

차량 능동 소음 제어 시스템에서 제어 위치 선택에 따른 소음 저감 성능에 관한 예비 평가

Preliminary Evaluation of Noise Suppression Performance by Selected Control Position in an Active Noise Control System of a Passenger Car

김 성 현[†] · M. Ercan Altinsoy* · 김 중 관**
Seonghyeon Kim[†], M. Ercan Altinsoy* and Joong-Kwan Kim**

(Received July 13, 2022 ; Revised August 3, 2022 ; Accepted August 3, 2022)

Key Words : Active Noise Control(능동 소음 제어), Interior Noise(실내 소음), Road Noise(로드 노이즈),
Vehicle(차량), Adaptive Control(적응 제어)

ABSTRACT

This study uses a modified cost function with weighted error signal channels to demonstrate that the vehicle active noise control system can focus control efforts on one specific seat. In a conventional active noise control system for road noise suppression inside a passenger car, the control algorithm targets the attenuation of all seats, hence affecting the maximum performance that can be obtained when applied to a single seat. To address this limitation, we employed weighting factors in the error signal to control the selected seat positions only. A practical active noise control system was implemented in a large sedan to investigate the effect of the weighting factor on the noise attenuation performance. Experimental results showed that the error weighting factor strategy increased attenuation of the target seats by up to 1.15 dB more than in the case of the entire seat control.

기 호 설 명

d : 외란 신호
 e : 오차 신호
 P : 제1경로
 q : 가중 계수
 S : 제2경로
 \hat{S} : 제2경로 모델
 u : 제어 신호
 W : 제어 필터

x : 참조 신호
 x' : 제2경로를 필터링한 참조 신호
 y : 제2경로를 통과한 제어 신호
 μ : 수렴 계수

1. 서 론

최근 10여 년 동안 자동차 소음 진동 분야에서는 차량 소음을 저감하는 방안으로 능동 제어 기술이 활

[†] Corresponding Author ; Member, Technische Universität Dresden, Hyundai Motor Company, Senior Research Engineer
E-mail : seonghyeon.kim@tu-dresden.de, seonghyeon.kim@hyundai.com
* Technische Universität Dresden, Professor
** Member, Hanseo University, Professor

A part of this paper was presented at the KSNVE 2021 Annual Autumn Conference
[‡] Recommended by Editor Won Seok Yang
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

발히 적용되고 있다⁽¹⁻³⁾. 차량 능동 제어 기술은 제어 대상과 사용 하드웨어의 형태에 따라 능동 소음 제어(ANC, active noise control), 능동 음향 설계(ASD, active sound design), 능동 구조 음향 제어(ASAC, active structural acoustic control) 등 다양한 형태로 응용 기술들이 개발되고 있다. 그중 중첩의 원리를 이용한 ANC 기술은 일반적인 수동적 소음 저감 방법에 비해 질량 증대나 큰 구조 설계 변경 없이 효과적으로 저주파수 대역의 구조 기인 소음(structure-borne noise)을 저감할 수 있다. 이에 따라 완성차 업계에서는 차실 내 구조 기인 소음 저감 방안으로 ANC 기술의 차량 적용을 확대하고 있다. 차량 ANC에서 주요하게 저감 목표로 설정하는 구조 기인 소음은 파워트레인 부밍 소음(booming noise)과 로드 노이즈(road noise)다. 엔진 부밍 소음 저감을 위한 ANC 기술이 1990년대 초에 최초로 차량에 적용된 반면, 로드 노이즈 ANC 기술은 2020년에 이르러 처음으로 차량에 양산 적용되었다. 이는 로드 노이즈 ANC 기술이 엔진 부밍 소음 ANC 대비 필요로 하는 센서의 수량이 많고, 제어를 위한 연산량이 크기 때문이다. 하지만 디지털 센서의 적용, 고성능 제어기의 저가화, 그리고 성숙된 제어 기술의 발전에 따라 로드 노이즈 ANC 또한 양산화가 활발하게 이뤄지고 있다⁽³⁾. 이 연구에서는 로드 노이즈 능동 제어(ARNC, active road noise control) 시스템에 대해 다룬다.

