

Sub-cavity를 이용한 초음속 공동유동의 압력진동 제어

이영기* · 정성재** · 김희동***

Control of the Pressure Oscillation in a Supersonic Cavity Flow Using a Sub-cavity

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

ABSTRACT

The present study aims at investigating the effectiveness of a new passive cavity flow control technique, sub-cavity. The characteristics of cavity flow oscillation with the device are compared with those with other control techniques tested previously, including a triangular bump and blowing jet. In the computation, the three-dimensional, unsteady Navier-Stokes equations governing the supersonic cavity flow are solved based on an implicit finite volume scheme spatially and multi-stage Runge-Kutta scheme temporally. Large eddy simulation (LES) is carried out to properly predict the turbulent features of cavity flow. The present results show that the pressure oscillation near the downstream edge dominates overall time-dependent cavity pressure variations, and the amplitude of the pressure oscillation can be reduced in the presence of a sub-cavity.

초 록

본 연구에서는 sub-cavity를 적용한 경우 얻어지는 압력진동의 제어효과를 수치계산 방법을 사용하여 조사하였으며, 삼각돌기와 블로잉제트를 사용하여 얻어진 결과들과 비교하여 그 효율성을 검토하였다. 사각형의 공동을 지나는 유동장은 3차원 비정상 압축성 Navier-Stokes 방정식에 완전 내제적 유한체적법 및 다단계 Runge-Kutta 방법을 적용하여 수치모사하였으며, 공동유동의 난류상태량들을 적절히 예측하기 위하여 large eddy simulation(LES)을 수행하였다. 본 연구의 결과로부터, 공동후단 부근에서 발생하는 압력진동이 전체 공동유동의 비정상 거동을 지배하며, sub-cavity를 사용하여 압력진동의 폭을 감소시킬 수 있음을 알았다.

Key Words: Compressible Flow(압축성 유동), Passive Flow Control(피동적 유동제어), Pressure Oscillation(압력진동), Supersonic Cavity Flow(초음속 공동유동)

1. 서 론

* 안동대학교 기계공학부

연락저자, E-mail: ylee@andong.ac.kr

** Kyushu 대학교 총합이공학부

*** 안동대학교 기계공학부

최근 항공우주분야의 기술력 확보가 국가적으로 중대한 과제로 부각되면서, 초음속 유동장에

설치된 공동시스템(cavity system)에 대한 연구가 국내에서도 관심을 끌고 있다. 초음속 공동시스템의 궁정적인 효과의 예로, 내부에 안정된 와의 구조를 가지는 형태로 공동이 설계되면 마찰항력(friction drag)이 감소하여 항공기 익(airfoil)의 항력을 저감시키는 도구로 사용될 수 있다 [1]. 또한, 추진시스템의 초음속 공기 흡입구(supersonic air-intake)에서 효율을 높이기 위하여 적용된 공동시스템은, 초음속 압축의 최종단계에서 발생하는 수직충격파로 인하여 발생하는 문제점을 줄이게 된다[2]. 그러나 공동을 설치하는 경우, 일반적으로 공동내부에서 발생하는 압력진동은 시스템의 안정적인 운전을 방해한다. 또한, 공동의 설계는 전체 시스템의 성능과 밀접한 관계를 가지게 되므로, 이러한 압력진동을 효과적으로 제어하기 위한 방법을 고안할 필요가 있다.

공동유동에 대한 능동적(active) 혹은 피동적(passive) 압력진동 제어방법에 관한 연구들은 종래에는 주로 실험적 방법들을 통하여 수행되었다. 그러나 실험적 방법만으로는 유동의 물리를 자세히 이해하는데 어려움이 있으며, 제어방법의 최적설계를 위한 설계변수 조사를 위한 비용이 많이 드는 단점이 있기 때문에, 최근에는 LES 방법을 적용한 수치계산적 연구들이 수행되고 있다[3].

