

해상풍력(Offshore Wind Power) 기술동향

나도백 · 신호순[†] · 나덕주

한국과학기술정보연구원

(2011년 3월 31일 접수, 2011년 5월 23일 수정, 2011년 5월 25일 채택)

Offshore Wind Power, Review

Do-Baek Nah, Hyo-Soon Shin[†] and Duck-Joo Nah

KISTI(KOREA Institute of Science and Technology Information)

(Received 31 March 2011, Revised 23 May 2011, Accepted 25 May 2011)

요 약

해상풍력발전은 가장 유망한 재생 에너지의 하나이며, 육상풍력발전보다 풍력이 강력하고 일정해서 장시간 고출력 발생이 가능하고 소음, 공간적 한계, 경관훼손 등 기존 육상풍력발전의 단점을 보완하고 초대형으로 제작할 수 있다. 우리나라는 3면이 바다로 둘러싸여 해상풍력자원이 풍부하고 발전가능성이 크다. 이 고찰은 해상풍력발전기의 터빈과 하부구조물 기술동향, 국내외 시장동향, 학술 및 특허정보를 분석하였다.

주요어 : 해상풍력터빈 블레이드 설계, 설계통합, 공탄성, 장기 극한하중, 해상풍력터빈 하부구조물

Abstract — Offshore wind power(OWP) is one of the most promising renewable energy and gives higher output than onland one due to stronger and consistent wind in offshore. it offsets shortcoming of noise, spatial limit and less affects scenery, and can be built in larger size. Korea has plenty of offshore wind resources as it is surrounded by the sea in three directions. This review describes recent progress in offshore wind turbine and substructure technology. Market trend in local and overseas, Number of papers published and patents registered are analysed.

Key words : offshore wind turbine blade design, integration, Aeroelasticity, long term extreme loads, offshore wind turbine substructures

1. 서 론

해상 풍력발전은 육상 풍력발전에 비하여 풍력이 더 강력하고 일정해서 장시간 고출력 발생이 가능하나 풍력과 조력에 의해 구조물에 걸리는 하중이 더 크다. 염분에 의한 부식과 과도한 설치비용 및 유지보수의 어려움이 있어 20년 동안 고장이 발생하지 않도록 유지관리보수가 용이하고 신뢰성 있는 설계 제작이 요구된다.

나셀을 밀봉시킴으로써 바닷바람으로 유입되는 염분, 먼지 등의 이물질을 차단하는 역할을 하여 나셀 내 구성부품의 부식을 방지할 수 있는 설계가 필요하다. 해상 풍력발전은 소음, 공간적 한계, 경관훼손 등 기존 육상풍력발전의 단점을 보완하고 초대형으로 제작할 수 있다. 대형터빈이 단위 kW-hr당 하부 구조비, 설치비, 운영보수비 및 그리드전기 인프라 비용을 낮춘다. 1기 용량이 2 MW에서 5 MW급이 개발되어 있고 10 MW 급의 해상풍력발전기도 Clipper Windpower, American Superconductor 및 Areva/SWAY에 의해 연구개발 중이다.

[†]To whom corresponding should be addressed.
66, Hoegi-ro, Dongdaemoon-gu, Seoul 130-741 Korea
Tel : 02-3299-6114; E-mail : 0637shon@resear.re.kr

2. 해상풍력 터빈설계

전통적 블레이드 설계는 외부 블레이드 형상과 공기 역학적 특성을 우선 결정 확인하고 그 다음 내부 구조를 설계한다. 최근에는 이 전통적 접근법과 반대로 구조설계에서 시작해서 공기 역학적 설계를 위한 제약 조건을 설정하는 설계절차를 따라 수행하기도 한다 [1].

Opti-OWECS와 DOWEC 같은 초기의 통합연구 프로젝트는 해상풍력단지의 설계가 기존 빌딩블록을 모으는 건조노력으로 처리하는 것이 아니고 모든 관련 설계팀이 빌딩블록의 세부설계를 함께하도록 모인다. 통합관점에서 설계자는 부품의 요구사항, 사양 등이 시스템의 나머지에 주는 효과에 주의를 기울인다.

2-1. 해상풍력터빈의 공탄성 및 구조설계

해상 하부구조물에 탑재된 해상풍력터빈을 모사 하기 위하여 공탄성 모델을 적용하는 다양한 접근법이 개발되고 있는데 [2], 한 방향은 터빈의 표준 공탄성 모델(aeroelastic model)과 해상 지지구조물(support structure on the sea bed)의 유체하중, 파도하중 및 토질력을 포함한 수중 지지 구조물의 유체탄성 모델(hydroelastic model)을 완전히 통합하는 것이다.

다른 방향은 표준 공탄성 모델을 파도하중과 수력 하중을 포함한 지지 구조물을 모사하는 분리된 모듈에 연결하는 것이다. 이 접근법은 Flex5 공탄성 코드가 해상구조물의 파도하중을 계산하기 위한 ASAS 표준 패키지와 연결되는 REpower에 의해 제시되었다. 최소 5500개의 time series를 가지고 각 knot에 피로하중이 얼마만큼 걸리는가를 계산한다. 여기에 ASAS (NL) of ANSYS를 연계하여 dynamic load를 계산해서 전체 피로하중을 계산한다 [3]. 하중 수준을 계산하기 위해서는 전체시스템에 대한 고유진동수 특히 공진 근처의 고유진동수가 중요하다.

전체 시스템의 강성(stiffness)이 변형과 가속을 결정한다. 극단적인 작업돌풍을 생각해서 IEC 61400에 따라 계산해보면 REpower에서 극한하중의 경우 헤드 질량에 걸리는 일반적 가속도는 2 m/sec^2 , 435 ton의 헤드질량, 870 KN의 관성력을 유발한다. 파도하중과 해상지지구조물의 강성역시 피로하중에 영향을 준다.

세 번째 개발방향의 주 아이디어도 표준 공탄성 코드를 사용하고 그 다음 기초의 슈퍼 요소에 그것을 연결하는 것이다. 이 접근법은 Vestas에 의해 제시되었는

데 기초가 유한요소로 모델 되지만 Craig-Bampton 하부구조 계획을 사용하여 슈퍼요소로 분해된다.

풍력터빈에서는 공기역학 하중과 구조물의 시간 의존적 행동사이에 강한 결합이 있다. 블레이드는 구부러질 때 비틀림을 바꾸어서 받음각을 바꾼다. 블레이드가 고정지면에 대해서 속도를 가질 때도 받음각이 변한다. 공기역학적 반응은 양력과 항력이 받음각에 따라 어떻게 변하는가에 의존한다. 실제 풍력터빈에서는 타워가 진동할 뿐 아니라 모든 다른 부품도 같이 진동하고 받음각에 연계된다.

