

Research Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2016.20.1.001>

## 곡면 벽을 지나는 고아음속 공동 유동에 관한 수치해석적 연구

예아란<sup>a</sup> · Rajarshi Das<sup>a</sup> · 김희동<sup>a,\*</sup>

### Numerical Analysis of the High-Subsonic Cavity Flows over a Curved Wall

A Ran Ye<sup>a</sup> · Rajarshi Das<sup>a</sup> · Heuy Dong Kim<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup>Department of Mechanical Engineering, Andong National University, Korea

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

#### ABSTRACT

Most of the work has been done till now focused on flows over wall mounted cavities in a straight wall where the incoming flow is uniform. However, the investigation on such kind of flow over a cavity mounted on the curved walls has been seldom reported in the existing literatures. In the present study, the numerical analysis was performed to investigate the cavity flow mounted on the curved walls. The effects of wall shape, the curvature radius and the flow Mach number, were investigated for high-subsonic flows. The results show that the static pressure of cavity floor increases as the L/R increases. This effect is found to be more significant when the flow Mach number is higher. The cavity drag for the curved walls are higher as compared with that of straight wall.

#### 초 록

공동 유동에 대한 연구는 유동이 균일하게 유입되는 수평면상에 설치된 공동에 대한 연구가 대부분이나, 곡면 벽상에 설치한 공동 유동에 관한 연구에 대해서는 거의 수행되지 않았다. 본 연구에서는 곡면 벽상에 설치한 공동 유동의 특성을 조사하기 위해 수치계산을 수행하였으며, 곡면의 형상, 곡면의 곡률 반경 그리고 유동의 마하수를 변화시켜 고아음속 유동에서의 공동 유동 특성을 조사하였다. 그 결과 공동 바닥의 압력은 L/R이 증가함에 따라 증가하였으며, 유동의 마하수가 높을수록 그 효과가 증가하였다. 공동 저항은 수평면 벽보다 곡면 벽에서 더 높은 값을 가졌다.

Key Words: Cavity Flow(공동 유동), Compressible Flow(압축성 유동), Cavity Drag(공동 저항), High-Subsonic Flow(고아음속 유동)

Received 22 October 2015 / Revised 15 December 2015 / Accepted 21 December 2015

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

Nomenclature

$C_D$  : 공동 저항  
 $H$  : 공동 높이  
 $L$  : 공동 길이  
 $M$  : 마하수  
 $P$  : 압력  
 $R$  : 곡면의 곡률 반경  
 $U$  : 입구 속도  
 $\delta_w$  : 와도 두께  
 $\theta_0$  : 운동량 두께

## 1. 서 론

공동 유동(cavity flow)에 대한 연구는 지난 60년 동안 기체의 안정성을 위해 세계 각국에서 활발하게 연구되었으며, 항공우주 산업의 급속한 발전과 더불어 다양한 연구주제들과 관련하여 현재까지 지속적으로 이루어져오고 있다. 공동은 그 형상이 매우 단순함에도 불구하고 와류의 생성과 소멸, 유동의 박리와 재부착, 충격파와 팽창파 등과 같은 복잡한 유동특성들을 발생시키며, 특히 비행체의 경우 공동의 형상이 외부로 노출될 때 공동 내부에서 발생하는 압력진동이 추가적인 항력(drag), 버퍼팅(buffeting), 음향 피로(acoustic fatigue) 등을 유발해 공력성능 및 안정성에 해를 주게 된다.

공동 유동에 관한 과거 연구로는 주유동의 마하수, 공동의 세장비( $L/H$ ), 공동의 형상 변화가 공동 유동에 미치는 영향과 관련된 연구들이 주를 이루었다[1-3]. Krishnamurthy[4]는 최초로 쉘리렌 장비를 이용하여 공동에서 발생하는 유동 특성을 관찰하였으며, Rossiter[5]는 실험적 연구를 통해 공동의 형상과 입구 유동의 속도에 따른 공동 유동의 압력 진동을 조사하였다. 실험을 통해 유동의 조건과 공동의 형상에 따라 특정 주파수가 결정되는 것을 밝혀냈으며, 이러한 결과를 토대로 공동 유동의 공명 주파수를 예측할 수 있는 Rossiter 식을 제안하였다. Plumblee 등[6]은 공동의 선단에서 발달된 난류 전단층이 공동의 특정 주파수를 강화시켜 광대역 소음원을 제공하는 것을 관찰하였다. Rockwell 등[7]은 공

