

## 다몸체 역학을 이용한 풍력발전 시스템 모델링

민병문\*, 노태수\*, 정성남\*, 최석우\*\*, 송승호\*\*

\*전북대학교 기계항공시스템공학부, \*\*전북대학교 전자·정보공학부

### Wind Turbine System Modeling using Multi-body Dynamics

B.M. Min, T.S. No, S.N. Jung, S.W. Choi, and S.H. Song

\*Dept. of Mechanical and Aerospace System Eng. of Chonbuk National Univ.

\*\*Dept. of Electronics and Information Eng. of Chonbuk National Univ.

#### ABSTRACT

In this paper, an efficient modeling method of wind turbine system is proposed using multi-body dynamics. This method is based on representing a wind turbine system as a multi-body system with several rigid bodies. Also, simulation software WINSIM is developed to evaluate performance of wind turbine system. Simulation results show that proposed modeling method and simulation software is efficient and reliable

#### 1. 서 론

풍력발전 시스템의 특성을 파악하고 성능 해석을 수행하기 위해서는 풍력발전 시스템을 구성하고 있는 각 구성품에 대한 모델링이 선행되어야 하며, 이를 기반으로 전체 시스템을 구성함으로써 시스템에 대한 전반적인 성능 해석을 효과적으로 수행할 수 있게 된다. 이와 같은 풍력발전 시스템의 모델링 과정에 있어서 Naruhito<sup>[1]</sup>는 실제 운용되고 있는 풍력발전 시스템으로부터 획득한 자료를 기반으로 System Identification 접근 방법을 통해, Delarue<sup>[2]</sup>는 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, 고려하고자 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 다몸체 역학을 이용한 운동 방정식 형성 방법을 제안하고, 이를 풍력발전 시스템 모델링 과정에 적용함으로써 일반적인 수평축 단일로터 풍력발전 시스템뿐만 아니라 한반도의 풍황에 적합하도록 설계된 듀얼 로터 형상의 상반회전 풍력발전 시스템<sup>[3]</sup>에 대한 모델링을 효과적으로 수행할 수 있는 기법을 제안하였다. 또한 풍력발전 시스템의 성능 해석을 위한 시뮬레이션 소프트웨어인 WINSIM을 개발하였으며, 이를 기반으로 풍력발전 시스템에 대한 모델링 및 시뮬레이션을 수행하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 다몸체 시스템의 운동 방정식 형성 방법

###### 2.1.1 시스템 모델링 및 운동 기구학

다몸체 시스템이란 서로 상대적인 운동이 가능한 채 연결되어 상대방의 운동을 구속할 수 있는 다수의 몸체로 구성된 시스템으로, 본 논문에서 고려한 다몸체 시스템은 관성 좌표계에서 서로 연결된 채 떠다니는 개방형 나무구조(Open Tree Topology)를 갖는 시스템을 설정하였다.

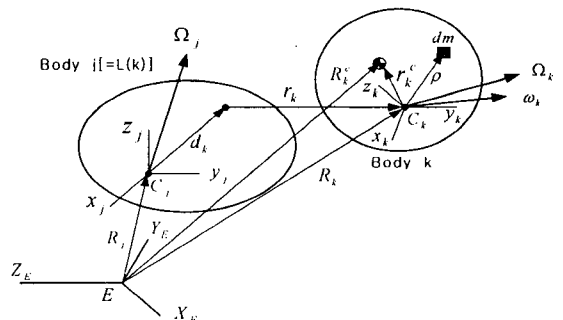


그림 1 다몸체 시스템의 이웃 몸체간의 기하학적 관계  
Fig. 1 Geometry Between Neighboring Component Bodies

그림 1은 개방형 나무구조를 갖는 다물체 시스템의 이웃 물체간의 기하학적 관계를 도시한 것으로, 그림 1에 사용한 기호와 정의는 표 1에 정리하였다. 각 물체의 기하학적 관계나 시스템의 형상은 경로 행렬(Path Matrix)과 기준 물체 연산자(Reference Body Operator)인  $L(j)$ 로 정의할 수 있다.<sup>[4]</sup>

