

공중 풍력발전 기술개발 현황 및 시장전망

강승원*, 길두송, 박동수, 정원섭, 김의환

Technical Development Status and Market Prospects for High Altitude Wind Power Generation System

Seungwon Kang*, Doosong Gil, Dongsu Park, Wonseoup Jung, Euihwan Kim

Abstract

The wind speed at the altitude around 300 m is much higher and less variable than at the altitude around 80 m which is the same height of the MW class tower turbine's hub height. The wind power density is increased 0.37 W/m² per meter at the altitude around 6 to 7 km and 0.25 W/m² per meter at the altitude around 80 to 500 m. There are two types of power generation systems using lifting bodies. The one is that The generator is installed in the ground station and stretched into the lifting body through the tether. The other is that the generator is installed in the lifting body and stretched into the ground station through the tether. Many kinds of lifting bodies are also researched in the world, called kites, wings, single or twin aerostat, and so on. This article introduced the technical development status and the market prospects of the high altitude wind power generation system all over the world in detail.

Key words

High Altitude Wind Power(공중풍력), Altitude(고도), Wind Power Density(풍력밀도), Wind Speed(풍속), Kite(연), Tether Unit(연결장치), Mooring Unit(계류장치), Invertor(전력변환장치)

(접수일: 2011. 5. 13, 수정일: 2011. 6. 3, 게재확정일: 2011. 6. 3)

* 한전전력연구원 녹색성장연구소

■ E-mail : ksw4783@kepco.co.kr ■ Tel : (042)865-5322 ■ Fax : (042)865-7569

1. 서론

풍력발전은 석탄, 석유보다 저렴하고 지구 온난화나 환경 오염을 일으키지 않는 청정에너지이다. 국내외적으로 풍력발전시장은 급속한 성장추세를 보이고 있으며, 이러한 추세에 힘입어 5~6MW급 대형 풍력발전기가 상용화 단계에 진입하였으며, 각국은 풍력자원의 적극적 활용을 위해 많은 예산을 투자하여 기술개발과 단지건설에 노력을 기울이고 있다.

최근 해외연구⁽¹⁾에 의하면 지표면 80m 높이에서 평균풍속 6.9m/s 이상인 지역의 20%만 풍력발전단지로 개발하여도 전 세계 에너지 소요량을 충족시킬 수 있다는 결과를 발표하였다.

그러나 현실적으로 이 같은 잠재적 풍력자원을 100% 활용한다는 것은 불가능하다. 육상은 바람이 빠르지 않고 항상 불지 않기 때문에 출력을 높이는데 한계가 있어 발전효율이 떨어지며 연중 발전 가능한 시간이 제한적이다. 최고의 풍황자

원을 보유한 지역에 설치된 풍력발전단지인 경우에도 설비용량기준 평균 30~45% 정도의 전력만을 생산하는 수준이다. 또한 풍력발전기를 높이 설치하기 위해서는 타워의 크기가 커져야 하고 로터의 회전날개의 길이가 커져야 한다. 즉, 회전자 직경이 77m인 1.5MW급 풍력발전기를 설치 대상으로 고려 할 경우, 1km²당 약 6개의 풍력발전기를 설치할 수 있으며, 이는 설비용량 기준 9MW/km²에 해당한다. 그러나 동일면적에 화력발전소를 건설할 경우, 약 200~300배의 발전 설비용량을 확보할 수 있다. 또한 육상 풍력발전설비의 경우, 운송 및 설치를 위해서는 국토 및 산림훼손이 불가피하며 가동 중 발생하는 저주파소음 등 많은 환경적 문제점을 내포하고 있다. 반면, 하늘 위의 바람은 지상에서 부는 바람보다 빠르고 풍향이 자주 바뀌지 않아 활용 가능성이 훨씬 높다. 따라서 공중 풍력발전은 향후 화석연료를 대체할 차세대 재생에너지라고 할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 공중 풍력발전의 국내외 기술개발현황과 향후 시장전망 및 상업화계획 등을 제시하고자 하였다.

