

마이크로폰 측정 시 발생하는 산란파 간섭에 대한 경계요소 해석

°전인열*, 강승천**, 이정권*

Boundary Element Analysis of Interference Effect Due to Scattering in Microphone Measurement

In-Youl Jeon, Sung-Chon Kang, Jeong-Guon Ih

ABSTRACT

In this article, the scattering effect around a microphone is studied by using boundary element method, because it is hard to find the scattering experimentally. The scattering problem is defined by impinging an obstacle, i.e. a solid cylinder, with an incident plane wave. From this analysis, the scattering is numerically calculated by varying the microphone shape, the incident angle and the distance between microphones. It is found that the scattering effect of a microphone increases as the frequency increases and is not considerable in the low frequency region. However, it is noted that there might be the pressure distortion above 4 kHz due to the scattering in microphone measurement.

1. 서론

최근 다수의 마이크로폰을 이용하여 음원을 예측하거나 음장을 재구성하는 방법이 개발되고 있으며 재구성 오차의 저감을 위한 연구가 진행 중에 있다. 재구성 오차는 대부분 음원과 음장 측정점들 사이에서 발생하는 전달행렬의 특이성이나 근접장에서 발생하는 비전달파에 의해서 영향을 받게 된다[1-2]. 특히 근접장 음향 홀로그래피 방법에서는 비전달파의 영향을 최소화하기 위해 마이크로폰을 음원에 근접시키는 방법을 이용한다. 여기서 음원으로부터 거리가 가까울수록 마이크로폰에 의한 음파의 반사, 산란 등의 간섭 현상이 발생하게 된다. 따라서 음원으로부터 마이크로폰 사이의 거리와 오차에 대한 연구[3]가 수행되었으나

입사파와 산란파의 정확한 간섭정도를 파악하기가 어렵다는 문제점이 있다. 따라서 경계요소법을 이용하여 입사파와 산란파가 모두 고려된 음장 해석을 통하여 간섭정도를 계산하고자 한다.

일반적으로 음장 해석은 순수한 물체의 진동에 의해서 음장으로 전파하는 음원 방사 해석과, 이와는 반대로 구면파 또는 평면파와 같은 외부 음원으로부터 발생된 음파가 물체의 경계면에 입사 될 때 발생하는 산란 해석[4-5]이 있다. 음원 방사 현상은 헬름홀츠 적분 방정식을 기초로 한 경계요소법을 이용하여 해석을 하며, 이와 비슷하게 산란 해석은 기존의 경계요소법을 기반으로 하여 평면파가 음장에서 전파하는 과정에서 물체와 부딪쳐서 발생하는 음장의 요동을 해석하는 방법[6]을 이용한다는 특징이 있다.

본 연구에서는 경계요소법과 평면파 입사 해석을 통하여 마이크로폰 주위에서 발생하는 음장을 수치해석

* 한국과학기술원 기계공학과 소음진동제어연구센터

** 대우중공업

적인 방법을 이용하여 모사하였다. 아직까지는 마이크로폰 주위에서 발생하는 음압을 직접적으로 측정하는 방법은 쉽지 않고, 산란파를 직접적으로 측정하는 것도 한 어렵기 때문에 기존의 경계요소법과 평면파 입사 방법을 이용하여 입사각 및 마이크로폰 모델의 형상에 따른 마이크로폰 주위에서의 산란 해석을 수행하였다. 또한 2개의 마이크로폰이 근접하여 위치하였을 때 마이크로폰 사이의 거리 및 입사각에 따른 상호 산란 해석을 수행하였다.

