



[2018-12-WD-001]

# 1.5 MW 풍력 터빈 소음 측정 및 저주파 소음 특성 분석

손은국<sup>1)</sup> · 이광세<sup>1)\*</sup> · 이진재<sup>2)</sup> · 강승진<sup>2)</sup> · 황성목<sup>1)</sup> · 박사일<sup>2)</sup> · 김석우<sup>3)</sup>

## 1.5 MW Wind Turbine Noise Measurement and Analysis of Low-Frequency Noise

Eunkuk Son<sup>1)</sup> · Gwang-Se Lee<sup>1)\*</sup> · Jinjae Lee<sup>2)</sup> · Seungjin Kang<sup>2)</sup> · Sungmok Hwang<sup>1)</sup> · Sail Park<sup>2)</sup> · Seokwoo Kim<sup>3)</sup>

Received 15 May 2018 Revised 9 June 2018 Accepted 4 December 2018

**ABSTRACT** The noise from a 1.5 MW wind turbine was measured and the apparent sound power level, tonal audibility, and spectrum balance were analyzed. The apparent sound power level and tonal audibility were analyzed according to IEC 61400-11: ed3. (2012-11). The measured noise data at the turbine site was mainly in the north-west (NW) and north-north-west (NNW) directions, and approximately 500 and 250 samples of total noise and background noise data were obtained. Three tone components were observed in the low frequency region below 100 Hz. The tones in the low frequency critical band with a center frequency of 78.1 Hz were found to have a higher level than the hearing threshold. The possibility of wind turbine noise annoyance was also analyzed through the spectrum balance analysis.

**Key words** Wind Turbine Noise(풍력소음), Noise Measurement(소음 측정), Low-frequency noise(저주파 소음), IEC 61400-11 (풍력소음 측정 표준)

### Nomenclature

WTN : wind turbine noise  
BGN : background noise  
R : radius of blade  
H : hub height  
D : diameter of rotor blade  
L : sound pressure level or sound power level

### subscript

WA,k : apparent sound power level, dBA  
i : frequency band of spectrum  
k : wind speed bin, m/s  
V : total wind turbine noise, dBA  
V<sub>c,i,k</sub> : background noise corrected wind turbine noise, dBA  
70% : 70% energy of spectrum, dBA  
pn,avg : the energy average of all the lines classified as masking, dBA  
pt,j,k : energy sum of all of tone spectral lines, dBA  
pn,j,k : masking noise level, dBA  
tn,j,k : difference of tone and masking noise level, dBA

1) Senior Researcher, Wind Energy Laboratory, Korea Institute of Energy Research

2) Researcher, Wind Energy Laboratory, Korea Institute of Energy Research

3) Principal Researcher, Wind Energy Laboratory, Korea Institute of Energy Research

\*Corresponding author: lgs@kier.re.kr

Tel: +82-64-800-2335 Fax: +82-64-805-2203

a : tonal audibility / audibility criterion, dB  
 a,k: overall tonal audibility, dB

### 1. 서론

풍력 발전의 낮은 주민 수용성은 육상풍력의 경우 주로 환경파괴 및 풍력 소음을 원인으로 꼽을 수 있다. 실제로 풍력소음이 항공기 소음, 도로 교통 소음, 철도 소음과 같은 생활 소음원 보다도 더 낮은 소음 노출도에서 더 높은 성가심 반응을 갖는 것으로 알려져 있다.<sup>[1]</sup> 풍력 소음의 다양한 음색을 의성어로 분류 표기하고, 이를 활용한 성가심 평가를 통해 음색에 따른 대한 성가심 원인을 분석하기도 하였다. 또한 블레이드 회전에 의한 진폭 변조의 강도와 깊이의 정도가 성가심과 연관성이 있다고 알려져 있다.<sup>[2]</sup> 더욱이 30Hz 이상의 저주파 영역에서 발생하는 대형 풍력 발전기의 소음으로 인해 심리학적 불편을 호소할 정도이며, 집의 문, 창문 등이 떨리는 것 또한 관측되었다.<sup>[3]</sup> 이러한 현상들은 풍력발전기의 저주파 소음과 밀접한 연관이 있으며 풍력 저주파 소음의 주요 원인으로는 블레이드의 회전에 의한 공력 소음과 난류에 의한 블레이드 주변의 공력 소음 그리고 타워 근처를 지나는 유동과 블레이드와의 상호간섭에 의한 공력소음 등이 있다. 이중 타워-블레이드 유동 간섭 소음은 주로 다운윈드 형식의 풍력발전기에서 주로 발생한다.<sup>[4]</sup> 저주파 소음의 성가심 반응은 주관적 요인에 의해 결정되는 것으로 알려져 있지만 대체로 저주파 소음의 크기가 증가함에 따라 급격하게 성가심이 증가하는 경향을 가지고 있다.<sup>[5]</sup> 하지만 풍력 저주파 소음에 대한 특성 분석 연구는

부족하여 어떠한 요소들이 풍력 소음에 대해 성가심 반응을 유발하는지 판단하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 풍력 저주파 소음 특성 분석을 위하여 풍력 발전기 소음을 측정하고 측정된 데이터를 활용하여 겉보기 음향 파워 레벨과 순음 가청도 분석을 수행하였다. 또한 Bryan(1976)이 제안한 수용가능 선(acceptable line)을 기준으로 풍력소음의 스펙트럼 균형 평가를 수행하였다.<sup>[6]</sup>

2장에서는 풍력발전기 소음 측정 절차(사이트 평가, 측정 장비 설정, 소음 측정)에 대한 설명을, 3장에서는 측정된 소음에 대한 분석과정 및 방법에 대한 내용을 기술 하였다. 그리고 4장에서는 측정된 데이터를 활용하여 겉보기 음향 파워 레벨 및 순음 가청도 분석을 수행하였고 저주파 순음 성분의 순음 가청도 변화 및 풍력소음의 스펙트럼 균형 분석 결과에 대하여 기술 하였다.

