

〈논 문〉

원통내부의 음향여기에 의한 와류유출제어

김경천* · 부정숙** · 구명섭*** · 이상욱***

(1995년 7월 20일 접수)

Control of Vortex Shedding from Circular Cylinder by Acoustic Excitation

K. C. Kim, J. S. Boo, M. S. Koo and S. U. Lee

Key Words: Acoustic Excitation(음향여기), Control of Vortex Shedding(와류유출제어) Pressure Coefficient(압력계수), Drag Coefficient(항력계수), Lift Coefficient(양력계수)

Abstract

The flow around a circular cylinder was controlled by an acoustic excitation issued from a thin slit along the cylinder axis. The static pressure distributions around the cylinder wall and flow characteristics in the near wake have been measured. Experiments were performed under three cases of Reynolds number, 7.8×10^4 , 2.3×10^5 and 3.8×10^5 . The effects of excitation frequency, sound pressure level and the location of the slit were examined.

Data indicate that the excitation frequency and the slit location are the key parameters for controlling the separated flow. At $Re_d = 7.8 \times 10^4$, the drag is reduced and the lift is generated to upward direction, however, at $Re_d = 2.3 \times 10^5$ and 3.8×10^5 , the drag is increased and lift is generated to downward direction inversely. It is thought that the lift switching phenomenon is due to the different separation point of upper surface and lower surface on circular cylinder with respect to the flow regime which depends on the Reynolds number. Vortex shedding frequencies are different at upper side and lower side. Time-averaged velocity field shows that mean velocity vector and the points of maximum intensities are inclined to downward direction at $Re_d = 7.8 \times 10^4$, but are inclined to upward direction at $Re_d = 2.3 \times 10^5$.

기 호 설 명	
C_d : 항력계수	g : 슬릿의 크기
C_l : 양력계수	h : 시험부의 높이
C_p : 압력계수	L : 양력
D : 항력	l : 시험부의 길이
d : 원주의 직경	P : 원주표면의 정압
f_p : 여기 주파수	P_0 : 자유 흐름의 압력
f_s : 와류유출 주파수	Re_d : 레이놀즈 수(Ud/ν)
	S : 형상계수
	SPL : 음파의 세기
	St : Strouhal 수
	t : 원주의 두께

*회원, 부산대학교 생산기계공학과

**회원, 부산대학교 기계공학과

**부산대학교 대학원 기계공학과

U_p	: 섭동방출속도
U_0	: 자유 흐름 속도
\bar{U}	: u 성분의 평균값
\bar{V}	: v 성분의 평균값
u	: 흐름 방향의 순간속도
v	: 흐름 방향에 수직인 방향의 순간속도
u', v'	: x, y 방향의 속도의 변동성분
u_{rms}	: u 성분의 r. m. s $\sqrt{\bar{u'^2}}$
v_{rms}	: v 성분의 r. m. s $\sqrt{\bar{v'^2}}$
$-\overline{u'v'}$: 레이놀즈 전단응력
w	: 시험부의 폭
x, y, z	: 직교 좌표계
α	: 원주에서의 음파방출각도
ρ	: 공기의 밀도

1. 서 론

최근 국내외적으로 난류유동의 실험은 점점 더 복잡한 난류유동장으로 관심이 옮겨지고 있으며, 그 중에서도 난류경계층 유동에서의 박리현상은 실제적인 외부 및 내부 유동에서 자주 관찰되는 현상으로 공학적으로 중요한 문제라 할 수 있다. 특히 물체표면으로부터 생성되는 전단층은 유체력을 지배하는 중요한 인자이므로 이의 제어를 통한 외형성 영역의 위치 변화 및 유출되는 와의 세기를 억제하는 것은 유체력을 감소시키는 데 필수적인 문제라 할 수 있으며, 많은 연구자들이 이와 같은 유동의 제어에 대하여 연구를 하고 있다.^(1~5)

일반적으로 외부유동에서 유동특성에 변화를 주는 방법으로 자유 흐름의 난류강도를 증가시켜 주거나 둔탁한 물체(bluff body) 주위에 제어원주를 강제로 삽입하는 등의 수동적 방법과 물체 후류내에 oscillating plate를 설치하여 와류구조를 기본적으로 변화시키거나 물체의 내부나 외부에 주기적인 음파의 여기를 주어 전단층을 제어하는 등의 능동적인 방법이 있다.⁽¹⁾

주기적인 여기를 주는 방법으로는 진동을 이용하는 얇은 보조익(flap)을 이용한 방법과 음향 스피커(acoustic speaker)를 이용한 음파에 의한 방법이 있다. Kiya et al.⁽²⁾는 원봉의 얇은 슬릿으로 음향 스피커에 의한 삼각함수파형의 여기를 가하여 가장 효과적인 주파수는 초기 켈빈-헬름홀츠(Kelvin-Helmholtz) 주파수의 1/6 정도의 값이며, 재부착영역에서 발생하는 대규모 와의 와류유

출 주파수(vortex shedding frequency)의 8배 정도가 된다는 것을 발견했다. Sigurdson과 Roshko⁽³⁾는 마찬가지로 방법으로 하여 전단층의 초기부분이 여기의 영향을 받게 되면, 그 결과로 재부착 길이, 박리기포의 높이, 박리점의 압력, 표면의 항력 등 모두가 감소함을 보였다. 또한 Fei-Bin Hsiao et al.⁽⁴⁾은 제어유효변수로는 여기주파수, 여기레벨, 여기위치를 제시하였으며, 그 중 가장 중요한 변수로 여기주파수와 여기위치라는 것을 발견하였다. 한편, 전경빈 등⁽⁷⁾은 후방계단 박리점에서 음파에 의한 주기적인 여기물 가한 결과 여기는 전단층내부에서 형성되는 대규모 와들의 형성과 융합을 촉진하여 정상유동보다 평균속도의 확산을 빠르게 하며, 재순환구역내의 난류강도 및 난류3차 곱을 증가시킴을 발견하였다. 그러나 현재까지 대부분 연구는 주기적인 음파 여기에 의한 유동특성의 변화 파악이 전부이며, 특히 광범위한 레이놀즈수의 범위에서 와의 생성 및 소멸과 같은 유동구조의 제어 가능성에 관한 체계적인 연구는 극히 드물다.

따라서 본 연구에서는 능동적인 제어방법의 하나로 원주 내부로부터 음파를 여기서서 길이 방향으로 좁은 슬릿 slit)을 통해 원주외부에 생기는 전단층을 교란시킴으로써 와류유출을 제어하고, 아울러 원주표면의 평균압력 및 원주후류의 유동특성을 조사하여 음파의 여기위치 및 주파수 변화가 와류유출에 미치는 영향을 체계적으로 조사하고자 한다. 동시에 항력감소(drag crisis)가 발생하는 임계 레이놀즈 수의 변화도 조사함으로써 궁극적으로 유동구조를 가장 효과적으로 제어할 수 있는가에 대한 가능성을 타진하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

유동실험에 사용한 풍동은 폐회로 아음속 풍동(closed-circuit sub-sonic wind tunnel)으로 전체길이는 36,000 mm 이다. 유속은 구동용 모터를 전기적으로 제어하여 0.5~60 m/s 의 범위내에서 적절하게 조절이 가능하다. 시험부의 크기는 2,000(l)×700(h)×700(w) mm 이며, 수축비는 6.6:1이다. 시험부에서의 흐름 방향의 난류강도는 약 1% 미만이고, 속도분포의 균일도는 경계층부분을 제외하고는 약 1.0~1.5% 정도이다. 한편 원주의 형상비(aspect ratio)는 약 6.1이고, 폐쇄비(blockage ratio)는 16.3%로 작은 값은 아니지만 유동성

질은 x, y 의 2차원적 특성이 지배적이므로, 본 연구에서는 폐쇄비와 형상비에 의한 영향이 중요한 연구의 목적이 아니기 때문에 측정 데이터를 보정하지는 않았다.

