

## 정온 비뉴턴 유체내에서 이동하는 원통형 물체의 항력계수비에 대한 직경비 및 길이비의 영향

조 금 남

성균관대학교 기계공학과  
(1993년 12월 13일 접수)

### Diameter and Aspect Ratio Effects on the Drag Coefficient Ratio of Cylinder Moving in Isothermal Non-Newtonian Fluids

Keumnam Cho

Department of Mechanical Engineering, Sung Kyun Kwan University, 300,  
Chunchun-dong, Changan-ku, Suwon 440-746, Korea  
(Received December 13, 1993)

#### 요 약

비뉴턴 유체내에서 이동하는 섬유들과 대분자들은 경우에 따라 일정한 길이와 직경을 갖는 원통형 물체로 간주 될 수 있으므로 유체내에서 이들의 운동을 효과적으로 제어하기 위해서는 비뉴턴 유체내에서 이동하는 원통형 물체들의 길이비와 직경비에 의한 항력계수의 영향을 조사할 필요가 있다. 이러한 사실에 근거하여 원통형 물체의 길이비와 직경비 변화가 물체의 항력계수에 미치는 영향을 실험적으로 연구하는 것이 본 연구의 목적이었다. 원통형 물체들의 길이비를 기준으로한 항력계수비와 직경비를 기준으로한 항력계수비들은 작업유체로 사용된 일반화된 뉴턴 유체와 점탄성 유체내에서 이동하는 원통형 물체들의 길이비와 직경비가 증가함에 따라 감소했다. 원통형 물체의 직경비가 0.007에서 0.029까지 변하고 길이비가 10에서 130까지 변하는 경우 점탄성용액내에서의 항력계수비의 감소율은 일반화된 뉴턴 유체내에서의 항력감소비의 감소율 보다 10배 내지 30배까지 더 컸다. 또한, 모든 작업유체에서 원통형 물체들의 항력계수비들은 Reynolds 수가 증가함에 따라 감소했다.

**Abstract**—The fibers and macromolecules moving in Non-Newtonian fluids may be considered as cylinders which have constant length and diameter in some cases. It is necessary to investigate the effects of the aspect ratio and the diameter ratio of cylinders on the drag coefficient in order to effectively control them moving in Non-Newtonian fluids. Based on that fact, the purpose of the present work experimentally investigate the effects of the aspect ratio and the diameter ratio of cylinders on the drag coefficient. The drag coefficient ratios based on the aspect ratio and the diameter ratio of cylinders were decreased as the aspect ratio and the diameter ratio of cylinders moving in generalized Newtonian fluids and viscoelastic fluids which were used as working fluids were increased. Their decreasing rates in viscoelastic fluids were approximately ten to thirty times larger than those in generalized Newtonian fluids when the diameter ratios and the aspect ratios of cylinders range from 0.007 to 0.029 and from 10 to 130, respectively. And, the drag coefficient ratios of cylinders were decreased as the Reynolds number was increased in all working fluids.

**Keywords:** Aspect ratio, diameter ratio, drag coefficient, drag coefficient ratio, viscoelastic fluid, reynolds number

## 1. 서 론

뉴톤 유체내에서 이동하는 여러 모양의 물체들 및 기포들에 대한 유체역학적 연구가 현재까지 많이 진행되었으며 이들은 Leal[1], Probstein[2], Happel과 Brenner[3]에 의해 요약되어 보고되었다. 특히 뉴톤 유체내에서 이동하는 편장회전 타원체나 편구면에 대한 항력은 Perrin[4], Burgers[5], Broersma[6], Tillett[7], Batchelor[8], Cox[9]들에 의해 얻어졌다.

비뉴톤 유체내에서 이동하는 여러가지 모양을 갖는 물체들의 방향성 및 운동성에 관한 연구는 Karnis와 Mason[10], Leal[11], Chiba 등[12], Cohen 등[13], Manero 등[14], Park과 Irvine[15], Cho 등[16, 17], Chee 등[18]에 의해 다음과 같은 목적 때문에 수행되어 왔다. 첫째, 고분자 용액, 고분자 용액, 현탁액등에 있는 여러 형태의 물체들에 대한 방향성과 운동성을 제어하기 위함이다. 고분자 용액내 실제 섬유들은 직경이 mm 크기 정도이고 길이는 cm 크기 정도이다. 둘째, 전기영동방법이 적용될 때 대분자들을 고분자 용액내에서 효과적으로 분리시키기 위함이다. 대분자들 중 특히 Tabacco Masaic Virus(TMV)는 Grossman과 Soanne[19]에 의해 길이비가 22.7로 알려져 있다. DNA 분자들을 분리시키는 경우에 적용되는 겔(Gel)을 이용한 전기영동방법 대신 점탄성 유체 용액을 이용한 새로운 전기영동방법을 개발하기 위한 시도가 Chee 등[18]에 의해 수행되었다. 비뉴톤 유체내 점탄성 용액내에서 이동하는 섬유들과 대분자들은 경우에 따라 일정한 길이비와 직경비를 갖는 원통형 물체로 간주할 수 있다. 유한한 크기의 용기내에 담겨있는 점탄성 유체내에서 이동하는 원통형 물체들에 대한 방향성과 운동성에 미치는 직경비와 길이비의 영향에 대한 조사가 Cho 등[16, 17]에 의해 일부 보고되었다.

