

풍력발전의 대형화와 이에 따른 핵심 부품 · 설비 기술

한국과학기술정보연구원
전문연구위원 조흥곤
(chohungg@reseat.re.kr)

1. 풍력발전의 대형화와 성능향상

1-1. 풍력발전의 대형화에 관한 기본 사상

풍력발전(wind power generation)의 대형화 혹은 대용량화는 풍차(풍력 터빈)를 대형화시키거나 풍력단지(wind farm; 집합형 풍력발전소)를 대용량으로 조성하는 등의 2가지 방법을 통하여 이뤄질 수 있다. 이는 풍력발전은 기본적으로 풍차를 이용하여 가능한 한 많은 풍력 에너지를 기계적 동력으로 바꿔야만, 다시 이 기계적 동력을 대용량의 전기 에너지로 변환시킬 수 있는 여건이 조성되기 때문이다.

질량이 $m(\text{kg})$ 인 공기가 속도 $v(\text{m/s})$ 로 운동할 때, 공기가 가지는 운동 에너지 $E_k(\text{Joule})$ 는 물체의 운동 에너지에 대한 기본 식은 다음 (1)과 같이 변화시킬 수 있다. 이 식에서는 풍차를 회전시키는 공기의 전체 질량 m 은 밀도가 ρ 이며 흐름의 직각 방향 면적 A 에 속도 v 로 유동하는 것을 가정하였다.

$$E_k = 1/2mv^2 = 1/2(Avtp)v^2 = 1/2Atpv^3 \quad (1)^{(1)}$$

따라서 풍력으로 얻을 수 있는 E_k 를 증대시키기 위해서는 외부 공기의 조건인 tpv^3 를 제외하면 A 값을 증대시켜야 한다.

한편, 풍차의 형식으로는 수평축의 프로펠러형(propeller type)이 가장 많이 사용되고 있으나, 용도에 따라 수직축인 다리우스형(darrius type), 자이로밀형(gyromill type), 사보니우스형(sabonius type) 등과 이들을 병용한 형식도 이용되기도 한다. 이들 중에서 수평축 프로펠러형 풍차의 경우를 예로 들면, 풍차의 회전반경(r)의 크기에 의하여 A 값(πr^2)이 결정된다.

따라서 풍력발전의 대형화를 위해서는 풍차의 r^2 에 비례하여 이뤄지므로 큰 풍차 블레이드(blade, 날개, 익, 깃)를 활용하거나, 사용 풍차 수를 늘려야 한다.

1-2. 풍력발전의 대형화 추이

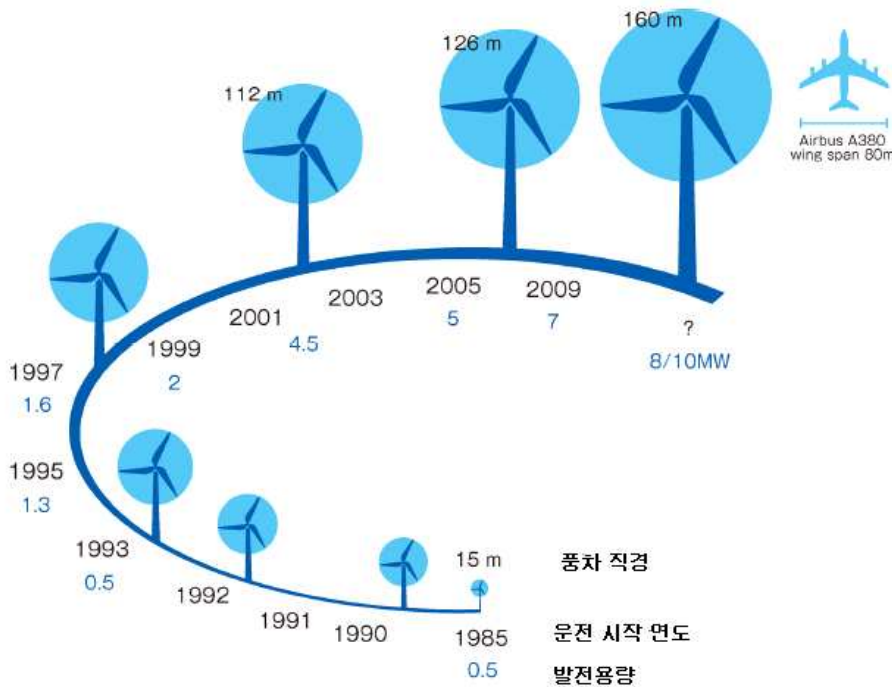
육상 풍력의 기술개발은 1970년대의 오일쇼크 이후 유럽과 미국에서 본격적으로 이뤄졌다. 한편 정격출력에 따른 풍차의 분류 기준은 일반적으로, ① 마이크로 풍차(정격출력 1kW 미만), ② 소형풍차(동 1~50kW 미만), ③ 중형풍차(I)(동 50~500 kW 미만), ④

