

곡면상에 설치된 열린 공동을 지나는 천음속/초음속 유동에 관한 연구 (I)

- 정상 유동의 특성 -

예아란* · Rajarshi Das* · 김희동*†

* 안동대학교 기계공학과

Investigation of Transonic and Supersonic Flows over an Open Cavity Mounted on Curved Wall (I)

- Steady Flow Characteristics -

A Ran Ye*, Rajarshi Das* and Huey Dong Kim*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Andong Nat'l Univ.

(Received August 26, 2014 ; Revised January 12, 2015 ; Accepted January 20, 2015)

Key Words: Cavity Flow(공동 유동), Compressible Flow(압축성 유동), Shock Wave(충격파), Transonic Flow(천음속 유동), Supersonic Flow(초음속 유동)

초록: 공동유동은 종래 많은 연구가 수행되었으나 대부분의 연구는 공동 상류의 압력구배가 없는 수평면 상에 위치한 공동 유동에 대한 연구가 수행되어 왔으며, 실제 공학적 응용에서 나타나는 곡면 벽상에 위치한 공동 유동에 대한 연구는 거의 수행되지 않고 있다. 일반적으로 곡면 벽상에 위치한 공동유동에는 원심력이 작용하여 종래의 공동 유동 연구결과와 상이한 유동특성을 가질 것으로 판단되나, 이러한 데이터는 지금까지 보고되지 않았다. 본 연구에서는 곡면 벽상에 설치한 공동 유동을 수치해석법으로 조사하여 곡면의 곡률반경 및 유동의 마하수가 천음속 및 초음속 공동유동의 특성에 미치는 영향을 조사하였다. 그 결과 곡면의 곡률반경이 작아질수록, 유동의 마하수가 증가할수록, 공동내부에서 발생하는 피크압력의 크기는 증가하였으며 공동으로 인한 전압력손실 증가한다는 것을 확인할 수 있다.

Abstract: Investigations into cavity flows have been conducted for decades now, most of them being about zero-pressure-gradient flows entering a cavity on a straight wall. However, the flow over curved walls in real-life situations has not been fully investigated. As cavity flows on curved walls exert centrifugal force, these walls are likely to possess different features from straight walls. To verify this possibility, this study investigated cavity flows on curved walls. Using numerical method, the effect of two variables, namely, radius of curvature on a curved wall and inlet Mach number, were investigated for subsonic and supersonic cavity flows. The result demonstrates that the value of the peak pressure generated inside the cavity increases with the decrease in the radius of curvature on a curved wall or an increase in the inlet Mach number. The total pressure loss in the cavity also results in an increase in the cavity drag.

- 기호설명 -

C_p : 압력 계수

H : 공동 높이(mm)

L : 공동 길이(mm)

M : 마하수

P : 압력(Pa)

R : 곡률 반경(mm)

하첨자

∞ : 공동상류의 입구상태

c : 공동 중심

† Corresponding Author, kimhd@anu.ac.kr

- o : 공동하류의 출구상태
- peak1 : 공동 바닥의 정압 압력점의 위치
- peak2 : 공동 우측 면의 정압 압력점의 위치
- s : Static 상태
- t : Total 상태

1. 서론

공동유동(Cavity flow)에 대한 연구는 공동에서 발생하는 소음 및 진동 문제를 해결하기 위하여 1950년대부터 본격화 되었으며, 항공기, 고속열차, 자동차 등 다양한 분야에서 적용되고 있다. 대부분의 공동유동의 경우, 와류의 생성과 소멸, 유동의 박리와 재부착, 충격파와 팽창파 등과 같은 복잡한 유동특성들을 발생시킨다. 이러한 유동특성들은 공동의 형상이나 유입되는 유동의 상태에 따라 다양한 형태로 발생하며, 공력성능의 저하 및 시스템의 불안정성을 야기시키므로, 공동유동 특성의 정확한 해석과 체계화된 연구가 필요하다.

