

## ◎ 해설

# 현대의 풍력발전 기술

김정환\* · 김윤해\*\* · 이영호\*\*\*

## Technique of Modern Wind Power Generation

Jeong-Hwan KIM\*, Yoon-Hae KIM\*\*, Young-Ho LEE\*\*\*

**Key Words:** Wind Power Generation(풍력발전), Windmill(풍차), Turbine Tower(터빈타워), Yaw Mechanism(Yaw 회전기  
니즘), Gear Box(가어박스)

## ABSTRACT

The modern wind turbines are widely used as important natural energy sources for the electric generation in western countries and some Asian nations. They are commercially matured and progressive and clear policy for the more development with higher technical purposes is maintained throughout the world. Modern wind turbines produce nearly 2000 kW output in their largest sizes and this trend increases up to more powerful power and ultimate utilization of wind energy favoured by clean natural energy. This article has the points of reviewing the states of the art of modern wind turbines with their present technical directions toward next generation version. Some descriptions are given for easy understanding of the turbine components and related fluid mechanics concerned. The general outlines of policy taken over some countries are also introduced.

## 1. 서 론

풍력발전은 에너지변환장치의 일종인 풍력발전용 터빈에 의해 풍력 에너지(속도에너지)를 회전기계에너지로 변환하여 발전기를 구동시킴으로써 전기에너지를 생산하는 것을 말한다. 그러나, 이러한 풍력에너지의 단점은 에너지의 밀도가 낮고 풍향, 풍속 등의 시간적 변동이 심하여 이를 해결하기 위한 기술적인 애로점이 크게 문제가 되어 왔다. 최근에는 중·대형급 수평축

발전기의 개발로 인하여, 효율을 높아지고, 풍력발전 단지조성의 결과로 전력생산이 대량으로 가능해짐으로써 발전단가(48원/1 kW)가 점차 경쟁력을 확보할 수 있을 만큼 낮아지고 있는 추세이다. 국내에서는 1970년대의 유류 파동 이후, 풍력발전 연구를 시작하였는데, 1975년에 KAIST가 경기도 화성군에 설치한 2 kW급 풍력 발전기가 국내 풍력발전기의 효시이며, 1990년대 이전까지 약 20여대의 소형 풍력발전용 터빈이 설치되었으나, 풍력자원 부족이나 관리소홀 등의 이유로 대부분 철거되어 뚜렷한 성과를 올리지 못한 상태이다. 그러나 최근 국내에서도 신뢰성 있는 선진외국의 풍력시스템을 도입하여 풍력발전기에 대한 설치 운영 및 개발연구가 진행되고 있으나, 아직까지는 모두 연구단계에 머물러 있어 실용화 단계까지는 상당한 시간이 소요될 것이다. 한편, 무공해 친환경 에너지원으로써 풍력 발전용 터빈의

\* 한국해양대학교 기계공학과, 박사과정  
E-mail : jhkim@pivlab.net

\*\* 한국해양대학교 기계소재공학부, 부교수  
E-mail : yunheak@hanara.kmaritime.ac.kr

\*\*\* 한국해양대학교 기계·정보공학부, 교수  
E-mail : lyh@pivlab.net

운전시 공해 물질 질감량으로 황 및 질소 산화물은 9g/kWh, 중금속류 0.1g/kWh, 이산화탄소 0.5~1.0g/kWh, 입자 물질 200g/kWh 정도로서 환경보존에 크게 이바지 할 수 있으며, 최근 거론되는 기후변화 협약에 의한 온실 가스 배출 억제 분위기에 능동적으로 대처할 수 있는 수단으로서도 크게 기대가 된다. 국내 부존자원이 부족한 우리나라의 실정에서 이러한 풍력자원을 활용하는 것은 매우 매력적인 부분임에 틀림이 없으며, 매년 막대한 에너지를 수입해 오는 우리나라의 실정에 비추어 볼 때 에너지의 자급도에도 크게 영향을 미칠 수 있을 것으로 보여진다.

## 2. 풍력에너지

### 2.1 바람의 특성

풍력터빈을 구동시키는 에너지원은 바람이며, 이러한 바람은 태양에 의한 지구표면의 불균일한 가열에 의해서 발생한다. 지구의 적도부근은 다른 지역보다 많이 가열되어 적도지방과 극지방의 운도차이는 극지방으로부터 적도쪽으로 찬 공기의 유동을 일으킨다. 바다나 호수 주변의 공기와 육지 주변의 공기의 낮과 밤 동안의 가열과 냉각 속도의 차이는 바람을 발생하며 이렇게 생긴 바람의 힘이 로터 블레이드를 통해서 토크(torque)로 바뀌어지게된다. 이 토크에 의해 풍력에너지는 발전기를 거쳐 전기에너지로 바뀌게되는데, 이때 바람의 입장에서 고찰해보면, 변환되는 에너지의 양은 공기의 밀도, 로터의 면적, 풍속에 관계된다. 움직이는 물체의 운동에너지는 물체의 질량에 비례한다. 그러므로, 바람이 가지는 운동에너지는 공기의 밀도(단위체적당의 질량)에 비례한다는 것이다. 다른 말로 풀이하면, 무거운 공기는 로터 블레이드에 의해서 더 많은 에너지를 생산할 수 있다는 뜻이다. 보통의 대기압 하 그리고 상온 조건(15 °C)에서 공기의 밀도는 1.225 kg/m<sup>3</sup> 정도이다. 하지만, 공기의 밀도는 습도가 증가함에 따라 약간 감소하는 경향이 있다. 또한, 공기는 더울 때 보다 추울 때 밀도가 더 높다. 고도가 높은 경우 공기의 압력은 낮아지게 되며, 따라서 밀도 또한 낮아지게 된다.

일반적인 600kW급 풍력터빈은 직경이 약 43~44m 정도의 로터 블레이드들을 가지고 있다. 즉, 로터의 면적이 대충 1,500 m<sup>2</sup>라는 계산이 나온다. 보통 로터의 면적으로써 얼마나 많은 양의 에너지를 생산할 수 있는

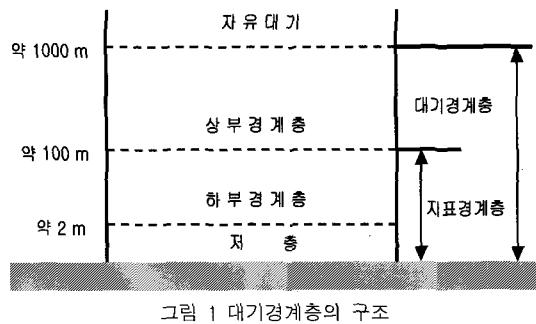


그림 1 대기경계층의 구조

가를 판단 할 수 있는데, 로터의 면적은 로터의 직경의 제곱에 비례하여 증가하게되므로, 2배가 커진다면  $2 \times 2 = 4$  배의 에너지를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

바람은 지표면, 해면 또는 지형지물 등과의 마찰로 인하여 지상으로부터의 높이에 따라 변하게 되며 대기경계층을 형성하게 된다. 이러한 지표면상의 저항으로 인해 발생된 풍속분포에 따라 대기권은 그림 1에서와 같이 저층, 하부마찰층, 상부마찰층 및 자유 대기층으로 구분할 수 있다.

지상 1,000m 이상의 자유대기층에서는 지표면과의 마찰력이 거의 작용하지 않으며, 그 이하의 높이에서는 지표면과의 마찰력에 의해 지상에 가까울수록 풍속이 낮아지게 된다. 기상학적으로 수집된 자료를 보면 이와 같은 현상이 잘 나타난다.

### 2.2 국내의 풍속자료

오늘날 세계에는 약 35,000기의 풍력발전기가 12,000MW의 용량으로 1년에 200억 kWh 이상의 전력을 생산하고 있다. 하지만 이것은 지구전체의 풍력에너지에 비하면 매우 작은 양이다.

그림 2와 3은 우리나라 축후소와 관측소에서 5년간 조사한 서·남해안에 위치한 제주, 부산, 인천지역과 내륙지방의 하나인 대전지역의 풍속특성을 나타내고 있다.

그림 2는 풍속의 시간별 변화를 보여주고 있는데 그림에서 보는 바와 같이 년 평균풍속이 높은 해안지역에 위치한 제주, 부산, 인천지역에서의 시간별 평균 풍속을 나타내는 곡선이 낮은 풍속을 나타내는 대전지역보다 위에 위치해 있으며 하루 중 낮 동안의 풍속이 아침이나 밤 동안의 풍속보다 높은 것은 낮 동안 지표면에 비쳐진 태양의 복사에너지의 영향으로 대기의 압력구배가 크기 때문에 일어나는 현상이다.

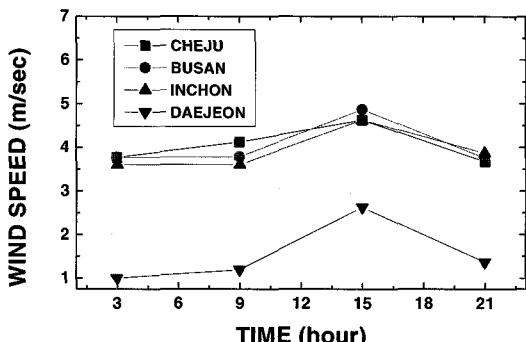


그림 2 시간별 평균풍속의 변화

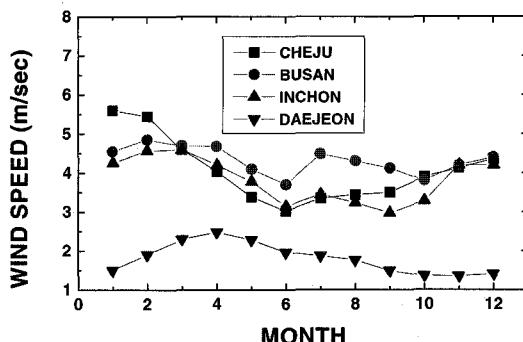


그림 3 월별 평균풍속의 변화

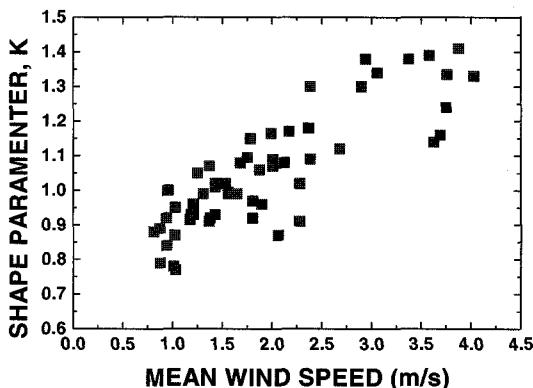


그림 4 국내 풍속의 형상계수 분포

그림 3은 월별 평균풍속의 변화를 보여주고 있는데 그림에서 보는 바와 같이 해안지방에 위치한 제주, 부산, 인천지역은 하절기에 월 평균풍속이 다른 계절보다 낮은 반면에 동절기에 월 평균풍속이 가장 높은 것으로 나타났는데 이는 우리나라의 지리적인 특성상 겨울철에 대륙으로부터 강한 계절풍이 불기 때문이며 대전지역은 내륙에 위치한 관계로 계절풍의 영향을 별로 받지 않기 때문이다.