중형풍차(Ⅱ)(동 500~1,000kW 미만), ⑤ 대형풍차(동 1,000kW 이상) 등 5가지로 되어 있다.⁽²⁾⁽¹²⁾ 따라서 본고에서 설명하는 대형풍차는 정격출력 1,000kW, 즉 1MW급 이상을 가지는 풍차를 말한다.

수평축과 수직축을 대상으로 하는 연구개발이 진행되었으나, 대형풍차는 1990년대 이후 현재에 이르기까지, 블레이드 3개를 가진 수평축 프로펠러식 풍차가 주류이었다. 또한 풍력 에너지 밀도는 풍속 8m/sec에서 약 0.3kW/m²으로 낮았으며, 1대의 풍차로 출력을 증대하기 위해서는 풍차를 크게 제작하여야 하기 때문에, 우선 대형화에 따른 기술개발이 중요한 과제로 되었다.

세계의 풍차에 대한 평균 크기는 나라에 따라 다르지만 육상 풍력의 평균 크기는 2MW 전후까지 대형화되었다. 또한 각종 기술개발에 의하여 kWh당 발전원가도 종래의 화력 발전이라든가 다른 재생가능 에너지에 대하여 경쟁력을 가진 수준에 이르게 되어서 세계적으로 확대되는 추이를 보이고 있다.

또한 근년에는 선진국을 중심으로 육상에서의 적당한 용지가 감소함에 따라 풍력발전의 활용을 늘릴 목적으로 해상풍력(offshore wind power)에 관한 기술개발이 활발하게 진행되고 있다.



<그림 1-1> 세계의 풍차 대형화 추이⁽¹²⁾

해상풍력은 육상풍력에 비하여 설치, 계류, 계통연계, 운전·보수 등의 비용이 많이 소요되므로, 채산성을 확보하기 위해서는 1대당의 발전량의 증가가 필요하여, 선박을 이용한 기자재의 운반 기술 개발과 함께 해상풍력의 대형화에 따른 기술개발이 활발히 이뤄지고 있다. 해상풍력발전의 1대당 평균 용량은 해마다 확대되어 현재 도입되어 있는 것은 2~3MW 기종이 주류를 이루고 있으나 5~10MW 이상의 초대형 기종도 개발되고 있다.

<그림 1-1>은 세계의 풍차에 관한 대형화의 추이를 나타내었다.

2. 풍력발전의 대형화 기술

2-1. 단일 기종의 용량과 풍력단지의 대형화

일반적으로 바람은 일정한 높이까지는 지상보다 상공의 쪽이 강하기 때문에, 풍차의 높이(허브의 높이)를 가능한 한 높게 할수록 많은 에너지를 얻을 수 있으며, 발전량이 증가한다. 또한 풍차의 취득 에너지는, 상기 식 (1)로부터 풍차의 날개에서 바람이 닿는 면적에 비례하므로, 날개를 길게(풍자 로터 직경을 크게) 하면 증대한다. 풍차를 대형화하면 단일 기종당의 발전 출력을 증대시킴과 더불어 복수기 배치를 통한 풍력단지 전체의 출력을 증대시킴으로써 발전원가를 줄일 수 있다. 이 때문에 세계적으로 풍력단지의 대규모화가 활발하게 이뤄지고 있다.

풍력발전의 1대당 평균 용량과 풍력단지의 평균 규모에 대한 대형화 추이는 나라에 따라 다르지만, 육상풍력의 1대당 평균 용량은 2MW 정도까지 대형화되었다. 프로펠러식 풍차의 크기는 정격출력이 600kW인 경우의 타워 높이는 40~50m, 로터 직경은 45~50m이며, 정격출력이 1~2MW인 경우에는 타워 높이 60~80m, 로터 직경 60~90m가 일반적이다.

