

# 중대형 풍력터빈의 저주파 및 초저주파 소음 방사 특성에 대한 실험적 고찰

## Experimental investigation into infrasound and low-frequency noise radiation characteristics from large wind turbines

이승엽\*·정철웅\*·#·신수현\*·정성수\*\*·정완섭\*\*

Seungyub Lee, Su-Hyun Shin, Cheolung Cheong  
Sung-Soo Jung, Wan-Sup Cheung

**Key Words:** Wind Turbine (풍력터빈), Infrasound (초저주파음), Low-frequency noise (저주파소음), BPF noise (날개통과주파수 소음), Broadband Noise (광대역 소음).

### ABSTRACT

In this paper, characteristics of infrasound and low-frequency noise emission from large modern wind turbines are experimentally investigated. The sound measurement procedures of IEC 61400-11 and ISO 7196 are utilized to field test and evaluation of noise emission from each of 1.5 MW and 660 kW wind turbines using the stall regulation and the pitch control for the power regulation, respectively. It was found that the G-weighted SPLs of low-frequency noise including infrasound shows positive correlation with the wind speeds, irrespective of methods of power regulation. This highlights the potential complaint of local community against the infrasound and low-frequency noise of wind turbines. The comparison of measured data with the existing hearing thresholds and criteria curves shows that it is highly probable that the low-frequency noise from the 1.5 MW and 660 kW wind turbines in the frequency range over 30 Hz leads to the psychological complaint of ordinary adults, and that the infrasound in the frequency range from 5 Hz to 8 Hz causes the complaint by rattling the house fitting such as doors and windows.

### 1. 서 론

풍력터빈 같은 회전기계에서 방사되는 소음은 일반적으로 날개통과주파수(Blade-Passing Frequency)의 순음 소음(Tonal noise)과 난류와 블레이드 간의 상호작용으로 발생하는 광대역 소음(Broadband noise)으로 이루어진다. 상대적으로 빠르게 회전하는 회전기계류에서는 날개통과주파수 소음이 전체 소음에 중요한 비중을 차지한다. 하지만 풍력 터빈의 경우 최근 효율적으로 많은 양의 에너지를 생산하기 위해 발전 용량이 계속해서 증가하고 있는 상태이고 이에 따라 터빈의 회전속도는 점점 더 낮아지고 있다. 이런 낮은 회전 속도로 인하여 1~20Hz 주파수 대역에서 날개통과주파수의 소음을 발생시킨다. 즉, 최근의 중대형 풍력 터빈의 날개통과주파수 소음은 초저주파음(Infrasound)과 저주파소음(Low-frequency noise) 대역에 속하게 된다. 이러한 특성으로 인하여 중대형 풍력터빈의 경우가 청주파수영역대에서 날개통과주파수 소음은 거의 기여를 하지 못하게 됨으로 인하여 광대역 소

음이 주요 소음원으로 작용하게 하게 된다. 같은 맥락에서 풍력 터빈 소음에 대한 기존의 연구가 대부분 광대역 소음을 중심으로 이뤄지고 있다<sup>(1-4)</sup>.

그러나 초저주파 날개통과주파수 소음과 관계된 중대형 풍력 터빈의 특성은 다음과 같은 중요한 물리 음향학적 고려 사항을 초래한다: 원거리까지의 음향과의 전파; 음향과의 구조물에 대한 가진, 인간에 대한 잠재적인 위해성과 불편함 초래. 먼저 하류(downstream)방향으로 저주파소음의 전파는 이차원 전파특성과 같이 전파거리가 두 배가 될 때마다 3 dB 이 감소하는 경향이 나타난다고 알려져 있다. 이 같은 저주파소음의 상대적으로 낮은 거리감쇄 특성은 지구경계층에서 소리경로의 채널효과에 기인한다<sup>(5)</sup>. 둘째로 벽의 투과손실은 주파수가 낮을수록 작아지고 따라서 저주파음은 벽면을 손쉽게 투과하여 실내의 사람에게 보다 쉽게 인지된다. 또한 저주파음대의 주파수는 실내의 방과 공진이 일어나기 쉬운 대역에 있다. 셋째로 저주파와 초저주파 소리가 인간에게 잠재적인 불편함이나 위해성과 불편함을 초래할 수 있다<sup>(6)</sup>. 이 분야에 대한 연구가 아직 많이 부족하지만 일부의 국가에서는 인간에 대한 잠재적인 위해성을 이유로 주요 생활 소음원으로 규정하고 있다<sup>(7)</sup>.

이러한 초저주파음과 저주파소음의 물리적인 특성을 고려해 보았을 때, 최근 신재생에너지에 대

# 책임저자 정회원 부산대학교 기계공학부

E-mail: [ccheong@pusan.ac.kr](mailto:ccheong@pusan.ac.kr)

Tel: (051) 510-2311, Fax: (051) 514-7640

\* 정회원, 부산대학교 공과대학 기계공학부

\*\* 정회원, 한국표준과학연구원 기반기준부 유체유동/음향진동그룹

한 관심의 증가에 따라 정부에서 추진하고 풍력발전의 개발·보급정책<sup>(8)</sup>을 효과적으로 추진하기 위해서는 중대형 풍력 터빈에서 방사되는 초저주파음과 저주파소음에 대한 잠재적인 위해성이나 불쾌감을 평가하는 것이 중요한 문제로 대두된다.