떡볶이 비뉴톤 유체내에서 원통형 물체가 비압축성 층류 유동을 하는 경우에 대한 해석은 Manero 등[14], Park과 Irvine[15], Tadmor와 Bird[20], Chen과 Kubler[21] 등에 의해 수행되어 왔으나 유한한 크기의 용기내에 담겨있는 점탄성 유체내에서 이동하는 원통형 물체들의 방향성, 운동성 및 항

력들에 미치는 직경비 및 길이비의 영향을 예측하기에는 경계조건의 상이함이나 해석시 점탄성 유체의 탄성효과가 고려되지 않음등의 이유 때문에 한계를 갖는다.

따라서 본 연구에서는 유한한 크기의 용기내에 담겨있는 순수점성 비뉴톤 유체와 점탄성 유체가 일정한 온도로 유지되는 경우 유체내에서 이동하는 원통형 물체의 항력계수비에 대한 길이비 및 직경비의 영향을 측정하였다. 측정결과는 원통형 물체로 간주될 수 있는 섬유들과 대분자들을 효과적으로 제어하는 경우에 적용될 수 있다.

## 2. 실험장치 및 실험절차

본 연구에서 사용한 실험 장치의 개략도는 그림 1에 나타나 있다. 그림에 보여진 용기상부에 launcher가 위치해서 원통형의 물체가 용기의 중심선을 따라 중력방향과 평행인 축방향으로 이동하고 원통형 물체가 launcher를 통과한 후 자유낙하하도록 제작되어 있다. 용기의 원주 주위에는 자유낙하된 물체의 낙하속도(terminal velocity)를 측정하기 위해서 축방향으로 매 10 cm마다 수평선을 새겼다. 원통형 물체의 낙하가 정상상태에 도달했는지에 대한 여부는 여러다른 구간들에 대한 물체의 낙하속도를 측정 비교함으로써 조사하였고 각 구간들에서의 낙하속도들은 1% 이내에서 일치하였다. 작업유

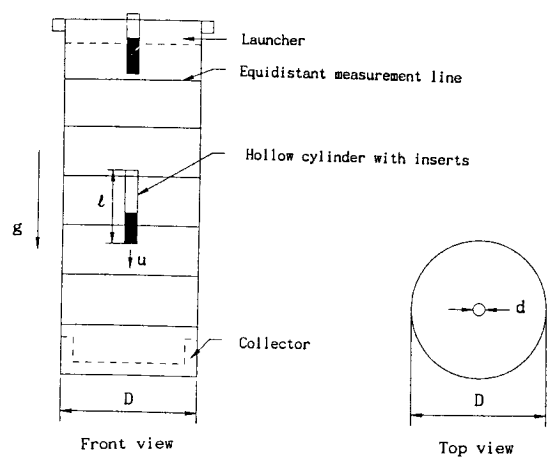


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus.

체를 채운 용기의 높이는 110 cm였다. 용기하부에는 낙하된 물체들을 다시 들어 올려 재 사용하기 위한 collector를 위치시켰다. 원통형 물체들은 속이 빈 원통내에 추를 삽입시킨 후 양쪽 끝을 접착제로 밀봉시켜 만들어 졌으므로 자유낙하시 화살촉이 움직이듯이 수직하게 이동하였다. 원통형 물체들은 0.071~0.292 cm 범위의 직경과 0.71~26.28 cm 범위의 길이를 가지므로 물체의 길이비는 10~130 범위였고 밀도는 2.211 g/cm<sup>3</sup>였다. 용기의 직경은 10.05 cm이므로 용기의 직경에 대한 원통형 물체의 직경비율인 k는 0.00706~0.0291 범위였다. 작업유체들로는 99.9%의 순도를 갖는 글리세린(Fisher Scientific사)이 뉴톤 유체로, Sodium Hydroxide가 추가되어 PH 7.0으로 조정된 Carbopol(Carboxy polyethylene) 934(B.F. Goodrich사) 1200 wppm이 순수점성 비뉴톤 유체로, Polyacrylamide(Separan AP-273)(Dow Chemical사) 1000 wppm이 점탄성 유체로 사용되었다. 실험시 작업유체의 온도는 25.5 °C로 일정하게 유지되었고 이 온도에서 작업유체의 밀도값은 글리세린, Carbopol, Separan 용액 각각에 대해 1.2616, 0.9975, 0.9985 g/cm<sup>3</sup>였다. 작업유체내에서 이동하는 원통형 물체들의 항력계수비는 물체의 측정 낙하속도, 원통형 물체의 제원 및 작업유체의 물성치 값들을 이용하여 항력계수값들을 계산한 후 구해졌다. 측정된 낙하속도 값으로는 여러번 측정된 낙하속도값들의 평균치가 사용되었다. 길이비에 기준한 항력계수비는 직경비가 일정한 경우에 길이비가 10인 경우의 항력계수 값에 대한 다른 길이비에서의 항력계수 값의 비로 계산했고 직경비에 기준한 항력계수비는 길이비가 일정한 경우에 최소의 직경비를 갖는 경우의 항력계수 값에 대한 다른 직경비에서의 항력계수 값의 비로 계산했다.

