



3차원 고세장비 공동 주위의 난류유동 및 음향 특성에 관한 수치적 연구

문 바울,¹ 김재수^{*2}

NUMERICAL ANALYSIS FOR TURBULENT FLOW AND AERO-ACOUSTIC OVER A THREE DIMENSIONAL CAVITY WITH LARGE ASPECT RATIO

P.U. Mun¹ and J.S. Kim^{*2}

The flight vehicles have cavities such as wheel wells and bomb bays. The flow around a cavity is characterized as unsteady flow because of the formation and dissipation of vortices due to the interaction between the freestream shear layer and cavity internal flow, the generation of shock and expansion waves. Resonance phenomena can damage the structures around the cavity and negatively affect aerodynamic performance and stability. The flow field is observed to oscillate in the "shear layer mode" with low aspect ratio. In the present study, numerical analysis was performed for cavity flows by the unsteady compressible three dimensional Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) equations with Wilcox's $k - \omega$ turbulence model. The flow field is observed to oscillate in the "shear layer mode" with large aspect ratio. Based on the SPL(Sound Pressure Level) analysis of the pressure variation at the cavity trailing edge, the dominant frequency was analyzed and compared with the results of Rossiter's formul. The aero-acoustic wave analyzed with CPD(Correlation of Pressure Distribution).

Key Words : 비정상 아음속 유동(Unsteady Subsonic Flow), $k - \omega$ 난류모델($k - \omega$ Turbulence Model), 3차원공동유동 (Three Dimensional Cavity Flow), SPL 분석(Sound Pressure Level Analysis), CPD 분석 (Correlation of Pressure Distribution Analysis), 공력소음(Aero-acoustics)

1. 서 론

공동 주위의 유동은 비행체에 미치는 영향이 크기 때문에 1950년대부터 현재까지 많은 연구가 진행 중에 있다. 공동 주위의 유동은 와류와 박리 등과 같이 여러 가지 현상들이 복합적으로 작용하여 공동 주위에 진동과 소음을 발생시킨다.

공동은 유동에 노출될 때 강한 압력 교란을 발생시키며, 이것은 큰 소음을 유발하고, 구조물의 고장 혹은 파괴의 원인이 되기도 하고, 공력성능 및 안정성에 해를 주고, 민감한 계기를 손상시킬 수도 있다. 따라서 공동 유동의 정확한 이해와 해석으로, 소음과 유동의 가진을 줄여 구조물의 안정성을 확보하고자 많은 연구가 수행되어 왔다.

개방형 공동 중에서 L/D가 1보다 작은 경우를 깊은 공동

(Deep Cavity), L/D가 1보다 큰 경우를 얇은 공동(Shallow cavity)이라고 부른다. 깊은 공동의 경우에는 공동의 깊이 방향의 압력 진동 현상이 강하게 발생하는 반면, 얇은 공동의 경우 공동의 길이 방향의 압력 진동이 강하게 발생한다[1,2].

초기 연구로는 Krishnamurty[3]는 쉬리렌 사진으로 공동에서 발생하는 유동 및 소음을 가시화하는 등 실험에 의한 연구가 활발히 수행되었으며, Rossiter[4]는 실험 결과를 토대로 얇은 공동에서 발생하는 유동과 소음의 공명 주파를 예측할 수 있는 식을 제안하였다. 공동 주위를 지나는 유동이 비정상 전단층 형태일 경우 주어진 공동의 형상과 유동의 조건에 따라 모드 값에 따른 어떠한 특정 주파수를 가지게 된다. Rossiter[4] 식은 공동의 되먹임 메커니즘을 토대로 공동에서 발생하는 공명현상의 주파수를 예측하기 위하여 사용되는 식으로서, 전단층을 따라 흘러가는 와류와 뒷전에서 부딪혀 나오는 압력과 사이의 피드백 과정을 무차원 진동수(Strouhal Number)로 표현하였다. 이 식은 유동의 마하수와 공동의 길이만을 알면 쉽게 주파수를 예측할 수 있는 장점을 가지고

1 학생회원, 조선대학교 항공우주공학과

2 정회원, 조선대학교 항공우주 공학과

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



있어 널리 사용되고 있다. Tame[5]은 수학적 해석을 통해 공명 주파수를 예측할 수 있는 선형모델을 제시하였다. Cattafesta[6]는 실험을 통하여 공동의 공명 현상에서 다른 모드로의 변화 및 모드 사이의 상호 작용이 있음을 밝혀냈다.

