

# 풍력발전기 초기단계 모사실험을 위한 4자유도 수학적 모형에 대한 연구

## Study on 4-degree-of-freedom Mathematical Model for Simulation of Wind Turbine System at Initial Design Stage

신 윤 호<sup>†</sup> · 문 석 준\* · 정 태 영\*

Yun-ho Shin, Seok-jun Moon and Tae-young Chung

(Received August 6, 2012 ; Revised August 1, 2013 ; Accepted August 1, 2013)

**Key Words** : Equivalent Wind Turbine Model(등가 풍력 터빈 모형), Wind Turbine Modeling(풍력 터빈 모형화),  
Modal Analysis(모드 해석), Mathematical Wind Turbine Model(풍력 터빈의 수학적 모형)

### ABSTRACT

The commercial tools to simulate the non-linear dynamic characteristics of wind turbine system are various but, the tool take much time to simulate the control algorithm and require many input variables. In this paper, the procedures to derive the simplified 4-degree-of-freedom mathematical model of a 2-MW wind turbine which could be used at the initial design stage of the controller are proposed based on RISO's suggested method. In this model, the 1st tower fore-aft bending motion and 1st blade flapping motion are also considered in addition to the rotor-generator rotation motion in the 2-DOF model. The effectiveness of the 4-DOF model is examined comparing with the 2-DOF model and verification of the simplified model is accomplished through modal analysis for whole wind turbine system.

### Nomenclature

$\Omega_{r,g}$  : 로터/발전기 회전속도, rad/s  
 $\Theta_{r,g}$  : 로터/발전기 회전변위, rad  
 $\lambda$  : 종단속도비  
 $B_{r,g}$  : 로터/발전기 베어링 감쇠계수, Ns/m  
 $J_{r,g}$  : 로터/발전기 질량관성모멘트,  $kgm^2$   
 $M_n$  : 나셀 질량, kg  
 $N$  : 기어비  
 $R$  : 날개 반지름, m

$T_a$  : 공력 토크, Nm  
 $T_{r,g}$  : 로터/발전기 축계 토크, Nm  
 $\Phi_{t,b}$  : 정규화된 타워/날개의 모드형상  
 $c_{r,g}$  : 로터/발전기 감쇠계수, Ns/m  
 $k_{r,g}$  : 로터/발전기 강성계수, N/m  
 $k_b$  : 날개 1차 플래핑 모드에 대한  
등가 강성, N/m  
 $k_t$  : 타워 1차 굽힘모드에 대한 등가 강성, N/m  
 $m_b$  : 날개 질량, kg  
 $m_{b1}$  : 날개 1차 모드에 대한 1차 등가질량, kg  
 $m_{b2}$  : 날개 1차 모드에 대한 2차 등가질량, kg

<sup>†</sup> Corresponding Author ; Member, Korea Institute of Machinery and Materials

E-mail : shinyh77@kimm.re.kr

Tel : +82-42-868-7211, Fax : +82-42-868-7418

\* Member, Korea Institute of Machinery and Materials, Dept. of System Dynamics

‡ Recommended by Editor Don Chool Lee

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

$m_t$  : 타워 1차 굽힘모드에 대한 2차 등가질량, kg  
 $y_{b,t}$  : 타워/날개 전후 방향 변위, m  
 $n$  : 날개의 갯수, EA

산출하는 과정을 포함한다.

### 1. 서 론

저탄소·녹색성장에 대한 관심이 커져가고 에너지 고갈 문제가 인류가 직면한 가장 큰 문제 중 하나로 대두되면서 회수할 수 있는 에너지양이 상대적으로 큰 풍력에너지에 대한 관심이 고조되고 있다. 입력에 해당하는 바람의 특성 모사에서부터 날개를 거쳐 소비를 위한 전력망으로의 연결까지 신호 처리 분야부터 동역학, 제어, 전기 공학 등에 대한 전반적인 지식을 요구하는 풍력 시스템은 공학에 대한 통합적인 지식을 요구할 뿐만 아니라, 계 자체가 가지고 있는 비선형 성으로 인해 모사실험을 비롯하여 그 특성 예측이 어렵다.

풍력 터빈 계의 모형화에 대한 연구는 크게 바람 에너지로부터 기계적으로 회수될 수 있는 에너지를 산출하는 과정에 대해 기술한 기계 시스템에 중점을 둔 연구<sup>(1-4)</sup>와 기계로부터 회수된 에너지를 전력망과 연결시키는 과정에 주안점을 둔 전기 시스템에 대한 연구<sup>(5,6)</sup>로 구분할 수 있으며, 이에 대한 모사실험을 위한 다양한 상용 프로그램들<sup>(7,8)</sup>이 개발되어 사용되고 있다. 개발된 상용 프로그램들은 터빈 계의 비선형적인 특성 묘사에는 초점을 맞추고 있는 반면, 대상 풍력 터빈에 대한 많은 모형 정보를 요구하며 프로그램 사용을 위해 숙지해야 할 사항들이 많다. 상대적으로 간략하게 등가화 되어 제어기 설계 및 검토에 빈번하게 사용되는 2자유도 풍력 터빈의 경우<sup>(1)</sup>, 날개 및 타워, 추력에 대한 검토를 할 수 없다는 한계를 가진다.

