

<학술논문>

벽면 근처에서 회전하는 원주의 마그너스 효과

노기덕[†] · 김광석^{*} · 오세경^{**}

(2007년 7월 28일 접수, 2007년 9월 20일 심사완료)

The Magnus Effects of a Rotating Circular Cylinder Near a Plane Wall

Ki-Deok Ro, Kwang-Seok Kim and Se-Kyeong Oh

Key Words: Fluid Mechanics(유체공학), Rotating Circular Cylinder(회전 원주), Flow Visualization(흐름의 가시화), Lift(양력), Separation(박리)

Abstract

The flow around a rotating circular cylinder near a plane wall is investigated by the measurement of the lift acting on the cylinder and by the flow visualization using the hydrogen bubble technique in the circulating water tank. The experimental parameters are the rotating direction of the cylinder, the space ratios $H/D(H/D=0.05\sim 0.5)$ between cylinder and plane wall and the velocity ratios $\alpha(\alpha=0\sim\pm 2.0)$. In the case of clockwise, the lift on the rotating circular cylinder was increased with the reduction of the space ratios and with the velocity ratios, the upper separation point was more shifted in the rotating direction with them. In the case of anticlockwise, the absolute value of the lift on the rotating circular cylinder was increased with the space ratios and with the velocity ratios, the lower separation point was more shifted in the rotating direction with them.

1. 서론

일정류 중에서 원주가 중심축을 중심으로 회전할 경우, 원주가 흐름에 대하여 수직방향으로 양력을 받게 되는데 이런 현상을 마그너스(Magnus) 효과라 한다. Swanson⁽¹⁾은 회전원주의 마그너스 효과에 관한 그때까지의 여러 연구결과를 정리했다. 결과를 요약하면 레이놀즈 수에 따라 다소 차이가 있으나 회전원주의 양력계수는 원주의 종횡비(aspect ratio)가 클수록, 주속비(회전원주의 주속도와 일정류와의 비)가 클수록 증가했다. 또한 주속비가 $\alpha=0\sim 1.0$, 레이놀즈 수 $Re=12.8\times 10^4\sim 50.1\times 10^4$ 범위에서 양력이 음이 되는 영역이 존재

함을 나타냈는데, 이는 증속측의 경계층과 감속측의 경계층이 난류 또는 층류로 바뀌는 비대칭적인 천이현상 때문으로 추정된다. 최근 노와 강⁽²⁾은 정방향 덤플을 가진 회전원주에 대해 덤플의 유무에 따른 유동장 특성을 실험적으로 조사했다. 요약하면 원주에 정방향 덤플을 설치하여 회전시키면 매끄러운 원주에 비해 양력은 증가하나 항력은 다소 감소하였다.

원주의 양력발생은 정지원주에서도 일어나는데 예를 들면 정지원주가 일정 전단류 중에 놓여 있을 때 주류속도구배가 원주 주위의 압력분포를 비대칭으로 만들기 때문에 양력이 발생하며,⁽³⁾ 또한 정지원주가 벽면 등 경계면 가까이 놓여 있으면 지면효과로서 양력이 발생한다고 알려져 있다. Yagita⁽⁴⁾ 등은 지면효과에 관한 기초연구로서 회전원주가 경계면(지면)에 다가갈 때 마그너스 효과가 어떻게 변화하는가를 원주 주위의 압력분포를 측정해서 양력변화를 구하였다. 그 결과 원주 아래쪽에 경계면이 있을 때 원주가 반시계방

[†] 책임저자, 회원, 경상대학교 기계항공공학부, 해양산업연구소

E-mail : rokid@gaechuk.gsnu.ac.kr

TEL : (055)640-3123 FAX : (055)640-3128

^{*} 경상대학교 대학원 기계시스템공학과

^{**} 경상대학교 기계항공공학부 · 농생명과학연구원

향으로 회전하면 회전원주가 경계면에 접근한 어느 위치에서 양력이 갑자기 변하는 스위칭 현상이 일어나는 것을 발견했다. 그 원인으로 회전원주와 경계면 사이의 흐름이 경계면을 따라 흐르다가 원주의 회전방향으로 흐르기 때문이라고 설명하고 있으나 유동장의 가시화 실험으로 보여주시는 못했다. 본 연구는 일정류 중에 벽면 가까이에서 회전하는 원주에 대해 벽면과 원주사이의 간격비 및 주속비에 따라 마그너스 효과 및 흐름패턴이 어떻게 변화하는지 양력측정 실험과 수소기포법에 의한 유동장 가시화 실험으로 파악한 것이다. 이러한 문제의 공학적 예로서는 활주로에 이착륙하는 항공기 또는 고속 주행하는 경주용 자동차 바퀴주위의 흐름 등을 들 수 있다.

