

< 논 문 >

능동음원 및 벽면 어드미턴스의 재구성을 통한 실내 소음원의 정확한 규명 방법

Identification of Interior Noise Sources by Using Reconstruction
of Active Sources and Surface Admittance

김 영 기* · 김 양 한**

Young-Key Kim and Yang-Hann Kim

(1998년 1월 7일 접수 ; 1998년 4월 3일 심사완료)

Key Words : Source Identification(소음원 추정), Surface Admittance(표면 어드미턴스), Interior Noise Source(실내소음원), Holography(홀로그래피)

ABSTRACT

The main objective of this study is to estimate locations and strength of sound sources distributed on the surface of an enclosure. Acoustic holography method has been used to identify the sources in an interior sound field. However, it can not completely distinguish between the direct sound field from sources and the reflections from surfaces. The method just reconstructs the entire sound field based on the sound pressure at the finite number of measurement points. In this study, a method which estimates only the active sources by using measurements of field pressure and surface admittance is proposed. An in-situ technique to estimate the general boundary condition is also proposed by using acoustic holography, assuming the surfaces are locally reacting.

1. 서 론

실내소음원의 정확한 파악을 위해서는 벽면에서 반사와 흡음을 고려한 실제 소음원의 추정방법이 요구된다. 벽면 임피던스가 매우 크거나, 혹은 이와 반대로 무반사 조건에 가까운 극단적인 상황에서는 벽면의 진동속도, 혹은 공간내에서의 음향 인텐시티 등으로부터 소음원에 대한 간접적인 정보를 얻을 수 있다. 하지만, 일반적인 벽면에서는 흡음 및

반사가 복잡한 형태로 발생하므로, 이를 고려한 소음원 추정 방법의 개발이 요구된다.

실내에서의 음장의 재구성 및 소음원 추정을 위해 최근 소개된 경계요소법에 근거한 음향 홀로그래피 방법(Acoustic Holography Method)^(1,2)을 고려해 볼 수 있다. 하지만, 이 방법은 앞서 설명한 바와 같이 벽면의 임피던스가 일정한 크기를 갖는 경우, 정확한 실내 소음원 파악에 문제점을 나타낸다. 이 방법은 실내의 제한된 영역에서 측정된 음압과 경계요소법에 의한 전달함수의 모델링을 이용하여, 공간내의 모든 음장을 재구성해 내는 방법이다. 즉, 실내 공간내에서의 인텐시티 및 벽면에서의 속도등의 재구성을 통한 소음원의 간접적인 추정

* 한국과학기술원 기계공학과 박사과정

** 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

방법이다. 따라서, 실제 벽면에서 방사에 가담하는 능동 소음원과, 벽면의 반사를 나타내는 가상의 소음원을 구별하지 못한다.

능동 소음원 및 벽면의 반사에 의한 가상의 소음원이 동시에 존재하는 음장에서의 소음원 규명은 일차원 덕트계에서 수행된 바 있다⁽³⁾. 차량의 배기계 소음원을 이상적인 소음원과 소음원 임피던스의 합으로 모델하고 이를 각각 추정하는 방법이 소개된 바 있다. 일차원 덕트의 경우, 임피던스의 측정이 비교적 용이하고, 전달함수가 간단하게 표현되므로, 측정된 음압을 이용하여 소음원의 추정이 가능함을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 개념을 삼차원 음장으로 확장하여 벽면에서의 능동 소음원의 추정에 이용하고자 한다.

본 연구에서는 일반적인 삼차원 공간의 실내 벽면에 존재하는 능동 소음원과 수동 경계조건의 추정을 위해 다음과 같은 방법을 사용하였다. 첫째, 벽면을 비동차 로빈 경계조건(inhomogeneous Robin boundary condition)⁽⁴⁾을 사용하여 표현하였다. 이 경계조건은 정상상태에 이른 일반적인 음장의 경계조건을 표현하며, 비동차항은 능동 소음원을 표현하고 동차항은 경계조건을 표현한다. 둘째, 이러한 경계조건을 기존의 홀로그래피 방법을 이용해 공간내에서 측정되는 음압과 관계지음으로써, 음압 및 수동경계조건의 측정을 통한 소음원의 추정이 가능하도록 하였다.

