

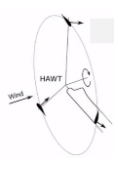
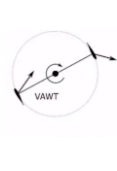
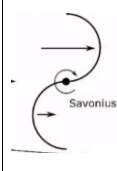
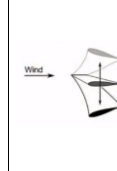
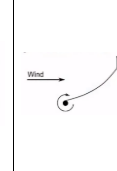



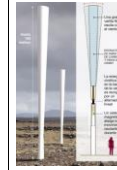

Core of Green New Deals; Offshore Wind Power A to Z

그린 뉴딜의 중심, 해상풍력 A to Z

Dongho Cho
 조동호

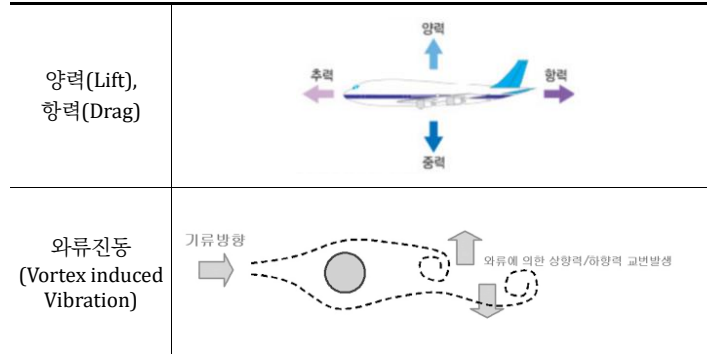
I. 풍력발전기 종류

풍력발전기 종류는 크게 아래표와 같이 5가지로 분류 할 수 있
다. 풍력발전기 형식을 다양한 조건으로 분류할 수 있는데,
 우선 회전식과 왕복식, 회전식은 다시 회전축과 바람이 이루는 각
 에 따라 수직, 수평축으로 구분한다.

형식	1. 수평, 회전식	2. 수직, 회전식	3. 수직, 회전식	4. 수직, 왕복식	5. 공중, 비행체
원리	양력	양력	항력	와류진동	양력
명칭	-	다리우스	사보니우스	볼텍스	공중풍력
개념도					
실물					

* 이미지 출처: DTU wind

위치에 따라 육상, 해상, 공중풍력으로 구분하며, 이용하는 바
 람의 힘 성분과 원리에 따라 양력, 항력, 와류진동식으로 구분한다.
 양력은 비행기가 뜨는 원리와 동일하며, 항력은 선풍기 날개의 원
 리와 같다. 와류(Vortex)는 공기 덩어리가 물체에 부딪치면 그 양
 옆으로 서로 반대방향의 소용돌이가 교대로 발생하는 현상이다. 이
 와류 발생주기와 구조물의 고유진동수가 일치하게 되면 구조물에
 공진이 발생하고, 바람에 수직인 방향으로 구조물이 강하게 흔들리
 게 되는데, 이러한 왕복운동을 발전에 활용을 하는게 와류진동 발
 전기(Vortex Vibration Generator 또는 Vortex Bladeless Turbine)이
 다.



풍력발전이라고 하면 보통 1번 수평축 양력이용 회전식 발전
 기를 의미한다. 상용 대형 발전기에 사용하는 형식이며, 단위면적
 당 에너지 밀집도가 높고, 정격용량당 가장 적은 재료가 투입되어
 효율적이다.

2. 다리우스는 수평축 발전기와 마찬가지로 양력을 이용하며,
 수직축이라 바람의 방향에 무관하게 발전할 수 있는 장점이 있다.
 대형화하는 경우 수평축 발전기에 비해 에너지밀도, 재료비에 불리
 하여 소형풍력발전기에 주로 사용된다.

3. 사보니우스의 경우 항력을 이용한다. 오목한면이 볼록한
 면에 비해 항력계수가 높은 특성을 이용하여 날개를 회전시킨다.
 구조와 동작원리가 단순한 장점이 있으나, 항력을 이용하는 경우
 바람 속도 이상으로 날개를 회전시킬 수 없어 고속회전이 필요한
 발전용에 불리하다. 참고로, 양력을 이용하는 경우 유입풍속의
 7~9배 이상의 속도로 회전이 가능하다.

