

수시연구 2011-05

해상풍력발전의 환경적 · 경제적 영향 분석

Environmental and Economic Impacts
of Offshore Wind Power

2011. 12.
신철오 · 육근형



한국해양수산개발원
KOREA MARITIME INSTITUTE

◆ 보고서 집필 내역

● 연구책임자

- 신 철 오 : 제1장, 제4장, 제5장

● 연구진

- 육 근 형 : 제3장

● 외부 집필진

- 박 년 배(세종대학교) : 제2장

◆ 산·학·연·정 연구자문위원

● 이 철 용(에너지경제연구원)

● 우 영 석(국토해양부)

* 연구자문위원은 산·학·연·정 순임

◆ 연구감리자

● 이 원 갑(한국해양수산개발원 연구위원)

머 리 말

해양자원 중에서도 에너지 자원이 수산자원이나 공간자원과 마찬가지로 점차 중요한 역할을 차지하고 있다. 더욱이 최근에는 기후변화 문제가 대두되면서 화석연료를 대체하는 에너지원으로서 해양에너지를 적극적으로 개발하려는 노력이 필사적으로 이루어지고 있다. 우리나라에서도 점차 불안정해지고 있는 에너지 수급상황과 더불어 환경 문제에 적극적으로 대응하기 위해 조력, 조류, 풍력발전 등 여러 해양 관련 신·재생에너지 개발에 대한 관심이 높아지고 있다. 이미 정부 차원에서도 풍력발전과 같은 신·재생에너지 산업을 세계 5위 수준으로 끌어올린다는 목표 아래 2015년까지 총 40조 원을 이 분야에 투자하기로 공언한 바 있으며, 관련 계획도 수립된 상황이다.

우리가 현재 시점에서 대규모로 이용가능한 해양에너지 가운데 해양풍력발전은 전통적인 화석연료 자원 빈국에서 벗어나 신·재생에너지 중심의 새로운 에너지 강국으로 도약하는 계기가 될 수 있다. 이미 세계 최고수준의 조선·해양플랜트 기술을 바탕으로 안정적인 부품 공급 체계를 마련한다면 신흥국을 중심으로 세계 해상풍력 시장에 접근할 수 있는 기회가 마련될 것이다. 다만 이러한 과정에서 먼저 충분한 시험을 통해 기술적 문제, 사회적 논란, 경제성 여부에 대한 검증이 수행될 필요가 있다. 최근까지 시험발전을 하고 있는 시화호 조력발전의 사례와 같이 충분한 운용을 통해서 경험을 축적하고 경제성 유무를 확인하는 절차를 마련하는 것이 중요하다. 특히 우리나라는 연안해역에 대한 경제적 이용도가 매우 높은 특징을 지니고 있어 대규모 해상풍력단지의 개발이 미칠 환경적 영향에 대해 면밀한 조사와 사전 연구가 진행되어야 한다.

이 연구는 향후 해상풍력단지의 개발이 이루어지기 전에 검토해야 할

다양한 환경적인 영향과 고려사항, 그리고 경제성 평가에 대한 내용을 담고 있다. 이 연구가 아직까지 현재의 제도 내에서 고려하지 못하고 있는 환경적 영향과 경제성 분석에 필요한 최소한의 내용을 담고 있지만 향후 우리나라 연안에 본격적인 대단위 해상풍력단지의 개발이 이루어지는 데 일정 부분 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 마지막으로 본 연구를 수행한 신철오 전문연구원과 육근형 전문연구원의 노고에 깊은 감사를 표한다.

2011년 12월

한국해양수산개발원
원 장 김 학 소

차 례

Executive Summary	i
-------------------	---

제1장 서 론	1
---------	---

1. 연구의 배경 및 필요성	1
2. 연구의 목적	2
3. 연구의 범위와 방법	3

제2장 신·재생에너지 정책분석	4
------------------	---

1. 에너지수급 여건의 변화 및 신·재생에너지 현황 및 전망	4
2. 해상풍력 기술 및 시장 동향(산업 여건 등) 및 전망	11
3. 신·재생에너지 공급 의무화 제도 도입 배경 및 시행 현황	21
4. 풍력 산업의 발전 시나리오 및 발전 방안	25

제3장 해상풍력발전의 환경영향과 대응 방안	35
-------------------------	----

1. 해상풍력발전에 따른 환경영향	35
1) 개요	35
2) 해상풍력발전 단지 건설 단계	36
3) 해상풍력발전 단지 운영 단계	40
4) 해상풍력발전 단지 해체 단계	49
2. 해상풍력발전 환경영향에 대한 정책 대응 방향	50
1) 환경영향 관련 기존 평가 제도 보완	50
2) 환경영향 수용체별 조사연구 시행	53
3) 해양공간관리계획(Marine Spatial Planning) 조기 도입	54

제4장 해상풍력의 경제적 영향 ————— 57

1. 해상풍력 관련 경제성 평가의 개요	57
2. 해상풍력의 경제성 분석	58
1) 사업성 분석	58
2) 수익	63
3. 국내 해상풍력의 경제성 분석 사례	66
1) 100MW급 해상풍력단지 조성사업	68
2) 20MW급 서남해안 해상풍력단지 조성사업	70
4. 기타 경제적 영향	71

제5장 결론 및 시사점 ————— 74

1. 연구의 요약과 결론	74
2. 정책적 시사점	76
1) 해상풍력의 환경성 검토	76
2) 경제성 검토 사항	76

참 고 문 헌 ————— 79

표 차 례

표 2-1. 국내 풍력발전 보급 목표	4
표 2-2. 지역별 풍력발전 잠재량 및 발전량	6
표 2-3. 풍력자원 잠재량 산정개요	8
표 2-4. 전 세계 재생가능 에너지별 발전량 전망	10
표 2-5. 2009년, 풍력 국가별 설치 용량	12
표 2-6. 현재 설치된 해상풍력 프로젝트 요약(2010년 2사분기 기준)	14
표 2-7. 신·재생에너지원에 대한 요인별 평가 순위	20
표 2-8. 신·재생에너지원별 매출액, 고용인원, 기업체수 추이 비교	20
표 2-9. 연도별 신·재생에너지 의무공급량의 비율	23
표 2-10. 신·재생에너지 공급의무화제도에서 신·재생에너지원별 가중치	23
표 2-11. 발전차액제도에서 신·재생에너지 전원의 기준 가격	24
표 2-12. 태양광 전원의 용량 및 적용기간별 기준가격(원/kWh)	24
표 2-13. 풍력 발전을 위한 녹색, 저배출, 기후 복원성 증진 로드맵 예시	31
표 2-14. 풍력 발전의 환경적·사회적 문제 저감 방안	34
표 3-1. 해상풍력시설 건설 시 종별 회피 예상 거리	39
표 3-2. 레이더 종류별 영향과 저감대책	47
표 3-3. 해양경관에 미치는 영향의 임계값	48
표 3-4. 풍력발전 환경영향평가 검토 현황	52
표 4-1. 재무적 타당성의 평가기준	62
표 4-2. 연도별 CDM 단가 예측치	65
표 4-3. 경제성 분석의 주요 지표	68
표 4-4. 건설단가 예시	69
표 4-5. 경제성 검토	69
표 4-6. 건설단가 예시	70
표 4-7. 경제성 검토	70

표 4-8. 해상풍력단지 이격거리에 따른 연안관광지 방문의사	72
표 4-9. 지역경제에 미치는 효과 조사(Michigan Wind Council)	73

그림 차례

그림 2-1. 풍력 보급 전망 및 목표안	5
그림 2-2. 신·재생에너지 발전량 추이	6
그림 2-3. 전 세계 재생에너지의 기술적 잠재량 범위	9
그림 2-4. 전 세계 재생에너지 발전량	10
그림 2-5. 전력을 생산하는 에너지원에 대한 선호도 설문 응답 결과	11
그림 2-6. 1996~2010년 전 세계 풍력 설비용량 추이	12
그림 2-7. 풍력 설비의 규모 추이	13
그림 2-8. EU27의 국가별 2020년 재생가능 전력 생산량 계획과 풍력의 발전량 비중 추이	16
그림 2-9. 벨기에 Thornton Bank 해상풍력단지	16
그림 2-10. 비재생에너지와 상용화된 재생에너지 기술의 최근 연간균등화비용 비교 ..	17
그림 2-11. 에너지원별 연간균등화 발전비용	18
그림 2-12. 육상풍력단지의 자본비용 구조	18
그림 2-13. 해상풍력단지의 자본비용 구조	19
그림 2-14. 풍력 R&D 전략 로드맵	22
그림 2-15. 해상풍력단지 배치도	25
그림 2-16. 해상풍력 추진 로드맵	26
그림 2-17. 풍력 R&D 전략 로드맵	27
그림 2-18. 발전 부문 재생가능 에너지 전환 시나리오 결과 비교	28
그림 2-19. 대관령 풍력 발전단지의 2010년 시간대별 발전량 추이	29
그림 2-20. 재생에너지의 장애요인 구분 및 지원 정책	30
그림 2-21. EU27의 발전 기술별 사적 비용 및 외부 비용 비교	33
그림 3-1. 제주도 행원리 해상풍력 시범단지 조성	36
그림 3-2. 네덜란드 니스테드 풍력단지 주변 새떼 이동경로	43
그림 4-1. 풍력발전과 해상풍력	57

그림 4-2. 연도별 SMP 기준 단가	63
그림 4-3. 월별 SMP 기준 단가	64
그림 4-4. 시간대별 SMP 기준 단가	64
그림 4-5. 연도별 CDM 단가 예측치	65
그림 4-6. 전남 신안군 일대 사례지역	67
그림 4-7. 전북 고창군 일대 사례지역	67

Executive Summary

Environmental and Economic Impacts of Offshore Wind Power

Wind power is the most popular energy with the greatest potential among various renewable energy sources, such as photovoltaic, wind, tidal power and marine bio-energy. Offshore wind power, in particular, is the type of energy which can be actively used and developed in Korea, a nation surrounded by the sea on three sides. The Korean government took note of such possibilities and has operated test facilities, securing technology and experience. All these efforts were geared towards finding out national new growth engines. Synergy effects in relevant sectors and new industries will be created as development of offshore wind power spread nationwide and more companies actively jump in the area.

Offshore wind power development in Korea is now at the test operation stage which was firstly implemented at the Jeju Island. However, European nations have actively tapped the energy so far, building and operating offshore facilities. As a result, detailed analyses were conducted on its various impacts on the marine environment. Although Korea is surrounded by the sea on three sides, stakeholders took the lead in developing and using the coast. Therefore, unless thorough pre-surveys and research are conducted on the impacts on the marine environment, large social conflicts and delay costs can occur at the development and operation stage of offshore wind power.

At the test-operation phase, in particular, detailed analysis should be carried out

on damages to the ocean floor, sediment accumulation, noise and vibration during construction. Moreover, long-term measures need to be prepared for noise, vibration, magnetic field, landscape damages and impacts on the marine environment.

It is clear that offshore wind power is a relatively effective tool than other energy sources in supplying large scale electricity at a time when renewable energy supply becomes mandatory. And genuine efforts of both advanced and developing nations to adopt that energy source implies its great growth potential and possible effects. As for its economic feasibility, however, offshore wind power faces lots of limitation due to connection to electricity networks, licensing procedures, insufficient domestic manufacturing of key facilities and equipment.

제1장 서론

1. 연구의 배경 및 필요성

최근 들어 풍력발전은 기술개발과 설비의 대량 공급, 도입주체의 다각화, 국가적 차원의 활발한 지원에 힘입어 신·재생에너지원 가운데 비교적 적극적으로 상업화가 추진되고 있다. 이 가운데서도 해상풍력발전(offshore wind power)의 경우 육상의 공간적 제약에서 비교적 자유롭고, 풍력에너지의 방대한 부존량이 인식되면서 국내에서는 서남해안 해상을 중심으로 도입이 적극적으로 추진되고 있다. 지구온난화에 대한 범지구적 위기의식이 심화되면서 선진국을 중심으로 온실가스에 대한 감축 요구와 맞물려 에너지 정책의 방향전환을 국내외에서 요구받고 있다. 또한 2011년 3월 발생한 일본 후쿠시마 원전의 사고를 계기로 원자력발전의 안전성에 대한 논란이 야기되면서 해양을 중심으로 한 신·재생에너지의 개발 수요가 향후 큰 폭으로 확대될 전망이다.

우리의 경우는 이러한 국제적 상황과 더불어 신·재생에너지원의 개발을 통한 저탄소 경제성장을 적극적으로 추진하고 있고 이 과정에서 국내에 부존자원이 비교적 풍부하고 관련 산업분야의 연관효과가 큰 풍력산업이 각광을 받고 있다. 뿐만 아니라 지역 차원에서는 풍력발전 클러스터의 도입을 통해서 지역경제 진흥을 위한 정책수단의 하나로 인식되고 있다. 그리고 세계적인 수준의 해양플랜트 기술을 보유한 국내 기업의 활발한 시장참여가 이루어질 경우 향후 전 세계 신·재생에너지 시장의 상당부분을 선점할 수 있는 계기가 마련될 것으로 기대된다.

우리의 경우에는 지난 2010년 11월 지식경제부 주관으로 ‘해상풍력추진협의회’를 개최하여 ‘해상풍력 추진 로드맵’을 발표하였으며, 이러한

‘해상풍력 추진 로드맵’ 발표는 최근 국내에서 수립한 ‘신·재생에너지산업 발전전략’ 후속조치에 해당한다. 동 로드맵에서는 조속한 해상풍력발전 운영경험을 확보하여, 급속히 확산되고 있는 해상풍력 시장을 선점하기 위한 단계적 추진계획을 제시한 바 있다.

반면 해상풍력발전이 미치는 해양환경 측면의 영향이나 경제적 영향에 대한 본격적인 논의가 미흡한 상황이다. 해상풍력의 부존량이나 국내 입지여건에 대한 연구와 논의는 비교적 활발하게 이루어졌으나 우리나라 연안의 특성을 고려한 해양환경에 미치는 영향에 관해 보다 심층적인 분석이 필요한 시점이다. 또한 해상풍력발전이 저탄소·녹색에너지원의 중요한 축으로 논의되고 있지만 현재 시점에서 어느 정도의 실질적인 경제성을 확보하고 있는지와 향후 기술의 발전 정도에 따른 경제적 타당성의 변화 가능성 여부를 검토하는 것도 합리적인 국가에너지 정책의 마련을 위해 필요하다고 판단된다.

2. 연구의 목적

본 연구에서는 해상풍력이 해양환경에 미치는 영향 및 현재 국내외 기술수준 하에서의 경제적 타당성에 대해서 살펴보고 이를 기반으로 향후 우리나라 해상풍력의 발전방안에 관해 살펴보고자 한다.

먼저 신·재생에너지 및 해상풍력 대두 배경, 국내외 에너지 수급 여건 변화, 그리고 해양분야 신·재생에너지 기술 및 시장동향에 대해 살펴본다. 그리고 해상풍력발전에 따른 해양환경 영향 및 대응 방안에 관해 논의하고자 한다. 해상풍력의 개발은 발전 특성과 경제적 이유로 인해서 대규모로 수행될 수밖에 없는 특징을 지닌다. 따라서 국외 해상풍력 건설·운영 사례에 대한 분석을 통해서 해양환경영향 평가의 내용과 소음과 진동, 해양물리 및 퇴적환경 변화, 어업환경 변화 및 영향, 경관 영향, 해양생

태계 영향, 바닷새 이동 및 서식환경 변화에 대한 내용을 분석하고자 한다.

또한 해상풍력의 타당성을 검토하기 위해서 국내에서 수행된 타당성 분석 사례를 소개하고 사회경제적 영향에 대해 논의한다.

3. 연구의 범위와 방법

본 연구는 총 5개의 장으로 구성되었다. 연구의 배경 및 필요성 등을 기술한 서론에 이어 제2장에서는 국내외 신·재생에너지 정책 현황을 분석하였다. 여기서는 해상풍력과 관련된 기술 및 시장 동향과 전망에 대해 검토하였다. 제3장에서는 해상풍력발전의 환경영향과 그 대응 방안에 대해 기술하였다. 해상풍력발전의 환경영향은 설비·운용의 생애주기에 맞추어 건설단계, 운영단계, 그리고 해체단계로 나누어 고려하였다. 그리고 발생 가능한 환경영향에 대한 정책적인 대응 방향으로는 크게 환경영향 관련 평가제도, 수용체별 조사연구, 해양공간관리계획 도입 방안으로 구분하였다. 제4장에서는 해상풍력발전의 경제적 영향을 국내에서 수행된 사례지역의 경제성 분석 자료를 토대로 설명한다. 마지막으로 제5장은 향후 해상풍력 자원의 본격 개발에 앞서 경제성 확보 및 해양환경 영향 평가를 위해 필요한 정책적 시사점을 포함하였다.

연구의 방법으로는 먼저 우리나라의 신·재생에너지 정책의 추진 현황과 해외 선진국의 해상풍력 현황을 분석하기 위해 전문가 자문을 통해 발전과정과 배경, 현황 등을 분석하였다. 해상풍력은 국내에는 도입 초기의 신산업에 해당하는 특성이 있어 기술적 분석에 관한 연구는 국외 사례를 중심으로 풍부한 반면, 관련 정책 연구는 많지 않다. 따라서 해상풍력이 발전한 북해 일원의 국가를 중심으로 경제성 및 환경영향 관련 연구보고서와 지침을 수집·분석하였다.

제 2 장 신·재생에너지 정책분석

1. 에너지수급 여건의 변화 및 신·재생에너지 현황 및 전망

온실가스 감축 및 증가하는 에너지(특히 전력) 수요를 충족시키기 위한 수단으로 재생에너지가 주목을 받고 있다. 2008년 발표된 ‘제1차 국가에너지기본계획’(국무총리실 외, 2008)에 따르면, 2030년까지 1차 에너지의 약 11%를 신·재생에너지로 공급할 계획이다. 또한 ‘제3차 신·재생에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획’(지식경제부, 2008)에 따르면, 2030년까지 전력 수요의 약 7.7%를 신·재생에너지로 공급하며, 신·재생 전력의 약 42%를 풍력으로 공급할 계획이다(<표 2-1> 참고). 2010년 발표된 ‘제5차 전력수급기본계획’(지식경제부, 2010)에 따르면, 신·재생에너지의 발전 비중을 2024년까지 8.9% 수준으로 목표를 더욱 강화하였다.

2009년 현재 풍력 발전은 육상풍력만 가동되고 있지만, 향후 공급 잠재량, 민원발생 여부 등을 고려할 때 육상풍력보다 해상풍력을 더욱 육성할 계획이다(<그림 2-1> 참고).

표 2-1 | 국내 풍력발전 보급 목표

구분	실제 통계	목표 전망		
	2009년	2015년	2020년	2030년
1차에너지(백만TOE)	243	270	287	300
신·재생에너지(천TOE)	6,086	11,731	17,520	33,027
1차 대비 신·재생 비중(%)	2.50	4.33	6.08	11.0
풍력(TOE)	147,351	1,084	2,035	4,155
신·재생 중 풍력비중	2.42	9.2	11.6	12.6
전력 수요(백만TOE)	33,925	-	40,567	44,119
신·재생전력(GWh)	4,618	13,016	21,977	39,517

| 표 2-1 | 국내 풍력발전 보급 목표(계속)

구분	실제 통계	목표 전망		
	2009년	2015년	2020년	2030년
신·재생 전력 비중(%)	1.1		4.7	7.7
태양열(GWh)	0	15	392	2,046
태양광(계통연계)(GWh)	470	962	1,424	1,972
풍력(GWh)	685	4,336	8,138	16,620
해양(GWh)	0	1,571	3,629	6,160
소수력(GWh)	225	654	913	1,926
대수력(GWh)	2,596	3,632	3,746	3,861
목질계(GWh)	0	166	1,146	2,629
바이오가스(GWh)	7	31	64	161
LFG(GWh)	449	903	1,122	1,340
지열	0	745	1,402	2,803
신·재생전력 중 풍력비중(%)	14.8	33.3	37.0	42.1

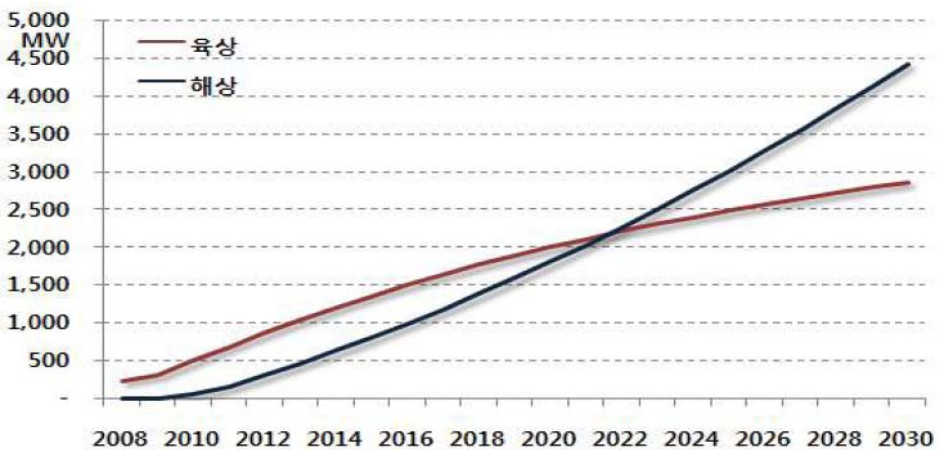
자료 : 에너지경제연구원, 에너지통계연보, 2010

에너지관리공단, 2009년 신·재생에너지보급통계, 2010

국무총리실 외, 제1차 국가에너지기본계획(2008~2030), 2008

지식경제부, 제3차 신·재생에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획, 2008

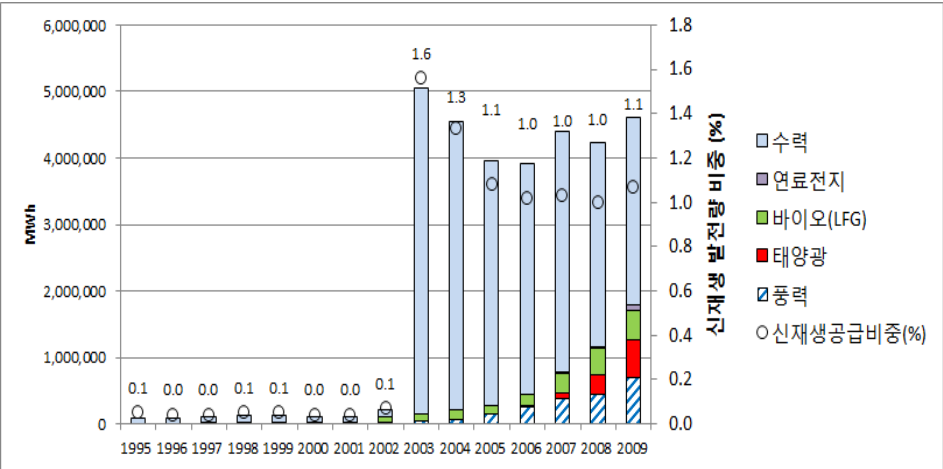
지식경제부·에너지기술평가원, 그린에너지 전략로드맵 2011; 풍력, p. 19 수정



자료: 지식경제부, 제3차 신·재생에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획 수립방안 연구, 2008, p. 77

| 그림 2-1 | 풍력 보급 전망 및 목표안

2003년부터 대수력을 신·재생에너지 보급 통계에 포함시키면서부터, 전력 부문 신·재생에너지의 비중은 약 1%대를 유지하고 있으며, 최근 비수력 재생에너지의 경우 풍력, 태양광, 바이오가스 및 매립가스 순으로 발전량이 증가하고 있다(<그림 2-2> 참고).



