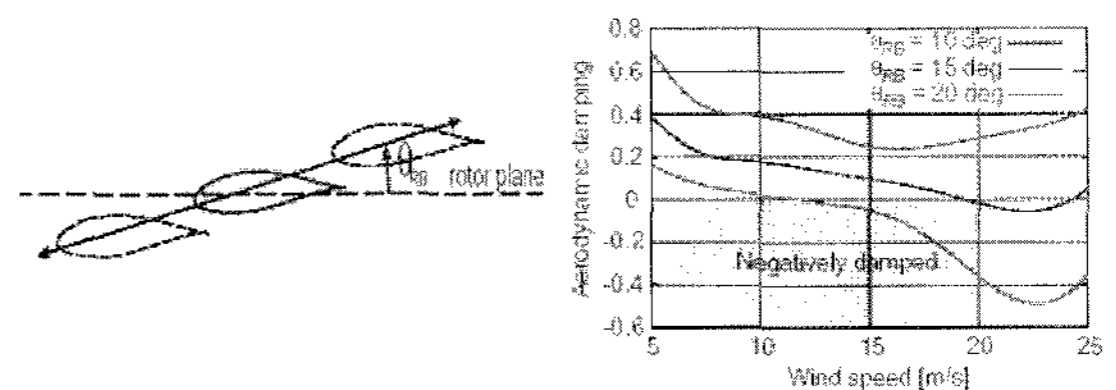


그림 5. Stall-induced vibration of blade

유발 진동의 특성을 보여준다. 유동 박리에 의한 양력곡선의 음의 기울기와 낮은 항력으로 인해 블레이드에 대한 음의 공기역학적 감쇠가 발생하여, 리드래그 방향의 진동이 발생하게 된다. 이러한 스톨-유발 진동 혹은 스톨-플러터는 스톨제어의 풍력발전기에서는 더욱 중요한 고려대상이다.

### 3. 풍력발전기 블레이드의 2차원 공탄성 모델

#### 3.1 3자유도 공탄성 모델

본 연구에서 풍력발전기 블레이드의 공탄성 특성을 조사하기 위해 2차원 블레이드의 3자유도 공탄성 모델을 고려하였다. 그림 6은 블레이드의 3자유도 공탄성 모델을 보여준다. 3자유도 모델은 플랩, 리드래그(에지방

