

## 단일 공동주위의 2차원과 3차원 초음속 유동 비교

우철 훈<sup>1\*</sup>, 김재수<sup>2\*</sup>

### COMPARISON OF TWO- AND THREE-DIMENSIONAL SUPERSONIC TURBULENT FLOWS OVER A SINGLE CAVITY

C.H. Woo and J.S. Kim

*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  $k-w$  turbulence model. The unsteady flow is characterized by the periodicity due to the mutual relation between the shear layer and the internal flow in cavities. Numerical method is upwind TVD scheme based on the flux vector split with the Van Leer limiters, and time accuracy is used explicit 4th stage Runge-Kutta scheme. Cavity flows are Comparison of two- and three-dimensional. The cavity has a  $L/D$  ratio of 3 for two-dimensional case. and same  $L/D$  and  $W/D$  ratio is 1 for three-dimensional case. The Mach and Reynolds numbers are held constant at 1.5 and 450000 respectively. For the three-dimensional case, the flow field is observed to oscillate in the "shear layer mode" with a feedback mechanism that follow Rossiter's formula. On the other hand, the self-sustained oscillating flow transitions to a "wake mode" for the two-dimensional simulation, with more violent fluctuations inside the cavity.*

**Key Words:** 초음속 난류유동(Supersonic Turbulent Flow),  $k-w$  난류모델( $k-w$  Turbulence model), 공동유동(Cavity Flow), 풍상차분법(Upwind TVD Scheme), Runge-Kutta

#### 1. 서 론

고속으로 운항하는 비행체에는 구조상 바퀴간, 폭탄 장착부, 이음새 등에 공동이 존재한다. 이 공동 주위의 초음속 유동은 박리, 와류, 충격파와 재부착 등과 같은 유동현상이 일어나며, 길이 대 폭( $L/D$ )이 작은 공동조차도 비정상적이며 3차원 특성이 강한 유동현상을 나타내는 것을 Maull과 East의 의해 관찰되었다[1].

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 외부유동과의 상호작용으로 발생하는 심한 압력변화에 의해 진동현상이 나타나게 된다. 밀폐형 공동은 고속의 외부유동과

저속의 공동 내 유동 사이에 형성된 전단층이 앞전 벽을 지나면서 팽창하여 공동바닥에 부딪친다. 때문에 앞전과 뒷전에서 두 개의 분리된 박리영역이 생기는 특징이 있다. 그리고 개방형 공동처럼 압력 변동에 의해 발생하는 진동현상이 심각하게 나타나지 않는다[2].

Krishnamurthy[3], Rossiter[4], Heller[5], Xin Zhang[2] 등의 연구를 통해서 공동유동의 압력진동은 규칙과 불규칙적인 유동 구성에 의해 발생한다고 알려져 있다. 이것은 일반적으로 공동에 유입되는 경계층과 공동의 형상, 유속 그리고 많은 인자들에 따라 다르게 나타나고, 공동의 깊이에 따라 소음의 발생 방법도 다르다고 알려져 있다. 2차원 공동의 유동은 길이 대 깊이( $L/D$ )가 커질수록 전단층모드에서 후류모드로 바뀐다는 걸 Gharib and Roshko[6]의 연구를 통해 입증하였으며, 3차원 공동의 유동은 후류모드(wake mode) 보다는 전단층모드(shear layer mode)가 우세하게 된다.

본 연구에서는 비정상, 압축성의 2차원 축대칭과 3차원 Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)방정식에

1 학생회원, 조선대학교 항공우주공학과

2 정회원, 조선대학교 항공우주공학과

\* E-mail : wch0070@stmail.chosun.ac.kr

jsckim@mail.chosun.ac.kr

$k-w$  난류 모델을 적용하여 종방향 진동이 지배적인  $L/D=3$  인 공동에 대하여 수치 계산을 수행하였다. 이를 Rossiter 공식에 기초한 무차원진동수와 Xin Zhang의 실험치 등으로 비교 검증하였으며, 2차원과 3차원의 각기 다른 유동현상을 등압력선도와 등밀도 및 유선도를 통하여 비교하였다.

### 2. 지배 방정식 및 수치 기법

지배방정식으로는 비정상 압축성 3차원 Navier-Stokes 방정식을 사용하였다. 수치적인 방법으로는 시간이산화を 위하여, 외계적인 방법으로 4차의 정확도를 갖는 Runge-Kutta 4th order 방법을 사용하였다. 공간이산화는 고유행렬을 이용한 유량벡터분리와 Van Leer의 유량한계계수를 이용한 2차 정확도 풍상차분법인 TVD 방법을 사용하였다.

