한국음향학회지 제40권 제1호 pp. 73~83 (2021)
The Journal of the Acoustical Society of Korea Vol.40, No.1 (2021)
https://doi.org/10.7776/ASK.2021.40.1.073

pISSN : 1225-4428
eISSN : 2287-3775

<리뷰논문>

초저주파음의 유해성 및 풍력 발전 소음 관리에 대한 고찰

Harmfulness of infrasound and wind turbine noise managements

김성찬,[1] 최민주[1,2†]

(Seong-Chan Kim[1] and Min Joo Choi[1,2†])

[1]제주대학교 의공학협동과정, [2]제주대학교 의학전문대학원 의학과

(Received January 12, 2021; revised January 25, 2021; accepted January 26, 2021)

초 록: 풍력 발전은 미래의 청정 에너지원으로 활용 가치가 높으나, 초저주파 소음을 발생한다. 초저주파 소음은 차폐가 어려우며, 생리적으로 다양한 부정적인 효과를 유발할 수 있다. 본 논문에서는 Wind Turbine Syndrome (WTS)을 유발하는 초저주파수 풍력 소음의 유해성을 개관하고, 풍력 발전기 소음의 측정 및 관리를 위한 기술적인 측면을 고찰하고자 한다.

핵심용어: 초저주파, 소음, 풍력 발전소, Wind Turbine Syndrome (WTS)

ABSTRACT: Wind power energy harvesting has a big potential as a future clean energy resource, but accompanies infrasonic noises. The infrasound is difficult to shield and can induce various negative physiological effects. In this study, the Wind Turbine Syndrome (WTS) caused by the infrasonic noises are introduced, and the technical aspects for the measurement and management of the infrasonic noises from wind power plants are discussed.

Keywords: Infrasound, Noise, Wind power plant, Wind Turbine Syndrome (WTS)

PACS numbers: 43.50.Ed, 43.50.Qp

I. 서 론

풍력 발전은 미래의 친환경 에너지원으로 활용가치가 높다. 화석 연료를 사용하는 에너지 소비가 탄소 발생을 유발하고 지구 온난화를 유발하는 환경 문제에 대응하는 시대적인 흐름에 따라 전 세계적으로 풍력 발전 시장이 급속히 성장하고 있다(Fig. 1). 그러나 풍력 발전기는 거대한 크기의 터빈 회전으로 인해 차폐가 어려운 초저주파 소음을 발생한다.[1]

초저주파 소음이 인체에 미치는 영향 및 유해성은 많은 연구자들에 의해 제기되어 왔다.[2-5] 초저주파 소음은 달팽이관, 유모세포, 중추신경계 등 인체에 부정적인 효과를 주는 것으로 알려져 있다.[6-10] 세계보건기구(World Health Organization, WHO)는 풍력터빈 증후군 (Wind Turbine Syndrome, WTS)으로 불리는, 풍력 발전 소음이 원인으로 여겨지는 인체의 부정적인 효과를 줄이기 위해, 유럽 지역의 풍력 발전기 소음을 포함하는 저주파 소음 관리 지침을 제시하고 있다.[11]

IEC 61400-11은 풍력 발전기에서 발생하는 소음을 측정할 때 적용하는 국제 규격이다.[12] IEC 61400-11은 가청 주파수 대역(20 Hz ~ 10 kHz)을 고려하며, 20 Hz 미만의 풍력 발전기 초저주파 소음을 포함하지 않고 있다. 국내의 풍력 발전기 소음은 2018년 환경부가 제시한 '저주파 소음 관리 가이드라인'에 의해 관리되고 있다.[13] 환경부 가이드라인은, 초저주파음에 대한 구현 기술의 한계로, 최저 주파수가 12.5

†**Corresponding author:** Min Joo Choi (mjchoi@jejunu.ac.kr)
Head, Biomedical Engineering Department, School of Medicine, Jeju National University, 102 Jejudaehak-Ro, Jeju-Si 63243, Republic of Korea
(Tel: 82-64-754-3876, Fax: 82-64-702-2687)

Copyright ⓒ2021 The Acoustical Society of Korea. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

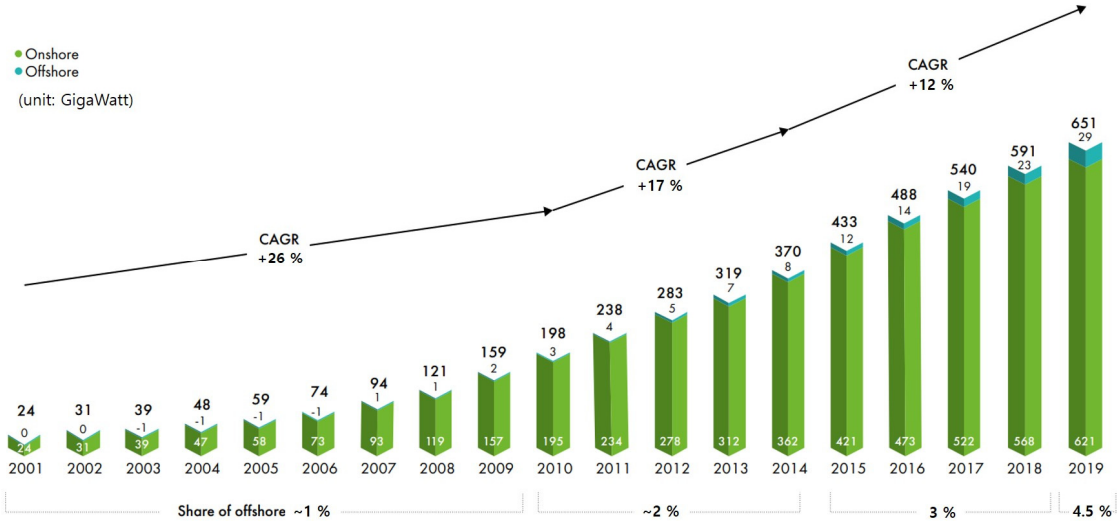


Fig. 1. (Color available online) The capacity of wind power plants installed throughout the world and its Compound Annual Growth Rate (CAGR) (GWEC, 2019).

Hz까지로 제한되어 있다. 그러나 풍력 발전기에서 방출된 소음은 12.5 Hz 이하의 초저주파 성분을 포함하고 있다.[1]

기존의 초저주파 소음 관리는, 소음원을 기준으로 일정 거리에서 측정된 자료에 근거한다.[14] 풍력 발전소는 다수의 발전기로 이루어진 단지형이기 때문에, 다수의 풍력 발전기로부터 발생된 소음이 합쳐진 소음에 대한 평가가 필요하다. 따라서 풍력 소음을 관리하기 위해서는 풍력 단지의 인근 지역에 대한 초저주파 소음의 분포를 파악해야 한다. 이러한 정보가 확보되지 못하고 있는 현 상태에서는 풍력 발전 단지에서 발생되는 초저주파 소음이 인근 거주민에게 미치는 영향을 평가하기가 어렵다.

