외부 음향여기가 원주 후류 유동에 미치는 효과에 관한 연구

최 재 호* · 이 상 준**

(1998년 10월 29일 접수)

Effect of External Acoustic Excitation on Wake behind a Circular Cylinder

Jae-Ho Choi and Sang-Joon Lee

Key Words : Acoustic Excitation(음향여기), Shear Layer Instability(전단층 불안정), Wake Structure (후류구조)

Abstract

The effect of an external acoustic excitation on the wake structure behind a circular cylinder was experimentally investigated. The sound wave was excited in the frequency range of the shear layer instability and two sound pressure levels of 114 and 120dB were used in this study. As a result, the acoustic excitation modified the wake structure by increasing the velocity fluctuation energy without changing the vortex shedding frequency. The acoustic excitation enhanced the vortex shedding process and promoted the shear layer instability. Consequently, the acoustic excitation reduced the length of the vortex formation region and decreased the base pressure. In addition, the vortex strength of vortices was increased and the width of the wake was spread out due to the acoustic excitation. When the excitation frequency was identical to the shear layer instability frequency, the effect of the external flow control on the cylinder wake was maximized. In addition, with increasing the sound pressure level, the effect of the external acoustic excitation on the wake structure increased.

1. 서 론

유체역학 분야에서 물체 주위의 유동은 넓은 응용분야와 유동특성 자체에 대한 흥미로 오래 전부터 많은 연구가 수행되어 왔다. 이와 같은 물체들 중에서 앞모양이 뭉툭한 물체는 그 후류구조가 주기적인 와유출에 의해 거시적인 응집구조를 가지며, 이러한 후류의 와유출은 공기역학적인 항력과 양력, 유동에 기인한 진동, 공력 소음등을 야기시킨다. 이러한 공기역학적인 문제점들을 해결하기 위한 방법의 하나로 유동속에 놓인 물체 후류의 유동제어에 관한 많은 연구가 진행되어 오고 있다.

물체 후류를 제어하는 방법으로는 외부로부터 공급되는 동력의 필요 유무에 따라 크게 능동적 제어와 수동적 제어로 나누어 진다. 수동적 제어는 외부 동력의 공급 없이 표면부착물등을 이용하여 후류를 제어하는 방법이고, 능동적 제어는 유체의 흡입이나 분출, 물체의 진동이나 회전, 음향여기등과 같이 외부로부터 계속적으로 에너지를 공급하여 후류 유동을 제어한다.

이러한 능동적 제어방법 중에서 음향여기는 음파를 유동장에 가하여 유동의 속도 변동 에너지를 변화시켜 물체 후류를 제어하는 방법으로 공학적 측면에서 유동에 기인한 소음 저감등에도 이용되고 있다. 음향여기에 의한 후류제어는 음향여기를 가해주는 위치에 따라 크게 외부 음향여기와 내부 음향여기로 나누어 진다. 전자는 음파를 물체 외부에서 물체 주위 유동에 가해주는 방법이고, 후자는 물체 내부에서 음파를 가해주어 물체 주위 유동을 제어하는 방법이다.

물체 주위 유동의 대표적인 경우로 원주 후류는 이차원적인 유동을 생성시키며 거시적인 와동구조를 가지고 있어 오래전부터 많은 연구가 진행되어 오고 있다. Bloor[1]는 원주 후류의 천이에 대

* 회원, 포항공과대학교 대학원 기계공학과
** 회원, 포항공과대학교 기계공학과

한 연구에서, 와유출 주파수에 대한 전단층 불안정 주파수의 비가 레이놀즈수의 1/2 승에 비례하는 상관관계식을 제안하였다.

