

論文

# 제어봉이 부착된 원관 후류의 주파수특성에 관한 연구

최상범\* · 한원희\*\* · 조대환\*\*\* · 김옥석\*\*\*\*

\*목포해양대학교 대학원 기관시스템공학과

\*\* , \*\*\*목포해양대학교 기관시스템공학부

\*\*\*\*목포해양대학교 대학원 해양시스템공학과

## A Study on Frequency Characteristics of Wake Flow a Circular Cylinder with Control Cylinder

Sang-Bom Choe\* · Won-Hui Han\*\* · Dae-Hwan Cho\*\*\* · Ok-Sok Gim\*\*\*\*

\*Department of Marine Engineering, Graduate School, Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea

\*\* , \*\*\*Division of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea

\*\*\*\*Department of Ocean System Engineering, Graduate School, Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea

**요약** : 제어봉이 부착된 원관 후류의 유동특성을 관찰하기 위해 입자영상유속계(PIV)를 사용한 계측을 수행하였다. 실험은 소형회류수조에서 유입 유속을 0.1m/s, 0.2m/s, 0.4m/s로 하고, 원관(D=50mm)에 제어봉이 없는 경우와 제어봉이 5mm, 10mm, 20mm가 부착된 총 12가지로 정하였고, 속도신호에 따른 주파수특성을 고찰하였다. 실험에서 제어봉의 영향으로 인하여 와류홀림 주파수가 작게 나타났으며, 유동제어의 지배변수로는 d/D와 레이놀즈수이며, 원관 후류의 주파수특성에 큰 영향을 미쳤다. 와류홀림 주파수는 제어봉이 0.2D인 경우 가장 작게 나타났다.

**핵심용어** : 원관, 제어봉, 입자영상유속계(PIV), 와류홀림주파수, 주파수특성

**ABSTRACT** : Flow characteristics of the cylinder wake controlled with a small control cylinder were experimentally investigated by the PIV (Particle Image Velocimetry) technique. Flow visualization of the flow around a circular cylinder was conducted in the Circulating Water Channel. The control cylinder having diameter of d=5mm, 10mm and 20mm was installed behind a circular cylinder of D=50mm. And the Reynolds number were  $Re=4.9 \times 10^3$ ,  $Re=9.9 \times 10^3$  and  $Re=1.9 \times 10^4$ . In this study, the frequency characteristics of the controlled wake were analyzed by using spectral analysis of the measured wake velocity signals. As a result, the controlled wake had smaller vortex shedding frequency than that of circular cylinder wake by the effect of the control cylinder. Governing parameters of the flow control were d/D, and Reynolds number and they largely influenced the frequency characteristics of the cylinder wake. And vortex shedding frequency appeared most lowly at d=0.2D.

**KEY WORDS** : Circular Cylinder, Control Cylinder, Particle Image Velocimetry, Vortex Shedding Frequency, Frequency Characteristics

### 1. 서론

물체 후류의 유동현상과 영향에 대한 관찰과 고찰은 실제 산업분야에서 발생하는 많은 공학적인 문제를 해결하는데 필요하다. 물체 후류의 유동이 비정상 유동이며 조직적이고 일정한 주기성을 갖는 대규모의 난류 형태로 확산 소멸된다고 Von Karman<sup>1)</sup>에 의하여 밝혀진 후 원관의 기하학적 형태 변화, 유동방향 변화, 원관 주위의 유속 변화 그리고 유동 형태의 변화에 대한 연구가 진행되어 오고 있다.

장애물 후류에 대한 기하학적 형태 변화에 대한 연구에서 원

관은 기하학적으로 제작 및 설치가 가장 간단한 물체이지만 원관 주위의 유동장에는 경계층유동(Boundary layer flow), 유동박리(Flow separation), 후류유동(Wake flow), 와류홀림(Vortex shedding)등의 많은 유동현상들이 혼재하여 복잡한 양상을 가지고 있다. 따라서 원관 주위의 유동 현상을 규명하는 것은 각종 장애물 후류를 이해하는데 기본이 된다. 또한 원관 주위의 유동에 대한 연구는 굴뚝, 냉각탑, 통신 및 전력선 등의 풍력에 의한 하중계산, 해중 운동체에 작용하는 유체 역학적 하중 계산, 열교환기에서의 대류 열전달 계산, 해양 구조물 지지 파이프의 유동장 및 원관 사이의 유동해석 등 실제 산업분야에서도 응용 범위가 광범위하다.

원관 주위 유동에 대한 연구는 실험적인 연구<sup>2~7)</sup>와 점성유체의 운동방정식인 Navier-Stokes방정식의 해를 찾는 수치해법을 통한 연구<sup>8~10)</sup>로 대별할 수 있는데 실험을 통한 연구에서는

\*대표저자 : 비회원, king@mmu.ac.kr, 061)240-7167

\*\*중신회원, winhan@mmu.ac.kr, 061)240-7239

\*\*\*중신회원, dhcho@mmu.ac.kr, 061)240-7104

\*\*\*\*비회원, domingo@mmu.ac.kr, 061)240-7076

유동의 가시화 및 원관 표면의 압력, 속도, 와류흔림주기 (Vortex shedding frequency) 등의 측정을 통하여 원관 후류의 유동특성을 규명해 오고 있다.

본 연구에서는 원관 뒤쪽에 제어봉을 부착하여 제어된 원관 후류의 와류구조 및 유동변화를 가시화하고, PIV를 이용해 해석하였으며, 제어봉의 크기와 유속의 변화에 따라 후류 유동특성의 변화를 관찰하였다. 특히, 원관 후류의 유동장에서 발생하는 와류 흐름(Vortex shedding) 현상을 주파수 분석을 통하여 제어조건에 따른 유동특성을 관찰하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 유동가시화 및 PIV해석을 위해 Fig. 1과 같이 길이, 폭 및 높이가 1000mm × 300mm × 300mm인 소형 이동 회류수조를 이용하였으며, 실험유체는 19°C의 청수를 사용하였다. 회류수조 내에 설치할 유로, 원관 및 제어봉은 레이저의 투과성이 좋고, 투명성이 최대한 보장되는 아크릴로 제작하였다. Fig. 2과 Fig. 3는 유로의 개략적인 도면과 실제 아크릴로 제작한 유로장치의 사진을 보여주고 있으며, 유로의 크기는 최대한 회류수조 내에 장착할 수 있도록 제작하고, 제어봉이 부착된 원관을 탈착할 수 있게 하였다.

유로장치 내에 장착할 원관 및 제어봉은 Fig. 4와 같이 제작하였으며, 실험에 사용된 원관의 직경은 50mm이고, 원관 후류에 부착된 제어봉의 직경은 5mm(0.1D), 10mm(0.2D) 그리고 20mm(0.4D)이다. 원관의 길이는 264mm이고 제어봉의 길이는 254mm로 원관의 양 끝단이 유로장치 홈에 들어갈 수 있도록 원관 양쪽에 5mm의 여유를 주었다.

본 연구에서 채택한 실험 조건은 Table 1과 같이 제어봉이 없는 경우와 제어봉이 5mm, 10mm, 20mm가 부착된 경우로 하고, 이에 따른 회류수조의 유입속도는 0.1m/s, 0.2m/s 및 0.4 m/s로 설정하여 총 12가지 경우에 대하여 실험을 수행하였다. 그리고 원관의 직경 D=50mm를 대표 길이로 하여 평균 유입유속의 변화에 따른 레이놀즈수로 환산하면  $Re=4.9 \times 10^3$ ,  $Re=9.9 \times 10^3$  및  $Re=1.9 \times 10^4$ 이었다.

Fig. 5은 전체적인 실험장치의 구성도이며 PIV에 의한 영상처리시스템은 크게 수냉식인 아르곤-이온 레이저(Argon-ion laser, 5W), 레이저 시트(Laser sheet), 고속카메라(High Speed Camera), 영상처리프로그램(CACTUS 3.1), 제어 및 계산용 컴퓨터 등으로 구성되어, 레이저로 유동가시화를 한 후 가시화된 영상을 고속카메라로 촬영하여 영상처리장치로 해석하는 일괄적인 과정을 나타낸다.

PIV계측에서 유동장을 가시화하고 해석하는데 있어 가장 중요한 부분을 차지하는 것이 입자의 선정일 것이다. PIV는 유동장에 분포된 입자의 미소시간 간격 영상을 컴퓨터로 분석하여 속도벡터에 대한 데이터를 얻는 방법이므로 입자의 추종특성은 결과의 신뢰성에 매우 큰 영향을 미친다. 따라서 사용되는 입자의 선별기준은 입자에 미치는 다양한 외부 힘 성분이 무시될

수 있는 미소 입자를 경험적으로 선택하거나, 될 수 있으면 유체 측과의 밀도차가 작은 것을 사용하여 부력 또는 침강력의 영향이 최소화 될 수 있도록 해야 한다. 트레이서 입자의 직경은 대상유체에 대한 추종성의 측면에서 작은 쪽이 좋으나 관찰의 용이성과 영상처리의 정도(精度)를 고려하였다. 실험에서 사용한 고체 트레이서 입자는 거름망을 이용하여 직경이 100μm~150μm의 PVC 백색 구형입자를 이용하였다.

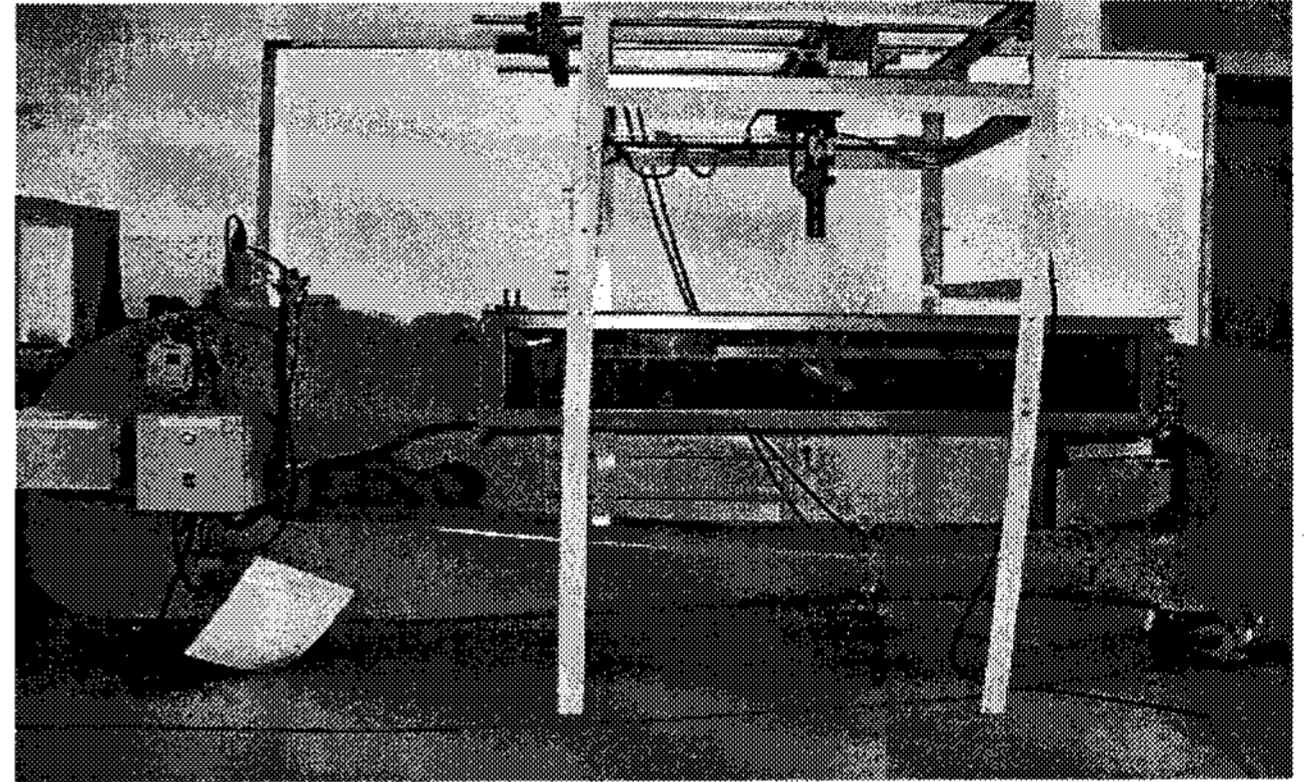


Fig. 1. Circulation water channel.

