

2차원 장방형 각주유동의 주파수 특성에 관한 연구

손 호 석¹⁾, 이 영 호²⁾

A Study on Frequency Characteristics of Two-Dimensional Rectangular Prism Flow

Seok-Ho Son, Young-Ho Lee



Abstract

It is well known that Karman vortex streets are formed in the wake behind a rectangular prism when the Reynolds number is above 60. Also, the rectangular prism wake flow provides a potential means for numerous practical engineering applications. Recently, the use of Computation Fluid Dynamics(CFD) has been increased greatly because of the availability of high personal computers.

The present study is aimed to investigate frequency characteristics of the two-dimensional rectangular prism. Unsteady calculation by finite difference method based upon SOLA is carried out for three aspect ratios(1:1, 1:2, 1:3) of $Re=10^4$ in viscous incompressible flow within infinite domain. Fluctuation of velocity components at various pick-up points and time variation of drag and lift coefficients are analysed by FFT method to reveal shedding vortex frequency

1) 한국해양대학교 기계공학과 석사과정 임용제 진공

2) 한국해양대학교 기계공학과 교수

patterns.

At aspect ratio 1:1, one primary Strouhal number appears for about all pick-up points. At aspect ratio 1:2, two representative Strouhal numbers are classified by pick-up positions and their flows show two different reattachment patterns. For aspect ratio 1:3, frequency spectrum maintains multiple peaks.

1. 서 론

장방형 각주는 몽통한(bluff) 형상을 갖는 물체로서 주변에 역류 및 박리영역을 형성하며 후류에 주기성을 갖는 규칙적인 와열이 형성되어 매우 복잡한 유동특성을 나타낸다. 그러므로 후류에 생성되는 후류와열의 와방출 특성을 명확히 규명하는 것은 이들의 유동 패턴을 알기 위한 유체역학적 관심과 더불어 공학적으로는 물체후단의 물질 운송(輸送) 및 확산상태를 다루기 위해 혹은 후류에 의하여 혹은 후류에 의한 물체의 공력특성을 알기 위한 자료로서 중요하다.

장방형각주 또는 원주후방에서 연속적으로 방출된 와의 주기성은 보통 스트로할수(Strouhal number, 이하에서 St수로 부름)로서 나타낸다. 지금까지 이에 관련된 많은 실험연구결과가 공표되고 있으며 특히 장방형의 2차원각주에 대하여는 많은 연구결과가 제공되고 있다. 이와 관련된 이전의 연구결과를 표1에 나타내었다. 그러나 St수를 구하기 위한 속도값을 구한 위치는 연구자에 따라 다르며 이것을 Fig.1에 도시하였다.

그림에서 보면 2차원 대상 레이놀즈수는 대부분 10^4 이상이며 St수는 레이놀즈수에 의존하지 않음을 나타내고 있다. 보통 각주 후류의 속도검출점에서 변동속도성을 검출하여 FFT에 의하여 주파수 분석을 행하는 기법을 택하고 있다. 또는 각주에 작용하는 양력 및 항력의 시간변동값에 대한 FFT분석도 행해지고 있다.

이와 같은 결과로부터 변장비가 1:2인 경우에는 약 0.09 및 0.15의 두 가지 St수가 나타나고 있으나 연구자에 따라서 한가지만을 보고하고 있으나 동시에 이 값을 제시한 경우는 거의 없는 실정이다. 결국 동일한 유동에 대하여 전혀 다른 두 가지의 방출와주파수를 나타내고 있으나 그 원인에 대하여 명확한 설

명이 부족한 실정이다. 본 연구에서는 실험대신 전산유체역학기법을 이용하여 비정상의 2차원 장방형 각주주위의 유동을 해석하였다. 다음으로 얻어진 속도벡터를 이용하여 각주주위의 여러 곳에서 속도값을 검출하여 FFT해석을 행하였으며 이렇게 얻어진 St수를 종합적으로 고찰하여 불분명하였던 후류의 주파수 특성에 관하여 체계적인 고찰을 행하였다.^{(15),(16)}

2. 지배방정식의 차분화

본 연구에서는 MAC법을 비압축성의 NS방정식에 적용하여 Euler의 직각좌표계에서 차분근사를 행한 것으로서, 2차원의 운동방정식과 연속의 식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + g_x + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + g_y + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

Fig.2과 같은 변수분포를 갖는 부등간격 격자상에서 차분근사를 행하였으며, 본 연구에서는 보존형의 스킴중에서 MAC법의 중심차분과 수치안정성에 기여하는 부분도너셀(partial-donor cell)의 풍상차분을 병용하였다.

2.1 계산방법 및 경계조건

대표속도값을 U, 대표길이를 각주높이 H, 동점도를 ν 로하여 정의된 레이놀즈수를 $Re=UH/\nu$ 라고 하였으며 계산대상은 1×10^4 으로 일정한 값을 취하였다. 일반적으로 비정상 흐름의 계산에 있어서 초기의 속도, 압력 및 밀도 등의 값을 정하는 방법에 따라 그 이후의 결과는 큰 영향을 받는다. 본 계산에서는 흐름장 전체에 무차원속도($u=1, v=0$)를 균일하게 분포시킨 뒤 Courant수 및 확산수⁽¹⁷⁾를 만족시키는 시간간격($\Delta t=0.001$)에 안정계수 0.2를 곱하여 무차원시간 50시간까지

계산을 진행시키고 과도유동이 지난 뒤에는 안정계수 0.8의 값을 부여하는 기법을 취하였다. 또한 풍상차분의 가중계수는 0.5로 설정하였다. 초기조건으로서 압력과 중력가속도는 전영역에서 0의 값을 부여했다. 여기에서 계산격자 ($i \times j$)는 변장비에 따른 격자수로서 변장비에 따라 각각 100×80 , 120×80 , 130×80 의 크기를 가지며, 최소격자의 크기는 $1/20H$ (H =각주 높이)의 크기를 갖는다. 각각의 변장비에 따른 계산영역은 대표높이($H=1$)로 Fig.3에서와 같이 표시한 경우에 각주 전면에서 $8H$, 후방에서 $14H$, 상하경계면으로 $6H$ 의 크기를 갖는다. 후류와의 주파수 분석은 Fig.4에 나타난 바와 같이 변장비 1:1일 때는 좌측하단에서의 거리 $x/H=1.1 \sim 14.0$, $y/H=-4.0 \sim 6.0$, 변장비 1:2일 때는 $x/H=2.1 \sim 14.0$, $y/H=-4.0 \sim 6.0$, 변장비 1:3일 때는 $x/H=3.1 \sim 14.0$, $y/H=-4.0 \sim 6.0$ 의 범위 영역에서 속도시간의 변화파형을 검출하였으며, 각주주위 속도검출점의 위치로서는 Fig.4에 나타난 바와 같이 변장비 1:1일 때는 $x/H=0.1 \sim 1.1$, $y/H=1.1 \sim 1.5$, 변장비 1:2일 때 $x/H=0.1 \sim 2.1$, $y/H=1.1 \sim 1.5$, 변장비 1:3일 때 $x/H=0.1 \sim 3.1$, $y/H=1.1 \sim 1.5$ 의 위치에서 시간변화파형을 검출하였다. 공력특성값으로는 항력 및 양력, 배압계수값을 구하였다.

