

연구노트

# 대형 풍력발전기 소음원 분석

신형기 · 방형준

한국에너지기술연구원 풍력발전연구센터,  
(2009년 4월 24일 접수; 2009년 6월 25일 수정; 2009년 7월 22일 채택)

## Noise Source of Large Wind Turbine

Hyungki Shin and Hyungjun Bang

Wind Energy Research Center, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea  
(Manuscript received 24 April, 2009; revised 25 June, 2009; accepted 22 July, 2009)

### Abstract

Wind turbine noise become main environmental problem as wind energy have been installed all around. Noise from large wind turbine give annoyance to listener, moreover it increase loading to whole system by restricting blade tip speed. However accurate noise mechanism of wind turbine is not yet examined. This paper reviewed noise source and analysis theory. Broadband noise is main component of wind turbine noise and airfoil self noise is main noise source. These make acoustic analogy hard to apply for analysis. For this reason, experimental equation is method for wind turbine noise prediction up to now. Spectrum analysis shows that vortex shedding noise exists around 1 k~2 k Hz. This region is most sensitive frequency range to human. Thus it is necessary to reduce this noise source.

**Key Words** : Wind turbine noise, Turbulence Ingestion Noise(TIN), Vortex Shedding Noise(VSN), Turbulent Boundary Noise(TBN).

### 1. 서론

현재 전세계적인 에너지 문제로 인하여 재생에너지가 가장 큰 이슈로 대두되고 있다. 여러 재생에너지원 가운데 풍력발전은 미국과 유럽에서 가장 성공적으로 상용화를 이루고 있으며 기존의 발전원과 경제성면에서도 대등한 수준을 이루고 있다<sup>1)</sup>. 실제로 2008년 현재 전세계적으로 122 GW 용량의 풍력발전기가 설치되어 있으며 매년 30% 이상의 성장으로 보이고 있다<sup>2)</sup>. 국내 역시 정부의 제1차 국가에너지기본계획(2008~2030) 중 신재생에너지 보급목표

에 의하면 2030년까지 풍력발전 설비용량을 현재의 199 MW에서 7,301 MW로 37배 확대하겠다는 계획이 제시되었다.

이러한 대규모 풍력발전기의 보급은 친환경적이라는 재생에너지의 명성에 걸맞지 않는 또 다른 환경 문제를 유발시키고 있다. 이 가운데 가장 영향을 주는 것은 소음 문제이다<sup>3)</sup>. 풍력발전기에서 발생하는 소음은 설치 장소 주민에게 불쾌감을 유발함으로써 민원 문제를 발생시켜 풍력발전기의 보급에 장애요인으로 작용하게 된다<sup>4)</sup>.

현재 상용화되어 있는 3개의 날개를 가진 upwind 방식의 풍력발전기와 유사한 형태의 기계장치는 크게 헬리콥터 로터와 축류팬, 선박의 스크류를 들 수가 있다. 풍력발전기의 로터는 위의 기계장치와 그

형태와 작동방식이 유사하지만 로터의 회전수, 날개의 끝단 속도, 유입류의 난류 조건의 상이성으로 인하여 주 소음원에서 서로 다른 발생 메커니즘을 가지게 된다. 회전익 소음 분야에서 많은 연구가 이루어진 헬리콥터, 축류팬 등의 연구 결과를 적용시키는 것에 무리가 따른다.

## 2. 풍력발전기 소음

### 2.1. 풍력발전기 소음 특성

실제 2 MW급의 대형풍력발전기의 소음크기는 다음 Table 1과 같다. 풍력발전기의 소음은 일반적인 상황에서 음압이 60 dB(A)이하이며 거리가 500 m 이상 떨어지게 되면 45 dB(A)이하로 감소하게 되어 다른 기계장치에 비해 그리 크지 않은 소음레벨을 갖는다. 그러나 풍력발전기의 운전 특성상 24시간 운전을 가정하며 연속적으로 운전하게 되므로 배경소음수준이 낮은 야간의 경우 주변 거주자에게 불쾌감을 유발할 수 있으며 쉬지않고 연속적으로 발생하게 됨으로써 성가심(annoyance)를 유발하게 된다.

풍력발전기의 일반적인 소음 스펙트럼은 다음 Fig. 1과 같다. 풍력발전기 소음의 주파수 특성은 일반적인 회전익 장치와는 달리 토널 성분이 약하다. 또한 회전수가 30 RPM이하가 되기 때문에 BPF (Blade Passing Frequency)가 가청 주파수 이하가 된다. 이에 비해 광대역 소음이 주요 소음 성분으로 존재한다. 따라서 기존의 회전익 소음의 해석과 예측에 많이 사용되었던 BPF 성분을 중심으로 하는 분석 기법의 적용에 어려움이 따른다<sup>5)</sup>.

