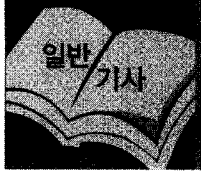




WATER  
FOR  
FUTURE



# 해상풍력 개발 동향 및 토목기술의 역할



**강 금 석**  
한국전력공사 전력연구원  
gldstn@kepri.re.kr

## 1. 서론

해양은 장차 밀어닥칠 자원난에 대비할 수 있는 지구상의 마지막 보고로서 그 가치가 점차 높아지고 있으며, 특히 해양에너지 자원개발은 점차 심화되고 있는 전 지구적인 환경오염 문제에 효과적으로 대응할 수 있는 방안의 하나로서 중요성이 인식되고 있다.

해양에는 이용 가능한 다양한 형태의 에너지가 부존한다. 해양에너지는 크게 태양, 달, 지구 등 천체의 상호운동에 의한 에너지와 태양에서 방사되는 태양에너지로 나눌 수 있다. 태양 방사에너지가 지구의 대기권에 도달하면 약 30%는 대기 중에서 산란이나 반사 등에 의하여 우주공간으로 되돌아가고, 나머지 70%는 대기권 내에서 흡수되어 여러 가지 형태의 에너지로 변환되며, 크게 바람, 파랑, 해류와 같은 흐름 형태의 운동에너지와, 대기, 육지 또는 해양에 저장되는 열에너지로 나누어진다. 전체의 약 23%를 차지하는 운동에너지는 풍력, 해류, 파력에너지로 이용될 수 있는 반면에, 열에너지 부분은 47%로 크지만 온도가 낮아 효율적인 이용은 어렵다. 해양에너지는 조력, 조류력, 파력, 해수온도차와 해상풍력, 해상태양광, 해수염도차, 그리고 해양바이오 등 다양한 에너지원이 존재한다.

해상풍력은 해상의 강한 바람으로 높은 발전량을 확보할 수 있어 설치 및 운영 비용의 증가를 상쇄할 가능성이 있고, 경관 영향(Visual impact), 소음 문제의 해결이 가능하며, 육상의 경우 도로 등 운반 능력의 한계로 크기의 제약을 받지만, 해상 설치는 크기의 제한이 없으며, 연안의 대도시와 가깝게 설치할 수 있어 송배전 손실을 줄일 수 있는 잇점이 있다.

또한, 신재생에너지 가운데 풍력은 발전 단가 측면에서 화력, 원자력 등 기존 에너지원에 가장 근접해 있는 기술로서 해상풍력이 개발될 경우, 해상풍력의 송전 라인을 이용하여 인근 해양의 파력, 조류력 등 다른 에너지원의 추가 개발이 가능하여, 다른 해양에너지원 개발에 직접 기여할 수 있어, 선진 외국에서도 비상한 관심을 보이는 이슈 중 하나이다.

풍력발전단지 조성에 있어 해상풍력은 육상풍력에 비해 대형단지를 조성하기가 용이한 반면 설치 및 유지보수 비용이 많이 소요되어 현재는 육상풍력단지보다 경제성이 낮은 상태이다. 하지만 해상풍력기, 단지설계, 건설기술 및 유지보수 기술 등과 같은 관련기술이 성숙단계에 이르면, 향후 해상풍력이 풍력발전분야의 주축이 될 것으로 전망된다.

