

도로 소음 저감용 능동소음 제어시스템의 구현과 지향성 및 무지향성 스피커의 특성 고찰

A Study on the Active Noise Control System for Road Noise Reduction Implementation and Characterization of Directional and Non-directional Speaker

문 학 룡[†] · 임 유 진*
(Hak-ryong Moon · You-jin Lim)

Abstract - Road traffic noise barriers being used to reduce the noise, but the city surroundings inhibition, ecosystem disturbance, and it is difficult to maintain. Can enhance or complement the existing noise barrier performance, so that it is necessary to develop an electronic noise-reduction system. In this paper, we proposed an electronic road noise reduction devices to reduce road noise for a DSP-based signal processing and analog signal input-output controller. In order to verify the control performance, we performed noise reduction experimentation of ANC by filtered-X LMS algorithm and traffic noise signal injection. The controller is equipped with noise reduction algorithms were tested on the characteristics of directional and omnidirectional speaker.

Key Words : Active noise control, Digital signal processor, Filtered-X LMS, Least mean squares, Noise reduction, Road environment

1. 서 론

도로교통과 관련한 소음을 저감하기 위한 방법으로 방음벽이 적용되고 있으나 방음벽은 도시 주변 경관 저해, 자연 생태계 교란 및 유지관리에 어려움이 있다. 이러한 도로교통에 대한 소음 저감의 한계를 극복하면서 방음 성능 수준을 개선시킬 수 있는 전자식 소음저감 장치 및 관련 시스템 개발과 기초 핵심 기술의 확보가 필요한 시점이다[1].

기존의 방음벽체나 소음저감 장치 등의 수동적인 소음 제어 방법은 1000[Hz] 이상의 주파수대를 가지는 소음에 대하여 효과적이거나 500[Hz] 미만의 소음 특성을 가지는 소음을 제거하기에는 크기와 부피가 증가하여 사용하기 어려운 점이 있다. 또한, 도로 환경의 방음벽 설치로 인한 차폐 효과는 500[Hz] 이상의 고주파 대역에서는 높은 차음효과를 보이는 반면 500[Hz] 이하의 저주파 소음에 대해서는 흡음제의 크기가 커져야 하므로 비용이 증가하는 단점이 있다[2].

국내외적으로 방음벽 상단의 회절음 저감을 위한 연구들이 진행되어 왔으나 전 주파수 영역에 대한 소음 저감이 이루어지지 못한 실정이다. 도로교통 소음제어 분야에서는 전자식 소음저감 기술이 주로 기존 방음벽의 대체보다는 방음벽의 높이를 억제하면서 차음 성능을 높일 수 있는 방향으로 그 기술과 방법 등이 다양하게 연구되고 있다[3].

본 논문에서는 이러한 방법의 일환으로 도로상에서 차량

이 주행하면서 발생하는 소음을 측정하고 Filtered-X LMS(이하; Fx-LMS)알고리즘 기반의 시스템을 구축하였다. 도로환경에서의 정온화 대책을 위한 전자식 능동형 소음장치(Active Noise Control: ANC)의 구축 사례 모델 및 제어 스피커의 특성 분석을 통하여 완성도를 높일 수 있는 ANC 시스템의 기초 모델을 제시하는 방향으로 연구가 수행되었다[4].

ANC 시스템의 구현에 대한 H/W의 설계에 있어서는 DSP 및 ARM기반의 프로세서가 병렬코어로 구성된 CPU를 사용하여 신호처리 제어기를 구성하였다. DSP부에서는 제어운용 알고리즘과 Fx-LMS 능동제어 알고리즘을 수행하도록 하였으며 ARM 프로세서부에서는 외부 입출력 및 신호처리, 통합연동 관리를 위한 통신 및 네트워크를 담당하도록 하였다. ANC 시스템의 S/W 설계는 통합 개발환경을 통하여 DSP 및 ARM 아키텍처에 맞는 소스 코드를 작성하여 해당 프로세서별 컴파일의 수행되도록 설계하였으며, DSP 및 ARM코어 프로세서 간에 상호 연동의 API(Application Programming Interface)를 통하여 각각 어플리케이션이 수행되도록 설계하였다.

