

Duct ANC System에서 부가음원 방향별 소음감소효과 Noise Attenuation Effect According to the Direction of Secondary Sound Source in Duct ANC System

이 응 석*·이 형 석†

Eung-Suk Lee and Hyung-Seok Lee

(2008년 7월 10일 접수 ; 2009년 2월 26일 심사완료)

Key Words : ANC(능동소음제어), DSP(디지털신호처리), Reference Input Signal(기준입력 신호), Secondary Source(부가음원), FxLMS(filtered x least mean square)

ABSTRACT

In this paper, we studied on an attenuation effect of automobile exhaust noise according to the direction of canceling speaker in ANC system. Automobile exhaust noise was recorded at 800 rpm, 3500 rpm and 5000 rpm of a diesel engine. Directions of canceling speaker can be set to 30°, 90° and 150° against the primary noise flow by acrylic ducts to be made for the experimentation. DSP board with TMS320C6416 chip of Texas Instrument Co. used to control the ANC system. The algorithm of this ANC system applied the Filtered-x-LMS algorithm that is modified to compensate for a property of DSP input signal and the secondary-path effect. As an experiment result, the direction of canceling speaker was proved to influence the reduction effect of noise. The 150° duct in the attenuation effect of noise showed a better result than the 90° or 30° duct.

기 호 설 명

$e(n)$: 오차신호
 $w(n)$: 필터계수
 $x(n)$: 기준입력신호
 $y(n)$: 제어출력
 u : 입자속도[m/sec]
 μ : 수렴계수
 L : 필터차수

1. 서 론

환경오염의 하나인 소음문제는 산업의 발달과 함

께 엔진, 블로워, 휠, 컴프레서 등의 사용이 많아지면서 더욱더 중요한 문제가 되었다. 소음저감을 위하여 흡·차음재를 사용하는 수동제어방식으로는 500 Hz 미만의 저주파 영역에서는 효과가 미비하여 능동소음제어(ANC)에 관심을 갖게 되었다.

ANC의 기본적 개념은 소음원에서 발생한 음파를 마이크로 감지하여 제어하고자 하는 위치에 전파되는 소음에 위상이 반대되는 부가음을 발생시켜 중첩시킴으로서, 상쇄간섭을 일으켜 소음을 줄이는 것이다.

ANC는 1936년 P. Lueg에 의해 미국특허로 등록된 이후 상당기간동안 실제화 과정에서 어려움이 있었으나, 1990년대 들어와 디지털신호처리(DSP)의 급속한 발달과 함께 능동소음제어 기술에 대한 연구가 활발해졌다.

현재 가장 성공적인 ANC적용은 대형 공기배출 팬 등에 사용되는 1차원 덕트에서 저주파 음향소음

† 교신저자; 정회원, 주성대학 자동차과
E-mail : hyung@jsc.ac.kr
Tel : (043)210-8326, Fax : (043) 210-8156
* 충북대학교 기계공학과

을 제어하는 단일채널 시스템이 대표적이다.

1992년 Denenberg는 450마력 6기통 2사이클 디젤 엔진에 전기머플러 적용사례를 발표하였고, 1991년 Nishimura는 배기온도 410 °C, 배기속도 40 m/s인 6기통 디젤엔진의 배기관 주위에 4개의 스피커 박스를 설치하여 냉각기능과 보호기능을 가진 전기머플러를 개발하여 적용한 결과 200 Hz 이하의 엔진 조화소음에 대해 10~30 dB의 감소를 성취하였다⁽¹⁾.

국내의 덕트-음향 ANC연구동향으로는 1992년 FxLMS 알고리즘을 응용한 덕트내 평면파소음제어 연구에서 PVC파이프(φ20 cm) 및 사각철제덕트(43 × 22 cm)를 제작하여 실험한 결과 500 Hz 미만의 소음에 대해 15~20 dB정도 감소가 되었다. 또한 이 연구에서 음원에서 마이크까지 50 cm 이상일 경우 감쇠파의 영향을 피할 수 있음을 밝혔다⁽²⁾.

2007년 Co-FxLMS알고리즘을 이용한 덕트계의 능동소음제어 연구에서 백색소음에 대해 아크릴 사각덕트(30 × 30 cm)를 제작하여, 기준신호 파위에 따라 수렴계수가 변하는 Co-FxLMS알고리즘이 수렴계수가 상수인 FxLMS알고리즘 비해 수렴시간단축 및 소음감소효과가 크게 나타남을 밝혔다. 그러나 덕트의 음향모드가 나타나는 주파수에서는 Co-FxLMS알고리즘의 소음제어성능이 약간 저하되는 것으로 나타났다⁽³⁾.

2002년 자동차흡기소음제어에 ANC의 적용가능성을 시험한 연구에서는 엔진 rpm이 일정할 경우와 급가속시에 자동차 흡기소음의 안정적 제어를 위해 FxLMS알고리즘을 수정하여 소음제어성능을 향상시켰다^(4,5).

이 외에도 덕트-음향 ANC시스템에의 소음감소효과를 높이기 위한 마이크의 최적위치, 제어알고리즘 등의 많은 연구와 더불어 부가음원방향과 소음감소효과에 대한 고찰도 필요하다고 생각한다.