자료: 에너지관리공단, 2009년 신·재생에너지 보급통계, 2010 재구성
주: 2003년부터 수력에 대수력 포함됨

그림 2-2 | 신·재생에너지 발전량 추이

표 2-2 | 지역별 풍력발전 잠재량 및 발전량

단위: GWh

구분		육상풍력	해상풍력	계	육상풍력	해상풍력
전국	부존 잠재량	485,730	691,124	1,176,854	41.3%	58.7%
	가용 잠재량	97,170	243,153	340,323	28.6%	71.4%
	기술적 잠재량	32,387	89,054	121,441	26.7%	73.3%
	공급가능 잠재량	11,982	51,915	63,897	18.8%	81.2%
	발전량(2009년)	685		685	100.0%	0.0%
경기 (+서울+인천)	부존 잠재량	45,756	66,181	111,937	40.9%	59.1%
	가용 잠재량	6,411	36,637	43,048	14.9%	85.1%
	기술적 잠재량	3,445	10,719	14,164	24.3%	75.7%
	공급가능 잠재량	1,194	2,226	3,420	34.9%	65.1%
	발전량(2009년)	0		0	100.0%	0.0%

| 표 2-2 | 지역별 풍력발전 잠재량 및 발전량(계속)

단위: GWh

구분		육상풍력	해상풍력	계	육상풍력	해상풍력
강원	부존 잠재량	81,048	28,842	109,890	73.8%	26.2%
	가용 잠재량	39,902	1,371	41,273	96.7%	3.3%
	기술적 잠재량	10,838	763	11,601	93.4%	6.6%
	공급가능 잠재량	2,852	483	3,335	85.5%	14.5%
	발전량(2009년)	308		308	100.0%	0.0%
충남	부존 잠재량	39,505	54,714	94,219	41.9%	58.1%
	가용 잠재량	2,231	30,399	32,630	6.8%	93.2%
	기술적 잠재량	1,382	11,479	12,861	10.7%	89.3%
	공급가능 잠재량	812	3,341	4,153	19.6%	80.4%
	발전량(2009년)	0		0	100.0%	0.0%
충북 (+대전)	부존 잠재량	33,412	0	33,412	100.0%	0.0%
	가용 잠재량	5,045	0	5,045	100.0%	0.0%
	기술적 잠재량	1,423	0	1,423	100.0%	0.0%
	공급가능 잠재량	0	0	0	100.0%	0.0%
	발전량(2009년)	0		0	100.0%	0.0%
전북	부존 잠재량	35,863	42,069	77,932	46.0%	54.0%
	가용 잠재량	4,600	27,771	32,371	14.2%	85.8%
	기술적 잠재량	1,439	9,137	10,576	13.6%	86.4%
	공급가능 잠재량	545	3,255	3,800	14.3%	85.7%
	발전량(2009년)	11		11	100.0%	0.0%
전남 (+광주)	부존 잠재량	62,723	315,897	378,620	16.6%	83.4%
	가용 잠재량	9,003	113,977	122,980	7.3%	92.7%
	기술적 잠재량	4,258	43,710	47,968	8.9%	91.1%
	공급가능 잠재량	1,899	32,399	34,298	5.5%	94.5%
	발전량(2009년)	7		7	100.0%	0.0%
전남 (+광주)	부존 잠재량	62,723	315,897	378,620	16.6%	83.4%
	가용 잠재량	9,003	113,977	122,980	7.3%	92.7%
	기술적 잠재량	4,258	43,710	47,968	8.9%	91.1%
	공급가능 잠재량	1,899	32,399	34,298	5.5%	94.5%
	발전량(2009년)	7		7	100.0%	0.0%
경북 (+대구)	부존 잠재량	110,907	39,053	149,960	74.0%	26.0%
	가용 잠재량	17,593	2,503	20,096	87.5%	12.5%
	기술적 잠재량	3,729	1,020	4,749	78.5%	21.5%
	공급가능 잠재량	1,720	940	2,660	64.7%	35.3%
	발전량(2009년)	241		241	100.0%	0.0%

| 표 2-2 | 지역별 풍력발전 잠재량 및 발전량(계속)

단위: GWh

구분		육상풍력	해상풍력	계	육상풍력	해상풍력
경남 (+부산+ 울산)	부존 잠재량	64,566	82,834	147,400	43.8%	56.2%
	가용 잠재량	8,795	27,755	36,550	24.1%	75.9%
	기술적 잠재량	4,252	11,198	15,450	27.5%	72.5%
	공급가능 잠재량	2,250	8,243	10,493	21.4%	78.6%
	발전량(2009년)	2		2	100.0%	0.0%
제주	부존 잠재량	11,950	61,534	73,484	16.3%	83.7%

자료: 지식경제부·에너지관리공단, 2010 신·재생에너지 백서, 2010, pp.161~162 재구성

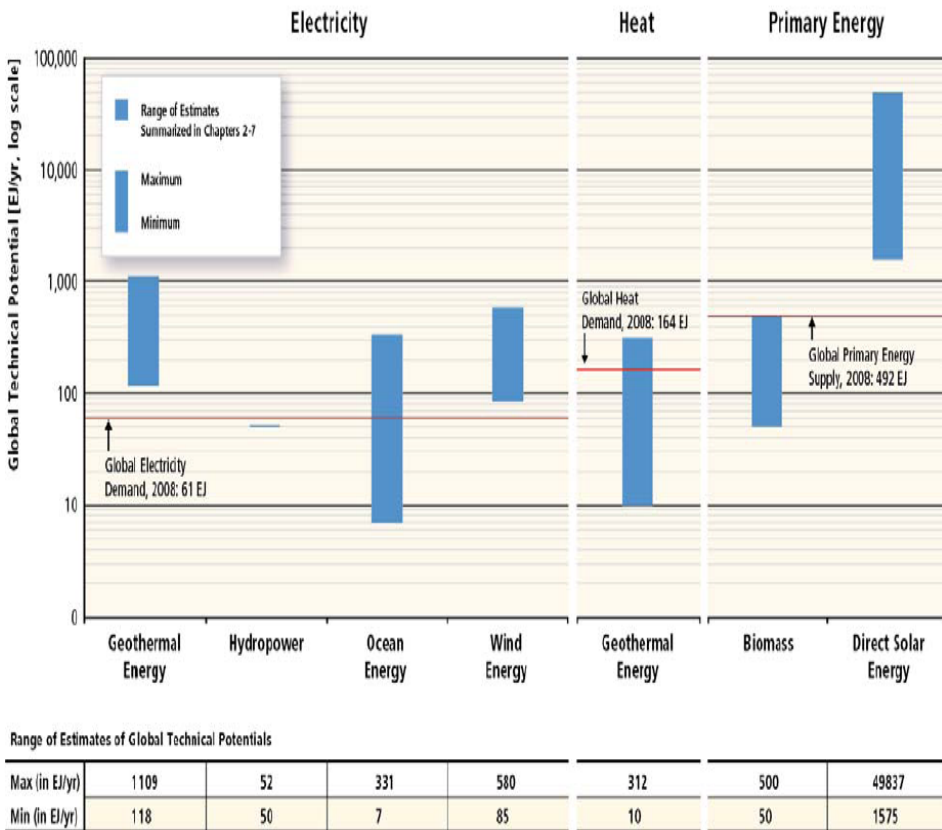
| 표 2-3 | 풍력자원 잠재량 산정개요

구분		산정
부존 잠재량	육상	육상(영토) 전 면적에 풍력발전기를 2MW/k㎡의 용량밀도로 설치한 경우 (이론적으로 태양에너지 잠재량의 2% 수준)
	해상	해상(영해) 전 면적에 풍력발전기를 3MW/k㎡의 용량밀도로 설치한 경우 (이론적으로 태양에너지 잠재량의 2% 수준)
가용 잠재량	육상	영토 중 도시, 수계, 도로, 국립공원 면적 및 급경사지, 협곡 등 개발 부적합 면적을 제외한 경우 (전 영토의 18% 가용)
	해상	영해 중 이안거리 1~25km, 수심 5~50m인 영역 중 항로, 국립공원, 해저구조물 등 개발 부적합 면적을 제외한 경우 (전 영해의 32% 가용)
기술적 잠재량	육상	전력계통 연계거리 10km 이하인 경우 (후류손실, 계통손실, 설비가동률 등을 종합하여 손실률 10% 적용)
	해상	전력계통 연계거리 25km 이하, 수심 30m 이하인 경우 (후류손실, 계통손실, 설비가동률 등을 종합하여 손실률 20% 적용)
공급가능 잠재량	육상	설비이용률 25% 이상으로 발전사업에 의한 경제성이 보장되는 경우 (전 영토의 3% 가용)
	해상	설비이용률 30% 이상으로 발전사업에 의한 경제성이 보장되는 경우 (전 영해의 10% 가용)

자료: 지식경제부·에너지관리공단, 2010 신·재생에너지백서, 2010, p. 159

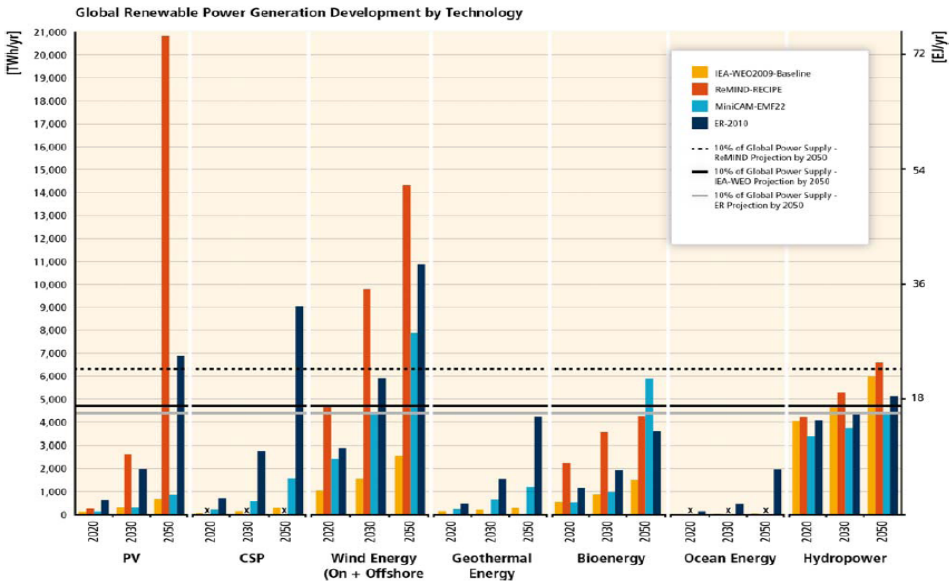
주: 설비이용률 (capacity factor)은 연중 풍력발전기가 최대출력으로 가동하는 비율

2011년 6월 발표된 IPCC 보고서에 따르면, 전 세계적으로 풍력의 기술적 잠재량은 현재 전 세계 전력 소비량보다 높은 것으로 평가되고 있으며, 태양에너지의 경우 현재 전 세계 1차 에너지 소비량보다 높은 것으로 평가되고 있다(<그림 2-3> 참고). 그리고 2050년까지 기후변화 대응을 위해 온실가스 감축 목표 수준을 강화할수록 재생에너지의 비중은 증가하며, 재생에너지 발전량 중에서는 풍력과 태양에너지의 비중이 가장 높으며, 일부 시나리오에서는 풍력과 태양에너지 각각 총 발전량의 10% 이상을 담당할 것으로 전망하고 있다(<그림 2-4> 참고).



자료: IPCC, Special Report Renewable Energy Sources(SRREN), 2011

| 그림 2-3 | 전 세계 재생에너지의 기술적 잠재량 범위



자료: IPCC, 2011

| 그림 2-4 | 전 세계 재생에너지 발전량

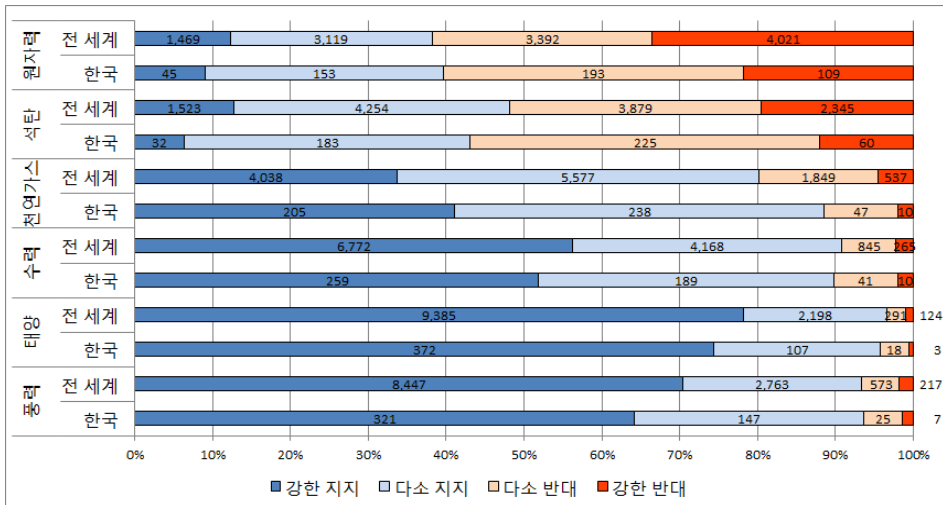
| 표 2-4 | 전 세계 재생가능 에너지별 발전량 전망

구분	에너지 및 공정상 배출(Gt CO ₂)	현 배출량 대비	1차에너지 대비 RE (%)	2050년 RE 발전량 (TWh)
2007	27.4	100.0%	6.5	
IEA-WEO 2009 Baseline	44.3	161.7%	15.0	11,159
ReMINDRECIPE	15.8	57.7%	48.0	63,384
MiniCAM-EMF22	12.4	45.3%	31.0	21,660
ER-2010	3.7	13.5%	77.0	41,500

한편 금년 3월 11일, 일본 후쿠시마 원전 사고 이후 전 세계적으로 원전에 대해 재검토하려는 움직임이 있으며, 스위스(5.25), 독일(5.30), 이탈리아(6.23)는 정부 결정 또는 국민투표를 통해 원전을 단계적으로 폐지하기로 하였다. 원전의 신규 건설 및 전력 공급 기여도는 후쿠시마 원전 사고로 인해 정도의 차이는 있지만 영향을 받을 것으로 전망된다. 원전의 공급 기여

도가 감소하게 된다면, 대안으로 에너지 소비 저감 및 신·재생에너지 공급의 확대가 필수적이다.

최근 국제여론조사기관이 수행한 설문조사에 따르면, 원자력에 대한 선호도는 40% 이하로 지지보다 반대가 더 많으며, 에너지원별로는 태양, 풍력, 수력, 천연가스, 석탄, 원자력 순으로 선호도가 높았다. 이는 24개국을 대상으로 한 전체 설문 결과와 한국의 설문 결과가 유사한 내용을 보이고 있다.



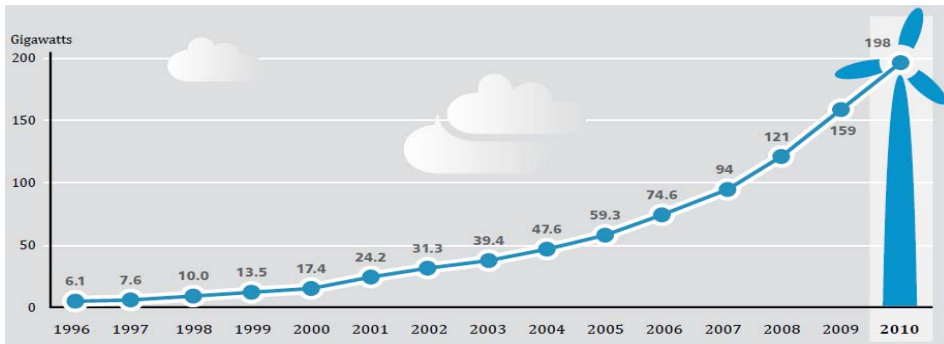
자료 : Global advisor, Global Citizen Reaction to the Fukushima Nuclear Plant Disaster, 2011

주: 전 세계 24개국, 약 12,000명(한국, 약 500명), 2011. 4. 6.~2011. 4. 21.

| 그림 2-5 | 전력을 생산하는 에너지원에 대한 선호도 설문 응답 결과

2. 해상풍력 기술 및 시장 동향(산업 여건 등) 및 전망

전 세계적으로 풍력 발전은 빠르게 확대되고 있으며, 2010년 현재 198GW에 이르렀으며 과거 약 15년 동안 30배 이상 성장하였다.



자료: REN21, 2011, p. 20

| 그림 2-6 | 1996~2010년 전 세계 풍력 설비용량 추이

2009년 기준으로 풍력 발전 누적 설비용량은 미국, 중국, 독일, 스페인 순이다. 최근 중국, 미국 등에서 새로 설치하는 풍력 설비용량이 증가하고 있다. 해상풍력 발전의 누적 설비용량은 영국, 덴마크, 네덜란드 순으로 유럽 국가들이 선두를 차지하고 있다. 풍력 터빈은 덴마크, 미국, 중국, 독일, 스페인 국가의 제품이 대다수를 차지하고 있다(<표 2-5> 참고).

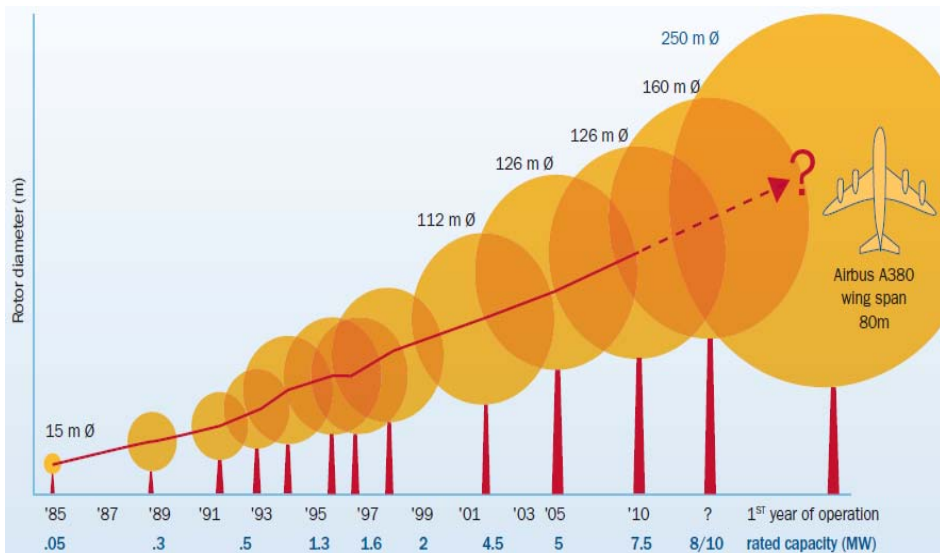
| 표 2-5 | 2009년, 풍력 국가별 설치 용량

순위	풍력(GW)		순위	해상풍력(MW)		풍력 터빈 제작사	비중
	신규	누적		신규	누적		
미국	10.0	35.1	영국	306.0	894.0	Vestas(덴마크)	12.5%
중국	13.8	25.8	덴마크	228.0	625.9	General Electric(미국)	12.4%
독일	1.9	25.8	네덜란드	0.0	246.8	Sinovel(중국)	9.2%
스페인	2.5	19.2	중국	63.0	63.0	Enercon(독일)	8.5%
인도	1.3	10.9	독일	60.0	60.0	Goldwind(중국)	7.2%
이태리	1.1	4.9	벨기에	0.0	30.0	Gamesa(스페인)	6.7%
프랑스	1.1	4.5	아일랜드	0.0	25.0	Dongfang(중국)	6.5%
영국	1.1	4.1	노르웨이	2.3	2.3	Suzlon(인도)	6.4%
포르투갈	0.7	3.6	스웨덴	30.0	163.3	Siemens(덴마크)	5.9%
덴마크	0.3	3.5				Repower(독일)	3.4%
전 세계	38.3	158.5	전 세계	689	2110	기타	18.5%

자료: REN21, 2010, p. 54; 지식경제부·에너지기술평가원, 2011, p. 36, 39

한국은 2009년 말 기준으로 육상풍력이 224기, 360MW 설치되어 있으며 (계통연계는 약 342MW), 해상풍력은 아직 없지만 서남해안에 해상풍력단지를 계획하고 있다(지식경제부 · 에너지관리공단, 2010, pp. 374~375). 국내 설치된 제품들은 덴마크 Vestas사와 스페인 Acciona사의 제품이 국내 보급용량의 98%를 차지하고 있다(지식경제부 · 에너지기술평가원, 2011, pp. 28~29).

현재 국내 풍력단지에서는 1.5~3MW 발전 설비도 사용되고 있다. 국내 기업들도 2~3MW 풍력발전 시스템을 개발 및 실증 완료하였으며, 5MW급을 개발 중에 있다(지식경제부 · 에너지기술평가원, 2011, p. 52). 외국에서는 5MW급이 개발되어 시연되고 있으며, 향후 해상풍력을 중심으로 설비 규모는 더 커지고 비용은 감소할 전망이다(<그림 2-7> 참고).



자료: EWEA, Upwind : Design limits and solutions for very large wind turbines, 2011

| 그림 2-7 | 풍력 설비의 규모 추이

영국, 덴마크, 독일 등 유럽에서는 대규모 해상풍력단지를 추진하고 있으며, 5MW급 풍력발전설비도 사용되고 있다. 해상풍력의 수심은 3~108m에 이르며, 해안에서 거리가 0.1~30km에 이르고 있다(<표 2-6> 참고).

| 표 2-6 | 현재 설치된 해상풍력 프로젝트 요약(2010년 2사분기 기준)

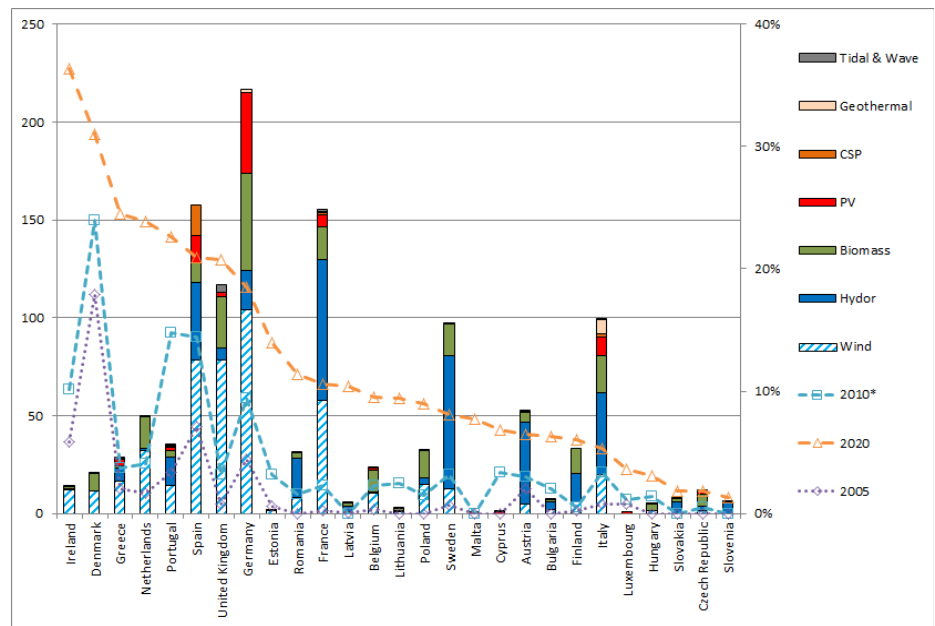
국가	프로젝트	총 설비용량 (MW)	평균 수심 (m)	평균 해상 거리 (km)	터빈 수	터빈 용량 (MW)	터빈 제조사	가동 연도
영국 (1041.4 MW)	Blyth	4	6	1	2	2	Vestas	2000
	North Hoyle	60	9	8	30	2	Vestas	2003
	Scroby Sands	60	6	3	30	2	Vestas	2003
	Kentish Flats	90	5	9	30	3	Vestas	2005
	Barrow-in-Furness	90	15	7	30	3	Vestas	2006
	Beatrice	10	45	25	2	5	Repower	2007
	Burbo	90	10	5	25	3.6	Siemens	2007
	Lynn/Inner Dowsing	194.4	10	5	54	3.6	Siemens	2009
	Rhyl Flats	90	8	8	25	3.6	Siemens	2009
	Robin Rigg	180	5	9.5	30	3	Vestas	2009
	Gunfleet Sands	173	8	7	48	3.6	Siemens	2010
덴마크 (663.6 MW)	Vindeby	5	4	3	11	0.45	Bonus	1991
	Tunø	5	3	6	10	0.5	Vestas	1995
	Middelgrunden	40	8	3	20	2	Bonus	2000
	Horns Rev	160	10	16	80	2	Vestas	2002
	Samsø	23	20	3.5	10	2.3	Bonus	2002
	Frederickshavn	10.6	3	1	4	2.65	Vestas/Bonus/ Nordex	2003
	Nysted	165.6	8	8	72	2.3	Bonus	2003
	Ronland	17.2	Un- known	Un- known	8	2.3/2	Bonus/Vestas	2003
	Horns Rev 2	209	13	30	91	2.3	Siemens	2009
	Sprogø	21	11	1	7	3	Vestas	2009
	Avedøre	7.2	2	0.1	2	3.6	Siemens	2009
네덜 란드 (246.8 MW)	Lely	2	7.5	0.8	4	0.5	Nedwind	1994
	Irene Vorrink	16.8	2	0.1	28	0.6	Nordtank	1996
	Egmond aan Zee	108	20	10	36	3	Vestas	2006
	Prinses Amalia	120	22	23	60	2	Vestas	2008
스웨덴 (163.3 MW)	Bockstigen	2.8	7	3	6	0.3	Windworld	1998
	Utgrunden	10.5	7	7	7	1.425	Enron/GE Wind Energy	2000
	Yttre Stengrund	10	10	4	10	2	NEG-Micon	2001
	Lillgrund	110	6	10	48	2.3	Siemens	2007
	Vanern	30	7	4	10	3	WinWind	2010

| 표 2-6 | 현재 설치된 해상풍력 프로젝트 요약(2010년 2사분기 기준)(계속)

국가	프로젝트	총 설비용량 (MW)	평균 수심 (m)	평균 해상 거리 (km)	터빈 수	터빈 용량 (MW)	터빈 제조사	가동 연도
독일 (71.8 MW)	Ems-Emdem	4.5	3	0.1	1	4.5	Enercon	2004
	Breitling	2.3	2	0.5	1	2.3	Nordex	2006
	Hooksiel	5	5	0.5	1	5	Enercon	2008
	Alpha	60	30	45	12	5	Repower	2009
벨기에	Thornton Bank	30	20	29	6	5	Repower	2008
핀란드	Kemi	30	0	1	10	3	WinWinD	2008
아일랜드	Arklow	25.2	15	10	7	3.6	GE	2004
노르웨이	Hywind	2.3	100	10	1	2.3	Siemens	2009
일본	Setana	1.32	10	0.2	2	0.66	Vestas	2004
이태리	Brindisi	0.08	108	20	1	0.08	Blue	2008
중국 (102 MW)	Donghai Bridge	102	10	10.5	34	3	Sinovel	2010
합계		2,377.8			906			

자료: NREL, 2010, p. 23

유럽에서는 2050년까지 온실가스를 1990년 대비 80% 이상 감축할 계획이며, 이를 달성하기 위하여 구체적인 재생에너지 보급 목표도 수립하고 있다. EU 27 회원국별은 2020년의 재생에너지 전력 생산량과 발전량 비중에 대한 목표를 수립하였는데, 2020년 풍력의 발전량 비중이 가장 높은 국가는 아일랜드, 덴마크 등이며, 풍력 발전량은 독일, 스페인, 영국 순을 보이고 있다(<그림 2-8> 참고).

