

직렬 및 병렬배열에서 2원주의 유체역학적 간섭

노기덕[†] · 박지태^{**} · 강호근^{*}

(원고접수일 : 2002년 11월 5일, 심사완료일 : 2002년 12월 10일)

Hydrodynamic Interference between Two Circular Cylinders in Tandem and Side by Side Arrangements

Ki-Deok Ro[†] · Ji-Tae Park^{**} · Ho-Keun Kang^{*}

Key words : Fluid Mechanics(유체공학), Unsteady Flow(비정상 유동), Two Circular Cylinder (2원주), Fluid Force (유체력), Flow Interference (유동의 간섭)

Abstract

The hydrodynamic interference between two circular cylinders in tandem and side by side arrangements was investigated by measuring of lift and drag on each cylinder. The time variations of interference lift and drag coefficients in each arrangement were observed at center-to-center pitch ratios of $P/D=1.25$ and 2.5 and Reynolds number of $Re=1.5 \times 10^4$. Average interference lift and drag coefficients were also observed at pitch ratios from $P/D=1.25$ to 2.5 and Reynolds number from $Re=1.5 \times 10^4$ to 1.6×10^4 . The hydrodynamic interference between two circular cylinders differed with the shape of the arrangement and the pitch ratio, but the characteristics were revealed by measuring of lift and drag on each cylinder.

1. 서론

2원주의 간섭에 관한 연구는 원자로 등 열교환기의 관속, 잠수함의 흡·배기관, 소형 항공기기의 지지대 등 그것들을 설계하는데 있어 대두되는 유체역학적 문제를 해결하기 위해 주로 실용적인 측면에서 연구되어 왔다. Zdravkovich⁽¹⁾는 2원주에 대한 그 동안의 연구를 배치형태에 따라 직렬(tandem), 병렬(side by side) 및 엇갈림(stagger-

ed) 배열(arrangement)로 구분하여 정리하였다. 이중에서 직렬 및 병렬배열은 2원주의 가장 기본적인 배열형태이며, 원주간의 거리에 따라 다양한 형태의 유동장을 형성하므로 이들 배열에 대한 연구가 집중되어 왔다. 또한 연구기법으로는 2원주에 작용하는 양·항력측정^{(2),(3),(4)}, 압력분포측정^{(5),(6)}, 와방출 주파수 측정^{(6),(7)} 및 유동장의 가시화^{(7),(8)} 등을 들 수 있는데 이중에서 양·항력측정은 그 결과를 강도설계에 바로 적용할 수 있기 때문 실용성

[†] 책임저자(경상대학교 수송기계공학부, 해양산업연구소) E-mail : rokid@gshp.gsnu.ac.kr, T : 055)640 - 3123

^{*} 경상대학교 수송기계공학부 해양산업연구소

^{**} 경상대학교 대학원 기관공학과

측면에서 매우 중요하다. 직렬 및 병렬배열에서 2원주의 양·항력특성에 관한 주요 연구결과를 살펴보면 다음과 같다.

Pannell 등⁽²⁾은 2원주 중심간의 수평 간격비 $L/D=1.0\sim 6.0$ 의 범위에서 직렬배열인 2원주의 조합항력을 측정했는데, 어느 간격비에 있어서도 조합항력은 단독원주 항력의 2배보다 작게 나타났고, 2원주가 접촉해 있는 상태에서 최소항력은 단독 원주의 40%정도 지나지 않았다. 또한 간격비 $L/D=1\sim 2, 2\sim 3, 3\sim 4$ 로 증가함에 따라 조합항력은 급속히 증가한 반면 4~6에서의 증가는 매우 작았음을 나타냈다.

Biermann 등⁽³⁾은 직렬배열 2원주의 간격비의 범위를 $L/D=1.0\sim 9.0$ 으로 넓히고 동시에 각각의 원주에 대해 항력을 측정했다. 여기서 그들은 원주간의 간섭의 효과를 명확하게 나타내기 위해 소위 간섭항력계수를 도입하였는데 이는 2원주의 각 원주에 작용하는 항력계수와 같은 레이놀즈 수에서의 단독 원주의 항력계수의 차로써 정의된다. 상, 하류측 각 원주에 작용하는 간섭항력계수는 -이고, 간격비에 따라 감소했다가 증가하는 변곡점(kink)을 가지며, $L/D=4$ 이상에서는 거의 일정함을 보였다.

