

PIV에 의한 직렬배열 상태에 놓인 3원주 주위의 유동장 가시화 노기덕¹ · 장동휴² · 배형섭² · 김원철[†]

(원고접수일 : 2010년 12월 3일, 원고수정일 : 2011년 1월 19일, 심사완료일 : 2011년 1월 28일)

The Visualization of the Flowfield around Three Circular Cylinders in the Tandem Arrangement by the PIV

Ki-Deok Ro¹ · Dong-Hyu Jang² · Hung-Sub Bae² · Won-Cheol Kim[†]

요 약 : 본 연구는 직렬배열 상태에 놓인 3원주 주위의 유동장 특성을 PIV를 이용하여 파악한 것이다. 실험은 레이놀즈수 $Re=3.0 \times 10^3 \sim 5.0 \times 10^3$ 범위 내에서 수평간격비(P/D)를 $P/D=1.25 \sim 3.75$ 로 변화 시켜가며 행하였다. 각각의 실험 파라미터에서 Strouhal 수, 와도변화, 순간 및 평균 속도벡터 및 속도 분포를 측정하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다. 3번째 원주 후방에서 측정된 Strouhal 수는 수평 간격비 P/D에 따라 크게 3가지 영역으로 구분되며, 각 원주의 후류에서의 흐름 패턴은 이들 영역에 따라 달랐다. 각 원주 후방에서 시간평균 흐름은 거의 정체상태에 있었으며, 그 정체영역의 크기는 1번째, 2번째, 3번째 원주 순으로 작았다. 2번째 원주 전, 후방 영역에서는 받음각 미소 ($\alpha = \pm 5^\circ$)에 따라 서로 반대방향의 볼텍스가 형성했다.

주제어 : 유체역학, 유동 가시화, 입자영상유속계, 비정상 유동, 3원주

Abstract: The Characteristics of the flowfield around three circular cylinders in tandem arrangement was investigated by PIV. Strouhal numbers, vorticity, velocity vectors and velocity profiles were observed at centre-to-centre space ratios of $P/D=1.25 \sim 3.75$, and Reynolds number of $Re=3.0 \times 10^3 \sim 5.0 \times 10^3$. As the results the Strouhal numbers measured in the rear region of 3rd the cylinder were distinguished three kind of regions with the space ratios and The flow pattern in the wake of each cylinder was different according to these regions. The time averaged flow at region of each cylinder was almost stagnated and the size of the stagnated region was small in order of 1st, 2nd and 3rd cylinder. The direction of vortex at the front and rear region of 2nd cylinder was opposed each other with the small difference($\alpha = \pm 5^\circ$) of the attack angle α .

Key words: Fluid mechanics, Flow visualization, PIV, Unsteady flow, Three circular cylinder

1. 서 론

원주열로서 대표되는 유동장은 원통다관식 열교환기내의 관열, 강물 속에 설치된 다리교각, 양식장에 설치된 수하식 양식시설 등 수없이 많다. 이러한 원주열주위의 흐름은 단독 원주 주위의 흐름

과 유사할 것이라고 가정하는 것이 일반적인 관습이다. 이러한 가정은 각 원주가 충분히 멀리 떨어져 있을 때는 정당화되나, 근접해 있을 때는 전혀 다른 형태의 흐름을 보인다. 또한 원주열은 그 배치형태에 따라 3가지로 대별되는데 흐름에 나란한

[†] 교신저자(경상대학교 기계시스템공학과 · 농생명과학원, E-mail:wckim@gnu.ac.kr, Tel: 055-772-9102)

1 경상대학교 기계시스템공학과 · 해양산업연구소

2 경상대학교 기계시스템공학과

형태의 직렬배열(tandem arrangement), 흐름에 수직인 병렬배열(side by side arrangement), 그 외 입의의 받음각을 갖는 엇갈림배열(staggered arrangement)이 그것이다. 이 중에서도 가장 기본적인 배치형태가 흐름에 나란한 직렬배열이며, 특히 직렬배열 상태에 놓인 2원주의 간격비 변화에 따른 유동장 간섭에 관한 연구가 주류를 이루고 있고, 이에 관한 연구를 종합해보면 다음과 같다.