본 연구에 사용된 실험 모델의 재질은 PVC로 표면을 최대한 매끈하게 처리하고, 풍동내에서 흐름 방향에 대하여 수직하게 z 방향으로 설치하였다. Fig. 1에는 실험모델의 형상 개략도 및 풍동 시험구간에서의 설치 형태가 나타나 있다. 원주의 직경(d)은 114mm, 두께(t)는 7mm이고 내부는 비어 있다. 원주내부에서 발생하는 음파의 여기를 원주 표면에 전달하기 위하여 만든 슬릿의 폭(g)은 1 mm로 하였다. 또한 원주의 한 쪽 끝은 완전히 밀폐를 시키고, 다른 한쪽 편에다 스피커를 장착하여 슬릿 외의 압력손실은 최대한 억제되도록 하였다.

음파의 주기적인 여기를 발생시키기 위하여 사용된 스피커는 저음(woofer) 스피커로서 가용 주파수범위는 25.5~4000Hz, 저항은 8Ω 이고, 직경은 300mm이다. 음파에 의한 주기적 여기는 함수발생기(WAVETEK, Model 23)에서 만들어진 삼각함수파형을 스피커로 입력시켜 얻었으며, 이때 함수발생기에서 만들어진 삼각함수파형의 출력은 최대가 24.1 dB이기 때문에 그 이상의 출력을 얻기 위해서는 증폭기(Gold Star, Model GSA-3030)를 사용하였고, 증폭기를 거친 신호가 정확하게 스피커로 보내지는 것을 확인하기 위하여 오실로스코프를 통하여 그 파형과 진폭 및 주파수를 체크하였다.

본 연구에서 속도측정은 X형 열선 프로브를 look-up table 기법으로 교정하여 사용하였다. 시험부 전방의 자유 흐름 속도 측정에는 표준 피토 정압관 (standard pitot-static tube)과 미세압력계 (Furness사 FCO12 micromanometer)를 사용하였으며, 평균속도는 피토관을 통해 측정된 속도 데이터는 A/D 변환기를 거쳐 PC에서 온라인 처리된다. 풍동내의 온도를 측정하기 위하여 T형 열전대와 디지털 온도계(Fluke, HYDRA Data Acquisition Unit)를 사용하였다. 유속측정에는 정온열선 풍속계(TSI, Model 1054A)와 범용파형분석기(Data precision 6000)를 사용하였으며, 후류측정에는 직경이 $4\mu\text{m}$ 의 공기용 엔드플로우 X형 열선 프로우브(TSI, Model 1241-T1.5)를 사용하였다. 또한 신호분석을 위한 데이터는 추출주파수(sampling frequency) 10 kHz, 매 측정점당 20번씩을 총합평균(ensemble average)하여 GPIB 카드를 거쳐 IBM-PC에 저장되며, 이때의 데이터 획득 및 분석은 PC와의 온라인되어 처리되도록 시스템을 구성하였다. 원주의 슬릿에서 나오는 음파의 여기방출 속도(pulsating velocity, U_p)와 와류유출 주파수(f_s)를 측정하기 위하여 별도의 I형 열선 프로우브(Kanomax, Model 0251-T5)를 사용하였다.

원주표면의 정압측정은 원주표면에 내경 0.8mm, 외경 1mm의 스테인리스 파이프를 삽고 여기에 비닐튜브로 미세압력계와 연결시켜 측정하였다. 원주표면에는 5° 간격으로 1mm의 구멍 70개를 뚫어서 가능한 압력을 촘촘히 받아들였다. 정압은 각 지점에서 20초 동안 60개의 압력신호를 받아들여 평균을 취하였으며 이때의 신호처리에는 평균속도 측정계와 마찬가지로 측정된 정압은 미세압력계를 거쳐 A/D 변환기를 거쳐 PC에서 온라인으로 처리되었다. 압력 측정용 센서(PCB, Model 103A02)는 감도가 1500 mV/psi, 공진주파수가 13 kHz이며, 최대압력이 30 psi까지 계측이 가능하며 해상도(resolution)가 2.2×10^{-5} psi이다. 이 센서에서 나오는 신호는 별도의 신호추출기(signal conditioner)를 통하여 전기적 신호로 증폭되어 역시 A/D 변환기를 거쳐 PC로 연결된다.

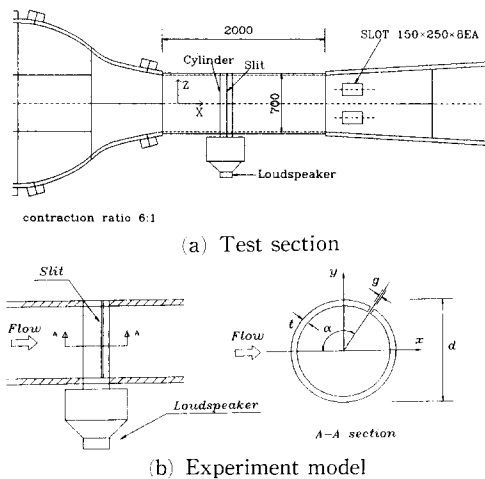


Fig. 1 Schematic diagram of (a) test section and (b) experimental model

3. 결과 및 고찰

3.1 음파의 주기적 여기 조건

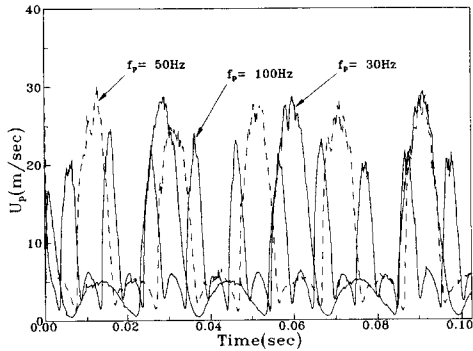
압력 센서를 사용하여 스피커 전면부에서 500

mm 떨어진 곳에서 합수발생기의 여기주파수 (exciting frequency, f_0)를 60Hz로 일정하게 하고 음파의 SPL을 바꾸어 가며 측정한 결과 스피커에서 방출되는 압력파의 세기는 진폭과 비례하여 방출됨을 알 수가 있었다. 그리고 스피커에서 출력된 음파의 세기를 고정시키고 주파수를 가변시키며 측정한 결과 스피커에서 나오는 음파의 주파수는 여기주파수와 일치함을 알 수 있었다.

