Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 38, No. 2, pp. 115~120, 2014

<학술논문> DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2014.38.2.115

ISSN 1226-4873(Print) 2288-5226(Online)

# BEM 이론을 적용한 풍력발전기 해석용 RecurDyn 모듈 개발

임 대 근\*·유 완 석\*<sup>†</sup> \* 부산대학교 기계공학부

# Development of RecurDyn Module for Wind Turbine Analysis Applying BEM Theory

Dae Guen Lim<sup>\*</sup> and Wan Suk Yoo<sup>\*†</sup> \* Dept. of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.

(Received July 16, 2013; Revised December 6, 2013; Accepted December 11, 2013)

Key Words: BEM Theory(날개 요소 운동량 이론), Multi-Body Dynamics(다물체 동역학), GH-Bladed(GH 블레 이디드), RecurDyn(리커다인)

**초록**: 본 연구에서는 다물체 동역학 해석 소프트웨어인 RecurDyn 을 이용하여 풍력 발전기를 쉽게 모델 링하고 동적 거동 해석을 수행할 수 있는 기법을 개발하였다. 풍력 발전기는 타워, 너셀, 허브, 그리고 블레이드로 구성되어 있다. 타워와 블레이드는 탄성체로 가정하였고 탄성효과를 고려하기 위하여 탄성 체 이론을 이용하여 모델링 하였다. 바람의 속도는 일정하다고 가정하였고 날개 요소 운동량 이론을 이 용하여 공력하중을 모델링 하였다. 이를 통해 계산된 공력을 풍력 발전기에 적용시키고 동적 거동 해석 을 수행하였다. 해석의 타당성을 검증하기 위하여 풍력 발전 시스템 상용 소프트웨어인 GH-Bladed 를 이용한 해석결과와 비교하였다.

**Abstract**: In this study, a module is developed for modeling and analyzing dynamic behavior of a wind turbine using RecurDyn, which is a commercial multi-body dynamics software developed by FunctionBay,Inc. The wind turbine consists of tower, nacelle, hub and blades. Tower and blades are regarded as flexible bodies for considering elastic effect using beam theory and spring force. In this paper, a constant speed wind was assumed and aerodynamic force is modeled using BEM theory. Dynamic analysis applying this aerodynamic force is carried out. To verify the validity of analysis results, these results are compared to those of GH-Bladed which is a commercial software for analyzing wind turbine system distributed by Garrad Hassan.

1. 서 론

전세계의 주된 에너지원은 아직까지 석탄, 석유, 천연가스 그리고 원자력 등 재생 불가능한 에너지 이다. 이러한 에너지들은 환경을 파괴시키고 양이 제한되어 있다. 이러한 이유로 태양광, 풍력 등과 같이 친환경적이고 무한한 양을 가진 대체에너지 가 각광받고 있다. 특히 풍력 에너지는 현재 가장 각광받고 있는 대체에너지 중 하나이다. 덴마크, 독일 등 유럽 지역뿐만 아니라 미국, 중국 그리고 일본 등 여러 국가에서 풍력 발전 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

풍력 발전기는 매우 거대한 구조물이며 타워, 너셀, 허브 그리고 3개의 블레이드로 구성되어 있 다. 구조물이 매우 크기 때문에 풍력 발전기의 동 적 특성을 예측하는 것이 매우 중요하다. 하지만 우리나라에는 풍력 발전기의 동적 특성을 예측할 수 있는 기술이 아직까지 부족한 실정이다.

본 연구에서는 다물체 동역학 해석 소프트웨어 인 RecurDyn 을 이용하여 풍력 발전기를 쉽게 모 델링하고 동적 거동 해석을 수행할 수 있는 기법 을 개발하였다. 오재원<sup>(1)</sup>의 연구결과를 통해 새로 운 풍력 발전기 모델링 방법이 제안되었으며 이를 기반으로 전체 풍력 발전기 구조물은 모델링 하였 다. 풍력 발전 시스템은 바람을 이용하여 발전하 는 것이므로 공력하중 모델링이 반드시 필요하다.