차량에서 ARNC 알고리즘은 일반적으로 피드 포워드 제어(feedforward control) 기법이 적용된다^(4,5). 특히, ARNC에서는 FxLMS(filtered x least mean square) 알고리즘을 주로 이용하여 차실 내 로드 노이즈를 상쇄(cancellation)시킨다⁽⁶⁾. ARNC 시스템에서 높은 소음 저감 성능을 얻기 위해서는 참조 신호와 오차 신호의 높은 기여도(coherence)를 확보하는 것이 중요하다⁽⁷⁾. 엔진 부밍 소음 제어에서 참조 신호는 일반적으로 엔진 회전수가 사용된다. 하지만 ARNC에서는 실내 구조 소음과 기여도가 높은 소음원들을 모두 고려하기 위해서 다수의 참조 신호가 필요하다. ARNC의 초기 연구에서 Sutton 등⁽⁸⁾은 로드 노이즈 소음원을 모두 고려하기 위해서는 최소 6채널의 참조 신호가 필요하다고 보고했다. 승용차에 적용되고 있는 현대(modern) ARNC 시스템에서는 일반적으로 총 12채널의 참조 신호가 사용되고 있다^(9,10). 한편, 차실 내 각 좌석에서는 타이어 가진력에 의한 차체 전달 특성

이 다르기 때문에 로드 노이즈는 각 좌석 별 상이한 특성을 갖는다⁽⁸⁾. 더욱이, ARNC는 보통 20 Hz ~ 500 Hz 대역의 구조 소음 대역을 관심 주파수로 갖기 때문에, 고주파 대역에서의 오차 마이크로폰의 정은 공간(ZoQ, zone of quite)은 협소해진다⁽¹¹⁾. 따라서 ARNC 시스템에서는 각 좌석 위치에서 좌이, 우이에 해당하는 2개의 마이크로폰이 사용되며 총 8채널의 오차 신호가 적용된다⁽¹⁰⁾. Kim and Altinsoy⁽⁹⁾의 최근 연구에서는 총 12채널의 참조 신호와 좌석 당 2개의 오차 신호, 총 8채널을 사용하여 전체 좌석 평균 3.4 dB의 소음 저감 성능을 보여주었다.

ARNC의 실제적인 개발 과정에서 참조 신호의 위치는 각 위치 별 제어 성능의 집중보다는 전체 좌석에서 전반적인 소음 감쇠 성능이 확보되도록 배치된다. 제어 알고리즘 또한 전체 오차 신호의 고른 저감을 성능 목표로 한다. 따라서 현재 ARNC 시스템은 단일 좌석을 제어할 때 얻을 수 있는 최대 성능을 포기하고, 전체 좌석의 평균 소음만을 제어하도록 설계된 한계가 있다. 이에 따라 운전자 단독 탑승 조건과 같이 일반적인 사용조건에서 제어 성능을 최대로 상승시키지 못한다. 참조 신호나 오차 신호에 가중치를 적용하여 특정한 위치에서의 제어 성능을 향상시킬 수 있을 것으로 예상되지만, 실제 차량 시스템에서 이에 대한 효과를 입증한 연구는 찾기 어렵다.

이를 입증하기 위해 이 연구에서는 참조 센서와 오차 센서의 설치 위치를 변경하지 않고, 차실 내 선택된 제어 위치에 대해 오차 신호를 활성화할 수 있는 오차 신호의 가중치 적용에 대한 실험 결과를 제시한다. 제안된 방법은 차실 내 제어 좌석을 선택하여 제어 성능을 향상시킬 수 있는 것으로 실제 차량 ARNC 시스템에 구현되었다. 또한 그 효과를 실험적으로 검증하였다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 제어 알고리즘을 기술하고 3장에서는 구성된 제어 시스템을 기술한다. 4장에서는 실험 방법과 결과를 기술하고 마지막 5장에서는 이 연구의 결론을 기술한다.

