

# 난류 경계층에 놓인 공동 내부유동에 관한 수치해석적 연구

이 영 태\* · 임 희 창\*\*†

\* 부경대학교 기계공학과, \*\* 부산대학교 기계공학과

## Numerical Study on Turbulent Flow Inside a Channel with an Extended Chamber

Young Tae Lee\* and Hee Chang Lim\*\*†

\* Dept. of Mech. Engineering, Pukyong Nat'l Univ.,

\*\* School of Mech. Engineering, Pusan Nat'l Univ.

(Received May 25, 2010 ; Revised August 21, 2010 ; Accepted August 23, 2010)

**Key Words** : Extended chamber(확장챔버), Fluctuating Pressure(섭동압력), LES (대와류모사)

**초록**: 본 논문은 공동 주위 난류유동특성을 LES 기법으로 수치해석을 수행하여 알아보았다. 본 연구에 적용된 레이놀즈수는 공동 깊이만큼의 높이  $h$  에서의 유속을 기준으로  $1.0 \times 10^5$  이며 3 차원 공동에서의 유동특성을 알아보았다. 적절한 비압축성 Filtered Navier-Stokes 방정식을 적용하기 위해, 계산격자를 공동 표면 근처에는 조밀하게 멀어질수록 성기게 생성하였으며, 이는 계산시간을 단축시키며 빠른 수렴을 도와준다. 또한, Boussinesq 가설을 subgrid-scale 난류모델에 적용하였고, Subgrid-scale 난류점성을 얻기 위해 smagorinsky-Lilly SGS 모델을 적용하였으며, 그 때의 CFL 수는 1.0 이다. 또한, 본 논문은 서로 다른 4 가지 형상의 공동의 및 입구조건에 변화에 따른 유동 특성도 함께 연구되었다.

**Abstract**: The paper describes a Large Eddy Simulation (LES) study of turbulent flow around a cavity. A series of three-dimensional cavities placed in a turbulent boundary layer are simulated at a Reynolds number of  $1.0 \times 10^5$  by considering  $U$  and  $h$ , which represent the velocity at the top and the depth of the cavity, respectively. In order to obtain the appropriate solution for the filtered Navier-Stokes equation for incompressible flow, the computational mesh forms dense close to the wall of the cavity but relatively coarse away from the wall; this helps reduce computation cost and ensure rapid convergence. The Boussinesq hypothesis is employed in the subgrid-scale turbulence model. In order to determine the subgrid-scale turbulent viscosity, the Smagorinsky-Lilly SGS model is applied and the CFL number for time marching is set as 1.0. The results show the flow variations inside cavities of different sizes and shapes.

- 기호설명 -

- $U$  : 입구에서의 평균유속(m/s)
- $Re$  : 레이놀즈 수
- $h$  : 공동의 깊이
- $C_p$  : 표면압력계수

### 1. 서론

충돌전단류 (Impinging shear layers)의 한 형태인 공동을 지나는 유동은 항공기의 윙이나 바디, 선박이나 잠수함들의 선체, 자동차엔진 내부의 유동에 이르기까지 우리 생활도처에서 일어나는 대표

적인 3 차원 특성이 강한 진동/소음 현상을 일으킨다. 유동이 공동을 통과할 경우 공동 내부의 유동장과 외부 흐름을 구분하게 되는 전단층이 존재하게 되며 이는 공동의 길이방향으로 형성된다. 이는 공동 외부영역과 내부영역의 상호작용에 의해 비정상유동에 의한 전단층의 진동을 유발하게 된다. Heller 와 Bliss<sup>(1)</sup>는 공동 내에서의 압력파의 상호작용에 대해서 설명하였다. 특히, 공동은 그 형상이 극히 단순함에도 불구하고, 공동 주위에서 발생하는 유동 및 소음이 전파되는 특성은 그 형상이나 위치 및 유입되는 유동의 특성에 따라 매우 다양/복잡하고, 난류나 비정상유동에 의해 유발되는 부압/배압과 섭동압력, 그리고 소음/진동(flow induced noise/vibration) 등과 관련한 복잡한 유동 특성들을 발생시킨다. 공동에 의한 유동의 박리

