

750kW급 Geared Type 풍력발전시스템 개발

차중환, 한상열, 이호준, 고장욱, 이현주, 오시덕(효성 중공업 연구소)
신형기, 이수갑(서울대학교), 김태욱(한국기계연구원), 성대영, 박성배(에드컴텍)

요 약

본 연구에서는 에너지 및 환경에 대한 문제가 대두되면서 기술 개발의 필요성이 높아지고 있는 풍력발전시스템에 대하여 750kW급 Geared Type 가변속 풍력발전시스템을 개발하였다. 풍력발전시스템이 급속히 대용량화됨을 고려하여 MW급의 기술 조합이 반영되도록 설계하였으며, 베어링과 같은 국내 인프라가 부족한 구성품을 제외한 모든 구성기기들을 자체 설계/제작하였다.

블레이드는 국내 풍황에 적합하도록 자체 에어포일을 설계하여 개발하였으며, 가변속 제어를 위한 이중 여자 유도발전기 및 제어기와 Down sizing 구현을 위한 유성 및 헬리컬 기어 혼합형 증속기를 개발하여 시동 풍속 3.5m/s, 정지 풍속 25m/s, 정격 풍속은 12.7m/s이며 IEC 61400-1의 Class I 에 준한 750kW급 풍력발전시스템을 개발하였다.

1. 서 론

인간의 산업혁명에 따른 산업 활동으로 인한 온실가스 배출량 증가는 지구의 기후 시스템에 영향을 미쳐 지구를 둘러싼 대기층의 “온실효과”로 인해 지구 온난화 문제를 야기 시키고 있다. 이러한 기후변화는 개별 국가의 문제가 아니라 전 지구적 차원의 공동 대응이 필요하다는 인식하에 교토의정서를 채택하면서 국제적인 이슈로 떠오르게 되었으며, EU를 비롯한 선진 각국에서는 이에 대한 대책으로 연료전지와 풍력발전 등 새로운 기술개발을 추진하여 사회 인프라 등에 적극적으로 활용하거나 에너지 절약, 친환경적인 건축물 건설 및 재생 에너지 개발, 산업, 에너지, 폐기물 처리 개선을 촉진하고 2010년 이후를 대비한 R&D 개발 확대 등을 적극적으로 추진하고 있다.

그 중에서도 풍력발전시스템이 이와 같은 국제 환경의 변화 및 유가 상승과 경제성 및 기술의 성숙도로 인해 에너지 산업에서 세계적으로 가장 빠르게 성장하는 분야가 되었다. 최근 10년간 설치 용량이 10배 이상 증가하여 이미 전 세계적으로 약 47,912MW(2004년말 누계기준)의 풍력발전시스템이 설치 운전되고

있으며, 발전단가는 대형화 및 단지화와 함께 지속적으로 낮아지고 있는 추세로 보급당시 95kW급 풍력발전기의 8.8c€/kWh로부터 MW급 풍력발전시스템이 보급되고 있는 최근에는 4.1c€/kWh로 약 20년간 50%가 넘게 감소하게 되었다. 이러한 이유로 인해 이미 여러 선진국에서는 풍력 에너지의 개발/보급이 실용화, 활성화 단계에 있으며, 유럽의 경우 전체 전력 수요의 2%를 풍력발전이 담당하고 있는 실정이며 풍력발전시스템 기술은 이미 상당히 발전한 단계에 이르러 최근에는 직경 124m의 5MW 시스템을 개발 완료하여 실증 단계에 있다.