이 연구에서는 2MW 풍력 터빈을 대상으로 RISO에서 제안한 4자유도 등가 모형을 이용하여<sup>(9)</sup>, 모사실험을 위한 터빈 모형을 유도하는 과정을 제안하고자 한다. 그리고 전체 계에 대한 모드 해석 결과와의 비교를 통해 유도된 모형의 유효성을 검증하고자 한다. 근사화된 4자유도 모형은 입력 바람 파워가 저주파에 집중된다는 점을 고려하여 날개와 타워의 저차 모드를 이용하여 유도하며, 모드형상 함수를 이용하여 등가 질량 및 강성항을

### 2. 2자유도 풍력 터빈의 수학적 모형화

Fig. 1은 2자유도 풍력 터빈에서 고려하는 터빈을 구성하는 기계요소들과 그 사이의 관계를 나타낸다. 터빈으로 바람이 입력되면 바람과 터빈축의 회전 속도, 날개의 공기역학적 특성에 의해 공력 토크가 산출되며, 이를 이용하여 날개 및 축계가 회전한다. 회전 속도에 의해 발전기의 명령 토크가 결정되며, 발전기 토크와 축계의 회전 속도 정보를 이용하면, 발전기의 발전량이 개략적으로 결정된다.

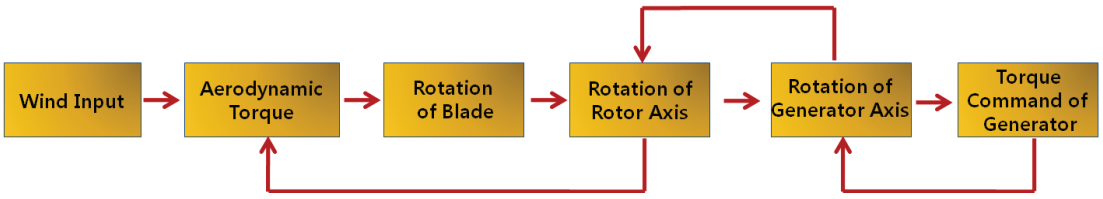
Fig. 2는 날개(blade)의 공기역학적 특성을 나타내는 출력계수(power coefficient)와 추력계수(thrust coefficient)를 날개의 피치각(pitch angle)과 주속비(tip speed ratio)에 따라 나타낸 예이다. 여기서 주속비는 축계의 회전속도와 바람 속도에 의해 결정되며, 식 (1)과 같이 정리된다. 터빈 계의 입력에 해당하는 공력 토크가 터빈의 거동 특성(회전 속도)에 의해 결정된다는 점에서 풍력 터빈 계는 강한 비선형계로 간주되며, 이를 반영 혹은 보상하기 위한 노력이 다양한 방법으로 진행되고 있다.

$$\lambda = \frac{R \times \Omega_{rotor}}{V_{wind}} \tag{1}$$

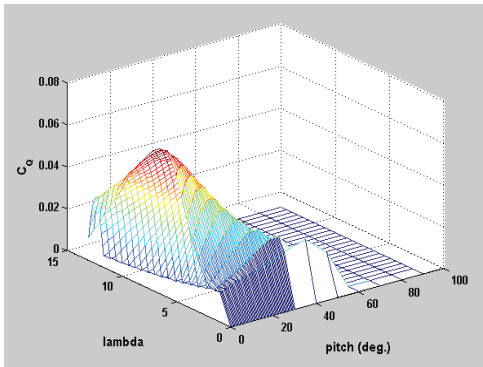
여기서  $\lambda$ ,  $R$ ,  $\Omega_{rotor}$ ,  $V_{wind}$ 는 각각 주속비, 날개길이, 로터 회전속도, 바람 속도를 의미한다.

Fig. 3은 풍력 터빈을 2자유도로 간략화한 모델에 대한 개략도를 나타내며, 날개를 포함하여 증속기 전단까지를 하나의 원판으로 모형화하고, 증속기 후단부터 발전기까지를 또 하나의 원판으로 모형화하였다. 두 개의 원판은 증속비를 갖는 증속기로 연결되며, 모형화 내용 및 단순화를 위한 가정을 정리하면 다음과 같다.

