

단일 공동 주위의 2차원 및 3차원 초음속 난류 유동 분석

우철훈¹, 김재수²

TWO- AND THREE-DIMENSIONAL SUPERSONIC TURBULENT FLOW OVER A SINGLE CAVITY

C.H. Woo¹ and J.S. Kim²

The unsteady supersonic flow over two- and three-dimensional cavities has been analyzed by the integration of unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes(RANS) with the $k-\omega$ turbulence model. The unsteady flow is characterized by the periodicity due to the mutual relation between the shear layer and the internal flow in the cavity. An explicit 4th order Runge-Kutta scheme and an upwind TVD scheme based on the flux vector split with the van Leer limiters are used for time and space discretizations, respectively. The cavity has a L/D ratio of 3 for two-dimensional case, and same L/D and W/D ratio of 1 for three-dimensional case. The Mach and Reynolds numbers are 1.5 and 450000 respectively. In the three-dimensional flow, the field is observed to oscillate in the 'shear layer mode' with a feedback mechanism that follows Rossiter's formula. In the two-dimensional simulation, the self-sustained oscillating flow has more violent fluctuation inside the cavity. The primary fluctuating frequencies of two- and three-dimensional flow agree very well with the 2nd mode of Rossiter's frequency. In the three-dimensional flow, the 1st mode of frequency could be seen.

Key Words: 비정상초음속유동(Unsteady Supersonic Flow), $k-\omega$ 난류모델($k-\omega$ Turbulence model), 비정상 공동유동(Unsteady Cavity Flow), 풍상차분법(Upwind TVD Scheme)

1. 서 론

고속으로 운항하는 비행체에는 구조상 바퀴 칸, 폭탄 장착 부등에 공동이 존재하며, 공동 주위의 초음속 유동은 와류의 생성과 소멸, 유동의 박리와 재부착, 충격파와 팽창파 등과 같은 유동현상이 복합적으로 일어나는 매우 복잡한 유동을 형성한다. 세장비(길이 대 깊이 비, L/D)가 작은 공동에서조차도 비정상적이며 3차원 특성이 강한 유동현상을 나타낸다[1,2]. 이러한 공동주위에 발생하는 복합적인 유동현상은 와류의 생성과 소멸을 거치며 공동 주위에 진동과 소음 생성의 원인이 된다. 그 결과는 유동제어, 화학적 연소, 및 열전달 과

정 등에 크게 영향을 미치고 있다. 고레이놀즈수의 초음속 유동의 경우, 공동 내부의 유동은 주로 난류전단층에 의한 압력 진동현상 및 공동의 형상과 외부 유동조건에 의한 공진현상으로 특징지어진다. 이러한 공진현상들은 공동 주위의 구조물에 손상을 줄 수 있고, 공기역학적 성능 및 안정성에 나쁘게 작용할 수가 있다.

초음속 공동은 형태에 따라 개방형($L/D < 10$)과 밀폐형($L/D > 13$)으로 나뉘어 진다. 개방형 공동은 전단층이 뒷전 부근에 재부착하여 공동을 완전히 연결하므로 자유전단층과 외부유동의 상호작용으로 발생하는 심한 압력변화에 의해 진동현상이 나타난다. 이 진동은 스펜방향(spanwise), 종방향(longitudinal) 및 횡방향(transverse)으로 일어나고, 각 방향의 진동에 의해 심각한 소음 및 구조물에 문제가 유발될 수 있다. 밀폐형 공동은 개방형 공동처럼 압력 변동에 의해 발생하는 진동현상이 심각하게 나타나진 않지만, 고속의 외부유동과 저속의 공동유동 사이에 형성된 전단층이 앞전 벽을 지나면서 팽창하고, 그 전단층이 공동 바닥에 부딪힌다. 따라서 앞

접수일: 2005년 9월 2일, 심사완료일: 2005년 11월 10일.

1 학생회원, 조선대학교 항공우주공학과 대학원

2 정회원, 조선대학교 항공우주공학과

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

전에서는 팽창과가 형성되고, 공동 바닥에 부딪친 전단층은 연속적인 충격파를 형성하며 위쪽으로 이동, 뒷전 벽을 통해 빠져나간다. 그러므로 앞전과 뒷전에서 두 개의 분리된 박리 영역이 생기는 특징이 있다[3,4].

Xin Zhang & Edwards[3,4], Krishnamurty[5], Rossiter[6], Heller[7] 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 길이 대 깊이(L/D)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]. 전단층모드와 후류모드의 큰 특성 차이는 전단층모드는 전단층에서 와류가 말려지면서 공동의 뒷전 벽면에 충돌하는 것으로 특징지어지고, 후류모드는 공동의 앞전에서 박리된 유동이 공동의 바닥에 충돌하여 공동의 하류로 유출되는 과정을 거침으로 후류모드의 유동은 매우 격렬하다.