## 2. 해상풍력 개발 동향

최근 육상풍력은 양호한 입지의 고갈과 민원의 증가에 따라 추가적인 입지확보에 어려움을 겪고 있어, 풍력산업 선진국들은 해상풍력단지 개발에 총력을 기울이고 있다. 유럽의 경우 현재 운영 중인 해상 풍력이 약 3GW이지만(표 1), 2010년까지 독일에서 만

표 1. 유럽의 상업운전 해상풍력(2009. 1 현재)

Wind farm	Nation	Year built	Capacity (MW)	Total cost (million)	Depth (m)	Developer	Foundation type	Turbine manufacturer	Turbine size (MW)	Hub Height (m)	Distance to shore (km)
Vindeby	DK	1991	5	11.2	3.5	SEAS	gravity	Bonus	0.45	38	1.5
Lely	NL	1994	2	4.8	7.5	Energie Nord West	mono	NED Wind	0.5	39	0.8
Tuno Knob	DK	1995	5	11.2	4	Midtkraft		Vestas	0.5	40.5	3
Dronten	NL	1996	11	28.6	1.5	Nuon	mono	Nordtank	0.6	50	0.03
Bockstigen	SDN	1997	3	4.8	6		mono	wind world	0.55	41.5	
Blyth	UK	2000	4	7	8.5	Nuon, Shell, E.ON		Vestas	2	69	1
Middlegrunden	DK	2001	40	53	6	Energie E2	gravity	Bonus	2	64	2
Utgrunden	SDN	2001	10	14	8.6	Vattenfall	mono	Enron	1,425		
Yttre Stengrund	SDN	2001	10	18	8	Vattenfall	mono	NEG	2	60	
Horns Rev	DK	2002	160	500	10	Vattenfall	mono	Vestas	2	70	14
Nysted	DK	2003	165	373	7.75	DONG	gravity	Bonus	2.3	70	10
Samsø	DK	2003	23	52	20		mono	Bonus	2.3	63	3.5
North Hoyle	UK	2003	60	148	12	npower	mono	Vestas	2	67	7
Ronland	DK	2003	17.2	26	1			Bonus/Vestas	2.3	78	0.1
Scroby Sands	UK	2004	60	155	16.5	E.ON	mono	Vestas	2	68	2.5
Arklow	IRE	2004	25	70	3.5	Airtricity	mono	GE	3.6	74	10
Ems Emden	GMN	2004	4.5		3	Enova		Enercon	4.5	100	0.04
Kentish Flats	UK	2005	90	217	5	Vattenfall	mono	Vestas	3	70	10
Barrow	UK	2006	90	190	17.5	DONG	mono	Vestas	3	75	7.5
Egmond aan Zee	NL	2006	108	334	18	Nuon	mono	Vestas	3	70	10
Rostock	GMN	2006	2.5		2			Nordex	2.5	80	0.5
Burbo Bank	UK	2007	90	185	5	DONG	mono	Siemens	3.6	83.5	6.5
Beatrice	UK	2007	10	70	45	Talisman	Jacket	Repower	5	88	22
Lillgrund	SDN	2007	110	300	7	Vattenfall	gravity	Siemens	2.3	69	10
Q7 (Princess Amalia)	NL	2007	120	590	21.5	Econcern	mono	Vestas	2	59	23
Thronton Bank	BEL	2008	30	197	20	C-Power	gravity	Repower	5	94	28
Kemi Ajos	FIN	2008	24			PVO-Innopower	Artificial island	WinWind	3	88	<1
Inner Dowsing	UK	2008	97	300	10	Centrica	mono	Siemens	3.6	80	5.2
Lynn	UK	2008	97	300	10	Centrica	mono	Siemens	3.6	80	5.2
Brindisi	ITL	2008	0.08		108	Blue H	Floating		0.08		20
Hooksiel	GMN	2008	5		2-8	BARD	Tripod	Enercon	5		<1

도 3GW 이상의 해상풍력이 건설될 예정으로 기하급수적으로 풍력의 양이 증가하고 있는 형국이다. European Wind Energy Association (EWEA)는 2030년까지 유럽 전력 수요의 23%를 풍력이 담당할 것을 목표로 하고 있다.

