

풍력발전소 소음 영향 예측식 개발에 관한 연구

Study on a Development of the Prediction Equation of the Wind Power Plant Noise

구진회[†]·이재원^{*}·이우석^{*}·정성수^{**}

Jinhoi Gu, Jaewon Lee, Woo Seok Lee and Sungsoo Jung

(Received September 30, 2015 ; Revised December 21, 2015 ; Accepted December 21, 2015)

Key Words : Wind Power Plant(풍력발전소), Sound Pressure Level(소음도), Regression Analysis(회귀분석)

ABSTRACT

The wind power plants were installed in many places because of the low climate changing effects since 2000. Generally, the wind power plants located in the seaside and the mountainous area and the heights of the windmills are about 40 m~140 m above the ground level. So the noises emitted from the wind power plants propagate far away compared with other environment noise sources like trains and cars noise. Because of these reasons, the noise emitted from the wind power plant is easy to cause the additional social problems like as noise complaints. Under the situation, the ministry of environment has established the guideline to evaluate the environmental effects for the wind power plant. According to the guideline, the noise of the wind power plant has to meet 55 dB(A) at day-time and 45 dB(A) at night in the residential area, which is regulated in the noise and vibration management law. But, it is difficult to estimate the noise emitted from the wind power plant because of the absence of the prediction model of the wind power plant noise. Therefore, the noise prediction model for wind power plants using the regression analysis method is developed in this study. For the development of the model, the sound pressure levels of the wind power plants in Jeju island are measured and the correlations between the sound pressure levels are analyzed. Finally, the prediction equation of the wind power plant noise using by regression analysis method derived. The prediction equation for the wind power plant noise proposed in this study can be useful to evaluate the environmental effects in any wind power plant development district.

1. 서 론

풍력발전소는 지구온난화 등 기후변화 방지를 위한 세계적인 흐름과 화석연료 고갈에 따른 신재생에너지 산업의 활성화 등의 시대적인 요구에 부

응하여 2000년도에 들어서서 급속한 성장을 하게 되었다⁽¹⁾. 하지만 풍력발전단지 조성에 따라 발생되는 소음 문제는 새로운 환경 문제로 인식되기 시작했는데 이는 풍력발전소 소음이 기존의 환경소음(자동차 및 기차소음 등)과 다른 소음 발생 특성을 갖기 때문이다⁽²⁾. 풍력발전소 소음원에 대

[†] Corresponding Author ; Member, National Institute of Environment Research

E-mail : gujhgjuh@korea.kr

^{*} National Institute of Environment Research

^{**} Korea Research Institute of Standards and Science

[#] A part of this paper was presented at the KSNVE 2015 Annual Autumn Conference

[‡] Recommended by Editor Myung Jun Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

한 연구는 있었지만 환경영향평가⁽³⁾ 시 풍력발전 단지 개발에 따른 주변 지역에서의 소음영향에 대한 예측모델이 개발되어 있지 않은 상황으로 풍력발전소 소음 민원 증가 추세를 고려할 때 향후 이에 대한 연구가 시급한 실정이다.

이에 따라 이 연구에서는 국내 풍력발전소 소음에 대한 실태조사를 통해 기초자료를 확보하고 풍력발전소 소음이 주변 환경에 미치는 영향을 예측하기 위한 식을 회귀분석을 통해 도출하고자 하였다. 이 연구에서 도출된 연구결과는 향후 풍력발전소 주변 소음영향에 대한 환경영향평가 시 예측모델로 활용이 기대된다.