또한 본 논문에서는 DSP 기반의 신호처리 제어기를 구성하면서 도로 소음이 암소음(소음원이 없는 정상시의 소음 상태; 이하 암소음)-시변의 공간에서 각 스피커에 따른 소음 저감 특성을 실험하였다. 무지향성 및 지향성 스피커로 소음저감 특성을 각각 실험하여 주파수의 특성에 맞는 결과를 도출하였다.

따라서 본 논문에서 구현된 ANC시스템의 설계모델을 기반으로 향후 도로환경 특성에 적합한 개선된 제어 알고리즘의 적용과 각 주파수 대역별 스피커의 특성을 고려한 ANC 시스템을 도로교통 현장에 적용한다면 보다 신뢰성이 우수할 것으로 사료된다.

† 교신저자, 정회원 : 한국건설기술연구원 연구위원 · 공백
E-mail : hymoon@kict.re.kr

* 비 회 원 : 한국건설기술연구원 연구원

접수일자 : 2013년 11월 8일

수정일자 : 2013년 11월 19일

최종완료 : 2013년 11월 25일

2. 시스템 설계 및 구현

도로 소음의 저감을 위한 전자식 소음저감 장치의 구성은 크게 신호처리 제어기, 오디오 입/출력부 및 소프트웨어 알고리즘으로 구분하여 설명하였다.

2.1 신호처리 제어기 하드웨어

소음저감 시스템의 제어운동을 위한 신호처리 제어기는 TI사에서 제공되는 OMAP-L137로 ARM9(375[MHz])과 C674X DSP(375[MHz])인 듀얼-코어 프로세서를 사용하였으며, DSP에서는 오디오 입출력 및 제어 알고리즘 연산을 수행하도록 설계하였다.[5]

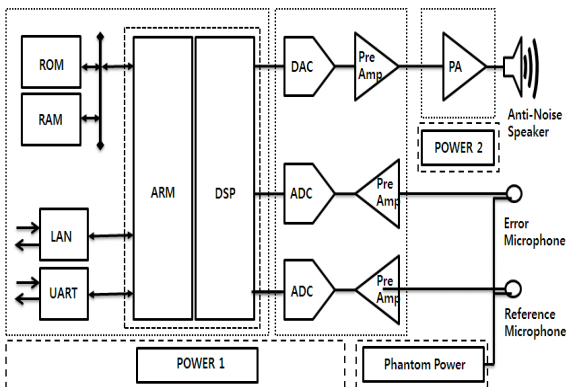


그림 1 신호처리 하드웨어 제어기의 블록 다이어그램
Fig. 1 The H/W Block diagram of the signal processing controller.

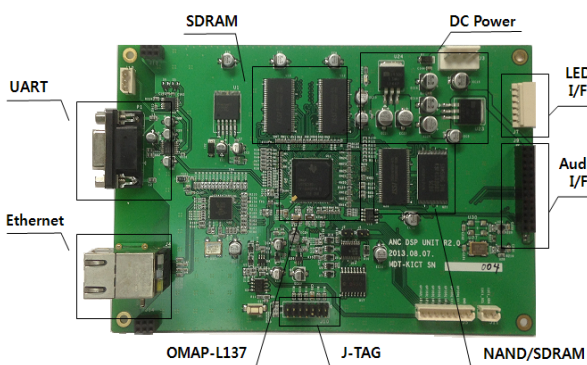


그림 2 신호처리 제어기의 사진
Fig. 2 Photograph of the signal processing controller.

