

3차원 공동의 폭변화에 따른 초음속 유동에 대한 수치분석연구

우철훈¹, 김재수^{*2}, 최홍일²NUMERICAL ANALYSIS OF THREE DIMENSIONAL SUPERSONIC CAVITY FLOW
FOR THE VARIATION OF CAVITY SPANWISE RATIOC.H. Woo¹, J.S. Kim^{*2}, H.I. Choi²

High-speed flight vehicle have various cavities. The supersonic cavity flow is complicated due to vortices, flow separation and reattachment, shock and expansion waves. The general cavity flow phenomena include 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

고속으로 운항하는 비행체에는 여러 가지 공동이 존재한다. 공동 주위의 유동은 비행체에 미치는 영향이 크기 때문에 1950년대부터 현재까지 계속해서 많은 연구가 진행 중에 있다. 공동 주위의 초음속 유동은 와류의 생성과 소멸, 유동의 박리와 재부착, 충격파와 팽창파 등과 같은 유동현상이 복합적으로 일어나는 매우 복잡한 유동을 형성한다. 이러한 공동 주위에 발생하는 복합적인 유동현상을 와류의 생성과 소멸을 거치며 유동의 진동과 소음생성으로 나타나며, 그 결과 다시 유동제어, 화학적 연소, 열전달 과정 등에 크게 영향을 미치게 된다.

고레이놀즈수 초음속 유동의 경우 공동 내부의 유동은 주로 난류전단층에 의한 압력진동현상과 공동의 형상 및 외부 유동조건에 의한 공진현상으로 특징지을 수 있으며, 이러한 공진 현상은 공동 주위의 구조물에 손상을 줄 수 있고 공기역학적 성능 및 안정성에 나쁘게 작용할 수가 있다.

공동유동은 공동의 세장비에 따라 개방형($L/D < 10$)과 밀폐형($L/D > 13$)으로 구별한다. 개방형 공동은 앞전에서 발생한 자유전단층이 뒷전에 재부착하여 공동 내부유동과 외부 유동을 불안정하게 차단기 때문에 유동의 상호작용에 의한 압력변화로 진동현상이 나타나며, 진동에 의해 심각한 소음 및 구조물에 문제가 유발될 수 있다. 밀폐형 공동은 앞전에서 발생한 전단층이 공동의 바닥에 충돌하고, 이는 다시 바닥에서 반사되어 팽창파를 형성하면서 공동 뒷전으로 유출된다. 그러므로 공동내부에 분리된 2개의 박리영역을 형성하게 된다. 따라서 개방형과 달리 압력진동 등이 심하게 나타나지는 않는다[1,2].

이 분야에 대한 연구는 Krishnamurty[3], Rossiter[4],

1 학생회원, 조선대학교 항공우주공학과

2 정회원, 조선대학교 항공우주공학과

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

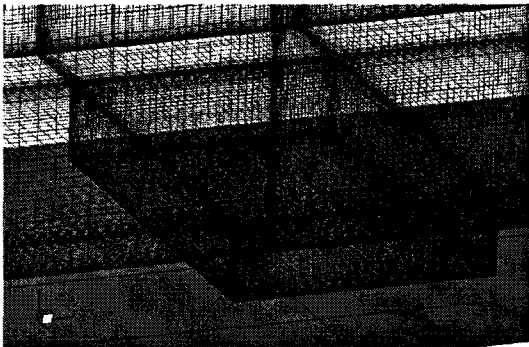


Fig. 1 Computational grid for the three dimensional calculation

Heller[5], Xin Zhang & Edwards[6], Woo & Kim[7]에 의해 공동 유동의 압력진동은 공동에 유입되는 경계층, 공동의 형상, 유속 및 기타 인자들에 따라 다르게 나타나고, 공동의 세장비에 따라 소음의 발생 방법도 다르다고 알려져 있다. 2차원 공동의 유동은 길이 대 깊이(L/D , Length of Depth ratio)가 커질수록 전단층모드에서 후류모드로 바뀐다는 것이 Gharib & Roshko[8]의 연구를 통해서 입증되었으며, 3차원 공동의 유동은 후류모드 보다는 전단층모드가 우세한 특성을 갖는 것으로 알려져있다[9]. 대부분의 연구는 2차원 유동에 대한 연구가 주로 수행되었으며, 최근에 들어 3차원 연구가 수행되고 있다.

