

반사면 위에서의 콤팩트 원형 하이브리드 소음 제어 시스템 Compact Circular Hybrid Noise Control System on the Reflecting Surface

이 상 현* · 박 영 진†
Sanghyeon Lee* and Youngjin Park†

(Received July 4, 2023 ; Revised August 9, 2023 ; Accepted August 16, 2023)

Key Words : Active Noise Control(능동소음제어), Noise Barrier(소음 방벽), Theoretical Solution(이론해), Noise Reflection(소음 반사), Ground(지면)

ABSTRACT

The compact hybrid noise control system is proposed to prevent noise-induced hearing loss of workers in industrial sites. Noise in a wide frequency band can be reduced through a hybrid method combining a noise barrier, which is a passive noise reduction method, and active noise control. Unlike conventional active noise barriers that use semi-infinite barriers and error microphones, a finite-sized circular barrier is used for movability, and a control filter based on theoretically calculated sound fields is applied without error microphones for convenience of installation and calibration. However, in the prior study, simulations and experiments were conducted under free field conditions. Because free field conditions are acceptable only in specific spaces, the verification of the compact hybrid noise control system on the ground is required for practical use. Therefore, in this study, the compact hybrid noise control system is examined on a reflecting surface. To retain the advantages of movability and simple installation, a theoretical model in the free field should be used to obtain a control filter. Nevertheless, it is shown that the noise in the target control space is reduced by approximately 6 dB in a frequency band of interest. It is also demonstrated that the noise reduction performance can be improved by suppressing the noise reflection through a sound absorbing material and active noise control.

1. 서 론

산업이 발전함에 따라 소음 문제는 심화하고 규제는 강화되고 있다. 소음은 스트레스 및 집중력 저하와 같은 부정적인 영향을 미치며 크기가 크거나 장시간 노출 시 청력 손실로 이어지게 된다⁽¹⁻³⁾. 이에 소음 및 청력 손실 문제를 해결하고자 전 세계적으로 노력해 왔고 관련 정보와 기준을 다루어 왔다⁽²⁻⁶⁾. 그

중, 작업 현장 내 소음 노출로 인한 청력 손실 문제는 특히 해결 방안을 고려할 필요가 있다. 작업 특성상 큰 소음에 장시간 노출되는 노동자들은 청력 손실을 겪기 쉽고, 실제로 청력 손실이 있는 성인의 약 16%가 작업 공간에서의 큰 소음이 원인이 되었다고 하는 조사 결과를 WHO report에서 확인할 수 있다⁽²⁾. 국내의 경우도 근로자 건강진단 실시 결과에 따르면⁽⁷⁻¹⁰⁾ 직업병 유소견자의 약 96% 이상이 소음성 난청에 해당하는 문제가 다년간 지속되고 있고 그 비율이 점

† Corresponding Author ; Member, KAIST, Professor
E-mail : yjpark@kaist.ac.kr
* KAIST, Researcher

‡ Recommended by Editor Pyung Sik Ma
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

진적으로 증가하고 있다. 따라서, 점차 작업자를 위한 소음 저감 방안이 필요할 것으로 사료되나 소음 저감 공간을 형성하는 기존의 방안들은 위 문제에 적용하기 적합하지 않다. 작업자를 위한 소음 저감 방안은 기본적으로 다양한 소음에 대응할 수 있도록 제어 가능한 주파수 대역이 넓어야 하고, 작업 공간 변경에 대응할 수 있도록 이동 및 설치가 간단해야 한다. 그러나 기존에 사용되던 소음 방벽은 회절로 인해 저주파 소음 저감에는 취약하며 이동성을 위해 크기를 줄일수록 소음 저감 효과가 떨어진다. 다른 방안으로 상쇄간섭에 기반하여 다량의 스피커와 마이크로폰을 사용하는 능동소음제어를⁽¹¹⁾ 적용할 수 있지만, 스피커나 마이크로폰의 배치 제약 및 신호 처리 장비의 한계로 인해 제어 주파수 대역과 제어 공간이 제한된다.^(12,13)

제어 가능한 주파수 대역 및 소음 저감 공간을 넓히기 위해 소음 방벽 주변에 스피커를 배치하여 능동소음제어를 적용하는 능동 소음 방벽이 제안된 바 있다.^(14,15) 소음이 회절 되는 방벽의 모서리 부근에 제어 스피커를 배치함으로써 소음장과 제어음장을 유사하게 형성하여 방벽 뒤편의 넓은 공간의 소음을 저감할 수 있으며 문제가 되었던 저주파 소음 저감 성능을 개선할 수 있다. 더 나아가 소음장에 대한 제어음장의 유사도를 높여 능동 소음 방벽의 성능을 높이고자 하는 연구들이 진행되었다.⁽¹⁶⁾ 크게 능동소음제어의 적용 방식의 변경^(17,18), 단방향 지향성의 제어 스피커 사용⁽¹⁹⁾, 스피커와 마이크로폰의 적절한 배치 위치 조사⁽²⁰⁾, 방벽과 멀리 떨어진 공간에서 소음 저감을 위한 가상 마이크로폰 기법의 사용⁽²¹⁾ 등이 있다. 다만, 위 연구들은 고정된 소음 환경에서의 소음 저감을 상정하여 반 무한 방벽을 다루었다. 이는 매우 큰 소음 저감 공간을 형성할 수 있지만, 작업자를 위한 이동 및 설치가 간단한 소음 제어 시스템으로는 적합하지 않다. 이에 유한한 크기의 방벽을 사용하는 컴팩트 하이브리드 소음 제어 시스템이 제안되었다.^(22,23) 원형 방벽과 둘레에 배치된 제어 스피커로 구성되며 방벽 뒤편의 전역 소음 제어가 아닌 특정 공간의 소음 저감을 목표로 능동소음제어를 적용한다. 이때, 작업공간 내 배치되는 많은 오차 마이크로폰은 작업자의 활동을 방해하며 시스템의 복잡도를 높여 제어 필터의 수렴 속도를 늦춘다. 이에 제안된 컴팩트 소음 제어 시스템은 이론적으로 계산한 제어 필터를 통해

