한국자동차공학회논문집 제1권 제3호, pp. 55~62, 1993.

〈논 문〉 SAE NO. 933764

디지탈 필터링 技法을 利用한 自動車 排氣騷音의 音響特性 再現에 關한 硏究

A Study on the Reproduction of Acoustic Characteristics of a Car's Exhaust Noise Using Digital Filtering Technique.

조 재 환,* 이 종 민,** 황 요 하***
J. H. Cho, J. M. Lee, Y. Hwang

ABSTRACT

Autoregressive moving average(ARMA) model which is a time domain parametric modeling method is implemented for modeling and reproducing characteristics of exhaust noise of an automobile in various RPM range. Experiments have been carried out using 9 set of exhaust noise signals measured at 1,000−3,000 RPM range. Characteristics of sampled signals were estimated using ARMA modeling and Akaike's FPE(final prediction error) criterion to define exact model structure and for model validation. The digital filter consisted of the esitmated ARMA(70,1) model parameters was programed to reproduce exhaust noise. The spectral analysis of reproduced noise is very close to original. The results show that our approaching technique for reproducing acoustic characteristics is valid and feasible to apply in the field of noise quality control.

주요기술용어 : ARMA, exhaust noise(배기소음), digital filtering(디지탈 필터링)

1. 서 론

최근 일반적인 자동차 개발 추세가 차량의 경량화, 고출력 엔진개발등의 방향으로 진전되어 자동차의 연비와 고속주행 능력이 향상된 반면 상대적으로 소음환경이 악화되어 자동차의 소음 제어에 대한 필요성이 증대 되었다. 또한 이러한 소음 제어에 관한 기술이 차량의 상품성 및 기술수준을 평가하는 중요한 지표가 되고 있다.

1980년대 이후, 소음원에서 발생하는 원래의 소음과 같은 크기이고 반대의 위상을 갖는 제2의 소음을 만들어서 공간적으로 간섭, 상쇄시키는 능동적 소음 제어방법에 대한 이론과 연구[1,2,3]가 급속한 발전을 이루어 왔다. 최근에는 이와 병행하여 인간의 감성까지도 고려하는 소음합성에 관한 연구가 진척되고 있다. 이는 소음의 느낌(quality)을 개선하고자 하는 것으로써 소음이 다소 증가하더라도 승차자가 쾌적한 음향 환경을 느낄 수 있는 소리를 만들어 내는 것을 목적으로 하고 있다. 예로써는 소형 승용차에서 엔진 가

* 아시아자동차 기술연구소
** 한국과학기술연구원 Tribology Lab.
*** 정회원, 한국과학기술연구원 Tribology Lab.

속에 따라 원래 차량의 소리 대신 고급 스포츠카의 엔진 소리가 승차자에게 들리도록 하는 연구[4]등이 있다.

본 논문은 이러한 관점에서 특정차량의 배기 소음을 엔진 회전수에 따라 재현할 수 있는 음향 시스템에 대하여 연구하였다. 상용화 되었을 경우 자동차에 사용되고 있는 다수의 제어용 마이크로프로세서나 오디오에 적용되기 시작하고 있는 DSP(digital signal processor)를 사용하고 기존의 오디오를 이용하는 등 별도의 하드웨어 없이 단순히 프로그램만을 추가하여 적용될 수 있도록 연구하였으며 음향 시스템 구현에 필요한 많은 자료량을 최소화할 수 있도록 매개변수기법을 사용하여 소형 승용차의 배기 소음을 재현할 수 있는 음향 시스템을 구성하였다.

2. 이론해석

소음신호로부터 음향 특성을 분석하고 적절한 음향모델을 구성하기 위하여 사용된 매개변수 모델링 기법과 모델의 유효성을 판단하기 위해 사용된 방법을 이론적으로 고찰 하였다.