표 1 이웃 물체간의 기하학적 관계에 따른 기호 정의  
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 $B_j$
$\omega_k$	Relative angular velocity vector of $B_k$ w.r.t $B_j$
$\Omega_k$	Absolute angular velocity vector of $B_k$
$\theta_k$	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

### 2.1.2 시스템 운동 방정식과 구속 방정식

그림 1에 도시된 다물체 시스템의 물체  $B_k$ 를 독립된 단물체로 간주하면  $B_k$ 의 병진 및 회전 운동 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

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

여기서  $F_k^c$ 와  $M_k^c$ 는 물체  $B_k$ 에 연결된 주변 물체들에 의한 구속 반발력을 말한다. 또한 시스템 구성 물체간의 운동 구속 관계를 식으로 표현한 후 단순 결합하여 가속도 레벨의 시스템 구속식으로 표현하면 다음과 같다.

$$A \dot{x} = g(t, x, r_i, \theta_i, \dots) \quad (3)$$

여기서  $A$ 는 구속행렬(Constraint Jacobian Matrix)이고  $x$ 는  $\dot{r}_i$ 와  $\omega_i$ 로 표현되는 상태벡터이다. 또 식 (1)과 (2)를 상태벡터  $x$ 로 표현하면,

$$m \dot{x} = f^e + f^i + f^c \quad (4)$$

이다. 그리고 식 (3)과 식 (4)를 통합하면,

$$\begin{bmatrix} m & A^T \\ A & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f^e + f^i \\ g(t, x, r_i, \theta_i, \dots) \end{bmatrix} \quad (5)$$

와 같이 쓸 수 있다. 본 논문에서는 Kane's 방법 또는 Projection 방법<sup>[5]</sup>과 유사하게  $A$ 를 두 개의 직교행렬로 분해하는 대신  $A^T$ 의 직교행렬  $B$ 를 구한 후, 식 (5)을

$$\begin{bmatrix} Bm \\ A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B(f^e + f^i) \\ g(t, x, r_i, \theta_i, \dots) \end{bmatrix} \quad (6)$$

과 같이 변형된 미분 방정식으로 표현하였다.

## 2.2 시뮬레이션 소프트웨어의 구성

본 연구에서는 사용자로부터 시스템 형상과 각 물체간의 연결부재 종류, 외력 특성 등을 입력으로 받아들여 2.1.2절의 식 (5) 또는 식 (6)과 같은 형태로 표현된 최종 운동방정식을 자동으로 형성한 후, 수치 적분을 수행하여 풍력발전 시스템의 성능 분석을 수행할 수 있는 시뮬레이션 소프트웨어인 WINSIM(WIND Turbine Power Generation System SIMulator)를 개발하였다. 그림 2에서는 WINSIM의 전체적인 구성과 각 구성 모듈의 기능을 간단히 도시하였으며 프로그램의 작성은 FORTRAN 언어를 사용하였다.

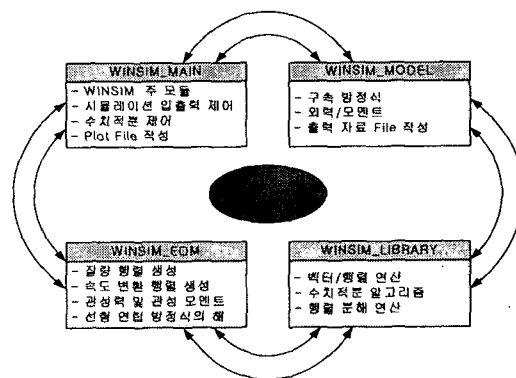


그림 2 WINSIM의 구조 및 각 모듈의 기능  
Fig. 2 Structure and Functions of WINSIM

그림 2에서 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 물체 간 연결 부위에서의 운동 자유도와 각 물체에 가해지는 외력 및 모멘트를 사용자가 직접 작성하도록 하는 기능을 담당한다. 또한 WINSIM\_LIBRARY는 다물체 시스템의 운동 방정식 형성에 필요한 벡터와 행렬 연산 및 적분 알고리즘을 이용하여 수치 적분을 수행하는 기능을 담당하며, 마지막으로 WINSIM\_EOM은 다물체 시스템의 운동방정식을 형성하는 기능과 운동 변수들의 변화율을 수치 적분 알고리즘에 제공하는 기능을 수행한다.