2.3 실험결과와의 비교

표2^{(1),(15),(16),(17)}에 변장비 1:0.5, 1:1, 1:2, 1:3, 1:4에 대한 각각의 항력계수의 실험 결과를 나타내었다. 표3^{(1),(15),(16),(17)}에 변장비 1:0.5, 1:1, 1:2, 1:3, 1:4에 대한 각각의 배압계수의 실험 결과를 나타내었다. Fig.5은 시간평균의 항력계수 및 배압계수의 실험결과와의 비교이다. 변장비 1:1, 1:2, 1:3일 때 본 연구에서 구한 각각의 항력계수는 2.20, 1.60, 1.42값을, 배압계수는 각각 -1.43, -0.72, -0.58값으로 나타나 실험결과와 비교적 잘 일치함을 나타내고 있다.

검출된 속도값으로부터 구해진 파워스펙트럼(Power-spectrum)의 밀도분포에서 가장 큰 값을 가진 주파수를 탁월주파수로 그 외의 주파수를 고차주파수라고 편의적으로 구분하였다. 표4^{(1),(15),(16),(17)}에 변장비 1:0.5, 1:1, 1:2, 1:3, 1:4에 대한 각각의 St수의 실험결과를 나타내었다. Fig.6는 변장비 1:1일 때 $x/H=7.0$, $y/H=2.0$ 인 속도검출점의 위치로부터 구해진 탁월주파수의 성분이 0.13, 변장비 1:2일 때 $x/H=5.0$, $y/H=1.1$ 인 속도검출점의 위치로부터 구해진 탁월주파수 성분이 0.10, 0.145, 변장비 1:3일 때 $x/H=7.0$, $y/H=1.5$ 인 속도검출점의 위치로부터 구해진 탁월주파수의 성분이 0.13이 나타나 실험결과값과 비교적 잘 일치함을 나타내었

다. 특히 변장비 1:2에서 탁월 주파수 성분이 두개가 혼재함을 나타내고 있다.

Table 2 Experimental Results of Drag Coefficient for Varied Blockage Ratio

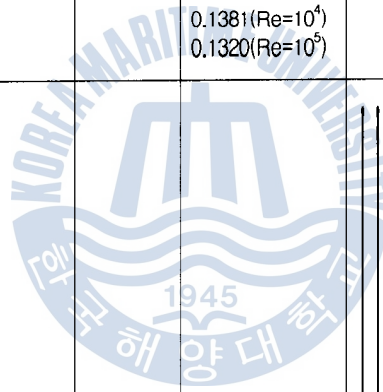
| Name | D/H | 0.5 | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 |
|--------------------|--------------------------|-------|----------------------------|-------|-------|-------|
| Bearman | (1972) | 2.410 | 2.191 | | | |
| | | | | | | |
| Re=2 | $10^2 / 10^4$ | | | | | |
| Nakaguchi | (1967) | 2.372 | 2.138 | 1.500 | 1.209 | 1.120 |
| | | | | | | |
| Re=2.6 | 10^2 | | | | | |
| Delany & Sorensen | | 2.239 | 2.000 | 1.472 | | |
| | | | | | | |
| Re=10 ² | 10^2 | | | | | |
| Bostock | (1972) | 2.530 | 2.256 | 1.500 | | |
| | | | | | | |
| Re=1 | 10^3 | | | | | |
| Okajima | (1993) | | 2.050(Re=10 ⁴) | | | |
| | | | 2.240(Re=10 ⁵) | | | |
| Re=1 | 10^4 | | | | | |
| Murakami | | | 2.125 | | | |
| | | | | | | |
| Re=2 | 10^2 | | | | | |
| Kamemoto | | | 2.130 | | | |
| | | | | | | |
| Re=3 | 10^2 | | | | | |
| Matsumiya | | | 2.77(Re=10 ⁴) | | | |
| | | | 2.75(Re=10 ⁵) | | | |
| Re=2.56 | $10^2 / 5.77 \cdot 10^2$ | | | | | |
| Igarashi | (1984) | 2.478 | 2.240 | 1.688 | 1.433 | 1.240 |
| | | | | | | |
| Re=2.56 | $10^2 / 5.77 \cdot 10^2$ | | | | | |
| Courchesne | (1979) | 2.530 | 2.220 | 1.625 | 1.312 | |
| | | | | | | |

Table 3 Experimental Results of Back Pressure Coefficient for Varied Blockage Ratio

| Name | D/H | 0.5 | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 |
|-----------|--------------------------|-------|------------------------------|----------------------------|-------|-------|
| Bearman | (1972) | 1.763 | 1.391 | | | |
| | | | | | | |
| Re=2 | $10^2 / 10^2$ | | | | | |
| Nakaguchi | (1967) | 1.477 | 1.582 | 0.737 | 0.562 | 0.492 |
| | | | | | | |
| Re=2.6 | 10^2 | | | | | |
| Okajima | (1993) | | ① 1.126(Re=10 ³) | 0.600(Re=10 ³) | | |
| | | | ② 1.500(Re=10 ⁴) | 0.670(Re>10 ³) | | |
| | | | 1.550(Re=10 ⁵) | | | |
| Re=1 | 10^2 | | | | | |
| Kamemoto | | | 1.500 | 0.730 | | |
| | | | | | | |
| Re=3 | 10^2 | | | | | |
| Matsumiya | | | 2.150(Re=10 ³) | | | |
| | | | 2.250(Re=10 ⁴) | | | |
| Re=2.56 | $10^2 / 5.77 \cdot 10^2$ | | | | | |
| Igarashi | (1984) | 1.542 | 1.417 or | 0.687 or | 0.436 | 0.375 |
| | | | or 1.621 | 0.812 | | |
| | | | | | | |
| Re=2.56 | $10^2 / 5.77 \cdot 10^2$ | | | | | |
| 1.813 | | | | | | |

Table 4 Experimental Results of Strouhal Numbers for Varied Blockage Ratio

| Name \ D/H | 0.5 | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 |
|---|-------|--|--------------------|---------------------|-----|
| Bearman (1972) Re=2×10 ⁴ -7×10 ⁴ | 0.131 | 0.124 | | | |
| Nakaguchi (1967) Re=2-6×10 ⁴ | 0.126 | 0.125 | 0.086 | 0.155 | |
| Okajima (1993) Re=1×10 ⁴ | | 0.128 | 0.078 | 0.128 or 0.13 | |
| Murakami Re=2×10 ⁴ | | 0.133 | | | |
| Kamemoto Re=3×10 ⁴ | | 0.118 | 0.0813 or 0.154 | | |
| Matsumiya | | 0.1381(Re=10 ⁴) 0.1320(Re=10 ⁵) | | | |



다. 특히 변장비 1:2에서 탁월 주파수 성분이 두개가 혼재함을 나타내고 있다.

Table 2 Experimental Results of Drag Coefficient for Varied Blockage Ratio

| Name \ D/H | 0.5 | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 |
|---|-------|--|-------|-------|-------|
| Bearman (1972) Re=2 · 10 ² / 10 ⁴ | 2.410 | 2.191 | | | |
| Nakaguchi (1967) Re=2.6 · 10 ⁴ | 2.372 | 2.138 | 1.500 | 1.209 | 1.120 |
| Delany & Sorensen Re=10 ³ / 10 ⁵ | 2.239 | 2.000 | 1.472 | | |
| Bostock (1972) Re=1 · 10 ⁵ | 2.530 | 2.256 | 1.500 | | |
| Okajima (1993) Re=1 · 10 ² | | 2.050(Re=10 ⁴) 2.240(Re=10 ⁵) | | | |
| Murakami Re=2 · 10 ² | | 2.125 | | | |
| Kamemoto Re=3 · 10 ² | | 2.130 | | | |
| Matsumiya | | 2.77(Re=10 ³) 2.75(Re=10 ⁴) | | | |
| Igarashi (1984) Re=2.56 · 10 ³ / 5.77 · 10 ² | 2.478 | 2.240 | 1.688 | 1.433 | 1.240 |
| Courchesne (1979) | 2.530 | 2.220 | 1.625 | 1.312 | |

