

해양 환경 변화를 고려한 최적의 전파 보정 계수 산출 Estimation of Optimal Spreading Calibration Coefficients Considering Marine Environmental Variations

함다현* · 이정준** · 성주현* · 추상민* · 문광석*** · 배윤경*** · 최병근* †
Da-Hyeon Ham*, Jeong-Jun Lee**, Ju-Hyeon Seong*, Sang-Min Choo*,
Kwang-Seok Moon***, Yoon-Kyung Bae*** and Byeong-Keun Choi* †

(Received 13 August 2025, Revision received 27 August 2025, Accepted 27 August 2025)

초록 : 본 연구는 수심, 해저면 특성, 기상 조건에 따라 변동하는 음압 레벨을 고려하기 위해 동시 측정을 수행하여 최적의 전파 보정 계수를 산정하는 방법을 제안한다. 전북 부안 해상 풍력단지를 대상으로, 두 대의 선박을 이용하여 수중 소음을 측정하였으며 소음원으로부터 근접하게 위치한 고정 선박에서는 풍속에 따라 129 ~ 132 dB/1μPa의 소음 레벨이 측정되었고, 등간격으로 이격한 이동 선박에서는 거리별 117~122 dB/1μPa의 소음 레벨이 측정되었다. 측정된 음압 레벨을 통해 음압 준위를 예측하고 이 값들의 평균 오차가 최소가 되는 전파 보정 계수는 8.3으로 산정되었다. 해양 환경에 따른 최적의 전파 보정 계수를 산정하여 음원 준위를 예측함으로써 보다 정밀하게 피해영향범위를 예측할 수 있을 것으로 기대된다.

키워드 : 원통형 확산, 구면 확산, 전파 보정 계수, 동시 측정

Abstract : This study proposes a method to estimate the optimal propagation correction coefficient. The method involves conducting simultaneous measurements to account for variations in sound pressure levels caused by water depth, seabed characteristics, and meteorological conditions. Under the offshore wind farm project in Buan, Jeonbuk-do, underwater noise measurements were carried out using two vessels. The stationary vessel, located near the noise source, recorded sound pressure levels ranging from 129 to 132 dB/1 μPa depending on wind speed. In contrast, the moving vessel, placed at regular intervals from the source, recorded levels between 117 and 122 dB/1 μPa depending on distance. By predicting the sound

*† 최병근(<https://orcid.org/0000-0001-8912-3688>) : 교수, 경
상국립대학교 스마트에너지기계공학과

E-mail : bgchoi@gnu.ac.kr, Tel : 055-911-9525

*함다현(<https://orcid.org/0009-0007-3909-9262>), 성주현(<https://orcid.org/0009-0004-8390-8694>), 추상민(<https://orcid.org/0009-0000-3617-422X>) : 대학원생, 경상국립대학교 스마트에
너지기계공학과

**이정준(<https://orcid.org/0000-0002-7039-2412>) : 교수, 울
산과학대학교 기계공학부

***문광석(<https://orcid.org/0009-0006-4910-7759>), 배윤경(<https://orcid.org/0009-0006-5940-6912>) : 연구원, (주)세광종합기술
단, 해양사업부

*† Byeong-Keun Choi(<https://orcid.org/0000-0001-8912-3688>) :
Professor, Department of Smart Energy Mechanical Engineering,
Gyeongsang National University.

E-mail : bgchoi@gnu.ac.kr, Tel : 055-911-9525

*Da-Hyeon Ham(<https://orcid.org/0009-0007-3909-9262>), Ju-Hyeon
Sung(<https://orcid.org/0009-0004-8390-8694>), Sang-Min Choo
(<https://orcid.org/0009-0000-3617-422X>) : Graduate student,
Department of Smart Energy Mechanical Engineering,
Gyeongsang National University.

**Jeong-Jun Lee(<https://orcid.org/0000-0002-7039-2412>) : Professor,
Department of Mechanical Engineering, Ulsan College.

***Kwang-Seok Moon(<https://orcid.org/0009-0006-4910-7759>),
Yoon-Kyung Bae(<https://orcid.org/0009-0006-5940-6912>) :
Researcher, Sekwang Engineering Consultants Co., Ltd.

pressure levels and minimizing the mean error between predicted and measured values, the optimal propagation correction coefficient was determined to be 8.3. Estimating this coefficient based on the specific marine environment is expected to improve the accuracy of source level prediction and the assessment of the impact range on marine life.

