

마이크로폰 어레이를 이용한 2차원 공동 유동에 대한 소음원 규명

Acoustic Source Localization in 2D Cavity Flow using a Phased Microphone Array

이재형* · 최중수* · 박규철**

Jaehyung Lee, Jong-Soo Choi and Kyu-Chol Park

Key Words : Cavity Noise(공동 유동 소음), Microphone Array(마이크로폰 어레이), Beamforming(빔형성법), Noise Source(소음원), Anechoic Wind Tunnel(무향 풍동)

ABSTRACT

This paper presents an acoustic source localization technique on 2D cavity model in flow using a phased microphone array. Investigation was performed on cavity flows of open and closed types. The source distributions on 2D cavity flow were investigated in anechoic open-jet wind tunnel. The array of microphones was placed outside the flow to measure the far field acoustic signals. The optimum sensor placement was decided by varying the relative location of the microphones to improve the spatial resolution. Pressure transducers were flush-mounted on the cavity surface to measure the near-field pressures. It is shown that the propagated far field acoustic pressures are closely correlated to the near-field pressures. It is also shown that their spectral contents are affected by the cavity parameter L/D .

1. 서 론

전방향 계단과 후방향 계단의 조합으로 이루어진 형상을 공동 구조라 하는데 이를 지나는 불안정한 전단층과 공동 형상의 상호 관계에 의해 발생하는 소음을 공동 유동 소음이라 한다. 이는 항공기와 고속 지상 운송체의 외부 구조물에서 많이 발생하는 유체 소음원으로 고속전철의 열차간 연결부나 항공기 착륙장치 수납부 등에서의 발생 소음과 관련하여 많은 연구가 진행되어 왔다.

공동 구조는 크게 깊은 공동 구조와 얇은 공동 구조로 나누는데 이를 공동의 길이(L)와 깊이(D)의 비로 구분할 수 있다. $L/D \geq 1$ 인 경우를 얇은

공동 구조라 하고 $L/D \leq 1$ 인 경우 깊은 공동 구조라 한다.^(1, 2) 공동 구조에서 발생하는 소음은 후방향 계단의 박리된 유동과 전방향 계단에서 충돌하는 유동간의 상호 작용에 의해 발생한다.⁽²⁾ 깊은 공동 유동은 공동 구조 내에서 정지된 유동과 상류의 유동이 전단층을 유지하며 순환한다. 따라서 깊은 공동 구조의 소음은 유동 방향과 유동 진동이 수직인 방향으로 즉 깊이 방향으로 작용할 때 발생하는 소음으로 강한 톤 성분의 소음이 발생된다. 얇은 공동 구조의 소음은 유동장에 따라 다르며 일반적으로 유동방향과 같은 방향으로 진동할 때 톤 소음이 발생되며 발생하지 않는 경우도 있다.⁽³⁾

그러므로 깊은 공동 구조의 경우 유동이 공동의 벽면에 미칠 수 있는 변동 압력이 공동 유동에서 발생하는 소음과 상관성이 있음을 예상할 수 있고 이를 이용하여 공동의 표면 변동 압력을 측정함과 동시에 마이크로폰 어레이로 측정되는 음압신호를 분석하여 소음원의 위치를 예측할 수 있다.

* 충남대학교 항공우주공학과

E-mail : aerjhl@cnu.ac.kr

Tel : (042) 821-7776, Fax : (042) 825-9225

** (주) 파워엠엔씨 기술연구소

본 논문은 이차원 공동 구조 유동 소음에 대하여 마이크로폰 어레이를 이용하여 소음원의 위치를 규명하고, 공동 구조 표면의 변동 압력을 측정하여 발생소음에서 지배적인 주파수에서의 소음원의 위치를 비교하였다. 본 연구를 위해 마이크로폰 16개를 일차원으로 배열하여 실험을 수행하였고 어레이의 구성을 위해서 각 관심주파수에 대하여 어레이가 가질 수 있는 특성을 확인해 보았다. 측정 결과 변동압력의 분포와 어레이에서 측정하여 나온 에너지의 분포가 비교적 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