국내의 경우도 강원도 일부와 제주도를 제외하고는 육상풍력단지로서 경제성을 가지는 입지가 극히 제한

되어 있고 이마저도 민원의 증가에 따라 입지확보의 어려움을 겪고 있어 해상풍력 개발에 관심을 기울여야만 하는 상황에 처해있다. 지식경제부는 풍력분야에 3~5년 동안 매년 100억원 이상을 투자하고 있으며, 2012년까지 풍력발전 용량을 2.25GW, 2030년까지는 7.3GW 이상을 보급하는 목표를 가지고 있다. 국내 발전회사와 건설사 등은 다양한 해상풍력단지



표 2. 국내의 해상풍력 추진 현황

추진 기업	추진지역	규모
금호산업	전라남도 여주시	2,000억원
한국남부발전	부산시 앞바다	350MW
한국수력원자력 등	제주시	30MW
동국 S&C	전남 신안	90MW
POSCO 건설	전남 서남해안	600MW
한화건설 컨소시엄	인천 무의도	2.5MWx39
한전 및 발전자회사	서남해안	300MW

투자협약(MOU)을 경쟁적으로 맺고 있어 조만간 국내에도 해상풍력이 현실화될 전망이다(표 2).

### 3. 국내의 해상풍력 자원 및 입지 평가

풍력발전사업이란 최소의 설치비용으로 최적의 풍황 입지에 풍력발전기를 설치하여 최대의 전력을 생산하고, 생산된 전력을 계통연계를 통하여 수송가로 안정되게 전력을 공급하는 것을 목표로 하기 때문에, 발전단지 개발에는 표 3에 제시되어 있는 항목들에 대한 평가가 중요하다. 풍력발전은 풍황에 의해 경제성이 결정되므로 풍황이 가장 중요한 선정기준이 되며, 해상풍력의 경우 기기 설치에 용이한 수심 및 항구이격거리 등이 경제성 확보 및 유지관리 측면에서 추가적인 핵심 요소로 작용한다. 표 3에 해상풍력단지의 부지선정시 고려해야 할 세부기준을 나타내고

표 3. 해상풍력 부지선정시 기준

항목	세부항목	세부기준
풍황	풍력자원	바람등급(풍력밀도 및 평균풍속)
	태풍 및 풍 기상	태풍 발생빈도와 최대풍속
해황	파랑	파향별 파고 및 주기
	조위차 및 조류속	평균조차, 최대조차, 조류속
	수심 및 지질	수심, 해저지질, 지반상태
	지진	지진활동도, 지진력
환경 보호	환경보호지역, 조류 이동경로 및 서식지	환경보호지역, 조류 이동경로 및 서식지 유무
	입지 조건	항구, 변전소 등으로부터의 이격거리
기타	인근 해양 이용현황	어장, 채사장, 군사시설, 항로, 국립공원 유무

표 4. 풍력의 분류

Elevation Wind Power Class	80 m Wind Power Density (W/m <sup>2</sup> )	Wind Speed (m/s)
1	< 245	< 5.9
2	245 - 367	5.9 - 6.9
3	367 - 490	6.9 - 7.5
4	490 - 612	7.5 - 8.1
5	612 - 735	8.1 - 8.6
6	735 - 980	8.6 - 9.4
7	> 980	> 9.4

있다.

풍력 에너지는 풍속의 세제곱에 비례한다. 풍속의 미소한 차이가 풍력발전량에는 큰 변화로 나타나기 때문에, 주어진 입지조건에서 풍력기기가 제대로 성능을 발휘하기 위해서는 풍력자원을 정확히 평가해야 한다. 단위면적당 파워로 표현할 수 있는 풍력밀도는 풍력단지에서 바람자원을 산출하는 유용한 방법으로, 사용 가능한 풍력에너지를 나타내는 지표이다. 표 4는 3MW급 풍력터빈의 허브높이로 예상되는 고도 80m의 풍속 및 풍력밀도에 따른 풍력등급(Wind Power Class)을 나타내고 있다.