Table 3 Experimental Results of Back Pressure Coefficient for Varied Blockage Ratio

| Name \ D/H | 0.5 | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 |
|--|----------------------|--|--|-------|-------|
| Bearman (1972) Re=2 · 10 ² / 10 ² | 1.763 | 1.391 | | | |
| Nakaguchi (1967) Re=2.6 · 10 ² | 1.477 | 1.582 | 0.737 | 0.562 | 0.492 |
| Okajima (1993) Re=1 · 10 ² | | ① 1.126(Re=10 ⁴) ② 1.500(Re=10 ⁵) 1.550(Re=10 ⁶) | 0.600(Re=10 ³) 0.670(Re>10 ³) | | |
| Kamemoto Re=3 · 10 ² | | 1.500 | 0.730 | | |
| Matsumiya | | 2.150(Re=10 ³) 2.250(Re=10 ⁴) | | | |
| Igarashi (1984) Re=2.56 · 10 ² 5.77 · 10 ² | 1.542 or 1.813 | 1.417 or 1.621 | 0.687 or 0.812 | 0.436 | 0.375 |

Table 4 Experimental Results of Strouhal Numbers for Varied Blockage Ratio

| Name \ D/H | 0.5 | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 |
|---|-------|--|------------------------|------------------------|-------|
| Bearman (1972) Re= 2×10^4 - 7×10^4 | 0.131 | 0.124 | | | |
| Nakaguchi (1967) Re= $2-6 \times 10^4$ | 0.126 | 0.125 | 0.086 | 0.155 | |
| Okajima (1993) Re= 1×10^4 | | 0.128 | 0.078 | 0.128 or 0.13 | |
| Murakami Re= 2×10^4 | | 0.133 | | | |
| Kamemoto Re= 3×10^4 | | 0.118 | 0.0813 or 0.154 | | |
| Matsumiya | | 0.1381(Re= 10^4) 0.1320(Re= 10^5) | | | |
| Okajima (1982) Re= 1×10^4 | | 0.131 | 0.0818(강) 1.4690(약) | 0.1625 or 0.1687 | 0.130 |
| Vickery (1966) Re= 1×10^5 | | 0.119 | | | |

3. 적용 및 고찰

3.1 주파수 특성

Fig.7는 변장비 1:1일 때 $x/H=0.1 \sim 5.0$ 및 $y/H=1.1$ 범위에서의 주파수 분석을 행한 것이다. 각주에 근접된 위치인 전단층 영역 지점에서의 주파수 성분은 1개의 탁월주파수인 0.12값이 강하게 나타남을 알 수 있으며 와의 재부착현상이 두드러지지 않음을 알 수 있다. 또한 각주의 먼 후방에 국한하여 두 종류의 고차주파수가 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 $y/H=1.25, 1.5$ 에서도 유사한 형태의 주파수 성분분포를 나타내었다.

Fig.8은 변장비 1:2에서 $x/H=0.1 \sim 5.0$ 및 $y/H=1.1$ 영역에서의 주파수 분석 결과를 나타낸 것으로서 전단층영역에서 탁월주파수 성분 0.05의 값이 강하게 나타나며 $x/H=3.0$ 의 위치에서는 탁월주파수 성분이 0.15값으로 바뀌면서 고차의 주파수 성분인 0.05값과 0.10의 값이 나타남을 알 수 있다. 또한 각주의 먼 후방에서($x/H=5.0$)은 탁월주파수 성분이 0.10으로 바뀔 수 있다. 이와 같은 특성은

결국 두 종류의 재부착구조가 혼재함을 나타내며 각주의 먼 후방에서는 두 종류의 유동이 혼합하여 새로운 탁월주파수 성분을 나타냄을 알 수가 있다.

Fig.9은 변장비 1:3일 때 $x/H=0.1\sim 5.0$ 및 $y/H=1.1$ 에서의 주파수 분포를 나타내고 있다. 전단층영역 $x/H=0.1\sim 3.0$ 의 범위에서 다수의 주파수 성분이 나타나며 이는 주기적으로 와의 재부착 현상이 일어남을 보여준다. 그러나 각주 후방에서는 한 종류의 탁월주파수 성분이 0.13값으로 나타남을 알 수 있다. Fig.10은 $x/H=0.1\sim 5.0$ 및 $y/H=1.25$ 의 위치에서의 주파수 분포로서 전단층영역에서는 2개의 주파수 성분이 재부착의 영향으로 나타나지만 $y/H=1.1$ 에서와 같이 0.10 또는 0.16의 값이 나타나지 않음을 알 수 있으며 각주후방에서는 탁월주파수 0.13이 단독으로 존재함을 알 수 있다. $y/H=1.5$ 의 범위에서도 $y/H=1.25$ 의 주파수 특성과 유사하게 나타내었다.

Fig.11는 변장비 1:1일 때의 양력계수와 항력계수의 시계열 변동과 이를 이용한 주파수 분석결과를 나타내고 있으며 카르만와의 주기적인 방출로 인한 제1주파수 성분의 존재가 확인되고 있다. 특히 양력계수와 항력계수값을 적용한 탁월주파수비가 1:2로 나타나고 있음으로서 방출와의 제1주파수 성분만이 존재함을 보여주고 있다.

Fig.12은 변장비 1:2일 때의 양력계수와 항력계수의 시계열 변동과 이를 이용한 주파수 특성이다. 양력계수를 적용한 탁월주파수는 0.05이며 고차의 주파수로서 0.15값이 약하게 나타남을 알 수 있다. 또한 항력계수를 적용한 탁월주파수는 0.10으로 나타났으며 변장비 1:1에서와 같이 양력계수와 항력계수를 적용한 탁월주파수의 비가 1:2로서 입구유동이 일정함을 알 수 있다.

Fig.13은 변장비 1:3에서의 양력계수와 항력계수의 시계열 변동과 주파수분석을 나타내고 있으며, 탁월주파수외에 다양한 크기의 고주파수 성분이 혼재함을 알 수 있다. 이것은 각주의 상하면에서 와의 재부착현상이 강하게 발생함을 의미한다. 양력계수를 이용한 탁월주파수는 0.13이나 항력계수값을 이용한 경우에는 약 0.16으로 Fig.2.6에서의 실험값과 매우 잘 일치함을 나타내고 있다. 그러나 양력계수와 항력계수를 적용한 탁월주파수비가 변장비 1:1에서와 같이 1:2로 나타나지 않음을 알 수 있다.

Fig.14는 변장비 1:1에서 후방의 한 위치에서 검출한 v 속도값과 배압계수값을

적용한 주파수 성분을 나타낸 것으로서 v 속도값에서는 St수가 0.12, 배압계수값을 적용한 경우에는 0.25의 값을 나타냄으로서 두 경우의 St수가 2배수임을 보여주고 있다.

Fig.15은 변장비 1:2에서의 동일위치에서의 주파수 변동을 나타내고 있다. v 속도값을 적용한 경우에는 0.14, 배압계수값을 적용한 경우에는 0.10의 두 종류의 탁월주파수를 나타내었다.

Fig.16는 변장비 1:3에서의 결과이다. v 속도값에서는 0.13, 배압계수에서는 0.15 값을 보이며 배압계수값을 적용한 경우가 실험값에 더욱 잘 일치함을 나타내고 있다.