이러한 공동유동의 특성을 조사하기 위해, 많은 실험 및 수치해석적 연구가 수행되어 왔다. Stallings 등,⁽¹⁾ Plentovich 등,⁽²⁾ 그리고 Tracy 등⁽³⁾은 실험을 통해 공동의 형상 및 유동의 조건에 따른 정압 변화를 측정하여 유동 특성을 조사하였다. Zhang 등^(4,5)은 2 Equation 인 Standard k- ω 난류 모델을 사용하여 공동 주변에서 발생하는 복잡한 파형 패턴을 관측하였다. Yang 등⁽⁶⁾은 입구 마하수 변화에 따른 공동 내부의 정압 분석을 통하여 개방형 공동인 경우 입구 마하수에 크게 영향을 받지 않은 것으로 보고하였다. Atvars 등⁽⁷⁾은 공동 모서리 하류 주변에 형성된 와도가 재순환하여 유동 흐름을 따라 공동 밖으로 이동하는 것을 관찰하였다. 또한 Lee 등⁽⁸⁾은 초음속 공동 유동에서 발생하는 압력진동 제어법을 체계적으로 분석하여 연구하였다. 이와 같이 공동유동 특성들을 해석하기 위해 많은 연구들^(9,10)이 현재까지 수행되고 있다.

그러나 기존의 연구들은 대부분 수평벽상에 설치된 공동에 대한 것이며, 실제 공학적 응용에서 많이 적용되는 곡면 벽상에 설치한 공동유동에 관해서는 거의 연구가 수행되지 않았다. 수평 벽상에 위치한 공동의 경우, 공동 상류에서 유동이 영압력구배의 상태로 공동에 유입하는 반면, 곡면 벽상에 위치하는 공동의 경우에는 역압력구배나 순압력구배의 상태로 공동에 유입하게 되므로, 공동내부에서 발생하는 유동은 수평 벽과는 다르게 될 것이다. 더욱이 곡면 벽상에 설치한 공동의 경우, 곡면의 곡률반경에 따라 유동방향과 수직한

방향으로 원심력이 작용하여 공동 내부에서 발생하는 전단층과 충격파 유동은 더욱 복잡해 질 것으로 기대되나, 이러한 데이터는 지금까지 보고된 바가 없다. 따라서 곡면 벽상에 설치한 공동 내부의 유동특성을 파악해야 하며, 공동 주변에서 발생하는 복잡한 유동 현상에 대해 물리적으로 설명할 수 있는 체계적인 연구가 필요하다.

본 연구는 곡면 벽상에 설치한 공동 내부의 유동 특성을 조사하기 위해, 수치해석을 수행하였다. 지배 방정식 및 수치방법으로 2 차원 압축성 Navier-Stokes 방정식을 적용하였으며, Standard k- ω 난류 모델을 적용한 수치계산을 수행하여, 곡면의 곡률반경, 유동의 마하수가 천음속 및 초음속 공동유동의 특성에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 수치계산방법

2.1 수치계산

본 연구에서는 공동주위에서 발생하는 복잡한 유동장을 해석하기 위하여, 2 차원 압축성 Navier-Stokes 방정식을 적용하였으며, 완전 내제적 유한 체적법 (Implicit finite volume scheme)을 적용하였다. 또한 수치해석은 압축성 유동을 고려하여 지배 방정식을 Density-Based Solver 인 Coupled Scheme 을 적용하였으며, 수치적 안정성을 위해 AUSM-DV 와 2nd Order Up-Wind Scheme 을 적용하여 Convective Term 을 계산하였다.

