

論 文

장방형 해양구조물의 변장비에 따른 와방출 특성에 관한 연구

김진구* · 조대환**

A Study on Vortex Shedding Characteristics of Rectangular Marine Structure With Aspect Ratio

Jin-Goo Kim · Dae-Hwan Cho***

〈목 차〉

Abstract

1. 머리말

2. 이론해석 및 계산조건

3. 적용 및 고찰

4. 맺음말

참고문헌

Abstract

High negative pressure coefficient is formed in the corner of the bluff body structures. For many curtain wall designers this phenomena is of interest because this high negative pressure coefficient is adopted in structural calculation. The present study is aimed to investigate shedding vortex characteristics of two-dimensional rectangular prism flow. 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 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.

* 독립 육천대학 기계과

** 목포해양대학교 기관공학부

1. 머리말

유체유동이 비유선형의 형상을 갖는 원주나 장방형 물체 등과 같은 흐름의 박리를 발생시키는 물체를 만났을 때 박리에 의한 와방출(Vortex shedding)이 발생하며 물체후방에서 공력특성이 많은 변화가 있게 된다. 해양구조물의 표면으로부터 유동이 박리 하는 형태를 예로 들 수 있으며 여기에 작용하는 유체력을 감소시키기 위한 연구는 매우 중요하다. 공학적으로는 구조물에 작용하는 유체력의 평가가 구조물의 강도의 설계에 필요할 뿐만 아니라 주기적으로 유출하는 와열이 구조물 등의 진동에 관련되기 때문에 와의 생성 및 억제와 같은 메커니즘이 중요한 의미를 갖는다. 이러한 각주 또는 원주후방에서 연속적으로 방출된 와의 주기성은 매우 중요한 공력특성 중의 한가지이며 보통 스트로할수(Strouhal Number, 이하 St수)로서 나타낸다. 지금까지 이에 관련된 많은 실험 연구결과가 제시되고 있으며 특히 장방형의 2차원각주에 대하여는 많은 연구결과⁽¹⁻¹⁵⁾가 제시되어 있다. 대상 유동장의 레이놀즈수는 구조물의 대표적인 단면인 장방형의 경우 넓은 레이놀즈수의 범위에서 큰 변화가 없고 St수도 레이놀즈수에 의존하지 않음으로 실험결과와 비교가 용이한 $Re=10^4$ 에 대한 연구가 주류를 이루고 있다. 물체후류에서 주기성을 파악하는 방법으로는 속도검출점에서 변동속도를 검출하여 FFT에 의하여 주파수분석을 행하는 기법을 자주 이용된다. 그리고 물체에 작용하는 양력 및 항력의 시간변동값에 대한 FFT분석도 행해지고 있다. 이와 같은 결과로부터 변장비가 1:2 인 경우에는 약 0.09 및 0.15의 두 가지의 St수가 나타나고 있으나 연구자에 따라서 한가지만을 보고하고 있으며 동시에 이 값을 제시한 경우는 거의 없는 실정이다. 결국 동일한 유동장에 대하여 전혀 다른 두 가지의 방출와 주파수를 나타내고 있으나 그 원인에 대하여 명확한 설명이 부족한 실정이다.

Igarashi⁽⁵⁾는 변장비 2.3~2.8에서 2개의 스트로할수가 나타나고 있음을 보고하고 있으며 그 원

인으로서 재부착 패턴이 다른 두 가지의 유동이 혼재하기 때문으로 밝히고 있다. 그러나 속도 값의 검출점은 나타나 있지 않다. Okajima⁽⁴⁾는 변장비 2.8≥보다 큰 경우에 있어서는 주기적인 재부착흐름이 각주의 상하면에서 반복적으로 나타남을 보고하였으며, 또한 레이놀즈수가 10^4 이상의 범위에서는 장방형각주 후류의 스트로할수의 값과 배압계수의 값은 거의 변하지 않고 일정하나, 장방형 각주의 변장비에 따라 스트로할수의 값은 다르며, 특히 변장비 2.8 부근에서는 스트로할수 값이 0.09에서 0.16으로 급격히 변화함을 보고하고 있으나 그 원인에 대해서는 자세한 언급이 없다. Ayukawa등⁽⁶⁾은 다양한 변장비를 갖는 각주 후면을 원점으로 하여 $0.1 \leq x/H \leq 2.4$, $-1.6 \leq y/H \leq 1.6$ 의 범위인 전단류 층에서 각각 0.1간격으로 스트로할수를 측정하여 이를 탁월주파수 및 현저한 주파수로 분류하여 고찰을 행하고 있다. Berman & Trueman⁽²⁾ 장방형각주 배면의 중심에서 2h의 거리에서 hot wire를 이용하여 스트로할수를 측정하였다.