2. 로드 노이즈 능동 제어 알고리즘

Fig. 1은 이 연구에서 사용한 좌석 선택형 ARNC를 구현하기 위해 사용한 알고리즘의 블록도이다. Fig. 1에서 사용한 기호는 다음과 같다. J 는 참조 신호

호(가속도계)의 수, M 은 오차 신호(마이크로폰)의 수, K 는 2차 소음원(스피커)의 수이다. \mathbf{q} 는 마이크로폰으로부터 입력되는 오차 신호에 곱해지는 가중치의 행렬이다. $\mathbf{P}(s)$ 는 1차 경로를 의미하고 $\mathbf{S}(s)$ 는 2차 경로를 의미한다. 이 연구에서는 다중 입출력(MIMO, Multi-Input Multi-Output) FxLMS 알고리즘의 업데이트식을 일부 수정하여 좌석 선택형 로드 노이즈 저감을 구현하였다.

FxLMS 알고리즘은 식 (1)의 오차 신호를 최소화하는 방식으로 작동한다.

$$\mathbf{e}(t) = \mathbf{d}(t) - \mathbf{y}(t) \tag{1}$$

여기서 $\mathbf{d}(t)$ 는 제어 대상인 소음 신호이고 $\mathbf{y}(t)$ 는 제어 스피커로부터 방사된 마이크로폰 위치에서의 제어 신호이다⁽⁷⁾. 오차 신호는 $\mathbf{e}(n) = \mathbf{d}(n) - \mathbf{y}(n)$ 으로 이산화되어 표현된다. 여기서 n 은 이산 시간에 대한 변수이다. 이 연구에서는 좌석 선택형 로드 노이즈 제어 기법을 구현하기 위하여 오차 신호에 가중치를 부여한 형태의 변형된 비용 함수(cost function)를 활용하였다. 마이크로폰으로부터 계측된 오차 신호에 가중치가 곱해지면 그 가중치에 따라서 특정 영역의 오차 신호가 실제 대비 증가되거나 감소된다. 이는 제어 성능을 향상시키고자 하는 좌석의 오차 신호 합을 집중적으로 최소화하는 방식으로 알고리즘을 작동시키고 목적하는 좌석 선택형 소음 제어를 가능하게 한다.

비용 함수는 차실 내 마이크로폰으로부터 계측된 모든 오차 신호의 제곱합으로 나타낼 수 있다. 이러한 비용 함수에 가중치를 부여함으로써 집중적으로 제어하고자 하는 오차 신호의 조합을 선택할 수 있다. 집중적으로 제어하고자 하는 위치의 오차 신호 조합에 다른 오차 신호보다 큰 가중치 q_i 를 곱하게 된다. 이를 통하여 원래의 오차 신호보다 큰 값을 바탕으로

적응 필터(adaptive filter) \mathbf{w}_{jk} 가 수렴하게 되고 선택한 위치의 제어 출력이 커지게 되어 좌석 선택형 소음 제어를 구현할 수 있다. 이와 같은 집중 제어 컨셉을 구현하기 위하여 이 연구에서 사용한 비용 함수는 식 (2)와 같이 정의된다.

$$\hat{\xi}(n) = \sum_{m=1}^M q_m e_m^2(n) = \mathbf{e}^T(n) \mathbf{q} \mathbf{e}(n) \tag{2}$$

가중치가 적용된 비용 함수의 순간 기울기(instantaneous gradient)를 구하여 적용하면 적응 필터의 업데이트 식은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\mathbf{w}_{jk}(n+1) = \mathbf{w}_{jk}(n) + \mu \sum_{m=1}^M q_m \mathbf{x}'_j(n) e_m(n) \tag{3}$$

여기서 μ 는 수렴 계수이다.

$$\mathbf{x}'_j(n) = \hat{\mathbf{S}}_{km} * \mathbf{x}_j(n) \tag{4}$$

식 (4)는 2차 경로 모델인 $\hat{\mathbf{S}}_{km}(z)$ 로 필터된 참조 신호 벡터를 나타내며, *는 선형 컨볼루션(convolution)을 의미한다.

