

승용차의 실내 소음 저감을 위한 능동소음제어 연구

이 원 구, * 박 성 기 *

(A study on the Active Noise Control for the reducing the in-cabin noise of a passenger car)

(Lee-WonGoo, Park-SongKee)

1. 서론

환경 보호와 연비 향상을 목표로 한 고출력 엔진과 초 경량 차체의 차량을 설계하려는 최근의 차량 개발 추세는 진동과 소음의 문제를 더욱 악화시키는 요인이 되었다. 이에 반해 차량을 구입하는 고객은 보다 정숙한 주행 성능을 요구하고 있다. 이런 상황에서 커다란 설계의 변형이나 차체의 중량 증가없이도 적용가능한 능동 제어 기술(Active Control Technique)은 차량의 진동, 소음문제에서 훌륭한 해결책의 하나로 등장하였다. 최근까지 능동 소음 제어와 관련한 연구는 여러 분야에서 수행되었으며, 실제로 시작차량뿐만 아니라 양산차에 적용된 사례가 있다. P.A.Nelson 등은 음향 공동내의 음향 에너지를 최소화시키는 소음 제어에 관한 이론, 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험에 대하여 발표하였다.¹⁾ 이외에도 유한 요소 해석이나 경계 요소 해석등의 수치 해석을 이용한 연구 사례등도 발표되었다.²⁾ 또한 최근의 디지털 신호 처리기(DSP, Digital Signal Processor)의 개발에 힘입어 해석의 검증외에도 실제 차량에 적용한 사례도 있다. 로터스(LOTUS,英)는 다양한 시작차를 제작하여 그 효과를 검증하였으며³⁾, 닛산(Nissan,日)은 양산차에 적용하여 판매하고 있는 실정이다.⁴⁾ 본 논문에서는 능동 소음 제어 장치를 개발하여 승용차에 적용한 결과를 보이도록 한다.

2. 제어 알고리즘

능동 소음 제어 기술의 기본적 원리는 중첩의 원리로서, 이는 원래의 소음에 대해 반대의 위상을 갖는 부가적인 음을 합성시켜 그 결과로 원하지 않는 소음을 제거하는 것이다. 능동 소음 제어의 원리는 이와같이 간단하나 실제로 이를 구현하는 것이 가능하게 된것은 최근의 일이다. 이는 발달된 디지털 신호 처리기(DSP, Digital Signal Processor)를 이용하여 제거하고자 하는 소음과

반대의 위상을 갖는 신호음을 실제 소음이 전달되는 속도보다 빠르게 생성하고 수정시킬 수 있게 되었기 때문이다. 기존의 많은 연구들은 위의 능동 소음 제어 기술을 이용한 1차원 덕트문제등에서 그 효과를 보여왔다. 나아가서 3차원 공간으로 적용성을 확장시켜 비행기나 차량의 실내소음 저감에 이용하게 되었다. 차량의 실내 소음을 저감시키기위해 능동 소음 제어 기술을 구현하려면 먼저 원래의 소음을 생성하는 요인을 검출하여 반대 파형을 구성할 수 있도록 정보를 제공하여야 한다. 본 능동 소음 제어 시스템으로 제거하고자 하는 엔진 소음은 엔진의 회전수(RPM)와 동기된(Synchronized) 성분들이 지배적인 구성 요소이므로 엔진의 회전수, 즉 타코미터(Tachometer)로부터 나오는 신호를 이용하여 반대 파형인 제어음을 생성토록 한다. 이는 기준 신호(Reference Signal)를 제어기에 통과시켜 제어 신호를 생성하는 피이드포워드(Feedforward)방식의 제어를 의미한다. 한편 차량의 엔진 회전수는 주행중에 수시로 변하며 이에 따른 엔진 소음도 정상 상태(Steady State)로 유지되는 것이 아니므로 제어 시스템은 변화되는 엔진 회전수 신호를 빠르게 추적해야 하며 동시에 차실 내부 환경의 변화를 반영할 수 있어야 한다. 이와같은 특성들을 고려하면 능동 소음 제어에는 적응 제어(Adaptive Control)방식이 필요하다.⁵⁾ 적응 제어시에는, 소음을 제거하고자 하는 위치에서 초기 소음과 제어음의 합성으로 감소된 소음을 검출하여 이를 제어기로 피이드백(Feedback)시켜 제어기의 디지털 필터(Digital Filter)의 계수를 보정하는데 이용한다.

