

# 풍력발전시스템의 소개 및 이용 동향

- 김 두 훈 | 유니슨산업 기술연구소, 소장/e-mail : kimdh@unison.co.kr
- 류 지 윤 | 유니슨산업 기술연구소
- 홍 승 기 | 유니슨산업 기술연구소

이 글에서는 풍력발전시스템에 대한 소개 및 작동원리에 대하여 알아보고, 세계적인 동향 및 향후 발전방향을 살펴본다.

풍력발전은 바람의 운동에너지를 전기에너지로 변환하는 에너지변환 기술이다. 바람은 태양에너지의 지표면 차동 복사와 지구의 자전에 의해 발생하는 공기의 유동이므로 바람도 태양에너지의 일부로 볼 수 있으며, 자연현상에서 발생하는 에너지로서 변환 과정에서의 청정성과 고갈되지 않는 지속성을 갖는 에너지원이다. 따라서 이를 청정/자연에너지(green energy), 재생에너지(renewable energy), 신에너지(new energy) 등으로 정의하고

있고 화석연료를 대체한다는 의미에서 대체에너지 (alternative

energy)라고도 한다.

바람을 이용하는 기술은 고대

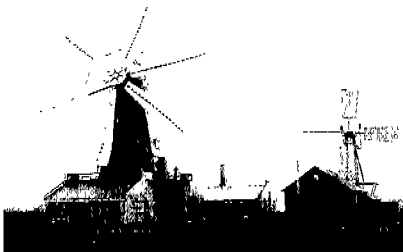
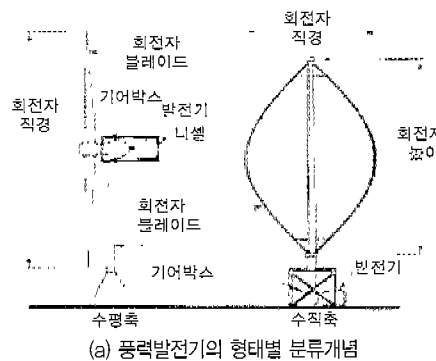


그림 1 최초의 풍력발전기(1891년, Denmark)