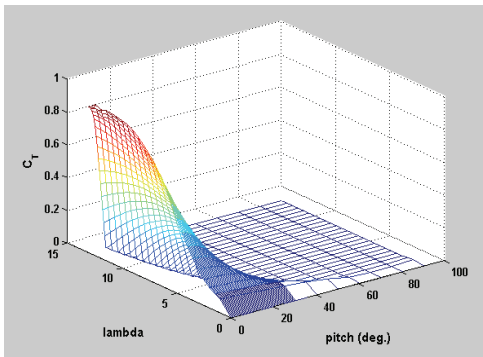
- 공력회전 토크( $T_a$ ) 및 발전기 토크( $T_g$ )에 의해 운전되는 2자유도 비선형 모델
- 공력 회전 토크 산출 시 날개 거동 영향 무시
- 타워 모드 등의 추력 관련 요소 무시
- 날개, 발전기 등의 동적 거동 무시
- 신호처리 필터 등의 동적 특성 무시



**Fig. 1** Relationship between wind turbine components, wind velocity and control algorithm for 2-DOF wind turbine model



(a)  $C_p$  curves(3D plot)



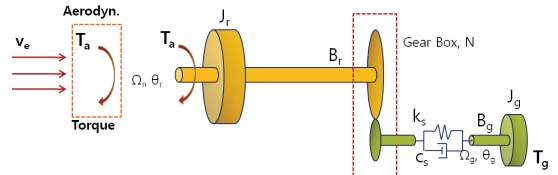
(b)  $C_T$  curves(3D plot)

**Fig. 2** Aerodynamic characteristic coefficients of blade

언급한 내용을 바탕으로 유도한 2자유도 풍력 터빈에 대한 운동방정식은 식 (2)와 같다<sup>(1)</sup>.

$$\begin{aligned}
 J_r \frac{d\Omega_r}{dt} &= T_a(\lambda, \beta_0) - k_s(\theta_r - \frac{1}{N}\theta_g) - c_s(\Omega_r - \frac{1}{N}\Omega_g) - B_r\Omega_r, \\
 J_g \frac{d\Omega_g}{dt} &= \frac{k_s}{N}(\theta_r - \frac{1}{N}\theta_g) + \frac{c_s}{N}(\Omega_r - \frac{1}{N}\Omega_g) - B_g\Omega_g - T_g
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

여기서 회전 시 기어, 베어링 등에서 발생하는 손실에 대한 항( $B_r$ ,  $B_g$ )은 주로 무시하며, 사용된 각 매개변수들에 대한 세부적인 값들에 대한 기술은 생략



**Fig. 3** 2-DOF wind turbine system

한다. 2자유도 시스템에 대한 입력은 공력 토크( $T_a$ )이며, 발전을 위해 사용되는 발전기 토크( $T_g$ )가 제어 가능한 변수가 된다. 이때 입력에 해당하는 공력토크는 대상 터빈의 회전속도( $\Omega_r$ ) 및 날개의 피치각( $\beta$ )의 함수로 나타내며, 이로 인해 시스템이 비선형성을 나타낸다.

### 3. 4자유도 풍력 터빈의 수학적 모형화

이 장에서는 2장에서 고려한 2자유도 터빈 모형에 타워 및 날개에 대한 거동 특성을 고려하여, 4자유도 풍력 터빈 모형을 구성하는 방법에 대해 논하고자 한다. 4자유도 모형화에서 고려한 계의 자유도에 대해 정리하면 다음과 같으며, 이는 RISO에서 제시한 모형화 방법에 기초한다<sup>(9)</sup>.

- 1st Flapping Mode of Blade(1-DOF)
- 1st Fore-aft Bending Mode of Tower(1-DOF)
- Rotor and Generator Rotation Behavior(2-DOF)

#### 3.1 4자유도 풍력 터빈 모형의 개요

이 연구에서 언급하는 풍력 터빈 모형은 최대 출력 제어 구간 검토를 위한 모형으로서 날개의 피치각에 대한 부분은 고려하지 않는다. 이는 해당 구간에서 날개의 피치각을 0°로 고정시키고 발전기의 토크 제어만을 수행하므로 이 연구의 모형화 과정에서 고려하지 않는다. 정격 풍속 이하의 운전 구간 즉, 최대 출력 제어 구간에서 모형화 시 고려하는 상태

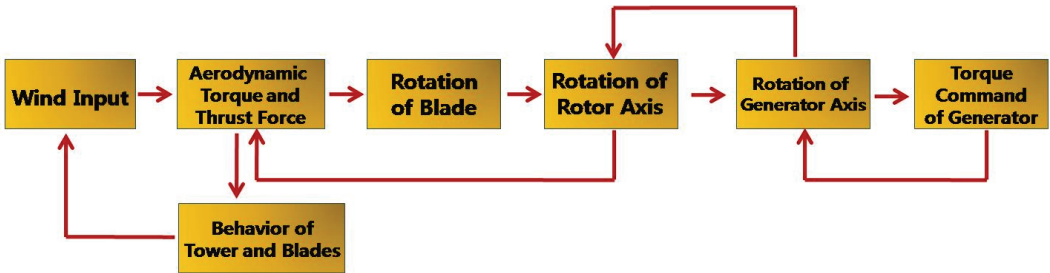


Fig. 4 Relationship between wind turbine components, wind velocity and control algorithm for 4-DOF wind turbine model

