

# 해상용 풍력발전 시스템에 대한 소개 Introduction of Off-Shore Wind Turbine Systems

정맹화 · 고권성 · 유광택  
M. H. Jung, G. S. Goh and K. T. Yoo

## 1. 소개

해상용 풍력발전기(Off-shore Wind turbine)는 가까운 미래에 있어 중요한 에너지원이 될 것이다. 적어도 10년내에는 전세계의 바다위에 수천 MW 규모의 풍력발전단지가 조성될 것으로 생각되며, 국내에서도 수십 MW의 해상풍력발전단지가 건설되어 운전될 것으로 확신한다.

육상용(On-shore) 풍력발전기는 과거 짧은 시간 동안 거대하게 그 수가 증가하여 현재 덴마크 및 독일의 Schleswig Holstein주(독일), Gotland(스웨덴)등에서는 약 소비되는 전력의 10%를 감당하는 엄청난 양의 전력을 생산하고 있다. 해상 풍력발전단지는 육상에 건설된 풍력발전단지에 비하여 부지의 활용이 용이하며, 고출력발생이 가능하며, 무엇보다 육지보다 일정한 바람으로 인하여 피로하중(Fatigue Load)의 영향이 적으므로 더욱 경제적이라 할 수 있다. 하지만 현재에 해상용 풍력발전단지를 건설함에 있어서는 해상에 설치함으로 인한 과도한 설치비용 및 유지보수의 어려움등을 가지고 있다.

그러나 지속적인 연구개발로 건설단가는 현저하게 줄 것이라고 판단된다.

따라서, 본 보고서에서는 현재 전세계 해상용 풍력발전기로서 가장 큰 단위 용량 2.75MW 덴마크 NEG-Micon사의 해상용 풍력발전기에 대한 주요 구성품에 대하여 고찰 및 현재 해상용 풍력발전시스템의 시장과 향후 전망에 대하여 알아보고자 한다.

## 2. 해상용 풍력발전기 주요 구성품

### 2.1 특징 및 주요제원

2.75MW 풍력발전기는 지난 20년간에 걸친 풍력

발전기의 개발 및 설치, 생산, 운영등으로부터 경험에서 나온 결실이라고 할 수 있으며, 주요 특징 으로서는 가변 회전 속도를 가진 피치(Pitch)제어 방식이며, 권선형(Double-fed) 유도 발전기를 적용하고 있다. 주요제원은 표1과 같다.

표 1 주요제원

정격출력	2750 kW
정격전압	960 V / 670 V
회전자 지름	92 m
회전자 면적	6648 m <sup>2</sup>
회전자 속도(동기)	14.15 rpm
제어방식	PRVS
발전기 형식	Double fed asynchronous
주파수 변환기	IGBT PWM
제동 시스템	blade pitch, Disk brake
허브 높이	70 m

풍력발전기의 주요 구성품은 회전자(날개+허브), 너셀(Nacelle), 타워로 구성되며, 풍력발전기의 구동축인 너셀의 구성은 메인베어링, 메인샤프트, 기어박스, 발전기, 요 시스템 및 제동장치, 제어판넬로 구성되어 있다.

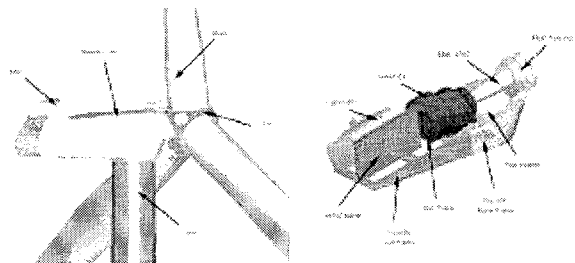


그림 1 풍력발전기 주요 구성품 및 너셀 구성품

### 2.2 메인 베어링 및 주축(Main bearing & Shaft)

그림 2에서와 같이 메인 베어링은 고 품질의 2중 구형 물러로 구성되어 있으며, 베어링 하우스내에는 규칙적으로 오일 베스(Oil bath)로부터 오일이 공급되며, 오일은 오일펌프에 의해 자동적으로 오일