2. 국내외 기술개발현황 및 시장전망

2.1 기술개요

공중 풍력발전은 지상으로부터 300m 이상의 고공에 비행체, 연, 닷 등의 부양체를 띄워 공중에서 부는 바람의 일정한 방향성과 빠른 속도를 이용하여 전기에너지를 얻는 기술이다. 공중 풍력발전시스템은 부양체, 터빈발전장치, 테더, 계류장치, 전력변환장치, 시스템 종합제어 및 감시장치 등으로

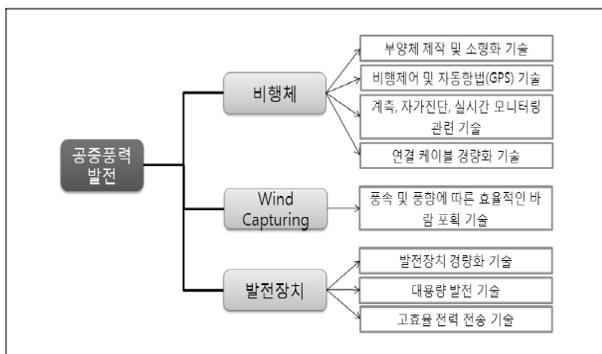


그림 1. 공중 풍력발전 핵심기술 분류

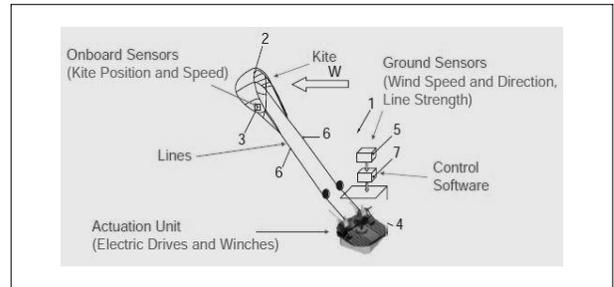


그림 2. 지상 거치형 공중풍력발전기 외형⁽²⁾

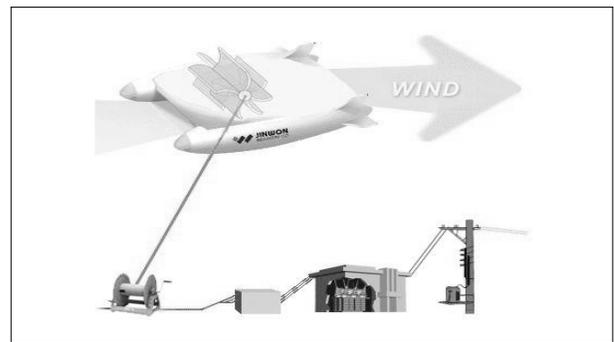


그림 3. 고공 거치형 공중풍력발전기 외형⁽³⁾

구성된다. 그림 1은 공중 풍력발전시스템의 핵심기술을 나타내고 있다. 즉, 부양체의 장기적인 체공안정성 확보와 바람에너지의 효율적인 포획 그리고 이를 지상으로 안전하게 전송하는 기술 등을 들 수 있다.

또한, 공중 풍력발전방식은 크게 2가지로 분류된다. 즉, 발전기가 지상에 설치되는 경우와 고공에 설치되는 경우로 구분된다. 발전기가 지상에 설치되는 경우에는 연, 닷 등의 기구에 의해 테더가 이완되면서 발전기 회전자를 구동하여 발전을 하고 이완된 테더는 모터의 구동에 의해 다시 되감기는 구조를 하고 있다. 한편, 발전기가 부양체에 설치되는 경우에는 고공에서 전력을 생산하고 테더를 이용하여 지상으로 전송하는 구조를 하고 있다. 그림 2와 그림 3은 각각의 구조를 나타내고 있다.