2. 풍력발전소 소음도 조사

풍력발전소 소음도 조사 지역은 제주도 행원(4개 지역), 한경(5개 지역) 등 총 15개 지역으로 하였

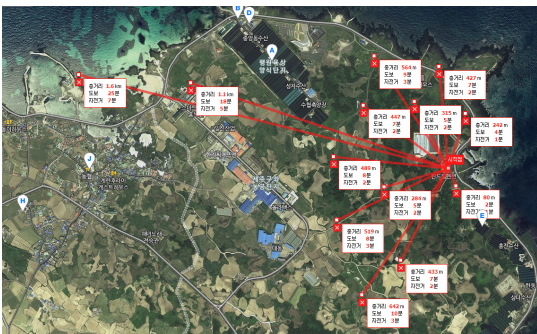


Fig. 1 The wind power plant at Hangwon

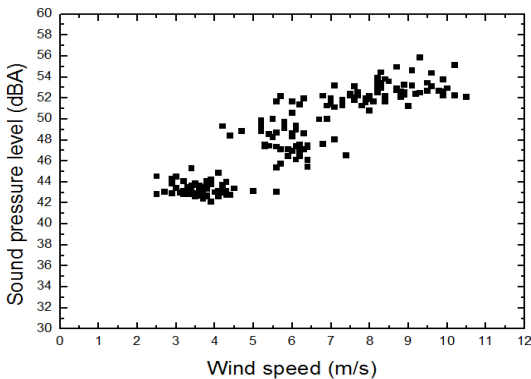


Fig. 2 A-weighted sound pressure level of the wind power plant according to the wind speed at Hangwon in Jeju island

다. 풍력발전소 소음 측정 일반적인 환경소음 측정방법을 적용하였으며 지면 위 1.2 m~1.5 m높이에 마이크로폰을 설치하여 측정하였다⁽⁴⁾. Fig. 1은 제주도 행원지역에 설치된 풍력발전소 위치를 나타내며 Fig. 2는 제주도 행원지역에서 풍속 변화에 따른 풍력발전소 소음도 변화를 나타낸다. Fig. 2에서 풍속 증가에 따라 소음도가 증가하며 풍속 8 m/s 이상에서는 50 dB(A) 이상의 소음도를 보이고 있다⁽⁵⁾. 이 지역에서 바람속도와 풍력발전소 주변 소음도 간의 적률상관계수는 0.9675로 선형적인 상관관계가 매우 높은 것으로 나타났다. 이외의 조사지역(15개)에서도 바람속도와 풍력발전소 주변 소음도 간의 상관계수(correlation coefficient)는 0.7085~0.9770수준으로 높게 나타났다.

3. 회귀분석을 통한 풍력발전소 소음 영향 예측식 도출

3.1 회귀모델 설계

풍력발전소 소음도 회귀모델은 다른 소음원(도로 교통, 항공기 등)의 소음 영향이 적은 5개 조사지역(제2지역, 제4지역, 제5지역, 제9지역, 제12지역) 849개 소음도 정보를 기반으로 하여 총 2개의 회귀변수(풍력발전소 설비 용량(MW), 바람속도(m/s))를 갖는 회귀모델로 설계하였다. 회귀모델 설계를 위한 상용프로그램은 Matlab의 Signal Processing Toolbox을 이용하였다. 먼저 회귀모델은 식 (1) 및 (2)~(4)와 같이 선형 모델(linear model)과 비선형 모델(non-linear model)로 설계하였으며, 회귀모델의 적정성에 대한 평가 지표로 사용되는 R^2 (결정계수, coefficient of determination)값을 각 모델별로 산정하여 R^2 값이 큰 모델을 우수한 회귀모델로 선정했다⁽⁶⁾. 비선형 모델 (2)는 설비 용량을 비선형 인자로 풍속을 선형 인자로 설계하였고, 비선형 모델 (3)은 설비 용량은 선형 인자로 풍속은 비선형 인자로 설계하였으며 비선형 모델 (4)는 설비 용량과 풍속 모두를 비선형 인자로 설계하였다. 이 연구에서는 풍력발전소를 점음원으로 가정하고 회귀모델 (1), (2), (3), (4)에 점음원 거리감쇠(‘ $-20\log(d/d_0)$ ’)항에 의한 소음영향을 적용하였다. 이때 기준거리(d_0)는 풍력발전소가 통상 주택으로부터 100 m 이상 떨어져 있는 점을 고려하여 편의상 100 m로 하였다.

선형 모델:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 - 20\log(d/d_0) \quad (1)$$

비선형 모델:

$$y = b_0 + b_1\log(x_1) + b_2x_2 - 20\log(d/d_0) \quad (2)$$

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2\log(x_2) - 20\log(d/d_0) \quad (3)$$

$$y = b_0 + b_1\log(x_1) + b_2\log(x_2) - 20\log(d/d_0) \quad (4)$$

여기서, y : 소음도

b_0, b_1, b_2 : 각각 회귀상수, 설비 용량(MW) 및 바람속도(m/s)에 대한 회귀계수

x_1, x_2, d, d_0 : 각각 설비 용량(MW) 및 바람속도(m/s)에 대한 관측값, 소음측정 거리(m), 100 m(기준거리)

Table 1은 풍력발전소 소음도의 선형 회귀모델과 비선형 회귀모델에 대한 결정계수(R^2)를 나타낸다. 선형 모델 (1)과 비선형 모델 (2)~(4)의 R^2 값은 0.776~0.793 수준으로 대체로 높은 수준으로 나타났다.