### 3. 항력계수비들에 대한 자료처리

#### 3.1. 원통형 물체의 길이비에 기준한 항력계수비 ( $C_{D1}^+$ )

원통형 물체가 유체내에서 자유낙하하는 경우에 대한 물체의 항력은 중력에서 부력을 뺀 값과 같다.

$$F_D = F_G - F_B = (\rho_s - \rho_f) \frac{\pi d^2}{4} l g \quad (1)$$

물체의 항력은 다음과 같이 정의된 항력계수로 나타낼 수 있다.

$$C_D = (F_D/A)/(1/2\rho_f u^2) \quad (2)$$

원통형 물체에 항력이 작용하는 면적(A)는 다음과 같다.

$$A = \pi d l + \frac{\pi d^2}{2} = \pi d(l + \frac{d}{2}) \quad (3)$$

식 (1)과 (3)을 (2)에 대입하면 유체내에서 이동하는 원통형 물체에 대한 항력계수를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_D = \frac{g}{2} \left( \frac{\rho_s}{\rho_f} - 1 \right) \frac{1}{u^2} \frac{2ld}{(2l + d)} \quad (4)$$

동일한 크기의 용기내에 담겨있는 동일한 유체내에서 직경비와 밀도가 동일하나 길이비가 다른 원통형 물체들이 이동하는 경우에 대한 항력계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_D = B_1 \frac{1}{u_a^2} \frac{2ld}{(d + 2l)} \quad (5)$$

식 (5)의  $B_1$ 은 일정 상수이다. 식 (5)를 무차원 낙하속도에 의해 나타내면 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} C_D &= B_1 d \left( \frac{1}{u_{a=10}} \right)^2 \left( \frac{1}{u_a^+} \right)^2 \left( \frac{2\alpha}{2\alpha + 1} \right) \\ &= B_2 \frac{2\alpha}{(u_a^+)^2 (2\alpha + 1)} \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)의  $B_2$ 는 일정상수이다.

원통형 물체의 길이비에 기준한 항력계수비 ( $C_{D1}^+$ )는 길이비가 10인 경우의 항력계수에 대한 임의의 길이비인 경우의 항력계수비로 정의되므로

$$C_{D1}^+ = \frac{C_{D,\alpha}}{C_{D,\alpha=10}} = \frac{1.05}{\left(1 + \frac{1}{2\alpha}\right) u_a^{+2}} \quad (7)$$

#### 3.2. 원통형 물체의 직경비에 기준한 항력계수비 ( $C_{D2}^+$ )

동일한 크기의 용기내에 담겨있는 동일한 유체내에서 길이비와 밀도가 동일하나 직경비가 다른 원통형 물체들이 이동하는 경우에 대한 항력계수는

다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_D = B_3 \frac{k}{(u_{\alpha=10})^2 (u_{\alpha}^+)^2} \quad (8)$$

식 (8)의  $B_3$ 는 일정상수이다. 원통형 물체의 직경비 변화에 의한 항력계수비의 변화를 길이비가 10에서 90까지 변하는 경우에 조사하므로 길이비에 대한 해당 범위내에서 원통형 물체의 직경비에 기준한 항력계수비( $C_{D2}^+$ )를 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} C_{D2}^+ &= \frac{C_{D,k}}{C_{D,kmin}} \\ &= \left( \frac{k}{k_{min}} \right) \left( \frac{u_{\alpha=10,kmin}}{u_{\alpha=10,k}} \right)^2 \quad (\alpha=10 \text{ 일 때}) \\ &= \left( \frac{k}{k_{min}} \right) \left( \frac{u_{\alpha=10,kmin}}{u_{\alpha=10,k}} \right)^2 \left( \frac{u_{\alpha=90,kmin}^+}{u_{\alpha=90,k}^+} \right)^2 \\ &\quad (\alpha=90 \text{ 일 때}) \end{aligned} \quad (9)$$

### 3.3. Reynolds 수 변화에 따른 물체의 항력계수 비들

비뉴턴 유체내에서 Reynolds 수를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$R_{ed} = \frac{\rho_f u d}{\eta} \quad (10)$$

식 (10)에서 낙하속도를 구해 식 (6)에 대입하면 식 (11)과 같다.

$$C_D = B_4 \frac{1}{\eta^2 R_{ed}^2 (1 + \frac{1}{2\alpha})} \quad (11)$$

식 (11)의  $B_4$ 는 일정상수이다. 식 (7)의  $C_{D1}$ 를 식 (11)을 이용하여 Reynolds 수로 나타내면 다음과 같다.

