

# 2차원 공동 유동에서의 소음원 위치 판별을 위한 실험적 연구 Experiments for the Acoustic Source Localization in 2D Cavity Flow

이 재 형\* · 최 종 수† · 박 규 철\*\*

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

(2004년 3월 9일 접수 : 2004년 11월 6일 심사완료)

**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 an 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 and 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.<sup>(1, 2)</sup>

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

공동 구조라 하고  $L/D \leq 1$ 인 경우 깊은 공동 구조라 한다.<sup>(1, 2)</sup> 공동 구조에서 발생하는 소음은 후방향 계단의 박리된 유동과 전방향 계단에서 충돌하는 유동 간의 상호 작용에 의해 발생한다. 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. 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 음압 신호를 분석하여 소음원의 위치를 예측할 수 있다. 얇은 공동 구조의 소음은 유동장에 따라 다르며 일반적으로 유동방향과 같은 방향으로 진동할 때 톤 소음이 발생되며 발생하지 않는 경우도 있다.<sup>(3)</sup>

이 논문은 이차원 공동 구조 유동 소음에 대하여

† 책임저자 : 정희원, 충남대학교 항공우주공학과  
E-mail : jchoi@cnu.ac.kr  
Tel : (042) 821-66834, Fax : (042) 825-9225  
\* Pennsylvania State University  
\*\* (주)파워엠엔씨 기술연구소

마이크로폰 어레이를 이용하여 소음원의 위치를 규명하였고, 공동 구조 표면의 변동 압력을 측정하여 발생소음에서 지배적인 주파수에서의 소음원의 위치를 비교하였다. 원거리에서 측정되는 소음은 주로 표면에서의 변동압력에 의하여 발생하나, 근접장에서의 압력 상호 간섭에 의하여 전파되는 소음의 상대적 크기는 표면에서의 분포와 다를 수 있으며 이 연구에서는 이들 간의 상대적 위치 변화를 비교하기 위하여 수행되었다. 실험을 위하여 공동 주변에 마이크로폰 16개를 일차원으로 배열하였고 이차원 공동 표면에 8개의 변동압력 센서를 부착하여 실험을 수행하였다.

## 2. 어레이의 구성

어레이를 이용하여 소음원을 측정할 때, 음원이 어레이 평면에 가까이 존재할 경우는 음원으로부터 전파되는 음파를 구면파로 가정하여 센서 간 상대적 시간지연을 계산할 수 있다. 어레이 중심으로부터  $\vec{x}^0$  거리에 위치하고 있는 음원을 점음원으로 가정하고, 음원으로부터 발생하는 신호를  $s(t)$ 라 하면, 음파는 구면파의 형태로 전파된다. 이때 파동 방정식은 다음과 같은 형태로 표현되며,

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

따라서,  $m$  번째 센서에서 측정되는 신호는  $y_m(t) = s(t - r_m^0/c)/r_m^0$  이 된다. 여기서  $r^0$  와  $r_m^0$  는 각각 소음원로부터 어레이 중심과  $m$  번째 센서까지의 거리이고  $c$  는 음파의 진행 속도이다. 구면파의 경우 각 센서 간 위상차  $\Delta_m$  은 다음과 같이 계산되며,

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

이를 고려하여 각각의 센서에서 측정된 신호의 위상을 보정하고, 이들을 아래의 식을 이용하여 더하여 주면 어레이 출력 신호가 계산 된다.

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

위 식에서  $w_m$  은 어레이의 가중치이다.