[1]은 직렬배열 상태에 놓인 2원주에 대해 중심간의 수평 간격비를 $P/D=1.0\sim 6.0$ 로 변화시켜가며, 각 원주에 작용하는 항력을 측정하여 그 결과를 단독 원주의 항력과 비교했는데 2원주의 합계 항력 즉 조합항력은 어느 간격비에 있어서도 단독 원주 항력의 2배보다 작게 나타났다.

[2]는 직렬배열 상태에 놓인 2원주의 후류를 연기로 가시화하여 하류측 원주의 뒤쪽에 항상 하나의 볼텍스 열이 존재하며, 수평간격비가 클 경우는 상류측 원주의 뒤쪽에도 볼텍스 열이 생성됨을 밝혔다.

[3]은 비교적 작은 수평 간격비 $P/D=1.25\sim 2.5$ 의 범위에서 간격비에 따른 양·항력계수의 시간변화를 측정하였는데, 2원주 양력계수의 진동은 수평 간격비 1.25의 경우 동시성, 동위상, 동진폭을 가지나, 2.5의 경우 서로 역위상이며, 상류측 원주의 진폭이 상대적으로 매우 작았음을 보였다.

또한 [4]은 이 간격비에서 PIV에 의한 유동장 가시화 실험을 행하였는데, 비교적 작은 수평 간격비에서는 2원주 사이의 흐름은 거의 정체되어 있으며, 상류측 원주에 가까울수록 정체 범위가 크게 나타났고, 하류측 후방에서 측정된 Strouhal 수는 수평 간격비가 클수록 작게 나타났다. 또한 일정류와 2원주의 중심선이 이루는 영각(α)의 미소 변화($\alpha = \pm 1.0^\circ$)에 따라 2원주 사이에는 서로 반대 방향의 볼텍스가 생성됨을 보였다.

상술한 바와 같이 직렬 2원주의 유체역학적 간섭에 대해서는 많은 연구가 있었는데 직렬 3원주에 관해서는 [5]의 연구 외에는 보이지 않고 있다. 그는 직렬 3원주에 대해 등간격으로 수평 간격비 $P/D=1\sim 4$ 의 범위에서 레이놀즈 수 및 간격비를

변화시켜가며 여러 가지 실험을 행하였는데 그 주요결과를 요약하면 다음과 같다. 항력계수는 일정류에 대하여 1 번째 원주가 가장 컸으며, 3번째, 2 번째 순으로 작았다. 3번째 원주의 후방에서 측정된 Strouhal 수는 수평 간격비에 따라 변화하며, 특히 간격비 $P/D=1.47$ 및 3.24에서 급격한 변화를 보였으나 그 원인을 명확하게 파악하지 못하였고, 각 원주 사이의 와도변화도 측정하지 않았다.

그래서 본 연구에서는 PIV를 이용하여 직렬 3원주에서 간격비에 따른 각 원주 후방에서의 와도변화와 흐름패턴을 명확히 파악함과 동시에 미소받음각 변화에 따른 각 원주 사이의 흐름 패턴의 변화를 조사하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 3원주의 모델 및 구조

먼저 직렬상태에 놓인 3원주의 실험모델을 Figure 1에 나타낸다.