2.2 계산영역 및 경계조건

본 연구에서 사용된 도메인의 형상은 Fig. 1 과 같다. 공동의 길이 $L = 254$ mm, 공동의 높이 $H = 63.5$ mm, 공동의 상류와 하류의 길이는 각각 528 mm, 1638 mm 이며, 관의 높이는 587 mm 로 정하였다. 또 곡면의 곡률 반경은 관의 하부 벽면을 기준으로 설계하였다. Fig. 2 는 계산에 사용된 정렬

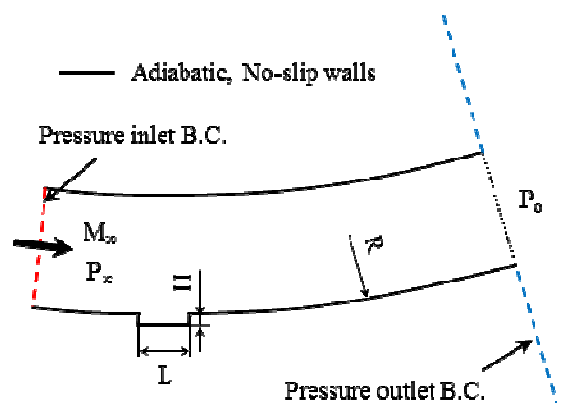


Fig. 1 Computational geometries and boundary conditions

Table 1 Conditions used for present study

Parameters	Values
L [mm]	254
H [mm]	63.5
L/H	4
L/R	0~0.11
M_∞	0.4~1.8

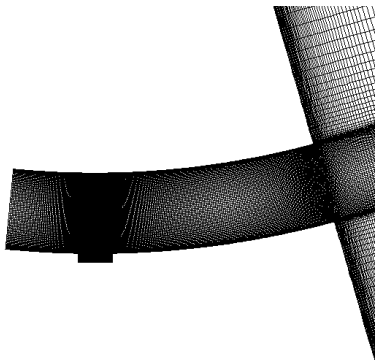


Fig. 2 Computation grid

격자계로, 경계층이 발달하는 벽면 주변과 전단층 및 공동내부에 격자를 집중시켰으며, 총 격자수는 약 8 만개를 적용하였다. 본 연구에서 사용된 기체는 대기상태의 공기를 적용하였으며, 경계조건으로 입구와 출구에서 각각 Pressure inlet, Pressure outlet 을 적용하여, inlet 에서 전압력(113 ~ 582 kPa) 과 온도(300 K)를 지정하였으며, 정압은 대기 조건의 압력을 적용하였다. 또 벽면에서는 Adiabatic, no-slip 조건을 적용하였다.

Table 1 에는 본 연구에 적용된 여러 변수 및 조건을 정리하였다. 공동의 길이와 곡면의 곡률 반경비(L/R)를 $L/R = 0 \sim 0.11$ 로 변화시켰으며, 상류로부터 공동으로 유입되는 주유동의 마하수(M_∞)를 0.4 ~ 1.8 로 변화시켰다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3 은 계산방법의 타당성을 검증하기 위하여 문헌⁽¹⁾의 실험 결과와 2 Equation 난류모델 종류에 따른 수치해석 결과를 비교한 것이다. 그림에서 횡축 x/L 는 벽면을 따르는 거리이며, 종축은 압력 계수 C_p 로 나타내었다. 계산결과 Standard k- ω 난류 모델이 후연부(Trailing edge)에서 압력이 급격히 상승하는 실험 결과를 정량적으로 잘 예측하므로, 공동유동의 수치모사에 유효한 것으로 판단된다. 공동 내의 압력 변화를 조사하기 위해 Fig. 3 에서 나타난 바와 같이, 공동 바닥 중심의 압력을 P_c ,