그림 4는 형상계수와 년 평균풍속과의 관계를 보여주고 있는데 년 평균풍속이 높은 지역의 형상계수가 년 평균풍속이 낮은 지역보다 대체로 크게 나타나고 있다. 년 평균 풍속이 동일한 지역이라 하더라도 형상계수의 값에 변화가 있는 것은 각 계급별 풍속의 출현빈도가 서로 다르기 때문이다. Weibull분포의 형상계수는 1.5보다 작다.

### 3. 풍차의 형식

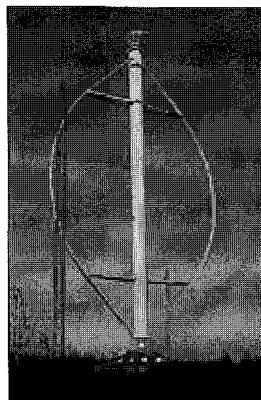
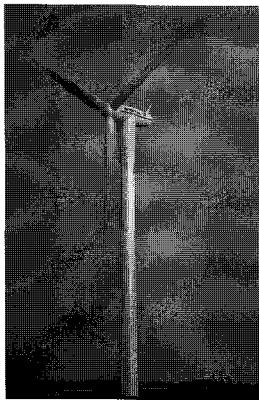
풍력발전의 기본요소인 풍차의 종류는 일반적으로

지면에 대한 회전축의 방향에 따라 수평축 풍차와 수직축 풍차로 나눌 수 있고 회전속도에 따라 분류할 수 있다.

수평축 풍차는 그림 5에서와 같이 회전자의 축이 지면과 수평을 이루며 바람의 방향과는 평행하게 된다. 그리고 바람에 대한 회전자와 철탑과의 상대적 위치에 따라 상류형(upwind)과 하류형(downwind)으로 구별된다.

상류형 풍력터빈들은 로터가 바람이 불어오는 방향으로 Nacelle의 전면 부에 장착되어 있는 형태이다. 이러한 형태의 기본적인 장점은 타워의 뒷면에서 발생하는 Wind shade 현상을 피할 수 있으며, 오늘날 대다수의 풍력터빈들은 상류형으로 제작되고 있다. 반대로, 타워의 앞부분에서도 약간의 Wind shade 현상이 발생하게 되며, 비록 타워의 형상이 둑글고 부드러운 형상이더라도 바람은 타워에 도달하기 전에 굽이치기 시작한다. 따라서 로터 블레이드들이 타워를 통과할 때 Wind shade 현상으로 약간의 동력손실이 발생하게 된다. 상류형 설계의 기본적인 결점은 로터가 다소 강건한 구조로 제작되어야만 하고 타워 전면 부에서 발생하게 되는 Wind shade 현상을 피하기 위해 타워와 일정한 거리를 두고 장착되어야만 한다는 것이다. 그리고 이러한 형태는 항상 로터를 바람의 방향으로 위치시키기 위하여 별도의 Yaw mechanism을 필요로 한다.

하류형 풍력터빈들은 로터가 Nacelle의 뒷면에 장착되어 있는 형태이다. 이러한 형태는 이론적으로 로터와 Nacelle이 바람의 흐름에 따라 이동할 수 있도록 적절한 설계를 한다면 Yaw mechanism이 필요하지 않다는 장점이 있다. 하지만 이러한 점들은 발전기로부터 전류를 보내기 위해 케이블을 사용하기 때문에 대형 풍력터빈에 적용하기에는 다소 부적절하지만, 하류형 풍차들은 날개들이 아주 강한 바람이 부는 조건에서 휘어질 수가 있는데 이로 인하여 타워가 받는 부하를



줄일 수가 있다. 하류형 풍력터빈이 가지는 장점은 상류형 풍력터빈에 비해 가벼운 터빈을 제작할 수 있지만, 결정적인 결점은 풍차의 날개들이 타워를 지나게 될 때 바람이 타워를 통과하면서 발생하는 Wind shade 현상으로 인하여 섭동을 일으키게 되는데 이러한 섭동 성분이 결국은 상류형 풍차에 비하여 더 많은 피로 하중을 가져다주게 된다.

그림 6에서는 수직축 풍차의 대표되는 풍차라고 할 수 있는 다리우스 풍차를 나타내고 있다. 수직축 풍차는 보통 전형적인 물레방아에서 볼 수 있듯이 물은 물레방아의 축에 수직으로 유입되는 것을 알 수 있다. 수직축 풍력발전용 터빈들은 이러한 관점에서 옛날의 전형적인 물레방아의 개념과 비슷하다고 생각하면 된다. 상업적으로 개발된 유일한 수직축 풍력터빈은 1931년 독특한 설계를 한 프랑스의 엔지니어인 Georges Darrieus의 이름을 딴 다리우스 풍차이다.

다리우스 풍차는 발전기, 기어박스 등의 장치들을 지상에 설치할 수 있고, 풍차를 위한 타워가 필요 없으며, 바람의 방향으로 항상 로터 블레이드를 일치시킬 필요가 없으므로, Yaw mechanism이 필요치 않는 장점을 가지고 있지만 수평축 풍차의 효율과 비교할 때 턱없이 효율이 낮기 때문에 주로 수평축 풍차를 많이 사용하고 있다.

## 4. 세부기술

### 4.1 발전출력

600 kW의 정격출력을 가지는 풍력터빈이 있다면 이 풍력터빈은 초당 15 m/sec의 풍속에서 최대성능을 발휘

하면서 운전될 때 600 kW의 전기에너지를 생산할 수 있다는 것을 의미한다. 풍력터빈의 작동기간은 보통 연간 75 % 정도이지만, 이러한 작동시간에 풍력터빈들이 정격출력을 내면서 작동하는 시간은 아주 제한적이다. 각각의 풍력터빈이 얼마만큼의 에너지를 생산하는지 알기 위해서 각각의 풍력터빈에서의 풍속분포를 알아야 할 필요가 있다. 텐마크의 경우에는 연간 풍력터빈들이 2,300시간동안 최대출력을 내는 것으로 알려져 있다. 전체에너지 생산량을 알기 위해서는 1기당 풍력터빈의 출력 1 MW(1,000 kW)에 2,300 시간을 곱하면 2,300 MWh의 에너지를 얻을 수 있다. Wales, Scotland, Western Island에서의 풍력터빈은 3,000 시간이상 최대출력을 내면서 작동을 하는 것으로 알려져 있다.

### 4.2 풍력발전 터빈

그림 7은 Nacelle의 내부구성도를 나타내고 있다. 풍력발전용 터빈의 Nacelle에는 기어박스, 발전기 등의 아주 중요한 핵심 부품들이 장착되어있고, 유지보수나 고장 수리를 위해서 터빈의 타워를 통해서 Nacelle로 진입 할 수 있도록 되어있다. Nacelle의 원쪽에는 로터 블레이드가 장착 되어있으며, 로터 블레이드는 바람이 가지는 운동에너지를 갖고 이 에너지를 회전에너지로 변환해주는 역할을 한다. 현대의 600 kW 급 풍력발전용 터빈의 로터 블레이드 길이는 약 20 m 정도이며 공기역학적인 형상을 하고 있다.

600 kW급 풍력터빈에 있어서 로터의 회전속도는 약 19~30 RPM 정도로 저속이다. 저속 샤프트에는 공기역학적인 브레이크 시스템을 위한 유압구동(블레이드를 Pitching 시키는 역할을 함) 방식의 파이프들이 연결되어있고, 기어박스에도 연결 되어있다. 저속 샤프트로 부터 얻은 회전력이 기어박스를 통과하면서 기어박스에 연결된 고속 샤프트로 약 50 배의 속도로 가속된

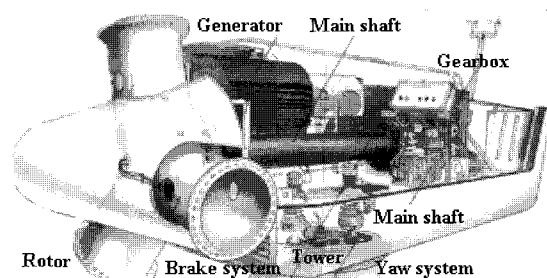


그림 7 Nacelle 내부 구성도

고속 샤프트의 회전속도는 보통 약 1,500 RPM 정도이며, 이로써 발전기의 로터를 회전시키게 된다. 여기에는 비상시에 수동으로 정지시킬 수 있는 비상용 디스크 브레이크가 장착되어있고, 이러한 디스크 브레이크는 풍력터빈의 공기역학적인 브레이크 시스템에 문제가 발생하거나, 터빈이 수리중인 경우에 작동된다. 발전기는 보통 유도형 발전기나 비동기식 발전기를 사용하는데, 현대 풍력발전용 터빈의 최대 전력 생산량은 약 1~1.5 MW 정도이다. 터빈의 전기제어 시스템은 풍력터빈의 상태를 지속적으로 모니터링하고, Yaw mechanism을 제어하는 컴퓨터를 포함하고 있다. 어떤 기능상의 문제가 발생한 경우(기어박스나 발전기의 과열) 풍력터빈은 자동으로 정지되며, 내부에 장착된 모뎀으로 모니터링하는 운전자의 컴퓨터에 지금의 상황을 전송된다.

