

Research Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2016.20.5.077>

곡면 벽을 지나는 고아음속 공동 유동에서 발생하는 압력 진동에 관한 연구

예아란^a · 이익인^a · 김정수^b · 김희동^{a,*}

A Study on the Pressure Oscillations in the High-Subsonic Cavity Flows over a Curved Wall

A Ran Ye^a · Ik In Lee^a · Jeong Soo Kim^b · Heuy Dong Kim^{a,*}

^aDepartment of Mechanical Engineering, Andong National University, Korea

^bDepartment of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Korea

*Corresponding author. E-mail: kimhd@anu.ac.kr

ABSTRACT

A considerable amount of researches has been performed to investigate the flow characteristics produced in the cavity system over straight wall. However, many practical applications of the cavity flows are found on curved walls, which are strongly subject to the centrifugal force effects. No work has been made on the cavity flows on the curved wall to date. In the present study, a computational fluid dynamics method has been applied to investigate the cavity flows over curved walls at Mach numbers in range of 0.4 to 0.8. The aspect ratio of the cavity was fixed at $L/H=3$, but the radius of curvature of the curved wall is changed in considering the real engineering practice. The results reveal that the pressure oscillations in the curved walls are stronger than those in the straight wall. It is found that the ratio of curvature of the curved wall significantly affects the unsteady flow characteristics inside the cavity.

초 록

종래, 직선벽상의 공동에서 발생하는 유동에 대한 많은 연구가 수행되어 왔다. 그러나 실제 공학적 응용에서 빈번하게 접하게 되는 곡선벽상의 공동 유동에 대한 연구는 찾아보기 드물다. 이러한 곡선 벽상에서는 강한 원심력의 효과가 발생하여 공동 유동에 영향을 미치게 되므로, 종래 직선 벽에서 발생하는 공동 유동과는 그 특성이 다를 것으로 예상되나, 이에 대한 구체적인 정보는 알려져 있지 않다. 본 연구에서는 유동의 마하수가 0.4에서 0.8까지의 고아음속 유동조건에서 곡선 벽 위의 공동 유동장을 수치해석적 방법으로 조사하였으며, 공동의 세장비(L/H)는 3.0으로 고정하였으나, 곡면의 곡률반경을 변화시켰다. 그 결과 곡선 벽의 공동에서 발생하는 압력진동이 직선 벽에 비하여 더 크며, 곡면의 곡률반경이 공동내부에서 발생하는 비정상 유동특성에 큰 영향을 미친다는 것을 알았다.

Key Words: Cavity Flow(공동 유동), Compressible Flow(압축성 유동), Pressure Oscillation(압력 진동), High-Subsonic Flow(고아음속 유동)

Received 11 January 2016 / Revised 8 September 2016 / Accepted 13 September 2016

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

1. 서 론

공동 유동은 주변의 다양한 분야에서 쉽게 볼 수 있는 유동 현상으로 항공기의 내부 무장창, 바퀴집, 자동차의 선루프, 내부 연소실의 vortex combustor 등 다양한 산업 응용분야에 적용되고 있다. 공동은 그 형상이 매우 단순함에도 불구하고 와류의 생성과 소멸, 유동의 박리와 재부착, 압력 진동 등과 같은 복잡한 유동특성들을 발생시킨다. 특히, 공동으로 인해 발생하는 압력 진동은 구조물의 손상 및 소음 발생 등의 문제를 야기하므로 공동 내부에서 일어나는 현상에 대한 정확한 이해가 필요하다.

공동 위를 지나가는 유동은 주기적인 진동과 소음을 발생시키게 되는데 이러한 현상에 대해 Rossiter[1]는 음향되올림의 결과로 설명하였으며, 실험을 통해 공동 유동의 진동 주파수를 예측할 수 있는 Rossiter 식을 제안하였다. Heller 등[2]은 공동과 주유동의 온도 조건을 고려하여 앞서 수행된 Rossiter 식을 수정하였다. 이후 수많은 연구자들이 공동 내부에 발생하는 열유체 역학적 물리현상을 이해하기 위해 실험과 수치 해석적 연구를 수행하였으며[3, 4], 또 공동 유동의 특성을 조사하고 공진 현상을 제어하기 위한 다양한 연구들이 수행되었다.