이 연구에서는 실험대신 전산유체역학기법을 이용하여 비정상인 2차원 장방형 각주주위의 유동을 해석하였다. 그리고 얻어진 속도벡터를 이용하여 물체주위의 여러 곳에서 속도 값을 검출하여 FFT해석을 행하였으며 이렇게 얻어진 St수를 종합적으로 고찰하고자 하였다.

2. 이론해석 및 계산조건

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

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} \\ &= -\frac{\partial p}{\partial x} + g_x + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} \\ = -\frac{\partial p}{\partial y} + g_y + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.3)$$

여기에서 압력 p 는 밀도 ρ 로 나눈 값으로 만일 변수를 무차원화하는 경우에는 대표속도($U=1$)를 사용하면 $2p$ 의 값이 그대로 압력계수의 계산에 이용된다. (g_x, g_y)는 각각 (x, y)방향의 중력 가속도이며 ν 는 동점성계수를 표시한다. 그림1과 같은 변수분포를 갖는 부등간격 격자 상에서 차분근사를 행하였으며, 이 연구에서는 보존형의 스킴중에서 MAC법의 중심차분과 수치안정성에 기여하는 부분도너셀(partial-donor cell)의 풍상 차분을 병용하였다. 그리고 대표속도 값을 U , 대표길이를 각주높이 H , 동점도 ν 로 하여 레이놀즈수를 $R=UH/\nu$ 로 정의하였으며, 계산대상은 많은 실험결과와의 비교를 위하여 $Re=10^4$ 로 하였다.

시간평균의 공력계수의 값을 완전히 발달한 유동장의 값을 평균하여 산출하였다. 한편 물체

의 공력특성계수의 산출은 무차원 속도 u, v 와 압력 p 를 이용하였다. 계산에 있어서는 유동장 전체에 무차원속도($U=1, v=0$)를 균일하게 분포시킨 뒤에 대류와 확산이 동시에 존재하는 경우의 안정성확보를 위한 시간간격의 제한을 두었다. 또한 Courant수 및 확산수를 만족시키는 시간간격에 안정계수 0.2를 곱하여 무차원시간 약50까지 계산을 진행시킨 다음 그 이후에는 0.8의 값을 부여하였다.

수속판정기법으로서는 각 격자에서의 발산의 최대 값이 0.002이하가 되면 다음의 시간간격으로 적분이 되도록 하였다. 단 최초의 사이클에서는 임의의 작은 시간간격($\Delta t=0.001$)값을 취하였다.

계산격자 ($i \times j$)는 변장비에 따라 달라지며 변장비에 따라 각각 $100 \times 80, 120 \times 80$ 및 130×80 의 크기를 가지며 최소격자는 $1/20H$ (H =각주 높이)의 값을 갖는다. 계산은 무차원시간 1000 (UT/H)에서 종료하였으며 이때의 계산시간은 펜티엄(100MHz)상에서 약 12시간이 소요되었다. 시간진행은 1차정도의 오일러법을 양적으로 적용하였으며 테이타의 샘플링 시간간격은 1.0이다.

시간평균의 값을 구하기 위한 테이타의 수는 100~999개 전후이다.

그림2에 나타난 바와 같이 각주의 좌측하단을 원점으로 취하였으며 수평방향으로는 $x/H=3.1 \sim 14.0$ 의 범위를 수직방향으로는 $y/H=-4.0 \sim 5.5$ 의