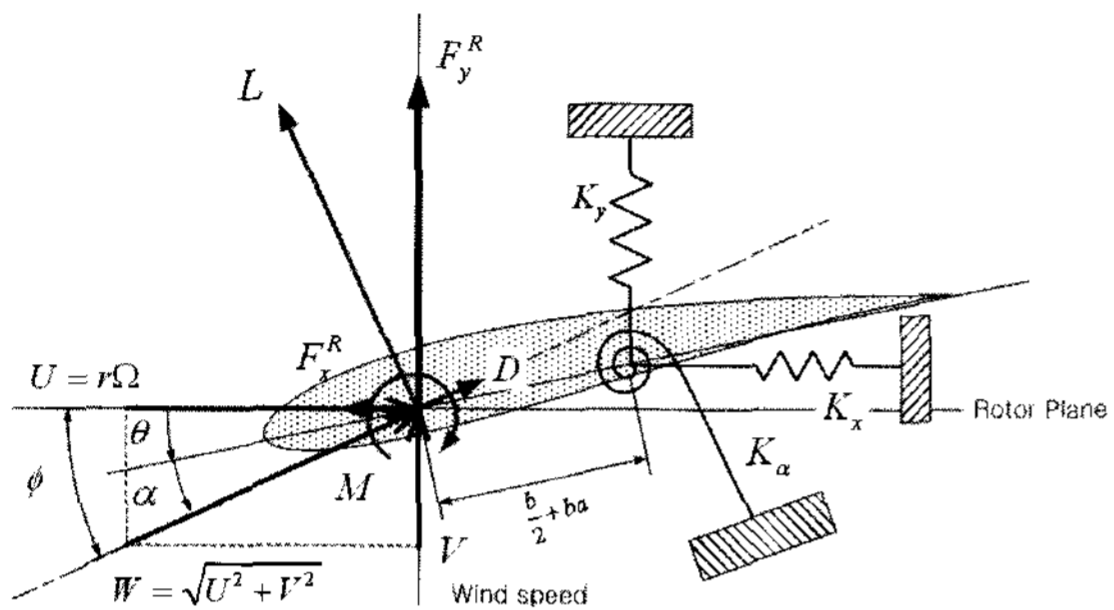


그림 6. 3 DOF aeroelastic model of blade

향), 피치 운동을 가진다. 풍력발전기 블레이드 단면은 로터 평면(rotor plane)에 대해 비틀림각( $\theta$ )을 가지고 있으며, 회전각속도( $\Omega$ )로 회전하게 된다. 따라서, 회전에 의한 임의의 스패위치에서의 로터 평면방향의 속도( $U$ )는  $r\Omega$ 가 되며, 풍속  $V$ 는 로터 평면과 수직이다. 블레이드의 3자유도 공탄성 방정식 유도를 위해 블레이드의 리드래그 모드는 로터 평면과 일치하며, 플랩 운동은 로터 평면에 수직이다.

그림 6의 3자유도 공탄성 모델의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & S_\alpha \\ 0 & S_\alpha & I_\alpha \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{\alpha} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_x & 0 & 0 \\ 0 & C_y & 0 \\ 0 & 0 & C_\alpha \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\alpha} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_x & 0 & 0 \\ 0 & K_y & 0 \\ 0 & 0 & K_\alpha \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \\ \alpha \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_x^R \\ F_y^R \\ M_\alpha^R \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서,  $F_x^R, F_y^R, M_\alpha^R$ 은 탄성축에 작용하는 힘과 모멘트이다.

#### 3.2 플랩-래그 공탄성 모델

식(1)의 3자유도 모델에서 플랩 운동과 리드래그 운동만을 고려하면 다음과 같은 2자유도의 플랩-래그 공탄성 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} m\ddot{x} + c_x\dot{x} + k_x x &= F_x^R \\ m\ddot{y} + c_y\dot{y} + k_y y &= F_y^R \end{aligned} \quad (2)$$

풍력발전기의 블레이드 단면은 매우 큰 받음각으로 회전을 하게 된다. 따라서, 식(2)의 공탄성 모델의 특성을 조사하기 위해 perturbation 방법을 사용한다. 식(2)의 변위는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x &= x_0 + \varepsilon x_1 \\ y &= y_0 + \varepsilon y_1 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $\varepsilon \ll 1$ 이다.

식(3)을 식(2)에 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \varepsilon(m\ddot{x}_1 + c_x\dot{x}_1 + k_x x_1) + k_x x_0 &= F_{x_0}^R + \varepsilon F_{x_1}^R \\ \varepsilon(m\ddot{y}_1 + c_y\dot{y}_1 + k_y y_1) + k_y y_0 &= F_{y_0}^R + \varepsilon F_{y_1}^R \end{aligned} \quad (4)$$

식(4)에서 정적 거동을 나타내는  $\varepsilon^0$ 차수와 동적 거동을 나타내는  $\varepsilon^1$ 차수로 구분할 수 있으며, 임의의 위치  $x_0$ 와  $y_0$ 에 대한 플랩-래그 공탄성 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[M_s]\{\ddot{x}\} + ([C_s] + [C_A])\{\dot{x}\} + [K_s]\{x\} = \{0\} \quad (5)$$

여기서,

$$\begin{aligned} [M_s] &= \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix}, [C_s] = \begin{bmatrix} c_x & 0 \\ 0 & c_y \end{bmatrix}, [K_s] = \begin{bmatrix} k_x & 0 \\ 0 & k_y \end{bmatrix}, \\ [C_A] &= \begin{bmatrix} -\frac{\partial F_x}{\partial U} & \frac{\partial F_x}{\partial V} \\ -\frac{\partial F_y}{\partial U} & \frac{\partial F_y}{\partial V} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

식(6)의  $[C_A]$ 은 공기력에 의한 감쇠항을 의미한다. 식(6)의 감쇠항을 구하기 위해 에어포일에 작용하는 양력/항력과 로터평면에 대한 수직 수평방향 힘의 관계가 필요하며, 블레이드에 작용하는 양력과 항력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} L &= \frac{1}{2} \rho W^2 C_L(\alpha) \bar{C} \\ D &= \frac{1}{2} \rho W^2 C_D(\alpha) \bar{C} \end{aligned} \quad (6)$$

그림 6으로부터 양력/항력과  $F_x/F_y$ 의 관계는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} F_x^R \\ F_y^R \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\phi & -\cos\phi \\ \cos\phi & \sin\phi \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} L \\ D \end{Bmatrix} \quad (7)$$