4. 볼텍스 발전기의 경우 스페인 Vortex bladeless사는 2012
 년 프로젝트 펀딩으로 시작하여, 2014년 회사 창립 후 현재까지
 Vortex Nano (1m, 3W), Vortex Tacoma (2.75m, 100W), Vortex
 Atlantis (9m), Vortex Grand (13m, 1kW) 모델을 개발 완료하였다.
 단지 구성 테스트, 사이즈 확대 등 다양한 연구를 수행 중이다.

5. 공중풍력의 경우 글라이더, 카이트, 헬륨풍선 등의 비행체
 를 활용하여 높은 고도의 강하고, 안정적인 바람을 발전에 이용하
 는 발전기이다.

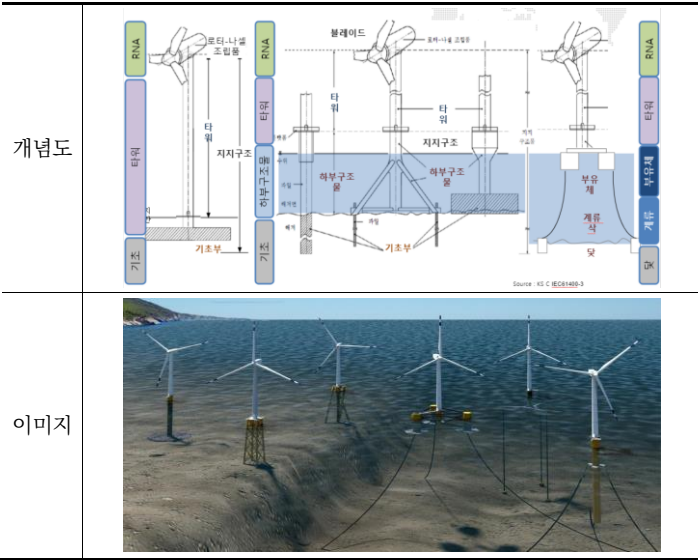


저자 **조동호** | 한국전력공사 전력연구원 신재생에너지연구소

조동호 선임연구원은 2010년 삼성중공업 풍력사업부에 입사하여 풍력발전기 기본설계, 구조해석 연구를 수행하였으
 며, 2016년 한국전력공사 전력연구원에 입사하여 풍력단지 설계, 석션하부기초, 풍력터빈 제어 및 상태감시 연구를 수
 행 중이다.

타워구조물 없이 높은 고도의 바람을 이용할 수 있는 장점이 있다. 국외에서는 마카니사가 2020년까지 13년간 연구 프로젝트를 수행했으며, 600kW 프로토타입 실증 결과물을 보고하였다. 비행체로 글라이더 형식을 채용했으며, 300m 고도에 띄워 지름 145m의 원형을 그리며 전기를 생산하는 방식이다. 해당 연구는 2020년 종료되었다. 국내에서는 한국전기연구원이 우리회사의 개방형 연구개발 사업을 통해 2017년부터 실증하고 있으며, 비행체로 카이트 형식을 사용 중이다.

II. 육/해상 풍력발전기



육상풍력은 콘크리트 기초, 강관 타워, 로터-나셀 조립품으로 구성된다. 풍력발전기가 넘어지지 않도록 콘크리트로 지반을 보강한 후, 그 위에 강관 타워를 볼트조립 하고, 타워 위에 전기, 기계실인 나셀과 날개를 설치한다.

해상풍력은 크게 고정식과 부유식으로 나눌 수 있다. 고정식은 육상풍력에 비해 하부구조물이 추가로 필요하다. 구조물이 넘어지지 않도록 해저면에 고정하는 기초로 육상처럼 콘크리트를 이용하는 중력식 기초와 항타방식으로 설치하는 모노파일, 핀파일 기초, 석션펌프로 설치하는 석션벤퀫기초 방식이 있다. 중력식 기초의 경우 매우 얇은 수심에서만 제한적으로 활용된다. 모노파일의 경우 유럽의 지반조건에 유리하며, 핀파일 기초는 보다 다양한 환경에 두루 적용이 가능하다. 한국, 유럽에서는 해양산업에서 오랜 기간 사용되던 석션기초를 풍력에 도입하여, 기존 기초방식으로는 경제성이 낮아 풍력단지로 개발이 되지 않고 있던 지역들을 석션기초 방식으로 개발비를 낮춰 활발히 개발하고 있다.

