
크로스 스펙트럼 기법을 이용한 저레벨 소음의 측정

박창규*, 강경일**

Measurement of low level sound noise using cross spectrum method

Chang-Gyu Bak*, Kyung-Il Kang**

요약

실내 소음의 정확한 측정은 환경소음 관리상에 요구되어 지는 것이나 측정계 자체의 잡음으로 인하여 소음원이 가지는 원래의 잡음이 항상 영향을 받게되는 문제가 있다.

본 연구에서는 새로운 소음레벨 측정기술로서 크로스 스펙트럼법을 사용하여 측정된 신호로부터 측정계가 가지는 잡음을 효과적으로 제거하는 방법을 제안 하였다.

두 개의 측정용 마이크로폰으로 부터 받아들인 신호는 각각의 전치 증폭기를 통하여 A/D 변환기에 의해 디지털 신호화 하여 크로스 스펙트럼을 이 디지털화 된 신호로부터 계산하고 측정계가 가지는 잡음과 소음원의 잡음은 서로 무상관이므로 우리가 원하는 정확한 소음레벨을 측정할 수 있는 것이다.

제안된 기술의 성과는 염가의 상용 마이크로폰으로도 사용할 수 있었기 때문에 실험적으로 그 유효성과 경제성이 입증 되었다.

Abstract

The accurate measurement of the room sound level is required in environment noise control. However, it has been found that the measurement system noise always corrupts the actual noise from the sound source.

In this study, a new sound level measurement technique in which the system noise is eliminated from the measured signal by the cross spectrum method, is proposed.

The received signals of two measuring microphones are recorded to DAT through the pre-amplifier and digitized by A/D converter. The cross spectrum calculated from the digitized signals gives the accurate sound level since the system noise is uncorrelated with the sound source noise which we want to measure.

The performance of the proposed technique is verified experimentally to be effective and the technique is found to be economic since the low cost general purpose microphone could be used in this technique.

* 부산기능대학 메카트로닉스학과 전임강사

** 거창기능전문대학교 전자학과 부교수

접수일자 : 1988년 7월 2일

I. 서 론

저레벨의 암소음을 정확하게 측정하는 것은 환경소음 측정기술에 있어서 매우 중요하다. 소음에 대한 측정 방법으로는 인간의 귀를 이용하여 그 크기를 감지하는 주관적 방법과 소음계, 주파수 분석기, 녹음기 등의 측정기기를 사용한 계량적인 객관적 방법들이 있다[1]. 이들 측정 방법에 대한 문제점으로서 전자는 개인적 차이에 의한 객관성의 문제와 후자의 방법은 측정계 자체의 자기잡음 발생으로 인하여 마이크로폰과 전치 증폭기가 충분한 특성을 갖는 경우를 제외하고는 저레벨의 암소음을 정확하게 측정할 수 없는 문제가 있다.

이에 대한 개선 방안으로서 상호상관법의 주파수 스펙트럼상에서 크로스 스펙트럼법을 사용하여 측정하는 방법을 제안하였다.

이 연구의 배경을 살펴보면 Wisner와 Lee[2]가 상호상관 함수의 이론을 이용 측정 하였으며, Anderson 등[3]은 그 이론에 기초한 실용적 방법을 개발 하였다. 그리고 Goodman, Reswick과[4] Mangolis[5]는 상호상관법을 일반화 하여 측정 하였다. 그후 1965년 Cooley와 Tukey에 의한 고속 푸리에 변환(FFT) 알고리즘의 개발[6]에 의해 주파수 영역에서 크로스 스펙트럼법을 사용한 측정 방법들이 제안되고 있다.

본 연구에서는 두개의 마이크로폰에 의해 픽업한 신호를 크로스 스펙트럼을 장시간 평균함으로써 측정계 내부에서 발생하는 잡음을 효과적으로 감소시키고 실내 공간의 암소음 스펙트럼을 구하여 그 특성을 분석 하고 유효성을 검토 하였으며, 제안된 방법은 시판되고 있는 염가의 마이크로폰과 프리앰프에 의해 구성된 측정 시스템으로 측정계 내부에서 발생하는 열잡음 등을 효과적으로 감소시키고 측정대상 환경의 낮은 레벨의 암소음도 측정이 가능함을 확인 하였다.