2.2 고공 풍력자원 특징

풍력밀도(Wind Power Density)는 공기의 밀도에 비례하며, 풍속의 세제곱에 비례하는 관계를 갖는다. 따라서 고공으로 올라갈수록 공기밀도는 떨어지지만, 풍속의 세제곱에 비례하여 풍력밀도가 급격히 증가하게 된다. 그러나 지상 수 km

이상의 고공에서의 풍력자원을 장기간에 걸쳐 지속적으로 측정하고, 정확하게 평가하기 위해서는 기상위성의 측정자료 또는 세계기상감시계획(WWW, World Weather Watch)의 일환으로 실시하는 고층기상관측 자료를 활용하는 것이 유일한 현실적 대안이다. 최근 미국의 에너지성(DOE, Department of Energy)와 국립환경예측센터(NECP, National Centers for Environmental Prediction)의 기상 관측자료를 이용한 고공 풍력자원 연구결과⁽⁴⁾에 의하면 일반적으로 고도 2km 이상부터 풍력 밀도가 급격하게 증가하는 것으로 조사되었다. 연구에 사용된 기상자료는 1979년부터 2006년까지 측정된 것으로서, 최고의 풍력밀도는 대류권과 성층권의 경계층인 대류권계면에 해당하는 고도 8~10km에 존재하는 것으로 분석되었다.

다음의 그림 4는 고도에 따른 풍력밀도를 지구 전체 및 서울, 동경, 뉴욕 등에 대해 퍼센타일 값으로 나타낸 연구결과이다.

지구 전체에 대한 경우를 보면 고도 500~2,000m 사이에서는 풍력밀도의 변화가 거의 없는 일정한 값을 지니고 있으나, 2km 이상의 고도에서는 급격한 변화의 양상을 보이고 있다. 메디안 풍속에 대해 고도 6~7km 구간에서는 고도가 증가함에 따라 단위 m당 0.37W/m²의 풍력밀도 증가를 보이고 있으나, 지표로부터 80~500m의 구간에서는 단위 m당 0.25W/m²의 풍력밀도 증가를 보이고 있다. 서울의 경우에는 지구 전체에

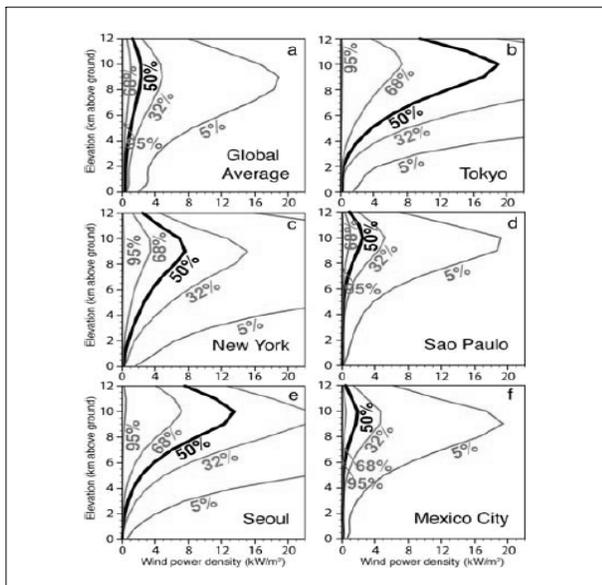


그림 4. 고도별 풍력밀도(kW/m²) 변화

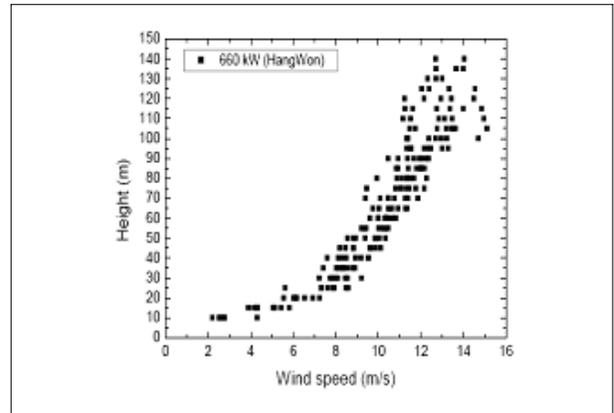


그림 5. 고도별 풍속변화(제주행원)

