

에어컨 실내기에서 발생하는 충격 소음원의 위치 추정

Source localization of impact noise on an indoor unit of air-conditioner

최영철*·김양한**·이종구***·김구영***

Young-Chul Choi, Yang-Hann Kim, Jong-Ku Lee, Ku-Young Kim

Key Words: Source identification(소음원 규명), Beamforming method(빔형성방법), Impact source(충격 소음원), air-conditioner(에어컨)

ABSTRACT

An air-conditioner has various noise sources such as cooling fan noise, pumping noise, flow noise and impact noise. Among these, impact noise is the most unpleasant source. This is because the noise is produced in indoor unit of air-conditioner. To control the noise source effectively, first we must identify the noise sources. When we identify impact noise source, the measurement have to be carried out simultaneously. So we use beamforming method that requires less measurement points than intensity method and acoustic holography. The objective of this paper is to estimate the location of impact source. This objective can be achieved by using minimum variance cepstrum that is able to detect impulse embedded in noise. In this study, modified beamforming method based on cepstrum domain is proposed. Then this method applied to air-conditioner noise sources which produce impact noise.

- 기호설명 ————
- P_{beam} : 빔형성 파워
 - $p(t)$: 시간 영역에서의 음압신호
 - $h(t)$: 시스템의 임펄스 응답함수
 - $\delta(t)$: Dirac 델타 함수
 - τ : 시간 지연
 - $n(t)$: 노이즈
 - $P(\omega)$: $p(t)$ 를 푸리에 변환한 값
 - $H(\omega)$: $h(t)$ 를 푸리에 변환한 값
 - $N(\omega)$: $n(t)$ 를 푸리에 변환한 값
 - T : 충격신호 사이의 시간지연
 - θ_s : 1차원에서 소음원의 위치
 - F_{MV} : 최소분산 켈스트럼
 - \mathbf{R} : 상관 행렬(correlation matrix)
 - \mathbf{W} : 스캔 벡터(scan vector)
 - H : 허미션(Hermitian)
 - P : 밴드 리프터의 차수
 - d : 마이크로폰 사이의 간격
 - M : 충격 신호의 개수
 - c : 음속 (wave speed)

- λ : 파장 (wave length)
- ξ^2 : 노이즈의 분산
- A : 음압신호의 크기

1. 서론

에어컨에서 발생하는 소음으로 실외기에서 발생하는 냉각팬 소음, 펌프 소음 등이 있으며 실내기에서는 유동 소음, 충격 소음 등이 있다. 특히 에어컨 실 내기는 건물 내에 설치 되어 있어 실내기에서 발생하는 소음은 직접적으로 사람들에게 불쾌감을 줄 수 있기 때문에 소음제어 대한 필요성이 생기게 된다. 이러한 소음을 효과적으로 줄이기 위해서는 소음원의 규명이 선행되어야 할 것이다.

충격 소음원을 규명할 때는 모든 센서가 동시에 측정되어야 하기 때문에 센서의 개수에 대한 제한을 받게 된다. 따라서 적은 수의 마이크로폰을 사용하여 소음원의 위치 및 세기를 구할 수 있는 방법이 필요하게 된다. 이러한 요구조건을 만족하면서 소음원을 규명할 수 있는 방법으로 빔형성 방법[1]이 있다. 이 방법은 센서 어레이를 사용하기 때문에 인텐시티 방법[2], 음향 홀로그래피 방법[3] 등에 비해 시간과 노력이 적게 드는 장점이 있다. 본 연구에서는 센서 어레이를 이용한 가장 대표적인 방법인 빔형성 방법을 사용하여

* KAIST
E-mail : youngcc@kaist.ac.kr
Tel : (042) 869-3065, Fax : (042) 869-8220

** KAIST

*** LG 생산 기술원

충격 소음원 규명에 적용하고자 한다.

각 마이크로폰에서 측정되는 신호에 음원의 모델에 따라 위상보정을 하여 얻은 신호 파워로부터 음원의 입사각 또는 위치를 찾는 방법을 빔형성 방법이라 하고, 다음 식과 같이 정의 된다.

$$P_{beam} = \mathbf{W}^H E [\mathbf{P} \mathbf{P}^H] \mathbf{W} \quad (1)$$

$$= \mathbf{W}^H \mathbf{R} \mathbf{W}$$

여기서 P_{beam} 은 빔형성 파워 (beamforming power)를 의미한다.

