

공동구조내 회전하는 실린더의 유동소음원 해석

박계찬* · 이승배**

Flow Noise Source of Rotating Cylinder in a Cavity Structure

Kye-Chan Park*, Seungbae Lee**

Key Words : Flow Noise Source(유동소음원), Cavity(공동구조), Rotating Cylinder(회전 실린더), Acoustic Mirror(음향거울), Radiated Sound(방사 소음)

ABSTRACT

Cavities are inevitable structures in automobile configuration. The flow-induced noise is generated from the wheel housing section by the interaction between a rotating wheel and the unsteady flows in the cavity. In this research, the wheel housing was assumed by a rectangular cavity for simplification. We measured the radiated sound from the 2-D cavity without cylinder and from the rotating cylinder in the cavity by using the sound source localization method with an acoustic mirror system. In the 2-D cavity case of low Mach number($Ma=0.029$), the sound sources were found to be located near the leading edge of cavity due to the shear layer instabilities. Comparing the cases of the rotating and the non-rotating cylinder, it is observed that the sound pressure levels around the rotating cylinder in the cavity increased and the main acoustic sources were located at the rear section of the rotating wheel.

1. 서론

공동(cavity)은 물체 표면 위에 유동방향에 수직인 홈이 주로 스펜방향으로 나있는 형상으로, 육상 운송체나 항공기 등에서 많이 발견되는 구조물 형상이다. 공동형상 위를 지나는 유동은 구조물에 심각한 버펫팅(buffeting) 및 소음발생과 함께 강한 주기적인 진동을 발생시킬 수 있다.

공동에서의 주기적인 진동은 층류 및 난류를 포함한 넓은 범위의 마하수 및 레이놀즈수에서 관찰된다.

일반적으로 공동은 개방형 공동(open cavity)과 폐쇄형 공동(closed cavity)으로 분류되며 이러한 공동 주위에서는 공동의 크기 및 형상에 따라 다양한 유동 특성이 나타난다. 개방형 공동에서는 공동의 전단

(leading edge)으로부터 박리된 전단층(shear layer)이 공동의 후단(trailing edge) 벽면에 부딪치게 된다. 반면, 폐쇄형 공동은 공동의 전단에서 박리된 전단층이 공동의 바닥에 재부착되고 다시 공동의 후단에서 박리된다. Charwat 등⁽¹⁾의 분류에 의하면 개방형 공동과 폐쇄형 공동의 구분은 공동의 길이에 대한 깊이의 비(L/D)가 약 11을 기준으로 이루어진다.

개방형 공동은 또한 깊은 공동(deep cavity)과 얇은 공동(shallow cavity)으로 다시 분류된다. 깊은 공동은 공진기(resonator)와 같은 역할을 하게 된다. 즉, 공동의 위를 지나는 전단층은 공동 내의 압력 진동을 야기시키며, 개방형 공동 안에서의 공진(resonance)은 특별한 유동 조건 하에서만 발생된다.

깊은 공동과는 대조적으로 낮은 마하속 상태의 얇은 공동에서는 공동의 후단으로 이동함에 따라 증폭되는 불안정한 교란에 의해 유동의 섭동이 발생된다. 일

