

## 음향 임피던스 0의 경계면에 의한 짧은 덕트의 능동소음제어

## Active Noise Control of Short Duct using Zero Acoustic Impedance Boundary

차 경 환\*, 이 재 봉\*\*, 김 천 덕\*\*\*

(Kyung-Hwan Cha\*, Chai-Bong Lee\*\*, Chun-Duck kim\*\*\*)

## 요 약

본 논문에서는 길이가 긴 덕트를 대상으로 개발된 능동소음제어 방법이 길이가 짧은 덕트에서 적용될 수 없는 문제점을 해결하기 위하여 음향 임피던스 0의 경계면에 의한 SISO (Single Input Single Output) 알고리즘을 적용하였다. 하나의 마이크로폰으로 소음원의 입력과 에러 감지를 동시에 할 수 있는 SISO 제어기는 TMS320E25 DSP(Digital Signal Processing) 칩을 이용하여 실시간으로 구현하고 실험을 통하여 그 성능을 평가하였다. 길이가 0.80m인 짧은 덕트를 대상으로 실험한 결과 전체적으로 4.7dBA의 소음저감을 얻었다.

## ABSTRACT

The active noise control method that was developed for long duct has some problems to be applied for short duct. To overcome this problem, we apply the SISO(Single Input Single Output) algorithm for the active noise control of short duct using zero acoustic impedance boundary. The SISO algorithm can input noise signal and error signal with one microphone simultaneously. The real-time controller was implemented using TMS320E25 DSP(Digital Signal Processing) chip and its performance was evaluated by experiment. As a result, we obtain total 4.7dBA noise reduction for 0.80m short duct.

## 1. 서 론

최근들어 좀 더 쾌적하고 안락한 실내공간을 연출하기 위한 소비자들의 욕구는 공조기기의 저소음화를 위한 다양한 기술들을 발전시켜 왔다. 그 중에서 가장 광범위하게 사용되고 있는 기술은 흡음과 차음 기술이다. 이러한 기술들은 제품을 설계하는 과정에서 제품 공간의 여유를 최적화하기 때문에 흡음, 차음재를 제품내에 부착시키는 것이 어렵고 재활용의 환경문제도 내포하고 있다. 또한 고주파 성분의 소음은 흡음과 차음으로 어느 정도 저감이 가능하나 1KHz이하의 저주파 성분의 소음저감은 한계가 있다. 따라서 이러한 문제점을 극복하기 위한 기술로서 능동소음제어 방법이 적용되기 시작했다[1][2].

공조용 덕트의 출구에서 방사되는 소음을 제어하기 위하여 능동소음장치를 개발하여 상품화한 회사는 미국의 DIGISONIX사, 일본의 HITACHI사, MITSUBISHI중공업 등이 있다. 현재까지 개발된 능동소음장치는 대부분

길이가 긴 덕트를 대상으로 하고 있으며 덕트내의 환경 변화에 효율적으로 대응하기 위하여 적응알고리즘을 채택하고 있다. 길이가 긴 덕트의 능동소음장치에서는 그림 1에서와 같이 스피커에서 방사되는 상쇄음이 송풍기의 소음을 입력시키는 마이크로폰에 입력되어 제어기의 성능을 저감시키고 시스템을 불안정하게 만드는 음향 피드백현상을 제거하는 것이 매우 중요하다. 음향 피드백 현상을 제거하기 위한 능동소음제어기법은 덕트내에서 음파가 전파되는 길이가 어느정도 확보되는 길이가 긴 덕트에서는 가능하다. 그러나 두개의 마이크로폰을 설치하기에는 덕트 길이가 짧은 경우에는 충분한 계산시간을 확보할 수 없어 프로그램내에서 음향 피드백 보상필터를 구성하기가 곤란하고 실시간 처리에 있어서도 문제점이 발생한다[3][4].