풍력터빈의 공기탄성반응을 모사하기 위해 관성을 포함한 비정상 구조모델을 만들어야한다. 모드 형상함수에 적용된 가상작업법과 FEM(Finite Element Method)의 두 방법이 적용된다. 공기역학 하중을 평가하기 위하여 BEM(Blade Element Momentum)이 간단하고 우수한 컴퓨팅 효율 때문에 가장 널리 사용된다. 액추에이터 라인(AL)모델이 경험을 덜 포함하기 때문에 곧 BEM 모델을 대체할 것이다. AL 모델과 함께 후류도 해법의 일부여서 더 하류에 설치된 풍력터빈에 대한 후류의 효과가 계산될 수 있다. 이 모사는 풍력터빈이 대형 해상풍력단지에서 그룹화 되기 때문에 더 중요하게 되고 있다.

2-2. 해상풍력터빈 블레이드 설계

Zhao-xue CHENG [4] 등은 대형 풍력터빈(1~10 MW)의 공기역학적 성능, 기하학적 특성과 정격 풍속, 블레이드 팁 속도 및 로터 강성과 같은 주요 특성 파라미터를 연구하였다. 고성능 풍력터빈의 필수 기준은 최고 연간 사용가능한 에너지 패턴 계수, 가능한 최소 치수, 최고의 풍력 에너지 획득 및 연간 전력생산 극대화이다.

풍력터빈을 위해 좋은 공기역학 성능을 가진 S 시리즈 에어 포일을 블레이드 단면으로 결정하였다. 높은 연간 사용가능 에너지 패턴계수(Ku)를 얻기 위하여 블레이드 팁(U_0)의 원주 속도는 100 m/sec의 특히 높은 값이 주어졌다. 로터 강성(σ)은 높은 동력계수를 얻기 위해 0.08 수준의 약간 높은 값이 주어졌다. 5가지 다른 출력과 최적 연간 사용가능 에너지 패턴 계수를 갖는 풍력터빈의 주요 공기역학 및 기하학적 특성 파라미터가 Table 1에 주어졌다.

풍력터빈 설계를 위한 정격풍속으로 연간 평균풍속이나 최대 연간회수를 갖는 풍속보다 더 큰 풍속을 택하는 것이 동력계수는 극대화가 되지 않지만 연간 전발전을 증가하고 풍력터빈 치수를 감소하는 핵심기

Table 1. Main aerodynamic and geometric parameters of wind turbine rotors with five capacities.

출력 P/MW	1	2	4	7	10
지름 D/m	28.8	40.76	57.5	76.1	91.1
정격 풍속 V/(m.s ⁻¹)	19.2	19.2	19.2	19.2	19.2
회전 속도(n/rpm)	66.25	46.85	33.13	25.11	20.95
동력계수(C _p)	0.3741	0.3741	0.3741	0.3741	0.3741
연간 사용가능 에너지 패턴계수(K _e)	0.9649	1.0447	1.0922	1.1287	1.1562
블레이드 비틀림 Δφ/(°)	32.92	32.92	32.92	32.92	32.92
로터 강성(σ)	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077

Table 2. Optimum design parameters for Offshore Wind Turbine Blade.

설계 매개 변수		설계된 블레이드	
		초기설계 공간	최종설계 공간
설계 조건	P	3 MW	
설계 변수	D	76.29 m	79.72 m
	rpm	24.26	21.35
목적함수	P(V)	1.603 MW	1.612 MW
제약조건	σ	0.0345	0.0345
	M _{tip}	0.288	0.265

솔방법이다. 해상환경의 특징상 높은 팁 속도 비율(블레이드 팁의 높은 원주 속도)이 해상 풍력터빈을 위해 적용될 수 있다. 공기압축이 소음을 높이겠지만 풍력터빈의 연간 발전능력을 증가시킬 뿐 아니라 풍력발전기의 치수를 감소시킨다.

풍력터빈의 연간 사용가능 에너지 패턴계수를 정확히 결정하기 위하여 두 가지 필요한 전제가 보증되어야 한다. 첫째 연간 풍속 회수특성과 풍력 단지의 기상학 조건을 조사하여 정확히 결정되어야 한다. 다음 블레이드 피치가 터빈로터의 가능한 높은 동력계수를 보장하기 위하여 저 풍속 조건에서 무리 없이 조절되어야 한다.

이기학 [5] 등은 국내 연안의 해상풍력 자원을 고려하여 설계범위내의 설계요구조건과 제약조건을 만족하면서 연평균동력을 최대 목적함수로 가지는 해상 풍력터빈 블레이드의 최적형상을 도출하였다. 블레이드 단면 익형은 NREL S830을 이용하였고, 익형의 공력성능은 XFOIL을 이용하여 예측하였다. Table 2는 3 MW의 요구풍력 설계조건에서 모든 제약조건을 만족하고 목적함수를 최대로 하여 설계된 풍력터빈 블레이드 형상의 각 설계 매개변수들을 보여 준다.

풍력 터빈에 작용하는 공력하중의 해석을 통해 풍력터빈의 블레이드 공기탄성해석을 비롯한 타워, 허브 등의 구조물에 대한 구조해석 등을 통해 다분야통합 최적설계기법에 대한 연구가 병행되어야 한다.

2-3. 장기적 극한 하중 예측

모사를 사용하여 해상풍력터빈의 장기적(20~30년) 극한하중 추정이 필요할 때는 통계적 외삽법을 사용한다. 20 m 수심에 위치한 5 MW 해상터빈의 피크 이상 경계(POT: Peak-Over Threshold)를 사용한 블레이드와 타워의 장기적 극한하중은 각각 15.3 MN m와 147.1 Mn m이었다. 다양한 풍력과 파력 조건을 위한 조건부 하중 분포의 값비싼 직접 적분법에 비교할 때 역신뢰성 접근법이 장기적 하중을 더 정확히 예측하는 것을 보여주었다 [6].