본 논문에서는 풍력 발전기에서 발생하는 초저주파 소음의 유해성 및 WTS에 대해 개관하고, 풍력 발전 소음의 관리 현황 및 주요 쟁점을 토의하고자 한다. 이를 통해, 초저주파 소음으로부터 풍력 발전 단지 인근의 거주민을 보호하기 위한 풍력 소음 관리에서 고려해야 할 기술적인 측면을 고찰하고자 한다.

II. 초저주파 소음 및 유해성

일반적으로 200 Hz 이하의 소리를 저주파 음으로 정의한다. 가청음의 최저 주파수인 20 Hz 이하는 별도로 초저주파 음으로 구별하고 있다.[6] 초저주파 영역은 인간의 정상적인 청력 범위를 기준으로 설정한 소리의 주파수 범위이다. 초저주파 소음은 가청주파수 이하의 소리이기 때문에, 청각 기관을 통해 감지할 수 없다. 초저주파수 음에 노출되면 인체는 해당 주파수를 가지는 압력의 변화를 느끼게 된다.

초저주파 소리는 생리적으로 부정적인 영향을 유발하며, 인체에 유해할 수 있다는 연구 결과들이 지속적으로 보고되고 있다.[5,6,8-10,15-28] 초저주파 대역의 소리는 외유모세포, 달팽이관을 포함하는 내이의 구성 요소를 자극하여[9,10] 진동 음향 질환(Vibro Acoustic Diseases, VADs)을 유발할 수 있다.[6,7]

Table 1은 동물 및 인체를 대상으로 수행된 초저주파 음에 대한 생리적인 효과를 예시하고 있다. 강한 음압 레벨의 초저주파 소음(7 Hz ~ 16 Hz, 90 dB ~ 130 dB)에 노출될 경우 뇌파 및 뇌 기능에 부정적인 영향을 줄 수 있다.[10,17] 주파수 5 Hz ~ 8 Hz 부근의 강력한 세기(90 dB ~ 130 dB)의 소리는 세포 내 칼슘 농도를 증가시키며, 뇌의 해마 및 심장 세포의 사멸을 유도하는 것으로 관찰되었다.[15,16] 초저주파 음에 장기간(25년) 노출된 VAD 환자에게서 후기 발병 간질, 진동 자극에 의한 반사 간질, 시각적 자극 및 청각 자극에 의한 분노 반응, 운동 장애, 균형 장애, 갑상선 내분비 장애, 호흡기 질환, 자가 면역 질환 등의 병리가 관찰되고 있다.[6]

초저주파 소음은 생리적인 효과 뿐 아니라 부정적

Table 1. Studies on the physiological and clinical effects of infrasound.

Study	Subject	Frequency (Hz)	SPL (dB)	Experiment	Results
Fei *et al*. (2000)	40 rats	8	120	Check the prefrontal cortex after exposing the mouse to infrasound 1 to 14 times for 2 hours each	Direct damage to the cerebral microstructure and the function and structure of the BBB by infrasound
Alves-Pereira & Castelo (2007)	140 VAD patients	0 ~ 500	-	Comprehensive medical records of patients with vibroacoustic disease (VAD) for 25 years to observe pathologic findings.	Late-onset epilepsy, reflex epilepsy and visual stimulation due to vibration stimulation, rage reactions and movement disorders due to auditory stimulation, Balance disturbances, Endocrine disorders, auto-immune diseases is observed
Hensel *et al*. (2007)	12 normal people	6 ~ 50	91 ~ 130	Modulation distortion product oto-acoustic emission (DPOAE) was conducted after the subject heard the infrasound 9 times for 30 minutes for 40 seconds each.	infrasound affect the cochlear function of the human inner ear.
Yuan *et al*. (2009)	48 rats	16	130	infrasound exposure to rats for 2 hours once a day for 14 days	There is a risk of infrasound impairing hippocampal learning and memory.
Pei *et al*. (2011)	Cardiac myocytes cultured from neonatal rats (1 to 3 day old)	5	130	The cardiomyocytes were treated with infrasound for 24, 48, and 72 h.	infrasound is an apoptotic inducer of cardiac myocytes
Liu *et al*. (2011)	60 rats	8	90,130	rats received infrasonic exposure at 90 (8 Hz) or 130 dB (8 Hz) for 2 h per day.	Infrasound increases intracellular calcium concentration and induces apoptosis in hippocampi of adult rats.
Kasprzak (2012)	33 normal people	7	120	EEG measurement after listening to infrasound for 20 minutes	Reduction of Alpha rhythm power
Shi *et al*. (2013)	10 rats	16	90 ~ 130	Checking the time required for the Morris water maze behavioral test after exposure to infrasound.	Learning and memory are impaired as the dB of infrasound increases.
Raufer *et al*. (2018)	Human organs	0.9 ~ 2k	-	Measurement of stapes and round window membrane velocity in the ears of human corpse specimens	As a result of the ear canal sound stimulation response, infrasound significantly limit the sound transmitted from the middle ear to the inner ear.

인 심리적인 효과를 유발한다.[5,6,18,21,24,29-32] 풍력 발전기에서 발생하는 소음은 공항, 산업, 교통, 기차에서 발생하는 소음보다 더 큰 성가심을 유발하는 것으로 나타났다.[21,33] 풍력 발전기의 소음이 증가하면, 인근 거주민의 성가심 정도가 증가하는 것으로 보고되고 있다.[31]

일반적으로, 초저주파수 대역에서 느리게 변하는 강력한 압력은 중추신경계, 소화계, 심혈관계, 호흡기 등에 손상을 줄 수 있다.[6,8,9,17,18] 초저주파 음에 노출된 일부 사람에게서는 두통, 귀의 압력, 어지러움, 메스꺼움, 불안, 정신적 피로 등이 관찰된다.[26] 풍력 발전기에서 생성되는 소음은 심각한 수면 장애를 유발할 수도 있다.[5,21,29,33]

초저주파 소음의 유해성에 대한 기전은 아직 명확하지 않다. 이러한 기전을 학술적으로 규명하기 위해서는 음향학 및 다양한 영역의 기초/임상 의학 분야 전문가들의 협력 연구가 요구된다. 특히 기술적으로 초저주파수 소리에 대한 구현 및 측정이 쉽지 않기 때문에 초저주파 음에 대한 음향공학 전문가의 참여가 필수적이다.

III. 풍력 발전 소음의 측정 및 관리

풍력 발전기는 날개가 회전할 때 가청주파수 대역

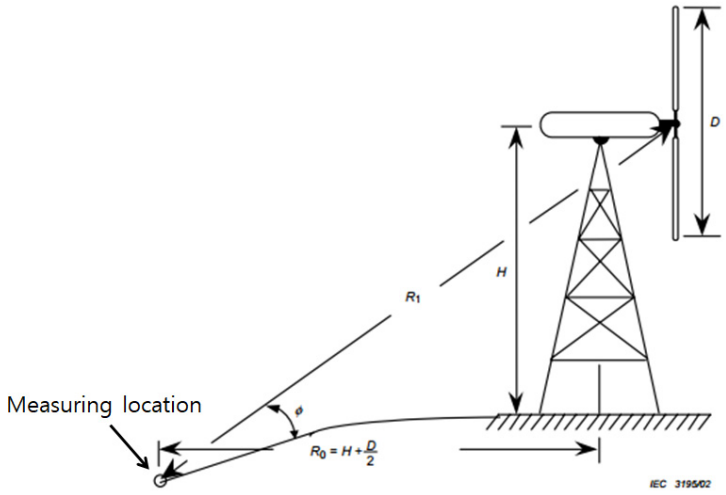


Fig. 2. Location for measuring the sound noises from a horizontal axis wind power generator (IEC 61400–11). (H : Vertical distance from the ground surface to the center of the rotor, D : Diameter of rotor, R0 : Reference distance, R1 : Distance from the center of the rotor to the measuring position).

