

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2015.39.6.477>

ISSN 1226-4881(Print)
2288-5324(Online)

곡면상에 설치된 열린 공동을 지나는 천음속/초음속 유동에 관한 연구 (II)

- 비정상 유동의 특성 -

예아란* · Rajarshi Das* · 김희동**

* 안동대학교 기계공학과

Investigation of Transonic and Supersonic Flows over an Open Cavity Mounted on Curved Wall (II)

- Unsteady Flow Characteristics -

A Ran Ye*, Rajarshi Das* and Huey Dong Kim**

* Dept. of Mechanical Engineering, Andong Nat'l Univ.

(Received October 8, 2014 ; Revised April 1, 2015 ; Accepted April 7, 2015)

Key Words: Cavity Flow(공동 유동), Compressible Flow(압축성 유동), Pressure Oscillation(압력 진동), Unsteady Flow(비정상 유동), Transonic Flow(천음속 유동), Supersonic Flow(초음속 유동)

초록: 공동유동에 관한 연구는 공동시스템에서 발생하는 소음/진동 문제로 인하여 많은 연구가 이루어졌으며, 현재 항공우주 산업의 급속한 발전과 더불어 다양한 공학적 장치에 적용되고 있다. 하지만, 실제 공학적 응용에서 많이 적용되는 곡면 벽상에 설치한 공동유동에 관한 연구에 대해서는 거의 수행되지 않았다. 본 연구에서는 곡면벽상에 설치한 공동유동의 특성을 조사하기 위해 수치계산을 수행하였으며, 곡면의 곡률 반경의 비(L/R) 및 입구 유동의 마하수를 변화시켜, 천음속/초음속 공동유동에서 발생하는 압력진동을 조사하였다. 그 결과 곡면에 부착된 공동유동의 경우 와류의 상호작용으로 인한 압력 교란을 완화시켰으나, 압력 진동의 진폭을 증가시켰으며, 또한 마하수가 증가함에 따라 압력 진동의 진폭이 증가하였다. 주파수 분석 결과, 곡관의 무차원 진동수는 직관에 비해 낮은 값이 측정되었으며, 또한 Rossiter의 실험값에 비해 낮은 값을 가졌다.

Abstract: Investigations into cavity flows have been conducted for noise and vibration problems that arise in cavity systems. Cavity systems have been applied in engineering devices and have undergone rapid development in the aerospace industry. Meanwhile, to the author's best knowledge, the cavity on a curved wall has been seldom studied. The present work is conducted to study the flow physics of a cavity mounted on a curved wall. Numerical analysis is performed to investigate the cavity flow. Two variables of sub- and supersonic cavity flows were considered: the radius of curvature of the curved wall (L/R) and the inlet Mach number. The results show that the uniform vortex generated by the cavity flow on the curved wall stabilize the pressure fluctuation as time passes. As the inlet Mach number increases, the pressure fluctuation amplitude increases. The results obtained from the curved wall are compared with those from a straight wall using Rossiter's formula. The Strouhal number of the curved wall is lower than that of the straight wall. Lower Strouhal numbers have been obtained in the present computational fluid dynamics (CFD) results than in the theoretical results using Rossiter's formula.

- 기호설명 -

H : 공동 높이(mm)

L : 공동 길이(mm)

M : 마하수

P : 압력(Pa)

R : 곡면의 곡률 반경(mm)

St : 무차원 진동수

† Corresponding Author, kimhd@anu.ac.kr

U : 속도(m/s)
 m : m 번째 피크 주파수

하첨자

∞ : 공동상류의 입구상태
 0 : 공동하류의 출구상태

1. 서론

공동의 소음은 항공기, 고속열차, 자동차 등과 같은 물체의 단면부나 홈에서 쉽게 발생하며, 입구 유동과 공동의 형상에 영향을 받는다. 공동으로 인해 발생한 소음은 주변 유동에 큰 영향을 주어 기기에 진동을 유발하고 공력성능의 저하, 시스템의 불안정을 야기한다. 따라서 천음속/초음속 공동 유동에서 발생하는 압력진동과 유동 특성을 조사하기 위한 구체적인 연구가 필요하다.

