

좌석의 정음공간 형성을 위한 가상마이크로폰 기반 능동음향제어 기법 연구

Active Sound Control Approach Using Virtual Microphones for Formation of Quiet Zones at a Chair

유 석 훈* · 김 제 관* · 이 영 섭†

Seokhoon Ryu, Jeakwan Kim and Young-Sup Lee

(Received July 24, 2015 ; Revised July 24, 2015 ; Accepted August 18, 2015)

Key Words : Active Sound Control(능동음향제어), Zone of Quiet(정음공간), Active Headrest(능동헤드레스트), Virtual Microphone(가상마이크로폰)

ABSTRACT

In this study, theoretical and experimental analyses were performed for creating and moving the zone of quiet(ZoQ) to the ear location of a sitter by using active sound control technique. As the ZoQ is actively created at the location of the error microphone basically with an active sound control system using an algorithm such as the filtered-x least mean square(FxLMS), the virtual microphone control(VMC) method was considered to move the location of the ZoQ to around the sitter's ear. A chair system with microphones and loudspeakers on both sides was manufactured for the experiment and thus an active headrest against the swept narrowband noise as the primary noise was implemented with a real-time controller in which the VMC algorithm was embedded. After the control experiment with and without the VMC method, the location variation of the ZoQ by analyzing the error signals measured by the error and the virtual microphones. Therefore, it is observed that the FxLMS with the VMC technique can provide the re-location of the ZoQ from the error microphone location to the virtual microphone location. Also it is found that the amount of the attenuation difference between the two locations was small.

1. 서 론

자동차의 고급화에 따라 승객들의 쾌적한 승차환경 위해 캐빈 내부의 소음을 최소화시키는 기술 개발의 필요성이 지속적으로 증대되고 있다. 특히, 급가속하는 자동차의 경우에 캐빈 내의 소음이 급격히 증가되는 특징을 가지고 있으며, 외부 소음이 차량

의 벽체, 차량하부, 그리고 유리창 등의 다양한 경로를 통해 캐빈 안으로 유입된다⁽¹⁾. 이러한 소음을 저감시키기 위해 사용되는 차음재 또는 흡음재 등의 재료를 이용한 수동적인 소음 제어 기법은 차량의 중량 증가를 초래한다. 따라서 능동음향 제어(active sound control 또는 active noise control, ANC) 기법에 대한 연구가 이루어져 왔다⁽²⁾.

ANC의 이상적인 제어결과는 캐빈 내부 모든 공

† Corresponding Author ; Member, Dept. of Embedded Systems Eng., Incheon National University
E-mail : YSL@inu.ac.kr

* Dept. of Embedded Systems Eng., Incheon National University

‡ Recommended by Editor Il Kwon Oh

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

간에 대한 전역적(global) 소음저감이지만 이러한 전역적 제어는 비용증가, 중량증가, 공간사용 등과 같은 현실적인 제약이 있으므로 착석자의 귀 주변으로 제한된 국부적인(local) 정음공간(zone of quiet, ZoQ)을 형성하는 것이 더욱 효율적이다⁽³⁾. 그래서 이러한 국부적 ANC는 특히 착석자가 주요 고객이 되는 자동차, 기차, 항공기, 선박 등에서 효율적으로 적용될 수 있다.

FxLMS(filtered-x least mean square) 알고리즘은 ANC 기법 중 하나로서 최대하강법(steepest descent method)에 기반을 두고 있다^(2,4). FxLMS 알고리즘을 이용한 국부적 ANC의 적용을 위해서는 착석자의 귀 위치에 오차마이크로폰(error microphone)의 설치가 필요하나 이는 착석자의 움직임에 방해할 수 있다. 착석자의 귀와 오차마이크로폰의 간격을 충분히 늘리면 이러한 방해는 없앨 수 있지만, 이럴 경우 제어대상 주파수가 상대적으로 낮아야만 가능하다. 즉, 실용적인 관점에서 제어주파수 범위에 대한 제약이 따르게 된다⁽³⁾.

그러므로 오차마이크로폰의 위치에 생성된 정음공간을 가상마이크로폰(virtual microphone)의 위치로 옮기는 가상마이크로폰제어(virtual microphone control, VMC) 기법의 적용을 통해 착석자의 귀 위치로 정음공간을 이동시킴으로써 해결될 수 있다^(5,6).

Rafaely et al.은 정음공간의 이동과 관련하여 음향 및 제어 측면에서 고정 제어기를 사용하여 능동 헤드레스트에 제어하는 연구를 수행하였고 이를 통해 제어 안정도 및 성능에 대해 분석하였다⁽⁵⁾. Pawelczyk은 MIMO IMC(internal model control) 및 MIMO VMC 기법을 의자시스템에 적용하였는데, 정확히는 2개의 오차마이크로폰과 2개의 제어스피커를 사용하여 능동헤드레스트를 구현하였다^(6,7). 그런데, 그의 이틀 논문에서는 제1 음원으로 사용된 신호가 고정된 주파수의 stationary 단일 순음(pure tone) 또는 다중 순음(multiple tones)을 적용하여 제어를 수행하였다.