Blevins[2]는 유동장에 가해지는 음향여기 주파수가 원주 후류의 와유출 주파수대역이면, 음향여기가 후류의 와유출 주파수를 음향여기 주파수로 이동시킴을 발견하였다. Peterka and Richardson[3]은 전단층 불안정 주파수대의 음향여기가 후류의 와유출 주파수는 변화시키지 않으나, 전단층 불안정을 촉진시켜 원주 주위의 열전달을 증가시킨다고 밝혔다. 외부 음향여기가 원주 근접 후류의 와유출에 미치는 영향을 연구한 Yamanaka and Adachi[4]는 음향여기로 인해 후류의 와유출 주파수는 변하지 않으나, 전단층 불안정이 촉진되어 와형성영역의 길이가 감소하며, 이러한 효과는 음향여기 주파수가 전단층 불안정 주파수와 일치할 경우에 가장 크다는 사실을 발견하였다. Hsiao and Shyu[5]는 내부 음향여기에 의한 원주 후류의 변화를 연구하였다. 그들은 음파를 가해주는 부분이 박리점 부근일 경우에 원주 후류가 음향여기에 가장 크게 영향을 받으며, 이러한 박리점 부근에서의 음향여기가 후류의 폭을 감소시키고 항력감소와 함께 양력을 증가시키는 결과를 얻었다. 김경천 등[6]은 레이놀즈수 변화에 따른 내부 음향여기의 효과를 실험적으로 연구하였는데, 레이놀즈수가 층류 박리영역인 경우에는 음향여기에 의해 원주에 작용하는 항력이 감소하고 양력은 위로 작용하지만, 임계영역에서는 항력은 증가하고 양력이 아래로 작용하는 결과를 얻었다.

내부 음향여기에 비해 설치가 용이하고 구조가 간단한 외부 음향여기에 대한 기존의 연구들은 대부분 음향여기가 원주 근접 후류의 와유출에 미치는 영향을 다루고, 후류의 난류특성이나 와구조 변화에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 전단층 불안정 주파수대의 외부 음향여기를 이용하여 원주 후류를 제어하였으며, 이러한 제어가 후류의 유동특성과 와구조에 미치는 영향에 대하여 실험적으로 연구하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구는 풍동 수축부 노즐 출구가 40×40 cm^2인 분로 다운식 개방형 풍동에서 수행되었으며, Fig. 1은 본 연구에서 사용한 실험장치와 좌표계를 보여주고 있다. 실험을 수행한 시험부 영역은 노즐 제트의 포텐셜 유동영역(30×30 cm^2)으로 이곳에서 유동균일도와 난류강도는 각각 0.5% 이하이었다. 풍동의 시험부 부분은 본 실험에 사용되는

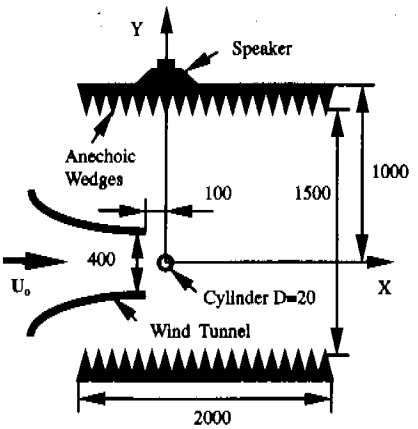


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus and coordinate system (unit:mm).

음파의 최소 주파수를 기준으로 하여 설계된 두께 76.2 mm 의 흡음재(SONEX 3")로 둘러싸여 있다[7]. 이 흡음재는 시험부 내부에서 음파의 잔향 성분을 최소화시키고, 주위의 소음으로부터 영향을 받지 않도록 하기 위한 것이다. 흡음재의 흡음율은 역 2 승법칙을 이용하여 검증하였는데, 역 2 승법칙이란 음원으로부터 거리가 2 배가 됨에 따라 음압강도(SPL)가 6 dB 씩 감소한다는 것으로 이상적인 무향상태를 나타낸다. 일반적으로 이론치와 1, 2 dB 정도의 차이를 보이면 성능이 우수하다고 할 수 있는데, 본 실험장치는 최대 1 dB 정도의 차이를 보였다.

좌표계는 원주의 중심으로부터 주유동 방향을 X 축, X 축과 원주의 길이방향에 수직인 방향을 Y 축, 그리고 원주의 길이방향을 Z 축으로 설정하였다. 원주는 풍동 수축부 노즐 출구로부터 100 mm 되는 위치에 설치하였으며, 유동에 음파를 가해주는 스피커는 원주로부터 수직방향(Y)으로 1 m 되는 위치에 설치하였다. 원주의 직경(D)은 20 mm 이고 길이는 250 mm 이며, 원주 후류의 2 차원성을 유지하기 위하여 Stansby[8]에 의해 제안된 형태의 경판을 원주 양단에 설치하였다. 본 실험에서 사용한 자유흐름 속도(U_o)는 5, 14 m/s 로 원주의 직경을 기준으로 한 레이놀즈수는 각각 Re_D = 6430 18000 이었다. 음향여기에 사용된 음파는 파형발생기(Feedback FG601)에서 만들어진 정현파를 증폭기(QSC-1400)로 증폭시키고, 이를 저주파 스피커(JBL 2235H)에 입력시켜 발생시켰으며, 음파의 주파수(f_e)와 음압강도(SPL)는 원주의 중심 위치에 설치된 마이크로폰을 사용하여 측정하였다.

