

< 논문 >

PIV를 이용한 직렬배열에서의 두 정사각기둥 주위의 유동특성에 관한 연구

김동건* · 이종민** · 성승학*** · 윤순현†
(2005년 5월 17일 접수, 2005년 10월 7일 심사완료)

A Study on Characteristics of the Flow Around Two Square Cylinders in a Tandem Arrangement Using Particle Image Velocimetry

Dong-Keon Kim, Jong-Min Lee, Seung-Hak Seong and Soon-Hyun Yoon

Key Words: Square Cylinder(정사각 실린더), Particle Image Velocimetry(입자영상유속계), Mean Flow Field(평균유동장), Separated Shear Layer(박리 전단층), Reattachment(재부착), Vortex Shedding(와유출), Strouhal Number(스트로할 수), Tandem Arrangement(직렬배열)

Abstract

The flow fields including velocities, turbulence intensities, Reynolds shear stress and turbulent kinetic energy were investigated using particle image velocimetry(PIV) to study the flow characteristics around two square cylinders in a tandem arrangement. The experiments were carried out in the range of the spacing from 1.0 to 4.0 widths of cylinder, Reynolds number of 5.3×10^3 and 1.6×10^4 respectively. Discontinuous jumping at the drag coefficient variation was found for two cylinders simultaneously when the spacing between two cylinders is varied. This phenomenon is attributed to a sudden change of the flow pattern which depends on the reattachment of the shear layer separated from the upstream cylinder. Near such a critical spacing, the changes of the flow fields as well as the effect of Reynolds number were studied in detail.

기호설명

D : 정사각형 실린더의 한 변의 길이
 s : 두 실린더 사이의 거리
 f : 와유출 주파수
 U_∞ : 자유유동 속도
 Re_D : 레이놀즈 수(= $U_\infty D / \nu$)
 St_D : Strouhal 수(= fD / U_∞)

x, y : 유동방향 및 수직방향 좌표
 u, v : x, y 방향의 속도성분
 u', v' : u, v 의 난류섭동성분
 U, V : u, v 의 평균속도
 u_{rms} : x 방향의 속도 r.m.s. (= $\sqrt{u'^2}$)
 v_{rms} : y 방향의 속도 r.m.s. (= $\sqrt{v'^2}$)

1. 서론

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부
E-mail : yshyoon@pusan.ac.kr
TEL : (051)510-2314 FAX : (051)583-7640
* 회원, 부산대학교 기계기술연구소
** 회원, 한국델파이(주)
*** 회원, 부산대학교 기계공학부

인접구조물간의 바람의 작용은 이들이 각각 단독으로 존재하는 경우와는 근본적으로 다르며, 구조물의 형태, 간격, 풍향 그리고 상대적인 위치 관계에 따라 구조물에 미치는 공력학적인 특성 및 유동특성은 다르게 나타난다. 이러한 특성을

규명하는 것은 공학적으로 상당한 흥미를 가진다. 현대의 고층건물은 단독으로 존재하지 않고, 주위의 건물에 영향을 받는다. 이때의 두 건축물에 작용하는 공력학적인 힘의 평가가 구조강도 설계상 필요하다. 예를 들면 주기적으로 유출되는 와류출(vortex shedding)과 같은 현상은 구조물의 진동에 관련되기 때문에 와의 생성 및 소멸이 두 건축물에 미치는 영향에 관한 메카니즘을 이해하는 것은 실용적인 문제에서 중요한 의미를 갖는다. 선행연구들을 간단히 살펴보면, Sakamoto 등^(1,2)은 2차원적인 두 사각 실린더가 직렬배열(tandem arrangement)로 있을 때, 두 사각 실린더 사이의 간격에 따른 두 사각 실린더의 항력계수가 갑자기 변하는 불연속 지점인 임계거리가 존재한다고 밝혔고, 또한 자유유동의 난류강도가 클수록 임계거리의 값이 작아짐을 밝혔다. Ko 등⁽³⁾은 2차원적이고 크기가 다른 두 사각 실린더가 병렬배열로 있을 때, 두 사각 실린더의 간격에 따라 항력 및 양력계수가 다르게 나타나고, 두 사각 실린더 사이 면에서의 재부착지점도 다르게 나타난다고 밝혔다. Gu 와 Sun⁽⁴⁾은 2차원적인 두 원형 및 사각 실린더를 풍향 및 간격을 조절하면서 두 사각 실린더의 항력 및 양력계수 관한 연구를 하였다. 특히 원형 실린더에서는 직렬배열의 경우에 임계거리가 나타나지 않음을 밝혔다. 또한 병렬배열(side-by-side arrangement)에서는 두 실린더 사이의 거리가 짧을 때 유동이 한 쪽으로 쏠리는 현상이 발생된다고 말한다. Hangan 등^(5,6)은 2차원적인 두 사각 실린더가 직렬배열로 있을 때, 상부 실린더(upstream cylinder)의 크기와 두 실린더 사이의 간격에 따른 항력계수의 상관관계에 관한 연구를 하였다. 또한 2D와 3D인 두 사각실린더가 직렬배열로 있을 때, 간격을 조절하면서 항력계수 값을 얻고, (1) one-body regime (2) bistable regime (3) resonant regime (4) quasi-isolated regime 으로 4부분으로 구분하여 유동특성을 조사하였다. 특히 3D 모델에서는 임계거리가 나타나지 않는다고 말한다. Sakamoto 등⁽⁷⁾은 2차원적인 두 사각 실린더가 직렬배열로 있을 때, 상부실린더 앞쪽에 제어판(control plate)을 설치하여 두 사각 실린더의 항력을 줄일 수 있는 방법에 관한 연구를 하였다. 그리고 제어판과 상부 실린더의 간격을 조절하면서 두 사각 실린더의 항력이 최소가 되는 구간이 있음을 구명하였

다. Chen과 Liu⁽⁸⁾는 2차원적인 두 사각 실린더가 직렬배열로 있을 때, 실린더 사이의 간격이 증가하는 방향과 감소하는 방향에 따라 임계거리 값이 다르게 나타나며, 이러한 값은 Reynolds 수에 따라 조금 차이가 있으며 전 영역에서 다 나타나고 있음을 밝혔다. Martinuzzi 등⁽⁹⁾은 3D 모델인 두 개의 정육면체(cube)가 직렬배열로 있을 때, 임계거리가 나타나지 않음을 밝혔다. 이는 LDV를 통해서 상부물체의 상면모서리에서 박리된 유동이 양옆에서 박리된 유동과 상호작용하여 유동이 안정화되기 때문이다.