우리나라도 이미 1993년 12월 기후변화협약에 가입하였으며 2002년 11월 교토 의정서를 비준하여 2차 공약기간 중(2013~2017) 온실가스 감축 의무 부담이 가시화 될 전망이어서, 친환경형 신·재생 에너지의 개발 및 보급이 시급한 실정이다. 이에 “제2차 신·재생 에너지 기술 개발 및 이용·보급 계획”에서 풍력발전기술을 태양광, 연료전지와 함께 3대 중점 기술의 하나로 선정하여 기술 개발을 지원하고 있으며, 풍력발전을 2012년까지 2,237MW를 보급하는 것을 계획하고 있다. 또한, 선진국의 대형화 추세에 맞추어 1.5MW, 3MW급 풍력발전시스템의 개발, 해양용 초대형 풍력발전시스템의 개발도 추진 중에 있으며, 신·재생 에너지를 이용하여 생산된 전기의 우선 구매 및 차액 보전(풍력의 경우 107.66원/kWh), 신·재생 에너지 발전사업 지원 확대, 보급된 신·재생 에너지 설비의 사후 관리, 시설 투자금에 대한 세제 지원 및 수입품에 대한 관세 감면(세율 8% → 2.8%) 등의 지원 제도를 추진하고 있다. 이러한 노력으로 인해 국내의 풍력발전 시스템의 도입 여건 조성에는 상당한 역할을 했다고 할 수 있으나 대부분이 풍력발전 시스템을 수입에 의존하고 있어 초기 투자비의 상승으로 인한 경제성 확보의 어려움이 있고 문제 발생 시 유지 보수의 어려움을 겪고 있어 풍력발전시스템의 원활한 보급을 위해서는 시스템 국산화 개발의 필요성이 매우 절실하다고 할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 당사의 주요 구성기기 개발 경험과(증속기, 발전기, 타워 등) 관련 기반 기술의 적용을 효과적으로 활용하여 연구 개발 성과를 극대화할 수 있는 기어드 타입의 가변속 피치 제어형 풍력발전시스템을 3년(2002. 12 ~ 2005. 4) 동안 참여기업으로 (주)에드컴텍, (주)코헤와 위탁기관인 한국에너지기술연구원, 한국기계연구원(대전, 창원), 서울대학교 등과 공동으로 자체 개발하였다. 블레이드는 국내 풍황에 적합하도록 자체 에어포일을 설계하여 2D 및 3D 풍동실험을 실시하고 구조 해석 및 설계를 수행하여 개발하였으며, 가변속 제어를 위한 이중 여자 유도발전기 및 제어기와 Down sizing 구현을 위한 유성 및 헬리컬 기어 혼합형 증속기를 개발하였다. 피치 및 요 시스템은 전동식으로 하였으며, 허브, 메인 프레임, 원통형 타워 등을 설계/제작하여 시동 풍속 3.5m/s, 정지 풍속 25m/s, 정격 풍속은 12.7m/s이며 IEC 61400-1의 Class I 에 준한 750kW급 풍력발전시스템을 개발하였다. 또한, 시스템 해석과 시험을 통하여 풍력발전 시스템

엔지니어링 기술을 확보하였으며, 대관령 풍력 실증 단지에 설치하여 실증 연구를 수행할 예정이다.

2. 본 론

가. 시스템 개념설계

풍력발전 시스템은 바람을 원동력으로 하기 때문에 발전 가능한 풍속 범위에서 시스템이 안정을 유지하면서 효율적으로 운전될 수 있는 운전 조건을 결정하여야 하며, 최근 풍력발전시스템이 급속히 대용량화됨을 고려하여 MW급에서 적용되는 기술 조합을 검토하여 개념설계에 반영하였다. 이에 본 고에서는 기상청 및 KIER의 자료를 이용하여 설치가 가능한 지역을 대상으로 풍력발전기의 운전 조건 자료의 추출과 함께 기존에 선진국에서 개발 및 상용화되어 운전 중인 풍력발전 시스템의 운전조건을 조사·분석하여 결정하였으며 개념설계 결과는 다음 표와 같다.

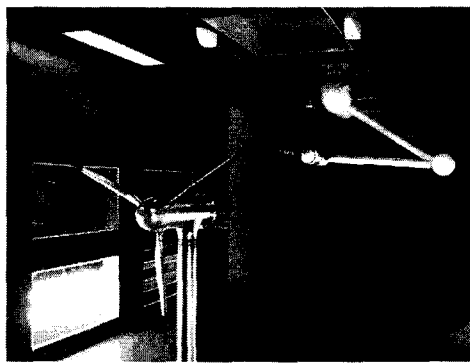
<표 1 : 시스템 개념설계>

운전 조건	시동 풍속	3.5 m/s
	정지 풍속	25 m/s
	정격 풍속	12.7 m/s
블레이드	갯수	3
	출력제어	가변속 피치제어용
	재료	GRP
증속기	유성 기어열	
발전기	증속기-영구자석 일체형 동기발전기 or 이중 여자 유도발전기	
허브	구형 허브 (구상 흑연 주철)	
피치제어시스템	전동식 개별 피치제어 방식	
요잉 시스템	전동식 + 슬루잉 링 베어링	
타워	강재 원통형	