3.2 회귀변수 결정

이 연구에서 설계한 풍력발전소 회귀모델 식 (1)~(4)는 풍력발전소 설비 용량(MW) 및 바람속도(m/s) 정보를 회귀모델의 입력값으로 하여 최소자승법(least mean square method)으로 계수 b_0, b_1, b_2 를 도출하였다. 이때 풍력발전소 주변 소음도는 가장 근접한 오직 풍력발전소 1기에 의한 것이라는

가정하에 도출하였다. 이렇게 도출된 풍력발전소의 소음도 회귀모델의 회귀변수는 Table 1과 같다.

3.3 회귀변수의 보정

풍력발전 단지 주변에는 여러 기의 풍력발전소가 입지해 있으므로 복합적인 풍력발전소 소음에 의한 배경소음을 고려하여 회귀변수를 도출해야 한다. 따라서 가장 가까운 풍력발전소 뿐만 아니라 주변의 풍력발전소 설치 정보(설비용량(MW) 및 이격거리(m, 개별 풍력발전소로부터 소음 측정지점까지))와 풍속(m/s) 정보를 토대로 기준에 도출된 회귀변수를 보정(adjustment)하는 과정을 거쳤다. 회귀변수의 보정은 기 도출된 회귀식을 이용하여 주변(2 km 이내)에 설치된 타 풍력발전소 소음에 의한 배경소음을 산정·보정하여 다시 회귀분석을 수행하는 과정으로 진행하였다. 이러한 보정과정은 총 4회에 걸쳐 수행되었으며 최종 도출된 회귀변수는 Table 2와 같다. Table 2의 선형 모델 (1)과 비선형 모델 (2)~(4)의 R^2 값을 비교한 결과 비선형 모델 (4)의 R^2 값이 0.9085로 선형 모델 (1) 및 비선형 모델 (2)~(3)의 R^2 값 0.8115~0.9055보다 크게 나타나 이 연구에서는 비선형 회귀모델 (4)를 풍력발전소의 소음 영향 예측식 회귀모델로 선택하였다. 이는 풍력발전소의 소음도가 설비 용량 및 풍속에 대해 비선형적으로 증가하는 경향과도 일치한다. Table 3은 회귀모델 (4)의 보정과정 중 결정계수의 변화값을 나타내며 보정이 진행 될수록 결정계수가 증가하는 것을 알 수 있다. 이 연구에서 도출된 최종 풍력발전소 소음 영향 예측 모델은 식 (5)와 같다.

$$y = 35.303 + 12.767 \log x_1 + 20.184 \log x_2 - 20\log(d/d_0) \quad (5)$$

여기서, x_1 : 풍력발전소 설비 용량(MW)

x_2 : 바람속도(m/s)

d 및 d_0 : 각각 소음측정 거리(m) 및 100 m(기준거리)

Table 1 The parameter and the R^2 value of the wind power plant regression model(linear model (1) and the nonlinear model (2), (3), (4))

Content	b_0	b_1	b_2	Correlation coefficient
Linear model, (1)	36.3891	2.7095	2.3007	0.779
Nonlinear model, (2)	39.8751	10.6902	2.2653	0.798
Nonlinear model, (3)	34.0418	2.3929	22.9369	0.776
Nonlinear model, (4)	37.2366	9.4477	22.5154	0.790

Fig. 3은 이 연구에서 도출된 풍력발전소 소음도 회귀모델(식 (5))을 이용하여 실측값('*' 및 '+')과 예측값(실선 및 점선)을 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 3에서 위쪽의 실선 및 표식(*)은 각각 제주도

행원지역에서의 풍력발전소 소음도 회귀곡선과 소음도 실측 결과를 나타내고 아래의 점선 및 표식 (+)은 각각 환경지역에서의 풍력발전소 소음도 회귀곡선과 소음도 실측 결과를 나타낸다. 두 지역에서의 풍력발전소 소음도 예측값과 실측값 간의 상관계수는 ‘0.9323’ 및 ‘0.9071’로 매우 높게 나타나 향후 풍력발전 개발 지역에 대한 소음환경영향평가식으로 활용 가능성을 확인하였다.

