

풍력발전의 탄소 절감 효과

한국과학기술정보연구원
전문연구위원 장태현
(changtae@reseat.re.kr)

1. 서론

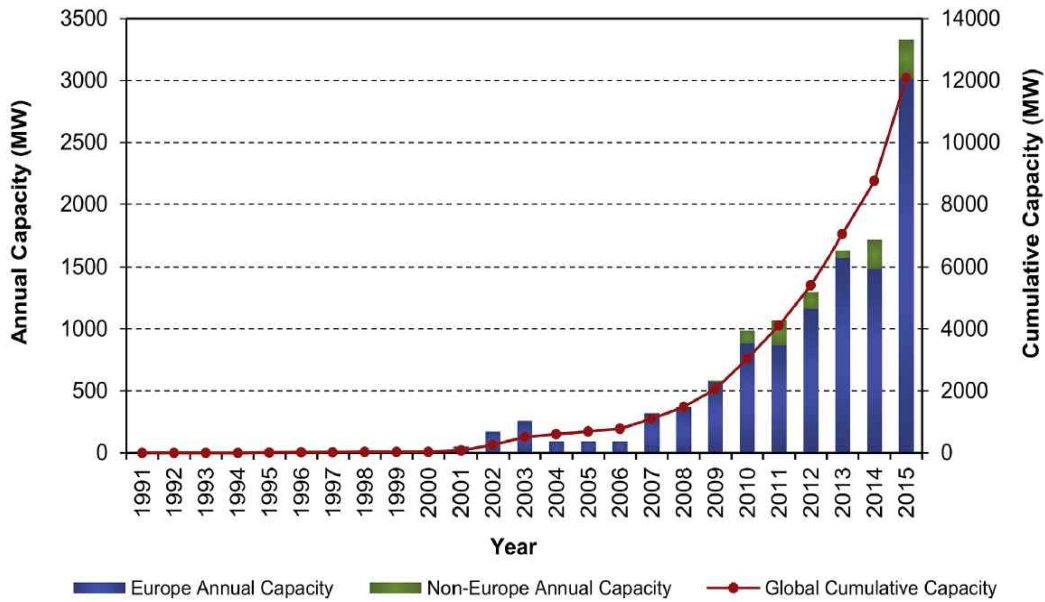
2007년 영국 Carbon Trust의 Carbon Reduction Label을 시작으로 일본의 CFP(Carbon Footprint Product), 한국 탄소성적표지 인증제도 등 국내외 약 15개 국가 또는 기관에서 제품에 대한 탄소라벨링 제도를 시행중에 있다. 또한, ISO (International Organization for Sandards)에서 ISO/DIS 14067을 표준화 작업 중에 있으며 WRI/WBCSD에서도 가이드라인을 발표하여 기업들이 제품의 온실가스 배출량을 산출할 수 있는 기준을 제시하고 있다.

영국, 일본, 한국 등에서 시행되고 있는 탄소라벨링은 기업이 제품 및 서비스에 대한 전 과정 즉, 원료물질 채취, 원료 생산, 제품 생산, 사용 및 폐기단계에서 발생하는 온실가스 배출량을 정량화하고 해당 제품에 제품 온실가스 배출량 결과를 라벨링 형태로 부착하여 저탄소 제품을 시장에 확대함으로써 제품의 전 과정에 발생하는 온실가스 배출량을 최소화하는 목적을 가지고 시행되고 있다.¹⁾

2. 풍력에너지 기술과 CO₂ 광도

세계 풍력 에너지의 이용은 비 화석에너지 시대의 안착 목표에 도달하기 위한 많은 인자들을 포함하고 있다. 생명주기(life cycle) 평가관점에서, 전기 생산에 사용된 기술은 1차적으로 에너지 소비와 온실가스 배출이다. 에너지와 탄소발자국(carbon footprint)을 평가하기 위하여, 전력생산 발전소의 생명주기에서 상·하류흐름의 연구가 필요하다.

풍력은 오늘날 가장 경쟁력이 있고, 성숙하고 지속가능한 기술 중의 하나이다. 세계적으로 2015년 말까지 432.9GW가 누적되었고, 지금까지 육상풍력(onshore)의 시설용량은 420.8GW에 달한다. 그러나 육상풍력은 시각적 그리고 소음충격 등의 부정적인 환경 영향과 연관되어있다. 해상풍력(offshore) 량은 지난세기에 현저하게 증가되었고, <그림 2-1>에 세계의 축적된 풍력에너지 용량을 유럽과 비유럽을 비교하였다.