II. 크로스 스펙트럼법을 사용한 소음레벨 측정

1. 크로스 스펙트럼법에 의한 잡음감소

실내의 음장은 단일 마이크로폰으로 음압을 측정하는 방법과 두개나 세개의 마이크로폰에 의해

픽업한 신호를 크로스 스펙트럼법을 사용하는 음향 인텐시티 측정 등에 의해 그 특성을 분석한다.

일반적으로 단일 마이크로폰을 사용하여 음압을 측정하는 방법은 상용화된 소음계가 널리 사용되고 있다. 그러나 소음의 레벨이 낮은 측정 환경에서는 마이크로폰과 전치 증폭기(Pre Amplifier)로 구성된 측정 전달계 내부에 열잡음 등의 잡음이 발생할 경우 단일 마이크로폰으로 픽업한 신호에 내부 잡음이 보태어지므로 그 영향을 줄일 수 없다.

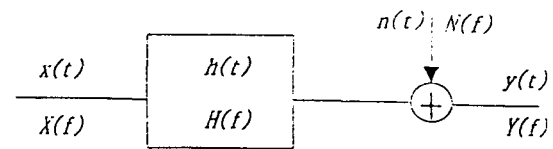


그림 1. 단일 마이크로폰에 의한 측정 전달계의 블록도.

Fig. 1. Block diagram of the measurement transfer system using single microphone.

그림 1은 단일 마이크로폰에 의해 구성된 측정 전달계의 블록도를 나타내며 x(t)는 입력신호인 환경소음이다. 마이크로폰과 전치 증폭기로 구성된 측정 전달계의 임펄스 응답은 h(t), 측정계 내부에서 발생하는 노이즈는 n(t)이고 y(t)는 전치 증폭기의 출력단 신호이며, 식 (1)과 같이 나타낸다.

$$y(t) = x(t) * h(t) + n(t) \dots\dots\dots (1)$$

각 신호에 대하여 푸리에 변환하여 각 주파수에 대하여 출력단 신호 y(t)의 파워 스펙트럼을 구하면 다음 식과 같이 된다.

$$Y(f) = X(f)H(f) + N(f) \dots\dots\dots (2)$$

$$Y(f)Y^*(f) = (X(f)H(f) + N(f))(X(f)H(f) + N(f))^* \dots\dots\dots (3)$$

$$|Y(f)|^2 = |X(f)H(f)|^2 + X(f)H(f)N^*(f) + X^*(f)H^*(f)N(f) + |N(f)|^2 \dots\dots (4)$$

윗 식에서 마이크로폰에 픽업한 신호 x(t)와 측정계 내부에서 발생하는 잡음신호 n(t)가 통계적으로 정상성이고 무상관성이면 2항과 3항은 다수회 평균함으로써 제거된다.

$$|Y(f)|^2 = |X(f)H(f)|^2 + |N(f)|^2 \dots\dots\dots (5)$$

식 (5)에서 측정 전달계의 내부 잡음은 통계적인 특성에 의해 그 크기가 결정되므로 단일 마이크로폰에 의한 저레벨 압소음 측정의 한계이다. 두개의 마이크로폰을 사용한 크로스 스펙트럼법에 의한 저레벨 압소음의 측정 원리는 2개 이상의 시계열 신호에 대하여 두신호 사이의 상호관계를 정량적으로 표현하는 방법으로 시간영역에서 상호 상관법이 있다.

근접한 거리에 설치한 두 마이크로폰에서 픽업된 2종류의 랜덤적인 신호는 시계열 파형은 아주 닮아 보이지만 전파시간만큼 지연되거나 또한 약간 변형하고 있는 경우도 있다. 이와같은 두가지 신호가 불규칙 변동하는 $y_1(t)$ 과 $y_2(t)$ 사이의 시간영역에서 상관성을 조사하는데 상호상관 함수는 다음과 같이 정의되며 τ 는 시간지연을 표시한다.

$$C_{xy}(\tau) = y_1(t)y_2(t + \tau) \dots\dots\dots (6)$$

상호상관 함수를 푸리에 변환하여 크로스 스펙트럼으로 표시하면 식 (7)과 같이 나타낸다.

$$S_{xy}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} C_{xy}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \dots\dots\dots (7)$$

식(7)을 역푸리에 변환하면 다음 식과 같이 상호상관 함수가 된다.