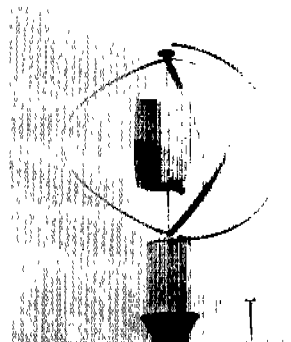


그림 2 풍력발전기의 형태별 종류

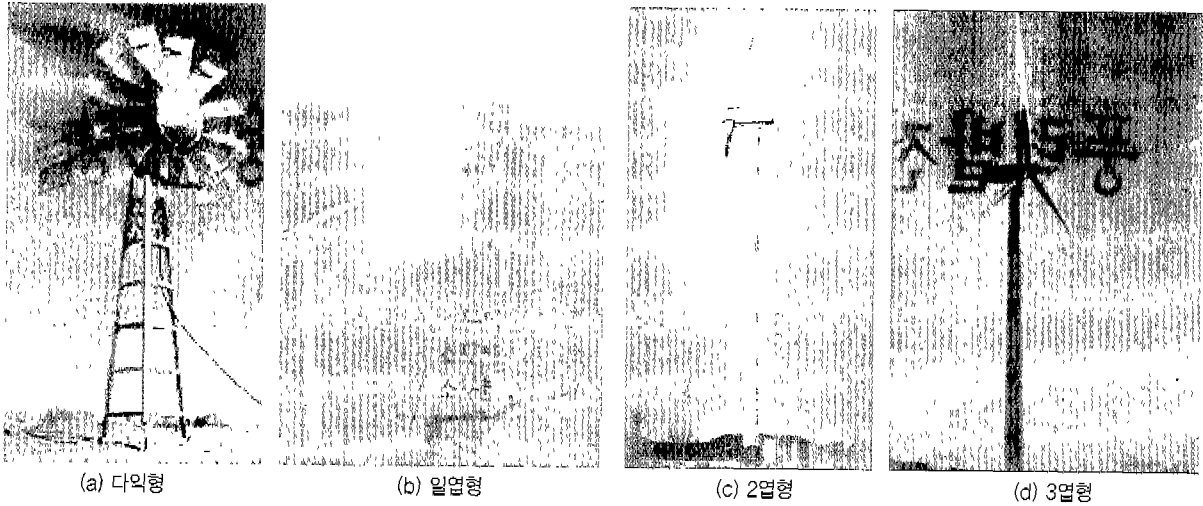


그림 3 수평축 풍력발전기의 형태별 종류(다익형(Multi-bladed) - 미국 서부지역, 중국 내몽고 지역 등에서 양수용으로 사용되는 모델, 현대에는 3엽형이 주종)

페르시아 등지에서 곡식을 찧는 방아, 물을 퍼올리는 양수기 등으로 활용되어 왔다. 바람을 이용하여 전기를 생산하는 풍력발전기의 효시는 1891년 덴마크의 Poul La Cour가 개발한 풍력발전기이며(그림 1 참조), 그 이용 기술이 근래 들어 지속적인 발전함에 따라 화석연료를 대체하는 대안에너지로 각광받고 있다.

### 풍력발전기의 형태

시스템의 형태에 따라 수직축 풍력발전기(VAWT: vertical axis wind turbine)와 수평축 풍력발전기(HAWT, horizontal axis wind turbine)로 분류된다. 수직축 풍력발전기는 로터의 형태에 따라 H-형과 다리우스형으로 분류되며 1980년대 후반까지는 연구개발이 활성화된 바 있는 모델이나, 상용화에는 실패한 모델이다(그림 2 참조). 이에 비해

수평축 풍력발전기는 1981년의 Poul La Cour 이후 현재까지 지속적으로 발전하여 세계 풍력발전시장의 대부분을 차지하는 모델로 자리잡고 있다.(그림 3 참조)

기술의 형태는 날개의 수와 기계장치의 구성형태에 따라 시스

템의 종류가 변천해가고 있다.

