

대서양 연어 생육환경 소음 수준 적합성 평가를 위한 환경소음 영향 예측 및 분석

Prediction and Analysis of Environmental Noise Effect for Evaluating the Suitability of Noise Level in Atlantic Salmon Growing Environment

김민수* · 이상준†
Min Soo Kim* and Sang Jun Lee†

(Received June 3, 2024 ; Revised September 14, 2024 ; Accepted September 24, 2024)

Key Words : Environmental Noise(환경소음), Acoustics FEM Numerical Analysis(유한요소법 기반 음향 수치 해석), Hearing Threshold(청각역치), Atlantic Salmon(대서양 연어)

ABSTRACT

In this study, environmental noise was analyzed and its effect was predicted to evaluate the suitability of noise level in Atlantic salmon growing environment. First, the environmental noise in atmosphere was measured at major positions within the aquaculture project candidate site located near Gimhae airport and light rail transit. Using the frequency analysis, it was found that the overall noise characteristics at the site is dominated by aircraft noise. Further, to derive the underwater noise in a realistic and efficient way using FEM numerical analysis, the measured noise was imported as input to the FEM model implemented at the scale of a water tank; the acoustic propagation characteristics originated from the aircraft noise source were considered as plane waves in the far-field through a simple theoretical approach. The predicted underwater noise results from the acoustic numerical analysis were compared with hearing threshold of Atlantic salmon to evaluate the suitability of noise level in water tank. The approach and process used in this study may prove to be an effective and practical method to quantitatively predict and analyze environmental noise at a relatively large scale using a combination of measurement and FEM numerical analysis.

기 호 설 명

A : 음파의 진폭
 c : 음속
 k : 파수
 p : 음압
 r : 구형파의 전파 반경

u : 매질입자속도
 Z_s : 고유 음향 임피던스
 λ_{max} : 관심 주파수대역에서의 음파의 최대 파장
 λ_{min} : 관심 주파수대역에서의 음파의 최소 파장
 ρ_0 : 매질(공기)의 밀도
 ω : 각주파수

† Corresponding Author ; Member, Architecture Technology Research Center, GS Engineering & Construction Co., Ltd., Head
E-mail : sjlee01@gsenc.com

* Member, Eco-friendly Architecture Research Team, GS Engineering & Construction Co., Ltd., Researcher

A part of this paper was presented at the KSNVE 2024 Annual Spring Conference

‡ Recommended by Editor Jooyoung Hong

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

1. 서 론

전세계적으로 연어시장은 무려 약 159억 8천만 달러 규모로 추산되고(22년 기준), 제공되는 연어의 약 70%가 양식으로 생산된다^(1,2). 특히, 어종별로 가장 높은 비율을 차지하는 대서양 연어의 경우 대부분 노르웨이와 칠레에서 생산된다⁽³⁾. 국내에서는 전량 수입에 의존하고 있는 실정으로, 현재는 양식산업의 활성화와 첨단화를 위해 부산시 등 총 6개소를 대상으로 스마트 양식 클러스터 조성 사업을 진행하고 있다⁽⁴⁾.

당사에서도 신사업의 일환으로 부산시와 업무협약을 체결하여 국내 최초로 폐쇄식 육상순환여과 방식의 연어 양식사업을 추진하고 있는데⁽⁵⁾, 김해공항과 경전철로 인근에 위치한 양식사업 후보 부지의 지리적 요건으로 인해 항공기와 철도 소음 등의 환경소음이 이슈가 대두되었다. 대서양 연어와 같은 어류의 경우, 일반적으로 소음에 의해 신체기형이나 발달 지연, 성장률 저하, 높은 스트레스 호르몬 분비, 신체상태 악화 등과 같은 부정적인 영향이 나타날 수 있는 것으로 알려져 있다⁽⁶⁾. 그러므로, 해당 부지에서 대서양 연어의 생육환경 소음 수준에 대한 적합성 평가가 요구되고, 이를 위해 양식장 시공에 착수하기 전 대기에서의 환경소음에 따른 양식장 수조 내 수중에서의 소음을 사전에 예측하여 그 영향에 대한 명확한 분석이 이루어질 필요가 있다.

우선, 수중소음이 어류를 포함한 해양생물에 미치는 영향과 관련된 연구나 조사들은 수차례 보고되어 왔다⁽⁶⁻¹¹⁾. 하지만, 이러한 사례들은 기본적으로 수중에서의 소음원과 그에 따른 소음 수준을 고려한 경우로서, 소음원이 대기와 같은 공기중에서 발생할 경우 이와 직접적으로 대응하기에는 무리가 있다. 아쉽게도, 공기중에서의 소음에 대해 수중에서의 해양생물이 받는 영향과 관련된 연구는 매우 드물고⁽¹²⁾, 나아가 공기중에서의 소음 수준에 대해 다양한 해양생물별 소음 영향과 관련된 가이드라인 역시 보고된 바가 없다. 그러므로, 수중에서의 대서양 연어의 생육환경 소음 수준에 대한 적합성을 평가하기 위해, 공기중으로부터 기인된 수중소음을 정량적으로 파악하는 것이 중요하다.

이와 관련하여, 공기중에서 수중으로 전파하는 음파 또는 전달되는 소음을 이론적으로 계산하거나 수치해석적으로 도출하기 위한 연구들이 이루어져 왔다⁽¹³⁻¹⁷⁾.

하지만, 실제로 많은 경우의 환경소음은 다양한 소음원에 의해 복합적으로 발생하고 소음원의 움직임과 그에 따른 도플러 효과(Doppler effect) 등 그 특성 또한 매우 복잡하므로⁽¹⁷⁾, 이를 충분히 반영하기 위해 측정값을 적용하는 것이 가장 현실적이다. 또한, 수중에서의 소음을 유의미한 범위에서 예측하기 위해 공기중 소음의 측정값에 대한 분석을 통해 주요 환경소음과 그 전파특성을 파악할 필요가 있다. 그리고 양식장 수조 환경과 같이 특정 형상과 사이즈, 경계조건 등을 갖는 시스템에서의 수중소음을 최대한 정확히 예측하는 데에는 FEM(유한요소법) 기반의 수치해석이 적합할 것으로 판단된다.

이 연구에서는 해당 양식사업 후보 부지의 주요 지점에서 소음을 측정하고, 상용해석툴인 COMSOL Multiphysics(V6.2)를 이용하여 FEM 기반의 음향 수치해석을 통해 환경소음 영향을 예측하였다. 최종적으로, 이를 대서양 연어의 청각역치(hearing threshold)^(11,18,19)와 비교하고 분석하여 환경소음으로 인한 수조 내 수중소음 수준에 대한 적합성을 평가하였다. 특히, 항공기 소음 등과 같은 대기에서의 환경소음으로부터 기인된 양식장 수조 내 수중소음을 수치해석적으로 예측하여 어류가 받는 영향을 분석한 연구는 전무한 실정으로, 이 연구에서의 과정이 측정과 수치해석 방법을 복합적으로 이용하여 비교적 큰 규모의 스케일에서의 환경소음 영향을 사전에 정량적으로 예측하고 분석할 수 있는 효과적이고 실용적인 방법이 될 것으로 기대한다.

