

## 소형 히터펌퍼 압축기의 쉘 진동 기인 방사소음에 대한 능동소음제어

김성열·김도연·최준석·이상권\*

인하대학교 기계공학과

### Active Noise Control for Radiated Noise Caused by Shell Vibration of Small Heater Pump Compressor

Seongyoel Kim · Doyeon Kim · Junseok Choi · Sangkwon Lee\*

Department of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea  
(Received 22 August 2024 / Revised 22 August 2024 / Accepted 4 October 2024)

**Abstract** : The HVAC system in an autonomous bus generates middle-frequency vibroacoustic noise, mainly in the 100 to 600 Hz range, due to the shell vibration of the compressor. This noise, which is dominated by harmonics of the rotation frequency of compressor shaft and blower fan, is not only clearly perceptible but also contributes to passenger discomfort and negatively impacts the perceived quality of the vehicle. To mitigate this issue, an active noise control(ANC) system was developed. While the commonly used filtered-X least mean squared(FXLMS) algorithm is effective for noise control in reciprocating compressors, to enhance the effectiveness of ANC, a momentum algorithm was implemented, offering a lower residual error and faster convergence rate compared to FXLMS. This led to the development of a dynamic system-based ANC algorithm, which significantly improved noise reduction.

**Key words** : Compressor(압축기), Vibroacoustic noise(진동음향 소음), Active noise control(능동 소음 제어), Momentum algorithm(모멘텀 알고리즘), Fast convergence(빠른 수렴)

#### Nomenclature

HVAC : heating ventilation and air conditioning  
ANC : active noise control  
LMS : least mean square  
FXLMS : filtered-x least mean square  
SPL : sound pressure level  
DFTs : discrete fourier transforms  
A/D : digital to analog

#### Subscripts

$n$  : time index  
 $\eta$  : mass of particle  
 $b$  : damping  
 $\mu, \beta$  : step size  
 $\alpha$  : normalized step size

$\gamma$  : inertia  
 $\xi$  : cost function  
 $L$  : filter length  
 $v$  : leakage factor  
 $f$  : frequency of interest  
 $\nabla$  : gradient  
 $\Delta$  : difference  
 $v$  : accumulated gradient  
 $\hat{P}_x$  : power of reference signal  
 $x(n)$  : reference signal  
 $w(n)$  : weight vector  
 $e(n)$  : error signal  
 $d(n)$  : desired signal  
 $y(n)$  : output signal  
 $s(n)$  : impulse response of secondary path  
 $S(z)$  : secondary path transfer function

\*Corresponding author, E-mail: sangkwon@inha.ac.kr

\*This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

- $P(z)$  : primary path
- $\hat{S}(z)$  : estimated transfer path function of the secondary path
- $W(z)$  : time-varying adaptive filter
- $S_{dx}(f)$  : cross-power spectrum
- $S_{dd}(f), S_{xx}(f)$  : auto-power spectra

### 1. 서론

전기자동차의 HVAC 소음은 전기자동차 실내에서 승객의 승차감에 큰 영향을 미친다. 본 연구는 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 일반적인 승용 전기자동차의 HVAC 시스템과 달리 자율주행 버스 좌석 아래에 설치되는 개별 HVAC 시스템의 소음을 제어하는 기술을 개발하고자 한다. 이러한 HVAC 시스템은 냉장고 시스템과 유사하게 압축기, 증발기, 응축기, 팬 등과 같은 구성요소로 이루어져 있다. 따라서 냉장고 시스템에 사용되는 소음 제어 기술을 적용할 수 있다. 이러한 HVAC 부품 중 압축기의 쉘 진동은 왕복식 압축기의 회전 주파수에 고조파를 이루는 소음을 발생시킨다. 수동 제어와 능동 제어의 조합인 하이브리드 방식은 지배적인 소음의 전체 주파수 범위를 줄이는데 사용할 수 있다. ANC는 중·저주파 소음을 저감하는 기술로, 수동 제어와는 달리 추가적인 무게나 공간을 차지하지 않으면서 효과적으로 소음을 감소시킨다.<sup>1)</sup>

반대로 흡·차음재를 사용하는 수동 제어는 고주파 소음을 감소시키는데 효과적이다.<sup>2,3)</sup> ANC는 1차 소음과 크기는 같지만 위상은 반대인 안티 노이즈를 2차로 생성하여 1차 소음의 크기를 제어하는 기술이다. LMS 알고리즘은 적응형 필터링에 사용하며, 시간에 따라 변하는 소음 특성을 처리하기 위한 ANC 시스템의 핵심 요소이다.<sup>4)</sup> 이러한 효과에도 불구하고 시스템 내의 공간 제약으로 인해 스피커 크기가 제한되면 100 Hz 미만의 저주파 소음 감소에 영향을 미친다.<sup>5)</sup> 본 연구에서는 스피커의 크기가 2.25인치이므로 100 Hz에서 600 Hz 주파수 범위를 목표로 ANC를 적용했다. 하지만 이 주파수 범위는