난류모델은  $k-w$  모델을 사용하여 난류운동에너지  $k$ 와 비소산을  $w$ 를 특성속도와 길이에 대하여 무차원화하여 Navier-Stokes식에 대입하여 사용하였다[7].

무차원은 공동의 깊이(D), 자유유동속도, 자유유동밀도로 무차원화 하였다. 그 외 기타부호는 참고문헌[8]과 같다.

### 3. 계산 결과 및 고찰

#### 3.1 문제의 정의 및 격자계

앞에서 고찰한 수치기법을 적용하여 공동의 유동을 2차원과 3차원으로 수치해석을 수행하였다. 공동의 유동계산을 위한 형상과 유동모델 조건은 Xin Zhang[2]이 실험한 조건을 바탕으로 정하였다. 공동 모델은 깊이가 15mm이고 공동의  $L/D=3$  이다. 공동 깊이에 기준한 Reynolds 수는  $4.5 \times 10^5$  이고, 마하수는 1.5인 초음속 유동에 대하여 계산을 수행하였다. 기본적인 유동의 조건은 2차원과 3차원에 동일하게 부여하였다.

Fig. 1은 3차원 격자계의 일부를 보여주고 있다. 벽면 부근에 격자를 밀집시켜 주었다. 격자수는 2차원의 경우 상부에  $350 \times 100$ 이고, 공동부는  $100 \times 70$ 이며, 3차원은  $140 \times 40 \times 40, 50 \times 30 \times 20$  이다. 공동 바닥 중앙부에 대한 압력변화로부터 주진동주파수는 다음과 같은 식으로 표현되는 음압수준 (SPL, Sound Pressure Level)값을 통해 비교하였다.[9]

$$SPL = 20 \log_{10} \left| \frac{p}{p_{ref}} \right| \quad (dB) \quad (1)$$

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

#### 3.2 2차원과 3차원 유동해석 및 비교

Fig. 2과 Fig. 3는 마하수 1.5일 때 시간에 따른 수치잔여치

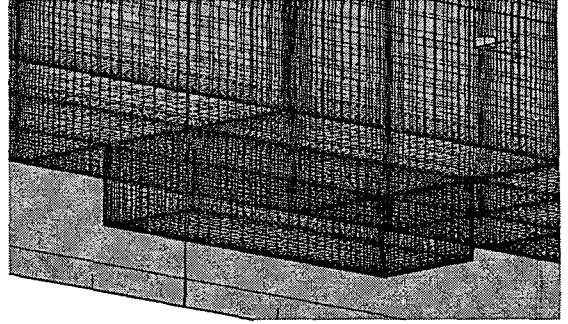


Fig. 1 Computational Grid for the three-dimensional

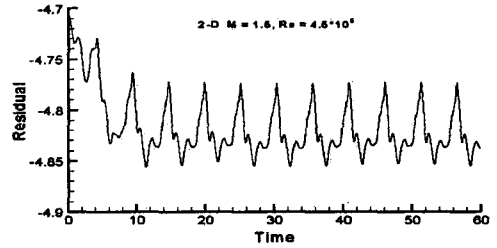


Fig. 2 2-D Residual history M=1.5

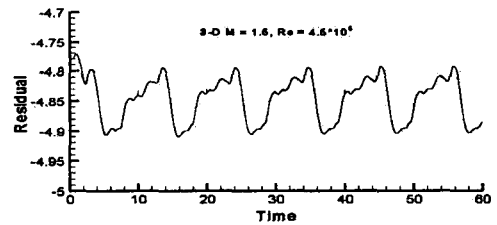


Fig. 3 3-D Residual history M = 1.5

의 변화를 나타내었다. 무차원화된 시간으로 2차원은  $T=10$ , 3차원은  $T=5$  이후에 불안정한 진동은 없어지고 주기적인 진동에 들어감을 확인할 수 있다. 잔여치의 시간주기( $T_p$ , Time Period)는 2차원이 약 5.2, 3차원이 약 10.4로 유동의 진동주기를 그대로 반영하고 있다.

여기서 3차원이 2차원에 비해 2배의 주기가 관측 되었는데, 이는 2차원과 3차원 공동바닥의 압력변화로부터 그 원인을 찾을 수 있다. 3차원 공동의 바닥에서 압력변화를 관측하면 2차원과 같은  $5.2T_p$ 로 압력이 진동하는 것을 관측할 수 있었다. 그러나 압력진동 진폭은 큰 진폭과 작은 진폭이 번갈아가며 진동을 하므로 전체적인 압력진동 주기는  $10.4T_p$ 가 됨을 알 수 있다.