그림 1은 한국에너지기술연구원에서 작성한 격자 크기 3km × 3km 한반도 풍황지도를 이용하여 한반도 해양의 풍력자원을 평가한 자료이다. 이 지도는 3시간 단위인 KMA/RDAPS(Regional Data Assimilation and Prediction System)를 기본 입

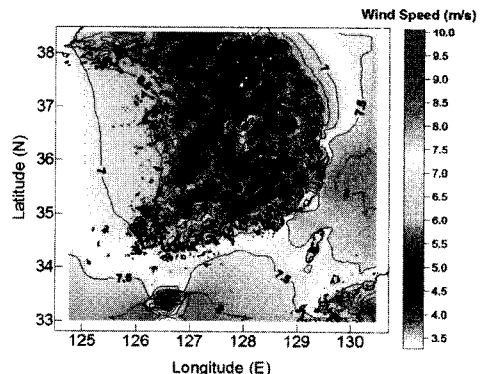


그림 1. 한반도 주변 해양의 평균 풍속

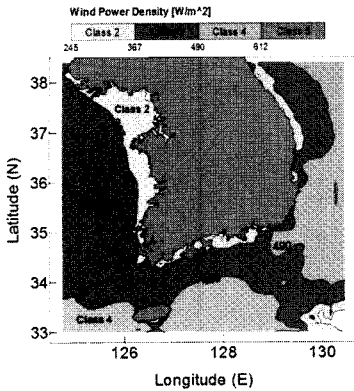


그림 2. 한반도 주변 해양의 풍력 밀도

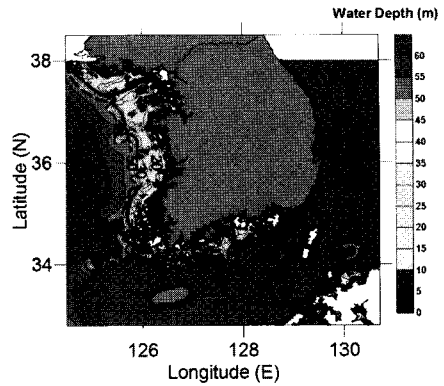


그림 4. 한반도 주변 해양의 수심

력 자료로 하여, 최근 3년간(2005~2007)의 풍황자료를 분석하여 고도 80m의 평균풍속을 나타낸 것이다. 이 풍황자료를 이용하여 표 4의 기준에 따라 한반도 주변의 풍력밀도등급을 나타내면 그림 2와 같다.

기존에는 일반적으로 풍력등급 4 이상 지역을 풍력개발 적지로서 판단하여 왔으나, 최근 유럽 풍력단지 건설 경험에 따르면 기술의 발전과 대형화에 따라 3등급 지역도 유망지역으로서 경쟁적으로 개발이 진행되고 있으며, 2등급 지역으로 확대 적용되고 있다.

그림 2를 보면, 제주도 남쪽과 동해 외해 부분은 4등급에 해당하고, 제주도 북쪽, 남해 연안, 서해 외해 지역이 3등급에 해당하며, 서해 연안은 2등급에 해당한다. 4등급 지역은 대수심 지역으로 현재 설치 가능한 고정식 기초구조의 적용이 어려워 현재 상태에서 개발이 어려울 것으로 판단된다. 따라서 국내 해상풍력은 수심 및 전력계통 연계 등과 같은 다양한 변수들을 고려할 때, 풍황은 상대적으로 유리하지 않지만 수

심이 낮고 계통 연계비가 적게 소요되는 2~3등급 지역에서 우선적으로 개발될 전망이다. 해상 풍력의 선두 주자인 유럽 각국이 4등급 이상의 지역에 개발하고 있는 것과 비교하면 국내는 상대적으로 낮은 풍력 등급 지역에 개발이 될 전망이어서 경제성 확보를 위한 노력이 필요한 실정이다.