공동 주위를 지나는 유동이 비정상 전단층 형태일 경우 주어진 공동의 형상과 유동의 조건에 따라 어떠한 특정 주파수를 가지게 되며, 이때 유동의 주파수는 유동의 조건과 공동의 형상에 따라 특정 모드($n=1,2,3...$)의 값을 가지면서 특정 주파수가 결정된다. 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 있어 널리 사용되고 있다.

2. 지배 방정식 및 수치 계산

지배방정식으로는 비정상 압축성 3차원 Navier-Stokes 방정식을 사용하였다. 난류모델은 $k-\omega$ 모델을 사용하였다[11]. 수치적인 방법으로는 시간이산화를 위하여, 외제적인 방법으로 4차의 정확도를 갖는 Runge-Kutta 4th order 방법을 사용하였다[10]. 공간이산화는 2차의 정밀도를 갖는 van Leer의 유량한계계수를 이용한 유량벡터분리(Flux Vector Split) 방법을 사용하였으며, 수치계산은 16대의 pc-cluster를 사용한 병렬처리 기법이 사용되었다.

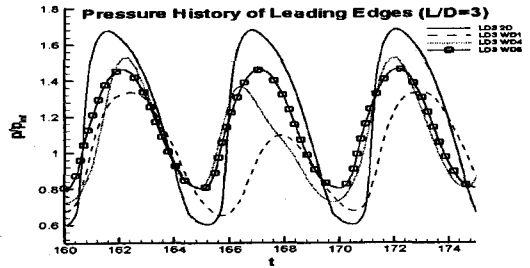


Fig. 2 Pressure history at the leading edge ($z/D=50\%$)

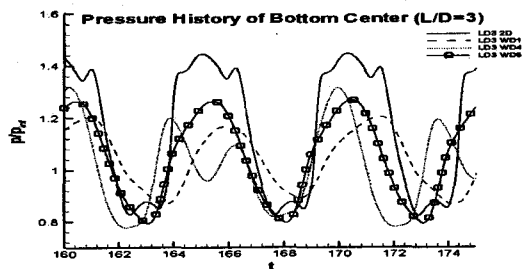


Fig. 3 Pressure history at the bottom center ($z/D=50\%$)

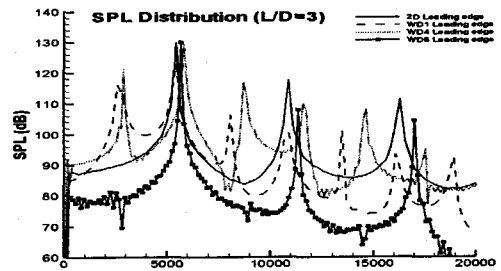


Fig. 4 SPL distribution ($z/D=50\%$)

본 연구의 수치계산모델은 개방형 공동유동의 종방향 진동이 지배적인 세장비(L/D)가 3인 경우이고, 이 때 폭비(W/D , Width of Depth ratio)를 1에서 5까지 1씩 변화시켜가며 수치계산을 수행하였다. 공동의 깊이(D)는 15mm이고, 공동 깊이를 기준으로한 Reynolds수는 4.5×10^5 이고, 마하수는 1.5인 초음속 유동에 대하여 계산을 수행하였다. 기본적인 수치계산은 Woo & Kim[7]에서 검증한 수치코드를 사용하였다. Woo & Kim[7]의 연구에서 Rossiter공식[4]에 기초한 무차원 진동수(Strouhal Number)와 Xin Zhang & Edwards[6]의 실험치와 2차원 및 3차원 수치계산 결과를 비교하여 검증하였다.

Fig. 1은 공동유동 해석을 위한 세장비(L/D)가 3이고, 폭비(W/D)가 5인 3차원 격자계의 일부를 보여주고 있다. 벽면 부근에 격자를 밀집시켜 주었으며, 원방경계조건은 깊이(D)의 7배를 준 격자계를 사용하였다.