해상풍력터빈 설계에서 주요 고려사항은 풍력과 파력의 결합효과이다. 풍력은 터빈 여러 곳에 양력이나 항력을 통해 작용한다. 구조물의 기하학적 형상이 주어지면 이 힘들의 누적 효과가 하중이 된다. 하중은 BLADED, FAST, FLEX나 ADAMS와 같은 상세한 모사모델로 계산된다. 파도하중 추정에 사용되는 기본식은 Morison 식인데 다음과 같이 해수의 가속도와 관련된 관성 성분과 해수의 속도와 관련된 드래그 성분이다 [7].

$$\tilde{F} = C_M \frac{\rho_W \pi D^2}{4} \dot{u} + C_D \frac{\rho_W D}{2} |u|u$$

3. 해상풍력 기초

3-1. 모노파일

얕은 수심에서 하부구조물은 해상(sea floor)까지 연장하고 모노파일(Fig. 1의 2번째), 중력기초 및 흡입 잠함(Fig. 2)을 포함한다.

모노파일은 해상풍력 단지가 선호하는 기초 형식이다. 모노파일의 정력학적 능력이 중요하지만 안전 설계는 장기적 주기 하중 후의 누적된 회전 및 강성 변화도 다루어야 한다. 수분을 제거한 모래에 박힌 파일에 8000에서 6000사이클 사이의 결합 모멘트 및 수평하중으로 실험실 테스트가 수행되었다. 파일 치수와 하중범위가 현실적인 것을 보장하기 위해 전형적인 해상 풍력터빈 모노파일 설계가 연구기준으로 사용되었다 [8].

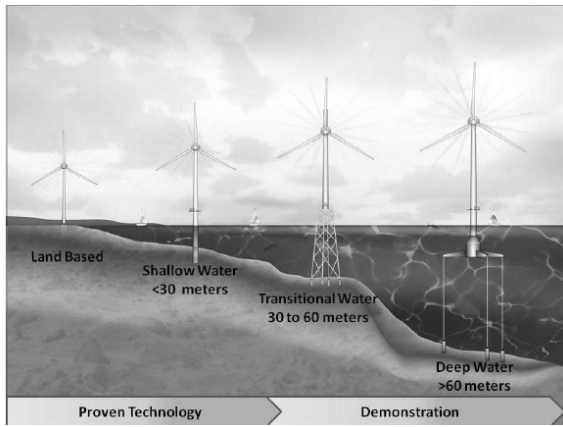


Fig. 1. Substructure technology classes for offshore wind turbines.

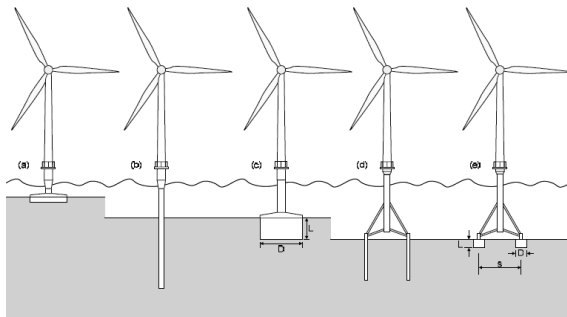


Fig. 2. Options for wind turbine foundations (a) gravity base, (b) monopile, (c) suction caisson, (d) tetrapod pile, (e) tetrapod caisson [10].

주기적 측면하중에 초점을 둔 풍력발전기의 해상 모노파일 기초의 설계는 최근 증명된 설계 규칙이 없기 때문에 설계자와 컨설턴트에게 문제이다. 연구개발에서 사용되는 첫 접근법으로 FEM이나 소규모 시험은 단방향 과장된 하중에 집중한다. 그러나 여기에 기술한 소규모 시험은 하중방향의 작은 변화가 지금까지 단방향 하중을 받는 파일의 것을 초과하는 파일헤드 이동을 보여준다. 파일은 최소의 토양저항을 따른다. 이것이 주하중 방향을 이동 시킨다 [9].

3-2. 흡입 잠함(suction Caisson)

파일과 같은 기초를 위한 현재의 해상엔지니어링 전략이 특정해안에서는 비용효율적인 구조로 적합하지 않을 수 있다 [10]. 어떤 위치에서는 더 비용효율적일 수 있는 흡입 설치 스커트 형 기초 같은 새로운 기술의 설계와 분석이 개발 되어야 한다. 이는 구조 해석 내에 기초반응을 포함한 더 좋은 기술모델의 개

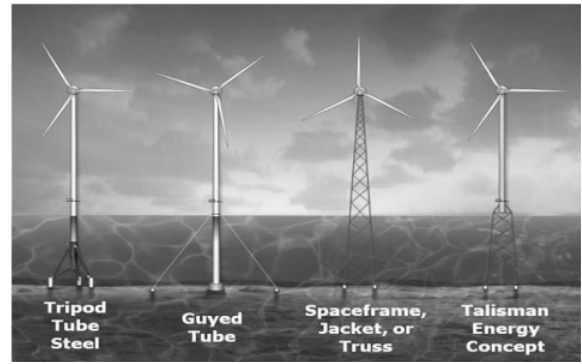


Fig. 3. Transitional substructure technology.

발을 포함한다.

가장 유망한 모델은 변형경화 소성에 근거하지만 현재는 단조로운 하중만 모델링할 수 있다. 미래 과제는 이들 모델을 주기 및 과도적 하중까지 확대해서 시간 지배적 구조분석에 사용할 수 있도록 하는 것이다. Fig. 2는 해상 풍력터빈 적용을 위해 제안된 기초 구조이다 [11].

3-3. 천이수역(transitional structures)

천이 하부구조 기술은 수심이 30 M 보다 깊으나 60 M보다 얇은 수심의 해상 풍력터빈을 지지하기 위해 사용 된다(Fig. 3). 천이 수역 하부 구조 기술은 비용이 높고 기술적 과제를 추가한다.

4. 해상풍력발전 시장동향

4-1. 국내 해상풍력발전 시장동향

한국은 2019년까지 9조 2000억원을 투입해서 2.5 GW 해상단지를 조성할 계획이다. 로드맵에 따라 2013년까지 부안·영광 지역 해상에 100 MW(5 MW급 20기) 국산해상풍력발전기 실증단지가 조성되며, 2016년까지 900 MW(5 MW급 180기) 시범단지로 확대된다. 2019년까지는 5 MW급 300기 해상풍력발전단지가 추가로 건설될 예정이다. Fig. 4는 국내 해상풍력단지 최적지로 부안 영광을 선정한 것을 보여 준다.

부안·영광지역 해상의 바람 등급은 class 3(6.9~7.5 m/s)으로, 수심 20 m 이내이며, 변전소 이격거리 15 km 로 측정되 300 MW 이상의 대규모 단지 개발이 가능하다. 우리나라의 해상풍력단지 개발은 아직 초기 단계로, 국내 조선중공업업계에서 해외시장 진출목적으로 5 MW급 이상의 대형 해상풍력발전기 개발을 추



Fig. 4. Buan-Youngkwang was as selected best sites for Korean Offshore Wind farms.

