

고공 풍력발전 기술개발 현황

김석우*, 김현구**

*한국에너지기술연구원 풍력발전연구센터(wemins@kier.re.kr),
**한국에너지기술연구원 풍력발전연구센터(hyungoo@kier.re.kr),

Technology Development Trends for High Altitude Wind Power Generation

Kim, Seok-Woo* Kim, Hyun-Goo**

*Wind Power Research Cenetr, Korea Institute of Energy Research(wemins@kier.re.kr),
**Wind Power Research Cenetr, Korea Institute of Energy Research(hyungoo@kier.re.kr)

Abstract

At the altitudes above 3km, the wind is three to four time faster and less variable than at the current MW sized wind turbine hub height of around 100m. In addition, power generation from wind turbines installed on the ground is intermittent because local wind conditions are affected by local topography and artificial structures. The wind energy researchers and engineers are now looking for revolutionary ideas to utilize high altitude wind resources in-creasing the capabilities of wind turbine installations.

This article presents and discusses several concepts for wind energy exploitation from wind at high altitudes. The concepts presented in this paper make use of lifting bodies, called wings or kites, connected to a tether that stretches into the higher regions of the atmosphere.

Keywords : 고공 풍력발전(High Altitude Wind Power), 연결 장치(Tether), 풍력 밀도(Wind Power Density), 안정화(Stabilization), 연(Kite)

1. 서 론

국내외적으로 풍력발전 시장은 급속한 성장 추세를 보이고 있으며, 이러한 추세에 힘입어 5~6MW급 대형 풍력발전기가 상용화 단계에 진입하였으며, 각국은 풍력자원의 적극적

활용을 위해 많은 예산을 투자하여 기술개발과 단지 건설에 노력을 기울이고 있다.

최근 해외 연구¹⁾에 의하면 지표면 80m 높 이에서 평균풍속 6.9m/s 이상인 지역의 20% 만 풍력발전단지로 개발하여도 전 세계 에너 지 수요량을 충족시킬 수 있다는 결과를 발표

투고일자 : 2009년 12월 14일, 심사일자 : 2009년 12월 20일, 게재확정일자 : 2010년 2월 1일
교신저자 : 김석우(wemins@kier.re.kr)

하였다. 그러나 현실적으로 이 같은 잠재적 풍력자원을 100% 활용한다는 것은 불가능하다. 이는 풍력발전기의 회전자 직경과 허브 높이를 고려한 타워 높이 등 현실적 한계를 고려할 경우 천문학적인 예산이 투입되어야 하기 때문이다. 예로써 회전자 직경 77m인 1.5MW급 풍력발전기를 설치 대상으로 고려할 경우 1km²당 약 6개의 풍력발전기를 설치할 수 있으며, 이는 설비용량 기준 9MW/km²에 해당한다. 그러나 동일면적에 화력발전소를 건설할 경우 약 200~300배의 발전설비용량을 확보할 수 있다.

또한 최고의 풍황자원을 보유한 지역에 설치된 풍력발전단지인 경우에도 풍속의 변화로 인해 설비용량 기준 평균 30~45% 정도의 전력만을 생산한다는 사실을 감안할 경우 육해상 풍력발전단지의 경제성 향상을 위해서는 단순한 풍력발전기의 대형화 이외에 획기적인 기술혁신이 필요함을 알 수 있다.

2. 고공 풍황자원

풍력 밀도(Wind Power Density)는 공기의 밀도에 비례하며, 풍속의 세제곱에 비례하는 관계를 갖는다. 따라서 고공으로 올라갈수록 공기밀도는 떨어지지만 풍속의 세제곱에 비례하여 풍력 밀도가 급격히 증가하게 된다. 그러나 지상 수 km 이상의 고공에서의 풍황자원을 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 고공풍황자원 연구결과²⁾에 의하면 일반적으로 고도 2km 이상부

터 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 1은 고도에 따른 풍력 밀도를 지구 전체 및 서울에 대한 퍼센타일 값을 나타낸 연구결과이다.

