한국소음진동공학회 2004년도 춘계학술대회논문집, pp. 843~846.

공동 주위에서의 압력 변화에 대한 연구

Study on Pressure Variation around an Open Cavity

허대녕*·이덕주**

Dae Nyoung Heo and Duck Joo Lee

Key Words : Open Cavity, Feedback Mechanism, Computational Aeroacoustics (CAA), Pressure Variation, Phase Lag

ABSTRACT

Cavity tone is generated due to the feedback between flow and acoustic wave. It is recognized that the period is determined by the time required for the flow convection in one direction, the time required for the acoustic propagation in the other direction and the time for phase shift depending on the flows and mode. Most of the phenomena have been investigated by experiments and a simple but fundamental theory. But the cause of the phase shift and the correctness of the theory have not been clearly explained so far. In this paper, the phenomena are calculated numerically to obtain detail information of flow and acoustic wave to explain the mechanism including the phase. High order high resolution scheme of optimized high order compact is used to resolve the small acoustic quantities and large flow quantities at the same time. The data are reduced using cross correlation function in space and time and cross spectral density function which has phase information. Abrupt change in pressure near corner in cavity is observed and is relate to phase variation. The time required for the feedback between the flow and acoustic wave is calculated after the numerical simulation for various modes. The periods based on the time calculated using the above method and direct observation from the acoustic waves generated and propagated in the numerical simulation are compared. It is found that no phase shift is required if we examine the time required carefully. Rossiter's formula for the cavity tone used for quick estimation needs to be modified for some modes.

1. 서 론

우리의 주변에서 쉽게 볼 수 있는 많은 구조물들이 공동의 형상을 가지고 있다. 이러한 공동의 주위로 유동이 흘러갈 때 강한 압력 교란이 발생하며, 이것은 큰 소음을 유발할 뿐만 아니라 피로하중으로 작용하여 구조물 파괴의 원인이 되기도 한다. 따라서 공동을 정확히 해석하고 설계에 적용하여, 저소음화 상품을 개발하고 구조물의 안정성을 확보하기 위하여 많은 연구가 수행되어 왔으며,[1-3] 최근에는 능동 제어를 적용하여 소음 및 유동의 가진을 줄이고자 하는 연구가 많이 수행되고 있다.[4-6]

공동에서 발생하는 유동과 소음의 되먹임 관계는 우선 leading edge의 shear layer에서 교란이 발생하면, 이 교란은 유동을 따라 전파되면서 점점 증폭되게 된다. 그리고 downstream edge에서 부딪히면 벽면에서 강한 압력 교란을 유발하고 이것은 소음원으로 작용하게 된다. Downstream edge에서 발생한 소음 중 일부는 upstream 방향으로 전파되며 upstream edge에서는 shear layer와 상호작용을 하여, 초기보다 더 큰 교란을 유발하게 된다. 이러한 메커니즘을 통해 공동 내부에서의 되먹임 관계가 발생을 하며, leading edge에서 downstream edge로 전파되는 교란 성분은 유동의 특징을, downstream edge에서 leading edge로 전파되는 교란 성분은 소음의 특징을 지니고 있다. Rossiter's equation[1]은 이러한 되먹임 현상을 바탕으로 만들어진 실험식으로서 공동 연구에서 실험 및 수치해석의 정확도를 검증하기 위하여 널리 사용되고 있으나 많은 경우에 상당히 큰 오차를 보인다. 그러므로 본 연구에서는 전산공력음향 수치기법을 이용하여 공동 주위에서 발생하는 유동과 소음의 되먹임 현상을 해석하고, 특히 압력 변화를 고찰함으로써, Rossiter의 식의 정확도 및 개선 방안을 재고해 보고자 한다.

2. 지배 방정식 및 수치 해석 기법

본 연구에서는 유동과 소음간의 강한 상호 작용을 해석하기 위하여 고차 고해상도 수치기법을 이용하여 2차원 압축성 Navier-Stokes 방정식을 해석하였다.

