

풍력에너지의 이용 및 기술 현황

이영호* · 김범석**

1. 국가적 아젠다 - 환경보전과 자연에너지 이용

석탄과 석유와 같은 화석연료의 사용은 지구환경 및 생태계에 심각한 영향을 미쳐 왔으나 환경피해와의 인과관계가 단기간에 걸쳐서 표면화되지 않기 때문에 이에 대한 사회적비용은 고려되지 않았다. 2002년도에 발표된 기후변화에 관한 정부간패널(IPCC) 제3차 보고서에 의하면 지구온난화의 진행이 현저해진 1990년대 이후부터는 홍수나 해일 그리고 가뭄과 같은 환경재해가 분명하게 증가하고 있다. 예를 들어, 지난 100년간 지구온난화의 영향으로 해수면이 10~20 cm 가량 상승하였으며 다가오는 2100년에는 최대 88 cm에 이를 것으로 예상하고 있다. 또한, 원유를 운반하는 유조선의 사고에 의한 해양오염은 매년마다 발생하여 해양생태계나 연안어업에 심각한 피해를 주고 있다. 그러나 이러한 오염방제나 환경파괴 회피를 위한 비용은 석유가격에 거의 반영되지 않는 실정이다.

또한 최근의 이라크사태는 전쟁을 반대하는 많은 사람들로 부터 "석유확보를 위한 전쟁"으로 인식되고 있다. 우리나라도 석유 및 가스의 안정적인 확보 및 미국을 비롯한 강대국과의 호의적인 관계를 유지하기 위한 방안으로서 파병안을 어렵게 선택하였으며, 이에 소요되는 막대한 비용도 당연히 화석연료의 수입원가로서 산정되어야 할 것이다.

원자력의 경우에도 직접적인 사고에 의한 대규모의 환경파괴 및 인명피해, 방사성 폐기물에 의한 오염, 핵무기로의 전용과 테러 위험이 상존하고 있다. 나아가, 원자력발전의 연료인 우라늄을 포함한 모든 자원은 유한하며 이대로 사용을 지속하면 석유는 40년 정도, 천연가스과 우라늄은 60년정도밖에 남아 있지 않은 실정이다. 즉, 21세 후반에 가서는 전통

적인 에너지자원이 모두 고갈되어 버리는 상황에 직면하게 된다.

그리고, 에너지를 소비하여 환경오염과 지구온난화를 초래함으로써 발생하는 사회적 비용은 에너지혜택을 받음과 동시에 사용후 배출에 대한 책임을 져야 하는 선진국의 사람들뿐만이 아니라 오히려 혜택에서 멀어진 3세계의 사람들과 후속세대가 부담하여야 하는 모순이 있다. 따라서, 지구 공동체의 일원으로서 차세대 후손에게 더러운 유산을 남기지 않도록 하기 위한 시민사회의 성숙한 공론이 절실하게 필요한 시점이다.

한편, 자연에너지에 대하여 회의적인 사람들은 "자연에너지는 불안정하다, 비싸다, 사용하기 어렵다"라고 불평을 한다. 그러나 석유나 천연가스도 자국에서 생산되지 않는 한 늘 가격폭등의 위험에 직면하고 있으며 환율변동에도 큰 영향을 받는다. 한편, 자연에너지는 화석연료와 같이 편재하지 않고, 날씨가 좋은 곳에서는 태양광, 바람이 부는 곳에서는 풍력, 물이 풍부한 곳에서는 수력과 같이 조건에 맞게 선택할 수 있는 에너지원이다. 또한, 이러한 시설들은 일단 설치하기만 하면 불안한 국제정세와 불확실한 환율변동에도 좌우되지 않는다. 이것뿐만이 아니라 기술발전 및 양산효과에 의하여 해가 갈수록 설치가격이 대폭 낮아지고 있다. 또한 인간에게 해를 주지도 않고 장래에도 자연환경을 훼손하지 않음으로서 사회적 비용에 대한 염려가 전혀 필요 없다. 따라서, 자연에너지는 이러한 눈에 보이지 않는 가치를 모두 고려하면 화석연료나 원자력보다도 태생적으로 훨씬 저렴한 에너지원인 것이다.

한편, 우리나라는 이러한 자연에너지를 보다 효율적으로 개발·이용하기 위하여 교토의정서의 가입 및 적극적인 실천이 국가적 아젠다로서 추진되어야 할 시점에 처해 있다. 지구 환경보호를 위한 온실가스배출량 절감을 주요목표로 하는 동 국제협약에 대한 유럽의 노력을 살펴보면 다음과 같다.