2.1 ARMA 모델

본 연구에서는 ARMA모델이 사용되었다. ARMA모델은 현재의 출력을 가중된 과거출력의 합과 필터링된 백색소음(white noise)으로 나타낸다. 일반적으로 입·출력 시스템에서 ARMAX 모델이 보다 정확한 모델을 구성할 수 있으나 자동차 배기 소음에서는 정확한 입력을 구할 수 없으므로 ARMA모델을 사용하였다. 일정한 간격으로 샘플된 시간영역의 데이터 y(t)를 이용한 ARMA모델을 차분방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$y(t)=-\sum_{i=1}^{na}a_iy(t-i)+\sum_{i=0}^{nc}c_ie(t-i) \qquad (1)$$

여기서 a_i, c_i와 na, nc는 각각 AR, MA항의 매개변수와 차수의 크기를 나타내며 e(t)는 평균값이 0인 랜덤 신호이다. 식(1)을 z변환하여 지연기 z^{-1}을 포함하는 다항식으로 나타내면 다음과 같이 된다.

$$A(z^{-1})y(t)=C(z^{-1})e(t) \qquad (2)$$

윗식에서

$$A(z^{-1})=1+a_1z^{-1}+\cdots+a_{na}z^{-na}$$

$$C(z^{-1})=c_0+c_1z^{-1}+\cdots+c_{nc}z^{-nc} \qquad (3)$$

시간에 따른 시스템의 출력은 다음과 같다.

$$y_t=q^T\theta \qquad (4)$$

$$q^T=(-y_{t-1}\cdots,-y_{t-na},\ e_1\cdots,e_{t-nc})$$

$$\theta^T=(a_1\cdots,a_{na},\ c_0\cdots,c_{nc}) \qquad (5)$$

여기서 q^T는 입출력, θ^T는 매개변수 벡터를 나타낸다. t가 1부터 N까지 변하면 N개의 측정된 입력과 출력 데이터는 $y=Q\theta$로 나타낼 수 있다. 여기서 Q는 다음과 같다.

$$Q=\begin{bmatrix} -y_0\cdots & -y_{1-na} & e_1\cdots & e_{1-nc} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -y_{N-1}\cdots & -y_{N-na} & e_N\cdots & e_{N-nc} \end{bmatrix}$$

시스템 오차(error) 또는 잉여치(residual) C(t)는 다음식이 된다.

$$\varepsilon=y-\tilde{y}=y-Q\theta \qquad (7)$$

따라서 최적의 모델 계수값을 구하려면 LMS (least mean square)알고리즘을 이용하여 시스템의 자승오차인 손실함수가 최소가 되는 매개변수 벡터를 구하면 된다. 손실함수는 순간자승오차(instantaneous squared error)와 기대치로 다음과 같이 주어진다.

$$V(\theta)=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\varepsilon^2(t)=E[y^2+\theta^TQ^TQ\theta-2Q^T\theta y] \qquad (8)$$

식(8)을 미분하면

$$\frac{dV(\theta)}{d\theta} = E[-2Q^T y + 2Q^T Q\theta] \quad (9)$$

따라서 LSM에 의해 구한 최적의 계수값은 다음과 같다.

$$\tilde{\theta} = (Q^T Q)^{-1} Q^T y \quad (10)$$

식(10)이 선형 방정식이므로 Q와 y를 이용하여 매개변수 벡터 θ를 구할 수 있다.

2.2 모델의 구조결정 및 유효성(validation) 판단

시스템 모델의 구조 결정과 모델차수의 유효성 판단은 시스템 구명에 있어 매우 중요한 부분이다. 모델차수를 낮게 추정한 경우에는 모델이 부정확하게 되며 과도하게 높게 추정된 모델차수는 불필요하게 복잡한 계산을 발생 시킨다. 일반적으로 시스템 구조결정에는 절대적인 기법이 존재하지 않으며 본 연구에서는 아래에서 설명된 잉여치 분석과 모델구조 비교기법을 상호 보완적으로 사용했다.