풍력터빈을 해상에 설치하기 위해서는 육상에서와는 달리 해상 지지구조물을 구비해야 하기 때문에, 해상단지 예정지의 수심은 경제성에 매우 큰 영향을 준다. 해상풍력발전 기초구조물은 수심에 따라 다른 지지구조형식을 적용하고 있다. 고정식 기초(모노파일, 트라이포드 방식 등)는 많은 해양 구조물 기초 시공 실적을 통하여 검증이 완료된 구조형식으로, 얕은 수심에서는 경제적이고 효율적이지만 수심이 깊어지면 경제성이 낮아지는 단점이 있다. 반면, 부유식 기초는 해안에서 멀리 떨어져 수심이 깊은 곳에 설치할 수 있지만 기술개발 수준이 낮고 아직까지 시공사례가 없어 실제 현장적용까지는 많은 시간이 소요될 것으로 예상된다.

해외에서 운영 중인 해상풍력 단지는 대부분 수심 30m 이내에 위치하고 있으며, 기술적으로는 수심이 대략 50m인 해역까지 고정식 지지구조물의 설치가 가능한 것으로 파악된다. 국내 해역의 수심을 격자간격 1분(약 1.5km, 풍황자료의 해상도는 3km) 자

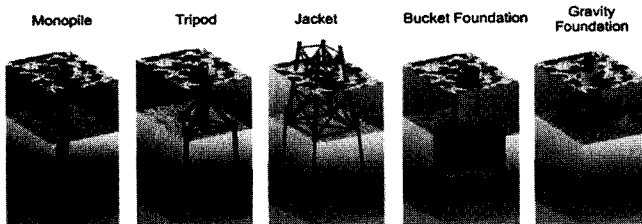


그림 3. 해상풍력의 기초 및 지지구조물 형식

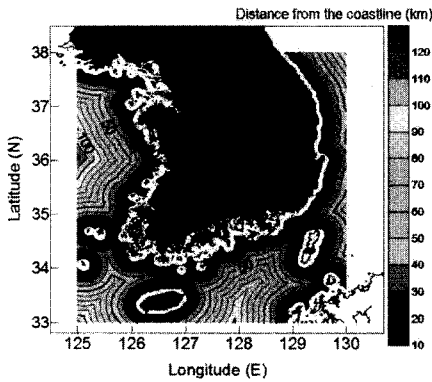


그림 5. 연안으로부터의 이격거리

료로 분석해 보면(그림 4), 수심 10m~20m 해역이 전체 면적의 약 51%를 차지한다. 특히, 현재 기술 상태로 해상풍력의 주요 설치 지점인 5~20m 사이가 22,251km<sup>2</sup>로서 연안 해역의 약 48%에 해당함을 알 수 있다(표 5). 서해에 저수심 영역이 넓게 분포하고 있으며, 남해안은 다도해 연안에 50m 이하의 저수심 영역이 존재한다. 반면, 동해안의 경우는 급격한 해저 경사로 저수심 영역이 해안 일부로 국한된다. 이를 고려할 때 현재 기술로 대형 풍력발전단지 조성이 가능한 지역은 서해 및 남해 일부 해역이라 할 수 있다.

현재의 기술개발 수준을 고려할 때, 수심 5~20m 지역은 현재 해상풍력이 일반적으로 적용되고 있는 지역이며, 20m~30m 지역은 기술적으로 가능한 지역이고, 50m까지는 고정식을 적용할 수 있는 지역, 50m 이상은 고정식 보다는 부유식의 적용이 필요한 지역으로 판단된다.