접수일 : 2002년 11월 15일  
정맹화(책임저자) : 주식회사 STX 기술연구소  
E-mail : mhjung@stx.co.kr Tel. 055-280-0153  
고권성, 유광택 : 주식회사 STX 기술연구소

탱크로부터 필터를 거쳐 공급되며, 과도한 오일이 주입될 경우 다시 그 양 만큼 오일탱크로 환원된다.

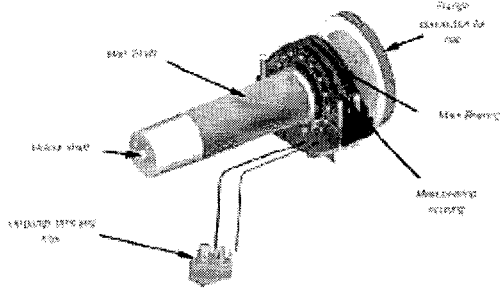


그림 2 메인베어링 및 주축

주축은 전단부의 주축베어링 및 기어박스 입력축에 연결되어 있다. 특히 주축은 중공축(Hollow shaft)로서 너셀로부터 허브내 유압시스템용 전력공급 및 통신선로등의 통로 역할을 수행한다.

2.3 기어박스(Gearbox)

풍력발전기 구동축(Power train)을 구성하는 구성품중 기어박스는 다른 구성품보다 더 중요하다고 할 수 있다. 특히, 비선형인 회전자로부터 전달되는 힘을 안정하게 발전기를 구동 가능케 하도록 증속을 시켜야 한다는 측면에서 볼 때 기어박스의 신뢰성 및 강인성은 무엇보다 중요하며, 특히 해상용 풍력발전기인 경우 기기의 문제로 인하여 교체해야 한다면 그 비용은 상당할 것으로 판단한다. 간략하게 기어박스의 제원은 표 2와 같다.

표 2 기어박스 주요 제원

형식	3-stage planet/helical hybrid
기어하우징 재질	Cast
기어비	1: 70.65
동력	2750 kW
굽힘강도	Sf > 1.6 (ISO 6336)
스커플링 안정도	Ss > 1.3 (DNV41.2)

기어박스의 형상은 아래 그림3과 같다.

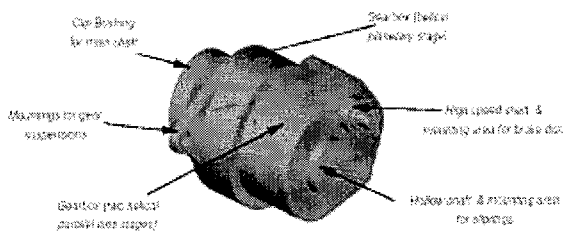


그림 3 기어박스 형상

그림 3에서의 완충장치(Suspension)는 회전자로부터의 힘(Load)을 지탱가능하도록 3점 완충장치로 구성되어 있으며, 비선형인 회전자로부터 가해지는 모든 하중에 견딜 수 있도록 IEC 규격등에 부합하는 안전율(Safety factor)을 가지고 설계되어 있다.

특히 해당 기어박스는 육상용(On-shore)으로 적용된 기종 기어박스에서 발생되었던 모든 결함을 해석, 재설계 및 검증된 시스템일 뿐 아니라, 특별히 해상용에 적용 가능토록 설계되어 있다. 전체적인 기어비는 발전기의 기준속도에 대해 날개 중단 속도가 최적화 될 때의 기어비로 선정되며, 출력제어는 날개각도조절 및 날개속도의 변화 등에 의한 조합에 의해 영향을 받게 된다.