3. 로드 노이즈 능동 제어 시스템

2장에서 제안된 제어 알고리즘은 텍사스 인스트루먼트(texas instrument)사의 DRA75X DSP(Digital Signal Processing)에 적용되어 실시간 제어기에 구현되었다. 샘플링 주파수(sampling frequency)는 1500 Hz이고 알고리즘의 제어 주파수 대역은 로드 노이즈의 특성을 고려하여 20 Hz ~ 300 Hz로 설정하였다. Fig. 2는 이 연구에서 사용된 ARNC 시스템의 구성도를 나타낸

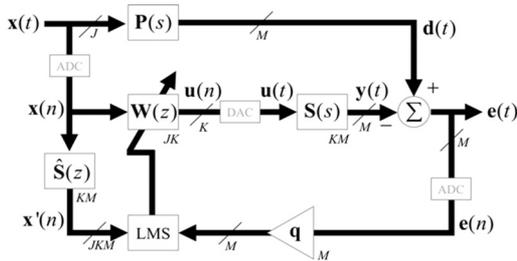


Fig. 1 Block diagram of the MIMO FxLMS algorithm with weighting factor

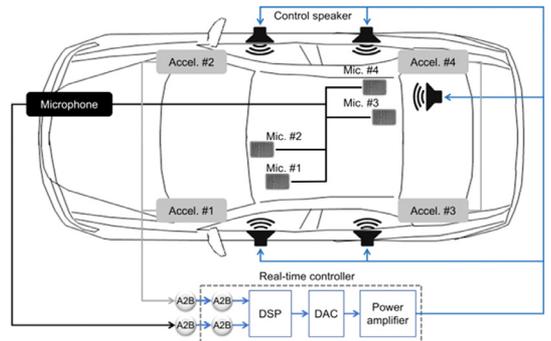


Fig. 2 Schematic representation of the active road noise control system

다. 차량 바디(body)에 설치된 4개의 3축 가속도계(ADXL317, Analog Devices)를 통해 참조 신호가 측정된다. 그리고 4개의 마이크로폰(SPG08P4HM4H-1, Knowles)은 차실 헤드라이닝(head lining)에 설치되어 오차 소음이 계속되고 알고리즘에 입력된다. Fig. 3은 실험에 사용된 가속도계와 마이크로폰의 설치 사진을 나타낸다. 가속도계와 마이크로폰 모두 Analog Devices사의 AD2425 A2B 인터페이스(interface)를 통해 제어기와 연결된다. 4개의 도어 우퍼(woofer)와 1개의 서브 우퍼가 2차 소음원으로 사용되었다. 제어 스피커와 오차 마이크로폰 사이의 2차 경로는 차량 실내를 백색 소음(white noise)으로 가진하여 오프라인 방식(offline method)으로 모델링 후 적용하였다⁽¹²⁾.