Fig.17는 변장비가 1:1인 경우에 있어서 각주 후방에서의 u 속도 검출점 위치 $x/H=5.0, 7.0$ 및 $y/H=2.0$ 에서의 주파수 성분을 나타낸 것으로서 탁월주파수가 0.12이며 실험값과 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig.18은 변장비가 1:2일 때의 각주 후방의 u 속도 검출점 위치 $x/H=5.0, 7.0$ 및 $y/H=0.5$ 에서의 주파수 분포를 나타낸 것으로서 탁월주파수는 0.10으로 나타나고 있다. Fig.19은 변장비가 1:3일 때의 동일위치에서의 결과이다. 탁월주파수는 약 0.135로 나타남을 알 수 있다.

4. 결 론

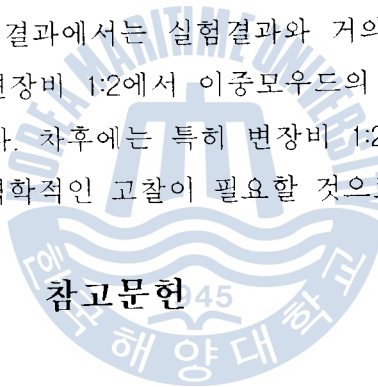
2차원의 장방형 각주에 대하여 와방출주파수 특성을 전산유체역학 기법을 동원하여 해석하였다. 본 연구에서는 2차원 장방형 각주에서 세종류의 변장비(1:1, 1:2, 1:3)에 대하여 각주주위 및 후방에서의 속도값, 각주에 작용하는 항력 및 양력, 각주 배면중심에서의 배압계수를 수치해석으로 구하였으며 여기에 FFT를 적용하여 스트로할수(Strouhal number)를 산출하였다.

그 결과 각주 후방에서의 u 속도값을 검출한 경우에는 변장비 1:1에서 0.12의 값을 얻었으며 변장비 1:2에서는 각각 0.10 및 0.14의 두 가지 값을, 즉 실험결과에서와 같이 각주 후방에서 두 가지의 다른 유동패턴이 존재하고 있음을 나타내었다. 변장비 1:3에서는 0.135값을 구하였다. 또한 항력계수와 양력계수값을

적용한 주파수 분석에서는 변장비 1:1 및 1:2에서 탁월주파수의 비가 1:2로 나타났다. 또한 변장비 1:3에서는 양력계수를 적용한 것($St=0.13$)보다 항력계수($St=0.157$)를 적용한 것이 실험값과 잘 일치하였다.

각주후방에서의 v 속도변동값과 각주배면에서의 배압계수값을 적용한 경우에는 변장비 1:1에서 v 속도값을 적용한 탁월주파수가 0.12의 값을, 배압계수를 적용한 탁월주파수가 0.24의 값으로 나타났다. 변장비 1:2에서 v 속도값을 적용한 경우에는 0.14값을 얻었으며, 배압계수를 적용한 탁월 주파수는 0.10의 값으로 나타났다. 변장비 1:3에서는 각주 배면에서의 배압계수값과 양력계수값을 적용한 결과에서 각각 0.15, 0.13값이 구해졌으며 배압계수를 적용한 경우가 실험값에 더욱 잘 일치함을 알 수 있었다.

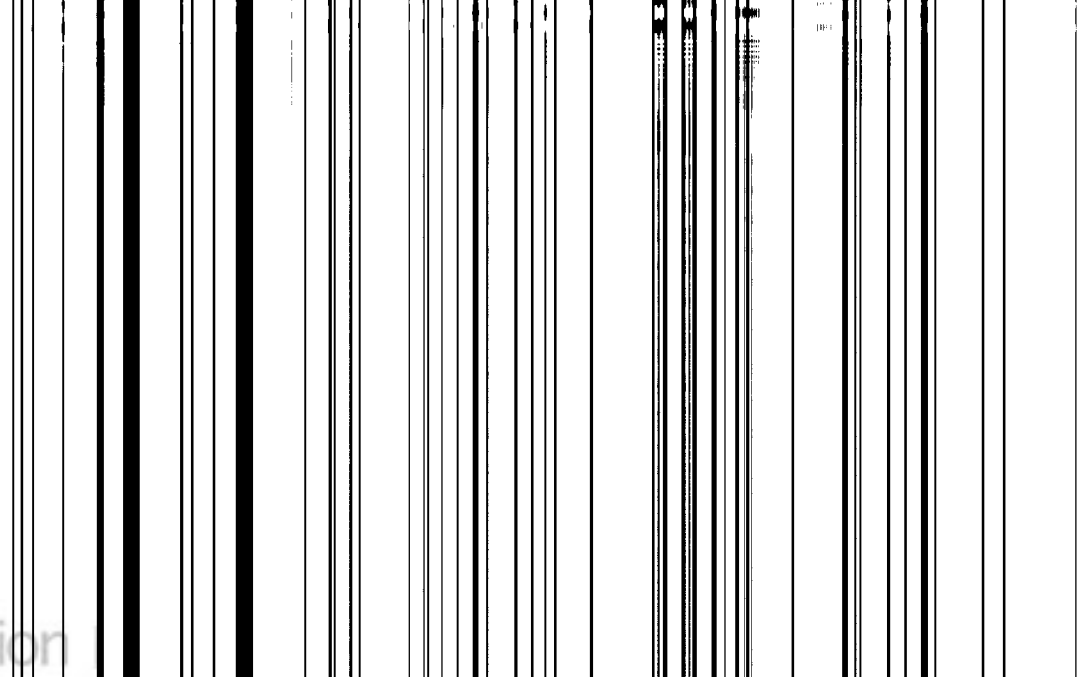
이상에서와 같이 본 연구결과에서는 실험결과와 거의 유사한 스트로할수값을 얻을 수 있었으며, 특히 변장비 1:2에서 이중모우드의 주파수 특성이 존재함을 체계적으로 밝힐 수 있었다. 차후에는 특히 변장비 1:2.8부근에서의 스트로할수의 점핑현상에 관한 유체역학적인 고찰이 필요할 것으로 예상된다.



1. Nakaguchi et.al., "An experimental study on aerodynamic drag of rectangular cylinders", J.Japan Soc Aero & Space Sci. 16, 1968, pp.1-5.
2. P.W. Berman and D.M.Trueman, "An investigation of the flow around rectangular cylinder", Aeronautical Quarterly 23, 1972, pp.229-237.
3. Otsuki et.al., "A note on the aeroelastic instability of a prismatic bar with square section", J. Sound & Vibration 34(2), 1974, pp.233-248.
4. Okajima, "Strouhal numbers of rectangular cylinders", JFM 123, 1982, pp.379-398.
5. Igarashi, "Characteristics of the flow around rectangular cylinders", Trans. JSME, 50-460, 1984, pp.3185-3192.
6. 鮎川恭三, 川崎則和, 大倉充, 淺野亮, "せん断流中にある角柱まわりの流れ", 日本機械學會論文集(B編) 51卷 472號, 1984, pp.3887-3895.

7. Nakamura and Nakashima, "Vortex excitation of prisms with elongated rectangular", JFM 163, 1986, pp.149-169.
8. Taniguchi et.al., "The wake structures of two-dimensional rectangular cylinders having different length-to-width ratios", Trans. JSME, 54-498, 1988, pp.256-264.
9. Nakamura and Hirata, "Critical geometry of oscillating bluff bodies", JFM 208, 1989, pp.375-393.
10. Okajima, et.al., "A numerical analysis of flow around rectangular cylinders", Trans. JSME, 56-522, 1990, pp.280-288.
11. Nakamura, Ohya, Tsuruta, "Experiments on vortex shedding from flat plates with square leading and trailing edges", JFM 222, 1991, pp. 437-447.
12. Ohya, Nakamura, Ozono, Tsuruta, Nakayama, "A numerical study of vortex shedding from flat plates with square leading and trailing edges", JFM 236, 1992, pp.445-460.
13. Igarashi and Ito, "Drag reduction of a square prism", Trans. JSME, 59-568, 1993, pp.3701-3707
14. Igarashi, "Drag reduction of a square prism", Trans. JSME, 60-573, 1994, pp.1561-1567.
15. 손호석, 김춘식, 이영호, "2차원 장방형 각주유동의 주파수 분석", 대한기계학회 부산지부 '95년도 추계 학술대회논문집, 1995, pp.55-61.