한편 차량의 실내와 같은 3차원 공간에 대한 소음 제어를 위해서는 전 영역 제어(Global Control)가 되도록 하여야 한다. 공간 내부의 특정 영역만을 제어하는 경우에는 제어 대상이외의 영역에서는 소음의 증가를 초래하게 된다. 따라서 초기 소음과 제어음의 합성음을 검출하는 센서, 즉 여러 감지용 마이크로폰을 다수 사용하여 전 영역에서 소음의 제어 효과가 나타날 수 있도록 하여야 한다. 전 영역제어를 위해 다수의 마이크로폰을 사용

* 기아자동차 기술센터

하는 경우에는 제어 음원을 생성하는 액츄에이터인 스피커의 수도 증가하게 된다. 이와같이 3차원 공간에서의 소음 제어시에는 다채널의 입/출력 신호들을 처리할 수 있도록 고려되어야 한다.

엔진 회전수의 정보를 이용한 능동 소음 제어를 생성된 제어 음원은 제어용 스피커를 통해서 발생되고 스피커와 마이크론사이의 음향학적 경로(Acoustic Path)를 통과하여 마이크론에 도달하게 된다. 제어시 에러 신호 감지용 마이크론에서 검출되는 n번째 신호, e(n)은 다음과 같이 수식적으로 표현될 수 있다.

$$e(n) = d(n) - \sum_{j=0}^{J-1} C_j \sum_{i=0}^{N-1} W_j x(n-i-j)$$

$$= d(n) - \sum_{i=0}^{N-1} W_i r(n-i) \quad (1)$$

여기서 d(n)은 초기 소음(Primary Noise)이며, C_j는 제어용 스피커와 마이크론사이의 음향학적 경로(혹은 오차계(Error Path))를 표현하는 오차계필터의 j번째 계수이다. x(n-i-j)는 엔진 회전수의 정보를 갖는 기준 신호(reference signal)이며, W_j는 이 기준신호로서 제어 신호를 생성하는 제어 필터의 i번째 계수이며, r(n)은 보상된 기준 신호(filtered reference signal)를 나타낸다. 보상된 기준 신호, r(n-i)은 $\sum_{j=0}^{J-1} C_j x(n-i-j)$ 으로 표

현된다.

능동 소음 제어 시스템의 목적은 위의 오차 신호인 e(n)의 재규함을 최소화시키는 것이며, 이를 위해 제어 필터의 계수인 W_j를 변화시키며 제어 음원을 생성하는 것이다. 제어 필터 계수의 보정을 위해 가장 보편적으로

사용되는 알고리즘이 LMS(Least Mean Square) 알고리즘이다. LMS 알고리즘에서 목적함수는 오차 신호, e(n)의 제곱항 형태(E{e(n)²})가 되며, 이는 제어필터의 계수 W_i를 미지수로 하는 함수의 형태가 된다. 따라서 이 목적 함수의 최소값은 제어 필터의 계수에 의해 결정되며, 최소값을 찾기 위해 매 제어신호의 생성후 보정(Update)되는 제어 필터의 계수는 다음과 같이 표현되며, 보정된 계수들은 다음 샘플링시 제어 음원을 생성하는 계산에서 이용되게 된다.