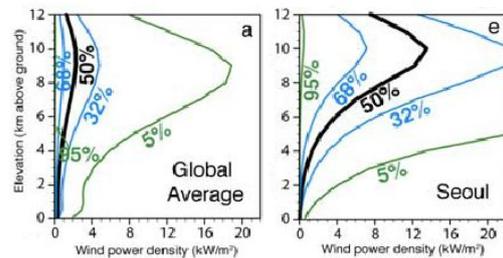


그림 1. 고도에 따른 풍력밀도(kW/m²) 변화²⁾

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. 다음의 표 1은 지구 전체에 대한 분석결과에 의한 고도별 평균 풍속 및 풍력밀도이다.

표 1. 고도별 평균 풍속 및 풍력밀도

| 고도 (m) | 평균 풍속(m/s) | 평균 풍력밀도(W/m ²) |
|--------|------------|----------------------------|
| 10 | 3.3 | 22 |
| 80 | 4.6 | 58 |
| 800 | 7.2 | 205 |

서울의 경우에는 지구 전체에 대한 분포와는 달리 5% 퍼센타일 값의 분포가 지표면에

서부터 급격한 변화를 보이고 있으며, 32% 및 50% 퍼센타일 값들은 약 1.5km 고도에서부터 급격한 변화의 양상을 보이고 있다. 이처럼 지구 전체 분포와 상이한 경향을 보이고 있는 이유는 대류권계면에 존재하는 제트 기류의 영향인 것으로 판단된다.

3. 해외 고공 풍력발전 기술개발

현재까지 개발이 완료되어 실증단계에 진입한 고공풍력발전기는 없으며, 미국 및 유럽 일부 국가에서 개념연구 및 초기 단계의 시제품 제작 등이 이루어지고 있다. 또한 국내에서도 진원인더스트리가 비행선 형태의 고공풍력발전기를 개발하여 실증운전을 추진 중이다. 다음의 표 2는 현재 연구개발이 진행 중인 고공풍력발전기 현황이다.

표 2. 고공 풍력발전기 연구개발 현황

| 국가 | 기관 | 풍력발전기 형상 | 운전 고도 |
|------|-----------------|----------|-------|
| 캐나다 | Magenn Power | 비행선 | 300m |
| 이태리 | KiteGen | 연 | 1km |
| 미국 | Sky Wind Power | 로터 | 10km |
| 미국 | Makani Power | 연 | 10km |
| 네델란드 | Delft Univ. | 연 | - |
| 네델란드 | Ampyx Power | 비행선 | - |
| 영국 | Univ. of Sussex | 연 | - |
| 영국 | Chetwoods | 돛 | 25m |
| 대한민국 | 진원인더스트리 | 비행선 | 300m |

현재 개발 중인 풍력발전기는 운전고도 300m에서부터 10km에 이르기까지 다양하며, 공중 부양체 역시 비행선 형태로부터 연 또는 돛의 형태 등 다양한 종류에 대한 연구개발이 이루어지고 있다. 그러나 적용고도를 제외하고 발전기의 설치 위치만으로 구분하자면 크게 두 가지 형식으로 구분된다. 첫 번째 형식은 발전기가 공중 부양체의 부력을 이용해 고공에 설치되는 경우(이하 공중 부양형 발전기)로써 대표적인 예가 캐나다 Magenn Power이다.

다른 하나의 형태는 발전기는 지상에 설치되고 다만 발전기 회전자를 구동하기 위한 연 또는 돛 등이 공중에 위치하는 경우(이하 육상 거치형 발전기)이다.

3.1 공중 부양형 발전기

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



그림 2. Magenn Power 10kW 고공 풍력발전기

위 그림 2의 풍력발전기는 2008년 4월 실증 시험을 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 경량화하는 것이었다.

