

# 750kW Gearless형 풍력발전시스템 국산화 개발

류지윤\*, 김두훈, 박진일, 황진수, 변철진, 김대현, 방조혁, 장성태  
정진화\*\*, 전중환\*\*, 김동언\*\*, 오종석\*\*

유니슨주식회사\*, 포항풍력에너지연구소\*\*

## 요 약

본 연구는 2001년 12월부터 2004년 12월까지 정부지원으로 유니슨(주)가 개발을 주관하고 포항공과대학교 및 국내 관련 기업이 참여한 콘소시엄에서 개발한 750kW Gearless형 풍력발전시스템의 국산화 개발에 관한 연구결과로서 풍력발전시스템의 하중평가, 구성요소품의 설계 결과와 블레이드, 발전기 및 전력변환장치 등 개발요소품의 성능시험결과와 국제 설계인증 추진 및 시제품 제작에 대한 내용을 포함하고 있다.

## 1. 서 론

대형 풍력발전기의 기술동향은 크게 고전적 개념의 덴마크형 풍력발전기(Danish Type WTGS)의 기술변천과 기어리스형 풍력발전기(Gearless Type WTGS)의 기술변천으로 구별될 수 있다.

첫번째 개념으로, 고속증속기와 농형유도발전기(induction generator)를 사용한 덴마크형 풍력발전기는 대형풍력발전기에서 요구되는 가변속제어가 가능한 형태로의 발전을 추구하면서(고속증속기+DFIG, double fedly induction generator)와 전력변환장치를 사용하는 개념으로 발전하여 현재 시장에 공급되는 풍력발전기의 한 주류를 형성하고 있다.

두번째 개념으로는 기어장치(증속기)를 제거하고 저속동기발전기를 사용하고 인버터를 이용하여 계통과 연계되는 기어리스형 풍력발전기이다.

국내에서는 당사가 2001년 12월부터 750kW급 Gearless형 풍력발전기의 개발을 수행하였다. 증속기를 제거하여 로터와 발전기를 직결하는 형태인 직접구동형(direct drive) 풍력발전기는 동력전달장치의 구성이 단순해져 간결한 시스템의 구성이 가능하고, 빈번히 발생되고 있는 증속기의 파손 위험을 사전 제거할 수 있

다. 또한 풍력발전기 전 운전풍속 영역에서 가변속(variable speed)운전이 가능함으로 정격풍속 미만의 출력구간에서 최대 동력계수( $C_{p_{max}}$ )의 영역에서 운전이 가능하여 출력효율 향상과 바람에 의한 급격한 토크의 변화가 동력전달장치로 전달되지 않으므로 시스템의 내구성을 증대시킬 수 있는 잇점이 있다.

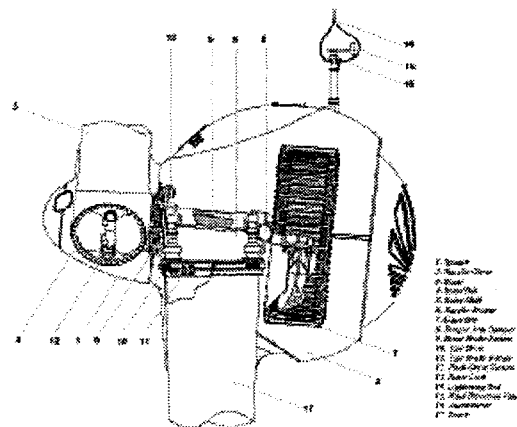
본 연구에서는 국내에서 처음으로 시도된 750kW Gearless 풍력발전기의 시스템 설계, 구성요소품 설계 및 성능시험결과 그리고 시제품의 제작과정을 살펴보고자 하였다.

## 2. 본 론

### 가. 시스템 개요

#### 1) 시스템의 외형 및 구성

750kW Gearless형 풍력발전기는 3엽 날개, 전방위형(upwind) 및 50m의 날개직경을 갖는 수평축 풍력발전기이다. 터빈로터(turbine rotor)와 나셀은 회전중심높이 50m 또는 60m인 원통형 타워상부에 설치된다. 기계 장치부는 블레이드, 로터 허브, 피칭시스템으로 구성된 로터시스템과 동력전달장치, 기계의 주 구조물(machine structure), 발전기, yawing시스템 및 브레이크 및 유압장치로 구성된 나셀(Nacelle)로 구성되어 있다. 또한 제어장치부는 풍력발전기가 환경조건에 적합토록 자동운전이 가능한 주제어반과 타워하부에 설치된 보조 제어반으로 구성되고 원격 및 지상에서 시스템의 상태를 감시 및 제어할 수 있는 모니터 장치로 구성된다. 그림 1은 750kW급 Gearless형 풍력발전 시스템의 내부구성도이다.



[그림 1 : Nacelle layout of KBP-750D(U50)]

2) 시스템의 주요사양

본 개발시제품의 주요사양은 표 1과 같다.

