

Duct ANC 시스템에서 2차음원 방향별 소음감소효과

An attenuation effect of noise according to the direction of secondary sound source in duct ANC system

이형석† · 이응석*

Hyung-Seok Lee, Eung-Suk Lee

Key Words : ANC(능동소음제어), FxLMS(filtered x least mean square), FIR(finite impulse response) , secondary sound source(2차음원), DSP(디지털 신호처리기)

ABSTRACT

In this paper, we studied on an attenuation effect of automobile exhaust noise according to the direction of secondary sound source in duct ANC system. Automobile exhaust noise was recorded at 800rpm, 3500rpm and 5000rpm of a diesel engine. Directions of loudspeaker(second sound source) can be exchanged to 30°, 90° and 150° against the primary noise flow by acrylic ducts to be made for experimentation. DSP board with TMS320C6416 chip of Texas Instrument Co used to control adaptive ANC system. This ANC system is based on the single-channel FxLMS algorithm. In experiment result, when the loud speaker direction was 150°, the attenuation effect showed largely. In case of 90° duct, the noise was a little increased. In case of 30° duct, the noise was a little increased or decreased according to the frequency range and the sound pressure(dB) of exhaust noise to comply with engine rpm.

기 호 설 명

- μ : 스텝사이즈 (step size)
- L : 필터차수
- $e(n)$: 오차신호
- $w(n)$: 기중치 계수
- $x(n)$: 입력신호
- $y(n)$: 출력신호

1. 서론

환경오염의 하나인 소음을 저감하기위해 흡-차음재를 사용하는 수동제어방식으로는 500Hz미만의 저주파 영역에서는 효과가 미비하여, 점차로 능동소음제어(ANC)에 관심을 갖게 되었다. ANC의 기본적 개념은 소음원에서 발생한 음파를 마이크로 감지하여 제어하고자 하는 위치에, 전파되는

소음에 위상이 반대되는 2차음을 발생시켜 중첩시킴으로서, 상쇄간섭(destructive interference)을 일으켜 소음을 줄이는 것이다.¹⁾

ANC는 1934년 독일의 Lueg에 의해 미국특허로 등록된 이후 상당기간동안 실제화 과정에서 어려움이 있었으나, 1990년대 들어와 디지털 신호처리기(DSP)들의 급속한 발달과 함께 능동소음제어 기술에 대한 연구가 활발해졌다.

현재 가장 성공적인 ANC적용은 대형 공기배출 팬 등에 사용되는 1차원 덕트에서 저주파 음향소음을 제어하는 단일 채널 시스템이 대표적이다.

1991년 Nishimura는 배기온도 410°C 배기속도 40m/s 인 6기통 디젤엔진에 스피커 및 센서의 냉각기능과 보호기능을 가진 전기머플러를 개발하여 적용한 결과 200Hz이하의 엔진 조화소음에 대해 10~30dB의 감소를 성취하였다.¹⁾

국내에서도 FxLMS 알고리즘을 응용한 덕트내 평면파 소음의 능동제어에 대한 연구가 많이 이루어지고 있어 알고리즘의 개발 및 소음감소에 성과를 이루고 있다.²⁾³⁾

이와 같은 덕트-음향 ANC시스템의 소음감소효과 관한 수많은 국내외의 연구결과물에 비해, 2차음원의 방향과 소음감소효과에 대한 고찰은 비교적 부족하였다고 생각한다.

따라서 본 연구에서는 덕트-음향시스템에서 2차음원의 방향에 따라 소음 감소결과에 미치는 영향을 상대적으로 비

† 정회원, 주성대학 자동차과 교수
E-mail : hyung@jsc.ac.kr
Tel : (043)210-8326, Fax : (043) 210-8328

* 충북대학교 기계공학과 교수

교해 보고자 하였다. 2차음원의 방향을 소음 진행방향에 대해 30°, 90°, 150°방향으로 변경 가능하도록 닥트를 제작하여 실행하였다. 배기소음은 스타렉스 2500cc차량의 배기소음을 배기소음검사규정에 준해서 800rpm, 3500rpm, 5000rpm에서 녹음하여 사용하였으며, 디지털 필터는 FIR filter를 적용한 전향제어방식을 적용하였다. 알고리즘은 FxLMS algorithm을 사용하였으며, DSP 입출력특성 및 실험장치의 특성을 고려하여 일부 수정하였다.