비행선의 자세 안정화는 외벽에 설치된 안내깃의 형상과 위치를 그림에 도시된 바와 같이 수정함으로써 해결되었으며, 고장력 전력선의 중량은 고강도 폴리아크릴레이트 섬유인 Vectran을 적용함으로써 극복하고자 하였다. 공중 설치형 발전기의 경우 발전기가 고

공에 위치하는 관계로 지상과 연결된 전력선에는 높은 인장력이 작용하게 되며 전력선 자체 중량 역시 운전 고도에 따라 급속하게 증가하게 된다. 따라서 기존의 전력선을 이용할 경우 높은 자체 중량을 극복하기 위해 비행선의 크기가 증가하게 된다는 약점을 지니고 있다. Magenn사는 이를 극복하기 위해 구리 전력선의 외피에 Vectran을 적용함으로써 중량 감소와 인장강도의 증가를 이루고자 하였다.

다음의 표 3은 100kW 고공 풍력발전기의 사양으로서 최대 풍속이 30m/s인 점과 제품에 대한 보증기간 및 판매가가 기존의 타워형 동급 풍력발전기 대비 열위에 있음을 알 수 있다. 판매가의 경우 고공 풍황자원의 경제성과 직접적인 연관관계에 있으므로 운전 고도인 200~450m 구간의 고도에 대한 장기 풍황자원 측정결과가 없는 현 단계에서는 판매가격의 적정성에 대한 평가를 유보하고자 한다.

표 3. Magenn 100kW 주요사양

| 구분 | 사양 |
|----------------|---------------------|
| 정격 발전량 | 100kW |
| 비행선 크기 (D x L) | 13.5m x 30m |
| 헬륨가스 용량 | 5,600m ³ |
| 운전 고도 | 200 ~ 450m |
| 기동 풍속 | 2.5m/s |
| 정격 풍속 | 12m/s |
| 최대 풍속 | 30m/s |
| 예상 판매가 | \$500,000 USD |
| 보증 기간 | 1년 |

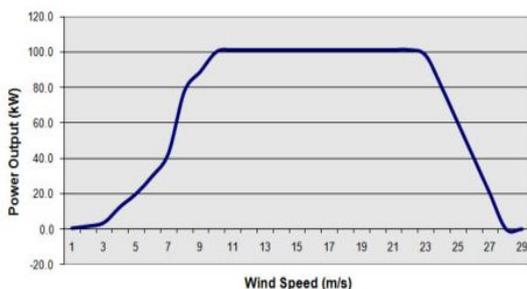


그림 3. Magenn사 10kW 고공 풍력발전기 출력곡선³⁾

Magenn사는 전력계통망이 없는 지역에 디젤발전기와 연계한 복합발전시스템을 구성하여 보급한다는 목표 하에 2010년 중 100kW급 고공 풍력발전기 상용화를 추진하고 있으나 실증운전 실적이 현재까지 없다. 또한 낙뢰에 대한 시스템 보호대책과 추락을 대비한 안전장치 등에 대해서는 현재까지 공개된 자료가 없는 관계로 시장의 신뢰를 확보하는데 많은 제약이 있을 것으로 판단된다.

3.2 육상 거치형 발전기

육상 거치형은 바람을 이용하여 회전운동을 발생시키는 구동부를 공중에 설치하고 전력을 생산하는 발전기는 육상에 설치하는 경우이다. 이는 2.1절에서 설명한 바와 같이 공중 설치형의 경우 발전기와 전력선 등의 중량물이 대기 중에 위치함으로 인해 발생하는 비용의 증가와 안전성을 고려한 방식이다.

육상 거치형의 대표적인 예가 이태리에서 개발중인 KiteGen이다. 기존의 풍력발전기는 그림 4에 나타낸 바와 같이 회전날개의 끝단 부위가 가장 높은 에너지 전환효율을 갖는다는 점에 착안하여 연을 이용하여 발전기의 회전운동을 얻는 방식이다.

