

공동을 지나는 비정상 유동에 의한 소음 방사 해석

⁰허대녕*, 이덕주**

Numerical Investigation of Sound Generation in the Flow Past a Cavity

Dae Nyoungh Heo and Duck Joo Lee

ABSTRACT

The modes of oscillation and radiated acoustic fields of compressible flows over open cavities are investigated computationally. The compressible Navier-Stokes equations are solved for two-dimensional cavities with laminar boundary layers upstream. The high-order and high-resolution numerical schemes are used for the evaluation of spatial derivatives and the time integration. Physically correct numerical boundary conditions are implemented to produce time-accurate solutions in the whole computation domain. The computational domain is large enough to directly resolve a portion of the radiated acoustic field. The results show a transition from a shear layer mode, for shorter cavities and lower Mach numbers, to a wake mode for longer cavities and higher Mach numbers. The shear layer mode is well characterized by Rossiter modes and these oscillations lead to intense upstream acoustic radiation dominated by a single frequency. The wake mode is characterized instead by a large-scale vortex shedding. Acoustic radiation is more intense, with multiple frequencies present.

1. 서론

항공기 및 여러 수송기에서 개방형 공동(open cavity)은 유동과 소음의 공진(resonance)에 의해 강한 압력교란을 발생한다. 공동의 leading edge에서 shear layer의 불안정성이 발생하여 와동을

생성하고, 이 와동들은 유동을 따라 전파되어 공동의 downstream edge와 부딪치거나 공동을 빠져나가 소음원으로 작용하게 된다. 따라서, 전영역으로 소음이 방사되고, leading edge의 shear layer에 추가적인 불안정성을 유발하게 된다. 이러한 유동과 소음의 공진은 큰 소음을 발생시킬 뿐만 아니라 공력음향하중으로 작용하여 심각한 구조물 파괴의

* 한국과학기술원 항공우주공학전공 대학원

** 정희원, 한국과학기술원 항공우주공학전공 교수

원인이 되기도 한다.

그러므로, 공동을 지나는 비정상 유동에서 발생하는 유동과 소음의 공진을 물리적으로 이해하고 [1],[2], spoiler 등을 사용하여 제어하려는 연구가 많이 이루어져 왔다. 그리고, 최근들어서 feedback loop를 이용한 active noise control 기법이 활발히 연구되고 있다.[3],[4],[5]

본 연구에서는 완전한 2차원 압축성 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 직사각형 공동 형상을 해석한다. 공동의 형상 및 유입류의 마하수 변화에 따른 소음 발생, 원음장으로서의 소음 방사를 수치적으로 직접 모사함으로써, 공동에서의 소음 발생 메카니즘의 특성을 이해하고, 향후 수치적으로 active noise control을 모사할 수 있는 기반을 마련하는 것을 목적으로 한다.

공동에서 발생하는 유동과 소음의 강한 상호작용을 정확히 모사하기 위해서는 고차의 정확도와 고해상도를 갖는 수치기법이 필수적으로 요구된다. 이러한 수치해법으로 OHOC (Optimized High-Order Compact) 공간차분법과 LDDRK(Low Dissipation and Dispersion Runge-Kutta) 시간적분법을 사용하였다. 또한 계산의 정확도를 위해 물리적으로 타당하다고 알려져 있는 특성치 경계조건(Characteristic Boundary Condition)과 유입조건으로는 laminar Blasius boundary layer를 사용하였다.

2. 지배 방정식 및 수치 해석 기법

본 연구에서는 완전한 2차원 압축성 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 수치 해석을 수행하였다. 직교좌표계에서 보존형태의 N-S 방정식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} = \frac{\partial E_v}{\partial x} + \frac{\partial F_v}{\partial y} \quad (1)$$

일반적으로 음향장은 유동장에 비해 그 크기가 매우 작다. 따라서 음향장과 유동장의 상호작용을

정확히 모사할 수 있기 위해서는 고차, 고해상도 수치기법을 사용하여야 한다.

공간 차분을 위해서는 J. W. Kim[6],[7]에 의해 제안된 OHOC scheme를 사용하였다. 지배 방정식은 식(2)와 같다.

$$\begin{aligned} & \beta f'_{i-2} + \alpha f'_{i-1} + f'_i + \alpha f'_{i+1} + \beta f'_{i+2} \\ & = c \frac{f_{i+3} - f_{i-3}}{6\Delta x} + b \frac{f_{i+2} - f_{i-2}}{4\Delta x} + a \frac{f_{i+1} - f_{i-1}}{2\Delta x} \end{aligned} \quad (2)$$

이 기법은 Fourier analysis를 통해 위상 오차와, 확산 오차를 최소화 할 수 있도록 계수들을 최적화한 방법이다. 본 연구에서는 계산의 정확도가 가장 우수하다고 알려져 있는 OFOP(Optimized Fourth-Order Pentadiagonal) scheme을 사용하였다. OFOP의 각 상수값은 식(3)과 같다.