### 2. 소음 측정

풍력 소음을 측정하기 위해 참조하는 국제표준은 IEC 61400-11이며, 이는 발전기 자체에서 방사되는 음향 파워를 결정하기 위한 방법이고 일반적으로 환경소음 측정을 위해 적용되는 표준은 아니다.

국내의 경우 환경소음 측정을 위해서는 「소음 진동공정 시험기준」의 규제기준 중 생활소음 측정방법을 참조한다. 그러나 생활소음 측정방법은 발전기 가동 상태에 따른 음향 파워 특성을 분석할 수 없는 한계점이 있어 본 논문에서는 발전기 가동 상태를 같이 측정 할 수 있는 IEC 61400-11 표준의 측정 방법을 준수하였다.

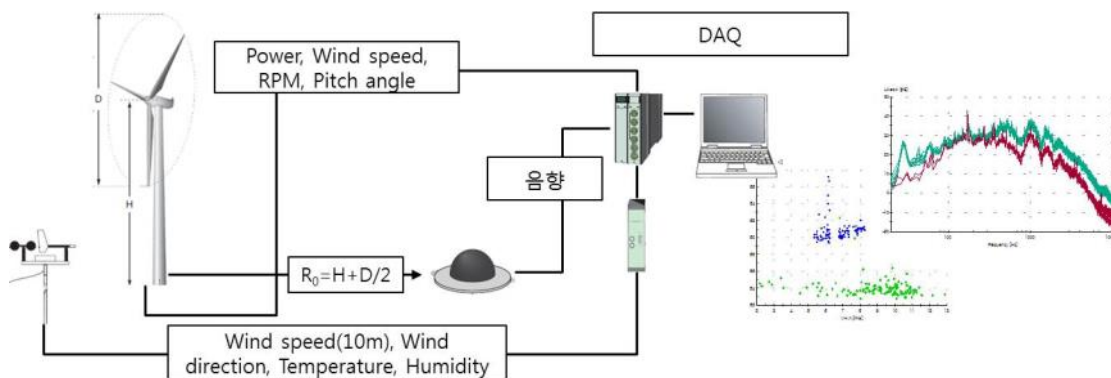


Fig. 1. Schematic diagram of wind turbine noise measurement

Table 1. Specification of the measurement equipment

Type	Model	Specification
Mircophone	Type 4189	Frequency range: (6,3~20 000) Hz
Data acquisition system	Type 3056-A-040	Input channel: 4-ch, Input Module/HS Tacho+8 ch, LAN-XI 51,2 kHz Frequency range: (0~51 200) Hz
Sound Calibrator	Type 4231	Frequency: 1 000 Hz Amplitude: 94,0 dB ± 0,2 dB
anemometer	WQ-3336 WS	Range: (0,3~75) m/s
wind vane	WQ-3336 WD	Range: (0~360) °
Temperature/ Humidity/ Atmospheric pressure	BARO-1A	Range: (-10~52,5) °C (20~90) % R.H. (800~1 060) hPa

소음 측정의 전체적인 개략도는 Fig. 1과 같으며, 측정을 위해 사용한 주요 장비는 Table 1과 같다.<sup>[7]</sup>

소음 측정을 위해서는 Fig. 1과 같이 음향 데이터, 비음향 데이터, 그리고 풍력 발전기 운영 신호를 동시에 취득하는 것이 핵심이다. 이를 위해 풍력 발전기 제어기로부터 출력, 나셀 풍속, RPM 정보를 받아오며, 기상탑으로부터 풍향, 10m 높이 풍속, 온/습도/대기압 정보를 계측한다. 또한 음향 신호도 동시에 계측한다.

### 2.1 사이트 평가

풍력 소음을 측정하기 이전에 발전기 주변 지형에 대한

평가가 이루어진다. 이는 IEC 61400-11의 표준에도 명시되어있다. 본 연구에서 계측한 풍력 발전기의 위치는 제주도 제주시 구좌읍 월정리에 위치한 1.5MW 풍력 발전기로서, 해안도로에 인접해 있다. 또한 인근에 3.0MW 풍력 발전기가 상업 운전을 하고 있기 때문에 그로 인한 영향이 최소화 되는 풍향 조건에서 계측이 이루어져야 한다. 풍향이 동풍인 경우에는 인접한 발전기와 거리가 가까워져서 측정에 적합하지 않다. 그리고 남풍, 서풍인 경우는 규정된 측정 거리를 확보할 만한 지점이 없다. 하지만 풍향이 북, 북서, 그리고 북북서 방향은 Fig. 2와 같이 인접한 발전기와 이격거리가 500m 이상 떨어지게 되며, 규정된 발전기와 마이크로폰과의 측정 거리를 확보할 수 있는 조건이다. 이에 풍향이 북, 북서, 북북서 인 경우에만 제한적으로 해당 사이트는 소음 측정에 적합한 지역으로 판별하였다.

계측 시점에서는 바람이 북서 혹은 북북서에서 불어왔기 때문에 사이트 내에서 소음 측정하기에 적합한 지역에서 이루어졌다.