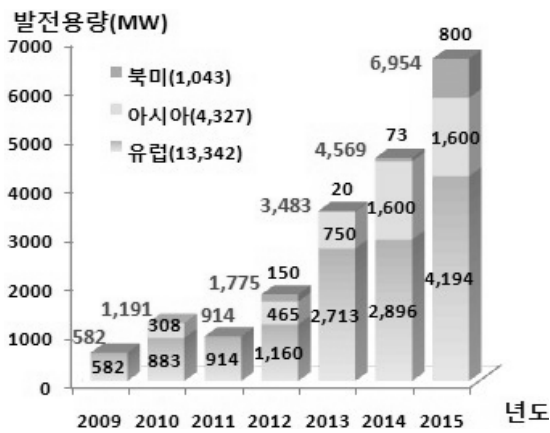


Fig. 5. World market trend and forecast by region [12].

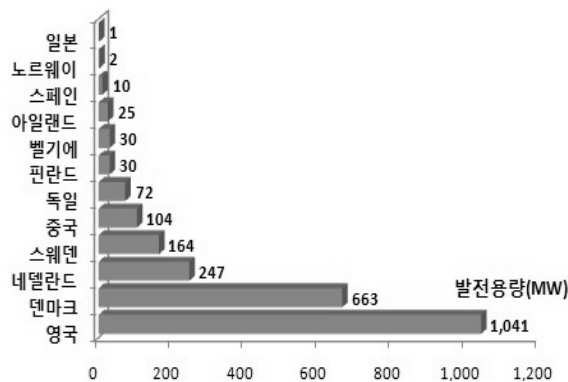


Fig. 6. Offshore wind power capacity by each country (2010.06) [13].

진 중이며 1단계 실증단지는 기업들이 수출을 위해 필요한 운영경험 확보를 지원하는 의미도 있다.

Table 3은 2012년 말까지 국내 우수 조선·중공업 회사의 해상풍력발전기 제작 계획이다.

Table 3. Offshore Wind Power Manufacturing Plan by Korean Shipbuilders and Heavy Industries.

순위	회사명	개발 중인 해상풍력발전기 용량(MW)	개발완료(년)
1	두산 중공업	3	완료
2	현대 중공업	5	2011
3	삼성중공업	5~7	2012
4	효성 중공업	5	„
5	대우조선해양	6~7	„
6	STX 중공업	7~8	„

4.2. 해외 해상풍력발전 시장동향

4-2-1. 세계 해상풍력 시장동향

1990년에 첫 해양풍력발전을 시작해서 2008년에 0.38 GW에 불과했던 연간 해상풍력시장 규모가 2010년 1.2 GW에 이르는 신규시장 규모에서 2015년에 6.2 GW로 급성장하게 될 것으로 예상된다(Fig. 5). 또한 지금까지 유럽시장 중심으로 성장해 왔으나 향후에는 중국을 비롯한 아시아, 북미 지역 등 전세계 지역으로 확대될 전망이다.

현재까지의 각국별 해상풍력발전 도입용량(2010. 6 기준)을 보면 영국이 가장 많은 발전용량을 운영하고 있다(Fig. 6).

4-2-2. 각국 해상풍력 시장 동향

1) 유럽연합(EU) 동향

EU는 2030년까지 해상풍력 설치용량을 150 GW까지 늘릴 계획이다. 주요 국가들의 시장 동향을 살펴보면, 영국은 2001년부터 국가 프로젝트 1,2,3라운드에 걸친 해상풍력 개발 계획을 추진하고 있으며, 2020년까지 32 GW의 해상풍력을 설치하여 전체 전력의 25%를 공급할 계획이다. 2010년 9월부터 세계 최대 크기인 300 MW 해상풍력발전단지를 운영하고 있다. 독일 역시 정부 프로젝트로 북해연안을 개발하고 있다. 계통연계 등 제도적 지원을 통해 2010년 4월 최초로 해상풍력단지를 운영하고 있는 독일은 2015년까지 4.6 GW를 신규 설치한다는 목표를 세우고 있다. 덴마크는 초기 해상풍력발전 초기시장을 주도해 왔으며, 현재에는 EU의 슈퍼그리드 개발에 적극 참여하고 있다. 프랑스는 2010년 9월에 근해상 10여개 지역에 3 GW(600기 터빈) 규모의 해상풍력발전단지 건설계획을 세우고, 2020년까지 6 GW 규모의 해상풍력발전단지 설치 계획을 진행하고 있다.

2) 미국 동향

미국은 아직 가동 중인 해상풍력단지 는 없으나 육상풍력발전 용량이 가장 많은 것으로 알려지고 있다. 지난 해 전체 풍력시장 규모에서 중국에 밀려나기는 했지만, 미국의 해상풍력 잠재량은 1,000 GW에 달하는 것으로 알려져 있으며, 향후 대규모 개발계획을 세워놓고 있다. 2010년 468 MW 케이프 윈드 풍력발전 단지를 처음으로 승인했으며, 이어 동부 대서양 연안 10개주에 20 GW에 달하는 해상풍력 컨소시엄을 선정해 놓은 실정이다.

3) 중국 동향

중국에서 개발 및 이용 가능한 해상 풍력 에너지 축적량은 700 GW에 이른다. 2010년 아시아 최초로 상하이 지역에 102 MW 규모의 해상풍력발전 단지를 완공하였으며, 장수성과 광동성 등 4개성을 중심으로 대규모 해상풍력발전 개발계획을 통해 2015년에 15 GW, 2030년에 35 GW에 이르는 해상풍력발전을 계획하고 있는 것으로 알려지고 있다.

5. 해상풍력 학술정보 분석

5-1. 전세계 연도별 국별 학술정보 추이

Web of Science [14]에 발표된 해상풍력 관련 학술정보(2000년~2010년)를 다음과 같은 검색식으로 국가별, 연도별, 연구기관, 피인용 관련 등의 분포현황을 분석하였다.

Search / Advanced Search

1. #1 ti=wind adj ti=(turbine· or power· or mill· or energy or resource· or farm·)

2. #2 ti=offshore or off-shore or ocean· or marine· or sea or seabed)

3. #1 and #2

4. Timespan=2000-2010

ti : Title ➡ Search Result (ti) : 267 articles

Data check ➡ Data Analysis

2005년부터 최근까지는 발표건수가 눈에 띄게 늘어나고 있다. 2010년은 발표된 정보가 늦게 데이터베이스에 등록되는 경우가 많기 때문에 변동값이 늘어나는 경우를 고려해야 한다(Fig. 7).