$$W_i(n+1) = W_i(n) + \alpha e(n) r(n-i) \quad (2)$$

여기서 α는 목적 함수인 오차 표면(Error surface)상에서 최소치를 찾아가는 수렴 계수(convergence coefficient)이며, 수렴 속도 및 시스템의 안정성등을 고려하여 적절히 선택되어야 한다. 일반적인 LMS 알고리즘과는 달리 (2)식에서는 보상된 기준신호, r(n-i)가 기준 신호인 x(n)대신에 사용되고 있다. 이는 제어 필터를 통과한 신호가 스피커에서 오차 감지용 마이크론까지의 오차계를 통과하여 초기 소음과 합성되기 때문이며, 필터 계수의 보정시 수식적으로 미리 처리를 하는 것이다. 이를 Error Filtered X LMS 알고리즘이라 한다. 최종적으로 제어용 적응필터를 거친 제어 음원, Y(n)은 다음과 같이 나타나고, 하나의 입,출력 시스템에 대한 블록 선도는 그림 1과 같다.

$$Y(n) = \sum_{i=0}^{N-1} W_i x(n-i) \quad (3)$$

한편 앞절에서 설명한 바와 같이 차량의 실내와 같은 3차원 공간의 소음 제어시에는 전역적 제어를 위해 다수의 제어 스피커와 마이크론이 사용되는 다채널(Multi-

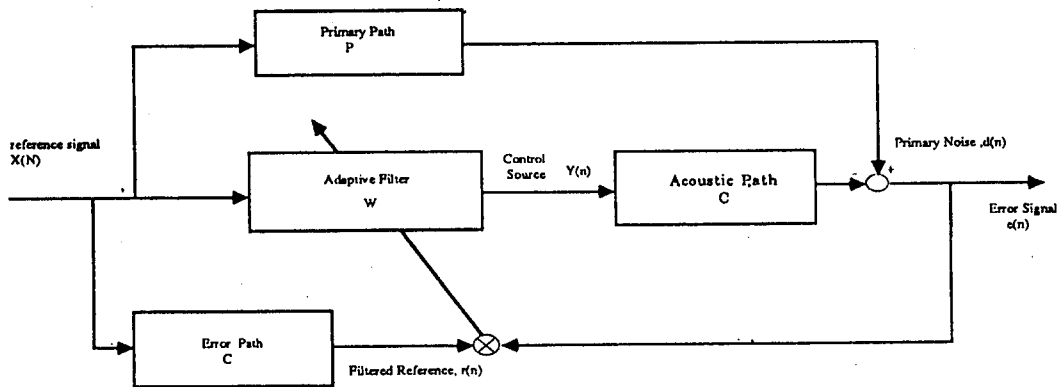


그림 1 능동 소음 제어 블록 선도

Channel) 제어 방식이 되어야 한다. 이러한 경우에는 각 스피커와 마이크로폰사이의 음향학적 경로들이 고려되어야 한다. 이를 위해 위의 알고리즘을 다채널로 확장한 것이 MEFX(Multiple Error Filtered X) LMS 알고리즘이다.⁶⁾

3. 시스템 구성

차실내 소음저감을 위한 능동 소음 제어 장치는 크게 세가지 요소, 즉 센서와 액츄에이터 그리고 제어기인 컨트롤러(Controller)로 구성이 된다.

센서

먼저 제거하려는 초기 소음의 음원(Primary Noise Source)을 감지하는 센서와 제어의 효과인 감소된 소음을 감지하는 센서가 필요하다. 일반적으로 랜덤 소음(Random Noise)을 제어하는 경우에는 초기 소음의 음원을 마이크로폰을 이용하여 감지하여 이를 기준 신호로 하여 제어 음원 생성에 이용하나, 차실 내부의 엔진 소음 제어의 경우에는 엔진 회전수의 신호를 검출하여 제어 시스템에서 이용한다. 이는 초기 소음인 엔진 소음이 엔진 회전수와 동기된 특정 주파수 성분이므로 엔진 회전수의 정보를 갖고 있는 타코미터(Tachometer)의 신호를 ECU에서 받아 이를 기준 신호로 이용한다. 한편 능동 소음 제어시 시스템의 작동으로 초기소음과 제어음의 합성으로 생기는 효과를 컨트롤러에 피이드백(Feedback) 시키기 위한 에러 소음 감지용 마이크로폰이 필요하다. 위의 두가지 센서에서 검출된 신호는 앞절에서 설명된 알고리즘에서 제어음원의 크기와 위상을 결정하는데 이용된다.

