

## 풍력에너지의 이용

풍력은 인류가 고대로부터 사용한 에너지원으로서 주로 양수, 도정, 관개의 목적으로 많이 이용되어왔으며 19세기에 이르러서는 신기술의 발달에 따라 발전시스템으로 활용이 가능하게 되었다. 그러나 값싼 화석 에너지원에 밀려 크게 활용이 되지 못하다가 1970년대의 에너지 위기 이후 세계 각국은 이 분야에 집중 투자하여 현재에는 MW급 풍력발전시스템을 실용화하여 사용하기에 이르렀다.

우리나라에서도 에너지위기 이후 개발을 시작하였다. 초기에는 낙도의 미전화 지역을 대상으로 소형 시스템 개발에 주력하였으며 1단계 대체에너지 기술개발사업을 추진하기 시작한 이후로 한국과학기술연구원에 의해서 계통선 연계용 풍력발전 시스템의 국산화 개발을 시작하였다. 또한 국산화와 병행하여 한국에너지기술연구소는 100 kW급 풍력발전시스템을 도입하여 계통선 연계 운전을 위한 연구를 수행하고 있다. 이밖에도 제주도는 600 kW급 풍력발전 시스템을 도입하여 설치하여 가동하고있으며 울릉도, 새만금 지역 등에서 풍력발전단지의 조성을 추진하고 있다.

### 풍력 에너지

바람은 태양에 의한 지구표면의 불균일한 가열에 의해서 발생한다. 지구의 적도 부근은 다른 지역보다 많이 가열되어 적도지방과 극지방의 온도차이는 극지방으로부터 적도 쪽으로의 찬 공기의 유동을 일으킨다. 이러한 현상은 극지적으로도 발생하게 된다. 바다나 호수 주변의 공기와 육지 주변의 공기의 낮과 밤 동안의 가열과 냉각 속도의 차이는 바람을 발생하며 산과 계곡의 경우에도 낮과 밤 동안의 불균일한 가열과 냉각은 국지적인 바람을 생성한다.

태양에너지로부터 변환되는 풍력에너지에 의해서 이론적으로 공급될 수 있는 에너지의 양은 연간  $5.3 \times 10^8$  GWh로 추정된다. 이것은 세계에서 필요로 하는 에너지 15배 이상에 해당한다.

오늘날 세계에는 약 35,000기의 풍력발전기가 12,000 MW의 용량으로 1년에 200억 kWh 이상의 전력을 생산한다. 그러나 이것은 지구 전체의 풍력 에너지에 비하면 매우 적은 양이다.

그림 1은 우리나라의 풍력에너지 밀



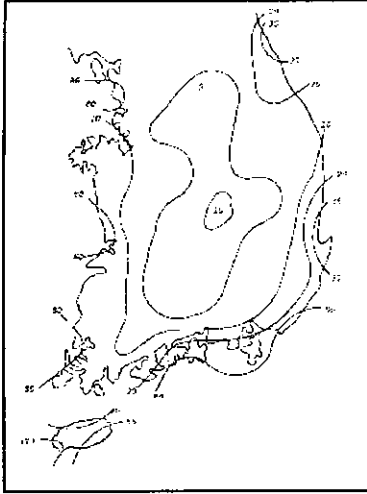
김 광 호

한국과학기술연구원  
열유동제어연구센터  
(khkim@kist.re.kr)



최 항 철

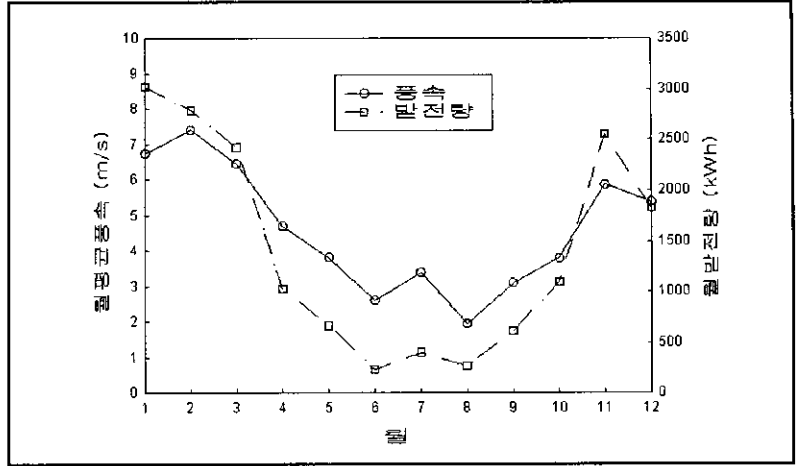
한국과학기술연구원  
열유동제어연구센터  
(choice@kist.re.kr)



