

정방형 홈을 가진 회전원주 주위의 유동과 유체력

강명훈[†] · 노기덕* · 공태희**

Flow and Fluid Force around a Rotating Circular Cylinder with Square Grooves

Myeong Hoon Kang , Ki Deok Ro and Tae Hue Kong

Key Words: Fluid Mechanics(유체공학), Rotating Circular Cylinder(회전 원주), Flow Visualization(흐름의 가시화), Fluid Force (유체력), Velocity ratio(주속비)

Abstract

Flow patterns around a rotating circular cylinder having square dimpled surface were visualized by the hydrogen bubble technique at velocity ratios from $\alpha=0$ to 4.8 and Reynolds number of $Re=1.0 \times 10^4$. The wake region of the cylinder was reduced as the velocity ratios increase and was smaller than that of the smooth cylinder without dimples at the same velocity ratio. The hydrodynamic characteristics on the cylinder was investigated by measuring of lift and drag at velocity ratios from $\alpha=0$ to 4.1 and Reynolds number from $Re=1.2 \times 10^4$ to $Re=2.0 \times 10^4$. As the velocity ratios increase, the average lift and drag coefficients were increased and at the same velocity ratio, the average lift was larger but the average drag was smaller than that of the smooth cylinder.

1. 서론

일정류 중에서 원주가 중심 축을 중심으로 회전하면 원주는 흐름에 대하여 수직방향으로 양력을 받게 되는데 이것을 소위 마그너스(Magnus) 효과라 한다. 이러한 현상은 특히 회전하면서 나아가는 물체 주위의 유동장을 해석하는데 자주 응용된다. 예를 들면 테니스 공, 골프 공에 스핀을 걸면 스핀의 강도에 따라 그 궤적 및 비행거리가 달라지는데 이 역시 마그너스(Magnus) 효과로 정성적으로 회전원주 주위의 흐름으로 해석할 수 있다. 또한 미사일, 로켓 등 가늘고 긴 물체가 공중에서 회전하면서 돌진할 때 비행방향과 수직방향의 횡력이 문제가 되고 있어 회전원주 주위의 흐름은 공학적으로도 중요한 의미를 가진다.

Swanson⁽¹⁾은 회전원주의 마그너스 효과에 관한 그때까지의 여러 연구결과를 정리했다. 결과를 요

약하면 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 존재함을 나타냈다. 회전원주의 항력계수에 대해서는 주속비 $\alpha=4$ 까지 항력계수는 주속비가 클수록 증가하여 그 값이 2.8까지 도달했으나 그 후로 단순히 감소하여 주속비 $\alpha=10$ 부터는 거의 일정치 1.8을 유지했다.

Tanaka⁽²⁾ 및 Diaz⁽³⁾ 등은 열선유속계로 회전하는 원주의 후류를 조사해서 회전원주의 주속비가 클수록 후류의 폭이 좁게 되고, 후류의 칼만와에 의한 스트로홀(Strouhal) 수가 증가하며, 어느 주속비를 넘으면 칼만와가 소멸함을 나타냈다.

Sung⁽⁴⁾ 등은 일정류 대신 일정 전단류를 흘려보내고 회전하는 원주 후류측에 레이저 유속계(LDV)로 속도강도 스펙트럼을 측정해서 볼텍스 방출특성을 조사했다. 일반적으로 볼텍스 방출 주파수는 주속비 및 전단류의 속도구배율이 클수록 증가하지만 주속비 $\alpha=1.5$ 를 넘으면 와방출 주파수가 구별되지 않고 무질서하게 되며, 칼만와열도 매우 약하게 나타남을 보였다.