공동유동에 관한 종래의 연구는 공동 입구 유속 및 공동의 형상이 공동 유동장의 특성에 주는 영향에 대한 실험 및 수치해석적 연구가 주를 이루었다.⁽¹⁻⁴⁾ Rossiter⁽²⁾는 실험적 연구를 통해 공동의 형상과 입구 유동의 속도에 따른 공동 유동의 압력 진동을 조사하였다. 실험을 통해 유동의 조건과 공동의 형상에 따라 특정 주파수가 결정되는 것을 밝혀냈으며, 이러한 결과를 토대로 공동 유동의 공명 주파수를 예측할 수 있는 Rossiter 식을 제안하였다. 공동에서 발생하는 공명현상의 주파수를 예측하는 식으로 무차원 진동수(Strouhal Number)로 표현하였다. Rockwell 등⁽³⁾은 유체 역학적 이론을 적용하여 유동의 진동수를 예측하였으며, 공동의 기하학적 형상에 따른 진동 메커니즘을 강화하였다. 또한, 공동의 세장비(L/H)에 따라서, 공동 상류에서 발달된 전단층이 공동 뒷전(열린 공동)이나 공동 바닥(닫힌 공동)에 재부착하는 것을 관찰하였다. Bilanin 등⁽⁴⁾은 전단층의 진동 운동으로 인해, 공동에서 주기적으로 유동의 입출입이 발생하는 것을 관찰하고 이를 공동 압력 진동의 메커니즘으로 고려하였다. 공동은 전단층과 유동의 불안정을 발생시켜 강한 압력진동을 발생시킨다. Heller 등⁽⁵⁾은 공동과 주유동의 온도 조건을 고려하여 앞서 수행된 Rossiter 식을 수정하였으며, 공동 유동의 압력진동은 불규칙적인 유동에 의해 발생한다고 주장하였다.

또한, Zhang 등^(6,7)은 수치해석적 연구를 통하여 2 Equation 인 Standard k- ω 난류 모델을 사용하여

공동 주변에서 발생하는 복잡한 파형 패턴을 관측하였다. Yang 등⁽⁸⁾은 입구 마하수 변화에 따른 공동 내부의 정압 분석을 통하여 개방형 공동인 경우 입구 마하수에 크게 영향을 받지 않은 것으로 보고하였다. Atvars 등⁽⁹⁾은 공동의 하류 주변에 형성된 와도가 재순환하여 유동 흐름을 따라 공동 밖으로 이동하는 것을 관찰하였다. Lee 등⁽¹⁰⁾은 초음속 공동 유동에서 발생하는 압력진동을 제어하기 위해 피동기구를 이용하여 체계적으로 분석하여 연구하였다.

이와 같이 수평면에 설치된 공동유동에 관해 수많은 연구가 수행되었던 반면에, 실제 공학적 응용에서 많이 적용되는 곡면 벽상에 설치한 공동유동에 관한 연구에 대해서는 거의 수행되지 않았다. 곡면 벽상에 설치한 공동의 경우, 곡면의 곡률 반경에 따라 유동방향과 수직인 방향으로 원심력이 작용하여 공동 내부에서 발생하는 전단층과 충격과 유동은 더욱 복잡해 질것으로 예상되나, 이러한 데이터는 지금까지 보고된 바가 없다. 따라서 곡면 벽상에 설치한 공동 내부의 유동 특성을 파악해야 하며, 공동 주변에서 발생하는 복잡한 유동 현상에 대해 물리적으로 설명할 수 있는 체계적인 연구가 필요하다.

본 연구에서는 기존의 수평면에 부착된 공동 유동과 곡면 벽상에 부착된 공동 유동의 특성을 비교 분석하였다. 압축성 2차원 Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes (URANS) 방정식에 Standard k- ω 난류 모델을 적용하여 수치계산을 수행하였으며, 곡면의 곡률반경, 유동의 마하수 변화가 소음 및 유동에 미치는 영향을 해석하였다. 천음속/초음속 공동유동의 주진동 주파수를 조사하기 위하여, Fast Fourier Transform(FFT)를 이용한 Power Spectrum Density(PSD)를 분석하였다.

