

다몸체 역학을 이용한 수평축 풍력발전 시스템 모델링

閔炳文*, 魯泰洙†, 宋丞鎬**, 崔碩佑***

Horizontal-Axis Wind Turbine System Modeling using Multi-body Dynamics

Byoung Mun Min, Tae Soo No, Seung Ho Song, and Seok Woo Choi

요 약

본 논문에서는 로터 블레이드, 발전기, 로터 블레이드와 발전기에 연결된 고/저속 회전축 및 회전축간의 회전력을 전달하는 기어 시스템 등 다수의 몸체가 서로 상대적인 운동이 가능한 채 연결되어 있는 단일로터 수평축 풍력발전 시스템을 다몸체 시스템으로 간주한 후, 다몸체 역학을 이용한 풍력발전 시스템 모델링 기법을 제안하였다. 이를 기반으로 풍력발전 시스템의 성능 해석을 위한 시뮬레이터를 개발하였다. 그리고 다양한 시뮬레이션을 통해 제안된 풍력발전 시스템 모델링 기법과 시뮬레이터의 타당성을 검증하였다.

ABSTRACT

In this paper, an efficient modeling method of Horizontal-Axis Wind Turbine(HAWT) system is proposed. This method is based on representing a HAWT system as a multi-body system with several rigid bodies i.e. rotor blade, low/high speed shaft, gear system, and generator. Also, simulation software WINSIM is developed to evaluate performance of wind turbine system. Simulation results show that the proposed modeling method and simulation software are efficient and reliable.

Key Words : Horizontal-Axis Wind Turbine(HAWT) system, Multi-body system, Multi-body dynamics, Simulation software WINSIM

1. 서 론

풍력발전 시스템이란 그림 1에 도시한 바와 같이 바람의 운동 에너지를 블레이드를 통해 기계적 회전 에너지로 변환시키고, 이를 이용하여 발전기를 구동시킴으로써 전기 에너지를 생산하는 방식의 발전 시스템을 말한다. 풍력발전 시스템의 특성을 파악하고 성능 해석

을 수행하기 위해서는 풍력발전 시스템을 구성하고 있는 각 구성품에 대한 모델링이 선행되어야 하며, 이를 기반으로 전체 시스템을 구성함으로써 전체 시스템에 대한 성능 해석을 효과적으로 수행할 수 있게 된다. 이와 같은 풍력발전 시스템의 모델링 과정에 있어서 Naruhito^[1]는 실제 운용되고 있는 풍력발전 시스템으로부터 획득한 자료를 기반으로 시스템 동정 접근 방법을 통해 전체 풍력발전 시스템을 모델링하고 있으며, Delarue^[2]은 블레이드, 회전축과 기어, 직류 발전기, 커패시터 및 인버터가 연계된 매우 복잡한 전체 시스템을 간단한 몇 개의 부 시스템으로 나눈 후, 부 시스템 사이의 입출력 관계를 통해 전체 시스템에 대한 모델링을 수행하고 있다. 그러나 이와 같은 접근 방법은 실제 시스템으로부터 획득한 정보가 없거나, 고려하고

† 교신저자 : 정회원, 전북대 항공우주공학과 부교수
E-mail : rotthee@moak.chonbuk.ac.kr

* 학생회원, 전북대 차세대풍력발전연구센터 위촉연구원

** 정회원, 전북대 전자정보공학부 조교수

*** 정회원, 전북대 전자정보공학부 부교수

접수일자 : 2003. 8. 26 1차심사 : 2003. 9. 29

심사완료 : 2003. 10. 7

자 하는 전체 시스템의 각 구성품이 구조적으로 매우 복잡하게 연계되어 있는 경우에 있어서는 전체 시스템을 모델링 하는데 많은 제약이 따르게 된다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하고자 기존의 일반적인 수평축 풍력발전 시스템뿐만 아니라 한반도의 풍황에 알맞게 설계된 한국형 풍력발전 시스템^{[3],[4]}에 대해서도 전체 시스템 모델링과 성능 해석을 효과적으로 수행할 수 있도록 다몸체 역학을 이용한 운동 방정식 형성 방법과 이를 기반으로 다몸체 시스템의 운동 해석을 통해 풍력발전 시스템의 성능 분석을 수행할 수 있는 시뮬레이터인 WINSIM을 개발하였다. 또한 다양한 시뮬레이션을 통해 본 논문에서 제안한 모델링 기법과 시뮬레이터의 타당성을 검증하였다.

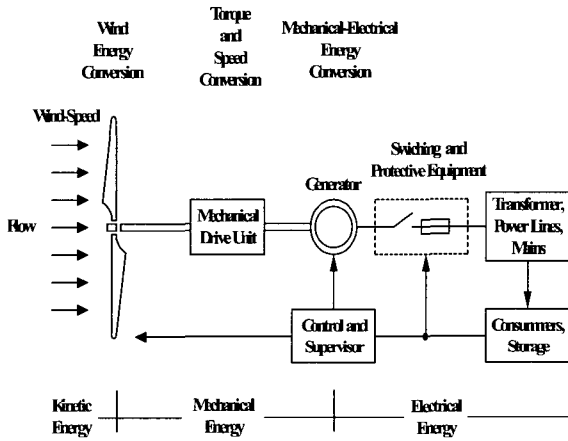


그림 1 풍력발전 시스템의 개요
Fig. 1 Power transfer diagram of wind turbine system

2. 다몸체 시스템의 운동방정식 형성 방법

2.1 시스템 모델링 및 운동 기구학

다몸체 시스템이란 서로 상대적인 운동이 가능한 채 연결되어 상대방의 운동을 구속할 수 있는 다수의 몸체로 구성된 시스템으로 정의할 수 있다. 본 논문에서 고려한 다몸체 시스템은 관성 좌표계에서 서로 연결된 채 떠다니는 개방형 나무구조(Open Tree Topology)를 갖는 시스템으로 각 구성 몸체가 강체라고 가정한 것 외에는 어떠한 가정도 사용하지 않았다. 그림 2는 개방형 나무구조를 갖는 다몸체 시스템의 이웃 몸체간의 기하학적 관계를 도시한 것으로, 그림 2에 사용한 기호와 정의는 표 1에 정리하였다. 각 몸체의 기구학적 관계나 시스템의 형상은 경로 행렬(Path Matrix)과 기준 몸체 연산자(Reference Body Operator)를 이용하여 정의할 수 있다.^[5]