* 인하대학교 대학원 기계공학과

** 인하대학교 기계공학과

E-mail : kyebaek@naver.com

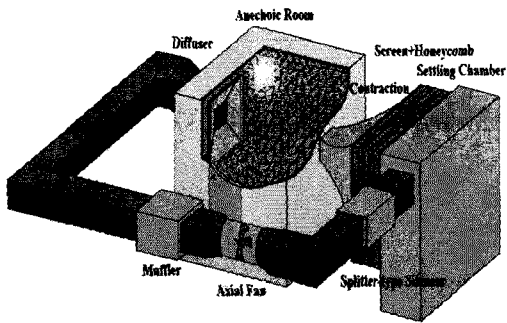


Fig. 1 Schematic of closed-type, anechoic wind tunnel

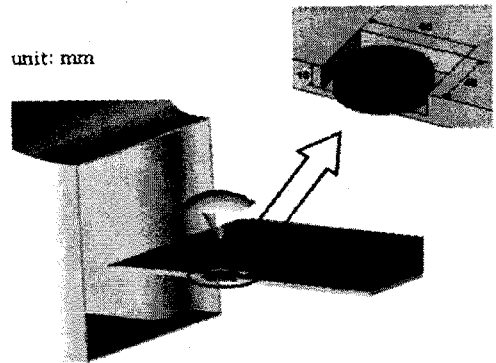


Fig. 3 Schematic of rotating cylinder in a cavity structure

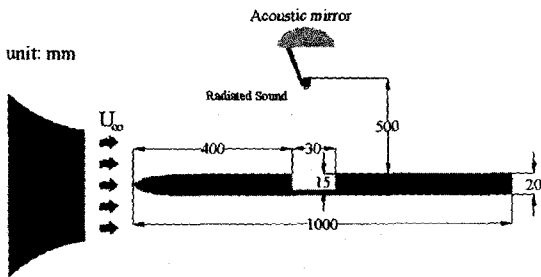


Fig. 2 Schematic of 2-D cavity structure in the experiment

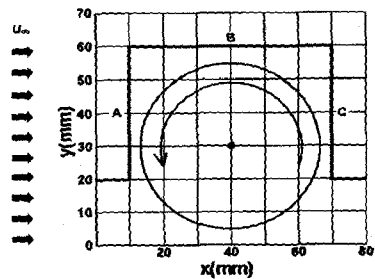


Fig. 4 Measuring points of localized sources by the rotating cylinder in the cavity

반적으로 개방형 공동 중 깊은 공동과 얇은 공동의 구분은 공동의 길이에 대한 깊이의 비(L/D)가 1을 기준으로 이루어진다. 이러한 공동 내의 섭동은 구조물의 진동, 피로 및 소음을 발생시킨다는 점에서 바람직한 현상은 아니다.

자동차에서의 공동구조는 문틀, 선루프(sun roof), 휠 하우스(wheel housing) 등에서 볼 수 있다. 특히 휠 하우스 부분은 고속 주행시 복잡한 유동과 함께 주요 공력소음이 발생하는 곳이다. 휠 하우스 근처에서는 먼저 범퍼를 지나 유입되는 고속의 유체가 휠 하우스 상류(upstream)의 공동 전단에서 박리되면서 소음을 일으키며 하류(downstream)에서는 공동의 전단에서 박리된 유동, 회전하는 바퀴에 의해 발생하는 원심력에 의해 반경 방향으로 가속되는 유동 및 주유동이 합쳐지고 다시 휠 하우스와 충돌하면서 복잡한 유동 패턴을 발생시켜 소음을 일으킨다.

본 연구에서는 자동차 휠 하우스 부분에서의 공력 소음을 밝혀내고자 했다. 먼저 2차원 형태의 공동구조 내의 방사 소음을 측정하였고, 자동차 휠 하우스를

직사각형 공동구조로 단순화하여 공동구조 내에 회전하는 바퀴에 해당하는 실린더가 회전하였을 때와 회전하지 않았을 경우에 대하여 유동 소음원을 주파수별로 국소화(localization)하여 비교·분석하였다.

2. 실험 장치 및 방법

본 연구의 실험을 수행한 무향풍동은 인하대학교 내에 설치된 Fig. 1과 같은 폐쇄형 무향풍동으로 400mm(H)×400 mm(W)×500 mm(L)의 시험부를 가지며 유동이 없을 때의 암 소음 레벨은 20 dBA이다. 최대 난류강도는 0.25%를 유지하며 0~30 m/s까지 연속적인 유속 변화가 가능하다.

첫 번째 실험에서는 유동에 의한 2차원 얇은 개방형 공동구조($L/D=2$, 경계층 $Re_{\delta}=313$) 내 (Fig. 2 참조)의 소음원을 밝혀내기 위해 1/50 mm까지 정밀 이송이 가능한 이송장치를 이용하여 공동을 66개의 초점으로 나누어서 방사 소음을 측정하였다. 실험세트는 아크릴 재질의 평판을 만들었고 유속은 10 m/s로 고정하였다.