본 연구에서는 길이가 짧은 덕트에서 음향 피드백 보상필터의 계산시간을 최소화 하기 위해 음파의 진행방향에 대해서 수직으로 스피커와 마이크로폰을 설치하고 음향 임피던스 0의 경계면에 의한 음파의 반사로서 소음을 능동 제어하였다. 능동제어기는 하나의 마이크로폰으로 소음의 입력과 에러감지를 동시에 할 수 있는 SISO 알고리즘을 적용하여 능동제어기를 실시간으로 구현하고 실

\*동서대학교 전자기계공학부 전임강사

\*\*동서대학교 전자기계공학부 조교수

\*\*\*부경대학교 전기공학과 교수

접수일자:

험을 통하여 그 성능을 평가하였다.

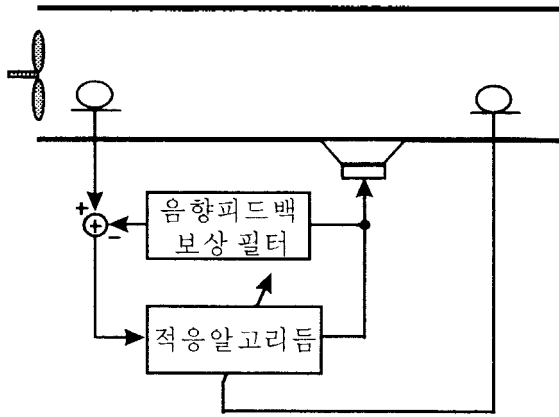


그림 1. 음향 피드백 보상필터를 이용한 긴 덕트의 능동소음제어 기법

II. 임피던스 0의 경계면에 의한 음파의 SISO제어

2.1 임피던스 0의 경계면에 의한 음파의 반사

2차 음원인 스피커를 추가하여 음향 임피던스 0의 경계면을 만드는 것이 가능하면, 소음원이 방사하는 음파를 반사하는 것이 가능하다[5]. 이 원리를 1차원 음장에 대해서 설명하면 그림 2에서와 같이 단면적이 S인 덕트의 입구에 소음원이 있고, 소음이 의 정방향으로 전파한다. 이때 정방향으로 평면진행파가 생겨나고 1차원 음장이 된다. 그때의 속도포텐셜  $\phi_1(t, x)$ 은 다음과 같이 정의된다. 식(1)에서 A는 소음원의 진폭,  $\omega$ 는 주파수, k는 파장상수이다.

$$\phi_1(t, x) = Ae^{j(\omega t - kx)} \tag{1}$$

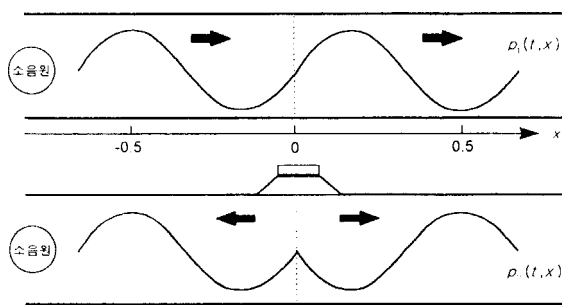


그림 2. 음향 임피던스 0의 경계면에 의한 음압

또 덕트의  $x=0$ 의 벽면에 2차음원인 스피커로부터 음파를 방사시키면,  $x \geq 0$ 에서는 정방향으로,  $x < 0$ 에서는 부방향으로 진행파가 생성된다. 그 때의 속도포텐셜  $\phi_2(t, x)$ 는 다음과 같이 표현된다. 식(2)에서 B는 2차 음원의 진폭,  $\varphi$ 는 위상이다.

$$\phi_2(t, x) = \begin{cases} Be^{j(\omega t + kx - \varphi)} & x < 0 \\ Be^{j(\omega t + kx - \varphi)} & x \geq 0 \end{cases} \tag{2}$$

여기서 소음원 및 2차음원을 동시에 구동시키면, 소음원 및 2차음원의 방사파위는 변화되지않고, 각각을 합성한 음장이 생겨난다고 가정할 수 있다. 이때 소음원의 음압  $p_1(t, x)$ 과 입자속도  $\mu_1(t, x)$ 는 식 (3)으로 나타난다. 여기서  $\rho_0$ 는 매질의 평균밀도이다.