Key Words : Cylindrical Spreading, Spherical Spreading, Spreading Calibration Coefficient, Simultaneous Measurement

1. 서 론

해상풍력 발전은 바람의 힘으로 전기 에너지를 생산하는 발전 장치로서, 화석연료를 대체하는 친환경에너지를 얻기 위한 목적으로 사용되고 있다. 최근 정부의 온실가스 배출 저감 정책 및 탄소 중립 정책에 따라 해상풍력 발전의 설치 및 운영 비중이 높아지고 있다.

해상풍력은 육지에 비해 장애물이 없어 풍속이 70%나 빠르고, 설치 위치에 대한 제약이 적어 공간 효율성이 높다는 장점이 있다. 하지만 풍력 터빈 가동 및 블레이드 회전 시 발생하는 소음 및 진동¹⁾이 수중에 전달된다는 단점이 존재한다.²⁾ 수중 소음이 증가하게 되면 음향 신호를 통해 의사소통을 하는 어류의 균형 감각 상실, 번식 억제와 같은 현상을 초래하며 해양 생태계에 부정적인 영향을 미치게 된다.^{3,4)}

이로 인해, 정부는 해양 개발 및 이용 사업이 해역 환경에 미치는 영향을 사전에 평가하는 해양 환경 영향평가 정책을 시행하고 있다. 이러한 정책들로 인해 수중 소음 조사가 필수적으로 요구됨으로써 명확한 피해 영향범위 예측과 해양 환경을 고려한 음원 주파수 대역 및 확산 형태 분석에 관한 연구가 이루어지고 있다.⁵⁾ Yoon 등은 천해에서의 소음 감쇠 정도를 실제 실험을 통해 만든 수식에 적용하여 피해 영향범위를 산출하였으며, 구면 확산과 원통형 확산 형태의 전달 손실을 사용하여 피해 영향범위를 예측해 왔다.^{3,4)}

그러나 이러한 방법들은 해역별 입사, 흡수, 흡음, 반사 등의 특성을 반영하지 못해 전파 보정 계수 선정 및 적용에 따라 전달 손실의 과대 또는 과소평가로 이어질 수 있고, 실제와 다른 결과를

초래할 수 있다. 이때 전달 손실은 측정 거리와 전파 보정 계수에 의해 결정된다. 전파 보정 계수는 수중에서 소리가 전파될 때 거리, 매질, 주파수 등에 따라 변하는 소리의 세기를 보정 하는 핵심 변수로, 수중 소음의 영향범위 예측 정확도를 향상시키는 역할을 한다.^{3,4)} 따라서 신뢰도 높은 수중 소음 영향평가 및 예측을 위해서는 환경변화에 따라 적합한 전파 보정 계수를 산출해야 한다.

본 연구는 실시간 변동되는 파고, 풍속 등과 같은 조건을 고려하기 위해 선박 두 대를 이용하여 선박 한 대를 소음원으로부터 최대한 근접하게 위치하여 고정하고, 다른 한 대는 등간격으로 거리를 이격시켜 동시간대 측정을 수행하였다. 또한, 거리, 매질 등에 따라 변화하는 전달 손실을 고려해야 한다. 따라서 측정을 통해 얻은 결과를 바탕으로 음원 준위를 예측하고 내부점법을 통해 예측한 음원 준위 값들의 편차가 최소값이 되는 전파 보정 계수 최적화를 수행하였다.

2. 이론적 배경 및 연구 방법

2.1 음원 준위 예측 방정식

음원 준위(Source Level)는 음원으로부터 1 m 떨어진 거리에서 측정되는 음압 준위(dB/uPa at 1 m)를 의미하는데, 소음원 주변으로부터 공사 및 설비의 오작동 등의 물리적, 안전상의 이유로 1 m 지점 내에서 직접적인 측정은 한계가 있다. 따라서 음원 준위는 배경소음, 실제 측정 소음, 거리에 따라 변화하는 전달 손실을 이용하여 나타내고 이를 역산하여 예측하는 방식으로 계산된다. 식 (1)은 음원 준위의 예측 방정식을 나타낸 것이다.