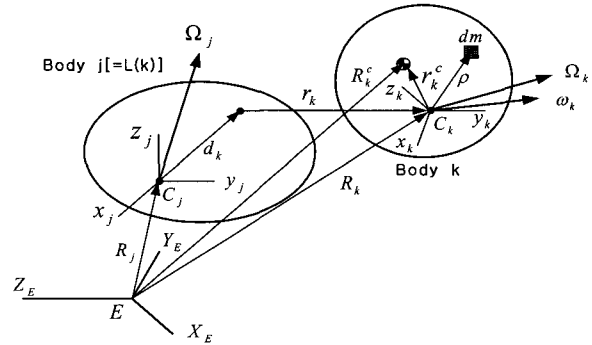


그림 2 다몸체 시스템의 이웃 몸체간의 기하학적 관계
Fig. 2 Geometry Between Neighboring Components Bodies

표 1 이웃 몸체간의 기하학적 관계에 따른 기호정의
Table 1 Notation Used to Define the Geometrical Relationships Between Neighboring Bodies

Notation	Definition
m_k	mass of body B_k
I_k	Inertia matrix of body B_k
d_k	Location of B_k attachment point to B_j
r_k^c	Position vector of B_k 's mass center
r_k	Relative position vector of B_k w.r.t B_j
ω_k	Relative angular velocity vector of B_k w.r.t B_j
Ω_k	Absolute angular velocity vector of B_k
θ_k	1-2-3 Euler angle of B_k -fixed w.r.t B_j -fixed frame
R_k^c	Absolute position vector of B_k 's mass center

2.2 시스템 운동 방정식과 구속 방정식

그림 2에 도시된 다몸체 시스템의 몸체 B_k 를 독립된 단몸체로 간주하면 B_k 의 병진 및 회전 운동 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.^[6]

$$m_k \dot{R}_k^c = F_k^c + F_k^i + F_k^c \quad (1)$$

$$I_k \dot{\Omega}_k = M_k^e + M_k^i + M_k^c \quad (2)$$

여기서 F_k^i 와 M_k^i 는 Coriolis와 Centrifugal 관성력과 관성 모멘트, F_k^c 와 M_k^c 는 몸체 B_k 에 연결된 주변 몸체들에 의한 구속 반발력을 나타낸다. 식 (1)과 식 (2)를 결합하여 전체 시스템의 운동 방정식을 절대 속도와 절대 각속도로 구성된 상태 벡터 $X = (\dot{R}_1, \dot{R}_2, \dots, \Omega_1, \Omega_2, \dots)$ 로 표현하면

$$M \dot{X} = F^e + F^i + F^c \quad (3)$$

과 같다. 또한 시스템 구성 몸체간의 운동 구속 관계를 상대 속도와 상대 각속도로 구성된 상태 벡터 $x = (\dot{r}_1, \dot{r}_2, \dots, \omega_1, \omega_2, \dots)$ 로 표현한 후 단순 결합하여 가속도 레벨의 시스템 구속식으로 표현하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$A \dot{x} = g(t, x, r_i, \theta_i, \dots) \quad (4)$$

여기서 A 는 구속 행렬(Constraint Jacobian Matrix)을 말한다. 또 식 (3)을 변수 변환을 통해 상태 벡터 x 로 표현하면 다음과 같다.

$$m \dot{x} = f^e + f^i + f^c \quad (5)$$

식 (5)에서 미지의 구속력 f^c 를 Lagrange multiplier vector λ 로 표현할 수 있으므로^[6], 식 (4)와 식 (5)를 통합하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} m & A^T \\ A & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f^e + f^i \\ g(t, x, r_i, \theta_i, \dots) \end{bmatrix} \quad (6)$$

식 (6)을 풀어 수치 적분함으로써 시스템에 대한 운동 해석이 가능하다. 식 (6)은 구속식의 개수가 늘어나는 경우 풀어야할 식의 증가에 의한 계산량 증대와 수치적분 속도가 저하되게 된다. 본 논문에서는 위와 같은 문제를 해결하기 위하여 Kane's 방법 또는 Projection 방법^[7]과 유사하게 A 를 두 개의 직교행렬로 분해하는 대신 A^T 의 직교행렬 B 를 구한 후, 식 (6)을

$$\begin{bmatrix} Bm \\ A \end{bmatrix} \dot{x} = \begin{bmatrix} B(f^e + f^i) \\ g(t, x, r_i, \theta_i, \dots) \end{bmatrix} \quad (7)$$

과 같이 변형된 미분 방정식으로 표현하였다. 이러한 경우 식 (5)는 독립적 운동이 가능한 영역과 구속에 의하여 자유로운 운동이 제한되는 영역 모두를 나타내는 운동 방정식이며 행렬 B 를 식 (5)의 양변에 곱함으로써 운동 영역이 제한되는 방향으로의 운동식을 제거하는 효과가 나타나게 된다.