식(1)은 \mathbf{R} 즉 마이크로폰 어레이에 측정된 신호의 공간상 특성과 가장 잘 일치하는 \mathbf{W} 를 찾아내는, 즉 빔형성 파워가 최대가 되는 \mathbf{W} 를 찾는 것이 소음원 혹은 음원의 위치를 찾는 것임을 이야기하고 있다. 결국은 선택하는 \mathbf{W} 가 얼마나 실제 음압 신호의 공간상 특성 (\mathbf{R})과 유사한가가 탐지의 성공여부를 좌우한다

따라서 빔형성 방법은 음원의 위치를 규명하는데 있어 스캔 벡터가 그 성능을 좌우함을 쉽게 알 수 있다. 예를 들어 음원이 멀리 존재하여 파면 (wave front)이 평면처럼 전파 된다면 스캔 벡터는 평면파 모델에 기초하여 표현할 수 있다. 하지만 음원이 측정점 가까이 존재하게 되면 파면은 구형처럼 전파 되기 때문에 스캔 벡터는 구면파 모델 [2]을 이용하여 표현할 수 있다. 이와 같이 어레이를 이용한 음원 탐지법에서 음원의 위치를 찾는 문제는, 곧 스캔 벡터가 실제 음원에 의해 형성된 음장을 얼마나 잘 표현하는가와 직결되어 있음을 알 수 있다. 따라서 소음원에서 충격소음을 발생시키더라도 스캔 벡터를 잘 모델링하여 기존의 신호처리 방법을 보완한다면 음원의 위치를 탐지할 수 있음을 쉽게 생각할 수 있다. 우선 충격 신호의 특성에 대해 알아 보도록 한다.

2. 충격 소음원 위치 추정

충격신호는 그림 1(a)와 같이 한 개 발생하는 경우도 있지만, 회전 기계 결합처럼 주기적으로 충격신호가 발생하여 그림 1(b)와 같은 형상의 신호도 존재하게 된다. 이러한 신호들은 다음 식들과 같이 표현할 수 있는데

$$p(t) = h(t) * \delta(t - \tau) \quad (1)$$

$$p(t) = h(t) * \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(t - \tau - m \cdot T) \quad (2)$$

시스템의 임펄스 충격 응답과 임펄스의 컨볼루션으로 표현됨을 알 수 있다. 시간 지연을 의미하는 τ 는 소음원의 위치에 따라 마이크로폰에서 얻은 값이 다르기 때문에 이것을 이용하여 충격소음의 위치를 찾게 된다.

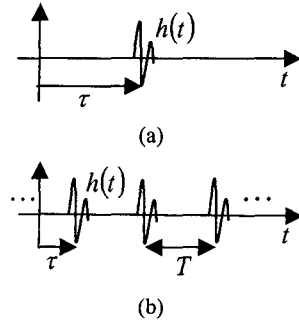


Fig. 1 충격신호의 종류 (a) 충격신호가 한 개인 경우 (b) 충격신호가 주기적으로 나타나는 경우

2.1 어레이가 느끼는 일반적인 소음과 충격 소음의 차이

그림 2 은 일반적인 소음원의 형태인 $y = Ae^{-j(\omega t - kx)}$ 와 충격 소음인 (1)식과 같은 평면파가 진행할 때 어레이 센서가 느끼는 파(wave)의 형태를 보여주고 있다. 그림 2(a)처럼 일반적인 소음원으로부터 파장이 λ 인 평면파가 전파될 경우 센서 어레이는 파장이 $\frac{\lambda}{\sin \theta}$ 로 느끼게 되지만, 임

펄스 신호일 경우에는 임펄스 신호가 속도 $\frac{c}{\sin \theta}$ 를 가지고 어레이 방향(x 축 방향)으로 진행하는 것처럼 느끼게 된다. (그림 2(b))

따라서 소음원의 형태가 다른 위 두 경우에는 그 위치를 찾는 방법에는 차이가 생기게 된다. 일반적인 소음원일 경우는 센서에서 얻은 신호와 파장을 변화가면서 얻은 스캔함수(scan function)을 비교해가면서 소음원의 위치를 추정하게 된다. 하지만 임펄스일 경우는 그림 2 (b)처럼 임펄스의 속도를 변화가면서 만든 스캔 함수를 이용해야 함을 짐작할 수 있다.