ARM9 프로세서에서는 외부 인터페이스 및 통합관리 환경을 지원하기 위한 네트워크 등 제어 알고리즘 이외의 기능을 수행하도록 설계하였다. 또한, 외부 기능기와 디스플레이 인터페이스, 이더넷을 통한 네트워크 장치, 소음원 수집 및 에러 신호 수집을 위한 두 개의 마이크 입력 처리용 오디오 입력, 신호처리 제어기에서 처리된 오디오 신호를 출력하는 고풍력 앰프와 스피커 및 제어기 동작을 위해 다양한

전원 공급을 위한 전원부로 구성하였다. 이렇게 설계된 신호처리 제어기의 하드웨어 구성은 그림 1과 같으며, 그림 2에서는 이렇게 설계되어 구현된 하드웨어 제어기의 실제 모습을 나타내었다.

2.2 오디오 입출력부

오디오 입력에 대한 신호처리는 입력 마이크의 출력을 차동(differential) 입력으로 갖는 프리앰프 PGA2505로 입력 되도록 설계하였다. 앰프로 부터 출력된 신호는 아날로그-디지털 변환기의 입력이 되도록 설계하였다. DSP 내부의 처리된 Anti-Noise 신호를 스피커로 출력하기 위하여 고풍력의 아날로그 입력/디지털 방식의 Class-D 파워 앰프인 TAS5630을 사용하여 스피커로 출력할 수 있도록 설계하였다.

소음원에 대한 입력용 오디오 입력부는 그림 3과 같이 소음원 입력용 마이크와 피드백으로 잔류된 소음의 입력용 마이크를 구성하였다. 콘덴서 마이크를 위한 팬텀파워(Phantom Power, +48/24[V]) 기능도 설계하였다.

오디오 출력부는 그림 4와 같이 OMAP-L137의 DSP에서 연산되어진 소음저감 데이터를 아날로그 신호로 변환하기 위하여 I2S 버스를 통해 디지털-아날로그 변환기로 전송하도록 하였다. 변환된 아날로그 신호를 스피커로 출력할 수 있도록 프리앰프와 고풍력 파워앰프를 통해 600[W]의 무지향성 스피커, 625[W]의 지향성 스피커 및 지향성 평판 스피커를 사용하여 실험 시스템을 구성하였다. 그림 5는 이렇게 구현된 오디오 입출력부의 실제 모습을 나타내고 있다.

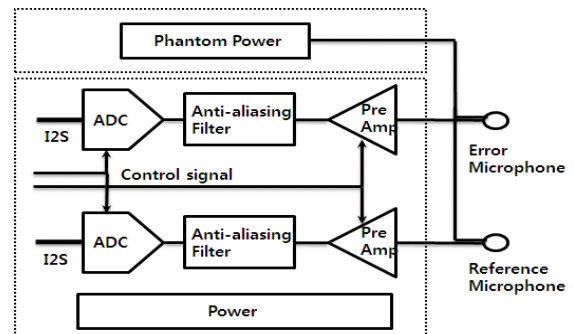


그림 3 오디오 입력처리부
Fig. 3 Audio input processing unit.

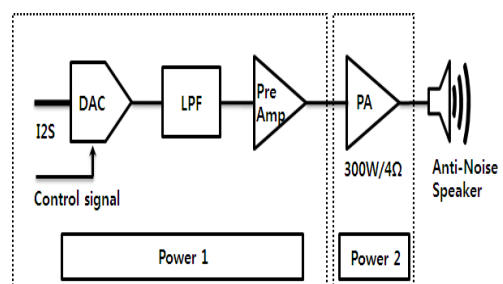


그림 4 오디오 출력처리부
Fig. 4 Audio output processing unit.

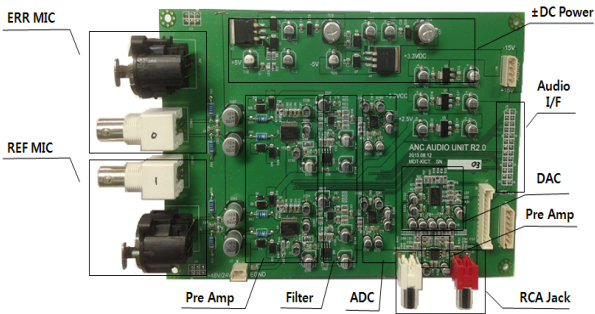


그림 5 오디오 입출력부 사진
Fig. 5 Photograph of the audio Input-output unit.

