

# 피동제어법을 이용한 초음속 공동유동의 진동 제어

이영기\* · Srikanth Deshpande\*\* · 김희동\*\*\*

## Control of Supersonic Cavity Flow Oscillation Using Passive Means

Youngki Lee\* · Srikanth Deshpande\*\* · Heuydong Kim\*\*\*

### ABSTRACT

The effectiveness of two passive control techniques for alleviating the pressure oscillation generated in a supersonic cavity flow is investigated numerically. The passive devices suggested in the present research include a triangular bump and a sub-cavity installed near the upstream edge of a rectangular cavity. The supersonic cavity flow characteristics are examined by using the three-dimensional, unsteady Navier-Stokes computation based on a finite volume scheme. Large eddy simulation (LES) is carried out to properly predict the turbulent features of cavity flow. The results show that the pressure oscillation near the downstream edge dominates overall time-dependent cavity pressure variations. Such an oscillation is attenuated more considerably using the sub-cavity compared with other methods, and a larger sub-cavity leads to better control performance.

### 초 록

본 연구에서는 초음속 공동유동장에서 발생하는 압력 진동을 완화시키기 위하여 사용된 두 가지 피동제어방법들의 유효성을 수치해석적으로 조사하였다. 사용된 제어 장치들은 삼각돌기와 sub-cavity로, 전단층의 발달 특성을 조절하기 위하여 공동 전단 부근에 설치된다. 공동유동의 압력변동 특성을 조사하기 위하여 3차원 비정상 Navier-Stokes 방정식에 유한체적법을 적용하여 유동장을 모사하였으며, 유동의 난류상태량들은 LES 방법을 사용하여 계산하였다. 그 결과, 공동유동의 진동 특성은 공동의 후단 벽면에서 발생하는 압력 진동에 의해 지배되며, 제시된 방법들의 효과는 공동의 후단에서 가장 크게 나타났다. 특히, sub-cavity는 삼각돌기나 블로잉이 있는 경우에 비하여 압력 진동 저감효과가 상대적으로 크며, sub-cavity가 큰 경우 압력 진동의 저감효과가 더욱 뚜렷하게 나타났다.

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

\* 안동대학교 기계공학부

\*\* 안동대학교 대학원 기계공학부

\*\*\* 안동대학교 기계공학부

연락처, E-mail: kimhd@andong.ac.kr

### 1. 서 론

공동유동(cavity flow)에서 발생하는 소음/진

동에 관한 연구는 1950년대부터 본격화 되어, 지난 수십 년간 이루어진 항공우주 산업의 급속한 발전과 더불어 제시된 다양한 주제들과 관련하여 현재까지 지속적으로 이루어져오고 있다. 과거 공동유동의 진동과 관련된 연구는 주유동의 유속에 따라 공동의 깊이나 길이 변화가 공동유동장 특성에 주는 영향[1]이나 유동특성을 고려한 공동유동의 연구방법 개발[2]과 관련한 내용들이 주를 이루었다.

아음속 공동유동은 초음속 공동유동에 비하여 그 적용분야도 분야도 매우 다양할뿐더러, 수치해석법을 이용하는 경우 계산영역의 경계조건 문제와 같이 초음속에서는 발생하지 않는 많은 사항들이 고려되어야 하므로, 상대적으로 더욱 다양한 해석방법들이 개발되어 왔다[3]. 이에 반하여, 초음속 공동유동의 연구에 대한 관심은 레이더 신호를 최소화시킬 수 있는 스텔스 항공기의 weapon bay 개발과 관련하여 비교적 근래에 시작되었다고 볼 수 있다. 초음속 비행에서는 공동의 형상이 외부로 노출될 때 공동내부에서 발생하는 압력 진동이 추가적인 항력, 버페팅(buffeting), 음향피로(acoustic fatigue) 등을 유발시키게 되며, 이러한 현상들을 해석하고 최소화시켜 비행효율과 안정성을 향상시키기 위한 많은 연구들이 현재까지 이루어지고 있다[4].