$$C_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{xy}(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega \dots\dots\dots (8)$$

두개 이상의 마이크로폰에 의해 평균 음압과 음향 인텐시티 측정은 각 채널의 신호를 푸리에 변환하여 크로스 스펙트럼법에 의해 측정되며 다른 측정 방법에 비하여 구동신호에 대한 제약이 적은 방법으로서 외래잡음이 존재하여도 평균횟수를 증가시키에 의해 측정 정도(精度)를 향상 시킬 수 있는 방법이다. 그리고 측정 전달계 내부에 발생하는 잡음특성이 다르면 내부잡음의 영향을 크게 감소시킬 수 있다[7].

크로스 스펙트럼을 이용한 잡음 감소의 원리를 그림 2에 나타내었다. 피측정 압소음의 스펙트럼을 $X(f)$, 2개의 마이크로폰계의 전달함수 및 자기 노이즈 스펙트럼을 각각 $H_1(f)$, $H_2(f)$ 및 $N_1(f)$, $N_2(f)$ 라

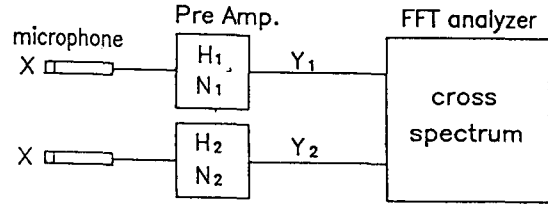


그림 2. 두 개의 마이크로폰에 의한 측정 전달계의 블록도

Fig. 2. Block diagram of the measurement transfer system using two microphone.

하고 각 마이크로폰계에 의한 측정치의 출력 스펙트럼을 $Y_1(f)$, $Y_2(f)$ 라 할 때 입-출력 신호의 시간영역 관계식은 다음 식으로 나타내어지며, *는 컨벌루션(convolution)을 표시한다.

$$y_1(t) = x(t) * h_1(t) + n_1(t) \dots\dots\dots (9)$$

$$y_2(t) = x(t) * h_2(t) + n_2(t) \dots\dots\dots (10)$$

식 (9), (10)을 푸리에 변환하여 주파수 영역에서 나타내면

$$Y_1(f) = H_1(f)X(f) + N_1(f) \dots\dots\dots (11)$$

$$Y_2(f) = H_2(f)X(f) + N_2(f) \dots\dots\dots (12)$$

여기서 $Y_1(f)$ 와 $Y_2(f)$ 의 크로스 스펙트럼은 정의에 따라 다음식으로 유도된다.

$$\begin{aligned} Y_1^*(f)Y_2(f) &= (H_1(f)X(f) + N_1(f))^*(H_2(f)X(f) + N_2(f)) \\ &= H_1^*(f)X^*(f)H_2(f)X(f) + H_1^*(f)X^*(f)N_2(f) \\ &\quad + H_2(f)X(f)N_1^*(f) + N_1^*(f)N_2(f) \end{aligned} \dots\dots\dots (13)$$

그러나 (5)식의 우변 제 2, 3, 4항은 입력 압소음 X와 잡음 N_1 , N_2 는 서로 무상관 관계이므로 크로스 스펙트럼을 장시간 평균함에 따라 0으로 수렴하게 되어 우변 제1항만이 남게 된다. 이것을 M회 가산 평균하면

$$\frac{1}{M} \sum_{k=1}^M Y_{1k}^*(f)Y_{2k}(f) = H_1(f)H_2(f)X^2(f) \dots (14)$$

으로 되어 잡음의 영향을 제거할 수 있게 된다.

그리고 평균횟수 M을 증가 시켰을 때의 S/N 개선

그리고 평균횟수 M 을 증가 시켰을 때의 S/N 개선 비는 다음과 같이 된다. $n(t)$ 의 이산 푸리에 변환 $N(f)$ 는 샘플마다 복소 평면상에서 원점의 주위에 랜덤적으로 분포한다. 따라서 $N_1^*(f) N_2(f)$ 의 평균도 동일한 성질을 가져 그 분산(파워의 2승에 상당)을 σ^2 으로 표시하면 M 회의 평균치 분산은 σ^2/M 으로 된다. 따라서 크로스 스펙트럼에 의한 잡음성분의

감소정도는 \sqrt{M} 에 비례하는 것으로 되어 이것을 대수 표시하면 $10 \log_{10} \sqrt{M}$ 의 음압레벨이 된다[8].