2.3 신호처리 제어기 소프트웨어

그림 6은 신호처리 제어기에 대한 소프트웨어 개발의 처리과정 블록도를 나타낸 것이다. TI사의 CCS(Code Composer Studio) Ver. 5.3 개발도구를 이용하여 DSP에서 Fx-LMS 알고리즘의 수행 함수 및 메모리 관리를 수행하도록 설계하였다. 이때의 ARM 프로세서는 임베디드 리눅스 기반에서 동작하도록 소프트웨어를 구성하였다.

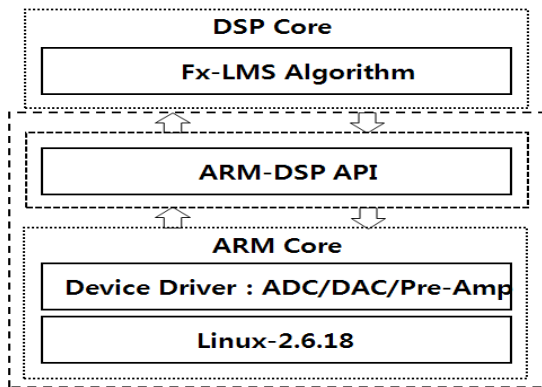


그림 6 신호처리 제어기의 소프트웨어 구성
Fig. 6 Software configuration of the signal processing controller.

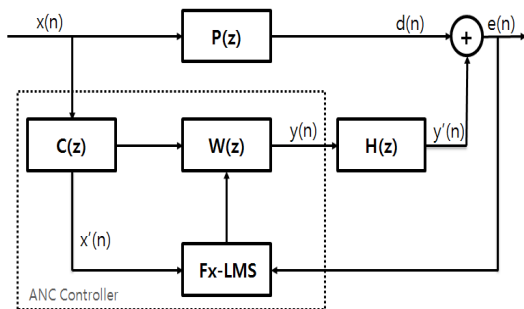


그림 7 Fx-LMS 알고리즘 블록도
Fig. 7 Block Diagram of Fx-LMS algorithm

원하지 않는 소음제거를 위한 ANC 제어기법은 소음원의 근방에서 측정된 신호에 대하여 제어 스피커를 이용하여 소음의 크기와 같고 위상이 반대(180°)인 상쇄파를 발생하여 소음을 상쇄하는 방법이다. 그림 7은 ANC 제어기법 중에서

일반적으로 사용되고 있는 Fx-LMS 알고리즘을 사용한 피드포워드 ANC 시스템의 블록선도를 나타낸다[6],[7].

그림 7의 Fx-LMS 알고리즘에 대한 제어 블록도에 있어서 출력 $y(n)$ 은 식(1)과 같이 계산되며, 구현된 DSP 제어기의 출력 필터 $y(n)$ 은 식(2)와 같다.

$$y(n) = wT(n)x(n) = \sum_{i=0}^{N-1} w_i(n)x(n-i) \tag{1}$$

여기서, $wT(n) = [w_0(n) w_1(n) \dots w_{N-1}(n)]^T$ 는 시간 n 에서 $w(Z)$ 의 coefficient vector이고, $x(n) = [x_0(n)x(n-1) \dots x(n-N+1)]^T$ 은 시간 n 에서 reference signal vector이다.

$$y(n) = \sum_{i=0}^{N-1} w_i(n)x(n-i) \tag{2}$$

따라서 소음 저감을 위한 Fx-LMS 알고리즘은 식(3)과 같이 표현 될 수 있다.

$$w(n+1) = w(n) - \mu e(n)x(n)h(n) \tag{3}$$

여기서, μ 는 알고리즘의 안정성과 수렴을 결정하는 step size이고 $h(n)$ 은 $H(Z)$ 의 임펄스 응답이다[8].