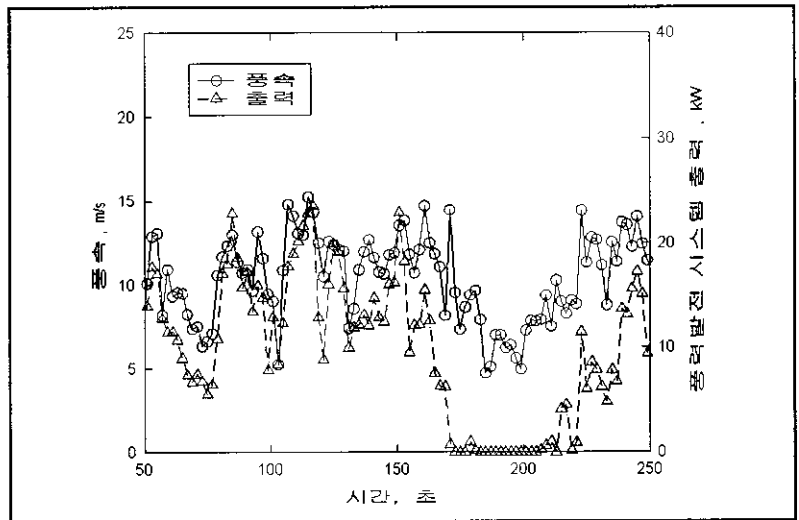
[그림 1] 우리나라의 풍력 에너지 밀도

도 분포이다. 서남 해안의 경우 평균 풍속은 약 4 m/s 이상으로 풍력에너지 밀도는 80~190 W/m<sup>2</sup> 정도로서 풍력이용 가능성이 높은 것으로 평가되고 있다. 남한의 경우 이용 가능한 공학적 부존량은 연간 약 2.16 x 10<sup>9</sup> kWh로 추정된다. 그러나 이것은 기상대의 관측자료에 기초한 것으로 관측 위치의 지형조건에 따라 크게 달라질 수 있다. 따라서 풍차를 설치하기 위해서는 설치하려는 장소의 풍차 높이에서 가능한 1년 이상의 지속적인 풍속 측정이 필요하다.

바람은 계절적으로 변화하는 특성을 가지고 있다. 우리나라는 겨울에 시베리아로부터의 북서 계절



[그림 2] 월평균 풍속과 풍력발전 시스템의 월발전량 (1988년 제주도 월령: 14kw급 풍력발전 시스템)



[그림 3] 풍속과 풍력발전시스템 출력의 변화 특성

풍에 크게 영향을 받는다. 그림 2는 제주도 월령에서 1년간 관측된 월평균 풍속의 변화와 풍력발전 시스템의 월별 전력 생산량을 보여 준다.

이것으로부터 11월부터 다음해 4월까지의 월평균 풍속이 4 m/s

이상으로 강한 바람이지만 여름에는 낮은 풍속임을 알 수 있다. 또한 풍력발전 시스템의 출력도 계절에 따라 민감하게 변화하고 있음을 알 수 있다.

풍속은 계절적으로 장기적인 변



화뿐만 아니라 짧은 시간에 매우 빠르게 변동하여 풍력발전시스템의 출력 또한 크게 변동하게 된다. 그림 3은 풍속의 변동과 그에 따른 풍력발전 시스템의 출력변동 특성의 예이다.

