

# 근접 음향 홀로그래피에서 음압 측정용 마이크론의 근접 거리 한계

<sup>0</sup> 강승천 <sup>1)</sup>, 이정권 <sup>2)</sup>

## Near-field limit in positioning the microphone for pressure measurements in using the near-field acoustical holography

Sung-Chon Kang and Jeong-Guon Ih

### ABSTRACT

The recently developed BEM-based NAH (nearfield acoustical holography) is a useful technique for identifying the sound source of vibrating objects. The acoustic parameters of a sound source can be reconstructed by using the vibro-acoustic transfer matrix, which is determined by means of BEM, and the sound pressure measured in the nearfield. Theoretically, one can come up with a very nice reconstructed result as the field plane gets near to the source surface. However, when a microphone is placed in the very close nearfield of the source surface, the scattering, reflection, or resonance in the gap between the source and the microphone can distort the acoustic field, and therefore, the measured field pressure would differ from the actual one in the absence of the microphone. In order to analyze this problem, the interference effect of the microphone is numerically calculated by using the non-singular BEM that yields very small error in the nearfield. From this analysis, it is found that the prediction error of the field pressure decreases firstly and then increases as the microphone approaches the vibrating surface from the farfield to the close nearfield. It is noted that the microphone should be separated from the source surface by at least a diameter of the microphone for an error ratio less than 2% in the low frequency range less than about 2.7kHz. This means that if one wants to put a microphone in the very close nearfield, a microphone with small diameter should be used.

### 1. 서론

음향 홀로그래피는 음원으로부터 일정한 거리에서 측정한 음압을 이용하여 음원과 음원 주위 음장에서의 음압, 진동 속도 등 음향학적 정보를 간접적으로 구하는 기법이다. 이 기법은 움직이는 물체나 흡음재, 제진재 등이 부착되어

있어 음원의 진동 정보를 직접 측정하기 어려운 표면에서 간접적으로 진동 정보를 구하는데 유용하다. 이러한 음향 홀로그래피는 그 수행 기법에 따라 공간 푸리에 변환을 이용하는 방법[1]과 경계요소법에 기초한 방법으로 구분된다. 이 방법들은 각각의 장단점을 갖고 있으며, 특히, 경계요소법에 기초한 방법은 임의의

---

1) 대우중공업

2) 한국과학기술원 기계공학과

형상을 갖는 음원 문제를 다루는데 더욱 효과적이다.[2-5] 음향 홀로그래피를 수행할 때 가능하면 음원에 가까운 위치에서 음압을 측정할수록 음원 주위에만 존재하는 비전파음 관련 데이터를 많이 확보할 수 있고, 측정된 음압 신호의 S/N비도 좋기 때문에 좀 더 정확한 음원 재구성이 가능하다. 그러나, 마이크로폰이 음원에 매우 근접한 공간에 놓이게 되면 음원에서 발생한 소리가 전파되면서 마이크로폰에 부딪혀 음원과 의 사이 공간에서 산란, 반사, 공명 등 간섭 현상을 일으켜 측정된 음압에 오차를 포함하고, 궁극적으로는 음원 재구성의 정확도를 저하시킬 수 있다. 이 경우 측정된 음압은 마이크로폰이 없을 때 음장에서 발생하는 실제 음압과는 차이를 보이게 된다. 본 논문에서는 음원에 근접한 공간에서 음압을 측정할 때 마이크로폰의 간섭이 음압 측정에 미치는 영향을 조사하고, 오차를 줄일 수 있는 마이크로폰 근접 한계를 살펴보고자 한다.

## 2. 음향 홀로그래피 방정식

경계면  $S_0$ 로 둘러싸인 영역  $V$ 가 단열, 압축성 유체로 채워져 있을 때, 잘 알려진 Kirchhoff-Helmholtz 적분 방정식은 다음과 같다.

$$c(\mathbf{r})p(\mathbf{r}) = \int_{S_0} \left[ G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) \frac{\partial p(\mathbf{r}_0)}{\partial \mathbf{n}(\mathbf{r}_0)} - \frac{\partial G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0)}{\partial \mathbf{n}(\mathbf{r}_0)} p(\mathbf{r}_0) \right] dS(\mathbf{r}_0). \quad (1)$$

여기서  $p(\mathbf{r}_0)$ 는 경계면의 음압을 의미하고,  $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) = \exp(-jkR)/R$ 은 3차원 자유 공간에서의 Green 함수,  $R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|$ 은 음장점  $\mathbf{r}$ 과 경계면 상의 점  $\mathbf{r}_0$  사이의 거리이다. 또한,  $\partial/\partial \mathbf{n}$ 는 경계면에서 외부 공간으로 향하는 법선방향 미분이고,  $c(\mathbf{r})$ 은  $\mathbf{r}$ 점에서의 입체각을 의미한다.