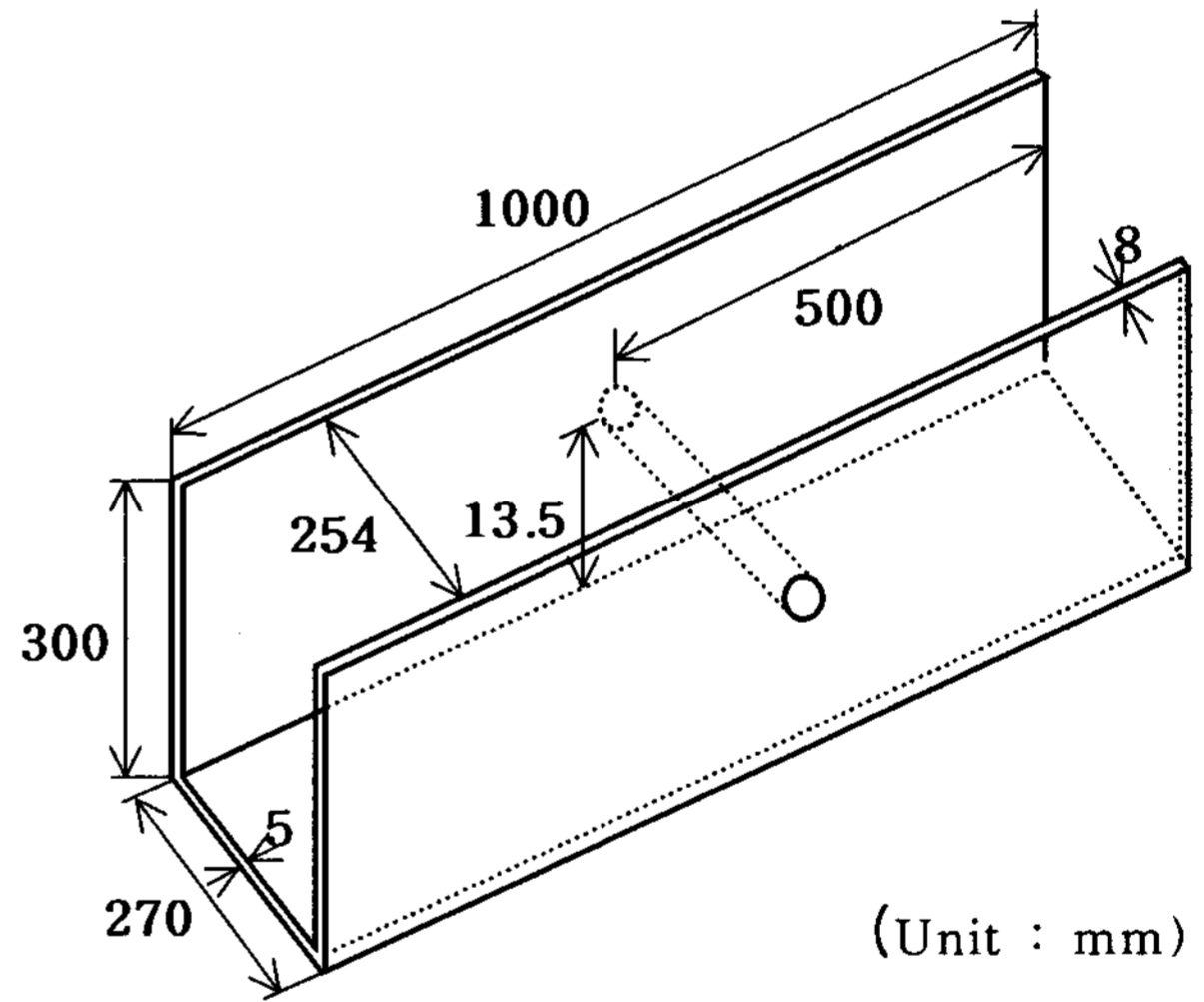


Fig. 2. Schematic diagram of experimental model.

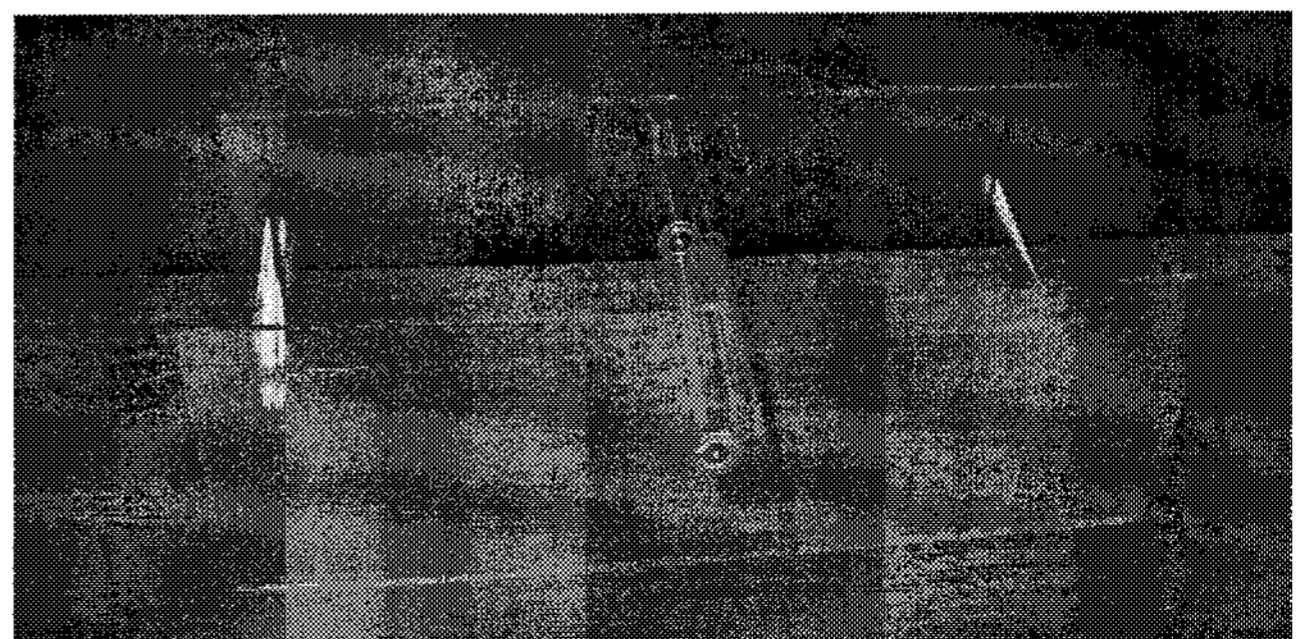


Fig. 3. Experimental model.

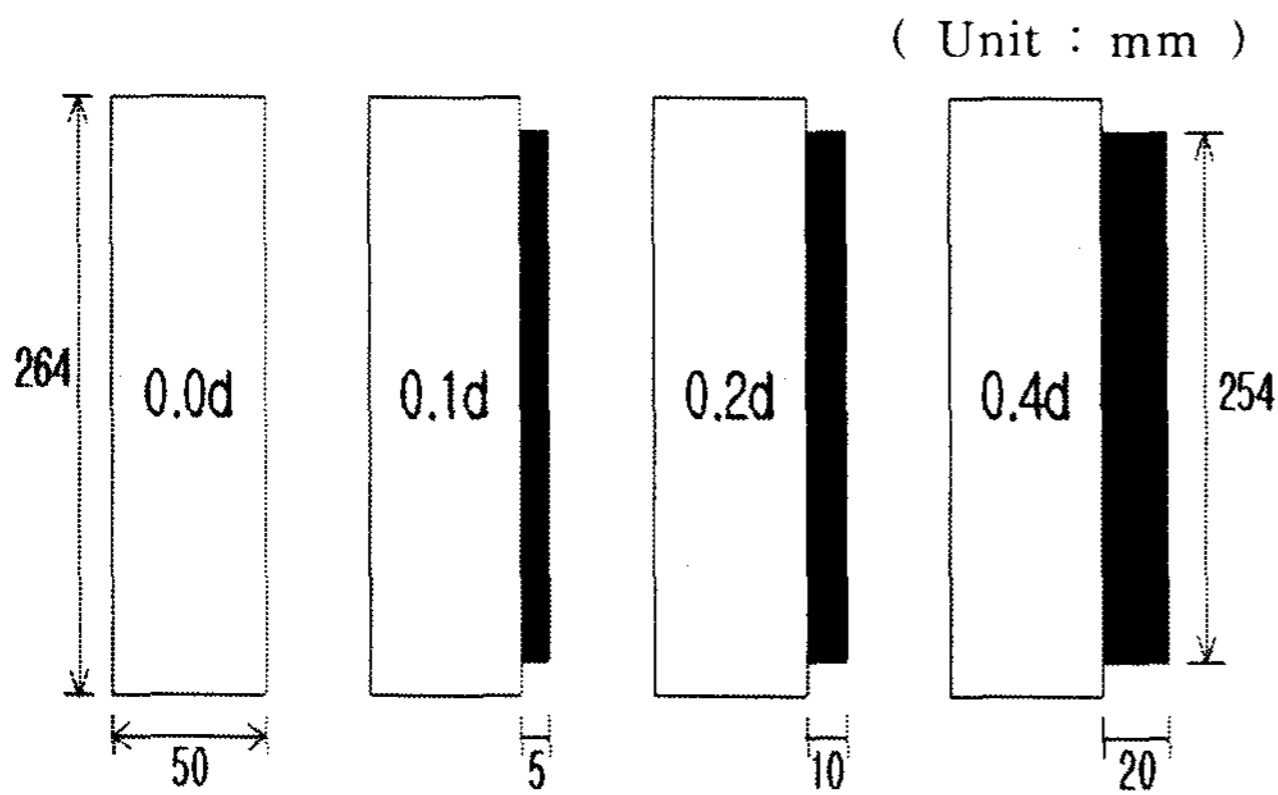


Fig. 4. Schematic diagram of circular cylinder & control cylinder.

