

표면에 정방형 딴플을 가진 원주의 항력저감 특성

노기덕*, 박지태**, 진윤식***, 여광수***

Drag Reduction Characteristics of Cylinder Having Square Dimpled Surface

Ki-Deok Ro, Ji-Tae Park, Youn-Sig Jin, Kawang-Su Yeo

* 경상대학교 수송기계공학부, 해양산업연구소

** 경상대학교 대학원

*** 경상대학교 기관공학과

Abstract : The drag reduction of the cylinder having square dimpled surface was studied by the measuring the drag force acting on the cylinder. The level of the drag reduction was changed by the arrangement shape of the square grooves and Reynolds number. The drag of the cylinder was reduced about 28% with proper arrangement of square grooves. The flow field around the cylinder having grooves at the minimum drag was visualized by using post color ink in order to see the influence of the grooves. In this case, the separation points were sifted rearward and the wake region was smaller than that of the smooth cylinder.

Key words: Fluid Mechanics(유체공학), Circular Cylinder(원주), Flow Separation(흐름의 박리), Fluid Force(유체력), Flow Visualization(흐름의 가시화).

1. 서론

물체표면의 유동을 제어하여 물체에 작용하는 항력을 저감시키면 유체력에 의한 구조물 파괴의 방지는 물론, 비행기, 자동차, 선박 등은 추진효율이 증가하여 에너지 절감에도 효과가 크다. 그래서 물체주위의 유동장을 제어해서 항력을 감소시키는 문제는 유체역학적으로 아주 중요한 연구테마이다.

일반적으로 물체주위의 유동을 제어해서 항력을 감소시키는 방법으로 에너지가 부족한 경계층 영역에 외부에너지의 공급유무에 따라 능동적 기법과 수동적 기법으로 나눌 수 있다.^[1] 전자는 경계층이 박리하기 직전에 경계층 내에 운동에너지를 보충하던지 아니면 에너지를 소실한 경계층을 흡입해서 하류에 새로운 경계층을 만드는 방법이다.

반면 후자는 물체의 표면을 유선형으로 하여 압력상승을 완만하게 하는 소극적인 방법과 물체 표면에 부가물을 설치하여 경계층 부근의 흐름을

교란시켜 운동에너지가 부족한 물체표면의 흐름이 경계층 외측의 흐름과 혼합해서 박리에 견디는 능력을 증가시키는 적극적인 방법이 있다. 이 방법은 외부에너지 공급 없이 단순히 물체의 기하학적 형상을 변경하거나 간단히 부가장치를 부착하면 되기 때문에 산업현장에 응용하기 쉽다. 한편 원주주위의 흐름은 물체주위의 흐름 중 가장 기본적인 형태의 하나이며, 원주로 대표되는 구조물은 공장의 굴뚝, 다리교각, 안테나, 케이블, 열교환기 등 수없이 많다.

수동적 제어 방법에 의한 원주의 항력저감에 관한 연구로는 Achenbach^[2], Guven 등^[3]은 원주의 표면거칠기가 항력계수 및 흐름의 천이에 미치는 영향을 조사했다. Igarashi와 Tsutsui^[4,5]는 원주의 박리전단층내에 제어봉을 설치하여 원주의 평균항력을 20~30%정도 감소시켰다. 임과 이^[6]는 원주표면에 유동방향으로 홈을 파는 소위 U자형 리블렛(Riblet) 가공에 의해 원주의 항력을 최고 21% 정도 감소시켰다. 노기덕^[7]은 원주표면에 규칙적인 원주형 딴플을 가공, 항력계수를 측

정하여 원주형 딩플의 적당한 배열로 25%정도 항력을 감소시켰고, 이때 원주주위의 유동장을 수조기포법으로 가시화 하여 항력감소원인을 규명하려고 노력하였다.

