

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

문 바 울,¹ 김 재 수^{*2}NUMERICAL ANALYSIS FOR TURBULENT FLOW AND AERO-ACOUSTICS
AROUND A THREE DIMENSIONAL CAVITY WITH HIGH ASPECT RATIOP.U. Mun¹ and J.S. Kim^{*2}

Flight vehicles such as wheel wells and bomb bays have many cavities. The flow around a cavity is characterized as an unsteady flow because of the formation and dissipation of vortices brought by the interaction between the free stream shear layer and the internal flow of the cavity. The resonance phenomena can damage the structures around the cavity and negatively affect the aerodynamic performance and stability of the vehicle. In this study, a numerical analysis was performed for the cavity flows using the unsteady compressible three-dimensional Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) equation with Wilcox's turbulence model. The Message Passing Interface (MPI) parallelized code was used for the calculations by PC-cluster. The cavity has aspect ratios (L/D) of 5.5 ~ 7.5 with width ratios (W/D) of 2 ~ 4. The Mach and Reynolds numbers are 0.4 ~ 0.6 and 1.6×10^6 , respectively. The occurrence of oscillation is observed in the "shear layer and transient mode" with a feedback mechanism. Based on the Sound Pressure Level (SPL) analysis of the pressure variation at the cavity trailing edge, the dominant frequencies are analyzed and compared with the results of Rossiter's formula. The dominant frequencies are very similar to the result of Rossiter's formula and other experimental datum in the low aspect ratio cavity ($L/D = \sim 4.5$). In the high aspect ratio cavity, however, there are other low dominant frequencies of the leading edge shear layer with the dominant frequencies of the feedback mechanism.

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), 공력소음(Aero-Acoustics)

1. 서 론

공동 주위의 유동은 박리, 와류, 충격파, 팽창파, 재부착 등과 같은 복잡한 유동현상이 일어난다. 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 유

동에 의한 가진을 줄여 구조물의 안정성을 확보하고자 많은 연구가 수행되어 왔다.

일반적으로 공동을 나눌 때, 공동의 길이대 깊이 비에 따라서 분류한다. 세장비(L/D)가 10보다 작은 경우를 개방형 공동, 세장비(L/D)가 13보다 큰 경우를 폐쇄형 공동이라 한다. 폐쇄형 공동은 앞전에서 발생한 전단층이 공동의 바닥에서 반사되어 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 차단한다. 따라서, 내·외부유동의 상호작용에 의한 압력변화로 심한 진동현상이 나타날 수 있다[1-2].

이러한 공동 유동에 대해 Krishnamurty[3]는 쉬리렌 사진으로 공동에서 발생하는 유동 및 소음을 가시화하는 등 실험에

접수일: 2010년 1월 20일, 심사완료일: 2010년 6월 15일.

계재확정일: 2010년 6월 18일.

1 정회원, 조선대학교 대학원 항공우주공학과

2 정회원, 조선대학교 항공우주공학과

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

의한 연구를 수행하였으며, Rossiter[4]는 실험 결과를 토대로 얇은 공동에서 발생하는 유동과 소음의 공명 주파수를 예측할 수 있는 식을 제안하였다. 공동 주위를 지나는 유동이 비정상 전단층 형태일 경우 주어진 공동의 형상과 유동의 조건에 따라 어떠한 특정 주파수를 가지게 된다는 이론이다.

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. Tame[5]은 수학적 해석을 통해 공명 주파수를 예측할 수 있는 선형모델을 제시하였다. Cattafesta[6]는 실험을 통하여 공동의 공명 현상에서 모드변화 및 모드 사이의 상호 작용이 있음을 밝혀냈다.

Rockwell[7]은 전단층 불안정 이론(shear layer instability theory)을 공동 유동에 적용하여 유동의 진동수를 예측하여 실험 결과와 잘 일치함을 보여주었으며, Xin Zhang & Edwards[8], Krishnamurthy[3] 및 Heller[9]등은 쉬리렌사진으로 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 깊이에 따라 소음의 발생 방법도 다르다고 알려져 있다.