<그림 2-1> 해상풍력발전 용량 추이⁽²⁾

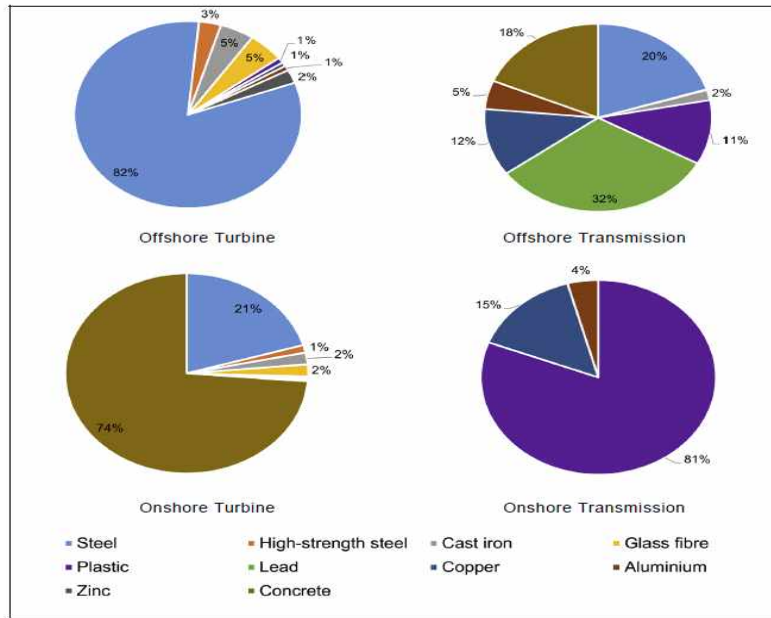
2-1. 내재에너지

앞에서 기술한바와 같이, 풍력터빈의 내재에너지(Embodied energy)는 원자재 추출, 제작, 운전 그리고 생명주기의 끝에서 최종 처분의 단계 동안에 소비된 에너지이다. 육상과 해상 풍력 발전단지를 건설하는 동안에 소요되는 재료와 제작에 요구되는 에너지를 포함하고 있다. <그림 2-2>에 이들 두 가지 풍력발전에 필요한 사회기반시설의 차이를 보였다.

<그림 2-2>에서 V80-2MW 터빈은 사용된 재료가 거의 같고, 해상풍력 프로젝트에 요구된량은 철, 납이 현저하게 많다. 이것은 주로 해상풍력 기초 작업, 내부케이블, 그리고 변전소 건설로 기인된 것이다.

이 내재에너지(ELC)는 총 중요 에너지의 함수로 나타나고, 건설(E_C), 운전과 보수(E_{OM}) 그리고 풍력발전소의 사용중지에 따른 에너지(E_D) 등이고, 식(1)로 나타낸다. R은 전력생산(kWh) 기준단위이다.

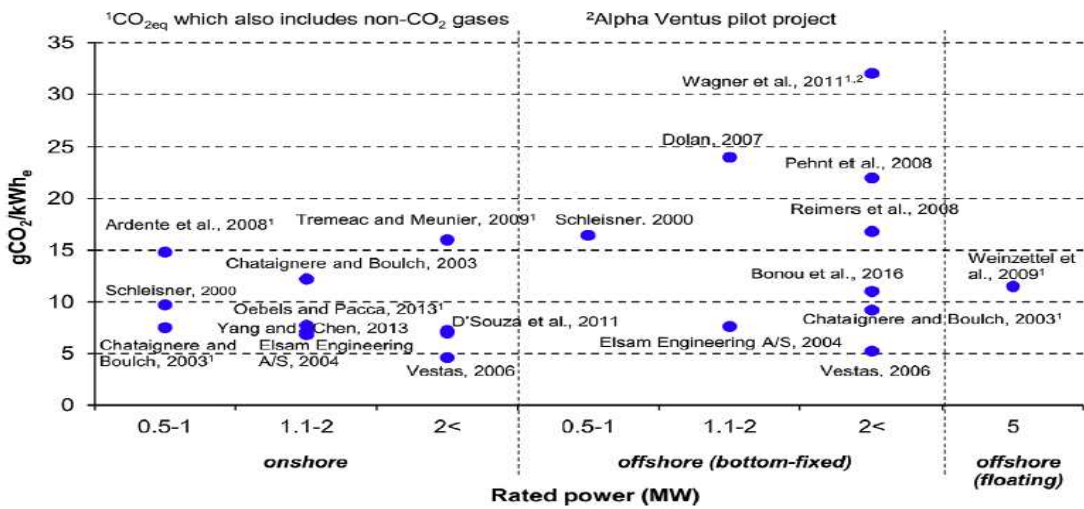
$$ELC = \frac{E_C + E_{OM} + E_D}{R} \quad (1)$$



<그림 2-2> 육상 및 해상풍력발전설비용 재료 구성비⁽²⁾

2-2. 카본 족적

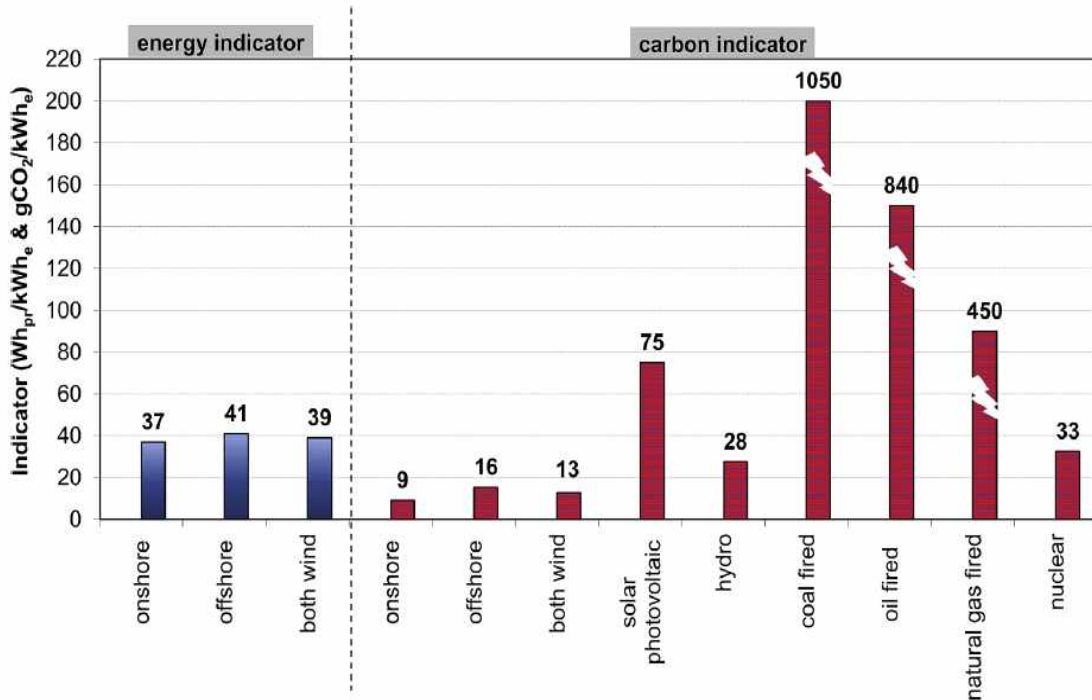
에너지원 지표(energy source indicator)의 생명주기외에, 온실가스배출에 대한 연구, 주로 CO₂와 에너지 원금회수 기간(EPBP: Energy pay-back period) 기준 등이 고려되었고, 이를 <그림 2-3>에 나타낸다.