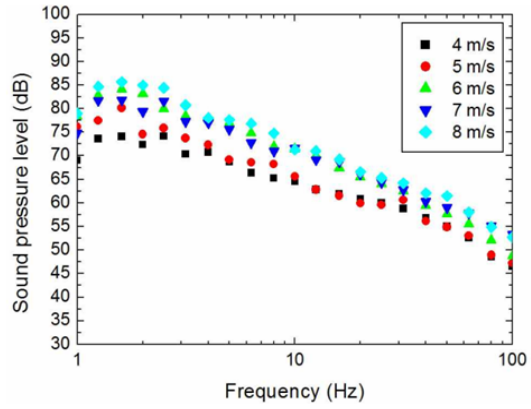
의 소음과 함께 20 Hz 이하의 초저주파 소음을 방출한다.[1,34-36] 풍력 발전기의 소음은 날개 끝 부분에서 주로 발생하며, 소음의 주파수 특성은 날개 통과 주파수와 밀접하게 관련되어 있다.[1,34,37] 풍력 터빈은 일반적으로 매우 낮은 속도로 회전하는 타워 공진 주파수를 가지기 때문에 1 Hz 이하의 초저주파 대역에서 큰 에너지를 가진다.[1,37-40] 풍속이 빨라지면 날개의 회전 속도가 상승하여 소음이 증가한다.[34,35] 소음을 줄이기 위해 회전 속도를 낮게 조절할 경우 초저주파 대역의 소음이 증가하게 된다.[36] 최근 중대형 풍력 발전기의 경우 회전수가 적어 1 Hz 이하의 초저주파 영역까지 소음이 크게 나타난다.[1,37]

국내에는 2018년 말 기준 98개 풍력 발전 단지에 635대의 풍력 발전기가 설치되어 있다.[41] 그러나 풍력 발전 단지 인근 지역에 대한 초저주파 소음 분포가 아직 제대로 파악되지 못하고 있다.[34] 풍력 발전기에서 방출된 소음의 측정은, 일반적으로, IEC 61400-11 또는 일반 환경 소음 측정 방법을 따른다.[14]

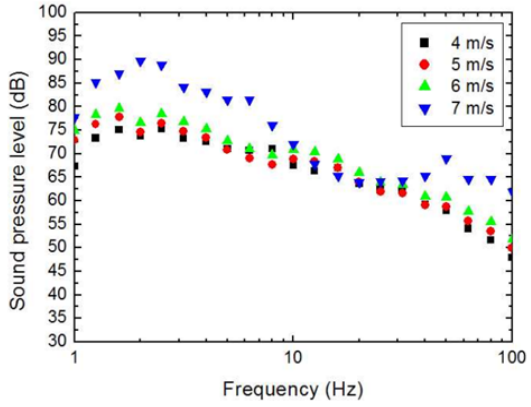
IEC 61400-11은 풍력 발전기에서 방사되는 소음을 측정하는 절차 및 방법에 관한 국제 표준이다.[12] IEC 61400-11은 IEC 61672 등급 1의 소음계를 사용하여 가청주파수대역(20 Hz ~ 10 kHz)의 소음을 A-Weighting을 적용하여 측정한다. Fig. 2에서 도시하듯이, 풍력 발전기의 높이 및 날개의 지름을 확인하고 계산식을 통해 측정 위치를 결정하고, 지표면에서 소음을 측정한다. 풍력 소음은 풍속에 따라 영향을 받으므로, 소음 측정 시 풍속을 동시에 측정한다. 풍속계는 4 m/s ~ 12 m/s 범위에서 측정 가능한 것을 사용하며, 최소 10 m 높이의 마스트에 장착하도록 한다. IEC 61400-11은 풍속과 풍향을 측정하여, 풍력 발전기 소음의 특성을 규명하며, 일반 소음의 평가 방식과 차이가 있다.

일반 환경 소음 측정 방식은 국내의 풍력 발전기 소음 측정에 활용되고 있다. 2018년 환경부가 제시한 '저주파 소음 관리 가이드라인'에서, 풍력 발전 소음을 포함한 저주파 소음의 측정은 「소음·진동공정시험기준」의 '규제 기준 중 생활 소음 측정 방법'을 따르고 있다.[13] 이 방법은 12.5 Hz ~ 80 Hz의 저주파 대역의 소음을 Z-Weighting을 적용하여 측정한다. 측정 지점은 소음도가 높을 것으로 예상되는 지점의 지면 위 1.2 m ~ 1.5 m 높이로 선택한다. 풍속이 2 m/s 이상일 때에는 반드시 방풍망을 부착하며, 풍속이 5 m/s를 초과할 때에는 측정하지 않도록 한다. 다만, 대상이 풍력 발전기 소음일 경우, 풍속이 5 m/s 초과해도 6 m/s 이하에서는 측정할 수 있도록 하고 있다.

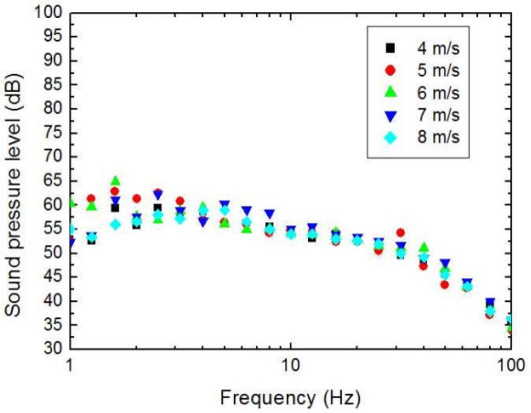
Fig. 3은 IEC 61400-11 방법을 사용하여 측정된 제주도 한경지역 풍력 발전 단지의 측정 위치 및 풍속에 따른 풍력 소음의 주파수 분포를 예시하고 있다.[14] 한경지역 풍력 발전 단지에는 11개의 풍력 발



(a)



(b)



(c)

Fig. 3. (Color available online) Low-frequency noise spectra measured at the different locations of Jeju Hankyung Wind Farm (a) Area 7, (b) Area 8, and (c) Area 9, under different wind speeds. (Korea Research Institute of Standards and Science, 2014).