2차원 공동의 유동은 세장비(L/D)가 커질수록 전단층 모드에서 후류모드로 바뀐다는 것이 Gharib & Roshko[8]의 연구를 통해서 입증되었다. 3차원 공동의 유동은 후류모드 보다는 전단층 모드가 우세한 특성을 갖는 것으로 알려져 있다. 전단층 모드와 후류모드의 큰 특성 차이는 전단층 모드는 전단층에서 와류가 말리지면서 공동의 뒷전 벽면에 충돌하는 것으로 특징지어지고, 후류모드는 공동의 앞전에서 박리된 유동이 공동의 바닥에 충돌하여 공동의 하류로 유출됨으로 유동이 매우 격렬하다[10-11].

그러나 위의 연구들은 대부분 실험 및 2차원 유동에 대한 연구이고, 3차원 유동에 대한 연구로는 N.Sinha, S. & Arunajatesan[11] 및 K.S Chang[12]는 수치해석을 통하여 3차원 공동에서의 유동에 관하여 연구하였다. 또한 중 세장비(L/D) 2.5~4.5에 대한 연구는 Choi & Kim[14]에 의해서 연구 되었다.

본 연구에서는 중간영역세장비($L/D=2.5 \sim 4.5$)와 세장비가 매우 큰 영역($5.5 < L/D$)에 대해서 비교 분석 하였다. 지배방정식 및 수치방법으로는 비정상, 압축성 3차원 Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)방정식에 $k-\omega$ 난류 모델을 적용하여 수치 계산을 수행하여 공동에서의 고세장비

변화에 따른 소음발생, 원음장으로서의 소음 방사를 수치적으로 모사함으로써, 공동에서의 소음 발생 메커니즘을 이해하고, 고세장비가 소음 및 유동에 미치는 영향을 해석하였다. 수치 기법은 4차 Runge-Kutta 시간적분법을 사용하였고, 공간적분은 van Leer의 한계치를 이용한 FVS(Flux Vector Split) 법을 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.

2. 지배 방정식 및 수치 계산

무차원화된 3차원 Navier-Stokes 방정식은 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), 자유유동속도와 자유유동 밀도이며, t, ξ, η 와 ζ 는 시간과 일반 좌표축이다. \bar{Q} 는 일반 좌표로 변환된 무차원 보존유량함수 벡터 $Q/J=(\rho, \rho u, \rho v, \rho w, \rho e)/J$ 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[16]. \bar{S} 는 난류계산에 사용되는 항이다. 난류모델은 Wilcox[11]의 $k-\omega$ 모델을 사용하였으며, Navier-Stokes식과 같은 보존형태로 일반좌표에 대해 쓸 수 있다. 이때 Navier-Stokes식의 각 유량벡터들에 대응하는 난류 모델식의 벡터와 상수 값들은 다음과 같다.

$$Q = \begin{bmatrix} \rho k \\ \rho w \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} \rho u k \\ \rho u w \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} \rho v k \\ \rho v w \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} \rho w k \\ \rho w w \end{bmatrix}$$

$$E_v = \begin{bmatrix} \mu k \frac{\partial k}{\partial x} \\ \mu w \frac{\partial w}{\partial x} \end{bmatrix}, F_v = \begin{bmatrix} \mu k \frac{\partial k}{\partial y} \\ \mu w \frac{\partial w}{\partial y} \end{bmatrix}, G_v = \begin{bmatrix} \mu k \frac{\partial k}{\partial z} \\ \mu w \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix}$$

$$S = \begin{bmatrix} P - \beta^* \rho w k \\ (\alpha P - \beta p w k) \frac{w}{k} \end{bmatrix}$$

$$\alpha = \frac{13}{25}, \sigma = \frac{1}{2}, \sigma^* = \frac{1}{2}, \beta = \frac{9}{125}, \beta^* = \frac{9}{100}$$

