

공동의 폭 변화에 따른 3차원 초음속 공동 유동연구

우철훈¹, 김재수²

NUMERICAL ANALYSIS OF THREE DIMENSIONAL SUPERSONIC CAVITY FLOW FOR THE VARIATION OF CAVITY SPANWISE RATIO

C.H. Woo¹ and J.S. Kim^{*2}

High-speed flight vehicle have various cavities. The supersonic cavity flow is complicated due to vortices, flow separation, reattachment, shock waves and expansion waves. The general cavity flow phenomena includes the formation and dissipation of vortices, which induce oscillation and noise. The oscillation and noise greatly affect flow control, chemical reaction, and heat transfer processes. The supersonic cavity flow with high Reynolds number is characterized by the pressure oscillation due to turbulent shear layer, cavity geometry, and resonance phenomenon based on external flow conditions. The resonance phenomena can damage the structures around the cavity and negatively affect aerodynamic performance and stability. In the present study, we performed numerical analysis of cavities by applying the unsteady, compressible three dimensional Reynolds-Averaged Navier-Stokes(RANS) equations with the $k-\omega$ turbulence model. The cavity model used for numerical calculation had a depth(D) of 15mm cavity aspect ratio (L/D) of 3, width to spanwise ratio(W/D) of 1.0 to 5.0. Based on the PSD(Power Spectral Density) and CSD(Cross Spectral Density) analysis of the pressure variation, the dominant frequency was analyzed and compared with the results of Rossiter's Eq.

Key Words : 비정상 초음속 유동(Unsteady Supersonic Flow), $k-\omega$ 난류모델($k-\omega$ Turbulence Model), 3차원 공동유동(Three Dimensional Cavity Flow), PSD 분석(Power Spectral Density Analysis), CSD 분석(Cross Spectral Density Analysis)

1. 서 론

개방형공동에서 유동에 의한 압력진동의 특성은 유동속도, 공동의 기하학적 구조 등에 의해 특성지어진다. 진동의 발생과 강도는 자유유동으로부터 공급되는 에너지와 점성 손실, 음향적 손실, 대류에 의한 물질교환 등 다양한 에너지손실간의 균형에 의해 결정된다고 알려졌다. 이 압력진동은 공동 주위의 구조체에 미치는 영향이 크기 때문에 1950년대부터 많은 연구가 수행되어 왔다. 고레이놀즈수 초음속 공동유동은 난류전단층에 의해 내부유동과 외부유동이 분리되고, 공동 형

상과 외부유동조건에 의해 압력진동으로 나타나며, 이는 소음 발생, 구조물 손상, 공기역학적 성능 및 안정성에 나쁘게 작용할 수가 있다.

공동유동은 Fig. 1처럼 공동의 세장비에 따라 개방형($L/D < 10$)과 밀폐형($L/D > 13$)으로 구별한다. 밀폐형 공동은 앞전에서 발생한 전단층이 공동의 바닥에 충돌하고, 이는 다시 바닥에서 반사되어 팽창파를 형성하면서 공동 뒷전으로 유출된다. 따라서 공동내부에 분리된 2개의 작은 박리영역을 형성하게 되어 공진현상이 심각하지 않다. 한편, 개방형 공동은 앞전에서 발생한 자유전단층이 뒷전에 재부착하여 공동 내부유동과 외부유동을 불안정하게 차단하기 때문에, 내외부 유동의 상호작용에 의한 압력변화로 심한 진동현상이 나타날 수 있다[1,2].

초기연구는 Krishnamurty[3], Rossiter[4], Heller[5] 등에 의해 주로 실험적 방법에 의한 진동예측모델에 대한 연구가 수행되었으며, 그 모델은 지금까지도 폭넓게 사용되고 있다. Xin

접수일: 2006년 9월 12일, 심사완료일: 2006년 11월 20일.

