

해외 풍력발전기술의 동향과 전망

김두훈 · 류지윤

(유니슨산업(주) 기술연구소)

1. 풍력발전기 기술의 개요

풍력발전은 바람이 갖는 에너지를 이용하여 전기를 생산하는 기술이다. 바람은 태양의 복사열과 지구의 자전에 의해 생기는 공기의 흐름임으로 바람도 태양에너지의 일부라 할 수 있고, 이런 자연현상에서 발생하는 에너지 임으로 청정성과 고갈되지 않는 지속성을 갖는 에너지로 이를 대체 에너지 또는 재생에너지, 신에너지로 정의하고 있다.

바람을 이용하는 기술은 고대 페르시아 등지에서 곡식을 찧는 방아, 물을 퍼올리는 양수기등으로 활용되었으며, 바람을 이용하여 전기를 생산하는 풍력발전기의 효시는 1891년 덴마크의 Poul La Cour가 개발한 풍력발전기이며 [그림 1] 그 이용기술이 근래들어 지속적 발전함에 따라 현대의 화석연료를 대체하는 대안에너지로 각광받고 있다.

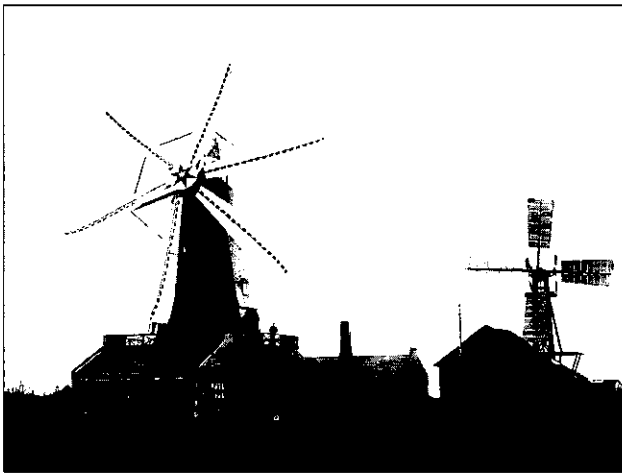


그림 1. 최초의 풍력발전기(1891년, Denmark)

풍력발전기는 바람에너지를 기계에너지로 변환하는 회전자(Rotor blade)와 나셀(nacelle)로 불리는 동력장치실 내부에는 동력전달장치, 증속기(gear box), 발전기 및 요잉장치 등이 있고, 이들 부품들을 지지하는 철탑과 철탑 바닥에는 무인운전을 가능하게 하는 제어장치들로 구성되어 있다.

풍력발전기는 시스템의 형태에 따라 수직축 풍력발전기(VAWT, vertical axis wind turbine)과 수평축 풍력발전기(HAWT, horizontal axis wind turbine)로 분류된다 [그림 2].

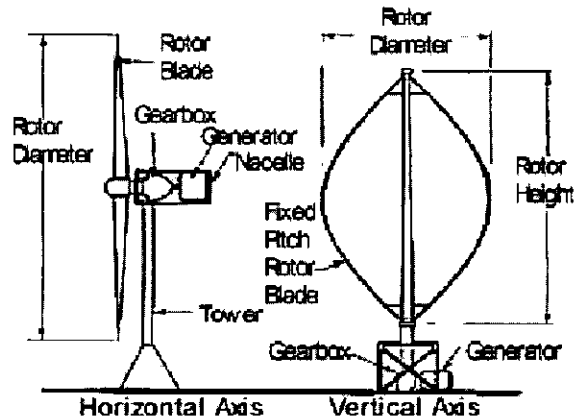
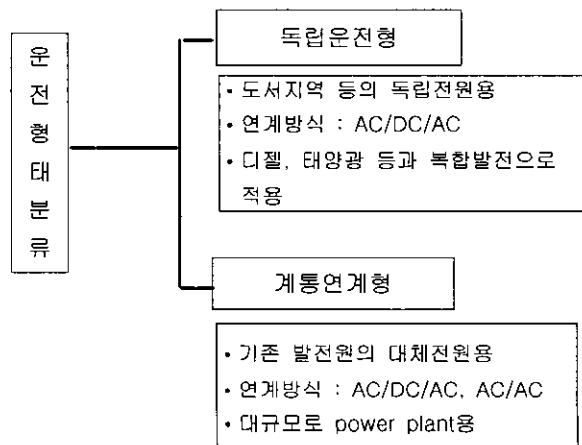


그림 2. 풍력발전기의 형태별 분류

풍력발전기를 운전형식에 따라 분류하면 다음과 같이 독립운전형(stand alone type)과 계통연계형(grid connection type)이 있다.