기존에 제시된 압력 진동의 피동제어 방법들은 대부분 시스템의 특정 작동조건에 제약을 받는다. 따라서 비교적 넓은 유속 범위에 대하여 적용될 수 있고, 공동의 주요 형상을 크게 변화시키지 않으면서 설치가 간단한 제어장치의 개발을 위한 연구는 실용적인 면뿐만 아니라 학술적으로도 가치가 있다. 이에 본 연구에서는 삼각돌기(triangular bump)와 sub-cavity를 적용한 초음속 공동유동장을 상세히 수치모사하고, 제어장치들의 효과를 블로잉 제트(blowing jet)를 사용한 기존의 결과와 비교하였다.

## 2. 연구방법

Figure 1에는 본 연구에서 사용된 초음속 공동 모델과 유동의 압력 진동의 제어를 위하여 사용된 기구들을 개략적으로 나타내었다. 그림에서 사각공동은 높이 20 mm의 사각덕트 내부에 설치되어 있으며, 공동의 깊이  $D$ 는 20 mm이다.

또한, 공동의 길이  $L$ 과 폭  $W$ 는 각각  $2.0D$ 와  $1.8D$ 로 설계되어 있으며, 상류로부터 공동으로 유입되는 주유동의 마하수  $M$ 은 1.8로 계산된 모든 경우에 대해서 동일하다. 공동 내부의 비정상 압력 변동은 공동의 바닥(No.1)과 하류 벽면(No.2 와 No.3)의 세 지점에서 측정하였으며, 측정된 데이터는 FFT변환을 통한 주파수 분석을 하여 공동유동의 진동특성을 조사하였다.

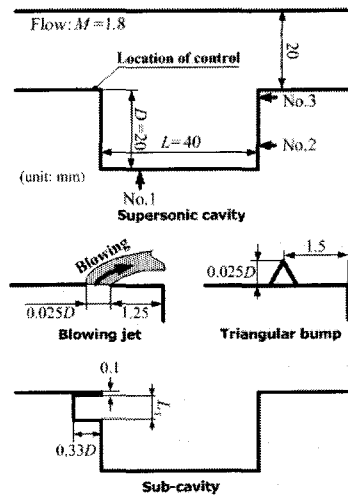


Fig. 1 Supersonic cavity and control devices

초음속 공동유동의 압력 진동 제어기구로는 삼각돌기와 sub-cavity가 사용되었다. 정삼각형 단면을 가지는 2차원 돌기(이하 삼각돌기)는 공동의 전단 모서리에서 1.5mm상류에 위치하며, 크기는 유로 높이의 2.5%로 설정하였다. 그림에는 삼각돌기와 동일한 위치와 크기로 설치된 블로잉 제트 슬릿(blowing jet slit)이 함께 주어져 있으며, 다른 피동제어 방법들을 사용하여 얻은 결과들과 비교할 목적으로 테스트하였다. 한편 sub-cavity는 공동의 전단 바로 아래에 설치되며, 전단으로부터  $1/3D$ 의 깊이와  $L_s$ 의 길이를 가지고, 상부 벽면에 대하여 0.1 mm 지점에 위치한다.

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  $0.0067 \text{ kg/s}$ 이다. 계산 영역의 격자점은 약 70만개 이며, 경계층이 발달

하는 벽 주변, 전단층, 유동이 복잡한 제트출구나 삼각돌기 주변과 공동내부에 격자를 집중시켰다. 초음속 공동주변에서 발생하는 복잡한 난류유동 특성을 적절히 모사하기 위하여 Smagorinsky-Lilly 모델을 적용한 LES계산을 수행하였다.

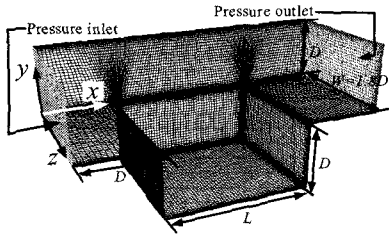


Fig. 2 Computational grids and boundary conditions

### 3. 결과 및 고찰

Figure 3은  $L/D=3$ 인 경우에 덕트 하부 벽면과 공동 벽면의 중심을 따르는 압력분포를 나타낸 것으로, Sakamoto 등[5]의 실험모델을 사용하여 얻은 결과이다. 그림에서  $x/D$ 는 벽면을 따르는 거리이며, 벽면압력은 압력계수  $C_p$ 로 나타내었다. 계산 결과는 거리가 증가함에 따라  $x/D=1, 5$  및 6 지점에서 압력이 급격히 증가하는 실험결과를 정량적으로 잘 예측하므로, 본 연구의 계산방법이 초음속 공동유동의 수치모사에 유효한 것으로 판단된다.