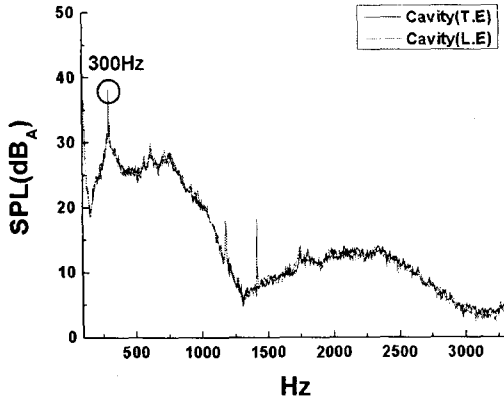


Fig. 5 Sound spectra from 2-D cavity structure in the free stream of $U_{\infty} = 10\text{m/s}$

측정된 방사 소음은 SRS사의 신호 분석기 (model SR780)를 사용하여 80회의 RMS 평균을 취한 후 분석되었다. 스펙트럼의 스패ן(span)은 3.2kHz로 하였으며, 이때 밴드폭은 4Hz이다.

두 번째 실험은 자동차 휠 하우징을 직사각형 공동 구조($L/D=4$)로 단순화하여 주유동 상태에서 공동구조 내에 실린더를 회전시켰을 때와 회전시키지 않았을 경우에 발생하는 방사 소음을 측정하였다 (Fig. 3 참조). 실린더 회전 바뀌면에서의 공동의 깊이는 15 mm, 길이는 60 mm이다. 모형 실린더는 지름이 50 mm, 두께가 13 mm인 알루미늄으로 제작되었으며, 실린더의 구동을 위해 축지름 4 mm인 모터에 연결하였다. 이때 사용된 모터는 BLDC 모터로서 최대 회전속도, N 은 5400 rev/min이며, 1 rpm까지 제어가 가능하다. 방사 소음 실험을 위한 풍동 자유유동 속도는 10 m/s로서 실제 자동차 주행시 바뀌회전 속도에서의 경계층 발달을 고려하여 모형 실린더의 회전속도를 $N=3820$ rev/min으로 설정하였다. 정밀 이송장치를 이용하여 Fig. 4에서와 같이 실린더의 중심에서 상·하·좌·우 10 mm간격으로 72개 초점의 방사 소음을 1/3 옥타브 밴드를 이용하여 주파수별로 유동 소음원을 국소화시켜 비교·분석하였다.

두 실험 모두 음향 거울 시스템(acoustic mirror system)을 이용하여 방사 소음을 측정하였다. 음향거울은 직경 240mm, 초점거리 500mm를 갖는 두께 5mm의 아크릴 반사판에 1/2" 마이크로폰 (B&K 4190)을 설치하여 제작되었고, 측정에 사용되었던 음향거울은 이승배 등⁽²⁾에 의해서 그 성능이 검증된 바 있다. 유동

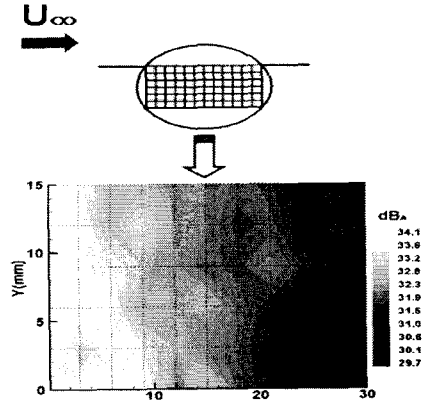


Fig. 6 Contour map of radiated sound at 300Hz in the free stream of $U_{\infty} = 10\text{m/s}$

장 내에서 발생하는 음원은 유동장의 영향에 의해서 회절 현상이 발생됨을 고려하여 측정된다. 본 실험에 사용된 음향 거울의 성능 계수는 1.05로 식(1)과 같은 성능식을 갖는다.

$$\Delta x = 1.05 y_T \frac{U_{\infty}}{a_0} \quad (1)$$

y_T 는 소음원으로 부터 유동의 경계면까지 거리이며, a_0 는 시험조건에서의 음속이다. $U_{\infty} = 10\text{m/s}$ 의 유동장에서 방사소음 측정은 측정 포인트 위치보다 대략 0.62 cm 후류 쪽에서 수행되었다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 2차원 공동구조 방사소음