앞서 설명한 회전원주 유동장 연구에 채용된 원

† 경상대학교 대학원 기계시스템공학과

E-mail : kangwoosu@naver.com

TEL : (055)640-3123 FAX : (055)640-3228

* 경상대학교 기계항공공학부 · 해양산업연구소

** 경상대학교 대학원 기계시스템공학과

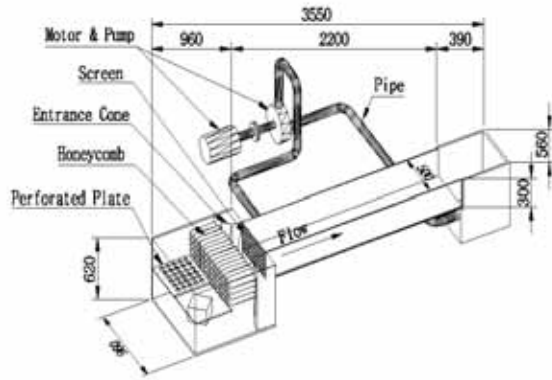


Fig. 1 A circulating water tank (unit:mm)

주는 거의 대부분이 표면에 거칠기가 없는 매끄러운 원주이며, 다양한 주속비에 대한 가시화 실험 결과는 보이지 않고 있다. 그러나 실제로 회전하면서 비행하는 골프 공, 야구 공 또는 로켓 등은 표면이 매끄럽지 않다. 그래서 본 연구에서는 원주표면에 정방향 딴플을 설치, 딴플이 회전원주의 유동장에 어떤 영향을 미치는지 실험적으로 조사하기로 했다. 구체적으로 딴플의 유, 무에 따라 주속비 변화에 따른 회전원주 주위의 유동장을 가시화함과 동시에 양, 항력특성을 측정하고자 한다. 한편 $Ro^{(5)}$ 등은 정지 원주의 표면에 정방향의 딴플을 설치하여 약 28%의 항력감소를 보였다.

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

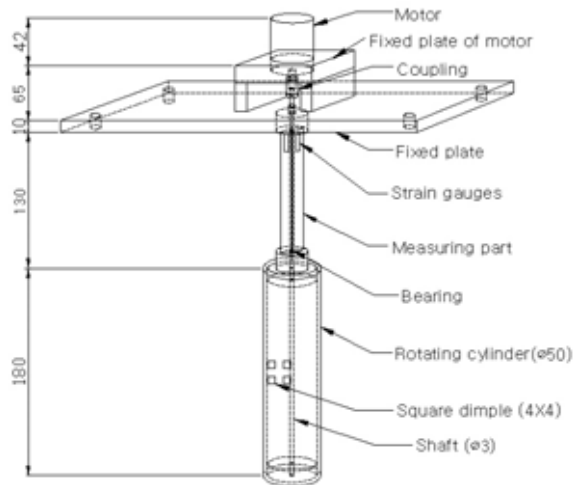


Fig. 2 Schematic structure of driving system of a rotating cylinder(unit: mm)

디지털 인버터로 제어하여 변속했는데 이때 수로내의 최대 유속은 0.34m/s 였다.

2.2 양·항력 측정실험

회전원주의 양·항력 측정 및 가시화 실험을 위해 제작한 회전원주 구동장치의 개략도를 Fig. 2에 나타낸다. 장치는 제작을 쉽게 하기 위해 모터, 커플링, 베어링 및 축을 제외하고는 전부 투명한 아크릴 판을 재료로 하여 만들었다. 회류수조상에 실험장치를 고정할 고정판은(fixed plate)은 가로 270mm, 세로 300 mm로 두께 10mm의 아크릴 판으로 제작했으며, 그 상부는 모터 고정판을, 하부는 측정부를 강력 접착제로 고정시켰다. 모터(DC3W)의 동력은 커플링, 축을 경유해서 원주에 전달되며, 원주의 회전속도는 모터 컨트롤러 및 디지털 표시기로 제어한다. 이때 모터의 회전력이 원활하게 원주에만 전달되도록 측정부의 상, 하부에는 축 베어링을 설치하여 축을 관통시켰다. 회전원주는 직경 50mm의 투명 아크릴 판을 180mm로 잘라 만들었으며 그 상, 하부에 원형 덮개를 부착했고 덮개 중앙에 축이 관통하도록 직경 3mm의 구멍을 뚫었다. 원주의 회전축은 직경 3mm의 스텐레스 봉을 375mm로 잘라 만들었으며, 축과 원주는 강력접착제로 고정시켰다. 측정부 역시 재질은 투명 아크릴이며 중앙에는 축이 잘 관통하도록 길이 방향으로 직경 4mm의 구멍을 뚫었다. 또한 일정류 중에서 양·항력을 용이하게 분리하여 측정할 수 있도록 단면을 정방향(12×12mm)으로 정밀 가공하였다. 그리고 그곳에 각 방향으로 2매씩