<표 1 : Specification of KBP-750D(U50)>

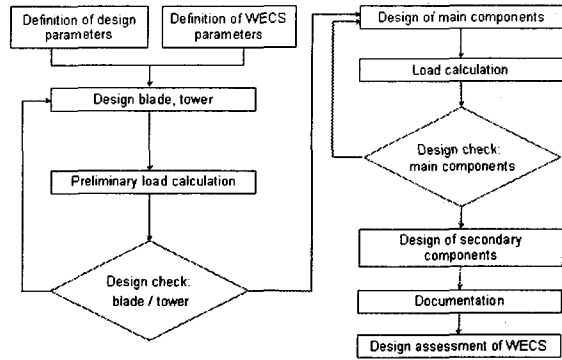
	정격출력(kW)	750
설계풍속	시동풍속(m/s)	3
	정격풍속(m/s)	12
	정지풍속(m/s)	25
	한계풍속(m/s)	70
발전기	형식	영구자석형 동기발전기
	정격출력	805 kw
	정격주파수	17.5 Hz
회전자	회전자 직경(m)	50
	회전속도(rpm)	9~28
	정격회전속도(rpm)	25
	허브 높이(m)	50 / 60
브레이크 시스템	full feathering pitch	Three independent electric motor
	mechanical disk brake	Hydraulic
	계통연계장치	AC/DC/AC, IGBT, PWM제어
	요잉 시스템	Electrical active yaw
	출력제어방식	Pitch control regulated
	설계등급	IEC Class IA
	형식 승인	Germanisher Lloyd
블레이드	재질	Glass / Epoxy
	형상	AE02-xxx / NACA634xx
	길이	23.9 m
	중량	2360 kg

나. 풍력 발전 시스템 설계

풍력발전기의 설계조건은 IEC 61400-1, GL사 Guideline등에 규정되어 있으며, 개발 시제품은 이러한 표준규격에 요구하는 조건에 적합토록 설계 되었다. 풍력발전기 예비설계 단계에서 설계대상 기종의 형식등급(Type class), 로터 직경, 허브 높이, 출력제어방식 등에 대한 기본 설계조건을 결정한다. 풍력발전기의 형식등급은 IEC 61400-1 규격에서 정의하는바와 같이 설계조건의 평균풍속, 극한풍속, 난류강도 등에 의해 결정된다. 표 2는 IEC 61400-1 규격에 정의된 풍력발전기의 형식등급을 표기하였다.

<표 2 : Basic parameters for wind turbine classes >

WTGS class	I	II	III	IV
$V_{ref}$ (m/s)	50	42.5	37.5	30
$V_{ave}$ (m/s)	10	8.5	7.5	6
A	$l_{15}$ (-)	0.18	0.18	0.18
	a (-)	2	2	2
B	$l_{15}$ (-)	0.16	0.16	0.16
	a (-)	3	3	3



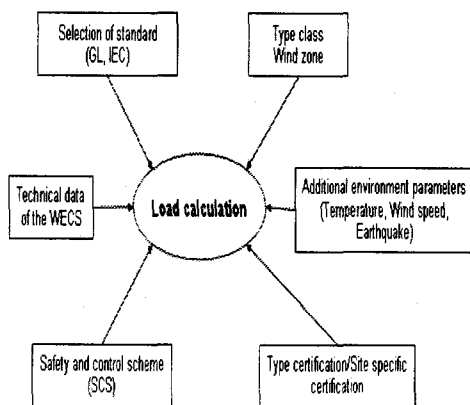
[그림 2 : Design process of wind turbine system for U50]

본 연구에서 개발된 시제품은 IEC Type Class IA 조건에 맞게 설계되었다. 그림 2는 시제품개발에 적용된 시스템의 설계절차를 도시하였다.

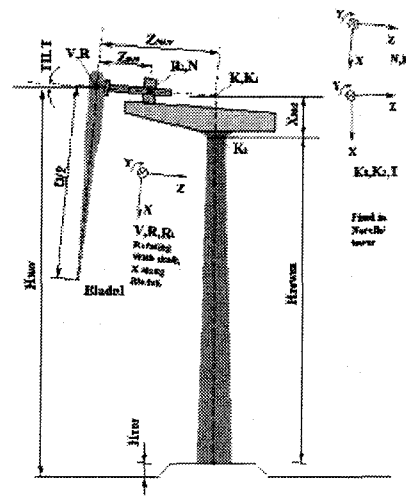
### 1) 시스템의 하중계산

풍력발전기의 설계수명은 IEC 및 GL에서 20년으로 규정하고 있다. 하중계산 (Load calculation)은 20년의 수명기간 동안 인명 및 시스템의 안전은 물론 풍력발전의 효율성과 신뢰성을 확보하기 위한 종합적인 설계정보를 계산하는 것으로서, 풍력발전기 설계시 매우 중요한 절차이다.

시스템의 하중계산은 IEC 61400-1 규격에서 정의된 총 8가지의 운전조건에 대한 각 하중조건을 적용한다. 이때 요구되는 입력 값은 그림 3에서 보는바와 같이 적용규격, 시스템의 형식등급 및 주요 재원, 제어 알고리즘 등 이다. Fig. 4은 풍력발전기의 하중계산에 사용되는 좌표계를 도시한 것이다.



[그림 3 : General input parameters for load calculation]



[그림 4 : Coordinate system for load calculation]

본 연구에서는 하중계산을 위해 세계적으로 많은 제작사들이 사용하고 있는 상용 Software인 Flex5(덴마크)를 사용하여 하중계산을 수행하였다.

본 연구에서 적용된 설계풍속은 IEC 61400-1 Type class IA로서 연평균풍속  $V_{ave} = 10 \text{ m/s}$ , 50년 극한풍속  $V_{e50} = 70 \text{ m/s}$ , 난류강도  $I = 18\%$  이다.