## 2.3 풍력발전 시스템 모델링에 대한 적용

### 2.3.1 풍력발전 시스템 동역학 모델링

본 논문에서는 2.1절에서 기술한 다물체 역학의 운동 방정식 형성 과정을 기반으로 그림 3과 같이

3개의 블레이드는 회전축에 대하여 피치 운동만이 가능하고 회전축은 타워에 직접 연결되어 있는 4-자유도 단일로터 풍력발전 시스템에 대한 모델링을 수행하였다. 먼저 각 몸체에 대한 기준 몸체 연산자는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$L(1)=0, L(2)=L(3)=L(4)=1 \quad (7)$$

다음으로 시스템의 구속 관계를 설정하면 회전축인 몸체  $B_1$  은 관성 좌표계 공간에서 임의의 고정된 위치에서  $x_1$  축을 중심으로 한 회전 운동만이 가능하고, 각 블레이드에 해당하는 몸체  $B_2, B_3, B_4$  는 회전축인 몸체  $B_1$  에 고정된 점을 기준으로 피치운동(즉  $z_k$  축을 중심으로 한 회전운동)만 가능하다고 가정하면 시스템의 구속식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{r}_1 &= \dot{r}_2 = \dot{r}_3 = \dot{r}_4 = 0 \\ \omega_{y1} &= \omega_{z1} = 0 \\ \omega_{xk} &= \omega_{yk} = 0 \quad (k = 2, 3, 4) \end{aligned} \quad (8)$$

그림 3에 도시된 풍력발전 시스템에 가해지는 외력으로 중력과 바람에 의한 공력을 고려하고 회전축과 타워 사이에 마찰력을 고려하기 위하여 회전 댐퍼가 부착되어 있다고 가정하면, 외력에 의한 힘과 모멘트는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F_1^e &= m_1 g \\ F_k^e &= m_k g + F_{aero} \quad (k=2, 3, 4) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} M_1^e &= -c \theta_{11} \hat{k}_1 \\ M_k^e &= r_k^c \times m_k g + r_k^s \times F_{aero} \quad (k=2, 3, 4) \end{aligned} \quad (10)$$

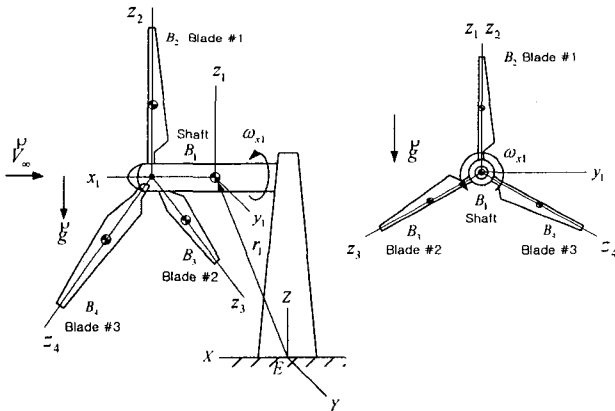


그림 3 풍력발전 시스템 형상 및 기하학적 관계  
Fig. 3 Configuration and Geometrical Relationship of Wind Turbine System

### 2.3.2 공력 모델링

풍력 발전 시스템의 블레이드에 대한 공기역학적 모델링은 그림 4와 같이 블레이드의 임의의 미소 단면적에 대한 공력을 계산한 후, 이를 블레이드 반경 방향에 대하여 적분함으로써 전체 블레이드에 작용하는 공력을 계산할 수 있다.<sup>[3,6]</sup>

이와 같은 과정에 따른 블레이드의 공기역학적 모델링 과정을 살펴보면 다음과 같다. 먼저 그림 4와 같이 블레이드 임의의 위치  $r$  에서의 블레이드 단면에서, 상대속

도  $V_r$  이 이루는 유입각  $\phi$  는 다음의 관계식을 갖게 된다.

$$\tan \phi = \frac{V_0(1-a)}{r\Omega(1+a')} = \frac{1-a}{\lambda_r(1+a')} \quad (11)$$