독립운전형은 전력계통이 없이 생산된 전력을 사용자에게 직접공급하는 방식으로 저장장치인 축전기와 보조전력인 디젤발전기 등과 함께 복합적으로 사용되는 형태로서 도서지역, 산간오지, 등대 및 통신장비 전원용 등으로 활용되고 있다. 그림 3은 독립운전형 발전시스템의 전력공급개념이다.

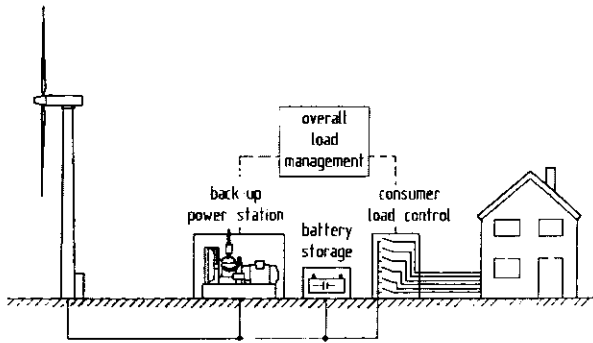


그림 3. 독립운전형 발전기의 사용 예

현대들어 풍력에너지 이용의 급속한 증가를 가져온 분야는 기존 전력계통선에 풍력발전기를 병렬연계하여 생산전력을 계통선에 공급하는 계통연계 방식으로 대규모로 건설되어 발전소의 역할을 하는 방식이다. 이를 풍력발전단지(wind park 또는 wind farm)라고 한다. 1기의 용량이 1,500kW인 풍력발전기가 20기 설치된 풍력발전단지의 용량은 30MW가 되어 기존발전소를 대체하는 발전소(power plant)가 되는 것이다 [그림. 4]

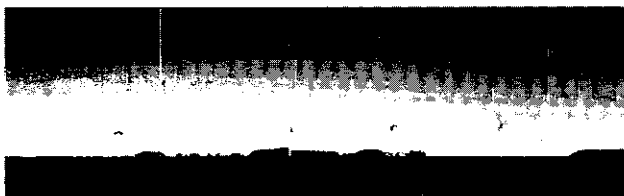


그림 4. 미국에서 운용중인 풍력발전단지 (미네소타주, Lake Bemont)

계통연계형 풍력발전기는 연계되는 전력계통의 조건에 맞게 Low/Medium/High Voltage로 계통에 연계됨으로 변압기(trasformer), 계통연계장치 등을 포함하여 구성되어 있다. 그림 5는 계통연계형 풍력발전기의 연계 개념이다.

2. 풍력발전의 장점

바람에너지를 이용하여 발전하는 풍력발전의 중요한 장점은 다음과 같이 정리할 수 있다.

2.1. 환경친화성 에너지

화석연료를 이용한 발전설비의 경우 전력 1kWh생산에

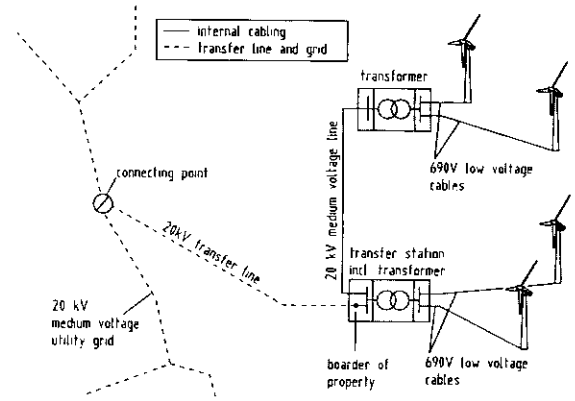


그림 5. 풍력발전단지의 계통연계 개념도

850g의 CO₂, 2.9g의 SO₂, NO_x 2.6g, Slag 55g 및 Dust 0.1g 등이 대기중으로 배출되는 것으로 알려져 있다. 풍력 발전을 이용할 경우 공해물질의 배출저감 효과에 상당한 잇점을 제공한다. 1997년 유럽연합국가들이 풍력 발전을 이용함으로써 얻어진 공해물질 저감효과는 다음과 같다.

