

초음속 공동유동에서 발생하는 압력변동의 제어

이영기* · 정성재** · 김희동***

Control of the Pressure Oscillations in Supersonic Cavity Flows

Youngki Lee* · Sungjae Jung** · Heuydong Kim***

ABSTRACT

The present study describes unsteady flow phenomena generated in a supersonic flow passing over a rectangular cavity and suggests a way of control of pressure oscillation, doing harm to overall performance and stable operation of aerodynamic and industrial applications. The three-dimensional, unsteady, compressible Navier-stokes equations are numerically solved based on a fully implicit finite volume scheme and large eddy simulation. The cavity flow are simulated with and without control methods, including a triangular bump and blowing jet installed near the leading edge of the cavity. The results show that the pressure oscillation is attenuated by both control techniques, especially near the trailing edge of cavity.

초 록

본 연구에서는 초음속 공동 주위에서 발생하는 비정상 유동현상을 이해하고, 공동시스템이 설치된 장치의 성능 및 안정적인 운전을 방해할 수 있는 공동유동의 압력진동을 제어할 수 있는 방법을 제시한다. 사각형의 공동을 지나는 초음속 유동장은 3차원 비정상 압축성 Navier-Stokes 방정식에 완전 내제적 유한체적법 및 large eddy simulation을 적용하여 수치모사하였다. 수치계산은 공동전단 근처에 설치된 삼각돌기나 블로잉 제트가 초음속 공동유동장의 유동특성에 미치는 영향을 조사하였다. 본 수치계산 결과로부터 이러한 제어방법들이 특히 공동후단 부근에서 발생하는 강한 압력진동을 억제하는데 효과가 있음을 알 수 있다.

Key Words: Compressible Flow(압축성 유동), Flow Control(유동제어), Shock Wave(충격파), Supersonic Cavity Flow(초음속 공동유동), Pressure Oscillation(압력진동)

1. 서 론

* 안동대학교 기계공학부
** Department of Energy and Environmental Engineering, Kyushu University
*** 안동대학교 기계공학부
연락처, E-mail: kimhd@andong.ac.kr

초음속 유동장에 설치된 공동시스템(cavity system)은 항공 및 산업의 많은 응용분야에 적용되고 있으며, 이에 관한 연구가 현재까지 활발

하게 수행 되고 있다[1]. 예를 들어 추진시스템의 초음속 공기 흡입구(supersonic air intake)에서 효율을 높이기 위하여 공동시스템이 적용되며, 초음속 압축의 최종단계에서 발생하는 수직 충격파로 인하여 발생하는 문제점을 줄이게 된다. 그러나 공동을 설치하는 경우, 공동내부에서 발생하는 압력진동은 시스템의 안정적인 운전을 방해한다. 또한 공동의 설계는 전체 시스템의 성능과 밀접한 관계를 가지게 되므로, 효율적인 공동시스템의 개발을 위하여 이러한 압력진동을 효과적으로 제어하기 위한 구체적인 연구가 필요하다.

초음속 공동유동에 관한 연구는 주로 외부유동에 대하여 수행되었으며, 공동을 적용한 항공기익(airfoil)의 항력감소에 관하여 관심이 집중되었다[2]. 한편 초음속 내부 유동장에서 공동이 적용된 경우, 공동전단에 블로잉 제트(blowing jet)를 설치하여 공동의 압력진동을 제어하기 위한 연구[3]가 수행되었다. 그러나 이러한 방법은 제트를 구동시키기 위한 부가적인 장치와 에너지가 필요하게 되어, 시스템의 중량을 증가시킬 뿐만 아니라 유동제어를 위한 추가비용을 발생시킨다.

본 연구에서는 이러한 단점을 극복할 수 있는 피동제어법으로서 공동의 전단에 작은 삼각돌기를 설치하여 공동 내의 압력진동을 제어하는 방법을 수치모사하였다. 수치계산에서는 3차원 비정상 압축성 Naier-Stokes 방정식에 유한체적법을 적용하여 공동내부에서 발생하는 압력진동을 조사하고, 블로잉 제트 및 삼각돌기를 설치하여 얻어진 결과를 비교하였다.

