

## 技術論文

## 풍력발전시스템 성능 해석 S/W의 초기 검증에 관한 연구

문정희\*, 노태수\*\*, 박종혁\*\*\*, 김성주\*\*\*\*

Preliminary Validation of Wind Turbine Generator System  
Performance Analysis S/W, WINSIM

Jung-Heu Mun\*, Tae Soo No\*\*, Jong-Hyuk Park\*\*\* and Sung Ju Kim\*\*\*\*

## ABSTRACT

The simulation software for predicting the performance of a wind turbine generator system (WTGS) is validated using the field measured data obtained from the idling test run of a dual rotor wind turbine recently developed and installed in Korea. Both steady-state and transient responses at low and high wind conditions are compared with the theoretically predicted ones from the simulation software WINSIM.

## 초 록

본 논문에서는 풍력발전시스템의 정상 및 과도 응답과 같은 동적 거동 분석은 물론 피치제어 시스템의 성능 예측을 위하여 개발된 시뮬레이션 소프트웨어의 검증을 위하여 실제 현장에서 측정된 자료와 비교 검증을 수행하였고 실제와 유사하도록 시스템 모델링 및 소프트웨어의 개선 방향을 제시함으로써 향후 본 연구를 통하여 개발한 소프트웨어의 유용성을 제시하고자 한다.

**Key Words** : Wind Turbine Generator System(풍력발전시스템), Simulation(시뮬레이션), Software(소프트웨어), WINSIM, Field Test and Evaluation(실증 연구), Preliminary Validation(초기 검증), Performance Analysis(성능 해석)

## 1. 연구 배경 및 목적

풍력발전시스템은 바람의 공기역학적 운동 에너지를 로터 블레이드를 통해 기계적 에너지로 변환하고 다시 발전기를 통해 전기 에너지를 생산하는 시스템으로써, 풍력발전시스템의 실제 운영을 위해서는 성능 예측, 피치 제어, 운용 기법 최적화 등에 관한 연구가 필요하다. 풍력발전시스템은 단순한 회전 운동과는 달리 매우 복잡한

시스템으로 시스템의 특성과 성능해석은 해석적 방법으로는 불가능하며, 수치적인 시뮬레이션을 통한 방법이 효과적이다. 현재 주로 사용되고 있는 시뮬레이션 소프트웨어는 FAST [1], Modes, MSC.ADAMS [2], GL의 DHAT 및 유럽에서 많이 사용되는 GH Bladed [3] 등이 있다. 그러나 이러한 S/W의 적용 대상은 풍력발전기의 전형적인 형태로서 소위 Upwind 또는 Downwind 방식의 3-Blade, 수평축 시스템에 한정되어 있다.

최근 산학연 연구를 통하여 개발된 신개념의 풍력발전시스템이 제안된 바 있다[4]. 그림 1은 현재 충남 서천 지역에 설치되어 시험 운전 중인 1MW 수평/수직 통합 이중로터 풍력발전시스템의 실제 모습으로 기존 풍력발전시스템과는 달리 주 로터와 반지름이 주 로터의 절반에 해당하는 보조 로터를 장착하고 있다. 주/보조 로터 축은

† 2008년 12월 29일 접수~2009년 1월 21일 심사완료

\* 정희원, 전북대학교 항공우주공학과 대학원

\*\* 정희원, 전북대학교 기계항공시스템공학부  
교신저자, E-mail : rotthee@chonbuk.ac.kr  
전북 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14

\*\*\* 정희원, (주)코원텍 연구개발팀

\*\*\*\* 정희원, 서남대학교 컴퓨터응용수학과

로부터 발생하는 힘은 기어박스를 통해 수직축 발전기에 전달되어 전력을 생산함으로써 발전시스템의 효율을 높이고 풍향의 변화에 효과적으로 추종하도록 하는 시스템이다