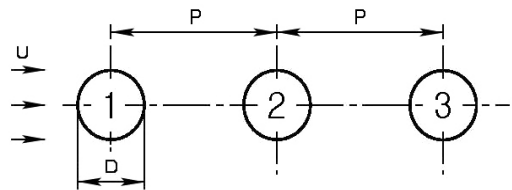


Figure 1: Model of two cylinders in the tandem arrangement

그림에서 일정류 U 중에 직경 D 인 3개의 원주가 원주 중심간 간격 P 를 유지하면서 일정류와 나란하게 놓여 있다. 실험은 실험모델에서와 같은 3원주를 제작하여 일정류가 흐르는 회류수조의 수로 내에 장착하고, 간격비 P/D 및 레이놀즈 수를 변화시켜가며 행하였다. 레이놀즈 수 산정 시 대표길이는 원주의 직경 D 로 했으며, 일정류 U 를 조정하여 레이놀즈 수를 변화시켰다.

다음으로 본 실험에 사용한 3원주의 구조를 Figure 2에 나타낸다. 각 원주는 직경 20mm의 투명한 아크릴관을 길이 170mm로 잘라 만들었다. 이 원주를 폭 165mm, 길이 370mm 두께 2mm의 밀판에 Figure 2에서와 같이 등간격으로

순간접착제를 사용하여 고정 시켰다. 밑판은 흐름에 영향을 주지 않도록 가장자리를 그라인더로 갈아 경사를 주었고, 실험 시 추적입자가 잘 보이도록 검정색 도료로 칠하였다.

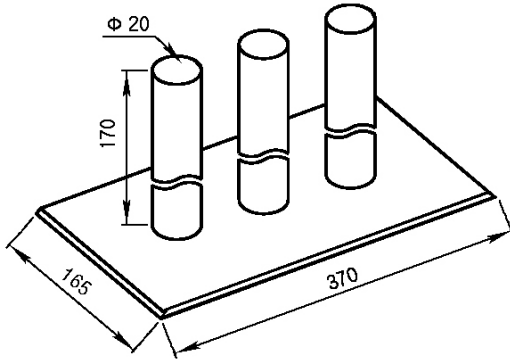


Figure 2: Structure of three cylinders(unit : mm)

본 실험에서 일정류 U의 범위는 $U=0.13\sim 0.23\text{m/s}$ 이며, 원주 직경을 대표길이로 하여 계산한 레이놀즈 수(Re)의 범위는 $Re=3.0\times 10^3\sim 5.0\times 10^3$ 이다. 그러나 Strouhal 수를 제외하고 이 레이놀즈 수 범위에서는 각각의 실험변수의 대체 거의 같은 유동특성을 보였으므로, 실험은 가시화 결과가 가장 명확한 $Re=4.0\times 10^3$ ($U=0.18\text{m/s}$)을 중심으로 행하였다.

2.2 PIV를 이용한 유동장의 계측

Figure 3에 PIV 계측을 위한 실험장치의 개략도를 나타낸다. 본 실험에 사용한 회류수조의 수로 크기는 폭 500mm, 깊이 300mm, 길이 2200mm이며, 수로바닥에서 160mm까지 물을 채워 순환시켜 일정류를 얻는다.

PIV계측 실험은 그림에서와 같이 3원주의 모델을 회류수조의 수로 내에 설치하고 회류수조 밖에서 일정류와 수직, 수평방향으로 연속광 레이저에 의한 시트상의 조명광을 비추고, 3원주의 상부에서 수직하방으로 고속카메라로 유동장을 촬영했다. 이때 조명광의 위치는 수로바닥에서 130mm, 즉 수면하 30mm인 곳이다.

또한 추적입자로 는 평균직경이 $100\mu\text{m}$ 이고, 비중이 1.02인 구형의 PVC(Poly Vinyl Chloride)

를 사용했다. 고속카메라는 PHOTRON사의 FAST CAM 1280 PCI 모델을, 레이저는 JENOPTIK사의 Jenlas D2.8 모델을 사용했으며 본 실험에 사용한 PIV시스템의 주요규격은 Table 1과 같다. 그리고 한 개의 실험변수에 대한 연속촬영시간은 16.37초이며, 1/125초 간격으로 2048프레임의 화상을 얻어, 1/62.5초 간격으로 연속한 2프레임의 화상으로부터 각각 1024장의 와도장, 속도분포 및 속도벡터장을 추적했다. 또한 후술하는 평균 유동장은 각각 1024장의 유동장을 시간 평균한 것이다.