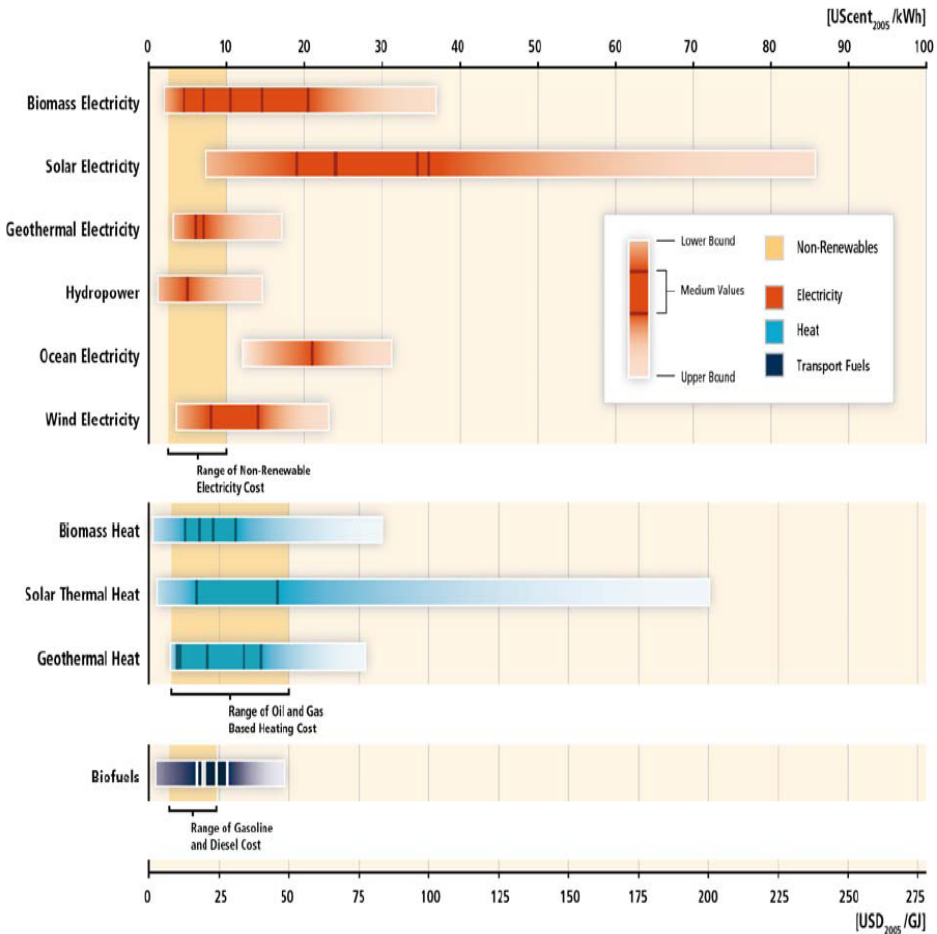


자료: EWEA, EU Energy Policy to 2050: Achieving 80~95% emissions reductions, 2011 재구성
| 그림 2-8 | EU27의 국가별 2020년 재생가능 전력 생산량 계획과 풍력의 발전량 비중 추이



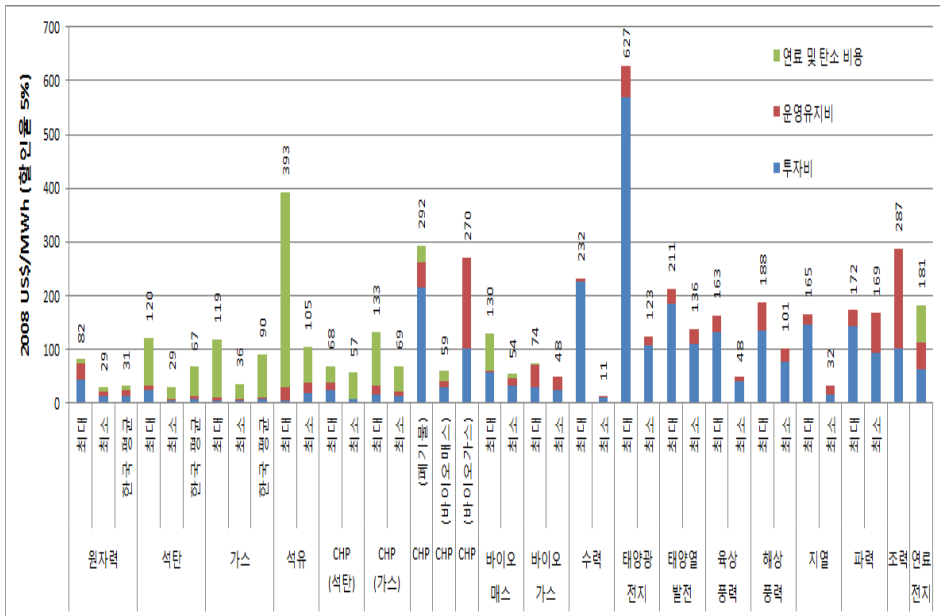
자료: 구글 해상풍력 이미지 검색
| 그림 2-9 | 벨기에 Thornton Bank 해상풍력단지

이처럼 풍력 발전이 앞으로도 주요 재생가능 에너지원이 될 것으로 전망하는 배경에는 풍력이 기술적 잠재성도 높으며, 재생가능 에너지원 중에서 상대적으로 저렴하며, 비재생 에너지의 비용과 비교해서 경쟁력을 확보하기 때문이다.



자료: IPCC, SRREN, 2011

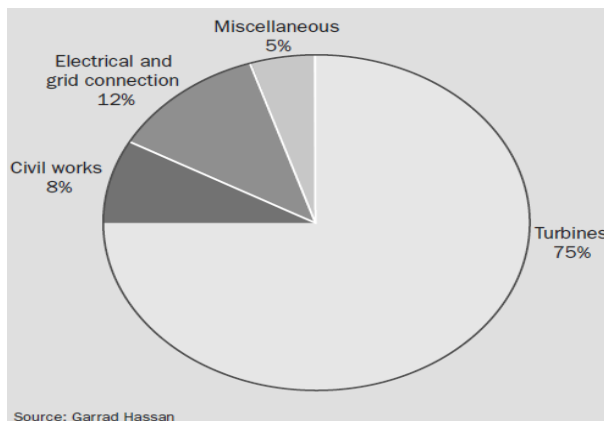
| 그림 2-10 | 비재생에너지와 상용화된 재생에너지 기술의 최근 연간균등화비용 비교



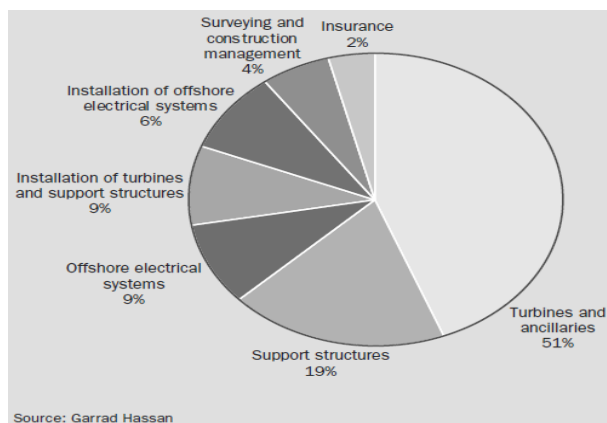
자료: IEA, Projected costs of generating electricity, 2010, pp. 90~97 재구성

| 그림 2-11 | 에너지원별 연간균등화 발전비용

육상풍력보다는 해상풍력의 발전 비용이 조금 더 높는데, 이는 풍력 터빈을 해상에 설치하고 전력 계통에 연계하는 부분의 비용이 추가되기 때문이다.



| 그림 2-12 | 육상풍력단지의 자본비용 구조



자료: Gardner, Wind Energy - the facts, 2009

| 그림 2-13 | 해상풍력단지의 자본비용 구조

국내 신 · 재생에너지원에 대해 전문가 설문을 통해 보급 우선순위를 조사한 결과, 국내 기술의 경쟁력, 사업의 경제성, 국제 시장의 규모 등의 항목을 종합적으로 검토할 때, 발전 기술 중에서는 풍력 > 바이오 > 태양광 순인 것으로 조사되었다(<표 2-7> 참고).

| 표 2-7 | 신 · 재생에너지원에 대한 요인별 평가 순위

구분	태양열	풍력	바이오	태양광	폐기물	소수력	가중치
종합	4.921	4.904	4.656	4.525	4.463	4.368	
국내기술의 경쟁력	5.000	4.375	4.375	4.750	4.500	4.500	0.1271
사업의 경제성	4.500	4.500	4.125	2.500	5.000	4.750	0.1232
국제시장의 규모	5.250	6.125	5.375	5.750	4.625	4.000	0.0949
에너지공급사업의 지속가능성	5.000	5.250	4.875	4.250	4.875	4.375	0.0889
온실가스 및 오염물질 저감효과	5.750	5.625	4.375	5.000	3.250	5.625	0.0679
원천기술 국내확보 가능성	5.000	4.500	4.625	4.875	4.625	4.500	0.0609
국내시장의 규모	4.750	4.750	4.875	4.625	5.250	3.625	0.0541
에너지원 공급기술의 신뢰도	5.000	5.000	4.875	4.250	4.875	5.375	0.0518
R&D와의 연계성	4.750	5.500	4.750	5.625	4.250	4.000	0.0458

| 표 2-7 | 신·재생에너지원에 대한 요인별 평가 순위(계속)

구분	태양열	풍력	바이오	태양광	폐기물	소수력	가중치
공급산업의 생산능력	4.875	4.750	4.375	4.500	4.625	4.000	0.0456
설치지역 주민 수용성 및 사용 편리성	5.375	3.125	4.250	5.625	2.250	3.625	0.0452
신·재생에너지 보급목표 달성 기여도	4.125	5.250	5.500	2.250	5.750	4.375	0.0423
간접적 파급효과	5.000	5.750	5.000	5.875	3.750	3.750	0.0349
법/제도 영향 정도	5.000	5.375	5.000	6.000	4.125	3.875	0.0322
에너지 생산에 요구되는 부가적 자원 요구 정도	3.625	3.250	3.625	2.625	3.875	3.875	0.0314
에너지원 공급기술의 완결성	5.250	5.000	4.875	4.875	4.750	4.875	0.0297
에너지원 공급기술의 혁신성	4.750	4.875	4.875	6.000	3.625	3.125	0.0243

자료: 지식경제부, 「제3차 신·재생에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획 수립방안 연구」, pp. 241~249 재구성

신·재생에너지에 대한 정부 지원과 시장 확대 등을 통해 최근 신·재생에너지 기업체와 매출액, 고용 인원이 증가하고 있다. 매출액과 고용인원 등 외형적 측면과 업체당 매출액, 매출액당 고용인원 등 질적 측면 모두에서 태양광 > 풍력 > 바이오 사업 순으로 나타나고 있다(<표 2-8> 참고). 태양열, 지열, 연료전지까지 포함할 때 총 6개 신·재생에너지사업 중에서 풍력은 국내에서 두번째로 증가세를 보이고 있다.

| 표 2-8 | 신·재생에너지원별 매출액, 고용인원, 기업체 수 추이 비교

구분		2004년	2005년	2006년	2007년	2008년	2009년	2010년
태양광	매출액(십억 원)	33	66.4	166	441.1	1601.4	3120	5909.7
	고용인원(명)	160	317	507	1156	3015	6232	8579
	기업체 수(개)	10	13	18	30	51	83	97
	업체당 매출액	3.3	5.1	9.2	14.7	31.4	37.6	60.9
	매출액당 고용인원	48.5	62.1	55.0	78.6	96.0	165.8	140.8
	업체당 인원 수	16.0	24.4	28.2	38.5	59.1	75.1	88.4

| 표 2-8 | 신·재생에너지원별 매출액, 고용인원, 기업체 수 추이 비교(계속)

구분		2004년	2005년	2006년	2007년	2008년	2009년	2010년
풍력	매출액(십억 원)	101	194.8	462.1	618.7	1357.3	1184.5	1167.8
	고용인원(명)	301	472	900	1430	1929	2411	2654
	기업체 수(개)	13	15	18	23	26	30	32
	업체당 매출액	7.8	13.0	25.7	26.9	52.2	39.5	36.5
	매출액당 고용인원	38.7	36.3	35.1	53.2	37.0	61.1	72.7
	업체당 인원 수	23.2	31.5	50.0	62.2	74.2	80.4	82.9
바이오	매출액(십억 원)	0.5	1.4	69.5	136.1	300.7	647.1	796.1
	고용인원(명)	68	133	309	396	453	898	1102
	기업체 수(개)	6	9	14	19	26	39	46
	업체당 매출액	0.1	0.2	5.0	7.2	11.6	16.6	17.3
	매출액당 고용인원	816.0	855.0	62.2	55.3	39.2	54.1	63.7
	업체당 인원 수	11.3	14.8	22.1	20.8	17.4	23.0	24.0

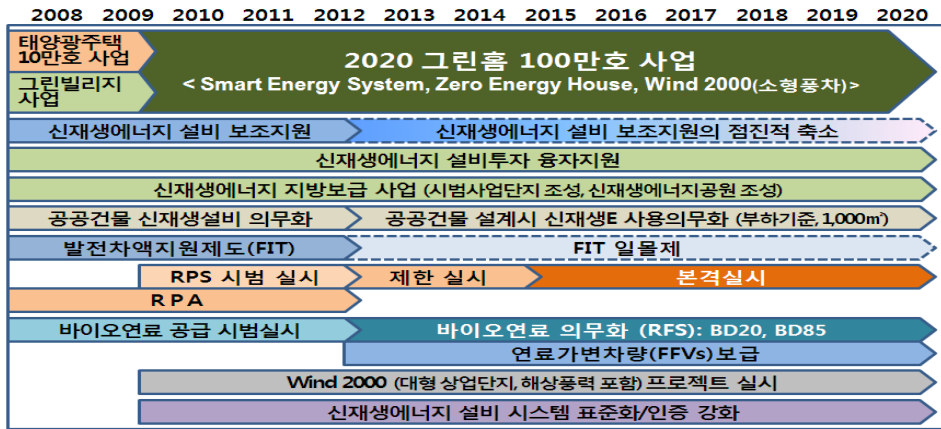
자료: 지식경제부, 2011. 2. 15, 보도자료 재구성

주: 상위 3개만 비교. 태양열, 지열, 연료전지는 자료 부족으로 제외함

3. 신·재생에너지공급의무화제도 도입 배경 및 시행 현황

정부는 신·재생에너지 기술 개발 및 보급 촉진을 위해 2020년까지 그린홈을 100만호로 확대하는 계획을 수립하였으며, 수송용 연료에 대한 바이오디젤 혼합 비중을 단계적으로 확대할 계획이다.

2002년 도입된 신·재생에너지 발전차액지원제도(Feed-In Tariff)는 신·재생에너지로 생산한 전력에 대해 기준가격과 계통한계가격의 차액을 지원해줌으로써 신·재생에너지의 보급 확대에 기반을 마련하였다. 원별 고시 가격은 기술 발전에 따른 비용 인하를 반영하여 2006년 8월, 2008년 5월, 2009년 4월, 2009년 9월 개정되었다. 그러나 정부는 재정 부담과 가격경쟁 메커니즘 도입, 국산제품 양성 등을 위해 2012년부터 신·재생에너지 공급 의무화제도(Renewable Portfolio Standards)로 변경하기로 하였다.



자료: 지식경제부, 2008, p. 50

| 그림 2-14 | 풍력 R&D 전략 로드맵

발전차액지원제도는 신·재생에너지에 대해 일정 기간 동안 고정 가격으로 매입하는 반면, 공급의무화당제는 발전사업자에게 발전량의 일정량 이상을 신·재생에너지로 공급하도록 양을 고정하는 정책이다. 발전차액지원제도는 1978년 미국에서 도입된 이후, 독일과 덴마크 등에서 시행되면서 재생에너지 확대에 큰 기여를 하였다. 2011년 현재 87개국에서 시행되고 있다. 한편 공급의무화제도는 1983년 미국 아이오와주를 시작으로 미국의 자치 주에서 주로 시행되었으며 2011년 현재 63개국에서 시행 중이다 (REN21, 2011).¹⁾

발전차액지원제도에서 신·재생에너지에 대한 기준가격과 계통한계가 격의 차이를 전력산업기반기금을 통해 보전해 주었다. 반면 공급의무화제도에서는 REC(Renewable Energy Certificate, 신·재생에너지 공급인증서)를 통해 의무이행을 증명하며, 사업자의 공급의무 이행에 들어가는 비용을 보전해주며, 추후 전기요금에 반영할 계획이다. 2012년 의무이행비용을 고려할 경우, kWh당 0.63원이 필요할 전망이다.²⁾ 공급의무화제도에 따르면,

1) 일본은 2011년에 재생에너지 보급 촉진을 위해 기존 의무화당제에서 발전차액지원제도를 시행하기로 하였다.

2022년까지 발전량의 10%를 신·재생에너지로 공급하도록 하고 있다(<표 2-9> 참고). 신·재생에너지원별 가중치는 에너지원별로 차이가 있으며, 육상풍력과 조력(방조제 유)의 경우 1.0, 연계거리에 따른 해상풍력은 1.5~2.0으로 하고 있어, 해상풍력에 대해 유인책을 제공하고 있다. 한편 조력발전의 경우 방조제 유무에 따라서 육상풍력과 동일하거나, 해상풍력과 동일한 가중치를 인정받기 때문에, 발전차액지원제도(풍력보다 기준가격이 낮음)의 경우보다 더 유리해졌다(<표 2-11> 참고).

| 표 2-9 | 연도별 신·재생에너지 의무공급량의 비율

연도	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022 이후
비율(%)	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0

자료: 신·재생에너지센터, 공급인증서 발급 및 거래시장 운영에 관한 규칙(신·재생에너지센터 공고 제2011-9호), 2011

| 표 2-10 | 신·재생에너지 공급의무화제도에서 신·재생에너지원별 가중치

구분	공급인증서 가중치	대상에너지 및 기준		
		설치 유형	지목 유형	용량 기준
태양광 에너지	0.7	건축물 등 기존시설물을 이용하지 않는 경우	5개 지목(전, 답, 과수원, 목장용지, 임야)	
	1.0		기타 23개 지목	30kW 초과
	1.2			30kW 이하
	1.5	건축물 등 기존 시설물을 이용하는 경우		
기타 신·재생 에너지	0.25	IGCC, 부생가스		
	0.5	폐기물, 매립지가스		
	1.0	수력, 육상풍력, 바이오에너지, RDF 전소발전, 폐기물 가스화 발전, 조력(방조제 유)		
	1.5	목질계 바이오매스 전소발전, 해상풍력(연계거리 5km 이하)		
	2.0	해상풍력(연계거리 5km 초과), 조력(방조제 무), 연료전지		

자료: 신·재생에너지센터, 공급인증서 발급 및 거래시장 운영에 관한 규칙(신·재생에너지센터 공고 제2011-9호), 2011

주: 가중치는 발전원가, 온실가스 감축효과, 산업육성효과, 환경훼손 최소화, 해당 부존잠재량 등을 고려하여 지식경제부 고시로 규정. 가중치는 3년마다 재검토

2) 기획재정부 외, 제12차 녹색성장위원회 및 제2차 이행점검 결과 보고대회: 모두가 체감하고, 함께 가는 신·재생에너지 - 신·재생에너지, 도전을 기회로. 2011. 10. 31.

표 2-11 | 발전차액제도에서 신·재생에너지 전원의 기준 가격

전원		적용설비 용량기준	구분		기준가격(원/kWh)		비고
					고정요금	변동요금	
풍력		10kW 이상	-		107.29	-	감소율 2%
수력		5MW 이하	일반	1MW 이상	86.04	SMP+15	
				1MW 미만	94.54	SMP+20	
			기타	1MW 이상	66.18	SMP+5	
				1MW 미만	72.80	SMP+10	
폐기물 소각 (RDF 포함)		20MW 이하	-		-	SMP+5	
바이오 에너지	LFG	50MW 이하	20MW 이상		68.07	SMP+5	화석연료 투입비율: 30% 미만
			20MW 미만		74.99	SMP+10	
	바이오 가스	50MW 이하	150kW 이상		72.73	SMP+10	
			150kW 미만		85.71	SMP+10	
	바이오 매스	50MW 이하	목질계 바이오		68.99	SMP+15	
해양 에너지	조력	50MW 이상	최대조차 8.5m 이상	방조제 유	62.81	-	
				방조제 무	76.63	-	
			최대조차 8.5m 미만	방조제 유	75.59	-	
				방조제 무	90.50	-	
연료전지		200kW 이상	바이오가스 이용		227.49	-	감소율 3%
			기타연료 이용		274.06	-	

자료: 지식경제부, 신·재생에너지이용 발전전력의 기준가격 지침(지식경제부 고시 제 2009-207호), 2009

표 2-12 | 태양광 전원의 용량 및 적용기간별 기준가격(원/kWh)

적용 시점	설치 장소	적용 기간	30kW 이하	30kW 초과 200kW 이하	200kW 초과 1MW 이하	1MW 초과 3MW 이하	3MW 초과
2009년	-	15년	646.96	620.41	590.87	561.33	472.70
		20년	589.64	562.84	536.04	509.24	428.83
2010년	일반 부지	15년	566.95	541.42	510.77	485.23	408.62
		20년	514.34	491.17	463.37	440.20	370.70
	건축물 활용	15년	606.64	579.32	546.52	-	-
		20년	550.34	525.55	495.81	-	-

자료: 지식경제부, 신·재생에너지이용 발전전력의 기준가격 지침(지식경제부 고시 제 2009-207호), 2009

4. 풍력 산업의 발전 시나리오 및 발전 방안

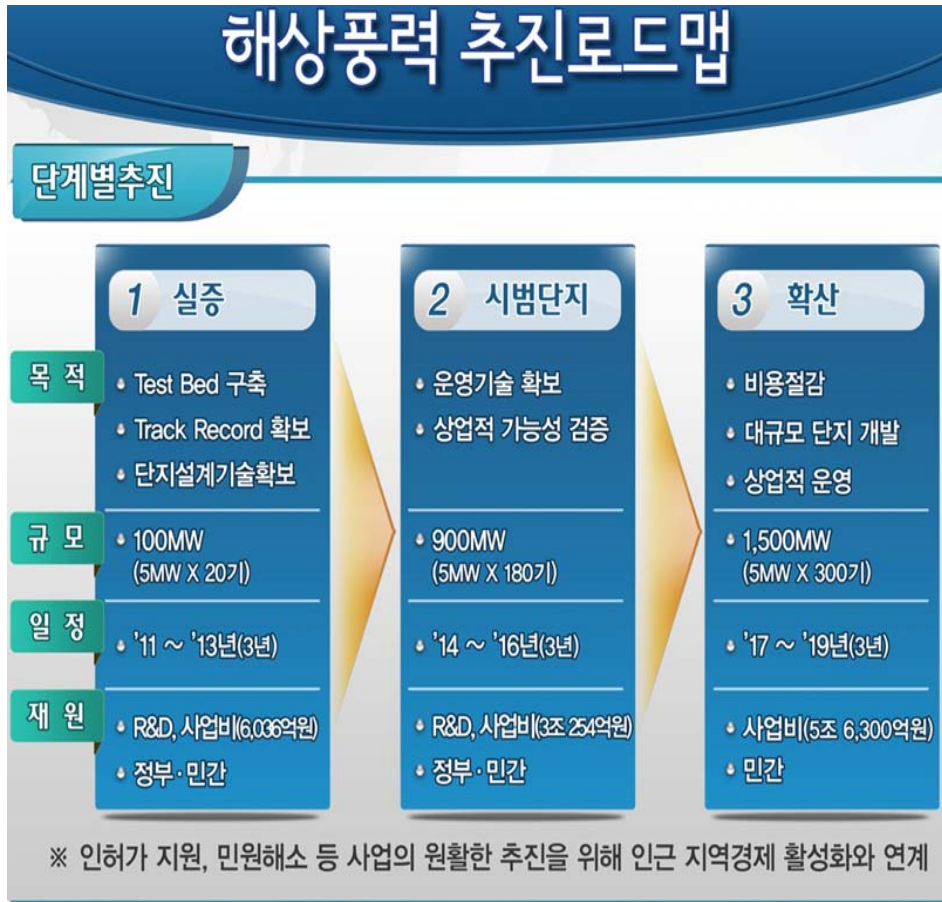
정부는 2019년까지 서남해안에 2,500MW(5MW, 500기) 규모의 해상풍력 단지를 건설하는 해상풍력 추진 로드맵을 수립하였다(지식경제부, 2010).³⁾ 2013년까지 5MW 해상풍력 20여 기를 건설하고, 2016년까지 900MW 해상 풍력단지를, 그리고 2019년까지 1,500MW 규모의 해상풍력단지를 조성할 계획이다. 현재 정부에서는 해상풍력 마스터플랜을 수립 중이며 금년 말에 발표될 전망이다.