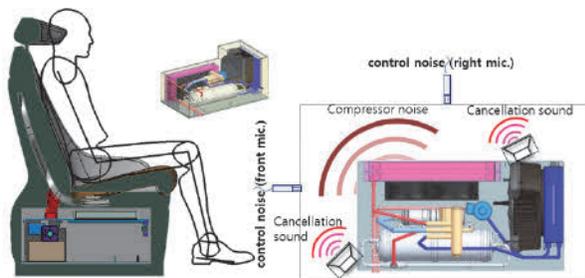


Fig. 1 HVAC system of autonomous bus seat

ANC를 적용하기에는 상대적으로 높다. 이러한 중 주파수에서는 1차 짧은 파장으로 인해 ANC가 어렵게 때문이다. 따라서 빠른 수렴이 가능한 ANC 알고리즘이 필요하다. ANC 알고리즘에서는 FXLMS 알고리즘이 널리 사용되는데, 이는 견고하고 계산이 적게 필요하기 때문이다. 그러나 LMS 알고리즘의 수렴 속도는 고유값 분산이라는 현상으로 인해 느리다.<sup>6)</sup> 본 연구에서는 LMS 알고리즘의 성능을 개선하기 위해 모멘텀 알고리즘<sup>7)</sup>을 개발하고 이것을 자율주행 버스 좌석의 개별 HVAC 시스템의 ANC에 적용하여 HVAC 시스템에서 발생하는 소음을 능동적으로 제어하고자 한다.

### 2. FXLMS 알고리즘 이론

Least Mean Square(LMS) 알고리즘의 기본적인 목적은 평균 제곱 오차를 최소화하는 최적 필터 계수를 계산하는 것이다. 최적화는 최급강하법을 사용하며, 각 반복은 오류 표면의 기울기와 반대 방향으로 진행된다.<sup>4)</sup>

$$w(n+1) = w(n) + \mu(-\nabla_n) \tag{1}$$

오류 신호  $e(n)$ 은 원하는 신호  $d(n)$ (이 경우, 제거된 소음)와 출력 신호  $y(n) = x(n)w(n)$  사이의 차이로 정의된다.

$$e(n) = d(n) - y(n) = d(n) - x^T(n)w(n) \tag{2}$$

따라서 제곱 오차의 기울기는 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla e^2(n) = -2e(n)x(n) \tag{3}$$

식 (3)을 식 (1)에 대입하면 LMS 알고리즘의 최종 형태는 다음과 같다.

$$w(n+1) = w(n) + \mu x(n)e(n) \tag{4}$$

여기서  $\mu$ 는 알고리즘의 안정성과 정상 상태 성능에 중요한 수렴 인자를 나타낸다. 알고리즘은 참조 신호의 전력( $\hat{P}_x$ )과 필터 길이( $L$ )에 반비례하는 시간 가변 스텝 크기를 사용한다. 이는 다음과 같이 표현된다.

$$\mu(n) = \frac{\alpha}{L\hat{P}_x(n)} \tag{5}$$

여기서  $\alpha$ 는 정규화된 스텝 크기로  $0 < \alpha < 2$  범위 내에 있다. 참조 신호의 전력은 다음 공식을 사용하여 추정한다.

$$\hat{P}_x(n) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} x^2(n-m) \quad (6)$$

마이크로폰, 필터, 앰프와 같은 전자 제품을 포함하는 구현에서는 스피커에서 오류 마이크로폰까지의 신호 경로인 2차 경로가 ANC 시스템의 효율성에 중요한 영향을 미친다. Burgess<sup>8)</sup>는 시스템 성능을 향상시키기 위해 2차 경로 효과를 보상하는 방법을 제안했다. 이는 참조 신호를 2차 경로를 모방하는 필터로 필터링하여 이루어지며, 이로 인해 Filtered-X LMS(FXLMS) 알고리즘이 개발되었다. FXLMS 알고리즘에서 참조 신호는 다음과 같이 재정의된다.

$$\hat{x}(n) = s(n) * x(n) \quad (7)$$

여기서  $s(n)$ 은 2차 경로의 임펄스 응답이고, 선형 컨볼루션으로 정의된다. 제곱 오차의 기울기는 다음과 같이 재정의된다.

$$\nabla e^2(n) = -2\hat{x}(n)e(n) \quad (8)$$

FXLMS 알고리즘은 최적 소음 제거를 달성하기 위해 필터 가중치를 반복적으로 갱신한다.

$$w(n+1) = w(n) + \mu \hat{x}(n)e(n) \quad (9)$$

일반적으로 2차 경로 전달 함수  $S(z)$ 는 알 수 없기 때문에 별도의 LMS 알고리즘을 통해 추정할 수 있다. 적응형 필터 출력은 최적 필터와 참조 신호 사이의 선형 컨볼루션에 의해 계산된다.

$$y(n) = \sum_{l=0}^L w_l(n) \hat{x}(n-l) \quad (10)$$

FXLMS 알고리즘의 블록 다이어그램은 Fig. 2와 같다. 여기서  $\hat{S}(z)$ 은 2차 경로의 추정된 전달 함수이고,  $P(z)$ 은 1차 경로,  $W(z)$ 은 시간에 따라 변하는 적응형 필터를 의미한다.