수동 경계조건의 측정 방법도 삼차원 음장에서 일반화 하였다. 단순화를 위하여, 벽면의 흡음 물질은 국부적으로 반응(locally reacting)⁽⁵⁾한다고 가정하였다. 국부적 반응이란 점가진에 대해 그 점만이 독립적으로 반응한다고 가정하는 것으로, 벽면의 임피던스 혹은 어드미턴스는 임의의 음장에서 측정된 벽면의 수직속도와 음압의 비가 된다. 따라서, 본 연구에서는 공간내의 임의의 위치에 스피커 등의 소음원을 작동시켜 벽면을 가진하고, 벽면과 스피커 사이의 공간에서 홀로그래피를 수행하므로써 벽면의 수직속도와 음압비를 추정하였다.

2. 경계요소법에 근거한 음향 홀로그래피 방법^(1,2)

공간내의 임의의 한점 \mathbf{r} 에서(Fig. 1)의 음압 $p(\mathbf{r})$ 은 키르히호프-헬름홀츠(Kirchhoff-Helmholtz)의 적분방정식으로부터, 공간을 둘러싼 벽면의 음압 $p(\mathbf{r}_s)$ 와 수직 속도 $v_n(\mathbf{r})$ 를 이용해 다음과 같

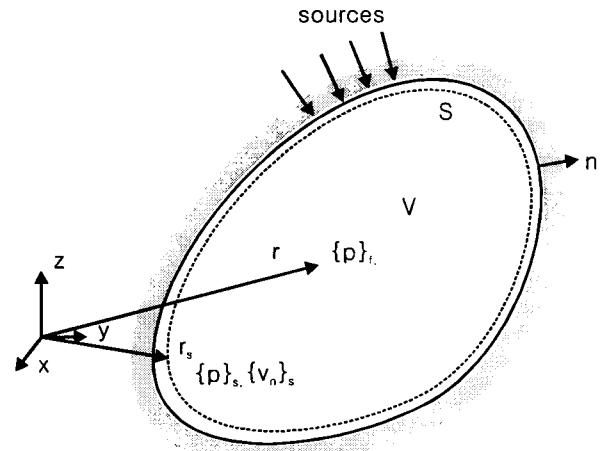


Fig. 1 Definitions of geometric conditions and acoustic variables. The vectors denote the surface pressure normal velocity on the surface, and field pressure

이 표현할 수 있다⁽⁶⁾.

$$\gamma(\mathbf{r})p(\mathbf{r}) = \int_S p(\mathbf{r}') \frac{\partial G}{\partial n}(\mathbf{r} - \mathbf{r}') dS - i\rho c k \int_S v_n(\mathbf{r}') G(\mathbf{r} - \mathbf{r}') dS \quad (1)$$

여기서, $G(\mathbf{r} - \mathbf{r}_s')$ 는 공간에서의 그린함수(Green's function)를 뜻한다. 또한 c 는 음파의 속도, ρ 는 매질의 밀도를 나타내며, $k = \omega/c = 2\pi/\lambda$ 이다(여기서 ω 는 각주파수, λ 는 파장). 계수 $\gamma(\mathbf{r})$ 은 점 \mathbf{r} 의 고체각(solid angle)을 나타낸다.

경계요소법은 식 (1)의 적분을 수치적으로 수행하는 것으로서, 경계면을 유한한 개수의 요소(element)로 나누어 적분을 수행한다. 이때, 정확도의 증가를 위해 요소내의 값을 선형 혹은 고차 곡선으로 모델하기도 한다. 벽면에서의 음압과 속도를 각각 $\{p\}_s, \{v_n\}_s$ 라 하고, 공간내에서의 음압을 $\{p\}_f$ 라하여 이산화된 헬름홀츠 적분 방정식을 행렬 및 벡터를 이용해 써보면 다음과 같이 두개의 행렬식으로 표현 가능하다⁽⁷⁾.

$$[D]_s \{p\}_s = [M]_s \{v_n\}_s \quad (2)$$

$$\{p\}_f = [D]_f \{p\}_s + [M]_f \{v_n\}_s \quad (3)$$

경계요소법에 근거한 음향 홀로그래피 방법의 근간이 되는 관계식은 식 (2)를 식 (3)에 대입함으로써 얻을 수 있다. 소거하는 변수에 따라 다음 두개의 식을 얻을 수 있다.