자료: 지식경제부, 서남해안에 대규모 해상풍력단지 건설 추진(보도자료), 2010. 11. 3.

| 그림 2-15 | 해상풍력단지 배치도

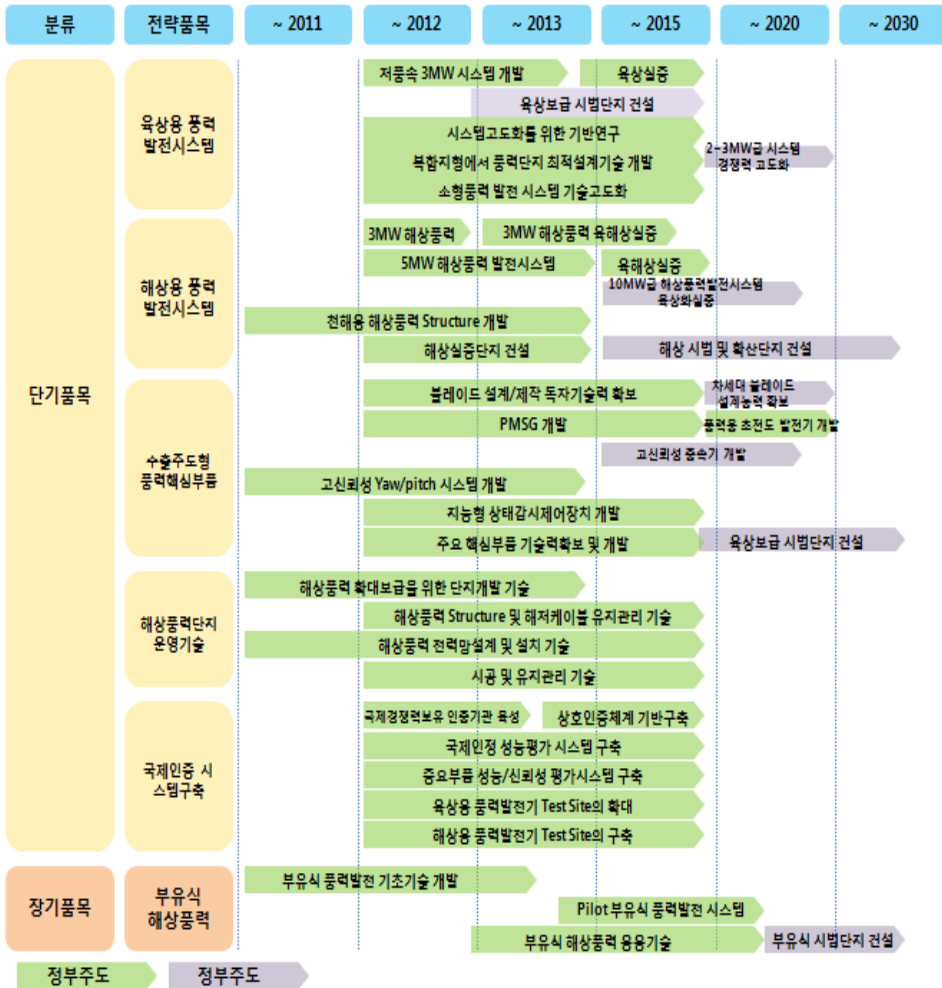
3) 지식경제부, 서남해안에 대규모 해상풍력단지 건설 추진(보도자료), 2010.



자료: 지식경제부, 서남해안에 대규모 해상풍력단지 건설 추진(보도자료), 2010. 11. 3.

| 그림 2-16 | 해상풍력 추진 로드맵

아울러 그린에너지 전략로드맵을 통해 육상풍력은 2~3MW, 해상 3MW 이상을 국내기술로 개발 및 보급하기 위한 R&D 전략 로드맵을 수립하였다.

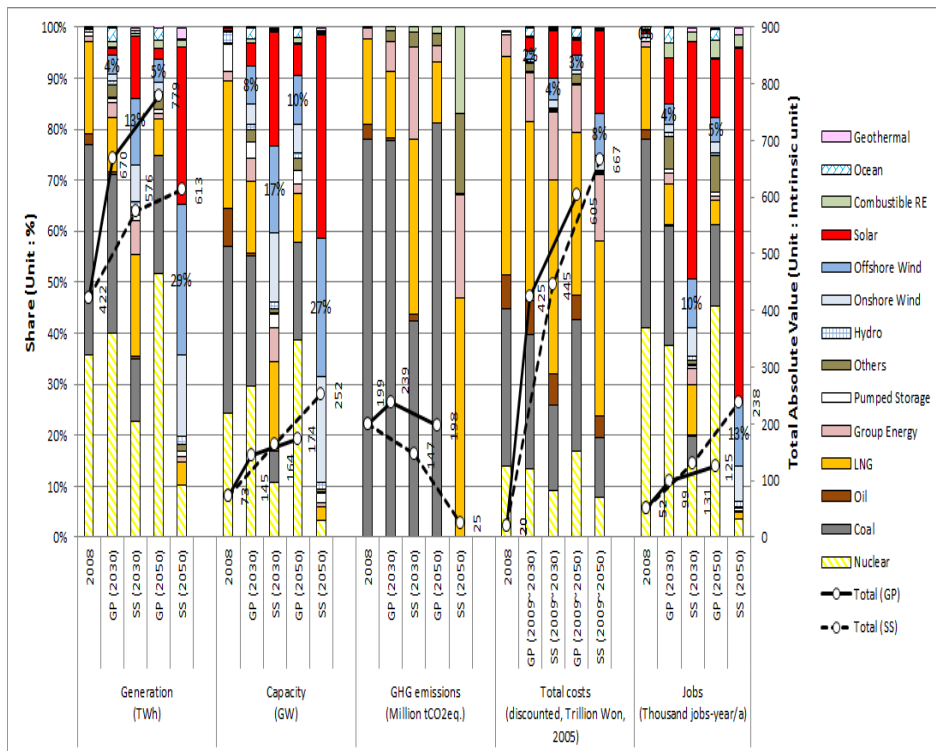


자료: 지식경제부 · 에너지기술평가원, 그린에너지 전략 로드맵 2011: 풍력, 2011

| 그림 2-17 | 풍력 R&D 전략 로드맵

향후 에너지 가격 인상 및 기후변화대응 노력이 강화될수록 재생에너지, 특히 해상풍력에 대한 관심이 증가할 것이다. 2020년 이후에는 해상풍력 설비용량이 더 확대될 가능성이 높다. 중국 정부는 2050년까지 약 1,000GW의 육상 및 해상풍력 설치를 목표로 하는 로드맵을 발표하였다 (IEA and NDRC ERI, 2011). 중국의 로드맵에 따르면 해상풍력을 2050년까지 약 200GW 규모로 확대할 계획이다. 박년배(2011)는 발전 부문 온실가스

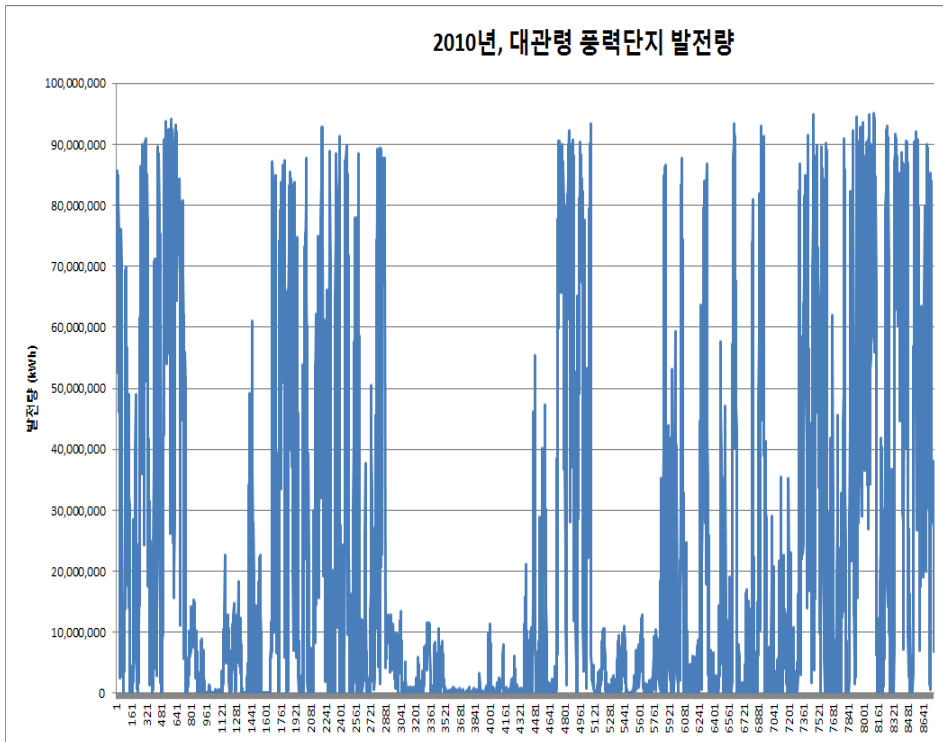
배출량을 2005년 대비 80% 이상 감축하고, 원자력을 단계적으로 폐기하는 지속가능 사회 시나리오에서 육상 및 해상풍력 발전과 태양광발전이 큰 비중을 차지하는 것으로 분석하였다. 이 경우, 해상풍력은 2020년, 약 9GW, 2030년 28GW, 2040년 52GW, 2050년 약 68GW 규모에 이른다. 원자력과 화석에너지를 통한 발전량의 상당 부분이 풍력과 태양광으로 대체되면서 해상풍력의 보급 규모가 커질 것으로 분석되었다(<그림 2-17> 참고).



자료: 박년배, 2011

| 그림 2-18 | 발전 부문 재생가능 에너지 전환 시나리오 결과 비교

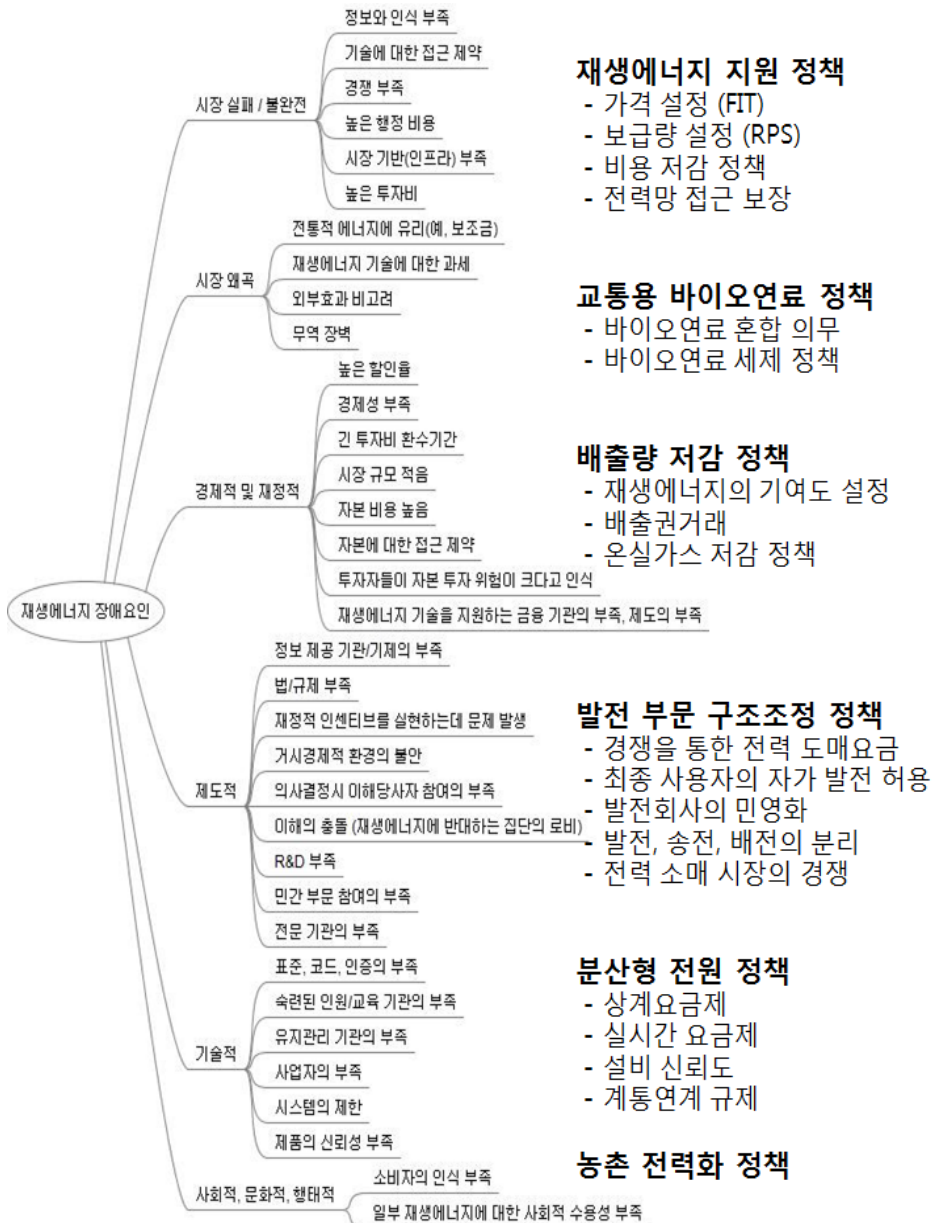
한편 풍력단지에는 입지의 바람 여건에 따라서 발전량이 시간대별로 가변적인 특성을 보이고 있다. 따라서 풍력 발전의 간헐성(Intermittency)을 보완하기 위하여 예측 가능성 제고, 전력 저장 설비, 계통 연계 보장 등이 중요 이슈이다.



자료: (주)유니스 내부 자료, 2011

| 그림 2-19 | 대관령 풍력 발전단지의 2010년 시간대별 발전량 추이

일반적으로 풍력 등 재생에너지는 화석에너지 및 원자력 등 전통적 발전 기술들에 비해 비싸며, 기술 R&D 부족, 인적 자원 등의 부족 등 장애요인으로 인해 보급에 제약을 받고 있다(<그림 2-19> 참고). 정부에서 진행하고 있는 발전차액지원제도, 공급의무화제도, R&D 지원 등의 정책은 재생에너지 보급에 유리한 환경을 조성해 주고 있다. 아직 시장 보급 초기 단계에 있는 재생에너지는 정부 정책의 영향을 크게 받으며, 정책의 예측가능성과 방향성이 재생에너지 보급에 중요하다. 따라서 해상풍력 등 재생에너지 정책에 대한 장기 로드맵이 제시되어 풍력 등 사업자 및 계통 운영자들에게 미래 방향을 읽고 의사결정을 하는 데 참고할 수 있도록 할 필요가 있다(<표 2-13> 참고).



자료 : J. P. Painuly, 2001. F. Beck and E. Martinot, 2004⁴⁾

| 그림 2-20 | 재생에너지의 장애요인 구분 및 지원 정책

4) http://www.martinot.info/Beck_Martinot_AP.pdf

| 표 2-13 | 풍력 발전을 위한 녹색, 저배출, 기후 복원성 증진 로드맵 예시

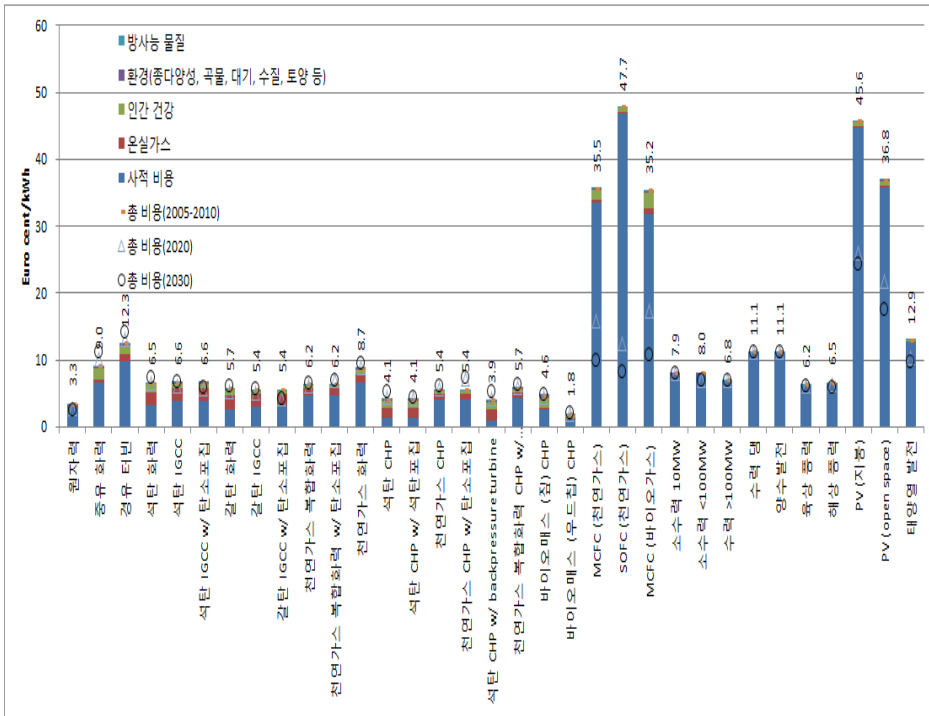
구분		2010~2015년	2015~2025년	2025~2050년
공공 기관 및 규제 기관	규제 수단	<ul style="list-style-type: none"> • 풍력 사업에 대한 간단, 명료, 예측가능한 규정을 제정하도록 인 · 허가 절차를 검토 • 계통 연계 및 사용 규정 검토(계통 운영자와 함께) • 발전차액지원제도(FIT) 또는 공급의무화제도(RPS) 도입 	<ul style="list-style-type: none"> • 풍력을 이용한 전력 목표 설정 • 풍력의 수용성 제고를 위한 환경통합 규정 채택 • 향후 풍력 개발을 기대하고 계통을 확대하려는 신규 계통연계 운영자에 대한 규제 	<ul style="list-style-type: none"> • 국가/지역 목표 제고 • 풍력이 경쟁력 가지면서 요금 인하 • 기술과 영향의 진화에 따른 규제 개정 • 계통 개발에 대한 모니터링
	재정 인센티브 및 시장 수단	<ul style="list-style-type: none"> • 실증 프로그램 지원 • CDM 사업에 유리한 환경 조성 	<ul style="list-style-type: none"> • 필요시 세제 혜택, 보조금, 소프트 론 제공 • CDM 사업 장려 	<ul style="list-style-type: none"> • 풍력 사업의 특성에 부합하는 금융 지원 촉진 • 탄소 시장 촉진
	정보 및 훈련	<ul style="list-style-type: none"> • 풍력 자원 평가 수행 • 풍력에 대한 정보 캠페인 	<ul style="list-style-type: none"> • 개발자가 이용할 수 있는 풍력자원평가 수행 • 풍력 터빈의 표준과 상표 개발 및 시험 기관 설립 • 기술 훈련 프로그램 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 정보 제공 및 업데이트 • 표준 시행 및 상표 장려 • 전력의 탄소 함량 공개 의무화
개발자		-	<ul style="list-style-type: none"> • 환경 및 사회적으로 예민한 지역을 피하고, '우수 지역' 사례 채택 	<ul style="list-style-type: none"> • 영향을 최소화하는 최고 기술을 채택
투자자/금융기관		<ul style="list-style-type: none"> • 풍력에 대해 직원 훈련 	<ul style="list-style-type: none"> • 풍력 특화 금융 상품 개발(장기 투자회수, 소규모 프로젝트) 	-
계약자		<ul style="list-style-type: none"> • 풍력단지의 설치 및 유지에 대해 훈련 	-	<ul style="list-style-type: none"> • 신기술에 대한 훈련
공급자 및 제조사		<ul style="list-style-type: none"> • 설치자에 대한 훈련 	<ul style="list-style-type: none"> • 비용과 환경 영향을 줄이고 간헐성에 대한 관리를 개선하기 위한 연구 지속 • 설치자에 대한 기술적 지원 제공 	<ul style="list-style-type: none"> • 신기술 장려 및 가능한 많은 국가들에서 이용할 수 있도록 함 • 설치자에 대한 기술적 지원 제공

| 표 2-13 | 풍력 발전을 위한 녹색, 저배출, 기후 복원성 증진 로드맵 예시(계속)

구분	2010~2015년	2015~2025년	2025~2050년
발전 사업자 및 계통 운영자	<ul style="list-style-type: none"> • 풍력에 대해 직원 교육 • 계통 연계 및 이용 규정을 검토(규제기관과 함께) 	<ul style="list-style-type: none"> • 상업적 풍력보급 사업 착수 • 풍력 발전량 구매 목표 설정 • 표준 전력구매 계약 • 계통 이용에 대한 공평하고 투명한 접근 보장 • 계통 계획시 풍력 확대 고려 • 스마트그리드, 전력 저장, 간헐적 자원에 대한 관리 등 신기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • ‘녹색’ 매물 유지 및 소비자 요구에 맞춰 조정 • 목적 강화 • 풍력 결과에 따라 직원에게 인센티브 제공 • 공정하고 단순한 전력 구매 계약 체결 • 계통 이용에 대한 공평하고 투명한 접근 보장 • 신규 풍력단지에 연계하기 위한 전력계통 지속적 개발 • 신기술을 고려하여 간헐적 발전 자원에 대한 관리 개선

자료: Schwarz, 2009; UNDP, 2011, p. 126 재인용하여 수정

전력 공급을 위한 발전 기술들을 현재 사적 비용뿐만 아니라 온실가스 배출 등 환경 외부비용을 고려하고, 미래 기술 발전을 고려한 비용 인하 수준도 고려할 필요가 있다. EU27개국을 대상으로 한 발전 기술들의 비용을 보면, 재생에너지 기술 중에서 특히 풍력(육상 및 해상) 발전은 현재 화석 에너지 기술과 경쟁할 수 있는 수준이며, 향후 보급 확대를 통해 비용이 더 인하될 전망이다(<그림 2-20> 참고).



자료: Cost Assessment for Sustainable Energy Systems 홈페이지⁵⁾

| 그림 2-21 | EU27의 발전 기술별 사회적 비용 및 외부 비용 비교

한편 해상풍력 발전 기술이 육상풍력 발전에 비해 환경적 영향 및 주민 생활에 미치는 영향은 적을지라도 지역에서 반대하는 의견이 있을 수 있다. 이 경우, 부정적 환경 영향을 최소화할 수 있도록 입지와 기종을 선정하고, 충분한 설명, 지역주민들을 사업에 참여시키고, 이익이 지역에 환원될 수 있도록 하는 방안을 모색할 필요가 있다(<표 2-14> 참고).