동 저항과 유동 진동 특성에 대해 연구하였으며, 공동의 세장비에 따라서 공동 상류에서 발달된 전단층이 공동 뒷전(열린 공동)이나 공동 바닥(닫힌 공동)에 재부착하는 것을 관찰하였다. Bilanin 등[8]은 전단층의 진동으로 인해, 공동에서 주기적으로 유동의 입출입이 발생하는 것을 관찰하고 이를 공동 압력 진동의 메커니즘으로 고려하였다. Heller 등[9]은 공동과 주유동의 온도 조건을 고려하여 앞서 수행된 Rossiter 식을 수정하였으며, 공동 유동의 압력진동은 불규칙적인 유동에 의해 발생하며 압력 진동은 레이놀즈수의 변화에 큰 영향이 없음을 주장하였다. Gharib 등[10]은 공동에서 발생하는 압력 진동이 공동의 세장비가 변함에 따라 경계층 모멘텀 두께가 증가하는 것을 관찰하였다.

최근 Ye 등[11,12]은 곡관에 설치된 천음속 및 초음속 공동 유동을 조사하여, 직관의 경우와 비교하였다. 그 결과 곡관에서 발생하는 공동 유동은 공동 벽면의 압력과 전압력 손실을 증가시켰으며, 와류의 상호작용으로 인해 압력 진동 및 주진동 주파수의 특성이 직관과 다르게 나타나는 것으로 보고하였다. 그러나 이들의 연구에서는 공동 설치를 위하여 2차원 덕트를 곡관으로 가정하여 사용하였으며, 이 경우 덕트의 상하벽의 영향으로 인하여 외부 유동에서 발생하는 공동 유동과는 차이가 있었다. 더욱이 유선에 법선 방향으로 발생하는 원심력의 변화에는 한계가 있어, 유동 방향의 압력 구배를 다양하게 변화시키지 못하였다. 따라서 천음속 및 초음속 공동 유동에 미치는 곡면의 영향을 체계적으로 조사하는 데는 한계가 있었다.

본 연구에서는 외부 유동의 곡면상에 설치한 고아음속 유동의 특성을 상세하게 조사하였다. 압축성 2차원 Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) 방정식에 SST  $k-\omega$  난류 모델을 적용하여 수치계산을 수행하였으며, 벽면의 형상과 유동의 마하수 변화가 공동 유동에 미치는 영향을 해석하였다.

## 2. 수치계산 방법

2.1 수치계산

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 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. 난류모델로는 SST  $k-\omega$  모델을 적용하였다.

2.2 계산영역 및 경계조건

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. 곡면의 형상은 concave, convex로 설정하였으며, 관의 하부 벽면을 기준으로 공동의 길이와 곡면의 곡률 반경비(L/R)를 0.05, 0.11로 설정하였다. Fig. 2는 계산에 사용된 정렬 격자계로, 경계층이 발달하는 벽면 주변과 전단층 및 공동내부에 격자를 밀집시켰다. 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 마하수 M을 0.4, 0.6, 0.8로 설정하여 수치해석을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 Zhang[13]의 실험 결과와 2 Equation 난류 모델 종류에 따른 수치해석 결과를 비교한 것이다. 그림에서 횡축  $x/H$ 는 벽면을 따르는 거리이며, 벽면의 정압을 대기압  $P_0$ 로 무차원시켜 나타내었다. 계산결과 SST  $k-\omega$  난류 모델이

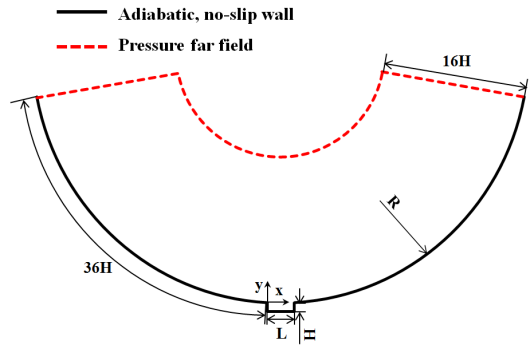


Fig. 1 Schematics of the flow domain for the present computation.