이전의 연구<sup>(3,4)</sup>에서 풍력 터빈의 소음을 IEC 61400-11<sup>(9)</sup>의 규정에 따라 평가하고 파워조절 방법에 따른 소음 방사 특성에 대해서 분석하였다. 본 연구에서는 이들 자료를 바탕으로 초저주파 소리와 저주파 소음에 중점을 두고 풍력 터빈의 소음방사특성을 고찰하였다. 초저주파음과 저주파 소음의 풍속의존성과 파워조절방법 간의 관계를 실험적으로 평가하였으며 초저주파와 저주파소음의 G-가중(G-weighted) 1/3-옥타브 밴드 레벨을 ISO 7196<sup>(6)</sup>에 따라 분석하였다. 최종적으로 중대형 풍력 터빈의 초저주파음과 저주파 소음의 인간에 대한 잠재적 불쾌감과 위해성을 실측값과 평가곡선값<sup>(10,11)</sup>과의 비교를 통하여 고찰하였다.

## 2. 풍력발전기 제원 및 측정방법

### 2.1 풍력발전기 제원

풍력발전기 현장소음 실증을 수행한 곳은 제주도 북제주군 한경면 용당리에서 남부발전이 운영하고 있는 풍력단지과 제주도 북제주군 구좌읍 행원리의 제주시에서 운영하고 있는 풍력단지로서 각각 1.5 MW 와 660 kW 풍력터빈에 대해서 소음 실증을 수행하였다<sup>(3,4)</sup>. 한경면에 위치한 풍력단지는 1.5 MW 급의 풍력터빈 4 기가 운용 중에 있고 그 중 3 호기에서 소음 측정을 수행하였다. 행원리 풍력단지 내에는 600 kW 에서 750 kW 급까지 총 15 기의 풍력터빈을 운용 중이고 그 중 가장 남쪽에 위치한 660 kW 풍력터빈에 대해서 소음 실증을 수행하였다. 주요 제원을 각각 Table 1 과 2 에서 나타내었다. 대상 풍력터빈의 정격발전용량이 다르다는 점과 한경면 풍력터빈은 실속제어를 행원리의 풍력터빈은 피치제어를 사용하고 있다는 점이 주목해야 할 차이점이다.

Table 1. Specification of 1.5 MW WTG (Manufacturer: NEG-Micon/STX)

Rated Output	1.5 MW
Rated Wind Speed	15 m/s
Rotor Diameter	72 m
Tower Height	62 m
Operating Wind Speed	4~25 m/s
Rotor Speed	17.3 rpm
Regulation	Active Stall
Annual Generation Electricity	3,343 MWh (Vmean:6.5m/s)

Table 2. Specification of 660 kW WTG (Manufacturer: Hyosung/VESTAS)

Rated Output	660 kW
Rated Wind Speed	13 m/s
Rotor Diameter	47 m
Tower Height	45 m
Operating Wind Speed	4~25 m/s
Rotor Speed	28.5~32 rpm
Regulation	Opti Slip/Tip
Annual Generation Electricity	2,388 MWh (Vmean:8 m/s)

### 2.2 측정 위치 및 장비

IEC61400-11 에서 요구하는 측정기기와 방법에 의해 풍력터빈 방사소음을 평가하였다. Fig. 1 에서 풍력터빈의 소음 측정을 위한 마이크로폰 위치와 측정 및 분석 장비 구성도를 나타내었다.

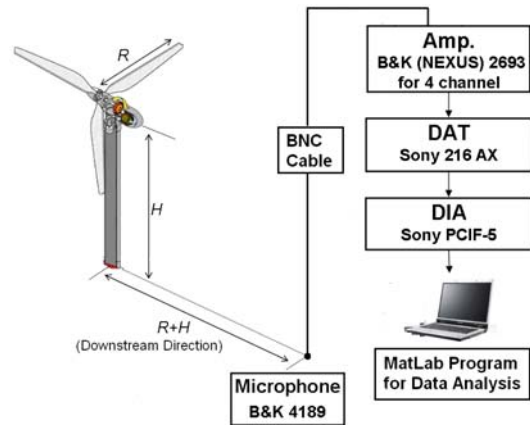


Fig. 1 Measurement locations and devices for acoustic quantities

IEC61400-11 의 규정에 따라 타워의 지면 중심에서 하류(downstream)방향으로  $R+H$  떨어진 위치에서 마이크로폰을 설치하였다. 먼저 마이크로폰 신호를 증폭기를 통하여 DAT 에 녹음시키고 DIA(Digital Interface Adapter)장비를 이용하여 컴퓨터에서 사용할 수 있는 이진자료로 변환한 다음 풍력터빈의 소음 분석을 위하여 개발한 MATLAB 프로그램을 이용하여 측정자료를 분석하였다. 풍력터빈 소음 실증 과정에서는 소음에 영향을 주는 가장 큰 변수로 여겨지는 풍향·풍속도 소음과 동시에 측정해야 한다. 풍속측정을 위하여 이동식 기상타워와 기상 측정장비를 사용하였다.

Fig. 2 에서 기상 자료를 측정하기 위한 이동식 기상타워 장비를 나타냈다. 풍속을 비롯한 기상자료를 1 초 간격으로 평균하여 기록하였으며 풍속은 지상 10 m 높이에서 측정하여 IEC61400-11 제시한 보정식을 사용하여 표준화하여 소음 자료 분

석 시 동기화 하였다.