5) http://feem-project.net/cases/downloads_presentation.php

| 표 2-14 | 풍력 발전의 환경적·사회적 문제 저감 방안

항목	내용
부정적 환경 영향 최소화 방안 모색	<ul style="list-style-type: none"> •환경 피해 최소화 기종과 입지 선정 •자연적, 역사문화적, 경관적 가치가 큰 지역, 거주지와 완충거리 확보 등
풍력발전에 대한 긍정적 사회 인식 마련	<ul style="list-style-type: none"> •독일: 정부의 원자력 포기 정책이 환경단체 및 시민사회의 호의적 태도를 유도 •덴마크: 풍력 이용의 문화적 전통 •스페인: 지방정부와 기업의 지방산업 육성 •일본: 새로운 투자 대상으로의 발상 전환
사업 설명회 및 공청회 개선	<ul style="list-style-type: none"> •사업 정보, 환경 영향, 장·단점 등 상세한 설명 및 정보 공개 •설명회/공청회를 사업 홍보와 자본 모집 수단으로 적극 활용 •계획단계부터 운영기간 전반에 걸쳐 설명 및 홍보
이해당사자 로서 주민 참여 보장	<ul style="list-style-type: none"> •독일: 풍력발전에 지역 주민의 출자 참여(주민 의견 소규모에서 대규모로 점진적 확장 및 주민 의견 수렴) •덴마크: 지역 협동조합 및 합자회사(길드) 주도 •스페인: 부가산업 유치 및 수익의 지역 환원 •일본: 펀드 투자를 통한 수익 창출(시민 펀드와 전력회사의 협력)
지역사회로의 이익 환원	
지역 특수성을 고려한 도입 차별화	

자료: 이희선 외, 2009, pp. 156~170 요약

제 3 장 해상풍력 발전의 환경영향과 대응 방안

1. 해상풍력 발전에 따른 환경영향

1) 개요

육상에서 풍력발전이 소음과 진동, 경관훼손에 대한 문제점이 대두되고 이에 따른 지역주민의 민원 제기가 늘어나자, 최근에는 육상에서 풍력 발전을 하던 많은 국가에서 해상풍력에 관심을 갖게 되었다. 해상풍력은 풍황이 육상보다 우수하고 민원 발생의 소지가 적다. 그러나 해상풍력이 직접적으로 사람에게 영향을 줄 가능성은 육상보다 줄기는 했지만 환경에 미치는 영향은 여전하거나 더 다양해졌다고 할 수 있다. 해양은 해수면 위는 물론 수면 아래 해양 환경에 다양한 방식으로 영향을 미치기 때문이다. 육상에서는 시설이 건설된 대지와 대기환경에 미치는 환경영향을 주로 고려하지만, 해양에서는 저질 환경, 해양수환경, 대기환경 등 수환경이라는 인자가 추가적으로 포함된다. 수환경이라는 측면에서는 해류나 조류의 변화, 어류나 해양포유류의 영향 등 환경적으로 검토할 부분이 더 늘어나는 것이다. 또한 이런 변화는 육상환경에 비해 파악하기 어려운 특징이 있어 심각한 영향이 있어도 정확히 감지되지 않거나 무시되기 쉽기도 하다.

해상풍력 발전이 국내에는 아직 본격적으로 도입되지는 않았으나 이미 수백 기를 북해 연안에 건설해서 발전하고 있는 유럽에서는 환경적 영향에 대해 일찍부터 관심을 가지고 있었다. 특히 해상 시설물인 해상풍력시설을 건설하고 운영하는 과정에 발생하는 환경문제에 대해 환경영향평가의 관점에서 고려할 여러 사항들을 점검하는 것으로 알려져 있다.

이 장에서는 해상풍력에 따른 환경문제에 대해 해상풍력 발전의 생애

전 주기에 발생할 수 있는 환경 문제점을 짚어 보고자 한다. 해상풍력에 따른 환경문제는 우선 건설시기에 나타나는 문제, 풍력단지에서 얻은 전력을 전력계통에 인입하는 단계에서 발생하는 문제, 해상풍력 발전의 운영단계에서 발생하는 문제, 풍력발전기의 터빈을 유지하는 과정에서 발생하는 문제, 그리고 마지막으로 내구연한을 채우고 시설물을 해체하는 과정에서 발생하는 문제로 나눌 수 있다.



2011. 10. 26.

| 그림 3-1 | 제주도 행원리 해상풍력 시범단지 조성

2) 해상풍력발전 단지 건설 단계

해상풍력발전은 발전 방식 중 해저에 고정하지 않고 부유식도 있으나, 대부분 해저에 시설물을 설치하거나 파일을 박아 풍력시설 자체를 고정한다. 따라서 해저는 우선적으로 영향을 받을 수밖에 없는 곳이다. 건설을 하기 위해 해저에서 벌어지는 활동으로 대상이 되는 곳에 서식하던 동식물상은 우선적으로 제거되고 주변 지역도 부유토사 등으로 서식지가 훼손된다. 예를 들어 해저에 말뚝을 박아 시설물을 만들려고 하면 수심에 따라 파일의 직경은 달라지겠지만 대략 25m 수심에 약 3.5m 직경의 말뚝이 필요하

다. 단지형식으로 대규모로 조성되는 해상풍력의 특성상 발전기 100기를 건설한다고 가정하면 말뚝을 박는 데 소요되는 면적만 약 1,000m² 수준이다. 그런데 이처럼 훼손되는 면적은 시공방식에 따라 크게 차이가 난다. 예를 들어 말뚝을 박는 방식이 아니라 무거운 추를 바닥에 내려놓는 중력식이라면 저지대의 가벼운 토양은 제거하고 대신 자갈 등을 채워 넣게 된다. 또한 중력식은 말뚝식보다 두꺼운 기둥을 필요하기 때문에 더 넓은 면적의 저질을 교란할 수밖에 없다.

기둥을 설치할 때 필요한 면적만큼 저질을 교란하기는 하지만 이런 직접적인 물리적인 교란은 공간적으로 넓은 면적에 영향을 주는 것은 아니다. 오히려 해상풍력발전이 건설되면 주변 해역에서의 어업활동은 안전상 문제 등으로 금지될 가능성이 높다. 이는 장기적으로 어업활동에 따른 해저 교란을 방지하는 효과를 낳는다. 풍력시설 단지 전체 면적의 0.23%(말뚝식의 경우)만이 직접적인 교란을 받는 대신 상당수의 저질에 대해서는 어업활동에 따른 교란을 배제할 수 있는 효과도 있는 것이다. 다만 건설 시에 발생하는 문제는 시설을 설치할 때 발생한 부유토사가 해류에 흘러가면서 여러 날 또는 수 주간 주변 해역에 영향을 주는 부분이다.

이상과 같은 단기적 영향은 물론 장기적 영향이 존재한다. 즉, 시설물이나 바람의 변화에 따라 퇴적물의 이동과 퇴적에 변화가 생기거나 오염물질이 재부유되는 등의 변화로 예측이 매우 어려운 특징이 있다. 다만 이런 영향은 모든 경우에서 문제가 되기는 어려우나 일부 해역에서는 이런 변화가 심각한 문제가 될 가능성이 충분하기 때문에 사전에 모형 등을 통해 면밀한 검토가 필요하다(Kube, 2000).

정리하면 시설물이 들어서면서 말뚝이 설치되는 지점이나 풍력발전에서 나온 전기를 육상으로 인입하는 해저전력선을 놓게 되는 저질에 살고 있던 저서생물은 서식처를 잃게 된다. 또한 공사 시에 발생하는 부유물질이나 부유토사는 간접적으로 주변 해역의 생물들, 특히 여과섭식을 하는

생물에 영향을 미친다. 그러나 시설물 건설시에 발생하는 이들 영향은 예외적으로 민감한 저서생태환경이 아니라면 전체 해양생태계에서 볼 때 심각한 영향을 준다고 하기는 어렵다. 특히 시공 기간이 단기에 마무리되고 나면 시설물이 들어서는 일부 공간을 제외하고는 특별히 해저 환경이 훼손된다고 하긴 어렵다.

다만 이후 풍력발전기의 운영에서도 문제가 되는 부분이기도 한 공사 투입되는 건설장비나 말뚝 등의 시공 과정에서 소음과 진동의 문제는 고려할 필요가 있다. 일단 현장에서 소음과 진동이 발생하면 영향이 미치는 공간에 있는 모든 저서생물이나 유영생물은 모두 영향을 받는다고 할 수 있다. 대체로 유영능력이 좋은 생물의 경우 회피하는 방식으로 영향권에서 사라지는데 반해 저서성의 생물의 경우 이동능력이 제한되기 때문에 영향을 더 크게 받을 수 있다. 해양포유류 역시 사람이나 다른 어류와 마찬가지로 소음과 진동에 영향을 받을 수 있다. 가능하면 말뚝을 지반에 고정하는 과정에서 발생하는 타격음 등이 최소화할 수 있는 시공방식을 선택할 수 있을 것이다. 아직까지 시공과정에서 발생하는 소음·진동이 해양포유류에게 어떤 영향을 미치는 지에 관해서는 해상풍력 발전을 먼저 도입한 유럽의 여러 국가에서도 거의 알려져 있지 않은 상태이나 일부 연구에서 해양 포유류에 미치는 영향을 확인할 수 있다. 덴마크 남동부인 발틱해에 위치한 니스테드(Nysted) 해상풍력단지에서 쇠돌고래(Harbour porpoises, *Phocoena phocoena*)의 행태를 연구한 Carstensen et al.(2006)의 연구에 따르면, 풍력발전 시설의 건설 단계, 특히 말뚝을 지반에 박아 넣을 때 발생하는 충격파와 진동의 영향으로 풍력발전 단지 인근에서 서식하던 쇠돌고래는 이동해서 사라진 것으로 나타났다.

독일연방환경부에서는 북해와 발틱해에 건설된 두 개의 풍력시설 단지에서 건설과정에서 발생한 소음을 측정하였다. 북해에 있는 시설에서는 중심 구조물을 박아 넣을 때 발생한 소음이 400m 떨어진 곳에서 193dB에 달

했고, 발틱해에서는 300m 떨어진 곳에서 196dB에 달하는 엄청난 소음이 발생했다. Gill(2005)에 따르면 기초공 단계에서는 최대 260dB, 전력선 매설 과정에서는 178dB이 발생한다고도 한다.

시설물 건설 과정에서 발생하는 엄청난 크기의 소음은 주변의 생물들에게 장기적 또는 단기적 영향을 미치게 된다. 그러나 아직까지 생물들이 얼마나 영향을 받고 어떻게 반응하는지에 관해서는 정확하게 알려져 있지 않다. 다만 Nedwell et al.(2004)에서와 같이 생물종별로 피하기 위한 거리는 다소 차이가 나는 것으로 계산되었다.

| 표 3-1 | 해상풍력시설 건설 시 종별 회피 예상 거리

종	거리
연어(salmon)	1,400m
대구(cod)	5,500m
가자미(dab)	100m
병코돌고래(bottlenose dolphin)	4,600m
쇠돌고래(harbour porpoises)	1,400m
잔점박이물범(harbour seal)	2,000m

자료: Nedwell et al., 2004

프로펠러와 말뚝을 갖춘 해상풍력발전 시설이 일반적으로 사람에게 보이는 시설이지만 여기서 생산한 전력을 육지로 보내기 위해서는 해저에 전력선을 매설해야 한다. 전력선은 그냥 해저에 늘어뜨리는 방식이 아니라 일반적으로 해저에 약 1m 정도 깊이의 도랑을 파고 여기에 전력선을 설치한다. 도랑을 만들기 위해 고압 물분사기를 이용하거나 물리적으로 파내기도 하는데, 보통 도랑이 2m 정도의 폭을 갖는 수준이다. 비록 전력선의 길이가 수km에 달하지만 매설에 필요한 도랑의 폭과 깊이가 소규모이고, 전력선을 매설한 후 수시간 내지 수일이 지나면 안정화되기 때문에 전력선이

해양환경에 큰 영향을 미치는 부분이라고 하기는 어렵다고 할 수 있으며, 관련된 연구(Ministerie van Economische Zaken, 2000)에서도 그 영향은 무시할만한 수준이라고 밝히기도 한다. 다만 전력선이 지나가는 곳에 환경적으로 민감한 보호지역이 있어 불가피하게 횡단을 하게 되면 보호지역과 관련된 법률에서 정한 훼손행위나 행위규제에 해당하는지는 추가적으로 살펴볼 필요가 있다.

해저에 매설되는 전력선은 선형이기 때문에 비록 그 길이가 길더라도 차지하는 공간이 크지 않기는 하나 결국 그 수가 많아지면 문제가 된다. 더욱이 해상풍력단지가 여러 곳에 건설되면 각각의 풍력단지에서 연안 육지에 있는 전력계통에 연계하는 것은 불가피하게 전력을 연결하는 곳을 많이 만들게 되어 환경적으로나 경제적인 측면에서 불리하다. 때문에 여러 해상풍력발전 단지를 연결해서 하나의 전력선이 육상의 전력계통에 연계되는 방식도 가능한 방법으로 꼽힌다.

3) 해상풍력발전 단지 운영 단계

(1) 시설물의 도료 등 화학물질

해상에 풍력시설을 도입하면 선박이나 다른 해상시설물과 마찬가지로 발전시설물의 표면에 생물이 부착하거나 녹이슬어 오손(fouling)을 입기 쉽다. 이를 방지하기 위하여 선박에서는 방오도료(防汚塗料)를 칠하곤 하는데, 여기에 사용하는 페인트 등의 유해성이 문제가 되면서 전 세계적으로 독성이 있는 유기주석 성분(TriButylTin: TBT)의 방오도료 사용을 국제협약으로 금지하기도 하였다. 네덜란드에서는 더욱 강력한 조치로 어떤 화학물질도 해상풍력발전 시설의 방오도료로 사용하지 못하도록 하고 있기도 하다. 풍력시설에 적용되는 방오도료는 시설물 주변의 해역에 있는 생물은 물론 해

류를 따라 흘러내려 가면서 넓은 영역에 있는 생물에게 악영향을 줄 수 있기 때문이다.

방오도로뿐만 아니라 풍력시설에 사용되는 각종 윤활유나, 연료, 냉각제 등도 누출되어 해양환경에 유입되는 경우 생물학적인 영향을 줄 수 있다. 또한 회전하는 터빈 내부에서 마찰 등으로 연마제 성분이 시설물 밖으로 나와 바다로 유입될 수도 있다. 따라서 가능한 시설에 필요한 각종 화학물질들은 독성이 없거나 생물학적으로 분해가 가능한 물질을 활용할 필요가 있다. 누출의 가능성은 실제로 예측하기도 어렵고 대응도 어려운 형편이기 때문에 누출될 수 있는 물질의 독성을 관리하는 것이 가장 현실적인 관리대책이 될 수 있다고 할 수 있다.

(2) 전자기장의 발생

풍력시설의 운영에서 문제가 되는 부분은 이처럼 시설 자체, 즉 해상에 세워지는 말뚝의 오손을 방지하기 위한 방오물질이나 터빈에서 누출될 수 있는 화학물질과 같은 오염물질의 관리인데, 이와 함께 풍력시설 운영시 문제가 되는 또 다른 부분은 전력계통에 인입하는 전력선에서 발생하는 전자기장과 열에 의한 영향이다. 전자기장의 세기는 전력선의 형태나 용량에 따라 달라질 수는 있지만 전력선 주변에 전자기장이 형성된다. 스웨덴에서 독일을 잇는 발틱 전력선이라는 고전압 전력선의 경우 600MW의 용량에 1,330암페어가 흐르는데 전력선 주변 6m에서 흐르는 자기장은 이 지점에서 흐르는 지구자기장의 크기에 맞먹는 수준이라고 한다.⁶⁾ 이 때문에 해저 전력선 바로 상단의 해수면을 지나는 선박의 운항에도 영향을 줄 정도이다. 전력선에서 발생한 자기장은 특히 지구 자기장을 활용하여 이동을 하는 어류나 해양포유류에게는 교란요인이 될 수 있다. 전자기장에 민감한

6) Lago, Wind Energy - the facts, 2009.

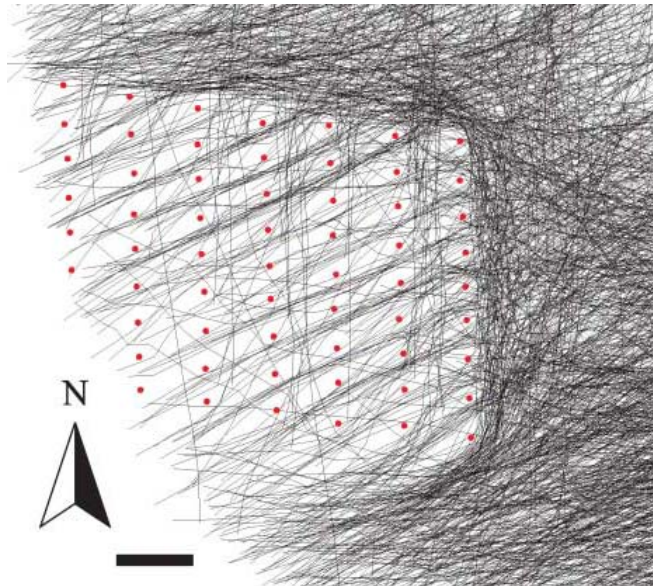
생물 중 하나로 알려져 있는 상어류(elasmobranch)는 자기장이 $0.005\sim 1\mu\text{T}$ 의 범위에 있을 때는 선호하는 영역이기 때문에 가까이 가지만 $10\mu\text{T}$ 을 넘어서는 수준에서는 회피하는 행동을 보여준다. 그러나 3.7mT 에서 수주간 여러 바다생물을 대상으로 시험한 결과나 홍합을 가지고 산란시기 동안 전자기장에 노출시킨 실험결과 특별히 전력선에서 발생한 자기장에 의해 저서 생물의 생태나 생리에 특별한 영향을 주었다고 볼 수는 없는 것으로 나타났다. 그러나 아직까지 장기간에 누적된 영향이나 먹이활동을 하거나 계절에 따른 이주 시에 전자기장에 의해 영향을 받을 수 있는 가능성에 대해서는 구체적인 연구결과가 축적되지 못한 상태이다.

(3) 조류 등의 충돌

흔히 풍력발전 시설의 운영 시 가장 우려하는 문제는 풍력시설의 날개에 새떼가 부딪히는 경우이다. 특히 철새와 같이 바다를 건너 이동하는 해양성조류에게 풍력시설이 악영향을 미칠 것을 우려하여 유럽을 중심으로 해상풍력시설에 대한 조류의 충돌문제가 몇몇 학자에 의해 연구되었다(Camphuysen et al., 2004; 김소리나 외, 2007).

일반적으로 해상풍력 발전기에 들어가는 터빈은 육상풍력보다 더 높게 설치되고 풍력시설의 날개도 더 크기 때문에 날개 끝에서의 회전 속도도 더 빠르고 이에 따른 와류 현상도 더 강력하다. 대부분의 해양성 조류는 100m 이하의 고도에서 비행하나 해양성 조류의 종별로 선호하는 비행고도가 달라 충돌가능성은 각기 다르다(Exo et al., 2003). 일반적으로 새들이 풍력시설이나 날개에 충돌하는 경우는 달이 없는 야간이나 안개나 비, 강력한 바람 등으로 비행 환경이 좋지 못한 경우에 주로 발생한다. 다만 새들 역시 이런 악조건 하에서는 비행고도를 조정하거나 날씨가 좋을 때는 풍력단지 내를 관통하던 새들도 풍력단지 외곽으로 우회하는 것이 관찰되는

(Spaans et al., 1998) 등 일반적인 결론을 내리기는 힘든 상황이다.



자료: Desholm & Kahlert, 2005

| 그림 3-2 | 네덜란드 니스테드 풍력단지 주변 새떼 이동경로

Desholm & Kahlert(2005)는 오리나 기러기류가 해상의 풍력시설을 탐지해서 피할 수 있는지 여부를 레이다 장비를 활용해 분석하였다. 분석결과 건설 전에 비해서 풍력단지가 운영된 이후 풍력단지를 지나는 새떼가 시설이 없던 때에 비해 8.9~40.4% 감소했다. 야간의 경우 주간보다 더 많은 수가 풍력단지 내로 들어오기는 하나, 개별 풍력터빈에서의 거리를 멀리 잡고 비행하면서 충돌 가능성을 낮추는 것을 확인하기도 하였다. 전체적으로 1% 미만의 새떼가 터빈에 충돌할 만큼 가까이 이동하는 것으로 보고하였다.

(4) 소음과 진동

해상풍력발전기가 돌아갈 때 발생하는 소음 역시 육상에서와 마찬가지로 환경적인 문제를 일으킨다. 비록 주변에 사람이 사는 상황은 아니기 때

문에 직접적인 민원의 소지는 크지 않다고 볼 수 있지만 주변에 서식하거나 지나쳐가는 생물에게는 위협요인이 된다. 발전시설에서 발생하는 소음은 대기 중에 전달되기도 하고 한편으로는 수직 구조물을 따라 바닷속으로 전달되기도 한다. 다만 대기 중으로 전달된 소음이 해중으로 전해지는 효과는 미미한 것으로 알려져 있다(EWEA, 2009).

대기 중 소음이 바닷물로는 전해지지 않다고 가정할 경우 1MW의 풍력발전기에서 내는 소음도는 약 103dB에 달하고, 이런 발전기가 여러 기일 경우 106dB까지도 이를 수도 있다. 참고로 중형 선박에서 발생하는 소음은 주파수 대역은 20Hz~10kHz에 달하고 소음도는 130~160dB에 달하는 수준이다. 운영과정에서 발생하는 소음은 몇몇 연구에서 확인할 수 있다. Thomsen et al.(2006)이 우트그룬텐(Utgruden)에 있는 1.5MW 용량의 단일 터빈에서 운영 시 발생소음을 측정했는데, 평시 풍속인 12m/s 조건에서 발전기에서 110m 떨어진 곳에서 약 90~115dB 정도가 측정되었다.

아직까지 구조물을 타고 바다 속으로 전해지는 소음이나 진동을 바닷속의 물고기가 감지할 수 있는지 여부는 제대로 밝혀져 있지 않다. 독일 환경부의 조사에서는 터빈에 아주 가까운 곳이 아니면 풍력시설의 운영과정에서 발생하는 소음으로 주변의 해양생물의 청력에는 별 영향을 찾아보기 힘들다고 하였다. 또한 이로 인한 회피행동이나 우려할 만한 생태의 변화도 터빈 소음에 의한 것이라고 결론짓기 어렵다고 하기도 하였다(EWEA, 2009). 물론 해중에서도 낮은 주파수의 소음은 어류에게 감지될 수 있다. 어류 역시 의사소통을 위해 다양한 소리를 내기 때문에 터빈의 소음으로 영향을 받을 수 있는데, 소음으로 어류가 영향을 받는 정도는 주파수와 소음도, 지속시간에 따라 다를 것이다. 금붕어(gold fish)나 대구, 연어의 경우 풍속이 8~13m/s 범위에서 풍력시설이 운영될 때 400m에서 25km 밖에서도 풍력시설을 감지할 수 있다고 한다. 생물의 탐지 거리는 풍력시설의 규모, 어류의 청력, 수심, 해저의 기질에 따라 달라지기는 하나 아직까지 어류에

미치는 영향, 특히 행동특성에 변화가 있는지 여부는 밝혀진 바가 거의 없다. 혼스레브(Horns Rev) 풍력단지나 니스테드(Nysted) 풍력단지에서 조사한 환경 모니터링 결과에 따르면 풍력단지에서 발생하는 소음이나 진동이 어류에 미치는 영향은 무시할 만큼 낮은 수준으로 알려져 있다.

어류와 달리 풍력시설에서 나오는 소음이나 진동은 해양포유류에게는 직접적인 영향을 줄 수 있다. 아직까지 고래류가 풍력시설에서 발생하는 소음과 진동에 얼마나 영향을 받는 지에 대해서는 정확히 알려진 바가 없으나, 일부 연구(Kube, 2000)에서는 점박이물범과 같은 해양포유류는 풍력 발전기의 소음에 직접적인 영향을 받는 것처럼 보이지 않는다고 한다.