Table 2 The adjusted parameter of the wind power plant regression model

Content	b_0	b_1	b_2	Correlation coefficient
Adjusted linear model, (1)	35.063	2.3156	2.265	0.8115
Adjusted nonlinear model, (2)	37.669	12.122	2.180	0.9055
Adjusted nonlinear model, (3)	31.417	3.006	20.397	0.9022
Adjusted nonlinear model, (4)	35.303	12.767	20.184	0.9085

Table 3 The coefficient of determinant at each adjustment level

Adjustment level	0	1	2	3	4
R^2	0.7900	0.9060	0.9081	0.9085	0.9085

4. 풍력발전소 소음 영향 예측식의 검증

이 연구에서 도출된 풍력발전소 소음 영향 예측 모델(식 (5))은 임의의 풍력발전소 설치 단지(제주도 월령, 목포 비금도 및 강원도 용대리) 지역에 대한 실측값과 예측값간의 오차 분석을 통하여 적용성을 검증하였다. Table 4는 제주도 월령지역, 목포 비금도 및 강원도 용대리 지역의 풍력발전소 소음 실측값과 이 연구에서 도출된 예측식의 예측값 간의 오차를 나타낸다. 제주도 월령지역의 경우 풍력발전소 소음도 실측값과 예측값간에 오차는 0.1 dB~3.7 dB (평균 1.1 dB)수준으로 나타났고 목포 비금도 지역과 강원도 용대리 지역의 경우 각각 0.3 dB~6.6 dB (평균 3.6 dB), 0.2 dB~6.1 dB(평균 2.7 dB)수준으로 나타나 제주도 월령지역의 풍력발전소 소음 영향 예측값이 목포 비금도 지역 및 강원도 용대리 지역 대비 정확한 것으로 나타났다. 이는 이 연구에서 도출

Table 4 The adjusted parameter of the wind power plant regression model

Region	Range of error(average)
Walryong in Jeju Island	0.1~3.7 dB(1.1 dB)
Bigeundo in Mokpo-si	0.3~6.6 dB(3.6 dB)
Yongdaeri in Gangwon-do	0.2~6.1 dB(2.7 dB)

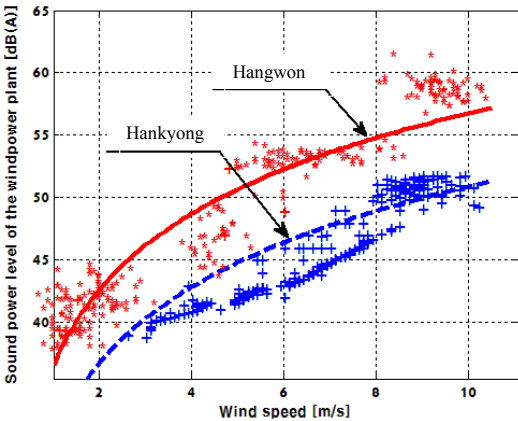


Fig. 3 A-weighted sound pressure level regression curve of the wind power plant at Hangwon and Hankyong

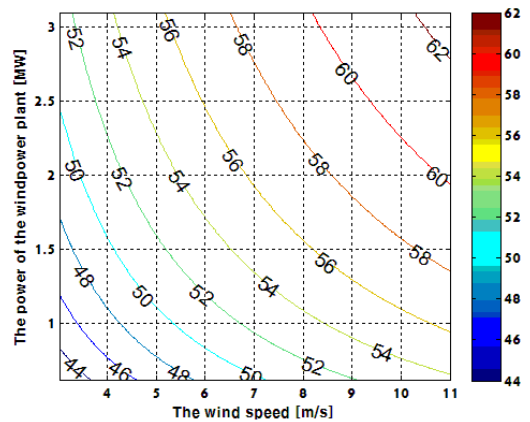


Fig. 4 The contour map of the A-weighted sound power level of the wind power plant according to the capacity of generating plant and the wind speed

된 풍력발전소 소음 영향 예측식은 제주도 풍력발전소 단지 주변의 소음도 정보를 토대로 도출되어 제주도 주변 지형 특성 등의 환경인자가 예측식 도출을 위한 회귀분석 과정에 간접적으로 영향을 주었기 때문으로 판단된다.