Zdravkovich⁽⁴⁾는 병렬배열의 2원주에 대하여 다양한 레이놀즈 수에서 간격비 변화에 따른 양력계수 및 항력계수 변화에 관한 그 동안의 연구를 한 개의 그래프로 나타냈다. 결과를 종합해 보면 양력계수는 수직 간격비 T/D 가 클 때는 0에 가까우나 $T/D<3$ 에서는 간격비가 감소할수록 증가한다. 참고로 병렬배열의 2원주에 작용하는 양력은 서로 밀치는 방향 측 척력을 통상 +로 잡는다. 그리고 항력계수는 $2.25<T/D<5$ 에서는 간격비가 감소할수록 증가하나, $T/D<2.25$ 에서는 간격비가 감소할수록 급속히 감소했다가 증가하는 2차원 곡선을 그린다.

그러나 상술한 직렬 및 병렬배열에서 2원주의 양·항력특성에 관한 연구는 간격비에 따른 각 계수의 평균값을 정리한 것으로 시간변화에 따른 역학적 간섭의 변화는 보이지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 2원주의 직렬 및 병렬배열에서 간격비의 대, 소에 따른 양·항력 간섭의 시간적 변화를

중심으로 그 특성을 파악하고자한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 회류수조

먼저 일정류를 얻기 위해 제작한 회류수조의 개략도를 Fig. 1에 나타낸다.

이 수조는 펌프를 이용해서 하류측의 저수탱크에서 상류측의 저수탱크로 물을 회류시켜, 수로내의 일정류를 흐르게 한 것으로 상류측과 하류측에 각각 저수탱크를 가지고 있다. 상류측 저수탱크는 가로, 세로 960mm, 높이는 620mm이고, 하류측 저수탱크는 가로, 세로 560mm, 높이 620mm이다. 그리고 수로는 폭 500mm, 깊이 300mm, 길이는 2200mm이며, 수로 내에 일정류를 얻기 위하여 상류측 저수탱크내에 다공판을 설치했고, 수로의 입구에는 정류격자 및 10메시 정도의 그물망을 50mm 간격으로 6장 설치했다. 또한 본 회류수조는 양·항력 측정실험과 유동장의 가시화 실험을 함께 할 수 있도록 투명한 아크릴 판으로 제작했다. 수로내의 유속은 펌프 구동용 모터(AC 3.7kW)의 회전수를 디지털 인버터로 제어하여 변속했는데 이때 수로내의 최대 유속은 0.32m/s 였다.

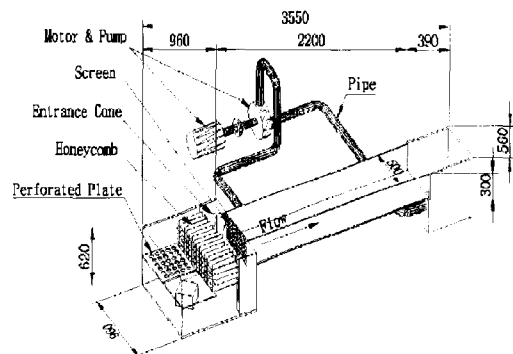


Fig. 1 A circulating water tank (unit:mm).

2.2 양·항력 측정실험

2원주의 양·항력 측정을 위한 실험장치의 개략도를 Fig. 2에 나타낸다.

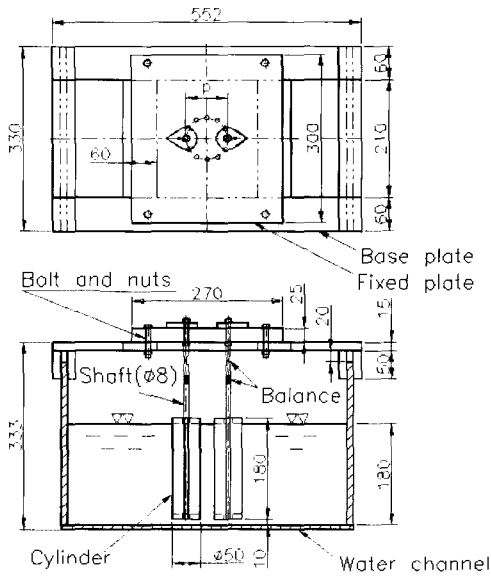


Fig. 2 Schematic structure of experimental apparatus(unit: mm).