여기서, 유동속도  $W$ 와 로터 평면과의 각도  $\phi$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\phi = \theta + \alpha \quad \tan\phi = \frac{V}{U} \quad \cos\phi = \frac{U}{W} \quad \sin\phi = \frac{V}{W} \quad (8)$$

식(6)-(8)로부터 식(5)의 감쇠항은 다음과 같이 로터 회전에 의한 속도  $U$ 와 풍속  $V$ 의 함수가 된다.

$$\begin{aligned} C_{xx}^A &= \frac{1}{2} \rho \bar{C} \frac{U}{W} \left[ \frac{2U^2 + V^2}{U} C_D - V \frac{\partial C_D}{\partial \alpha} - V C_L + \frac{V^2}{U} \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \right] \\ C_{xy}^A &= \frac{1}{2} \rho \bar{C} \frac{U}{W} \left[ -V C_D - U \frac{\partial C_D}{\partial \alpha} + \frac{U^2 + 2V^2}{U} C_L + V \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \right] \\ C_{yy}^A &= \frac{1}{2} \rho \bar{C} \frac{U}{W} \left[ \frac{U^2 + 2V^2}{U} C_D + V \frac{\partial C_D}{\partial \alpha} + V C_L + U \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \right] \\ C_{yx}^A &= \frac{1}{2} \rho \bar{C} \frac{U}{W} \left[ -V C_D + \frac{V^2}{U} \frac{\partial C_D}{\partial \alpha} - \frac{2U^2 + V^2}{U} C_L + V \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

식(4)의 공탄성 방정식에서 풍속 및 회전속도의 변화에 따라 공기역학적 감쇠항의 변화

가 발생한다. 따라서, 플랩-래그 플러터 특성은 리드래그 혹은 플랩의 감쇠값에 의해 결정됨을 알 수 있다. 식(9)의 감쇠항은 양력계수, 항력계수, 양력계수 기울기, 항력계수 기울기와 에어포일 특성에 따라 변화하며, 이들 값의 부호에 따라 감쇠계수가 음의 값도 가질 수 있다.

### 3.3 플랩-피치 공탄성 모델

식(1)의 공탄성 방정식에서 플랩-피치 운동의 공탄성 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} m\ddot{y} + S_\alpha \ddot{\alpha} + c_y \dot{y} + k_y y &= F_y^R \\ I_\alpha \ddot{\alpha} + S_\alpha \dot{y} + c_\alpha \dot{\alpha} + k_\alpha \alpha &= M^R \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, 우변의 공기력항은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F_y^R &= L \cos\phi + D \sin\phi \\ M^R &= M_{AC} + L \left( \frac{b}{2} + ba \right) \cos\alpha + D \left( \frac{b}{2} + ba \right) \sin\alpha \\ &= M_{AC} + \bar{L} b \cos\alpha + \bar{D} b \sin\alpha \end{aligned} \quad (11)$$

perturbation 방법을 사용하면 다음과 같은 플랩-피치의 미소운동에 대한 공탄성 방정식을 얻을 수 있다.

$$[M_s] \{\ddot{x}\} + ([C_s] + [C_A]) \{\dot{x}\} + ([K_s] + [K_A]) \{x\} = 0 \quad (12)$$

여기서 공기력에 의한 감쇠력 및 강성항은 다음과 같다.

$$[C_A] = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_y}{\partial V} & 0 \\ \frac{\partial M}{\partial V} & 0 \end{bmatrix}, \quad [K_A] = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{\partial F_y}{\partial \alpha} \\ 0 & -\frac{\partial M}{\partial \alpha} \end{bmatrix} \quad (13)$$

식(13)에서 플랩방향의 감쇠계수  $\frac{\partial F_y}{\partial V}$ 는 식(9)와 같으며, 피치 운동의 강성계수  $-\frac{\partial M}{\partial \alpha}$ 는 다음과 같다.

$$K_{\alpha\alpha}^A = -\frac{\partial M}{\partial \alpha} = -\frac{1}{2}\rho c b \frac{W^2}{U} \left[ \begin{aligned} &(2V\cos\alpha - U\sin\alpha)C_L + U\cos\alpha \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \\ &+ (2V\sin\alpha + U\cos\alpha)C_D + U\sin\alpha \frac{\partial C_D}{\partial \alpha} \end{aligned} \right] \quad (14)$$