16 소호석 김춘식 이영호 "장방형 각주유동의 주파수 분석" 대한기계학회 부산지부 '95년도 추계 학술대회논문집, 1995, pp.55-61.



적용한 주파수 분석에서는 변장비 1:1 및 1:2에서 탁월주파수의 비가 1:2로 나타났다. 또한 변장비 1:3에서는 양력계수를 적용한 것($St=0.13$)보다 항력계수($St=0.157$)를 적용한 것이 실험값과 잘 일치하였다.

각주후방에서의 v 속도변동값과 각주배면에서의 배압계수값을 적용한 경우에는 변장비 1:1에서 v 속도값을 적용한 탁월주파수가 0.12의 값을, 배압계수를 적용한 탁월주파수가 0.24의 값으로 나타났다. 변장비 1:2에서 v 속도값을 적용한 경우에는 0.14값을 얻었으며, 배압계수를 적용한 탁월 주파수는 0.10의 값으로 나타났다. 변장비 1:3에서는 각주 배면에서의 배압계수값과 양력계수값을 적용한 결과에서 각각 0.15, 0.13값이 구해졌으며 배압계수를 적용한 경우가 실험값에 더욱 잘 일치함을 알 수 있었다.

이상에서와 같이 본 연구결과에서는 실험결과와 거의 유사한 스트로할수값을 얻을 수 있었으며, 특히 변장비 1:2에서 이중모우드의 주파수 특성이 존재함을 체계적으로 밝힐 수 있었다. 차후에는 특히 변장비 1:2.8부근에서의 스트로할수의 점핑현상에 관한 유체역학적인 고찰이 필요할 것으로 예상된다.

참고문헌

1. Nakaguchi et.al., "An experimental study on aerodynamic drag of rectangular cylinders", J.Japan Soc Aero & Space Sci. 16, 1968, pp.1-5.
2. P.W. Berman and D.M.Trueman, "An investigation of the flow around rectangular cylinder", Aeronautical Quarterly 23, 1972, pp.229-237.
3. Otsuki et.al., "A note on the aeroelastic instability of a prismatic bar with square section", J. Sound & Vibration 34(2), 1974, pp.233-248.
4. Okajima, "Strouhal numbers of rectangular cylinders", JFM 123, 1982, pp.379-398.
5. Igarashi, "Characteristics of the flow around rectangular cylinders", Trans. JSME, 50-460, 1984, pp.3185-3192.
6. 鮎川恭三, 川崎則和, 大倉充, 淺野亮, "せん断流中にある角柱まわりの流れ", 日本機械學會論文集(B編) 51卷 472號, 1984, pp.3887-3895.

7. Nakamura and Nakashima, "Vortex excitation of prisms with elongated rectangular", JFM 163, 1986, pp.149-169.
8. Taniguchi et.al., "The wake structures of two-dimensional rectangular cylinders having different length-to-width ratios", Trans. JSME, 54-498, 1988, pp.256-264.
9. Nakamura and Hirata, "Critical geometry of oscillating bluff bodies", JFM 208, 1989, pp.375-393.
10. Okajima, et.al., "A numerical analysis of flow around rectangular cylinders", Trans. JSME, 56-522, 1990, pp.280-288.
11. Nakamura, Ohya, Tsuruta, "Experiments on vortex shedding from flat plates with square leading and trailing edges", JFM 222, 1991, pp. 437-447.
12. Ohya, Nakamura, Ozono, Tsuruta, Nakayama, "A numerical study of vortex shedding from flat plates with square leading and trailing edges", JFM 236, 1992, pp.445-460.
13. Igarashi and Ito, "Drag reduction of a square prism", Trans. JSME, 59-568, 1993, pp.3701-3707
14. Igarashi, "Drag reduction of a square prism", Trans. JSME, 60-573, 1994, pp.1561-1567.
15. 손호석, 김춘식, 이영호, "2차원 장방형 각주유동의 주파수 분석", 대한기계학회 부산지부 '95년도 추계학술대회논문집, 1995, pp.55-61.
16. 손호석, 김춘식, 이영호, "장방형 각주의 스트로할수 분석에 관한 연구", 박용기관학회, 95년도 추계학술강연회, 1995, pp.8-15.
17. 이영호, "2차원 각주의 비정상 공력특성(SOLA 스킴의 재평가)", 한국박용기관학회지 제14권 제2호, 1990, pp.48-65.

Table 1 Previous Studies Related to Strouhal Number

| No | reference & investigators | experimental outlines | sensing position | Strouhal number(St) | studies included |
|----|---|---|---|--|---|
| 1 | J. Japan Soc. Aero. & Space Sci. 16 (1968) Nakaguchi | <ul style="list-style-type: none"> wind tunnel Re: $2.7-7 \times 10^4$ T.L: unknown d/h: 0.1-4.0 | <ul style="list-style-type: none"> hot wire downstream, 20° outward from rear end | <ul style="list-style-type: none"> single mode | <ul style="list-style-type: none"> C_D & C_{pb} visualization |
| 2 | Aeronautical Quarterly 23 (1972) Bearman & Trueman | <ul style="list-style-type: none"> wind tunnel Re: $2-7 \times 10^4$ T.L: 0.3% d/h: 0.2-1.2 | <ul style="list-style-type: none"> hot wire just outside the wake | <ul style="list-style-type: none"> single mode | <ul style="list-style-type: none"> C_D & C_{pb} splitter plate |
| 3 | J. Sound & Vib. 34(2), (1974) Otsuki, Washizu, Tomizawa, Ohya | <ul style="list-style-type: none"> wind tunnel Re: (0.26-1.24) $\times 10^7$ T.L: 0.8% d/h: 1.0 | <ul style="list-style-type: none"> hot wire downstream, 30° outward from rear edge (two points) | <ul style="list-style-type: none"> dual mode (d/h: 2.0-2.8) | <ul style="list-style-type: none"> vortex-induced oscillation galloping |
| 4 | JFM 123 (1982) Okajima | <ul style="list-style-type: none"> wind & water tunnel Re: $70-2 \times 10^4$ T.L: 0.5% d/h: 1.0-4.0 | <ul style="list-style-type: none"> hot wire x/h: 6.0-11.5 y/h: 4.5-5.0 from prism center CFD | <ul style="list-style-type: none"> Re > 10^4: single mode | <ul style="list-style-type: none"> Re > 10^3: turbulence inception for d/h = 1.0 |
| 5 | Trans. JSME 50-460 (1984) Igarashi | <ul style="list-style-type: none"> wind tunnel Re: $2.56 \times 10^4 - 5.77 \times 10^4$ T.L: 0.5% d/h: 0.1-4.0 | <ul style="list-style-type: none"> hot wire inside wake | <ul style="list-style-type: none"> dual mode (d/h: 2.0-2.8) irregular shear reattachment | <ul style="list-style-type: none"> C_D & C_{pb} visualization Reynolds independence of St |
| 6 | Trans. JSME 51-472 (1985) Ayukawa, Kawasaki, Ohkura, Asana | <ul style="list-style-type: none"> wind tunnel Re: (2.0-2.5) $\times 10^4$ T.L: 0.4% d/h: 1.0-4.0 | <ul style="list-style-type: none"> hot wire from rear end x/h: 0.1-2.4 y/h: -1.6-1.6 | <ul style="list-style-type: none"> single mode d/h: 2.75, multiple mode | <ul style="list-style-type: none"> C_D, C_L & C_{pb} inlet shear effects |
| 7 | JFM 163 (1986) Nakamura, Nakashima | <ul style="list-style-type: none"> wind tunnel Re: (5-30) $\times 10^4$ T.L: unknown H- prism d/h: 1.0-10.0 | <ul style="list-style-type: none"> hot wire from rear center x/h: 1.0 y/h: 1.5 | <ul style="list-style-type: none"> dual mode (d/h: 2.0-3.5) | <ul style="list-style-type: none"> impinging shear layer effect visualization |
| 8 | Trans. JSME 51-498 (1987) Taniguchi, Deguchi, Miyakoshi, Dohda | <ul style="list-style-type: none"> wind tunnel Re: 3×10^5 T.L: 0.5% d/h: 0.25-4.0 | <ul style="list-style-type: none"> hot wire from rear center x/h: 7.0 section | <ul style="list-style-type: none"> dual mode (d/h: 2.0-2.75) | <ul style="list-style-type: none"> three vortex sheddings - d/h < 2.0, - 2.0 < d/h < 3.0, - d/h > 3.0 |