그러므로 이 논문에서는 실제적인 적용이 가능하도록 제1 음원을 자동차의 엔진소음을 모사한 신호를 적용하였으며, 이에 대응 가능한 협대역(narrowband) 소음 제어용 MIMO narrowband VMC를 구성하였다. 이 엔진소음은 다중의 주파수가 가변되는 non-stationary 스위프(sweep) 신호로서

narrowband VMC 알고리즘을 이용한 국부적 정음공간의 생성과 그것의 이동 방법을 음향제어 관점에서 구현하고 분석하였다.

이를 위해 FxLMS 알고리즘에 VMC 기법을 적용하기 위한 이론적인 분석이 이루어졌고 고려된 알고리즘이 디지털 신호처리장치(digital signal processor, DSP)에 구현되었다. 정음공간의 이동은 오차마이크로폰과 관측마이크로폰(observer microphone, 가상마이크로폰의 위치)에서 측정된 소음의 저감 정도를 비교하여 판단되었다.

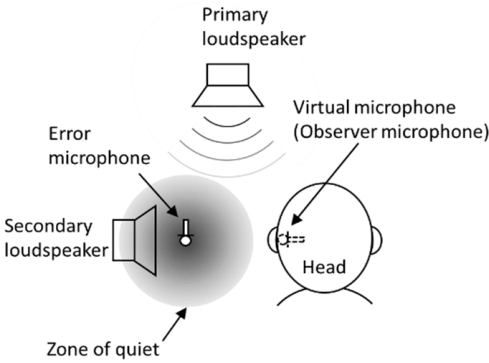
이 논문은 다음과 같이 정리 되었다. 2장에서는 희망위치로 정음공간을 이동시키기 위한 가상마이크로폰 알고리즘을 소개하고 좌석시스템 구현을 위한 이론적인 내용이 다루어졌다. 3장에서는 좌석시스템과 제어실험 설계가 이루어졌다. 4장에서는 제어 실험 결과가 분석되었고, 정음공간의 생성위치와 이동에 대해 논의되었다. 5장에서는 실험 분석을 바탕으로 이 논문의 결론을 기술하였다.

2. 가상 정음공간의 형성

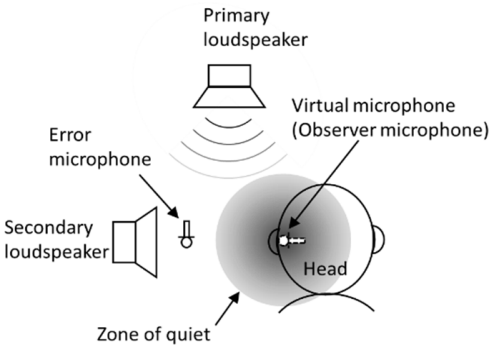
Fig. 1(a)와 같이 보통의 ANC 시스템에 의해 형성된 정음공간은 오차마이크로폰의 위치에 존재하며, 이 정음공간은 VMC 기법의 적용을 통해 가상마이크로폰(관측마이크로폰)의 위치로 이동될 수 있다⁽⁵⁻⁸⁾. 정음공간에서 소음저감의 정도는 오차마이크로폰의 위치에서 가장 크고 오차마이크로폰으로부터 점차 멀어지면서 점진적으로 줄어든다.

그래서 능동헤드레스트가 장착된 좌석시스템의 경우, VMC off인 상태에서 착석자의 귀(가상마이크로폰의 위치)가 정음공간 외부에 위치한다면 Fig. 1(a)에 기반한 ANC 시스템이 성공적으로 작동하더라도 착석자의 청취 위치에서는 소음 저감이 이뤄지지 않는다. 그러므로 VMC 기법을 적용하면 정음공간을 Fig. 1(b)와 같이 착석자의 귀 근처인 가상마이크로폰의 위치로 이동시킬 수 있다.

Fig. 2는 VMC기법이 적용된 FxLMS 알고리즘의 블록선도이다. 점선 내부는 DSP 내부에서 일어나는 디지털 처리과정(이때 z 는 z -domain, n 은 이산 시간 변수를 의미)을 나타내며, 점선 외부는 아날로그 처리과정(이때 s 는 s -domain, t 는 연속 시간 변수를 의미)으로 실제 물리적 과정을 표현한 것이다. $P(s)$ 는



(a) Location of the zone of quiet at an error microphone(VMC off)



(b) Relocation of the zone of quiet at the ear position(VMC on)

Fig. 1 Formation of the zone of quiet by an active method

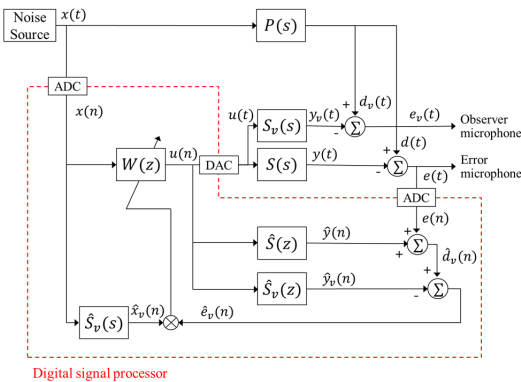


Fig. 2 Block diagram of the FxLMS algorithm with the virtual secondary path

제1 경로(primary path), $S(s)$ 는 제2 경로secondary path), $x(t)$ 는 가상 제2 경로(virtual secondary

path), $d(t)$ 는 제1 소음원 신호(primary source signal), $d(t)$ 는 교란신호(disturbance signal), $d_v(t)$ 는 가상마이크로폰 위치의 교란신호, $u(n)$ 은 제어 필터의 출력 신호, $y(t)$ 는 제2 경로의 출력 신호이며 $y_v(t)$ 는 가상 제2 경로의 출력신호이다.