$$SL = DL + NL + TL \quad (1)$$

여기서, DL(Detective Level : 측정 음압 레벨)은 실제 측정 시 음압 수준을 의미한다. 또한 NL(Noise Level : 배경 소음)은 수중에서 일상적으로 나타나는 환경 소음에 의해 결정되고, TL (Transmission Loss : 전달 손실)은 음원에서부터 대상까지 전달되는 동안 손실되는 음압을 의미한다. TL은 음원과 대상 사이의 거리 및 주변 해양 환경에 따라 변화되기 때문에 구면 확산에 따른 거리 감쇠, 매질에 의한 흡수 손실로 식 (2)와 같이 따로 정의한다.

$$TL = \alpha_{eff} \frac{r}{1000} + N \log_{10} r \quad (2)$$

여기서, α_{eff} (Effective Attenuation coefficient : 유효 감쇠 계수)는 음파가 전파될 때 에너지 감쇠 계수를 나타내고(Korea ocean water: 0.18 at 100~300 Hz),⁶⁾ r 은 소음원으로부터 측정 지점까지의 거리, N(Spreading Calibration coefficient: 전파 보정 계수)은 음원이 바다에 전파될 때, 전파 형태에 따라 변화하는 계수를 나타낸다.

수중에서 소음이 발생하게 되면 매질을 따라 음압이 퍼지게 된다. 이러한 확산 현상으로 인해 거리가 늘어남에 따라 음압이 감소하고, 결과적으로 수신 지점에서의 전달 손실을 계산할 때 주요한 요인으로 작용하게 된다.

대표적인 확산 형태로는 소리가 모든 방향으로 균일하게 퍼지는 환경에서 발생하는 구면 확산과 수면과 해저에 의해 상하 경계가 형성된 환경에서 발생하는 원통형 확산이 존재한다.⁷⁾ 통상적으로 구면 확산의 전달 손실은 $20\log(r)$, 원통형 확산의 전달 손실은 $10\log(r)$ 으로 산출이 된다. 하지만 이렇게 산출된 결과는 측정 지점의 해양 환경을 고려하지 않고 이상적인 환경을 바탕으로 계산된 값을 의미한다. 실제로 우리나라 동해를 기준으로 전달 손실을 측정할 결과, 자갈 기반 해저면과 깊은 수심으로 인해 전달 손실이 $17\log(r)$ 로 다르게 나타나는 것을 확인하였다.^{3,4)}

2.2 전파 보정 계수 최적화

확산 형태만으로 전달 손실이 달라질 뿐만 아니라, 수심, 해저면의 매질 등 해양 환경에 따라 서로 전달 손실 값이 달라진다. 이는 전파 보정 계수를 해역별 특성과 환경을 반영하지 않고 고정된 이론값을 이용하기 때문이다. 따라서 전파 보정 계수 N 을 추정할 때, 측정 거리 및 해양 환경에 따른 오차를 최소화하고자 해양 환경에 맞는 전파보정계수 산출이 필요하다.

Fig. 1에서 보이는 바와 같이 선박 한 대(고정 선박)는 소음원(Sound Source)과 최대한 근접하게 위치하여 고정하고, 나머지 선박(이동 선박)은 등간격으로 이격하며 동시간대 측정을 수행하였다. 측정된 값을 통해 각 지점별 음원 준위를 예측하였고, 이격 거리에 따라 유사한 결과를 도출하기 위해서 전파 보정 계수를 내부점법을 이용한 최적화를 통해 전파 보정 계수를 구하였다. 내부점법(Interior point method)은 다음 식 (3)과 같이 정의한다.⁸⁾

$$\begin{aligned} \min_{X \in R^n} f(X) - \frac{1}{t} \sum_{i=1}^m \log(-g_i(X)) \quad (3) \\ \text{subject to : } AX = b \end{aligned}$$

식 (3)은 컨벡스 최적화 문제의 KKT(Karush - Kuhn - Tucker) 조건식으로 t 를 변화하며 내부의 중심 경로에 따라 최적의 해를 점근적으로 찾아가는 특성을 갖는다. 최적화 과정에서 사용된 목