† Corresponding Author, hclim@pusan.ac.kr

그리고 재부착에 의한 소음/진동을 발생시키며, 주위 시스템에 방해 및 불안정성을 야기시킬 뿐만 아니라 때로는 피로파괴의 위험성에 노출되게 된다. 이러한 소음/진동을 줄이고 주위 시스템의 안정성 유지하기 위해 공동유동의 정확한 해석과 이해가 필요하다. 육면체 형상을 가지는 공동을 지나는 유동특성에 대한 기존 연구를 살펴보면 Krishnamurty,<sup>(2)</sup> Rossiter,<sup>(3)</sup> Heller<sup>(4)</sup> 등 연구에서 공동유동의 압력진동은 공동 내부의 규칙적인 유동과 경계의 불규칙적인 유동에 의해 발생한다고 보고한 바 있다. Zhang 등<sup>(5)</sup>은 2 차원 얇은 공동의 전방 모서리 형상의 변화에 따른 초음속 공동 유동 특성에 관한 연구를 수행하였으며, Larcheveque 등<sup>(6)</sup>은 3 차원 공동의 깊이 변화에 따른 유동특성을 LES 를 이용해 수치 분석 하였다. 기존의 연구들은 대부분 입구조건이 균일 유동 하에서 육면체 형상의 공동에 대한 연구가 많이 이루어져왔다. 하지만 본 연구에서는 육면체 형상뿐만 아니라 다양한 형상의 공동 및 입구유동 조건에 따른 공동 주위의 3 차원 유동 특성을 파악하고자 한다.

공동을 지나는 유동은 일반적으로 고레이놀즈 수 유동으로써, 고주파수 영역의 미소 스케일 (small scale)과 난류 특성을 가지는 간헐(intermittence)적인 운동이 서로 유동에너지 전달을 유발시키며 이는 유동해석을 더욱 복잡하게 만든다. 즉, 이러한 현상으로 인해 RANS 기법 만으로는 유동특성을 기술하는데 무리가 있으며, 그렇다고 모델링을 쓰지 않고 난류의 에디를 표현하는 최소 스케일인 Kolmogorov 스케일을 포함하는 DNS(Direct Numerical Simulation)해석을 이용하는 것은 비용이나 시간이 많이 드는 비현실적인 방법이다. 따라서, 이러한 실제적인 관점에서 본다면 평균유동을 모사할 수 있는 RANS 기법과 어느 정도 규모의 비정상

유동을 모사할 수 있는 LES (Large Eddy Simulation) 를 사용하는 것이 바람직하다고 판단된다. 본 연구에서는 상용 CFD 코드인 Ansys Fluent 를 사용하였으며, 격자의존성의 확인을 위해 표준  $k-\epsilon$  난류모델 플랫폼 기반으로 공동의 격자 개수를 변경하면서 최적 도메인 크기를 선정하였다. 또한, 공동의 형상을 바꾸어가며 공동 내부에서 발생하는 유동의 특성을 비정상, 비압축성 3 차원 Large Eddy Simulation (LES) 해석기법을 적용하여 수치 계산을 수행하였다. 실제 적용성 연구를 위하여 자동차 엔진 내부 유동과 같은 입구영역에서 발생하는 주기적인 맥동류 유동에 의한 공동 주위 유동특성도 병행하여 알아보았다. 이러한 수치해석을 통하여 소음/진동에 영향을 줄 수 있는 공동의 형상 및 유동의 입구조건에 의한 공동 주위의 유동 특성을 파악하였다. 본 연구를 요약하면, 수치해석기법은 우선 표준  $k-\epsilon$  난류 모델을 사용하여 평균 유동장 해석을 하였고 이후 LES 를 이용한 비정상 유동 수치해석을 수행하였다.

## 2. 수치 해석 방법

Fig. 1 은 본 공동 유동에서 사용되어진 계산영역 및 경계조건을 나타낸 그림이다. 그림에서 수치해석영역은 x 방향(유동방향)으로 무차원 단위 2.1의 길이를 가지며 y, z 방향으로 각각 0.5의 크기를 가진다. 해석영역의 중앙부 바닥에 위치하는 정육면체 형상과 원통형 확장부분의 길이 및 높이는 각각 0.1의 크기를 가진다. 그리고 경계조건으로 완전 발달한 난류경계층 유속을 입구조건으로 설정하였으며, 출구조건은 압력을 제외한 다른 변수들의 출구방향으로의 구배가 없는 조건을 주었고 양 옆면은 periodic 경계 조건을 부과하였다. 또한, 아래면은 난류경계층을 생성시키기 위한 벽조건 (wall condition)을 상부면은 symmetry 조건을 주어 해석을 수행하였다. 또한, 입구조건에 맥동류를 생성하기 위하여 Fig. 2 에서와 같이 3 개의 주기함수를 적용하였다. Fig. 2(a)는 시계열에서 입구 유동의 유속을 나타내며 시간에 따라 여러가지 복잡한 사인파들이 복합적으로 적용되어있는 것을 확인할 수 있다. 또한, Fig. 2(b)는 이 시계열의 신호를 주파수영역에서 바라 본 결과로 입구조건에 주어진 맥동류가 어떠한 주기를 가지는지 알 수 있다. 즉, 3 가지 주기적인 파가 포함되어있으며, 주기 0.01 인 저주파수영역의 사인파와 0.005 그리고 0.003 주기의 사인파가 복합적으로 들어가 있는 것을 확인할 수 있다.