2. 시뮬레이션 실험

시뮬레이션 실험한 결과를 그림 3에 나타냈다. 그림 3(a)는 시뮬레이션 실험용으로 가정한 측정전달

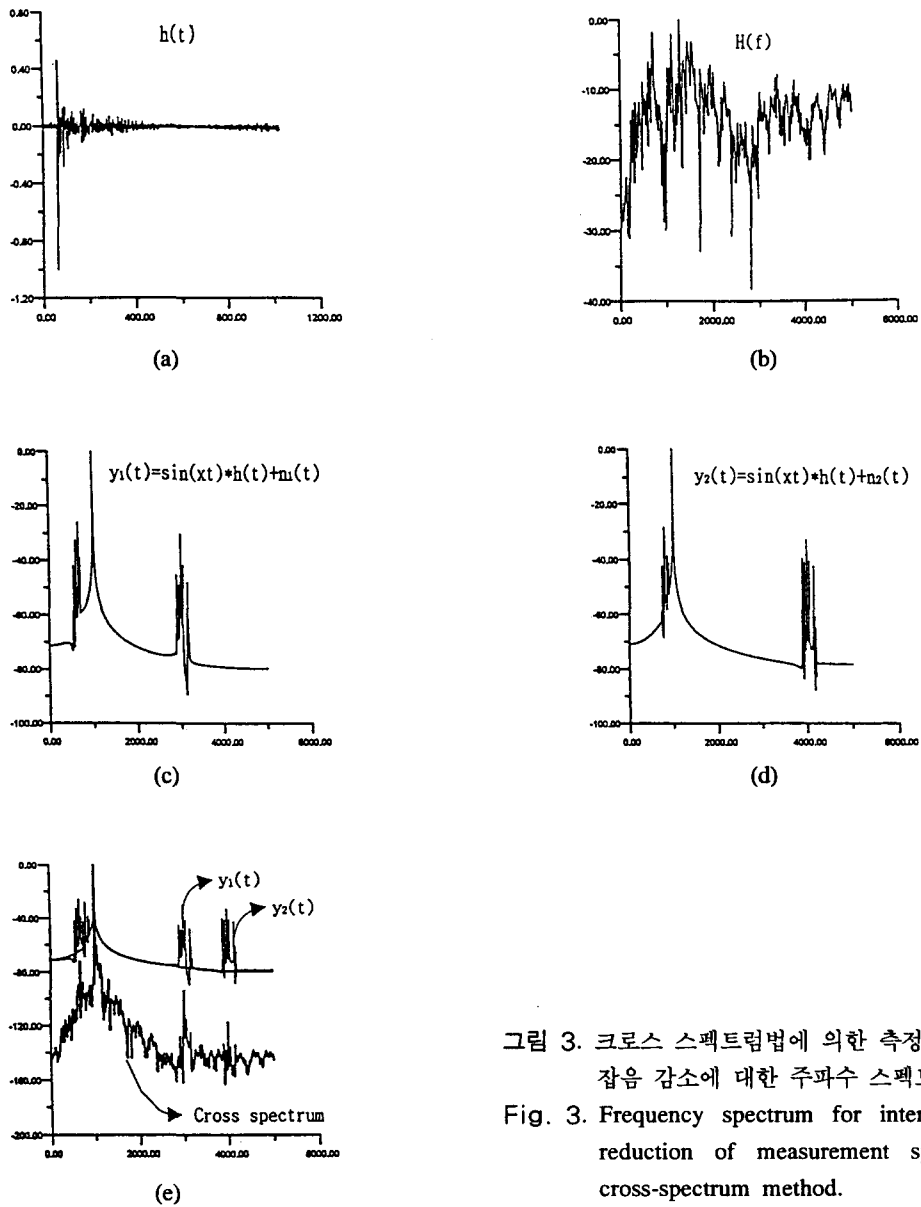


그림 3. 크로스 스펙트럼법에 의한 측정계의 내부 잡음 감소에 대한 주파수 스펙트럼.
 Fig. 3. Frequency spectrum for internal noise reduction of measurement system by cross-spectrum method.

