압력진동을 저감하기 위한 sub-cavity를 가진 초음속 공동유동에 대한 실험 및 수치해석적 연구

임채민† · 이영기* · 김희동**

Experimental/Computational Study on the Supersonic Cavity Flow with a Sub-Cavity to Reduce the Pressure Oscillation

Chae-Min Lim, Young-Ki Lee and Heuy-Dong Kim

Key Words: Cavity flow(공동 유동), Supersonic flow(초음속 유동), Shock wave(충격파), Passive control(피동제어), Pressure Oscillation(압력 진동)

Abstract

The effectiveness of passive control techniques for alleviating the pressure oscillation generated in a supersonic cavity flow was investigated numerically and experimentally, respectively. The control device includes a sub-cavity installed near the leading edge of a rectangular cavity. Time-dependent supersonic cavity flow characteristics with turbulent features were examined by using the three-dimensional, mass-averaged Navier-Stokes computation based on a finite volume scheme and large eddy simulation. The results show that the pressure oscillation near the trailing edge dominates overall time-dependent cavity pressure variations. Such an oscillation can be attenuated more significantly in the presence of the sub-cavity compared with the cavity without sub-cavity, and a larger sub-cavity leads to better control performance.

1. 서 론

공동유동(cavity flow)에서 발생하는 소음/진동에 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 공동 유동장 특성에 주는 영향[(1)]이나 유동특성을 고려한 공동유동의 연구방법 개발[(2)]과 관련한 내용들이 주를 이루었다.

아음속 공동유동은 초음속 공동유동에 비하여 그 적용분야도 다양하며, 수치해석법을 이용하는 경우 계산영역의 경계조건 문제와 같이 초음속에서는 발생하지 않는 많은 사항들이 고려되어야 하므로, 상대적으로 다양한 해석방법들이 개발되어 왔다[(3)]. 이에 반해, 초음속 공동유동의 연구는 기체의 안정성을 저해할 수 있는 항공기의 weapon bay에서 발생하는 압력진동으로 인한 소음/진동 문제를 저감하기 위해 시작되었다[(4)]. 항공기뿐만 아니라 육상 수송 기계인 자동차나 고속 열차, 또는 다양한 유체기계에서 자주 발생하고 있다[(5)]. 초음속 비행에서는 공동의 형상이 외부로 노출될 때에 공동내부에서 발생하는 압력진동이 추가적인 항력, buffeting, 음향피로(acoustic fatigue) 등을 유발시키며, 이러한 현상들을 해석하고 최소화 시켜 비행효율과 안정성을 향상시키기 위한 많은 연구들이 현재까지 이루어지고 있다[(6)].

† 안동대 대학원 기계공학과
* (주)풍산 안강연구소
** 안동대 기계공학부
E-mail : kimhd@andong.ac.kr
TEL : (054)820-5622 FAX : (054)820-6127

Figure 1은 초음속 공동유동장을 모식적으로 나타내었다. 공동 선단과 후단부에서 충격파 시스템이 발생하며, 이들 충격파 시스템으로 인하여 공동내 제한적인 영역에서 feedback 시스템이 발생한다.

