

음파 가진을 이용한 2차원 웨이크 유동 제어에 관한 연구

김현진* · 김명균** · 김재호***

(1996년 8월 27일 접수)

A Study on 2-D Wake Flow Control by Acoustic Excitation

Hyun J. Kim, Myung K. Kim and Jae H. Kim

Key Words : Wake(웨이크), Shear Flow Control(전단류 제어), Acoustic Excitation(음파 가진), Vortex Shedding(와류 생성), Shear Layer Instability Frequency(전단류 불안정 주파수), Jet Column Instability Frequency(제트 축 불안정 주파수)

Abstract

In a low speed open-type wind tunnel, a group of parallel wakes downstream of two dimensional grid model consisting of several circular cylinders were experimentally investigated to study the response of the wake flows to the acoustic excitation, in hoping to promote the understanding of the underlying mechanism behind the gross flow change due to artificial excitation. In the unexcited wake flows, the development of the individual wakes behind cylinders was almost uniform for the ratio of the spacing to the cylinder diameter of $s/d \geq 1.5$. For smaller s/d , however, the jet streams issued through the gaps between the cylinders became biased in one side and the cylinders had wakes of different sizes. At $s/d=1.25$, the gap flow directions change in time, leading to unstable wake patterns. Further reduction in s/d made this unstable flip-flopping of the jets stable. The most effective excitation frequency was found to be in the Strouhal number range of $St=0.5-0.6$. This frequency was related to the vortex shedding. At $s/d=1.75$, the excitation frequency was 2 or 4 times the vortex shedding frequency. When the flow was excited at this frequency, the vortex sheddings were energized, and pairings between neighboring vortices were generated. Also, the merging process between individual wakes was accelerated. The unstable and unbalanced wake patterns at $s/d=2.15$ were made stable and balanced. For smaller spacing of $s/d \leq 1.0$, the acoustic excitation became less effective in controlling the flow.

기 호 설 명	
c	: 와류 이동 속도, m/s
Cp	: 압력계수
d	: 원통 직경, cm
f	: 주파수, Hz

f_0	: 음파 가진 주파수, Hz
f_v	: 와류 생성 주파수, Hz
p	: 압력, Pa
Re	: 레이놀즈 수
s	: 원통 간격, cm
SPL	: 음압레벨, dB
$Se=f_0 d/U_0$: 음파 가진 스트라우할(Strouhal) 수
$St=f d/U_0$: 스트라우할 수

*회원, 인천대학교 기계공학과

**LG전자 리빙시스템 연구소

***회원, 대우전자 에어콘 개발팀

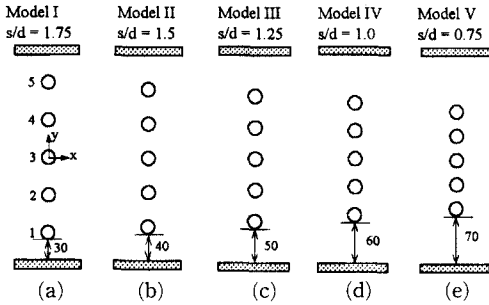


Fig. 1 Gird models consisting of 5 cylinders at various spacings(unit: mm).

- $S_v = f_v d / U_0$: 와류 생성 스트라우할 수
- U_0 : 자유흐름 속도
- x : 흐름방향 좌표 (Fig. 1 참조)
- y : 세로방향 좌표 (Fig. 1 참조)
- z : 원통 축 방향 좌표

그리스문자

- θ : 원통 표면각

1. 서 론

전단유동에 대한 이해를 증진시키기 위한 방법의 하나로 인위적으로 유동을 가진하는 방법이 실험적 연구에 널리 사용되고 있다. 유동을 가진해 주는 목적은 유동의 안정성을 연구하거나, 난류유동장의 일반적인 난류 성분 속에 잠복해 있는 응집구조를 부각시켜 이의 규명을 가능케 하거나, 또는 인위적 가진을 통해 유동장에 변화를 가져 와서 유동을 제어하고자 하는 것 등이다.

유동 제어를 목적으로 하는 인위적 가진 중에서 가진의 강도나 주파수 등을 자유로이 조절할 수 있는 능동 제어의 한 방법으로 음파 가진의 방법이 있다. 음파 가진을 통해 유동을 제어한 여러 사례들 가운데, 먼저 전단 유동에서 난류를 증가시키고 혼합을 증진시켜 확산속도를 높이거나, 또는 반대로 제트류와 같은 전단류에 높은 주파수의 가진을 적용하여 난류도를 감소시킨 예들이 있다. 이때의 가진 주파수는 전단류의 초기에 자연적으로 발생하는 전단류 불안정주파수보다 더 높으며 Kibens⁽¹⁾는 이러한 주파수 영역을 제트의 축불안정 주파수와 연계하여 생각하였다. 또 다른 음파 가진의 사례로는 경계층 천이제어가 있다. 경계층 천이제어에서 천이를 늦추는 사례는 아직 알려지지 않았으나 천

이를 앞당긴다든지 고정시키는 것은 가능하다.⁽²⁾ 음파 가진을 통해 박리를 제어한 사례로는 이차원 익형상에서 양력을 증가시키고 실속을 지연시키는 보고가 있다.⁽³⁾ 음파 가진이 실속의 영역을 뒤로 늦추었을 뿐만 아니라 실속 후 영역에서조차 양력 계수가 증가토록했다. 또한 축대칭 물체인 구 주위의 유동장에 음파를 적용하여 와류 생성 주파수를 바꾸거나 구에 걸리는 항력 및 구 표면상의 압력분포를 변화시킨 경우도 있다.⁽⁴⁾ 여기서 와류 생성 주파수가 가진에 의해 가진 주파수의 반으로 고정되어 가진 주파수를 따라 변화하며, 음파 적용시 구 주위의 압력분포가 변화됨이 보고되었다. 압력이 변화하는 영역은 경계층이 박리된 후의 웨이크 영역에 국한되었다. 결국 음파의 적용을 통해 배압의 크기가 증가하여 항력이 18%정도 증가하는 결과를 얻었다. 자유 전단류간의 간섭을 음파를 사용하여 제어한 예는 Kim and Durbin⁽⁵⁾에 나타난다. 근접해 있는 두개의 원통 후류에 발생하는 웨이크들은 원통사이 간격이 좁을 경우 서로 간섭을 일으켜 한 쪽의 웨이크는 크게 다른 쪽은 작게 형성되며 이러한 비대칭 웨이크 형성은 시간이 흐름에 따라 크기가 서로 엇바뀌게 된다. 음파를 적용할 경우 비대칭 웨이크는 대칭형으로 서로 그 크기가 동일하게 변화된다. 최근 음파의 섭동을 이용한 국내의 관련 연구로는 후방계단 뒤의 재순환 영역에서 재부착 길이를 25%-40% 정도 감소시킨 결과⁽⁶⁾와 임계 영역 전후에서 원주의 표면 압력 분포 및 항력과 양력에 음파가 미치는 영향을 조사한 연구⁽⁷⁾ 등이 있다.

이제까지 살펴 본대로 음파를 이용하여 전단류를 제어한 많은 사례들이 있다. 하지만 작은 에너지의 음파의 적용이 이러한 대규모의 유동장의 변화나 제어를 가능케 하는 기본 기구에 대해서는 아직까지도 명확한 규명이 이루어 지지 않은 상태이다. 따라서 본 연구는 이러한 음파를 적용한 전단류 제어의 새로운 사례를 도출해냄과 동시에 이러한 유동제어의 물리적 기구의 이해에 이르는 실마리를 모색해 보고자 한다.

본 연구에서 음파를 적용하여 제어하려는 대상인 전단류는 자유류에 수직으로 놓여 있는 여러 개의 원통으로 이루어진 이차원 격자(grid)의 후류에 형성되는 웨이크들이다. 원통 모델로부터 이루어지는 유동장은 한면으로는 웨이크들로도 여겨질 수 있으며 또 한면으로는 원통 사이의 틈새들로 분출되는

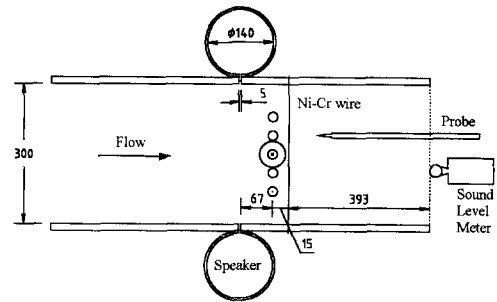
다중 이차원 제트로도 간주될 수 있다. 따라서 이러한 형태의 유동장은 많은 특성주파수를 지니게 된다. 즉 전단류가 형성되기 시작하는 초기에 발생하는 전단류 불안정 주파수, 와류 생성 주파수, 그리고 격자 사이로 분출되는 분류의 제트축 불안정 주파수 등이 존재하게 된다. 이러한 풍부한 주파수들은 음파에너지 적용시 가진에 가장 효과적인 주파수의 근거, 즉 물리적인 연관 관계를 찾는 데 도움을 준다.