| No | reference & investigators | experimental outlines | sensing position | Strouhal number(St) | studies included |
|----|--|---|--|---|--|
| 9 | JFM 208 (1989) Nakamura & Hirata | <ul style="list-style-type: none"> wind tunnel Re:(2.5-10) $\times 10^4$ T.I.:unknown d/h:0.2-1.0 d/h:0.2 | <ul style="list-style-type: none"> hot wire from front corner x/h:1.5 y/h:1.0 | <ul style="list-style-type: none"> single mode (d/h:0.2-1.0) | <ul style="list-style-type: none"> D-section prism reduced velocity by oscillation |
| 10 | Trans.JSME 56-522 (1990) Okazima, Nagahisa, Rokugou | <ul style="list-style-type: none"> 3rd-order upwind scheme Re:100-1200 d/h:0.4-8.0 | <ul style="list-style-type: none"> velocity spectrum unknown but partially two detection points (just off the downside wall and inside wake) | <ul style="list-style-type: none"> single mode (d/h:0.4-8.0) dual modes for detection points | <ul style="list-style-type: none"> comparison with experiments St from C_L spectrum |
| 11 | JFM 222(1991) Nakamura, Ohya, Tsuruta | <ul style="list-style-type: none"> wind tunnel Re:(1-3)$\times 10^3$ d/h:3.0-16.0 | <ul style="list-style-type: none"> hot wire trailing edge or 1.5h up and 5h downward from T.E. | <ul style="list-style-type: none"> single mode except d/h=8 (dual mode) | <ul style="list-style-type: none"> phase angle of velocity impinging shear layer instability |
| 12 | JFM 236(1992) | 3rd-order | T.T. of C | | |

Table 1 Previous Studies Related to Strouhal Number

| No | reference & investigators | experimental outlines | sensing position | Strouhal number(St) | studies included |
|----|---|--|---|--|--|
| 1 | J. Japan Soc. Aero. & Space Sci. 16 (1968) Nakaguchi | <ul style="list-style-type: none"> wind tunnel Re: $2.7-7 \times 10^4$ T.I.: unknown d/h: 0.1-4.0 | <ul style="list-style-type: none"> hot wire downstream, 20 " outward from rear end | <ul style="list-style-type: none"> single mode | <ul style="list-style-type: none"> C_D & C_{pb} visualization |
| 2 | Aeronautical Quarterly 23 (1972) Bearman & Trueman | <ul style="list-style-type: none"> wind tunnel Re: $2-7 \times 10^4$ T.I.: 0.3% d/h: 0.2-1.2 | <ul style="list-style-type: none"> hot wire just outside the wake | <ul style="list-style-type: none"> single mode | <ul style="list-style-type: none"> C_D & C_{pb} splitter plate |
| 3 | J. Sound & Vib. 34(2), (1971) Otsuki, Washizu, Tomizawa, Ohya | <ul style="list-style-type: none"> wind tunnel Re: (0.26-1.24) $\times 10^5$ T.I.: 0.8% d/h: 1.0 | <ul style="list-style-type: none"> hot wire downstream, 30 outward from rear edge(two points) | <ul style="list-style-type: none"> dual mode (d/h: 2.0-2.8) | <ul style="list-style-type: none"> vortex-induced oscillation galloping |
| 4 | JFM 123 (1982) Okajima | <ul style="list-style-type: none"> wind & water tunnel Re: $70-2 \times 10^4$ T.I.: 0.5% d/h: 1.0-4.0 | <ul style="list-style-type: none"> hot wire x/h: 6.0-11.5 y/h: 4.5-5.0 from prism center CFD | <ul style="list-style-type: none"> Re $> 10^4$: single mode | <ul style="list-style-type: none"> Re $> 10^3$: turbulence inception for d/h-1.0 |
| 5 | Trans. JSME 50-460 (1984) Igarashi | <ul style="list-style-type: none"> wind tunnel Re: $2.56 \times 10^3-5.77 \times 10^4$ T.I.: 0.5% d/h: 0.1-4.0 | <ul style="list-style-type: none"> hot wire inside wake | <ul style="list-style-type: none"> dual mode (d/h: 2.0-2.8) irregualr shear reattachment | <ul style="list-style-type: none"> C_D & C_{pb} visualization Reynolds independence of St |
| 6 | Trans. JSME 51-472 (1985) Ayukawa, Kawasaki, Ohkura, Asana | <ul style="list-style-type: none"> wind tunnel Re: (2.0-2.5) $\times 10^4$ T.I.: 0.4% d/h: 1.0-4.0 | <ul style="list-style-type: none"> hot wire from rear end x/h: 0.1-2.4 y/h: -1.6-1.6 | <ul style="list-style-type: none"> single mode d/h: 2.75, multiple mode | <ul style="list-style-type: none"> C_D, C_L & C_{pb} inlet shear effects |
| 7 | JFM 163 (1986) Nakamura, Nakashima | <ul style="list-style-type: none"> wind tunnel Re: (5-30) $\times 10^4$ T.I.: unknown H- prism d/h: 1.0-10.0 | <ul style="list-style-type: none"> hot wire from rear center x/h: 1.0 y/h: 1.5 | <ul style="list-style-type: none"> dual mode (d/h: 2.0-3.5) | <ul style="list-style-type: none"> impinging shear layer effect visualization |
| 8 | Trans. JSME 51-498 (1987) Taniguchi, Deguchi, Miyakoshi, Dohda | <ul style="list-style-type: none"> wind tunnel Re: 3×10^5 T.I.: 0.5% d/h: 0.25-4.0 | <ul style="list-style-type: none"> hot wire from rear center x/h: 7.0 section | <ul style="list-style-type: none"> dual mode (d/h: 2.0-2.75) | <ul style="list-style-type: none"> three vortex sheddings - d/h: 2.0, - 2.0- d/h- 3.0 - d/h: 3.0 |