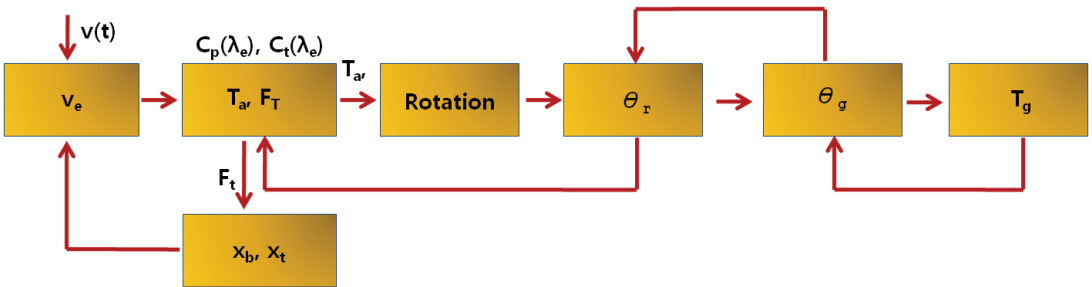


Fig. 5 Relationship between wind velocity input and state variables of 4-DOF wind turbine model

변수들 사이의 관계와 터빈의 운전 개념은 아래와 같다. 만일, 정격 이상의 구간을 고려할 경우, 추력 및 출력 계수를 산출하는 과정에서 피치각( $\beta$ )의 변화를 고려하는 방식으로 반영하는 것이 가능하며, 이때 피치 구동부의 동역학적 거동 특성을 무시한다면 이 연구에서 제안하는 모형을 수정 없이 적용하는 것이 가능하다.

4자유도 풍력 터빈의 모형화 과정에서 로터와 발전기의 회전축 계와 타워와 날개의 거동 특성을 연성하는 항은 바람 속도이다. 이는 일반적으로 정의되는 바람 특성에 식 (3)과 같이 날개와 타워의 거동 특성을 고려하여 터빈이 실질적으로 받아들이는 바람을 계산한다. 여기서 터빈으로 불어오는 바람 속도(wind speed,  $V_w$ )와 구분하기 위하여 이를 유효 바람 속도(effective wind speed,  $V_e$ )로 정의한다.

$$V_e = V_w - \dot{y}_t - \dot{y}_b \quad (3)$$

여기서  $\dot{y}_t, \dot{y}_b$ 는 각각 타워와 날개의 전후 방향 속도를 의미한다.

4자유도 풍력 터빈의 모형화에서 회전축 계에 대한 모형화는 2장에서 기술한 내용과 동일하므로 생략

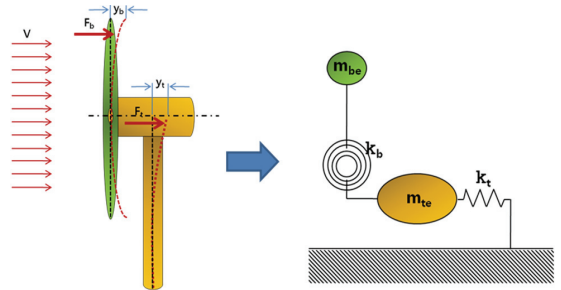


Fig. 6 Simplified tower and blade model

하며, 여기서는 날개와 타워의 거동 특성을 반영하기 위한 등가 모형화 방법에 대해서만 논의한다. 날개와 타워의 모형화는 바람의 파워가 저주파에 집중된다는 점을 고려하여 각각의 첫 번째 굽힘 모드만을 고려하며, 이에 대한 개념도는 Fig. 6과 같으며 등가 모형으로 간략화한 모형을 함께 나타내었다.

타워와 날개의 거동이 각각의 첫 번째 굽힘 모드 형상(mode shape)과 같다고 가정하면, 각각의 절대 변위와 거동 형상은 Fig. 7과 같이 정의된다. 여기서  $\phi_{ib}$ 는 각각 자유단에서의 변형이 1로 정규화된 타워와 날개 각각의 첫 번째 모드 형상 함수를 의미한다.

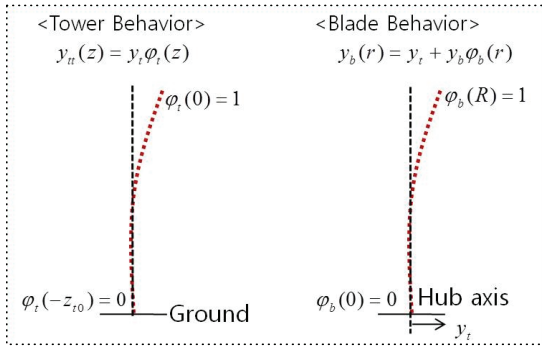


Fig. 7 Behavior of tower and blade by normalized 1st bending mode

### 3.2 4자유도 풍력 터빈 모형의 모형화

Fig. 7과 같이 가정된 타워와 날개의 거동 형상을 고려하여 식 (4)와 같이 라그랑지 방정식을 적용하면, 식 (5)와 같이 회전축 계, 날개 및 타워에 대한 운동방정식이 유도된다<sup>(9)</sup>. 이때, 날개 및 타워의 운동방정식에서 소문자로 정의된 질량항들은 식 (6)과 같이 유도된다. 이는 첫 번째 모드 형상을 고려한 등가 질량(equivalent mass)으로 정의되며, 강성항도 이와 유사하게 식 (7)과 같이 정의된다. 등가 관성 질량 항은 타워와 날개에 대해 이산화된 단위 질량과 그 위치에서의 모드 형상함수에 비례 혹은 제곱에 비례하는 형태로 정의되며, 등가 강성은 단위 굽힘 강성에 대해 공간에 대한 미분 형태의 모드 형상 함수의 곱으로 유도된다. 상기에 기술된 바와 같이 공간에 대한 미분 형태의 모드 형상 함수를 필요로 하기 때문에 연속함수 형태의 모드 형상함수가 필요하다. 이에 대해서는 3.3절에서 세부적으로 설명한다.