2. 이론

3차원 헬름홀츠 적분 방정식을 이용하면 음원의 방사와 산란 현상을 해석 할 수 있는데, 외부 문제에 대해서 산란 음장은 방사 음장과 마찬가지로 다음과 같은 헬름홀츠 적분 방정식을 만족해야 한다[6].

$$c(r) p_s(r) = \int_{S_0} \left[p_s(r) \frac{\partial G}{\partial n}(r, r_0) - \frac{\partial p_s}{\partial n}(r) G(r, r_0) \right] dS \quad (1)$$

여기서 r 은 음장점, r_0 는 물체 표면 위의 점이며 $c(r)$ 은 경계면의 형상에 의존하는 입체각(solid angle) 그리고 산란 음압 p_s 는 Sommerfeld 방사조건과 헬름홀츠 방정식 $(\nabla^2 + k^2)p_s = 0$ 을 만족한다. 또한 헬름홀츠 방정식의 기본해인 그린 함수는 다음과 같이 정의된다.

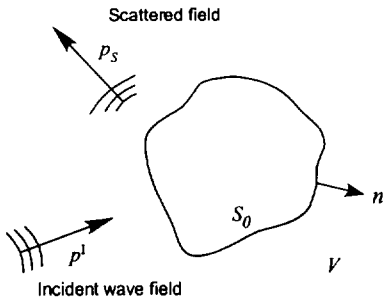


Fig. 1. Description of scattered field by impinging an obstacle with an incident wave

$$G(r, r_0) = \frac{e^{-jkR}}{4\pi R}, \quad R = |r - r_0| \quad (2)$$

만약 그림 1처럼 물체 표면에 음파가 입사하였을 때 입사파와 물체에 부딪치면서 발생하는 산란파를 모두 해석하기 위해서는 아래 식처럼 입사 음압과 산란 음압이 더해진 전체 음압을 이용해야 한다.

$$p = p^i + p_s \quad (2)$$

여기서 p^i 는 입사 음압이며, p_s 는 산란 음압이다. 따라서 입사 음압과 산란 음압이 모두 고려된 전체 음압에 대한 헬름홀츠 적분 방정식은 다음과 같이 표현이 된다.

$$c(r) p(r) = \int_{S_0} \left[p(r) \frac{\partial G}{\partial n} - \frac{\partial p}{\partial n}(r) G \right] dS + p^i(r) \quad (3)$$

만약 위 식에서 입사파가 평면파라고 가정을 하면 입사 음압은 다음과 같이 표현이 된다.

$$p^i(r) = P^i e^{-jk(r_s - r)} \quad (4)$$

식 (3)을 이산화하여 정리하면 다음과 같다.

$$\sum_{i=1}^I \sum_{\alpha} a_{ij}^{\alpha} p_{i\alpha} - c(r) p_j = \sum_{i=1}^I \sum_{\alpha} b_{ij}^{\alpha} v_{i\alpha} - p_j^i \quad (5)$$

여기서 I 은 요소수, $p_{i\alpha}$ 는 i 번째 요소의 α 번째 절점에서의 음압을 나타내며, 계수 a_{ij}^{α} , b_{ij}^{α} 는 각각 다음과 같다.

$$a_{ij}^{\alpha} = \int_{S_j} \Psi_{j\alpha}(\xi) \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{\exp(-jkR_{ij}^{\alpha}(\xi))}{R_{ij}^{\alpha}(\xi)} \right) J(\xi) d\xi \quad (6.a)$$

$$b_{ij}^{\alpha} = -j\omega\rho \int_{S_j} \Psi_{j\alpha}(\xi) \left(\frac{\exp(-jkR_{ij}^{\alpha}(\xi))}{R_{ij}^{\alpha}(\xi)} \right) J(\xi) d\xi \quad (6.b)$$

이며 a_{ij}^{α} 는 경계면 음압에 의한 다이폴 효과, b_{ij}^{α} 는 경계면 진동에 의한 모노폴 효과를 의미한다.