<그림 2-3> 육상 및 해상 풍력발전 에너지의 수명주기 카본 족적⁽²⁾

<그림 2-3>에서 육상풍력에너지 생산에 대한 해상풍력의 카본족적(carbon footprint)이 다소 높다. 에너지와 탄소 농도 지시계(carbon intensity indicator) 사이의 차이에도 불구하고, 가장 비판적인 결론은 낮은 평균에너지와 지구온난화지수(global warming impact)가 다른 전력생산에 비교하여 낮고 이를 <그림 2-4>에 제시하였다.

비교된 기술에 대해 상응하는 범위로서, 수력발전이 15-40g CO₂/kWh (mean value 28), 원자력발전이 15-50gCO₂/kWh (mean value 33), 그리고 광전지발전이 50-100gCO₂/kWh (mean value 75)이다. 천연가스를 이용한 발전, 오일, 그리고 석탄연소 발전에서 라이프사이클 GHG 배출은 각각 400, 500g CO₂/kWh(mean value 450), 780-900g CO₂/kWh(mean value 840) and 900-1200g CO₂/kWh (mean value 1050)이다. 이들 결과로부터 풍력발전의 카본족적은 화석에너지 발전보다 현저하게 낮다.



<그림 2-4> 에너지 소스 별 에너지 및 탄산가스 배출의 평균 값⁽²⁾

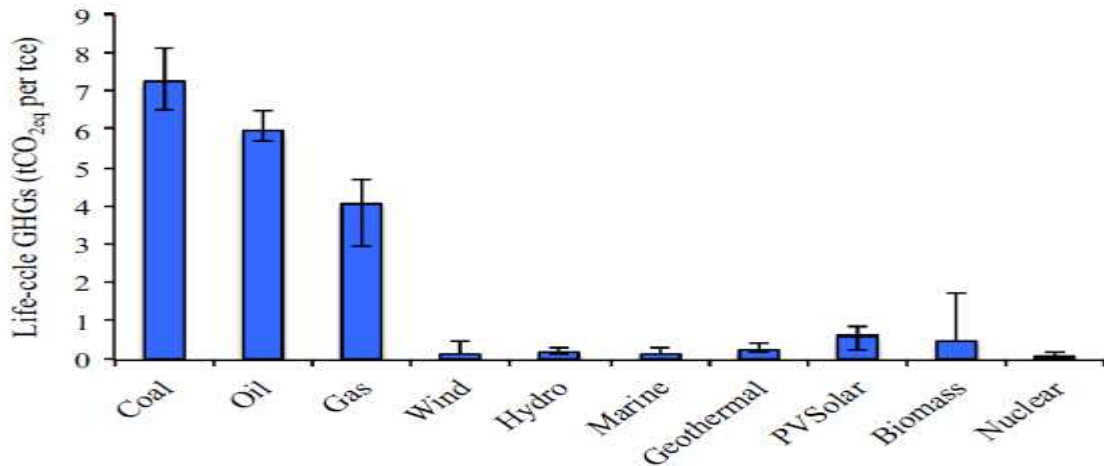
3. 중국의 CO₂ 감축

라이프사이클 온실가스 배출목록을 만드는 것은 동적 온실가스배출 수준을 평가하기 위하여 그리고 배출에 대한 전기에너지 대체효과를 연구하기 위해 필수적으로 필요하다. 이 연구에서 에너지-경제-환경과 통합된 모델(CE3-METL)과 배출-온난화 기후 반응 모델의 두 가지 모델을 사용하였다.

일반적으로 석탄연소 화력발전소에 대한 라이프사이클 온실가스 배출은 800-1000gCO₂eg(grams of CO₂ equivalent)이고, 수력발전의 온실가스 배출은 22.84gCO₂이다. 반면에 육상풍력은 20.23gCO₂eg이다. 이들을 <그림 3-1>에 나타낸다.

<표 3-1> 중국의 풍력 에너지 개발 계획(2050년까지)³⁾

Sources	Scenarios	Description	Cumulative installed capacity(GW) and power generation(TWh)			
			2015	2020	2030	2050
Global wind energy outlook 2010(GWE C, 2010)	Reference	The projected annual average growth rate during the 13th five-years plane is approximately 9% and gradually decreases to 3%.	45 (110)	70 (1720)	95 (233)	
	Moderate	The growth rate of wind power will stabilize at 16% during th period of the 13th-year plane, after which it gradually decreases to around 8%.	122 (298)	220(54 0)	434 (1065)	
	Advanced	The rate of expansion of wind energy during the 13th five-year plane increases 18%.	129 (317)	253 (622)	509 (1251)	
2010 China wind power review and outlook(Li et al. 2010)	Conservative	Some problems remain with wind power fusion and turbine blade quality :the annual newly installed capacity is projected to be 12 GW before 2020, then it stabilized at around 10 GW.	80 (150)	150 (303)	250 (537)	450 (990)
	Optimistic	There are fundamental problems in wind power development: the average newly installed capacity per annum before 2020 expands about 18GW.	112 (202)	202 (408)	302 (649)	502 (1104)
	Positive	Wind power is a dominant choice to reduce CO ₂ emissions: even after 2020, the annual newly installed capacity is still 15 GW.	130 (244)	230 (465)	380 (817)	680 (1496)
China's renewable energy roadmap 2050(CNR EC 2014)	Basic	Onshore wind is largely explored : offshore plots are launched and reform of the power dispatching and operation grid is completed after 2030.	80 (150)	200 (400)	400 (800)	1000 (2000)
	Positive	No bottlenecks occur in smart grid construction: by 2050, China will have achieved complete development of onshore wind and offshore wind.	112 (202)	300 (600)	1200 (2400)	2000 (4000)

