

난류 유동일때 관과 channel에서 고분자와 계면활성제에 의한 마찰저항 감소에 관한 연구

Drag Reduction by Polymer and Surfactant in Turbulent Channel and Pipe Flows

박 성 룡*

S. - R. Park

Key words : Drag Reduction(마찰저항 감소), Surfactant(계면활성제), Polymer(고분자), Turbulence(난류), Buffer layer(완충층), Homogeneous solution(균일혼합용액), Micelle(교질입자)

Abstract

The drag reduction phenomenon with an additives of surfactant(STAC, stearlytrimethyl ammonium chloride) and polymer(PEO, polyethylene oxide) was investigated in fully developed turbulent pipe and channel flows at various *low* Reynolds numbers as well as very *low* additives concentration. A maximum of 70% drag reduction compared with plain water flow was found. This maximum drag reduction percentage obtained with surfactant solution was slightly higher than that of the Virk's asymptote in polymer solution.

기 호 설 명

C_f : 마찰저항계수

d, D : 관 직경

dP : 유동방향의 압력공사이의 압력강하

dx : 유동방향의 압력공사이의 거리

h : 채널(channel) 높이

l : 채널 입구에서 시험부까지의 거리

R_m : 채널유동의 Reynolds 수($\equiv \frac{U_m h}{\nu}$),

관유동의 Reynolds 수($\equiv \frac{U_m h}{\nu}$)

u_τ : 마찰속도

U_m : 평균속도

그리스 문자

ρ : 작동유체의 밀도

τ_w : 벽에서의 전단력

ν : 동점성계수

하첨자

m : 평균

a : 첨가물

w : 여과된 물 또는 벽

1. 서 론

적은 양의 고분자 또는 계면활성제를 순수 용액에 첨가해서 얻어지게 되는 난류의 마찰저항 감소에 대한 연구는 유체역학적인 면에서 매우 흥미 있는 것인데, 그것은 첨가 용액에서의 점성이 순수한 물과 비교할 때 더 크다는 이유에서뿐만 아니라, 기술적인 면에서의 유체의 수송이나 소음의 제거 등과 같은 많은 분야에서 이용이 가능하기 때문이다. 1948년 Toms⁽¹⁾에 의해 처음으로 polymethyl-

* 한국에너지기술연구소, 지역냉난방연구팀

methacrylate를 mono-chlorobenzene에 적용해서 얻어지게 된 마찰저항의 감소에 대한 보고이후, 실험 및 이론적인 방법에 의해서 마찰저항의 감소에 대한 기구(mechanism)를 규명하려고 많은 연구가 수행되었으나^(2~4), 유체 유동이 난류일때 마찰저항의 감소에 대한 기구(mechanism)는 아직도 확실하게 밝혀지지 않고 있다. 더군다나 많은 연구가들의 측정값이 서로 다른 경향을 보이고 있는 경우도 있는데, 이것은 난류에 대한 확실한 이해의 부족과 첨가용액에 대한 분석이 분명하지 않은데서 야기된다고 할 수가 있다. 예로써 고분자를 관 내부에 분사했을 때와 미리 혼합된 고분자 용액에서의 난류의 구조에 대한 이해의 부족에서도 찾아 볼 수가 있다^(5~7).

그럼에도 불구하고 대부분 고분자에 관한 연구는 벽 가까운 곳, 즉 완충층(buffer layer)에서 난류 구조와 연관된 난류의 특성값에 의해서 일반적으로 설명되어져 왔다.

Hoyt⁽⁸⁾ 및 Virk⁽⁹⁾는 고분자를 이용시의 마찰저항 감소에 대해서 자세한 설명을 하고 있는데, Virk는 고분자와 난류의 상호 연관 관계에 의해서 마찰저항에 대한 감소를 설명하면서, 균일 혼합용액에서 얻을 수 있는 최대 마찰저항 감소값은 어떤 점근선에 의해서 제한된다는 것을 알아냈는데, 이 점근선은 "Virk의 점근선"이라고 불리고 있다.