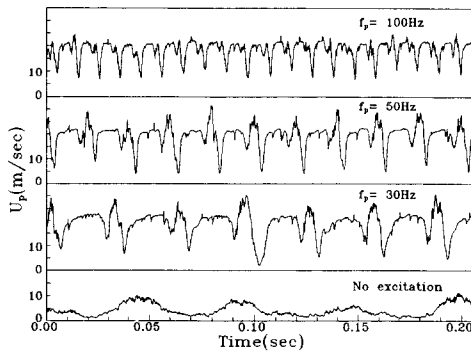
본 실험에서는 30, 50, 100, 250, 400Hz의 다섯 가지 여기주파수를 사용하였다. Sound level meter (NODE사, Type-2020)를 슬릿 입구에 설치하여 음파의 세기(Sound pressure level)를 측정한 결과 약 100dB이었으며, 모든 실험은 동일한 SPL로 실시하였다. 스피커에서 방출되는 음파가 소리 유도통을 통하여 슬릿으로 전파될 때 실린더의 내부 공진 및 반사의 영향을 피할 수 없다. 그러나 본 실험의 경우 헬름홀쯔 공진주파수를 계산한 결과 약 510Hz이므로 본 실험의 여기 주파수보다 큰 값이

다. 더구나 본 실험의 음향여기 진폭은 0.85~11.3 m의 범위이므로 저주파의 경우 실린더의 길이 0.7 m에 비해 훨씬 길다. 그리고 슬릿을 통해 방출되는 음파의 크기와 위상을 z방향에 따라 측정한 결과 위치에 따른 변화는 거의 없음을 확인했다.

슬릿에서 나오는 여기방출속도(excitation velocity, U_p)는 I형 열선유속계를 사용하여 슬릿의 끝에서 수평방향으로 2mm, 수직방향으로 0mm 되는 지점에서 측정하였다. Fig. 2(a)에서 알 수 있듯이 주파수에 따라 다르지만 평균속도가 8.6~11.3m/sec인 유체가 주기적으로 분출하고 있음을 확인할 수 있으며 음향여기는 결국 슬릿을 통한 수직방향의 유동 섭동을 유발시키는 역할을 한다고 볼 수 있다. I형 열선은 유체의 방향을 감지하지 못하므로 분출 또는 흡입 유동은 모두 +방향의 속도로 나타나고 있다. 이 그림에서도 소리 유도통에 의한 반사나 공명 효과는 심각하지 않음을 알 수 있다. Fig. 2(b)는 자유 흐름이 10m/sec일 때 슬릿의 위치가 90°이고 슬릿에서 2mm 떨어진 곳에서 여기방출속도를 측정한 결과이다. 그림을 보면 여기주파수에 해당하는 주파수로 속도가 변동하고 있음을 알 수 있다. 그러나 주위유동과 순수 음향여기에 의한 속도가 합쳐져 Fig. 2(a)와 같은 속도파형은 볼 수 없다.



(a) No free stream



(b) Free stream velocity, $U_0=10\text{m/sec}$

Fig. 2 Excitation velocity through slit of circular cylinder

3.2 원주 표면의 압력 분포

실험 조건으로 유속은 레이놀즈 수가 층류박리영역인 7.8×10^4 과 임계영역인 2.3×10^5 그리고 초임계 영역인 3.8×10^5 의 세 가지 경우로 하여 측정하였다. 원주 내부에서 음향여기가 있을 때, 공기역학적 특성과 유동에 대한 특성을 알아보기 위해 원주

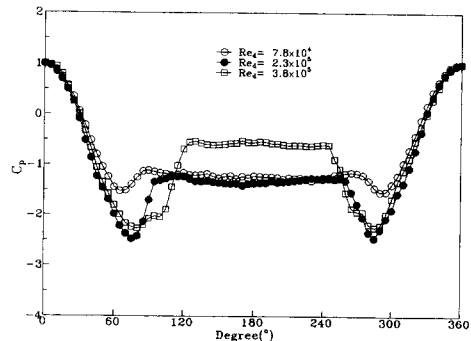


Fig. 3 Surface pressure distribution around circular cylinder without slit

주위의 표면 정압을 측정하였다. 압력계수(C_p)는 다음과 같이 정의된다.

$$C_p = \frac{P - P_0}{\frac{1}{2} \rho U_0^2} \quad (1)$$

먼저 슬릿이 없는 원주의 경우 정압분포를 측정한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 기존의 문헌에 나와 있듯이 층류박리영역에 해당하는 $Re_a = 7.8 \times 10^4$ 인 경우는 층류경계층이 약 80° 부근에서 박리하여 넓은 후류를 이루는 것으로 본 연구에서도 전형적인 압력 분포를 재현하고 있다. 한편 2.3×10^5 및 3.8×10^5 의 레이놀즈 수에서는 점점 항력 감소가 진행되는 임계영역으로 층류 경계층이 일단 박리후 재부착이 일어나 난류 경계층이 되고 최종적으로 박리는⁽¹⁾ 약 120° 부근에서 일어나는 것으로 알려져 있으며 본 실험의 경우에는 박리점이 후퇴하고 압력회복이 진행되는 양상을 보여주고 있다. 슬릿이 없는 원주의 경우 최소 C_p 값은 레이놀즈 수가 7.8×10^4 인 경우 65° , 295° 에서 -1.5 의 값을 가지

며 임계영역인 2.3×10^5 일 때에는 75° , 285° 에서 -2.5 로 나타났고 3.8×10^5 인 경우에는 80° , 290° 에서 -2.3 으로 나타났다. 또한 후류영역에서 배압은 7.8×10^4 일 때 $C_p = -1.2$, 2.3×10^5 일 때 -1.4 로 비슷하나 3.8×10^5 일 때는 $C_p = -0.5$ 까지 크게 회복되었다.

Fig. 4는 $Re_a = 7.8 \times 10^4$ 와 2.3×10^5 의 경우에 내부 음향여기를 위한 슬릿이 원주 표면 정압분포에 미치는 영향을 알아보기 위해 $\alpha = 90^\circ$ 에서 원주 표면 정압을 측정한 결과이다. Fig. 4(a)에서 음향여기가 없을 때 C_p 분포를 보면 상·하면의 최소 C_p 의 위치가 달라지고 그 값은 슬릿이 없는 경우보다 아래쪽 면에서 더 낮아짐을 알 수 있다. 음향여기가 있는 경우($f_p = 50\text{Hz}$)와 비교해 보면 C_p 분포에서 확연히 차이가 난다. 즉 음향여기가 있는 경우에 상하면의 압력차이가 더 심하게 나타난다. 그러나 Fig. 4(b)를 보면 음향여기가 있는 경우와 없는 경우가 비슷한 C_p 분포를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 본 실험에서 내부 음향여기를 위한 슬릿이 포