(5) 새로운 서식지 제공: 인공어초 효과

풍력시설이 바다에 들어서면 기초공과 같은 시설물은 사실 인공어초와 특별히 다르지 않기 때문에 바다 생물에게 새로운 서식처를 제공하는 기능도 할 수 있다. 인공어초의 경우 우리나라나 해외에서도 어류를 모으게 하는 효과에 대해서는 인정받고 있다. EWEA(2009)에 따르면 아직까지 풍력 시설의 기초공이 어초와 같이 생물을 모으게 하는 효과가 있다고 보기 어렵다고 한다. 다만 네덜란드 혼스 레브 해상풍력단지에서는 일부 어종이지만, 까나리(sand eel)와 같은 어종은 풍력단지 안에서는 다른 해역에 비해 3배 이상 수가 증가한 반면, 풍력단지 외곽에서는 20% 정도 적은 것으로 나타났다. 해상풍력시설 기초공의 어초효과보다는 오히려 풍력단지에서 어업 활동이 금지되면서 얻는 생물량 증가 현상이 나타나 해상풍력시설을 건설하는 긍정적 효과로 홍보되기도 한다.

(6) 레이더 교란

풍력발전시설에 의한 영향 중 그다지 주목을 받지 않는 영향 중 하나가 풍력터빈이나 날개에 의해 레이더의 탐지능력이 떨어지는 부분이다. 레이더는 물체를 찾아내기 위하여 마이크로파의 전자기파를 발사하고 그 반사파를 수신장치로 받아서 물체의 상태나 위치를 해석하는 장비로 군사적인 목적이나 항공기 비행 시 이용된다. 풍력시설은 수직적인 구조로 이런 전자기파를 교란하기 쉽다. 특히 회전하는 풍력 날개는 고정된 구조물보다 전자기파를 교란하는 효과가 크다. 레이더의 종류에 따라 다르기는 하나 항공교통을 관제하는 차원에서는 해상풍력시설은 부정적인 영향을 줄 수 있는 시설이다.

영국에서는 무역 및 산업부의 요청으로 해상풍력의 환경영향 평가를 위한 검토 결과(Metoc Plc, 2000)에 따르면 영국 내에서 해상풍력이 레이더에 미치는 영향에 대한 주 이해관계자는 역시 국방부와 민간항공기구(Civil Aviation Authority)였다고 한다. 영국 국방부의 검토의견에 따르면, 풍력단지가 레이더의 감지권역 내에 있게 되면 회전하는 날개가 발생하는 간섭효과로 레이더의 성능이 크게 떨어진다. 예를 들어 풍력발전기의 터빈은 항공기로 인식되기 때문에 실제 항공기와 구별이 어렵다. 특히 레이더가 설치된 곳에서 풍력시설의 날개 반경의 공간을 잇게 되면 일종의 레이더가 제대로 감지하지 못하는 그림자 영역이 되면서 해당 영역에서는 레이더가 제 기능을 다하지 못하게 된다. 기술적으로는 이런 간섭효과를 보정하는 방법이 있겠지만 아직까지 관련 연구가 알려져 있지 않다. 따라서 레이더 장비에 대한 교란에 관해서는 우선 레이더에 교란을 주지 않는 공간을 확보하는 것이 필요하며, 여의치가 않을 때는 교란된 영역에 대한 정보수집이 가능하도록 추가적인 레이더 장비의 도입 또는 기술적인 레이더 영상해석 방식을 개발하는 것이 방법일 것이다.

또 다른 교란은 풍력발전기의 회전하는 날개에서 나온다. 여러 대의 터빈에서 날개가 각자 회전하다 보면 그 조합이 마치 레이더상에선 미확인 비행체로 인식될 수 있어 인근의 다른 항공기에 항로변경 등 잘못된 조치를 취하게 할 수도 있다. 미텔그룬데(Middelgrunden) 해상풍력발전단지에서 레이더 교란을 받아 네덜란드의 코펜하겐 공항에서는 잘못된 탐지정보가 확인되기도 하였다(EWEA, 2009).

EWEA(2009)에서는 풍력발전의 환경적 영향 부분에서 레이더 교란의 문제를 검토하여 아래 표와 같이 저감대책을 일부 제시하였다.

| 표 3-2 | 레이더 종류별 영향과 저감대책

시스템	항공교통 관제		기상학적 관측		영공 수호(군사적)	
임무	공항 주변의 항공기 이착륙 및 항공기 접근 관제		날씨 예보		영공을 드나드는 항공기 관찰 및 식별	
종류	primary radar	secondary surveillance radar	기상 레이더	풍향 레이더	지상 레이더	항공기 레이더
터빈의 효과	잘못된 레이더 신호 반송	실제 항공기 신호 차폐 또는 위치 오인	반사	반사	매우 복잡하고 그 효과가 정확히 이해되지 못함	
프로젝트 초기에 취할 수 있는 저감대책	항공기가 적은 공간 선정 항공기 관제레이더 관측 범위 외 선정	레이더 인근 지역 설치 제한	레이더 시설 10km 외 지역 선정		영국 국방부는 레이더 기지 74km 이내 설치 금지	단지의 위치 또는 배치 조정 레이더 시스템 개선

자료: EWEA, 2009

레이더 교란 문제는 환경문제라고 하기 어려운 측면이 있기는 하나 우리와 같이 해상을 통해 북한의 전투기 등이 침입할 가능성에 대비해야 하는 입장에서는 해상에 대단위 풍력단지가 건설되면 그만큼 항공탐지 능력

이 제한되는 점을 감안할 수밖에 없다. 따라서 해상풍력을 도입하기 전에 레이더에 미칠 영향에 관해 사전에 국방부와 국토해양부 항공 관련 부서와 협의가 필요할 것으로 보인다. 또한 해상풍력단지를 건설하더라도 풍력발전기의 레이더 교란효과를 상쇄하기 위해서는 추가적인 레이더 시설을 확보한다든지 하는 대책이 필요하다.

(7) 경관 훼손

해상풍력은 육상과 달리 사람들의 시각을 교란할 기회가 상대적으로 적다. 다만 연안에서 바다를 볼 때 해상풍력단지가 들어선 해양경관(seascape)은 영향을 받을 수 있고, 이에 대해 몇몇 유럽 국가들은 우려를 표명하였다. 새로운 풍력단지가 해상에 들어오면 해안에서의 거리나 터빈의 개수, 풍력시설에서 밝히는 항로 유도등에 따라 해양경관에 영향을 미친다. 이 중 시각적으로는 해안에서 풍력단지까지의 거리가 가장 중요한 요인이다. 그러나 이 역시 항로유도등의 점멸 방식이나 날씨에 따라 차이가 있다. 영국에서는 무역 및 산업부(Department of Trade & Industry: DTI)의 주관으로 시작한 연구인 Wratten et al.(2005)을 통해 해양경관에 미치는 영향거리의 임계값을 <표 3-3>과 같이 제시하였다.

| 표 3-3 | 해양경관에 미치는 영향의 임계값

거리	영향 상태
< 13km	주요한(major) 시각적 영향 가능
13 ~ 24km	일반적인(moderate) 시각적 영향 가능
> 24km	미미한(minor) 시각적 영향 가능

자료: Wratten et al., 2005

풍력단지가 해양경관에 미치는 영향을 판단하는 것에는 주관적인 특성이 있다. 앞서 영국에서는 거리 등이 중요하다고 지적하면서 이를 구분하

는 거리 기준을 제시하였으나, 영국과 가까운 네덜란드에서는 이미 운영 중인 니스테드와 호른스레브(Horns Rev) 풍력단지를 건설할 당시 경관에 대한 부정적인 의견은 없었다고 한다. 특히 두 대규모 풍력단지를 건설·운영하면서 실시한 여론조사에서는 오히려 건설 후에 풍력사업을 수용하는 비율이 더 높아졌다는 결과를 통해 풍력발전이 해양경관에 미치는 영향은 반드시 부정적이지는 않다고 한다.

4) 해상풍력발전 단지 해체 단계

해상의 풍력발전 시설의 수명은 약 40~50년 정도로 잡는다. 수명을 다한 발전 시설은 중앙의 말뚝 구조물부터 시작하여 터빈, 날개, 그리고 육지로 전기를 인입하던 전력선까지 모두 철거해야 한다. 특히 해저에 박아 놓은 말뚝 구조물은 적어도 지하 3m 깊이까지는 구조물을 제거해야 한다. 이렇게 갑작스럽게 기초공 등을 제거하는 작업은 앞서 시설을 건설할 때 고려했던 대부분의 영향과 유사한 영향을 준다고 할 수 있다. 예를 들어 시설을 제거하기 위해서는 다른 선박이 와서 해체작업을 해야 하고 이 과정에서 해저에 부유토사가 재부유한다. 특히 수심이 얇은 바다라면 해체작업을 하는 선박의 프로펠러에 의해 부유토사의 양은 더 많아지게 된다. 또한 해저에 매설된 전력선은 적어도 1m 깊이의 도랑을 파고 묻었기 때문에 이를 뽑아내는 과정에 주변 토사가 부유하게 되고, 매설 이후 안정화되었던 해저의 저서생태계 역시 파괴된다. 시설 건설과 거의 동일한 방식으로 영향이 발생하는 것이다.

해상풍력시설이 제거되고 나면 그동안 어업활동이 금지되던 단지 내 수역이 다시 개방된다. 적어도 40년 이상 어업활동으로 교란 받지 않았던 해역이기 때문에 수산업의 관점에서는 매력적인 어장이다. 그러나 만약 해당 수역이 풍력시설이 도입된 이후 보전할 가치가 있고 전체 해양에서 산

란장이나 섭이장으로서 가치가 높은 공간으로 안정화되었다면, 비록 풍력 시설을 해체하여 조업이 가능하다 할지라도 채취금지공간(no-take zone)과 같은 보호구역 관리방식의 도입도 가능할 것이다. 이는 정책방안에서 조금 더 다루기로 한다.

2. 해상풍력발전 환경영향에 대한 정책 대응 방향

전 세계적으로 해상풍력발전은 유럽연합과 영국을 중심으로 상당히 진전되는 중이고, 이들 국가에서 시설을 건설하거나 운영하면서 발생하는 환경영향에 대해 최근 들어서 일부 연구 결과들이 보고되고 있다. 육상과는 달리 해양환경은 변화가 있어도 그 원인을 특정하기 힘들고 관찰 자체가 어려워 인과관계를 밝혀내기 어려운 특성이 있다. 이런 어려움은 해양에서 벌어지는 대부분의 개발 사업의 환경영향을 검토하는 데서도 마찬가지로 나타나는 문제이다.

해상풍력은 터빈에 날개가 달려 시설의 형태가 다소 다르지만 해양에서 이루어지는 다른 건설사업, 예를 들어 원유 시추 시설과 같은 해양플랜트 사업의 하나로 이해하는 것이 타당하다. 해상풍력에서 가장 중요한 중앙 구조물을 세우는 작업이 실제로 바다에서 이루어지는 작업 중 핵심적인 부분이기 때문이다. 마치 원유를 캐내기 위해 시추공을 해저에 박아 넣는 것과 같이 풍력 터빈과 날개를 달 수 있는 중앙구조물을 설치하는 작업도 유사하다.

1) 환경영향 관련 기존 평가제도 보완

해양에서 벌어지는 대부분의 개발사업은 환경영향을 검토하기 위한 기존 제도를 통해 평가할 수 있다. 환경영향평가나 사전환경성검토 또는 해

역이용협의, 해역이용영향평가 등이 그것이다. 해상풍력이 신규 사업분야 이기는 하나 기존의 제도를 통해 환경영향을 검토할 수 있으며, 다만 관련 법이나 지침상에 해상풍력이 적절하게 반영되었는지를 확인하는 과정은 필요하다.

제도적으로는 어렵지 않게 해상풍력에 대한 환경영향을 검토할 수 있으나 정작 중요한 부분은 환경영향을 검토할 때 어떻게 환경영향을 평가하고 정량화 또는 원인과 결과의 인과관계를 확인할 것이냐이다. 스코핑 제도를 통해 대상사업별로 필요한 평가항목을 선정하고 이에 따라 해당항목을 조사하는 현재의 평가제도에서는 신규 분야인 해상풍력 역시 평가항목별로 환경영향을 확인하는 것은 가능하다. 하지만 해상풍력에 따른 환경영향과 그 원인, 즉 인과 관계와 그 기작에 대해서는 환경영향평가를 통해 제대로 파악하기 어렵다. 예를 들어 조류의 이동경로 변화나 소음이나 진동이 해양포유류 등에게 어떤 영향을 미치는지와 같은 부분은 현재의 평가항목이 요구하는 환경조사를 통해서도 파악하기 어려운 주제이다.

국내에서 풍력 발전이 이미 육상에서는 상당수 진행되었고 이를 위해 환경부에서도 여러 건의 환경영향평가를 수행하기도 하였다. 2002년 강원 풍력발전 사업에 관한 사전환경성 검토서가 들어온 이후 2011년 말까지 총 29건의 풍력발전단지 사업에 대한 환경영향평가서 내지 사전환경성검토서가 환경부에 접수되었다. 대부분 육상의 풍력사업으로 평가서 접수현황으로만 보면 아직 해상풍력이 본격적으로 도입되었다고 보기는 어렵다. 한편 해상풍력이 지식경제부에서 추진하는 시범단지부터 서남해안에 들어서게 되면 해역에서 개발사업에 대해 그 영향과 타당성을 검토하는 해역이용협의도 사업의 추진단계에서 거쳐야 할 단계이다. 현재 국토해양부에서 운영하는 해역이용협의 제도에서 해상풍력을 새로운 사업분야로 포함시키고 검토에 필요한 항목이나 조사방법 등을 사전에 정비하여야 한다. 예를 들어 풍력발전기를 해상에 건설하거나 또는 운영과정에서 발생하는 소음에

대한 측정 역시 표준화된 방법이 제대로 정비되지 않은 상태이다. 이는 외국에서도 마찬가지이기는 하나 풍력 기술을 조기에 확보하고 수출한다는 차원에서도 함께 정비가 필요한 부분이다.

【 표 3-4 】 풍력발전 환경영향평가 검토 현황

연번	사업명	구분	접수일
1	강원풍력발전 건설사업(발전부문)	사전환경성검토서	2002-08-24
2	풍력발전단지 건설	사전환경성검토서	2003-08-05
3	강원풍력발전 건설사업(발전부문)	사전환경성검토서	2003-10-22
4	풍력발전 건설사업	사전환경성검토서	2004-02-09
5	태백풍력 건설사업	사전환경성검토서	2006-06-20
6	태백 풍력 건설사업(보완)	사전환경성검토서	2006-12-22
7	횡성풍력단지조성사업	사전환경성검토서	2007-01-25
8	영양풍력 발전사업	사전환경성검토서	2007-02-22
9	강릉 풍력단지 조성사업	사전환경성검토서	2007-03-13
10	성산풍력 건설사업	사전환경성검토서	2007-03-26
11	삼달리 풍력발전시설 개발사업	사전환경성검토서	2007-03-30
12	영양풍력 발전사업	사전환경성검토서	2007-04-12
13	밀양 풍력발전단지 조성사업	사전환경성검토서	2007-05-29
14	밀양 풍력발전단지 조성사업	사전환경성검토서	2007-08-08
15	강릉풍력단지 조성사업(보완)	사전환경성검토서	2007-10-30
16	김천풍력발전단지 건설사업	사전환경성검토서	2007-10-30
17	김천풍력발전 개발사업	사전환경성검토서	2008-02-18
18	김천풍력발전 개발사업(보완)	사전환경성검토서	2008-04-08
19	국산화풍력발전 실용화사업	사전환경성검토서	2009-05-28
20	영양풍력발전단지 건설사업(초안)	환경영향평가서	2009-09-14
21	영양풍력발전단지 건설사업	환경영향평가서	2009-10-26
22	태백풍력발전단지 건설공사	사전환경성검토서	2010-08-23
23	제주 월령 풍력발전단지 개발사업	사전환경성검토서	2010-09-02
24	제주한림풍력발전 건설사업	사전환경성검토서	2010-09-02
25	제주 상명풍력 건설사업	사전환경성검토서	2010-09-14
26	태백풍력발전단지 건설공사(보완)	사전환경성검토서	2010-10-11
27	태백 창죽풍력발전단지 조성사업	사전환경성검토서	2011-01-10
28	태백 창죽풍력발전단지 조성사업(보완)	사전환경성검토서	2011-06-10
29	경주풍력발전단지 조성사업	사전환경성검토서	2011-10-12

자료 : 한국환경정책·평가연구원 홈페이지, 2011. 11. 10.

2) 환경영향 수용체별 조사연구 시행

앞서 여러 환경영향에 대해 살펴보았듯이 조류의 충돌, 어류나 해양포유류의 회피, 레이더 교란 효과 등은 일회성의 환경영향평거나 해역이용협의 과정에서 제대로 밝혀내기 어렵다. 영향이 나타나는 대상을 중심으로 해상풍력에 의한 환경영향을 심층적으로 조사·연구하는 것이 바람직하다. 예를 들어 서남해안에 들어설 시범단지는 단지 적절한 전력이 생산되어 육상의 수요처에 효율적으로 전기를 보내는지 여부에만 관심을 둘 것이 아니라, 시범시설이 조류에 미치는 영향, 항공 및 해운에 미치는 영향, 어류나 해양포유류에 미치는 영향, 저서생태 및 환경에 미치는 영향 등 환경에 대한 연구도 병행하여야 한다. 환경영향을 이렇게 구분한 기준은 이들이 환경변화에 영향을 받는 일종의 수용체(receptor)라는 점이다. 즉, 환경변화의 인과관계를 영향을 받는 대상을 중심으로 파악하고 이를 통해 해상풍력발전의 어떤 요소가 원인이 되어 어떤 과정을 거쳐 환경의 수용체-사람이나 생물, 또는 경관 등-에 영향을 주는지 종합적으로 파악하는 것이다.

서남해안은 호주 등 남반구에서 출발하여 동남아시아를 거쳐 우리나라를 지나는 이른바 동아시아-호주 철새 이동경로(East Asian-Australasian Flyway)라는 국제적으로 중요한 철새 이동통로로 알려져 있다. 전라남도 일원은 물론 해안을 따라 인천연안까지 다양한 종류의 새들이 우리 연안을 종착지 내지 경로로 이용한다. 따라서 앞서 풍력시설에 의한 조류에 미치는 영향 역시 우리에게서 철새 이동경로와 연계하여 면밀히 검토할 부분이다. 또한 서남해안은 낮은 수심과 연안의 갯벌이 있어 어장으로서도 가치가 높은 환경이다. 시범단지 적지 선정과정에서 어민들과 협의를 거쳐 어업활동에 문제가 적은 곳을 선정할 수 있겠지만 해상풍력에 따른 어업활동의 영향이나 어류에 나타나는 회피행동 등에 관한 조사 역시 시범단지에서 필수적인 연구분야이다. 또한 풍력단지 인근 해역에서의 어업행위를 금지하는 기

준 등은 실제 해상에 풍력단지를 건설하고 운영하는 과정에서 어민들과 협의가 필요한 부분으로 이에 대한 조업활동의 안전이나 환경관리를 위해 필요한 기준을 설정하기 위해서라도 관련 연구가 필요하다 할 것이다.

환경영향에 대한 외국의 선행 연구사례를 옮겨와 그 결과를 검토하는 수준이 아니라, 우리 해역의 생태적 조건이나 풍황 등 외국과 다른 조건을 가지고 있는 우리 해역을 대상으로 실증적인 조사를 통해 환경영향의 정도를 밝혀야 한다. 이는 우리가 해상풍력 발전을 차세대 성장동력으로 키우기 위해 우선적으로 운영실적(트랙레코드)을 확보하고 이를 기반으로 외국에 수출하는 차원에서도 필요한 부분이다. 왜냐면 다른 나라 역시 해상풍력을 건설하려 할 때 여기서 유발되는 전력생산 효과는 물론 환경적 영향에도 큰 관심을 가질 수밖에 없는 것이고, 이때 우리가 스스로 연구·조사한 결과가 풍력기술 자체의 신뢰성도 높여줄 수 있기 때문이다.

3) 해양공간관리계획(Marine Spatial Planning) 조기 도입

해양 자원과 공간에 대한 이용과 보전수요가 점증하면서 다양한 해양활동의 균형을 유지하고 조화로운 이용을 하는 것이 점차 어려워지고 있다. 해양공간계획은 육상에서와 같이 이용 간의 갈등이나 보전과의 갈등을 풀기 위한 방법으로 각광받고 있다. 육상에서 해당 토지에 대한 용도를 사전에 정해주는 용도구역제나 허가제 등을 바다에도 적용하여 여러 활동 간에 빗을 수 있는 갈등을 최소화하자는 것이다.

해양공간관리계획은 처음에는 주로 용도구역제(zoning)로 호주의 대보초해양공원과 같이 보전활동을 보다 체계적으로 하고자 하는 곳에 도입되었다. 최근에는 북해와 같이 고밀도로 이용되는 해역에서 해양공간관리계획이 크게 주목받고 있는데(최희정 외, 2011), 이는 이들이 생태적으로 북해를 잘 관리하고자 하는 차원이나 다른 해양활동과의 조정을 위해서라고 보기 보

다는 실질적으로 해상풍력 분야가 크게 성장하고 있는 것과 무관하지 않다.

해상풍력발전은 시설의 특성상 어업활동을 하기도 어렵고 대형 선박이 통항하기도 어려워 일정 해역에 대한 배타적인 공간이용을 특징으로 한다. 항만구역에서 조업활동과 같은 일부 활동이 제한되기는 하나 해역은 기본적으로 다목적 이용이 가능한 해역이다. 보호구역이라 하더라도 보전목적에 위배되지 않는다면 어선이건 컨테이너선이건 그 운항을 제한하는 경우는 거의 없다. 또한 어장으로 이용이 활발한 해역이라 하여도 안전에 지장이 없는 이상 선박 운항에 특별한 제한을 가하지 않는다. 반면 해상풍력은 단지의 형태로 넓은 지역을 차지하고 구조물에 터빈과 날개가 움직이기 때문에 단지 안은 물론 주변에서도 다른 활동을 하기 어렵다.

이와 같이 배타적인 공간이용이 특징인 해상풍력단지를 건설할 때마다 사업자가 해당 해역에 관련된 이해관계자와 협의를 거쳐 대상지를 선정하는 것은 매우 어렵고 지난(至難)한 작업이 될 가능성이 크다. 따라서 해상풍력 발전시설이나 단지에 대한 개별적인 접근보다는 전체 해역을 대상으로 풍력자원의 분포, 해상운송로, 어업활동 및 보호구역 등을 파악해서 이용이 가능한 활동을 사전에 구획하는 것이 더 편리할 수 있다. 이런 필요성에서 나온 제도가 바로 해양공간계획이다.

지식경제부의 해상풍력발전 로드맵에 따르면 국내에는 시범단지를 영광 앞바다에 건설하겠다는 수준의 계획만 있다. 해당 해역이 현재 어떻게 이용되고 있는지, 또한 어느 해역에 풍력단지를 설치할 것인가는 제주도 해상 일부를 제외하고는 구체화되지 않은 상태이다. 게다가 해양공간계획 역시 우리나라 전체 해역을 대상으로 하기 때문에 조기에 해역별로 다양한 이용행위를 파악하고 해양환경의 자료 등을 확보하는 데 매우 긴 시간이 소요될 수 있다. 따라서 우선적으로 시범단지로 선정된 해역을 중심으로 해양공간계획을 시범적으로 시행하는 것이 바람직하다. 시범사업 과정에서 공간계획을 위해서는 해상풍력사업자, 어민, 해역관리자, 해상풍력 관련 중

양정부 담당자 등 여러 이해관계자 간의 협의와 조정을 거치게 되고, 여기서 얻은 경험과 교훈을 앞으로 해상풍력단지의 본격화 단계에서도 활용하고 해양공간계획을 전 해역으로 확대할 때도 활용할 수 있을 것이다.

제 4 장 해상풍력의 경제적 영향

1. 해상풍력 관련 경제성 평가의 개요

에너지 가격의 급격한 증가추세와 이에 따른 신·재생에너지원의 보급 노력에 힘입어 우리나라에서도 해상풍력발전의 적극적인 도입이 추진되고 있다. 비록 현재 해상풍력을 포함한 전체 풍력발전이 우리나라 발전량에서 차지하는 비중은 상대적으로 매우 낮은 수준이지만 관련 분야의 연구개발과 산업계의 참여가 가장 활발하게 일어나고 있다.