능동소음제어를 적용하였다. 오차 마이크로폰 없이 거리 및 온도와 같은 일부 정보를 통해 제어 필터를 간단히 구할 수 있어 설치 및 이동에 대한 간편성을 극대화할 수 있다. 간단한 소음 환경에서는 이론적으로 계산한 제어 필터를 사용하여 목표 제어 공간 내 넓은 주파수 대역의 소음 저감이 달성 가능하다는 것을 시뮬레이션 및 실험을 통해 보였다. 실제 시스템을 근사한 이론 모델을 기반으로 제어 필터를 계산하기 때문에 실험적으로 구할 수 있는 최적 제어 필터 대비 성능 저하가 발생할 수 있으나, 기존의 소음 제어 시스템의 주요 성능 저하 요인을 조사하여⁽²⁴⁾ 이론 모델 및 소음 제어 시스템을 수정함으로써 성능을 제어 공간 내 약 10.6 dB까지 개선한 바 있다.⁽²⁵⁾

그러나 기존의 연구는 이론적으로 계산된 제어 필터를 적용한 컴팩트 소음 제어 시스템의 가능성 검증에 초점을 두고 매우 한정적인 자유 음장의 소음 환경만을 다루었다. 자유 음장 조건은 반사가 없는 무향실과 같은 특수 공간에서만 만족할 수 있기에 실제 환경으로 보기가 어렵다. 실적을 고려하기 위해서는 최소한 지면의 존재를 인지할 필요가 있고 이에 의한 반사를 고려해야 한다. 따라서, 이 연구에서는 자유 음장이 아닌 지면이 있는 소음 환경에서 컴팩트 하이브리드 소음 제어 시스템의 적용 가능성을 조사하였다. 지면에 의해 반사되는 소음 및 제어음으로 인해 소음장과 제어음장이 자유 음장 조건의 환경과 다르게 형성된다. 콧솔(COMSOL)을 통해 시뮬레이션을 수행하여 이상적인 지면을 포함한 소음 환경에서의 반사에 따른 영향을 확인하였다. 다만, 지면을 포함한 이론 모델을 사용하면 고려 공간이 커져 계산량이 매우 높아지는 문제가 있고 지면과 소음 제어 시스템 간의 거리에 따른 경우의 수가 늘게 된다. 또한, 지면의 형태나 반사 특성 등의 실측치 데이터가 요구되기 때문에 제어 필터 계산 과정이 복잡해지고 시간이 오래 걸리게 된다. 이에 원초의 목표인 이동 및 설치를 간단히 할 수 있는 소음 제어 시스템의 특성을 유지하고자 이 연구에서는 기존의 자유 음장 조건인 이론 모델을 통해 계산된 제어 필터를 사용하였다. 일반적인 상황에서 지면에 의해 반사되는 소음 대비 직접적으로 전파되는 소음이 크기에 해당 부분만 제어하더라도 소음 저감 효과를 기대할 수 있다. 이를 검증하기 위해 시뮬레이션 및 실험에서 지면을 포함한 소음 환경을 구축하여 컴팩트 소음 제어 시스

템을 적용해 보았다. 더 나아가, 성능 저하 요인인 지면에 의한 반사를 억제함으로써 소음 저감 성능을 더 높일 수 있는지 확인하였다.

2. 지면이 있는 공간에서의 컴팩트 하이브리드 소음 제어 시스템

2.1 컴팩트 하이브리드 소음 제어 시스템

이 절에서는 기존에 제안되었던 컴팩트 하이브리드 소음 제어 시스템에⁽²³⁾ 대해 간략히 설명하고자 한다. 해당 소음 제어 시스템은 Fig. 1과 같이 원형 방벽과 둘레에 배치되는 제어 스피커로 구성 되어있고 이론적으로 계산된 제어 필터를 사용하는 개 루프 형태로 능동소음제어가 수행된다.

제어 공간내 소음을 저감하기 위해 제어 필터는 공간 내 음압(P) 제곱의 합으로 구성되어 있는 식 (1)의 음향 퍼텐셜 에너지를(C) 최소화하도록 계산된다. 제어 공간 내 음압(P)은 소음(P_n)과 이를 저감하기 위한 제어음(P_c)의 합으로 제어 공간내 관심 주파수대역의 음향 퍼텐셜 에너지는 식 (2a)로 나타낼 수 있다. 주파수 별 음향 퍼텐셜 에너지는 서로 독립적이므로 주파수 별 제어 필터는 식 (2b)를 만족하도록 각기 계산되어지며 이는 식 (2c)의 K_f 와 같다^(23,26). \bar{P} 는 제어 공간내 음압 값이며 F 는 관심 주파수 대역이다. ρ, c 공기 밀도 및 음속이다.

$$C = \int_F \int_V \frac{|P|^2}{2\rho c^2} dV dF \tag{1}$$

$$C_{\min} = \int_F \int_V \frac{|P_{n,f} + K_f P_{c,f}|^2}{2\rho c^2} dV dF \tag{2a}$$

$$\frac{\partial C_{\min}}{\partial K_f} = 0 \tag{2b}$$

$$K_f = \left(\int_V \overline{P_{c,f}} P_{n,f} dV \right) \left(\int_V \overline{P_{c,f}} \overline{P_{c,f}} dV \right)^{-1} \tag{2c}$$

$P_{c,f}$ 는 f 주파수에서의 제어 음원의 음압, $P_{n,f}$ 는 소음원의 음압 값이다. ρ, c 는 공기 밀도 및 음속이며 \bar{P} 는 켈레 복소수를 의미한다. 제어 필터를 구하기 위해 필요한 제어 공간 내 음압 값은 이론 모델을 통해 계산한다. 이 연구에서는 제어 필터의 계산을 간단히 할 수 있도록 기존과 같이 자유 음장의 이론 모델을 사용하였다. 다만, 처음 제안되었던 극도로 단순화한 이론 모델⁽²³⁾ 대신 주요 소음 저감 요인을 고려하여 개선된 이론 모델 및 소음 제어 시스템을 사용하였다⁽²⁵⁾. 두 모델의 가장 큰 차이는 제어 음원으로 원형 제어 음원 대신 ‘단힌 베플의 진동하는 링 피스톤’을 사용한 것이다. 이론 모델이 더 복잡해지나 축 대칭 특성이 유지되기 때문에 계산량이 크게 차이 나지 않는다.