상술한바와 같이 다양한 방법으로 원주의 항력을 저감시키는 연구가 진행되어 왔는데 실용화를 위해서는 항력감소율을 크게 함은 물론, 설치도 용이해야 한다. 본 연구에서는 실용화에 초점을 맞추고, 원주 표면에 다양한 배치형태의 정방형 딩플을 설치, 유체의 흐름에 의한 항력을 측정하여 항력이 최소가 되는 딩플의 배치형태를 찾고, 이때 원주 주위의 흐름을 가시화 하여 항력이 감소한 원인을 규명하려고 노력하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 회류수조

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

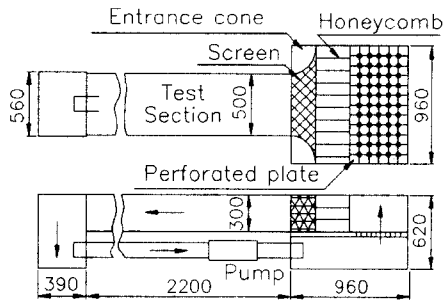


Fig. 1 A Circulating water tank (unit:mm)

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 390mm, 세로 560mm, 높이 620mm이며, 내수합판으로 제작하였다. 수로는 폭 500mm, 깊이 300mm, 길이는 2200mm이며, 가시화 실험을 할 때 조명광이 잘 투과하도록 투명한 아크릴 판으로 제작했다. 그리고 수로 내에 일정류를 얻기 위하여 상류측 저수탱크내에 다공판을 설치했고, 수로의 입구에는 정류격자 및 10메시 정도의 그물망을 50mm 간격으로 6장 설치했다.

실험은 수로바닥에서 180mm까지 물을 채워 행하였으며, 일정류는 펌프 구동용 모터(AC 3.7kW)의 회전수를 디지털 인버터로 제어하여 변속했는데 이때 수로내의 최대 유속은 0.40m/s 였다.

2.2 양·항력 측정실험

양·항력 측정용 원주 및 축의 구조를 Fig. 2에 나타낸다.

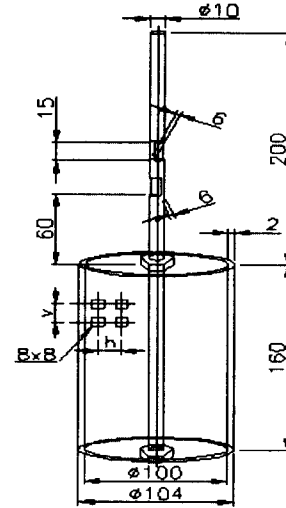


Fig. 2 Schematic diagram of the cylinder model having grooves and its shaft

회류수조의 크기에 맞추어 원주는 직경100mm, 길이160mm로 했으며, 관성력을 줄이기 위해 투명 아크릴 파이프를 잘라, 물이 스며들지 않도록 상·하부에 원형 덮개를 부착하였다. 이 덮개 중앙에 너트를 부착하고, 측정축 하부 160mm에 나사를 가공하여 그림에서와 같이 축을 원주에 고정시켰다.

항력감소 실험은 이 원주의 표면에 두께 2mm, 길이 160mm의 비닐장판을 감아서 행하였으며, 딩플은 그림에서와 같이 비닐장판에 가로, 세로 8mm의 정방형 구멍을 일정간격으로 펀치로 뚫어 만들었다. 측정축은 직경 10mm, 길이 360mm 크기의 봉을 사용했고, 진동을 줄이기 위해 재질은 알루미늄으로 했으며, 양·항력은 이 축에 걸리는 스트레인량으로 측정했다. 이때 일정류 중에서 양·항력을 용이하게 분리하여 측정할 수 있도록 그림에서와 같이 알루미늄 봉의 상부를 전후, 좌우 방향으로 두께 6mm로 평평하게 깎았다. 그리

고 그곳에 각 방향으로 2매씩(계 4매) 스트레인 게이지를 부착하고 브릿지 회로를 결성하여 양·항력을 측정했다. 즉 Fig. 3에 나타낸바와 같이 각 채널(계 2채널)의 브릿지 회로에서 나온 출력 파형은 스트레인앰프, AD변환기를 거친 다음 퍼서널 컴퓨터에서 미리 보정한 계수에 의해 양·항력 값으로 출력된다.

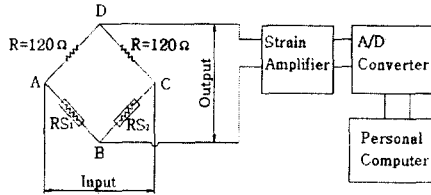


Fig. 3 Schematic diagram for the measurement of fluid force

양·항력 측정실험은 Fig. 1에 나타낸 회류수조의 측정부에 Fig. 2의 원주모형을 수면하 140mm 잠기도록 넣고, 축의 상부 끝 부분을 회류수조 밖에서 고정시킨 후 일정류 U(U=0.13~0.39m/s)를 일정간격으로 증가시키며 양·항력을 측정했다.