2003년 2월, 미국과 영국에 의해 이라크 공격준비가 진행되는 도중에 영국은 "우리의 에너지미래-저탄

* 한국해양대학교 기계·정보공학부

** 한국해양대학교 대학원 기계공학부

E-mail: lyh@pivlab.net, bum_suck@pivlab.net

소경제의 창조"라고 하는 백서를 발표하여, 2050년까지 영국의 온실가스 배출량을 60%까지 삭감하는 것을 공약하였다. 이것은 그동안 영국이 보여 왔던 자연에너지의 개발자세에 대한 의문점을 결정적으로 해소시키기에 충분한 내용으로 평가되고 있다. 이를 위한 주요정책으로서는 에너지의 이용효율화와 자연에너지의 도입이다. 영국에서는 자국 전력생산량중 자연에너지원으로부터의 발전비율을 2010년까지 10%, 2020년까지 20%를 충당한다고 하는 목표를 이미 발표하였다. 그러나 이의 순조로운 달성을 위하여 신정책에서는 목표달성을 위하여 연차보고서를 발표할 것, 추진책으로서 자연에너지에 대한 추가적인 투자 및 자연에너지산업에 대한 세금우대, 세금공제 및 육상·해상 풍력발전단지 설치에 대한 새로운 법규를 만드는 조치를 취하였다. 영국은 북해유전을 보유한 산유국이나 석유자원이 고갈되어 감에 따라 2010년경에는 산업혁명 이후 처음으로 에너지 수입국이 될 입장에 처해 있다. 따라서 영국정부의 전략은 이러한 점을 충분히 고려한 것으로 볼 수 있다. 프랑스도 영국과 같은 시기에 온난화 방지계획을 수정 발표하였다. 즉, 2050년까지 1990년의 배출량 대비 75%의 삭감, 즉, 배출량을 1/4로 저감시키는 것이다. 2002년에 독일은 2020년 목표치로서 90년 대비 40% 삭감을 발표하였으나, 영국과 프랑스의 것은 이보다 훨씬 진취적이며 야심적인 것으로서 금후 EU전체가 장기적인 목표치를 설정하고 이를 달성하기 위한 국가적 총력을 기울일 것으로 예상된다. 미국은 현재 교도의정서에 참여하고 있지는 않으나 2002년~2012년 사이에 온실가스를 18% 감축한다는 목표아래 자연에너지개발, 에너지효율개선, 수소연료, 탄소고정기술 등에 막대한 예산을 투자하고 있다.

다음으로 자연에너지를 효율적으로 이용하기 위한 사회적 인프라로서 전력시장의 자유화와 분산형 에너지발전이라고 하는 선진국형 시스템의 도입을 염두에 두어야 한다. 지금까지의 발전사업은 전형적인 자연독점형산업으로서 국가나 대기업에 의한 집중적인 대규모 발전을 원칙으로 하였다. 즉, 발전소와 송전망 그리고 배전망을 모두 소유함으로써 소비자의 의사와 무관하게 전력수급을 행하였다. 그 결과, 우리는 대규모 중앙집중형 발전소로부터 만들어진 전기가 초고압 송전망을 경유하여 먼 곳에 떨어진 수요자에 도달하는 일방통행의 전력공급 시스템을 경험하면서 살아왔다. 따라서, 에너지의 일방적인 수요자로서 이러한 전력수

요·공급체계를 당연한 것으로 받아들여 왔다. 그러나 지금부터의 새로운 전력시장은 발전소와 수요자의 양방향성을 고려하여야 한다. 즉 수요자는 전력을 소비하는 쪽만이 아니라 풍력발전과 같은 분산형 에너지를 생산하는 기능도 갖게 된 것이다. 수요자 즉, 고객은 전기를 사용하는 것뿐만이 아니라 전기를 만들어서 공급 할 수 있으며, 시간대에 따라서는 사용하지 않은 전기를 판매하여 이익을 낼 수도 있다. 이러한 새로운 전력시장 메커니즘은 오랫동안 연구되어 왔고 본격적인 실현을 목전에 두고 있으며, 분산형 발전이 가능하도록 혁신적인 에너지 기술개발이 이루어지고 있다. 예를 들어, 독립적으로 전기를 생산할 수 있는 수십 킬로와트 급의 마이크로 가스터빈이 판매되고 자동차용 연료전지와 같이 전기에너지를 저장할 수 있는 장비와 인프라들이 속속 시장에 출현하고 있는 추세이다. 또한 자연에너지를 이용하여 발생시킨 전기에너지를 기존의 전력망에 연결시키는 계통연계기술의 발달로 인하여 에너지의 상호공급이 가능하게 되었다. 이러한 배경으로부터 지역의 에너지는 지역에서 생산하여 공급·소비하고자 하는 "커뮤니티 에너지"의 발상이 크게 각광을 받고 있다. 이의 실현을 위해서는 자연에너지를 이용한 전기생산, 특히, 해상풍력에 의한 대형 상업발전이 선도적인 역할을 할 것으로 예상된다.

2. 풍력발전기술

현대적인 의미의 풍력발전기는 덴마크의 Poul La Cour에 의하여 1891년에 만들어진 것이 최초이며, 1903년에는 덴마크풍력발전회사가 세계최초로 설립되었다. 현존하는 덴마크의 3대 업체가 풍력발전기를 본격적으로 생산하기 시작한 것은 1979년이며, 이전까지는 농업용 수송기계를 제작하거나, 물탱크제작을 전문으로 하거나, 관개 및 급수설비를 제작하여 왔다. 이후, 다양한 형태의 풍력발전기가 이들 업체를 중심으로 개발되어 1981년에는 날개직경 15m, 최대출력 55kW의 풍력발전기가 덴마크의 VESTAS사로부터 출시되었다. 이후 지속적으로 대형화를 위한 기술개발과 시장 확대정책에 힘입어서 2000년을 전후하여 1,000kW급이 출시되어 MW시대가 열리게 되었다. 지금은 날개직경이 110m를 넘고 1기당 최대출력이 5,000kW에 이르는 소위 "멀티메가와트"의 대형기가 만들어지고 있으며 기술적으로는 10,000kW의 초대형 해상풍력발전기도 수년내에 가능한 시점에