### 2.2 측정 장비 설정

비음향 데이터의 종류는 풍속, 풍향, 온도, 습도, 대기압이며 음향 데이터 및 발전기 운영 신호와 동시 측정 되어야 한다. 배경소음 측정 시 요구되는 10m 이동식 기상탑은 Fig. 3의 좌측과 같으며 Fig. 2의 주황색 위치에 설치하였다. 해당 위치는 발전기 직경의 1D이상 떨어져 있으며, 발전기 후류의 영향을 받지 않는 위치여야 한다. 또한 Fig. 3의 음향 계측 장비인 마이크로폰의 위치는 Fig. 2의 파란색

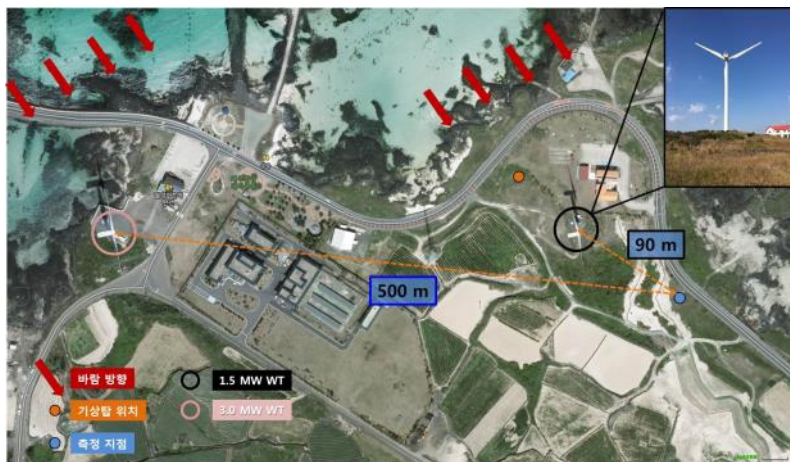


Fig. 2. Measurement site and 1.5 MW wind turbine (right-top)



Fig. 3. 10 m mobile mat-mast (left) and microphone with secondary wind screen (right)

동그라미 지점에 설치하였다. 풍력 발전기 소음의 경우 높은 풍속에서 계측이 이루어지기 때문에 2차 방풍망 사용이 가능하다. 본 연구에서도 2차 방풍망을 사용 하였으며, 주파수별 방풍막의 삽입 손실치를 적용하여 음압보정을 수행하였다.

마이크로폰의 위치는 IEC 표준에 의해 허브 높이에 로터 직경의 1/2을 더한 길이만큼 발전기 후방에 설치하여 계측을 수행하였다.

### 2.3 소음 측정

풍력 소음 측정의 표준 절차는 음향 신호와 전기적 출력, 풍향, 풍속, 로터 회전 속도 등을 동시에 측정 하게 되어있다. 또한 풍력 발전기가 가동 중 일 때 발생하는 전체소음과 가동 중이지 않을 때 발생하는 배경소음을 각 풍속 빈마다 계측해야 한다. 배경소음의 측정은 전체소음 측정과 동일한 지점, 동일한 풍향 조건에서 바로 실시하였다.<sup>[7]</sup>

계측된 풍속의 분포는 Fig. 4에 나타내었다. 측정 시기는 11월 중순으로 주풍향인 북서풍 혹은 북북서풍이 주를 이루었다.

표준 절차에 따라 계측된 주요 비음향 신호들은 Fig. 5에 도시하였다. 그림의 파란 실선들은 전체소음 측정에서의 값을 나타내었고, 주황색 실선은 배경소음 측정에서의 값들을 나타낸 것이다. 전체 계측 데이터의 수는 이보다 많지만 이중 3000s 까지의 데이터만 도시하였다. 전체소음과 배경소음은 서로 다른 시간에 이루어졌지만, 편의상 같은 시계열 상에 표현하였다. 풍속의 분포는 약 5m/s~15m/s에 이르고 그에 따르는 출력의 구간도 약 500kW~1500kW에 이른다. 하지만 풍향을 계측한 신호에서 알 수 있듯이

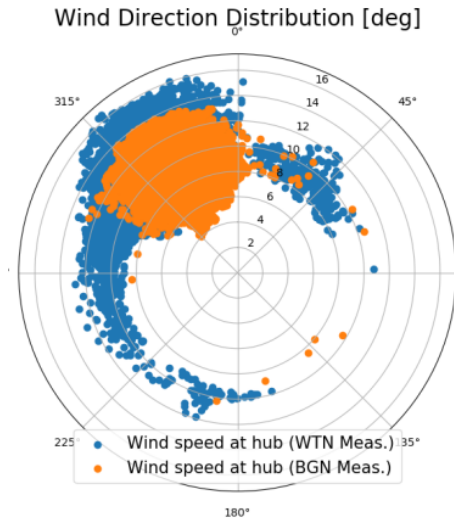


Fig. 4. Distribution of wind speed measurement

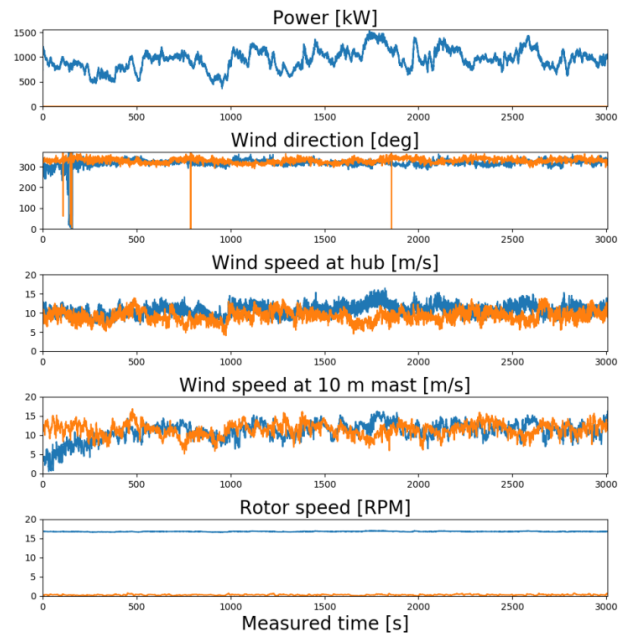


Fig. 5. Time series of measurement data (electric power, wind direction, wind speed at hub height, wind speed at 10m height, rotor speed).