$$p_1(t, x) = \rho_0 \frac{\partial \phi_1(t, x)}{\partial t} = j\omega \rho_0 A e^{j(\omega t - kx)} \text{ [Pa]}$$

$$\mu_1(t, x) = \frac{\partial \phi_1(t, x)}{\partial x} = jk A e^{j(\omega t - kx)} \text{ [m/s]} \tag{3}$$

2차 음원인 스피커의 음압  $p_2(t, x)$ 와 입자속도  $\mu_2(t, x)$ 는 식(4)로 나타난다.

$$p_2(t, x) = \rho_0 \frac{\partial \phi_2(t, x)}{\partial t} = \begin{cases} j\omega \rho_0 B e^{j(\omega t + kx - \varphi)} & x < 0 \\ j\omega \rho_0 B e^{j(\omega t - kx - \varphi)} & x \geq 0 \end{cases} \text{ [Pa]}$$

$$p_2(t, x) = -\frac{\partial \phi_2(t, x)}{\partial x} = \begin{cases} -jk B e^{j(\omega t + kx - \varphi)} & x < 0 \\ jk B e^{j(\omega t - kx - \varphi)} & x \geq 0 \end{cases} \text{ [m/s]} \tag{4}$$

소음원과 2차 음원의 출력에 의해 합성된 음압  $p_3(t, x)$ 와 입자속도  $\mu_3(t, x)$ 는 식 (5와) 같이 표현된다.

$$p_3(t, x) = \begin{cases} j\omega \rho_0 (A e^{j(\omega t - kx)} + B e^{-j\varphi} e^{j(\omega t + kx)}) & x < 0 \\ j\omega \rho_0 (A + B e^{-j\varphi}) e^{j(\omega t - kx)} & x \geq 0 \end{cases} \text{ [Pa]}$$

$$\mu_3(t, x) = \begin{cases} jk (A e^{j(\omega t - kx)} - B e^{-j\varphi} e^{j(\omega t + kx)}) & x < 0 \\ jk (A + B e^{-j\varphi}) e^{j(\omega t - kx)} & x \geq 0 \end{cases} \text{ [m/s]} \tag{5}$$

즉 2차음원이  $B=A, \varphi=\pi$ [rad]가 되면  $x \geq 0$ 에서는 음압 및 입자속도 두가지 모두 상쇄 가능하고,  $x < 0$ 에서는 정재파가 생성된다는 것을 알 수 있다. 여기서  $x=0$ 에 관한 단면의 소음원측을  $x^-$ , 그 반대측을  $x^+$ 로 하면  $x^-$ 면에 관한 음향 임피던스  $z^-$ 는 다음과 같이 된다.

$$z^- = \frac{p_3(t, x^-)}{\mu_3(t, x^-)} = \rho_0 c \frac{A + B e^{-j\varphi}}{A - B e^{-j\varphi}} \text{ [Pa} \cdot \text{s/m]} \tag{6}$$

즉 2차 음원인  $B=A, \varphi=\pi$ [rad]가 되었을때  $z^-$ 된다. 이것은  $x=0$ 의 위치에 생성되는 음향 임피던스 0의 경계면이  $x < 0$ 의 방향으로 부터 전파해오는 소음을 반사시켜서  $x \geq 0$ 에서는 음압이 0이 된다. 이와같이 1차원 음장에서는 2차음원인 스피커를 덕트의 벽면에 설치하는 것에 의해 음향 임피던스 0의 경계를 만드는 것이 가능하다.