2. 수치계산방법

2.1 수치계산

본 연구에서는 초음속/천음속 공동유동에서 발생하는 복잡한 유동장을 해석하기 위하여, 비정상 2차원 압축성 Navier-Stokes 방정식을 적용하였으며, 완전 내제적 유한 체적법(Implicit Finite Volume Scheme)을 적용하였다. 또한 수치해석은 압축성 유동을 고려하여 지배 방정식을 Density-Based Solver 인 Coupled Scheme을 적용하였으며, 수치적 안정성을 위해 AUSM DV와 2nd Order

Table 1 Conditions used for the present study

Parameters	Values
L [mm]	254
H [mm]	63.5
L/H	4
L/R	0 ~ 0.11
M_∞	0.4 ~ 1.8

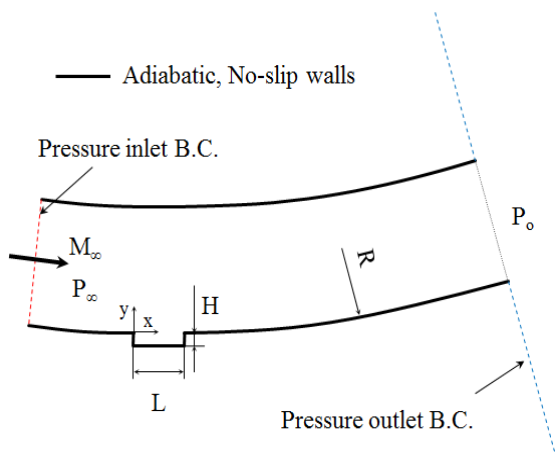


Fig. 1 Schematics of the geometry and boundary conditions for the present computation



Fig. 2 Computation grid

Up-Wind Scheme을 적용하여 Convective Term을 계산하였다.

2.2 계산영역 및 경계조건

Fig. 1에는 본 연구에서 사용된 공동모델과 경계조건을 개략적으로 나타내었다. 공동의 형상과 수치는 Stallings 등⁽¹¹⁾의 실험 모델을 기본으로 하였으며, 계산에 사용된 난류모델은 Ye 등⁽¹²⁾에서 검증된 Standard k- ω 모델을 사용하였다. 공동은 높이 586 mm인 덕트 내부에 설치되어 있으며, 공동의 높이(H)는 63.5 mm이다. 또한, 공동의 길이(L)는 4H이며, 공동의 상류와 하류의 길이를 각

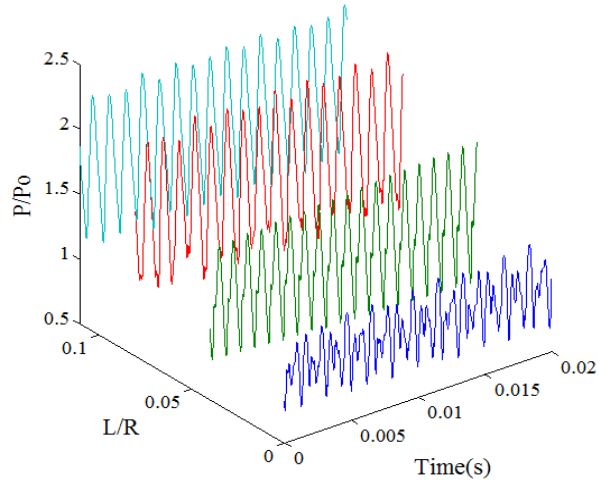


Fig. 3 Pressure histories at the cavity centre at $M_\infty = 1.4$

각 8.4H, 25.8H로 설정하였다. Fig. 2는 계산에 사용된 정렬 격자계로, 경계층이 발달하는 공동의 벽면 주변과 전단층 및 공동내부에 격자를 집중시켰다. 계산영역의 격자점은 약 8만개로 본 연구에서는 여러 격자에 대한 예비수치계산을 수행하여, 격자의존성을 확인하였다. 본 연구에서 사용된 기체는 대기상태의 공기를 적용하였다. 경계조건으로 입구와 출구에서 각각 Pressure Inlet, Pressure Outlet을 적용하여, Inlet에서 전압력과 전온도(300 K)를 지정하였으며, 정압은 대기 조건의 압력을 적용하였다. 또 벽면에서는 Adiabatic, No-slip 조건을 적용하였다.