두 개의 사각 실린더가 직렬배열로 있을 때, 항력계수가 갑자기 변하는 임계거리가 존재하는 원인은 최근에 와서 몇몇 연구자^(7,8,9)들이 유동가시화의 방법을 통하여 그 원인을 설명하고 있지만, 세부적인 정보는 아직도 부족하다. 특히, 두 사각 실린더 사이의 유동장(flow field)에 관한 연구는 이루어 지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 PIV를 이용하여 두 실린더 사이의 거리 변화에 따른 유동장을 획득하여 임계거리 전후로 유동장이 어떻게 변화하는지 조사하였다. 또한 열선풍속계를 통하여 상부실린더의 와류유출 주파수의 변화도 함께 고려하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치 및 조건

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도 및 좌표계를 나타낸 것이다. 본 실험에 사용된 풍동은 7.5 kW 교류 3상 전동기에 구동되며 주파수변환기(Inverter)를 사용하여 시험부 입구의 자유유동 속도를 0~33 m/s로 가변할 수 있는 개회로 저속 풍동(open circuit low speed wind tunnel)으로 송풍기가 외기를 흡입하여 시험부로 토출하는 방식이다. 풍동의 전체길이는 대략 6m이며 송풍기(blower)와 확대부(diffuser) 그리고 수축노즐(contraction nozzle)로 구성되어 있다. 확대부 풍동 내에 여덟 곳에 10 mesh의 스크린(screen)을 설치하여 흐름의 균일성(homogeneity)을 꾀하였고, 풍동과 실험부 사이에는 기계적 진동방지와 기밀 유지를 위하여 유연한 생고무판의 사각형 고리(flexible rubber coupler)를 설치하였다. 시험부(test section)의 크기는 폭(W)이 0.3m, 높이

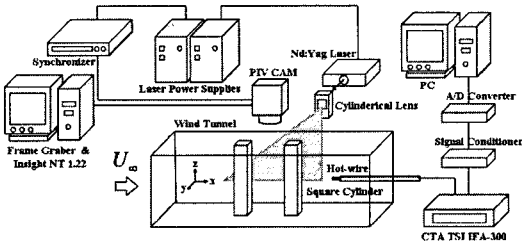


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

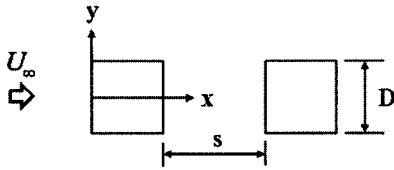


Fig. 2 Two square cylinders in tandem arrangement

(H)가 0.3m, 길이(L)가 2.0m이며 유리 및 아크릴로 제작되어 있다. 시험부에서 유입되는 공기의 자유유동 난류강도는 0.5%이내의 균일 유동으로 유지된다.

정사각 실린더는 투명한 아크릴을 사용하여 표면은 매우 매끄럽게 하고 모서리들은 가능한 한 날카롭게 제작되었으며, 높이(H)는 30cm, 한변의 길이(D)는 20mm로 두 실린더 중 상부실린더는 풍동 시험부 입구로부터 30cm(15D) 후방 중앙에 양변면에 수평으로 고정되게 설치하였다. 종횡비(aspect ratio = L/D)는 15로 충분한 이차원성의 유동을 구현하였고, 폐쇄비(blockage ratio)는 6.6%로 유동에 대한 벽면의 영향은 매우 작다.

자유유동 속도는 각각 $U_\infty = 3.87 \text{ m/s}$, $U_\infty = 11.68 \text{ m/s}$ 으로 고정하였으며, 이 때 각각의 Re_D 는 5300, 16000 이었다. Fig. 2는 본 실험에서 사용된 두 사각 실린더의 배열형태를 나타낸다. 실린더 사이의 간격은 s/D 로 무차원화하여 나타내었으며, 두 실린더 사이의 간격은 $s/D = 1 \sim 4$ 로 변화하였다.

2.2 PIV 측정시스템 및 계측방법

PIV 시스템은 적절한 추적 입자를 선정하고, 실린더형 렌즈(cylindrical lens)를 이용하여 레이저 평면광을 만들어, 측정하고자 하는 유동 평면에

조사하게 한 후, CCD 카메라와 같은 영상 입력 장치를 평면광에 수직으로 설치하여 입자 영상을 취득한다. 취득한 입자 영상의 분석을 통해 속도 장 추출이 가능하며, 이와 더불어 후처리 과정(post processing)을 통해 와도(vorticity), 난류강도(turbulence intensity), 레이놀즈 전단응력(Reynolds shear stress), 난류 운동에너지(turbulent kinetic energy) 등과 같은 다양한 물리량을 구할 수 있다.

