

<論 文>

제어오차계의 가중치를 이용한 차실내 능동소음제어 시스템 연구

A Study on the Active Noise Cancellation System in a Vehicle Cabin using the Weighting Factors of Control Error Path

홍 석 윤* · 허 현 무**

Suk-Yoon Hong and Hyeon-Moo Heo

(1996년 8월 19일 접수 ; 1996년 9월 6일 심사완료)

Key Words : Active Noise Cancellation(능동소음제어), Adaptive Filter(적응필터), Error Path(오차계), Digital Signal Processor(이산신호처리기), Engine Booming(엔진부밍)

ABSTRACT

The active noise cancellation system showing the effective convergence and stability has been studied by simplifying the controller structures using the weighting factors of control error path to the multi-channel filtered-x LMS algorithm which needs a lot of calculations and the performance has been verified experimentally. Besides, to implement the system performance in a vehicle cabin, experimental work for selecting the suitable numbers and positions of the microphones and speakers was accomplished. Effectively combining a TMS 320C 31 main processor conducting real number calculations and having various functions with other components, the purpose-built system board for active noise cancellation has been designed and with this board, car active noise cancellation system showing maximum stable 10dB noise reduction has been obtained at the car idling conditions above 3000rpm range.

1. 서 론

소음저감을 위하여 일반적으로 사용되는 수동적인 제어방법과 함께 최근에는 소리의 중첩 현상을 이용하는 능동소음제어(Active Noise Cancellation/Control, ANC) 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 능동소음제어는 수동제어에서 나타나는 시스템의 부피와 하중의 증가를 최소화하면서 500 Hz 이하의 저주파 대역에서 효과적인 제어성능을 기대할 수 있다. 특히 적응 제어 및 디지털 필터의 응용과 제어시스템의 구현을 가능케 해주는 초고속 이산신호처리기(Digital Signal Processor, DSP)의 출현으로 인하여 소음원이 비교적 저주파이면서 주기적인 특

성을 갖는 공조덕트, 자동차, 선박 및 항공기 등 많은 분야에서 실용화를 위한 연구가 추진 되고 있다.

능동소음제어기의 설계에는 적응제어기로 자주 사용되는 filtered-x LMS(Least Mean Square) 알고리즘이 근간이 되어왔고⁽¹⁾ 1차원 평면파가 형성되는 덕트내의 능동소음제어 시스템에 대한 연구는 여러 곳에서 실용성있는 결과를 보이고 있다⁽²⁾. 또한 차실내와 같은 3차원 공간에서의 능동소음제어 시스템의 구현을 위한 다채널 filtered-x LMS 알고리즘도 개발되어^(3, 4) 공간상에서도 능동소음제어 시스템의 활용이 가능하여 졌으며 실용화를 위하여 제어 알고리즘, 제어기의 하드웨어 및 센서와 액추에이터 등 모든 관련 분야별로 지속적인 연구가 수행되고 있다.

본 논문에서는 많은 연산이 필요한 다채널 filtered-x LMS 알고리즘의 오차계에 가중치를 적용하여 제어기의 구조를 간략히 함으로써 수렴성과 안정성의 향상을 가져오는 능동소음제어 방법을 제안

*정회원, 고등기술연구원 자동차기술연구소

**정회원, 한국철도기술연구원 차량동력학실

하였으며, 차실내 공간에서의 구현을 위해 적절한 스피커와 마이크론의 갯수 및 위치선정과 이에 따른 시험연구 결과를 보여주고 있다.

2. 오차계 가중치를 고려한 제어기법

차실내로 전달되는 주요 소음성분이 되는 엔진소음은 차실내 음향모우드와 관련한 부밍(booming) 소음을 유발하며 엔진의 회전수와 연관이 많음을 알 수 있다. 따라서 엔진의 회전수를 제어기 입력신호로 하여 차실내로 유입되는 소음을 예측하는 feedforward 방식의 능동소음제어 기법을 적용하면 우수한 제어효과를 기대할 수 있다. 또한 소음의 주파수 대역이 변화되므로 이에 대처할 수 있는 적응 제어필터로 제어기를 구성하면 제어시스템의 전반적인 성능과 안정성에도 유리함을 알 수 있다.

