

공동 입구의 경계층에 관한 실험적 연구

정용운*.박승오**.이덕주***

Experimental study of boundary layer at the entrance of a cavity

Yong-Wun Jung*, Seung-O Park** and Duck-Joo Lee***

Key Words : Cavity flow, Boundary-layer thickness, Instability, Shear flow

Abstract

In order to analyse the mechanism of a flow tone around a cavity, the correlations between the flow in the cavity and the boundary layer flow in front of the cavity are studied experimentally in this paper. The instability in the boundary layer forms the vortex at the front edge of the cavity and the flow tone is occurred by the vortex breakdown at the rear edge of the cavity. Therefore, the boundary layer measurement is important in the cavity flow control.

We measure the velocity of the boundary layer at the entrance of the cavity using hot-wire anemometry and the flow tone around the cavity by microphone. The boundary layer characteristic is changed by the various angle of the flap on the front edge of the cavity, while it is less influenced by the ratio of length and depth of the cavity.

1. 서론

항공기의 이착륙 장치, 폭탄 투하 장치(weapon bays)와 자동차의 선루프(sun-roof) 그리고 레이저 발생 장치 등 다양한 유체 역학적 시스템에서 공동(cavity)의 형상이 나타나는 경우가 많다. 이때 공동의 형상과 유동 조건에 따라 공동위를 지나는 유동의 압력과 속도 값이 시간에 따라 변하게 되고, 공동의 앞전과 뒷전의 형상은 압력과 속도 변화에 따른 소음 발생의 원인이 된다.

공동에서의 소음 발생을 간단히 모델링하면 Fig.1과 같다. 공동 앞전(upstream edge)에서 경계층 높이의 변화가 와류의 크기 변화에 영향을 주고, 이 와류들은 유동을 따라 전파되어 공동의 뒷전(downstream edge)에 부딪히면서 소음이 발생한다. 이 뒷전에서 발생한 소음은 소리의 방사현상에 따라 다시 앞전쪽으로 퍼지며, 이 퍼지는 소음이 다시 경계층 높이변화에 영향을 주는 공진 현상이 일어나게 된다. 이러한 유동과 소음의 피드백 작용으로 인한 공진 현상의 발생은 큰 소음원으로 작용할 뿐만 아니라 공역음향 하중으로 작용하여 심각하게 구조물의 피로도를 증가시키기도 한다. 그러므로, 공동을 지나는 비정상 유동에서 발생하는 유동과 소음의 공진을 실험 및 수치해석을 통해 물리적으로 이해하려는 연구가 활발히 진행되어 왔다[1,2,3]. 이러한 소음을 줄이기 위해서

spoiler, air injection, suction 등의 방법들이 많이 연구되었으며 최근에는 piezoelectric actuator[4] 등을 이용한 능동 소음 제어(active noise control)에 대한 연구도 활발히 되고 있는 상황이다.

지금까지의 연구들을 살펴볼 때, 공동 유동 특성은 공동 주위를 흐르는 유동의 조건이나 공동의 형상에 따라 바뀌게 되는데, 길이 대 깊이비(L/D), 깊이에 따른 레이놀즈 수(Re_D) 그리고 공동 앞전에서 경계층의 두께(δ) 등이 공동 유동에 크게 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 여러 요소의 상관관계를 알아보기 위하여 공동의 길이 대 깊이비, 레이놀즈수의 변화에 따른 공동 앞전에서의 경계층 특성 변화에 대해서 살펴보았다. 또한, 소음 제어를 위하여 공동 앞전에 설치한 플랩(flap)의 각도에 따른 변화도 함께 살펴보았다.

2. 실험 장치 및 실험 조건

2.1 실험 장치

음향 풍동(Anechoic wind tunnel)

본 실험은 공동 형상에서 발생하는 유동과 소음을 같이 분석하기 위해서 유동장과 소음을 모두 측정할 수 있는 음향 풍동에서 수행되었다. 음향 풍동은 풍동의 시험부에 무향실을 만든 것으로 시험부의 크기는 $0.35 \times 0.35 \times 1.2(m)$, 최대 유속은 $62m/s$ 이며 cut-off 주파수는 $250Hz$ 이다.