2. 실험 장치 및 방법

실험모델을 Fig. 1에 나타낸다. 일정류 U중에 직경 D인 원주가 아래 벽면에서 H만큼 떨어져 각속도 ω 의 속도로 회전하는 경우를 생각한다. 이때 회전원주는 마그너스 효과에 의해 흐름에 수직방향으로 양력 L을 받게 된다. 실험은 원주의 회전방향, 원주와 벽면과의 거리 및 회전속도를 변화시키며 행하였다. 즉 간격비 H/D 및 주속비 α 를 실험변수로 잡아 회전원주에 작용하는 양력을 측정함과 동시에 수소기포법을 이용하여 원주 주위의 흐름패턴을 가시화하였다. 일반적으로 벽면의 효과를 정확하게 나타내기 위해 회전벨트 등을 사용하여 일정류와 같은 속도로 벽면을 이동시켜 가며 실험을 해야 한다. 그러나 본 실험에서는 격판(sider board)의 앞 끝이 원주 중심에서 1.5D(D: 원주의 직경) 밖에 나와 있지 않고 실험범위도 비교적 고 레이놀즈 영역이기 때

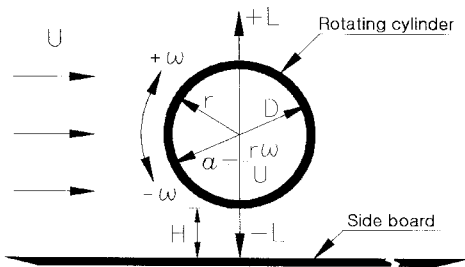


Fig. 1 Experimental model

문에 벽면에서의 경계층 두께가 작을것으로 판단되어 실험장치의 편의상 고정벽면으로 하였다.

먼저 본 실험에 사용한 회전원주 구동장치의 개략도를 Fig. 2에 나타낸다. 실험은 이 구동장치를 제작하여 일정류가 얻어지는 회류수조에 장착하여 행하였다.

구동장치는 Fig. 3의 사진에서와 같이 제작하기가 쉽도록 또한 가시화 실험시 조광광이 잘 투과하도록 모터, 커플링, 베어링 및 축을 제외하고는 전부 투명한 아크릴 판을 재료로 하여 만들었다.

회류수조상에 실험장치를 고정할 고정판은 (fixed plate)은 가로 270mm, 세로 300mm로 두께 10mm의 아크릴 판으로 제작했으며, 그 상부는 모터고정판을, 하부는 측정부를 강력 접착제로 고정시켰다. 모터(DC 3W)의 동력은 커플링,축을 경유해서 원주에 전달되며, 원주의 회전속도는 모터 컨트롤러 및 디지털 표시기로 제어한다.

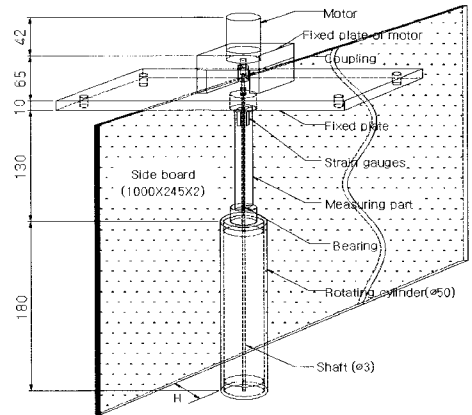


Fig. 2 Schematic structure of driving system of a rotating cylinder (unit:mm)