$$\begin{aligned} \alpha &= 0.5900108167074074 \\ \beta &= 0.09779791767419070 \\ a &= 1.279672797796143 \\ b &= 1.051191982414920 \\ c &= 0.04475268855213291 \end{aligned} \quad (3)$$

시간 적분을 위해서는 LDDRK 시간 적분법[8]을 사용하였다. 이 기법은 OHOC scheme과 마찬가지로 낮은 위상 오차와, 확산 오차를 갖도록 최적화되어, 그 정확도가 뛰어나 널리 사용되고 있는 방법이다.

또, 물리적이고 안정적인 경계조건을 위해 특성치 경계조건(Characteristic Boundary Condition) [9]을 사용하였다. 이 기법은 계산영역 밖에서 안으로 들어오는 성분에 대하여 물리적으로 올바른 정보를 직접 대입하여 내부의 수치해가 정확성을 유지하도록 하는 방법이다. 본 연구에서는 특히 입출류 조건으로 Poinot and Lele[10]의 경계조건을 사용하였다.

초기 경계조건으로 공동의 윗부분은 공동이 없을 때 Flat-Plate에서의 Blasius boundary layer를 사용하였고, 공동 내부는 유속을 모두 0으로 주었

다.

공동의 형상과 유동 특성을 결정하는 파라미터로는 Fig.1과 같이 공동의 깊이(D), 공동의 길이(L), 공동의 leading edge에서 Boundary Layer의 momentum thickness(θ), 유입류의 속도(U)이다. 이것을 무차원화하여, 공동의 길이 비(L/D), 공동의 길이에 대한 momentum thickness의 비(L/ θ), freestream의 마하수(M), Reynolds number ($Re_\theta = \frac{U\theta}{\nu}$)로 결정된다.

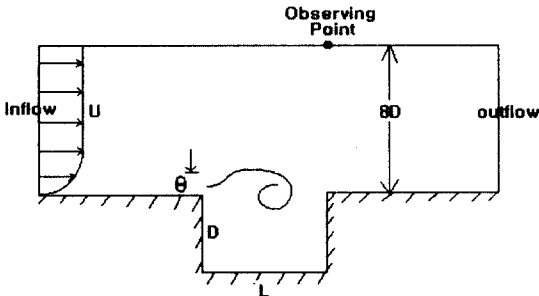


Fig. 1. Schematic diagram of cavity configuration and observing point

본 연구에서는 Table. 1과 같이 4가지 경우에 대하여 연구를 수행하였다. 계산 영역은 공동에서 발생하는 소음에 영향을 주지 않도록 upstream 방향으로 $-4D$, downstream 방향으로 $8D$, normal 방향으로 $8D$ 로 설정하였다. 계산에 사용한 격자는 공동의 윗부분에 300×100 , 공동의 내부에 160×100 개의 격자를 사용하였다.

Case	L/D	L/ θ	M	Re_θ	Mode
Case 1	2	52.8	0.2	56.8	Steady
Case 2	2	52.8	0.5	56.8	Shear Layer
Case 3	4	102	0.2	58.8	Shear Layer
Case 4	4	102	0.5	58.8	Wake

Table. 1. Parameters for each case

3. 계산 결과 및 토론

Table. 1의 4가지 case에 대하여 해석한 결과, Gharib and Roshko[3]와 같이 서로 다른 mode가 발생함을 확인할 수 있고, 마하 수(M)가 증가하고 공동의 길이가 길어짐에 따라 shear layer mode에서 wake mode로의 transition이 발생함을 알 수 있었다.

Case 1은 steady mode를 갖게 된다. Streamline를 그려보면, Fig. 2와 같이 driven cavity와 같은 형상으로 완전히 수렴해 버림을 확인할 수 있다. 그러므로 공동에서 유동과 소음의 공진 현상은 발생하지 않고, 공동의 존재로 인해 발생하는 소음원도 없다.

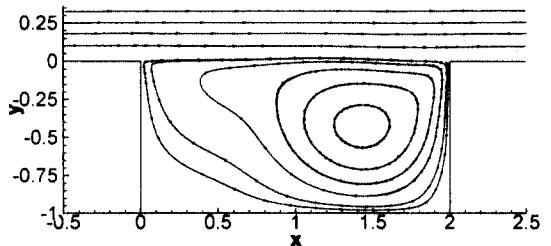


Fig. 2. Streamline (Case 1)