공동유동의 압력진동을 감소시키기 위하여 피동제어법을 사용하는 경우, 제어장치의 설계는 시스템의 특정 작동조건에 제약을 받는 경우가 대부분이므로, 넓은 범위의 작동조건에 대하여 효과적인 제어성능을 낼 수 있는 능동제어법[4]이 더욱 선호되어온 것이 사실이다. 그러나 능동제어법은 제트유동과 같은 에너지를 만들어 내기 위한 부가적인 장치가 필요하므로, 시스템의 중량을 증가시킬 뿐만 아니라 유동제어를 위한 부가비용을 발생시킨다. 따라서 비교적 넓은 유동조건에 대하여 적용될 수 있으며, 공동의 주요형상을 크게 변화시키지 않으면서 설계가 간단한 피동제어기구의 개발을 위한 연구는 실용적인 면뿐만 아니라 학술적으로도 가치가 있다.

본 연구는 이를 위한 기초단계로서, sub-cavity

를 부착한 3차원 공동유동의 진동특성을 수치해석적인 방법으로 조사하고, 본 제어기구의 효율성을 기존에 제시된 제어방법들과 비교하였다.

2. 수치계산방법

Figure 1에는 본 연구에서 사용된 초음속 공동모델과 유동의 압력진동의 제어를 위하여 사용된 기구들을 개략적으로 나타내었다. 그림에서 사각공동은 높이 20 mm의 사각덕트 내부에 설치되어 있으며, 공동의 깊이(D)는 20 mm이다. 공동의 길이(L)와 폭(W)은 각각 $2.0D$ 와 $1.8D$ 로 설계되어 있으며, 상류로부터 공동으로 유입되는 주유동의 마하수(M)는 1.8이다. 공동 내부의 비정상 압력 변동은 공동의 바닥(No.1)과 하류벽면(No.2 와 No.3)의 세 지점에서 측정하였으며, 측정된 데이터는 FFT변환을 통한 주파수 분석을 하여 공동유동의 진동특성을 조사하였다.

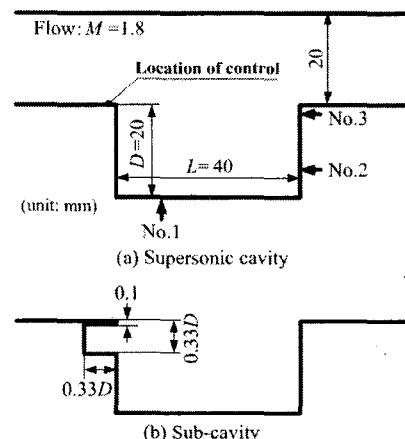


Fig. 1 Supersonic cavity model

초음속 공동유동의 압력진동 제어기구로 사용된 sub-cavity는 공동의 전단 바로 아래에 위치하며, 전단으로부터 $1/3D$ 의 깊이와 길이를 가지고, 상부벽면에 대하여 0.1 mm의 거리를 가진다. 이와 비교를 위한 제어기구들로는 삼각돌기 [5]와 블로잉 제트(blowing jet)가 사용되었다. 제트 슬릿은 삼각돌기와 동일한 위치와 크기로 적

용하였으며, 0.0067 kg/s의 질량유량이 슬릿을 통하여 주유동으로 유입된다.