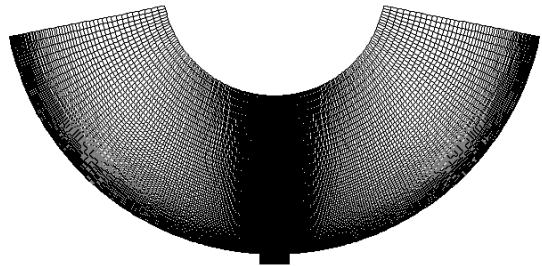


Fig. 2 Computational grid.

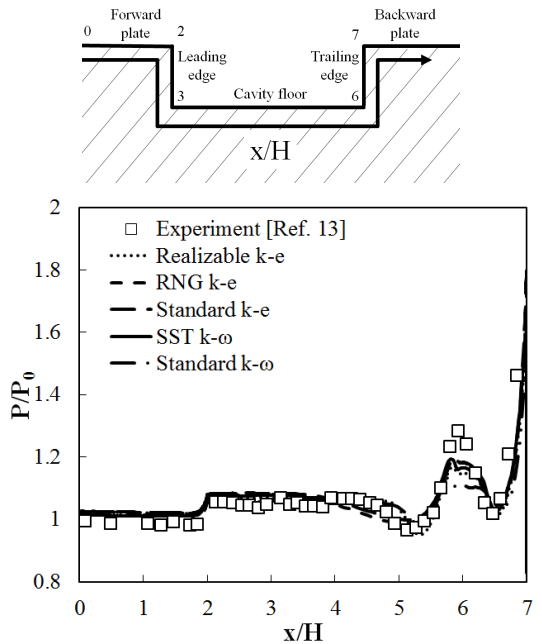


Fig. 3 Comparison between experimental result and CFD prediction.

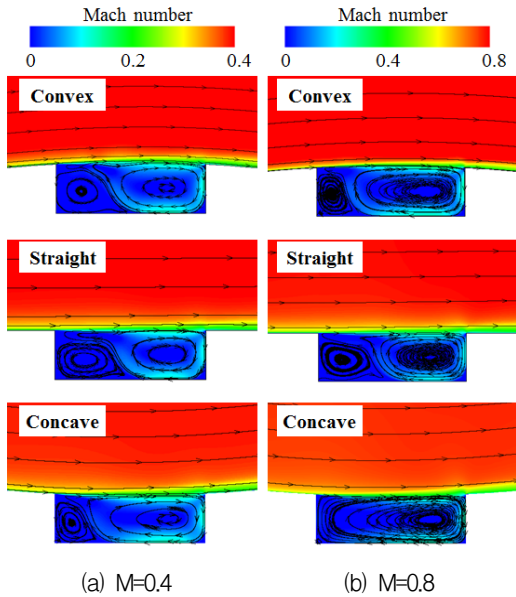


Fig. 4 Mach number contours and streamline patterns for different models ( $L/R=0.11$ ).

실험 결과를 정량적으로 잘 예측하므로, 공동 유동의 수치모사에 유효한 것으로 판단된다.

자유류가 공동으로 유입되는 경우 유동은 공동의 후단(trailing edge)에 부딪히면서 일부 공동 내부로 유입하게 되며, 이로 인해 공동 내부에 와류(vortex)가 형성된다. 비정상 공동 유동의 경우 형성된 와류의 분리와 재결합으로 인해 공동 내에 압력 진동이 발생하게 되며, 구조물의 손상을 야기한다. Fig. 4는 벽면 형상에 따른 마하수 분포 및 유선을 도식화하였다. 마하수가 0.4인 경우, 공동 내부에 존재하는 와류는 유동이 공동으로 유입되면서 형성된 와류와 그로 인해 부차적으로 공동 전단(leading edge) 주변에 형성된 이차와류(secondary vortex)가 존재하였다. 벽면의 형상이 straight, convex인 경우 공동 내에 존재하는 와류의 형상은 유사했으나, concave 벽면은 상대적으로 작은 이차와류가 형성되었다. 마하수가 0.8로 증가된 경우, straight 벽면을 제외하고는 모두 이차와류의 크기가 줄어들었으며, concave 벽면의 공동 내부에는 하나의 큰 와류가 지배적으로 형성되었다.

