

초음속 Cavity 유동에 관한 수치해석적 연구

정성재* · 광중호* · 김희동**

A Computational Study of the Supersonic Cavity Flow

Sung-Jae Jung* · Jong-Ho Gwak* · Heuy-Dong Kim*

ABSTRACT

A computational analysis has been conducted to investigate the detailed flow structure inside a supersonic cavity. The free stream Mach number and Reynolds number are 1.83 and 6.02×10^5 respectively. In the present study, the depth and width of the cavity are changed to investigate the effect of the cavity dimensions. A fully implicit finite volume scheme is applied to solve the three-dimensional, steady, unsteady, compressible, Navier-Stokes equations. The computed results are validated with the previous experimental data available. The present computation provides reasonable predictions of the cavity flow, compared with experimental results. The obtained results show that a shock wave is generated in front of the downstream edge of the cavity and the dominant frequencies of the pressure oscillations inside the cavity were obtained.

Key Words: Cavity(공동), Compressible Flow(압축성 유동), Shear Layer(전단층), Shock Wave(충격파), Supersonic Flow(초음속 유동)

1. 서 론

추진 시스템의 고효율화는 초음속 및 극초음속 수송기 개발의 주요 기술이며, 이에 관한 연구가 현재까지 활발히 수행되고 있다[1-3]. 이러한 추진시스템의 핵심요소인 초음속 공기 흡입구(supersonic air intake)는 광범위한 비행 마하수에 대하여 엔진에 필요한 공기를 확보하기 위해 유입공기를 초음속으로부터 아음속으로 효율적인 감속과 압축을 수행하여야 한다. 그러나 공기 흡입구 목(throat)에서는 초음속 압축의 최종단계에

서 발생하는 수직충격파가 경계층과 간섭하여 경계층 박리를 유발한다. 이로 인하여 유동장을 불안정하게 하고, 산화제의 불연소를 야기할 수 있다. 대부분 이러한 문제점을 해결하기 위하여 흡입구 목 부분에 공동(cavity)을 설치하여 수직 충격파의 안정화를 꾀하고 있다[4]. 따라서 공동의 설계는 초음속 공기 흡입구의 성능과 밀접한 관계를 가지고 있으며, 고효율의 추진시스템을 개발하기 위해서는 공동 내부의 유동특성이 충분히 알려져야 한다.

초음속 공동에 관한 연구는 주로 외부 유동에 대하여 수행 되었으며[5-7], 공동을 적용한 항공기 익(airfoil)의 항력 감소에 관하여 관심이 집중되었다[8]. 한편 초음속 내부 유동장에서 공동이 적용된 경우, 몇몇 연구가 수행 되었으나 공동

* 안동대학교 기계공학과 대학원

** 안동대학교 기계공학부

연락처, E-mail: kimhd@andong.ac.kr

내부 유동의 상세한 유동기구가 조사되지 않았다 [9]. 따라서 고성능 초음속 공기 흡입구의 설계를 위하여 체계적인 연구가 필요한 실정이다. 더욱이 공동 형상의 최적화에 관한 연구는 수직충격파 제어시스템을 확립하는데 중요한 과제이다.

본 연구에서는 3차원 압축성 Naier-Stokes 방정식에 유한체적법을 적용하여 초음속 공동 유동장을 모사하였다. 수치계산 결과는 참고문헌[1]의 실험 결과와 비교하여 해석방법의 타당성을 검증하였다. 본 연구의 목적은 수직충격파를 제어하기 위하여 설치한 공동 내부의 상세한 유동 구조와 공동의 형상비에 따른 유동특성을 조사하여 성능이 뛰어난 초음속 공기 흡입구의 개발에 요구되는 기초자료를 제시하고자 한다.

2 수치해석

본 연구에서는 3차원 압축성 Navier-Stokes 방정식에 유한체적법을 적용한 Fluent6 코드를 사용하여 유동장을 모사하였다. 유동구조를 나타내기 위한 정상계산에서는 RNG k- ϵ 난류모델과 표준벽함수(standard wall function)를 사용하였다. 그리고 비정상계산에서는 공동내의 압력변동을 예측하기 위해 LES(Large eddy simulation)을 적용하였다. 수치계산의 time step은 2×10^{-5} 초로 설정하여 0.04096 초 동안 계산을 수행하였다. 또한 공동내의 압력변동에 대한 주파수특성을 알아보기 위해 FFT(Fast Furier transform) 해석을 수행하였다.