장치는 제작을 쉽게 하기 위해 축 및 볼트, 너트 부분을 제외하고 전부 투명한 아크릴판을 재료로 하여 만들었다. 먼저 회류수조상에 실험장치를 설치할 기초판(base plate)은 가로 552mm, 세로 330 mm로 두께 15mm의 아크릴판으로 제작했으며, 그림에서와 같이 수로쪽에 맞추어 세로방향으로 ㄷ자형 홈을 만들어 수로에 끼워 고정했다. 이 기초판 상부에 가로 270mm, 세로 300mm, 두께 25mm의 2원주 고정판(fixed plate)을 볼트, 너트로 고정시켰다. 원주고정판의 중심부는 원주축을 끼울 수 있도록 2원주 중심간의 간격 P를 직경으로 하는 원주상에, 그림에서와 같이 30° 간격으로 총 12개의 구멍을 뚫었다. 이때 원주고정판은 각각 원주의 직경 D에 대한 간격비 P/D가 1.25, 1.75, 2.0, 2.25, 2.5가 되도록 5종류를 만들었다. 원주의 측정축은 직경 8mm의 알미늄 봉을 각각 길이 360mm로 잘라 만들었는데 고정판 및 원주에 고정시키기 위해 축의 상부 50mm, 하부 180mm를 나사가공 하였다. 또한 일정류 중에서 양·항력을 용이하게 분리하여 측정할 수 있도록 그림에서와 같이 축의 측정부(balance)를 전후, 좌우 방향으로 두께 4mm로 평평하게 갈았다. 그리

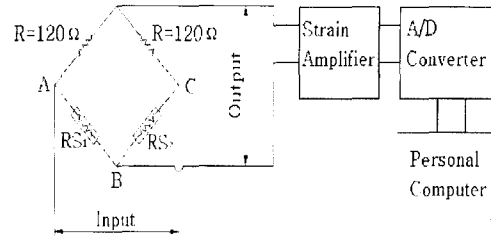


Fig. 3 Schematic diagram for the measurement of fluid force

고 그곳에 각 방향으로 2매씩(계 8매) 스트레인게이지를 부착하고 브릿지 회로를 결성하여 스트레인량으로 양·항력을 측정했다. 한편 각 원주는 직경 50mm의 투명아크릴 관을 길이 180mm로 잘라 만들었으며, 물이 스며들지 않도록 상·하부에 두께 10mm의 원형 동판 덮개를 부착하였다. 이 덮개 중앙에 직경 8mm의 나사를 가공하여 그림에서와 같이 축을 원주에 고정시켰다. 한편 각 채널(계 4채널)의 브릿지 회로에서 나온 출력파형은 Fig. 3에 나타난 바와 같이 스트레인앰프, AD변환기를 거친 다음 퍼서널 컴퓨터에서 미리 캘리브레이션한 계수에 의해 양·항력 값으로 출력된다. 2원주의 양·항력 측정실험은 Fig. 1에 나타난 회류수조의 수로에 Fig. 2의 실험장치를 설치하고, 깊이 180mm로 물을 채워, 일정류 U(U=0.13~0.29m/s)를 일정간격으로 변화시켜가며 양·항력을 측정했다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 4에 직렬배열(tandem arrangement)에서 원주중심간의 수평간격비 L/D=1.25 및 2.5에서의 양력계수 C_L 의 시간변화를 나타낸다. 원주의 직경 D를 대표길이로 했을 때 레이놀즈 수는 두 경우 모두 1.5×10^4 이며, 그림에서 횡축은 일정류 U 및 측정시간 t를 원주의 직경 D로 무차원화한 것이다. 간격비 L/D=1.25의 경우, 상류측 원주가 하류측 원주 보다 다소 진폭은 작으나, 진동의 위상은 거의 동위상을 가지며 주파수도 양자는 거의 동일하다. 이에 대해 L/D=2.5의 경우 상류측 원주의 진폭은 하류측 원주에 비해 아주 작으며, 진동의 위상도 서로 역위상이나, 주파수는 서로 비슷하다. 원