5-2. 국별 학술정보 발표 추이

전체 267건 가운데 덴마크, 독일, 미국의 발표건수가 많으며, 다음으로 영국, 네델란드 등이 다음을 따르고 있다. 이들 모든 국가들이 대부분 2005년 이후

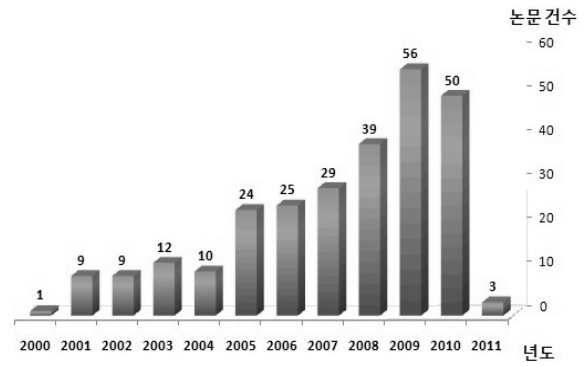


Fig. 7. Number of papers published each year.

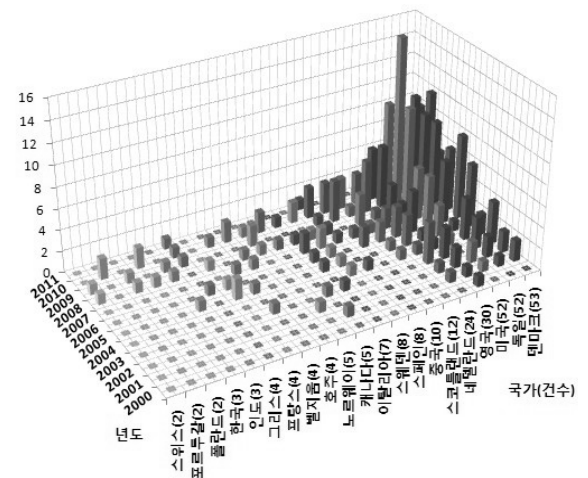


Fig. 8. Trends of papers published each nation each year.

에 학술활동이 많아진 것을 볼 수 있다. 2005년 이전까지는 주로 경제성 문제로 육상풍력에 대한 학술정보가 대부분을 차지하고 있었으나, 육상풍력이 가진 단점을 보완하기 위해 해상풍력의 장점을 다시 보게 된 이유가 가장 크다고 볼 수 있다(Fig. 8).

5-3. 연구기관별 순위

RISO NATL LAB(덴마크)이 가장 많은 학술활동을, 다음으로 DELFT UNIV TECHNOL, INDIANA UNIV, UNIV AALBORG 등으로 나타나고 있다. 상위15위 가운데 덴마크가 5개 기관, 미국이 4개 기관, 독일이 3개 기관, 나머지 유럽기관들이 링크되어 있으며, 동양권 국가들은 없다(Table 4).

5-4. 저자별 피인용 순위

해상풍력에 관한 전체 학술정보 267건 가운데 전체 1,232회의 인용이 있었으며, 이들은 피인용 논문의 평

Table 4. No of papers published by research institutes.

순위	연구기관명	논문 건수 (267)	비율
1	RISO NATL LAB(덴마크)	16	6.0
2	DELFT UNIV TECHNOL(네델란드)	14	5.2
3	INDIANA UNIV(미국)	9	3.8
4	UNIV AALBORG(덴마크)	9	3.4
5	UNIV DELAWARE(미국)	7	2.6
6	AARHUS UNIV(덴마크)	5	1.9
7	NATL ENVIRONM RES INST(덴마크)	5	1.9
8	UNIV OLDENBURG(독일)	5	1.9
9	UNIV TEXAS AUSTIN(미국)	5	1.9
10	REPOWER SYST AG(독일)	4	1.5
11	TECH UNIV DENMARK(덴마크)	4	1.5
12	UNIV ABERDEEN(스코틀랜드)	4	1.5
13	UNIV KIEL(독일)	4	1.5
14	UNIV MASSACHUSETTS(미국)	4	1.5
15	UNIV NOTTINGHAM(영국)	4	1.5

균값은 4.61을 보이고 있다. 상위 10개 논문을 살펴보면 스페인의 Barrios L(주저자)이 55회의 인용수를 기록하였고, 이어 캐나다의 Lu WX(주저자)이 42회의 인용수를 기록하고 있다. 국가별로 보면 독일이 가장 많은 4개의 논문을 갖고 있으며, 나머지 미국, 덴마크, 영국, 호주 등이 인용 횟수가 많다(Table 5).

6. 해상풍력 특허정보 분석

6-1. 연도별 특허출원추이

DWPI DB [15]를 활용하여 발표된 해상풍력 관련 특허정보(2000년~2010년 공개특허 기준)를 검색하여 출원을 기준으로 국가별, 연도별, 기술별 분포현황을 분석하였다. 조사결과 1,081건이 검색되었으며, 관련도가 적은 데이터를 제외하고 862건에 대하여 분석하였다.

DWPI Search (Boolean)
 1. All Fields
 (wind.tx adj (turbine· or power· or mill· or energy or resource· or farm·1.tx)
 and (offshore or off-shore or ocean· or marine· or sea or seabed).tx.
 2. Timespan=2000-2010

tx : Text ➡ Search Result (tx) : 1081 articles

Data cleansing ➡ Data(862 articles) Analysis

Table 5. Highly cited papers.