시험부에 설치된 공동은 아크릴로 제작하였는데, 바닥과 양 옆면은 막아주고 윗 부분은 뚫어둠으로써, cavity의 특징을 살리면서 공동의 상향부에서 마이크로폰을 이용하여 유동에 직접 영향을 받지 않고 소음을 측정할 수 있도록 하였다. 공동 형상은 깊이가 5cm, 10cm, 15cm로 변환이 가능하고, 길이는 0cm~45cm까지 자유롭게 변화시킬 수 있도록 만들었다.

측정 장비

본 실험에서 공동 앞전과 주위의 속도를 측정하기 위하여 직

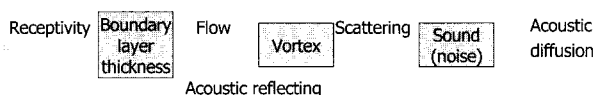


Fig.1 Feedback mechanism of the noise around a cavity

* 한국과학기술원 기계공학과, gari@sop1.kaist.ac.kr

** 한국과학기술원 기계공학과, sopark@sop1.kaist.ac.kr

*** 한국과학기술원 기계공학과, djlee@mail.kaist.ac.kr

경 $5\mu\text{m}$ 의 텅스텐 선을 사용한 55P63 X형 열선과 55P15의 경계층 I형 열선을 사용하였다. X형 열선은 두 개의 prong사이의 부피로 인한 벽면 근접 속도 측정이 어려운 반면 U, V속도를 동시에 측정할 수 있으며, 크기가 작은 공동에서도 유동의 교란을 최소화하여 속도를 측정할 수 있는 장점이 있다. 이에 반하여 I형 열선은 벽면으로부터 1mm이하의 가까운 거리로부터 측정이 가능하기 때문에 본 실험에서는 공동의 상류 경계층은 55P15의 열선으로 측정하고 공동 입구와 주위의 속도는 55P63의 열선을 이용하여 측정하였다. 이 열선은 Dantec 55M01 Main Unit에 장착시킨 Dantec 55M10 CTA Standard bridge에 연결하여 사용되었다. 실험 전 속도 검정을 하였고, 열선의 과열비(over heat ratio)는 1.6으로 하였다.

열선 풍속계의 출력전압은 엘리어싱(aliasing)을 막기 위하여 3kHz의 절단주파수를 갖는 lowpass filter (NI SCXI 1141 low-pass filter modul)에 연결되어 있고, 이를 통과한 전압을 컴퓨터로 저장하기 위하여 DAQ Board(National Instruments AT-MIO-16E-2)와 Labview를 이용하였다.

본 실험에서 사용한 좌표계는 시험부의 시작부분에서 풍동과 공동이 연결된 부분을 기준으로 하여 주흐름 방향이 x축, 그리고 이의 수직 상방이 y축이다. 측정 위치로 열선을 움직이기 위하여 1/100mm까지 이동할 수 있는 이동장치(traverse unit)를 사용하였다. 또한 후류의 하류방향(x방향)의 측정위치 선정은 1/100mm까지 측정할 수 있는 눈금을 가진 독취 현미경을 이용하여 수행하였다.

공동의 소음을 제어하기 위한 플랩은 길이가 2cm인 알루미늄 판으로 풍동의 앞전에 설치되었으며 플랩의 지지봉은 제어를 위한 스피커에 연결되어 있다.

2.2 실험 조건

공동은 시험부의 시작부분에서 $x=370\text{mm}$ 위치에 설치되어 있으며, 공동의 깊이는 5cm, 10cm, 15cm로 변화가 가능하고 풍동의 속도는 0-60m/s까지 변화가 가능하다. 하지만, 낮은 레이놀즈수에서의 공동 유동은 Fig.1과 같이 소음이 발생하는 최소한의 공동 깊이와 속도의 영역이 존재하게 된다. 본 연구에서는 소음 측정의 결과를 바탕으로 공동의 깊이는 15cm로 고정하고 L/D는 0, 0.13, 0.5, 0.6, 0.67, 1, 1.33으로 변화시켜가면서 공동 앞전에서의 경계층을 측정하였다. 또한, 경계층 앞전에 설치된 플랩의 각도는 $0^\circ - 13^\circ$ 로 변화시켜가며 플랩 각도에 따른 소음과 앞전 주위의 유동 변화를 측정하였다.