2.2.1 잉여치 분석

매개변수를 평가하여 얻은 예상오차(prediction error)를 잉여치라고 하며 이 값의 자기상관(auto-correlation)함수 및 입력과의 상호상관(cross-correlation)함수를 분석하여 얻는 공분산(covariance)비를 통계치로 주어지는 어떤 신뢰간격과 비교하여 모델의 정확성을 판단하는 것으로써 본 연구에서는 측정된 ARMA모델[5]의 유효성 및 정확성을 판단하는데 사용하였다.

2.2.2. 모델구조의 비교기법

불필요하게 높은 모델차수를 방지하고 최적의 의미를 갖는 모델구조를 결정하기 위해서는 모델차수별로 비교하는 별도의 기준이 요구된다. 이 기준의 일반적인 식은 다음과 같이 표현된다.[5],

$$W_N = V_N(\tilde{\theta}_N)\ [1+\beta(N,p)] \quad (11)$$

여기서 $V_N(\tilde{\theta}_N)$)loss function

p : total number of estimated parameters

N : data record length

W_N는 기대 예측 편차분산(expected predition error variance)이고 $V_N(\tilde{\theta}_N)$는 시스템 구조의 손실함수이며 $\beta(N,p)$는 자료수와 전체 매개변수의 크기로 이루어진 함수이다. 본 연구에서는 시스템의 구조 결정에 많이 사용되는 일반적인 기법인 아카케의 FPE(final prediction error)방법을 이용하여 최적의 모델 차수를 결정하였다. FPE 기준은 다음의 관계식으로 표현된다.

$$FPE \cong W_N = V_N(\tilde{\theta}_N)\ \frac{1-p/N}{1+p/N} \quad (12)$$

측정된 신호에 대해 모델차수를 증가시키면서 구한 차수별 모델의 오차를 식(12)에 적용하여 FPE값이 최소로 나타나는 최적의 모델차수를 구할 수 있다.

3. 실 험

실험은 자동차 배기 소음을 대상신호로 하여 신호의 특성을 ARMA 모델의 매개변수로 구하였다. 평가된 ARMA모델을 이용하여 랜덤입력으로 출력을 발생시켰으며 출력된 신호는 D/A (digital to analog) 변환을 거쳐 스피커로 소리를 발생시켰다. 전체적인 실험의 흐름을 간략하게 Fig.1에 나타냈다.

3.1. 자동차 배기 소음의 측정 및 주파수 분석

소음측정 대상 자동차는 4기통 엔진의 소형 승용차(배기량 1,500cc)를 무부하 상태에서 엔진 회전수 1,000부터 3,000 RPM 사이를 250 RPM씩 9단계로 나누어서 측정하였다. 측정은 농구장 크기의 열린 공간에서 B&K 사의 음압 측정기 (sound level meter, type 2230)를 이용하여 실시

