

난류강도가 소형 풍력발전기 출력에 미치는 영향

Turbulence Intensity Effects on Small Wind Turbine Power Performance

김석우*

Kim, Seokwoo*

(Submit date : 2013. 9. 27., Judgement date : 2013. 10. 5., Publication decide date : 2013. 12. 13.)

Abstract : Energy generation from an instrumented Skystream 3.7 small wind turbine was used to investigate the effect of ambient turbulence levels on wind turbine power output performance. It is widely known that elevated ambient turbulence level results in decreased energy production, especially for large sized wind turbine. However, over the entire wind speed range from cut in to the rated wind speed, the measured energy generation increased as ambient turbulence levels elevated. The impact degree of turbulence levels on power generation was reduced as measured wind speed approached to the rated wind speed of 13m/s..

Key Words : 소형 풍력발전기(Small wind turbine), 출력(Power output), 난류강도(Turbulence intensity), 정격 풍속(Rated wind speed), 기동 풍속(Cut in wind speed)

기 호 설 명

| | |
|---------------|--------------------------------|
| ρ_{1min} | : 1분 평균 공기밀도 (kg/m^3) |
| ρ_o | : 표준 공기밀도 (kg/m^3) |
| T_{1min} | : 1분 평균 공기온도 ($^{\circ}C$) |
| B_{1min} | : 1분 평균 대기압 (Pa) |
| R_o | : 가스상수 278.05 $J/(kg \cdot K)$ |
| P_n | : 보정 출력 (kW) |
| P_{1min} | : 1분 평균 출력 (kW) |

1. 난류와 소형 풍력발전기 출력성능

MW급 대형 풍력발전기의 출력에 미치는 난류강도의 영향은 수치해석 등의 방법에 의해 다양하게 연구되어 왔다.^{[1],[2]} 이는 주로 대형 풍력발전기로 구성되어지는 풍력발전단지 내에서 풍력발전기의 후류가 인접한 타 풍력발전기의 출력과 피로하중에 미치는 영향을 규명하기 위한 것을 주 목적으로 이루어졌다.

*김석우 : 한국에너지기술연구원 책임연구원
E-mail : wemins@kier.re.kr, Tel : 042-860-3568

*Kim Seokwoo : Korea Institute of Energy Research, Principal Researcher
E-mail : wemins@kier.re.kr, Tel : 042-860-3568

소형 풍력발전기는 인접한 다른 풍력발전기의 후류 영향보다는 자체의 설치 특성으로 인한 난류 영향에 대한 평가가 더욱 중요하다. 즉, 소형 풍력발전기는 대형과는 달리 도심의 건물 옥상 설치 또는 도심 가로등 적용형 등 애초에 난류가 강한 유동장에 설치되는 경우가 대부분이며, 이로 인해 자체 출력에 미치는 난류의 영향에 대한 이해가 중요하다. 그러나 이에 대한 실증 연구는 매우 제한적이며, 미국 Bergey사의 소형 풍력발전기를 대상으로 이루어진 실증시험^[3] 등 소수의 자료만이 공개되어 있다. 특히 Bergey XL1 1kW 풍력발전기에 대한 출력 측정결과 난류강도 0.14 미만(측정 풍속 4~7m/s)에서는 약 2%의 출력 감소가 있음을 확인하였다.

일반적으로 상용화 소형 풍력발전기 제작사들은 자사의 제품이 IEC 61400-2에 명기된 소형 풍력발전기의 난류 설계등급에 따른 분류 중 어느 등급에 속하는지 정확히 표기하지 않는 경우가 많아서 난류가 출력 성능에 미치는 영향을 평가하는데 장애가 되고 있다.