유압 시스템은 풍력터빈의 공기역학적인 브레이크 시스템을 제어하는데 사용된다. 터빈의 내부에는 발전기로부터 발생하는 열을 소산시켜주는 팬이 설치되어 있다. 또한 기어박스 내부의 오일을 냉각시키는 냉각 시스템이 장착되어있는데 보통은 공랭식이나 일부 터빈에서는 수냉식도 사용되고 있다. 풍력발전용 터빈의 타워는 Nacelle과 로터를 지탱하고 있으며, 일반적으로, 지상에서 고도가 높아질수록 풍속이 높게되므로 타워는 높을수록 유리하다. 전형적인 현대식 600 kW급 터빈에서 보통 타워의 높이는 약 40~60 m 정도인데 보통 타워는 원통형 또는 격자망형 타워로 나뉠 수 있다. 터빈의 외관상의 문제와 Nacelle로 접근하는데 대한 안전성 등을 따져보면 원통형 타워가 격자망형 타워보다 유리하다. 하지만, 격자망타워의 경우 동일한 강성을 가지는 설계에 있어서 원통형 타워보다 제작비용이 저렴하다는 장점이 있다.

Yaw mechanism은 터빈 로터를 항상 바람이 불어오는 방향과 수직이 되게 Nacelle을 전기구동 모터에 의해 일정한 각도를 가지고 회전시켜주는 장치이다. 이것은 Nacelle의 외부에 장착되어있는 풍향계로부터 바람의 방향을 체크하고 컨트롤러에 의해 적절한 각도를 가지고 제어된다. 보통 바람의 방향이 바뀔 때 풍력터빈은 한번에 몇 도씩만 Yawing을 하게된다. Nacelle의 외부에 장착된 풍속계(anemometer)나 풍향계 등은 풍향이나 풍속을 측정하기 위해 사용되는 계측장치이다. 풍속계로부터의 풍속에 대한 정보가 제어장치로 전송되고 제어장치는 풍속이 터빈의 시동 풍속에(약 5 m/s) 도달한 경우 터빈을 시동시킨다. 그리고 또한, 측정된 풍속이 25 m/s를 초과하는 경우 컴퓨터에 의해 터빈의

안정성을 확보하기 위하여 터빈을 정지시키게 된다. 풍향계로부터의 시그널은 앞서 설명한 것과 같이 Yaw mechanism의 구동을 위한 정보로써 이용된다.

### 4.3 터빈 블레이드

그림 8은 한 개의 로터 블레이드를 나타낸 그림이며, 허브에 장착되는 부분에서 블레이드의 텁 부분까지를 보여주고 있다. 그림에서 바람은 사진의 아래방향으로부터 약 8~16 m/s 정도로 불어오고 있다면, 로터는 그림의 왼쪽 방향으로 회전을 하게된다. 그림에서 바람의 영향 변화가 블레이드의 텁 부분(A선)에서 보다 허브 부분(B선)에서 얼마나 심한지를 알 수 있다. 만약 바람이 블레이드가 실속을 발생할 만큼 심하게 불어온다면 블레이드의 허브 부분에서부터 실속이 발생하게된다.

그림 9는 로터 블레이드의 단면을 B선을 기준으로 절단한 모습이다. 절단된 단면에서의 화살표가 가르키는 방향이 양력이 발생하는 방향이다. 이러한 양력의 힘으로 블레이드는 일정한 방향으로 회전을 하게 된다.

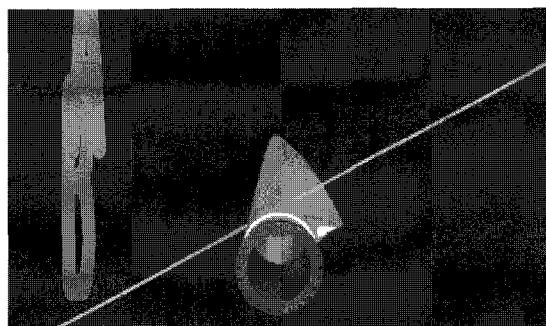


그림 8 풍력발전용 블레이드 형상

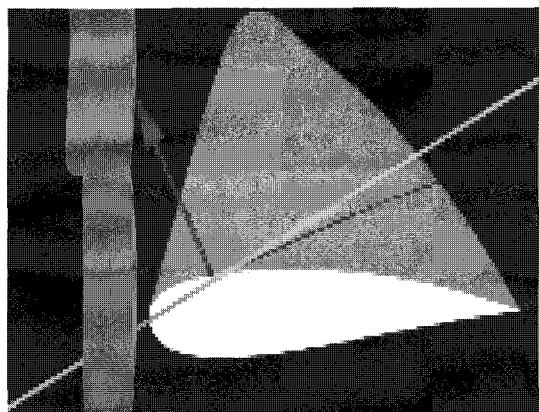


그림 9 풍력터빈의 작동원리

또한, 이러한 양력은 블레이드에 약간의 급한 모멘트를 발생시킨다.

풍력발전용 터빈에 장착되는 로터 블레이드의 단면은 항공기의 날개 등에 이용되는 익형이다. 터빈 블레이드를 설계할 때 보다 높은 양력을 얻기 위하여 실속 등의 복잡한 항공 역학적인 문제 등을 고려하여 설치하고자 하는 터빈의 특성에 맞게 익형의 종류를 결정한다. 그리고 결정한 형상의 표면 등이 다소 손상되거나 오염되어도 원래 특성을 잘 발휘하는지에 대한 고려 또한 중요하다.(표면손상이나, 오염 등에 의해서 익형 형상이 제 기능을 발휘하지 못한다면, 강우량이 많은 지역 등의 기후 조건에서 심각한 문제가 된다.)

보통 현대식 대형 풍력터빈에 장착되는 로터 블레이드는 유리섬유 강화 플라스틱 즉, 유리섬유 강화 폴리에스터나 유리섬유 강화 애폴시 등의 복합재료를 사용하여 제작된다. 보통 carbon fiber나 aramid(Kevlar) 등의 재료가 강화제로서 사용될 수도 있는데 이러한 재료들은 경제적인 입장으로 볼 때 그리 타당한 방법은 아니다. wood, wood-epoxy, wood-fiber-epoxy 등의 복합재료는 아직까지 개발단계이기 때문에 로터 블레이드 시장에 널리 보급되지는 못하고 있다. 강철과 알루미늄 합금 같은 재료들이 가지는 중량과 피로문제 등으로 인하여 그 사용이 제한적이며, 이를 재료는 단지 아주 소형의 풍력터빈에서만 적용될 수 있다.

바람이 로터 블레이드에 대하여 어떻게 이동하는지에 대한 연구를 위해 그림 10에서처럼 풍력터빈의 블레이드 텁 부분에 빨강 리본을 설치하고, 허브로부터 1/4 지점에 노랑 리본을 설치하였다. 그림과 같이 리본들은 대기 중에서 바람의 흐름에 따라 자유롭게 움직이도록 하였으며, 그림에서는 터빈의 측면과 정면을 나타내고 있다. 대다수의 풍력터빈들의 회전속도는 일정하므로 블레이드 텁 부분에서의 속도는 대략 64 m/s 정도이며, 허브의 중심부에서는 속도가 0이 된다. 허브로부터 1/4 떨어진 지점의 회전속도는 대략 16 m/s 가 된다.

그림에서 알 수 있듯이 허브에서 1/4 떨어진 지점에서의 노랑 리본이 허브로부터 1만큼 떨어져있는 블레이드 텁에 설치된 빨강 리본보다 더 뒤쪽으로 치우쳐 있음을 알 수 있다. 이는 블레이드 텁 부분의 회전속도가 풍력터빈으로 불어오는 풍속 보다 8배정도 높기 때문이다.

대형 풍력터빈에 장착되는 로터 블레이드들은 항상 일정한 각도를 가지고 비틀려있다. 따라서 로터 블레이드

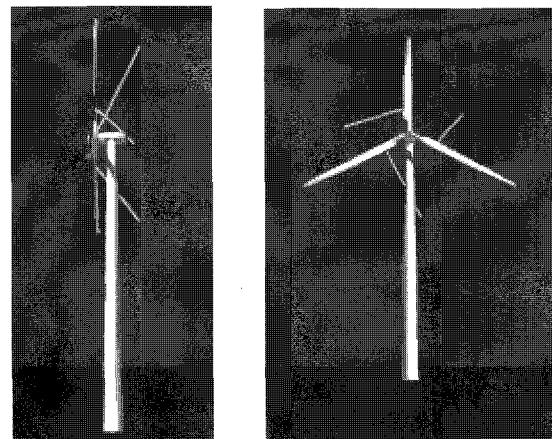


그림 10 로터 블레이드에 대한 바람의 경로

로 입사하는 바람은 로터 허브 쪽으로 가까이 갈수록 급한 경사를 가지고 블레이드로 입사하게 된다. 그런데 입사하는 바람이 아주 심한 경사를 가지고 입사된다면, 블레이드에서는 양력이 급격하게 감소하는 실속 현상이 발생한다. 그렇기 때문에 로터 블레이드는 최적의 영각을 얻기 위해 반드시 어느 정도의 각도를 가지고 비틀어져야만 한다.

#### 4.4 블레이드 수

현대의 풍력터빈 설계자들은 대형 풍력터빈을 설계하는데 있어서 많은 수의 로터 블레이드들을 사용하지 않는데, 다 익형 블레이드를 사용하지 않는 주된 이유는 터빈의 안정성에 대한 문제 때문이다. 보통 훌수 개의 로터 블레이드들(최소 3 익)은 터빈의 동적 특성을 해석하는데 있어서 일반적으로 원판 디스크와 같이 생각할 수 있다. 그리고 짹수 개의 블레이드들을 가지는 풍력터빈들은 강건한 구조물에 있어서 안정성에 대한 문제 등을 발생시킨다.