그러나 앞서 소개한 기존의 소프트웨어는 통상적인 단일 로터 방식의 풍력발전시스템 성능해석에만 적용할 수 있다. 우선 이중 로터 방식에 있어서 Upwind 및 Downwind 로터간의 유동장 간섭 모델이 정립되어 있지 않으며, 상대적으로 복잡하게 구성된 동력전달체계 (Power Train)의 모델링이 용이하지 않기 때문이다. 따라서 본 논문의 저자는 참고문헌[5]에 기 보고한 바와 같이 다물체 역학, 블레이드 요소 이론과 모멘텀 이론을 이용하여 시스템 모델링을 수행하고, FORTRAN과 Matlab/Simulink 기반의 하이브리드 시뮬레이터 소프트웨어 WINSIM을 개발한 바 있다.

WINSIM의 가장 주된 목적은 블레이드 피치 제어 시스템 개발 및 성능 해석에 있다. 즉, 풍속 및 로터 (또는 발전기) 회전 속도에 따라 각각의 운용 모드에서 적용할 제어 알고리즘을 실제 시스템에 이식하기 전에 사전 검증용 Tool로서 사용된다. 이처럼 검증용 Tool로서 신뢰성을 확보하기 위해서는 먼저 발전기가 연결되지 않은 상태의 운전으로 정의되는 무부하 시험 결과의 비교를 통하여 시뮬레이션 결과의 정확성을 분석하고 또한 현장 자료의 분석을 통한 실제 시스템의 Identification과 그 결과를 다시 소프트웨어 시뮬레이션에 반영하는 반복 작업이 필수적이다 [6,7,8].

따라서 본 논문의 목적은 최근 개발이 완료되어 시험 중에 있는 이중로터 풍력발전시스템의 무부하 운전 자료와 시뮬레이션 예측치의 비교를



그림 1. 1MW 수평/수직 통합 이중로터 풍력발전시스템 (충남 서천)

통하여 소프트웨어의 신뢰성을 확보하는 데 있다. 이를 위하여 먼저 정상 상태 (Steady-state)와 과도 응답 (Transient response) 거동을 비교하는 초기 검증 결과를 제시하고자 한다.

## II. WINSIM S/W의 구성 및 기능

WINSIM S/W의 개발 배경 및 기능에 대하여는 참고문헌[5]에 상세히 기술되어 있으나 본 논문의 이해를 돕기 위하여 간단하게 소개한다. 그림 2에 도시된 WINSIM의 초기 기동 화면에서 알 수 있듯이 풍력발전시스템의 시뮬레이션에 필요한 필수 요소를 모두 포함하고 있다. 시나리오에 따른 풍향의 생성, 시스템에 작용하는 공력 및 중력, 회전 로터의 동역학, 센서, 피치 제어기, 그리고 피치 모터 모델로 구성되어 있다. 각 모듈은 FORTRAN 또는 Matlab/Simulink 기반으로 코딩되어 있다.

WINSIM의 주요 목적은 다양한 형태의 풍력발전시스템과 이에 필요한 피치 제어 알고리즘의 성능을 파악하기 위한 것으로 해당 입력 파일 및 모듈만의 교체를 통하여 번거로운 재코딩 작업 없는 Tool로서 기능을 수행하는 것이다. 그러나 본 논문에서 제시하고 있는 무부하 시험의 목적은 특정 피치 알고리즘의 시험에 있는 것이 아니라 WINSIM에 적용된 모델링 기법 및 코딩의 신뢰성을 확보하는 데 있다. 따라서 소위 Closed Loop 피치 알고리즘은 적용하고 있지 않으며 다음 장에 설명되는 바와 같이 시험에 필요한 피치 각을 임의로 설정할 수 있도록 설정되어 있다.

