

기술보고

W국외 모니터링 사례를 통한 해상풍력발전의 환경적 영향 고찰

맹준호[†] · 조범준 · 임오정 · 서재인
한국환경정책·평가연구원

A Study on the Environmental Impact of Offshore Wind Farms Through Monitoring Case in Overseas Country

Jun-Ho Maeng[†], Beom-Jun Cho, O-Joung Lim and Jane Seo

Division of Environmental Assessment, Korea Environment Institute, Seoul 122-706, Korea

요 약

해상풍력발전 단지를 개발함에 있어 전력수급과 경제성 논리에만 초점이 맞춰짐으로써 여러 가지 환경적 문제들이 발생하고 있으며, 이에 따른 지역사회 갈등이 유발되고 있는 실정이다. 특히 최근에 국내 해역의 풍황과 해양 조건 등을 중심으로 해상풍력에 대한 입지와 개발량에 대한 연구가 이루어져 왔으나, 해양환경 및 해양생태계에 미치는 영향에 대한 연구는 매우 부족하다. 유럽의 해상풍력발전 선진국에서는 개발 사업에 뒤따르는 환경 모니터링이 활발히 진행되고 있는 데 비해, 국내에서는 해상풍력을 설치하고 운영할 때에 발생할 수 있는 환경적 영향에 관한 모니터링 자료가 전무하다. 따라서 본 연구에서는 국외 해상풍력의 모니터링 사례 및 참고문헌의 사례를 분석함으로써 공사 시와 운영 시의 환경적 영향과 국내 해역에 적합한 환경영향평가 단계에서의 가이드라인을 제시하였다. 이에 따라 궁극적으로는 해상풍력개발에 따른 환경영향을 최소화하고 환경영향평가의 행정절차에 소요되는 협의기간을 단축시키는 데에 목적이 있다.

Abstract – In developing offshore wind farms, many environmental issues arise because of the concentration on supply demand and economic logic. Accordingly, community conflict is induced. Especially, recent studies regarding the capacity and location of offshore wind development have been conducted considering wind states and ocean conditions, etc. of coastal seas in Republic of Korea. Nevertheless, studies on the impact of marine environments and ecosystems are very limited so far. Environmental monitoring that follows development projects has been actively done in the offshore wind farms in many developed European countries. In contrast, there is no domestic monitoring data regarding environmental impacts caused by installing and operating offshore wind power. Therefore, the environmental impacts under construction and operation phases as well as the guidelines in the stage of environmental impact assessment suited for domestic coastal seas are well presented in this study by analyzing monitoring cases and references of overseas offshore wind farm. For this reason, this research is ultimately aimed at minimizing the environmental impact in offshore wind farm development and thus simplify administrative procedures in Korea.

Key words: Offshore Wind Farm(해상풍력발전 단지), Marine Environment(해양환경), Environmental Monitoring(환경 모니터링), Environmental Impact Assessment(환경영향평가), Guideline(가이드라인)

1. 서 론

전 세계 신재생에너지 중에서도 풍력은 신재생에너지 투자의 45%를 차지하고 있으며, 가장 경제성이 있는 에너지원으로 평가받

고 있다. 그동안 풍력개발은 육상풍력 위주로 개발되어 왔으나, 육상은 개발입지가 극히 제한되어 있고, 민원의 증가에 따라 입지확보에 어려움이 많아 최근 해상풍력으로 관심이 이동하고 있는 상황이다. 해상풍력은 육상풍력에 비해 설치 및 유지보수 비용이 많이 소요되어 현재로서는 경제성이 다소 낮지만, 해상은 대형단지를 조성하기가 용이하고 민원이 비교적 적은 이점이 있으며, 단지설계

[†]Corresponding author: jhmaeng@kei.re.kr

및 건설, 유지보수 등과 같은 관련기술의 개발로 향후 풍력발전 분야의 주축이 될 것으로 전망하고 있다(Kim *et al.*[2009]).

그러나 해상풍력발전 단지를 개발함에 있어 전력수급과 경제성 논리에만 초점이 맞춰짐에 따라 또 다른 환경적 문제들이 발생함으로써, 이로 인한 지역사회 갈등이 유발되고 있는 실정이다. 또한 풍력발전에 대해서는 현재까지 풍력 터빈 블레이드의 설계 및 기기개발 관련 연구와 육상풍력자원 평가 분야의 연구 등이 주로 이루어져왔으나, 해상풍력발전 단지의 도입으로 인한 환경영향에 대한 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다(Kim *et al.*[2012]).

최근에 국내 해역의 풍황과 해황 조건 등을 중심으로 해상풍력에 대한 입지와 개발량에 대한 연구가 이루어져 왔으나(Kim and Chung[2009]; Kim *et al.*[2009]), 해양환경 및 해양생태계에 미치는 영향에 대한 연구는 매우 부족한 상황이다. 본격적으로 해상풍력 발전을 도입하려는 우리나라의 현 상황에서는 해양환경과 해양생태계 등에 미치는 영향에 대하여 구체적인 분석이 선행되어야 한다. 해상풍력발전 단지의 건설은 사업의 특성상 해상에서 이루어지는 대규모 공사이지만, 앞서 언급한 바와 같이 해양환경과 해양생태계에 미치는 영향에 대한 정보가 부족하고 구체적인 환경영향평가 내용이 매우 미흡한 상황이다. 이러한 상황에서 해상풍력발전 추진 시 적절한 입지를 선정하고, 해양환경과 해양생태계 등에 미치는 영향을 합리적으로 진단하여 대책을 마련하는 것이야말로 국내 현실에 적합한 해양환경영향평가에 대하여 명확하게 스코핑을 해주는 방안이 될 것이다.

국내의 해상풍력발전 관련 연구는 풍력자원 분석을 위하여 풍황 관측자료의 분석연구나 풍력 관련 정책연구가 주로 수행되어 왔으며, 해상풍력발전 개발 사업 시 입지선정 및 환경영향평가 단계에서 중점검토 사항 등을 고찰한 연구도 있었다(Kim *et al.*, 2012). 그러나 본 연구는 기존 국내 연구와는 다르게 국외 해상풍력발전 사업 시 환경영향평가 내용 및 운영 중인 해상풍력 모니터링 자료를 활용하여 해양생물에 미치는 영향 등을 분석하였고, 이를 근거로 국내 현황에 적합한 환경영향평가 단계에서의 가이드라인을 제시하였다.

2. 연구내용 및 추진방법

본 연구는 미국, 영국 및 덴마크의 해상풍력발전 사업 시 환경영향평가 항목과 덴마크 Horns Rev와 Nysted 해상풍력발전 모니터링 사례를 중심으로 해양환경 및 해양생태계에 미치는 영향에 대하여 조사하였다. 조사 분야는 풍력발전기 설치에 따른 해저지형 변화와 이에 따른 해양생태계와 양식장에 미치는 영향, 기타 환경적 영향, 그리고 운영 시 터빈의 소음 및 진동으로 어장과 해양생태계에 미치는 영향, 해양생물의 이동경로, 해양생물의 개체수 변화 등을 포함하였다. 특히 덴마크의 환경 모니터링 사례는 저서생물, 어류, 해양포유류, 조류(birds) 및 경관·사회경제 등의 항목으로 나누어 영향을 분석하고 정리하였다. 이를 토대로 공사 시와 운영 시의 환경적 영향을 분석하여 국내 해역에 적합한 환경영향평가 단

계에서 연구내용에 따른 분야별-해양물리, 해양수질과 퇴적물, 해양생태계, 조류(새) 및 수중소음-현황 조사, 환경영향 예측 및 저감방안의 가이드라인을 도출하였다.

연구 추진방법은 전술된 바와 같은 내용으로 현황 파악에 따른 국내·외 문헌자료 및 해양 관련 전문기관의 전문가 포럼(1차포럼: 2012년 5월 16일 한국환경정책평가연구원, 2차포럼: 2012년 6월 7일 한국환경정책·평가연구원) 등을 통하여 국내 해역에 적합한 환경영향평가 단계에서의 가이드라인을 마련하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 국내 해상풍력발전 현황

전 세계적으로 해상풍력발전의 개발이 급부상하고 있는 상황에서 국내에서도 수심이 낮은 서남해안에 해상풍력발전 단지를 조성하여 해상풍력 핵심 기술개발 및 대규모 해상풍력단지 개발 능력을 확보하고자 하였다(Fig. 1 참고). 정부는 수출 운영경험(track record) 확보 및 기술경쟁력 확보가 시급하자 2010년 11월 ‘해상풍력 추진협의회’를 열고 해상풍력 실증단지(100 MW 규모) 조성 및 기술개발·계통연계 등을 포함한 해상풍력 추진 로드맵을 발표하였다(MKE[2010b]). 2013년까지 부안·영광 지역 해상에 100 MW급 실증단지를 조성한 후 2016년까지 900 MW, 2019년까지 1,500 MW,



Fig. 1. Offshore wind farm plan in Gunsan, Korea (Source: MKE [2010a]).

Table 1. Roadmap and overall plan for offshore wind farm development

	☐ Demonstration	☑ Test bed	☒ Application
Roadmap for 2010			
Objective	· Construct test bed · Retain track record · Retain project design technology	· Retain operation technology · Verify commercial potential	· Reduce expenses · Develop large scale projects · Commercial operation
Capacity	100MW (20×5MW)	900MW (180×5MW)	1,500MW (300×5MW)
Period	2011~2013	2014~2016	2017~2019
Finance (won)	40 billion	160 billion	563 billion (private)
Overall plan for 2011			
Objective	· Offshore demonstration · Develop core technology	· Retain track record · Develop Biz model	· Develop large scale projects · Commercial operation
Capacity	100MW	400MW	2,000MW
Period	2011~2014	2015~2016	2017~2019
Finance (won)	60 billion (public, private)	325 billion (public, private)	819 billion (private)

Source: MKE [2010b].