원주를 따라 10° 간격으로 설치한 압력공에서 나온 압력은 다점 압력 측정장치(scanivalve)와 마이

크로 마노메터(Furness FCO-12)로 측정되었으며, 컴퓨터에 연결된 자료취득장치(DT 2838)를 이용하여 시간 평균화된 값을 구하였다. 원주 후류의 속도분포는 TSI사 IFA100 정온형 열선유속계를 사용하여 측정하였다. 음향여기에 따른 원주 근접 후류의 와구조 변화를 해석하기 위하여 조건부 위상 평균기법을 사용하여 속도를 측정하였는데, 기준신호를 I형 열선 프로우브(DANTEC 55P11)로 취득하고 후류 속도를 X형 열선 프로우브(DANTEC 55P61)로 측정하였다.[9,10] 측정된 속도성분은 DMA(Direct Memory Access)방식으로 컴퓨터에 저장한 후 통계처리하여 원하는 속도정보를 얻었다. 열선유속계의 보정은 피토관과 마이크로 마노메터를 사용하여 풍동시험부 내부에서 수행하였다. 실제 측정속도와 열선유속계에서 나온 전압신호와의 관계는 다음과 같은 King's 법칙을 이용하여 구하였다.

$$E^2 = A + BU^n \qquad (1)$$

여기서 지수 n은 통상적으로 사용되는 0.45를 사용하였다.

한편 X형 열선 프로우브는 실험 전후로 유효요각 보정법(effective yaw angle calibration)을 이용하여 보정하였다[11]. 본 실험에서 사용한 X형 열선 프로우브는 보정결과 각각 $\phi_1 = 47.0°$, $\phi_2 = 46.1°$의 요각을 가지고 있었다. 또한 실험중 풍동시험부 내부의 공기온도를 ±0.5°C 의 정확도로 일정하게 유지시켜 속도측정값에 온도보정을 따로 하지않아도 되게 하였다.

음향여기가 원주 후류에 미치는 영향을 정성적으로 조사하기 위하여 연선(smoke-wire) 방법으로 자유흐름속도 $U_o = 2$ m/s 에서 원주 후류 유동을 가시화하였다. 펄스형 Nd:YAG 레이져에서 나온 레이져 빔을 원통형 렌즈에 통과시켜, 얇은 시트로 원주 주위를 조명하였으며, 동기회로를 이용하여 레이져와 동기되어진 카메라(Nikon F5)로 순간영상을 촬영하였다.

3. 결과 및 고찰

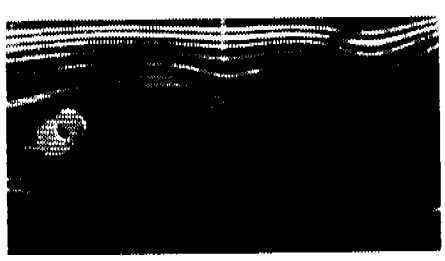
음향여기시 음파의 주파수 영역을 원주 후류의 전단층 불안정 주파수대로 일치시키기 위하여 먼저 음향여기가 없는 경우의 원주 주위 유동에 대한 실험을 수행하였다. 실험결과, 음향여기가 없는 경우의 와유출 주파수(f_s)와 전단층 불안정 주파수(f_i)는 다음과 같다.

U_o (m/s)	Re_D	f_s (Hz)	f_i (Hz)	f_i/f_s
2	2570	22	152	7
5	6430	53	543	10
14	18000	135	2000	15

여기서 와유출 주파수에 대한 전단층 불안정 주파수의 비값(f_i/f_s)과 레이놀즈수(Re_D)와의 상관관계는 Bloor[1]가 제안한 상관관계식($f_i/f_s = 0.1\times Re_D^{0.5}$)과 잘 일치하고 있다.