2. 실험장치 및 방법

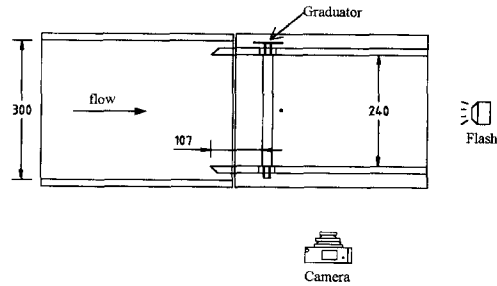
실험에 사용된 풍동은 저속 개방-송출형으로서 시험부 단면은 높이와 폭이 30 cm×30 cm이다. 시험부로 연결되는 수축부 전에는 허니콤과 난류도저감을 위한 4장의 스크린이 있는 정지부가 있다. 풍속은 팬 입구측의 공기 유입구의 개공도로 조절하며, 풍동 시험부에서의 난류도는 평균 유속 $U=3$ m/s에서 약 0.5% 정도이다.

일련의 웨이크군을 만들어주기 위해 5개의 원통으로 구성되는 2차원 격자 모델을 Fig. 1과 같이 설치하였다. 각 원통은 황동으로 제작하였고, 직경은 2 cm, 유효길이는 24 cm이다. 통상 실험은 원통 직경을 기준하여 레이놀즈 수 $Re=4000\sim 4500$ 에서 수행되었다. 원통 간격 조절은 중앙부 원통을 시험부 높이 중앙($y/d=0$)에 고정시키고, 주위의 원통을 움직여서 수행하였다. 연속적 간격 조절이 가능하며 본 실험에서는 원통간격 변화를 $s/d=1.75, 1.5, 1.25, 1.0, 0.75$ 에 국한하였다. 일부 측정은 $s/d=1.785$ 에서 수행하였으나 $s/d=1.75$ 의 경우와 실제적인 차이가 없었으므로 혼잡을 피하기 위해 $s/d=1.75$ 로 표기를 통일하였다. 다만 Fig. 17에서는 $s/d=1.785$ 를 case I으로, $s/d=1.75$ 를 case II로 구분하였다.

각 원통의 측방향 길이 중앙에 압력공을 설치하였다. 압력공은 $\phi 0.8$ 의 스텐관을 통해 모델 한쪽 끝단에서 나온 후, 내경 $\phi 2$ 의 고무튜브로 FCO91-MKII 스캐닝 상자(scanning box)를 거쳐 또는 직접 FCO12-2 디지털 마노미터로 연결된다. 원통 모델 가운데 한 개는 원통축을 중심으로 자전이 가능토록 하고 그 한쪽 끝에 각도기를 부착하여 원통의 표면의 압력 분포를 측정할 수 있게 하였다. 2대의 디지털 마노미터가 사용 가능하였으므로, 압력의 동시 측정은 단지 한 번에 두 지점에



(a) Side view



(b) Top view (unit: mm)

Fig. 2 Schematic of grid model set up in the wind tunnel.

서만 가능하였다.

Fig. 2는 격자모델을 풍동 시험부의 개방된 출구에 연이어 장착한 개요도를 보여준다. 웨이크의 확산을 방지하기 위한 측면에 연장부를 연결시켰고, 모델부 상류측에는 측관을 107 mm 연장시켜 앞의 시험부 측면에서 발달되어 오는 경계층의 영향을 벗어나게 하였다.

음파발생을 위해 20 W 스피커를 한쪽이 막혀 있는 $\phi 140$ 길이 300 mm인 아크릴 원통의 열린 다른 쪽 끝에 장착하고 원통 옆면상에 길이 240 mm, 폭 5 mm인 슬릿을 내었다. 이러한 공진형 스피커 2대를 Fig. 2와 같이 시험부 끝단과 모델부 상단의 접선 지점에 상하에 하나씩 장착하였다. GS FG-6001 함수발생기(function generator)에서 원하는 주파수의 신호를 증폭기에서 증폭하여 스피커로 보내어 열린 슬릿을 통해 시험부내 흐름을 가진시키도록 한다. 적용된 음파의 측정은 시험 연장부 출구에서 B&K-2236 음압레벨미터로 측정하였다.

Kanomax I-형 열선풍속계를 사용하여 웨이크 내의 평균속도 및 난류속도 성분을 측정하였다. 열선 프로브 신호는 리니어라이저(linearizer)에서 선

형화하였다. 프로브 이송을 위해 y 방향으로 185 mm, x 방향으로 600mm 이동이 가능한 이송장치를 이용하였다. 두 지점에서의 속도신호 사이의 상관관계 측정은 2개의 I-형 열선 프로브를 이용하여 수행하였다. 압력계의 신호와 열선 풍속계의 신호는 16채널 12-bit A/D Board인 NT-LAB을 이용하여 486 PC에서 처리하였다.

흐름 가시화를 위해 연선(smoke-wire)기법을 적용하였다. 저항 $35\Omega/m$ 인 $\phi 0.2$ 의 Ni-Cr 선을 사용하였고, 적용 오일로는 광유를 이용하였다. 연선 가열 시점과 카메라 작동시각의 시간지연을 조절하기 위한 타이밍 회로를 제작하였다. 전반적인 유동양상을 파악하기 위해서는 원통 모델 바로 뒤에 연선을 설치하고 사진으로 연기패턴을 포착했다. Fig. 2는 연선, 카메라, 그리고 플래쉬의 위치를 보여준다.

3. 흐름 가시화

원통 모델에서 발생하는 유동의 양상과 음파 적용에 따른 효과에 대한 전반적인 파악을 위해, 먼저 흐름가시화를 수행하였다. 각 모델 후류의 유동

장 가시화 사진을 Fig. 3-Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 3(a) (b) (c)는 $s/d=1.75$ 에서 각각 자연류와 무차원주파수 $Se=0.573$, 그리고 $Se=1.04$ 로 가진한 경우이다. 자연류에 비해 가진된 웨이크에서 와류 발생이 두드러지게 조직화 되었다. 자연류에서는 어느 한 원통 후류에서의 와류 발생이 옆 원통에서의 와류 발생과는 거의 무관하게 이루어지는 반면, 가진된 웨이크에서는 근접한 원통들에서 생성되는 와류간의 상관 관계가 존재한다. 즉 인접한 두 원통에서 발생하는 와류는 서로 대칭인 형상을 이룬다. 예를 들면 원통 3번의 상단에서의 와류 발생은 원통 4번의 하단에서 발생하는 와류와 위상이 같고, 원통3번의 하단에서 발생하는 와류는 원통2번의 상단에서 발생하는 와류와 동일한 위상을 갖는다. $Se=1.04$ 로 가진한 경우도 $Se=0.573$ 로 가진한 경우와 비슷한 효과를 얻었다.

Fig. 4(a) (b) (c) (d)는 $s/d=1.5$ 에서 각각 자연류 및 $Se=0.548$, $Se=1.082$, 그리고 $Se=2.164$ 로 가진하였을 때의 흐름가시화 사진을 보여준다. 유동장을 $Se=0.548$ 로 가진하였을 때 각 원통 사이로 나온 연기선이 일찍 웨이크 속으로 휘어져 들어감을 볼 수 있다. 즉 음파 적용시 각 웨이크가 일찍