오차마이크로폰 위치에서 $d(t)$ 와 $y(t)$ 가 서로 상쇄되어 오차신호 $e(t)$ 가 되며, 가상마이크로폰 위치에서 $d_v(t)$ 와 $y_v(t)$ 가 서로 상쇄되어 $e_v(t)$ 가 된다. $e(t)$ 는 다시 ADC를 통해 디지털 신호 $e(n)$ 으로 변환되어 DSP 내부로 입력된다. 참조신호(reference signal) $x(n)$ 은 제2 경로 모델인 $\hat{S}(z)$ 를 통과하여 $\hat{x}(n)$ 이 되며, 제어필터 $W(z)$ 의 계수 업데이트에 사용된다.

FxLMS에 의해 생성되는 정음 공간을 이동시키기 위해 VMC 기법을 사용하면, 가상마이크로폰 위치를 중심으로 제어가 이뤄지는데, 이때 알고리즘 연산을 위해 가상마이크로폰 위치의 오차신호 $e_v(n)$ 이 필요하다. 하지만 실제로는 가상마이크로폰의 위치에는 마이크로폰이 존재하지 않아 이를 얻을 수 없기 때문에 $e(n)$ 을 이용하여 $e_v(n)$ 을 추정해야 한다. 추정에 앞서 제1 스피커(primary loudspeaker)로부터 ANC 좌석시스템까지의 거리가 충분히 멀어 가상마이크로폰과 오차마이크로폰의 위치까지 각 경로간의 차이가 거의 없다고 가정하였다. 즉, $d_v(n) \approx d(n)$ 으로 가상마이크로폰과 오차마이크로폰 위치의 교란신호는 동일하다고 가정된다. 이러한 가정아래 각각의 마이크로폰에서 측정되는 교란신호의 추정은 $\hat{d}_v(n) \approx \hat{d}(n)$ 라 할 수 있다

$$\hat{e}_v(n) = \hat{d}(n) - \hat{y}_v(n) \tag{1}$$

실제는 $\hat{d}_v(n)$ 을 이용해야 하지만 $\hat{d}_v(n) \approx \hat{d}(n)$ 에 의해 $\hat{d}_v(n)$ 대신 $\hat{d}(n)$ 을 이용하여 $\hat{e}_v(n)$ 은 식(1)과 같이 추정 될 수 있다. 또한 $\hat{d}(n)$ 은 $e(n)$ 에서 제2 경로의 제어신호를 제거함으로써 아래와 같이 추정될 수 있다.

$$\hat{d}(n) = e(n) + \hat{y}(n) \tag{2}$$

그러므로, 식(1)은 식(2)를 대입하여 식(3)과 같이 정리된다.

$$\hat{e}_v(n) = e(n) + \hat{y}(n) - \hat{y}_v(n). \quad (3)$$

$\hat{y}(n) = \mathbf{u}^T(n) \hat{\mathbf{s}}(n)$, $\hat{y}_v(n) = \mathbf{u}^T(n) \hat{\mathbf{s}}_v(n)$ 이므로 $\hat{e}_v(n)$ 은 다시 아래와 같이 표현된다. 이때, $\hat{\mathbf{s}}(n)$ 과 $\hat{\mathbf{s}}_v(n)$ 은 각각 실제 제2 경로와 가상 제2 경로의 충격응답함수(impulse response function, IRF)이다.

$$\hat{e}_v(n) = e(n) + \mathbf{u}^T(n) \{ \hat{\mathbf{s}}(n) - \hat{\mathbf{s}}_v(n) \}. \quad (4)$$

앞서 $d_v(n) \approx d(n)$ 라 가정하였으나, $e(n)$ 과 $e_v(n)$ 의 경우 마이크론들로부터 제2 스피커(secondary loudspeaker)까지의 거리가 매우 가까워 각 경로간의 차이가 크기 때문에 $e(n)$ 과 $e_v(n)$ 은 동일하다고 할 수 없다(즉, $e(n) \neq e_v(n)$). 따라서 정음공간을 가상마이크로폰으로 옮기기 위해 제어 필터 업데이트 방정식은 아래 식 (5)와 같이 적용되며, 제어 필터는 가상마이크로폰의 위치를 중심으로 제어하도록 업데이트 된다.

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \alpha \hat{\mathbf{x}}_v(n) \hat{e}_v(n). \quad (5)$$

3. 실험 셋업

3.1 ANC 능동헤드레스트 좌석시스템

실험을 위해 Fig. 3과 같은 능동헤드레스트가 장착된 좌석시스템이 제작되었다. 제2 스피커는 각각 좌우측으로 Head And Torso Simulator(HATS)의 귀 내부에 탑재된 관측마이크로폰으로부터 70 mm 떨어진 곳에 설치되었고, 오차마이크로폰은 각각 좌우측으로 제2 스피커로부터 10 mm 떨어진 곳에 위치되었다. 관측마이크로폰은 가상마이크로폰 위치의 오차신호를 측정하기 위한 마이크로폰으로, 가상 제2 경로 모델링에 사용되는 가상마이크로폰과 동일하며 제어와 상관없이 측정 목적으로만 사용되었다. 제1 스피커와 관측마이크로폰의 수평 거리는 2000 mm로 설정되었으며 제1 소음원 신호는 PC 사운드 카드에서 전력증폭기(power amplifier)를 통해 제1 스피커로 출력되었다. 측정을 위한 HATS는 B&K사의 Type 4128C 모델이 사용되었고 관측마이크로폰