과거 공동 유동에 대한 연구는 크게 1) 주유동 [5]과 공동의 세장비(L/H)[6-10] 변화가 공동 유동에 미치는 영향에 관한 연구와 2) 압력 진동 및 소음을 줄이기 위한 유동 제어 연구[9]가 주를 이루었다. 최근 Ye 등[11,12]은 곡관에 설치된

공동 유동에 대해 수치해석적 연구를 수행하였으며, 곡면의 곡률 반경(L/R)과 마하수에 따른 공동 유동 특성을 조사하였다.

이와 같이 공동 유동에 관해 수 많은 연구가 수행되었던 반면, 실제 공학적 응용에서 많이 적용되는 곡면 벽상에 설치된 공동유동에 대한 연구는 거의 수행되지 않으며, 더욱이 외부 유동에 대한 연구는 찾아보기 드물다.

본 연구에서는 외부 유동의 곡면 벽상에 설치된 마하수 0.4에서 0.8까지의 고아음속 유동의 특성을 조사하였다. 수치해석적 기법을 사용하여 2차원 비정상 압축성 유동장을 조사하였다. 수치 계산은 종래의 실험 결과와 비교 검증 하였으며 벽면의 형상과 유동의 마하수 변화에 따른 유동 현상을 조사하였다. 공동에서 발생하는 압력변동의 데이터에 Fast Fourier Transform(FFT)를 적용하여 주파수 분석을 하였다. 이들 수치계산 결과로부터 압력변동의 Power Spectrum Density (PSD)를 구하고, 피크주파수 성분을 상세하게 조사하였다.

2. 수치계산 방법

본 연구에서는 공동 주위에서 발생하는 복잡한 유동장을 해석하기 위하여, 2차원 압축성 Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식을 적용하였으며, 완전 내재적 유한 체적법(Implicit finite volume scheme)을 적용하였다. 또한 수치

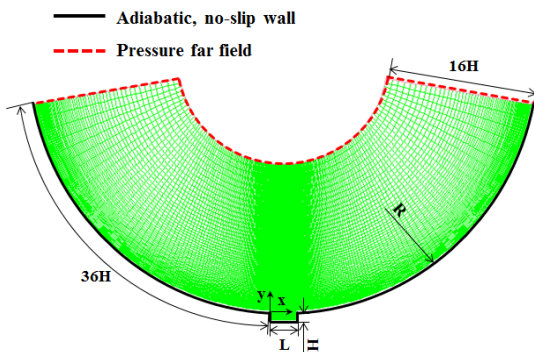


Fig. 1 Computational grid and boundary conditions for the case of concave.

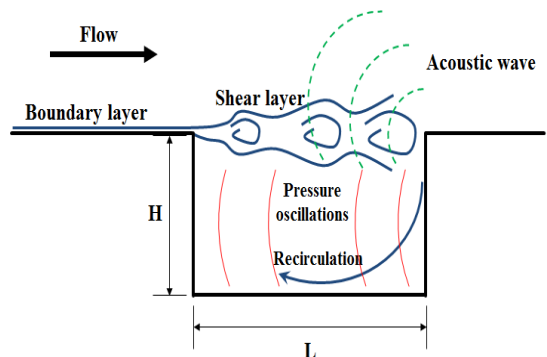


Fig. 2 Features of a cavity flow.