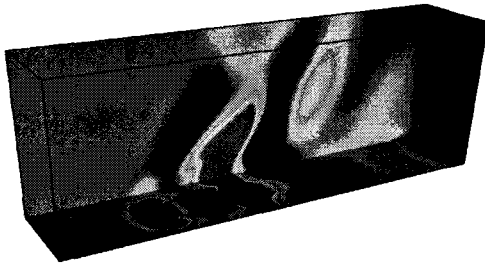


Fig. 5 CSD distribution of 3D cavity at the 2.9kHz (mode=1)

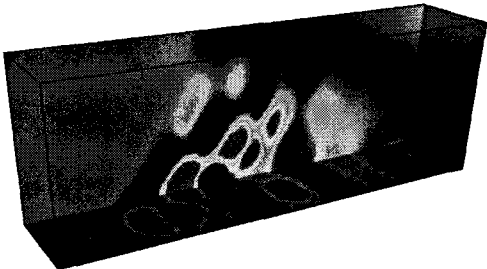


Fig. 6 CSD distribution of 3D cavity at the 5.4kHz (mode=2)

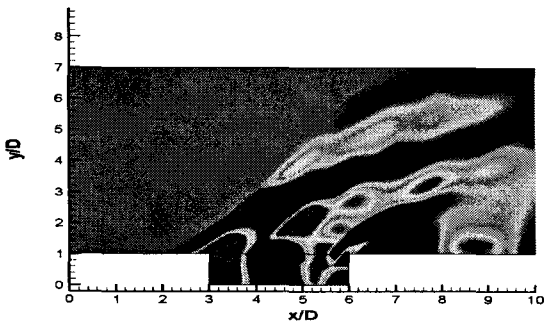


Fig. 7 CSD distribution of 2D cavity at 5.4kHz (mode=2)

3. 계산 결과 및 고찰

세장비 (L/D)가 3이고, 폭비 (W/D)를 1 ~ 5까지 증가할 때 공동내의 유동현상과 압력변화에 의한 주진동 주파수를 관찰하였다. Fig. 2와 Fig. 3은 공동의 앞전과 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 이상부터는 2차원 공동과 같은 압력변화를 나타내면서 2차원 공동과 같은 진동 주기로 변해가는 것을 그림을 통해 확인할 수 있다.

Fig. 4는 2차원 공동과 폭비 (W/D)가 1, 4, 5인 3차원 공동의 주진동 주파수를 알아보기 위하여 SPL(Sound Pressure

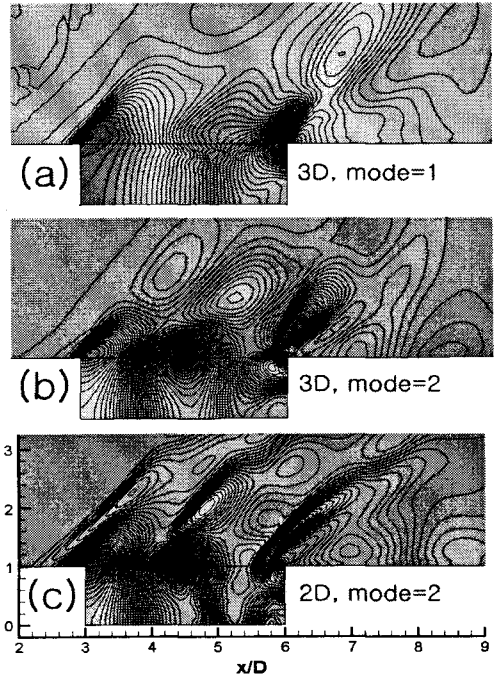


Fig. 8 Contour line distribution of dominant frequency ($z/D=50\%$)

Level)값으로 주파수 특성을 분석한 그림이다. 실선으로 된 2차원 공동의 주파수 분석을 보면 5.4kHz대역이 세장비 (L/D)가 3인 공동의 주진동 주파수 대역인 것을 알 수 있으며, 이는 Rossiter[4]식에 의해서 mode=2에 해당하는 주파수 대역인 것을 알 수 있었다. 3차원 공동은 폭비가 증가할수록 세장비에 의한 주파수 대역인 5.4kHz와 폭비에 의한 주파수 대역인 2.9kHz가 같이 나타나는 것을 볼 수 있으며, 2.9kHz는 mode=1에 해당하는 주파수 대역인 것을 알 수 있었다. 그러나 폭비 (W/D)가 5이상인 공동의 주진동 주파수를 보면 폭비가 1, 2, 3, 4인 경우와는 달리 3차원 효과에 의한 2.9kHz(mode=1)의 주파수 대역이 사라지고 2차원 공동과 같은 주파수대역만 나타나는 것이 확인되었다. 그리고 폭비가 6인 3차원 공동도 계산한 결과 폭비가 1, 2, 3, 4인 경우와 달리 폭비가 5일 때와 같은 5.4kHz대역만 나타나는 것을 확인하였다.