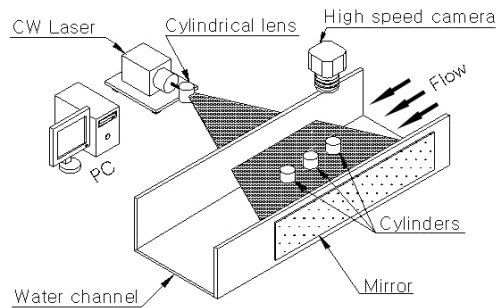


Figure 3: Schematic structure of experimental device

Table 1: Main specification of PIV system

Item	Specification
Image board	Fast Cam-X panel link board drive
Light source	8W continuous wave laser
Sheet light	Cylindrical lens: $\text{Ø}3.8\times 11.4\text{mm}$
Resolution	1280×512pixel
Software	CACTUS 3.2
Error vector(%)	Average: about 0.1%

3. 실험결과 및 고찰

Figure 4에 간격비 변화에 따른 3번째 원주 후방에서 측정한 Strouhal 수를 나타낸다. 그림에 나타낸 바와 같이 간격비에 따른 Strouhal 수는 레이놀즈 수에 관계없이 거의 같은 경향을 보이고 있다. 또한 본 실험결과를 [5]의 실험결과(그림에

서 ○표시)와 비교해 보면 정량적으로는 다소 차이를 보이나 그 경향은 유사하다. 정량적인 결과에 다소 차이를 보이는 것은 Igarashi 등은 레이놀즈 수 10^4 이상의 범위에서 풍동을 이용했고, 측정방법도 PIV가 아닌 열선(hot wire)으로 측정한 데 따른 차이로 추정된다. Figure 4를 살펴보면 간격비에 따라 Strouhal 수가 확연히 구별되는 ①, ②, ③ 개의 영역이 존재함을 알 수 있다. 이러한 3개의 영역이 존재하는 것은 각 원주 사이의 흐름 패턴과 밀접한 관계가 있을 것으로 판

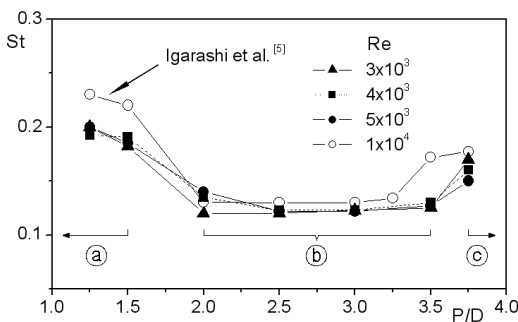


Figure 4: Strouhal number with space ratio

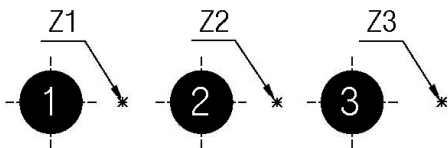


Figure 5: Measurement positions of vorticity

단되어 각 영역의 대표되는 간격비 $P/D=1.25, 2.50$ 및 3.75 에서 Figure 5에 나타낸바와 같이 각 원주의 후방 Z1, Z2 및 Z3에서 와도의 시간변화를 측정해 보았다.