2. 어레이의 구성

음원이 측정점으로부터 비교적 가까이 존재할 경우는 음원으로부터 전파되는 음파를 구면파로 가정하여 센서간 상대적 시간지연을 계산하여야 한다. 공간상 한 지점 \vec{x} 에 위치하는 음원을 점음원으로 가정하고, 음원으로부터 발생되는 신호를 $s(t)$ 라 하면 음파는 구면파의 형태로 전파된다. 이때 파동 방정식의 해는 다음과 같은 형태로 표현되며,

$$f(x, t) = \frac{s(t - |\vec{x} - \vec{x}^0|/c)}{|\vec{x} - \vec{x}^0|} \quad (1)$$

m 번째 센서에서 측정되는 신호는 $y_m(t) = s(t - r_m^0/c)/r_m^0$ 이 된다. 여기서 r_m^0 는 소음원과 센서간의 거리이고 c 는 음파의 진행 속도이다. 구면파의 경우 각 센서간 위상차 Δ_m 은 다음과 같이 계산되며,

$$\Delta_m = \frac{r^0 - r_m^0}{c} \quad (2)$$

이를 고려하여 구한 어레이 출력신호는 다음과 같이 표현된다.

$$z(t) = \frac{1}{r^0} s(t - r^0/c) \left[\sum_{m=0}^{M-1} w_m \frac{r^0}{r_m^0} \right] \quad (3)$$

만약 음원의 실제 위치와는 다른, 어레이 중심으로부터 r 만큼 떨어진 위치(가상점)에서 음파가 발

생되는 것으로 가정하여 시간차를 계산할 경우 보정량에 오차가 발생하고 이때의 출력 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$z(t) = \sum_{m=0}^{M-1} \frac{w_m}{r_m^0} s\left(t - \frac{r - (r_m^0 - r_m)}{c}\right) \quad (4)$$

가상점과 음원의 위치가 일치하지 않을 경우 위상차에 의한 각 센서신호 상호간의 간섭에 의하여 출력 값은 감소하게 된다. 이러한 간섭은 가상점의 위치에 따라 변화하며 결국 어레이의 방향성(어레이 패턴)을 나타낸다. 어레이 패턴은 주파수에 따라 변화하는데, 위에서 구한 어레이 출력신호를 푸리에 변환하여 주파수 도메인에서 다음과 같이 어레이 출력 $W(k, \vec{x}, \vec{x}^0)$ 는 다음과 같이 표현된다.⁽⁴⁾

$$W(k, \vec{x}, \vec{x}^0) \equiv \sum_{m=1}^M w_m \frac{r^0}{r_m^0} e^{jk(r-r) - (r_m^0 - r_m)} \quad (5)$$

여기서 \vec{x} 는 어레이가 가정한 음원의 위치(가상점)를 의미하고, \vec{x}^0 는 음원의 위치이다. 그리고 r^0 와 r_m^0 은 각각 소음원으로부터 어레이 중심과 m번째 센서까지의 거리이고, r 과 r_m 은 각각 가상점으로부터 어레이 중심과 m번째 센서까지의 거리이다. w_m 은 어레이의 응답을 개선하기 위해 사용되는 가중치이다. 어레이 응답은 \vec{x}^0 를 기준으로 하여 dB로 다음과 같이 표현하였다.⁽⁴⁾

$$dB(\vec{x}) = 20 \log_{10} \left[\frac{|W(k, \vec{x}, \vec{x}^0)|}{|W(k, \vec{x}^0, \vec{x}^0)|} \right] \quad (6)$$

어레이의 응답으로부터 어레이의 배열에 따라 이론적으로 빔폭과 사이드롭(side lobe)의 특성을 알 수 있다. 어레이 빔폭은 어레이 방향 패턴의 파위가 반이 되는 지점으로부터 만나는 각도로 표현된다. 다시 말해 방향성 패턴 위에 있는 이들 점들은 어레이 개인이 최고 개인보다 3dB 낮은 개인이 있는 지점들이다. 어떤 임의의 주어진 소음원 거리가 있으면 이 각도의 빔 폭은 거리 단위로 표시될 수 있다.