고분자가 실제로 폐쇄회로(closed loop)에 산업용으로 이용되는 경우, 산업용 기기의 전단응력에 의해서 고분자의 구조가 끊어지면서 마찰저항 감소 성능을 잃어버리기 때문에, 많은 연구에도 불구하고 폐쇄회로에서의 사용은 큰 어려움을 갖고 있다.

이에 반하여 계면활성제는 전단응력이 큰 경우에는 분자들이 서로 모여 결합된 구조의 교질입자(micelle)의 고리가 끊어져서 성능을 잃어버리지만, 전단응력이 적은 곳에 가면 그 입자의 고리들이 다시 결합함으로써 해서 새것과 같은 역할을 하기 때문에, 고분자에 비해서 많은 장점을 갖고 있으며 지역 냉난방에 실제로 응용이 되고 있는 실정이다⁽¹⁰⁾.

지금까지 대부분의 연구가 상대적으로 큰 농도와 큰 Reynolds 수일 때 행하여져 왔는데, 본 연구에서는 작은 농도와 낮은 Reynolds 수일 때도 그 효과가 있는지에 대해서, 관에서 고분자와 계면활성제를, 채널(channel)에서 계면활성제를 각각 이용하여 마찰저항 감소에 대한 효과를 정량적으로 알아보는데 그 목적이 있다.

2. 실험 방법

2.1 관에서의 유동

Fig.1은 실험 장치의 개략도인데, 작동유체는 기

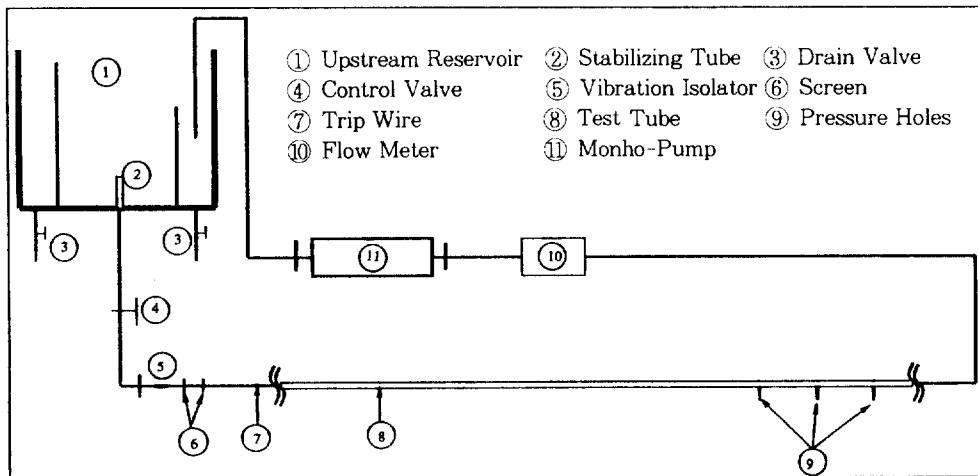


Fig.1 Schematic Diagram for Pipe Flow.(Not in Scale)

계적 퇴화를 가능한 줄이기 위해서 모노펌프(mohno-pump, 11)에 의해서 구동되었고, 유량은 모노펌프의 회전속도와 제어 밸브(4)에 의해서 조절되었다. 작동유체는 여과기(filter, (2,6))에 의해서 더러운 입자가 제거된 후, 0.7cm 직경과 3.5cm 길이의 플라스틱 세관(plastic straw tube)에 의해서 큰 크기의 난류구조(eddy)가 부서진 후에, 시험부(test section, 8)에 들어가도록 설계되었다. 시험부의 총길이는 3.5m였고, 30mm의 내경(ID)을 갖는 프렉시글래스(plexiglas)관으로 이루어져 있고, 그 입구에서부터 시험부까지의 길이에 대한 관 직경의 비(l/D)가 100정도 되는 곳에는, 유동 방향의 압력 변화를 측정할 수 있도록 압력공(pressure hole, 9)을 설치하였다.