와 있다. 따라서 현대의 풍력발전 기술의 키워드는 풍력발전기의 대형화이며, 이를 바탕으로 한 발전프로젝트의 대형화로 볼 수 있다. 이와 같이 대형기를 선호하게 된 배경에는 전력회사의 영향이 크다. 즉, 화력이나 원자력발전소는 대부분 출력이 수십만kW로 대규모이기 때문에 풍력발전소에도 이와 같은 규모의 경제성을 요구하게 되었고 이에 대응하기 위한 대형기의 개발이 필요하게 되었다. 또한, 이를 집적하여 수용하기 위한 대형 풍력발전단지의 개발이 중요한 과제로 대두되었다. 그중에서도 대형 풍력개발 프로젝트로서 각광을 받고 있는 것이 off-shore wind farm (해상풍력발전단지)이다. 수심 20~30 m까지의 해상에 설치되는 풍력발전기는 대형이 적합하며, 현재 유럽에서 5,000 kW급이 시운전중이다. 이와 같은 대형풍력발전기를 육상에 설치하는 경우에는 전체무게가 수백톤을 초과함으로써 도로를 이용한 운반이 사실상 어렵다. 특히, 50m를 초과하는 긴 풍력날개를 운반하기 위하여는 직선도로의 확보가 선결과제로서 이의 해결이 현실적으로 어려운 경우가 많다. 그러나, 해상의 경우에는 임해지역에서 만들어진 대형 부품들을 선박이나 바지선에 탑재하여 이송과 설치가 가능함으로써 운반상의 문제점을 해결할 수 있는 장점이 있다.

한편, 덴마크의 코펜하겐 상과대학의 Karnoe교수를 중심으로 사회과학의 입장에서 풍력발전기술을 국제적으로 비교분석한 연구결과가 제시되어 있다. 연구의 요점은 덴마크와 미국의 풍력발전 개발과정을 비교하고 톱다운 방식에 의한 대기업 중심의 미국식 기술개발이 중소기업 중심의 바텀업식 기술개발을 추진하였던 덴마크를 이기지 못하고 시장에서 패퇴하였다는 것이다. 즉, 기술혁신과 기업규모 간에는 정의 상관관계가 있다고 하는 오스트리아 경제학자 슈페터의 가설이 성립하지 않는 대표적인 예가 덴마크의 풍력발전 산업임을 적시하고 있다. 한편, 이러한 톱다운식 기술개발경향이 독일과 네덜란드에서도 유사하게 나타나고 있다는 점이 흥미롭다. 독일의 풍력발전 기술의 풍토는 과학적이며 이론 지향적이었다. 독일에서는 피팅겐 대학의 공기역학연구소의 알베르트 베츠가 풍력발전 이론정립에 큰 기여를 하였다. 또한, 2차 세계대전 전에는 무선탑 설계의 1인자였던 헤르만 혼네프가 높이 250 m, 로터직경 60 m이상의 대형풍력발전기를 설계하였으나 실현시키지는 못하였다. 이어서, 휴터는 이론적으로 완벽한 고효율, 경량 풍력발전기의 제작을 목표로 하여, 3매의 덴마크식 날개대신 고속회전을 하

는 단일날개 설계를 제안하였으나 실용상 많은 문제점이 노출되어 상업화에 이르지 못하였다. 1979년에는 Growian 개발 프로젝트가 추진되어 타워높이가 100미터, 날개직경이 100 m, 정격출력이 3 MW인 세계 최대의 발전기가 1983년에 완성되었다. 그러나 4년간 불과 420여 시간의 운전실적에 그쳤으며 금속피로와 베어링 및 기어의 결함 등으로 1988년에 해체되었다. 결국 독일은 정부가 대형풍력발전기의 개발을 주도하며 첨단기술을 모두 동원하였으나 상업적인 성공까지 이르지 못하고 풍력발전의 보급에도 공헌하지 못하였다. 독일은 최첨단의 기술을 연구하고 있는 과학자가 풍력발전 기술개발을 주도하고 정부나 대기업이 개발을 하여 나가는 톱다운 방식을 채택하였다. 대표적인 연구자인 휴터는 항공공학의 전문가로서 미묘한 벨런스로 비행하는 항공기에 비하여 풍력발전기는 훨씬 단순한 기계로 여겼으며, 항공기술을 이용하면 간단하게 새로운 풍력터빈을 개발할 수 있다고 믿었다. 그러나 미국에서와 같이 풍력발전에 대한 기술적인 오만함이 앞서고 이론을 중요시 하는 경향에 치우침으로서 경험중심의 덴마크에 승리하지 못한 점이 지적되고 있다. 현재 독일의 풍력발전기 제조업체로서는 1984년 설립된 Enercon사가 독보적이며, 세계최초로 증속기어가 없는 기어리스방식을 개발하였다. 또한, 가변속, 동기발전기, 피치제어 등의 최신 기술들을 채택하고 있다.

네덜란드는 풍차의 나라로 가장 유명한 나라임에도 불구하고 지금은 풍력발전 산업에서 주도적인 지위를 상실하고 있다. 네덜란드는 풍차에 관한 오랜 전통을 가지고 있는 나라로서 현대적인 풍력발전기의 개발에 다양한 국책 프로그램을 동원하였으나 결과는 독일에서와 같이 성공하지 못하였다. 수백년간 네덜란드에서 사용되어 왔던 풍차가 쇠퇴하게 된 결정적인 계기는 증기터빈의 등장이었다. 1835년에는 3,000기에 달하였던 풍차가 1890년에는 1,800기로 감소하여 점차 자취를 감추었다. 2차 세계대전 후 1950~1960년대에 풍력발전에 대한 연구가 일부 시도되었으나 당시의 값싼 석유의 사용과 특히, 원자력 발전에 대한 기대감이 커서, 1973년에 제1차 오일쇼크가 발생하기 1년 전에 모든 개발연구를 종료하였다. 제1차 오일 쇼크 이후인 1980년에 에너지백서 제2권이 발표되었다. 그러나, 네덜란드 정부는 풍력발전은 발전비용이 높고, 풍력에너지에 대한 신뢰성이 낮으며, 발전 전력의 보존문제, 그리드 (송전망)로의 접속문제 그리