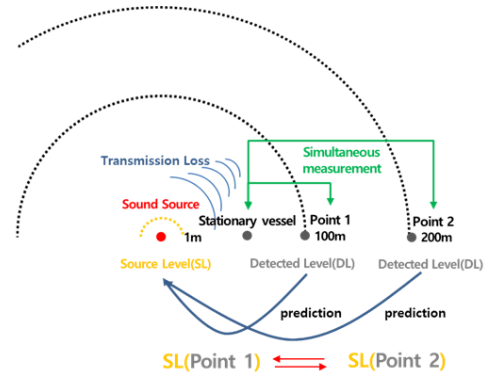


Fig. 1 Example of simultaneous measurement method

적 함수는 환경 및 거리에 따라 변함없는 예측 음원 준위 값을 산출하기 위해 식 (4)와 같이 고정 선박과 이동 선박의 음원 준위 예측 차이가 최소가 되는 값으로 설정하였다.

$$Obj : \sum_{n=1}^4 |SL_{P_n} - SL_{P_0}| \quad (4)$$

여기서, SL_{P_n} 은 이동 선박의 n 번째(1,2,3,4) 지점에서 예측 음원 준위 값을, SL_{P_0} 은 고정 선박의 예측 음원 준위 값을 나타낸다. 다른 최적화 방법으로 비선형 최소 제곱법, 담금질 기법과 비교 분석해본 결과 두 가지 방법 모두 내부점법과 계산 속도가 유사하고 최적화된 전파 보정 계수 값의 오차율도 유사하게 나타나는 것을 확인하였으나, 수렴 정도를 설정할 수 있다는 측면에서 상대적으로 정확성 확보가 뛰어난 내부점법을 이용하여 최적화를 수행하였다. 또한 동시 측정 값(음압 레벨)을 이용해 최적의 전파 보정 계수를 적용한 고정 선박과 이동 선박의 예측 음원 준위를 산출하여 비교를 통해 예측 정확도를 평가하였다.

3. 측정 장비 및 방법

수중에서 발생하는 소음을 측정하기 위해 수중 음향센서 Hydrophone을 사용하였다. 데이터의 신뢰도를 위해 2개의 센서를 사용하였고, 수심 10 m에서 2~5분간 수중 소음을 측정하였다. 데이터 분석 장치는 B&K사의 Pulse 3560C 장비를 사용하였으며, 측정 센서 및 장비의 세부 사양은 Table 1에 나타내었다.

일반적인 서남해 해상풍력 발전기의 시동 풍속은 최소 3 m/s 이상에서 가동되므로 풍속이 3 m/s 이하일 때 배경소음을 측정하였다.²⁾ 풍력 발전기가 가동될 때 수중 소음을 측정했고 측정 당시 날씨는 맑음, 풍속은 3~5 m/s, 파고는 0.1~0.3 m의 높이였으며, 항공기 및 선박 통과 등에 의한 인위적인 외부 소음은 기록하여 분석에서 제외하였다. 또한 서남해는 해저면이 자갈로 이루어진 동해안과 달리, 진흙과 모래로 이루어져 있고 수심이 일

정하지 않다는 특성 때문에 다양한 해양 환경의 조건을 충족한다고 판단하여 서남해 지역을 측정 지역으로 선정하였다.²⁾

따라서 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 선박 한 대를 소음원과 최대한 근접하게 위치시킨 후(50 m) 닻을 내려 고정하고, 또 다른 선박 한 대를 고정 선박으로부터 250 m, 500 m, 750 m, 1 km까지

Table 1 Measurement equipment specifications

Type		Product name	Detail
Pulse 3560C	3109	4/2-ch. Input/output Module	Direct/CCLD/ Mic. Preamp. 1 Tacho Conditioning
	7537A	5/1-ch. Input/output Controller Module	Direct/CCLD 1 Tacho Conditioning
Hydrophone	8105	2606830	53.9 uV/Pa

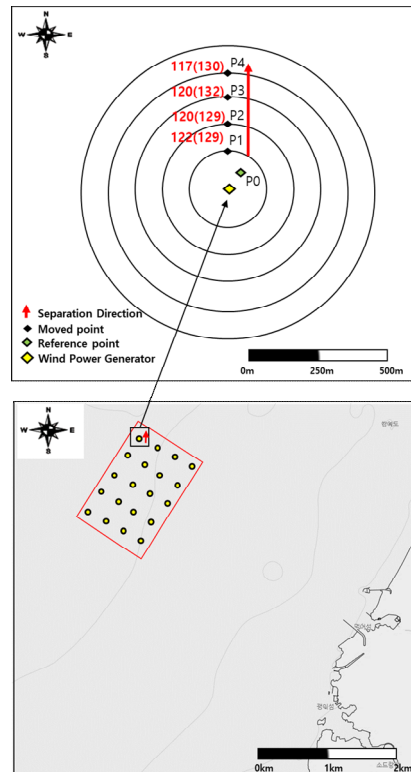


Fig. 2 Measurement point and sequence

Table 2 Measurement point

Measurement	Case1	Case2	Case3	Case4
Reference point	P0			
Moved point	P1	P2	P3	P4

등간격으로 이격시켜 두 선박에서 동시에 측정을 수행하였다. 이를 바탕으로 Table 2 와 같이 Case 를 구분하여 정리하였다.