본 연구에서는 비정상, 압축성의 2차원과 3차원 Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes(RANS)방정식에 $k-\omega$ 난류 모델을 적용하여 종방향 진동이 지배적인 $L/D=3$ 인 공동에 대하여 수치 계산을 수행하였고, 이를 Rossiter[6] 공식에 기초한 무차원 진동수와 Xin Zhang & Edsards[3,4]의 실험결과로 비교 및 검증하였으며, 2차원과 3차원의 각기 다른 유동특성을 우선도를 통하여 비교하였다.

2. 지배 방정식 및 수치 기법

무차원화된 3차원 Navier-Stokes 방정식은 다음과 같다.

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

무차원 기준값은 공동의 깊이(D), 자유유동속도, 자유유동 밀도 등이며, 시간과 일반 좌표축은 t, ξ, η, ζ 로 표현된다. \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 점성항 유량 벡터 E_v, F_v, G_v 및 기타 부호는 참고문헌[10]과 같다. \bar{S} 는 난

류계산에 사용되는 소스 항이다.

난류모델은 Wilcox[11]의 $k-\omega$ 모델을 사용하였으며, 난류 운동에너지 k 와 비소산율 ω 를 특성속도와 길이에 의해 무차원화하여 Navier-Stokes식과 같은 보존형태로 일반좌표에 대해 쓸 수 있다. 이때 Navier-Stokes식의 각 유량벡터들에 대응하는 난류 모델식의 벡터와 상수값들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Q &= \begin{bmatrix} \rho k \\ \rho \omega \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} \rho u k \\ \rho u \omega \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} \rho v k \\ \rho v \omega \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} \rho w k \\ \rho w \omega \end{bmatrix} \\ E_v &= \begin{bmatrix} \mu k \frac{\partial k}{\partial x} \\ \mu \omega \frac{\partial \omega}{\partial x} \end{bmatrix}, F_v = \begin{bmatrix} \mu k \frac{\partial k}{\partial y} \\ \mu \omega \frac{\partial \omega}{\partial y} \end{bmatrix}, G_v = \begin{bmatrix} \mu k \frac{\partial k}{\partial z} \\ \mu \omega \frac{\partial \omega}{\partial z} \end{bmatrix} \\ S &= \begin{bmatrix} P - \beta^* \rho \omega k \\ (\alpha P - \beta \rho \omega k) \frac{w}{k} \end{bmatrix} \\ \alpha &= \frac{13}{25}, \sigma = \frac{1}{2}, \sigma^* = \frac{1}{2}, \beta = \frac{9}{125}, \beta^* = \frac{9}{100} \end{aligned}$$

시간이산화를 위하여, 외재적인 방법으로 4차의 정확도를 갖는 4단계 Runge-Kutta 방법을 사용하였으며, 공간이산화는 고유행렬을 이용한 유량벡터분리와 van Leer의 유량한계계수를 이용한 2차 정밀도 풍상차분법(Second Order Upwind Scheme)인 TVD방법을 사용하였다[12]. 수치계산은 PC-cluster를 사용한 병렬처리 기법이 사용되었다.

3. 계산 결과 및 고찰

3.1 문제의 정의 및 격자계

단일공동 주위의 유동현상을 관찰하기 위하여 2차원과 3차원으로 수치해석을 수행하였다. 공동의 유동계산을 위한 형상과 유동조건 모델은 Xin Zhang & Edwards[3,4]가 실험한 형상을 바탕으로 정하였다. 공동모델의 깊이(D)는 15mm이고, 공동의 $L/D=3$ 이다. 공동 깊이(D)에 기준한 Reynolds 수는 4.5×10^5 이고, 마하수는 1.5인 초음속 유동에 대하여 계산을 수행하였다. 기본적인 유동의 조건은 2차원과 3차원에 동일하게 부여하였으며, 3차원의 경우 폭비 $W/D=1.0$ 이다.

Fig. 1은 공동유동 해석을 위한 3차원 격자계의 일부를 보여주고 있다. 공동 전후의 평판과 바닥 및 벽 부근에 격자를 충분히 밀집시켜 주었으며, 첫 격자점의 y^+ 는 약 15정도로 벽함수를 사용하지 않고 직접 계산을 수행하였다. 원방향 경계조건은 깊이(D)의 7배를 주었다. 계산에 사용된 격자수는 2차원의 경우 상부에 350×100 , 공동부에 100×70 이며, 3차원의 경우 각각 $140 \times 40 \times 40$, $50 \times 30 \times 20$ 이다.

