

2차원과 3차원 아음속 공동 유동 특성에 대한 수치적 연구

최 흥 일¹, 김 재 수^{*2}

NUMERICAL ANALYSIS OF TWO- AND THREE-DIMENSIONAL SUBSONIC TURBULENT CAVITY FLOWS

Hongil. Choi¹ and Jaesoo. 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. 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 cavity has the aspect ratios of 2.5, 3.5 and 4.5 for two-dimensional case, same aspect ratios with the W/D ratio of 2 for three-dimensional case. The Mach and Reynolds numbers are 0.53 and 1,600,000 respectively. The flow field is observed to oscillate in the "shear layer mode" with a feedback mechanism. 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 formula. The MPI(Message Passing Interface) parallelized code was used for calculations by PC-cluster.

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)

1. 서 론

비행체의 바퀴간, 폭탄 장착부, 자동차의 창문 등 수송기 표면에는 많은 공동이 존재하고, 이 공동 주위의 유동은 박리, 와류, 충격파, 팽창파, 재부착 등과 같은 복잡한 유동현상이 일어난다. 이 공동유동은 세장비(L/D)가 작은 경우에도 비정상적이며 3차원 특성이 강한 소음과 진동이 발생한다. 공동은 그 주위 유동에 커다란 영향을 주어, 큰 소음을 유발하고, 구조물의 고장 혹은 파괴의 원인이 되기도 하고, 공력 성능 및 안정성에 해를 주고, 민감한 계기를 손상시킬 수도

있다. 생활 주변에서 발생하는 자동차의 내부 소음, 공항이나 철도 주변 소음, 청소기나 세탁기에서 나는 소음들은 생활수준의 향상으로 인하여 관심이 높아지고 있다. 따라서 공동 유동의 정확한 이해와 해석으로, 소음과 유동의 가진을 줄여 구조물의 안정성을 확보하고자 많은 연구가 수행되어 왔으며, 현재도 최신 기술을 접목시킨 연구가 많이 수행되고 있다.

지금까지 공동주위의 유동에 대한 결과를 보면 개방형 ($L/D < 10$)과 밀폐형($L/D > 13$)으로 구별한다. 밀폐형 공동은 앞전에서 발생한 전단층이 공동의 바닥에 충돌하고, 이는 다시 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

1 학생회원, 조선대학교 항공우주공학과

2 정회원, 조선대학교 항공우주공학과

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

외부유동을 불안전하게 차단하기 때문에, 내외부유동의 상호 작용에 의한 압력변화로 심한 진동현상이 나타날 수 있다 [1].

Krishnamurty[2], Rossiter[3], Heller[4] 등의 연구에서 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 전단층모드에서 후류모드로 바뀐다는 것이 Gharib & Roshko[5]의 연구를 통해서 입증이 되었다. 3차원 공동의 유동은 후류모드 보다는 전단층모드가 우세한 특성을 갖는 것으로 알려져 있다[6]. 전단층모드와 후류모드의 큰 특성 차이는 전단층모드는 전단층에서 와류가 말려지면서 공동의 뒷면 벽면에 충돌하는 것으로 특징져지고, 후류모드는 공동의 앞면에서 박리된 유동이 공동의 바닥에 충돌하여 공동의 하류로 유출됨으로 유동이 매우 격렬하다.

본 연구에서는 비정상, 압축성 2차원과 3차원 Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)방정식에 $k - \omega$ 난류 모델을 적용하여 수치 계산을 수행하였다. 공동에서의 세장비와 폭비의 변화에 따른 소음발생, 원음장으로의 소음 방사를 수치적으로 직접 모사함으로써, 공동에서의 소음 발생 메커니즘을 이해하고, 세장비와 폭비의 변화가 소음 및 유동에 미치는 영향을 해석하였다. 수치기법은 4차 Runge-Kutta 시간적분법을 사용하였고, 공간적분은 van Leer의 한계치를 이용한 FVS(Flux Vector Split) 법을 사용하였다. 또한 계산의 정확도를 위해 물리적으로 타당하다고 알려져 있는 특성치 경계 조건(Characteristic Boundary Condition)[7]을 사용하였다. 이를 Rossiter 공식에 기초한 무차원진동수와 Ahuja & Mendoza[8]의 실험치 등으로 비교 검증하였으며, 2차원과 3차원의 각기 다른 유동현상을 동압력선도와 등밀도 및 유선도를 통하여 비교하였다. 공동유동의 주진동 주파수를 보기 위하여, FFT를 이용하여 SPL(Sound Pressure Level) 분석하였다. 압력파의 전파과정을 보기위하여 기준점의 주진동 압력 변화와 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, 자유유동밀도 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 변환행렬과 축대칭 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[9]. \bar{S} 는 난류계산에 사용되는 항이다.