만약 음장 측정점의 위치가 경계면 상에 존재하게 되면 위 식(5)은 다음과 같은 행렬식으로 표현이 된다.

$$[D]_s \{p\}_s = [M]_s \{v\}_s - \{p^1\} \quad (7)$$

또한 경계면이 진동이 없는 고정단 (rigid) 경계조건이면 입사파에 의해서 산란된 음장은 다음과 같이 구할 수 있게 된다.

$$[D]_s \{p\}_s = -\{p^1\} \quad (8)$$

위 식(8)에서 좌항의 $[D]_s$ 을 계산하면 표면 음압은 $\{p\}_s = -[D]_s^{-1} \{p^1\}$ 로부터 구할 수 있으므로 이를 이용하면 다음과 같이 입사의 음장점에서의 음압을 구할 수 있다.

$$\{p\}_f = [D]_f \{p\}_s + \{p^1\} \quad (9)$$

위 식으로부터 입사파와 이 음파가 공간상의 물체를 부딪치면서 발생하는 산란파가 모두 고려가 된 산란 음장의 음압을 구할 수 있다.

3. 수치 해석

음장 해석을 위한 마이크로폰 모델의 형상은 그림 2 과 같다. 여기서 그림 2.a는 단일 마이크로폰의 형상이며 입사각 θ , 마이크로폰 형상비 h/d 를 변화시켜 가면서 해석을 하였다. 그리고 그림 2.b는 2개의 마이크로폰의 형상이며 입사각 θ , 형상비 h/d , 거리비 z/d 를 해석 변수로 설정을 하였다.

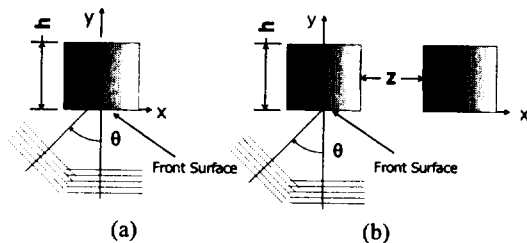


Fig. 2. Geometry of analyzed microphones; (a) Single microphone, (b) Two adjacent microphones.

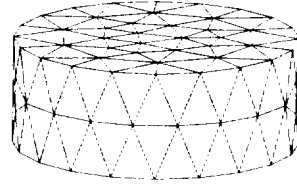


Fig. 3. BEM model of a microphone (ϕ 13.2 mm, height = 5 mm, 438 nodes, 218 quadratic triangular elements).

그림 3은 지름 13.2 mm, 높이 5 mm의 실린더로 모델링된 마이크로폰의 형상이며 최대 주파수 한계는 2차 요소 모델 $\lambda/3$ 로 계산을 하면 약 46 kHz이내의 범위에서 유효하다. 그리고 마이크로폰에 입사하는 평면파의 크기는 1 Pa로 91 dB이며 이 값을 기준으로 변화된 값은 입사파와 산란파의 간섭에 의해서 생성된 값으로 해석될 수 있다.

입사각 θ 의 변화에 따라서 마이크로폰 주위에서 발생하는 산란 음장을 해석한 결과는 그림 4와 같다. 여기서 입사파의 가진 주파수 kd 는 1이다. 그림 4.a는 수직 입사 경우의 산란 음장인데 마이크로폰 앞부분에서의 음압이 크게 나온 이유는 마이크로폰 전면(front surface)에서 발생하는 반사파가 입사파에 크게 영향을 미치기 때문이다. 입사각이 증가하면 마이크로폰으로부터 직접 반사하는 간섭파의 영향이 줄어들기 때문에 산란 현상은 감소될 것이라고 예측 할 수 있다. 그림 4.b는 45°의 각도로 입사하였을 때의 결과인데 대체적으로 입사각을 중심으로 대칭인 모습을 보여주고 있으며 수직 입사의 경우에 비하여 산란 현상이 감소한 결과를 보여주고 있다.

마찬가지로 그림 4.c와 4.d는 2개의 마이크로폰이 중심 간격 20mm일 때의 산란 음장을 보여주는데 1개 마이크로폰의 수직입사, 45° 입사의 결과와 유사한 경향을 보인다.