3. 풍력발전 시스템 성능 해석 시뮬레이터

3.1 시뮬레이터의 구성 및 기능

본 논문에서는 다물체 시스템의 운동 해석을 통해 풍력발전 시스템의 성능 해석을 수행할 수 있는 시뮬

레이션 소프트웨어(WINSIM : WIND Turbine Power Generation System Simulator)를 개발하였다. 본 논문에서 개발한 WINSIM은 사용자로부터 시스템 형상과 각 몸체간의 연결부재 종류, 외력 특성 등을 입력으로 받아들여 2.2절의 식 (6) 또는 식 (7)과 같은 형태로 표현된 최종 운동방정식을 자동으로 형성한 후, 수치 적분을 수행함으로써 다물체 시스템의 운동을 해석할 수 있도록 하였다. 그림 3에서는 시뮬레이터인 WINSIM의 전체적인 구성과 각 구성 모듈의 기능을 간단히 도시하였으며 프로그램은 FORTRAN 언어를 사용하여 작성하였다.

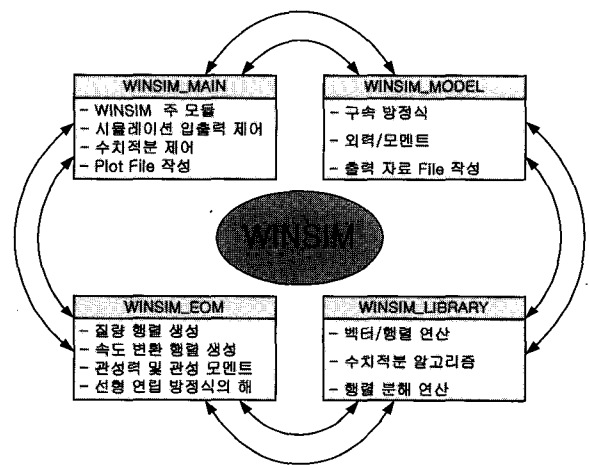


그림 3 WINSIM의 구조 및 각 모듈의 기능
Fig. 3 Structure and Functions of WINSIM

그림 3에서 WINSIM_MAIN은 전체 시뮬레이션의 흐름을 관장하는 모듈로 입력 및 출력 파일의 개폐, 변수의 초기화 및 초기치 설정, 수치적분 제어, 그리고 운동 해석에 필요한 변수를 일정 시간 간격에 따라 출력 파일에 기록하는 기능을 수행한다. WINSIM_MODEL은 다물체 시스템을 구성하는 연결 부재의 종류, 즉 몸체간 연결 부위에서의 운동 자유도와 각 몸체에 가해지는 외력 및 모멘트를 사용자가 직접 작성하도록 하는 기능을 담당한다. 따라서 WINSIM_MODEL 부분을 작성하기 위해서는 해당 모델에 대한 충분한 지식이 요구되며, 운동 결과의 해석에도 주의해야 한다. WINSIM_LIBRARY는 다물체 시스템의 운동방정식 형성에 필요한 벡터와 행렬 연산 및 적분 알고리즘을 이용하여 수치 적분을 수행하는 기능을 담당한다. 마지막으로 WINSIM_EOM은 다물체 시스템의 운동방정식을 형성하는 기능과 운동변수들의 변화율을 수치 적분 알고리즘에 제공하는 기능을 수행한다.

3.2 시뮬레이션 소프트웨어 검증 예제

본 논문에서 개발한 다물체 시스템의 운동 해석을 통해 풍력발전 시스템의 성능 해석 수행을 목적으로 개발한 시뮬레이터인 WINSIM의 신뢰성 검증을 위하여 그림 4와 같은 이중 진자에 대한 Benchmark 문제를 제시하고, 서로 다른 시뮬레이션 소프트웨어로부터 동일한 해석 결과를 얻는지 비교하는 직접적인 방법을 통하여 시뮬레이터 WINSIM에 대한 신뢰성 검증을 수행하였다.

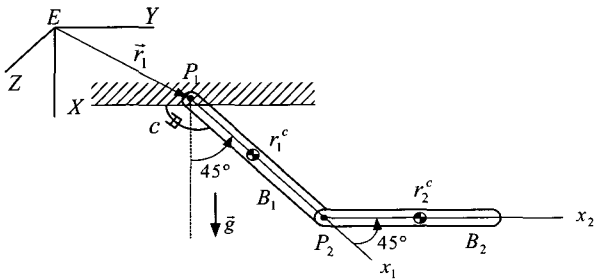


그림 4 이중 진자 모델의 형상
Fig. 4 Double pendulum model configuration

먼저 그림 4에 도시한 바와 같이 몸체 B_1 의 Hinge 점 P_1 은 고정되어 있고 몸체 B_1 과 B_2 의 연결부 P_2 는 Revolution 조인트로 연결되어 있으며 관성 좌표계의 XY 평면에서만 운동이 가능한 이중 진자를 고려하였다. 또한 시스템에 작용하는 외력은 중력만을 고려하였으며, P_1 에서 마찰력을 고려하기 위하여 P_1 에 회전 댐퍼(Torsional Damper)를 부착하였다. 각 물체의 물성치 및 초기 조건은 표 2에 정리하였다.

시스템 위치 에너지의 시간 변화를 도시한 그림 5는 상용 소프트웨어인 DADS^[8]와 동일한 결과를 보이고 있다. 그림 6은 기준 몸체에 대한 각 물체의 상대 각도의 시간 변화를 도시한 것으로 초기에 그림 4와 같이 각각의 진자가 기준 몸체에 대하여 45° 기울어진 상태에서 운동을 시작하는 경우 몸체 B_1 의 마찰력 효과에 의하여 결국 각 진자가 관성 좌표계의 X 축 방향으로 놓은 상태에서 운동이 정지하게 되고, 이때 시스템의 전체 위치 에너지는 이론적으로 계산한 78.4 (N.m)의 값과 동일한 값을 나타내고 있다.