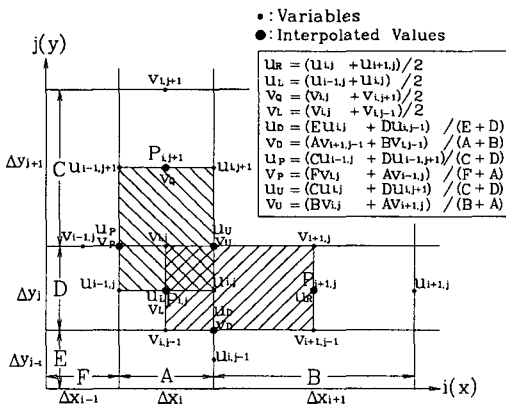


Fig. 1 Variable Allocation

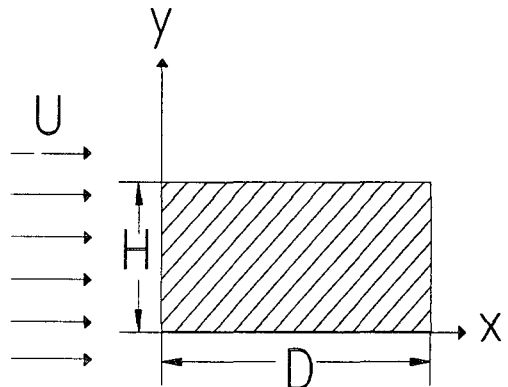


Fig. 2 Karman Vortex Simulation

범위를 택하여 속도의 시간변화 파형을 검출하였으며, 각주주위에서의 속도검출점 위치로서는 그림3에 나타난 바와 같이 $x/H=0.1\sim 3.0$, $y/H=1.1\sim 1.5$ 의 위치에서 시간변화 파형을 검출하였다. 또한 항력, 양력 및 배압계수값을 적용하여서 주파수분석을 행하였다.

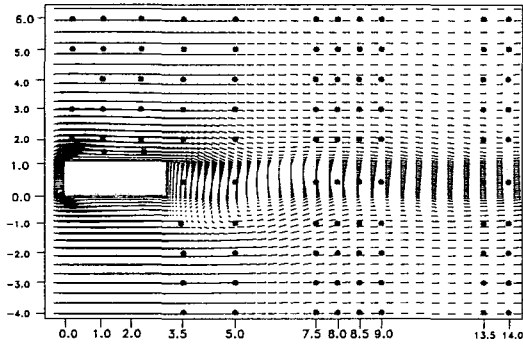


Fig. 3 Pick-up Point of u-Velocity

표1은 이 연구와 관련되어 제시된 결과를 도표로 요약하여 도시하였으며 그림4에서 St수를 구하기 위하여 속도 값을 측정된 위치를 나타내었다. 여기에서도 대상 레이놀즈수는 대부분 $Re=10^4$ 이상임을 알 수 있고 St수는 레이놀즈수에 의존하고 있지 않음을 알 수 있다. 그러나 속도 값을 구하기 위한 위치는 연구자에 따라 다르게 설정하고 있다.

3. 적용 및 고찰

검출된 속도 값으로부터 구해진 파워스펙트럼(Power-spectrum)밀도분포에서 가장 두드러진 값을 가진 값을 탁월주파수로 그 외의 주파수 값을 고차주파수 값이라고 편의적으로 구분하였다.

그림5는 구해진 탁월주파수 성분을 실험값과 비교한 결과이며 비교적 잘 일치함을 나타내고 있다.

그림6은 변장비 1:1일 때 $x/H = 0.1\sim 5.0$ 및 $y/H=1.1$ 범위에서의 주파수 분석을 행한 것이다.

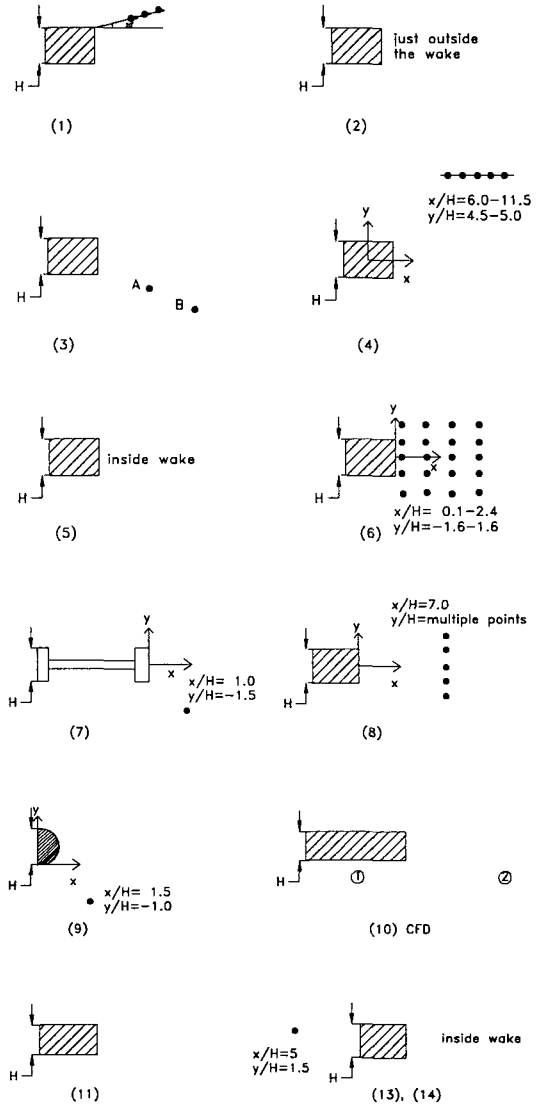


Fig. 4 Velocity Pick-up Point for FFT Spectrum

물체에 근접된 위치인 전단층 영역인 지점에서의 주파수 성분은 1개의 탁월주파수 성분값 0.12가 강하게 나타남을 알 수 있으며 와의 재부착현상이 두드러지지 않음을 알 수 있다. 또한 물체의 먼 후방에 국한하여 두 종류의 현저한 주파수 성분이 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 $y/H=1.25, 1.5$ 에서도 유사한 형태의 주파수 성분 분포를 나타내고 있으나 여기에서는 그림을 도시하지