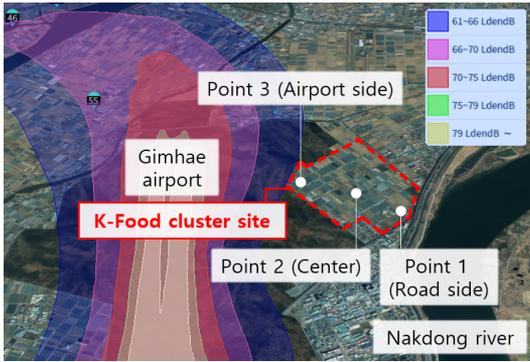
2. 소음 측정 및 분석

2.1 측정 개요

양식사업 후보 부지(K-food 클러스터 부지)는 Fig. 1과 같이 김해공항과 낙동강 주변에 위치해 있고, 이중 당사에서 고려하고 있는 주요 지점 3곳(도로쪽 및 중앙쪽, 공항쪽)을 측정 위치로 고려하였다.

해당 현장 조사상, 1번 지점(도로쪽)의 경우 인근 자동차 주행과 기계 작업, 동물 소리(새 지저귐 및 개 짖는 소리 등), 경전철 차량 주행 소리 영향이 컸다. 2번 지점(중앙쪽)에서부터 경전철 차량 주행 소리와 함께 항공기(여객기 및 군용기 등) 소리 영향이 커지기 시작하고, 3번 지점(공항쪽)의 경우 대부분 항공기 소리만이 주요 소음으로 인지되었다. 측정 당시 항공기 소리의 경우 약 5분~10분 간격으로, 경전철 차량

주행 소리의 경우 약 10분~15분 간격으로 발생하였고, 각 지점별로 소음 측정/분석기(B&K 2270 sound level meter/analyzer)를 사용하여 음압레벨(sound pressure level)을 각각 약 5분간 3회 이상 측정하였다.



(a) Gimhae airport noise map and surrounding environment



(b) Measuring positions within the K-food cluster

Fig. 1 Noise measurement location and nearby environment

2.2 측정결과 분석

양식사업 후보 부지 내 주요 지점에서 측정한 음압레벨(등가소음, 공기중, Z-가중값) 결과는 Fig. 2 및 Table 1과 같다.

우선, Table 1에서 전체 주파수대역에서의 overall 값은 1번 지점에서 3번 지점으로 갈수록 증가하는 것을 볼 수 있고, 이는 모든 지점에서의 배경소음(background noise)이 서로 유사한 수준이라는 전체 하에 공항에 가까워질수록 항공기 소음 영향이 커지는 것을 의미한다. 다만, 평균값의 경우 1번 지점(46.5 dB(Z))이 2번 지점(45.9 dB(Z))에 비해 약간 더 큰 값을 나타내는데, 이는 1번 지점에서의 인근 환경소음 영향으로 인한 결과로 추정할 수 있고 Fig. 2의 그래프 상에서도 그 이유를 대략적으로 파악할 수 있다(약 1000 Hz 이상의 주파수대역에서, 1번 지점에서의 음압레벨은 2번 지점에서의 경우에 비해 모든 구간에서 더 크다).

12.5 Hz ~ 1000 Hz의 주파수대역에서의 경우 전체 주파수대역에서의 경우와 달리, overall 값 뿐만 아니라 평균 음압레벨도 공항에 가까워질수록 증가하는 것을 볼 수 있고, 이를 통해 공항과의 거리에 따른 항공기 소음 영향에 대한 경향성은 상대적으로 낮은 주파수대역에서 더 잘 나타나는 것을 알 수 있다. 또한, 일반적으로 낮은 주파수대역의 음파일수록 더 멀리 전파된다는 사실을 고려할 때, 이는 항공기 소음이 주로 한 지점에만 국한되어 있는 것이 아니라 여러 지점에 걸쳐 전역적인 영향을 끼칠 가능성이 높을 것으로도 추정할 수 있다. 그리고 모든 지점에서 해당 주파수대역에서의 overall 값은 전체 주파수대역에서의 overall 값과 거의 동일한 수준이고, 1000 Hz ~ 8000 Hz의 주파수대역에서의 경우와 비교할 때 overall 값과 평균 값 모두 훨씬 더 높기 때문에, 해당 주파수대역에서의 항공기 소음이 1000 Hz 이상의 다른 환경소음에

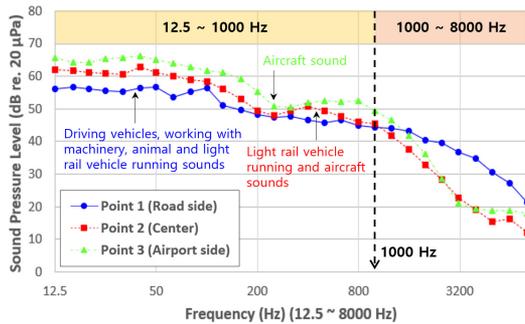


Fig. 2 Sound pressure level(Z-weighting) measurement results at major positions

Table 1 Sound pressure level(Z-weighting) measurement results for each position and frequency range

Measuring positions		Point 1	Point 2	Point 3
All freq. band (12.5 Hz ~ 8000 Hz)	Overall	66.6 dB	71.4 dB	75.2 dB
	Average	46.5 dB	45.9 dB	49.3 dB
12.5 Hz ~ 1000 Hz	Overall	66.5 dB	71.4 dB	75.2 dB
	Average	51.5 dB	55.2 dB	59 dB
1000 Hz ~ 8000 Hz	Overall	50.1 dB	47.6 dB	51.8 dB
	Average	36.2 dB	27.2 dB	29.9 dB

비해 전반적으로 더 주요한 영향을 끼칠 것으로 생각할 수 있다. 물론 이러한 분석만으로는 근거가 다소 부족할 수 있기 때문에, 추가적으로 각 지점에서의 배경소음과 함께 대상소음(target noise)을 도출하여 이를 좀 더 명확히 분석할 필요가 있다.

참고로, Fig. 2 및 Table 1과 같이 측정한 소음은 환경소음임에도 불구하고, 대부분의 경우와 달리 A-가중값(A-weighting)이 아닌 Z-가중값(Z-weighting)을 적용하여 도출하였는데, 그 주된 이유는 궁극적으로 인간과 연어 간 소리에 대한 청각역치와 주파수별 민감도가 서로 다르기 때문이다^(11,18-20).