따라서 이 연구에서는 덕트-음향시스템에서 부가음원의 방향에 따라 소음감소결과에 미치는 영향을 상대적으로 비교해 보고자 하였다. 따라서 부가음원의 방향을 소음진행방향에 대해 30°, 90°, 150°방향으로 변경 가능하도록 아크릴덕트를 제작하여 실험하였다. 소음원 소음은 스타렉스 2500 cc차량의 배기소음을 배기소음 검사규정에 따라 배기출구의 45°방향 50 cm거리에서 녹음하여 스피커로 재생하였다. 검사규정에서는 공전, 급가속, 최고출력상태에

서 측정하도록 돼 있으나, 실험에서는 각 상태를 대신하여 개략적으로 공전은 800 rpm, 급가속은 3500 rpm, 최고출력은 5000 rpm정도에서 측정하였다. 디지털필터는 FIR(finite impulse response)필터를 적용한 전향제어방식을 적용하였다. 알고리즘은 FxLMS 알고리즘을 컨트롤러인 DSP의 입출력특성 및 실험 장치의 특성을 고려하여 일부 수정하였다.

2. 이론적 배경

2.1 강체 4각 덕트에서 차단주파수

Fig. 1과 같이 벽이 강체(아크릴)로 되어있고 4각 단면을 가진 덕트내에서 압력파가 전파될 경우, 단면의 압력변동을 $p(z,t)$, 입자(질점)속도를 u 라 할 때 식 (1)과 같은 파동방정식이 성립한다.

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial t^2} - V^2 \nabla^2 \right] p = 0 \tag{1}$$

$$\text{단, } V = \sqrt{\frac{E}{\rho}} : \text{음속 [m/s]}$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} : \text{라플라시안(Laplacian)}$$

편미분방정식 (1)의 일반해와 파수관계식을 구하면 식 (2)~(3)과 같다.

$$p(z,t) = (C_1 e^{-jk_x x} + C_2 e^{+jk_x x}) \times (C_1 e^{-jk_y y} + C_2 e^{+jk_y y}) \times (C_1 e^{-jk_z z} + C_2 e^{+jk_z z}) e^{j\omega t} \tag{2}$$

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = k^2 \tag{3}$$

단, $k = \omega / V = 2\pi / \lambda$: 파수(wave number)

식 (2)에서 C_1, C_2 는 진폭을 나타내며 C_1 계수항은

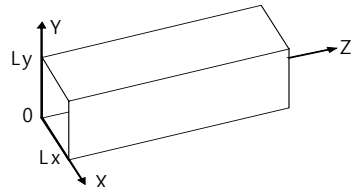


Fig. 1 A rectangular duct in Cartesian coordinate system

속도 V 로 오른쪽으로 진행하는 파동을 나타내며, C_2 계수항은 속도 V 로 왼쪽으로 진행하는 파동을 나타낸다.

Fig. 1과 같이 높이 L_y , 폭 L_x 인 강체덕트에서 압력파가 진행할 때 x 와 y 방향의 횡단파는, 덕트의 경계조건 때문에 정재파(standing wave)가 발생하며, z 방향으로는 진행파(traveling wave)형태가 된다. 이때 각 방향의 경계조건(boundary condition) 및 파수성분간의 관계는 식 (4)~(7)과 같다.

$$\partial p / \partial x = 0 \text{ at } x=0 \ \& \ x=L_x : \text{ B. C. of } x\text{-dir.} \quad (4)$$

$$\partial p / \partial y = 0 \text{ at } y=0 \ \& \ y=L_y : \text{ B. C. of } y\text{-dir.} \quad (5)$$

$$k^2 = k_z^2 + k_{xm}^2 + k_{yn}^2 = (\omega / V)^2 \quad (6)$$

$$k_z = \sqrt{k^2 - k_{xm}^2 - k_{yn}^2} = \sqrt{(\omega / V)^2 - k_{mn}^2} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{단, } k_{xm} &= m\pi / L_x, & k_{yn} &= n\pi / L_y \\ k_{mn}^2 &= k_{xm}^2 + k_{yn}^2, & m, n &= 0, 1, 2, \dots \end{aligned}$$

식 (7)에서 어느 특정한 (m, n) 모드에서 $k_z = 0$ 일 경우, $+z$ 방향으로 파동이 감소하지 않고 진행할 수 있는 한계조건이 되며, 이때의 주파수를 차단주파수(cutoff frequency)라 한다. 또한 $(\omega / V) > k_{mn}$ 일 때 k_z 는 실수가 되고, 이때 단면직각 방향에 형성된 (m, n) 모드의 압력파는 $+z$ 방향으로 진행할 수 있다. 반대로 $(\omega / V) < k_{mn}$ 일 때는 가진주파수가 차단주파수보다 작을 경우로 k_z 는 허수가 되어 이때의 (m, n) 모드의 압력파는 $+z$ 방향으로 진행하면서 지수함수로 감소하는 감쇠파(evanescent wave)가 되어 사라진다. 4각 덕트에서 (m, n) 모드에서의 차단주파수를 구하면 식 (8)과 같다.

$$f_{c,mn} = \frac{V}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L_y}\right)^2} \quad (8)$$

이와 같이 덕트의 단면형상(원형단면의 경우는 다름) 및 크기에 의해 결정되는 1차 차단주파수보다 작은 주파수에서는 평면파만 전파되는 것으로 간주되어 1차원문제로 단순화 된다.

이 실험에서 제작한 덕트의 경우 폭과 높이가 $L=17.5 \text{ cm}$ 이다. 그리고 $V=343 \text{ m/s}$ (at $20 \text{ }^\circ\text{C}$)에 $(0, 1)$ 이나 $(1, 0)$ 모드를 고려할 경우 주파수 $f_c=980$

Hz가 된다. 즉 이 실험에서 관리대상으로 삼는 1 kHz 미만의 주파수는 평면파만이 전파됨을 알 수 있다.