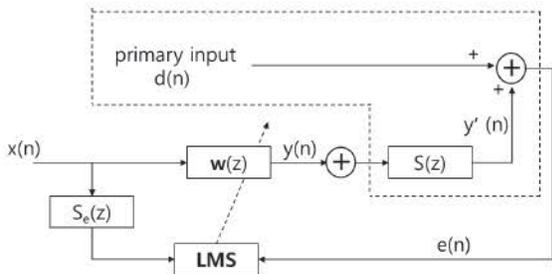


Fig. 2 Block diagram of ANC system using FXLMS algorithm

### 3. 모멘텀(Momentum)알고리즘의 이론

모멘텀 알고리즘도 경사하강법으로부터 유도할 수 있고, 경사하강법은 ANC에서 오류 표면인 비용함수  $\xi$ 에 따라 하강한다. 최소화해야 할 비용함수 (Cost function)는 식 (2)의 오차 신호의 제곱이며 식 (11)과 같이 표현된다.

$$\xi(w(n)) = \frac{1}{2} w(n)^T R w(n) - p^T w(n) + \frac{1}{2} E[d^2(n)] \quad (11)$$

여기서  $R$ 은 입력벡터  $x(n)$ 의 자기상관 행렬(Autocorrelation matrix)이며,  $p$ 는 원하는 신호  $d(n)$ 와 입력 신호  $x(n)$  사이의 상호상관벡터(Cross correlation vector)이다. 이 시스템은 오류 표면을 따라 이동하는 질량을 가진 동적 시스템과 유사하다. 이때 이동 방향은 잡재된 기울기  $\nabla \xi$ 에 의해 결정되고, 다음과 같이 표현된다.<sup>9)</sup>

$$\frac{dw}{dt} = -\nabla \xi \quad (12)$$

그러므로 식 (12)에서  $\nabla \xi(w) = 0$ 일 때 국소 최솟값이고, 이는 최소점이 정확히  $\nabla \xi(w) = 0$ 에서 얻을 수 있는 유일한 방정식은 아니며, 시스템의 움직임을 제한한다. 다시 말해, 시스템은 목표 지점으로 한번에 수렴하지 않고, 진동하면서 점차 수렴한다. 이는 발생하는 진동을 고려한 단순 진자로 간주할 수 있다. 이를 이용해 얻은 2차 미분 방정식은 다음과 같다.

$$\eta \frac{d^2 w}{dt^2} = -\nabla \xi(w) - b \frac{dw}{dt} \quad (13)$$

만약  $\eta \geq 0$ 이면, 입자의 질량을 고려하는 것이고,  $b \geq 0$ 이면, 시스템의 변화 과정 동안 발생하는 댐핑을 고려하는 것이다. 기울기  $\nabla \xi(w) = 0$ 일 때 식 (12)에서 미분 방정식은 최소점에 도달한다.  $\eta$ 이 0에 수렴할 때, 이는 식 (12)에 해당한다.  $\eta$ 이 양수인 경우, 식 (13)에 의해 표현된 궤적은  $-\nabla \xi(w)$ 에 의해 제시된 방향으로 점차 방향을 바뀌가며 모멘텀의 증거를 보여준다.<sup>9)</sup> 식 (13)에서 단순 유한 차분 추정은 다음과 같다.

$$\eta \frac{w(t+\Delta t) - 2w(t) + w(t-\Delta t)}{(\Delta t)^2} \approx -\nabla \xi(w(t)) - b \frac{w(t+\Delta t) - w(t)}{\Delta t} \quad (14)$$

요약하면,

$$w(t+\Delta t) = w(t) - \beta \nabla \xi(w(t)) + \gamma (w(t) - w(t-\Delta t)) \quad (15)$$

ANC 시스템에서 신호들은 연속 신호가 아닌 이산 신

호로 처리되므로  $t = n$ ,  $\Delta t = 1$ 이다. 그러므로 식 (15)는 이산 신호에 대해 다음과 같이 재정리할 수 있다.

