

## 초음속 Cavity 내에서의 압력 진동 특성 연구

김형준, 김세훈, 권세진, 박근홍

### An investigation of pressure oscillation in supersonic cavity flow

Hyungjun Kim\*, Sehoon Kim\*\*, Sejin Kwon\*\*\* and Kunhong Park\*\*\*\*

**Keywords :** Fluid Engineering, supersonic, cavity, oscillation

#### Abstract

Experimental investigation of the flow field of supersonic cavity is described. In this research, supersonic cavity is used in chemical laser system. For efficient laser, downstream flow after cavity need to be uniform and clear for pressure recovery system. In previous research, it's known that there's oscillation in cavity and is due to Mach number and L/D ratio. A strong recompression occurs at the after wall and the flow is visibly unsteady. Cavity flow in this research is of the open type, that is, length-to-depth ratio  $L/D < 10$  at  $M = 3$ . Experiment is done with pressure measurement by piezo-type sensor and visualization by Schlieren method. The time-dependent experimental result is compared with computation.

#### 1. 서론

Cavity 유동은 오래 전부터 연구되어 온 고전적인 문제 중 하나이다. 주로 internal flow에서 나타나게 되는 것으로 초음속 유동의 경우, cavity 내부에서 shear layer의 fluctuation으로 인해 내부의 유동이 복잡하게 된다. 특히 화학레이저에서 레이저 발진에 사용되는 cavity의 경우, 반응물질을 cavity 앞의 다단노즐을 통하여 보내주고, 이들을 반응시켜 cavity에서 발진을 시킨다. 이는 화학레이저에서 사용되는 반응물질이 강한 산성을 띄고 있어서 레이저 발진이 일어나는 거울에 닿는 것을 방지하기 위해서이다.

일반적으로 cavity 내부의 vortex의 생성과 소멸로 인해 cavity 내부의 압력이 진동한다고 알려져 있는데, 이러한 특성은 마하수와 cavity의 형태, 즉  $L/D$  ( $L$ : length of cavity,  $D$ : depth of cavity)에 의해 결정된다. 그리고  $L/D = 1$ 인 경우, cavity 내의 압력 변동은 일정하고 규칙적인 것으로 알려져 있다. 그러나  $L/D = 2-3$  이상으로 커지게 되면 압력 변동(pressure fluctuation)은 불규칙적으로 바뀐다. 이는  $L/D = 2-3$  이상이 되면 소위 말하는 'open cavity'가 되어 초음속의 상류 영역에서 발달된 shear layer가 cavity의 뒷벽에 영향을 주기 전에 cavity 바닥쪽으로 먼저 영향을 주어 cavity 내부에서 vortex가 발생하기 때문이다.

Cavity에서는 위에서 밝힌 것처럼, 내부의 압력 변동으로 인해 후류에서의 압력으로 인한 항력이 크게 증가하게 된다. 이를 해결하기 위해서 [그림 1]에서처럼, cavity의 뒷벽을 곡선으로 처리하기도 한다. 이는 cavity 뒷벽에서 발생하는 recompression shock의 생성을 방해하여 후류로 유동이 shock에 영향을 받지 않도록 하기 위함이다.