2.3 유동장의 가시화실험

가시화 실험은 트레이서로 형광잉크(post color ink)를 이용했으며, Fig. 1에 나타낸 회류수조의 측정부(test section)의 상류측에 형광잉크 주입기를 설치하고 그 하류측에 원주모형을 설치하여 행하였다. 먼저 본 실험에 사용한 형광잉크 주입기의 개략적인 구조를 Fig. 4에 나타낸다.

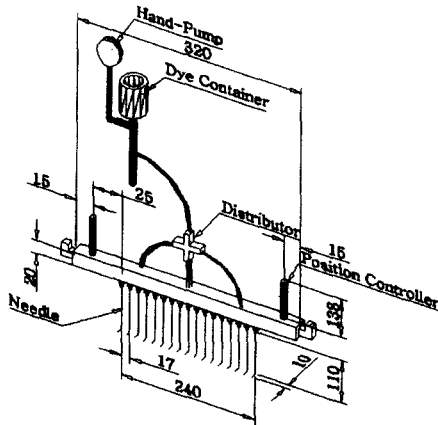


Fig. 4 Structure of the dye injector

형광잉크 주입기는 그림에서 나타낸 바와 같이 가로, 세로 20mm, 길이 320mm 속이 빈 블럭의 하부에 직경 0.9mm, 길이 120mm의 주사바늘을 17mm 간격으로 끼워 만들었다. 이때 형광잉크가 각 주사바늘에 끌고루 유입되도록 속이 빈 블럭 중앙 상부에 3방향의 분배기(distributor)을 설치했으며, 관로 중간에 차있는 공기를 배출시켜 형광잉크가 잘 흐르도록 저장용기 하부에 핸드펌프를 부착했다. 또한 가시화실험시 유맥선이 잘 형성되도록 주사바늘 끝 부분 10mm를 유속방향으로 90° 구부렸으며, 수면으로부터 50mm 깊이에서 형광잉크가 배출되도록 중공블럭의 높이를 조정했다. 본 실험에 사용한 트레이서는 주황색의 형광잉크를 알코올에 녹이고, 여기에 과다한 확산을 방지하기 위해 글리세린을 적당량을 배합해서 만들었다.

가시화실험에 사용한 원주모형은 가시화를 용이하게 하기 위해 양·항력측정에 사용된 모델의 치수를 1/2로 줄인 것을 이용했다. 즉 원주모형은 직경 50mm의 투명아크릴 파이프를 길이 210mm로 잘라 만들었고, 그 둘레에 두께 1mm의 투명 비닐을 감고 거기에 일정간격으로 가로, 세로 4mm의 정방형 구멍을 편치로 뚫어 담판을 설치했다. 이 원주모형은 가로 495mm, 세로 600mm, 두께 2mm의 아크릴 밀판의 중앙에 접착제로 고정 시켰으며, 가시화실험시 형광잉크가 잘 보이도록 아크릴 밀판을 검정색 도료로 칠했다.

가시화사진은 회류수조의 밖에서 슬라이드 프로젝트(150W×2대)를 이용해서 일정류와 수평, 수직방향으로 스크린상의 조명광을 비추고, 형광잉크를 흘러보내면서 원주의 상부에서 수직 아래 방향으로 원주모형주위의 유맥선을 촬영했다.

3. 실험결과 및 고찰

먼저 원주의 역학적 특성을 나타내는 계수, 즉 양력계수 C_L , 항력계수 C_D 는 다음과 같다.

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

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

표면에 정방형 뒤편을 가진 원주의 항력저감 특성

여기서 양력 L 및 항력 D 는 각각 원주에 작용하는 일정류 U 와 수직방향 및 같은 방향의 힘의 성분이다. 또한 ρ 는 유체의 밀도, S 는 수면 아래에 잠겨있는 원주의 투영면적을 나타낸다.

먼저 Fig. 5에 원주의 양력계수 C_L 및 항력계수 C_D 의 시간변화를 나타낸다.