Figure 4는 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 공동 하류 벽면에서 발생하는 유동장의 변화가 공동유동장의 전체적인 진동을 지배함을 나타낸다.

Figure 5는 시간이 경과함에 따라 공동 벽면에서 발생하는 압력변동을 나타낸 것으로, 압력 진동 제어를 하지 않은 경우와 제어장치를 사용하여 얻은 결과를 비교하였다. 네 경우 모두 공동후단에 가까울수록 압력 진동이 더욱 심하게 발생한다. Fig. 5a와 Fig. 5c의 RMS값을 비교해 보면, 삼각돌기를 설치한 경우 No.3의 RMS값이 약 9.5% 감소하지만 다른 측정점들에서는 큰 효과가 없다. 반면, sub-cavity의 경우 진동수는 약간 늘어나지만 진폭은 전체적으로 크게 줄어드는 결과를 얻었다.

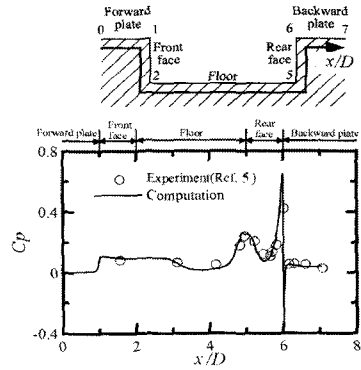


Fig. 3 Static pressure distributions ( $L/D=3$  and  $M=1.83$ )

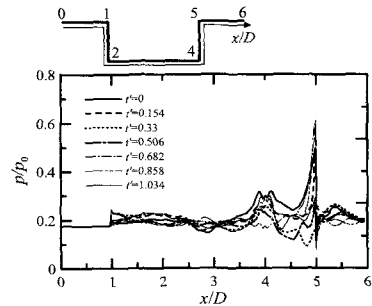


Fig. 4 Static pressure variations with time (without control)