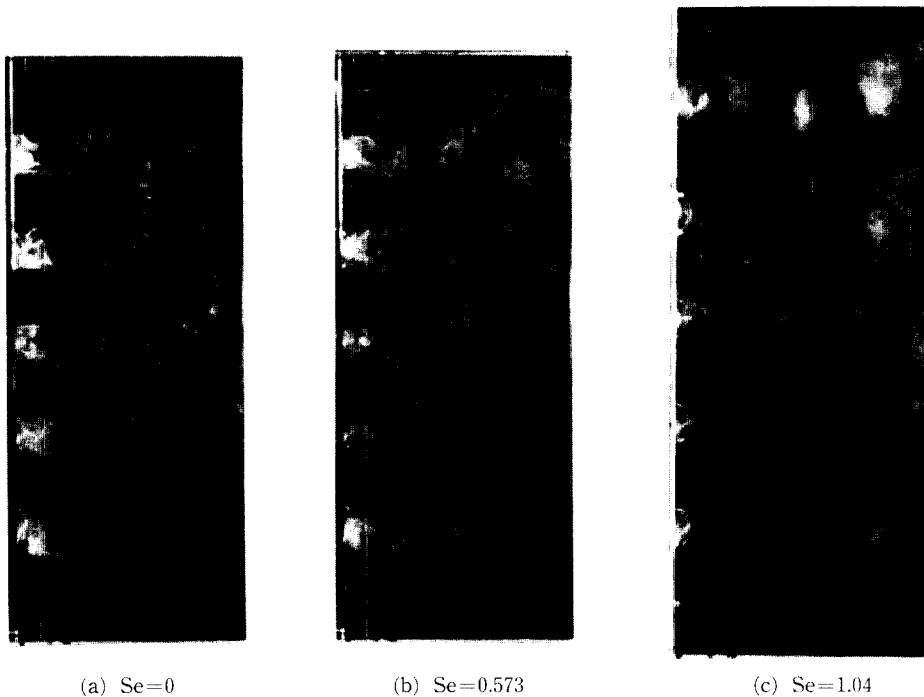


Fig. 3 Wake flows at $s/d=1.75$

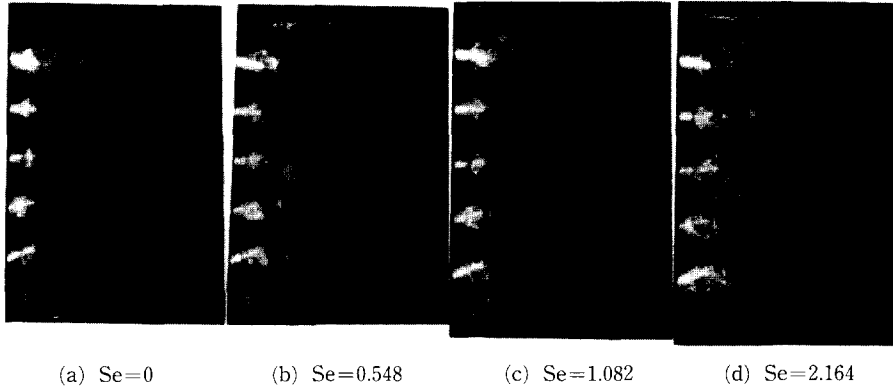
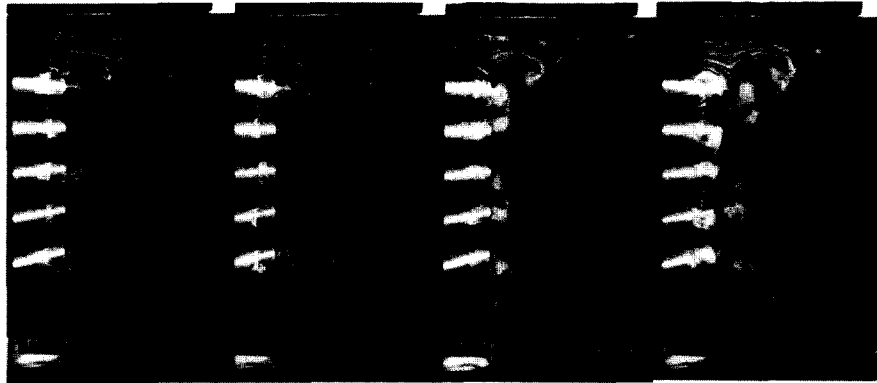


Fig. 4 Wake flows at $s/d=1.5$.



(a) $Se=0$, Pattern A (b) $Se=0$, Pattern B (c) $Se=0.505$ on pattern A (d) $Se=0.505$ on pattern B

Fig. 5 Wake flows at $s/d=1.25$.

달리게 된다. 웨이크 속으로 빨려 들어간 연기는 와류 중심에서 응집되어 덩어리를 형성한다. 앞의 $s/d=1.75$ 의 경우에서와 같이 음파를 적용한 경우 와류의 생성 및 발달이 강화됨을 알 수 있다. 또한 한 열에서 발생한 와류는 옆 열에서 발생하는 와류와 쌍을 이루어 함께 후류로 이동한다. $Se=1.082$, $Se=2.164$ 에서도 이와 유사한 현상을 얻었다.

Fig. 5(a) (b) (c) (d)는 $s/d=1.25$ 에서 흐름 가시화를 보여준다. Fig. 5(a) (b)는 둘 다 자연류인 경우인데, 외부의 교란 없이도 단지 시간이 경과함에 따라 Fig. 5(a)와 같이 원통 3번에서는 작은 웨이크를, 원통 2번과 원통 4번에서는 큰 웨이크를 갖는 유동장이 형성되기도 하고, 또는 Fig. 5(b)와 같이 원통 3번에서는 큰 웨이크를, 원통 2번과 원통 4번에서는 작은 웨이크를 갖는 유동장이 형성되기도 한다. 앞으로는 편의상 Fig. 5(a)와 같은 유

동 패턴을 패턴 A, Fig. 5(b)와 같은 유동 패턴을 패턴 B라고 부르기로 한다. Fig. 5(c) (d)는 각각 패턴 A와 패턴 B를 $Se=0.505$ 의 음파로 가진하였을 때의 흐름 가시화 사진이다. 자연류 때의 상태가 어떠한지, 가진 후에는 동일한 결과를 얻는다. 가진된 유동장에서는 원통 사이로 분출되는 제트류가 웨이크 속으로 빠르게 확산되어 들어가며, 앞서와 같이 대칭적 쌍을 이루는 와류가 생성되어 이동한다. 한편 이러한 원통간격에서는 Fig. 1(c)에서 보듯 모델 양끝의 원통과 풍동 시험부 상면 또는 하면과의 거리는 각각 4 cm로 원통간의 간격 $s=3$ cm보다 크다. 이로 인한 영향은 사진에서 보듯 5개의 원통으로 이루어지는 모델 전체가 하나의 물체로서 와류를 생성하는 것과 같아 보인다.

Fig. 6(a) - (d)는 $s/d=0.75$ 에서의 흐름가시화 사진이다. Fig. 6(a)는 풍동을 가동하면 얻어지는 자연류 상태로 항상 패턴 B가 얻어진다. Fig. 6(b)는

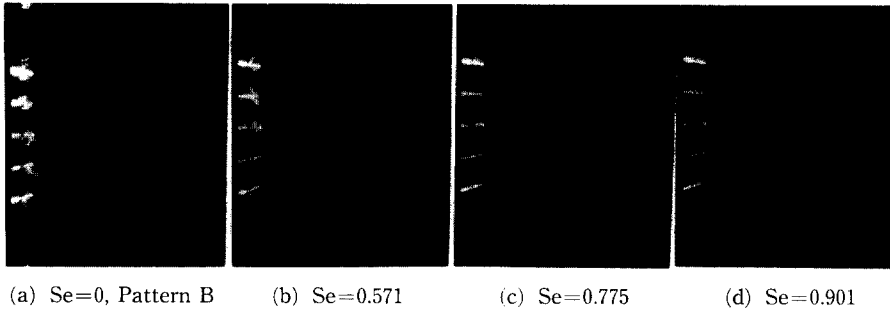


Fig. 6 Wake flows at $s/d=0.75$.

패턴 B인 자연류 상태를 $Se=0.571$ 로 가진하여 유동 패턴을 패턴 A로 바꾸어준 후, 음파를 제거하여도 패턴 A가 그대로 유지됨을 보여준다. Fig. 6(c)(d)는 패턴 A에 $Se=0.775$ 및 $Se=0.901$ 로 가진한 유동을 보여주는 흐름 가시화 사진들이다. 이 경우 가진으로 인한 유동 패턴의 변화는 없으나 와류 생성이 강화되었음을 알 수 있다.

4. 자유류 유동장 측정

모델의 원통 간격을 변화시켜가며 측정한 각 원통의 배압을 Fig. 7에 나타내었다. 음파를 적용하지 않은 경우($Se=0$), 원통 간격 $s/d=1.5$ 에서는 배압 분포가 거의 균일하나, $s/d=1.25$ 및 $s/d=1.0$ 에서는 모델의 양단에 있는 두 원통을 제외한 중앙부의 세 원통은 단일한 배압 값을 갖지 않고 경우에 따라 이중치를 갖는 것이 관찰되었다. 원통 3번의 배압이 작을 경우 원통 2번과 원통 4번은 큰 값의 배압을 갖고, 원통 3번의 배압이 큰 경우, 원통 2번과 원통 4번은 작은 배압을 갖는다. 원통 3번이 작은 배압을 갖는 형태는 Fig. 5(a)의 패턴 A, 원통 3번이 큰 배압을 갖는 경우는 Fig. 5(b)의 패턴 B에 해당한다.

Fig. 8은 $s/d=1.25$ 에서 원통 3번과 4번의 배압을 동시에 측정한 것을 보여준다. 가진이 없는 경우(Fig. 8(a)) 각 배압은 크고 작은 2개의 일정한 값 사이를 수십초의 간격으로 변화한다. 즉 원통 3번이 작은 배압을 갖는 동안은 원통 4번은 큰 값의 배압을 갖고, 원통 3번이 큰 값을 보이면 원통 4번은 작은 값을 보인다. 원통 3번과 원통 2번의 배압을 동시에 측정한 것도 이와 비슷한 결과를 보였다.