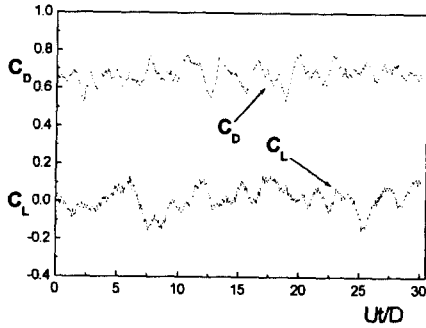


Fig. 5 Drag and lift coefficients of a smooth cylinder ($Re=4.5 \times 10^4$)

그림은 뒤편이 없는 매끈한 원주의 경우 (smooth type)이며, 그림에서 횡축은 일정류 U 및 측정시간 t 를 원주의 직경 D 로 무차원한 값이다. 그림은 각 계수 모두 9.2초 동안 1,000개의 데이터를 취해서 선으로 연결한 것이다. 양력계수 C_L 은 0.0을 중심으로 크게 진동하고 있는데 이것은 원주주위에서 발생한 칼만와의 영향으로 판단된다. 그러나 그 주기성이 일정하지 않은 것은 본 실험에 사용한 원주는 유한길이 원주이므로 원주 끝단에서 발생한 와류가 칼만와에 간섭을 주었기 때문으로 사료된다. 항력계수 C_D 는 0.7을 기준으로 주기적으로 진동하고 있는데, 이 역시 원주주위의 칼만와 및 원주끝단에서 발생한 와류의 영향으로 판단된다. 일반적으로 유한길이 원주의 평균항력계수^[8]는 레이놀즈 수 $Re=4.5 \times 10^4$ 부근에서 0.7로 알려져 있으며, 그림에서 알 수 있듯이 여기서도 그 평균치는 같은 값으로 본 실험의 정확성을 입증하고 있다. 또한 기존의 실험치^[8]를 살펴보면, $Re=10^4 \sim 10^5$ 영역에서는 유한길이 원주이건, 무한길이 원주이건 항력계수의 값은 거의 일정하므로 유한길이 원주의 항력저감특성은 무한길이 원주의 그것과 유사할 것으로 판단된다.

다음은 사각형 뒤편에 의한 항력감소 실험으로 먼저 Fig. 6에 뒤편의 배열이 정방형인 경우 레이

놀즈 수 Re 의 변화에 따른 평균항력계수 $\overline{C_D}$ 를 나타낸다.

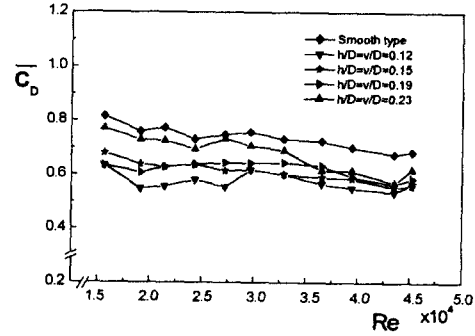


Fig. 6 Average drag coefficients for the cylinder with the square arrangement of grooves

그림에서 smooth type이란 뒤편을 설치하지 않은 경우이며, h 및 v 는 Fig. 2에서 나타낸바와 같이 가로방향 및 세로방향의 뒤편 간격을 나타낸다. 그림에서 나타낸바와 같이 정방형 뒤편이 있는 경우는 모두 뒤편이 없는 경우에 비해 평균항력계수가 적으며 그 경향은 레이놀즈 수에 따라 다소 차이가 있으나, 뒤편의 간격이 적을수록 항력계수 값도 작다.

Fig. 7에 뒤편의 가로간격은 $h/D=0.15$ 로 고정시키고, 세로간격을 $v/D=0.12, 0.15, 0.19$ 로 변화시켰을 경우, 레이놀즈 수 Re 의 변화에 따른 평균 항력계수 $\overline{C_D}$ 를 나타낸다.

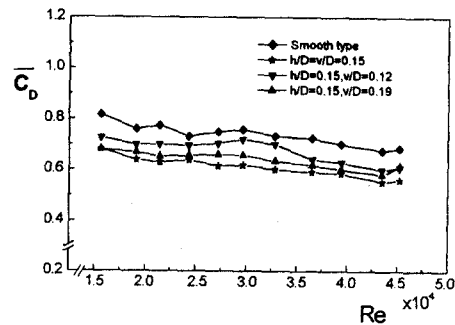


Fig. 7 Average drag coefficients for the cylinder with the vertical variation of grooves

이 경우 역시 뒀플을 설치한 원주의 항력계수가 설치하지 않은 원주 그것보다 적으며, 특히 $h/D=v/D=0.15$ 의 경우가 전 레이놀즈 수에 걸쳐 가장 작게 나타나 있다.