Corresponding Author, wsyoo@pusan.ac.kr
 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

**Table 1** Gross properties for the 5MW wind turbine<sup>(2)</sup>

Rotor orientation	Upwind	
Rotor diameter	126 m	
Rotor speed	14.3 rpm	
Cut-in wind speed	3 m/s	
Cut-out wind speed	25 m/s	
Rotor mass	110839 kg	
Tower mass	347475 kg	
Nacelle mass	240000 kg	



Fig. 1 Wind turbine modeling



Fig. 2 Tower modeling

날개 요소 운동량 이론을 이용하여 공력하중을 모 델링 하였으며 계산한 공력하중을 적용시켜 동적 거동 해석을 수행하였다. 모델링에 관련된 이론적 배경은 2 장에 서술하였고, 해석결과를 3 장에 기 술하였다.

# 2. 풍력발전기 모델링

#### 2.1 풍력 발전기 기본 제원

본 연구에서 선정한 5MW 급 풍력 발전기의 기 본적인 제원을 Table 1 과 같이 정리하였다. Fig. 1 은 RecurDyn 을 이용하여 기구학적 구속조건을 부 여하여 모델링한 것이다. 타워는 지면과 구속이 되어 있고 타워와 너셀은 고정 조인트로 연결되어 있다. 그리고 너셀과 허브는 회전 조인트로 연결 되어 있으며 허브와 블레이드는 고정 조인트로 연 결되어 있다.<sup>(3)</sup>

#### 2.2 타워 모델링

상부 구조물을 지지하는 역할을 하는 타워는 탄 성 효과를 고려하기 위하여 Fig. 2 와 같이 10 개의 요소로 나누어 Timoshenko 빔에서 정의되는 강성 행렬을 적용시켜 연결하였다. Timoshenko 빔에서 정의되는 강성행렬은 식 (1)과 같다.<sup>(4)</sup>

$$\begin{bmatrix} K_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{22} & 0 & 0 & 0 & K_{26} \\ 0 & 0 & K_{33} & 0 & K_{35} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{53} & 0 & K_{55} & 0 \\ 0 & K_{62} & 0 & 0 & 0 & K_{66} \end{bmatrix}$$
(1)

여기서.

$$K_{11} = EA / L$$

$$K_{22} = 12EI_{zz} / [L^{3}(1+P_{y})]$$

$$K_{33} = 12EI_{yy} / [L^{3}(1+P_{z})]$$

$$K_{44} = GI_{xx} / L$$

$$K_{55} = (4+P_{z})EI_{yy} / [L(1+P_{z})]$$

$$K_{66} = (4+P_{y})EI_{zz} / [L(1+P_{y})]$$

$$K_{26} = -6EI_{zz} / [L^{2}(1+P_{y})]$$

$$K_{35} = 6EI_{yy} / [L^{2}(1+P_{z})]$$

강성 행렬의 요소에서 E 는 Young's modulus, A 는 단면적, L은 길이, G는 Shear modulus, I 는 관 성 모멘트, P 는 전단력을 고려했을 때 적용되는 상수이다.

# 2.2 너셀 및 허브 모델링

너셀과 허브는 Fig. 3 과 같이 각각 직육면체와 구로 모델링 하였다. 너셀과 허브의 제원을 Table 2 와 같이 정리하였다.

Table 2 Properties for Nacelle and Hub

Nacelle	Length	7 m
	Height	3.9252 m
	Width	5.5 m
Hub	Diameter	3 m
	Mass	56780 kg



Fig. 3 Nacelle and Hub modeling



Fig. 4 Blade modeling

#### 2.3 블레이드 모델링

블레이드는 공력이 직접적으로 작용하여 허브에 회전력을 전달시키고 전달 받은 회전력을 이용하 여 풍력 발전기는 발전을 한다. 블레이드 또한 탄 성효과를 고려하기 위하여 Fig. 4 와 같이 9 개의 요소로 나누었다. 그리고 GH-Bladed 에서 계산된 강성을 적용시켜 요소간을 연결시켜 모델링 하였 다.