4. 실험 과정 및 결과

제어 전략에 따른 소음 저감 성능을 평가하기 위해 제어 전(before control), 기존과 같이 오차 신호 전체

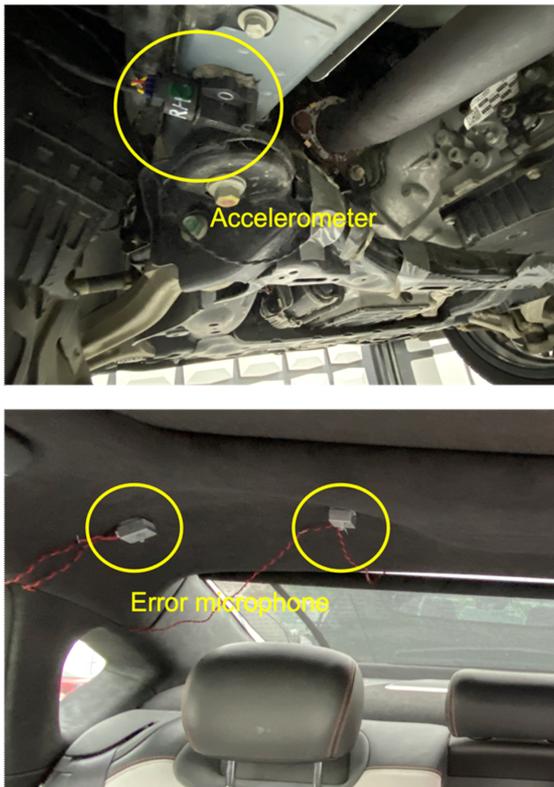


Fig. 3 Installation of accelerometers and error microphones

를 제어하는 경우(case 1), 그리고 선택된 위치만 제어하는 경우(case 2)의 두 가지 실험이 수행되었다. 실험은 고급 승용 차량을 대상으로 하였고, 제어 위치는 운전석 위치(FL, front left)와 2열 우측 좌석(RR, rear right)으로 선정하였다. 가중치는 선택한 좌석 위치에 대해 1로 설정하였고 나머지 좌석에 대해서는 0으로 설정하였다. 실험은 현대 자동차 남양 연구소 주행 시험장 내 거친 노면 시험로에서 진행되었다. 실내 소음은 제어 좌석의 양쪽 귀 위치에서 1/2인치 마이크로폰을 사용하여 60 km/h의 정속 주행 조건에서 실험 조건 별 15초간 측정되었다. 60 km/h의 정속 조건에서 측정한 이유는 통상 로드 노이즈가 해당 조건에서 가장 두드러지기 때문이다.

Table 1은 실험 조건 별 소음 저감 성능을 나타낸다. Case 1의 경우 전체 오차 마이크로폰 위치에서 균일한 소음 저감을 위해 모든 오차 신호에 가중치가 적용되었다. Case 1의 FL 위치에서는 좌이, 우이 각각 3.56 dB, 3.77 dB의 소음 저감 성능이 나타났다. 한편 FL 위치에 가중치를 부여한 case 2의 FL 조건에서는 좌이, 우이 각각 4.18 dB, 4.16 dB의 소음이 저감 되었으며, case 1과 비교하여 평균 0.5 dB가 추가적으로 저감 됨을 확인할 수 있었다. RR 위치에서는 case 1이 좌이, 우이 2.51 dB, 2.38 dB의 저감 성능을 나타내었고 RR 위치에 가중치가 부여된 case 2, RR 조건의 경우 좌우 귀 위치에서 각각 1.13 dB, 1.18 dB의 추가적인 소음이 저감 됨을 확인하였다. Fig. 4는 1/3 옥타브 밴드에서의 조건 별 소음 저감량을 나타낸다. Fig. 5와 Fig. 6은 실험 조건 별 주파수 영역에서 실내 소음을 나타낸다.

한편, case 2의 경우 가중치가 적용되지 않은 위치에서는 안정성이 다소 저하되는 것으로 나타났다.

Table 1 Noise attenuation for each experimental condition

Measured position	Noise attenuation [dB]		
	Case 1	Case 2	
		Control for FL seat	Control for RR seat
FL-left ear	3.56	4.18	-0.15
FL-right ear	3.77	4.16	-0.75
RR-left ear	2.51	-0.46	3.64
RR-right ear	2.38	-0.15	3.56