Table 1. Experimental analysis conditions

Control cylinder diameter	유속	Re
Without Control cylinder	0.0D	0.1m/s, $4.9 \times 10^3$
		0.2m/s, $9.9 \times 10^3$
		0.4m/s, $1.9 \times 10^4$
d=5mm	0.1D	0.1m/s, $4.9 \times 10^3$
		0.2m/s, $9.9 \times 10^3$
		0.4m/s, $1.9 \times 10^4$
d=10mm	0.2D	0.1m/s, $4.9 \times 10^3$
		0.2m/s, $9.9 \times 10^3$
		0.4m/s, $1.9 \times 10^4$
d=20mm	0.4D	0.1m/s, $4.9 \times 10^3$
		0.2m/s, $9.9 \times 10^3$
		0.4m/s, $1.9 \times 10^4$

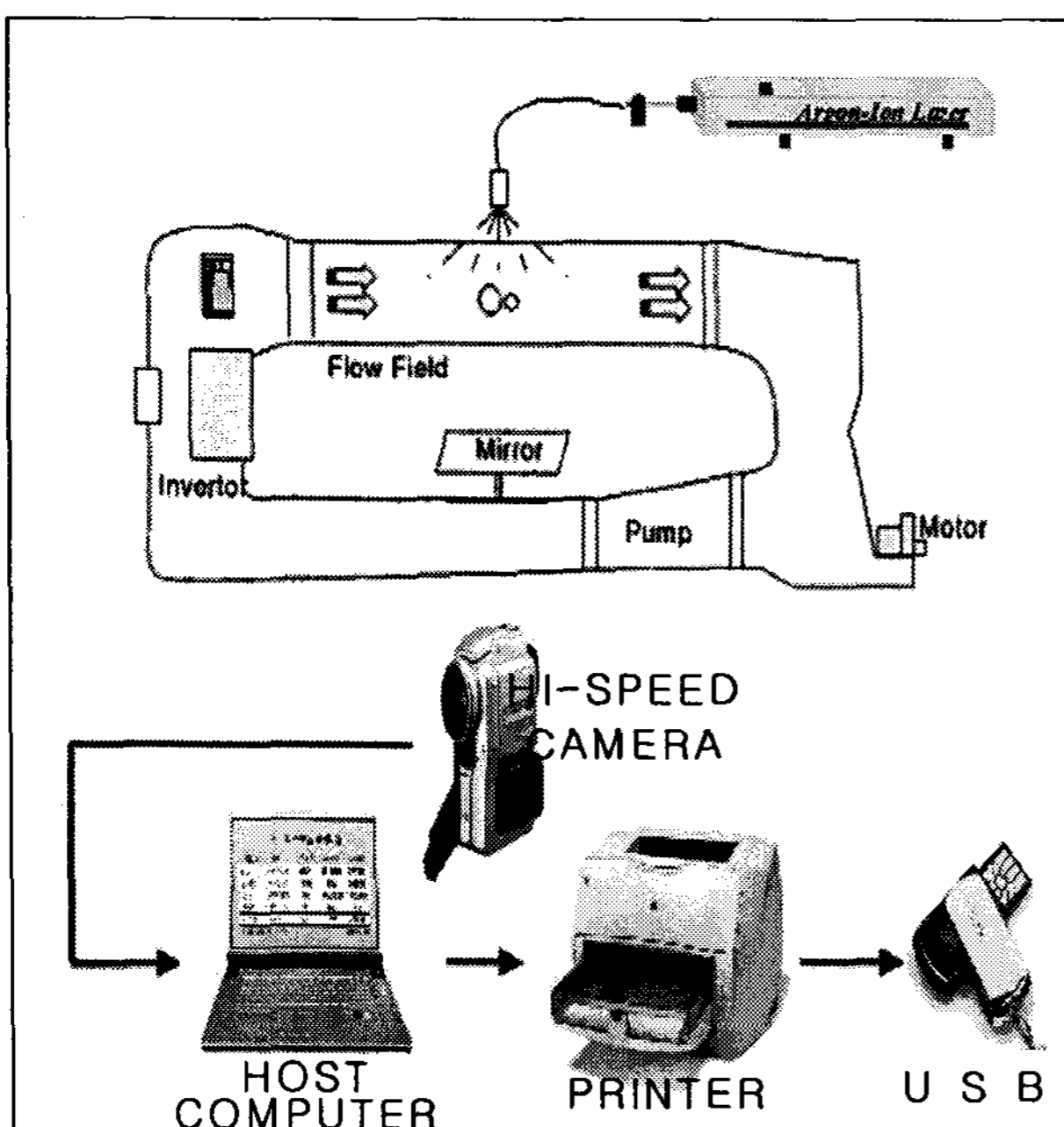


Fig. 5. Schematic arrangement of PIV system.

Table 2는 PIV계측을 위한 실험조건으로써, 가시화를 위한 유동장 조명은 수냉식 5W 출력의 Argon-Ion 레이저를 사용하였으며, 원통형 렌즈에 연결된 광파이버를 이용하여 유동장의 계측영역에 시이트 광(Sheet light)을 조사하였다.

유동장을 해석하기 위해 가시화된 유동장을 고속카메라를 이용하여 초당 125프레임으로 8초간 촬영하여 1000프레임의 영상을 취득하였다. 이렇게 얻어진 영상 중 1~500프레임까지 500장의 영상에 대해 PIV해석을 수행하였다. 해석영역은 원관의 직경  $D=50\text{mm}$ 를 기준으로 하여 수평방향으로는  $X/D=5.5(275\text{mm})$ , 수직방향으로는  $Y/D=3(150\text{mm})$ 만큼 설정하였으며, 영역안의 해석격자수는 가로70, 세로 38로 설정하였다.

Table 2. Measuring condition

	Item	Specification
Visualization equipment	Image board	Fastcam-x1280pci, 16k
	Light source	5W Argon-Ion laser
	Sheet light	Cylindrical lens (width : about 2mm)
Measuring condition	Working fluid	Water (19°C)
	Particle	PVC(specific gravity : 1.02, diameter: 100~150 $\mu\text{m}$ )
	$Re = \frac{U_{\infty} D}{\nu}$	$Re = 4.9 \times 10^3, 9.9 \times 10^3, 1.9 \times 10^4$
	Time resolution	1/125 sec
Image processing	Host computer	Pentium PC
	Calculation time	4 sec
	Number of time-mean data	500 Frames
	Identification	Two-frame grey-level cross correlation algorithm(CACTUS) Calculation grid: 70x38
	Ratio of error vector(%)	under 2% / frame average : about 1.0%

### 3. 실험결과 및 고찰

원관 후류에서의 Vortex는 강한 자유 전단층에 의해 생성되고 역류하는 유동에 의해 성장하게 된다. 이런 일련의 과정이 원관의 양 측에서 일어나게 되는데 한쪽 면에서 생성된 와가 반대의 다른 면에서 생긴 와에 의해 떨어져 나가면서 Shedding이 일어나게 된다. 이 과정에서 서로 다른 측면에서 생성된 Vortex가 충돌하여 유동의 꼬임 현상이 발생하게 되고, 그로

인하여 Secondary vortex가 형성되게 된다. 이런 원관 후류에서 발생하는 주기적 특성을 파악하기 위해 수평방향 속도성분에 대한 스펙트럼 해석을 수행하였다.

Fig. 6은 스펙트럼 해석을 수행하기 위하여 원관 후류에 15개의 지점을 산정한 위치도이다. X축 방향으로 원관의 중심을 기준으로 1D에서부터 3D까지 0.5D간격으로 5개의 지점을 선택하고, Y축 방향으로 원관 중심선을 포함한 0.25D간격으로 0.5D까지 3개의 지점을 선택하여 서로 교차하는 15개 지점에 대하여 제어봉의 부착여부와 제어봉의 크기, 레이놀즈수의 변화에 따른 스펙트럼 해석을 수행하였다.

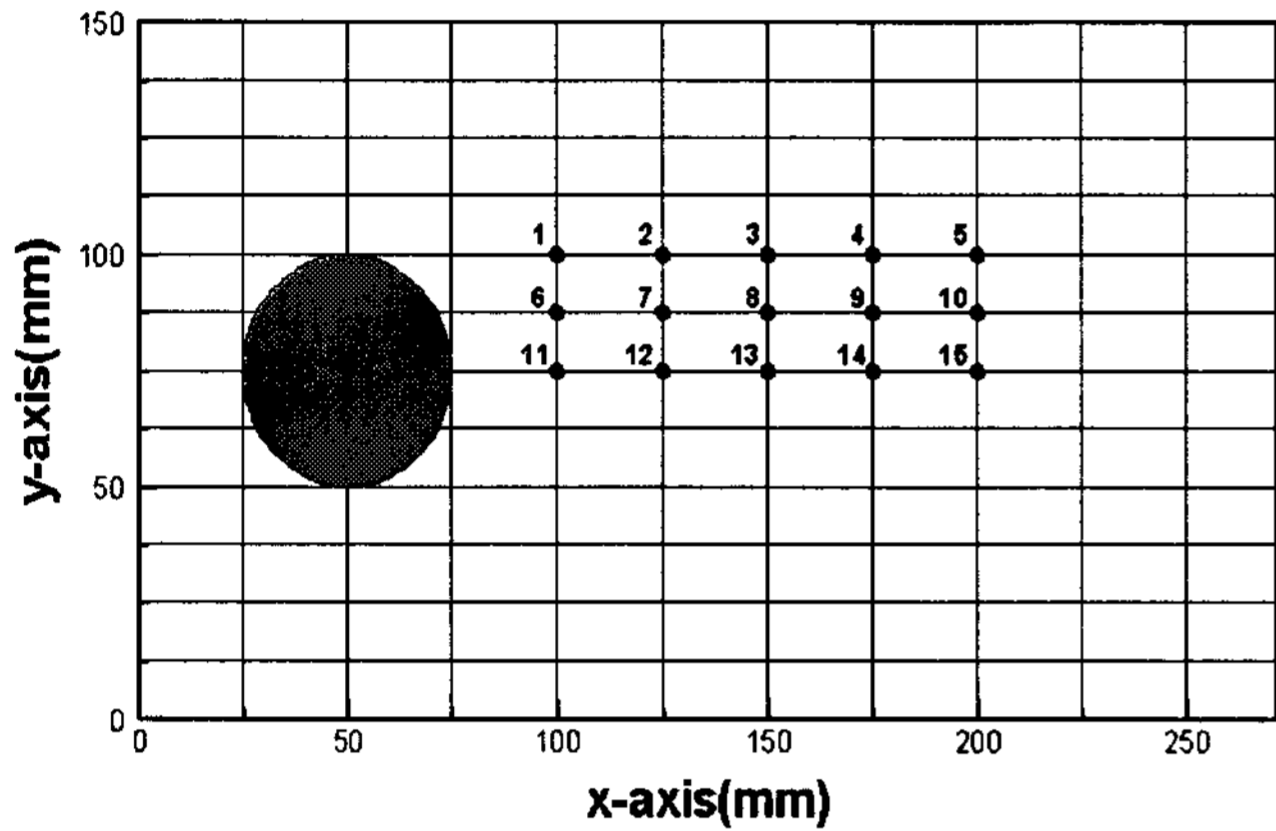


Fig. 6. Pick-up point for frequency analysis.