난류모델은 Wilcox[10]의 $k - \omega$ 모델을 사용하였으며, 난류운동에너지 k 와 비소산율 ω 를 특성속도와 길이에 의해 무차원화하여 Navier-Stokes식과 같은 보존형태로 일반좌표에 대해 쓸 수 있다. 이 모델은 원래 비압축성 유동 계산을 위해 개발되어 압축성유동에 확장 적용되었다. Bardina, Huang & Coakley[11]는 여러 종류의 난류모델을 비교하는 논문에서 Wilcox의 모델이 압축성유동에서도 충분한 타당성이 있음을 보여주었다. 이때 Navier-Stokes식의 각 유량벡터들에 대응하는 난류 모델식의 벡터와 상수 값들은 다음과 같다.

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

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

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

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

시간이산화를 위하여, 외재적인 방법으로 4차의 정확도를 갖는 Runge-Kutta 4th 방법을 사용하였으며, 각 단계의 계수는 $1, 1/4, 1/6, 3/8c$ 이다. 공간이산화는 2차 정밀도를 갖는 van Leer의 유량한계계수를 이용한 유량벡터분리(Flux Vector Split) 방법을 사용하였다. 수치계산은 20대의

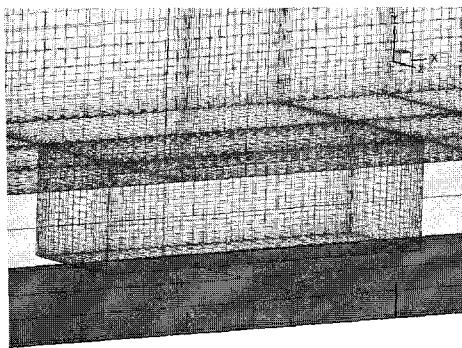


Fig. 1 Computational grid for the three dimensional calculation

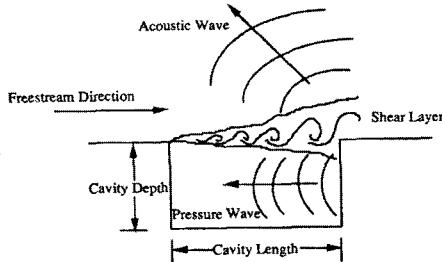


Fig. 2 Schematic of the cavity air flow receptivity between the shear layer instability wave and the sound wave disturbances.

pc-cluster를 사용한 병렬처리기법이 사용되었다.

3. 계산 결과 및 고찰

단일공동 주위의 유동현상을 관찰하기 위하여 2차원과 3차원으로 수치해석을 수행하였다. 공동의 유동계산을 위한 형상과 유동조건 모델은 Ahuja & Mendoza[8]의 실험 모델을 기본으로 하였으며, 공동의 깊이(D)는 5.08cm이고, 마하수는 0.53인 아음속 유동에 대하여 계산을 수행하였다. 기본적인 유동 조건은 2차원과 3차원에 동일하게 부여하였으며 3차원의 경우 폭비 $W/D = 2.0$ 이다.

Fig. 1은 공동유동 해석을 위한 3차원 격자체의 일부를 보여주고 있다. 공동 전후의 평판과 바닥 및 벽 부근에 격자를 충분히 밀집시켜 주었으며, 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 and Carlson[12]의 연구에 의하면 큰 박리영역을 포함하는 유동에



Fig. 3 Density contours of shear layer mode

Fig. 4 Acoustic fields of entire domain ($M=0.53$, $L/D=2.5$, $Re=1.6 \times 10^6$)

서 첫격자점의 y^+ 가 10이하 이면 타당한 결과를 보여주는 것을 알 수 있다. 원방향 경계조건은 깊이(D)의 8배를 주었다. 격자수에 의한 계산의 영향을 확인하기 위하여 몇 셋의 격자계를 테스트하여, 2차원의 경우 상부에 350×100 , 공동부에 100×70 이며, 3차원의 경우 각각 $190 \times 70 \times 50$, $70 \times 50 \times 30$ 이다.