Parameter	Quantity
풍력발전기 설치용량	4,425MW
에너지 생산량	8.8 TWh/yr
CO ₂ 배출 저감량	7,800,000 tons/yr
SO ₂ 배출 저감량	26,000 tons/yr
NO _x 배출 저감량	22,000 tons/yr

또한, 모든 발전설비들은 건설과 운용단계에서 환경에 영향을 미치지지만 풍력에너지의 이용은 그 영향을 최소화할 수 있다.

풍력발전소의 경우 발전단지 전체면적 가운데 99%의 토지를 농업, 목축 등의 용도로 활용할 수 있는 잇점을 갖고 있다.

2.2. 무한정의 자원성(sustainable resource)

유럽지역에서는 이용가능한 풍력에너지 자원량을 예측하려는 시도가 있었다. 이들 연구는 년평균풍속이 5.1m/sec 이상인 지역에서 토지이용 여건을 고려하여 5%만이 풍력발전기를 건설할 수 있다고 가정하면 전세계에 분포된 풍력자원은 약 20,000~50,000 TWh/년 정도인 것으로 연구되었다 [표]. 1994년 한해동안 전세계에서 소비된 전력량이 12,500 TWh임을 감안할 때 풍력에너지는 무한한 자원이며, 전력설비 분야의 기술이 발전될수록 활용가능한 에너지량은 더욱 증가될 것으로 예측되고 있다.

2.3. 화석에너지와의 가격경쟁성

대체에너지 또는 재생에너지 사용의 가장 큰 문제점은 전력생산가격이 고가여서 현실적인 사용성이 떨어지는 점이었다. 그러나 이들중 풍력에너지는 지속적인 기술개발과 시스템의 대형화 및 대단지화를 통해 가장 경제성이 확보된 에너지원으로 평가되고 있다 [그림 6].

표 1. 대륙별 풍력에너지 잠재량

Region	Grubb and Meyer [1] (TWh/annum)	Wijk and Coelingh [2] (TWh/annum)
Africa	10 600	-
Australia	3 000	1 638
North America	14 000	3 762
Latin America	5 400	-
Western Europe	480	520
Eastern Europe and CIS	10 600	-
Rest of Asia	4 900	-
Total OECD		6351
Approximate world total	50 000	20 000
World consumption of electricity in 1994	12 500 TWh/annum	
OECD consumption	6 351 TWh/annum	

미국의 경우 1980년 풍력발전의 평균생산원가는 30 cents/kwh 였으나, 2000년에 4.7cents/kWh로 기존 에너지원과도 경쟁력있는 발전기술이 되어가고 있다.

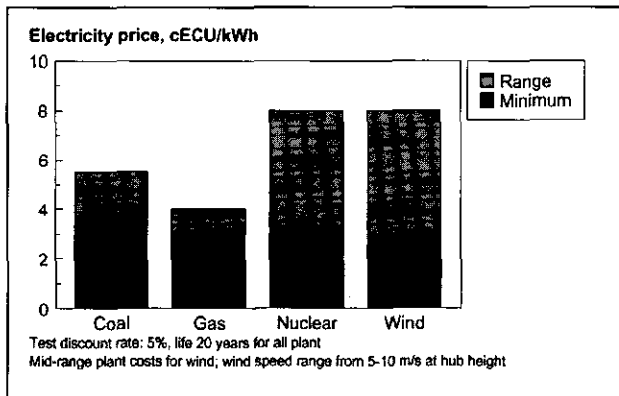


그림 6. 발전원별 생산원가 비교

3. 풍력에너지 이용의 해외 동향

1990년대 들어 지구온난화 현상으로 대두되는 환경문제와 자원의 고갈우려, 고유가 시대에 대한 대책으로 세계각국은 자국의 여건에 맞는 지원육성 프로그램을 수립하여 풍력산업의 발전을 주도하기위한 투자를 강화하고 있다. 표 2는 주요 국가별 풍력에너지 이용 목표 및 육성프로그램이다.