## III. 자료 취득 시스템 구성

풍력발전시스템의 자동화된 그리고 안정된 운영을 위해서는 시스템을 구성하는 각종 기계 (로터 회전수, 오일 압력 및 온도, 저속 및 고속 축 회전수 및 토크 등등), 전기 (발전기 RPM, 슬립 링 통신 상태, 피치 모터 상태, 인버터 등등)는 물론 계통과 연계되는 각종 계전기 및 안전장치의 감시 및 제어를 수행하는 전용 소프트웨어가 필요하다[9]. 그러나 본 논문에서는 단순히 무부하 운전 상태 파악에 최소한으로 필요한 측정치 취득을 위하여 그림 3과 같은 하드웨어를 구성하였다. 그림 4에 간단히 데이터 취득 체계를 보이고 있으며, 그림 3과 4를 바탕으로 그림 5에 보이는 바와 같이 자료 취득 시스템을 구축하였다. 그림 3~4에서 알 수 있듯이, 보조 로터 및 주 로

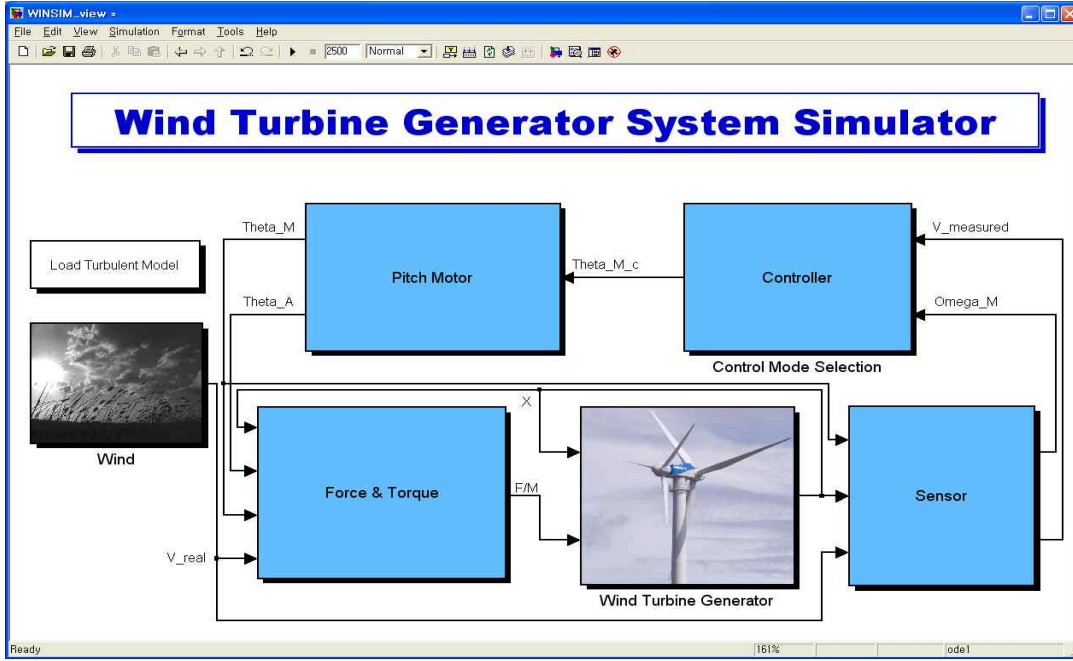


그림 2. WINSIM의 초기 기동화면

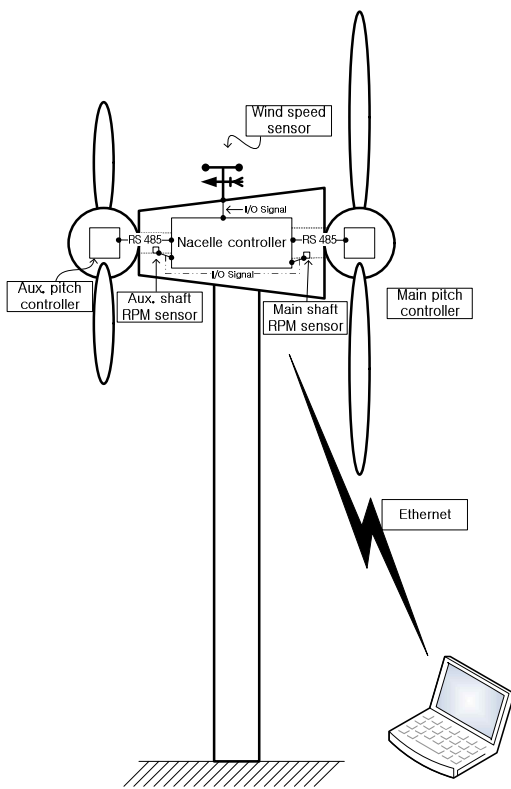


그림 3. 데이터 취득을 위한 하드웨어 구성

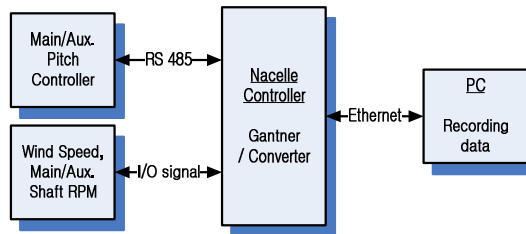


그림 4. 데이터 취득 체계

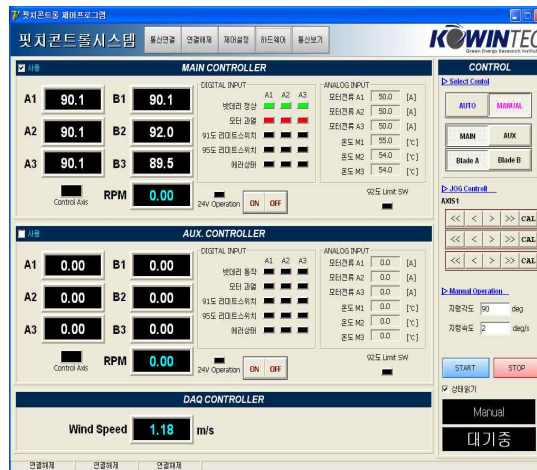


그림 5. 피치 제어 및 데이터 기록 소프트웨어