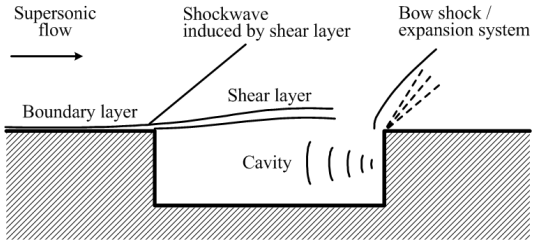


Fig. 1 Supersonic cavity flow

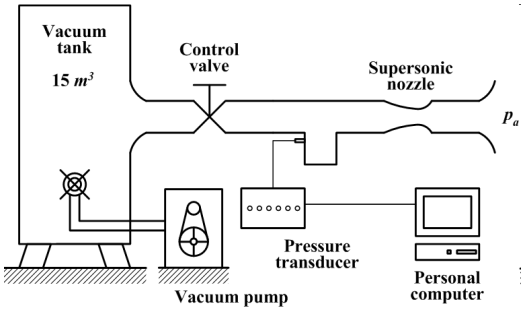


Fig. 2 Experimental apparatus

압력 진동을 제어하기 위하여 능동제어와 피동제어로 구분되어 연구되어 왔다. 능동제어는 피동제어 보다 넓은 작동조건에서 진동 및 소음 저감효과가 두드러지게 나타나지만, actuator와 같은 부가장치로 인하여 중량증가와 유지비용 증가 등의 문제점이 존재한다. 또한 진동하는 플랩[7], 공동 상류에서 2차 분사[8], harmonic/pulse blowing[9, 10], piezoelectric actuators[11, 12] 등을 이용/설치하여 유동을 제어하는 경우 주유동의 유동 자체가 변화하여 또 다른 문제점이 발생할 수도 있다.

기존에 제시된 ramped trailing edge[13], leading edge에 설치한 spoiler[13], compression ramp[14], fence[15] 등의 압력 진동의 피동제어 방법들은 대부분 시스템의 특정 작동조건에 제약을 받는다. 따라서 비교적 넓은 유속 범위에 대하여 적용되며, 공동의 주요 형상을 크게 변화시키지 않으며 설치가 간단한 제어장치의 개발은 실용적인 부분뿐만 아니라 학술적인 부분으로도 가치가 매우 높다고 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 공동내부에 sub-cavity를 적용한 경우, 압력진동의 저감과 초음속 공동유동장을 상세히 이해하기 위하여 실험적인 방법과 수치적인 방법으로 수행하였으며, 두 결과를 비교하였다.

2. 연구방법

2.1 실험적인 방법

Figure 2는 본 연구에서 사용된 실험장치의 개략도를 나타낸다. 진공펌프를 사용하여 진공탱크 내 공기를 빼내어 고 진공상태로 만든 후 제어밸브를 열어 대기로부터 공기를 흡입하는 흡입식 초음속 풍동이다. 덕트 하부 벽면에서부터 3 *mm* 떨어진 공동 하류 벽면에 설치된 압력센서에서 압력진동을 측정하며, 데이터 저장장치에 저장된다.

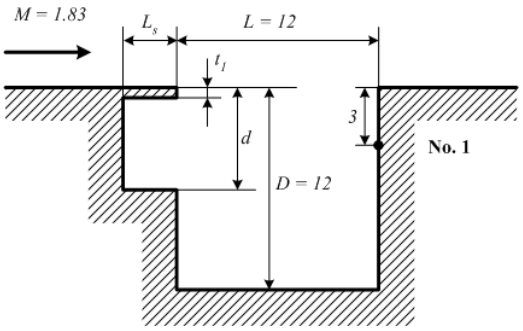


Fig. 3 Schematic diagram of supersonic cavity with sub-cavity

Figure 3은 본 연구에서 사용된 초음속 고동모델과 유동의 압력 진동의 제어를 위하여 사용된 sub-cavity를 개략적으로 나타내었다. 공동의 깊이와 길이는 12 *mm*이며, 각각 *D*와 *L*로 정의하였다. 사각 덕트의 높이(*H*)와 폭(*W*)은 각각 24 *mm*(2*D*), 38 *mm*(3.17*D*)이다. 상류로부터 공동으로 유입되는 주유동의 마하수 M은 1.83으로 하였으며, 모든 경우에 대해 동일하게 적용하였다. 공동 내부의 비정상 압력진동은 공동의 하류벽면에 설치한 압력공(No. 1)을 통하여 측정하였다. 측정된 압력진동 값은 FFT변환을 통하여 주파수 분석을 하였으며, 공동유동의 진동특성을 조사하였다. sub-cavity의 형상변수는 공동 상류 leading edge에서 측정된 두께 t_1과 공동 상류 벽면에서 측정된 sub-caivity의 길이 L_s, 덕트 하부에서 sub-cavity 하부 벽면까지의 길이 *d*로 표현된다. 본 실험에서

는 L_s = 1.5 ~ 3 *mm*, t_l = 0.6 ~ 2.4 *mm*, *d* = 3.0 ~ 12.0 *mm*로 각각 변화시켜 압력진동을 측정하였다.