Rockwell[7]은 전단층 불안정 이론(shear layer instability theory)을 공동 유동에 적용하여 유동의 진동수를 예측하였으며, 실험 결과와 잘 일치함을 보여주었다. Xin Zhang & Edwards[8], Krishnamurthy[3], Heller[9]등은 쉬리렌 사진으로 공동에서 발생하는 유동 및 소음을 가시화하는 등 실험에 의한 연구를 수행하였다. 위의 연구 등에서 공동 유동의 압력진동은 규칙성과 불규칙적성의 유동에 의해 발생한다고 알려져 있다. 이것은 일반적으로 공동에 유입되는 경계층, 공동의 형상, 유속 및 기타 인자들에 의해 다르게 나타나고, 공동의 깊이 따라 소음의 발생 방법도 다르다고 알려져 있다.

2차원 공동의 유동은 세장비(L/D)가 커질수록 전단층 모드에서 후류 모드로 바뀐다는 것이 Gharib & Roshko[8]의 연구를 통해서 입증되어 있다. 3차원 공동의 유동은 후류 모드보다는 전단층 모드가 우세한 특성을 갖는 것으로 알려져 있다. 전단층 모드와 후류 모드의 큰 특성 차이는 전단층 모드는 전단층에서 와류가 탈리되면서 공동의 뒷전 벽면에 충돌하는 것으로 특징지어지고, 후류 모드는 공동의 앞전에서 박리된 유동이 공동의 바닥에 충돌하여 공동의 하류로 유출됨으로 유동이 매우 격렬하다[10,11]. 위의 연구들은 대부분 실험 및 2차원 유동에 대한 연구이고, 3차원 유동에 대한 연구로는 N.Sinha, S. & Arunajatesan[11], K.S Chang[12]는 수치해석을 통하여 3차원 공동에서의 유동에 관하여 연구하였다. 중간영역세장비($L/D=2.5 \sim 4.5$)에 대한 연구로는 Choi & Kim[14]의 연구로 전단층형태(shear layer mode)의 유동으로 공동내부에 1개의 대와류가 나타나는 유동영역으로 볼 수 있다.

본 연구에서는 세장비가 매우 큰 영역($5.5 < L/D$)이거나 매우 적은 ($L/D < 1.0$)인 경우로 내부에 나타나는 와류의 형상 및 음향과의 전파특성이 중간영역 세장비 일 때와는 매우 다르다. 또한 계산의 정확도를 위해 물리적으로 타당하다고 알려져 있는 특성치 경계 조건(Characteristic Boundary Condition)[17]을 사용하였다. 이를 Rossiter 공식에 기초한 무차원진동수와 K. K. Ahuja and J. Mendoza[16]의 실험치 등으로 비교 검증하였으며, 3차원의 각기 다른 유동현상을 비교하였다. 공동유동의 주진동 주파수를 보기 위하여, FFT를 이용하여 SPL(Sound Pressure Level) 분석하였다. 압력과의 전파과정을 보기위하여 기준점의 주진동 압력변화와 기타영역의 압력변화 관계를 보여줄 수 있는 CPD(Correlation of Pressure Distribution) 분석을 수행하였다.

2. 지배 방정식 및 수치 계산

무차원화된 3차원 Navier-Stokes방정식은 다음과 같다.

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

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 $Q/J = (\rho, pu, pv, pw, pe)^T/J$ 이다. $\bar{E}, \bar{F}, \bar{G}$ 및 $\bar{E}_v, \bar{F}_v, \bar{G}_v$ 는 변환행렬과 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[18]. \bar{S} 는 난류계산에 사용되는 항이다. 난류모델은 Wilcox[11]의 $k - \omega$ 모델을 사용하였다.

