

풍력발전기의 저주파 소음 전파 모델 비교

Comparison of models for sound propagation of low frequency wind turbine noise

정성수,^{1†} 박태호,² 이병권,² 김진형,³ 최태묵³

(SungSoo Jung,^{1†} Taeho Park,² ByungKwon Lee,² JinHyeong Kim,³ and TaeMuk Choi³)

¹한국표준과학연구원, ²한국환경연구원, ³(주)크리에이티브

(Received December 11, 2023; accepted January 8, 2024)

초 록: 풍력발전기에서 방사되는 저주파 소음은 가장 관심이 높은 불만족 사항 중의 하나이다. 이에 본 연구에서는 공학적으로 유용하게 사용할 수 있는 덴마크 모델과 ISO 9613에 기초한 상용 프로그램인 SoundPLAN과 ENPro에 의한 풍력발전기 저주파 소음 예측값들과 측정값을 비교함으로써 모델들에 대한 신뢰성을 살펴보았다. 육상에서 대표적인 3 MW 급 풍력발전기를 대상으로 적용한 결과 주파수 12.5 Hz에서 80 Hz 범위에서 측정값과 예측값은 최대 5 dB 이내의 차이를 보였다. 이러한 원인으로는 대상 풍력발전기는 7년 이상 운영되었기 때문에 음향파워레벨의 변화가 생겼기 때문으로 추정할 수 있다. 하지만 저주파 대역에서 가장 정확하다고 할 수 있는 Boundary Element Method (BEM) 예측값과 다른 모델에 의한 예측값 그리고 측정값은 2.5 dB 이내로 잘 일치한 점을 고려할 때 본 연구 대상의 모델들은 3 dB 이내의 편차로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어: 풍력발전기 소음, 저주파 소음, 배경소음, 음향파워레벨, 음압레벨

ABSTRACT: Low frequency noise emitted by wind turbines is one of the most noise complaints. In this study, the reliability of the models was examined by comparing the measured sound pressure levels with the predicted levels based on Danish model and commercial programs of the SounPLAN and the ENPro based on ISO 9613. As a result of applying it to representative 3 MW wind turbines, on land, the measured and the predicted values differed within a maximum of 5 dB in the frequency range of 12.5 Hz to 80 Hz. It may be due to the change in the acoustic power levels because the wind turbines have been in operation for more than 7 years. However, considering that the Boundary Element Method (BEM) predicted value, which is known to be the most accurate in the low frequency band, the predicted values are well matched within 2.5 dB, the models of this study are expected to be used as deviation within 3 dB.

Keywords: Wind turbine noise, Low frequency noise, Background noise, Sound power level, Sound pressure level

PACS numbers: 43.55.Mc, 43.55.Br

I. 서 론

탄소배출 저감 대책의 하나인 재생에너지로 풍력 발전기가 육상 및 해상에 활발히 건설되고 있다. 풍력발전기의 용량도 점차 증가하여 최근에는 10 MW 급 풍력발전기도 곧 활성화 될 전망이다. 풍력발전

단지가 조성될 경우 가장 민감하게 다가오는 것은 소음이라고 할 수 있다. 풍력발전기의 소음은 기본적으로 가청대역(20 Hz~20 kHz)의 소음도 중요하지만 최근에는 저주파 소음에 더 관심이 높다. 이것은 저주파 소음은 멀리까지 전파되는 특성과 특히 인체에 미치는 영향¹⁾에 대해 아직까지 명확한 결론이 나

†Corresponding author: SungSoo Jung (jss@kriss.re.kr)

Acoustics, Ultrasound, Vibration Metrology Group, Korea Research Institute of Standards and Science, 267 Gajeong-Ro, Yuseong-Gu, Daejeon 34113, Republic of Korea

(Tel: 82-42-868-5307, Fax: 82-42-868-5643)



Copyright©2024 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.

지 않았기에 관심이 높다고 판단된다. 우리나라의 경우도 환경부에서 저주파 소음에 대한 가이드^[2]를 마련함으로써 12.5 Hz부터 80 Hz 범위에서 주파수 대역별로 기준값을 제시한 바 있다. 이들 기준값들은 규제기준이 아니라 기준값을 초과한 경우에는 소음으로 인한 성가심의 원인이 저주파 소음에 의한 것일 수 있다는 것을 뜻한다.