풍차의 대형화에서는 풍차의 중량이 로터 직경의 3승에 비례하지만 취득 에너지는 로터 직경의 2승에 비례하며, 또한 풍차의 제작비용은 직경의 3/2승에 비례하여 증가한다.⁽²⁾ 따라서 구성부품의 강도를 향상시키고 풍차에 작용하는 공력하중(aerodynamic load)을 저감시키는 것 등이 풍력발전 대형화의 핵심 기술이다. 또한 산간지역은 기기설비의 관점에서 대형 풍차가 적합하지 않는 등과 같은 자연 조건도 적극 고려해야 한다.

해상풍력은 육상풍력에 비하여 설치비용이 많이 소요되므로 1대당의 발전량의 증대가 더욱 필요하다. 따라서 해상풍력의 1대당 용량의 대형화가 더욱 진전되고 있다. 예를 들어 덴마크의 Vestas Wind Systems A/S사는 로터 직경 164m의 7MW급 기종을 2012년에 개발 완료하였다. 또한 해상풍력의 풍력단지의 규모도 육상풍력보다 대규모화되는 경향을 보이고 있다.

대형풍차의 구성부품(component)은 타워, 로터 블레이드(rotor blade), 동력전달 시스템(power train, drive train) 등과 관계되는 설치비용이 크다. 이 중에서 로터 블레이드와 동력전달 시스템의 제작비가 의외로 많이 소요(육상풍차의 경우 풍차 전체에 대한 약 50%를 차지)된다. 따라서 대형풍차의 설치비를 줄이기 위한 중점과제로는 구성부품의 경량화, 고효율화, 고신뢰성화 등을 꼽고 있다.

한편 풍력발전의 대형화와 이에 따른 해상풍력단지의 대용량화의 세계적 추이와 함께 타워의 설치 기술이 다양하게 개발되고 있으며, 이에 소요되는 대형풍차 전체 구성부품에서의 타워 설치비 비율도 크게 높아지는 사례가 늘고 있다.

2-2. 블레이드

블레이드의 구조(structure)와 형상(profile과 airfoil)은 초기의 풍력발전 활용 단계에서는 대부분 블레이드 가격의 지표를 출력당으로 나타낸 바 있다. 한편 일반 유저들은 고성능을 나타내며 양력계수(lift coefficient)가 큰 블레이드 형상을 선호하기도 한 사례가 많다.

그러나 근래의 풍력발전에 대한 대형화 추이와 함께 블레이드의 기술개발 방향이 바뀌고 있다. 출력은 로터 직경의 2승에 비례하는데 비하여, 중량과 설치비는 2.3승까지 변화하므로 단순 대형화(scale-up)에서의 3승 비례를 어떻게 하면 줄일 수 있을까 하는 것이 앞으로의 대형화에 대한 과제이다.

현재의 대형 블레이드의 제작에서는 탄소섬유(carbon fiber)를 활용함으로써 경량화를 꾀하고 있지만, 이 방법이 경제성을 만족시키는 유효한 대책인지 계속 연구되어야 한다.

블레이드의 형상(익형)에 관해서는 양력계수를 다소 희생시키더라도 구조상의 강성(rigidity)을 우선시(블레이드 두께를 크게) 할 필요가 있다. 즉, 블레이드 구조와 익소(blade element)의 개발은 단위발전량당의 비용이 최소화되도록 최적화의 지표를 결정하여야 한다.

대형화에 따른 하중의 저감이라든가 신뢰성의 향상을 위하여 프리벤트 블레이드(pre-bent blade: 운전중의 동하중에 의한 변형을 고려하여 제작된 블레이드)에 상태진단 시스템(condition monitoring system)을 활용하여 블레이드의 지능화를 꾀함으로써, 효율 향상과 하중 저감 및 생애주기비용(life cycle cost)의 최소화 등의 효과를 기대할 수 있다.

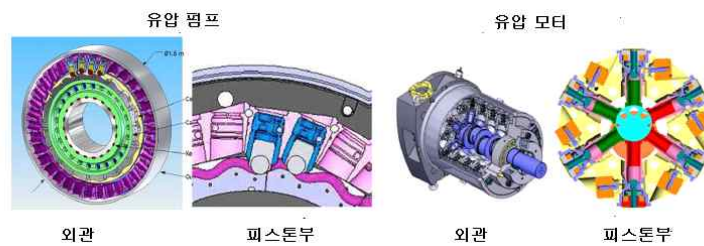
2-3. 동력전달 시스템

대형 풍력발전기의 동력전달에 사용되는 변속 시스템은 증속기를 통하여 회전수를 올리면서 발전기에 동력을 전달하는 증속기 방식과, 풍차의 회전을 그대로 발전기에 전달하는 직접 구동 방식(direct drive, gearless)으로 나뉜다.