시간이산화를 위하여, 4th-order Runge-Kutta Explicit Method를 사용하였다. 공간이산화는 2차 정밀도를 갖는 van Leer의 유량한계계수를 이용한 유량벡터분리(Flux Vector Split) 방법을 사용하였다. 수치계산은 20대의 pc-cluster를 사용한 병렬처리 기법이 사용되었다.

3. 계산 결과 및 고찰

공동의 유동계산을 위한 형상과 유동조건 모델은 K. K. Ahuja and J. Mendoza[16]의 실험 모델을 기본으로 하였으며, 공동의 깊이(D)는 $5.08cm$ 이고, 공동의 세장비(L/D)는 5.5, 6.5, 7.5이다. 공동 깊이를 기준으로, Reynolds 수는 1.6×10^6 이고, 마하수는 0.53인 아음속 유동에 대하여 계산을 수행하였다.

본 연구에서는 3D인 $M=0.53, L/D=5.5, 6.5, 7.5, W/d=2, Re=1.6 \times 10^6$ 인 경우가 해석되었으며, 이 조건은 Gharib[8]의 실험을 통하여 언급한 정상모드, 전단층 모드, 웨이크 모드 중 전단층 모드에 해당한다. 공동에서 발생하는 유동과 소음은 Fig. 2와 같다. 우선 앞전의 전단층에서 교란이 발생하면, 이 교란은 유동을 따라 전파되면서 점점 증폭되게 된다. 그리고 뒷전에 부딪히면 벽면에서 강한 압력 교란을 유발하고, 이것이 소음원으로 작용하게 된다. 뒷전에서 발생한 소음 중 일부는 상류방향으로 전파되어 앞전의 전단층과 상호작용을 하여, 초기보다 더 큰 교란을 유발하게 된다[10].

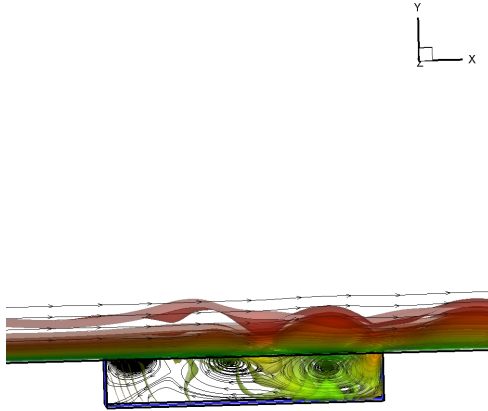


Fig. 1 3-D Density contours of entire domain & Stream line (M=0.53, L/D=5.5, Re=1.6*10⁶)



Fig. 2 3-D Acoustic fields of entire domain(M=0.53, L/D=5.5, Re=1.6*10⁶)