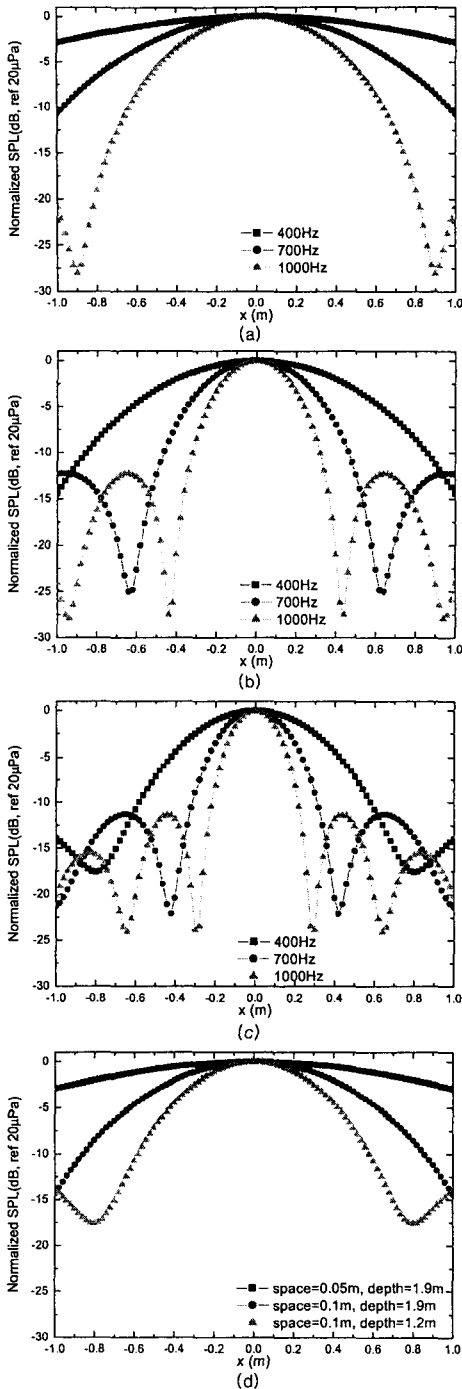


Fig. 1 Beam-patterns of 400Hz, 700Hz, and 1000Hz when microphone array configuration is (a)spacing=0.05m, depth=1.9m, (b)spacing=0.1m, depth=1.9m (c)spacing=0.1m, depth=1.2m. (d) Beam-pattern Comparison of 400Hz case when different array configurations

Fig. 1은 16개의 마이크로폰을 일렬로 배치하여 일차원 어레이를 구성할 때 어레이의 형태와 소음원과의 거리에 따른 빔패턴을 보여주고 있다.

센서의 수를 16개로 고정하고 센서와 소음원과의 거리를 1.9m, 1.2m로 변화시키고 센서 사이 간격 0.05m와 0.1m로 각각 변화시키면서 빔폭과 사이드롭이 변화하는 것을 비교하였다. Fig. 1의 (a)와 (b)에서 센서의 간격이 좁을 경우에 사이드롭의 영향은 적지만 빔폭이 넓고 간격이 넓어지면 빔폭이 좁아지면서 사이드롭의 크기가 증가하는 것을 알 수 있다. 빔폭이 증가하거나 사이드롭이 커지면 어레이가 지향하는 방향의 음원 뿐 아니라 주변의 소음까지 포함하여 인식하기 때문에 분해능이 떨어지게 된다. 또한 Fig. 1의 (b)와 (c)에서 보듯이 센서간의 간격이 같은 경우 센서와 소음원과의 거리가 가까워지면 빔폭이 줄어들게 된다.

Fig. 1 (d)에서 관심주파수가 400Hz이고 센서의 수가 16개일 경우, 센서간격을 0.05m에서 0.1m로 두 배로 넓히면 빔폭이 줄어들음을 확인할 수 있다. 그러나 간격이 넓어짐에 따라 사이드롭의 영향이 커짐으로 인한 문제가 발생한다. 결국 어레이 간격은 빔폭과 사이드롭의 영향을 최소화하는 범위에서 결정되어야 하고 또한 측정하고자 하는 신호의 주파수에 따라 변화되어야 한다.

본 실험에서 사용한 어레이를 사용할 경우의 빔패턴은 Fig. 1의 (b)에 도시하였다. 앞의 두 가지 다른 경우에서와 마찬가지로 관심 주파수에 따라 어레이 특성이 바뀌고 있음을 알 수 있다.

3. 실험 장치 구성

공동 구조의 유동 소음 측정 실험은 충남대학교 항공우주공학과에 있는 무향 풍동 실험실에서 수행하였다. 무향 풍동의 차단주파수는 350Hz이고 출구의 형상은 0.3m×0.3m의 정사각형 형태이다.

실험에 사용된 장비는 벽면의 변동압력을 측정하기 위한 PCB Piezotronics사의 변동압력센서 8개와 자유음장 측정용 마이크로폰 16개를 사용하였다. 데이터 획득에 사용된 컴퓨터는 펜티엄IV 2GHz이고 LabVIEW를 이용하여 데이터 측정 및 후처리를 하였다.

신호계측은 NI사의 PCI-4472 데이터획득카드 두

장을 사용하여 채널 간 위상차 없이 동시에 샘플링할 수 있도록 하였다. PCI-4472 데이터 획득카드 는 개인용 컴퓨터에 장착하여 사용되었고, 두 장 이상의 카드를 RTSI 케이블로 연결하여 확장 사용할 수 있다. 또한 ICP 회로가 있어 마이크로폰과 압전 센서에 전류를 걸어줄 수 있는 기능을 가지고 있다.