만약 음원의 실제 위치와는 다른, 어레이 중심으로 부터  $r$  만큼 떨어진 가상의 위치에서 음파가 발생하는 것으로 가정하여 시간차를 계산할 경우 가중치에 의하여 보정된다. 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 출력값은 감소하게 된다. 어레이의 출력값의 크기는 가상점의 위치에 따라 변화하며 어레이의 방향성 혹은 빔패턴으로 표현된다. 또한 빔패턴은 주파수에 따라 변화하는데, 위에서 구한 어레이 출력신호를 푸리에 변환하여 주파수 영역에서 식 (5)와 같이  $W(k, \vec{x}, \vec{x}^0)$  로 표현할 수 있다.  $\vec{x}$  는 어레이가 가정한 음원의 위치(가상점)를 의미하고,  $\vec{x}^0$  는 실제 음원의 위치이다. 그리고  $r$  과  $r_m$  은 각각 가상점으로부터 어레이 중심과  $m$  번째 센서까지의 거리이다.<sup>(4)</sup>

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

어레이의 빔패턴은  $\vec{x}^0$  에 대하여 계산한 파워를 기준으로 다음과 같이 dB로 표현한다.<sup>(5)</sup>

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

어레이의 형상에 따라 변하는 빔패턴의 빔폭 (beam width) 과 부엽 (side lobe) 으로부터 어레이 성능을 파악할 수 있다. 어레이 빔폭은 어레이의 동적 영역 (dynamic range) 에서 최고점의 크기보다 3 dB 낮은 지점들로 둘러진 크기이고 어레이 빔패턴에서 파워가 반이 되는 지점으로 각도의 함수로 표현하거나 임의의 측정 거리가 있으면 빔폭은 거리 단위로도 표시될 수 있다.

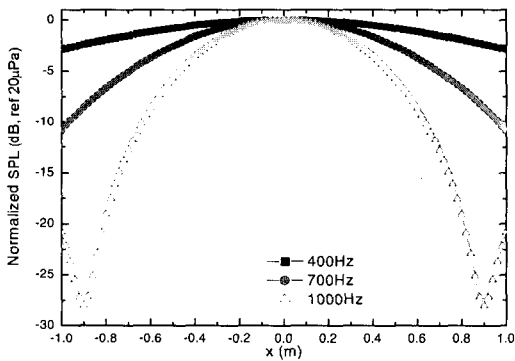
Fig. 1은 16개의 마이크로폰을 일렬로 배치하여 일차원 어레이를 구성할 때 어레이의 형태, 소음원과의 거리 그리고 관심 주파수에 따른 빔패턴을 보여주고 있다.

센서 수를 16개, 그리고 측정 공간을 고려하여 센서 간격을 0.05 m와 0.1 m로 변화시키면서 빔폭과 부

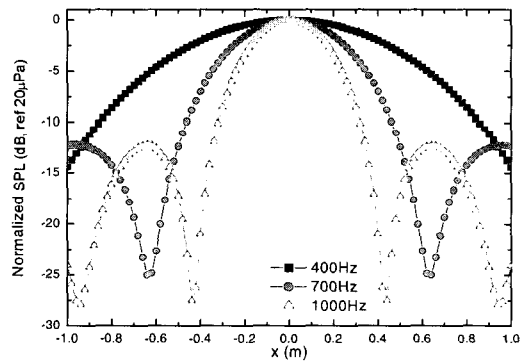
음이 변화하는 것을 비교하였다. 무향실의 크기와 노즐로부터 나오는 후류의 영향을 받지 않는 범위를 고려하여 어레이와 소음원의 거리는 1.9m와 1.2m의 경우로 하였다. 어레이의 관찰 범위는 어레이 중심으로부터 좌우 1.0m 내이다. Fig.1의 (a)와 (b)를 비교할 때 센서의 간격이 좁을 경우, 관찰범위 내에서 부엽의 영향은 작지만 빔폭이 넓어져 분해능이 작아지고, 센서의 간격이 넓어지면 빔폭이 좁아지면서 부엽의 수가 증가하는 것을 알 수 있다. 빔폭이 증가하거나 부엽의 수가 증가하면 어레이가 지향하는 방향의 음원 뿐 아니라 주변의 존재하지 않는 소음원을 나타내거나 분해능이 떨어지게 된다. 또한 Fig.1의 (b)와 (c)에서 보듯이 센서 간격이 같은 경우 센서와 소음원과의 거리가 가까워지면 빔폭이 줄어들게 된다.