Fig. 8에 뒀플의 세로간격 $v/D=0.15$ 로 고정하고, 가로간격을 $h/D=0.12, 0.15, 0.19$ 로 변화시켰을 때, 레이놀즈 수의 변화에 따른 평균항력계수 $\overline{C_D}$ 를 나타낸다.

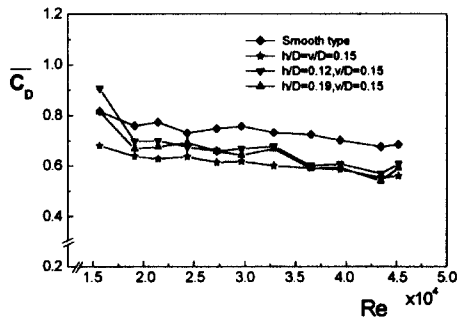


Fig. 8 Average drag coefficients for the cylinder with the horizontal variation of grooves

레이놀즈 수에 따라 다소 차이는 있으나, 이 경우 역시 $h/D=v/D=0.15$ 의 경우가 $\overline{C_D}$ 값이 가장 적다.

Fig. 9에 정방형 뒀플 배열 중간에 뒀플을 하나씩 더 설치한 경우(그림에서 S표시) 레이놀즈 수 Re 변화에 따른 평균항력계수 $\overline{C_D}$ 를 나타낸다.

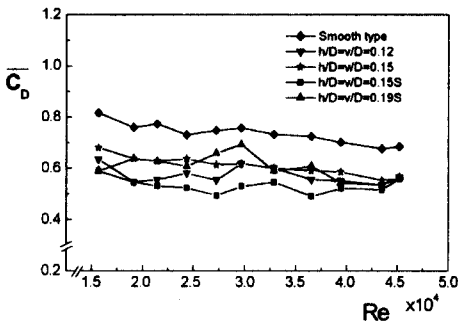


Fig. 9 Average drag coefficients for the cylinder having the special arrangement of grooves

중간에 뒀플을 하나 더 설치한 경우가 설치하지 않았을 경우보다 평균항력계수 값이 적으며, 그 중에서도 $h/D=v/D=0.15S$ 의 경우가 그 값이 가장 적다.

Fig. 6,7,8을 종합해 보면 항력저감은 뒀플의 가로, 세로 간격의 변화보다는 뒀플의 배치형태에 더 큰 영향을 받으며, 정방배열, 특히 뒀플의 간격이 적은 정방배열이 항력저감효과가 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 10에 항력저감효과가 가장 큰 정방배열 뒀플을 가진 원주의 항력감소율 R_D 의 레이놀즈 수에 따른 변화를 나타낸다.

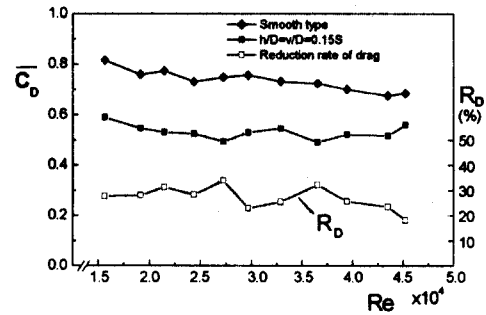
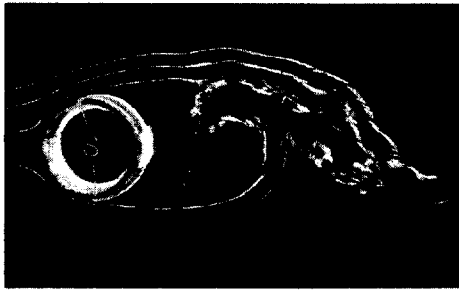


Fig. 10 Reduction rate of drag coefficient for the cylinder having the optimum arrangement of grooves

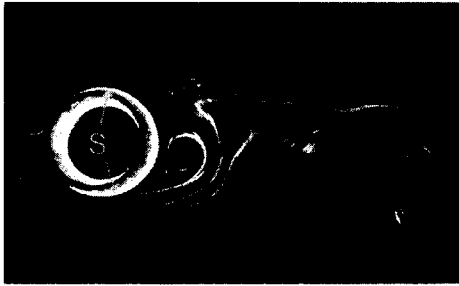
여기서 항력감소율 R_D 는 뒀플의 설치에 의한 항력계수 감소량을 뒀플을 설치하지 않은 원주의 항력계수로 나눈 백분율을 의미한다. 그림에서 알 수 있듯이 항력감소율은 레이놀즈 수에 따라 다소 차이는 있으나 20~40%범위에 있으며, 각 레이놀즈 수의 항력감소율을 평균하면 28%정도이다.