유동특성의 분석은 뒷전 모서리 중앙($Z/D=1$)점의 압력변화를 식(2)와 같은 FFT 분석을 이용한 SPL(Sound Pressure Level)분석으로 주진동 주파수를 구하였다. 주진동주파수의 압력파동전파 특성을 보기위하여 뒷전모서리 중앙점의 주진동주파수와 나머지 영역의 주진동주파수와의 CPD(Correlation of Pressure Distribution)를 식(3)과 같이 분석했다.

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

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

f , p , 그리고 p_{ref} 는 각각 주파수, 압력 그리고 기준음 압이다. $SPL(f)$ 과 $Re(CPD(f))$ 은 각각 뒷전 모서리 중앙을 기준점으로 SPL과 CPD를 나타낸다.(Newland 1993)

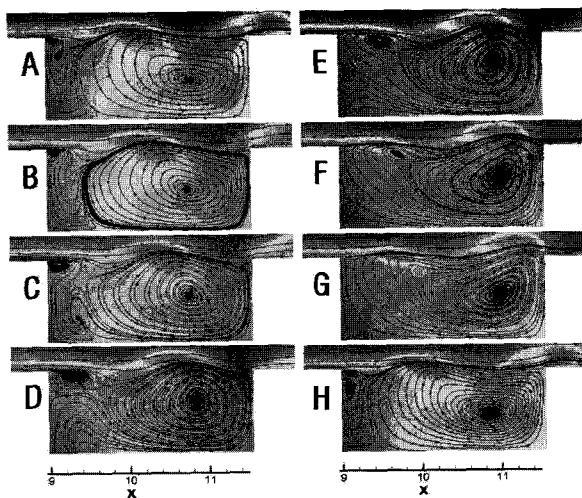


Fig. 5 Streamlines of three dimensional cavity flow (Total time=2.94, Sampling time=0.3675, Z/D=1)

3.1 공동에서 발생하는 유동 및 소음 해석

본 연구에서는 2D와 3D인 $M=0.53$, $L/D=2.5, 3.5, 4.5$, $Re=1.6 \times 10^6 c$ 인 경우가 해석 되었으며, 이 조건은 Gharib[5]의 실험을 통하여 언급한 정상모드(steady mode), 전단층 모드(shear layer mode), 후류모드(wake mode) 중 전단층 모드에 해당한다. 공동에서 발생하는 유동과 소음의 개략적인 특성은 Fig. 2와 같다. 우선 앞전의 전단층에서 교란이 발생하면, 이 교란은 유동을 따라 전파되면서 점점 증폭되게 된다. 그리고 뒷전 모서리에서 부딪히면 벽면에서 강한 압력 교란을 유발하고 이것이 소음원으로 작용하게 된다. 뒷전 모서리에서 발생한 소음 중 일부는 상류방향으로 전파되며 앞전에서 오는 전단층과 상호작용을 하여, 초기보다 더 큰 교란을 유발하게 된다. 여기서 뒷전 모서리 아래 방향으로 반사되어서 나오는 파는 압력파이고 상류방향으로 전파되는 파는 음향파이다.

Fig. 3은 앞전의 전단층에서 발생한 소용돌이가 공동의 경계면을 따라 뒷전 모서리에 부딪히고, 이 소용돌이는 몇 개의 소용돌이로 나뉘지며, 그 중 일부는 공동의 밖으로 뒷전 방향의 벽면을 따라 흘러가며, 다른 일부는 공동의 내부로 흘러 들어가는 현상을 보여 주고 있다. 이렇게 공동 내부로 흘러 들어간 소용돌이의 영향으로, 공동의 뒤쪽 부분에 커다란 한 개의 소용돌이가 존재하게 되며, 앞전에서 발생하여 공동의 경계면을 따라 흐르는 소용돌이와 상호작용을 일으켜 상하로 크게 진동하게 된다. 이러한 소용돌이간의 상호작용은 공동유동에 큰 가진을 유발한다. Fig. 4는 소음장을 그

린 것으로, 뒷전 모서리를 중심으로 전구간으로 소음이 방사됨을 볼 수 있다.

Fig. 5는 3차원 유동의 중앙단면에서 한 주기에 대해 $\Delta t=0.3675$ 의 시간간격으로 샘플링 하여 공동내부의 밀도와 유선을 나타낸 그림이다.