Feedforward 방식의 적응제어기로 자주 사용되는 filtered-x LMS 알고리즘은 주로 공조덕트와 같은 관내를 전파하는 1차원 소음의 제어에 이용되어 왔다⁽⁵⁾. 그러나 차실과 같은 공간에서의 소음저감을 위해서는 여러 위치에서 소음저감 효과가 나타나는 3차원 공간상의 알고리즘인 다채널 filtered-x LMS 알고리즘으로 확장이 필요하다⁽⁶⁾. L개의 센서와 M개의 액추에이터로 구성되는 능동소음제어계에 있어서 1번째 센서의 오차 $e_i(n)$ 은 식 (1)과 같이 표현 되는데

$$e_i(n) = d_i(n) + \sum_{m=1}^M \sum_{j=0}^{l-1} c_{lmj} \sum_{k=1}^n w_{mi}(n-j)x(n-i-j) \quad (1)$$

이 식에서 $d_i(n)$ 은 원소음이며 c_{lmj} 는 l번째 센서와 m번째 액추에이터 간의 J개의 차수로 모델링된 오차계(error path)이며, w_m 은 m번째 적응제어 필터이고 $x(n-i-j)$ 는 제어기 입력이다. 적응 제어 필터 w_m 의 계수값은 식 (2)의 각 센서에서 오차 자승의 합의 평균값을 목적함수로 하여 그 값을 최소화시키는 LMS 알고리즘으로 부터 식 (3)과 같이 유도된다.

$$J = E \left[\sum_{i=1}^l e_i^2(n) \right] \quad (2)$$

$$w_{mi}(n+1) = w_{mi}(n) - \alpha \sum_{i=1}^l e_i(n) \cdot \sum_{j=0}^{l-1} c_{lmj} x(n-i-j) \quad (3)$$

여기서 α 는 적응필터 계수의 수렴속도를 결정하는

수렴계수이다. 한편 식 (3)은 m번째 제어기 w_m 이 각 오차계에 균일하게 지배를 받는 구조로 M개의 제어기 수렴과정에 있어서 $L \times M$ 개의 오차계 연산과정을 필요로 한다. 이 오차계 연산과정은 제어기 수렴과정에 확일적으로 관계하고 시스템 수렴속도와 안정성은 수렴계수로만 조정이 가능하다. 한편 $L \times M$ 의 오차계 중 각 제어기에 미치는 영향을 고려하면, 센서와 액추에이터 각각의 위치에 따라 미치는 효과가 다르므로 이것을 고려할 필요가 있다. 또한 제어 프로그램 구현시 오차계를 모두 고려하면 센서와 액추에이터의 증가에 따른 연산의 증가로 프로그램의 크기가 커지게 되어 결국 전체 시스템의 샘플링 속도를 느리게 하므로 소음제어의 해당 주파수 밴드에 제한을 가져오는 단점을 갖게 된다. 따라서 아래 식 (4)와 같이 오차계에 가중치 β_{lm} 을 부과하여 식을 전개하고, 오차계의 영향이 작아 제어기의 성능에 기여하지 못하는 항은 가중치를 0으로 하여 제어기 구조를 줄이면 연산속도가 증가되고 아울러 수렴성과 안정성의 향상을 예상할 수 있다.

$$w_{mi}(n+1) = w_{mi}(n) - \alpha \sum_{i=1}^l e_i(n) \cdot \sum_{j=0}^{l-1} \beta_{lm} c_{lmj} x(n-i-j) \quad (4)$$

이와 같이 산출된 제어기 계수는 제어입력 $x(n-i)$ 와 식 (5)에 의하여 제어기 출력을 발생시켜 각 센서에서의 오차를 최소화 하도록 적응제어루프를 형성한다. Fig. 1은 제어기 W와 오차계 C를 포함하는 적응제어루프를 나타낸 블럭선도이다.