Fig. 2는 자유흐름속도 $U_o = 2$ m/s 에서 연선방법으로 원주 주위 유동을 가시화한 결과를 보여주고 있다. 이때 유동에 가해준 음향여기의 주파수는 $f_e = 152$ Hz 이고, 음압강도는 SPL = 120 dB 이다. 여기서 보면, 음향여기에 의해 와형성영역의 끝부분이 원주쪽으로 이동하여 와형성영역의 길이가 크게 감소하였으며, 하류로 나아감에 따라 외부유동이 후류 중심부까지 유입되고 있다. 또한 음향여기가 있는 경우가 없는 경우보다 동일 위치상에서 후류의 폭이 확대되고 있음을 알 수 있다.

음향여기에 따른 와형성영역의 변화를 측정하기 위해 I형 열선 프로우브를 원주 후류 중심축을 따라 이동시키면서 주유동 방향의 속도성분을 측정하였다. 와형성영역에 대하여 서로 다른 몇가



(a) Without acoustic excitation(AE) control

(b) With acoustic excitation(AE) control ($f_e/f_s = 7$, SPL = 120dB)

Fig. 2 Flow visualization using smoke-wire method at $Re_D = 2570$.

지 정의됨이 사용되고 있으나, 본 연구에서는 와유출 주파수의 2배가 되는 주파수에서 주유동 방향의 속도 변동성분이 최대값을 가지는 위치를 와형성영역의 경계로 정의하였다.[1]

Fig. 3과 4는 서로 다른 2개의 레이놀즈수 조건에서 음향여기에 따른 와형성영역과 원주 배면압력의 변화를 나타내고 있다. 여기서 하첨자 e와 o는 각각 음향여기의 유무에 따른 상태를 나타낸다. 레이놀즈수와 상관없이 음향여기로 인하여 와형성영역의 길이는 짧아지고 있으며, 원주 배면압력의 절대값은 증가하고 있다. 이러한 경향은 음압강도가 증가할수록 효과가 크게 나타났으며, 음향여기의 주파수가 전단층 불안정 주파수와 일치하는 경우에 최대값을 가졌다. 또한 음향여기의 주파수가 전단층 불안정 주파수보다 큰 경우가 작은 경우보다 유동제어 효과가 조금 크게 나타나고 있다. 와형성영역이 전단층 불안정 주파수의 음향여기에서 가장 크게 감소하는 경향은 기존의 Yamanaka & Adachi[4]의 연구결과와 잘 일치하고 있다. 한편 레이놀즈수의 영향을 살펴보면, 레이놀즈수가 작은 Re_D = 6430 의 경우가 큰 레이놀즈수 조건인 Re_D = 18000 경우에 비해 음향여기 효과가 크게 나타났다.

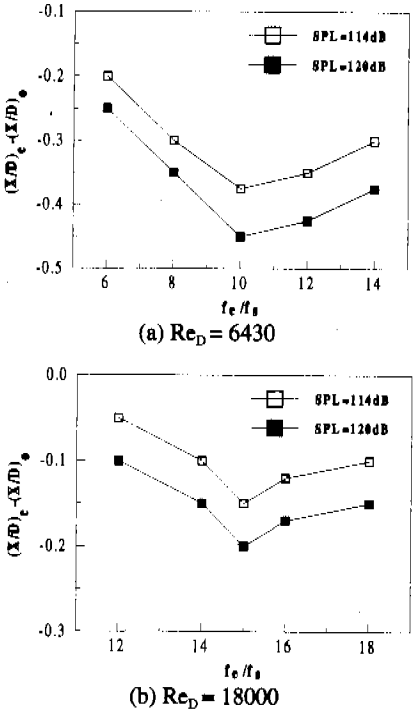


Fig. 3 Length variations of the vortex formation region.