3. 실험 및 고찰

본 실험을 위해 실제 도로환경과 유사한 환경의 야외에서 오후시간대에 스피커와 마이크를 설치하고 설계된 소음저감 장치를 사용하여 Fx-LMS 제어 알고리즘을 기반으로 실험을 수행하였다. 소음원인 Primary Noise 스피커와 Anti-Noise 발생 스피커와의 거리는 7[m]이고, Anti-Noise 스피커와 Error Microphone과의 거리는 3[m]인 지점에서 지면으로부터 약 120[cm] 높이인 공간에서 소음저감의 특성을 실험하였다. 실험에 사용된 Anti-Noise 스피커는 무지향성의 FBT PSR212(600W/4[Ω])를 사용하여 그림 8과 같이 구성하였다.

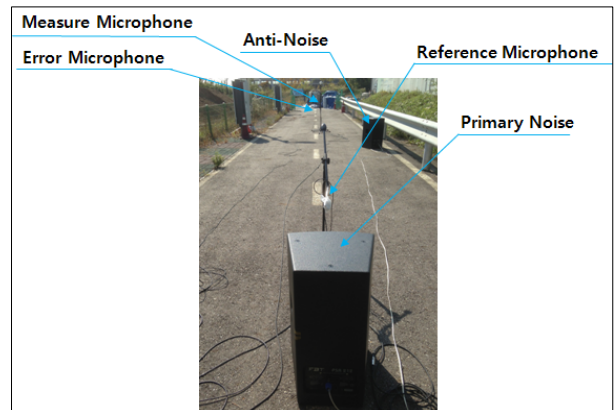


그림 8 무지향성 스피커 FBT PSR212(600W/4[Ω])
Fig. 8 Non-directional speaker FBT PSR212.

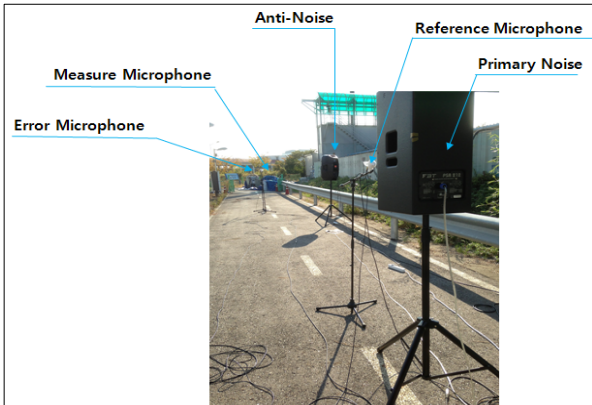


그림 9 지향성 스피커 JBL 515XT(625[W])
 Fig. 9 Directional speaker JBL 515XT.

또한 그림 9에서는 지향성 스피커로 Class-D 앰프 내장 제품인 JBL 515XT(625W)를 사용하여 실험한 광경을 나타내었으며 그림 10에서는 Panphonics사 Sound shower 60x60RS 평판 스피커를 사용하여 실험하는 모습을 나타내었다. 이때 Primary Noise로 사용된 스피커는 도로소음을 모델링 할 수 있도록 무지향성 스피커 FBT PSR212 (600W/4[Ω])를 공통으로 적용하였다. Primary Noise 집음을 위하여 ES945 마이크로폰을 사용하였고 Error Microphone 과 소음저감 특성을 측정하기 위하여 GRAS사의 고정밀 마이크로폰을 사용하였다. 시간 및 1/3 옥타브 분석을 위하여 National Instrument사의 NI-9234 측정 장비를 사용하여 소음저감 특성을 분석하였다.