풍력발전기의 주요 소음 발생 요소는 다음 Fig. 2와 같다<sup>6)</sup>. 그림에서 볼 수 있는 것과 같이 가장 큰 소음을 발생시키는 것은 공력소음 성분이며 이는

Table 1. wind turbine noise level

Model Nordex N90		Rotor Dia.90m					
Hub Height : 80m							
Wind speed (m/s)	SPL	Sound pressure level dB(A)					
		distance (m)	100	200	300	400	500
6	100.9		53.8	49.2	46.1	43.7	41.8
7	101.7		54.6	50.0	46.9	44.5	42.6
8	102.8		55.7	51.1	48.0	45.6	43.7
9	103.3		56.2	51.6	48.5	46.1	44.2

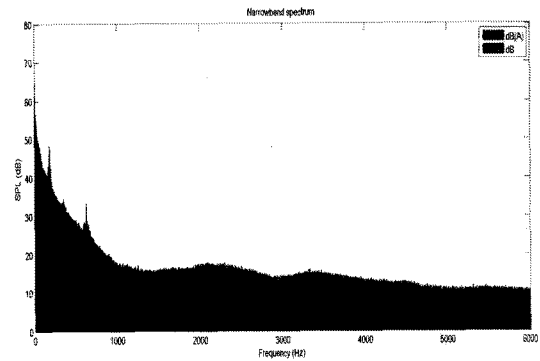


Fig. 1. Noise spectrum of wind turbine(1.5 MW class, wind speed : 10 m/s, measurement location : 100 m behind rotor plane)

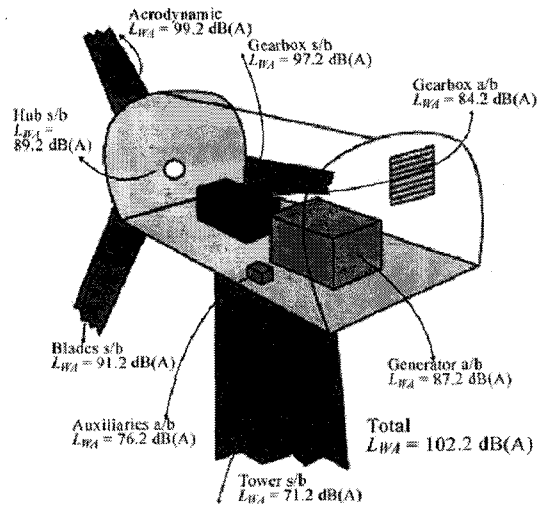


Fig. 2. wind turbine noise source.

주로 블레이드에서 발생하게 된다.

풍력 발전기의 공력 소음은 날개의 팁 속도와 밀접한 관계를 가지며 다음식과 같이 날개팁속도의 로그스케일에 비례하게 된다.

$$\text{음향파워}(A\text{-weighted}) \propto \log_{10}(\text{날개팁속도}) \quad (1)$$

따라서 소음을 줄이는 가장 손쉬운 방법은 풍력발전기의 회전 속도를 낮추어 팁 속도를 낮추는 방법이다. 그런 이유로 다음 Table 2에서 볼 수 있듯이 육상에서 운전되는 풍력 발전기의 경우 60 m/s 내외의 팁 속도를 가지도록 운전되고 소음이 상대적으로 적게 문제되는 해상에서 운전되는 2 MW 이상

**Table 2.** Blade tip speed of various rotor diameter

Wind Turbine	Power (MW)	Dia (m)	Tip Speed (m/s)
BONUS 600kW	0.60	44.0	62.2
BONUS 1MW/54	1.00	54.0	42.6
BONUS 1.3MW/62	1.30	62.0	61.7
BONUS 2MW/76	2.00	76.0	67.7
BONUS 2.3MW/82	2.30	82.4	71.6
De Wind D4	0.60	48.0	73.4
De Wind D6/1000	1.00	62.0	67.2
De Wind D6/62	1.00	62.0	81.8
De Wind D6/64	1.25	64.0	83.1
De Wind D8/2MW	2.00	80.0	86.7

급의 풍력 발전기는 80 m/s의 팁 속도를 가지도록 운전된다. 그러나 팁 속도를 낮게 운전하게 되면 실제로 기계적인 부담을 증가시키게 된다. 파워는 토크와 회전수의 곱으로 표시 되기 때문에 일정 파워를 얻기 위해 회전수를 낮추게 되면 결국 토크가 증가되어 주축에서부터 풍력 발전기 전체의 하중을 증가 시키게 된다. 따라서 소음 문제로 인해 낮아진 회전수는 풍력 발전기 전체의 하중을 증가시키고 이는 단가의 상승과 유지 보수의 문제에 악영향을 주게 된다.