BTM Consults의 보고에 의하면, 2000년 12월말현재 세계 45개 국가에 보급된 풍력발전기 규모는 총 17,706MW로, 우리나라의 전체 발전설비규모(1999년) 51,587MW의 30%를 초과하는 규모이다. 특히 유럽국가들이 90년 후반부터 원자력 발전의 증설을 중지하면서부터 풍력발전기 이용보급은 비약적으로 성장하여, 연평균 30%가 넘는 성장률을 보이고 있으며, 세계 풍력발전기 보급규모는 2004년에 47,512MW, 2009년에는 130,000MW에 이를것으로 전망되고 있으며, 1999년 약 38억불이었던 세계시장의 규모는 2004년에 280억불에 이를것으로 전망되고 있다[그림 7].

표 2. 해외 주요국가들의 육성프로그램

국 가	육성프로그램/목표
미 국	National Energy Policy, 1992 2010년까지 전력소비량의 2% 대체
독 일	Energy Research and Technology, 1996 2005년까지, 25%의 CO ₂ 저감
덴마크	Energy 21, 1996 2005년까지, 전력소비량의 12%
스페인	Royal Law, 2366 2010년까지 전력소비량의 12%
일 본	New Sunshine, 1993 2010년까지, 300MW 보급

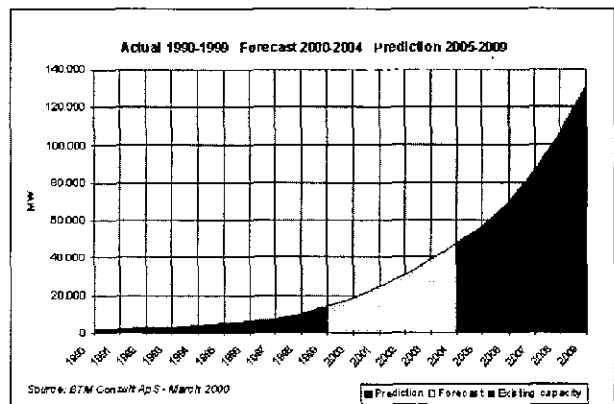


그림 7. 풍력발전기 세계시장 보급규모 및 전망

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

4. 전력·전자기술의 역할과 구성

4.1. 전력·전자기술의 역할

계통 연계형 풍력발전기가 생산전력을 전력계통에 병입하기 위해서는 전력 계통의 일반적인 표준조건(standard requirement)에 만족되어야 하며 이들 요구조건들은 주로 전력계통의 보호성과 생산전력의 품질조건의 충족을 규정하고 있다. 또한, 풍력발전기는 안정적으로 무인자동운전이 가능해야 하는 장치임으로 이들 조건을 만족시키기 위해서는 고유의 전력생산의 목적에 부가한 전력·전자장치의 기술이 요구되고 있다.

4.2. 발전장치의 종류 및 구성

풍력발전기에 사용되는 발전기는 풍력발전기의 운전특성과 계통의 연계특성에 따라 달리 적용되며, 수십년동안 많은 변화를 가져왔다. 풍력발전기는 로타의 회전속도가 바람

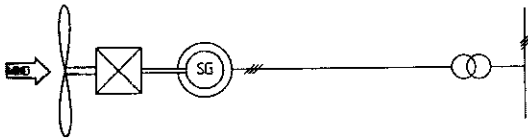
의 량에 따라 고정되는 고정속(fixed speed)과 변화되는 가변속(variable speed)형으로 대별된다.

이들 특성에 따라 사용되는 발전기의 종류를 구분하면 다음과 같다.

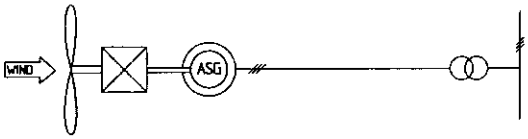
① 고정속 발전장치(Fixed speed generator)

고정속 발전장치는 계통에 직결하여 사용하는 것이 보편적이며, 다음 두가지 종류의 발전기가 사용되고 있다.