Fig. 2 및 Table 1과 같이 측정한 소음을 A-가중값 음압레벨 결과로 나타낼 경우, Fig. 3 및 Table 2와 같이 도출된다. Table 1에서의 경우와 같이, 전체 주파수대역에서의 overall 값은 1번 지점에서 3번 지점으로 갈수록 증가하는 것을 볼 수 있고, 12.5 Hz ~ 1000 Hz의 주파수대역의 경우 overall 값과 평균값 모두 공항에 가까워질수록 증가하는 것을 볼 수 있다. 즉, 이처럼 각 주파수대역에서 지점에 따른 overall 값 및 평균 음압레벨의 경향성은 Z-가중값 음압레벨 결과에서

의 경우와 동일하게 나타난다.

하지만, 이 경우 주파수대역에 따라 달라지는 A-가중값을 적용함으로써, 특히 12.5 Hz ~ 1000 Hz의 주파수대역에서의 음압레벨은 동일한 주파수대역에서의 Z-가중값 음압레벨에 비해 상당히 낮아지게 되어, Z-가중값 음압레벨 경우에 비해 1000 Hz ~ 8000 Hz의 주파수대역에서의 overall 값과의 차이가 크게 감소한다. 또한, 1번 지점에서의 평균값은 12.5 Hz ~ 1000 Hz의 주파수대역에서의 경우(28.8 dB(A))가 1000 Hz ~ 8000 Hz의 주파수대역에서의 경우(36.8 dB(A))에 비해 더 작게 나타난다. 즉, 인간의 청감을 고려할 경우 실제 소음에 대한 경향성이 다소 다르게 분석될 여지가 있다.

각 주요 지점에서 측정한 배경소음 결과는 Fig. 4 및 Table 3, Table 4와 같다. 우선 Z-가중값 음압레벨의 경우, 전체 주파수대역에서는 지점들 간 0.4 dB(Z) ~ 4.1 dB(Z) 그리고 12.5 Hz ~ 1000 Hz의 주파수대역에서도 0.4 dB(Z) ~ 4.1 dB(Z), 1000 Hz ~ 8000 Hz의 주파수대역에서는 2.5 dB(Z) ~ 7.5 dB(Z) 정도 차이가 난다. 또한 A-가중값 음압레벨의 경우, 전체 주파수대역에서는 지점들 간 1.2 dB(A) ~ 4.7 dB(A) 그리고 12.5 Hz ~ 1000 Hz의 주파수대역에서는 2.1 dB(A) ~ 4.2 dB(A), 1000 Hz ~ 8000 Hz의 주파수대역에서는 2.6 dB(A) ~ 7.8 dB(A) 정도 차이가 나타난다. Z-가중값과 A-가중값 음압레벨 두 경우 모두 상대적으로 높은 주파수대역에서 낮은 주파수대역에서의 경우에 비해 지점들 간 배경소음의 차이가 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 전반적으로, 지점들 간 배경소음이 서로 다소 차이가 있기 때문에, 각 지점에서의 대상소음과 그에 따른 기여도를 파악할 필요가 있다.

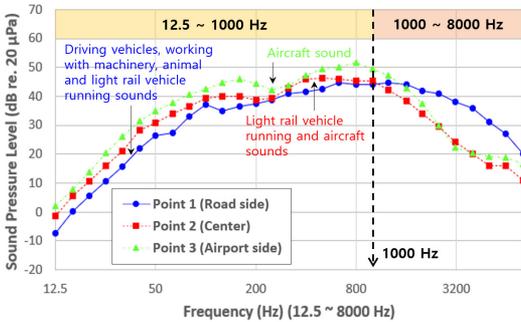


Fig. 3 Sound pressure level(A-weighting) measurement results at major positions

Table 2 Sound pressure level(A-weighting) measurement results for each position and frequency range

Measuring positions		Point 1	Point 2	Point 3
All freq. band (12.5 Hz ~ 8000 Hz)	Overall	54 dB	54.6 dB	58.6 dB
	Average	31 dB	30.4 dB	33.8 dB
12.5 Hz ~ 1000 Hz	Overall	51.9 dB	54.1 dB	58.1 dB
	Average	28.8 dB	32.5 dB	36.3 dB
1000 Hz ~ 8000 Hz	Overall	50.8 dB	47.9 dB	52.2 dB
	Average	36.8 dB	27.7 dB	30.4 dB

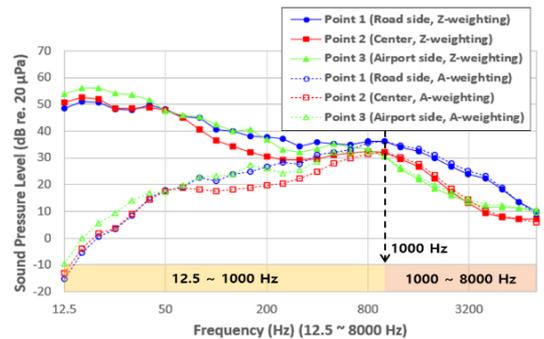


Fig. 4 Sound pressure level(Z-weighting and A-weighting) measurement results of background noise at major positions

Table 3 Sound pressure level(Z-weighting) measurement results of background noise for each position and frequency range

Measuring positions	Point 1	Point 2	Point 3
Overall in all freq. band (12.5 Hz ~ 8000 Hz)	58.7 dB	59.1 dB	62.8 dB
Overall dB in the freq. band of 12.5 Hz ~ 1000 Hz	58.7 dB	59.1 dB	62.8 dB
Overall dB in the freq. band of 1000 Hz ~ 8000 Hz	40.1 dB	35.1 dB	32.6 dB

Table 4 Sound pressure level(A-weighting) measurement results of background noise for each position and frequency range

Measuring positions	Point 1	Point 2	Point 3
Overall in all freq. band (12.5 Hz ~ 8000 Hz)	43.6 dB	38.9 dB	40.1 dB
Overall in the freq. band of 12.5 Hz ~ 1000 Hz	41.8 dB	37.6 dB	39.7 dB
Overall in the freq. band of 1000 Hz ~ 8000 Hz	40.7 dB	35.5 dB	32.9 dB

Table 5와 Table 6은 각 주요 지점에서의 대상소음 결과와 대상소음의 기여도를 나타낸다. 대상소음의 경우, Table 1 및 Table 2와 같이 측정된 전체 소음 결과 중 overall 값과 Table 3 및 Table 4와 같이 측정된 배경소음 결과를 토대로 계산하였고(측정한 전체 소음과 배경소음 간의 차이와는 별개로, 모든 전체 소음값들을 보정치로 보정하였다), 각 지점에서 모두 전체 주파수대역에서의 대상소음을 기준으로 주파수대역별 대상소음의 기여도를 계산하였다. 이 때, 12.5 Hz ~ 1000 Hz 및 1000 Hz ~ 8000 Hz의 주파수대역에서 각각 계산한 대상소음의 기여도의 합이 100%를 초과할 경우, (모든 지점에서 12.5 Hz ~ 1000 Hz의 주파수대역에서의 대상소음이 1000 Hz ~ 8000 Hz의 주파수대역에서의 대상소음에 비해 큰 점을 고려하여) 12.5 Hz ~ 1000 Hz의 주파수대역에서의 대상소음의 기여도를 먼저 계산한 후 이에 맞춰 1000 Hz ~ 8000 Hz의 주파수대역에서의 대상소음의 기여도를 도출하였다. 참고로, 대상소음은 소수점 첫째 자리에서 반올림하여 도출하는 것이 일반적이지만, 보다 정확한 기여도 계산을 위해 소수점 첫째 자리까지 유효숫자로 도출하였다.