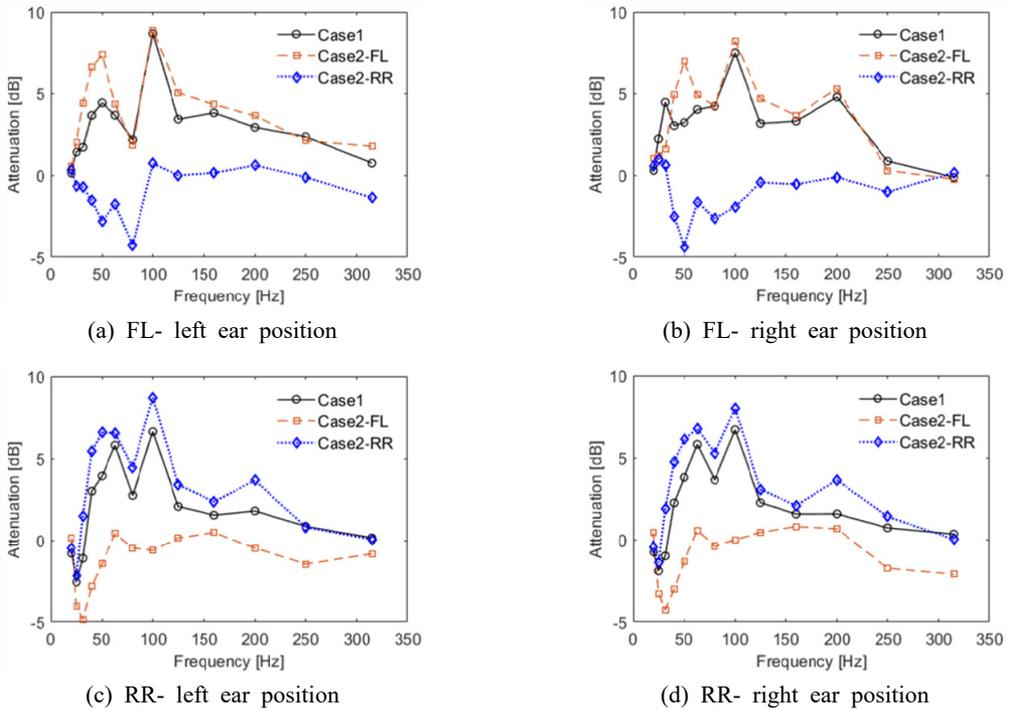


Fig. 4 Attenuation by 1/3 octave band for experimental cases

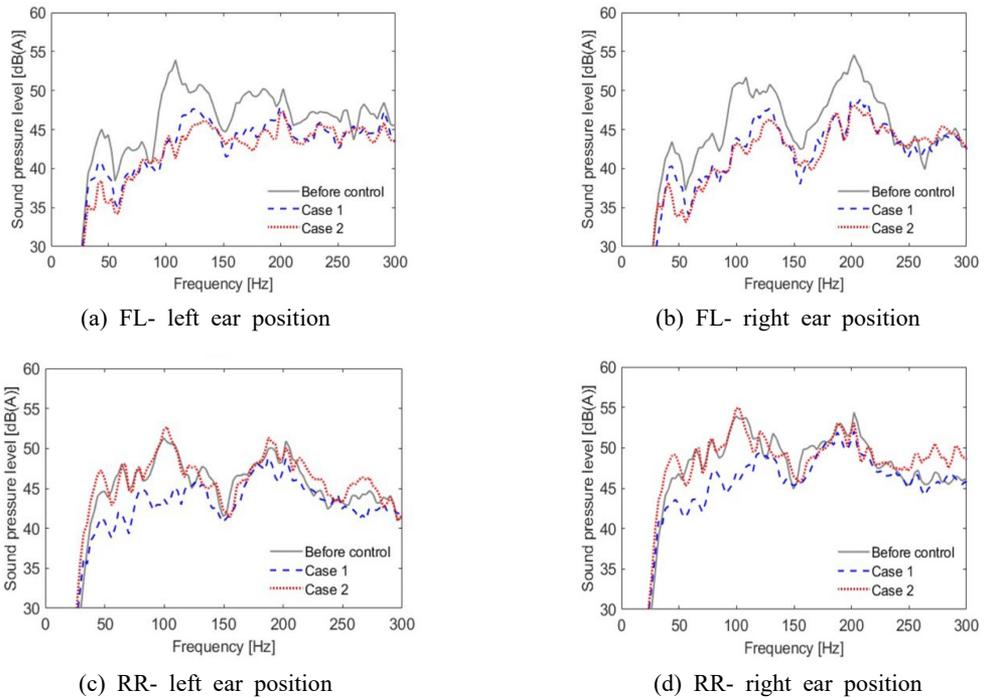
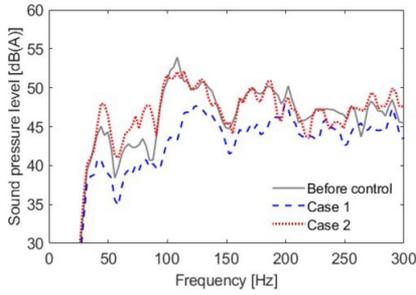
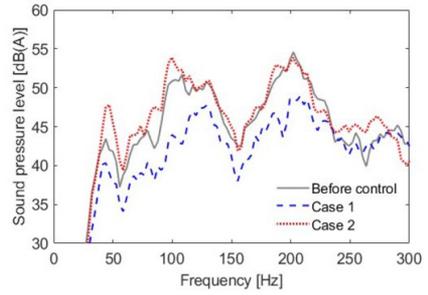


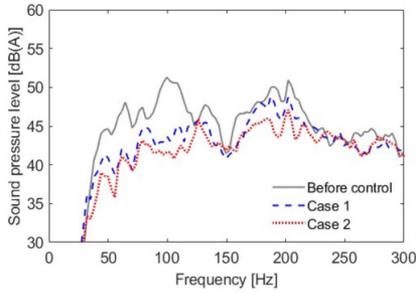
Fig. 5 Experimental results of selectively controlled for the driver's seat position (FL)