$M=1.5$ 이고  $L/D=3$ 일 때 cavity에서 발생하는 주진동주파수를 Table. 1에 비교하였다. 주진동주파수는 2차원과 3차원이

Table. 1 M=1.5 Comparison of Dominant Frequency

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

동일하게 5.40kHz로 단일 공동의 Xin Zhang과 Rossiter식의 결과와 잘 일치한다.

Fig. 4와 Fig. 5는 2차원 공동과 3차원 공동의 주진동주파수를 보기 위하여 SPL(Sound Pressure Level)값의 주파수 특성을 분석한 그림이다. Rossiter공식을 통해 계산한 값과 Xin Zhang의 실험치 결과와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 그러나 3차원 유동을 분석한 Fig. 5를 보면, 주진동주파수는 2차원에서와 같이 5.4kHz로 동일하나 공동 내 크고 작은 작은 압력의 진폭이 번갈아 나타나는 특성으로 인해 2.59kHz에 또 다

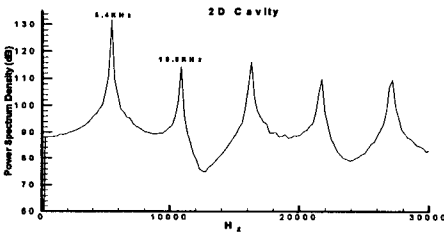


Fig. 4 2-D Cavity SPL(dB)

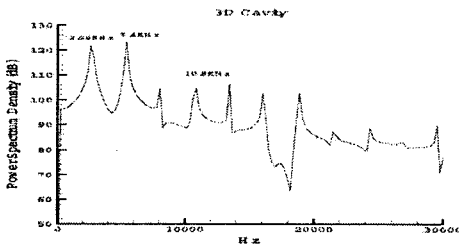


Fig. 5 3-D Cavity SPL(dB)

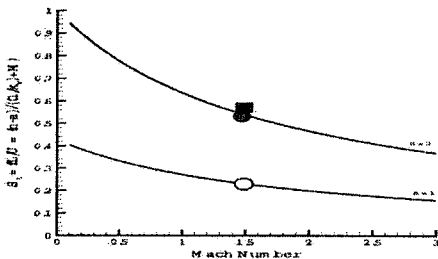


Fig. 6 Non-dimensional resonant frequencies as a function of Mach number, n = mode, — : Rossiter's formula, ■: L/D=4[5], ●: 2-D CFD, ○: 3-D CFD

른 주진동주파수가 있음을 볼 수 있다. 이 저주파 성분은 Fig. 6에서 보는 좌와 같이 Rossiter 공식에 의해 mode n=1 일 때의 무차원진동주파수 대역과 일치함을 알 수 있다.

Fig. 6은 무차원진동수의 그래프를 나타내는 그림으로 Heller[5]의 실험치 결과와 공동의 계산결과를 Rossiter의 공식에 비교하여 나타낸 것이다. Rossiter의 공식은 다음과 같다.

$$St = \frac{fL}{U} = \frac{n - \gamma}{1/k_v - M} \quad (2)$$

St는 무차원진동수(Strouhal number)이고, n은 n번째 진동 모드,  $k_v$ 는 공동입구에서 자유유동과 대류속도의 비를 나타내는 상수이고, M은 자유유동 마하수이다.  $\gamma$ 는 실험에 의하여 얻어진 상수이다. 본 연구에서는  $\gamma = 0.25$ ,  $k_v = 0.57$ 을 사용하였다. Heller[5]의 논문에서는 무차원진동수가 0.6정도이다. 2차원과 3차원으로 계산한 공동의 무차원진동수는 0.57로 Rossiter[4]식과 Heller[5]의 실험치와 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 3차원 유동에서는 Rossiter식의 첫 번째 모드 (n=1)에 해당하는 무차원진동수 0.269가 존재하며 이는 Rossiter의 값과 매우 유사하다.