소형 풍력발전기는 작은 회전자 직경과 무게로 인해 풍향 및 풍속 변화에 민감하게 반응하게 되며, 이는 출력 성능과 블레이드 및 타워 등 구조물의 피로수명에 부정적으로 작용하는 것으로 알려져 있다.^[4]

본 연구에서는 Skystream 3.7 소형 풍력발전기의 출력 성능을 실측하여 난류강도의 변화가 출력 성능에 미치는 영향을 정량적으로 규명하고자 하였으며, 그 결과 기존에 알려진 바와는 달리 난류강도의 증가가 출력 향상으로 연결됨을 알 수 있었다.

2. Skystream 3.7 출력 성능 평가

출력 성능 시험 평가에 사용된 풍력발전기는 미국 Southwest가 미국 에너지성(Department

of Energy) 산하의 국립연구소인 National Renewable Energy Laboratory와의 협력을 통해 개발한 Skystream 3.7이다. 해당 풍력발전기는 2008년 당시 정격출력 1.8kW 용량으로 최초 개발되어 독일 GL의 인증을 획득하였으나, 설계출력 보다 향상된 출력 성능 보임에 따라 별도의 설계 변경 없이 2009년부터 정격출력 2.4kW로 변경하여 상용화 판매 중인 제품이다.

2.1 월령기지 설치 현황

다음의 Fig. 1은 월령기지의 배치도를 나타낸 것으로, 평가 대상 풍력발전기로부터 40m 거리에 (주)한진산업의 100kW급 풍력발전기가 설치되어 있으며, 16.5m 이격된 위치에 출력 성능 평가를 위한 기상탑을 설치하였다. 100kW 풍력발전기는 출력 성능 평가 기간 중 정지 상태를 유지하여 운전시 발생하는 후류 영향을 원천적으로 배제하였다. 다만 100kW 풍력발전기 구조물로 인해 왜곡된 풍향이 Skystream 3.7 출력에 미치는 영향을 배제하기 위해 출력 성능 평가를 위한 유효 측정 방위각을 270°~360° 및 0°~45°로 제한하였다.



Fig. 1 General arrangement drawing of Wol-Ryoung site

월령기지는 연 평균 풍속 6.6m/s의 양호한 풍황 자원이 분포하고 있으며, 잠재 풍력 발전 에너지는 1,313.6kWh/m²로 평가된다. Table

1은 월령기지의 상세 풍향자원 분포를 보여주고 있으며, Fig. 2에 나타낸 바와 같이 주 풍향은 북북서 및 동북동에 분포하고 있다. 주 풍향의 변화는 계절 및 시간에 따라 변화하게 되며, 시간에 따른 변화보다는 계절풍의 영향으로 인해 하절기와 동절기의 계절에 따른 변화가 크다. 따라서 이번 출력성능 평가와 같이 특정 계절에 걸쳐 단기간에 수행되는 성능평가에 적합함을 알 수 있다.

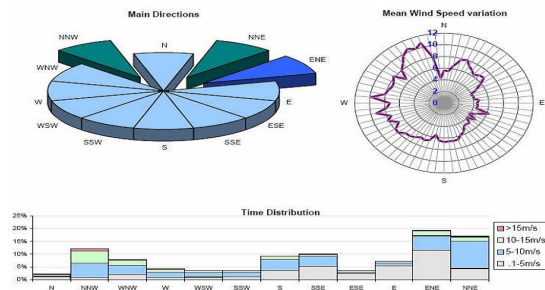


Fig. 2 Wind resource distribution at Wol-Ryoung site

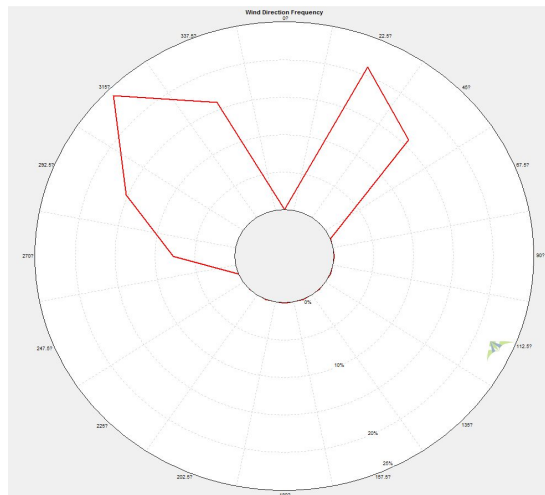


Fig. 3 Wind direction distributions during the measurements

Fig. 3은 출력 측정기간 중의 풍향변화를 보여주고 있으며, 주 풍향이 346°~270°와 8°~45°로 일정하게 유지되고 있음을 알 수 있

며, 이번 연구에서는 8°~45° 풍향에서 획득한 출력 자료를 평가대상으로 하였다.