$$y_m(n) = \sum_{j=0}^{l-1} w_{mi}(n) x(n-i) \quad (5)$$

3. 제어시스템 구성

오차계 가중치를 고려한 차실내 능동소음제어 시스템 시험연구는 1500cc급 DOHC 승용차를 대상으로 수행하였다. 차실내 소음을 감지하는 센서인 마이크론, 제어음 발생용 액추에이터로 쓰이는 스피

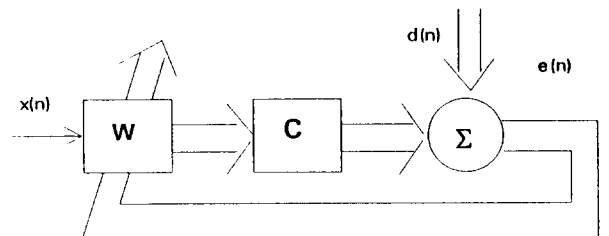


Fig. 1 Block diagram of multi-channel ANC system

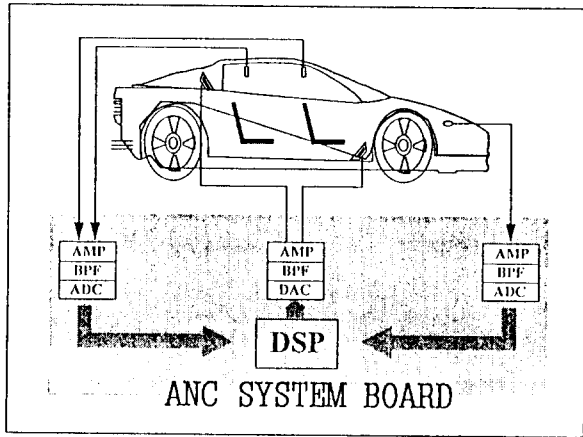


Fig. 2 ANC system in a vehicle cabin

이커, 그리고 이산신호처리기인 제어기와 AD변환기, DA변환기, 필터, 앰프등이 내장된 능동소음제어 전용 시스템 board로 구성된다. 이와 같이 구성된 차실내 능동소음제어 시스템은 Fig. 2와 같다.

차실내 음압을 감지하기 위한 센서로 사용된 마이크로폰은 콘덴서형으로 500 Hz 미만의 저주파 대역에서 균일한 특성을 발휘하며 차실내 루프의 각 모서리에 4개 장착하였다. 제어기 출력용 스피커는 모두 4개 사용하였다. 앞좌석에는 4 in 스피커를 좌우 도어의 기 장착된 곳에 위치하였고 뒷좌석에는 6in 스피커 2개를 기 장착된 곳 근처에 추가로 설치하여 병렬로 연결하여 사용하였다. 제어기인 능동소음제어 시스템 board는 차량의 트렁크에 장착되어 있으며 제어 알고리즘이 이식되어 제어출력을 발생시킨다. 제어기 입력은 엔진의 점화신호를 참조신호로 하여 그 주파수 성분의 2배수까지 포함하여 사용한다. 제어 알고리즘은 식 (4)를 이용한 다채널 filtered-x LMS 알고리즘을 사용하였으며, 센서와

액추에이터 간의 오차계는 5 kHz 대역의 pseudorandom 신호를 이용하여 필터차수 64개의 FIR(Finite Impulse Response) 필터로 모델링하였다. 제어기 필터 역시 차수를 64로 하여 사용하였다. 전체 차실내 능동소음제어 시스템은 4개의 마이크로폰, 4개의 스피커를 사용하나 후반부 스피커 2개를 병렬로 연결시켰으므로 결국 3개의 스피커를 사용한 4×3 구조가 되며, 전체 시스템의 샘플링 속도는 1 kHz가 되도록 하였다⁽⁷⁾. 이와 같이 구성된 능동제어 시스템이 효과적으로 구현될 수 있도록 개발된 차량 전용 시스템 board의 블럭선도와 내부구조는 각각 Fig. 3, 4와 같다.