$$\{p\}_f = ([M]_f + [D]_f [D]_f^{-1} [M]_f) \{v_n\}_f = [T]_f \{v_n\}_f \quad (4)$$

$$\{p\}_f = ([D]_f + [M]_f [M]_f^{-1} [D]_f) \{p\}_f = [T]_f \{p\}_f \quad (5)$$

이때, 행렬 $[D]_f$ 및 $[M]_f$ 의 역행렬이 존재하는 경우에 한정한다. 식 (4)와 식 (5)를 살펴보면 공간내에서 측정가능한 음압 $\{p\}_f$ 가 벽면에서의 음압 $\{p\}_s$ 와 속도 $\{v_n\}_s$ 와 관계지어져 있음을 알 수 있다. 따라서, 일반적으로 벽면에서 가정한 노드의 수 N 보다 많은 지점에서 음압을 측정하게 되면, 식 (4)와 식 (5)의 해를 계산함으로써 벽면에서의 음압 $\{p\}_s$ 와 속도 $\{v_n\}_s$ 의 예측이 가능함을 알 수 있다. 또한, 예측된 벽면에서의 음압 및 속도를 임의의 지점에 대해 이산화된 헬름홀츠의 적분식 (3)에 적용함으로써, 임의의 공간내에서의 음압의 예측이 가능함을 알 수 있다. 실제 적용시에는 오차의 증폭을 방지해 주기 위하여 극값분해방법 (singular value decomposition)등을 통해 전달함수의 특이성(singularity)을 제거하는 방법을 취한다. 또한 노드수보다 많은 수의 측정을 통하여 최소자승해(least mean square solution)를 얻으므로, 실험에 의한 랜덤오차를 감소 시킨다^(1,8).

3. 벽면 능동 소음원의 재구성

정상상태의 음장을 지배하는 헬름홀츠 방정식 (Helmholtz equation)을 만족하는 음장의 일반적인 경계조건은 다음과 같이 일반적인 비동차 로빈 경계조건 (inhomogeneous Robin boundary condition)을 통하여 표현할 수 있다. 물리적 의미를 부여하기 위하여, 속도의 차원으로 표현하였다.

$$v_n(\mathbf{r}_s) = iS(\mathbf{r}_s)/\rho c k + \int_S A(\mathbf{r}_s/\mathbf{r}'_s) p(\mathbf{r}'_s) dS \quad (6)$$

식 (6)에서 첫번째 항이 나타내는 속도 성분은 $S(\mathbf{r}_s)$ 의 크기에 의해 결정됨을 알 수 있으며, 두 번째 항이 나타내는 속도 성분은 표면에서의 음압과 어드미턴스에 비례하고 있음을 알 수 있다. 즉 첫번째항은 벽면에서 발생되는 크기 $S(\mathbf{r}_s)$ 의 능동 소음원을 나타내며, 두번째항은 벽면의 반사에 의해서 나타나는 가상의 소음원을 나타내고 있음을 알 수 있다.

식 (6)과 같은 형태의 경계조건을 헬름홀츠의 적분식 (1)에 대입함으로써 공간상의 음압과 벽면의 소음원 및 어드미턴스의 관계를 적분 방정식의 형

태로 얻을 수 있다. 또한, 이를 홀로그래피 방법의 경우와 마찬가지로 경계요소법을 이용하여 이산화하면, 다음식과 같이 표현할 수 있다.

$$\{S\}_s = -\frac{i}{\rho c k} [M]_f^* [T]_p - [D]_f - [M]_f [A] [T]_p \{p\}_f \quad (7)$$

여기서 $[A]$ 는 어드미턴스 행렬을 의미하여, *는 수도 역행렬(pseudo inverse)로서, $[G] = ([G]^H [G])^{-1} [G]^H$ 와 같이 정의 된다. 윗첨자 H는 행렬의 허미션 (hermitian)을 나타낸다.

식 (7)은 이산화된 벽면의 소음원 강도 $\{S\}_s$ 와 공간상에서의 측정 음압 $\{p\}_f$ 의 관계를 의미한다. 관계식은 어드미턴스 행렬 $[A]$ 를 제외하면, 모두 경계요소법을 이용해 수치적으로 계산이 가능하므로, 식 (7)로 부터 공간내의 음압 및 벽면의 어드미턴스 측정을 통해 소음원 강도의 추정이 가능함을 알 수 있다.