$$\begin{aligned}
 T &= T_{nacelle} + T_{blade} + T_{tower} + T_{\theta_r} + T_{\theta_g} \\
 V &= V_{tower} + V_{blade} + V_{shaft} \\
 L &= T - V \\
 T_{nacelle} &= \frac{1}{2} M_n \dot{y}_t^2 \\
 T_{tower} &= \int_0^h \frac{1}{2} m_t(z) (\dot{y}_t \phi_t(z))^2 dz \\
 T_{blade} &= \int_0^R \frac{n}{2} m_b(r) (\dot{y}_t + \dot{y}_r \phi_b(r))^2 dr \\
 T_{\theta_r} &= \frac{1}{2} J_r \dot{\theta}_r^2, \quad T_{\theta_g} = \frac{1}{2} J_g \dot{\theta}_g^2 \\
 V_{tower} &= \int_0^h \frac{1}{2} EI_t(z) (y_t \phi_t'(z))^2 dz
 \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
 V_{blade} &= \int_0^R \frac{n}{2} EI_b(r) (y_b \phi_b'(r))^2 dr \\
 V_{shaft} &= \frac{1}{2} k_s (\theta_g - \theta_r)^2
 \end{aligned}$$

여기서  $T, V$ 는 각각 운동에너지와 위치에너지를 의미한다.

$$\begin{aligned}
 J_r \frac{d\Omega_r}{dt} &= T_s(\lambda_c, \beta_0) k_s (\theta_r - \frac{1}{N} \theta_g) - c_s (\Omega_r - \frac{1}{N} \Omega_g) - B_r \Omega_r \\
 J_g \frac{d\Omega_g}{dt} &= \frac{k_s}{N} (\theta_r - \frac{1}{N} \theta_g) + \frac{c_s}{N} (\Omega_r - \frac{1}{N} \Omega_g) - B_g \Omega_g - T_g \\
 (M_n + m_t + nm_b) \ddot{y}_t + nm_{b1} \ddot{y}_b + c_t \dot{y}_t + k_t y_t &= F_r(\lambda_c, \beta_0) \\
 nm_{b1} \ddot{y}_t + nm_{b2} \ddot{y}_b + nc_b \dot{y}_b + nk_b y_b &= F_b(\lambda_c, \beta_0)
 \end{aligned} \tag{5}$$

여기서  $M_n$ 은 너셀의 질량을,  $k_t, b, c_t, b$ 는 타워와 날개의 등가 강성과 감쇠를,  $n$ 은 날개의 개수를 의미하며, 등가 감쇠 관련항은 무시할 만큼 작다고 가정하고 계산하였다.

$$\begin{aligned}
 m_t &= \int m_t(z) \phi_t^2(z) dz = \sum m_t(i) \Delta z \phi_t^2(i) \\
 m_b &= \int m_b(r) dr = \sum m_b(i) \Delta r_i \\
 m_{b1} &= \int m_b(r) \phi_b(r) dr = \sum m_b(i) \Delta r_i \phi_b(i) \\
 m_{b2} &= \int m_b(r) \phi_b^2(r) dr = \sum m_b(i) \Delta r_i \phi_b^2(i) \\
 k_t &= \int EI_t(z) \{\phi_t'(z)\}^2 dz = \sum EI_t(i) \Delta z_i \{\phi_t'(i)\}^2 \\
 k_b &= \int EI_b(r) \{\phi_b'(r)\}^2 dr = \sum EI_b(i) \Delta r_i \{\phi_b'(i)\}^2
 \end{aligned} \tag{6}$$

여기서 유의할 점은 추력 항이 하나의 자유도에 대한 입력 힘이 아닌 각 자유도(타워, 날개)에 대해 외력으로 유도된다는 점이며, 이는 등가화 과정을 고려하면 설명이 가능하다. 날개 거동에 대한 근사화 과정에서 날개의 끝단에서의 병진 방향 거동으로 간략화된 등가 모형을 유도하였으나, 날개의 실제 거동은 고정단 쪽에서의 회전 거동에 기인한다는 점을 고려하면 날개에 가해지는 병진 방향 힘은 바람에 의한 회전 모멘트를 끝 단에서 가해지는 병진 방향 힘으로 환산하여 계산한 입력으로 간주하면 설명 가능하다. 날개와 타워에 대해 유도된 추력은 식 (8)과 같으며<sup>(2)</sup>, 이는 바람에 의해 날개와 타워 끝단의 전후 방향 거동을 유발하는 입력 항이다.