$$C_{D1}^+ = 1.05 \left( \frac{1}{1 + \frac{1}{2\alpha}} \right) \left( \frac{\eta_{\alpha=10}}{\eta_{\alpha}} \right)^2 \left( \frac{R_{ed,\alpha=10}}{R_{ed,\alpha}} \right)^2 \quad (12)$$

또한 식 (8)을 Reynolds 수의 함수로 나타내면 식 (13)과 같고  $B_5$ 는 일정상수이다.

$$C_D = B_5 \frac{k^3}{\eta^2 R_{ed}^2} \quad (13)$$

식 (9)의  $C_{D2}^+$ 를 식 (13)을 이용하여 Reynolds 수로 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} C_{D2}^+ &= \left( \frac{k}{k_{min}} \right)^3 \left( \frac{\eta_{\alpha=10,kmin}}{\eta_{\alpha=10,k}} \right)^2 \left( \frac{R_{ed,\alpha=10,kmin}}{R_{ed,\alpha=10,k}} \right)^2 \quad (\alpha=10 \text{ 일 때}) \\ &= \left( \frac{k}{k_{min}} \right)^3 \left( \frac{\eta_{\alpha=90,kmin}}{\eta_{\alpha=90,k}} \right)^2 \left( \frac{R_{ed,\alpha=90,kmin}}{R_{ed,\alpha=90,k}} \right)^2 \quad (\alpha=90 \text{ 일 때}) \end{aligned} \quad (14)$$

뉴턴 유체인 글리세린내에서 이동하는 원통물체에 대한 항력계수에 대한 식은 유체의 점도가 물체의 직경비나 길이비 변화에 무관하며 유체의 온도도 일정하므로 다음과 같이 단순화된다.

$$\begin{aligned} R_e &= \frac{\rho_f u d}{\mu} \\ C_{D1}^+ &= \frac{1.05}{1 + \frac{1}{2\alpha}} \left( \frac{R_{ed,\alpha=10}}{R_{ed,\alpha}} \right)^2 \\ C_{D2}^+ &= \left( \frac{k}{k_{min}} \right)^3 \left( \frac{R_{ed,\alpha=10,kmin}}{R_{ed,\alpha=10,k}} \right)^2 \quad (\alpha=10 \text{ 일 때}) \\ &= \left( \frac{k}{k_{min}} \right)^3 \left( \frac{R_{ed,\alpha=90,kmin}}{R_{ed,\alpha=90,k}} \right)^2 \quad (\alpha=90 \text{ 일 때}) \end{aligned} \quad (15)$$

## 4. 실험결과 및 토의

작업유체들에 대해 측정된 점도를 전단율의 함수로 나타내는 유동곡선이 그림 2에 나타나 있다. 글리세린의 점도는 전단율에 무관하며 25.5°C에서 0.85818(N s/m<sup>2</sup>)이었고 측정치는 문헌들에 나타나 있는 값들과 잘 일치했다. 중화된 Cabopol 934 1200 wppm용액과 Separan AP-273 1000 wppm용액의 겔보기점도값들은 전단율이 증가함에 따라 감소하는 shear-thinning 현상을 나타냈다. 전단율이 0.5 (1/s) 이하의 범위에서 Cabopol 용액은 뉴턴 영역으로 변해가는 천이 영역에 있었으나 Separan 용액은 딱딱칙 영역에 있었다. 이들 비뉴턴 유체들에 대한 겔보기점도를 전단율의 함수로 식 (16)과 (17)에서와 같이 LSE(least square equation)로 나타낼 수 있다. 중화된 Cabopol 1200 wppm에 대한 LSE는 식 (16)과 같다.

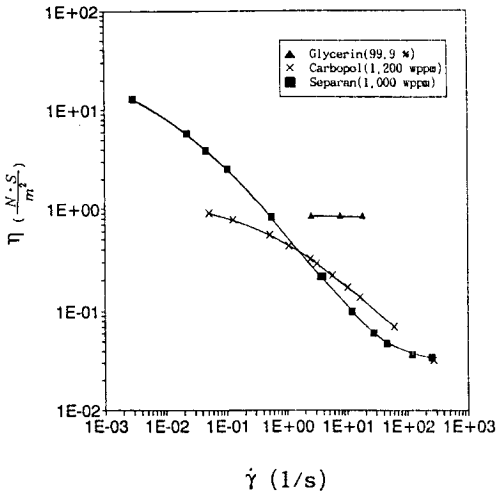


Fig. 2. Flow curves of glycerin, neutralized Carbopol solution with 1,200 wppm and Separan solution with 1,000 wppm.

$$\log \eta = 2.6538 - 0.3468(\log \dot{\gamma}) - 0.0741(\log \dot{\gamma})^2 + (\log \dot{\gamma})^3 \quad (16)$$

(0.0516 ≤  $\dot{\gamma}$  ≤ 270.14)

Separan 1000 wppm 용액에 대한 LSE는 식 (17)과 같다.

$$\log \eta = -0.2811 - 0.7100(\log \dot{\gamma}) + 0.0125(\log \dot{\gamma})^2 + 0.0308(\log \dot{\gamma})^3 \quad (17)$$

(0.104 ≤  $\dot{\gamma}$  ≤ 255.1)

유체의 겔보기점도에 대한 식 (16)과 식 (17)은 항력계수비들을 Reynolds 수의 함수로 나타내고자 할 때 사용되는 겔보기점도 값이 계산시 이용된다.