2.2 지면 유무에 따른 음장 변화 및 제어 공간 내 소음 저감

(1) 시뮬레이션 조건

이 절에서는 지면의 영향으로 인해 소음 환경이 변화될 수 있음을 보여주고, 그럼에도 불구하고 자유 음장 조건인 이론 모델 기반의 제어 필터로 소음 저감이 가능함을 보여주고자 한다. 이를 확인하기 위해 컴술을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였으며 사용한 모델의 개략도는 Fig. 2와 같다. 지면은 표면이 매끄럽고 음향학적으로 단단한 조건의 이상적인 경우로 가정하였다. 시뮬레이션 스케일은 기존 논문과⁽²⁴⁾ 동일하게

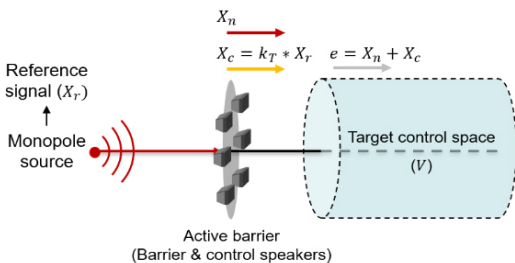


Fig. 1 Configuration of the compact hybrid noise control system

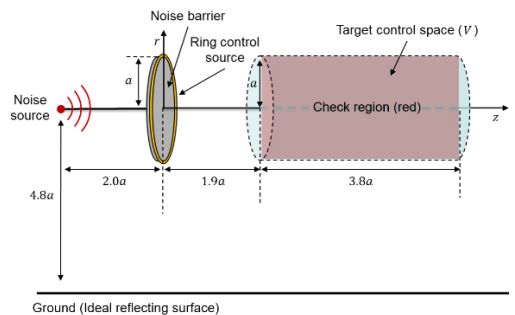


Fig. 2 Configuration of the simulation model including the ground

설정했고 지면과의 거리는 성인 남자가 작업을 위해 몸을 기울였을 때를 상정하여 선정하였다. 음장의 변화 여부, 제어 공간 내 소음 저감 가능성 확인을 목표로 원형 제어 음원을 사용하는 단순화시킨 이론 모델을 사용하여 500 Hz에서의 결과를 확인하였다.

(2) 시뮬레이션 결과

지면 유무에 따른 제어 공간 단면의 소음 분포는 Fig. 3과 같다. 지면에 의해 반사된 소음으로 인해 음장이 다르게 형성되는 것을 확인할 수 있다. 좀 더 자세히 확인하기 위해 소음을 직접적으로 전파된 부분과 지면에 의해 반사된 부분으로 분리해 보았다. 반사되지 않고 직접적으로 전파되는 부분은 자유 음장 조건에서 계산된 소음장과 같으며, 지면에 의해 반사된 부분은 지면이 있는 경우와 자유 음장인 경우의 차로 구할 수 있다. 분리한 소음장은 Fig. 4에서 확인할 수 있다.

지면에 반사되는 소음에 비해 직접적으로 전파되

는 소음이 주요하므로 해당 소음만 제어해도 제어 공간 내 유의미한 소음 저감을 기대할 수 있다. 지면을 포함한 시뮬레이션에서 자유 음장 조건인 이론 모델 기반의 제어 필터를 사용하여 능동소음제어를 적용했을 때의 잔여 소음 분포는 Fig. 5에서 확인할 수 있다. 직접적으로 전파되는 소음이 저감되면서 지면에 반사되어 전파되는 소음과 유사하게 형성되는 것을 확인할 수 있다.

소음 저감 성능을 확인하기 위해 식 (3)의 삽입 손실을 그리면 Fig. 6과 같다. $P_{n,0}$ 는 소음원의 음압, P_e 는 하이브리드 소음 제어를 적용했을 때의 잔여 음압이다. 자유 음장 조건인 이론 모델 기반의 제어 필터로도 제어 공간 내 유효한 소음 저감이 가능함을 확인할 수 있다. 결론적으로 반사되는 소음에 의해 약간의 성능 저하가 발생하지만, 필요 계산량이 적고 지면의 조건을 측정할 필요가 없는 자유 음장 조건의 이론 모델이 이동성 및 간단함을 중시하는