본 연구에서의 PIV 시스템은 250mJ/Pulse의 이중 펄스 방식의 Nd:Yag 레이저 시스템과 2K×2K의 고해상도 CCD 카메라(TSI), 동기화장치(Synchronizer, TSI), 화상처리 보드(TSI, Frame grabber) 및 구동용 펜티엄 컴퓨터로 구성되어 있다. 이중 펄스 방식의 Nd:Yag 레이저 광원으로 출사된 레이저 빔이 원통형 렌즈를 거쳐 평면빔으로 만들어져 시험부로 조사된다. 2K×2K 고해상도 CCD 카메라가 입자 영상 취득을 위하여 사용되었으며, 두 개의 프레임(frame)간의 시간 간격은 $Re_D = 5300$ 에서는 $50\mu\text{s}$, $Re_D = 16000$ 에서는 $20\mu\text{s}$ 을 사용하였다. CCD 카메라에 부착된 렌즈는 60mm 렌즈를 사용하였다. 동기화 장치 및 화상처리보드를 사용하여 레이저 시스템, CCD 카메라와 구동 컴퓨터 사이의 동기화를 가능케 하였다. 라스킨 노즐(laskin nozzle)을 사용하여 올리브 오일을 에어로졸화 하였으며, 이때의 평균 직경은 $2\mu\text{m}$ 로 유동에 영향을 거의 주지 않는다. PIV 측정영역(field of view)의 면적은 $120 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 이다. 속도벡터의 추출 알고리즘은 2화상 상호상관기법(two frame cross-correlation)을 이용하였다. 탐색영역(interrogation window)의 크기는 $48 \times 48 \text{ pixels}$ 이고, 50%의 겹침(overlap)이 허용되었다. 구해진 속도벡터는 후처리 프로그램을 이용하여 불량벡터의 제거, 속도계산, 보간, 앙상블평균 등의 통계적인 처리를 거쳤다.

2.3 와류 유출 주파수 측정

두 실린더 사이의 간격 변화에 따른 상부실린더 와류출주파수를 구하기 위해서 유속의 시계열을 획득하였으며, 시계열의 획득은 정전형 열선 유속계(IFA-300, TSI)를 사용하였다. 열선(hot-wire)은 상부 실린더의 반대측(opposite side)에서 유출되는 속도신호와의 간섭을 피하기 위해 $x/D = 2.5$, $y/D = 1$ 에 위치시켰다. 열선유속계의 신호는 동

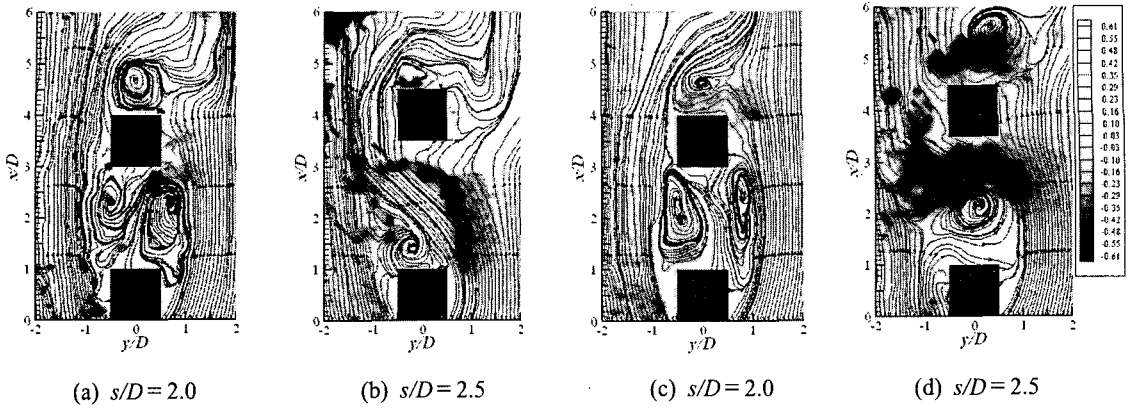


Fig. 3 Instantaneous spanwise velocity fields and streamlines : v/U_∞ , $Re_D = 5300$ (a, b), $Re_D = 16000$ (c, d)

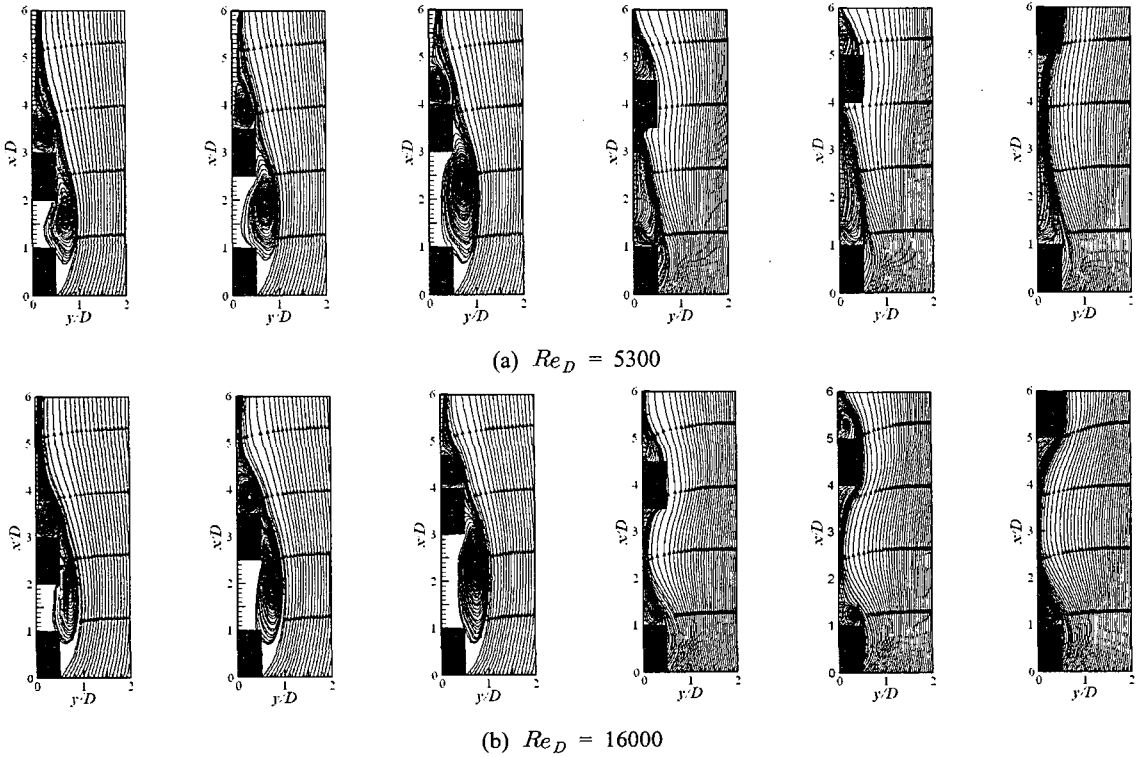


Fig. 4 Streamlines from ensemble averaged velocity fields with spacing at $Re_D = 5300$ and $Re_D = 16000$ ($s/D = 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0$)