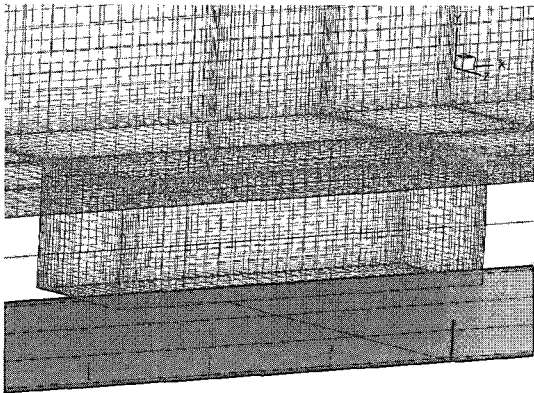


Fig. 1 Computational grid for the three dimensional calculation

3.2 2차원과 3차원 유동해석 및 비교

Fig. 2와 Fig. 3에 마하수 1.5일 때 시간에 따른 밀도변화의 수치잔여치 변화를 나타내었다. 무차원화된 시간으로 Δt 는 $35.3 \times 10^{-6} sec$ 이다. 2차원은 $t = 90$, 3차원은 $t = 130$ 이후에 불안정한 진동은 없어지고 주기적인 진동에 들어감을 확인할 수 있으며, 수치잔여치의 시간주기(T_p)는 2차원이 $T_p = 5.2$, 3차원이 $T_p = 10.4$ 로 유동의 진동주기를 잘 반영하고 있다.

여기서 3차원이 2차원에 비해 2배의 주기가 관측 되었는데, 이는 3차원 공동내부의 압력변화와 z-방향의 3차원 효과로부터 그 원인을 찾을 수 있다.

Fig. 4와 Fig. 5, Fig. 6은 2차원과 3차원 공동의 몇 지점에서 압력변화를 나타낸 것이다. 실선은 공동의 앞전에서 압력변화이고, 점선은 공동의 바닥중앙에서 압력변화를 나타낸 것이다. Fig. 4를 보면 무차원 시간에 따른 압력변화주기가 $T_p = 5.2$ 인 것을 확인할 수 있으며, 압력변화의 진폭은 공동의 앞전이 바닥에 비해 더 큰 진폭을 갖는 것을 확인할 수 있다. 그 이유로는 공동의 바닥중앙에서는 앞전에서 형성된 전단층과 와류가 후류방향으로 이동함에 따른 압력변화이지만, 공동의 앞전에서는 팽창파가 발생하고, 공동 내부의 영향에 의해 팽창파의 진동이 유발됨으로 인해서 변화의 폭이 커졌음을 알 수 있다.

Fig. 5는 3차원 공동의 바닥중앙($z/D = 0.5$)에서 압력변화를 나타낸 그림이고, Fig. 6은 3차원 공동의 z-방향으로 바닥 모서리($z/D = 0.0$)인 지점에서 압력변화를 나타낸 그림이다. Fig. 5와 Fig. 6을 보면, 2차원 유동에서는 주기 $T_p = 5.2$ 로 반복되었으나, 3차원에서는 주기가 $T_p = 10.4$ 로 반복되고, 그 안에서 큰 진폭과 작은 진폭이 반복됨을 볼 수 있다. 또한, 공동바닥 중앙($z/D = 0.5$)에서의 압력진폭이 모서리($z/D = 0.0$)부근의 압력진폭보다 더 큰 것을 볼 수 있다. Fig.

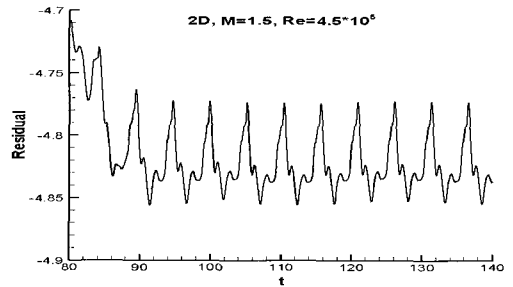


Fig. 2 Residual history of two dimensional cavity

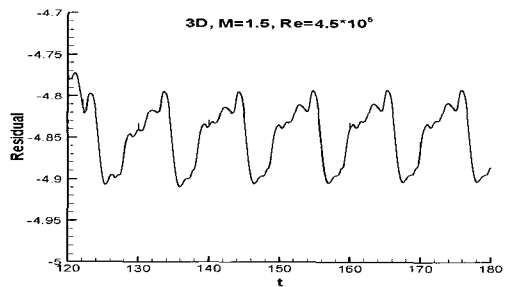


Fig. 3 Residual history of three dimensional cavity

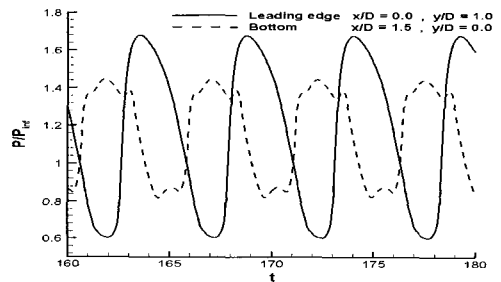


Fig. 4 Pressure history at the cavity leading edge and the cavity center of floor for two dimensional cavity