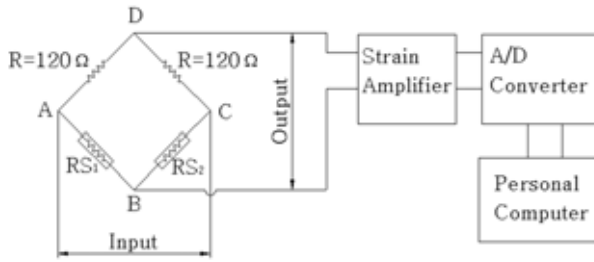


Fig. 3 Schematic diagram for the measurement of fluid force

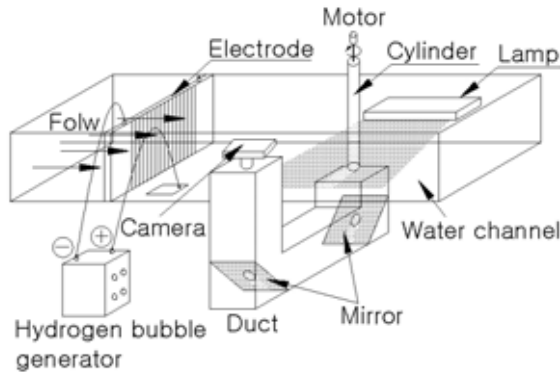


Fig. 4 Schematic structure of experimental apparatus for flow visualization

(계 4매) 스트레인게이지를 부착하고 브릿지 회로를 결성하여 스트레인량으로 양·항력을 측정했다. 한편 각 채널(계 2채널)의 브릿지 회로에서 나온 출력파형은 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 스트레인 앰프, AD변환기를 거친 다음 퍼스널 컴퓨터에서 미리 캘리브레이션한 계수에 의해 양·항력 값으로 출력된다. 실험은 원주 표면에 두께 1mm, 길이 180mm의 투명비닐을 감아 행하였으며, 덤플은 투명비닐에 가로, 세로 4mm의 정방형 구멍을 4mm 간격으로 펀치로 뚫어 만들었다.

2.3 유동장 가시화 실험

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 원주주위의 흐름을 사진촬영 하는 데는 한계가 있어 그림에서와 같이 회류수조 아래쪽으로 ㄷ자형 덕트를 설치하고, 그 내부에 45°각도로 거울을 2장 설치하여 거울에 반사된 영상을 사진촬영했다. 전극은 직경 0.2mm의 에나멜

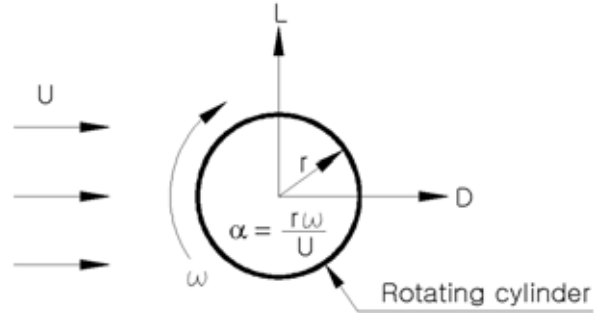


Fig. 5 Experimental model of a rotating cylinder

선을 5mm 간격으로 설치하여 만들었고 그 중간부분의 피복을 벗겨 전기가 통하도록 하였다. 그래서 수소기포발생장치의 -극은 이 전극에, +극은 동판에 연결하였다. 가시화사진은 회류수조의 밖에서 일정류와 수평, 수직방향으로 할로겐 램프(150W×2대)에 의한 슬릿상의 조명광을 비추고 앞서 설명한 바와 같이 거울에 반사된 회전원주 주위의 유맥선을 촬영했다.