Table 2. Roadmap and overall plan for offshore wind farm development

Complex	Capacity (MW)	Remarks
Southwest Coast	2,500	Under investigation of wind states, prosecuting approval
Cheonnam	4,000	Under investigation of wind states, evaluating validity
Tamla	30	Construction began July, 2012
Daejung	200	First stage 84MW contract Second stage under design
Hanrim	150	Under investigation of wind states
Haengwon	60	Under complex design
Saemangeum	20	Under complex design
Total	6,960	

Source: Sung and Lee [2013].

총 2.5 GW급 해상풍력발전 단지를 조성한다는 목표이다(Table 1 참고). 하지만 이 계획은 현실성이 결여된 사업기간과 부족한 기술

력, 낮은 경제성 등으로 1년 만에 변경되어 최근에 지식경제부는 2020년까지 세계 3대 해상풍력 강국으로 도약하기 위한 「서남해 2.5GW 해상풍력 종합추진계획」을 발표하였다(MKE[2011]). 100MW급 실증단지 조성시기를 1년 늦췄고, 2단계 사업도 기존 900MW에서 400MW로 축소했다. 동 사업을 계기로 국산 해상풍력발전기 개발·인증·설치, 시공 등을 통한 운영경험(track record)을 확보함으로써 국외시장 진출 및 선점의 초석이 될 수 있을 것으로 기대하고 있다. 그 성공을 위하여 민·관 모두의 협력과 정부의 필요한 지원을 강화해 나갈 계획이다. Table 2는 현재 국내에서 계획 중인 해상풍력개발에 관한 내용이다.

3.1.1 국외 해상풍력발전 현황

국외에서도 육상풍력발전은 1990년대부터 이미 한계에 이르렀다는 지적이 나왔다. 풍력 터빈이 대형화되면서 엄청난 소음과 경관훼손 및 생태계 파괴 등의 문제가 불거지고, 주민들의 민원이 잇

Table 3. Global offshore wind capacity

(Unit: MW)						
Rank	Country	Total offshore capacity 2011	Added offshore capacity 2011	Total offshore capacity 2010	Total offshore capacity 2009	Total offshore capacity 2008
1	UK	1,524.6	183.6	1,341.0	688.0	574.0
2	Denmark	857.6	3.6	854.0	663.6	426.0
3	Netherlands	249.0	0.0	249.0	247.0	247.0
4	China	222.3	99.3	123.0	23.0	2.0
5	Germany	215.3	108.3	107.0	72.0	12.0
6	Belgium	195.0	0.0	195.0	30.0	30.0
7	Sweden	164.0	0.0	164.0	164.0	134.0
8	Finland	30.0	0.0	30.0	30.0	30.0
9	Japan	25.3	0.0	25.3	11.3	1.0
10	Ireland	25.0	0.0	25.0	25.0	25.0
11	Spain	10.0	0.0	10.0	10.0	10.0
12	Norway	2.3	0.0	2.3	2.3	0.0
13	Portugal	2.0	2.0	0.0	0.0	0.0
Total		3,522.4	396.8	3,125.6	1,966.2	1,491.0

Source: modified after WWEA [2011].

따르면서 대안으로 부상한 것이 해상풍력이다.

미국 국립재생에너지연구소(NREL[2010])에 따르면, 해상풍력발전기는 덴마크에서 1991년 최초로 설치한 이래, 2010년까지 유럽을 중심으로 약 830기가 설치된 것으로 보고되었다. 덴마크에서는 Vindeby 단지가 건설된 이후, 현재까지 대부분의 해상풍력발전 단지는 유럽을 중심으로 건설되어 왔으나, 최근에는 미국과 중국, 한국 등 아시아 국가에서도 본격적으로 해상풍력발전 시장에 합류하여 해상풍력발전 단지 개발을 활발히 추진 중이다.

세계적으로 해상풍력발전의 시장은 2008년부터 유럽을 중심으로 형성되었으며, 2011년 말까지 해상풍력발전 총 설치용량은 약 3,522MW로 알려졌다. 2010년 신규 설치용량은 397MW로 덴마크·영국·독일·포르투갈·중국 등 5개 국가에 설치되었다. Table 3은 2011년 해상풍력발전 단지를 보유하고 있는 총 13개 주요 국가를 순위별로 정리한 것이다. 그중 11개국이 유럽에 속해있으며, 대표 국가로는 영국, 덴마크, 네덜란드, 독일 등이 있다. 전문가들은 2020년까지 유럽 풍력발전의 25%를 해상풍력이 담당할 것으로 전망하고 있다. 아시아에서는 중국과 일본이 포함되어 있다.

3.2 해상풍력발전 환경영향평가 국외 사례 및 모니터링 운영 사례 조사

3.2.1 해상풍력발전 환경영향평가 국외 사례

해상풍력발전 환경영향평가를 실시한 미국, 영국, 덴마크의 해상풍력발전 사업에 관한 구체적인 조사, 예측 및 평가 실시항목은 수질·저질, 해류, 소음에 의한 동물 영향, 동물 서식환경 변화 및 해양경관에 관한 내용이었다(Table 4 참고). 각 평가분야의 조사방법, 영

향 예측, 저감대책에 대한 세부사항은 미국, 영국, 덴마크의 사례를 토대로 정리하였다.

가. 해양 수·저질에 미치는 영향

미국의 경우 수질 및 저질의 현황 조사를 위하여 기존의 문헌자료를 참고하고, 대상해역의 퇴적물 샘플링을 수행할 것을 제안한다. 공사 중 발생하는 탁도의 증가가 해양생물에 미치는 영향을 파악하기 위하여 정성적인 평가를 실시하고, 이로 인한 피해를 최소화하기 위하여 케이블의 매설공사에서 해저면의 변화 및 수질악화를 최소화하는 공법을 채택하도록 권고하였다. 또한, 우수의 배수처리와 부식으로 인한 녹물방지대책을 실시할 것을 권고하고 있다. 덴마크에서는 기존의 자료를 토대로 수리모델링을 실시하여 해저면의 굴착에서 발생하는 부유사 농도 및 조류 변화가 수질악화에 기여하는 바를 예측하도록 한다. 부유사 농도는 10 mg/L 이상이 되면 어류에 영향을 미치는 것으로 판단한다. BOD와 DO를 측정하여 수질악화정도를 평가하고, 퇴적물 중 유해 중금속 농도를 조사하여 해양생태계에 미칠 수 있는 영향을 예측하도록 한다.

나. 해류에 미치는 영향

미국의 경우 대상해역에서 수심, 수온, 해저지형, 해류의 유향, 유속 및 파고빈도를 파악하여 인공구조물의 크기 및 위치를 고려한 정성적인 평가를 실시하도록 한다. 사업부지의 선정 시 해류에 영향이 적은 지역을 선택하고, 전력 케이블을 지하에 매설하여 해류로 인한 영향을 최소화하도록 한다. 덴마크에서는 수리모델링을 실시하여 수심, 해류의 유향, 유속 및 파고빈도를 파악하고, 운영 시 조류 및 파랑의 변화에 대한 시뮬레이션을 실시하도록 한다. 또한 단지의 설계 시 조류 및 파랑의 영향을 최소화할 수 있도록 권

Table 4. Trend of offshore wind energy in developed countries

Country	Trend
Germany	<ul style="list-style-type: none"> · Initiate a test bed: 60MW Alpha Ventus offshore wind farm, 2008 · Initiate first offshore wind farm in 2010 (12×5MW) · Plan to build offshore wind farms with 40 turbines to produce 12GW of electricity by 2020
Denmark	<ul style="list-style-type: none"> · One of leading countries in global offshore wind · Site selection, feasibility study and project development under government management · Participating in development of EU Super grid · Cumulative installed capacity in 2010: 862MW
UK	<ul style="list-style-type: none"> · Plan to proceed Round 1~3 under government management (2001~2020) · Operating the largest offshore wind farm (100×3MW, since Sep. 2010) · Plan to build offshore wind farms to produce 32GW of electricity by 2020 (25% of total electricity supply) · Cumulative installed capacity in 2010: 1,341MW
France	<ul style="list-style-type: none"> · Plan to build offshore wind farms around 10 sites to produce 3GW (600 turbines)
USA	<ul style="list-style-type: none"> · Not currently operating any offshore wind farm · Plan to build offshore wind farms (estimated potential resource more than 1,000GW) · Plan to build around 54GW by 2030 · Gave permission to develop Cape Wind Project in Massachusetts, 2010 (130×3.6MW)
Japan	<ul style="list-style-type: none"> · Built 7 Hitachi turbines (2MW) near offshore Ibaraki in 2009 · Plan to operate offshore wind turbine near offshore Choushi as a part of NEDO Project · Plan to fund 2 billion yen every year to introduce offshore wind system since 2012
China	<ul style="list-style-type: none"> · First offshore wind farm in Asia (Shanghai, 102MW, 34×3MW) built in 2010 · Plan to build large offshore wind farms over four provinces including Guangdong and Jiangsu · Expected capacity by 2015: 115GW · Expected capacity by 2030: 35GW · Potential offshore wind source: 7,500GW

Source: modified after Issuequest [2011]; Kwon [2012].

고하고 있다.