고 도시근처의 경관문제 등을 들어 대규모 풍력발전 단지의 건설을 금지하였다. 한편, 국책 기술개발 프로젝트(NOW1)가 1976년부터 5년간에 걸쳐서 시행되었다. 그러나 풍력발전에 회의적이었던 전력회사는 공동연구에 참가하지 않았고 1981년부터 시작된 NOW2에는 전력회사가 기술개발에 참여하였으나 상용화개발은 성공하지 못하고 종료되었다. 그 결과 당초 2000년까지 450 MW의 설치용량을 목표로 하는 NOW2의 계획은 1985년까지 불과 6.5 MW에 그쳐 목표달성이 매우 어렵게 되었다. 이를 해결하기 위하여 1986년부터 1990년에 걸쳐서 풍력발전 국내시장 육성책인 IPW프로그램을 도입하였다. 여기에서는 상업용 발전기 기술개발에 대한 보조금을 프로젝트 경쟁에 의하여 선정된 업체에 지원하도록 하고, 설치용량의 확대를 위하여 전력회사가 참가하도록 하였다. 그 결과 1988년에는 발전기의 80%를 전력회사가 구입하여 윈드파크를 조성하였다. 그리고, 풍력발전기의 구입시 보조금 지원은 인증테스트에 합격한 것만을 대상으로 하였으며, 출력에 비례하여 kW당 보조금액이 결정되고 해수가 지날수록 보조금액이 작아지도록 하였다. 따라서 모든 제조업체는 대형기의 생산에 매달려 1988년에 당시 세계의 대형기시장을 선점할 수 있는 250 kW 발전기가 인증테스트에 합격하였다. 이해에 덴마크에서는 오랜 경험을 가진 VESTAS사보다 작은 규모인 200 kW발전기를 출시한 시점이기도 하였다. 그러나, 네덜란드의 업체들은 충분한 경험을 보유하지 못하고 대형기를 개발함으로써 많은 기술적인 문제를 발생시켰으며 큰 출력에도 불구하고 국제 경쟁력을 유지하지 못하였다. 또한, 보조금을 선진기술이 집약된 대형기 개발업체에 할당하기 때문에 많은 연구개발비가 소요되었다. 그 결과 회사경영이 압박을 받음으로서 자금문제를 해결하기 위하여 많은 회사가 합병 또는 도산되어 소수기업의 과점형태로 옮겨가는 계기가 되었다. IPW이후에는 새로이 TWIN프로그램이 1992년부터 1995년까지 시행되었다. 설치용량 목표는 2010년까지 2,000 MW를, 그중에서 200 MW를 해상풍력으로 신설하는 것이었다. 또한, 대형발전단지의 조성을 목표로 하여, 대형기의 개발을 다시 추진하게 되었다. 그 결과 1994년에 당시 국내시장 점유율 1위였던 네드윈드사가 1MW급 인증테스트에 합격하였다. 이것은 덴마크의 VESTAS사의 것보다 약 5년 앞선 결과이다. 그러나, 이러한 대형기의 개발에 의하여 제조업체는 심각한 경영악화를 초래함

으로서 합병, 매수 및 도산의 길을 걷게 되는 상황에 이르게 되었다. 그 결과 마지막 대형기 제조업체였던 Lagerwey사가 2003년에 문을 닫게 되었다.

이와 같이, 네덜란드의 기술개발은 정부주도형으로서 대기업이 중심이 되어 추진되었으며, 대학도 중요한 역할을 하였으나 독일에서와 같은 선도적인 연구자가 없었다. 또한 전력회사는 오랜 동안 기술개발에 소극적이었다. 보조금은 대형기의 개발에 주안점을 두고 지원되었으나 업체는 기술부족으로 경쟁력을 상실하고 도산되었다. 또한 국책연구기관도 전력회사 편에 서서 대형기의 개발에 치중함으로써 성공을 거두지 못하고, 정부가 주도한 튼튼한 방식의 연구개발은 실패로 끝나고 말았다.

현재의 전세계 풍력발전기의 시장은 대기업화되어 신규기업의 시장 참여가 활발하지 못하다. 1980년대 초까지 많은 풍력발전기 제조업체가 산재하였던 덴마크에서도 현재는 소수 기업의 독과점 형태가 되었다. 이러한 과정에서 다수의 업체가 소멸되었으며, 합병뿐만 아니라 치열한 경쟁의 와중에서 도산되거나 중요한 기술자의 이직에 의해 사라져 버린 경우가 허다하였다.

한편, 우리나라는 750 kW급의 풍력발전기 개발이 완료되어 실증테스트를 거치고 있으며, 2 MW급의 개발도 진행되고 있다. 그러나 원천기술의 부재로 핵심기술은 유럽에서 비싼 로열티를 지급하면서 도입되고 있는 실정이다. 또한, 풍력발전사업에 관심이 있는 발전사업자는 국내에서 기술개발된 제품을 구입하기 보다는 가격경쟁력이 있는 외국제품을 직수입하여 발전단지를 조성하고 있는 실정이다. 이것은 아직까지 국산대형 풍력발전기가 본격적으로 생산되지 못하고 있기 때문이기도 하나 현재 개발 중인 국산제품에 대한 신뢰성이 종합적으로 입증되어야 하는 근본적인 문제가 남아있기 때문이다.