1 연구원, 한국항공우주산업주식회사

2 정회원, 연락저자, 조선대학교 항공우주공학과

* Corresponding author, E-mail: jsckim@chosun.ac.kr

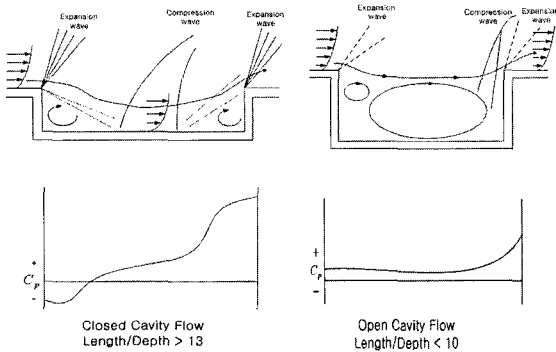


Fig. 1 Classification of cavity flows

Zhang & Edwards[6], Sinha, Dash & Chidambaram[7] 등 에서 부터 2차원 유동에 관한 수치계산 및 난류유동 특성 분석이 수행되었으며, Gharib & Roshko[8]은 2차원 공동 유동은 세장 비(L/D , Length to Depth ratio)가 커질수록 전단층모드에서 후류모드로 바뀐다는 것을 수치계산을 통해 입증 하였다. 3차원 유동에 관한 수치계산은 Chingwei & Philip[9] 등에 의해서 시도되었는데, 3차원 공동 유동은 후류모드 보다는 전단층모드가 우세한 특성을 갖는 것을 보였다. Woo, Kim & Lee[10]는 2중 공동에 대한 2차원 및 3차원 유동특성을 비교분석하였다. 그러나 대량 수치계산용량에 대한 제약으로 인해, 단편적인 3차원 수치계산결과를 보여주고 있다.

Rossiter[4] 및 Heller[5]의 연구에 의하면, 비정상 전단층에 의한 공동유동의 주진동 주파수는 공동의 형상과 유동의 조건에 따라 모드 1,2,3...등으로 특정 주파수가 결정된다. Rossiter[4] 식은 파동의 순환구조를 토대로 공명현상의 주파수를 예측하기 위하여 개발된 식으로서, 전단층을 따라 흘러가는 와류와 뒷전에서 반사되어 나오는 압력과 사이의 순환 과정의 무차원 진동수(Strouhal Number)를 모드 1,2,3...로 나타내었다. 이 식은 유동의 마하수와 공동의 세장비만 알면 쉽게 주진동주파수를 예측할 수 있는 장점을 가지고 있어 지금까지도 널리 사용되고 있다.

본 논문에서는 폭비(W/D)에 따른 3차원 초음속유동을 분석하기 위한 연구를 수행하였다. 지배 방정식은 3차원 비정상 압축성 Reynolds-Averaged Navier-Stokes(RANS)방정식에 $k-\omega$ 난류모델을 사용하였으며, 수치기법은 4차 Runge-Kutta 방법을 사용하였고, 공간적분은 van Leer의 유량한계치(flux limiter)를 이용한 FVS(flux vector split) 법을 사용하였다. 수치계산은 16개의 CPU를 이용한 병렬처리 기법을 사용하였다. 기본적인 수치계산의 검증은 Woo & Kim[11]의 연구에서 Rossiter공식[4]에 기초한 무차원 진동수(Strouhal Number)와 Xin Zhang & Edwards[6]의 실험치와 2차원 및 3차원 수치계산 결과를 비교하여 검증하였다.

2. 지배 방정식 및 수치 계산

무차원화된 3차원 Navier-Stokes방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \bar{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{E}}{\partial \xi} + \frac{\partial \bar{F}}{\partial \eta} + \frac{\partial \bar{G}}{\partial \zeta} = \frac{\partial \bar{E}_v}{\partial \xi} + \frac{\partial \bar{F}_v}{\partial \eta} + \frac{\partial \bar{G}_v}{\partial \zeta} + \bar{S} \tag{1}$$

무차원 기준값은 공동의 깊이(D), 자유유동속도, 자유유동 밀도 등이며 t, ξ, η, ζ 는 시간과 일반 좌표축이다. \bar{Q} 는 일반 좌표로 변환된 무차원 보존유량함수 벡터 $Q/J=(\rho, \rho u, \rho v, \rho w, \rho e)^T/J$ 이다. $\bar{E}, \bar{F}, \bar{G}$ 및 $\bar{E}_v, \bar{F}_v, \bar{G}_v$ 는 변환 행렬과 유량벡터에 의해 표현된 일반좌표 유량 벡터이다. 비점성 유량 벡터 Q, E, F, G 와 점성항 유량 벡터 E_v, F_v, G_v 및 기타 부호는 참고문헌과 같다[11,12]. \bar{S} 는 난류계산에 사용되는 항이다. 난류모델은 Wilcox[13]의 $k-\omega$ 모델을 사용하였다.