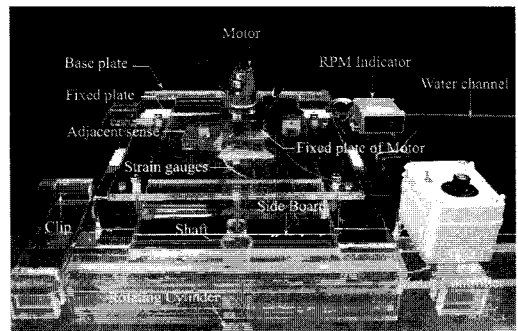


Fig. 3 Photo of driving system

이때 모터의 회전력이 원활하게 원주에만 전달 되도록 측정부의 상, 하부에는 베어링을 설치하여 축을 관통시켰다. 회전원주는 직경 52mm의 투명 아크릴 관을 180mm로 잘라 만들었으며 그 상, 하부에 원형 덮개를 부착했고 덮개 중앙에 축이 관통하도록 직경 3mm의 구멍을 뚫었다. 원주의 회전축은 직경 3mm의 스테인레스 봉을 375mm로 잘라 만들었으며, 축과 원주는 강력접착제로 고정시켰다. 측정부 역시 재질은 투명 아크릴이며 중앙에는 축이 잘 관통하도록 길이 방향으로 직경 4mm의 구멍을 뚫었다. 또한 일정류중에서 양·항력을 용이하게 분리하여 측정할 수 있도록 단면을 정방형(12×12mm)으로 정밀 가공하였다. 그리고 그곳에 흐름에 수직방향으로 양면에 각 1매의 스트레인지지를 부착하고 브릿지 회로를 결성하여 스트레인량으로 양력을 측정했다. 한편 각 채널의 브릿지 회로에서 나온 출력파형은 스트레인앰프, AD변환기를 거친 다음 퍼스널 컴퓨터에서 미리 캘리브레이션한 계수에 의해 양·항력 값으로 출력된다. 양력의 캘리브레이션은 물을 채우지 않은 회류수조의 수로에 회전원주의 구동장치 Fig. 2를 설치하고 원주길이의 1/2되는 지점에 양력의 ±방향으로 정하중을 가하여 행하였다. 구체적으로 -1.0~1.0N의 범위 내에서 0.2N씩 정하중을 증가시켜가며 각각의 하중에 대응하는 출력전압을 구하였다. 그리고 이 자료를 이용하여 선형최소자승근사법으로 하중과 출력전압 관계식을 구하였다. 이때 실험값과 선형관계식에서 구한 값에서의 평균제곱근(root-meansquare) 오차는 양·항력 모두 0.05이내였다.

다음은 수소기포법에 의한 회전원주 주위의 유동장 가시화 실험장치의 개략도를 Fig. 4에 나타낸다. 가시화 실험에 사용한 회전원주의 구동장치는 Fig. 2를 그대로 사용했다. 그러나 상부에 모터 등 부가물이 많아 위에서 원주 주위의 흐름을 사진촬영 하는데는 한계가 있어 그림에서와 같이 회류수조 아래쪽으로 ㄷ자형 덕트를 설치하고, 그 내부에 45°각도로 거울을 2장 설치하여 거울에 반사된 영상을 사진 촬영했다. 전극은 직경 0.2mm의 에나멜선을 5mm 간격으로 설치하여 만들었고 그 중간부분의 피복을 벗겨 전기가 통하도록 하였다. 그래서 수소기포발생장치의 -극은 이 전극에, +극은 동판에 연결하였다. 가시화사진은 회류수조의 밖에서 일정류와 수평, 수직방향

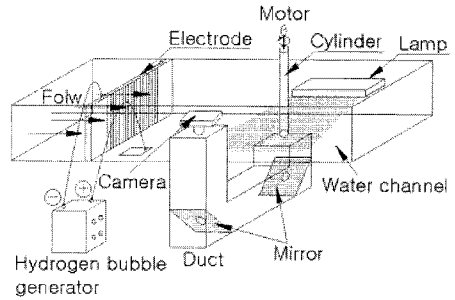


Fig. 4 Schematic structure of experimental apparatus for flow visualization

으로 할로겐램프(150W×2대)에 의한 슬릿상의 조명광을 비추고 앞서 설명한 바와 같이 거울에 반사된 회전원주 주위의 유맥선을 촬영했다. 이때 가시화부의 유속은 수소기포가 가장 잘 보이는 $U=0.12\text{m/s}$ 로 고정했다.