기어박스내 저속축계는 중공축이며, 기어박스내에 함몰되어 취부되며, 연결부위는 강한 클립부싱에 의해 고정된다. 해당 연결부위는 3점 완충장치의 한 부분으로 운전간 발생가능한 얼라어먼트를 잡아주는 역할을 수행한다. 기어박스의 고속축계는 디스크 브레이크 및 발전기 축과 연결된다. 기어박스의 하우징은 기어박스내 모든 기어 및 베어링의 윤활 및 냉각용 오일을 담고있는 오일탱크로서의 부가기능을 가지고 있으며, 기어박스 하단에 외부 윤활 및 냉각시스템과 직접 연결되어 있다.

2.4 윤활 및 냉각시스템

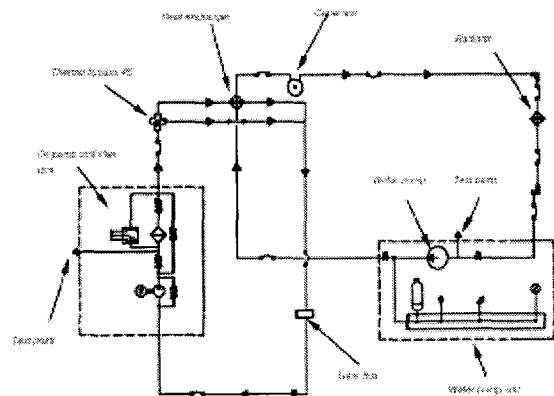


그림 4 윤활 및 냉각시스템

그림 4에서 보여지는 외부 윤활시스템은 3가지 주요한 기능을 가지고 있다. 즉, 기어오일의 순환, 필터링, 기어오일 냉각 이며, 데워진 기어오일은 냉각된 냉각수와 함께 지나가도록 제작된 열 교환기(Heat exchanger) 및 오일 필터를 거친 오일을 순환시켜 다시 기어박스내에 동작중인 기어 및 베어링을 냉각시켜주는 역할을 수행한다. 냉각수는

발전기 운전중 발생하는 열을 제거하는 역할 및 열 교환기내에서 기어오일을 냉각시키는 이중 역할을 수행하며, 데워진 냉각수는 너셀 상단의 라디에이터(Radiator)에 의해 다시 냉각되어 워터펌프에 의해 다시 순환되는 매우 간단하면서도 효율적으로 기어박스 및 발전기로부터 발생하는 열을 냉각시킨다.

수냉식 방식으로 기어오일 및 발전기를 냉각시킨다는 것은 너셀내에 공기흐름이 없음을 의미하며, 다시말해서, 너셀을 밀봉시킴으로써 바다바람으로 유입되는 염분, 먼지등의 이물질을 차단하는 역할을 함으로써 너셀내 구성품들의 부식등을 방지할 수 있다. 특히, 비상정지 상태 외에는 연속적으로 운전된다.

### 2.5 회전자 시스템(Rotor System)

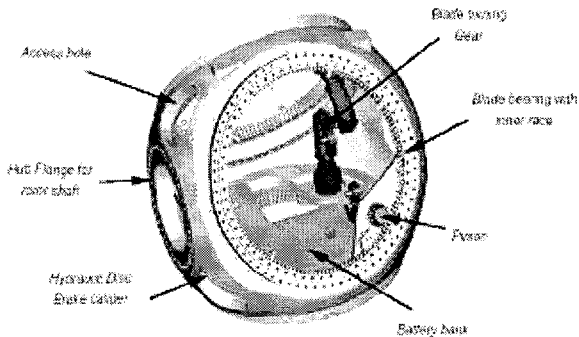


그림 5 회전자 시스템

회전자란 풍력발전기에 있어 실질적으로 동력을 발생시키는 부분으로 날개(Blade) 및 허브로 구성된다. 회전자에 주요 제원을 알아보면, 표 3과 같다.