전기가 거리를 두고 설치되어 있다. 소음 측정 위치는 풍력 발전기에서 가장 근접되어 있는 주택이며, 풍력 발전기에서 90 m ~ 500 m 떨어진 위치를 선정했다. Fig. 3(a)는 가장 가까운 풍력 발전기로부터 약 90 m 떨어진 거리에서 측정한 결과이다. 주위에 2대의 다른 풍력 발전기가 동작하고 있는 상태에서 측정했다. Fig. 3(b)는 가장 가까운 풍력발전기로부터 약 140 m 떨어진 위치에서 측정한 결과이다. 측정 위치에서 약 330 m 거리에 2대의 풍력 발전기가 동작하고 있는 상태에서 측정되었다. Fig. 3(c)는 가장 가까운 풍력 발전기로부터 약 500 m 떨어진 위치에서 측정한 결과이다. 다른 풍력 발전기로부터 멀리 떨어져 있어 소음 측정에 영향을 주지 않은 상태에서 측정되었다. 측정 결과 초저주파 소음은 약 50 dB ~ 90 dB 범위에서 변화하고 있으며, 주파수가 감소함에 따라 증가하는 경향을 보이고 있다. 예상할 수 있듯이, 측정 거리가 가까울수록 소음의 크기가 커지고 있다. Fig. 3(a) ~ (c)에서 측정 거리가 커지면 풍속에 따른 측정된 소음의 편차가 줄고 있다. 동일한 위치에서 측정된 소음은 풍속이 증가하면 커지는 경향을 보이나, 측정 거리가 멀어져 소음이 작아질 때 측정된 소음은 풍속의 영향이 줄어드는 것으로 나타났다.

초저주파 풍력 소음은, Fig. 3으로부터, 풍력 발전기로부터의 거리, 근처에 동작 중인 풍력 발전기의 유무 및 풍속에 크게 영향을 받는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3에서 사용된 동일한 측정 방법(IEC 61400-11)으로, 풍력 발전기로부터 10 m 및 98 m 거리에서 측정된 초저주파 소음이, Fig. 3과는 다르게, 거리에 따라 차이가 거의 없는 경우도 보고되고 있다.[1] 이러한 이유는 풍력 발전기에서 발생하는 초저주파 소음은, Fig. 3에서 고려된 환경적인 요인(근처에 동작 중인 풍력 발전기의 유무 및 풍속) 외에도 풍향 및 풍력 발전기의 기술적인 요소(예. 발전 용량, 풍력 터빈 요각, 풍력 터빈의 운전 상태 등)에 영향을 받을 수 있기 때문이다.[1,14,37,39,42-44] 초저주파수 풍력 소음의(거리에 따른) 측정 효과를 일반화하기 위해서는 풍력 발전기의 기술적인 요소와 풍속, 풍향, 주변 소음, 지형, 건물 밀집도 등 환경적인 조건을 동시에 고려해야 한다.

풍력 발전 단지에서는 다수의 풍력 발전기가 설치되어 작동하고 있다. 풍력 소음은 다수의 풍력 발전기로부터 방출된 소음이 합쳐진 형태이다. 효율적인 소음의 관리를 위해서는 풍력 발전 단지 및 인근 지

역에 대한 초저주파 소음의 분포를 파악하는 것이 필요하다. 풍력 발전 단지 인근 거주민이 생활하는 위치에서 초저주파 소음 분포가 파악될 경우, 풍력 발전 단지에서 발생되는 초저주파 소음이 인근 거주민에게 미치는 영향을 평가할 수 있게 된다.

IV. Wind Turbine Syndrome

WTS는 풍력 발전기의 터빈에서 발생하는 초저주파 성분에 의해 수면 장애, 두통, 이명, 현기증, 메스꺼움, 과민성 반응, 집중력과 기억력 문제 등을 유발하는 증상 또는 증후군을 의미한다.[2-6]

Pierpont(2009)는 풍력 발전기로부터 1 km ~ 1.5 km 거리에서 생활하는 거주민의 약 55 % ~ 84 %가 편두통, 수면 장애, 과민성 반응, 집중력 문제와 같은 WTS 관련 증상을 보이는 것으로 보고했다.[2] 풍력 발전의 초저주파 소음은 차폐가 어렵기 때문에, WTS를 방지하기 위해서는 풍력 발전 단지는 거주 지역과 최소 2 km 이상의 거리를 권고하고 있다.

WHO는 2018년 10월 10일 유럽 지역의 소음 노출을 줄이고, 건강에 중대한 영향을 미칠 수 있는 소음 수준을 식별하기 위해, 환경 소음 관리 지침을 제시했다.[11] WHO 가이드라인은 풍력 발전 소음이 건강에 미치는 부정적인 영향을 줄이기 위해 야간에 풍력 소음이 45 dB L_{den}[1]를 넘지 않도록 권고하고 있다.

WHO의 우려와 다수의 선행 연구에서 풍력 소음이 건강에 부정적인 영향을 줄 수 있다는 근거를 제시하고 있음에도 불구하고, WTS는 아직 학술적으로 논란의 여지가 많은 상태이다. 일부 연구자들은 WTS이 허구이고 노시보 효과[2]와 같은 심리적 효과로 나타난 증상으로 간주한다.[30,45,46] WTS에 대한 회의론자들은, WTS은 풍력 발전 단지가 아닌 어디서나 있는 흔한 증상이며, 풍력 소음이 건강에 해롭다는 사회적인 통념과 언론 보도를 통해 유발되고 있다고 주장한다.[45,46] WTS의 주된 증상인, 수면 방해, 두통, 긴장감, 과민성 반응 등은 소음에 대한 개인의 주관적인 요소 및 성격에 크게 좌우될 수 있어, 초저주파 풍력 소음과의 상관성을 일반화하기 쉽지 않다.[45]

풍력 터빈 소음에 지속적으로 노출될 경우, 건강에 유해하다고 확증하기 위해서는 유발된 증상 및 질환별로 초저주파 소음과의 상관성에 대한 지속적이고 추가적인 증거가 필요하다.[11,30,45,46] Table 1에서 예시하는 초저주파수 소리의 유해성이 풍력 발전 초저주파 소음에 노출된 거주민들에게도 동일하게 나타날지 여부는 학술적으로 면밀한 조사가 요구된다.

WTS는 풍력 발전 단지 인근의 거주민을 대상으로 수집된 임상 데이터를 기반으로 정리된 내용이다. WTS에 대한 인식과 합리적인 경계심은, 풍력 소음의 피해를 최소화하는 풍력 소음 관리 가이드라인 설정을 위한 건설적인 동기를 부여할 수 있을 것으로 기대된다.[5,6,8,9,15,21,26-33]

V. 고 찰

환경부의 저주파 소음 관리 가이드라인은 20 Hz 이하의 초저주파수 영역인 16 Hz 및 12.8 Hz까지 포함하지만, 풍력 발전기의 소음은 이보다 더 낮은 주파수를 포함한다.[1,14]

Fig. 4는 각국에서 제한하고 있는 저주파수 및 초저주파수 소음의 허용 한도를 보여준다.[47] 비교한 7개 국가 중 스웨덴을 제외한 6개 나라는 20 Hz 이하의 초저주파 대역을 포함한다. 독일은 7개국 중 가장 낮은 8 Hz까지 허용 한도를 제시하고 있다. 국내의 경우는 20 Hz를 포함, 초저주파수 대역인 16 Hz, 12.8 Hz에서 소음의 허용 한도를 제시하고 있다.