$$w(n+1) = w(n) - \beta \nabla \xi(w(n)) + \gamma(w(n) - w(n-1)) \quad (16)$$

이 알고리즘은 Polyak's heavy ball 방식이라고 정의된다. 약간의 수정을 통해 Nesterov's 최적화라는 관련된 식도 얻을 수 있다. 만약  $\xi$ 이 볼록한 이차 방정식이라면, 식 (16)(각 반복에 따라 달라지는  $\beta$ 와  $\gamma$ 의 적응적 선택을 허용함)에서 접근은 Chebyshev 반복법으로 부른다. 또한, 식 (16)은 다음과 같이 재정의를 할 수 있다.

$$\begin{aligned} v(n) &= w(n+1) - w(n) & (17) \\ &= -\beta \nabla \xi(w(n)) + \gamma(w(n) - w(n-1)) \\ &= -\beta \nabla \xi(w(n)) + \gamma v(n-1) \end{aligned}$$

식 (17)에서 다음과 같이 두 개의 방정식으로 나눌 수 있다.

$$\begin{cases} w(n+1) = w(n) + v(n) \\ v(n) = -\beta \nabla \xi(w(n)) + \gamma v(n-1) \end{cases} \quad (18)$$

여기서  $v$ 는 누적 기울기,  $\beta$ 는 스텝 크기,  $\gamma$ 는 관성을 나타내며,  $0 < \beta < 1$ 이고, 일반적으로  $\beta = 0.9$ 을 사용한다. 또한,  $\nabla \xi(w(n))$ 은 식 (12)에서  $\nabla \xi(n)$ 로 나타내고, 식 (18)에서  $\nabla \xi(w(n))$ 은 식 (9)에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla \xi(w(n)) = 2[\nabla e(n)]e(n) = -2x(n)e(n) \quad (19)$$

식 (18)과 식 (19)에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{cases} w(n+1) = w(n) + v(n) \\ v(n) = \mu x(n)e(n) + \gamma v(n-1) \end{cases} \quad (20)$$

$\mu$ 은 스텝 크기를 나타낸다. 즉,  $\mu$ 은 LMS 알고리즘처럼 안정성과 정상 상태 성능에 중요한 수렴 계수이다.

그러므로, 수렴 성능은  $\mu$ 에 의해 결정되므로 적절한  $\mu$ 값을 찾아야 한다. LMS와 모멘텀 알고리즘의 수렴 성능 비교를 위해, 임의의  $R, P$  값에 대한 비용함수를 식 (11)을 통하여 구하고, 비용함수에 대해 LMS 알고리즘과 모멘텀 알고리즘을 적용하여 수렴성능을 계산하였다. 두 알고리즘에 대한 수렴결과를 Fig. 3에 시각화로 나타내었다. 모멘텀 알고리즘의 수렴성능이 우수함을 확

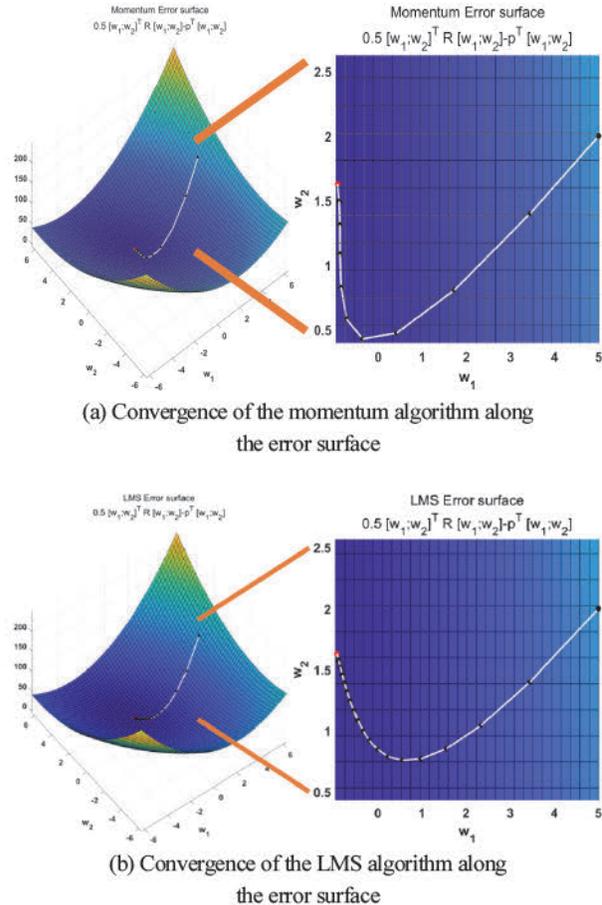


Fig. 3 Comparison of convergence performance the momentum and LMS algorithm along the error surface

인할 수 있다. 본 연구에서는 모멘텀 알고리즘을 ANC에 적용하였다.