Table 1. Previous Studies Related to Strouhal Number(Measurement and CFD)

Ref. No	experimental outlines	sensing position	Strouhal number(St)	studies included
1	<ul style="list-style-type: none"> wind tunnel, • Re:2.7-7x10⁴ 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	<ul style="list-style-type: none"> wind tunnel, • Re:2-7x10⁴ 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	<ul style="list-style-type: none"> wind tunnel Re:(0.26-1.24)x10⁵ 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	<ul style="list-style-type: none"> wind & water tunnel Re:70-2x10⁴ T.I.:0.5%, • d/h:1.0-4.0 	<ul style="list-style-type: none"> hot wire • CFD x/h:6.0-11.5, y/h:4.5-5.0 from prism center 	<ul style="list-style-type: none"> Re>10⁴: single mode 	<ul style="list-style-type: none"> Re>10⁴:turbulence inception for d/h=1.0
5	<ul style="list-style-type: none"> wind tunnel Re:2.56x10³-5.77x10⁴ 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) 	<ul style="list-style-type: none"> C_D & C_{pb} Reynolds independence of St
6	<ul style="list-style-type: none"> wind tunnel Re:(2.0-2.5)x10⁴ 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	<ul style="list-style-type: none"> wind tunnel, • Re:(5-30)x10⁴ 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	<ul style="list-style-type: none"> wind tunnel Re:3x10⁵ 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 shedding
9	<ul style="list-style-type: none"> wind tunnel, Re:(2.5-10)x10⁴ 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	<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 	<ul style="list-style-type: none"> single mode (d/h:0.4-8.0) dual modes for detection 	<ul style="list-style-type: none"> comparison with experiments St from C_L spectrum
11	<ul style="list-style-type: none"> wind tunnel Re:(1-3)x10³ 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	<ul style="list-style-type: none"> 3rd-order upwind scheme Re:10³ 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	<ul style="list-style-type: none"> wind tunnel, • Re:3.2x10⁴ 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 	<ul style="list-style-type: none"> rod size and distance effects
14	<ul style="list-style-type: none"> wind tunnel Re:5.3x10³-3.2x10⁴ 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 & Reynolds effects three St patterns by rod distance

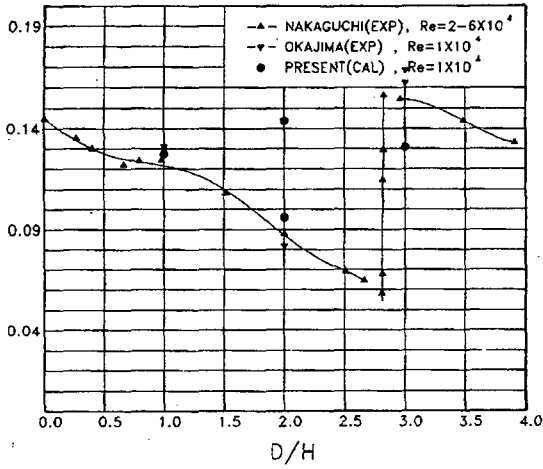


Fig. 5 Comparison of Strouhal Number of Varied Blockage Ratio

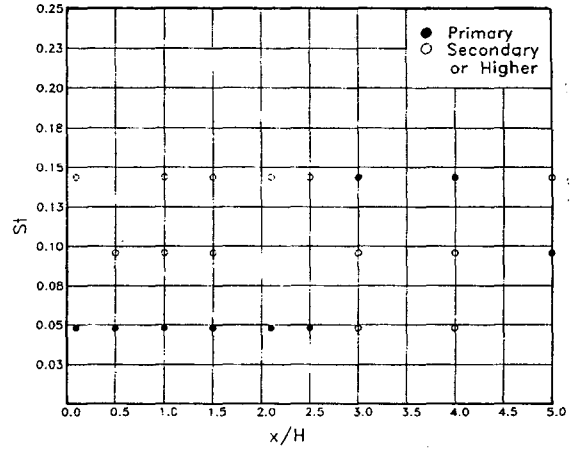


Fig. 7 Prominent Frequencies(D/H=2, x/H=0.1~5.0, y/H=1.1)