Figure 6에 대표 간격비 $P/D=1.25, 2.50$ 및 3.75 에서 각 원주 후방에서 측정된 와도의 시간변화를 나타낸다. 먼저 (a) $P/D=1.25$ 를 살펴보면 Z1, Z2에서는 와도가 전혀 나타나지 않고 있으나 Z3에서는 와도의 변화가 주기적으로 명확히 나타나고 있다. 이는 간격비가 비교적 작은 ①영역에서는 각 원주 사이의 흐름이 정체되어 있고 3번째 원주 후방에서만 칼만와가 생성됨을 보여주고 있다. 다음은 (b) $P/D=2.50$ 를 살펴보면 Z1에서는 간헐적으로 와도의 변화가 보이긴 하나 전체적으로는 거의 변화가 없지만 Z2 및 Z3에서는 와도의 변화가 확연하게 나타나 있다. 이는 간격비가 중간 정도의 ②영역에서는 1번째 원주와 2번째 원주 사이에서는 흐름이 정체되어 있으나, 2번째 원주와 3번째 원주 후방에서만 칼만와가 생성됨을 보여주고 있다. 그리고 이것을 Figure 4와 연계해서 살펴보면 2번째 원주의 후방에서 발생한 칼만와가 3번째 원주의 후방에서 생성한 칼만와의 주파수에 영향을 미쳐 3번째 원주의 후방에서의 Strouhal 수가 ①영역에 비해 작게 됨을 알 수 있다. 마지막으로 (c) $P/D=3.75$ 에서는 Z1, Z2 및 Z3에서 모두 와도의 변화가 명확하게 나타나 있다. 즉 간격비가 비교적 큰 ③영역에서는 3개 원주 모두 그 후방에

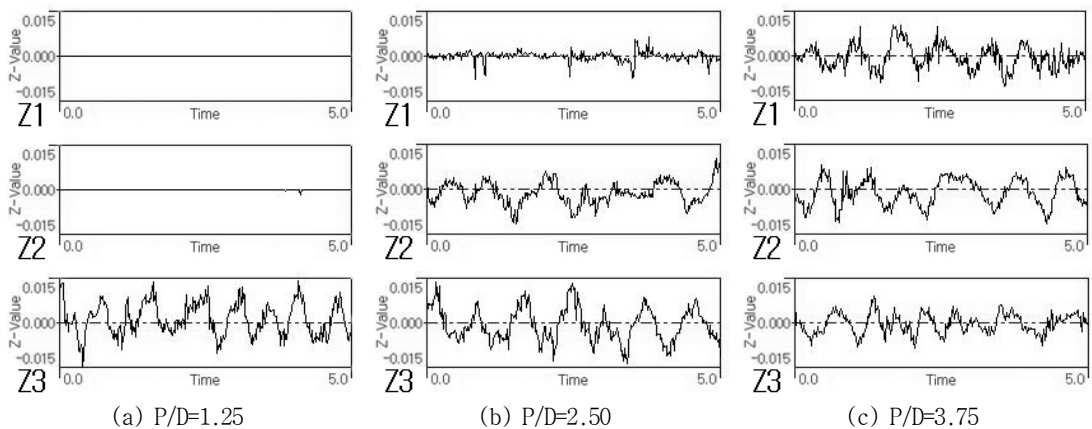


Figure 6: Time various of vorticity at wake of each cylinder with space ratio

서 칼만와가 발생하고 있음을 나타내고 있다.

Figure 7에 대표 간격비 $P/D=1.25, 2.50$ 및 3.75 에서 직렬배열 3원주 주위의 순간 속도벡터장을 나타낸다.