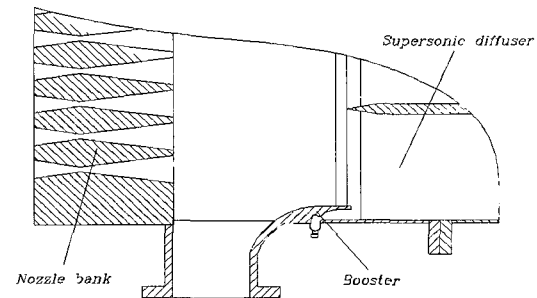


그림 1 Cavity and booster in chemical laser

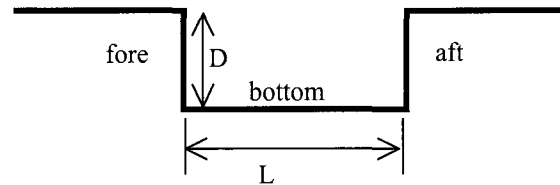


그림 2 Description of cavity

이번 연구에서는 cavity내의 압력 특성을 실험적 방법과 계산을 통하여 알아보고, 후류 영역에 boosting nozzle을 설치하였을 경우, 그 영향을 계산을 통하여 알아보기로 한다. 실험에서는 설계마하수 3인 초음속 노즐을 이용하여  $L/D = 5/3$ 인 cavity에서 Schlieren method를 이용하여 cavity 내부에서 형성되는 유동의 특성을 관찰하고 cavity 벽면에서의 압력을 측정하고 이를 상용코드를 이용한 계산결과와 비교하였다. 그리고 boosting nozzle을 이용한 cavity는 계산결과를 이용하여 실제 제작하였을 경우의 현상을 예측하여 보았다.

\* 한국과학기술원, elquin@kaist.ac.kr  
\*\* 한국과학기술원, sse@kaist.ac.kr  
\*\*\* 한국과학기술원, melody@kaist.ac.kr  
\*\*\*\* 경원테크, ensight@mail.kw-tech.co.kr

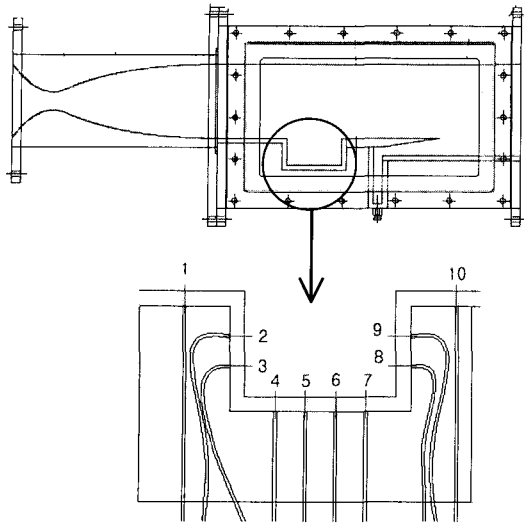


그림 3 Schematic of cavity experiment

## 2. 본 론

### 2.1 실험 결과

이번 실험에서는 초음속 유동에서 cavity 내에서의 유동과 압력 특성을 관찰하였다. 이를 위해 초음속 풍동을 만들어 초음속 유동을 형성하고 여기에 cavity를 설치하였다. [그림 3] 그리고 압력 측정을 위하여 cavity 벽면에 작은 hole을 내고 여기에 10개의 piezo type의 압력 센서를 설치하여 압력의 변화를 측정하였다. 본 실험에서 사용한 초음속 노즐은 MOC로 설계된 것으로, 면적비는 4이며, 설계 마하수는 3이다.

Cavity의 Schlieren method를 이용한 결과는 [그림 4]에 나타나 있다. 그림에서 보듯이, cavity의 fore wall과 after wall의 끝에서 shock이 생기는 것을 확인할 수 있다. 이처럼, 초음속 유동 내에서 cavity를 통한 shock의 발생 과정은 비정상 평면 압력파(unsteady planar compression wave)를 통해 해석하는 Heller-Bliss wave interaction mechanism과 Rockwell, Naudascher가 제안한 vortex interaction mechanism 등으로 해석되고 있다.

Vortex interaction mechanism에 따르면, cavity의 특징적인 유동을 일으키는 shear layer oscillation이 cavity 내의 vortex 운동에 의해 결정된다. fore wall에서는 초음속 유동이 진행되면서 cavity를 거치면서 유동이 cavity 안으로 유입되면서 vortex를 형성하게 된다. 그리고 생성된 vortex가 앞으로 나아가면서 cavity의 뒷벽, 즉 after wall을 만나면서 깨어지고, 이로 인해 after wall쪽에서 oblique shock이 발생하게 된다. 그와 동시에 cavity의 앞에서는 다시 vortex가 형성되면서 위의 과정을 반복하게 된다.

이번 실험의 결과에서는 초음속 유동장에서 weak oblique shock이 다수 나타나는 것을 볼 수 있는데, 이는 MOC로 설계된 노즐의 제작과정에서 생긴 것으로 각각의 characteristic line이 정확하게 continuous하게 연결되지 못했기 때문이다.