대다수의 현대식 풍력터빈들은 그림 11에서와 같이 3-블레이드 타입이며, 로터 블레이드는 Nacelle의 상부에 상류형 방식으로 장착되어 있으며, Nacelle은 보통 전기 모터로 구동되는 Yaw mechanism에 의해 바람이 불어오는 방향과 항상 로터 블레이드들을 수직으로 일치시키게 된다. 이러한 디자인을 보통 전형적인 덴마크 디자인이며, 여러 가지 다른 개념들 중에서 표준화 되어있다.

전 세계적으로 판매되고 있는 대다수의 풍력터빈들은 거의가 이러한 전형적인 덴마크 디자인을 적용하고



그림 11 3-블레이드의 수평축 풍차

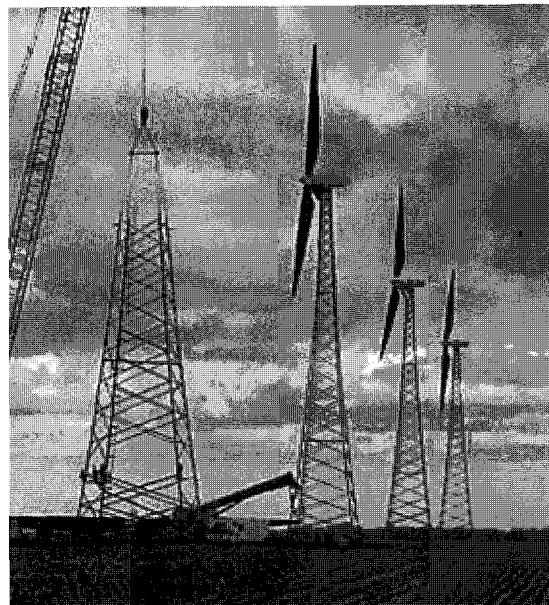


그림 12 2-블레이드의 수평축 풍차

있다. 이런 디자인이 처음 적용되었던 것은 비동기식 발전기를 장착한 Gedser 풍력터빈에서였다.

그림 12는 2-블레이드의 풍력터빈을 나타내고 있다. 2-블레이드 풍력터빈이 가지는 장점으로는 블레이드 수가 줄어듦에 따른 로터의 총 중량 감소와 제작비용 절감이다. 그러나 이러한 방식들은 3-블레이드 풍력터빈과 비교할 때 동일한 출력을 얻기 위해 3-블레이드 풍력터빈보다 로터 블레이드가 더 많은 회전을 하여야만 하는 문제점이 있다. 이러한 고속회전으로 야기되는 문제점들은 소음문제가 있을 수 있다. 최근 들어 일부 전통적인 2-블레이드 풍력터빈들이 3-블레이드 형으로 바뀌어가고 있는 추세이다. 2, 1-블레이드 풍력터빈을 설계하는데 있어서 로터 블레이드가 타워를 통과 할 때 발생하는 많은 충격으로 인하여, 로터는 앞뒤로 약간씩 요동이 가능하도록 설계되어야만 하며, 따라서 설계방법은 더욱 복잡해진다. 물론 1-블레이드 형 풍력터빈 또한 제작 가능하며, 로터 블레이드의 개수가 다른 형태들보다 적은 만큼 제작비용이 적게들며, 로터 블레이드의 중량 자체가 줄어드는 장점은 밀할 것도 없다.

그리고 만약 어떠한 로터 블레이드 타입을 선택해도 상관이 없다면 엔지니어들은 당연히 1-블레이드 타입을 선택할 것이다. 하지만 1-블레이드 풍력터빈은 상업적인 효용성 낮다. 왜냐하면, 2-블레이드 형에서 지

적된 문제점들과 동일한 문제점들이 나타나기 때문이다. 더 많은 회전속도를 필요로 하게되며, 더 많은 소음 문제와 시각적인 문제들이 발생하게 된다. 그리고 또한, 1-블레이드 형의 가장 큰 단점은 로터 블레이드의 밸런스 문제를 해결하기 위하여 블레이드의 반대방향에 중량을 달아야만 한다는 것이다. 따라서 이는 1-블레이드 형의 유일한 장점인 로터 블레이드 총 중량 감소는 무의미하다.

#### 4.5 기어박스

풍력터빈 로터의 회전력에 의해 얻어진 힘(torque)은 Power train에 의해서 메인 샤프트, 기어박스와 고속 샤프트를 지나 발전기로 전달된다. 하지만, 왜 기어박스를 사용하는 것일까? 우리는 메인 샤프트를 통해 직접 발전기로 동력을 전달 할 수 없는 것일까? 만약 2, 4, 6극으로 50 Hz AC에 직접 연결된 일반적인 발전기를 기어박스 없이 직접 메인 샤프트에 연결하여 사용한다면 터빈의 로터 블레이드 회전 속도는 약 1,000~3,000 rpm 정도로 아주 고속으로 회전하여야만 한다. 이는 블레이드 직경이 43 m 정도의 풍력발전용 터빈의 경우 블레이드 텁에서의 속도가 음속의 2배 이상이 된다.

발전기와 메인 샤프트를 직접연결해서 발전하기 위해 다르게 생각해 볼 수 있는 것들 중 하나는, 많은 극

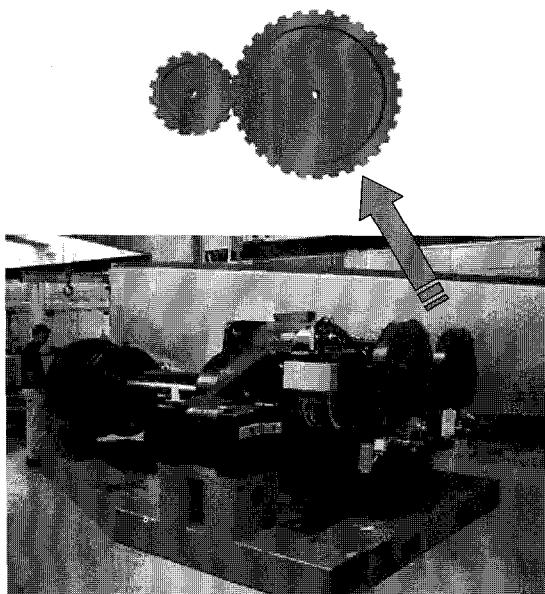


그림 13 풍력터빈용 기어박스

수의 발전기를 사용하는 것이다. 하지만, 30 rpm 정도의 회전 속도를 얻기 위해서는 약 200극의 극 수가 필요하게 된다. 따라서 이러한 개념 또한 타당성이 없다.

풍력 발전용 터빈의 내부에 장착된 기어박스는 변속을 할 수 없다. 보통 로터와 발전기 사이에서 기어는 단일 비를 갖는데, 600 kW급이나, 750 kW급 풍력발전용 터빈에서 기어 비는 보통 약 1 : 50 정도이다. 그림 13은 1.5 MW급 풍력터빈에 장착되는 기어박스의 모습이다. 이러한 형태의 기어박스는 그 모습이 다소 일반적인 기어박스의 형상과 다르다. 오른쪽 끝단에 장착된 두 개의 플랜지에 용량이 서로 다른 2기의 발전기가 장착되어 있다.

#### 4.6 터빈타워

풍력발전용 터빈의 타워는 Nacelle과 로터를 지지하고 있다. 대형 풍력발전용 터빈의 타워는 보통 원통형, 격자형, 등으로 구분할 수 있다. 지지 와이어가 필요한 원통형 타워는 일반적으로 소형 풍력발전용 터빈(1 kW정도의)에 적용된다.

그림 14는 해양에 설치되고 있는 원통형 타워인데, 대다수의 대형 풍력발전용 터빈에 사용되는 타워들은 20~30 m 높이의 양 끝단에 플랜지를 장착한 원통형 타워이며, 타워의 형상은 자체의 강성을 증가시키고, 동시에 제작단가를 저렴하게 하기 위하여 지면에 항할



그림 14 해양에 설치된 원통형 타워

수록 단면적이 넓어지는 Conic 형으로 제작된다.

격자형 타워는 강철로 제작된 기둥들을 용접에 의해서 접합하여 제작되는데, 이러한 격자형 타워의 주된 이점은 원통형 타워에 비해 제작 단가가 작아지는 편, 왜냐하면 이러한 형상의 타워는 원통형 타워의 강성과 동일한 강성을 가지도록 제작하는데 필요한 재료가 원통형 타워의 절반정도밖에 소요되지 않기 때문이다. 그러나 이러한 타워의 결점은 시각적으로 보기 좋지 않다는 점을 들 수 있다. 현대의 대형 풍력발전용 터빈에서 이러한 형태의 타워는 미관상으로 보기 좋지 않으므로 거의 사용되고 있지 않는다.

대다수 소형풍력터빈들은 그림 15에서 보이는 것처럼 Guy 와이어들에 의해 지지되는 직경이 작은 원통형 타워를 사용하는데, 이러한 타워의 주요한 장점은 격자형 타워와 마찬가지로 재료가 적게 들어가기 때문에 상대적으로 비용이 적게 든다는 점이다.

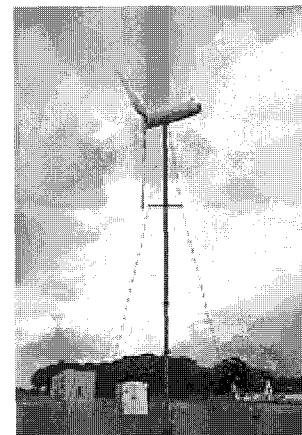


그림 15 Guy 와이어에 의해 지지된 수평축 풍차

하지만 이러한 형태의 타워는 Guy 와이어가 타워를 지탱하므로 타워의 주변으로 접근하기가 곤란하다는 단점이 있다. 이러한 단점은 대단위 풍력발전 단지를 건설하는데 있어서 상당히 불리한 조건이 된다.

일부 타워들은 앞서 언급한 타워들의 기술을 복합해서 제작되기도 한다.

보통 풍력발전용 터빈에 사용되는 타워의 제작비용은 전체터빈 제작비용의 20 %를 차지하게 된다. 약 50 m 정도 높이의 타워가 10 m 높아질 때마다 15,000 USD의 추가비용이 발생하게 된다. 따라서 타워를 제작할 때 가능한 한 최적 설계를 하여 제작해야만 발전 에너지 단가를 낮출 수 있으므로, 이것은 아주 중요한 고려 사항이 된다. 보통 제작비용만을 고려할 때 격자형 타워의 제작비용이 일반 튜브형 타워를 제작하는 비용보다 1/2정도 감소한다.