각 기계장치의 설계하중을 결정하기 위해 계산된 하중을 분석하여 극한하중, 피로하중을 계산하였다. 극한하중은 전체 하중조건에서 6개의 자유도에 대한 최대값을 선택하였으며, 피로하중은 20년의 운전조건에 대한 하중이력을 Rain-flow counting한 후 식(1)을 이용해 6개의 자유도에 대한 유효등가하중(Effective equivalent load)을 계산하였다.

$$\sigma_e = \left[ \frac{\sum_i (\sigma_i)^m n_i}{N_e} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (1)$$

표 6은 하중계산을 통해 결정된 구동장치의 극한 설계하중을 표기한 것이며, 로터의 2차 임계속도 29 rpm 이상에서 로터 브레이크 작동에 의한 비상정지 조건에서 2,000kNm의 최대 회전토크가 발생하였다. Table 7은 20년 수명에 대한 구동장치의 설계 피로하중을 계산한 후 Rain-flow counting 하여  $N = 10^8$  사이클에 대한 유효등가하중을 계산한 것이다.

<표 3 : Extreme design load for the drive train>

Fx-N	Fy-N	Fz-N	Mx-N	My-N	Mz-N	Operation condition
310.5	-71.3	26.7	28.4	-579.9	-5.8	Ready for operation
248.9	-284.3	-268.5	-268.5	-822.6	-3.1	Ready for operation
194.3	-2.9	-158.3	-158.3	-69.5	364.3	Normal power production
6.3	-215.7	-1190	-1199	-394.3	10.1	Ready for operation
197.9	90.9	377.5	377.5	-2000	446.7	Normal power production
185.8	-6.1	86.5	86.5	-111.9	1253	Emergency stop 1

<표 4 : Fatigue design load for the drive train>

Slope of S-N curve m	$\Delta Fx-R1$ [kN]	$\Delta Fy-R1$ [kN]	$\Delta Fz-R1$ [kN]	$\Delta Mx-R1$ [kNm]	$\Delta My-R1$ [kNm]	$\Delta Mz-R1$ [kNm]
3	311.74	311.28	41.02	571.09	575.15	64.29
4	292.56	292.14	44.83	574.63	578.64	83.79
6	274.66	274.28	53.61	633.47	635.38	113.92

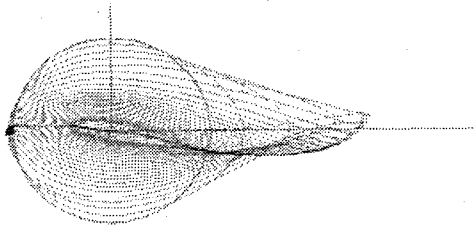
## 2) 블레이드 설계

블레이드 공력설계 결과 공력의 기여도가 가장 큰 익단에서 허브방향으로 70%까지 NACA 63-series 익형을 이용하였다. 블레이드 뿌리부근의 내측에는 두꺼운 익형을 사용하여 구조강도를 확보하고, 큰 받음각에서도 좋은 성능을 낼 수 있는 AE02-series 로 선정하였다. 허브와 블레이드 연결부는 원통형 익형을 배치하였다. 또한 최대 코드길이가 배치되는 곳에 코드에 대한 두께비를 약 40%로 하여 공력 성능과 구조강도의 요구조건이 만족하도록 설계하였다. 표 5 및 그림 5는 공력설계를 통해 선정된 KBP-750D(U50)의 블레이드 익형이다.

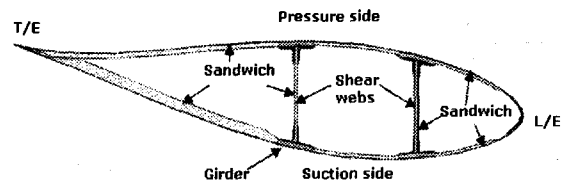
블레이드의 기본 단면은 그림 6과 같이 표피와 스파 구조로 이루어져 있으며, 스파는 다시 4개의 스파 캡과 상하 스파 캡을 지지하는 2개의 웹으로 이루어져 있다. 표피는 전체 공력형상을 유지하며 비틀림과 전단력을 지지토록 설계되었다.

<표 5 : Profiles of airfoil for UNISON U50>

Radius (m)	Profile
0.8	Cylinder
1.5	Cylinder
5.5	AE02-xx
7.4	AE02-xx
10	AE02-xx
13.5	AE02-xx
17	NACA 63xxx
25	NACA 63xxx

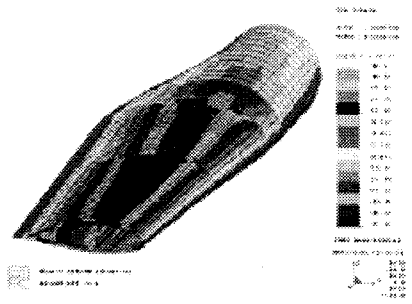


[그림 5 : Front view of rotor blade of KBP-750D(U50)]

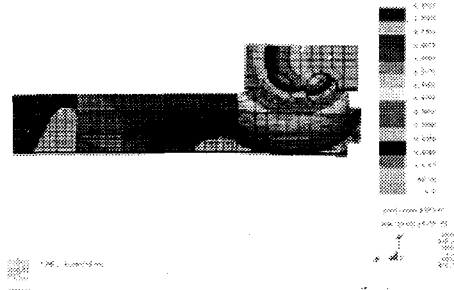


[그림 6 : Basic structure of rotor blade of KBP-750D(U50)]

블레이드 재료는 Glass/Epoxy 재질의 일방향 프리프레그와 45도 직조 프리프레그를 사용하였으며, 코아재료를 사용한 샌드위치가 Shell에 적용되었다. 허브와의 조립은 T-bolt를 사용하였다. 그림 7은 블레이드의 구조해석 결과 및 T-bolt 조립부의 구조해석 결과를 나타낸 것이다.