- $t=123.9375(A)$: 큰 와류가 공동 안에 생성되고, 앞전 벽면과 밑에서 작은 와류들이 있는 것을 볼 수 있다.
- $t=124.6725(C)$: 앞전 벽면에 부착된 와류는 성장하고, 바닥 앞 모서리 부분에서 작은 와류가 생성되는 것을 볼 수 있다.
- $t=125.4075(E)$: 충분히 성장했던 앞전 와류가 벽면에서 떨어져 나가서 큰 와류가 있는 뒷전으로 이동하고, 뒷전에 있는 와류의 크기가 처음에 비해 많이 작아짐을 확인 할 수 있다.
- $t=125.1425(G)$: 앞전의 와류가 뒷전에 있던 와류와 합쳐져 하나의 큰 와류를 형성하고, 뒷전 모서리에 부딪혀 부서지면서 일부는 공동의 내부로 들어가고, 일부는 벽면을 따라서 흘러가고 있는 것을 보여주고 있다. 와류의 형태가 상당히 불안정하고 불규칙적임을 볼 수 있다.
- $t=126.51(H)$: 유동의 한 주기가 끝난 뒤 $t=123.9375(A)$ 일 때와 똑같은 모습으로 돌아가 공동 안에 큰 와류가 다시 생성되는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 5의 공동 경계면의 전단층에서 진한색 분분이 앞전에서 생성되어 전파되는 소용돌이에 해당하게 된다.

Fig. 6는 $y=1.022D$ 인 높이에서 x 방향에 따른 압력분포이다. 각각의 시간은 Fig. 5에서와 같다. $x=9$ 는 앞전 모서리이고 $x=11.5$ 는 뒷전 모서리이다. 모든 경우에서 뒷전 모서리가 존재하는 $x=11.5$ 부근에서 급격히 변화하는 것을 관찰할 수 있다. 뒷전에서 압력변화는 전단층을 따라 흘러온 소용돌이의 충돌에 의한 것으로 고압의 소용돌이가 충돌할 때 고압을 이루고, 이 소용돌이가 부딪쳐 사라질 때 저압을 이룬다.

3.2 2차원과 3차원 유동해석 및 비교

Fig. 7은 3차원에서 세장비($L/D=2.5$)이고 마하수 0.53일 때 시간에 따른 밀도변화의 수치잔여치 변화를 나타내고 있다. $t = 100$ 이후에 불안정한 진동은 없어지고 주기적인 진동에 들어감을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 2차원과 3차원 공동의 뒷전에서의 압력변화를

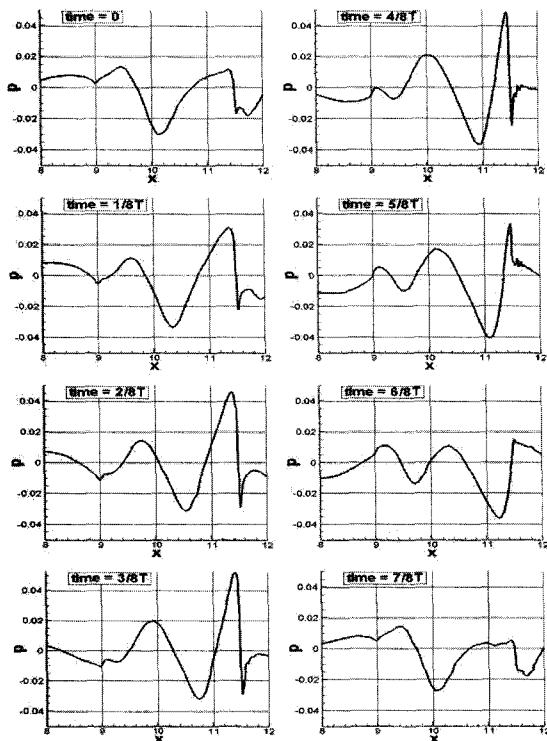
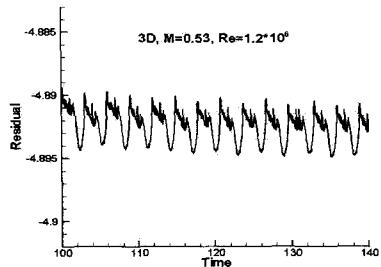
Fig. 6 Pressure signals along x-direction at $y=1.02D$ 

Fig. 7 Residual history of three dimensional cavity

그래프로 나타낸 것이다. 실선은 2D에서의 압력변화이고, 점선은 3D에서 압력변화를 나타낸 것이다. 그래프를 보면 무차원 시간에 따른 압력변화주기가 2D일 때 $T_p = 5.78$ 인 것을 확인할 수 있으며, 2D일 때가 3D일 때 보다 큰 압력주