액츄에이터

액츄에이터는 실제 제어음원을 발생시켜 소음을 제거하는 스피커이다. 본 시스템에서 제어하려는 엔진소음은 주로 30 ~ 200Hz 이하의 저주파수 성분이므로 제어용 스피커도 이 주파수대의 음을 잘 발생시켜 주어야 한다. 본 시스템 구성시 사용한 스피커는 장치 구성 대상 차량 기존 오디오 시스템에서 사용되는 스피커(Rear Trim에 위치)이며 장치되는 모든 위치에서 동일한 종류의 스피커를 사용토록 한다.

제어기

또 다른 구성요소는 센서에서 신호를 받아 제어 신호를 생성하여 액츄에이터를 구동하는 제어기이다. 이는

디지털 신호 처리기(DSP, Digital Signal Processor)를 이용하여 제어 알고리즘을 운영할 수 있는 컨트롤러를 일컫는다. 실제 능동 소음 제어 장치를 실시간에서 운용 가능하게 한 것이 DSP이며, 본 연구에서는 부동 소수점 연산(Floating Point Operation)이 가능한 TI(Texas Instruments)사의 TMS320C31 칩을 내장한 프로세서보드를 컨트롤러로 사용한다.⁷⁾

기타

위의 주요 구성 요소외에 부가적으로 A/D 변환기와 D/A 변환기, 저역 통과 필터(Low Pass Filter) 및 앰프 등이 필요하다. 각 변환기는 디지털 신호 처리를 통한 제어필터를 구현하기 위해 센서에서 검출되는 아날로그 신호를 디지털 신호로 바꾸고, 계산된 디지털 제어 신호를 아날로그 신호로 변환시키는 데 필요하다. 또한 각 신호를 적절히 증폭시키는 앰프와 적절한 대역의 주파수 성분의 신호만을 통과시키는 저역 통과 필터가 필요하다. 그림 2는 시스템의 구성도를 보여준다.

본 시스템에서는 전/후석의 각 승객, 네곳과 그 사이의 두곳등 여섯 위치에서 마이크로폰을 부착한다. 소음의 감소 효과는 실제 승객의 귀위치에서 크게 나타나야 하므로 가장 가까운 위치에 마이크로폰이 위치하여야 하나 설치상의 제약으로 차실 천장에 장착한다. 또한 스피커는 제어 알고리즘의 안정성을 고려하면 마이크로폰의 수보다 적어야 하며, 장착 위치는 마이크로폰으로의 응답 성능이 최적인 위치를 선택하여야 한다. 그림 3은 6개의 에러소음감지용 마이크로폰과 4개의 제어용 스피커로 구성된 실차의 능동 소음 제어 장치의 구성도이다.

4. 실험 및 결과

차실 소음에 대한 능동 소음 제어 실시에 따른 평가실험으로, 차량의 정지상태에서의 무부하 완가속하에서 시스템의 On/Off에 대한 실내 소음 레벨의 비교실험인 Racing 테스트와 3단 기어 상태에서의 완가속 및 감속시 실내 소음 레벨의 비교실험인 주행테스트를 각각 수행하였다. 제어 대상 차량은 2.0리터 DOHC 엔진을 장착한 수동 변속 차량이다.