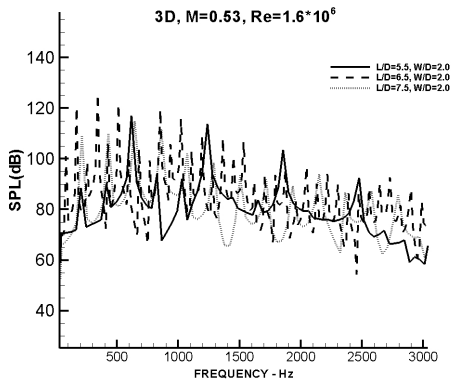


Fig. 3 SPL distribution for three dimensional cavity

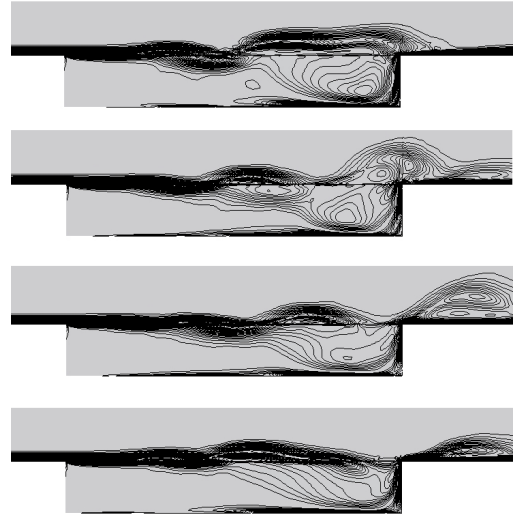


Fig. 4 L/D=6.5, Vorticity Contours

Fig. 1은 세장비 5.5의 공동에서의 등밀도선도를 3차원 형태로 그린 것이다. 고 세장비에서의 전형적인 전단층 모드 형태를 보여 주고 있다. Fig. 2는 계산 영역에서의 소음장을 그린 것으로, 뒷전을 중심으로 전구간으로 소음이 방사됨을 볼 수 있다.

Fig. 3는 3차원 공동의 주진동 주파수를 보기 위하여, SPL(Sound Pressure Level)값으로 주파수 특성을 분석한 그림이다. 한주기 동안에 압력의 변화를 SPL 분석을 하면 여러 가지의 피크를 확인을 할 수 있다. 세장비 5.5 일때, 3번째의 피크의 값의 주진동 주파수로 생각할 수 있다. 그러나 이경우에도 주진동주파수 이하에도 2개의 약한 피크가 존재하는 것을 볼 수 있다. 이 주진동 주파수는 K.K. Ahuja and J. Mendoza[16]의 실험결과와 유사하다. 장비 6.5와 7.5에서도 3번째 피크점이 세장비 5.5의 피크 위치와 비슷하다는 것을 알 수 있다. 그러나 고세장비에서는 저 세장비에서 약하게 존재 하던 2개의 피크점이 model 주진동주파수에서와 비슷한 강도로 존재하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 4는 Mach 0.53에 세장비 6.5에 대한 한 주기 동안의 등와류선도이다. Fig. 4의 경우 앞전의 전단층에서 와류가 발생하여 공동의 경계면을 따라 하류방향으로 흘러감이 선명하게 보인다. 이것은 고세장비의 특징으로 공동의 길이가 길어서 와류가 앞전에 붙은 전단층에서 완전히 떨어져 나올 만큼 발달하여기 때문이다. Fig. 4를 보면, 뒷전에 부딪힌 와류는 몇 개의 와류로 나누어지며 그중의 일부는 공동의 밖으로나 하류 방향의 벽면을 따라 흘러가며, 다른 일부는 공동의 내부로 흘러 들어간다. 이의 내부로 흘러 들어간 와류의 영향으로 인하여, 공동 내부엔 공동의 뒤쪽 부분에 커다란 한개의 와류

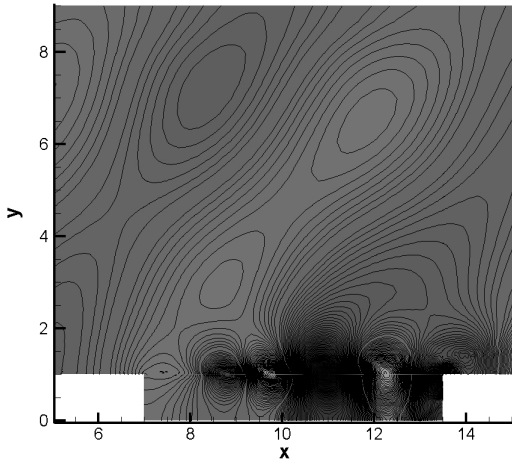


Fig. 5 CPD distribution of 3D Cavity(L/D=6.5) for the mode 1(at first spl distribution pick)