Fig.1(d)에서 관심주파수가 400 Hz이고 센서의 수가 16개일 경우, 센서간격을 0.05m에서 0.1m로 두 배로 넓히면 빔폭이 줄어들음을 확인할 수 있다. 그러나 간격이 넓어짐에 따라 부엽의 형태가 가운데로 모아지는 양상을 확인할 수 있다. 그리고 Fig.1의 (a), (b), (c)에서 볼 수 있듯이 각 조건에 대해 관심주파수가 높아지면 빔폭도 작아지는 것을 알 수 있다.

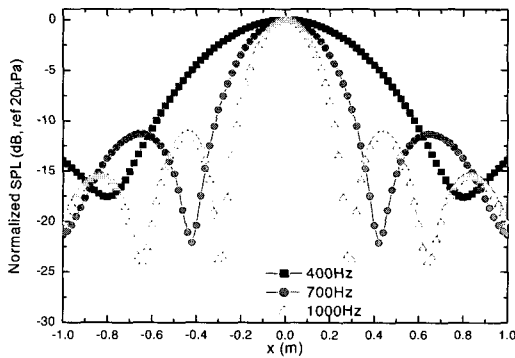
어레이 형상은 빔폭을 최소화하고 부엽의 영향이 낮은 빔패턴을 갖도록 결정되어야하고 또한 측정하고자 하는 신호의 주파수에 따라 좋은 분해능을 나타내는 형상을 선택해야 한다. 따라서 본 실험 조건에서 좋은 빔폭을 나타내는 어레이의 조건으로 0.1m의 센서 간격과 측정 거리 1.2m인 것을 선택하여 시험에 적용하였다.



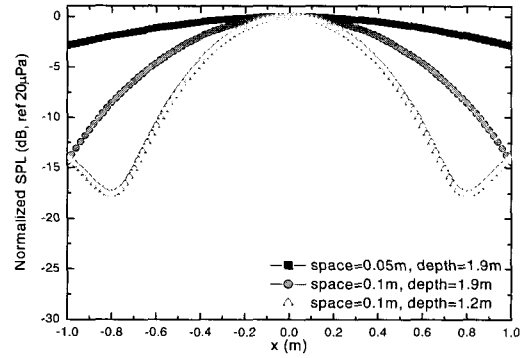
(a)



(b)



(c)



(d)

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

### 3. 실험 장치 구성

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

벽면의 변동압력을 측정하기 위하여 PCB Piezotronics 사의 변동압력센서 8개를 벽면에 설치하고 자유 음장 측정용 마이크로폰 16개로 일차원 어레이를 구성했다. 어레이는 공동으로부터 1.2 m 떨어진 거리에 위치시켜 후류의 영향이 없도록 했다. 신호계측은 NI사의 PCI-4472 데이터 획득장비로 수집 속도

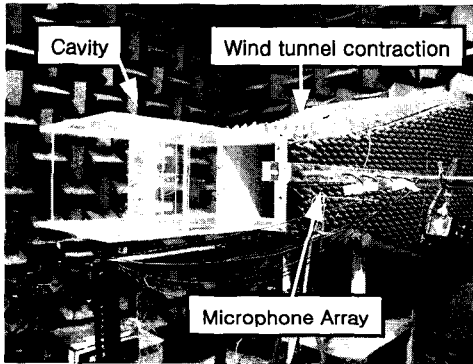


Fig. 2 Photo of the measurement system of cavity noise in the CNU anechoic wind tunnel

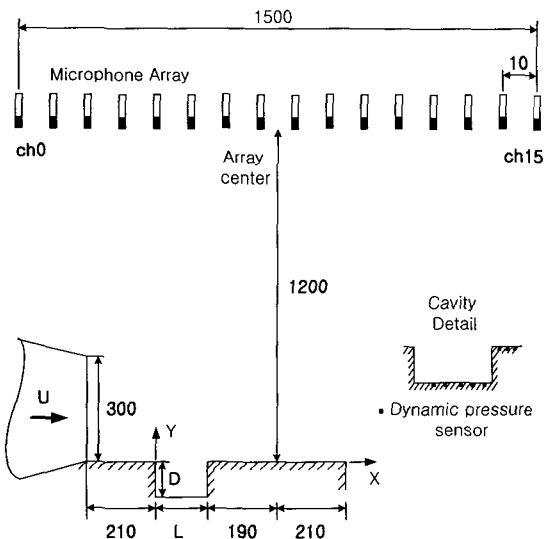


Fig. 3 Geometry of microphone array and cavity

4,096 Hz로 102,400개의 데이터를 받았다. 데이터의 후처리 시 FFT의 블록 크기는 1,024개로 하고 100번 평균 내었다.