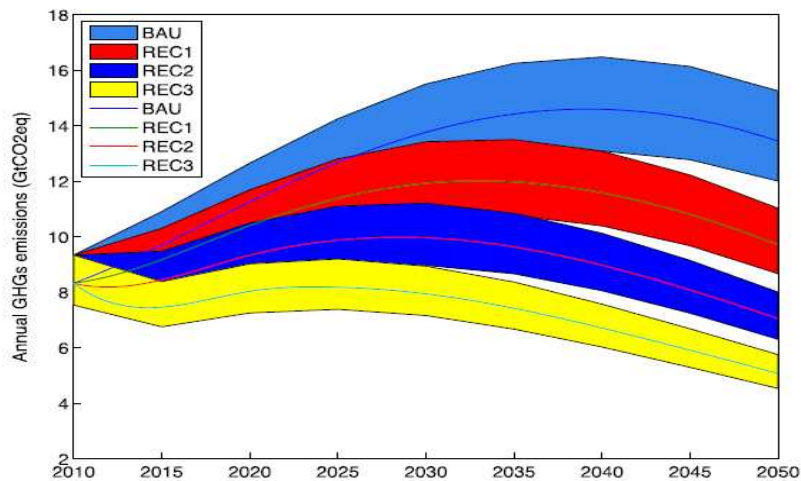


<그림 3-1> 각종 에너지 기술에 대한 수명주기 온실가스 배출 비교⁽²⁾

지구온난화에 대한 두 가지 계획안이 정의 되었고, 2050년을 향한 중국의 풍력에너지 개발계획과 온난화 한계 온도 2°C도를 따르는 온실가스(GHG) 배출구역이다. “Wind Roadmap 2015”으로부터 2050년까지 누적된 풍력설치 용량은 ” Wind Outlook 2010“보다 32% 높다. 상세한 내용을 <표 3-1>에 기술한다.

3-1. 온실가스 배출에 대한 풍력에너지 확장 영향

석탄 화력발전에 대한 풍력에너지의 대체를 고려하지 않고, REC(Representative emission control)를 넘어서 동적배출경로를 <그림 3-2>에 나타낸다.



<그림 3-2> 탄소제어 및 풍력대체의 경우에 대한 온실가스 배출 비교 전망⁽³⁾

<그림 3-2>에서 선들은 평균 GHG 배출인자들에서 배출을 평가하고, 채색된 부분은 고저의 라이프사이클 배출인자에 의해서 측정된 온실가스의 범위를 나타낸다. 온실가스 배출량전망치(BAU: Business As Usual) 경우에, 중국의 배출은 2040년까지 최

대가 되고, 최댓값은 12.01~15.26 GtCO₂eq 이다.

예를 들면, 중간정도 배출제어 시나리오(REC2)에서, 중국은 2030년까지 최댓값의 약 속을 다할 것이고, 그 평균값은 9.97GtCO₂eq이다. 이와 대조적으로 REC3는 2025년에 일찍이 최대치에 달하고, 완화율은 62.22%에 상응한다. 전기에너지 대체는 온실가스 배출에서 중요한 역할을 하고, <표 3-2>에 수록하였다.

만약 풍력에너지가 전통적인 경로로 개발된다면, 전력대체와 연관한 최대 GHG 감축은 0.88GtCO₂eq에 달할 것이다. 이는 2050년까지 경감율을 세 가지 제어에서 31.14%, 51.86% 그리고 67.28%로 각각 증가할 것이다.

<표 3-2> 각종 풍력발전 및 REC의 경우에 대한 순 온실가스 배출⁽³⁾

	Wind pathways	2015	2020	2030	2040	2050
REC1	Conservative Scenario	9.058	10.168	11.544	1.111	9.261
	Optimistic Scenario	8.999	10.068	11.445	11.009	9.159
	Positive Scenario	8.966	10.014	11.296	10.759	8.811
REC2	Conservative Scenario	8.330	9.093	9.567	8.446	6.475
	Optimistic Scenario	8.271	8.993	9.468	8.345	6.373
	Positive Scenario	8.238	8.939	9.319	8.095	6.026
REC3	Conservative Scenario	7.343	7.779	7.537	6.146	4.400
	Optimistic Scenario	7.248	7.679	7.438	6.044	4.299
	Positive Scenario	7.251	7.626	7.289	5.794	3.951

<표 3-3> BAU 및 각종 REC의 경우에 대한 온도 상승 예측⁽³⁾

	2015	2020	2030	2040	2050
BAU	0.010	0.032	0.107	0.212	0.331
REC1	0.010	0.031	0.100	0.194	0.294
REC2	0.010	0.029	0.092	0.173	0.256
REC3	0.009	0.027	0.082	0.149	0.216

또한, 중국의 지구온난화 온도는 2050년 까지 0.19℃에서 0.37℃로 증가한다. 이를 <표 3-3>에 수록한다.