Fig. 2 Mobile meteorological mast at Hangwon

### 3. 측정 결과

IEC61400-11에서는 풍력 터빈 소음 방사에 의한 걸보기 음향 파워 레벨, 1/3-옥타브 밴드 레벨과 순음성을 정수값 풍속에서 분석하도록 요구한다. 본 논문에서는 풍속과 파워조절방법에 따른 초저주파음과 저주파 소음 방사에 특성에 중점을 두어 음향 스펙트럼, 풍속과 소음 간의 상관관계, G-가중된 1/3-옥타브 밴드 레벨에 대한 분석을 실시하였다. 측정은 겨울에 수행하였으며 Fig. 2에서 풍향·풍속의 측정결과를 제시하였다. 환경면에서는 3m/s에서 14m/s의 풍속으로 서풍이 불었고, 행원리에서는 3m/s에서 14m/s 풍속 범위로 북풍이 불었다. 두 지역의 평균 풍속은 겨울에 약 9m/s였다.

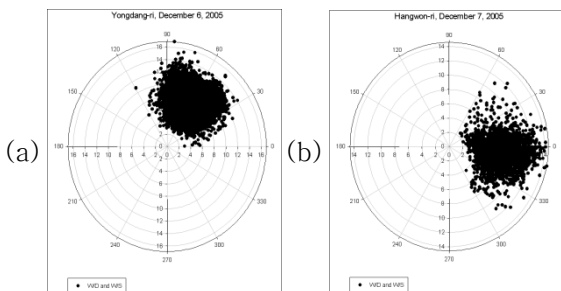


Fig. 3: Measured data of wind speed and direction (a) at the Hankyung wind farm and (b) at the Hangwon wind farm. (0° denotes the north direction.)

#### 3.1 음향 스펙트럼

Fig. 4은 환경면의 1.5 MW 풍력터빈의 초저주파 영역의 음향 스펙트럼의 전형적인 측정값이다. 이 풍력터빈은 17.3 rpm의 고정된 속도로 회전하면서

첫 번째 날개통과주파수가 0.865 Hz에서 나타난다. Fig. 4의 주파수 값들은 이 날개통과주파수로 무차원화하였다. 측정결과에서 1 Hz에서 7 Hz 주파수 범위 사이에서 날개통과주파수 소음이 8 번째 조화성분까지 확연히 나타남을 확인할 수 있다.

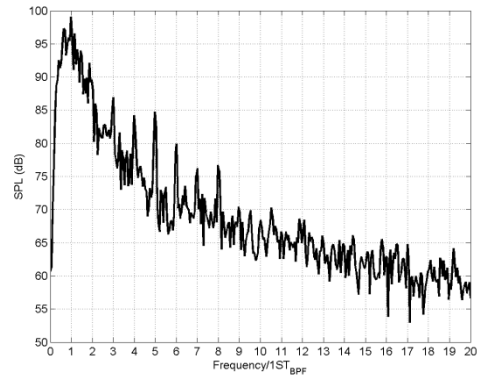


Fig. 4 Measured typical acoustic power spectral density of 1.5MW wind turbine at the wind speed of 10m/s.

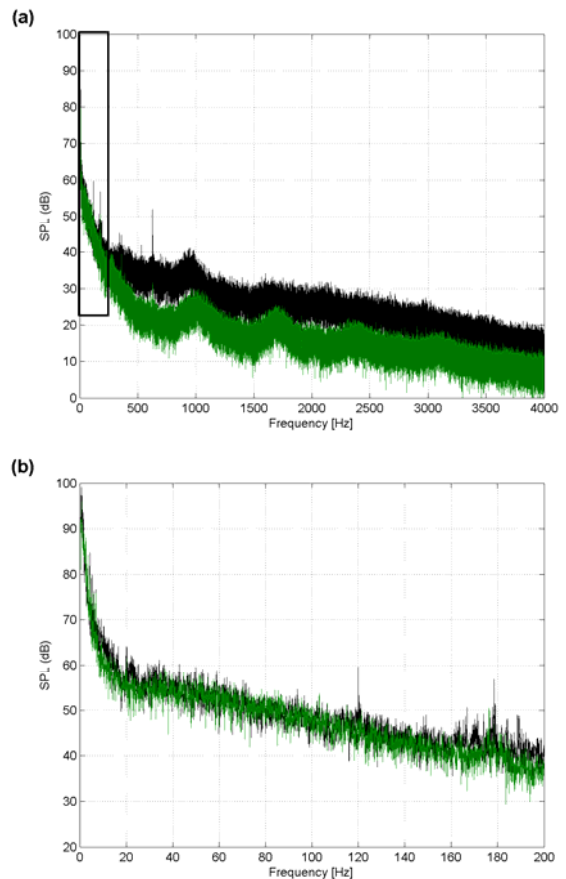


Fig. 5 Comparison of sound spectral densities measured at 10m and 98m apart from the center of tower of 1.5MW wind turbine

Fig. 5는 환경면 풍력 터빈으로부터 각각 10m, 98m 떨어진 거리에서 음압(SPL)을 측정하여 비교

한 결과이다. 거리에 따라 스펙트럼의 크기가 200Hz 이상의 고주파 영역에서 약 10 dB 정도 차이가 남을 알 수 있다. 그러나 초저주파 영역을 포함하는 저주파 영역에서는 거리에 따른 음압의 차이가 거의 나타나지 않음을 확인할 수 있다. 이것은 저주파 영역의 음파가 고주파 영역의 음파보다 거리에 따른 감쇄가 적어 더 먼 거리까지 전파됨을 나타낸다. 풍력터빈 주변지역은 풍력터빈에서 방사되는 초저주파음과 저주파 소음으로 인한 잠재적인 불만에 더 쉽게 노출될 수 있음을 시사한다.