2. 이론적 배경

2.1 적응 디지털 필터

적응 디지털 필터는 크게 두 개의 영역으로 구성되는데 한 부분은 바람직한 신호처리 과정을 수행하는 디지털 필터 부분이고, 다른 하나는 그 필터의 계수나 가중치를 조정하기 위한 적응알고리즘 부분이다.

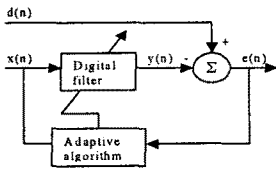


Fig. 1 Adaptive digital filter

Fig. 1은 적응 필터의 일반적인 형태를 나타내었다. 그림에서 d(n)는 기준입력신호이고, x(n)는 마이크로폰으로 감지되는 참조입력신호이다. y(n)는 디지털 필터의 출력신호로 프로그램 실행결과 구해지며, 오차신호 e(n)는 d(n)와 y(n)의 차이로 마이크로폰으로 입력받는다.

적응 알고리즘은 e(n)의 평균제곱 값(MSE)이 점진적으로 최소가 되도록 디지털 필터 계수 w(n)를 샘플링 되는 x(n)과 e(n)신호를 근거로 하여 갱신한다.

본 연구에서 적용한 디지털 필터는 FIR filter로 샘플링 시간 n에서 출력 y(n)는 식(1)과 같이 표현된다.

$$y(n) = \sum_{i=0}^{L-1} w_i(n)x(n-i) \quad (1)$$

식 (1)에서 L은 FIR filter 차수이며, 필터계수 w(n)과 참조입력신호 x(n)은 (L×1)벡터로 다음과 같이 정의된다.

본 논문의 모든 식에서 첨자 T는 transpose를 나타낸다.

$$\mathbf{w}(n) \equiv [w_0(n) w_1(n) \dots w_{L-1}(n)]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{x}(n) \equiv [x(n-0) x(n-1) x(n-2) \dots x(n-(L-1))]^T \quad (3)$$

따라서 식(1)의 y(n)는 벡터연산에 의해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y(n) = \mathbf{w}^T(n)\mathbf{x}(n) = \mathbf{x}^T(n)\mathbf{w}(n) \quad (4)$$

그리고 d(n)와 y(n)의 차이인 오차신호 e(n)도 식(5)와 같이 표현된다.

$$e(n) = d(n) - y(n) = d(n) - \mathbf{x}^T(n)\mathbf{w}(n) \quad (5)$$

2.2 FxLMS 알고리즘

앞막임 FxLMS algorithm의 블록선도는 Fig. 2와 같다. ANC시스템은 전기계와 음향계가 결합되어 작동하는 시스템으로 그림에서 합산표시(Σ)는 원소음과 능동필터의 출력인 스피커 음이 포개어 지는 것을 표시한다. 따라서 시스템을 정확히 제어하기 위해서는 여러 종류의 전달함수가 포함되어야만 한다. 스피커 출력 y(n)와 e(n)사이의 경로를 2차 경로라 하며, 출력음 발생과 잔류음향의 전달 및 감지에 관련된 여러 전달함수 전체를 2차경로 전달함수라 한다. 2차 경로 전달함수에 관련된 인자는 D/A변환기, 출력용 필터, 동력증폭기, 스피커, 스피커와 오차마이크사이의 통로, 오차 감지마이크, 예비증폭기, A/D 변환기 등이 있다. 이와 같은 2차경로의 영향을 보정한 알고리즘을 FxLMS algorithm이라고 한다.