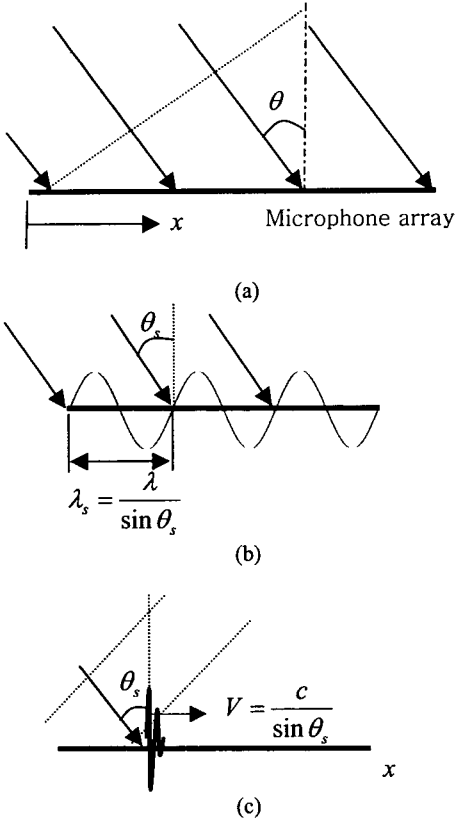


그림 2. 마이크로폰 어레이가 느끼는 신호의 형태 (a) 1차원 평면파가 전파될 때의 소음원 위치 추정 (b) 일반적인 소음원일 경우 어레이 센서는 파장이 $\frac{\lambda}{\sin \theta_s}$ 인 신호로 인식. (c) θ_s 에서 임펄스 신호가 입사 될 때 센서 어레이에서 느끼는 신호의 형태. 임펄스가 속도 $\frac{c}{\sin \theta_s}$ 를 가지고 x 축으로 이동하는 것처럼 보임.

2.2 충격 소음원 위치 추정

이 절에서는 식(1)과 (2)와 같이 충격신호를 발생하는 소음원의 위치를 추정하는 방법에 대해 이론적으로 알아 보기로 한다.

우선 어레이 선상에서 거리 x 만큼 떨어진 마이크로폰에서 얻는 음압신호를 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$p_x(t) = h(t) * \delta(t - \tau_x) + n(t) \quad (3)$$

이 식을 푸리에 변환(Fourier transform)을 취하여 주파수 영역에서 관찰하여 보면

$$P_x(\omega) = H(\omega) \cdot e^{j\omega \tau_x} + N(\omega) \quad (4)$$

와 같이 된다. 기준 마이크로폰에 대한 전달함수를 구하면 다음 식과 같이 노이즈 속에 조화 함수가 섞여 있는 형태가 된다.

$$\frac{P_x(\omega)}{P_r(\omega)} = e^{j\omega(\tau_x - \tau_r)} + N'(\omega) \quad (5)$$

만약 $P_r(\omega) = P_{x=0}(\omega)$ 로 둔다면

$$\frac{P_x(\omega)}{P_0(\omega)} = e^{j\omega(\tau_x - \tau_{x=0})} + N(\omega) = e^{j\omega \frac{x}{c} \sin \theta_s} + N(\omega) \quad (6)$$

와 같이 된다.

(6)식에서 보여 주듯이 노이즈 속에서 조화함수의 주기를 찾으면 소음원의 위치에 대한 정보 θ_s 를 얻을 수 있다. 따라서 주파수 영역에서 최소분산 캡스트럼[5]방법을 적용하면 소음원의 위치에 대한 정보를 얻을 수 있다.

$$F_{MV}(\tau) = \frac{\frac{\xi^2}{1+p} + 1}{1 + \frac{1}{\xi^2(1+p)} \left\{ (1+p)^2 - \left| \sum_{k=0}^p e^{j\left(\tau - \frac{x}{c} \sin \theta_s\right)k} \right|^2 \right\}} \quad (7)$$

(7)식은 (6)식을 최소 분산 캡스트럼식에 대입하여 캡스트럼 영역으로 변환하는 식이다.

앞 절에서 빔형성 방법으로 음원을 탐지할 때는 스캔함수가 중요한 요소임을 알았다. 소음원에서 충격 신호를 발생 시키더라도 스캔 함수를 잘 모델링하여 빔형성 방법을 보완한다면 음원의 위치를 탐지할 수 있음을 알 수 있다.