공간차분을 위해서는 optimized fourth-order pentadiagonal compact scheme[7]을 사용하였고, 시간 적분법은 4차 정확도의 Runge-Kutta 기법을 사용하였다. 또한, 비물리적 진동을 억제하기 위하여 adaptive non-linear artificial dissipation[8]과 characteristic boundary condition[9] 등을 사용하였다.

* LG 전자 DA 연구소 COMP 그룹
E-mail : nyoung@kaist.ac.kr
Tel : (02) 818-2473, Fax : (02) 867-3941
** KAIST 기계공학과 항공우주공학전공

공동의 형상과 유동 특성을 결정하는 파라미터는 figure 1과 같이 공동의 깊이(D), 공동의 길이(L), 공동의 leading edge에서의 boundary layer의 momentum thickness(θ), 유입류의 속도(U)이다. 이것을 무차원화하면, 길이의 비 L/D, θ/D, freestream의 마하수(M), momentum thickness에 대한 Reynolds number ($Re_\theta = U\theta/\nu$)로 결정된다.

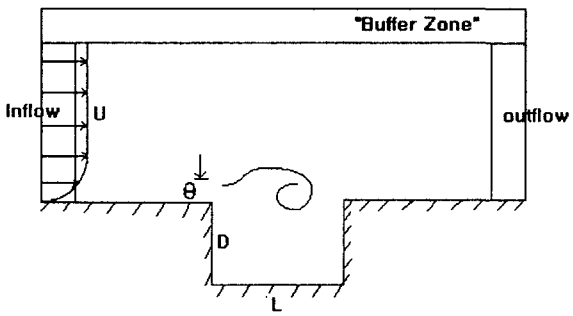


Fig. 1 Schematic diagram of cavity configuration and Computational domain

3. Rossiter's Equation

Rossiter's equation[1]은 식 (1)과 같다.

$$\frac{L}{U_c}+\frac{L}{c}=\frac{n-\beta}{f_n}, \quad n=1,2,3,\cdots \tag{1}$$

L은 공동의 길이, U_c와 c는 각각 vortex의 convection 속도와 speed of sound이다. β는 downstream edge에서의 유동과 소음의 phage lag을 나타내고, n은 자연수로서, f_n의 주파수가 몇번째의 모드에 해당하는가를 나타낸다.

좌변의 첫번째 항은 vortex가 유동의 속도로 공동의 leading edge에서 downstream edge까지 흘러가는데 걸리는 시간, 두번째 항은 공동의 downstream edge에서 발생한 소음이 leading edge까지 전파하는데 걸리는 시간을 나타낸다. 유동과 소음 사이에서는 β/f_n에 해당하는 time delay가 발생하고, 이 전체 시간이 주파수 f_n에 해당하는 주기의 정수 배일 공명이 발생할 수 있음을 의미하는 식이다. 이 식은 공동의 길이와 마하수만 알면 쉽게 이용할 수 있다는 장점이 있으므로, 공동에 대한 연구에서 실험이나 수치해석의 결과를 검증하기 위한 자료로 폭넓게 사용되고 있다.

그러나, 이 식을 사용하기 위해서는 vortex의 convection 속도와 freestream의 속도 비 $k=U_c/U$와 phase lag β를 정확히 알아야만 본 식을 사용할 수 있다. k는 실험결과를 fitting하여 결정하는 값으로 0.56이 가장 널리 사용 되어지며 실험 조건에 따라서 다른 값을 사용한다. β는 Rossiter[1]의 경우 실험치와의 fitting을 통해 0.25를 사용하였고, Blake[10]는 가진력과 그 반응 사이에는 90도의 위상차이가 발생하여야 공진이 발생하므로 공동에서의 되먹임 관계에서도 90도의 위상차이가 있어야 한다는 생각에서 0.25가 타당한 값임을 주장하고 있다. 또, Mast[11]의 경우 linear Euler equation에서 평균 속도가 0일 때, 한 개의 주파수 성분에 대하여 속도와 압력은 90도의 위상차가 발생하므로 0.25가 타당한 값임을 밝히고 있다. 그러나 공동에서 발생하는 유동과 소음의 되먹임 형상은 비선형적인 현상이므로 이러한 주장들은 정확하지 않다.