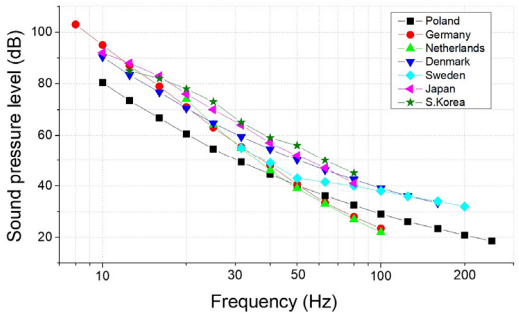


Fig. 4. (Color available online) Comparison of the low-frequency noise limits of each country.

1) dB L_{den}(day-evening-night noise level): 하루 동안의 소음의 수준을 표현하는 유럽의 표준 단위.
2) 노시보 효과(nocebo effect): 실제로는 무해하지만 부정적인 생각에 의해 해로운 영향이 미친다는 심리학 용어.

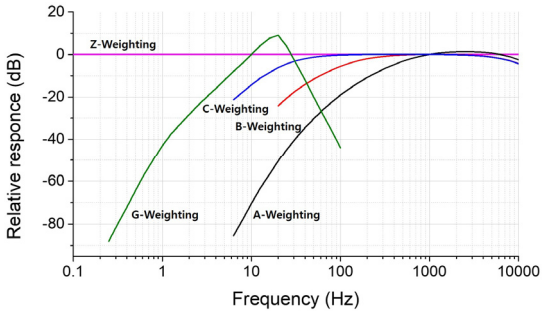


Fig. 5. (Color available online) Various frequency weighting curves.

저주파수 소음의 허용 한도는 일반적으로 주파수가 감소할수록 허용 음압이 높아진다. 국내의 허용 한도는, 20 Hz 이상의 주파수 영역에서, 비교된 모든 국가에 비해 가장 높다. 그러나 주파수가 20 Hz 보다 낮은 초저주파 영역(16 Hz, 12.8 Hz) 에서는 타 국가의 중간 또는 그 이하의 값을 가진다.

독일의 경우, 최저 주파수인 8 Hz까지 소음의 허용 한도를 제시하고 있으나, 풍력 발전 소음 측정에 이보다 낮은 주파수 범위를 포함할지 여부에 대한 검증이 필요하다. 뿐만 아니라, Fig. 4에서 도시하고 있듯이, 각 국별로 허용하고 있는 초저주파 소음의 허용치가 상이하다. 예를 들어, 10 Hz에서 최대 15 dB의 차이가 난다. 이러한 차이를 허용할 수 있거나 줄일 수 있는 근거를 마련할 수 있는 연구 및 국제적인 공조가 요구된다.

IEC 61400-11은 풍력 발전기의 소음 측정 과정에서 A-Weighting을 적용하고 있다. Fig. 5는 소음 측정에 사용되는 다양한 형태의 주파수 가중(frequency weighting) 곡선을 도시하고 있다. A, B, C-Weighting은 인간 청각 기관의 주파수에 따른 민감도를 반영한 것으로, 가청 주파수 대역의 소음을 측정할 경우에 사용된다. 상기 3가지 주파수 가중 방식은 Fig. 5에서 보여주듯이, 주로 1,000 Hz에서 20 Hz까지 주파수가 감소할 때 측정된 소음의 크기를 줄여 준다. A, B, C-Weighting으로 갈수록 주파수 가중 처리로 감소되는 정도가 줄어든다. G-Weighting은 ISO 7196에서 규정하고 있으며, 100 Hz 이하 저주파수 영역 및 20 Hz 이하의 초저주파수 영역을 포함하는 소음 측정에 적용된다. Z-Weighting은 모든 주파수 영역에서 아무런 가중 처리를 하지 않고 측정된 소리를 그대로 사용하는 방식이다.

IEC 61400-11에 의거 A-Weighting을 적용한 측정은, 풍력 소음에서 중요한 초저주파 소음의 크기를 지나치게 축소할 수 있다. 이러한 문제를 피하기 위해, 풍력 소음 측정에 저주파수 및 초저주파수 대역까지 고려한 G-Weighting을 사용하기도 한다.[1,37,39] 아직 인간의 청각 기관을 통해 감지하지 못하는 초저주파 소리에 대한 인체의 주파수 반응 특성은 아직 명확히 보고된 바 없다. 인체의 초저주파수 음에 대한 주파수 반응 특성이 명확하지 않은 상태에서, 초저주파수 대역의 풍력 소음에 대한 G-Weighting 적용 여부의 적절성은 명확하지 않으며, 향후 학술적으로 면밀한 검증이 요구된다.

현실적으로, 초저주파 풍력 소음 측정에는 주파수 가중치를 적용하지 않는 Z-Weighting이 당분간 적절한 대안으로 여겨진다.[40] 실제로 국내의 경우, 환경부의 저주파 소음 가이드라인에서 Z-Weighting을 사용하여 측정하도록 권고하고 있다.[13] 만일 Z-Weighting을 적용한 초저주파 소음에 대해, 인체의 유해성 효과를 평가할 때는, 인체의 대상 부위 또는 장기에 대한 초저주파수 소리에 대한 주파수 반응 특성을 고려한 해석이 필요하다.

풍력 발전기 소음 측정에는 바람을 포함한 외부 요인에 의해 잡음이 포함될 수 있다.[42] 환경부의 가이드라인에서 풍력 발전기의 소음 측정은 생활 소음 측정 방식을 따르기 때문에 풍향 및 풍속을 고려하지 않는다.[13] Fig. 3 및 선행 연구에서 예시하고 있듯이, 풍력 발전기 초저주파 소음은 풍속이 강해질수록 소음의 크기가 커지는 경향을 보인다.[1,13,39] 따라서 환경부의 풍력 소음 측정 가이드라인은 풍향 및 풍속의 효과가 고려될 수 있도록 개정이 필요하다.

초저주파 소음 측정 시, 바람에 의한 영향을 줄이기 위해, IEC 61400-11에 기술된 방법으로 지면에서 방풍망을 사용하여 측정하거나, 지면 아래로 0.5 m × 0.5 m × 0.5 m의 공간을 파고 상단을 방풍망으로 덮은 후 지하 내부 공간에서 측정할 수 있다.[1,14,42,43] 또한 바람의 효과를 줄이기 위해, 풍력 발전기와 20 m 떨어진 위치에 1.8 m × 2.4 m × 4.5 m 크기의 가건물을 설치하여 옥내에서 측정할 수도 있다.[44] 덴마크, 독일, 일본 등 에서는 초저주파 대역을 포함한 소음 측정 시