2.2 수치해석적 방법

본 연구에서는 초음속 공동 유동에서 발생하는 압력진동을 제어하기 위해 sub-cavity를 적용한 경우 sub-cavity가 공동내부 유동에 미치는 영향을 수치적으로 모사하기 위해, 3차원 비정상 압축성 Navier-Stokes 방정식에 유한체적법을 적용하였다. 지배방정식들은 공간항에 대해서는 implicit finite control volume scheme, 시간항은 multi-stage Runge-Kutta scheme을 적용하여, 이산화하였다. 초음속 공동주변에서 발생하는 복잡한 난류유동 특성과 공동내에서 발생하는 압력진동을 적절히 모사하기 위하여 Smagorinsky - Lilly 모델[16]을 적용한 Large eddy simulation(LES)계산을 수행하였다.

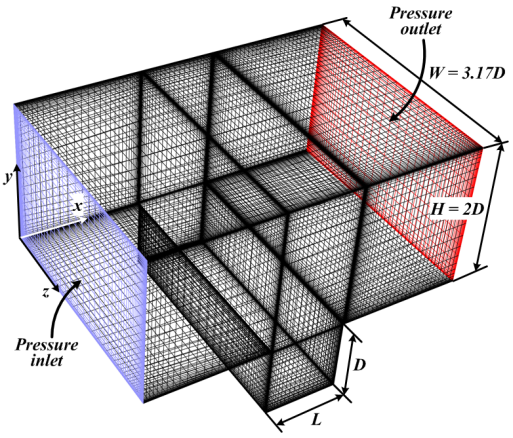
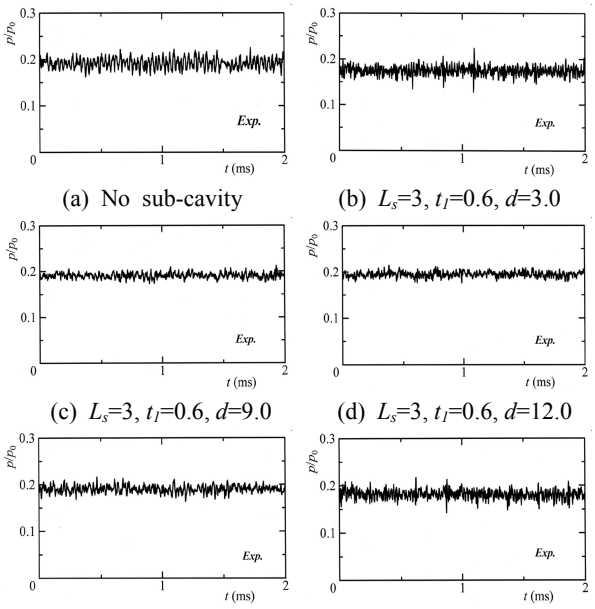