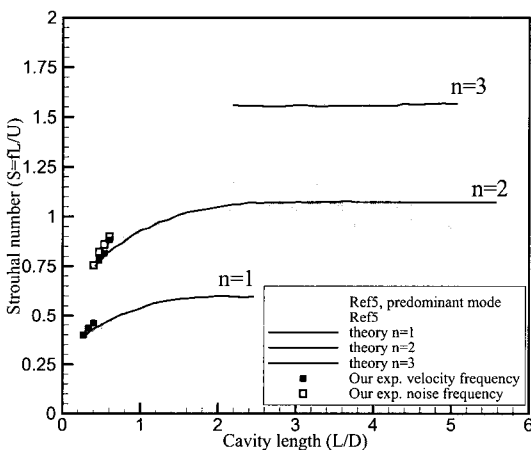


Fig.2 Comparison of theoretically and experimentally determined frequencies

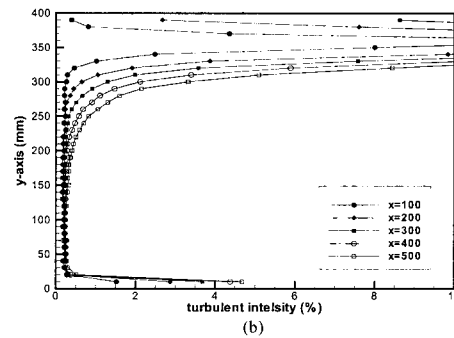
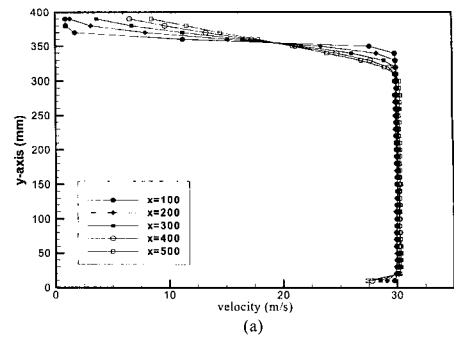


Fig.3 Uniformity of (a)velocity; (b)turbulence intensity in the test section

속도가 40m/s가 넘어가게 되면 열선의 고정봉이 진동하기 때문에 본 실험에서 유동 속도는 40m/s이하에서 실험을 하였다. 경계층의 측정을 위해서 벽면으로부터 1mm지점으로부터 0.2mm간격으로 각 측정 위치와 속도에 따라서 1.5δ 이상이 되는 범위까지 포함되도록 측정 범위를 정하였다. 신호 획득 주파수는 10kHz로 고정하고 앞에서도 언급한 것처럼 데이터를 저장하기 전에 3kHz의 low-pass filter로 filtering을 시켜주었다. 각 포인트에서 10초동안 10만개의 데이터를 각각의 경우에 획득하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 풍동의 균질도와 난류 강도의 측정

공동 앞전의 평균 경계층은 풍동의 난류 강도에 따라 달라지기 때문에 실험에 앞서서 난류 강도와 풍동의 속도 균질도 측정이 선행되어야 한다. 현재 실험하는 음향 풍동에서의 공동은 소음의 측정을 위해서 한쪽은 열린 상태로 되어 있기 때문에 위치에 따른 균질도가 변할 가능성이 있기 때문이다. 난류 강도를 정확하게 측정하기 위해서 각 풍동의 위치와 속도에 따라서 I-type의 열선으로 측정된 신호를 해상도를 높이기 위해서 500배의 gain으로 신호를 획득하여 난류 강도를 구하였다. 또한, 10kHz의 획득 주파수로 30초 동안 30만개의 데이터를 획득하여 충분한 시간동안의 신호를 평균하여 값을 구하였다. 풍동의 난류 강도는 6m/s 이상의 속도에서는 0.1%의 낮은 난류 강도를 가지고 있으며 3m/s의 낮은 속도에서는 0.5%의 높은 난류 강도를 보이고 있다.