시간이산화를 위하여, 외제적인 방법으로 4차의 정확도를 갖는 4th order Runge-Kutta 방법을 사용하였으며, 각 단계의 계수는 1, 1/4, 1/6, 3/8이다[12]. 공간이산화는 2차 정밀도를 갖는 van Leer의 유량한계계수를 이용한 유량벡터분리(Flux Vector Split) 방법을 사용하였다. 수치계산은 16대의 pc-cluster를 사용한 병렬처리기법이 사용되었다.

공동 형상과 유동조건은 Xin Zhang & Edwards[6]의 실험 모델을 기본으로 하였으며, 공동의 깊이(D)는 15mm 이고, 공동의 세장비(L/D)는 3 이다. 공동 깊이를 기준으로한 Reynolds 수는 4.5×10^5 이고, 마하수는 1.5인 초음속 유동에 대하여 계산을 수행하였다. 기본적인 유동 조건은 2차원과 3차원에 동일하게 부여하였으며, 3차원의 경우 폭비(W/D , Width to Depth ratio)를 1.0부터 6.0까지 변화시키며 수치계산을 수행하였다.

Fig. 2은 공동유동 해석을 위한 세장비(L/D)가 3이고, 폭비(W/D)가 5인 3차원 격자계의 일부를 보여주고 있다. 벽면 부근에 격자를 밀집시켜 주었으며, 첫 격자점의 y^+ ($= y \sqrt{\rho_w \tau_w / \mu_w}$)는 약 0.01~1.5 정도로 벽합수를 사용하지 않고 직접 계산을 수행하였다. Abdol-Hamid[14]의 연구에 의하면 큰 박리영역을 포함하는 유동에서 첫격자점의 y^+ 가 10이하면 타당한 결과를 보여주는 것으로 알려졌다. 원방경계조건은 깊이(D)의 7배를 주었으며, 계산에 사용된 격자수는 2차원의 경우 상부에 351×100, 공동부에 100×70이며, 3차원의 경우 상부는 140×40×40에서 140×40×90까지, 공동부에는 50×30×20에서 50×30×70까지 격자계를 사용하였다.

기본적인 수치계산은 Woo & Kim[11]에서 검증한 수치코드를 사용하였다. Woo & Kim[11]의 연구에서 Rossiter공식[4]

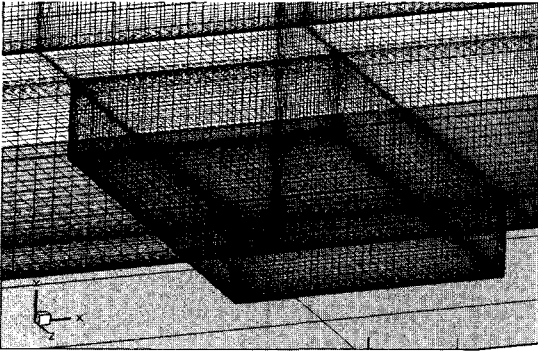


Fig. 2 Computational grid for the three dimensional calculation

에 기초한 무차원 진동수(Strouhal Number)와 Xin Zhang & Edwards[6]의 실험치와 2차원 및 3차원 수치계산 결과를 비교하여 검증하였다.

3. 계산 결과 및 고찰

세장비(L/D)가 3이고, 폭비(W/D)를 1 ~ 6까지 증가할 때 공동내의 유동현상과 압력변화에 의한 진동 주파수를 분석하였다. Fig. 3과 Fig. 4는 공동의 앞면과 중앙바닥에서 무차원 시간에 대한 압력변화를 나타낸 그림이다. 그림을 보면 압력변화의 크기는 2차원 공동이 3차원 공동보다 큰 것을 알 수 있다. 그러나 3차원 공동의 경우 폭비가 증가함에 따라 3차원 효과에 의한 압력진동이 점점 사라지고 폭비가 5 부터는 2차원 공동과 같은 압력변화를 나타내면서 2차원 공동과 같은 진동 주기로 변해가는 것을 그림을 통해 확인할 수 있다.