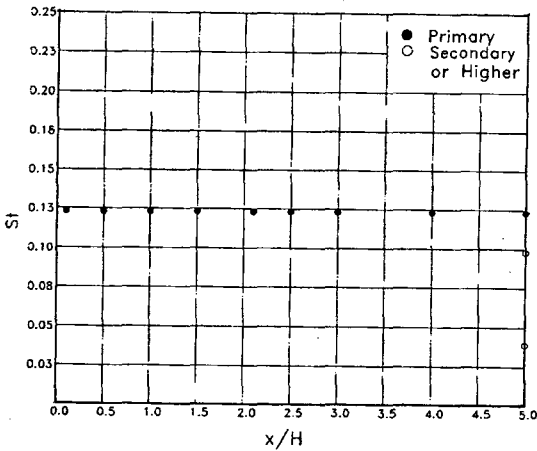


Fig. 6 Prominent Frequencies(D/H=1, x/H=0.1~5.0, y/H=1.1)

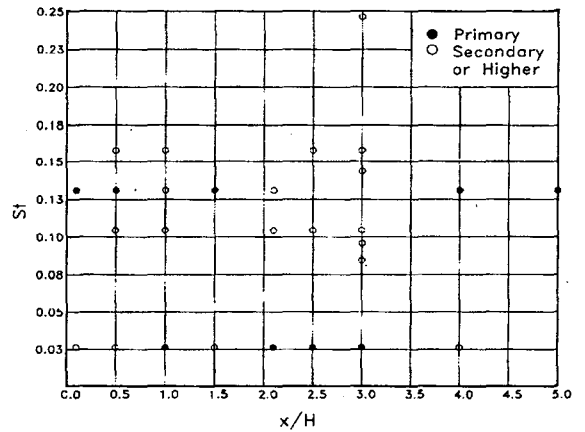


Fig. 8 Prominent Frequencies(D/H=3, x/H=0.1~5.0, y/H=1.1)

않았다.

그림7은 변장비 1:2에서 x/H=0.1~5.0 및 y/H=1.1 영역에서의 주파수 분석결과를 나타낸 것으로서 전단층 영역에서 탁월주파수 성분인 0.05의 값이 강하게 나타나며 x/H=3.0의 위치에서는 탁월주파수 성분이 0.15값으로 바뀌면서 고차의 주파수 성분인 0.05 과 0.10의 값이 나타남을

알 수 있다. 또한 물체의 먼 후방에서 (x/H=5.0)는 탁월주파수 성분이 0.10으로 바뀔을 알 수 있다. 이와 같은 특성은 결국 두 종류의 재부착구조가 혼재 함을 나타내며 물체의 먼 후방에서는 두 종류의 유동이 혼합하여 새로운 탁월주파수 성분을 나타냄을 알 수가 있다.

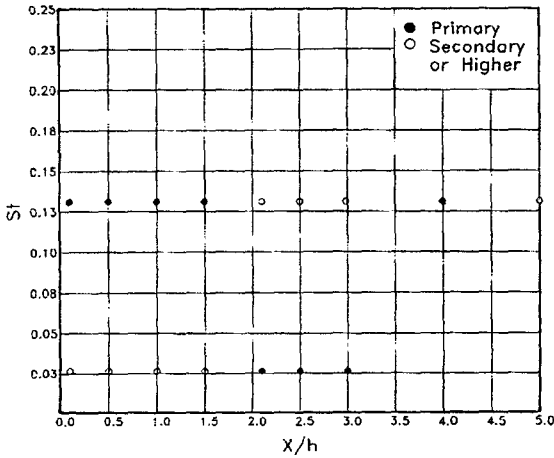


Fig. 9 Prominent Frequencies($D/H=3$, $x/H=0.1 \sim 5.0$, $y/H=1.25$)