한편 위 식 (7)에 $(0, 0)$ 모드를 대입할 경우 $k_z = k = \omega / V$ 가 되어 1차원 평면파의 파수식이 된다. 따라서 $(0, 0)$ 모드는 평면파 모드로, 감소하지 않고 항상 전파됨을 알 수 있다.

2.2 정재파와 마이크 위치

정재파는 어떤 파동이 강체벽면을 만나거나, 특성이 다른 매질의 경계면을 만났을 때 그 경계면에서 파의 전부 또는 일부가 반사되어 진행파와 반사파가 합쳐져 보기에 마치 움직이지 않고 정지해 있는 것처럼 보이는 파를 말한다. 파동의 최고압을 p_m 이라 할 때 진행파 p_i , 반사파 p_r , 정재파 p_s 의 관계는 식 (9)과 같다.

$$\begin{aligned} p_s &= p_i + p_r = p_m [\sin(\omega t - kz) + \sin(\omega t + kz)] \\ &= 2p_m \sin(\omega t) \cos(kz) \end{aligned} \quad (9)$$

정재파는 두 경계면사이의 거리가 반파장($\lambda/2$)의 자연수배가 되면 만들어져 공진하게 된다. 이 경우 주파수에 따라 일정한 위치들에서 음압이 최저가 되는 노드가 나타난다. 따라서 덕트-음향 ANC시스템의 가제어성 및 가관측성 확보하고 제어효율을 높이기 위해 기준 및 오차 마이크는 노드위치를 피해 안티노드(anti-node)위치에 설치되어야 한다.

정재파주파수 f_s [Hz], 파장 λ [m], 두 경계면사이의 거리가 B [m]일 때 이들의 관계는 식 (10)과 같다.

$$V = \lambda f_s = \frac{B}{N/2} f_s \quad (10)$$

$$f_s = \frac{V}{2B} N, \quad N=1, 2, 3 \dots \quad (11)$$

식 (11)에서 N 은 음향모드(acoustic mode)의 차수를 나타낸다. 각 차수별로 음압이 최저가 되는 노드 위치를 X_N 라 하면

$$X_N = \frac{(2n-1)B}{2N}, \quad n \leq N \text{인 자연수} \quad (12)$$

모드별로 노드 및 안티노드의 위치를 정리하면 Table 1과 같다.

일반적으로 관내에서 음파가 전파될 경우 우단이 막혔을 때 우단에서 입자속도 $u=0$, 음압 $p=\max$ 가 되며, 열려있을 때는 $u=\max$, $p=0$ 되어 임피던스 (p/u)가 0이 된다. 그러나 관이 개방된 경우라 하더라도 단면의 크기나 길이에 따라 1차원 평면파가 전파되는 관의 내부와 3차원으로 개방되는 관의 끝단에서 경계면이 형성되며 전파되는 파의 일부가 반사되는 것으로 가정할 수 있다.

이 실험에 사용한 덕트의 기준마이크는 소음원 스피커로부터 0.05 m, 오차마이크는 2.028 m의 위치에 있다. 식 (11), (12)에 덕트길이 $B=2.385$ m, 음속 $V=343$ m/s를 대입하여 모드별 주파수, 노드점 및 안티노드에 대해 조사하였다. 조사결과 제어대상 주파수를 1 kHz이하로 할 때 f_s 는 1차모드 71.9 Hz에서 13차모드 934.7 Hz까지 나타났다. 각 모드별 노드점을 조사한 결과 10차모드 719 Hz에서 오차마이크 위치가 노드점으로 나타났으며, 안티노드점은 6차모드 431 Hz와 7차모드 503 Hz에서 오차마이크 위치와 거의 일치하는 것으로 나타났다. 이와 같은 조사결과에 의하면 소음원주파수가 430~500 Hz 영역의 소음은 오차마이크에서 비교적 감지가 잘되어 제어가 용이하나, 720 Hz영역의 소음은 정재파의 영향으로 감지가 잘 안되어 비교적 제어가 어려울 것임을 예측할 수 있다. 오차마이크 위치가 덕트의 맨 끝에 위치할 경우를 제외하고, 주파수가 높아질수록 파장이 짧아지고 그 만큼 노드점의 위치도 증가하게 되므로 정재파의 영향을 피하기 어려울 것이다.

또한 기준마이크 위치도 저주파 영역에서 노드 위치를 피하고 부가음원의 음향회환의 영향을 피하기 위해 소음원에 가까이 설치하는 것이 유리하나 너무 가까울 경우, 감쇠파의 영향을 받을 수 있다.

이 실험에서는 기준마이크를 비교적 소음원에 가까이 설치함으로써 정재파 및 음향회환의 영향을

최대한 피하였으며, 출력파형을 확인한 결과 감쇠파의 영향이 별로 없음을 확인하였다.

2.3 FxLMS 알고리즘

ANC 시스템의 알고리즘 중에서 앞먹임 FxLMS 알고리즘의 블록선도는 Fig. 2와 같다. ANC시스템은 전기계와 음향계가 결합되어 작동하는 시스템으로 Fig. 2에서 합산표시(Σ)는 원소음 $d(n)$ 와 능동필터의 제어출력 $y'(n)$ 가 포개어 지는 것을 표시한다. 따라서 시스템을 정확히 제어하기 위해서는 제어출력 $y'(n)$ 와 오차신호 $e(n)$ 사이의 부가경로 전달특성이 알고리즘에 포함되어야 한다. 이와 같은 부가경로의 영향을 보정한 알고리즘을 FxLMS알고리즘이라 한다.