터의 회전수 그리고 Wind Vane을 통하여 측정된 풍속 정보를 I/O Signal, 보조 로터 및 주 로터의 피치각은 RS 485 통신 라인을 이용하여 기어 박스 내부에 설치된 Nacelle Controller에 전달한다. 이 정보는 다시 무선 Ethernet을 통해 지상 모니터링 PC에 송신한다. 데이터 기록시 Data Sampling은 임의로 변경이 가능하지만 본 논문에서는 3초에 25번으로 고정하였다. 지상 모니터링 PC는 자료 수신 및 저장 기능 외에 주 로터 및 보조 로터의 Pitch 명령 지령을 직접 지정할 수 있는 기능을 부여하였다. 시스템 안전을 위한 부가적인 모니터링 변수 등에 관한 설명은 본 논문과 직접 연관이 없으므로 생략한다.

IV. 무부하 시험 결과 및 해석

풍력발전시스템의 성능 예측은 정상 상태와 과도 응답 분석으로 구분할 수 있다. 정상 상태는 일정한 풍속과 고정된 블레이드 피치각에 로터의 회전 속도 측정이 주목적이다. 이를 근거로 로터가 생성하는 공기역학적 토크를 계산할 수 있으며, 로터의 이론적 공력 특성(양력 및 항력)을 검증하게 된다. 또한 과도 응답은 가변하는 풍속 및 피치각에 따른 로터 회전 속도의 시간 변화를 파악하는 작업으로서, 시스템 초기 단계에서 계산이 불가능한 회전부의 마찰 손실, 관성에 의한 응답 지연 특성을 파악하는 자료로 사용된다.