Figure 3에서 볼 수 있듯이 속도와 난류 강도의 균질도는 공동의 앞전이 위치한 $x=370$ 위치에서 거의 일정하며, 뒷면이 열린 상황도 공동주위나 경계층에 영향이 적을 것으로 생각한다. 벽면에 가까워질수록 경계층의 영향으로 속도는 감소하고 난류 강도는 증가하는 특성을 보이고 있다.

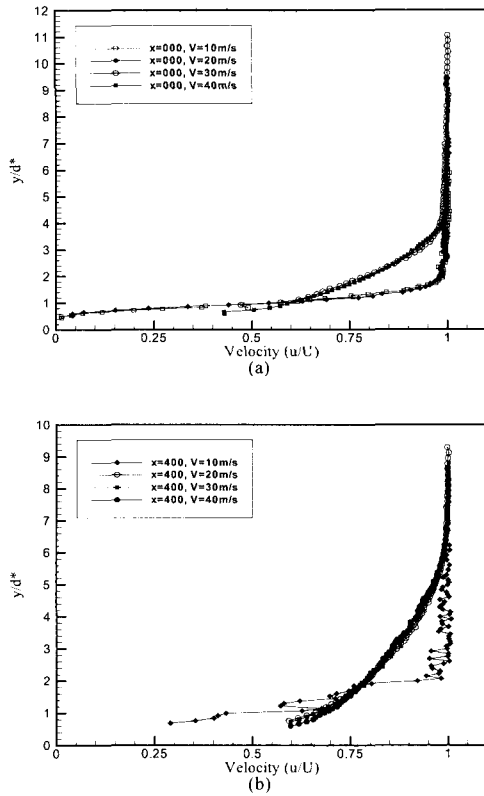


Fig.4 Profiles of mean velocity in the boundary layer at the various condition

3.2 길이 변화에 따른 주파수 변화

경계층을 측정하기에 앞서 우선 소음이 발생하는 경우를 알아보기 위하여 레이놀즈수와 길이 대 길이비(L/D)를 바꾸어가면서 공동 입구에서의 와류 주파수와 소음 주파수를 측정하였다. 본 실험에 사용된 공동에서는 30m/s 이상의 속도에서 길이 15cm일 때만 소음이 발생하였다. Figure 1은 V=38m/s에서 길이를 바꾸어 가며 측정한 결과를 Rockwell[1]에 나와있는 결과와 비교한 그림이다. 그림의 circular symbol은 Ethembaoglu[5]의 데이터이며, 실선은 Rockwell의 이론값이다. 본 연구의 실험 결과와 비교해 볼 때 잘 맞음을 볼 수 있다. 또한 공동의 길이가 4cm에서 6cm까지는 mode1의 주기적 현상이고, 7cm부터는 mode2의 현상이 일어나는데 현재 공동에서는 mode1에 의한 소음은 나타나지 않고 있다.

x	δ	δ^*	θ	H
0	11.20	2.71	1.66	1.63
100	12.47	2.47	1.69	1.46
200	14.07	2.46	1.81	1.36
300	15.47	2.54	1.93	1.32
400	17.95	2.8	2.22	1.35

Table 4. Characteristic parameters at the various position

3.3 공동이 없을 때의 평판 경계층 측정

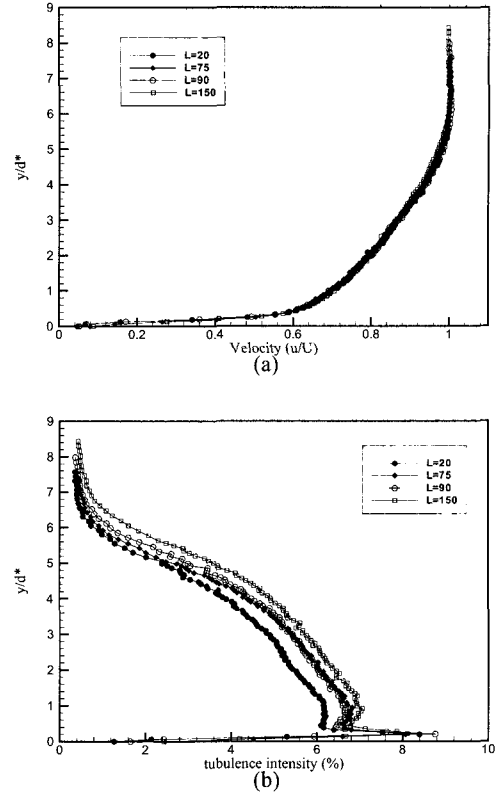


Fig.5 Profiles of (a)mean velocity; (b)turbulence intensity in the boundary layer