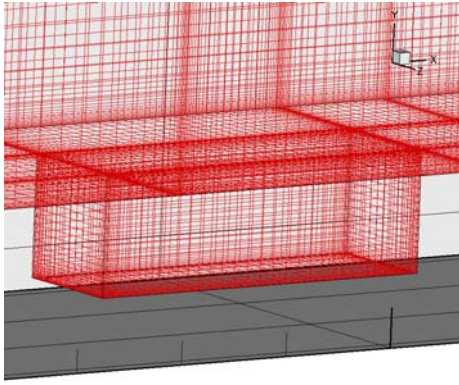


Fig. 1 Computational grid for the three dimensional calculation

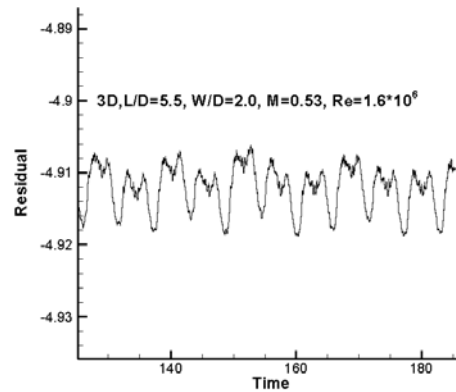


Fig. 3 Residual history of three dimensional cavity

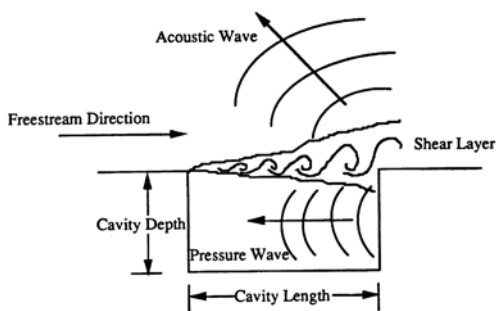


Fig. 2 Schematic of the cavity air flow receptivity between the shear layer instability wave the sound wave disturbances

시간이산화율 위하여, 외제적인 방법으로 4차의 정확도를 갖는 Runge-Kutta 4타 정밀도 방법을 사용하였으며, 공간이산화는 2차 정밀도를 갖는 van Leer의 유량한계계수를 이용한 유량벡터분리(Flux Vector Split) 방법을 사용하였다. 경계조건으로는 후류유동은 외삽조건, 원방경계조건으로는 자유유동과 압력에 대한 외삽조건, 유입조건으로는 자유유동조건과 압력에 대한 외삽조건을 사용하였다. 수치계산은 20대의 PC-cluster를 사용한 MPI 병렬처리방법이 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 5.08 cm이고, 공동의 세장비(L/D)는 5.5, 6.5 및 7.5이다. 공동 깊이를 기준으로, Reynolds 수는 1.6×10^6 이고, 마하수는 0.53인 아음속 유동에 대하여 계산을 수행하였다. 이러한 계산 결과를 Choi, Mun & Kim[14]의 연구 결과인 중 세장비(L/D) 2.5~4.5의 특성과 비교하였다.

Fig. 1은 공동유동 해석을 위한 3차원 격자계의 일부를 보여주고 있다. 공동 전후의 평판과 바닥 및 벽 부근에 격자를 충분히 밀집시켜, 첫 격자점의 $y^+ (= y \sqrt{\rho_w \tau_w / \mu_w})$ 는 약 0.01 ~ 1.5 정도로 벽함수를 사용하지 않고 직접 계산을 수행하였다. Abdol-Hamid, Lakshmanan & Carlson[14]의 연구에 의하면 큰 박리영역을 포함하는 유동에서 첫격자점의 y^+ 가 10이하이면 타당한 결과를 보여주는 것으로 알려졌다. 원방향 경계 조건은 길이(D)의 8배를 주었졌으며, 폭방향의 계산영역은 폭의 4배가 주어졌다. 격자수에 의한 계산의 영향을 확인하기 위하여 몇 셋의 격자계를 테스트하여, 최적의 격자계로 세장비와 폭비에 따라, 공동외부 $190 \times 70 \times 50 \sim 240 \times 70 \times 50$, 공동내부 $70 \times 50 \times 30 \sim 120 \times 50 \times 30$ 로 계산하였다.

유동특성의 분석은 뒷전 모서리 중앙점의 압력변화를 식 (2)와 같은 FFT 를 이용한 SPL(Sound Pressure Level)분석으로 주진동 주파수를 구하였다.

$$SPL(f) = 20 \log_{10} (FFT(p) / p_{ref}) (dB) \quad (2)$$

$$p_{ref} = 2 \times 10^{-5} (N/m^2)$$

f , p , 그리고 p_{ref} 는 각각 주파수, 압력 그리고 기준음압이다.