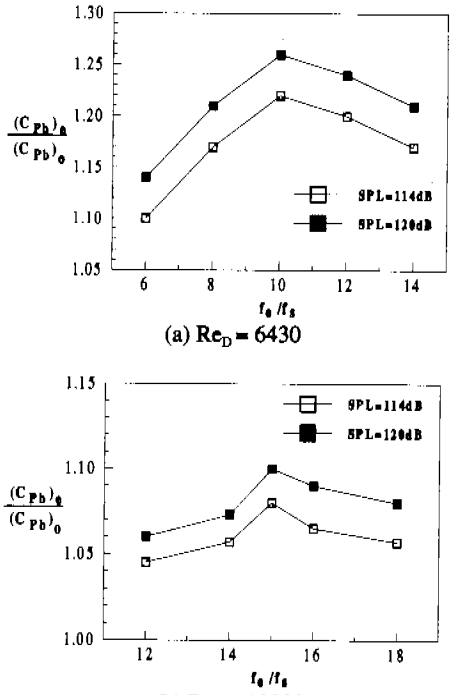
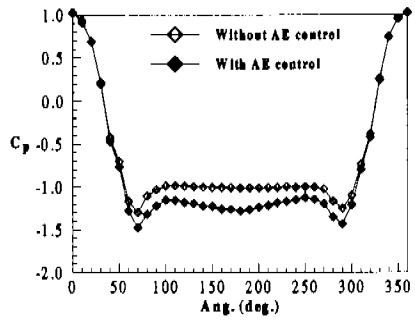


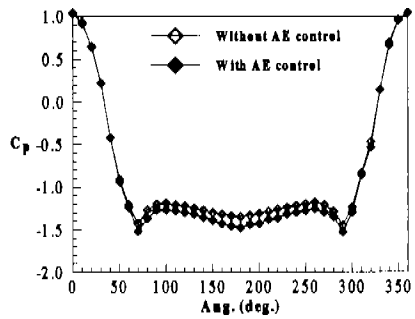
Fig. 4 Variations of the base pressure.

Fig. 5는 전단층 불안정 주파수로 원주 후류를 상부에서 음향 여기하였을때 원주 표면압력(C_p)의 변화를 나타낸 것이다. 음향여기가 있는 경우 정체점에서 박리점까지의 압력분포는 음향여기가 없는 경우와 큰 차이가 없으나, 박리구간부터 원주 후면까지의 압력분포는 음향여기가 없는 경우보다 작은 값을 가진다. 특히 원주 배면압력이 상대적으로 크게 감소하고 있다. 이러한 결과로부터 음향여기가 원주 전면의 유동흐름에는 크게 영향을 미치지 못하지만, 유동박리와 원주 후류에는 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 원주 후면의 압력감소로 인하여 원주의 형상저항(C_D)은 음향여기가 없는 경우보다 Re_D = 6430 에서 약 16%, Re_D = 18000 에서 약 6% 증가하고 있다. 이것으로부터 외부 음향여기가 표면압력에 미치는 효과도 낮은 레이놀즈수 조건에서 더욱 크게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 6은 원주 후류의 전단층 내부 한 지점(X/D = 0.5, Y/D = 0.7)에서 측정한 주유동방향 속도성분의 파워 스펙트럼 밀도(PSD) 분포를 보여주고 있다. 첫번째 정점은 와유출 주파수(f_s)를 의미하며, 두번째 정점은 전단층 불안정 주파수(f_l)를 나타내고 있다. 원주 후류를 전단층 불안정 주파수로 음향여기한 경우 불안정 주파수보다 낮은 주파수 영



(a) Re_D = 6430 (f_e/f_s = 10, SPL = 120dB)



(b) Re_D = 18000 (f_e/f_s = 15, SPL = 120dB)

Fig. 5 Comparisons of the surface pressure distribution.

역에서 PSD 값이 증가되며, 와유출 주파수와 전단층 불안정 주파수에서 PSD 값이 음향여기가 없는 경우에 비해 매우 크다. 특히 불안정 주파수대에서 음향여기가 PSD에 미치는 효과가 현저하여, 음향여기가 없을 때 넓게 퍼져 있던 불안정 주파수대가 음향여기 주파수(f_e)로 집중되어 매우 큰 값을 가진다. 그러나 와유출 주파수와 전단층 불안정 주파수 자체는 음향여기에 상관없이 거의 변하지 않았다. 이것으로부터 음향여기는 전단층 불안정을 촉진시켜 전단층 영역에서 외부유동의 유입과 혼합을 활발하게 하여 와형성영역을 감소시킴을 알 수 있다. 또한 음향여기는 와유출과정을 강화시켜 와유출이 보다 규칙적으로 발생되어짐을 확인할 수 있다. Peterka & Richardson[3]도 음향여기가 전단층의 불안정을 촉진시킨다고 하였다.