작업유체내에서 원통형 물체들의 길이비를 기준으로한 항력계수비( $C_{D1}$ )에 대한 길이비의 영향이 직경비가 0.200인 경우에 대해 그림 3에 나타나 있다. 측정된 항력계수값은 작업유체인 글리세린, 중화된 Carbopol, Separan 용액 각각에 대해 길이비가 10일 때는 61.88, 2.32, 3.43에서 길이비가 130으로 증가했을 때는 30.6, 1.14, 0.18로 감소하였다.  $C_{D1}$ 는 이 값들을 근거로 하여 계산하였다.  $C_{D1}$ 의 정의에 의해서 모든 작업유체에 대해 길이비가 10인 원통형 물체들에 대한  $C_{D1}$ 는 일이 된다. 모든 작업유체에 대해 원통형 물체의 길이비가 10에서 130까지 증가할 때  $C_{D1}$ 는 감소했다. 원통형 물체의 길이비가

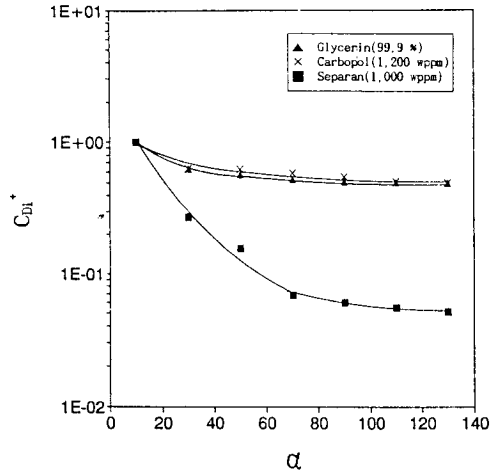


Fig. 3. Drag coefficient ratio based on the aspect ratio of cylinder when  $k=0.0200$ .

130인 경우에 글리세린과 Cabopol 용액에 대한  $C_{D1}$ 는 길이비가 10인 경우에 비해 약 0.49까지 감소했고 길이비가 130인 경우에 Separan 용액에 대한  $C_{D1}$ 는 길이비가 10인 경우에 비해 0.05까지 감소했다. 즉 원통형 물체의 직경비가 0.0200인 경우 길이비가 10에서 130까지 증가할 때 Separan 용액에서의 물체에 대한  $C_{D1}$ 가 글리세린과 Cabopol 용액에서의 값보다 약 10배 정도까지 더 감소했다. 이는 동일한 직경을 갖는 원통형 물체가 동일한 크기의 용기내에 담겨 있는 유체내에서 이동할 때 물체의 길이 증가에 따른 원통형 물체에 대한 항력 감소가 일반화된 뉴턴 유체 내에서 보다 점탄성 유체 내에서 최대 열배까지 크을 의미한다. 이러한 현상에 대한 근거는 점탄성 유체의 긴 분자들이 낙하물체의 운동방향과 평행하게 재배치됨과 점탄성 유체의 탄성 효과에 의해 일반화된 뉴턴 유체에 비해 상대적으로 작은 항력을 갖기 때문일 것으로 사료된다. 그림 3에서 모든 작업유체에 대해 길이비가 증가함에 따라  $C_{D1}$ 값이 일정한 값으로 점근되고 있음을 알 수 있다. 이는 물체의 길이비 10을 기준으로 하여 길이비가 커질수록 물체의 단위길이당 항력이 작아지고 어느 길이비 이상에서는 단위 길이당 항력의 감소가 거의 일정함을 의미한다. 이는 물체가 받는 전체 항력 중 압력항력(pressure drag)의 비중이 점성항력(viscous drag)의 비중에 비해 물체의 길이가 증가할수록 점진적으로 작아지기 때문인 것으로 추정된다.