3. 실험 결과 및 고찰

본 실험은 원주가 벽면 가까이에서 회전할 때 벽면과 원주의 간격변화에 따라 마그너스 효과에 어떠한 영향을 미치는지를 양력측정 실험과 수소기포법에 의한 가시화 시험으로 파악한 것이다. 두 실험 모두 회전방향, 간격비 및 주속도를 실험변수로 잡아 행하였다. 먼저 회전원주 마그너스 효과의 크기를 나타내는 양력계수 C_L 은 다음과 같다.

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho U^2 S} \quad (1)$$

여기서 양력 L 은 원주에 작용하는 일정류 U 와 수직방향의 힘의 성분을 말하며, ρ 는 유체의 밀도, S 는 수면 아래에 잠겨있는 원주의 투영면적을 나타낸다.

Fig. 5에 원주의 양력계수 C_L 의 시간변화를 나타낸다. 그림에서 횡축은 일정류 U 및 측정시간 t 를 원주의 직경 D 로 무차원화한 값이다. 그림은 각 계수 모두 9.2초 동안 1,000개의 데이터를 취해서 선으로 연결한 것이다. 그림에서 점선은 간격비 H/D 가 0.1인 경우, 실선은 0.4인 경우

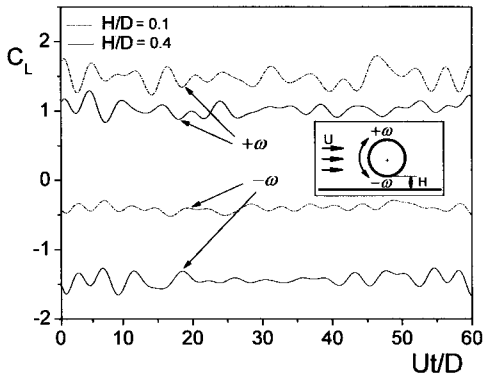


Fig. 5 Lift coefficients of the rotating cylinder with time ($|\alpha|=1$, $Re=1.9 \times 10^4$)

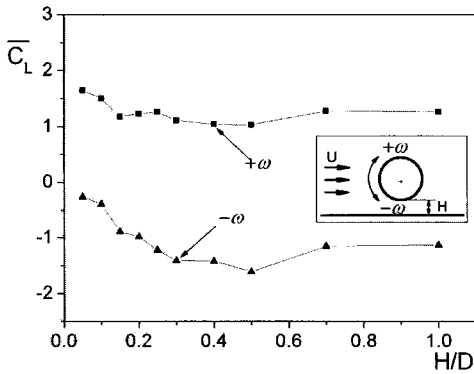


Fig. 6 Average lift coefficients of the rotating cylinder with H/D ($|\alpha|=1$, $Re=1.9 \times 10^4$)

를 나타낸다. 두 경우 모두 양력계수 C_L 선이 시간에 따라 진동하고 있는데, 이것은 원주 후류에 발생한 칼만 와의 영향으로 판단된다. 그러나 진동의 주기성이 불확실한 것은 측정원주 및 원주 주위 유체의 관성력에 기인하는 것으로 추정된다. 양력계수 C_L 값을 보면 원주가 시계방향(+ ω)으로 회전할 경우 간격비 H/D 가 작은 쪽이, 반시계 방향(- ω)으로 회전할 경우는 H/D 가 큰 쪽이 양력계수의 절대 값이 크게 나타나 있는데, 이는 벽면의 영향으로 Fig. 7의 가시화 실험결과에서 자세히 논하기로 한다.

Fig. 6에 간격비 H/D 변화에 따른 평균양력계수 $\overline{C_L}$ 을 나타낸다. 여기서 평균양력계수란 Fig. 5에 나타난 양력계수 1000개를 각각 평균한 것이다. 앞서 설명한 바와 같이 양력계수 시간변화의 주