표 3 회전자 주요제원

날개 수	3 EA
회전자 지름	92 m
회전자 면적	6648 m <sup>2</sup>
회전자 속도	14,15 rpm
회전자 종단 속도	75 m/sec
회전자 축 경사	5°
출력제어방식	PRVS
회전자 형식	Up wind
날개 길이	44.8 m
날개 재질	Fibre glass/PE
허브 재질	EN-GJS-400-18U-LT

회전자중 허브(Hub)는 날개가 취부되는 부분이며, 아울러 피치제어 및 제동장치를 위한 유압시스템이 취부되어 있다. 허브의 설계는 전적으로 유한요소법(FEM) 계산에 의해 설계되며, 필요시 허브내 작업용으로 너셀에서 허브로 들어가기 위한 3개의 통로를 가지고 있다.

날개(Blade)의 모델은 LM44.8P이며, 길이는 44.8m이고, 각각 허브단의 플랜지에 취부된다. 날개의 회전시스템은 독립적으로 제어 가능한 3개의 직류모터에 의해서 제어되며, 각 모터는 허브내 제어기로부터의 속도요구를 받는 직류증폭기에 의해 구동된다. 허브내 제어기는 타워 하단에 위치한 주 제어기로부터 입력을 받는다. 회전자 시스템은 피치제어시스템으로 날개의 피치각은 약 0에서 90도까지 조절가능하다. 특히 날개의 피치각은 정격풍속이상으로 바람이 불 경우 안정적인 출력곡선을 얻기 위한 발전기 토크를 제어하는 사용되기도 한다.

안전시스템(Safety system) 또는 정전시동에도 안전을 확보하기위해 각 날개마다 독립적인 무정전장치를 구축함으로써 날개를 정지위치로 회전시킬 수 있다.

날개회전시스템 자체가 해당 풍력발전기의 주 제동시스템이며, 기계적인 디스크 제동장치는 단지 서비스용으로 사용한다.

### 2.6 요 시스템(Yaw system)

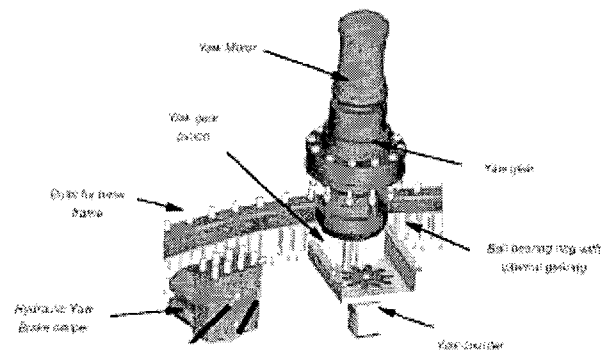


그림 6 요 시스템

요(Yaw) 시스템이란 풍력발전시스템에 있어 중요한 시스템으로 요 시스템의 기능은 풍향계(Windvane)로부터 받은 입력에 의하여 항상 풍력발전기의 회전자가 Upwind방향으로 위치되도록 하는 역할을 수행한다.

그림 6을 참고하여 요 시스템의 구성품을 간략하게 살펴보면 다음과 같다.

- 내부 기어 및 기계적으로 잠금가능한 4점 볼 베어링

- 유도모터에 구동되는 5개의 평형기어
- 요 작동이후 정확하게 정지 시키기 위한 6개의 유압 제동장치
- 요 시스템의 기동 및 제어를 위한 위치 트랜스 듀스 및 너셀에서 요를 수동으로 조작하기위한 수동 조작반등을 가지고 있다.