4. 풍력발전 시스템 모델링에 대한 적용

4.1 풍력발전 시스템 동역학 모델링

본 논문에서는 2.2절에서 기술한 다물체 역학의 운동 방정식 형성 과정을 기반으로 그림 7과 같이 3개의 블

표 2 이중 진자의 물성치 및 운동 초기 조건

Table 2 Physical properties and initial conditions of double pendulum system

Body No.(Ref. Body)	B_1	$B_2(B_1)$
Location of Outboard Body	$d_2 = (2, 0, 0)$	End Body
Mass Properties	$m_1 = 2$ $I_{zz} = 2.6667$ $r_1^c = (1, 0, 0)$	$m_1 = 2$ $I_{zz} = 2.6667$ $r_2^c = (1, 0, 0)$
Initial Conditions	$\theta_{13} = \pi/4$	$\theta_{23} = \pi/4$
Remark (Constraints)	Gravity Acceleration $g = 9.80665$ Damper Coefficient : $c = 28.6$	

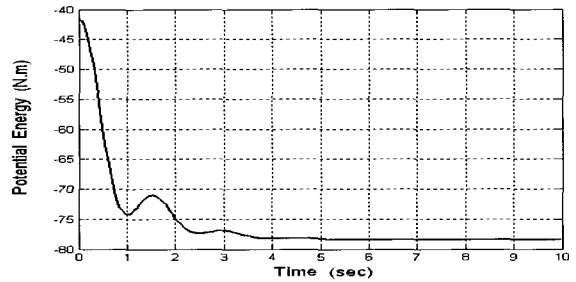


그림 5 위치 에너지 변화
Fig. 5 Time history of total potential energy

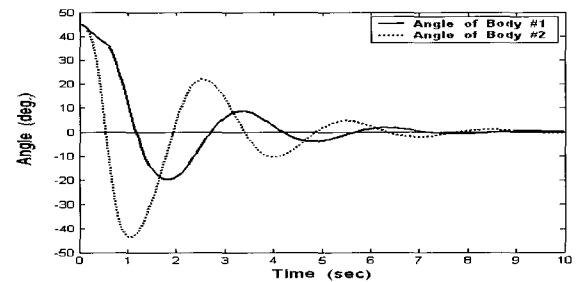


그림 6 시간에 따른 각도 변화
Fig. 6 Time histories of position angles

레이드와 로터 블레이드 및 발전기에 연결된 저/고속 회전축, 회전축의 회전력을 전달하는 기어 시스템, 발전기로 구성된 일반적인 수평축 풍력발전 시스템에 대한 모델링을 수행하였으며, 각 물체의 물성치와 초기 조건은 표 3에 정리하였다.

본 논문에서 고려한 풍력발전 시스템은 회전축 및 발전기는 기준축을 중심으로 한 회전 운동과 3개의 로터 블레이드는 회전축에 대한 피치 운동이 가능한 4자

유도 모델로 간주하였다.

그림 2와 그림 7을 참조하여 각 몸체의 질량 중심의 위치 벡터와 부착 위치 벡터를 각각 다음과 같이 설정하였다.

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_1^c &= (0, 0, 0) \\ \mathbf{r}_2^c &= (-0.1725, 0, 0) \\ \mathbf{r}_3^c &= \mathbf{r}_4^c = \mathbf{r}_5^c = (0, 0, 3.555) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{d}_1 &= (0, 0, 0) \\ \mathbf{d}_2 &= (-0.5, 0, 0) \\ \mathbf{d}_3 &= \mathbf{d}_4 = \mathbf{d}_5 = (0.5, 0, 0) \end{aligned} \quad (9)$$

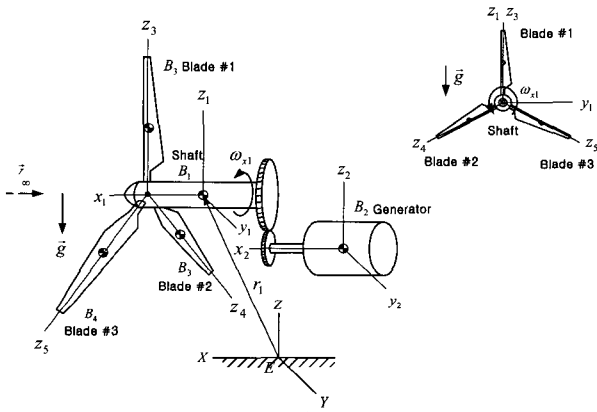


그림 7 단일로터 수평축 풍력발전 시스템 형상
Fig. 7 Single-rotor horizontal-axis wind turbine system configuration

다음으로 시스템의 병진 운동에 관한 구속 관계를 설정하면 시스템을 구성하는 각 몸체는 관성 좌표계 공간의 서로 고정된 위치에서 병진 운동이 불가능하므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{\mathbf{r}}_1 = \dot{\mathbf{r}}_2 = \dot{\mathbf{r}}_3 = \dot{\mathbf{r}}_4 = \dot{\mathbf{r}}_5 = 0 \quad (10)$$