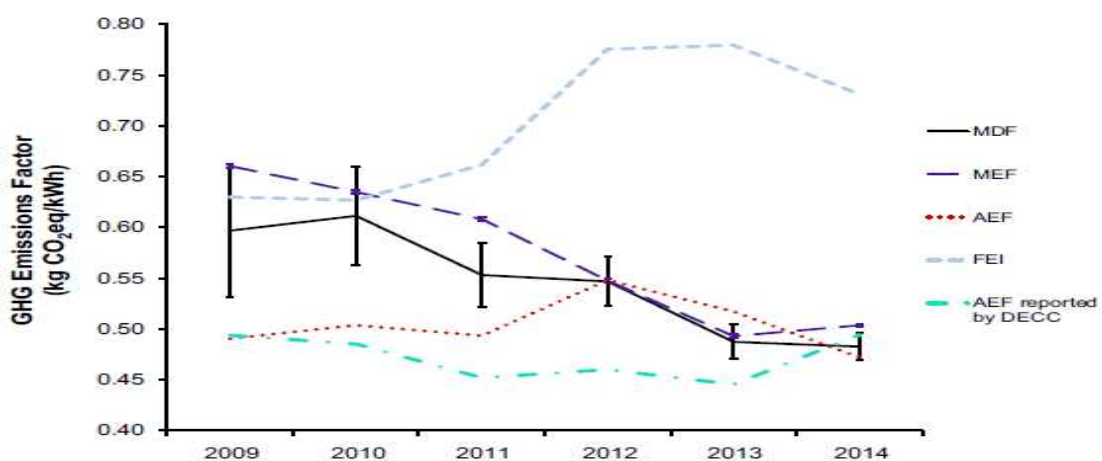
4. 영국의 한계온실가스 배출

4-1. 방법론

Hawkes 등이 2010년 발표한 “Estimating marginal CO₂ emissions rates for national electricity systems. Energy Policy 38 (10), 5977--5987, (URL < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421510004246> >.)을 기초로 하였고, 평균 한계배출인자(MEF: Marginal Emission Factor)를 계산하였다. 영국 에너지기후변화부(Department of Energy and Climate Change, DECC)의 연간 AEF(average emission factor)를 풍력에너지에 대한 배출량 평가에 사용되었다. <그림 4-1>에 한계 값을 그리고 <표 4-1>에 연간배출인자를 나타내었다.

<표 4-1> kg CO₂eq/kWh으로 표기한 배출가스 인자⁽⁴⁾

Year	MDF(wind)	MEF(supply)	AEF	FEI	Offset	Fit(R ²)
2009	0.597±0.066	0.660±0.002	0.490	0.630	0.013±0.005	0.964
2010	0.611±0.049	0.635±0.002	0.504	0.627	0.010±0.004	0.967
2011	0.553±0.032	0.608±0.002	0.494	0.662	0.006±0.004	0.964
2012	0.547±0.0025	0.548±0.002	0.548	0.775	-0.006±0.004	0.957
2013	0.487±0.017	0.493±0.002	0.517	0.779	-0.004±0.004	0.953
2014	0.483±0.014	0.504±0.002	0.472	0.731	-0.002±0.004	0.961



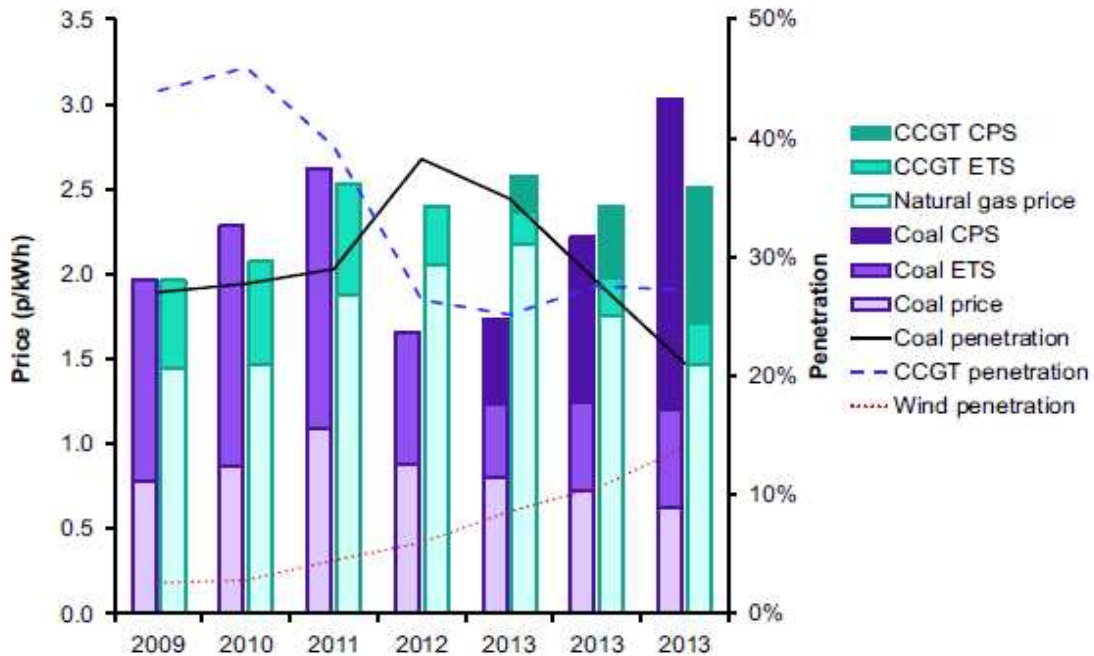
<그림 4-1> 연간 배출가스 인자비교⁽⁴⁾

여기서 MDF(marginal displacement fact), MEF(marginal emission factor),

AEF(average emission factor), FEL(emission intensity of fossil-fuelled generation), offset는 온실가스배출에서 변화 그리고 $it(R^2)$ 는 적합성이고 이들을 연도별로 온실가스배출인자를 나타내었다. <그림 4-1>에서 영국 에너지 기후변화부(DECC)에서 발표한 AEF(average emission factor)와 MEF, MDF는 2013년까지 계속 저하하고 있다. 그러나 2014년까지 약간 증가하고 있다. 반면에 화석연료의 배출강도(FEL)은 2012년부터 점차 저하하는 것을 볼 수 있다. 즉, 2009-2014년에서 MDF가 저하하지만, 풍력용량은 6년에 걸쳐 35.8MtCO₂-eq로 증가하였다.