Fig. 5는  $L/R$ 과 마하수에 따른 공동 바닥 중

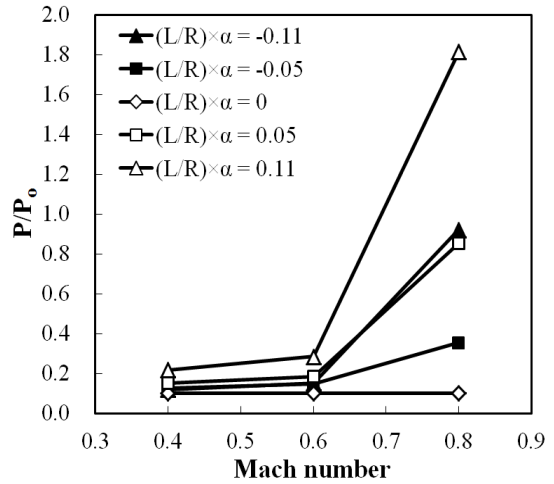


Fig. 5 Static pressure at center of the cavity.

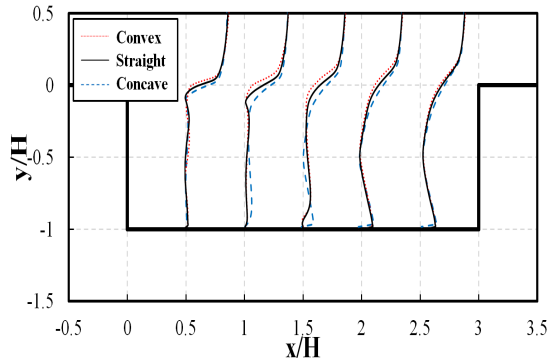


Fig. 6 Mean streamwise velocity profiles ( $M=0.4$ ).

심에서의 정압을 나타내었다. 범례의  $\alpha$ 는 concave 곡관인 경우 + 으로 convex 곡관인 경우 - 으로 지정하였다. 마하수가 0.4인 경우 straight 벽면에서 가장 낮은 압력 값을 가졌으며, concave 벽면에서 가장 높은 압력 값을 가졌다. 마하수 증가에 따른 압력 증가율은 수평면 벽상에 설치된 공동에 비해 곡면 벽상에 설치된 공동에서 상대적으로 높은 증가율을 가졌으며,  $L/R$ 이 증가함에 따라 더 큰 증가율을 나타내었다. 동일한  $L/R$ 을 가진 곡면 벽의 경우, 공동 바닥의 압력은 convex 벽면보다 concave 벽면에서 높은 증가율을 가졌다. Ye 등[11]은 concave 곡관을 이용하여 마하수와  $L/R$ 변화에 따른 공동 내부의 정압을 조사하였으며, 마하수와  $L/R$ 이

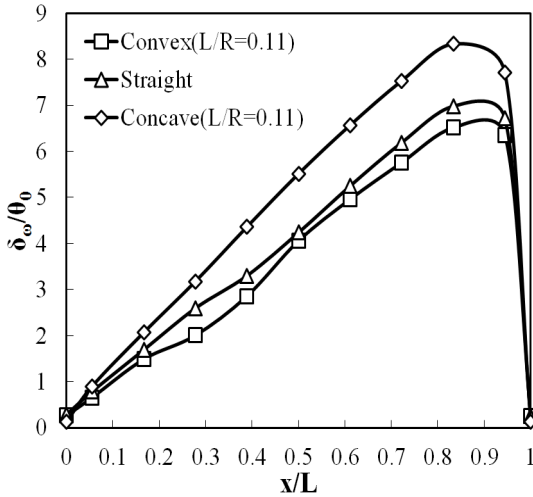


Fig. 7 Vorticity thickness for M=0.4.

증가함에 따라 정압이 증가하는 것을 보고하였다. 본 연구 결과와 비교한 결과, L/R과 마하수에 따른 압력 변화는 문헌[11]과 동일한 경향을 가졌다. 공동 내부 벽면의 압력 증가는 주유동에서 유입되는 유량의 증가를 의미하므로 마하수가 0.8인 경우에서 주유동과 공동 사이의 질량 유량율을 분석하였다. 그 결과, straight 벽면의 경우  $1.8 \times 10^{-2}$  kg/s, concave(L/R=0.11) 벽면의 경우  $2 \times 10^{-1}$  kg/s로 concave 벽면에서 주유동과 공동 사이에 더 많은 질량 교환이 이루어지는 것을 확인하였다.