4. 전파 보정 계수 최적화 결과

수중에서 발생하는 배경소음은 수심, 수중 음속, 파도 등과 같은 환경적 요인에 따라 영향을 받게 된다.⁹⁾ 실제 측정 당시 배경소음을 측정된 결과, 115 dB/1uPa로 측정되었다.

측정 결과는 Table 3에 나타내었으며, 풍속 세기에 따라 고정 선박에서는 129~132 dB/1uPa의 음압 레벨이, 이동 선박에서는 최대 117~122 dB/1uPa의 음압 레벨이 측정되었다. 고정 선박에서 측정된 값과 비교하였을 때, 이동 선박의 소음 값은 소음원에서 거리가 멀어질수록 소음 레벨이 점차 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 지점별 측정된 결과를 바탕으로 예측된 음원 준위의 평균 오차가 가장 적게 나타나는 값을 전파 보정 계수로 설정하였다. 앞서 기술한 바와 같이 내부점법을 이용하여 최적의 전파 보정 계수 값을 산출한 결과, 8.3의 값이 선정되었고, 이 값을 식 (2)에 대입하여 이동 선박과 고정 선박에 대한 음원 준위를 각각 예측하고 비교하여 전파 보정 계수의 적합한 선정 여부와 예측 정확도 평가를 수행하였다. 이동 선박과 고정 선박의 예측 음원 준위는 Table 4에 나타났다. 비교 결과, 각각의 예측 음원 준위 값이 높은 수준의 유사성을 보였다.

Fig. 3은 고정 선박과 이동 선박에서 측정한 음압 레벨을 1/3 Octave band와 Contour map으로 나타낸 결과이다. Case 1~4는 거리의 증가에 따라 전체 음압 레벨이 낮아지는 양상을 보였으며, 주파수별 분포 특성은 전반적으로 유사한 경향을 나타냈기 때문에 Case 1의 결과만을 제시하였다.

Table 3 Measurement results

Sound level (dB/1uPa)				
Case	Case1	Case2	Case3	Case4
Reference point	129	129	132	130
Moved point	122	120	120	117