4. 실험방법 및 결과

능동소음제어 시스템의 성능 향상을 위하여, 오차계의 가중치를 반영한 알고리즘의 개선 실험과 차실내의 오차 마이크로폰의 최적위치 선정을 위한 각종 실험을 수행하였다. 이 중 최상의 시스템에 대하여 정차상태에서 최종 성능실험을 수행함으로써 개선된 시스템의 성능을 확인하였다. 알고리즘 개선실험으로 각 센서와 액추에이터 조합시 오차계의 gain을 Fig. 5와 같이 구하여 이로부터 식 (4)에서의 오차계 영향에 따른 가중치를 선정함으로써 무부하 정차상태에서 시스템 성능을 비교하였다. Table 1은 본 실험에서 수행한 대표적인 경우의 오차계 가중치를 보여주는데 Fig. 5의 오차계 gain의 영향력을 반영하여 선정하였다. Fig. 6은 위 세 가지 경우에 대하여 오차 마이크로폰의 위치를 차실내 루프의 4모서리에 장착하고 귀빈석(오른쪽 뒷좌석, RR/RH)의 머리 부근에 위치한 마이크로폰에서 측정한 소음저감선도이다. 예상대로 오차계 가중치를 반영 하여 제어기

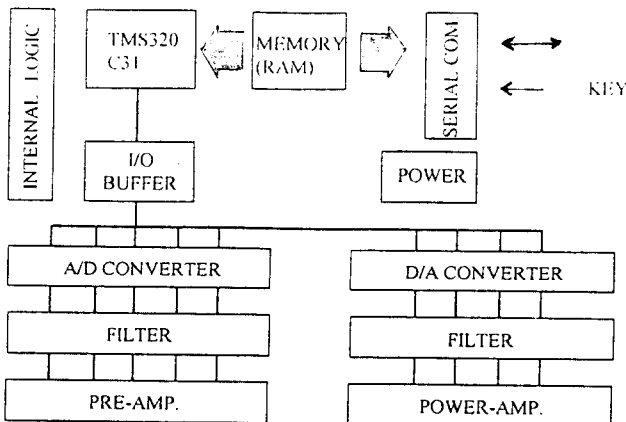


Fig. 3 Block diagram of ANC system board