따라서 이와 같이 빠르게 변하는 풍력발전 시스템으로부터 일정한 양의 출력을 얻기는 어렵다. 이의 보완을 위하여 대규모 풍력발전 시스템의 경우에는 계통선에 연결하여 송전함으로써 출력의 변동성을 보완하고 있다. 그러나 소형 풍력발전 시스템의 경우에는 축전지와 같은 전력 저장장치나 디젤발전기와 같은 보조 발전 시스템과 연계하여 운영함으로써 풍력발전의 변동성을 보완할 수 있다. 그러나 풍력발전 시스템과 연계되어 있는 시스템의 용량이 풍력발전 시스템의 용량과 비교해서 충분히

크지 않을 경우 풍력발전 시스템 출력의 변동은 연계 시스템에도 영향을 주게된다. 이외에도 무효 전력의 발생, 전압 제어, 주파수 제어 등과 같이 연계 운전 중에 발생할 수 있는 여러 가지 기술적 문제가 있으며 이에 대한 연구들이 진행되고 있다.

### 풍력발전

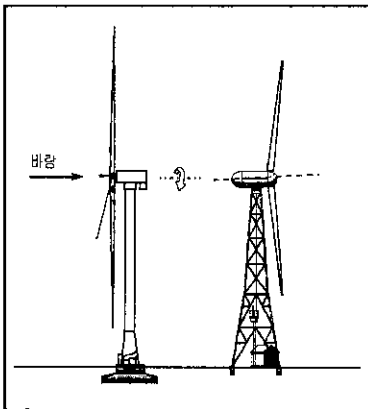
풍력발전은 바람의 운동에너지를 공기역학적인 힘을 일으키는 날개에 의해 회전에너지로 변환시키고 이 기계적 에너지를 발전기를 이용하여 전기로 변환하여 전력계통이나 수요자에게 공급하는 것으로 현재 풍력에너지 활용 방법 중에 가장 보편적인 방법이다.

풍력발전시스템의 기본 구성요소인 풍차는 다양한 형태로 되어

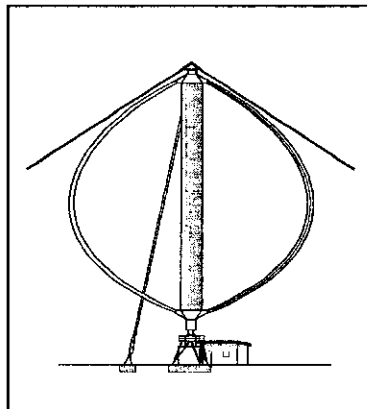
있으나 일반적으로 지면에 대한 회전축의 방향에 따라 그림 4의 수평축 풍차와 그림 5의 수직축 풍차로 분류한다.

수평축 풍차는 그림 4에서와 같이 회전자의 축이 지면과 수평을 이루며 바람의 방향과는 평행하게 된다. 수평축 풍차의 기본적인 구성은 (1) 회전자, (2) 동력전달장치, (3) 동체, (4) 철탑, (5) 기초 그리고 (6) 제어시스템과 계통 연결 시스템이 설치되어있는 지상장치이다. 수평축 풍차는 바람에 대한 회전자와 철탑과의 상대적 위치에 따라 (a) 상류형과 (b) 하류형으로 구별된다.

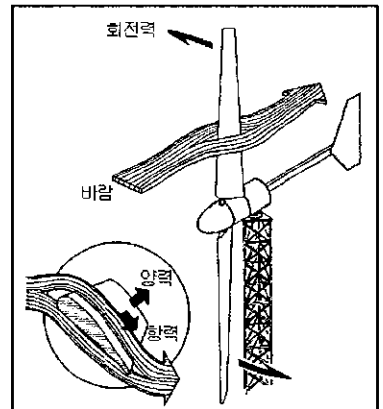
수직축 풍차는 그림 5에서와 같이 회전자의 축이 지면에 수직하도록 되어있고 따라서 바람의 방향과도 수직을 이룬다. 이 풍차는 (1) 회전자, (2) 동력전달장치, (3) 지지 구조물, (4) 기초 그리