축 케이블을 통하여 신호 처리부로 전달되며, 전달된 신호는 5 kHz의 저역 통과 필터를 거쳐 12bit의 A/D 변환기를 통하여 이산화하여 컴퓨터에 저장하였다. 신호의 추출 주파수(sampling frequency)는 10,000Hz로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 순간 유동장

Fig. 3은 Reynolds 수와 실린더 간격에 따른 유선과 y -방향의 순간 속도분포를 나타낸 그림이

Table 1 Comparison of various investigations for square cross-section cylinders

Researcher	Re_D	Tu ($\sqrt{u'^2}/U_\infty$, %)	Critical spacing (s/D)	St_D for $s/D=\infty$
Sakamoto ⁽¹⁾	5.5×10^4	0.2	3.0	0.130
Hangan ⁽⁶⁾	2.2×10^4	1.5	2.3	0.123
Chen ⁽⁸⁾	1.6×10^4	0.5	2.5	0.133
Present	2.7×10^3	0.5	2.5	0.134
	1.6×10^4	0.5	2.5	0.138

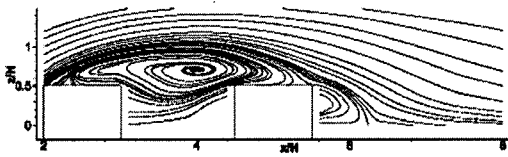


Fig. 5 Streamlines of the LDV measured mean velocity vectors for 2D cylinders at $s/D=1.5^{(5)}$, $Re_D = 22000$

다. Fig. 3(a)를 보면 $s/D=2.0$ 일 때 두 Reynolds 수 영역 모두 상부 실린더의 앞 모서리에서 박리된 유체는 하부 실린더의 옆면에서 유동이 재부착되면서 두 실린더 사이에서 재순환 영역(recirculation region)이 발생된다. 그러나 Fig. 3(b)에서 $s/D=2.5$ 가 되면서 상부실린더에서 박리된 유체는 두 실린더 사이로 들어가게 된다. 재순환 영역이 발생하지 않는 순간 유동장이 나타난다. $s/D=2.0$ 에서는 두 실린더 사이에서 순간 y -방향의 속도는 낮은 값을 가지나, $s/D=2.5$ 가 되면서 높은 값을 가진다. Fig 3(c), (d)를 보면 이러한 특징은 Reynolds 수가 증가하여도 유사하게 나타난다.

본 연구는 선행연구자들과 동일하게 상부 실린더에서 박리된 유체가 두 실린더 사이로 들어가지 못하는 상태를 Mode 1, 두 실린더 사이로 들어가는 상태를 Mode 2, 그리고 그 임계점을 임계거리로 정의한다. 본 연구에서는 임계거리가 $s/D=2.5$ 로 나타났다. Table 1은 본 연구와 다른 선행연구자들의 임계거리 값을 비교 한 표이다. Sakamoto⁽¹⁾와는 다소 차이가 있으나, Hangan⁽⁶⁾과 Chen⁽⁸⁾ 비슷한 결과 값을 가짐을 알 수 있다.

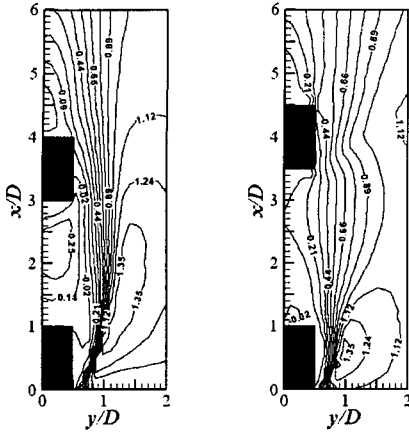
3.2 평균 속도장

Fig. 4는 2000장의 순간 속도장을 앙상블 평균

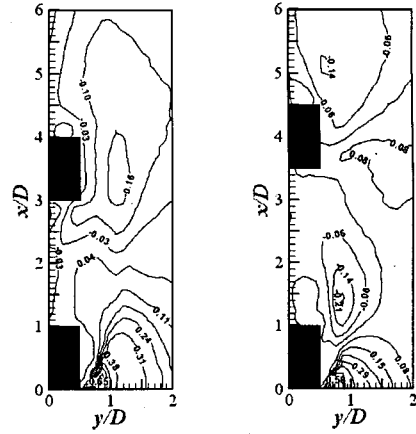
화된 속도장의 유선을 나타낸 그림이다. 평균 유동장은 실린더의 중심선($x/D=0$)을 기준으로 좌우 대칭구조를 갖고 있기 때문에 오른쪽 면만 표시하였다. Fig. 4(a), (b) 모두 임계거리를 기준으로 두 개의 유동구조를 가짐을 알 수 있다. 즉 상부 실린더의 앞면에서 박리된 유체가 하부 실린더 옆면에 재부착으로 인하여 생기는 두 개의 큰 재순환영역(recirculation region)을 갖는 유동구조와 상부실린더에서 박리된 유체가 하부 실린더 앞면에서 다시 박리되는 유동구조이다. Fig. 5는 Hangan⁽⁶⁾이 LDV로 측정된 속도장으로부터 $s/D=1.5$ 에서의 유선을 나타낸 그림이다. $Re=22000$ 에서도 본 연구와 유사한 유선형태가 나타남을 알 수 있다.