본 연구에서 계산한 유동 조건은 Gharib[6]의 실험을 통하여 언급한 정상모드(steady mode), 전단층 모드(shear layer mode) 및 후류모드(wake mode) 중 전단층 모드와 후류모드에 해당한다. 공동에서 발생하는 유동과 소음의 개략적인 특성은 Fig. 2와 같다. 우선 앞전에서 교란이 발생하고 유동을 따라 전파되면서 점점 증폭 된다. 그리고 뒷전에 도달한 교란이 뒷전모서리에 부딪히면서 주변에 심한 압력 교란을 유발하고 소음이 발생하게 된다. 뒷전 모서리에서 발생한 압력교란과 소음 중 일부는 상류로 일부는 하류로 전파되며 앞전에서 오

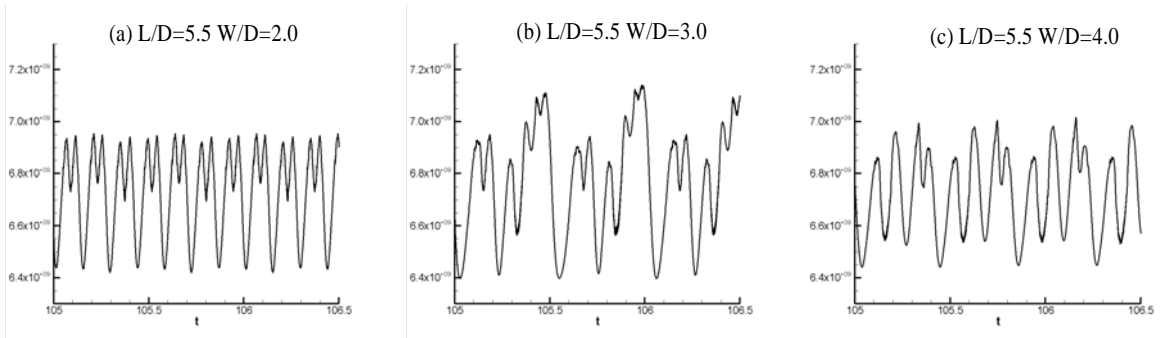


Fig. 4 3D pressure history at the Downstream edge at L/D=5.5(3D, M=0.53, Re=1.6*10⁶)

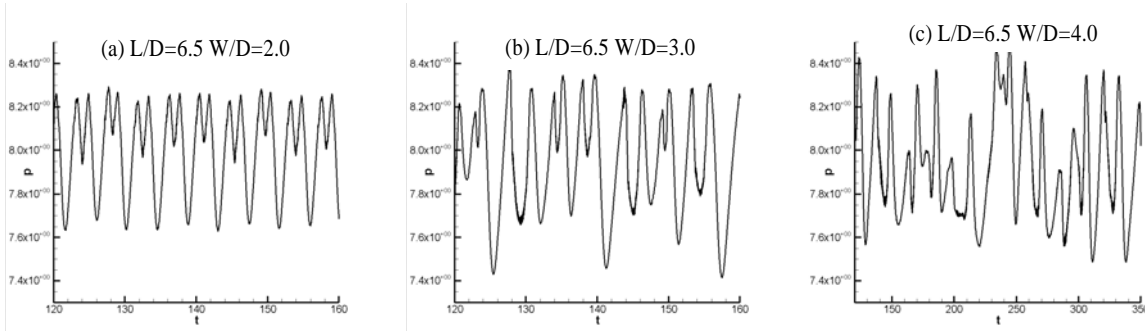


Fig. 5 3D pressure history at the Downstream edge at L/D=6.5(3D, M=0.53, Re=1.6*10⁶)