| No | reference & investigators | experimental outlines | sensing position | Strouhal number(St) | studies included |
|----|---|---|--|---|--|
| 9 | JFM 208 (1989) Nakamura & Hirata | <ul style="list-style-type: none"> • wind tunnel • Re:(2.5-10) $\times 10^4$ • T.I.:unknown • d/h:0.2-1.0 • d/h:0.2 | <ul style="list-style-type: none"> • hot wire • from front corner • x/h:1.5 • y/h:1.0 | <ul style="list-style-type: none"> • single mode • (d/h:0.2-1.0) | <ul style="list-style-type: none"> • D-section prism • reduced velocity by oscillation |
| 10 | Trans.JSME 56-522 (1990) Okazima, Nagahisa, Rokugou | <ul style="list-style-type: none"> • 3rd-order upwind scheme • Re:100-1200 • d/h:0.4-8.0 | <ul style="list-style-type: none"> • velocity spectrum • unknown but partially two detection points (just off the downside wall and inside wake) | <ul style="list-style-type: none"> • single mode • (d/h:0.4-8.0) • dual modes for detection points | <ul style="list-style-type: none"> • comparison with experiments • St from C_L spectrum |
| 11 | JFM 222(1991) Nakamura, Ohya, Tsuruta | <ul style="list-style-type: none"> • wind tunnel • Re:(1-3)$\times 10^3$ • d/h:3.0-16.0 | <ul style="list-style-type: none"> • hot wire • trailing edge or 1.5h up and 5h downward from T.E. | <ul style="list-style-type: none"> • single mode • except d/h=8 (dual mode) | <ul style="list-style-type: none"> • phase angle of velocity • impinging shear layer instability |
| 12 | JFM 236(1992) Ohya, Nakamura, Ozono, Tsuruta, Nakayama | <ul style="list-style-type: none"> • 3rd-order upwind scheme • Re:10^3 • d/h:3.0-9.0 | <ul style="list-style-type: none"> • FFT of C_L | <ul style="list-style-type: none"> • single mode • except d/h=8 | <ul style="list-style-type: none"> • stepwise increase of St with increasing d/h |
| 13 | Trans. JSME 59-568 (1993) Igarashi, Ito | <ul style="list-style-type: none"> • wind tunnel • Re:3.2×10^4 • T.I.:0.4% • d/h:1.0 | <ul style="list-style-type: none"> • hot wire • inside wake | <ul style="list-style-type: none"> • small vortex shedder • cylindrical rod before prism | <ul style="list-style-type: none"> • rod size and distance effects |
| 14 | Trans. JSME 60-573 (1994) Igarashi | <ul style="list-style-type: none"> • wind tunnel • Re:5.3×10^3-3.2×10^4 • T.I.:0.4% • d/h:1.0 | <ul style="list-style-type: none"> • hot wire • inside wake | <ul style="list-style-type: none"> • small vortex shedder • cylindrical rod before prism | <ul style="list-style-type: none"> • rod size, distance and Reynolds effects • three St patterns by rod distance |

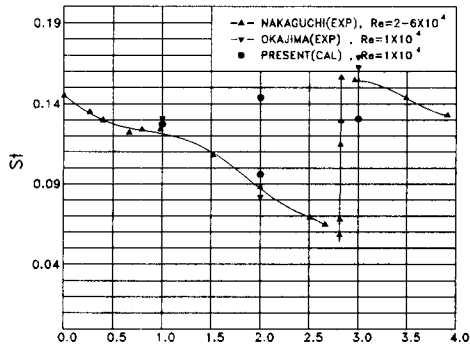


Fig.6 Comparison of Strouhal numbers for varied blockage Ratio

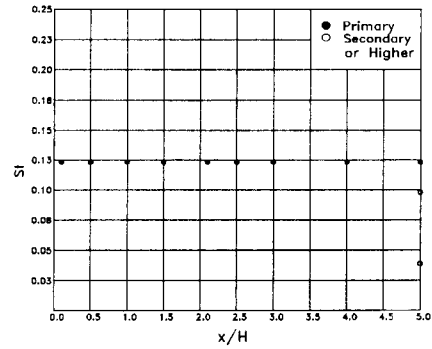


Fig.7 Dominant Frequencies(D/H=1, x/h=0.1~5.0, y/h=1.1)

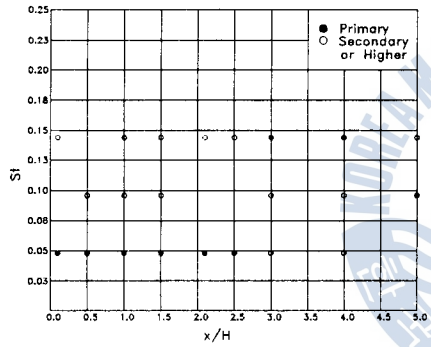


Fig.8 Dominant Frequencies(D/H=2, x/h=0.1~5.0, y/h=1.1)

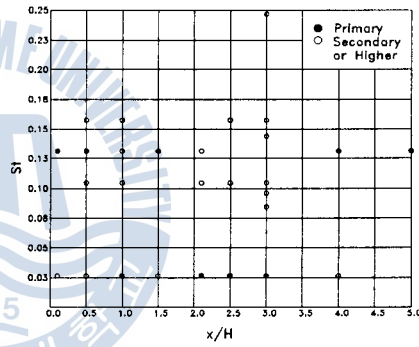


Fig.9 Dominant Frequencies(D/H=3, x/h=0.1~5.0, y/h=1.1)

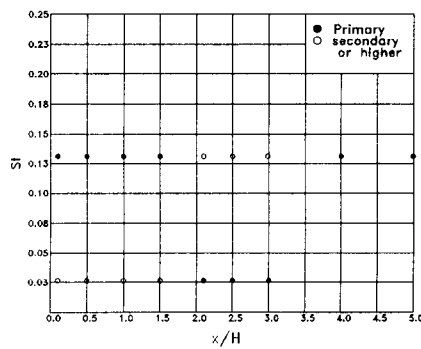


Fig.10 Dominant Frequencies(D/H=3, x/h=0.1~5.0, y/h=1.25)

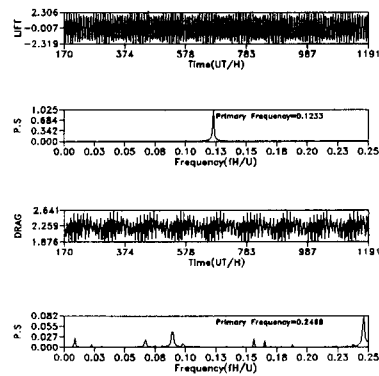


Fig.11 Frequency for C_L and C_D (D/H=1)