### 풍력발전장치의 구성

풍력발전기의 구성은 외형상 바람에너지를 기계적 회전에너지로 변환하는 회전자(rotor blade)와 나셀(nacelle)로 불리는 동력

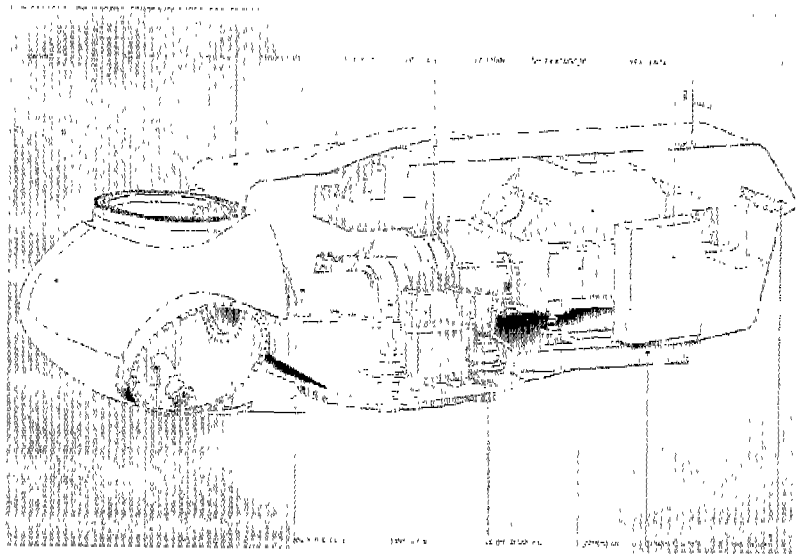


그림 4 풍력발전 장치의 구성

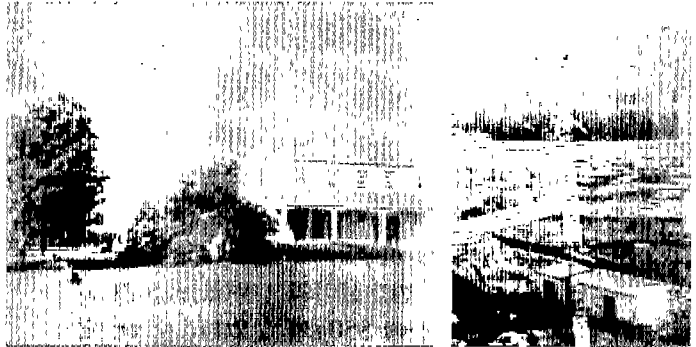
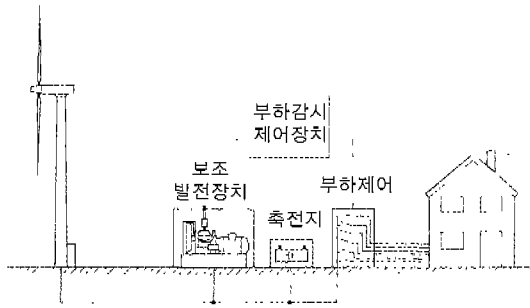


그림 5 독립운전형 발전기의 사용 개념과 상용발전기 종류

장치실, 나셀을 지지하는 타워로 구분할 수 있다. 또 나셀 내부는 크게 증속기(gear box), 베어링, 커플링 등의 동력전달장치(power train)와 발전기(generator) 그리고 이들 장치를 모니터링/제어하는 제어장치와 각종 액추에이터로 구성되어 있으며, 바람의 방향을 감지하여 회전자와 나셀전체를 회전시키는 요잉(Yawing)장치로 구성되어 있다.

**풍력발전기의 사용형태**

풍력발전기는 운전형식에 따라 분류하면 다음과 같이 독립운전

형(stand alone type)과 계통연계형(grid connection type)이 있다. 독립운전형은 전력계통이 없이 생산된 전력을 사용자에게 직접 공급하는 방식으로 저장장치인 축전기와 보조전력인 디젤발전기 등과 함께 복합적으로 사용되는 형태로서 도서지역, 산간오지의 전원공급과 등대 및 통신장비 전원용 등으로 활용되고 있다. 그림 5는 독립운전형 발전시스템의 전력공급개념이다.

현대 들어 풍력에너지 이용의 급속한 증가를 가져온 분야는 기존 전력계통선에 풍력발전기를 병

렬 연계하여 생산전력을 계통선에 공급하는 계통연계 방식으로 대규모로 건설되어 발전소의 역할을 하는 방식이다. 이를 풍력발전단지(wind park 또는 wind farm)라고 한다. 1기의 용량이 1,500kW인 풍력발전기 20기가 설치된 30MW 풍력발전단지는 기존발전소를 대체하는 발전소(power plant)가 되는 것이다. 계통연계형 풍력발전기는 연계되

표 1 풍력발전 이용에 따른 공해물질 저감효과

항 목	용량/저감량
풍력발전기 설치용량	4,425MW
에너지 생산량	8.8TWh/yr
CO <sub>2</sub> 배출 저감량	7,800,000 tons/yr
SO <sub>2</sub> 배출 저감량	26,000 tons/yr
NOx 배출 저감량	22,000 tons/yr

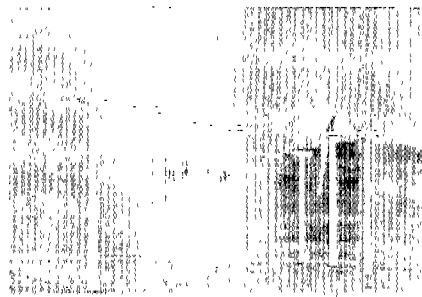
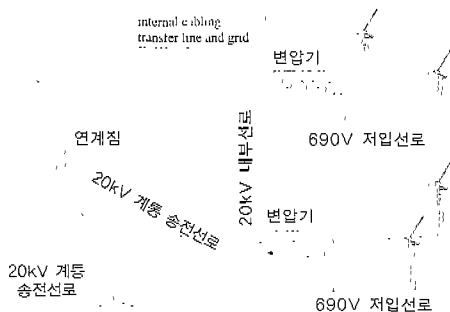


그림 6 계통연계형 풍력발전기 개념도 및 발전단지 전경

는 전력계통의 조건에 맞게 Low/Medium/High Voltage로 계통에 연계됨으로 변압기(transformer), 계통연계장치 등을 포함하여 구성되어 있다.(그림 6 참조)

## 풍력발전의 이점

바람에너지를 이용하여 전력을 생산하는 풍력발전의 주요 이점은 다음과 같이 정리할 수 있다.