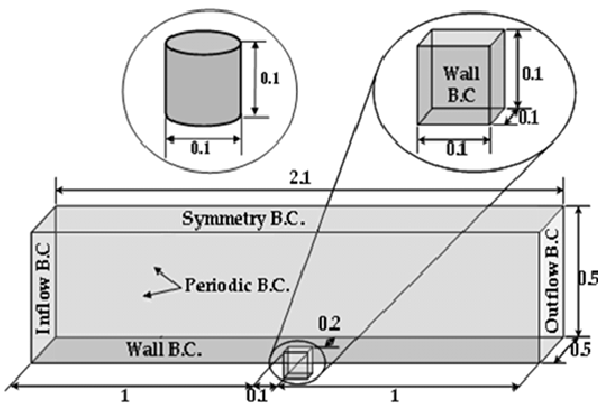


Fig. 1 Computational domain aligned with a cavity

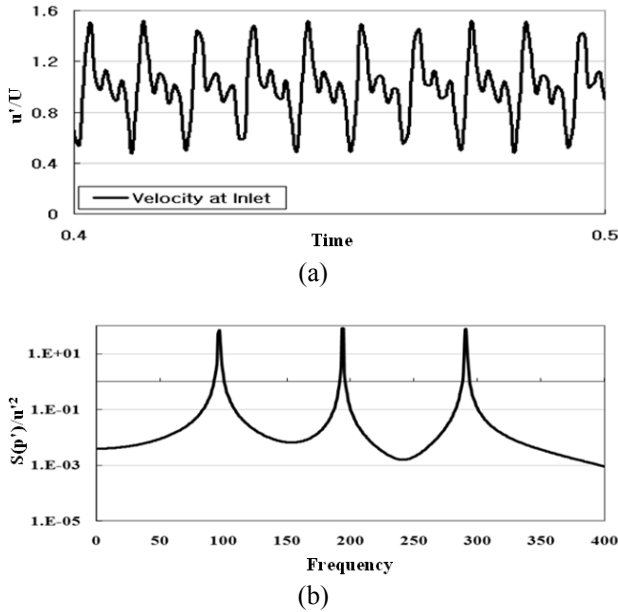


Fig. 2 (a) Temporal history of inlet velocity; (b) Power spectra of inlet velocity

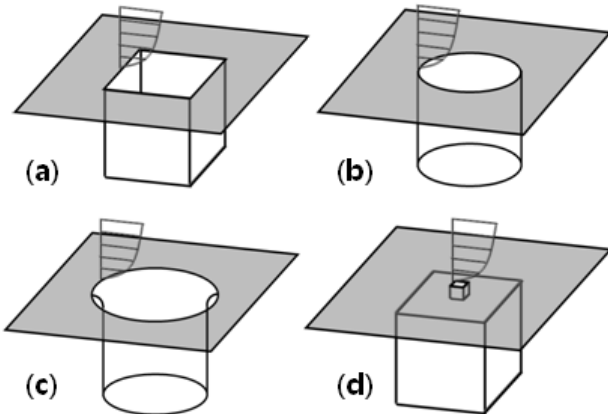


Fig. 3 Computational grid system; (a) Hexahedron, (b) Cylinder, (c) Rounded Cylinder, (d) Resonator