충격 소음의 위치 추정에서 중요한 것은 위상(phase)에 해당하는 충격 신호의 시간 지연이기 때문에 스캔함수는 다음 식과 같이 캡스트럼 영역에서 임펄스로 모델링 할 수 있다.

$$W(\tau) = \frac{1}{\sqrt{L}} \delta\left(\tau - \frac{x}{c} \sin \theta\right) \quad (8)$$

(7)식과 (8)식을 곱하여 x 에 대해 적분을 수행하면 다음 식과 캡스트럼 영역에서 빔형성 파워를 유도할 수 있다.

$$P_{beam}(\tau, \theta) = \frac{1}{L} \left| \frac{\frac{\xi^2}{1+p} + 1}{1 + \frac{1}{\xi^2(1+p)} \left\{ (1+p)^2 - \sum_{k=0}^L e^{jk\tau \left(\frac{1 - \sin \theta_s}{\sin \theta} \right)^2} \right\}} \right|^2 \quad (9)$$

위 식은 $\theta = \theta_s$ 일 때와 아닐 때를 나누어 보면 다음 식과 같이 간략히 나타낼 수 있다.

$$P_{beam}(\theta) \cong \begin{cases} \frac{\xi^2}{1+p} + 1 & ; \theta = \theta_s \\ \frac{\xi^2}{1+p} & ; \theta \neq \theta_s \end{cases} \quad (10)$$

따라서 p 가 커짐에 따라 소음원의 위치인 $\theta = \theta_s$ 에서는 1로 수렴하지만, 다른 곳에서는 감소하게 되어 노이즈 속에서 소음원의 위치를 찾을 수 있게 됨을 수식에서 알 수 있다.

그림 3은 $\theta_s = 10^0$ 일 때 (9)식을 그래프로 표현한 것이다.

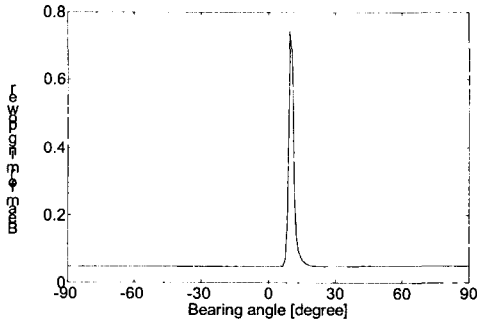


Fig. 3 (9)식에서 $p=20, \tau=0.1, \xi^2=1$, 소음원의 위치 $\theta_s = 10^0$ 일 때의 그래프

3. 이산 영역에서 충격 소음원의 위치 추정

지금까지 마이크로폰 어레이에 연속적인 음압 분포를 알고 있을 때 충격소음을 추정하는 방법에

대해 살펴 보았다. 하지만 현실적으로는 마이크로폰의 개수에 의한 제한 때문에 공간상에서 일정한 간격으로 신호를 샘플링하게 된다. 이 장에서는 (7)식을 이용한 상관 행렬 및 (8)식에 해당하는 스캔 벡터를 이산 영역에서 구성하는 방법에 대해 살펴 보기로 한다.

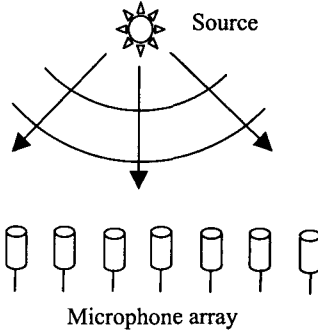


Fig. 4 2차원 일 경우 마이크로폰 어레이에서 얻게 되는 충격 신호

그림 4와 같이 2차원일 경우의 상관 행렬은

$$R(\tau) = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & \cdots & F_{1M} \\ F_{12} & F_{22} & \cdots & F_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ F_{M1} & F_{M2} & \cdots & F_{MM} \end{bmatrix} \quad (13)$$

와 같이 쓸 수 있고 여기서

$$F_{ij}(\tau) = \frac{\frac{\xi^2}{1+p} + \left(\frac{A_i}{A_j} \right)^2}{1 + \left(\frac{A_i}{A_j} \right)^2 \frac{1}{\xi^2(1+p)} \left\{ (1+p)^2 - |\mathbf{e}\mathbf{e}^H| \right\}} \quad (14)$$

와 같이 크기 항 A_i 를 포함하게 된다.