한 번의 데이터 계측 시 데이터의 개수를 102,400개를 받았고 수집 속도는 4096Hz로 하였다. 데이터의 후처리 시 FFT의 블록 크기는 1024개로 했고 100번 평균을 낼 수 있도록 했다.

실험 장치의 좌표는 Fig. 3에서 보듯이 공동의 전방향 계단 끝을 기준으로 x축은 흐름 방향으로 y축은 흐름에 수직인 방향으로 삼았다. 변동압력센서의 위치는 0.0375m, 0.06m, 0.09m, 0.125m, 0.135m, 0.165m, 0.18m, 0.195m에 각각 설치되었다.

실험은 공동의 깊이를 변화시키면서 유속 20m/s에서 40m/s까지 변화시키면서 수행되었다. 공동 형상에서 길이는 0.15mm로 고정되어 있고 깊이는 136.4mm, 125.0mm, 115.4, 107.1mm, 100.0mm에 대하여 각각 속도를 변화시키면서 측정하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

Fig. 4는 공동이 없는 상태와 L/D가 1.1인 상태의 공동 유동에 대한 스펙트럼을 비교하여 나타낸 것이다. 실선은 공동이 없는 상태의 흐름에서 발생하는 소음의 스펙트럼을 보여주고 있고 점선은 공동이 있는 상태의 소음 스펙트럼이다. 200Hz 이하인 부분에서 스펙트럼의 형상이 같게 나오는 것은 공동 구조물을 지지해 주고 있는 평면판 끝 부분에서 발생하는 후류의 영향 때문인 것으로 판단된다. 유속이 30m/s의 경우보다 35, 40m/s의 경우에서 신호대 잡음비가 크게 나오는 것을 관찰할 수 있다. 이런 강한 톤 성분의 소음원에 대하여 관찰하는 것이 뚜렷한 소음원 판별에 유리하다. 또한 후방계단 위에 위치한 변동 압력센서와 공동의 중심과 같은 위치에 있는 마이크로폰과의 코히어런스를 이용하여 공동 유동내의 변동압력과 유동 소음에 의한 상관성을 살펴보면 400Hz와 800Hz주변에서 상관성이 있는 톤 성분의 주파수를 관찰할 수 있다.

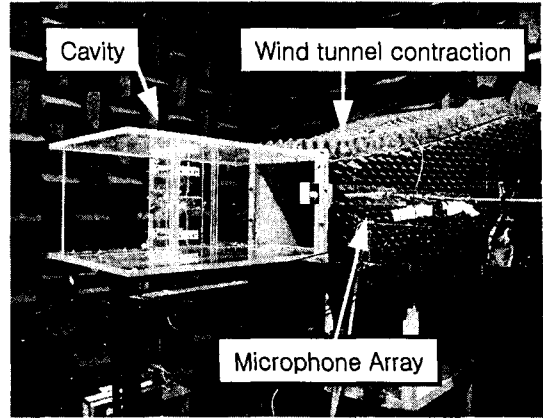


Fig. 2 Picture of cavity noise measurement in CNU anechoic wind tunnel

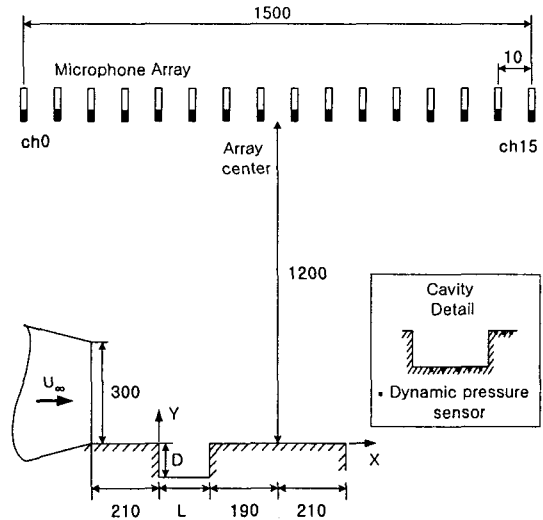


Fig. 3 Geometry of microphone array and cavity

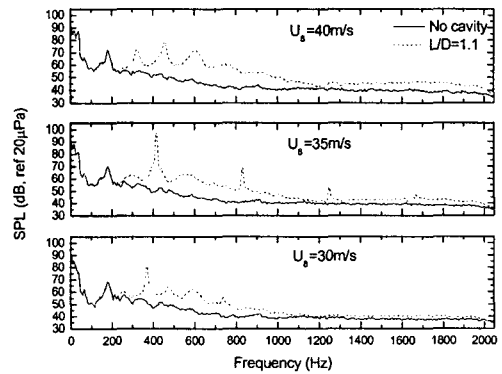


Fig. 4 Spectrum of background and cavity flow noise (L/D=1.1 U_{∞} =30m/s, 35m/s, and 40m/s)