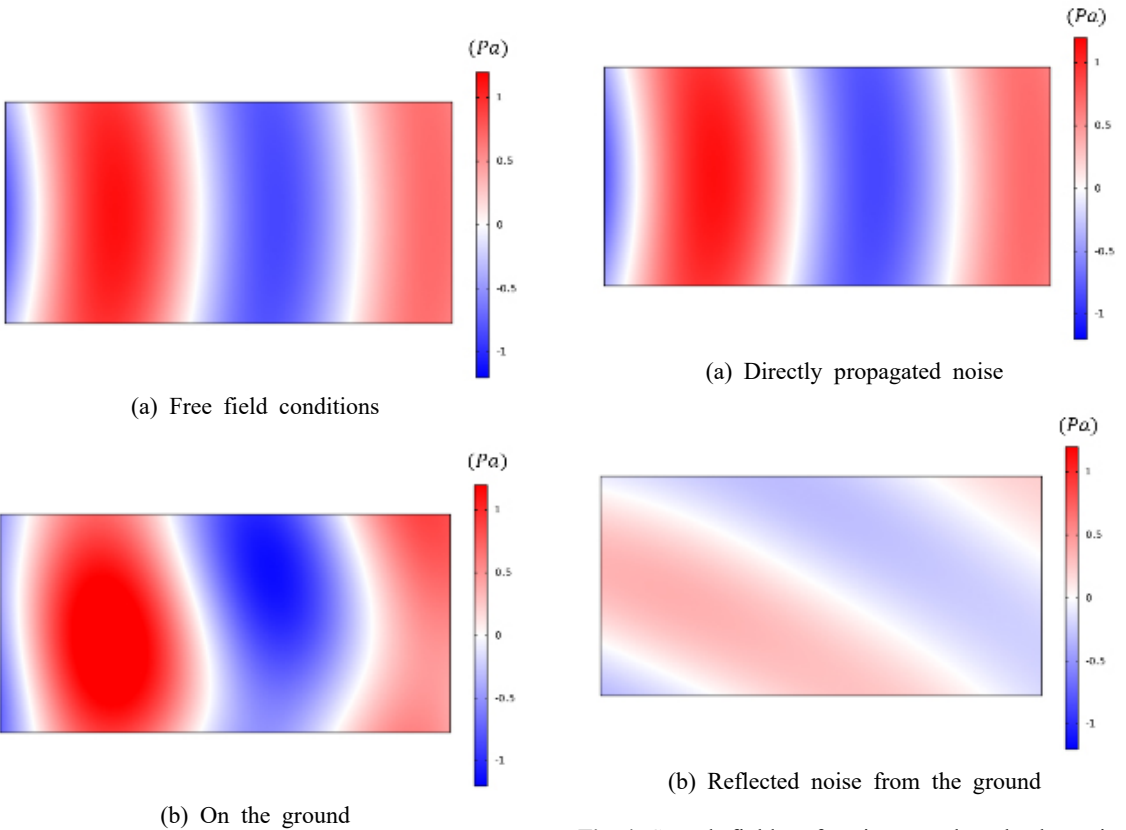
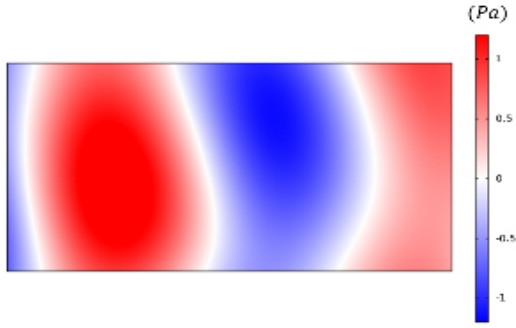
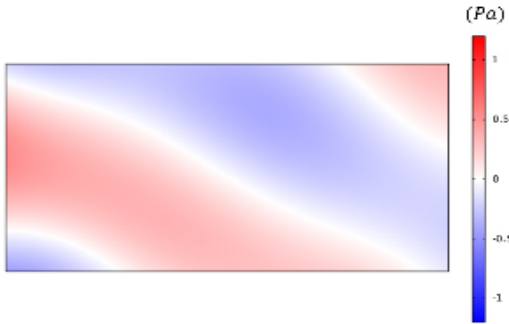


Fig. 3 Sound fields of noise on the check region

Fig. 4 Sound fields of noise on the check region according to the propagation path



(a) On the ground without ANC



(b) With ANC for reducing the directly propagated noise

Fig. 5 Sound fields of noise on the check region

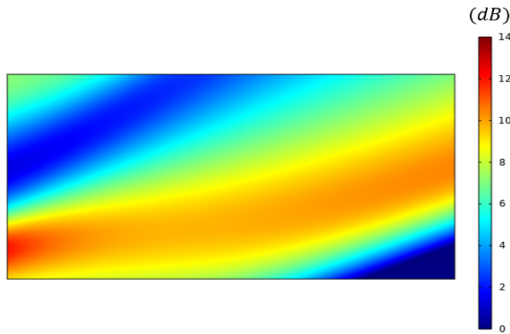


Fig. 6 Insertion loss when ANC for reducing direct propagating noise is applied

컴팩트 하이브리드 소음 제어 시스템에 적절할 것으로 사료된다.

$$\text{Insertion Loss} : 20 \log_{10} \frac{P_{n,0}}{P_e} \quad (3)$$

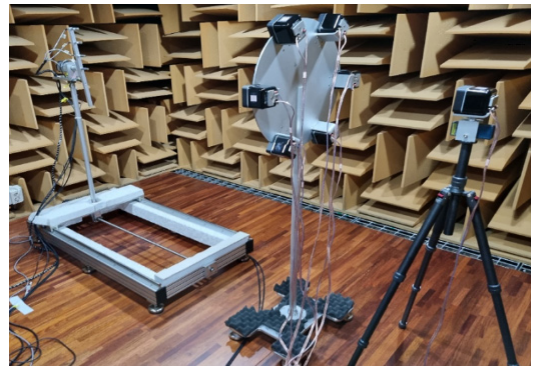
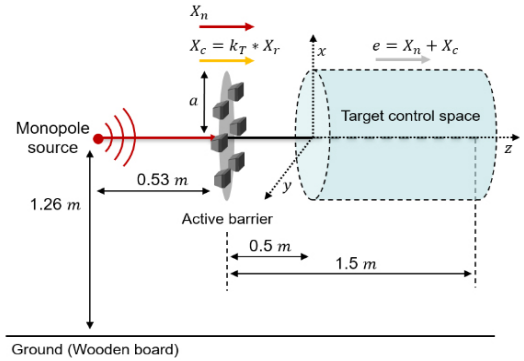