Fig. 4 Computational grids and boundary conditions

2.2.1 계산영역 및 경계조건

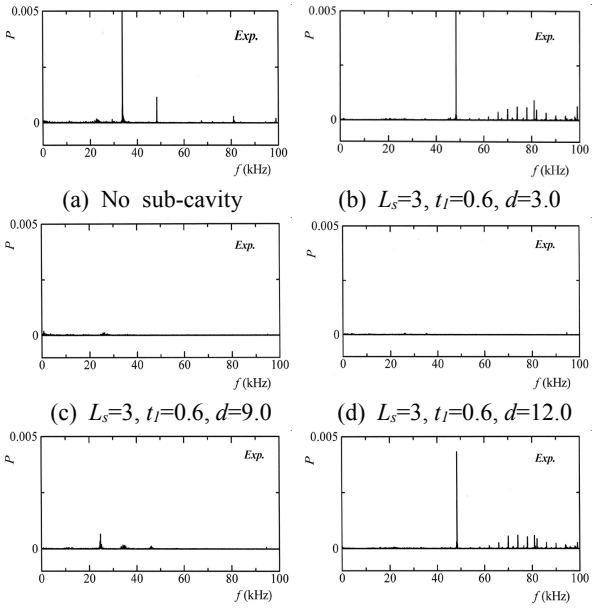
Figure 4는 수치해석에 적용된 계산영역과 경계조건을 나타낸다. 전체 계산영역은 폭 4.33*D*, 높이는 2*D*이며, 경계조건은 유로입구에 전압과 전온도를, 유로출구에 정압을 적용하였으며, 모든 벽면은 단열 No-slip 조건을 적용하였다. 계산영역의 격자점은 대략 58만개 이며, 경계층이 발달하는 벽 주변, 전단층 및 공동내부에 격자를 집중시켰다. 수렴해의 판정을 위해서 질량, 운동량, 에너지의 잔차(residual)가 1×10^{-4}이하이고, 상류 경계조건으로부터 유입되는 질량유량과 하류 경계조건의 출구로 배출되는 질량유량을 비교하여 그 질량유량의 차가 0.1%이하로 되는 조건을 수치해가 수렴하였다고 판정하였다.

3. 결과 및 고찰



(a) No sub-cavity (b) L_s=3, t_l=0.6, d=3.0
(c) L_s=3, t_l=0.6, d=9.0 (d) L_s=3, t_l=0.6, d=12.0
(e) L_s=3, t_l=2.4, d=12.0 (f) L_s=1.5, t_l=0.6, d=12.0

Fig. 5 Time histories of cavity wall pressure with a subcavity

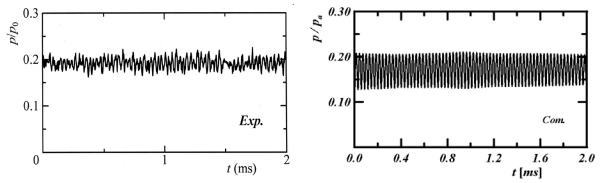


(a) No sub-cavity (b) L_s=3, t_l=0.6, d=3.0
(c) L_s=3, t_l=0.6, d=9.0 (d) L_s=3, t_l=0.6, d=12.0
(e) L_s=3, t_l=2.4, d=12.0 (f) L_s=1.5, t_l=0.6, d=12.0

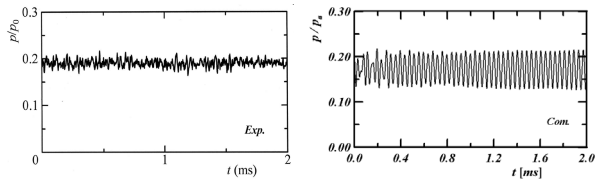
Fig. 6 Pressure spectra with control

Figure 5와 6은 sub-cavity가 적용되지 않은 경우와 sub-cavity가 적용된 경우, 공동내 하류벽면

의 No. 1인 지점에서 측정한 벽면정압진동과 벽면정압진동 값을 FFT변환하여 주파수를 분석하여 나타내었다. Sub-cavity를 적용한 경우 적용하지 않은 경우보다 압력진동의 진폭이 상대적으로 감소한 것을 볼 수 있다. Fig. 5(b), (c), (d)의 경우, sub-cavity의 깊이(d)의 변화에 따른 벽면압력진동의 진폭은 보다 큰 값을 가지는 경우 감소하는 것을 볼 수 있으며, Fig. 5(d), (e)에서 leading edge의 두께(t_l)의 영향은 얇은 것일수록 진폭의 저감효과는 커진 것을 볼 수 있다. 또한 공동내 유동에 대한 L_s의 영향은 커질수록 진폭을 저감시킨다. Fig. 6에서 sub-cavity의 크기가 클수록, leading edge 두께가 얇을수록 주 진동수(dominant frequency)가 감소한다.