#### 4. 해석 결과

##### 4.1 해석모델

3장에서 유도한 공탄성 모델에 대해 공탄성 특성을 조사하기 위해 공기역학적 감쇠, 강성항을 계산하였다. 그림 7은 본 연구의 수치계산에 사용된 에어포일의 양력과 항력 곡선을 보여준다. 그림 7의 항력곡선에서 항력계수 및 기울기는 모든 영역에서 양의 값을 가짐을 알 수 있고, 양력도 모든 영역에서 양의 값을 가지나, 양력계수는 스톨이 일어난 이후인 약 15도 이상의 영역에서는 음의 값을 가지게 된다. 표 1은 본 장에서 수치예제로서 사용된 블레이드의 데이터를 보여준다<sup>4)</sup>.

##### 4.2 리드-래그 모델의 공탄성 특성

그림 7의 양력선도에서 실속 이후의 양력

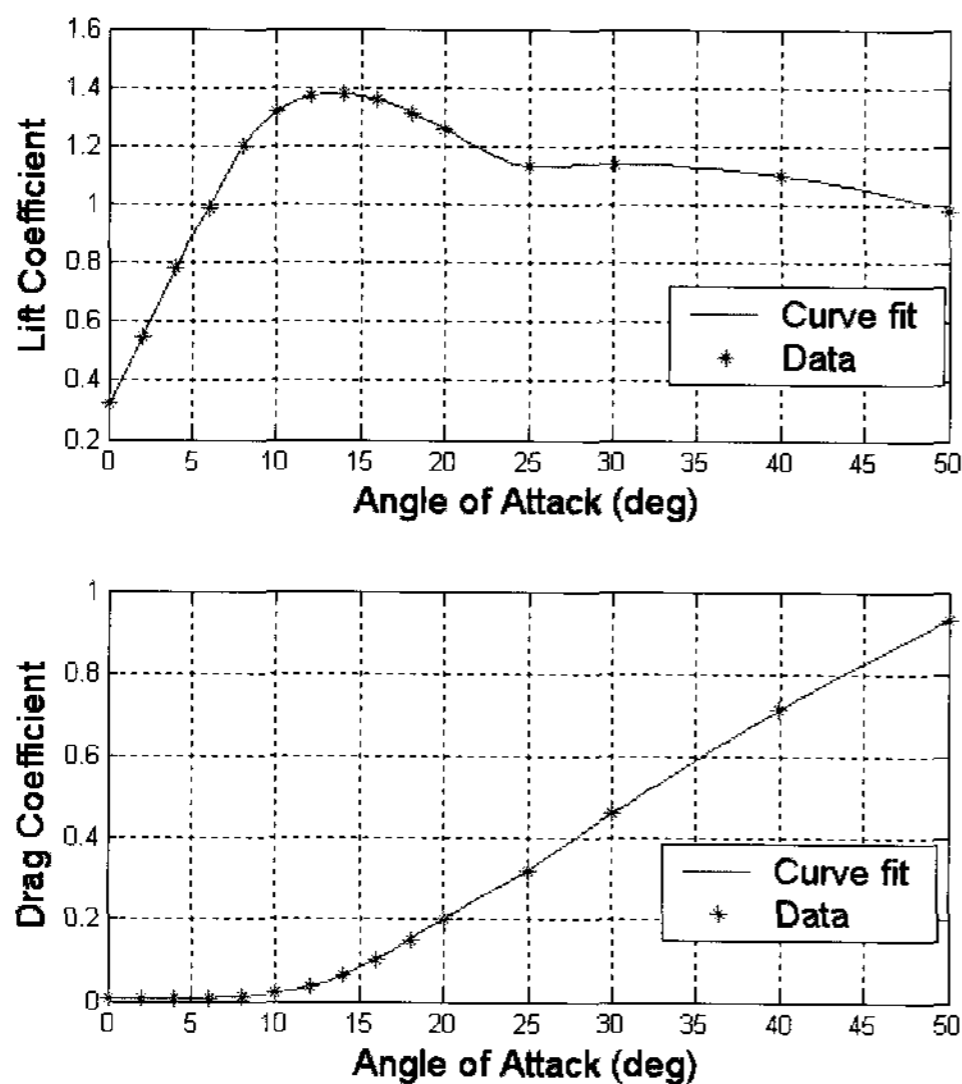


그림 7. 양력 및 항력 선도

계수는 음의 값을 가지게 되므로 식(9)의 리드래그 운동의 감쇠  $C_{xx}^A$ 의 오른쪽 세 개의 항이 음의 값을 가지고, 리드래그 운동의 감쇠는 음의 값을 가질 가능성이 높다. 식(9)의 플랩운동의 감쇠  $C_{yy}^A$ 의 마지막 항만이 음의 값을 가지게 된다.