Table 1에는 본 연구에 적용된 여러 변수 및 조건을 정리하였다. 공동의 길이와 곡면의 곡률반경비(L/R)를 L/R = 0.0, 0.04, 0.08, 0.11로 변화시켰으며, 상류로부터 공동으로 유입되는 주유동의 마하수(M_∞)를 0.4, 0.8, 1.4, 1.8로 변화시켰다. 공동 내부의 비정상 압력 진동은 공동 바닥 중심($x/L=0.5$) 지점에서 측정하였으며, 측정된 데이터는 FFT변환을 통한 PSD를 이용하여 공동유동의 진동특성을 조사하였다. PSD는 임의의 진동이나 음파와 같은 파형을 분석하여, 주파수에 따른 에너지 밀도를 쉽게 알 수 있다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 $M_\infty = 1.4$ 인 경우, 곡면의 곡률 반경의 비(L/R)에 대한 공동바닥 중심에서의 압력변화를 그래프로 나타내었다. 직관인 경우, 불규칙적인 압력특성이 나타났는데, 이는 공동내부에서 와류

의 생성 및 소멸과정으로 인해 혼합된 압력특성이 나타난 것으로 보인다. 곡관의 경우, 직관과 비교해 규칙적인 압력특성을 나타냈으며, 이는 공동내부에 생성된 크고 안정적인 와류로 인한 것으로 확인하였다.

곡면의 곡률 반경의 비(L/R) 및 입구 유동의 마하수가 주파수 특성에 미치는 영향을 조사하였다.

Fig. 4와 Fig. 5은 공동의 주진동 주파수를 조사하기 위하여, 공동 바닥의 중심인 $x/L=0.5$ 지점에서 측정된 주파수 값들을 그래프로 나타낸 것이다. 그림의 횡축은 무차원진동수(St , Strouhal number)를 그리고 종축은 PSD이며, 사용된 Rossiter의 수정된 실험식⁽⁵⁾은 다음과 같다.

$$St = \frac{fL}{U_\infty} = \frac{m - \beta}{\frac{M_\infty}{\sqrt{1 + \frac{(\gamma - 1)M_\infty^2}{2}}} + \frac{1}{\kappa}} \quad (1)$$

식 (1)은 공동의 길이와 유동의 마하수를 이용하여 주파수를 쉽게 예측할 수 있는 식이다. m 은 m 번째 진동 모드를 나타내고, M_∞ 은 자유유동의 마하수이다. β 는 공동 뒷전에서 소리의 방사와 와류의 흐름사이의 지연시간에 대한 비례상수, γ 는 회복 계수, κ 는 자유유동 속도에 대한 대류속도의 비이다. β , $1/\kappa$ 는 유동의 조건과 세장비에 따라 그 값이 달라지나, 실험⁽⁵⁾을 통해 최적화된 값인 0.25, 1.75를 사용하였다.