4.1 정상 상태

실제 현장 시험에서 진정한 의미의 정상 상태를 파악하기는 거의 불가능하다. 시스템이 설치되는 지역의 Local 풍속은 난류 및 경계층 효과로 인하여 매순간 변하기 때문이다. 본 연구에서는 풍속의 순간 변화가 심하지 않은 상태에서 반복적인 무부하 시험을 수행하였고, 측정된 풍속 및 로터 회전 속도의 평균값을 이용하였다. 표 1에 몇 가지 대표적인 풍속 및 주 로터 피치각 조합에 따른 로터 회전 속도를 정리하였다. 이때 보조 로터의 피치각도는 일정한 값으로 고정하였다. (본 예제의 경우 30°)

WINSIM을 이용한 정상 상태 예측은 초기에 시스템이 정지된 상태에서 일정한 풍속 및 피치각에 따른 시뮬레이션으로 결정한다. 즉, 표 1에 제시된 풍속 및 피치각을 입력으로 WINSIM을 수행하면 초기 과도 응답을 경과한 후 궁극적으로 정상 상태에 도달하게 된다. 그림 6은 보조 로터를 30°로 고정한 상태에서 풍속 10m/s, 주

표 1. 풍속과 피치각에 따른 주 로터 회전 속도 (1MW 이중 로터 풍력발전시스템 실측 데이터) 단위 : RPM

주 로터 피치각	풍속				
	4 m/s	6 m/s	8 m/s	10 m/s	12 m/s
0°	26.8	39.8	52.7	65.8	79.0
10°	18.0	27.0	36.0	45.1	54.1
20°	6.1	9.2	12.1	15.2	18.2
30°	3.9	5.8	7.7	9.6	11.7
40°	2.7	4.0	5.4	6.7	8.0
50°	1.9	2.9	3.8	4.8	5.6
60°	1.3	1.9	2.7	3.2	3.9

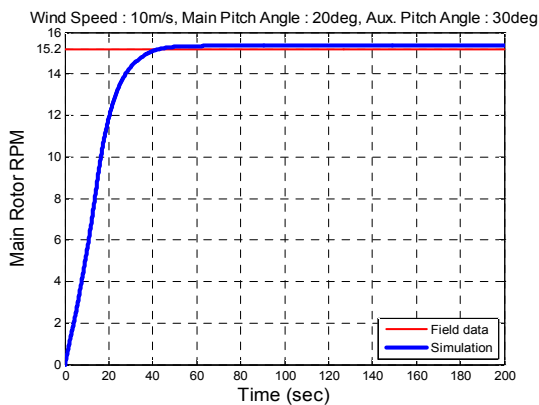
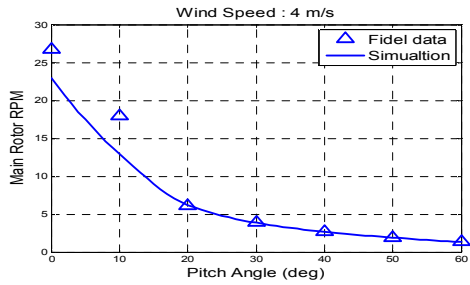


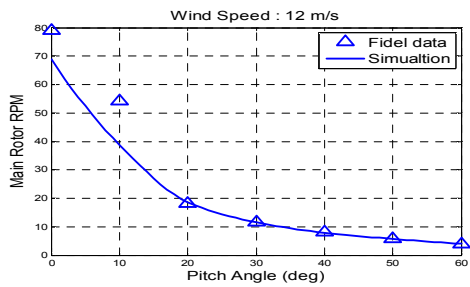
그림 6. 정상 상태 시뮬레이션

로터 피치각 20°의 입력으로 시뮬레이션을 수행한 예제를 보이고 있다. 약 50초 후에 정상 상태에 도달하고, 이때 로터 회전 속도는 표 1에 제시한 실측 데이터와 매우 근접함을 알 수 있다.