우리나라의 조선이나 자동차산업의 발달과정에서 보듯이 기술력이 부족한 일부 핵심부품은 초기에 수입을 하더라도 풍력발전에서 소요되는 타워나 발전기 등 국내제작이 가능한 일부품목은 국내조달하고 날개 등 주요부품업체를 전략적으로 육성할 필요가 있다. 또한, 해외유수업체의 R&D센터를 적극적으로 유치함으로써 핵심기술을 급속히 확보할 필요성이 있다. 이러한 경우에 독일과 네덜란드에서와 같은 전철을 밟지 않고 중앙과 지방정부의 지원이 효과적으로 이루어져서 우리나라의 풍력발전 산업이 적어도 아시아권에서

는 주도적인 위치를 빠른 시일 내에 점할 수 있도록 하기 위한 정책적인 노력이 요구된다.

3. 선진국 풍력발전산업

중세의 영국이나 네덜란드에서는 장원영주가 "풍차 사법권"을 부여받음으로서 영지내에서 풍차에 대한 독점적인 지위를 누렸다. 이러한 특권에는 교회가 개입하기도 하였다. 로마교황은 풍차를 움직이는 바람은 교회의 소유이며, 풍차를 세울 때에는 교회의 허가가 필요하며, 운전시에는 수입중 10분의 1을 세금으로 지불하도록 하였다. 덴마크에서는 1862년까지 풍차를 세우거나 대형화할 때에는 국왕의 허가가 필요하였으며 풍차를 신축하는 것이 대단히 어려웠다. 또한, 1800년대까지 풍차를 소유한 사람들은 대외문물을 잘 아는 엘리트로서 크게 대접을 받았다.

현대의 풍력발전 산업은 크게 "풍력발전기시장"과 풍력에 의해 발전된 "전력시장"으로 크게 구분될 수가 있다. 풍력발전기의 수요는 풍력에 의해 만들어진 전력시장의 상황에 크게 의존하며, 전력시장의 공급자 즉, 풍력발전소는 풍력발전기의 수요처이므로 이들 두 시장 간에는 밀접한 관련이 있다고 할 수 있다.

풍력산업에 대한 관심이 지금과 같이 급증한 이유로서 두 가지를 들 수가 있을 것이다. 우선, 말할 것도 없이 지구규모로 발생하는 환경문제의 심각성이다. 지구온난화에 대한 문제는 이미 현실적인 것으로서 이를 방지하기 위한 근본적인 대책이 세계적으로 요구되고 있다. 그중 한 가지가 자연에너지와 같은 재생가능에너지의 활용이며, 풍력발전은 경제적인 규모로의 실현이 가능함으로써 보급이 크게 이루어져 왔다. 지역적으로는 EU의 독일, 스페인, 그리고 덴마크가 중심적인 역할을 하고 있다. 또 다른 이유로서는 인도, 중국 내륙부, 아프리카, 남미 등에서와 같은 신흥경제권에서의 전력수요를 충족시키기 위한 풍력발전이다. 이들 지역은 발전능력이 크게 부족함에도 불구하고 석유의 수입이 어렵거나, 내륙에 위치함으로써 석유의 수송이 쉽지 않아 화력발전이 어려운 점 때문에 지역에너지원으로서 풍력이 주목을 받고 있는 것이다. 현재 전 세계 풍력발전기는 약 65%가 독일과 스페인에 집중되어 있다. 특히, 독일은 2030년까지 자국 전력생산에서 풍력발전이 차지하는 비율을 24%까지 할당하고 다양한 투자촉진책을 시행하고 있다. 1991년에는 "전력공급법"을 제정하여 전력회사로 하여금 재생에너

지발전을 소매가격의 90%로 구매하도록 의무화하였다. 2000년에는 "재생가능에너지법"을 제정하여 전력회사의 부담을 공평하게 하도록 개선하였다.

덴마크에서 풍력발전 산업이 촉진된 계기는 풍력발전기 소유자에 대한 보조금제도의 도입이었다. 이 법안은 1979년에 국회를 통과하여 시행 첫해에는 건설자금의 30%를 보조하는 것으로 하여 1989년 폐지될 때까지 그 비율을 연차적으로 축소하는 방식이었다.

이것은 풍력발전기 개발에 대한 직접보조금이 아니라 풍력발전시장을 우선 육성하기 위한 것이었다. 그 결과 발전기의 수요를 증대시켜서 풍력발전기산업이 크게 발전하는데 기여하였으며, 1979년부터 1985년까지 약 1,300기의 풍차가 보조금제도에 의해 세워졌다.

1970년대에 덴마크에서 발전기를 주로 구입한 곳은 토지를 소유한 농민이나 협동조합이었다. 또한 풍력발전기 제조업체들도 대부분 농업기계를 생산하는 곳이었다. 따라서, 사용자와 제조업체간의 의사소통이 대단히 원활하였으며 사용자로부터의 제품에 대한 의견이 바로 피드백 되어 풍력발전기의 신뢰성을 향상시킬 수 있었다. 이것은 1980년대초 캘리포니아주를 휩쓴 "윈드러쉬" 시장에서 덴마크가 발전기시장을 석권을 하게 된 결정적인 이유였으며, 이러한 바텀업 형태의 의사결정 풍토가 덴마크 풍력발전 기술확립 과정에서 중요한 역할을 하였다. 또 한가지 큰 공헌을 한 곳은 RISO국립연구소이다.