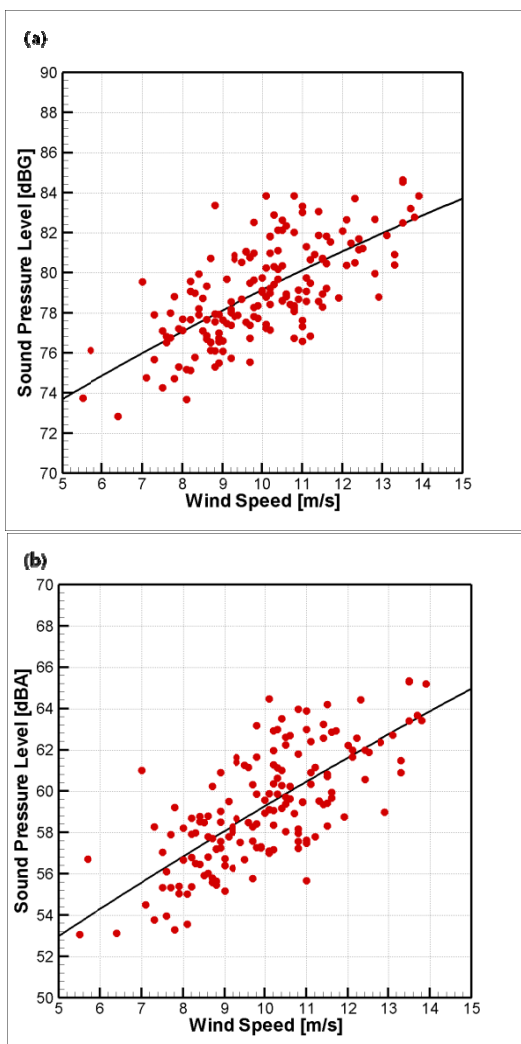


Fig. 6 Equivalent continuous sound pressure level of WT(1.5MW)at Hankyung wind farm: (a) G-weighted SPL in low-frequency range, 1-200[Hz](Regression curve:  $67.4 + 1.3V - 0.0173V^2$ ) and (b) A-weighted SPL in audible frequency range (Regression Curve:  $46.1 + 1.44V - 0.0121V^2$ )

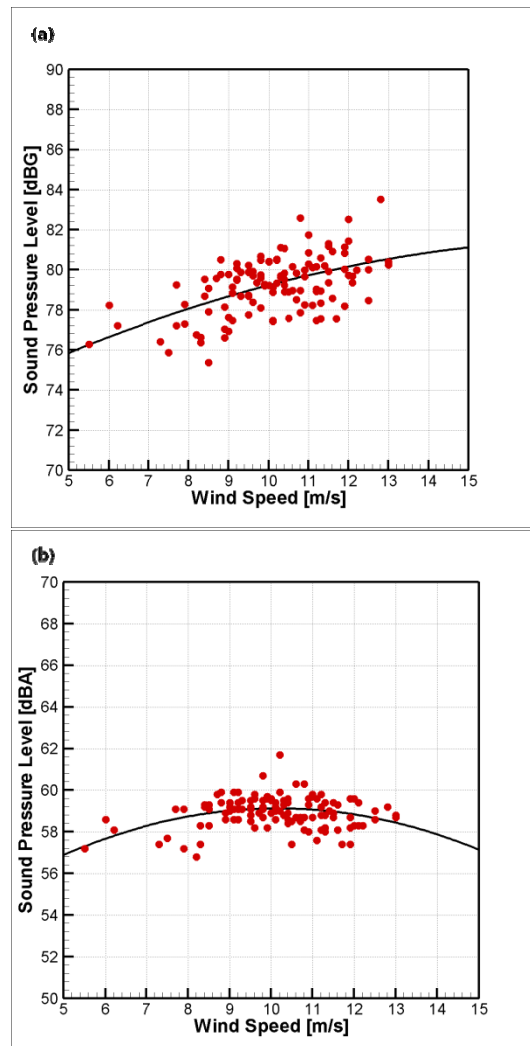


Fig. 7: Equivalent continuous sound pressure level of WTG (660 kW) at the Hangwon wind farm (a) G-weighted SPL in low-frequency range, 1-200 [Hz] (Regression curve:  $70.1 + 1.12V - 0.0298V^2$ ) and (b) A-weighted SPL in audible frequency range (Regression Curve:  $50.4 + 1.72V - 0.0846V^2$ )

### 3.2 풍속 의존성

ISO 7196 은 1Hz 에서 20Hz 사이의 주파수 영역대를 포함하는 소음의 스펙트럼 분석에 적용할 수 있는 G-가중(G-weighted) 값을 규정하였다. IEC 61400-11 은 풍력터빈의 등가연속 A-가중 음압,  $L_{Aeq}$  을 기준 위치에서 풍속과 동시에 30 개 이상의 자료에 의해 분할할 것을 규정하고 있다. 그리고 각각의 측정은 적어도 1 분 이상의 시간 동안 기록한 값을 적분하도록 한다.