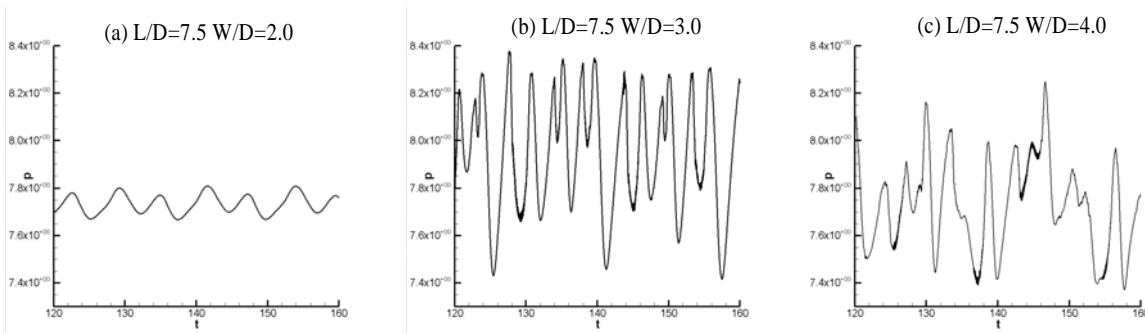


Fig. 6 3D pressure history at the Downstream edge at L/D=7.5(3D, M=0.53, Re=1.6*10⁶)

는 전단층과 상호작용을 하여, 더 큰 교란이 발생하게 된다. 여기서 뒷전 모서리 공동내부 아래 방향으로 반사되어서 나오는 파는 압력파이고 공동외부 상류방향으로 전파되는 파는 음향파이다.

Fig. 3은 3차원에서 세장비(L/D)=2.5이고 마하수 0.53일 때 시간에 따른 밀도변화의 수치잔여치 변화를 나타내고 있다. t=100 이후에 불안정한 진동은 없어지고 주기적인 진동에 들어감을 확인할 수 있다 Fig. 4, Fig. 5와 6은 3차원 세장비(L/D) 5.5, 6.5 및 7.5, 폭비(W/D) 2.0, 3.0 및 4.0에 대한 공동의 뒷전에서의 압력변화를 그래프로 나타낸 것이다.

Fig. 4의 특성을 보면 폭비가 클 경우에도 명확한 주기성을 보여주고 있으나, Fig. 5와 6에서는, 폭비가 커지면서 주기성이 명확하지 않는 것을 보여준다. 이는 세장비와 폭비가 커지면서 전단층 모드에서 후류모드로 변함으로 인해 주진동주파수가 뚜렷한 주기적 비정상유동에서 여러개의 주진동주파수가 혼합된 비정상유동으로 천이해 가는 것으로 보인다. 또한, 세장비가 커짐에 따라 후류모드로 변환되는 폭비는 작아지는 특성을 보여준다[11]. 이러한 주파수 특성은 뒤의 주파수 특성분석에 의하여 좀 더 명확히 볼 수 있다.

공동에서 발생하는 유동 특성은 Fig. 7와 같다. 우선 앞전

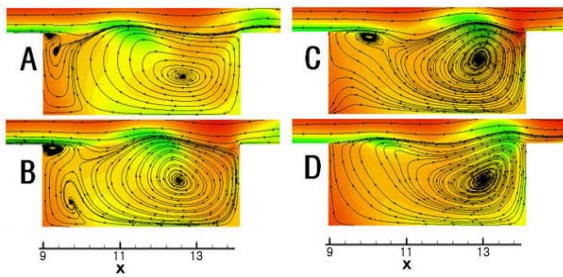


Fig. 7 Density contours of entire domain & Stream line
($M=0.53, L/D=5.5, W/D=2.0, Re=1.6 \times 10^6$)

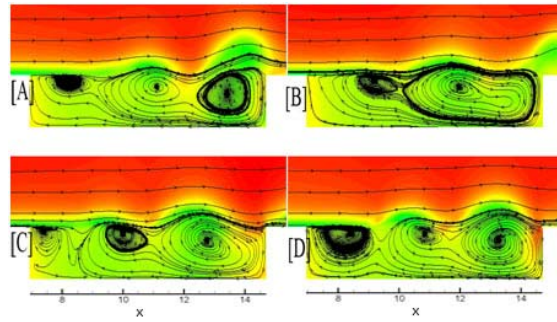


Fig. 9 Density contours of entire domain & Stream line
($M=0.53, L/D=7.5, W/D=2.0, Re=1.6 \times 10^6$)