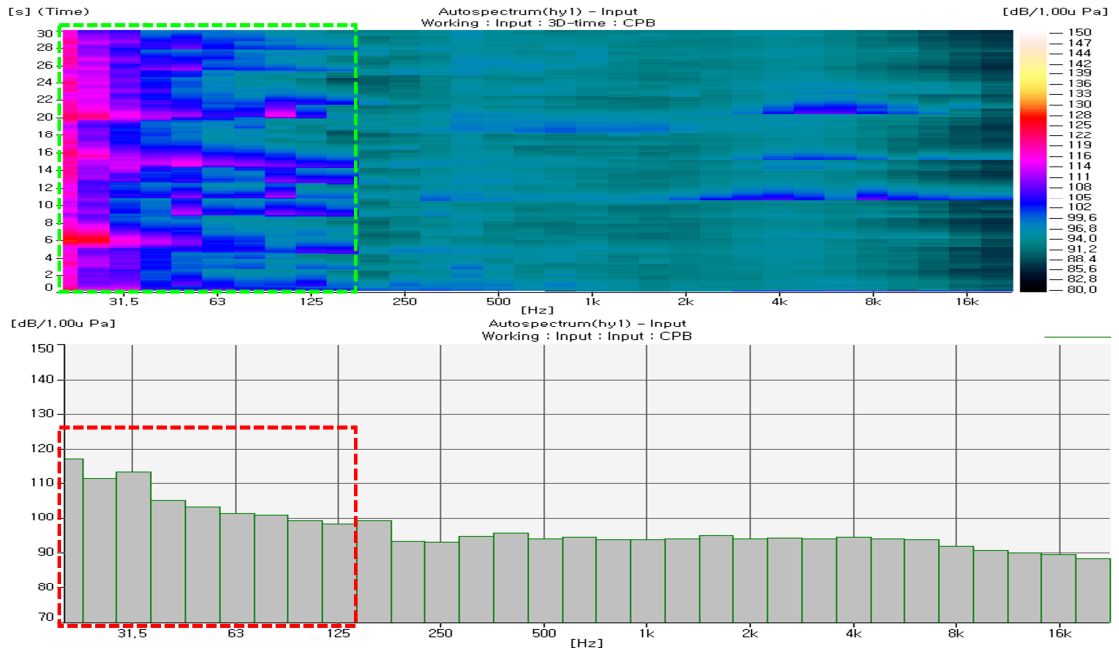
Table 4 Predicted Source Level results

Sound Level (dB/1uPa)				
Case	Case1	Case2	Case3	Case4
Reference point	143	143	146	144
Moved point	143	144	145	144

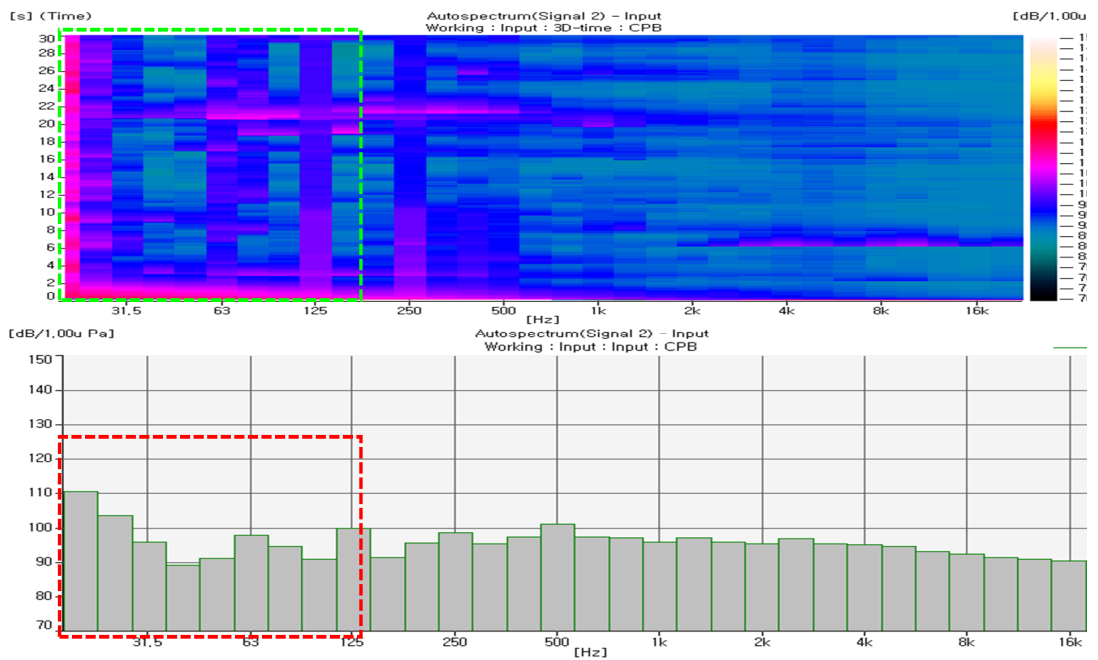
1/3 Octave band는 측정된 특정 시간대의 진폭 정도를 밴드별로 더욱 상세히 확인하기 위해 사용하였고, Contour map은 측정시간 동안 발생하는 대역별 진폭 레벨의 변화 정보를 확인하기 위해 사용하였다. 약 500 Hz 이하의 저주파 대역에서 음압 레벨이 높게 나타나는 것을 확인할 수 있는데, 이는 풍속이 증가함에 따라 파도의 영향과 풍력 발전기에서 발생하는 수중 소음에 의한 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 해상풍력 운영 시 소음피해 범위를 예측하기 위한 수심, 해저면 특성 등 해양 환경에 따라 변화하는 음압 레벨을 고려하는 전파 보정 계수 산출을 위해 동시 측정을 진행하였다. 측정은 서남해 해상풍력 실증단지에서 진행하였으며 동시 측정을 위해 두 대의 선박을 활용하였다. 두 선박 중 하나는 소음원으로부터 50 m 떨어진 지점에 고정하고 나머지 하나는 이격 거리를 250 m 간격으로 증가시키며 측정을 진행하였다. 해상 풍력기 가동 전후 소음을 비교한 결과, 가동 시 배경소음이 약 15 dB 증가한 것으로 나타났으며 특히, 500 Hz 이하의 저주파 대역에서 소음레벨이 증가한 것을 확인할 수 있었다.