Fig. 4는 $M_\infty = 1.8$ 인 경우, 시간에 따른 압력값

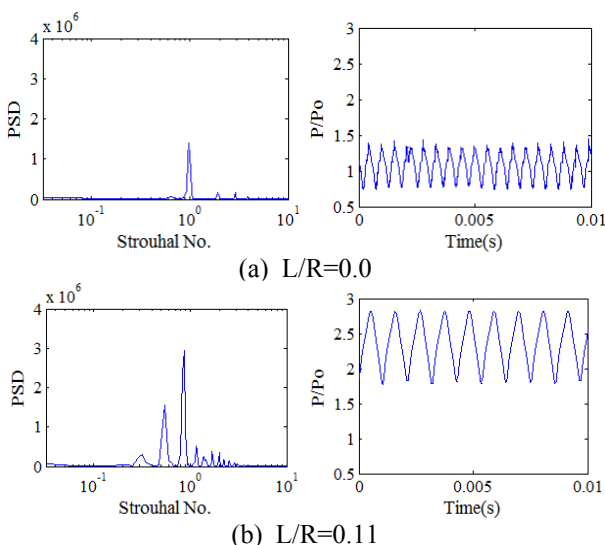


Fig. 4 Pressure histories and PSD at $M_\infty=1.8$

과 주파수 분석을 나타내었다. PSD 값은 곡면의 곡률반경의 값이 최대인 $L/R = 0.11$ 에서 높게 측정되었다. 앞서 수행한 정상 유동 분석에서 충격과 발생 후의 정압을 조사한 결과, $L/R=0$ 의 경우 108,376 Pa, $L/R=0.11$ 의 경우 243,196 Pa로, 곡관에서 압력 차이가 더 크게 발생했다. 곡관에서 발생한 높은 압력 차이는 전단층의 진동을 가진시켜, 공동 주변의 난류유동에 영향을 주게 된다. 이러한 난류유동의 변동으로 인해 곡관에서 PSD 값이 더 높게 측정된 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 마하수와 곡면의 곡률반경의 비에 따른 주파수 분석을 나타내었다. 아음속 유동에서 압력 변화를 분석한 결과, 직관과 곡관 모두 $M_\infty = 0.4$ 일 때 낮은 PSD 값을 가졌다. 직관의 경우 마하수가 증가함에 따라 PSD 값 또한 증가하였으나, 그 변화의 폭은 적었다. 하지만 곡관의 경우, 직관에 비해 마하수가 증가함에 따라 PSD 값이 크게 증가하였다. $M_\infty = 0.8$ 인 경우, 곡관이 직관에 비해 주진동 주파수의 PSD 값이 높게 관측되었으나, 곡면의 곡률 반경 변화에 따른 PSD 변화는 거의 없었다. 초음속 유동에서 압력 변화를 분석한 결과, 직관의 경우 마하수가 증가함에 따라 압력 진폭의 변화는 거의 없었으나, 곡관의 경우 마하수가 증가함에 따라 PSD 값이 크게 증가하였다. 따라서 곡관의 경우, 마하수가 증가함에 따라 압력 진동의 진폭 변화가 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 5을 통해 얻은 무차원 진동수(St)를 Rossiter의 실험식과 비교하였다. 그림의 횡축은 입구 마하수를 그리고 종축은 무차원 진동수(St)이다. 실선은 Rossiter의 실험식인 식 (1)에 의한 결과값이며, 각 m 번째 진동 모드에 따른 무차원 진동수(St)를 나타내었다. 첫 번째 피크 주파수에서, 마하수 변화와 관련 없이 직관과 곡관의 무차원 진동수(St)는 거의 변하지 않았다. 반면에 두 번째, 세 번째 피크 주파수의 경우 마하수가 증가함에 따라 직관과 곡관의 무차원 진동수는 Rossiter의 실험값을 따라 감소하였다. 곡관의 무차원 진동수는 $M_\infty = 1.4$ 일 때를 제외하곤, 직관에 비해 낮은 값을 가졌다. $M_\infty = 0.8$ 인 경우, 주진동 주파수는 두 번째 피크 주파수 모드에서 관측되었다. 이때, Rossiter의 실험식에 의한 두 번째 피크 주파수는 0.698이며, 직관의 경우 0.695으로, Rossiter의 실험값과 매우 일치하는 값을 가졌으