육지로부터 풍력단지의 이격거리는 해상풍력의 경관 문제를 고려하기 위한 것으로서 현재 국내 및 외국 모두 경관 문제에 대한 특별한 법적 규제기준은

표 5. 한반도 주변 해양의 수심별 면적

수심(m)	0-5	5-10	10-20	20-30	30-40	40-50	total
면적(km <sup>2</sup> ) (면적비, %)	1,655 (3.6)	6,484 (13.9)	15,767 (33.8)	9,530 (20.5)	5,423 (11.6)	7,728 (16.6)	46,587
누적면적(km <sup>2</sup> ) (누적면적비, %)	1,655 (3.6)	8,139 (17.5)	23,906 (51.3)	33,436 (71.8)	38,859 (83.4)	46,587 (100.0)	46,587

표 6. 국내 해상풍력 개발 가능량

수심별	제한	면적(km <sup>2</sup> )	최대설치 용량(GW)
0~50m	전체영역	33,765	166
0~30m	사회·환경측면 고려	2,623	12.9
5~20m	사회·환경측면 고려	1,544	7.6
	사회·환경측면 고려	801	3.9

존재하지 않는다(그림 5). Eerens(2008)는 환경 및 사회적 측면을 고려하여 연안으로부터의 이격거리별 개발 가능량을 0~10km까지는 해상면적 중 4%로, 10~50km 지역은 10%로 추정하고 있다. 이 방법은 해양의 이용 현황, 가시성, 환경문제 등 계획 단계에서의 불확실한 부분을 반영하는 방법으로 유용하다고 판단된다.

국내의 해상풍력 개발 가능량을 평가하기 위하여 표 6과 같은 기준들 중에서 풍력등급, 수심, 연안 이격거리에 따른 사회·환경적 제약 조건을 고려하여 최대 풍력터빈 설치용량을 산출하였다. 개발 가능 지역으로는 풍력등급 3이상이며, 수심 50m 이내의 영역으로 제한하고 각 조건별 해당 면적을 산출하였으며, 단위면적당 풍력터빈 설치용량을 고려하여 개발 가능량을 산출하였다. 국내에서 해상풍력용으로 개발 중인 3MW 용량의 터빈은 허브 높이 80m, 블레이드 직경 91.3m로서 10D x 5D로 배치한다고 가정했을 때, 단위 면적당 설치 용량이 4.92MW/km<sup>2</sup> 이다. 이상의 조건들을 고려하여 개발 가능량을 추정하면 표 5와 같다. 고정식 지지구조물을 이용하여 개발 가능한 용량은 약 12.9GW로 나타났으며, 우선 적용 대상 지역인 수심 5~20m 지역의 경우, 약 3.9GW로 추정되었다. 본 검토는 개발 가능량을 매우 보수적으로 판단한 것으로서 단지 설계시 터빈 배치 등이 최적화

되어 배치된다면 실제 개발가능량은 더욱 증가할 것으로 판단된다.

결론적으로 국내 해상의 풍황은 바람등급 4 이하로서 외국에 비해 상대적으로 풍황조건이 우수하지는 않지만, 서해안과 남해안에 고정식 지지구조물로서 풍력터빈의 설치가 가능한 수심 50m 이하의 천해역이 광범위하게 존재하고, 우선적으로 개발이 가능한 수심 5-20m, 바람등급 3 이상 지점에는 약 3.9GW 용량의 설치가 가능할 것으로 추정되었다.

#### 4. 해상풍력 분야에서 토목 기술의 역할

해상풍력 단지개발을 위한 풍력자원 평가는 수력 발전소 설계시 수자원 평가와 매우 유사한 기술이 이용되는 분야로서 적정입지 선정을 위한 광역의 풍황 분포 조사 및 해석, 풍황지도 작성, 기상탑 설치, 풍황조사 및 분석, MCP (Measure -Correlation - Prediction), 자원량 산출의 과정을 거치게 된다. 국내의 경우 한반도 해양의 풍황지도는 에너지기술연구원에서 1km x 1km 스케일로 작성 중에 있으며, 해상풍력 자원 평가를 위한 기상탑은 현재까지 설치된 곳이 없으나 2009년에 서남해안에 최초로 설치될 예정이다. 또한, 해상풍력 단지 설계를 위해서는 표 3에 나타난 바와 같이 광범위한 해양조사 및 환경조사가 필수적이어서 토목, 해양분야의 연구 및 사업 참여가 필연적일 것으로 판단된다.