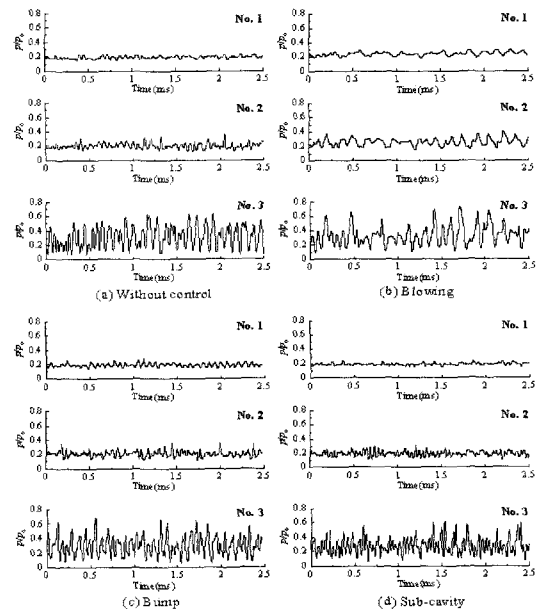


Fig. 5 Time histories of cavity wall pressure with and without control

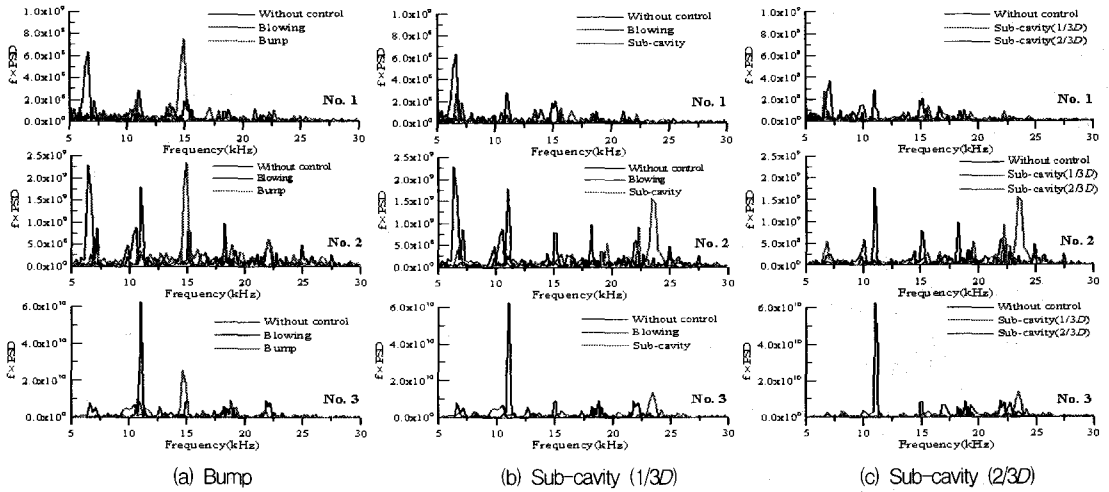


Fig. 6 Pressure spectra with and without control

Figure 6에는 예측된 시간변동압력에 대하여 주파수 분석을 한 결과를 나타내었다. 삼각돌기를 설치하면 No.1과 No.2 에서는 압력 진동에너지가 약간 증가하지만, 지배적인 진동이 발생하는 No.3에서는 크게 감소한다(Fig. 6a). 따라서 전체적인 압력 진동이 다소 감소하는 것으로 판단되지만, 그 효과는 다른 제어방법들과 비교하여 그다지 뚜렷하지 않다. 한편, sub-cavity를 사용한 경우에는 dominant frequency가 다소 증가하지만 PSD레벨이 큰 폭으로 감소한다. 이것은 주로 sub-cavity에서 발생한 와류가 전단층의 상류로 전파되어 오는 압력파를 동반한 유동의 에너지를 상쇄하는 효과 때문이며, sub-cavity의 크기가 큰 경우(Fig. 6c)에 그 경향은 더욱 뚜렷하게 관찰된다. 두 결과에서, 블로잉과 비교하여 삼각돌기 보다는 sub-cavity가 초음속 공동유동의 압력 진동에 보다 효과적임을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구는 초음속 공동유동의 압력 진동을 완화시키기 위하여 사용된 피동장치인 삼각돌기와 sub-cavity의 제어효과를 수치해석적으로 조사하였다. 3차원 비정상 Navier-Stokes 방정식에 LES 방법을 적용하여 공동유동장을 해석한 결과, 유동의 진동특성은 공동의 후단 벽면에서 발생하는 압력진동에 의해 지배되며, 제시된 방법들의 효과는 공동의 후단에서 가장 크게 나타났다. 특

히, sub-cavity는 삼각돌기나 블로잉이 있는 경우에 비하여 압력 진동 저감효과가 상대적으로 크며, sub-cavity의 크기가 큰 경우 그 제어효과는 더욱 뚜렷한 것으로 조사되었다.

#### 참 고 문 헌

1. Maull, D. J. and East, L. F., "Three-Dimensional Flow in Cavities," J. Fluid Mechanics, Vol. 16, 1963, pp.620-632.
2. Bilanin, A. J. and Covert, E. E., "Estimation of Possible Excitation Frequencies for Shallow Rectangular Cavities," AIAA J., Vol. 11, 1973, pp.347-351.
3. Hardin, J. C. and Pope, D. S., "Sound Generation by Flow Over a Two-dimensional Cavity," AIAA J., Vol. 33, No. 3, 1995, pp.407-412.
4. Jeng, Y. N. and Payne, U. J., "Numerical Study of a Supersonic Open Cavity Flow and Pressure Oscillation," J. Aircraft, Vol. 32, No. 2, 1995, pp.363-369.
5. Sakamoto, K., Fujii, K., Tamira, Y. and Matsunaga, K., "Numerical Analysis of a Three Dimensional Cavity Flow Field in a Supersonic Duct," JSME J. B, 96-0948, 1996.