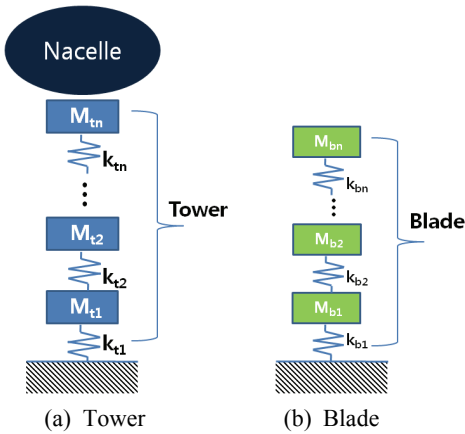


Fig. 8 Free body diagram of tower and blade elements

$$F_T = \int_0^R f_T(r)dr = f_{T,C}R = \frac{\rho\pi R^2}{2} C_T(\lambda_e, \beta) V_e^2 \quad (8)$$

$$F_b = \int_0^R f_T(r)rdr / R = \frac{1}{2} f_{T,C}R = \frac{1}{2} F_T$$

여기서  $V_e$  와  $\lambda_e$  는 각각  $V_w - \dot{y}_t - \dot{y}_b$  와  $(R \times \Omega_{rotor}) / V_e$  로 정의되며 식 (5)의  $T_a(\lambda_e, \beta_0)$  항과 식 (8)을 이용하여 4자유도 운동 방정식이 연성된다.

### 3.3 타워 및 날개의 모형 매개변수 추출

2-MW 풍력 터빈에 대해 식 (6)과 (7)에서 설명하는 등가 질량과 강성을 계산하기 위한 방법은 다음과 같다. Fig. 8과 같이 이산화된 풍력 발전기의 단위 질량 및 단위 굽힘 강성 정보는 각각 25개와 36개의 단위 질량 및 강성 항으로 구성된다.

해당 질점과 강성에 대한 정보를 이용하여 각 날개와 타워를 외팔보로 가정하고 모드 해석을 수행하면, Fig. 9와 같은 결과를 도출할 수 있다. Fig. 7에서 가정한 바와 같이 첫 번째 모드 형상을 끝단을 기준으로 정규화하고, 이에 대해 연속화된 형상함수를 도출하여 등가 질량 및 강성을 계산한다.

식 (7)에서 기술한 바와 같이, 등가 강성을 계산하기 위해서는 모드 형상에 대한 공간 미분 결과가 요구되며, 이를 위해서는 연속 함수 형태의 모드 형상 함수가 필요하다. 연속함수 형태의 모드 형상함수는 식 (9)와 같이 6차 다항식을 이용하여 도출하며, 날개와 타워 각각의 첫 번째 모드 형상에 대한 곡선 맞춤 결과는 Table 1과 Fig. 10과 같다.

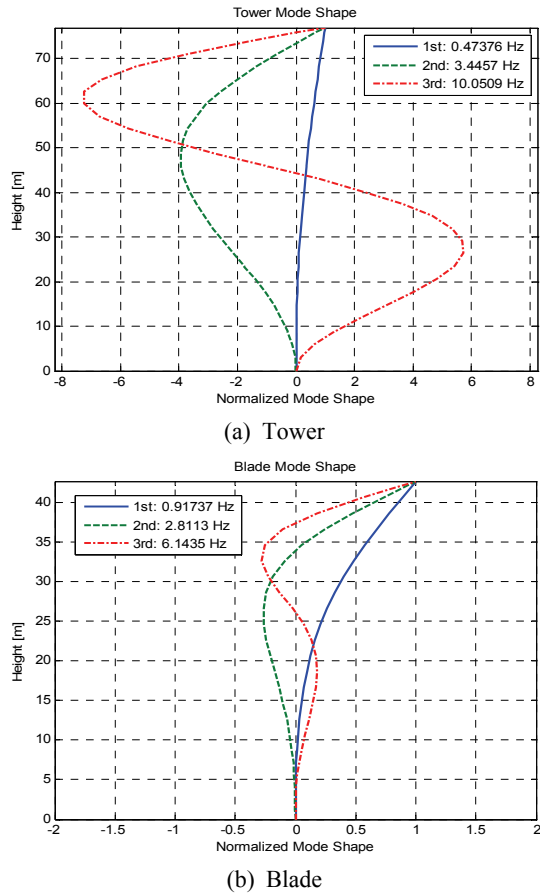


Fig. 9 Mode shape of tower and blade elements

$$V_t(x_t) = a_{t6}x_t^6 + a_{t5}x_t^5 + a_{t4}x_t^4 + a_{t3}x_t^3 + a_{t2}x_t^2 + a_{t1}x_t \quad (9)$$

$$V_b(x_b) = a_{b6}x_b^6 + a_{b5}x_b^5 + a_{b4}x_b^4 + a_{b3}x_b^3 + a_{b2}x_b^2 + a_{b1}x_b$$

식 (6), (7), (9)를 이용하여 등가 질량 및 강성을 계산하면 Table 2와 같으며, 이는 4자유도 터빈 모형의 모사실험을 가능하게 한다.