원통 간격 $s/d=1.25$ 에서 이러한 배압 분포의 패턴간의 변화, 즉 패턴 A에서 패턴 B로의 변화나

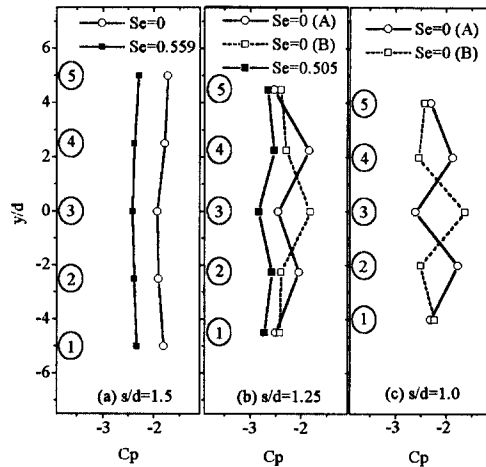


Fig. 7 Base pressure distributions.

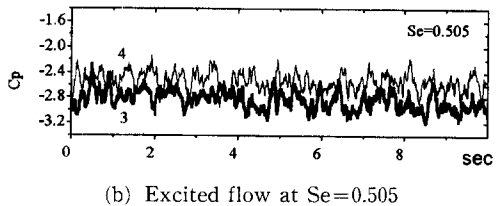
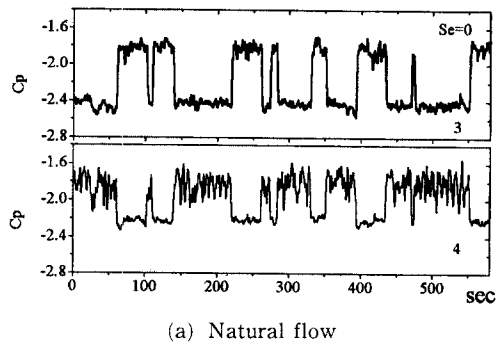


Fig. 8 Simultaneous time traces of base pressure of cylinders 3 & 4 at $s/d=1.25$.

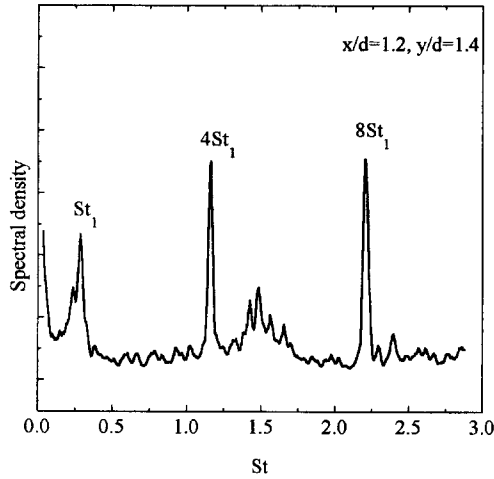


Fig. 9 Velocity spectrum at $s/d=1.75$; measurement at $x/d=1.2, y/d=1.4$.

또는 그 반대로의 변화가 아무런 인위적인 외부의 교란없이 자연적으로 발생하는 반면, $s/d=1.0$ 에서는 외부의 교란이 없는 한 일단 한 패턴이 형성되면 그 패턴이 그대로 유지되었다. 원통간격 $s/d=0.75$ 에서는 풍동을 기동할 때마다 원통 3번에서 큰 배압이 발생하는 패턴 B만이 관찰되었다.

$s/d=1.75$ 에서 와류 생성 무차원 주파수 $Sv=f_v d/U_0$ 는 위치에 따라 약간의 변화를 보이는 하지만 대략적으로 $Sv=0.292$ 정도이다. 이는 각 웨이크의 크기가 비슷함을 의미한다. 또한 원통 사이로 분출되는 제트의 중앙부에서는 와류 생성 주파수 외에도 Fig. 9에서와 같이 와류 생성 주파수의 4배 및 8배에 해당하는 스펙트럴 피크가 보인다. $s/d=1.5$ 에서는 위치에 따른 와류 생성 주파수 변화의 폭이 약간 증가하여 $Sv=0.283\sim 0.318$ 의 와류 주파수가 관찰되었다.

$s/d=1.25$ 에서는 웨이크의 패턴에 따라 와류 주파수가 변화한다. 예를 들면 패턴 B인 경우에는 원통 3번에 큰 웨이크가 형성되고 와류 주파수는 $Sv=0.194$ 이 되고, 패턴 A에서는 원통 3번에서 작은 웨이크가 형성되며 와류 주파수는 $Sv=0.443$ 이 된다. 다른 원통에서는 웨이크 크기에 따라 각각 와류 주파수가 관찰된다.

모델의 s/d 를 변화시켜 가며 측정된 와류 생성 주파수들을 Fig. 10에 정리하였다. $s/d=1.75$ 에서 거의 단일이던 와류발생 주파수가 $s/d=1.5$ 에서는 약간의 분산을 보이며, $s/d=1.25$ 에서는 패턴 A에서 $Sv=0.242, 0.346$, 그리고 0.443 , 패턴 B에서

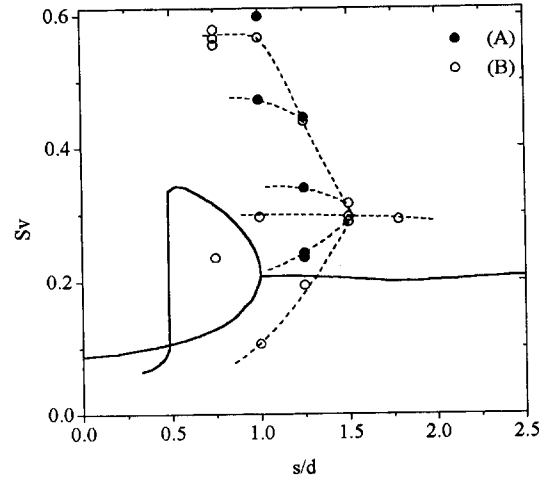


Fig. 10 Vortex shedding frequency vs. s/d .

는 $Sv=0.194$ 및 0.442 의 다양한 주파수를 보인다. 다양한 와류발생 주파수는 다양한 크기의 웨이크의 형성에 기인한다. Fig. 10에 실선으로 표시된 부분은 Bearman⁽⁹⁾이 두 개의 원통으로 구성된 모델에서 측정된 와류발생 주파수이다. 큰 값의 s/d 에서 본 실험의 와류 주파수와 Bearman⁽⁹⁾의 와류 주파수가 다른 것은 본 실험의 경우 풍동 시험부의 폐쇄도가 33.3%로서 Bearman⁽⁹⁾의 경우보다 상당히 크기 때문이다.

5. 음파로 가진된 유동장

음파의 적용에 대한 이러한 유동장의 반응을 조사하기 위하여 앞서 설명한 스피커를 통해 음파의 주파수 및 세기를 바꾸어 가며 유동장을 관찰하였다.

5.1 배압분포

Fig. 11은 음파의 주파수를 변화시켜 가며 원통 3번에서의 배압 변화를 측정된 것이다. 여기서 ΔC_p 는 자연류 때의 배압의 압력계수와 음파로 가진하였을 때의 배압의 압력계수와와의 차이를 나타낸다. $s/d=1.75$ 에서 음파의 세기가 $SPL=108.5$ dB 일 때, $Se=0.53\sim 0.7$ 의 주파수 영역에서 배압을 변화시킬 수 있었다. 음파의 세기가 클수록 더 배압을 더 감소시킬 수 있었다. 음파 가진의 최대효과를 $Se=0.536$ 에서 $SPL=108.5$ dB이면 $\Delta C_p=-0.3$, $SPL=111$ dB이면 $\Delta C_p=-0.6$ 이다. SPL

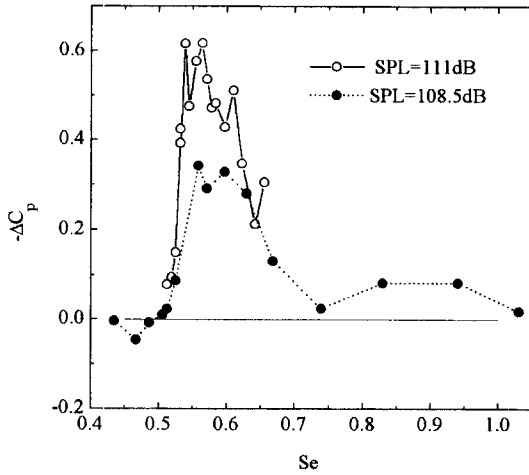


Fig. 11 Effect of excitation frequency on the base pressure at $s/d=1.75$.