2.4 특성계수의 정의

회전원주의 실험 모델을 Fig. 5에 나타낸다. 그림에서와 같이 일정류 U중에 원주가 반시계 방향으로 각속도 ω로 회전할 경우 회전원주에는 일정류와 같은 방향의 항력 D와 수직방향의 양력 L이 발생한다. 회전원주의 역학적 특성을 나타내는 각 계수 즉 양력계수 C_L , 항력계수 C_D 는 다음과 같이 정의한다.

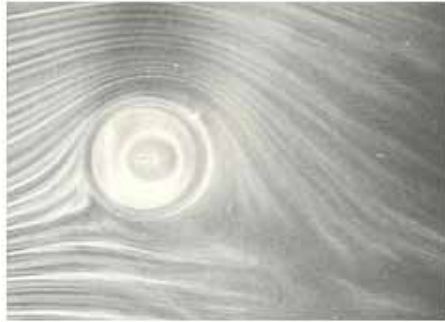
$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho U^2 S} \tag{1}$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho U^2 S} \tag{2}$$

여기서 ρ는 유체의 밀도, S는 수면 아래에 잠겨 있는 원주의 투영면적을 나타내며 낸다. 또한 회전원주의 주속비 α 및 레이놀즈 수 Re는 다음과 같이 나타낸다.

$$\alpha = \frac{r\omega}{U} \tag{3}$$

$$Re = \frac{2rU}{\nu} \tag{4}$$



(a) In case of a smooth cylinder without dimples



(b) In case of a cylinder having dimples

Fig. 6 Flow pattern around the rotating cylinder ($\alpha=3.6, Re=1.0 \times 10^4$)

여기서 r 은 댄플의 비닐 두께를 포함한 회전원주의 반경을 나타내며, v 는 유체의 동점도이다. 실험은 주속비 $\alpha=0 \sim 4.8$, 레이놀즈 수 $Re=1.0 \times 10^4 \sim 2.0 \times 10^4$ ($U=0.18 \sim 0.34\text{m/s}$) 범위 내에서 행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

먼저 가시화 실험결과로 **Fig. 6**에 회전원주 주위의 흐름패턴을 나타낸다. 그림에서 (a)는 댄플을 설치하지 않은 원주 주위의 유맥선이며 (b)는 댄플을 설치한 원주 주위의 유맥선의 사진이다. 두 경우 모두 정체점이 원주의 좌측 하방에 위치해 있다. 또한 원주 위쪽의 유맥선의 간격이 아래쪽보다 밀집해 있어 위쪽의 유속이 빠름을 알 수 있고 정성적으로 두 경우 모두 상방향으로 양력이 작용함을 유추할 수 있다. 후류쪽의 박리영역을 비교해보면 (a)의 경우는 작지만 그 영역이 존재하고 있으나, (b)의 경우는 박리영역이 소멸되어 거의 보이지 않고 있다.

Fig. 7에 다양한 주속비 α 에 있어 댄플의 유무에 따른 회전원주 주위의 흐름패턴을 나타낸다.