다. 소음이 해양생태계에 미치는 영향

미국에서는 대상 사업지구에서의 수중소음을 먼저 파악하고, 공사 중 항타와 선박에서 발생하는 소음에 배경소음을 합성하여 모델링을 실시하도록 권고하고 있다. 소음이 해양생태계에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 미국 해양어업국에서 제시한 기준을 넘기지 않아야 한다. 해양포유류와 바다거북의 경우 소음의 영향을 피하기 위한 기준은 180 dB이다. 또한 가능한 소음 피해를 줄이기 위해 공사영역으로부터 반경 500 m 이내에 해양포유류가 없는 것을 확인한 뒤 항타공사를 개시해야 할 것이다. 영국에서는 선박에서 해양포유류의 현황을 직접 관찰하거나 울음소리를 확인하는 방법으로 연간 조사를 실시한다. 어류와 해양포유류가 회유행동을 나타내는 소음 기준으로 90 dB, 일시적인 청각장애가 나타나는 소음 기준으로 140 dB을 참조하여 공사 시 영향을 고려하도록 한다. 가능한 소음 피해를 줄이기 위해 공사영역으로부터 반경 1 km 이내에 해양포유류가 없는 것을 확인해야 하며, 공사의 개시 전에는 인위적인 소음을 발생시켜 해양포유류 및 어류가 회피할 수 있도록 한다. 덴마크에서는 해양포유류의 가청역치 및 일시적인 청각장애가 나타나는 소음 기준을 포함하여, 공사 시 예상되는 소음으로부터 청각장애가 나타나는 범위를 계산하고, 영향범위 내에서 해양포유류의 서식유무를 확인한다. 또한 공사의 개시 전에는 경고음을 발생시켜 해양포유류 및 어류가 회피할 수 있도록 한다(Lucke *et al.*[2006]).

라. 조류(새)에 미치는 영향

미국과 덴마크에서는 비행기나 선박에서 조류의 행동 양상을 관측하거나 레이더를 이용하여 조류의 거동을 파악한다. 해상풍력발전 단지의 영향이 미칠 것으로 판단되는 지역과 비교 지역에서 이동장애, 교란 및 충돌의 여부를 정성적인 방법으로 평가한다. 미국에서는 발전단지가 조류에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 풍력발전기의 기초부가 조류의 휴식공간으로 이용되지 않도록 펜스를 설치하고, 조명을 이용하여 조류를 단지 밖으로 유도할 것을 대책으로 제시하였다. 영국에서는 사업지구의 인근 해역에 관측지점을

설치하여 정점관측법으로 연간 조사를 실시한다. 일주 혹은 계절에 따라 조류의 이동장애 정도를 파악하도록 한다. 단지의 영향을 최소화하기 위하여 개발 부지를 선정할 때 조류의 섭이장이나 고이용역은 피할 것을 권고하고 있다(Exo *et al.*[2003]).

마. 경관에 미치는 영향

영국과 덴마크에서는 해상풍력발전 단지가 주변 경관에 미치는 영향을 파악하기 위하여 역사적, 문화적 풍치지구에 조망점을 설정하여(미국 12개소, 영국 11개소, 덴마크 7개소) 포토몽타주 기법으로 경관 영향을 예측할 것을 권고하고 있다. 또한 미국에서는 경관에 부정적인 영향을 최소화하기 위하여 발전설비의 기수와 배열을 적절히 설정할 것과 눈에 잘 띄지 않는 색감의 도료를 사용할 것을 권고한다(Wratten *et al.*[2005]).

3.2.2 덴마크의 모니터링 운영 사례 조사

덴마크 Horns Rev와 Nysted 해상풍력 단지에서 2001년부터 2006년까지 6년간 실시한 환경 모니터링 결과를 정리하였다. 환경



Fig. 2. Location of Horns Rev and Nysted offshore wind farms in Denmark.

Table 5. Selection of environmental impact assessment contents for offshore wind farm

Assessment contents		No. of selected project	
Installation process	Air quality	2 (USA, Denmark)	
	Onshore noise ¹⁾	2 (USA, Denmark)	
	Water quality, turbidity	2 (USA, Denmark)	
	Sediment quality	2 (USA, UK)	
	Waste	1 (Denmark)	
	Fauna and flora (marine mammal, bird, fish, benthos) including noise effect	3 (USA, UK, Denmark)	
	Landscape	2 (USA, Denmark)	
	Travel, recreational site	2 (USA, Denmark)	
	Operational process	Onshore noise ¹⁾	2 (USA, Denmark)
		Water quality, turbidity	2 (USA, Denmark)
Ocean current		2 (USA, Denmark)	
Fauna and flora (marine mammal, bird, fish, benthos) including noise effect		3 (USA, UK, Denmark)	
Landscape		3 (USA, UK, Denmark)	
Travel, recreational site		2 (USA, Denmark)	

¹⁾Onshore noise stands for the noise impact on human

Table 6. Outlines of offshore wind farm in Horns Rev and Nysted

Offshore Wind Farm	Total Capacity (MW)	Depth (m)	Distance (km)	Area (km ²)	Foundation	Construction Start Date	Operation Start Date
Horns Rev	160 (2MW×80)	6~14	14~20	24	Monopile	March, 2002	July, 2003
Nysted	165.6 (2.3MW×72)	6~9.5	10	28	Gravity	June, 2002	Dec., 2003

모니터링의 목적은 생태계를 비롯한 환경의 훼손, 대상 해역의 생태적 약점, 해역의 적합성을 파악하여, 향후 해상풍력발전 단지의 대규모화에서 나타날 수 있는 환경영향을 예측하고 환경현황에 대한 다각적인 영향의 중요성을 인지하는 데 있다. 모니터링은 단지의 건설로부터 직접적으로 영향을 받을 가능성이 있는 저서생물, 어류, 해양포유류 및 조류에 대하여 수행하였다.

가. 덴마크 해상풍력발전 단지 개요

Horns Rev 해상풍력발전 단지는 덴마크 남서부의 북해에 있는 암초의 남쪽에 조성되어 있으며, Nysted 해상풍력발전 단지는 덴마크 남동부의 발트해에 있는 Roedsand 환초 남부에 위치하고 있다. Nysted 해상풍력발전 단지 북측해역 일대는 람사르 등록 습지로 지정되었으며, 유럽연합에서 지정한 조류보호구역이다.

나. 환경 모니터링 조사개요

해상풍력발전 단지 해역의 환경에 대한 상세한 조사는 건설 전·중·후로 나뉘어 실시되었다. 1999~2001년 3년간 조사는 환경영향평가가 조사 또는 환경 모니터링 계획의 기초조사로 실시되었으며, 2001~2006년 6년간 환경 모니터링 계획은 5개의 항목을 초점으로 단지 건설 전·중·후를 비교하는 방법(BACI Method: Before After Control Impact)으로 실시되었다.

(1) 저서생물: 어류의 먹이로 이용되는 관점으로 해상풍력발전의 기초구조물 건설로 인하여 출현하는 표재저서생물에 초점을 맞추어 연구

(2) 어류: 해상풍력발전 단지 주변의 어류 분포와 해저 케이블 매설로 인한 전자기장의 영향에 관한 연구

(3) 해산포유류: 해상풍력발전 단지 주변의 쥐돌고래와 바다표범류의 행동에 관한 연구

(4) 조류: 조류 충돌 모델링과 모니터링을 포함한 조류 생태에 관한 연구

(5) 인간의 의식: 해상풍력발전 단지 시설에 대한 인간의 의식에 관한 사회적·환경경제적 연구

다. 해양동·식물 조사결과

(1) 저서생물

해상풍력발전 단지의 건설에 따른 서식환경의 중요한 변화는 사질의 해저에 기초 구조물을 설치하는 데서 기인한다. Horns Rev에서는 구조물의 설치 후 기존의 내재저서생물 군집에서 표재저서생물 군집으로 종조성의 변화가 나타났으며, 출현 종수가 증가하였다. 발전단지의 건설 후에 Horns Rev에서는 불가사리류가 우점한 반면 Nysted에서는 담치류가 증가하는 동시에 천적인 불가사리와 계

Table 7. (a) Programmes carried out at Horns Rev offshore wind farm

Performed contents	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Visualisation and socioeconomic investigations	●	●			●	●		
Hydrography	●							
Benthid fauna and flora in the farm area	●	●	●		●	●	●	
Fish in the farm area	●			●				
Fish, sand eel				●		●		
Monitoring of harbour porpoises	●	●	●	●	●	●	●	●
Monitoring of seals	●			●	●	●	●	
Monitoring of birds	●	●	●	●	●	●	●	
Development of new habitats					●	●	●	

(b) Programmes carried out at Nysted offshore wind farm

Performed contents	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Visualization and socioeconomic investigations	●	●			●	●		
Hydrography and coastal morphology	●	●		●	●	●		
Benthic fauna and flora along 132kV cable	●	●	●	●	●	●		
Benthic fauna and flora in the farm area	●		●				●	
Fish in the farm area	●	●						
Electromagnetic fields and possible effect on fish			●	●	●	●		
Monitoring of harbour porpoises			●	●	●	●	●	
Monitoring of seals	●			●	●	●	●	
Monitoring of birds	●	●	●	●	●	●	●	●
Development of new habitats					●	●	●	

류가 감소하는 것으로 나타났다. 특히 기초 구조물에서는 담치류가 현저히 증가하여, 생물량이 기존에 비해 50~150배 증가하였다. 해상풍력발전 단지 기초 부분의 면적에서 저서생물의 서식처가 유실되었으나 총 점유면적은 Horns Rev에서 약 50,000 m², Nysted에서 45,000 m²으로 시설 전체면적의 0.2%에 그쳐 그 영향은 미미한 것으로 보인다(DEA[2006]).