우선 앞의 2.1 측정 개요에서 언급하였듯이, 해당

Table 5 Sound pressure level(overall, Z-weighting) results and contribution of target noise for each position and frequency range

Measuring positions		Point 1	Point 2	Point 3
All freq. band (12.5 Hz ~ 8000 Hz)	Target	65.8 dB	71.1 dB	74.9 dB
	Contribution	100 %	100 %	100 %
12.5 Hz ~ 1000 Hz	Target	65.7 dB	71.1 dB	74.9 dB
	Contribution	97.7 %	100 %	100 %
1000 Hz ~ 8000 Hz	Target	49.6 dB	47.3 dB	51.7 dB
	Contribution	2.3 %	0 %	0 %

Table 6 Sound pressure level(overall, A-weighting) results and contribution of target noise for each position and frequency range

Measuring positions		Point 1	Point 2	Point 3
All freq. band (12.5 Hz ~ 8000 Hz)	Target	53.6 dB	54.5 dB	58.5 dB
	Contribution	100 %	100 %	100 %
12.5 Hz ~ 1000 Hz	Target	51.5 dB	54 dB	58 dB
	Contribution	61.7 %	89.1 %	89.1 %
1000 Hz ~ 8000 Hz	Target	50.4 dB	47.6 dB	52.1 dB
	Contribution	38.3 %	10.9 %	10.9 %

현장 조사상, 1번 지점의 경우 인근 자동차 주행과 기계 작업 소리, 동물 소리, 경전철 차량 주행 소리 그리고 2번 지점의 경우 경전철 차량 주행 소리와 항공기 소리, 3번 지점의 경우 항공기 소리가 주요 소음으로 파악된 상황이다.

전체 주파수대역에서, Table 5와 Table 6에서 3번 지점에서의 대상소음인 항공기 소음(각각 74.9 dB(Z) 및 58.5 dB(A))이 모든 지점에서의 경우 중 가장 크게 나타났고, 2번 지점에서의 대상소음인 경전철 차량 주행 소음과 항공기 소음이 함께 섞인 소음(각각 71.1 dB(Z) 및 54.5 dB(A))이 그 다음으로 크게 나타났다.

12.5 Hz ~ 1000 Hz의 주파수대역에서의 경우, Table 5와 Table 6에서 대상소음과 기여도가 공항에 가까워 질수록 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한, 해당 주파수대역에서의 기여도가 1000 Hz ~ 8000 Hz의 주파수대역에서의 경우에 비해 대체로 훨씬 더 크게 나타나는

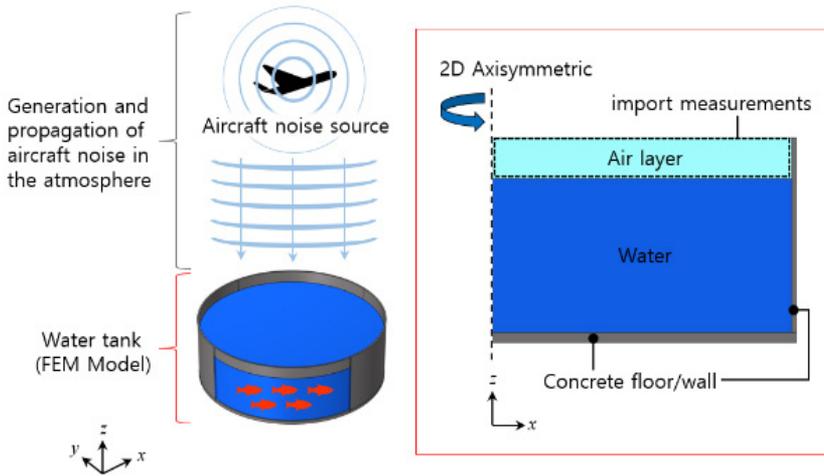


Fig. 5 Schematics of modeling overview

데, 이를 통해 항공기 소음은 상대적으로 낮은 주파수대역에서 보다 지배적으로 나타나는 소음으로 판단할 수 있다. 특히, Table 5에서는 모든 지점에서 해당 주파수대역에서의 대상소음은 전체 주파수대역에서의 대상소음과 거의 동일한 수준이다. 1000 Hz ~ 8000 Hz의 주파수대역에서의 경우 Table 5와 Table 6에서 모두, 3번 지점에서의 대상소음(각각 51.7 dB(Z) 및 52.1 dB(A))이 모든 지점에서의 경우 중 가장 크게 나타났고, 특히 2번 지점보다 더 크게 나타난 것으로 볼 때 항공기 소음이 경전철 차량 주행 소음에 비해 상대적으로 높은 주파수대역에서도 더 크게 나타나는 소음으로 판단할 수 있다. 하지만, 해당 두 지점을 포함한 모든 지점에서의 기여도는 모두 12.5 Hz ~ 1000 Hz의 주파수대역에서의 경우에 비해 각각 현저히 낮은 수준으로, 상대적으로 낮은 주파수대역에서의 소음에 비해 영향이 매우 적을 것으로 볼 수 있다.

결론적으로 앞에서의 설명(Fig. 2 및 Table 1 관련)과 함께, 양식사업 후보 부지에서의 전반적인 소음특성은 결국 항공기 소음에 의해 지배된다고 판단할 수 있다.

3. 해석 및 분석/고찰

3.1 모델링 개요 및 구성

대기에서의 항공기 소음에 따른 양식장 수조 내 수중에서의 소음을 예측하는 전 과정을 FEM 해석모델만으로 구현하여 실제 수중소음 측정값에 근사할 정도로 설득력 있는 결과를 도출하기 위해서는, 기본적

으로 항공기 소음원과 대기 영역을 실제와 충분히 동일하게 구현할 수 있어야 한다. 구체적으로, 항공기 소음원의 음향/유동 특성⁽²¹⁾ 소음원 이동에 따른 효과(대표적으로, 도플러 효과)⁽¹⁷⁾, 대기에서의 기류 변화 등을 모두 반영해야 하는데, 이는 일반적인 수치해석 관점에서 매우 복잡하고 한계가 있으며(모델링 및 해석 시간, 리소스 등) 실무적으로도 비효율적이다.