(1)식을 이용하면 음원 표면의 음압, 진동 속도, 음향 임피던스 등의 경계조건을 이용하여 음장에서의 음향 정보를 구할 수 있다. 이것을 수치적으로 구현하는 것이 음향 경계요소법이다.

(1)식을 이산화하고 행렬-벡터 방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\{p\}_f = [D]_f \{p\}_s + [M]_f \{v\}_s, \quad \text{in the domain,} \quad (2a)$$

$$[D]_s \{p\}_s = [M]_s \{v\}_s, \quad \text{on the boundary.} \quad (2b)$$

여기서  $\{p\}_s$ ,  $\{v\}_s$ 는 각각 경계면에서의 음압 벡터와 속도 벡터이고,  $\{p\}_f$ 는 영역에서의 음장 음압 벡터이다. 또한,  $[D]_s$ ,  $[M]_s$ 는 경계면에서의 쌍극, 단극 음원과 관련된 행렬이며,  $[D]_f$ ,  $[M]_f$ 는 음장 음압에 관한 쌍극, 단극 음원 행렬이다.  $[D]_s^{-1}$ 이 존재할 때, (2a) 및 (2b) 식으로부터 다음과 같이 경계면의 속도분포와 음장 음압의 관계를 표현할 수 있다.

$$\{p\}_f = ([M]_f + [D]_f [D]_s^{-1} [M]_s) \{v\}_s \equiv [G] \{v\}_s. \quad (3)$$

여기서  $[G]$ 는 경계면에서의 속도 분포와 음장 음압의 관계를 표현해 주는 진동-음향 전달 행렬로서, 진동-음향계의 기하학적 관계에 대한 정보를 포함하고 있다. (3)식을 이용하면 경계요소법으로 전달행렬을 구한 후  $m$ 개의 음장점에서 음압을 측정하면, 경계면 상에 있는  $n (\leq m)$ 개의 점에서 진동 속도 분포를 유일하게 구할 수 있게 된다. 이러한 문제는 수학적으로 과결정 문제(over-determined problem)가 되며, 최소사승해와 특이치 분리기법(singular value decomposition, SVD)을 적용하면 다음과 같이 (3)식의 역문제 해를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \{v\}_s &= [G]^+ \{p\}_f = ([G]^H [G])^{-1} [G]^H \{p\}_f \\ &= [W][\Lambda]^{-1} [U]^H \{p\}_f. \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $[G]^*$  는  $n \times m$ 의 크기를 갖는  $[G]$ 의 의사 역행렬(pseudo-inverse matrix)이며, 윗첨자  $H$ 는 Hermitian 연산자를 의미한다. 특이치 분리기법에 의해 전달행렬  $[G]$ 는 다음과 같이 분리된다.

$$[G] = [U][\Lambda][W]^H \quad (5)$$

여기서

$$[\Lambda] = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n), \lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n \geq 0. \quad (6)$$

(6)식에서  $\lambda_i$  는  $[G]$ 의 특이치(singular value)들이다.  $[U]$ 와  $[W]$ 의 열 벡터 들은 각각 전달행렬  $[G]$ 의 좌측 및 우측 특이벡터(singular vector)들이다. 좌우측 특이벡터 들은 각각 음압 측정면에서의 음장 음압분포와 경계면에서의 진동 속도분포를 웨이브 벡터로 분리한 것에 해당하며, 고유치 문제에서 고유치 벡터와 유사한 의미를 갖는다. 한편, 각각의 특이치  $\lambda_i$  들은 분리된 각각의 웨이브벡터 모드 들이 음원에서 음장으로 전파되는 가중치, 즉, 음향 방사 효율의 의미를 갖는다.