k와 β를 정확히 알지 못할 때, 식 (1)은 더 이상 정확한 공명 주파수를 예측할 수가 없다. 일례로 식 (1)은 많은 경우에 약 20%에 달하는 큰 오차를 유발하며[12,13] 오차가 더 큰 경우에는 다른 모드의 값으로 오해될 소지도 있다. Figure 2는 k=0.56일 때, β가 0과 0.25인 것을 비교한 것이다. 두 경우 모두 k를 잘 fitting하면 실험치에 잘 맞출수 있다. Figure 3(a)는 k=0.66, β=0.25이고 figure 3(b)는 k=0.60, β=0일 때 식 (1)을 Cattafesta[13]의 실험 결과와 비교한 그림으로 모두 잘 맞음을 알 수 있다. 그러므로 정확한 k와 β에 대하여 고찰하여 볼 필요성이 있다. 본 연구에서는 공동 주위의 유동장 및 소음장을 해석하고, 특히 압력 변화를 관찰함으로써 k, β및 공동에서 발생하는 되먹임 현상을 규명해 보고자 한다.

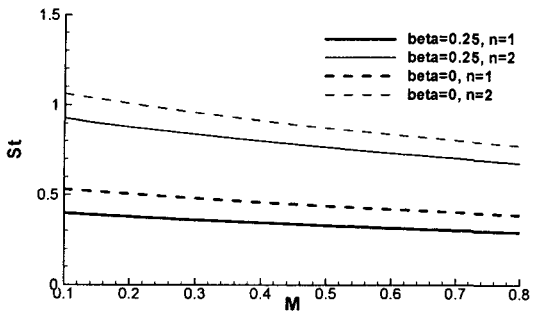
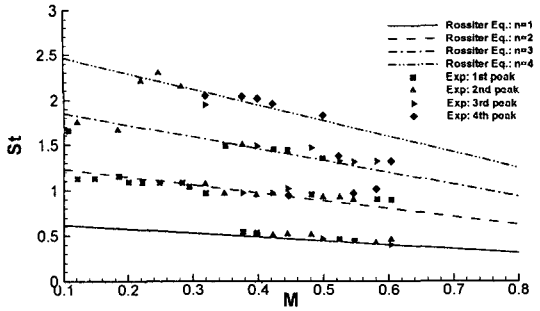
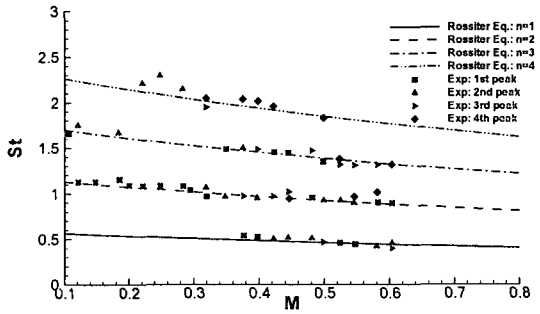


Fig. 2 Comparison of different phase lag



(a) k=0.66, β=0.25



(b) k=0.60, β=0

Fig. 3 Fitting Rossiter's equation (Eq. (1)) to experimental data[13]

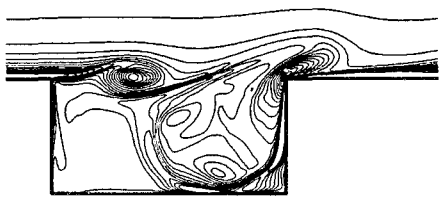
4. 수치해석 결과

본 연구에서는 다양한 조건에서 공동에 대한 수치해석을 수행하였다. 그 결과 공동의 길이 대 깊이의 비(L/D)가 커질수록, 마하수가 증가할수록 steady mode에서 shear layer mode, wake 모드로 변화됨을 확인할 수 있었다. Rossiter's equation은 shear layer mode에서 잘 맞는다고 널리 알려져 있으므로 [12] shear layer mode에 대해서만 언급하도록 한다.