(2) 어류

해상풍력발전 단지의 건설이 어류에 미치는 영향은 공사기간이 짧고 소음·진동으로 인한 영향은 미미할 것으로 판단하여 조사에서 배제되었다. 어종과 서식량에 대한 기초설비의 영향, 해저 케이블의 전자기장 영향에 중점을 두어 조사하였다. 어탐기를 이용하여 분석한 결과 Horns Rev와 Nysted 발전단지 내·외측의 서식밀도와 생물량은 뚜렷한 차이를 보이지 않았으나 Nysted 발전 단지내에서 야간의 어류 분포밀도가 주간에 비하여 높은 것으로 나타났다. 하지만 대상해역은 야간에 특히 유속이 약한 것으로 알려져 이를 선호하는 종의 이동이 있는 것으로 판단된다. 낚치과 어류는 전자기장이 약할 것으로 예상되는 약풍시기에만 케이블 영역을 횡단하는 것으로 나타나 해저 케이블의 영향을 추측할 수 있었다(Gill[2005]).

(3) 해양포유류

조사해역은 모두 바다표범류와 돌고래류의 섭이 해역으로 알려져 있으며, Nysted 단지의 인접 해역은 회색바다표범의 번식지이다. 비행기와 선박을 이용하여 바다표범류를 관측한 결과 Horns Rev에서는 행동변화가 감지되지 않았으나, Nysted 해역에 서식하고 있던 바다표범의 개체수는 단지의 건설 중에 감소한 것으로 관찰되었다. 선상 목시조사와 어탐기를 이용하여 돌고래류를 관측한 결과 Horns Rev에 서식하고 있던 돌고래의 일부만 감소하고 공사가 완료된 후 단지의 운영 시에는 복귀하는 것으로 나타났다. 하지만 Nysted에서는 돌고래의 서식밀도가 2년간 감소되어 그 영향이

비교적 큰 것으로 판단되었다. 그 원인으로는 기초공법의 차이, 기존 서식밀도의 차이 등이 있으며, 지리적으로 폐쇄된 환경에 위치한 Nysted 해역이 발전기의 운영 시 소음을 증폭시킨 것으로 추측된다.

(4) 조류(새)

조류의 비행경로에 관한 조사는 주로 레이더 관측, 선박과 비행기를 이용한 목시 관측을 통해 이루어졌다. 일반적으로 조류는 해상풍력발전 단지를 우회하여 비행하는 것으로 알려져 있다. Horns Rev에서는 71~86%의 조류가 단지로부터 1.5~2.0 km 되는 곳까지 접근하면 분산하여 단지로부터 5 km 정도 이격된 곳으로 비행하는 것으로 나타났다(Dong Energy[2006]). Nysted에서도 조류는 단지로부터 1.5~5.0 km 되는 곳까지 접근하면 비행경로를 변경하여 단지로부터 멀리 떨어져 비행하는 양상이 확인되었으며, 단지의 건설 후 사업지구의 공간 이용률은 78% 감소하는 것으로 나타났다. 단지를 우회하여 서식밀도가 현저히 감소하는 경향을 보인 종으로는 Horns Rev에서는 아비, Nysted에서는 바다꿩이 있었으며, 흰뺨기러기는 두 단지에서 모두 주목할만한 서식밀도의 변화를 보이지 않았다.

라. 결론

국외 해상풍력발전 단지의 환경 모니터링 사례를 비교 분석한 결과 Horns Rev와 Nysted 해상풍력발전 단지는 공사 시 및 운영 시에서도 환경에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 보고되었다. 기초시설과 그 주변 세굴방지 사석공사로 인하여 새로운 서식기반의 출현으로 저서생물의 생물량과 다양성이 증가하였다. 이러한 먹이생물의 증가로 인하여 어패류 자원의 변화가 나타날 것으로 예상되면, 모니터링 조사는 건설 후 충분한 시간에 걸쳐서 이루어지지 않았기 때문에 이러한 현상을 명확하게 파악하고 있지 않았다. 해양포유류의 바다표범류는 공사 중 소음에 의한 일시적인 영향(도피)을 제외하

Table 8. Main results of the environmental monitoring programme of the Horns Rev and Nysted offshore wind farms

Main contents	Horns Rev offshore wind farm	Nysted offshore wind farm
Fauna and vegetation	· The artificial effects from the wind turbine foundations and scour protections are changing the benthic communities to hard bottom communities with increased abundance of species and biomass	· Monocultures of common mussels have developed at the turbines structures, due to low salinity and a lack of predators
Fish	· Introduction of new artificial habitats with positive effects on fish communities after full development of artificial reef communities · No linkage between the strength of the electromagnetic field and the migration of selected fish species	
Marine mammals	· Seals were only affected by pile driving operations. No general change in the behaviour of seals at sea or on land could be linked to the construction or operation of the wind farm · The harbour porpoise population decreased slightly during construction, but increased again during operation	· The harbour porpoise population decreased significantly during construction and only slight recovery was observed after two years of operation
Birds	· Birds generally show avoidance responses to the wind farm. Some species are displaced from former feeding areas · The collision risk with turbines is low · Effects on overall bird populations are negligible	
Attitudes	· More than 80% of the respondents from the local areas were “positive” or “very positive” towards the wind farms · The prevailing perception is that the impact on birds and marine life is neutral · Almost two birds of the respondents stated that they found the wind farm effect on the landscape either “neutral” or even “positive” · More than 40% stated that they preferred future wind farms to be moved out of sight · There’s significant willingness to pay to have wind farms located at distances where the visual intrusion is fairly small, ie up to 18 km from the shore. At Horns Rev there is no extra willingness to pay to have wind farms moved out of sight from 18 to 50 km from the shore	

고, 해상풍력발전 단지 건설에 의한 영향은 미미하였지만, 쥐돌고래는 Horns Rev와 Nysted에서의 영향 정도는 서로 상이하였으며, Nysted에서는 가동 후 2년간 감소하였다. 그 이유는 기초공법이나 서식환경의 차이로 볼 수 있지만, 명확한 결론을 제시하고 있지는 않다.

3.3 환경적 영향 고찰

3.3.1 공사 시 및 운영 시 환경적 영향

해상풍력발전 단지 공사 시 및 운영 시 환경적 영향에 대하여 현재 운영 중인 국외의 사례를 통해 살펴보았다. 그 결과, 공사 시의 주요 환경영향으로는 항타로 인하여 파일기초 구조물 설치와 송전 케이블 지중매설에 따른 해저지형 변화 그리고 해저 퇴적물의 채부유로 인한 부유사 확산영향인 것으로 파악되었다. 운영 시에는 풍력발전기의 수중소음·진동에 따른 해양생물 영향, 해저케이블 주변의 전자기장, 조류(새)의 영향 그리고 해양경관의 영향 등이 주요 환경영향으로 파악되었다.

검토항목별로 보다 상세히 살펴보면, 첫째, 공사 시에 해상풍력발전기 기초구조물 설치공사는 해저면 굴착 및 지지를 위한 앵커 설치 등으로 해저면의 지형을 변형시키거나 저서생태계에 영향을 미쳐 서식환경변화를 일으킬 것으로 예상되며, 매몰이나 준설이 직접 일어나지 않는 인근 해역까지도 부유사가 확산되어 해양생태계에 영향을 줄 것으로 예상된다. 송전 케이블 매설은 해저면 굴착 후 송전선로를 설치하고 굴착도를 메우는 형식과 굴착 후 송전선로의 표면을 쇄석으로 피복하는 형식이 있을 수 있는데 모두 해저면 굴착이 수반되므로 부유사 발생 및 해저지형 변화가 불가피할 것으로 판단된다.

둘째, 해상풍력발전은 육상과 달리 사람들의 시각을 교란할 기회가 상대적으로 적다. 다만 연안에서 바다를 볼 때 해상풍력발전 단지가 들어선 해양경관은 영향을 받을 수 있고, 이에 대해 몇몇 유럽 국가에서는 우려를 표명하였다. 새로운 단지가 해상에 들어오면 해안에서의 거리나 터빈의 개수, 풍력발전 시설에서 밝히는 항로 유도등에 따라 해양경관에 영향을 미친다. 그중 시각적으로는 해안에서 풍력발전 단지까지의 거리가 가장 중요한 요인이다. 그러나 이 역시 항로 유도등의 점멸방식이나 날개에 따라 차이가 있다. 영국에서는 무역·산업부(DTI: Department of Trade and Industry)의 주관으로 시작한 연구에서 해양경관에 미치는 영향거리의 임계값을 Table 9와 같이 제시하였다(Wratten *et al.*[2005]). 특히 해양경관은 연안에서의 이격거리 등과 연관시켜 환경영향검토가 전제되어야 할 것이다.

셋째, 풍력발전 시설의 풍력 터빈이나 날개에 의해 레이더의 탐

지능력이 떨어지게 된다. 특히 회전하는 날개는 고정된 구조물보다 전자기파를 교란하는 효과가 크다. 따라서 레이더 장비에 대한 교란에 관해서는 우선 레이더에 교란을 주지 않는 공간을 확보하는 것이 필요하다. 또다른 교란은 풍력발전기의 회전하는 날개에서 나온다. 여러 대의 터빈에서 날개가 각자 회전하다 보면 그 조합이 마치 레이더상에서는 미확인 비행체로 인식될 수 있어 인근의 다른 항공기에 항로변경 등 잘못된 조치를 취하게 할 수도 있다. 특히 사업대상지 해역 주변에 군이용시설 또는 공방시설 유무를 파악하여 이러한 시설물에 영향을 미치는지 검토가 필요할 것으로 판단된다.