주의 진동은 칼만와의 영향이며, 상류측 원주의 진폭이 상대적으로 작은 것은 상류측 원주에서의 박리선이 하류측 원주에 재부착하여 상류측 원주에서의 칼만와 발생을 억제하기 때문으로 판단된다. 그러나 $L/D=1.25$ 의 경우는 2원주의 진폭이 비슷한 것은 이 경우 원주간의 간격비가 작으므로, 하류측 진동의 유동장이 그대로 상류측 원주에 전달했기 때문으로 판단되며, 2원주 진동의 위상 및 주파수가 같은 것이 이를 뒷받침 해주고 있다. 또한 이러한 경향은 Fig. 6의 간섭항력계수의 시간변화에도 잘 나타나 있다.

Fig. 5에 직렬배열에서 수평간격비 L/D 변화에 따른 평균간섭양력계수 $\overline{C_L}$ 의 변화를 나타낸다. 여기서 평균간섭양력계수는 평균양력계수로부터 같은 레이놀즈 수에서의 단독원주의 그것을 값을

뺀 값이다. 평균간섭양력계수는 간격비 L/D 및 레이놀즈 수 Re 에 관계없이 거의 0에 가깝다. 이것은 직렬배열인 경우 Fig. 4에 나타난 바와 같이 양력

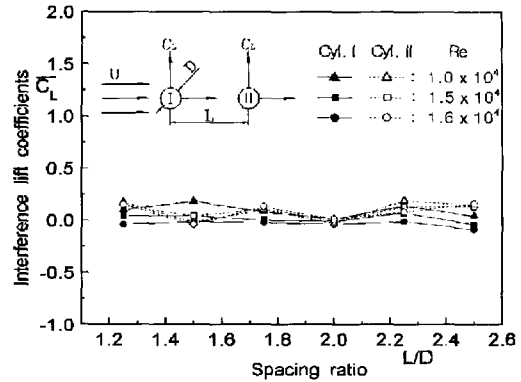
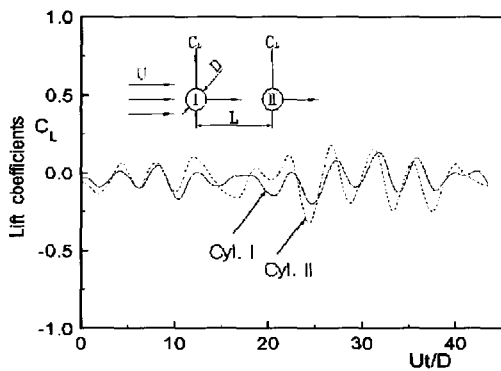
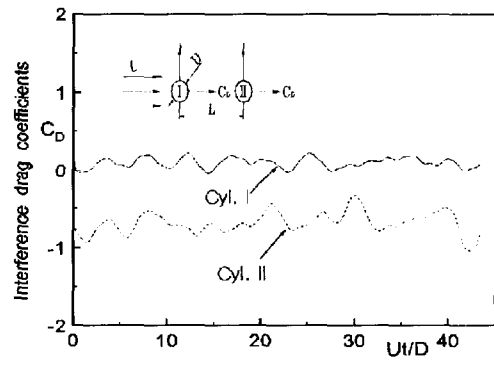


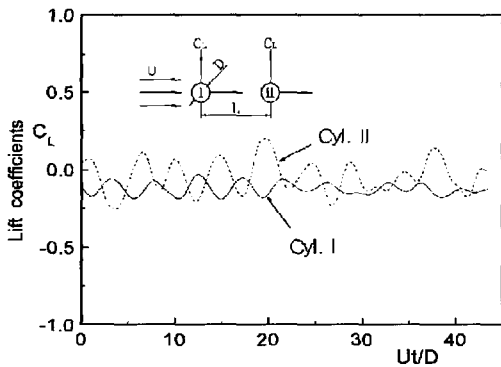
Fig. 5 Average interference lift coefficients with spacing ratio in tandem arrangements.