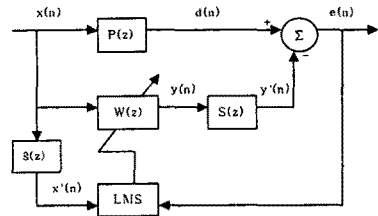


Fig. 2 FxLMS algorithm

2차 경로 전달함수(임펄스 응답) S(z)는 오프라인으로 모델링되도록 하며 그 추정치는 s(z)으로 표시한다. 2차경로의 영향을 보정하기 위하여, 출력 y(n)는 S(z)에 의해 필터링 되며, 참조신호 x(n)는 s(z)에 의해 필터링 된다.

$$y'(n) = s(n)*y(n) = s(n)*[\mathbf{w}^T(n)\mathbf{x}(n)] \quad (6)$$

$$\mathbf{x}'(n) = \hat{s}(n)*\mathbf{x}(n) \quad (7)$$

$$= [x'(n) \ x'(n-1) \ \dots \ x'(n-L+1)]^T \quad (8)$$

위식에서 *는 convolution을 나타낸다. 따라서 오차신호 e(n)는 식 (9)과 같이 표현된다.

$$e(n) = d(n) - y'(n) = d(n) - s(n)*[\mathbf{w}^T(n)\mathbf{x}(n)] \quad (9)$$

능동필터의 목적은 매순간에 계산되는 오차제곱 J(n) = e²(n)를 최소화하는 것이다. 이를 성취하기 위해 필터계수는 step size μ를 이용하여 오차표면의 음의 기울기방향으로 갱신된다. 이를 위해 많이 사용되는 최급강하 알고리즘은

식 (10)과 같이 표현된다.

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) - \frac{\mu}{2} \nabla \hat{v}(n) \quad (10)$$

식 (10)에서 $\nabla \hat{v}(n)$ 은 시간 n 시점에서 최소평균제곱 변화율에 대한 그 순간의 추정치이다. $\nabla \hat{v}(n)$ 은 식 (11)과 같이 쓸 수 있다. $\nabla e(n)$ 는 식 (9)을 $\mathbf{w}(n)$ 로 미분하여 식 (12)과 같이 구할 수 있다.

$$\nabla \hat{v}(n) = \nabla e^2(n) = 2[\nabla e(n)]e(n) \quad (11)$$

$$\nabla e(n) = \frac{\partial e(n)}{\partial \mathbf{w}_l(n)} = -s(n) * \mathbf{x}(n) = -\mathbf{x}'(n) \quad (12)$$

$$\therefore \nabla \hat{v}(n) = -2\mathbf{x}'(n)e(n) \quad (13)$$

식(13)을 식 (10)에 대입하면 FxLMS algorithm은 식 (14)과 같이 구할 수 있다.

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu \mathbf{x}'(n)e(n) \quad (14)$$

2.3 실험에 적용한 Modified-FxLMS 알고리즘

본 실험에 사용한 DSP의 입력신호 범위가 0~2.5v로 제한되었다. 이 입력조건에 맞추기 위해, 0v를 중심으로 +, -값으로 출력되는 마이크 신호에 shift회로를 통과시켜 + 방향으로 1v정도 shift시켜 입력시켰다. 이처럼 shift되어 0~2.5v범위로 입력된 아날로그 data는 DSP CPU 내에서는 0~2¹² (0~4096)범위의 디지털 data로 변환되어 저장된다. 따라서 정확한 필터계수 $\mathbf{w}(n)$ 의 연산처리를 위해서는 변환된 정수형태데이터 x_d 를 실수형태데이터 x_f 로 다시 변환시켜야만 한다. 따라서 DSP내에서 참조신호와 오차신호는 식 (15)을 이용하여 수정된다.

$$x_f = (x_d \times 5/4096) - 1.0 \quad (15)$$

연산 수행결과 산출된 출력값 $y(n)$ 의 정상적인 출력을 위해서는 실수 연산값을 정수값으로 다시 역변환해야 됨은 물론, FxLMS 알고리즘의 특성인 2차경로의 전달특성을 파악하여 프로그램에 추가시켜야 한다. 식 (16)에서 T1, T2, T3은 실험장치의 특성을 반영한 값으로, 닥트길이, 참조마이크와 오차마이크의 위치, 앰프의 전달특성 등에 따라 출력과형을 확인하면서 여러 번의 Trial을 통해 적절히 선정해야 한다.