(a) Case 1 (P0)



(b) Case 1 (P1)

Fig. 3 Contour map & 1/3 Octave band

측정 결과, 풍력 발전기 즉, 고정된 위치에서는 129~132 dB/uPa, 이격 거리에 따라서는 117~122 dB/1uPa의 음압 레벨이 측정되었다. 측정된 값을 바탕으로 예측 음원 준위 값이 최소가 되는 전파 보정 계수 값은 8.3으로 산출되었으며, 예측 음원 준위는 141~144 dB/1uPa로 계산되었다. 또한 이동 선박과 고정 선박의 예측 음원 준위를 비교 검증하여 선정된 전파 보정 계수의 적합도를 평가하였고, 예측 음원 준위의 높은 유사성을 통해 최적의 전파 보정 계수가 선정됨을 입증하였다. 이러한 결과를 통해 해역별 특성을 고려하여 최적의 전파 보정 계수를 선정하고, 수중 소음에 대한 피해 영향범위를 더 정확하게 예측할 것으로 기대된다.

후 기

“이 논문은 2025년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥의 지원을 받아 수행된 연구임(20210427, 과학기술기반 해양환경영향평가 기술개발).”

Author contributions

D. H. Ham & J. J. Lee & J. H. Seong & S. M. Choo; Vibration analysis, Underwater Acoustics. K. S. Moon & Y. K. Bae; Resources provide. B. K. Choi; Project administration.

References

1. J. H. Lee, S. G. Lee and J. O. Kwak, 2025, “Frequency Characteristics of Acoustic Emission Signals and Classification of Damage Mechanisms for Wind Turbine Blade Root Materials”, *Journal of Power System Engineering*, 29(1), 71-81. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2025.29.1.071>)
2. Y. G. Yoon, 2023, “Measurement and monitoring of underwater noise generated by operational offshore wind turbine in Southwest offshore wind farm”, PhD dissertation, Hanyang University, Korea.

3. J. R. Yoon, S. W. Lee, S. Y. Ahn, J. H. Park, J. W. Bae and M. S. Ahn, 2006, “Effects of Underwater Noise on Fishes”, *The Korean Society for Noise and Vibration Engineering* 702-709.
4. J. H. Park and J. R. Yoon, 2017, “Overview of anthropogenic underwater sound effects and sound exposure criteria on fishes”, *Journal of the Korean society of Fisheries and Ocean Technology*, 53(1), 19-40. (<https://doi.org/10.3796/KSFT.2017.53.1.019>)
5. J. M. Ha, J. M. Lee, J. H. Lee, D. S. Gu and B. K. Choi, 2012, “Prediction of Effect Zone for Marine Organisms Using Distance Attenuation Equations for Oceanic Noise”, *Journal of Ocean Engineering and Technology* 26(2), 14-19. (<https://doi.org/10.5574/KSOE.2012.26.2.014>)
6. I. Rozenfeld, W. M. Carey, P. G. Cable and W. L. Siegmann, 2001, “Modeling and analysis of sound transmission in the strait of Korea”, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 26(4), 809-820. (<https://doi.org/10.1109/48.972121>)
7. B. J. Koh, C. W. Lee, J. E. Lee and K. H. Lee, 2022, “Analysis of Underwater Radiated Noise in Accordance with the ISO Standard and Class Notations Using the Hybrid Sound Propagation Model”, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 59(6), 362-371. (<https://doi.org/10.3744/STNAK.2022.59.6.362>)
8. K. S. Kim, 2006, “Security Constrained Economic Dispatch using Interior Point Method”, MS thesis, Jungang University, Korea.
9. I. Y. Jeong, S. H. Min and D. G. Paeng, 2020, “Moored measurement of the ambient noise and analysis with environmental factors in the coastal sea of Jeju Island”, *The Journal of the Acoustical Society of Korea*, 39(5), 390-399. (<https://doi.org/10.7776/ASK.2020.39.5.390>)