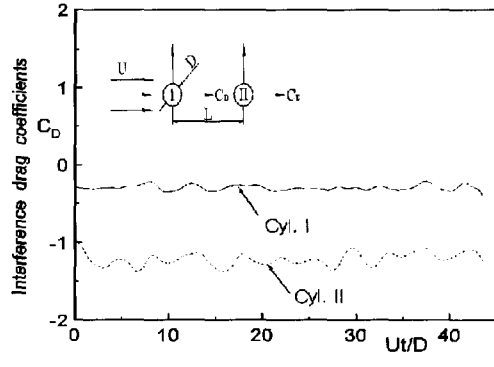
(a) $L/D=1.25$



(a) $L/D=1.25$



(b) $L/D=2.5$



(b) $L/D=2.5$

Fig. 4 Lift coefficients with time in tandem arrangements ($Re=1.5 \times 10^4$).

Fig. 6 Drag coefficients with time in tandem arrangements ($Re=1.5 \times 10^4$).

값은 시간에 따라 진동하지만 그 평균값은 2원주 모두 단독원주의 그것과 같음을 의미한다.

Fig. 6에 직렬배열에서 수평간격비 $L/D=1.25$ 및 2.5 에서의 간섭항력계수 C_D 의 시간변화를 나타낸다. 여기서 간섭항력계수 역시 각 원주의 항력계수에서 같은 레이놀즈 수에서 단독원주의 평균항력계수를 뺀 값이다. 간격비 $L/D=1.25$ 의 경우 상류측 원주의 간섭항력계수는 거의 0이고, 하류측의 그것은 -0.9 정도이다. 또한, 간격비 $L/D=2.5$ 의 경우 상류측 원주의 간섭항력계수는 -0.3 , 하류측 원주의 그것은 -1.3 정도로 매우 작다. 이러한 이유는 이들 간격비에서 2원주 사이에는 사수영역이 형성되어 유속이 거의 0이기 때문, 이 사수영역이 상류측 원주의 항력에는 영향을 끼치지 않으나 하류측 원주에는 항력의 대폭적인 감소를 초래한 것으로 판명된다. 한편 그림중의 (a), (b)의 진동경향을 살펴보면 시간에 따라 (a)의 경우 간섭항력계수가 2원주 모두 진동하는데 대해, (b)의 경우는 하류측 원주만 진동하고 있으며, 그 이유는 Fig. 4의 양력계수 변화에서 설명한바와 같다.

Fig. 7은 직렬배열에서 수평간격비 L/D 변화에 따른 평균간섭항력계수 \bar{C}_D 의 변화를 나타낸다.

간격비 및 레이놀즈 수에 따라 다소 차이는 있으나 전 간격비, 전 레이놀즈 수에 걸쳐 Fig. 6에서와 같이 상류측 원주의 항력은 단독원주에 비해 거의 영향을 받지 않으나 하류측 원주는 영향을 크게 받아 항력이 대폭 감소함을 알 수 있다.

Fig. 8은 병렬배열(side by side arrangement)

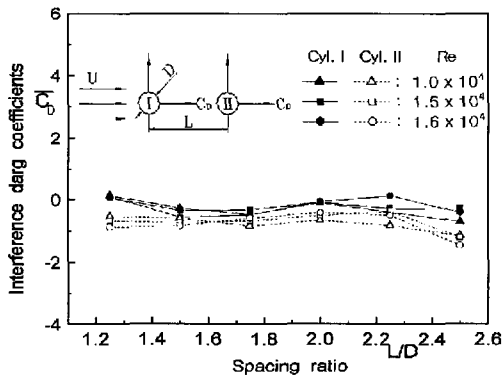
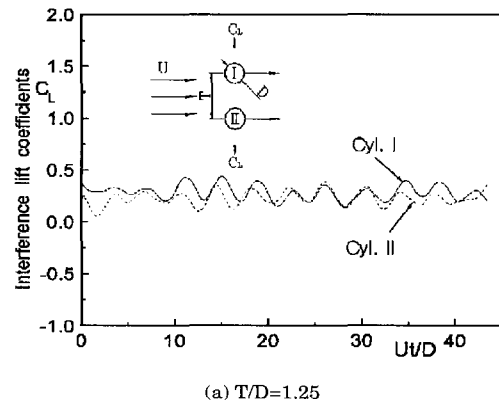
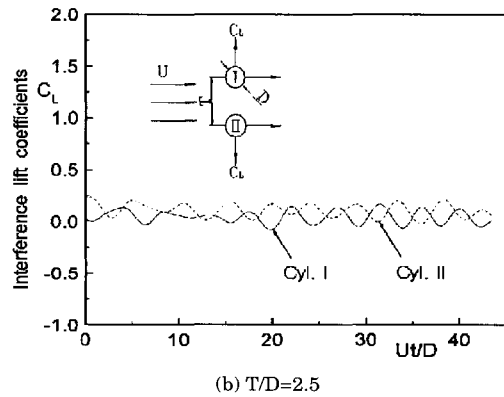