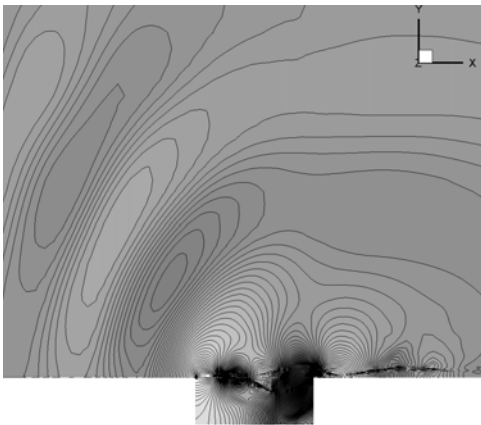


Fig. 8 Acoustic fields of entire domain ($M=0.53, L/D=5.5, W/D=2.0, Re=1.6 \times 10^6$)

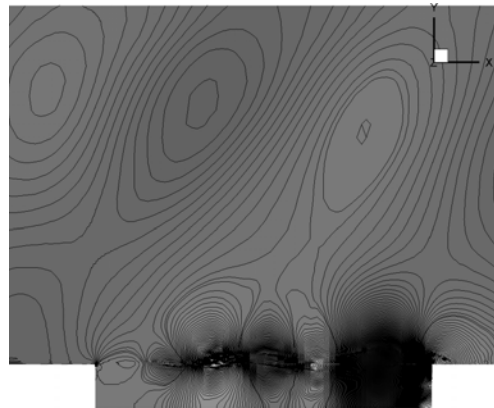


Fig. 10 Acoustic fields of entire domain ($M=0.53, L/D=7.5, W/D=2.0, Re=1.6 \times 10^6$)

의 전단층에서 교란이 발생하면, 이 교란은 유동을 따라 전파되면서 점점 증폭 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.

Fig. 7과 8은 세장비 5.5이고 폭비 2.0인 공동의 중앙단면의 등밀도선도와 소음장을 그린 것으로, 뒷전을 중심으로 전구간으로 소음이 방사됨을 볼 수 있다. 공동내부의 유동특성이 기본적인 큰 와류가 있고 앞전부근의 작은와류가 생성과 소멸을 반복하면서, 전단층이 뒷전에 부딪치면서 발생하는 압력교란이 주된 소음원임을 볼 수 있다.

Fig. 9와 10은 세장비 7.5이고 폭비 2.0인 공동의 중앙단면의 등밀도선도와 소음장을 그린 것으로, 뒷전으로부터 전구간으로 소음이 방사됨을 볼 수 있다. 공동내부의 유동은 기본적으로 2개의 큰와류가 존재하고, 중간영역에 1개의 작은 와류가 생성과 소멸을 반복한다. 따라서, 뒷전에 부딪치는 전단층 뿐만 아니라, 공동중앙의 작은 와류에 의해서도 전단층에 압력교란을 줌으로 인해 혼합된 주진동주파수가 나타날 것을 예

측할 수 있다. 이러한 와류의 특성은 K.J. Oh[17]에서도 확인할 수 있다.

Fig. 11,12 및 Fig. 13은 3차원 공동의 주진동 주파수를 보기 위하여, SPL(Sound Pressure Level)값과 PSD(Power Spectrum Density)로 주파수 특성을 분석한 그림이다. 한주기 동안에 압력의 변화를 SPL분석을 하면 여러 개의 피크를 확인을 할 수 있다. 세장비 5.5 일 때 PSD 분석 결과를 보면, 약 600 hz에서의 피크의 값이 주진동 주파수이다. 그러나 이경우에도 SPL 분석 그래프를 보면 주진동주파수 이하에도 2개의 약한 피크가 존재하는 것을 볼 수 있다.