Fig. 6 는 1.5 MW 의 풍력터빈에서 측정된 풍속과 음압레벨(SPL)과의 상관관계를 나타내었다. Fig 6(a) 와 6(b)는 각각 G-가중음압( $L_{Geq}$ )과 A-가중음압( $L_{Aeq}$ )을 나타낸다. 그래프에서  $L_{Geq}$  과  $L_{Aeq}$  의 풍속에 대한 평균증가율이 약 1.07 dB/s/m 과 1.25 dB/s/m

가 됨을 알 수 있다. Fig. 4의 결과에서 알 수 있는 것과 같이 초저주파 소음은 주로 로터 블레이드 표면 위에서 토크를 발생시키는 정상압력분포에 의해 발생하는 날개통과주파수 순음 소음이 주를 이루고 가청주파수 범위의 A-가중된 음압레벨은 광대역 자가소음(broadband self-noise)이 주요 소음원으로 된다<sup>(12)</sup>. 이들 두 가지 가중된 음압레벨의 소음발생 메커니즘은 현저히 다르지만 풍속의 의존성은 유사하게 나타난다.

Fig. 7은 660 kW 풍력터빈의 방사소음의 풍속의 의존성을 나타낸다. Fig. 7의 (a)와 (b)는 각각 음압을 G-가중( $L_{Geq}$ )과 A-가중( $L_{Aeq}$ )한 결과이다.  $L_{Geq}$ 의 경우 평균증가율은 약 0.65 dB·s/m 로서 풍속에 대해 선형적으로 증가하지만  $L_{Aeq}$ 는 풍속과의 관계가 비선형적으로 나타남을 알 수 있다.

풍속에 따라 이처럼  $L_{Geq}$ 과  $L_{Aeq}$ 이 뚜렷한 차이를 보이는 것은 두 개의 풍력터빈이 서로 다른 파워조절방법을 사용하기 때문이다; 1.5MW 풍력터빈은 실속(stall) 제어를 사용하고 660kW 풍력터빈은 피치(pitch) 제어를 사용하고 있다. 두 가지 파워조절방법은 풍속이 증가함에 따라 풍력터빈 블레이드에서 발생하는 양력(Lift)를 줄이기 위한 것으로 그 목적은 서로 같지만 목적을 달성하기 위한 방법으로서 공기역학적 메커니즘은 매우 다르다. 실속 제어는 풍속이 증가하면 에어포일의 받음각(angle of attack)을 증가시켜 실속을 일으킴으로써 에어포일에 발생하는 양력을 줄여 풍력터빈의 파워 출력을 조절하는데 반해 피치제어는 반대로 받음각을 감소시킴으로써 양력을 줄여 파워출력을 조절한다. 두 가지 방법 모두 항력을 줄이려는 목적은 같지만 이처럼 기본적인 메커니즘의 차이로 인하여 풍력터빈 로터 주위의 유동 패턴이 다르게 되어 두 풍력터빈의 A-가중된 음압 레벨의 풍속 의존 특성이 다르게 나타난다. 앞서 설명했던 것처럼 중대형 풍력터빈의 방사 소음은 주로 블레이드 표면 위의 경계층 안에서 발생된 난류와 끝단과의 상호작용에 의한 광대역 자가소음이 주요 원인으로 알려져 있다. 블레이드 표면 위의 실속은 강한 난류를 유발시켜 광대역 소음을 증가시킨다. 이것은 풍속이 증가할 때 실속제어를 기본 메커니즘으로 사용하는 풍력터빈은 더 많은 소음을 방사하는 반면 피치제어를 이용하는 풍력터빈의 방사 소음은 풍속과는 비례하지 않는 관계를 나타낸다. 이런 풍속의존성의 차이가 환경소음측면에서 고려할 었을 때 실속제어보다 피치제어를 선호하는 주된 이유가 된다. 그러나 초저주파음을 포함하는 저주파 소음은 주로 블레이드 표면 위의 정상 압

력분포가 날개의 회전에 의한 도플러 효과에 의하여 발생하는 날개통과주파수 소음으로 이루어져 있다. 이것은 저주파 소음이 블레이드 주위의 난류특성과 관계가 적다는 것을 의미하고 피치제어를 이용하는 풍력터빈의 가청주파수 영역에서 A-가중된 음압레벨과는 저주파 소음의 풍속의존성이 다른 특성을 나타내는 원인으로 생각된다. 이것은 또한 피치제어를 사용하는 풍력터빈도 초저주파음이나 저주파 소음의 관점에서는 실속제어에 비해 별 이점이 없음을 의미한다.