### 2.2 계산 결과

본 논문에서는 CFDRC에서 제작한 압축성 유동전용 해석프로그램인 CFD-FASTRAN을 이용하여 이번 실험에서 사용된 cavity 문제를 해석하였다. 계산영역에서 grid는 48,000개를 사

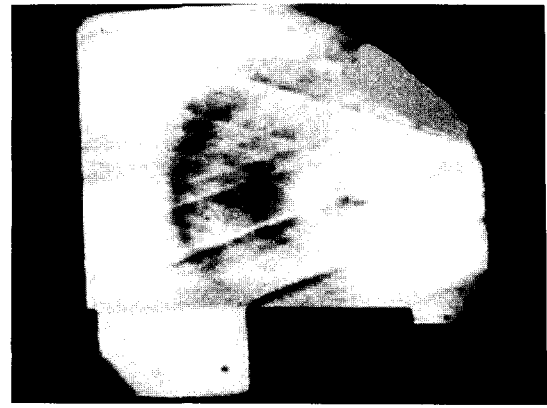


그림 4 Schlieren image of cavity

용하였고, 난류모델은 k- $\omega$  model을 사용하였다. k- $\omega$  model은 dissipation energy  $\varepsilon$  대신 turbulent kinetic energy의 specific dissipation rate  $\omega$ 를 이용하여 난류유동을 해석하는 모델이다. CFD-FASTRAN에서의 k- $\omega$  model은  $\omega = \varepsilon / k\sigma$ 로 한 Wilcox의 모델에 기초하고 있다. 이 모델에서 eddy viscosity는

$$\mu_t = C_\mu \frac{k\rho}{\omega}$$

그리고 k와  $\omega$ 에 의한 transport equation은

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = P - \rho\omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \omega) = C_{\omega_1} \frac{P\omega}{k} - C_{\omega_2} \rho\omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right]$$

where

$$C_\mu = 0.09; C_{\omega_1} = 0.555; C_{\omega_2} = 0.833;$$

$$\sigma_k = 2.0; \sigma_\omega = 2.0$$

그리고 벽면 boundary에서의 k와  $\omega$ 는

$$k = 0 \text{ at } y = 0,$$

$$\omega = \frac{7.2\mu}{\rho y^2} \text{ at } y = y_1$$

where

$y_1$  = normal distance to the wall of the center of the cell next to the wall

위의 방법을 이용하여 unsteady로 cavity를 계산하였다. 각각의 time step은 0.5ms 이고, time accuracy는 backward Euler method로 하였고, 총 수렴 시간은 20.5 ms이었다.

### 2.3 결과 분석

그림 5에서처럼,  $L/D = 5/3$ 인 경우,  $L/D = 1$ 인 경우와는 달리 내부에서 발생한 vortex가 진동하게 되는 것을 볼 수 있다.  $L/D > 10$ 인 closed cavity에서는 shear layer가 after wall로 가면서 확산되면서 vortex가 cavity 내부에서 진동하지 않게 되지만,  $L/D < 10$ 인 open cavity에서는 vortex가 cavity 내부에서 생성과 소멸을 반복하게 된다. 대개  $L/D = 2-3$ 인 경우, cavity 앞전에서 발생된 vortex가 뒤로 가면서 소멸되지만, 이 경우 vortex가 소멸되지 않고 계속적으로 왕복하는 것을 볼 수 있는데, 이는 초음속 유동에서 유도된 shear layer가 fluctuation되기 전에 cavity의 뒷벽에 부딪혀서 cavity내의 vortex가 미처 cavity를 빠져