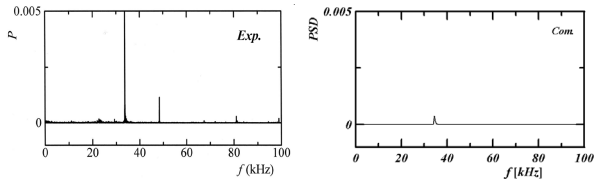


(a) No sub-cavity

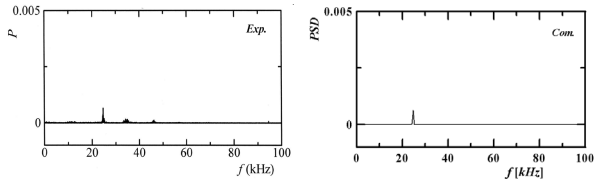


(b) Sub-cavity (L_s = 3 mm, t_l = 2.4 mm, d = 12.0 mm)

Fig. 7 Time histories of cavity wall pressure with a subcavity



(a) No sub-cavity



(b) Sub-cavity (L_s = 3 mm, t_l = 2.4 mm, d = 12.0 mm)

Fig. 8 Pressure spectra with control

Figure 7과 8은 sub-cavity가 적용되지 않은 경우와 L_s = 3, t_l = 2.4, d = 12.0 mm의 크기를 가진 sub-cavity가 설치된 경우, 앞서 개략도에서 설명한 No.1인 위치에서 측정한 실험값과 수치계산값을 비교하여 나타내었다. 두 결과에서 압력진동 진폭은 다소 차이가 나지만 정성적으로 잘 일치한다. Sub-cavity를 적용하지 않은 경우와 적용한 경우의 주 진동수는 각각 약 34.4 kHz, 24.4 kHz이고, 실험값과 수치계산값이 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. Sub-cavity를 적용한 경우 공동으로 인한 압력진동을 저감할 수 있다.

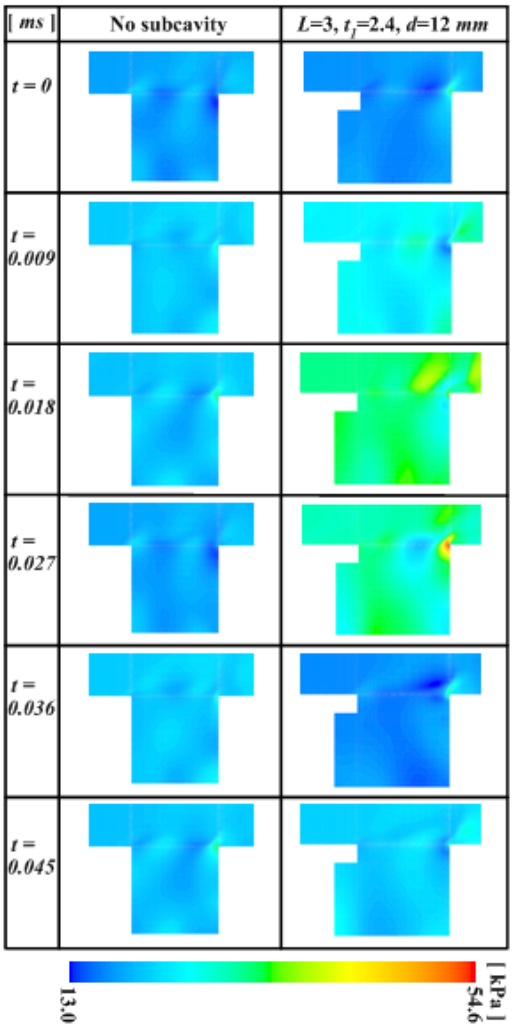
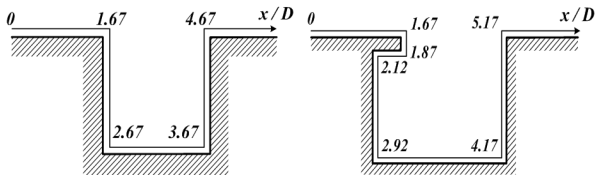


