

## 풍력발전 기술

이 글에서는 재생 가능 에너지 중 가장 경제성이 있어서 기존의 화석연료 발전소와도 가격 경쟁력을 가지고 있는 풍력발전 기술의 현황과 시장전망에 대해 소개하고자 한다.

경남 호 / 한국에너지기술연구원 신재생에너지연구부 풍력연구센터장

e-mail : nhkyong@kier.re.kr

화석연료 부존자원의 유한성과 그로 인해 발생되는 온실가스의 위해성이 밝혀짐에 따라 풍력 에너지 기술은 중소 규모의 분산형으로도, 혹은 대단위로도 유연하게 저가의 청정에너지를 확보할 수 있는 가장 유망한 대안의 하나로 부상하고 있다. 풍력 에너지 기술은 바람의 운동 에너지를 전기 에너지로 변환하는 기술로서 구미 각국은 이미 1980년대에 대규모의 육상 풍력 발전 단지를 조성해 온 바 있으며 해상 풍력발전 단지도 1991년도에 세계 최초로 덴마크에 건설되었다. 1990년대에 기후 협약 문제가 세계적인 초미의 관심사로 등장한 시점에 즈음하여 유럽의 풍력 에너지 기술은 비약적으로 발전하여 풍력 발전 기기의 신뢰성이 현저히 높아졌고 가격 경쟁력도 유럽에서는 석탄, 석유 등의 화석 연료와 비교할 수 있을 정도로 향상되었다.

이에 유럽 공동체는 2010년까지 유럽 공동체 전체 사용 에너지의 12%(전력 비율은 22%)를 재생 가능 에너지로 대체할 계획을 가지고 있으며 기술 개발과 더불어 풍력 발전 단지 개발과 보급을 정책적으로 지원하고 있다. 이 중 풍력 에너지의 용량은 4,500만 kW에 달할 것으로 예상되고 있으며 이 양은 현재 우리나라

라 전체의 전력 생산 용량(5,000만 kW)과 대등하다. 인도, 중국 및 일본에서도 풍력 발전 시스템을 자체 생산하여 적극 보급하고 있으며 용량이 이미 수십만 킬로와트에 달하고 있다. 특히 일본은 기후 협약에 대비하여 최근 풍력 발전 산업이 더욱 활성화되고 보급도 가속화되어 목표를 초과 달성하고 있을 정도이다. 이 글에서는 풍력발전 기술에 대해 간략한 개요와 시장전망에 대해 설명하고자 한다.

### 풍력발전시스템 개요

풍력발전시스템은 그림 1에 나타낸 바와 같이 회전자, 허브, 주축 및 증속장치 등을 포함하는 기계동력전달시스템, 발전기, 발전기 제어장치 및 계통연계

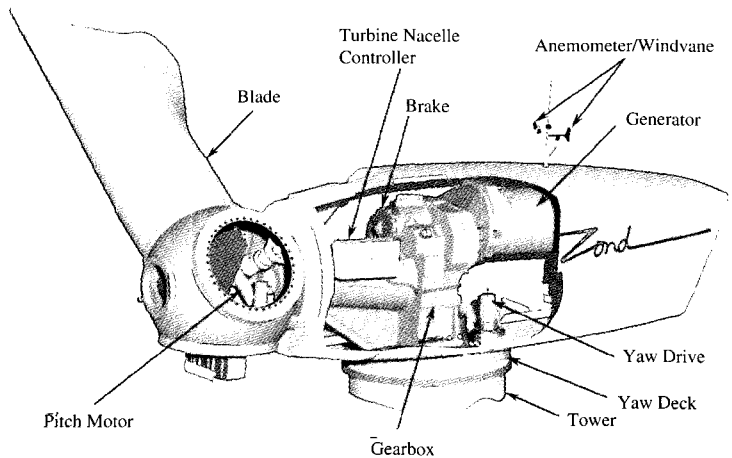


그림 1 풍력발전시스템 구조

장치를 포함하는 전기시스템, 피치제어장치, 요(yaw) 제어장치, 출력제어장치, 제동장치, 안전장치 및 중앙제어 감시장치를 포함하는 제어감시시스템 및 지지타워, 토목기초 등의 기타시스템으로 구성된다.