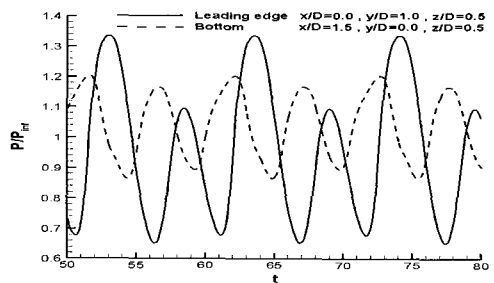


Fig. 5 Pressure history at the leading edge and the center of floor for three dimensional cavity ($z/D = 0.5$)

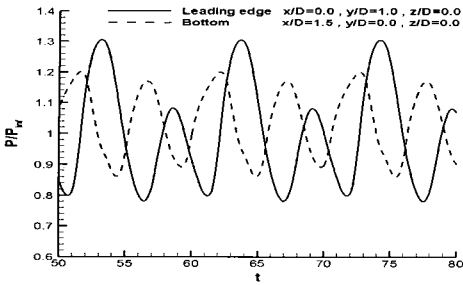


Fig. 6 Pressure history at the leading edge and the center of floor for three dimensional cavity ($z/D = 0.0$)

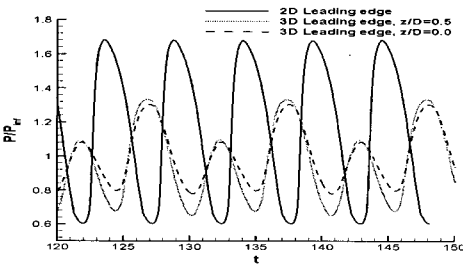


Fig. 7 Two and three dimensional pressure history at the leading edge

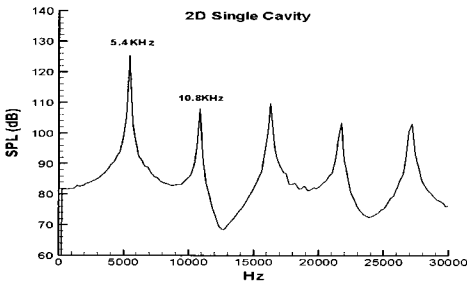


Fig. 8 SPL distribution for two dimensional cavity

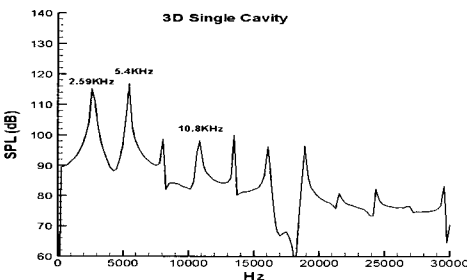


Fig. 9 SPL distribution for three dimensional cavity

7은 2차원과 3차원 공동의 앞전에서 시간에 따른 압력변화를 2차원 시간축을 기준으로 3차원 유동의 변화를 증첩하여 표현한 것이며, 2차원 공동의 압력변동 진폭이 3차원 공동에 비해 약 30%정도 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 3차원의 경우 2차원에 비해서 z-방향에서 공동으로 유량의 유입·유출에 의해 압력 진폭의 변화율이 2차원 해석보다 낮게 나타나게 된 것으로 유추할 수 있고, z-방향으로 유량이 유입·유출하는 것을 유선을 통해 확인할 수 있었다.

압력변화에 대한 주진동주파수를 분석하기 위하여 다음 식으로 표현되는 음압수준 (SPL, Sound Pressure Level)값을 통해 비교하였다.

$$SPL = 20 \log_{10} \left[\frac{|p|}{p_{ref}} \right] (dB) \quad (2)$$

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

Fig. 8과 Fig. 9는 2차원 및 3차원 공동의 주진동 주파수를 보기 위하여, SPL(Sound Pressure Level)값으로 주파수 특성을 분석한 그림이다. Rossiter[6]공식을 통해 계산한 값과 Xin Zhang & Edwards[4]의 실험결과와 잘 일치하는 것을 Table. 1에서 볼 수 있다. 그러나 Fig. 9의 3차원 공동의 경우에는 주진동 주파수는 2차원 공동에서와 같이 5.4kHz로 동일하나 z-방향의 3차원 효과에 의해서 공동 내에서 크고 작은 압력의 진폭이 변갈아 나타나는 것을 볼 수 있고, 이 주파수 대역은 2.59kHz로 식 (3)의 Rossiter공식 1차 모드에 해당하는 주파수 대역인 것을 확인 하였다.