2.2 Skystream 3.7

Skystream 3.7은 IEC 61400-2의 등급 분류 중 풍속등급 Class II, 난류등급 A에 속하는 정격출력 2.4kW의 소형 풍력발전기이다. 설계상의 특징으로는 공력소음 저감을 위해 만곡형 블레이드를 채택한 점과 발전기의 cogging torque 저감과 출력향상을 위해 slotless/brushless 형 영구자석 발전기를 적용하였다는 것이다.

다음의 Fig. 4와 Table 2는 각각 Skystream 3.7의 제작사 제시 출력곡선과 설계사양을 보여주고 있다.

Table 1 Wind Characteristics at Wol-Ryoung

| | |
|--------------------------------------|--------------------------|
| Mean wind speed (at 24m height) | 6.6m/s |
| Mean turbulence intensity (at 10m/s) | 10.0% |
| Max. 60min average wind speed | 18.5m/s |
| Maximum gust | 20.4m/s |
| Uncertainty of wind speed measured | 0.2m/s |
| Mean wind power | 330.0 W/m ² |
| Total wind energy | 1313.6kWh/m ² |
| Best sector in energy contained | NNW 25.7% |
| 2nd best sector in energy contained | NNE 16.6% |
| Best sector in time distribution | ENE 19.4% |
| 2nd best sector in time distribution | NNE 17.1% |

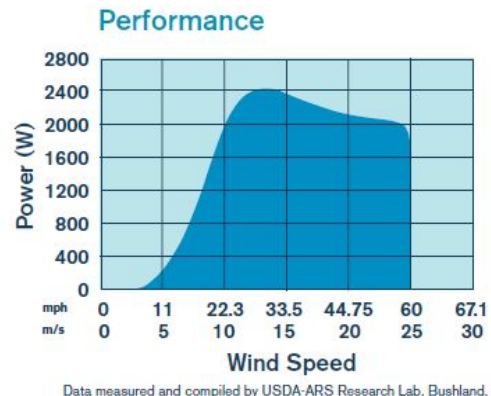


Fig. 4 Manufacturer's power curve

Table 2 Skystream 3.7 specifications

| | |
|-----------------------|-------------------------|
| Design class | IIA |
| Rated power | 2.4kW |
| Rotor diameter | 3.72m |
| Cut in wind speed | 3.5m/s |
| Rated wind speed | 13m/s |
| Survival wind speed | 63m/s |
| Rotor speed | 50~325 rpm |
| Swept area | 10.87m ² |
| Rotor position | Downwind |
| Overspeed protection | Electrical relay switch |
| Weight (Except tower) | 77kg |

2.3 출력성능 측정 절차

풍력발전기의 출력성능평가를 위해서는 실시 간 풍황 측정을 위한 기상탑이 필요하며, 측정 기상자료와 출력자료를 동기화 처리하기 위한 Data Logger가 필요하다. 기상탑의 경우 풍황 왜곡을 피하기 위해 IEC 61400-12-1에서는 측정대상 풍력발전기 회전자 직경의 2배에서 4배 사이의 거리에 설치할 것을 추천하고 있으며, 이번 측정에서는 회전자 직경의 4.4배 이격된 위치에 설치되었으며, 기상탑의 높이는 Skystream 3.7의 허브 높이와 동일하게 10m로 하였다.