대한 분포와는 달리 5% 퍼센타일 값의 분포가 지표면에서부터 급격한 변화를 보이고 있으며, 32% 및 50% 퍼센타일 값들은 약 1.5km 고도에서부터 급격한 변화의 양상을 보이고 있다. 이처럼 지구전체 분포와 상이한 경향을 보이고 있는 이유는 대류권계면에 존재하는 제트기류의 영향인 것으로 판단된다. 또한, 그림 5는 우리나라 제주행원지구의 고도에 따른 풍속분포를 나타내고 있다. 고도가 높아짐에 따라 풍속이 증가함을 알 수 있다.

2.3 기술개발 현황

2.3.1 해외

현재까지 개발이 완료되어 실증단계에 진입한 공중 풍력 발전기는 없으며, 미국, 캐나다, 유럽 등 일부국가에서 기초 연구 및 상용화모델 개발을 위한 연구가 진행되고 있다. 다음의 표 1은 현재 해외에서 기술개발이 진행 중인 공중 풍력발전기의 기술개발 현황이다. 공중 풍력발전기의 운전고도는

표 1. 해외 공중풍력발전기 기술개발현황⁽⁵⁾

국가	기관	풍력발전기 형상	운전고도
캐나다	Margenn Power	비행선	300m
이태리	KiteGen	연	1km
미국	Sky Wind Power	로터	10km
미국	Makani Power	연	10km
네덜란드	Delft Univ.	연	-
네덜란드	Ampyx Power	비행선	-
영국	Univ. of Sussex	연	-
영국	Chetwoods	돛	25m

300m에서부터 10km에 이르기까지 다양하며, 공중 부양체 역시 비행선 형태로부터 연 또는 돛의 형태 등 다양한 종류의 연구개발이 이루어지고 있다.

공중 부양형 발전기는 비행선 형태의 부양체에 발전기를 설치하여 전력을 생산하는 방식으로서, 기존의 비행선에 발전기를 장착한 형태를 취하고 있다. 캐나다 마겐파워(Magenn Power)사는 발전기를 비행선 동체 내부에 설치하고 비행선 외부에 장착된 안내깃이 바람에 의해 회전하면서 발전기의 회전자를 회전시키는 방식을 취하고 있다.

그림 6은 캐나다 마겐파워사에서 2008년 4월 실증시험을 위해 100m 높이로 부양된 10kW급 풍력발전기이며, 당시 가장 큰 애로기술은 풍향 및 풍속의 변화에서도 비행선이 안정적 회전을 유지할 수 있도록 하는 부분과 지상과 연결된 전력선의 무게를 경량화 하는 것이었다. 비행선의 자세안정화는 외벽에 설치된 안내깃의 형상과 위치를 그림에 도시된 바와같이 수정함으로써 해결되었으며, 고장력 전력선의 중량은 고강도 폴리아크릴레이트 섬유인 벡트란(Vectran)을 적용함으로써 극복하고자 하였다. 공중 설치형 발전기의 경우 발전기가 고공에 위치하는 관계로 지상과 연결된 전력선에는 높은 인장력이 작용하게 되며 전력선 자체 중량 역시 운전고도에 따라 급속하게 증가하게 된다. 따라서 기존의 전력선을 이용할 경우 높은 자체 중량을 극복하기 위해 비행선의 크기가 증가하게 된다는 약점을 지니고 있다. 캐나다 마겐파워(Magenn Power)사는 이를 극복하기 위해 구리 전력선의 외피에 벡트란(Vectran)을 적용함으로써 중량감소와 인장강도의 증가를 이루고자 하였다. 표 2는 100kW 공중 풍력발전기의 주요사양을 나타내고 있다.

또한 그림 7과 그림 8은 캐나다 마겐파워(Magenn Power)사의 100kW급 모델에 대한 외형과 예상출력곡선을 나타내고 있다.