여기서  $\lambda_r$  은 블레이드 중심으로부터  $r$  만큼 떨어진 지점의 유입비로  $\lambda_r = r\Omega/V_0$  이며,  $a'$  은 입력 풍속에 대한 회전면 내 접선의 유도인자를 나타낸다. 또한 블레이드의 피치각  $\theta$  와 받음각  $\alpha$  및 유입각  $\phi$  는

$$\theta = \phi - \alpha \quad (12)$$

과 같은 관계식을 갖는다. 위에서 정의한 블레이드의 특성 값들을 이용하면, 블레이드 단면에 유입되는 상대속도  $V_r$  은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$V_r = \sqrt{V_0^2 \{ (1-a)^2 + \lambda_r^2 (1+a')^2 \}} \quad (13)$$

블레이드 미소 단면  $dr$  에 작용하는 공력은 2차원 준정상 공기력 이론에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} dL &= \frac{1}{2} \rho V_r^2 c dr C_l \\ dD &= \frac{1}{2} \rho V_r^2 c dr C_d \end{aligned} \quad (14)$$

여기서,  $\rho$  는 공기 밀도,  $c$  는 시위 길이를 나타내고  $C_l$  과  $C_d$  는 각각 양력계수와 항력계수로 블레이드 단면의 받음각  $\alpha$  에 따라서 결정된다.

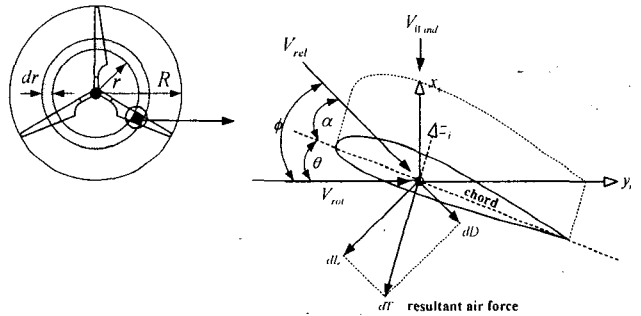


그림 4 블레이드 단면의 기하학적 형상과 바람 흐름도  
Fig. 4 Geometrical Configuration and Velocity Relationship in Blade Wing Section

### 2.4 시뮬레이션을 통한 풍력발전 시스템 특성 분석

본 연구에는 전북 부안군 해창 공원에 설치되어 시험운영중인 듀얼 로터 형태의 상반회전 풍력발전 시스템의 주 로터 부분에 대한 모델링을 수행한 후 시뮬레이션을 통해 제안된 풍력발전 시스템의 성능 분석을 수행하였으며, 시스템의 정격 출력 특성 및 블레이드의 제원은 표 2에 정리하였다.

표 2 시스템 설계 조건 및 블레이드 제원  
Table 2 Design Requirement and Blade Properties

Rated Velocity	10 m/s
Rotating Speed	150 RPM
Rotor Diameter	11 m
Airfoil	NACA 0012

먼저 블레이드가 피치각  $0^\circ$ 에서 초기에 정격에 해당하는  $10\text{ m/s}$ 의 풍속이 발생하는 경우의 정격출력 상태에서 풍력발전 시스템의 출력 특성을 살펴 보았다. 그림 5에 도시된 결과로부터 로터 블레이드가 약 25sec 이후에 정격 출력에서의 설계 조건인  $150\text{ RPM}$ 의 회전속도에 도달하고, 이때 블레이드에 작용하는 토크는 일정한 값을 유지하게 된다. 그림 5의 과도응답 상태에서 초기 로터 블레이드가 정지된 상태에서 임의의 풍속이 발생할 경우 블레이드가 큰 받음각을 갖는 스톨 영역에서 회전 속도가 증가함에 따라 받음각이 감소하여 정상 운전 영역으로 전이되는 15sec 이후에 급격한 토크의 증가가 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 그림 6에서는 입력 풍속의 변화에 따른 풍력발전 시스템의 출

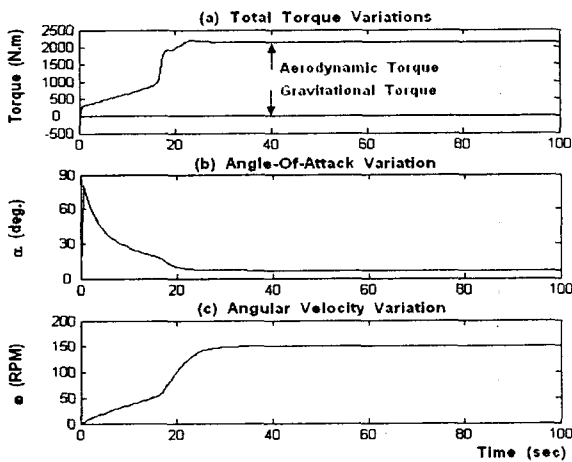


그림 5 풍력발전 시스템의 정격 출력 특성  
Fig. 5 Performance Characteristics in Rated Operation Condition