고분자 첨가제와 계면활성제로서 polyethylene oxide(PEO, grade Alcox, E-160, Meisei 화공제조)와 STAC(stearlytrimethyl ammonium chloride, Wako 화공)가 각각 사용되었고, 고분자에는 화학적 퇴화를 줄이는 안정제(stabilizer)로서 Sandex-c가, 계면활성제에는 살리실산 소다(sodium salicylate)가 반대이온(counter-ion)으로서 각각 사용되었다. 첨가된 양은 중량 %로 했을 때 Sanex-c는 고분자 첨가량의 10%, 그리고 계면활성제에는 같은 양의 살리실산 소다가 첨가되었다.

고분자 물질은 물에 잘 용해되지 않는 특성이 있기 때문에, 균일 혼합 고분자용액을 만들기 위해서 1,500ppm의 진한 용액이 먼저 만들어진 후에, 이 용액을 20~300ppm으로 만들기 위해, 여과 및 비수화된(dehydrated) 물을 첨가 희석시킴으로써 원하는 농도의 작동유체를 얻었다.

첨가제를 넣기 전에 먼저 순수한 물을 이용해서 측정에 대한 정확도와 유체의 유동상태를 점검하였다. 즉 실험부에서의 유동방향으로의 압력변화율의 일정함과, 유체의 흐름이 난류임을 확인하였다. 관을 이용한 실험의 경우 모노펌프에 의한 기계적 퇴화의 영향을 배제하기 위하여 회수되는 모든 유체는 배수밸브(3)를 통해서 버렸고, 탱크(1)내의 유량이 전부 소모될 때까지 유동 방향의 압력을 PC(personal computer)에 의해서 자동 기록하였다. 탱크의 수위에 대한 압력의 변동은 관찰되지 않았으며, 통과 유량은 유량계(10)가 있었지만, 유량계에 의한 압력 강하가 매우 컸기 때문에, 첨가

제가 섞인 작동유체의 경우에는 유량계를 제거하고 초시계(stop watch)와 일정 시간동안 관을 통과한 양(volume)을 반복하여 측정하여 평균유속을 계산하였다.

작동유체의 점도는 모세관형(capillary-tube type) 점도계(Sibata 사)를 이용하여, 균일온도를 유지하며 반복 측정되었으나, 측정된 점도의 정확도와 사용된 유체의 농도가 적었기 때문에 순수한 물의 점도를 사용해서 Reynolds 수를 계산하였다.

온도는 systemtechnik사의 모델 S1220에 의해서 측정되었고 첨가제의 온도효과를 완전 배제하기 위하여 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ 범위에서 제어되었고, 압력은 미분형 압력계(Model #DP103, Validyne-Eng., 측정 범위 $\pm 0.008\text{psid FS} \sim \pm 12.5\text{psid FS}$, $\pm 0.25\%$ FS의 정확도)에 의해서 측정되었고, 개인용 컴퓨터(PC)에 의해서 측정값들이 수집된 후, 모든 계산은 Sun 3/260에 의해서 후에 행하여졌다. 압력의 측정과 전체 시스템에 의해서 야기되는 오차(uncertainty)는 마찰계수로 표시할때 최대 3%였다.

2.2 채널에서의 유동

채널에서의 실험 장치의 개략도는 Fig.2에서 보여지고 있다. 작동유체는 원심력 펌프(9)와 조절 밸브에 의해서 상류탱크(upstream tank, 1)에 공급된 후, 하류탱크(downstream tank, 4)사이의 균일한 수두에 의해서 일정하게 조절되었다.

작동 유체는 2.8cm 높이 30cm 넓이의 직사각형 시험부에 유입되었고, 유동 방향으로 채널(channel) 높이의 100배 되는 곳에서, 압력의 변화를 압력공(10)에 의해서 측정함으로써 마찰저항 감소에 대한 효과를 관찰할 수 있게 하였다.