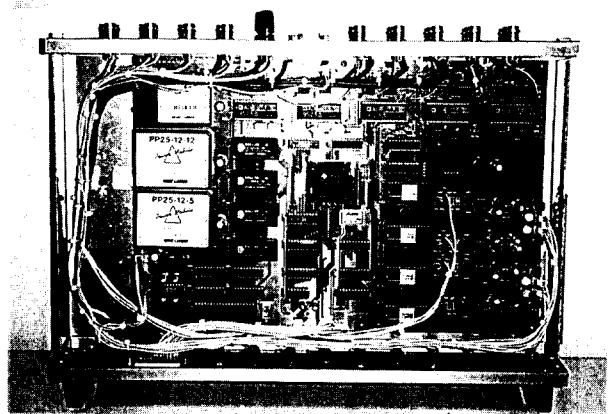


Fig. 4 ANC system board inner view

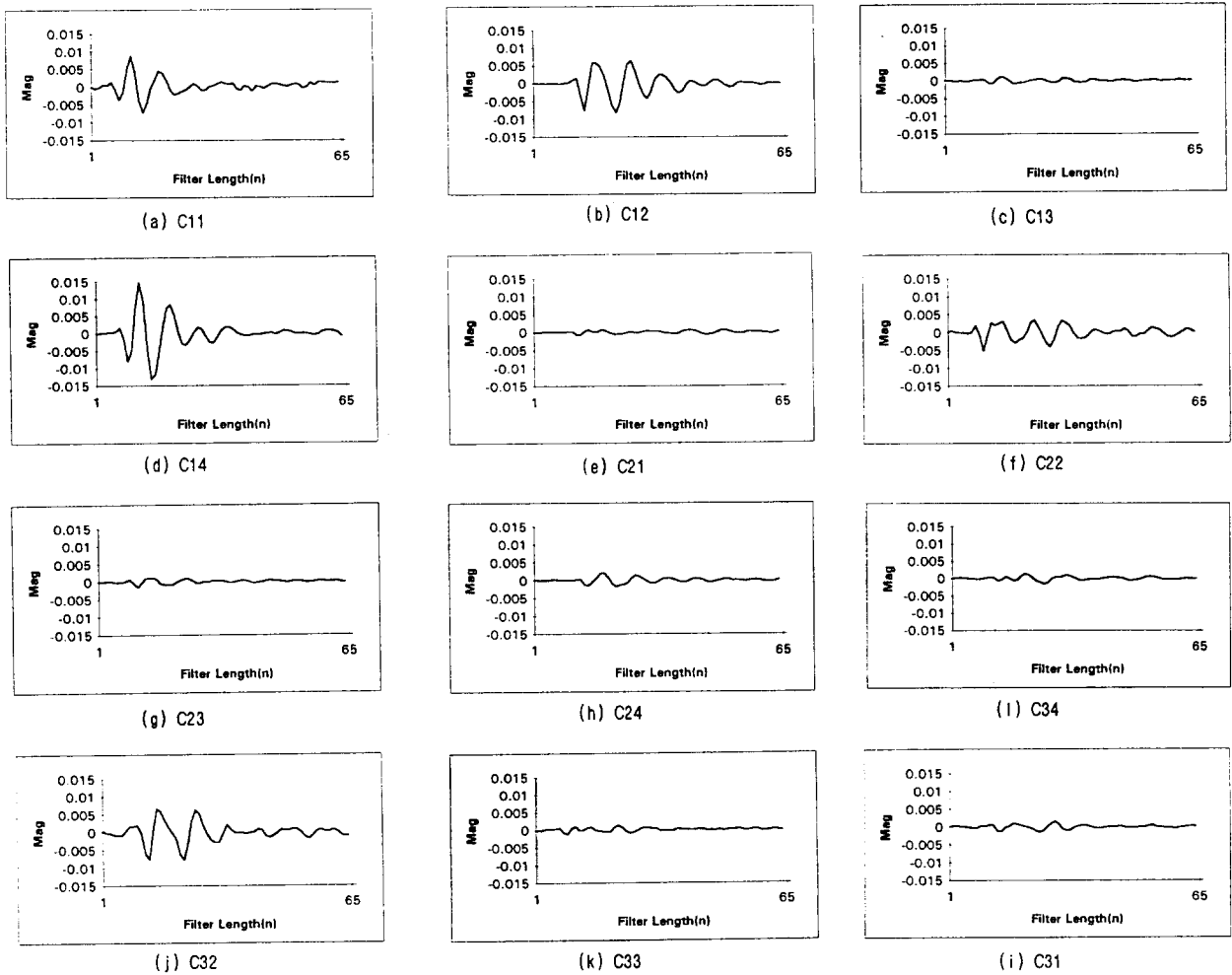


Fig. 5 Error path gains of vehicle cabin

Table 1 Weighting factors for the error paths

L \ M	CASE 1				CASE 2				CASE 3			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
I	1	1	1	1	1.2	1	1	1.2	1	1	1	1
II	1	1	1	1	1	1.2	1.2	1	0	1	1	0
III	1	1	1	1	1	1.2	1.2	1	0	1	1	0

의 구조가 간소화된 Case 3이 전영역에 걸쳐 고른 성능을 보이고 있다. Case 3의 가중치 특성은 센서 1, 4에 대한 액추에이터 II, III의 영향이 매우 적으므로, 이에 대한 오차계의 영향을 무시한 결과로 그 가중치를 0으로 하였다. 따라서 이 경우에 4개의 오차계에 관련된 연산을 생략할 수 있으므로 총 연산 시간의 절감과 이에 따른 성능 향상이 나타나게 된다.