Fig. 7 과 8 은 X/D = 4 위치단면에서 음향여기에 따른 주유동 방향과 수직방향 속도성분의 난류강도 변화를 나타낸 것이다. 낮은 레이놀즈수 조건인 Re_D = 6430 에서는 음향여기로 인하여 주유동방향 속도성분과 수직방향 속도성분의 난류강도가 후류영역 전체에서 뚜렷하게 증가하였다. 반면에 Re_D = 18000 에서는 후류 중심영역(Y/D = -0.5 ~ 0.5)에서 주유동방향 속도성분의 난류강도만 음향여기에 의해 뚜렷하게 증가하고 있으며, 수직방향 속

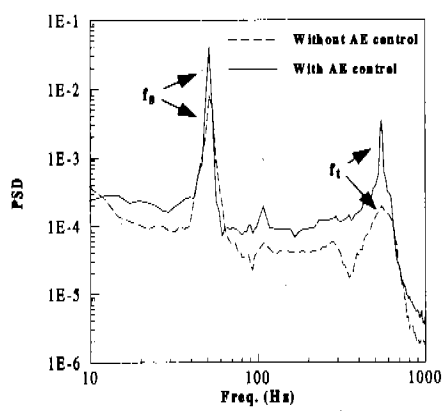
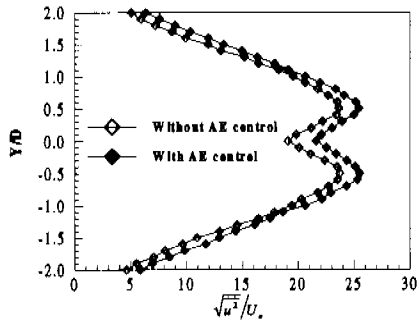
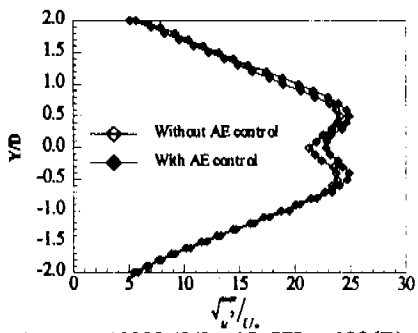


Fig. 6 Power spectral density distribution measured at a shear layer location of X/D = 0.5 and Y/D = 0.7 (Re_D = 6430 : f_e/f_s = 10, SPL = 120dB).



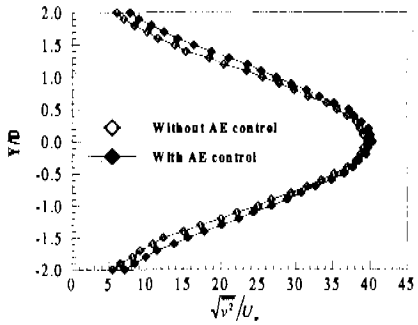
(a) Re_D = 6430 (f_e/f_s = 10, SPL = 120dB)



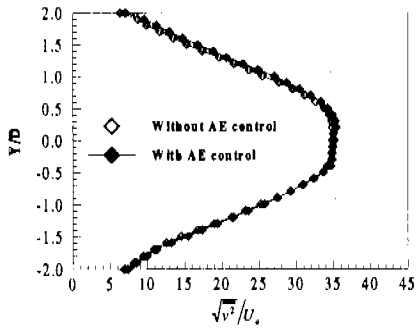
(b) Re_D = 18000 (f_e/f_s = 15, SPL = 120dB)

Fig. 7 Turbulent intensity profiles of streamwise velocity component at X/D = 4.