그림 8은 풍속의 변화에 따른 리드 래그

표 1. Blade data<sup>4)</sup>

parameter	value
chord, c	1.06 m
air density, $\rho$	1.23 kg/m <sup>3</sup>
radius, r	14.0 m
rotation speed, $\Omega$	3.04 rad/s
twist angle, $\theta$	2.00 deg

운동의 감쇠  $C_{xx}^R$ 와 그 성분들을 보여준다. 식(9)에서 항력계수는 항상 양의 값을 가지므로, 모든 풍속영역에서 양의 감쇠값을 가지고, 항력계수의 기울기도 양의 값을 가지므로, 음의 감쇠값을 가진다. 또한, 양력계수에 의한 감쇠값도 음의 값을 가지며, 양력계수의 기울기에 의한 감쇠값은 약 12-22m/s 영역에서만 음의 값을 가진다. 리드래그 운동의 전체 감쇠계수는 시동풍속 (약 3-4 m/s) 부근을 제외한 모든 풍속 영역에서 음의 감쇠값을 가지므로, 불안정한 리드래그 운동이 발생할 수 있다. 그러나 실제로는 리드래그 운동의 구조감쇠로 인해 모든 영역에서 음의 값을 가지지 않고, 공기력 감쇠의 절대값이 구조 감쇠값 보다 큰 풍속영역에서 불안정한 리드래그 운동이 발생할 수 있다. 따라서 풍속의 증가에 의해 리드래그 운동의 불안정한 현상은 일정한 속도 영역에서 발생하게 된다.

그림 9는 풍속의 변화에 따른 플랩 운동의 감쇠  $C_{yy}^A$ 와 그 성분들의 변화를 보여준다. 식(9)에서 양력계수 기울기에 의한 감쇠값을 제외한 성분들에 의한 플랩 운동 감쇠값은

양의 값을 가지게 된다. 따라서, 풍속이 약 13-20m/s 부근을 제외하고는 양의 감쇠값을 가지게 된다. 또한, 음의 감쇠값도 그림 8의 리드 래그 운동의 음의 감쇠값의 크기에 비해 작으므로, 플랩운동은 리드 래그 운동에 비해 공력탄성학적으로 안정함을 알 수 있다.