1	제목	Behavioural and environment or relates of soaring-bird mortality at on-shore wind turbines(2004)				
	저자	Barrios L(스페인)	피인용수	55	연평균 인용값	6.88
2	제목	Optimal acquisition and aggregation of offshore wind power by multiterminal voltage-source HVDC(2003)				
	저자	Lu WX(캐나다)	피인용수	42	연평균 인용값	4.67
3	제목	Scaling possible adverse effects of marine wind farms on seabirds(2004)				
	저자	Garthe S(독일)	피인용수	36	연평균 인용값	4.50
4	제목	Public opinion about large offshore wind power: Underlying factors(2007)				
	저자	Firestone J(미국)	피인용수	35	연평균 인용값	7.00
5	제목	Avian collision risk at an offshore wind farm(2005)				
	저자	Desholm M(덴마크)	피인용수	31	연평균 인용값	4.43
6	제목	Evaluation of wind energy potential and electricity generation on the coast of Mediterranean Sea in Egypt(2006)				
	저자	Shata ASA(독일)	피인용수	28	연평균 인용값	4.67
7	제목	Impacts of offshore wind farm construction on harbour porpoises(2006)				
	저자	Carstensen J(독일)	피인용수	27	연평균 인용값	4.50
8	제목	Wind turbine underwater noise and marine mammals: implications of current knowledge and data needs (2006)				
	저자	Madsen PT(독일)	피인용수	27	연평균 인용값	4.50
9	제목	The role of the DPSIR approach and conceptual models in marine environmental management: an example for offshore wind power (2002)				
	저자	Elliott M(영국)	피인용수	27	연평균 인용값	2.70
10	제목	Visual assessment of off-shore wind turbines(2007)				
	저자	Bishop ID(호주)	피인용수	26	연평균 인용값	5.20

전 세계적으로 2000년부터 2009년까지 “해상풍력” 관련 특허출원 및 등록건수는 지속적으로 증가하고 있다. 특히 2007년부터 현재까지 100건 이상의 꾸준한 성장률을 보인다.

2010년 이후에 출원된 특허는 미공개 특허가 상당수 존재하기 때문에 2010년도 특허 출원이 2009년과 비슷한 성장을 보일 것으로 추정할 수 있다. 따라서 해상풍력에 관한 기술개발은 발전단계에 있는 것으로 나타나고 있으며, 광범위한 활용 및 응용이 확대될 것으로 사료된다(Fig. 9).

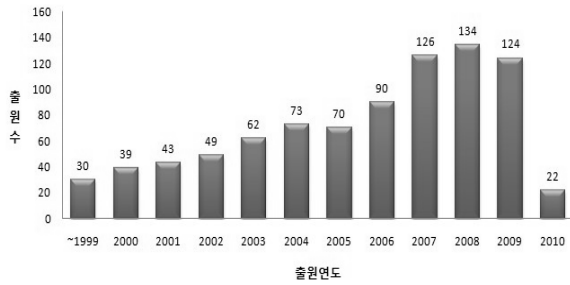


Fig. 9. Trends of patent registered each year.

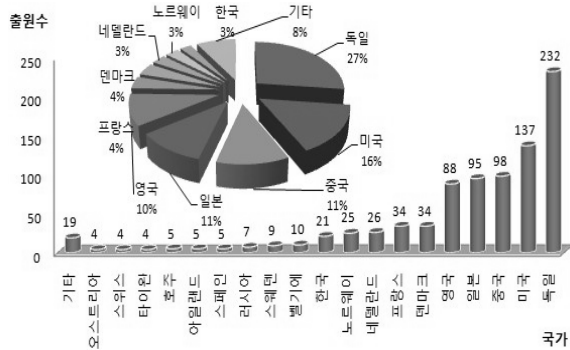


Fig. 10. trends of patents registered by each country.

6-2. 국적별 특허동향

전체 862건의 특허 중 독일이 전체 27%를 차지해 가장 높다(Fig. 10). 미국이 137건의 특허를 출원하여 전체 16%를 차지하고 있고, 중국은 98건 11%, 일본이 95건 11%, 영국이 88건 10%를 차지하고, 나머지 덴마크, 프랑스, 네덜란드, 노르웨이, 한국 등이 전체 출원특허의 3~4%를 차지한다. 독일, 미국, 중국, 일본, 영국 등 5개국 이 전체 85%를 점유하고 있으며, 그 뒤를 이어 덴마크, 프랑스, 네덜란드, 노르웨이, 한국 등이다. 특히 중국은 2006년도부터 특허출원 증가를 계속하며 2009년도에 가장 많은 특허출원을 했으며, 덴마크는 특허출원은 적지만 해상풍력 기술력은 상위 에 링크되어 있는 것으로 알려지고 있다.

6-3. IPC 분류별 주요국 출원(등록) 현황

특허의 IPC 분류별 특허 출원수를 분석하여 기술별 출원 집중도를 살펴보면, 출원 빈도수는 F03(액체용 기계 또는 기관; 풍력 원동기, 스프링 원동기, 중력 원동기; 다른 종류에 속하지 않는 기계동력 또는 반동 추진력을 발생시키는 것)이 411건으로 가장 많았는데, 그 중에서 F03D(풍력원동기)에 관한 특허가 328건으로 다수를 차지하고 있다(Fig. 11). 다음으로

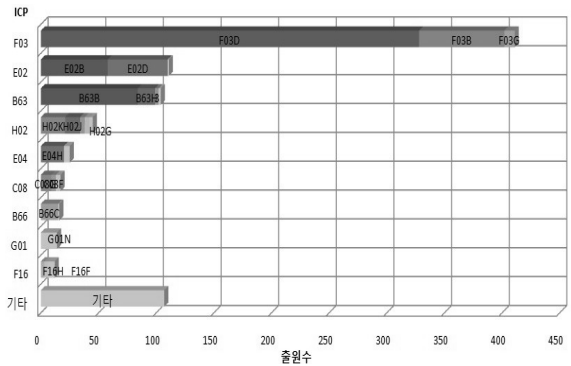


Fig. 11. Trends of patent registered by technology classification.

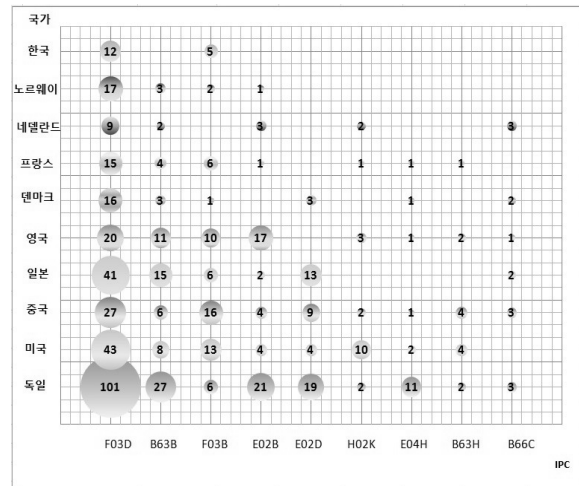


Fig. 12. Trends of major nation's patent registered by IPC classification.

많은 것이 E02(토사의 이송; 기초; 수공)가 111건으로 많았으며, B63(선박 또는 그 밖의 물 위에 뜨는 구조물; 관련 의장품) 104건, H02(전력의 발전, 변환, 배전) 45건 등으로 나타나고 있다.