계의 임펄스 응답이다. 그림 3(c)는 정현파가 마이크로폰에 픽업될 때 측정계의 내부잡음 $n_1(t)$ 가 존재할 때 그림 2의 $y_1(t)$ 의 출력 신호의 스펙트럼이고, 그림 3(d)는 측정 공간에서 그림 3(c)와 같이 동일 주파수의 정현파 신호가 마이크로폰에 픽업될 때 측정계 내부잡음 $n_2(t)$ 가 존재할 때 그림 2의 $y_2(t)$ 의 출력 신호의 스펙트럼이다.

결과적으로 그림 3(e)는 $y_1(t)$ 와 $y_2(t)$ 의 신호는 내부에 발생하는 잡음레벨로 인하여 각각 채널의 감도는 낮게 나타났다. 그러나 두 마이크로폰을 사용한 크로스 스펙트럼에 의한 스펙트럼은 양 측정계의 내부잡음을 감소 시키고 그림의 하단은 대상 주파수마다 감도가 높게 정확하게 측정할 수 있다는 식 (13)을 만족하고 있다는 것이 증명되었다.

III. 무향실내 암소음 측정 및 결과

암소음 측정은 실험장소로서 간이 무향실(길이 3.4m×폭 2.5m×높이 2m)을 사용하였고 그림 4는 실험장치에 대한 계통도이다.

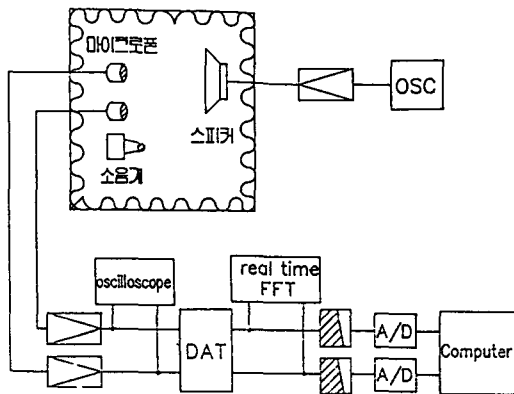


그림 4. 저레벨 암소음 측정 시스템의 블록도.
Fig. 4. Block diagram of low level sound noise measurement system.

암소음을 측정하기 위한 시험신호는 연속적인 정현파와 백색잡음으로서 시험신호는 신호 발생기를 통하여 파워앰프에 의하여 구동스피커를 구동하며 구동스피커에서 방사된 음은 동일 특성의 마이크로폰 2개의 의해 픽업 된다. 이때 구동 스피커와 픽업 마이크로폰간의 거리는 1.5m로 하였다.

픽업 마이크로폰의 출력신호는 전치 증폭기를 통하여 오실로스코프로 관측하면서 DAT에 녹음하고 이 녹음된 신호를 A/D 변환하여 마이크로 컴퓨터에 입력 하였다. 이때 A/D 변환은 DSP 보드(TMS 320 C25 chip내장)를 사용하였으며 샘플링 주파수는 48KHz, 샘플링 점수는 65,536점으로 하였고, 무향실내의 암소음 레벨을 마이크로폰으로 측정할 것과 비교하기 위하여 일반소음계로 측정 하였다.

실험에 사용한 마이크로폰은 콘덴서 마이크로폰 3종류를 사용하였고 각 마이크로폰의 특성을 비교한 것은 표 1에 나타내었다. (이하 각 마이크로폰을 C1, C2, C3로서 표기하도록 한다.)

표 1. 각 마이크로폰의 특성 비교

Table 1. Characteristics comparison of each microphone.

MIC 종류 특성	CMT - 760 (C1)	AT 805 (C2)	B&K 4135 (C3)
감도	-60 ± 2dB (0dB = 1V/ μ bar, 1kHz)	-68 ± 3dB	-48dB 1V / Pa, 1kHz
frequency range	30 ~ 16,000Hz	50 ~ 15,000Hz	2.6 ~ 140,000Hz
S/N 비	40dB 이상	50dB 이상	-
지향특성	무지향성	무지향성	무지향성