Fig. 7은 같은 위치에서의 제어봉 부착여부와 크기, 레이놀즈수 변화에 따른 주파수특성을 알아 보기위해 Y=100mm인 곳에 선정된 5개의 지점을 나타낸 것이다. Fig. 8은 레이놀즈수가  $Re=4.9 \times 10^3$ 일 때 1~5되는 지점의 탁월주파수 값을 나타낸 것이다. 제어봉이 없는 것과 제어봉이 0.1D인 경우 1~3까지 같은 탁월주파수 값을 보이고 있으며 4~5되는 지점에서는 미소한 차이를 보이고 있다. 0.2D와 0.4D는 3~4되는 지점에서 0.2D의 탁월주파수 값이 조금 낮게 나타남을 알 수 있다. Fig. 9은 같은 지점에서 레이놀즈수를  $Re=9.9 \times 10^3$ 으로 증가시켰을 때의 제어봉의 크기에 따른 탁월주파수 값을 나타낸 것이다. 전체적인 탁월주파수 값은 레이놀즈수 증가에 따라 산술 증가한 것을 볼 수 있으며, 제어봉이 0.2D와 0.4D인 경우는 제어봉이 없거나 0.1D인 경우보다 탁월주파수 값이 낮게 나타났다. 이는 제어봉이 와류형성과 와류유출에 영향을 주어서 나타난 결과라고 보여 진다. Fig. 10은 레이놀즈수가  $Re=1.9 \times 10^4$ 일 때의 탁월주파수 값이다. 제어봉이 0.2D와 0.4D의 경우는 탁월주파수 값이 5개의 지점에서 모두 같게 나타났으며 레이놀즈수가  $Re=9.9 \times 10^3$ 일 때와 같이 제어봉이 없는 경우 보다 낮은 주파수 특성을 보였다.

Fig. 11은 Y=87.5mm 되는 곳에 선정된 6~10까지의 위치도이며, Fig. 12은 레이놀즈수가  $Re=4.9 \times 10^3$ 일 때의 위치별 탁월주파수 값이다. 제어봉이 0.1D인 경우 6번 지점에서 가장 높은 탁월주파수 값을 보이고 있으며, 0.2D의 경우는 9~10번 지점에서

제어봉이 없는 경우보다 높게 나타났다. Fig. 13는 레이놀즈수가  $Re=9.9 \times 10^3$ 일 때의 탁월주파수 값을 나타낸 것이다. 제어봉이 없는 경우와 제어봉이 0.1D인 경우는 7번 지점에서 0.1D인 경우가 낮은 탁월주파수 값을 보였고, 나머지 지점들은 탁월주파수 값이 같거나 미소한 차이를 보였다. 제어봉이 0.4D의 경우는 6번과 10번 지점에서 가장 큰 탁월주파수 값을 보였으며, 0.2D의 경우는 다른 것과 비교했을 때 가장 낮은 주파수 특성을 보였다. Fig. 14은 레이놀즈수가  $Re=1.9 \times 10^4$ 일 때이며 제어봉이 없는 경우는 모든 지점에서 같은 탁월주파수 값을 보였고, 제어봉이 0.2D와 0.4D의 경우는 0.4D의 6번 지점과 0.2D의 10번 지점에 가장 낮은 탁월주파수 값을 보이고 있으며, 나머지 지점들은 같거나 미소한 차이의 탁월주파수 값을 보였다.

Fig. 15는 Y=75mm의 원관 중심선에서 산정한 5개 지점을 나타내고 있다. Fig. 16는 레이놀즈수가  $Re=4.9 \times 10^3$ 일 때의 각 지점의 탁월주파수 값으로 전체적인 탁월주파수 값은 후류로 갈수록 낮아짐을 보이고 있으며, 0.2D의 경우 12번 지점에서 높은 탁월주파수 값을 보였다. Fig. 17은 레이놀즈수  $Re=9.9 \times 10^3$ 에서의 탁월주파수를 나타낸 것이다. 제어봉이 없는 경우는 12지점에서 가장 높은 탁월주파수 값을 보이고, 13번 지점에서는 가장 낮은 탁월주파수 값을 보였다. 0.1D의 경우는 제어봉의 영향으로 제어봉이 없는 경우보다 낮은 탁월주파수 값을 보였으며, 원관에서 멀리 떨어질수록 증가하였다. 0.2D와 0.4D의 경우도 후류로 갈수록 탁월주파수가 증가하는 경향을 보였다. Fig. 18은 레이놀즈수를  $Re=1.9 \times 10^4$ 로 증가시켰을 때 탁월주파수 값이다. 제어봉이 없는 경우는 유속이 증가함에 따라 오히려 12지점에서 낮은 탁월주파수 값을 보이다 13번 지점에서 증가하여 일정한 값을 보였으며, 0.1D의 경우는 탁월주파수 값이 점차적으로 감소하는 경향을 보였다. 0.2D의 경우는 11번 지점에서 탁월주파수의 최고 값을 보이고, 후류로 갈수록 감소하는 경향을 보이고 있다. 0.4D의 경우는 12번 지점에서 높은 탁월주파수 값을 보인 후 점차 감소하였다.

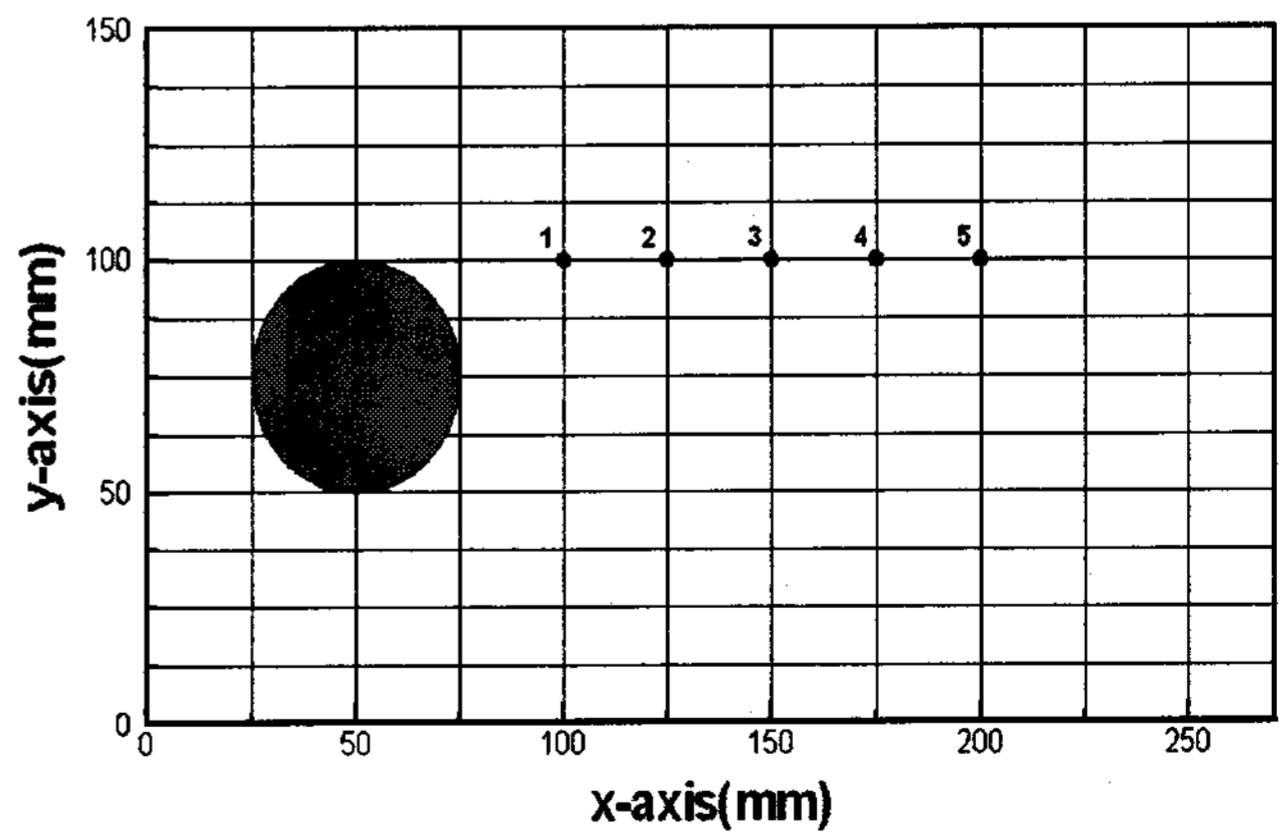


Fig. 7. Pick-up point for frequency analysis (point:1~5).