도성분의 난류강도에는 음향여기의 효과가 뚜렷하게 나타나지 않고 있다. 전반적으로 레이놀즈수가 큰 경우에는 음향여기가 속도 변동성분에 미치는 효과가 약하게 나타나는데, 이러한 경향은 와형성영역과 표면압력분포에서 음향여기의 효과가 레이놀즈수가 증가함에 따라 감소하는 경향과 일치하



(a) Re_D = 6430 (f_e/f_s = 10, SPL = 120dB)

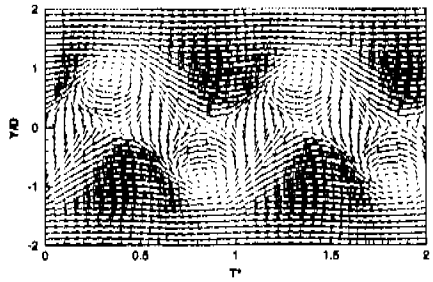


(b) Re_D = 18000 (f_e/f_s = 15, SPL = 120dB)

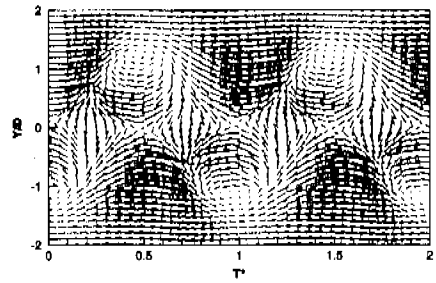
Fig. 8 Turbulent intensity profiles of vertical velocity component at X/D = 4.

고 있다. 본 연구에서 레이놀즈수의 변화는 자유흐름속도의 변화만을 통하여 얻은 것임을 고려할 때, 자유흐름속도가 증가함에 따라 동일한 음압강도의 음향여기에 의한 속도 변동 에너지의 변화가 감소하고 있다. 이러한 결과와 동일한 레이놀즈수 조건에서 음압강도가 증가함에 따라 원주 후류에 대한 음향여기의 효과가 증가하는 결과를 종합해 보면, 음향여기에 의한 속도 변동 성분과 자유흐름속도의 비가 음향여기의 중요한 변수로 작용함을 알 수 있다. 한편 음향여기에 의한 속도 변동 에너지의 변화는 상대적으로 변동성분의 크기가 적은 주유동방향 속도성분에 더 크게 영향을 주는 것으로 생각된다.

음향여기가 원주 후류의 와구조에 미치는 영향을 조사하기 위하여 열선 유속계로 측정한 후류속도에 조건부 위상 평균기법을 적용하여 위상 평균화된 속도분포를 구하였다. Fig. 9 는 X/D = 4 위치 단면에서 구한 위상 평균 속도장에서 대류속도(U_c)를 빼준 결과를 나타낸 것이다. 가로축 T*는 와유출 주파수를 무차원화하여 구한 시간척도로 와유출 주기를 나타내며, 대류속도는 원주로부터 유출된 와동이 주유동방향으로 진행해 나가는 속



(a) Without AE control



(b) With AE control (f_e/f_s = 10, SPL = 120dB)

Fig. 9 Phase-averaged velocity vector field relative to the convection velocity at X/D = 4 (Re_D = 6430)

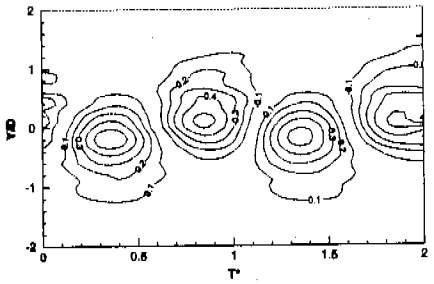
도로 다음과 같이 구하였다.

$$U_c = \Delta X \cdot f_s / \Delta T_p \qquad (2)$$

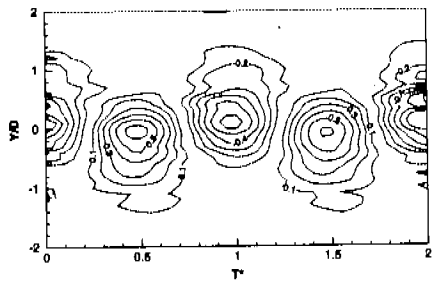
여기서 ΔT_p는 주유동방향으로 ΔX 만큼 떨어진 두 지점에서 측정한 속도사이의 위상차를 나타낸다. 본 연구에서 구한 대류속도는 4.42 m/s ($0.88U_o$)로 음향여기의 유무에 상관없이 동일하였다.