(a) Blade structure



(b) T-bolt connection

[그림 7 : Structural analysis of rotor blade]

### 3) 기계장치 구성품 설계

각 기계장치 구성품은 그림 2에서 제시된 설계절차를 적용하여 IEC 61400-1 규격 및 GL 규정을 만족하도록 설계를 수행한다. 또한 시스템의 하중계산을 통해 결정된 설계하중을 적용하여 극한강도 및 피로수명을 계산하여 각 요소품의 구조적 건전성을 평가 할 수 있다.

극한 풍속에 의한 풍력터빈의 극한강도는 식(2)과 같이 안전여유(Safety margin),  $S_{St} \geq 1.0$  의 조건을 만족해야 한다.

$$S_{St} = \frac{\sigma \times \gamma_F}{\sigma_a / \gamma_M} \geq 1.0 \quad (2)$$

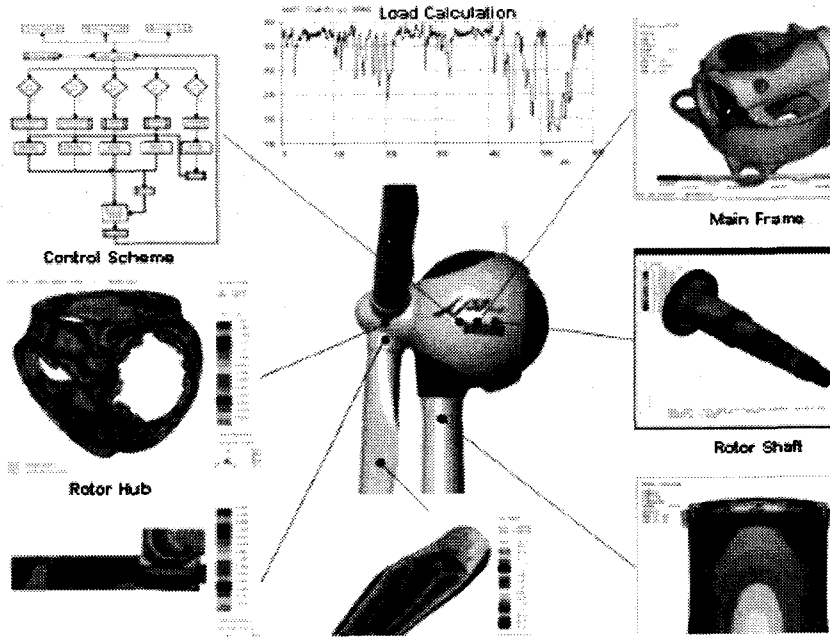
여기서  $\sigma$  는 하중,  $\sigma_a$ 는 재료의 허용응력,  $\sigma_F$  는 하중의 안전계수,  $\sigma_M$  는 재료의 안전계수이다.

또한 20년 동안 반복적인 하중에 의한 풍력발전기의 피로수명은 식(3)와 같이 손상(Damage),  $D \leq 1.0$  의 조건을 만족해야 한다.

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \leq 1.0 \quad (3)$$

여기서  $n_i$  는 작용하중의 빈도,  $N_i$  는 재료의 피로수명 이다.

750kW 풍력발전기 개발시제품의 공력하중에서 계산된 설계하중을 적용하여 그림 8의 주요 기계장치를 설계하였다. 설계하중에 의한 극한강도 및 피로수명 평가를 위해 FEM 해석을 수행하였다.



[그림 8 : Machine components design of UNISON U50]

<표 6 : Design results of machine components >

Component	Material	Weight (kg)	Manufacturing
Rotor hub	EN-GJS-400- 18U-LT	2,212	Casting
Rotor shaft	42CrMo4V	5,020	Forging
Main frame	S355 J2G3	3,760	Welding
Tower	S355 J0	49,510	Welding

#### 4) 설계인증 현황

앞서 설명한 바와 같이 풍력발전 시스템을 구성하는 전기제어 시스템은 크게 발전기 전력변환장치, 제어장치로 구성된다. 개발시제품에 사용된 각부품의 세부 설계 과정과 결과들은 타 논문에서 발표된 바가 있어 기본설계 제원만 정리하면 다음과 같다.

##### ① 발전기

발전기는 자속방향이 Radial flux인 영구자석형 동기발전기를 채택하였다. 324.5kNm의 정격 입력토크에 대하여 정격 회전수(25rpm)에서 805kW의 정격출력이 발생되도록 설계되었다. 발전기 내부 공극(air gap)의 기밀 확보를 위해 완전밀폐형구조로 설계하고 수냉각 방법을 설계에 반영하였다.