### 3.3 걸보기 음향 파워 레벨

IEC 61400-11은 기준 위치에서 1분 이상 동안 측정된 30개 혹은 그 이상의 자료들에 대해 이차회귀분석을 통해 등가연속음압레벨을 결정하도록 규정하고 있다. 풍속의존성의 이전 결과들을 토대로 하여 6 m/s에서 10 m/s 범위까지의 정수값 풍속에서의  $L_{Aeq,k}$  값을 결정한다.  $L_{Aeq,k}$ 은 정수값 풍속에서 이차회귀분석 곡선상의 값이다. 저주파소음에 대해서도 유사한 분석을 수행하여  $L_{Geq,k}$  값을 결정하였다. 걸보기 음향 파워 레벨  $L_{WA,k}$ 과  $L_{WG,k}$ 은 각각 음압레벨  $L_{Aeq,k}$ 과  $L_{Geq,k}$ 로부터 계산하였다.

$$L_{WA,k} = L_{Aeq,c,k} - 6 + 10 \log_{10} \left[ 4\pi R_1^2 / S_0 \right] \quad (1)$$

$$L_{WG,k} = L_{Geq,k} - 6 + 10 \log_{10} \left[ 4\pi R_1^2 / S_0 \right] \quad (2)$$

여기서  $R_1$ 은 로터 중심에서 마이크로폰까지의 경사거리이고  $S_0$ 은 기준넓이,  $S_0 = 1 \text{ m}^2$ 이다.

Table 3. Apparent sound power levels at integer wind speeds

Wind Speed (m/s)	1.5MW(Hankyung)		660 kW (Hangwon)	
	$L_{WG}$	$L_{WA}$	$L_{WG}$	$L_{WA}$
6	121.1	100.6	119.9	100.9
7	122.2	101.8	120.6	101.5
8	123.3	103.1	121.3	102.0
9	124.4	104.3	121.9	102.3
10	125.4	105.5	122.5	102.4

Table 3은 Fig 6와 7에서 계산한  $L_{WG,k}$ 과  $L_{WA,k}$ 의 값을 나타낸다. 7m/s 이하의 풍속범위에서 1.5MW 풍력터빈의 A-가중 음향파워가 660kW의 풍력터빈에 비해 작지만 7m/s 이상의 범위에서는 더 크다는 것을 알 수 있다. 이 같은 특성은 앞에서 기술한 바와 같이 파워조절방법 때문이라고 여겨진다. 그러나 1Hz에서 20Hz의 저주파 범위에서의

1.5 MW 풍력터빈의 G-가중 음향파워는 660kW 보다 더 크다. 이러한 사실은 저주파범위에서의 음향파워는 파워조절방법보다는 오히려 풍력터빈의 용량에 더 의존할 수 있다는 것을 나타낸다.

### 3.4 1/3-옥타브 밴드 레벨

IEC 61400-11 은 기준위치에서 풍력터빈으로부터 방사되는 소음의 1/3-옥타브 밴드 레벨을 풍속에서 1분 이상 동안 측정된 적어도 3 개의 스펙트럼의 에너지평균값으로 결정하도록 규정한다. Fig. 8 은 1.5 MW 풍력터빈에서 측정된 1/3-옥타브 밴드 레벨의 스펙트럼을 나타낸다. (a)는 1Hz 에서 200Hz 의 주파수 범위의 G-가중 밴드 스펙트럼, (b)는 20Hz 에서 10kHz 범위의 주파수에서 A-가중된 밴드 스펙트럼임을 보여준다. Fig. 6 에서 처럼 저주파 G-가중 1/3-옥타브 밴드 스펙트럼은 A-가중 스펙트럼과 유사한 풍속의존성을 보여준다. 그러나 Fig. 8(a)에서 10Hz 보다 낮은 주파수범위의 밴드 스펙트럼은 10Hz 보다 높은 주파수범위보다 풍속과 더 높은 상관관계를 가짐을 확인할 수 있다. Fig. 1 에서 나타난 바와 같이 10Hz 보다 영역에서 날개통과주파수의 순음성분이 주요 성분이기 때문이다.

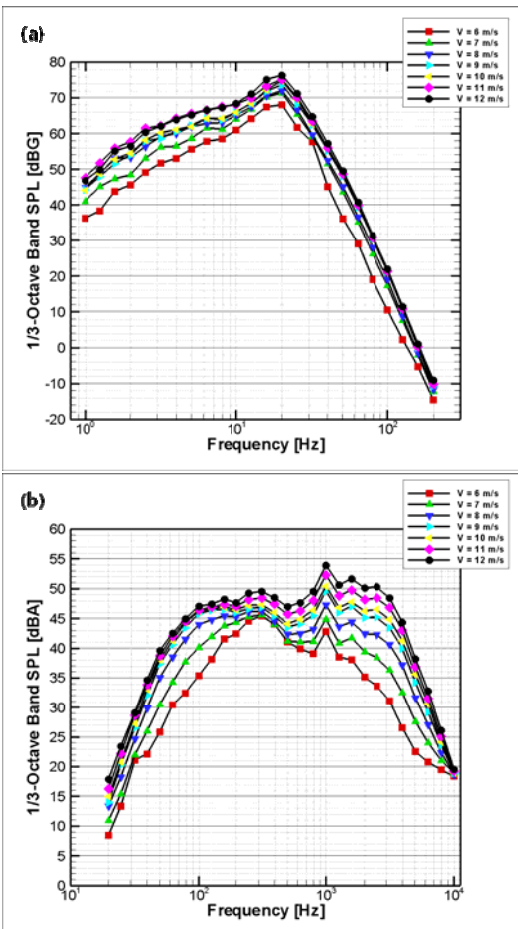


Fig. 8: Average one-third octave band levels of noise

emission from 1.5 MW WT at Hankyung: (a) G-weighted and (b) A-weighted spectrums.