Fig. 7 Average interference drag coefficients with spacing ratio in tandem arrangements.

에서 원주중심간의 수직 간격비 $T/D=1.25$ 및 2.5 에서의 간섭양력계수 C_L 의 시간변화를 나타낸다. 그림 중 양력계수의 방향에 나타낸 바와 같이, 병렬배열에서 2원주에 작용하는 양력은 서로 밀치는 방향, 즉 척력을 통상 +로 잡는다. 수직 간격비 $T/D=1.25$ 의 경우 시간변화에 따라 2원주 모두 간섭항력계수가 0.25 를 중심으로 진동하고 있어 각 원주에는 서로 평균적으로 같은 크기의 척력이 작용함을 알 수 있다. 또한, 진폭은 거의 같으나 진동의 위상은 거의 역위상에 가깝다. 일반적으로 유체 역학 책⁹⁾에는 병렬배열의 경우 가까워진 간격은 속도를 증가시키고 압력을 낮추어서 2원주에는 인력이 작용한다고 기술되어 있으나, 오히려 간극이 작아 그 사이에서의 흐름이 방해를 받아 유동의 방향이 각 원주의 바깥쪽으로 바뀌기 때문에 2원주에



(a) $T/D=1.25$



(b) $T/D=2.5$

Fig. 8 Lift coefficients with time in side by side arrangements ($Re=1.5 \times 10^4$).

는 서로 척력이 작용하는 것으로 판단된다. 한편, 간격비 $T/D=2.5$ 의 경우 시간변화에 따라 2원주 모두 간섭항력계수가 0을 기준으로 진동하고 있어 이 경우 거의 간섭이 없음을 알 수 있다. 또한, 진폭은 2원주 모두 거의 같으며, 진동의 위상은 시간 변화에 따라 다소 차이는 있으나 동위상에 가깝다.

Fig. 9에 병렬배열에서 수직 간격비 T/D 변화에 따른 평균간섭양력계수 $\overline{C_L}$ 의 변화를 나타낸다.

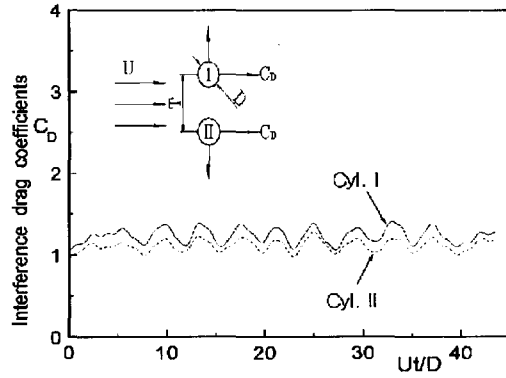
간섭양력계수 진동의 위상은 Fig. 8에 나타낸 바와 같이 간격비에 따라 다르나 그 시간평균값은 상, 하원주 모두 거의 같은 값을 가지므로 여기서는 상, 하원주에서의 각 계수 값을 평균해서 나타낸다. 그림에서 나타낸 바와 같이 평균간섭양력계수는 모든 레이놀즈 수에서 간격비가 작을수록 큰 값을 가진다. 즉 간격비가 작을수록 2원주에는 서로 큰 척력이 작용함을 알 수 있다. 이러한 경향은 Zdravkovich⁴⁾의 연구결과와 잘 일치한다.

Fig. 10의 병렬배열에서 수직간격비 $T/D=1.25$ 및 2.5에서의 간섭항력계수 C_D 의 시간변화를 나타낸다.