그림 10은 풍속에 대한 블레이드 단면의 받음각  $\alpha$ 의 변화를 보여준다. 정격풍속인

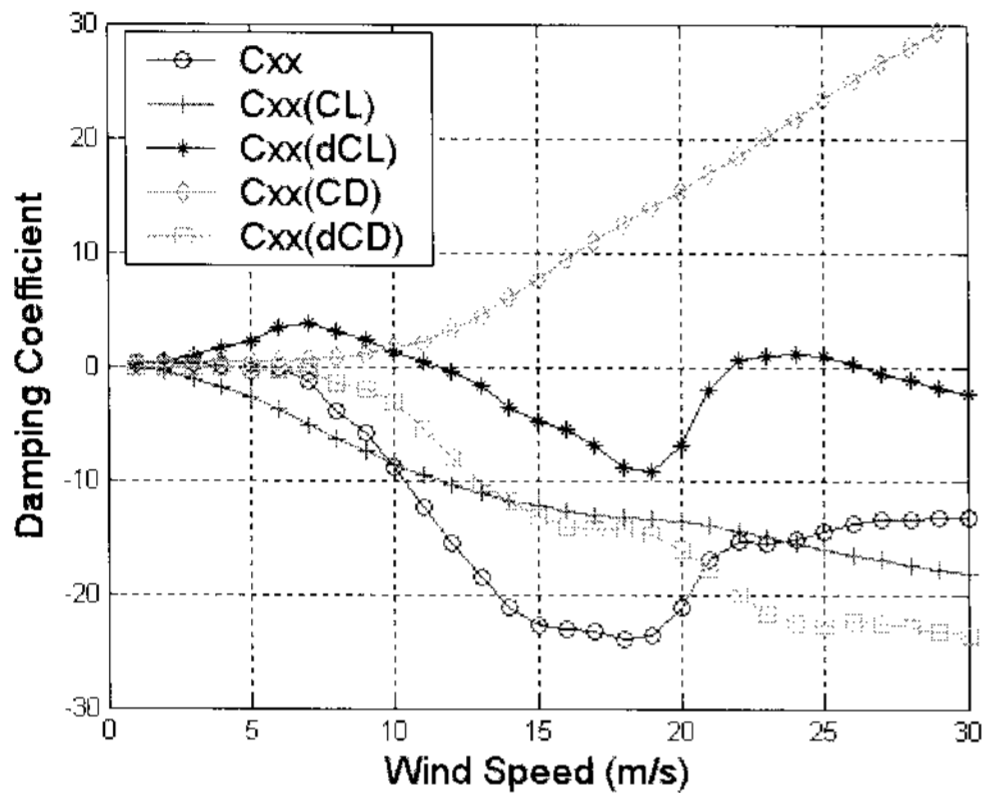


그림 8. Lead-lag damping coefficient and its components

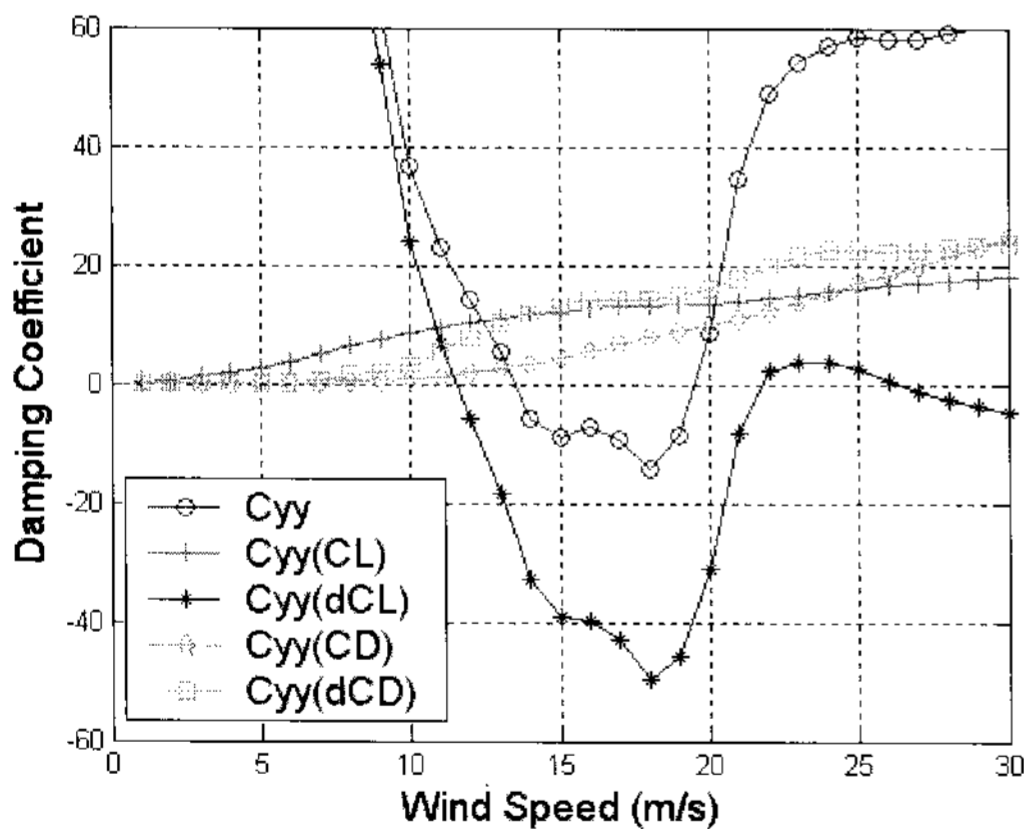


그림 9. Flap damping coefficient and its components

15m/s 부근의 풍속영역에서 약 15도-20도 사이의 받음각을 가지게 됨을 알 수 있으며, 그림 7로부터 이 받음각 영역에서 실속이 일어나게 되면 최대의 양력계수를 갖게 됨을 알 수 있다. 따라서, 최대 양력 계수를 가지

는 정격풍속 부근에서 블레이드의 리드래그 및 플랩운동의 공력탄성학적 안정성이 낮음을 알 수 있다.