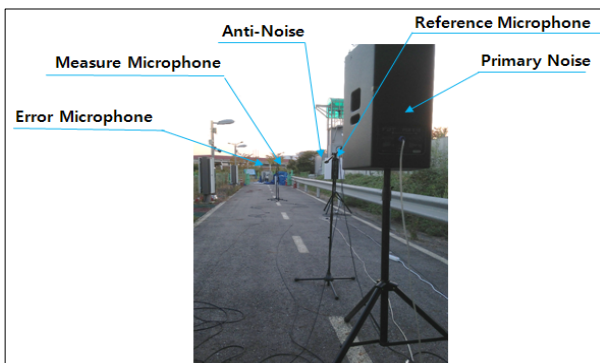


그림 10 지향성 스피커 Sound shower 60x60RS
 Fig. 10 Directional speaker sound shower 60x60RS

본 논문에서는 소음저감의 특성을 실험하고 그 결과를 확인하기 위하여 도로소음이 암소음이 존재하는 시변-공간에서 실험을 수행하였다. 이의 실험은 NI-9234 측정 장비에서 1/3 옥타브 밴드내의 4개 주파수 250[Hz], 500[Hz], 1000[Hz], 1250[Hz]를 선택하고 1개의 단일 주파수 소음원으로 영향을 줄 때 Fx-LMS 알고리즘을 적용하여 소음 저감의 특성을 파악하는 실험이다. 이때의 실험은 지향성 스피커와 무지향성 스피커, 지향성 Sound shower(평판형) 스피커를 각각 구별하여 소음저감 특성을 측정하였고 이의 비교 분석 데이터를 표 1에 나타내었다.

표 1 스피커별 소음 저감의 실험결과

Table 1 The experimental result of noise reduction with the speaker change.

구분	250[Hz] - 단위:[dB]		
	동작전	Fx-LMS	차이
무지향성 FBT PSR 212	75	73	-2
지향성 JBL 515XT	80	80	0
지향성 Sound Shower 60x60RS	80	76	-4
구분	500[Hz] - 단위:[dB]		
	동작전	Fx-LMS	차이
무지향성 FBT PSR 212	81	72	-9
지향성 JBL 515XT	80	80	0
지향성 Sound Shower 60x60RS	73	74	+1
구분	1000[Hz] - 단위:[dB]		
	동작전	Fx-LMS	차이
무지향성 FBT PSR 212	90	90	0
지향성 JBL 515XT	80	81	+1
지향성 Sound Shower 60x60RS	85	95	+10
구분	1250[Hz] - 단위:[dB]		
	동작전	Fx-LMS	차이
무지향성 FBT PSR 212	85	80	-5
지향성 JBL 515XT	80	64	-16
지향성 Sound Shower 60x60RS	80	83	+3

이에 따른 실험의 결과에서는 무지향성 스피커의 경우 4개의 주파수중 3개의 주파수에서 소음감소를 보여주고 있으나, 지향성 스피커의 경우 JBL은 250Hz에서 -4[dB]를, Sound shower는 1250[Hz]에서 -16[dB]의 소음 저감 효과가 있는 것으로 측정되었다.

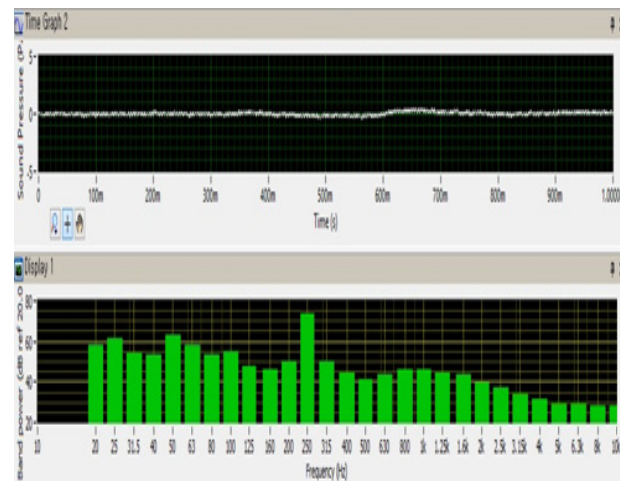


그림 11 무지향성 스피커(FBT PSR212) 동작의 제어음 분석
 Fig. 11 Controlled noise analysis results of the non-directional speaker operation.