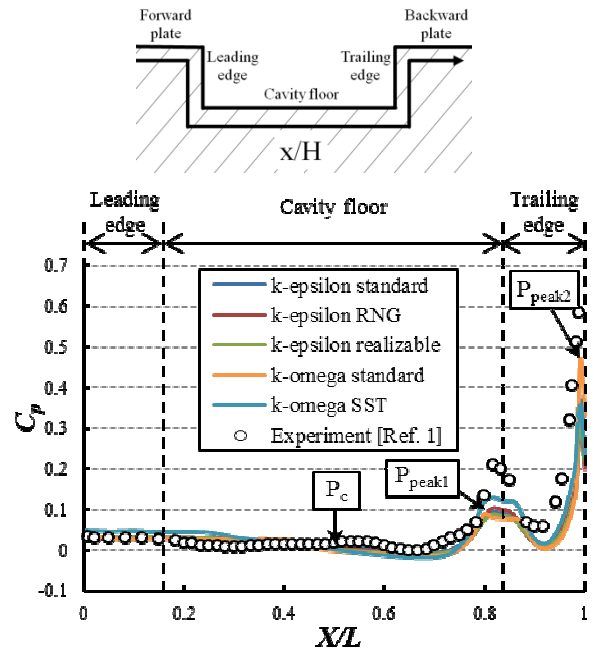


Fig. 3 Comparison of experimental results and CFD Predictions($L/H = 4$ and $M_\infty=2.16$)

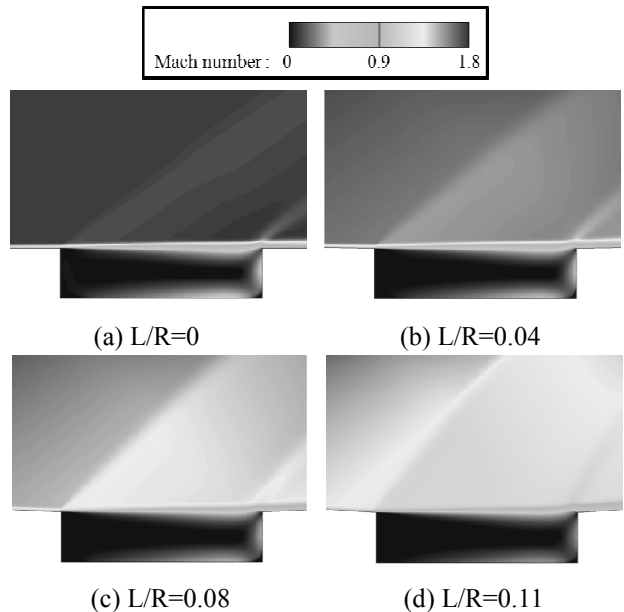


Fig. 4 Mach number contours on cavity with different L/R ($M_\infty=1.8$)

공동 바닥과 후연부에서 압력이 급격하게 상승하는 부분을 각각 P_{peak1} , P_{peak2} 로 지정하여 분석하였다.

Fig. 4, 5 는 마하수가 1.8 인 경우 곡면의 곡률 반경 변화에 따른 마하수와 와도 분포도를 각각 나타내었으며, $L/R = 0 \sim 0.11$ 을 차례대로 나타내었다. Fig. 4 로부터 공동으로 인해 발생한 충격파는 L/R 이 증가함에 따라 그 크기가 증가함을 알 수

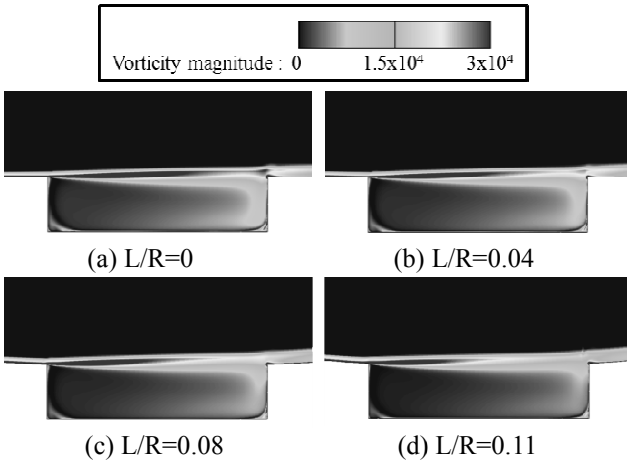


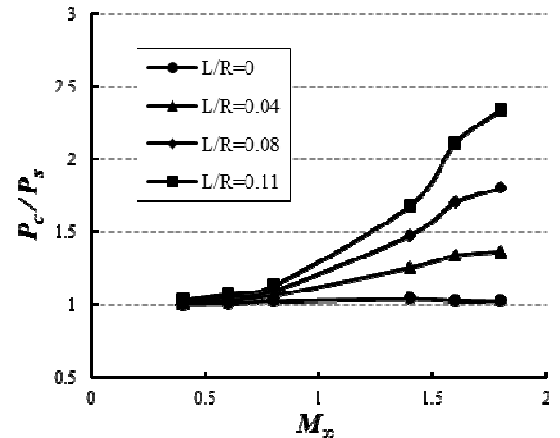
Fig. 5 Vorticity contours on cavity with different L/R ($M_\infty=1.8$)

