

공학석사 학위논문

선박용 HVAC 시스템의 팬코일냉각관
주위의 유동특성에 관한연구

A Study on Flow Characteristics around Cooling
Tubes of Fan Coil Unit for Marine HVAC System

지도교수 : 이 영 호

2003 년 2 월
한국해양대학교 해사산업대학원
기계시스템공학과

배 봉 갑

목 차

Abstract	iii
사용기호	v
제1장 서론	1
1.1 연구배경	1
1.2 관련연구	4
제2장 실험장치 및 실험방법	7
2.1 실험장치	7
2.2 PIV 영상처리	11
2.3 원주열후류의 PIV계측	15
2.4 유동가시화	18

제3장 실험결과 및 고찰	21
3.1 피치비에 따른 원주열의 후류특성	21
3.2 팬코일주위의 유동특성	32
3.2.1 속도분포	32
3.2.2 내부유동특성	45
3.2.3 열전달 특성	57
제4장 결론	60
참고문헌	62

A study on Flow Characteristics around
Cooling Tubes of Fan Coil Unit for
Marine HVAC System

Bong-Gab Bae

*Department of Mechanical System Engineering
Graduate School of Maritime Industrial
Studies, Korea Maritime University*

ABSTRACT

This experimental study investigates the wake flow behind a pair of cylinders displaced normal to a free stream and the flow characteristics around staggered cooling tube arrays of fan coil unit used in merchant vessel. This study is also aimed to analyze the transition mechanism of the large vortex generating process in the wake having unique vortex shedding pattern associated with the gap

difference between the cylinders. The detailed visualization is carried out using the PIV measurement. The transition mechanism of the large generating vortex is clarified by showing the streak lines, the vorticity and the statistical fluctuating velocity distributions.

As for the results of this experimental study, The flow characteristics around cooling tube of fan coil unit are divided into two distinctly areas between the wake behind cylinder. Flow velocity with pressure drop effects is shown according to various Reynolds numbers. Futhermore, the wake of cylinder shows a vortex region with the periodic flow separation due to the wake unsteady phenomena. With increasing air velocity into fan coil unit, heat transfer is also enhanced at evaporator from the temperature measurement.

NOMENCLATURE

C_{fg}	:	cross correlation coefficient
CR	:	compression ratio
f_i, g_i	:	gray level value of pixel in correlation area
g	:	gravitational acceleration [m/sec ²]
i, j	:	coordinate of grid for interpolation
M, N	:	radius of searching area [mm]
p, q	:	gray level of image
pps	:	number of pictures per second
Q	:	flow rate [m ³ /sec]
Re	:	Reynolds number
s, t	:	pixel coordinate in searching area
U_0	:	unit velocity [m/sec]
u	:	dimensionless x-axis direction velocity
V	:	mean velocity [m/sec]
v	:	dimensionless y-axis direction velocity
x	:	distance in horizontal direction [mm]
(x, y)	:	pixel coordinate of image
x', y'	:	x, y after calibrating rotation
y	:	distance in vertical direction [mm]

GREEK SYMBOL

Δt	:	time interval between image frame
γ	:	specific gravity [kg _f .s/m ²]
$v(s,t)$:	pixel coordinate in searching area
θ	:	rotation angle of image
ν	:	kinematic viscosity [m ² /sec]
λ	:	wave length of laser
ρ	:	density [g/m ³]

SUBSCRIPT

b	:	bulk temperature
i	:	inlet
m	:	mean
o	:	outlet
opt	:	optimal
∞	:	ambient fluid property
-	:	mean value

1. 서 론

1.1 연구배경

90년대 후반까지의 선박의 건조실적을 보면 특별한 일부 선박을 제외한 공조시스템은 Fig. 1.1의 중앙집중공조방식(central air handing unit)을 채택하여 왔다. 그러나 선박의 특성상 항해에 따른 지역별 기후의 변화에 민감하고, 선체가 강판으로 되어있어 주간과 야간의 온도가 크며 대기가 습한 환경으로 거주구의 각 데크(deck) 모두 쾌적한 환경을 만들기는 어려운 실정이다. 또한 승선인원이 감소하고 거주구의 구역별 사용빈도가 달라 최근에는 개별 분산공조시스템의 장점이 부각되고 있다.

Fig. 1.2의 팬코일유닛(fan coil unit)는 공냉식 열교환기(evaporator)와 송풍기를 케이싱 안에 조합 시켜 공냉식 열교환기 내부에 냉수 또는 온수를 통과시키면서 송풍기로 열교환기를 향하여 바람을 불어냄으로서 그 통과되는 공기를 차갑게도 하고 따뜻하게도 만들어 실내환경을 쾌적하게 만드는 장치로서 분산공조시스템의 핵심장치이다. 이러한 팬코일 유닛은 육상의 경우 대형빌딩의 공조시스템에서 다음과 같은 장점으로 천장속(plenum space)에 매입설치 또는 노출 설치하여 사용되고 있다.

1. 천장속의 여유공간에 설치되므로 별도의 기계실이 필요 없다.
2. 각 실 또는 각 존별로 유닛을 설치하여, 건물의 용도별 사용

장소를 분리 가능하며 에너지 절감 효과가 있다.

3. 기계실의 AHU(air handing unit)에서 각 실로 연결되는 덕트 공간이 필요 없다.

선박에 사용되는 팬코일유니트의 경우 관리상의 문제 및 안전도, 그리고 협소한 공간에 설치되어야 하는 점과 감항성 등이 추가로 고려되어야 하며 선급의 승인을 얻어야한다. 지금까지 국내 대형 신조선의경우는 기술적 문제점과 한정된 소요량으로 인한 시장성을 감안 거의 전량 수입에 의존하고 있었으나 날로 늘어나는 추세의 소요량에 비추어 볼 때 이에 대한 기술개발 및 다양한 규격의 국산화가 사실상 요구되는 실정이다.

이러한 배경으로부터 개별분산 공조시스템 중에서 현재 선박용으로 널리 탑재되고 있는 이등변관군 구조의 팬코일유니트 실물장비를 연구모델로 선정하였다. 연구방법으로서 피치비에 따른 원주열의 후류특성을 PIV로 측정하여 유동가시화 결과에 대한 속도분포와 내부 유동특성을 고찰하고 부가적으로 실물의 증발기에서 공기유입속도와 칠러냉각수 유입온도가 미치는 상관관계를 실험하여 열 전달 특성을 연구하였다.



Fig. 1.1 Central air handing unit

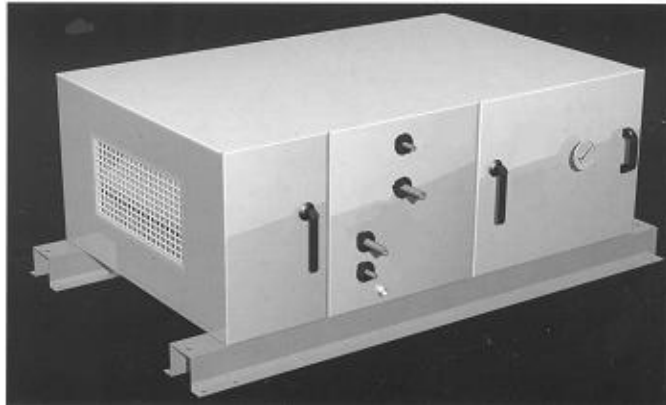


Fig. 1.2 Fan coil unit

1.2 관련연구

팬코일유니트에서 가장 중요한 구성품은 열교환기이며 일반적으로 엇갈린 관군의 구조로 되어있다. 그러나 엇갈린 관군 주위의 유동장은 기하학적형상에 따른 복잡한 유동의 특징, 즉, 높은 난류강도, 역압력구배, 박리와 재부착점, 유동형태의 주기성 또한 곡률 효과에 따른 추가적인 변형률 등으로 인하여 실험이나 수치해석을 수행하는데 많은 문제점을 가지고 있다.

이와 관련된 연구^{1~7)}에서 보면 팬코일 유니트의 열교환기의 경우 완전 발달된 이차원적 유동구조를 가진 종방향 및 축방향유동에 국한된 결과와 AHU 및 온열환경의 분석에 관한 연구가 주류를 이루고 있다. 그러나 공조기 냉각관군의 경우 내부에서 형성되는 유동에 대한 올바른 고찰을 하기 위해서는 실제상황에 근접한 모델이 필요하다. Scholten 등⁸⁾은 3열의 엇갈린 관군에 대하여 두종류의 레이놀즈수에 대해 속도의 변동성분을 측정하고 와류의 형성과 와흐림 현상이 국부적으로 발생하는 결과를 제시하였다. 그리고 각 열의 후류의 속도 변동은 3열까지 점차적으로 증가하여 발생하고 이것은 전열의 영향으로 분석하였다.

Tham 등⁹⁾은 실내의 공간을 두 구역으로 나누고 이를 다시 각 실별로 실내공기질(indoor air quality, IAQ)을 조사하고 계측영역에 대한 오염물질의 환기정도를 체계적으로 분석하였다. 그 결과 내부의 배치와 구획의 설정에 따른 IAQ의 저하가 나타남을 보고하였고,

Niu 등¹⁰⁾은 칠러시스템(chilled system)을 사용한 공조시스템이 에너지의 사용량을 연간 44% 감소시킬 수 있음을 보고하였다.

Williamson¹¹⁾은 균일한 흐름 속의 놓여있는 원형실린더 후류에 대한 기존연구를 체계적으로 정리하여 천이구역을 후류천이 영역($Re=190\sim 10^3$: Karman와류의 불안정성으로 2차 와류가 형성), 전단층 천이 영역($Re=10^3\sim 2\times 10^5$: 박리점 근처에서 전단층의 불안정성이 형성) 그리고 2×10^5 이상의 영역을 경계층천이구역으로 분류하였다.

Obara¹²⁾는 인접한 두 개의 원주에서 피치비(H/d)에 따른 후류 유동특성을 계측하여 와도분포 및 유맥선을 분석한 결과 피치비 2.0이상에서는 인접원주간의 상호 간섭이 없는 결과를 얻었다. 그러나 인접원주의 하류에 형성된 와류가 매우 근접하여 있어 레이놀즈수의 변화에 따라 상호간섭이 나타날 수 있는 점이 지적된다.

West 등¹³⁾은 Reynolds수 $10^4\sim 10^5$ 사이에서 차폐비와 형상이 실린더 주위 유동에 미치는 영향에 대해 연구하고 차폐비가 6% 미만일 때는 마찰계수, 압력분포, Strouhal수 등에 거의 영향이 없음을 밝혔다. Gerrard¹⁴⁾는 원주 후방에 형성되는 와류의 entrainment 현상과 역류가 와류쉐딩 주파수에 미치는 영향에 대해 논의하였다. Kim 등¹⁵⁾은 역류의 측정과 원주의 근접후류의 난류 구조에 미치는 자유흐름 난류의 영향을 정성적 및 정량적으로 조사하기 위하여 10mm 원주 하류에 형성되는 속도변동 상관의 변화 등을 SFP(split film

probe)센서를 이용하여 측정 분석하였다. 그리고 평균속도가 0인 지점이 후류 중심선에서 $x/d=1.65$ 근방임을 밝히고 있다.

Lee 등¹⁶⁾은 레이놀즈수와 난류강도의 변화에 따라 원주실린더 주위의 흐름특성과 박리점이후의 유동구조에 대해 고찰하였다. 박리점은 보텍스쉐딩으로 인해 발생하는 경계층내 요동성분 위상차를 이용하는 방법을 택하였고 난류강도의 증가에 따라 박리점이후 재순환류들이 상류로 이동함을 보였다. Cho 등¹⁷⁾은 일렬관군에 대해 유동가시화와 관의 표면압력측정시험 및 관 주위의 속도분포 등을 피치비에 따라 고찰하였다. 그리고 피치비가 감소함에 따라 평균속도분포비 (U/U_∞)가 증가하는 결과를 얻었다.

개별분산공조^{18~20)}에 관한 연구는 1990년대 이후 활발히 진행되고 있다. 대형빌딩의 경우 여러 가지 방식의 시스템의 상용화되어 사용되고 있으나 신조선박의 경우는 고가의 선박에서 브릿지 등에 복사열이 많은 특정구역이나 공공장소 등에서만 일부 적용되고있는 실정이며 여객선이나 특수목적선의 경우는 현재 상용화 단계이다.

제2장 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

실험에 사용한 소형회류수조의 전체길이는 3,000 *mm*이고 시험부의 유입단면은 가로(W), 세로(h) 300 *mm*이다. 0.3~0.5m/sec의 자유류 속도를 가지며 난류강도는 1.5% 이내로 유지되었다.

Fig. 2.1에서 실험장치의 전체 구성을 나타내고 있으며 Fig. 2.2는 실험장치를 개략적으로 보이고 있다. 가시화 장비는 크게 광원과 영상처리를 위한 이미지보오드 그리고 영상의 기록장치로 구분할 수 있다. 특히 2차원 PIV에 의한 계측에 있어서 광원은 계측 영역을 한정시키므로 매우 중요하다. 가시화를 위한 광원은 PIV 계측에 있어서 많은 영향을 미치는 초기 영상을 얻는데 중요한 요소이다. 레이저는 유도방출에 의한 빛의 증폭기이며 사인파로서 간섭성이 극히 양호하면서도 직진성이 좋은 특성을 갖고있어 주로 이용되고 있다. 실험에 사용된 레이저(COHERANT사, Argon-Ion laser)는 플라즈마 튜브에 채워진 아르곤 이온에 의해 유도 방출된 빛이 연속적으로 출력되며 간섭성이 양호한 특징을 갖는 수냉식 레이저이다. 두 개의 파장(0.4579 μm (청), 0.514 μm (녹))을 멀티렌즈로서 합성하여 출력을 5W 전후가 되게 하여 사용하였다. 레이저광을 유동장의 전 영역에 조사하기 위해서는 2차원 시트라이트(sheet light)를 만들어야 한다.

레이저광은 원형의 직진광을 반사거울을 이용하여 유동장의 계측단면과 수직이 되게 하고 크기 5 mm의 원통형렌즈를 통과시켜 퍼짐각 약 60도로서 유동장의 상부에 두께 약 2 mm, 폭 180 mm의 시트라이트를 계측영역에 조사하였다.

가시화 실험의 결과가 기록된 영상은 계조치와 휘도 등이 아날로그 형태로 저장되어 있으므로 컴퓨터에서 처리할 수 있는 디지털 신호로 바꾸어주는 아날로그-디지털(A/D) 변환이 필요하다. PC용 이미지보오드(프레임그래버)는 Data Translation사의 DT3155이며 흑백 영상에 대해 640×480 픽셀의 공간 해상도를 갖는다. 즉 유동장의 정보는 화소의 위치좌표와 그 계조치를 갖는 디지털 영상으로 저장된다. 영상을 입력할 때에 60 Hz의 수직동기신호 보정필터(DT3155제공 소프트웨어)를 사용하여 화질을 개선하였다.

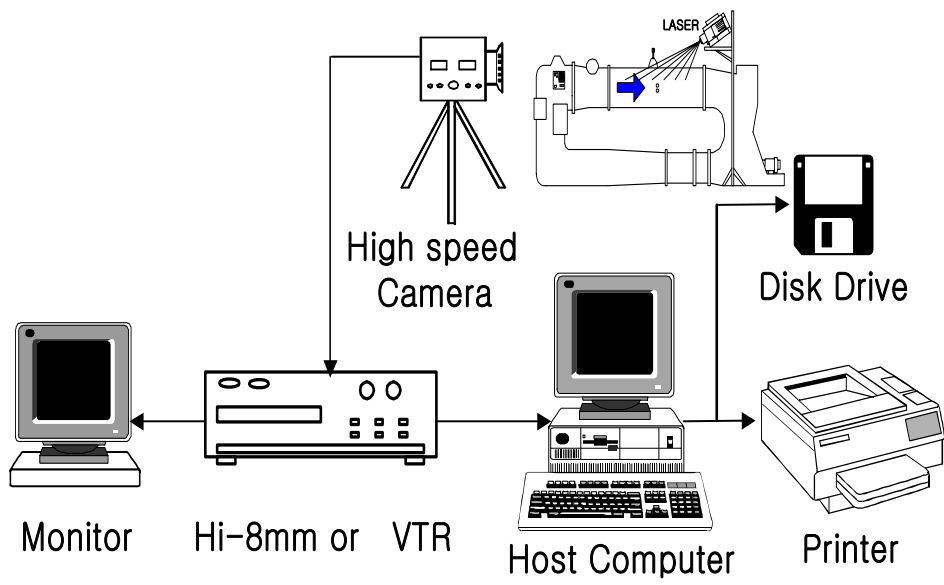
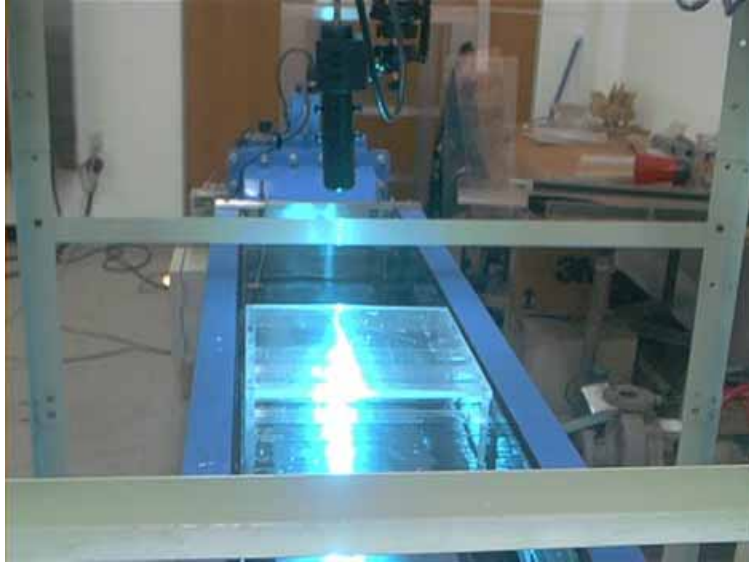


Fig. 2.1 Schematic arrangement of PIV system



(a)



(b)

Fig. 2.2 Photos of the experimental system

2.2 PIV 영상처리

실험은 대상유동장을 가시화 한후 얻어진 영상을 이용하여 PIV기법으로 속도를 계측하였다. PIV에서는 유동장에 분포된 입자의 미소시간 간격의 영상을 컴퓨터로 분석하여 속도벡터에 대한 데이터를 얻는 방법이므로 입자의 추종특성은 결과의 신뢰성에 매우 큰 영향을 미친다.