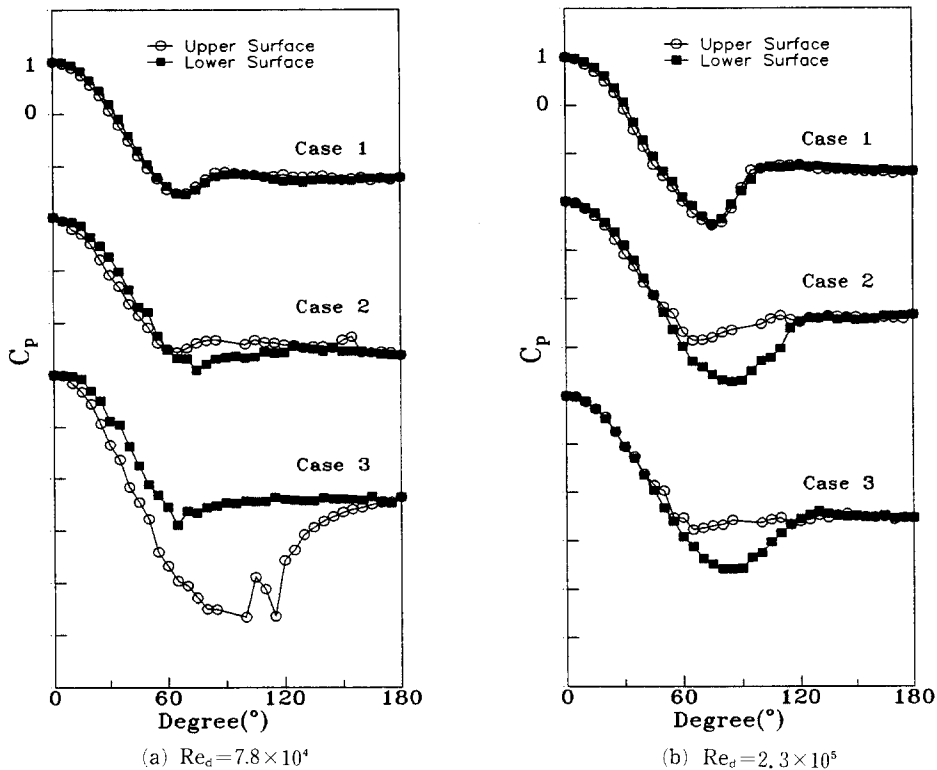


Fig. 4 Comparison of pressure distribution at $\alpha = 90^\circ$ (case 1, no slit; case 2, no excitation with a slit; case 3, excitation, $f_p = 50\text{Hz}$)

면 압력 분포에 미치는 영향은 레이놀즈 수가 층류 박리영역 경우는 음향여기의 영향에 비해 훨씬 적으나 임계영역인 경우는 그 정도가 엇비슷함을 알 수 있다.

Fig. 5.1~5.4에는 슬릿을 통한 음향여기가 있을 때 세 가지의 레이놀즈 수에 대한 원주 표면의 C_p 분포를 나타낸 것이다. 유동이 층류박리 영역인

$Re_d=7.8 \times 10^4$ 인 경우 C_p 값은 여기주파수(f_p)와 슬릿의 위치(α)에 따라 매우 민감하게 변화하는 것으로 나타났다. $\alpha=70^\circ$ 인 경우 여기주파수에 관계없이 최소 C_p 값이 -2.5 이하로 떨어졌다. 그런데 슬릿이 없는 매끈한 원주의 층류박리 영역에서 최소 C_p 값이 -1.5 인데 슬릿이 있을 경우 최소 C_p 값이 더 많이 떨어진 이유는 경계층에서의 압력강하

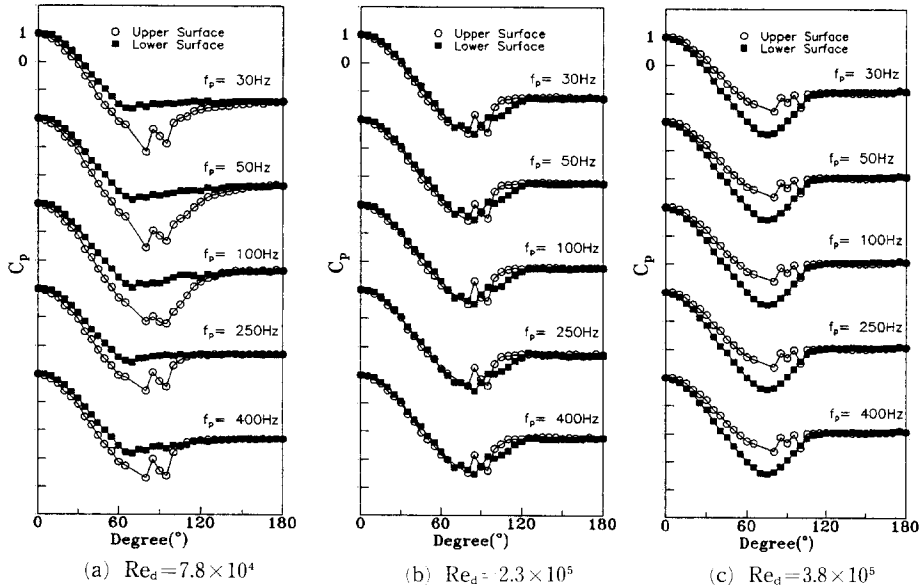


Fig. 5.1 Surface pressure distribution around circular cylinder with acoustic excitation at $\alpha=70^\circ$

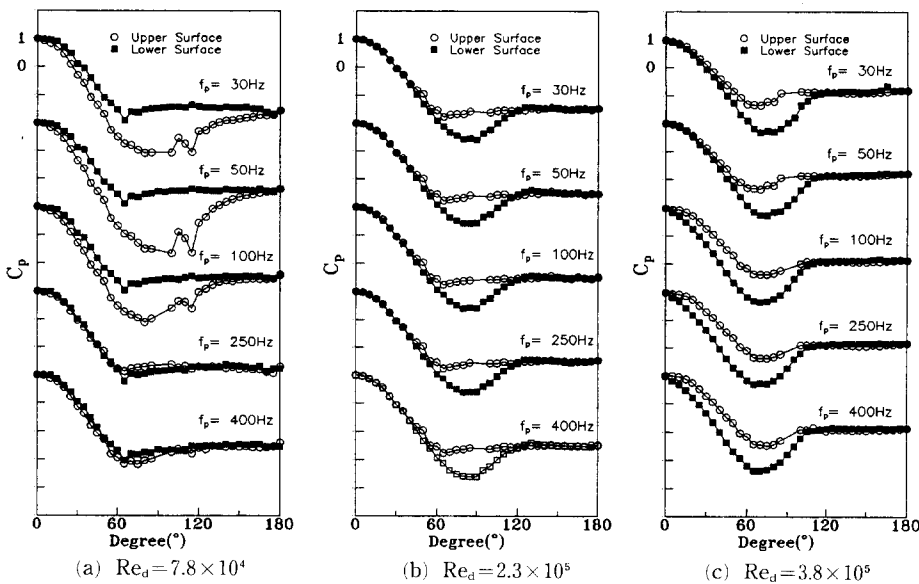


Fig. 5.2 Surface pressure distribution around circular cylinder with acoustic excitation at $\alpha=90^\circ$