나. 구성기기 설계 및 제작

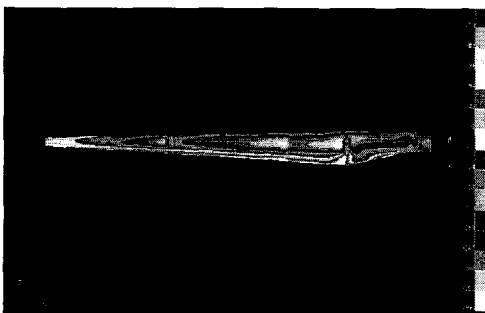
1) 블레이드

블레이드는 바람의 에너지를 기계적 회전 에너지로 변환시켜주는 풍력발전시스템의 중요한 구성 요소 중에 하나이며, 설계 단계에서 공력학적 조건과 구조적 조건을 모두 만족해야만 한다. 본 개발에서는 서울대학교에서 공력 설계를 수행하였고 한국기계연구원(창원)에서 구조설계를 실시하여 (주)에드컴텍에서 제작을 하였다. 에어포일은 국내 풍황에 적합하도록 해석적 방법을 통하여 새롭게 설계하였으며 2D, 3D 시험을 실시하여 출력계수(C_p)를 증가시키면서 최적화하였다.

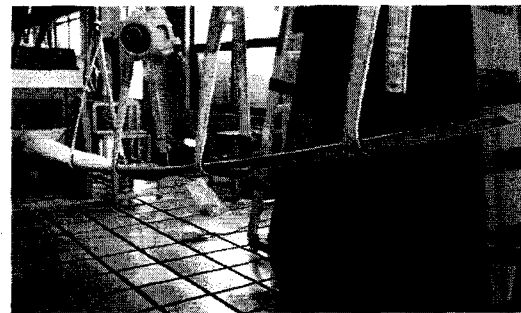


[그림 1 : 에어포일 3D 풍동 시험]

설계된 에어포일에 적합한 구조 설계 및 해석을 수행하였으며 1/7 축소시제를 제작하여 구조 강도 시험을 실시하였다. 시험 결과를 설계에 적용하여 실제 블레이드 설계를 실시하였다.

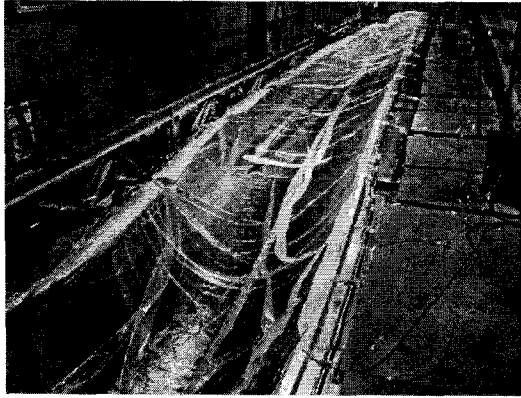


[그림 2 : 설계 블레이드 강도 해석]

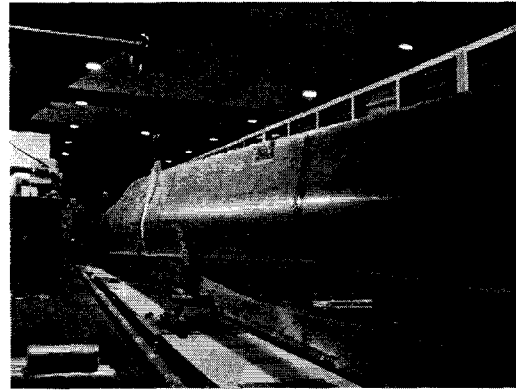


[그림 3 : 축소시제 강도 시험]

블레이드 제작은 여러 가지 공법 중에서 제품의 크기에 무관하게 성형시간이 매우 짧고, 균일하게 수지를 분포시킬 수 있어 제품의 품질이 균일하며, 복잡한 형상의 구조물을 일체형으로 성형할 수 있는 장점이 있는 Infusion 공법을 채택하여 제작하였다.