따라서 사용되는 입자의 선별기준은 입자에 미치는 다양한 외부힘 성분이 무시될 수 있는 미소입자를 경험적으로 선택하거나 될 수 있으면 유체 측과의 밀도차가 작은 것을 사용하여 부력 또는 침강력의 영향이 최소화 될 수 있도록 하여야 한다.

현재 시판되는 것은 주로 Nylon 12, 또는 PVC 등이며 비중은 물과 비슷하게 대략 1.02 정도의 값을 갖는다. 추적입자의 지름은 대상 유체에 대한 추종성의 측면에서는 작은 쪽이 좋으나 관찰의 용이성과 영상처리의 정도(精度)를 고려하여 선택하였다.

실험에서 사용한 고체 추적입자는 지름 100 μm 정도의 PVC(poly vinyl chloride, $\text{CH}_2\text{CH}(\text{Cl})$) 백색 구형입자를 사용하였다. 유동장에 주입되는 입자는 실험조건에 따라 여러 가지로 제약을 받기 때문에 항상 입자의 추종성이 만족되는 경우는 드물다. 실험에서는 입자의 선별을 위해서 용기 속에 입자를 분포시키고 수면에 있는 미소입자와 침강된 입자를 제외하고 공간에 일정시간 이상 부유하는 입자만

을 선별하여 사용하였다.

PIV에 의한 속도계측에서는 이 유동장에 분포된 입자의 미소시간 간격의 영상을 컴퓨터로 분석하는 기법이므로 입자의 추종성이 결과에 미치는 영향은 매우 크다. 이를 예비적으로 검토하기 위하여 Nylon 12, PVC입자 그리고 알루미늄 입자의 세 가지 종류에 대하여 같은 조건으로 실험을 행한 결과 얻어진 속도벡터의 분포와 최대속도 및 분포특성은 거의 일치하였다. 그러나 작동유체의 온도가 높을 경우나 레이놀즈수가 낮은 경우에는 입자의 비중과 형상에 따른 추정성의 검토가 필요하다.

Fig. 2.3에서는 기수와 우수필드가 겹쳐있는 영상과 선택된 직사각형 영역을 10배 확대한 것을 보여주고 있다. 입자의 이동거리를 알기 위해서는 입자의 모서리부분에 대해 직사각형영역을 설정하고 대각 길이로서 측정하여 최대이동거리를 파악하였다.

고속카메라(Photron사, 640x240픽셀, 흑백, 240 pps)의 경우, 각 레이놀즈수마다의 프레임 속도는 각각 120 pps, 240 pps로 선정하였다. 유동장 촬영시 고속카메라의 자체 메모리(160 MB)에 임시 저장되어 있는 연속 영상은 매초 30장의 비율로 다시 재생하여 NTSC방식의 Hi-8 mm 카메라에 기록하였다.

Fig. 2.4는 PIV계측의 처리 순서도이다. 가시화한 영상을 고속카메라로 촬영하여 Hi-8mm 카메라에 기록된 영상을 주처리 컴퓨터에 내장된 이미지보드로서 디지털 영상으로 바꾸고, 전처리를 거쳐 동일

입자 추적을 하게 된다. 이 연구에서 채택한 방식은 계조치 상호상관
법이며 얻어진 속도벡터는 PIV 전용소프트웨어(CACTUS 2000)로
후처리를 하였다.

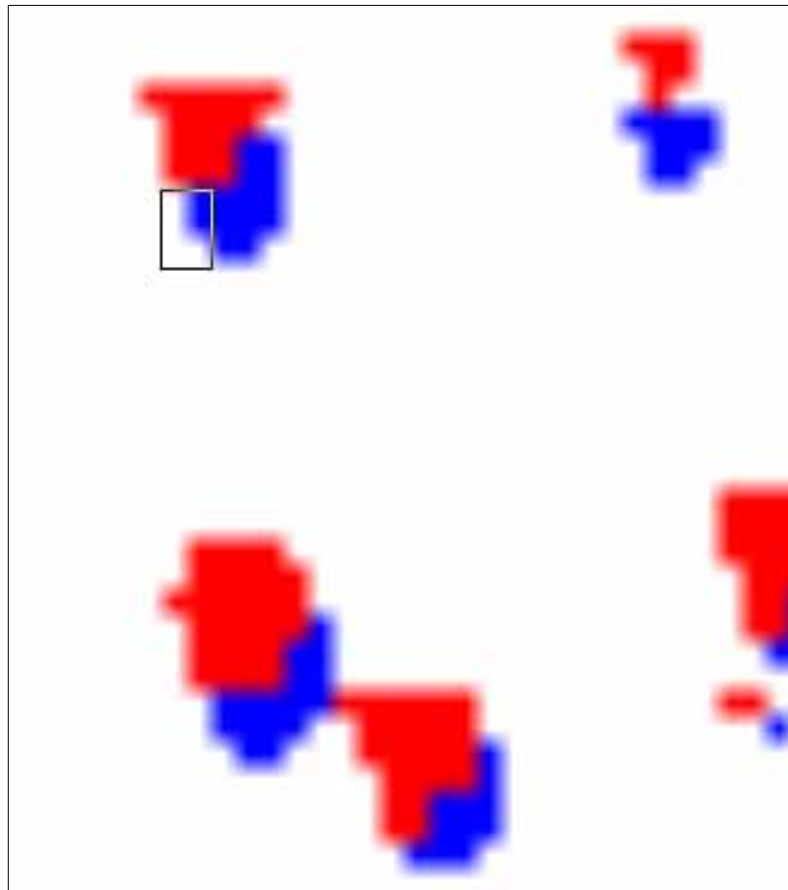


Fig. 2.3 Measured moving distance of particle

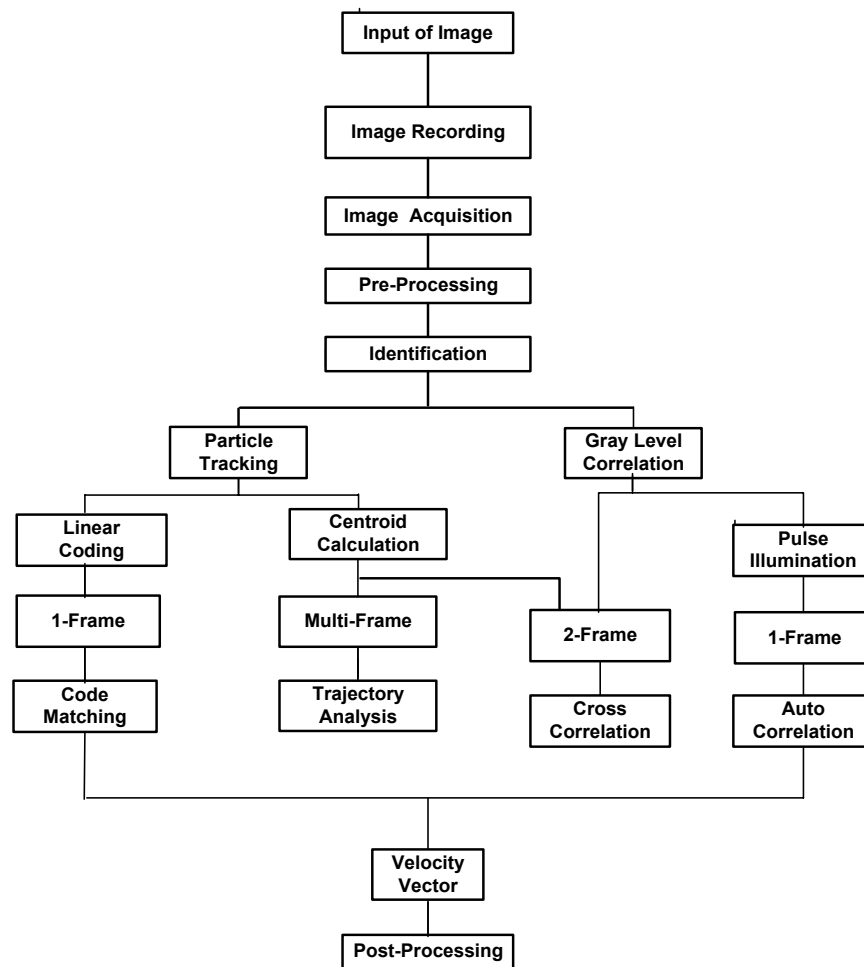


Fig. 2.4 Flow chart of PIV processing

2.3 원주열 후류의 PIV계측

원형실린더는 표면이 매끄러운 아크릴재질이며 직경(D) 10.5mm, 축 방향의 길이(l) 300mm이다. 원주열 실험의 경우 관련문헌과 비교 검토하기 위해서는 2차원성이 유지되어야 한다. 따라서 벽면의 영향을 고려하여 영향을 받지 않도록 실린더의 형상비(aspect ratio, l/d)는 28.6, 차폐비(blockage ratio, D/W)는 3.5%로 하였다.

Fig. 2.5는 실험에 적용된 원주열의 설치 및 좌표축을 나타내고 있다. 평행하게 설치되어있는 실린더에서 y 축 방향의 중앙부를 원점으로 하여 주유동의 방향을 x , 실린더 길이방향을 z , 주유동의 수직 방향이 y 축 이다. 계측 영역은 원점을 기준 하여 y 축 방향 $\pm 2D$, x 축 방향으로 $8D$ 이다. Table 2.5에 가시화와 PIV계측 그리고 계측에 관련된 실험조건을 정리하였다. 피치비는 선박용 개별공조장치에 사용되는 팬코일 유니트의 관군 배치와와 관련문헌^{4,7)}을 참고하여 2.0, 2.2 및 2.4로 하였다. 시험에서 채택한 레이놀즈수는 원주직경을 기준으로 $Re=3 \times 10^3$, $Re=5 \times 10^3$ 이다. 상관영역은 50×40 픽셀이며 탐색반경은 8픽셀이다. 에러처리는 모든 격자에 대하여 발산값을 계산하여 허용치를 초과했을 경우에 오류벡터로 판별하였다. Fig. 2.5에서 오류벡터의 비율은 최종적으로 선별된 개수에 대한 백분율이다.

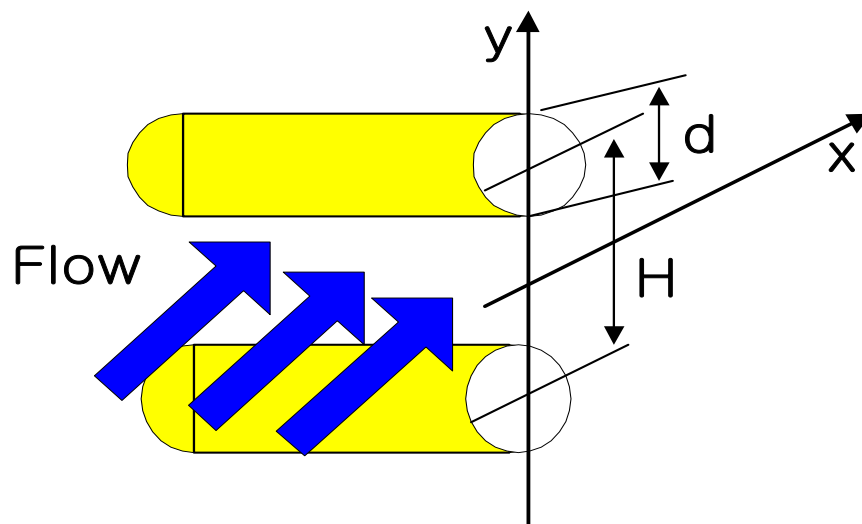


Fig. 2.5 Coordinate system

Table 2.5 Experimental Condition

	Item	Specification
Visualization Equipment	Image board	DT3155 (640 x 480 Pixel, B/W)
	Light source	5W Argon-Ion Laser, $\lambda=514\mu\text{m}$
	Sheet light	Cylindrical Lens & Fiber Line, about 1.5mm
Measuring condition	Gap ratio(H/d)	H/d=2.0, H/d=2.2, H/d=2.4
	Reynolds Number	3.0×10^3 . 5.0×10^3
	Particle	PVC(Specific Gravity:1.02, $90 \sim 150\mu\text{m}$)
	Resolution	1/400 sec.(High Speed Camera, Photron, B&W)
Image processing	Calculation Time	20 second/Frame(200MHz, PentiumII)
	Image Record	Hi-8mm, Sony, Model:Pro5000
	Data for Time-mean	100~300 Frame(Random Acquire)
	Identification	CACTUS'2000(grey-level cross correlation algorithm)
	Error Vector(%)	Under 0.5 %/Frame, Average : about 0.15%

2.4 유동가시화

튜브뱅크의 유동에서는 3열 및 4열을 지나면서 완전 발달한 유동을 갖게 된다. 따라서 이 연구에서는 엇갈린 튜브뱅크 내부열의 실제 형상과 같게 아크릴로 제작하고 3열과 4열을 중심으로 가시화 하였다.

Fig. 2.6은 실험에 적용된 유동장에 대한 개략적인 유동형태를 보이고 있다. 내부열의 유동은 원주간의 간섭에 의해 복잡하며 주기적인 반복유동특성도 나타나므로 주로 실험적 연구에 의존하고 있다. 실제 가시화 실험에서도 이와 같은 주기성이 나타났으며 개별원주의 후류특성은 단일원주의 후류 유동과도 밀접한 유사함을 보였다. 상류로부터 유입된 흐름은 전방에 있는 원주 후미의 박리에 따른 와류영역이 형성되는 형태를 나타내었으며 그 크기는 레이놀즈수에 따라 큰 변동은 나타나지 않았으나 주기성은 빨라지는 경향을 보였다. 이것은 후방에 있는 원주의 영향으로 판단되며 주기성은 원주 후류의 비정상 유동특성에 기인하는 것으로 추정된다.

Fig. 2.7은 유동가시화의 결과를 1/400초 동안 중첩하여 도시한 사진이다. 유동가시화의 결과는 고속카메라를 이용하여 기록하였으며 CACTUS 2000으로 PIV 계측을 수행하였다. 가시화 영상을 관찰하여 보면 기하학적인 수직선상에서 두 원주사이의 흐름이 비정상특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 레이놀즈수가 증가할수록 크게 나타났으며 이것은 레이놀즈수가 증가할수록 이 영역에

서 압력이 저하 및 유속상승이 커지므로 두 원주사이에 잡아 당기는 인력이 작용하기 때문으로 판단된다. 또한 전방의 원주로부터 박리된 작은 와열들이 이 영역에 합해져 매우 복잡한 비정상 흐름 특성을 보였다.

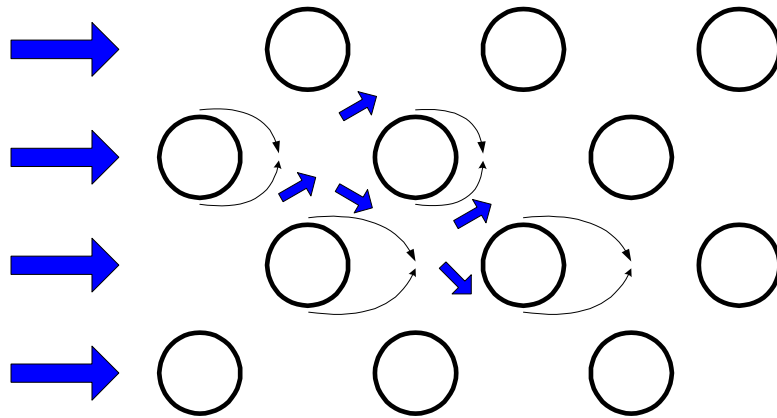


Fig. 2.6 Schematic diagram of the grooved channel



Fig. 2.7 Flow visualization

제3장 실험결과 및 고찰

3.1 피치비에 따른 원주열의 후류특성

Fig. 3.1은 $Re=5 \times 10^3$ 에서 피치비가 달라졌을 때의 속도분포를 보이고 있다. Fig. 3.1(b)는 $H/d=2.4$ 의 결과이다. 상부의 실린더 후류의 속도분포가 단일 실린더와 유사하게 나타내고 있으며 원주 후류 중심선에서 속도가 영이 되는 지점이 $x/d=1.6$ 근방에서 형성되고 있다. 또한 x 축 방향의 후류영역도 $x/d=8.0$ 이상까지 평활 되지 않고 길게 진행되고 있으며 y 축을 중심으로 거의 대칭적인 구조를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 Kim 등¹⁵⁾이 실험한 결과와 일치한다. Obara¹²⁾는 원주열 후류영역을 LDV로 측정하고 $H/d=2.0$ 이상에서 인접한 두 개의 원주의 하류에서 나타나는 와도의 분포가 대칭적으로 형성되고, $H/d=1.3$ 에서는 상호간의 간섭으로 하나의 장애물과 같은 유동특성이 나타남을 보고하고 있다.

Fig. 3.1(a)는 $H/d=2.0$ 의 결과이다. 전체적인 분포는 Fig. 3.1(b)와 유사하나 $y/d=0$ 의 선상에 나타난 속도분포는 오히려 증가하고 있다. 이것은 동일한 레이놀즈수에서는 관군 최소단면 측의 평균속도는 같으므로 피치비가 작을수록 상류 측의 자유흐름 평균속도도 작아지기 때문이다.

Fig. 3.2는 시간평균속도분포이다. 실험에 채택한 각 피치비에서

$y/d = -2.0 \sim 2.0$ 까지의 수평속도 속도성분을 $x/d=3.5, 5.5$ 및 8.0 에서 나타내었다.