<표 7 : Specification of Generator(RFPMG)>

Electrical parameter	
Type	RFPMG
Nominal rotating speed	25 rpm
Drive torque	324.5 kNm
Rated power	805 kW
Nominal frequency	17.5 Hz
Efficiency	95.6 %
Full load voltage( $V_{L-L}$ )	780 $V_{rms}$
No load voltage( $V_{L-L}$ )	824 $V_{rms}$

### ② 인버터시스템

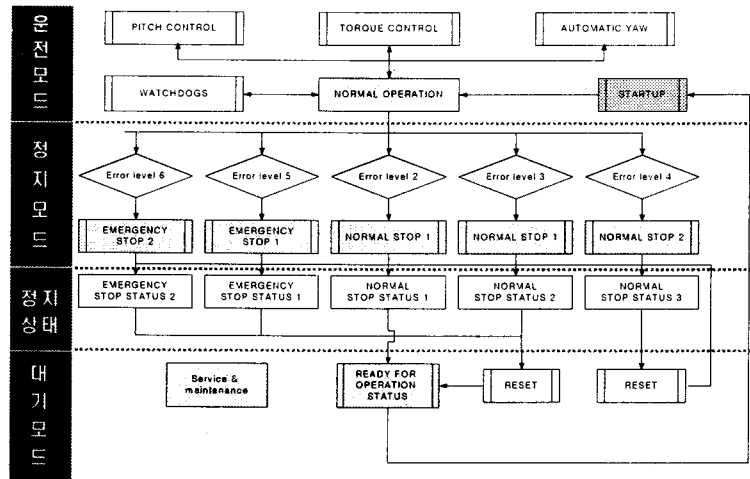
인버터시스템은 발전기에서 생산된 교류전력을 직류로 변환하는 컨버터부와 직류전력을 저장하는 DC link부 그리고 직류를 계통에서 요구하는 전압으로 변환하는 인버터부로 구성되어 있다. 컨버터부는 발전기의 출력이 최대가 되도록 벡터제어기법을 이용한 최대토크 추종제어를 수행하며, DC link부는 변환된 직류전력을 커패시터에 충전하고 순간 과전압에 대한 보호를 위하여 dynamic braking resistor에서 방전되도록 구성되어 있다. 또한 인버터부는 PWM 제어를 통하여 계통의 위상과 동기화가 되도록 구성함으로써 안정적인 계통연계가 되도록 설계되었다.

<표 8 : Specification of Inverter system>

Parameter	Value
Type	AC/DC/AC Inverter
Control	Power regulation
Rated power	750 kW
Output voltage	690 V
Output frequency	60 Hz

### ③ 제어시스템

제어시스템은 IEC 및 GL의 제어 및 보호성능 기준에 만족되도록 설계되었다. 특히, 관련규정에서 요구한 시스템의 안전조건과 장치등을 설계에 충분히 반영하여 시스템의 운전시 기계적, 전기적 위험의 회피기능을 고려하여 설계되었다. 그림 9는 이에 대한 기본적인 운전절차를 나타내고 있다.



[그림 9 : Basic Control Scheme]

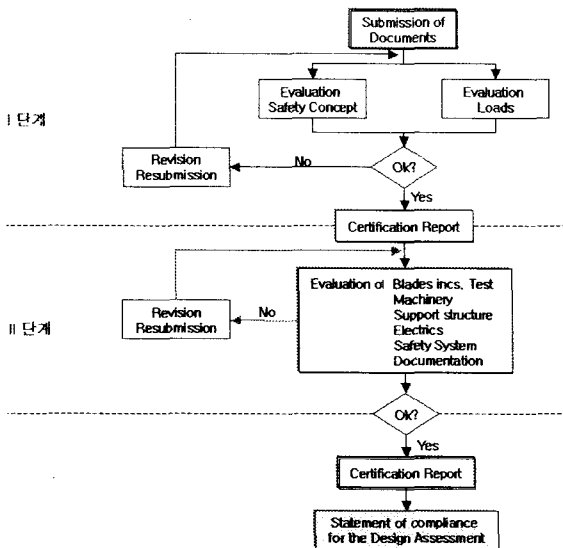
#### 다. 설계인증 현황

KBP-750D 풍력발전 시스템의 설계 및 표준적용의 적합성, 기술적인 요구사항의 만족여부 등 개발과정의 신뢰성 및 시스템의 안전성을 객관적으로 검증하기 위한 목적으로 국제적 인증기관인 독일 GL(Germanischer Lloyd)사로부터 설계인증 (Design Evaluation) 획득을 추진하였다.

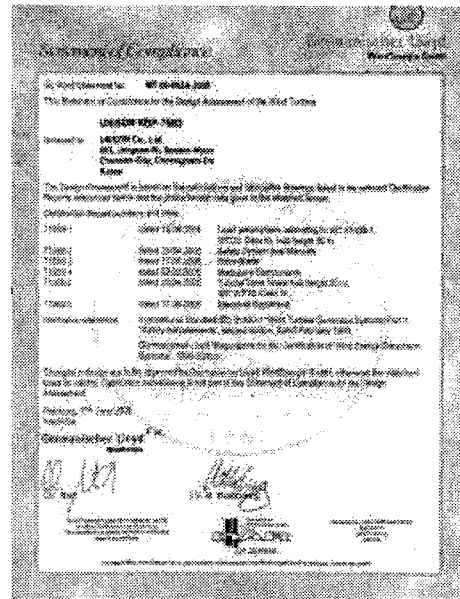
설계인증과 관련하여 IEC WT01이 요구하는 평가항목은,

- ▶ 시스템의 하중계산 및 제어개념
- ▶ 로터 블레이드 설계
- ▶ 기계장치 설계
- ▶ 전기장치 설계
- ▶ 타워설계
- ▶ 안전성 평가자료 및 매뉴얼

와 같으며, 관련 문서 및 설계 자료를 GL사 제출하여, 그림 10과 같은 추진 절차로 설계인증을 수행하여 독일 Germanischer Lloyd사로부터 설계인증서를 획득하였다.