Fig. 6, 7은 유동방향의 속도장을 나타낸 그림이다. Mode 1과 Mode 2의 최대 가속 값은 $1.35 (U/U_\infty)$ 로 같으나 그 영역은 다르게 나타나는데, Mode 1의 가속영역이 훨씬 더 크게 나타난다. 이는 Mode 1에서는 상부 실린더에서 박리된 유체가 두 실린더 사이로 들어가지 못하고, 하부 실린더의 옆면에 재부착으로 인하여 생기는 결과이다. 두 실린더 사이의 간격에 관계없이 $s/D < 2.5$ 에서는 Mode 1의 속도장과 같이 나타나고, $s/D \geq 2.5$ 에서는 Mode 2의 속도장을 가짐을 알 수 있었다. 또한 유동방향의 속도성분은 본 실험에 사용된 두 개의 Reynolds 수에 대해서는 거의 같은 유동장 형태가 나타남을 Fig. 6과 Fig. 7에서 알 수 있다. Fig. 6(a), 7(a)를 보면 두 실린더 사이의 영역에서 음(-)의 값이 나타나는데, 이는 재순환영역을 의미하는 것이다.

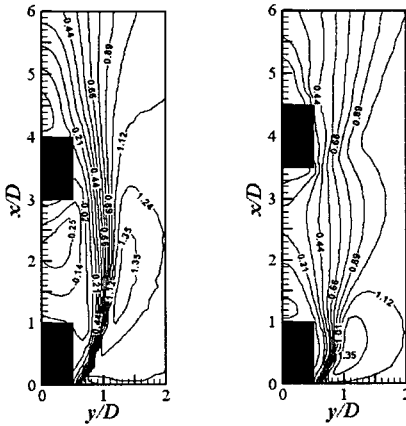
Fig. 8, 9는 자유흐름 속도 방향과의 직각방향의 속도장을 나타낸 그림이다. y -방향의 속도성분 역시 Mode 1과 Mode 2에서 다른 유동장이 나타난다. Fig. 8(a), 9(a)를 보면 $s/D=2.0$ 에서 하부



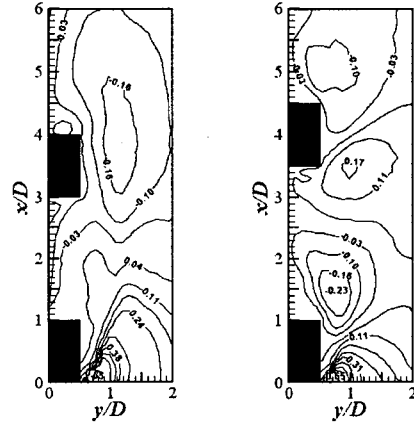
(a) $s/D = 2.0$ (Mode 1) (b) $s/D = 2.5$ (Mode 2)
Fig. 6 Contours of the streamwise velocity at $Re_D = 5300 : U/U_\infty$



(a) $s/D = 2.0$ (Mode 1) (b) $s/D = 2.5$ (Mode 2)
Fig. 8 Contours of the spanwise velocity at $Re_D = 5300 : V/U_\infty$



(a) $s/D = 2.0$ (Mode 1) (b) $s/D = 2.5$ (Mode 2)
Fig. 7 Contours of the streamwise velocity at $Re_D = 16000 : U/U_\infty$



(a) $s/D = 2.0$ (Mode 1) (b) $s/D = 2.5$ (Mode 2)
Fig. 9 Contours of the spanwise velocity at $Re_D = 16000 : V/U_\infty$

실린더 앞에서 음의 속도 값을 갖는데 이 역시 재순환에 의해 생기는 값이다. 그리고 Mode 2에 $x/D=1.5$, $y/D=0.8$ 부근에서 음의 값을 가지게 되는데, 이는 상부 실린더에서 박리된 유체가 두 실린더 사이로 들어감으로 인해 생기는 현상이다. 두 Reynolds 수 모두 $x/D=0$ 부근에서 Mode 1에 비해 Mode 2가 가속되는 영역이 작게 나타나는데, 이는 Mode 2에서는 박리된 유체가 빠르게 두 실린더 사이로 들어감으로 인해 생기는 현상이라고 생각된다.

Fig. 10은 전체 평균 속도장으로부터 y -방향속도 성분을 각 지점(x/D)에서 y -방향으로 잘라서

추출한 그림이다. Reynolds 수가 클수록 상부 실린더 앞 모서리 부근에서 더 넓은 영역에서 양의 V 값이 나타나고 $x/D=1.72$ 에서는 더 넓은 음의 V 값이 나타나게 된다. 이는 Reynolds 수가 클수록 유동방향을 기준으로 상부 실린더에서 박리되는 각도도 커지고, 실린더 사이로 들어가는 각도도 커짐을 의미한다. 이것은 Fig. 4의 유선으로 쉽게 확인될 수 있다.