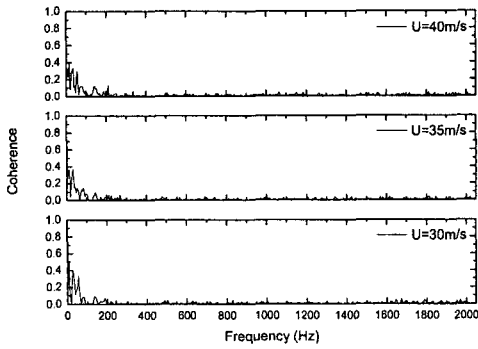


Fig. 5 Coherence between the surface pressure and a far-field microphone of background noise (No cavity, $U_\infty=30\text{m/s}$, 35m/s , and 40m/s)

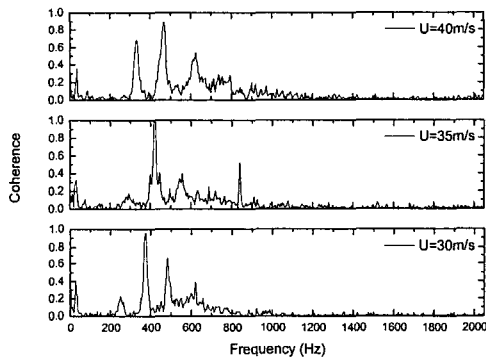


Fig. 6 Coherence between the surface pressure and a far-field microphone ($L/D=1.1$, $U_\infty=30\text{m/s}$, 35m/s , and 40m/s)

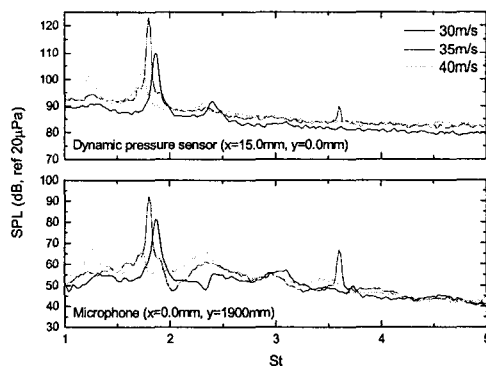


Fig. 7 Comparisons between spectrums of dynamic pressure and SPL in case of $L/D=1.1$

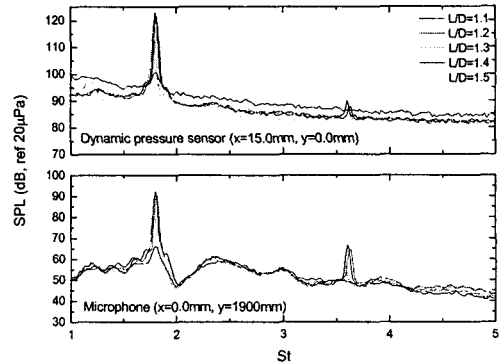


Fig. 8 Comparisons between spectrums of dynamic pressure and SPL in case of $U_\infty=35\text{m/s}$

코히어런스를 확인한 Fig. 5에서는 표면 변동 압력과 배경 소음의 상관성이 낮게 나타나는 것을 알 수 있다. 이것으로 배경 소음의 발생 원인이 평면판 경계층 내의 난류 성분에 의한 것이 아닌 것을 확인할 수 있다. L/D 가 1.1인 상태에서의 코히어런스는 Fig. 6에 도시되어 있는데 일부의 주파수에서 1에 가까운 값을 갖는 것을 확인할 수 있다. 이는 톤 성분이 강하게 있는 부분의 주파수에서 두 측정신호 사이의 상관성이 높게 나타나는 것으로 변동 압력에 의한 유동의 진동이 공동 소음 발생의 직접적인 원인임을 시사하고 이러한 주파수에서 빔파위에 의한 소음원 위치 판별 정확도가 높을 가능성이 있기 때문에 이를 실험 조건으로 사용하였다.

Fig. 7은 L/D 가 1.1($D=136.4\text{mm}$)인 상태에서 유속이 30m/s , 35m/s , 그리고 40m/s 인 경우로 변화시키면서 실험을 수행한 결과를, 특성길이 L , 각각의 속도로 무차원하여 스트로홀수에 따른 스펙트럼 변화를 보여주고 있다. 변동압력센서나 마이크로폰에서 같은 스트로홀수에서 높은 크기의 톤 성분이 발생하는 것을 관찰할 수 있고 유속이 변함에 따라 톤 성분의 주파수 위치와 스펙트럼 형상이 변하는 것을 알 수 있다.

