

## 대체에너지 기술인 풍력발전의 환경·경제적 평가에 관한 연구

채윤근, 신호철, 안재근, 박진원  
연세대학교 화학공학과

### Environmental and economic evaluation of wind power plant as the alternative technologies

Yoon-Keun Chae, Ho-Chul Shin, Jae-Keun Ahn, Jin-Won Park  
Department of Chemical Engineering  
Yonsei University

#### I. 서론

1970 - 1980년대에 OPEC의 담합에 의한 오일쇼크로 초유의 어려움을 겪으며 자원수입국들은 화석 연료를 대신할 수 있는 대체에너지개발에 많은 노력을 기울여 왔다. 그 결과 지역 및 나라별로 특성있는 대체에너지개발이 상당한 발전을 거듭하여 전체에너지 사용량의 10% 이상을 대체에너지로서 충당하고 있는 나라도 있다. 게다가 1990년대에 와서는 화석연료사용으로 인한 전 세계적 환경파괴문제가 대두되면서 단순한 화석연료의 대체가 아닌 환경친화적인 에너지의 개발 및 사용이 필요하게 되었다.

풍력에너지는 무한한 자원과 공해없는 에너지원으로 바람을 이용하여 전기를 생산하는 신발전 기술로 부존자원의 한계와 지구 온난화현상에 대비한 근래들어 가장 주목받는 에너지이다. 또한 최근들어 전세계적으로 풍력발전 관련기술이 급격히 발전하여 미국을 비롯한 유럽각국 등 많은 선진국가에서 단일기로서는 수 MW급의 대형 풍력발전 시스템개발과 풍력발전단지 건설에 관한 사업이 활발하게 진행되고 있으며 이에 대한 경제성과 신뢰도는 과거 1970년대보다 더욱 급진적으로 발전되어 21세기에 들어서는 기존의 발전 방식과 대등한 경쟁관계로 전개될 전망이다.

특히 기술개발 목표 중 핵심적인 것은 풍력 발전기의 대형화라고 할 수 있으며 기술적 분석에 의해 경쟁력있는 풍력발전기의 규모가 1-3MW급으로 조사됨에 따라 미국 및 유럽국가등 선진국에서는 이러한 초대형 풍력발전기의 개발 연구가 진행되고 있는 실정이다. 국내에서는 1970년대이후 풍력발전에 대한 기술개발 노력이 시작된 이후부터 1988년 대체에너지 개발 촉진법의 제정을 계기로 기술 개발을 본격적으로 추진하기 시작하였다. 그러나 아직까지 국산화의 기술개발이 미진하여 주로 국산화의 기술개발에 치우쳐 왔으나 국제적 상황과 기후협약 등 환경의 변화로 빠른 시기에 풍력 발전의 보급확대가 예상되고 있다.

#### II. 이론

##### 1. 풍력 발전

풍력발전이란 자연의 바람으로 풍차를 돌리고 이것을 기구 등을 이용해 속도를 높여 발전기를 돌리는 발전방식을 말한다. 풍력발전은 발전기를 풍속에 관계없이 일정한 속도로 회전시킬 필요가 있기 때문에 제어를 하기 위해서는 풍속에 따라서 풍차날개의 기울기를 바꿔야만 한다. 다시 말해 공기의 유동으로 발생하는 운동 에너지를 공기 역학적 특성을 이용하여 회전자를 회전시켜 기계적 에너지로 변화시키고 이 기계적 에너지로 전기를 얻는 기술로