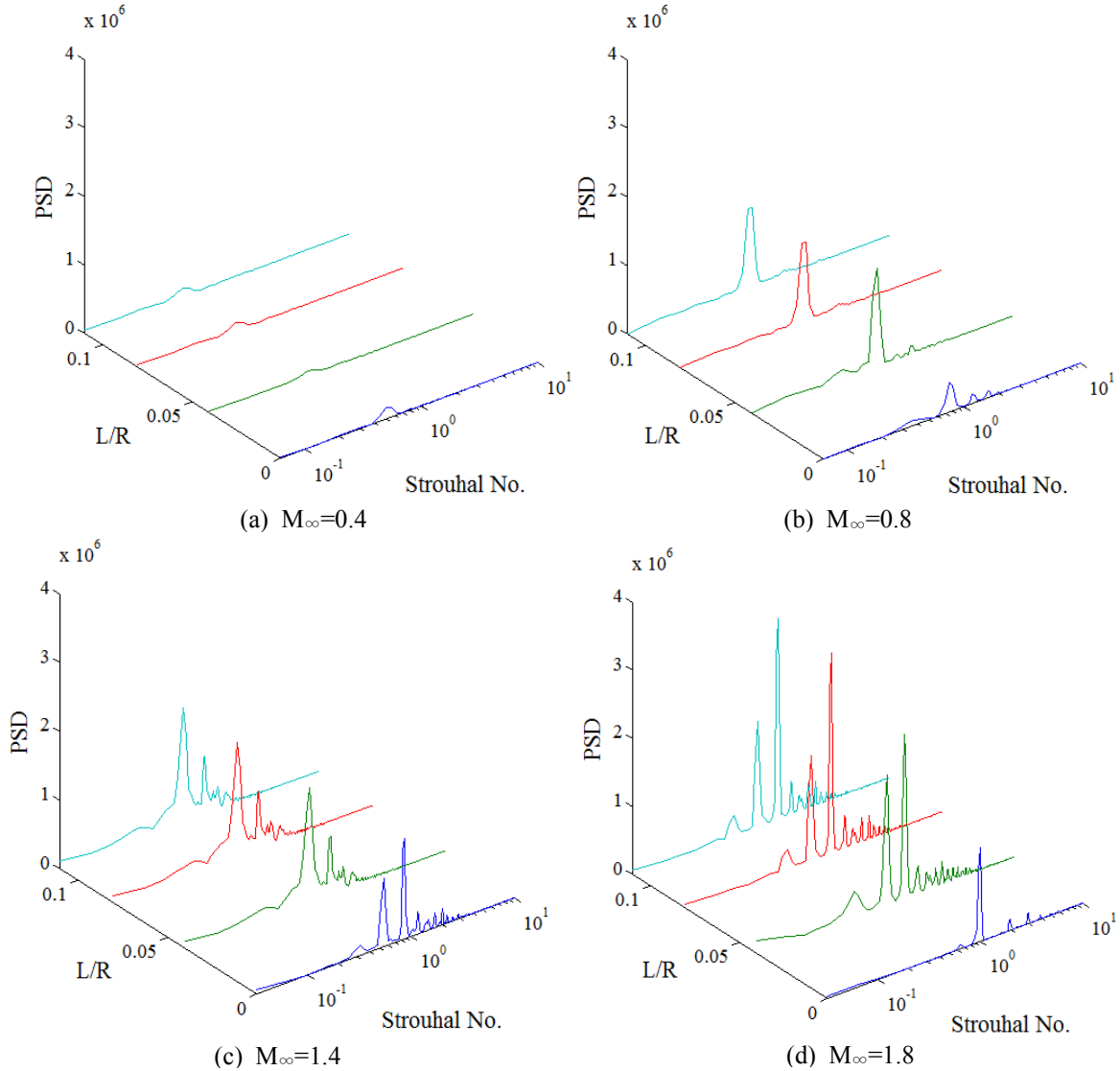


Fig. 5 Power spectrum density at $x/L=0.5$

나, 곡관($L/R=0.11$)의 경우, 0.633으로 실험값에 비해 낮았다. 또한 $M_\infty = 1.8$ 인 경우, 주진동 주파수는 세 번째 피크 주파수 모드에서 관측되었으며, Rossiter의 실험식에 의한 세 번째 피크 주파수에서의 무차원 진동수는 0.865으로, 직관의 경우, 0.931, 곡관($L/R = 0.11$)의 경우, 0.836으로 측정되었다. 두 번째 피크 주파수를 분석한 결과, 직관에서 무차원 진동수는 실험값과 매우 일치하였으나, 곡관($L/R=0.11$)의 경우 Rossiter의 실험값에 비해 낮은 값을 가졌다. 세 번째 피크 주파수 일때, $M_\infty = 0.4, 1.4$ 인 경우 높은 무차원 진동수를 가졌으나, $M_\infty = 0.8, 1.8$ 인 경우, 반대로 낮은 값을 가졌다. 직관 및 곡관에서의 주파수 분석으로부터 곡관에서의 무차원 진동수는 직관에 비해

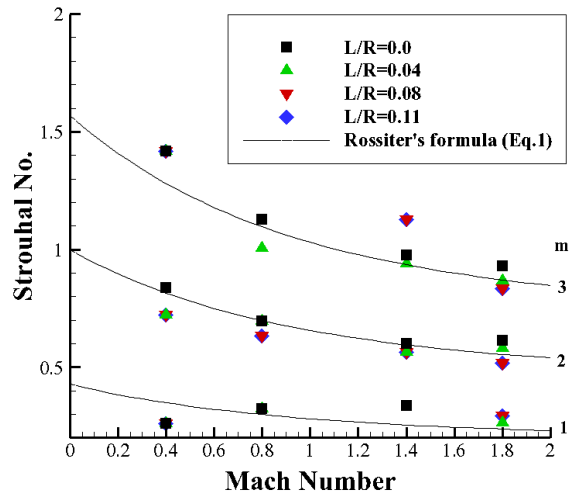


Fig. 6 Non-dimensional frequencies with Mach number

낮은 값이 측정되었으며, Rossiter의 실험값에 비해 낮은 값을 가지는 것을 알 수 있었다.