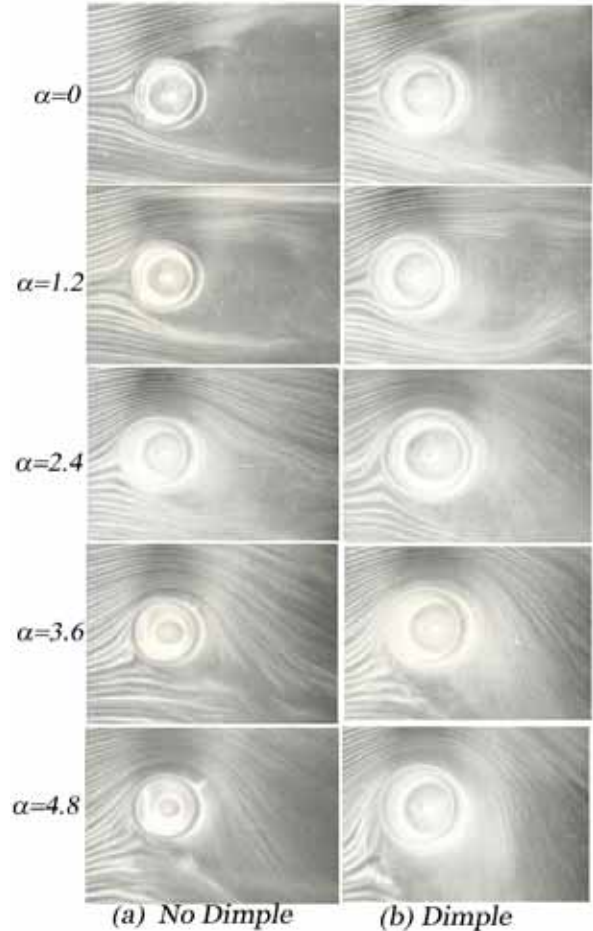


Fig. 7 Flow pattern around the rotating cylinder for various velocity ratios ($Re=1.0 \times 10^4$)

댄플의 유무에 관계없이 주속비가 증가할수록 정체점은 좌측 아래쪽으로 내려오고 있다. 원주 우측을 보면 상부 박리점이 주속비가 증가할수록 회전방향으로 이동하고 있는데 이것은 유체의 점성영향에 의해 원주주위의 유체가 원주와 함께 회전함을 나타낸다. 원주 후류쪽의 박리영역의 크기를 비교해 보면 전체적으로 같은 주속비에서는 댄플이 있는 쪽이 없는 쪽보다 작게 나타남을 볼 수 있다.

Fig. 8에 원주의 양력계수 C_L 및 항력계수 C_D 의 시간변화를 나타낸다.

그림은 정지한 원주의 경우이며, 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 실선은 댄플이 있는 경우이며, 점선은 댄플이 없는 경우이다. 두 경우 모두 양력계수 C_L 은 0.0을 중심으로 크게 진동하고 있는데 이것은 원주

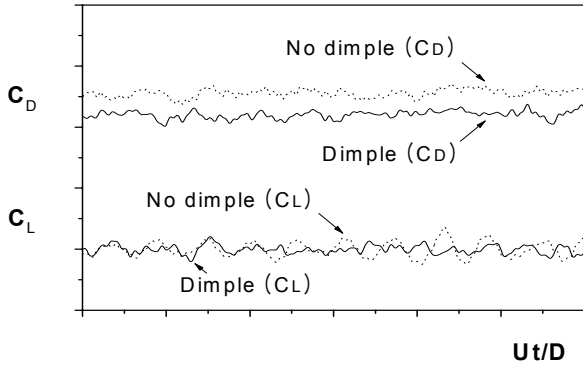


Fig. 8 Drag and lift coefficients of the cylinder with time ($\alpha=0$, $Re=2.0 \times 10^4$)

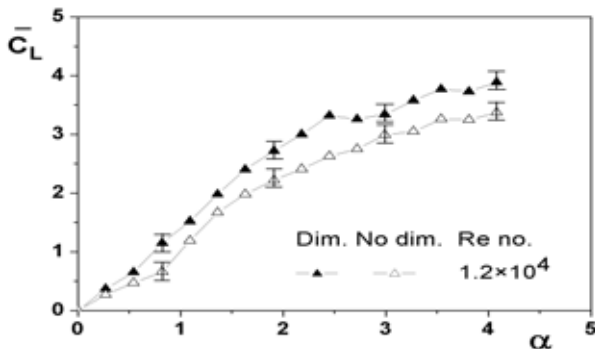


Fig. 9 Average lift coefficients of the rotating cylinder with velocity ratios

주위에서 발생한 칼만와의 영향으로 판단된다. 항력계수 C_D 를 보면 딴플이 있는 경우는 그 값이 1.1을 기준으로 진동하는데 비해 없는 경우는 1.25를 기준으로 진동하고 있다. 원주의 표면에 정방형 딴플을 설치함으로써 항력이 감소하는 이유에 대해서는 이전의 연구결과⁽⁵⁾에 자세히 설명하고 있다. 주속비를 변화시킬 경우 양, 항력계수의 평균값은 달라지나 시간변화는 거의 변동이 없어 이하 평균 양, 항력계수 값으로 그 특성을 나타낸다.