풍력발전시스템을 구성하는 기계동력전달시스템에는 바람의 운동에너지를 회전동력으로 변환시키는 회전자(blade, 회전날개), 날개에서 발생한 회전동력을 주축으로 전달하며 회전날개를 지지 고정하고 있는 허브(hub), 허브로부터 집합되어 전달된 회전동력을 전달하는 주축(main shaft)과 주축으로부터 전달된 회전동력을 발전기의 동기속도에 맞게 증속하여 전달하는 증속장치로서 구성된다.(다극형 발전기의 사용으로 증속장치 없이 회전자 주축과 발전기가 직결된 형태의 직결형 동력전달시스템으로 구성되기도 함)

또한, 전기시스템으로는 발생한 기계적 회전동력을 전기동력으로 변환하는 발전기, 유도형/동기형 및 영구자석형 등 발전기의 형태에 따라 발전기의 정상출력 및 과출력을 제어하는 발전기 제어장치, 발전기에 의해 생산된 전력을 계통에 안정된 품질을 유지하며 공급하는 인버터 또는 인버터/컨버터 등의 계통연계장치와 기타 역률보상장치 및 soft-starter 등의 부속기기로서 구성되며, 제어감시시스템으로는 회전자 날개의 피치각을 제어하여 최적 운전점, 과 출력 및 공력 제동장치로서의 역할 등을 제어하는 피치 및 출력제어장치, 바람방향의 변화를 추적하여 기계동력전달시스템의 방향과 일치시키도록 요잉(yawing)시키는 요 제어장치, 비상/점접시의 회전

자 및 발전기의 제동과 일정방향의 유지를 위한 요 제동기(yaw brake)를 포함하는 제동장치, 풍력발전시스템의 안전 운전 감시를 위한 안전장치와 전 시스템의 운전감시와 제어를 통한 안전운전을 보장하는 중앙제어감시 장치로서 구성된다.

풍력기술을 대표하는 풍력발전시스템을 분류하면 크게 네 가지의 방식으로 구분할 수 있다. 우선, 구조상 분류로는 풍력발전시스템의 주축의 지면에 대한 방향으로 구분함. 즉, 주축이 지면에 대해 수평인 시스템은 수평축 풍력발전시스템, 수직인 시스템은 수직축 풍력발전시스템으로 구분하며, 대표적인 풍력기기형태로는 수평축은 통상의 프로펠러형, 수직형은 다리우스형이 있다.

운전방식상 분류로는 풍력발전시스템의 주요 구성기기인 발전기의 형식에 따라 회전자의 운전방식이 정속운전과 가변속운전 방식으로 구분되며, 정속운전은 주로 발전기가 농형 유도기기일 경우 발전기와 회전자의 회전속도가 구속되어 일정 회전속도를 유지하며 운전하는 방식을 말하며, 가변속 운전은 권선형 유도발전기나 동기발전기(또는 영구자석형 발전기)를 사용시 일정범위 이상으로 회전자의 가능 회전속도 운전범위가 허용되는 방식을 의미한다.

출력제어방식상 분류로는 과풍속시 풍력발전시스템의 과출력을 제어하는 방식에 따라 실속제어방식과 피치제어방식으로 구분한다. 실속제어방식은 과속시 날개에 발생하는 실속현상에 의해 날개에 작용하는 회전토크를 제어하는 소동적 방식의 출력제어 방식이며, 피치제어방식은 능동적으로 날개의 피치각을 유압기구나 전동기기로서 제어하여 날개의 변

표 1 풍력기술의 분류

구 분	용 도
풍력발전시스템 기술	풍력시스템은 소형(100kW 이하), 중형(100-900kW), 대형(1,000kW 이상) 등으로 용량기준으로 분류하며, 용도에 따라서는 계통연계형과 독립전원형이 있으며, 시스템과 직접적 관계인 설계, 제작, 설치 및 운용 등을 포함하는 기술
풍력기반 기술	풍력자원의 측정분석 및 예측과 풍력발전 단지의 조성 및 관련 설비 및 경제성·타당성 분석과 관련하여 풍력기술의 확대를 위한 기반구축 기술
풍력응용 기술	한전 계통과의 연계 또는 기타 분산형 전원과의 연계운전에 필요한 시스템 통합운용 체계 구축과 타 자원과의 연계 및 원격운용 등을 포함하는 응용 풍력 기술

\* 풍력시스템의 용량별 분류는 국제적으로 정해진 것은 아니고, 각기 국가나 기관별로 통상 편의적으로 분류하고 있음.

표 2 풍력발전시스템의 분류

구조상분류 (회전축방향)	수평축 풍력발전시스템(프로펠러형)
	수직축 풍력발전시스템(다리우스형)
운전방식상 분류	정속운전(fixed rotor speed turbine)
	가변속운전(variable rotor speed turbine)
출력제어방식상 분류	실속제어방식(stall regulated type)
	피치제어방식(pitch regulated type)
전력사용방식상 분류	계통연계(grid connected type)
	독립 및 복합운전(stand-alone and hybrid type)

환효율을 제어함으로써 과출력을 제어하는 방식이다.