측정 도중에 강한 난류의 영향으로 인하여 풍향계의 움직임이 급격하게 나타난 곳이 존재한다. 측정 데이터는 10s 주기의 음압 데이터를 활용하여 소음 분석을 수행하였으며, 해당 주기 동안 풍향의 변화가  $\pm 15^\circ$  이상 차이가 나는 경우 해당 구간의 데이터는 분석에서 제외하였다. 배경소음을 측정할 때는 발전기의 가동을 멈추기 때문에 배경소음 계측 중에는 출력과 로터 회전속도가 0 인 것을 알 수 있다.

### 3. 측정 소음 분석 방법

측정을 통해 획득한 데이터는 각 풍속 빈 중심 값으로 정렬한다. 정렬된 데이터의 예는 Table 2와 같다. 표의 첫 번째 열은 빈 중심 풍속을 나타내고 있고, 두 번째 세 번째 열은 각각 전체소음과 배경소음의 측정 데이터의 10초 주기 샘플 수를 나타낸다. 마지막 열은 겉보기 음향 파워 레벨(Apparent sound power level)을 나타내며 A가중 레벨을 적용한 것이다.

데이터 중 음영이 열린 풍속 구간(8.0m/s~11.0m/s)은 전체소음 및 배경소음 샘플 수가 10개가 넘기 때문에 1/3 옥타브 밴드 기반의 겉보기 음향 파워 레벨을 산정하는데 무리가 없다. 그러나 순음 가청도를 평가하기 위해서는 샘플 수가 30개 이상이 필요하기 때문에 음영이 더 짙은 구간인 9.0m/s~10.5m/s에서만 순음 가청도 평가가 가능하다.

#### 3.1 겉보기 음향 파워 레벨

겉보기 음향 파워 레벨을 구하기 위해서는 크게 다섯 단계가 필요하다. 전체 흐름을 Fig. 6에 표시하였으며, 보다 자세한 분석 절차는 IEC 61400-11의 Fig. 6(Flowchart showing the data reduction procedure)에 나타나있다.<sup>[7]</sup>

##### 3.1.1 풍속 빈 별 분류

측정된 음향 신호를 풍속 빈 별로 데이터를 분류 한다. 10초 데이터의 평균값을 하나의 인덱스로 구분하여 분류하

Table 2. Measured WTN and BGN at bin centre wind speeds at hub height

Wind speed Bin	j (WTN)	i (BGN)	$L_{WA,k}$ (dBA)
7,5 m/s	5	16	103,7
8,0 m/s	12	26	106,2
8,5 m/s	24	35	107,5
9,0 m/s	82	41	107,3
9,5 m/s	239	38	107,6
10,0 m/s	99	32	108,1
10,5 m/s	52	42	108,2
11,0 m/s	28	9	107,9
11,5 m/s	2	12	108,0
12,0 m/s	2	3	108,5

게 된다. 이후 각 풍속 빈 별 전체 데이터 인덱스에서 FFT를 이용하여 1/3 옥타브 밴드 스펙트럼을 구한다.

##### 3.1.2 평균 값

음압의 평균값을 구하기 위해서는 먼저 스펙트럼 별 로그합을 취한다. 이후 풍속 빈 별 데이터 인덱스(j) 수만큼 평균을 취해 계산한다.

$$\bar{L}_{i,k} = 10 \log \left( \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N 10^{\left( \frac{L_{i,j,k}}{10} \right)} \right) \quad (1)$$

##### 3.1.3 빈 중심 풍속에서의 전체소음 및 배경소음

통상적으로 소음 측정 시 계속되는 각 풍속 빈에서의 평균값은 빈 중심 풍속과 일치 하지 않는다. IEC 표준에서는 이를 빈 중심 풍속으로 내삽하여 보정하도록 되어있다.

$$L_V(t) = (1-t)\bar{L}_k + t\bar{L}_{k+1} \quad (2)$$

여기서  $L_V$ 가 빈 중심 풍속에서의 1/3 옥타브 밴드 음압 레벨이며, 이를 전체소음 및 배경소음 측정 데이터 셋에 동일하게 적용한다. 여기서 t는, 수식 (3)과 같이 정의되는 풍속 보정비다.

$$t = \frac{(V - \bar{V}_k)}{(\bar{V}_{k+1} - \bar{V}_k)} \quad (3)$$

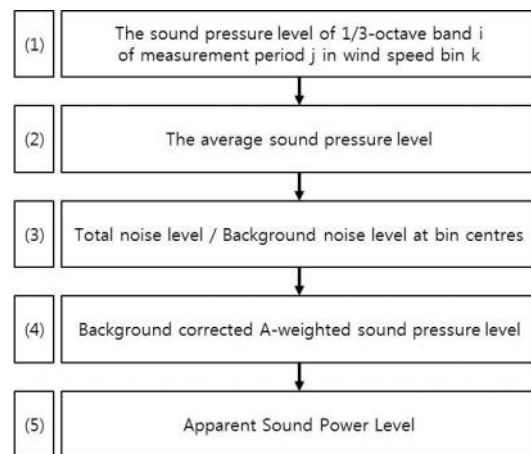


Fig. 6. Flowchart for the calculation of apparent sound power level

### 3.1.4 배경 소음의 영향이 보정된 전체소음

만약 전체소음과 배경소음의 동일한 스펙트럼 구간(i)에서 전체소음의 크기가 배경소음보다 3dB 이상인 경우 배경소음의 영향이 보정된 소음값을 계산하게 된다. 이는 전체소음에서 배경소음의 영향을 뺀 로그합을 취함으로써 얻게 된다.

$$L_{V,c,i,k} = 10 \log \left( 10^{\left( \frac{L_{V,T,i,k}}{10} \right)} - 10^{\left( \frac{L_{V,B,i,k}}{10} \right)} \right) \quad (4)$$

### 3.1.5 겹보기 음향 파워 레벨

빈 중심 풍속에서 보정된 전체소음을 이용하여 음압레벨에서 출력레벨로 변환한다.

$$L_{WA,i,k} = L_{V,c,i,k} - 6 + 10 \log \left[ \frac{4\pi R_1^2}{S_0} \right] \quad (5)$$

여기서 -6dB은 지표면에 마이크로폰을 완전 반사가 이루어지도록 단단한 나무판 위에 밀착시켜 설치하기 때문이다. 이는 계측 사이트 지표면의 영향을 최소화하기 위한 방법으로 측정 시 마다 달라지는 지표면의 임피던스 값을 계산하는 복잡한 과정을 생략하기 위함이다. 수식 (5)의 세 번째 항은 음압레벨에서 출력레벨로 변환 시 사용하는 항이다.