스트로홀수를 사용하여 무차원하였지만 스펙트럼 상 첨두치의 위치가 변하는 것은 특성 길이로 예상한 공동의 길이가 소음발생에 직접적으로 영향을 주는 주요변수가 아님을 알 수 있다. 또한 Fig. 8에서 보듯이 유속을 35m/s 로 고정하고 공동

의 깊이를 변화시켰을 경우에도 침두치의 위치에 영향을 주지 않음으로 공동의 깊이도 특성길이గా 아님을 알 수 있다. 따라서 스트로홀수는 공동의 형상에 독립적임을 예상할 수 있다.

하지만 같은 형상의 공동 구조에서 유속이 변화할 때 Fig. 7에서 스트로홀수 1.7 근처의 침두치가 변하는 것을 알 수 있다. 이것은 공동으로 들어오는 유속과 평판 사이에 발생하는 경계층의 두께가 특성 길이로서 영향을 미칠 수 있는 가능성이 있다고 할 수 있다.

Fig. 9, Fig. 10 그리고 Fig. 11에서 L/D 가 1.1인 상태에서 유속을 변화시키고 스펙트럼, 변동압력의 크기 그리고 빔형성법에 의한 파워의 분포를 그린 것이다. 각각의 그래프에서 (a)는 스펙트럼을 (b)는 공동에 설치한 변동압력의 센서가 위치한 곳에서의 변동압력의 크기를 보이고 있다. (c)는 각 주파수에서의 빔파워를 측정된 빔파워의 최대값으로 무차원한 것으로 소음원이 있는 곳은 크기가 0인 부분의 위치로 알 수 있다.

먼저 어레이 중에 중앙에 위치한 마이크로폰에서의 스펙트럼을 관찰해 보면 톤 성분이 크게 발생하는 주파수를 선정할 수 있다. 유속이 30m/s인 경우에 368Hz, 476Hz, 600Hz, 736Hz에서 35m/s인 경우에는 416Hz와 조화성분인 832Hz 그리고 40m/s인 경우에 324Hz, 464Hz, 604Hz 등에서 강한 톤 성분이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한 각 그래프 (b)에서는 변동압력 분포가 후방계단의 전후에서 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 특히 Fig. 10에서의 변동압력 분포는 후방계단을 전후로 큰 차이를 보이며 분포하고 있는데 이러한 뚜렷한 차이는 빔형성법에 의한 결과에서 빔파워가 정확히 소음원의 위치를 가리키는 것으로 확인할 수 있다. 일반적으로 공동 유동의 소음 발생원이 후방향 계단에 위치하고 나타나는 것을 확인할 수 있다.

마이크로폰 어레이를 이용하여 같은 L/D 에서 공동 유동 소음 중 강한 크기를 갖는 톤 성분의 주파수에 대하여 빔형성법을 적용하여 소음원의 위치를 판별한 결과를 고찰하였다. 이로써 각각의 주파수에서 공동 유동에 지배적인 소음원의 변동압력의 분포와 빔형성법의 결과가 비슷한 양상을 보이고 있음을 알 수 있다.