4. 벽면 어드미턴스의 측정

순수한 수동 경계조건의 경우, 식 (6)의 특수한 경우로서, 벽면에서의 음압과 속도의 관계식은 일반적인 어드미턴스 $A(\mathbf{r}_s/\mathbf{r}'_s)$ 만을 이용하여 표현된다. 이것은 점가진에 대해 벽면 전체가 반응하는 가장 일반적인 형태의 어드미턴스로서, 실용적으로는 좀더 간단한 형태로 모델할 수 있다. 예를 들어, 흡음재등이 부착된 일반적인 벽면의 단순화된 모델로는 국부적반응(locally reacting) 가정을 사용할 수 있으며, 중고주파영역에서 비교적 잘 적용되는 가정으로 알려져 있다⁽⁵⁾.

$$v_n(\mathbf{r}_s) = A(\mathbf{r}_s) p(\mathbf{r}_s) \quad (8)$$

따라서, 이를 이산화한 형태인 어드미턴스 행렬은 다음과 같이 중심항(diagonal term)에서만 값을 갖게 된다.

$$\{v_n\}_s = [a_i] \{p\}_s \quad (9)$$

여기서, $[a_i]$ 는 중심항으로 a_i 를 갖는 중심항 행렬(diagonal matrix)이다.

본 연구에서는 식 (9)로 표현되는 어드미턴스의 측정을 위해서 Fig. 2에서와 같은 측정 방법을 제안하고자 한다. 임의의 소음원을 공간내의 임의의 점에 위치 시키고, 그 주변에 가상의 경계면 S_m 을 가정 하면, 실제 경계면 S 와 가상의 경계면 S_m 사

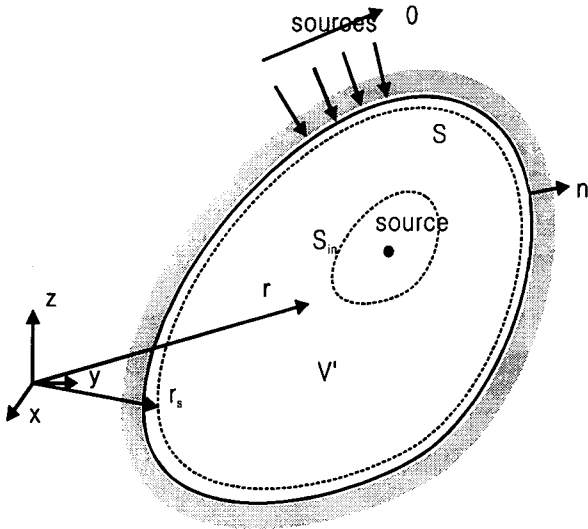


Fig. 2 Inner surface is supposed to construct volume to measure the surface admittance. Holographic reconstructions of surface velocities and pressures are employed in the volume

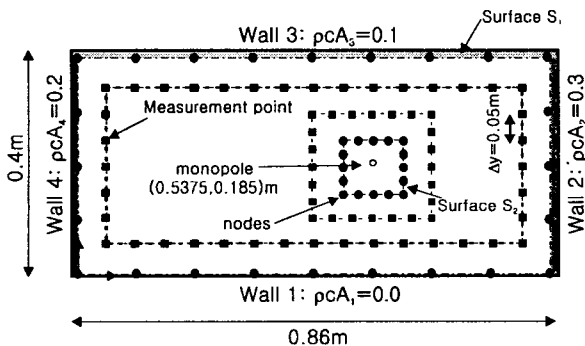
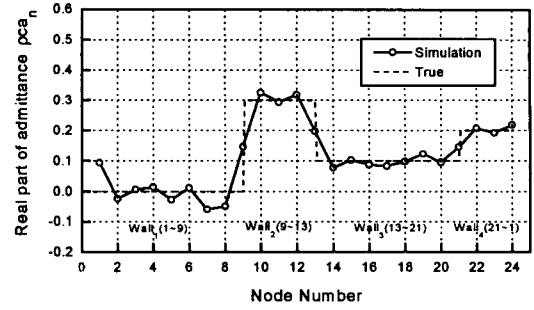