Fig. 7과 Fig. 8은 2차원과 3차원 공동의 유동주기를 무차원 시간 1.3으로 나누어 나타낸 것이다. Fig. 7의 A그림부터 H그림까지 차례로 살펴보면, 2차원은 공동 안에 3개의 작은 와류가 뒤로 이동함에 따라 하나의 큰 와류로 합쳐지고 점차 공동의 뒷전으로 이동하여 빠져나가는 것을 볼 수 있다. 또한, 와류가 공동의 뒷전으로 빠져나감과 동시에 공동의 앞전과 중앙바닥에 다시 새로운 작은 와류들이 생성되고 있는 것을 볼 수 있으며, 이렇게 주기적으로 계속 반복하는 것을 볼 수 있다. Fig. 8의 A그림부터 H그림까지 살펴보면 3차원 공동도 2차원 공동보다 와류의 개수와 크기는 작지만 작은 와류들이 공동 뒷전으로 이동함에 따라 큰 와류로 성장하여 공동의 뒷전으로 빠져나가고, 다시 공동 안에 새로운 와류가 생성되면서 주기가 반복하는 것을 볼 수 있다.

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

### 5. 결 론

본 논문에서는 마하수가 1.5일 때 L/D=3인 열린 공동 주위의 비정상 초음속 점성 유동을 2차원과 3차원으로 수치해석해본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

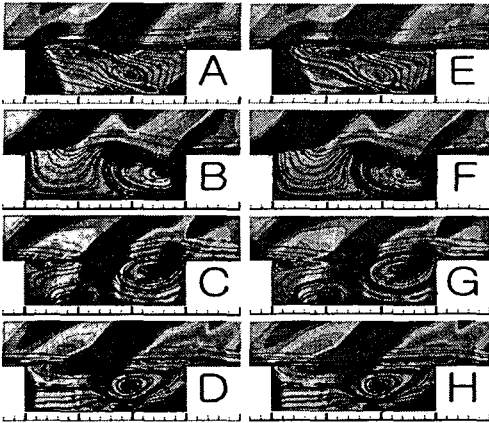


Fig. 7 Stream Line of two dimensional flow  
(Total Time=10.4, Sampling Time=1.3)

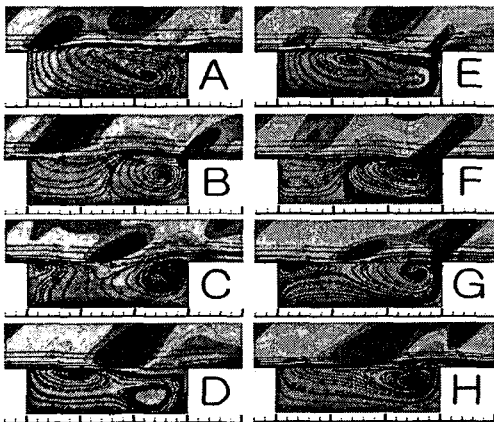


Fig. 8 Stream Line of three dimensional flow  
(Total Time = 10.4, Sampling Time = 1.3)

Reynolds-Averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식과  $k-w$  난류모델을 이용하여 공동 주위의 점성에 의해서 유발되는 와류의 생성과 이동, 자유전단층의 진동에 의한 파의 생성과 소멸 등 초음속 공동 유동의 특징을 실제 유동에 가깝게 모사해 볼 수 있었다.

압력 진동의 무차원 진동수와 주진동 주파수가 실험치 및

다른 수치해석 결과와 비교하여 잘 일치함을 확인 할 수 있었다. 또한  $L/D=3$ 인 열린 공동의 유동은 공동 내부에 생성된 앞전와류와 뒷전와류에 의해 주기적인 진동을 하였으며, 심한 압력변동이 발생함을 알았다.

### 참고문헌

- [1] O. Baysal, and R. L. Stallings Jr., 1998, ational and experimental Investigation of Cavity Flowfields," *AIAA J.* Vol.26, No.1.
- [2] Xin Zhang & John A. Edwards, 1992, Experimental Investigation of Supersonic Flow over Two Cavities in Tandem," *AIAA J.* Vol.30, No.3.
- [3] Krishnamurty, K., 1955, "Acoustic radiation from two-dimensional rectangular cutouts in aerodynamic surfaces," *NACA TN-3487*.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Gharib, M. and Roshko, A., 1987, "The effect of flow oscillations on cavity drag," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.177, p.501-530.
- [7] 최창호, 유정열, 1996, " $k-w$  난류모델을 채택한 2차원 초음속 익형유동의 수치해석," *항공우주공학회지*, 제24권, 제3호.
- [8] Hoffmann, K.C. and Chiang S.T., 1993, "Computational Fluid Dynamics for Engineers," *Engineering Education System USA*.
- [9] 노오현 1979, "항공기 소음 단위에 관하여", *항공우주공학회지*.
- [10] 송병호, 2002, " $k-\epsilon$  난류모델을 이용한 비정상 초음속 Cavity 유동장 해석", *석사학위 논문*, 조선대학교.