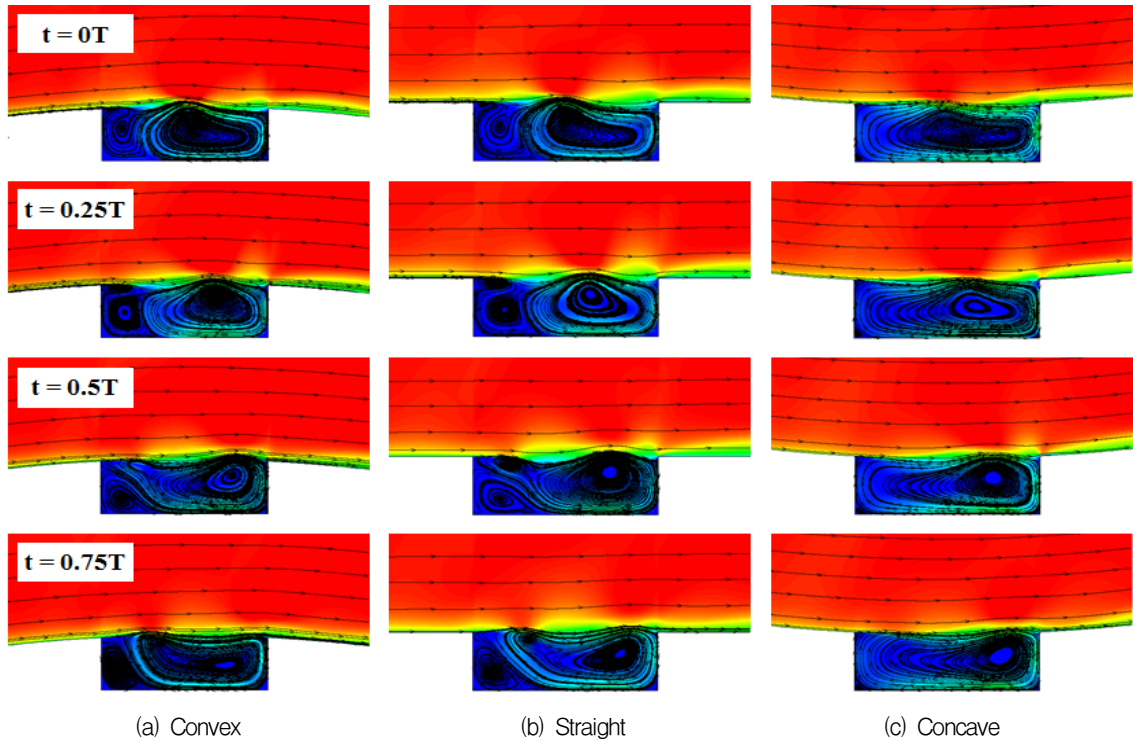


Fig. 3 Mach number contours with streamline patterns at $M=0.8$.

해석은 압축성 유동을 고려하여 지배 방정식을 Density-Based Solver 인 Coupled Scheme을 적용하였으며, 수치적 안정성을 위해 AUSM-DV와 2nd Order Up-Wind Scheme을 적용하여 Convective Term을 계산하였다.

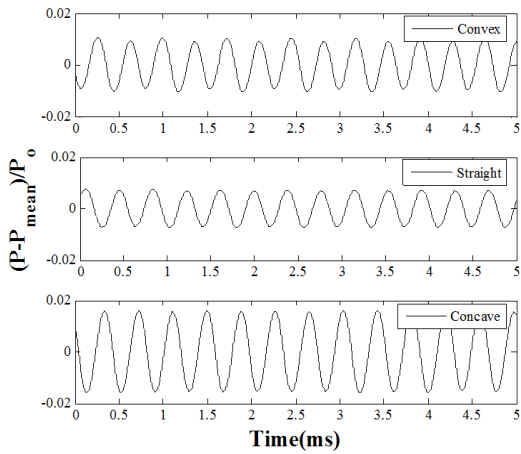
Fig. 1은 본 연구에서 사용된 유동 모델을 나타내었다. 공동의 길이(L)는 45 mm, 공동의 높이(H)는 15 mm, 공동의 상류와 하류의 길이는 540 mm 이며, 높이는 240 mm이다. 관의 하부 벽면을 기준으로 공동의 길이와 곡면의 곡률 반경비(L/R)를 0.11로 고정시켜 곡면의 형상을 concave, convex 로 설정하였다. 계산영역의 격자점은 약 7만개로 본 연구에서는 여러 격자에 대한 예비수치계산을 수행하여 격자의존성을 확인하였다. 본 연구에서 사용된 기체는 대기상태의 공기를 적용하였다. 경계조건은 Pressure far field로 설정하였으며, 벽면에서는 Adiabatic, No-slip 조건을 적용하였다. 공동 유동에 미치는 마하수의 영향을 조사하기 위해, 주유동의 마하

수 M 을 0.4, 0.6, 0.8로 설정하여 수치해석을 수행하였다.