다음은 가시화실험의 결과로 Fig. 11에 원주 주위의 흐름패턴을 나타낸다.

그림에서 (a)는 뒀플을 설치하지 않은 원주 주위의 유맥선이며 (b)는 뒀플을 설치한 원주 주위의 유맥선의 사진이다. 이때 정방형 뒀플의 배치형태는 항력감소율이 최대인 $h/D=v/D=0.15S$ 와 기하학적으로 상사이다. (a), (b) 두 경우 모두 원주의 상·하부에서 흐름이 박리하고 있으나, 그림에서 알 수 있듯이 뒀플을 설치한 경우는 설치하지 않은 경우에 비해 박리점(그림에서 S표시)이 뒤쪽으로 이동해 있으며, 박리영역의 크기도 20% 이하로 감소한 것으로 나타났다.



(a) In case of a smooth cylinder without grooves



(b) In case of a cylinder having grooves

Fig. 11 Flow pattern around the circular cylinder ($Re=8.4 \times 10^3$)

이것은 서론에서 언급한바와 같이 원주주위에 덩푼을 설치함에 의해 경계층 주위의 흐름을 교란시켜, 운동에너지가 부족한 박리점 부근의 경계층에 경계외측의 운동에너지를 혼입시켜 박리에 견디는 능력을 증가시켰기 때문으로 추정된다.

아무튼 원주주위의 흐름을 제어해서 항력을 저감시키는 기존의 연구결과는 항력감소율이 20~25%정도이나 본 실험에서는 28%로 매우 높으며, 원주표면의 정방형 덩푼은 그 설치도 용이하므로 실용화가 크게 기대된다.

4. 결론

본 연구는 정방형 덩푼이 있는 원주주위의 유체역학적 특성을 양·항력 측정실험과 형광잉크법(post color ink)에 의한 가시화실험으로 명확히 했으며 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 덩푼의 가로, 세로의 배치간격에 따라 평균 항력계수 C_D 가 변했으며 덩푼의 적당한 배열로 최대 28% 항력을 감소시킬 수 있었다.

(2) 항력이 최소가 되는 덩푼 있는 원주 주위의 흐름을 가시화한 결과, 덩푼이 없는 원주에 비해 박리점이 원주의 후방으로 옮겨졌으며 후류 영역의 크기도 매우 작았다.

(3) 형광잉크에 알코올 및 글리세린을 적당하게 배합하면 수중의 유동장을 깨끗하게 가시화 할 수 있다.

후 기

이 논문은 2001년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- [1] Gad-el-Hak, M., "Modern developments in flow control," *Appl. Mech. Rev.*, 49, No. 7, pp. 365, 1996
- [2] Achenbach, E., "Influence of surface roughness on the cross-flow around a circular cylinder," *J. of Fluid Mech.*, Vol. 46, part 2, pp. 321-335, 1971
- [3] Guven, O., Farell, C. and Patel, V. C., "Surface roughness effects on the mean flow past circular cylinders," *J. of Fluid Mech.*, Vol. 98, part 4, pp. 673-701, 1980
- [4] Igarashi, T. and Tsutsui, T., "Flow Control Around a Circular Cylinder by a New Method(2nd Report, Fluid Forces Acting on the Cylinder)," *Trans. of the JSME*, Vol. 55, No. 511, pp. 708-713, 1989
- [5] Igarashi, T. and Tsutsui, T., "Flow Control around a Circular Cylinder by a New Method(3rd Report, Properties of Reattachment Jet)," *Trans. of the JSME*, Vol. 57, No. 533, pp. 8-13, 1991
- [6] 임희창·이상준, "Riblet 홈을 가진 원주의 저항감소에 관한 연구," *대한기계학회 2000년도 춘계학술대회 논문집 B*, pp. 508-513, 2000
- [7] 노기덕, "표면에 덩푼이 있는 원주의 항력감소", *한국박용기관학회지*, 25권, 1호, pp. 155-160, 2001
- [8] 노병준·박종호 '유체역학, 동명사, 서울, pp. 364-387, 1997