- 동기발전기(synchronous generator)

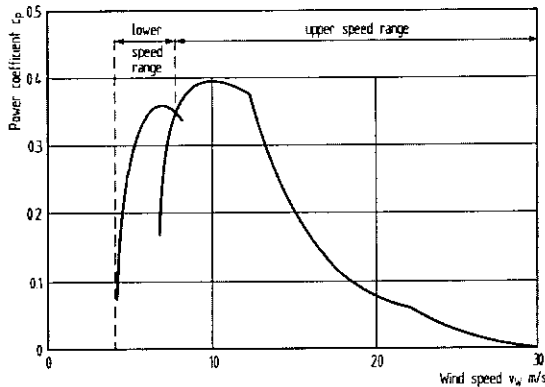


- 유도발전기(induction generator)



② 다단속 발전장치(Multi-speed generator)

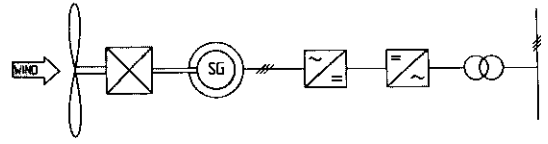
· 일반적으로 2단계의 속도변화가 가능토록 사용하며, 저풍속 대역에서는 작은 발전기를 고풍속에서는 용량이 큰 발전기를 사용하여 로타의 속도를 단계적으로 변화시키는 방식이다. 주로 유도발전기를 운전중 극변환(pole change)을 통해 발전기 속도를 변화하는 방식이다. 전통적인 농형유도발전기를 채택한 풍력발전기 제작사들이 대형풍력발전기에 적용하여 사용하는 형태이다. 아래 그림은 2단 변속기능을 갖는 풍력발전기의 풍속 변화에 따른 각 발전기의 동력계수, Cp의 변화를 도시한 것이다.



③ 가변속 발전장치(Variable speed generator)

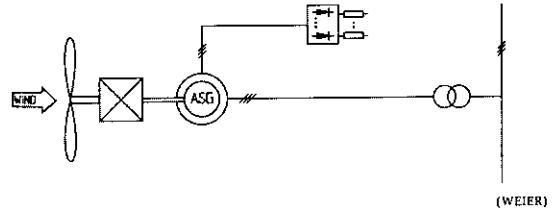
- 정주파수 변환기를 갖는 동기발전기

일반적의미에서 전운전 범위에서 로타속도가 변화되는 발전장치의 개념으로 출력주파의 특성변화를 On-line 된 인버터에서 전력계통의 요구조건을 충족시키는 방식이다.



- 슬립제어 유도발전기

유도발전기에서 Slip값의 허용영역을 확대시키고 이를 제어함으로서 일부분의 속도를 가변속으로 운전되게 하는 제어방식이다.



- 직접구동형 발전기

대형풍력발전기에서 채택이 두드러지고 있는 직접구동형 방식으로 동기발전기 방식에서 로타와 발전기 중간에 위치한 증속장치를 제거한 형태이다. 따라서, 발전기는 기존의 발전기들과는 달리 많은 극(pole)을 갖도록 설계되어야 한다. 일반적으로 소형 독립형 모델에서는 32극 발전기가 사용되고 있으며, 중대형 발전기에서는 80극이 넘는 발전기가 사용되고 있다.



4.3. 전력 및 전자부품의 구성과 역할

근래들어 메가와트 용량의 풍력발전기가 시장의 주류를 형성하면서 많은 시스템들이 가변속 운전방식을 채택하는 경향을 나타내고 있으며, 전력전자 장치들은 전체시스템 가격의 25~35%를 차지하는 정도에 이르고 있다. 표3은 풍력발전기에서 전력·전자 장치들을 구성하는 부품과 구성비로서 동기발전기와 인버터를 채택한 가변속 운전방식의 대형 풍력발전기의 예이다.

표 3. 전력·전자부품의 구성

Component	Cost share (%)
AC generator (synchronous, 4 pole)	15%
Frequency inverter (AC/DC/AC)	25%
Harmonic frequency filter	4%
Low voltage system for control systems 24VDC, 110V(220), transformer, inverter	4%
Auxiliary service supply $\phi 3 \times 220V$, driving units	10%
Safety systems lightning protection, safety lights	5%
Power transmission and grid connection	15%
Control system	7%
Assembly and cabling	15%

5. 해외 풍력발전 기술의 동향

90년대 이후의 국외 풍력발전기술의 동향은 크게 시스템의 대형화, 구조의 단순화를 통한 생산원가의 하락과 해양 풍력발전 단지 개발로 정리할 수 있다.