2.2 SISO에 의한 제어 알고리즘

그림 3은 길이가 짧은 덕트에서 하나의 마이크로폰으로 소음의 입력과 예러 감지를 동시에 할 수 있게 구성된 SISO 능동소음제어 기법이다. 마이크로폰에 입력된 신호는 소음원의 신호와 부가음원인 스피커의 출력 신호가

동시에 입력된다. 따라서 소음원에 의한 순수한 입력 신호는 입력 신호에서 스피커에 의한 출력 신호를 빼주면 얻을 수 있다. 그러나 마이크로폰에 입력된 출력 신호는 스피커에서 마이크로폰까지의 전달함수 (C)가 포함되어 있으므로 제어기 내부에서는 추정된 전달함수 (C)을 고려하여 입력신호에서 출력 신호를 제거하면 된다. 그림 4는 스펙트럼 분석기에 의해서 측정된 전달함수의 임펄스 응답이다. 스피커와 마이크로폰 사이의 거리가 짧기 때문에 시간지연이 짧으며 잔향이 많지 않으므로 음향퍼드백 보상필터의 차수를 줄일 수 있다. 희망응답은 순수하게 입력된 소음신호에 대해서 역위상의 상쇄신호가 되도록 입력신호에서 위상을 반전시킨 신호를 취하고 filtered-x LMS(Least Menu Square)에 의해서 에러가 최소가 되도록 필터계수가 갱신된다. 이러한 SISO기법은 스피커와 마이크로폰의 위치에서 음향임피던스 0의 경계면을 생성하여 덕트 출구측의 방사소음을 상쇄시킬 수 있다.

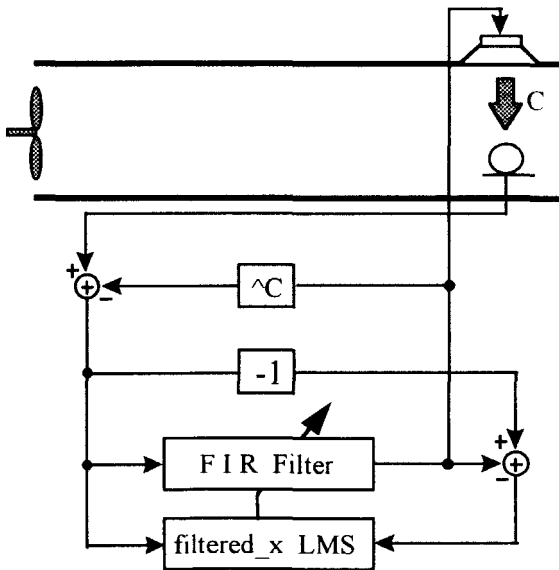


그림 3. SISO방법에 의한 짧은 덕트의 능동소음제어기법

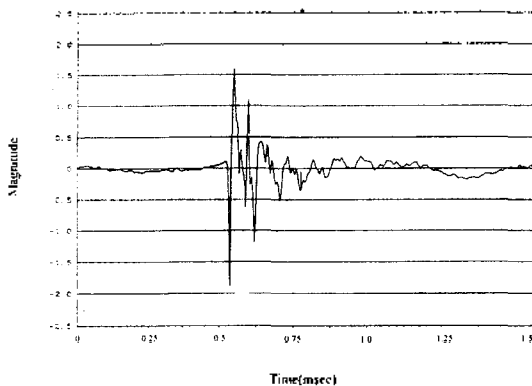


그림 4. 스피커와 마이크로폰사이의 임펄스 응답

### III. SISO 기법에 의한 실시간 능동소음제어기의 구현

능동소음제어기의 하드웨어는 그림 5에서와 같이 개발의 효율성과 제어기의 크기를 최소화하기 위하여 프로세서 내부에 프로그램 메모리와 데이터 메모리가 내장되어 있는 TI사의 TMS320E25(40MHz) 1개를 사용하였다. 입력부는 마이크로폰을 통해서 입력되는 소음신호를 증폭시키는 소신호 증폭회로, 얼라이싱(aliasing)을 방지하기 위한 저역통과필터(Low Pass Filter) 1개, 12bit의 분해능을 갖는 ADC(Analog to Digital Converter) 1개, 아날로그 출력신호를 매끄럽게 해주는 저역통과필터 1개, 스피커를 구동시켜주는 파워 증폭회로로 구성되어져 있다.