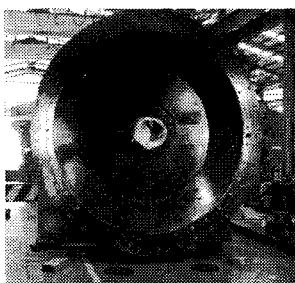
[그림 10 : Procedure of the design evaluation]



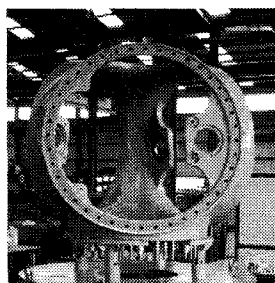
[그림 11 :Design Certification for KBP-750D]

## 라. 시제품제작

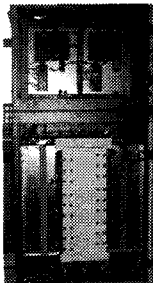
750kW Gearless 풍력발전기의 시제품은 크게 베어링, 구동용 모터, 센서, 스위치 등의 구입부품에서, rotor hub, main shaft, machine frame, drive train 등 기계 장치 요소품과 발전기, 인버터, 블레이드, 타워 등 시스템 요소부품 단위별로 자체 또는 국내 전문제작사 등에서 개발 제작되었으며, 당사 조립공장에서 이들 요소품의 하부 조립체(sub assembly)인 로터조립체, 나셀조립체 등이 조립된 후 시스템 전체 조립이 진행되었다. 그림 12는 개발된 시제품의 요소부품들의 전경이며 그림 13은 통합시험을 위해 타워와 블레이드만 제외하고 최종 조립되어 있는 시제품의 전경이다.