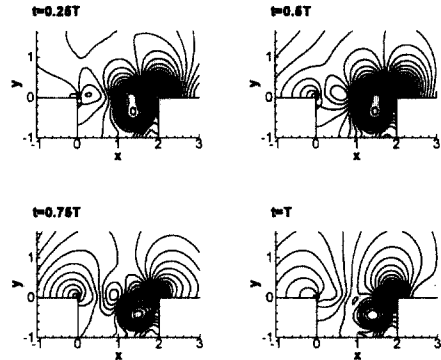


Fig. 3. Pressure contour (Case 2)

Case 2는 shear layer mode를 갖게 된다. Shear layer mode의 가장 큰 특징은 leading edge에서 발생한 와동이 downstream edge와 충돌을 일으켜

monopole type의 소음원을 생성한다. 따라서 Rossiter mode[11]에서 언급한 주파수와 정확히 일치하는 주파수 음압 신호를 확인할 수 있다. 한 주기 동안 공동 주위에서의 pressure contour를 보면 fig. 3과 같다. 전체적으로 와동들의 큰 변화는 없으며, 공동의 뒷부분에 존재하는 큰 와동이 매 주기마다 커졌다 작아졌다 하면서 아래 위로 움직여 shear layer를 교란시키게 된다. Case 3의 경우도 Case 2와 유사한 shear layer mode를 갖게 되었다.

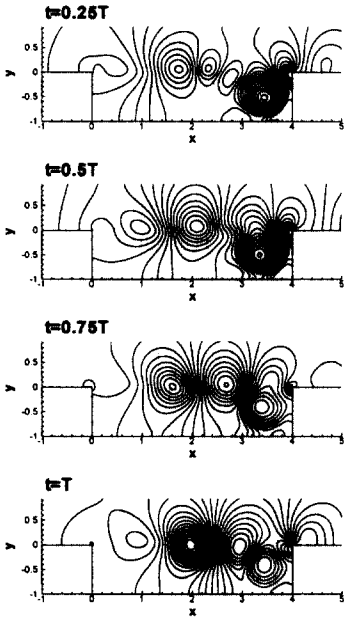


Fig. 4. Pressure contour (Case 4)

Case 4는 wake mode를 갖게 된다. Wake mode의 특징은 공동의 leading edge에서 large scale의 와동이 발생하여 wake flow와 같은 유동 형상을 갖게 된다. Leading edge에서 떨어져나온 와동은 공동밖으로 흘러나오기도 한다. 한 주기 동안의 pressure contour은 Fig. 4와 같다. Wake flow와 같이 leading edge에서 주기적으로 와동이 형성되어 나옴, 와동들의 상호작용으로 위, 아래로 움

직이게 된다. Downstream edge와 부딪힌 와동의 일부는 공동을 벗어나 벽면을 따라 흘러가게 된다.

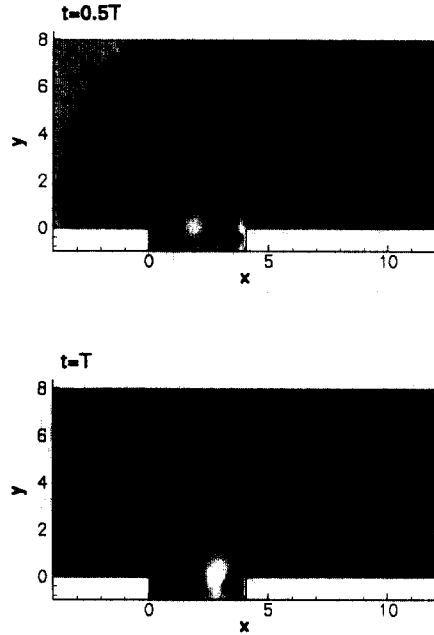


Fig. 5. Acoustic field of entire domain (Case 4)

Fig. 5는 Case 4에 대한 전체 계산 영역에서의 acoustic field를 나타내고 있다. 그림에서 어두운 부분은 expansion이 일어난 부분을, 밝은 부분은 compression이 일어난 부분을 나타낸다. 이것을 통해 공동에서 발생하는 소음이 far-field 영역까지 잘 전파되고 있음을 확인할 수 있고, 벽면 경계층에서 비물리적 반사가 전혀 일어나지 않음을 확인할 수 있다.

Fig. 6는 Fig. 1의 observing point에서 각 case의 acoustic signals를 나타낸 것이다. steady mode를 갖는 case 1의 경우, signal이 완전히 수렴하게 되고, shear layer mode를 갖는 case 2, case 3의 경우 1개의 dominant frequency의 주기적인 반복을 보이게 되며, wake mode를 갖는 case 4의

경우 2개 이상의 주파수가 복합되어 주기적인 반복을 보임을 확인할 수 있다. Wake mode인 case 4가 shear layer mode인 case 2, case 3에 비해 상당히 큰 소음을 발생함을 알 수 있다.