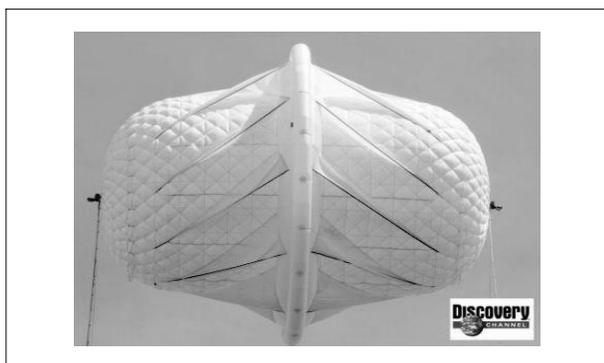


그림 6. 마겐파워사 10kW급 모델 외형⁽⁶⁾

육상 거치형 발전기는 바람을 이용하여 회전운동을 발생시키는 구동부를 공중에 설치하고 전력을 생산하는 발전기는 육상에 설치하는 경우이다. 이는 공중 설치형의 경우, 발전기와 전력선 등의 중량물이 대기 중에 위치함으로 인해 발생하는 비용의 증가와 안전성을 고려한 방식이다. 육상 거치형의 대표적인 예가 이탈리아에서 개발중인 카이트 젠(Kite Gen)이다. 기존의 풍력발전기는 그림 9에 나타난 바와 같이 회전날개의 끝단 부위가 가장 높은 에너지 전환효율을 갖는다는 점에 착안하여 연을 이용하여 발전기의 회전운동을 얻는 방식이다.

표 2. 마겐파워사 100kW급 모델 주요사양

구분	사양
정격발전량	100kW
비행선 크기(D x L)	13.5m x 30m
헬륨가스 용량	5,600m ³
운전고도	200~450m
기동풍속	2.5m/s
정격풍속	12m/s
최대풍속	30m/s