Table 1 $M=0.53$ Comparison of Non-dimensional resonant frequency ($L/D=2.5$)

	Ahuja & Mendoza[8]	2차원 공동	3차원 공동
mode-1	610Hz	474Hz	459Hz
mode-2	953Hz	895Hz	895Hz

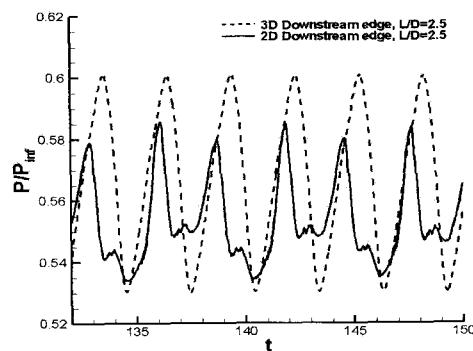


Fig. 8 Two and three dimensional pressure history at the Downstream edge

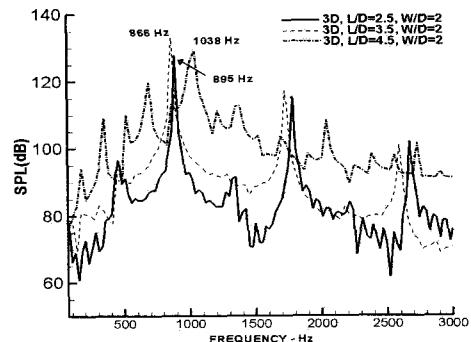


Fig. 9 SPL distribution for three dimensional cavity

기를 갖는 것을 확인할 수 있다. 그리고 2차원 공동의 압력변화 진폭이 3차원 공동에 비해 약 40%정도 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 3차원의 경우 2차원에 비해서 Z-방향에서 공동으로 유량의 유입·유출에 의해 압력진폭의 변화가 2차원 보다 낮게 나타나게 된 것으로 유추할 수 있었다. Fig. 8의 압력변화 주기는 곧 바로 주파수 특성을 나타내는 것으로, 주파수 특성을 분석한 Fig. 9와 Fig. 10에서 좀 더 깊이 있는 이해를 할 수 있다.

Fig. 9와 Fig. 10은 2차원 및 3차원 공동의 주진동 주파수를 보기 위하여, SPL(Sound Pressure Level)값으로 주파수 특성을 분석한 그림이다.

2차원 유동의 경우, 모든 세장비에서 약 900 Hz에서 모드 2에 해당하는 주진동주파수가 나타나며, 세장비가 커질수록 500 Hz 근방에서 모드1에 해당하는 주진동 주파수가 뚜렷이 나타난다. 3차원의 경우에는 900Hz-1000Hz 근방에 모드2 주진동주파수가 나타나며, 세장비가 작은 경우에도 500Hz

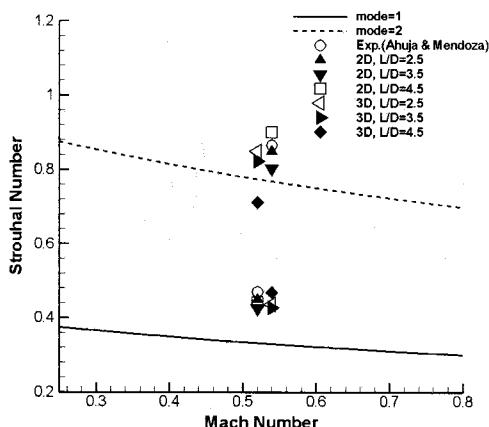


Fig. 10 Non-dimensional resonant frequencies as a function of Mach number

근방에서 모드 2 주진동주파수가 뚜렷이 나타난다. 이런 현상은 Fig. 8의 압력변화 주기에서도 세장비가 작은 경우에도 3차원유동에서는 주진동주파수가 더 있을 것이라는 것을 예측할 수 있다.

수치계산 결과와 Ahuja & Mendoza[8]의 실험결과와 잘 일치하는 것을 Table 1에서 볼 수 있다.