실험 장치의 좌표는 Fig. 3에서 공동의 전방향 계단 끝을 기준으로 x축은 흐름 방향으로 y축은 흐름에 수직인 방향으로 삼았다. 변동압력센서의 위치는 공동의 전방계단 모서리를 기준으로 0.0375 m, 0.06 m, 0.09 m, 0.125 m, 0.135 m, 0.165 m, 0.18 m 그리고 0.195 m의 위치에 설치했다.

공동의 깊이를 변화하며 유속 30 m/s, 35 m/s 그리고 40 m/s에 대해 실험을 수행하였다. 공동 형상에서 길이(L)는 0.15 m로 고정되어 있고, 깊이(D)는 0.136 m, 0.125 m, 0.115 m, 0.107 m 그리고 0.1 m로 변화시켰고 각 깊이 조건에 대하여 속도를 변화시키며 측정하였다.

### 4. 실험 결과 및 고찰

Fig. 4부터 Fig. 8은 공동 중앙에 위치한 5번 마이크로폰과 후방계단 위에 위치한 변동 압력센서 ( $x = 0.165$  m)의 측정 결과를 보이고 있다.

Fig. 4는 공동이 없는 상태와 L/D가 1.1인 상태의 공동 유동에 대한 마이크로폰 데이터로부터 스펙트럼을 비교하여 나타낸 것이다. 실선은 공동이 없는 상태의 흐름에서 발생하는 소음의 스펙트럼을 보여주고 있고 점선은 공동이 있는 상태의 소음 스펙트럼이다. 200 Hz 이하인 부분에서 스펙트럼의 형상이 같게 나오는 것은 공동 구조물을 지지해 주고 있는 평면판 끝 부분에서 발생하는 후류의 영향 때문인 것으로 판

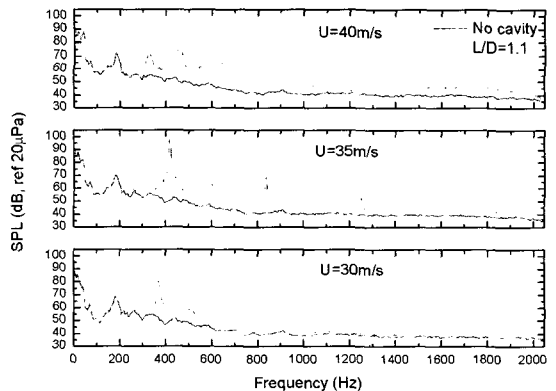


Fig. 4 Spectrum of background and cavity flow noise of ch 5 microphone ( $L/D = 1.1$ ,  $U = 30$  m/s, 35 m/s, and 40 m/s)

단된다. 유속이 30 m/s의 경우보다 35 m/s와 40 m/s의 경우에서 신호 대 잡음비가 크게 나오는 것을 관찰할 수 있다. 이런 강한 톤 성분의 소음원에 대하여 관찰하는 것이 뚜렷한 소음원 판별에 유리하다.