Fig. 3 Two-dimensional rectangle with monopole source in it

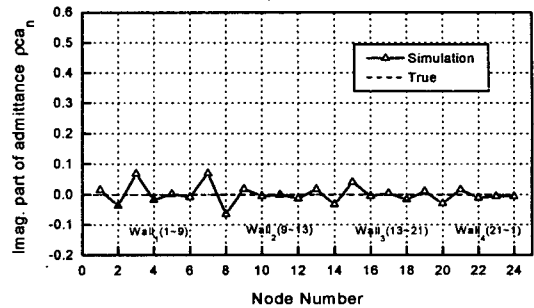
이 공간 V' 에서는 홀로그래피 방법이 성립한다. 따라서, 홀로그래피의 관계식 (4) 와 (5)를 이용하여 두 경계면에서의 음압과 속도를 다음과 같이 표현할 수 있다. 즉, 실제 경계면 S 와 가상의 경계면 S_{in} 에 N' 개의 노드를 가정했다면, N' 개보다 많은 공간내의 지점에서의 음압 $\{p\}_f$ 의 측정을 통하여 벽면에서의 음압 $\{p\}_{S+S_{in}}$ 및 속도 $\{v_n\}_{S+S_{in}}$ 의 예측이 가능함을 알 수 있다. 그러므로, 식 (9)로부터 국부적 반응하는 벽면의 어드미턴스의 추정이 가능함을 알 수 있다.

5. 전산기 모의 실험 및 실험 결과

5.1 이차원 사각형 음장



(a)



(b)

Fig. 4 Estimated wall admittance at 400 Hz (simulation): (a) Real part (b) Imaginary part

본 연구에서 제안된 방법을 검증하기 위해 Fig. 3와 같은 이차원 사각형에서 전산기 모의 실험을 수행하였다. 이차원 사각형은 길이 0.86 m, 폭 0.4 m이며, 각 면에서의 어드미턴스는 모두 실수로 가정하였다(Fig. 3). 간단한 모의 실험을 위해 소음원은 벽면 2에서 모두 동일한 위상을 갖는다고 가정하였다(Fig. 6). 벽면에서의 노드는 경계에서 24개를 취하였다. 노드간의 거리가 음파의 반파장에 해당하는 경우를 경계요소법의 최고 허용 주파수라고 할 때, 이 경우는 797 Hz가 최대 주파수가 된다.

사각형내의 음압은 모드합(modal summation) 방법⁽⁵⁾을 이용하여 음장을 계산하였다. 본 연구에서 다루고자 하는 경우는 벽면의 어드미턴스가 비교적 큰 경우로서, 모드 사이의 커플링을 고려하여 음압을 계산하였다. 본 연구에서는 총 1800(60×30)개의 모드를 이용하여 음압을 계산하였다.

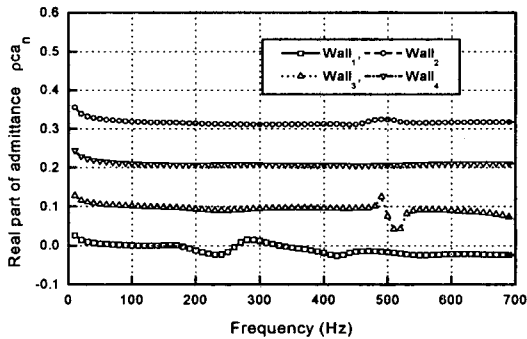
5.2 벽면 어드미턴스의 측정

벽면 어드미턴스 측정의 전산기 모의 실험을 위하여 Fig. 3과 같이 사각형 내에 단극음원을 작동시키고 가상의 경계 및 측정 지점을 설정하였다. 가상의 경계를 포함한 모든 경계에서의 노드의 수

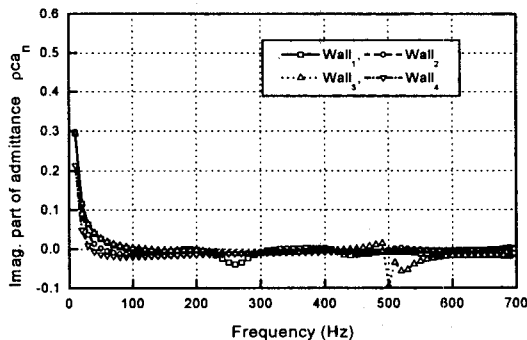
는 40개이며, 측정 지점은 경계에서 약 0.05 m 떨어진 64개 지점을 선택하였다. 따라서 측정지점의 개수는 노드의 개수보다 약 1.6배 많다.