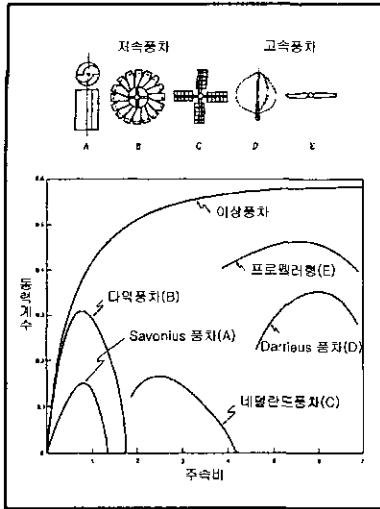
[그림 4] 수평축 풍차 (a)상류형, (b)하류형



[그림 5] 수직축 풍차



[그림 6] 풍차 날개와 적용하는 힘

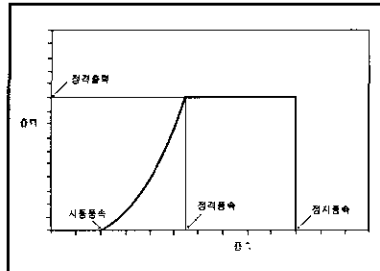


[그림 7] 풍차 회전자의 성능 특성

고 (5) 지상장치로 구성된다.

수직축 풍차는 수평축 풍차와 같은 출력일 때 수평축에 비해 토크가 크며 축 상부의 허브 베어링을 지지하기 위한 지지선의 설치 등으로 인하여 구조물에 보다 많은 재료가 보강되어야 하며 날개의 가공이 쉽지 않다. 또한 고속 회전시 실속의 위험이 있으며 실속 상태가 되면 다시 전동기에 의해서만 시동이 가능하다.

이로 인하여 바람의 방향에 관계 없이 운전할 수 있는 장점이 있음에도 불구하고 현재 계통선과 연결하여 운전하는 상업용 풍력발전 시스템(100 kW급 이상의 대형)의 경우 95% 이상이 수평축 풍차를 이용하고 있다.



[그림 8] 풍력발전시스템의 출력특성

풍차의 회전자는 바람에 의해서 날개에 발생하는 양력으로부터 회전력을 얻는다. 그림 6에서와 같이 바람이 날개 단면의 위와 아랫면을 지나가게 되면 비행기의 날개에서와 마찬가지로 아랫면의 압력이 윗면의 압력보다 커지게 되고 이 압력의 차이는 양력(lift)과 항력(drag)을 발생시킨다. 여기에서 양력은 날개를 회전시키는 토크를 발생시키며 항력은 풍차가 감당해야 하는 저항력이다. 따라서 양력과 항력의 비가 클수록 성능이 좋아지며 풍차 날개에 대한 공기역학적 설계의 주된 목표도 날개의 양항비 (lift-to-drag ratio)를 크게 하는 것이다.

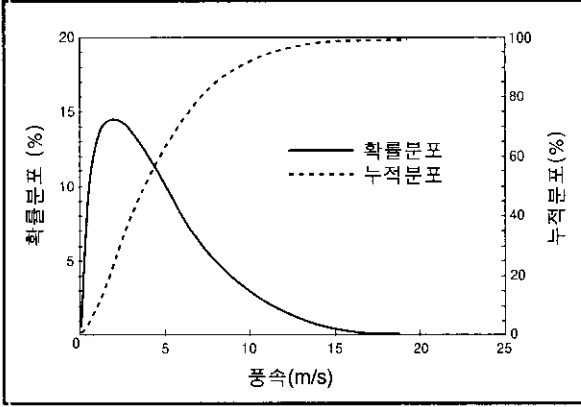
그러나 풍차에 종류에 따라서는 Savonius 풍차에서처럼 공기의 저항력에 의해서 풍차의 회전력을 얻는 경우도 있다. 그러나 이와 같이 저항력을 이용하는 풍차보다는 그림 7에서처럼 양항비가 큰 날개를 가지고 있는 고속의 수평

축 풍차의 성능이 월등히 우수함을 알 수 있다.