공동을 완전히 닫아 공동이 없을 경우의 속도에 따른 평판의 경계층을 우선 측정하였다. 평판에서의 경계층 두께와 특성은 속도와 평판 앞전으로부터의 거리 (x)를 기준으로 한 레이놀즈수에 의해서 달라지게 된다. 이에 반하여, 공동의 길이에 따른 경계층 두께의 변화는 적은 것으로 알려져 있다. 그렇기 때문에 공동이 없는 평판에서의 경계층 측정은 공동 위치 설정과 유동 특성 분석에 있어서 많은 도움이 된다.

Figure 4는 열선풍속계로 측정한 경계층 내부의 속도분포를 자유흐름속도와 변위 두께(displacement thickness)로 무차원한 결과이다. 각 측정점에서의 변위두께와 운동량 두께(momentum thickness)는 아래식과 같이 벽면에서부터 최대속도를 갖는 y지점까지 적분을 하여 구하였다. 경계층 두께로 무차원화하지 않은 이유는 경계층 두께는 속도 분포를 보고 측정을 하는 것이기 때문에 적분을 해서 구한 변위 두께보다 정확하지가 못하기 때문이다.

$$\delta^* = \int_0^{y_{max}} \left(1 - \frac{U}{U_\infty}\right) dy \quad (1)$$

$$\theta = \int_0^{y_{max}} \frac{U}{U_\infty} \left(1 - \frac{U}{U_\infty}\right) dy$$

Table 4는 자유 흐름속도가 40m/s일 때 각 측정점에서 경계층 두께와 변위 두께, 그리고 운동량 두께를 계산한 결과를 나타낸 것이다. 여기서, $H = \delta^*/\theta$ 로써 shape factor를 나타낸다. Shape factor를 보면 알 수 있듯이 전 영역에서 난류이고 후류로 갈수록 경계층 두께도 두꺼워지고 난류 강도도 커지고 있는 것을 알 수 있다.

4.3 공동 길이에 따른 경계층 측정

L(mm)	δ	δ^*	θ	H
20	16.64	3.17	2.10	1.51
75	17.21	3.18	2.16	1.47
90	15.94	3.01	1.98	1.52
150	16.03	2.84	1.95	1.46

Table 5. Characteristic parameters with various cavity length at V=40m/s

Figure 5는 속도가 40m/s일 때 공동의 길이에 따른 경계층의 속도 분포 및 난류 강도를 공동 앞전에서의 하류방향으로 2mm떨어진 위치에서 측정된 결과이다. 공동의 길이는 150mm로 일정하게 유지하였다. Figure 5a에서 볼 수 있듯이 변위 두께로 무차원화한 결과는 거의 비슷한 모습을 보이고 있다. 또한, Table 5에 나타나 있는 각 경우의 경계층 두께와 변위 두께, 그리고 운동량 두께를 계산한 결과를 보아도 공동 길이에 따른 특성 변수의 변화는 작음을 알 수 있다. 각 경우의 난류 강도는 Fig. 5b에 나타나 있는데 공동의 길이가 커질수록 공동 앞전에서의 난류 강도가 커지고 있는 것을 볼 수 있다.

4.4 플랩(flap)이 있을 경우의 경계층 분포

공동 앞전에 플랩을 설치하고 각도를 변화시키면서 경계층의 속도 분포를 조사하였다. 플랩의 기울기는 독취현미경으로 끝단의 높이 변화를 측정하여 계산하였다. 플랩의 각도가 커질수록 플랩 끝단에서의 속도는 U속도에 비해 V속도도 점차 커지기 때문에 플랩이 각도를 갖는 경우에는 X-type의 열선을 이용하여 속도를 측정하였다.