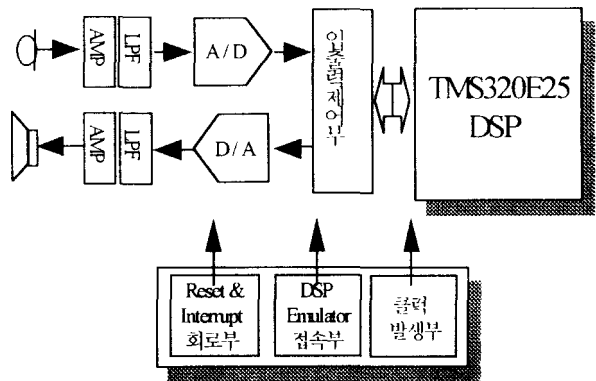


그림 5. 실시간 능동소음제어기의 하드웨어 구성도

구현된 제어기는 제어 알고리즘의 성능 검토에 있어서 DSP내부 메모리의 내용과 변수들을 한단계씩 검토할 수 있도록 PGA 형태의 에뮬레이터로도 동작할 수 있게 구성하였다. 그리고 SISO기법에 의한 능동소음제어 프로그램은 실시간 처리를 위하여 기계어로 작성하였다. 4KHz 표본화 및 12bit부호화에 의해 입력되는 데이터의 실시간 처리시간은 0.25msec로 제한된다. 따라서 TMS320E25의 처리능력을 최대한으로 사용하는 경우 약 80% 사용한 결과로써 실시간 처리됨을 확인하였다.

### IV. 실험 및 결과

실험에 사용된 덕트의 단면은 0.20m × 0.20m이고 길이는 0.80m이며 얇은 철판으로 제작하였다. 그림 6은 능동소음제어 실험 구성도를 보여주고 있다. 소음원은 B&K 4205인 sound power source를 사용하였으며 스피커의 위치는 음향 임피던스 0의 경계면을 생성하도록 덕트 출구측의 뒷쪽면에서 아래쪽으로 향하게 설치하였다. 마이크로폰은 아래쪽에서 스피커를 마주보게 위치시켰다. 능동소음제어에서 덕트의 음향학적 특성은 제어장치의 성능과 안전성 측면에서 매우 중요하다.

그림 7은 짧은 덕트의 능동소음제어 결과 스펙트럼이

나. 뒷쪽의 스펙트럼은 제어 이전의 소음 스펙트럼이며, 아래쪽의 스펙트럼은 제어 이후의 소음 스펙트럼이다. 능동소음제어 전후의 스펙트럼을 800Hz까지 비교해보면 400Hz 이하의 저주파 성분이 많이 감소된 것을 확인할 수 있었고 전체적으로 4.7dBA의 소음저감을 얻을 수 있었다. 능동소음 제어 이후의 스펙트럼 형태가 평탄화되어 소음의 음색측면에서도 부드럽게 순음화 된것을 확인할 수 있었다.