3.3 평균 난류 유동장

Fig. 11은 $Re_D=16000$ 에서의 Mode 1, Mode 2에

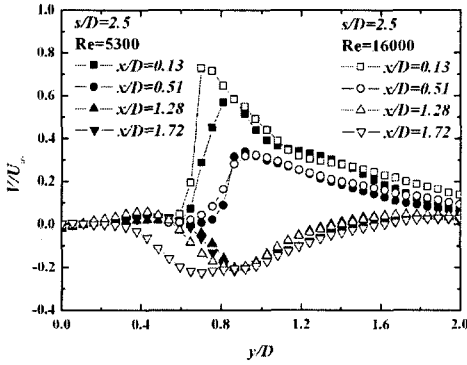


Fig. 10 Profiles of the mean spanwise velocity at different x -locations

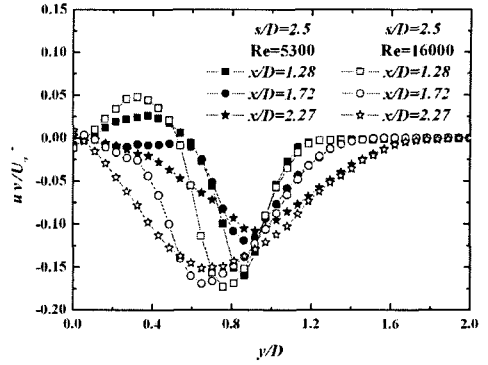
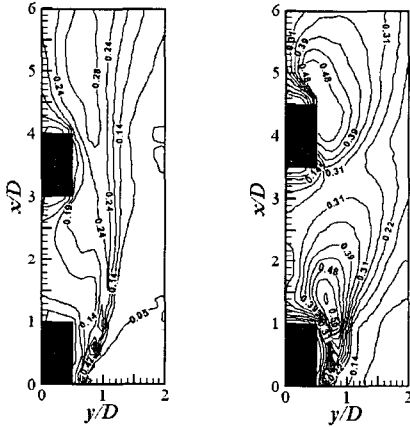
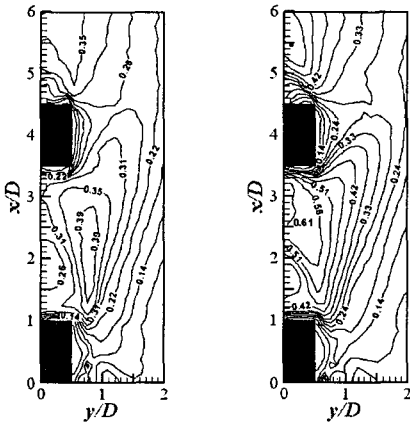


Fig. 13 Profiles of the Reynolds shear stress at different x/D



(a) $s/D = 2.0$ (Mode 1) (b) $s/D = 2.5$ (Mode 2)
 Fig. 11 Contours of the streamwise turbulent intensity at $Re_D = 16000 : u_{rms}/U_\infty$

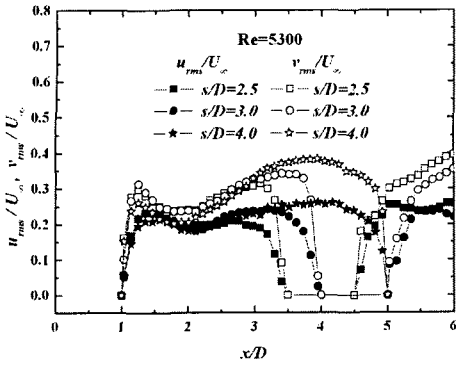


(a) $Re_D = 5300$ (b) $Re_D = 16000$
 Fig. 12 Contours of the spanwise turbulent intensity at $s/D = 2.5 : v_{rms}/U_\infty$

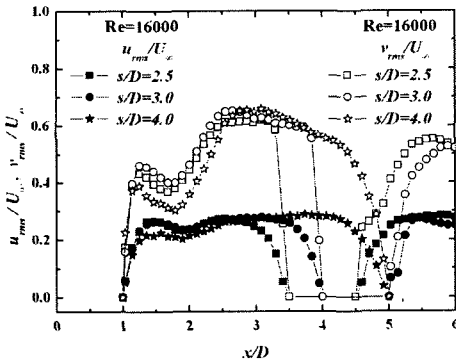
대한 난류 유동장을 나타낸 그림이다. 본 연구에서는 x -방향의 난류강도가 두 개의 Reynolds 수에 대하여 비슷하게 나타났다. Fig. 11(a)를 보면 하부 실린더 뒤쪽으로 높은 값을 가지는데, 이는 상부 실린더에서 박리된 유체가 하부 실린더 옆면에서 유동이 재부착됨으로 인한 후류의 영향이다. Fig. 11(b)를 보면 $x/D = 1.0 \sim 1.7$, $y/D = 0.8$ 부근에서 0.6 큰 값을 가지는데, 이는 순간 유동장에서 상부 실린더로부터 주기적으로 좌우에서 유출되는 대규모 와의 원인이다.

Fig. 12는 두 Reynolds 수에 대한 Mode 2에서의 y -방향의 난류 유동장을 나타낸 그림이다. 주목할 사항은 두 실린더 사이에서 확인한 차이를 보인다는 것이다. $Re_D = 5300$ 에 비해 $Re_D = 16000$ 에서 더 높은 값을 가진다. 이것은 실린더 표면의 압력계수로 설명할 수 있다. Chen⁽⁸⁾은 직렬배열에서 두 실린더 표면의 압력계수 값을 측정하였는데, $Re_D = 5300$ 과 $Re_D = 16000$ 에서 상부 실린더 뒷면의 가운데 점에서 $P_{mean} = -1.4$ 로 같은 음(-)의 압력계수 값을 얻었다. 이는 자유유동속도의 제곱에 비례하여 상부 실린더 뒷면에서 더 큰 음압이 발생함을 의미한다. Reynolds 수가 증가 할수록 상부 실린더 뒤쪽에서의 더 강한 흡입으로 주변의 유체가 두 실린더 사이로 더 많은 유입이 일어남으로 인하여 y -방향의 난류강도가 증가하게 된다.

Fig. 13은 전체 평균 속도장으로부터 추출한 레이놀즈 전단응력을 각 지점(x/D)에서 y -방향으로 잘라서 추출한 그림이다. 레이놀즈 전단응력은 난류성분 u' , v' 의 상호작용 의하여 발생하는 것



(a) $Re_D = 5300$

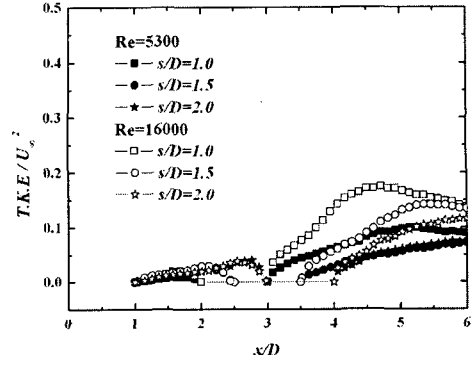


(b) $Re_D = 16000$

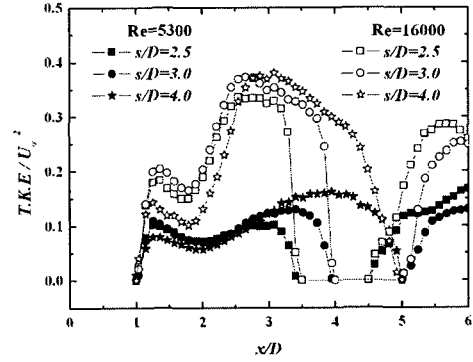
Fig. 14 Variation of turbulent intensities along the centerline at Mode 2

로 운동량의 이동을 의미한다. $x/D=1.72$ 를 보면 $y/D=0.6$ 에서 $Re_D=5300$ 은 -0.01 의 값을 가지지만, $Re_D=16000$ 에서는 -0.17 의 값을 가진다. 이것은 $Re_D=16000$ 일 때 실린더의 중심선으로 더 큰 운동량의 전달이 일어나고 있음을 의미한다. 전체적으로 보면 $y/D=0 \sim 1.0$ 에서 $Re_D=16000$ 이 실린더 중심선으로 더 많은 운동량의 전달이 일어나고 있음을 알 수 있다. $x/D=1.28$ 을 보면 $y/D=0 \sim 0.5$ 에서 양의 값이 나타나는데, 이것은 상부 실린더 뒷면에서 재순환에 의한 결과이다.