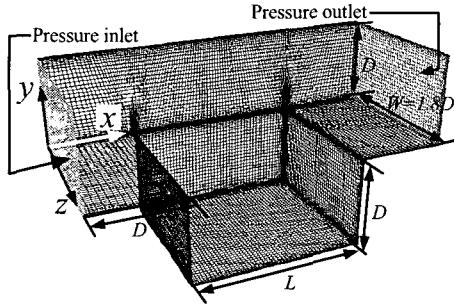


Fig. 2 Computational domain and boundary conditions

Figure 2는 수치해석에 사용된 계산영역과 경계조건을 나타낸다. 덕트에 대한 계산영역은 길이 4D로 $130 \times 45 \times 64$ 개의 육면체 셀로 구성되어 있으며, 제어기구를 설치하지 않은 단순 공동은 $70 \times 45 \times 65$ 개의 셀로 되어있다. 경계조건으로, 덕트 입구에 대하여 전압과 전온도를, 덕트 출구에 대하여 정압을 적용하였다. 덕트와 공동의 모든 벽면에는 단열 no-slip 벽조건을 사용하였으며, 블로잉을 하는 경우에는 슬릿 출구에 mass flow inlet 조건을 적용하였다. 공동유동장의 비정상 특성은 3차원 비정상 Navier-Stokes 방정식에 완전 내제적 유한체적법과 다단계 Runge-Kutta 방법을 적용하여 수치해석적으로 조사되었다. 또한, 초음속 공동유동의 난류상태량들을 적절히 예측하기 위하여 Smagorinsky-Lilly 모델을 적용한 LES를 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

Figure 3은 시간이 경과함에 따라 공동벽면에서 발생하는 압력변동으로 입구전압으로 무차원하여 2.5 ms동안 나타내었다. 그림의 결과에서, 두 경우 모두 공동후단에 가까울수록 압력진동이 더욱 심하게 발생하지만, sub-cavity를 설치함으로서 진동수는 약간 늘어나지만 진폭은 크게 줄어듦을 알 수 있다.

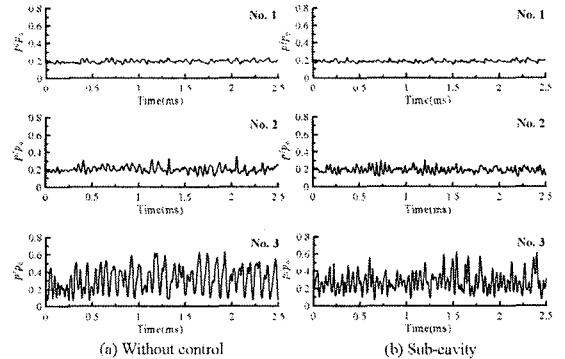


Fig. 3 Time histories of cavity wall pressure with and without control

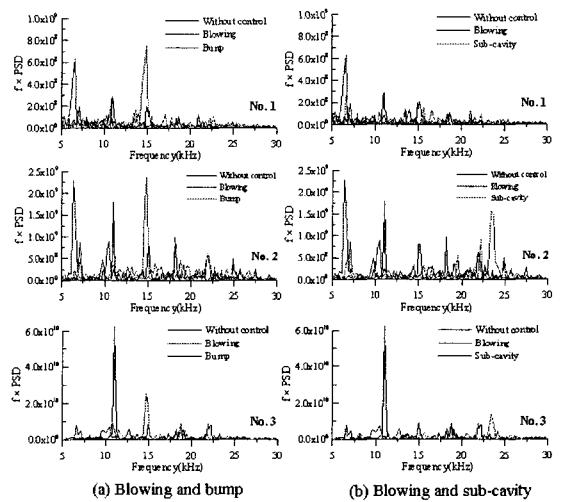


Fig. 4 Pressure spectra at the cavity wall with and without control

Figure 4는 공동유동의 진동특성을 더욱 자세히 조사하기 위해서 시간변동압력에 대하여 주파수 분석을 한 결과를 나타내었다. 모든 결과에서 가장 심각한 압력진동과 $f \times PSD$ 의 최대피크 값은 제어기구의 유무에 관계없이 No.3에서 발생한다. 삼각돌기를 설치한 경우, No.3에서 진동에너지의 감소는 관찰되지만 전체적인 제어효과는 그다지 뚜렷하지 못하였다. 반면에 블로잉을 한 경우는 공동 전체에 걸쳐 압력진동이 감소하며, 특히 삼각돌기에 비하여 공동후단 부근에서 더욱 뚜렷한 제어효과를 보였다. 한편, sub-cavity를 사용한 경우에는 dominant frequency

가 다소 증가하지만 PSD 레벨은 큰 폭으로 감소했으며, 두 피동제어기구들을 비교하면 sub-cavity가 압력진동 제어에 훨씬 효과적임을 알 수 있다.