이미 풍력은 영국, 네덜란드, 덴마크 등 유럽 일부 국가에서는 매우 중요한 에너지원으로 인정받고 있으며, 풍력산업이 갖는 사회경제적 파급효과와 중요도에 따라 중국이나 인도와 같은 신흥국에서도 급속도로 산업화가 진척되고 있는 상황이다(Perkins and Everett, 2011).



| 그림 4-1 | 풍력발전과 해상풍력

이러한 풍력 산업에 대한 인식 확대 및 성장 잠재력의 증가와 더불어 세계 풍력산업은 해상풍력단지의 개발과 확대 쪽으로 진전되고 있다. 이는 육상의 경우 활용가능한 부지의 선정에서부터 앞에서 언급한 소음과 진동, 그에 따른 지역 주민의 민원 발생과 같은 갈등 상황을 미연에 방지하기 위한 목적이 있으며, 다른 한편으로는 같은 규모의 풍력발전기를 이용하더라

도 더 높은 출력을 얻을 수 있다는 실제적인 장점이 있기 때문이다.

설치·운영되고 있는 풍력발전 가운데서 해상풍력이 차지하는 비중은 2009년 기준으로는 전체의 약 1%로 조사되고 있다(EWEA, 2009). 풍력발전이 가장 앞서 있는 유럽에서도 해상풍력은 주로 북해와 발틱해 인근 북유럽 국가를 중심으로 진행되고 있으며, 2008년 기준으로 총 설치용량은 1,471MW 수준으로 집계된다.

해상풍력은 육상풍력단지 개발과 비교할 때 추가적인 전력계통 연결을 위한 비용, 해양환경 관련 환경영향에 대한 조사와 같은 초기 비용이 발생하고 유지과정에서는 풍력자원의 특성, 즉 이용률에 따라서 발전량이 결정되는 특징을 지니고 있다(강금석 외, 2011). 현재까지 알려진 비용구조를 살펴보면 유럽의 해상풍력에서는 풍력터빈이 비용구조에서 차지하는 비중은 전체의 약 30% 내외에 해당하며, 지지구조물과 전력망 계통연계, 그리고 기타 운영비용이 60%를 넘는 것으로 조사된다(NREL, 2006). 특히 초기 비용이나 이용에 따른 수익의 경우 현재까지 충분한 국내 사례가 축적되어 있지 않으므로 경제성 평가에 일정 부분 한계가 존재하게 된다. 따라서 향후 지속적인 추가 분석을 통해서 우리나라의 입지 여건 하에서 경제성 평가가 수행될 필요가 있다(김현구 외, 2010; 김현구·황효정, 2010).

2. 해상풍력의 경제성 분석

1) 사업성 분석

(1) 사업성 분석 방법

재무타당성 분석은 기술적 타당성을 지닌 방안에 대하여 그 투자비와 예상효과를 비교 검토하여 연간 수익 대비 투자비, 소요비용, 현금의 현재

가치 등을 검토하여 투자의 가치를 판단하는 것이다. 투자에 대한 재무타당성 분석 방법은 분석의 관점, 비교대상, 경제성 척도 등에 따라 여러 가지 방법이 있으나, 대부분의 경우 사업성 분석을 위해서는 순현재가치, 편익비용분석, 내부수익률을 타당성 분석의 기초로 사용한다.

① 순현재가치(Net Present Value: NPV)

순현재가치는 투자사업의 전 기간에 걸쳐 발생하는 순편익의 합계를 현재가치로 환산한 값으로서, 순현재가치가 양의 값으로 나타나면 투자시점에서 사업종료 시까지 투자비용의 현재가치를 제외하고 양의 수만금의 수익을 얻었다고 할 수 있다. 순현재가치를 판단함에는 적절한 할인율을 사용하여 시간이 흐름에 따라 순편익의 가치를 할인해 주어야 하므로 어떤 수준의 할인율을 적용하느냐가 매우 중요한 관건이 된다.

비용과 편익의 미래 흐름을 비교하기 위하여 사용되는 할인율은 자원의 기회비용(Opportunity Cost), 즉 투자사업에 사용된 자본이 다른 투자사업에 사용되었을 경우 얻을 수 있는 수익을 추정하게 할 뿐 아니라 사람에 따라 혹은 사회에 따라 그리고 시대에 따라 다를 수 있는 시간의 객관적인 가치를 나타낸다. 할인율 개념의 적용에 있어서는 많은 이견이 있으나 특정 항만개발투자사업이 정부에 의해 주도되는 경우에는 사회적 할인율의 개념을 적용하고 민간자본에 의해 추진되는 경우에는 시장이자율에 근거한 재무적 할인율을 적용하는 것이 일반적이다.⁷⁾ 대부분의 국가는 투자사업의 특성에 따른 할인율을 자국의 경제성장률, 물가상승률, 경제적 잠재능력 등을 고려하여 개괄적인 방법으로 정부가 추정하여 사용하고 있는데 일반적으로 개발도상국 사회간접자본의 경우는 7~8% 이상, 선진국의 경우는

7) 사회적 할인율은 통상 시장이자율보다 낮은 수준으로 책정되는데, 그 이유는 사회적 할인율을 사용하여 사업타당성을 평가하는 주체가 주로 정부이며 정부로서는 미래사업의 중요성이 더 높게 평가되어야 할 것이기 때문이다.

보통 5~6% 수준이 적용되고 있다. 기획재정부 등의 ‘예비타당성조사 수행을 위한 일반지침 연구’에서는 우리나라 사회적 할인율을 9~10%(명목기준) 정도로 추정하고 1990년대의 물가상승률을 감안하여 실질할인율을 5% 내외로 추정한다.

② 내부수익률(Internal Ratio of Return: IRR)

내부수익률이란 투자사업이 원만하게 진행된다는 전제 하에 기대되는 예상수익률로서 투자사업의 전기간에 걸쳐 발생하는 편익의 현재가치와 비용의 현재가치를 일치시켜 순현재가치가 영(零)이 되게 하는 어떤 할인율로 계산된다. 즉 내부수익률은 편익과 비용의 현재가치로 환산된 값이 같아지는 할인율 r 을 구하는 것으로, 사업의 시행으로 인한 순현재가치를 0으로 만드는 할인율을 의미한다. 따라서 내부수익률이 사회적 할인율보다 크면 일반적으로 경제성이 있다고 판단하고 있으며, 산정방식은 다음과 같다.

$$\text{내부수익률 (IRR): } \sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r)^t} = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}$$

내부수익률기준에 따르면, 내부수익률이 큰 사업일수록 유리한 사업으로 판정되므로 사업 간 우선순위를 결정할 때 내부수익률의 크기를 직접적으로 비교하면 된다. 내부수익률이 사회적 할인율보다 크다는 의미는 이 사회적 할인율로 할인한 순현재가치가 0보다 크다는 의미와 동일하다고 할 수 있다.

그러나 내부수익률 기준도 한두 가지의 약점을 가지고 있다. 우선 어떤 사업이 성질상 사업의 초기에 많은 비용이 투입되어야 하고, 그리고 나서 어느 정도의 편익기간이 지난 후에 다시 대규모의 비용이 발생하는 그런 사업에 대해서는 내부수익률이 두 개로 계산될 수 있다는 것이다. 또한 예산상의 제약이 있다든가 혹은 사업들 간에 상호배타적인 관계가 있을 때에는

내부수익률 기준을 직접적으로 사용할 수 없다는 한계점을 내포하고 있다.

③ 편익-비용비율(Benefit-Cost Ratio)

편익-비용비율(Benefit-Cost Ratio : B/C)이란 총편익과 총비용의 할인된 금액의 비율, 즉 장래에 발생될 비용과 편익을 현재가치로 환산하여 편익의 현재가치를 비용의 현재가치로 나눈 값을 의미한다. 일반적으로 편익-비용비율이 높은 사업일수록 경제적 타당성이 높은 것으로 평가하고 있으며, 편익-비용비율 ≥ 1 이면 경제성이 있다고 판단한다. 산출방식은 다음과 같다.

$$\text{편익 - 비용비율 (B/C)} = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}}$$

여기에서, B_t 는 편익의 현재가치, C_t 는 비용의 현재가치, r 은 사회적 할인율(이자율), n 은 항만사업의 경제적 수명(분석기간)을 각각 의미한다. 편익-비용비율의 기준은 편익-비용비율이 높은 사업일수록 경제적 타당성이 높은 것으로 평가하는 기준이며 여기에서도 적절한 사회적 할인율을 적용이 핵심적인 역할을 한다.

(2) 재무타당성의 평가기준

신규 풍력발전시스템의 건설에 따른 경제성을 분석하기 위해서는 직접 영향을 미치는 제반 조건, 즉 설비용량, 건설기간, 수명기간, 설비이용률, 이자율 등에 관한 기준을 다음과 같이 설정하였다. 먼저 현가와 계수의 산정에 필요한 할인율은 연간 7.0%를 적용하였다. 또한 투자비의 차입률은 건설공사비 전액(100%)을 차입하는 것으로 산정하며, 이자율은 연간 5.0%로 산정한다. 운전관리비에 대한 물가상승률은 연간 3.0%로 산정하고 풍력발전의 경제수명기간 및 감가상각법과 관련하여 풍력발전 설비의 경제수

명기간은 20년, 감가상각법은 정액법으로 수명기간 후 잔존가가 총공사비의 0%가 되도록 한다. 소내소비율은 순수 발전시스템에 해당하므로 0%로 산정한다. 법인세 및 제세는 이익의 연경상이익 27.5%를 적용하며, 운전유지비는 인건비, 수선비와 기타 경비로 구분되며, 총사업비의 1.5%/년⁶⁾가 되는 것으로 산정한다.

| 표 4-1 | 재무적 타당성의 평가기준

항 목	기 준	단 위	비 고
할인율	7	%	-
투자비 차입률	50	%	-
차입금 이자율	5	%/년	5년 거치 10년 상환
기준 물가 상승률	3	%/년	-
풍력시스템 내구수명	20	년	-
잔존가치	0	%	-
정액 감가상각률	5	%/년	-
소내소비율	0	%	-
법인세	27.5	%	-
연간 수선유지비	16	eur/MWh	-
공사기간	3	년	-
공사기간 중 이자	산정 이자율 적용		-
전력판매단가	122.8	원/KWh	-
가동률	97	%	-
송전손실률	2	%	발전량 대비
온실가스 배출 기준	0.6207	MWh/ton	-
CDM가격 기준	14.16	EUR/ton	매년 3.94% 할증
유로화 환율 기준	1528.6	원/EUR	-
달러화 환율 기준	1126.7	원/USD	-
관세율	3.84%		-
환경분석	3%	건설비의 3%	-
건설팅비용	6%	건설비의 6%	-

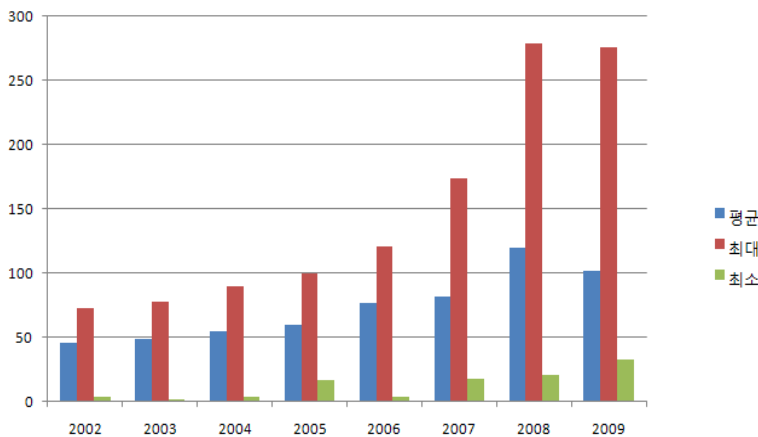
자료: 한국전력연구원 내부자료, 2011

2) 수익

(1) 전력판매단가(System Marginal Price: SMP)

SMP는 전력시장에서 시간대별로 수요와 공급이 일치할 때의 발전 변동비를 말한다. 화력, 수력, 원자력 등 발전기기의 시간대별 발전비용(유효 변동비) 가운데 가장 높은 값으로 책정된다. 따라서 전기를 많이 쓰는 낮에는 SMP가 올라가고, 전기를 상대적으로 덜 쓰는 밤에는 SMP가 내려가게 된다. SMP는 주로 원유나 LNG, 유연탄 등 연료가격에 연동되는데, 연료가격이 오르면 SMP도 덩달아 오르게 된다. SMP는 전력거래 가격 책정의 기준이 되는 중요한 가격지표이다.

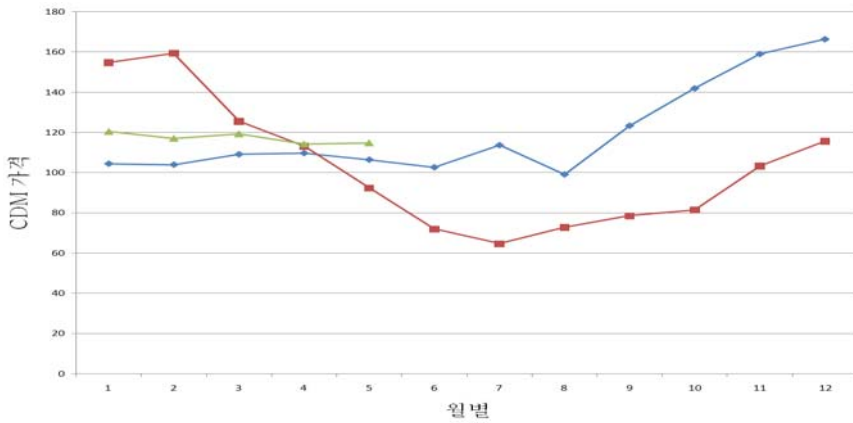
전력의 수요가 증가되는 현상으로 인해 전력판매금액도 점층적으로 상승하고 있으며, 이는 차후 전력판매금액이 현재보다 증가할 수 있는 요인으로 기대된다.



| 그림 4-2 | 연도별 SMP 기준 단가

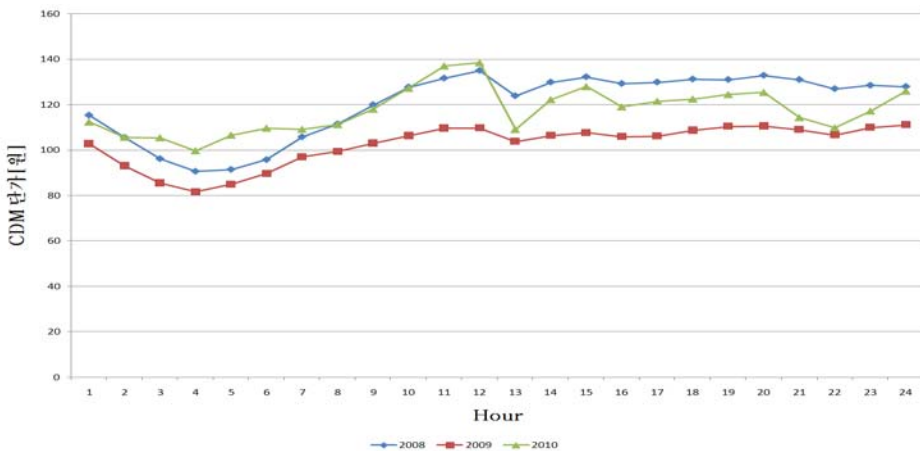
월별전력수요는 10월부터 2월까지의 전력판매금액이 상대적으로 높고, 4월에서 8월까지의 전력판매금액이 상대적으로 낮다. 풍력발전량이 11월에

서 3월에 집중되는 국내 풍향 특성을 고려하면 월별 전력판매금액의 특성은 풍력발전산업에 매우 유리한 조건이다.



| 그림 4-3 | 월별 SMP 기준 단가

시간별 전력판매금액은 2시에서 5시까지가 가장 낮다. 해안에서 계측된 풍향에너지가 12시에서 16시 사이에 집중되는 특성을 고려하면 풍력발전산업이 유리하다.



| 그림 4-4 | 시간대별 SMP 기준 단가

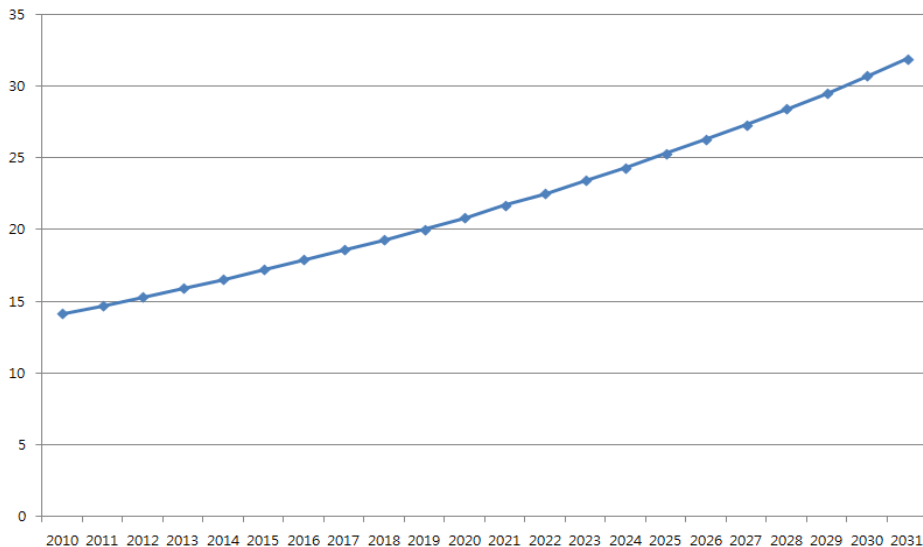
(2) CDM(Clean Development Mechanism, 청정개발체제)

선진국이 개발도상국에 기술·자금 등의 지원을 실시해 온실 효과 가스 배출량을 삭감, 또는 흡수량을 증폭하는 사업을 실시한 결과로서 삭감할 수 있던 배출량의 일정량을 선진국의 온실 효과 가스 배출량의 삭감분의 일부로 계산할 수 있는 제도를 말한다.

2010년 3월부터 2010년 5월까지 3개월 동안의 CantorCO₂에서 제공하는 CDM기준가격은 kWh당 14.16EUR이며, 매년 1.2%에서 8.1%까지 평균 3.94%의 비율로 증가할 것으로 예측되었다.

| 표 4-2 | 연도별 CDM 단가 예측치

연도	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
CDM 단가	14.16	14.7	15.3	15.9	16.5	17.2	17.9	18.6	19.3	20.0	20.8



| 그림 4-5 | 연도별 CDM 단가 예측치

(3) 이용률과 유지관리비용

이용률은 전력생산을 위한 발전설비의 생산성을 측정하는 척도에 해당하며, 연간발전량을 정격출력으로 운행되어 발전한 발전량으로 나눈 비율을 의미한다(황병선 외, 2010). 이용률은 풍력발전의 경제성을 결정하는 매우 중요한 요소에 해당한다. 통상 설치하고자 하는 부지의 풍황조건과 설치하고자 하는 풍력기의 성능에 따라 산출된다. 따라서 이용률을 산정하기 위해서는 예상 사업부지에 대한 실측이 선행되어야 하며, 계측한 자료를 참고하여 도입하는 풍력기의 성능곡선을 검토하게 된다. 기기별, 위치별로 서로 다른 이용률을 나타내지만 통상적으로는 25~40% 가량에 해당한다. 따라서 경제성 검토의 기준으로 이용률을 30%로 삼게 된다.

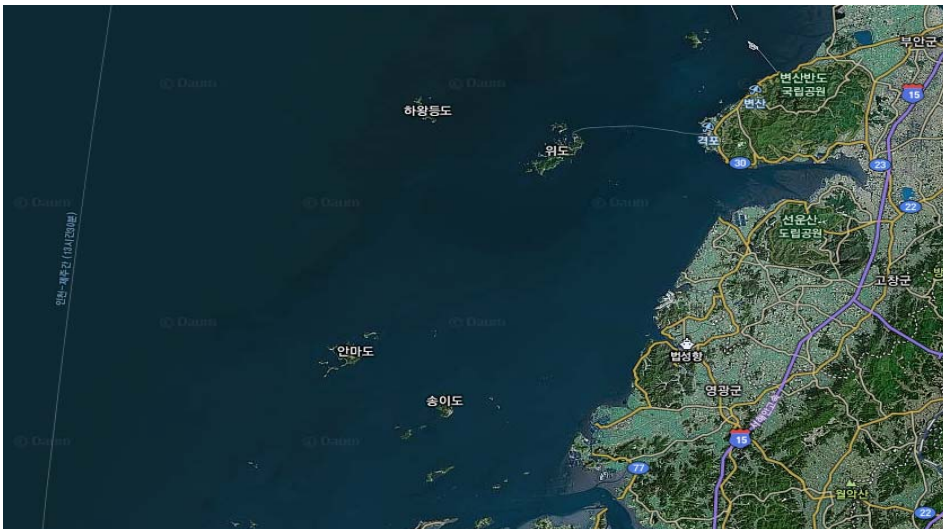
유지관리비용의 경우 유럽의 사례에서는 10~19€/MWh로 알려져 있으며, 해상풍력의 경우에는 접근성과 작업난이도를 고려할 때 이보다 더 높을 것임을 가정한다.

3. 국내 해상풍력의 경제성 분석 사례

본 연구에서는 최근 국내에서 수행된 해상풍력발전단지 조성의 경제성 분석 사례를 비교분석하고자 한다. 두 지역 모두 우리나라 서남해안지역 수심 15~20m 해상에 각각 100MW급과 20MW급 풍력단지의 설치를 예상하고 있다.



| 그림 4-6 | 전남 신안군 일대 사례지역



| 그림 4-7 | 전북 고창군 일대 사례지역

적용 가능한 부지선정의 기준으로는 풍력밀도 기준 Class III(6.9~7.5m/s) 이상, 수심조건으로는 5~20m, 해안과의 거리 10km 이상, 변전소와의 이격거리 30km 이내에 해당한다. 풍력밀도는 기본적인 출력조건을 결정짓는

가장 중요한 변수로 꼽을 수 있다. 수심조건과 변전소와의 거리는 해상풍력의 건설비 및 기초적인 투입비용 산정에 큰 영향을 미친다. 전 세계적으로 현재 운영되고 있는 해상풍력단지의 경우 대부분 수심조건은 30m 이내에 한정되고 있다(김도형, 2011). 2012년도부터 국내에서 적용되는 신·재생에너지 의무할당제(Renewable Portfolio Standard: RPS) 내에서는 해상풍력의 경우 해안과의 이격거리가 10km 이상인 경우 2배의 가중치를 얻게 된다. 또한 해상에 대한 이용이 매우 활발한 우리나라의 상황에서 주요 어장과 항로에 지장을 주지 않는 이격거리의 확보는 매우 중요하다(경남호 외, 2003).

1) 100MW급 해상풍력단지 조성사업

서남해안의 100MW급 해상풍력단지 조성사업의 주요 경제성 분석 지표는 <표 4-3>과 같다. 3단계에 걸쳐 발전용량을 확대하는 것으로 가정하는데 이용률은 초기 30%에서 3단계에서는 기술발전을 고려하여 36%로 상향되는 것을 염두에 두고 있다.

표 4-3 | 경제성 분석의 주요 지표

구분	단계별		
	1단계	2단계	3단계
발전용량	40MW	560MW	1,900MW
감가상각률(20년 정액법)	0.17075	0.17075	0.17075
이용률(%)	30	30	36
유지비	30원/kWh	30원/kWh	25원/kWh
건설단가	400만 원/kW	400만 원/kW	350만 원/kW
할인율(%)	7	7	7
소내소비율(%)	2.7	2.7	2.7
전력판매단가	188원/kWh(SMP+REC×2, REC는 40원 가정)		

자료: 한국전력연구원, 2011

| 표 4-4 | 건설단가 예시

단위: 백만 원

구분	단계별		
	1단계	2단계	3단계
터빈 및 기초시공(운반, 설치 포함)	112,000	1,568,000	4,750,000
해상풍력단지 내 및 해안까지 주케이블	396,000	264,000	1,710,000
기타(설계 및 사업관리, 환경평가)	30,000	30,000	190,000
합계	538,000	1,862,000	6,650,000

자료: 지식경제부, 2011

계략적인 건설단가는 <표 4-4>에 제시된 바와 같이 제3단계의 경우 터빈 및 운반, 설치를 포함하는 기초시공이 전체의 71.4%, 육상까지의 송전선로 연결에 25.7%가 소요되는 것으로 상정하고 있다.

| 표 4-5 | 경제성 검토

구분	1단계(40/100)	2단계	3단계
IRR(%)	-4.5/0.548	6.28	9.778
NPV(백만 원)	-333,254/-273,966	-105,516	1,537,354
적정 REC 가중치	12.08/5.38	2.25	1.13

자료: 지식경제부, 2011

먼저 서남해안 A지역에 대한 경제성 분석의 결과는 <표 4-5>와 같다. IRR과 NPV값을 통해 살펴보면 계획의 제1단계와 제2단계까지는 충분한 경제성이나 사업의 타당성을 확보하기가 불가능한 것을 알 수 있다. 적정 REC 가중치는 편익/비용의 비율을 1로 만들어 주는 REC 가중치를 의미한다.