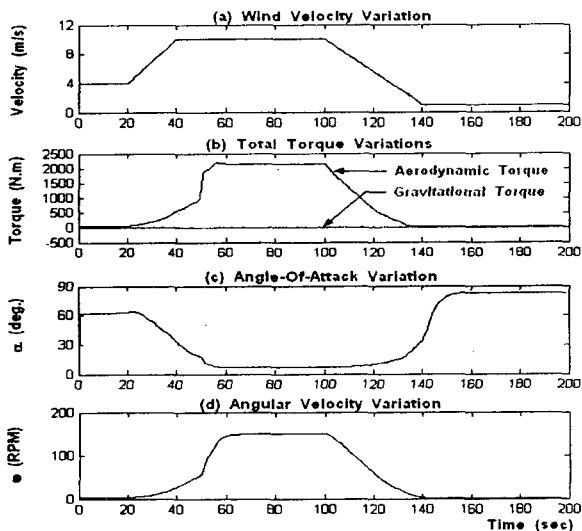


그림 6 입력 풍속 변화에 따른 출력 특성  
Fig. 6 Performance Characteristics with respect to Wind Velocity Variation

력 특성 변화를 도시하였다. 입력 풍속이 작은 운전 영역의 경우 낮은 회전속도와 큰 받음각에서 풍속이 증가함에 따라 회전속도의 증가와 동시에 블레이드의 받음각이 정상 영역에 이르게 됨으로써 토크의 증가와 함께 정격 출력 상태에 도달한다는 사실을 확인할 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 다몸체 역학을 이용한 시스템의 모델링 기법을 제안하고, 이러한 모델링 기법을 적용하여 풍력발전 시스템에 대한 동역학 모델링과 블레이드 공력 모델링을 수행하였다. 또한 풍력발전 시스템의 성능 해석을 위한 시뮬레이션 소프트웨어인 WINSIM을 개발하여 정격과 풍속이 변하는 상황에 대한 시뮬레이션을 통해 제안된 모델링 기법 및 시뮬레이션 소프트웨어에 대한 검증 및 풍력발전 시스템의 성능 분석을 수행하였다.

향후 연구에서는 본 연구에서 고려한 풍력발전 시스템 모델링을 기반으로 듀얼로터 풍력발전 시스템에 대한 모델링 확장 및 다양한 시뮬레이션을 통한 성능 분석을 수행할 계획이다. 나아가 듀얼로터 풍력 터빈의 성능 예측을 위해 수행된 풍동 시험 결과와 비교를 통해 다몸체 역학을 이용한 시스템 모델링 및 운동 해석 시뮬레이션 소프트웨어인 WINSIM에 대한 검증을 수행할 계획이다.

이 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력 공학공동연구소 주관으로 수행된 과제임.

### 참 고 문 헌

- [1] Naruhito, K., Tomouki, M., and Sayosi, Y., "Modeling and Analysis of the NEDO 500-kW Wind Generator", *Electric Engineering in Japan*, Vol 135, No. 3, 2001, pp. 37-47.
- [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, 2003, pp. 1169-1185
- [3] 동경민, 상반회전 풍차 블레이드의 공력성능 및 구조 동역학 해석에 관한 연구, 석사학위논문, 전북대학교, 2002.
- [4] 노태수, "다몸체 시스템의 운동방정식 형성 방법", *한국항공우주공학회지*, 제 22권, 제6호, 1994.
- [5] London, K. W., "Derivation of Dynamics Equations and Evaluation of the Kane Methodology", AIAA-90-2926, AAS Astrodynamics Conference, Aug. 20-22, 1990
- [6] R. T. Griffiths., "The effect of aerofoil characteristics on windmill performance", *Aeronautical Journal*, No. 251, July 1997