그리고 시스템의 회전 운동에 관한 구속 관계는 회전축인 몸체 B_1 은 관성 좌표계 공간에서 임의의 고정된 위치에서 x_1 축을 중심으로 한 회전 운동만이 가능하고 발전기는 N_{12} 의 기어비로 구성된 기어 시스템에 의하여 회전축에 대한 회전 운동을 하며, 각 블레이드에 해당하는 몸체 B_3, B_4, B_5 는 회전축인 몸체 B_1 에 고정된 점을 기준으로 피치운동(즉 z_k 축을 중심으로 한 회전운동)만 가능하다고 가정하면 시스템의 회전 운동에 대한 구속식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

표 3 단일로터 풍력발전 시스템의 물성치 및 초기 조건

Table 3 Physical properties and initial conditions of single-rotor wind turbine system

Body No.	Mass Properties	Initial Conditions
B_1 (Shaft)	$m_1 = 15.0$ $I_{xx} = 0.0405$ $I_{yy} = 1.3715$ $I_{zz} = 1.3715$	$\theta_{11} = 0^\circ$
B_2 (Generator)	$m_1 = 65.0$ $I_{xx} = 0.0987$ $I_{yy} = 2.8750$ $I_{zz} = 2.8750$	$\theta_{21} = 0^\circ$
B_3, B_4, B_5 (Blades)	$m_1 = 14.7$ $I_{xx} = 30.2140$ $I_{yy} = 30.1370$ $I_{zz} = 0.0766$	$\theta_{31} = 0^\circ$ $\theta_{41} = 120^\circ$ $\theta_{51} = 240^\circ$

$$\begin{aligned} \omega_{y1} &= \omega_{z1} = 0 \\ (\omega_{x1} + \omega_{x2}) &= -N_{12} \omega_{x1} \\ \omega_{xk} &= \omega_{yk} = 0 \quad (k=3, 4, 5) \end{aligned} \quad (11)$$

그림 7에 도시된 풍력발전 시스템에 가해지는 외력으로 중력과 바람에 의한 공력을 고려하면, 외력에 의해 각 몸체에 작용하는 힘은

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_1^e &= m_1 \mathbf{g} \\ \mathbf{F}_2^e &= m_2 \mathbf{g} \\ \mathbf{F}_k^e &= m_k \mathbf{g} + \mathbf{F}_{aero} \quad (k=3, 4, 5) \end{aligned} \quad (12)$$

이고, 모멘트는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_1^e &= \mathbf{r}_1^c \times m_1 \mathbf{g} \\ \mathbf{M}_2^e &= \theta_{21} \hat{\mathbf{i}}_2 \\ \mathbf{M}_k^e &= \mathbf{r}_k^c \times m_k \mathbf{g} + \mathbf{r}_k^s \times \mathbf{F}_{aero} \quad (k=3, 4, 5) \end{aligned} \quad (13)$$

식 (12)와 식 (13)에서 \mathbf{F}_{aero} 는 공력에 의한 외력을 의미하며, 식 (13)의 \mathbf{r}_k^c 와 \mathbf{r}_k^s 는 각 블레이드의 질량 중심의 위치 벡터와 공력 중심 벡터를 의미한다.

4.2 공력 모델링

풍력발전 시스템에서 바람에 의한 공력은 전체 시스템의 출력 성능을 결정하는 중요한 요소로, 풍력발전 시스템의 로터 블레이드에 대한 공기역학적 모델링은 필수적으로 선행되어야 한다. 풍력발전 시스템의 블레이드에 대한 공기역학적 모델링은 그림 8과 같이 블레

이드의 임의의 미소 단면적에 대한 공력을 계산한 후, 이를 블레이드 반경 방향에 대하여 적분함으로써 전체 블레이드에 작용하는 공력을 계산하게 된다.^{[3],[9]} 먼저 그림 8과 같이 블레이드 임의의 위치 r 에서의 블레이드 단면을 살펴보면, 상대속도 V_r 이 이루는 유입각 ϕ 는

$$\tan \phi = \frac{V_0(1-a)}{r\Omega(1+a')} = \frac{1-a}{\lambda_r(1+a')} \quad (14)$$

과 같은 관계식을 갖는다. 여기서 λ_r 은 블레이드 중심으로부터 r 만큼 떨어진 지점의 유입비(tip-speed-ratio)로 $\lambda_r = r\Omega / V_0$ 이며, a' 은 입력 풍속에 대한 회전면 내 접선의 유도인자(tangential induction factor)를 나타낸다. 또한 블레이드 피치각은 $\theta = \phi - \alpha$ 로 정의된다. 여기서 α 와 ϕ 는 각각 받음각과 유입각을 의미한다. 이상에서 정의한 블레이드의 특성 값을 이용하여 블레이드 단면에 유입되는 상대속도 V_r 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_r &= \sqrt{\{r\Omega(1+a')\}^2 + \{V_0(1-a)\}^2} \\ &= \sqrt{V_0^2\{(1-a)^2 + \lambda_r^2(1+a')^2\}} \end{aligned} \quad (15)$$

블레이드 미소 단면 dr 에 작용하는 공력은 2차원 준정상 공기역 이론에 의해

$$\begin{aligned} dL &= \frac{1}{2} \rho V_r^2 \bar{c} dr C_l \\ dD &= \frac{1}{2} \rho V_r^2 \bar{c} dr C_d \end{aligned} \quad (16)$$

과 같이 쓸 수 있다.

식 (16)에서 ρ 는 공기 밀도, \bar{c} 는 시위 길이를 나타내고 C_l 과 C_d 는 각각 양력계수와 항력계수로 블레이드 단면의 받음각 α 에 의해서 결정되게 된다.