총음압레벨의 단일값을 적용하는 환경소음과는 달리 저주파 소음은 1/3-옥타브 주파수 대역별로 적용하는 하는 점이 다르다. 따라서 저주파 소음을 예측하기 위해서는 소음원에 대한 1/3-옥타브 주파수 대역별 음향파워레벨값이 요구된다. 풍력단지를 조성하기 전에 사전 환경영향평가를 하기 위해서는 이들 음향파워레벨 값을 사용하여 전파모델 혹은 예측 프로그램으로 임의 수음지점에서의 소음레벨을 예측해야 한다. 풍력발전기 저주파 소음 예측을 위한 전파모델이 몇 가지 사용되고 있지만 실제 측정값과 예측값을 비교한 자료는 거의 없는 실정이다. 이에 본 연구에서는 소음예측 프로그램으로 많이 사용하고 있는 SoundPLAN과 국내에서 개발된 ENPro 그리고 반경험식으로 사용되고 있는 덴마크 모델에 의한 예측값들과 풍력발전기 저주파 소음 측정값을 비교하였다.

II. 저주파 소음 전파 모델

2.1 이론적 모델

저주파 소음의 전파모델 중 실용적으로 사용할 수 있는 반경험적 모델은 덴마크 모델^[3]로 Eq. (1)과 같다.

$$L_{pA} = L_{WA} - 10 \log(l^2 + H^2) + 11 \text{ dB} - \Delta L_a + \Delta L_g, \quad (1)$$

여기서

- L_{pA} : 임의 수음지점에서의 A-가중 음압레벨,
- L_{WA} : 1/3-옥타브 대역별 A-가중 음향파워레벨,
- l : 풍력발전기 타워와 수음점까지의 수평거리,
- H : 풍력발전기 허브 높이,
- ΔL_a : 대기에 의한 초과감쇠,

Table 1. Excess attenuation for the air and the ground.

1/3-octave band center frequency	ΔL_a (dB/km)	ΔL_g (dB)
12.5	0.00	6.0
16	0.00	5.8
20	0.00	5.6
25	0.02	5.4
31.5	0.03	5.2
40	0.05	5.0
50	0.07	4.7
63	0.11	4.3
80	0.17	3.7

ΔL_g : 지표면에 의한 초과감쇠.

Eq. (1)에서 알 수 있는 것처럼 임의 수음점에서의 음압레벨을 예측하기 위해서는 음향파워레벨이 필요하다. 덴마크 모델이 중요한 이유는 주파수 12.5 Hz 부터 1/3-옥타브 대역의 각 대역별 대기 및 지표면에 의한 초과감쇠량을 제시하고 있기 때문이다. 이들 두 초과 감쇠량은 Table 1과 같다. 육상에 설치된 풍력발전기의 지표면에 의한 초과감쇠는 Table 1과 같지만 해상 풍력발전기의 경우는 다른 값을 적용하게 된다.

상용프로그램으로는 외국의 SoundPLAN과 국내에서 개발된 ENPro를 사용하였다. 이들 모델은 기본적으로 ISO 9613(ISO 9613-1, ISO 9613-2)^[4,5]을 사용하기 때문에 유사한 예측값이 기대된다. ISO 9613의 소음전파 모델은 환경소음에서는 가장 잘 알려진 모델로 이미 잘 검증된 모델이기 때문에 대부분의 상용 프로그램에서 많이 사용하고 있다. 이 모델은 63 Hz 이상의 옥타브 대역에 대해 권장되지만 SoundPLAN과 같은 상용프로그램에서는 50 Hz 이하의 주파수 대역까지 적용하는 경우가 있기 때문에 본 연구에서는 63 Hz 미만의 주파수까지 확장 적용함으로써 저주파수 대역에서의 ISO 9613 전파모델의 신뢰성을 검증하였다.