전력사용방식상 분류로는 풍력발전시스템에서 생산된 전력과 운용형태에 따라 계통연계방식과 독립 및 복합운전방식으로 구분된다. 한전계통과의 연계운전에 의한 연계방식과 미전화 도서나 낙도 등지에서 독립적인 전원형태의 독립형 발전방식 또는 디젤과 기타의 타 전원과 복합연계운전의 복합운전방식 등으로 구분된다.

### 풍력발전 국내 동향

우리나라도 1998년 9월 교토 의정서에 서명하여 2018년도부터는 협약을 이행하여야 하는 상황에 처해 있으나, 1990년도부터 1996년도의 이산화탄소 배출량 증가율이 75%로서 세계 1위를 기록하고 있는 우리나라는 에너지 소비증가량이 선진국의 4~5배에 이르며, 낮은 에너지 효율과 높은 석유 및 석탄 의존도(80% 이상)에 의해 온실가스 방지 정책 및 기술개발에 대한 노력이 절실하여, 풍력발전시스템에 대한 기술개발과 보급기반 조성에 보다 많은 노력을 기울여야 할 것이다.

국내에서는 1970년대의 유류파동 이후 풍력발전 연구를 시작하였는데, 1975년도에 한국과학기술원(KAIS)에서 경기도 화성군 잇섬에 설치한 2kW급 풍력발전기가 국내 풍력발전기의 호시이다. '90년대 들어 본격적으로 보급과 기술개발이 병행하면서 국내에서도 신뢰성을 이

미 확보한 선진외국의 풍력설비를 도입하여 풍력발전기에 대한 설치 운영 및 보급사업이 활발히 진행되었다. 1998년도부터 제주도청이 600, 660kW

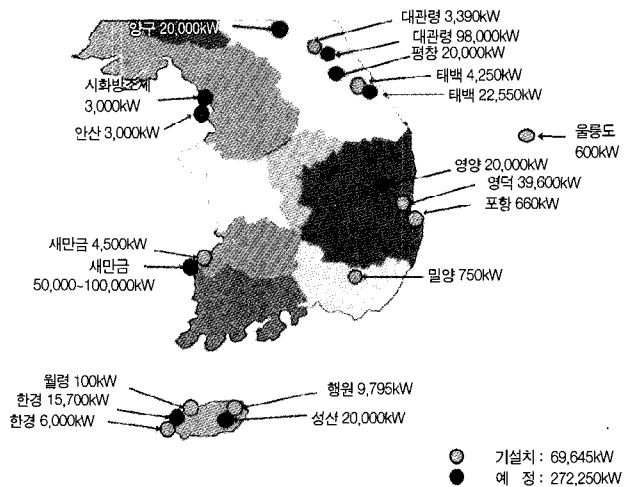


그림 2 국내 풍력발전단지 및 보급 전망

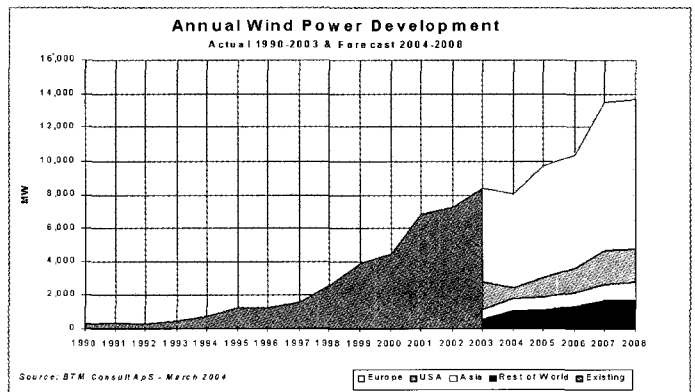


그림 3 세계 풍력발전 보급 전망

및 750kW 풍력발전설비를 제주 행원 풍력발전 단지에 설치 운전 중에 있으며, 1999, 2000 및 2001년도 사업으로서 2002년 5월 말까지 750kW 풍력발전시스템 5기를 추가로 건설하였고, 현재 총 16기에 9,795kW에 이르는 상업적 풍력단지로서 최초로 풍력발전 설비를 이용하는 의미 있는 사례로서 예시되고 있다. 이 밖에도, 현재 민간자본 투자로는 최초로 남부발전(주)에서 6MW 규모의 풍력발전단지를 건설하였으며 20MW로 확장할 예정이다. 이어 2005년 4월 40MW 규모의 영덕 풍력발전단지가 (주)유니슨에서 건설하여 가동 중에 있다.(그림 2)