이 연구소는 원래 원자력연구를 목적으로 1955년에 설립되었으나 1978년에 「풍력발전 테스트 & 리서치센터」가 설치되어 보조금 대상이 되는 풍력발전기의 성능인증업무를 수행하도록 하였다. 그 결과 보조금의 대상이 되기 위하여 풍력발전기 제조업체와 센터 간에 교류가 활발히 이루어짐으로서 기업과 연구소의 담을 넘어선 연구 성과를 얻을 수가 있었다. 과학적인 첨단기술이 아닌 공장현장으로 부터의 발상을 중시하는 바텀업 개발풍토에서는 공학적인 고급지식이나 경험이 없어도 안전한 기계를 제작하는 것이 가능하였다. 그 결과 덴마크 제품은 무겁고, 외관도 불품이 없었으나 오히려 이것이 후에 미국 캘리포니아 시장에서 견고한 제품으로 살아남은 결정적인 계기가 되었다.

한편, 덴마크가 풍력발전기 산업의 한계를 돌파할 수 있었던 것은 캘리포니아 풍력발전 붐이었다. 캘리포니아에서는 1978년에 풍력발전기를 설치하면 주

세를 감면하여 주는 캘리포니아 주법을 성안하였다. 동시에 공익사업 규제정책법(PURPA)이 제정되어 소규모 재생가능에너지 발전전력을 전력회사가 의무적으로 구입하도록 하였다. 마침 캘리포니아의 모하베 사막의 테하차피 지역이 풍황조건이 양호하여 세계의 풍력발전기가 여기에 모여들었다. 그중에서도 덴마크의 제품이 1986년도에는 65%를 차지함으로써 본토 미국을 누르고 시장을 석권하였다. 그 이유는 앞서 밝힌 대로 비록 공학적으로 세련된 설계는 아니었지만 경험에 의존하여 견고하게 만들었기 때문이다. 이즈음, 다른 업체의 제품들은 강풍에 견디지 못하고 고장이 속출하였으나 덴마크 제품만은 견고하여 파손이 적었다. 즉, 과학적인 지식이 치우치지 않고 공장현장의 발상이 주효하였던 때문이었다. 그러나 시장이 덴마크부터 멀어진 까닭에 현장의 경험이 피이드백 되지 못하게 되자 1986년경부터는 덴마크제품의 신뢰도가 떨어졌고 특히, 날개와 기어에서 많은 고장이 발생하게 되었다.

한편, 덴마크는 국가정책으로서 담당 에너지성과 전력회사 간에 매년 정해진 용량만큼 풍력발전기를 신설하는 데 합의하였다. 동시에 풍력발전기의 대형화가 착실히 진행되어서 최대출력이 캘리포니아에서의 55~65 kW에서 1980년대 후반에는 500 kW까지 발전하였다. 그 결과 현대적인 연구개발을 증시하는 체제로 변환하여야 하였으며 그 중심적인 역할을 RISO 국립연구소의 「풍력발전테스트&리서치센터」가 담당하였다. 1990년대에 들어서 세계규모의 환경중시 경향과 인도 및 중국에서의 경제발전에 따른 수요증대의 이중효과에 의하여 덴마크의 풍력발전기산업은 기반을 보다 튼튼히 할 수 있었다. 환경문제에서는 1986년 발생한 소련의 체르노빌 원자력발전소의 사고가 큰 영향을 미쳐서 독일과 스페인이 큰 시장으로 성장하여 수요를 창출하였다.

1992년에는 덴마크에서 "풍력발전기법"이 제정되었다. 그 내용은 풍력발전기 설치에 수반하는 송전망을 강화하는 비용은 전력회사가 부담하고 송전망으로의 접속비용은 풍력발전기 소유자가 부담하며, 전력회사는 풍력발전전력을 소매가격의 85%로 구매하도록 하는 것이었다. 또한, 1994년에는 풍력발전기를 소유하기 위한 거주제한이 완화되어 풍력발전기를 공동으로 소유하는 경우에는 소유자의 반수가 인근주민이면 허가되었다.

독일에서 풍력발전산업이 1990년부터 급성장하게

된 배경에는 풍력에너지에 관한 대대적인 정책변화가 있었기 때문이었다. 1990년 이전까지는 기술 및 연구개발 중심이었으나 1986년 발생한 소련의 체르노빌 원자력 발전소 사고 이후에 에너지정책을 근본적으로 변경하였다. 그 결과 풍력시장 확장과 연구개발이라는 두 가지를 동시에 지원하도록 하였으며 시장 확장정책으로서는 크게 투자보조금과 전력의 고정가격 매입, 그리고 저리 용자의 세 가지가 주요 역할을 하였다.

우선, 투자보조금제도는 1991년에 설정된 250 MW의 공급능력을 달성하기 위한 것으로서 풍력발전소 신설 프로젝트에 대하여 1kW당 200마르크의 보조금을 지급하며 보조금 상한선은 10만 마르크까지로 정하였다. 이로써 풍력발전기 투자코스트에 대하여 최대 10% 정도의 보조금 확보가 가능하도록 하였다. 다음으로 1991년에 "전력공급법"을 제정하여 전력회사는 재생가능 자원에 의하여 발전된 전력매입을 의무화 하고, 가격은 에너지원에 따라 다르나, 풍력발전의 경우에는 전력 소비자가격의 90%로 책정하였으며, 이것은 당시의 덴마크에서의 가격보다 약 10% 높은 수준이었다. 2000년에는 "재생가능에너지법"을 제정하여, 재생가능에너지에 의한 발전전력의 매입 부담을 전력회사가 균등하게 하고, 매입가격도 고정하도록 하였다.