**2.2. 소음원의 분석**

풍력발전기의 주요 공력 소음원은 다음의 Table 3과 같다<sup>7)</sup>. 이 가운데 주된 소음원은 난류 유입 소음, 난류 경계층 소음, 끝단 소음이다. 따라서 회전익 소음해석에 많이 사용되는 음향상사법을 적용하고자 할 경우 사중극이 주요 소음이 되기 때문에 정확한 난류 유동의 해석이 필요하다<sup>8)</sup>. 그러나 현재까지 현실적으로 블레이드 주위의 난류해석은 실질적으로 많은 어려움이 따르게 된다<sup>9)</sup>. 따라서 소음의 해석과 예측을 위하여는 현재까지 실험식에 기반한 방법이 주류를 이루고 있다.

유럽의 SIROCCO(Silent ROTors by acoutic Optimisation, 2003~2006) 프로젝트의 연구 결과는 풍력발전기 날개의 주 소음원의 위치는 날개의 팁부분이 아니고 날개 끝 근처 70~85% 위치가 되며 날개가 회전하며 지상으로 접근할 때 강한 소음원을 발생시키는 것을 보여주고 있다(Fig. 3). 따라서 풍력발전기 날개의 소음을 해석하기 위하여서는 후류와

**Table 3.** Main aerodynamic noise source of wind turbine

	Mechanism	Characteristics	
Steady thickness noise	Rotation of Blades	Frequency is related to BPF, not important at current rotational speed	
Unsteady loading noise	Passage of blades through tower velocity or wakes	Frequency is related to BPF, small in case of unwind turbines	
Inflow turbulence noise	Interaction of blades with atmospheric turbulence	Contribution to broadband noise; not yet fully quantified	
A I R F O I L S E L F N O I S E	Trailing edge noise	Interaction of boundary layer turbulence with blade trailing edge	Broadband, main source of high frequency noise
	Tip noise	Interaction of tip turbulence with blade tip surface	Broadband; not fully understood
	Stall, separation noise	Interaction of turbulence with blade surface	Broadband
	Laminar boundary layer noise	Non-linear boundary layer instabilities interacting with the blade surface	Tonal, can be avoided
	Blunt Trailing edge noise	Vortex shedding at blunt trailing edge	Tonal, can be avoided



**Fig. 3.** Wind turbine noise figure (SIROCCO project).

날개의 간섭에 의한 영향보다는 난류에 의한 영향과 에어포일 자체가 방사시키는 소음이 주로 영향을 주는 것으로 판단된다.

2.3. 소음해석기법

전술한 바와 같이 풍력발전기의 주요 소음은 광대역 소음 성분의 특성을 갖는다. 이 가운데 세가지 주요 소음 성분에 대한 해석식은 다음과 같이 표시된다<sup>10-18)</sup>.

- 난류 유입 소음 (Turbulence Ingestion Noise, TIN)

$$SPL_{1/3}(f) = 10 \log_{10} [B \sin^2 \theta \rho^2 c R \bar{w}^2 U^4 / (d_0^2 c_0^3)] + K_a(f) \tag{2}$$

- 난류 경계층 소음(Turbulent Boundary - Layer/Trailing-Edge Interaction Noise, TBN)

$$SPL_{1/3}(f) = 10 \log \left\{ K_2 U^5 B \bar{D} \frac{\partial s}{r_0^2} \left( \frac{S}{S_{max}} \right)^4 \times \left[ \left( \frac{S}{S_{max}} \right)^{1.5} + 0.5 \right]^{-4} \right\} \tag{3}$$

- 와동 발산 소음 (Trailing-edge bluntness Vortex Shedding Noise, VSN)

$$SPL_{1/3}(f) = 10 \log \left[ \frac{K_3 B U^6 t s \sin^2 \theta \sin \psi}{(1 + M \cos \theta)^6 r_0^2} \right] \quad \text{for } t/\delta' > 1.3 \tag{4}$$

$$SPL_{1/3}(f) = 10 \log \left[ \frac{K_4 B U^6 t s \sin^2(\theta/2) \sin^2 \psi}{(1 + M \cos \theta)^2 [1 + (M - M_c) \cos \theta]^6 r_0^2} \right] \quad \text{for } t/\delta' < 1.3 \tag{5}$$