작업유체들내에서 이동하는 다른 직경의 원통형 물체들에 대한 항력을 조사하기 위해 원통형 물체들의 직경비를 기준으로한 항력계수비( $C_{D2}^+$ )에 대한 직경비의 영향이 그림 4에 나타나 있다. 그림에 보여진 직경비의 범위는 0.00706~0.0291이며 글리세린과 Separan 용액내에서 이동하는 원통형 물체에 대한  $C_{D2}^+$ 가 길이비 10과 90인 경우에 나타났다. 직경비에 따른 항력계수값들은 길이비가 10인 경우 직경비가 0.00706에서 0.0291로 증가함에 따라 글리세린에서 1363.7에서 26.6으로 감소됐고 Separan 용액에서 957.9에서 1.09로 감소됐다. 길이비가 90인 경우 직경비가 0.00706에서 0.0291로 증가함에 따라 글리세린에서 402.7에서 12.89로 감소됐고 Separan 용액에서 53.1에서 0.058로 감소됐다.  $C_{D2}^+$ 는 이들을 이용하여 계산되었다.  $C_{D2}^+$ 의 정의에 의해 원통형 물체들의 최소 직경비인 0.00706에서의  $C_{D2}^+$ 는 모든 작업유체에 대해서 일이다. 글리세린과 Separan 용액내에서 이동하는 물체에 대한  $C_{D2}^+$ 는 물체의 직경비가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타냈다. 원통형 물체의 직경비가 0.00706에서 0.0291까지 증가할 때 글리세린내에서 이동하는 물체에 대한  $C_{D2}^+$ 는 길이비가 10인 물체의 경우에 0.019까지, 길이비가 90인 물체의 경우에 0.031까지 감소하였고 Separan 용액내에서 이동하는 물체에 대한  $C_{D2}^+$ 는 길이비가 10과 90인 물체들의 경우에 0.0011까지 감소하였다. 즉, 물체에 대한  $C_{D2}^+$ 는 글리세린내에서 보다 Separan 용액내에서 조사한 직경비 범위내에서 길이비가 10인 물체에 대해선 19배까지, 길이비가 90인 물체에 대해선 약 30배까지 감소하였다. 이는 동일한 크기의 용기내에서 원통형 물체의 직경에 대한 길이의 비율이 일정할 때 물체의 직경이 증가함에 따른 원통형 물체의 항력 감소는 뉴턴 유체를 사용하는 경우보다 점탄성 유체를 사용하는 경우에 20~30배 정도 큼을 의미한다.

그림 3과 4에 보여진  $C_{D1}^+$ 와  $C_{D2}^+$ 를 Reynolds 수의 함수로써 그림 5와 6에 나타났다. Reynolds수는 Cabopol과 Separan 용액내에서 이동하는 원통형 물체들의 낙하속도를 측정후 다음과 같은 방법으로 구했다. 원통형 물체에 대한 직경비와 최초로 추측한 유동지수를 이용해서 해당되는 전단율 값을 계산한다. 이 전단율은 물체표면에서의 전단율이다. 계산된 전단율을 이용해 해당 비뉴턴 유체에 대한

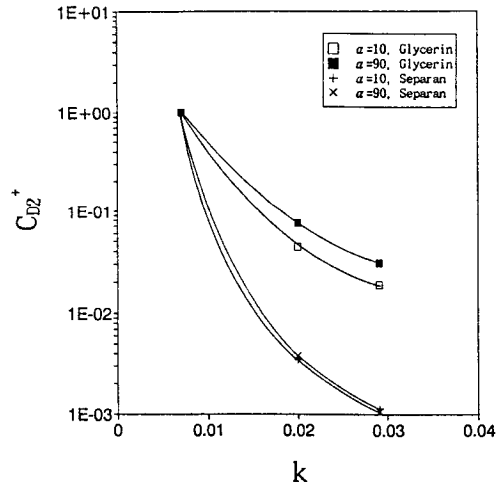


Fig. 4. Drag coefficient ratio based on the diameter ratio of cylinder when  $\alpha=10$  and 90.

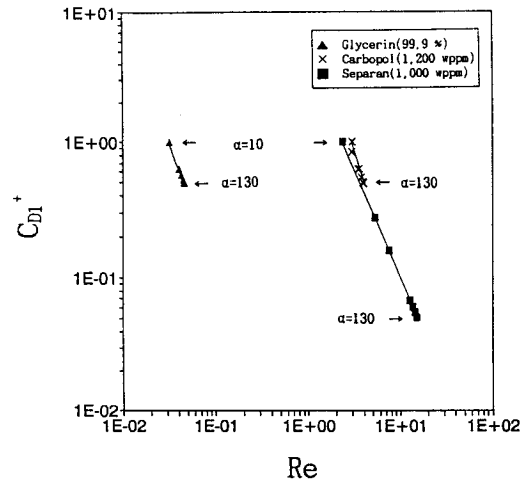


Fig. 5. Drag coefficient ratio versus Reynolds number when  $k=0.0200$ .