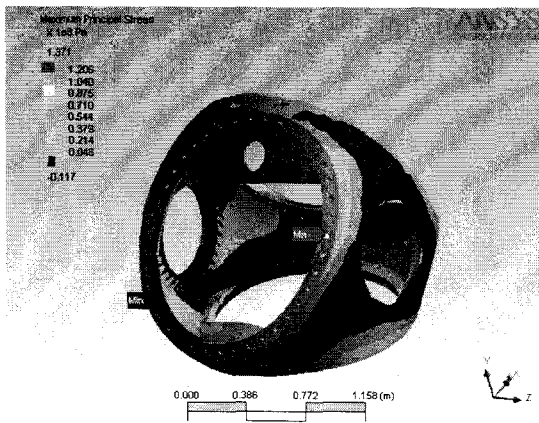
[그림 4 : 수지 주입]



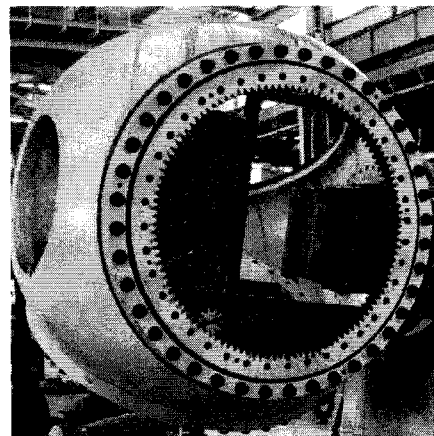
[그림 5 : 제작된 블레이드]

2) 허브

허브는 블레이드 각각의 연결부에서 3축방향의 힘과 모멘트를 받게 되어 허브 쉘의 인장/압축응력과 허브플랜지부의 굽힘 응력을 유발하게 되고, 이러한 복합적인 응력상태의 복잡성으로 인하여 유한요소해석 등을 활용하여 하중조건이 충분히 고려된 허브 구조 설계가 이루어져야 한다. 또한, 그 구조의 복잡성으로 인하여 주로 주조방식에 의한 제작이 일반적이며, 주물재질은 기계적 충격과 피로에 강하며, 진동감쇠특성이 우수한 성질을 갖는 구상흑연주철(GCD400)로 선정하였다.



[그림 6 : 유한요소해석 결과]



[그림 7 : 제작된 허브]

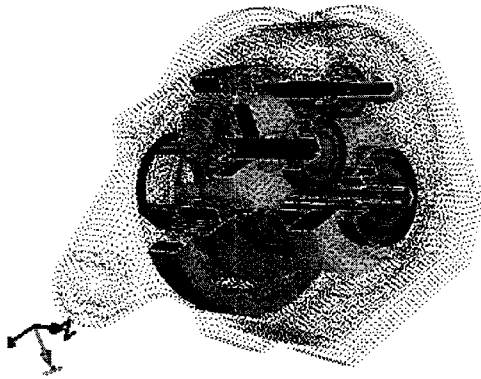
3) 증속기

기본 설계 단계에서 시장분석, 선진사 벤치마킹, Case Study 결과, 유성 기어열을 갖는 2단 유성-1단 헬리컬 기어열 및 이중케환형 유도 발전기와 연결되는 구성을 채택하였다. 그러나 상세 설계 과정에서 외형 크기와 유성 기어열의 숫자가 많은 경우는 그 만큼 유지 보수가 헬리컬 기어에 비해 상대적으로 어렵기 때문에