Racing 테스트시에는 차량 주행중 유입되는 도로 소음(Road Noise)나 풍절음(Wind Noise)이 배제되어 엔진 소음 성분만의 제거를 효과적으로 비교할 수 있다. 소음 레벨의 비교는 차실의 승객 귀위치인 좌석의 헤드 레

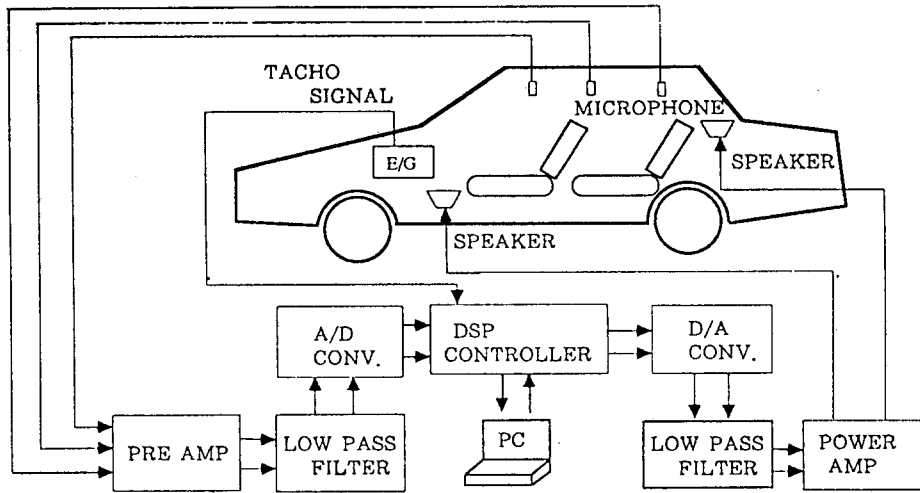


그림 2 능동 소음 제어 시스템의 구성

스트 네 곳에 부착된 소음 레벨 측정기를 이용한다. 소음 레벨 측정기의 위치는 제어 시스템에서 사용하는 에러 소음 감지용 마이크로폰의 위치가 일치되지는 않으나 가까운 거리이므로 소음 레벨의 변화 특성은 유사하다.

Racing 테스트시 소음 레벨 분석 결과는 유첨된 그림 4에 보인다. 본 테스트에서는 차량의 정지 상태인 무부하 상태에서 가속페달을 완만히 가속시켜 아이들상태에서 5000RPM까지 엔진회전수를 증가시키면서 각 위치에서 소음 레벨을 측정하는 것이다.

여기서는 주요 부밍 소음(Booming Noise) 발생 RPM에서 10 dB 이상의 저감효과가 나타남을 보여주고 전체적으로 3-4 dB의 저감 효과가 있음을 보여준다.

(a)-(d)는 각각 전석 및 후석의 2차리에서의 RPM대비 전석 소음 레벨을 비교한 2차원 그래프들이다.

각각의 결과를 비교하면, 소음 저감량이 각기 차이가 있음을 알 수 있다. 시스템 작동전의 초기 소음 경향에 따라 제어 효과가 차이가 있다. 알고리즘상 제어의 결과인 에러 소음 레벨이 클수록 이 값이 피이드백되어 제어 필드의 계수의 변화를 크게 하여 제어의 효과를 높이는 결과가 되어, 상대적으로 초기 소음 레벨이 높은 위치가 감소 효과가 더 크게 나타나도록 한다. 따라서 같은 RPM에서도 초기 소음 레벨이 높은 위치에서 제어 효과가 크게 나타난다. 즉 1000 - 2000 RPM대에서는 후석의 VIP석에서 제어 효과가 잘 나타나고 3000 - 4000