아음속 및 초음속 공동 유동에서 한 주기 동안 발생하는 유동 특성을 관찰한 결과를 Fig. 7, 8과 같이 나타내었다. 아음속 영역에서의 유동특성은 직관과 곡관 모두 유사한 특징을 가져, 곡관에서의 공동특성만 나타내었다. Fig. 7는 $L/R = 0.11$ 이고 $M_\infty = 0.8$ 인 경우, 한 주기에 대해 $\Delta t = 0.4ms$ 의 시간간격으로 공동의 마하수와 유선을 나타낸 그림이다. Fig. 7(A)에 나타낸 바와 같이, 공동내부에는 세 개의 큰 와류들이 존재하는 것을 볼 수 있다. 시간이 지남에 따라 공동 상류에 생성된 와류가 소멸하고 유동이 공동 내부로 유입되면서 생성된 와류가 성장한다. 성장한 와류는 박리되어 공동 뒷전에 있던 와류와 합쳐져 큰 와류를 형성

하였으며, 공동의 뒷전에 부딪히면서 분리된 일부 유동은 공동내부에서 재순환하여 공동의 앞쪽 모서리에 작은 와류가 생성하는 것을 확인할 수 있다. 그림을 통해 아음속 공동유동에서 소음이 발생하는 이유는, 공동내부에서 재순환하는 유동과 공동의 전단에서 박리된 유동이 주유동과 합쳐져 상호작용을 일으키면서 경계층을 가진시키기 때문인 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 직관과 곡관($L/R=0.11$)에 부착된 공동에 대해, $\Delta t = 0.1ms$ 의 시간간격으로 공동의 마하수와 유선을 나타낸 그림이다. 직관에서의 공동유동은 기본적으로 공동 상류에서 재순환하는 와류와 공동 하류에 큰 와류가 존재하였다. 그에 반해, 곡면에서의 공동은 공동의 앞면에 크고 안정적인 와류가 존재하였으며, 직관에 비해 공동 상류에 생성되는 재순환 와류의 크기가 작았다. 따라서 직관에 비해 곡관에 부착된 공동에서 적은 압력 교란이 발생할 것을 예측할 수 있었으며, Fig. 3을 통해 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구는 곡면 벽상에 설치한 공동유동의 압력 진동을 조사하기 위해, 2차원 비정상 Navier-Stokes 방정식을 적용하여 수치계산을 수행하였다. 곡면의 곡률반경, 유동의 마하수를 변화시켜 공동의 유동특성을 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 아음속 유동인 경우, 직관과 곡관에 부착된 공동에서 서로 유사한 유동특성을 가졌다.
- (2) 곡관에 설치된 공동의 경우, 직관에 설치된 공동에 비해 와류의 상호작용으로 인한 압력 교란을 완화시켰으나, 압력 진동의 진폭을 증가시켰다.
- (3) 압력 진동의 진폭 변화는 마하수가 증가함에 따라 직관에 비해 곡관에 설치된 공동에서 더 크게 증가하였다.
- (4) 주파수 분석 결과, 곡관의 무차원 진동수는 직관에 비해 낮은 값이 측정되었으며, 또한 Rossiter의 실험값에 비해 낮은 값을 가졌다.

후 기

본 연구는 서울대학교 차세대 우주추진 연구센터와 연계된 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 선도연구센터지원사업(NRF-2013R1A5A1073861)의 연구 결과입니다. (과제번호: 0659-20140012)

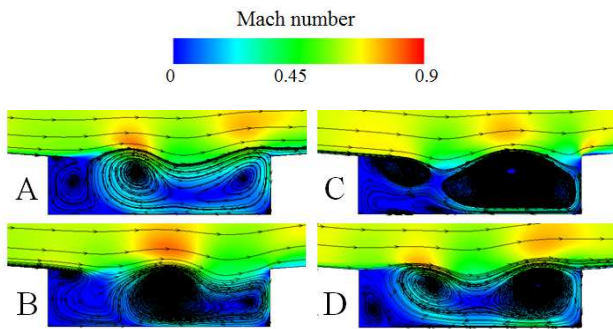


Fig. 7 Mach number contours with streamline patterns at $M_\infty=0.8(L/R = 0.11)$