$$y_d = ((y_f + T1) \times 96/2.5 + T2) \times 3 \quad (16)$$

한편 ANC에서 차수 L 과 step size μ 의 크기에 따라 수렴시간 및 수렴여부에 미치는 영향이 매우 크며, 실제 ANC에서 시스템이 안정적으로 수렴하기위한 L 과 μ 의 관계는 식 (17)을 적용한다.

$$\frac{0.01}{LP_x} < \mu < \frac{0.1}{LP_x} \quad , \quad P_x = E\{x^2(n)\} \quad (17)$$

ECU연산능력, 닥트길이, 컴퓨터시뮬레이션 결과 등을 고려하여 본 결과, 차수 $L=64$ 를 적용하였으며, P_x 는 0.1~4범위로 예측되었고, 이를 식 (17)에 적용할 경우 μ 의 범위는 0.015~0.000078해당된다. 따라서 수렴시간 및 시스템 안정성을 고려하여 본 실험에서는 $\mu=0.0005$ 를 적용하였다. 그 외에도 센서간의 Coherence, Causality condition, 앰프 전달특성 등을 확인하여 알고리즘의 일부를 수정하였다.

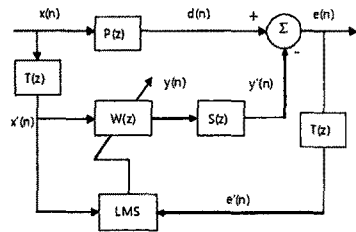


Fig. 4 The modified FXLMS algorithm

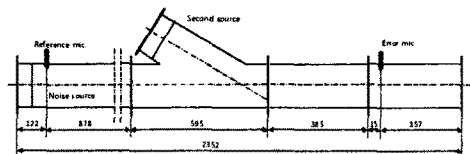
3. 실험장치 및 결과

실험 장치는 닥트와 전기장치로 구분할 수 있으며, ANC 시스템의 실시간 신호처리를 위한 컨트롤러는 Texas Instrument사의 TMS320C6416칩이 부착된 ND-Tech사의 DSP보드를 사용하였다. 실험결과는 FFT 분석결과를 중심으로 파악하였다.

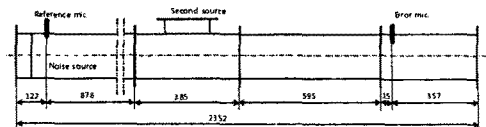
3.1 실험장치

(1) 닥트의 종류 및 구조

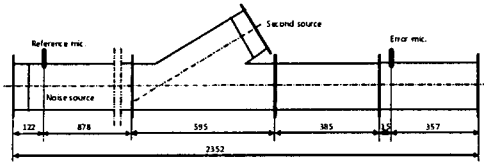
닥트의 종류는 3가지로, 2차음원의 방향을 소음 진행방향에 대해 30°, 90°, 150°방향으로 변경 가능하도록 제작하였다. 닥트의 총길이는 2,352mm이고 참조마이크에서 2차음 스피커까지 거리는 스피커의 설치방향에 따라 978mm ~ 1,373mm까지 조금씩 다르다.



(a) Direction of control speaker, 30°



(b) Direction of control speaker, 90°



(c) Direction of control speaker, 150°
Fig. 5 Structure of duct for examination

ANC system에서 참조마이크에서 2차음 스피커까지 duct 길이 D_L 를 통과하는 소음 전파시간 δ_A 가 전기적 신호 처리시간 δ_E 보다 길어야 한다는 조건이 Causality 조건이다. 여기서 δ_A 와 δ_E 는 식 (18), (19)과 같다.

$$\delta_A = \frac{D_L}{V_n} [\text{sec}] \quad (18)$$

$$\delta_E = \delta_W + \delta_T, (\delta_A > \delta_E) \quad (19)$$

식(19)에서 δ_W 는 필터그룹지연이고 δ_T 는 입출력 관련 전기장치 지연이다. Causality 조건을 확인하기 위하여 90° duct에 Fig. 6과 같이 마이크를 설치하고 출력장치를 통해 2차음 스피커로 정현파 출력을 내보내고 마이크신호가 입력 전기장치를 통해 DSP에 입력되는 신호를 오실로스코프로 검출하였다.