고정식의 경우 수심에 따른 비용 증가율이 부유식보다 크다. 저수심에서의 초기 비용은 부유식이 높으나, 수심이 증가함에 따라 고정식의 비용이 가파르게 증가하여 60m 이후부터는 오히려 부유식보다 비싸지게 된다. 부유식에서는 하부구조물 대신, 부유체와 계류식, 닻으로 풍력발전기를 지지한다. 공중풍력은 타워구조물이 없는 형태이고, 부유식 풍력은 하부구조물이 없는 형태라고 볼 수 있다. 전세계 바다의 80% 이상이 수심 60m 이상 지역이므로, 고정식 시장이 포화되면, 자연스럽게 부유식 시장으로 옮겨가게 된다. 실제로 오일, 가스산업도 초기에는 고정식이었으나, 현재는 유전의 평균 수심이 1,000m를 넘어 대부분의 시추, 생산설비가 부유식인 것과 같은 맥락이다. 고정식 자켓구조물의 경우 기술적으로

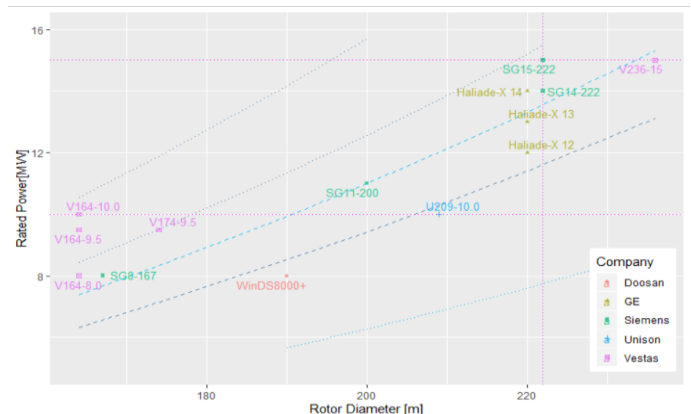
수심 300m까지 가능하지만, 대부분의 고정식 시추설비들은 수심 150m이내이며, 150m이상은 부유식 설비들이다. 수심이 150m를 넘게 되면 가격도 문제이지만, 설계면에서도 전체 구조물의 고유진동수가 파랑진동수만큼 낮아지게 되어 진동 회피설계가 까다롭다. 해상풍력의 경우 터빈 접근을 위해 선박이 추가로 필요하며, 원거리 대단지의 경우 작업자들의 상주를 위한 거주전용 선박을 투입하기도 하며, 긴급접근을 위해 헬기를 이용하기도 한다.

III. 초대형 해상 풍력발전기 개발현황

최근 세계 풍력기술 트렌드는 10MW 이상급 대형터빈 개발로 볼 수 있다. 10MW 이상의 초대형 해상풍력 발전기 개발경쟁은 GE, Siemens, Vestas 삼파전으로 요약 가능하다. 해상풍력은 Siemens, Vestas가 먼저 시작하여 6MW부터 9MW까지 다양한 크기의 발전기를 납품하고 있다. GE는 후발주자로 Alstom 사의 6MW 해상풍력발전기 설계기술을 인수하여, 이를 바탕으로 가장 먼저 10MW 이상 풍력발전기 개발을 착수하였다. GE의 경우 107m 길이의 블레이드를 이용하여 일부 부품과 제어만 변경하는 방법으로 12MW(인증완료), 13MW(인증완료), 14MW 순으로 빠르게 인증을 수행하고 있다.