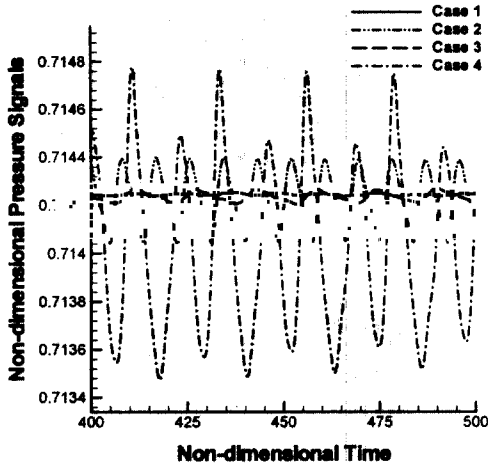


Fig. 6. Acoustic signals at observing point

4. 결론

본 연구에서는 고차-고해상도 수치기법을 이용하여 직사각형 공동에서 발생하는 유동과 소음의 공진 현상 및 공동에서 발생하는 소음의 방사를 직접 계산하였다.

공동을 지나는 유동의 특성은 공동의 길이 비 (L/D), 유입류의 마하수(M)에 따라 큰 차이를 보이며, 길이 비가 커짐에 따라, 마하수가 커짐에 따라 shear layer mode에서 wake mode로 transition 이 발생함을 알 수 있었다. 길이 비가 작고, 마하수가 작을 때 발생하는 steady mode에서는 공동의 존재로 인한 공진 현상이 전혀 발생하지 않았다. Shear layer mode는 leading edge에서 발생한 와동이 downstream edge에 부딪칠 때 monopole의 소음원 특성을 갖게 되어 1개의 dominant한 주파수 특성을 갖게 된다. Wake mode는 large scale의

와동이 주기적으로 발생하고, 와동이 공동 밖으로 흘러나가는 등 shear layer mode에 비해서 복잡한 유동을 특성을 갖는다. 그러므로 wake mode에서는 두 개 이상의 주파수가 중첩되어 나타나고, shear layer mode에 비해 큰 소음을 발생한다.

본 연구를 통해 공동의 형상과 유입류의 조건에 따른 공동 주위 유동 특성을 확인할 수 있었고, 본 수치기법이 공동에서 발생하는 유동과 소음의 공진 현상을 정확히 묘사할 수 있음을 확인할 수 있었다. 그러므로, 본 연구를 토대로 향후 공동에서의 active noise control을 수치적으로 묘사할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 물리적인 현상을 보다 정확히 묘사하기 위해서는 3차원 현상인 난류를 계산하기 위해 3차원으로의 확장이 필요하다.

5. 참고문헌

- [1] C. K. W. Tam, "The acoustic modes of a two-dimensional rectangular cavity," *Journal of Sound and Vibration*, 49(3), 353-364, 1976
- [2] Tim Colonius, Amit J. Basu and Clarence W. Rowley, "Computation of sound generation and flow/acoustic instabilities in the flow past an open cavity," 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference, FEDSM99-7228
- [3] M. Gharib and A. Roshko, "The effect of flow oscillations on cavity drag," *J. Fluid Mech.*, 177, 501-530, 1987
- [4] Stevens, J. and Ahuja, K., "Recent advances in active noise control," *AIAA Journal*, Vol. 29, No. 7, 1991, pp. 1058-1067
- [5] Tim Kestens and Franck Nicoud, "Active control of an unsteady flow over a rectangular cavity," 4th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, AIAA-98-2348, 1998
- [6] Kim, J. W., and Lee, D. J., "Optimized Compact Finite Difference Schemes with

- Maximun Resolution," AIAA Journal, Vol. 34, No. 5, 1996, pp. 887-893
- [7] Kim, J. W., and Lee, D. J., "Numerical Simulation of Nonlinear Waves Using Optimized High-Order Compact Schemes," Computational Fluid Dynamics Journal, Vol. 5, No. 3, 1996, pp. 281-300
- [8] Hu,F.Q., Hussaini,M.Y., and Manthey,J., "Application of Low Dissipation and Dispersion Runge-Kutta Schemes to Benchmark Problems in Computational Aeroacoustics", Proceedings of ICASE/LaRC Workshop on Benchmark Problems in Computational Aeroacoustics, U.S.A, Octorber, 1994
- [9] J.W.Kim and D.J.Lee, "Generalized Formulation and Application of Characteristic Boundary Conditions", 4th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 1998, Toulouse, France, AIAA 98-2222
- [10] Poinso, T. J., and Lele, S. K., "Boundary Conditions for Direct Simulations of Compressible Viscous Flow," Journal of Computational Physics, Vol. 101, 1992, pp. 104-129
- [11] J. E. Rossiter, "Wind-tunnel experiments on the flow over rectangular cavities at subsonic and transonic speeds," Technical Report 3438, Aeronautical Research Council Reports and Memoranda, October 1964