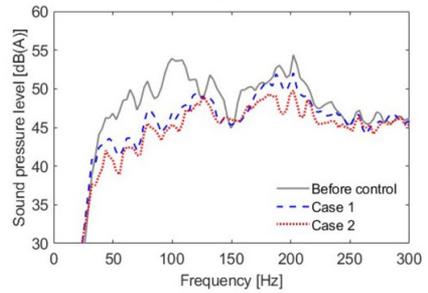
(a) FL- left ear position



(b) FL- right ear position



(c) RR- left ear position



(d) RR- right ear position

Fig. 6 Experimental results of selectively controlled for the rear right seat position (RR)

case 2, FL 제어의 경우 RR 위치에서 약 0.31 dB 소음 레벨이 증가하였고, case 2, RR 제어의 경우 FL 위치에서 약 0.45 dB의 소음 레벨이 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 운전자 단독 탑승과 같은 주행 조건처럼 특정 위치에서 소음 저감 성능을 더욱 증대시키고자 할 경우에는 승객 위치 별로 다른 가중치를 적용하는 것이 효과적일 수 있다. 이 연구에서는 타 위치에서 소음 증가량이 인지적인 관점에서 봤을 때 크지는 않았지만 전체 좌석을 모두 고려하는 경우에 대해 추가적인 평가와 검증이 필요하다.

차량 제조사들은 ANC 시스템을 적용할 때 모든 시트 위치를 고려하여 평균적인 소음 저감 성능을 확보하고자 한다. 따라서 개발 단계에서 전체 오차 신호에 대한 고른 소음 감쇠를 목표로 제어 파라미터들의 튜닝이 이뤄진다. 그러나 일부 승객만 탑승하는 실제적인 상황에서는 승객이 없는 좌석에서도 실내 소음이 제어되는 경우도 발생한다. 하지만 현재의 상용화된 제어 시스템에서는 오차 마이크로폰을 선별적으로 제어할 수 없기 때문에 현재 개발 전략에서는 실제 탑승한 승객의 위치에서 더 많은 소음 저감 성능을 달성할 수 없다. 따라서 가중치 인자를 적용 및

변경하여 승객의 탑승 상황에 따른 선택적 위치 제어 전략은 차량 ANC에서 실제적인 효용성 있는 적용 전략이라고 볼 수 있다. 최근에는 센서를 이용하여 승객을 감지하는 시스템이 차량에 적용되고 있다⁽¹³⁾. 따라서 이러한 승객 감지 시스템과 이 연구에서 제안한 방법을 함께 적용할 경우 승객의 탑승 상황에 따라 효과적으로 소음 저감 성능의 추가적으로 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

이 연구에서는 제안 컨셉에 대한 예비 평가로 특정한 조건에서만 평가를 수행하였다. 향후 후속 연구에서는 오차 마이크로폰을 전체 좌석으로 확대하고 가중치의 변화에 따른 제어 성능의 증대와 타 좌석에서의 안정성에 대한 추가적인 평가를 진행할 예정이다.

5. 결론

이 연구에서는 차량 내 선택된 위치에 대해 소음 저감 성능을 선택적으로 집중할 수 있는 제어 기법을 실험적으로 검증하였다. 선택된 위치에서의 제어 성능이 향상되도록 오차 신호에 가중치를 부여하여 제어 알고리즘을 구성하였다. 제안된 알고리즘은 효과

를 검증하기 위해 실시간 제어 시스템에 구현되었고 대형 세단에 적용되었다. 운전석과 2열 우측 좌석에 각각 가중치를 적용하여 차량 주행 실험 결과 위치별 각각 약 0.50 dB 및 1.15 dB의 추가적인 소음 저감 성능이 확보되는 것을 확인하였다. 이 연구를 통해 제안된 차량 승객의 탑승 조건에 따른 가중치 적용 전략을 적용할 경우 기존 접근 방식에 비해 추가적으로 더 높은 소음 저감 성능을 확보할 수 있음을 확인하였다. 이 연구는 가중치가 오차 신호에 미치는 영향을 검증하기 위한 예비 평가이다. 향후 차실 내 전체 좌석에 대해 가중치를 변경하여 성능 및 안정성 평가에 대한 추가 연구를 수행할 예정이다.