그림 11에서부터 그림 13까지는 ANC 소음저감에 대하여 제어음의 1/3 옥타브 분석을 위한 주파수 밴드의 스펙트럼 분석을 수행한 실험의 결과를 나타낸 것이다. 그림 11에서는 단일 주파수 250[Hz]일 때의 무지향성 스피커 FBT

PSR212을 사용하였을 때 -2[dB]레벨로 소음이 감소한 것을 보여주고 있다. 그림 12에서는 동일한 단일주파수 250[Hz]를 지향성 스피커 JBL 515XT로 동작 시켰을 때 1/3 옥타브 주파수 밴드 분석에서 소음 레벨이 감소하지 않고 있음을 보여주고 있다. 그림 13에서는 지향성 스피커 Sound shower 60x60RS를 사용한 경우 동일한 단일주파수 250[Hz]에 대한 소음 측정의 결과 데이터가 1/3 옥타브 분석에서 약 -4[dB] 감소하는 있다는 효과를 보여주고 있다.

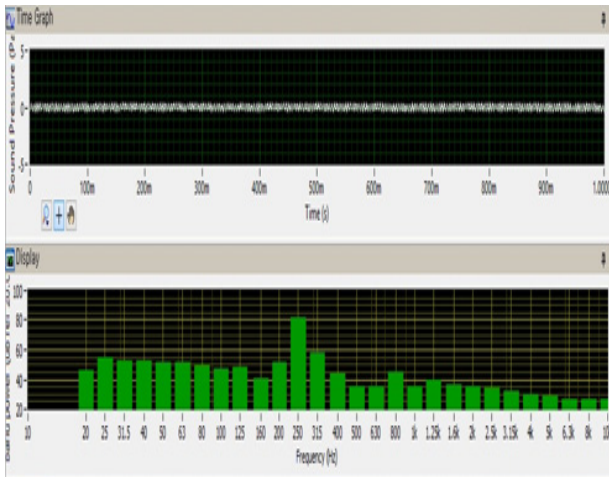


그림 12 지향성 스피커(JBL 515XT) 동작의 제어음 분석
 Fig. 12 Controlled noise analysis results of the non-directional speaker operation.

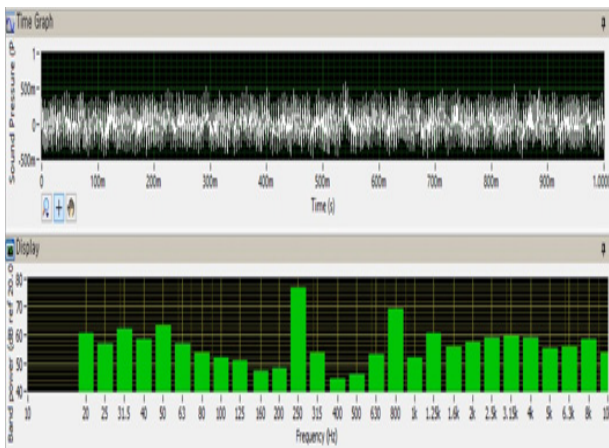


그림 13 지향성 스피커 sound shower 60x60RS 동작의 제어음 분석
 Fig. 13 Controlled noise analysis results of the Directional speaker(Sound shower 60x60RS) operation.

4. 결 론

경제 발전의 영향에 따른 차량의 증가는 많은 소음을 발생시켜 도시인에 대한 민원의 주 인자가 되고 있으며, 이에 따라 도로 교통 소음에 대한 대책의 필요성이 증대되고 있는 실정이다. 본 논문에서는 이러한 도로교통의 소음을 저감시키기 위하여 전자식 소음저감 기법인 ANC 시스템을

구현하여 다양한 실험을 수행하였다.