있다. $L/R = 0$ 의 경우 관내에 공동으로 인한 충격파만 존재하였으나, $L/R = 0.04 \sim 0.11$ 의 경우 공동 상류에서도 충격파가 발생하였다. 이것은 곡면으로 인한 경사충격파로 공동주변의 유동에 영향을 주는 것을 관찰할 수 있다. 곡면의 곡률 반경이 증가함에 따라 공동 주변에서 강한 충격파가 발생하였으며, 공동에서 생성된 강한 충격파로 인해 공동 상부에 입구 마하수보다 높은 마하수가 존재했다. 관의 상부에 존재하는 높은 크기의 마하수는 곡면의 곡률 반경이 증가함에 따라 그 크기가 커졌다.

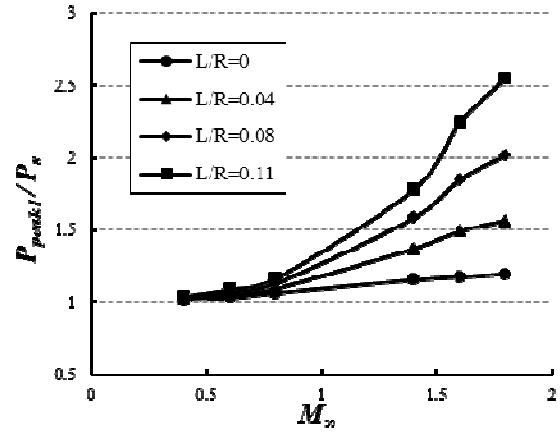
Fig. 5로부터 직관의 경우 상류에 생성된 강한 크기의 와도가 전단층을 따라 공동 상부에 존재하였으며, 전단층을 따라 이동한 유동은 후연부에 부딪쳐 하강하여 순환하는 유동과 공동 모서리에서 발생하는 와류로 인해 공동 내부와 모서리에 높은 크기의 와도가 존재하는 것을 알 수 있다. 와도 분포는 곡관과 직관 모두 유사하나, 곡면의 곡률 반경이 증가함에 따라 후연부 주변에 존재하는 와도의 크기가 감소하였다.

공동 내부의 유동 특성을 분석하기 위해 압력 특성이 잘 나타난 P_c , P_{peak1} , P_{peak2} 위치에서의 정압을 측정하였다. 마하수 및 곡면의 곡률 반경이 다른 각 지점에 대한 결과들을 정량적으로 정리하여 Fig. 6에 나타내었으며, 그림의 횡축은 마하수를 그리고 종축은 각 지점에서의 정압을 대기압으로 무차원하여 입구 마하수에 따른 공동 내부에서 발생하는 압력 이력을 비교하였다.

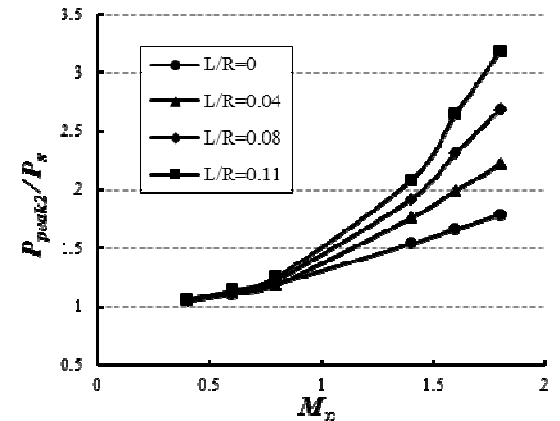
Fig. 6(a)에서 $L/R = 0$ 의 경우, 아음속 영역에서 마하수가 증가할수록 와도의 크기와 정압이 증가하는 경향이 나타났다. 하지만 이와 반대로 초음속 영역에서 마하수가 증가할수록 와도의 크기가