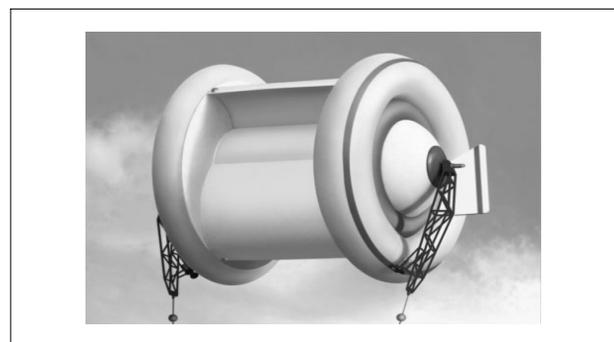


그림 7. 마겐파워사 100kW급 모델 외형

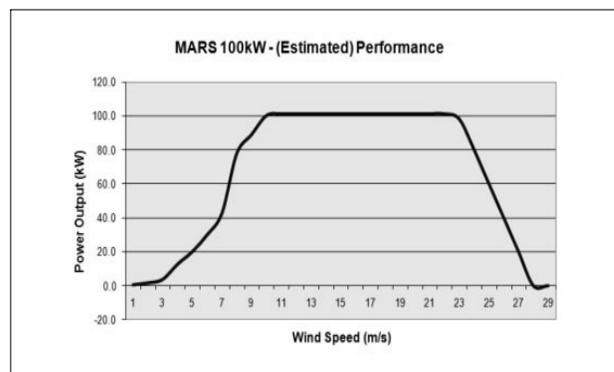


그림 8. 마겐파워사 100kW급 모델 출력예상곡선

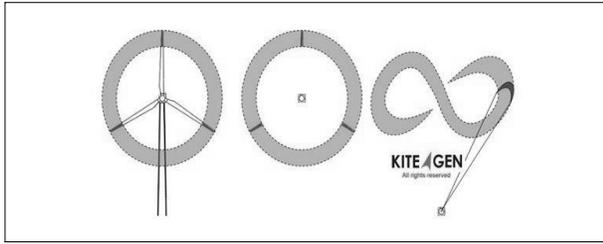


그림 9. 카이트젠 모델 작동원리



그림 10. 카이트젠 모델 외형⁽⁷⁾

대기 중에서 바람을 이용하여 회전력을 발생시키는 핵심 부품인 연의 양 끝단은 각각의 연결선에 의해 지상에 설치된 구동부(Actuation Unit) 및 발전기와 연결되며, 연에 작용하는 바람에 의해 연결선이 풀릴 때 구동부가 회전하면서 발전기의 역할을 수행하여 전력을 생산하게 되며, 연결선이 최대길이까지 풀리게 되면, 구동부가 모터의 역할을 수행하면서 연결선을 되감게 된다. 이때 소비되는 전력은 발전량의 약 12%에 해당하는 것으로 보고되었다. 개발팀은 2007년 이태리 토리노에서 40kW급의 시제품을 이용한 실증시험을 수행하였으며, 시제품의 연면적은 10m², 연결선의 최대 도달고도는 800m이었다. 그림 10은 이탈리아 카이트젠 모델의 외형을 보여주고 있다.

네델란드의 델프트 공대에서도 카이트젠(Kite Gen)과 유사한 방식의 육상 거치형 공중풍력발전기를 개발하고 있으며 래더밀(Ladder Mill)이라고 부르고 있다. 카이트젠(Kite Gen)과의 유일한 차이점은 발전기와 연을 연결하는 연결선에 다수의 연이 설치된다는 것이며, 연결선이 풀릴 때에는 전력을 생산하고 되감을 때에는 전력을 소모한다는 기본 운전방식(Yo-Yo Configuration)은 동일하다. 이처럼 다수의 연을 설치할 경우, 전력생산량을 증가시키면서 발전단가는 저감할 수 있다는 장점이 있지만, 각각의 연에 작용하는 풍하중이 상이한 관계로 인해 시스템의 안정적 제어가 어려워진다는 단점이 있다.

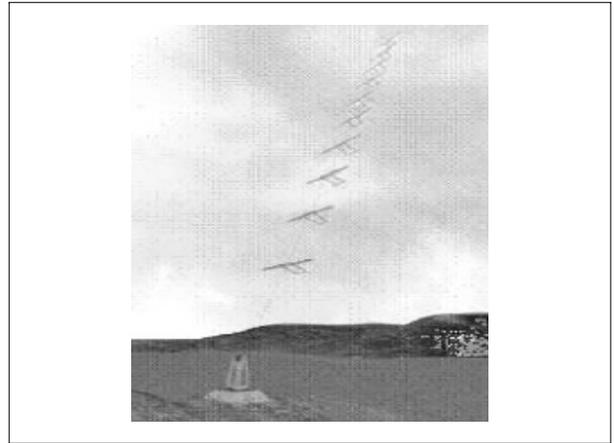


그림 11. 델프트공대 래더밀 모델 외형⁽⁸⁾

이로 인해 래더밀(Ladder Mill)은 1990년대 중반에 관련 연구가 시작된 이후 현재까지 시제품에 의한 실증시험은 이루어지지 않고 있다. 그림 11은 네델란드 델프트공대의 래더밀 모형의 외형을 보여주고 있다.

2.3.2 국내

국내에서는 진원 인더스트리社가 2006년부터 기술개발에 착수하여 2008년 국내에서는 최초로 부양체의 공중부양에 성공하였다. 그러나 발전기출력, 운전시간 등 당시의 실증운전데이터에 대해서는 공식적으로 확인되고 있지 않다.

AWP(Aero Wind Power)로 불리는 공중 풍력발전기는 고도 300m 높이에서의 풍력발전을 목표로 하고 있으며, 캐나다 마젠파워(Magenn Power)社와는 달리 쌍동선 형태로 제작된 부양체의 가운데에 발전기가 위치하고 있다. 또한 부양체 외벽의 파손으로 인한 추락을 방지하기 위해 부양체 내부를 선박과 같이 다수의 격벽으로 구성하였으며, 발전기는 기동토크(Cogging Torque)가 매우 낮은 AFPM(Axial Flux Permanent Magnetic)발전기를 채택함으로써 발전효율을 향상시켰다.