2. 수치해석

Figure 1은 본 연구에 적용된 초음속 공동시스템의 개략도를 나타낸다. 공동의 높이(D)와 폭(W)은 20mm와 40mm이며, 공동 위를 지나는 유동의 마하수(M)는 1.8이다. 공동 내부의 압력은 공동의 바닥(No.1)과 공동하류벽면(No.2와 No.3)의 세 지점에서 측정하였으며, 측정된 데이터는 FFT변환을 통한 주파수 분석을 하였다. 그림에서 압력진동을 제어하기 위하여 공동전단

부근에 설치된 블로잉 제트출구와 정삼각형 단면을 가지는 2차원 돌기(이하 삼각돌기)는 공동의 좌측 모서리에서 1.5mm상류에 위치하며, 크기는 유로 높이의 2.5%로 설정하였다.

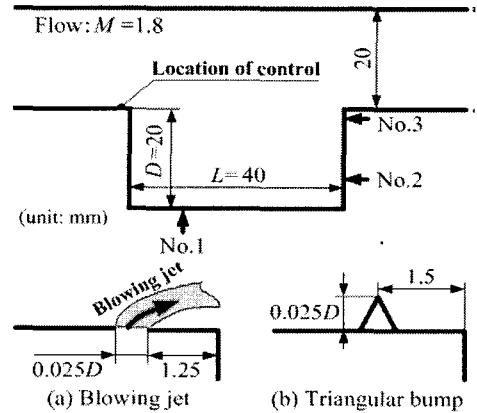


Fig. 1 Schematic diagram of the testing model

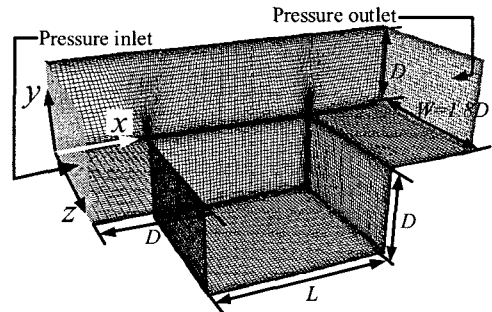


Fig. 2 Computational grid and boundary conditions

Figure 2는 수치해석에 적용된 계산영역과 경계조건을 나타낸다. 전체 계산영역은 폭 $4D$, 높이 $2D$ 이며, 경계조건은 유로입구에 전압과 전온도를, 유로출구에 정압을 적용하였다. 블로잉 제트가 있는 경우, 제트출구에는 mass flow inlet 조건을 적용하였으며 유량은 약 0.0067 kg/s 이다. 계산영역의 격자점은 약 70만개이며, 경계층이 발달하는 벽 주변, 전단층, 유동이 복잡한 제트출구나 삼각돌기 주변과 공동내부에 격자를 집중시켰다. 초음속 공동 유동의 복잡한 난류 현상을 모사하기 위해 상용코드인 Fluent 6를 사용하였으며, Smagorinsky-Lilly 모델을 적용한 LES 계산을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

Figure 3은 공동 주변에서 주기적으로 발생하는 압력의 변동을 약 한 주기 동안 나타낸 것이다. 공동 벽면의 압력은 공동의 하류 모서리 위치인 $x/D=5$ 에서 급격하게 증가하여 최대값을 가진다. $x/D>1$ 인 경우, 벽면의 압력은 시간이 지남에 따라 진동하고, $4<x/D<5$ 영역에서 압력의 변동 폭이 가장 크게 나타난다. 이는 전단층 주위에서 발생하는 유동장의 변화가 공동 하류 벽면에 가장 큰 영향을 미치기 때문이다.