Fig. 2에서 오차의 평균제곱 값(MSE)이 최소화 되도록 조정되는 FIR필터계수 $w(n)$ 와 기준입력신호 $x(n)$ 는 $(L \times 1)$ 벡터로 식 (13)~(14)과 같이 정의된다. 샘플링 시간 n 에서 FIR필터의 출력인 $y(n)$ 는 식 (15)와 같이 정의되며, 식 (16)과 같이 벡터연산식으로 표현할 수 있다.

$$x(n) \equiv [x(n-0)x(n-1)\dots x(n-(L-1))]^T \quad (13)$$

$$w(n) \equiv [w_0(n)w_1(n)\dots w_{L-1}(n)]^T \quad (14)$$

$$y(n) \equiv \sum_{l=0}^{L-1} w_l(n)x(n-l) \quad (15)$$

$$y(n) = w^T(n)x(n) = x^T(n)w(n) \quad (16)$$

위식들에서 L 은 FIR필터의 차수이고, 첨자 T 는 행렬의 전치(transpose)를 나타낸다. 부가경로의 전달함수 $s(z)$ 는 오프라인으로 모델링되도록 하며 그

Table 1 Nodal & anti-nodal point by mode

Mode order (N)	λ no.	Nodal point ($p=\min$)	Anti-nodal point ($p=\max$)
1	1/2	B/2	0, B
2	2/2	B/4, 3B/4	0, 2B/4, B
3	3/2	B/6, 3B/6, 5B/6	0, 2B/6, 4B/6, B
⋮	⋮	$0 < \text{Multiples of } B/N - B/2N < B$	$0 \leq \text{Multiples of } B/N \leq B$

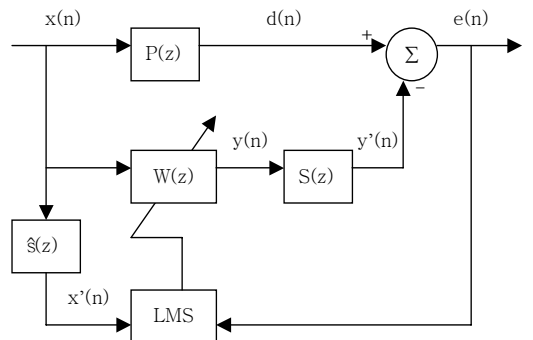


Fig. 2 FxLMS algorithm

추정치는 $\hat{s}(z)$ 로 표시한다. 부가경로의 영향을 보정하기 위하여, 출력 $y(n)$ 는 $s(z)$ 에 의해 필터링되며 기준입력신호 $x(n)$ 는 $\hat{s}(z)$ 에 의해 필터링되어 식 (17), (18)과 같이 표현된다. 따라서 $d(n)$ 와 $y'(n)$ 의 차이인 오차신호 $e(n)$ 는 식 (19)와 같이 표현된다.

$$y'(n) = s(n) * y(n) = s(n) * [w^T(n)x(n)] \quad (17)$$

$$x'(n) = \hat{s}(n) * x(n) \quad (18)$$

$$= [x'(n)x'(n-1) \cdots x'(n-L+1)]^T$$

$$e(n) = d(n) - y'(n) = d(n) - s(n) * [w^T(n)x(n)] \quad (19)$$

위 식들에서 *는 선형합성적분(convolution)을 나타낸다. 능동필터의 목적은 매순간에 계산되는 오차 제곱 $\zeta(n) = e^2(n)$ 를 최소화하는 것이다. 이를 성취하기 위해 필터계수는 수렴계수(step size) μ 를 이용하여 오차표면의 음의 기울기방향으로 갱신된다. 이를 위한 최급강하(steepest descent) 알고리즘은 식 (20)과 같이 표현된다.

$$w(n+1) = w(n) - \frac{\mu}{2} \nabla \zeta(n) \quad (20)$$

$$\nabla \zeta(n) = \nabla e^2(n) = 2[\nabla e(n)]e(n) \quad (21)$$

식 (21)에서 $\nabla \zeta(n)$ 은 시간 n 시점에서 최소평균제곱 변화율에 대한 그 순간의 추정치로, $\nabla e(n)$ 는 $e(n)$ 를 $w(n)$ 로 편미분한 값으로 식 (22)와 같이 구할 수 있다.

$$\nabla e(n) = \frac{\partial e(n)}{\partial w_i(n)} = -s(n) * x(n) = -x'(n) \quad (22)$$

$$\therefore \nabla \zeta(n) = -2x'(n)e(n) \quad (23)$$

식 (23)을 식 (20)에 대입하면 FxLMS알고리즘을 식 (24)와 같이 구할 수 있다.

$$w(n+1) = w(n) + \mu x'(n)e(n) \quad (24)$$

2.4 실험에 적용한 Modified-FxLMS 알고리즘

이 실험에 사용된 ANC컨트롤러인 DSP보드의 입력신호 범위가 0~2.5 V로 제한된다. 따라서 DSP 입력조건에 맞추기 위해, 0 V를 중심으로 +, - 값

으로 출력되는 마이크신호를 +방향으로 1 V정도 시프트(shift)시켜 입력시켰다. 이처럼 시프트 되어 0~2.5 V범위로 입력된 실수형 데이터는 DSP CPU 내에서는 0~2¹²(0~4096)범위의 정수형태데이터로 변환되어 저장된다. 따라서 필터계수 $w(n)$ 의 정확한 연산처리를 위해서 변환된 정수형태데이터(x_d)를 실수 형태데이터(x_f)로 역변환시켜야만 한다. 따라서 $x(n)$ 와 $e(n)$ 는 식 (25)를 이용하여 수정된다.