### 4. HVAC 압축기 소음 ANC

#### 4.1 알고리즘 흐름도

본 연구에서 사용된 ANC 시스템은 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 다중 출력 구성(1 x 2 x 2)을 갖는 단일 참조를 특징으로 한다. 이 시스템은 압축기 헬에 가속도계를 붙여 참조 신호를 받는다. 스피커 하나는 압축기 전면에, 다른 하나는 우측에 위치한다. 오류 신호들은 HVAC 시스템의 전면과 우측에 근접 영역에 전략적으로 배치된 마이크로폰에 의해 얻었다. 참조 신호와 오류 신호들은 필터 계수의 계산에 중요하고 이 것은 식 (10)과 식 (20)을 이용하여 실행되는 과정이다. 참조 신호는 알고리즘에 입력되기 전에 모델링된 2차 필터를 통해 필터링 과정을 거친다는 점에 유의해야 한다. 이 필터들은 아날로그 필터와 증폭기 같은 다양한 전자 부품의 특성뿐만 아니라

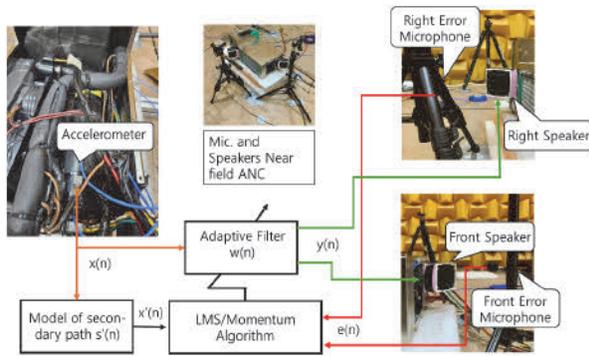


Fig. 4 Block diagram of ANC system using FXLMS algorithm

스피커에서 오류 마이크론까지의 음향 경로를 포함하는 전달 함수를 나타낸다. 이후, 도출된 최적 필터 계수는 식 (11)에 따라 참조 신호와 합성된다. 이 과정은 목표 소음 신호  $d(n)$ 에 대한 안티 노이즈 신호로 작동하는 출력 신호  $y(n)$ 을 생성한다.

#### 4.2 HVAC ANC 시스템 실험 설정

실험 설정에서는 노트북 컴퓨터를 dSPACE Autobox I/O보드와 연결하여 사용했으며, 이는 Fig. 5에 나타나 있다. 이 설정에서 dSPACE Autobox는 신호를 아날로그에서 디지털로, 그리고 그 반대로 변환하는 중요한 역할을 한다. 또한, 이 장치는 ANC를 위한 MATLAB Simulink 코드도 실행한다. 오류 마이크론과 가속도계에서 수집된 신호는 불확실한 주파수 성분 때문에 원래의 형태로는 사용할 수 없다. 따라서 저역 통과 필터링 과정을 거치는 것이 필수적이다. 이 단계는 적절한 샘플링 주파수를 결정하는데 도움이 된다. 본 연구에서는 저역 통과 필터를 ANC의 목표 주파수 중 최고 주파수를 약간 초과한 400 Hz를 차단 주파수로 설정했다. 신호를 왜곡시키는 앨리어싱 현상을 막기 위해 Nyquist-Shannon 샘플링 정리에 따라 샘플링 주파수는 신호의 주파수 성분의 최소 두 배 이상이 되어야 한다. 이 경우에는 신호의 주파수 성분의 두 배를 초과하는 2048 Hz의 샘플링 주파수가 선택되었다. 또한, 스피커로 전달되는 출력 신호  $y(n)$ 은 디지털-아날로그(A/D) 변환 과정에서 발생할 수 있는 재구성 오류를 수정하기 위해 필터링이 필요하다. 따라서 이 재구성 필터의 차단 주파수는 A/D 변환 중 발생할 수 있는 재구성 오류를 제거하고, 목표 주파수 범위(100-400 Hz) 밖에서 스피커를 과도하게 자극하여 알고리즘이 발산하는 것을 방지하기 위해 400 Hz로 설정됐다. 마지막으로, 이 신호는 앰프를 사용하여 증폭되어 스피커를 효과적으로 구동한다.

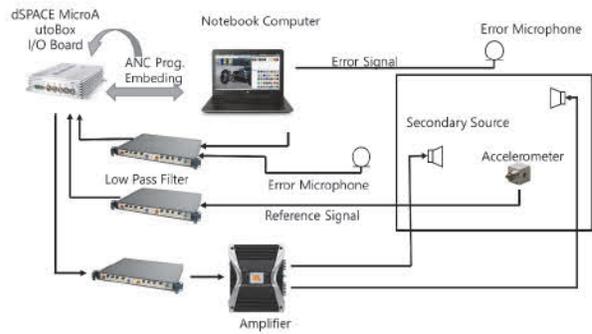


Fig. 5 Experimental setup for the implementation of ANC system

#### 4.3 오류 마이크론 위치

HVAC 시스템의 SPL(기본 음압 수준)을 측정하기 위해 5개의 마이크론을 Fig. 6에 나타난 것처럼 규정된 표<sup>10)</sup>에 따라 HVAC 시스템 중심에서 1 m 거리에 설치했다. 측정된 SPL 결과에 따르면, 주파수 범위(0-5000 Hz)에서의 전체 A-가중 음압 수준은 Table 1에 나열됐다.