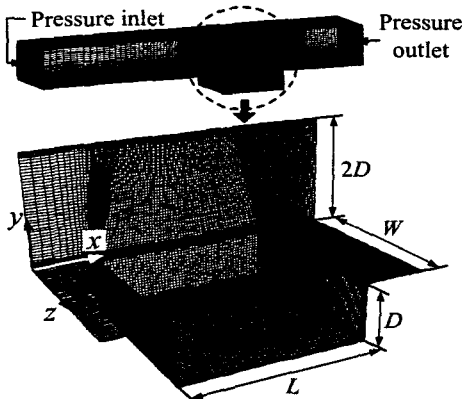


Fig. 1 Computational grid system

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 격자계와 경계조건을 나타낸다. 적용된 형상은 Skamoto[1]의 실험모델이며, 사각덕트는 전체 길이가 $16D$ 이며, 단면적이 일정하다. 사각덕트의 높이와 넓이(W)는 각각 $2D$ 와 $3D$ 이고 공동은 덕트 입구에서 $9D$ 후방에 위치한다. 그리고 공동의 길이와 깊이의 비인 L/D 가 1, 2 및 3인 형상을 적용하였다. 계산 영역의 경계조건으로, 초음속 유동이 유입되는 사각덕트 입구에는 유입조건으로 pressure inlet 조건을 적용하였고, 덕트 출구에는 유출조건으로 pressure outlet 조건을 적용하였다. 그리고 덕트의 모든 벽면에는 no-slip 조건을 적용하였으며, 격자점은 속도구배가 큰 전단층과 경계층이 발달하는 벽면 근처에 집중하였다. 또한 유입되는 유동의 상태량들은 Table 1과 같다.

Fig. 2는 $L/D=3$ 인 경우, 덕트 하부벽면과 공동 벽면의 중심을 따르는 압력계수의 분포를 나타낸다. x/L 은 원점으로부터 벽면을 따르는 거리를 나타낸다. 계산결과에서 x/D 가 증가함에 따라 $x/D=1, 5$ 및 6 지점에서 최고값을 가지며, 실험값을 정량적으로 잘 예측하고 있다. 따라서 본

Table 1 Test conditions

M	P_0	T_0	Re
1.83	196.1 kPa	275.6K	6.02×10^7

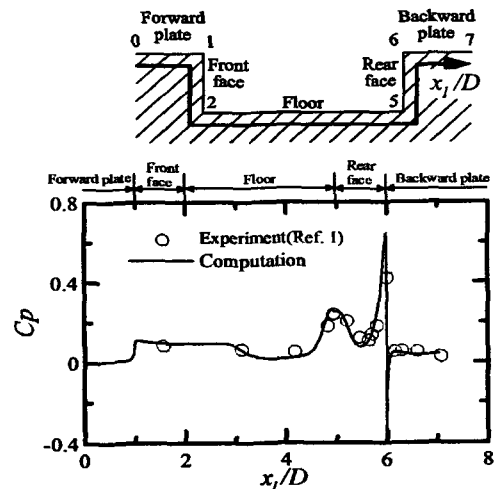


Fig. 2 Pressure coefficient distributions

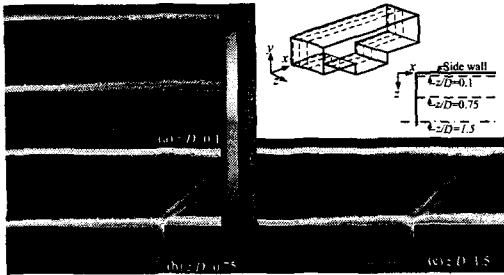


Fig. 3 Density contours ($L/D=3$)

해석방법은 초음속 공동 유동 모사를 위해 높은 유용성을 가진다고 판단된다.