LES 수치해석을 수행하기에 앞서 선택된 격자계의 크기와 형상에 대한 의존성을 확인하기 위하여 우선 채널유동에 대해 Table 1 과 같이 서로 다른 격자수를 가지는 격자계를 생성 하였다. 성긴(course) 격자는 총 3 만개 가량의 격자를 사용하였으며 세밀한(fine) 격자의 경우 6 만개 가량의 격자를 사용함으로써 2 배가량 격자차이로 인한 유동특성의 변화를 확인하였다. 유동해석을 위하여 동일한 표준난류모델 (여기서는  $k-\epsilon$  난류 모델)을 기본적으로 이용하였고, 서로 다른 격자 크기에 대해 격자의존성을 확인한 후, Fig. 3에서 보이는 것과 같은 기본 형상인 정육면체형상 (Fig. 3(a)) 이외에 원통형상(Fig. 3(b)), 원통형상 공동의 모서리부분에

Table 1  $y^+$  for grid independency check

	Coarse	Medium	Fine
$y^+$	20	10	1
# of Grid	35,000	42,000	63,000

에지반지름을  $0.1h$  ( $h$ 는 공동 깊이)인 곡면을 준 형상인 곡면원통형상(Fig. 3(c)) 및 좁은 입구영역을 가지는 공명기형상(Fig. 3(d))의 모델에 대하여 유동 특성을 서로 비교하였다. 각 형상의 공동 유동해석은 유한체적법을 사용하여 시간 의존적인 Navier-Stokes 방정식을 만족시킨다. 안정적인 LES 수치해석을 수행하기 위해 표준  $k-\epsilon$  난류모델로 먼저 유동해석을 수행하여 유동을 안정화시킨 후, 이어서 LES 해석을 수행하여 모든 영역에 대해 시계열의 데이터를 획득하였다.

공동 내 비정상 유동 특성을 파악하기 위해 공동의 후방의 모서리 중앙점과 공동 밀면중심의 유동변화에 의한 섭동압력의 주파수계 분석인 파워스펙트럼을 이용하였다.

### 3. 해석 결과 및 고찰

#### 3.1 격자 의존성 해석 결과

본 수치해석을 수행하기 전에 격자 수에 따른 수치영역의 변화특성을 확인하기 위하여, 주어진 영역 내 격자 수를 변화시키고 이에 따른 격자 의존성을 확인하였다. 이는 또한 차후 적용될 공동 형상에 따른 유동특성을 확인하기 전에 수치해석 격자에 따라 유동특성이 달라지는 것을 미연에 방지하고 계산시간 단축을 하기 위함이다. Fig. 4 는 Table 1 에 주어진  $y^+$  변화에 따른 격자 의존성을 나타낸 것이다. 입구조건에 사용되어진 유동의 경우, 3 가지 격자모델이 모두 비슷한 결과를 보여 주었으나 난류 강도에서는 성긴 격자가 다른 2 가지 격자모델에 비해 큰 값을 보여주었다. 이는 성긴격자의 경우, 자유유동쪽의 에너지생성은 세밀격자와 유사하게 생성되지만, 벽면에서 에너지 점성 소산(viscous dissipation)을 시킬 격자의 수가 상대적으로 적기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서 적용한 최종 격자 모델은  $y^+$ 가 10, 공동에서의 최초격자는  $y^+$ 를 1 로 하여 중간, 세밀한 격자 모델을 조합하여 사용하였다.

Fig. 5 는 표준  $k-\epsilon$  난류모델에서의 평균유속 및 난류강도를 실험값과 비교한 것이다.(Lim 등<sup>(7)</sup>) 그림에서 확인할 수 있듯이 수치해석의 입구조건은

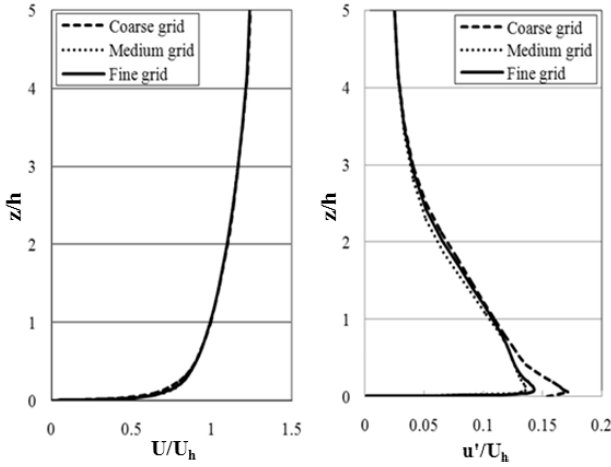


Fig. 4 Grid independency check (a) mean velocity profiles, (b) turbulence intensity profiles. Figures for the velocity at the equivalent height of cavity depth,  $U_h$