총시스템 배출량 생산에서 MEF는 풍력발전의 MDF에 유사한 경로로 진행하고 있다. 이것은 배출량감축에서 풍력발전이 기술적으로 효과적임을 암시한다. 화석연료 발전에 의한 탄소배출은 약 7-15\$/tCO₂로 평가된다. 이 관계를 <그림 4-2>에 나타낸다.

<그림 4-2>에서 CCGT(Coal and combined cycle gas turbine)과 풍력을 나타낸다. DEC8로부터 연료의 평균가격은 1.016과 0.437kg CO₂eq/kWh로 각각 석탄, CCGT 연료가격이다. 2011-2012년 사이에, CCGT의 강하와 상응하여, 석탄사용으로부터 급속히 증가한다. 이것은 석탄사용이 CCGT에 비하여 선호한 것을 제시한다. 2011-2012년 사이에, ETS(European Union Emission Trading system) 배출 허용가격은 뚜렷이 하락하였다. 이는 석탄의 하락과 상응하였고, 반면에 가스 가격은 계속하였다.



<그림 4-2> ETS와 영국 CPS가 제공한 연료가격 및 탄소가격 비교⁽⁴⁾

5. 인도의 CO₂ 감축 정책과 비용

풍력발전 후보 시스템에 대한 GEP(Generation expansion planning)을 결정하는 것이 주

목적이고, 현실적인 수학적 시스템과 모델해법으로 GEP를 적용하였다. 오염 부분에 대해 TERC(Total emission reduction constraints) 그리고 ETPC(Emission treatment penalty costs)를 부과하여, 지난 6-14년 동안 이 연구는 장기간에 걸친 풍력의 영향을 연구하였다.

5-1 풍력발전소의 모델링

사용 가능성을 연구하기 위하여 풍력발전소를 모델링하였다. DE 알고리즘과 변수들은 Rajesh K, 등의 “Least cost generation expansion planning with solar power plant using differential evolution algorithm. Renewable Energy 2016;85:677-86” 를 참고하였다.

풍력발전소에 대한 고장확률의 계산에서 슬라이딩 윈도우기술(Sliding window technique)을 사용하였고, 설비이용률(Capacity Factor)은 식(2)와 (3)을 사용하였다.

$$CF = \frac{\text{년간에너지 생산}(MWh)}{\text{관련인자}(MW \times 8760h)} \quad (2)$$

$$FOR = 1 - CF \quad (3)$$

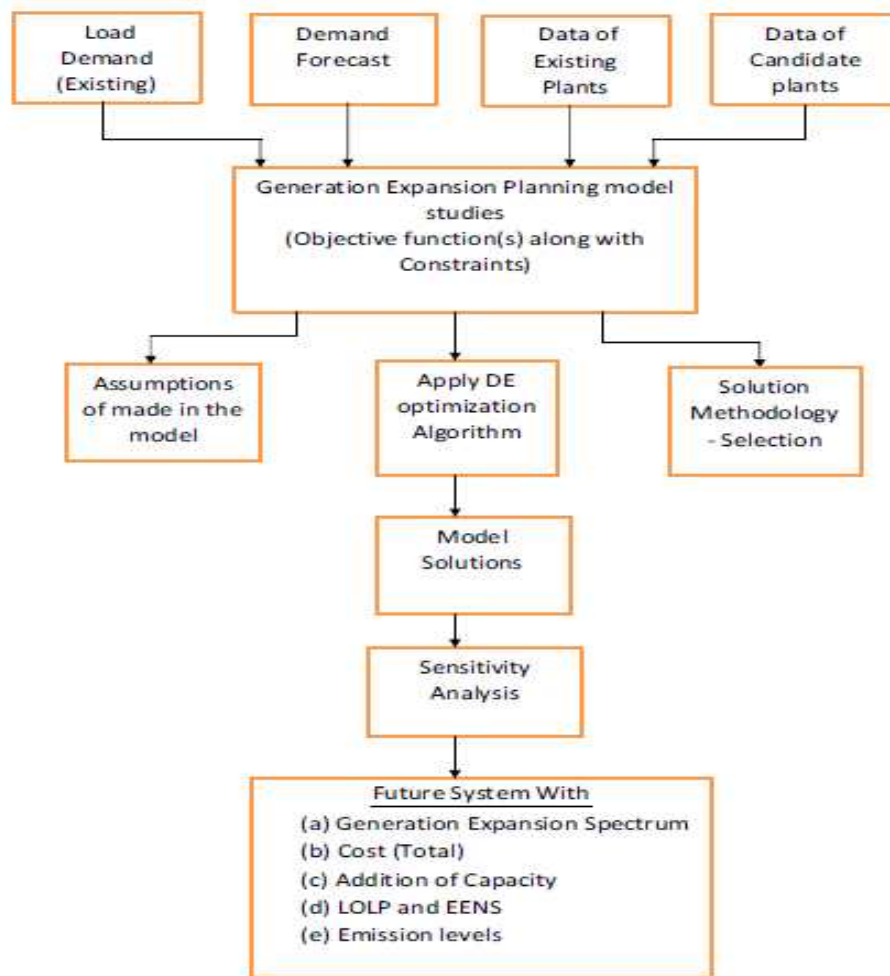
5-2. 결과 해석

모델해석은 세 가지로, 풍력발전소를 포함하지 않은 Base case scenario, 풍력발전이 5-10% 포함된 경우인 Low window scenario, 그리고 풍력발전이 10-20% 포함한 High window scenario이다.