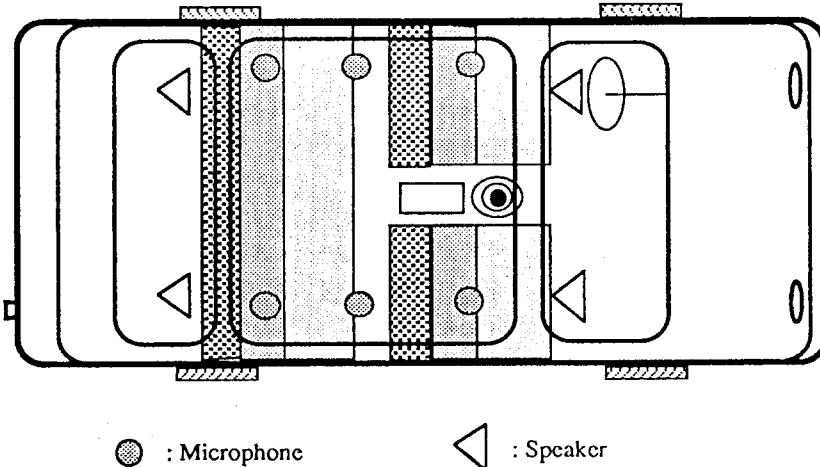


그림 3 능동 소음 제어를 위한 마이크로폰과 스피커 위치

RPM대에서는 운전석의 위치에서 효과가 더 좋게 나타나고 있다.

주행 테스트는 차량의 실제 주행중 시스템의 성능을 확인하기 위해 실시한다. 즉 차량 주행중에는 엔진 소음 이외에도 여러 요인에 의해서 소음이 발생하는데 능동 소음 제이시 전체적인 소음 레벨의 변화를 관찰하기 위해 실시한다. 소음 레벨 측정테스트는 3단 기어상태에서 1000RPM부터 5000RPM까지 완만한 가속과 급가속후 5000RPM부터 3단 기어의 엔진 브레이크에 의한 감속시 등 두가지 조건으로 실시한다. 소음 레벨의 측정은 Racing시와 마찬가지로 승객 귀 위치 4곳에서 실시한다.

먼저 그림 5는 RPM대비 소음 레벨의 변화로써 시스템 작동 전후를 비교한 것이다. 주요 Booming발생 영역에서 소음 레벨의 감소가 이루어짐을 보인다. Racing 테스트시와 비교하면 다른 요인에 의해 전체적인 소음 레벨은 증가하였으나 소음 제어 시스템에 의해 많은 저감 효과가 나타남을 보여준다.

감속시의 테스트 결과도 완가속시의 결과와 유사한 경향을 보인다. 그림 6은 감속시 각 위치에서의 소음 분석 결과이다.

5. 결론

차량의 실내 소음 제어를 위한 능동 소음 제어 장치 개발 연구를 수행하여 실차에 대한 시스템을 구현하고 그 성능을 확인하였으며, 다음의 연구 결과들을 얻었다.

① 본 시스템 구현을 위한 능동 소음 제어용 알고리즘에 관한 연구를 수행하여, 다수의 마이크로폰과 제어용 스피커를 사용하면서 에러 소음의 결과를 제어용 디지털 적응 필터에 반영할 수 있는 MEFX(Multiple Error Filtered X) LMS알고리즘을 채택하였다.

② 능동 소음 제어를 구현하기 위한 디지털 신호 처리기(DSP)등을 이용하여 실차에 6개의 마이크로폰과 4개의 스피커를 사용한 시스템을 구성하였으며, 이를 운영하기 위한 프로그램들을 구성하였다.

③ 구성된 실차의 능동 소음 제어 시스템의 성능을 확인하기 위한 비교 테스트를 수행하였다. 주행 테스트시 운전석의 귀 위치에서 발생하는 부밍 소음을 제거하여 최대 10dB의 소음 레벨 저감 효과를 보이는 등, 엔진 운전 RPM영역내에서 각 승객의 귀 위치에서 소음 레벨 감소 효과가 나타남을 확인하였다.