이러한 맥락에서, Fig. 5와 같이 전체 대상 영역 중앙식장 수조 영역만을 FEM 해석모델로 구성하고 항공기 소음원의 물리적 특성/역학적 상태와 대기에서의 현상 등에 따른 효과가 반영된 실제 측정값을 해석모델에 인풋으로 적용하여, 해석을 통해 수중소음을 도출하는 방법이 가장 현실적이고 효율적인 방법일 것이다. 이에, Fig. 5와 같이 해석모델의 경우 수면 위 약간의 공기층과 담수가 포함된 수조를 모델링 영역으로 고려하였고, 측정값의 경우 Fig. 2와 같이 양식사업 후보 부지 내 주요 지점에서 측정된 음압레벨(등가소음, 공기중, Z-가중값)을 적용하였다. 구체적으로, 측정된 소음은 해석모델의 공기층에 적용되는데, 해석상 합리적인 음향 조건을 적용하기 위해 측정된 소음의 전파특성을 파악할 필요가 있다.

편의상, 항공기 소음원을 구형파(spherical wave)를 발생시키는 단극음원(monopole)으로 고려하면⁽²²⁻²⁵⁾, 일반적으로 식(1)과 같이 구형파에 대한 선형 음파방정식(방위각 무시)으로부터 음압에 관한 식을 도출할 수 있고, 선형 오일러 방정식(linearized Euler's equation)을 이용하여 매질입자속도에 관한 식을 식(1a)~식(1c)와 같이 도출할 수 있다.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}, \quad p = p(r, t) \tag{1a}$$

$$p(r, t) = \frac{A}{r} e^{-ikr} e^{i\omega t} \tag{1b}$$

$$u(r, t) = \frac{1}{i\rho\omega} \frac{A}{r^2} (1 + ikr) e^{-ikr} e^{i\omega t} \tag{1c}$$

그리고 식 (1)의 음압과 매질입자속도로부터 식 (2a), 식 (2b)와 같이 고유 음향 임피던스(specific acoustic impedance)를 도출할 수 있는데, 원거리 음장(far-field) 일 경우($kr \gg 1$) 근사적으로 평면파(plane wave)에 대한 경우와 동일한 결과를 얻을 수 있다.

$$Z_s = \frac{p}{u} = \rho_0 c \left\{ \frac{(kr)^2}{1 + (kr)^2} + i \frac{(kr)}{1 + (kr)^2} \right\} \tag{2a}$$

$$Z_s \cong \rho_0 c, \quad (kr \gg 1) \tag{2b}$$

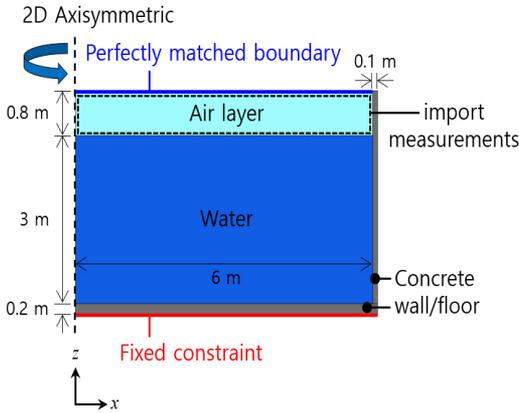


Fig. 6 Schematics of modeling set-up

즉, 항공기와 양식사업 후보 부지 간 거리는 원거리 음장으로 고려할 수 있을만큼 충분히 멀리 떨어져 있기 때문에(최소 약 500 m 이상 $\sim 20\lambda_{\max}$), 부지에 도달하는 음파는 근사적으로 평면파로 취급할 수 있다. 이에 따라, 해석모델의 공기층에 적용되는 소음 (측정값)의 음향 조건은 배경소음 그리고 항공기 소음원으로부터 기인된 평면파 전파특성의 대상소음이 중첩된 평면파 음장 조건으로 설정하였고, COMSOL Multiphysics(V 6.2)를 이용하여 음향 및 음향-구조 연성 해석을 수행하였다. 자세한 모델링 구성은 Fig. 6 및 Table 7과 같다.

Table 7 Details of modeling set-up

Modeling area	Wall and floor of tank, Air layer and water in tank	
Dimension	2D Axisymmetric(quasi-3D)	
Overall geometry	Cylinder	
Geometry parameters	Diameter and height of tank	12 m and 3.8 m *Depth of water: 3 m *Thickness of air layer: 0.8 m
	Thickness of wall and floor of tank	0.1 m and 0.2 m
Materials	Wall and floor of tank	Concrete(ρ : 2300 kg/m ³ , E : 25 GPa, ν : 0.2)
	Air layer(above the water surface in tank)	Air(20°C and 1 atm, relative humidity: 41 %)
	Water(in tank)	Fresh water(10°C and 8 pH)
Acoustic condition	Air layer	Perfectly matched boundary, Background pressure field(type: plane wave, import measurements), Atmosphere attenuation
	Water	Ocean attenuation
Structural condition	Floor of tank	Fixed constraint
Acoust. - Struct. coupling condition	Contact area between the air layer/water in tank and wall/floor of tank	
Mesh	Free triangular *Max. element size: $\lambda_{\min}/5$ and below	
Frequency range	12.5 Hz ~ 8000 Hz(1/3 octave)	

3.2 해석결과 분석 및 소음 수준 적합성 평가

위 3.1에서의 모델링 개요 및 구성을 토대로 해석한 수중에서의 음압레벨 결과는 Fig. 7 및 Table 8과 같다. 이 때, Fig. 7의 청록색 곡선과 노란색 곡선은 각각 연어와 인간에 대한 청각역치^(11,18,19,26)를 나타낸다.

Table 8에서 각 주파수대역별 overall 값 및 평균 음압레벨의 대응 지점에 따른 경향성은 전반적으로 측정결과(Table 1)에서의 경우와 동일하다. 참고로, 대기와 수중 간 임피던스 차이로 인해 대기에서 수중으로 전파하는 음파가 수면에서 많이 반사되지만⁽²⁰⁾, 공기중과 수중에서의 음압레벨 간 기준 음압(공기중: 20 μPa, 수중: 1 μPa)의 차이로 인해 수중에서 음압레벨이 더 크게 도출된다⁽²⁷⁾.

Fig. 7에서와 같이, 연어는 약 31.5 Hz~400 Hz의 주파수대역에서 약 95 dB(Z)~133 dB(Z) 범위의 소리를 감지할 수 있고, 전체 주파수대역에서 point 1의 대응 지점에서의 음압레벨은 연어가 인지하는 가장

작은 소리(연어의 청각역치, 청록색 곡선) 이하로 나타난 것을 볼 수 있다. 하지만, 약 160 Hz 부근의 주파수대역에서 point 2와 point 3의 대응 지점에서의 음압레벨은 각각 약 97.9 dB(Z) 및 104 dB(Z)로, 해당 주파수대역에서의 연어의 청각역치(95 dB(Z))보다 약 3 dB(Z)~9 dB(Z) 정도 더 높게 나타난다. 즉, point 2와 point 3의 대응 지점의 경우, 약 160 Hz 부근의 주파수대역에서는 연어가 소음을 인지할 수는 있을 것으로 판단된다.