만약, 지면이 고르지 못한 지형에 터빈을 설치할 경우, 지면에 대한 영향으로 로터가 장착된 높이에서의 풍속이 감소하게 되므로 많은 풍력에너지를 얻기 위해서는 타워의 높이가 높아져야 할 필요가 있다. 그리고 보통 로터 블레이드가 타워부분을 통과하면서 타워의 영향에 의해 발생하는 Wind shade 현상 때문에 터빈의 효율이 낮아지며, 블레이드가 진동을 하게된다. 이러한 Wind shade 문제를 고려한다면, 보통의 원통 튜브형 타워보다는 Guy pole 타워나, 격자형 타워가 유리하다.

로터 블레이드의 직경보다 상대적으로 짧은 길이의 타워를 가진 풍력터빈의 로터 블레이드는 블레이드 팁부분이 도달하는 최고 높이와 최저 높이에서의 풍속의 변화가 아주 심하게 되므로, 로터 블레이드가 받는 피로 하중 또한 커지게 된다.

대형 터빈을 이용해서 발전하는 것이 소형 터빈을 이용하는 경우보다 더 많은 에너지를 얻을 수 있는 것은 당연하다. 그림 16의 세 가지 터빈은 각각 225 kW, 600 kW, 1,500 kW 급 풍력 터빈을 나타내고 있다. 이들 터빈의 로터 블레이드 길이는 각각 27, 43, 60 m이다. 그림에서 보면 터빈의 높이가 서로 다르다. 로터 블레이드의 직경이 60 m인 터빈의 타워를 30 m 높이 이하로 제작하는 것은 불가능하다. 낮게 설치된 풍력 터빈의 발전량을 증가시키려고 직경이 더 큰 로터 블레이드를 달고, 더 큰 기어박스와 발전기를 설치하는 것은 어리석은 발상이다. 지면에서 높이가 높을수록 지면에 의한 영향을 덜 받게 되므로 타워의 높이를 높여주는 것이 더 적절할 것이다. 그러나 타워가 높아진다는 것 또한 비용과 관련이 있는 문제이다. 보통 타

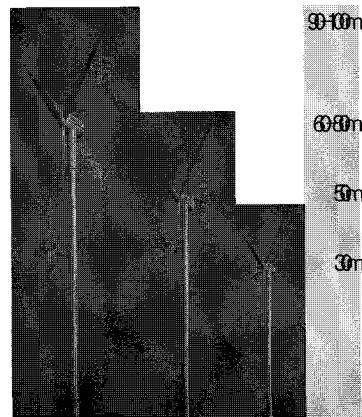


그림 16 로터 블레이드 직경에 따른 타워 높이

위를 설계할 때 최적의 높이를 가지도록 설계하며, 단위 미터 당 타워의 비용(보통 10 m당 15,000 USD가 소요된다.)과 지상으로부터 고도가 높아지면서 풍속이 얼마나 변하는가 즉, 설치하고자하는 지형의 형태 등을 고려하여 최적의 타워를 설계하여야 한다.

#### 4.7 YAW 메카니즘

풍력터빈의 Yaw mechanism은 바람이 불어오는 방향에 로터의 방향을 수직으로 위치시키기 위한 일련의 제어 장치이다.

보통 풍력터빈들은 로터의 방향이 바람에 정확하게 수직으로 일치되지 않으며, 이를 Yaw error라고 한다. Yaw error가 발생하면 풍력터빈은 다소의 피로 하중을 받게 되며, 로터가 받는 풍력에너지는 바람이 수직으로 입사하는 경우보다 낮아지므로, 발전량에 영향을 미치게 된다. 이러한 Yaw error가 일시적으로 발생하면, Yaw 컨트롤러에 의해 풍력터빈 블레이드로 유입되는 바람의 방향에 로터의 방향을 최적화시킨다. 보통 이러한 Yaw error에 의해서 바람은 특정한 각도를 가지고 로터로 유입되므로, 불어오는 바람에 대해 가장 가까운 곳에 위치하고 있는 블레이드는 나머지 2개의 로터 블레이드들 보다 훨씬 큰 굽힘 하중을 받게 되며, Yaw error를 가지고 계속 작동하는 풍력발전용 터빈들은 바람의 방향에 로터가 항상 직각방향을 유지한 채 운전되는 풍력터빈들에 비해 심한 피로하중을 받게 된다.

거의 대부분의 수평축 풍력터빈들은 강제구동 방식의 Yaw mechanism을 사용한다. 이 Mechanism은 전기모터와 기어박스 등으로 구성되어 있다.

그림 17은 750 kW급 풍력터빈의 Yaw mechanism을

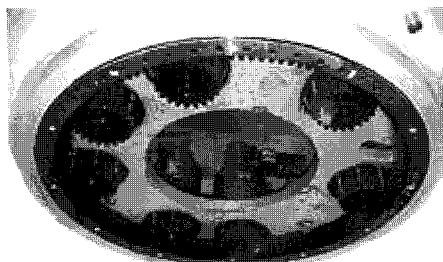


그림 17 Yaw 메카니즘

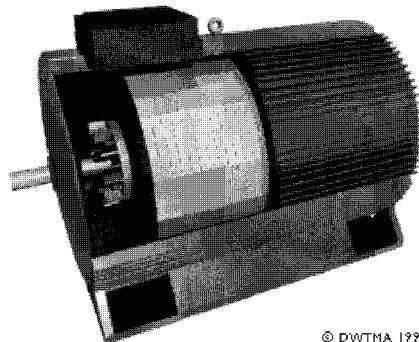
보여주고 있다. 이는 Nacelle의 아래에서 바라본 그림이다. Yaw mechanism은 터빈에 장착된 센서를 통해 초당 수회의 풍향정보를 읽어들이고, 이러한 정보를 바탕으로 내부에 장착된 Yaw controller에 의해 항상 로터의 방향이 불어오는 풍향과 일치하도록 제어하게 된다.

보통 풍력터빈의 발전기로부터 생산된 전류들은 타워 내부에 장착된 케이블들을 통해 지상으로 송전된다. 만약 풍력터빈이 항상 동일한 방향으로 오랫동안 요잉(yawing)하고 있다면, 타워내부의 케이블들은 서로 꼬 이게 된다. 따라서 반드시 풍력터빈들의 내부에는 Cable twist counter를 장착하여, 적절한 시기에 꼬여있는 케이블을 풀어주어야만 한다. 가끔 풍력터빈들이 갑자기 동일한 방향으로 수 차례 요잉 하는 것을 볼 수 있는 데, 이는 꼬여져 있는 케이블을 풀어주기 위한 작동이며, 케이블들이 아주 심하게 얹혀있을 때 강제로 풀어주는 Pull switch도 장착되어 있다.

#### 4.8 발전기

풍력발전용 발전기는 기계적인 에너지를 전기적인 에너지로 변환하여주는 장치이다. 이러한 풍력발전용 발전기는 변동이 아주 심한 기계적 동력인 풍력터빈로터를 그 동력원으로 사용하여 발전을 해야하기 때문에 일반적으로 볼 수 있는 다른 발전기들에 비해 다소 다른 점이 있다.

보통, 대형 풍력터빈에서(100~150kW 이상) 발전되는 전압은 대개 690V 3상 교류인데, 전류는 그 후에 풍력발전기 옆이나 타워의 내부에 설치된 변압기로 전송되고 변압기에 의해 다시 전압은 지역 송전망 기준에 따라 차이는 있겠지만, 약 10,000~30,000 볼트까지 승압된다. 대형 풍력발전용 터빈에서 사용되는 50Hz 풍력터빈 모델이나 미국 내에서 사용되는 60Hz 풍력터빈 모델 두 가지를 사용하고 있다.

그림 18 풍력발전용 발전기  
© DWTMA 1998

발전기는 작동되는 동안 반드시 냉각을 시켜주어야만 하는데, 대다수의 풍력터빈에서는 발전기를 덱트 내에 설치하고 대형 팬을 이용하여 냉각시키는 공랭식을 선택하고 있다. 하지만 일부 풍력터빈은 수냉식 발전기를 선택하기도 한다. 이러한 수냉식 발전기는 수냉식 시스템으로부터 발생하는 열을 방출하기 위해서 Nacelle 내부에 별도의 라디에이터(radiator)를 설치해야만 한다.

풍력터빈은 동기식 또는 비동기식 발전기를 선택하고, 발전기를 송전망에 직접 연결하거나, 간접적으로 연결하는 방식으로 설계된다. 직접 연결은 발전기가 교류 격자에 직접 연결되는 것이며, 간접 연결이란 송전망에 맞도록 발전기로부터 배출되는 전류를 여러 전기장치를 거쳐 조정 되도록 하여 연결하는 방식이다. 비동기식 발전기에서는 이러한 일련의 과정들이 자동으로 발생하게된다.

하지만 특수한 풍력터빈에는 두 가지의 발전기를 장착하기도 하는데, 이중 작은 발전기는 풍속이 낮을 때 사용되며, 대형 발전기는 풍속이 높을 때 사용된다. 최근에 제작되고 있는 풍력터빈은 발전기의 극 수를 제어하여 발전을 하게된다. 극 수에 따라 150kW급과 600kW급 두 가지 발전모드(두 가지의 서로 다른 속도) 작동이 가능하다. 보통 발전기를 2개 사용할 것인지, 아니면 극 수를 많이 사용하여 저속에서도 발전이 가능하게 할 것인지를 결정하기 위해선 풍력터빈 설치 지역의 풍속분포와 발전기의 극 수 변경에 따르는 투자비용과, 실제로 낮은 풍속에서 풍력터빈으로부터 얻을 수 있는 에너지의 양 등을 종합적으로 비교 검토하여야만 한다. 하지만 보통 낮은 풍속에서 얻을 수 있는 에너지의 양은 매우 작으며, 보통 극 수의 변경이 가능한 발전기를 사용할 때의 이점은 낮은 풍속모드에서 더 낮은 회전속도를 가지고 터빈이 발전을 할 수 있다는 점이다. 이는 공기역학적으로 더욱 효과적인

방법이 될 수 있으며, 로터의 회전속도가 낮기 때문에 소음 발생 등의 문제에 대하여 더욱 효과적인 방법이 될 것이다.