이와 같은 초저주파음의 특성은 Fig. 9 에서 660 kW 풍력터빈에 대해서 측정된 1/3-옥타브 밴드 레벨의 스펙트럼을 통해서도 나타난다. (a)는 1 Hz 에서 200 Hz 의 주파수 범위의 G-가중 밴드 스펙트럼, (b)는 20Hz 에서 10kHz 범위의 주파수에서 A-가중된 밴드 스펙트럼임을 나타낸다. Fig. 7 에서 나타난 것처럼 저주파 G-가중 1/3 옥타브 밴드 스펙트럼은 풍속과 선형적인 관계를 나타내지만 A 가중 스펙트럼은 비선형 관계를 나타낸다. Figs. 8(a), 9(a)는 10Hz 이하의 주파수범위에서 밴드 스펙트럼은 10Hz 이상의 주파수범위에서의 스펙트럼 보다 풍속과의 관계가 더 높은 상관관계를 가짐을 나타낸다. 앞에서 기술한 바와 같이 피치제어를 사용하는 풍력터빈의 초저주파음은 고주파 성분보다 풍속과 상관관계가 더 크다는 것을 확인할 수 있다.

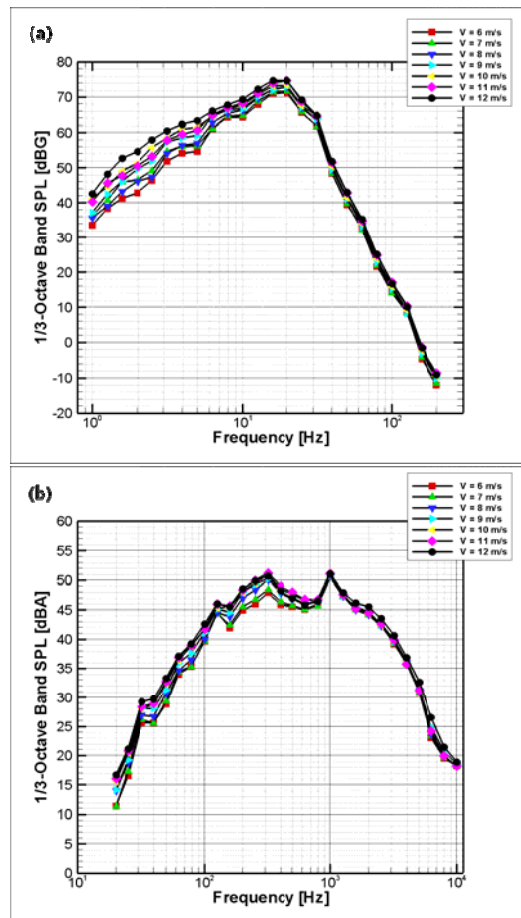


Fig. 9: Average one-third octave band levels of noise emission from 660 kW WT at Hangwon: (a) G-weighted and (b) A-weighted spectrums.

#### 4. 초저주파음 및 저주파소음의 평가

이 절에서는 풍력터빈에서 방사되는 초저주파음과 저주파소음에 대한 잠재적 불쾌성과 위해성을 기존의 평가곡선과의 비교를 통해서 분석하였다. 평가 기준곡선으로서 최소가청치 곡선(Watanabe & Møller and ISO 389-7)<sup>(10)</sup> 과 정지 소음원에서 방사되는 저수준 저주파 소음에 대한 불쾌성 또는 위해성을 평가하기 위해 일본 환경부가 제안한 기준값<sup>(11)</sup>을 사용하였다.

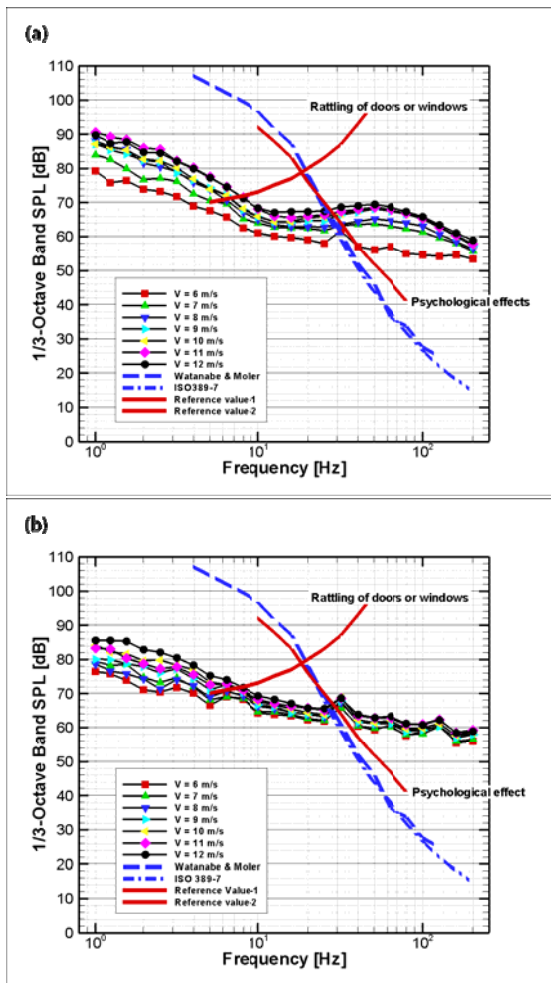


Fig. 10: Assessment of potential complaint against the infrasound and low-frequency noise from wind turbines with the existing data of hearing threshold (Watanabe & Møller, ISO 389-7) and reference values (INCE/Japan) on rattling of doors or windows and psychological effects: (a) 1.5 MW wind turbine at Hankyung wind farm and (b) 660 kW wind turbine at Hangwon wind farm