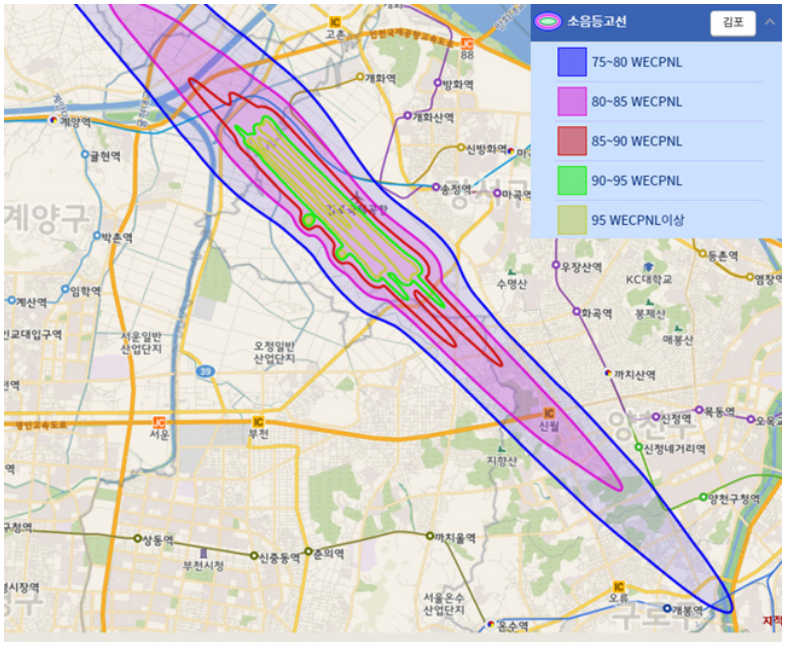


Fig. 6. (Color available online) Example of a sound noise contour map measured around Gimpo international airport.

일반적인 생활 소음과 같이 실내에서 측정하는 것을 택하고 있다.[47] 실내에서 측정할 경우 나라 별로 차이가 있지만 벽에서 0.4 m ~ 1 m 떨어진 곳에서 1 m ~ 1.5 m 높이의 삼각대에 마이크로폰을 설치하여 측정한다.[47,48]

풍력 발전 단지에서 발생된 초저주파 소음의 범위를 확인하기 위해서는, 풍력 발전 단지 및 주변에 대한 소음 분포를 파악해야 한다. 초저주파수 소리는 가청 주파수 대역의 소리에 비해 단위 거리 당 감쇄가 작아 더 멀리 전파한다.[49] 따라서 풍력 발전의 초저주파 소음은 동일한 음압의 가청 주파수 대역의 소음에 비해 더 넓은 범위에 영향을 끼치게 된다. Fig. 3에서 도시하듯이, 풍력 발전기의 초저주파 소음은 풍력 발전기로 부터의 거리 및 근처에 동작하는 다른 풍력 발전기의 존재 여부에 따라 크게 달라진다. 풍력 발전기가 가까운 위치에 있거나 밀집되면 초저주파 소음이 더 크게 측정될 것으로 예상된다. 풍속, 풍향 및 지형이나 건물 밀집 정도 역시 측정된 소음의 값에 영향을 줄 것으로 예상된다. 그러나 풍력 발전기에서 방출된 초저주파 소음은, 실외에서 거주 공간인 실내로 전달될 때, 크게 줄어들지 않는다. 특히 2.5 Hz 이하의 초저주파 성분은 거의 감소하지 않는다.[50]

초저주파 소음은 기술적으로 차폐가 어렵다. 풍력 발전 단지 인근 거주민의 초저주파 소음의 피해를 줄이기 위해서는, 풍력 발전 단지와 거주지 간의 거리가 필요하다. 풍력 발전 단지와 거주지의 최소 거리는 500 m ~ 1,500 m 범위에서 다양하게 제안되고 있지만, 아직 공식적으로 정해진 기준이 없다.[51,52] 일부 연구에서는, WTS를 방지하기 위해 풍력 발전 단지는 거주 지역과 최소 2 km 이상 떨어져야 할 것을 제안하고 있다.[2] 풍력 발전 단지와 거주 지역 간의 이격거리는 풍력 발전기의 소음 및 인근 지역의 지형 등을 고려하여, 초저주파 소음 등고선 지도 위에 표기할 수 있다.

풍력 발전의 초저주파 소음 등고선 지도를 작성하고 유지하기 위해 일정 규모의 소음 측정 설비 설치가 필요하다. 풍력 발전 단지 인근 지역에 대한 초저주파 소음의 등고선 지도의 확보 및 정보 제공을 환경부 가이드라인에 명시하는 것이 적절해 보인다. 실제로, 국내 김포 공항에서 발생하는 항공소음을 관리하기 위해 공항 근처에 20개의 소음 측정 지점을 설치하여 측정된 소음 값을 공항 소음 포털을 통해 소음 등고선 지도를 제공하고 있다(Fig. 6).[53]

이러한 소음 분포 지도는 풍력 발전 단지 인근 거주민들에게 노출되는 초저주파 소음의 피폭량을 평가

하기 위해 핵심 자료로 활용될 수 있다. 소음의 피폭량은 개념적으로 소음의 주파수 및 크기에 따른 소음의 인체에 미치는 효과를 반영하여 산출할 수 있다.

초저주파의 생리적인 효과를 실험하기 위해서는 초저주파수 음을 생성하고 측정할 수 있어야 한다. 일반적인 스피커는 초저주파수 대역의 소리를 구현하기 어렵다. 초저주파수 음을 발생하기 위해서는 특별히 고안된 서브 우퍼가 필요하다. 로터리 서브 우퍼 시스템은 1 Hz 부근의 초저주파 음을 생성할 수 있다.[54,55] 측정용 마이크로폰은 일반적으로 가청음의 측정에 사용하도록 설계되어 있다. 그러나 최근 최저 주파수가 0.02 Hz까지 측정이 가능한 초저주파수 대역 측정용 마이크로폰(B&K 4964)이 등장하고 있다.[56,57] 초저주파 소음이 인체에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 초저주파수 음을 구현하고 측정할 수 있는 표준화된 시스템이 필요하나, 아직, 초저수파 음의 구현 및 측정에 대한 기술 표준이 확립되지 못한 상태이다.

WHO를 비롯한 다수의 선행 연구에서는 풍력 발전기에서 발생된 초저주파 소음이 원인으로 여겨지는 WTS 및 유해성에 대해 우려하고 있다. 국내에서는 아직 초저주파 소음의 유해 사례에 대한 현황이 파악되지 못한 상태이다. 풍력 발전 단지의 소음이 건강에 미치는 부정적인 효과를 확인하기 위해, 풍력 발전 단지 인근 주민을 대상으로, 초저주파 소음의 노출 정도와 소음으로 유발된 질환을 파악하는 역학 조사가 요구된다.

VI. 결 어

풍력 발전은 미래의 청정 에너지원으로 활용 가치가 높다. 그러나 풍력 발전 과정에서 발생하는 초저주파 소음은 차폐가 어려우며, 풍력 발전 단지 인근 거주민에게 WTS를 유발할 수 있다.