### 4. 모드 해석을 통한 4자유도 풍력 터빈 유효성 고찰

연속함수 형태의 모드 형상함수를 이용하여 계산된 4자유도 풍력 터빈의 등가 질량과 등가 강성을 정리하면, Table 2와 같다. 등가화 과정을 통해 도출된

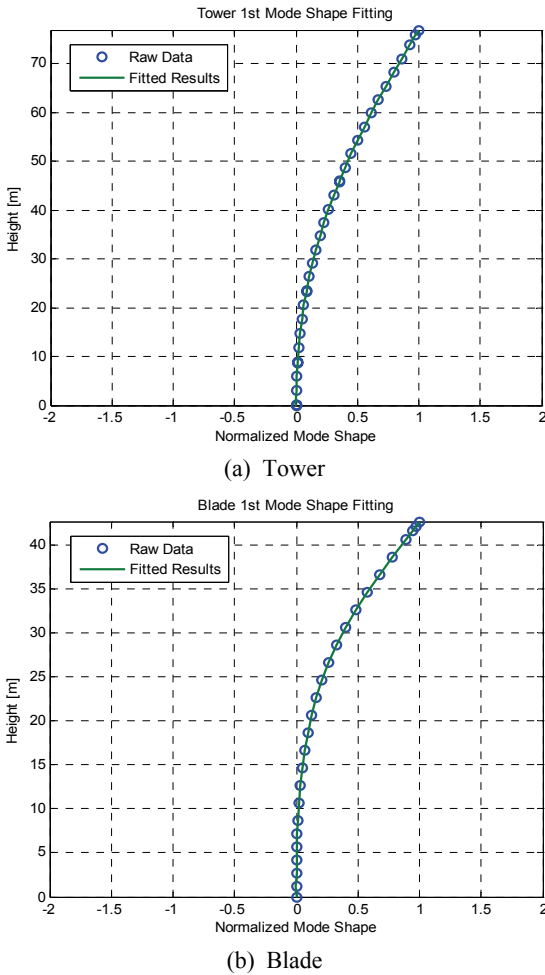


Fig. 10 Curve-fitting results of 1st mode shape by 6th order polynomial function

Table 1 Coefficients of mode shape function on tower and blade

	Tower	Blade
$a_6$	$-1.76 \times 10^{-12}$	$-2.14 \times 10^{-10}$
$a_5$	$3.08 \times 10^{-10}$	$1.31 \times 10^{-8}$
$a_4$	$-2.81 \times 10^{-8}$	$-9.65 \times 10^{-8}$
$a_3$	$1.63 \times 10^{-6}$	$6.88 \times 10^{-6}$
$a_2$	$1.32 \times 10^{-4}$	$1.32 \times 10^{-4}$
$a_1$	$-6.72 \times 10^{-5}$	$-3.33 \times 10^{-4}$

Table 2 Equivalent mass and stiffness of tower and blade via mode shape function

Name	Value	Unit
$n$	3	[EA]
$m_t$	$1.343 \times 10^5$	[kg]
$m_b$	8290	[kg]
$m_{b1}$	988.6	[kg]
$m_{b2}$	444.1	[kg]
$k_t$	$4.58 \times 10^5$	[N/m]
$k_b$	$8.88 \times 10^3$	[N/m]

결과의 유효성  $W$ 을 판단하기 위해 풍력 터빈 전체에 대한 모드 해석을 수행하였다. 4자유도 등가 모형에서 주로 관심을 가지는 모드가 타워의 전후 방향 굽힘 모드(tower 1st fore-aft bending mode)와 날개의 전후 방향의 플래핑 모드(blade 1st flapping mode)이므로 터빈 전체 계에 대한 모형을 수행할 때, Fig. 11과 같이 3개의 날개가 중첩된 형태로 간주하여 계산하였다.

Fig. 12에서 도시한 바와 같이 전체 터빈에 대한 모드 해석 결과의 첫 번째 모드 형상은 타워의 굽힘 거동이 주를 이루며, 두 번째 거동 형상은 날개의 첫 번째 플래핑 모드가 주를 이룬다.

풍력 터빈 전체 계에 대한 모드 해석 결과와 근사화된 4자유도 모형의 모드 해석 결과를 비교하면, Table 3과 같다. 각각은 10% 미만의 차이를 보이며, 상대적으로 크게 차이가 나는 타워의 경우를 살펴보면 차이 계산을 위한 기준값이 작아서 큰 차이가 남을 관찰할 수 있다. 참고로, 절대값 차이는 0.03 Hz 정도로 상대적으로 작은 차이를 보인다.

앞서 언급했듯이 계에 입력되는 바람의 파워가 저주파수에 집중되어 있다는 점을 고려하면 상대적으로 간단한 4자유도 모형을 이용해서도 유의미한 모사실험 결과를 도출할 수 있다고 판단된다. 또한 2자유도 터빈 모형을 이용할 때, 관찰 불가능한 타워 및 날개의 거동 특성과 제어기의 설계가 추력에 미치는 영향 등을 검토할 수 있다는 장점을 가진다.