2.7 Machine Base Frame & Sub Frame

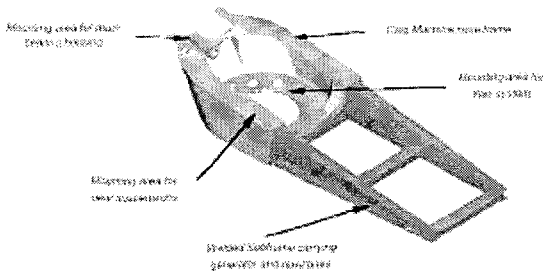


그림 7 Machine base frame & sub frame

Machine base frame 및 sub frame은 주물에 의해서 제작되며, 그 위에는 풍력발전시스템의 모든 관련 구성품들이 위치하게 된다. 특히, 너셀의 하중을 결정하는데 있어 Machine base frame 및 sub frame에 따라 상당히 하중을 감소시킬 수 있으나 회전자 무게등을 고려시 신중한 설계가 요구된다.

Base frame은 sub frame을 지탱하고 있는 형태이며, Base frame은 직접적으로 타워의 상단에 설치되며, sub frame 위에는 발전기 및 기타 냉각시스템등이 설치 되도록 되어 있다.

2.8 타워 및 기초대

해상용 풍력발전시스템에 있어 타워 및 기초대(foundation)는 풍력발전시스템을 안전하게 운전함에 있어 매우 중요한 부분이며, 육상용 풍력발전기의 타워 및기초대에 비하여 고가이다.

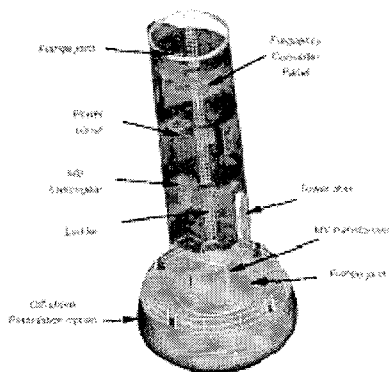


그림 8 타워 및 기초대

해상용 타워 및 기초대에 대하여 보다 더 구체적인 부분에 대해서는 아래 그림8.을 보면서 살펴 보도록 하자.

현재 풍력발전기의 타워는 강판을 롤링(Rolling)한 후 접속부분을 용접으로 처리하여 제작하며, 각 접속하여 용접된 부분은 제조간 반복적으로 검사를 실시하며, 특히 해상용 풍력발전기인 경우 도장간 표면처리부분에 대하여 염해등으로부터의 부식을 방지하기 위한 처리를 실시한다.

타워의 상단부분에는 특히 요잉 제동장치용 내부 브레이크의 기능을 갖도록 넓은 플랜지를 가지고 구성되며, 요잉용 링은 타워의 상단 플랜지에 직접 볼트로 취부된다.

통상 일반적인 육상용 풍력발전기의 타워인 경우 타워하단에는 전력제어용 판넬 및 제어용 컴퓨터가 위치하게 되어 있으며, 한전계통과의 전압을 맞추기위한 승압용 변압기는 타워 바깥쪽에 위치하고 있다. 그러나, 해상용 풍력발전기의 경우에는 기초대 및 타워가 해상에 설치되어 있는 관계로 모든 전력관련 판넬 및 컴퓨터등이 그림8.과 같이 타워 및 기초대 위에 위치하고 있으며, 특히, 해상용인 경우 타워 내부의 기후를 제어하기위한 습기 제거용 장치가 별도로 설치되어 있다. 이런 장치들은 외기의 기후상태가 어떤 상태일지라도 타워 및 모든 볼트 접속부위등의 부식을 효과적으로 방지할 수 있다.

타워하단에서 너셀까지 이동하기 위해 추가로 리프트 및 사다리가 준비되어 있으며, 해당 풍력발전기용 타워의 높이는 약 70m이다.