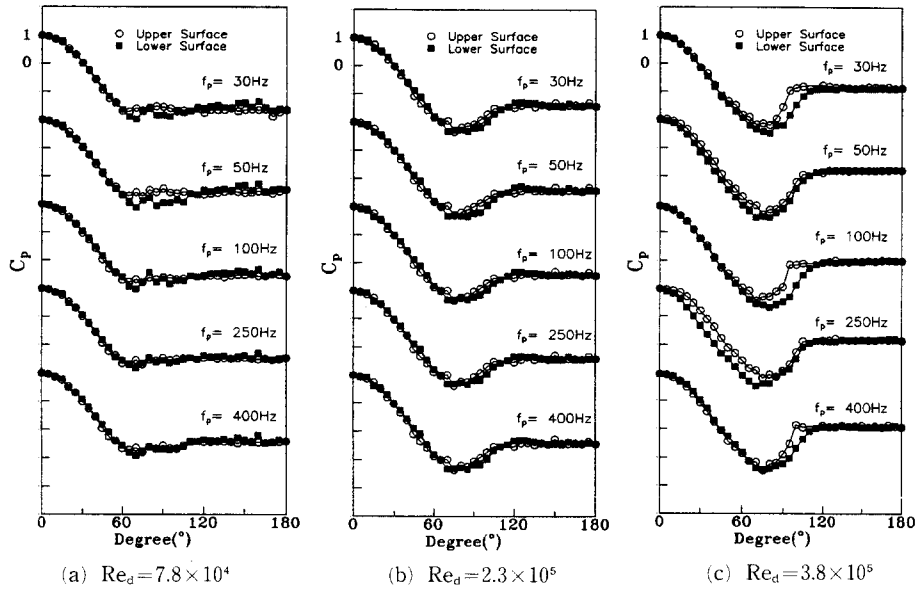


Fig. 5.3 Surface pressure distribution around circular cylinder with acoustic excitation at $\alpha=110^\circ$

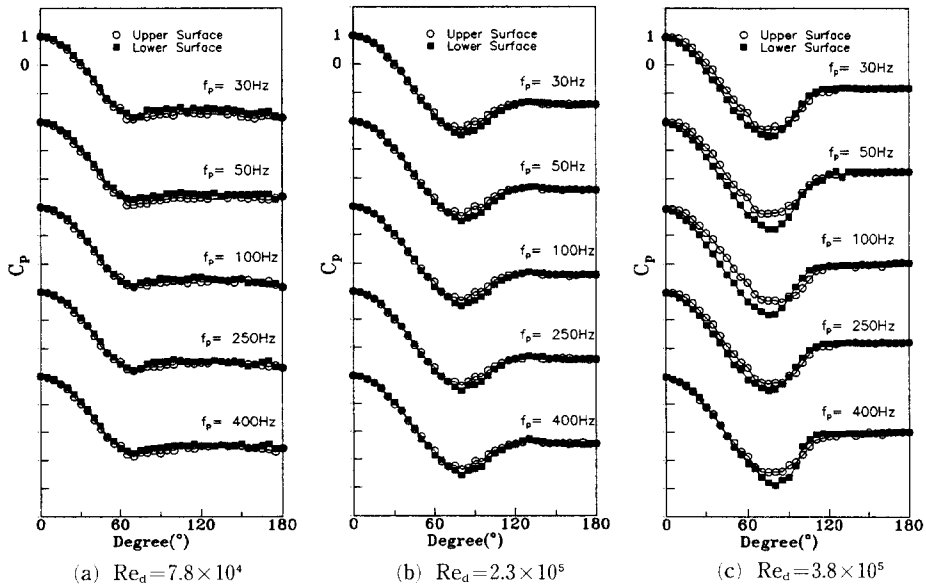


Fig. 5.4 Surface pressure distribution around circular cylinder with acoustic excitation at $\alpha=130^\circ$

가 음향여기에 의해 더 커졌기 때문이다. $\alpha=90^\circ$ 일 경우 상대적으로 고주파 여기에 해당하는 $f_p=250, 400$ Hz일 때 원주 윗면과 아랫면의 C_p 값이 비슷하게 나타났으며 C_p 값이 -2 이하로는 떨어지지 않았다. 여기서 주목할 현상은 슬릿의 위치에 따른 음파의 여기가 있는 위쪽면의 C_p 값이 아래쪽면의 C_p 값보다 많이 떨어진다는 것이다. 그러나

α 가 100° 이상이 되면 원주 윗면과 아랫면의 최소 C_p 값이 거의 비슷해진다. 이 경우에는 여기주파수의 변화에 따른 C_p 값의 변화가 없는 것으로 나타났다.

유동이 임계 영역인 $Re_d=2.3 \times 10^5$ 인 경우 C_p 값은 f_p 에는 별다른 변화가 없으며 슬릿의 위치에 따라 다소 변화가 있으나 층류바리 매치럼 -3 이하

의 값은 나타나지 않았다. 임계영역일 경우 음향여기가 있는 원주 윗면의 C_p 값이 매끈한 원주의 C_p 값보다는 높게 나타난 것이 특이할 만하다. $\alpha = 70^\circ$ 일 때 음향여기가 있는 위쪽의 C_p 값이 아래쪽의 C_p 값보다 작게 나타났다. 그러나 슬릿의 위치가 80° 를 넘어가면서 원주 위쪽보다는 아래면에서 C_p 값이 더 작고 약 -3 정도로 떨어졌다. 이러한 현상은 원주 아래쪽과 위쪽에서의 와의 크기 및 와류 유출주파수가 음향여기 및 슬릿에 의해 달라지기 때문이라고 생각된다. 즉 자유 흐름 속도에 따라 음향여기가 와의 형성에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 유속이 낮은 경우는 음향여기가 여기가 있는 면(윗면)쪽의 와의 형성을 촉진시키고, 반대로 유속이 높을 때는 음향여기보다는 음향여기를 위한 슬릿에 의해 여기가 없는 면(아랫면)쪽의 와의 형성을 상대적으로 촉진시키는 것으로 볼 수 있다. α 가 110° 이상인 경우에는 윗면과 아랫면의 C_p 값의 분포는 거의 같다. 그리고 원주 후면에서의 압력회복은 층류박리일 경우와 임계 영역일 경우 모두 C_p 값이 -1.5 까지 회복됨을 알 수 있다.

유동 조건이 초임계 영역에 해당하는 $Re_d = 3.8 \times 10^5$ 일 때는 C_p 분포는 음향여기 주파수의 영향이 유동방향에 대해서 뒤쪽으로 갈수록 C_p 값의 분포는 상하 대칭적인 구조를 보여준다. $\alpha = 110^\circ$ 가 되면 상하면의 C_p 값에 대한 음향여기와 슬릿의 영향은 거의 나타나지 않으며 C_p 의 분포는 대칭적임 거의 받지 않는 것으로 보여진다. 그러나 C_p 값의 분포는 슬릿의 위치에 약간의 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 즉 음향여기보다는 슬릿의 영향이 더 크다는 것을 알 수 있다. 슬릿 위치가 앞쪽에 있을 때는 임계 영역인 경우와 마찬가지로 위쪽면의 최소 C_p 값은 아랫면의 값보다 크며 슬릿 위치

을 보여준다.

항력계수(C_d)는 다음과 같이 정의되며, Fig. 6에 는 측정된 압력 분포로부터 적분하여 얻어진 항력 계수의 분포를 나타내었다.