공동구조 내에서의 톤소음(tone noise)은 공동 전단부터 시작하여 후단까지 위치한 불안정한 전단층과 공동의 형상(L/D)에 기인한 직교 공진 모드(normal resonance mode)에 의해 발생된다⁽³⁾. Figure 5는 공동구조의 전단과 후단에서 국소화된 음향 파워 스펙트럼의 이산주파수를 나타낸다. 여기에서 나타난 이산주파수는 Heller 등⁽⁴⁾의 식을 사용하여 얻은 327Hz와 비교하면 근사한 값을 가짐을 알 수가 있다. 공동의 이산주파수에 해당하는 음압레벨에 대한 등고선 분포를 Fig. 6에 나타내었다. Figure 6으로 부터 매우 낮은 마하수($Ma=0.029$) 공동구조 내에서 전단부분이 주된 소음원임을 알 수 있다. 이는 공동 전단에서의 불안정한

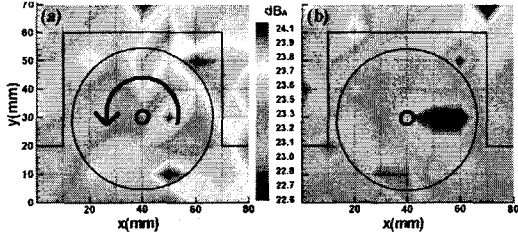


Fig. 7 Contour map of radiated sound at 80Hz
(a): rotating, (b): non-rotating

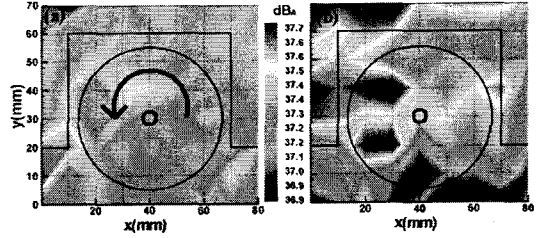


Fig. 9 Contour map of radiated sound at 630Hz
(a): rotating, (b): non-rotating

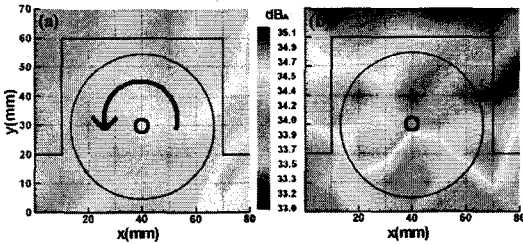


Fig. 8 Contour map of radiated sound at 500Hz
(a): rotating, (b): non-rotating

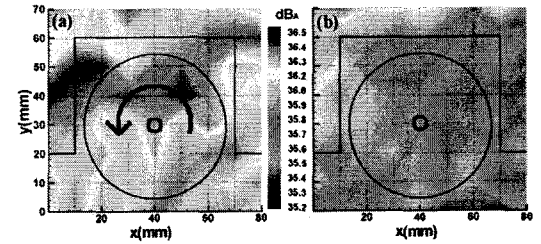


Fig. 10 Contour map of radiated sound at 1000Hz
(a): rotating, (b): non-rotating

경계층이 공동의 직교 공진 모드에 의해 가진되기 때문이다.

3.2. 공동구조내 회전하는 실린더의 유동소음원

회전하는 실린더에서 발생하는 원심력에 의해 반경 방향으로 가속되어 나가는 유동이 주유동과 합쳐지며, 공동의 전단에서 박리된 유동과 상호작용을 일으키면서 공동구조 내에서 회전하는 실린더 주위에서는 복잡한 와동(vortex)이 형성된다. 그로 인해 방사 음압이 실린더가 정지했을 때보다 매우 증가하게 된다.

Figure 7~15는 63Hz~4kHz 구간에서 1/3 옥타브 밴드를 이용하여 데이터를 얻어, 주파수 별로 실린더가 회전하였을 때와 정지하였을 때 음압레벨의 등고선 분포를 나타낸 것이다. Figure 7, 12, 13은 실린더의 회전운동으로 인해 주유동이 실린더 면을 따라 공동구조 내로 끌려 들어가게 되고 이렇게 공동 안으로 유입된 유동은 Fig. 4의 B-C면이 만나는 모서리 지점에서 공동의 전단 및 B면의 끝단에서 박리된 유동과 혼합됨으로써 복잡한 유동이 형성되어 음압레벨이 높아짐을 알 수 있다. 그리고 저주파 (80Hz)보다는 고주파 (1600Hz, 2500Hz)에서 음압레벨이 높은 것을 볼 수 있다.