증속기 방식은 기어와 베어링의 복잡한 상호 작용으로 작동되기 때문에 고속 상태에서는 불균형 현상이 생길 수 있어서 정기적인 보수관리가 필요하다. 그런데 육상풍력에서는 터빈으로의 접근이 쉬운 편이어서 보수관리가 용이하지만, 해상풍력의 경우는 접근성의 어려움으로 보수관리가 쉽지 않기 때문에 발전용량에 따라 블레이드와 발전기를 개량하여 조속기의 기어비(gear ratio of governor)를 최적화함으로써 보수관리 비용과 동력전달 장치의 중량을 줄이고 있으며, 증속기가 없는 직접 구동 방식을 활용하는 경우도 많다. 직접 구동 방식은 저속으로 발전하는 극수(pole)가 많은 발전기를 이용하기 때문에 고가인 결점이 있으나 보수관리 측면에서 유리하며, 증속기에 따른 동력 전달 손실과 중량 저감 등의 측면에서 이점도 있다.

이와 함께, 최근에는 대형 풍력발전기에 유압식 동력전달 시스템이 사용되기도 한다. 이 시스템은 유압 펌프, 유압 모터, 축압기(accumulator), 냉각기(cooler) 등으로 구성되

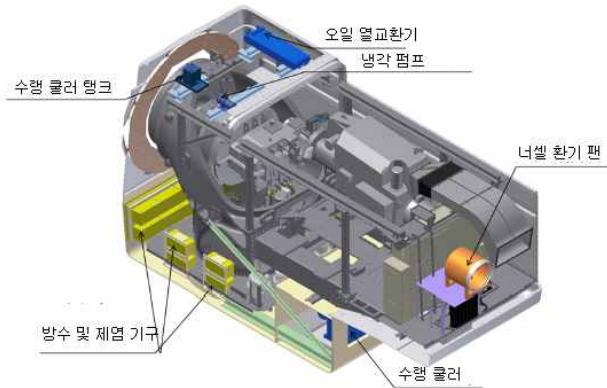
어 있다. 로터의 회전 동력으로 유압 펌프를 구동하여 고압유를 발생시켜서 배관을 통하여 유압 모터에 공급함으로써, 이 유압 모터를 정속으로 운전할 수 있게 되고, 이를 발전기 구동으로 연결하여 전기 에너지를 얻는 방식이다. 축압기는 유압의 맥동(pulsation)을 흡수하며, 유압 펌프는 링캠(ring cam)을 활용한 다단 피스톤 펌프(multi-stage piston pump)이고, 유압 모터는 크랭크(crank)를 이용한 피스톤 모터(piston motor)이다. <그림 2-1>에 유압 펌프와 유압 모터의 기본 구조를 나타내었다. 한편, 유압 펌프는 단수를 증가시켜서 출력을 상승시킬 수 있다. 또한 유압모터는 7MW의 대형풍차의 경우에는 3.5MW에 이용되는 기종 2대를 이용하며, 3대로 증가시키면 10MW급 대형풍차에 용이하게 이용할 수 있다.



<그림 2-1> 유압 펌프와 유압 모터의 기본 구조⁽¹³⁾

또한, 대형 육상풍차는 동력전달 시스템을 장착하고 있는 너셀(nacelle) 내부에 외기를 넣어 증속기의 윤활유 냉각기와 발전기 냉각기에 이용한다. 또한 너셀 내부의 모터, 전기 제어반, 변압기 등의 발열 부품도 외기로서 냉각한다. 하지만 해상풍차의 경우는 염분이 함유된 부식성 외기를 너셀 내부에 사용할 수 없다.

따라서 대형 풍차의 너셀은 외기에 대한 밀폐도를 높여서 부식성 외기의 유입을 최소한으로 줄이고, 너셀 내부 장치에 필요한 공기는 유입구에 빗물 막이 장치와 염분 제거용 필터를 설치하여 부식성의 성분이 제거된 것을 냉각용으로 이용한다. 너셀에 유입한 공기는 너셀 후반부의 배기구를 통하여 배출되며, 환기 성능을 높이기 위한 환기 팬(ventilating fan)이 설치되어 있다. 또한 냉각 풍량을 감소시키기 위하여 감속기의 냉각기에 부식 대책을 시행하여 외기로서 직접 냉각하기도 한다. 이 경우에는 냉각기의 손상이라든가 배관 이음 등의 불량에 의하여 바다에 냉각유가 누설되지 않도록, 냉각유는 우선 냉각수로 냉각하고 고온의 냉각수는 외기로서 냉각하는 시스템을 이용한다. <그림 2-2>는 대형 육상풍차 너셀 내부의 동력전달장치를 해상풍차에 적용할 경우의 변경 구조 내용을 나타내었다.