#### 2.4 공력 모델링

공력은 BEM 이론<sup>(5)</sup>을 사용하여 각 블레이드의 요소에 작용하는 축 방향 힘과 수직방향 힘을 계 산하였다. 본 논문에서는 풍속은 12m/s 로 일정한 속도로 설정하였으며 WindShear, 타워의 간섭 효 과 그리고 난류의 영향은 포함하지 않았다.

### 2.5 제어

블레이드에 계속적인 힘이 가해지면서 로터는 가속운동을 한다. 그리고 정격파워를 출력하는 정



Fig. 5 PID Control with Simulink

상 상태에 도달 하였을 때 로터는 일정한 회전속 도로 움직여야 하므로 토크에 대한 제어가 필요하 다. 그리고 증가하는 하중을 방지하기 위하여 공 력을 제어해야 한다. 그러므로 본 논문에서는 Fig. 5 와 같이 RecurDyn 과 Simulink 의 연동 해석을 이 용하여 풍력발전 시스템의 제어를 수행하였다. RecurDyn 모델에서 출력되는 값은 로터의 속도와 가속도이며 Matlab 에서 작성한 공력코드를 거쳐 계산된 힘이 RecurDyn 모델에 입력된다.

# 3. 해석결과 및 비교

#### 3.1 구조물 모델링 검증

구조물 모델링 검증을 위하여 비교할 대상을 선 정하였다. 너셀은 풍력발전기의 중요 부품들을 포 함하고 있고 타워는 시스템을 지탱하는 하부 구조 물이다. 그러므로 GH-Bladed v4.2<sup>(6)</sup>에서 추출한 하 중을 뽑아 RecurDyn 모델에 적용하고 너셀과 타 워의 가속도를 비교함으로서 구조물 모델링 검증 을 수행하였다.

Fig. 6 은 타워의 가속도 그래프이다. 파란색 선은 RecurDyn 의 결과이고 빨간색 선은 GH-Blade 의 결 과이다. X 방향 가속도 그래프에서는 RecurDyn 의 가 속도 값이 조금 크게 나오지만 주기는 비슷함을 알 수 있다. Y 방향 가속도 그래프에서는 GH-Bladed 의 가속도 값이 조금 크게 나오지만 마찬가지로 주기는 같다는 것을 알 수 있다. Z 방향 가속도는 정확하게 일치하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7 은 GH\_Bladed 에서 계산된 공력데이타를 RecurDyn 에 넣어서 구한 너셀의 가속도 그래프이 다. X 방향, Y 방향 가속도 그래프에서 RecurDyn 의 가속도 값이 조금 크게 나오지만 주기는 비슷함을 알 수 있다. Z 방향 가속도 역시 RecurDyn 에서 다 소 크게 나오는 것을 볼 수 있다. 두 모델의 감쇠



값의 차이로 인하여 가속도의 크기는 차이가 나지 만 진동수는 같은 것을 알 수 있다. 그러므로 RecurDyn 으로 모델링 한 구조물은 GH-Bladed 와 같이 모델링 되었다고 볼 수 있다.

3.2 Simulink 와 연결된 시스템의 응답 동역학 해석 Recurdyn 프로그램을 제어프로그램



Fig. 7 Nacelle acceleration

Simulink 와 연동시켜 동적 거동을 수행한 결과를 Fig. 8 과 Fig. 9 에 나타내었다. Fig. 8 에는 너셀의 가속도를 GH-Bladed 결과와 비교하였으며, Fig. 9 에 는 너셀의 변위를 비교하였다.