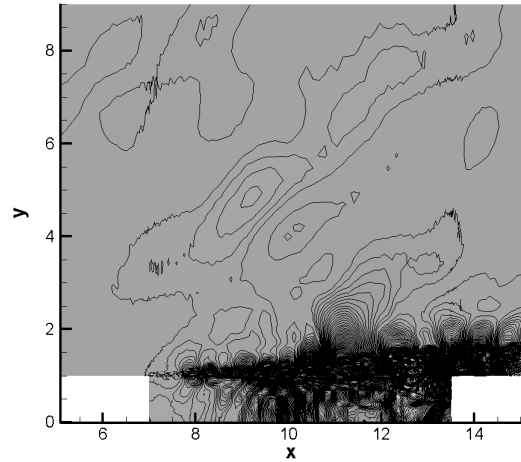


Fig. 7 CPD distribution of 3D Cavity(L/D=6.5) for the mode 1(at 3rd spl distribution pick)

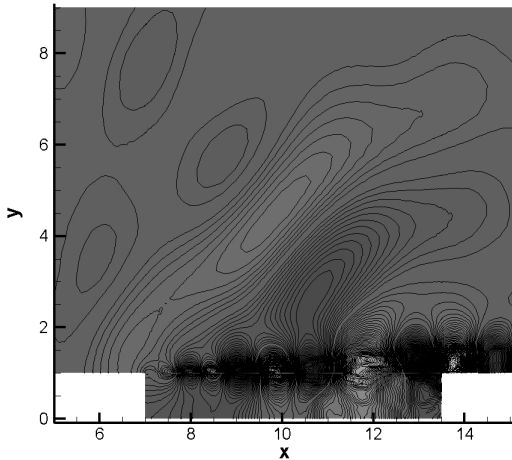


Fig. 6 CPD distribution of 3D Cavity(L/D=6.5) for the mode 1(at second spl distribution pick)

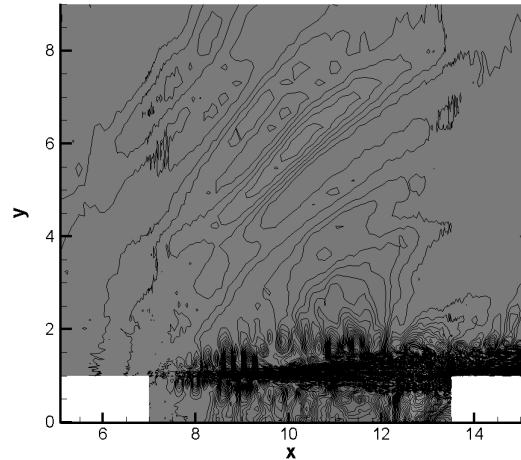


Fig. 8 CPD distribution of 3D Cavity(L/D=6.5) for the mode 2(at 6th spl distribution pick)

가 존재하게 되며, 앞전에서 발생하여 공동의 경계면을 따라 흐르는 와류와 상호작용을 일으켜 상하로 크게 진동하게 된다. 이러한 와류간의 상호작용은 공동에서 보다 큰 가진을 유발시키게한다. 또, 앞전에서 생성되어 뒷전에 부딪히는 와류는 직접적인 소음원으로 작용하게 된다[10].

Fig. 5에서부터 Fig. 8까지는 세장비 6.5의 각 피크점에서의 CPD분석이다. 첫 번째 피크에서 세번째 피크까지는 mode1의 영역으로 확인된다. 이것은 세장비 5.5에서의 mode1일 때의 CPD분석과 비슷한 양상을 보이고 있다. 그러나 mode2로 구별되어지는 여섯번째 주파수지점에서는 세장비 5.5의 mode2의 CPD분석과 비슷하게 나타나고 있다.

4. 결 론

비정상 Reynolds-Averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식과 $k-\omega$ 난류모델을 이용하여 세장비를 달리하면서 공동 주위의 점성에 의해서 유발되는 와류의 생성과 이동, 자유전단층의 진동에 의한 파의 생성과 소멸 등 공동유동의 특징을 실제 유동에 가깝게 모사하였다.