(a)



(b)



(c)

Fig. 6 Pressure distributions at different positions a : Static pressure at the cavity center, b : Peak pressure(P_{peak1}) and c : Peak pressure(P_{peak2})

감소하여 정압이 감소하는 경향을 나타냈다. 이에 반해 $L/R = 0.04 \sim 0.11$ 의 경우, $L/R = 0$ 과 비교해, 마하수에 관계없이 모두 강한 와도가 존재하였으며, 높은 정압값을 가졌다. 정압값은 마하수가 일정한 경우, 곡면의 곡률 반경이 증가함에 따라 정압이 증가하였다. 또한, 곡면의 곡률 반경이 일정

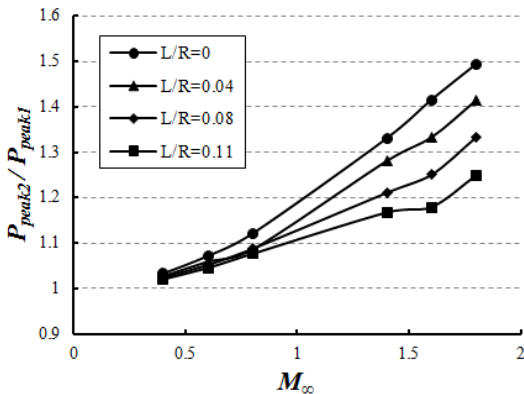


Fig. 7 Peak pressure distribution with different L/R

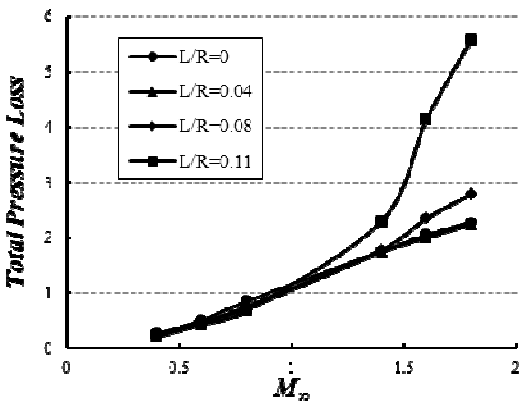


Fig. 8 Total pressure loss with different L/R

한 경우, 마하수가 증가함에 따라 정압이 증가하였으며, 아음속 영역에 비해 초음속 영역일 때 압력 증가에 더 큰 영향을 받았다.

Fig. 6(b, c)의 경우, 각각 공동 모서리 부분에서 발생하는 와류와 전단층이 후연부에 부딪쳐 발생한 와도로 인해 모두 강한 와도가 존재하였으며, 이로 인해 P_c 지점보다 높은 정압값을 가졌다. 마하수가 일정한 경우, 곡면의 곡률 반경이 증가함에 따라 정압 또한 증가하였으며, 곡면의 곡률 반경이 일정한 경우, 마하수가 증가함에 따라 정압이 증가하여 Fig. 6(a)와 동일한 압력 특성을 가진 것을 나타냈다.

Fig. 7은 마하수에 따른 피크압력비(P_{peak2}/P_{peak1})를 나타내었다. L/R이 일정한 경우, 마하수가 증가함에 따라 피크압력비의 크기가 증가하였다. 그리고 마하수가 일정한 경우, L/R의 증가에 따라 피크압력비의 크기는 감소하였으며, 그 영향은 초음속 영역에서 더 크게 나타났다. 이것은 L/R이 증가함에 따라, 전단층이 공동의 후연부에 부딪혀 발생한 와도가 공동의 모서리에서 발생하는 와도에 비해 상대적으로 적은 영향을 주는 것으로 나타내었다.