풍력 발전 소음으로부터 인근 거주민들을 보호하기 위해, 초저주파 소음 등고선 지도를 확보하여 거주민들에게 노출되는 소음의 피폭량을 평가할 수 있어야 한다. 또한 초저주파 소음에 대한 개별적인 민감도를 고려하여 초저주파 소음에 대한 거주민들의 시달림에 대한 실태 파악 및 유발된 질환에 대한 역학 조사가 필요하다. 이러한 자료가 확보되면, WTS으로부터 풍력 발전 단지 인근 거주민을 보호하기 위한 소음 허용 한도 설정 및 풍력 발전 단지와의 이격 거리 설정 등을 위한 학술적인 근거가 마련될 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

이 논문은 2020학년도 제주대학교 교육·연구 및 학생지도비 지원에 의해서 연구되었음

References

1. S. Lee, S.-H. Shin, C. Cheong, S.-S. Jung, and W.-S. Cheung, “Experimental investigation into infrasound and low-frequency noise radiation characteristics from large wind turbines” (in Korean), Proc. Kr. Soc. Noise Vib. Eng. 1476-1483 (2007).
2. N. Pierpont, *Wind Turbine Syndrome: A Report on a Natural Experiment* (K-Selected Books, Santa Fe, 2009), pp. 27-126.
3. K. Bolin, G. Bluhm, G. Eriksson, and M. E. Nilsson, “Infrasound and low frequency noise from wind turbines: exposure and health effects,” Environ. Res. Lett. **6**, 035103 (2011).
4. A. Farboud, R. Crunkhorn, and A. Trinidade, “‘Wind turbine syndrome’: fact or fiction?,” J. Laryngol. Otol. **127**, 222-226 (2013).
5. M. A. Nissenbaum, J. J. Aramini, and C. D. Hanning, “Effects of industrial wind turbine noise on sleep and health,” Noise and Health, **14**, 237-243 (2012).
6. M. Alves-Pereira and N. A. A. C. Branco, “Vibro-acoustic disease: biological effects of infrasound and low-frequency noise explained by mechanotransduction cellular signalling,” Prog. Biophys Mol. Biol. **93**, 256-279 (2007).
7. W.-K. Choi, K. Lee, H.-Y. Joung, Y.-C. Lee, J.-H. Sohn, B.-H. Lee, K.-H. Pyun, and I. Shim, “Low frequency noise induces stress responses in the rat” (in Korean), Sci. Emot. Sensibility, **10**, 411-418 (2007).
8. J. Hensel, G. Scholz, U. Hurtting, D. Mrowinski, and T. Janssen, “Impact of infrasound on the human cochlea,” Hear Res. **233**, 67-76 (2007).
9. A. N. Salt and T. E. Hullar, “Responses of the ear to low frequency sounds, infrasound and wind turbines,” Hear Res. **268**, 12-21 (2010).
10. Y.-J. Shi, M. Shi, L.-J. Xiao, L. Li, L.-H. Zou, C.-Y. Li, Q.-J. Zhang, L.-F. Zhou, X.-C. Ji, H. Huang, Y. Xi,

L. Liu, H.-Y. Zhang, G. Zhao, and L. Ma, “Inhibitive effects of FGF2/FGFR1 pathway on astrocyte-mediated inflammation in vivo and in vitro after infrasound exposure,” Front. Neurosci. **12**, 582 (2018).
11. World Health Organization. “Environmental noise guidelines for the European region,” 2018.
12. IEC 61400-11: *Wind Turbine Generator Systems - Part 11: Acoustic Noise Measurement Techniques.* Ed. 3.0 2012.
13. Ministry of Environment, “Low frequency noise management guideline” (in Korean), 2018.
14. Korea Research Institute of Standards and Science, “Research on the effects of wind turbine noise” (in Korean), National Institute Environmental Research, 2014.
15. Z.-H. Pei, B.-Y. Chen, R. Tie, H.-F. Zhang, G. Zhao, P. Qu, X.-X. Zhu, M.-Z. Zhu, and J. Yu, “Infrasound exposure induces apoptosis of rat cardiac myocytes by regulating the expression of apoptosis-related proteins,” Cardiovasc. Toxicol. **11**, 341-346 (2011).
16. Z. Liu, L. Gong, X. Li, L. Ye, B. Wang, J. Liu, J. Qiu, H. Jiao, W. Zhang, J. Chen, and J. Wang, “Infrasound increases intracellular calcium concentration and induces apoptosis in hippocampi of adult rats,” Mol. Med. Rep. **5**, 73-77 (2012).
17. C. Kasprzak, “Influence of infrasound on the alpha rhythm of EEG signal,” Acta Physica Polonica A General Physics, **121**, A61 (2012).
18. M. A. Persinger, “Infrasound, human health, and adaptation: an integrative overview of recondite hazards in a complex environment,” Natural Hazards, **70**, 501-525 (2014).
19. M. Weichenberger, M. Bauer, R. Kühler, J. Hensel, C. G. Forlim, A. Ihlenfeld, B. Ittermann, J. Gallinat, C. Koch, and S. Kühn, “Altered cortical and subcortical connectivity due to infrasound administered near the hearing threshold–Evidence from fMRI,” PLoS One, **12**, e0174420 (2017).
20. S. Carlile, J. L. Davy, D. Hillman, and K. Burgemeister, “A review of the possible perceptual and physiological effects of wind turbine noise,” Trends Hear. 22: 2331216518789551 (2018).
21. I. van Kamp and F. van den Berg. “Health effects related to wind turbine sound, including low-frequency sound and infrasound,” Acoustics Australia, **46**, 31-57 (2018).
22. J. H. Zhao, J. H. Wang, J. Y. Luo, X. Y. Guo, Y. Wang, and Y. Cheng, “Effects of infrasound on gastric motility, gastric morphology and expression of nitric oxide synthase in rat,” Biomed. Environ. Sci. **31**, 399-402 (2018).
23. A. Lousinha, G. Pereira, G. Borrecho, J. Brito, A. O. Carvalho, D. Freitas, P. Oliveira, M. J. R Oliveira, and E. Antunes, “Atrial fibrosis and decreased connexin 43 in rat hearts after exposure to high-intensity infrasound,” Exp. Mol. Pathol. **114**, 104-409 (2020).
24. G. M. Pereira, S. S. Pereira, M. Santos, J. Brito, D. Freitas, A. O. Carvalho, A. Águas, M. J. Oliveira, and P. Oliveira, “Effects of high-intensity infrasound on liver lipid content of rats,” Heliyon, **6**, e04383 (2020).
25. S. Tuleukhanov, Y. Shapovalov, A. Mautenbaev, M. Kulbayeva, and Z. Abdrassulova, “The level of the general reactivity of erythrocytes membranes in rats with combined action of infrasound,” Proc. E3S Web of Conf. 08004 (2020).
26. S. Raufer, S. F. Masud, and H. H. Nakajima, “Infrasound transmission in the human ear: implications for acoustic and vestibular responses of the normal and dehiscent inner ear,” J. Acoust. Soc. Am. **144**, 332-342 (2018).
27. H. Yuan, H. Long, J. Liu, L. Qu, J. Chen, and X. Mou, “Effects of infrasound on hippocampus-dependent learning and memory in rats and some underlying mechanisms,” Environ. Toxicol. Pharmacol. **28**, 243-247 (2009).
28. Z. Fei, X. Zhang, X.-F. Wang, Z.-G. Li, P.-L. Lu, X.-Z. Liu, J.-Z. Chen, and K.-Y. Jia, “The changes of rat blood-brain barrier permeability and expression of heat shock protein 70 after infrasonic damage,” J. LOW. FREQ. NOISE. V. A. **19**, 93-99 (2000).
29. S. Ambrose, R. Rand, and C. Krogh, “Wind turbine acoustic investigation: Infrasound and low-frequency noise—a case study,” Bull. Sci. Technol. Soc. **32**, 128-141 (2012).
30. G. J. Rubin, M. Burns, and S. Wessely, “Possible psychological mechanisms for ‘wind turbine syndrome,” On the windmills of your mind,’ Noise and Health, **16**, 116 (2014).
31. D. S. Michaud, K. Feder, S. E. Keith, S. A. Voicescu, L. Marro, J. Than, M. Guay, A. Denning, D. McGuire, T. Bower, E. Lavigne, B. J. Murray, S. K. Weiss, and F. Berg. “Exposure to wind turbine noise: perceptual responses and reported health effects,” J. Acoust. Soc. Am. **139**, 1443-1454 (2016).
32. J. A. Morsing, M. G. Smith, M. Ögren, P. Thorsson, E. Pedersen, J. Forssén, and K. P. Waye, “Wind turbine noise and sleep: Pilot studies on the influence of noise characteristics,” Int. J. Environ. Res. Public Health. **15**, 2573 (2018).
33. J. Radun, H. Valtteri, and S. Maija, “Variables associated with wind turbine noise annoyance and sleep disturbance,” Build Environ, **150**, 339-348 (2019).
34. Y.-H. Lee, W.-H. Jeon, T.-G. Lim, S.-M. Lee, and C.-M. Jang, “Numerical analysis of the aeroacoustic