한국전력연구원(2011)의 분석에 따르면 해상풍력단지 개발 사업이 제3단계까지 순차적으로 진행되는 경우에 있어서만이 타당성을 확보하는 것으로 나타남을 알 수 있다. 또한 강금석 외(2011)의 연구에서도 이와 동일한 결과가 도출되는 것으로 분석된 바 있다. 그러나 제3단계의 경우에도 <표 4-3>에서와 같이 풍력발전의 이용률, kWh당 유지비, 그리고 건설단가 등이 향후의 지속적인 기술발전을 고려하여 충분히 향상되는 상황을 가정

하고 있다. 따라서 현재까지의 경제성에 대한 검토는 앞으로의 기술진보를 미리 가정하고 있으므로 그 해석에 주의를 기울일 필요가 있다.

2) 20MW급 서남해안 해상풍력단지 조성사업

서남해안의 20MW급 해상풍력단지 조성사업의 건설단가 사례는 <표 4-6>과 같다. 해상풍력의 특성을 반영하여 터빈 및 시공 비용이 전체 소요 비용의 85.6%에 달하는 것으로 산정되고 있으며, 기초공사비와 설계 및 사업관리비용이 각각 5.5% 수준으로 집계된다.

| 표 4-6 | 건설단가 예시

구분	k€/MW	천 원/MW	천 원	비율
터빈 및 시공(운반, 설치 포함)	889	1,358,539	27,170,790	85.6%
단지 내 및 해안까지 주케이블	8	11,586	231,710	0.7%
기초공사	57	86,667	1,733,333	5.5%
설계 및 사업관리	57	87,407	1,748,150	5.5%
환경영향	29	43,704	874,075	2.8%
합계	1,039	1,587,903	31,758,058	100.0%

자료: 지식경제부, 2011

| 표 4-7 | 경제성 검토

구분	세부 항목	분석 결과
모델	용량	2MW
	설치 수량	10기
발전량 및 이용률	연간 전력생산량	42,930MWh/y
	가동률	97%
	소내소비율	2%
	연간 순에너지생산량(AEP)	40,783.5MW
	이용률	23.3%
경제성 분석	단순 투자비 회수기간	7.63
	IRR	11.24%
	NPV(백만 원)	9,326
	편익/비용비율(B/C ratio)	1.21

자료: 지식경제부, 2011

이와 같은 경제성 조건에 따른 사업의 타당성 결과는 <표 4-7>과 같다. 2MW급 풍력기 10기를 설치하는 경우 연간 전력생산량은 가동률 97% 수준 하에서 42,930MW에 해당하며, 이용률은 23.3%를 상정하고 있다. 이 경우 투자비 회수기간은 7.63년, 편익/비용 비율은 경제적 타당성이 인정되는 1.21로 조사된다.

4. 기타 경제적 영향

현재까지 우리나라에서 해상풍력단지 조성의 적격지로 언급되고 있는 남서해안이나 제주 해상의 경우에는 지역적으로 중요한 해양관광자원이 중첩되어 있는 지역이기도 하다. 이에 따라 해상풍력단지의 대규모 조성은 지역의 관광산업에 미치는 영향에 대해서도 충분한 사전 고려가 필요하다.

실증단지의 건설이 진행 중인 제주도 구좌읍 해상을 제외하고는 아직까지 완공·운영 중인 곳이 없음으로 인해서 우리나라의 상황에서 지역의 관광산업에 미치는 영향은 아직까지는 그 효과를 예측하기는 매우 어렵다. 아직까지 해상풍력의 환경적 영향이나 사회적 가치를 본격적인 경제적 가치로 환산하여 제시하는 연구사례를 매우 드문 편이다.

미국 동부 연안의 사례를 분석한 Haughton et al.(2003)의 연구에 따르면 미국 메사추세츠주 연안에 해상풍력단지가 건설될 경우에도 지역 방문객의 약 94%는 향후 자신들의 방문계획을 크게 수정할 의사가 없는 것으로 나타났다. 반면에 앞으로의 방문 여부에 부정적인 영향을 줄 것이라는 응답자는 전체의 5%로 조사되었다. 이에 따라서 전체적인 지역경제 생산감소액, 특히 관광산업에 미칠 영향은 연간 약 2억 3백만 달러에서 9천 4백만 달러에 이를 것으로 집계하였다.

Lilley et al.(2010)는 2007년 델라웨어에서 지역 외부의 방문자 1,000명

을 대상으로 연안에서 10km 떨어진 해상에 풍력발전단지를 설치한 가상의 자료를 보여 주고 이러한 풍력발전단지의 설치가 대상지역 해변 방문에 얼마나 영향을 미칠 것인가를 분석하였다. 조사 결과 85%의 응답자는 풍력발전 자체에 대해서 매우 긍정적인 태도를 보였다. 환경적 영향에 대해서도 80%의 응답자가 긍정적이라고 응답하였다. 반면에 경관에 미칠 영향에 대해서는 부정적이라는 응답이 20%인 반면에 별 영향을 미치지 않을 것이라는 응답이 가장 높은 56.5%로 조사되었다. 풍력기가 해안에서 1.5km 떨어진 위치에 설치될 경우 다른 해변을 방문하겠다는 응답은 35.0%로 조사된 반면에 풍력기의 위치가 10km로 멀어지는 경우에 그 비율은 18.9%까지 감소하는 것으로 나타났고 22km 수준으로 멀어지는 경우에는 그 영향이 매우 미미한 수준으로 집계되는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 이 경우에도 그리 멀리 떨어지지 않은 같은 지역의 다른 해변으로 목적지를 변경하겠다는 응답자가 대다수를 차지하고 있다. 뿐만 아니라 보트 관광과 같은 수단을 이용해서 최소한 한 번이라도 해상풍력단지를 보고 싶다는 의견도 44.4%로 보고되었다.

표 4-8 | 해상풍력단지 이격거리에 따른 연안관광지 방문의사

응답유형	1.5km	10km	22km	원거리 시야 밖
같은 해변 방문	55.3%	73.9	93.7	99.4
지역 내 타 해변 방문	35.0	18.9	4.3	0.3
지역 밖 이동	9.7	7.2	2.0	0.3

자료: Lilley et. al., 2010, p. 11

미국 5대호 연안의 미시건주에서는 5대호 내에 풍력단지의 설치를 앞두고 지역 주민과 관계자에 대한 조사를 실시한 바 있다(Michigan Great Lakes Wind Council, 2010). 미시건주 조사에서는 특별한 분석이나 표본선택 기법을 이용하지는 않았으나 응답자의 과반수가 연안에서 6마일(약 10km)

떨어진 해상에 풍력발전단지를 조성하는 것에 대해서 찬성하는 것으로 나타났다. 특히 응답자들이 지역경제에 대해서 긍정적인 영향을 미칠 것으로 예상하는 부분은 일자리 창출과 관광산업인 것으로 조사되었다.

| 표 4-9 | 지역경제에 미치는 효과 조사(Michigan Wind Council)

구분	편익 발생 기대	효과 없음	부정적 효과	불확실
관광	29%	31%	37%	3%
일자리 창출	74%	16%	7%	2%
심미적 효과	16%	28%	54%	2%
자산 가치 상승	14%	40%	40%	5%
해상관광 증가	17%	42%	38%	3%

자료: Michigan Great Lakes Wind Council, 2010(www.michiganwindcouncil.org)

따라서 이러한 지역관광에 미치는 영향이나 방문객 의향에 관한 조사를 통해서 우선 풍력발전단지의 위치가 해상에서 어느 정도 이상의 거리에 위치하는 경우에는 방문 빈도나 연안의 관광산업에 미치는 부정적 영향은 크게 상쇄될 수 있음을 알 수 있다. 그리고 방문지를 변경하더라도 인근의 다른 지역을 찾게 되어 전반적인 지역의 관광산업에 미칠 부정적 영향은 제한적일 수 있으며, 오히려 해상풍력단지 자체에 대한 추가적인 방문 수요를 기대할 수 있다.

우리나라에서 계획하고 있는 해상풍력발전단지에 대해서는 사전에 주변지역 관광에 미치는 영향과 실험선택법(choice experiment)을 활용해서 시각적인 부정적 효과가 갖는 경제적 효과에 대해서 평가할 필요가 있다.

제 5 장 결 론 및 시사점

1. 연구의 요약과 결론

중동지역 정세 불안, BRICs 국가의 에너지 수요 증가 및 세계 원유 생산량의 정점 도래 우려 등으로 가격 불안정이 심화되고 있다. 이에 따라 고유가 상황이 고착화되는 등 국제 원유가의 전 세계적인 상승세는 지속되는 상황이다. 비록 현재 시점에서는 세계적인 경제위기의 도래 가능성으로 인해 에너지가격이 다소 안정되어 있는 상황이지만 세계경제가 다시 성장세로 돌아서는 시점에서는 언제라도 에너지자원을 둘러싼 불확실성이 증대될 가능성이 있다.

특히, 중국·인도 등 개발도상국의 경제성장에 따라 세계 에너지 소비량이 급증하는 상황에서, 지구온난화에 따라 세계적으로 화석연료 사용에 대한 환경규제가 강화되는 등 ‘기후변화 협약’에 따른 온실가스 감축 부담이 본격화되어 환경비용을 최소화할 수 있는 청정에너지에 대한 관심이 고조되고 있다. 심지어 미국과 같은 선진국에서도 향후 20년 내에 50GW 규모의 개발가능한 자원이 있으며, 이를 통해 전체 전력의 5%가 대체 가능함을 분석한 바 있다. 이렇게 앞으로의 에너지 환경에 적극 대처하면서 국가 새로운 성장동력으로 활용할 수 있는 신·재생에너지 분야의 중요성이 그 어느 때보다 크게 부각되고 있다.

태양광, 풍력, 조력, 해양바이오에너지 등 다양한 신·재생에너지원 가운데서 가장 활발한 이용이 이루어지고 있으면서 앞으로도 높은 성장 가능성을 지닌 분야가 풍력이라고 할 수 있다. 풍력 가운데서도 해상풍력발전은 삼면이 바다인 우리나라의 상황에서 보다 적극적인 이용과 개발이 가능한 분야에 해당한다. 이러한 가능성에 주목하여 최근 정부 차원에서도 분

격적인 시험설비의 적용 및 관련 기술과 경험을 확보하여 국가의 새로운 성장동력으로 활용하기 위한 노력을 추진하고 있다. 해상풍력발전을 먼저 국내에서 확산시키고 기업의 참여를 적극적으로 추진하는 과정에서 연관 분야의 시너지효과와 신산업의 창출이 가능해질 것이다.

국내에서는 해상풍력발전이 제주도를 시작으로 시범실시 단계에 접어들었으나 활발한 개발이 이루어지고 있는 유럽의 풍력선진국에서는 해상시설을 건설하고 운영하는 단계에서 다양한 해양환경에 미치는 영향에 대해 세심한 검토가 이루어져 왔다. 우리나라의 경우 비록 삼면이 해양과 접하고 있으나 연안에 대한 이용행위가 다양한 이해관계자들에 의해 이루어지고 있다(안세웅·이희선, 2011). 따라서 해양환경에 미치는 영향에 관해 사전조사와 연구가 철저히 수행되지 않는다면 향후 해상풍력발전의 대규모 개발단계뿐만 아니라 유지·운영단계에서 많은 사회적 갈등과 지체비용이 발생할 가능성이 크다.

특히 건설단계에서 해저면 손상 및 퇴적물 발생, 공사 중에 발생하는 소음과 진동에 대한 분석이 시범실시단계에서 철저하게 조사될 필요가 있다. 또한 장기적으로는 운영 시에 발생하는 소음, 진동 문제, 자기장의 영향, 해양생태계에 미치는 영향과 경관 피해 등에 관한 대응책이 마련되어야 할 것이다.

신·재생에너지 공급의무화 확대를 앞두고 해상풍력발전은 타 에너지원에 비해 비교적 대규모로 전력공급을 가능케 하는 효과적인 수단임은 분명하다. 또한 선진국과 신흥개발국을 망라한 활발한 도입 움직임은 그 자체로서 해상풍력발전의 효과성을 반증한다고 볼 수 있다. 다만 전력계통의 연계 문제, 인허가 절차, 주요 설비와 부품의 국산화 미흡과 맞물려 현 시점에서의 경제적 타당성은 상당히 제한적이다.

2. 정책적 시사점

1) 해상풍력의 환경성 검토

본격적인 해상풍력발전을 도입하는 우리나라의 상황에서는 먼저 해양 환경에 미치는 영향에 관한 세심한 분석이 선행되어야 한다. 이를 위해서는 먼저 기존의 환경영향과 관련된 평가제도의 보완이 요구된다. 앞서 언급한 바와 같이 조류의 이동경로 및 해양포유류에 대한 영향, 소음·진동과 관련된 해양생태계 영향과 같이 현재의 환경영향조사를 통해서 분석하기 어려운 사안에 대한 조사가 이루어질 필요가 있다. 특히 우리나라에서 해상풍력의 적지로 꼽히는 서남해안과 제주 지역의 경우는 연안의 이용이 활발하며, 관련 이해관계자의 범위도 매우 넓은 상황이다. 따라서 우리 해역의 생태적 조건이나 사회적 이용 현황 등 외국과 다른 조건을 가지고 있는 연안의 실정을 대상으로 장기적인 실증적인 조사를 통해 환경영향의 정도를 지금과 같은 도입 초기에 분석해야 한다.

배타적인 공간이용을 특징으로 하는 해상풍력의 특성상 추진하는 사업별로 개별적인 접근을 시도하기보다는 우리나라의 전체 해역을 대상으로 풍력자원의 분포, 해상운송로, 어업활동 및 보호구역 등을 파악해서 이용이 가능한 활동을 사전에 구획하는 방식으로 해양공간계획에 해상풍력발전을 추가할 필요가 있다.

2) 경제성 검토 사항

해상풍력의 개발에 있어 경제성에 영향을 미치는 주요 변수들은 설비비용을 포함한 자본비용, 운영비용과 같은 가변비용, 가동률 또는 이용률, 기타 할인율이나 자본의 조달비용 및 내구연수 등으로 구분된다. 이 가운데서 전력량 생산에 직접적으로 영향을 미치는 설비의 가동률과 이용률은

최적 입지선정단계에서 해당 지역의 풍황조사를 통해 측정된 자료와 밀접한 관련을 지닌다. 가용한 바람자원의 분포가 경제적 타당성 분석의 초기 단계에 큰 영향을 미치게 된다.

향후 국가적인 차원에서 보다 광범위한 풍력발전의 경제성을 검토하기 위해서는 발전에 따른 관련 보조금이 제외된 판매가격을 통한 경제성 재산정이 이루어질 필요가 있다. 추진하고자 하는 특정 사업의 재무적 타당성을 판단하는 경우에는 사업자 입장에서 수입과 지출을 검토하는 것이 타당하다. 그러나 국가 전체적인 차원에서 경제성을 검토하기 위해서는 보조금이나 장려금 성격의 이전지출은 제외한 후 산정하는 것이 타당하다. 이전지출을 받는 사업 추진주체의 입장에서는 이전지출이 편익에 포함되어 재무적 타당성에 큰 영향을 미칠 수 있으나 국가경제의 차원에서는 변동이 발생하지 않기 때문이다. 국내 시범사업 사례를 통해 살펴본 경제성 분석에서는 공급인증서를 통해 발전량에 비례하여 보조를 받음으로 인해서 일정 단계 이상에서는 재무적 타당성이 인정되는 것으로 도출된 바 있다. 그러나 보조금의 비중이 판매가격에서 차지하는 비율이 상당히 높기 때문에 해상풍력발전의 경우 순수한 경제적 타당성은 아직 미흡한 편이다. 또한 국내 해상풍력의 후보지 가운데서는 연안에서의 이격거리가 커질수록 계통연계에 소요되는 초기 비용이 매우 증가하는 특징이 있으므로 충분한 경제성의 확보가 어렵다는 특성도 지니고 있다. 따라서 순수하게 전력 생산의 관점에서만 접근할 경우 당분간 해상풍력의 실용화는 어려워질 수 있다는 점을 감안하여 연관 산업의 개발에 따른 부가가치 창출과 같은 직·간접적 경제효과의 확보에 주목할 필요가 있다(손충렬 외, 2010; 손충렬, 2005). 특히 육상풍력과 달리 해상풍력의 경우에는 풍력발전시스템 자체에 소요되는 투자비중이 크지 않으므로 해상풍력의 개발을 통한 시장 확대가 연관 산업을 육성하는 견인효과를 가져올 수 있음에 주목할 필요가 있다.

마지막으로 주변지역에 미치는 환경적인 영향과 추가적인 비용을 포함

한 종합적인 경제성 분석이 이루어질 필요가 있다. 미래에 발생 가능한 환경적 영향을 경제적 비용으로 산출하기 위해서는 환경가치를 화폐화할 수 있는 분석기법을 적용해야 한다. 이 경우 주변지역에 미치는 경관피해, 소음영향, 이동성 조류 및 어류에 미치는 영향에 관한 기초 조사를 토대로 소비자 선호이론에 따른 접근을 이용하여 환경영향을 화폐적 비용으로 전환하며 전체 경제적 비용에 추가하게 된다.

본격적으로 활용 가능한 신·재생에너지원 가운데서 해상풍력발전이 상대적으로 타 에너지원보다 생태적·환경적 영향이 적으면서 경제적 비용조건을 충족시킬 수 있다면 앞으로 우리나라에서도 해상풍력을 통한 에너지원의 개발이 활발히 일어날 수 있다. 그러나 아직 우리나라의 상황에서는 환경적인 영향이나 경제적 효과에 대해서 충분한 분석이 이루어졌다고 보기는 어렵기 때문에 광범한 추가 분석이 요구된다.

참 고 문 헌

<국내 문헌>

- 강금석 · 이준신 · 김지영 · 유무성, “국내 개발 조건을 반영한 해상풍력단지의 경제성 분석”, 『풍력에너지저널』, 제2권 제1호, 2011.
- 경남호 · 윤정은 · 장문석 · 장동순, “한반도해역의 해상풍력 자원 평가”, 『한국태양에너지학회지』, 제23권 제2호, 2003.
- 국무총리실 외, 『제1차 국가에너지기본계획(2008~2030)』, 2008.
- 김도형, “국내 해상풍력 타당성 검토 및 추진전략”, 『전기전자재료』, 제24권 제3호, 2011.
- 김소리나 · 오홍식 · 김병수, “해상풍력실증 연구단지 건설에 따른 물새류 분포 현황 및 영향예측”, 한국환경생태학회 2007년 학술대회, 2007.
- 김현구 · 송규봉 · 황선영 · 윤진호 · 황효정, “국가바람지도 및 지리정보시스템 기반의 해상풍력단지 입지전략 연구”, 『한국환경과학회지』, 제18권 제8호, 2009.
- 김현구 · 황효정, “국가바람지도 및 국가지리정보에 의한 국내 해상풍력단지 개발계획의 비교분석”, 『한국태양에너지학회지』, Vol. 30, No. 5. 2010.
- 박년배, 『발전 부문 재생가능 에너지 전환을 위한 장기 시나리오 분석』, 서울대학교 환경대학원 박사학위논문, 2011.
- 손충렬, “미래의 해상풍력발전 개발 및 전략”, 『유체기계저널』, 제8권 제3호, 2005.
- 손충렬 외, 『해상풍력발전』, 도서출판 아진, 2010.
- 안세웅 · 이희선, “태양광 및 풍력단지의 개발에 따른 환경적 · 사회적 문제 분석 및 대응방안”, 『환경정책연구』, 제10권 제3호, 2011.
- 에너지경제연구원, 『에너지통계연보 2010』, 2010.

에너지관리공단, 「2009년 신·재생에너지 보급통계」, 2010.

이희선·안세웅·주현수·선효성·신경희·이명진, 「재생에너지의 환경성 평가 및 환경친화적 개발 I - 태양광 및 풍력에너지를 중심으로」, 환경정책평가연구원, 2009.

지식경제부·에너지관리공단, 「2010 신·재생에너지 백서」, 2010.

지식경제부·에너지기술평가원, 「그린에너지 전략로드맵 2011 : 풍력」, 2011.

지식경제부, 「국내 해역의 중형 해상풍력발전 플랜트 타당성 조사연구」, 2011.

_____, 「제3차 신·재생에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획」, 2008.

_____, 「제5차 전력수급기본계획」, 2010.

_____, 「제3차 신·재생에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획 수립방안 연구」, 2008.

_____, “서남해안에 대규모 해상풍력단지 건설 추진”(보도자료), 2010. 11. 3.

_____, “지난 3년간 신·재생에너지 산업규모는 기업체수 2.2배, 고용인원 3.6배, 매출액 6.5배, 수출액 5.9배, 민간투자 5배 증가”(보도자료), 2011. 2. 15.

최희정·최지연·정지호·남정호, 「해양자원의 최적이용을 위한 해양공간계획 수립 연구」, 한국해양수산개발원, 2011.

황병선 외, 「최신 풍력터빈의 이해」, 도서출판 아진, 2010.

<국외 문헌>

Blanco, I. Maria, “The Economics of Wind Energy”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, 2009, pp. 1372~1382.

Camphuysen, K., Tony Fox, Mardik Leopold, Ib Krag Petersen, “Towards standardised seabirds at sea census techniques in connection with environmental impact assessments for offshore wind farms in the U. K.”,

2004.

Carstensen, J., O. D. Henriksen, J. Teilmann, “Impacts of offshore wind farm construction on harbour porpoises: acoustic monitoring of echolocation activity using porpoise detectors(T-PODs)”, *MARINE ECOLOGY PROGRESS SERIES*, Vol. 321: 295 - 308, 2006.

Desholm, Mark and Johnny Kahlert, “Avian collision risk at an offshore wind farm”, *Biology Letters*, 1, 296-298, 2005.

European Environment Agency, “Europe’s Onshore and Offshore Wind Energy Potential - An Assessment of Environmental and Economic Constraints”, EEA Technical report, No. 6, 2009.

EWEA, “The Economics of Wind Energy”, The European Wind Energy Association, 2009.

Exo, K. -M., Ommo Huppopp, and Stefan Garthe, “Birds and offshore wind farms: a hot topic in marine ecology”, *Wader Study Group Bull*, 2003, 100: 50-53.

Gill, A. B., “Offshore renewable energy: Ecological implications of generating electricity in the coastal zone”, *Journal of Applied Ecology*, Vol. 42, 2005, pp. 605~615.

Gillis, Christopher, *Offshore Windpower*, Schiffer, 2011.

Global advisor, *Global Citizen Reaction to the Fukushima Nuclear Plant Disaster*, 2011.

Haughton, J., D. Giuffre, J. Barrett. “Blowing in the Wind: Offshore Wind and the Cape Cod Economy”, White paper, Beacon Hill Institute at Suffolk University, 2003.

Michigan Great Lakes Wind Council, *Report of the Michigan Great Lakes Wind Council*, 2010.

NREL, “Energy form Offshore Wind”, National Renewable Energy Laboratory

Conference Paper, NREL/CP-500-39450, 2006.

Perkins, D. Samuel and Melanie A. Everett (Eds), *Offshore Wind Power: Challenges, Economics, and Benefits*, Nova Science Publishers Inc, New York, 2011.

Spaans, A. L., J. van der Winden, L. M. J. van den Bergh & S. Dirksen, Vogelhinder door wind turbines. Landelijk onderzoekprogramma, deel4: nachtelijke vliegbewegingen en vlieghoogtes van vogels langs de Afsluitdijk. Bureau Waardenburg report 98.015, Culemborg, 1998.

Urley, W. Martin (Eds), *Wind Power Market and Economic Trends*, Nova Science Publishers Inc, New York, 2010.

Wratten, A., S. Martin, J. Welstead, J. Martin, S. Myers, H. Davies, and G. Hobson, *The Seascape and Visual Impact Assessment Guidance for Offshore Wind Farm Developers*, Enviro Consulting and Department of Trade and Industry, 2005.

<온라인 자료>

<http://www.un.org/>

에너지기술연구원 신·재생에너지자원 데이터센터(<http://kredc.kier.re.kr>).

해상풍력발전의 환경적 · 경제적 영향 분석

2011年 12月 29日 印刷

2011年 12月 31日 發行

編輯兼 發行人	金 學 韶
發行處	韓國海洋水產開發院 서울특별시 마포구 매봉산로 45
전 화	02-2105-2700 FAX : 02-2105-2800
등 록	1984년 8월 6일 제313-1984-1호

組版 · 印刷 / 한성애드컴 02-2266-6559 정가 15,000원

판매 및 보급 : 정부간행물판매센터 Tel : 02-394-0337