### 환경친화적 에너지

화석연료를 이용한 발전설비의 경우 전력 1kWh 생산에 850g의 CO<sub>2</sub>, SOx 22.9g, NOx 2.6g, Slag 55g, Dust 0.1g 등이 대기로 배출되는 것으로 알려져 있다. 풍력 발전을 이용할 경우 공해물질의 배출저감 효과에 상당한 이점을 제공한다. 1997년 유럽연합국가들이 풍력 발전을 이용함으로써 얻어진 공해물질 저감효과는 표1과 같다. 또한, 모든 발전설비들은 건설과 운용단계에서 환경에 영향을 미치지지만 풍력에너지의 이용은 그 영향을 최소화할 수 있다. 또한 풍력발전소의 경우 발전단지 전체 면적 가운데 99%의 토지를 농업, 목축 등의 용도로 활용할 수 있는 이점을 갖고 있다.

### 무한정의 자원성

유럽지역에서는 이용 가능한 풍력에너지 자원량을 예측하려는 시도가 있었다. 이들 연구는 연평균 풍속이 5.1m/sec 이상인 지역에서 토지이용 여건을 고려하여

5%만이 풍력발전기를 건설할 수 있다고 가정하면 전 세계에 분포된 풍력 자원은 약 20,000~50,000TWh/년 정도인 것으로 연구되었다. 1994년 한 해 동안 전 세계에서 소비된 전력량이 12,500TWh임을 감안할 때 풍력에너지는 무한한 자원이며, 앞으로 전력설비 분야의 기술이 발전될수록 활용 가능한 에너지량은 더욱 증가될 것으로 예측되고 있다.

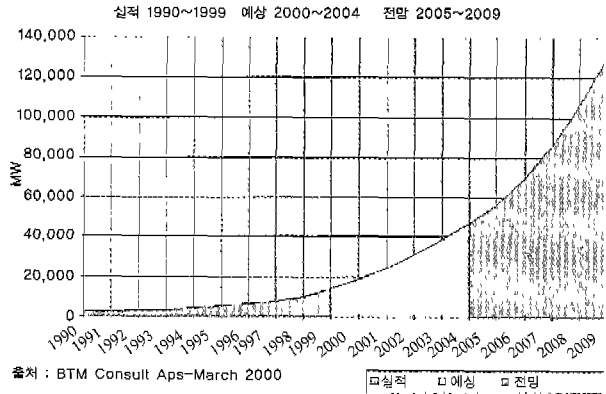


그림 8 풍력발전기 세계보급 규모 및 전망

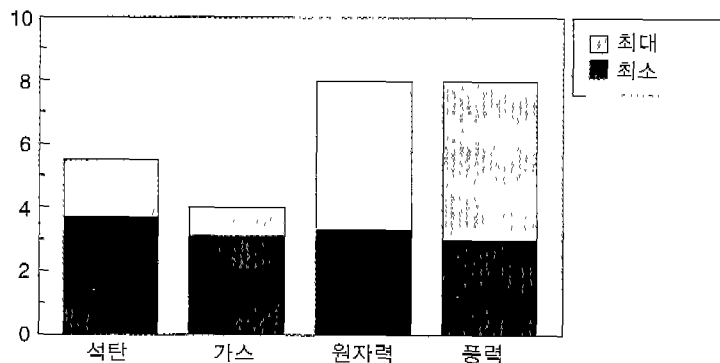
### 화석에너지와의 가격경쟁성

대체에너지 또는 재생에너지 사용의 가장 큰 문제점은 전력생산가격이 고가여서 현실적인 사용성이 떨어지는 점이었다. 그러나 이들 중 풍력에너지는 지속적인 기술개발과 시스템의 대형화 및 대단지화를 통해 가장 경제성이 확보된 에너지원으로 평가되고 있다(그림 6 참조). 미국의 경우 1980년 평균생산원가는 30 cents/kWh였으나, 2000년에 4.7cents/kWh로 기존 에너지원 과다 경쟁력 있는 발전기술이 되어가고 있다.