5.1. 풍력발전기의 대형화

블레이드 제작기술과 타워 구조물 제작 기술 등 관련 기술이 발달함에 따라 미국과 유럽을 중심으로 로터 직경이 60~90m에 정격용량이 1,000~3,000kW에 이르는 메가와트급 풍력발전기들이 개발되고 있다. 1992년 한해동안 독일에 설치된 풍력발전기의 평균 용량은 대당 200kW 미만이었던 것이 1995년에는 두 배 이상이 커진 450kW를 기록했고, 4년이 지난 1999년에는 또다시 2배인 919kW로 커졌으며 2000년 상반기에는 1,071kW에 이르고 있으며, 2001년 현재는 2MW급 풍력발전기 모델이 개발되어 공급중에 있으며 3~5MW에 이르는 Multi-Megawatt 풍력발전기의 상업화가 목전에 와 있는 실정이다.

이러한 풍력발전기 대형화의 잇점은 첫째, 단위 용량 당 건설비 및 설비비의 감소, 둘째, 대형화에 따른 에너지효율의 증가로, 대형 풍력발전기의 출력증가는 로터 직경이 커짐에 따른 로터 직경의 2.35승에 비례적으로 증가한다. 이는 타워의 높이 상승에 따른 평균풍속의 증가에 의한 용량 및 이용율이 증가하기 때문이다. 이런 대형화를 통해 풍력발전의 단가는 2004년에 4cents/kwh, 2010년에는 2.5cents/kwh로 낮아질 전망이다.

5.2. 시스템 구조의 단순화

현대들어 전력전자기술의 급격한 발전으로 풍력발전시스템의 구성 요소중에서 기계장치들이 전기장치로 교체됨으로써 기계적 구조가 단순되는 특징을 보이고 있다 [그림 8]

즉, 현재까지의 풍력발전기는 로터의 회전속도를 증속기를 통해 기계적으로 증속시켜 유도발전기를 통해 계통에 직접 연계하는 풍력발전기가 가장 널리 보급되어왔다.

그러나 근래에 들어와 로터의 회전속도를 기계적으로 증가시키는 기어장치를 제거하고 유도발전기 대신 다극형 동기발전기를 이용하여 이를 전기적으로 해결하는 직접구동, 풍력발전기의 개발이 새로운 분야를 자리를 잡고 있다.

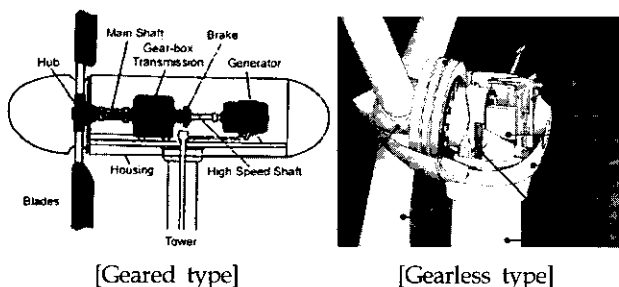


그림 8. 풍력발전기의 형태별 비교

이는 AC/DC/AC 계통연계 장치들을 포함한 전기장치들의 제작기술이 발달되고 가격이 낮아져 지속적인 유지보수가 필요한 기계적 장치를 단순하고 효율과 유지·보수면에서 유리한 전기장치로 변경하려는 현상이 두드러지고 있다는 것이다.

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

5.3. 해양풍력발전단지(offshore wind farm) 건설

덴마크, 네덜란드, 독일 및 영국 등은 해안에서 수km떨어져 수심이 5m~20m 바다위에 풍력발전기를 설치하는 해양 풍력발전단지를 개발중에 있다. 이 해양풍력발전단지는 내륙의 설치공간의 제약에서 벗어나 해상의 우수한 풍력자원을 이용하고 저 난류성으로 인한 시스템의 수명증대를 가져올 수 있는 장점이 있다. 이런 장점에도 불구하고, 해상 구조물의 높은 설치비용으로 인해서 그동안 실용화 되지 못하였으나, 대형풍력발전기 개발의 성공으로 인하여, 단위기의 용량을 대형화 할수 있음으로 발전단지의 경쟁성을 확보해가고 있는 실정이다. 표3은 유럽지역에 건설되었거나 진행중인 해상풍력발전단지의 현황이다.