각 스펙트럼 밴드에서의 겹보기 음향 파워 레벨을 계산하였다면, 에너지합을 이용하여 빈 중심 풍속에서의 값을 대표하는 겹보기 음향 파워 레벨을 계산한다.

$$L_{WA,k} = 10 \log \sum_{i=1}^{28} 10^{\left( \frac{L_{WA,i,k}}{10} \right)} \quad (6)$$

## 3.2 순음 가청도

순음 가청도(tonal audibility)는 풍력 발전기에서 발생하는 소음 성분 중 특정 주파수 성분이 큰 소음을 발생하여 사람이 그 순음을 인지 가능한지 여부를 평가하기 위하여 계산한다. 순음 가청도를 결정하기 위한 단계는 Fig. 7과 같이 크게 6단계로 나뉜다. 보다 자세한 사항은 IEC 61400-11의 Fig. 7을 참고하면 알 수 있다.<sup>[7]</sup>

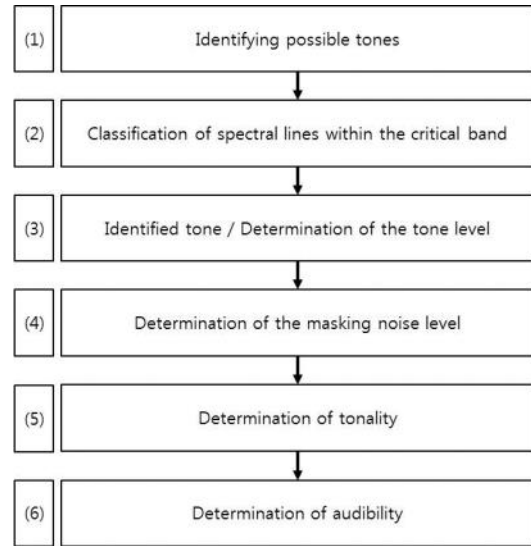


Fig. 7. Flowchart for the calculation of tonal audibility

### 3.2.1 순음 가능성

순음 가능성 여부를 판별하기 위하여 먼저 스펙트럼에서 국부 최대값을 찾는다. 이후 해당 주파수를 중심으로 임계 대역폭을 산정한 후 국부 최대값과 인접한 두 개의 스펙트럼 라인을 제외한 나머지의 평균 에너지를 계산한다. 만약 이 최대값이 평균 에너지보다 6dB 이상 높다면, 순음일 가능성이 높은 것으로 판별하여 해당 순음 성분을 따로 분류한다.

### 3.2.2 성분 분류

순음 가능성이 포함된 임계 대역폭에서 순음(tone), 마스킹(masking), 둘 다 아닌(neither)것을 분류 하는 과정이 필요하다. 임계 대역폭 내에서 스펙트럼 라인들의 에너지 평균의 70%( $L_{70\%}$ ) 해당하는 기준선을 계산한다.  $L_{70\%}$ 에 6dB을 더하여 판별 레벨( $L_{pm,avg}$ )을 결정하고  $L_{pm,avg}$ 보다 낮은 경우는 'masking'으로 분류한다. 만약  $L_{pm,avg}$ 을 6dB 초과하고 국부 최대값의 10dB 이내에 해당하는 스펙트럼 라인의 경우는 순음(tone)으로 분류한다. 둘 다를 만족하지 않는 스펙트럼 라인들은 'neither'로 분류한다.

### 3.2.3 순음 레벨

순음레벨( $L_{pt,j,k}$ )은 순음으로 분류된 모든 스펙트럼 라인들의 에너지 합으로 계산한다.

### 3.2.4 마스킹 소음 레벨

마스킹 소음 레벨( $L_{pm,j,k}$ )은 아래 수식 (7)을 이용한다.

$$L_{pm,j,k} = L_{pm,avg,j,k} + 10 \log \left[ \frac{\text{critical bandwidth}}{\text{effective noise bandwidth}} \right] \quad (7)$$

$L_{pm,avg,j,k}$ 는 임계 대역폭에서 마스킹으로 분류된 스펙트럼 라인의 에너지 평균이며 effective noise bandwidth는 주파수 해상도의 1.5 배이다.

### 3.2.5 순음도

순음도는 임계 대역폭에서 순음 레벨과 마스킹 레벨의 차이를 나타내며 수식 (8)을 이용하여 계산한다.

$$\Delta L_{tn,j,k} = L_{pt,j,k} - L_{pm,j,k} \quad (8)$$

### 3.2.6 순음 가청도

순음 가청도는 순음도( $\Delta L_{tn,j,k}$ )와 가청 기준( $L_a$ )과의 차이를 나타내는 것으로 수식 (9)로 표현된다.

$$\Delta L_{a,j,k} = \Delta L_{tn,j,k} - L_a \quad (9)$$

여기서 가청 기준은 아래와 수식 (10)과 같이 임계 대역폭에서 최대 순음값을 갖는 중심 주파수를 활용한다.

$$L_a = -2 - \log \left[ 1 + \left( \frac{f}{502} \right)^{2.5} \right] \quad (10)$$

각 풍속 빈 별 순음 가청도( $\Delta L_{a,k}$ )는 스펙트럼 별 순음 가청도( $\Delta L_{a,j,k}$ )의 에너지 평균으로 구해지며, 순음 가청도 값이  $-3.0\text{dB}$  이상인 경우는 해당 순음 가청도는 분석 보고서에 포함되어야 한다. 예외 조항은 IEC 표준을 참조한다.