### 국외의 풍력에너지 이용 현황

1990년대 들어 지구온난화현상으로 대두되는 환경문제와 자원의 고갈 우려, 고유가시대에 대한 대책으로 세계각국은 자국의 여건에 맞는 지원육성 프로그램을 수립하여 풍력산업의 발전을 주도하기 위한 투자를 강화하고 있다. BTM consults의 보고

전력가격, cECU/kWh



할인율 : 5%, 발전기 수명 20년  
중규모 풍력 발전단지, 평균 풍속 범위 : 5~10m/s

그림 7 발전원별 생산원가 비교

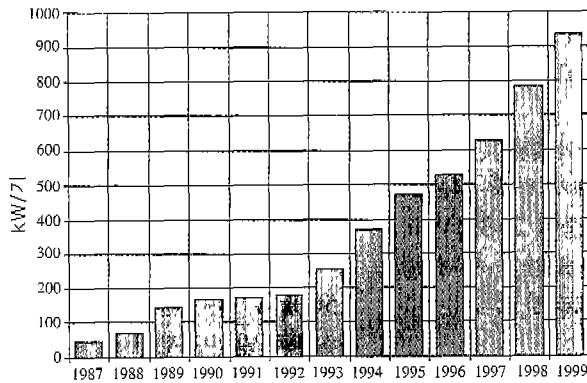


그림 9 연도별 풍력발전기 평균 설치 용량

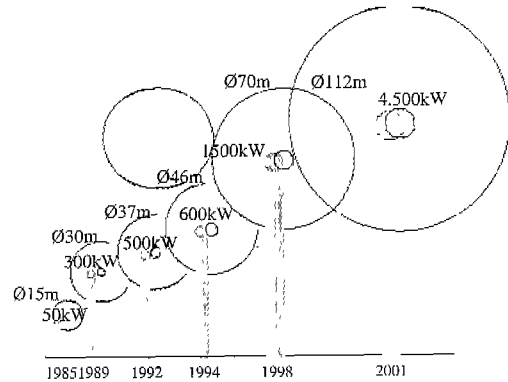


그림 10 풍력발전기의 연도별 크기 변화

에 의하면, 2000년 12월 말 현재 세계 45개 국가에 보급된 풍력발전기 규모는 총 17,706MW로, 우리나라의 전체 발전설비 규모(1999년) 51,587MW의 30%를 초과하는 규모이다. 특히 유럽 국가들이 '90년 후반부터 원자력 발전의 증설을 중지하면서부터 풍력발전기 이용보급은 비약적으로 성장하여, 연평균 30%가 넘는 성장률을 보이고 있으며, 세계 풍력발전기 보급 규모는 2004년에 47,512MW, 2009년에는 130,000MW에 이를 것으로 전망되고 있으며, 1999년 약 38억 달러였던 세계시장의 규모는 2004년에 280억 달러에 이를 것으로 전망되고 있다.(그림 8 참조)

또한, 고용면에서 1999년 미국의 경우 풍력발전산업의 직접종사자만 2,000명으로, 2010년에는 약 150,000명의 일자리가 창출될 것으로 예측하고 있으며, 유럽풍력학회(EWEA)의 보고에 의하면 유럽지역에만 2010년에 512,000명의 고용이 창출될 것

으로 보고되고 있다.

### 해외 풍력발전 기술의 동향

'90년대 이후의 국외 풍력발전 기술의 동향은 계통연계형 풍력발전단지 조성이 활발해짐에 따라 시스템의 대형화, 구조의 단순화를 통한 생산원가의 하락과 해양풍력발전 단지 개발이라는 경향을 보이고 있다.