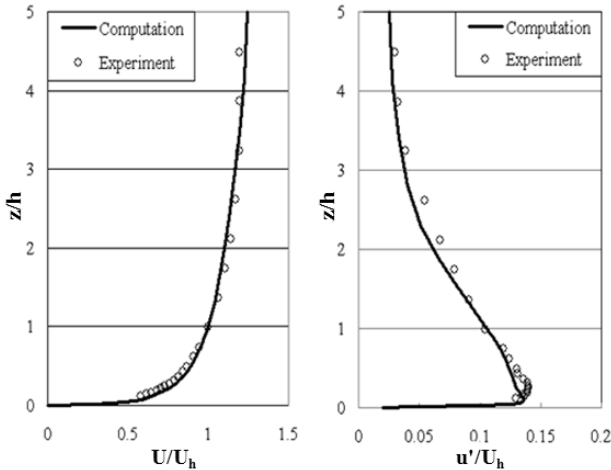


Fig. 5 Comparison with experimental results (a) mean velocity profiles, (b) turbulence intensity profiles. Figures for the velocity at cavity depth,  $U_h$

실험에서 구한 결과값과 상당히 유사한 양상을 보이는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6 은 본 연구에서 최종적으로 결정된 3 차원 격자계의 일부를 보여 준다. 보다 정밀한 유동특성을 확인하기 위하여 공동 전후의 바닥 및 벽 부근에 수치격자를 충분히 밀집시킨 것을 볼 수 있다.

3.2 형상에 따른 유동 해석 결과

Fig. 7 은 유동방향으로 형상별 모델의 중앙선 지점에서의 표면압력계수를 비교하기 위해 생성된 구역을 나타낸 그림이다. Fig. 8 은 유동방향으로 3 차원 공동 형태에 따른 표면압력변화를 서로 비교한 그림이다. 공동 중앙선을 따라 표면압력계수는

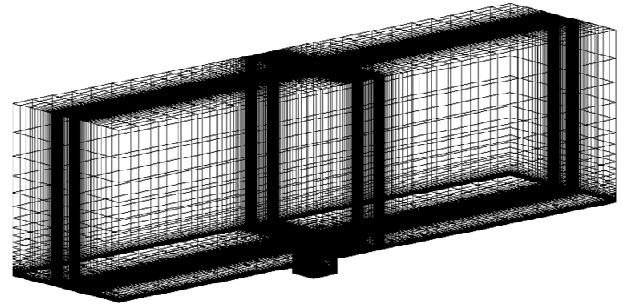


Fig. 6 3-D Computational grid system

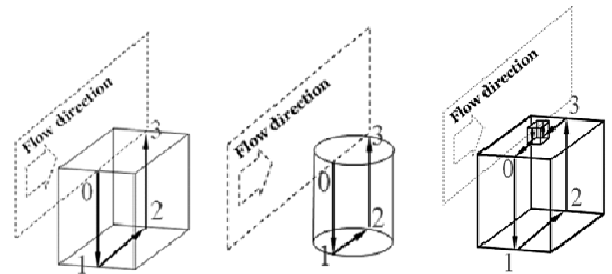


Fig. 7 The models with line along the centerline with different shape of cavity

공명기 형상을 제외하고 다른 3 가지 공동 전면영역(0~1)에서 전반적으로 음의 압력계수를 가지는 것을 확인할 수 있다. 그리고, 아래 밀면영역(1~2)과 후면영역(2~3)에서는 음과 양의 표면압력이 주기적으로 나타나는 것을 볼 수 있다. 최대 압력은 박리된 유동이 충돌하는 공동 후면에서 가장 크게 나타났다. 그리고 그 크기는 정육면체의 경우가 가장 컸고, 원통형, 곡면원통형 순으로 차이가 있었다. 그림에서 원통형과 곡면원통형의 경우 그 표면압력의 변화가 거의 나타나지 않았다. 이는 곡면의 모서리가 유동방향의 표면압력변화에는 거의 영향을 주지 않고 있다는 것을 보여준다. 반면, 공명기 형상은 실질적으로 박리된 유동이 영향을 주는 좁은 관의 후면(3.4~3.6)에서의 표면압력만 높게 나타나고, 그 외의 영역에서는 표면압력의 변화가 거의 나타나지 않았다. 이는 유동이 좁은 관의 후면 모서리에 충돌함으로 생기는 에너지가 넓은 공동으로 전달되지 못하고 모두 소산되었다고 볼 수 있다.