References

- (1) Lee, S. K., Lee, S., Back, J. and Shin, T., 2018, A New Method for Active Cancellation of Engine Order Noise in a Passenger Car. *Applied Sciences*, Vol. 8, No. 8, p. 1394.
- (2) Kim, S. and Altinsoy, M. E., 2021, Active Sound Control: State-of-the-arts and Challenges in Automotive, *Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference*, p. 107.
- (3) Valeri, F. and Stirlen, C., 2021, Practical Uses for Road Noise Cancellation, *SAE Technical Papers*, 2021-01-1018.
- (4) Lee, Y. S., Ryu, S., Yoo, E. and Lim, C., 2022, A Feasibility Study of an ESG to Suppress Road Noise of a Car. *Applied Sciences*, Vol. 12, No. 5, p. 2697.
- (5) Kim, E. Y., Kim, B. H., Kim, H. W. and Lee, S. K., 2012, Design of a New VSS-Adaptive Filter for a Potential Application of Active Noise Control to Intake System. *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 22, No. 2, pp. 146~155.
- (6) Oh, S. H., Kim, H. S. and Park, Y., 2002, Active Control of Road Booming Noise in Automotive Interiors, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 111, No 1, pp. 180~188.
- (7) Lee, N., Park, Y. and Park, Y. S., 2014, Active Noise Control for Target Point Inside Bore Using Property of MRI Noise, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 24, No. 1, pp. 62~68.
- (8) Sutton, T. J., 1994, Active Control of Road Noise Inside Vehicles, *Noise Control Engineering Journal*, Vol. 42, No. 4, pp. 137~147.
- (9) Kim, S. and Altinsoy, M. E., 2022, Active Control of Road Noise Considering the Vibro-acoustic Transfer Path of a Passenger Car, *Applied Acoustics*, Vol. 192, p. 108741.
- (10) Kim, S. and Altinsoy, M. E., 2022, A Complementary Effect in Active Control of Powertrain and Road Noise in the Vehicle Interior, *IEEE Access*, Vol. 10, pp. 27121~27135.
- (11) Moreau, D., Cazzolato, B., Zander, A. and Petersen, C., 2008, A Review of Virtual Sensing Algorithms for Active Noise Control, *Algorithms*, Vol. 1, No. 2, pp. 69~99.
- (12) Elliott, S., 2000, *Signal Processing for Active Control*, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- (13) Alizadeh, M., Abedi, H. and Shaker, G., 2019, Low-cost Low-power in-vehicle Occupant Detection with mm-wave FMCW Radar, *Proceedings of 2019 IEEE Sensors*, pp. 1~4.



Seonghyeon Kim received the B.S. and M.S. degrees in mechanical engineering from the Hanyang University, South Korea, in 2004 and 2006, respectively. He has joined the Chair of Acoustics and Haptics at TU Dresden from 2018.

Currently, he is a Senior Research Engineer with the Institute of Advanced Technology Development, Hyundai Motor Company. His research interests include active sound control, active sound design, sound quality, and vehicle NVH.



M. Ercan Altinsoy received the mechanical engineering degree from the Technical University of Istanbul, Istanbul, Turkey, and the Ph.D. degree in electrical engineering from Ruhr-University Bochum, Bochum, Germany, in 2005. He is currently a

Professor of Acoustic and Haptic Engineering, TU Dresden, Dresden, Germany. His research interests include vibroacoustics, vehicle acoustics, electroacoustics, haptic interfaces, haptic perception, whole-body vi-

brations, product sound and vibration design. He is a Lothar-Cremer medalist of the Acoustical Society of Germany, DEGA. He is the chairman of the Vehicle NVH expert committee of DEGA and one of the core team members of the cluster of excellence Centre for Tactile Internet with Human-in-the-Loop. In 2018, he was awarded a Visiting Professorship from Tohoku University, Japan.



Joong-Kwan Kim is an assistant professor in department of Unmanned Aircraft Systems at Hanseo University. He received his Ph.D. in Aerospace Engineering from KAIST. His research interests include structural vibration suppression, and active vibration/noise control for future mobility.