IEC 61400-3은 다음과 같이 해상풍력 터빈을 정의하고 있다.

"A wind turbine shall be considered as an off-shore wind turbine if the support structure is subject to hydrodynamic loading."(IEC 61400-3, Wind turbines-Part 3: Design requirements for offshore wind turbines)

즉, 해상풍력이 육상풍력과 구별되는 결정적 인자

는 파력, 조류력 등 동수력학적 부하가 작용한다는 것이다. 또한, 해상풍력은 기초 및 지지구조물과 시공이 차지하는 비용이 전체의 40% 이상으로서 육상 풍력과 달리 토목분야의 비중이 큰 영역으로서 많은 관심이 필요한 영역이나, 국내의 기존 풍력관련 연구 및 산업은 이 부분에 대한 준비가 매우 부족한 실정으로 토목인의 향후 역할이 필요할 것으로 판단된다.

한편, 외국의 경우 해상풍력 기초 및 지지구조물의 설계시 신뢰성 설계 기법을 이용하고 있다. 유럽의 경우에는 부분안전계수법(Partial Safety Factor Method) 이, 북미의 경우에는 LRFD(Load Resistance Factor Design) 기법이 주로 적용되는데, 국내 해상 구조물의 경우 이러한 신뢰성 설계 기법이 도입 초기 단계로서 해상교량 설계시 일부 적용되고 있는 실정이다. 따라서, 국내의 기술 향상 및 해외 사업 진출을 고려한다면 신뢰성 설계 기법의 도입이 반드시 필요하다 고 판단된다.

또한, 외국의 경우도 현재 운전중이거나 계획 중인 대부분의 해상풍력의 설치 수심이 20m 이내이고, Beatrice와 같이 대수심 지역에 대해서는 시험적인 연구를 진행 중에 있다. 따라서, 해상풍력의 입지 확대를 위해서는 30-50m의 고정식 지지구조물과 50m 이상의 대수심에 적용할 수 있는 부유식 기초에 대한 연구가 필요할 것이다.

#### 5. 결론

현재 세계적으로 해상풍력의 개발이 폭발적으로 증가하고 있으며, 국내의 경우도 활성화될 전망이다. 이와 같은 국내외 추세에 발맞춰 최근 정부는 해상풍력발전의 국내 도입 촉진 및 타당성 평가를 위한 정책 과제를 제안하여, 「국내 해역의 중형 해상풍력발전플랜트 타당성 조사 연구」를 한국전력공사 전력연구원 이 수행 중에 있으며, 본 글에서는 이 타당성 조사 연구의 일환으로, 해상풍력단지 개발 후보지를 선정하기 위하여 국내 해역의 풍황, 해황 등의 입지 조



건을 분석하고, 개발 가능량을 추정한 결과를 소개하였다.

해상풍력은 국내에서 설계 및 시공사례가 빈약하고, 특히 기초 및 지지구조물 분야는 관련 기술이 취

약하고 학술적 연구 기반이 형성되지 않는 분야로서 외국의 설계사에 의존할 가능성이 커서 국내 토목 학계의 보다 많은 관심과 학술적 지원이 요구되는 분야라 판단된다. 🌪

### ● 참고문헌

- 김지영, 강금석, 오기용, 이준신, 장문석 (2009). “국내 해역의 해상풍력 개발 가능량 평가.” 한국신·재생에너지학회 2009 춘계학술발표회.
- 한국전력공사 전력연구원 (2009). 국내 해상풍력 적정부지 선정 예비평가 보고서.
- Eerens, H. (2008). “Wind Energy Potential in Europe 2020–2030 : Methodology.” Work Programme 2008, Netherlands Environmental Assessment Agency.
- Snyder, M., Kaiser, M.J. (2009). "A comparison of offshore wind power development in Europe and the US: Patterns and drivers of development." Applied Energy, Vol. 86, pp. 1845–1856.