Fig. 3은 $z/D = 0.1, 0.75$ 와 1.5 인 단면의 등밀도 선도를 나타낸다. z/D 는 공동옆면을 원점으로 한 거리 z 를 공동깊이 D 로 무차원한 값이다. 공동전면과 후면에서 발생한 충격파는 $z/D=0.75, 1.5$ 인 경우에는 명확하게 나타나지만, $z/D = 0.1$ 인 경우는 덕트의 옆 벽면 경계층으로 인하여 명확하게 나타나지 않는다. 그리고 z/D 가 증가함에 따라 공동 내의 최저 밀도점의 위치가 공동의 오른쪽 상부에서 공동의 중심으로 이동한다. 이는 벽면효과의 감소로 인하여 공동 내에서 발생하는 볼텍스의 위치가 벽면과 멀어 질수록 공동의 중심에 위치함을 나타낸다. 그리고 이때 발생한 볼텍스를 주볼텍스라고 정의한다. 따라서 $L/D=3$ 인 경우 주볼텍스는 3차원 구조를 가짐을 알 수 있다.

Fig. 4는 $L/D=3$ 인 경우, 공동 유동장을 상세히 알아보기 위하여 유선을 세 가지 시점 A, B와 C에 대하여 나타내었다. 유동구조는 $z/D=1.5$ 인면을 기준으로 대칭적으로 형성되어 있다. 주 유동은 공동후면을 따라 유입되며, 공동후면에서 전면으로 향하면서 주볼텍스를 형성한다. 그리고 이 유동은 z 축 방향에서 y 축 방향으로 중심축이 휘어지는 2차볼텍스를 형성하면서 공동상부로 이동한다. 따라서 $L/D=3$ 인 경우, 공동의 유동구조는 중심축이 휘어지는 주볼텍스와 2개의 2차볼텍스로 이루어짐을 알 수 있다.

Fig. 5는 $L/D=2, 1$ 인 경우, 공동 내의 유선을 나타낸다. $L/D=2$ 인 경우, 공동후면에서 유입된 유동은 상류로 향하면서 주볼텍스를 형성한다. 그리고 유동이 공동 중심으로 편향되면서 2차볼

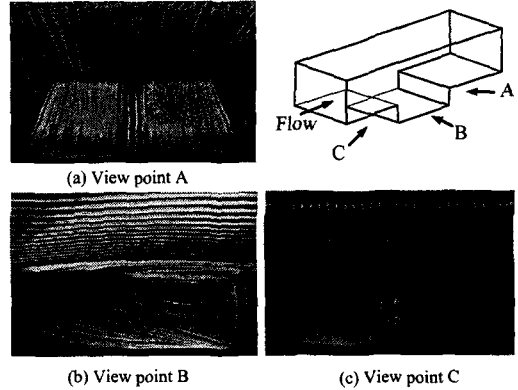


Fig. 4 Path line images ($L/D=3$)

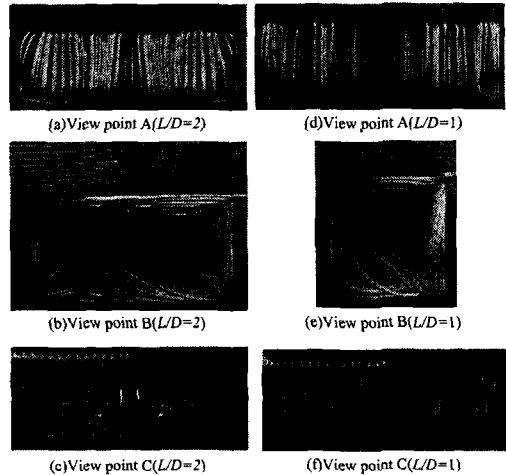


Fig. 5 Path line images ($L/D=2, 1$)

텍스를 형성한다. 이때 발생한 볼텍스는 $L/D=3$ 인 경우와 반대 방향으로 회전한다. $L/D=1$ 인 경우, 유입된 유동은 중심축이 일직선인 볼텍스를 형성한다. 두 형상 모두 중심면에 대해서 대칭을 이루고 있으나, $L/D=1$ 인 경우가 2차원 유동 구조를 나타낸다.