본 논문에서는 Table 4에 제시된 풍력발전기에 대하여 소음 계산 및 측정치와의 비교 분석을 수행하였다. Fig. 4과 Fig. 5는 앞의 식에 의해서 계산된 소음 예측값과 측정치에 대한 비교이다. 그림의 결과들을 살펴보면 저주파 영역의 경우 난류 유입 소음이 주요 성분이며 고주파 영역에서는 난류 경계층 소음이 주로 영향을 주는 것을 알 수 있다. 와동

Table 4. Spec. of WTS-4, USWP

	WTS-4	USWP
Rotor location	Down wind	Down wind
RPM	30.0	72.0
No. of Blades	2	3
Tip Speed m/s(M <sub>tip</sub> )	122.4(0.36)	66.5(0.19)
Rotor diameter	78.4	17.1
Hub height	80.0	18.3

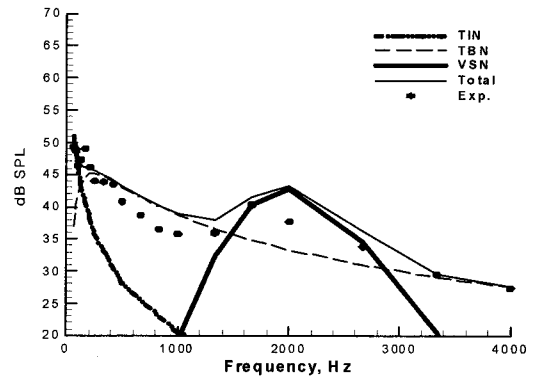


Fig. 4. Comparison of the measured and predicted broadband noise for USWP (r=91 m).

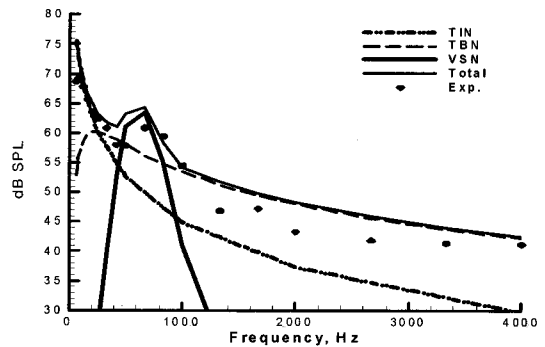


Fig. 5. Comparison of the measured and predicted broadband noise for WTS-4 (r=200 m).

발산 소음의 경우 에어포일 뒷전 두께와 관련이 있으며 이에 해당하는 중심주파수를 기준으로 하여 특정한 주파수 대역에서 큰 영향을 주는 것을 볼 수 있다. 이러한 특정한 주파수 대역은 사람의 등청감 곡선을 고려할 때 사람이 가장 민감하게 느끼게 되며 풍력발전기의 소음 저감을 위하여는 주로 이것에 관련한 연구가 필요할 것으로 보인다.

Fig. 6은 풍력발전기 광대역 소음의 예측값을 보여주고 있다. 여기서 90 도는 풍력발전기의 축방향, 즉 정면 방향을 나타내고 0 도는 로터회전면, 즉 풍력발전기의 옆방향을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있는 것과 같이 축방향으로 강한 방향성을 보임을 알 수 있다. 이는 이중극(dipole) 소음의 전형적인 특성이며 이를 통해 볼 때 풍력발전기의 주요 소음은 블레이드의 공력하중에 의한 하중 소음으로 볼 수 있다. 또한 이러한 소음은 축방향으로 대부분 전파되

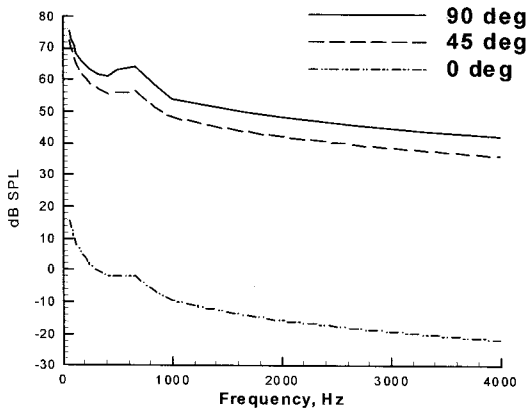


Fig. 6. Noise Directivity pattern of WTS-4.