2.2 모델 간 음압레벨 예측값 비교

전파 모델간의 비교를 위해 Fig. 1과 같이 대표적인 3 MW 급 풍력발전기를 가정하여 수음점까지 200

m부터 1 km까지 100m 씩 거리를 변화시키면서 음압레벨 예측값을 비교하였다. 이때 지표면은 풍력단지 주변지역을 대표할 수 있도록 음향학적으로 중간 정도의 음향임피던스를 가지는 지표면(흙, 작은 자갈, 초지로 혼합된 경우)으로 가정하였다. 지표면에서 풍력발전기 허브까지의 높이는 80 m 그리고 수음점의 높이는 1.5 m로 설정하였다. 일반적으로 풍력발전기의 높이는 수음점 높이에 비해 상당히 높기 때문에 Eq. (1)의 2가지 초과감쇠량만 고려하여도 무방하다.

Fig. 2에 각 모델에 의한 음압레벨 예측값들을 비교하였다. 모델간의 비교가 목적이기 때문에 모든 주파수 대역에서 음향파워레벨은 100 dB로 같게 설정하였다.

Fig. 2의 결과를 보면 ISO 9613에 기반한 SoundPLAN 혹은 ENPro에 의한 예측값은 유사하며 저주파 대역으로 갈수록 덴마크 모델보다 다소 낮게 예측되었다. 이러한 이유는 ISO 9613의 경우는 63 Hz 이하에서도 같은 초과감쇠량을 적용했기 때문이다. 이격 거리가 증가함에 따라 덴마크 모델과의 음압레벨 예

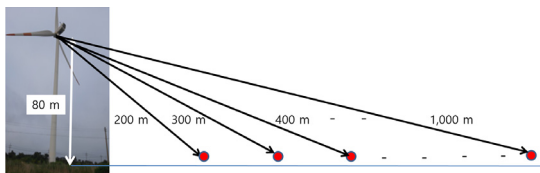


Fig. 1. (Color available online) Geometric distance for wind turbine noise prediction.

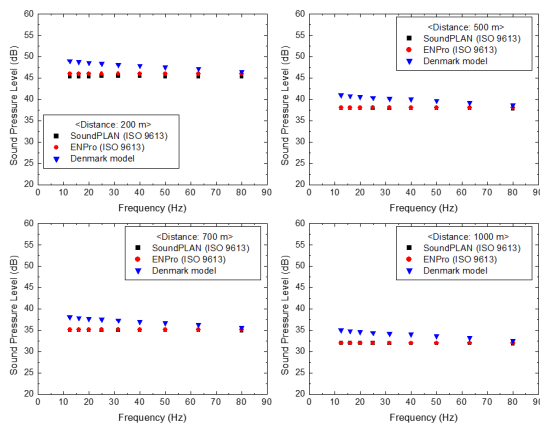


Fig. 2. (Color available online) Noise levels with several prediction models by varying the receiving distance.

측값은 감소함을 볼 수 있는데 이러한 결과를 볼 때 ISO 9613모델의 경우도 63 Hz 미만의 주파수에 대한 연구결과들이 향후 반영된다면 덴마크모델과 유사한 값을 보일 것으로 기대된다. 지금은 두 모델간은 최대 3.5 dB 정도의 차이를 발생하고 있지만 ISO 9613 모델의 경우 불확도가 3 dB 정도인 점을 고려할 때 덴마크 모델과 SoundPLAN 혹은 ENPro 모두 실용적으로 사용하기에 적합하다고 할 수 있다.

III. 풍력발전기 저주파 소음 측정

3.1 측정방법

국내 육상에 설치된 풍력발전기의 대표적인 모델인 3 MW 급을 대상으로 음압레벨을 측정하고 예측값과 비교하였다. 풍력발전기 소음은 풍력발전기 후방으로부터 일정한 거리에서 높이 1.5m에 마이크로폰을 설치하여 측정하였다. 풍력발전기는 지향성을 갖고 있으며 그동안의 연구 결과를 볼 때 후방과 전방에서의 음압레벨은 1 dB 이내로 유사하지만 측면은 10 dB 이상 낮다. 여기서는 IEC 61400-11에 기초하여 풍력발전기 후방에서 측정하였는데 Fig. 3은 제주도 설치된 A사의 풍력발전기의 소음을 측정하는 모습이다. 한편, 풍력단지에는 대부분 다수의 발전기가 이미 설치되어 운영되기 때문에 배경소음을 최



Fig. 3. (Color available online) Wind turbine noise measurement photograph.