#### 풍력발전기의 대형화

블레이드 제작기술과 타워 구조물 제작 기술 등 관련 기술이 발달함에 따라 미국과 유럽을 중심으로 로터 직경과 허브 높이가 60~90m에 다르는 정격용량 1,000~3,000kW의 메가와트급 풍력발전기들이 개발되고 상용화되고 있다. 그림 8과 같이 1992년 한 해 동안 독일에 설치된 풍력발전기 1기의 평균 용량은 200kW 미만이었다가 1995년에는 두 배 이상이 커진 450kW를 기록했고, 1999년에는

919kW, 2000년 상반기에는 1,071kW에 이르고 있으며, 2001년 현재는 2MW급 풍력발전기 모델이 상용화되어 공급 중이며 3~4.5MW에 이르는 초대형 풍력발전기(multi-megawatt wind turbine)의 상업화가 목전에 와 있는 실정이다.(그림 9, 10 참조)

이러한 풍력발전기 대형화의 이점은 첫째가 단위 용량 당 건설비 및 설비비의 감소이며, 둘째는 대형화에 따른 에너지효율의 증가를 들 수 있다. 특히 대형 풍력

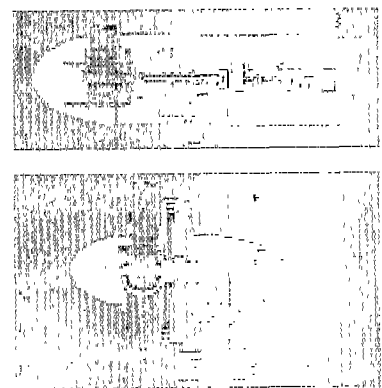


그림 11 풍력발전장치 구성의 변화

발전기의 출력증가는 로터 직경의 2승이 아니라 2.35승에 비례해 증가하게 되는데 이는 타워의 높이 상승에 따른 평균풍속의 증가로 용량 및 이용률이 증가하기 때문이다. 이런 대형화를 통해 풍력발전의 단가는 2004년에 4cents/kWh, 2010년에는 2.5cents/kWh로 낮아질 전망이다.

### 시스템 구조의 단순화

현대 들어 전력전자 기술의 급격한 발전으로 풍력발전시스템의 구성 요소 중에서 기계장치들이 전기장치로 교체됨으로써 기계적 구조가 단순되는 특징을 보이고 있다. 그림 11에서 위쪽 그림은 고전형 발전기의 동력전달체계이며, 아래쪽은 근래에 들어 급속히 성장하고 있는 기어리스형 발전기의 개념도로서 붉게 표기된 부분이 회전하는 부품들이다.

고전적 풍력발전기는 로터의 회전속도를 증속기를 통해 발전기 동기속도로 증속시켜 유도발전기를 통해 계통에 직접 연계하는 풍력발전기가 가장 널리 보급되어왔다. 그러나 근래에 들어와 로터의 회전속도를 증속장치가 아닌, 발전기 극수를 증대시킨 다극형 동기발전기를 이용하여 이를 전기적으로 해결하는 직접구동형 풍력발전기의 개발이 새로운 분야로 자리를 잡고 있다.

이는 근래에 들어 AC/DC/AC 계통연계 장치들을 포함한 전력 제어 장치들의 제작기술이 발달과 반도체 소자 가격이 낮아져 지속적인 유지보수가 필요한 기계적 장치를 단순화하고 경량화

와 효율 및 유지·보수면에서 유리한 전기적 장치로 대체하려는 현상이 두드러지고 있다는 것이다.

이러한 단순화의 경향은 특히 대형풍력발전기에서 더욱 두드러져 새롭게 개발 중인 2~3MW급 풍력발전의 많은 모델이 채택 중이거나 사용을 고려하고 있는 추세이다.