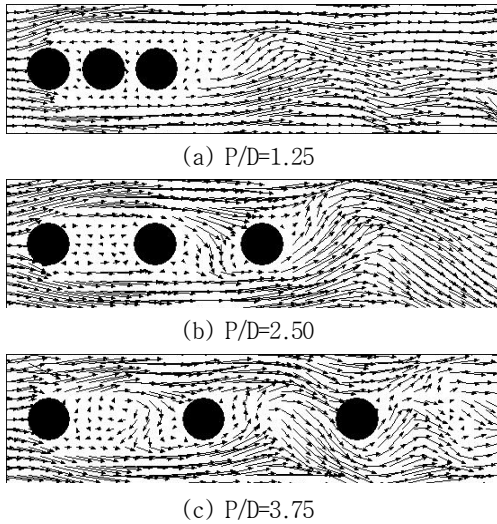


Figure 7: Instantaneous velocity vectors with space ratio

Figure 7(a), (b) 및 (c)에서 (a)의 경우 3번째 원주 후방에서만 흐름패턴의 변화가 보이나, (b)의 경우는 2번째 원주, 3번째 원주 후방에서 흐름패턴의 변화를 보이고 있고, (c)의 경우 3개의 원주에서 모두 그 후방에 흐름패턴의 변화를 보이고 있다. 이는 앞서 Figure 6 (a), (b) 및 (c)에서 고찰한 각 영역에서의 와도변화의 타당성을 잘 나타내고 있다.

Figure 8에 수평 간격비 $P/D=2.5$ 에서 3원주 주위의 시간평균 속도벡터 및 속도분포를 나타낸다. Figure 8(a)의 속도벡터를 살펴보면 각 원주 사이의 유속은 일정류와 비교하여 거의 정체상태에 있음을 알 수 있다. 그 곳의 일정류와 수직한 속도분포인 Figure 8(b)를 살펴보면 그 정체역역의 크기는 1번째 후방에서가 가장 크고, 2번째, 3번째로 갈수록 작게 나타나고 있다. 그리고 같은 원주의 후방에서는 상류측에 가까울수록 정체영역의 크기가 크게 나타남을 알 수 있다.

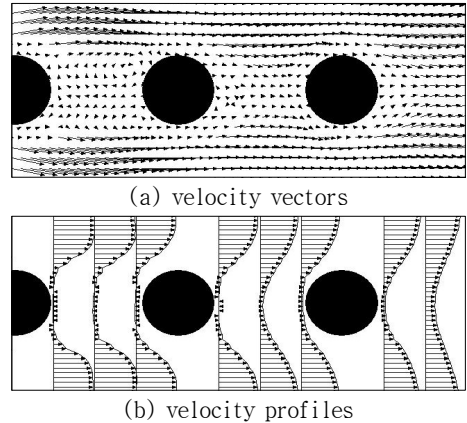


Figure 8: Average flow patterns around three cylinders ($P/D=2.5, Re=4.0 \times 10^3$)

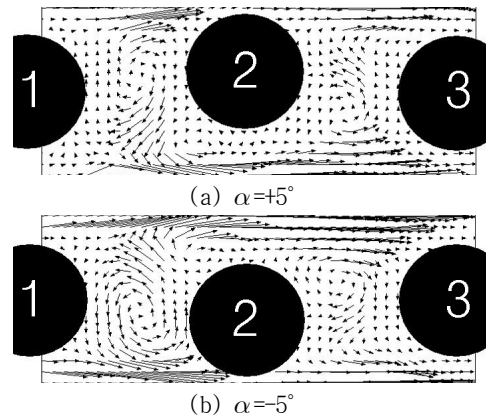


Figure 9: Average velocity vectors around three cylinders with small attack angle α ($P/D=2.0, Re=4.0 \times 10^3$)

Figure 9에 수평 간격비 $P/D=2.0$ 에서 2번째 원주의 받음각을 미세하게 변화($\alpha = \pm 5.0^\circ$)시킨 경우 시간평균 속도벡터를 나타낸다. 여기서 받음각 α 란 1번째 원주 중심과 2번째, 3번째 원주의 중심과를 이은 선의 각도를 말한다. Figure 9(a) 받음각 $\alpha = +5^\circ$ 의 경우 1번째 원주와 2번째 원주 사이에는 시계방향의 볼텍스가 그리고, 2번째 원주와 3번째 원주사이에는 반시계방향의 볼텍스가 생성되어 있다. Figure 9(b) 받음각 $\alpha = -5^\circ$ 의 경우 Figure 9(a)의 경우와 반대로 1번째 원주와 2번째 원주사이에는 반시계방향의 볼텍스가 그리