Fig. 9 를 보면 음향여기에 의해 와형성영역의 길이가 감소하여 동일 위치(X/D = 4)에서 음향여기 여부에 따라 위상 평균화된 속도장에 위상차가 나타나고 있다. 음향여기가 없는 일반적인 원주 후류의 경우 상하부에 생성된 와의 가장자리 위치가 각각 Y/D = ±1.2 인데 반해, 음향여기가 있는 경우에는 Y/D = ±1.4 로 증가하였으며, 후류 중심으로 들어오는 속도벡터의 크기도 증가하였다. 즉, 음향여기로 인해 후류의 폭이 증가하였으며, 후류 전단층에서의 유입이 증가하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 유동가시화에서 보여준 음향여기의 효과와 잘 일치하고 있다.

Fig. 10 은 Taylor 가설을 이용하여 위상 평균화된 속도분포와 대류속도로부터 구한 와도분포를 보여주고 있다. 여기서 보면 음향여기가 있는 경우가 없는 경우에 비해 와의 크기가 커져 음향여기로 인해 후류의 폭이 증가함을 알 수 있다. 또



(a) Without AE control



(b) With AE control (f_e/f_s = 10, SPL = 120dB)

Fig. 10 Comparison of vorticity contours at X/D = 4 (Re_D = 6430)

한 음향여기로 인해 와의 중심이 후류 중심축영역으로 밀집되는 현상을 보여주고 있으며, 와도외 세기도 증가한다. 이러한 결과로부터 음향여기는 와유출을 강화시켜 음향여기가 없는 경우보다 크고 강한 와구조를 생성시킴을 알 수 있다.

4. 결 론

외부 음향여기가 원주 후류의 유동구조 변화에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다. 연구결과, 음향여기는 와유출 주파수는 변화시키지 않으면서, 후류의 속도 변동 에너지를 증대시켜 후류구조를 변화시킴을 알 수 있었다. 음향여기로 인해 후류의 와유출과정은 강화되고 전단층 불안정은 촉진되었다. 이러한 음향여기의 영향으로 원주 후류에서 와형성영역의 길이와 원주 배면압력이 감소하였다. 또한 음향여기로 인해 원주 후류의 폭은 넓어지고 와도의 세기는 증가하였다. 이러한 음향여기 효과는 음향여기 주파수가 전단층 불안정 주파수와 일치하고 음압강도가 높을수록 크게 나타났다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 첨단유체공학연구센터 과제지원을 통해 수행되었으며, 이에 감사드립니다

참고문헌

(1) Bloor, M. S., 1964, "The transition to turbulence in the wake of a circular cylinder," J. Fluid Mech., Vol. 19, pp. 290-304.

(2) Blevins, R. D., 1985, "The effect of sound on vortex shedding from cylinders," J. Fluid Mech., Vol. 161, pp. 217-237.

(3) Peterka, J. A. and Richardson, P. D., 1969, "Effects of sound on separated flow," J. Fluid Mech., Vol. 37, pp. 265-287.

(4) Yamanaka, G. and Adachi, T., 1971, "Acoustic interferences in vortex-shedding from a circular cylinder," J. Acous. Soc. of Japan, Vol. 27, No. 5, pp. 246-256.

(5) Hsiao, F. B. and Shyu, J. Y., 1991, "Influence of internal acoustic excitation upon flow passing a circular cylinder," J. of Fluids and Structures, Vol. 5, pp. 427-442.

(6) 김경천, 부정숙, 구명섭, 이상욱, 1996, "원통내부의 음향여기에 의한 와류유출제어," 대한기계학회논문집, 제 20 권, 제 5 호, pp. 1649-1660.

(7) Foreman, J. E. K., 1990, "Sound analysis and noise control," Van Nostrand Reinhold.

(8) Stansby, P. K., 1974, "The effects of end plates on the base pressure coefficient of a circular cylinder," Aeronautical J., Vol. 78, pp. 36-37.

(9) Bradshaw, P., 1972, "An introduction to conditional sampling of turbulent flow," IC Aero Report, No. 72-18, Imperial College, U.K.

(10) Zaman, K. B. M. Q. and Hussain, A. K. M. F., 1981, "Taylor hypothesis and large scale coherent structure," J. Fluid Mech., Vol. 112, pp. 379-396.

(11) Bradshaw, P., 1985, "An introduction to turbulence and its measurement," Pergamon Press.