채널 중심에서의 속도는 10cm/s에서 35cm/s로 조절 될 수 있었으며, 채널의 경우 고분자를 사용할 경우 본 실험에서와 같은 조건의 작은 농도의 실험에서는, 기계적인 퇴화가 시스템(system)의 안정에 필요한 시간보다도 매우 급격하게 일어났기 때문에 실험이 불가능한 관계로, 계면활성제(STAC)를 사용한 균일 혼합용액에 한하여 실험을 실시하였다. 계면활성제를 균질하게 만드는 과정에서 발생된 거품은 매우 섬세한 50 μm 의 스크린(screen)(6)을 이용해서 완전 제거시킴으로써 해

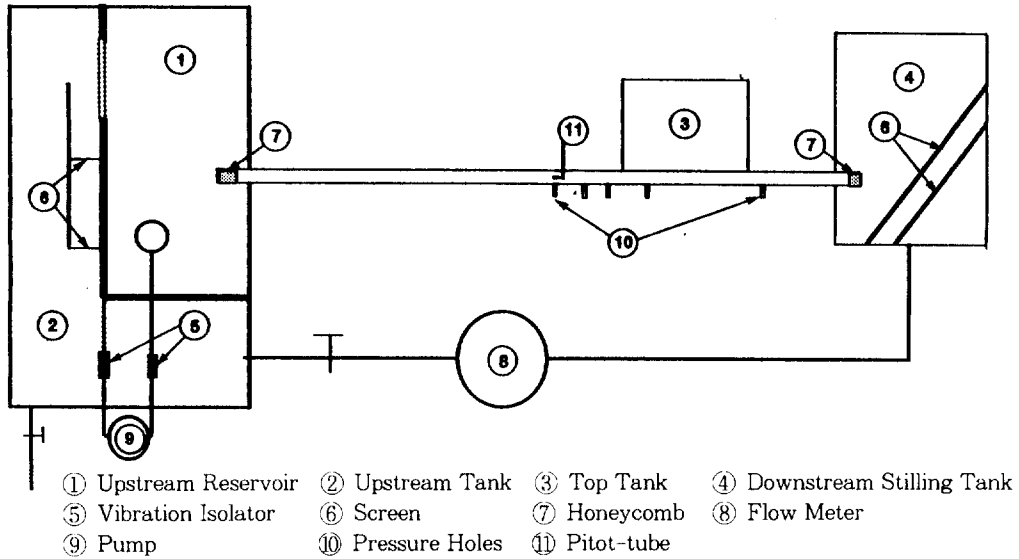


Fig.2 Schematic Diagram for Channel Flow (Not in Scale)

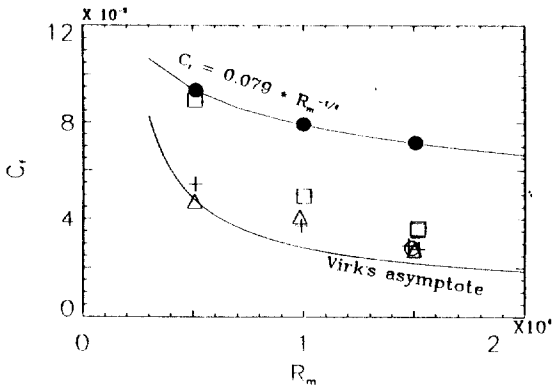


Fig.3 Concentration and velocity Effect on Drag Reduction in Pipe Flow with PEO Solution : □, 20ppm; △, 50ppm; +, 100ppm; ○, 300ppm; ●, pure water

서 거품에 의한 압력의 장애를 제거하였고, 개인용 컴퓨터에 의하여 자동 기록된 압력값이 일정 시간 동안 변동하지 않는 것이 확인된 후, 즉 작동유체가 균질하게 된 후에 유동 방향의 압력을 기록하였다. 작동유체의 온도는 실험실 내의 온도를 조절하여 $\pm 0.05^\circ\text{C}$ 한계로 균일하게 유지하였다. 채널 1의 경우의 오차(uncertainty)는 마찰계수의 향으로 표시할 때 최대 4%였다.

3. 결과 및 고찰

Fig.3에서 보는 바와 같이 관 내의 유동은, 순수 물을 사용한 경우, 관 유동의 특성식인 Blasius 식과 잘 일치하고 있는 것을 볼 수 있는데 이것을 통해서 시험부에서 작동유체는 완전 발달한 난류임을 확실하게 알 수가 있다.