### 풍력발전 국외 현황 및 전망

세계적으로 풍력발전 기술은 2003년 말에는 40,301MW, 2002년 말에는 32,037MW의 풍력발전 설비의 보급과 연간 82.24TWh/년 및 64.8TWh/년 이상의 전력을 생산하는 청정 에너지 기술로서, 세계적으로도 가장 빠르게 성장하고 있는 발전 기술로서 최근 5년간의 연평균 산업규모 성장률이 26.3%에 이르는 고도성장 기술이라 할 수 있다.

그리고 그동안의 선진국 보급 중심에서 점차 전 세계적으로 보급 확대되고 있는 상황이다. 현재, 풍력발전 전력의 전력수요에 대한 공급률도 덴마크의 경우에는 전체 전력수요의 18% 이상, 독일과 네덜란드는 약 1.0~3.3%, 미국 캘리포니아는 약 1.5% 정도를 차지하고 있을 정도이다.

1990년대 후반 이후 풍력발전 설비의 보급이 기

하급수적으로 증가하고 있는 것을 보이고 있으며, 이러한 경향은 2000년대와 그 이후에도 계속될 것으로 전망되고 있다. 그림 3에서는 각 대륙별 2002년과 2003년도의 풍력발전 설비의 보급증가 추이를 보이고 있다. 2003년도에 건설된 8,344MW 중에서 미주 지역이 21.8%, 유럽 지역이 66.5%, 아시아 지역이 6.2% 정도의 비율을 차지하고 있고, 2003년도 누계로는 유럽 지역이 29,301MW, 미주 지역이 6,905MW, 아시아 지역이 2,707MW 정도의 보급 누계량을 보이고 있다.

2003년 말 현재, 세계적으로는 유럽 지역이 38,242여 대의 풍력설비 대수 및 용량 기준으로 66.5%의 풍력설비를 점유하고 있으며, 독일, 미국, 스페인, 덴마크 등 네 개국이 30,469MW의 풍력설비 규모로서 세계 보급량의 75.6%로 대부분을 점유하고 있는 상황이다. 그러나 풍력발전 설비용량의 절대치가 유럽이 차지하고는 있으나, 최근 인도, 일본, 중국 등 유럽외의 국가에서 증가하는 추세를 보이고 있다. 한편, 최근 5년간의 풍력기술 시장의 평균 성장률은 약 31.7%에 이르고 있으며, 최근 3년간의 시장 성장률을 기준으로 할 때 독일(33.8%), 스페인(31.3%), 미국(34.6%) 및 이태리(29.5%)가 초고속으로 성장하고 있으며, 아시아권에서는 일본(75.1%) 및 중국(17.5%)로서 풍력발전 기술의 보급시장을 주도하고 있는 상황이다.

현재 풍력발전 기술은 전 세계에서 가장 빠르게 성장하고 있는 기술로서 2006년도까지는 연간 20~25% 정도 성장하고, 2010년도에 세계 보급량은 180,000MW 설비에 440TWh/년의 전력을 생산할 것으로 전망되고 있다. 그리고 10년 이내 가장

표 3 향후 풍력발전 설비의 대륙별 보급 전망

지역 \ 연도	2003년	2004년	2005년	2006년	2007년	2008년	총 누계(MW)
미 주	1,818	950	1,500	1,900	2,550	2,550	16,355
유럽	5,549	5,560	6,625	6,770	8,800	8,925	65,981
남/동아시아	521	720	770	790	940	1,050	6,977
OECD-태평양	352	590	650	650	875	875	4,717
기타 지역	104	215	195	285	285	285	1,576
신규 설치(MW)	8,344	8,035	9,740	10,395	13,450	13,686	95,606
설치 누계(MW)	40,301	48,336	58,076	68,471	81,921	95,606	

실용적인 발전기술로서 자리 잡을 것으로 예상되고 있으며, 2020년 기준으로 전 세계 전력수요의 12%를 공급하며, 세계 시장 규모는 1,500~4,000억\$/년, 세계 보급량은 180,000~474,000MW에 이를 것으로 전망되고 있다.

그러나 다소 보수적으로는 덴마크의 BTM Consult ApS에서는 표 3과 같은 전망을 예측하고 있어, 다소 변화를 보이

고 있는으나, 향후에도 가장 빠르게 발전하는 발전기술이라는 점에는 변화가 없을 것이다.