=111 dB일 때, 한정된 주파수 영역에서만 측정이 가능하였는데, 이는 $Se=0.66$ 이상의 주파수 영역에서는 일반적으로 이러한 음파의 세기를 얻기가 어려웠기 때문이다.

Fig. 12는 $s/d=1.75$ 에서 음파의 주파수를 $Se=0.571$ 및 $Se=1.09$ 에 고정하고 음파세기를 증가시켜 가며 배압에 미치는 영향을 관찰한 것이다. $Se=0.571$ 의 가진 주파수는 앞서 Fig. 11에서의 유효 주파수 영역에 속하는 주파수이다. $Se=1.09$ 의 주파수는 이러한 영역에 속하지 않지만, 이 주파수를 택한 것은 이 주파수에서는 특별히 현재의 실험 장치에서 음파의 세기를 $SPL=120$ dB까지 높일 수 있었기 때문이다. 시험부 출구에서 측정된 배경음, 즉 유동으로 인해 유발되는 음파의 세기는 94.5dB이다. $Se=0.571$ 에서 음파의 세기가 100dB를 넘어서면 SPL에 비례하여 배압의 변화를 얻을 수 있었다. $Se=1.09$ 에서는 음파의 세기가 110dB에 이르기까지는 별로 배압에 영향을 주지 못하다가 그후로부터 120dB에 이르기까지는 배압 변화에 유효함을 볼 수 있다. 배압변화의 기울기도 $Se=1.09$ 에서 더 크게 나타난다.

$s/d=1.5$ 에서는 배압의 변화가 일어나는 가진 주파수 영역이 $Se=0.53\sim 0.62$ 로 줄어들었다. 음파가진시 모델 전반에 일어나는 배압변화는 Fig. 7(a)과 같다. $s/d=1.5$ 에서 $Se=0.559$ 의 주파수로 유동장을 가진하였을 때, 모델 전반에 걸쳐 거의 균일한 배압의 감소를 얻을 수 있었다.

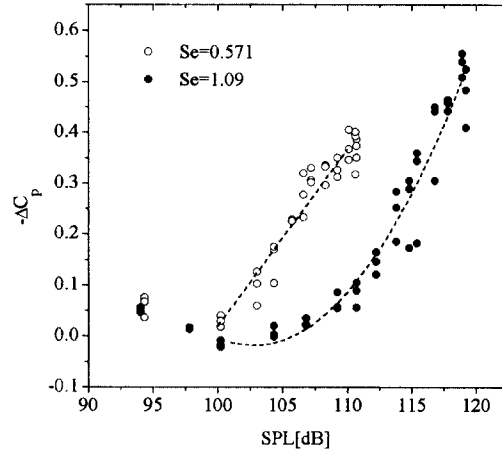


Fig. 12 Effect of excitation intensity on the base pressure at $s/d=1.75$.

$s/d=1.25$ 에서 배압을 변화시키는데 가장 효과적인 가진 주파수는 $St=0.505$ 이었다. Fig. 7(b)는 이 주파수로 가진된 유동장에서의 배압 분포를 보여준다. 음파로 인해 각 원통간의 배압 차이가 현저히 줄어들어 패턴의 구분이 없어졌고, 전반적으로 배압이 낮아졌다. Fig. 8(b)는 $s/d=1.25$ 에서 $Se=0.505$ 의 음파로 가진할 때, Fig. 8(a)와 같았던 배압 신호가 바뀌는 양상을 보여준다. 자연류에서 2개의 일정한 값 사이를 수십 초의 간격으로 급격히 변동하던 모양이 사라지고 단지 빠르고 불규칙한 압력 변동 시그널로 바뀌었다. 또한 배압 평균치도 감소하였다.

Fig. 13은 $s/d=1.0$ 에서 음파의 적용에 따른 배압 신호의 변화를 보여준다. Fig. 13(a)는 패턴 B에서 음파가 없을 때 원통 3번과 원통 4번의 배압 신호이다. Fig. 13(b)에서 주파수 $Se=0.509$ 인 음파를 적용하였을 때, 원통4번의 배압 평균값은 별 변동이 없으나 진폭이 증가하였고, 원통 3번에서는 $Cp=-1.5\sim -2.4$ 사이를 수초의 시간 간격을 가지고 움직였다. 이하 Fig. 13(c) (d) (e) (f)는 각각 $Se=0.532, 0.561, 0.584, 0.607$ 의 음파를 순차적으로 적용한 경우를 보여준다. 원통 3번의 배압이 일단 작아지면 음파를 이용하여 이를 다시 크게 해 줄 수는 없었다.

$s/d=0.75$ 에서 음파의 가진에 따른 배압 신호의 변화를 Fig. 14(a)-(f)에 나타내었다. Fig. 14(a)는 자연류에서 일어나는 패턴 B에서의 원통 3번과 원통 4번의 배압을 동시에 측정된 것이다. 이러한 상

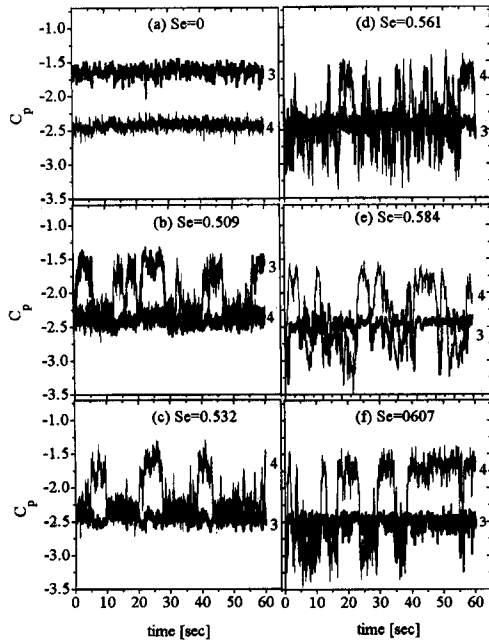


Fig. 13 Simultaneous time traces of base pressure of cylinders 3 & 4 at $s/d=1.0$.

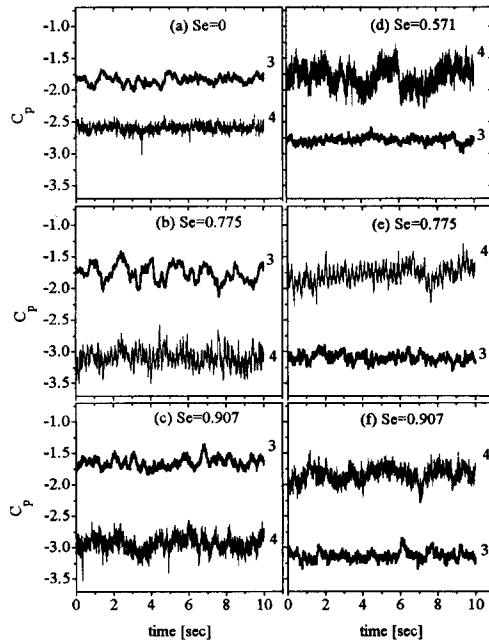


Fig. 14 Simultaneous time traces of base pressure of cylinders 3 & 4 at $s/d=0.75$.

태의 유동에 주파수 $Se=0.775, 0.907$, 그리고 0.571 로 순차적으로 가진한 경우의 압력신호를

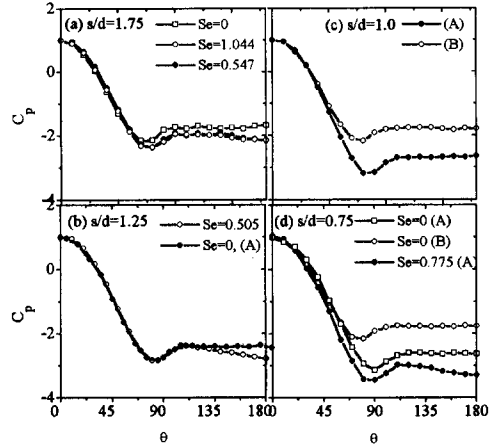


Fig. 15 Effect of acoustic excitation on the surface pressure distribution of cylinder.

Fig. 14 (b) (c) (d)에 나타내었다. $Se=0.775$ 와 0.907 로 가진한 경우 원통 3번과 원통 4번의 배압 크기를 서로 바꾸어 줄 수는 없었고 다만 각각의 값을 작은 것은 약간 더 작게, 큰 것은 약간 더 크게 해줄 수 있을뿐이었다. 그런데 주파수 $Se=0.571$ 로 가진한 Fig. 14 (d)의 경우 원통 3번과 원통 4번의 배압의 크기가 서로 뒤바뀌는 것을 볼 수 있었다. 실제로 이러한 패턴 변환은 $Se=0.563-0.600$ 에서 가능하였다. 일단 패턴 B가 패턴 A로 바뀌고 나면 음파를 제거해 주어도 그 바뀐 상태가 계속 유지되었다. Fig. 14 (e) (f)는 이같이 패턴 A로 바뀐 상태의 유동장에 주파수 $Se=0.775$ 와 0.907 로 가진한 경우이다. 이러한 음파의 적용에 따른 큰 변화는 없고 단지 원통 3번의 배압이 약간 낮아졌을 뿐이다.