해상풍력 관련 주요 상위 출원국별, 상위 IPC 세부 분류별에 대해 분석을 수행한 결과, 전반적으로 거의 모든 출원에 대한 IPC 세부 분류는 F03D(풍력원동기)에 가장 많은 특허출원을 보이고 있으며, 대부분의 국가가 이 분야에 가장 많은 출원을 하고 있는 것으로 나타나고 있다.

1위의 독일은 F03D와 B63B(선박 또는 그 밖의 물 위에 뜨는 구조물; 의장품) 부문에 많은 특허출원을 하고 있으며, 2, 3위의 미국과 중국은 F03D와 F03B(액체용 기계 또는 기관) 부문에, 4위의 일본은 F03D와 B63B에, 5위의 영국은 F03D와 E02B(수공 선박의 리프트(Lift) 준설) 부문에, 덴마크를 비롯한 기타

국가들은 F03D 부분에 특허출원을 주로 하고 있는 것으로 나타났다(Fig. 12).

6-4. 기술 분류별 주요국 출원(등록) 현황

해상풍력에 관한 주요 출원국별 대표적 기술내용에 대한 기술분류를 분석을 수행하였다. 출원특허의 해상풍력 내용에 따라 크게 Foundation 분야, Installation 분야, Blade 분야, Generator(Generation) 분야, Maintenance 분야, Tower 분야, Turbine 분야, Connecting Line 분야, Etc(기타) 분야 등으로 나누어 세분하였다.

각 국가별로 살펴보면 독일의 경우 Foundation 분야, Installation 분야, Maintenance 분야에 많은 비중을 나타내고 있으며, 미국의 경우에는 Blade 분야, Foundation 분야, Installation 분야 순으로 출원 내용이 많음을 보이고 있다. 그밖에 영국, 일본, 중국은 Foundation 분야, Installation 분야에, 덴마크는 Installation 분야에, 프랑스는 Blade 분야에, 네덜란드는 Installation 분야와 Blade

분야에, 노르웨이는 Foundation 분야와 Installation 분야에, 한국은 Generator(Generation) 분야와 Foundation 분야에 특허출원이 많은 것으로 나타나고 있다(Fig. 13).

6-5. 연도별 주요국 출원(등록) 현황

2001년~2010년까지의 공개특허를 대상으로 출원건수는 독일이 전체 862건 가운데 232건의 특허출원을 한 것으로 나타나고 있다. 이들 년도 가운데 2001년부터 2009년까지를 유효 데이터(특허출원부터 공개기간 : 18개월)로 설정, 최근 2007년을 기점으로 독일과 함께 프랑스, 일본의 특허출원은 감소하고 있는 것으로 나타나고 있다. 최근에는 중국, 영국, 일본, 한국을 제외한 국가에는 특허출원이 담보 및 감소하고 있는 것으로 나타나고 있다(Fig. 14).

6-6. 주요국의 기술위치

상대적 중요도(활동지수)와 상대 성장률의 상관관계에서 주요국의 기술위치를 분석하였다. 활동지수는 국가별로 특정 기술에 상대적으로 집중하는 정도를 살펴보기 위한 지표로서 그 값이 1보다 큰 경우는 비교국 대비 전체 특허 중에서 해상풍력 기술에 대해 상대적 특허 출원이 활발함을 나타낸다. 구하는 수식은 (해상풍력 분야에서 각국의 특허출원 비중)/(전체 분야에서 각국의 특허 출원비중)이다. 상대 성장률은 연도별 성장률의 평균값으로 산정하며, 평균을 구할 때는 기하평균을 사용한다. 분석 대상연도는 최근의 동향을 파악하기 위해 최근 5년(2005년~2009년)으로 하였다.

노르웨이(1,808)는 해상풍력 출원 특허수가 많지 않지만, 노르웨이의 국가전체 출원 특허수를 고려할 때 비교국가 대비 상대적으로 해상풍력에 출원 특허가 많은 것으로 나타났다. 따라서 상대 성장률이 매우 높은 것으로 나타났다. 이에 반해 덴마크(865)는 상대 성장률은 낮은 편이지만, 활동지수는 매우 높은 것으로 나타났다. 이밖에 중국(1,099,710), 한국(526,215), 네덜란드(4,880) 등의 국가들이 상대성장률이 높은 것으로 나타나고 있으며, 상대적으로 미국(1,221,600)과 영국(53,414)을 비롯한 독일(293,655), 프랑스(68,210), 일본(1,744,495) 등의 국가에서는 최근의 출원이 감소되면서 활동지수가 낮게 나타나고 있음을 보여주고 있다. 각국의 괄호 안 숫자는 DWPI에서 검색된 2005년부터 2009년까지의 전체 특허출원을 나타낸 것이다(Fig. 15).

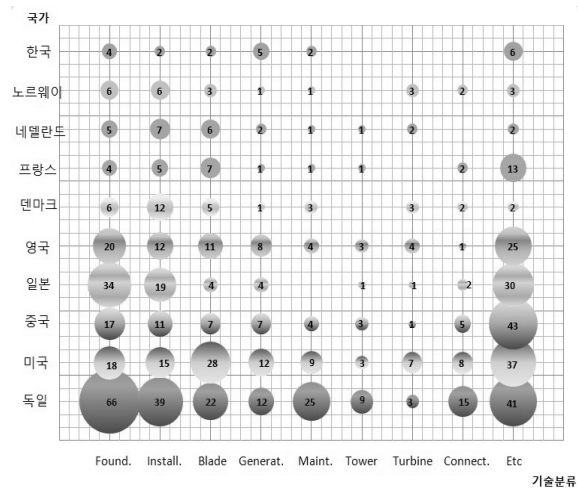


Fig. 13. Trends of major nation's patent registered by technology classification.

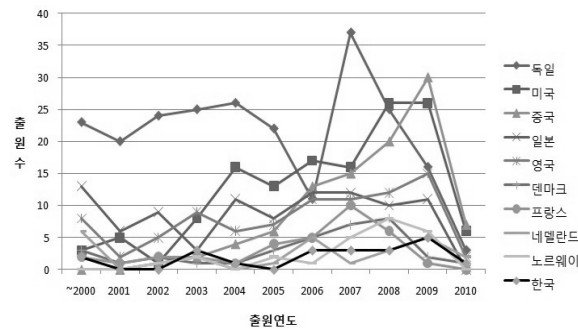


Fig. 14. Trends of annual patent registered by major country.