후방계단 위에 위치한 변동 압력센서( $x=0.165$  m)와 공동의 중심과 같은 위치에 있는 마이크로폰(5번)과의 상관함수(coherence)를 이용하여 공동 유동내의 변동압력과 유동 소음에 의한 상관성을 살펴보면 400 Hz와 800 Hz 주변에서 상관성이 있는 톤 성분의 주파수를 관찰할 수 있다. 상관함수를 확인한 Fig. 5에서는 표면 변동 압력과 배경 소음의 상관성이 낮게 나타나는 것을 알 수 있다. 이것으로 배경 소음의 발

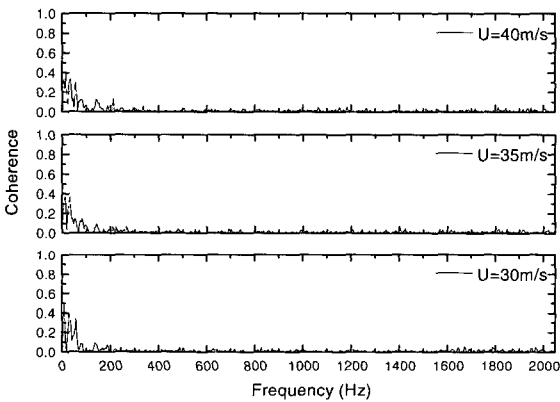


Fig. 5 Coherence between the surface pressure and a far-field microphone of background noise(No cavity,  $U=30$  m/s, 35 m/s, and 40 m/s)

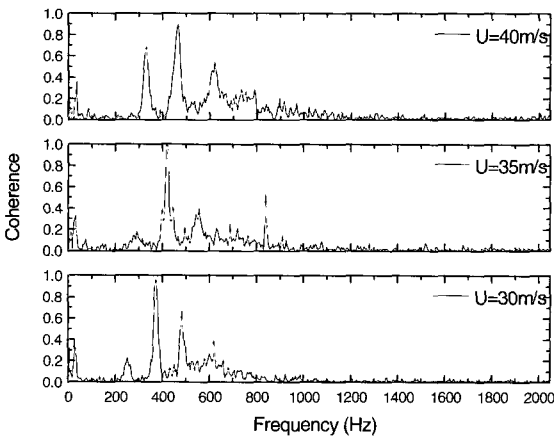


Fig. 6 Coherence between the surface pressure and a far-field microphone ( $L/D=1.1$ ,  $U=30$  m/s, 35 m/s, and 40 m/s)

생 원인이 평면판 경계층 내의 난류 성분에 의한 것이 아닌 것을 확인할 수 있다.

$L/D$ 가 1.1인 상태에서의 상관함수는 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 보이고 있고 이러한 주파수에서 빔파위에 의한 소음원 위치 판별 정확도가 높을 가능성이 있기 때문에 이를 빔형성 기법 적용 시의 관심 주파수로 선택하였다.

Fig. 7은  $L/D$ 가 1.1( $D=136.4$  mm)인 상태에서 유속이 30 m/s, 35 m/s, 그리고 40 m/s인 경우로 변화시키면서 실험을 수행한 결과를, 특성길이  $L$ , 각각의 속도로 무차원하여 스트로홀수에 따른 스펙트럼 변화

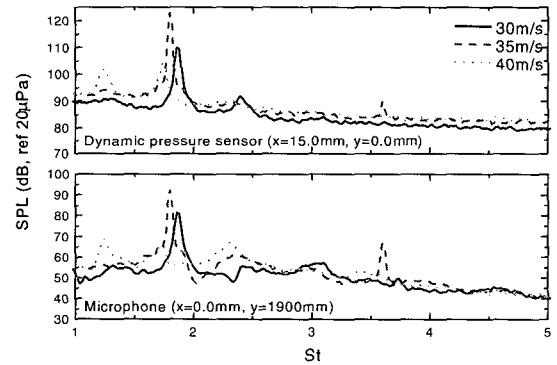


Fig. 7 Comparisons between spectrums of dynamic pressure and SPL in case of  $L/D=1.1$