Figure 6은 L=100mm인 공동 앞전에서 플랩의 각도가 8.74° 일 때 공동 입구에서의 속도 분포이다. 이 경우에 플랩의 끝단이 약 3mm 상방으로 이동해 있을 경우인데, 이것을 고려하여 경계층 두께를 구하면 약 15.66mm이다. 여기서 x_1 좌표는 공동 앞전의 모서리로부터 주흐름 방향의 거리를 나타낸다. Table 5의 값들과 비교해보면 경계층 두께가 플랩이 있는 경우에 약간 작아짐을 알 수 있다. 하지만, Fig.6에서 볼 수 있듯이 플랩에 의한 경계층의 발달 특성은 많이 바뀌어 있다. 플랩이 있을 경우에는 경계층의 두께는 크게 달라지지 않지만 플랩의 각도에 따라 유동의 특성이 변하기 때문에 이에 따라서 공동안에 형성되는 모드(mode)도 달라지게 된다. 그렇기 때문에 소음이 발생할 때 플랩을 높이면 소음

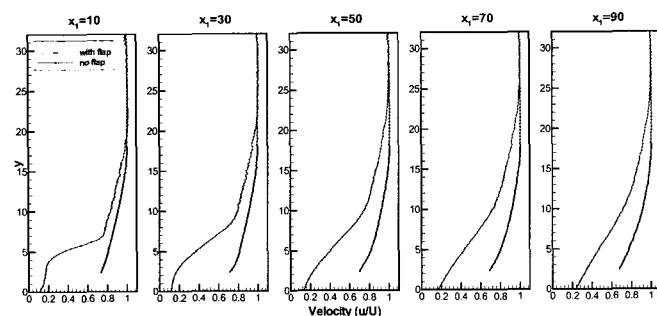


Fig.6 Profiles of mean velocity in the boundary layer (with flap)

이 줄어들기도 하고 소음이 작을 때 플랩을 올리면 소음이 증가하기도 한다. Spoiler, air injection 그리고 flap등으로 개회로 소음 제어가 영향을 미치는 것도 이러한 이유 때문이다.

열선을 이용하여 측정된 신호는 역류나 재순환 구간이 있는 부분에서는 방향성이 없다는 단점이 있긴 하지만 열선의 측정 결과로부터 어느 정도 유동의 특성은 파악할 수 있다. Figure 6에서 보면 플랩 가까운 곳에서는 박리가 발생해서 재순환 영역이 존재하는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 레이놀즈수와 공동의 길이 대 높이의 비(L/D)를 변화시켜가면서 공동 입구 경계층내의 속도를 열선풍속계를 이용하여 측정하여 그 특성 변화를 살펴보았다. 또한, 소음제어를 위하여 공동 입구에 플랩을 설치하고 플랩의 각도에 따른 경계층의 변화에 대해서도 알아보았다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 공동의 길이 대 높이의 비(L/D)의 변화에 따른 공동 입구에서의 경계층 특성 변화는 매우 작다.
- (2) 낮은 레이놀즈수의 공동에서 유동 소음이 발생하기 위해서는 깊이와 속도의 한계가 존재하며, 층류 경계층일 경우에는 유동 소음이 발생하지 않는다.
- (3) 플랩의 각도 변화에 따른 경계층 두께 변화는 크지 않지만 경계층의 발달 특성은 많이 변하게 된다.

후 기

본 연구는 과학재단의 특정기초 연구인 '유동과 소음의 되먹임 관계 규명 및 제어(1999-2-304-009-5)' 연구의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] D. Rockwell, "Prediction of Oscillation Frequencies for Unstable Flow Past Cavity," ASME J. of fluid engineering, Vol.99, 1977, pp.294-300.
- [2] K. W. Tam and J. W. Block, "On the tones and pressure oscillations induced by flow over rectangular cavities," J. Fluid Mech., Vol.89, 1978, pp.373-399.
- [3] M. A. Kegerise, E. F. Spina and L. N. Cattafesta III, "An Experimental Investigation of Flow-Induced Cavity Oscillations," AIAA Paper 99-3705, 1999.
- [4] L. N. Cattafesta III, S. Garg, M. Choudhari and F. Li, "Active Control of Flow-Induced Cavity Resonance," AIAA Paper 97-1804.
- [5] S. Ethembabaoglu, "On the Fluctuating Flow Characteristics in the Vicinity of Gate Slots," Division of hydraulic Engineering, University of Trondheim, Norwegian Institute of Technology, June, 1973.