만약 유동 방향의 압력의 변화를 측정한다면 마찰 속도(friction velocity, μ_τ)와 연관시켜서 마찰 저항계수(C_f)는 벽 전단응력(τ_w)에 의해서 아래와 같이 유도 될 수 있다.

$$\tau_w = C_f \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_m^2 = \frac{d dp}{4 dx} \tag{1}$$

$$\mu_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \tag{2}$$

$$C_f = 2 \cdot \left(\frac{\mu_\tau}{U_m} \right)^2 \tag{3}$$

여기서, U_m 은 혼합 평균속도(bulk mean velocity)를 나타내며, Reynolds 수는 관유동의 경우 U_m 과 관 직경(a), 채널(channel)에서는 U_m 과 관 높

이(h) 그리고 순수물의 동점성(ν)에 의해서 각각 계산되었다.

만일 시험부에 똑같은 유량이 통과할 경우, 마찰저항 감소율(DR%)은

$$DR\% = \left(1 - \frac{\Delta p_a}{\Delta p_w}\right) \times 100\% \\ = \left(1 - \frac{C f_a}{C f_w}\right) \times 100\% \quad (4)$$

와 같이 정의할 수 있는데 Δp_w , $C f_w$ 와 Δp_a , $C f_a$ 는 각각 뉴턴(Newtonian) 유체 및 마찰저항 감소 유체에서의 압력공 사이의 압력 강하와 마찰저항 계수를 나타낸다. 방정식 (4)는 고분자에서만 아니라 계면활성제에서도 사용될 수 있다.

Fig.3과 4는 각각 관 유동에서 고분자와 계면활성제의 마찰저항 감소에 대한 결과를 보여준다. 고분자 용액의 경우에 있어서, Reynolds 수와 용액의 농도가 증가할수록 마찰저항 감소의 효과가 증가하고 있음을 분명하게 볼 수 있지만, 어느 농도 이상이 될 경우에는 농도에 대한 효과가 관 내부에서 포화됨으로써 마찰저항은 최대가 되는데 이것이 바로 Virk가 제안한 점근선이다. 이것은 작동 유체의 속도가 빨라질 경우 고분자의 유동 방향으로의 덩어리 물질(thread)이 쉽게 벽 가까운 곳까지 확산됨으로써 해서, 벽 가까운 곳에 발생하는 난류 생성 기구(mechanism)와 벽쪽으로 확산된 고분자 덩어리 물질(thread)사이의 상관 관계에 의한 난류 생성의 억제에 의해서 야기된 것으로 사료되는데, 이와 비슷한 경우로서 고분자를 관 내부에 분사시켰을 때 또한 이러한 현상을 관찰할 수 있다. 즉 고분자 덩어리 물질(thread)이 유동방향으로 점점 이동해 가면서 결국 포화 상태에 이르게 된다고 볼 수 있다.(참조 Usui⁽¹¹⁾ 등). 이 경우 마찰저항감소효과는 순수한 물과 비교시 최대가 되는데 본 실험의 경우 거의 70%가 됨을 알 수가 있다.

그러나, Fig.4의 계면활성제의 경우는 이와 반대로 최대 마찰저항 감소를 가져오는 Reynolds 수 이상이 되면 마찰저항의 효과가 상실되어서 순수물의 경우와 같이 됨을 관찰할 수 있다. 이 현상에 대한 잠정적인 설명은 계면활성제의 특성에 있어서

전단력이 증가할 경우 교질입자를 이루는 고리가 끊어짐으로써 마찰저항감소효과를 상실함으로써 이와 같은 현상이 일어난 것으로 사료된다. 같은 그림에서 또한 50ppm과 100ppm의 계면활성제 용액의 경우, 마찰저항 감소 효과에 있어 큰 차이는 보이고 있지 않으며, 고분자를 첨가하였을 때 최대의 마찰저항감소를 나타내는 Virk의 점근선보다 더 큰 마찰저항 감소를 가져오고 있음을 관찰할 수 있다.