5-3. 추진 정책

정책 1A, 2A, 3A는 미래의 전력생산을 위한 No ETPC, No TERC, 정책 1B, 2B, 3B는 미래의 전력생산을 위한 ETPC와 TERC 조합이고, 정책 1C, 2C, 3C는 미래의 전력생산을 위한 No ETPC와 단지 TERC를 조합하고, 정책1A의 배출을 10% 감축한다.

정책 1D, 2D, 3D는 미래의 전력생산을 위한 ETPC와 TERC를 조합하고, 정책 1A의 배출을 10% 감축한다. 정책 1E, 2E, 3E는 미래의 전력생산을 위한 ETPC와 TERC를 조합하고, 정책 1A의 배출을 20% 감축한다. 정책 1F, 2F, 3F는 미래의 전력생산을 위한 ETPC와 TERC를 조합하고, 정책 1A의 배출을 30% 감축한다. 도식적인 프로차트를 <그림 5-1>에 나타낸다.



<그림 5-1> 발전확대 모델 분석에 대한 도식적 프로차트⁽⁵⁾

5-4. 정책별 결과

6년 동안의 BSC(Base case scenario)에서, HEP(High emission plant)는 총비용이 44.79%에서 73.25% 변하고, LEP(Low emission plant)는 26.75%에서 55.21%로 변동하였다. LES(LOW WIND SCENARIO)의 경우는 HEP가 16.12%에서 62.01%로 변하고, LEP는 37.89%~83.81%이었다. HWS(High WIND SCENARIO)의 경우는 HEP가 14.15%에서 53%로 변하고, LEP는 47%에서 85.84%로 변동하였다. 6년 동안 계획기간에서, BSC에 대한 LEP와 HEP는 가장 낮았고, HWS에 대해서는 가장 높았다.

6년 동안 계획에서, 총 시스템비용은 BSC에 대해 $12,009 \times 10^6$ INR에서 $13,709 \times 10^6$ INR로 산정되었다. LWS의 경우, $13,226 \times 10^6$ INR에서 $15,275 \times 10^6$ INR로 변동하였다. HWS는 $14,492 \times 10^6$ INR에서 $16,570 \times 10^6$ INR로 변하였다.

<표 5-1> 6년간 각종 정책에 대한 BCS, LWS, HWS의 모델 해석결과⁽⁵⁾

Policy alternative	Scenario	Oil	LNG(C C)	Coal(bitum)	Nuc(P WR)	Nuc(P HWR)	Wind	Added capacity	overall cost ×10 ¹⁰	LOLP (day/year)	EENS × 10 ⁴ (MWh)
Policy 1A	BCS	2000	2250	1500	0	2100	0	7850	1.2009	0.0086	27165
Policy 2A	LWS	800	2250	2500	1000	1400	1000	8950	1.3226	0.0096	3.3717
Policy 3A	HWS	1400	1350	2500	2000	700	2000	9950	14.492	0.0098	3.4713
Policy 1B	BSC	2000	2250	1500	0	2100	0	7850	1.2947	0.0086	2.7165
Policy 2B	LWS	1800	2250	1500	1000	1400	1000	8950	1.3753	0.0081	2.7451
Policy 3B	HWS	1000	1800	2500	2000	700	2000	10,000	1.4494	0.0093	3.3602
Policy 1C	BCS	1400	1800	1500	2000	1400	0	8100	1.2773	0.0088	3.0475
Policy 2C	LWS	200	1800	1500	1000	3500	1000	9000	1.4281	0.0089	3.1847
Policy 3C	HWS	0	1350	2000	2000	2800	2000	10.150	1.5583	0.0078	2.7848
Policy 1D	BCS	1400	1800	1500	2000	1400	0	8100	1.3187	0.0088	3.0475
Policy 2D	LWS	600	1350	1500	1000	3500	1000	8950	1.4518	0.0092	3.2975
Policy 3D	HWS	0	1350	2000	2000	2800	2000	10,150	1.5954	0.0078	2.7848
Policy 1E	BSC	800	1350	1500	1000	3500	0	8150	1.3442	0.0067	2.2878
Policy 2E	LWS	400	450	1500	3000	2800	1000	9150	1.4859	0.0094	3.5064
Policy 3E	HWS	0	0	2000	2000	4200	2000	10,200	1.6382	0.0067	2.4224
Policy 1F	BSC	1000	450	3000	1000	2800	0	8250	1.3709	0.0107	4.0013
Policy 2F	LWS	0	0	1500	4000	2800	1000	9900	1.5275	0.0083	3.348
Policy 3F	HWS	0	0	1500	5000	2100	2000	10600	1.657	0.0053	2.1028

6. 한국의 CO₂ 감축

우리나라는 2009년 코펜하겐에서 <표 6-1>과 같이 2020년까지 국가 온실가스 배출량을 전망배출량(BAU, Business-As-Usual) 대비 30% 감축이라는 목표를 발표하고, 지난 2011

년 7월에 <표 6-2>과 같이 해당 감축 목표를 달성하기 위해 세부부문별 업종별 감축목표를 수립 발표하였다. 이후 정부는 국가 중기 온실가스 감축목표 달성을 위한 다양한 정책수단과 조치를 도입하기 시작하였는데, 특히 지난 2012년 5월에는 주어진 감축목표를 가장 비용 효과적으로 달성하기 위해 개발도상국으로서 처음으로 온실가스 배출권 거래제를 입법화하였으며, 오는 2015년 1월부터 온실가스배출권거래제를 본격적으로 시행할 예정이다.