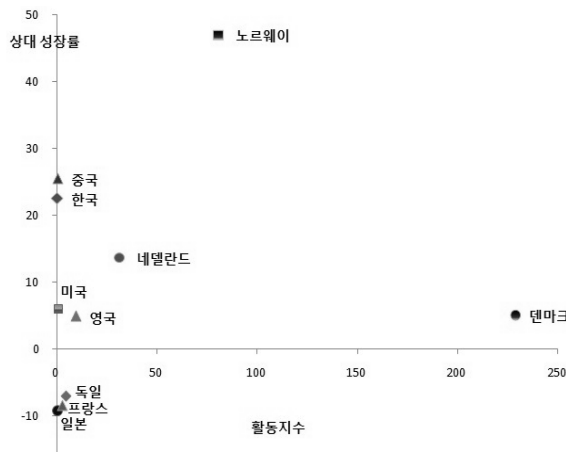


Fig. 15. Technology potential of major countries.

7. 결 론

해상 풍력발전사업은 그 특성상 해상풍력 최근접지에 생산설비를 확보하는 것이 매우 중요하다. 그렇지 못할 경우 물류비를 절감할 수 없어서 경쟁력이 낮아지게 된다. 따라서 국내 윈드 타워와 해양구조물 제조업체가 미국 및 EU 해상풍력발전시장에 공급하기 위해서는 미국 동북부, 캘리포니아 해안 및 북해 인근에 생산거점을 확보하는 것이 관건이다.

해상풍력발전기의 신뢰성과 효율증가가 해상풍력산업을 위한 도전이다. 앞으로 5년내에 중국에 10 GW, 미국에 10 GW 및 유럽에 10 GW의 해상풍력시장이 있다. 각국이 해상풍력설치를 증가하기 위해 전력망 인프라를 개발하고, 항구에 투지하는 것이 중요하다.

세계적으로 대형 해상풍력 발전 프로젝트 가능성이 있는 곳 중에서 미국 캘리포니아주 연안은 미국 동부의 매사추세츠주 · 델라웨어주 연안과 함께 가능성이 큰 지역이다. 특히 장기적으로 볼 때 수심 50 m 이상 심해 부유식 풍력발전 프로젝트가 가능성이 많다. 국내 대형조선업체들이 해상풍력발전 단지의 해외수출을 위해 지금부터 많은 관심을 가져야 한다.

해상풍력터빈은 상당한 새로운 실험설비가 필요하고 더 큰 부품 크기와 더 높은 신뢰성 요구를 수용하기 위해 개량이 필요하다. 5 MW 이상 10 MW의 대형 블레이드 실험설비와 구동력 시험설비를 정부와 기업이 공동분담으로 설치하고 해상현장에 5 MW급의 풍력발전기를 설치하여 설계용 데이터를 수집해야 한다.

특히 포트폴리오 분석에서 해상풍력 기술은 발전기에 위치하고 있으며, 향후 성숙기를 위한 기술적으

로 발전이 지속될 것으로 예측되고 있다.

최근 3년간 중국은 기술을 주도해 왔던 독일과 미국의 특허출원수와 비슷하게 증가하고 있으며, 해상풍력 기술에 기울이는 관심도 매우 높다. 그러나 중국은 다른 주요국에 비해 핵심 기술 특허가 부족한 것으로 알려 있다. 주요국 가운데서 중국의 특허 출원의 상대성장률이 가장 높지만, 출원 특허의 피인용비가 가장 낮게 나타나고 있다. 한국의 특허 출원은 해상풍력에서 미미한 상태를 보이고 있으며, 향후 관련분야 진출을 위해서 덴마크, 독일, 미국, 영국 등과 같은 이미 진입 국가의 논문과 특허정보 기술을 면밀히 검토하고, 시장 선점 및 확대를 위해 보다 적극적인 방법과 전략이 필요할 것으로 생각된다.

각대학교 기계과에 해상풍력발전을 포함한 대학원 전문과정을 개설하여 풍력발전 시스템 설계 및 통합설계를 수행할 수 있는 설계전문 인력을 배양하여 풍력발전사업을 발전시키고 새로운 고용창출을 하여야 한다.

감사의 글

이 원고는 한국과학기술정보연구원(KISTI)이 수행하고 있는 교육과학기술부의 과학기술 진흥기금 출연사업인 “고경력과학기술인을 활용한 지원사업(ReSEAT PROGRAM)”의 일부입니다. 이에 교육과학기술부에 심심한 사의를 표합니다.

참고문헌

1. S Tadigadapa et. al, “Review of Knowledge Development for the Design of Offshore Wind Energy Technology”, *Wind Energy*, 12, 2009, pp.411~430.
2. M. O. L. Hansen et al, “State of the art in wind turbine aerodynamics and aeroelasticity”, *Progress in Aerospace Science* 42, 2006, pp.285~330.
3. Seidel M, “Design, fabrication and installation of the offshore wind turbine REpower 5M”, *STAHLBAU*, 76, 9, pp.650~656.
4. Zhao-xue CHENG et., al, “Criterion of aerodynamic performance of large scale offshore horizontal axis wind turbine”, *Applied Mathematics and Mechanics*, 31, 1, 2010, pp.13~20.
5. 이기학 et., al, “효율적인 2단계 최적화를 통한 3차원 해상풍력터빈 블레이드 설계”, *신재생에너지*, 3, 3, 2007, pp.63~71.
6. Puneet Agarwal et., al, “Simulation of offshore wind turbine response for long-term extreme load prediction”, *Engineering Structures*, 31, 2009, pp.2236~2246.

7. J.F. Manwell et., al, "Review of design conditions applicable to offshore wind energy systems in the United States", *Renewable Energy and Sustainable Energy Review*, 11, 2007, pp.210~234.
8. Leblanc C et., al, "Response of stiff piles in sand to long-term cyclic lateral loading", *Geotechnique*, 60, 2, 2010, pp.79~90.
9. Duhrkop J et., al, "Monopile foundations for offshore-wind power plants - On the influence of multidirectional cyclic loading", *BAUTECHNIK*, 85, 5, 2008, pp.317~321.
10. B.W. Byme, "Assessing Novel Foundation Options for Offshore Wind Turbines", *PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS of THE ROYAL SOCIETY A*, 361, 2003, pp.2909~2930.
11. Houlsby GT et., al, "Field trials of suction caissons in sand for offshore wind turbine foundations", *Geotechnique*, 56, 1, 2006, pp.3~10.
12. EWEA(2010), *New Energy Finance(2010)*, 지식경제부 홈페이지.
13. N E D O 再生可能エネルギー技術白書 (2010年7月).
14. <http://apps.isiknowledge.com>
15. DWPI DB.