#### 4.9 풍력발전 장소선정

보통 농부들에게 경작을 얼마나 하냐고 질문을 한다면, 농부들은 헥타르나, 에이커 등의 용어로써 대답을 할 것이다. 이를 풍력터빈의 입장에서 본다면, 수평 면적에 대한 경작을 하는 것이 아닌 수직 면적에 대한 경작(여기서 경작이란, 풍력에너지를 이용하여 전기에너지를 생산한다는 의미이다.)을 하는 것이 되겠지만, 기본적인 개념은 농사를 짓는 것과 별반 다를 것이다.

그림 19는 전기를 발전 할 수 있는 풍력발전기 로터 블레이드 크기를 나타내고 있다.

일반적인 600kW급 풍력발전용 터빈의 로터 블레이드 직경은 약 44m정도이다. 만약 로터 블레이드의 직경을 두 배 가량 늘린다면, 발전량은 4배로 증가하게 된다. 하지만, 보통 로터 블레이드 직경은 위에 제시된 그림에서 다소 편차를 가지게 되는데, 이는 제작자들이 자신들의 터빈을 각 지역의 풍력 특성에 맞추어 최적화하여 설계하기 때문이다. 발전기들의 용량이 커지면, 이러한 대형 발전기를 구동시키기 위하여 더 많은 풍력에너지를 필요로 하게 된다. 따라서, 터빈을 설치하는 지역에서 풍속이 낮은 경우에는 보통 용량이 작은 발전기의 로터 회전속도가 대형 발전기의 로터 회전속도 보다 낮기 때문에 낮은 풍속에서 연간 발전하는 시간이 대형 발전기 보다 많아질 수 있으므로 장착된 로터 크기에 비해 작은 용량의 발전기를 이용하거

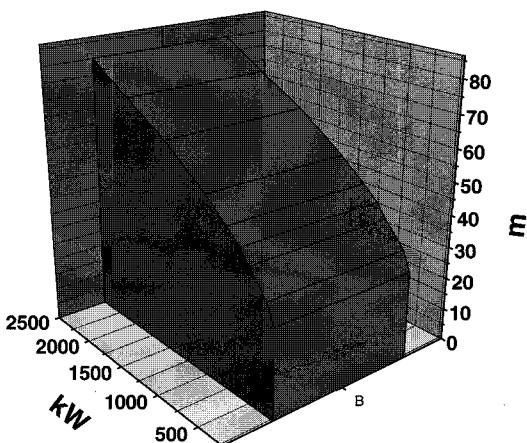


그림 19 로터블레이드 직경에 대한 발전용량

나, 다소 큰 로터를 장착함으로써 연간 더 많은 에너지를 생산 할 수 있을 것이다.(보통 600kW급 풍력터빈의 로터 사이즈는 39~48m 정도로 가변적이다.)

#### 4.9.1 대형터빈을 선정하는 이유

1. 풍력발전용 터빈의 크기가 커질수록 전력생산 단자가 낮아지므로 소형 터빈의 경우보다 더 경제적이다. 이는 보통 기초부 건설비용, 도로건설비용, 송전망 연결비용, 풍력터빈 내부에 장착되는 다수의 전기 장치들의 비용은 풍력터빈의 크기에 별 상관없이 거의 일정한 값을 가지기 때문이다.
2. 기초부위의 공사비용은 보통 풍력터빈의 크기에 비례하여 비용이 증가하지 않으며, 또한, 터빈의 유지보수비용은 터빈의 크기에 상관없이 거의 일정한 비용이 들기 때문이다.
3. 다수의 터빈을 설치할 수 없는 장소에서, 보통 타워가 높이 설치된 대형 풍력터빈의 경우, 소형 터빈보다 풍력에너지를 효과적으로 이용할 수 있다.(풍력에너지는 지상에서 고도가 높아질수록 많다)

#### 4.9.2 소형터빈을 선정하는 이유

1. 보통 각 지역의 송전망은 대형 풍력터빈으로부터 생산되는 전력을 감당 할 수 없다. 이러한 지역은 도시 외곽지역의 인구밀집도가 낮으며, 전력 소비량이 적은 지역에 한한다.
2. 번개 등의 자연재해 등으로 터빈의 작동이 멈추었을 때 대형 터빈의 경우보다 소형 터빈의 경우가 더욱 안전하며, 대형풍력터빈이 정지한 경우 소형터빈의 경우보다 더 많은 발전량이 감소하게 된다.
3. 주위 환경과의 어울림 등 시각적인 관점에서 대형터빈보다 소형 터빈이 권장된다. 보통 대형터빈의 경우 로터의 회전속도가 소형터빈에 비해 훨씬 낮기 때문에 로터가 빠르게 회전하는 소형 터빈의 경우 보다 시각적으로 매력적이지 못하다.

#### 4.10 출력조절

일반적으로 풍력터빈들은 가능한 발전단가가 낮은 전기에너지를 생산하기 위하여 최적설계 된다. 그러므로 보통 풍력터빈은 15m/s의 풍속 조건 하에서 최대 출력을 얻을 수 있도록 설계된다. 또한 가끔 돌풍이 불어오는 조건에서는 풍력터빈의 안전성을 확보하기 위하여 바람이 가지는 잉여 에너지를 버려야 할 필요가

있다. 따라서 모든 풍력터빈들은 출력제어(power control)를 할 수 있도록 설계된다. Power control 방법에는 두 가지의 서로 다른 방법들이 있다.

#### 4.10.1 제어방식

피치제어형 풍력터빈은, 터빈에 장착된 컨트롤러에 의해서 초당 수회에 걸쳐서 출력을 체크하게 된다. 발전량이 높아질 경우 이 컨트롤러에 의해 즉시 로터 블레이드들이 풍력에너지를 덜 받을 수 있도록 피칭(pitching)을 하게된다. 반대로 발전량이 적어질 경우엔 (즉, 풍속이 낮은 경우) 마찬가지로 컨트롤러에서 가능한 한 많은 풍력에너지를 이용하여 발전할 수 있는 위치로 로터 블레이드들을 피칭시킨다. 그런 이유로 로터블레이드는 반경방향으로 회전이 가능하도록 설계하여야만 한다. 사실 로터 블레이드들이 회전을 하게되는 범위는 매우 작은 범위이다. 피치제어형 풍력터빈을 설계하는데 있어서 정확하게 피치(pitch)범위를 제어하기 위해선 많은 기술적인 요소들이 필요로 하게된다. 보통 피치제어형 풍력터빈은 모든 풍속 범위에서 최대 출력을 낼 수 있도록 컴퓨터 시스템에 의해 로터가 최적화된 각도를 가지고 피치할 수 있도록 제어된다. 피치 메카니즘(pitch mechanism)은 일반적으로 유압계통을 통해서 작동한다.

#### 4.10.2 스톨제어방식

실속제어형 풍력터빈들은 로터 블레이드들이 허브에 일정한 각도를 가지고 비틀린 채 볼트로 제결되어있다. 이 로터 블레이드들의 형상은 순간적으로 불어오는 풍속이 아주 높은 경우 블레이드에서 강한 난류 성분들이 발생하도록 공기역학적으로 설계되어있다. 이로 인하여 블레이드에서의 양력발생은 현저하게 줄어들게 되며 실속(stall)현상이 발생하게된다. 실속 현상은 로터 블레이드에서의 양력발생을 현저하게 저하시키며, 아주 강한, 풍속 조건 하에서 풍력터빈의 출력을 제어 할 수 있다. 보통 블레이드를 구성하는 형상은 일련의 에어포일이며, 이들은 어느 지점까지 영각을 증가시켜 주면 실속이 발생하게 된다. 하지만 보통 실속제어형 풍력터빈의 블레이드들을 가까이서 관찰해 보면 약간 비틀림을 가지고 있는데 이는 일정 풍속 이상에서 갑자기 로터 블레이드에서 실속 현상이 발생함을 방지해 주고 점진적인 실속 현상이 일어 날수 있도록 하기 위한 한가지 방법이다. 실속제어형 풍력터빈의 기본적인 장점은 로터 블레이드 그 자체에서 움직이는 부분을

없앨 수 있다는 점이다. 반면에, 실속제어형 터빈 블레이드를 설계함에 있어서 공기역학적으로 아주 복잡한 문제가 발생하게된다. 현재 전 세계에 설치되어 있는 풍력터빈의 2/3정도가 이러한 실속제어형 풍력터빈이다.

#### 4.10.3 능동 스톨제어방식

현재 1MW급 또는 그 이상의 많은 대형 풍력터빈의 개발에 있어서 출력제어 방법으로 능동 실속제어 메카니즘을 적용하고 있다. 기술적으로 능동 실속제어 메카니즘은 블레이드들이 피치(pitch)가 가능하다는 점에 있어서 피치제어형과 유사한 점이 많다. 능동 실속제어형 풍력터빈은 풍속이 낮은 경우에는 적당한 토오크를 얻기 위하여 피치제어형과 같이 블레이드들이 더 많은 풍력에너지를 가질 수 있도록 피칭이 가능하게 프로그램 되어 있다. 그리고, 풍력터빈이 정격출력 범위에 도달하게되면, 능동 실속제어형 메카니즘과 피칭제어 메카니즘의 차이를 알 수 있다. 만약 발전기가 감당할 수 있는 부하 범위를 넘어서게 된다면, 그 순간 풍력터빈은 로터 블레이드들을 피칭시킴으로서 영각을 급격하게 높이고 이로 인한 실속 현상이 일어나게 함으로서 바람이 가지는 잉여 에너지들을 소비할 수 있도록 한다. 능동 실속제어형의 장점을 중에 한가지는 돌풍이 불어올 때 더욱 정확한 출력제어를 할 수 있다는 점이다. 또 다른 장점으로는 이러한 형의 풍력터빈은 높은 풍속 모드에서도 거의 정확한 정격출력을 낼 수 있다는 것이다.