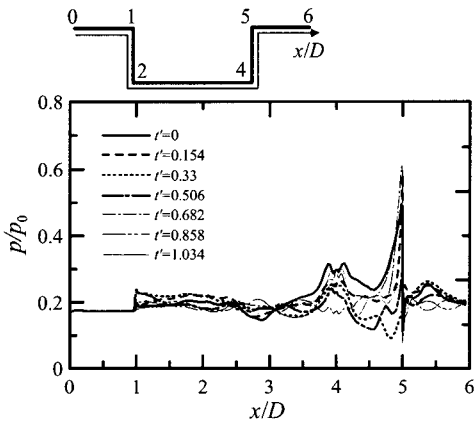


Fig. 3 Static pressure distributions along the cavity without control

Figure 4는 공동전단에 삼각돌기가 없는 경우 공동에서 일어나는 압력변동 과정을 알아보기 위하여, 시간의 경과에 따른 등밀도 및 등압력선도의 변화를 나타내었다. 그림에서 t' 은 유동시간을 진동하는 압력의 dominant frequency의 주기로 무차원한 값이며, 삼각돌기가 없는 경우의 dominant frequency는 11 kHz이다. $t'=0$ 인 경우, 공동의 상류 모서리로부터 전단층이 수평적으로 발달하며 공동내부에는 저압과 고압 영역이 발생하고 전단층이 상하로 움직인다. $t'=0.33$ 인 경우, 전단층을 따라 발달한 저압영역이 공동의 하류 모서리에 도달하여 모서리 부근의 압력은 낮아진다. 한편 $t'=0.66$ 인 경우는 전단층 주위에서 발생하는 고압의 유동이 하류 모서리에 도달하여 압력을 상승시키며, 이후 이러한 고압의 유동은 공동의 상류 영역으로 전파한다. 결국, 저압 및 고압영역이 하류 모서리에서 순차적으로 발생하며 상류로 전파하는 현상은 반복적으로 나타나므로, 공동 내부에서는 주기적인 압력진동이 일어난다.

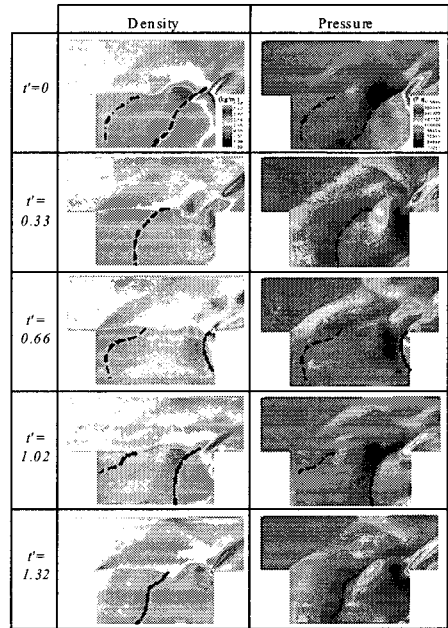


Fig. 4 Variation of flow structure in time without control

Figure 5는 삼각돌기나 블로잉 제트의 유무에 따라 발생하는 공동벽면 각 지점에서의 압력진동을 비교한 결과이다. 벽면의 압력은 입구전압으로 무차원하여 2.5ms 동안 나타내었다. 세 경우 모두 공동후단에 가까울수록 압력진동이 심하게 일어난다. Fig 5(b)에서 RMS값을 비교해 보면, No.1 과 No.2의 RMS값은 다소 증가 하였으나 No.3의 RMS값은 삼각돌기를 설치하지 않은 경우보다 약9.5% 감소하였다. 한편 블로잉을 하는 경우, 모든 측정점에서 진폭은 유사하지만 진동수는 크게 감소하였다.

Figure 6과 Fig 7은 공동 내의 각 지점에서 발생하는 압력진동을 주파수 해석한 결과이다. 그림에서 삼각돌기를 설치하면 dominant frequency는 증가하며, No.1과 No.2에서는 압력진동 에너지가 증가하지만 No.3에서는 감소하는 경향을 나타낸다. 따라서 No.3 지점의 압력변동의 영향이 지배적이라는 점을 감안하면, 공동 전방에 삼각돌기를 설치함에 따라 공동내의 압력은 간헐적으로 큰 압력변동이 발생하지만 전체적인 압력진동은 다소 감소 한다는 점을 알 수 있다. 한편, 블로잉을 하는 경우, 압력진동 에너지는 대부분 15 kHz 이하의 저주파 영역에서 집중되며, 공동 전체에 걸쳐 압력진동이 감소한다. 특히, 공동후단 부근의 압력진동은 삼각돌기가 있는 경우보다 더욱 크게 감소하였다.