Fig. 8은 point 1의 대응 지점에서 수조 내 공기층과 수중에서의 주파수별 전체 음압분포를 나타내고, 대기에서 수중으로 입사된 음파가 수조 벽과 바닥으로부터 반사된 음파와 중첩되어 형성된 정상상태 음장을 볼 수 있다.

추가적으로, 위와 같은 경우 Fig. 2와 같이 양식사업 후보 부지 내 주요 지점에서 측정한 등가소음을 해석모델에 적용하였지만, 가장 열악한 상황인 최대소음을 적용한 경우에 대해서도 적합성을 평가할 필요가 있다⁽²⁰⁾. 그리고 이러한 경우에 대해서도 Fig. 9와 같이 수중 음압레벨 해석결과를 도출하였다.

Point 1의 대응 지점의 경우 약 100 Hz 및 160 Hz 부근의 주파수대역에서의 음압레벨은 각각 약 101.7 dB(Z) 및 107.4 dB(Z)로, 해당 주파수대역에서의 연어의 청각역치(각각 98 dB(Z) 및 95 dB(Z))보다 약 4 dB(Z)~12 dB(Z) 정도 더 높게 나타난다. 또한, point 2의 대응 지점의 경우 약 80 Hz 및 125 Hz, 160 Hz 부근의 주파수대역에서의 음압레벨은 각각 약 105.2 dB(Z) 및 102.5 dB(Z), 116 dB(Z)로, 해당 주파수대역에서의 연어의 청각역치(각각 102 dB(Z) 및 96 dB(Z), 95 dB(Z))보다 약 3 dB(Z)~21 dB(Z) 정도 더 높게 나타난다. Point 3의 대응 지점의 경우 약 80 Hz 및 125 Hz, 160 Hz 부근의 주파수대역에서의 음압레벨은 각각 약 105.2 dB(Z) 및 101.2 dB(Z), 114.9 dB(Z)로, 해당 주파수대역에서의 연어의 청각역치(각각 102 dB(Z) 및 96 dB(Z), 95 dB(Z))보다 약 3 dB(Z)~20 dB(Z) 정도 더 높게 나타난다. 즉, point 1의 대응 지점의 경우 약 100 Hz 및 160 Hz 부근의 주파수대역에서, point 2와 point 3의 대응 지점의 경우 약 80 Hz 및 125 Hz, 160 Hz 부근의 주파수대역에서는 연어가 소음을 인지할 수는 있을 것으로 판단된다.

하지만 결론적으로, 어류에 피해를 끼치는 대표적인 소음 수준이 무려 약 158 dB(Z)(12시간 노출)~

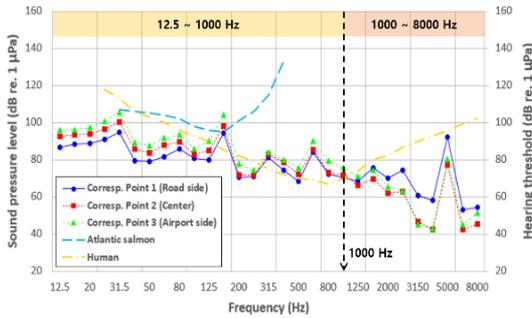


Fig. 7 Sound pressure level(Z-weighting) FEM results at corresponding major positions(w/thresholds of salmon and human)

Table 8 Sound pressure level(Z-weighting) FEM results for each corresponding position and frequency range

Corresponding positions		Point 1	Point 2	Point 3
All freq. band (12.5 Hz ~ 8000 Hz)	Overall	100.9 dB	104.9 dB	109.6 dB
	Average	76.9 dB	76.3 dB	79.7 dB
12.5 Hz ~ 1000 Hz	Overall	100.2 dB	104.9 dB	109.6 dB
	Average	81.1 dB	84.8 dB	88.6 dB
1000 Hz ~ 8000 Hz	Overall	92.5 dB	79.2 dB	82.8 dB
	Average	67.8 dB	58.7 dB	61.4 dB

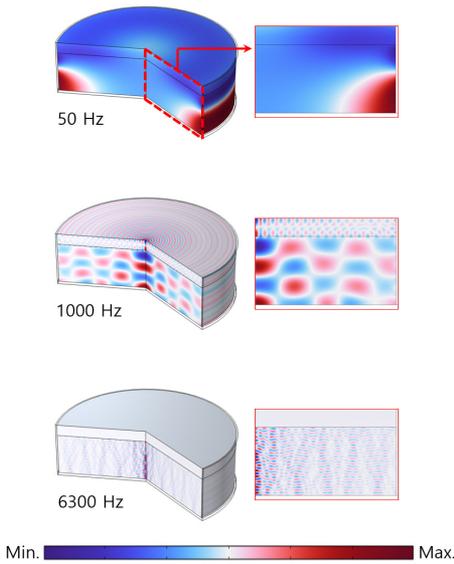


Fig. 8 Total acoustic pressure FEM results for the frequencies of 50 Hz, 1000 Hz and 6300 Hz (point 1)

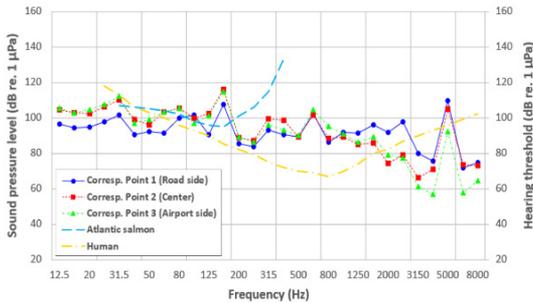


Fig. 9 Sound pressure level FEM results at corresponding major positions(w/thresholds of salmon and human)

170 dB(Z)(48시간 노출) 정도임을 고려할 때⁽¹¹⁾, 소음으로 인한 피해는 거의 없을 것으로 추정된다.

3.3 해석 타당성/신뢰성 고찰

이 연구에서는 양식사업 후보 부지 내 주요 지점에서 공기중 전용 소음 측정기를 사용하여 대기에서의 환경소음을 측정하고, 이를 해석모델에 적용하여 수중소음을 도출하였다. 그리고, 이와 같이 해석적인 방법을 통해 얻은 결과를 검증하기 위해 해당 현장의 양식장 수조 내에서 직접 수중소음을 측정하는 것이

가장 명확한 검증 방법일 것이다. 하지만, 해당 현장의 양식장은 아직 완공되지 않은 상태이고 수중 전용 소음 측정기인 hydrophone 장비의 획득에도 어려움이 있는 실정이다(물론, hydrophone을 사용하지 않고, 공기중 전용 소음 측정기로 공기중에서의 소음을 측정한 후 이러한 측정값에 획일적으로 약 26 dB를 가산하여 수중소음으로 환산하는 사례도 있지만, 수중소음을 평가하는데 있어서 이러한 방법은 엄연히 물리적 실제와는 다른 합리성이 결여된 방법이다). 이러한 이유들로 인해, 이 연구에서는 이전의 연구 사례에서 측정된 공기중과 수중에서의 소음 데이터를 바탕으로 해석의 타당성/신뢰성을 간접적으로 확보하였다.