$$x_f = (x_d \times 2.5 / 4096) - 1.0 \quad (25)$$

또한 연산수행결과 산출된 출력값 $y(n)$ 의 정상적인 출력을 위해서는 실수 연산값을 정수값으로 다시 역변환해야 됨은 물론, FxLMS 알고리즘의 특성인 부가경로의 전달특성을 파악하여 프로그램에 추가시켜야 한다. 식 (26)에서 T_1, T_2, T_3 은 실험장치의 특성을 반영한 값으로, 덕트길이, 마이크의 위치, 앰프의 전달특성 등에 따라 출력과형을 확인하면서 여러 번의 시험을 통해 적절히 선정되었다.

$$y_d = [(y_f + T_1) \times 4096 / 2.5 + T_2] \times T_3 \quad (26)$$

한편 ANC시스템에서 차수 L 과 수렴계수 μ 의 크기는 수렴시간 및 수렴여부에 미치는 영향이 매우 크며, 실제 ANC시스템이 안정적으로 수렴하기 위한 L 과 μ 의 관계는 식 (27)을 적용한다.

$$\frac{0.01}{LP_x} < \mu < \frac{0.1}{LP_x}, P_x = E[x^2(n)] \quad (27)$$

ECU연산능력, 덕트길이, 컴퓨터시뮬레이션 결과 등을 고려하여 본 결과, $L=64$ 를 적용하였으며, $x(n)$ 의

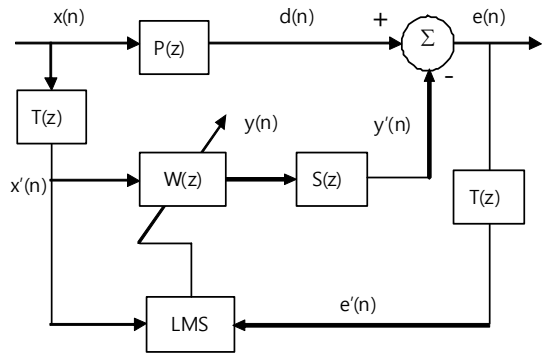


Fig. 3 The modified FxLMS algorithm for experiment

파워 P_x 는 0.1~4범위로 예측되었고, 이를 식 (27)에 적용할 경우 μ 의 범위는 0.015~0.000078에 해당된다. 따라서 수렴시간 및 시스템 안정성을 고려하여 $\mu=0.0005$ 를 적용하였다. 결과적으로 실험에 로 적용된 알고리즘을 Fig. 3에 나타내었다. 그 외에도 마이크간의 코히어런스(coherence), 앰프전달특성 등을 확인하였다.

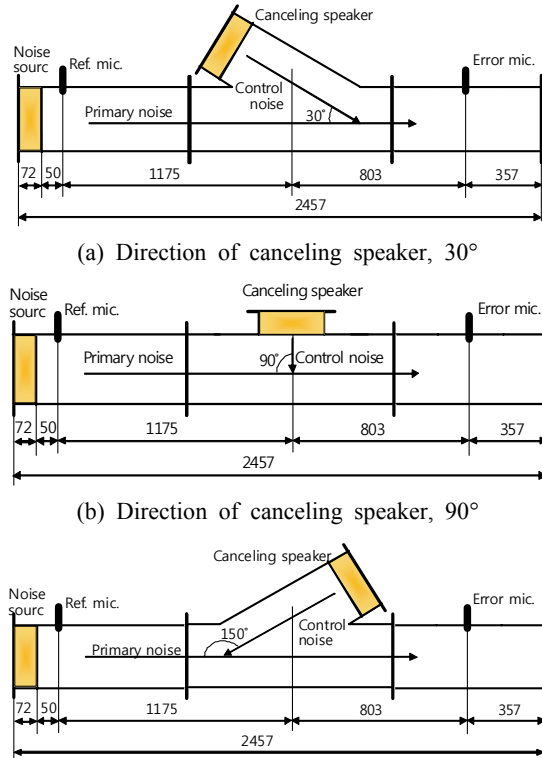
3. 실험장치 및 결과

실험 장치는 덕트와 전기장치로 구분할 수 있으며, ANC시스템의 실시간 신호처리를 위한 컨트롤러는 Texas Instrument사의 TMS320C6416칩이 부착된 ND-Tech사의 DSP보드를 사용하였다. 실험결과는 $e(n)$ 의 FFT분석결과를 중심으로 파악하였다.

3.1 실험장치

(1) 덕트의 종류 및 구조

덕트종류는 3가지로 부가음원의 방향이 소음 진



(a) Direction of canceling speaker, 30°
(b) Direction of canceling speaker, 90°
(c) Direction of canceling speaker, 150°
Fig. 4 Structure of duct for experiment

행방향에 대해 30°, 90°, 150°방향으로 변경 가능하다. 덕트의 총길이는 2,457 mm이나 소음원 스피커의 설치로 인해 소음이 진행되는 구간은 2,385 mm이다.

(2) 코우설리티 조건 확인

덕트 ANC시스템에서 기준마이크부터 부가음스피커까지 덕트길이를 D_L 이라 할 때 원활한 소음제거를 위해, 덕트내 소음전파시간 δ_A 가 마이크입력신호의 전기적 처리시간 δ_E 보다 길어야 한다는 조건이 코우설리티 조건(causality condition)이다.

$$\delta_A = \frac{D_L}{V} [\text{sec}], \quad V: \text{음속} \quad (28)$$

$$\delta_E = \delta_W + \delta_T [\text{sec}], \quad (\delta_A > \delta_E) \quad (29)$$

식 (29)에서 δ_W 는 필터그룹지연이고 δ_T 는 입출력 관련 전기장치 지연이다. 코우설리티 조건을 확인하기 위하여 90°덕트에서 Fig. 5와 같이 마이크를 설치하고 출력장치를 통해 부가음스피커로 정현파 출력을 내보내고 마이크신호가 입력전기장치를 통해 DSP에 입력되는 신호를 오실로스코프로 검출하여