이상의 연구 결과들은 본 연구에서 개발된 능동 소음

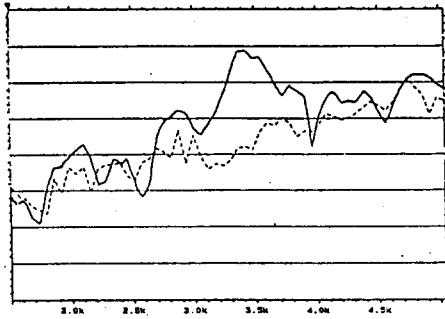
제어 시스템으로 엔진 운전에 의해 발생하는 차실내의 소음을 효과적으로 제거할 수 있음을 보여준다.

감사의 글

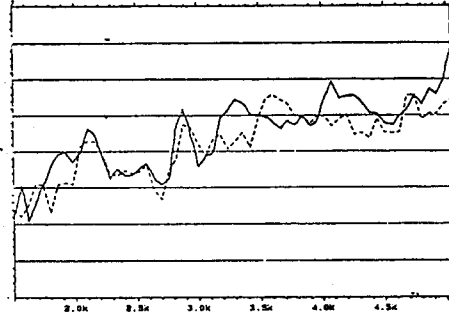
본 연구를 수행하는데 많은 도움을 주신 한국 기계 연구원의 이종식 박사님께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

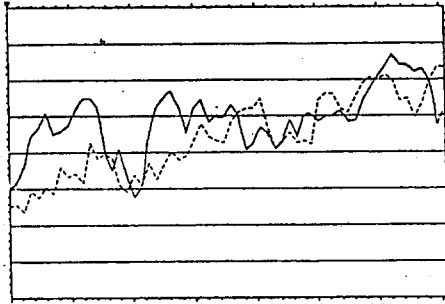
- (1) P.A.Nelson and S.J.Elliott, Active control of sound, Academic press, 1992
- (2) C.G.Mollo and R.J.Bernhard, "The optimal performance of active noise controllers in three dimensional cavities," SAE paper No.870994, 1987
- (3) A.M.Mcdonald, S.J.Elliott, and M.A.Stokes,"Active noise and vibration control within the automobile," International symposium on active control of sound and Vib., pp.147-156, 1991
- (4) S.Hasegawa, T.Tabata, and A.Kinoshita, "A study on active noise control using multichannel adaptive filtering," Proc. AVEC92, pp.17-22, 1992
- (5) B.Widrow and S.D.Stearns, Adaptive Signal Processing, Prentice-Hall, 1985
- (6) S.J.Elliott, I.M.Stothers, and P.A.Nelson, "A Multiple Error LMS Algorithm and Its Application to the Active Control of Sound and Vibration," IEEE Trans. on Acoustics, Speech and Signal Processing, Vol. ASSP-35, No.10., Oct. 1987
- (7) TI, TMS320C3X User's Guide, 1992



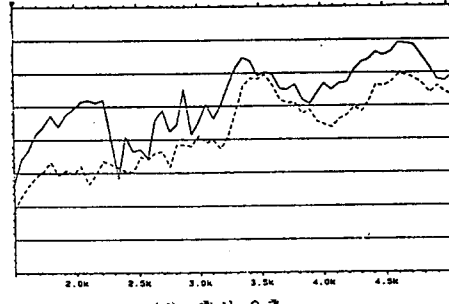
(a) 운전석 위치



(b) 조수석 위치



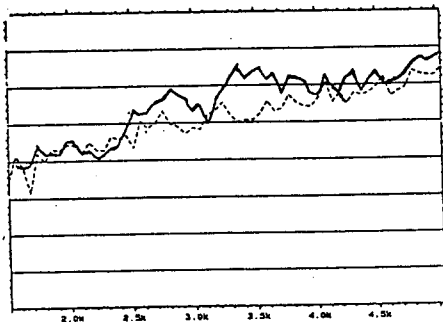
(c) 후석 좌측



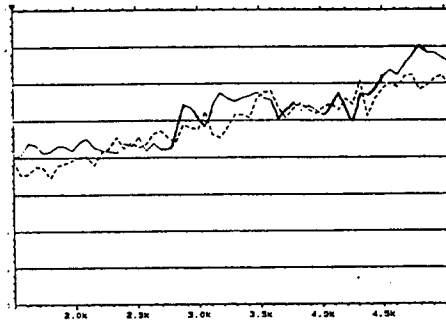
(d) 후석 우측

그림 4 RACING TEST시의 소음 레벨 변화(Overall)