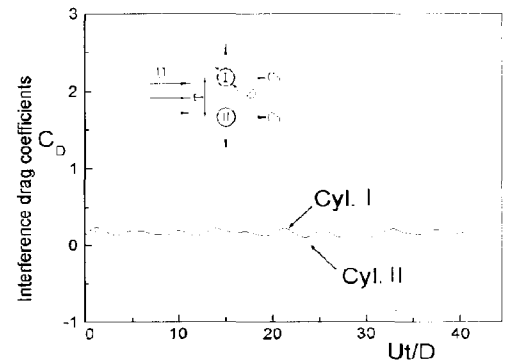
그림 (a), (b)에 나타낸바와 같이 2원주의 간섭항력계수의 진동은 같은 간격비에서는 상, 하원주 모두 동주파수, 동위상, 동진폭을 가지나, 간격비가 작은 쪽이 간섭의 영향을 많이 받아 진폭이 크게 나타나 있다. 또한 (a), (b) 모두 간섭항력계수가 위쪽 원주에서 다소 크게 나타나 있는데 이는 측정 오차에 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 11에 병렬배열에서 수직간격비 T/D 변화에

따른 평균간섭항력계수 $\overline{C_D}$ 의 변화를 나타낸다. 간섭항력계수는 Fig. 10에 나타낸바와 같이 상, 하원주 모두 같은 간격비에서 같은 크기, 같은 특성



(a) $T/D=1.25$



(b) $T/D=2.5$

Fig. 10 Drag coefficients with time in side by side arrangements ($Re=1.5 \times 10^4$).

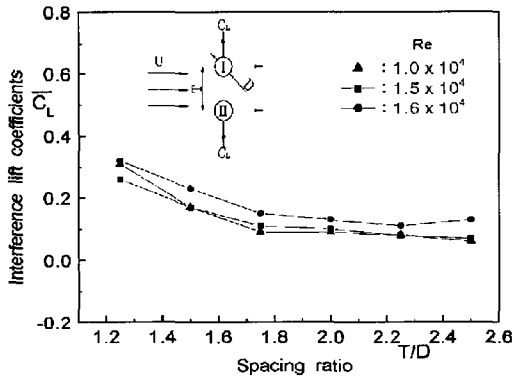


Fig. 9 Average interference lift coefficients with spacing ratio in side by side arrangements.

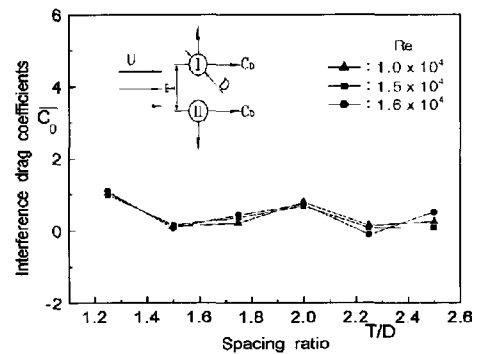


Fig. 11 Average interference drag coefficients with spacing ratio in side by side arrangements.

을 가지므로 평균간섭항력계수는 양자를 평균해서 나타낸다. 그림에 나타낸바와 같이 평균간섭항력계수는 레이놀즈 수 변화에 따라 거의 같은 값을 가진다. 간격비 변화에 대해서는 간격비가 1.25 및 2.0의 경우는 그 값이 1.0에 가까우나, 그 외의 간격비에서는 거의 0이다. 즉 병렬배열의 경우 2원주의 항력계수는 간격비에 따라 다소 다르나 단독 원주의 그것과 같거나 다소 크다.

4. 결 론

본 연구는 직렬 및 병렬배열 상태에 있는 2원주의 유체역학적 간섭특성을 각 원주에 작용하는 양·항력의 시간변화를 측정함에 의해 조사한 것이다. 레이놀즈 수 $Re=1.5 \times 10^4$ 로 고정시키고 각 배열에서 간격비 $P/D=1.25$ 및 2.5에서 2원주의 간섭특성을 비교하였다. 또한 각 배열에서 레이놀즈 수 $Re=1.5 \times 10^4 \sim 1.6 \times 10^4$, 간격비 $P/D=1.25 \sim 2.5$ 의 범위에서 간격비에 따른 평균간섭양·항력계수의 변화도 함께 파악하였다. 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 직렬배열에서 2원주 양력계수의 진동은 간격비 1.25의 경우 동시성, 동위상, 동진폭을 가지나, 2.5의 경우 서로 역위상이며, 상류측 원주의 진폭이 상대적으로 매우 작다. 그러나 시간 평균은 2원주 모두 거의 0이다.