Fig. 9에 주속비 α 변화에 따른 평균양력계수 $\overline{C_L}$ 을 나타낸다. 딴플의 유, 무에도 불구하고 평균양력계수는 주속비가 증가함에 따라 증가하고 있다. 또한 주속비 0인 경우를 제외하고 같은 주속비에서는 딴플이 있는 쪽이 없는 쪽보다 양력계수가 크며, 그 값의 차이는 주속비가 증가할수록 다소 크게 나타나 있다.

Fig. 10에 다양한 레이놀즈 수에 있어 주속비 α 의 변화에 따른 평균양력계수 $\overline{C_L}$ 을 나타낸다.

레이놀즈 수의 변화에도 불구하고 평균 양력계수

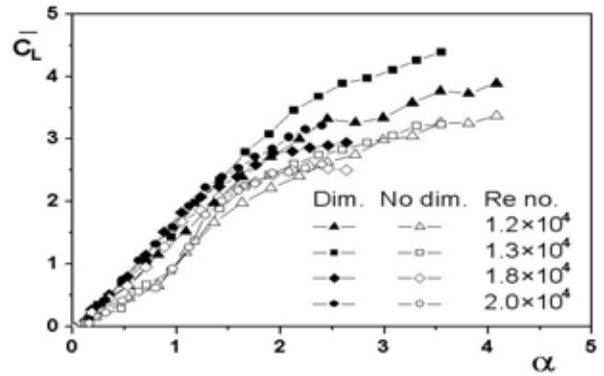


Fig. 10 Average lift coefficients of the rotating cylinder with velocity ratios for various Reynolds number

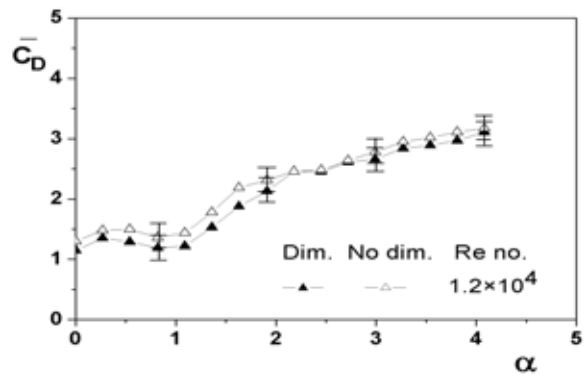


Fig. 11 Average drag coefficients of the rotating cylinder with velocity ratios

는 주속비가 증가함에 따라 증가하며, 같은 주속비에서는 딴플이 있는 쪽이 없는 쪽보다 그 값이 크다. 따라서 정방형 딴플을 설치함으로써 회전물체의 항력을 더욱 증가시킬 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 11에 주속비 α 변화에 따른 평균항력계수 $\overline{C_D}$ 를 나타낸다.

딴플이 있는 경우, 없는 경우 모두 유사한 특성을 보이고 있으며 주속비를 증가시키면 평균항력계수는 다소 증가하다가 감소하나 주속비가 1이상인 영역에서는 주속비가 증가함에 따라 그 값이 증가하고 있다. 이러한 경향은 Swanson⁽¹⁾의 연구결과와 일치한다. 주속비에 따라 다소 차이가 있으나 전체적으로 같은 주속비에서는 딴플이 있는 쪽이 없는 쪽보다 항력계수가 다소 작으며, 그 값의 차이는 주속비가 2이하일 때 확연하다.

Fig. 12에 다양한 레이놀즈 수에 있어 주속비 α 의 변화에 따른 평균항력계수 $\overline{C_D}$ 를 나타낸다.