저리용자제도는 환경보호지역에서의 풍력발전설치에 대하여 연방금융기관으로부터 시장금리보다 1~2% 낮은 금리로 용자를 받도록 한 조치이다. 그 결과 투자액의 75%가 충당되고, 지방은행으로부터 12~15%, 그리고 보조금에 의하여 5%가 지원됨으로서, 적은 자기자본을 가지고도 풍력발전기에 투자할 수 있도록 유도하였다. 이와 같이 독일은 풍력발전기 기술개발에서는 큰 성공을 거두지 못하였으나, 국가의 에너지정책을 전환하면서 풍력발전에 대한 적극적인 시장육성책을 시행하여 큰 성공을 거두고 있다. 향후 독일은 특히 대규모의 해상풍력발전 단지의 개발에 총력을 기울일 예정이며, 규모면에서 전 세계에서 가장 큰 풍력발전시장을 견지할 것으로 보여진다. 이와 같은 전력사업 시장우선 정책이 독일의 풍력발전기 시장을 어떻게 변화시킬 것인가 향후 매우 흥미있는 관심사가 될 수 있을 것이다.

참고로 우리나라는 신재생에너지에 대한 발전차액보전제도를 실시하고 있으며 풍력발전에 대하여는 기준가격을 1 kWh당 107.66원으로 고시하고 있다.

4. 차세대 풍력발전-해상풍력

해상풍은 육상풍에 비하여 다음과 같은 특징이 있다. 우선, 해상풍은 거칠기가 작은 해수면 경계층에 의한 영향으로 육상풍에 비하여 풍속이 높고 이는 해안으로부터 거리가 멀어질수록 더욱 커진다. 유럽의 경우 해상풍은 해안으로부터 10 km 떨어지면 풍속은 해안보다 약 25% 증가한다고 한다. 발전량은 통상 풍속의 3승에 비례하여 증가한다. 따라서 해상의 풍속이 20% 증가하면 이론적으로는 70%이상의 출력증가를 가져온다. 여러 손실을 감안하면 통상 해상풍력에서는 육상과 비교하여 50%정도의 출력증가를 예상한다. 다음으로 해상에서는 지형의 영향을 받지 않기 때문에 바람의 난류강도가 작음으로서 바람의 에너지 밀도가 양호하여 출력변동이나 기계적 피로가 감소한다. 또한, 육상에 비하여 해상은 표면 거칠기가 작기 때문에 중력방향으로의 평균풍속의 증가비율이 커지게 되어 타워를 육상보다 높게 할 필요가 없게 된다. 또한, 설치시 육상에 비하여 다음과 같은 장점이 있다. 우선 주변에 대한 소음문제를 발생하지 않음으로서 육상에서와 같이 대형기의 블레이드 끝단에서 발생하는 공력소음에 의한 설치거리 등 환경문제를 발생시키지 않는다. 그리고 풍력발전기의 수송이나 설치에 선박이나 해양기증기를 이용할 수 있어서 대형기의 설치가 용이하다. 또한, 넓은 영역에서의 이용이 가능하여 대규모 해상발전단지의 조성이 용이하다. 토지사용료가 필요하지 않으며 유럽에서는 어업보상비도 작업보상비 정도로 해결된다. 그러나 불리한 점도 있다. 우선, 기초구조물이나 해저 케이블, 고압연계의 변전설비 비용이 증대한다. 그리고 염분이나 고습도 상황에서 설치하기 때문에 방청대책이 필요하다. 다음으로 유지관리를 위하여 발전기에 접근하는 것이 날씨에 따라 좌우됨으로서 기기의 원격조작 기능이 부가되어야 하며 이에 따른 운전, 관리비용이 증가한다. 따라서, 해상풍력 발전은 육상풍력발전에 비하여 초기건설비가 증가하기 때문에 발전단가가 높게 된다. 그러나, 풍황조건이 육상에 비하여 양호하고, 발전기의 대형화가 가능하여 생산되는 발전량이 증가함으로써 대규모 해상풍력발전에 의한 발전단가는 육상에 필적할 만큼 차이가 작아지고 있다. 또한 육상에서는 환경문제를 해결하면서 가용할 수 있는 대규모의 단지 조성 장소가 많지 않으며, 덴마크와 독일에서 보는 것과 같이 육상풍력발전이 포화상태에 이른 상태에서는 해상으로의 진출이 유

일한 대안이 될 수 있다.

세계최초의 해상풍력 발전단지 소재지는 덴마크가 1991년에 완공한 Vindeby이며 450 kW의 발전기 11대로부터의 설치용량은 4.95 MW이다. 타워상단 높이에서의 평균풍속은 7.9 m/초이며 수심은 2~5 m이다. 현재 유럽에서의 풍력발전 전체용량에서 해상풍력이 차지하는 비율은 약 2% (600 MW) 정도이다. 그리고 현재 진행되고 있는 전세계의 해상풍력발전단지사업은 17개소에서 이루어지고 있다. 그중에서도 덴마크가 선도적인 역할을 하여 Middelgrund (40 MW), Horns Rev (160 MW), Mysted (165.6 MW) 등 8개소에 단지를 건설하였다.