위와 같은 절차를 반복함으로써 표 1에 보인 다양한 작동점 (Operation Point)에서 정상 상태 예측을 수행할 수 있다. 그림 7은 고정된 풍속(4 m/s, 12m/s)과 여러 가지 피치각도에서 정상 상태 예측치와 실측치를 비교하고 있으며, 그림 8은 고정된 피치각(0°, 30°)과 여러 가지 풍속에서 비교치를 도시하고 있다. 전체적으로 낮은 풍속 및 큰 피치각 영역에서의 시뮬레이션 예측은 매우 우수하다. 그러나 작은 피치각 영역(약 0~10°)에서의 예측치 상당한 오차를 보이고 있다. 이는 본 논문에서 다루고 있는 이중 로터 풍력발전시스템에 있어서 Upwind 및 Downwind 로터간 유동 간섭 현상이 공력 예측 모델에 충분히 반영되고 있는 않은 이유로 판단된다.

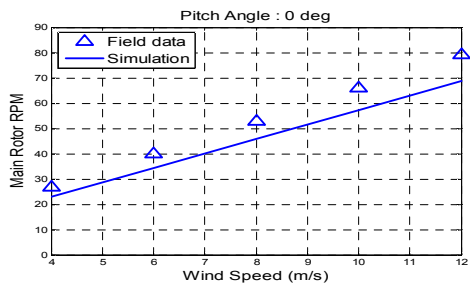


(a) Low Wind Speed

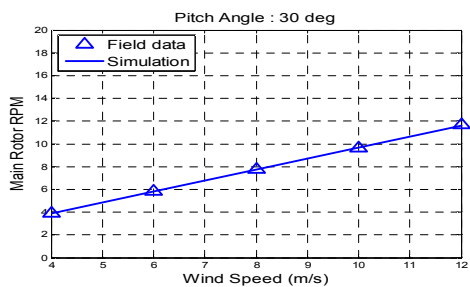


(b) High Wind Speed

그림 7. 피치각에 따른 주 로터 회전 속도



(a) Low Pitch Angle



(b) High Pitch Angle

그림 8. 풍속에 따른 주 로터 회전 속도

4.2 과도 응답

실제 풍속은 계속 변하며 또한 풍력발전시스템의 피치 제어 알고리즘은 각 운용 모드에 따른 제어 전략에 따라 로터 피치각도를 계속 변경

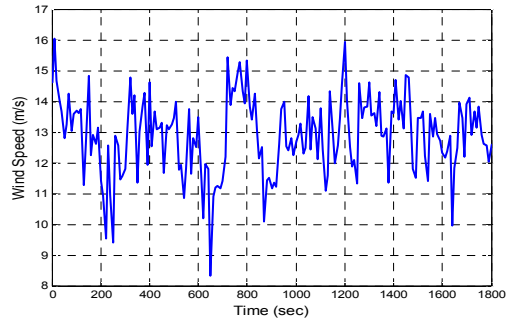


그림 9. 풍속 변화

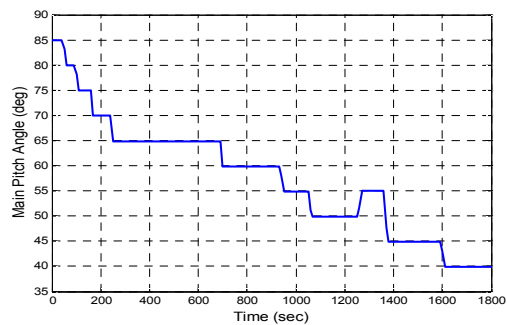


그림 10. 주 로터 피치각 명령

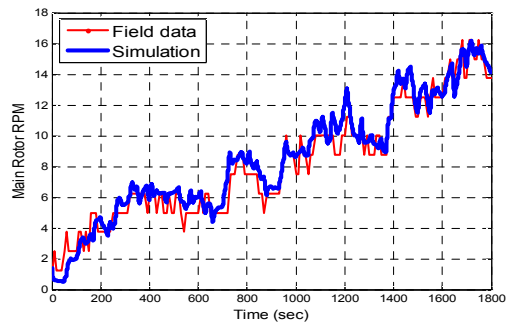


그림 11. 주 로터 회전 속도 시간 변화

한다. WINSIM의 주요 기능은 제안된 피치제어 알고리즘의 성능을 파악하기 위한 S/W 기반의 Test bed로서 위와 같이 변하는 풍속 및 피치각에 따른 시스템의 동역학적 응답을 정확하게 묘사할 수 있어야 한다.