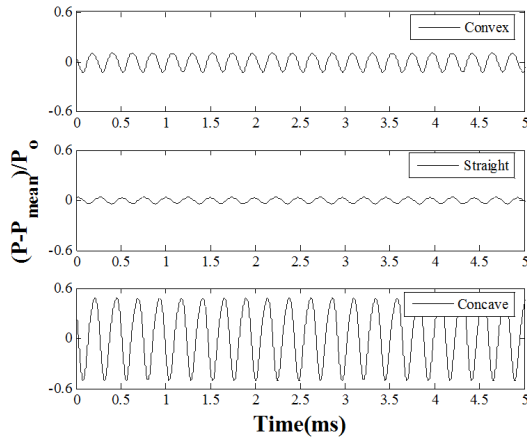
3. 결과 및 고찰

공동에서 발생하는 유동 특성을 개략적으로 나타내면 Fig. 2와 같다. 공동의 전단에서 주기적으로 발달되는 와류가 전단층 내를 따라 공동의 후단에 도착하면 공동의 전향 벽면과의 상호작용에 의해 음향학적 펄스가 발생하게 된다. 이러한 음향학적 교란은 공동의 상류로 진행하며, 공동의 상류에 도착했을 때 음향학적 펄스는 전단층이 공동의 전단에서 박리되도록 하여 새로운 와류가 형성되게 한다. 이러한 방법으로 음향학적 교란과 와류는 하나의 피드백 구조를 이루게 된다[1].

Fig. 3은 한 주기에 대한 공동 내부의 마하수와 유선을 나타내었다. straight 벽면의 경우, 공



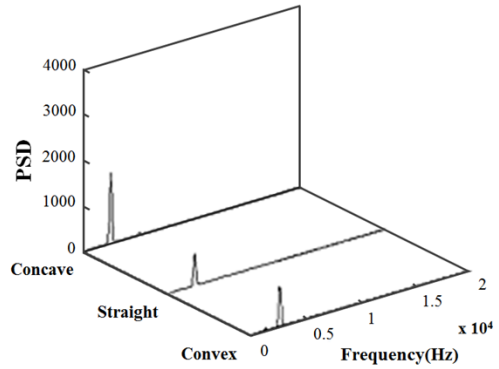
(a) M=0.4



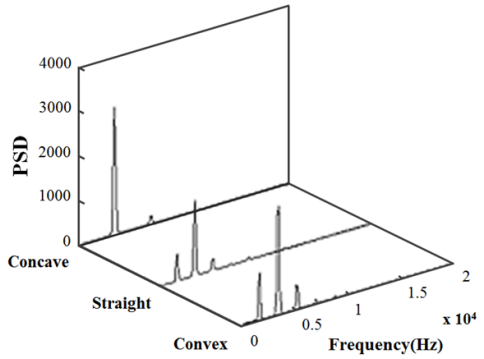
(b) M=0.8

Fig. 4 Static pressure time histories at the cavity center.

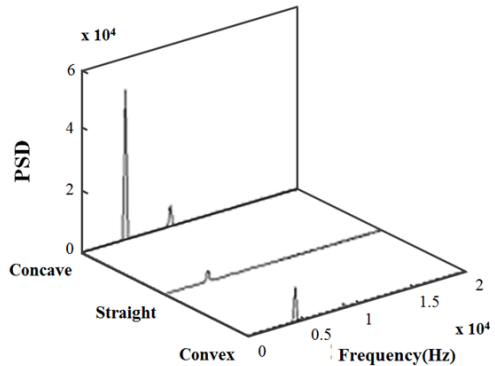
동 상류에 재순환하는 와류와 공동 내부에 큰 와류가 존재하였다. 시간이 지남에 따라 공동 전단에서 생성된 와류가 박리되어 공동 내부에 있던 와류와 합쳐졌다. 이후 공동 후단에 부딪혀 일부는 공동 밖으로 빠져나갔으며, 일부는 공동의 내부로 들어가 공동 유동에 가진을 유발하는 되먹임 현상을 보여주었다. convex 벽면의 경우 straight 벽면과 유사한 유동 특성을 보여주었으나, concave 벽면의 경우 공동 내부에 하나의 큰 와류가 존재하였으며, 직관에 비해 공동 상류에 생성되는 재순환 와류의 크기가 작았다. Ye 등



(a) M=0.4



(b) M=0.6



(c) M=0.8

Fig. 5 Power Spectrum Density.

[13]은 concave 곡관을 이용하여 마하수와 L/R 변화에 따른 공동 내부의 주기에 따른 와류 변화를 관찰하여 공동의 유동 특성을 조사하였으며, 아음속 유동인 경우 straight 관과 concave 곡관의 유동 특성은 동일하다고 보고하였다. 본

연구의 경우 다른 유동 특성을 나타냈는데, $M=0.8$ 일 때 공동바닥 주변의 속도를 비교한 결과, Ye 등[13]에서 straight 관의 경우 59 m/s, concave($L/R=0.11$) 곡관의 경우 53 m/s로 거의 유사한 속도가 측정되었으나, 본 연구에서 straight 벽면의 경우 12 m/s, concave($L/R=0.11$) 벽면의 경우 79 m/s이다. 비교 결과, straight 관에 설치된 공동에 비해 straight 벽면에 설치된 공동의 유속이 더 낮게 관측 되었으며, 외부 벽면에 설치된 공동의 경우 벽면의 형상이 변함에 따라 더 큰 속도차이를 가졌다.