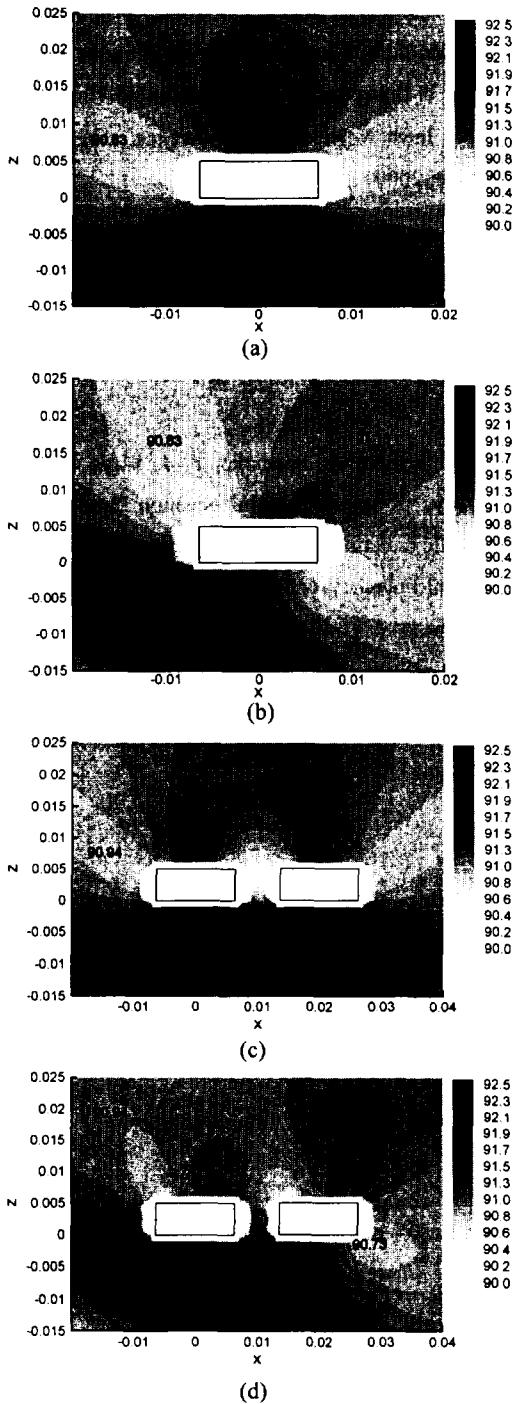


Fig. 4. Scattered wave fields of the microphone(s) with $h/d = 0.739$ at $kd = 1$. Single microphone: (a) $\theta = 0^\circ$; (b) $\theta = 45^\circ$. Two microphones: (c) $z/d = 0.5152$, $\theta = 0^\circ$; (d) $z/d = 0.5152$, $\theta = 45^\circ$.

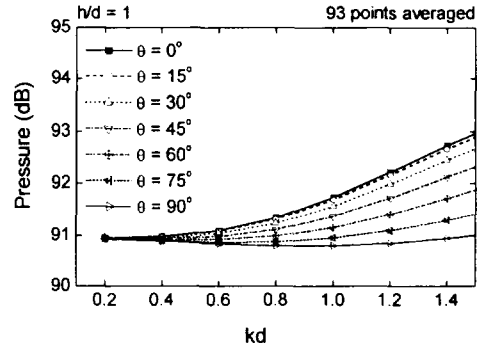


Fig. 5. Scattering of a microphone with varying the incidence angle ($h/d = 1$).

입사각 θ 가 산란파에 미치는 영향을 살펴보기 위해서 마이크로폰 모델의 전면(front surface) 절점들에서의 평균 음압을 이용하여 산란 해석을 하였으며 그 결과는 그림 5와 같다. 여기서 $kd < 1$ (본 모델에서는 주파수가 약 4kHz)인 범위 내의 주파수 영역에서 발생하는 산란파의 영향은 1dB 미만의 값을 갖으며 주파수가 증가할수록 산란 음압은 증가하는 경향을 보인다. 그리고 입사각 θ 가 커질수록 산란파의 영향은 적게 나타난다는 것을 알 수 있다. 2개의 마이크로폰 사이의 거리비 z/d 에 따른 결과는 그림 6과 같으며 거리에 따른 영향은 미비하다는 것을 알 수 있다. 그러나 입사각이 증가하면 그림 5처럼 전체적인 산란 정도가 감소한다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 마이크로폰을 이용하여 음압을 측정할 때 음원으로부터 마이크로폰에 음파가 입사하면서 발생하는 산란파에 대해서 연구를 하였으며 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 마이크로폰에 입사하는 평면파의 각도가 커질수록 산란이 적게 일어나며 입사각 $\theta = 90^\circ$ 인 수평입사를 하게 되면 산란 현상이 발생되지 않고 평면파의 음압과 거의 같은 결과를 얻을 수 있었다. 또한 주파수가 증가에 따른 산란현상은 현저하게 발생을 하며 실제 음압 측정 시에 주어진 주파수 범위