Fig. 8 에서 볼 수 있는 바와 같이 정적 상태에 도 달하였을 때 너셀의 가속도는 점점 수렴하는 것을

118

Table 3 Displacement of the nacelle

Direction	RecurDyn	GH-Bladed	Difference
Х	0.5047 m	0.3425 m	0.1622 m
Y	-0.0249 m	-0.0475 m	0.0226 m
Z	-0.0260 m	0 m	0.0260 m



-0.00 -0.00 -0.00 -0.00 -0.01 L 100 150 200 Time(sec) (c) Nacelle Z acceleration

Fig. 8 Nacelle acceleration

볼 수 있다. X, Y 방향 가속도는 GH-Bladed 보다 더 빠르게 진폭이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 정상상태 에서 차이가 보이는 이유는 공력하중 계산과 제어 시스템의 차이 때문이라고 생각한다. 그리고 가장 큰 이유는 두 프로그램의 적분 알고리즘 차이로 인 하여 결과가 다르게 나온다고 판단된다. GH-Bladed



Fig. 9 Nacelle displacement

는 명시적 시간적분을 하고 RecurDyn 에서는 암시적 시간적분을 수행한다. 풍력 발전 시스템처럼 강성이 높은 시스템에서는 RecurDyn 에서와 같이 적분간격 에 대한 제약이 없는 암시적 시간적분이 해석결과의 정확도를 높일 수 있다.

Fig. 9 에 나타난 너셀의 변위를 Table 3 에 정리 하여 비교하였다. X 방향은 약 25 cm, Y 방향은 약 2 cm, 그리고 Z 방향은 약 2.5 cm 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 특히 Z 방향에서 GH-Bladed 에서 는 변위가 정확히 0 m가 나오는 것을 볼 수 있는 데 이것은 GH-Bladed 프로그램 내부에서 너셀을 수직방향으로 고정시키는 구속을 가하고 있어 발 생하는 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 다물체 동역학 해석 소프트웨어 인 리커다인을 이용하여 풍력 발전기를 쉽게 모델 링하고 동적 거동 해석을 수행할 수 있는 기법을 개발 하였다. 검증을 위하여 GH-Bladed 를 이용한 해석결과와 비교해 보았다.

너셀에는 메인 샤프트 축과 기어박스와 같이 동 력을 전달하는 부품이 많이 있으므로 안정성에 대 한 해석이 필요하다. 그러므로 너셀의 가속도 응 답과 변위를 비교 분석 하였다.

위에서 분석한 결과를 보았을 때 GH-bladed 와 조금의 차이가 발생하는 것을 볼 수 있었다. 그러 나 경향성이 비슷하고 차이 또한 풍력시스템 규모 에 비하면 매우 작은 값이므로 수행한 해석이 타 당하다고 볼 수 있다.

본 연구에서 개발한 풍력 발전기 모델링 및 해 석 기법을 기초로 향후 파랑하중 또한 모델링 하 여 해상 풍력 발전기의 동적 거동 해석에 활용 될 수 있을 것이다.

#### 후 기

본 연구는 2011 년도 지식경제부의 재원으로 한 국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행 한 연구 과제입니다. (No. 20113020020010)

# 참고문헌

- Oh, J., Bae, D., Cho, H., Rim, C. and Song, J., 2012, "Development of Sea Wind Turbine System Structure Analysis Method by Using Multi-Body Dynamics," *Conference of KSAE*, pp.1120~1123.
- (2) Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W. and Scott, S., 2009, "Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development," NREL/TP-500-38060, National Renewable Energy Laboratory.
- (3) Park, K.-P., Cha, J.-H., Ku, N., Jo, A. and Lee, K.-Y., 2012, "Structural Analysis of Floating Offshore Wind Turbine Tower based on Flexible Multibody Dynamics," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 36, No. 12, pp.1489~1495.
- (4) FunctionBay, 2012, "RecurDyn v8.1 Help."
- (5) Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., Bossanyi, E., 2001, Wind Energy Handbook, Wiley, pp.41~92.
- (6) Hassan, G., 2003, "GH Bladed User Manual."