Figure 4(a)는 vorticity contours를 나타낸 것으로서 shear layer에서 vortex가 roll up을 하며 전파되어 downstream edge에 부딪히며, cavity의 오른쪽 내부에 존재하는 vortex와 강한 상호작용을 일으키고, 주기성을 나타냄을 확인할 수 있다. Figure 4(b)는 buff zone을 제외한 전체 계산 영역에서의 pressure contour를 나타낸 것으로써, downstream edge 부근이 소음원으로 작용하여 전방 상향으로 가장 강하게 소음이 전파됨을 확인할 수 있다.

Figure 5는 수치해석 결과를 바탕으로 공동의 경계면에서의 시간에 따른 압력 신호를 cross-correlation 및 cross-spectral density[14]를 해석한 결과이다. x/D=0과 2가 각각 공동의 leading edge와 downstream edge에 해당한다. Downstream edge를 지나면서 압력의 급격한 변화가 발생함을 알 수 있으며, 그 값은 약 90도의 위상 변화에 해당한다. 이러한 위상 변화는 cavity의 바깥쪽에서만 발생을 하며, 공동의 내부에서는 downstream edge 주위에서 급격한 위상의 변화가 발생하지 않는다. 이것은 공동 주위의 압력 변화를 면밀히 분석해 보면, vortex가 공동의 downstream edge를 지나갈 때, vortex가 깨져서 둘로 나눠지면서 공동의 바깥쪽에서는 주기의 약 1/4에 해당하는 time delay가 발생하게 된다. 반면 공동의 내부에서는 압력의 contours가 벽면에 attach되는 현상이 발생하므로 time delay가 0이 된다. 그러므로, 소음원이 공동의 바깥쪽 즉, downstream edge의 오른쪽 벽면에 있을 경우에는 phase lag β가 0.25가 적절한 값이 된다. 그러나, 소음원이 공동의 내부 즉 downstream edge의 아래에 있을 경우에는 β는 0이 되어야 한다. 이러한 개념을 적용한 Integral form of Rossiter's equation은 아주 정확한 공면 주파수 예측이 가능하였다.[15]

$$\int_{VG}^{VC}\left(\frac{1}{u}+\frac{1}{a-u}\right)dl_{\text{(along vortex convection path)}} = \frac{n-\tilde{\beta}}{f_n}, \quad n=1,2,3,\cdots \tag{2}$$



(a) Vorticity contours at an instant (20 levels between non-dimensional vorticity, $\omega D/U_\infty$=−7 and 3)

(b) Acoustic fields of entire domain except buffer zones

Fig. 4 Numerical results of shear layer mode (L/D=2, M_∞=0.5, θ/D=0.04 and $Re_\theta = U_\infty\theta/\nu$=200)

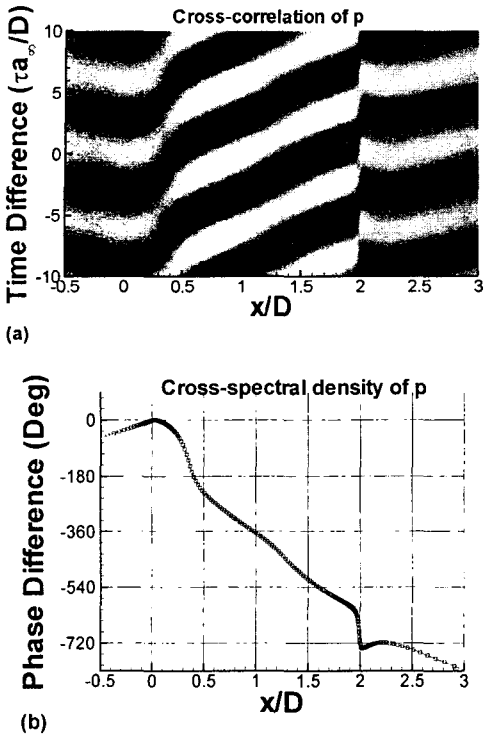


Fig. 5 Cross-correlation result of pressure and its phase variation (L/D=2, M_∞=0.5, θ/D=0.04 and $Re_\theta = U_\infty \theta/\nu$=200)