Fig. 10 에서 평가곡선과 측정된 풍력터빈의 1/3-옥타브 밴드 레벨을 비교하였다. 이 그림을 통하여 일반적인 성인이 1.5 MW 와 660 kW 두 풍력터빈이 방사하는 저주파소음의 30Hz 이상의 성분

대해서 심리적인 불쾌감을 느낄 가능성이 있다는 것을 알 수 있다. 또 풍력터빈에서 방사되는 5Hz 에서 8Hz 의 주파수 범위의 초저주파음 성분은 문과 창문과 같은 집 구조물의 떨림에 의한 불쾌감과 크게 관계됨을 알 수 있다. 이것은 초저주파가 집 구조물의 공진주파수와 일치할 때 발생하는 경향이 있다. 또한 풍속이 증가함에 따라 불만을 야기시키는 초저주파음과 저주파소음의 주파수범위와 레벨값이 증가함을 알 수 있다. 소음에 대한 불쾌감(annoyance)은 기준 주파수 1000Hz 와 비교했을 때 100Hz 이하의 영역대에서 레벨의 증가에 따라 급격히 증가하는 것으로 알려져 있다. 풍속과 풍력터빈이 방사하는 초저주파음 및 저주파소음의 선형적 관계와 더불어 이것은 풍력터빈의 환경 소음에 대한 잠재적 위해성과 불쾌감의 가능성을 증가시킨다. 이런 풍력터빈의 환경소음 규정치 결정값과 관련하여 최소가청치의 개인적인 차이와 가청치 이상 범위에서 급격한 지각능력의 증가를 고려한다면 초저주파음과 저주파소음에 규정값은 최소가청치보다 5~10dB 정도 낮게 두도록 권장하고<sup>(13)</sup> 있다는 사실도 고려하여야 할 것이다.

#### 5. 결론

중대형 풍력터빈에서 방사되는 소음의 특성을 초저주파음과 저주파 소음에 중점을 두고 실험적으로 분석하였다. 가청주파수내의 A-가중 음향과 위에 대해서는 실속제어를 이용하는 풍력터빈의 소음 크기는 풍속의 증가와 비례적으로 나타났지만 피치제어를 이용하는 풍력터빈은 비선형적인 특성을 나타내었다. 그러나 초저주파를 포함한 200 Hz 이하의 저주파 영역에서의 G-가중 음향과 위는 파워조절방법에 상관없이 풍속과 선형적인 관계를 보였다. 측정된 자료와 평가곡선과의 비교를 통해 1.5MW 와 660kW 풍력터빈에서 방사되는 30Hz 이상 범위의 저주파 소음은 일반 성인의 심리적 불만을 일으키고 5Hz 에서 8Hz 사이의 초저주파음은 문과 창문 같은 집 구조의 떨림에 의하여 불쾌감을 유발할 가능성이 있다는 것을 확인하였다.

#### 후 기

이 논문은 산업자원부의 제 2 차 신재생에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획과 관련된 연구의 지원을 받아 수행하였습니다.

## 참고문헌

- (1) A. L. Rogers and J. F. Manwell, Wind Turbine Noise Issues, White Paper by RERLC, (2004).
- (2) S. Oerlemans, P. Sijtsma and B. M. Lopez, "Location and quantification of noise sources on a wind turbine," Journal of Sound and Vibration, 299, 869-883 (2007).
- (3) C. Cheong, et al., "Field test and evaluation of noise from wind turbines at Yongdang and Hangwon in Jeju island," Proceedings of Fall Conference of Korea Society of Noise and Vibration Engineering, 2005.
- (4) C. Cheong, et al., "Characteristics of noise emission from wind turbine generator according to methods of power regulation," The 9th Western-Pacific Acoustics Conference, Seoul, Korea, 2006.
- (5) W. E. Zorumski and W. E. Willshire, Jr., "Low frequency acoustic propagation in an atmospheric boundary layer," AIAA Journal, 27, 6-12 (1989).
- (6) Acoustics – Frequency-weighting characteristics for infrasound measurement, International Standard ISO 7196: 1995(E), (International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1995).
- (7) SOSFS, 7E, General guidelines issued by the Swedish national board of health and welfare, indoor noise and high sound levels (1996).
- (8) Korean Wind Energy Development Organization, www.kwedo.or.kr
- (9) Wind turbine generator systems – Part 11: Acoustic noise measurement techniques, International Standard IEC 61400-11(2), (International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2002)
- (10) Acoustics – Reference zero for the calibration of audiometric equipment – Part 7: Reference threshold of hearing under free-field and diffuse-field listening conditions, International Standard ISO 389-7: 2005(E), 2005.
- (11) K. Kamigawara et al., Publication "Handbook to deal with Low Frequency Noise(2004)", 11th International Meeting on Low Frequency Noise and Vibration and its Control, 2004.
- (12) T.F. Brooks, "Progress in Rotor Broadband Noise Research," Vertica 7(4), 287-307 (1983).
- (13) J. Jakobsen, "Measurement and Assessment of Environmental Low Frequency Noise and Infrasound," Proceeding of INTER-NOISE 98, edited by A.H. Marshall, 1998.