그림 12는 진원 인더스트리社의 AWP 모델 외형을 나타내고 있으며 그림 13은 진원 인더스트리社의 AWP 모델 발전용량별 크기를 나타내고 있다. 그러나 각 모델에 대한 구체적인 연구개발결과는 아직 보고되고 있지 않다.

또한, 한전전력연구원에서도 국내에서는 두 번째로 2011년 1월부터 2014년 12월까지 독자 모델의 200kW급 공중 풍력발전시스템을 개발할 계획이다. 본 과제의 사업비는 100% 자체 재원으로 확보할 예정이며 국내 산업체 및 연구기관과

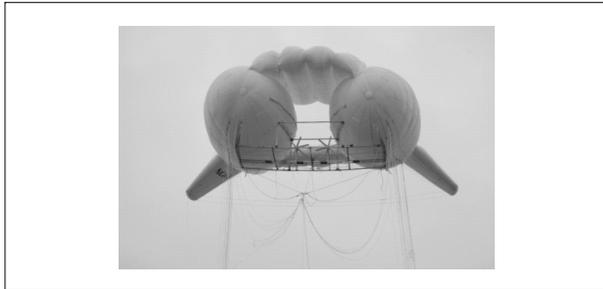


그림 12. 진원 인터스트리社 AWP 모델 외형

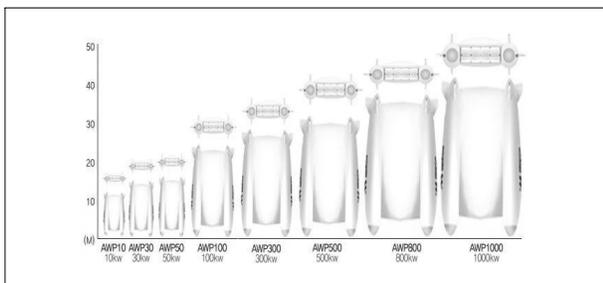


그림 13. 진원 인터스트리社 AWP 모델별 크기

공동으로 추진할 계획이다.

2.4 시장전망 및 상업화계획

공중 풍력발전의 초기시장은 도서지역이나 사막지역, 광산 지역, 고지대, 빙하지역 등 계통과 격리된 독립계통이 형성된 지역을 대상으로 틈새시장이 열릴 것으로 전망되며, 점차적으로 기존의 풍력발전시장을 대체하는 방향으로 확대될 것으로 전망된다. 캐나다 마켄파워社의 경우, 2010년 하반기나 2011년 상반기 중 100kW급 상용화 제품을 시장에 출시할 예정이었으나, 아직까지 실제 보급여부는 확인되고 있지 않다. 예상판매가는 500만원/kW로 동급 타워형 풍력발전의 100만원/kW 대비 열위에 있는 편이다. 또한 국내 진원 인터스트리社의 AWP 100kW급 모델의 경우에도 예상판매단가를 300만원/kW로 제시하고 있어, 동급 타워형 풍력발전 대비 열위에 있는 것이 사실이다. 그러나, 실제 운전고도(200~450m)에서의 장기 풍황 자원 측정자료 및 운전실적 자료가 없어, 정확한 경제성 평가는 현실적으로 어렵지만, 기존 타워형 풍력발전 대비 발전효율과 발전설비 이용율이 월등히 높을 것으로 예상되기 때문에 장기적인 측면에서 볼 때에는 경제성이 충분히 확보 될 것으로 추정된다. 한편, 한전 전력연구원에서도 2014년까지 독자 모델의

200kW급 공중 풍력발전기 개발을 목표로 하고 있으며 2015년부터는 본격적으로 시장공략에 나설 계획이다. 최초 상용화 모델의 제품판매단가는 250만원/kW를 목표로 하고 있으며 2020년까지 전 세계 풍력발전시장의 1%를 공중 풍력발전으로 대체하여 2조원의 매출을 올리는 것을 목표로 삼고 있다.