넷째, 풍력발전 시설에 적용되는 방오 도료는 시설물 주변의 해역에 있는 생물은 물론, 해류를 따라 흘러내려가면서 넓은 영역에 있는 생물에게 악영향을 줄 수 있다. 방오 도료뿐만 아니라 풍력발전 시설에 사용되는 각종 윤활유나 연료, 냉각제 등도 누출되어 해양환경에 유입되는 경우에는 생물학적인 영향을 줄 수 있으므로 이에 대한 현실적인 관리대책이 필요할 것이다(Shin and Yook[2011]).

다섯째, 해상풍력발전 단지의 운영 시 생산된 전기는 해저 케이블을 통해 육상으로 전송되는 과정에서 전력 케이블 주변에 전자기장을 형성한다. Gill *et al.*[2005]에 따르면 낚치와 어류는 전기와 자기장에 민감한 어종으로 보고되었다. 그렇지만 해저 케이블 매설 해역 주변 어류의 행동과 회유변화를 단순하게 전자기장의 영향으로 나타내기에는 곤란하다. 따라서 현재까지는 어류에 대해 장기간에 누적된 영향이나 섭이활동 및 회유에 전자기장이 미치는 영향에 관한 구체적인 연구결과는 전무하다고 보고 있다.

여섯째, 해상에 위치한 풍력발전 단지는 태풍과 높은 파도에 노출되어 풍력발전 설비의 염해가 우려된다. 이에 대해서는 기초와 타워의 설계 강도를 높이는 방식으로 대처하고 있다.

일곱째, 자연지형이나 인공구조물에 의하여 나타나는 그림자는 일조장에 대표되는 물리적 영향(shadow casting)과 블레이드 회전으로 인한 섬광(strobe) 효과에 따른 심리적 영향(shadow flicker)으로 구분된다. 풍력발전기에 의한 그림자는 로터와 타워에 의한 영향은 작고 블레이드 회전으로 인한 그림자 영향이 크기 때문에 심리적으로 문제시되고 있다. 일본 아키타 현에서 어획량이 전년과 비교하여 30% 감소한 원인으로 풍력발전기(600kW×24기) 설치에 따른 심리적 영향(아침에 풍력발전기의 그림자가 연안으로 1~2 km 드리워짐)을 조사하였다. 그러나 어획량 감소와 심리적 영향의 인과관계를 규명하지 못하였으며, 현재 심리적 영향으로 인한 해양생태계 영향은 거의 알려진 것이 없다.

여덟째, 해상풍력발전의 급속한 팽창은 충돌로 인한 새들의 죽음, 새들의 이동장애, 그리고 장기적인 서식지 손실 등의 영향을 준다는 점에서 많은 환경적인 관심을 불러 모으고 있다. 해상풍력발전은 큰 회전날개 지름과 높은 타워 형태로 되어 있어, 새와 터빈 날개의 충돌을 증가시킨다. 풍력발전단지 지역에서 보호종의 사망률은 특히 고려해야 할 대상이다(Sun *et al.*[2012]). 흔히 풍력발전 시설 운영 시 가장 우려하는 문제는 발전시설의 날개에 새 떼가 부딪히는 경우이다. 대부분의 해양성 조류는 100 m 이하의 고도에서 비행하나 해양성 조류의 종별로 선호하는 비행고도가 달라 충돌가

Table 9. Critical impact on ocean landscape

Distance	Impact on landscape
< 13 km	Major visual impact
13~24 km	Typical visual impact
> 24 km	Seldom visual impact

Source: Wratten *et al.* [2005].

능성은 각기 다르다(Exo *et al.*[2003]). 일반적으로 새들이 풍력발전 시설이나 날개에 충돌하는 경우는 달이 없는 야간이나 안개, 비, 강력한 바람 등으로 비행환경이 좋지 못한 경우에 주로 발생한다. 다만 날씨가 좋을 때는 풍력발전 단지 내를 관통하던 새들도 악조건 하에서는 비행고도를 조정하거나 단지 외곽으로 우회하는 것이 관찰되어 일반적인 결론을 내리기 힘든 상황이다(Spaans *et al.*[1998]).

전술한 바와 같이, 환경적 평가에 대하여 부정적인 영향만 있는 것이 아니다. 오히려 풍력발전 시설이 바다에 들어서면 기초공과 같은 시설물은 해양 생물에게 새로운 서식처를 제공하는 기능도 할 수 있다. 유럽 풍력에너지 협회(EWEA[2009])에 따르면, 아직까지 풍력발전 시설의 기초공이 어초와 같이 생물을 모이게 하는 효과가 있다고 보기는 어렵다고 한다. 다만 덴마크의 Horns Rev 해상 풍력발전 단지에서는 일부 어종이지만, 까나리(sand eel)와 같은 어종은 풍력발전 단지 안에서는 다른 해역에 비해 3배 이상 수가 증가한 반면, 풍력발전 단지 외곽에서는 20% 정도 적은 것으로 나타난 것으로 보고되었다.

3.3.2 수중소음 및 진동에 의한 영향

수중소음과 진동은 해상풍력발전 단지 구성에 따른 해양구조물 공사 시 및 운영 시에 해양생물에 영향을 미치는 인자이다. 일반적으로 해상풍력발전기를 건설하기 위한 단계에서 다양한 소음원이 발생하고 있으며, 그중에서 충격소음의 특성으로 인해 항타 작업에 따른 소음영향이 중요하게 다루어지고 있다. 충격소음은 항타기와 해저지면의 충돌에서 주로 발생한다. 여기서 발생하는 충격에너지는 수중으로 직접 전파되기도 하고 지반의 진동을 야기하여 그에 따른 소음을 발생시킨다. 또한 해상의 표면이나 해저의 지면에 의한 반사소음과 직접소음 간 간섭효과로 인해 복잡한 소음전파 양상을 보여준다(Fig. 3 참조).

이러한 수중소음이 건설 시에는 Monopile 타설 등 기초 설비공사로 인한 수중소음 및 진동이 해양생물에 미치는 영향이 있다. 대부분의 해양포유류는 의사소통, 비행, 수렵 그리고 포식자 탐지에

필요한 활동을 위해 어느 정도의 청력에 의존하기 때문에 인위적인 수중소음은 해양포유류에게 악영향을 준다(Sun *et al.*[2012]). 어류 등 해양생물은 수중에서 발생하는 인위적인 소음의 크기가 배경소음 보다 높게 되면 도피반응 또는 손상을 입게 되며, 특히 부레가 있는 어류는 충격소음에 매우 약하다(Yoon *et al.*[2006]). 수중소음으로 인해 발생하는 이러한 해양생물의 물리적 및 행동적 반응패턴을 살펴보면 다음과 같다(AMEC[2012]).

- (1) 행동적 반응: 먹이, 이동, 호흡패턴 등의 방해, 소리의 중단, 서식지로부터의 이동 등을 포함한 행동적 이상 반응
- (2) 차폐효과: 배경소음의 증가로 인해 해양생물 상호간 통신능력의 감소
- (3) 일시적 한계 이동: 외부소음에 의한 청감능력의 일시적 감소
- (4) 영구적 한계 이동: 외부소음의 지속적인 노출에 따른 청감기관 손상으로 인한 청감능력의 감소
- (5) 비청각 생리적 효과: 외부소음의 노출이나 행동상 변화 또는 부레 등과 같은 비청각 생리기관에 대한 영향

해상풍력발전이 운영되는 경우에 풍력발전기 로터 블레이드의 회전, 기어박스 등의 원인으로 인해 타워 부분의 진동을 발생시키고, 이러한 진동이 수중으로 전달되어 수중소음을 일으킨다(Betke *et al.*[2004]; Fig. 4). 해상풍력발전 시설의 운영 시 수중소음 및 진동 전달방식은 공중전달, 수중전달 및 지중전달이며, 음압의 세기는 풍속, 발전기 출력 등에 기인한다. 수중소음은 공중에서의 블레이드 회전소음에 의한 것보다는 발전기, 기어박스, 변압기의 냉각장치 등 기계설비에서 기인한 소음으로 타워 진동을 통하여 수중으로 전달된다(Nedwell and Howell[2004]).

한편, 독일 연방환경부(BMU)에서는 북해와 발트해에 건설된 2개의 풍력발전 단지에서 건설과정 중에 발생한 소음을 측정하였다. 북해에 있는 시설에서는 중심 구조물을 설치할 때 발생한 소음이

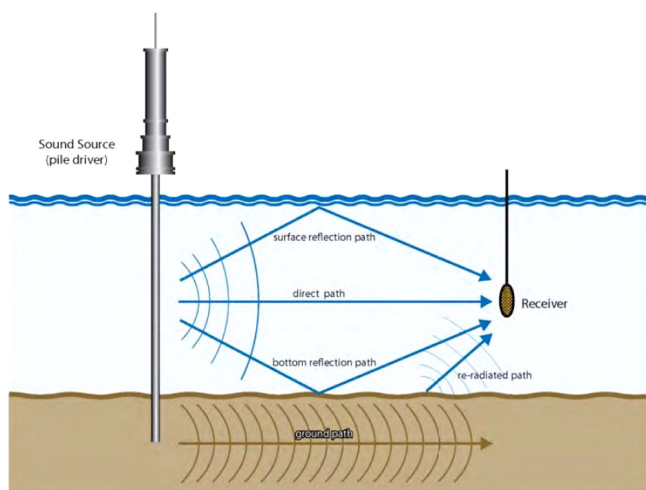


Fig. 3. Propagation of underwater piling noise (Source: CDT[2009]).