Fig.6는 $L/D=3$ 인 경우, $x/D=5.75$ 인 지점에서 압력변화에 대한 주파수 특성을 나타내며 실험결과와 비교 하였다. 수치계산에서 주파수분석을 하기위해 사용한 데이터 개수는 2048개이며, 0.04096초 동안 계산을 수행하였다. 계산결과에서 공동내의 압력변동은 다수의 조화진동수를 가지며, Table 2에 조화진동수와 PSD(power spectral density)값을 실험값과 비교하였다. 계산결과에서

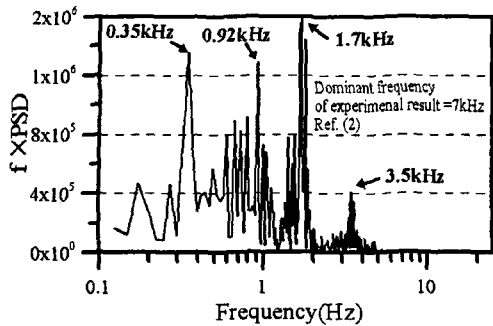


Fig. 6 Unsteady pressure Fluctuation at the rear face

Table 2 Dominant frequency and PSD

Computation		Experiment(Ref. 2)	
Dominant frequency(kHz)	PSD(dB)	Dominant frequency(kHz)	PSD(dB)
0.35	64	7	55
0.92	62.7		
1.7	61.8		
3.5	57.3		

공동내의 압력은 0.35, 0.92, 1.7과 3.5kHz 부근에서 조화진동수가 나타난다. 그러나 실험결과에서는 7kHz에서 조화진동수가 나타난다. 따라서 수치계산 결과는 실험에서 얻어진 조화진동수를 정확하게 예측하지 못하고 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 초음속 공기 흡입구의 수직충격파를 제어하기 위해 설치된 공동 내부의 상세한 유동 구조와 공동의 형상비에 따른 유동특성을 조사하기 위하여 3차원 압축성 Naier-Stokes 방정식에 유한체적법을 적용하여 초음속 공동 유동장을 모사하였다. 본 수치해석으로부터 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

본 연구에 사용된 수치해석방법은 실험의 벽면 압력 값을 잘 예측하였으며, 초음속 내부 공동 유동을 모사 하기위해 매우 유용한 것으로 판단된다. 세 가지 공동의 형상에 대하여 공동의 유동구조는 z축의 중심면에 대하여 대칭을 이룬다. 공동의 형상비가 $L/D=1$ 인 경우, 공동내 유동 2차원 유동 구조를 나타낸다. 그리고 $L/D=2, 3$ 인

경우는 주볼텍스와 2차볼텍스를 가지며 3차원적인 유동 구조를 나타낸다. 그리고 또한 비정상 수치계산 결과에서 공동내의 압력은 실험결과와 같이 조화진동수를 가지고 변동하였으나, 실험결과와 다소 차이를 보이고 있다.

참 고 문 헌

1. K. Sakamoto, K. Fujii, Y. Tamira and K. Matsunaga, "Numerical Analysis of a Three Dimensional Cavity Flow Field in a Supersonic Duct," 日本機械學會論文集(B編), 96-0948.
2. K. Sakamoto, K. Matsunaga, K. Fujii and Y. Tamura, "Experimental Investigation of Supersonic Internal Cavity Flows," AIAA 95-2213, 1995.
3. K. Sakata, S. Honami and A. Tanaka, "Supersonic Air-Intake studies Aiming at Future Air-Breathing Engine," AIAA Paper 91-2012, 1991.
4. J. Seddon and E. L. Goldsmith, "Intake Aerodynamics," AIAA Education Series, 1985.
5. R. W. McDearmon, "Investigation of the Flow in a Rectangular Cavity in a Flat Plate at a Mach Number of 3.55," NASA TN D-523, 1960.
6. D. J. Maull and L. F. East, "Three-Dimensional Flow in Cavities," Journal of Fluid Mechanics, Vol. 16, part 4, 1963.
7. R. L. Stallings Jr. and F. J. Wilcox Jr., "Experimental Cavity Pressure Distributions at Supersonic Speeds," NASA TP-2683, 1987.
8. D. C. McCormick, "Shock/Boundary-Layer Interaction Control with Vortex Generators and Passive Cavity," AIAA Journal, Vol. 31, No. 1, 1993.
9. K. Sakamoto and K. Fujii, "Experimental Investigation of Cavity Flow Fields at Supersonic Speeds," The 3rd Asian Symposium on Visualization, 1994.