Fig. 9 에서는 유동방향에 수직인 위치에서의 공동 내부 표면압력계수의 분포를 보여주고있다. 유동방향에 따른 결과와 마찬가지로 원통형과 곡면원통형의 경우, 서로 유사한 표면압력특성을 보여주고 있다. 정육면체 공동은 모서리부분( $y/h=1,2$ )을 제외하

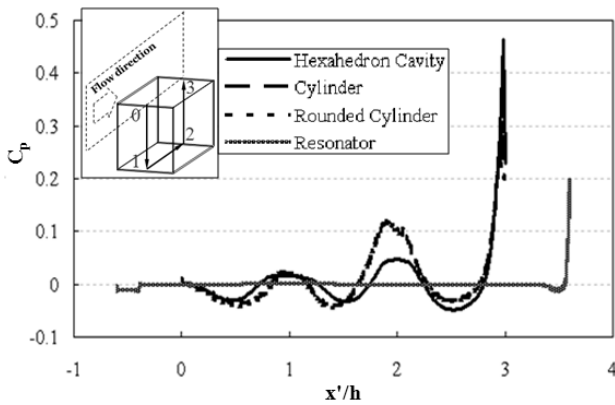


Fig. 8 The surface pressure coefficient along the centerline with different shape of cavity

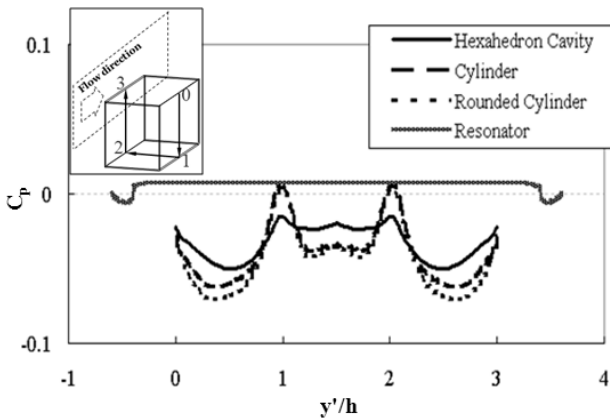


Fig. 9 The surface pressure coefficient along the transverse line with different shape of cavity

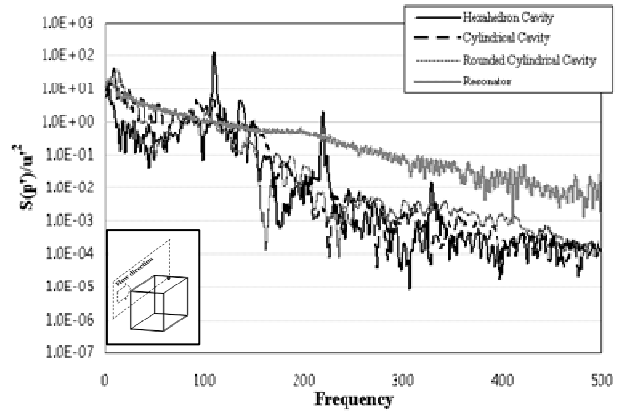


Fig. 10 Power spectrum with different shape at the rear rear edge of the cavity

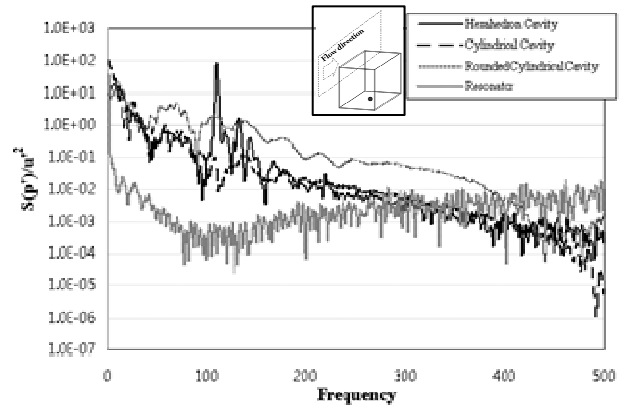


Fig. 11 Power spectrum with different shape at bottom center of the cavity

고는 원통형 공동에 비해 대체적으로 높은 표면압력 값을 가지며 원통형 공동은 대부분 낮은 압력계수를 가지는데 비해 공명기 형태의 경우에는 전 영역에 걸쳐 0 에 가까운 결과를 가지며 그 크기 변화는 거의 일어나지 않는 것을 확인하였다. 이는 공동의 형상에 따라 발생할 수 있는 압력이 크게 달라짐을 의미하며, 공명기형상의 경우 공동 내부에 압력 변화가 거의 없다는 것을 의미한다.