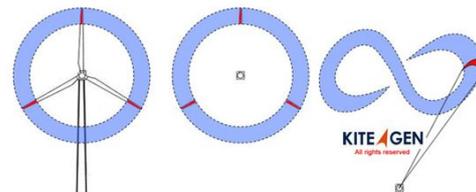


그림 4. 이태리 KiteGen의 작동원리⁴⁾

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 수행하면서 전력을 생산하게 되며, 연결선이 최

대 길이까지 풀리게 되면, 구동부가 모터의 역할을 수행하면서 연결선을 되감게 된다. 이 되감는 과정에서 소비되는 전력은 발전량의 약 12%에 해당하는 것으로 보고되었다.⁵⁾ 다음의 그림 5는 KiteGen의 개략적인 구성도로써 작동원리를 보여주고 있다.

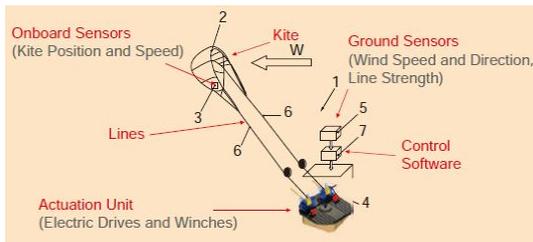


그림 5. 이태리 KiteGen의 구성도⁵⁾

개발팀은 2007년 이태리 토리노에서 40kW급의 시제품을 이용한 실증시험을 수행하였으며, 시제품의 연 면적은 10m², 연결선의 최대 도달 고도는 800m이었다. 이같은 시험결과에 근거하여 100MW급 고공 풍력발전기를 이용한 발전단가는 20€/kWh가 될 것으로 예측하였다.



그림 6. 이태리 40kW급 KiteGen 실증시험

네델란드의 델프트 공대에서도 KiteGen과 유사한 방식의 육상 거치형 고공풍력발전기를 개발하고 있으며 Laddermill이라고 부르고 있다. KiteGen과의 유일한 차이점은 발전기와 연을 연결하는 연결선에 다수의 연이 설치된다는 것이며, 연결선이 풀릴 때 전력을

생산하고 되감을 때에는 전력을 소모한다는 기본 운전방식(Yo-Yo Configuration)은 동일하다. 이처럼 다수의 연을 설치할 경우 전력 생산량을 증가시키면서 발전단가는 저감할 수 있다는 장점이 있지만, 각각의 연에 작용하는 풍하중이 상이한 관계로 인해 시스템의 안정적 제어가 어려워진다는 단점이 있다. 이로 인해 Laddermill은 1990년대 중반에 관련 연구가 시작된 이후 현재까지 시제품에 의한 실증시험이 이루어지지 않고 있다.

4. 국내 고공 풍력발전 기술개발

국내에서는 진원 인더스트리가 고공 풍력발전기술개발을 수행한 유일한 경우로서 2008년 시제품 제작 및 공중 부양에 성공하였다. AWP (Aero Wind Power)로 불리우는 고공 풍력발전기는 고도 300m 높이에서의 풍력발전을 목표로 하고 있으며, 캐나다 Magenn Power의 경우와는 달리 쌍동선 형태로 제작된 부양체의 가운데 발전기가 위치하고 있다. 또한 부양체 외벽의 파손으로 인한 추락을 방지하기 위해 부양체 내부를 선박과 같이 다수의 격벽으로 구성하였으며, 발전기는 기동 토크(Cogging Torque)가 매우 낮은 AFPM(Axial Flux Permanent Magnetic) 발전기를 채택함으로써 발전효율을 향상시켰다.