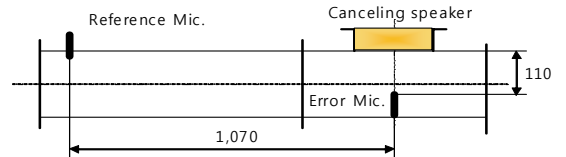


Fig. 5 Verify of causality condition

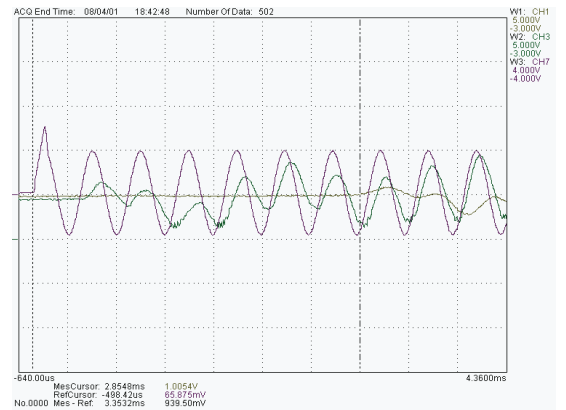


Fig. 6 Signal input time measuring at reference & error mic.

Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6에서 맨 윗줄그래프는 함수발생기에서 발생한 신호이고, 2번째는 기준마이크 입력 신호, 마지막 그래프는 오차마이크 입력신호이다.

부가음스피커로 정현파 출력 후 오차마이크 입력 신호는 553 μsec , 기준마이크 신호는 3,353 μsec 후에 감지되었다. 음속을 343 m/sec로 할 때 전기장치의 지연시간 분석결과 및 등가의 덕트길이에 대해 정리하면 Table 2와 같다.

Table 3은 DSP내에서 연산시간에 대한 분석내용으로, 연산여유를 2배로 하였을 때 총 실행시간은 2.732 μsec 로 예측되었다. 따라서 DSP CPU의 연산 부담률 8.2 %로 예상되었다.

Table 2와 3에서 확인결과와 같이 등가의 덕트길이는 81 mm정도로 이 실험에 사용한 덕트는 기준마이크에서 스피커까지 최소 978 mm로 causality 조건을 충분히 만족하였다.

(3) 스피커 및 마이크 규격

실험에 사용된 스피커는 HMC사의 승용차용 스피커로 내부저항 4.0 Ω , 평균출력 20 W, 직경 175 mm인 스피커로 공진점의 주파수 $f=300$ Hz, 저항 $R=4.16$ Ω , 리액턴스 $X=0.0017$ Ω 로 확인되었다. 차량에 부착 시 사용되는 케이스를 그대로 사용함으로써 인클로저기능을 유지하도록 하였다.

기준마이크 및 오차마이크는 동일한 규격으로 직경 15 mm의 Audio technic사의 AT805b 모델을 사용

하였다. 앰프는 소음원 스피커구동용, 부가음원구동용, 마이크 신호 증폭용으로 3대를 사용하였으며, 종류는 Inkel사의 RX4010R, GS사 FA-520, Samsung사 RS-750A이며 종류별로 입출력단자간의 전달특성을 확인하였으며, 이를 보정하기위해 반전 회로가 사용되었다.

(4) DSP의 알고리즘 작동시험

DSP내에 프로그램된 알고리즘의 정상적인 작동 여부를 확인하기 위해 DSP에 입력되는 기준마이크 및 오차마이크 신호와 DSP내에서 연산처리 후 출력되는 신호를 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 7의 왼쪽시작점에서 첫 번째 선은 부가음출력선이고 가운데 선은 오차마이크신호이고 세 번째 선은 기준마이크 신호이다. DSP입출력신호를 실시간으로 확인한 결과, 출력신호가 기준입력신호의 역위상과 거의 유사한 파형이 출력되고 있는 것으로 보아, DSP 내부에서의 신호처리과정이 정상적임을 확인하였다.

3.2 실험 결과

실험은 원소음 진행방향에 대해 부가음원 방향이 30°, 90°, 150°일 경우 엔진회전수가 800 rpm, 3500 rpm, 5000 rpm에서의 배기소음 저감효과에 대해 비교 실험하였다. 실험결과는 Figs. 8~13에 오차신호의 FFT결과로 나타내었다. 그림 배열순서는 각 rpm별로 ANC제어 전의 FFT결과를 먼저 나타내고, 덕트각도별로 ANC제어 후의 결과를 나타내었다.

Table 2 Delay time and equivalent duct length

Datum microphone	Delay time into duct by sound propagation	Delay time by electrical equip.	Equivalent duct length
Error microphone	110/343,000 = 320 μsec	553 - 320 = 230 μsec	343 \times 230 μ = 79 mm
Reference microphone	1,070/343,000 = 3,119 μsec	3,353 - 3,119 = 234 μsec	343 \times 234 μ = 80 mm

Table 3 DSP calculation time analysis

Amount of calculation	DSP execution number	DSP execution time	Equivalent duct length	DSP overhead
100+filter order \times 12	(64 \times 12) \times 2+100=1,636	1,636 \times 1.67 = 2,732 nsec	343 \times 2.7 = 1 mm	2.732 \times 30k Hz=8.2 %