1. 마이크로폰의 배치

마이크로폰은 그 배치에 의해 측정결과가 다르게 나타나는데 마이크로폰을 같은 방향으로 밀착시킨 경우는 거의 잡음 감소가 이루어지지 않고 평균화수를 증가 하더라도 곧 포화되고 만다. 이것은 마이크로폰막이 전기적인 잡음에 의해서 진동되고 미소한 음을 방사하는 것으로 2개의 마이크로폰이 음향적으로 결합을 할 수 있기 때문이라고 생각된다. 이 영향을 제거하기 위해서는 2개의 마이크로폰을 충분히 떨어지게 하면 좋지만 그렇게 하면 고주파 영역에서의 측정 정도(精度)가 보정되지 않는다. 따라서 본 실험에서는 배치형태를 그림 5와 같이 대향배치와 평행배치로 나누고 다시 각 배치형태에 따라서 2개의 마이크로폰간 거리를 서로 밀착시킨 것에서부터 1m까지 8가지의 거리별로 나누어 실험을 하였다.

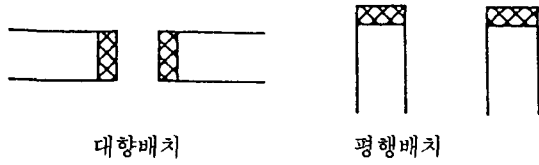


그림 5. 마이크로폰의 배치형태.
Fig. 5. Disposition form of the microphone.

실험의 결과 C1에서는 대향배치에서 마이크로폰 간의 거리가 2cm일때와, 평행배치에서 마이크로폰 간의 거리가 10cm일때 가장 이득이 높았고 C2에서는 대향 5cm와 평행 1cm, 그리고 C3에서는 많은 차이는 없으나 대향 5cm와 평행접촉일때가 가장 이득이 높은 결과를 나타내었다.

2. 압소음 측정결과

각 마이크로폰의 종류별로 위와 같이 이득이 가장 높은 배치형태와 마이크로폰간의 거리에 대해서 무향실내의 압소음을 평균회수 128회의 크로스 스펙트럼에 의한 주파수 분석한 결과를 그림 6, 그림 7, 및 그림 8에 이득이 가장 높은 배치형태와 거리에 대한 것만 나타내었으며, 결과는 각 마이크로폰이 배치형태에 따라 비슷한 결과가 나타났다. 그리고 C1에서는 대향배치일때가 평행배치 보다 약

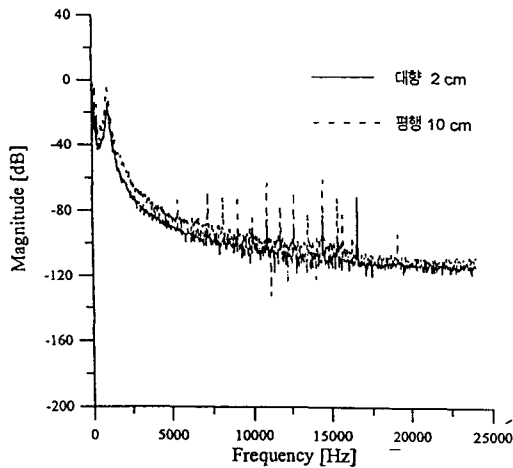


그림 6. C1에 의한 저레벨 압소음의 측정.
Fig. 6. Measurement of low level sound noise by C1.

간 낮은 압소음 레벨을 나타내고 있고 C2, C3에서는 평행배치일때가 대향배치일때 보다 낮은 압소음 레벨을 나타내고 있다.

그림 6의 C1에 의해 측정된 주파수 스펙트럼상 1kHz 부근에서 마이크로폰 자체의 공진현상이 나타나고 있었다.

다음으로 압소음 측정에 있어서 배치형태별로 각 마이크로폰의 크로스 스펙트럼에 의해 측정된 것과 감도가 높은 C3 마이크로폰 하나로 측정된 것을 서로 비교한 결과를 그림 9, 그림 10에 나타냈다.

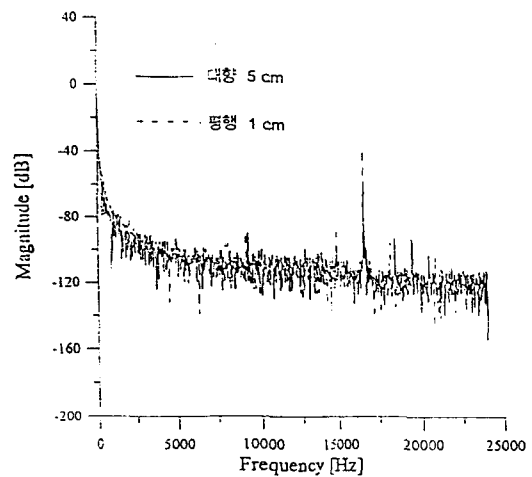


그림 7. C2에 의한 저레벨 압소음의 측정.
Fig. 7. Measurement of low level sound noise by C2.