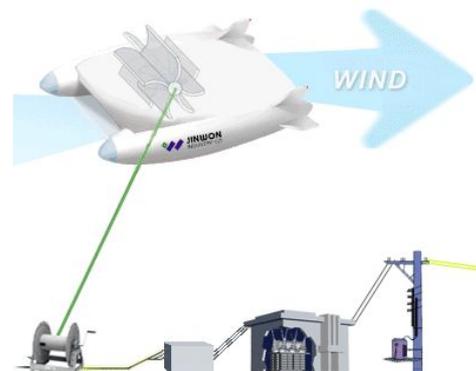


그림 7. 진원 인더스트리 AWP 개략도⁶⁾

부양체의 공중 부양에 대한 실증시험은 성공적으로 이루어졌으나, 부양 고도 및 육상과 연결된 전력선을 통한 실증 발전시험이 성공적으로 수행되었는지에 대해서는 현재까지 관련된 공식자료를 확보할 수 없으며, 발전가능 풍속은 최대 25m/s로 설계되었다.

현재 2010년 1월 제작 완료를 목표로 200kW 급 고공 풍력발전기를 제작 중이며, 향후 1.5MW 급 풍력발전기 개발 및 제작을 목표로 하고 있다. 다음의 그림 8은 진원 인더스트리가 제시하고 있는 발전용량별 AWP의 크기이며, 각 모델에 대한 시제품의 제작완료 및 실증시험 결과에 대한 보고는 이루어진 바 없다.

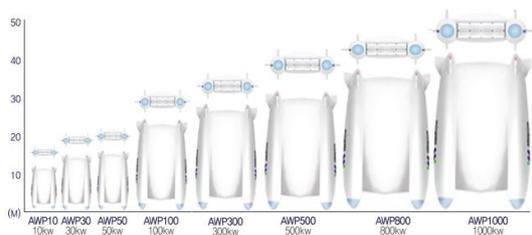


그림 8. 진원 인더스트리 AWP 용량별 크기

제작사에 의하면 AWP 100kW 모델 기준으로 제작 및 설치비는 약 3억원을 예상하고 있으며, 이 경우 건설단가는 약 300만원/kW로서 MW급 대형 풍력발전기와 소형 풍력발전기의 중간 수준이며, 발전원가는 약 70~90원/kW로 예상하고 있다. 이 같은 계산 근거는 발전시스템의 효율이 60%로서 연간 30일, 24시간 정격출력을 생산한 경우이다.

5. 결 론

고도 300m 이상의 우수한 풍황자원을 이용한 풍력발전기술에 대한 다양한 연구가 이루어지고 있으며 국내에서도 일부 기업에 의해 기술개발이 이루어지고 있다. 현재까지 상용화 단계에 도달한 연구개발 사례는 없으나 향후 기술개발 현황에 대한 면밀한 사례

연구가 필요하며 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- (1) 발전기가 고공에 부양되는 경우는 낙뢰, 전력선 하중 및 추락 시의 위험성으로 인해 대용량화에는 많은 어려움이 예상된다.
- (2) 경제성과 안정성의 측면에서는 KiteGen과 같이 발전기가 육상에 거치되는 경우가 보다 유망함.
- (3) 국내에서의 타당성 검토를 위해서는 선행적 연구로서 고공 풍황자원에 대한 조사분석이 선행되어야 함
- (4) 또한 국내 고공 풍력발전 실용화를 위한 관련 법령 및 인허가 절차에 대한 조사와 보완 필요성에 대한 검토가 이루어져야 함.
- (5) 현 단계에서는 해외 특허에 관한 조사와 함께 원천기술개발로서의 접근 가능.

참 고 문 헌

1. C.L. Archer, M.Z. Jacobson, Evaluation of Global Wind Power, J. Geophys. Res. 110, D12110, 2005
2. C.L. Archer, K. Calderia, Global Assessment of High-Altitude Wind Power, Energies, 2, 307-319, 2009
3. www.magenn.com/products.php
4. www.kitegen.com
5. M. Canale, L. Fagiano, and M. Milanese, IEEE Control Systems Magazine, 25-38, Dec. 2007
6. www.aerowindpower.com