기상탑에 설치된 풍속계는 Vector Instruments의 A100LK(시리얼 번호 7443)이며, 측정가능 풍속 범위는 최대 77m/s까지로서 1회전 당 12개의 펄스신호를 방출한다. 또한 측정자료의 보정을 위해 필요한 온습도 및 대기압 측정을 위한 센서류가 기상탑에 추가로 설치되었다.

IEC 61400-12-1에 따르면 실속형 소형 풍력발전기에 대해서는 측정 출력값에 대해서만 보정할 것을 권장하고 있으며, 이에 따라 본 측정에서도 다음의 관계에 따라 측정 출력값을 보정하였다.

$$\rho_{1min} = \frac{B_{1min}}{R_o T_{1min}}$$

$$P_n = P_{1min} \left(\frac{\rho_{1min}}{\rho_o} \right)$$

3. 측정 결과

3.1 난류강도 분포

측정된 모든 자료는 1분 간격으로 평균값, 최대값, 최소값 및 표준편차를 후처리 하였으며, 유효측정 방위각 이외의 풍향에서 획득한 자료는 폐기 처리하였다.

해안가에 위치한 월령기지는 내륙에 비하여 바람의 난류강도가 낮은 편에 속하며, 측정기간 중의 난류강도 분포는 Fig. 5와 같다. 전체 측정 풍속범위에 대해 난류강도가 10~20% 사이에 균일하게 분포하고 있음을 알 수 있다.

유효측정 방위각 내의 풍향에서 획득한 자료는 바람의 난류강도 10% 이하, 20% 이하 및 20% 이상으로 분류되어 난류의 영향에 의한 출력성능 변화를 분석하고자 하였다.

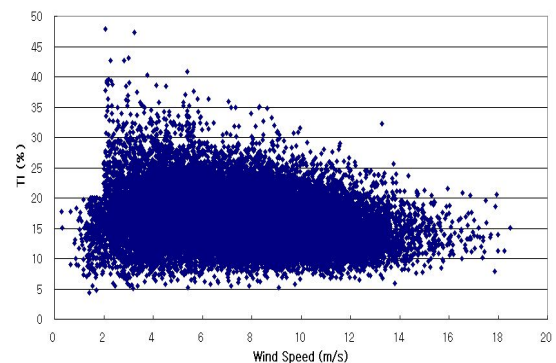


Fig. 5 Turbulence intensity distributions

3.2 난류강도 10% 이하에서의 출력성능

Fig. 6은 난류강도 10% 이하에서의 평균 출력곡선으로서 2009년 12월 23일 4시 10분부터 2010년 1월 28일 9시 21분까지 측정된 자료군 중 유효 측정자료는 모두 959개이며, 최대 풍속은 2010년 1월 13일 05시 41분에 측정된 17.85m/s이다. 제작사 제시 평균 출력곡선과 잘 일치하는 경향을 보이고 있으며, 약 13m/s

내외의 풍속 구간에서 정격출력인 2,4kW를 생산하고 있다. 실속이 발생하는 13m/s 이상의 풍속 구간에서 급격한 출력의 감소가 관찰되지는 않고 있으며, 이는 15m/s 이상의 고풍속 영역에서의 측정자료가 충분하지 않기 때문이다.

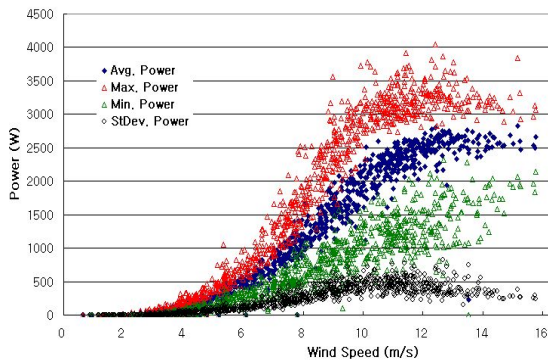


Fig. 6 Power output distributions (T.I. ≤ 10%).