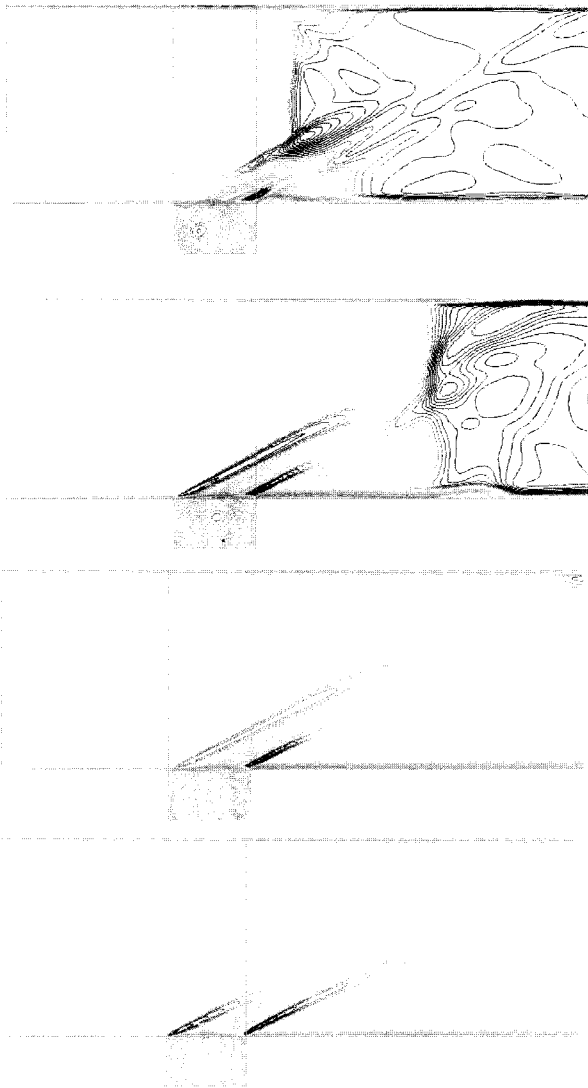


그림 5 Density contour of cavity

저나가지 못하기 때문이다. 이는 cavity 벽면에서의 정압을 나타낸 [그림 7]에서도 나타나듯이, cavity의 모서리 부분에서 압력이 높게 형성되는 것을 알 수 있다. 여기서 실험과 계산값이 상당한 차이가 나지만, 경향성은 충분히 따라가는 것을 알 수 있다. [그림 5]의 density contour를 보면 알 수 있듯이, vortex가 cavity내에서 왕복을 하므로 cavity의 각 모서리 부분의 압력이 증가하게 되는 것을 알 수 있고, 특히 bottom wall의 끝부분의 압력이 가장 높게 되어 있다. 그리고 after wall을 지나면서 recompression shock이 형성되면서 압력이 급격하게 증가하게 된다. 이는 내부에서 생성된 vortex로 인해 cavity 윗부분의 stream line이 휘어지면서 발생하게 된다.

[그림 6]에서는 cavity의 fore wall의 tip 부분을 원점으로 하였을 경우,  $x = 0.33, y = 0$ 인 지점에서의 압력값을 characteristic time으로 그린 것이다. 아직 수렴하기에 시간이 짧아 Rossiter's formula와의 진동 주파수를 비교하는 것은 무리가 있다고 본다. 그러나 초음속 cavity에서의 여러 가지 진동 모드가 함께 섞여서 나타나는 것은 확인할 수 있었다. 앞으로 시간을 가지고 약 10초 정도까지의 결과를 분석을 한다면 진동 주파수 영역을 파악할 수 있을 것이다.