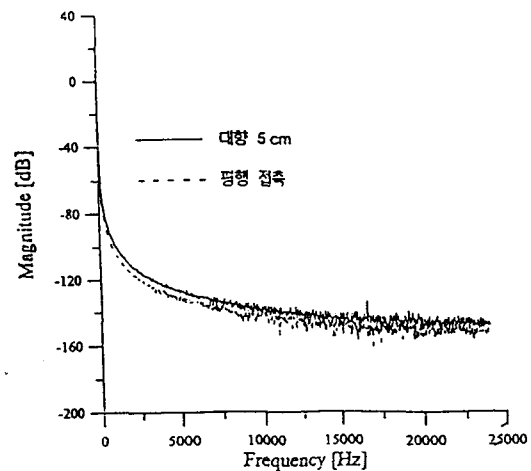


그림 8. C3에 의한 저레벨 압소음의 측정.
Fig. 8. Measurement of low level sound noise by C3.

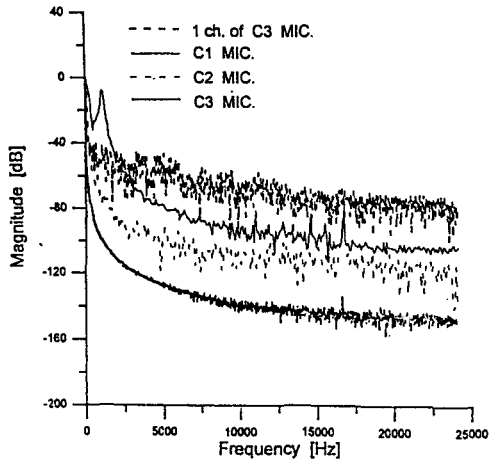


그림 9. 대향배치에 의한 각 마이크로폰의 압소음 레벨.

Fig. 9. Sound noise level of each microphone at face to face disposition.

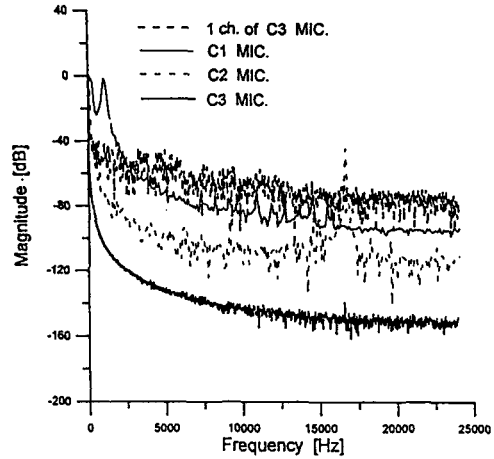


그림 10. 평행배치에 의한 각 마이크로폰의 압소음 레벨.

Fig. 10. Sound noise of each microphone at parallel disposition.

그림 10에서 C1, C2에 의한 압소음 레벨은 -100 dB정도이고 C3에 의한 압소음 레벨은 -140dB정도 나타나았다. 반면 감도가 우수하다고 해도 C3하나로 측정할 압소음 레벨이 -60dB정도로서 두개의 마이크로폰을 이용한 크로스 스펙트럼법으로 측정하는 본 방법이 더 낮은 레벨의 압소음을 측정하는데 유효한 것임을 알 수 있었으며, 표 2에 각 마이크로폰의 종류별로 측정할 압소음 레벨을 나타내었다.

표 2. 각 마이크로폰의 압소음 측정값
Table 2. Measurement value of low level sound noise of each microphone.

종 류	압소음 측정값[dB]	비 고
CMT-760 (C1)	-60 ~ -100	소음계 측정값 55 dB
AT 805 (C2)	-80 ~ -110	
B&K 4135(C3)	-100 ~ -140	

IV. 결 론

본 연구에서는 실내와 같은 환경내의 저레벨 압소음 측정을 하는 새로운 방법으로서 두 마이크로폰을 사용하여 픽업된 신호를 푸리에 변환하여 크

로스 스펙트럼법에 의해 음압을 측정하는 방법을 제안하고 몇 종류의 마이크로폰을 선정 실험하여 그 유효성을 확인하였다.