Fig. 5는 2차원 공동과 폭비(W/D)가 1, 4, 5, 6인 3차원 공동의 진동 주파수를 알아보기 위하여 SPL(Sound Pressure Level)값으로 주파수 특성을 분석한 그림이다. 실선으로된 2차원 공동의 주파수 분석을 보면 5.4kHz대역이 세장비(L/D)가 3인 공동의 진동 주파수 대역인 것을 알 수 있으며, 이는 Rossiter[4]식에 의해서 모드 2에 해당하는 주파수 대역인 것을 알 수 있었다. 3차원 공동은 폭비 4이하에서는 5.4kHz와 2.9kHz대역 두 곳에서 진동주파수가 나타나는 것을 볼 수 있으며, 2.9kHz는 모드 1에 해당하는 주파수 대역인 것을 알 수 있었다. 그러나 폭비(W/D)가 5인 공동의 진동 주파수를 보면 폭비가 4이하 인 경우와는 달리 3차원 효과에 의한 2.9kHz(모드 1)의 주파수 대역이 사라지고 2차원 공동과 같은 주파수대역만 나타나는 것을 볼 수 있다. 그리고 폭비가 6인 3차원 공동도 계산한 결과 폭비가 5일 때와 같은 5.4kHz대역만 나타나는 것을 확인하였다.

위의 결과에서 볼 때 3차원 공동의 경우 폭비(W/D)가 1,

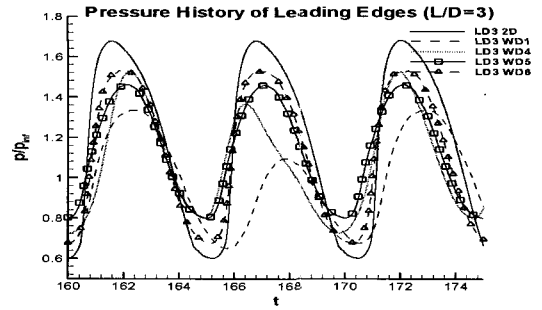


Fig. 3 Pressure history at the leading edge ($z/D = 50\%$)

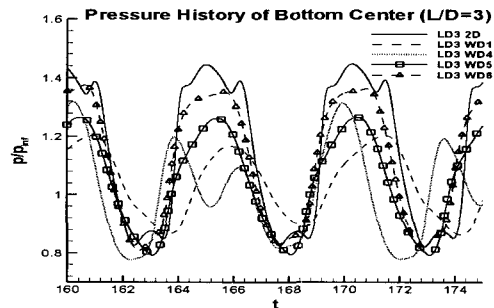


Fig. 4 Pressure history at the bottom center ($z/D = 50\%$)

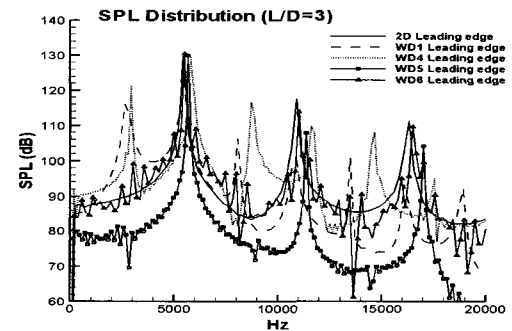


Fig. 5 SPL distribution ($z/D = 50\%$)

2, 3, 4인 경우 3차원 효과에 의한 Z-방향(Transverse)으로 유량의 유입과 유출 때문에 2.9kHz대역에 진동 주파수가 있는 것을 확인할 수 있으며, 폭비가 5부터는 Z-방향의 유입유출에도 불구하고, 5.4kHz의 주파수 대역만 존재하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 6, 7, 8은 2차원과 3차원 공동의 진동 주파수 대역에