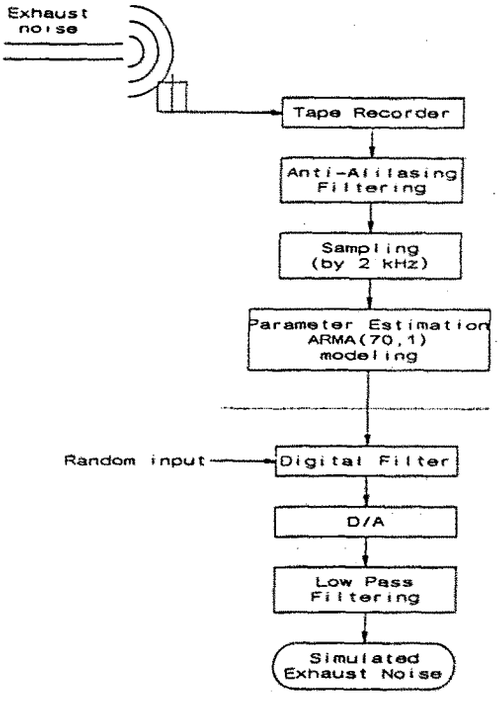


Fig.1 Block diagram of exhaust noise characteristics reproduction

했다. 측정기를 자동차 배기관으로부터 0.3m 정도 떨어진 곳에 고정하고 측정된 배기 소음을 테이프 녹음기(tape recorder, B & K 7005)에 기록하였다. 위와 같이 측정된 신호에 대하여 FFT분석기를 이용하여 주파수 성분을 분석하였다. 2,000 RPM에 대한 측정된 소음신호와 주파수 특성을 Fig.2에 나타냈다. Fig.2에서 윗 부분은 입력되는 신호를 시간에 따라 나타내고 있으며 아래그림은 입력된 신호의 주파수성분을 분석한 결과를 보여주고 있다. 신호는 약 10초간 입력되어 9회 평균화를 통해 분석 되었다. 분석 결과에 따라 측정된 신호에는 500Hz 이상의 성분이 미미한 것으로 판단하여 차단(cut off)주파수가 500Hz이고 차수가 4차인 버터워즈(Butterworth) 저역통과(low pass) 필터를 구성하였다. 제작된 필터를 이용하여 자료의 샘플링시 신호의 aliasing을 방지하였고 D/A 출력시 발생하는 계단형 고주파 신호성분을 제거하였다. 신호의 샘플링 시간 간격은 신호처리용 보드(board)의 처리속도와 신호의 차단 주파수의

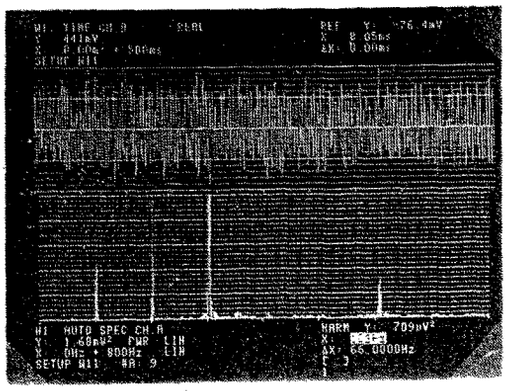


Fig.2 FFT analysis of exhaust noise at 2000 RPM

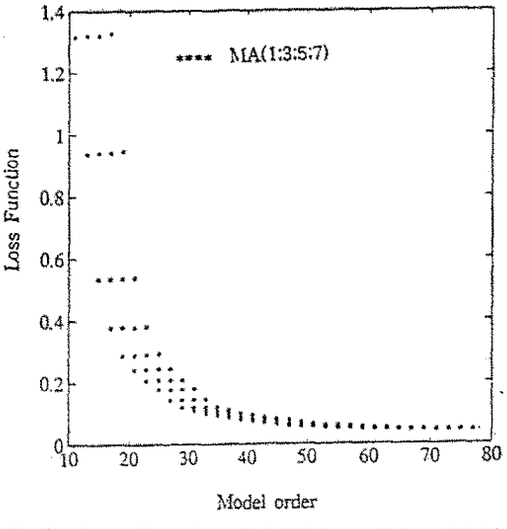


Fig.3 Loss function of ARMA model at 2000 RPM

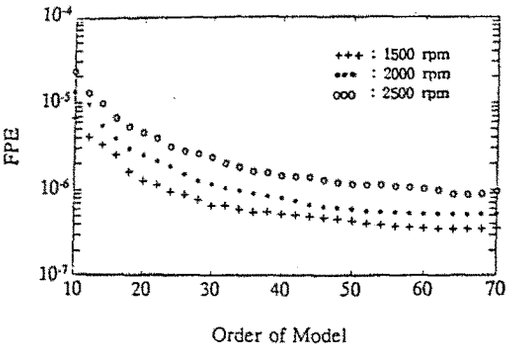


Fig.4 Final prediction error of ARMA model at 2000RPM

2배수인 최소 샘플링 시간 간격(1kHz)을 고려하여 2kHz로 하였고 각 3001개씩 데이터를 다림 시스템의 DR-TDAS 12보드를 이용 획득하였다.