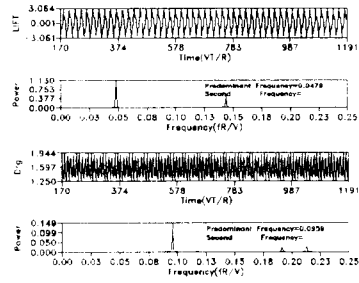


Fig.12 Frequency for C_L and $C_D(D/H=2)$

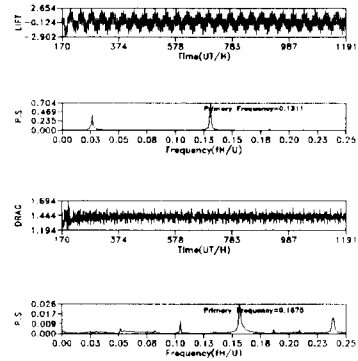


Fig.13 Frequency for C_L and $C_D(D/H=3)$

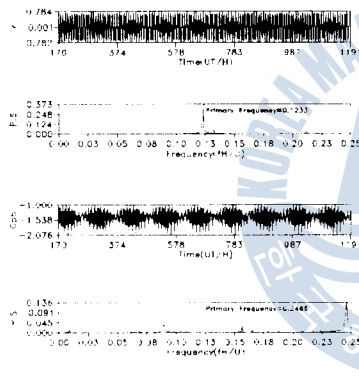


Fig.14 Frequency for v-velocity ($x/h=5.0, y/h=0.5$) and $C_{pb}(D/H=1)$

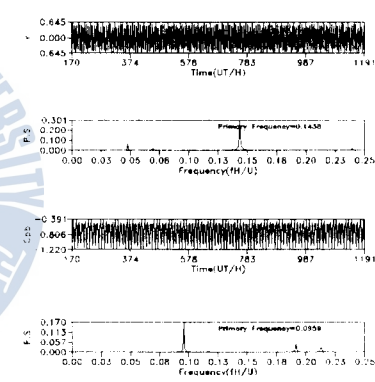
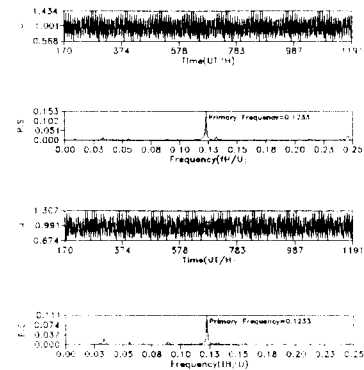
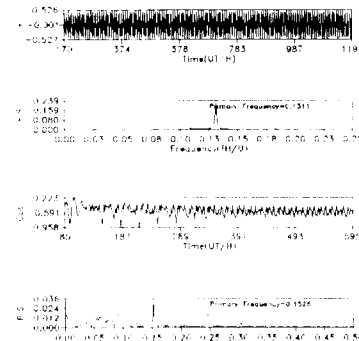


Fig.15 Frequency for v-velocity ($x/h=5.0, y/h=0.5$) and $C_{ub}(D/H=2)$



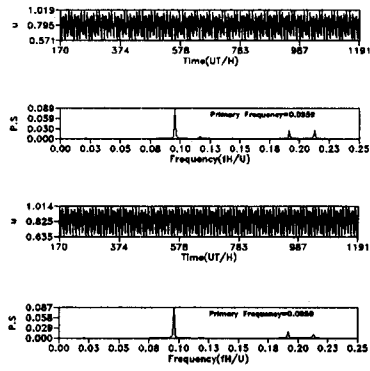


Fig.18 u-velocity and $St(D/H)=2$

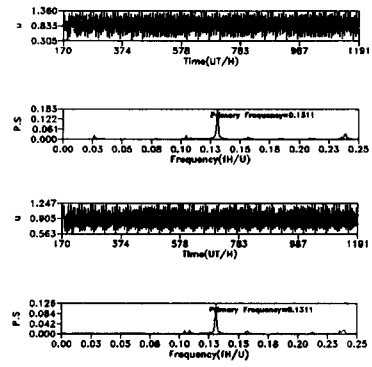


Fig.19 u-velocity and $St(D/H)=3$



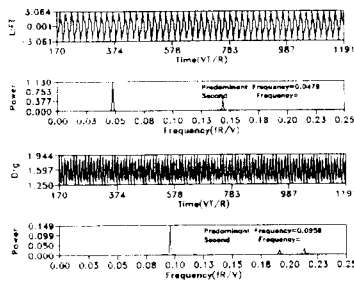


Fig.12 Frequency for C_L and C_D ($D/H=2$)

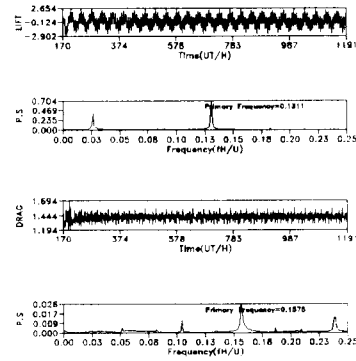


Fig.13 Frequency for C_L and C_D ($D/H=3$)

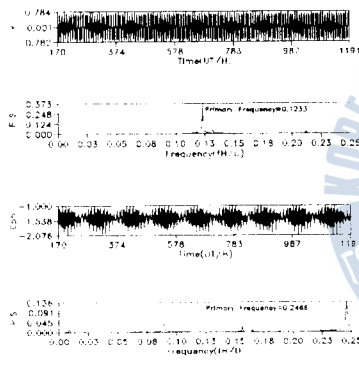


Fig.14 Frequency for v-velocity ($x/h=5.0$, $y/h=0.5$) and C_D ($D/H=1$)

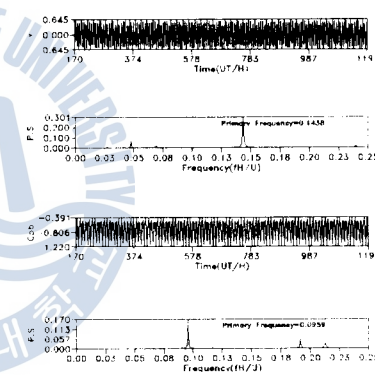
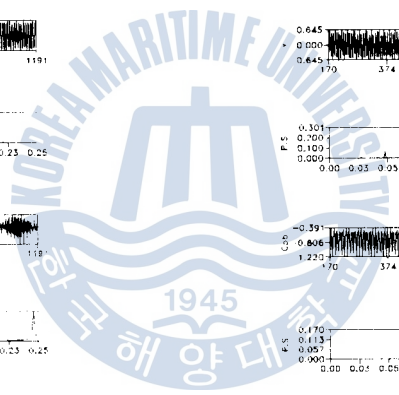


Fig.15 Frequency for v-velocity ($x/h=5.0$, $y/h=0.5$) and C_D ($D/H=2$)

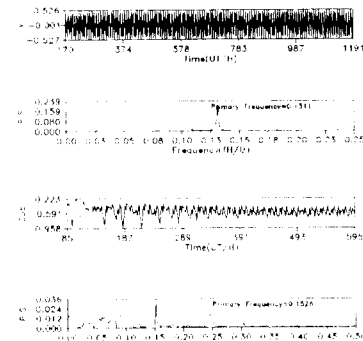


Fig.16 Frequency for v-velocity ($x/h=5.0$, $y/h=0.5$) and C_D ($D/H=3$)

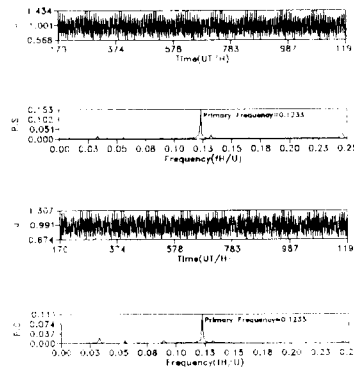


Fig.17 u-velocity and $St(D/H=1$, $x/h=5.0, 7.0$, $y/h=2.0$)

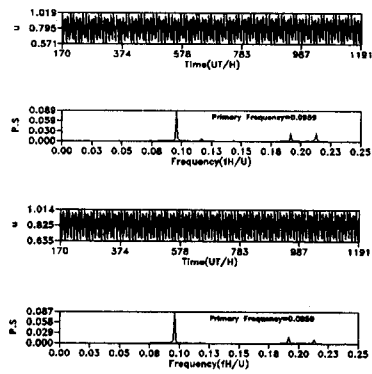


Fig.18 u-velocity and $St(D/H)=2$,
 $x/h=5.0, 7.0, y/h=0.5$

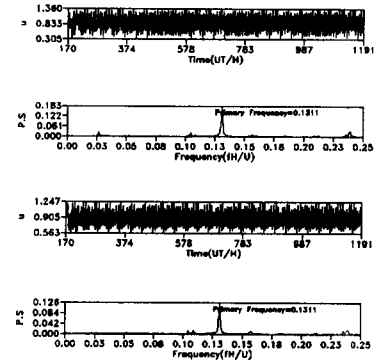


Fig.19 u-velocity and $St(D/H)=3$,
 $x/h=5.0, 7.0, y/h=1.5$