Fig. 9 Static pressure contours without control and with sub-cavity

Figure 9에는 sub-cavity가 있는 경우와 있지 않은 경우 시간에 따른 압력 선도를 나타내고 있다. leading edge에서 발달된 전단층은 공동 하류 벽면에 충돌한 후 공동내 압력파를 전파하여 leading edge에서 발생하는 전단층에 영향을 미치며, 주 진동수에 따른 공동내 유동장의 feedback loop를 볼 수 있다.

Figure 10에는 덕트 하부 벽면과 공동벽면의 중심을 따르는 압력분포를 나타낸 것이다. 그림에서 x/D는 벽면을 따르는 거리이며, 벽면 압력은 대기압으로 무차원화하여 나타내었다. 계산 결과에서 볼 수 있듯이 공동내 하류벽면에서 압력이 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 공동 상류부분에서 발달한 전단층이 공동 하류벽면에 부딪혀 발생한다. 공동내 하류벽면에서 압력이 급격히 증가한 후 감소하는 것은 앞서 나타낸 초음속 공동 후단부에서 발생하는 팽창파에 기인한다.

앞서 Kim 등[(6)]에 의해 보고된 바에 따르면 공동내 유동장의 변화는 공동 하류 벽면에서 발생하는 압력진동에 크게 의존하며, 공동유동장의 압력진동을 지배한다. 공동내 sub-cavity를 적용하는 경우 공동 하류 벽면에서 발생한 압력진동이 크게 저감되었으며, 이는 공동유동장의 압력진동을 감소시킨다.



(a) No sub-cavity (b) $L_s = 3$, $t_l = 2.4$, $d = 12$

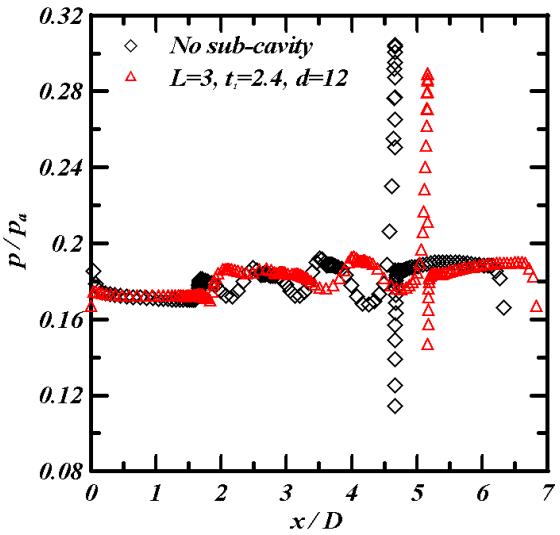


Fig. 10 Static pressure distributions

4. 결 론

본 연구는 초음속 공동유동에서 발생하는 압력진동을 저감하기 위하여 공동내 sub-cavity를 설치하였으며, sub-cavity의 저감효과를 조사하기 위하여 실험 및 수치해석을 수행하였다.