회사	제품	공개	프로토타입 제작	프로토타입 설치	설치 지역
GE	Haliade-X 14	'18.03	'19.07	'19.11	로테르담 (네)
SGRE	SG14-222	'20.05	'21.	'21.	Osterild (덴)
VESTAS	V236-15	'21.02	'22.	'22.	미정

유럽은 15MW 개발 중에 있는데, 왜 한국은 이제야 8MW, 10MW를 개발하느냐는 질문을 많이 받는다. 우선 정격용량을 키우는 첫 단계는 대형 블레이드를 설계, 제작하는 기술이다. 블레이드 길이만 보면, SG14-222(108m), Haliade-X 14(107m), HEMU-X 10(102m)로 5m밖에 차이 나지 않는다. 그러면 4MW의 차이는 어디서 오는 것인가. 블레이드 제작 기술력보다는 유럽과 한국의 풍황차이를 먼저 이해해야 한다. 유럽, 미국은 고, 중풍속 시장이 많이 분포되어 있다. 그래서 풍력발전기를 개발할 때 보통 출력밀도를 350W/m² 근방의(하늘색 점선) 모델을 설계한다. 그에 반해 한국은 저풍속 지역으로 300W/m² 이하의(모델이 적합하다. 같은 기준인 290W/m²으로 비교하면, 유니슨은 10MW, GE는 11MW로 차이가 크지는 않다.



회사	제품	로터 직경	정격 용량	출력 밀도	블레이드	비고
[-]	[-]	[m]	[MW]	[W/m ²]	[m]	[-]
Siemens	SG8-167	167	8.0	365	81.4	상 용
	SG11-200	200	11.0	350	97.0	상 용, 2022
	SG14-222	222	14.0	362	108.0	상 용, 2024
	SG15-222	222	15.0	388	108.0	상 용, 미정
Vestas	V164-8.0	164	8.0	378	80.0	상 용
	V164-9.5	164	9.5	450	80.0	상 용
	V164-10.0	164	10.0	473	80.0	상 용, 2021
	V174-9.5	174	9.5	400	85.0	상 용, 2021
	V236-15	236	15.0	342	115.5	상 용 2024
GE	Haliade-X 12	220	12.0	316	107.0	상 용 2021
	Haliade-X 13	220	13.0	342	107.0	상 용 2021
	Haliade-X 14	220	14.0	368	107.0	상 용 2025
두산	WinDS8000+	190	8.0	282	90.0	상 용 2022
유니슨	U209-10.0	209	10.0	291	102.0	상 용 미정

IV. 대형 육상 풍력발전기 개발현황 (5MW급)

15MW를 넘어, 20MW를 향해가는 해상터빈에 비해, 육상은 이제 6MW 모델이 개발되고 있다.

회사	제품	로터 직경	정격 용량	출력 밀도	블레이드	비고
[-]	[-]	[m]	[MW]	[W/m ²]	[m]	[-]
Siemens	SG5.0-132	132	5.0	365	64.5	
	SG5.0-145	145	5.0	303	71.0	
	SG5.8-155	155	5.8	307	76.0	
	SG5.8-170	170	8.8	256		up to 6.2MW
Vestas	V150-5.6	150	5.6	317	73.7	
	V150-6.0	150	6.0	340	73.7	
	V162-5.6	162	5.6	272	79.4	
	V162-6.0	162	6.0	291	79.4	
GE	5.3-158	158	5.3	270	77.0	
	5.5-158	158	5.5	281	77.0	
	6.0-164	164	6.0	306		two piece blade
두산	WinDS3000/134	134	3.0	213	65.5	
	WinDS3300/134	134	3.3	234	65.5	
	WinDS5500	140	5.56	357	68.0	
유니슨	U136-4.2	136	4.2	289	66.5	
	U151-4.3	151	4.3	240	74.0	

정격용량이 3배 가까이 크기 차이가 나는 이유는, 주로 운송, 설치에서 발생하는 제약사항에 따른다. 정격용량을 키우려면 대형 블레이드가 필요하며, 블레이드가 길어지면 모멘트 하중이 증가하고, 효율적으로 지지하려면 타워와 블레이드의 지름을 키워야 한다. 하지만, 육상운송의 경우 터널, 신호등, 표지판 등에 의해 지름 4.5m 이상은 운송이 불가능하다. 육상에서 6MW 이상의 대형터빈을 설치하기 위해서는 이러한 운송제약을 해결할 수 있는 신기술

이 필요하다. GE의 경우 블레이드를 2개로 나누어 부분 운송 후 현장에서 체결하는 방법을 고안하였으며, 타워의 경우 원형이 아닌 각진 형상으로 개발하여 부할 운송 후 현장 체결하는 식의 새로운 방법을 개발 중에 있다. 타워와 달리 블레이드의 경우 길이에 비해 무게가 크지 않기에, 항공으로 운송하는 방법 및 전용항공기 개발과 관련하여 논의가 이루어지고 있다.