공동 위를 지나는 유동의 경우 공동 내부 유동과 외부 유동을 불안정하게 차단하기 때문에 압력변화로 인한 심한 진동 현상을 발생시킨다 [14]. 마하수와 벽면의 형상에 따른 진동 현상을 조사하기 위해 공동 바닥 중심에서 측정한 압력 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 마하수가 0.4, 0.8인 경우 각각 약 0.4ms, 0.2ms 주기로 압력이 진동하였다. 마하수가 0.4인 경우, 곡면 벽에 설치된 공동은 straight 벽면에 비해 공동 내부의 압력 진동 폭이 컸으며, 마하수가 0.8로 증가함에 따라 압력진폭 또한 커졌다. 압력 주기 변화와 진폭 변화는 주파수 특성과 PSD를 나타내므로 Fig. 5에서 더 자세하게 이해할 수 있다.

압력변동 데이터들을 FFT를 이용한 주파수를 해석하여 PSD를 Fig. 5에 나타내었다. 마하수가 0.4인 경우 가장 낮은 PSD 값을 가졌으며, 마하수가 증가함에 따라 PSD 값이 증가하였다. 곡면 벽상에 설치된 공동은 수평면 벽상에 설치된 공동에 비해 높은 PSD 값을 가졌으며, 모든 경우에서 mode 2에 해당되는 주진동 주파수를 가졌다.

Fig. 6은 공동의 주진동 주파수를 조사하기 위해 벽면의 형상과 마하수에 따른 주차수 분석 결과이다. 그림의 횡축은 무차원진동수(St , Strouhal number)이며 종축은 마하수이다. 사용된 Rossiter의 수정된 실험식은 다음과 같다.

$$St = \frac{fL}{U} = \frac{m - \beta}{\frac{M}{\sqrt{1 + \frac{(\gamma - 1)M^2}{2}}} + \frac{1}{\kappa}} \quad (1)$$

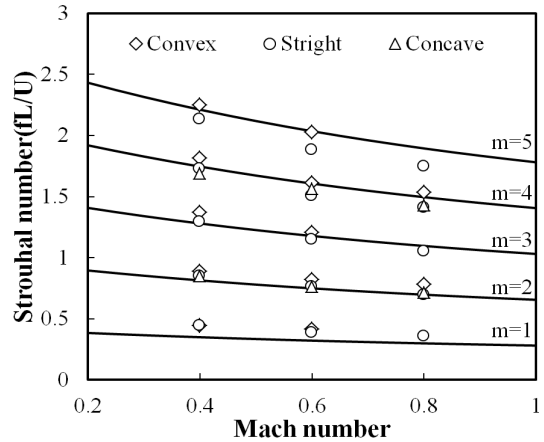


Fig. 6 Non-dimensional frequencies with Mach number.

여기서 f 는 주파수, L 은 공동의 길이, U 은 자유유동의 속도, m 은 m 번째 진동 모드, β 는 공동 후단에서 소리의 방사와 와류의 흐름사이의 지연시간에 대한 비례상수, M 은 자유유동의 마하수, γ 는 회복 계수, κ 는 자유유동 속도에 대한 대류속도의 비이다. β , κ 는 유동의 조건과 세장비에 따라 그 값이 달라지나, Rossiter[1]의 실험을 통해 최적화된 값인 0.25, 0.57을 사용하였다.

실선은 Rossiter 식에서 각 mode에 따른 무차원 진동수를 나타낸다. straight 벽면에서의 무차원 진동수는 Rossiter 식과 비교하여 mode 5를 제외하고는 비교적 잘 일치하였다. 주진동 주파수가 관측된 mode 2에서의 주파수를 보면, straight, concave 벽면은 Rossiter 식과 잘 일치하였으나, convex 벽면의 경우 Rossiter 식과 잘 일치하지 않았으며 마하수가 증가함에 따라 그 차이가 커졌다.