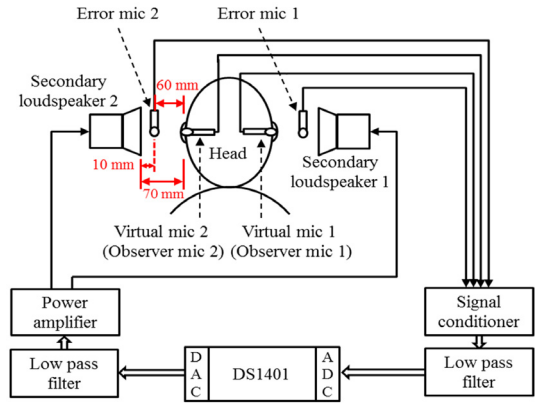


Fig. 3 Block diagram of the chair system for ANC (view from the front side)

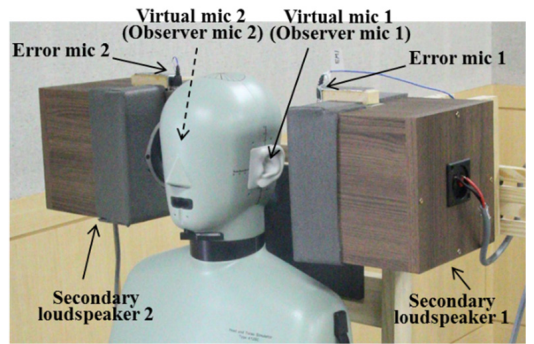


Fig. 4 Chair system for ANC implementation

1과 2는 각각 HATS 내부의 Type 4158-C 및 Type 4159-C가 사용되었다. 오차마이크로폰 1과 2는 모두 PCB 377B02 모델이 사용되었으며 신호 조절기(signal conditioner)는 PCB 480E09 모델이 사용되어 마이크로폰으로부터 입력되는 신호를 증폭시켰다.

제1 스피커는 Tannoy사의 mercury mx2-M, 제2 스피커 1과 2는 모두 삼미전자의 SR-100A 모델이 사용되었다. 그리고 2 kHz의 차단주파수를 갖는 저역통과필터(low pass filter)를 두어 입출력 신호의 anti-aliasing 및 reconstruction 용도로 사용하였다.

제어용 DSP는 dSPACE사의 DS1401 모델이 사용되었으며, 샘플링 주파수는 모두 10,000 Hz가 적용되었다. 능동헤드레스트 좌석시스템은 실험이 무향실에서 진행되었다.

Fig. 4는 구현된 좌석시스템의 실제 사진을 나타낸

것이며 착석자가 정면을 바라볼 때 좌측은 1번, 우측은 2번으로 설정되었다.

3.2 제1 소음원 신호

능동헤드레스트가 장착된 좌석시스템에 대한 ANC 실험에서는 자동차 엔진의 기본 주파수(C1, Component 1)와 그에 따라 나타나는 실수배의 하모닉 성분들에 의한 소음을 모사하기 위하여 Fig. 5에서 보이는 것처럼 4개의 오더를 가지는 정현파 스위프(sweep) 신호가 제1 소음원 신호로 사용되었다. 이 스위프신호는 기본 주파수 C1(200→320 Hz)을 기반으로 C1.5(300→480 Hz), C2(400→640 Hz) 그리고 C2.5(500→800 Hz)로 구성되며 주파수는 시간에 따라 선형적으로 증가되도록 하였다. 그래서 이 연구에서는 스위프신호의 주파수 범위인 200~800 Hz를 제어 주파수 범위로 고려하였다.

Fig. 5는 제어를 하지 않을 때 제1 소음원 신호에 대해 우측 오차마이크로폰에서 측정된 신호의 스펙트로그램을 나타낸 것인데, 처음엔 낮은주파수를 유지하고 3초 후부터 13초까지 10초간 주파수 스위프하도록 하였고 그 이후 2초간 높은 주파수를 유지시켰다. 이때, 주파수가 스위프되는 10초간의 데이터만이 추출되어 결과 분석에 사용되었다.

3.3 제2 경로 모델링

능동헤드레스트 제어에 적용되는 FxLMS 알고리즘의 구현을 위해 제2 경로 모델링이 수행되었다.