Fig. 14는 실린더의 중심선($y/D=0$)을 따라 Mode 2에서의 u_{rms} 와 v_{rms} 를 비교한 그래프이다. 전체적으로 유동방향의 난류강도보다 유동에 수직한 방향의 난류강도가 더 큰 것은 강한 외부유체의 유입과 혼합으로 인한 것이다. u_{rms} 는 Reynolds 수에 관계없이 0.25로 거의 같은 값을 가지나, v_{rms} 는 $Re_D=5300$ 일 때 최고점이 0.35서 $Re_D=16000$ 이 되면서 0.7로 더 큰 운동량의 전달



(a) Mode 1



(b) Mode 2

Fig. 15 Variation of turbulent kinetic energy along the centerline

이 일어나고 있다. 이것은 v_{rms} 가 Reynolds 수에 영향을 받고 있음을 설명해 준다.

Fig. 15는 실린더의 중심선($y/D=0$)을 따라 난류운동에너지의 값을 나타낸 그림이다. 일반적으로 단위질량당 난류운동에너지는 $k=0.5(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$ 로 정의되지만, Bradshaw 등⁽¹⁰⁾은 $\overline{v'^2}$ 과 $\overline{w'^2}$ 은 거의 같은 크기로 존재한다고 가정하였다. 본 연구에서는 2차원 PIV기법으로 x 및 y 방향의 난류속동성분만 측정하여 $w' = 0.5(u' + v')$ 로 가정하고 $k=0.75(\overline{u'^2} + \overline{v'^2})$ 으로 구하였다. Fig. 15(a)를 보면 난류운동에너지가 Mode 1에서는 Reynolds 수의 큰 영향 없이 거의 비슷한 값을 가지나, 하부 실린더 뒤쪽에서 후류의 영향으로 그 값이 0.1 이내로 차이가 나타난다. Fig. 15(b)를 보면 난류운동에너지가 Mode 2에서는 두 사각 실린더 사이에서 Reynolds 수에 따라 상당히 큰 값의 차이가 나타나는데, $Re_D=5300$ 에서는 전체적으로 0.1 정도의 값을 가지나 $Re_D=16000$ 을 보면 Fig.

14(b)에서와 같이 v_{rms} 의 최고점이 나천체적으로 0.1 정도의 값을 가지나 $Re_D=16000$ 을 보면 Fig. 14(b)에서와 같이 v_{rms} 의 최고점이 나타나는 $x/D=3.0$ 에서 최고점이 나타나고, 그 값은 0.4로 $Re_D=5300$ 보다 4배나 높다. 이것은 u' 의 성분보다 v' 의 성분이 더 큰 영향을 미쳤기 때문이라고 생각된다. 그래프 형상도 Fig. 14(b)의 v_{rms} 과 비슷한 양상으로 나타남을 알 수 있다.

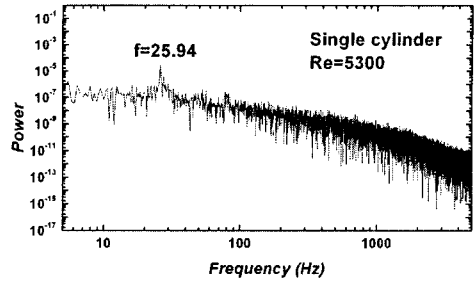
3.4 Strouhal 수의 특성

Fig. 16은 사각실린더가 하나일 때 $x/D=2.5$, $y/D=1$ 에서의 열선풍속계로 측정된 유동방향의 섭동속도성분에 대한 파워스펙트럼분석을 보여주고 있다. 각각의 지배적인 와류유출 주파수는 $Re_D=5300$ 에서는 $f=25.94$ Hz, $Re_D=16000$ 에서는 $f=80.57$ Hz로 나타났다. 이 때 Strouhal 수($St_D=fD/U_\infty$)는 각각 0.134, 0.138로 나타났다. Okajima⁽¹¹⁾는 정사각 실린더 주위를 지나는 유동에서 자유흐름 난류강도가 0.5%이고, $1 \times 10^3 < Re_D < 2 \times 10^4$ 범위의 Reynolds 수 영역일 때, Strouhal 수가 약 0.133으로 일정하게 나타난다고 보고하였다. Chen⁽¹²⁾은 0.5%의 난류강도이고, $2.0 \times 10^3 < Re_D < 2.1 \times 10^4$ 에서 Strouhal 수는 0.125에서 0.138까지 변화한다고 보고하였다. 이들의 결과는 본 실험의 결과 값이 비슷함을 알 수 있다.

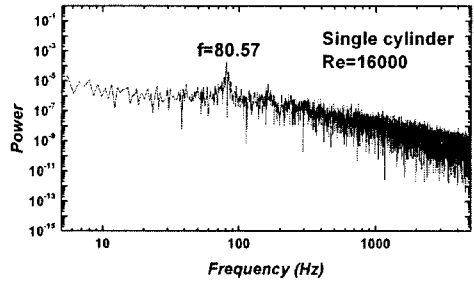
Fig. 17은 두 사각 실린더 사이의 거리변화에 대한 $x/D=2.5$, $y/D=1$ 에서의 상부 실린더의 Strouhal 수의 변화를 보여준다. 두 실린더 사이의 거리가 증가함에 따라 점점 감소하다가 한 점을 지나면서 다시 증가하는 형태가 나타나는데, 이 특정한 한 점이 임계거리가 된다. 본 연구의 임계거리인 $s/D=2.5$ 를 전후로 유동상황이 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다. s/D 가 점점 커짐에 따라 상부 실린더의 Strouhal 수는 하부 실린더의 간섭에서 벗어나 한 개의 실린더와 같은 값에 가까워지고 있음을 알 수 있다. 이것은 Fig. 17에 나타난 바와 같이 Chen⁽⁸⁾과 유사한 결과 값이 나옴을 알 수 있다.