Fig. 7 Constructed experimental system

3. 지면이 있는 소음 환경 구축 및 실험

3.1 실험 시스템

앞서 지면이 있는 소음 환경에서 직접적으로 전파되는 소음만을 제어하더라도 유효한 소음 저감을 달성할 수 있음을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 이 장에서는 실험을 통해 자유 음장 조건인 이론 모델 기반의 제어 필터를 사용하는 컴팩트 소음 제어 시스템의 실적용 가능성을 검증하고자 한다. 기존의 논문^(23,25) 맞춰 동일한 실험 장비를 사용하였고, 관심 주파수대역은 200 Hz ~ 2000 Hz로 설정하였으며, 허용주파수가 100 Hz인 3.6 m³ × 3.6 m³ × 2.4 m³ 크기의 무향실에서 진행하였다. 개루프 능동소음제어 적용을 위한 전체 실험 셋업은 이전 논문에서 확인할 수 있다⁽²²⁾. 다만, 이 실험에서는 지면이 있는 소음 환경을 구축하여 소음 저감 실험을 진행하였다. 구축한 실험 시스템은 Fig. 7에서 확인할 수 있다. 지면이 있는 환경을 모사하기 위해 무향실 내에 나무 합판을 배치하였다. 음향학적으로 단단한 경계 조건의 이상적인 지면에 가깝게 구현하기 위해 두께와 면밀도가 2.4 cm,

16.3 kg/m²인 밀바우 집성목 합판을 사용하였다. 나무 합판은 면밀도 15 kg/m²이상일 때 100 Hz 이상에서 음력의(sound power) 96.6 % 이상이 반사되는 것을 참고하여 선정하였다⁽²⁷⁾. 또한, 이 실험의 경우 지면에 의해 반사되는 소음으로 인해 제어 공간 내에서 축 대칭 조건이 만족하지 않는다. 따라서, 제어 공간 내 한 단면이 아닌 전반에 걸쳐 측정을 진행하였다. x축 방향 10 cm 간격으로 4개의 마이크로폰을 배치하여 z축 방향으로 10 cm 간격으로 이동 및 x-y 평면상에서 20도 간격으로 회전하며 제어 공간 내 모든 지점을 측정하였다.

3.2 지면이 있는 소음 환경에서 컴팩트 소음 제어 시스템의 소음 저감 성능

지면이 있는 상황에서 자유 음장 기반인 이론 모델을 통해 구한 제어 필터를 사용하여 하이브리드 소음 제어를 적용해 보았다. 실험에 사용된 시간 도메인의 제어 필터는 식 (2)의 주파수 도메인에서 계산된 제어 필터를 역 푸리에 변환을 거쳐 구하였다. 먼저, 하이브리드 소음 제어의 효과를 확인하기 위해 소음의 임펄스 응답을 측정하였다. 대역 제한된 백색 소음으로 전달 함수를 추정하고 이를 역 고속 푸리에 변환을 거쳐 임펄스 응답을 구하였다⁽²⁸⁾. 목표 제어 공간의 중심에서 측정된 소음과 잔여 소음의 임펄스 응답을 비교해 보면 Fig. 8과 같다.

Fig. 9와 같이 지면에 반사된 소음도 마찬가지로 반사된 제어음으로 인해 약간 저감 되기는 하나 직접적으로 전파되는 소음이 주로 저감되는 것을 확인할 수 있다. 구체적으로 소음 저감 성능이 달성되는 지를 확인하기 위하여 기존의 소음 저감 성능으로 정의된 제어 공간 내 음향 퍼텐셜 에너지의 차를 확인하였다. 주파수별 (f) 소음 저감량은 식 (4)와 같이 계산 되었으며 결과는 Fig. 10과 같다. $C_{n,f}$, $C_{e,f}$ 는 주파수별 제어 공간 내 소음 및 잔여 소음의 음향 퍼텐셜 에너지 값이다.

$$\text{Noise reduction}(f): 20\log_{10} \frac{C_{n,f}}{C_{e,f}} \quad (4)$$

직접적으로 전파되는 소음만을 제어하더라도 유효한 소음저감을 달성할 수 있으며, 소음 방벽만 사용하는 경우보다 소음 저감 량이 크게 높아지는

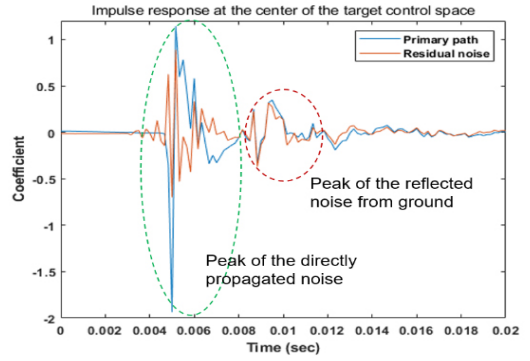


Fig. 8 Impulse response at the center of the target control space (blue: primary path, red: residual noise through the hybrid noise control)

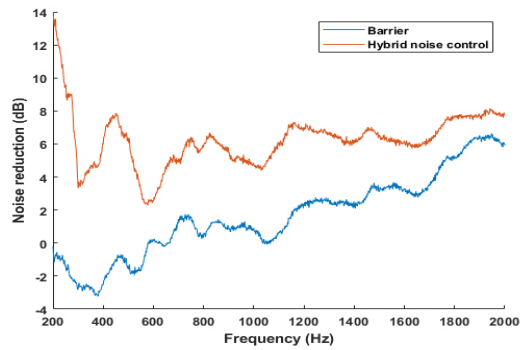


Fig. 9 Noise reduction (blue: noise barrier, red: hybrid noise control)