3.2 ARMA 모델의 차수 결정

측정된 각 신호의 정확한 ARMA 모델 차수를 구하기 위해 AR는 10차에서 70차까지 2차씩 증가시키고 MA는 1차에서 7차까지 2차씩 증가시키면서 총 124개의 모델에 대해 손실함수를 계산하였다. Fig.3은 2,000 RPM에서 구한 신호의 손실함수를 나타내고 있다. Fig.3에서 가로 방향으로 변화하는 * 표시는 MA차수의 증가에 따른 손실함수의 변화로 그 변화가 미약하게 나타났으나 AR차수의 증가에 대해서는 세로방향으로 크게 변화하는 것을 볼 수 있다. 따라서 MA를 1차로 고정하고 AR차수의 변화에 대해 1,500, 2,000과 2,500 RPM에서 모델의 FPE(final prediction error)를 구하여 Fig.4에 나타냈다. Fig.4를 통해 각 FPE 기준값이 모두 AR 64차 근방이 최소의 값임을 알 수 있다. 그러나 실제 자동차 배기소음 음향모델의 차수는 FPE에서 결정된 모델차수와 엔진 회전수의 전체영역을 고려하여 기준값 보다 약간 높은 70차, ARMA(70,1)차로 결정하였다.

3.3 자동차 배기 소음의 모델링

ARMA(70,1) 모델링에 사용한 신호의 갯수는 FFT 알고리즘에 용이하도록 샘플링된 소음신호의 전후를 절단하여 각각 2,048개의 신호를 사용하였다. Fig.5는 각각 1,500, 2,000과 2,500 RPM에 대해 ARMA 모델의 결과와 측정된 소음신호의 스펙트럼 분석에 의한 주파수 특성을 비교하여 나타내고 있다. Fig.5 스펙트럼 분석이 제한된 신호갯수 때문에 평균화 과정이 충분하지 못한 것을 고려하면 ARMA모델이 상당히 정확한 모델링을 나타내고 있음을 Fig.5를 통해 볼 수 있다.