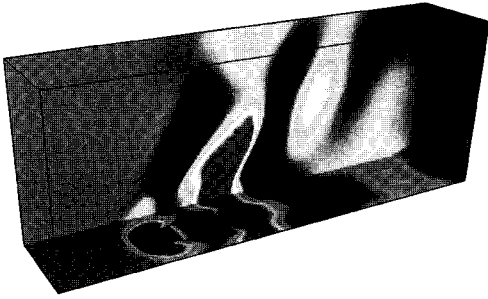


Fig. 6 Re(CSD) distribution of 3D cavity at the 2.9kHz (mode=1)

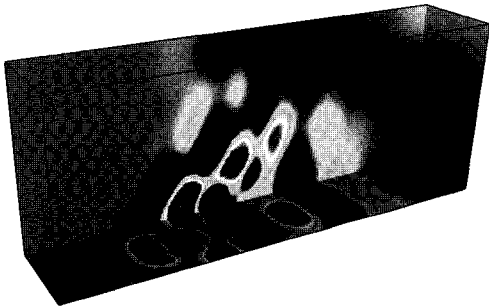


Fig. 7 Re(CSD) distribution of 3D cavity at the 5.4kHz (mode=2)

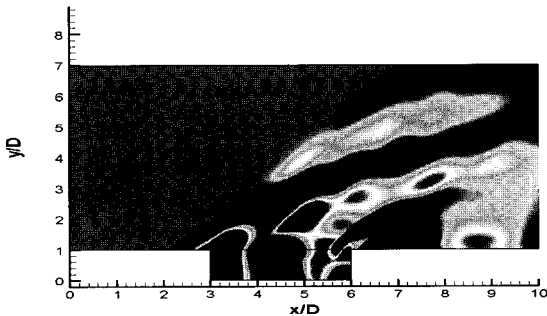


Fig. 8 Re(CSD) distribution of 2D cavity at the 5.4kHz (mode=2)

서 CSD(Cross Spectral Density)를 분석한 그림이다. Fig. 6, 7은 폭비(W/D)가 4인 3차원 공동에서 주진동 주파수가 2.9kHz와 5.4kHz일 때 CSD로 분석한 그림으로서 각 주파수의 파동 전파방향을 보여주고 있다. Fig. 7과 Fig. 8을 비교하면 5.4kHz에서 압력파의 전파가 2차원 공동과 3차원 공동의 전파특성이 유사한 것을 볼 수 있다.

Fig. 9는 2차원과 3차원 공동의 중앙단면($z/D=50\%$)에서

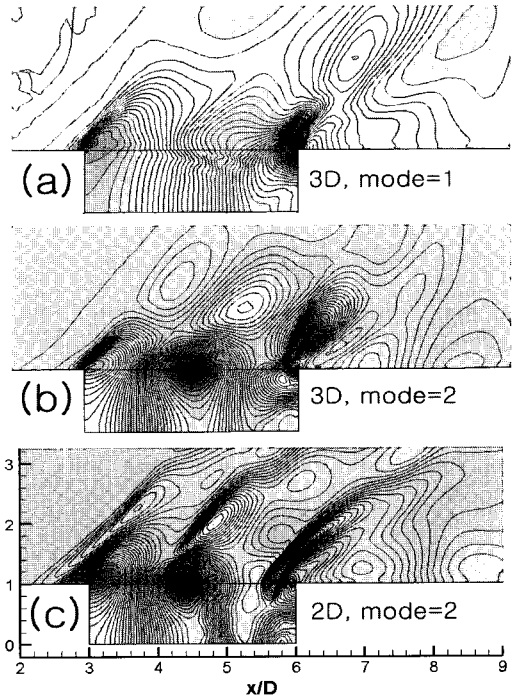


Fig. 9 Contour line distribution of dominant frequency ($z/D=50\%$)

주진동 주파수 대역을 CSD로 분석한 후 실수영역에 대해서 등고선으로 나타낸 그림이다. Fig. 9(a)을 보면 2.9kHz 대역에서 등고선의 밀집도가 공동의 앞전과 뒷전에 밀집되어 있는 것을 볼 수 있으며, 이는 공동이 진동모드 모드 1에 해당하는 반 파장만 있다는 것을 알 수 있다. Fig. 9(b), (c)을 보면 2차원과 3차원 공동 모두 5.4kHz 대역에서 등고선이 공동의 앞전과 중간 뒷전 이렇게 3지점에 밀집되어 있는 것을 볼 수 있으며, 이는 공동이 진동모드 모드 2에 해당하는 한파장이 있다는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