CMT-760(C1), AT 805(C2), B&K 4135(C3)의 마이크로폰 종류별로 실험한 결과 단일 마이크로폰으로 측정 하였을 때는 각각 -40dB, -50dB, -60dB로 측정되었고 두 마이크로폰으로 측정하여 크로스 스펙트럼 하였을 때는 각각 -60 ~ -100dB, -80 ~ -110 dB, -100 ~ -140dB로 측정되었다. 이 음압레벨에 대해서는 정규화 되어야 한다.

따라서 제안된 방법으로 실내의 저레벨 압소음을 시중의 일반 마이크로폰으로도 측정계가 가지는 잡음을 효과적으로 감소 시키고 저레벨의 압소음 측정이 가능하여 경제적이고 손쉽게 압소음을 측정할 수 있음을 확인 하였다.

참고문헌

- [1] 정일록 : "소음진동 이론과 실무", 신광 문화사, pp.203-215, 1995.
- [2] J.B.Wiesner and Y.W.Lee : "Experimental determination of system functions by the method of correlation", presented at IRE National

- Convention, New York, N.Y., March, 1950
- [3] G.W.Anderson et al. : "A self-adjusting system for optimum dynamic performance", IRE National Convention Record, Pt.4, pp.182-190, 1958
- [4] T.P. Goodman and J.B.Reswick : "Determination of system characteristics from normal operating records", Trans. ASME, Vol.78, pp.259-271, 1956-2.
- [5] S.G.Mangolis : "Measurement of Industrial Process Behavior", Quarterly Process Rept., REseach Lab. of Electronics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass., pp.42-46, 1956-4.
- [6] J.W.Cooley and J.W.Tukey : "An algorithm for the machine calculation of complex Fourier Series", Math. Comp., Vol.19, No.90, pp.297-301, 1965.
- [7] 김천덕, Masato Abe, Kenitokido : "DFT를 이용한 잔향이 긴 음향 전달계의 임펄스 레스폰스 추정에 관한 연구", 한국 음향학회지, Vol.7, No.2, pp.26-38, 1988.
- [8] Takahito Ono, Hiroyuki Katayama and Hideo Suzuki : "Detection of frequencies and power spectra of a periodic signal buried in noise by a cross-spectrum method", J. Acoust. Soc. Jp., Vol.44, No.2, 1988.
- [9] 김천덕 : "음향 전달계의 임펄스 레스폰스 측정과 그 응용에 관한 연구", 동북대학 심사 박사 학위논문.
- [10] 장재희 : "IB 사무소에서의 대화 프라이버시를 위한 암소음 마스크 시스템의 적용 방법에 관한 연구", 연세 대학교 건축공학과 석사 학위논문, 1992.
- [11] 越川常治 : "信号解析 入門", 近代 科學社, pp.56-57
- [12] Emmanuel C. Ifeachor, Barrie W. Jervis : "Digital Signal Processing", Addison-Wesley, 1993.
- [13] Alan V. Oppenheim, Ronald W. Schaffer : "Digital Signal Processing", Prentice Hall, 1994.
- [14] 이채욱 : "디지털 신호처리", 청문각, 1994.
- [15] 임제탁, 이두수 : "디지털 신호처리", 희중당, 1995.
- [16] 차일환 : "음향공학 개론", 한신 문화사, 1980.



강 경 일(Kyung-Il Kang)

1991년 2월 경일대학교 전자공학과(학사)

1993년 2월 경남대학교 대학원 전자공학과(석사)

1997년 8월 경남대학교 대학원 전자공학과(박사)

1975년 3월~1984년 6월 금오공업고등학교 전자과 교사
1984년 7월~1997년 2월 창원기능대학 전자학과 부교수

1997년 2월~현재 거창기능대학 전자학과 부교수

* 주관심분야 : 무선통신 및 회로설계



박 창 규(Chang-Gyu Bak)

1997년 2월 부경대학교 산업대학원 전자공학과(석사)

1998년 8월 현재 부산 기능대학교 메카트로닉스학과 전임강사

* 주관심분야 : 신호처리 및 제어계측