Table 2. Background noise levels (dB).

Frequency (Hz)	A company (v _H = 8 m/s)	B company (v _H = 5 m/s)
12.5	42	
16	42	
20	37	40
25	41	43
31.5	41	44
40	38	38
50	38	37
63	36	36
80	32	29

Table 3. Sound power levels (dB).

Frequency (Hz)	A company (v _H = 8 m/s)	B company (v _H = 5 m/s)
12.5	106	
16	106	
20	105	110
25	104	110
31.5	103	108
40	102	109
50	101	109
63	105	109
80	104	106

소화하기 위해 가장 외곽에 설치된 풍력발전기를 대상으로 하였다.

풍속측정은 가장 중요한 요소로서 IEC 61400-11^[6]에서 제시하고 있는 풍속계 설치 가능 영역에서 높이 10m의 이동형 풍속계를 설치하여 1s 단위로 풍속을 측정하였다. 지표면 거칠기 길이는 대상 풍력단지 지표를 고려하여 설정하게 되는데 여기서는 약간의 경작물과 초지가 있기 때문에 IEC 61400-11에서 제안하고 있는 0.05 m로 하였다. 이 경우 높이 10m에서 측정된 풍속으로부터 허브 높이에서의 풍속값은 Eq. (2)로부터 산출할 수 있다.

$$v_H = v_{10} \left[\frac{\ln \frac{H}{z_0}}{\ln \frac{10}{z_0}} \right], \tag{2}$$

여기서

- v_H: 허브 높이에서의 풍속 (m/s),
- v₁₀: 높이 10 m에서 측정된 풍속(m/s),
- z₀: 지표면 거칠기 길이(0.05 m).

3.2 측정값과 예측값 비교

임의 수음지점에서의 음압레벨 예측값을 산출하기 위해서는 풍속에 따른 음향파워레벨 측정값이 필요하다. 하지만 이미 풍력단지가 조성된 경우에는 음향파워레벨을 측정하기 어렵기 때문에 제조사에서 제공하는 값을 사용하였다. 풍속은 시험 여건상

단시간에 걸쳐 측정하였기 때문에 풍속 변화가 제한적이었으며 A 사의 경우는 7.5 m/s에서 8.5 m/s 그리고 B 사의 경우는 4.5 m/s에서 5.5 m/s 범위에서 유효한 데이터를 얻을 수 있었다. 따라서 허브높이에서의 평균풍속(v_H)은 8 m/s와 5 m/s로 하였으며 이때 풍력발전기가 정지한 상태에서의 배경소음레벨은 Table 2와 같다.

각각의 풍속에 대해 A사와 B사에서 제공하는 음향파워레벨은 Table 3에 정리하였는데 제조사마다 음향파워레벨과 측정 주파수 대역이 다르다는 것을 알 수 있다. 이것은 풍력발전기의 형식승인에서 소음은 선택사항이기 때문으로 만약 제조사가 음향파워레벨을 제시하지 않으면 직접 측정을 하거나 이론적 해석^[7]을 통해 산출해야만 한다.

A사 3 MW 풍력발전기로부터 186 m 이격된 거리에서의 음압레벨 측정값과 ENPro 및 덴마크 모델에 의한 예측값 그리고 Boundary Element Method(BEM)에 의한 예측값을 Fig. 4에 함께 비교하였다. BEM을 사용한 이유는 SoundPLAN 혹은 ENPro의 경우는 소음 전파 시 음의 직진성만 고려하기때문에 한계성이 있지만 BEM은 특히 저주파 음의 특성인 회절과 간섭을 모두 고려하기 때문에 가장 정확한 예측값이 기대되기 때문이다. 결과에서 보듯이 BEM 예측값과 다른 예측모델에 의한 예측값 그리고 측정값과 2.5 dB 이내로 잘 일치하고 있지만 다른 예측값과 측정값의 차이는 5 dB 정도이다.