이전의 대표적인 연구 사례로, 공사로 인한 소음/진동이 시험어의 유영행동에 미치는 영향을 조사하고 분석하기 위해 경기도 평택시 신대리에 위치한 아산호 부근의 육상 양어장에서 직접 소음 측정을 수행한 연구가 있다(microphone을 사용하여 공기중에서의 소음을, 수중 음압계(OKI, SW-1007)와 수중 청음기(OKI, ST-1001)를 사용하여 수중소음을 측정하였다)⁽²⁸⁾. 해당 연구에서는 공사장 과일작업 및 덤프트럭 통행, 발과 작업에 따른 소음을 측정하였는데, 이 중 소음의 발생 원인과 전달경로(공기중에서 수중으로 전달)가 항공기 소음과 물리적으로 비교적 유사한 덤프트럭 통행 시의 소음을 비교 대상으로 선정하였다(과일 및 발과 작업에 따른 소음의 경우 각각 타격음과 폭발음으로, 매우 짧은 시간동안 높은 세기로 발생하는 충격음이다).

Table 9와 같이, 육상 양어장에서 양어장 인접도를 이용하는 덤프트럭의 통행에 따른 공기중 및 수중에서의 평균 소음을 소음원로부터의 거리에 따라 측정하였다. 소음원로부터의 거리가 증가할수록 공기중과 수중 소음이 모두 감소하고, 이러한 경우들에서 각 위치별 공기중과 수중 소음 간 차이의 평균값은 약 52.3 dB(표준편차 약 2.6 dB)로 도출된다.

이러한 연구 사례에서의 측정결과와 비교하기 위해, Table 2(공기중, A-가중값) 및 8(수중, Z-가중값)의 전체 주파수대역에서의 각(대응) 지점별 측정 소음의 overall 값들을 Table 10과 같이 나타내었다. 모든 지점에서 각 지점별 공기중과 수중 소음 간 차이의 평균값은 49.4 dB(표준편차 약 1.8 dB)로 도출되고, 이는 앞서 언급한 연구 사례에서의 경우(52.3 dB)와 2.9 dB만큼의 오차가 나타나는 것을 알 수 있다.

Table 9 Sound pressure level(traffic noise level) measurement results by the distance

Distance from noise source	In air	Underwater
5 m	101 dB(A)	152 dB(Z)
50 m	80 dB(A)	130 dB(Z)
100 m	64 dB(A)	120 dB(Z)

Table 10 Sound pressure level measurement(in air, A-weighting) and FEM(underwater, Z-weighting) results for each(corresponding) position

(corresponding) Positions	In air (Measurement)	Underwater (FEM)
Point 1	54 dB(A)	100.9 dB(Z)
Point 2	54.6 dB(A)	104.9 dB(Z)
Point 3	58.6 dB(A)	109.6 dB(Z)

즉, 환경소음 분야에서 일반적으로 측정값과의 오차가 ±3 dB 이내(표준편차 3 dB 이내)일 경우 적절한 모델로 간주한다는 사실을 고려하면, 해석의 타당성/신뢰성을 충분히 확보하는데 있어서 큰 문제가 되지는 않을 것으로 판단된다.

물론, 해당 연구 사례와 이 연구에서의 실제 환경 간에 다소 차이가 있는 부분이 존재하기 때문에, 추후 양식사업 후보 부지 내 양식장에서 직접 수중소음을 측정하여 해석의 타당성/신뢰성을 보완할 필요가 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

이 연구에서는 대서양 연어 생육환경에서의 소음 수준에 대한 적합성을 평가하기 위해, 환경소음을 분석하고 그 영향을 예측하였다.

우선, 김해공항 및 경전철로 인근에 위치한 양식사업 후보 부지의 주요 지점에서 소음을 측정하였고, 지점에 따른 주요 소음원 영향에 대한 경향성 및 각 지점별 대상소음, 기여도 등을 분석함으로써 해당 부지에서의 전반적인 소음특성은 항공기 소음에 의해 지배된다고 판단할 수 있었다. 이후, FEM 해석을 통해 현실적이고 효율적인 방법으로 수중소음을 도출하기 위해, 실제 측정된 소음(등가 및 최대 소음)을 양식장 수조 영역을 구현한 해석모델에 인풋으로 적용

하였다. 이 때, 항공기 소음원으로부터 기인한 음향 전파특성을 간단한 이론적인 접근을 통해 원거리 음장에서의 평면파로 고려하여, 측정된 소음의 해석상의 음향 조건을 적절히 설정하였다. 최종적으로, 음향 수치해석을 통해 도출된 수중에서의 음압레벨 결과를 대서양 연어의 청각역치와 비교하고 분석하여, 지점별로 수조 내 수중소음 수준에 대한 적합성을 평가하였다. 측정된 등가소음을 해석모델에 적용했을 경우, 약 160 Hz 부근의 주파수대역에서 point 2와 point 3의 대응 지점에서의 음압레벨은 해당 주파수대역에서의 연어의 청각역치보다 조금 더 높게 나타났다. 또한 측정된 최대소음을 적용했을 경우, point 1의 대응 지점의 경우 약 100 Hz 및 160 Hz 부근의 주파수대역에서, point 2와 point 3의 대응 지점의 경우 약 80 Hz 및 125 Hz, 160 Hz 부근의 주파수대역에서 연어가 소음을 인지할 수 있을 것으로 판단되었다. 하지만, 어류에 피해를 끼치는 대표적인 소음 수준이 무려 약 158 dB(Z)(12시간 노출) ~ 170 dB(Z)(48시간 노출) 정도임을 고려할 때, 소음으로 인한 피해는 거의 없을 것으로 추정할 수 있었다. 마지막으로, 이전 연구 사례에서의 측정결과와의 비교를 통해 이 연구에서의 해석의 타당성/신뢰성을 간접적으로 충분히 확보할 수 있었다. 물론, 추후 양식사업 후보 부지 내 양식장에서 직접 수중소음을 측정하여 해석의 타당성/신뢰성을 보완할 필요가 있을 것으로 사료된다.

결론적으로, 이러한 이 연구에서의 과정이 측정과 수치해석 방법을 복합적으로 이용하여 비교적 큰 규모의 스케일에서의 환경소음 영향을 사전에 정량적으로 예측하고 분석할 수 있는 효과적이고 실용적인 방법이 될 것으로 기대한다.