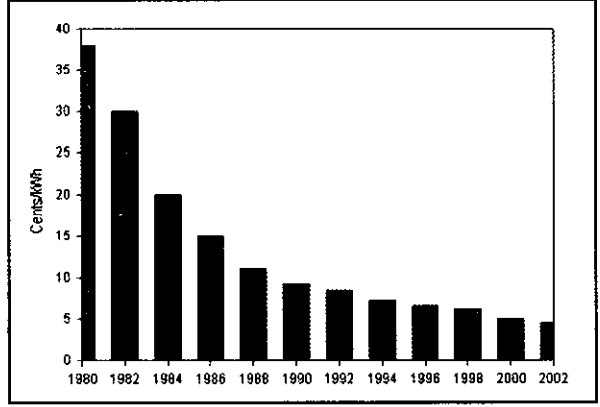
풍력발전 시스템의 출력특성은 일반적으로 그림 8과 같다. 시동풍속(cut-in wind speed)은 풍력 발전 시스템이 기동할 수 있는 최저 풍속이다. 풍차날개의 효율, 동력전달장치의 효율, 발전기의 효율 특성 등에 의해서 시동풍속 이상의 바람이 되어야 전기를 생산할 수 있게되며 일반적으로 3.5 m/s ~ 4.5 m/s이다. 시동풍속 이상에서의 풍력발전 시스템 출력은 풍속의 3승에 비례하게 되며 구성장치들의 효율을 고려하면 간단하게 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P = \eta C_p \frac{1}{2} \rho V^3 A$$

여기에서 P는 풍력발전시스템의 출력,  $\eta$ 는 동력전달장치, 발전기와 같은 구성장치의 에너지 변환 효율,  $C_p$ 는 회전자의 동력계수,  $\rho$ 는 공기의 밀도, V는 풍속이며 A는 날개가 회전한 면적이다. 이러한 출력특성은 정격풍속(rated wind speed)이 될 때까지이며 정격풍속 이상에서는 정격출력이 유지되도록 제어된다. 일정한 정격출력은 정지풍속(cut-out wind speed)이 될 때까지 유지되며 그 이상이 되면 풍력발전 시스템의



[그림 9] 풍속 분포와 누적분포



[그림 10] 풍력발전시스템의 발전단가

안전을 위하여 운전을 멈추게 되며 일반적으로 20 m/s 정도이다.

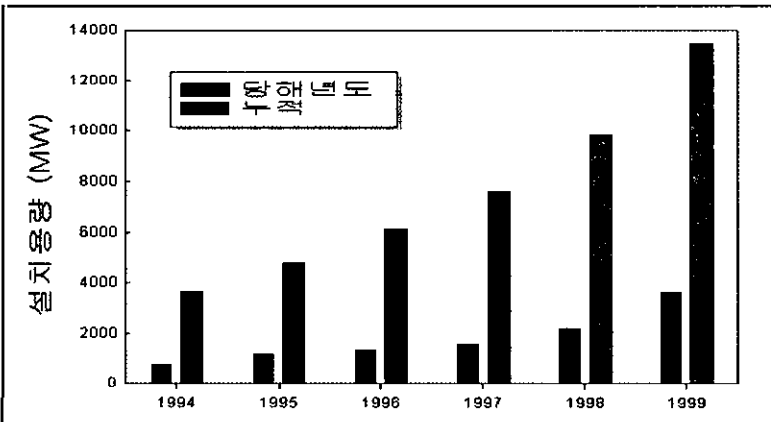
풍력발전 시스템으로부터 생산되는 전력량을 증가시키기 위해서 시동풍속을 낮추거나 정지풍속을 올리는 방법을 생각해 볼 수 있다. 그러나 그림 9의 일반적인 풍속분포 확률을 분석해보면 시동풍속을 낮추거나 정지풍속을 높이려는 노력과 비용에 비하면 그 결과로 얻는 전력 생산량에 미치는 효과는

크지 않다. 이러한 노력보다는 평균풍속이 높은 지역에 풍력발전 시스템을 설치하여 운전하는 것과 풍차가 설치된 지역의 풍속 조건에 맞는 최적의 정격풍속을 결정하는 것이 전력 생산량 증가에 기여하며 따라서 발전단가를 낮추는데 보다 효과적이다.