Table. 1에는 공동에서 발생하는 주진동 주파수를 비교하였다. 주진동 주파수는 2차원과 3차원 공동이 동일하게 5.4kHz로 단일공동의 Xin Zhang & Edwards[4]와 Rossiter식[6]의 결과와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 10는 Rossiter공식과 Heller[7]의 실험결과에 2차원과 3차원 공동의 무차원 진동수(St)를 비교하여 나타낸 그래프이다. Rossiter의 공식은 식 (3)과 같다[6].

$$St = \frac{fL}{U} = \frac{n - \gamma}{1/k_n - M} \quad (3)$$

St 는 무차원진동수(Strouhal number)이고, n 은 n 번째 진동

Table. 1 M=1.5 Comparison of dominant frequency(mode=2)

	Xin Zhang[4]	Rossiter Eq[6]	2차원 공동	3차원 공동
L/D=3	5.90kHz	5.45kHz	5.40kHz	5.40kHz

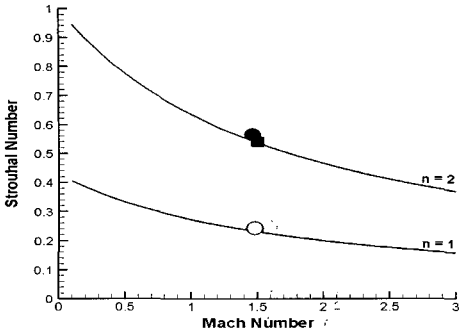


Fig. 10 Non-dimensional resonant frequencies as a function of Mach number, — : Rössiter's formula, ■ : 실험 $L/D=4$ [7], ● : 2D CFD, ○ : 3D CFD

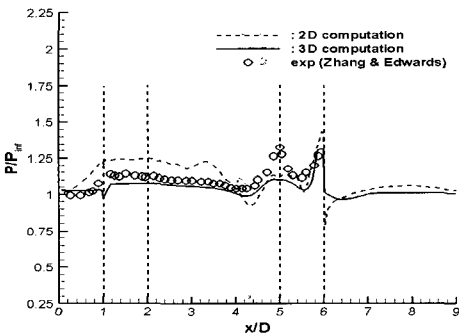


Fig. 11 Mean pressure distribution

모드, k_v 는 공동입구에서 자유유동과 대류속도의 비를 나타내는 상수이고, γ 는 실험에 의하여 얻어진 상수, M 은 자유유동 마하수이다. 위의 식 (3)에 사용되는 상수값들은 Heller[7]가 수행한 연구에서 최적화되어 사용된 값을 이용하였다.

Heller[7]에서 주진동모드 $n = 2$ 일 때 무차원 진동수는 0.6 정도이고, 본 논문에서 계산된 $n = 2$ 일 때 2차원과 3차원 공동의 무차원진동수는 0.57로 Rossiter 공식 및 Heller의 실험결과와 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 또한, 3차원 공동의 $2.59kHz$ 는 무차원 진동수가 0.269로 Rossiter 공식의 주진동 모드 $n = 1$ 에 해당하는 값인 것으로 재차 확인하였다.

Fig. 11은 한주기 시간에 대한 벽면의 평균압력분포를 Xin Zhang & Edwards[4]의 실험결과와 2차원과 3차원 공동의 수치해석 결과를 같이 비교한 그림이다. 그림에서 점선은 2차원 공동의 계산결과이고, 실선은 3차원 공동의 계산결과이다. 2차원과 3차원 공동의 계산결과 모두 공동의 뒷전바닥 모서리부근에서 Xin Zhang & Edwards[4]의 실험결과보다 압력이

낮게 나타내고 있는 것을 볼 수 있으며, 3차원 공동이 2차원 공동보다 실험결과에 근접하게 압력분포를 나타내는 것을 볼 수 있다. 이는 2차원 공동보다 3차원 공동의 형상이 Xin Zhang & Edwards[4]의 실험조건과 유사하기 때문에 비슷한 결과가 나온 것으로 볼 수 있다.

Fig. 12은 2 차원 공동에서 두 주기에 대해 $dt = 1.3$ 의 시간간격으로 샘플링하여 공동내부의 밀도와 유선을 나타낸 그림이다. 그림에서 시간 t 는 Fig. 4에서 사용된 무차원시간축의 각지점에 해당한다.