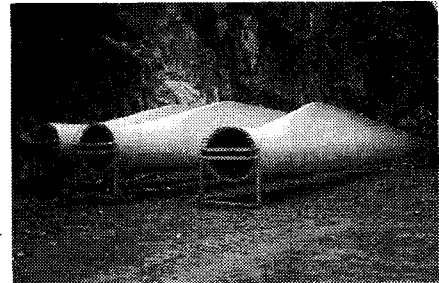
(a) 발전기



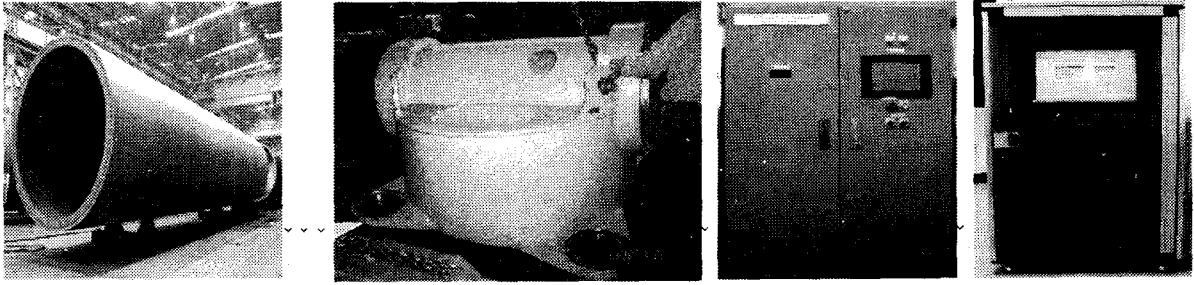
(b) 로터허브



(c) 인버터 시스템

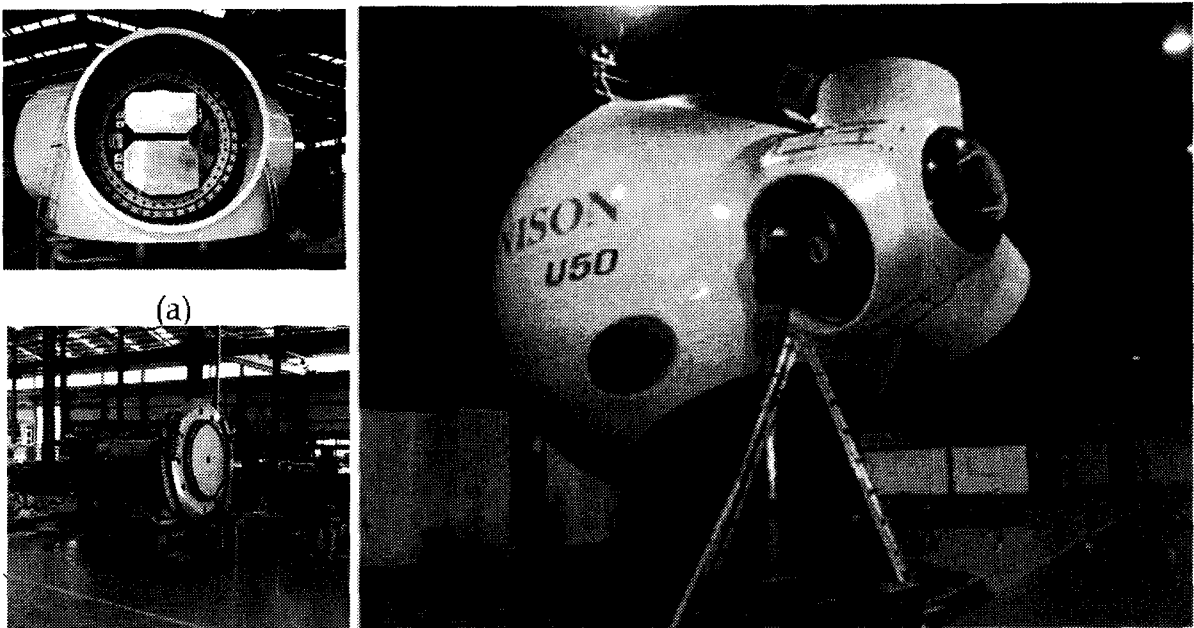


(d) 블레이드



(e) 타워                      (f) 나셀구조물                      (g) 제어시스템                      (h) 모니터링 장치

[그림 12 : 750kW gearless 풍력발전기의 요소부품 및 하부조립체]



(a)

(b)

(c)

(a) rotor assembly, (b) nacelle assembly, (c) Final assembly

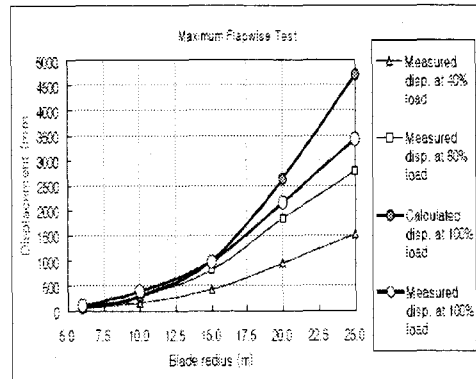
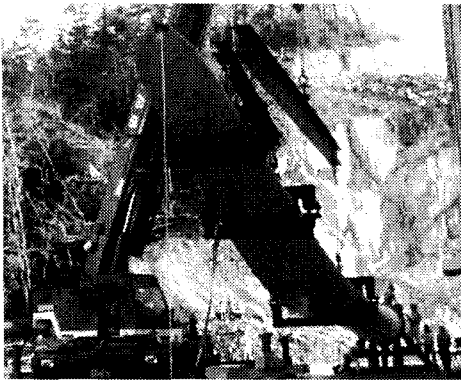
[그림 13 : 조립 완료된 750kW Gearless 풍력발전기 전경]

#### 가. 요소부품의 시험 및 평가

시제품은 ISO, EN, GL, IEC 등에서 규정된 품질검사 및 시험검사 요구조건을 만족하도록 제작되었으며 주요 요소부품인 발전기, 블레이드 및 인버터는 실제 제품의 성능평가를 수행하였다.

### 1) 블레이드 정하중 구조시험

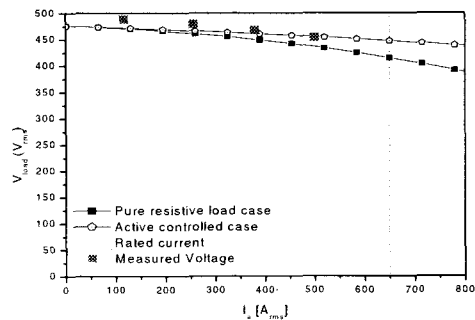
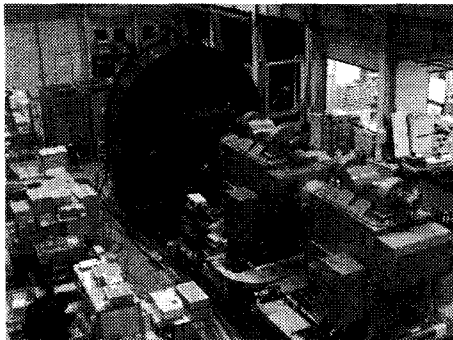
블레이드 정하중 구조시험은 인증기관인 Germanischer Lloyd사의 입회하에 수행되어야하는 설계인증서 발행의 필수 요구조건이다. 시험 절차는 flapwise 및 chordwise 고유진동수 측정, flapwise 하중시험, chordwise 하중시험 순으로 진행되었으며 각각의 시험조건에 대하여 블레이드는 파손되거나 규정에서 정한 허용한계치를 넘지 않아야한다.



[그림 13 : Blade flapwise static test and measured deflection ]

### 2) 발전기 성능시험

발전기의 성능시험은 한국전기연구원에 의뢰하여 시험 하였으며 시험 설비의 구성은 1100kW급 전동기 및 Drive System을 이용하여 38:1의 감속기를 통해 발전기를 구동시키게 구성하였으며, 시험 설비의 운전 가능 영역 내에서 무부하시험, 부하시험, 온도 특성 시험 등을 수행하였다.