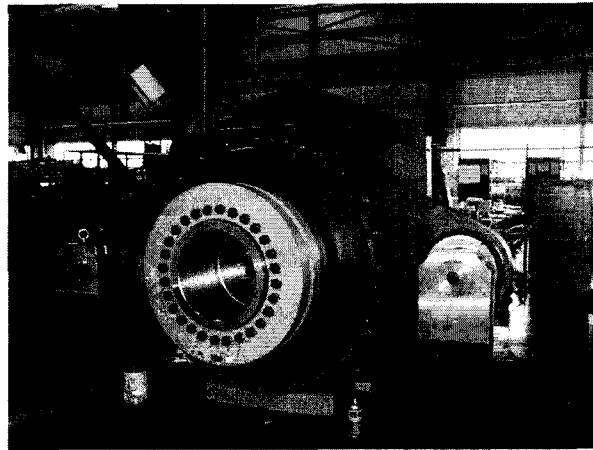
유지보수 비용이 가장 중요한 요소로 인식되는 현재의 증속기 시장 추이를 반영하여 1단 유성-2단 헬리컬 기어열을 갖는 구조로 사양으로 설계 제작 하였다.

<표 2 : 증속기 사양 >

설계 항목	설계값
형식	1단 유성 스퍼/ 2단 평행 헬리컬
증속비	1: 75
운환시스템	강제 운환방식
냉각 방식	공냉식



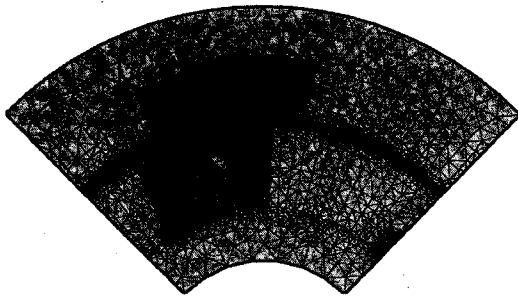
[그림 8 : 동적 거동 해석]



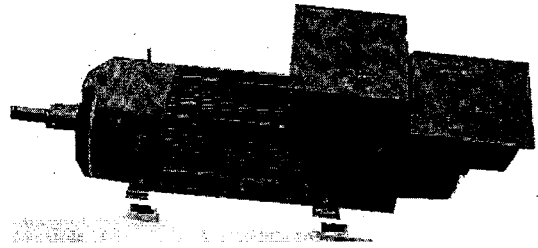
[그림 9 : 제작된 증속기]

4) 발전기

발전기는 가변속 시스템을 구현하기 위하여 3상 유도 발전기로서 고정자는 계통과 직접 연계되고 회전자는 인버터를 통하여 계통과 연계 운전을 하는 이중 여자(Double-Fed) 유도 발전기이다. 풍력 발전 시스템의 특성상 국제 규격에 의하면 보호등급 IP 54, 절연등급 F 중 이상(온도 155도) 요구하고 있으므로 이를 만족하도록 설계하였으며 FEM 해석을 통해 특성 해석을 수행하여 제작하였다.



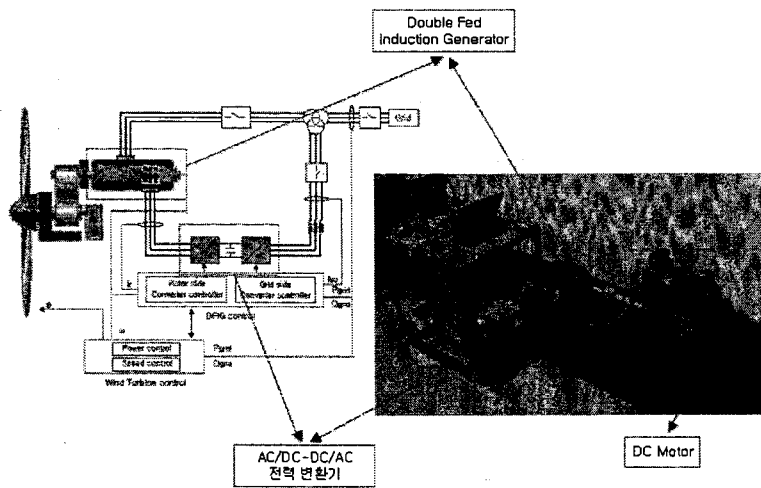
[그림 10 : 슬립에 따른 전류밀도]