#### 4.10.4 기타 출력제어방식

다소 구형의 풍력터빈들은 Ailerons(flaps)를 로터의 출력제어에 사용하곤 했었다. 이는 비행기들이 이륙할 때 날개의 형상을 변형시켜, 보다 고 양력을 얻기 위한 원리와 동일한 원리이다. 또 다른 이론적인 가능성은 출력을 줄이기 위하여 바람이 불어오는 방향에 대해 로터를 약간 Yaw시켜주는 방법이 있다. 이러한 Yaw control 기술들은 로터가 많은 피로하중을 받음으로써 풍력터빈의 전체 구조에 심각한 피해를 가져다 줄 수 있는 우려로 인하여, 현재 1kW 미만의 아주 소형의 풍력터빈에만 사용되고 있다.

#### 4.10.5 동력계수

동력계수는 터빈에 의해 바람이 가지는 에너지를 얼마만큼 전기적 에너지로 변환할 수 있는가를 말해주는 계수이다. 즉, 풍력에너지의 입력과 전기에너지의 출력을

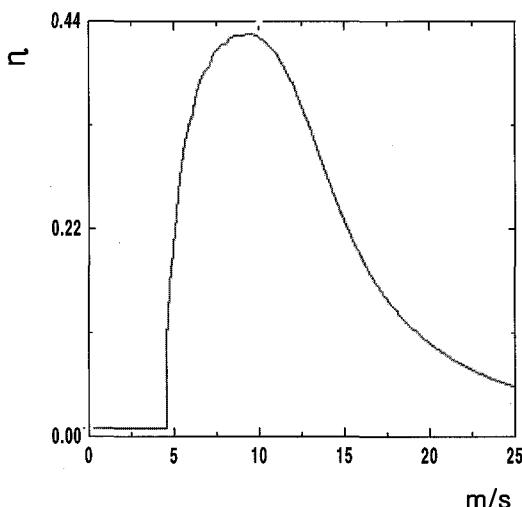


그림 20 덴마크형 풍력터빈 동력계수

서로 비교해보고 풍력터빈의 효율을 판단할 수 있다. 이를 통해 동력곡선을 얻을 수 있고 이를 로터블레이드의 면적으로 나누면, 로터면적( $m^2$ )당 출력동력을 얻을 수 있다. 그림 20의 그래프는 전형적인 덴마크형 풍력터빈의 동력계수 곡선을 나타내고 있다. 이 풍력터빈의 평균효율은 20% 정도일지라도, 풍속의 변화에 따른 효율의 변화 폭이 아주 크다는 것을 알 수 있다. (그래프의 곡선이 약간 뒤틀려져 있는 것은 측정 오차에 의한 영향이다) 그림에서 풍력터빈의 기계적 효율은 풍속이 9m/s인 경우 가장 높게 나타난다. 이는 풍력터빈의 설계자가 의도적으로 풍속 9m/s에서 가장 높은 효율을 낼 수 있도록 설계를 했기 때문이다. 낮은 풍속에서 발전되는 에너지의 양은 아주 적기 때문에 그때의 효율은 그리 중요하지 않다. 높은 풍속 조건에서 풍력터빈은 보통 바람이 가지는 잉여 에너지를 소비해버리도록 설계되어있으므로 동력계수가 상대적으로 높게 나오는 것을 알 수 있다.

풍력터빈의 효율을 높이기 위한 노력 그 자체가 목적이 될 수 없다. 사실 전기에너지를 얻어내는 구동원인 바람은 화석 연료 등과는 달리 무한하기 때문에 그리 절약하여야만 할 필요가 없기 때문이다. 하지만 로터의 면적 그 자체는 비용과 직결되는 문제이기 때문에 사용자가 원하는 만큼의 발전을 할 수 있을 정도의 로터블레이드 크기를 선택하여야만 에너지 생산 단계를 낮출 수가 있다.

풍속은 풍력발전용 터빈이 전기에너지로 변환할 수 있는 양을 결정하는 아주 중요한 요소이다. 바람이 가

지는 에너지의 양은 평균적으로 풍속의 3승에 비례하게 된다. 예를 들어 만약 풍속이 두 배로 증가하게 되면, 이 때 바람이 가지는 에너지의 양은 23 즉, 8배가 증가하게 된다. 위의 그래프에서 풍력터빈으로 불어오는 풍속이 8m/s인 경우 발전할 수 있는 에너지의 양은 314 W/m<sup>2</sup>가 된다. 16m/s의 풍속에서는 이보다 8배(풍속이 2배 증가했으므로) 많은 2509 W/m<sup>2</sup>의 에너지를 생산 할 수 있다.

## 5. 국외의 풍력발전기 보급 및 개발기술 정책 현황

세계적으로는 1996년 말 약 6,056 MW 용량의 풍력발전기가 설치 운행 중에 있으며, 풍력 발전에 의한 연간 전력생산량도 약 60억 kWh 이상으로서 비약적인 신장세를 기록하고 있다. 1996년 한해동안에도 약 1,297 MW 용량의 풍력발전기가 새로 설치되었고, 독일, 인도 및 영국을 위주로 신규 보급이 활발히 이루어지고 있다. 인도의 경우에는 1996년도까지 820 MW 규모의 풍력단지를 건설하였고, 중국은 79 MW 규모를 갖고 있는 등 보급률이 급속도로 증가하고 있다. 현재, 가장 많은 풍력발전기가 운전되고 있는 국가는 역시 미국으로서 캘리포니아주 내 대규모 풍력단지를 중심으로 1993년에는 연간 약 30억 kWh의 전력을 생산하여 캘리포니아주 전체 전력수요의 1.2%정도를 감당하였고, 1994년에는 약 35억 kWh의 전력을 생산하였다.

유럽 지역은 1996년도 한해동안 약 979 MW의 용량이 증가되어 현재 총 용량 약 1,750 MW정도의 풍력발전기가 운전 중에 있으며, 이중에 독일이 1,546 MW(1996년 12월 현재)로서 가장 많은 풍력발전 용량을 보유하고 있는 유럽 국가로서 나타나고 있다.

발전용량은 발전기의 출력을 높일 수 있는 발전시스템을 개발하는 것이다. 발전기 개발에 관련된 연구는 재료분야의 발전과 더불어 고효율, 저중량의 발전시스템 개발에 대한 연구를 상당히 수행하여 MW급 발전기를 실용화하고 있는 추세이다.

제어감시시스템은 기존의 시퀀스 방식에서 탈피하여, 시퀀스 방식, 통신모뎀 방식과 인터넷 방식을 혼합한 하이브리드 방식의 제어감시시스템을 실용화하고 있는 추세이다. 이러한 방식이 완벽히 실용화되면 풍력발전에 의해 생산되는 모든 전력을 실시간으로 제어감시 할 수 있는 글로벌(global)형 제어감시시스템을 구축할 수 있다.

현재 미국은 세계에서 가장 큰 풍력산업 규모를 유

지하고 있으며, 1994년도를 기준하여 전체 설치용량 및 발전량은 각각 1,717 MW와 35억 kWh에 이르고 있다. 그 중에서 캘리포니아주내의 5개의 큰 풍력단지에서는 약 16,000대의 시스템이 운전중에 있으며, 약 30억 kWh의 전력을 생산하고 있다. 이중 샌프란시스코의 동쪽에 위치한 ALTAMONT PASS, 로스엔젤레스의 북쪽에 위치한 TEHACHAPI PASS, 로스엔젤레스의 동쪽에 위치한 SAN GORGONIPO PASS 지역에 가장 많은 풍력발전 시스템이 보급되어 있으며 이 외에 SAN JOAQUIN과 SACRAMENTO강 근처의 SOLANO 지방과 샌프란시스코의 남동쪽에 위치한 PACHECO PASS에도 풍력발전 단지가 조성되어 있다. 이와 같이 캘리포니아주에서 풍력발전 단지 조성이 활발히 이루어진 요인은 다음과 같다.

- 샌프란시스코나 로스엔젤레스와 같은 대도시 근교에 풍력자원이 풍부한 광활한 대지가 위치
- 연방정부의 집중적인 세제 감면 혜택
- 풍력발전 시스템의 보급에 투자하는 투자자의 수요 증가
- 전력회사에서는 풍력발전 된 전력을 의무적으로 매입

덴마크 역시 20세기 초반부터 농업용으로 풍력기기를 활용하기 시작하였고, 1950년도부터 계통연계 발전용 200 kW 풍력발전기(DEDSER 200 kW)를 개발시도 하였으나, 본격적으로는 석유파동 시기(1973~1974)부터 기술개발이 진행되었다.

1976년도부터 연구개발 프로그램이 시작되었고, 많은 국가적인 장려정책과 지원협정이 풍력단지를 소유한 기관(개인)과 전력회사간에 체결되어 양적인 팽창이 이루어지고 있다. 1979년 이전에는 약 200~300기의 소형(10~15 kW) 풍력발전기가 설치 운전되었으나, 그 이후 다양한 용량의 풍력발전기가 개발되어 1981년도에는 55 kW 용량의 발전기가 개발되어 주종을 이루고 있다. 그 이후 계속된 개발로 1993년도에는 250~300 kW의 풍력발전기가 주종을 이루며 덴마크 전체 전력수요의 3%정도를 풍력발전으로 공급할 정도로 비약적인 발전을 거듭 하였고, 1996년 기준으로 총 용량 835 MW를 이루며 연간 12억 kWh정도의 전력을 생산해내고 있다. 이의 배경에는 국가적인 차원에서 9.5센트/kWh의 발전단가를 보장해주고 부가세 및 에너지 세금(Energy Tax)의 감면 등의 혜택이 큰 역할을 했다고 볼 수 있으며, 덴마크는 자국내 시장뿐만 아니라 해외시장도 활발히 개척하여 1994년도 기준으로 전 세계 설비용량의

52%정도를 차지할 정도로 기술적인 안정단계에 진입한 것으로 평가되고 있다.

이외에도 덴마크는 세계 최초로 국가적인 차원에서 1990년도에 에너지성(Danish Ministry of Energy)을 중심으로 하는 ENERGY 2000이라는 장기적인 에너지 추진정책을 추진하여 TORONTO회의에 대처하고 있는 국가이기도 하다. ENERGY 2000계획의 주된 내용은 2000년도까지 전체 전력 수요의 10%정도를 풍력발전에 의해 생산하는 목표로 매년간 70~110 MW 정도의 추가 단지를 건설하며, 2000년도까지 단일기로 800~1,350 kW정도의 풍력발전기를 개발하는 계획으로서, 이 계획 후에는 1,000 MW의 설비용량을 지니게 될 것이다.