유동곡선 상에서 유동지수를 찾아내어 직전에 계산한 전단율과 비교한 후 두개의 전단율 값들이 1%의 오차 범위내에서 일치할 때까지 반복 계산함에 의해 정확한 유동지수와 전단율을 구한다. 구한 전단율을 식 (16)과 (17)에 대입해서 겔보기점도를 계산한 후 식 (10)을 이용해 Reynolds 수를 계산한다. Park과 Irvine[15]은 탄성을 갖지 않는 비뉴턴유체들에 대해 전단율과 유동지수를 구했으나 점탄성 유체인 경우 점탄성 모델에 따라 복잡한 해석을 요하므로 본 연구에서는 유동지수와 원통형 물체벽에서의 전

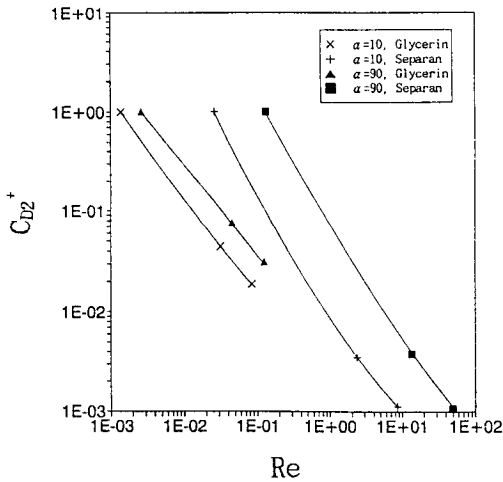


Fig. 6. Drag coefficient ratio versus Reynolds number when  $\alpha=10$  and 90.

단율에 대해 Park과 Irvine이 제시한 방법을 이용하였다. 이렇게 구한 Reynolds 수의 함수로써 그림 3에 나타난  $C_{D1}$ 를 그림 5에 나타냈다. 길이비가 10인 원통형 물체에 대한  $C_{D1}$ 는 그림 3에서와 같이 일어난다. 원통형 물체의 직경비가 0.0200으로 일정하고 길이비가 10에서 130까지 증가하는 경우 Reynolds 수의 범위는 글리세린에 대해 0.032~0.046, Cabopol 용액에 대해 3.03~4.03, Separan 용액에 대해 2.38~18.50 범위였다. Reynolds 수가 증가함에 따라 모든 작업유체내에서 움직이는 물체들에 대한  $C_{D1}$ 는 감소하는 경향을 나타냈다.  $C_{D1}$ 는 Reynolds 수의 역수에 대해 글리세린 내에서 1.9, Cabopol 용액 내에서 2.3, Separan 용액 내에서 1.5의 지수를 나타냈다. 즉, Reynolds 수가 증가함에 따른 원통형 물체에 대한  $C_{D1}$ 의 감소는 Cabopol 용액 내에서 가장 컸고 Separan 용액 내에서 가장 작았다.

Reynolds 수의 함수로써 그림 4에 나타난  $C_{D2}$ 를 그림 6에 나타냈다. 최소의 직경비인 0.00706을 갖는 원통형 물체에 대한  $C_{D2}$ 는 그림 4에서와 마찬가지로 일어난다. 원통형 물체의 직경비가 0.00706에서 0.0291까지 증가하는 경우 Reynolds 수의 범위는 길이비가 10인 원통형 물체에 대해 글리세린 내에서 0.0014~0.085, Separan 용액 내에서 0.026~8.59 범위였고, 길이비가 90인 원통형 물체에 대해 글리세린 내에서 0.026~0.12, Separan 용액 내에서 0.13~49.5 범위였다. 모든 작업유체내에서 움직이는 물

체들에 대한  $C_{D2}$ 도 Reynolds 수가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타냈다.  $C_{D2}$ 는 Reynolds 수의 역수에 대해 길이비가 10과 90인 원통형 물체들의 경우 글리세린 내에서 0.95, Separan 용액 내에서 1.2의 지수를 나타냈다. 즉, Reynolds 수가 증가함에 따른 원통형 물체에 대한  $C_{D2}$ 의 감소는 Separan 용액 내에서가 글리세린 용액 내에서 보다 약간 더 컸다.

### 5. 결론 및 요약

본 연구에서는 뉴턴 유체로써 글리세린, 순수점성 비뉴턴 유체로써 중화된 Cabopol 용액, 점탄성 유체로써 Separan 용액을 작업유체로 사용해서 작업 유체가 들어 있는 일정한 크기의 용기내에서 이동하는 원통형 물체들의 직경과 길이가 변할 때 물체가 받는 항력 계수를 실험적으로 조사하였다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 모든 작업유체내에서 이동하는 일정한 직경비를 갖는 원통형 물체의 길이비가 증가함에 따라 원통형 물체에 대한  $C_{D1}$ 는 감소했다. Separan 용액 내에서 이동하는 물체에 대한  $C_{D1}$ 의 감소비율은 물체의 길이비가 10에서 130까지 증가하는 경우 글리세린과 Cabopol 용액 내에서 이동하는 물체에 대한  $C_{D1}$ 의 감소비율보다 몇 배 정도나 컸다.

(2) 글리세린과 Separan 용액내에서 이동하는 일정한 길이비를 갖는 원통형 물체의 직경비가 증가함에 따라 원통형 물체에 대한  $C_{D2}$ 는 감소했다. Separan 용액 내에서 이동하는 물체에 대한  $C_{D2}$ 의 감소비율은 물체의 직경비가 0.00706에서 0.0291까지 증가하는 경우 글리세린내에서 이동하는 물체에 대한  $C_{D2}$ 의 감소비율보다 길이비가 10인 경우는 약 20배, 길이비가 90인 경우는 약 30배나 더 컸다.