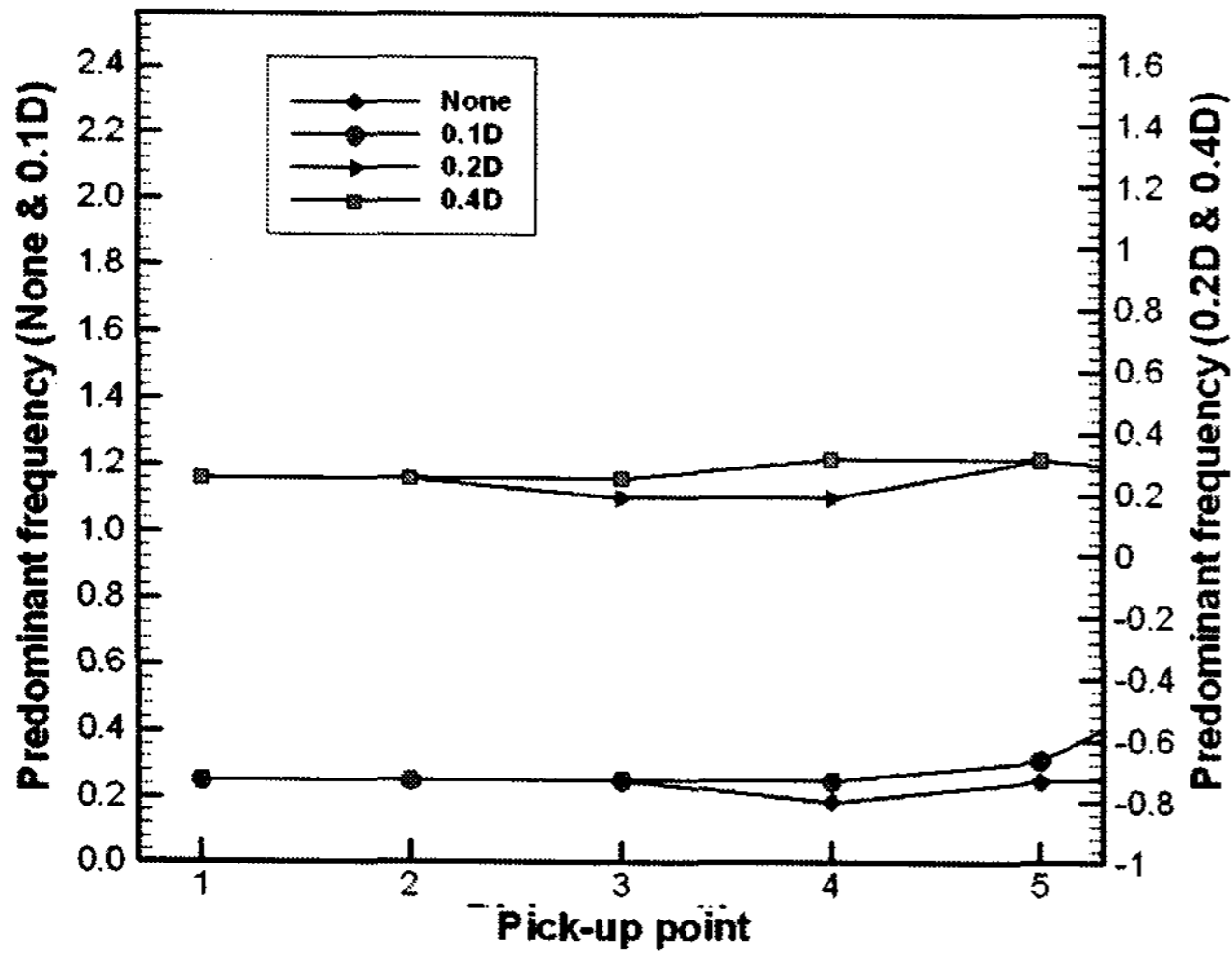


Fig. 8. Predominant frequency at  $Re=4.9 \times 10^3$

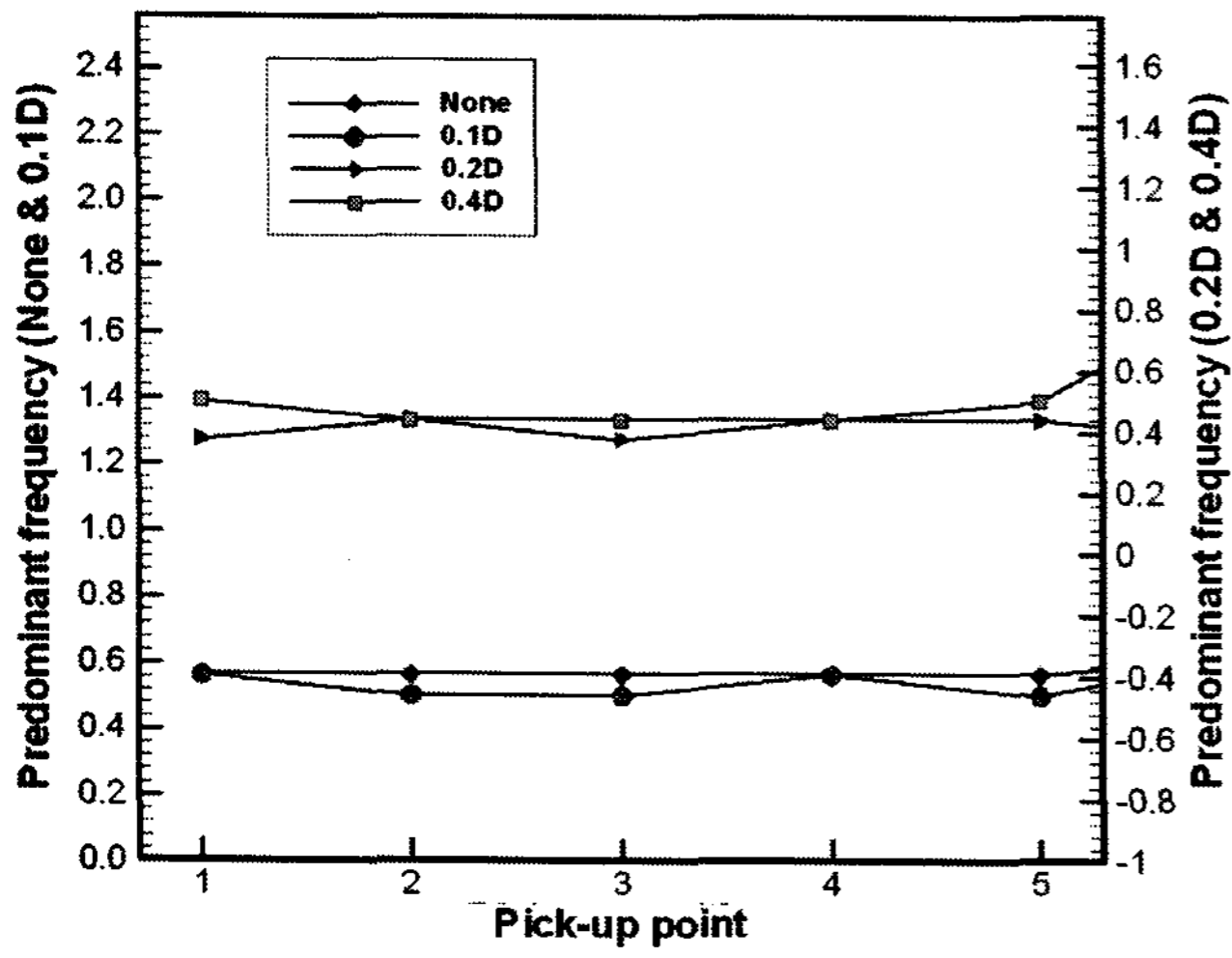


Fig. 9. Predominant frequency at  $Re=9.9 \times 10^3$

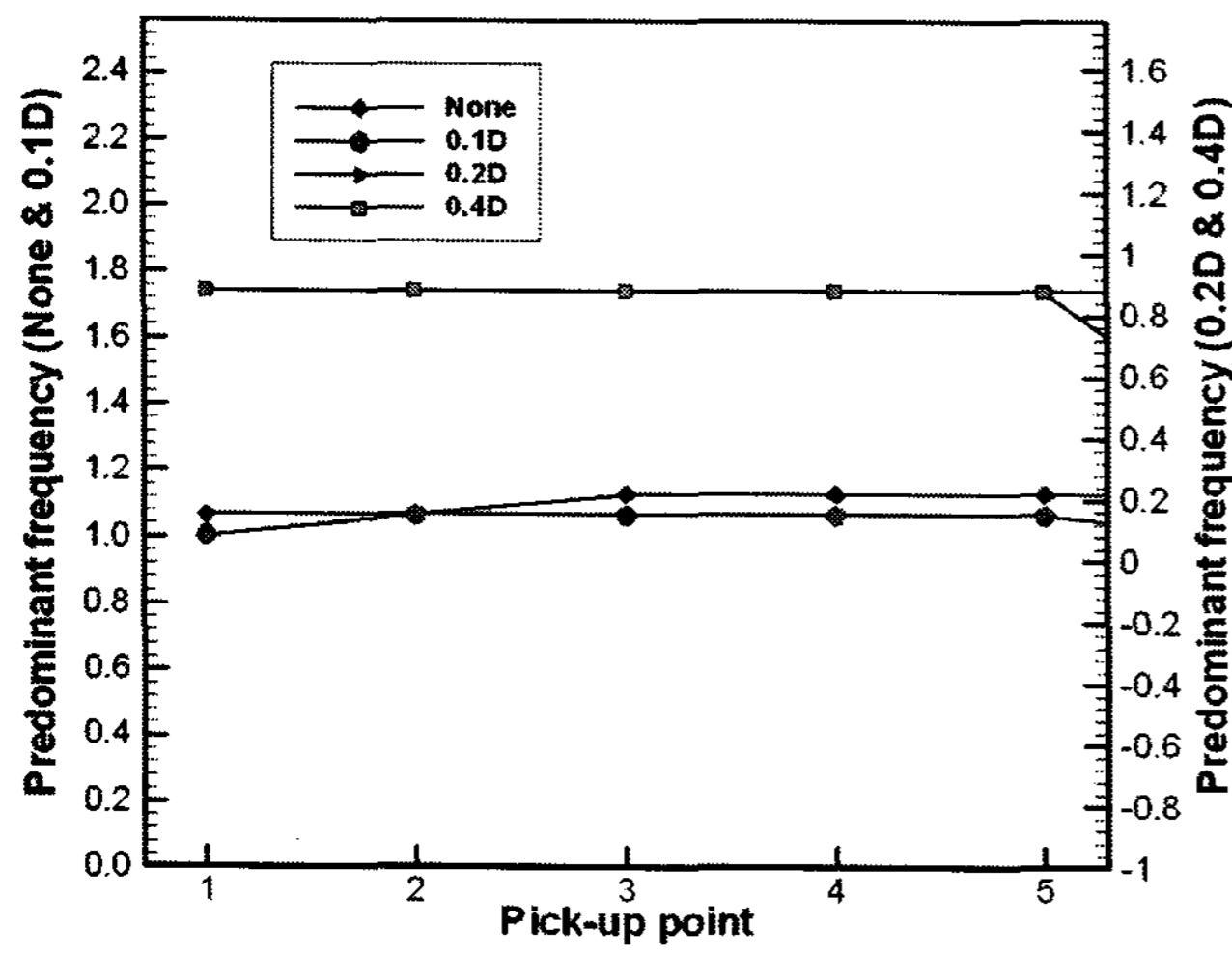


Fig. 10. Predominant frequency at  $Re=1.9 \times 10^4$

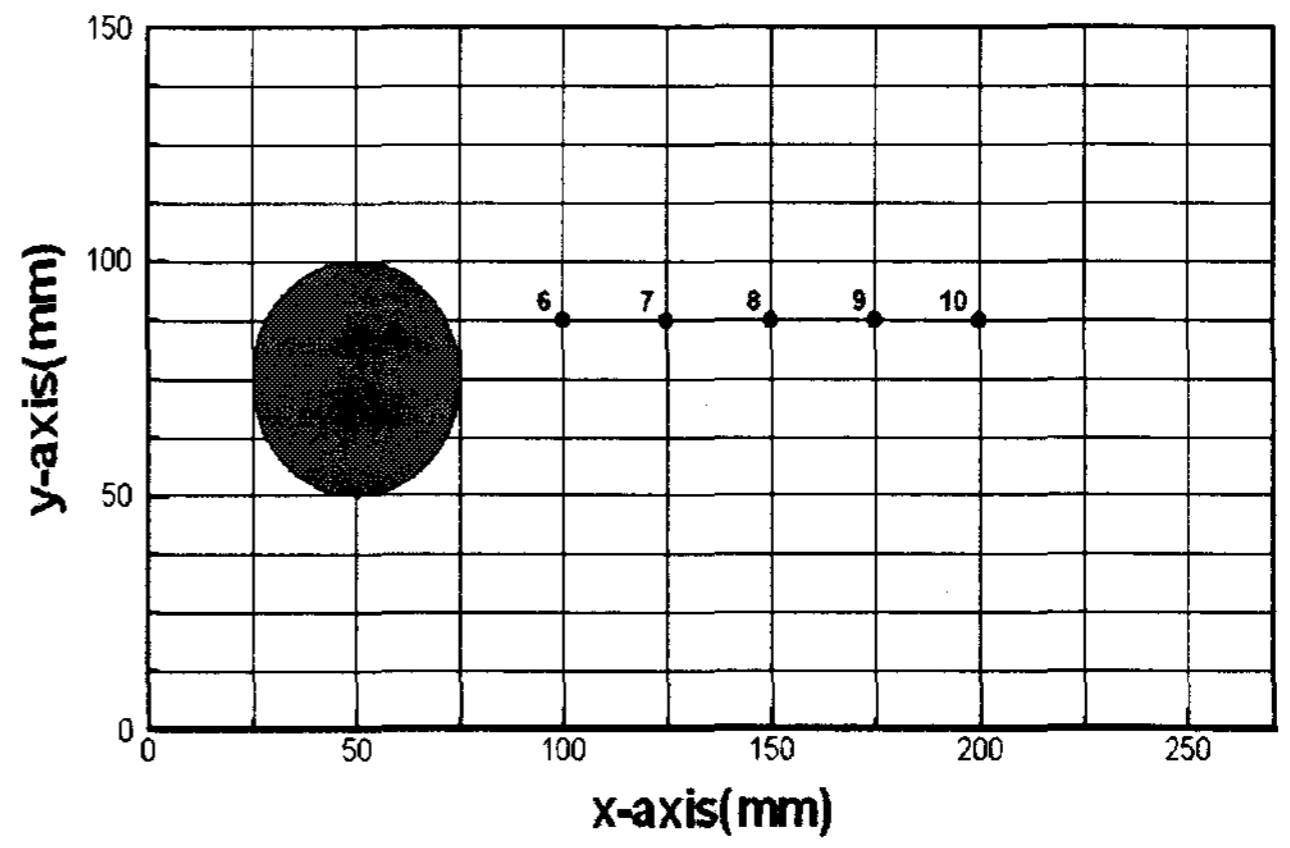


Fig. 11. Pick-up point for frequency analysis (point:6~10)