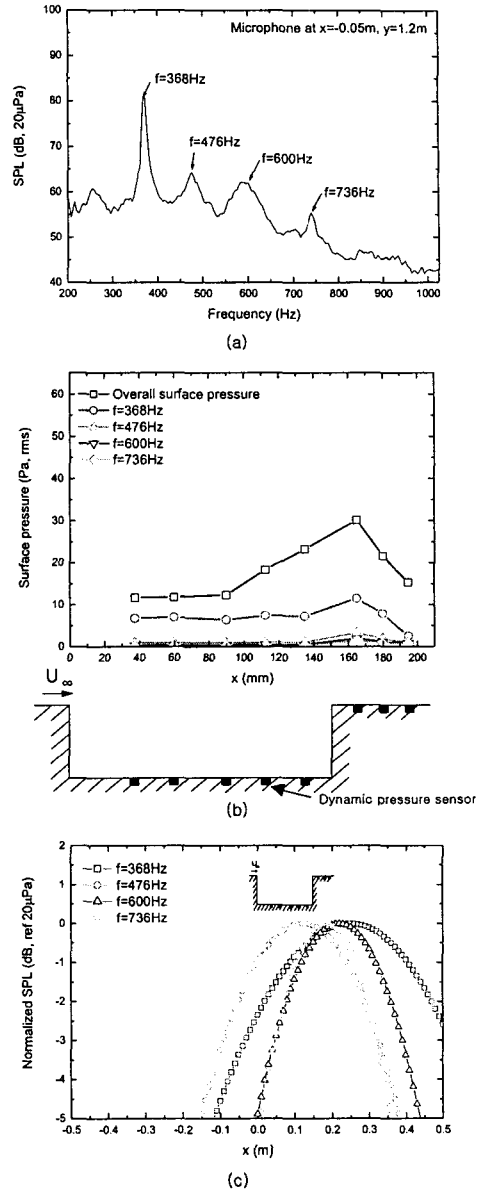
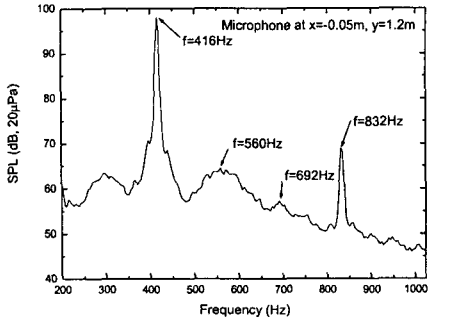
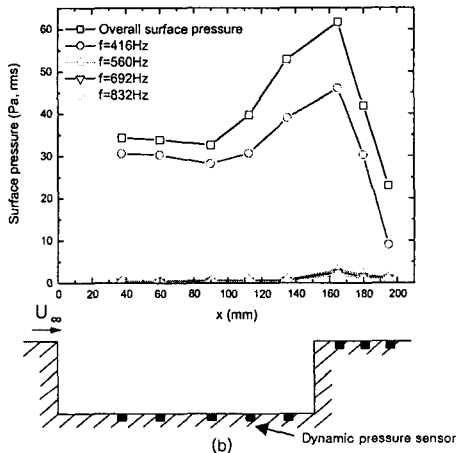


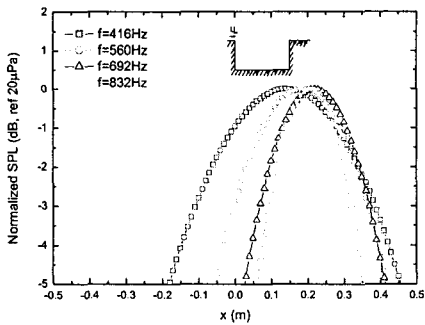
Fig. 9 $L/D=1.1$, $U_{\infty}=30\text{m/s}$ (a) Overall SPL ($\Delta f=4\text{Hz}$) (b) Overall dynamic pressure and dynamic pressure distributions at $f=368\text{Hz}$, 476Hz, 600Hz and 736Hz (c) Power distributions



(a)

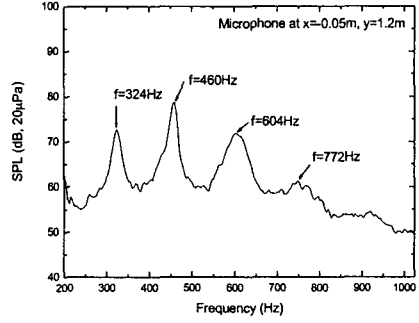


(b)

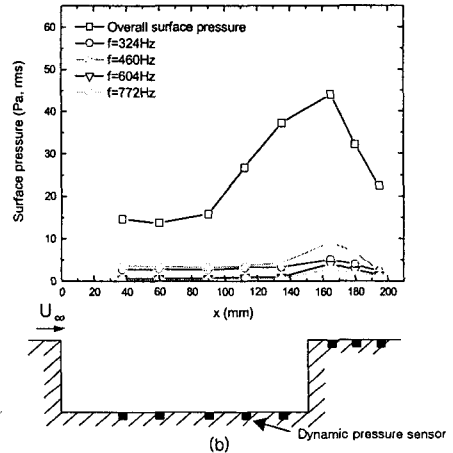


(c)

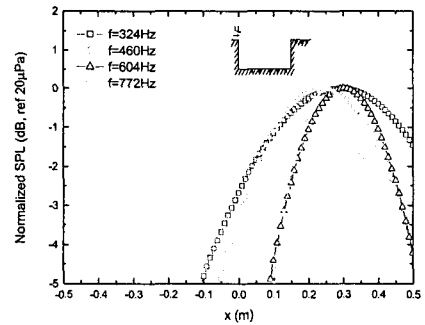
Fig. 10 $L/D=1.1$, $U_\infty=35\text{m/s}$ (a) Overall SPL ($\Delta f=4\text{Hz}$) (b) Overall dynamic pressure and dynamic pressure distributions at $f=416\text{Hz}$, 560Hz , 692Hz and 832Hz (c) Power distributions