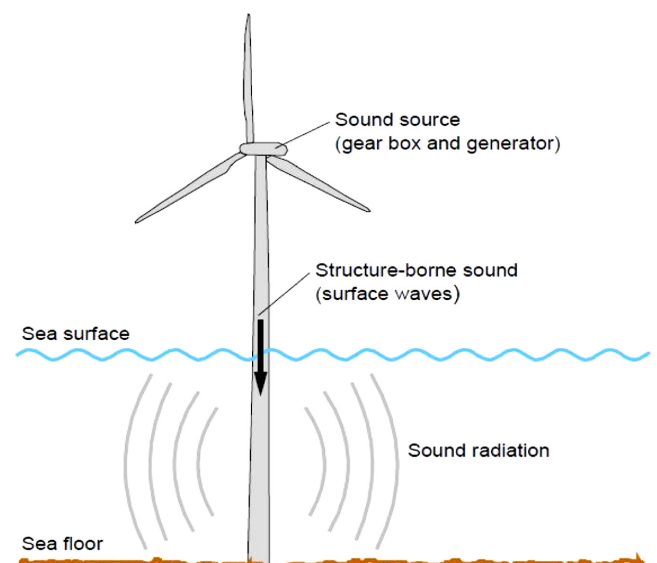


Fig. 4. Mechanism of underwater noise generation by offshore wind turbine (Source: Betke *et al.*[2004]).

Table 10. Ranges for significant avoidance reaction of marine species

Species	Distance (m)	Species	Distance (m)
Salmon	1,400	Bottlenose	4,600
Cod	5,500	Harbour porpoise	1,400
Dab	100	Harbour seal	2,000

Source: Nedwell and Howell (2004).

400 m 떨어진 곳에서 193 dB에 달했고, 발트해에서는 300 m 떨어진 곳에서 196 dB에 달하는 엄청난 소음이 발생했다.

Gill[2005]에 따르면, 기초공 단계에서는 최대 260 dB, 전력 케이블 매설과정에서는 178 dB의 소음이 발생한다. 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 알려지지 않았다(Shin and Yook[2011]). 다만 Nedwell and Howell[2004]이 보고한 바에 따르면, 생물 종별로 회피 예상거리는 다소 차이가 있는 것으로 알려졌다(Table 10 참고).

수중소음이나 진동은 부유생태계보다 해양포유류, 어류 및 저서생물에 더 큰 영향을 미친다. 해양포유류와 어류는 음압의 증가로 영향권으로부터 회피하여 서식처의 이동이 가능하지만, 저서생물은 이동능력이 제한되어 소음·진동에 대한 영향을 더 크게 받을 수 있다.

해상풍력발전기에 의한 수중소음 레벨이 잔점박이물범과 회색바다표범의 주파수별 청각능력을 초과하는 경우에는 다른 지역으로 이동하는 결과를 초래할 수 있다. 이외에 국외 연구사례의 결과들을 검토해 본 결과, 해상풍력발전기에 의한 수중소음이 포유류 등을 포함한 해양생물에 미치는 영향에 대해 다양한 의견(Lucke et al.[2006])이 있으나, 이와 관련한 지속적인 연구가 필요하다는 공

통된 인식을 가지고 있다. 또한 해상풍력발전기의 효율을 증가시키기 위해 5 MW 이상의 대형 풍력발전기가 운영될 경우, 이에 따른 수중소음으로 해양생물에 미치는 영향은 중요성이 더욱 높아질 것으로 보고 있다.

3.3 국내에 적합한 환경영향평가 가이드라인 도출

해상풍력발전 단지는 대규모의 공사가 수반되며 막대한 재원이 투입된다. 해상풍력발전 단지가 에너지 생산을 위해 운영에 들어가면 수십 년 동안 주변 해양환경 및 해양생태계, 인간의 해상활동 등에 영향을 미치게 된다. 이런 이유로 해상풍력발전 단지 조성 전에 주변 해양환경 및 해양 동·식물상에 미칠 수 있는 영향을 최소화하는 노력이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 해상풍력발전 단지 조성에 따른 국외의 환경 모니터링 사례를 토대로 환경영향평가 가이드라인을 도출하고자 하였다.

3.3.1 현황 조사

해상풍력발전사업에 따른 환경적 영향을 파악하기 위하여 현황 조사, 영향 예측 및 저감방안을 다음과 같이 수립하여 환경영향평가 단계에서의 가이드라인을 도출하였다. 본 가이드라인은 해상풍력발전 단지의 건설 및 운영으로 인하여 인근 해양물리 환경에 미치는 영향의 과학적·객관적·정량적 평가에 기반을 두어 제시하였다. 또한 주변 개발 사업 및 기후변화를 고려한 누적평가, 최악의 시나리오에 근거한 현황 조사(항목, 범위 선정 등) 및 영향평가를 실시하여 기존의 환경영향평가 작성규정과 차별화를 두고자 하였다.

가. 해양물리 및 해저지형 분야

해양물리 분야의 현황 조사는 조석조화상수와 비조화상수를 산출할 수 있는 해수위 관측과 해역의 조류 및 유동 특성을 파악할

Table 11. Investigation guidelines for marine physics

Item	Method	Result
Sea level	· Use pressure type or ultrasonic tide gauge · Measure at least 1 point over farm · Measure 2~4 points to produce boundary data for modeling	· Display graphs including tidal harmonic constants, non-harmonic constants · Display original data, time series floor plan including both tidal and non-tidal components
	· Select reliable global model to produce boundary data in case of observation difficulties · Measure every 10 minutes over 30 days at minimum · Measure over 2 month in case of high fluctuation as in summer	· Compare with nearby tidal data and analyze the difference (including yearly revision) · Analyze any anomalous and extraordinary data
Ocean and tidal current	· Use ultrasonic or rotor current meter · Measure at least 3 points over farm and 3 layers over water column · Measure every 10 minutes over 15~30 days - High tidal sea: more than 15 days - Low tidal sea: more than 30 days · 4-season observation	· Display original data for every water column, maximum flux, mean flux, harmonic constant, and tidal residual current · Statistical analysis on water column (flux level, appearance ratio for flow direction) · Display vector image to spatially understand the dimension and direction of tidal residual flow · Analyze any anomalous and extraordinary data
	· Analyze trajectory using coordinate buoy or GPS-built buoy · Measure at least 3 point over about 13 hours · Calculate dispersion area every hour at least 3 buoys in each point · 4-season observation	· Display Course map, hourly velocity, and hourly direction · Compute horizontal diffusion parameter
Wave	· Install wave-height meter underwater to observe wave direction every hour · Measure at least 2 points inside and outside farm · Measure every season over 30 days	· Analyze time serial characteristics of wave height, direction, and cycle · Display Appearance ratio for wave height to direction to cycle level · Scrutinize the timing of high wave

수 있는 해·조류 관측, 오염물질의 확산을 간접적으로 예측하는데 지침이 되는 부표추적, 구조물로 인한 주변 해안의 침식·퇴적의 영향을 예측하는데 지침이 되는 파랑의 관측 등이 있다. 또한 퇴적물과 부유사의 농도 분포를 파악하기 위하여 표층퇴적물과 부유사 조사를 실시한다. 각 항목별 조사 방법과 결과의 제시 방법은 Table 11에 나타내었다.

나. 해양수질 및 퇴적물 분야

해양수질과 퇴적물의 현황 조사는 해양모델링을 통해 해수유동 변화, 부유사 확산, 오염물질 확산에 대한 예측을 실시한 결과를 바탕으로 조사범위를 결정한다. 조사 정점은 대상 사업의 시행으로 인해 해양환경에 영향이 미칠 것으로 예상되는 해역과 비교를 위해 영향이 미치지 않을 것으로 예상되는 해역(대조구)을 모두 포함하도록 한다. 조사 정점의 수는 일률적으로 결정하기 어려우므로 사업의 규모를 고려하여 정한다. 한 지점이 나타내는 해양수질의 대표성과 발전기간의 간격을 고려하여 가급적 발전기당 1지점에 대한 조사를 실시하도록 권고한다. 해양수질은 확산에 의해 인접한 지역에서는 균일하게 유지되는 성질이 있어 주변의 농도를 추정하는 것이 가능하지만 퇴적물은 인접한 지점 간에 다른 성질을 가지기도 한다. 그러므로 한 정점의 농도가 갖는 대표성이 수질이 비해 낮고 불연속적인 분포를 갖는다. 또한 저질의 성질, 상태 및 농도는 연직 방향으로도 차이를 나타내기 때문에 일반적으로 해양수질과 같은 지점을 조사 정점으로 선정하되, 저질의 특성을 인지하여 정점을 선정해야 할 것이다. 각 항목별 조사방법과 결과의 제시 방법은 Table 12에 나타내었다.

다. 해양생태계 분야

해양생태계의 조사항목에는 동·식물플랑크톤, 저서생물, 어류, 어란 및 자치어, 해양포유류가 있다. 동·식물플랑크톤과 저서생물의 경우 조사범위는 해양물리모델을 이용하여 추정한 결과(Cho and Maeng[2012])를 바탕으로 결정하도록 권고한다. 모든 항목에 대하

여 조사 정점은 대상 사업의 시행으로 인해 해양환경에 영향이 미칠 것으로 예상되는 해역과 영향이 미치지 않을 것으로 예상되는 해역(대조구)을 모두 포함하도록 한다. 동식물플랑크톤의 조사는 해양수질과 같은 지점에 조사를 실시하는 것이 바람직하다. 조사 정점의 수는 일률적으로 결정하기 어려우므로 사업의 규모를 고려하여 정한다. 각 항목별 조사방법과 결과의 제시 방법은 Table 13에 나타내었다.