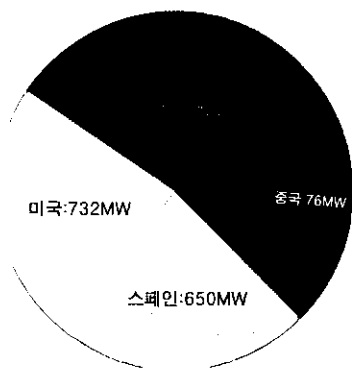
### 풍력에너지와 경제성과 시장

지난 20년 동안 상업용 발전 규모의 풍력발전 시스템의 발전단가는 80% 이상 낮아졌다. 1980년대 초의 발전단가는 30 ¢/kWh 이상이였으나 현재에는 4 ¢/kWh의 수준으로 낮아졌으며 이 가격은 화력, 수력, 원자력 등 다른 많은 기존의 발전방식과의 경쟁이 가능한 수준이다 그림 10. 또한 발전단가는 대규모 풍력발전소의 건설과 신기술의 도입으로 계속 낮아지고 있는 추세이다.

바람으로부터의 동력은 풍속의 3승에 비례한다. 예를 들어 풍속이 5 m/s인 곳에 설치된 풍차의 출력은 풍속이 4 m/s인 곳의 풍차의 거의 2배의 출력을 생산한다. 따라서 풍력발전의 경제성에 가장 중요한 열쇠는 적당한 입지의 선정이다.



[그림 11] 설치용량 추세



[그림 12] 1999년도 풍력발전 상위 5개국의 설치 용량

세계적인 풍력에너지의 설치 용량은 1990년의 2,000 MW이하에서부터 1999년 말의 13,400 MW로 약 6.5배로 급격히 증가하였으며 이미 1995년부터 1998년까지 세계적으로 4,893 MW 용량이 추가되었으며 이것은 27.75%의 세계 평균 성장률에 해당한다(그림 11).

특히 1999년에는 세계적으로 3,600 MW 이상의 새로운 풍력발전 시스템이 설치되었으며 누적 설치 용량은 1998년도까지의 누적 설치 용량 9,751 MW보다 36% 이상 증가한 것이다.

이러한 상승률로 풍력에너지는 세계에서 가장 빠르게 성장하는 에너지 기술로서 그 위치를 유지하는 것으로 보인다.

1999년 풍력 시장에서 독일, 미국, 스페인의 상위 3개국은 2,582 MW의 용량을 새로이 추가시켰으며 이것은 당해 년도에 설치된 전체 용량의 거의 64%에 달한다. 이 3개국은 1999년까지의 누적 용량에서도 60%를 차지한다. 그림 12는 1999년 풍력발전 시스템 설치 용량 상위 5개국의 국가별 풍력 에너지 시장의 규모를 보여준다.

이러한 증가 추세는 적절한 풍력에너지 이용 정책에 의해서 2020년까지 세계전력 생산의 10%를 풍력에 의해서 생산될 수 있을 것이라는 풍력 관련 기관들의 주장을 뒷받침해주고 있다. 사실 덴마크의 경우에는 이미 전력 생산의 약 10%를 풍력에 의존하고 있다. 그리고 몇몇 지역에서도 높은 수준의 풍력 이용률을 나타내고 있다. 예를 들어 독일의 Schleswig-Holstein은 약 15%를, 스페인의 Navarra의 경우에는 약 23%를 풍력으로부터 얻고 있다. 반면에 독일 전체로는 풍력 이용은 아직 2% 미만이며 1999년에 기록적인 증가 추세를 보인 미국의 경우에도 아직 1% 미만이다.

### 풍력에너지와 환경

< 표 1 > 발전방식에 따른 물 소비량

발전방식	ℓ /kwh
원자력	2.30
석탄	1.90
유류	1.60
복합발전	0.95
풍력	0.004
태양	0.110

풍력발전 시스템은 유해한 물질을 만들어 내지 않는다. 석탄, 석유, 가스 등 천연자원과 같이 채굴이나 운반과정에서 발생하는 환경 파괴도 없으며 자원의 고갈도 없다. 이와 같이 무공해의 풍력에너지의 이용은 전력생산에 따른 환경 파괴를 줄일 수 있다.

현재 미국의 경우 연간 풍력발전에 의해 생산되는 전력 60억 kWh는 450만 톤의 CO<sub>2</sub>, 23,500 톤의 SO<sub>2</sub>, 그리고 15,500 톤의 NO<sub>x</sub>의 배출을 억제하는 효과를 가지고 있는 것으로 평가되고 있다.