측정된 소음의 주요 주파수는 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 압축기 축의 회전 주파수(105 Hz)와 냉각 팬의 회전 주파수(140 Hz) 및 그 고조파와 관련이 있다. 근접장에서 압축기 및 팬의 헬에서 방사되는 진동음향 소음을 능동적으로 상쇄하기 위해 오류 신호  $e(n)$  마이크론은 각각 압축기의 앞면과 오른쪽에 설치되었다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 두 개의 보조 스피커가 압축기 근처에 설치됐다. ANC가 가능한 주파수 대역은 보조 스피커의 크기 제한과 음파의 파장 때문에 100 Hz에서 400 Hz이다.

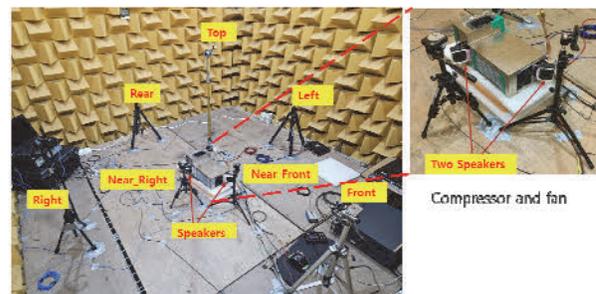


Fig. 6 Setup of seven microphones and two speakers for ANC of HVAC system

Table 1 A-weighted sound pressure level of all microphones

Microphones	Front	Right	Left	Rear	Top
Average SPL	80.1 dB	83.2 dB	75.8 dB	77.1 dB	78.3 dB

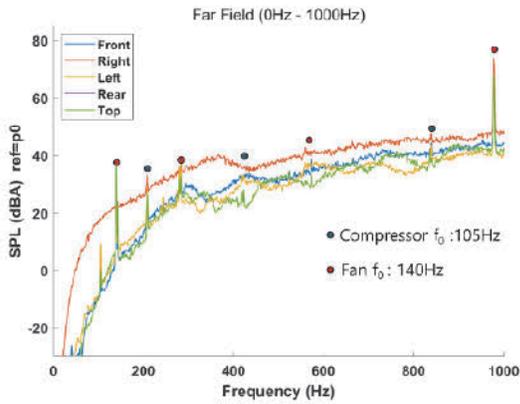


Fig. 7 Frequency analysis of the sound pressure measured at the five microphones

#### 4.4 참조 신호 선택

일반적으로 일관성 함수는 입력 신호와 출력신호와 같은 두 신호 간의 선형 관계를 평가하는데 사용된다.<sup>11)</sup> 따라서 일관성 값은 ANC 시스템 성능 평가에 중요한 매개변수이다.<sup>11)</sup> 이에 따라, 일관성의 크기의 제곱은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$C_{dx}(f) = |\gamma_{dx}(f)|^2 = \frac{|S_{dx}(f)|^2}{S_{dd}(f)S_{xx}(f)} \quad (21)$$

$f$ 는 관심있는 주파수로 정의되며,  $S_{dx}(f)$ 은 교차 전력 스펙트럼,  $S_{dd}(f)$ 과  $S_{xx}(f)$ 은 각각  $d(n)$ 과  $x(n)$ 의 자기 전력 스펙트럼이다.  $z$ 방향의 가속도계 신호와 앞면, 오른쪽 마이크로폰 사이의 일관성 값은 압축기 작동 주파수와 그 고조파에서 1에 근접했다. 이것은 높은 상관성을 나타내며, 압축기에서 발생하는 진동음향 소음이 효과적으로 제어될 수 있음을 시사한다.

일관성 결과에 따르면,  $z$ 축 방향에서 수집된 가속도계

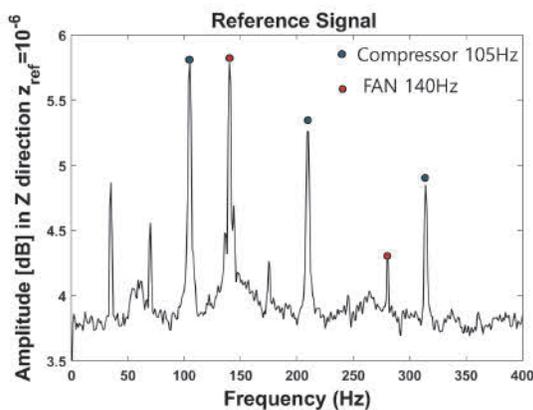
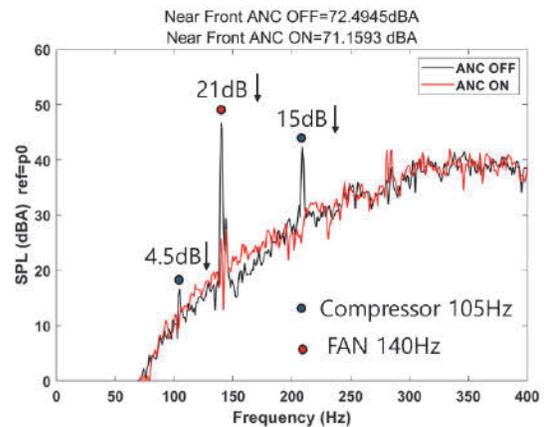