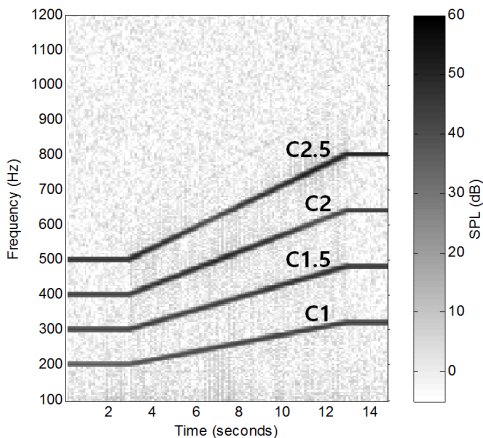
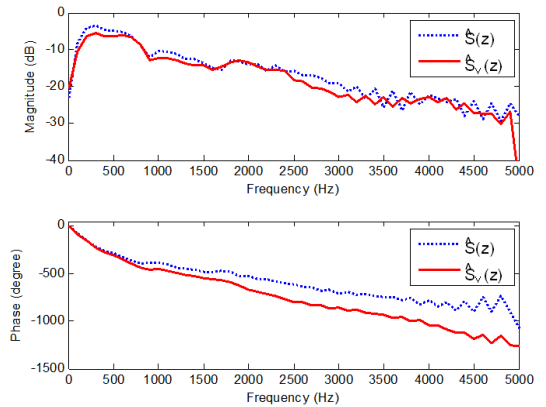


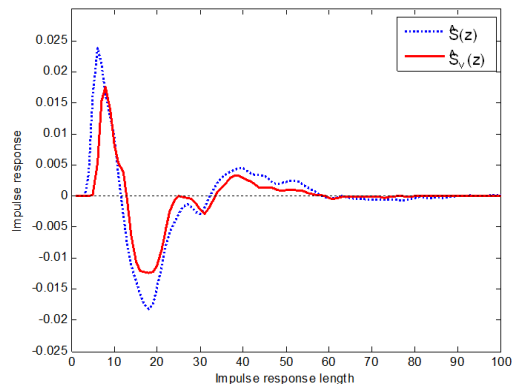
Fig. 5 Spectrogram of the measured signal(SPL) by the error microphone before control

좌석시스템에는 제2 스피커와 오차마이크로폰 간의 물리적 제2 경로 $S(s)$ 및 제2 스피커와 가상마이크로폰 간의 가상 제2 경로 $S_v(s)$ 가 존재한다. 각 경로 모델은 offline identification 방법을 통해 얻어졌고, Fig. 6(a)와 (b)는 우측에서의 제2 경로 모델 $\hat{S}(z)$ 와 가상 제2 경로 모델 $\hat{S}_v(z)$ 에 대한 각각 주파수응답함수 및 충격응답함수를 보여주고 있다.

Fig. 6(a)에서는 제2 스피커와의 거리가 가상마이크로폰 보다 60 mm 더 가까운 오차마이크로폰에서의 주파수 응답 $\hat{S}(z)$ 의 크기가 $\hat{S}_v(z)$ 의 크기에 비해 전반적으로 더 크게 나타났으며, 위상응답의 경우 두 경로간의 거리 차이가 반영되어 $\hat{S}(z)$ 의 주파수에 따른 위상차가 $\hat{S}_v(z)$ 의 것보다 작게 나타났다.



(a) Frequency response functions



(b) IRF

Fig. 6 Comparison of the secondary path model $\hat{S}(z)$ (dashed lines) and the virtual secondary path model $\hat{S}_v(z)$ (solid lines)

Fig. 6(b)에서 충격응답 함수의 경우 최대 피크의 크기가 $\hat{S}_v(z)$ 보다 $\hat{S}(z)$ 에서 더 크게 나타났고, 더 작은 지연을 보였다. 참고로 실시간 제어용 DSP의 연산량과 제어 성능을 고려하여 각 경로 모델의 충격응답함수는 두 경로 모델 모두 50개의 샘플이 사용되었다.

4. 실험 및 분석

4.1 오차마이크로폰 측정 데이터

정음공간 형성을 위한 FxLMS 기반의 ANC 실험은 총 두 가지 방법으로 수행되었는데, 첫 번째는 오차마이크로폰의 위치에 대한 제어(Fig. 1(a) 참조, VMC off)이고, 두 번째로는 VMC 기법을 적용한 가상마이크로폰의 위치를 기준으로 한 제어(Fig. 1(b) 참조, VMC on)이다. 3.2절에서 설명된 스위칭 신호가 제1 소음원 신호로 사용되었으며, 실험결과는 각각 오차마이크로폰과 관측마이크로폰에서 측정된 데이터로 나누어 분석되었다. 이 절에서 보여주는 결과 그림들은 헤드레스트의 좌우측이 유사하므로 우측 부분에 대한 것들을 나타내었다.

Fig. 7은 제어 전(before control) 1가지와 제어 후(VMC off, VMC on)의 2가지 경우에 대해 오차마이크로폰에서 측정된 오차신호 $e(n)$ 의 power spectral density(PSD)와 저감량(attenuation)의 결과를 나타낸 것이다. 즉, VMC off인 경우 제어 범위(200~800 Hz) 내 평균 저감량은 약 -24 dB를 보였으며, VMC on인 경우 평균 저감량은 약 -3 dB 임을 보여준다. 이것은 VMC off의 경우 정음공간이 오차마이크로폰을 중심으로 형성되었으나, VMC on의 경우 정음공간이 오차마이크로폰 위치에 더 이상 존재하지 않음을 알 수 있다.

Fig. 8은 오차마이크로폰에서 측정된 오차신호 $e(n)$ 의 스펙트로그램을 나타낸 것으로, Fig. 8(a) (VMC off)의 오차신호 $e(n)$ 은 Fig. 5(before control)의 3~13 초 구간의 오차신호 $e(n)$ 에 비해 상당히 감소되었으며, 3~13초 구간 중 11~13초 구간이 3~11초 구간보다 비교적 덜 저감되었다.