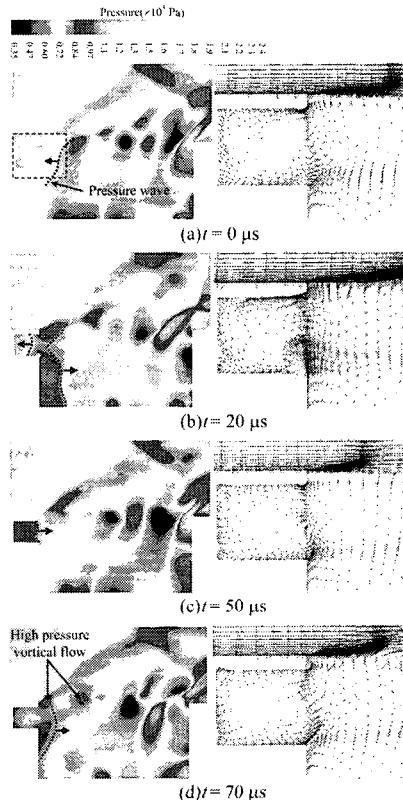


Fig. 5 Flow structures with a sub-cavity ($z/D=0.75$)

Figure 5는 sub-cavity를 설치한 경우, 시간 경과에 따라 변화하는 공동내부의 유동장을 등압력 선도와 속도벡터를 사용하여 조사한 결과이다. 공동전단으로부터 하류로 발달하는 전단층을 따라 고압과 저압의 와류가 연속적으로 발생하고 있으며, 전단층의 고압부가 후단벽면에 충돌하여 벽면주위에는 높은 압력의 유동이 형성된다. 시간이 경과함에 따라, 이러한 고압의 유동은 압력파의 전파에 이어 상류로 순환하고, sub-cavity에서 발생하는 와유동과 간섭하면서 공동전단의 전단층에 영향을 준 후에 다시 하류

로 전파한다. 따라서 Fig. 4에서 관찰된 압력진동에너지의 감소는, 와유동 간의 간섭이 전단층의 상단을 가진(excitation)하는 고압의 유동을 다소 완화시킨 결과임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 초음속 공동유동에 적용된 sub-cavity의 압력진동 제어효과를 LES 방법을 통하여 수치해석적으로 조사하였다. 공동유동의 진동특성은 주로 공동의 후단벽면에서 발생하는 압력진동에 의해 지배되며, 제어기구의 효과는 공동의 후단에서 가장 크게 나타났다. 기존에 제시되었던 삼각돌기나 블로잉과 비교하여 sub-cavity의 제어효과가 상대적으로 큰 것으로 조사되었지만, 실용적인 공동시스템 설계에 반영되기 위해서는 sub-cavity의 크기와 관련하여 보다 체계적인 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

1. Sinha, N., Arunajatesan, S., Shipman, J. D. and Seiner, J. M., "High Fidelity Simulation and Measurements of Aircraft Weapons Bay Dynamics," AIAA-2000-1968, 2000
2. Seddon, J. and Goldsmith, E. L., Intake Aerodynamics, AIAA Education Series, 1985
3. Lillberg, E. and Fureby, C., "Large Eddy Simulations of Supersonic Cavity Flow," AIAA-2000-2411, 2000
4. Smith, B. R., "Computational Simulation of Active Control of Cavity Acoustics," AIAA-2000-1927, 2000
5. 이영기, 정성재, 김희동, "초음속 공동유동에서 발생하는 압력변동의 제어," 한국추진공학회 추계학술대회 논문집, 2005, pp.117-120