피치비가 큰 $H/d=2.4$ 인 경우에는 평균속도의 분포가 y 축을 중심으로 유사하게 나타나고 있으며 쌍봉형태를 보이고 있다. 따라서 원주열을 이루는 2개의 실린더 모두 단일실린더와 같이 칼만볼텍스에 의한 와류유출이 존재하고 있다. 그러나 Fig. 3.2(a)의 경우 $x/d=3.5$ 에서만 쌍봉형태의 속도분포를 보이고 있다. 이것은 이 피치비에서도 불안정하지만 칼만볼텍스에 의한 와류유출이 있을 것으로 판단된다.

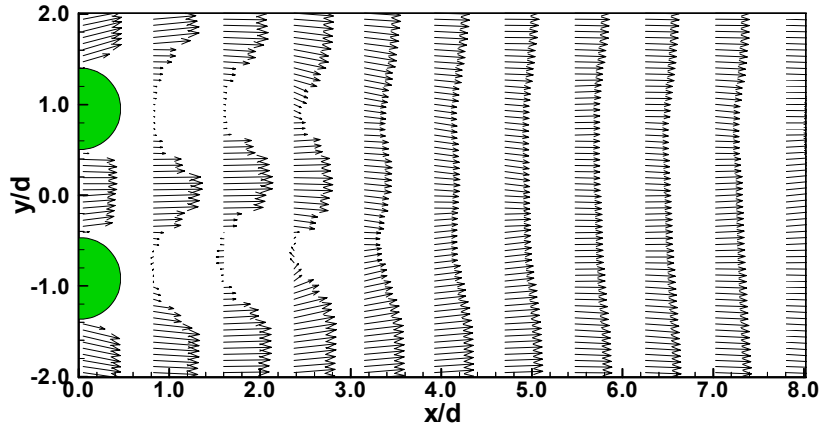
Fig. 3.3은 $H/d=2.0, Re=3.0 \times 10^3$ 에서 상부 실린더 주위의 유선을 나타낸 것이다. 압력 구배가 순 압력 구배인 경우에는 유동방향으로 작용하는 압력이 입자의 앞에서 막는 압력보다 크므로 유체입자는 압력이 낮은 쪽으로 미끄러져 내려가게 된다.

역압력구배인 경우에는 경계면에서 입자는 정지하게 되고 뒤에서 유입되는 유체에 밀려 결국은 경계면에서 이탈되는 현상이 나타나게 된다. 이러한 현상을 박리라고 하며 이러한 박리점은 여러 가지 방법으로 구할 수 있다. 열선을 이용하여 실린더 경계층 내에서 속도를 측정하여 구할 수도 있고 벽면 전단 응력의 최소 값으로 판정할 수도 있으며 오일, 연기, 수소거품을 이용한 가시화의 방법으로도 계측이 가능하다. 또한 압력계수의 변곡점에서도 박리점을 정하는 기법도 있다. 이 연구에서는 유선을 이용하여 박리점을 구하는 방법을 검토하였다. 이것은 PIV 계측이 전유동자의 속도를 임의의 한 시점에

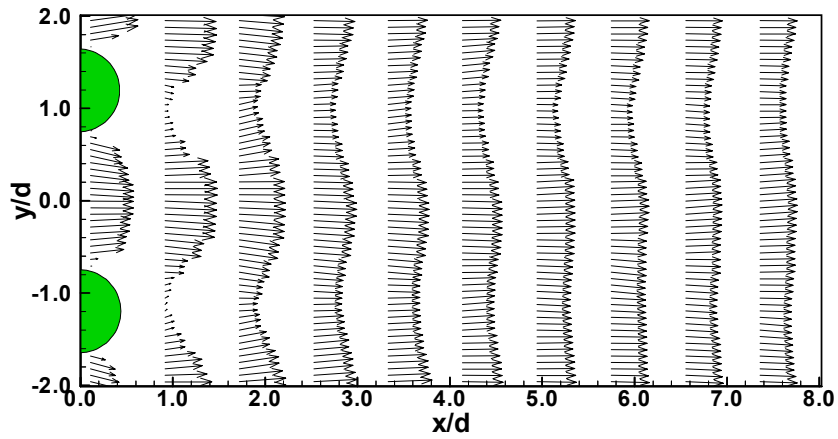
서 구할 수 있는 장점을 갖기 때문이다. Fig. 3.3에서 박리점은 83° 전후의 값으로 추정된다. 그러나 카메라 각도의 편향 및 여러 가지 불규칙성으로 추후에 추가적인 검토가 필요하다.

Fig. 3.4는 시간평균의 운동에너지 분포이다. 피치비에 따른 시간평균 운동에너지의 분포에서 피치비 $H/d=2.0$ 의 경우는 인접한 실린더의 영향이 남아 있음을 알 수 있다.

Fig. 3.5는 $Re=3.0 \times 10^3$, $H/d=2.0$, 일 때 원주열의 후류에 박리가 일어나기 시작하여 와류가 형성되고 발달하는 과정을 보여주고 있다. PIV계측에서 얻은 속도벡터에 유선을 도시하여 $1/200$ 초 간격으로 나타내었다. Fig. 3.5(a)에서 하부실린더의 하류에 박리현상이 나타나서 유선이 폐곡선으로 되며 이 영역에서 와류가 형성되고 있다(Fig. 3.6 b, 3.6c 참조). Fig. 3.5(d)에는 형성된 와류가 시간진행에 따라 점차 소멸되어 가는 것을 알 수 있다. 이러한 과정은 상부실린더의 하류에도 발생하고 있다(Fig. 3.6a, 3.6b, 3.6c 참조). 이러한 현상은 인접관의 최소단면을 통과하는 분류의 편향흐름의 영향으로 판단된다. 이 논문에 나타내지는 않았지만 가시화의 결과를 관찰하면 이러한 편향흐름의 방향도 주기적으로 반복되었다.

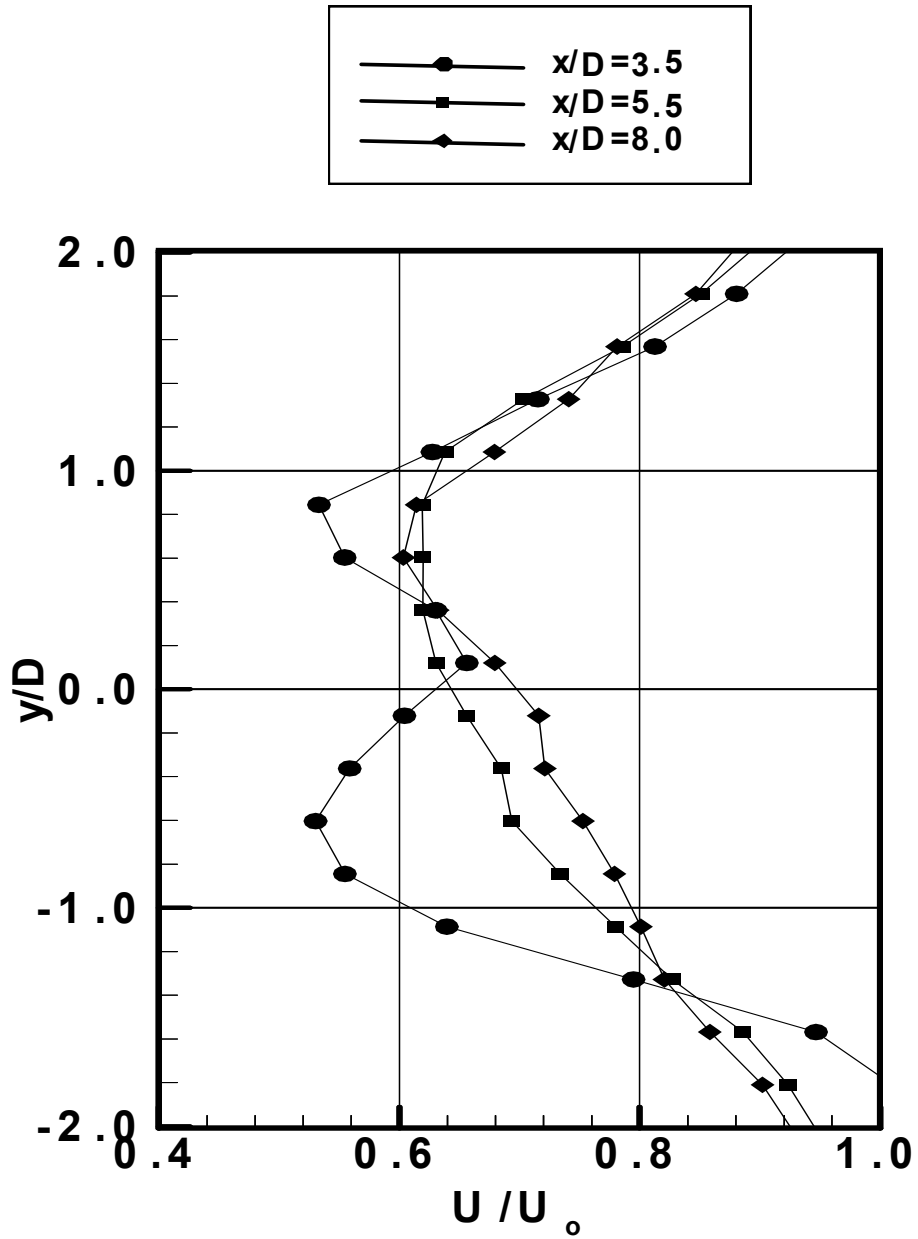


(a) $H/d=2.0$, $Re=5 \times 10^3$



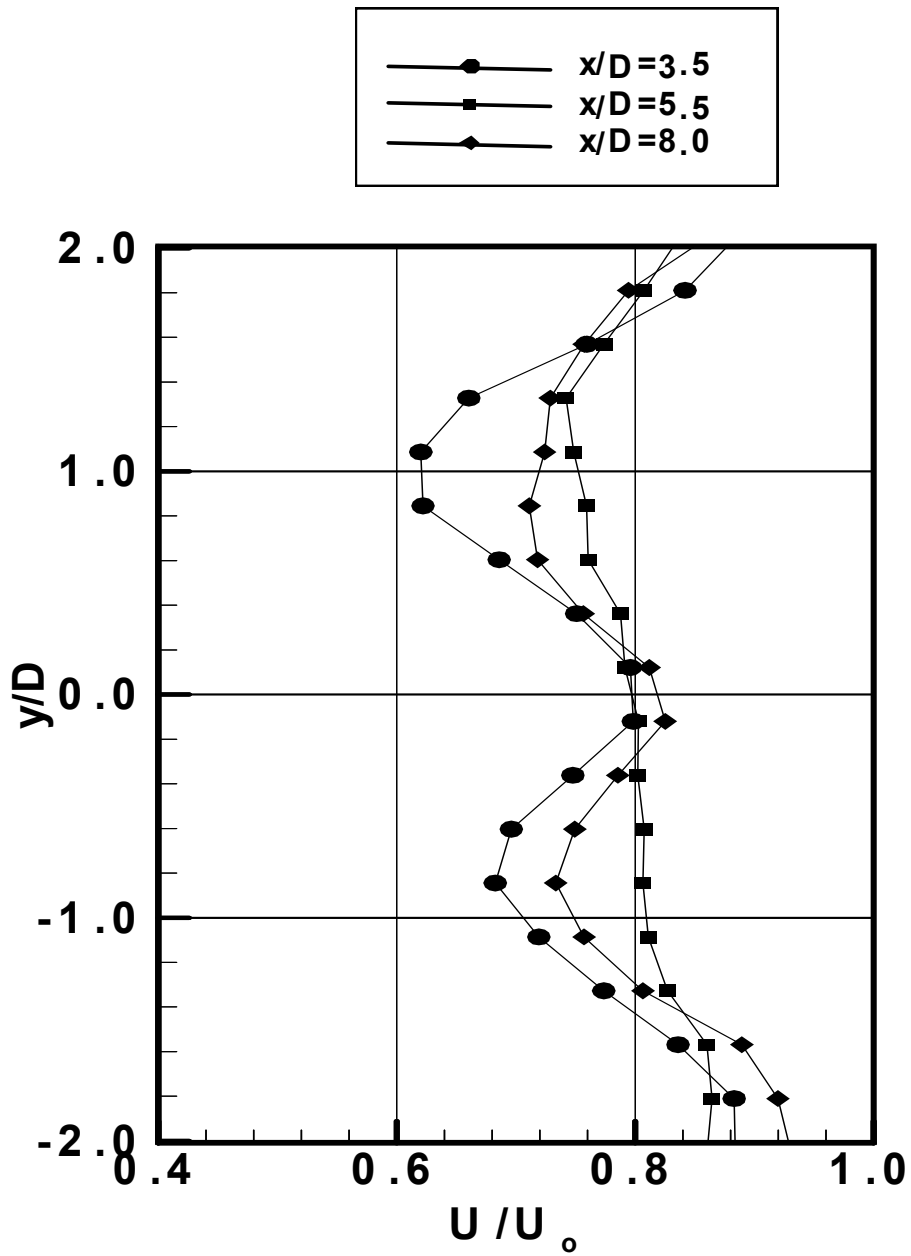
(b) $H/d=2.4$, $Re=5 \times 10^3$

Fig. 3.1 Velocity profile distribution



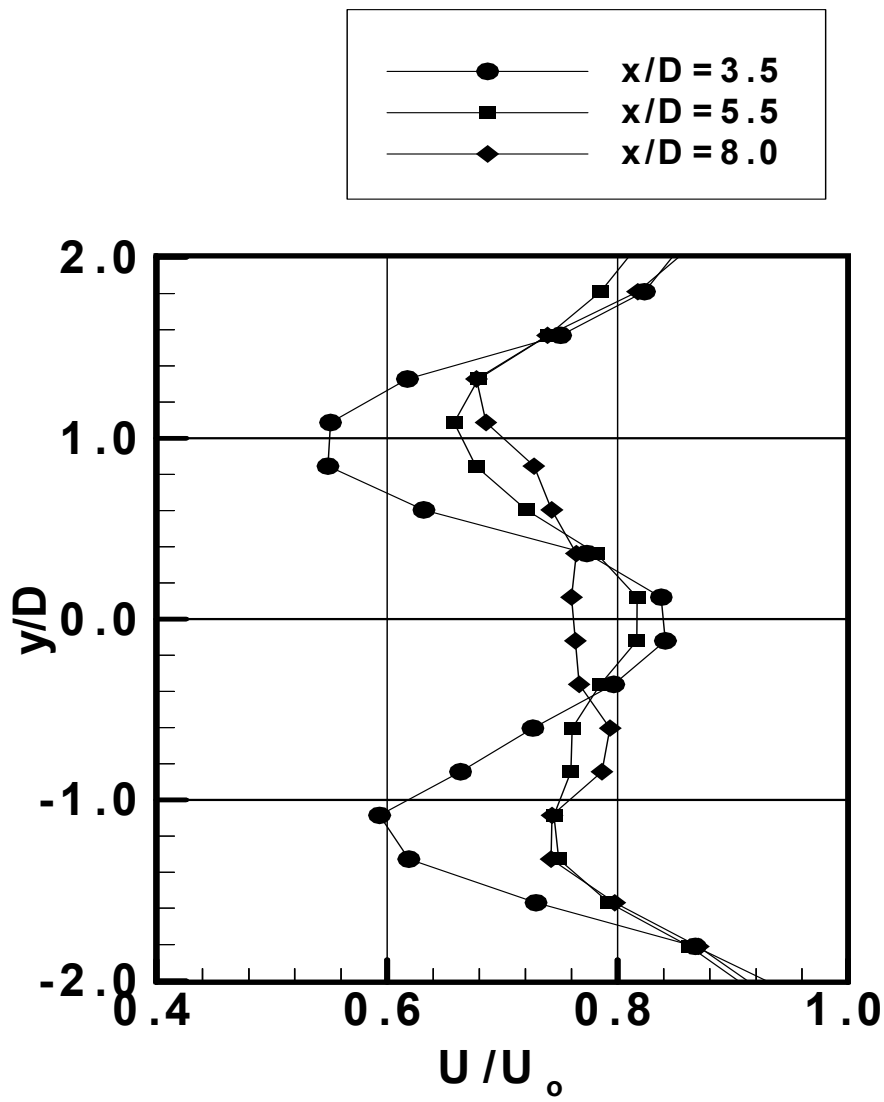
(a) $H/d=2.0$

Fig. 3.2 Comparison of velocity distribution



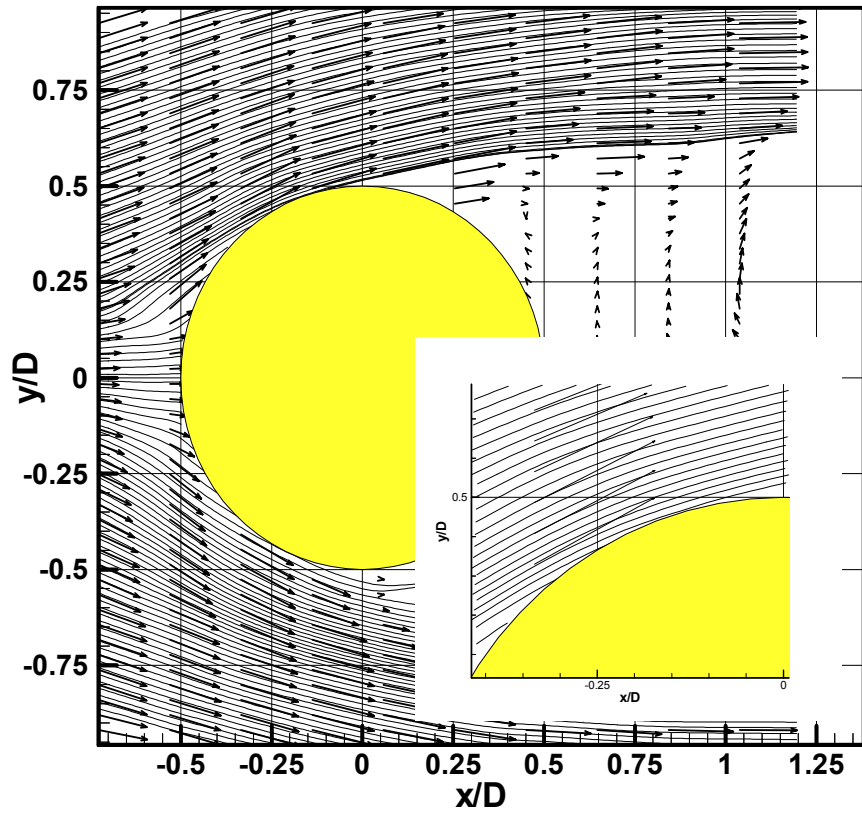
(b) $H/d=2.2$

Fig. 3.2 Continued



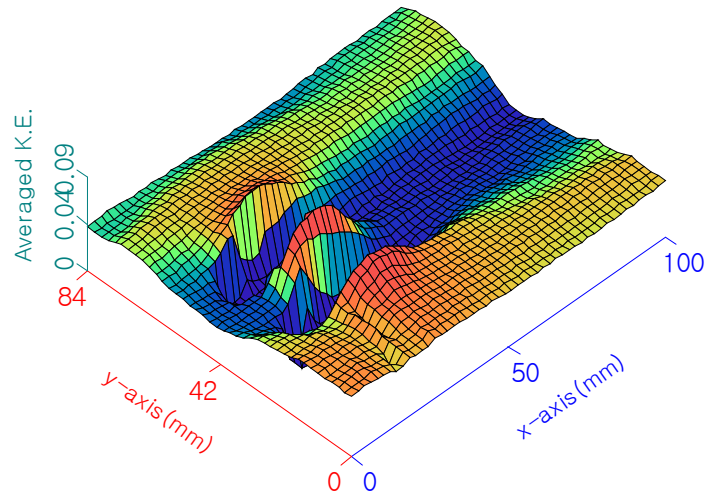
(c) $H/d=2.4$

Fig. 3.2 Continued



x-direction($Re=3\times 10^3$)