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 S} \quad (2)$$

항력계수는 레이놀즈 수가 층류박리 영역일 경우 여기주파수와 슬릿의 위치에 따른 일정한 경향은 나타나지 않았다. 그러나 슬릿이 없는 경우의 항력 계수값은 측정된 정압을 토대로 하여 산출한 결과 $C_d = 1.20$ 인데 비해서 전체적으로는 값이 상당히 낮아져 0.9에서 0.75 사이로 나타나 음파의 여기로 인하여 항력이 감소되었음을 알 수 있다. 슬릿이 없는 원주의 경우 항력계수가 0.9인 레이놀즈 수는 3.2×10^5 부근이고 0.75인 경우는 3.8×10^5 부근인데 비하여 본 실험의 레이놀즈 수는 7.8×10^4 인 것을 감안하면 항력감소(drag crisis)가 생기는 지점을 상당히 앞쪽으로 당겼다고 할 수 있다.

레이놀즈 수가 임계 영역일 경우는 여기주파수에 는 큰 영향을 받지 않고 슬릿의 위치에 민감한 것으로 나타났다. α 가 80° 일 경우에 항력이 가장 큰 값인 1.15 정도로 나타났고, 90° 일 경우 1.09 이고, α 가 70° 인 경우와 100° 이상인 경우에는 그 값이 1 보다 조금 더 큰 정도였다. 그러나 임계영역일 때 슬릿이 없는 매끈한 원주의 항력계수값은 측정결과 0.89로 나타나 슬릿을 통한 내부 음향여기 및 슬릿의 영향으로 항력이 오히려 증가된다는 사실을 발견하였다.

레이놀즈 수가 초임계 영역인 경우는 음향여기 주파수에 대한 영향은 거의 없으며 슬릿의 영향이 두드러짐을 알 수 있다. 슬릿 위치가 70° 일 경우에

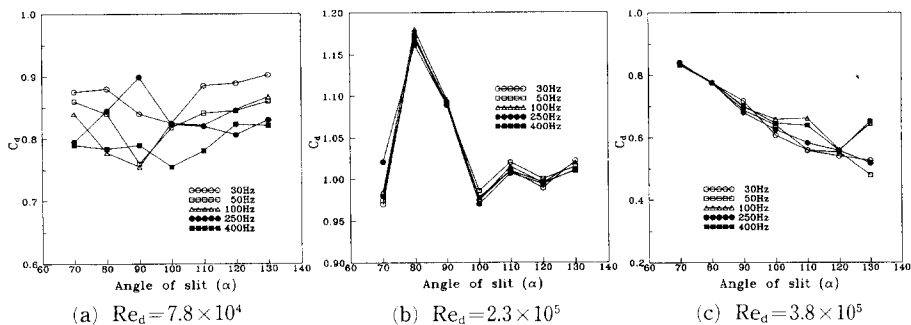


Fig. 6 Drag coefficient of circular cylinder with acoustic excitation

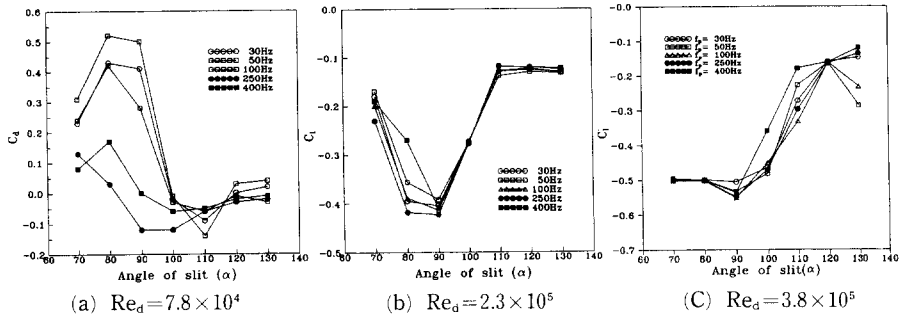


Fig. 7 Lift coefficient of circular cylinder with acoustic excitation

항력이 가장 크게 나타났으며 슬릿 위치가 유동방향에 대해 뒤쪽으로 갈수록 항력은 감소하는 경향을 보여준다.

양력계수(C_L)는 다음과 같이 정의되며, 압력계수의 수직성분을 적분하여 구한 양력계수의 분포가 Fig. 7에 나타나 있다.

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho U \infty^2 S} \quad (3)$$

양력계수는 슬릿이 없는 매끈한 원주의 경우에는 이론적으로는 아랫면과 윗면이 받는 압력이 같아서 0이 되어야 한다. 본 실험에서 슬릿이 없는 경우 양력계수는 층류박리일 때 $C_L = -0.0188$, 임계 영역일 경우에는 $C_L = -0.0246$ 으로 거의 0에 가까운 값으로 나타났다. 그러나 슬릿이 있는 원주의 경우에는 레이놀즈 수가 층류 박리일 때 여기주파수와 여기 위치에 영향을 받는 것을 알 수 있다. 이 경우에는 양력은 위쪽으로 향하며, α 가 90°와 100°일 때 양력이 가장 크게 나타난다. 특히 여기주파수가 30, 50, 100Hz이고 슬릿의 위치가 70°, 80°, 90°일 때 양력의 증가가 현저하게 나타났다. 그러나 여기 위치가 100°, 110°일 때는 원주 아랫방향으로 양력이 발생하였다.

레이놀즈 수가 임계 영역인 경우에는 여기주파수의 영향은 별로 받지 않으나 슬릿의 위치에 영향을 받으며 양력은 50°일 경우를 제외하고는 양력의 방향이 아래쪽으로 향함을 알 수가 있고 특히 α 가 90°와 100°인 경우에는 양력이 가장 크게 나타난다. 그리고 유동 조건이 초임계 영역일 경우에도 슬릿의 위치와는 관계 없이 모두 음(-)의 값을 나타내었다. 즉 양력의 방향이 아래쪽으로 향함을 알 수 있다. 그동안 발표된 선행연구에서는 원통내부

의 음향여기 기법으로 양력을 증가(양력의 방향이 위로 향함)시킨다는 보고만 있었는데 본 실험을 통해 임계영역 이상의 레이놀즈 수에서는 오히려 양력을 감소(양력의 방향이 아래쪽으로 향함)시키는 새로운 현상이 나타났음을 관찰하였고 우리는 이를 “양력역전현상(Lift switching phenomenon)”이라고 명명하였다. 이러한 현상은 슬릿의 위치가 층류박리점과 난류박리점 사이에서 상대적으로 어디에서 위치하느냐에 따라 박리점의 불균형으로 양력의 방향이 바뀔 수 있다는 것에 기인된다고 사료된다.

레이놀즈 수가 초임계 영역인 경우에는 여기주파수의 영향을 받지 않으나 음향여기 위치의 영향을 받으며 α 가 70°에서 100°까지는 양력계수가 -0.5로 일정하고 그 방향이 임계영역과 마찬가지로 아래쪽을 향해 있다.

3.3 와류유출주파수

I형 열선 프로브를 통하여 받은 전압 신호를 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform)을 거쳐 와류유출 주파수를 측정하였다. Fig. 8은 I형 열선 유속계를 원주로부터 x축 방향으로 2.5d, y축 방향으로 $\pm 1.8d$ 인 지점에서 측정하여 FFT한 결과이다.