각 벽면의 형상에 따른 전단층 발달 특성을 조사하기 위해 공동의 유동방향 속도성분을 도식화 하였으며 Fig. 6과 같다. 공동 유동은 전단층의 상호작용으로 인해 유동 특성이 달라지는데, 이를 연구하기 위해 유입 유동의 운동량 두께(momentum thickness)가 공동 유동에 미치는 영향에 대해 연구가 이루어졌다[14]. 하지만 Rowley 등[15]에 따르면, 운동량 두께는 공동 내의 재순환 영역에 의해 쉽게 변하게 되므로, 전단층의 특성을 판단할 수 있는 새로운 변수로 와도 두께(vorticity thickness)[16]를 제안하였으며, 다음의 식으로 정의하였다.

$$\delta_{\omega} = U / (du/dy)_{\max} \quad (1)$$

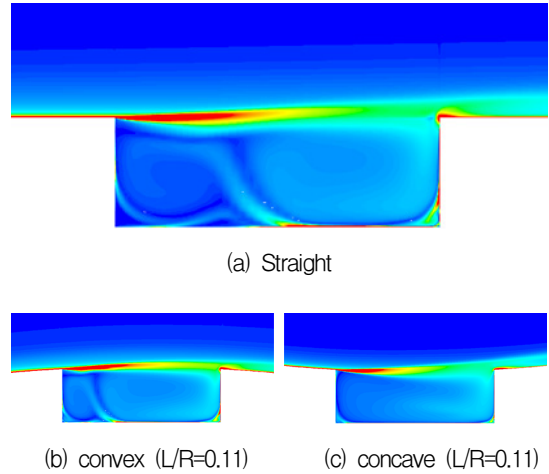


Fig. 8 Vorticity contours for M=0.8.

Fig. 7은 마하수가 0.4일 때 벽면의 형상에 따른 와도 두께를 나타냈다. 종축은 와도 두께를 straight의 운동량 두께  $\theta_0$ 로 무차원화 했으며, 횡축은 x방향에 따른 거리를 공동 길이로 무차원화 했다. 벽면 형상에 따른 와도 두께는 convex 벽면에서 가장 낮은 값을 가졌으며, concave 벽면에서 가장 높게 나타났다. 와도 두께는 전단층 성장률을 나타내는데, convex 벽면의 경우 전단층이  $x/L=0.9$  지점까지 점차 성장한 후 0.9 지점 이후로 급격하게 감소하였다. 반면, concave 벽면의 경우 convex 벽면과 비교해 전단층이 급격하게 성장하였다. 전단층의 빠른 성장률은 공동 내부로 유동이 많이 유입되도록 야기한다. 그로인해 공동 내부에 높은 속도로 순환하는 유동이 존재하였으며, Fig. 6에서 확인할 수 있다. 비정상 공동 유동일 경우, 전단층의 교란으로 인해 공동 후단 주변에서 큰 진동이 발생하게 되는데, 이를 자세하게 이해하기 위해 비정상 공동 유동에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

Fig. 8은 벽면의 형상에 따른 와도를 나타냈다. Fig. 8(a)의 경우 공동 전단에서 생성된 와도가 전단층을 따라 존재하는 것을 볼 수 있다. Ye 등[11]에 의하면 곡관의 경우 L/R이 증가함에 따라 공동 후단 주변에 존재하는 와도의 크기가 줄어든다고 보고하였다. 하지만 본 연구에

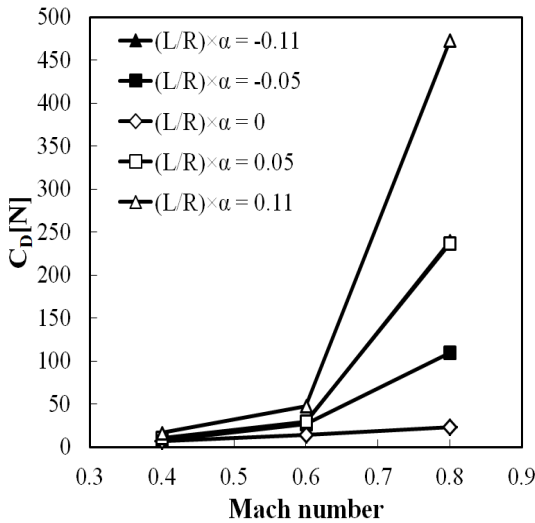


Fig. 9 Cavity drag according to wall configuration.