5. 고 찰

Fig. 4는 이 연구에서 도출된 풍력발전소 소음 영향 예측식을 이용하여 풍력발전소 설비용량 및 풍속 변화에 따른 소음도 변화를 분석한 그림이다. Fig. 4에서 종축(x축)은 풍속(m/s)을 나타내고 횡축(y축)은 설비용량(MW)을 나타낸다. Fig. 4에서 풍속 및 설비용량이 증가할수록 풍력발전소 주변에 미치는 소음 영향은 증가하는 것을 알 수 있다. 이 연구에서 도출된 예측식을 적용 시 풍력발전소로부터 100 m 가량 떨어진 지점을 기준으로 풍속 및 설비용량이 2배 가량 증가 시 소음도는 각각 6.1 dB, 3.8 dB가량 증가하는 것을 예측할 수 있다.

6. 결 론

이 연구에서는 풍력발전소 주변 소음환경영향평가 예측식 개발을 위한 첫 번째 단계로서 풍력발전소 주변 소음도 현황을 조사하였고 풍력발전소 설비용량 및 풍속 자료를 통해 풍력발전소 소음 영향 예측식을 회귀분석을 통해 도출하였다. 풍력발전소 소음은 설비용량 및 주변 바람속도에 의해 영향을 받으며 거리에 따른 소음 변화는 점음원의 거리감쇠공식을 따른다는 가정하에 회귀분석을 통해 풍력발전소 소음 영향 예측식을 도출하였다. 이 연구에서 도출된 풍력발전소 소음 영향 예측식의 적용성을 임의의 풍력발전 설치 지역에 적용하여 검증한 결과 타지역(목포 비금도 및 강원도 용대리) 보다 제주도에 설치된 풍력발전소의 소음 예측이 정확한 것을 확인 할 수 있었다. 이는 이 연구에서 도출된 풍력발전소 소음 영향 예측식은 제주도 풍력발전소 주변 지형 특성 등의 환경인자가 예측식 도출 과정에 영향을 주었기 때문으로 분석된다. 풍력발전소 소음은 발생원의 위치가 비교적 높은 곳(타워높이 40 m~140 m)에 있기 때문에 장애물 영향을 받지 않고 먼 지역까지 전파되는 특성이 있다. 특히 강

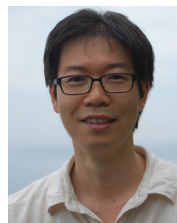
원도 등과 같은 산악지역에서는 지형 특성(산맥에 의한 반사 영향 등)을 고려하여 회귀모델 설계 시 지형 특성 변수를 추가로 설정해야 할 것이다. 지형 특성을 고려한 풍력발전소 소음 영향 예측식 개발을 통해 예측식의 정확도를 높이는 것을 향후의 과제로 제안하는 바이다.

후 기

이 연구는 국립환경과학원 연구용역 ‘풍력발전소 소음영향 실태조사’ 과제의 일환으로써 한국표준과학연구원에 발주되어 수행되었습니다.

References

- (1) Kim, S. H. and Kim, T. H., 2006, Noise Test and Evaluation of a 750 kW Wind Turbine Generator, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 16, No. 2, pp. 124~131.
- (2) Wagner, S., Bareiss, R., Guidati, G., 1996, Wind Turbine Noise, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, p. 72.
- (3) Guidelines to Assess the Environmental Effects for the Wind Power Plant Construction, 2014, Ministry of Environment.
- (4) Environmental Standard of Noise and Vibration Management, 2015, The Ministry of Environment, p. 68.
- (5) Research on the Effects of Wind Turbine Noise, 2015, National Institute of Environmental Research, ES 03303.1a
- (6) Myers, R. H., 2000, Classical and Modern Regression with Applications, Duxbury Press, Second Edition.



Jinhoi Gu received master degree in the mechanical engineering from Inha university in 2005. He is currently a senior researcher at the department of living environment in national institute of environment research in Korea. His research interests are the area of the measurement and analysis of the environment noise.



Jaewon Lee received master degree in the Environmental engineering from university of seoul in 2002. He is currently a Chief researcher at the department of living environment in national institute of environment research in

Korea. His research interests are the area of the analysis of the environment noise map.