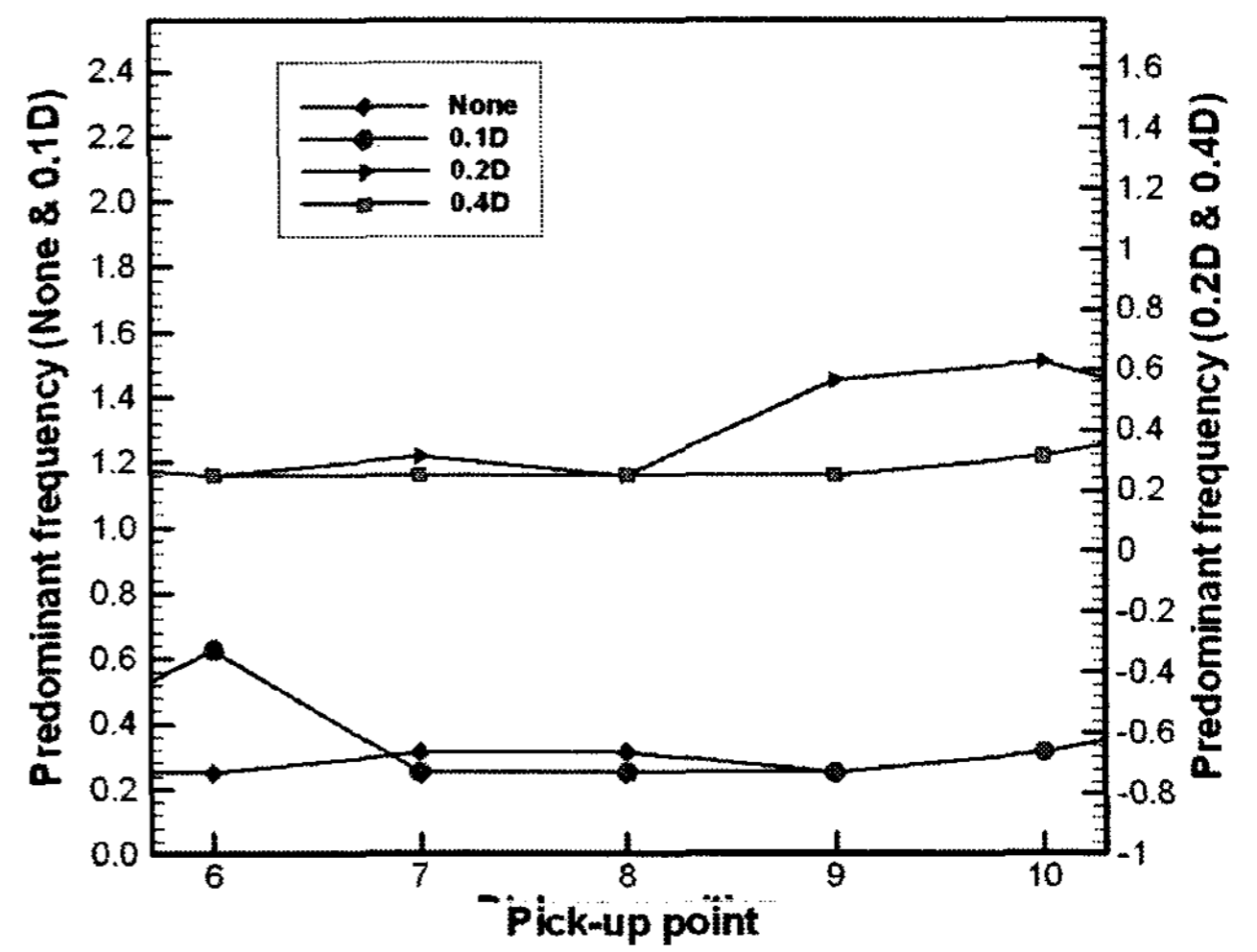


Fig. 12. Predominant frequency at  $Re=4.9 \times 10^3$

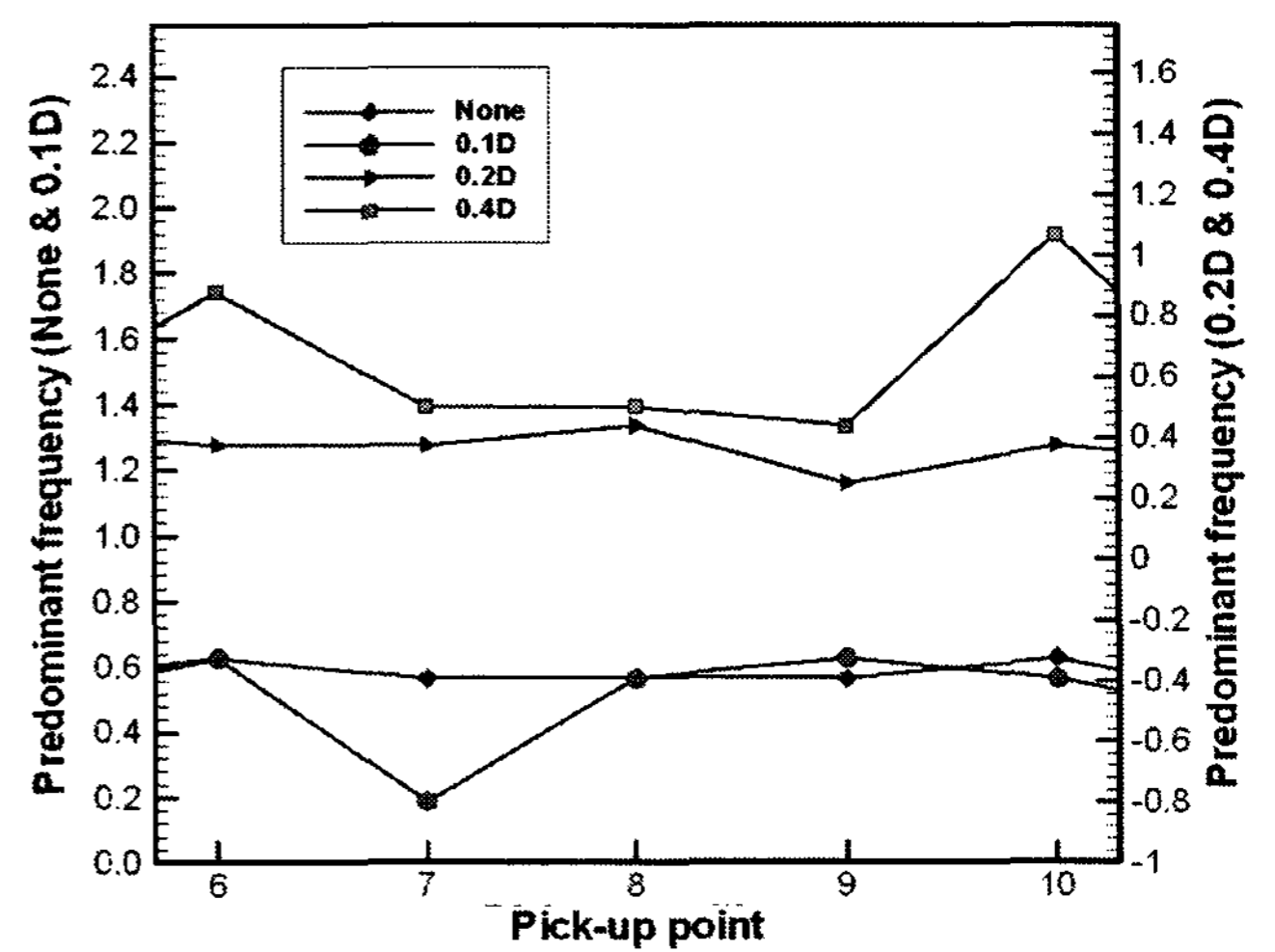


Fig. 13. Predominant frequency at  $Re=9.9 \times 10^3$

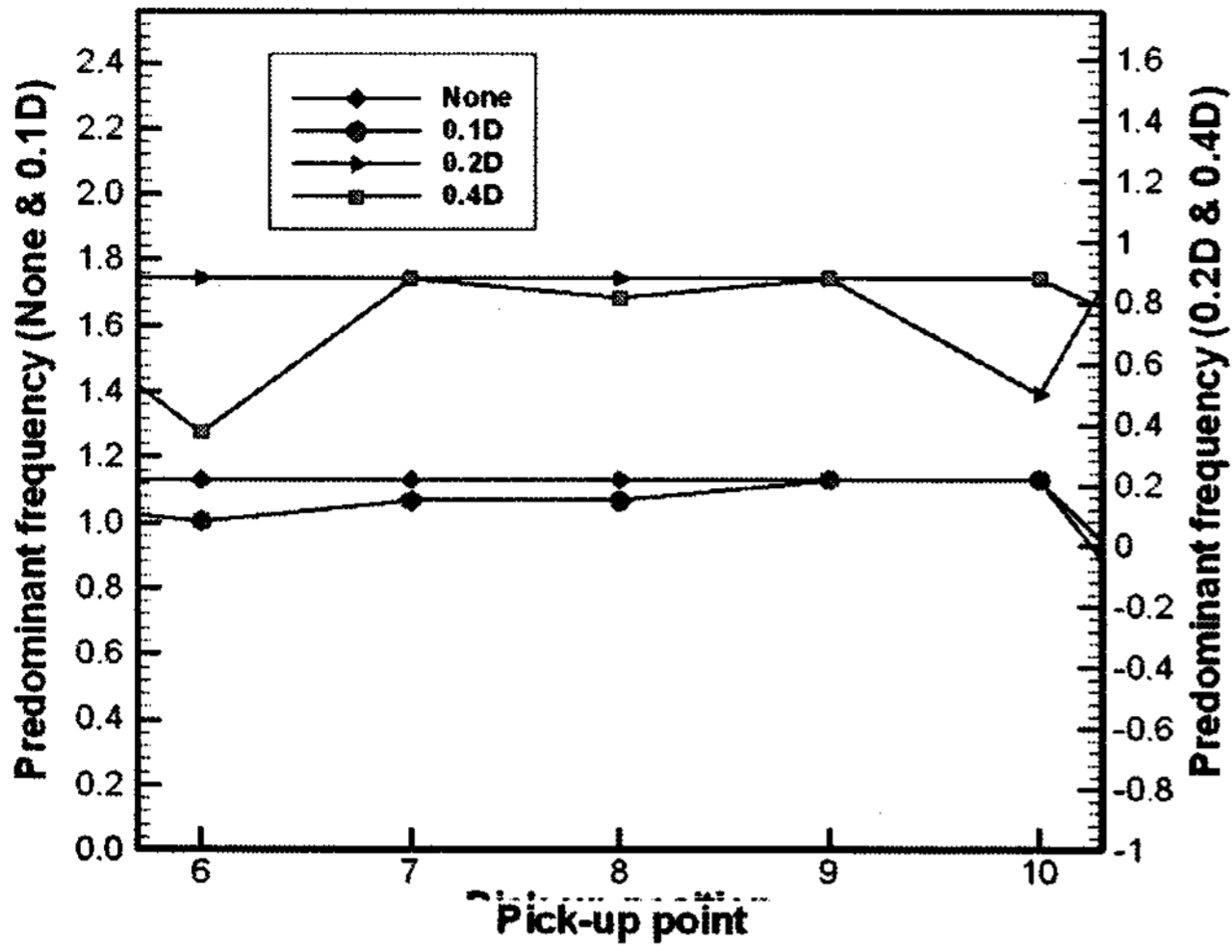