것을 확인할 수 있다. 소음 저감 성능 지표는 제어 공간내 관심 주파수 대역에서 음향 퍼텐셜 에너지의 저감량이며 식 (5)와 같다. 관심 주파수 대역인 200 Hz ~ 2000 Hz의 경우, 소음 방벽을 배치하면 약 0.7 dB의 소음만을 저감할 수 있으나 하이브리드 소음 제어 시스템을 적용하면 약 6 dB의 소음 저감을 달성할 수 있다.

$$\text{Reduction performance} : 20\log_{10} \frac{C_n}{C_e} \quad (5)$$

3.3 지면에 의해 반사되는 소음의 억제를 통한 소음 저감 성능의 향상

(1) 흡음재 배치를 통한 반사되는 소음의 억제 앞서 지면이 있는 상황에서 자유 음장의 이론 모델

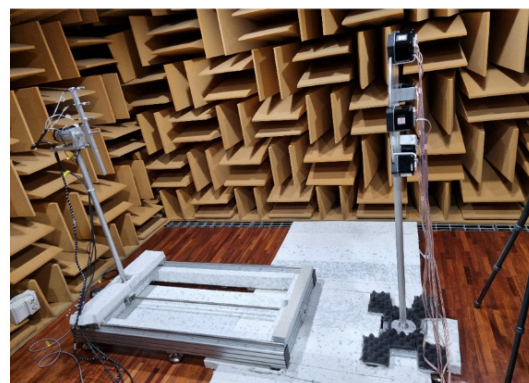
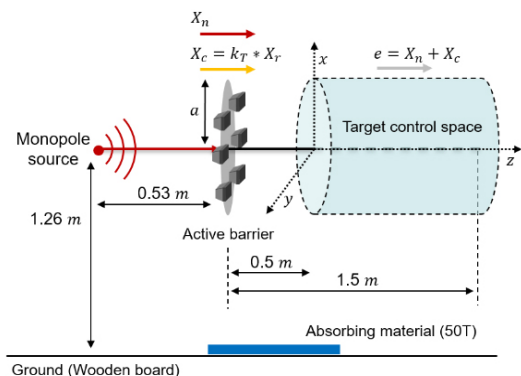


Fig. 10 Constructed noise control system on the reflecting surface with absorbing material

기반인 제어 필터를 사용하더라도 하이브리드 소음 제어 시스템을 통해 유효한 소음 저감을 달성할 수 있음을 확인하였다. 이는 소음 제어 시스템의 실적용 가능성 검증을 위한 중요한 단계를 거쳤다고 사료된다. 다만, 필요에 따라 소음 저감이 추가로 요구된다면 지면에 반사되는 소음을 억제해야 한다. 가장 쉬운 대처 방안으로 지면에 흡음재를 배치하는 것에 대해 검토해 보았다. 폴리 에스터 흡음재의 특성을 참고하여 컴술을 통해 시뮬레이션을 수행하였다⁽²⁹⁾. 이를 기반으로 충분한 효과를 볼 수 있는 흡음재의 두께와 지면에 배치하는 면적을 선정하였다. 구축한 실험 시스템은 Fig. 10에서 확인할 수 있다.

다만, 실험 환경 구축의 편의를 위해 폴리 에스터 대신 스펀지 형태의 흡음재를 사용하였으며, 몇 지점의 측정치를 확인하여 폴리 에스터와 시중에 판매되는 스펀지 형태의 흡음재의 효과가 거의 차이나지 않는 것을 확인하였다. 주파수별 소음 저

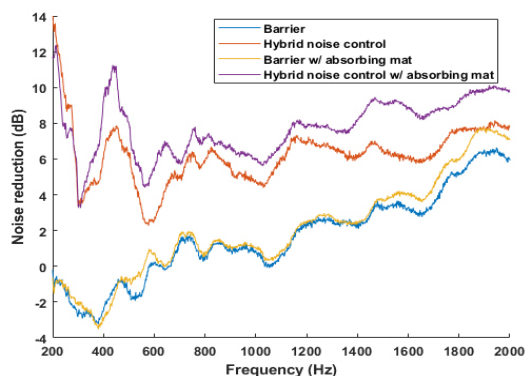


Fig. 11 Noise reduction through the barrier or hybrid noise control (blue, red: without absorbing material, yellow, purple: with absorbing material)

감량은 식 (4)와 같이 계산되었으며 결과는 Fig. 11과 같다.

지면에 배치된 흡음재를 통해, 지면에 반사되는 소음을 억제함으로써 소음 저감량이 높아지는 것을 관측할 수 있다. 식 (5)의 소음 저감 성능 지표를 살펴보면 방벽은 약 1 dB, 하이브리드 소음 제어는 약 7.6 dB의 소음 저감을 달성하는 것을 확인할 수 있다.

(2) 지면에 의해 반사되는 소음을 저감하기 위한 하이브리드 소음 제어 시스템의 추가 도입

이 항에서는 흡음재의 효과가 떨어지는 저주파 대역의 소음을 억제하기 위해 반사되는 소음을 목표로 능동소음제어를 도입한 경우를 보여주고자 한다. 지면에서 반사되는 소음 저감을 목표로 흡음재와 능동소음제어로 구성된 하이브리드 소음 제어 시스템으로 볼 수 있다. 구축한 실험 시스템은 Fig. 12에서 확인할 수 있다. 지면에 제어 스피커 하나를 배치하고 제어 공간의 중심을 소음 제어 지점으로 선정하였다. 소음 제어를 위한 관심 주파수 대역은 450 Hz 이하로 제한하였다. 반사 소음 저감을 위한 제어 필터는 제어 공간 중심 지점의 측정치를 통해 위너 필터 솔루션을 구하여 사용하였다⁽³⁰⁾. 식 (4)의 주파수별 소음 저감량 결과는 Fig. 13과 같다. 200 Hz ~ 400 Hz 대역에서 흡음재만 배치한 경우에 비해 1 dB ~ 5 dB 가량 소음 저감 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있다.