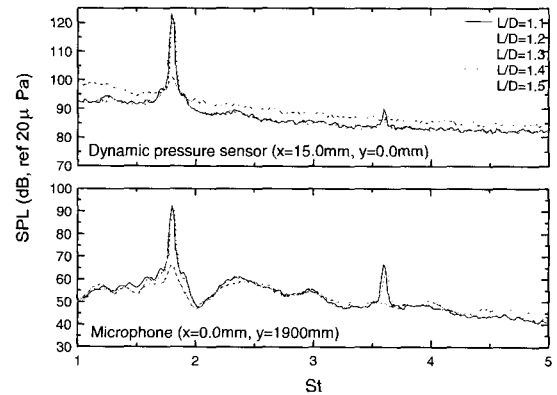
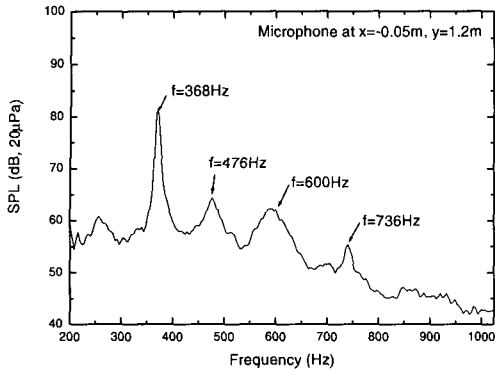
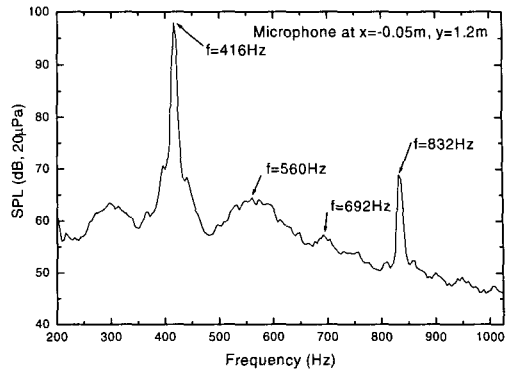


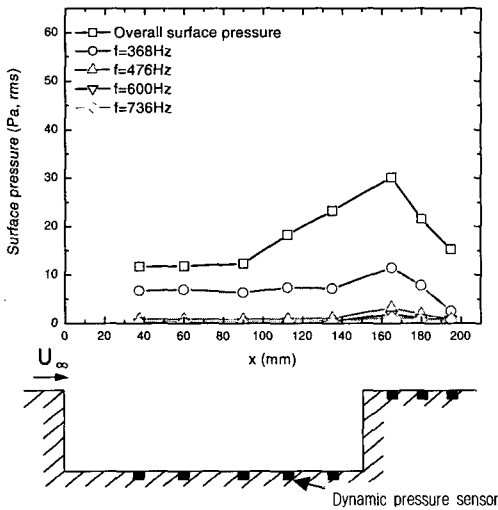
Fig. 8 Comparisons between spectrums of dynamic pressure and SPL in case of  $U=35$  m/s



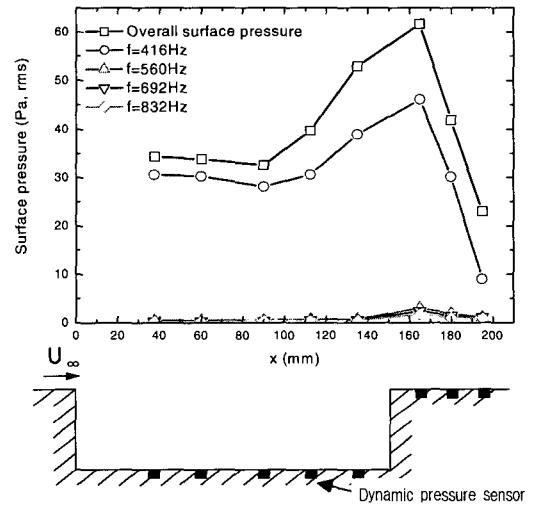
(a)



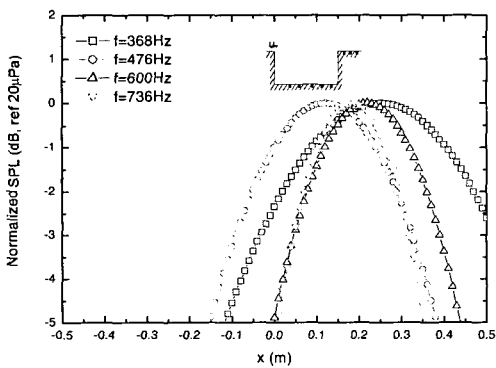
(a)