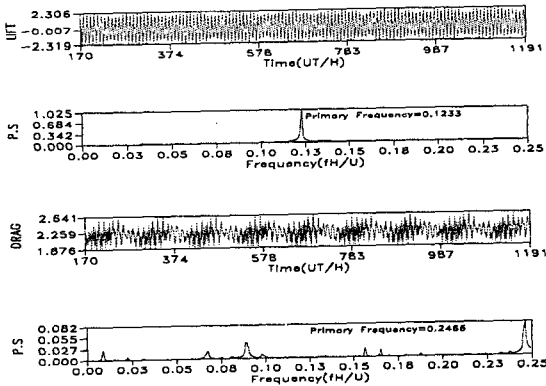


Fig. 10 Frequency of Temporal Variation for CL and $CD(D/H=1)$

그림8은 변장비 1:3일 때 $x/H=0.1 \sim 5.0$ 및 $y/H=1.1$ 에서의 주파수분포를 나타내고 있다. 전 단층 영역 $x/H=0.1 \sim 3.0$ 의 범위에서 다수의 주파수성분이 나타나며 이는 주기적으로 와의 재부착 현상이 일어남을 보여준다. 그러나 물체후방에서는 한 종류의 탁월주파수 성분이 0.13값으로 나타남을 알 수 있다. 그림9는 $x/H=0.1 \sim 5.0$ 및 $y/H=1.25$ 의 위치에서의 주파수분포로서 전 단층 영역에서는 2개의 주파수성분이 재부착의 영

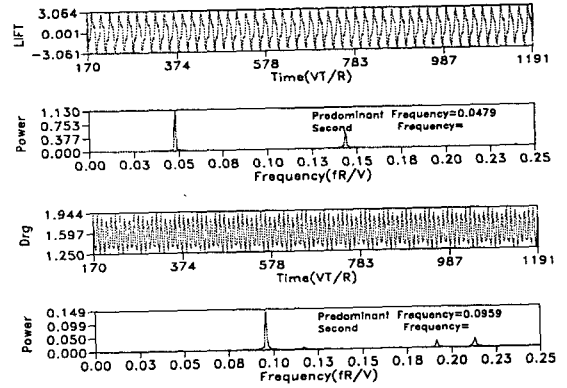


Fig. 11 Frequency of Temporal Variation for CL and $CD(D/H=2)$

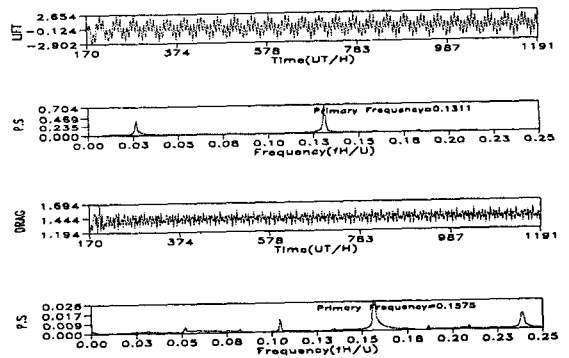


Fig. 12 Frequency of Temporal Variation for CL and $CD(D/H=3)$

향으로 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 주파수특성과 유사하게 나타났으나 그림을 생략하였다.

그림10은 변장비 1:1일 때의 양력계수와 항력계수의 시계열 변동과 이를 이용한 주파수분석 결과를 나타내고 있으며 카르만와의 주기적인 방출로 인한 제1주파수성분의 존재가 확인되고 있다. 특히 양력계수와 항력계수 값을 적용한 탁월주파수의 성분비가 1:2로 나타나고 있음으로서

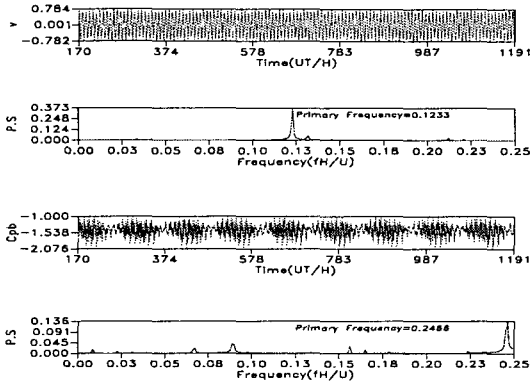


Fig. 13 Frequency of Temporal Variation for v-Velocity and $C_{pb}(D/H=1)$

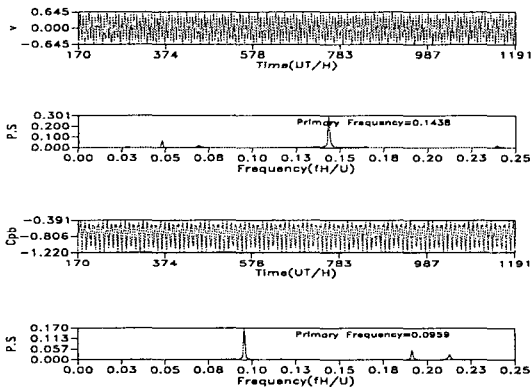


Fig. 14 Frequency of Temporal Variation for v-Velocity and $C_{pb}(D/H=2)$

유입속도가 일정함을 보여준다.

그림11은 변장비 1:2일 때의 양력계수와 항력계수의 시계열 변동과 이를 이용한 주파수특성이다. 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 유입속도가 일정함을 알 수 있다.