Fig. 8 Fourier transform of the reference signal

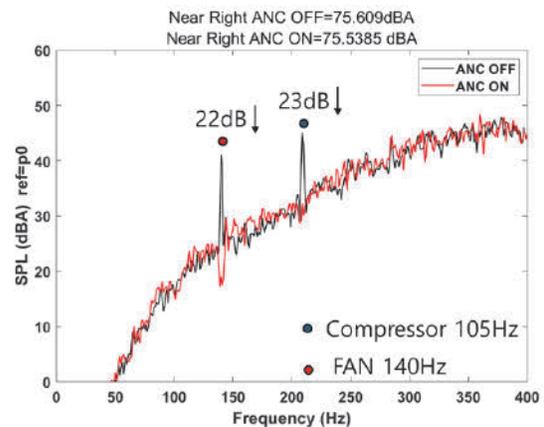
데이터가 참조 신호  $x(n)$ 으로 사용되었고, 이는 Fig. 4에서 확인할 수 있다. 참조 신호의 푸리에 변환은 Fig. 8에 제기되어 있으며, 상세한 스펙트럼을 볼 수 있다. 그래프의 피크는 압축기와 팬의 작동 주파수를 나타낸다.

#### 4.5 2차 경로 측정

스피커와 오류 마이크로폰 간의 전달 함수를 나타내는 2차 경로 모델의 추정은 이 모델들이 시간 불변이라는 가정에 기반한다. 따라서 이러한 필터 계수를 결정하기 위해 오프라인 모델링 기법이 구현되었다. 넓은 주파수 범위를 포함하는 광대역 백색 소음은 이러한 추정에 이상적인 신호로 인식되며, 이 과정에서 사용된다. 백색 소음이 스피커에 입력되고, 그에 따른 음압은 오류 마이크로폰으로 측정된다. 이 과정에서 적응형 필터 알고리즘을 사용하면 2차 경로에 대한 필터 계수를 결정할 수 있어 정확한 모델 추정이 가능해진다.<sup>12,13)</sup>



(a) Fourier transform of the front error microphone



(b) Fourier transform of the right error microphone

Fig. 9 Fourier transform of the error microphones data without and with ANC

### 5. 결론

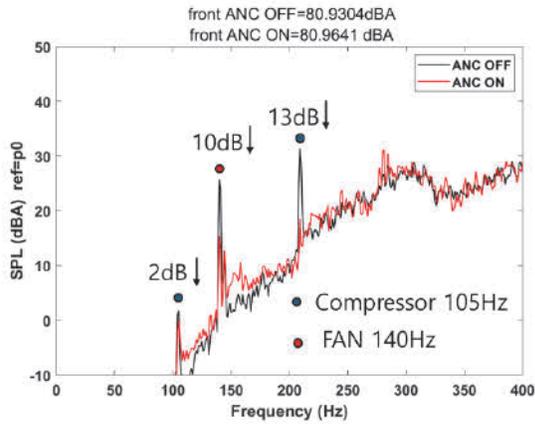
본 연구에서는 자율주행 버스 과정의 HVAC 시스템 내에서 모멘텀 알고리즘을 적용한 사례를 제시한다. HVAC 시스템은 주로 100 Hz에서 400 Hz 주파수 범위에서 발생하는 진동음향 소음의 주요 원인이다. 이 소음은 주로 압축기 셀의 회전 주파수 및 그 고조파에서 발생하는 진동으로 인해 주파수 응답에서 두드러진 피크를 형성한다. 이러한 소음을 제어하기 위해 ANC 시스템이 개발되었다. ANC 시스템의 참조 신호는 압축기 셀에 부착된 가속도계에서 추출되었다. HVAC 시스템의 소음 수준은 근거리에서 최대 20 dB, 원거리에서 최대 10 dB까지 감소되었다. 연구 결과, 모멘텀 알고리즘이 HVAC 시스템의 전체 소음 수준을 줄이는데 매우 효과적이라는 결론을 내렸다.