4.3 발전기 모델링

본 논문에서 고려한 풍력발전 시스템용 발전기는 정격용량 30 kW 로, 발전기 모델의 제원은 표 4에 정리하였다. 본 논문에서는 표 4의 제원을 이용하여 발전기를 하나의 관성체로 모델링하였다. 이때, 발전기의 회전 속도는 블레이드에 연결된 회전축과의 기어비에 의해 결정되어지게 되며, 발전기가 일정한 회전 속

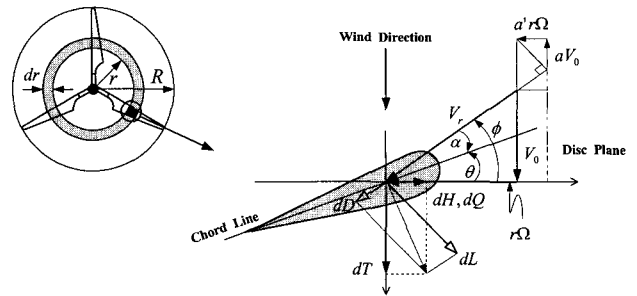


그림 8 블레이드 단면의 기하학적 형상과 바람 흐름도
Fig. 8 Geometrical configuration and velocity relationship in blade wing section

도 이상에 도달하는 경우 발전기에 부하 토크를 인가함으로써 전력을 출력할 수 있도록 하였다. 본 논문에서는 식 (17)과 같이 발전기의 속도 및 토크 제어를 통해 발전기 회전 속도에 비례하도록 최종적인 발전기 부하 토크가 결정된다고 가정하였다.

$$T_{gen} = K \omega_{gen} \quad (17)$$

여기서 K 는 풍력발전 시스템의 정격 출력 특성을 고려하여 설정한 비례 상수이다.

표 4 발전기 제원

Table 4 Generator properties

	Value	Unit
Rated Power	30	kW
Size (D×L)	270×345	mm
Weight	65	kg

5. 시뮬레이션을 통한 풍력발전 시스템 특성 분석

본 논문에서는 전북 부안군 해창 공원에 설치되어 시험운용중인 듀얼 로터 형태의 상반회전 풍력발전 시스템 중 주 로터와 기어 시스템 및 발전기가 결합된 단일로터 수평축 풍력발전 시스템에 대한 모델링을 수행한 후, 풍력발전 시스템의 성능 해석을 위해서 개발한 시뮬레이터 WINSIM을 이용하여 제안된 풍력발전 시스템 모델의 성능 해석을 수행하였다. 본 논문에서 고려한 풍력발전 시스템의 정격 출력 특성 및 블레이드의 제원은 표 5에 정리하였고, 그림 9는 블레이드 에어포일 모델인 NACA 0012의 받음각에 따른 양력(Lift) 계수와 양력 계수에 따른 항력(Drag) 계수의 분포를 도시한 그림이다.

표 5 시스템 설계 조건 및 블레이드 제원
Table 5 Design Requirement and Blade Properties

Rated Velocity	10 m/s
Rotating Speed	150 RPM
Rotor Diameter	11.0 m
Airfoil	NACA 0012
Gear Ratio	10.9

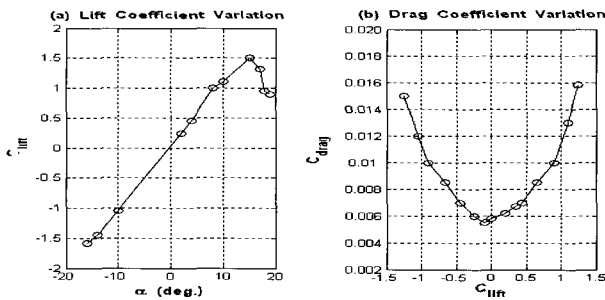


그림 9 NACA 0012 에어포일의 양력 및 항력 계수
Fig. 9 Lift and drag coefficient of NACA 0012 airfoil

먼저 블레이드가 초기 0°의 피치각에서 정격에 해당하는 10 m/s의 풍속이 발생하는 경우의 정격 출력 상황에 대한 시뮬레이션을 통해 풍력발전 시스템의 출력 특성을 고찰하였다.

그림 10은 정격출력 상황에서는 주속비와 회전 속도 및 발전기의 출력 전력을 도시한 것으로 로터 블레이드가 약 25 sec 이후에 정격에 해당하는 150 RPM의 회전 속도에 도달하고, 발전기는 시스템 형상과 기어 비에 의해 회전축과 반대 방향으로 1635 RPM으로 회전함으로써 설계 요구 조건을 만족하고 있음을 확인할 수 있다.

이때 로터 블레이드는 8.6의 주속비를 유지하게 된다 또한 발전기 출력 전력은 발전기가 일정 회전 속도 이상에 도달하면서 부하 토크를 인가함으로써 정상 상태에서 정격에 해당하는 30 kW의 전력을 출력하게 된다는 사실을 그림 10(c)를 통해 확인할 수 있다. 그림 10과 그림 11의 과도응답 상태에 나타나는 회전 속도와 공력에 의한 토크의 급격한 증가는 초기 정지된 상태에서 임의의 풍속이 발생하는 경우 로터 블레이드가 그림 11(b)에 도시한 바와 같이 큰 받음각을 갖는 스톨 영역에서 회전 속도가 증가함에 따라 받음각이 감소하여 17 sec 이후에 정상 운전 영역으로 전이되는 과정에서 양력 계수가 급격히 증가하기 때문에 발생하게 된다. 그림 12와 그림 13은 그림 12(a)에 도시한