3.3.2 영향 예측

영향 예측은 정량적으로 수행해야 하며, 환경평가의 신뢰도 제고를 위하여 모델 보정, 현장 검증 및 재현을 실시한 후 저감방안 도입 전·후에 대한 영향을 예측해야 한다. 해상풍력발전 단지의 건설 및 운영에 따른 환경영향평가를 위해서는 해당 사업과 인근의 다른 해상풍력발전 단지의 중복 영향까지 누적하여 평가하여야 한다. 대상 해역의 영향 예측 범위가 정해지면, 사업 특성에 따라 해수유동, 부유사 확산, 퇴적환경 및 해안선 변화 등을 모의할 수 있는 모형을 선정하고, 조건대가 위치할 경우 노출 및 침수(wet/dry) 모의가 가능한 모형을 선정한다. 수치모형이 선정되면, 격자, 수심, 입력자료 등의 수치모형을 구축하여 모델 검증 및 결과를 제시하여야 한다. 영향 예측 시 목적에 따라 사용될 수 있는 모델의 종류는 Table 14에 나타내었다.

한편, 해상풍력발전기 설치 및 운영에 따른 수중소음의 영향범위를 예측하기 위해서 수중소음 발생원(소음원)의 음향과외 레벨의 정보를 획득하는 것이 요구된다. 이를 위해 일정한 위치에서의 수중소음 측정자료를 활용하거나 수치해석 모델을 적용(해상풍력발전기의 운영에 따른 타워의 진동 레벨에 의한 수중소음의 예측 등)한 예측 결과를 활용할 수 있다. 해상풍력발전기 운영에 따른 수중소음의 측정방법을 보여주는 것이 Fig. 5이다.

수중소음 발생원(항타 장비, 풍력발전기 등)의 종류 및 특성 등을

Table 12. Investigation guidelines for seawater quality and sediment

Item	Method	Result
Water quality	· Measure water temperature, salinity, pH, COD, TOC, DO, SS, coliform, TN, TP, DIN, DIP, Chl-a, transparency, Cr ⁶⁺ , As, Cd, Pb, An, Cu, Fe, Mn, Hg, Ni, CN, Al, Ni, phenol, PCB, organic phosphorus, organotin compound	· Describe analysis result for each point and item to indicate characteristics of marine environment in detail · Compare the result with environmental standard suggested in Framework Act on Environmental Policy
	· Determine investigation time by considering seawater quality, sediment, ecosystem and physics at the same time · Investigate year-round to comprehend changes in marine environment · 4-season observation	· Indicate investigation time (spring, neap, flood and ebb tide) · Analyze any anomalous and extraordinary data than field and literature data · Analyze mid to long term variation of seawater quality to figure out the cause and predict potential impacts
Sediment	· Measure grain size, water contents, IL, AVS, COD, TOC, and hazardous chemicals including As, Cd, Pb, Zn, Cu, Hg, Al, Fe, Cr, Ni, Co, CN, PCBs, PAHs, organic phosphorus	· Describe analysis result for each point and item to indicate characteristics of marine environment in detail · Compare the result with environmental standard suggested in Framework Act on Environmental Policy
	· Sample(upper 1cm) surface sediment collected by grab or box core without disturbing surface · Sample pillar sediment collected by large box or twin core to avoid disturbance · Investigate year-round to comprehend changes in marine environment · 4-season observation	· Analyze any anomalous and extraordinary data than field and literature data · Analyze mid to long term variation of seawater quality to figure out the cause and predict potential impacts

Table 13. Investigation guidelines for marine ecology

Item	Method	Result
Phytoplankton and zooplankton	<ul style="list-style-type: none"> Quantitatively analyze phytoplankton by sampling each layer, and qualitatively analyze using μm mesh conical net with 30 cm core Analyze zooplankton by slope sampling each layer, or vertical sampling in case of deep water sea Analyze a far distance as possible to cover from bottom to surface Use 330 μm mesh net for standardization 	<ul style="list-style-type: none"> Display biomass composition in each point, biomass, dominant species, chlorophyll-a and community index every season by charts Indicate results of cluster analysis Compare biomass and composition with existing data
Benthos	<ul style="list-style-type: none"> Sample at least twice using quantitative sampler (so that the sampling areas become 0.2 m^2) Count and quantify species after screening in lab Sample by diving for hard bottom benthos 	<ul style="list-style-type: none"> Display biomass by charts, habitat density of each taxonomic group, species in each point, population, dominant species, variation of dominant and index of community Indicate results of cluster and multidimensional scaling analysis Evaluate coastal area using health or pollution index
Intertidal benthic organism	<ul style="list-style-type: none"> Sample at least twice over upper, middle, and lower parts for hard bottom benthos Conduct nondestructive survey in one of the parts in case of the East Sea Sample at least three times over five points using quantitative samplers for soft bottom benthos Use 1 mm circular mesh net to screen out remnants 	<ul style="list-style-type: none"> Describe species, composition, the number of species inhabit density and biomass both temporally and spatially Describe variation of spatial and temporal coverage (%) on dominant species through image analysis for hard bottom benthos Indicate results of cluster and multidimensional scaling analysis for soft bottom benthos
Fish	<ul style="list-style-type: none"> Use existing survey data to estimate the effect of vessel and productivity Use trawl or commercial fishing gears to quantitatively measure species composition, population, dominant species, and biodiversity 	<ul style="list-style-type: none"> Describe species composition, population, dominant species, and biodiversity Describe fishing vessels found in project area Describe migratory sedentary, coastal and anadromous fish found in project area
Roe and fry	<ul style="list-style-type: none"> Use fry net to sample in surface water Quantitatively investigate species, population, distribution, and dominant species 	<ul style="list-style-type: none"> Describe species, population, distribution, and dominant species
Marine mammal	<ul style="list-style-type: none"> Use binoculars or observe in naked eye Carry out line transect method Use data from state agencies to observe habitats and migrating path in vicinity and project areas 	<ul style="list-style-type: none"> Analyze migrating path in project area
Bird	<ul style="list-style-type: none"> Use binoculars or telescope Analyze migrating population and species coming into the view Use data from state agencies to observe habitats and migrating path in vicinity and project areas 	<ul style="list-style-type: none"> Analyze bird fauna and migrating path in project area
Underwater noise	<ul style="list-style-type: none"> Compute compound noise level of both installation and operation based on background noise Use underwater microphones to gauge underwater noise and analyze data related to background noise 	<ul style="list-style-type: none"> Describe each investigation point and item table by chart

Table 14. Applicable modeling programs to predict marine environment alternation

Item	Applicable modeling software	Purpose
Wave deformation	MIKE21, FUNWAVE, SWAN, CGWAVE, SWASH	<ul style="list-style-type: none"> Predict wave deformation near coastal structures Predict wave distribution of wave-induced current and sediment transport
Hydrodynamic	EFDC, POM, ELCOM FVCOM, ROMS, MOHID, DELFT3D	<ul style="list-style-type: none"> Predict hydrodynamic alternation after construction Predict sediment transport, provision in flow field
Wave-induced current and coastline deformation	FUNWAVE, SHORECIRC, GENESIS	<ul style="list-style-type: none"> Predict wave-induced current after construction Predict coastline after completion
Sediment transport	EFDC, ROMS, FVCOM, MOHID, DELFT3D	<ul style="list-style-type: none"> Predict sediment and erosion rate after construction Provide fundamental data required to measure geographical fluctuation
Suspended solids dispersion	EFDC, ROMS, FVCOM, MOHID, DELFT3D	<ul style="list-style-type: none"> Predict dispersion range of suspended solids during construction Evaluate reduction efficiency of suspended solids dispersion during installation of silt protector
Local scour	FLOW-3D	<ul style="list-style-type: none"> Predict local scour range nearby marine structures and depth of field Provide fundamental data to design construction without scour
Water quality	EFDC, NPZD MODEL, CHORERENS, MOHID, DELFT3D, ROMS, FVCOM, CAEDYM	<ul style="list-style-type: none"> Predict water quality variables Predict growth variation of phytoplankton and zooplankton
Ecosystem	IBM, ECO-PATH AFFILIATED MODEL, ATLANTIS	<ul style="list-style-type: none"> Predict variation of species composition Predict variation of biomass and population

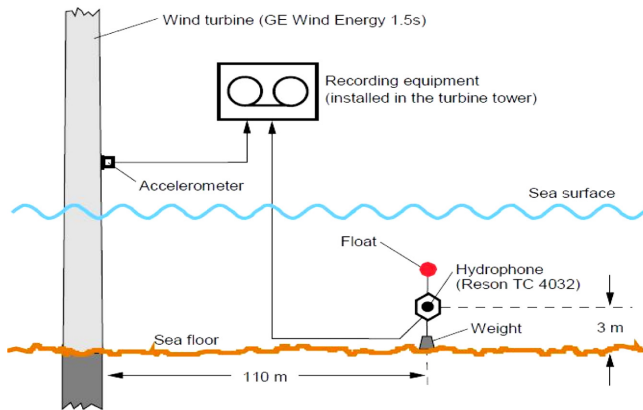


Fig. 5. Measurement setup for monitoring underwater noise unduced by an offshore wind turbine (Source: Betke *et al.*[2004]).

고려한 수중소음 영향범위, D_2 는 다음의 식을 통해 산출한다 (CDT[2009]).

$$D_2 = D_1 / (10^{TL/F}) \quad (1)$$

여기서 D_1 , TL , F 는 각각 수중소음 발생원으로부터의 거리, 수중에서의 소음감쇠, 수중소음 전파계수를 나타낸다. 수중소음 전파계수인 F 의 값은 수중소음 발생원의 종류 및 특성 등을 고려한 소음측정자료를 이용하여 구한다. 전술한 바와 같은 내용을 토대로 국내 해상풍력발전 단지의 설치 및 운영 시 발생하는 소음에 대해서 그 영향범위를 예측할 수 있다.