- i) $t=163.5$ (A) : 공동 안에 작은 3개의 작은 와류가 생성되기 시작하는 것을 볼 수 있다.
- ii) $t=164.8$ (B) : 작은 와류가 합쳐져서 하나의 큰 와류를 형성한 뒤 점차 공동의 뒷전으로 이동하고 있는 것을 보여 주고 있다.
- iii) $t=166.1$ (C) : 공동 뒷전으로 이동하였던 와류가 공동 밖으로 빠져나가고 있는 것을 볼 수 있으며, 이와 동시에 공동의 앞전과 중앙 바닥에서 작은 와류가 생성되고 있다.
- iv) $t=167.4$ (D) : 뒷전에 있던 큰 와류의 일부는 공동 뒤편으로 빠져 나가고 일부는 Heller-Bliss[13]의 파 반사 메커니즘에 의해 뒷벽에 부딪힌 다음 앞전으로 반사되고 있으며, 앞전과 중앙 바닥에 생성되었던 와류들은 점차 성장하면서 뒤쪽으로 이동을 하는 모습을 볼 수 있다.
- v) $t=168.7$ (E) : 2차원 공동에서는 한주기가 $Tp = 5.2$ 이기 때문에 Fig. 12(E)는 Fig. 12(A)와 같은 모습을 하고 있는 것을 볼 수 있다. 이렇게 해서 2차원 공동의 한주기 동안의 유동현상을 관찰 할 수 있다.

Fig. 12로부터 Heller-Bliss의 파 반사 메커니즘[13]과 동일하게 반복하면서 이동하는 것을 볼 수 있으며, 공동 내부 유동의 주기적인 반복 이동에 따라 자유 전단층이 주기적으로 변화하면서 유동이 반복적으로 유입된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 13은 3차원 유동의 중앙단면에서 한 주기에 대해 $dt = 1.3$ 의 시간간격으로 샘플링하여 공동내부의 밀도와 유선을 나타낸 그림이다. 각 시점 t 는 Fig. 5의 무차원 시간에 해당한다.

- i) $t=63.5$ (A) : 큰 와류가 공동 안에 생성되어 있는 것을 볼 수 있다.
- ii) $t=66.1$ (C) : 공동 안에 있던 큰 와류가 뒷전으로 이동하여 공동 뒤로 빠져나가고, 공동 앞전에서 새로운 작은 와류가 생성되고 있는 것을 볼 수 있다.
- iii) $t=68.7$ (E) : 공동의 뒷전으로 이동했던 와류의 일부는 뒤로 빠져나가고 일부는 공동 바닥으로 남아있는 상태에서 공동 앞전에서 생성된 와류가 점차 공동 뒷전으로 이동해 가고 있는 모습을 보여주고 있다.
- iv) $t=70$ (F) : 공동 뒤로 빠져나가고 남은 와류와 앞전에서 이

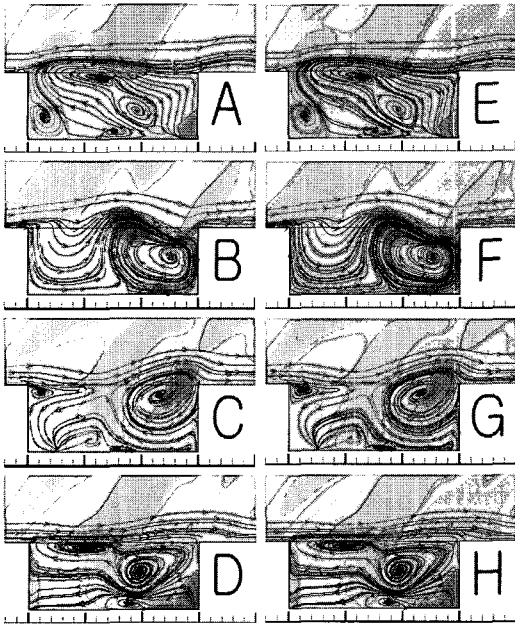


Fig. 12 Streamlines of two dimensional cavities flow (Total time=10.4, Sampling time=1.3)

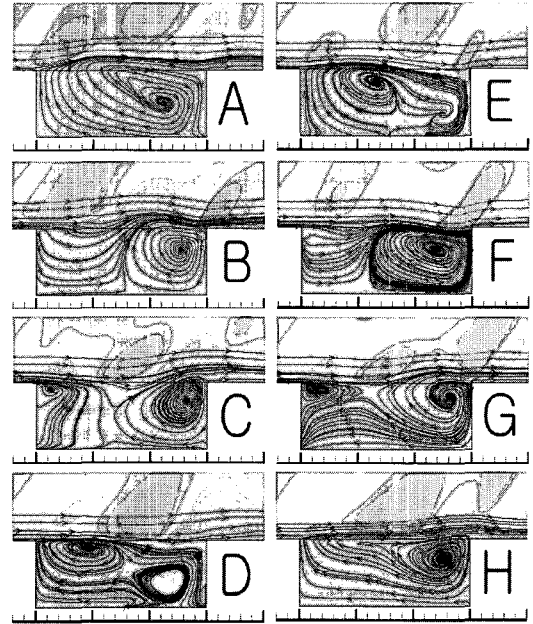


Fig. 13 Streamlines of three dimensional cavities flow (Total time=10.4, Sampling time=1.3, $z/D=0.5$)

동해은 와류가 합쳐져 하나의 큰 와류를 형성하고 있는 것을 보여주고 있다.