그림12는 변장비 1:3에서의 항력계수와 양력계수의 시계열 변동과 주파수분석을 나타내고 있으며, 탁월주파수 외에 다양한 크기의 고주파수성

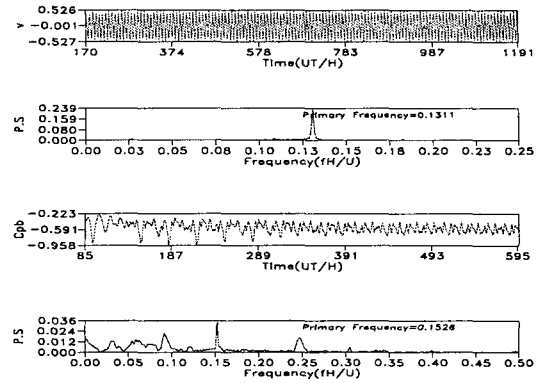


Fig. 15 Frequency of Temporal Variation for v-Velocity and $C_{pb}(D/H=3)$

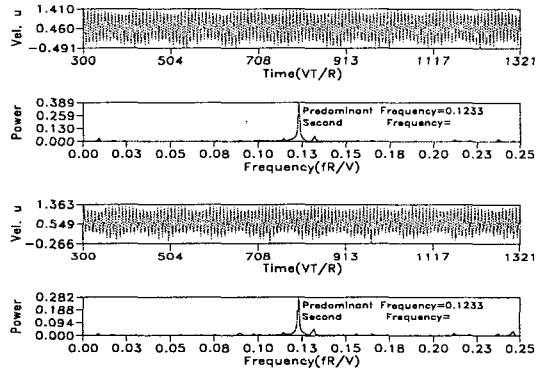


Fig. 16 u-Velocity and $St(D/H=1, x/H=5.0, 7.0, y/H=2.0)$

분이 혼재함을 알 수 있다. 이것은 각주의 상하면에서 와의 재부착현상이 강하게 발생함을 나타낸다. 양력계수를 이용한 탁월주파수는 0.13이나 항력계수 값을 이용한 경우에는 약0.16으로 그림 4에서의 실험 값과 매우 잘 일치함을 나타내고 있다.

그림13은 변장비 1:1에서의 후방의 한 위치에서 검출한 v속도 값과 배압계수 값을 적용한 주파수성분을 나타낸 것으로서 v속도 값에서는 St수가 0.12를 배압계수 값을 적용한 경우에는 0.25 값을 나타내어 St수의 비가 1:2로 나타나고 있다.

그림14는 변장비 1:2에서의 동일위치에서의 주

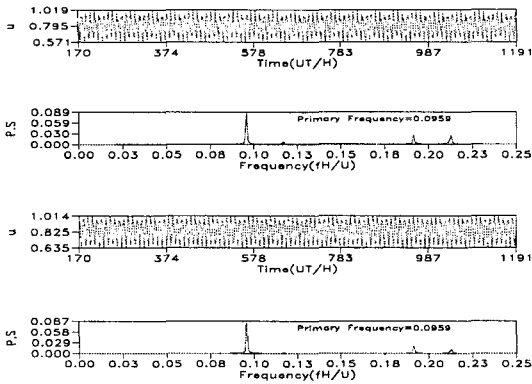


Fig. 17 u-Velocity and $St(D/H=2, x/H=5.0, 7.0, y/H=0.5)$

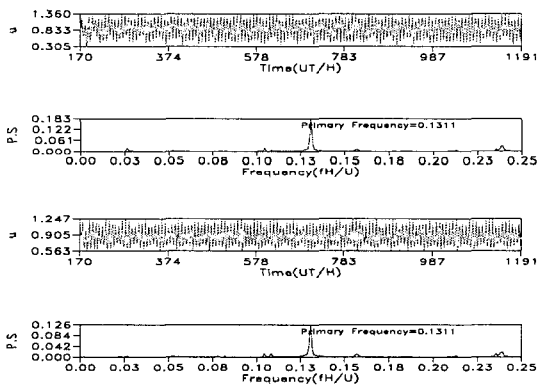


Fig. 18 u-Velocity and $St(D/H=3, x/H=5.0, 7.0, y/H=1.5)$

파수변동을 나타내고 있다. v속도 값을 적용한 경우에는 0.14를 배압계수 값을 적용한 때에는 0.10의 두 종류의 탁월주파수를 나타낸다.

그림15는 변장비 1:3에서의 결과이다. v속도에서는 0.13을 배압계수에서는 0.15값을 보이며 배압계수 값을 적용한 경우가 실험 값에 더욱 잘 일치함을 나타내고 있다.