음장 음압 측정치로부터 (4)식을 이용하여 경계면의 진동 속도분포  $\{v\}$ , 를 구하면, 이를 이용하여 음원 표면이나 음장 내 임의 공간에서의 음압, 진동 속도, 음향 인텐시티 분포 등을 구할 수 있다.

### 3. 근접 음장에서의 특이성

(1)식과 같은 Kirchhoff-Helmholtz 적분 방정식에 기초한 일반적인 음향 경계요소법을 이용하여 음향 홀로그래피를 수행할 때, 음원으로부터 경계요소 모델 특성길이의 약 20% 이내의 거리로 근접하는 경우는 음장 음압 예측의 정확도가 떨어지는 문제가 있다.[6,7] 이러한

정확도 저하의 문제는 Green 함수가 경계면 상의 수치 적분점 부근에서 특이성을 갖기 때문에 발생한다. 이 특이성에 의한 오차는 음장점이 음원에 근접해 갈수록 더욱 증가한다. 따라서, 이 영역에서는 전달행렬이 정확히 만들어지지 못하며, 재구성된 음원 정보도 크게 왜곡되어 버린다. 이론적으로는 음향 홀로그래피 기법을 적용하여 실험적으로 음원을 재구성할 때, 가능하면 음원에 근접한 공간에서 음압을 측정할수록 S/N비가 좋은 음압을 측정할 수 있고, 비전파음 성분에 대한 많은 정보도 얻을 수 있으며, 전달행렬의 특이성도 줄일 수 있어 음원 재구성의 정확도가 향상된다. 따라서, 음원 재구성을 보다 정확히 하려면 마이크로폰을 가능한 한 음원에 근접시켜야 하는 반면, 일반적인 음향 경계요소법은 근접음장에서 해의 정확도가 크게 악화되는 문제를 갖고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 근접 음장에서 해의 정확도가 보장되는 특이성이 제거된 경계요소법[6,7] 등을 도입할 필요가 있다.

### 4. 마이크로폰에 의한 음장의 간섭

근접음장에서 음압을 측정할 때 마이크로폰에 의한 음장 간섭 효과를 살펴보기 위하여 특이성이 제거된 경계요소법을 이용하였다. 수치계산 모델은 그림1(a)와 같다. 무한 배플 위에 있는 직경 13.2 mm의 피스톤을 음원으로 가정하였다. 그리고, 일반적인 1/2인치 마이크로폰을 직경 13.2mm, 높이 5mm의 실린더로 모델링 하였다. 선형 요소를 사용하였고,  $\lambda/10$  기준을 적용할 경우 이 경계요소 모델의 최대 유효 주파수는 20.8kHz였다. 음원의 조건으로는 그림1(b)-(d)와 같이 피스톤 진동의 위상을 세가지로 다르게 부가하였다. set-I은 피스톤 위의

모든 절점이 같은 위상으로 진동하는 경우이다. sets-II와 III는 각각 피스톤 면이 1/2 혹은 1/4로 분할되어 서로 반대의 위상을 갖는 경우이다. 피스톤의 수직축 상에서 음압을 비교하면 반대 위상에 의해 이론 음압이 0이 될 수 있기 때문에 수치해석에 부적합하다. 따라서, 원점을 피스톤 중심에 두었을 때  $(x, y, z)=(1, 1, 1 \text{ mm})$ 인 점에서 음압을 구하여 비교하였고, 마이크로폰과 음원 사이의 거리 변화에 대한 음장 음압 계산 결과는 그림2와 같다. 마이크로폰이 음원으로부터 충분히 멀리 있는 경우는 마이크로폰이 없는 경우의 음압에 수렴하였다. 그러나, 마이크로폰이 음원에 접근해 갈수록 음장에서의 음압은 증가하였고 고주파수 영역에서의 공명 현상이 관찰되었다. 피스톤이 반대의 위상을 가지며 진동할 경우는 음압의 크기는 낮아졌으나 그 경향은 앞의 경우와 거의 같았다. 그림3은 음향 홀로그래피 적용 대상이 되는 상대적으로 낮은 주파수 영역인 1kHz일 때 마이크로폰이 없는 경우에 대비하여 마이크로폰이 음원에 근접했을 때의 음압 오차율을 비교한 것이다. 음압 예측 오차는 마이크로폰이 진동하는 음원에 근접해 갈수록 증가하였다. 그리고, 마이크로폰과 음원 사이의 거리가 마이크로폰의 직경보다 멀면 음압 오차율은 1.7%를 넘지 않았다. 그림4(a),(b)는 set-I의 조건에 대해 음원으로부터 마이크로폰이 그 직경 이상의 거리만큼 떨어져 있을 때 주파수에 따른 음압 오차율과 위상차를 비교한 것이다. 주파수 증가에 따라서 오차율의 크기는 더욱 증가하는 경향을 보이며, 마이크로폰의 거리가 멀리 떨어질수록 오차율은 감소하는 경향을 보였다. 마이크로폰이 그 직경 만큼 떨어져 있을 경우 약 2.7kHz 이하에서 2% 이내의 오차율이 확보되었다. 마이크로폰이 직경의 4배 이상 떨어진 경우는 20kHz 이내의 모든 주파수