### 3.3 비정상 유동해석 결과

Figures 10 과 11 은 앞에서 언급한 4 가지 형상의 공동(즉, 정육면체형, 원통형, 곡면원통형, 공명기형)의 유동에 의한 변동압력의 주파수 특성을 2 가지 위치(후면 모서리와 밑면 중앙)에서 알아보기 위하여, 변동압력 스펙트럼값으로 분석한 것이다. Fig. 10 에서 정육면체 형상의 경우 입구조건이 균일한 유속임에도 불구하고 110Hz 부근에서 가장 큰 주 진동 주파수를 나타내며, 이후 정수배의 주

파수 값에서 피크를 가지는 특성을 보이고 있다. 이런 현상은 유동이 공동을 통과할 때 공동 전방 모서리에서 박리로 인해 생성된 전단층이 켈빈-헬름홀츠 불안정성(Kelvin-Helmholtz instability)에 기인하여 성장하는 것으로 보이며, 이 유동이 공동 후면에서 충돌했을 때 공동 내부로 흘러 들어간 유동이 공동 내부를 순환하며 생기는 피드백 작용에 의해 발생하는 것으로 보인다. 특히, 이런 유동 특성은 원통형과 공명기형 공동의 경우에는 뚜렷한 주 진동 주파수가 나타나지 않았다. 형상이 원통형일 경우에는 측면에서 불규칙하게 공동 내부로 들어오는 유동의 간섭으로 정육면체형에서 나타나는 피크값이 나타나지 않았다. 공명기형의 경우에는 좁은 공동 입구를 유동이 통과해야 하고, 통과한 유동에 의해 공동 내부로 에너지가 전달되었다 하더라도 그 유동이 활발하지 못할 것으로 판단된다. 이는 정육면체형 공동에서 나타나는 주기적인 피크값이 보이지 않는 이유로 설명되어 진

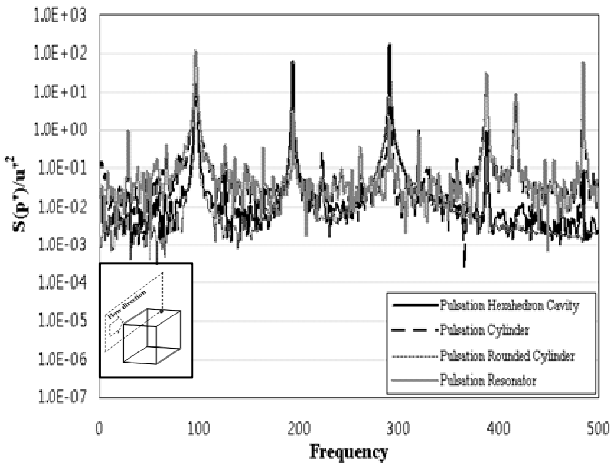


Fig. 12 Power spectrum with different shape at the rear rear edge of the cavity. (under pulsating inlet condition)

다. Figures 10 과 11 의 전체적인 스펙트럼 분포를 보게되면 정육면체형과 2 가지의 서로 다른 형상의 원통형 공동은 저주파수에서 높은 에너지를 가지며 고주파수로 갈수록 에너지가 감소하는 것을 볼 수 있다. 그러나 공명기형 공동의 경우 그 감소폭이 다른 형상에 비해 작거나 오히려 증가하는 등 전혀 다른 양상을 보이고 있다.

3.4 비정상 맥동류 유동해석 결과

Figures 12 와 13 은 비정상 유동해석에서 입구조건에 맥동류 유동을 적용하였을 때 앞서 언급한 위치에서의 변동압력 스펙트럼값을 분석한 것이다. Fig. 12 는 공동 후면 모서리 중앙에서의 결과로 맥동류 입구조건에 의한 영향이 지배적으로 나타났다. Fig. 13 은 공동 밑면에서의 결과로서 여러가지 다양한 스펙트럼 분포가 나타났다. 그 중에서 공명기형은 입구에서 주어진 맥동류에 의한 피크값이 좁은 입구영역을 통과하게 되면서 모두 사라지는 흥미로운 결과를 나타냈다. 이는 입구에서 주어진 맥동류의 영향에 의한 에너지가 공명기형 공동 내부로 전달이 원활하지 못하기 때문으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 난류 유동장에 놓인 여러 형상의 공동에 대해 표준 k-ε 난류 모델과 Large Eddy Simulation 을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 정확한 수치해석을 수행하기 위하여 우선 채널 유동에서의 격자의존성을 확인하고, 유동해석에 최적의 격자계를 선정하였다.