<표 6-1> 서남해 해상풍력단지의 단계별 추진 계획⁽⁶⁾

구분	1 실증	2시범	3 확산
목적	해살 Test bed 구축 핵심 기술 개발	Track record 확보 Biz 모델 개발	대규모 단지 개발 상업 운전
위치	부안 위도 인근 - 영광 안마도 해상		부안 위도 인근 - 영광 안마도 외해
면적	31km ²	84km ²	378km ²
용량	100MW	400MW	2000MW
계통연계	154kv 고장s/s		5,220GWh년
발전량	263GWh년	1,044GWh년	5,220GWh년
사업주체	한전●발전6사		민간사, 한전 및 발전6사

출처 : 서남해 2.5GW 해상풍력 종합추진계획(산업부,2011)

<표 6-2> 해상풍력 발전용량 확대 전망 (MW)⁽⁶⁾

년도	'08	'09	'10	'11	'12	'13	'14	'15	'16	'17
풍력전 체(A)	28,19	38,10	39,40	41,71	44,95	40,35	47,60	45,10	50,88	57,68
해상풍 력	0	3	4	2	1	0	0	5	0	5
B/A(%)	344	689	1,444	470	1,131	2,917	3,107	4,866	7,025	10,594
	1.2%	1.85	3.7%	1.1%	2.5%	7.2%	6.5%	10.8%	13.8%	18.4%

출처: 해상풍력추진로드맵(산업부, 2010)

본 연구는 서남해 해상 풍력 사업을 국가 전력 시스템으로 전환하기 위해 정부 주도로 진행되고 있는 니치 실험으로 정의하였다. 새로운 기술 요소 도입을 위한 니치 실험은 기존 정책들과의 모순과 갈등에 직면하게 된다. ‘서남해 2.5GW 해상풍력 개발사업’은 사업 초반 다양한 변수로 인해 추진이 지연되어왔다. 사업을 담당하는 특수목적 법인의 설립이 당초보다 지연되었을 뿐만 아니라, 2013년 9월까지 서남해 위도와 안마도 지역주민의 의견을 수렴한 뒤에 전원 개발 사업허가를 신청할 계획이었으나 아직 사업 설명회도 개최하지 못하였다.

7. 결론

중국은 만약 풍력에너지가 전통적인 경로로 개발된다면, 전력대체와 연관한 최대 GHG 감축은 0.88GtCO₂eq에 달할 것이다. 이는 2050년까지 경감율을 세 가지 제어에서 31.14%, 51.86% 그리고 67.28%로 각각 증가할 것이다. 또한, 중국의 지구온난화 온도는 2050년 까지 0.19℃에서 0.37℃로 증가할 것으로 예측하였다.

영국의 경우, Hawkes 등이 2010년 발표기초로 한계배출인자(MEF: Marginal Emission Factor)를 계산하였다. 배출인자들로서는 MDF(marginal displacement fact), MEF(marginal emission factor), AEF(average emission factor), FEI(emission intensity of fossil-fuelled generation), offset는 온실가스배출에서 변화 그리고 $it(R^2)$ 는 적합성 등을 사용하였다.

인도의 경우는 사용 가능성을 연구하기 위하여 풍력발전소의 모델링하였고, DE 알고리즘과 변수들은 Rajesh K, 등의 “Least cost generation expansion planning with solar power plant using differential evolution algorithm. Renewable Energy 2016;85:677-86” 를 참고하였다. 6 종류의 정책을 통하여 총비용을 산정하였지만, CO₂ 감축은 논하지 않았다.

국내에서는 “해상풍력 기술의 사회-기술시스템 전환과정에 관한 탐색적 사례연구” 등 23 편이 발표되었지만, 풍력발전과 관련하여 CO₂감축에 대한 연구는 없고, 단지 탐색적 사례연구가 유일하다.

석탄연소에 대한 풍력에너지의 대체로부터 배출가스 감축의 이득은 엄격한 배출제어로 증가하였고, 풍력에너지 시장이 확장되었다. 다른 중요한 결과는 풍력의 대체는 지구온난화를 개선하는데 적은 역할을 했다. 석탄연소 대한 풍력의 대체는 복사강제력(radiative forcing)에서 가장 큰 가능성 있는 기여이고, 2050년에는 복사강제력은 10%이하가 될 것이다.

<참고문헌>

1. 주홍신, 연성모, 신유진, 김범식, 임노현, 정현창, 홍응표, 한국, 영국, 일본 제품 탄소발자국 기준에 따른 세제, 단열재, 진공청소기 산정 결과 비교 평가, CLEAN TECHNOLOGY, Vol. 18, No. 4, December 2012, pp. 440~445
- 2 J.K. Kaldellis*, D. Apostolou, Life cycle energy and carbon footprint of offshore wind energy. Comparison with onshore counterpart, Renewable Energy 108 (2017) 72~84
3. Hongbo Duan, Emissions and temperature benefits: The role of wind power in China, Environmental Research 152(2017) 342 - 350
4. M. Karmellos, D. Kopidou, D. Diakoulaki, A decomposition analysis of the driving factors of CO₂ (Carbon dioxide) emissions from the power sector in the European Union countries, Energy 94 (2016) 680-692.
5. K. Rajesh a., S. Kannan b, C. Thangaraj, Least cost generation expansion planning

with wind power plant incorporating emission using Differential Evolution algorithm, Electrical Power and Energy Systems 80 (2016) 275 - 286

6. 김봉균, 김덕영, 김경남, 김동환, 해상풍력 기술의 사회-기술시스템 전환과정에 관한 탐색적 사례연구, 기술혁신학회지 제17권 2호 2014년 6월 pp.355~379
7. 이지울, 가격결정 모형 연구 최신 현황과 시사점, 2013, 에너지경제연구원



이 분석물은 과학기술정보통신부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.