### 4.3 플랩-피치모델의 공탄성 특성

고전적 플러터 모델에서는 식(14)의 두 번째 성분만을 가지고 있기 때문에 음의 공기역학적 강성을 가지게 되고, 속도가 증가하면서 피치 운동의 강성은 감소하게 된다. 그러나, 블레이드 플랩-피치 공탄성 모델의 경우 나머지 세 강성항에 의해 이러한 경향은 바뀌게 된다. 실속이후의 받음각에서 양력계수의 기울기  $\frac{\partial C_L}{\partial \alpha}$ 는 음의 값을 가지게 되므로 식(14)의 두 번째 항에 의한 강성은 양의 값이 되므로, 풍속이 증가할수록 피치 강성의 값은 증가함을 알 수 있다.

그림 11은 풍속변화에 대한 피치 강성의 변화를 보여준다. 풍속이 낮은 영역에서는 음의 강성값을 가지다가, 풍속이 증가할수록 강성 값이 증가하여 정격 풍속부근에서 양의 강성값을 가지게 된다. 따라서, 플랩-피치 공탄성 현상의 경우, 속도가 낮은 영역에서 오히려 낮은 강성값을 가지므로, 공력탄성학적 불안정성이 증가하게 된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 풍력발전기 블레이드의 공력탄성학적 현상을 파악하고, 그 특성에 대해 설명하였다. 이를 위해 간단한 3자유도 공탄성 모델을 소개하고, 플랩-피치 공탄성 모델과 플랩-래그 공탄성 모델에 대한 공탄성 방정식을 수립하였다. 두 모델을 이용하여 풍력발전기 블레이드의 공력탄성학적 특성을 일반적인 날개의 공탄성 특성과 비교/분석하였다. 풍력발전기 블레이드는 플랩-피치 운동의 공력탄성학적 안정성 보다 플랩-래그 운동의 공력탄성학적 안정성이 낮으며, 풍속의 증가에 의해 리드래그 운동의 공력탄

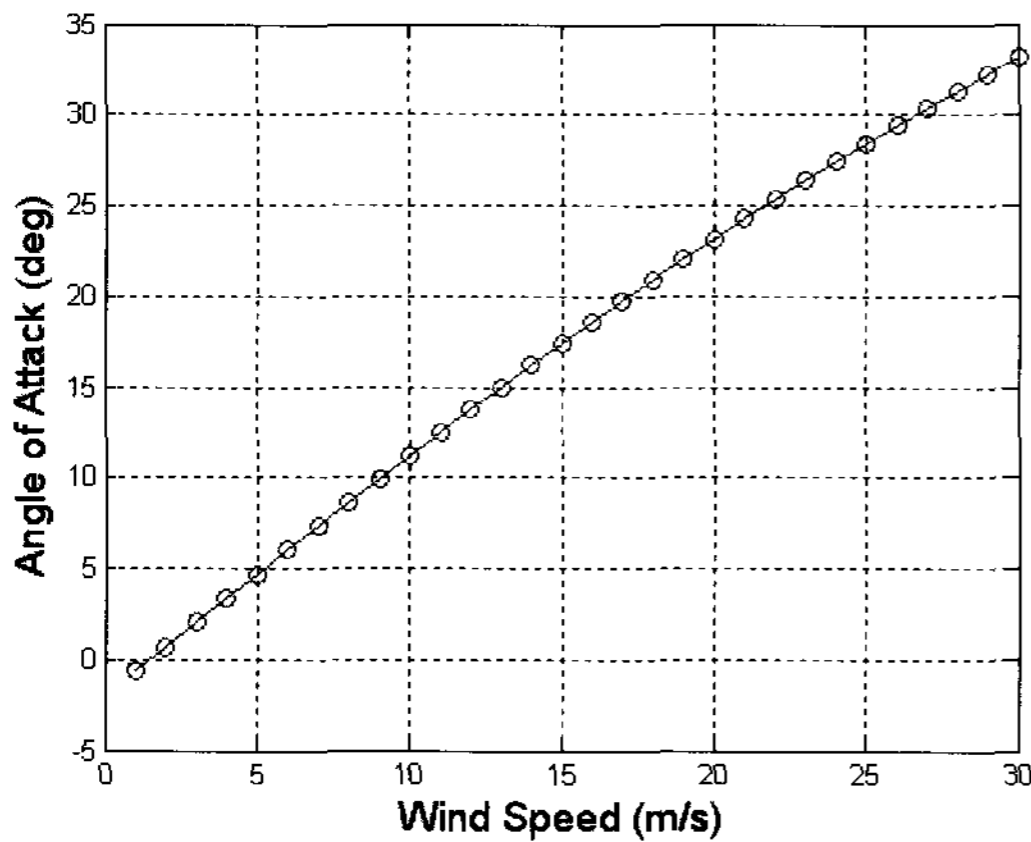


그림 10. Angle of attack variation.