덴마크 전력회사들의 경제성분석 결과에 따르면 대당 용량 1,500kW 풍력발전기를 사용한 해상풍력발전단지의 경우 Tuno지역의 해상단지의 경우는 발전원가는 kwh당 현재 6cents에서 3.8cents로 낮아질 것으로 전망하고 있다.

표 3. 해상풍력발전단지 현황(1997년 현재)

Location	Date	Capacity	Cost ECU/kW
Vindeby, DK	1991	4.95	1939
IJsselmeer,NL	1994	2	1900
Tuno,DK	1995	5	2120
Gotland,SW	1997	2	1400
Scroby, UK	Planned	37.5	1173
IJmuiden, NL	Planned	100	2250
Laeso, DK	Planned	600	1560

또한 국외 풍력발전기 전문제작사 들은 해양풍력단지용 모델로 대형발전기를 개발보급 중에 있으며, Enercon, ABB, Lagerwey사 등 많은 풍력발전기 제작사들이 해양풍력단지용 모델을 주력 모델로 내세우고 있는 실정이다.

현재 덴마크와 네덜란드 북쪽 해안에 대규모 해상풍력단지가 건설 중에 있으며 이들 해상단지의 용량은 각각 600 MW와 100MW에 이르며, 건설비용은 kW당 약1,560ECU와 2,250ECU 이를 것으로 예상된다. 또한 덴마크는 2030년까지 4,000MW의 해상풍력단지를 조성한다는 목표를 세우고 있다.

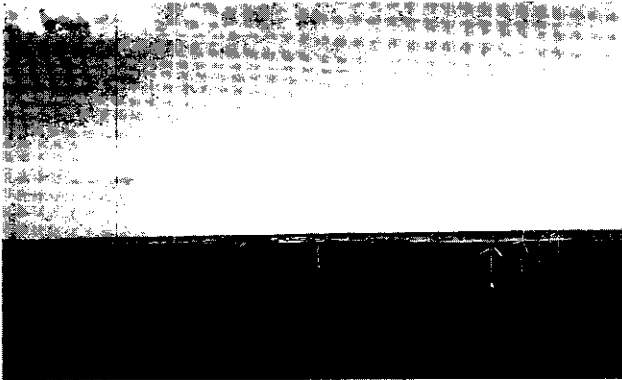


그림 9. 덴마크에 건설된 해상풍력발전단지

6. 발전전망 및 결론

우리나라에서도 1970년도부터 풍력발전기에 대한 개발을 추진하였으나, 산업화로 발전할 수 있는 시장여건의 결여로 상업화에는 성공하지 못한 실정이며, 현재 정부주도로 소규모 풍력단지들이 구성되어 2001년 현재 총 7.4MW 용량의 풍력발전기가 설치되어 있다. 그러나 최근들어 정부주도의 사업구조에서 민간이 투자하여 풍력에너지를 이용하려는 시도에 점차 관심이 증가되고 있으며, 정부정책 또한 기술개발과 병행한 이용보급 사업에도 역점을 두고 있어 국내에서의 풍력에너지 이용은 급속히 증대 될것으로 전망된다.

특히, 미국 및 유럽풍력에너지 학회(AWEA, EWEA)의 보고에 따르면 전 세계적으로 2000년에 설치된 풍력발전기 용량이 3,800MW로 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 1000MW 원자력 발전소 2기와 동등할 것으로 전망하고 있다.

지구 환경보존과 안정정적이고 경제적인 에너지원의 확보라는 두 가지 목표를 동시에 이루기 위해 앞으로도 풍력에너지의 이용은 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 고 효율화, 해상풍력단지의 개발이 가속적으로 이루어질 것으로 전망된다.

저 자 소개



류 지 윤 (柳 智 允)

1967년 11월 18일생. 영남대학교 기계공학과 졸업. 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사). 현재 유니슨 산업(주) 기술연구소 책임연구원.



김 두 훈 (金 斗 勳)

서울대학교 기계설계학과 졸업. 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학석사). 호주 Monash University 기계공학과(공학박사). 현재 유니슨산업(주) 기술연구소장. 1998~현재, 기술표준원 음향 진동시험 실무위원. 1998~현재, 산업자원부, 기술개발 기획평가단 위원. 1999~현재, 소음진동공학회 사업이사.