오차 마이크로폰의 위치 선정을 위해 차살내 장착 가능한 위치를 대상으로 마이크로폰을 각 좌석의 머

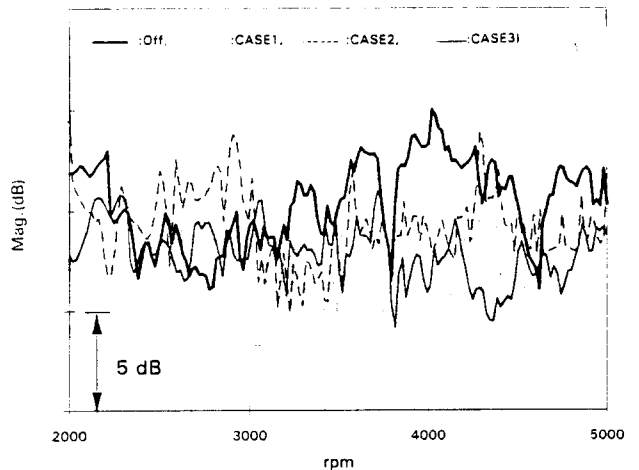


Fig. 6 ANC system performances for different weighting factors of error path

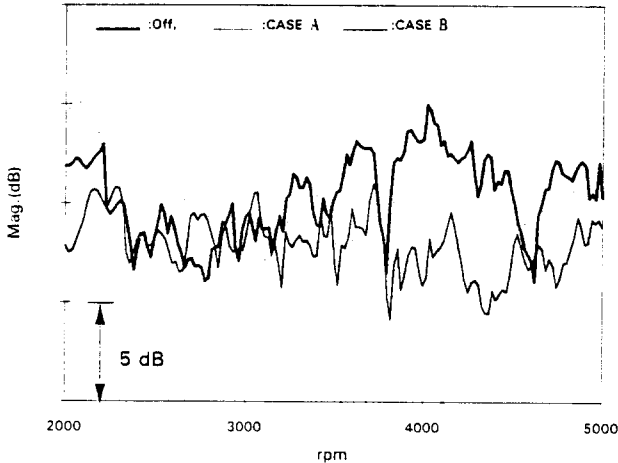
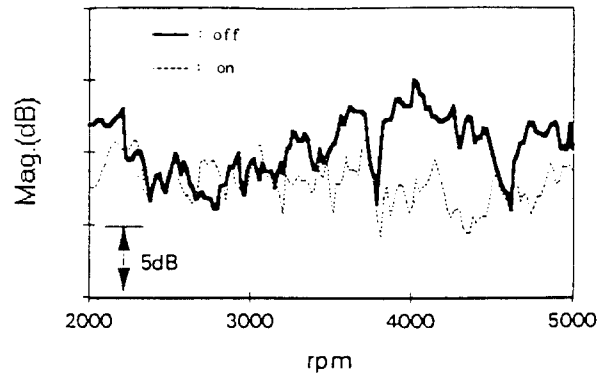