기성이 다소 부족하나 양력계수 값이 평균값을 중심으로 진동하고 있어 그 전체를 시간 평균하여도 오차는 적을 것으로 추정된다. 먼저 원주가 시계방향(+ ω)으로 회전하는 경우, 간격비가 증가할수록 $\overline{C_L}$ 값은 차츰 감소하다가 $H/D=0.7$ 이후에는 $\overline{C_L}=1.2$ 에 거의 수렴하고 있다. 이는 정지벽면에서의 Yagita 등⁽⁴⁾의 실험결과와 잘 일치하고 있다. 또한 원주가 반시계 방향(- ω)으로 회전하는 경우 간격비가 증가할수록 $\overline{C_L}$ 값은 차츰 감소하다가 $H/D=0.5$ 를 기점으로 약간 증가하여 $H/D=0.7$ 이후에는 거의 같은 값을 보이고 있다. 이 역시 정지벽면에서의 Yagita 등⁽⁴⁾의 실험결과와 같은 경향을 보인다. 그러나 $H/D=0.15$ 부근에서 Yagita 등⁽⁴⁾이 나타낸 양력계수 값의 스위칭(switching) 현상은 불명확하지만, 이 지점에서 $\overline{C_L}$ 값의 감소폭이 매우 크게 나타나 있다. 한편 시계방향(+ ω)과 반시계 방향(- ω)의 평균양력계수 변화 값을 서로 비교해보면 $H/D=0.5$ 까지 $\overline{C_L}$ 값의 감소폭이 + ω 경우보다 - ω 경우가 훨씬 크게 나타나 있어 반시계방향으로 회전할 경우가 시계방향으로 회전할 경우보다 벽면의 영향을 더 크게 받는 것으로 평가된다.

Fig. 7에 간격비 H/D 변화에 따른 회전원주 주위의 흐름패턴을 나타낸다. 각 원주상의 가장자리에 표시한 검은 점은 박리점을 표시한 것이다. 먼저 (a)시계방향으로 회전하는 경우를 보면 $H/D=0.1$ 에서는 원주와 벽면사이에서의 흐름은 거의 보이지 않고 상부 박리점의 위치도 $H/D=0.2$ 및 0.4 경우보다 회전방향으로 더 많이 이동해 있다. Fig. 5 및 Fig. 6에서 평균양력계수 $\overline{C_L}$ 값이 $H/D=0.1$ 경우가 $H/D=0.2, 0.4$ 경우보다 크게 나타나 있는 것은 이런 흐름의 영향으로 판단된다. 다음 (b)반시계방향으로 회전하는 경우를 보면 간격비 H/D 가 증가 할수록 원주와 벽면사이 흐름의 양도 많아지고, 하부 박리점의 위치가 회전방향으로 많이 이동해 있다. 이 역시 Fig. 5 및 Fig. 6에서 간격비가 증가할수록 평균양력계수 절대값이 증가하는 이유를 잘 설명해 주고 있다.

Fig. 8에 주속비 α 변화에 따른 평균양력계수 $\overline{C_L}$ 을 나타낸다. 전체적으로 보면 시계방향(+ ω) 및 반시계 방향(- ω)으로 회전할 경우 모두 주속

비가 증가할수록 평균양력계수의 절대 값이 증가하고 있다. 또한 $+\omega$ 인 경우는 간격비 $H/D=0.1, 0.4$ 모두 주속비 증가에 대하여 양력계수의 증가율이 거의 같은 쪽으로 증가하고 있다. 그런데 $-\omega$ 인 경우 $H/D=0.4$ 에서는 주속비가 증가할수록 평균양력계수의 절대값이 대폭 증가하고 있으나 $H/D=0.1$ 에서는 그 증가율이 둔하게 나타나 있다. 즉 $-\omega$ 인 경우 간격비가 큰 쪽이 작은 쪽보다 주속비의 영향을 더 크게 받고 있다. 이 이유에 대해서는 $+\omega$ 인 경우 회전원주 상부의 유속은 일정류와 회전방향의 흐름이 동일방향이기 때문에 가

속되나 하부의 유속은 서로 반대방향이기 때문에 감속되어 베르누이 정리에 의해 상방향으로 양력이 발생하며, 어느 주속비까지는 주속비가 증가할수록 유체의 점성에 의한 회전방향의 유속이 증가하여 양력계수 값도 증가한다. 한편 $-\omega$ 인 경우 간격비 $H/D=0.1$ 에서 주속비가 증가해도 양력계수 증가율이 둔한 것은 간격비가 작아 벽면에서의 마찰력 때문 벽면과 원주사이의 흐름이 원활하게 가속되지 못하였기 때문으로 판단된다.