해상풍력발전기용 기초는 크게 2가지로 구별된다. 즉 모노파일(Monopile) 기초 및 콘크리트 기초이다. 콘크리트 기초는 전통적으로 사용하던 방식의 기초대이며, 현재에는 기초공사시 파대한 비용으로 인하여 거의 사용하지 않고 모노파일 기초를 사용한다.[그림 9 참조]



그림 9 모노파일 기초대

### 2.9 발전기 및 전력제어 시스템

해상용 풍력발전기에 사용되는 전기적인 전력 구동시스템으로 권선형(Double-fed) 비동기 발전기 및 주파수 변환기(Frequency converter)를 사용한다. 주파수 변환기는 슬립링을 통해 발전기의 회전자에 연결되며, 주파수 변환기는 회전자 전류 및 전자기장의 영향으로 전자기적 토크를 제어할 수 있다. 또한 주파수 변환기가 발전기내 전자기장을 제어함으로써 무효전력(Reactive power)를 제어한다. 날개의 피치각이 조절됨과 동시에 발전기 토크는 발전기의 속도를 제어한다. 그림 9에서 보여지는 것과 같이 필터는 고조파 전류 및 전압에 대해 관련 설비들이 능동적으로 대처하기 위해 설치되어 있다. 계통 연계 전 발전기는 전류의 단락 현상을 완전히 제거하기 위해 회전자 회로를 통해 여자된다.

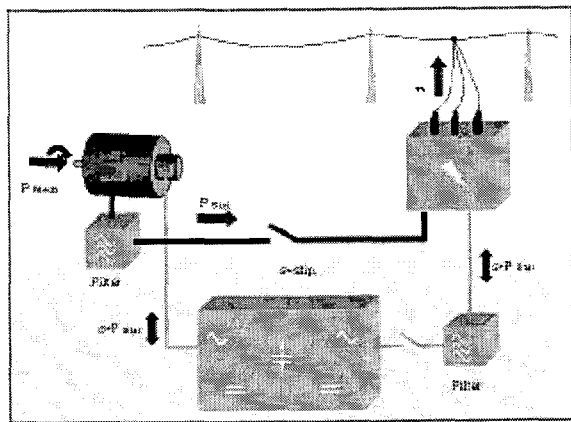


그림 10 권선형(Double-fed) 전력 구동 시스템

앞서 언급한 것과 같이 해당 해상용 풍력발전기의 출력범위는 0~2750kW이며, 전압변동율은 ±10이다. 주파수의 변동은 -5%에서 3%이며, 역률은 0.9에서 1사이이다.

이상과 같이 풍력발전시스템의 주요 구성품들에 대하여 간략하게 살펴보았으며, 3.에서는 현재 세계 시장에서의 해상용 풍력발전시스템 건설에 대한 활동 및 향후 추진될 사업에 대한 전망에 대하여 고찰코져 한다.

### 3. 해상용 풍력발전시스템의 현재 및 전망

해상용 풍력발전시스템은 풍력발전시스템 보급이 활성화된 유럽을 중심으로 소규모 또는 대규모 단지가 조성되고 있다. 최초 시범용으로 1기를 설

치 운전하였으며, 이후 세계에서 최초 및 가장 큰 규모로 설치된 해상용 풍력발전단지는 1991년 덴마크의 Vindeby 및 Middel-grunden이며, 현재 설치운전중인 해상 풍력단지에 대한 현황은 표4과 같다.

표 4 해상 풍력단지 현황

위치	설치 년도	설치용량(MW)	수심 및 거리
Nogersund (SE)	1991	1x0.22=0.22 WindWorld	수심:7m 거리: 250m
Vindeby (DK)	1991	11x0.45=4.95 Bonus	수심: 3-5m 거리: 1.5km
Medemblik (NL)	1994	4x0.5=2 NedWind	수심: 10m 거리: 0.75km
Tuno Knob (DK)	1995	10x0.5=5 Vestas	수심: 3-5m 거리: 6km
Dronten (NL)	1996	28x0.6=16.8 Nordtank	수심: 5m 거리: 20m
Bockstigen Valar, (SE)	1998	5x0.5=2.5 WindWorld	수심: 6m 거리: 3km
Middelgrun- den, (DK)	2000	20x2=40 Bonus	수심: 3-6m 거리: 3km
Utgrunden (SE)	2000	7x1.425=10 Enron	수심: 7-10m 거리: 8km
Blyth (UK)	2000	2x2=4 Vestas	수심: 8m 거리: 800m
Yttre Sten- grund, (SE)	2001	5x2=10 NEG-Micon	수심: 6-10m 거리: 5km