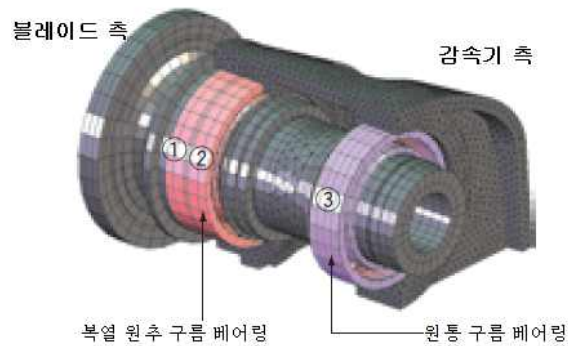
<그림 2-2> 대형 해상풍차의 너셀 내부구조(육상풍차와 다른 곳)⁽¹³⁾

3. 대형풍차의 핵심 부품 · 설비 기술

3-1. 베어링 기술

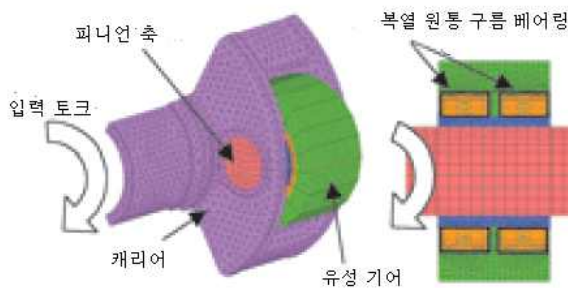
풍력발전의 대형화에는 주축, 감속기, 발전기 등 각 부위에 활용되는 베어링의 크기도 대형화가 선행되어 정밀 운전이 이뤄져야 한다. 즉, 대형풍차의 핵심 부품으로는 이들 베어링을 첫 번째로 꼽을 수 있다. 특히 대형 블레이드를 지지하는 주축 베어링(main shaft bearing)은 외경 2,000mm를 넘는 크기도 증가하고 있으며, 자동조심 구름 베어링(self aligning roller bearing), 복열 원추 구름 베어링(double row tapered roller bearing), 원통 구름 베어링(cylindrical roller bearing) 등이 활용되고 있다.

주축 베어링의 형상 결정 과정에서는 장기간 안정적 성능 발휘를 위하여, 실제 베어링을 사용한 실기 시뮬레이션이 필요하며, 이와 더불어 베어링, 축 케이스, 가대 등과 같은 베어링 주위 기구가 포함된 유한요소법(finite element method: FEM)의 구조해석(structural analysis)을 하여야만 신뢰성 높은 베어링 설계를 시행할 수 있다. <그림 3-1>은 주축 구조 해석에 이용한 베어링의 구조도 예를 나타내었다. 외부 하중에 의하여 베어링과 함께 축 케이스도 변형며, 풍력장치의 대형화에 따라 외부 하중에 의한 변형량이 베어링의 간극(clearnce)에 미치는 영향이 크기 때문에 해석에서는 그 변형을 고려해야만 최적의 베어링 형상을 결정할 수 있다. FEM 해석에서는 보통 탄성체(elastic body) 요소를 이용하여 변형을 해석하지만, 요소를 강체(rigid body)로 선정하면 변형을 고려하지 않은 경우의 계산도 시행할 수 있다.



<그림 3-1> 주축 구조 해석에 이용한 베어링의 구조도 예⁽¹⁴⁾

한편 <그림 3-2>는 2~2.5MW급의 대형풍차에 활용되는 증속기 내부의 베어링을 포함한 구조해석 예를 나타내었다. 이 그림은 구동계열(drive train)의 전달 토크(torque transfer)에 의한 캐리어(carrier), 피니언 축(pinion shaft), 유성 기어(planet gear) 등의 변형을 고려하여, 유성 기어의 형상(구조설계)을 검토한 예이다.