스캔 벡터는 거리에 대한 감쇠항도 고려해야 하기 때문에 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{w} = \frac{1}{\sqrt{M}} \left\{ \delta(\tau - T) \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \delta\left(\tau - T - \frac{d \sin \theta}{c} \right) \cdots \left(\frac{A_M}{A_1} \right)^2 \delta\left(\tau - T - \frac{(M-1)d \sin \theta}{c} \right) \right\}^T \quad (15)$$

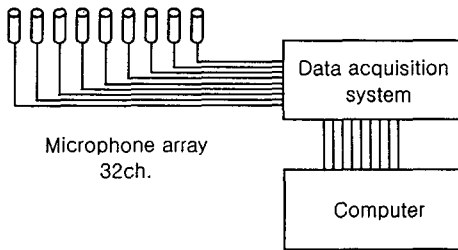
따라서 마이크로폰 어레이에서 얻은 신호를 (13) 식과 (15)식을 이용하여 빔형성 방법의 일반식인 (1)식에 대입한다면 충격소음원의 위치를 추정할 수 있게 된다.

4. 에어컨 소음원 위치 추정 실험



(a)

Indoor unit of air-conditioner

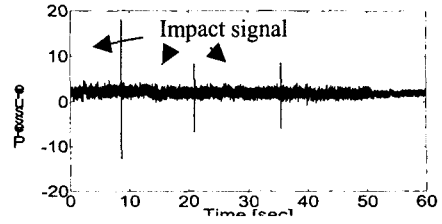


(b)

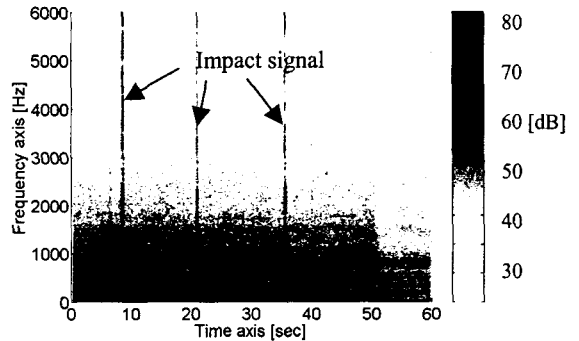
Fig. 5 소음원 추정 실험 장치 셋업 (a) 실험 사진, (b) 실험 장치 계략도.

앞에서 유도한 이론적인 내용을 에어컨 실내기에서 발생하는 충격 소음에 적용하였다.

총 32 개의 마이크로폰을 사용하여 어레이를 구성하였다. 어레이는 수평 방향뿐만 아니라 수직 방향의 분해능(resolution)을 고려하여 그림 5 (a)와 같이 + 형태로 구성하였다. 어레이에서 얻은 신호는 데이터 레코더를 사용하여 12.8kHz 로 샘플링하여 60 초간의 데이터를 얻었다. 어레이와 에어컨 사이의 간격은 100mm 이다.

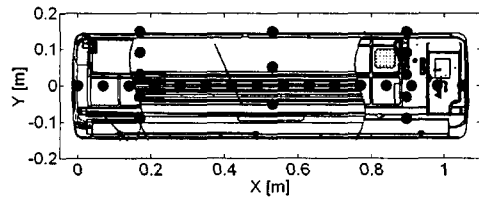


(a)

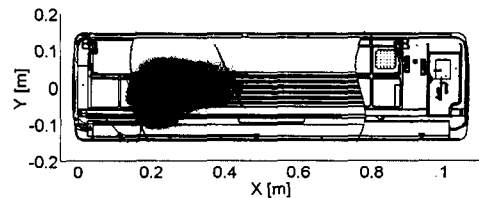


(b)

Fig. 6 온풍 후 송풍운전일 때 에어컨 실내기에서 발생하는 충격 소음. (a) 음압신호, (b) 음압신호에 대한 시간 주파수 해석



(a)



(b)

Fig. 7 에어컨 실내기 정면 실험 (a) 마이크로폰 어레이 위치, (b) 충격 소음원 위치 추정 결과

그림 6 은 에어컨 실내기에서 발생하는 충격 소음을 측정된 결과를 보여 주고 있다. 그림 6(a)의 음압 신호의 7 초, 19 초, 32 초, 44 초, 56 초 등에서 충격 신호를 관찰할 수 있다. 이러한 신호는 그림

6(b)의 시간-주파수 분석을 한 결과에서 더 잘 볼 수 있다. 충격 신호는 넓은 주파수 대역을 가진 시 키기 때문에 그림 6(b)그림 7 초, 19 초, 32 초, 44 초, 56 초에서 처럼 나타나게 된다.