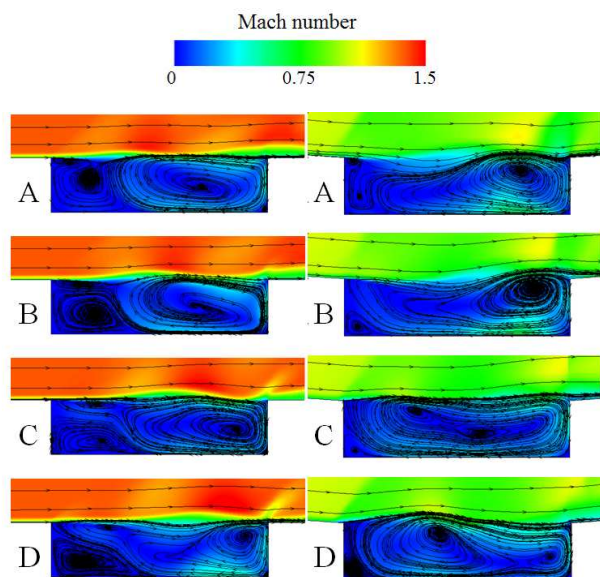


Fig. 8 Mach number contours of straight channel(left) and curved channel(right $L/R=0.11$) & streamline patterns at $M_\infty=1.4$

참고문헌
(References)

- (1) Krishnamurthy, K., 1955 "Acoustic Radiation from Two-Dimensional Rectangular Cutouts in Aerodynamic Surface," NASA-TN-3487.
- (2) Rossiter, J. E., 1964, "Wind Tunnel Experiments on the Flow over Rectangular Cavities at Subsonic and Transonic Speeds," Reports and Memoranda No. 3438, Aeronautical Research Council, pp. 1~36.
- (3) Rockwell, D. and Naudascher E., 1978, "Review-Self Sustaining Oscillations of Flow Past Cavities," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 100, No. 6, pp. 152~165.
- (4) Bilanin, A. J. and Covert, E. E., 1973 "Estimation of Possible Excitation Frequencies for Shallow Rectangular Cavities," *AIAA Journal*, Vol. 11, No. 3.
- (5) Heller, H. H., Holmes, D. G. and Covert E. E., 1971, "Flow-Induced Pressure Oscillations in Shallow Cavities," *J. Sound & Vib.*, vol. 18, pp. 545~553.
- (6) Zhang, X., 1995, "Compressible Cavity Flow Oscillation Due to Shear Layer Instabilities and Pressure Feedback," *AIAA Journal*, Vol. 33, No. 8, pp. 1404~1411.
- (7) Zhang, X., Rona, A. and Edwards, J. A., 1998, "The Effect of Trailing Edge Geometry on Cavity Flow Oscillation Driven by a Supersonic Shear Layer," *The Aeronautical Journal*, Vol. 102, No. 1013, pp. 129~136.
- (8) Yang, D. G., Li J. Q., Fan, Z. L. and Yao, D., 2010, "Aerodynamic Characteristics of Transonic and Supersonic Flow over Rectangular Cavities," *Flow Turbulence Combust*, Vol. 84, No. 4, pp. 639~652.
- (9) Atvars, K., Knowles K., Ritchie, S. A. and Lawson, N. J., 2009, "Experimental and Computational Investigation of an 'Open' Transonic Cavity Flow," Proceedings of IMechE. Part G: *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 223, No. 4, pp. 357~368.
- (10) Lee, Y. K., Kang, M. S., Kim, H. D. and Setoguchi T., 2008, "Passive Control Techniques to Alleviate Supersonic Cavity Flow Oscillation," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 24, No. 4, pp. 697~703.
- (11) Stallings, R. L. and Wilcox, F. J., 1987, "Experimental Cavity Pressure Distributions at Supersonic Speeds," NASA TP-2683.
- (12) Ye, A. R., Das, R. and Kim, H. D., 2015, "A Study of the Transonic and Supersonic Flows over a Open Cavity on Curved Wall," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 39, No.3. pp. 231~236.