<그림 3-2> 대형풍차에 활용되는 유성 베어링의 구조해석 예⁽¹⁴⁾

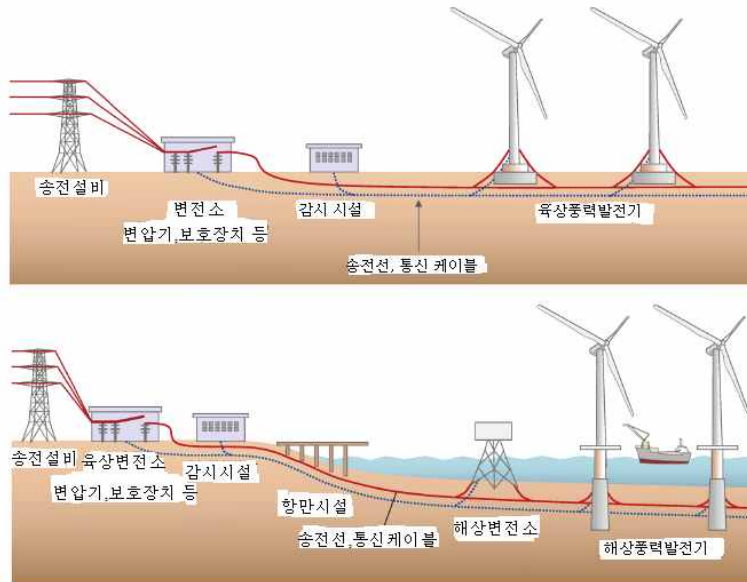
3-2. 풍력단지의 조성 기술

풍력발전의 대형화에는 풍력단지의 조성 기술이 우선 정착되어야 한다. <그림 3-3>은 풍력발전의 대형화를 위한 풍력단지 주요 구성요소를 나타내었다.

대형육상 풍력단지는 풍력발전기와 이의 운전·정지·감시·기록을 시행하는 감시시설, 변전소, 송전 케이블 등으로 구성되며, 발전된 전력은 육상의 변전소를 거쳐서 계통 전력에 이어진다. 감시시설에서는 각 풍차에 대한 실시간 데이터를 수집하며 발전기의 운전 상황 파악과 이상을 검지한 결과를 바탕으로, 풍력발전기의 운전과 정지를 제어한다. 변전소에는 계통에 보내는 전기나 계통에서 오는 전기의 전압을 변환시키는 변압기, 풍력발전 시스템의 이상이나 계통 사고 발생시에 설비를 계통으로부터 분리시키는 계통보호장치 등이 설치되어 있다.

한편 해상 풍력단지에는 풍력발전기, 운전 감시시설, 육상 변전소 송전 케이블 등과 같은 육상 풍력단지 설비 이외에, 해저 송전 케이블, 해상 변전소 등이 필요하다. 또한 해상 풍력단지의 건설이라든가 운전·유지보수에 필요한 작업 선박의 출항과 정박 시설,

단지 내의 관련 설비를 운송·보관하는 항만 시설도 필요하며, 해저 송전선의 설치비를 삭감하기 위한 해상 변전소가 건설되는 경우도 있다.



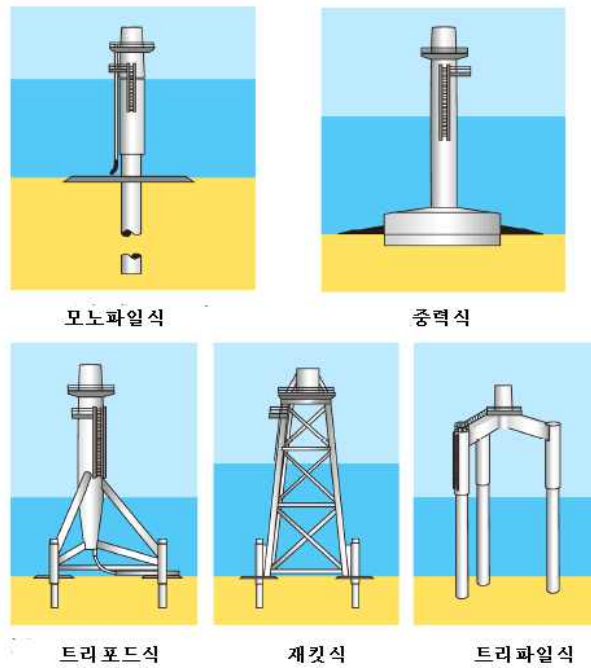
<그림 3-3> 풍력발전의 대형화에 따른 풍력단지 구성요소(상: 육상, 하: 해상)⁽¹²⁾

한편 풍력발전의 대형화를 위한 풍차의 대형화와 풍력단지의 대규모화의 필요성 때문에, 해상 풍력단지의 풍차에 대한 기초(foundation)와 타위가 기술 개발의 핵심으로 부각되고 있다.