보통 풍속의 세제곱과 회전자 직경의 제곱에 비례하는 에너지량으로 변환되게 된다. 이리

한 풍력에너지기술의 분류는 상당히 여러 가지로 나눌 수 있으나, 일반적으로 구조상 분류와 용도상 분류를 하고 있다. 구조상의 분류로는 주 회전축이 지면에 대한 방향을 구분하여 수평축 풍력기기(HAWT)와 수직축 풍력기기(VAWT)로서 분류하며, 용도상의 분류로는 최종적인 변환 에너지의 형태가 전력인 발전을 하는 발전기기와 기계적 에너지를 직접 이용하여 양수를 펌핑하는 풍력기기 또는 교반기(Agitator)를 이용하여 온수를 생산하는 형태의 풍력기기 등 그 용도에 따른 분류도 매우 다양하게 구분되고 있다. 이러한, 풍력에너지원의 특징으로는 우선 무공해 천연 에너지원으로서 환경에 미치는 영향이 거의 없고 국토가 비좁은 우리의 현실에서 제방이나 산간오지 등을 개발 할 수 있다는 특성으로, 국토이용 효율을 높일 수 있다는 장점도 지니고 있다. 또한, 그 실용성에서도 매우 뛰어나, 대단위 규모로 운전하고 있는 미국의 경우에는 발전단가 면에서도 기존 에너지원인 원자력 및 화력 등에 대등한 상태로까지 발전된 상태이다. 그밖에도, 여러 가지의 대체에너지원 중에서도 최저의 사회 회피비용(avoided cost)으로서 향후 그 가치가 절대적으로 커지게 될 환경영향에 대한 부담이 적은 에너지원으로서 각광을 받고 있다. 또한, 기타 다른 산업이 시설투자비 보다는 상대적으로 연료나 운영상 투자비가 높지만 풍력분야는 기계화 및 자동화보다는 고용증대효과가 큰 제조, 설치 및 운전관리에 투자가 많아야 하므로, 단위 에너지당 천연가스에 비해 약66%, 석탄산업에 비해서는 약27%정도의 고용증대 효과를 누릴 수 있음도 주목해야 할 사항이다.

## 2. 에너지-경제 모형

1970년대부터 온실가스가 환경에 미치는 영향을 분석하기 위한 여러 환경모형들이 개발되기 시작하였다. 이들 모형은 자연과학분야에서 개발된 기술기후모형(Technical-climatic models)으로 온실가스 배출량을 결정하는 공학적 파라미터에 기반을 둔 것을 시작으로 1970년말부터는 경제적 파급효과의 분석을 위해 확장되기 시작했다. 이산화탄소 배출저감의 비용편익분석을 위한 기후모형의 개발이 활발이 이루어진 이후 컴퓨터의 성능향상과 알고리즘의 개발에 힘입어 경제관련 파라미터를 고정된 것으로 다루던 기존의 투입산출모형이나 거시계량모형들이 응용일반균형모형으로 대체되었으며 최근에는 상향모형(Bottom-up model)과 하향모형(Top-down model)을 혼합한 절충모형들로 발전하였다. 최근기후모형들은 경제학, 공학, 생물학, 물리학 등 기후변화와 관련된 정보와 지식을 보다 폭넓게 이용하는 통합평가모형의 형태로 옮겨가고 있는 추세이다. 상향모형은 기후시스템의 최하부인 기술을 중심으로 한 부분균형모형이다. 이 모형은 다양한 기술을 구체적으로 고려할 수 있기 때문에 기술의 발전이나 신기술의 도입이 온실가스 배출량에 미치는 효과를 분석할 때 유용하다. 또한 경제내의 기술적 잠재력과 에너지공급기술을 구체적으로 정의하여 다양한 대체기술이 비용조건과 에너지공급에 미치는 영향을 분석한다. 그러나 에너지부문과 여타 부문들간의 관계를 고려하지 않기 때문에 기술변화의 효과를 과대 혹은 과소 평가하는 약점이 있다. 따라서 이들 모형은 경제 전체의 온실가스 저감비용을 평가하고 자 할 때는 적합하지 않다. 상향모형과 달리 하향모형은 시장에서 채택된 기술만을 고려하여 소득, 가격탄력성 등과 같은 총량경제지수를 통해 에너지수요를 결정하여 기후시스템을 분석한다. 다양한 기술적 잠재력과 대체가능성을 고려하지 못하는 단점을 가지고 있다.