Fig. 3.3 Streamlines around upper cylinder



(a) $H/d=2.0$

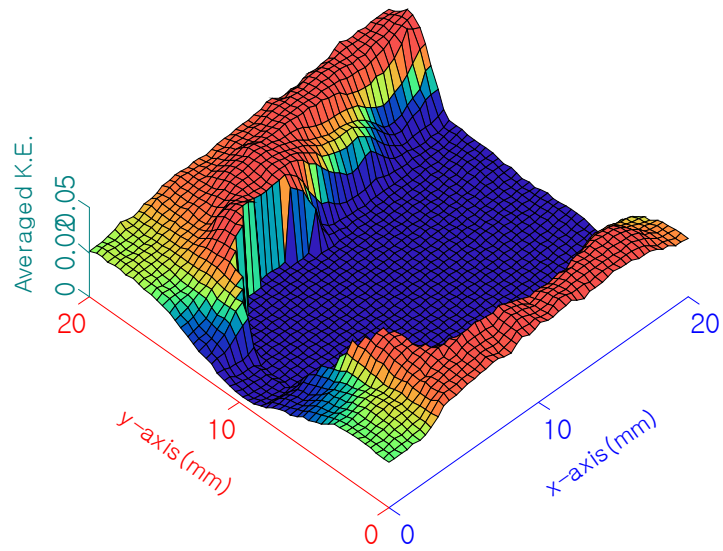
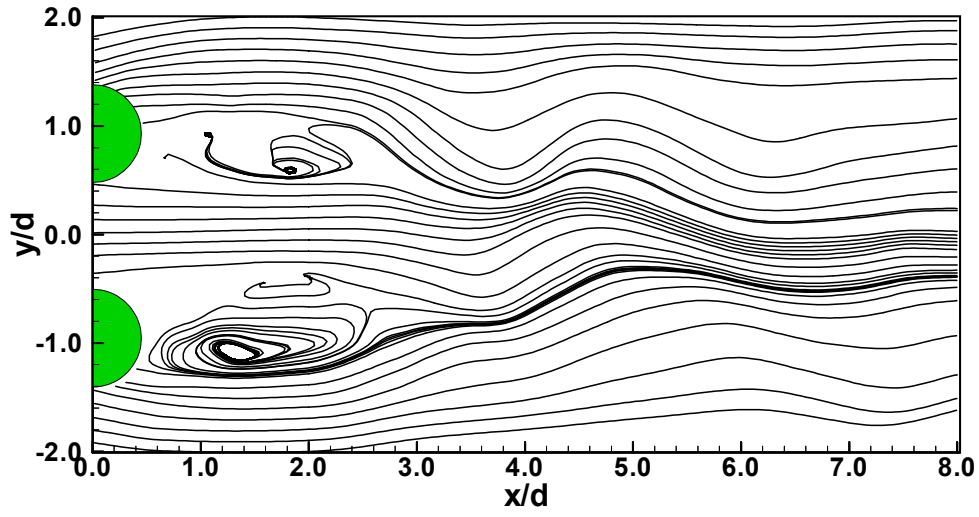
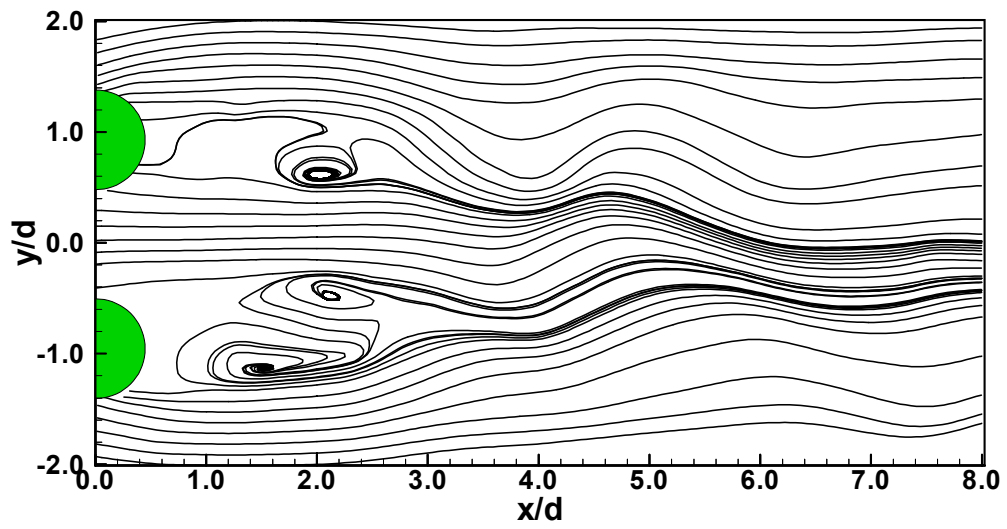


Fig. 3.4 Average kinetic energy distribution

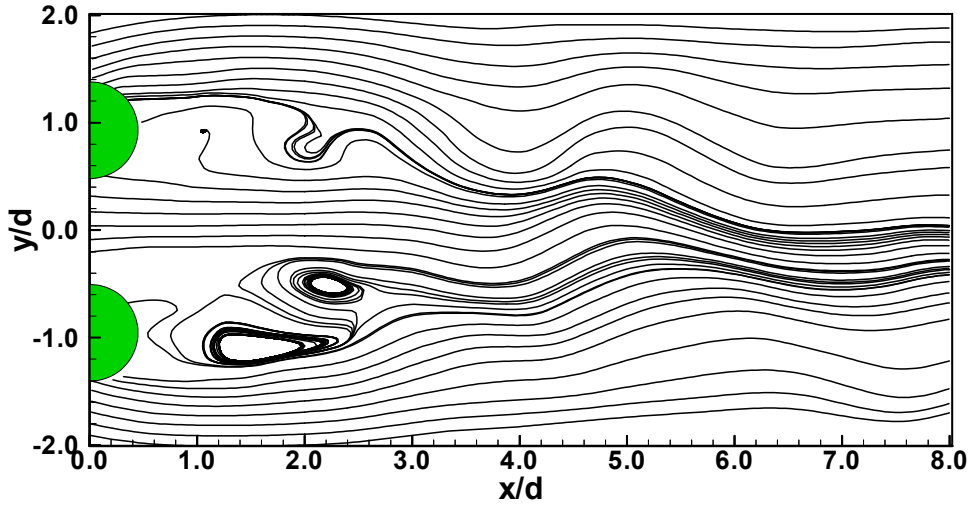


(a) $T = 1/200$

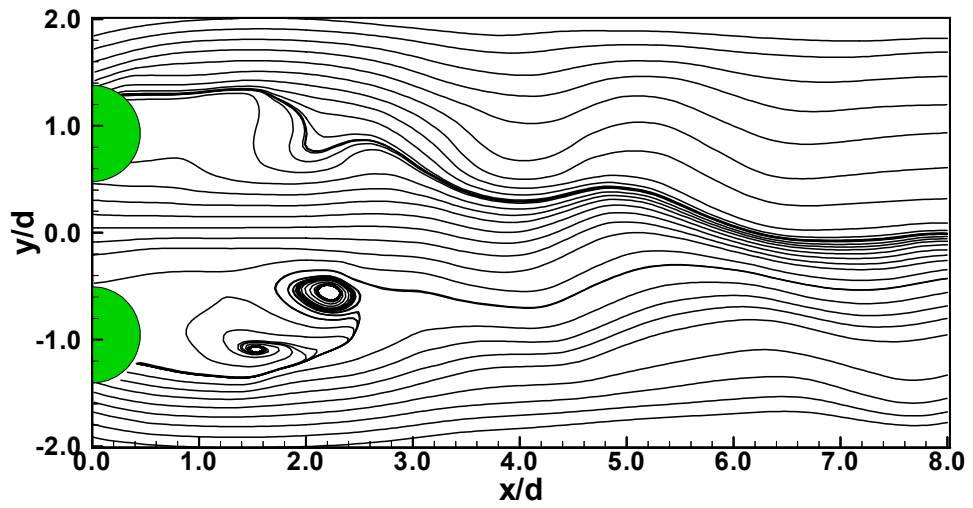


(b) $T = 2/200$

Fig. 3.5 Instantaneous streamlines



(c) $T = 3/200$



(d) $T = 4/200$

Fig. 3.5 continued

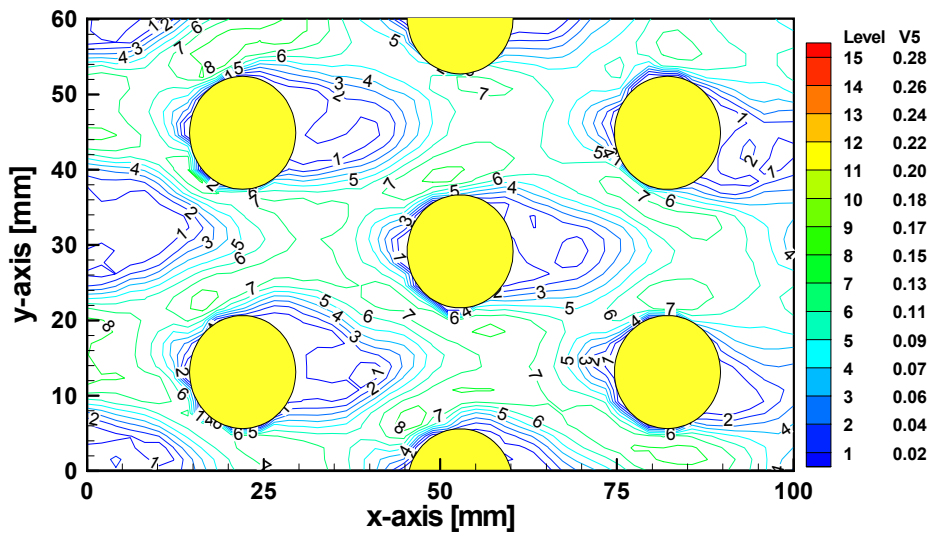
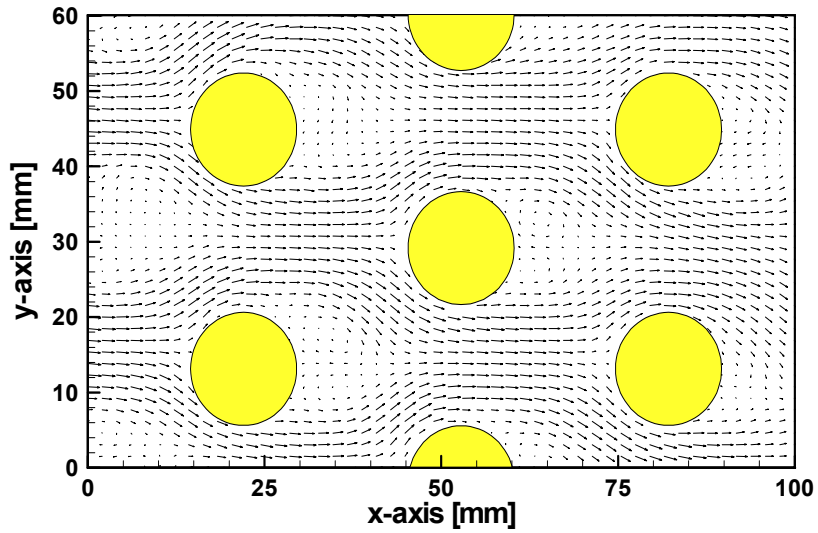
3.2 팬코일 주위의 유동특성

3.2.1 속도분포

Fig. 3.6은 레이놀즈수가 증가함에 따른 시간 평균의 유동 특성을 알아보기 위하여 $Re=1.5 \times 10^3$ 에서 $Re=2.5 \times 10^3$ 까지 11가지 경우에 대해 기록한 영상을 연속적으로 재생하여 샘플링한 300회의 영상중 3의 배수에 해당하는 영상을 선택하여 동일입자 추적을 행하여 얻은 순시 속도벡터를 산술 평균한 결과이다. 상부에는 속도벡터의 분포도를 나타내었고 아래측에는 등속도선을 15단계로 구분하여 등고선으로 표시하였다. 평균속도벡터분포를 보면 전체적으로 순간의 속도벡터 분포와 비교하여 정연한 모습을 보이고 있으며 와류의 형태 등이 확연하게 나타나 있다. Fig. 3.6(a)와 Fig.3.6(k)를 제외하고는 원주후류의 영역의 크기는 대체로 유사함을 보이고 있으며 두 원주사이를 통과하는 흐름의 세기가 레이놀즈수의 증가에 따라 커지고 있다.

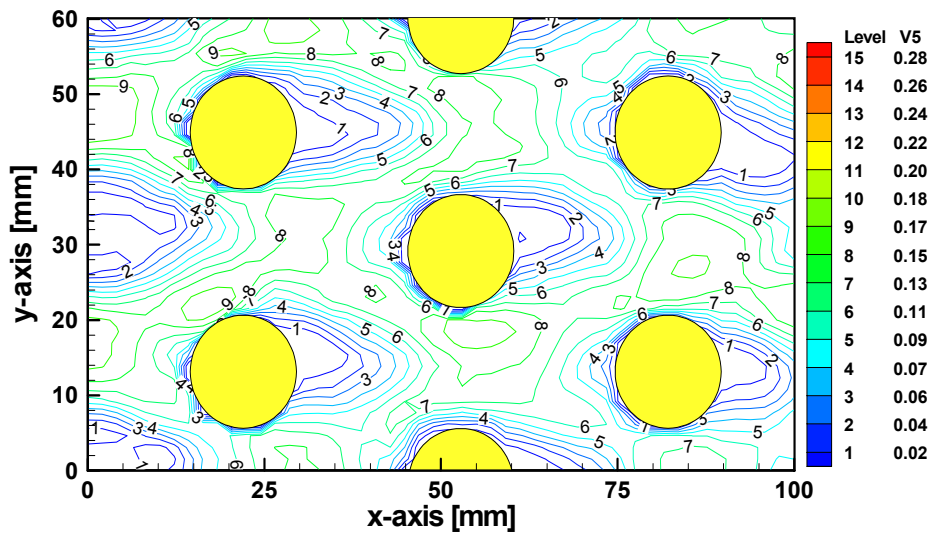
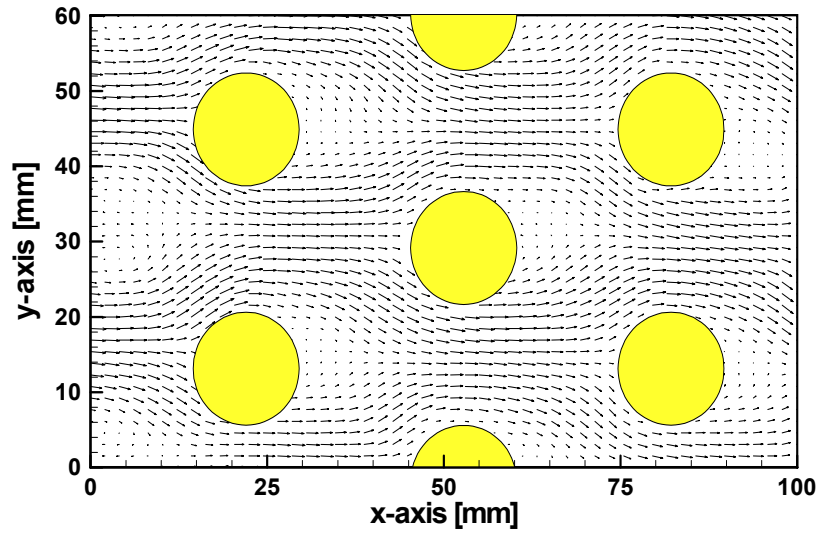
Fig. 3.6(a)의 경우 $Re=1.5 \times 10^3$ 의 속도분포이다. 원주후류의 형태를 보면 칼만볼텍스의 형태가 일부 나타나 있다. 이러한 와류의 형태는 $Re=2.1 \times 10^3$ 까지 나타나며 그이후의 경우 4열이후의 경우 대체로 대칭형의 후류형태를 보인다. 일반적으로 저레이놀즈영역에서 원주열의 흐름이 단독원주주위의 흐름과 같거나 유사한 것으로 공학적으로 가정한다. 그림에서는 나타내지 않았으나 $Re=1.5 \times 10^3$ 이하에서는 이러한 경향을 보였다. $Re=2.1 \times 10^3$ 이상의 경우에는 원주열의 상하영역의 등속도분포가 유사하게 나타나고 있으며 흐름의 세기만 증가하고

있다. 상술한 바와 같이 원주열의 내부의 유동특성은 원주간의 간섭이 복잡하며 특히 후류의 명확한 가시화가 용이하지 않다. 이 연구에 채택한 엇갈림 배열 뿐만 아니라 직·병렬의 경우를 포함한 유동장에 대해 여러 종류의 레이놀즈수와 주파수분석등의 추가적인 연구가 필요하다.