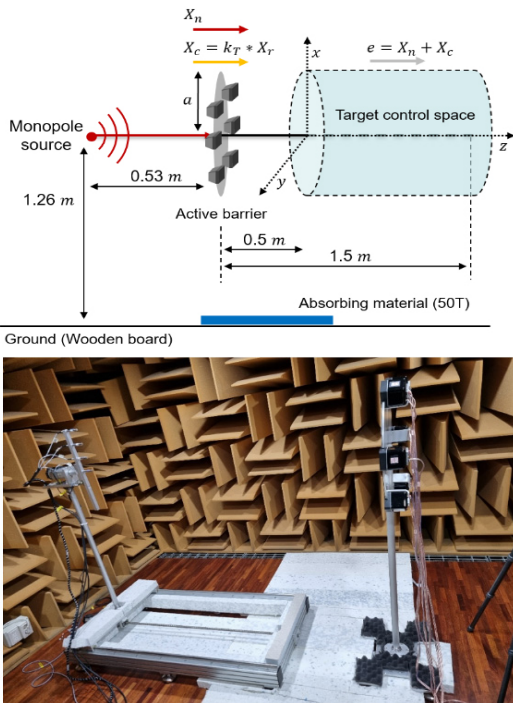


Fig. 12 Experimental set-up to apply additional ANC system to reduce the reflected noise from the reflecting surface

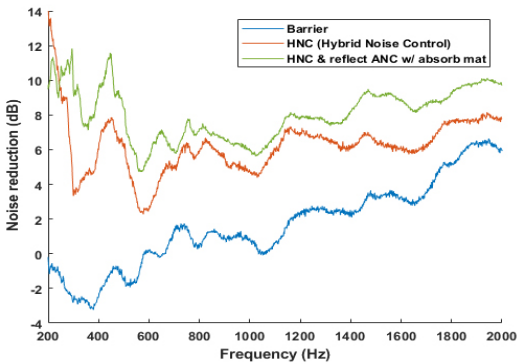


Fig. 13 Noise reduction (blue, red: noise barrier and hybrid noise control without absorbing material, green: applying additional hybrid noise control to reduce the reflected noise from the ground)

4. 결 론

컴팩트 하이브리드 소음 제어 시스템은 이동성 및 간편성을 목표로 제어 공간 내 오차 마이크로폰 없이

넓은 주파수 대역의 소음 저감을 달성할 방안으로 제안된 바 있다. 다만, 기존의 연구는 자유 음장 공간에 한정하여 소음 제어 시스템을 다루었고 이는 무향실과 같은 특수 공간 외에는 일반적으로 만족하지 않기에 현실에서의 실 적용 가능성을 검증했다고 보기 어렵다. 따라서, 이 연구에서는 컴팩트 소음 제어 시스템의 실 적용 가능성 검증을 위한 일환으로 지면이 있는 공간에서 적용 가능 여부를 시뮬레이션 및 실험을 통해 확인하였다. 직접적으로 전파되는 소음이 주요 하기에 유효한 소음 저감을 달성할 수 있음을 시뮬레이션을 통해 확인하고 실험을 통해 제어 공간 내 소음을 약 6 dB 저감할 수 있음을 결과로 보였다. 결론적으로 기존의 자유 음장 조건인 이론 모델을 통해 제어 필터를 간단히 구하면서도 효과적인 소음 저감을 달성할 수 있음을 확인하였다. 뿐만 아니라 필요하다면 추가 방안을 통해, 지면에 의해 반사되는 소음을 억제함으로써 소음 저감 성능을 향상할 수 있음을 보였다.

다만, 컴팩트 하이브리드 소음 제어 시스템은 실 적용을 위해 여전히 여러 후속 연구를 필요로 한다. 이동성 및 편의성을 위해 이론적으로 계산된 제어 필터를 적용하므로, 실 적용시 성능 저하가 필연적이다. 오차 분석을 통해 허용 오차를 확인하고 이를 만족할 수 있도록 최소의 마이크로폰을 사용하는 위치 추정 방식을 연구할 필요가 있다. 또한, 실제 소음 환경에서 환경의 변화 반영을 위한 제어 필터 보정 방안이나 참조 신호 획득에 따른 제어 필터 보정 방식과 같은 튜닝 기술 또한 조사할 가치가 있다. 더 나아가 제어 공간 주변의 산란체 혹은 제어 공간 주변에 반사면이 있는 상황에서의 적용가능성을 확인하여 실내 공간에서의 적용도 고려해 볼 수 있다. 다만, 여러 제약과 어려움이 있을 것으로 사료된다. 먼저, 소음장과 제어 음장의 높은 유사도를 유지해야 하기에 소음 제어 시스템이 소음원에 가깝게 배치해야 할 것이고 이에 따라 거리 오차 영향이 거처 소음원의 음향 중심을 정밀하게 추정할 필요가 있다. 혹은 해당 공간의 구조를 파악하고 제어 공간 외 마이크로폰 배치를 통해 벽면 반사 계수를 알아내 모든 반사면의 영향을 고려하여 제어 필터를 계산해야 한다. 더 나아가다면 입력 에너지 값을 최소로 하여 다른 공간에서 소음 에너지가 크게 향상하는 것을 방지하는 방법을 고려할 수 있다. 이외에도 음장 추정을

통한 하이브리드 소음 제어 방식을 발전시키기 위한 다양한 연구들이 추가로 이뤄질 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2020R1A2C1012904).