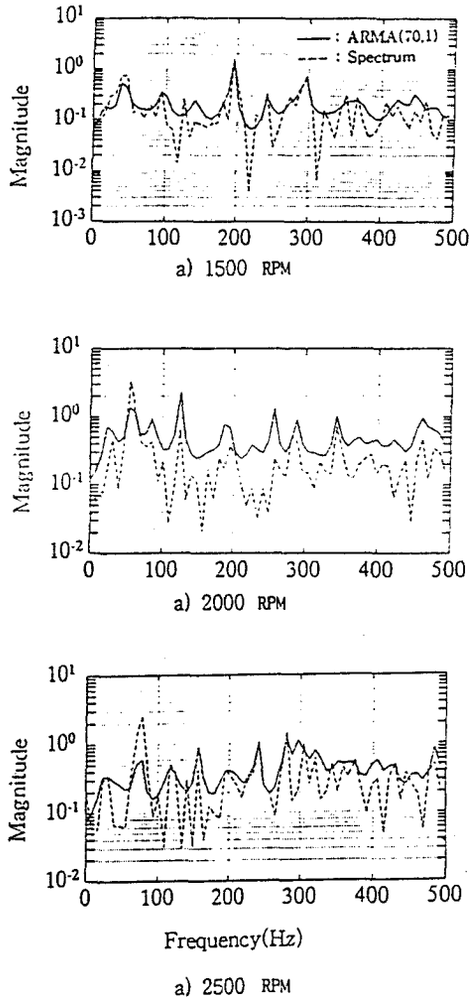


Fig.5 Comparison of spectrum between exhaust noise and ARMA model

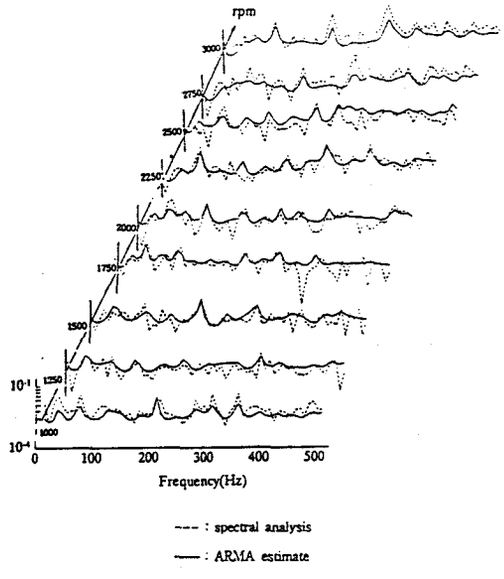


Fig.6 Spectrum of exhaust noise and ARMA model at various RPM

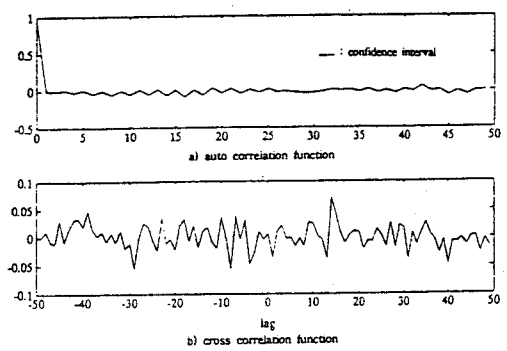
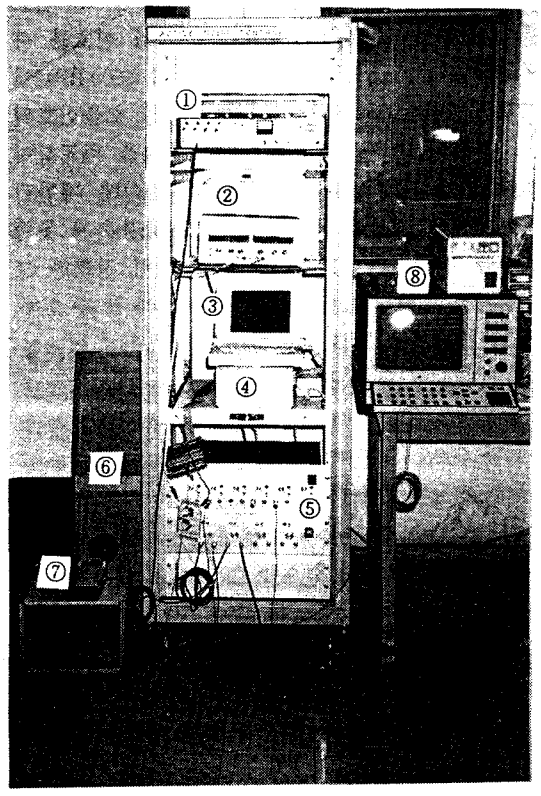


Fig.7 Validation of ARMA(70,1) model



① tape recorder ② regulated DC power supply
③ PC ④ DR-TDAS12 board
⑤ amplifier ⑥ speakers
⑦ sound level meter ⑧ FFT analyzer

Fig.8 Experimental setup

Fig.6은 각 RPM별로 측정된 소음신호 전체에 대해 ARMA(70,1)모델로 모델링한 결과를 타나냈다. Fig.6에서 RPM의 증가에 따라 모델별 주파수 특성이 변화하고 있는 관계를 볼 수 있다. 이처럼 결정된 ARMA(70,1) 모델의 유효성을 검토하기 위해 잉여치 분석 방법으로 모델의 유효성을 검토한 결과를 Fig.7에 나타냈다. Fig.7에서 잉여치의 상관함수 값이 신뢰구간 내에 존재하고 있어 평가된모델이 유효함을 확인할 수 있다.

3.4 배기 소음의 재현

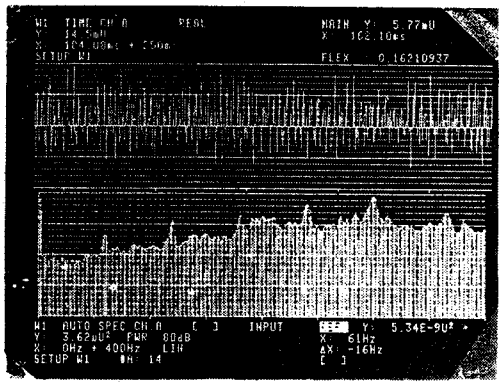
자동차 배기 소음의 음향특성을 갖는 평가된 ARMA(70,1) 모델의 매개변수를 이용하여 엔진 회전수에 따라 연속적으로 변화된 소리를 출력할 수 있도록 음향장치를 구성하였다. 각 RPM에 따른 전체 필터의 계수 639개를 자료파일로 읽어 기억하고 엔진 회전수에 따라 필요한 계수값으로 랜덤신호를 필터링하여 D/A 변환을 통해 신호를 내 보냈다.