## 3. LEAP 모형

SEIB(Stockholm Environmental Institute Boston)에서 개발된 LEAP(Long-range Energy Alternatives Planning system)은 에너지정책과 온실가스 감축방안의 분석을 위해서 사용되었다. LEAP모형의 시스템은 크게 Energy scenario, Environmental data base, Aggregation, Fuel chain의 4모듈로 구성된다. 이들 모듈은 에너지부문을 구성하는 자연자원, 변환과정, 최종에너지, 그리고 최종 에너지수요 등을 묘사하여 기술변화나 파급효과의 분석을 가능하

게 한다. 또한 시나리오 분석을 통해 수요, 변환, 자원 및 환경 배출에 대한 분석을 할 수 있으며 이러한 분석은 사회적 비용 및 이익에 기초한 통합에너지계획과 온난화가스 배출분석으로 이루어진다. LEAP 과 같은 모형에서 나타나는 일반적인 분석과정을 Figure 2 에서 나타내었다.

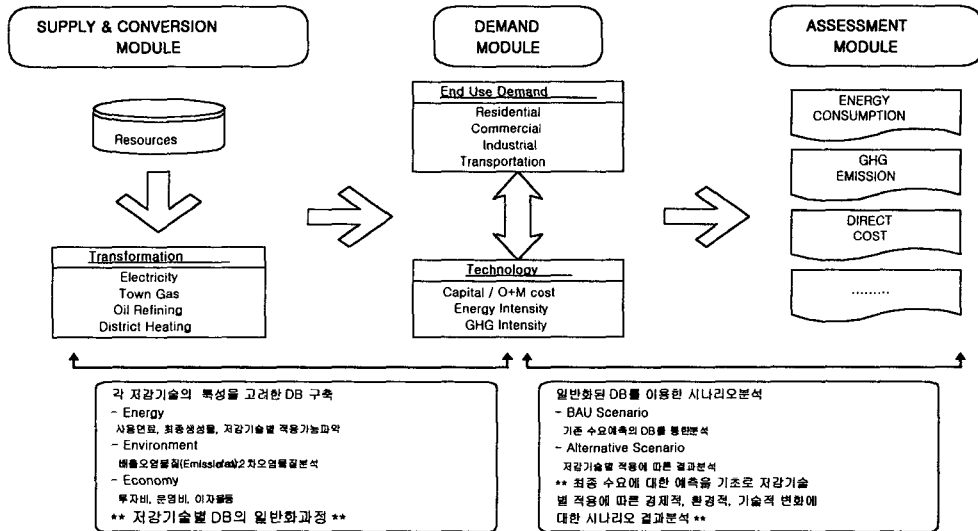


Figure 2. LEAP 모형에서의 일반적인 분석과정의 예

### III. 실험 및 결론

#### 1. 시나리오 분석을 위한 기준 및 기본가정

저감기술분야인 풍력발전의 평가는 환경성, 기술성, 경제성 측면의 기준이 필요할 것이다. 환경성 측면에서는 CO2의 배출을 줄임으로써 온실효과를 저감시킬 수 있으며 기술적 측면에서는 기술의 효율성, 안정성 및 내구성에 의해서 설정될 수 있으며 경제성 부분은 이용설비의 설치비 및 연간 운영비의 가격을 분석하는 비용 측면이 기준이 될 것이다.

- 이 가정은 실질적인 발전연료별 단가비교를 통해 만들어 진 것임

- Maximum Capacity Factor : 80-90%

- 평가시스템의 time range : 2001-2015년

(에너지 관련 수요조사는 2000년을 기준으로 2015년까지 수요예측을 통해 산정)

- 에너지 수요 및 기존 한국의 전력설비에 대한 Current account와 2015년까지의 전망은 기초 자료조사에 의해 설정됨

#### 2. 풍력발전의 기대효과

-바람의 운동에너지를 이용한 발전방식으로 화석연료 대체효과 큼

-낙도 등의 미전화지역에 경제성 있는 전력보급 가능

-풍황이 우수한 해안 및 산간지역에 설치함으로써 국내 토지이용 합리화

-제주지역과 같은 일부 특정지역의 경우 대규모 풍력발전단지 조성으로 관광자원화 가능

#### 3. 평가 결과

기존의 우리나라 에너지 수요 및 전력설비에 대한 시나리오를 기초로 하여 풍력발전기술에 대한 시나리오 분석을 해 보았다. 기술성 및 전력생산량을 변수로 두어 시나리오를 설정하여 풍력발전기술이 미치는 영향을 비교하여 보았다.