고, 2번째 원주와 3번째 원주사이에는 시계방향의 볼텍스가 생성됨을 보이고 있다. 그러나 속도벡터의 크기를 일정류와 비교해 보면 두 경우 모두 아주 약한 볼텍스임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 직렬배열(tandem Arrangement) 상태에 놓인 3원주 주위의 유동장 특성을 PIV를 이용하여 파악한 것이다. 실험은 레이놀즈수 $Re=3.0 \times 10^3 \sim 5.0 \times 10^3$ 범위 내에서 수평간격비(P/D)를 $P/D=1.25 \sim 3.75$ 로 변화시켜가며 행하였다. 각각의 실험 파라미터에서 Strouhal 수, 와도변화, 순간 및 평균 속도벡터 및 속도분포를 측정하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 3번째 후방에서 측정된 Strouhal 수는 수평간격비 P/D에 따라 크게 3가지 영역으로 구분되며, 비교적 작은 간격비($P/D \leq 1.5$)에서는 3번째 원주 후방에서만, 중간영역의 간격비($2.0 \leq P/D \leq 3.5$)에서는 2, 3번째 원주에서만, 비교적 큰 간격비($3.75 \leq P/D$)에서는 모든 원주의 후방에서 칼만와가 발생했다.

(2) 각 원주 후방에서는 시간 평균적으로 정체영역이 생성하였으며, 그 정체영역의 크기는 1번째 후방에서가 가장 크고, 2번째, 3번째로 갈수록 작았다. 그리고 같은 원주의 후방에서는 상류측 원주에 가까울수록 정체영역의 크기가 크게 나타났다.

(3) 1번째 원주 중심과 2번째, 3번째 원주의 중심과를 이은선이 이루는 받음각(α)의 미소 변화($\alpha = \pm 5^\circ$)에 따라 2번째 원주의 전, 후방에는 서로 반대 방향의 볼텍스가 생성되었다.

참고문헌

[1] Pannell, J. R., Griffiths, E. A., and Coales, J. D., "Experiments on the interference between pairs of aeroplane wires of circular and lenticular cross section", (British) Advisory Committee for Aeronautics, Reports and Memoranda no. 208, Annual Reports for 1915-1916, vol. 7, pp. 219-221,

1915.

[2] Zdravkovich, M. M., "Smoke Observations of Wakes of Tandem Cylinders at Low Reynolds Number", The Aeronautical journal, vol. 76, pp. 108-114, 1972.

[3] 노기덕, 박지태, 강호근, "직렬 및 병렬배열에서 2원주의 유체역학적 간섭", 한국 박용기관학회지, vol. 27, no. 1, pp. 49-56, 2003.

[4] 노기덕, 김광석, 박지태, 오세경, "PIV를 이용한 직렬배열에서 2원주 주위의 유동장 특성 연구" 한국마린엔지니어링학회지, 제31권, 2호, pp. 159-165, 2007.

[5] Igarashi, T., and Suzuki, K., "Characteristics of the flow around three circular cylinders arranged in line", Bulletin of the Japan Society Mechanical Engineers, vol. 27, no. 233, pp. 2397-2404, 1984.

저 자 소 개



노기덕(盧基德)

1977년 부산수산대학 기관학과 졸업, 1989년 코오베대학대학원 졸업(공학박사), 현재 경상대학교 기계시스템공학과 교수



장동휴(張東休)

2011년 현재 경상대학교 해양과학대학 기계시스템공학과 학부생



배형섭(裴炯燮)

2011년 현재 경상대학교 해양과학대학 기계시스템공학과 학부생

**김원철(金源喆)**

1972년 부산수산대학 기관학과 졸업,
1993년 부경대학교대학원 졸업(공학박
사), 현재 경상대학교 기계시스템공학과
교수