(2) 직렬배열에서 2원주 간섭항력계수는 간격비 1.25의 경우 양자 모두 진동하고 있으나, 2.5의 경우 하류측 원주만 진동한다. 또한 평균 항력계수는 상, 하류측 원주 모두 단독원주에 비해 작으며, 특히 하류측 원주의 감소 폭은 훨씬 크다.

(3) 병렬배열에서 2원주 양력계수의 진동은 간격비 1.25의 경우 동시성, 동진폭, 역위상을 가지나, 2.5의 경우 진폭은 1.25에 비해 상대적으로 작으나 동시성을 가지며, 위상은 서로 동위상이다. 또한 2원주에는 평균적으로 서로 척력이 작용하며, 그 크기는 간격비가 감소할수록 크다.

(4) 병렬배열에서 2원주 항력계수의 진동은 간격비가 작은 쪽이 진폭은 크나, 같은 간격비에서는 양자 모두 동시성, 동위상, 동진폭을 가진다. 평균 간섭항력계수는 상, 하 원주 모두 같으며, 간격비

에 따라 그 값이 다르다.

후 기

이 논문은 2002년도 두뇌한국 21사업에 의하여 지원되었음. 본 실험을 도와준 당시 학부 학생인 정홍채, 송진수 군에게 감사한다.

참 고 문 헌

- [1] Zdravkovich, M. M., "Review of Flow Interference Between Two Cylinders in Various Arrangements," *Trans. of ASME, Journal of Fluid Engineering*, Vol. 99, pp. 618-633, 1977.
- [2] 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.
- [3] Biermann, D., and Herrnstein, W. H., Jr., The Interference between Struts in Various Combinations," National Advisory Committee for Aeronautics, Tech. Rep. 468, 1933.
- [4] Zdravkovich, M. M., "Interference Between Two Circular Cylinders; Series of Unexpected Discontinuities," *Journal of Industrial Aerodynamics*, Vol. 2, pp. 255-270, 1977.
- [5] Hori, E., "Experiments on Flow around a Pair of Parallel Circular Cylinders," *Proc. 9th Japan National Congress for Applied Mech.*, Tokyo, pp. 231 - 234, 1959.
- [6] Kim, H. J. and Durbin, P. A., "Investigation of the Flow between a Pair of Circular Cylinders in the Flopping Regime," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 196, pp. 431-448, 1988.
- [7] Ishigai, S., Nishikawa, E., Nishimura, K., and Cho, K., "Experimental Study on Structure of Gas Flow in Tube Banks with Tube Axes Normal to Flow (Part 1, Karman Vortex Flow around two Tubes at Various Spacings)," *Bulletin of the Japan Society Mechanical Engineers*, Vol. 15, No. 86, pp. 949-956, 1972.
- [8] Sumner, D., Wong, S. S. T., Price, S. J., and

Paidoussis, M. P., "Fluid Behaviour of Side-by-Side Circular Cylinders in Steady Cross-Flow," *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 13, pp. 309-338, 1999.

- [9] 부정숙 · 서용권 · 손동주 · 김경천 공역, 유체역학, 반도출판사, 서울, pp. 775, 1996.

저 자 소 개



노기덕(盧基德)

1953년 6월생. 1977년 부산수산대학 기관공학과 졸업(학사). 1986년 코오베대학 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1989년 코오베대학 대학원 기계공학과 졸업(박사). 현재 경상대학교 수송기계공학부 교수.



박지태(朴知泰)

1970년 10월생. 1999년 경상대학교 기관공학과 졸업(학사). 2001년 경상대학교 대학원 기관공학과 졸업(석사). 현재 경상대학교 실습선 새바다호 3기사.



강호근(姜鎬根)

1969년 11월생. 1992년 한국해양대학교 기관공학과 졸업(학사). 1997년 한국해양대학교 대학원 기관공학과 졸업(석사). 2001년 코오베대학 대학원 기계공학과 졸업(박사). 현재 경상대학교 수송기계공학부 BK 교수.