5. 결 론

본 연구에서는 Rossiter's equation 에 대하여 그 물리적 의미 및 정확도를 고찰하여 보았다. 고차 고해상도 수치기법을 이용하여 공동에서 발생하는 유동과 소음의 되먹임 관계를 해석하고, 특히 공동 주변의 압력의 위상 변화를 관찰하였다. 그 결과 공동의 바깥부분에서는 vortex 가 흘러갈 때 발생하는 time delay 현상으로 인하여 약 90 도의 위상 변화가 발생하고, 공동의 내부에서는 위상 변화가 발생하지 않는다. 그러므로 소음원의 위치에 따라서 이 공동의 내부에 있을 때는 0 이, 소음원이 공동의 외부에 있을 때는 0.25 가 phase lag 으로 적절한 값이 된다.

후 기

This research was supported by 'Basic Research Program of Korea Science & Engineering Foundation under Grant No. R01-1999-000-00264-0' and 'Space Technology Program of KISTEP(Korea Institute of Science and Technology Evaluation and Planning)'.

참 고 문 헌

(1) Rossiter, J. E., 1964, "Wind-tunnel experiments on the flow over rectangular cavities at subsonic and transonic speeds," Technical report 3438, Aeronautical Research Council Reports and Memoranda.

(2) Rockwell, D., and Naudascher, E., 1978, "Review-Self-sustaining oscillations of flow past cavities," *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, Vol. 100, pp. 152-165.

(3) Rowley, C. W., 2001, "Modeling, simulation, and control of cavity flow oscillations," PhD thesis, California Institute of Technology

(4) Kook, H., and Mongeau, L., 2002, "Analysis of the periodic pressure fluctuations induced by flow over a cavity," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 251, No. 5, 2002, pp. 823-846.

(5) Cattafesta III, L. N., Shukla, D., Garg, S., and Ross, J. A., 1999, "Development of an adaptive weapon-bay suppression system," AIAA paper 99-1901.

(6) Rowley, C. W., Williams, D. R., Colonius, T., Murray, R. M., MacMartin, D. G., and Fabris, D., 2002, "Model-based control of cavity oscillations, part II: system identification and analysis," AIAA paper 2002-0972.

(7) Kim, J. W., and Lee, D. J., 1995, "Optimized compact finite difference schemes with maximum resolution," *AIAA Journal*, vol. 23, No. 5, pp. 887-893.

(8) Kim, J. W., and Lee, D. J., 2001, "Adaptive nonlinear artificial dissipation model for computational Aeroacoustics," *AIAA Journal*, Vol. 39, No. 5, pp. 810-818.

(9) Kim, J. W., and Lee, D. J., 2000, "Generalized characteristic boundary conditions for computational Aeroacoustics," *AIAA Journal*, Vol. 38, No. 11, pp. 2040-2049.

(10) Blake, W. K., 1986, "Mechanics of flow-induced sound and vibration," Academic Press. Inc.

(11) Mast, T. D., and Pierce, A. D., 1995, "Describing-function theory for flow excitation of resonators," *J. Acoust. Soc. Am*, Vol 97, No. 1, 1995, pp. 163-172.

(12) Colonius, T., Basu, A. J., and Rowley, C. W., 1999, "Numerical investigation of the flow past a cavity," AIAA paper 99-1912.

(13) Cattafesta III, L. N., Garg, S., Kegerise, M. A., and Jones G. S., "Experiments on compressible flow-induced cavity oscillations," AIAA paper 98-2912.

(14) Heo, D., Kim, J. W. and Lee, D. J. Lee, 2003, "Study on noise characteristics of an open cavity with cross-correlation anaysis," AIAA paper 2003-3104

(15) Heo, D. N., Kim, J. W. and Lee, D. J., 2003, "Numerical study on mode transition of open cavity with lids," Inter-noise, N760, Jeju, South Korea