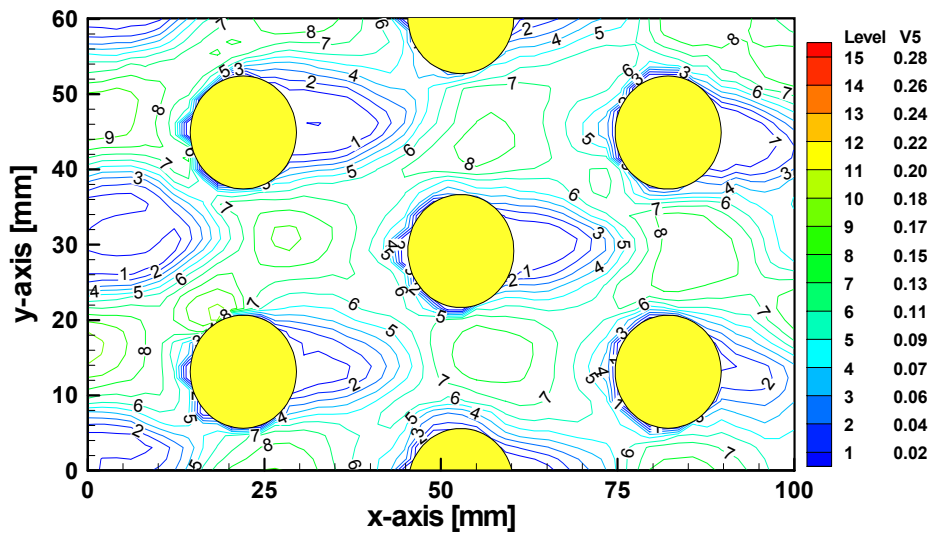
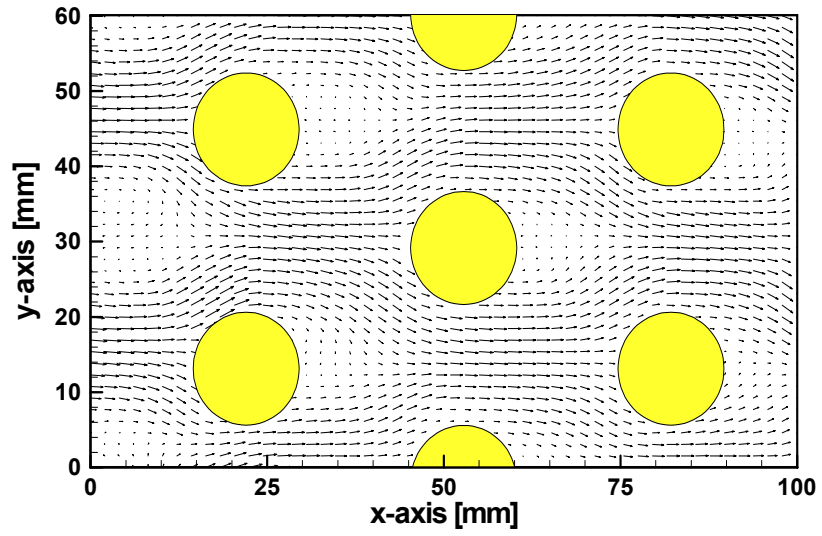
(a) $Re = 1.5 \times 10^3$

Fig. 3.6 Velocity distribution



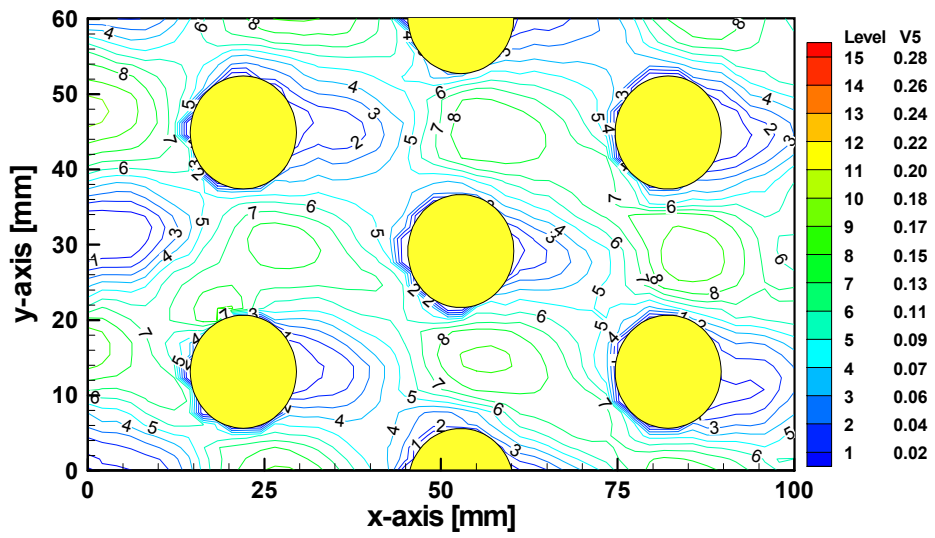
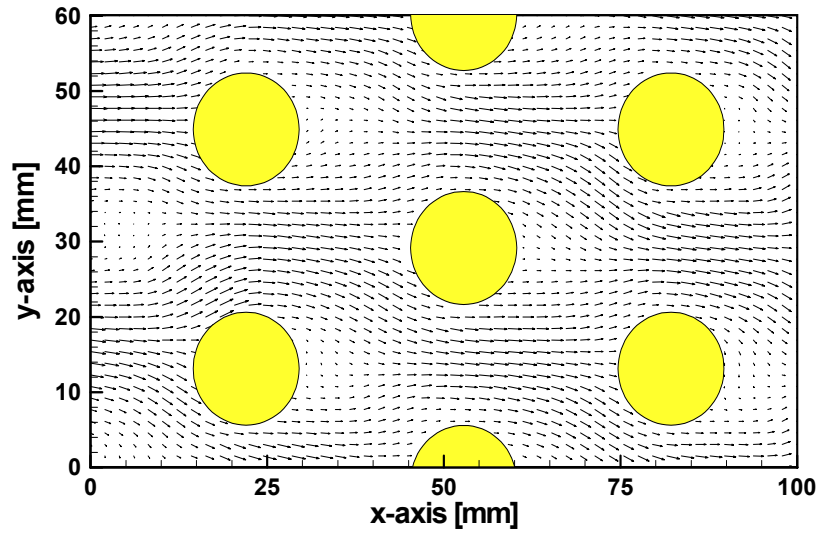
(b) $Re = 1.6 \times 10^3$

Fig. 3.6 continued



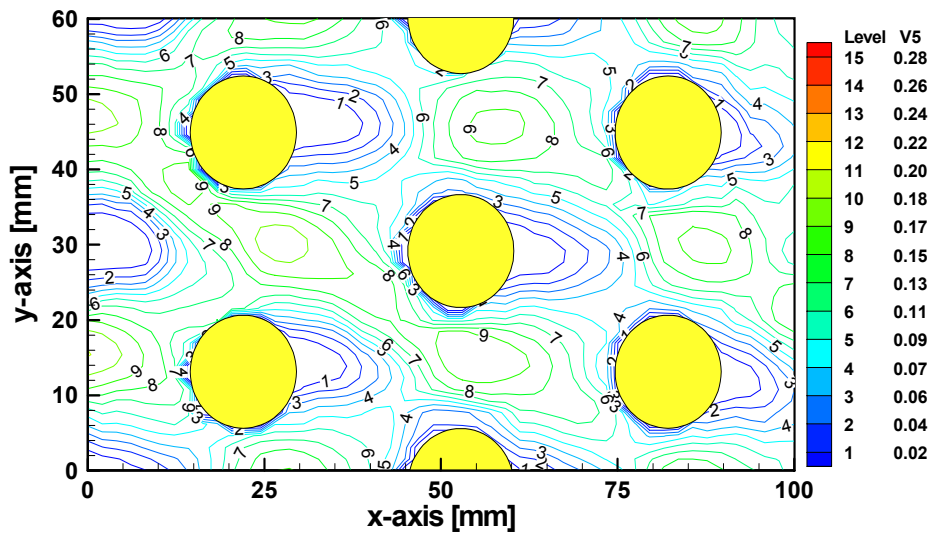
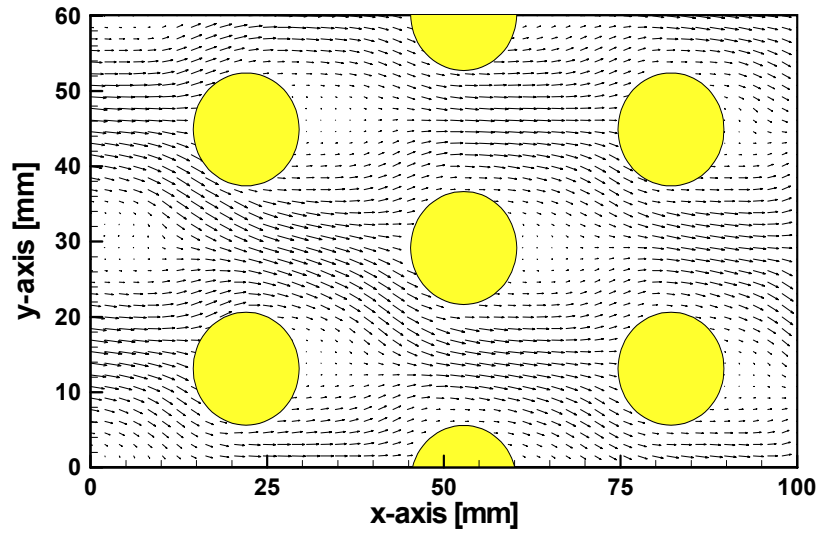
(c) $Re = 1.7 \times 10^3$

Fig. 3.6 continued



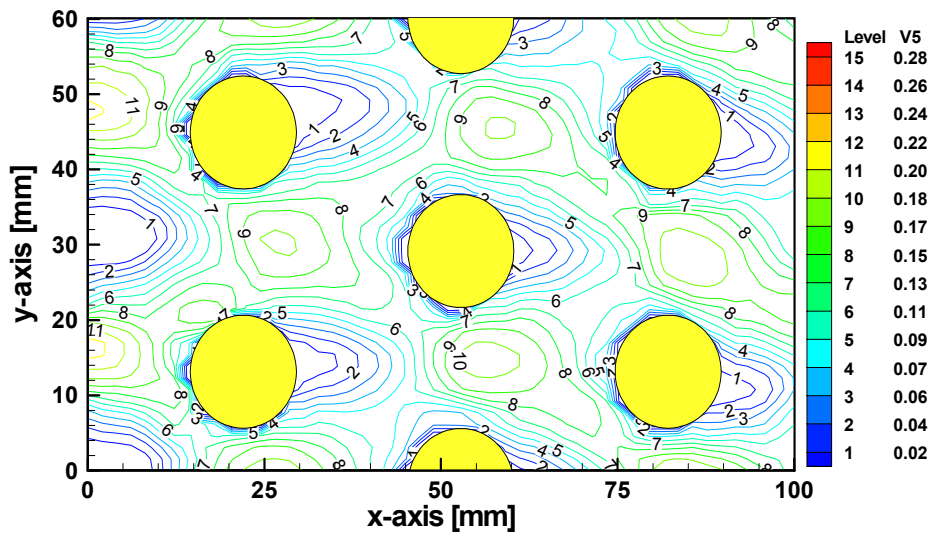
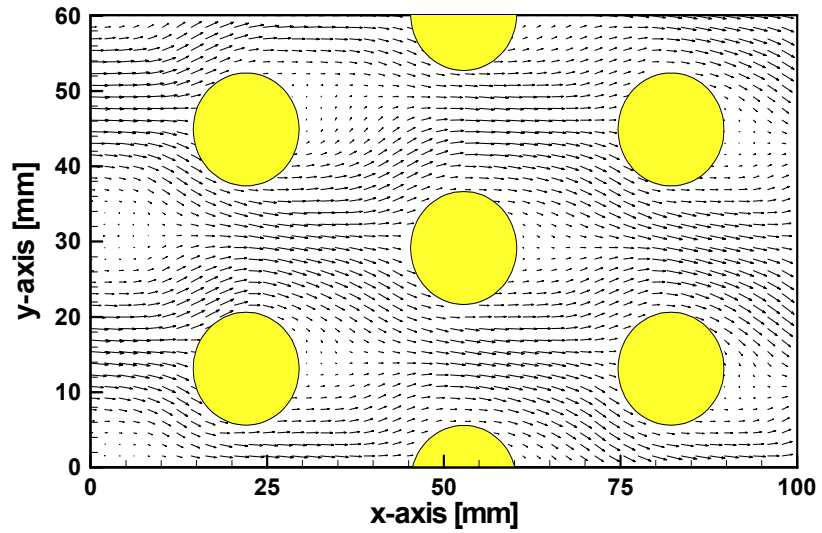
(d) $Re = 1.8 \times 10^3$

Fig. 3.6 continued



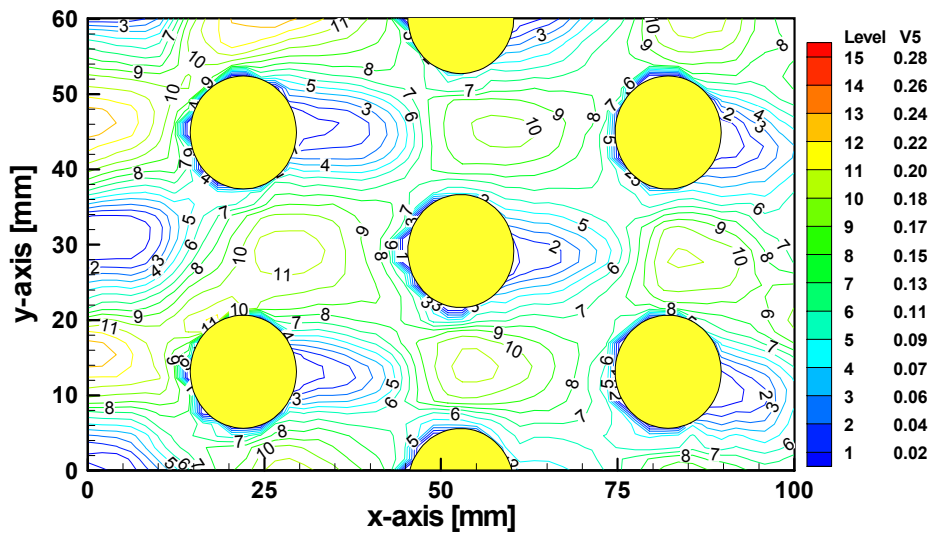
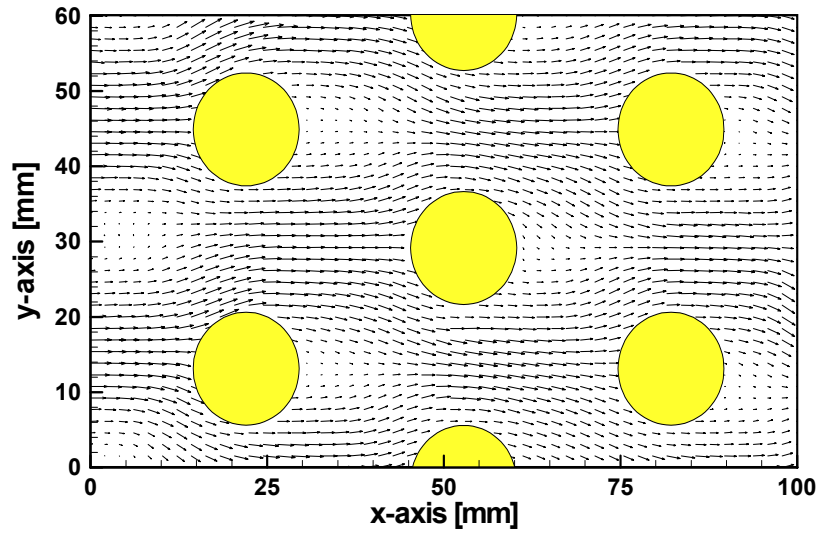
(e) $Re = 1.9 \times 10^3$