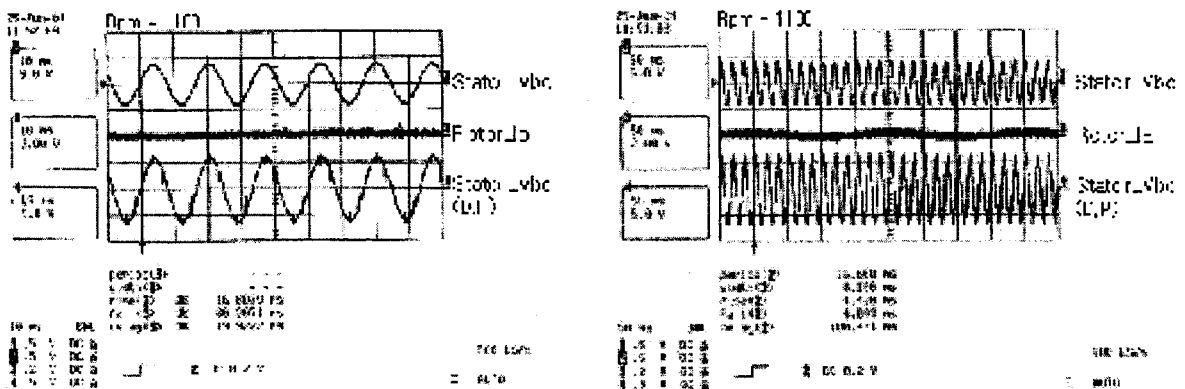
[그림 11 : 제작된 발전기]

5) 제어 시스템

이중 여자 유도발전기를 모델링하고 PSCAD를 활용하여 시뮬레이션을 실시하였으며 축소 시스템을 제작하여 시험을 통해 제어 알고리즘을 확립하였다. 주 제어기로 TMS320C31를 사용하였으며 IGBT를 사용하여 제어 시스템을 구현하였다.



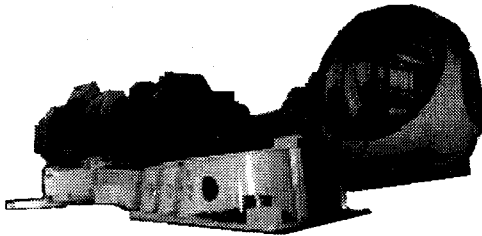
[그림 12 : 이중여자시스템 축소 시험장치]



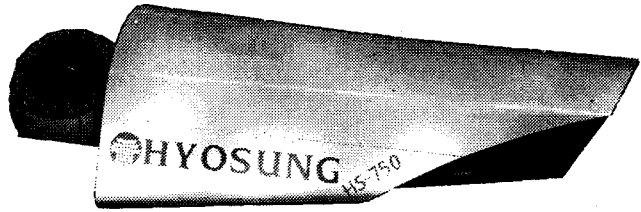
[그림 13 : 고정자 전압 및 회전자 전류 파형]

6) 시스템 조립

시스템의 외형을 담당하는 너셀 형상은 풍력발전시스템의 친환경적인 특징을 반영하여 디자인하였으며, 제작된 구성기기를 절차에 따라 조립하여 시스템을 완성하였다.



[그림 14 : 내부 구성기기 조립]



[그림 15 : 최종 완료시 형상]

3. 결 론

국내외적으로 에너지와 환경 문제는 산업화 이후부터 현재까지 인류가 해결해야 할 가장 중요한 문제라 아니할 수 없다. 특히, 최근에 기후변화협약과 관련하여 2005년 2월 16일자로 교토의정서가 국제법으로 정식 발효됨에 따라 세계 각국에서는 이에 대한 대안으로서 풍력, 연료전지, 수소 에너지 등과 같은 신재생 에너지원의 개발을 적극적으로 추진하고 있다. 국내에서도 “제2차 신·재생 에너지 기술 개발 및 이용·보급 계획”에서 풍력발전기술을 태양광, 연료전지와 함께 3대 중점 기술의 하나로 선정하여 기술 개발을 지원하고 있으며, 지방자치 단체를 중심으로 풍력발전의 보급이 활발히 진행되어 최근에는 발전자회사를 필두로 한 민간발전 사업자들이 풍력발전 사업을 활발히 진행하고 있다. 그러나, 현재 보급되어 운전 중인 대부분의 시스템이 선진 외국 제작사의 제품으로 경제성 확보나 기술 지원 등의 어려움을 겪고 있다.