- v) $t=74(I)$: 유동의 한 주기가 끝난 뒤 $t=63.5(A)$ 일 때와 똑 같은 모습으로 돌아가 공동 안에 큰 와류가 다시 생성되어 있는 것을 볼 수 있다. 여기서 Fig. 13(A)-(C)는 큰 진폭을 갖는 압력진동이며, Fig. 13(C)-(G)는 작은 진폭으로 압력진동을 할 때 그림을 나타낸 것이다.

3차원도 2차원 해석과 같이 공동 내부 유동의 주기적인 반복 이동에 따라, 자유전단층이 주기적으로 변화하면서 유동이 반복적으로 유입되는 것을 볼 수 있다. 그리고 3차원 공동 유동이 2차원 공동의 유동에 비해 덜 복잡하고 와류의 개수도 적다는 것을 2차원 공동과 비교해서 알 수 있다.

Fig. 14는 3차원 공동에서 3차원적 유동현상을 관찰하기 위하여 $x/D=1.5, z/D=0.9$ 인 지점에서 유동방향과 단면의 유선을 나타낸 그림이다. 전체 시간은 5.4이고 Fig. 5의 $t=63.5$ 부터 $t=68.7$ 까지 $dt=0.65$ 의 시간간격으로 샘플링하여 3차원 공동의 유선도를 표시하였다. 그림을 보면 전체적으로 공동내부에 와류가 발생했을 때 와류 뒤쪽에서는 공동 내부로 하강하는 유동이 발생하여 z-방향에서 공동 안쪽으로 유동이 유입되는 것을 볼 수 있으며, 와류 앞쪽에서는 공동 밖으로 상승하는 유동이 발생하여 공동 안에서 z-방향 밖으로 유동이 유출되는 것을 볼 수 있다. 그리고 z-방향에서 공동 내부로 유동의 유입과 유출의 주기적인 반복으로 인해 공동 바깥쪽 모서리에서도 작은 와류가 생성되고, 소멸되는 것을

볼 수 있다.

4. 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 1.5, 세장비 $L/D=3.0$, 폭비 $W/D=1.0$, 레이놀즈수 4.5×10^5 이다. 압력 진동의 주파수 분석에 의하여 2차모드에 해당하는 주파수 대역이 Rossiter[6], Heller[7]와 Xin Zhang & Edwards[4]의 실험결과와 비교하여 잘 일치함을 확인 할 수 있었으며, 3차원 유동의 경우 z-방향 유동의 3차원 효과로 인하여 Rossiter식[6]의 1차모드에 해당하는 진동 주파수를 볼 수 있었다. 또한 유동의 진동 특성은 2차원 공동과 3차원 공동에서 모두 전단층모드에 해당하는 진동 특성, 즉 공동 앞전에서 발생한 전단층이 확산되지만 공동 뒷전에 부착함으로써 자유유동과 공동유동간의 격렬한 유동 혼합은 발생하지 않는 현상을 보여주는 것을 확인하였다. 그리고 2차원 유동이 3차원 유동에 비해 더 격렬하고, 와류의 개수도 많은 것을 알 수 있었다. 이는 3차원 공동 유동의 경우 z-방향에서 유동의 유입·유출이 가능한 이유 때문인 것으로 보인다.