그림 7 (a)는 에어컨 실내기 정면에서 실험할 때 마이크로폰 어레이 형상을 보여 있고 이때 실험한 결과를 그림 7(b)에서 보여 주고 있다. 에어컨 실내기에서 발생하는 충격 소음원의 위치는 실내기의 좌측 중앙임을 쉽게 알 수 있다.

그림 8은 측면에 대한 실험 결과를 보여 주고 있다. 측면에 대한 실험에서 어레이 형상은 그림 7.(a)와 같이 총 30 개의 마이크로폰으로 구성하였다. 식 (14)와 (15)를 적용하여 소음원의 위치를 추정하면 그림 7(b)과 같은 결과를 얻을 수 있다.

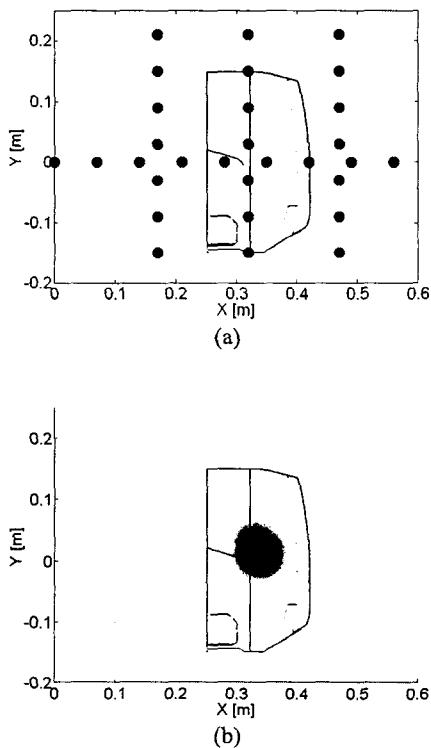


Fig. 8 에어컨 실내기 측면 실험, (a) 마이크로폰 어레이 위치, (b) 측면 충격 소음원 위치 추정 결과

그림 7 과 그림 8 에서의 실험 결과에 따르면 에어컨 실내기의 충격 소음은 팬의 연결 부위에서 발생함을 유추 할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 빔형성 방법을 통해 충격 소음원을 추정하는 방법에 대해 소개하고 에어컨 실내기에서 발생하는 충격소음원에 대해 적용하였다.

충격 신호는 시스템의 임펄스 응답함수와 임펄스의 컨볼루션으로 표현할 수 있으며 여기서 음파의 위상에 해당하는 임펄스의 시간 지연이 음원의 위치를 추정하는데 중요한 정보임을 알았다. 이러한 사실을 이용하여 충격소음원을 규명하기 위해 일반적인 빔형성 방법과는 달리 캡스트럼 영역에서 상관 행렬과 스켈벡터를 구성하여 빔형성 파워를 구함으로써 소음원을 규명하였다.

제안된 방법을 충격소음이 발생하는 에어컨 실내기에 적용한 결과 에어컨의 좌측 중앙부인 팬 연결 부위에서 충격 소음이 발생함을 알 수 있었다.

후기

본 연구는 LG 생산 기술원, BK 21, 과학기술부의 국가저정연구실(NRL)사업에 의한 연구 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- (1) Don H. Johnson and Dan E. Dudgeon, 1993, *Array Signal Processing*, PTR Prentice Hall.
- (2) F. J. Fahy, 1995, *Sound intensity second edition*, E&FN SPON
- (3) Maynard, D., Williams, E. G and Lee, Y., 1985, "Nearfield Acoustic Holography: I. Theory of Generalized Holography and Development of NAH," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 78, pp.1395-1413.
- (4) Choi J.-W. and Kim Y.-H., 1995, "Estimation of locations and strengths of broadband planar and spherical noise sources using coherent signal subspace," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 98(4), pp. 2082~2093.
- (5) Y.-C. Choi and Y.-H. Kim, "Detection of impulse signal in noise using a minimum variance cepstrum-theory," *Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol.10(3) , pp.642-647, 2000
- (6) Y.-C. Choi and Y.-H. Kim, "Detection of impulse signal in noise using a minimum variance cepstrum-application on faults detection in a bearing system," *Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 10(6),pp.985-990, 2000