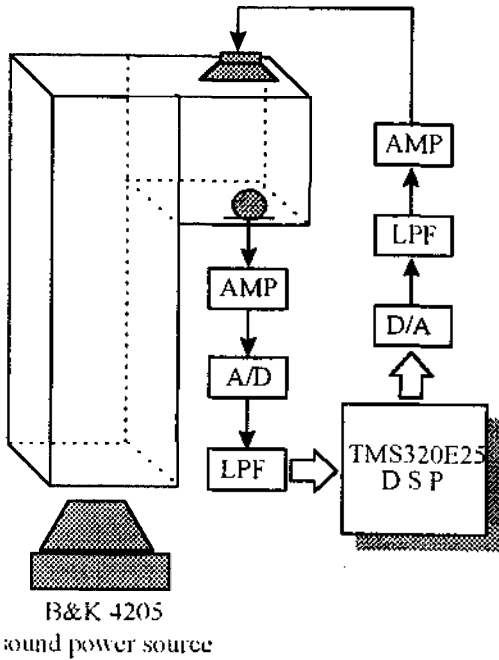


그림 6. 짧은 덕트의 능동소음제어 실험 구성도

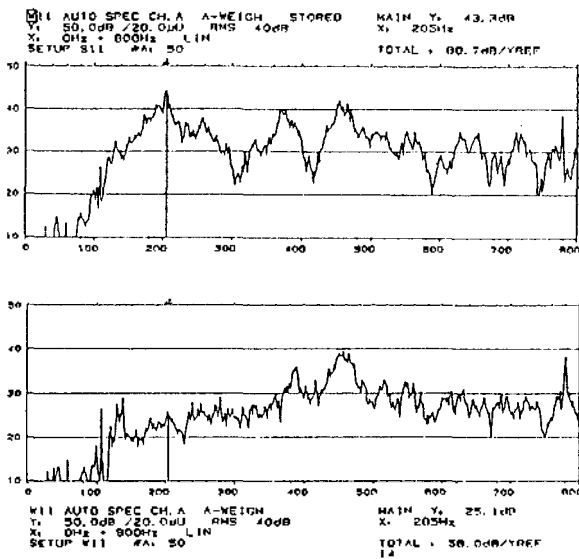


그림 7. 짧은 덕트의 능동 소음제어 결과 스펙트럼

V. 결 론

덕트의 출구에서 발생하는 소음을 제어하기 위하여 개발된 능동소음제어 방법은 덕트의 크기, 덕트내 유속의 흐름, 소음원의 특성에 따라서 성능이 많은 제약을 받는다.

본 논문에서는 덕트의 길이가 짧아서 소음원의 입력용 마이크로폰과 애러감지용 마이크로폰을 설치할 수 없고, 연산시간의 제약에 의해 음향 피드백 보상필터를 적용할 수 없는 문제점을 극복하기 위하여 2차 음원인 스피커의 위치에서 음향 임피던스 0의 경계면에 의한 음파의 반사로서 소음을 능동제어하였다. SISO방법은 스피커와 마이크로폰 사이의 거리를 가깝게 할 수 있으므로 음향 피드백 보상필터의 연산시간을 줄일 수 있어서 실시간 처리가 가능하였다.

0.8m의 짧은 덕트를 대상으로 실험한 결과 평면파가 진행하는 800Hz 이하에서 전체적으로 4.7dBA의 제어성능을 얻었다. 따라서 덕트의 길이가 짧고 애러감지용 마이크로폰을 외부에 설치할 수 없는 제약이 따르는 제품에 SISO방법에 의한 음향 임피던스 0의 경계면을 생성할 수 있어서 능동제어가 가능하다는 것을 확인하였다. 앞으로 절대적인 소음치의 저감과 더불어 음색지각모델에 기초한 스펙트럼의 형태변화에 의한 소음의 순음화에도 많은 노력이 필요하다고 생각된다.

참 고 문 헌

1. Leitch R. R. and Tokhi M. O., "Active noise control systems", IEE Proc., Vol.134, Pt.A, No.6, pp525~546, 1987.
2. Lueg P., "Process of silencing sound oscillations", US Patent, 1934.
3. Jessel M. and Angevine O.L. "Active sound absorbers in air duct", Journal of Sound and Vibration, 23(3), pp383~390, 1972.
4. Pool, J.H.B. and Leventhall, H.G., "Active Attenuation of Noise in Ducts", Journal of Sound and Vibration, 58, 333-345, 1978.
5. 江端正直, "그릇내음의 active제어의 일반식 인피-댄스による解析", 音講論集1984. 10.
6. Swinbanks M. A., "The active control of sound propagation in long ducts", Journal of Sound and Vibration, 27(3), pp411~436, 1973.
7. 차경환, 이재봉, 김천터, "SISO에 의한 가전기기의 능동소음 제어", 제2회 전기음향학술대회 논문집, pp148-153, 1996.

▲차 경 환(Kyung-Hwan Cha)

동서대학교 전자기계공학부 전임강사  
한국음향학회지 15권 5호 참조

▲이 채 봉(Chai-Bong Lee)

동서대학교 전자기계공학부 조교수  
한국음향학회지 15권 5호 참조

▲김 천 덕(Chun-Duck Kim)

부경대학교 전기공학과 교수  
한국음향학회지 12권 3호 참조