따라서, 본 연구에서는 국내 풍황에 적합한 블레이드를 위탁 및 참여 기업과 함께 자체 개발함은 물론 허브, 발전기, 증속기, 제어 시스템, 타워 등의 구성기기들을 설계/ 제작하여 750kW급 가변속 피치 제어형 Geared Type 풍력발전시스템을 개발하였으며 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 750kW급 가변속 피치 제어형 풍력발전시스템의 설계/제작
 - 국내 풍황에 적합하도록 자체 설계한 에어포일의 블레이드
 - 가변속 구현을 위한 이중 여자 유도발전기 및 제어 시스템
 - 1단 유성 스퍼/2단 평형 헬리컬 구조의 경량화 증속기
 - 전기 구동 방식의 피치 및 요 시스템과 강제 원통형 타워

- 허브, 주축, 메인 프레임 등의 강구조물 설계/제작
- Bladed for windows를 활용한 시스템 해석 기법 개발
 - Design Load Case 해석을 통해 시스템 설계를 위한 부하 산정
 - 극한 하중 해석 및 피로 해석
- 블레이드 구조 해석 및 설계 기술의 확립
 - 유한요소법을 이용한 블레이드 구조 해석
 - 블레이드 제작 설계
- 국내 풍황에 적합한 자체 에어포일의 설계
 - 최적설계기법을 이용한 에어포일 설계
 - 2D/3D 풍동시험을 통한 에어포일 및 블레이드 성능 측정

특히, 본 연구에서는 시스템 설계에 있어서 중요한 개념설계 단계에서 풍력발전시스템의 급속한 대용량화를 고려하여 MW급에 적용되는 가변속 피치 제어 기술을 채택함으로써 기술의 완성도를 높였으며, 베어링 등 이외에는 블레이드를 포함하여, 허브, 증속기, 발전기, 제어 시스템, 타워, 메인 프레임 등의 모든 구성기기를 자체 설계/제작하고 시스템 해석을 수행함으로써 중형급 풍력발전시스템의 설계/제작 기술의 자립화 기반을 확보하였다. 또한, 세계적으로 시장에서 수용되는 기술이 MW급 기술이므로 개발 결과의 시장 수용성은 낮지만, 시스템 설계/제작 기술을 자체적으로 확보하였기 때문에 상시 상용화뿐만 아니라 구성기기 자체만으로도 사업화가 가능할 수 있을 것으로 여겨진다.

따라서, MW급의 적용 기술을 채택함으로써 대형 풍력발전시스템 개발 기술의 기반을 확보하였을 뿐만 아니라 구성기기 대부분을 자체적으로 설계/제작함으로써 풍력 발전 시스템의 상용화 및 유지보수 기반 기술이 확보되었다고 판단되며, 본 연구 개발의 성과를 풍력발전 구성기기 및 시스템의 기술성숙도와 성능 향상을 위한 R&D 플랫폼으로 활용하면서 풍력발전용 구성기기, 풍력발전 시스템 기술 수준 및 시장 요구 간의 기술적 Gap을 확인하고, 최적화하는 기술개발 사업을 지속적으로 수행 하여 국산 기술 및 제품의 경쟁력 제고를 도모하는 데 활용할 수 있을 것으로 사료된다. 또한, 기술개발 성과의 응용을 통하여 증속기, 발전기 등을 포함한 구성 기기 및 시스템 제작, 공급 사업 등을 수행함으로써 풍력발전시스템의 보급 확대 및 국산품의 상용화에 기여할 것이다.

후 기

본 연구는 산업자원부 & 에너지 관리 공단의 대체·청정 에너지 및 자원기술개발 사업의 지원을 받아서 수행한 연구 결과입니다.

참 고 문 헌

1. 750kW급 Geared Type 풍력발전시스템 개발 1차년도 보고서, 2002
2. 750kW급 Geared Type 풍력발전시스템 개발 2차년도 보고서, 2003
3. Development Status of Medium size Wind turbines in Korea, 3차 한중세미나 자료집, 2003
4. 750kW급 Geared Type 풍력발전시스템 개발 최종 보고서, 2005