그림16은 변장비가 1:1인 경우에 있어서 각주 후방에서의 u속도 검출점 위치 $x/H=5.0, 7.0$ 및 $y/H=2.0$ 에서의 주파수성분을 나타낸 것으로써 탁월주파수가 0.12로 실험 값과 잘 일치하고 있다.

그림17은 변장비가 1:2일 때의 각주 후방의 u

속도 검출점 위치 $x/H=5.0, 7.0$ 및 $y/H=0.5$ 에서의 주파수분포를 나타낸 것으로써 탁월주파수는 0.10값으로 나타나고 있다. 그림18은 변장비가 1:3일 때의 동일위치에서의 결과이다. 탁월주파수는 약 0.135로 나타남을 알 수 있다.

4. 결 론

이 연구에서는 장방형 해양구조물을 각주로 단순화하고 세 종류의 변장비에 대하여 속도값, 항력, 양력 및 배압계수를 수치해석으로 구하였다. 그리고 와방출 특성을 조사하기 위하여 FFT 기법으로 스트로할수(Strouhal Number)를 산출하였다. 그 결과 물체 후방에서의 u 속도 값을 검출한 결과에서는 변장비 1:1과 1:2에서 각각 0.12 그리고 0.10 및 0.14의 값을 얻었다. 이 경우 실험의 측정치와 같이 장방형의 물체후방에서는 두 가지의 다른 유동패턴이 혼재되어 존재함을 알 수가 있었다. 배압계수값을 적용한 경우에는 변장비 1:2에서 탁월주파수가 0.10, 변장비 1:3에서는 0.15로 실험결과와 잘 일치하고 있으며, 항력계수와 양력계수값을 적용한 주파수분석의 결과 변장비 1:1 및 1:2에서 탁월주파수의 비가 1:2로 이중모우드의 주파수 특성이 존재함을 체계적으로 보였다.

참고문헌

- [1] Nakaguchi, "An Experimental Study on Aerodynamic Drag of Rectangular Cylinders," 日本航空學會誌, 第 16卷 168호, pp.1-5, 1967
- [2] P W Berman and D M Trueman, "An investigation of the flow around rectangular cylinder," Aeronaut. Q. 23, pp. 229-237, 1972
- [3] Y. Otsuki and K. Washizu, H. Tomizawa, A.Ohya, "A Note on the Aeroelastic Instability of A Porismatic Bar with Square Section," J. Sound & Vibration, 34(2), pp.

- 233-248, 1974
- [4] Okajima, "Strouhal numbers of rectangular cylinders," J. Fluid Mech, vol.123, pp. 379-398, 1982
- [5] Igarashi, "長方形断面柱まわりの流れの特性," 日本機械學會論文集(B編) 50卷 460号, pp. 3185-3192, 1884
- [6] Kyozo Ayukawa, Norikazu Kawasaki, Mitsuru Ohkura, Ryo Asano, "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号, pp. 3887-3895, 1985
- [7] Nakamura and Nakashima, "Vortex excitation of prisms with elongated rectangular, H and cross-sections," J. Fluid Mech, vol.163, pp. 149-169, , 1986
- [8] Taniguchi, "The Wake Structures of Two-Dimensional Rectangular Cylinders Having Different Length-to-Width Ratios," J. Fluid Mech, No. 87-0041 A, 1988
- [9] Nakamura and Hirata, "Critical geometry of oscillating bluff bodies," J. Fluid Mech, vol. 208, pp. 375-393, 1989
- [10] Okajima, NagaHisa, Rokugou, "A Numerical Analysis of flow around Rectangular Cylinders," JSME, 56-522, pp. 280-288, 1990
- [11] Nakamura, Ohya, Tsuruta, "Experiments on vortex shedding from flat plates with square leading and trailing edges," J. Fluids Mech, vol. 222, pp. 437-447, 1991
- [12] Ohya, Nakamura, Ozono, Tsuruta, Nakayama, "A numerical study of vortex shedding from flat plates with square leading and trailing edges," J. Fluid Mech, vol. 236, 1992, pp. 445-460
- [13] Igarashi and Ito, "Drag Reduction of a square Prism," JSME, 59-568, pp. 3701-3707, 1993
- [14] Igaradhi, "Drag Reduction of a square Prism," JSME, 60-573, pp.1561-1567, 1994
- [15] 이영호, 2차원 각주의 비정상 공력특성 (SOLA 스킴의 재평가), 한국박용기관학회지 제14권 제2호, pp. 154-156, 1990