비정상 Reynolds-Averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식과 $k-\omega$ 난류모델을 이용하여 폭비를 달리하면서 3차원 공동 주위유동이 자유전단층의 진동에 의한 주주파수와 파의 전파 방향을 모사할 수 있었다. 계산에 사용된 모델은 마하수 1.5, 세장비(L/D)가 3, 폭비(W/D)가 1~6이고, 레이놀즈수는 4.5×10^5 이다. 주진동 주파수를 Rossiter[s4]의 진동 모드에 의한 무차원 진동수(St)와 비교해본 결과 2차원 유동에서는 모드 2인 주파수만이 주진동 주파수로 나타나나, 3차원 유동에서는 폭에 따라 모드 1과 2에 해당하는 주진동 주파수가 같

이 나타나며, 폭의 변화에 따른 주진동주파수가 모드 2로 변해가는 것을 볼 수 있다. 또한 PSD와 CSD분석을 통하여 3차원 유동의 모드 1과 2인 주파수대역의 파장 전파 특성을 확인할 수 있었다.

후 기

본연구결과는 2004년도 조선대학교 교내연구과제의 연구결과의 일부이며, 병렬처리수치계산과정에 도움을 주신 슈퍼 컴퓨팅센터 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Baysal, O. and Stallings Jr, R.L., 1998, "Computational and experimental Investigation of Cavity Flowfields," *AIAA J.*, Vol.26, No.1.
- [2] Maull, D.J. and East, L.F., 1963, "Three-dimensional flow in cavities," *journal of Fluid Mechanics*, Vol.16, pp.620-632.
- [3] Krishnamurty, K., 1955, "Acoustic radiation from two-dimensional rectangular cutouts in aerodynamic surfaces," *NACA TN-3487*.
- [4] Rossiter, J.E., 1964, "Wind-tunnel experiments on the flow over rectangular cavities at subsonic and transonic speeds," *Aeronautical Research Council Reports and Memoranda* 3438.
- [5] Heller, H.H., Holmes, D.G., and Covert, E.E., 1971, "Flow-induced pressure oscillations in shallow cavities," *Journal of Sound and Vibration*, Vol.18(4), pp.545-553.
- [6] Xin Zhang & John A. Edwards., 1995, "Analysis of Unsteady Supersonic Cavity Flow employing an Adaptive Meshing Algorithm," *Computers & Fluids*, Vol.25, No.4.
- [7] N. Sinha, S.M. Dash and N. Chidambaram, 1998, "A perspective on the simulation of cavity aeroacoustics," *AIAA Paper* No.98-0286.
- [8] Gharib, M. and Roshko, A., 1987, "The effect of flow oscillations on cavity drag," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.177, pp.501-530.
- [9] Chingwei M.S., Philip J.M., 2001, "Comparison of Two- and Three-Dimensional Turbulent Cavity Flows," *AIAA journal*, Vol.29, No.2, pp.248-251.
- [10] C.H. Woo, J.S. Kim, and K.H. Lee, 2006, "Analysis of Two Dimensional and Three Dimensional Supersonic Turbulence Flow around Tandem Cavities," *Journal of Mechanical Science and Technology(KSME Int. J.)*, Vol.20, No.8, pp.1256-1265.
- [11] 우철훈, 김재수, 2005, "단일 공동 주위의 2차원 및 3차원 초음속 난류 유동 분석," *한국전산유체공학회*, 제 10권 제 4호, pp.51-58.
- [12] Hoffmann, K.C. and Chiang S.T., 1993, "Computational Fluid Dynamics for Engineers," *Engineering Education System USA*.
- [13] Wilcox, D.C., 1988, "Reassessment of the Scale Determining Equation for Advanced Turbulence Models," *AIAA journal*, Vol.26(11), pp.1299-1310.
- [14] Abdol-Hamid, C.S., Lakshmanan, B. and Carlson, J. R., 1975, "Application of Navier-Stokes Code PAB3D With Turbulence Model to Attached and Separated Flows," *NASA Technical Paper* 3480.