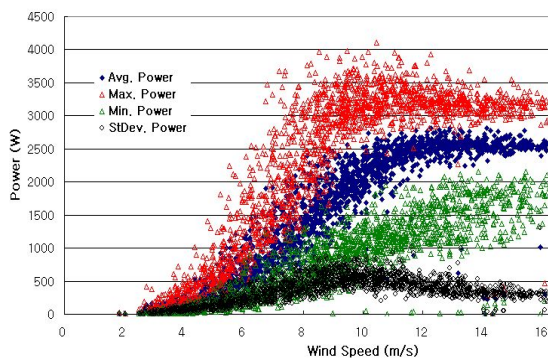


Fig. 7 Power output distributions (T.I. > 20%)

3.3 난류강도 10% 초과에서의 출력성능

전술한 바와 같이 위 자료는 난류강도 10% 이하의 풍속 조건 하에서 측정된 자료만을 분석한 결과이며 난류강도가 이 보다 높을 경우에는 Bin 평균 출력이 다른 양상을 보일 수 있다. 이를 확인하기 위해 난류강도 10%를 초과하는 상태에서 측정된 출력값을 별도로 구분하여 해석을 수행하였다. 분석에

사용된 측정자료는 2010년 1월 10일 12시 18분부터 2010년 1월 13일 11시 59분까지 측정된 1,824개의 자료군이며 각 자료군은 1분 평균값으로 구성되어 있다. 기간 중 최대 풍속은 2010년 1월 13일 2시 38분에 측정된 20.46m/s이다.

Fig. 6과 비교 시 풍속 증가에 따른 출력의 증가는 동일한 경향을 나타내고 있으나, 전체적으로 동일 풍속 구간에 대해 출력량이 증가하였음을 확인할 수 있다. 그러나 측정 출력값의 표준편차는 Fig. 6과 Fig. 7이 정성적 및 정량적으로 의미있는 변화를 확인할 수 없다.

3.3 출력에 미치는 난류강도의 영향

난류강도 변화에 따른 출력변화를 정량적으로 규명하기 위해 난류강도를 ① 10% 이하, ② 20% 이하 및 ③ 20% 초과로 세 구간으로 구분하여, 각각의 난류강도 구간에 대해 풍속 0.5m/s 단위로 평균 출력값을 구하였다. 풍속 구간은 Skystream 3.7의 기동풍속인 3.5m/s 부터 종단풍속인 13m/s까지이다. 각각의 난류강도 구역에 대한 측정 자료군 수는 아래의 Table 3와 같다.

Table 3 1minute averaged data bin

| Turbulence Intensity | No. of data bin | Accumulated measurement hours |
|----------------------|-----------------|-------------------------------|
| T.I. ≤ 10% | 781 | 13.0 |
| T.I. ≤ 20% | 14,924 | 248.7 |
| T.I. > 20% | 4,195 | 69.9 |

Fig. 5에 나타난 바와 같이 측정기간 중 난류강도는 주로 10~20%의 분포를 보여주고 있으며, 이로 인해 10% 이하 및 20% 초과 시 측정된 출력자료가 상대적으로 적다.

Fig. 8은 난류강도 변화에 따른 평균출력곡선의 변화를 보여주고 있다. 출력곡선은 난류강도가 증가함에 따라 출력 역시 증가하고 있음을 명확하게 보여주고 있다. 난류강도 10% 이하의 경우와 20% 이하의 경우를 비교하면 풍속 5~9m/s 구간에 대해 약 30.4%의 출력 증가를 보여주고 있다. 동일 풍속구간에 대해 난류강도 10% 이하와 20% 초과를 비교하면 평균 0.05kW, 5.6%의 출력증가가 측정되었으며, 20% 초과 및 10% 이하의 경우를 비교하면 난류강도 20% 초과인 경우가 평균 0.15kW 출력증가로서 약 18.5%의 증가 경향을 보여주고 있다. 그러나 저풍속 구간인 3~5m/s와 9m/s 이상의 고풍속 영역에서는 상대적으로 출력증가 경향이 저감됨을 알 수 있다. 특히 11m/s를 초과하는 영역에서는 난류강도가 증가할수록 출력이 낮아지는 경향을 보이고 있다. 이 같은 측정결과는 Table 4는 풍속에 따른 측정 출력값이며, 풍속 6.6m/s는 측정지역의 연평균 풍속이다.