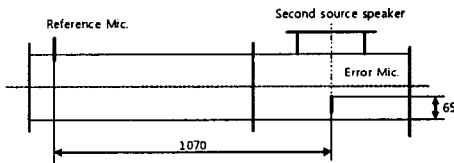


Fig. 6 Verify of causality condition

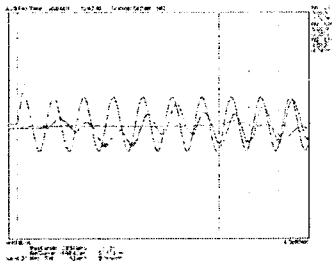


Fig. 7 Signal input time measuring at reference & error mic.

Fig. 7은 센서간의 Coherence 특성 및 전기장치에 의한 지연시간을 알아보기 위한 실험결과의 일부로 Fig. 7에서 맨 윗줄 그래프는 합성발생기에서 발생한 신호이고, 2번째는 참조마이크 입력 신호, 마지막 그래프는 오차마이크 입력 신호이다. 마이크에서 신호감지 초기에 약간의 유동현상이 보이나, 곧바로 입력신호를 정확하게 감지하고 있어 센서간의 Coherence 특성에 문제가 없음을 알 수 있었다.

2차음 스피커로 정현파 출력 후 오차마이크 입력신호는 553 μ sec, 참조마이크신호는 3,353 μ sec 후에 감지되었다. 음속을 343.7m/sec로 할 때 전기장치의 지연시간 분석결과 및 등가의 덕트길이에 대해 정리하면 Table1과 같다.

Table 1 Delay time and equivalent duct length

구분	스피커~마이크까지 소음 전파시간	입/출력 전기장치 소요시간	등가의 덕트 길이
오차마이크 신호	110/343,700 = 320 μ sec	553-320 = 230 μ sec	343.7 \times 230 μ = 79mm
참조마이크 신호	1,070/343,700 = 3,113 μ sec	3,353-3,113 = 240 μ sec	343.7 \times 240 μ = 83mm

Table2는 DSP내에서 연산시간에 대한 분석내용으로, 연산여유를 2배로 하였을 때 총 실행시간은 2.732 μ sec로 예측되었다. 참고로 DSP부담률 8.2%로 예상되었다.

Table 2 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 = 1,636	1,636 \times 1.67 = 2,732nsec	343.7 \times 2.7 = 1mm	2.732 \times 30KHz = 8.2%

Table1과2에서 확인결과와 같이 등가의 덕트길이는 84mm정도로 본 실험에 사용한 덕트는 참조마이크에서 스피커까지 최소 978mm로 Causality 조건을 충분히 만족하였다.

(2) 전기장치류

실험에 사용된 스피커는 HMC사의 승용차용 스피커로 내부저항 4.0 Ω , 평균출력 20W, 직경 175mm인 스피커로 공진점의 주파수 $f=300\text{Hz}$, 저항 $R=4.16\Omega$, 리액턴스 $X=0.0017\Omega$ 로 확인되었다. 차량에 부착시 사용되는 케이스를 그대로 사용함으로써 인클로저기능을 유지하도록 하였다. 참조마이크 및 오차마이크는 동일한 사양으로 직경 15mm의 Audio technic사의 AT805b 모델을 사용하였다. 앰프는 소음원 스피커구동용, 제어음원 구동용, 마이크 신호 증폭용으로 3대를 사용하였으며, 종류는 Inkel사의 RX4010R, GS사 FA-520, Samsung사 RS-750A이며 종류별로 입출력단자간의 전달특성을 확인하였으며, 이를 보정하기위해 반전회로가 사용되었다.