3.3.3 저감방안

해상풍력발전기의 설치 및 운영에 따른 수중저감에 의해 해양생물에 미치는 영향을 저감하기 위한 방안으로서 수중소음원의 음향파워를 감소시키는 방법, 수중소음 발생영역으로 해양생물이 접근하지 못하도록 하는 방법과 공사 시 부유물질 발생에 따른 저감대책, 운영 시 해양생물 부착에 따른 방지대책 및 기타 등으로 구분할 수 있다. 기타 내용으로는 자치어의 성장 시기 및 어류·대형저서동물의 산란시기인 봄과 여름에 공사의 강도를 다소 낮추고, 가을과 겨울에는 공사의 강도를 높이는 것과 같은 탄력적인 공정계획으로 공사 강도를 조절하는 것이다. 또한 공사 시 오염물질이 급격히 증가하여 해양동·식물상에 영향이 있는 경우와 사업 대상 해역이 강한 흐름이 형성될 경우에는 오탁방지막 설치에 따른 효과를 기대하기 어려우므로 일시적인 작업 중단, 작업시간 단축 및 작업 방법 개선 등의 추가 저감대책을 수립한 후에 공사를 재개하도록 하여 해양동·식물에 미치는 영향을 최소화한다.

5. 결 론

선진국에서는 해상풍력발전 시설의 공사는 물론 운영 시 해양환경에 미치는 영향이 다양한 분야에서 발생하는 것으로 나타났으며, 이에 따라 환경영향평가를 위한 조사 방법, 영향 예측 및 저감대책

이 수립되고 있다.

국내에서의 해상풍력발전 사업은 제주도를 시작으로 시범 실시 단계에 접어들었으나 유럽의 풍력발전 산업 선진국들은 해상풍력발전 단지의 개발에 총력을 기울이면서 건설 및 운영단계에서 해양환경에 미치는 다양한 영향을 세심하게 파악하고 환경 모니터링을 수행하고 있다. 이에 따라 해상풍력발전 개발 사업으로 인한 환경적 부작용에 대해서 면밀하게 파악함으로써 환경친화적 대책을 사전에 철저히 수립하는 것이 궁극적인 목적이다. 더불어 미국, 영국 및 덴마크의 해상풍력발전 개발사업 시 구체적인 현황 조사, 영향 예측 및 평가 실시 항목 등을 파악하였으며, 현재 운영 중인 덴마크 Horns Rev와 Nysted의 해상풍력발전 모니터링 자료를 정리하여 운영 시 해양생물에 미치는 영향에 대해 저서생물, 어류, 해양포유류, 조류 및 경관·사회경제 등으로 나누어 분석하였다. 이러한 국외 해상풍력발전 환경영향평가 내용과 운영 중인 모니터링 자료를 근거로 하여 환경영향평가 단계에서 국내 해역에 적합한 가이드라인을 분야별로 도출하였다.

국내에서는 입지선정 시 고려해야 할 항목과 공사 시 및 운영 시 환경적 영향을 연구한 사례가 있지만, 특히 본 연구는 미국, 영국 및 덴마크 등의 해상풍력발전사업의 환경영향평가 내용과 현재 운영 중인 모니터링 자료를 분석한 점이 기존 연구내용과는 다른 점이다.

마지막으로 이러한 문헌자료를 분석하여 해상풍력발전 개발사업 시 환경영향평가 단계에서 가이드라인을 제시했지만, 단계별로 세분화시킨 내용은 향후 지속적으로 개선의 여지가 남아 있다고 본다. 이는 대상해역에서 사업시행 전과 후의 해양환경 및 해양생태계 변화가 달라질 수 있기 때문이다. 이러한 영향들을 고려한다면, 지속적인 사후모니터링을 통하여 해양환경 및 해양생태계 조사가 전반적으로 개선될 것이다.

더불어 본 논문이 해상풍력발전사업의 환경영향평가에 대한 작성지침이라기 보다는 해상풍력발전사업의 특성 및 규모 등에 따라 해양환경 및 해양생태계 조사를 실시하는데 있어 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국환경정책·평가연구원의 지원으로 수행한 “조력 및 해상풍력사업 환경평가방안 연구 II 해상풍력발전사업”의 결과 중 일부임을 밝히며, 업무지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] AMEC Environment & Infrastructure, Inc. 2012. 20MW Offshore wind energy project -Offshore of Atlantic city, New Jersey.
- [2] Betke, K., Glahn, M.S., and Matuschek, R., 2004, Underwater noise emissions from offshore wind turbines, In: *Proceedings of CFA/DAGA 2004*.
- [3] California Department of Transportation (CDT), 2009, Techni-

cal Guidance for Assessment and Mitigation of the Hydroacoustic Effects of Pile Driving on Fish.

- [4] Cho, B.J. and Maeng, J.H., 2012, A study on determinations of survey station in marine ecosystems based by impact prediction of environmental impact assessment in coastal development projects, Korean Society of Environmental Impact Assessment, Vol.21(5): 767-779.
- [5] Danish Energy Authority (DEA), 2006, "Offshore wind farms and the environment - Danish experiences from Horns Rev and Nysted".
- [6] Dong Energy, 2006, Danish offshore wind - key environmental issues, Danish Energy Authority and Danish Forest And Nature Agency.
- [7] Exo, K.M., Huppopp, O. and Garthe, S., 2003, "Birds and offshore wind farms: a hot topic in marine ecology", Wader Study Group Bulletin, Vol.100: 50-53.
- [8] European Wind Energy Association (EWEA), 2009, The Economics of Wind Energy.
- [9] Gill, A.B., 2005, "Offshore renewable energy: Ecological implications of generating electricity in the coastal zone", J. of Applied Ecology, Vol.42: 605-615.
- [10] Issuequest, 2011, Market trend and outlook of offshore wind power plant
- [11] Kim, G.Y., Lee, D.I., Jeon, K.A., Eom, K.H. and Yu, J., 2012, Improvement for marine environmental impact assessment on the development of offshore. Korean Society of Environmental Impact Assessment, Vol.21(1): 1-13.
- [12] Kim, J.K. and Chung, C.M., 2009, A study on marin factor of large offshore wind park by location condition selection, Korean Urban Management Association, Vol.22(1): 145-165.
- [13] Kim, J.Y., Kang, K.S., Oh, K.Y., Lee, J.S. and Ryu, M.S., 2009, "Assessment of possible resources and selection of preparatory sites for offshore wind farm around Korean peninsula", The Korean Society for New and Renewable Energy, Vol.5(2): 39-48.
- [14] Kwon, K.N., 2012, Future of offshore wind power industry in Denmark, KOTRA economy industry trend.
- [15] Lee, D.I., Eom, K.H., Jeon, K.A. and Kim, G.Y., 2010, Scoping for environmental impact and system improvement of marine sand mining in Korea, J. of Environmental Impact Assessment, Vol.19(3): 335-345.
- [16] Lucke, K., Storch, S., Cooke, J. and Siebert, U., 2006, Literature review of offshore wind farms with regard to marine mammals, In: *Ecological Research on Offshore Wind Farms: International Exchange of Experiences, Part B: Literature Review of Ecological impacts.*
- [17] Ministry of Knowledge Economy, 2011, A feasibility study of offshore wind power plant in Korea.
- [18] Ministry of Knowledge Economy, 2010a, Roadmap for offshore wind farm development.
- [19] Ministry of Knowledge Economy, 2010b, Development of offshore wind farm in southwestern coastal area in Korea on a large scale.
- [20] Nedwell, J. and Howell, D., 2004, "A review of offshore wind farm related underwater noise sources", COWRIE Report No. 544 R 0308.
- [21] National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2010, Large-scale offshore wind power in the United States: Assessment of opportunities and barriers.
- [22] Shin, C.O., Yook, K.H., 2011, Environmental and Economic impacts of Offshore Wind Power, Korea Maritime Institute.
- [23] Spaans, A. L., J. van der Winden, L. M. J. van den Bergh and S. Dirksen, 1998, Vogelhinder door wind turbines. Landelijk onderzoekprogramma, deel 4: nachtelijke vliegbewegingen en vlieghoogtes van vogels langs de Afsluitdijk, Bureau Waardenburg report 98.015, Culemborg.
- [24] Sun, X., Huang, D. and Wu, G., 2012, "The current state of offshore wind energy technology development", Energy, Vol.41(1): 298-312.
- [25] Sung, J.K. and Lee, T.J. 2013, Study on present status and future direction of Korean offshore wind power. Vol.62(3): 312-321.
- [26] Wratten, A., Martin, S., Welstead, J., Martin, J., Myers, S., Davies, H. and Hobson, G., 2005, The Seascape and Visual Impact Assessment Guidance for Offshore Wind Farm Developers, Enviros Consulting and Department of Trade and Industry.
- [27] World Wind Energy Association (WWEA), 2011, World Wind Energy Report 2011.
- [28] Yoon, J. R., Lee, S. w., Ahn, S. Y., Park, J. H., Bae, J. W. and Ahn, Y. S. 2006. Effects of underwater noise on fishes. Korean Society for Noise and Vibration Engineering. Annul Autumn Conference.

2013년 8월 16일 원고접수
 2013년 10월 1일(1차), 2013년 10월 16일(2차),
 2013년 11월 13일(3차) 심사수정일자
 2013년 11월 18일 게재확정일자