슬릿이 없는 매끈한 원주의 경우 레이놀즈 수가 층류박리인 7.8×10^4 인 경우 스트로할수가 0.21이었고 이때의 와류유출 주파수(Shedding Frequency, f_s)는 약 18Hz이었다. 레이놀즈수가 임계 영역에 가까운 2.3×10^5 인 경우 스트로할수가 0.22 이었고 이때의 와류유출 주파수는 약 58Hz이었다.

슬릿이 있는 경우에는 위쪽면과 아래쪽면에서의 와류유출 주파수는 진폭과 주파수가 다르게 나타났다. 양력방향의 역전현상이 관찰되는 $\alpha=90^\circ$ 조건

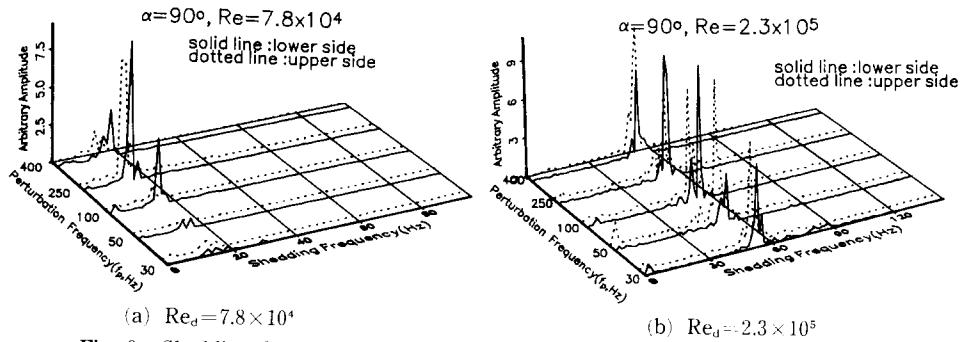


Fig. 8 Sheddng frequency of circular cylinder with acoustic excitation at $\alpha=90^\circ$

을 살펴보면 층류박리 영역에서는 슬릿이 있는 상부의 탁월주파수의 진폭이 하부의 탁월주파수보다 작으나 임계영역인 경우는 슬릿이 있는 상부의 탁월주파수 스펙트럼의 크기가 하부보다 커짐을 알 수 있다.

3.4 시간 평균 유동장

$\alpha=90^\circ$, 여기주파수 (f_p)가 50Hz일 때, x축 방향으로 5d, y축 방향으로 2.2d ~ -2.2d에서 구한 시간 평균 물리량들을 Fig. 8, 9에 나타내었다.

Fig. 9에 나와 있는 평균속도 벡터를 관찰해 보면 레이놀즈 수가 층류박리인 7.8×10^4 인 경우에는 속도결손부의 최소속도지점이 $y/d = -0.5$ 지점으로 아래방향으로 치우쳐진다. 그러나, 레이놀즈 수가 난류박리에 근접하는 임계 영역에 가까운 2.3×10^5 인 경우에는 $y/d = 0.2$ 지점으로 윗방향으로 치우쳐

짐을 알 수 있다. 또한 후류폭의 크기는 유속에 관계 없이 일정함을 알 수 있다.

Fig. 10(a)의 흐름 방향 난류강도를 살펴보면 일반원주에서 나타나는 쌍봉구조는 찾아볼 수가 없고 층류박리일 경우 -0.25d에서 최대값을 가지며, 아래쪽으로 9회향되어 있으나, 반쪽은 아래쪽보다는 위쪽이 더 크게 나타난다. 임계영역인 경우에는 0.45d에서 최대값을 가지며 편향성은 찾아볼 수가 없고 반쪽은 아래쪽보다는 위쪽의 커짐을 알 수 있다. 그리고 층류박리일 때보다는 임계영역에서 값이 조금 더 크게 나타난다.

Fig. 10(b)의 흐름에 수직인 방향의 난류강도의 경우에는 층류박리에서는 -0.4d에서 최대값을 가지며 아래쪽으로 편향되고, 임계영역인 경우에는 -0.2d에서 최대값을 가지나, 마찬가지로 편향성은 찾아볼 수가 없고 반쪽은 아래쪽보다는 위쪽이 증가하고 그 값도 층류박리일 때 보다 더 커짐을 알 수 있다. 이는 임계영역의 경우가 층류박리일 때 보다 난류에너지가 더 커짐을 알 수 있다. 이것은 흐름 방향의 평균속도와 관련지어 볼 때 유동이 층류박리일 경우에는 후류가 아래쪽으로 치우쳐져서 아래쪽의 난류강도가 위쪽보다 더 커지나 임계영역의 경우에는 후류가 위쪽으로 치우쳐져서 반대의 경향이 나타난다.

Fig. 10(c)의 전단응력을 살펴보면 가운데 부분의 0이 되는 지점은 층류박리일 경우 -0.5d, 임계영역의 경우에는 -0.4d로 전체적으로 아래쪽으로 이동되어진 반면 아래쪽에서는 층류박리일 때의 전단응력값이 크게 나타지만 위쪽면에서는 임계영역의 전단응력값이 크게 나타났다. 이것은 앞에서 살펴본 평균속도와 난류강도 데이터를 비교해 볼 때 잘 일치하는 결과이다.

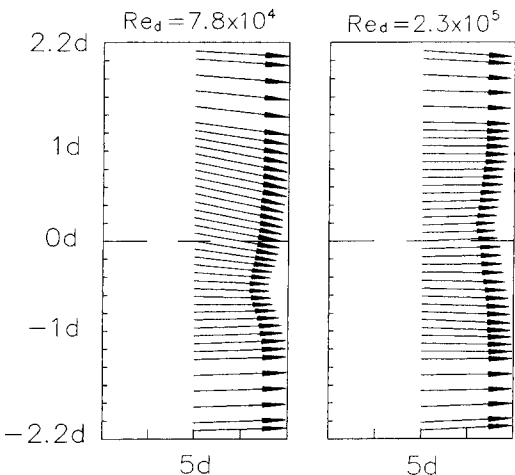
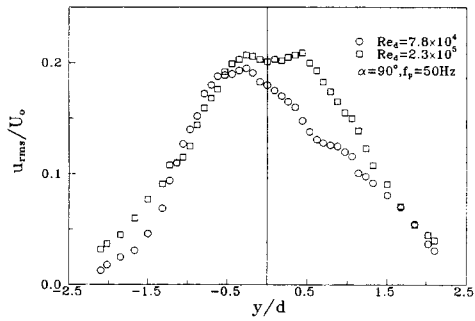
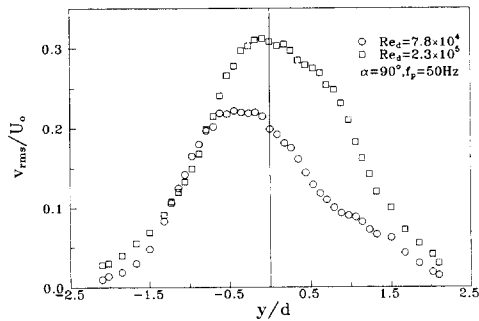