Fig. 9에 각 간격비에 있어 주속비 α 변화에 따른 평균양력계수 \overline{C}_L 을 나타낸다. 먼저 시계방향($+\omega$)으로 회전하는 경우를 보면 같은 주속비에서는 간격비가 작은 쪽이 다소 큰 \overline{C}_L 값을 가지나 대체로 평균양력계수 값은 모든 간격비에서 주속비가 증가할수록 거의 일정하게 증가하고 있다. 이에 대하여 반시계 방향 ($-\omega$)으로 회전할 경우 간격비 $H/D=0.2$ 까지는 \overline{C}_L 값의 절대치는 주속비가 증가함에 따라 그 증가율은 둔하지만 거의 일정하게 증가하고 있으나 $H/D=0.4, 0.5$ 경우는 주속비가 증가할수록 그 절대치는 대폭 증가하고 있다. 한편 Fig. 8, 9에서 주속비 $\alpha=0$ 인 경우, 회전방향과 관계없이 동일한 간격비에 대해서는 동일한 \overline{C}_L 값을 가져야하나 다소 차이를 보이고 있는데, 이는 측정부의 히스테리시스(hysteresis)성 오차에 기인한 것으로 추정된다. 즉 실험순서를 양 방향 모두 회전수의 최대치에서부터 회전수를 줄여가며 양력을 측정하였기 때문에 Fig. 2의

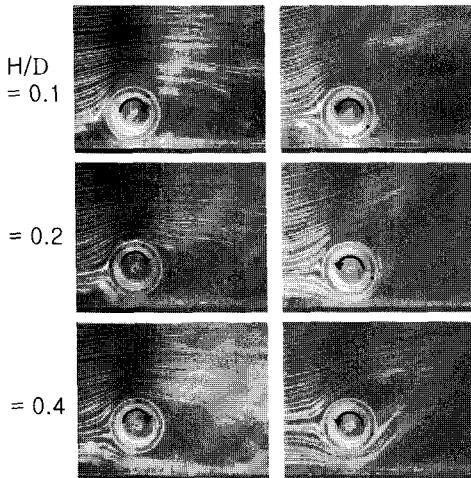


Fig. 7 Flow pattern around the rotating cylinder with H/D ($|\alpha|=1, Re=0.7 \times 10^4$)

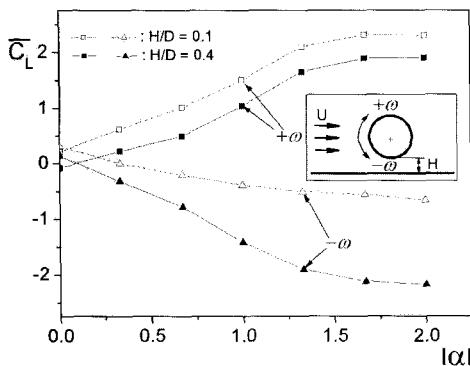


Fig. 8 Average lift coefficients of the rotating cylinder with velocity ratios ($Re=1.9 \times 10^4$)

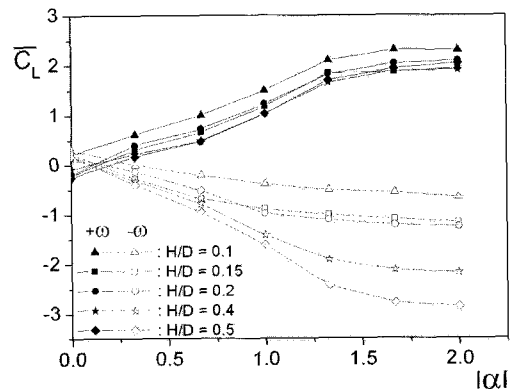


Fig. 9 Average lift coefficients of the rotating cylinder with H/D ($Re=1.9 \times 10^4$)

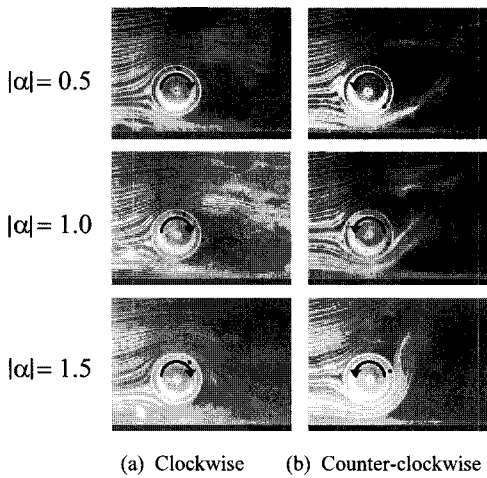


Fig. 10 Flow pattern around the rotating cylinder with velocity ratios ($H/D=0.4$, $Re=0.7 \times 10^4$)

측정부(measuring part) 상, 하에 베어링을 설치했음에도 불구하고, 축의 회전에 의한 측정부에 비틀림 모멘트가 축적되어 생성된 오차로 사료된다.