Fig. 3.6 continued



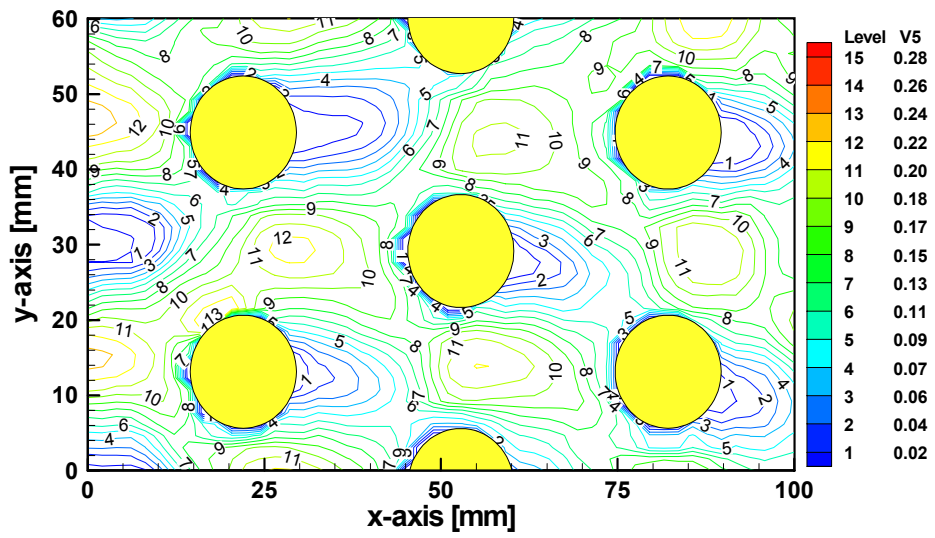
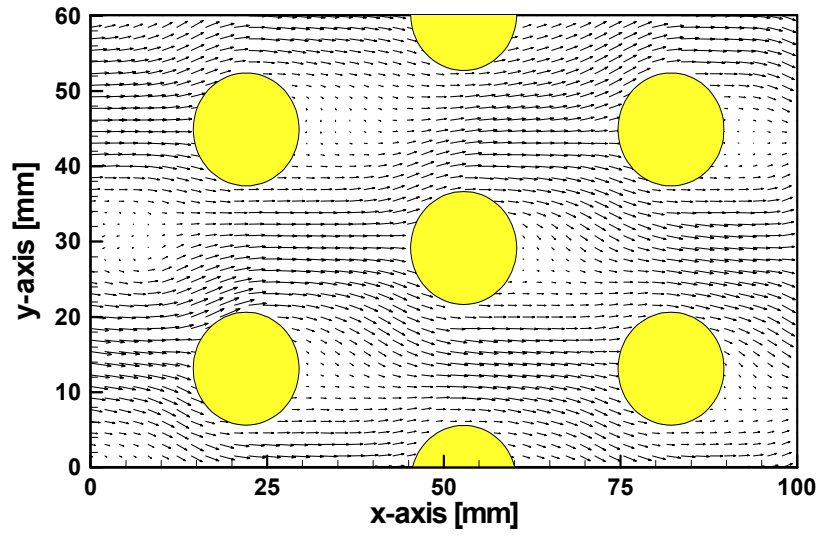
(f) $Re = 2.0 \times 10^3$

Fig. 3.6 continued



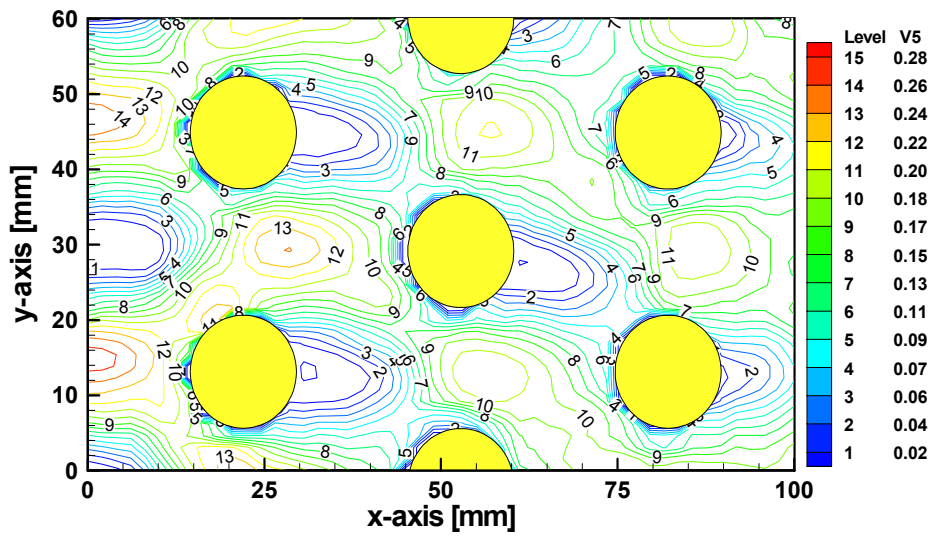
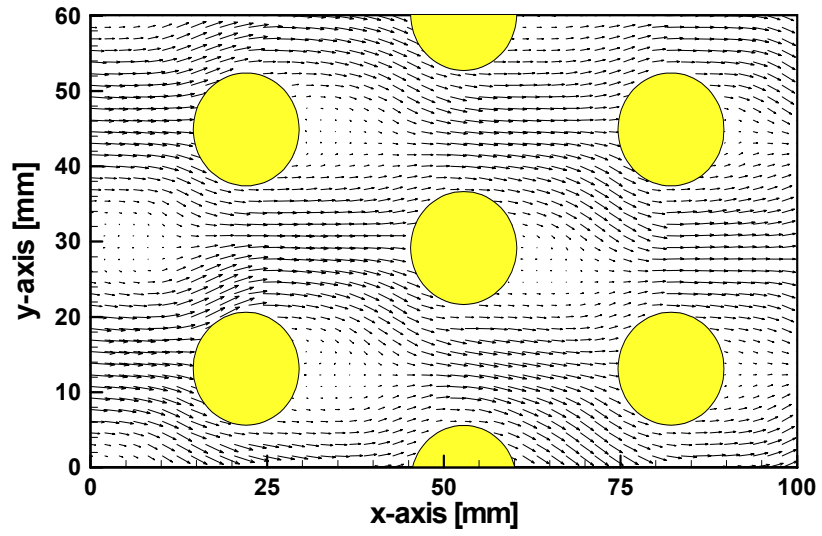
(g) $Re = 2.1 \times 10^3$

Fig. 3.6 continued



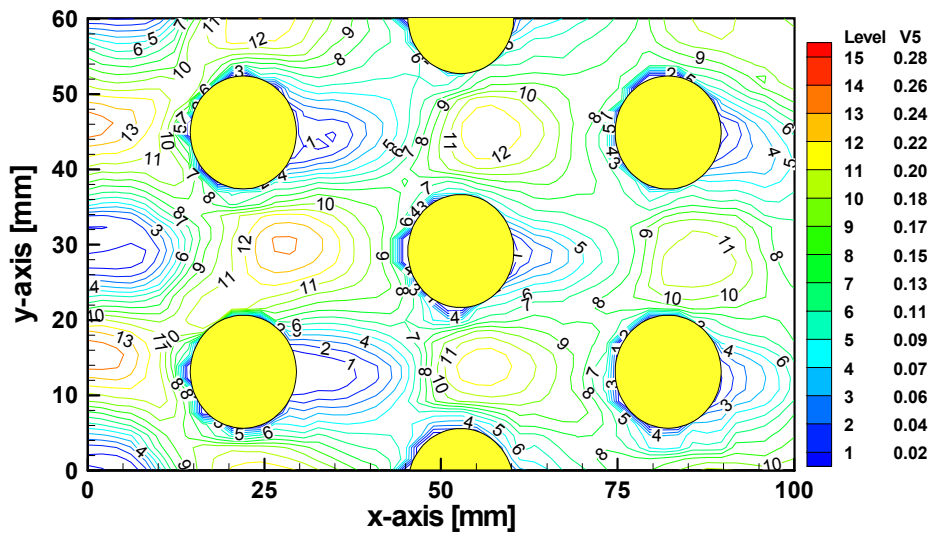
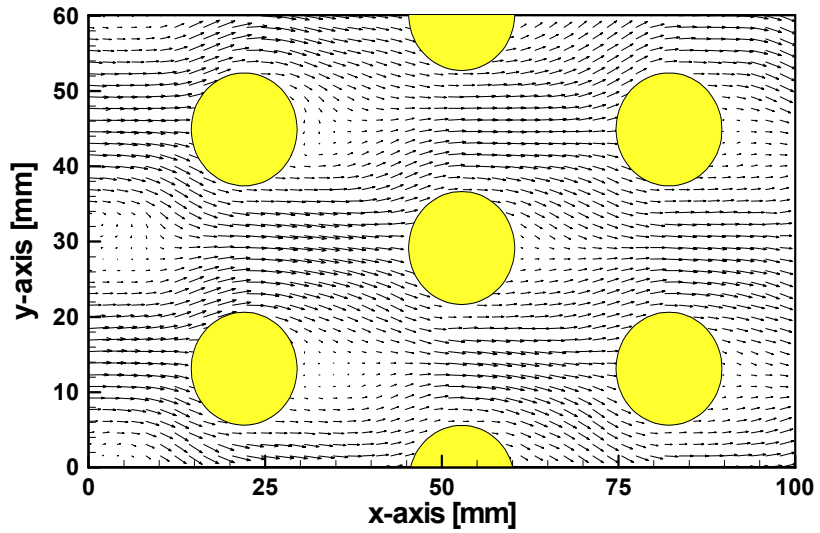
(h) $Re = 2.2 \times 10^3$

Fig. 3.6 continued



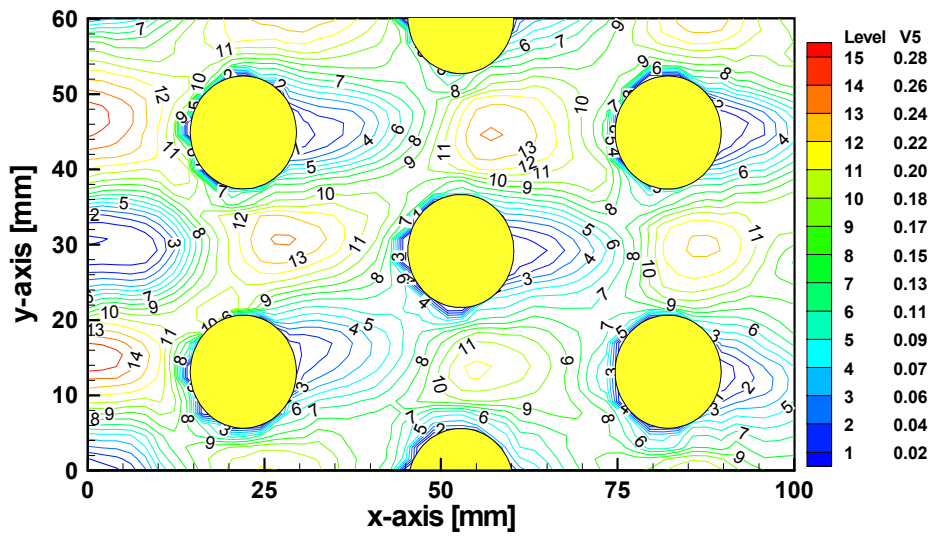
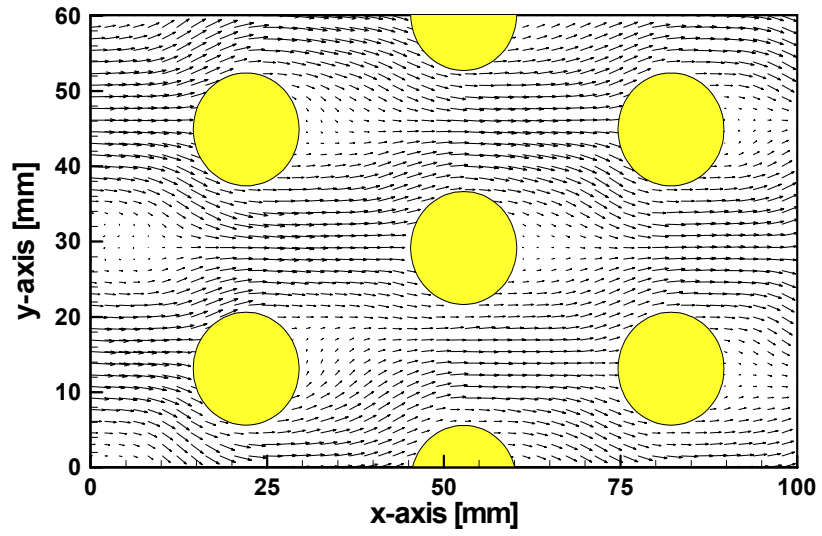
(i) $Re = 2.3 \times 10^3$

Fig. 3.6 continued



(j) $Re = 2.4 \times 10^3$

Fig. 3.6 continued



(k) $Re = 2.5 \times 10^3$

Fig. 3.6 continued

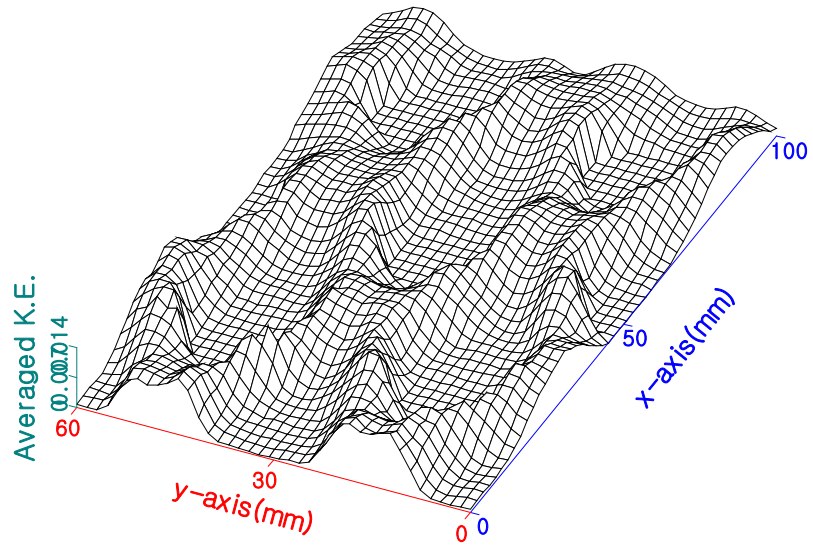
3.2.2 내부유동특성

Fig. 3.7과 각 레이놀즈수에 따른 평균 속도벡터에서 각 위치의 운동에너지를 3차원적으로 도시한 운동에너지 분포이다. 운동에너지의 전체적인 분배구조를 잘 보여주고 있다. 원주와 후류영역은 가운데가 가라앉은 모습으로 운동에너지의 분포가 나타나 있다. 레이놀즈수가 증가할수록 운동에너지의 크기는 비례적으로 증가하고 있으며 Fig. 3.7(c) $Re=1.7 \times 10^3$ 이상에서는 후류의 영역과 원주사이에 흐름이 형성되는 영역 사이의 경계가 다소 완만하며 원주를 중심으로 대칭적인 형태를 보이고 있다. 이것은 원주열의 흐름에서 피치비가 2.0 이상일 경우 상호간의 간섭이 미약해지는 결과와 일치한다. 그러나 Fig. 3.7(j) $Re=1.4 \times 10^3$ 전후의 레이놀즈수 이상에서는 다시 경계면의 변화가 급격하게 나타나고 있다. 이것은 피치비에 따른 원주후류간의 간섭이 레이놀즈수의 변화에 따라 영향을 받기 때문으로 추정되며 이에 관해서는 차후 면밀한 검토가 필요하다.

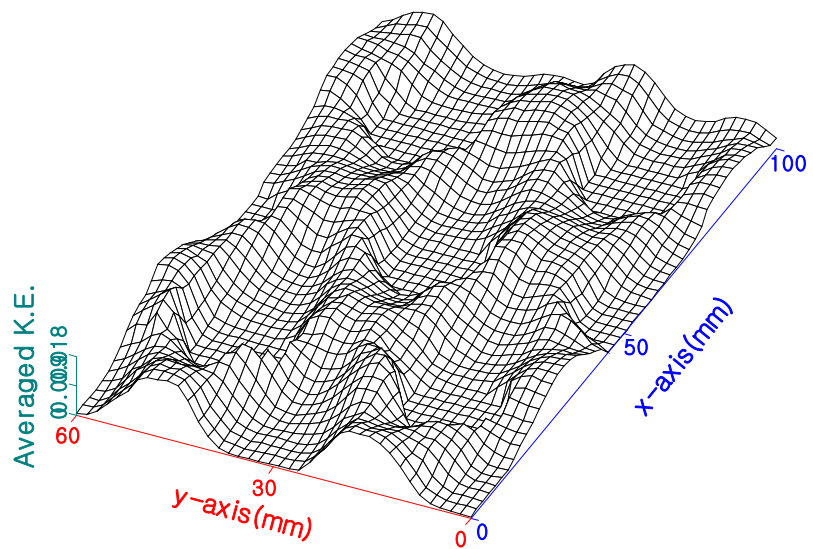
Fig. 3.8은 난류운동에너지분포이다. Fig. 3.8(b) $Re=2.0 \times 10^3$ 의 경우를 제외하고는 원주 주변에서 난류운동에너지가 불규칙하게 나타나 있다.

Fig. 3.9는 계측 유동장의 속도분포에서 최고속도와 산술평균한 속도를 비교하여 나타내고 있다. 속도벡터장을 관찰하여 보면 원주사이 영역의 유속이 다른 영역보다 매우 빠르고 유속의 방향도 각 원주의

중심선을 잇는 선에 거의 수직인 방향이다. 따라서 유속이 빨라지면 그 영역에서의 압력이 저하하므로 2원주에는 서로 끄는 인력이 작용한다. 그리고 이 인력은 그 작용방향으로부터 상류측 원주에는 양력감소, 항력증가, 또는 하류측의 원주에는 양력증가, 항력감소를 초래할 것으로 예상된다. 유동장에서 최고속도를 나타내는 곳도 원주사이 영역의 중앙부근이다.