4. 결 론

본 연구는 외부 유동의 곡면 벽상에 설치한 공동 유동의 압력 진동을 조사하기 위해, 2차원 비정상 압축성 Navier-Stokes 방정식을 적용하여 수치계산을 수행하였다. 또한, 곡면의 형상과 유동의 마하수를 변화시켜 공동의 유동특성을 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1. straight, convex벽면인 경우, 와류는 공동 전단에서 발달한 와류와의 상호작용으로 인해 유동이 변화하였으나, concave 벽면의 경우 공동 내부에 존재하는 주와류에 의해 지배받았다.
2. 곡면 벽상에 설치한 공동의 경우 수평면 벽상에 설치된 공동에 비해 높은 압력 진동이 발생하였으며, 마하수가 증가함에 따라 커졌다.
3. mode 2에서의 주파수를 분석한 결과, straight, concave 벽면의 경우 Rossiter의 경험식과 잘 일치하였으나, convex 벽면의 경우 잘 일치하지 않았으며 마하수가 증가함에 따라 그 차이가 커졌다.

후 기

본 연구는 서울대학교 차세대 우주추진 연구센터와 연계된 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 선도연구센터지원사업(NRF-2013R1A5A1073861)의 연구 결과입니다. (과제번호: 0659-20150012)

References

1. Rossiter, J.E., "Wind Tunnel Experiments on the Flow over Rectangular Cavities at Subsonic and Transonic Speeds," Aeronautical Research Council Reports and Memoranda, No. 3438, 1964.
2. Heller, H.H., Holmes, D.G. and Covert E.E., "Flow-Induced Pressure Oscillations in Shallow Cavities," *Journal of Sound & Vibration*, Vol. 18, No. 4, pp. 545-553, 1971.
3. Rowley, C.W., Colonius, T. and Basu, A.J. "On Self-Sustained Oscillations in Two-Dimensional Compressible Flow over Rectangular Cavities," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 455, pp. 315-346, 2002.
4. Atvars, K., Knowles K., Ritchie, S.A. and Lawson, N.J., "Experimental and Computational Investigation of an 'Open' Transonic Cavity Flow," *Proceedings of IMechE. Part G: Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 223, No. 4, pp. 357-368, 2009.
5. Bilanin, A.J. and Covert, E.E., "Estimation of Possible Excitation Frequencies for Shallow Rectangular Cavities," *AIAA Journal*, Vol. 11, No. 3, pp. 347-351, 1973.
6. Rockwell, D. and Naudascher E., "Review-Self Sustaining Oscillations of Flow Past Cavities," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 100, No. 6, pp. 152-165, 1978.
7. Stallings, R.L. and Wilcox, F.J., "Experimental Cavity Pressure Distributions at Supersonic Speeds," NASA TP-2683, 1987.
8. Gharib, M. and Roshko, A., "The Effect of Flow Oscillations on Cavity Drag," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 177, pp. 501-530, 1987.
9. Zhang, X., "Compressible Cavity Flow Oscillation Due to Shear Layer Instabilities and Pressure Feedback," *AIAA Journal*, Vol. 33, No. 8, pp. 1404-1411, 1995.
10. Zhang, X., Rona, A. and Edwards, J.A., "The Effect of Trailing Edge Geometry on Cavity Flow Oscillation Driven by a Supersonic Shear Layer," *The Aeronautical Journal*, Vol. 102, No. 1013, pp. 129-136, 1998.
11. Lee, Y.K., Kang, M.S., Kim, H.D. and Setoguchi T., "Passive Control Techniques to Alleviate Supersonic Cavity Flow Oscillation," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 24, No. 4, pp. 697-703, 2008
12. Ye, A.R., Das, R. and Kim, H.D., "Investigation of Transonic and Supersonic

- Flows over an Open Cavity Mounted on Curved Wall(1. Steady Flow Characteristics)," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, Vol. 39, No. 3, pp. 231-236, 2015.
13. Ye, A.R., Das, R. and Kim, H.D., "Investigation of Transonic and Supersonic Flows over an Open Cavity Mounted on Curved Wall(2. Unsteady Flow Characteristics)," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, Vol. 39, No. 6, pp. 477-483, 2015.
14. Zhang, X. and Edwards, J.A., "Experimental Investigation of Supersonic Flow over Two Cavities in Tandem," *AIAA Journal*, Vol. 30, No. 5, pp. 1182-1190, 1992.