수치계산의 정확성을 검토하기 위하여 타논문과 비교하였는데, 세장비 2.5일 때의 모드1 과 모드2의 주진동 St수 ($= fD/U$)는 각각 1.1과 2.12로 K.K. Ahuja and J. Mendoza[18]의 실험결과치 1.125 및 2.12로 거의 일치하는 것을 확인 할 수 있었다[14]. 세장비 6.5와 7.5에서 폭비 2일 때 PSD분석 결과의 3번째 피크점(600 Hz)이 세장비 5.5의 피크 위치와 거의 일치한다는 것을 알 수 있다. 그러나 고세장비에

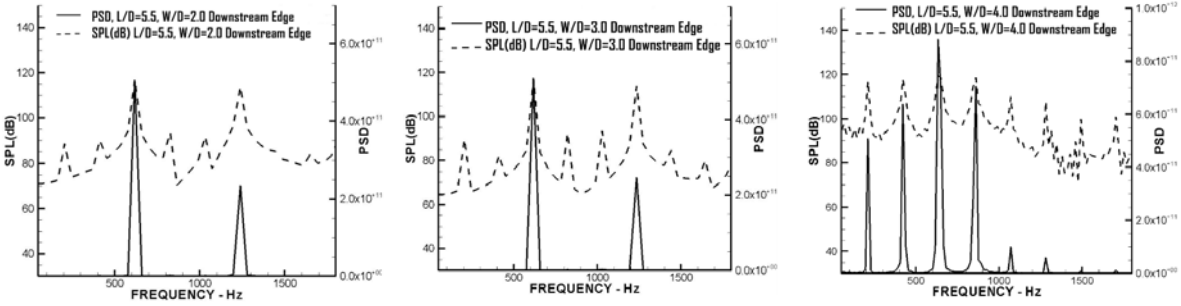


Fig. 11 SPL & PSD distribution for three dimensional cavity($L/D=5.5$)

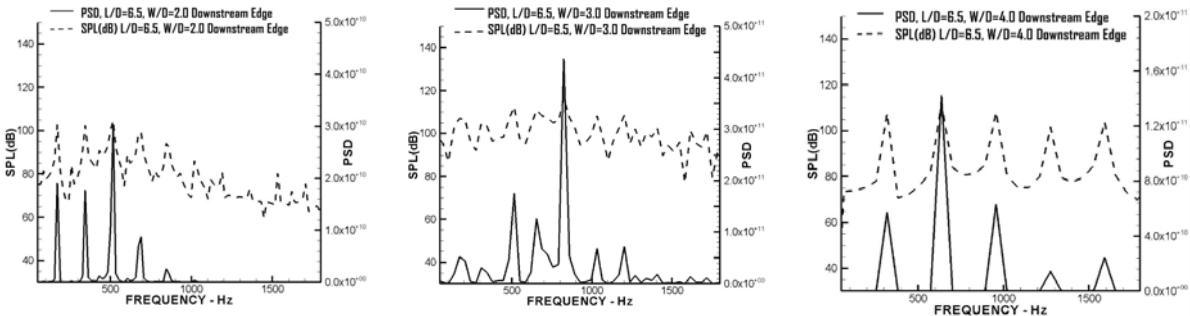


Fig. 12 SPL & PSD distribution for three dimensional cavity($L/D=6.5$)

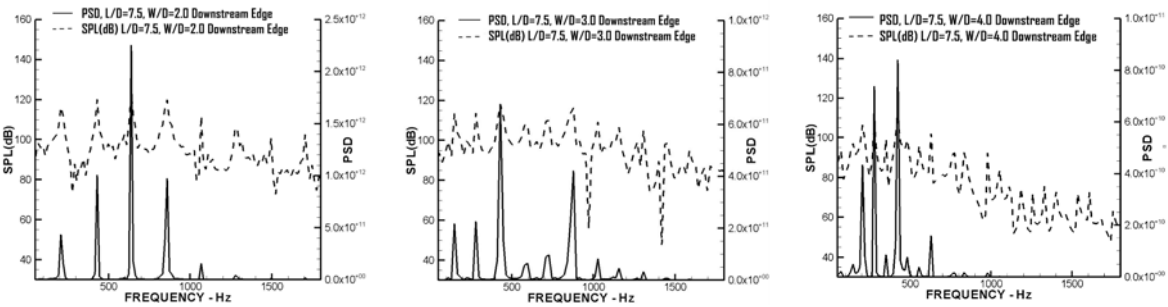


Fig. 13 SPL & PSD distribution for three dimensional cavity($L/D=7.5$)

서는 저 세장비에서 약하게 존재하던 2개의 피크점이 주진동 주파수에서와 비슷한 강도로 존재하는 것을 볼 수 있다. 이는 Choi, Mun & Kim[14]의 논문과 비교해 보면 중 세장비에서는 폭비가 상당한 크기까지 증가하여도 후류모드로 변하지 않으나, 고세장비에서는 작은 폭비에서도 후류모드로 변하는 것을 볼 수 있다. 고세장비의 공동의 첫 번째 피크의 위치가 빨리 나타나며 세장비가 7.5에 폭비 2.0에서의 첫 번째 피크는 175 Hz에서 나타나는 것을 확인 할 수 있다.