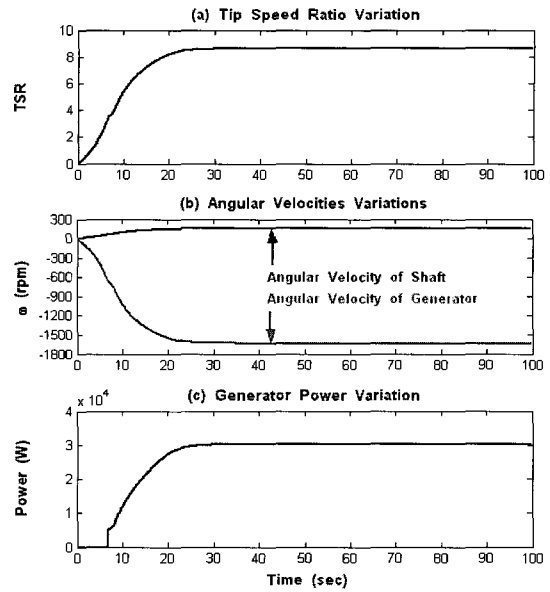


그림 10 주속비, 회전 속도, 발전기 전력 변화
Fig. 10 Time histories of tip-speed-ratio, angular velocities, and generator power

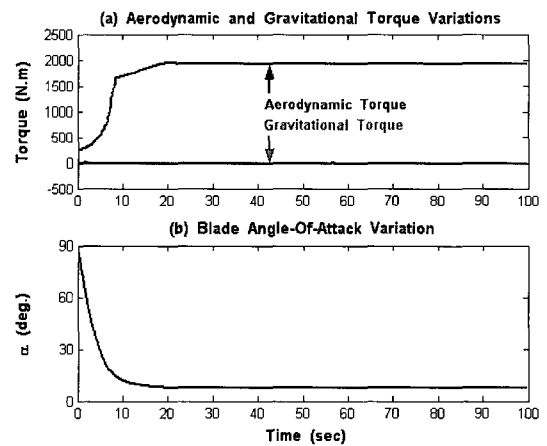


그림 11 토크 및 블레이드 받음각 변화
Fig. 11 Time histories of torque and angle-of-attack

바와 같이 초기 4 m/s의 풍속에서 풍속이 점차 증가하여 정격에 해당하는 10 m/s의 풍속에 도달한 후 다시 풍속이 감소하는 상황을 설정하고 시뮬레이션을 수행하여 얻은 풍력발전 시스템의 출력 특성을 도시한 그림이다. 그림 12(b)와 (c) 및 그림 13에 도시된 시뮬레이션 결과로부터 초기 4 m/s의 풍속에서는 블레이드의 받음각이 스톨 영역에 존재함으로써 블레이드에 회전력을 제공하는 공력에 의한 토크값이 작아 블레이드가 매우 낮은 속도를 가지고 회전 하지만, 풍

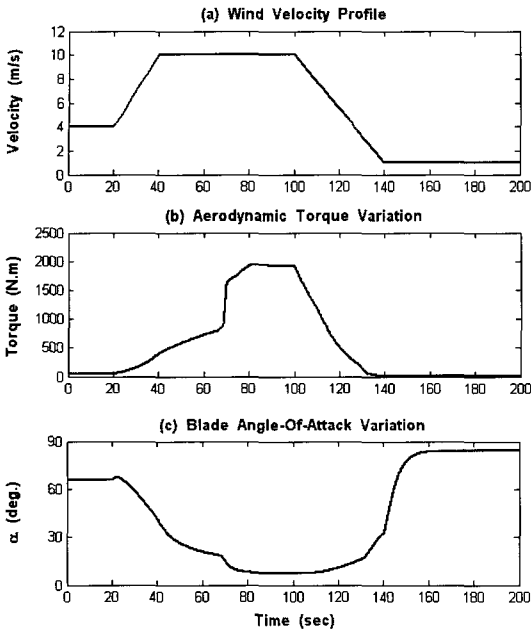


그림 12 풍속에 따른 출력 특성 변화
 Fig. 12 Time histories of torque and angle-of-attack w.r.t wind velocity profile

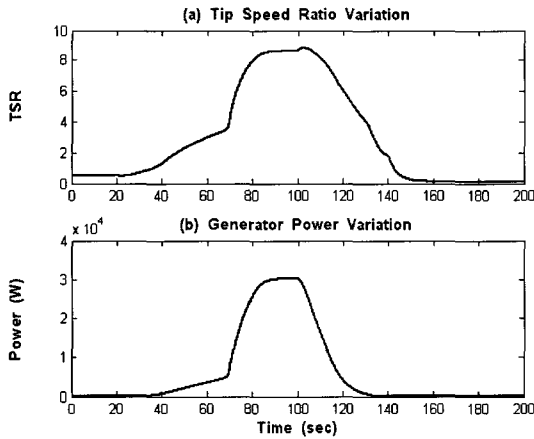


그림 13 주속비 및 발전기 전력 변화
 Fig. 13 Time histories of tip-speed-ratio and generator power

속이 점차 증가함에 따라 이에 따른 블레이드의 받음각이 감소하여 정상영역에 도달함으로써 토크 및 회전 속도가 급격히 증가하고, 발전기가 정격에 해당하는 전력을 출력하게 된다는 사실을 알 수 있다. 그리고 풍속이 점차 감소하게 됨에 따라 블레이드의 받음각의 증가와 함께, 토크 및 회전 속도가 작아져 결국 정지상태에 이르게 됨을 확인할 수 있다.