### 해양풍력발전단지(offshore wind farm) 건설

덴마크, 네덜란드, 독일 및 영국 등은 해안에서 수km 떨어져 수심이 5m~20m 바다 위에 풍력발전기를 설치하는 해양풍력발전 단지를 개발 중에 있다. 이 해양 풍력발전단지는 내륙의 공간적 제약에서 벗어나 해상의 우수한 풍력자원을 이용하고 저 난류성으로 인한 시스템의 수명증대를 가져올 수 있는 장점이 있다. 이런 장점에도 불구하고, 해상 구조

물의 높은 설치비용으로 인해서 그동안 실용화되지 못하였으나, 대형풍력발전기 개발의 성공으로 인하여, 단위기의 용량을 대형화할 수 있음으로 발전단가의 경쟁성을 확보해가고 있는 실정이다. 덴마크 전력회사들의 경제성분석 결과에 따르면 대당 용량 1,500kW 풍력발전기를 사용한 해상풍력발전단지의 경우 Tuno 지역의 해상단지의 경우는 발전 원가는 kwh당 현재 6cents에서 3.8cents로 낮아질 것으로 전망하고 있다.

또한 국의 풍력발전기 전문제작사 들은 해양풍력단지용 모델로 대형발전기를 개발보급 중에 있으며, Enercon, ABB, Lagerwey 사 등 많은 풍력발전기 제작사들이 해양풍력단지용 모델을 주력 모델로 내세우고 있는 실정이다. 현재 덴마크와 네덜란드 북쪽 해안에 대규모 해상풍력단지가 건설 중에 있으며 이들 해상단



그림 12 해상 풍력 발전단지(덴마크, 40MW)



그림 13 제주도 행원풍력발전단지

지의 용량은 각각 600MW와 100MW에 이르며, 건설비용은 kW당 약 1,560ECU와 2,250 ECU 이룰 것으로 예상된다. 또한 덴마크는 2030년까지 4,000 MW의 해상풍력단지를 조성한다는 목표를 세우고 있다.

### 국내 풍력에너지 이용현황

우리나라의 풍력발전기 이용현황은 2001년 현재 총 7.4MW의 설비가 제주도, 전남 무안 및 경북 포항 등지에서 운용 중에 있으며, 중·대형급 풍력발전기의 블레이드, 증속기 및 발전기와 전력 변환장치 및 제어장치들의 개발이 국가주도로 진행 중에 있다. 그러나 외국과 같이 중소규모의

발전단지화를 위한 시도가 없었으나, 근래에 들어 민간주도의 풍력발전단지 건설이 추진 중에 있어 풍력발전단지 건설에 관한 관심이 증대되고 있는 실정이다. 그림 13은 제주도 행원지역의 소규모 풍력발전단지로서, 1997년 정부가 시범사업으로 시작하여 매년 1,500~2,000kW씩 규모를 증설해 가고 있다.

### 발전전망

미국 및 유럽풍력에너지 학회(AWEA, EWEA)의 보고에 따르면 전 세계적으로 2000년에 설치된 풍력발전기 용량이 3,800 MW로 IAEA가 보고한 같은 기간에 건설된 원자력 발전설비의

신규 건설량인 3,056MW를 상회한 것으로 알려졌다. 또한 AWEA는 2001년 풍력산업의 성장률이 미국에서 60%, 세계적으로 34%를 기록할 것으로 예측하고 있으며 올해 신규로 건설되는 풍력발전설비에서 생산되는 전력량은 1,000MW 원자력 발전소 2기와 동등할 것으로 전망하고 있다.

지구 환경보존과 안정적이고 경제적인 에너지원의 확보라는 두 가지 목표를 동시에 이루기 위해 앞으로 풍력에너지의 이용

은 지속적으로 증가될 것이다. 또한 풍력에너지의 개발은 제한된 토지 및 에너지 자원이라는 기존의 제약 환경을 벗어나는 방향으로 나아갈 것이다. 앞서 설명한 바와 같이 초대형 풍력발전기의 개발, 풍력발전기의 단순화 및 고효율화, 해상풍력단지의 개발이 가속적으로 이루어질 것으로 전망되며, 우리나라 풍력에너지 이용을 위한 지원법규를 제정비하고, 생산전력을 우대가격으로 매입하려는 검토 중에 있으므로 이들 관련 지원제도가 수립되면 국내의 풍력에너지 이용규모는 급속히 성장될 것으로 전망된다.