ANC 시스템의 구현에 있어서는 DSP 및 ARM기반의 프로세서가 병렬코어로 구성된 CPU를 사용하였다. DSP부에서는 제어운용 및 능동제어 알고리즘을 수행하도록 하였으며 ARM 프로세서에서는 외부 입출력 및 신호처리, 통신 및 네트워크를 담당하도록 하였으며, S/W에서는 DSP 및 ARM 아키텍처에 맞는 소스 코드의 작성 및 DSP/ARM 프로세서 간 연동 API(Application Programming Interface)를 통하여 각각 어플리케이션이 수행되도록 설계하였다.

또한 본 논문에서는 자체 제작된 신호처리 제어기를 기반으로 도로 소음이 압소음-시변의 공간에서 각 스피커에 따른 소음저감 특성을 실험하였다. 600[W] 출력의 무지향성 스피커와 625[W] 출력의 지향성 스피커로 소음저감 특성을 실험하여 그 결과를 제시하였다. Fx-LMS 알고리즘을 기반으로 한 단일 주파수가 포함된 ANC 실험의 결과 무지향성 스피커는 전체적으로 소음이 저감 되어지는 특성을 보여주며 지향성 스피커의 경우는 각각 특정 주파수에 대해서만 소음저감 효과가 있다는 것을 알 수 있었다.

향후에는 본 신호처리 제어기를 기반으로 도로환경 특성에 적합한 모델링에 따르는 개선된 능동소음제어 알고리즘을 적용하며, 본 연구의 결과를 바탕으로 각 주파수 대역별로 스피커의 특성을 고려한 도로교통 ANC 시스템을 현장에 적용하여 보다 신뢰성을 확보할 계획이다.

감사의 글

본 논문은 한국건설기술연구원 주요사업 ‘전자식 도로교통 소음저감기술 개발’의 연구의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] Korea Institute of Construction Technology, “Technology Development of Noise and Dust Reduction for Road Environmental Improvement - Development of Electronic Road Traffic Noise Reduction Technology”, Annual Report 2012, KICT 2012-106, 2012
- [2] H. R. Moon, “A Study on the Active Noise Cancellation Technology for Traffic Calming”, 2011.12, Korea Institute of Construction Technology
- [3] C. H. Kim, T. S. Chang, D. S. Kim, D. J. Kim, S. I. Chang, “A Study on the Test Method for Noise Reduction Devices Installed on the Noise Barriers”, Transactions of the Korean Society For Noise and Vibration Engineering, 20(9), pp. 791 ~ 796, 2010
- [4] S.J. Elliott, “A Review of Active Noise and Vibration Control in Road Vehicles”, Institute of Sound and Vibration Research University of Southampton, 2008.
- [5] Sen M. Kuo, Dennis R. Morgan, “Active Noise Control System Algorithm and DSP implementations”, John Wiley & Sons, 1996.

- [6] Finn Jacobsen, "An Elementary Introduction To Acoustics", Acoustic Technology, Department of Electrical Engineering, Technical University of Denmark, 2011.
- [7] 문학룡, 손진근, "교통환경 정온화를 위한 도로 소음의 측정 및 ANC시스템에의 적용 특성 고찰", 대한전기학회 논문지, Vol. 62P, No. 3, pp. 111~116, 2013.
- [8] Sen M. Kuo, Ph.D., Issa Panahi, Ph.D., Kai M. Chung, Tom Horner, Mark Nadeski, Jason Chyan, "Design of Active Noise control system with the TMS320 family", Texas Instruments, 1996.

저 자 소 개



문학룡 (文鶴龍)

1990년 숭실대학교 전기공학과 졸업.
1993/2001 동 대학원 전기공학과 졸업(석사/박사). 2005~현재 한국과학연합대학원 대학 ITS공학과 부교수, 1996~현재, 한국건설기술연구원 연구위원.

E-mail : hymoon@kict.re.kr



임유진 (林有眞)

2010년 명지대학교 교통공학과 졸업.
2013년 서울시립대학교 교통공학과 졸업(석사). 2013~현재, 한국건설기술연구원 연구위원.

E-mail : yjlim@kict.re.kr