계산에 사용된 모델은 마하수 0.53, 세장비(L/D)가 5.5, 6.5, 7.5, 폭비(W/D)가 2이고, 레이놀즈수는 1.6×10^6 이다. 주진동 주파수를 Rossiter's[4]의 진동 모드에 의한 무차원 진동수(S)와 비교해본 결과, 3차원 유동에서는 세장비에 작을



경우에는 mode 1과 2에 해당하는 주진동 주파수가 잘 일치하지만, 이 경우에도 mode 1 이하에 2개의 약한 피크점이 존재한다. 세장비가 커지는 경우에는 mode 1 이하에 있던 2개의 약한 진동이 mode 1 주진동 주파수에서 발생하는 만큼의 강도로 커지는 것을 볼 수 있다. 또한, 저세장비에서는 뒷전에 부딪치는 와류가 소음의 주요인이었으나, 고세장비에서는 앞전에서 발생한 전단층이 중간정도에서 와전이 분리된 와류로 성장함으로 인해 또 다른 소음원으로 작용한다.

참고문헌

- [1] 1998, Baysal, O. and Stallings Jr, R.L., "Computational and experimental Investigation of Cavity Flowfields," *AIAA J.*, Vol.26, No.1.
- [2] 1963, Maull, D.J. and East, L.F., "Aerodynamically induced resonance in rectangular cavities," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.16, pp.620-632.
- [3] 1955, Krishnamurty, K., "Acoustic radiation from two-dimensional rectangular cutouts in aerodynamic surfaces," *NACA TN-3487*.
- [4] 1964, Rossiter, J.E., "Wind-tunnel experiments on the flow over rectangular cavities at subsonic and transonic speeds," *Aeronautical Research Council Reports and Memoranda* 3438.
- [5] 1987, Tam, C.K.W., and Block, P.J.W., "On the tones and pressure oscillations induced by flow over rectangular cavities," *J. Fluid Mech.*, Vol.89, pp.373-399.
- [6] 1998, Cattafesta, L.N.I., Kegerise, M.S. and Jones, G.S., "Experiments on compressible flow-induced cavity oscillations," *AIAA paper 98-2912*.
- [7] 1977, Rockwell, D., "Prediction of Oscillation Frequencies for Unstable FLOW Past Cavities," *ASME*, pp.294-300.
- [8] 1995, Xin Zhang and John A. Edwards., "Experimental Investigation of Supersonic Flow over Two Cavities in Tandem," *Computers & Fluids*, Vol.25, No.4.
- [4] 1971, Heller, H.H., Holmes, D.G. and Covert, E.E., "Flow-induced pressure oscillations in shallow cavities," *Journal of Sound and Vibration*, Vol.18, pp.545-553.
- [10] 2003, 허대녕, "공동에서 발생하는 유동과 소음의 되먹임 특성 해석," *한국과학기술원 박사 학위 논문*.
- [11] 2008, Woo, C.H., Kim, J.S. and Lee, K.H., "Three-dimensional effects of supersonic cavity flow due to the variation of cavity aspect and width ratios," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.22 pp.590-598.
- [12] 2002, Sinha, N. and Arunajatesan, S., "A perspective on the simulation of cavity resonance," *AIAA-2002-2403*.
- [13] 2007, Chang, K.S., Constantinescu, S.G. and Park, S., "Assessment of predictive capabilities of Detached Eddy Simulation to simulate flow and mass transport past open cavities," submitted to *Journal of Fluids Engineering*, ASME.
- [14] 2008, 최홍일, 김재수, "아음속 3차원 난류 공동 유동에 대한 수치적 해석," *조선대학교 석사 학위 논문*.
- [15] 1988, Wilcox, D.C., "Reassessment of the Scale Determining Equation for Advanced Turbulence Models," *AIAA journal*, Vol.19, No.2, pp248-251.
- [16] 1995, Ahuja, K.K. and Mendoza, J., "Effects of cavity dimensions, boundary layer, and temperature in cavity noise with emphasis on benchmark data to validate computational aeroacoustics codes," *NASA CR-4653*.
- [17] 1998, Kim, J.W. and Lee, D.J., "Generalized Formulation and Application of Characteristic Boundary Conditions," 4th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Toulouse, France, AIAA 98-2222.
- [18] 1993, Hoffmann, K.C. and Chiang, S.T., *Computational Fluid Dynamics for Engineers*, Engineering Education System USA.