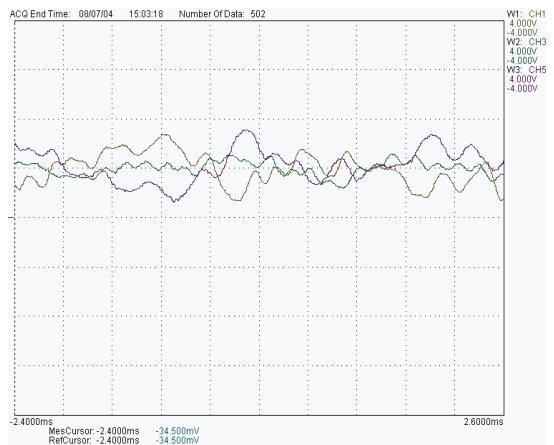


Fig. 7 Input & output signal wave of DSP

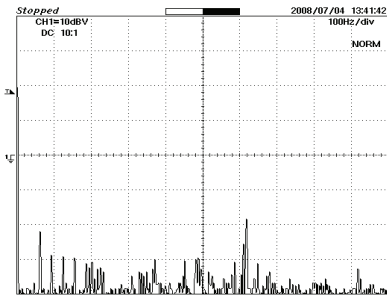


Fig. 8 FFT result on exhaust noise of 800 rpm when none-ANC

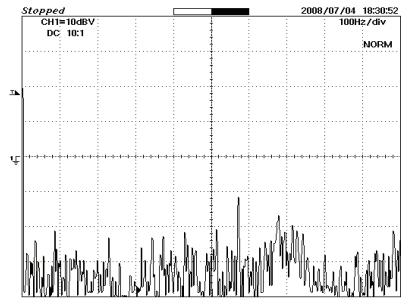
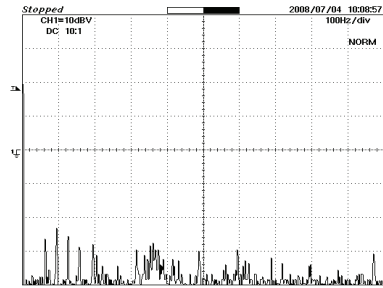
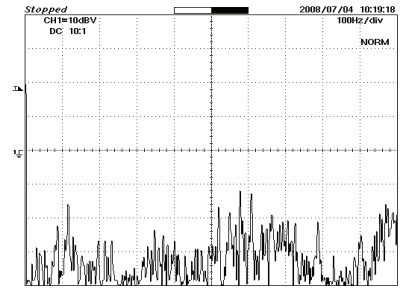


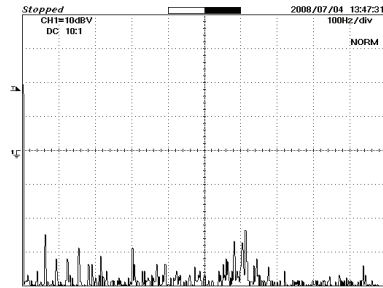
Fig. 10 FFT result on exhaust noise of 3500 rpm when none-ANC



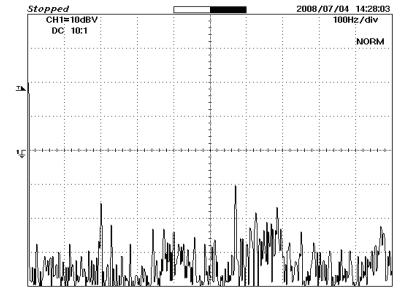
(a) FFT result on error signal, when canceling speaker is 30°



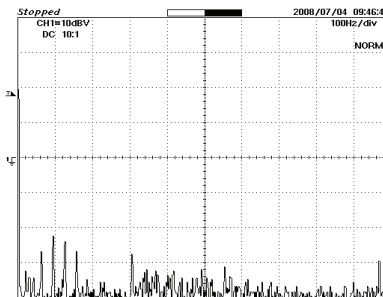
(a) FFT result on error signal, when canceling speaker is 30°



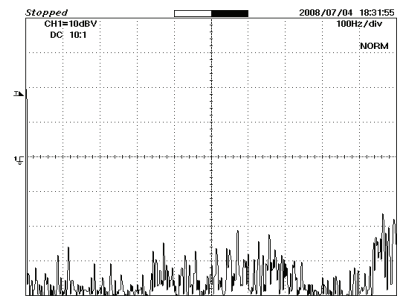
(b) FFT result on error signal, when canceling speaker is 90°



(b) FFT result on error signal, when canceling speaker is 90°



(c) FFT result on error signal, when canceling speaker is 150°



(c) FFT result on error signal, when canceling speaker is 150°

Fig. 9 Noise attenuation effect on exhaust noise at 800rpm by the direction of canceling speaker in duct-acoustic system

Fig. 11 Noise attenuation effect on exhaust noise at 3500 rpm by the direction of canceling speaker in duct-acoustic system

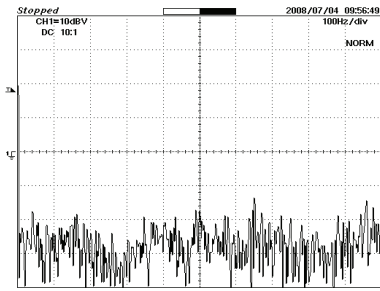
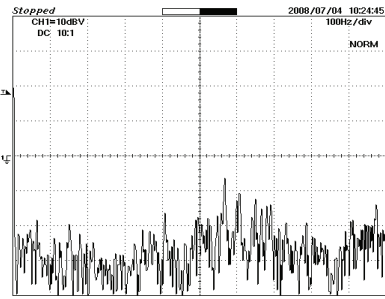
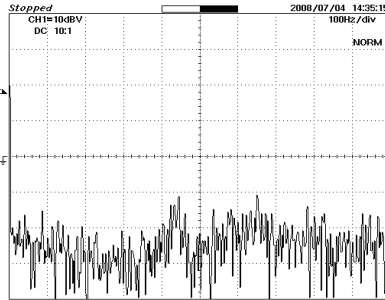