B사 3 MW 풍력발전기로부터 313 m 이격된 거리에서 측정된 음압레벨값과 예측값들은 Fig. 5에 비교

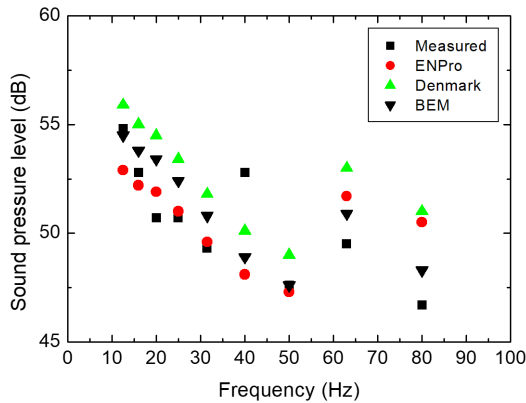


Fig. 4. (Color available online) Comparison of the predicted sound pressure levels by several models with the measured levels (A company).

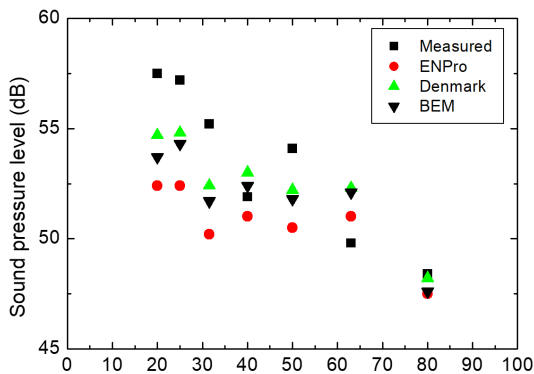


Fig. 5. (Color available online) Comparison of the predicted sound pressure levels by several models with the measured levels (B company).

하였다. 결과를 보면 BEM에 의한 예측값과 다른 모델에 의한 예측값 그리고 측정값들이 잘 일치하고 있지만 최대 3.5 dB 정도의 차이를 보이고 있다.

A사와 B사 모두 측정값과 예측값이 차이가 나는 것은 대상 풍력발전기들은 설치되어 운영되지 7년 이상 경과되었기 때문에 음향파워레벨값의 변화가 생겼기 때문으로 사료된다. 하지만 각 주파수 대역별 음향파워레벨의 변화는 같은 기종의 풍력발전기 일지라도 개별적으로 다르기 때문에 일반화하기는 불가능하다. 하지만 현재 상태에서 음향파워레벨 측정값을 적용할 수 있다면 측정값과 예측값들의 차이는 더 감소할 것으로 기대된다. 한편, Fig. 4에서 40 Hz 대역에서의 음압레벨 측정값의 증가는 Table 3의 음향파워레벨과 Table 2의 배경소음이 다른 주파수 대역과 비교할 때 큰 변화가 없는 점을 고려할 때 그동

안 운영에 따른 음향파워레벨의 변화보다는 진폭변조(amplitude modulation)^[8] 효과로 추정된다. 또한 63 Hz와 80 Hz 대역에서 BEM과 덴마크모델에 의한 예측값들 사이에 차이가 다른 주파수 대역에 비해 증가하고 있는데 Fig. 5의 경우를 고려할 때 음원과 수음점 사이의 거리 차와 지표면의 임피던스 효과가 복합적으로 영향을 미치는 것으로 사료된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 풍력발전기 방사소음 중 특히 12.5 Hz부터 80 Hz까지의 저주파 소음 주파수 대역에 대해 반경험식에 기초한 덴마크모델을 비롯하여 상용 프로그램인 SoundPLAN과 ENPro에 의한 음압레벨 예측값들과 측정값을 비교 검증하였다. 3 MW급 풍력발전기를 대상으로 한 결과 단시간의 측정에 따른 제한된 풍속이지만 예측값들과 측정값이 5.0 dB 이내로 일치하였으며 특히 저주파 소음예측에 가장 정확하다고 할 수 있는 BEM에 의한 결과와는 2.5 dB 이내로 잘 일치하였다. 예측값과 측정값의 차이가 나는 원인은 풍력발전기가 운영되지 7년 정도 경과됨으로써 음향파워레벨 역시 변화하였기 때문으로 판단된다.