Fig. 14. Predominant frequency at  $Re=1.9 \times 10^4$

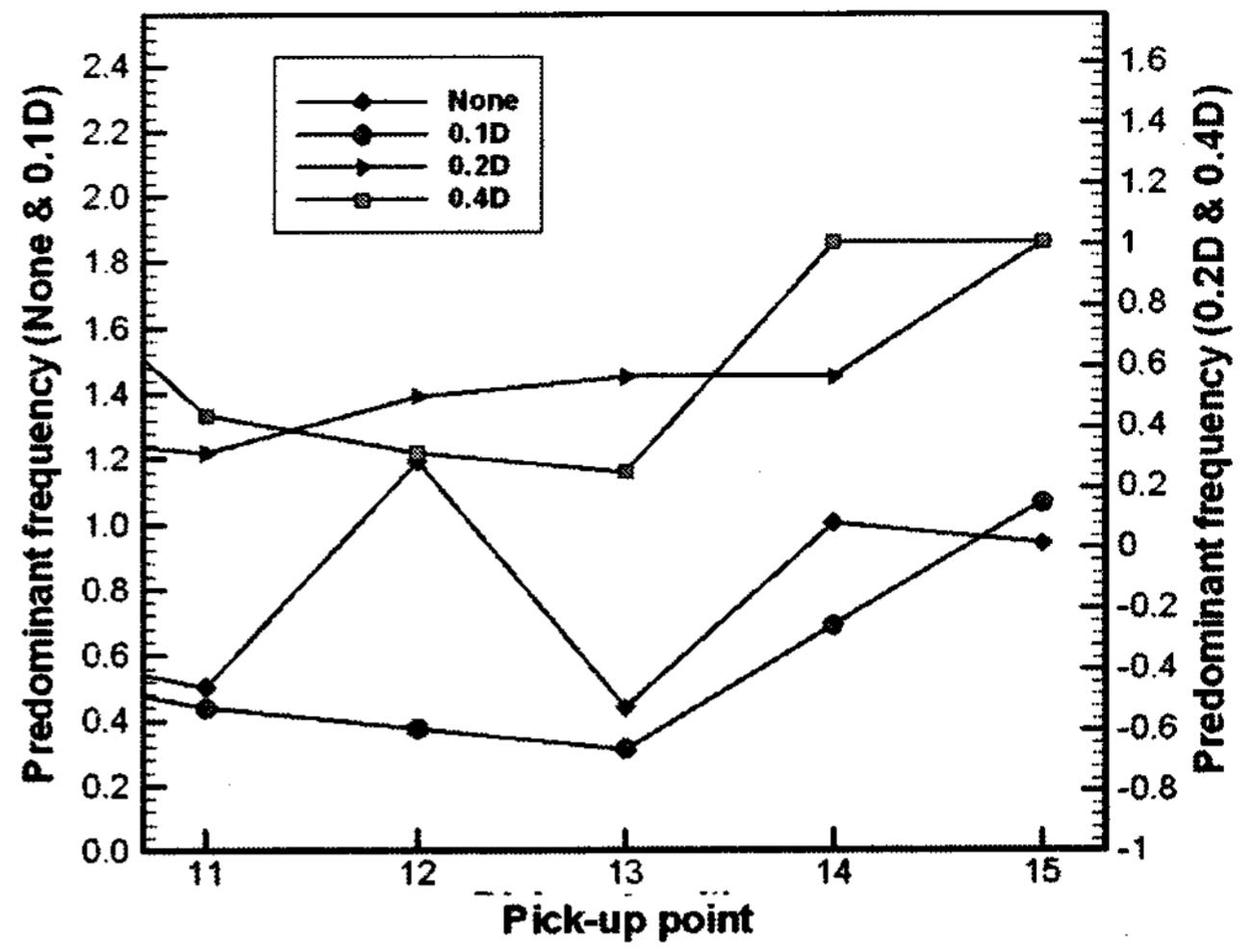


Fig. 17. Predominant frequency at  $Re=9.9 \times 10^3$

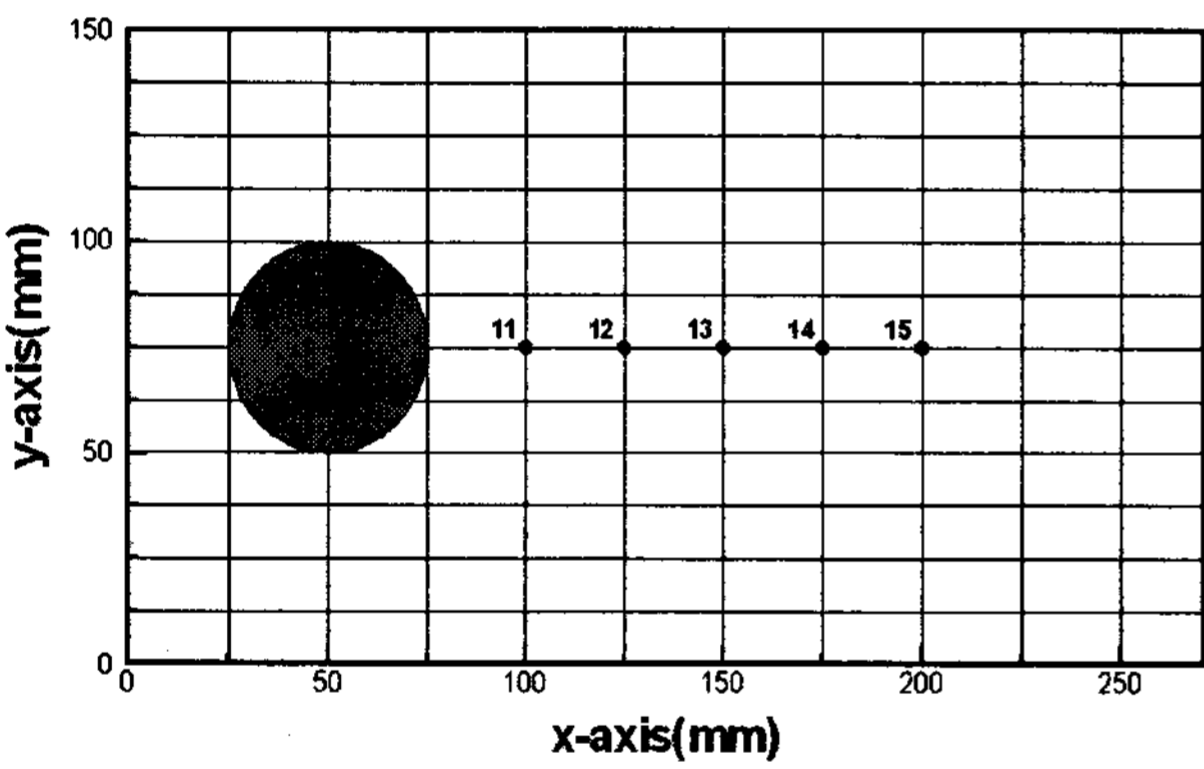


Fig. 15. Pick-up point for frequency analysis (point:11~15)