육상풍차의 기초는 중력식(gravity type)이나 착상식(bottom-mounted type) 등으로 나눌 수 있으며, 해상풍차의 기초는 착상식과 부체식(floating type)등으로 나눌 수 있다. 그러나 부체식은 계류 장비, 탱크, 균형 설비 등과 같은 지지 구조를 이용하는 방식으로, 전세계에서 여러 가지 방안이 제시되어 실험 단계에 있다.

착상식의 지지 구조는 <그림 3-4>에 나타낸 모노파일식(monopile type), 중력식(gravity-based structure: GBS), 트라이포드식(tripod type), 재킷식(jacket type), 트리파일식(tri-pile type) 등 5종류로 대별하는 것이 보통이다.

유럽에 도입되어 있는 해상 풍력발전 시스템은 대부분 30m 이하의 얕은 해역에 설치된 착상식이며, 착상식 중에서도 기초의 구조는 해저에 1개의 파일(pile)을 박는 모노파일식과 콘크리트 케이슨(concrete caisson)을 기초로 하는 중력식이 주로 이용되고 있다. 이들 방식은 수심 20~30m의 해역에 쉽게 설치할 수 있지만, 이보다 깊어지면 깊이에 대응하여 비용이 높아질 뿐만 아니라 강도의 유지가 어렵게 되어 시공 자체도 어려워진다. 이러한 경우는 대체로 트라이포드식이나 재킷식 등과 같은 입체 골조 구조가 유리하다⁽⁶⁾⁽¹²⁾.



<그림 3-4> 착상식 해상풍차의 지지 구조 방식⁽¹²⁾

4. 맺음말



CO₂를 배출하지 않는 청정 에너지를 발생시키는 풍력발전 장치는 근년에 이르러 전세계적으로 연간 약 20%의 성장을 계속하고 있다. 한편 대형화 혹은 대용량화의 풍력발전 시스템을 건설하기 위해서는 막대한 분량의 희토류, 콘크리트, 강철, 구리, 유리섬유 등의 원자재가 필요하다. 한편 효율이 낮은 대형 풍력발전기를 보완하기 위해서는 다수의 보조 발전기와 수천km의 고압 송전선도 설치해야 할 경우도 있다. 또한 이에 필요한 원자재를 생산하고 가공하여 운반하는 데에는 엄청난 분량의 화석연료를 소비하고 환경에 광범위한 부수적 피해를 주는 것이 불가피한 경우도 발생할 수 있다. 따라서 풍력발전의 대형화와 대용량화에 따른 세계적인 순기능과 함께, 이와 더불어 앞으로 불가피하게 생길 수 있는 역기능에 대해서도 연구해볼 가치가 있을 것이다.

풍력발전기는 바람이 강한 지역에 설치해야 하므로 도시에서 멀리 떨어진 경우가 많으며 송전선을 설치하는 데도 많은 용지가 소요된다. 따라서 앞으로의 풍력발전 대형화는 육상풍차보다는 해상풍차의 고출력·대형화를 바탕으로 하는 풍력단지 중심으로 이뤄질 것으로 예상되며, 보다 엄격하게 자연환경에 대처할 수 있는 고신뢰성의 핵심 부품과 풍력단지 조성기술의 개발이 더욱 필요하게 될 것이다.