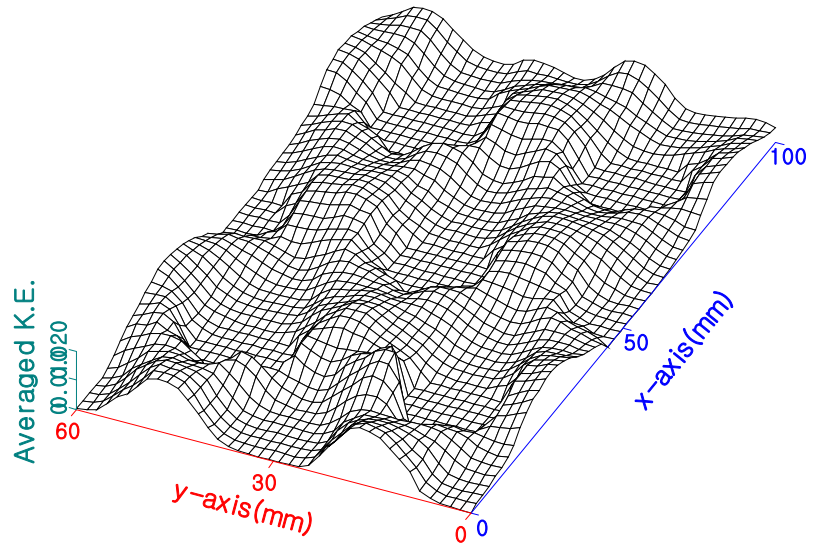


(a) $Re = 1.5 \times 10^3$

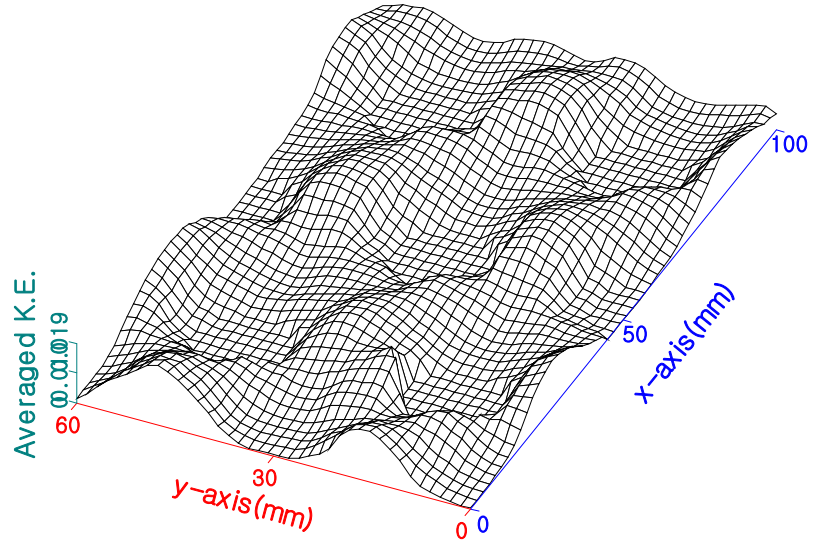


(b) $Re = 1.6 \times 10^3$

Fig. 3.7 Distribution of time-mean kinetic energy

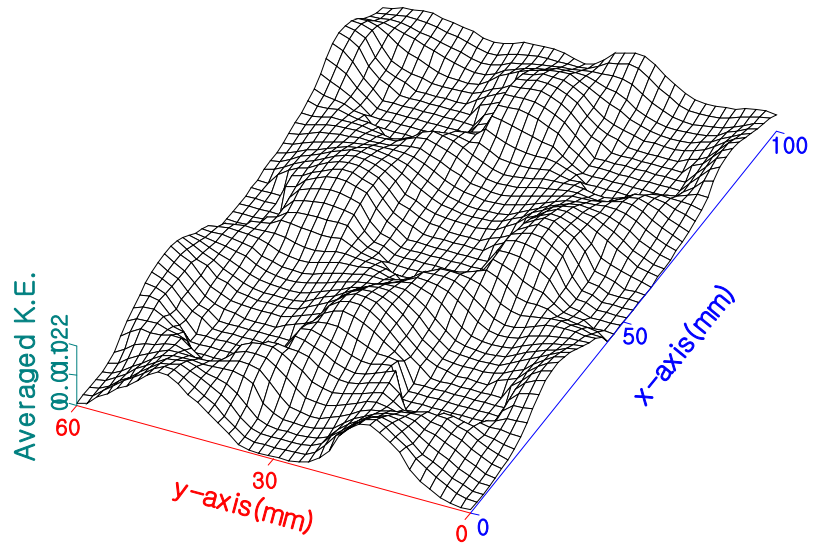


(c) $Re = 1.7 \times 10^3$

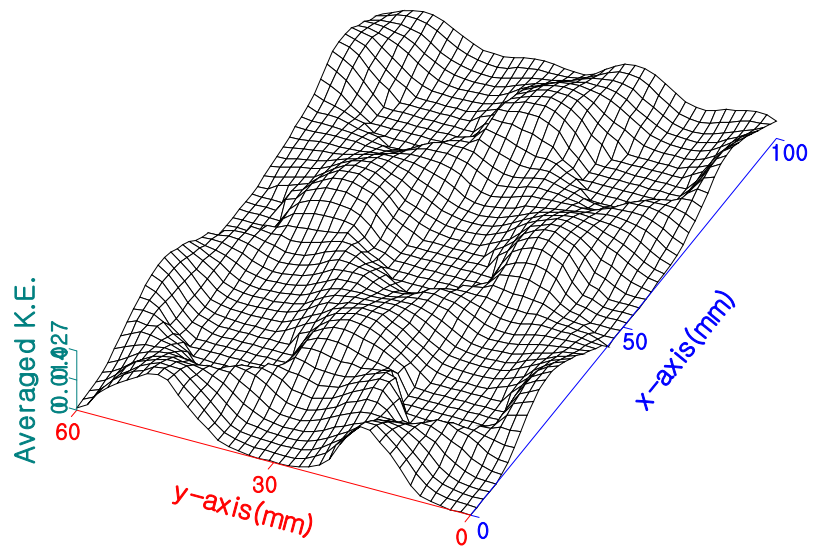


(d) $Re = 1.8 \times 10^3$

Fig. 3.7 continued

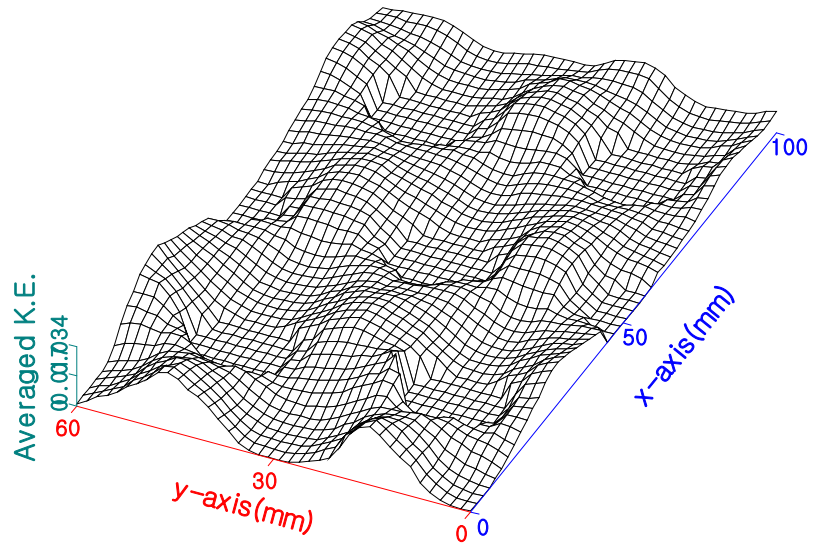


(e) $Re = 1.9 \times 10^3$

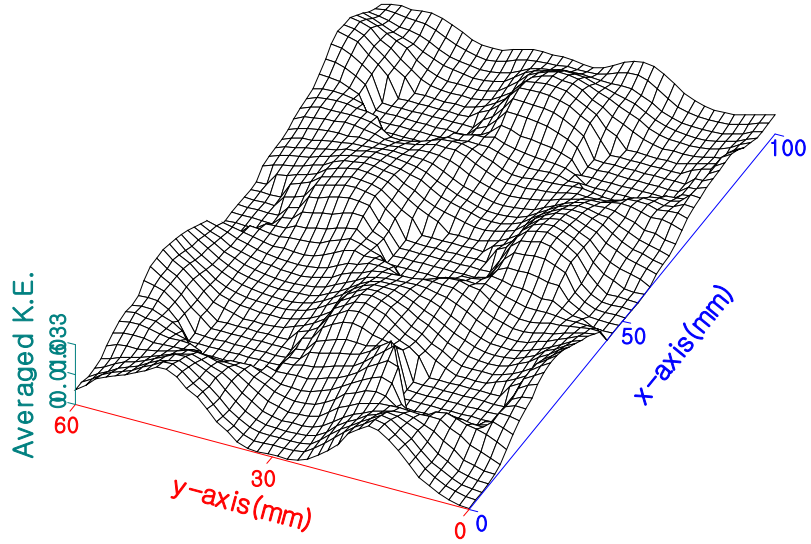


(f) $Re = 2.0 \times 10^3$

Fig. 3.7 continued

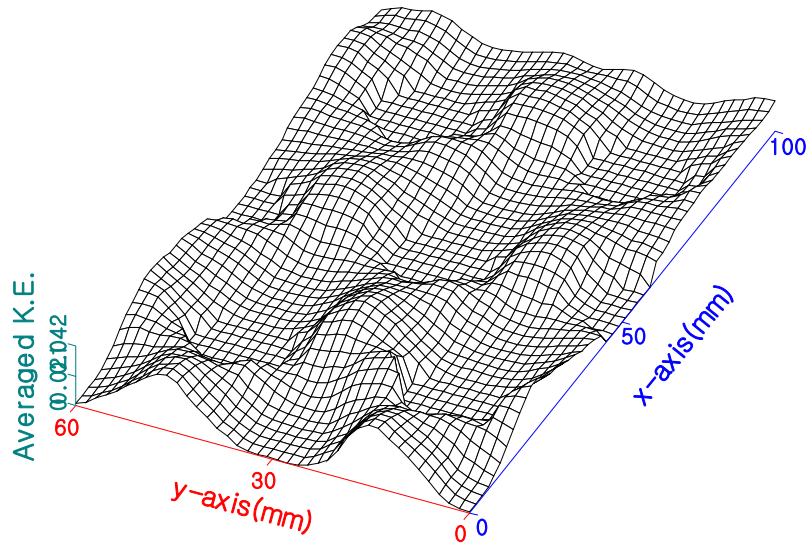


(g) $Re = 2.1 \times 10^3$

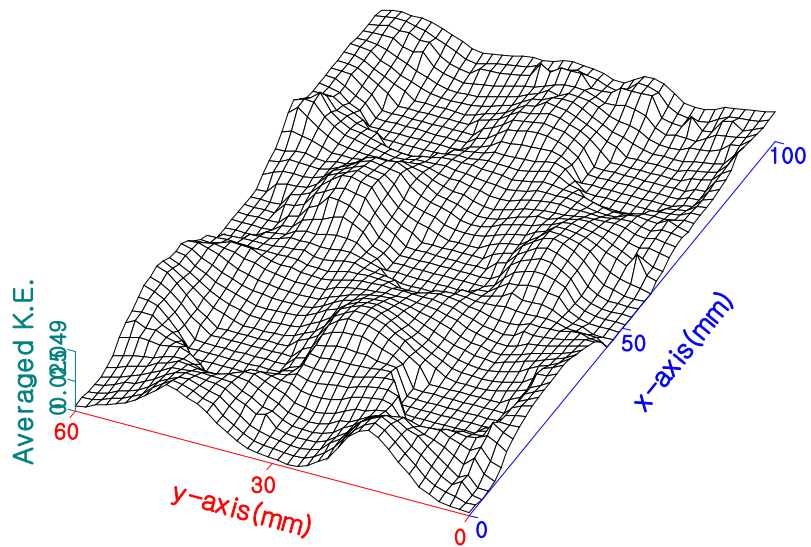


(h) $Re = 2.2 \times 10^3$

Fig. 3.7 continued

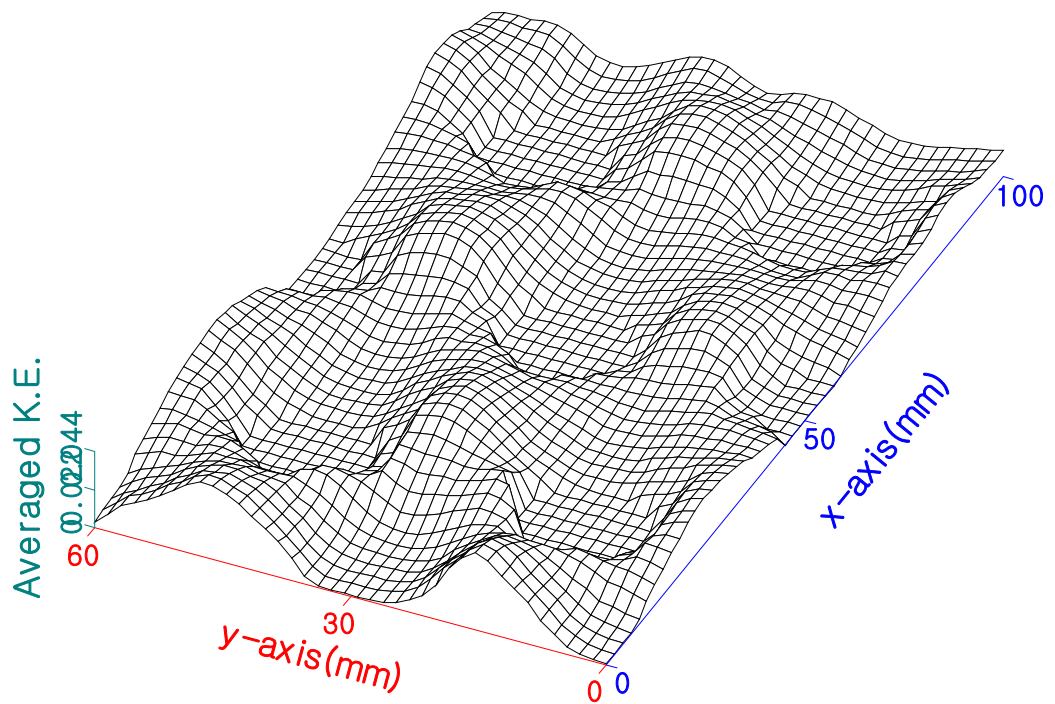


(i) $Re = 2.3 \times 10^3$



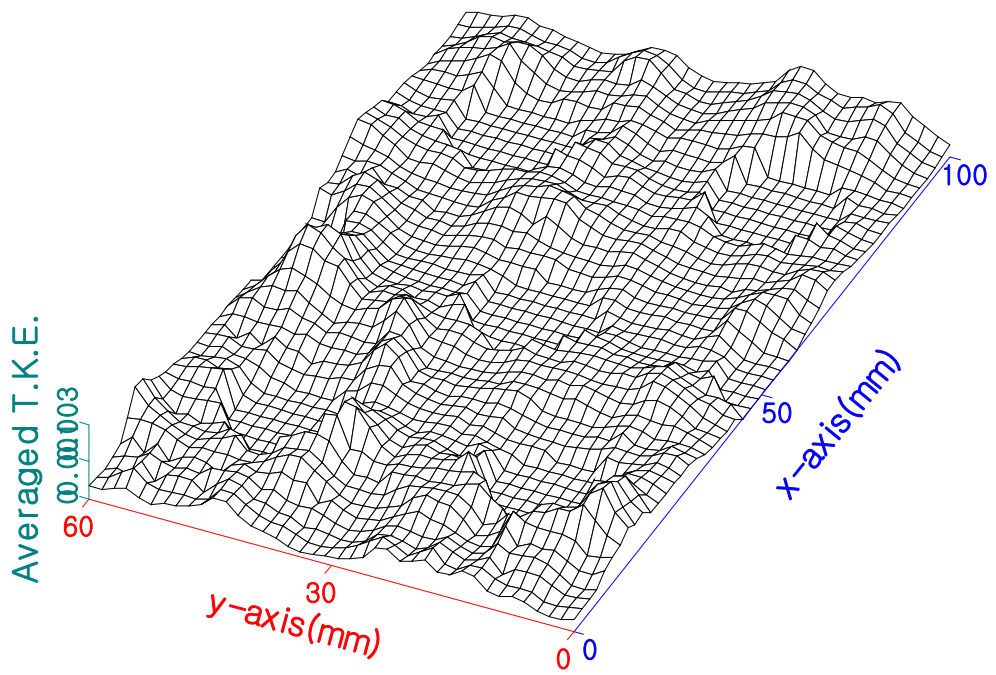
(j) $Re = 2.4 \times 10^3$

Fig. 3.7 continued



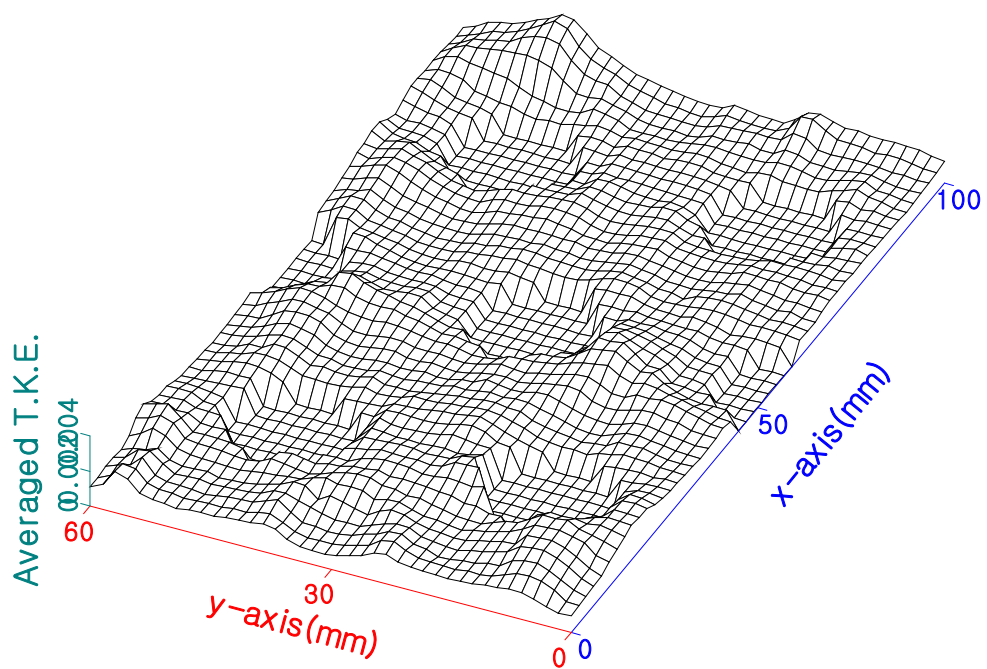
(k) $Re = 2.5 \times 10^3$

Fig. 3.7 continued



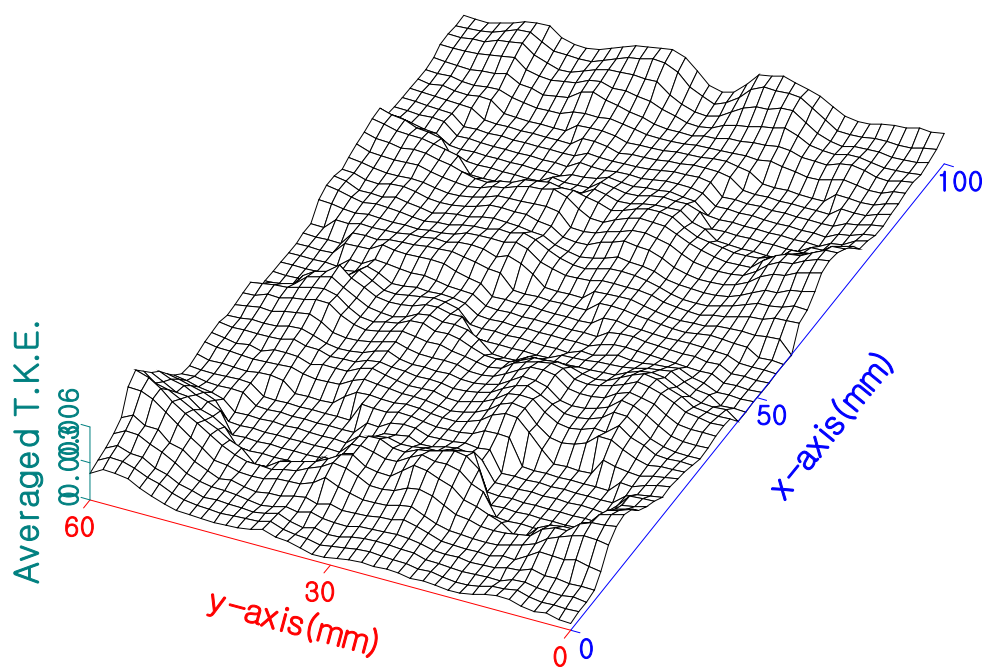
(a) $Re = 1.5 \times 10^3$

Fig. 3.8 Distribution of time-mean turbulent kinetic energy



(b) $Re = 2.0 \times 10^3$

Fig. 3.8 continued



(c) $Re = 2.5 \times 10^3$

Fig. 3.8 continued

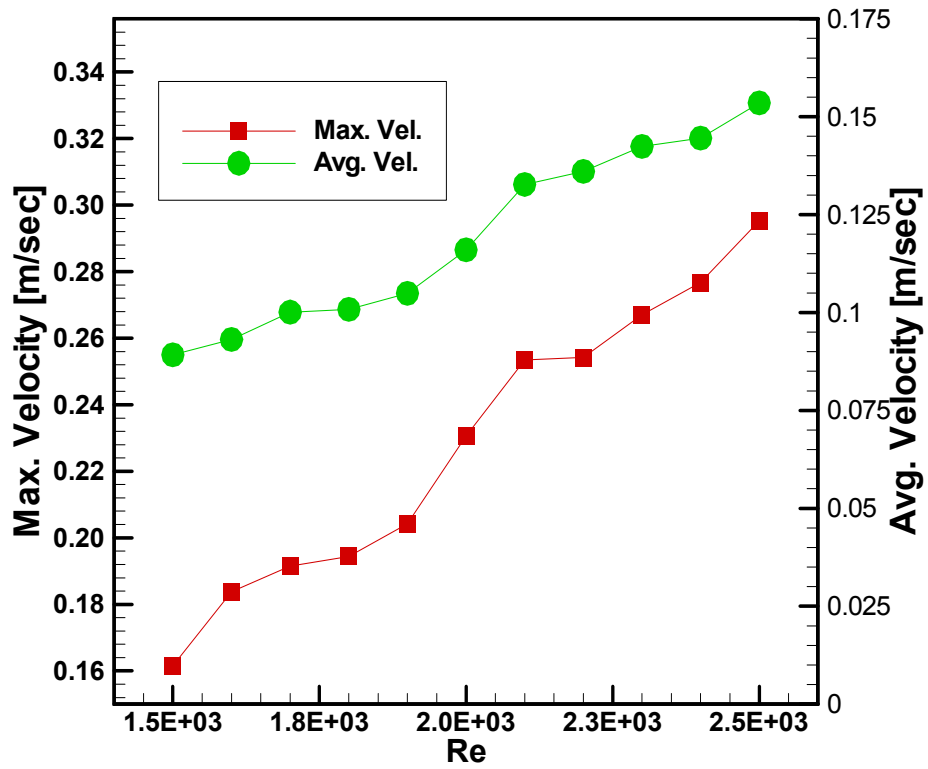


Fig. 3.9 Comparison of velocity profile on flow field

3.2.3 열전달 특성

선행실험과는 별도로 이등변관군배열의 증발기에서 공기유입속도와 칠러 냉각수(chilled water) 유입온도가 미치는 영향의 상관관계를 부가적으로 실험하기 위하여 실제 신조선박에 탑재된 Fig. 3.10의 팬코일유니트 장치를 운전하여 공기 입구측에 화이어댐퍼 및 증발관 입.출구에 각각 디지털 온도계를 설치한 후 일정한 팬 운전속도에서 열 교환을 일으키는 증발기에 공급공기량을 조절하여 증발관 출구의 칠러 냉각수 온도 변화를 계측하였고 기관실에 설치된 칠러냉각장치의 출구온도를 단계적으로 임의조절하여 한정된 송풍량에서 팬코일유니트의 증발기 출구온도변화를 각각 실험하였다.

Fig. 3.11에서는 공급되는 공기의 속도가 변할 경우 칠러냉각수 온도 및 열전달특성을 나타내고 있으며 Fig. 3.12는 칠러냉각수 유입온도가 변할 경우의 증발기측 열전달특성에 대한 결과값이다. 이 연구에서 나타난 열전달 특성은 공기 유입속도가 빠를수록 증발기 입.출구측 칠러냉각수 Δt 는 높게 나타났고 또한 동일한 유입공기량에서 칠러냉각수 유입 온도가 낮을수록 증발기 입.출구 대비 Δt 는 상대적으로 높게 나타냄을 알 수 있었으며 반면에, 공기 공급량에 따른 열 전달 특성은 유입속도가 낮고 칠러냉각수 입구온도가 높을수록 다소 감소하는 경향을 보이고있음을 알 수 있었다.

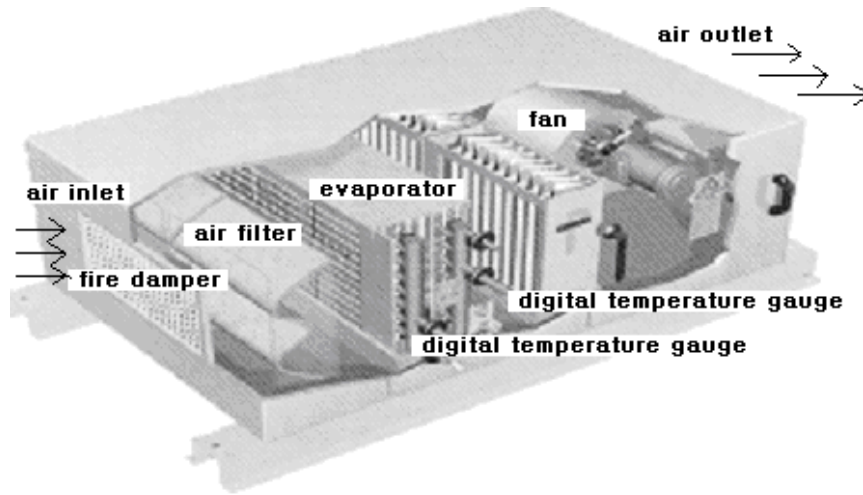


Fig 3.10 Fan coil unit

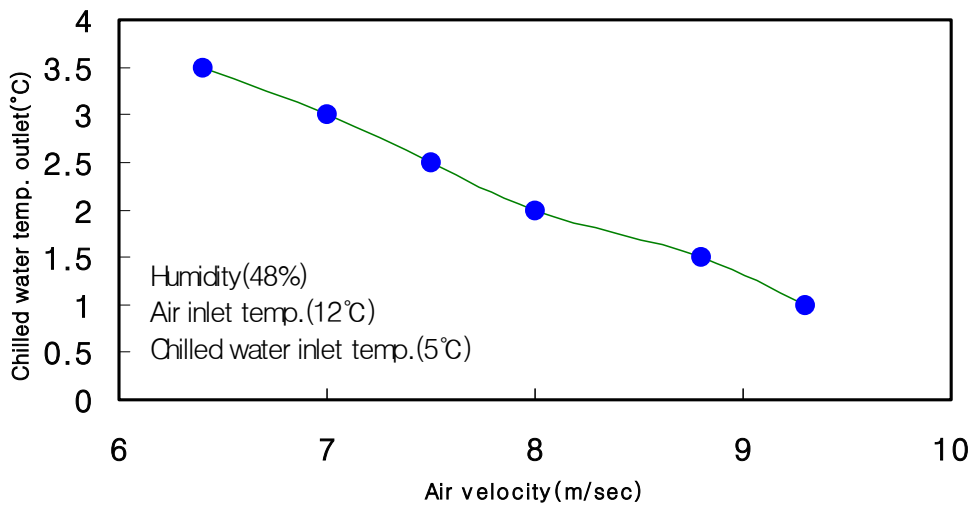


Fig. 3.11 Comparison of air velocity with chilled water temp.

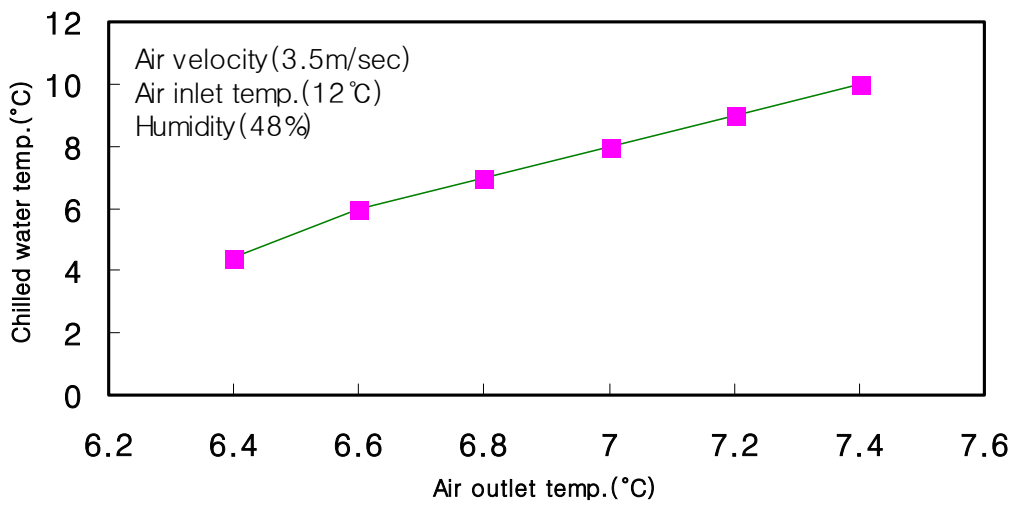


Fig. 3.12 Comparison of chilled water temp with air outlet temp.

제4장 결 론

엣갈림 관군배열 원주열은 공조기의 팬코일유니트의 열교환기의 내부유동장으로서 개별분산공조기의 성능에 큰 영향을 미치는 장치이다. 이 연구에서는 실제 팬코일유니트의 열교환기 내부 형상을 모사한 유동장을 대상으로 고속카메라를 이용한 유동 가시화 및 PIV 상용소프트로 전 유동장의 속도를 계측하여 내부유동 특성을 고찰하였고 별도로 실물 팬코일유니트 장비를 운전하여 이등변관군 배열의 증발기에서 공기유입속도와 칠러냉각수 유입온도가 미치는 영향의 상관관계를 부가적으로 실험하였다. 전자의 실험은 원주의 직경과 유입흐름의 단면평균유속에 의해 계산된 11종류의 레이놀즈수를 채택하여 속도분포 및 제반 내부유동 특성을 고찰하였으며 그 결과 다음의 결론을 얻었다.

1. 팬코일유니트의 내부 유동형태는 원주 후류 영역과 원주 사이 영역으로 크게 구분되며 유동특성의 변화는 피치비와 레이놀즈수에 따라 변화를 보였다. 원주사이영역의 유속은 다른 영역보다 매우 빠르고 유속의 방향도 각 원주의 중심선을 잇는 선에 거의 수직인 방향이며, 유속증가, 압력 저하의 특성을 보였으며 유동장에서 최고속도는 원주사이 영역의 중앙부근에서 나타났다.

2. 상류로부터 유입된 흐름은 전방에 있는 원주 후미의 박리에 따른 와류영역이 형성되는 형태를 나타내었으며 그 크기는 레이놀즈수에 따라 큰 변동은 나타나지 않았으나 주기성은 빨라지는 경향을 보였다. 이것은 후방에 있는 원주의 영향으로 판단되며 주기성은 원주 후류의 비정상 유동특성에 기인하는 것으로 추정된다.
3. 일정한 간격을 갖는 각 원주열 후류의 유동특성과 관련하여 피치비(H/d) 2.0이하의 실험결과에서는 인접원주의 간섭현상으로 인한 평균속도 분포비가 크게 증가하는 영향이 나타났으며 피치비가 2.4이상의 경우는 상부의 실린더 후류의 속도분포가 단일 실린더와 유사하게 양호한 유동흐름특성을 나타내고 있었다. 이러한 비교연구결과로 볼 때 실물모형 피치비(H/d=2.65)에 근접할수록 상류 측의 자유흐름 평균속도가 커지고 인접실린더의 영향이 적은 안정된 결과를 나타내었다.
4. 팬코일 유니트의 열 전달 특성은 공기 유입속도가 빠를수록 증발기에서의 열전달율은 높게 나타나는 결과였으며 또한 동일한 유입 공기량 일 경우 칠러냉각수 유입 온도가 낮을수록 출구측과의 Δt 는 높게 나타냄을 알 수 있었고 반면에, 공기 유입속도가 낮고 칠러냉각수 입구온도가 높을수록 증발관에서의 열 전달 특성은 다소 감소하는 경향을 보였다.

참고문헌