Fig. 4은 400 Hz에서 추정된 벽면 어드미턴스를 나타내고 있다. 그림에서 x축은 경계의 노드 번호를 나타내고 있으며, y축은 ρc 로 정규화된 어드미턴스를 나타낸다. Fig. 4(a)의 실수부와 Fig. 4(b)의 허수부 모두가 참값과 잘 일치하고 있음을 보여 준다. 노드 9, 13, 21에서 큰 차이를 보이는 것은 유한한 개수의 노드로 인해 급격히 변화하는 소음원을 표현해 주지 못하기 때문이다.

주파수가 변화함에 따른 어드미턴스의 추정 방법을 검증하기 위하여 0~700 Hz 대역에서 전산기모의 실험을 수행하였다. Fig. 5은 각 면에서 추정된 어드미턴스를 공간적으로 평균한 값이다. 각 면에서의 추정결과는 대부분의 주파수에서 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 상대적으로 큰 오차를 보이는 265 Hz와 500 Hz부근은 소음원의 위치에서 입력 임피던스(input impedance)가 커지게 되어, 소음



(a)



(b)

Fig. 5 Estimated averaged admittance of each wall(simulation): (a) Real part (b) Imaginary part ($\rho c a_1 = 0.0$, $\rho c a_2 = 0.3$, $\rho c a_3 = 0.1$, $\rho c a_4 = 0.2$)

원 주변에 강한 감쇄파를 형성되는 주파수다. 따라서, 이 주파수에서는 모드합에 의한 음장 계산시 상대적으로 큰 오차를 포함하게 됨을 알 수 있다. 모드수를 증가시키면 오차의 절대적인 크기를 줄일 수 있으나, 다른 주파수에 비해 상대적인 오차는 계속 존재할 것임을 알 수 있다.

5.3 소음원 강도의 추정

추정된 벽면의 소음원 강도를 추정하는 전산기모의 실험을 수행하였다(Fig. 6). 계산된 소음원 강도는 ρc 로 나누어 속도의 차원을 갖게 하므로써 홀로그래피를 이용해 구한 벽면속도와 비교하였다.

Fig. 7은 400 Hz의 음장에 대해 소음원 강도를 추정한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 제안된 방법에 의한 소음원 강도의 추정은 참값과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 반면, 홀로그래피를 이용해 얻은 경계에서의 입자속도는 실제 소음원이 존재하지 않는 벽면에서도 일정한 값을 나타내고 있다. 뿐만아니라, 소음원이 존재하는 벽면 2의 경우에서도 벽면의 수동 경계조건으로 인해 큰 오차를

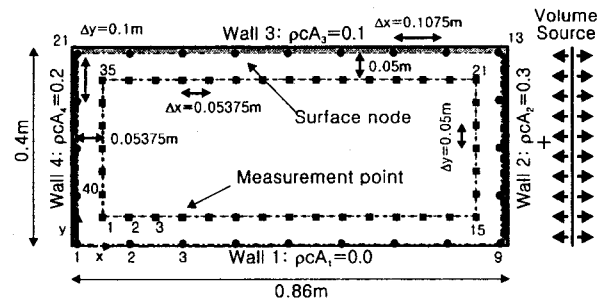


Fig. 6 Two-dimensional rectangle with source on the wall 2

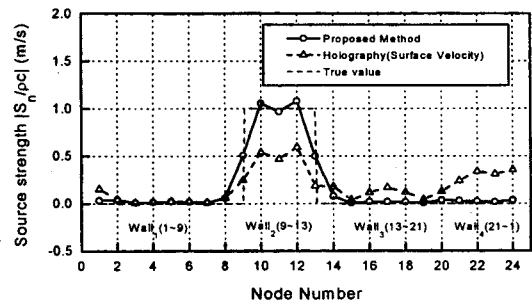


Fig. 7 The source strengths scaled by ρc are calculated by a proposed method at 400 Hz (simulation). The surface velocities which are calculated by holography method are also drawn for the comparison