주속비에 따른 평균항력계수의 변화는 전체적으로

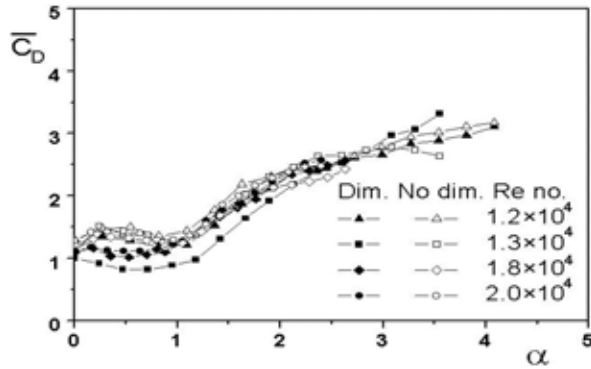


Fig. 12 Average drag coefficients of the rotating cylinder with velocity ratios for various Reynolds number

레이놀즈 수가 변화하여도 같은 경향을 보이며 주속비를 증가시키면 그 값이 주속비 1을 기점으로 약간 감소하다가 증가한다. 또한 주속비가 2이하의 영역에서는 같은 주속비에서 뒤편이 있는 쪽이 없는 쪽보다 평균항력계수가 작으나 2이상의 영역에서는 레이놀즈 수에 따라, 주속비에 따라 다소 다른 경향을 보이고 있다.

4. 결 론

본 연구는 표면에 정방형 뒤편을 설치한 회전원주의 유동장 특성을 수조기포법에 의한 가시화 실험과 양·항력 측정실험으로 파악한 것이다. 뒤편의 영향을 명확하게 하기 위하여 동일조건에서 뒤편이 없는 매끄러운 원주에 대해서도 같은 실험을 행하여 양자를 비교검토 하였다. 실험변수로서 주속비 α 와 레이놀즈 수 Re 로 했으며 각각의 실험범위는 $\alpha=0\sim 4.8$, $Re=1.0\times 10^4\sim 2.0\times 10^4$ 이다. 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 회전원주의 상부박리점 위치는 주속비가 증가할수록, 같은 주속비에서는 뒤편을 설치한 쪽이 뒤편을 설치하지 않은 쪽보다 회전방향으로 더 많이 이동했다.
- (2) 회전원주의 박리영역의 크기는 주속비가 증가할수록 감소했으며 같은 주속비에서 뒤편을 설치한 쪽이 뒤편을 설치하지 않은 쪽보다 더 작게 나타났다.

- (3) 회전원주의 평균양력계수는 주속비가 증가할수록 증가했으며 같은 주속비에서 뒤편을 설치한 쪽이 뒤편을 설치하지 않은 쪽보다 크게 나타났다.
- (4) 회전원주의 평균항력계수는 주속비가 증가할수록 주속비 1을 기준으로 약간 감소했다가 증가했다. 주속비가 2이하의 영역에서는 같은 주속비에서 뒤편이 있는 쪽이 없는 쪽보다 평균항력계수가 작으나 2이상의 영역에서는 레이놀즈 수 및 주속비에 따라 다소 다른 경향을 보였다.

후 기

이 논문은 2004년도 두뇌한국21사업 및 지방대학혁신역량강화사업에 의하여 지원되었음.

참 고 문 헌

- (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) Tanaka, E. and Nagano, S., 1972, "A Study on the Flow around a Rotating Circular Cylinder", *Transactions of the JSME*, Vol. 38, No. 310, pp. 1343-1352.
- (3) Diaz, F., Gavaldà, J., Kawall, J. G. and Keffer, J. F., 1985, "Asymmetrical Wake Generated by a Spinning Cylinder," *AIAA Journal*, Vol. 23, No. 1, pp. 49-54.
- (4) Sung, H. J., Chun, C. K. and Hyun, J. M., 1995, "Experimental Study of Uniform Shear Flow past a Rotating Cylinder," *Trans. of ASME, Journal of Fluids Engineering*, Vol. 117, pp. 62-67.
- (5) Ro, K. D. and Park, J. T., 2002, "Drag Reduction Characteristics of Cylinder Having Square Dimpled Surface," *Journal of the Korean Society of Marine Engineers* Vol. 26, No. 2, pp. 233-239.