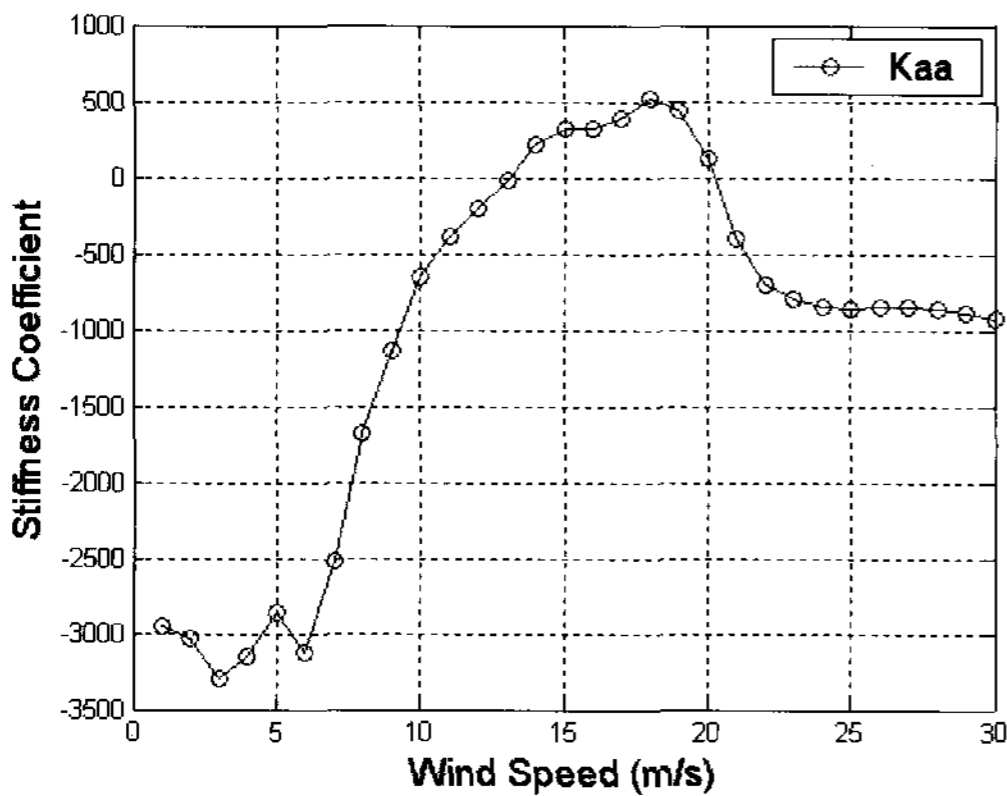


그림 11. Pitch stiffness variation

성학적 불안정성이 증가 하게 되므로, 블레이드의 구조설계시 이를 고려하여야 한다

본 연구에서 사용한 3자유도 및 플랩-피치, 플랩-래그 공탄성 모델은 복잡하고, 해석이 어려운 풍력발전기 블레이드의 공탄성 특성 해석에 있어서 기초자료로서 활용될 수 있을 것이며, 동적-스톨(dynamic stall)과 같은 공기력 모델의 사용으로 더욱 정확한 블레이드의 공탄성 현상을 파악할 수 있을 것이다.

## 후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원의 연구비지원으로 수행되었으며, 본 연구의 수행에 있어서 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. Bisplinghoff, R. L., Ashley, H., and Halfman, R. L., Aeroelasticity, Addison-Wesley Publishing Company, Cambridge, 1955.
2. 배재성, "구조 비선형성을 고려한 공탄성 특성 및 플러터 억제," 박사학위논문, 한국과학기술원, 대전, 2002년 8월.
3. 배재성, "풍력발전기 로터 블레이드의 구조해석 및 공탄성 안정성 해석기법 연구," 위탁연구과제 보고서, 한국에너지기술연구원, 2006년 9월.
4. Petersen, J.T, et. al., "Prediction of Dynamic Loads and Vibrations in Stall," Riso-R-1045, Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark, May 1998.