위의 결과에서 볼 때 3차원 공동의 경우 폭비 (W/D)가 1, 2, 3, 4인 경우 3차원 효과에 의한 Z-방향(Transverse)으로 유량의 유입과 유출 때문에 2.9kHz대역에 주진동 주파수가 있는 것을 확인할 수 있으며, 폭비가 5이상부터는 Z-방향의 3차원 효과가 사라지고 2차원 공동과 같이 세장비 (L/D)에 의한 5.4kHz의 주파수 대역만 존재하는 것을 알 수 있었다. Figure 5, 6, 7은 2차원과 3차원 공동의 주진동 주파수 대역에서 CSD(Cross Spectral Density)를 분석한 그림이다. Fig. 5, 6은 폭



비(W/D)가 4인 3차원 공동에서 주진동 주파수가 2.9kHz와 5.4kHz일 때 CSD로 분석한 그림이다. Fig. 5와 Fig.6에서 3차원 공동의 주진동 주파수 2.9kHz와 5.4kHz 파동 특성의 전파 과정을 보여주고있으며, Fig. 6과 Fig.7을 비교하면 5.4kHz에서 압력파의 전파가 2차원 공동과 3차원 공동의 전파특성이 유사한것을 볼수 있다.

Fig. 8은 2차원과 3차원 공동의 중앙($z/D=50\%$)에서 주진동 주파수 대역을 CSD로 분석한 후 실수영역에 대해서 등고선(contour line)으로 나타낸 그림이다. Fig.8(a)을 보면 2.9kHz 대역에서 등고선이 진동모드 mode=1에 해당하는 것을 확인할 수 있으며, Fig.8(b),(c)을 보면 2차원과 3차원 공동 모두 5.4kHz 대역에 대한 등고선이 진동모드 mode=2에 해당하는 것을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

비정상 Reynolds-Averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식과 $k-\omega$ 난류모델을 이용하여 폭비를 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 1.5, 세장비(L/D)가 3, 폭비(W/D)가 1 ~ 5이고, 레이놀즈수는 4.5×10^5 이다. 주진동 주파수를 Rossiter's[4]의 진동 모드에 의한 무차원 진동수(St)와 비교해 본 결과 2차원 유동에서는 모드 2인 주파수만이 주진동 주파수로 나타나나, 3차원 유동에서는 폭에 따라 모드 1과 2에 해당하는 주

진동 주파수가 같이 나타나는 것을 알 수 있었다. 또한 PSD와 CSD분석을 통하여 3차원 유동의 경우 Z-방향의 영향으로 인해 mode=1에 해당하는 주진동 주파수와 파장의 이동을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- [1] Baysal, O. and Stallings Jr, R.L., 1998, *AIAA J.*, Vol.26, No.1.
- [2] Maull, D.J. and East, L.F., 1963, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.16, p.620-632.
- [3] Krishnamurty, K., 1955, *NACA TN-3487*.
- [4] Rossiter, J.E., 1964, *Aeronautical Research Council Reports and Memoranda* 3438.
- [5] Heller, H.H., Holmes, D.G., and Covert, E.E., 1971, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.18, pp. 545-553
- [6] Xin Zhang & John A. Edwards., 1995, *Computers & Fluids*, Vol.25, No.4.
- [7] 우철훈, 김재수, 2005, *한국전산유체공학회*, 제10권 제4호.
- [8] Gharib, M. and Roshko, A., 1987, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.177, P.501-530.
- [9] Chingwei M.S., Philp J.M., 2001, *AIAA journal*, Vol.19, No.2, p.248-251.
- [10] Hoffmann, K.C. and Chiang S.T., 1993, *Engineering Education System USA*.
- [11] Wilcox, D.C., *AIAA journal*, Vol.19, No.2, p.248-251.