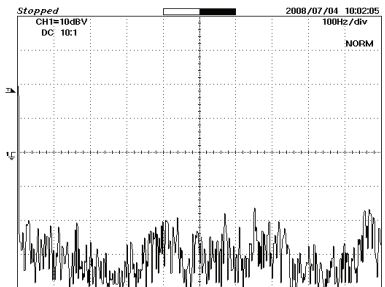
Fig. 12 FFT result on exhaust noise of 5000 rpm when none-ANC



(a) FFT result on error signal, when canceling speaker is 30°



(b) FFT result on error signal, when canceling speaker is 90°



(c) FFT result on error signal, when canceling speaker is 150°

Fig. 13 Noise attenuation effect on exhaust noise at 5000 rpm by the direction of canceling speaker in duct-acoustic system

Table 3 FFT analysis result on error signal

Control speaker direction	rpm	Decreasing range		Increasing range	
		Frequency	Decrement	Frequency	Increment
30°	800	610 Hz	12 dB	350 Hz	5 dB
	3500	-	-	610 Hz 110 Hz	10 dB 10 dB
	5000	-	-	580 Hz	10 dB
90°	800	610 Hz 50~400 Hz	5 dB 5 dB	-	-
	3500	-	-	200 Hz	15 dB
	5000	-	-	430 Hz	10 dB
150°	800	610 Hz	15 dB	-	-
	3500	580 Hz	10 dB	-	-
	5000	100~250 Hz, 450~600 Hz	5 dB 5 dB	-	-

실험결과 Table 3과 같이 부가음원 방향에 따라 주파수 영역별로 소음감소효과가 다르게 나타났다. 이와 같은 원인은 우선적으로 부가음원 방향이 DSP출력신호가 소리로 바뀌어 원소음과 합성되는 과정에 영향을 미치고 있는 것으로 예측할 수 있다. 그 외에도 정재파, 음향궤환, 외부소음 등이 실험결과에 영향을 미쳤을 것으로 예상된다.

그러나 이 연구의 목적은 원소음 제거에 대한 양호한 결과가 아니라, 정재파나 음향궤환 등 기타의 요인을 포함한 상태에서 소음 감소효과를 상대적으로 비교함으로써 부가음원의 방향이 소음감소에 미치는 영향에 대해 조사하고자 하였다.

실험결과 150°덕트에서 감소효과가 제일 양호하게 나타났으며, 90°덕트와 30°덕트에서는 rpm(음압) 및 주파수대별로 소음이 감소하기도 하고 증가하기도 하였다. 이처럼 150°덕트에서 비교적 감소효과가 양호한 것은, 원소음 진행방향에 대해 부가음원 방향이 직교(orthogonal)하는 90°덕트에 비해 상쇄간섭이 보다 쉽게 일어나는 것으로 추측된다. 단지 30°덕트에서 감소효과가 크지 못한 것은 부가음의 일부가 오차마이크 입력신호에 영향을 미친 것으로 추측된다.

4. 결 론

이 연구에서 실시한 ANC시스템에서 부가음원의 방향이 소음감소효과에 미치는 영향에 대해 실험내용을 토대로 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 실험결과 부가음원의 방향에 따라 소음제거 효과가 다르게 나타났으나, 이 효과에는 부가음 방

향변화에 의한 소음과 부가음의 합성효과의 변화 이외에 부가음원에서 참조 및 오차마이크까지 거리에 따른 음향궤환 등의 여러 요인이 함께 영향을 미친 결과로 추측된다.

(2) 이 실험의 덕트구조에서는 부가음원 방향이 150°일 때 소음저감효과가 제일 양호한 것으로 나타났다으나, 덕트길이를 충분히 길게 할 경우 음향궤환등의 영향이 달라져 실험결과가 달라질 수 있다.

(3) 부가음원의 방향에 따른 소음감소효과에 미치는 영향에 대해 보다 명확한 결론을 위해서 덕트 구조, 마이크위치, 정재파 및 음향궤환의 영향 등을 고려한 더 많은 연구가 필요할 것으로 생각한다.

(4) 덕트-음향시스템에서 감소효과를 보다 높이기 위해서는 'Y'형과 같은 덕트구조를 이용하여 원소음과 부가음이 동일조건에서 합성하고 합성한 이후 두 덕트의 중간방향으로 소음이 진행하도록 한다면 소음감소가 더 클 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- (1) Kuo, S. M. and Morgan, D. R., 1996, "Active Noise Control System: Algorithm & DSP Implementation," John Wiley & Sons, New York, pp. 275~285.
- (2) Woo, J. H., Kim, I. S., Ih, J. G. and Kim, K. J., 1992, "Active Noise Control of the Plane Wave Travelling in a Duct Using FxLMS Algorithm," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 2, No. 2, pp. 107~116.
- (3) Lee, G. T., 2007, "A Study on the Active Noise Control of the Duct System Using Co-FxLMS Algorithm," Master's Thesis in Mechanical Engineering of Hanyang University, pp. 1~96.
- (4) Kim, K. T., 2002, "Experimental Study of ANC System for Reducing Intake Noise of Automobile," Master's Thesis in Mechanical Engineering of Seoul National University, pp. 1~79.
- (5) Lee, C. H., Oh, J. E., Lee, Y. Y. and Lee, J. Y., 2003, "The Performance Improvement for an Active Noise Control of Automotive Intake System Under Rapidly Accelerated Condition," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 11, No. 6, pp. 138~189.