Fig.8은 구성된 실험 장치를 보여주고 있다. 평가된 매배변수로 디지탈 필터를 구성하기 위한 프로그램은 turbo-C 언어와 다림 시스템에서 제공하는 D/A변환을 위한 라이브러리를 이용하여 프로그래밍 하였다. DR-DAS 12보드를 PC에 설치하고 작성된 프로그램을 수행시켜 소리를 재현하였다. 실험에서 신호처리에 소요되는 시간이 샘플링 시간보다 작게하여야 하나 일반 PC로는 속도가 부족하여 처리속도가 33MHz인 486PC를 이용 충분한 처리속도를 갖도록 하였다. 디지탈 필터를 통해 재현된 소리와 녹음된 소리는 매우 유사하였으나, 이를 객관적으로 비교하기 위해 스피커를 통해 나오는 두 소리를 음압측정기로 측정하여 FFT 분석기로 분석하였다. Fig.8, 9는 비교 분석된 두신호의 스펙트럼을 보여주고 있다. 그림에서 두신호의, 기본적인 주파수 특성이 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 녹음기에서 재생되는 소리와 필터에서 발생되는 소리에는 음색에 있어 약간의 차이를 나타냈는데 이는 녹음기에 흐르는 높은 주파수의 아날로그 신호와 H/W(hardware)에서 발생하는 불필요한 잡소음 및 D/A 보드의 성능에 영향을 받는 것으로 판

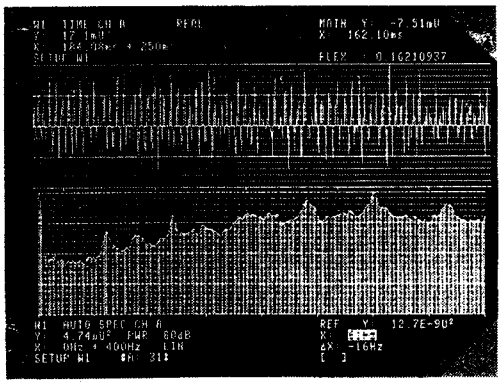
단되었다. RPM의 변화에 따라 변화하는 재현된 소리를 자유롭게 출력할 수 있었으나 엔진 회전수 변화에 보다 완벽하게 연결된 소리를 얻기 위해서는 RPM별 모델의 구성을 보다 세분화할 필요가 있는 것으로 판단되었다.

3.5 실험결과 및 고찰

자동차 배기 소음의 음향특성을 갖는 ARMA (70,1) 모델을 구성하여 모델이 유효함을 확인하였다. 평가된 매개변수로 구성된 디지탈 필터에 랜덤신호를 입력하여 구간 출력신호를 측정신호와 비교하여 유사함을 확인할 수 있었는데 소리가 갖는 마스킹(masking)특성을 고려하면 크기가 작은 주파수는 소음특성에 미치는 영향이 미미하다고 볼 수 있으므로 앞의 Fig.9, 10은 거의 같은 특성을 갖는다고 판단할 수 있다. 음향 시스템의 모델링시 신호의 측정 환경에서 흡입되는 불규칙적인 외부소음이 보다 정확한 모델에 방해가 되었으리라 판단된다. 따라서 완벽한 측정이 가능한 무향실을 이용하고 신호처리의 시간, 신호량의 제한등을 극복하면 수차례 평균에 의해 상당히 정확한 모델을 구성할 수 있을 것이다. 디지탈 필터를 이용 소리를 발생시키는 것은 소리가 갖는 빠른 위상변화와 상대적으로 작은 크기의