범위에서 음압 오차율이 2% 이내였고, 위상차도 1.3도 이내의 범위에 포함되었다. 따라서, 음원 근처에서 발생하는 간섭효과를 피하고 정확한 음압을 측정하기 위해서는 마이크로폰은 음원으로부터 최소한 그 직경 이상 떨어지도록 하는 것이 좋으며, 이것은 낮은 주파수 영역에 한한다는 것을 확인할 수 있었다. 만일 가능한 한 음원에 근접하여 음압을 측정해야 하는 경우라면 가능한 한 작은 직경의 마이크로폰을 사용해야 한다는 것을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 근접음장에서 마이크로폰에 의한 간섭효과에 대해서 살펴보았다. 마이크로폰이 음원 표면에 근접한 경우는 음원에서 발생한 음파가 음원과 마이크로폰 사이의 공간에서 반사, 공명하면서 원래의 음장을 왜곡시키게 된다. 음원으로부터 최소한 마이크로폰의 직경 이상의 거리를 확보하고 측정을 수행하면 약 2.7 kHz 이하의 주파수 범위에서 오차율이 2% 이내에 들어감을 확인하였다. 만일 가능한 한 음원에 근접하여 음압을 측정해야 하는 경우라면 가능한 한 작은 직경의 마이크로폰을 사용해야 한다.

근접 음장에서의 진동 음향 문제 예측에 있어서 일반적인 경계요소법은 특이성 문제 때문에 해의 정확도가 저하되는 문제를 갖고 있으며, 특이성이 제거된 경계요소법을 적용하면 이러한 문제를 해결할 수 있다. 그러나, 실제 측정을 수행하는 단계에서는 마이크로폰과 음원 사이의 공간이 오차를 유발할 수 있으므로 주의해야 한다.

## 참고문헌

[1] J. D. Maynard, E. G. Williams, and Y. Lee, *J. Acoust. Soc. Am.* 78, pp.1395-1413, 1985.

[2] B. K. Gardner and R. J. Bernhard, *Trans. ASME, J. Vib. Acoust. Stress Reliab. Des.* 110, pp.84-90, 1988.

[3] W. A. Veronesi and J. D. Maynard, *J. Acoust. Soc. Am.* 85, pp.588-598, 1989.

[4] M. R. Bai, *J. Acoust. Soc. Am.* 92, pp.533-549, 1992.

[5] B.-K. Kim and J.-G. Ih, *J. Acoust. Soc. Am.* 100, pp.3003-3016, 1996.

[6] B.-U. Koo, B.-C. Lee and J.-G. Ih, *J. Sound Vib.* 192, pp.263-279, 1996.

[7] S.-C. Kang and J.-G. Ih, *J. Sound Vib.* 233, 353-358, 2000.