Fig. 8은 실험장치구성 후 두 개의 마이크 신호와 DSP출력이 앰프를 거쳐 스피커로 나가는 출력신호를 실시간으로 확인한 결과로, 출력신호가 참조마이크신호의 역 위상과 거의 유사한 파형이 출력되고 있음을 확인 할 수 있었다. 따라서 입출력 전기장치 및 DSP 내부에서의 신호처리과정에 는 문제가 없는 것을 알 수 있었다.

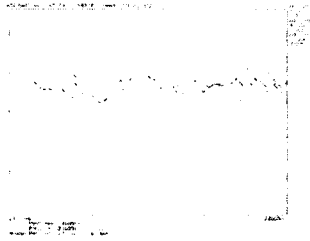


Fig. 8 Input & output signal wave of DSP

3.2 실험 결과

실험은 원소음 진행방향에 대해 2차음원 방향이 30°, 90°, 150°일 경우 배기소음 저감효과에 대해 비교 실험 하였다. 모든 실험에서 앰프의 볼륨은 일정하게 유지하였다.

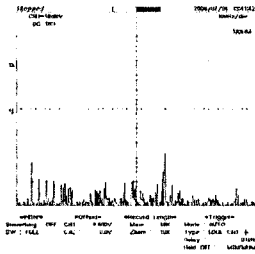
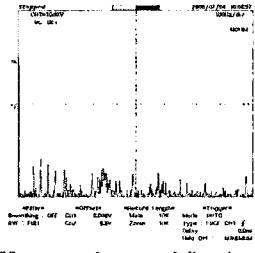
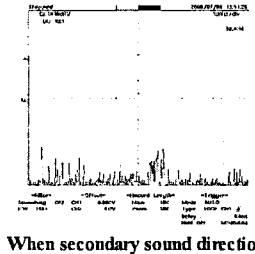


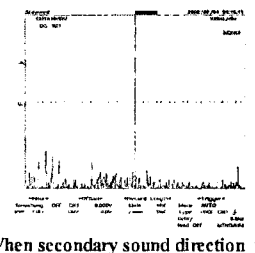
Fig. 9 Automobile exhaust noise at 800rpm



(a) When secondary sound direction is 30°



(b) When secondary sound direction is 90°



(c) When secondary sound direction is 150°

Fig. 10 Attenuation effect according to secondary sound direction on automobile exhaust noise at 800rpm

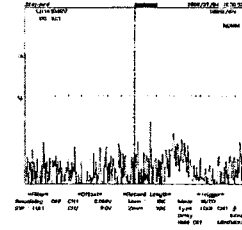
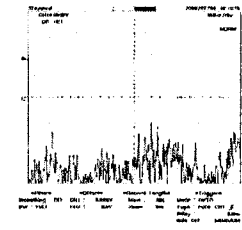
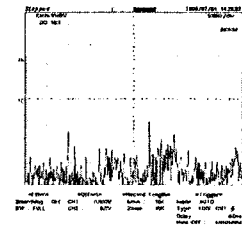


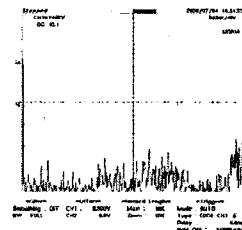
Fig. 11 Automobile exhaust noise at 3500rpm



(a) When secondary sound direction is 30°



(b) When secondary sound direction is 90°



(c) When secondary sound direction is 150°

Fig. 12 Attenuation effect according to secondary sound direction on automobile exhaust noise at 3500rpm

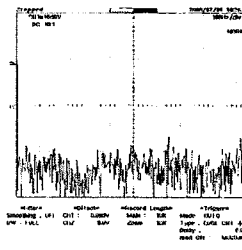
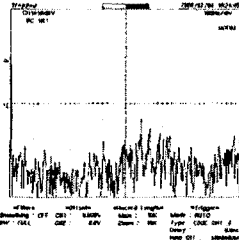
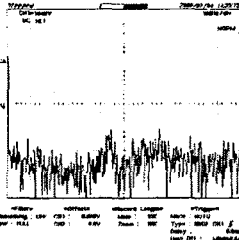


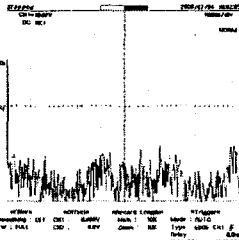
Fig. 13 Automobile exhaust noise at 5000rpm