5.2 원통표면 압력분포

Fig. 15 (a)-(d)는 음파 가진이 원통 3번의 표면 압력 분포에 미치는 영향을 보여준다. Fig. 15 (a)의 $s/d=1.75$ 에서 $Se=0.547$ 로 가진한 경우 경계층 박리가 시작되는 80도 부근부터 압력이 감소하기 시작하여 웨이크 내로 들어가는 전 영역이 압력 감소를 겪는다. 원통의 전면에서는 음파의 영향이 거의 없다. $Se=1.044$ 에서의 음파가진 역시 $Se=0.547$ 과 비슷한 결과를 가져온다. Fig. 14 (b)는 $s/d=1.25$ 의 패턴 A에 $Se=0.505$ 를 적용할 경우 표면압력 분포변화를 보여준다. 자연류의 경우 측정 도중 패턴이 바뀌는 것을 감지하기 위해 원통 3번

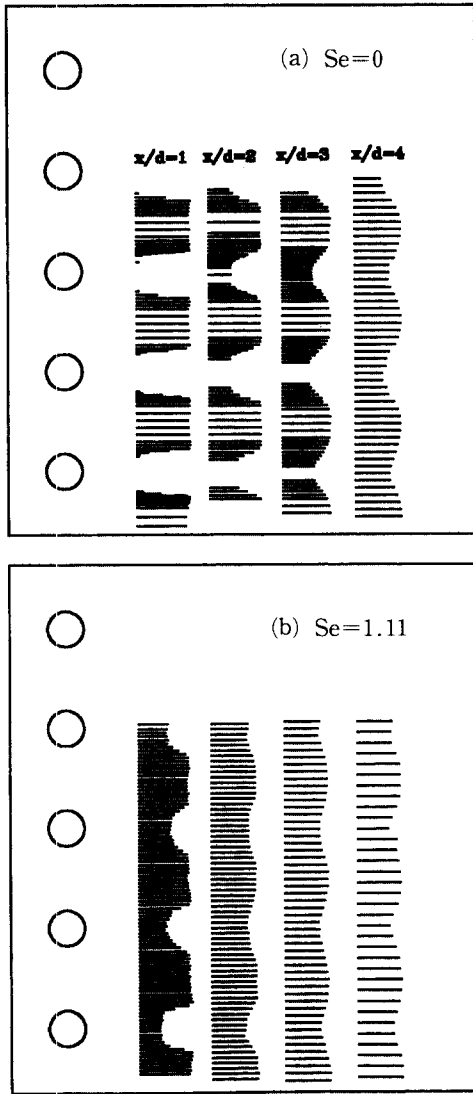


Fig. 16 Effect of acoustic excitation on the velocity profiles in the wake of cylinder 3 at $s/d=1.75$.

의 표면압력과 동시에 측정하여 원통 4번에서의 배압을 패턴변화의 판별 기준으로 삼았다. 주파수 $Se=0.505$ 의 음파로 가진한 경우 $\theta=120^\circ\sim 180^\circ$ 에서 압력이 감소한다.

Fig. 15(c)의 $s/d=1.0$ 인 경우에는 패턴 A 및 패턴 B에서 나타나는 압력분포를 보여준다. 음파 가진시의 표면 압력분포는 측정하지 않았다. Fig. 15(d)의 $s/d=0.75$ 에서는 패턴 A에 $Se=0.775$ 를 적용하던 $40^\circ < \theta < 180^\circ$ 의 표면 압력이 더욱 감소하였다.

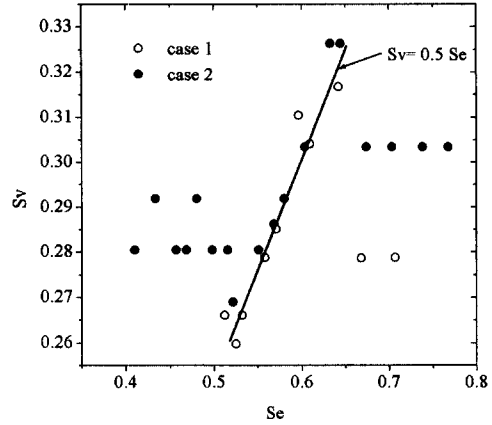


Fig. 17 Effect of excitation frequency on the vortex shedding frequency at $s/d=1.75$.

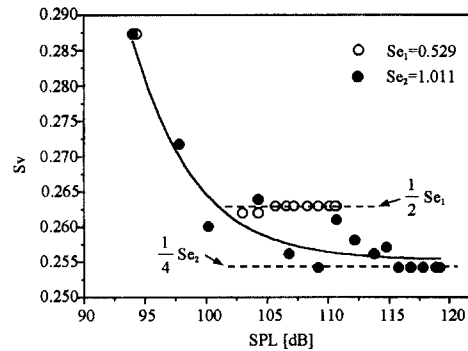


Fig. 18 Effect of excitation intensity on the vortex shedding frequency at $s/d=1.75$.

5.3 속도분포

$s/d=1.75$ 에서 음파의 가진에 의한 속도장의 전반적인 변화를 Fig. 16(a)(b)에 나타내었다. 이러한 원통 간격에서는 각 원통에서 형성되는 웨이크들의 크기가 거의 균일함을 알 수 있다. 자유류에서는 각 원통의 후류에서 발생한 웨이크 영역이 오래 동안 지속되는 반면, $Se=1.11$ 의 음파로 가진한 경우에는 개개의 웨이크간의 합병이 빠르게 진행됨을 볼 수 있다.

5.4 와류 발생 주파수

Fig. 17은 $s/d=1.75$ 에서 음파 주파수를 변화 시키며 와류 발생 주파수를 측정한 것이다. 원통 배압이 음파에 의해 영향을 받는 가진 주파수 영역 내에서 와류발생 주파수도 영향을 받아서 $Sv=1/2 \cdot Se$ 와 같이 와류발생 주파수가 가진 주파수의

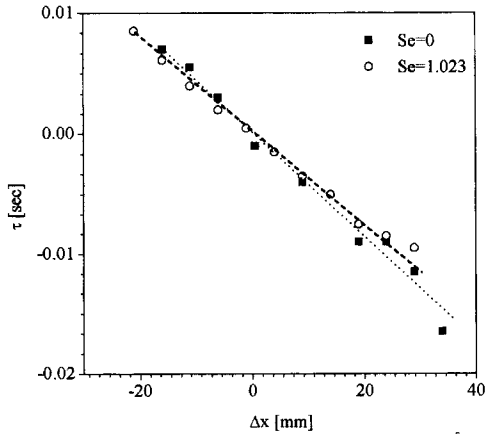


Fig. 19 Cross-correlation measurement for convection velocity of vortex shedding at $s/d=1.75$.

1/2의 값을 따라간다. 와류발생 주파수 값들이 어느 정도 산포하는 것은 아마도 가진이 없을 경우에도 미세하나마 존재하는 고유음향모드에 기인한 것이 아닌가 여겨진다.

Fig. 18에는 음파의 세기가 와류 발생 주파수에 미치는 영향을 보여준다. 가진 주파수 $Se_1=0.529$ 에서는 음파세기가 작을지라도 곧바로 $Sv=1/2 Se_1$ 로 고정되어, 음파세기가 더 이상 증가하여도 와류 발생 주파수는 변화하지 않는다. 가진 주파수 $Se_2=1.011$ 에서는 음파의 세기를 증가시키며 따라 와류 발생 주파수가 서서히 감소하다가 115dB를 넘어서서는 $Sv=1/4 Se_2$ 로 고정된다.

5.5 와류이동 속도

모델 후류에서의 음파가 와류 이동 속도에 끼치는 영향을 조사하기 위해서 2개의 열선 프로부를 이용하여 상호상관계수(cross-correlation coefficient)를 얻었다. 열선 프로부 1번은 ($x/d=3.7$, $y/d=2.15$, $z/d=0$)에 고정하고 열선 프로부 2번은 ($x/d=3.7$, $y/d=2.15$, $z/d=0.25$)을 기준점으로 하여 x방향으로 이동시키며 측정을 수행하였다. Fig. 19는 $s/d=1.75$ 에서 이러한 상관관계 측정으로부터 2개의 열선프로부간 거리 Δx 대 시간 지연 τ 를 구한 것을 보여준다. 자유 웨이크에서의 와류 이동 속도는 $c=2.317\text{m/s}$ 이며, 음파 $Se=1.023$ 로 가진한 경우에는 $c=2.557\text{m/s}$ 이다. 이는 자유흐름속도에 대하여 각각 $c/U_0=0.697$, $c/U_0=0.769$ 로서 가진된 경우 와류 이동 속도가 약 10%

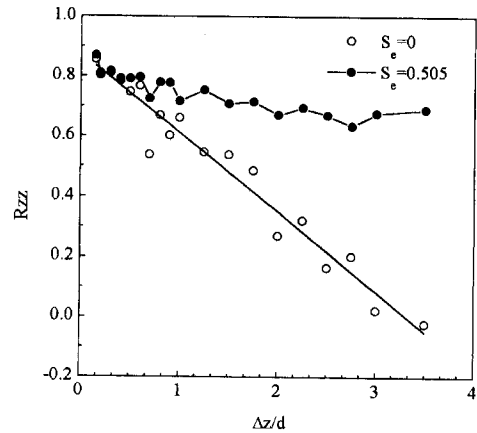


Fig. 20 Cross-correlation of velocity signals separated in the axial direction.