서는 수평면 벽상에 설치된 공동에 비해 곡면 벽상에 설치된 공동인 경우 공동 후단 주변에 더 큰 와도가 존재하였다. 비정상 공동 유동인 경우, 공동 후단 주변에 존재하는 강한 와도로 인해 공동 내부에 더 큰 압력상승이 일어날 것으로 사료된다.

공동이 외부로 노출된 경우 추가적인 저항을 발생시키며, 공력 성능에 해를 주게 된다. Fig. 9는 벽면의 형상에 따른 공동 저항을 나타냈다. 곡면 벽의 상류와 하류에서 발생된 저항은 고려하지 않았으며, 공동 저항  $C_D$ 는 다음의 식으로 정의된다[10].

$$C_D = \int_{(a)} PdA + \int_{(b)} \tau dA - \int_{(c)} PdA \quad (2)$$

Eq. 2의 (a)는 공동 하단 벽의 압력, (b)는 공동 바닥의 점성력, (c)는 공동 상단 벽의 압력이다. 마하수가 0.4인 경우, straight, convex, concave 벽면 순으로 공동 저항이 높았으며, 마하수가 증가함에 따라 공동 저항이 증가하였다. 마하수가 0.8인 경우, concave 벽면의 공동 저항은 다른 두 형상과 비교하여 매우 높은 값을 가졌으며, 마하수에 따른 공동 저항은 Fig. 5의 공동 증앙에서의 정압 변화와 동일한 경향을 보였다.

#### 4. 결 론

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

1. 수평면 벽상에 설치된 공동의 경우 마하수가 증가함에 따라 공동 내부에 존재하는 와류의 형상은 유사하였으나, 곡면 벽상에 설치된 공동의 경우 마하수가 증가함에 따라 주 와류의 크기가 커졌으며, 이차와류의 크기가 줄어들었다.
2. 공동 내부에 분포한 압력과 공동 저항은 수평면 벽상에 설치된 공동에 비해 곡면벽상에 설치된 공동에서 높은 값을 가졌으며, 마하수가 증가함에 따라 그 값은 증가했다.
3. 와도 두께는 straight 벽면과 비교하여 convex 벽면에서 낮은 값을 가졌으며, concave 벽면에서 높은 값을 가졌다.
4. 곡면 벽상에 설치된 비정상 공동 유동은 수평면에 설치된 공동 유동과 다른 유동 특성이 나타날 것이므로 비정상 공동 유동에 대한 후속 연구가 필요하다.

#### 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. Stallings, R.L. and Wilcox, F.J., "Experimental Cavity Pressure Distributions

- at Supersonic Speeds," NASA TP-2683, 1987.
2. 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.
  3. 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.
  4. Krishnamurthy, K., "Acoustic Radiation from Two-Dimensional Rectangular Cutouts in Aerodynamic Surface," NASA-TN-3487, 1955.
  5. 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.
  6. Plumblee, H.F., Gibson, G.S. and Lassiter, L.W., "A Theoretical and Experimental Investigation of the Acoustic Response of Cavities in an Aerodynamic Flow," WASDD-TR-61-76, 1962.
  7. 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.
  8. 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.
  9. 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.
  10. Gharib, M., and Roshko, A., "The Effect of Flow Oscillations on Cavity Drag," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 177, pp. 501-530, 1987.
  11. 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.
  12. 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.
  13. Zhang, X., "Compressible Cavity Flow Oscillation Due to Shear Layer Instabilities and Pressure Feedback," *AIAA Journal*, Vol. 33, No. 8, pp. 1404-1411, 1995.
  14. Grottadaurea, M. and Rona, A., "The Role of the Inflow Momentum Thickness in Subsonic Cylindrical Cavity Noise Generation," *Proceedings of the 14th International Congress on Sound and Vibration*, Cairns, Australia, pp. 1-8, July 2007.
  15. 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.
  16. Brown, G.L. and Roshko, A., "On Density Effects and Large Structure in Turbulent Mixing Layers," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 64, No. 4, pp. 775-816, 1974.