그림 9는 실제 풍속 측정치를 보이고 있으며, 그림 10은 과도 응답을 유발하기 위하여 임의로 설정된 피치 입력각 시나리오를 도시하고 있다. 이 때 보조각은 20°로 고정하였다. 이 같이 설정된 풍속 및 피치각 시나리오를 그림 2에 보인 WINSIM의 "Wind" 및 "Controller" 블록에 적용하고 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 11은 주 로

터 회전 속도 시간 변화의 실제 측정치 및 시뮬레이션 예측치를 단순 비교하고 있다. 시스템 Identification을 이용한 물성치 및 공력 계수의 조정 등 소프트웨어 Tuning을 하지 않았음에도 불구하고 상당히 정확한 예측 성능을 보이고 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 풍력발전시스템 성능 해석 및 예측 소프트웨어 WINSIM의 검증 및 신뢰성 확보의 일환으로 최근 개발이 완료되어 시험 중에 있는 1MW급 이중 로터 풍력발전시스템의 운전 자료를 이용하여 정상 상태 및 과도 응답 결과를 비교 분석하였다. 실제 측정치와 시뮬레이션 예측치가 상호 매우 유사한 경향을 보임으로써 향후 WINSIM을 이용한 초기 성능 예측에 활용할 수 있다고 판단된다. 그러나 정상 상태 예측에 있어서 이중 로터 시스템의 주 및 보조 로터간 유동 간섭을 고려한 공력 모델의 개선이 필요한 것으로 파악되었다. 과도 응답 결과를 이용한 시스템 Identification 과정을 통하여 시스템에 적용한 각종 물성치, 피치 모터 특성, 공력 계수 조정, 시스템 마찰력 모델링 등의 추가적인 작업이 수행되어야 한다. 궁극적으로 부하 시험 결과를 이용하여 발전기, 인버터 등 전체 시스템을 통합한 성능 예측 및 분석이 가능하도록 WINSIM을 개선할 예정이다.

#### 후 기

이 논문은 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. R01-2007-000-10138-0)

#### 참고문헌

- 1) Jason M. Jonkman, Marshall L. Buhl Jr. "FAST User's Guide", Technical Report, NREL/EL-500-38230, August 2005
- 2) "MSC.ADAMS Release Guide", MSC. Software Corporation
- 3) E. A. Bossanyi, "GH Bladed version 3.6 User Manual", Garrad Hassan and Partners Ltd
- 4) 산업자원부, "1MW급 Dual-rotor 풍력발전 시스템 개발", 2차년도 보고서, 2005
- 5) 문정희, 노태수, 김지언, 김성주, "풍력발전 시스템 성능 해석 S/W 개발에 관한 연구", 한국항공우주학회지, 제36권 제2호, pp. 202-209, 2008
- 6) Lennart Ljung, "System Identification Toolbox", The Mathwoks, User's Guide, Version 6, 2005
- 7) 박종혁, 노태수, 문정희, 김지언, "풍력발전 시스템 피치 제어에 관한 연구", 한국항공우주학회지, 제34권 제12호, pp. 25-34, 2006
- 8) Mate Jelavić, Nedjeljko Perić, Ivan Petrović, "Identification of Wind Turbine Model for Controller Design", CD-ROM Preceedings of the 12th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE - PEMC 2006, Portorož, Slovenia, pp.1608 - 1613, August 30 - September 1, 2006
- 9) S. Gallardo, F. Barrero, J.M. Carrasco, "Novel control system based in DSPs for 800 KW wind power station", International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICRE PQ'04), Barcelona, 31 March-1,2 April, 2004