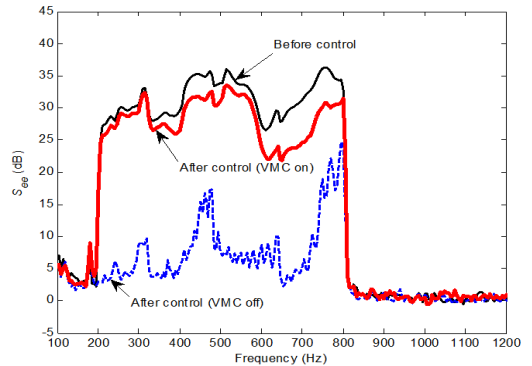
반면에 Fig. 8(b)(VMC on)의 오차신호 $e(n)$ 은 Fig. 5(before control)의 3~13초 구간의 오차신호에 비해 소폭 감소되었다. 그러므로 Fig. 8의 결과도 Fig. 7과 같이 VMC off일 때의 정음공간은 오차마

이크로폰의 위치에 생성되지만 VMC on의 경우 오차마이크로폰 위치에 존재하던 정음공간이 사라졌음을 재확인할 수 있었다.

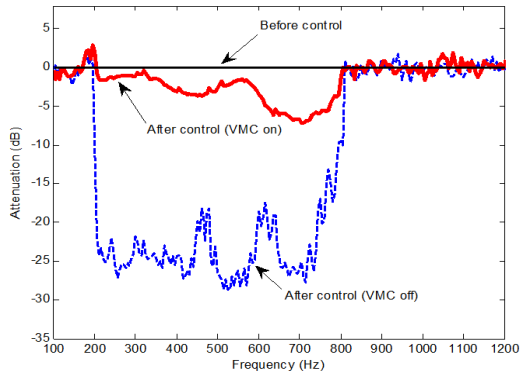
4.2 가상마이크로폰 측정 데이터

4.1절에서 나타낸 결과에 의하면 VMC on인 경우 오차마이크로폰 위치의 정음공간이 사라졌음을 확인하였다. 따라서, 사라진 정음공간의 위치가 가상마이크로폰의 위치로 옮겨졌는지 확인하기 위해 관측마이크로폰에서 측정된 데이터의 PSD와 저감량, 그리고 스펙트로그램 결과를 Fig. 9와 Fig. 10에 나타냈다.

Fig. 9는 Fig. 7과 마찬가지로 제어 전(before control)의 1가지와 제어 후(VMC off, VMC on)의 2가지 경우에 대해 관측마이크로폰에서 측정된 오차신호 $e(n)$ 의 PSD와 저감량의 결과를 나타낸 것이다.

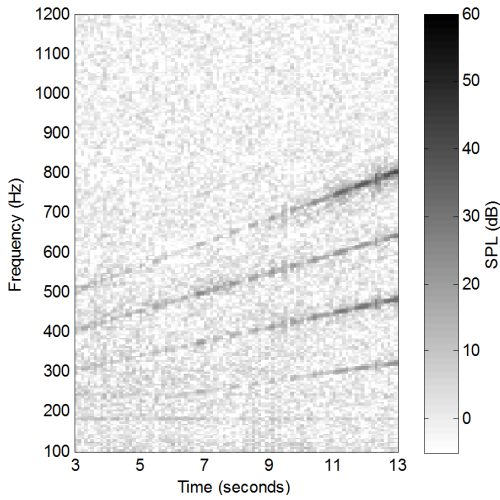


(a) PSD functions

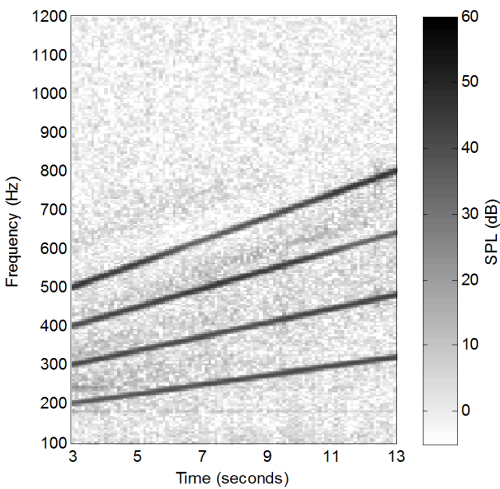


(b) Attenuations

Fig. 7 Comparison of the measured error signals $e(n)$ at the error microphone location before and after controls



(a) Control with VMC off

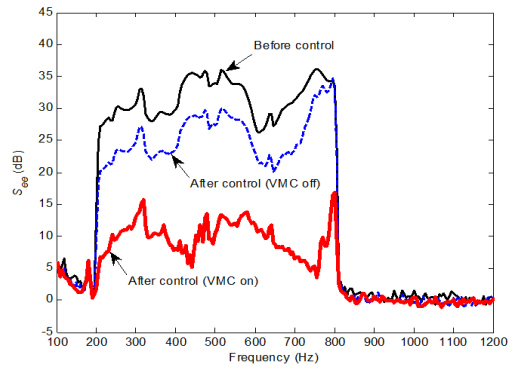


(b) Control with VMC on

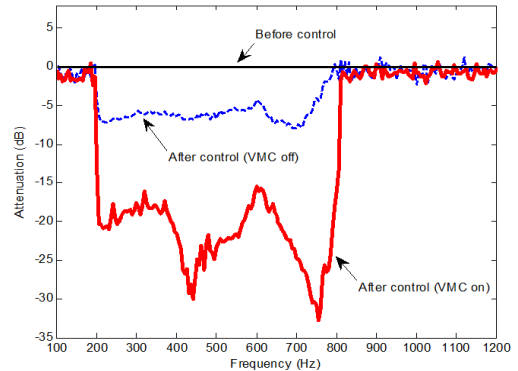
Fig. 8 Comparison of the spectrograms of the measured error signals $e(n)$ at the error microphone location after controls