그리고, 특이한 것은 덴마크는 국토가 좁은 나라인 관계로 새로운 풍력단지의 개발 대상을 바다로까지 확대하고 있다는 것이다. 즉, 동부해안의 풍부한 풍력자원을 활용하여 해안가에서 4 km 바다로 진출하여 6 m의 수심에 450 kW 풍력발전기 11대를 건설함으로서 약 30% 정도 생산량의 증가를 가져온 VINDEBY 풍력단지는 국토가 좁은 우리나라 같은 상황에서는 눈여겨 볼만한 상황이라 할 수 있다.

불과 5년 전만 해도 60 MW정도의 설비용량에 그쳤던 독일도 1990년 신발전기술에 의한 전력을 의무적으로 매입토록 규정한 법률 통과와 1991년도부터 2억4천만 달러가 투자되는 250 MW 풍력 프로젝트를 시작함으로서 1994년에는 전세계 추가설치된 용량의 65%가 독일에 설치될 정도로 보급이 활발히 이루어지고 있다. 따라서, 1997년도 약 5,193여대의 풍력발전기가 운전 중에 있으며, 설비용량은 2,081 MW으로서 연간 3,954 GWh 이상의 전력을 생산해 내고 있다. 역시 이런 비약적인 증가에는 국가적으로 발전전력 kWh 당 4센트의 지원금 보조와 전력회사의 11 센트/kWh의 전력 구입단가가 보장되는 상황이 크게 기여하였다 할 수 있다.

이후로도 독일은 매년 200~250 MW의 추가설치를 금세기 말까지 계획하고 있어 2005년도까지 4,000 MW 용량을 추가할 계획을 적극적으로 추진 중에 있다.

1989년도에 시작된 NFFO(Non-Fossil Fuel Obligation) 정책에 의해 탄소세가 부가됨으로서, 유럽내에서 가장 많은 풍력자원을 보유하고 있는 영국 내에서도 신 발전기술에 대한 관심이 높아져, 1990년도에 1998년도까지 102.25 MW의 신 발전방식의 설비를 전력회사가 구입하도록 1단계 NFFO계획이 시작되었다. 이 후 2단계 NFFO는 1991년부터 시작되어 1998년도까지 추가로 475 MW의

설비를 추가 구입토록 의무화되어 2000년도까지 최소 한 1,000 MW의 설비용량을 갖추려는 목표에 접근하고 있다. 영국은 현재 약 170 MW의 풍력설비를 갖추고 있으며, 1995년도부터 시작된 3단계 NFFO계획에 의거하여 추가로 400 MW의 풍력설비를 갖추고 이에 대해 8 센트/kWh정도의 지원금을 보조하는 정책이 발표되기도 하였으며, 이 NFFO 계획은 2000년도까지 2단계가 더 진행될 것으로 예상되고 있다.

인구가 많고 넓은 지역에 펴져 살고 있는 중국은 형편상 지역자원에 의한 지역 전원화 문제는 매우 심각하다고 할 수 있다. 따라서, 자연적으로 풍력발전에 관심이 매우 높게 되어, 1996년도 현재 중국 내의 총 설비 용량은 79 MW에 이르며 약 90여대가 운전중인 계통연계 풍력발전기는 12 MW, 약 126,000여대가 운전 중인 독립형은 17 MW의 용량을 나타내고 있다. 중국 내 대표적인 풍력단지는 서부지방에 위치한 Dabanchung 으로서 금년도에 30 MW, 2000년도까지 100 MW 규모로 확대시킬 계획을 추진 중에 있고, 중국전체로는 2000년도 까지 1,000 MW의 설비를 운영할 계획을 추진 중에 있다.

일본은 NEDO주도의 선사인 계획에 의거하여 1995년도까지 3,000 kW의 풍력발전 설비를 갖추려고 계획을 추진하여, 이미 1994년도 말 현재 5,145 kW의 설비 보급으로 목표를 초과하였고 금년 말까지 약 6,100 kW의 설비가 보급될 전망이며, 2000년도까지 20 MW, 2010년도까지 150 MW의 설비를 보급할 계획을 추진 중이다.

## 6. 국외의 연구동향

국외의 풍력발전 관련 기술은 이미 실용화 단계에 있기 때문에 요소기술개발 보다는 MW급 풍력발전시스템 확대로 치중하고 있다. 또한 Vortec사의 DAWT (Diffuser Augmented Wind Trubine), ENECO사의 WARP (Wind Amplify Rotor Platform)와 같은 풍속 증폭 및 단위 적층을 통한 새로운 개념의 대형풍력발전 시스템이 개발되어, 시험기를 설치하고 공기역학적, 구조역학적 실증 실험을 수행하고 있다.

WARP 발전 시스템은 그림 21과 같은 장치를 이용하여 바람의 세기를 1.2~1.7배정도 증폭시켜 회전체를 구동하는 방식이다. 일반적으로 WARP 시스템의 회전체 반경은 3 m를 초과하지 않으므로 심각한 소음이나 전파방해 등을 일으키지 않으며, 기존 시스템의 경우 발전

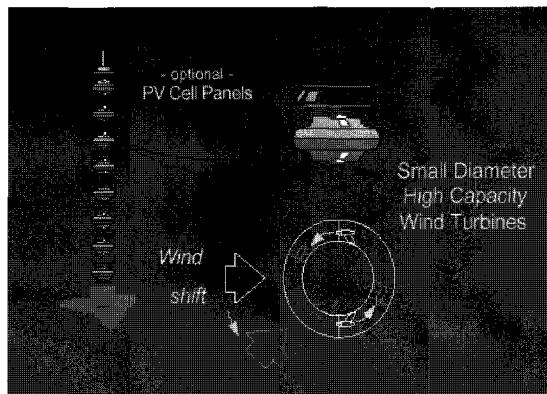


그림 21 WARP의 개념도

시스템 상부에 많은 중량물이 집중되는 반면 WARP는 시스템 전체에 고르게 중량물이 분포되기 때문에 구조적 안정성을 지니고 있다. 또한 하나의 증폭장치와 회전자를 모듈화하여 그림 21과 같이 적층하면 대용량 발전시스템을 구성할 수 있을 뿐 아니라 송수신탑 등 다른 여러 가지 부가적인 기능을 수행할 수 있는 장점을 가지고 있다.

DAWT 발전 시스템에서 사용하고 있는 디퓨저(diffuser)는 로터 후류쪽에 낮은 압력을 형성시키는 공기역학적인 장치로서 로터 후방에서 일종의 흡입효과(suction effect)를 통해 로터를 지나는 공기 유속을 자유류의 1.7배정도 상승 시켜주는 역할을 한다. 따라서 디퓨저를 이용하면 바람의 에너지 밀도는 약 5.5배나 증가하게 된다. 디퓨저를 장착하여 풍속을 증가시키는 개념을 그림 22에 나타내고 있다.

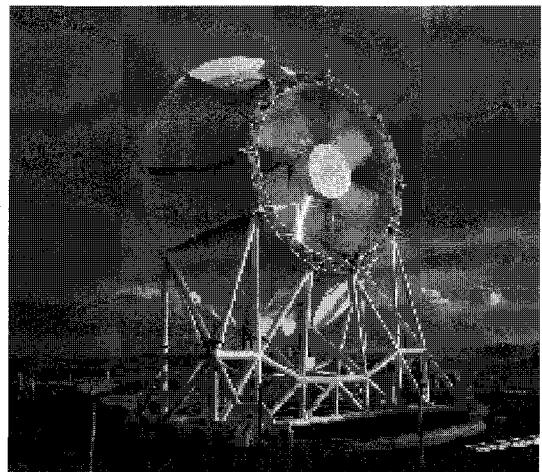


그림 22 현재 운용 중인 DAWT 시험장치

## 7. 결 론

대체에너지로서 유럽지역과 미주지역의 풍력발전 분야는 국가의 정책적 지원 하에 성장하였으며 많은 풍력발전의 선진국의 풍력발전시스템의 소유자는 개인으로서 하나의 사업으로서 역할을 하고 있을 정도로 국가적인 보조나 지원정책이 선행하여 풍력발전시스템의 기술개발과 보급을 유도하고 있다. 그리고 풍력발전시스템 건설비용의 국가보조와 생산전력의 의무 매입과 지원 육성 차원의 전력매입단가를 형성하고 있다. 이런 현실로 볼 때 풍력 선진국과 같은 장치를 하루 빨리 도입할 필요가 있으며, 우리나라의 풍력발전의 잠재량은 6억 6천 MW로 석유의 1억6천 5백만톤에 해당하며 이것을 5%만 개발해도 전체 전력량의 14%를 충당할 수 있다. 그리고 이것은 풍력발전의 선진국인 덴마크와 비슷하다. 그렇기 때문에 정부와 민간 그리고 학계의 연구자들이 합심하여 풍력발전에 매진한다면 우리나라도 조만간 풍력발전의 선진국 대열에 올라서리라 생각된다.

## 후 기

자료 정리에 도움을 준 한국해양대학교 유동정보연구실의 대학원생 김범석 군에게 감사한다.

### 참고문헌

- (1) E. Hau J. Langenbrinck W. Palz, 1993, WEGA Large Wind Turbines, Springer-Verlag Berlin Geidelberg.
- (2) 이규현, 박경호, 1988, 풍력발전기술개발, KE-88-19, 한국동력자원연구소, pp. 21~27.
- (3) 김두훈, 장강석, 홍승기, 2000, 중속증폭형 풍력발전 기술, 에너지관리공단, pp. 2-68~2-82.
- (4) 김광호, 최항철, 2001, 풍력에너지의 이용, 설비저널, 제30권, 제1호, pp. 25~31.
- (5) <http://www.kbs.co.kr>(2001년 2월 28일 환경스페셜 – 바람이 주는 선물)
- (6) <http://www.windpower.dk>
- (7) <http://www.awea.org>