EU각국은 육지에서의 대단위 발전단지를 조성하는 것이 현실적으로 어려운 점을 감안하여, 해상풍력발전 단지를 유일한 대안으로 인식하고 다양한 목표치를 설정하고 있다.

유럽풍력협회 (EWEA)는 EU에서의 2020년의 해상풍력 설치용량을 70,000 MW (100만 kW급 원자력 발전소 70기에 해당함)으로 추산하고 있으며, 덴마크의 BTM사는 2008년까지 10,000 MW를 예상하고 있다. 나라별로는 독일이 2030년까지 25,000 MW를, 덴마크가 2030년까지 5,000 MW를 계획하고 있다. 영국은 현재까지 개발허가를 내준 것이 7,200 MW에 이르며, 스웨덴은 2015년까지 2,700 MW를 계획하고 있으며 네덜란드는 2020년까지 6,000 MW를 예상목표로 설정하고 있다.

현재 해상풍력발전단지의 건설비용은 1991년 초기의 kW당 2,200유러달러에서 2002년의 Horns Rev의 경우 1,650유러달러로 감소하였으며, 발전단가는 kWh당 8 유로센트에서 4.7 유로센트로 낮아졌다. 육상 대형풍력발전의 경우에는 발전단가가 50 m 타워높이에서 평균풍속이 6 m/초를 가정하면 4~6 유로센트 범위이다. 이 단가는 석탄, 석유 및 가스 화력 발전과 비교하여 이미 충분한 가격경쟁력을 갖추고 있으며, 해상풍력의 경우에도 1기당 3~5 MW의 멀티메가급이 사용될 경우 충분한 가격경쟁력을 확보할 수가 있다.

덴마크에서 2001년부터 상업발전을 시작한 Middelgrund에서의 해상풍력발전단지를 소개하기로 한다. 이곳은 코펜하겐 해안에서 2~3 km 떨어진 곳으로서 Bonus사의 2000 kW급 발전기 20기가 설치되어 있으며 최대출력은 40 MW이다. 1997년부터 해면 50 m에서의 풍황조사가 2년간 행해졌다. 그 결

과 설치된 발전기 중심위치에서의 평균풍속은 7.1 m/초이며 연간 발전량은 89 GWh로 추정되었다. 그러나 실제로는 공사전 발전기 규격을 변경하여 발전량은 100 GWh로 증가하였다. 건설비용으로는 총 4,920만 유로달러가 투입되었으며 이것은 1 MW당 120만 유로달러에 해당한다. 발전단가는 1 kWh당 5.3 유로센트이다.

이 사업에는 섬주민 8,552인이 참가하는 공동조합과 코펜하겐 시영전력회사가 출자하여 각 10기씩을 보유하도록 하였다. 발전단지의 설계에는 여러 응모작 가운데 주민투표에 의하여 시내의 관광명소를 연결하는 반경 약 3.4 km의 원호 상에 설치하도록 하였다. 타워간격이 182 m로서 좁은 편으로 바람이 불어오는 쪽 발전기의 영향으로 풍속이 감소(웨이크효과라고 함)하나 채산성보다 경관을 우선 배려한 설치로 알려져 있다. 덴마크의 풍력발전 투자 대상은 개인 또는 공동소유가 83%를 점유하고 있다.

영국은 해안선으로부터 19 km까지의 영해선까지 해상 13개소에서 10여 민간기업과의 해상풍력발전 개발 교섭을 진행 중이며 1기업당 30기의 설치를 예정하고 있다.

독일풍력연구소(DEWI)에 의하면 2030년까지 독일의 북해와 동해 해상 쪽에 20,000 MW~25,000 MW정도의 설치용량을 갖춘 단지조성을 추진하고 있다. 이 발전량은 독일 전기 생산량의 10%~20%에 해당하는 양이다. 지금까지 신청된 해상풍력발전단지 프

로젝트는 북해 쪽에 22개소, 동해 쪽에 8개소이다. 이 프로젝트는 대개가 중소기업들에 의하여 제출되었다.

한편, 해상풍력발전 기술로서 개념설계수준에서 논의되고 있는 것이 대 수심에서 사용할 수 있는 부유식 해상풍력기술이다. 이것은 해저까지의 기초공사를 필요치 않고 풍향에 따라서 부유체를 회전시킬 수 있음으로서 원리적으로는 매우 우수한 공법이다. 그러나 앞으로 해결해야할 기술적인 난제가 많다.

우리나라의 경우에는 삼면이 바다로 둘러싸여 있고, 특히 수심이 낮은 남해와 서해에서 대형 해상풍력발전단지의 조성이 가능하다. 간단히 소요면적을 산출하여 보면 다음과 같다. 향후 1기당 5,000 kW의 발전기를 500 m간격으로 설치한다고 하면 50만 kW의 단지조성에는 가로 5 km, 세로 5 km의 해상면적이 필요하다. 육지에서 이와 같은 대단위 부지를 확보하는 것은 쉽지 않으며, 결국 풍황조건이 양호한 해상을 잘 선택하면 쉽게 해결될 수가 있다.

대규모 해상풍력발전단지의 조성을 위하여는 우선 정밀한 풍황조사가 선결되어야 한다. 이 데이터에 의하여 경제성 있는 발전단지의 규모가 결정되며, 이어서 제반 환경영향 평가에 따른 항로, 어로구역, 양식장에 대한 피해, 철새 및 수중동물 등에 대한 조사가 이루어지고, 필요시 지역주민에 대한 보상과 홍보가 이루어져서 지역과 함께 혜택을 누릴 수 있는 해상풍력발전 사업의 추진이 필요하다.