VMC off인 경우에는 제어 범위 내의 평균 저감량이 약 -6 dB로 측정된 반면 VMC on인 경우에는 평균 저감량이 약 -22 dB로써, 이번에는 VMC on에서 더 큰 저감이 나타나서 정음공간이 가상마이크로폰 위치로 이동했음을 알 수 있다.

Fig. 10은 $e_v(n)$ 의 스펙트로그램을 나타낸 것으로, Fig. 10(a)(VMC off)에서 오차신호 $e(n)$ 는 Fig. 5 (before control)에서 3~13초 구간의 오차신호 $e(n)$ 에 비해 소폭 감소되었다. 반면에 Fig. 10(b)(VMC on)의 오차신호 $e(n)$ 는 Fig. 5(before control)에서



(a) PSD functions



(b) Attenuations

Fig. 9 Comparison of the measured virtual error signals $e_v(n)$ at the virtual microphone location before and after controls

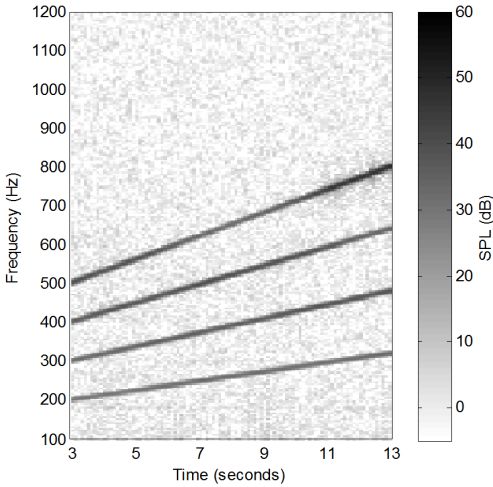
3~13초 구간의 오차신호 $e(n)$ 에 비해 크게 감소되었다.

따라서, 가상마이크로폰 기법에 의한 FxLMS 기법은 정음공간을 가상마이크로폰의 위치로 이동시킬 수 있음을 실험적으로 명확히 보여 주고 있다.

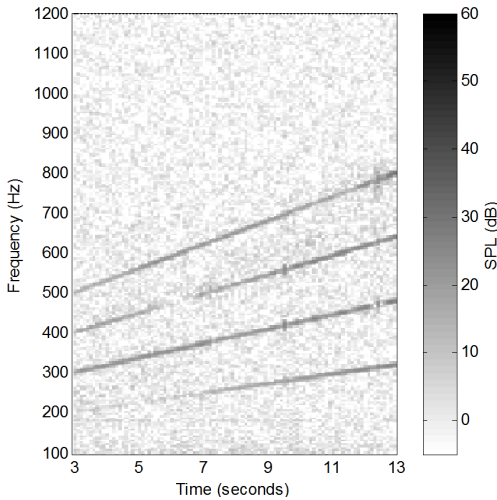
Table 1은 이 논문에서 수행된 제어 실험의 평균 소음 저감량 결과를 나타낸 것으로 오차마이크로폰 위치에서는 VMC off일 때, 가상마이크로폰 위치에서는 VMC on일 때 저감량이 크게 나타났다. 특히 Table 1에서 보는 바와 같이 VMC on시 가상마이크로폰 위치에서의 저감량은 VMC off시 오차마이크로폰 위치에서의 저감량 보다 1.5~2.4 dB 가량 적게 나오는데 이것은 가상 제2 경로 모델 $\hat{S}_v(z)$ 의 부정확성에 상당 부분 기인하는 것으로 이 모델의 정확도가 VMC 제어 성능에 중요한 요소임을 확인할 수 있다. 비록 작은 양의 차이이지만, 이 연구에서의

Table 1 Average attenuation after control

	Left side(position 1)		Right side(position 2)	
	VMC off	VMC on	VMC off	VMC on
Error microphone	-24.8208 dB	-4.2430 dB	-23.9327 dB	-3.1795 dB
Observer microphone	-6.3681 dB	-21.4194 dB	-6.4201 dB	-22.4050 dB



(a) Control with VMC off



(b) Control with VMC on

Fig. 10 Comparison of the spectrograms of the measured virtual error signals $e_v(n)$ at the virtual microphone location after controls

이러한 제2 경로 모델의 미소한 오차는 IRF의 길이를 50 개로 제한함에 따른 영향으로 판단된다. 이것의 길이를 증가시켜 오차를 개선시킬 수는 있으나 이는 연산량의 증가를 초래하므로 실시간의 VMC

기반 ANC 제어시스템에서의 IRF 최적 길이는 이런 사항들을 고려할 필요가 있다.