### 후 기

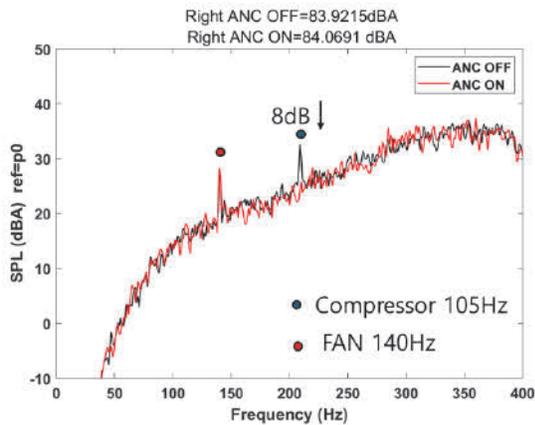
이 연구는 한국산업기술평가관리원(KEIT)의 지원을 받아 수행되었다(No.20018706). 이 연구는 한국 정부(과학기술정보통신부, MSIT)의 지원을 받아 한국연구재단(NRF)에서 제공한 연구비로 수행되었다(No.2022R1F1A1062889).

### References

- 1) S. M. Kuo and D. R. Morgan, Active Noise Control Systems, Vol.4, Wiley, New York, 1996.
- 2) D. G. Smith, M. F. Arnold, E. W. Ziegler, K. Egtesadi and M. Brown, "A Systems Approach to Appliance Compressor Quieting Using Active Noise Control Techniques," International Compressor Engineering Conference, p.821, 1992.
- 3) W. Hwang, I. Oh, B. Kim, S. Park and K. Ryu, "A Study on Noise Radiation from Compressor Shell," International Compressor Engineering Conference, p.1760, 2006.
- 4) B. Widrow and S. D. Stearns, Adaptive Signal Processing, Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, 1985.
- 5) J. M. Ku, W. B. Jeong and C. Hong, "Active Control of Compressor Noise in the Machinery Room of Refrigerators," Noise Control Engineering Journal, Vol.67, No.5, pp.350-362, 2019.
- 6) J. M. Ku, W. B. Jeong and C. Hong, "Controller Design for Active Noise Control of Compressor by Using the Time Window POCS Technique," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol.34, pp.2693-2700, 2020.



(a) Fourier transform of the front error microphone



(b) Fourier transform of the right error microphone

Fig. 10 Fourier transform of the far field microphones data without and with ANC

### 4.6 ANC 결과

본 연구에서는 압축기와 팬 소음의 ANC를 위해 모멘텀 알고리즘을 사용했다. 오류 마이크로폰에서 포착된 신호의 이산 푸리에 변환(DFTs)은 Fig. 9에 그래프로 나타났다. 이 그림에서 모멘텀 알고리즘이 특히 피크 주파수 감소 측면에서 뛰어난 성능을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 앞면과 오른쪽 마이크로폰의 경우, 주파수 스펙트럼 전반에 걸쳐 피크 감소 성능이 매우 유사하다.

팬 소음의 감소 수준은 140 Hz에서 최대 22 dB, 압축기 소음은 최대 23 dB였다.

앞면과 오른쪽 마이크로폰으로 측정된 소음의 감쇠 수준은 Fig. 10에 나타나 있다. 그 결과, 원거리 마이크로폰으로 측정된 제어되지 않은 소음도 근거리 소음의 ANC를 통해 감쇠되었다.

- 7) S. R. Meena and C. S. Rai, "Effect of Eigenvalue Spread in Noise Cancellation of Two Sensory Systems Using Adaptive Algorithms," *Journal of Statistics and Management Systems*, Vol.23, No.1, pp.157-169, 2020.
- 8) J. C. Burgess, "Active Adaptive Sound Control in a Duct: A Computer Simulation," *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.70, No.3, pp.715-726, 1981.
- 9) G. Nakerst, J. Brennan and M. Haque, "Gradient Descent with Momentum — To Accelerate or to Super-Accelerate?," *arXiv*, arXiv:2001.06472v1, pp.1-23, 2020.
- 10) International Organization for Standardization, *Acoustics — Noise Test Code for Compressors and Vacuum Pumps — Engineering Method (Grade 2)*, ISO Standard No. 2151:2004, <https://www.iso.org/standard/31316.html>, 2024.
- 11) K. Shin and J. Hammond, *Fundamentals of Signal Processing for Sound and Vibration Engineers*, John Wiley & Sons, Chichester, 2008.
- 12) S. K. Lee, S. Lee, J. Back and T. Shin, "A New Method for Active Cancellation of Engine Order Noise in a Passenger Car," *Applied Sciences*, Vol.8, p.1394, 2018.
- 13) H. W. Kim, H. S. Park, S. K. Lee and K. H. Shin, "Modified-Filtered-u LMS Algorithm for Active Noise Control and Its Application to a Short Acoustic Duct," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.25, pp.475-484, 2011.