## 4. 소음 분석 결과

### 4.1 겉보기 음향 파워 레벨

3.1.1~3.1.5절에 설명한 일련의 과정을 거쳐 계산된 풍속 빈( $k=10.0\text{m/s}$ )의 겉보기 음향 파워 레벨을 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8은 1/3 옥타브 밴드로 나타낸 것이며 저주파 영역에서 순음이 성분이 발견되었다.

해당 순음이 풍속 변화에 따라 발생하는 지 여부를 확인하기 위하여 Fig. 9과 같이 풍속 변화에 따른 겉보기 음향 파워 레벨을 나타내었다. 풍속 범위 8.5m/s~14.0m/s 구간 사이에 풍속의 증가에 따라 전 주파수 구간에 걸쳐 소음

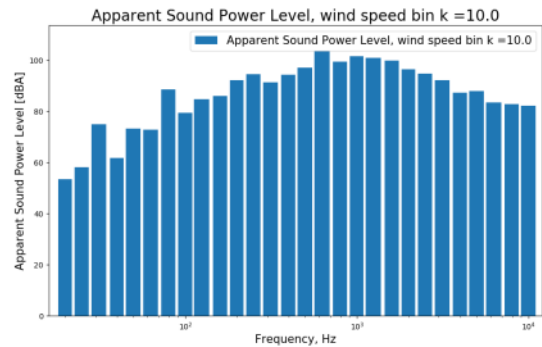


Fig. 8. Apparent sound power level at wind speed bin  $k=10.0$  m/s

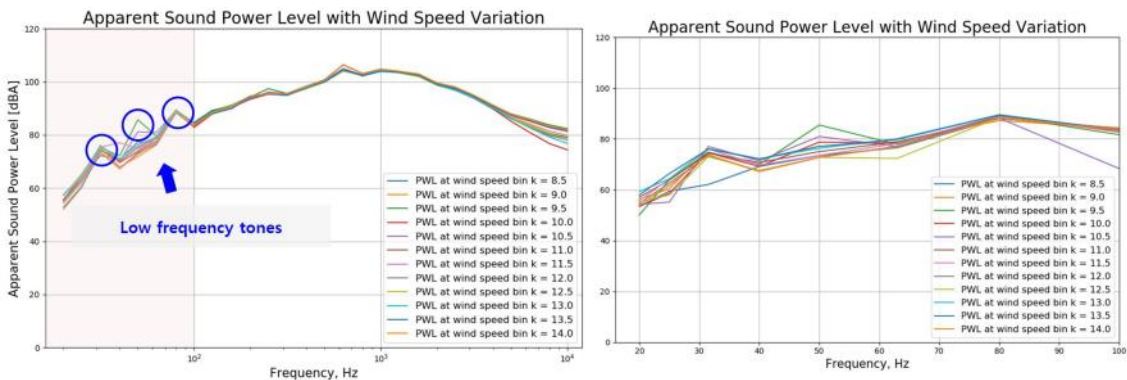


Fig. 9. Apparent sound power level with wind speed variation (left) and Zoomed spectra in the low-frequency range (right)

의 레벨이 크지는 않지만 조금씩 증가하는 것을 알 수 있다. 하지만 중간 주파수 범위에서는 풍속 변화에 따른 레벨의 변화는 거의 없었다. 또한 100Hz 이하 구간에서 3개의 저주파 순음(약 30Hz, 50Hz, 80Hz)이 꾸준히 발생하는 것을 확인하였다. 하지만 저주파 순음의 강도는 풍속 변화에 따라 선형적인 관계를 보이지는 않았다.

또한 해당 저주파 순음 성분 중 Fig. 10과 같이 배경소음 계측 시에도 발생하는 것이 관측되었다. 배경소음 계측 시 관측되는 저주파 음은 측정 시마다 일정한 크기를 갖지 않으며 높은 레벨의 변동성을 갖고 있다. 해당 저주파 순음 성분의 소음원은 여러 문헌을 통해 쿨링팬 및 기어박스 소음 그리고 기어박스의 기어 맞물림 주파수 성분들로 인한 것으로 알려져 있다.<sup>[8,9]</sup> 하지만 정확한 성분 분석을 위해서는 쿨링팬 및 기어박스의 동작 RPM을 측정하여야 하지만

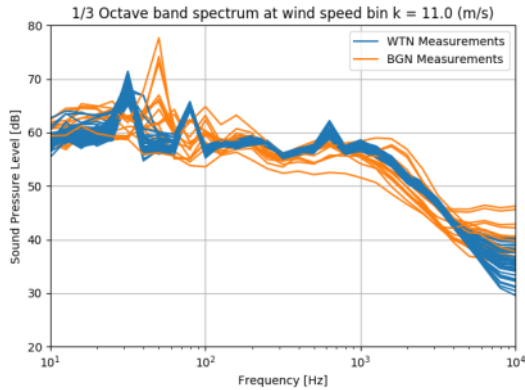


Fig. 10. 1/3 Octave band spectra (dB) at wind speed bin k=11.0 m/s

해당 정보를 계측할 수 있는 시스템은 아직 구축되어있지 않다. 하지만 1880 RPM(31.3Hz) 내외로 운영되는 기어박스 정보를 토대로 계측된 저주파 순음 성분은 나셀 내부의 열기가 빠져나가는 외부로 노출된 관을 통해 쿨링팬, 기어박스 소음 그리고 기어 맞물림 주파수 성분들이 혼합되어 방사된 것으로 추측 할 수 있다.