<참고문헌>

1. Wikipedia, the free encyclopedia English edition, "Wind power" 2017
2. Xiong Liu, Cheng Lu, Gangqiang Li, Ajit Godbole, Yan Chen, "Tower Load Analysis of Offshore Wind Turbines and the Effects of Aerodynamic Damping", *Energy Procedia*, 105(May), 2017, pp.373~378
3. D. Ahn, SC Shin, SY Kim, Hicham Kharoufi, HC Kim, "Comparative evaluation of different offshore wind turbine installation vessels for Korean west - south wind farm", *Inter J Naval Archit Ocean Eng*, 9(1), 2017, pp.45~54
4. Madjid Karimirad, Constantine Michailides, "Dynamic Analysis of a Braceless Semisubmersible Offshore Wind Turbine in Operational Conditions", *Energy Procedia*, 80, 2015, pp.21~29
5. G. Benassai, A. Campanile, V. Piscopo, A. Scamardella, "Ultimate and accidental limit state design for mooring systems of floating offshore wind turbines", *Ocean Engineering*, 92, 2014, pp.64~74
6. Mayilvahanan Alagan Chella, Alf Tørum, Dag Myrhaug, "An Overview of Wave Impact Forces on Offshore Wind Turbine Substructures" *Energy Procedia*, 20, 2012, pp.217~226
7. H. Ibrahim, M. Ghandour, M. Dimitrova, A. Ilinca, J. Perron, "Integration of Wind Energy into Electricity Systems: Technical Challenges and Actual Solutions", *Energy Procedia*, 6, 2011, pp.815~824
8. M. El-Samanoudy, A.A.E. Ghorab, Sh.Z. Youssef, "Effect of some design parameters on the performance of a Giromill vertical axis wind turbine", *Ain Shams Eng J*, 1(1), 2010, pp.85~95
9. Arne Klein, "A Continuously Differentiable Turbine Layout Optimization Model for Offshore Wind Farms", *Energy Procedia*, 94(Sep), 2016, pp.497~503
10. Amir Rasekhi Nejad, Erin E. Bachynski, Lin Li, Torgeir Moan, "Correlation between Acceleration and Drivetrain Load Effects for Monopile Offshore Wind Turbines", *Energy Procedia*, 94(Sep), 2016, pp.487~496
11. Tuhfe Göçmen, Paul van der Laan, Pierre-Elouan Réthoré, Alfredo Peña Diaz, Gunner Chr. Larsen, Søren Ott, "Wind turbine wake models developed at the technical university of Denmark: A review", *Renew Sustain Energy Rev*, 60(Jul), 2016, pp.752~769
12. 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO), "NEDO 再生可能エネルギー技術白書 第2版, 第3章 風力発電" 2017, pp.1~82
13. 宇磨谷 雅英, 野口 俊英, 内田 満哉, 柴田 昌明, 河合 康裕, 納富 良介, "風力発電(洋上風車の開発状況)", 三菱重工技報, 50(3), 2013, pp.49~55
14. 二之湯 伸幸, 八木 壯一, 丹羽 健, "風力発電装置の大型化と軸受技術", *NTT Tech*

Rev, (77), 2009, pp.26~31

<관련기술목록>

1. Mohammed G. Khalfallah, Aboelyazied M. Koliub, "Effect of dust on the performance of wind turbines", *Desalination*, 209(Apr), 2007, pp.209~220
2. Oliver Mankowski, Qing Wang, "Real-time Monitoring of Wind Turbine Blade Alignment Using Laser Measurement", *Procedia CIRP*, 56, 2016, pp.128~132
3. Christos Galinos, Torben J. Larsen, Helge A. Madsen, Uwe S. Paulsen, "Vertical Axis Wind Turbine Design Load Cases Investigation and Comparison with Horizontal Axis Wind Turbine", *Energy Procedia*, 94(Sep), 2016, pp.319~328
4. Andrew Summers, Qing Wang, Neil Brady, Roger Holden, "Investigating the measurement of offshore wind turbine blades using coherent laser radar", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 41, 2016, pp.43~52
5. Yifei Wang, Xiandong Ma, Malcolm J. Joyce, "Reducing sensor complexity for monitoring wind turbine performance using principal component analysis", *Renewable Energy*, 97, 2016, pp.444~456
6. Zhu Chenghui, Li Pengju, Wang Jianping, Xu Xiaobing, "Research on intelligent controller of wind-power yaw based on modulation of artificial neuro-endocrine-immunity system", *Procedia Engineering*, 15, 2011, pp.903~907
7. H.M. Hassan, W.A. Farag, M. Shawkey, Abdel Latif ElShafei, "Designing Pitch Controller for Large Wind Turbines via LMI Techniques", *Energy Procedia*, 12, 2011, pp.808~818
8. M. Philippe, A. Babarit, P. Ferrant, "Modes of response of an offshore wind turbine with directional wind and waves", *Renewable Energy*, 49(Jan), pp.151~155
9. Qijin Lu, Jun Zhang, "Experimental study of improved modal strain energy method for damage localisation in jacket-type offshore wind turbines", *Renewable Energy*, 72, 2014, pp.174~181
10. 小松正夫・澤井貴之・伊藤弘人・熊本均, "洋上風車設置作業の経済性と次世代型風車設置船コンセプト", *三菱重工技報*, 50(2), 2013, pp.32~36

이 분석물은 미래창조과학부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.