일반적으로 가장 잘 알려지고 검증된 ISO 9613 모델은 63 Hz 이상의 주파수에서 적용하지만 12.5 Hz까지 확장할 경우 편차가 증가할 수 있다. 하지만 ISO 9613 모델 자체에 3 dB 정도의 편차가 있음을 고려할 때 63 Hz 미만의 주파수 대역에서의 연구결과들이 보완될때까지는 적절하게 사용할 수 있는 모델이라고 판단된다. 덴마크모델의 경우 반경험식이지만 본 연구에서와 같이 평탄하고 지표면이 음향학적으로 중간 정도의 음향임피던스 갖는 경우는 비교적 신뢰성있게 실용적으로 활용할 수 있는 모델임을 확인할 수 있었다. 하지만 복잡한 지형이나 지표면의 음향학적 변화가 있는 경우에 대해서는 추가적인 연구를 통해 평가할 필요가 있다. 향후 장시간에 걸쳐 다양한 종류의 풍력발전기를 대상으로 광대역 풍속범위에서 측정값과 예측값을 비교함으로써 예측 모델들에 대한 신뢰성을 검증할 예정이다.

감사의 글

본 논문은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 ICT기반 환경영향평가 의사결정 지원 기술개발사업(2021003360003)의 지원을 받아 작성되었습니다.

References

1. S.-C. Kim and M. J. Choi, "Harmfulness of infrasound and wind turbine noise managements" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **40**, 73-83 (2021).
2. Ministry of Environment, "Low frequency noise management guideline" (in Korean), 2018.
3. The Danish Ministry of the Environment, "Statutory order on noise from wind turbines," Translation of Statutory Order no. 1284, 2011.
4. ISO 9613-1, "Acoustics-attenuation of sound during propagation outdoors - Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere," 1993.
5. ISO 9613-2, "Acoustics-attenuation of sound during propagation outdoors - Part 2: General method of calculation," 1996.
6. IEC 61400-11, "Wind turbines - Part 11: Acoustic noise measurement techniques," 2012.
7. G.-S. Lee, C. Cheong, H.-T. Kim, and W.-H. Joo, "Time domain prediction and analysis of low frequency noise from wind turbine using hybrid computational aeroacoustics (CAA) method" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **32**, 369-376 (2013).
8. E. Blumendeller, L. Gaßner, F. J. Y. Müller, J. Pohl, G. Hübner, J. Ritter, and P. W. Cheng, "Quantification of amplitude modulation of wind turbine emissions from acoustical and ground motion recordings," Acta. Acust. **7**, 1-19 (2023).

저자 약력

▶ 정 성 수 (SungSoo Jung)



1985년 2월 : 한국외국어대학교 물리학과 학사
 1987년 2월 : 한국외국어대학교 물리학과 석사
 1995년 02월 : 한국외국어대학교 물리학과 박사
 1996년 10월 ~ 현재 : 한국표준과학연구원 책임연구원

▶ 박 태 호 (Taeho Park)



2008년 8월 : 서울시립대학교 환경공학 학사
 2011년 2월 : 서울시립대학교 에너지환경 시스템공학 석사
 2019년 2월 : 서울시립대학교 환경공학 박사
 2019년 3월 : 서울시립대학교 연구교수
 2021년 12월 ~ 현재 : 한국환경연구원 부연구위원

▶ 이 병 권 (ByungKwon Lee)



2001년 2월 : 한양대학교 건축공학과 학사
 2003년 2월 : 한양대학교 건축공학과 석사
 2003년 3월 : 대림산업 기술개발원
 2016년 2월 : 한양대학교 건축공학과 박사
 2017년 3월 ~ 현재 : 한국환경연구원 연구위원

▶ 김 진 형 (JinHyeong Kim)



1998년 2월 : 부산대학교 조선해양공학과 학사
 2000년 2월 : 부산대학교 조선해양공학과 석사
 2000년 4월 ~ 현재 : (주)크리에이티브 연구소장

▶ 최 태 목 (TaeMuk Choi)



1999년 2월 : 한국항공대학교 항공기계공학과 학사
 2001년 2월 : 부산대학교 조선해양공학과 석사
 2005년 2월 : 부산대학교 조선해양공학과 박사
 2000년 4월 ~ 현재 : (주)크리에이티브 대표