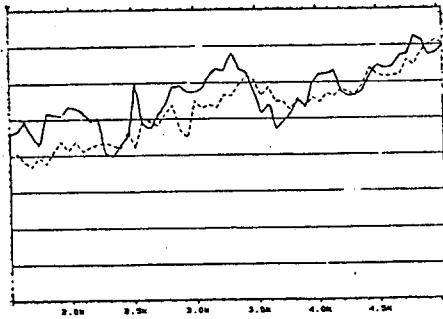
(실선 : 제어전 점선 : 제어후)



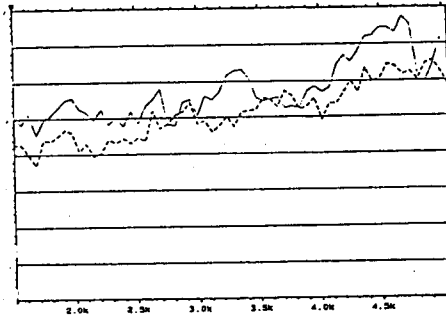
(a) 운전석 위치



(b) 조수석 위치



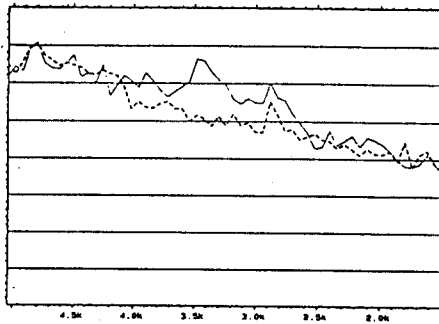
(c) 후석 좌측



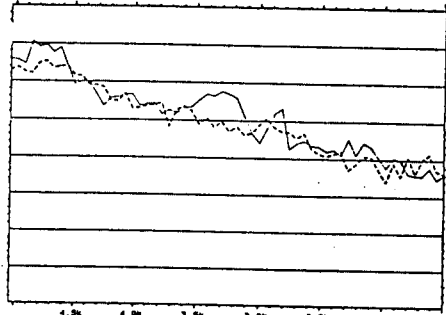
(d) 후석 우측

그림 5 완가속시의 소음 레벨 변화(Overall)

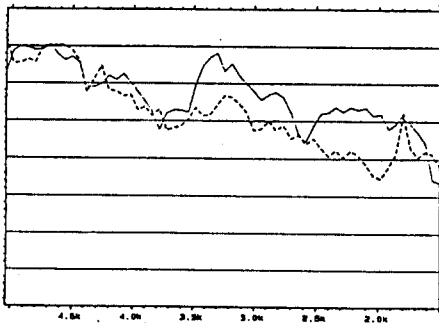
(실선 : 제어전 점선 : 제어후)



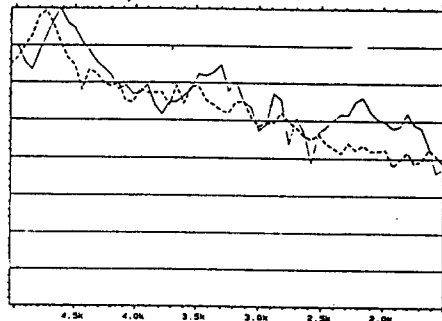
(a) 운전석 위치



(b) 조수석 위치



(c) 후석 좌측



(d) 후석 우측

그림 6 감속시의 소음 레벨 변화(Overall)

(실선 : 제어전 점선 : 제어후)