500, 630Hz에서는 실린더 정지시보다 회전시가 오

히려 음압레벨이 낮음을 Fig. 8~9에서 볼 수 있다. 이는 실린더의 회전에 의해서 유동이 고르게 혼합되기 때문이다.

1kHz 옥타브 밴드 음압레벨을 나타낸 Fig. 10은 공동의 전단에서 박리된 유동이 실린더 전단에 부딪치면서 공동 내에서 재순환을 하여 공동 전단의 경계층을 가진시킴으로써 공동 전단부분의 음압레벨이 주위보다 높아짐을 보여준다.

1250Hz 옥타브 음압레벨을 나타낸 Fig. 11은 공동의 전단 및 실린더의 중앙 전단면에서 박리된 유동이 실린더 위에 재부착(reattachment)됨으로써 주위보다 음압레벨이 높게 되는 것을 알 수 있다.

Figure 14~15는 유동 소음원이 실린더의 회전에 의해 위치가 이동하는 것을 보여준다. 실린더가 정지했을 때 소음원의 위치는 유동의 박리가 일어나는 실린더의 윗면 전단부분과 박리된 유동이 재부착하는 실린더의 중앙 뒷부분이지만 실린더의 회전에 의해 유동이 실린더 면을 따라 움직이면서 주유동과 혼합되어 실린더 윗면 후단 쪽으로 주 소음원이 이동하게 된다.

공동구조 내에서 실린더가 회전함으로써 공동 내의 유동은 실린더가 정지했을 때 발생하는 끝단 와동에 회전하는 실린더 면을 따라 움직이는 유동이 합쳐지면

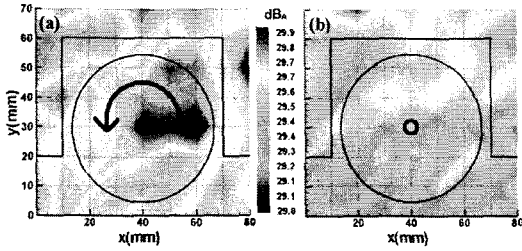


Fig. 11 Contour map of radiated sound at 1250Hz
(a): rotating, (b): non-rotating

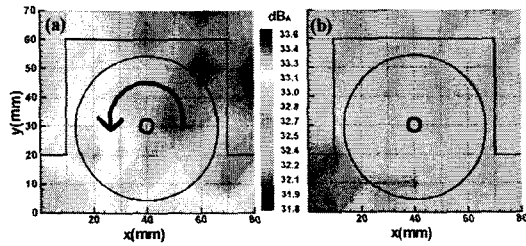


Fig. 12 Contour map of radiated sound at 1600Hz
(a): rotating, (b): non-rotating

서 매우 복잡해진다. 이러한 비정상 난류 유동은 구조적 유동소음을 발생시키며 주 소음원의 위치는 실린더의 후단이 된다.

4. 결론

본 연구는 이차원 얇은 개방형 공동구조 내에서 발생하는 방사 소음과 공동구조 내에서 실린더가 회전하였을 때 발생하는 방사 소음을 국소화하여 분석하였다.

얇은 개방형 공동구조 실험에서는 강한 톤소음이 발생하였다. 공동 전단에서 박리된 유동이 공동 후단면에 부딪치면서 공동내부에서 재순환하여 경계층을 가진시킴으로써 공동의 전단이 주 소음원의 위치가 된다. 이 결과는 Krishnamurthy⁽⁵⁾ 및 Bilanin 등⁽⁶⁾이 제안한 불안정한 전단층과 공동의 후단사이의 상호작용에 의한 강한 공력소음의 발생과 공동의 후단이 주 소음원이라는 것과는 대조적이다. 이러한 결과의 차이는 Tam 등⁽³⁾이 제안한 바와 같이 낮은 마하속 ($Ma \leq 0.15$)에서 톤소음 발생 메커니즘은 높은 마하속 일 때와 다르다는 것을 보여준다.