#### 4.2 순음 가청도

일련의 순음 가청도 분석 과정을 활용하여 풍속 bin 10 m/s에서의 순음 가청도를 분석하였다. Fig. 11은 해석 결과를 하나의 그래프로 도시한 것이다. 저주파 영역(200Hz 이하)에서 인지 가능한 순음 성분이 발견되었는데, 해당 임계대역에서의 순음도는 0.72dB이고, 중심주파수 78.1Hz를 갖는 해당 순음의 순음 가청도는 2.72dB이다. Fig. 11의 임계대역에서 순음 가청도를 결정하기 위한 주요 성분값을 Table 3에 나타내었다.

Table 3. Criteria level of tonal audibility and level of tonality

Fc = 78.1 Hz	41.4 (dBA)
L 70%	12.4 (dBA)
L 70% + 6 dB	18.4 (dBA)
L pn,avg	12.0 (dBA)
L pn,avg + 6 dB	18.0 (dBA)
L pt,max - 10 dB	31.4 (dBA)
$\Delta L_{tn,j,k}$ (Tonality)	0.72 (dB)
$\Delta L_{a,j,k}$ (Tonal audibility)	2.72 (dB)
$\Delta L_{a,k}$ (Overall tonal audibility)	6.35 (dB)

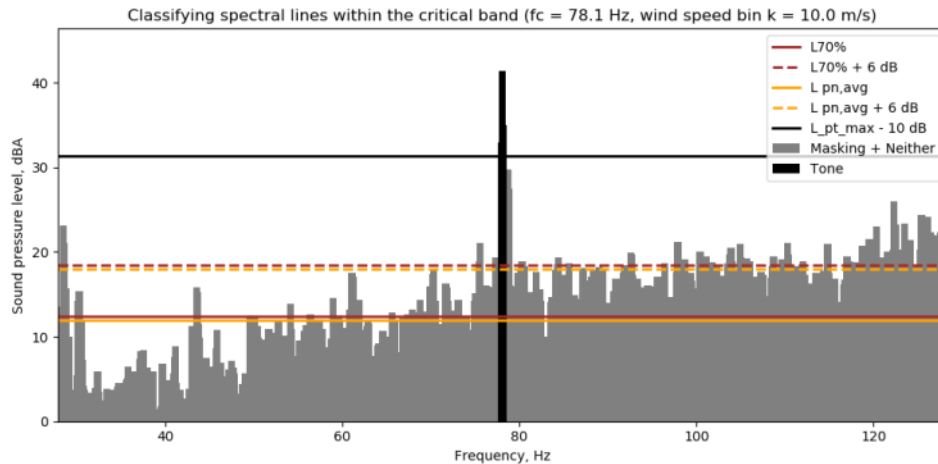


Fig. 11. Classifying spectral lines within the critical band



중심 주파수 78.1Hz에서 발생한 순음의 A-가중 음압레벨은 41.4dB이지만, A-가중을 취하지 않을 경우 64.1dB이 된다. 이 값은 ISO 226:2003의 정규화된 가청레벨에서 80Hz의 기준 값(32dB)보다 훨씬 높은 값이다.

### 4.3 스펙트럼 균형

Bryan(1976)에 의해 제안된 스펙트럼 균형 분석은 옥타브 밴드별 소음 레벨을 구한 후 소음 스펙트럼의 분포를 통해 성가심 여부를 판단하는 방법이다. 만약 32Hz 이상의 주파수에서 옥타브 변화에 따라  $-5.7\text{dB}$  이상의 기울기 크기를 가지면 주파수 영역에 따라 우르릉거림, 포효/함성 소리, 쉬익 하는 소리 등을 느껴 성가심 반응을 보일 수 있다. 이러한 정도를 평가할 수 있는 스펙트럼 선이 Bryan이 제안한 수용가능 선으로 이를 기준으로 측정된 소음 스펙트럼

을 비교하였다.<sup>[6]</sup>

Fig. 12-14는 각각 풍속 빈 8.5m/s, 10.5m/s, 12.5m/s에서의 평균 소음 값을 수용가능 선과 비교 한 것이다. 빨간 실선이 Bryan의 수용가능 선이며, 파란선이 측정된 소음의 옥타브 밴드 값이다. 32Hz를 기준 값으로 모든 풍속에 걸쳐  $-5.6\text{dB/Octave}$  보다 낮은 기울기 값을 가지게 되어 앞서 기술한 특성을 보이지 않아 계측된 소음으로는 성가심 반응이 보일 것으로 판단되지는 않는다. 하지만, 풍속이 높아짐에 따라 저주파 영역에서의 레벨이 기준선에 점점 근접해지는 경향을 가지고 있어 개인의 소음 민감도에 따라 고풍속에서 저주파 소음에 의한 성가심을 표현 할 수 있을 것으로 판단된다.