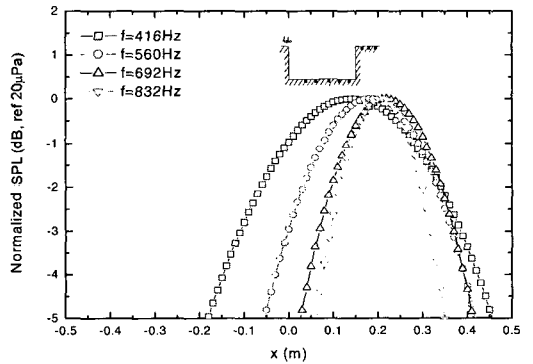
(b)



(b)



(c)



(c)

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

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

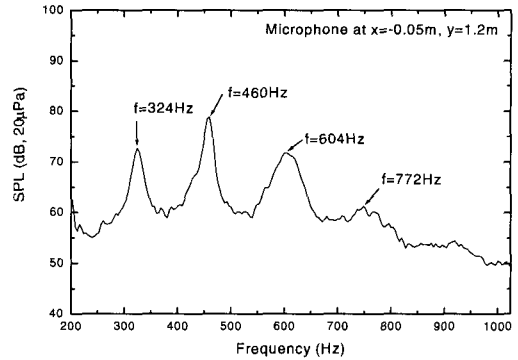
를 보여주고 있다. 변동압력센서나 마이크로폰에서같은 스트로홀수에서 높은 크기의 톤 성분이 발생하는 것을 관찰할 수 있고 유속이 변함에 따라 톤 성분의 주파수 위치와 스펙트럼 형상이 변하는 것을 알 수 있다.

스트로홀수를 사용하여 무차원하였지만 스펙트럼상 첨두치의 위치가 변하는 것은 특성 길이로 예상한 공동의 길이가 소음발생에 직접적으로 영향을 주는 주요변수가 아님을 알 수 있다. 또한 Fig. 8에서 보듯이 유속을 35 m/s로 고정하고 공동의 깊이를 변화시켰을 경우에도 첨두치의 위치에 영향을 주지 않음으로 공동의 깊이도 특성길이로 아님을 알 수 있다. 따라서 스트로홀수는 공동의 형상에 독립적임을 예상할 수 있다.

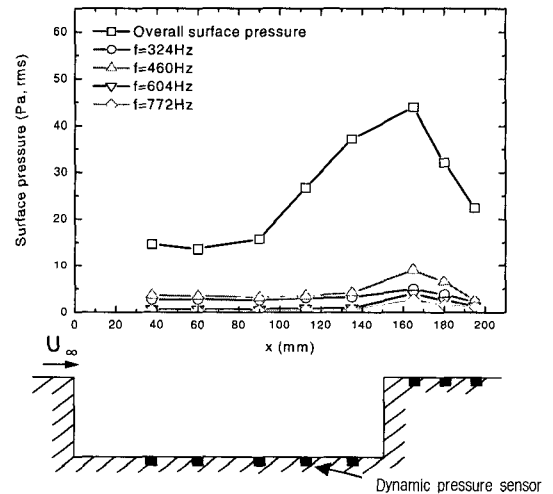
하지만 같은 형상의 공동 구조에서 유속이 변화할 때 Fig. 7에서 스트로홀수 1.7 근처의 첨두치가 변하는 것을 알 수 있다. 이것은 공동으로 들어오는 유속과 평판 사이에 발생하는 경계층의 두께가 특성 길이로서 영향을 미칠 수 있는 가능성이 있다고 할 수 있다.