Fig. 10에 주속비 α 변화에 따른 회전원주 주위의 흐름패턴을 나타낸다. 이때 간격비는 양 회전방향 모두 주속비 변화에 대해 평균양력계수의 변화폭이 비교적 크게 나타난 $H/D=0.4$ 인 경우를 택하였다. 양 회전방향 모두 주속비가 증가할수록 박리점의 위치가 회전방향으로 이동해 있고 박리영역의 크기도 감소하고 있다. 이러한 흐름패턴은 Fig. 8 및 Fig. 9에서 주속비가 증가함에 따라 평균양력계수의 절대치가 증가하는 원인을 잘 설명하고 있다. 또한 같은 주속비에서 박리점의 위치를 비교해보면 반시계방향의 경우 박리점의 위치가 시계방향의 경우의 그것보다 더 많이 회전방향으로 치우쳐져 있다. 이것은 Fig. 8에서 $H/D=0.4$ 인 경우 평균양력계수의 절대치가 같은 주속비에서 시계방향보다 반시계방향에서가 훨씬 큰 값을 나타내는 원인으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 벽면에 인접해서 회전하는 원주의 유동장 특성을 가시화 실험 및 양력 측정 실험으로 파악한 것이다. 벽면은 일정류에 대하여 원주하방에 설치했으며 원주의 회전 방향, 원주와 벽면과의 간격비 H/D 및 주속비 α 를 실험변수로 잡았다. 실험범위 $H/D=0.05 \sim 0.5$, $\alpha=0 \sim \pm 2.0$ 에서의 결과들

요약하면 다음과 같다.

(1) 시계방향으로 회전할 경우 간격비가 작을수록 상부 박리점은 회전방향으로 더 많이 이동했고, 평균양력계수도 증가했다.

(2) 반시계 방향으로 회전할 경우 간격비가 클수록 하부 박리점은 회전방향으로 더 많이 이동했고, 평균양력계수도 음의 방향으로 증가했다.

(3) 시계방향으로 회전할 경우 주속비가 증가할수록 평균양력계수는 간격비와 관계없이 거의 일정한 형태로 증가했다.

(4) 반시계방향으로 회전할 경우 주속비가 증가할수록 평균양력계수는 음의 방향으로 증가했으나, 그 증가폭은 간격비가 큰 쪽이 더 컸다.

(5) 큰 간격비($H/D=0.4$)에서 양 회전방향 모두 주속비가 증가할수록 박리점의 위치가 회전방향으로 이동했으며, 같은 주속비에서는 반시계방향이 시계방향보다 더 많이 이동했고 양력계수의 절대치도 컸다.

후 기

이 논문은 2007년도 지방대학혁신역량강화사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- (1) Swanson, W. M., 1961, "The Magnus Effect : A Summary of Investigations to Date," *Trans. of ASME, Journal of Basic Engineering*, Vol. 83, pp. 461~470.
- (2) Ro, Ki. Deok. and Kang, Myeong. Hoon., 2004, "Flowfield Characteristics of a Rotating Circular Cylinder Having Square Dimpled Surface," *Trans. of the K.S.M.E. (B)*, Vol. 38, No. 4, pp. 486~492.
- (3) Kiya, M., Arie, M. and Furukawa, M., 1980, "Fluid Dynamic Characteristics of the Circular Cylinder in the Free Mixed Region of Turbulent Flow," *Trans. of the J.S.M.E. (B)*, Vol. 46, No. 411, pp. 2086~2094.
- (4) Yagita, M., Arimura, K., Kano, I., Inuzuka, N. and Tsukada, T., 1996, "Effects of a Ground Plate on Magnus Effect of a Rotating Cylinder," *Trans. of the J.S.M.E. (B)*, Vol. 62, No. 596, pp. 1294~1299.