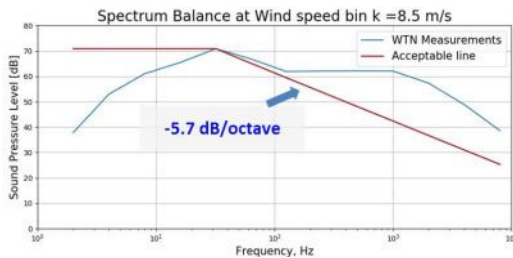


Fig. 12. Spectrum balance at wind speed bin k = 8.5 m/s

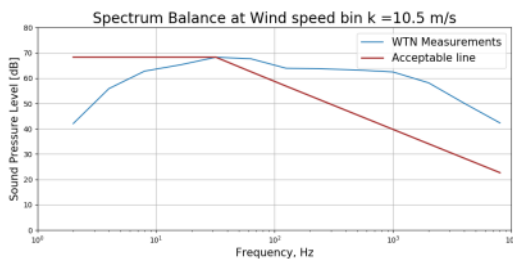


Fig. 13. Spectrum balance at wind speed bin k = 10.5 m/s

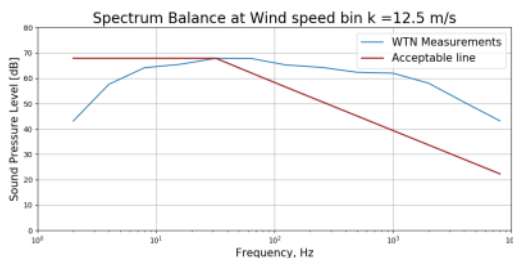


Fig. 14. Spectrum balance at wind speed bin k = 12.5 m/s

## 5. 결론

1.5MW 풍력 발전기의 소음을 측정하고 측정된 소음을 활용하여 겉보기 음향 파워 레벨, 순음 가청도 분석, 스펙트럼 균형 분석을 수행하였다. 풍속별 겉보기 음향 파워 레벨 분석을 통해 풍속 범위 8.5m/s~14.0m/s 구간 사이에 풍속 증가에 따라 전 주파수 구간에 걸쳐 소음의 레벨이 조금씩 증가하는 것을 확인 하였다. 하지만 중간 주파수 범위에서는 풍속 변화에 따른 소음 레벨의 변화가 거의 없었다. 또한 100Hz 이하 구간에서 3개의 저주파 순음 성분이 관측되었다. 저주파 순음들의 강도는 풍속 변화에 따라 선형적인 관계를 보이지는 않았다. 해당 저주파 순음 성분은 쿨링 팬, 기어박스 소음 및 기어 맞물림 주파수들의 조합으로 이루어진 것으로 판단되지만, 정확한 원인 분석을 위해서는 후속 연구에서 나셀 내부의 쿨링팬, 기어박스 등에 진동 계측 센서를 설치해 소음 측정값과의 상관관계를 분석하여 수행되어야 할 것이다.

IEC 61400-11의 분석 절차에 따른 순음 가청도 분석을 수행 한 결과, 중심 주파수 78.1Hz인 저주파 영역에서 강한 순음 성분이 관측 되었다. 해당 주파수를 중심 주파수로 갖는 임계 대역에서 순음 가청도는 10m/s에서 2.72dB이며, A-가중을 취하지 않은 순음의 레벨은 64.1dB으로서 ISO 226:2003의 정규화된 가청레벨에서 80Hz의 기준 값(32dB)보다 훨씬 높아 사람이 인지 가능한 순음 성분으로

분석된다.

Bryan에 의해 제안된 수용가능 선을 기준으로 스펙트럼 균형 분석을 수행한 결과 전 풍속에서 모두 해당 기준선보다 높은 기울기를 갖는 것으로 나타났다. 하지만 풍속이 높아지면서 저주파 영역의 크기가 기준선에 가까워짐에 따라 개인의 소음 민감도에 따라 고품속 환경에서 발생하는 풍력 소음의 저주파 성분에 의한 성가심 반응을 나타낼 가능성이 있을 것으로 판단된다.

계측된 풍력발전기의 소음은 저주파 영역에서 강한 순음 성분을 포함하고 있다. 이 저주파 음은 사람이 충분히 인지 가능한 수준의 순음도를 갖는 것으로 분석되었다. 또한 풍속이 증가함에 따라 저주파 영역의 소음 레벨이 증가함에 따라 스펙트럼 불균형이 발생할 가능성이 있음을 확인하였다.

하지만 분석에 활용한 소음 데이터는 IEC 61400-11에 의해 수행된 근접장 데이터이기 때문에 발전기와 멀리 떨어져 있는 거주지역에서의 소음 특성과 일치 하지 않다. 이는 소음의 전파 과정 중 발생하는 다양한 감쇠 효과에 의해 주파수 특성이 달라지기 때문이다. 따라서 향후 주거지역에서의 소음 계측 데이터를 통한 특성 분석 및 거주지를 대상으로 한 연구가 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요사업(B8-2443)을 재원으로 수행한 연구과제의 결과입니다.

## References

- [1] Eja Pedersen, Kerstin Persson Waye, 2004, "Perception and annoyance due to wind turbine noise—a dose-response relationship", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 116, 3460-3470.
- [2] Seunghoon Lee, Kyutae Kim, Wooyoung Choi and Soogab Lee, 2011, "Annoyance caused by amplitude modulation of wind turbine noise", *Noise Control Eng. J.* 59 (1).
- [3] Sung Soo Jung, Wan-Sup Cheung, Cheolung Cheongy and Su-Hyen Shin, 2008, "Experimental Identification of Acoustic Emission Characteristics of Large Wind Turbines with Emphasis on Infrasound and Low-Frequency Noise", *Journal of the Korean Physical Society*, 53(4), 1897-1905.
- [4] Con Doolan, 2013, "A Review of Wind Turbine Noise Perception, Annoyance and Low Frequency Emission", *WIND ENGINEERING*, 37(1), 97-104.
- [5] DELTA, 2008, "Low Frequency Noise from Large Wind Turbines - A procedure for evaluation of the audibility for low frequency sound and a literature study", EFP-06 project.
- [6] Bryan, M. E., 1976, "Low frequency noise annoyance. In: *Infrasound and Low Frequency Vibration*", Academic Press.
- [7] IEC 61400-11:ed3.(2012-11), 2012, "Wind turbines -Part 11: Acoustic noise measurement techniques", International Electrotechnical Commission.
- [8] Henrik Møller, 2011, "Low-frequency noise from large wind turbines", *J. Acoust. Soc. Am.* 129 (6).
- [9] Bill DAWSON, 2014, "Tonal characteristics of wind turbine drive trains", *Inter-noise 2014*.