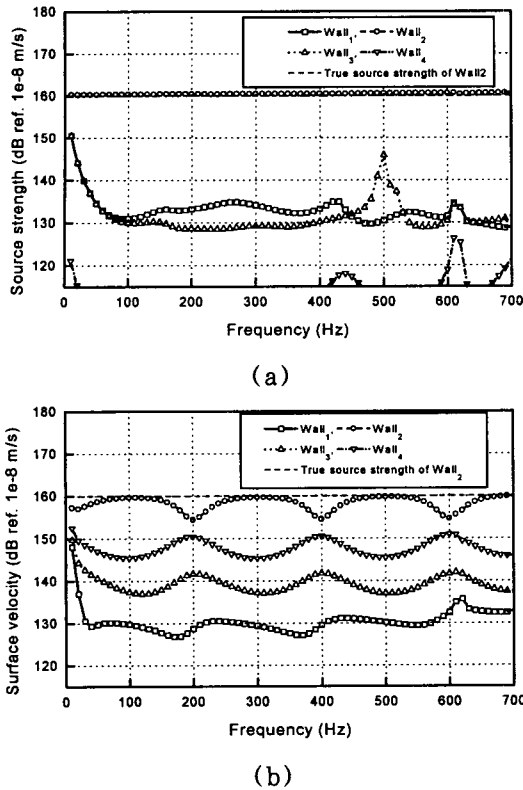


Fig. 8 Averaged (a) Source strengths of each wall are calculated by using estimated surface admittance(simulation).
 (b) The surface velocities are drawn for the comparison

보이고 있는 것을 알 수 있다.

제안된 방법의 주파수 특성을 살펴보기 위하여 0~700 Hz 대역에서 동일한 전산기 모의 실험을 수행하였다. Fig. 8(a)은 네 벽면에서의 소음원 강도의 공간적 평균값을 주파수에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 벽면 2의 소음원 강도가 다른 벽면의 비해 약 30 dB이상 높게 나타나므로 벽면 2에 소음원이 있음을 잘 나타내 준다. 한편, 홀로그래피를 이용해 얻은 벽면 속도(Fig. 8(b))는 Fig. 8(a)와는 달리 소음원이 존재하지 않는 면에서도 큰 값을 나타내며, 또한 내부음장의 주파수 특성에 의해 주파수에 따라 변화를 보이고 있다. 즉, 정확한 소음원 추정에 적합하지 않음을 알 수 있다.

6. 결 론

방사 및 반사, 흡음이 동시에 일어나는 실내 음장에서, 벽면에 존재하는 소음원을 음압측정과 수치적 모델을 이용하여 규명하는 방법을 제안하였

다. 또한, 이 과정에서 필요한 벽면의 수동 경계조건의 측정을 위하여, 홀로그래피 방법을 이용한 어드미턴스 측정방법을 제시하였다. 이 방법은 시편을 사용하는 기존의 방법들과는 달리, 벽면 전체의 어드미턴스를 부착된 상태에서 직접 측정하는 방법이다.

측정 방법의 검증을 위하여 이차원 음장의 전산기 모의 실험 및 실험을 수행하였다. 전산기 모의 실험시, 음장의 계산을 위하여 모드합 방법을 사용하여, 경계요소법의 구현시 존재할 수 있는 오차를 간접적으로 검증하였다. 벽면 소음원 강도 및 어드미턴스의 측정 방법이 사용된 노드개수에 의한 분해능의 범위내에서 모두 잘 적용됨을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) W. A. Veronesi and J. D. Maynard, 1989, Digital Holographic Reconstruction of Sources with Arbitrarily Shaped Surfaces, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 85, No. 2, pp. 588~598.
- (2) K. Gardner and R. J. Bernard, 1988, A Noise Source Identification Technique Using an Inverse Helmholtz Integral Equation Method, *Trans. ASME. J. Vib. Acoust. Stress Reliab. Des.*, Vol. 110, pp. 84~90.
- (3) M. L. Munjal, 1987, *Acoustics of Ducts and Mufflers*, John Wiley and Sons, New York, pp. 212~227.
- (4) P. M. Morse and H. Feshbach, 1953, *Methods of Theoretical Physics: Part I*, McGraw-Hill, New York, pp. 688~706.
- (5) A. D. Pierce, 1981, *Acoustics*, McGraw-Hill, New York, pp. 110~111, 288~291.
- (6) P. M. Morse and K. U. Ingard, 1968, *Theoretical Acoustics*, McGraw-Hill, New York, pp. 319~325.
- (7) R. D. Ciskowski and C. A. Brebbia, 1991, *Boundary Element Methods in Acoustics*, Elsevier Applied Science, London, pp. 13-76, 67~68.
- (8) B. K. Kim and J. G. Ih, 1996, On the Reconstruction of the Vibro-acoustic Field Over the Surface Enclosing an Interior Space using the Boundary Element Method, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 100, No. 5, 3003~3016