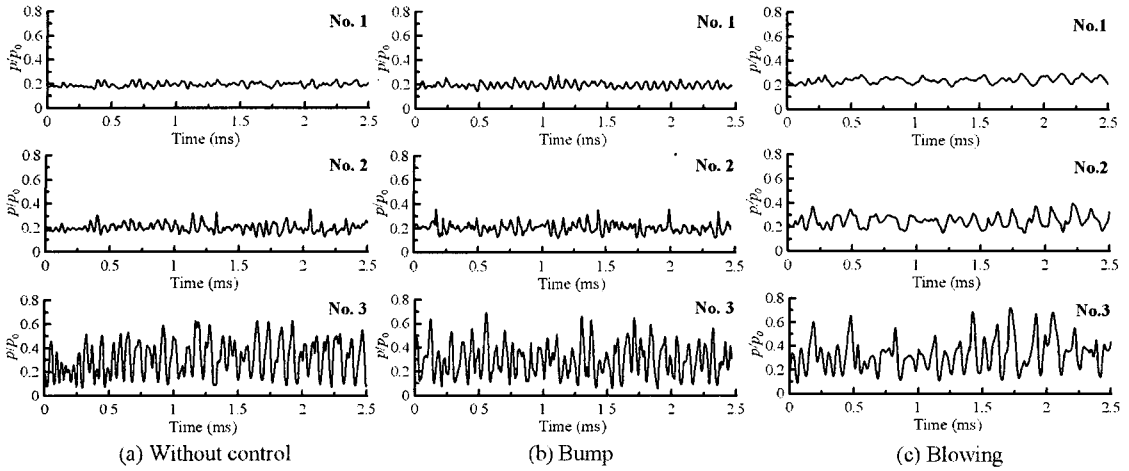


Fig. 5 Pressure oscillation at the cavity wall with and without control

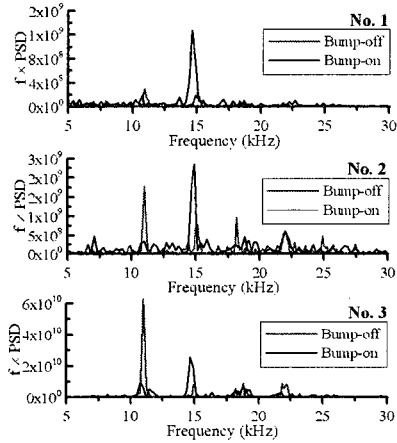


Fig. 6 Pressure spectra at the cavity wall with and without a bump

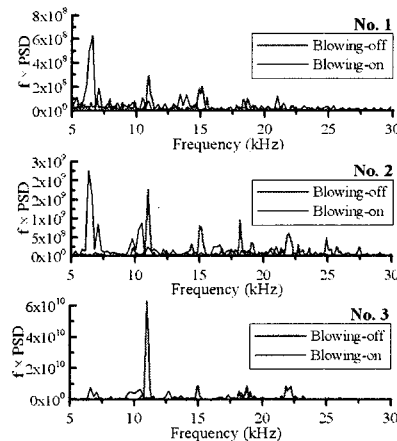


Fig. 7 Pressure spectra at the cavity wall with and without blowing

4. 결 론

본 연구에서는 초음속 공동유동에서 발생하는 압력진동을 제어 할 수 있는 효과적인 제어법을 개발하기 위하여 공동전단 주위에 설치된 삼각돌기 및 블로잉 제트가 공동내부의 압력진동에 주는 영향을 조사하였다. 본 연구의 결과로부터, 공동후단 부근의 압력진동이 지배적으로 나타나며, 블로잉을 하면 이러한 압력진동이 크게 감소함을 알 수 있었다. 삼각돌기를 설치한 경우도, 공동후단에서의 압력진동을 다소 감소시키는 효과를 얻을 수 있었으나, 효과적인 제어를 위해서는 적절한 돌기의 크기 및 위치 등을 제시할 수 있는 체계적인 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

1. 김희동, "고속철도의 공기역학 I~IV," 대한 기계학회 학회지 제36권 1호, 제36권 3호, 제36권 5호, 제36권 10호, 1996
2. Kim, H. D. and Setoguchi, T., "Passive Control of Impulsive Noise Caused by Unsteady Compression Wave," ASME Trans. Journal Fluid Engineering, 1996
3. Zhuang, N., Alvi, F. S., Alkisslar, M. B. and Shih, C., "Aeroacoustic Properties of Supersonic Caivy Flows and Their Control," AIAA 2003-3101, 2003