1. Younggy Shin, Young Soo Chang and Youngil Kim, Controller design for a real-time air handling unit, *Control Engineering Practice*, Volume 10, Issue 5, May 2002, pp. 511-518
2. Barak Avisar, Lev Shemer and Abraham Kribus, Measurements of velocity fields in finite cylinder arrays with and without tip clearance, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Volume 24, Issues 3-4, May 2001, pp. 157-167
3. Man-Hoe Kim and Clark W. Bullard, Air-side performance of brazed aluminum heat exchangers under dehumidifying conditions, *International Journal of Refrigeration*, Volume 25, Issue 7, November 2002, pp. 924-934
4. Yuan, Jiankun, Circulation Methods in Unsteady and Three-dimensional Flows, Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Worcester Polytechnic Institute
5. E. Buyruk, Numerical study of heat transfer characteristics on tandem cylinders, inline and staggered tube banks in cross-flow of air, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Volume 29, Issue 3, April 2002, pp. 355-366
6. E. Buyruk, M. W. Johnson and I. Owen, Numerical and experimental study of flow and heat transfer around a tube in cross-flow at low Reynolds number, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Volume 19, Issue 3, June 1998, pp. 223-232
7. Man-Hoe Kim, Baek Youn and Clark W. Bullard, Effect of inclination on the air-side performance of a brazed aluminum heat exchanger under dry and wet conditions, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 44, Issue 24, December 2001, pp. 4613-4623

8. J. W. Scholten and D. B. Murray, Heat transfer and velocity fluctuations in a staggered tube array, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Volume 19, Issue 3, June 1998, pp. 233-244
9. K. W. Tham, S. C. Sekhar and David Cheong, Indoor air quality comparison of two air-conditioned zones served by the same air-handling unit, *Building and Environment*, Volume 37, Issue 10, October 2002, pp. 947-960
10. J. L. Niu, L. Z. Zhang and H. G. Zuo, Energy savings potential of chilled-ceiling combined with desiccant cooling in hot and humid climates, *Energy and Buildings*, Volume 34, Issue 5, June 2002, pp. 487-495
11. C.H.K. Williamson, "Vortex Dynamics in the Cylinder Wake," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 28, pp.477-539, 1996
12. H. Obara and Y. Matsudaira, "Vortex Generating Process behind a Pair of Circular Cylinder" Proc. of 4th KSME-JSME Fluids Eng. Conf., pp.141-144, Tokyo, 1998
13. G. S. West and C. J. Apelt, "The Effects of Tunnel Blockage and Aspect Ratio on the Mean Flow Past a Cylinder with Reynolds Numbers Between 10^4 and 10^5 ," *J. Fluid Mech.*, Vol. 114, pp. 361-377, 1982
14. J.H. Gerrard, "The Mechanics of the Formation region of vortices behind Bluff bodies," *J. Fluid Mech.* Vol.25, part2, pp.401-403, 1966
15. 김경천, 정양범, "원주의 근접후류에 대한 자유흐름 난류강도의 영향," *대한기계학회 논문집*, Vol. 15, No. 6, pp. 2062- 2072. 1991
16. 임용섭, 손동기, 이준식, 양경수, "Reynolds수와 난류강도의 변화에 따른 실린더주위 유동 박리점의 거동에 관한 실험적 연구," *대한기계학회 논문집*, Vol. 22, No. 7, pp. 889-898. 1998

17. 조석호, 부정숙, “ 일렬관군에서 난류 후류특성에 관한 연구”, 대한기계학회 논문집, Vol. 13, No.5, pp. 1023-1031. 1989
18. C.S.Tae On the Individually Separated Air-Conditioning System, 개별분산 공조시스템에 관한 관찰, 공기조화·냉동공학회지, 1994, Vol.23, No.1, pp. 37-52
19. W.T.Hwang and S.H.Kim, 공간절약을 위한 천장형 분산 공조기, 냉동공학회지, 1995, Vol.24, No.6, pp.628-634
20. K.B.Jeong, D.W.Cho, 인텔리전트빌딩에서 개별공조시스템의 최근 동향, 냉동공학회지, 1999, Vol.28, No.3, pp.196-202