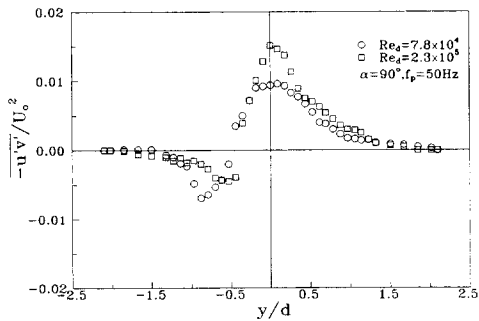
Fig. 9 Nondimensional velocity field



(a) Streamwise turbulent intensity



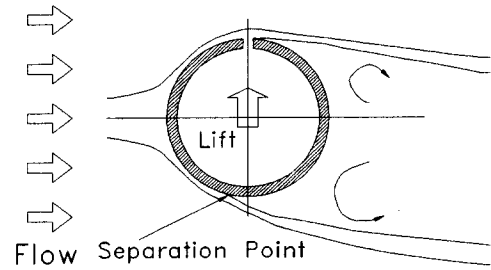
(b) Vertical turbulent intensity



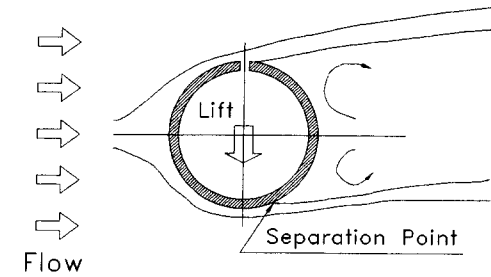
(c) Reynolds shear stress

Fig. 10 Time-averaged velocity field and turbulent stress

이상에서 고찰한 결과를 토대로 90° 위치에 음향여기가 가해진다고 할 때 와류유출 특성 변화의 개념도를 Fig. 10에 그려 보았다. 레이놀즈 수에 따라 속도 및 압력이 편향되어 나오는 물리적 의미를 살펴보면 층류박리일 경우에는 아래쪽면에서는 80°에서 박리가 일어나지만 음파의 섭동이 있는 위쪽에서는 90°에서 박리가 일어나게 된다. 따라서 박리점의 발생위치 차이로 인해서 박리가 먼저 발생하는 쪽으로 전체적인 후류의 흐름이 편향되어 압



(a) $Re_d = 7.8 \times 10^4$ (sub-critical flow)



(b) $Re_d = 3.8 \times 10^5$ (super-critical flow)

Fig. 11 Possible scenario of flow separation

력계수, 시간평균속도장의 물성치가 아래쪽으로 편향된다고 여겨진다. 또한 후류의 흐름이 아래쪽으로 편향되어 항력은 감소하고 양력은 위쪽 방향으로 발생한다. 그러나 임계영역인 경우에는 위쪽은 마찬가지로 90°에서 박리가 일어나지만 아랫면의 경우에는 박리되는 지점이 90° 뒤쪽으로 후퇴된다. 이 경우 박리점의 발생위치 차이로 인하여 후류의 흐름이 박리가 먼저 발생하는 위쪽으로 편향된다. 그래서 흐름방향의 평균속도는 위쪽으로 편향되고 난류강도는 편향성은 보이지 않으나 위쪽의 반쪽이 커짐을 알 수 있다. 마찬가지로 후류의 흐름이 위쪽으로 편향되어 항력은 커지고 양력이 아래쪽 방향으로 발생된다.

4. 결론

폐회로 풍동 내부에 유동과 수직된 방향으로 설치된 원주의 내부를 통하여 음향여기를 원주의 길이 방향으로 만들어진 긴 슬릿으로 방출시킬 때 원주의 표면정압, 항력계수, 양력계수 및 원주 후류에서의 와류유출주파수, 시간평균유동장을 측정할 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 레이놀즈 수가 7.8×10^4 인 경우 음향이 여기되는 쪽의 압력이 여기되지 않는 쪽보다 많이 떨어

졌고 특히 슬릿의 위치가 80, 90°에 위치해 있을 때 현저하다.

(2) 레이놀즈 수가 2.3×10^5 인 경우에 슬릿의 위치가 60°, 70°일 때를 제외하고는 음향이 여기되지 않는 쪽의 압력이 많이 떨어졌으며 특히 슬릿의 위치가 80°, 90°에 위치할 때 현저하게 나타났다.

(3) 항력계수는 레이놀즈 수가 층류박리영역일 경우에 슬릿이 없을 때는 1.2 이지만 슬릿이 있을 경우 0.9~0.75 사이의 값으로 줄어들며 레이놀즈 수가 임계영역인 경우는 슬릿이 없을 때는 0.89 이지만 슬릿이 있는 경우는 1~1.15 사이의 값으로 증가하였다.

(4) 양력은 레이놀즈 수가 층류박리일 때 음향이 여기되는 방향으로 발생한 반면 레이놀즈 수가 임계영역일 경우에 압력은 음향이 여기되지 않는 쪽으로 발생하는 양력역전현상이 나타났다.

후기

본 연구는 1994년도 교육부 학술연구조성비(기계공학 : ME94-B-02)에 의하여 이루어졌으며 이에 관계자 여러분께 감사함을 드립니다.

참고문헌

- (1) Dalton, C. and Chantranuvatana, B., 1980, "Pressure Distributions around Circular Cylinders in Oscillating Flow," *J. Fluids Engineering.*, Vol. 102, p. 331
- (2) Kiya, M., Mochizuki, O., Tanka, H. and Tsukasab, T., 1987, "Control of Turbulent Leading-Edge Separation Bubble," *JSME*, Vol. 53
- (3) Sigurdson, L. W. and Roshko, A., 1988, "The Structure and Control of A Turbulent Reattaching Flow," *Turbulence Management and Relaminarisation* (ed. Liepman, H. W. and Narasimha, R.), Spring-Verlag, p. 497
- (4) Fei-Bin Hsiao, Chin-Fung Liu and Jong-Yaw Shyu., 1990, "Control of Wall-Separation Flow by Internal Acoustic Excitation," *AIAA J.*, Vol. 28, p. 1440
- (5) 전경빈, 성형진, , 1994, "국소교란에 의한 재순환유동의 제어," 대한기계학회논문집 제18권 제2호, pp. 446~455
- (6) Meier, H. U. and Zhou, M. D, 1991, "The Development of Acoustic Generators and their Application as a Boundary Layer Transition Control Device," *Experiments in Fluids.*, 11, pp. 93~104
- (7) Lueptow, R. M., Breuer, K. S. and Haritonidis, J. H., 1988, "Computer Aided Calibration of X-Probes using a Look-Up Table", *Experiments in Fluids*, Vol. 6, pp. 115~118
- (8) Tamotsu Igarashi., 1982, "Flow Characteristics around a Circular Cylinder with Slit," *Bulletin of the JSME*, Vol. 25, No. 207. Sep. p. 1389
- (9) Fiedler, H. E. and Mensing, P., 1985, "The Plane Turbulent Shear Layer with Periodic Excitation," *J. Fluid Mech.*, Vol. 150, p. 281