(a)



(b)



(c)

Fig. 11 $L/D=1.1$, $U_\infty=35\text{m/s}$ (a) Overall SPL ($\Delta f=4\text{Hz}$) (b) Overall dynamic pressure and dynamic pressure distributions at $f=324\text{Hz}$, 460Hz , 604Hz and 772Hz (c) Power distributions

5. 결 론

공동 유동 소음의 발생 메카니즘을 고려하였을 때 표면에서 발생하는 변동 압력과 공기 증으로 전파되는 소음간에 매우 밀접한 상관관계가 있음을 변동 압력 측정과 마이크로폰 어레이를 이용한 소음원 관찰로 확인하였다. 빔형성법의 결과로 나타난 소음원의 위치는 코히어런스를 고려한 주파수에서의 변동 압력 크기 분포와 일치하는 결과를 보여주는 것을 확인할 수 있었다.

발생 소음의 크기가 클수록 배경 소음과 대비되는 소음원에 대한 빔파워의 분해능을 좋게 한다. 본 실험에서 공동 유동 소음의 특성으로 L/D의 크기가 증가하면서 따라 첨두치의 크기가 감소하게 되는 것을 알 수 있었고 뚜렷한 첨두치가 나타나는 L/D가 1.1인 상태를 기준으로 측정을 수행했다.

마이크로폰을 구성할 때 빔패턴에 영향을 미치는 인자로 어레이의 크기, 센서간의 간격, 소음원과의 거리, 관심 주파수 등에 의한 영향을 고려하여야 한다. 본 논문에서 공동 유동의 발생 소음은 비교적 낮은 주파수 성분의 것으로 이에 대한 소음원 측정을 위해 최적인 어레이의 구성이 필요했다.

낮은 주파수 성분에 대한 빔파워의 결과는 분해능이 높은 주파수 성분의 것보다 상대적으로 낮기 때문에 좋은 분해능을 갖기 위해서는 어레이 크기가 커져야할 필요가 있다. 하지만 풍동 시설과 공간의 문제로 어레이의 크기에는 한계가 있을 수 밖에 없고 센서의 배치와 소음원과의 거리를 조절하여 원하는 분해능을 얻어야 한다. 혹은 유속을 증가시켜 발생 소음의 주파수를 높임으로써 빔파워의 분해능을 높이는 방법이 될 수 있다.

참 고 문 헌

- (1) M. B. Trace, E.B. Plentovich, Characterization of cavity flow field using pressure data obtained in the Lagley 0.3-Meter Transonic Cryogenic Tunnel, NASA Technical Memorandum NASA TM-4436.
- (2) M. B. Trace, E.B. Plentovich, Measurement of fluctuating pressure in a rectangular cavity in transonic flow at high Reynolds numbers, NASA Technical Memorandum NASA TM-4363.
- (3) 박규철, 1999, "마이크로폰 어레이를 이용한 공동 구조에서의 공력 소음원 규명에 관한 연구", 충남대학교 대학원 석사논문.
- (4) Johnson, D. H., Dudgeon, D. E., 1993, Array Signal Processing: Concepts and Techniques, Prentice-Hall.
- (5) Blake, William K., 1986, Mechanics of Flow-Induced Sound and Vibration, Academic Press, INC, pp. 138~pp 149.
- (6) William M. Humphreys, Jr Thomas F. Brooks, William W. Hunter, Jr Kristine, R. Meadows, 1998, Design and Use of Microphone Directional Arrays for Aeroacoustic Measurement, AIAA 36th Aerospace Science Meeting & Exhibit.
- (7) Kristine R. Meadows, Thomas F. Brooks, William M. Humphreys, Jr, William W. Hunter, Jr Carl H. Gerhold, 1997, Aeroacoustic Measurements Of a wing-Flap Configuration, AIAA 97-1595.
- (8) Virendra Sarohia, 1977, Experimental Investigation of oscillations in flows over shallow cavities, AIAA J Vol. 15, No. 7.
- (9) T. M. Farabee, M. J. Casarella, 1986, Measurements of fluctuating wall pressure for separated/reattached boundary layer flows, ASME Vol. 108.
- (10) Jay C. Hardin, D. Stuart Pope, 1997, Sound generation by flow over a two-dimensional cavity, AIAA J. Vol. 33, No. 3.
- (11) D. Rockwell, C. Knisley, 1979, The organized nature of flow impingement upon a corner, J. Fluid Mech., Vol. 93, part 3, pp 413-432.