(a) When secondary sound direction is 30°



(b) When secondary sound direction is 90°



(c) When secondary sound direction is 150°

Fig. 14 Attenuation effect according to secondary sound direction on automobile exhaust noise at 5000rpm

Table 3 Experimental result on noise reduction

2 sound direction	rpm	FFT analysis result on error signal		Remark
		decreasing range	increasing range	
30°	800	610Hz	350Hz	decrease & increase
	3500	-	500-600Hz	
	5000	150Hz	550-620Hz	
90°	800	-	-	a little increase
	3500	-	200Hz	
	5000	-	600-700Hz	
150°	800	600Hz	-	decrease
	3500	600Hz, 700Hz	-	
	5000	100-250Hz, 450-600Hz	-	

실험결과 Table3과 같이 2차음 방향 및 음압에 따라 주파수 영역별로 음압 감소효과가 다르게 나타났다. 이와 같은 원인은 2차음원 방향이 DSP 출력신호가 소리로 바뀌어 원소음과 합성되는 음향적 과정에 영향을 미치고 있는 것으로 예측할 수 있다.

2차음 방향별 배기소음에 대한 실험결과에서는 150°닥트의 경우가 전반적으로 감소효과가 제일 크게 나타났으며,

증가하는 영역은 없었다. 90° 닥트의 경우에는 주파수영역에 따라 증가하는 경우도 발생하였다. 30°닥트의 경우에는 음압과 주파수대별로 소음이 감소하기도 하고 증가하기도 하였다.

90°닥트에서 효과가 없는 것은 원소음 진행방향에 대해 소거용 소음의 방향이 직교(orthogonal)하므로 비교적 상쇄간섭이 잘 일어나지 않는 것으로 추측되며, 150°닥트의 경우에는 완전하지는 않으나 90° 닥트에 비해 상쇄간섭이 보다 쉽게 일어나는 것으로 생각된다. 단지 30°닥트에서 감소효과가 크지 못한 것은 2차음(기본소음 및 고조파 성분)의 반사음이 오차마이크 입력신호에 영향을 미친 것으로 추측된다.

4. 결론

본 연구에서는 ANC system에서 2차음원의 방향에 따라 소음감소효과에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 실험하였다.

실험결과 2차음원의 방향이 소음제거효과에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 결론적으로 본 연구에서 실시한 닥트-음향시스템에서는 2차음원 방향이 150° 일 때 소음저감효과가 제일 큰 것으로 나타났다. 감소효과가 큰 이유는 2차음방향이 150°의 경우 원소음과 2차소음이 비교적 상쇄간섭을 잘 일으킨 효과로 추측된다. 따라서 감소효과를 보다 높이기 위해서는 "Y"형과 같은 닥트 구조를 이용하여 원소음과 2차음이 동일조건에서 합성하고 합성한 이후 두 닥트의 중간방향으로 소음이 진행하도록 한다면 소음감소가 더 클 것으로 생각된다. 2차음원의 방향에 따른 소음감소효과에 미치는 영향에 대해 보다 명확한 결론을 위해서는 소음 감소효과에 영향을 미치는 닥트구조, 필터차수, step size, 참조마이크와 오차마이크의 위치등과 병행한 더 많은 연구가 필요할 것으로 생각한다.

참고 문헌

- (1) Sen M. Kuo, Dennis R. Morgan, 1996, "Active Noise Control System : Algorithm and DSP Implementation", John Wiley & Sons, New York.
- (2) J. H. Woo, I. S. Kim, J.G. Ih, K. J. Kim, 1992, "Active noise control of the plane wave travelling in a duct using filtered -x LMS Algorithm", KSNVE, Vol.2, No.2, pp.107~116.
- (3) O-Cheol Kwon, Gyeong-Tae Lee, Sang-Gil Park, Jung-Youn Lee, Jae-Eung Oh, 2008, "Performance Improvement of active noise control using Co-FXLMS algorithm", KSNVE, Vol.18, No.3, pp.284~292.