1. sub-cavity의 설치는 공동내 하류 벽면에서 발생하는 압력진동을 저감시킨다.
2. 주파수 분석을 한 경우, sub-cavity를 설치했을 때 지배적인 진동수가 감소한다.
3. sub-cavity의 저감 효과는 leading tip 두께와 sub-cavity의 크기에 의존한다.
4. 압력진동의 저감효과는 sub-cavity의 형상에 크게 의존하므로 보다 다양한 형상에 대한 연구가 필요하다.

참고문헌

(1) Maull, D. J. and East, L. F., 1963, "Three-Dimensional Flow in Cavities," J. Fluid Mechanics, Vol.16, pp.620~632.

(2) Bilanin, A. J. and Covert, E. E., 1973, "Estimation of Possible Exitation Frequencies for Shallow Rectangular Cavities," AIAA J., Vol.11, pp.347~351.

(3) Hardin, J. C. and Pope, D. S., 1995, "Sound Generation by Flow Over a Two-dimensional Cavity," AIAA J., Vol.33, No.3, pp.407~412.

(4) Dix, R. E. and Dobson, T. W. Jr., 1990, "Database for internal store carriage and jettison," Final Report, AEDC-TR-90-23.

(5) George, A. R. and Callister, J. R., "Recent advances in Understanding Automobile Aerodynamic Noise," AIAA-95-004, 16th aeroacoustics Conference.

(4) Jeng, Y. N. and Payne, U. J., 1995, "Numerical Study of a Supersonic Open Cavity Flow and Pressure Oscillation," J. Aircraft, Vol.32, No.2, pp.363~369.

(5) Sakamoto, K., Fujii, K., Tamira, Y. and Matsunaga, K., 1996, "Numerical Analysis of a Three Dimensional Cavity Flow Field in a Supersonic Duct," JSME J. B, 96-0948.

(6) Lee, Y. K., Deshpande, S. and Kim, H. D., 2006, "Control of Supersonic Cavity Flow

Oscillation Using Passive Means," Proceedings of KSPE Fall Meeting, pp.363~366.

(7) Smith, D. L. and Shww, L. L., Oct. 1975, "Prediction of the Pressure Oscillations in Cavities Exposed to Aerodynamics Flow," AFFDL-TR-75-34.

(8) Vakili, A. D. and Gauthier, C., 1994, "Control of Cavity Flow by Upstream Mass Injection," Journal of Aircraft, Vol.31, No.1, pp.169~174.

(9) Smith, B. R., Jordan, J. K., Rizk., S. N. and Shaw, L., 2000, "Computational Simulation of Active Control of Cavity Acoustics," AIAA Paper 2000-1927.

(10) Shaw, L. and Northcraft, S., 1999, "Closed Loop Active Control for Cavity Acoustics," AIAA Paper 99-1902.

(11) Cattafesta Ⅲ, L. N., Shukla, D., Garg, S. and Ross, J. A., 1999, "Development of an Adaptive Weapons-Bay Suppression System," AIAA Paper 99-1901.

(12) Kegerise, M. A., Cattafesta Ⅲ, L. N. and Ha, C., 2002, "Adaptive identification and Control of Flow-Induced Cavity Oscillations," AIAA Paper 2002-3158.

(13) Baysal, O., Yen, G. W. and Fouladi, K., 1994, "Navier-Stokes Computations of Cavity Aeroacoustics with Suppression Devices," Journal of Vibration and Acoustics, Vol.116, pp.105~112.

(14) Zhang, X., Chen, X. X., Rona, A. and Edwards, J. A., 1999, "Attenuation of Cavity Flow Oscillation Through Leading-edge Flow Control," Journal of Sound and Vibration, Vol.221, No.1, pp.23~47.

(15) Ukeiley, L. S., Ponton, M. K., Seiner, J. M. and Jansen, B., 2003, "Suppression of Pressure Loads in Resonating Cavities Through Blowing," AIAA-2003-0181.

(16) Lilly, D. K., 1996, "On the Application of the Eddy Viscosity Concept in the Inertial Subrange of Turbulence," NCAR Manuscript 123.