다른 에너지 기술과 마찬가지로 풍력발전도 환경에 영향을 주게된다. 그러나 기존의 기술들에 의해 발생하는 유해 물질이 광범위하게 영향을 주는 반면에 풍력발전의 영향은 극히 제한적이며 지역사회와의 타협으로 쉽게 해결이 가능한 것들이다. 이러한 것들로는 새



와의 충돌, 소음, 경관의 훼손 등이 있다.

새들은 건물과 같은 큰 구조물에 충돌하듯이 가끔 풍차와 충돌하게 된다. 그러나 이것은 대부분의 풍력발전소에서의 문제는 아니며 조류 보호지역이나 서식지 부근 등과 특정 지역을 피한다면 큰 문제는 아닌 것으로 평가되고 있다.

풍차로부터 발생하는 소음은 문제가 될 수 있으나 주거지와 적당한 거리를 유지한다면 해결이 가능하다. 예를 들어 직경이 40 m이고 발전용량이 500 kW인 풍력발전 시스템의 경우 95~100 dB(A)의 소음이 발생하지만 120 m 떨어진 위치에서는 45 dB(A) 수준으로 감소한다.

경관의 훼손 문제 또한 매우 지역적인 것이다. 이것은 주위 경관에 어울리는 풍력발전 시스템의 배치나 주거지역과의 적절한 거리 유지 등과 같이 지역 주민과의 적절한 타협에 의해서 해결이 가능한 문제이다.

풍력발전 시스템이 점유하는 면적은 평야 지역에서는 설치 용량 1 MW 당 약 0.2 km<sup>2</sup>이다. 그러나 풍차, 접근도로, 기타 지상 장치 등으로 인하여 직접 점유하는 면적은 이것의 5% 이내이다. 즉 나머지 95%는 농사나 목축 등의 다른 용도로 이용이 가능하다. 관련 연구에 의하면 수력은 0.75

km<sup>2</sup>/GWh의 토지를 필요로 하며 풍력의 경우에는 0.12 km<sup>2</sup>/GWh의 토지를 사용하는 것으로 보고 되었다

에너지의 생산에 사용되는 물은 매우 중요한 쟁점이 될 수 있다. 캘리포니아 에너지 위원회는 표 1과 같이 발전방식에 따른 물의 소비량을 비교하였다.

원자력이나 화력과 같은 발전방식의 경우에 물은 냉각수나 작동 매체로 사용되는 반면에 풍차나 태양에너지 시스템의 경우에는 청소용으로 약간 사용되는 것이 전부이다. 표 1을 보면 풍력이 소비하는 물의 양은 원자력의 1/600, 석탄의 약 1/500 수준임을 알 수 있다.

## 결론

풍력에너지 이용을 보다 활성화하기 위해서는 기술개발과 정책적 지원들이 적극적으로 이루어져야 한다.

현재 세계적으로 발전단가를 낮추기 위한 많은 기술개발이 진행 중이며 그 연구의 방향은 크게 두 가지이다. 그 하나는 풍력발전 시스템의 구성 요소들의 성능을 개선하여 시스템의 효율을 향상시킴으로써 에너지 생산량의 증대와 이에 따라 발전단가를 낮추는 것

이다. 이러한 연구에는 고효율의 날개 개발, 첨단 소재의 개발 등이 있다. 다른 방향의 연구는 풍력발전 시스템 용량을 최적화 하는 것으로 관련 기술의 발전에 따라 풍력발전시스템의 용량은 대형화하고 있으며 발전단지도 대규모화되고있는 추세이다.

기술개발과 병행하여 정책적인 지원도 병행되고 있다. 풍력발전을 상업화하는 초기단계에서는 기존의 에너지원의 진입장벽을 극복하기 위한 정책적인 배려가 필요하며 상업화에 적극적인 나라들의 경우 풍력에너지 이용의 활성화를 위해 초기단계에서는 세금의 감면이나 생산 전력 구매 등에서 장려금을 제공함으로써 풍력에너지 이용을 촉진시키고 있다.

또한 장기적으로는 풍력에너지의 이용에 대한 대중들의 긍정적인 자세가 필요하며 기존의 전력회사들의 자세도 보다 긍정적이고 적극적인 필요가 있다. 따라서 이를 위한 정책의 마련과 실천은 풍력에너지 이용을 성공으로 이끄는 열쇠가 될 것이다.