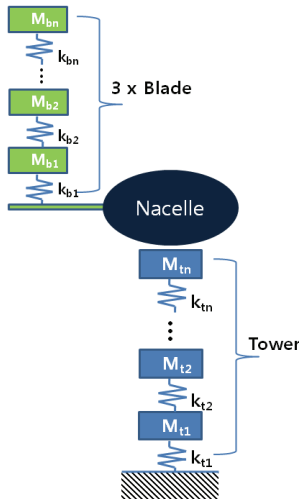


Fig. 11 Whole wind turbine model for modal analysis

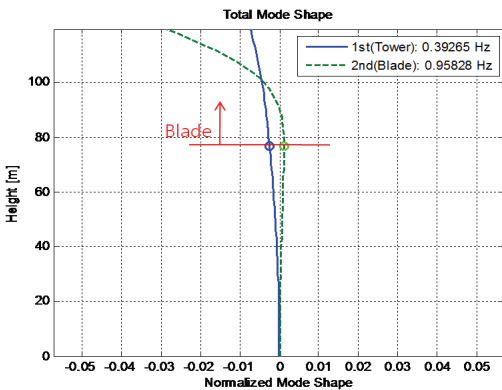


Fig. 12 Modal analysis results of whole wind turbine system: 1st and 2nd mode

Table 3 Natural frequency of wind turbine model

	Tower 1st fore-aft mode	Blade 1st flapping mode
Equivalent 4-DOF wind turbine	0.427 Hz (8.7 % ↓)	0.978 Hz (2.1 % ↑)
Original whole system	0.393 Hz	0.958 Hz

### 5. 결 론

이 연구에서는 2-MW 풍력 터빈을 대상으로 RISO에서 제안한 4자유도 등가 모델을 이용하여,

모사실험을 위한 터빈 모형을 유도하는 과정을 제안하였으며, 그 유효성을 전체 계에 대한 모드 해석 결과와의 비교를 통해 검증하였다. 근사화된 4자유도 모형은 전체 계에 대한 모드 해석 결과와 비교하여 10% 이하의 차이를 보이며, 바람입력 파워가 저주파에 집중된다는 점을 고려하면 풍력 터빈 제어기의 초기설계 단계에서 부족한 설계 정보를 바탕으로 신속한 제어기 검토를 위해 활용 가능할 것으로 판단된다.

유도된 모형은 간략화된 2자유도 모형과 비교하여 타워 및 날개의 거동 특성을 관찰하는 것이 가능하며, 제어기의 설계 및 적용이 추력 및 터빈 거동에 미치는 영향을 검토할 수 있다는 장점을 가진다.

### 후 기

이 연구는 미래창조과학부 산하 산업기술연구회의 지원 아래 한국기계연구원 주요사업(NK174E/F) 연구과제의 결과 중 일부임을 밝힙니다.

### References

- (1) Nam, Y.-S., 2009, Wind Turbine Control, GS Inter Vision, ISBN 978-89-93668-33-9.
- (2) Bindner, H., 1999, Active Control: Wind Turbine Model, Riso-R-920(EN) pp. 1~32.
- (3) Hodges, D. H. and Patil, M., 2000, Multi-flexible-body Analysis for Application to Wind-turbine Control Design, 19th ASME Wind Energy Symposium, Jan. 10~13.
- (4) Jung, K.-I. and Yoo, H.-H., 2010, Dynamic Stability Analysis of a Rotating Blade Considering Gravity Effect, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 20, No. 11, pp. 1052~1057.
- (5) Hannefors, L. and Nee, H. P., 1998, Model-based Current Control of AC Machines Using the Internal Model Control Method, IEEE Trans, Ind. Applicat., Vol. 34, No. 1, pp. 133~141.
- (6) Kim, W. S., Sim, G. H., Lee, K. B., Jeong, B. C. and Song, S. H., 2008, Sliding-mode Based Direct Power Control of a Doubly Fed Induction Generator for Wind Turbines, Trans. of KIPE, Vol. 13, No. 2, pp.



152~162.

(7) Garrad Hassan & Partners Ltd., 2010, Bladed User Manual Version 4.0.

(8) Jonkman, J. M. and Buhl Jr., M. L., 2005, FAST User's Guide, Technical Report of NREL.

(9) Hansen, M. H., Hansen, A., Larsen, T. J., Oye, S., Sorensen, P. and Fugl-sang, P., 2005, Control Design for a Pitch-regulated, Variable Speed Wind Turbine, RISO-R-1500(EN), RISO National Laboratory.



**Yun-ho Shin** received his Ph.D. from Dept. of Mechanical, Aerospace and Systems Engineering at KAIST in 2009, respectively. He has worked at Korea Institute of Machinery and Materials from 2010. His research interests include active vibration control, wind turbine control and naval ship survivability.



**Seok-jun Moon** received his Ph.D. from Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering at Seoul National University in 1995. He has worked at Korea Institute of Machinery and Materials from 1996. His research interests include structural control devices, wind turbine control and energy harvesting solution.



**Tae-young Chung** received his Ph.D. from Dept. of Ocean Engineering at MIT in 1987. He has worked at Korea Institute of Machinery and Materials. His research interests include dynamics of offshore structures, cost analysis and energy harvesting solution.