4. 결론

입자 영상 유속계를 이용하여 두 사각 실린더의 직렬배열에서의 간격 변화에 대한 속도 및 난



(a) $Re_D = 5300$



(b) $Re_D = 16000$

Fig. 16 Power spectra of streamwise velocity fluctuation for a single cylinder

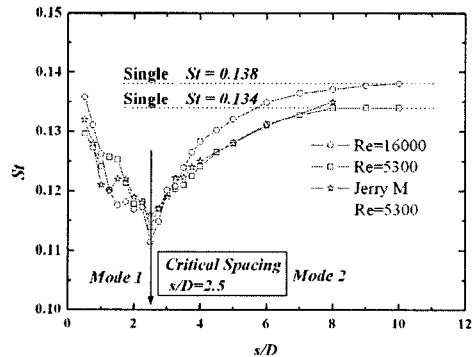


Fig. 17 Variation of Strouhal number with spacing

류유동장, Strouhal 수의 특성을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Reynolds 수 5300과 16000에서 항력계수의 갑작스런 변화가 일어나는 임계거리가 $s/D=2.5$ 로 나타났다.

(2) 평균 속도유동장에서 유동방향의 속도가 가속되는 영역을 비교해 보면 최고값은 Mode 1과 Mode 2 모두 1.35로 같으나, 그 영역은 Mode 1이 더 넓게 나타난다. 이는 상부 실린더에서 박리된

유체가 하부 실린더의 옆면에 재부착으로 인한 결과이다.

(3) 평균 난류유동장에서 Reynolds 수에 대한 영향은 u_{rms} 는 Mode 1, 2에서 큰 차이가 없으며, v_{rms} 만이 Mode 2에서 상당한 차이가 나타났다. 이것은 실린더 표면의 압력계수로 설명할 수 있다. 자유유동속도의 제곱에 비례하여 상부 실린더 뒷면에서 더 큰 음압이 발생함을 의미한다. Reynolds 수가 증가 할수록 상부 실린더 뒤쪽에서의 더 강한 흡입으로 주변의 유체가 두 실린더 사이로 더 많은 유입이 일어남으로 인하여 y -방향의 난류강도가 증가하게 된다.

(4) 두 사각 실린더의 간격 변화에 대한 상부 실린더의 Strouhal 수가 변화한다. Strouhal 수의 변화로도 임계거리를 찾을 수 있는데, 간격이 증가 할수록 점점 감소하다가 임계거리 이후로 다시 점점 증가하여 하부 실린더의 간섭에서 점점 벗어나면서 단일 실린더의 Strouhal 수에 가까워진다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 수행되었음.

참고문헌

- (1) Haniu, H., Obata, Y. and Sakamoto, H., 1987, "Fluctuating Forces Acting on Two Square Prisms In a Tandem Arrangement," *J. Wind Eng & Ind. Aerodyn.*, Vol. 26, pp. 85~103.
- (2) Haniu, H. and Sakamoto, H., 1988, "Effect of Free-Stream Turbulence on Characteristics of Fluctuating Forces Acting on Two Square Prisms in Tandem Arrangement," *Transaction of ASME*, Vol. 110, pp. 140~146.
- (3) Chiu, A.Y.W. Ko, N.W.M. and Wong, P.T.Y., 1995, "Flow Characteristics Around Two Parallel Adjacent Square Cylinders of Different Sizes," *J. Wind Eng & Ind. Aerodyn.*, Vol. 54/55, pp. 263~275.
- (4) Gu, Z.F. and Sun, T.F., 1995, "Interference Between Wind Loading on Group of Structures," *J. Wind Eng & Ind. Aerodyn.*, Vol. 54/55, pp. 213~225.
- (5) Hangan, H. and Vickery, B.J., 1999, "Buffeting of Two-Dimensional Bluff Bodies," *J. Wind Eng & Ind. Aerodyn.*, Vol. 82, pp. 173~187.
- (6) Hangan, H., Havel, B. and Martinuzzi, R., 2001, "Buffeting for 2D and 3D Sharp-Edged Bluff Bodies," *J. Wind Eng & Ind. Aerodyn.*, Vol. 89, pp. 1369~1381.
- (7) Mahbub, MD. Moriya, M. Sakamoto, H. and Takki, K., 2002, "Suppression of Fluid Forces Acting on Two Square Prisms in a Tandem Arrangement by Passive Control of Flow," *J. Fluids & Structures*, Vol. 16, No. 8, pp. 1073~1092.
- (8) Chen, J.M. and Liu, C.H., 2002, "Observations of Hysteresis in Flow Around Two Square Cylinders in a Tandem Arrangement," *J. Wind Eng & Ind. Aerodyn.*, Vol. 90, pp. 1019~1050.
- (9) Havel, B. and Martinuzzi, R.J., 2004, "Vortex Shedding from Two Surface-Mounted Cubes in Tandem," *J. Heat & Fluids Flow*, Vol. 25, pp. 364~372.
- (10) Bradshaw, P., 1968, "An Instruction to Turbulence and Its Measurement," *Pergamon Press*.
- (11) Okajima, A., 1982, "Strouhal Numbers of Rectangular Cylinders," *J. Fluid Mech.*, Vol. 123, pp. 379~398.
- (12) Chen, J.M. and Liu, C.H., 1999, "Vortex Shedding and Surface Pressures on a Square Cylinder at Incidence to a Uniform Air Stream," *J. Heat & Fluids Flow*, Vol. 20, pp. 592~597.