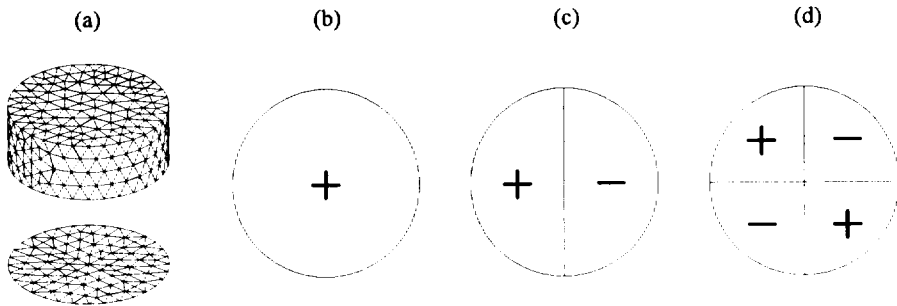


Fig.1 (a) BEM model of a baffled piston and a microphone (diameter of microphone = 13.2 mm, height of microphone = 5 mm, 428 nodes, 818 linear triangular elements), and the phase sets of the piston are: (b) set-I; (c) set-II; (d) set-III.

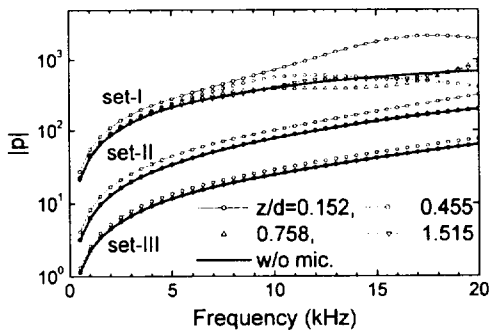


Fig.2 Amplitude of field pressure at  $(x,y,z) = (1,1,1)$  mm for a baffled piston by varying the distance of microphone from the source surface ( $z$  = relative distance of the microphone,  $d$  = diameter of the microphone).

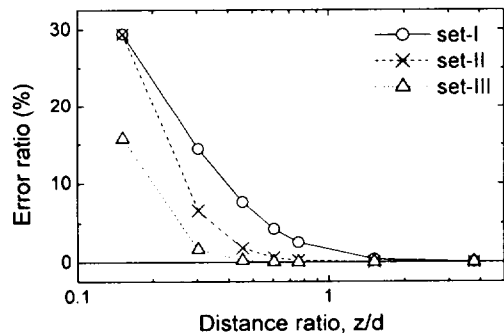


Fig.3 Error ratio of field pressure at  $(x,y,z) = (1,1,1)$  mm for a baffled piston by varying the distance of microphone from the source surface (1 kHz,  $z$  = relative distance of the microphone,  $d$  = diameter of the microphone).

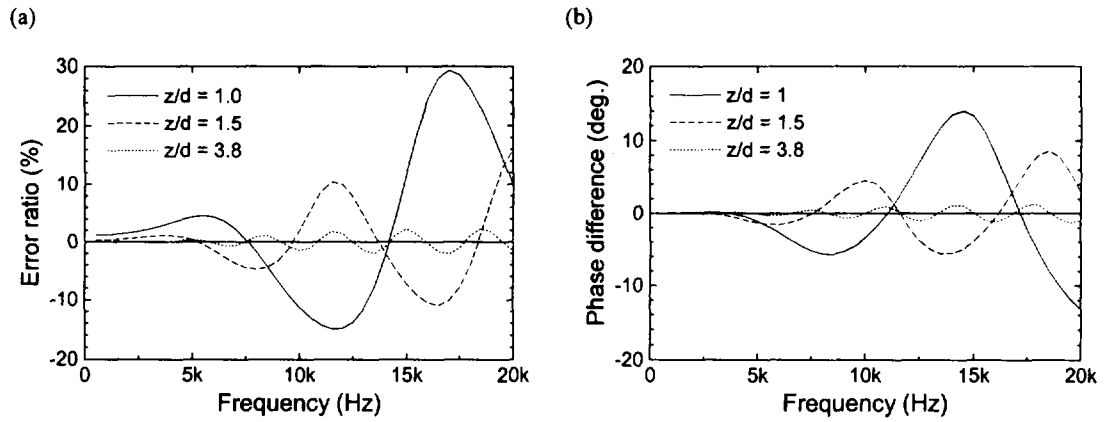


Fig.4 (a) Error ratio and (b) phase difference of field pressure at  $(x,y,z) = (1,1,1)$  mm for a baffled piston by varying the distance of microphone from the source surface (set-I,  $z$  = relative distance of the microphone,  $d$  = diameter of the microphone).