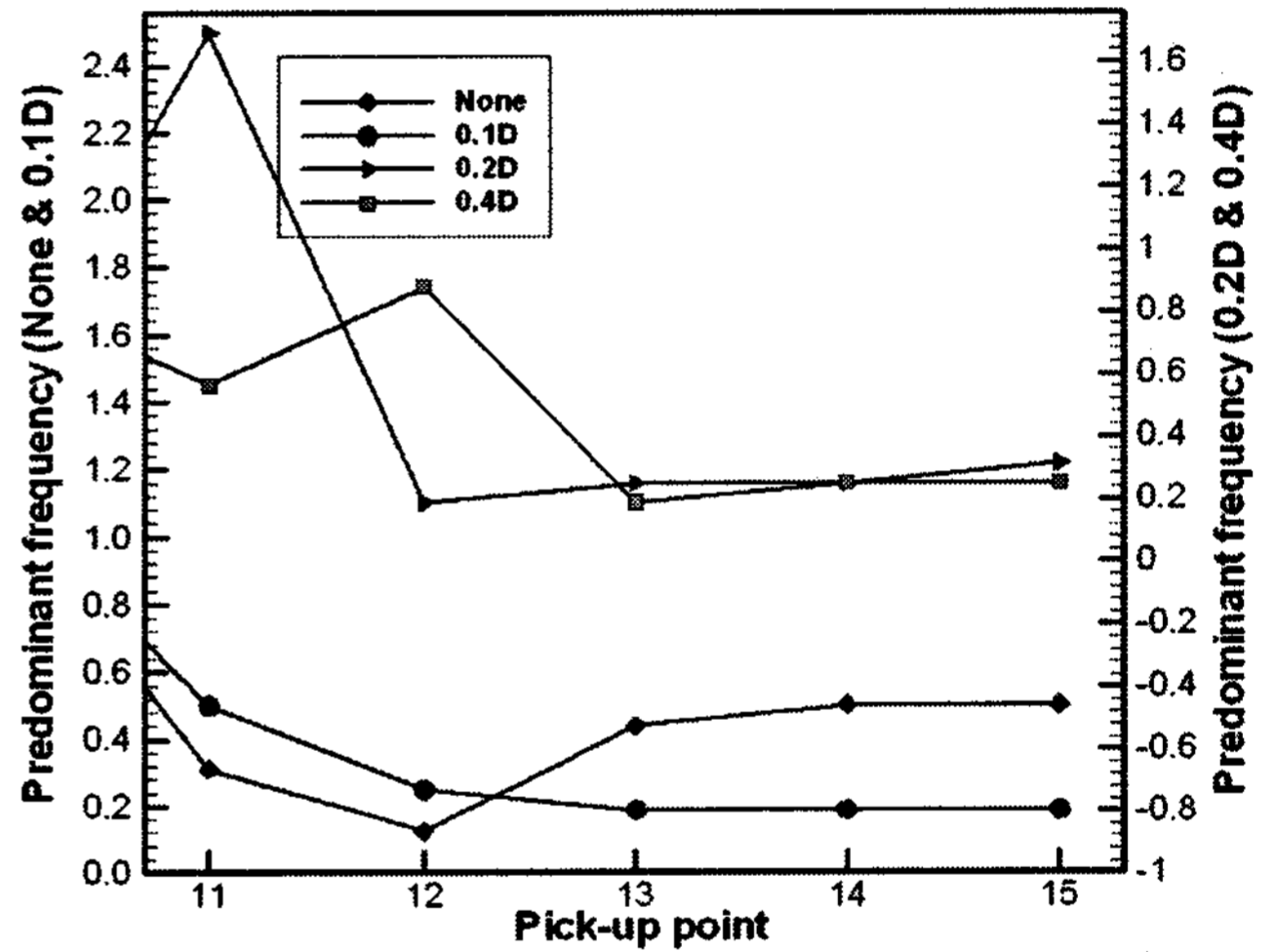


Fig. 18. Predominant frequency at  $Re=1.9 \times 10^4$

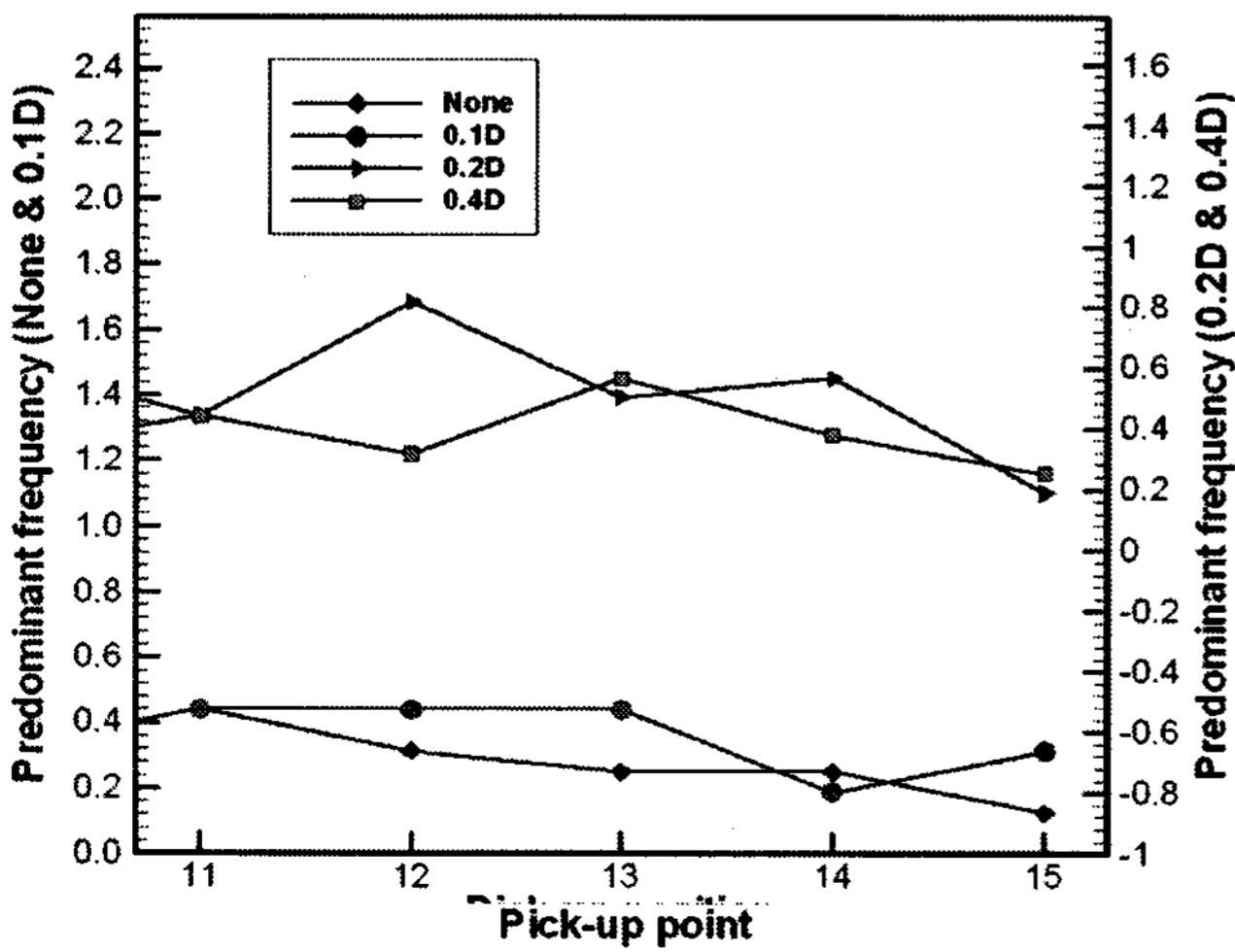


Fig. 16. Predominant frequency at  $Re=4.9 \times 10^3$

#### 4. 결론

유동 가시화 기법을 이용해 원관 후류의 유동장을 가시화하고, 제어봉의 유무에 따른 2차원 유동 패턴을 PIV기법을 적용하여 해석하였으며, 레이놀즈수를  $Re=4.9 \times 10^3$ ,  $Re=9.9 \times 10^3$ ,  $Re=1.9 \times 10^4$ 로 변화시키면서 원관 후류에서 발생하는 와류홀림의 주기적 특성을 파악하기 위해 수평방향 속도성분에 대한 스펙트럼 해석을 수행하였다. 이러한 실험 결과를 토대로 다음과 같은 결론을 얻었다.

원관의 기하학적 중심선을 기준으로 상부영역( $Y=150\text{mm}$ ), 중간영역( $Y=100\text{mm}$ ) 및 중심영역( $Y=50\text{mm}$ )으로 구분하고 각각 5개소의 검출점을 설정하여 주파수분석을 실시한 결과, 상부영역에서 박리된 전단층 주위의 와류유출 주파수가 가장 낮게 나타났다. 그리고 레이놀즈수의 증가에 따른 탁월주파수의 변화는 산술 증가하는 경향을 보였으며, 레이놀즈수 증가에 따른 원관 후류의 유동제어 특성은  $Re=10^4$  전후에서 크게 달라

지며 제어봉을 갖는 원관의 경우에도 같은 경향을 보였다.

실험에서  $Re=9.9 \times 10^3$ 을 경계로  $X/D=2.0$  지점의 와류 유출 주파수의 크기가 이원화되는 경향을 보였다. 또한,  $Re \approx 10^4$  부근에서 와류 유출주파수가 검출점에 따라 변동이 큰 결과를 얻었다. 이것은 원관의 항력계수가 크게 달라지는 임계레이놀즈수 때문으로 추정되며, 차후 임계레이놀즈수에 관한 엄밀한 검증이 필요할 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부와 한국산업기술재단의 지역혁신 인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

## 참 고 문 헌

- [1] Karman, Th., "Über den Mechanismus des Widerstandes den ein bewegter Körper in einer Flüssigkeit erfährt," Nachr. konigl. Gesellschaft, 1912
- [2] Strykowski, P. J. and Sreenivassn, K. R., "On the Formation and Suppression of Vortex Shedding at Low Reynolds numbers," Journal of Fluid Mechanics, Vol.218, 1990, pp.71-107
- [3] Sakamoto, H., Tan, K. and Haniu, H., "An Optimum Suppression of Fluid Forces by Controlling a Shear layer Separated From a Square Prism," J. Fluids Eng., Vol.113, 1991, pp.183-189
- [4] Sakamoto, H. et al., "Control of fluid forces acting on a circular cylinder and its effectiveness", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol.57, 1991, pp.882-890
- [5] Sakamoto, H. and Haniu, H., "Optimum Suppression of Fluid Forces acting on a circular cylinder," Journal of Fluids Engineering, Vol.113, 1991, pp.183-189
- [6] Igarashi & Tsutsui, "Flow Control around a Circular Cylinder by a New Method", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol.55, No.511, 1989, pp.701-714
- [7] Igarashi & Tsutsui, "Flow Control around a Circular Cylinder by a New Method", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol.57, No.533, 1991, pp. 8-13
- [8] 김문상, "점성 유동장 해석을 위한 Navier-Stokes Solver의 개발과 응용" 한국 항공대학교 항공산업기술 연구소 연구지 Vol.9, 1999, pp. 43-55
- [9] 명현국, "원형 실린더 주위의 비정상 이차원 층류유동 수치해석", 한국전산유체공학회지 제9권 제4호, 2004, pp. 41-47
- [10] 강상모, "원형실린더를 지나는 균일전단 유동에 관한 수치연구", 대한기계학회논문집 제29권 제1호, 2005, pp. 139-150