Fig. 8은 반경 변화 및 마하수 변화에 따른 전압력 손실을 나타낸 것이다. 전압력 손실률은 입구 전압력($P_{t,\infty}$)에 대한 출구 전압력($P_{t,o}$)을 퍼센트로 표시한 것으로, 다음과 같이 정의하였다.

$$Total\ Pressure\ Loss = \frac{P_{t,\infty} - P_{t,o}}{P_{t,\infty}} \times 100\% \quad (1)$$

전압력 손실은 모든 경우에서 입구 유동의 마하수가 증가함에 따라 증가하였다. 마하수가 일정한 경우, 초음속 영역에서 곡면의 곡률 반경이 증가함에 따라 손실이 증가하였으나, 아음속 영역에선, 거의 변화가 없다. $M_\infty = 1.8$ 일 때 충격과 발생 후의 정압을 조사한 결과, L/R = 0은 108,376 Pa, L/R = 0.11은 243,196 Pa로 나왔으며, 이는 공동으로 인해 발생한 충격파가 곡면의 곡률 반경이 증가함에 따라 더 큰 압력구배를 발생시켜 전압력 손실 증가에 영향을 주었음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구는 곡면 벽상에 설치한 공동 유동을 조사하기 위해 수치해석을 수행하였다. 곡면의 곡률 반경, 유동의 마하수를 변화시켜 공동의 유동 특성을 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 곡면의 곡률 반경이 증가함에 따라 강한 충격파가 발생하였으며, 더 큰 압력구배를 발생시켰다.
- (2) 곡면 벽상에 설치된 공동유동은 곡면의 곡률반경이 작아질수록 그리고 유동의 마하수가 증가할수록, 공동내부에서 발생하는 피크압력의 크기가 증가한다.
- (3) 곡면의 곡률 반경과 유동의 마하수가 증가함에 따라 공동으로 인해 발생한 전압력손실은 증가한다.

후 기

본 연구는 서울대학교 차세대 우주추진 연구센터와 연계된 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 선도연구센터지원사업(NRF-2013R1A5A1073861)의 연구 결과입니다(과제 번호: 0659-20140012).

참고문헌 (References)

(1) Stallings, R. L. and Wilcox, F. J., 1987, "Experimental Cavity Pressure Distributions at Supersonic Speeds,"

- NASA TP-2683.
- (2) Plentovich, E. B., Stallings, R. L. and Tracy, M. B., 1993, "Experimental Cavity Pressure Measurements at Subsonic and Transonic Speeds," NASA Technical Paper 3358.
- (3) Maureen, B. T. and Plentovich, E. B., 1997, "Cavity Unsteady-Pressure Measurements at Subsonic and Transonic Speeds," NASA TP 3669
- (4) Zhang, X., 1995, "Compressible Cavity Flow Oscillation Due to Shear Layer Instabilities and Pressure Feedback," *AIAA Journal*, Vol. 33, No. 8, pp. 1404~1411.
- (5) Zhang, X., Rona, A. and Edwards, J.A., 1998, "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.
- (6) Yang, D. G., Li, J. Q., Fan, Z. L. and Yao, D., 2010, "Aerodynamic Characteristics of Transonic and Supersonic Flow over Rectangular Cavities," *Flow Turbulence Combust*, Vol. 84, No. 4, pp. 639~652.
- (7) Atvars, K., Knowles, K., Ritchie, S. A. and Lawson, N. J., 2009, "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.
- (8) Lee, Y. K., Kang, M. S., Kim, H. D. and Setoguchi, T., 2008, "Passive Control Techniques to Alleviate Supersonic Cavity Flow Oscillation," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 24, No. 4, pp. 697~703.
- (9) Nayyar, P., 2005, "CFD Analysis of Transonic Turbulent Cavity Flows," PhD thesis, University of Glasgow.
- (10) Murray, N., Sallstrom, E. and Ukeiley, L., 2009, "Properties of Subsonic Open Cavity Flow Fields," *Physics of Fluids*, Vol. 21, No. 9, pp. 095103~095119.