Table 4 Power output variations in terms of wind speed

| | T.I.≤10% | T.I.≤20% | T.I.>20% |
|---------|----------|----------|----------|
| 3.7m/s | 0.08kW | 0.12kW | 0.15kW |
| 6.6m/s | 0.63kW | 0.80kW | 0.87kW |
| 9.7m/s | 1.76kW | 1.91kW | 1.98kW |
| 12.7m/s | 2.46kW | 2.42kW | 2.42kW |

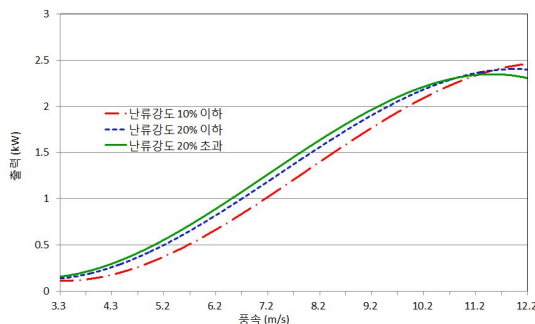


Fig. 8 Measured Mean Power Curve

4. 결 론

난류강도 증가에 따른 출력증가는 기존에 알려진 업윈드형 Bergey XL.1에 대한 측정결과와^[3] 상반되는 결과로서, 그 원인은 설계 및 운전 특성과 연계분석을 통하여 규명해야 한다. 그러나 해당 풍력발전기에 대한 설계자료를 확보할 수 없는 상황에서 측정자료와 운전 특성 및 제한적 설계특성을 근거로 다음의 결론에 도달하였다.

- (1) 출력측정 지역인 월령은 주풍향이 일정하게 유지되는 해풍이라는 특성으로 인해 풍력발전기의 요잉이 안정적으로 유지되어 잦은 요잉기동에 의한 출력손실이 저감되었다.
- (2) 동일한 평균 풍속에서는 난류강도가 높은 경우가 낮은 경우에 비해 큰 운동에너지를 갖게 되며^[5], 이로 인해 회전자의 관성모멘트가 증가하여 출력이 증가하게 된다.
- (3) 특히 풍속 5~9m/s 범위에서 난류강도 증가에 따른 출력 증가효과가 가장 크게 나타남을 확인하였다.
- (4) 그러나 11m/s 이상의 풍속에서는 난류강도가 증가할수록 출력이 감소함을 평균 출력곡선에서 확인할 수 있다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단의 연구비지원으로 수행되었음(과제번호 : 2012-N-WD16-P-01)

참 고 문 헌

1. L.P. Chamorro, Fernando Porte-Agel, A Wind Tunnel Investigation of Wind Turbine Wakes: Boundary Layer Turbulence Effects. Boundary-Layer Meteorol 132, 2009, pp.129~149.

2. Sheinman Y, Rosen A, A Dynamic Model of the Influence of Turbulence on the Power Output of a Wind Turbine. 1992, J Wind Eng Ind Aerodyn 39, pp.329~341.
3. William D. Lubitz, Impact of Ambient Turbulence on Performance of a Small Wind Turbine, World Renewable Energy Congress, Linkoping, Sweden, 2011.
4. V. Riziotis, Voutsinas, S., Fatigue Loads on Wind Turbines of Different Control Strategies Operating in Complex Terrain, J. Wind Eng. & Ind. Aerodyn. 85, 2000, pp.211~240.
5. Cochran B., The Influence of Atmospheric Turbulence on the Kinetic Energy Available during Small Wind Turbine Power Performance Testing, Soria, Spain: CEDER- CIEMAT, April, 2002