내에서 얼마나 산란 현상이 발생하는가 하는 척도로써 사용이 되어질 수 있다. 만약 경계요소법에 기초한 음원의 탐색문제에 적용을 하게 되면 $kd < 1$ 인 범위 내의 주파수 영역에서 발생하는 산란파의 영향은 1dB 미만의 값을 갖는 것을 이용하여 적절한 주파수 범위와 산란 영향을 예상할 수 있을 것으로 생각된다.

참고 문헌

- [1] B.-K. Kim and J.-G. Ih, "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, pp.3003-3016, 1996.
- [2] S.-C. Kang, J.-G. Ih, "On the Accuracy Of Nearfield Pressure Predicted by the Acoustic Boundary Element Method," *J. Sound Vib.*, Vol. 233, no.2, pp.353-358, 2000
- [3] S.-C. Kang, J.-G. Ih and Y.-J. Park, "Near-Field Limit in Positioning the Microphone for Pressure Measurements in Using the Nearfield Acoustical Holography," *Proc. Inter Noise 2000 Conference*, August, Nice, France, 2000
- [4] A. F. Seybert, B. Soenarko, F. J. Rizzo and D. J. Shippy, "An advanced computational method for radiation and scattering of acoustic waves in three dimensions," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 77, pp.362-368, 1985.
- [5] A. F. Seybert, B. Soenarko, F. J. Rizzo and D. J. Shippy, "A special integral equation formulation for acoustic radiation and scattering for axisymmetric bodies and boundary conditions," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 80, pp.1241-1247, 1986.
- [6] W. S. Hwang, "A boundary integral method for acoustic radiation and scattering," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 101, pp.3330-3335, 1997.

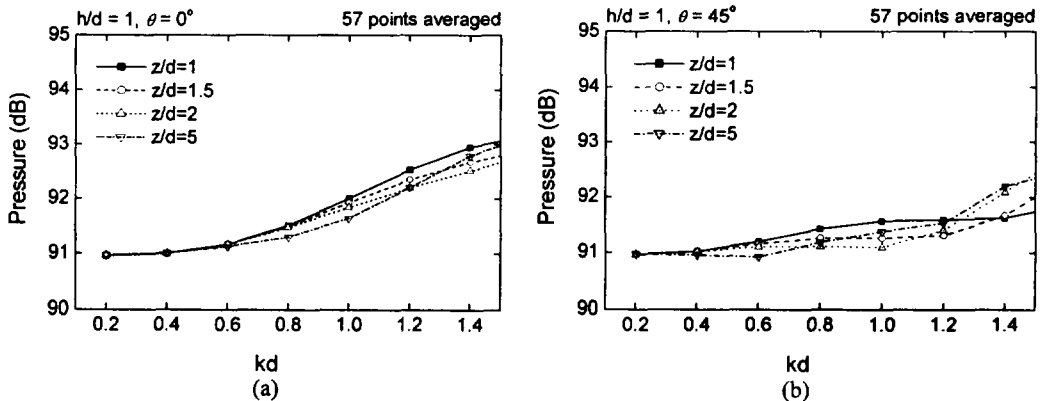


Fig. 6. Scattering of two microphones with varying distance z/d ; (a) $\theta=0^\circ$, (b) $\theta=45^\circ$