정도 증가하였다.

5.6 축방향 상관계수

Fig. 20은 $s/d=1.25$ 에서 원통의 축 방향(z)으로의 속도의 상관계수를 보여준다. 두 개의 열선 프로부 중에 하나는 ($x/d=2$, $y/d=1.1$, $z/d=0$)에 고정하고 다른 하나는 z 방향으로 이동하며 속도를 측정하였다. 음파가 없는 자연류의 경우 R 값이 두 열선 프로부의 거리가 증가함에 따라 빠르게 감소하나 주파수 $Se=0.505$ 의 음파를 적용한 경우 두 프로부의 거리가 $z/d=3.5$ 가 되어도 $R=0.7$ 정도로 유지됨을 알 수 있다.

Fig. 21(a)(b)는 자연류에서 z 방향으로 떨어져 있는 두 열선 프로부에서 동시에 측정한 속도 신호를 보여준다. $\Delta z/d=0.25$ 에서는 두 신호의 위상차가 거의 없는 상태가 계속 유지되지만 $\Delta z/d=2.85$ 에서는 두 신호의 위상차가 시간에 따라 변화하고 있다. 반면에 음파를 적용한 경우 Fig. 21(c)(d)에서 보듯이 두 프로부의 거리가 커져도 위상차의 시간에 대한 변화가 적게 나타났다. 이는 음파 가진이 와류의 2차원성을 증가시킴을 알 수 있다.

6. 고찰

6.1 웨이크 유동

원통으로 이루어지는 2차원 격자의 간격이 넓은 경우 각 원통으로부터 발생하는 웨이크 간의 간섭이 적어 각 웨이크들이 거의 균등한 크기를 갖게 된다. $s/d=1.75$ 에서 각 원통의 배압이 일정하고,

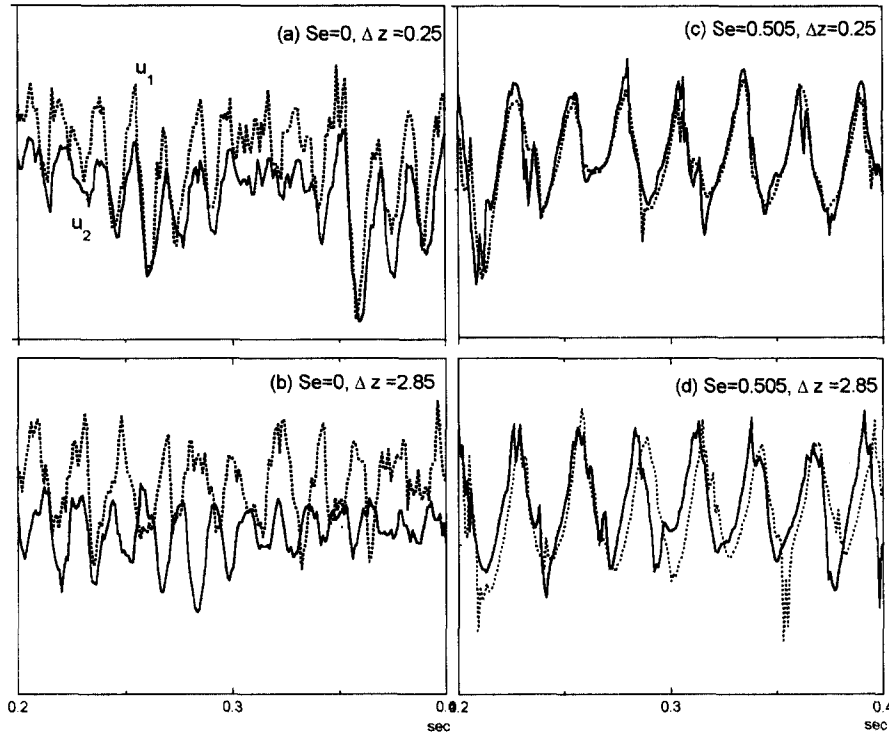


Fig. 21 Simultaneous velocity signals separated in the axial direction.

흐름 가시화 사진을 통해 본 웨이크의 폭도 거의 동등하게 나타났다. 모델 후류에서의 웨이크간의 합병도 균등하게 진행된다. 원통 간격을 $s/d=1.5$ 로 한 경우, 각 웨이크의 균등성은 일반적으로 유지되지만 $s/d=1.75$ 에 비해 웨이크간 간섭이 개입되기 시작하는 것을 유동가시화 사진에서 볼 수 있다.

원통간 거리를 $s/d=1.25$ 로 더욱 좁히면 웨이크간의 간섭이 증가하여 각 원통의 웨이크는 더 이상 균일한 크기를 유지하지 못하고 크고 작은 웨이크가 교차적으로 형성된다. 예를 들어 원통 3번에 작은 웨이크가 발생하면 주위의 원통 2번과 4번에는 큰 웨이크가 형성된다. 그런데 이러한 유동 패턴은 계속 지속되지 못하고 시간이 경과함에 따라 다른 패턴으로 변화한다. 이러한 변화는 Fig. 5(a) (b)에서와 같이 패턴 A 및 패턴 B의 두 가지 패턴 사이에서만 나타난다. 이러한 두 가지 유동 패턴은 Hayashi⁽⁸⁾가 관찰한 유동 패턴들과는 차이가 있는데 이는 Hayashi⁽⁸⁾의 경우 격자 모델이 원통이 아니고 직사각형 또는 양 모서리가 각이진 평판으로 이루어져 있기 때문으로 여겨진다. 또한 Hayashi

⁽⁸⁾의 경우 격자 간극이 풍동 시험부 단면적에 비해 매우 작아 시험부 폐쇄도에 큰 차이가 난다. 한 패턴에서 다른 패턴으로의 전환은 Fig. 8(a)에서 보듯 수십 초 정도의 시간 간격을 가지고 일어난다. 이러한 유동 패턴간의 시간에 대한 전환은 Kim⁽⁵⁾의 두 개의 원통 모델에 대한 실험에서 그 특성 시간의 길이가 레이놀즈 수가 작을수록 길어지는 것으로 보고되었다. 본 모델의 원통의 직경을 기준으로한 레이놀즈 수는 $Re=4000$ 정도이므로 Kim⁽⁵⁾에 의하면 $TU/d=3$ 이므로 $T=20$ 초가 된다. 본 실험의 관찰결과는 이와 같은 범위에 있는 것으로 나타났다.

이러한 두 가지 유동 패턴은 $s/d=1.0$ 에서도 관찰된다. 하지만 $s/d=1.0$ 에서는 패턴 간의 전환이 저절로 이루어지는 경우는 관찰되지 않았다. 풍동을 기동하면 두 가지 패턴 중에서 한 가지 패턴이 발생하여 외부 교란이 없는 한 그 패턴은 그대로 유지된다. 즉 $s/d=1.25$ 의 유동장을 ‘불안정 이중 패턴’이라고 하면 $s/d=1$ 의 유동은 ‘안정 이중 패턴’이라고 할 수 있다. $s/d=0.75$ 에서는 풍동을 기동할 때마다 항상 패턴 B만이 관찰되었다. 이러한

추세로 볼 때 원통 간격이 더욱 작아진다면 ‘이중 패턴’ 상태에서 ‘단일 패턴’ 상태로 귀착되리라고 여겨진다.

6.2 음파의 효과

$s/d=1.75$ 에서 웨이크의 원통의 배압을 변화시키는데 가장 효과적인 음파의 주파수는 $Se=0.52-0.64$ 이었고 이때 배압을 $\Delta Cp=0.6$ 정도 감소시킬 수 있었다. 또한 이 주파수 대역에서는 와류 생성 주파수가 가진 주파수의 $1/2$ 에 고정되며 와류의 강도 또한 크게 증대된다. 이러한 음파의 효과는 Fig. 3(a)(b)(c)에서 보듯이 와류를 활성화시켜 전단류간의 합병을 촉진하고 그 결과 웨이크가 일찍 닫히게 된다.