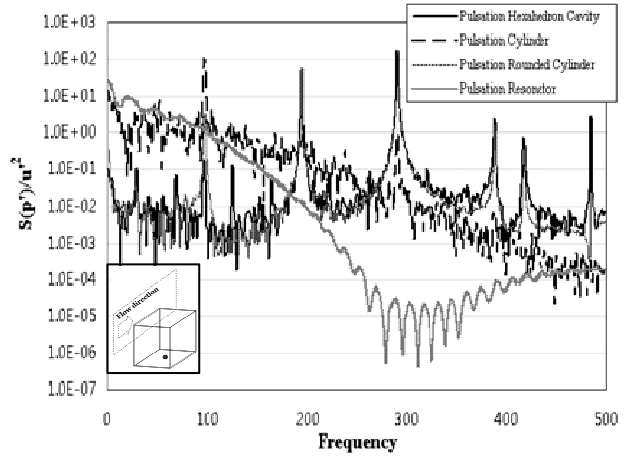


Fig. 13 Power spectrum with different shape at bottom center of the cavity. (under pulsating inlet condition)

공동의 형상을 변화시키기에 따라 내부의 위치에 따른 압력계수의 변화는 정육면체 형상을 가지는 공동의 경우에 가장자리 형상이 원통형의 경우가 더 낮은 압력계수가 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 비정상유동의 파워스펙트럼분석을 통해 외부의 유동과 공동 사이의 가장자리 형상이 완만할수록 최대압력을 감소시킬 수 있음을 알 수 있었다. 균일유동 입구조건에서 정육면체형은 공동 내부에서 유동의 순환에 의한 주기적인 피크가 발생하였다. 이러한 공동 내부 유동의 순환에 의한 피크는 맥동류 입구조건하에서는 입구조건에 의해 생성되는 주기적인 피크로 인해 발견하기 어려웠다. 이와 비슷한 특성이 원통형 공동에서도 나타났으나, 공명기형은 좁은 공동 입구에 의해 공동 내부에서 유동이 원활하지 않으며 맥동류 유동의 영향도 나타나지 않았다. 이러한 결과는 공동의 형상을 적절히 변형함으로써 유동에 의한 소음/진동 특성을 파악하는데 기초적인 자료가 될 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2009 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단(또는 한국과학재단)의 지원을 받아 수행되었으며(No. 2009-0076096), 2010 학년도 부산대학교 신입교수연구정착금 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

(1) Heller, H. and Bliss, D., 1975 “Aerodynamically

- Induced Pressure Oscillations in Cavities: Physical Mechanisms and Suppression Concepts,” U.S AirForce Fluid Dynamics Lab.,AFFDL-TR-73-133, Dayton, OH, February 1975.
- (2) Krishnamury, K., 1955, “Acoustic Radiation from Two-Dimensional Rectangular Cutouts in Aerodynamic Surfaces,” NACA TN-3487.
- (3) Rossiter, J.E., 1964, “Wind-Tunnel Experiments on the Flow over Rectangular Cavities at Subsonic and Transonic Speeds,” *Aeronautical Research Council Reports and memoranda* 3438.
- (4) Heller, H.H., Holmes, D.G., and Covert, E.E., 1971, “Flow-Induced Pressure Oscillations in Shallow Cavities,” *Journal of Sound and Vibration*, Vol.18, pp.545~553.
- (5) 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.
- (6) Larcheveque1, L., Comte, P. and Sagaut, P., 2004 “Large-Eddy Simulation of Flows Past Cavities,” AFM Research Group Seminar of Southampton.
- (7) Lim, H.C. and Jeong, T.Y., 2008, "Study on the Generation of Turbulent Boundary Layer in Wind Tunnel and the Effect of Aspect Ratio of a Rectangular Obstacle," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 32, No. 10, pp. 791~799.