이처럼 고세장비에서 저주파에서 발생하는 소음은 전단층 모드에서 후류모드로 변환됨으로 인한 것으로 보인다. 후류모드에서 발생하는 Fig.9와 10의 유동장과 음향장을 Fig.7과 8의

전단층모드와 비교하면 내부의 와류가 3개가 생성되면 전단층와류도 2단계로 구성되는 것을 볼 수 있다. 이 그림들로부터 고세장비에서 저주파의 원인은, 전단층이 뒷전에 부딪치기 전에 경계면의 중간정도에서 분리된 와류가 발생하면서 발생하는 압력교란으로 생각되며, 전단층이 뒷전에 부딪치면서 발생하는 주진동 주파수와 혼합되어 소음특성이 나타난다. 공동의 세장비가 고세장비로 변해갈 때 중저 세장비의 공동에서는 첫 번째 피크 아래에서 발생하던 약한 진동이 고 세장비로 가면서 주요 진동 원인으로 커지는 것을 그래프를 통해서 확인 할 수 있다. 이러한 특성은 K.J. Oh[17]에서도 확인할 수 있다.

4. 결 론

비정상 Reynolds-Averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식과 $k-\omega$ 난류모델을 이용하여 전단층모드에서 후류모드로 전환되는 고세장비 공동 주위의 점성에 의해서 유발되는 와류의 생성과 이동, 자유전단층의 진동에 의한 파의 생성과 소멸 등 공동유동의 특징을 모사하였다. 계산에 사용된 모델은 마하수 0.53, 세장비(L/D)가 5.5, 6.5, 7.5, 폭비(W/D)가 2, 3, 4이고, 레이놀즈수는 1.6×10^6 이다. 주진동 주파수를 Rossiter[4]의 진동 모드에 의한 무차원 진동수(St)와 비교해본 결과, 세장비가 작을 경우에는 주진동 주파수가 잘 일치하지만, 고세장비에서는 저세장비의 주진동주파수 아래에 저-주진동주파수가 존재하는 것을 볼 수 있다. 이는 유동특성을 볼 때, 저세장비에서는 공동내부에 존재하는 주와류와 공동 앞전의 작은 와류의 생성과 소멸만 있으나, 고 세장비에서는 공동 내부에 앞전과 뒷전에 주 와류가 존재하고, 중간영역에 작은 와류가 생성과 소멸을 반복함으로써 전단층의 중간부분에서 또다른 압력교란이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이에따라, 전 단층이 뒷전에 부딪치는 주진동주파수와 함께, 중간영역의 교란에 의한 저주파 주진동주파수가 혼합되어 유동 및 음향 특성이 나타나는 것으로 예측할 수 있다.

후 기

본 연구결과는 2009년도 조선대학교 교내연구과제의 연구결과입니다.

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, Zhang, Xin. and Edwards, J.A., "Experimental Investigation of Supersonic Flow over Two Cavities in Tandem," *Computers & Fluids*, Vol.25, No.4.
- [9] 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] 2009, Choi, H.L., Mun, B.U. and Kim, J.S., "Numerical analysis of the subsonic flow around a three dimensional cavity," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.23, pp.1702-1709.
- [15] 1988, Wilcox, D.C., "Reassessment of the Scale Determining Equation for Advanced Turbulence Models," *AIAA journal*, Vol.19, No.2, pp248-251.
- [16] 1993, Hoffmann, K.C. and Chiang, S.T., *Computational FLuid Dynamics for Engineers*, Engineering Education System USA.
- [17] 2004, Oh, K.J., "Large eddy simulation of the compressible flow over a cavity with high aspect ratio," *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol.9, No1, pp1-9.
- [18] 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*.