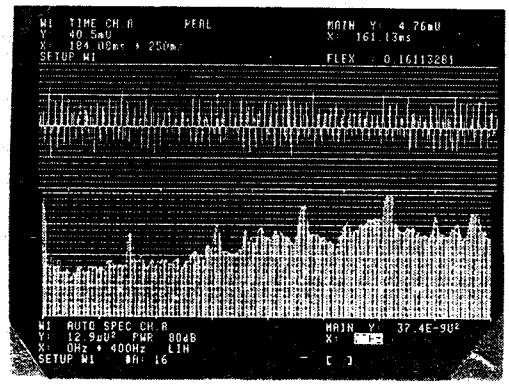


(a) 측정된 소음특성

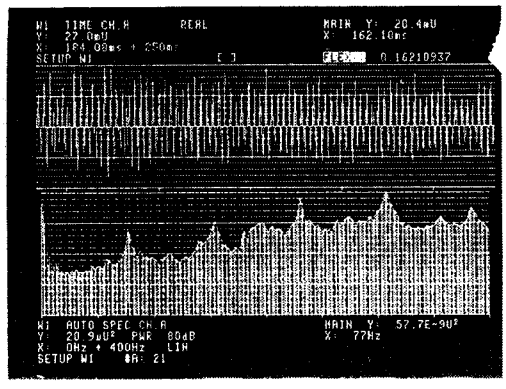


(b) 재현된 소음특성

Fig.9 Comparision of real and reproduced exhaust noise at 1750RPM



(a) 측정된 소음특성



(b) 재현된 소음특성

Fig.10 Comparision of real and reproduced exhaust noise at 2250RPM

에너지 때문에 기계적인 성능에 많은 영향을 받는 것으로 판단되었다. D/A시 발생되는 높은 주파수(D/A 간격)와 계단 형태로 출력되는 초기 아날로그 신호를 부드럽게 연결하기 위해서도 저역통과 필터의 사용이 필수적이었다. 따라서 저역통과 필터의 성능이 보다 충실한 원음재현에 중요한 역할을 하리라 판단되었다. 본 음향 프로그램의 반복 수행이 2kHz내에 필터링을 위한 연산과 D/A 변환을 마쳐야하므로 PC의 처리속도가 33MHz 이상 되어야 만족스러운 결과를 얻을 수 있다. 차후 보다 좋은 결과를 위해서는 신호처리 전용 프로세서(DSP)의 사용이 적절하다고 판단되었다.

5. 결 론

매개변수기법의 하나인 ARMA모델 기법을 이용하여 차량의 배기 소음을 재현할 수 있는 유효한 음향모델을 구성할 수 있었으며, 실험을 통하여 차량의 배기 소음과 동일한 특성을 갖는 소리를 출력 시킬 수 있었다. 본 논문의 접근방법은 차량에 실제 적용시 기존의 H/W(hardware)를 그대로 이용하고, S/W(software)의 크기를 최소화 할 수 있으므로 최소한의 경비로 차량뿐만 아니라 일반적인 공학설계에 있어서 점차 중요시되는 소음의 감성적인 측면을 개선하기 위한 방법으로 제시되었다.

참 고 문 헌

1. S. J. Elliott, et al, "The Active Control of Low Frequency Engine and Road Noise inside Automotive Interior", ASME, WAM, pp.125－129, 1990.
2. R. Shoureshi, N. Kubota and G. Batta, "A Modern Control Approach to Active Noise Control", ASME, WAM, pp.167－175, 1990.
3. S. J. Elliott, P. A. Nelson, "Active Control of Sound", Academic Press, 1992.
4. D. Perry, "Noise Synthesis", Lotus Engineering (Lotus Cars Ltd.), Vol 1 1991 ISSUE2.
5. T. Soderstrom and P. Stoica, "System Identification", Prentice hall, 1989.
6. 한국 표준 연구소, "제2회 진동, 소음 제어를 위한 디지탈 신호처리 기법 워크샵", 1990. 11. 19－11.23