해상 풍력발전단지로부터 발생되는 전기는 최초 기대했던 것보다 더 많은 양의 전력을 생산하고 있으며, 표 4에서 각 설치된 해상 풍력발전단지의 건설단가 비교시 점차적으로 감소하고 있다고 한다.

최근 2000년 이후 3개의 MW급 풍력발전기를 이용한 해상 풍력발전 단지가 표4와 같이 설치운전중에 있으며, 향후 유럽지역의 거대한 해상 풍력발전단지가 조성될 곳을 살펴보면 표 5와 같다.

표5와 같이 유럽지역에서는 거대한 규모의 해상 풍력발전단지를 건설 예정중에 있으며, 향후 그 규모는 상당할 것으로 판단된다.

현재 국내에서도 해상 풍력발전단지를 건설하기 위한 선행 연구가 진행되고 있는 것으로 알고있으며, 향후 몇 년이내에 시범적으로 해상용 풍력발전기가 설치될 것으로 판단된다. 특히 국내의 경우 육지에 풍력발전단지를 건설한다는 것은 국내 풍

력발전 타당성 고려시 지역적으로 한정적이며, 국내에서 풍력발전단지를 건설하기에 타당한 지역으로는 제주, 강원도 일대, 그리고 전북 해안 일대, 동해안 일대등으로 그 지역은 다소 협소하다고 할 수 있다.

진중인 유럽등에서의 해상 풍력발전 사업에 대한 현황을 살펴봄으로써 열악한 국내의 풍력발전시스템에 더 많은 관심을 갖고자 함에 있다.

**참고 문헌**

표 5 설치예정된 해상 풍력발전단지

위치	설치 년도	설치용량(MW)
Horns Rev(DK)	2002	80x2=160, Vestas
Lillegrunden(SE)	2002	42x1.5=63, Enercon
Klasarden(SE)	2002	21x2=42, NEG-Micon
Samsø(DK)	2002	22
Lubeck(DE)	2002	100
Schelde(BE)	2002	100
Egmond(NL)	2002	100
Rodsand(DK)	2003	72x2.2=158, Bonus
Laeso Syd(DK)	2003	150
Q7(NL)	2003	60x2=120
Schelde(BE)	2003	100
Scroby Sand(DK)	2003	70
Omo Stal- grunde(DK)	2004/5	150
Gedser(DK)	2006	150

1. A.R. Henderson and C. Morgan, 2001, "Offshore Wind Energy in Europe"
2. NEGEM, 2002, "NM92/2750 Technical Description"
3. WWW.NEG-MICON.DK
4. WWW.WINDPOWER.ORG

**4. 결 론**

풍력발전시스템을 구성품으로 나열한다면 아주 단순하다고 할 수 있다. 하지만 실제 풍력발전시스템의 메카니즘은 아주 복잡한 비선형 시스템이라고 할 수 있다.

특히, 해상용 풍력발전기인 경우 여러 가지 환경요건등을 고려시 육상용에 비하여 더욱 더 정밀을 요하는 시스템이며, 비용적으로 볼때 초기 투자비용이 높다고 할 수 있다.

본 보고서에서의 목적은 아직 국내에서 덜 익숙한 풍력발전 시스템 특히 해상용 풍력 발전시스템 중 현재까지 세계에서 가장 큰 단위용량을 가진 2.75MW 풍력발전시스템의 구성품을 다소 상세하게 소개하는데 그 목적이 있으며, 아울러 현재 해상풍력 발전사업에 있어 가장 활발하게 사업을 추