Fig. 7 ANC system performances for different error microphone positions

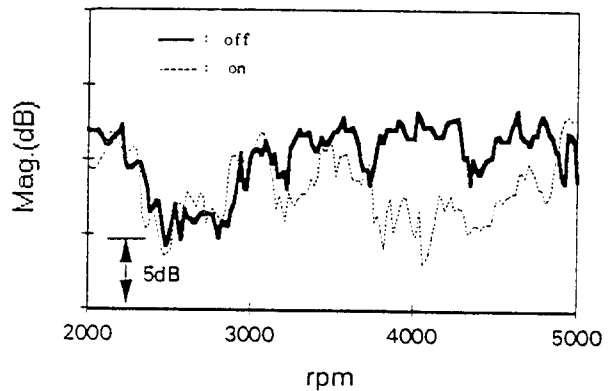
리부근에 장착한 경우(Case A)와 루프의 4모서리에 장착한 경우(Case B)를 선정하여, Case 3에서 적용했던 제어알고리즘으로 비교 실험하였다. Fig. 7은 귀빈석의 머리부근에서 측정한 소음저감선도로, Case A보다 Case B가 전 대역에서 안정된 특성과 함께 보다 우수한 소음저감 성능을 나타낸다. 이것은 Case B의 센서가 엔진소음에 대한 차실내 음향모드를 잘 감지하도록 위치한 결과이며, 또한 마이크로폰의 장착이 용이하다는 장점도 갖고 있다. 따라서 Case 3의 오차계에 대한 가중치와 Case B의 차실내 오차 마이크로폰을 루프의 4모서리에 장착한 경우가 본 능동소음제어 시스템에서는 가장 안정된 성능을 발휘하는 방안으로 평가되었다. Fig. 8은 선정된 제어시스템을 사용하여 왼쪽 뒷좌석(RR/LH)의 위치에서 측정한 시험결과를 앞의 결과와 비교한 것으로 3000 rpm 이상에서 최대 10dB 정도 소음이 저감되는데, 좌석의 위치에 따라 저감 정도의 차이가 생기는 것은 실내 음장모드와 스피커의 성능에 기인하는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문은 여러 형태로 유입되는 차실내 소음 중 주요 성분인 엔진에 기인하는 소음을 저감시키기 위하여, 능동소음제어의 원리를 적용한 효과적인 차실내 능동소음제어 시스템 개발에 관한 연구결과이며 개발된 능동소음제어기 전용의 시스템 board를 소개하였다. 성능개선을 위하여 제어 알고리즘의 개선과 시스템 구성요소들의 위치변경 실험 등을 수행한 결



(a) RR/RH



(b) RR/LH

Fig. 8 ANC system performances for different measurement positions

과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 다채널 filtered-x LMS 알고리즘을 사용한 제어기의 수렴과정 중, 오차계에 대한 가중치를 고려함으로써 제어기 구조를 간략화 할 수 있으며, 수렴속도와 안정성 측면에서도 향상을 기할 수 있다.

(2) 능동소음제어 시스템 구성요소인 오차 마이크로폰의 위치는 액추에이터로 쓰이는 스피커의 위치를 고려하여 볼 때, 각 좌석의 머리 부근 위치 보다는 루프의 4모서리에 분포시키는 것이 차실내 음향모드를 잘 반영하여 더 양호한 시스템 성능을 발휘한다.

(3) TMS 320 C 31 DSP를 이용하여 AD변환기, DA변환기 및 각종 앰프등의 주변장치를 통합한 능동 소음제어 시스템 board를 개발하였으며 차실내에 적용하여 성능실험을 수행한 바, 4개의 마이크로폰과 4개의 스피커로 구성된 본 능동소음제어 시스템은 무부하 정차시 최대 10 dB의 소음저감을 보이며 그 대역은 3000 rpm 이상에서 주로 나타나는데 응답성이 좋은 스피커를 사용하면 보다 저주파 대

역에서도 우수한 제어성능을 구현할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- (1) Widrow, B., and Sterns, S. D., 1985, Adaptive Signal Processing, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- (2) Roure, A., 1985, "Self Adaptive Broband Active Sound Control System", Journal of Sound and Vibration 101, pp. 429~441.
- (3) Elliott, S. J., Stothers, M. I., and Nelson, P. A., 1987, "A Multiple Error LMS Algorithm and Its Application to the Active Control of Sound and Vibration", IEEE Tr. on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol. ASSP-35, No. 10, pp. 1423~1434.
- (4) Elliott, S. J., and Nelson, P. A., 1988, "Multichannel Active Sound Control using Adaptive Filtering", IEEE ICASSP, pp. 2590~2593.
- (5) Eriksson, L. J., Allie, M. C., and Bremigan, C. D., 1988, "Active Noise Control using Adaptive Digital Signal Processing", IEEE Internal Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, April 11~14, New York.
- (6) Elliott, S. J., Boucher, C. C., and Nelson, P. A., 1992, "The Behavior of a Multiple Channel Active Control System", IEEE Tr. on Signal Processing, Vol. 40, No. 5, pp. 1041~1052.
- (7) TMS320C30 User's Guide, Texas Instruments, 1993.