characteristics in relation to the power generation of vertical axis wind turbines" (in Korean), Proc. Trans. Korean Soc. Mech. Eng. 3784-3789 (2015).
35. S.-S. Jung, "Wind power generation and noise trend" (in Korean), Trans. Korean Inst. Electr. Eng. **68**, 9-13 (2019).
36. H.-K. Shin and H.-J. Bang, "Noise source of large wind turbine" (in Korean), J. Environ. Sci. **18**, 927-932 (2009).
37. Y.-M. Park and T.-R. Jung, "Effect of noise and low frequency noise generated by wind power plant(Wind Farm)" (in Korean), Korea Environment Institute, 1-103, 2009.
38. R. D. O'Neal, R. D. Hellweg, and R. M. Lampeter, "Low frequency noise and infrasound from wind turbines," Noise Control. Eng. J. **59**, 135-157 (2011).
39. E.-K. Son, G.-S. Lee, J.-J. Lee, S.-J. Kang, S.-M. Hwang, S.-I. Park, and S. W. Kim, "Measurement of 1.5 MW wind turbine noise and analysis on its low-frequency noise" (in Korean), New. Renew. Energy, **14**, 105-105 (2018).
40. S.-S. Jung, Y.-B. Lee, B.-S. Jeon, and J.-G. Suh, "A study on acceptability of low frequency noise" (in Korean), Proc. Korean Soc. Noise Vib. 804-805 (2011).
41. Korea wind energy industry association "2018 Annual report on wind energy industry in Korea" (in Korean), Korea wind energy industry association, 2018.
42. C. Turnbull, T. Jason, and W. Daniel, "Measurement and level of infrasound from wind farms and other sources," ACOUST. AUST. **40**, 45-50 (2012).
43. J. Jakobsen, "Infrasound emission from wind turbines," J. LOW. FREQ. NOISE V. A. **24**, 145-155 (2005).
44. T. Sugimoto, K. Koyama, and Y. Kurihara, & K. Watanabe, "Measurement of infrasound generated by wind turbine generator," Proc. 2008 SICE Annual Conf. 5-8 (2008).
45. F. Crichton and K. J. Petrie, "Health complaints and wind turbines: The efficacy of explaining the nocebo response to reduce symptom reporting," Environ. Res. **140**, 449-455 (2015).
46. S. Chapman and F. Crichton, *Wind Turbine Syndrome: A Communicated Disease* (Sydney, Sydney University Press, 2017), pp. 139-177.
47. S.-S. Jeong, "Low frequency noises" (in Korean), Korean J. Air-Cond. Refrig. Eng. **41**, 32-40 (2012).
48. R. A. Carman, "Measurement procedure for wind turbine infrasound," Noise Control. Eng. J. **250**, 1 (2015).
49. L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, and J. V. Sanders *Fundamentals of Acoustics* (John wiley & sons, Hoboken, 1999), pp. 210-245.
50. K. L. Hansen, C. H. Hansen, and B. Zajamšek. "Out-door to indoor reduction of wind farm noise for rural residences," Build Environ, **94**, 764-772 (2015).
51. Y.-M. Prak, T.-R. Jung, and J.-H. Son, "Study on noise and low frequency noise generated by wind power plant(wind farm)" Environ. Impact Assess. Rev. **20**, 425-434 (2011).
52. U.-S. Park, N.-S. Yoo, J.-H. Kim, K.-S. Kim, D.-H. Min, S.-W. Lee, I.-S. Peak, and H.-G. Kim, "The delection of promising wind farm sites in Gangwon Province using multi exclusion analysis" (in Korean), J. Korean Sol. Energy Soc. **35**, 1 (2015).
53. *Airport Noise Portal System*, http://www.airportnoise.kr/, (Last Viewed December 4, 2020).
54. J. Park, M. Garcés, and B. Thigpen. "The rotary sub-woofer: A controllable infrasound source," J. Acoust. Soc. Am. **125**, 2006-2012 (2009).
55. J. Park and J. Robertson, "A portable infrasound generator," J. Acoust. Soc. Am. **125**, EL148 -EL151 (2009).
56. C. Novak, A. Sjostrom, H. Ule, and G. Sandberg, "An investigation of different secondary noise wind screen designs for wind turbine noise applications," Proc. Inter-noise, 1-9 (2014).
57. M. Bahtiarian, I. B. Cert, and A. Beaudry, "Infrasound measurements of falmouth wind turbines wind# 1 and wind# 2," Noise Control Eng. NCE Rep,. 2015.

저자 약력

▸ 김 성 찬 (Seong Chan Kim)

2104년 2월 : 제주대학교 음학학과 학사
2014년 9월 ~ 현재 : 제주대학교 의공학협동과정 석박사통합 과정 수료

▸ 최 민 주 (Min Joo Choi)

1985년 2월 : 서울대학교 기계공학과 학사
1987년 11월 : University of Surrey(영국) 의공학 석사
1992년 12월 : University of Bath(영국) 의공학 박사
1988년 3월 ~ 1995년 8월 : 런던 세인트토마스병원 Medical Physicist
1995년 9월 ~ 1997년 8월 : 서울의대 의공학교실 브레인풀교수
1997년 9월 ~ 현재 : 제주의대 의공학교실 주임교수
2019년 9월 ~ 현재 : 분당서울대병원 연구겸임교수