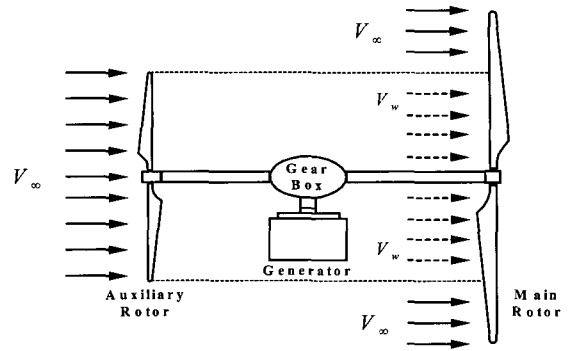


그림 14 듀얼로터 풍력발전 시스템
 Fig. 14 Dual-rotor wind turbine system configuration

6. 결론

본 논문에서는 다몸체 역학을 이용한 다몸체 시스템의 운동 방정식 형성 기법을 제안하고, 이러한 모델링 기법을 적용하여 단일로터 수평축 풍력발전 시스템에 대한 동역학 모델링과 블레이드 공력 모델링 및 발전기의 부하 모델링을 수행하였다. 또한 풍력발전 시스템의 성능 해석을 위한 시뮬레이터인 WINSIM을 개발하여 정격과 풍속 변화에 따른 시뮬레이션을 통해 제안된 모델링 기법 및 시뮬레이터에 대한 검증을 수행하였다. 본 논문에서 제안한 모델링 기법을 이용한 모델링 과정과 시뮬레이터를 이용한 시뮬레이션 결과 일반적인 풍력발전 시스템으로부터 얻을 수 있는 결과와 유사한 출력 특성을 얻을 수 있었으며^{[10],[11]}, 이러한 시뮬레이션 결과를 기반으로 본 논문에서 고려한 풍력발전 시스템의 성능 분석을 수행하였다.

향후 연구에서는 본 연구에서 고려한 풍력발전 시스템 모델링 기법과 풍력발전 시스템 성능 해석을 위한 시뮬레이션 소프트웨어를 이용하여 그림 14와 같이 보조로터와 주로터가 연계되어 있는 듀얼로터 풍력발전 시스템에 대한 모델링 확장 및 시뮬레이션을 수행하여 이에 대한 성능 분석을 수행할 계획이다. 이 경우 보조로터에 의해 발생하는 후류가 주로터에 영향을 미침으로써 전체 시스템의 성능을 좌우하게 되므로, 보조로터에 의해 야기되는 후류의 공력 모델링이 중요한 것으로 생각된다. 또한 보조로터와 주로터 사이의 이격거리 역시 듀얼로터 풍력발전 시스템의 성능 해석에 중요한 설계 인자로 고려되어야 할 것이다. 나아가 듀얼로터 풍력발전 시스템의 성능 예측을 위해 수행된 풍동 시험 결과와 비교를 통해 다몸체 역학을 이용한 시스템 모델링 및 운동 해석 시뮬레이터인 WINSIM에 대한 검증을 수행할 계획이다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소 주관으로 수행된 과제임.

참 고 문 헌

[1] K. Naruhito, M. Tomouki, and Y. Sayosi, "Modeling and Analysis of the NEDO 500-kW Wind Generator" *Electric Engineering in Japan*, Vol 135, No. 3, pp. 37~47, 2001.

[2] Ph. Delarue, A. Bouscayrol, A. Tounzi, X. Guillaud, and G. Lancigu, "Modeling, control and simulation of an overall wind energy conversion system" *Renewable Energy* 28, pp. 1169~1185, 2003.

[3] 동경민, "상반회전 풍차 블레이드의 공력성능 및 구조 동역학 해석에 관한 연구", *전북대학교 석사학위논문*, 2002.

[4] 윤성준, "Upwind/Downwind 방식의 수평축 풍력터빈에 대한 풍동 성능 시험 연구", *전북대학교 석사학위논문*, 2003.

[5] 노태수, "다몸체 시스템의 운동방정식 형성 방법," *한국항공우주공학회지*, 제 22권, 제6호, pp. 134~140, 1994.

[6] Haug, E. J., "Intermediate Dynamics" Prentice-Hall, International Edition, 1992.

[7] K. W. London, "Derivation of Dynamics Equations and Evaluation of the Kane Methodology" AIAA-90-2926, AAS Astrodynamics Conference, 1990, Aug. 20~22.

[8] DADS Tutorial (Double Pendulum)

[9] R. T. Griffiths, "The effect of aerofoil characteristics on windmill performance" *Aeronautical Journal*, Paper No. 251, pp. 322~326, 1977. July.

[10] 부성환, "풍력발전 시스템의 피치제어에 관한 연구", *제주대학교 석사학위논문*, 1999.

[11] A. Mullane, G. Lightbody, and R. Yacamini, "Adaptive Control of Variable Speed Wind Turbines" *Electrical and Electronic Engineering(U.C.C)*, 2001.

저 자 소개



민병문(閔炳文)

1973년 7월 20일생. 2001년 전북대 항공우주공학과 졸업. 2003년 동 대학원 항공우주공학과 졸업(석사). 현재 전북대 차세대 풍력발전연구센터 위촉연구원.



노태수(魯泰洙)

1961년 2월 13일생. 1984년 서울대 항공공학과 졸업. 1987년 미국 Auburn University 항공우주공학과 졸업(석사). 1992년 미국 Auburn University 항공우주공학과(공학박). 1992년~1995년 한국항공우주연구소 우주사업단 무공화위성 연구그룹 선임연구원. 1995년~현재 전북대 기계항공시스템공학부 부교수.



송승호(宋丞鎬)

1968년 8월 27일생. 1991년 서울대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1992년~1995년 포스콘 기술연구소 연구원. 1996년~1998년 서울대 공학연구소 조교. 2000년~현재 전북대 전자정보공학부 조교수.



최석우(崔碩佑)

1962년 3월 14일생. 1988년 전북대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1999년~2001년 The Ohio State University. Post-Doc. 1996년~현재 전북대 전자정보공학부 부교수.