Fig. 11에 계산된 2차원과 3차원 무차원진동수(St)를 Ahuja & Mendoza[8] 실험치와 Rossiter[3]의 실험식 결과와 비교하였다. 사용된 Rossiter[3]의 실험식은 다음과 같다.

$$St = \frac{fL}{U} = \frac{n - \beta}{M} \quad (3)$$

$$1/k_v = \sqrt{1 + \frac{(\gamma - 1) \times M^2}{2}}$$

St는 무차원진동수(Strouhal number)이고, n은 n번째 진동모드, k_v 는 공동입구에서 자유유동과 대류속도의 비를 나타내는 상수이고, β 는 실험에 의하여 얻어진 상수, M은 자유유동 마하수이다. 속도비 k_v 는 실험 데이터로 부터 결정되며, Rossiter[3]가 수행한 연구에서 최적화되어 사용된 값 0.56이 가장 많이 사용된다. 이 실험식은 유동의 마하수, 공동의 길이만 알면 쉽게 주파수를 예측할 수 있는 장점으로 인하여 널리 사용되지만, 많은 경우에 약 20% 전후의 상당히 큰 오차를 발생한다[13].

그럼에서 실선은 Rossiter공식에 의한 mode(n)=1과 mode(n)=2일 때 마하수에 따른 무차원진동수(St, strouhal

number)를 나타내는 그래프이고, (○)는 Ahuja & Mendoza[8]의 세장비가(L/D) 2.5인 공동을 가지고 실험한 결과를 나타내고 있다. 2차원 공동의 수치해석결과 L/D=2.5일 때 n=2에서 무차원진동수(St)가 0.848(▲)로 Rossiter공식 및 Ahuja & Mendoza[8]의 실험결과와 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 또한, 세장비가(L/D) 2.5인 3차원 공동의 0.895kHz는 무차원진동수가 0.848(●)로 Rossiter공식의 주진동 모드 n = 2에 해당하는 값인 것으로 확인하였다. 세장비가(L/D) 2.5인 2D와 3D공동은 Rossiter공식에 의한 값들과 Ahuja & Mendoza[8]이 가지고 실험한 결과 값과 수치 해석한 결과 값들이 큰 오차 없이 잘 맞는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 세장비가(L/D) 3.5, 4.5일 때도 2D와 3D와 비교해보면 mode=1일 때와 mode=2일 때 비슷한 무차원 진동수를 확인할 수 있다.

5. 결 론

비정상 Reynolds-Averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식과 $k - \omega$ 난류모델을 이용하여, 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 2.5, 3.5, 4.5, 폭비(W/D)가 2이고, 레이놀즈수는 1.6×10^6 이다. 주진동 주파수를 Rossiter's[3]의 진동 모드에 의한 무차원 진동수(St)와 비교해본 결과 2차원과 3차원유동에서는 모드 1과 2에 해당하는 주진동 주파수가 같이 나타나는 것을 알 수 있었다. 그리고 Ahuja & Mendoza[8]의 실험결과와 수치해석 결과가 잘 일치하는 것을 확인 할 수 있었다. 원음장의 정확한 소음 예측을 위해서는 소음원이 되는 근접장의 계산에서 고차의 정확도를 갖는 수치해석 기법의 계발과 정확한 난류모델링이 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

- [1] 1992, Xin Zhang, & Edwards John A., "Experimental Investigation of Supersonic Flow over Two Cavities in Tandem," *AIAA J.* Vol.30, No.3.
- [2] 1955, Krishnamurty, K., "Acoustic radiation from two-dimensional rectangular cutouts in aerodynamic surfaces," *NACA TN-3487*.
- [3] 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.
- [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.
- [5] 1987, Gharib, M. and Roshko, A., "The effect of flow oscillations on cavity drag," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.177, pp.501-530.
- [6] 2001, Chingwei, M.S., Philip, J.M., "Comparison of Two- and Three-Dimensional Turbulent Cavity Flows," *AIAA A01-16385*.
- [7] 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*.
- [8] 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*.
- [9] 1993, Hoffmann, K.C. and Chiang S.T., "Computational Fluid Dynamics for Engineers," *Engineering Education System USA*.
- [10] Wilcox, D.C., "Reassessment of the Scale Determining Equation for Advanced Turbulence Models," *AIAA journal*, Vol.19, No.2, pp.248-251.
- [11] 1997, Bardina, J.E., Huang, P.G. and Coakley, T.J., "Turbulence Modeling Validation, Testing, and Development," *NASA Technical Memorandum 110446*.
- [12] 1975, Abdol-Hamid, C.S., Lakshmanan, B., Carlson, J.R., "Application of Navier-Stokes Code PAB3D With $k - \omega$ Turbulence Model to Attached and Separated Flows," *NASA Technical Paper 3480*.
- [13] Colonius, T., Basu, A.J. and Rowley, C.W., "Numerical investigation of the flow past a cavity," *AIAA paper 00-1912*.