또한 Table 1은 VMC on/off와 관계없이 60 mm 가 떨어진 위치에서도 3.2~6.4 dB 정도의 저감이 발생하고 있는 것을 보여 주는데 이것은 정음공간의 크기와 관계되는 의미 있는 측정치임을 알 수 있다. 그리고 Table 1에서 보는 것과 같이 좌측 제어결과와 우측 제어결과는 거의 비슷하게 나타났다.

이 연구의 결과를 실제에 적용하고자 할 경우 다음과 같은 고려가 필요할 것으로 판단된다. 이 논문에서는 Fig. 2와 같이 제1 소음원이 1가지 ($P(s)$)인 경우에 대해 다루고 있는데 반해서 자동차의 캐빈과 같은 실제의 경우에는 주행 중 다양한 경로를 통해 소음이 유입될 것이므로 다중의 제1 경로 ($P_1(s)$, $P_2(s)$, $P_3(s)$, ...)와 다중의 제1 소음원이 존재하게 될 것이다. 그래서, 실제에 적용되는 능동헤드레스트 시스템은 다중의 레퍼런스 센서가 필요할 것으로 판단되며 능동헤드레스트의 제어 알고리즘은 이러한 다중의 레퍼런스 신호를 수용해서 각각에 대응하는 다중의 제어알고리즘으로 구현되어야 할 것이다. 그리고 이 논문에 제시된 좌석시스템에서의 제어스피커 배치의 착석자의 머리의 움직임에 제한을 초래할 것이 자명하다. 다만, 이 연구는 좌석에서 VMC 기반의 ANC 제어의 적용 가능성 및 그 제한점 등에 대한 다각도의 분석을 시도하는데 그 목적이 있다. 그런데, 머리 움직임의 자유공간을 확보하고자 마이크로폰 간의 단순한 직선적인 거리의 확장은 제어성능의 악화를 초래할 가능성이 농후하므로, 확장해가기 보다는 스피커를 현재의 위치에서 회전을 시켜 착석자의 귀 후방으로 가져가는 연구를 진행할 예정이다.

5. 결 론

이 논문은 ANC 능동헤드레스트가 장착된 좌석 시스템에 대한 FxLMS 기반의 제어에 VMC 기법을

적용하여 오차마이크로폰 위치에 생성된 정음공간을 가상마이크로폰의 위치로 이동시키는 연구에 대해 기술하였다. 이 연구에서는 오차마이크로폰과 가상마이크로폰의 거리는 60 mm로 설정되었으며, 협대역의 주파수를 갖는 스위칭신호에 대해 VMC 제어를 수행하였다. VMC off의 경우 정음공간이 오차마이크로폰의 위치에 생성되었고, VMC on의 경우 정음공간이 가상마이크로폰의 위치에 생성되었는데, 평균 저감량은 가상마이크로폰 위치에서 조금 줄었음을 확인하였다.

후 기

이 논문은 인천대학교 2013년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

- (1) Jee, T. H. and Choi, Y. B., 1999, Transfer Path Analysis on the Passenger Car Interior Noise, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 9, No. 1, pp. 97~102.
- (2) Kuo, S. M. and Morgan, D. R., 1999, Active Noise Control: a Tutorial Review, Proceedings of the IEEE, Vol. 97, No. 6, pp. 943~973.
- (3) Tseng, W.-K., 2011, Local Active Noise Control Using a Novel Method of Designing Quiet Zones, Control Engineering Practice, Vol. 19, No. 12, pp. 1450~1458.
- (4) Elliott, S. J., 2001, Signal Processing for Active Control, Academic Press.
- (5) Rafaely, B. and Elliott, S. J., 1999, H2/H-infinity Active Control of Sound in a Headrest: Design and Implementation, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 7, No. 1, pp. 79~84.
- (6) Pawelczyk, M., 2002, Control Algorithms for Locating Zones of Quiet in the Active Headrest System, Molecular and Quantum Acoustics, Vol. 23, pp. 339~350.
- (7) Pawelczyk, M., 2004, Adaptive Noise Control

Algorithms of Active Headrest System, Control Engineering Practice, Vol. 12, No. 9, pp. 1101~1112.

(8) Kuo, S. M. and Morgan, D. R., 1996, Active Noise Control Systems, Wiley-Interscience.



Seokhoon Ryu received the B.S. degree in Mechanical Engineering and Robotics from Incheon National University, Incheon, Korea in 2015. He is currently working toward the M.S. degree in Embedded Systems Engineering from Incheon National University, Incheon, Korea. His research interests in signal processing and active control of sound and vibration.



Jeakwan Kim received the B.S. degree in Embedded Systems Engineering from Incheon National University in 2015. He is currently in an integrated M.S. & Ph.D. candidate at the same department. His interesting research area is active control and real-time signal processing.



Young-Sup Lee received his B.S. degree in Naval Architecture from Pusan National University, Korea, in 1987. He then received his MSc and Ph.D. degrees from ISVR, University of Southampton, United Kingdom, in 1997 and 2000, respectively. Dr. Lee is currently a professor at Department of Embedded Systems Engineering in Incheon National University, Korea. Dr. Lee's research interests include active control of sound and vibration, real-time embedded control and digital signal processing, smart sensors and actuators, and leak detection of pipelines.