꾸준한 풍력기술의 발전으로 현재는 풍력기기의 대형화와 고 신뢰도화가 이루어져, 설비 도입 실적을 기준으로 하는 경우 평균 설비용량은 지역, 기술 수준 등에 따라서 차이를 보이고 있으나, 독일의 경우에는 1999년 919kW, 2000년 1,101kW, 2001년 1,281kW, 2002년 1,397kW 및 2003년 1,650kW로서 지속적으로 증가하여 2012년에는 수MW에 이를 것으로 전망되고 있다. 그리고 풍력기술 및 시장의 규모가 커짐에 따라, 풍력설비의 저가화 및 비용 저감에도 큰 발전이 있어, 2002년도의 평균 설비비가 765US\$/kW에서 2012년에는 529US\$/kW로 31% 정도로 획기적으로 하락할 전망이며, 아울러 발전단가는 2010년 평균풍속이 7.5m/s를 기준으로 할 때 3.61센트/kWh에서 2.5센트/kWh로서 약 40% 정도 저감될 수 있을 것으로 예측되고 있다.

풍력발전기술은 2003년 현재 5개 정도의 선진 제작사의 시장 지배 구조 하에서 성장기에 진입하는 기술이고, 기술의 도입도 유럽 및 미국 등 10여 개국에 세계 누적 시설용량의 90% 이상을 차지하는 등 지역 편중이 심한 기술적 특성을 지니고 있다. 그러나 지속가능 사회에 대한 사회적 욕구의 증대와 풍력발전 기술의 경쟁력 강화 등에 힘입어 범세계적으로 시장 확대가 가속화될 것이며, 특히 풍력발전 기술은 선진국에서는 대형화, 단지화를 통한 자원 개발

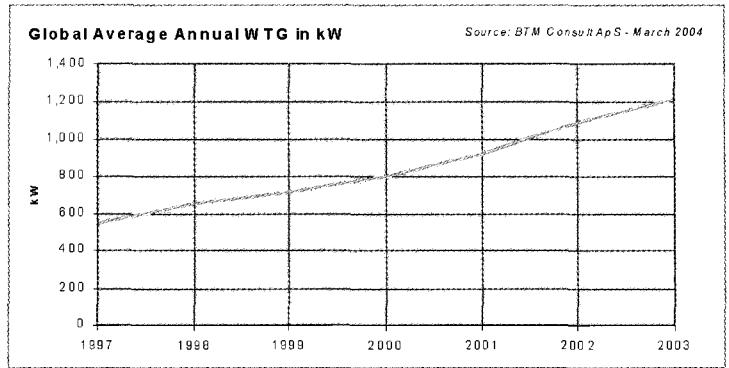


그림 4 풍력발전기 평균 용량 대형화 추이

및 발전사업의 형태로, 저개발국의 경우에는 미전화 지역에 현대적 개념의 에너지를 공급하는 전화 사업 등 다양한 형태로 사업화가 진행되어 풍력산업의 시장은 향후 10년간 연평균 20~25% 정도로 지속적으로 성장할 전망이다.

또한, 풍력기술의 개발이 거듭되어 최근에는 풍력산업에 의한 단위 풍력기기의 평균 용량도 대형화를 거듭하고 있는 상황이다. 단위 풍력발전 설비의 용량이 1980년대 초의 25kW/대에 비하여 현재 평균 1,200kW/대급에서 최근에는 2,500kW급의 단일 풍력발전기기가 상용화되기에 이르렀으며, 3,600kW급 풍력발전기기는 날개의 직경이 104m, 타워의 높이가 90~100m 정도에 이르는 거대 구조물의 규모를 하고 있다.

이 밖에도, 선진 외국에서의 풍력산업의 보급형태가 대규모 단지화되고 있으며, 해양 풍력자원을 이용하는 풍력산업의 발전도 비약적으로 이루어지고 있는 상황으로서, 선진국에서는 해양풍력(offshore) 시장에 대비하여 3,000kW~5,000kW급의 대형 풍력발전 설비도 개발을 진행 중에 있다.(그림 5)

한편, 풍력기술은 향후에도 2006년도까지는 연간 20~25% 정도로 성장하고, 기술의 시장규모는 100억\$/년에 이를 것으로 전망되고 있으며, 2020년에는 세계 전력수요의 12%, 2030년에는 20% 이상을 담당할 것으로 예상되는 발전 지향적 산업으로서 청정에너지 시장을 주도할 핵심 기술로서 주목받고 있다.