References

- (1) Polaris Market Research, 2023, Salmon Fish Market Size, Share Global Analysis Report, Polaris Market Research, 2023-2032, DE, United States.
- (2) Kocatepe, D., Çorapçı, B., Altan, C., Köstekli, B., Keskin, İ. and Turan, H., 2024, Potential Contribution of Farmed Fishes to The Recommended Nutrient Intakes (RNIs): A Case Study of Farmed Atlantic Salmon(S. salar) and Different Origin Large Rainbow Trout(O. mykiss), Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi, Vol. 14, No. 1, pp. 23-37.

(3) Iversen, A., Asche, F., Hermansen, Ø. and Nystøyl, R., 2020, Production Cost and Competitiveness in Major Salmon Farming Countries 2003-2018, *Aquaculture*, Vol. 522, 735089.

(4) Lee, H. L., 2023, K-salmon will be on the Table in 2 Years, What is Smart Salmon Farming? The 'K-salmon' Era is Coming, Posted on the Economist, Seoul, Korea.

(5) Moon, Y. K., 2024, When will we be able to Taste Salmon Farmed by GS Construction, Posted on the Hansbiz, Seoul, Korea.

(6) Weilgart, L., 2018, The Impact of Ocean Noise Pollution on Fish and Invertebrates, *OceanCare*, Wädenswil, Switzerland.

(7) McCauley, R. D., Fewtrell, J. and Popper, A. N., 2003, High Intensity Anthropogenic Sound Damages Fish Ears, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 113, No. 1, pp. 638-642.

(8) Hastings, M. C. and Popper, A. N., 2005, Effects of Sound on Fish, California Department of Transportation Contract No. 43A0129, CA, United States.

(9) Popper, A. N., Smith, M. E., Cott, P. A., Hanna, B. W. and MacGillivray, A. O. et al., 2005, Effects of Exposure to Seismic Airgun Use on Hearing of Three Fish Species, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 117, No. 6, pp. 3958-3971.

(10) Bae, J. W., Park, J.-H. and Yoon, J. R., 2009, Characteristics of Impulsive Noise of Waterfront Construction Site and its Effects on Fishes, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 19, No. 9, pp. 928-934.

(11) Popper, A. N., Hawkins, A. D., Fay, R. R., Mann, D. A. and Bartol, S. et al., 2014, ASA S3/SC1.4 TR-2014 - Sound Exposure Guidelines for Fishes and Sea Turtles: A Technical Report Prepared by ANSI-accredited Standards Committee S3/SC1 and Registered with ANSI, Springer, Cham, Switzerland.

(12) Erbe, C., Williams, R., Parsons, M., Parsons, S. K., Hendrawan, I. G. and Dewantama, I. M. I., 2018, Underwater Noise from Airplanes: An Overlooked Source of Ocean Noise, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 137, pp. 656-661.

(13) Weinstein, M. S. and Henney, A. G., 1965, Wave Solution for Air-to-water Sound Transmission, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 37,

No. 5, pp. 899-901.

(14) Chapman, D. M. F., Thomson, D. J. and Ellis, D. D., 1992, Modeling Air-to-water Sound Transmission using Standard Numerical Codes of Underwater Acoustics, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 91, No. 4, pp. 1904-1910.

(15) Kim, H.-S., Kim, J.-S., Kim, B.-K., Kim, S.-R. and Lee, S.-H., 2011, Effect of Airborne Noise from Ship Machinery on Underwater Noise, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 48, No. 6, pp. 569-574.

(16) Kim, H. S., Kim, J. S., Lee, S. H. and Seo, Y. H., 2013, An Analysis of the Underwater Radiated Noise from Engine Noise via a Water Tank, *Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference*, pp. 444-445.

(17) Peng, Z.-H. and Zhang, L.-S., 2016, A Review of Research Progress in Air-to-water Sound Transmission, *Chinese Physics B*, Vol. 25, No. 12, 124306.

(18) Nedwell, J. R., Edwards, B., Turnpenny, A. W. H. and Gordon, J., 2004, Fish and Marine Mammal Audiograms: A Summary of Available Information, *Subacoustech Report No. 534R0214*.

(19) Abersold, J., 2016, Specialized Hearing in the Pacific Herring, Article posted on the Virginia Tech Ichthyology Class, VA, United States.

(20) Lim, D.-K., Shin, Y.-C. and Jun, Y.-B., 2010, A Study on the Establishment of Management Criteria for Underwater Noise, *Explosives & Blasting*, Vol. 28, No. 2, pp. 119-132.

(21) Filippone, A., 2014, Aircraft Noise Prediction, *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 68, pp. 27-63.

(22) Putnam, T. W., 1975, Review of Aircraft Noise Propagation, NASA, TM X-56033, DC, United States.

(23) Pietrzko, S. and Hofmann, R., 1996, Mathematical Modelling of Aircraft Noise based on Identified Directivity Patterns, *Proceedings of the AIAA and CEAS, Aeroacoustics Conference*, p. 1768.

(24) Morgan, J., Neilsen, T. B., Gee, K. L., Wall, A. T. and James, M. M., 2012, Simple-source Model of Military Jet Aircraft Noise, *Noise Control Engineering Journal*, Vol. 60, No. 4, pp. 435-449.

(25) Papamoschou, D., 2018, Wavepacket Modeling of the Jet Noise Source, *International Journal of*

Aeroacoustics, Vol. 17, No. 1-2, pp. 52~69.

(26) Yost, W. A. and Killion, M. C., 1997, Hearing Thresholds, Vol. 3, Chapter 123, Encyclopedia of Acoustics, pp. 1545~1554.

(27) Committee on Low-frequency Sound and Marine Mammals Ocean Studies Board and Commission on Geosciences, Environment, and Resources National Research Council, 1994, Low-frequency Sound and Marine Mammals: Current Knowledge and Research Needs, National Academy Press, DC, United states.

(28) Shin, H. O., 1995, Effect of the Piling Work Noise on the Behavior of Snakehead(*Channa argus*) in the Aquafarm, Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, Vol. 28, No. 4, pp. 492~502.



Min Soo Kim received a Ph.D. degree in Department of Mechanical Engineering from Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), Ulsan, Republic of Korea. After graduation, he worked as a

senior researcher and acoustics application engineer at Hyundai Heavy Industries and ALTSOFT, respectively. Currently, he is working as a senior researcher in the field of acoustics and noise engineering at GS Engineering & Construction. His main areas of expertise are pressure acoustics, ultrasonic waves in elastic solids, mechanical waves CAE, and metamaterial engineering.



Sang Jun Lee received a Bachelor's degree in Department of Architectural Engineering from Kyungpook National University and graduated a Master of Science in Architectural Studies from University of Florida, United States of America. He is currently as a Head of Architecture Technology Research Center in GS Engineering & Construction.