References

- (1) Magiera, A. and Solecka, J., 2021, Environmental Noise, Its Types and Effects on Health, *Roczniki Panstwowego Zakladu Higieny*, Vol. 72, No. 1, pp. 41~48.
- (2) WHO (World Health Organization), 2021, World Report on Hearing, Geneva, Switzerland. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
- (3) WHO (World Health Organization), 2022, Media Brief on #Safelistening, Geneva, Switzerland. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
- (4) HLAA (Hearing Loss Association of America), 2018, Hearing Loss Facts and Statistics, Bethesda.
- (5) Peris, E., 2020, Environmental Noise in Europe - 2020, European Environment Agency, Copenhagen, Denmark.
- (6) Jang, J.-K. and Kim, J.-K., 2014, Workers' Exposure Characteristics to Noise in Car Inspection Processes, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 24, No. 11, pp. 854~860.
- (7) Ministry of Employment and Labor, 2018, Result of Medical Examinations of Workers in 2017.
- (8) Ministry of Employment and Labor, 2020, Result of Medical Examinations of Workers in 2018.
- (9) Ministry of Employment and Labor, 2021, Result of Medical Examinations of Workers in 2019, 11-1492000-000029-10.
- (10) Ministry of Employment and Labor, 2021, Result of Medical Examinations of Workers in 2020, 11-1492000-000029-10.
- (11) Kuo, S. M. and Morgan, D. R., 1996, Active Noise Control Systems: Algorithms and DSP Implementations, John Wiley and Sons, New York.
- (12) Berkhout, A. J., de Vries, D. and Vogel, P., 1993, Acoustic Control by Wave Field Synthesis, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 93, No. 5, pp. 2764~2778.
- (13) Epain, N. and Friot, E., 2007, Active Control of Sound Inside a Sphere via Control of the Acoustic Pressure at the Boundary Surface, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 299, No. 3, pp. 587~604.
- (14) Ise, S., Yano, H. and Tachibana, H., 1991, Basic Study on Active Noise Barrier, *Journal of the Acoustical Society of Japan*, Vol. 12, No. 6, pp. 299~306.
- (15) Omoto, A. and Fujiwara, K., 1993, A Study of an Actively Controlled Noise Barrier, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 94, No. 4, pp. 2173~2180.
- (16) Lee, H. M., Wang, Z., Lim, K. M. and Lee, H. P., 2019, A Review of Active Noise Control Applications on Noise Barrier in Three-dimensional/open Space: Myths and Challenges, *Fluctuation and Noise Letters*, Vol. 18, No. 4, 1930002.
- (17) Han, N. and Qiu, X., 2007, A Study of Sound Intensity Control for Active Noise Barriers, *Applied Acoustics*, Vol. 68, No. 10, pp. 1297~1306.
- (18) Hart, C. R. and Lau, S.-K., 2012, Active Noise Control with Linear Control Source and Sensor Arrays for a Noise Barrier, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 331, No. 1, pp. 15~26.
- (19) Chen, W., Rao, W., Min, H. and Qiu, X., 2011, An Active Noise Barrier with Unidirectional Secondary Sources, *Applied Acoustics*, Vol. 72, No. 12, pp. 969~974.
- (20) Sohrabi, S., Pàmies Gómez, T. and Romeu Garbí, J., 2023, Proper Location of the Transducers for an Active Noise Barrier, *Journal of Vibration and Control*, Vol. 29, No. 9-10, pp. 2290~2300.
- (21) Berkhoff, A. P., 2005, Control Strategies for Active Noise Barriers using Near-field Error Sensing, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 118, No. 3, pp. 1460~1479.
- (22) Lee, S. and Park, Y., 2020, Noise Reduction Performance of Active Noise Control with Barrier using Theoretical Control Filter, *Proceedings of the International Conference on Motion and Vibration Control*, 10022.
- (23) Lee, S. and Park, Y., 2022, Compact Hybrid

Noise Control System: ANC System Equipped with Circular Noise Barrier using Theoretically Calculated Control Filter, *Applied Acoustics*, Vol. 188, 108472.

(24) Lee, S. and Park, Y., 2022, Performance Degradation Factors of Compact Hybrid Noise Control System using Theoretical Control Filter, *Proceedings of the 19th Asia-Pacific Vibration Conference*, 93.

(25) Lee, S. and Park, Y., 2023, Circular Active Noise Barrier Using Theoretical Control Filter Considering Interaction between Speaker and Barrier, *Scientific Reports*, Vol. 13, 2649.

(26) Lee, S., 2023, Active Noise Control Using Circular Barrier and Array Speakers, *Doctoral Dissertation*, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Daejeon, Korea.

(27) Yamada, K., Takahashi, H. and Horiuchi, R., 2015, Theoretical and Experimental Investigation of Sound Power Transmitting through Reflecting Plane with Low Surface Density in the Calibration of Reference Sound Sources, *Acoustical Science and Technology*, Vol. 36, No. 4, pp. 374~376.

(28) Vold, H., Crowley, J. and Rocklin, G. T., 1984, New Ways of Estimating Frequency Response Functions, *Sound & Vibration*, Vol. 18, No. 11, pp. 34~38.

(29) Park, H.-J., Jeong, M.-G., Shim, S.-Y. and Lee, J., 2003, A Study on the Effect of Acoustic Properties on the Absorption Characteristics of Polyester Fiber Materials, *Proceedings of the KSNVE Annual*

Autumn Conference, pp. 885~891.

(30) Hayes, M. H., 1996, *Statistical Digital Signal Processing and Modeling*, John Wiley & Sons, New York.



Sanghyeon Lee received the Ph.D. degree in Mechanical Engineering from KAIST in 2023. He has studied for development of hybrid noise control system by combining barrier and ANC. Currently, he is a post-doctoral researcher of Mechanical Engineering Research Institute in KAIST.



Youngjin Park B.S. in Seoul National University, Mechanical Eng., 1980, M.S. in Seoul National University, Mechanical Eng., 1982, Ph.D. in University of Michigan, 1987, University of Michigan Research Fellow, 1987~1988, New Jersey Institute of Technology Assistant Professor, 1988~1990, KAIST Mechanical Eng. Professor, 1990~Present, in System Dynamics and Applied Control Lab. Research interests are active and passive noise control, control strategy for ANC, road noise control, robust control and system identification.