V. 육상터빈 블레이드 운송 전략

육상운송	
해상운송, RoRo ship	
항공운송, Airship	

VI. 풍력발전기, 시장 수요



* GWEC Market Intelligence (23 March, 2021)

2019년 1년 판매량 기준, 세계 10대 터빈제작사. 베스타스의 경우 해상(MHI Vestas, 1GW)까지 합치면, 10.6GW로 1위를 차지했으며, 해상만 별도로 파악하는 경우 지멘스 가메사가 3.3GW로 최대 판매량을 보이고 있다. 풍력발전시장은 2014년 이후 매년 40GW 이상의 신규 발전기가 설치되는 매우 큰 시장이다. 용량은

로만 보면, 베스타스 하나의 회사가 매년 원전 10기 이상씩 설치하고 있으며, 작년 베스타스의 설치량 16GW는 우리나라의 12년 기간('18~'30년)의 신규설치 목표량인 16.5GW에 맞먹는 큰 규모이다.

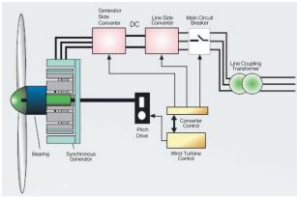
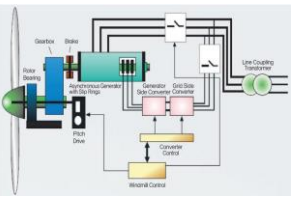
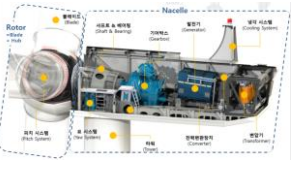
VII. 풍력발전기, 나셀 내부

육상 풍력의 경우 제어는 복잡하지만, 전력변환장치 비용을 절감할 수 있는 이중여자 유도기(DFIG) 방식이 시장지배적이다. 영구자석 동기기에 비해 전력변환장치 용량을 30%만 설치해도 넓은 풍속 가변범위를 확보할 수 있어 가격을 낮게 유지할 수 있다.

해상에서는 육상과는 달리 영구자석 동기기(PMSG) 방식이 시장지배적이다. DFIG의 경우 발전을 위해 고속회전이 필요하며, 이를 위해 기어비 90~100 사이의 3단 고속기어박스가 필요한데, 기어박스의 경우 고장이 잦아 접근이 어려운 해상풍력에서는 부품 가격 하락의 이점보다 유지보수비용 증가가 크게 된다. 그래서, 해상에서는 기어박스를 기어비 10 정도의 1단 저속을 사용하거나, 기어박스가 없는 직접구동(Direct drive) 방식이 주로 사용된다. 직접구동의 경우 다극의 대형 영구자석동기기가 설치되어, DFIG 방식에 비해 나셀의 중량이 무거우며, 전력변환장치를 정격의 100%를 갖춰야 한다.

풍력발전기의 전력변환장치는 2가지 역할을 가진다. 하나는 풍력발전기가 너무 빠르거나 너무 느리지 않게 (풍속의 7~9배 사이)

돌도록 발전기의 토크를 제어하는 것이고, 다른 하나는 계통접속조건에 맞춰 일정 역률제어, 무효전력 공급, 유/무효전력 제어, 증감을 조정 등을 하는 것이다. 발전기는 보통 690V, 45~75Hz 정도의 교류 출력을 내며, 전력변환장치를 통해 50/60Hz의 교류로 변환하여 계통에 연계된다.

	PMSG, DD or Geared (해상)	DFIG, Geared (육상)
개념도		
3D	유니슨 10MW	
증속기	없거나, 저속	3단 고속 (증속비 100 근방)
발전기	영구자석 동기기 (저속, 다극)	이중여자 유도기 (고속)
컨버터	전용량 100% 발전기의 고정자에 연결	정격의 30% 발전기의 회전자에 연결