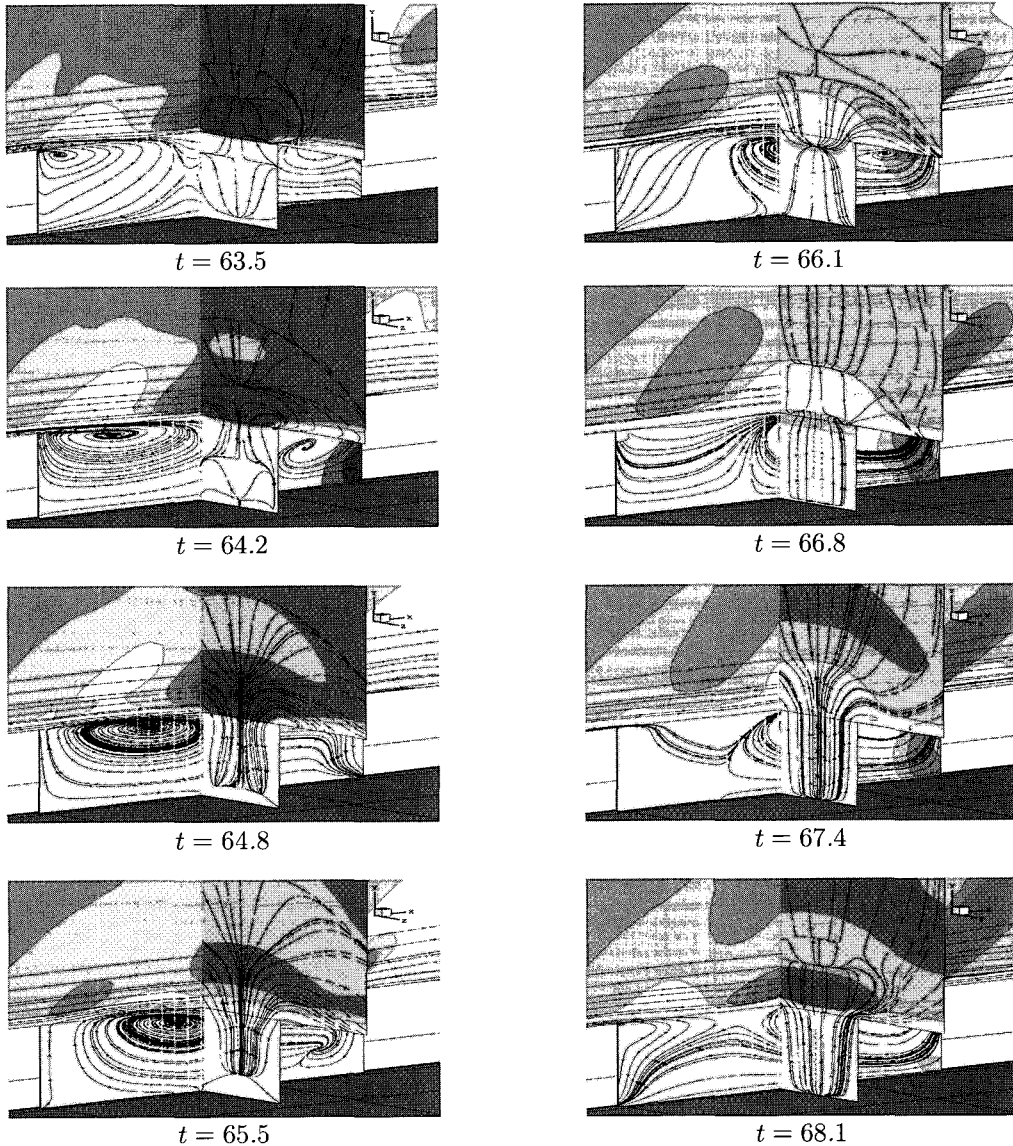


Fig. 14 Streamlines of three dimensional cavity(Total time = 5.2 , Sampling time = 0.65 , $x/D = 1.5$, $z/D = 0.9$)

후 기

본 연구는 2003년도 조선대학교 교내연구과제의 일부이며, 병렬처리수치계산 과정에 도움을 주신 슈퍼컴퓨팅센터에 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, p.620-632.

[3] Xin Zhang & John A. Edwards., 1992, "Experimental Investigation of Supersonic Flow over Two Cavities in Tandem," *AIAA J.*, Vol.30, No.3.

[4] Xin Zhang & John A. Edwards., 1995, "Analysis of Unsteady Supersonic Cavity Flow employing an Adaptive

- Meshing Algorithm," *Computers & Fluids*, Vol.25, No.4.
- [5] Krishnamurty, K., 1955, "Acoustic radiation from two-dimensional rectangular cutouts in aerodynamic surfaces," *NACA TN-3487*.
- [6] 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.
- [7] 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, p.545-553.
- [8] Gharib, M. and Roshko, A., 1987, "The effect of flow oscillations on cavity drag," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.177, p.501-530.
- [9] Chingwei M.S., Philip J.M., 2001, "Comparison of Two- and Three-Dimensional Turbulent Cavity Flows," *AIAA A01-16385*.
- [10] Hoffmann, K.C. and Chiang S.T., 1993, "Computational Fluid Dynamics for Engineers," *Engineering Education System USA*.
- [11] Wilcox, D.C., 1991 "Reassessment of the Scale Determining Equation for Advanced Turbulence Models," *AIAA journal*, Vol.19, No.2, p.248-251.
- [12] 김제수, 1996, "진동하는 NACA0012 날개 주위의 비정상 천음속유동 해석," *한국항공우주공학회*, 제 24권, 제 6호.
- [13] Hanno H. Heller and Donald B. Bliss, 1975, "The Physical Mechanism of Flow-Induced Pressure Fluctuations in Cavities Concepts for Their Suppression," *AIAA*.