공동구조 내에서 실린더를 회전시켰을 때는 실린더의 회전에 의해 유동이 공동 내로 유입되고 원심력에

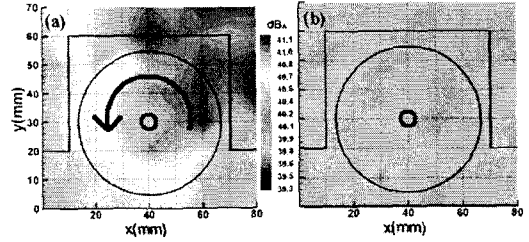


Fig. 13 Contour map of radiated sound at 2500Hz
(a): rotating, (b): non-rotating

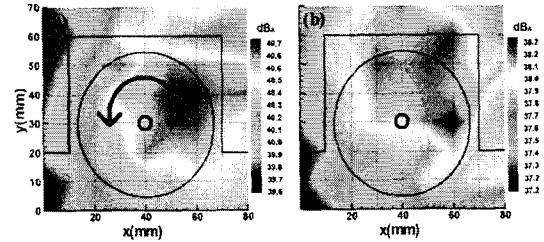


Fig. 14 Contour map of radiated sound at 3150Hz
(a): rotating, (b): non-rotating

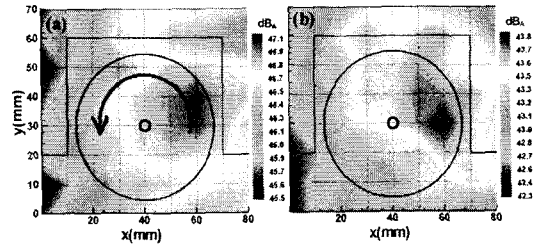


Fig. 15 Contour map of radiated sound at 4000Hz
(a): rotating, (b): non-rotating

의해 반경 방향으로 유동이 가속된다. 이렇게 유입 및 가속된 유동들과 공동 전단 및 실린더 전단에서 박리된 유동이 상호작용을 일으키면서 공동 내에서 회전하는 실린더 주위에서는 복잡한 와동이 형성되어 주위보다 높은 음압레벨이 나타난다. 그러나 500Hz 및 630Hz부근의 주파수 영역에서는 실린더의 회전에 의해 오히려 유동이 균일하게 혼합됨으로써 소음이 고르게 분포됨을 알 수 있다. 그리고 3150, 4000Hz에서 실린더의 회전에 의해 유동이 회전면을 따라 이동함으로써 실린더 중앙 뒷부분에서 윗면 후단 쪽으로 주 소음원이 이동하는 것을 볼 수 있다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(과제번호 [2001-401])의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Charwat, A. F., Roos, J. N., Dewey, F. C., and Hitz, J. A., "An Investigation of Separated Flows. Part 1. The Pressure Field," *Journal of the Aerospace Sciences*, Vol. 28, 1961, pp. 457~470.
- (2) 이승배, 권오섭, 이창준, "난류 유동장 내에 놓인 탄성을 갖는 박판의 방사소음에 대한 실험적 연구," *대한기계학회논문집 B권*, Vol. 25, 제10호, 2001, pp. 1327~1336.
- (3) Tam, C. K. W., and Block, P. J. W., "On the Tones and Pressure Oscillations Induced by Flow Over Rectangular Cavities," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 89, Part 2, 1978, pp. 373~399.
- (4) Heller, H. H., Homes, D. G., and Cover, E. E., "Flow Induced Pressure Oscillations in Shallow Cavities," *Journal of Sound and Vibrations*, Vol. 18, No. 4, 1971, pp. 545~522.
- (5) Krishnamurty, K., "Acoustic Radiation from Two-dimensional Rectangular Cutouts in Aerodynamic Surfaces," NACA. TN 3487, 1955.
- (6) Bilanin, A. J., and Covert, E. E., "Estimation of Possible Excitation Frequencies for Shallow Rectangular Cavities," *AIAA Journal*, Vol. 11, No. 3, 1973, pp. 347~351.