(3) 모든 작업유체내에서 이동하는 일정한 직경비를 갖는 원통형 물체에 대한  $C_{D1}$ 는 Reynolds 수가 증가함에 따라 감소했다. Reynolds 수가 증가함에 따른  $C_{D1}$ 의 감소비율은 Cabopol 용액 내에서 가장 컸고 Separan 용액 내에서 가장 작았다.

(4) 글리세린과 Separan 용액내에서 이동하는 일정한 길이비를 갖는 원통형 물체에 대한  $C_{D2}$ 는 Reynolds 수가 증가함에 따라 감소했다. Reynolds 수가 증가함에 따른  $C_{D2}$ 의 감소비율은 Separan 용액내에서가 글리세린 내에서 보다 약간 더 컸다.

## 기 호

- A : 원통형 물체의 표면적  
 B : 일정상수  
 $C_D$  : 항력계수  
 $C_{D1}^+$  : 원통형 물체의 길이비에 기준한 항력계수비  
 ( $=C_{D,d}/C_{D,\alpha=10}$ )  
 $C_{D2}^+$  : 원통형 물체의 직경비에 기준한 항력계수비  
 ( $=C_{D,k}/C_{D,k_{min}}$ )  
 d : 원통형 물체의 직경  
 D : 용기의 직경  
 F : 원통형 물체에 작용하는 힘  
 g : 중력 가속도  
 k : 원통형 물체의 직경비( $=d/D$ )  
 l : 원통형 물체의 길이  
 Re : Reynolds 수  
 u : 원통형 물체의 낙하속도  
 $u_{\alpha}^+$  : 길이비가  $\alpha$ 인 원통형 물체의 무차원 낙하속도  
 ( $=u_{\alpha}/u_{\alpha=10}$ )  
 $\alpha$  : 원통형 물체의 길이비( $=l/d$ )  
 $\dot{\gamma}$  : 유체의 전단율  
 $\eta$  : 비뉴턴 유체의 겔보기점도  
 $\rho$  : 밀도  
 $\mu$  : 뉴턴 유체의 점도

## 하첨자

- B : 부력  
 d : 원통형 물체의 직경  
 D : 항력  
 f : 유체  
 G : 중력  
 k : 원통형 물체의 직경비  
 $k_{min}$  : 원통형 물체의 최소 직경비  
 s : 원통형 물체  
 $\alpha$  : 원통형 물체의 길이비

## 참고문헌

1. L.G. Leal, "Annual Review of Fluid Mechanics", ed. by J.L. Lumley, M.V. Dyke, and H.L. Reed, Vol. 12, Annual Review Inc., Palo Alto, 1980, p.435.
2. R.F. Probstein, "Physicochemical Hydrodynamics, An Introduction", Butterworths Publishers, Boston, 1989, p.108.
3. J. Happel and H. Brenner, "Low Reynolds Number Hydrodynamics", Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1991, p.141.
4. F. Perrin, *J. Phys. Radium*, **5**, 497 (1934).
5. J.M. Burgers, "Second Report on Viscosity and Plasticity", North Holland, Amsterdam, 1938.
6. S. Broersma, *J. Chem. Phys.*, **32**, 1632 (1960).
7. J.P.K. Tillett, *J. Fluid Mech.*, **44**, 401 (1970).
8. G.K. Batchelor, *J. Fluid Mech.*, **44**, 419 (1970).
9. R.G. Cox, *J. Fluid Mech.*, **44**, 791 (1970).
10. A. Karnis and S.G. Mason, *Trans. Rheol.*, **10**, 571 (1966).
11. L.G. Leal, *J. Fluid Mech.*, **69**, 305 (1975).
12. K. Chiba, K. Song, and A. Horikawa, *Rheol. Acta*, **25**, 360 (1986).
13. C. Cohen, B. Chung, and W. Stasiak, *Rheol. Acta*, **26**, 217 (1987).
14. A. Manero, B. Mena, and L. Devargas, *Rheol. Acta*, **26**, 266 (1987).
15. N.A. Park and T.F. Irvine, Jr., *Rev. Sci. Instrum.*, **59**(a), 2051 (1988).
16. K. Cho, B. Park, Y.I. Cho and N.A. Park, The Winter Annual Meeting of the ASME, FED-Vol. **124**, 53 (1991).
17. K. Cho, D. Chee and Y.I. Cho, The 5th Asian Congress of Fluid Mechanics, Vol. **1**, 25 (1992).
18. D. Chee, Y.I. Cho, K. Cho and P. Lu, Sep. Technol., accepted and to be appeared in 1994.
19. P.D. Grossman and D.S. Soane, *Anal. Chem.*, **62**, 1592 (1990).
20. Z. Tadmor and R.B. Bird, *Polym. Eng. Sci.*, **14**(2), 124 (1974).
21. J.L.S. Chen and E.A. Kubler, *Phy. Fluids*, **21**, 749 (1978).