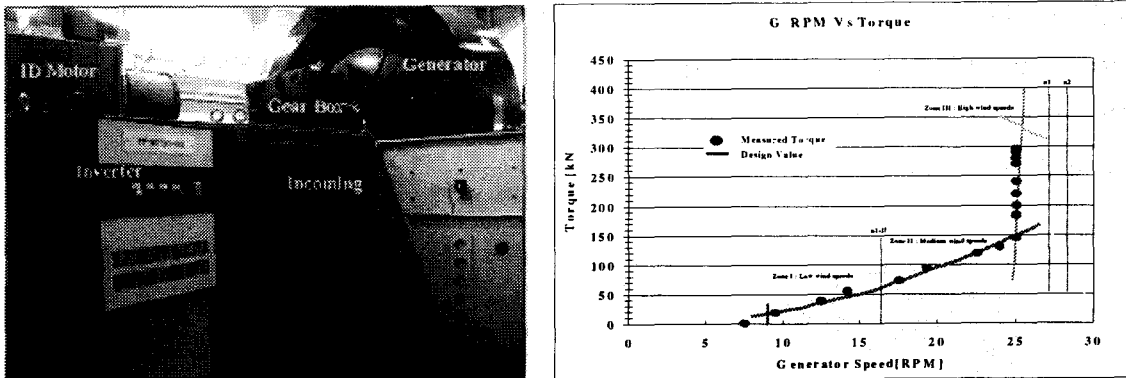


[그림 14 : 발전기 성능시험 전경과 측정결과]

### 3) 인버터 성능시험

인버터 성능시험은 국책연구기관인 전기연구원에서 실시하였으며, 효율, 고조파,

토크제어 및 보호성능 등 인버터 성능 검증과 내전압, 절연저항 및 온도상승 등 설비 안전성에 대한 검증시험을 수행하였다.



[그림 15 : 인버터 성능시험과 토크제어 성능시험 결과 그래프]

### 3. 결론 및 향후계획

풍력발전시스템 개발은 개념설계, 예비설계, 상세설계의 절차를 거쳐 요소부품 개발과 시제품개발, 요소품의 성능평가 그리고 시스템 통합과정(system integration)이 필요한 장기간의 노력과 높은 기술 성숙도를 요구하는 분야이다. 특히 상당한 부분의 국산요소품을 적용한 시스템의 국산화 개발에는 풍력기술의 선진국인 유럽지역과 비교할 때 상당한 어려움과 높은 위험도를 요구하고 있다. 유럽지역의 경우는 부품공급 인프라가 잘 확보되어 있어 발전기, 블레이드, 제어 장치, 전력·전자장치 등의 요소부품들은 풍력분야의 오랜 경험과 높은 제조기술을 보유한 품목별 전문기업들로부터 설계조건에 적합한 부품을 원활히 공급받을 수 있는 반면, 국내의 실정은 시스템개발의 범위 내에 발전기, 블레이드, 인버터 등 주요 요소부품들의 개발을 동반해야 하는 어려움이 있고, 특히 이런 과정에서 부품개발의 위험도가 시스템 개발의 위험으로 전가됨으로 풍력발전기 전체 시스템의 국산화 개발에 많은 위험요인을 제공하고 있다. 따라서 유럽 기술선진국과 비교할 때 비교적 오랜 개발기간을 요구하고 있는 실정이며 본 과제 또한 개발 시제품의 현장실증 시험을 남겨두고 있는 상태이다.

본 연구과제는 정부주도로 국내 관련 기업들의 상호 경쟁과제 형태를 도입하여 수행하였으며, 금번 750kW gearless형 풍력발전시스템의 개발을 통해 다음과 같은 성과를 얻었다.

1. 기어리스형 풍력발전시스템의 개념설계 기술 확보
2. 풍력발전시스템의 하중예측 및 평가 기술의 습득
3. 풍력발전시스템 각 구성요소 부품의 설계 기술 확보 및 적용 가능한 수준의

## 기술 확보

4. 풍력발전시스템의 국제 설계인증을 통한 개발 시제품의 설계 신뢰성확보 및 인증평가 기술 습득

5. 시제품의 개발을 통해 각 부품의 제조기술 확보 및 시험평가 기술 확립

## 4. 향후연구계획

개발된 시제품은 정부가 조성한 대관령지역 “풍력실증연구단지”내에 금년 11월 설치되어 출력성능측정, 소음측정 및 평가, 전력품질측정, 하중측정 및 평가 등의 성능평가가 수행될 예정이다.

## 5. 후 기

본 연구는 산업자원부에서 시행한 에너지 자원기술개발 사업의 지원으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

1. Guidelines for Design of Wind Turbines, 2nd Edition, DNV and Risø, 2002.
2. IEC 61400-1 Wind Turbine Generator Systems - part 1: Safety Requirements, 2nd Edition, 1999.
3. Regulations for the Certification of Wind Energy Conversion Systems, Germanischer Lloyd, 1999.
4. H. J. Sutherland, On the Fatigue Analysis of Wind Turbines, Sandia National Laboratories, 1999.
5. R. Gasch, J. Twele, Wind Power Plants, Solarpraxis AG, 2002.
6. 김두훈 외, 750kW급 Gearless형 풍력발전 시스템 개발 2차년도 중간보고서, 2004.
7. 손영욱 외, 750kW급 직접 구동형 풍력발전장치의 부하계산, 2003 한국풍력기술 연구회 한국풍력기술 및 정책 Workshop, 2003.
8. 김두훈 외, 750kW급 Gearless형 풍력발전 시스템 개발 최종보고서 2004. 12.
9. Tony Burton 외, Handbook of wind energy