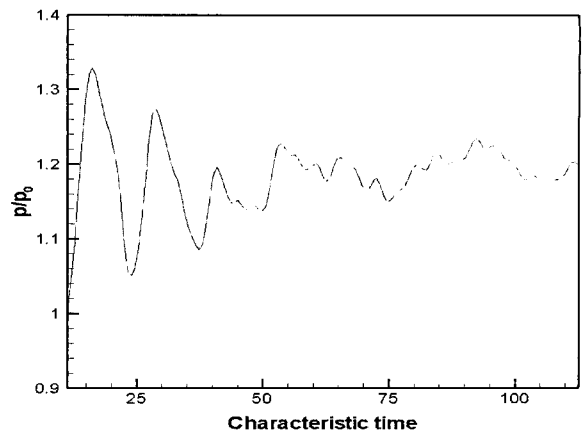


그림 6 Monitered pressure at  $x = 0.33$

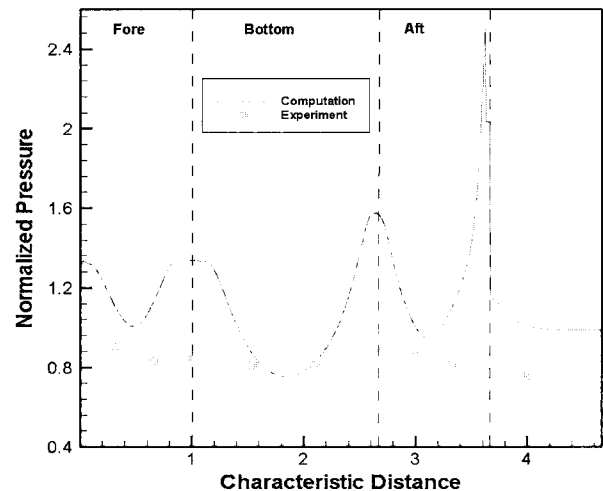


그림 7 Experimental and computational wall static pressure distribution

### 3 결 론

화학레이저에서 cavity는 laser가 발진이 되는 곳이므로 유동의 특성이 중요하다고 할 수 있다. 레이저용 cavity의  $L/D$ 는 반응물간의 반응을 고려하여 결정이 되는데, 여기에는 만들고자 하는 레이저의 출력, 반응 특성 등이 고려된다. 지금까지 초음속 유동장에서 Cavity의  $L/D = 1 \sim 2$ 인 경우의 유동과 압력 특성을 알아보았다. 일반적으로는 cavity의  $L/D > 2$ 인 경우, cavity의 뒷벽에서 vortex가 소멸되면서 다시 앞에서 생성되는 것을 반복하지만, 이번처럼  $L/D$ 가  $1 \sim 2$ 인 경우에는 shear layer의 영향에 의해 vortex가 완전히 소멸되지 못하고 cavity 내에서 진동하게 되는 것을 실험과 계산으로 확인하였다. 이번에는 마하수가 1가지로 정해져 있지만, 앞으로 다양한 마하수와  $L/D$ 를 변화시켜 가면서  $L/D < 2$ 인 경우에 대해 연구할 필요가 있다는 것을 확인하였다. 그리고 실제적인 적용을 위하여 이번과 같은 공기가 아닌  $H_2$ 와 F 혹은 CI의 혼합물을 가지고 실험을 해 볼 수도 있다.

#### 참고 문헌

- [1] Xhang. Zhang and John A. Edwards, Analysis of unsteady supersonic cavity flow employing an adaptive meshing algorithm, *Computers & Fluids*, vol. 25, no. 4 (1996), pp. 373-393
- [2] M.R Gruber, R. A. Raurle, T. Mathur and K.-Y Hsu, Fundamental Studies of cavity-based flameholder concepts for supersonic combustors, *J. of propulsion and power*, vol. 17, no. 1 (2001) pp. 146-153
- [3] Ashutosh Gangwar, Bojan Lukovic, Paul Orkwis and Balu Sekar, Modeling unsteadiness in steady cavity simulations, Part I : parametric solutions, *AIAA* 2001-0153, (2001)
- [4] Y. N. Jeng and U. J Payne, Numerical study of a supersonic open cavity flow and pressure oscillation control, *J. of aircraft*, vol. 32, no. 2, (1995), pp. 363-369
- [5] Chung-Jen Tam, Padul D. Orkwis and Peter J. Dismile, Algebraic turbulence model simulations of supersonic open-cavity flow physics, *AIAA* vol. 34, no. 11, (1996) pp. 2255-2261
- [6] I Kim and N. Chokani, Navier-Stokes study of supersonic cavity flowfield with passive control, *J. of aircraft*, vol. 29, no. 2, (1992), pp. 217-223
- [7] W.L. Hankey and J.S. Shang, Analyses of pressure oscillations in an open cavity, *AIAA* vol. 18, no. 8, (1979), pp. 892-898
- [8] Xiin Zhang, Compressible cavity flow oscillation due to shear layer instabilities and pressure feedback, *AIAA*, vol. 33, no. 8, (1995), pp. 1404-1411
- [9] David C. Wilcox, Dilalation-dissipation corrections for advanced turbulence models, *AIAA* vol. 30, no. 11, (1992) pp. 2639-2646
- [10] X. Zhang and J.A. Edwards, Computational analysis of unsteady supersonic cavity flows driven by thick shear layer, *Aeronautical J.*, (1998), pp. 365-374
- [11] X. Zhang and J.A. Edwards, An investigation of supersonic oscillatory cavity flows driven by thick shear layers, *Aeronautical J.*, (1990), pp. 355-364