가진된 유동장에서 각 원통의 웨이크별로 볼 때는 웨이크 양쪽의 전단에서 여전히 180도 위상차를 갖고 와류가 생성되지만, 원통 사이로 분출되는 제트의 관점에서 볼 때는 양쪽 전단류의 와류가 대칭인 쌍을 이루며 형성된다고 볼 수 있다. 이런 유동을 다중 제트류로 간주할 때, 제트의 폭 s 를 기준으로 $St_j=f_v \cdot s/U_0$ 와 같이 정의되는 스트라우할 수는 $St_j=0.466-0.506$ 이 되어, 이는 제트축 불안정주파수(jet column instability)인 $St=0.5$ 와 일치한다. Kibens⁽¹⁾는 전단 불안정주파수 f_s 가 제트축 불안정 주파수 f_{jet} 의 2배에 해당 할 경우, 즉 $f_s=2^n \cdot f_{jet}$ 인 경우, 전단에서 와류의 쌍(pairing)이 촉진되어 전단에서의 혼합이 증가하고 제트의 포텐셜 코어(jet potential core)는 짧아진다고 보고하였다. 금번 $s/d=1.75$ 의 유동에서 효과적인 가진 주파수가 와류 생성 주파수의 2배되는 영역에서 있음과 또한 음파의 세기를 충분히 높여 줄 수 있는 경우, 와류생성 주파수의 4배가 되는 가진 주파수에서도 동일한 효과를 볼 수 있음은 Kibens⁽¹⁾의 주장을 뒷받침 한다고 볼 수 있다.

$s/d=1.5$ 에서 효과적인 기본 가진 주파수도 역시 $Se=0.524-0.611$ 의 범위에 있다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 이번에도 앞서와 유사한 음파 가진의 효과가 존재한다. $s/d=1.5$ 에서는 기본 가진 주파수 외에도 이의 2배와 4배되는 음파의 주파수에서도 효과적인 유동제어가 가능했다.

‘불안정 이중 패턴’을 보이는 $s/d=1.25$ 의 유동에서 음파의 적용은 Fig. 7(b)에서와 같이 각 원통에서의 웨이크가 거의 균일하게 평준화되는 유동 패턴을 형성해준다. $s/d=1.25$ 에서 가장 효과적인 가

진 주파수는 $Se=0.505$ 이었다.

자연류에서 ‘안정 이중 패턴’을 보이는 $s/d=1.0$ 의 유동에서 가진 주파수 $Se=0.508-0.607$ 의 음파로 인한 가진은 패턴 B를 패턴 A, 또는 이와 흡사한 형태의 패턴 A’으로 전환시켜 준다. A’이란 가운데 위치한 원통 3번은 작은 웨이크를 갖지만 원통 4번(2번)의 웨이크는 시간에 따라 그 크기가 작아지기도 또는 커지기도 하는 불안정한 상태를 나타낸다(Fig. 13(c)-(f)).

자연류 상태에서는 항상 패턴 B만이 나타나는 $s/d=0.75$ 에서 주파수 $Se=0.564-0.601$ 에서의 가진만이 패턴을 B에서 A로 전환시켜 주는데 효과적이다. 이 가진 주파수는 자연류의 패턴 B에서 나타나는 특성 주파수 $St=0.57-0.58$ 과 거의 동일한 주파수이다. 패턴이 일단 B에서 A로 전환되면 음파를 제거하여도 여전히 패턴 A로 유지된다. 가진 주파수 $Se=0.776$ 및 0.907 은 이러한 패턴 A를 더 강화시킨다. 즉 원통 3번의 배압은 더 낮추고, 원통 2, 4번의 배압은 더 높여 준다.

이상의 결과들이 2차원 격자를 이루는 원통의 수나 또는 레이놀즈 수 등과 같은 실험 조건의 변화에 어떤 영향을 받는지에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

7. 결 론

시험부 전체에 걸쳐 있는 이차원 격자 모델의 후류에서 일어나는 다중 웨이크 유동장에 대한 음파 적용 연구를 통해 얻은 결과들을 요약하면 다음과 같다.

가. 음파의 가진이 없는 자연류에서,

(1) $s/d \geq 1.5$ 에서는 각 원통의 웨이크들이 거의 독립성을 유지하며 균형을 이루어 발달한다. $s/d=1.25$ 에서는 원통 3번의 웨이크는 작고, 원통 2번, 4번의 웨이크는 큰 패턴 A와 원통 3번의 웨이크가 크고, 원통 2번, 4번의 웨이크는 작은 패턴 B가 외부의 교란 없이 번갈아 나타나는 ‘불안정 이중 패턴’을 보이며, 간격을 $s/d=1$ 로 더 낮추면 어느 한 패턴에 고정되어 ‘안정 이중 패턴’ 상태로 되고, $s/d=0.75$ 에서는 패턴 B만이 관찰되는 ‘안정 단일 패턴’ 상태가 나타났다.

(2) $s/d=1.75$ 에서 웨이크의 와류 생성 주파수는 원통사이로 분출되는 흐름의 제트 축 불안정 주파수와 일치하며 이 기본 주파수의 4배와 8배 되는

주파수들도 존재한다. $s/d=1.5$ 에서는 다양한 속도 스펙트럼 피크 주파수들이 나타나며, $s/d \leq 1.25$ 에서 와류 생성 주파수는 웨이크의 크기에 상당히 민감하게 $St=0.2-0.6$ 의 범위에 걸쳐 나타난다.

나. 음파를 이용한 유동 제어에 있어서,

(1) '가'항의 웨이크군 유동의 제어에 효과적인 음파의 주파수는 $Se=0.5-0.6$ 으로서, 이 가진 주파수는 와류생성 주파수와 밀접한 관계를 가지고 있다. $s/d=1.75$ 에서 효과적인 가진 주파수는 와류생성 주파수의 2배, 또는 4배에 해당하며, $s/d \leq 1.5$ 의 경우 다양한 와류 주파수들 가운데 높은 주파수 영역에 상응한다.

(2) (1)의 주파수의 음파로 유동을 가진다면 와류의 생성이 활성화되어 제트와 웨이크간의 혼합이 증진되므로 웨이크가 일찍 단된다. 이런 웨이크의 소형화는 $s/d=1.25$ 에서는 각 웨이크간의 불균형적 형성 패턴인 패턴 A 및 패턴 B를 전반적으로 균형화한다. 원통사이의 간격이 더 작아지는 경우($s/d \leq 1$), 와류 생성 증진과 웨이크의 소형화 효과는 여전히 존재하지만 웨이크간의 불균형을 깨뜨리는데는 점차로 그 영향력이 감소한다. 이는 웨이크들의 접근으로 인한 각 전단류간의 상호간섭이 강화되어 상대적으로 음파의 영향이 감소하기 때문으로 여겨진다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 핵심전문 연구비(951-1006-011-2) 지원으로 수행되었으며 지원에 감사를 드립니다.

참고문헌

(1) Kibens, V. , 1979, "Discrete Noise Spectrum

Generated by an Acoustically Excited Jet," *AIAA Paper* 79~0592, Mar.

- (2) Maestrello, L. and Ting, L., 1985, "Analysis of Active Control by Surface Heating," *AIAA J.*, Vol. 23, No. 7, July, pp. 1038~1045.
- (3) Zaman, K. B. M. Q. , Bar Sever, A., and Mangalam, S. M., 1987, "Effect of Acoustic Excitation on the Flow Over a Low-Re Airfoil," *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 182, Sept., pp. 127~148.
- (4) Kim, H. J. and Durbin, P. A., 1988, "Observations of the Frequencies in a Sphere Wake and of Drag Increase by Acoustic Excitation," *Physics of Fluids*, Vol. 31, No. 11, pp. 3260~3265.
- (5) Kim, H. J. and Durbin, P. A., 1988, "Investigation of the Flow between a Pair of Circular Cylinders in the Flopping Regime," *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 196, pp. 431~448.
- (6) 전경빈, 성형진, 현재민, 1992, "음파의 섭동에 의한 난류 재순환 유동의 제어," 대한기계학회 '92년도 춘계학술대회 논문집(II), pp. 151~154.
- (7) 김경천, 부정숙, 구명섭, 1995, "원통내부의 음향여기에 의한 와류유출 제어의 실험적 연구," 대한기계학회 '95년도 춘계학술대회 논문집(II), pp. 331~336.
- (8) Hayashi, M., Sakurai, A., and Ohya, Y., 1986, "Wake Interference of a Row of Normal Flat Plates Arranged Side by Side in a Uniform Flow," *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 164, pp. 1~25.
- (9) Bearman, P. W. and Wadcock, A. J., 1973, "The Interaction Between a Pair of Circular Cylinders Normal to a Stream," *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 61, pp. 499~511.