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

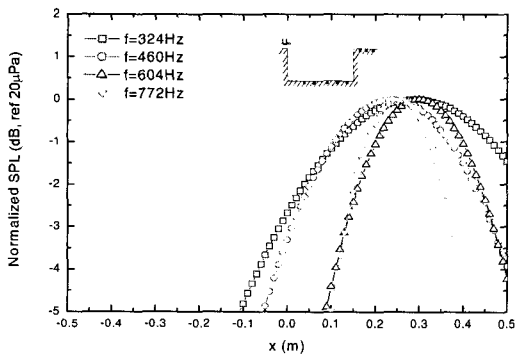
먼저 어레이 중에 중앙에 위치한 마이크로폰에서의 스펙트럼을 관찰해 보면 톤 성분이 크게 발생하는 주파수를 선정할 수 있다. 유속이 30 m/s인 경우에 368 Hz, 476 Hz, 600 Hz, 736 Hz에서 35 m/s인 경우에는 416 Hz와 조화성분인 832 Hz 그리고 40 m/s인 경우에 324 Hz, 464 Hz, 604 Hz 등에서 강한 톤 성분이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한 각 그래프 (b)에서는 변동압력 분포가 후방계단의 전후에서 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 특히 Fig. 10에서의 변동압력 분포는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



(a)



(b)



(c)

Fig. 11  $L/D=1.1$ ,  $U=40$  m/s, (a) Overall SPL ( $\Delta f=4$  Hz), (b) Overall dynamic pressure and dynamic pressure distributions at  $f=324$  Hz, 460 Hz, 604 Hz, and 772 Hz, (c) Power distributions

소음원의 위치를 나타내는 중요한 요소인 빔폭을 고려하면 음원의 크기를 크게 판단할 수 있지만 파워의 크기가 최대인 곳을 음원의 위치로 고려하면 빔폭의 크기 내에서 공동 유동에 의한 소음원의 위치를 가리키는 것을 확인 할 수 있다.

마이크로폰 어레이를 이용하여 같은 L/D에서 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.

## 5. 결 론

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

발생 소음의 크기가 클수록 배경 소음과 대비되는 소음원에 대한 빔파위의 분해능을 좋게 한다. 본 실험에서 공동 유동 소음의 특성으로 L/D의 크기가 증가함에 따라 침두치의 크기가 감소하게 되는 것을 알 수 있었고 뚜렷한 침두치가 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.

빔파위 분포 결과 그래프를 통해 빔파위의 크기가 0인 곳이 소음원의 위치를 나타내는 부분으로 생각할 수 있지만, 엄밀히 말해 파워가 -3 dB가 되는 영역에서 소음원이 존재한다고 보는 것이 일반적인 정의이다. 하지만 실험 대상의 크기와 비교하여 보았을 경우 분해능에 한계가 있는 것을 알 수 있다. 그러므로 공동 부분을 둘러서 위치를 지적함에도 문제가 있다. 이런 문제를 극복하기 위하여 빔형성법을 적용할

경우 실험 대상에 따라 공간 분해능을 높이는 방법을 고려해야 한다. 본 연구의 결과에서는 빔폭과 함께 파워의 크기가 가장 크게 나타나는 부분도 함께 고려하였다.

낮은 주파수 성분에 대한 빔파위의 결과는 분해능이 높은 주파수 성분의 것보다 상대적으로 낮기 때문에 좋은 분해능을 갖기 위해서는 어레이 크기가 커져야 할 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 관심 주파수를 높임으로써 빔파위의 분해능을 높이는 방법이 될 수 있다.

## 후 기

이 연구(논문)은 과학기술부 지원으로 수행하는 21세기 프론티어 연구사업(스마트무인기기술개발)의 일환으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Sarohia, V., 1977, "Experimental Investigation of Oscillations in Flows over Shallow Cavities", AIAA J. Vol. 15, No. 7, pp. 984~991.
- (2) Farabee, T. M., Casarella, M. J., 1986, "Measurements of Fluctuating Wall Pressure for Separated/Reattached Boundary Layer Flows", ASME Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design, Vol. 108, pp. 302~307.
- (3) Hardin, J. C., Pope, D. S., 1995, "Sound Generation by Flow over a Two-dimensional Cavity", AIAA J. Vol. 33, No. 3, pp. 407~412.
- (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. 138~149.
- (6) 박규철, 1999, "마이크로폰 어레이를 이용한 공동 구조에서의 공력 소음원 규명에 관한 연구", 석사학위논문, 충남대학교.