풍력발전이 기존 전력시장에 미치는 영향을 알아보기 위해 다음과 같은 대안 시나리오를 설정하였다.

- 2000년 100MW 풍력발전이 도입된다는 대안시나리오

LEAP 모형에 들어가는 Data는 산업자원부의 대체에너지 발전단가자료를 근거로하여 설정해 주었다.

대안 시나리오 분석결과 풍력발전설비는 연간 720억 정도가 소요될 전망이며 전력은 연간 612GWh 정도의 전력을 생산할 것으로 예측되어 진다.

Table 1. Cost alteration of alternative scenario in comparison with BAU scenario

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Coal Steam	-911.30	-1,973.0	-2,043.9	-1,987.7	-1,930.4	-1,959.6	-1,982.4	-1,953.2	-1,770.0	-1,579.1	-1,533.6	-1,590.0	-1,591.8	-1,646.4	-1,690.4
Combined Cycle	0.00	0.00	0.00	0.00	-5,682.6	-5,682.6	-5,682.6	-5,682.6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-5,682.6	-5,682.6
Hydro	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-7,551.0	0.00	0.00	-359.30	-7,551.0	0.00	0.00
LNG Steam	-365.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-306.30	-348.20	-263.40	0.00	0.00	0.00
Nuclear	-295.80	-692.20	-717.10	-657.80	-634.70	-627.90	-625.60	-606.50	-587.70	-586.80	-596.90	-597.10	-611.10	-613.10	-667.00
Oil Steam	-4,276.8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-4,335.9	-4,294.1	-4,158.0	0.00	0.00	0.00
Wind power	75,935.9	74,249.5	75,306.2	73,599.5	72,679.6	72,740.5	72,854.3	72,224.2	70,492.8	69,100.7	68,996.7	69,406.1	69,725.4	70,164.5	71,663.9
Sum	70,086.7	71,584.3	72,545.2	70,953.9	64,431.9	64,470.4	64,563.7	63,982.0	60,584.2	62,292.7	62,224.1	62,438.3	59,971.6	62,222.4	63,623.9

Table 2. Electricity output alteration of alternative scenario in comparison with BAU scenario

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Coal Steam	-63.50	-137.50	-142.40	-138.50	-134.50	-136.60	-138.10	-136.20	-123.40	-110.00	-106.80	-110.80	-110.90	-114.70	-117.80
Combined Cycle	0.00	0.00	0.00	0.00	-221.30	-221.30	-221.30	-221.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-221.30	-221.30
Hydro	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-174.70	0.00	0.00	-8.30	-174.70	0.00	0.00
LNG Steam	-13.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-11.50	-13.20	-9.90	0.00	0.00	0.00
Nuclear	-63.00	-147.30	-152.70	-140.10	-135.10	-133.70	-133.20	-129.10	-125.10	-124.90	-127.10	-127.10	-130.10	-130.60	-142.00
Oil Steam	-161.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-163.20	-161.70	-156.50	0.00	0.00	0.00
Wind power	650.70	634.30	644.60	628.00	619.10	619.70	620.80	614.70	597.90	584.40	583.40	587.40	590.50	594.70	609.30
Sum	349.40	349.50	349.50	349.40	128.20	128.20	128.20	128.20	174.70	174.70	174.70	174.70	174.70	128.10	128.20

### 감사의 글

본 연구는 환경부에서 지원하는 차세대 핵심 환경기술 개발 사업으로 연구비 지원에 감사드립니다.

**참고 문헌**

- 1) SEI Boston Center, Tellus Institute : LEAP User Guide For LEAP Version 2000
- 2) 손충렬 : “풍력발전의 현황과 미래”  
( 인하대학교 산업과학기술연구소 대체에너지 시스템연구개발센터 )
- 3) 산업자원부 : 발전연료별 단가 비교
- 4) 에너지경제연구원 : Yearbook of Energy Statistics
- 5) 한국전력공사 : The Status of Generation Facilities 1997
- 6) 산업자원부 : Statistics on Electricity 2001