기 때문에 풍력발전기의 설치시 주 풍향 방향을 고려하여 풍력발전기의 정면 또는 후면 방향이 민가와 일치되지 않도록 하는 것이 민원의 소지를 피할 수 있는 하나의 방법이라고 하겠다.

### 3. 결론

최근에 와서 문제가 심각해진 소음 문제를 해결하기 위해 유럽과 미국에서는 저소음 날개의 개발에 주력하고 있지만 현재까지 소음 발생 메커니즘이 완전하게 밝혀지지 않았으며 이로 인해 소음 해석 기법 자체의 개발도 미진한 상태이다. 이러한 이유로 그 필요성에도 불구하고 현재까지 확연하게 소음이 저감된 블레이드의 개발은 이루어지지 못하고 있다.

앞서 살펴본 바와 같이 풍력발전기의 주요 소음은 광대역 소음이며 이로 인하여 해석과 예측에 어려움이 따른다. 가청 성분 영역에서 주요 소음 성분 가운데 에어포일 자체에서 발생하는 소음이 주요 소음원으로 나타나며, 이러한 소음의 발생 특성상 날개의 형상 변경만으로는 저소음화가 어렵고 에어포일의 설계에서부터 저소음을 염두한 설계가 필요하다 하겠다.

이 외에도 Fig. 1에서 보듯이 BPF가 가청 주파수 이하의 저주파대역에서 강하게 나타난다. 현재 저주파소음의 유해성에 대한 우려가 확대되고 있으며 풍력발전기의 대형화에 따른 회전수의 감소는 저주파 소음의 영향을 더욱 증대시킬 것이다. 따라서 이에 대한 연구 역시 더욱 필요해질 것으로 생각된다.

### 감사의 글

본 연구는 지식경제부 신재생에너지기술개발사업인 「풍력 블레이드 하중저감을 위한 능동형 공력제어장치 개발」의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

### 참고 문헌

- 1) EWEA, 2009, Wind Energy The Fact.
- 2) BTM Consult, 2009, World Market Update 2008.
- 3) Hubbard H. H., Shepherd K. P., 1990, Wind Turbine Acoustics, NASA Technical Paper.
- 4) Davis J. T., Davis J., 2007, Noise Pollution from wind turbines, Wind Turbine Noise 2007.
- 5) Farassat F., Kenneth S., Brener, 1998, The Acoustic Analogy and the Prediction of the Noise of Rotating Blades, Theoretical and Computational Fluid Dynamics.
- 6) Wagner S., Bareiss R., Guidati G., 1996, Wind Turbine Noise, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- 7) Anthony L. R., James F. M., 2004, Wind Turbine Noise Issues, A white paper of University of Massachusetts.
- 8) Shin H. K., Sun H. S., Lee S. G., 2006, Development of a new free wake model considering a blade-vane interaction for a low noise axial fan planform optimization.
- 9) Arakawa C., Fleig O., Iida M., Shimooka M., 2005, Numerical Approach for Noise Reduction of Wind Turbine Blade Tip with Earth Simulator, Journal of the Earth Simulator, 2, 11-33.
- 10) 신형기, 선호성, 이수갑, 2002, 자유후류 해석을 통한 수평축 풍력 터빈의 성능 및 소음 예측, 한국음향학회지, 21(2), 2002.
- 11) 김현정, 김호진, 이수갑, 2007, 블레이드 통과 주파수 소음과 지연시간을 고려한 중대형 수평축 풍력발전기의 공력소음해석, 한국소음진동공학회 2007년 추계학술대회.
- 12) Boeing Engineering and Construction, 1979, MOD-2 Wind Turbine System Concept and Preliminary Design Report, U.S. Department of Energy, Rept. DOE/NASA 0002-80/2.
- 13) Curle N., 1955, The Influence of Solid Boundaries upon Aerodynamic Sound, Proceedings of the Royal Society of London, A231, 505-514.
- 14) Schlinker R. H., Amiet R. K., 1981, Helicopter Rotor Trailing edge Noise, NASA CR 3470.
- 15) Blake W. K., 1975, A Statistical Description of Pressure and Velocity Fields at the Trailing Edges of a Flat Strut, David W. Taylor Naval Ship R&D Center, Rept. 4241.

- 16) Berger E., Willie R., 1972, Periodic Flow Phenomena, American Review of Fluid Mechanics, 4, 313.
- 17) Chase D. M., 1975, Noise Radiated from an Edge in Turbulent Flow, AIAA Journal, 13, 305-306.
- 18) Brooks T. F., Hodgson T. H., 1980, Prediction and Comparison of Trailing Edge Noise Using Measured Surface Pressures, AIAA Paper 80-0977.