3. 결론

이상에서 살펴본 바와 같이, 지상 300m 이상의 고공에서 부는 바람을 이용한 풍력발전기술은 다양한 방법으로 연구가 진행되고 있기는 하나, 아직까지 상용화에 성공한 사례는 없으며 대부분 기초연구단계나 상용화준비단계에 머물고 있음을 알 수 있었다. 또한 이를 통해 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- (1) 고공의 풍력자원은 지상의 풍력자원에 비해 수배의 빠른 풍속과 일관된 방향성을 가지고 있어, 기술개발에 의한 경제적 가치는 매우 클 것으로 전망된다.
- (2) 본 공중풍력발전의 초기시장은 주로 도서지역이나 사막 지역, 광산지역, 고지대, 빙하지역 등 계통과 격리된 지역을 대상으로 틈새시장이 열릴 것으로 전망되며, 중장기적으로는 기존의 육상 풍력발전시장을 점차적으로 대체하는 방향으로 확대될 것으로 전망된다.
- (3) 전 세계 기술개발국간 기술격차가 크지 않기 때문에 집중적인 R&D투자가 뒷받침 된다면 조기상용화 및 세계시장 선점을 통한 미래 고부가가치 수익창출이 가능할 것으로 전망된다.
- (4) 본 공중풍력발전기술은 융·복합기술에 가까우며 제품의 조기상용화를 위해서는 신뢰성과 내구성을 우선적으로 확보한 후, 부품과 소재의 국산화와 보급 확대 등을 통해 제조원가를 점진적으로 낮추어 가는 전략이 필요하다.
- (5) 본 공중풍력발전 기술개발을 위해서는 고공에서의 정확한 풍력자원에 대한 조사연구와 관련법령 및 인허가 등의 조사연구가 병행되어야 한다.

후 기

본 연구는 한전의 미래유망기술 전략과제인 「지상 300m급 공중 풍력발전 기술개발 과제」의 일환으로 수행되었습니다.

References

[1] C.L.Archer, M.Z.Jacobson, Evaluation of Global Wind Power, J. Geophys. Res. 110, D12110, 2005.
 [2] M.Canale, L.Fagiano, and M.Milanse, IEEE Control Systems Magazine, 25-38, Dec.2007.
 [3] www.aerowindpower.com

[4] C.L.Archer, K.Calderia, Global Assessment of High-Altitude WindPower, Eneres, 2,307-319, 2009.
 [5] 김석우, 김현구, 고공 풍력발전 기술개발 현황, 한국태양에너지학회, Vol. 30. No. 1, pp. 19-24, 2010.
 [6] www.magenn.com
 [7] www.kitegen.com
 [8] www.awec2010.com

강 승 원



1989년 한국해양대학교 기관공학과 공학사
 2005년 충남대학교 기계공학과 공학석사

현재 한전전력연구원 선임연구원
 (E-mail : ksw4783@kepco.co.kr)

길 두 승



1992년 수원대학교 기계공학과 공학사
 2000년 충남대학교 기계공학과 공학석사
 2004년 충남대학교 기계공학과 공학박사

현재 한전전력연구원 선임연구원
 (E-mail : 95106404@kepco.co.kr)

박 동 수



1985년 전북대학교 건축공학과 공학사
 1987년 전북대학교 건축공학과 공학석사

현재 한전전력연구원 책임연구원
 (E-mail : copper@kepco.co.kr)

정 원 섭



1994년 한밭대학교 토목공학과 공학사
 1997년 연세대학교 토목공학과 공학석사

현재 한전전력연구원 선임연구원
 (E-mail : jisws@kepco.co.kr)

김 의 환



1997년 충남대학교 기계공학과 공학석사
 2001년 충남대학교 기계공학과 공학박사

현재 한전전력연구원 책임연구원
 (E-mail : kimehwa@kepco.co.kr)