고분자를 이용한 채널(channel)에서의 유동은 위에서 언급한바와 같이, 실험조건이 낮은 Reynolds 수와 작은 농도일 경우 기계적 퇴화(degradation) 현상이 매우 빠르게 일어나기 때문에 전단응력이 적은 시스템(system)을 사용한 실험이 고려되어야 할 것이나, 본 실험에서와 같은 농도의 채널에서의 실용도는, 기계적 퇴화로 인하여 그 이득이 거의 없는 것으로 사료된다. 만일 온도에 의한 영향이 고려될 경우, 이 퇴화현상은 더욱더 심해지기 때문에 상기조건인 농도에서는 실용성의 가치는 찾아 볼 수가 없을 것이다.

채널(channel)유동의 경우 계면활성제를 이용하였을 때 Reynolds 수에 대한 마찰저항감소특성이 Fig.5에서 보여지고 있다. 관 유동에서와 같이, 작동유체가 순수한 물인 경우는 난류 유동에 대한 Dean⁽¹²⁾에 의해서 제시된 실험식과 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 이것은 시험부에서의 유동이 난류임을 입증하는 것이다. 채널의 경우에서도 계면활성제를 사용하여 얻어진 마찰저항 감소 효과는 고분자의 경우의 Virk에 의한 최대 마찰저항 감소 선보다 더 큰 것을 분명하게 알 수가 있으며 (45ppm의 경우 Reynolds 수가 5,000 이상인 경우, 60%~70%), 관에서의 흐름에서 계면활성제를 사용했을 때와 같이 최대 마찰감소효과를 얻는 Reynolds 수 이상이 되면 마찰저항감소 효과는 서서히 줄어들고 있는 것을 잘 관찰 할 수가 있다. 또한 용액의 농도가 증가할수록 층류일때의 실험식과 평행하는 현상을 보이고 있음을 관찰할 수 있어서, 난류의 층류화 현상이 마찰저항감소의 영향에 큰 영향을 주는 것으로 사료된다. 특이한 사항은 본 실험의 경우, 계면활성제의 농도는 임계교질농도보다 다소 작거나(20ppm 보다 작은 경우) 비슷한 경우여서, 임계교질농도보다도 작은 농도에서

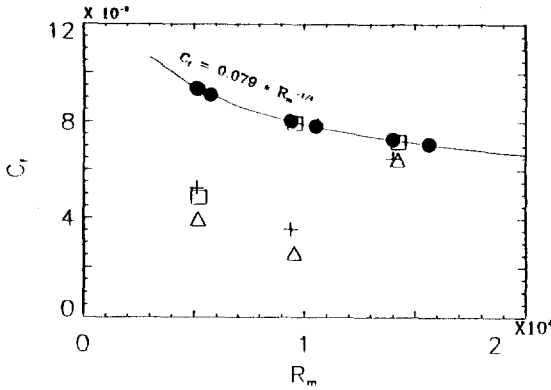


Fig.4 Concentration and Velocity Effect on Drag Reduction in Pipe Flow with STAC Solution(Symbols are same as Fig.3)

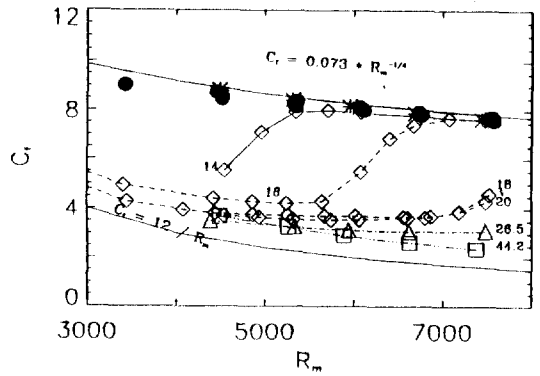


Fig.5 Concentration and Velocity Effect on Drag Reduction in Channel Flow with STAC Solution :

+, 5ppm; *, 10ppm; ●, pure water
(Others are written in nearby symbols)

교질물질이 형성됨없이 마찰저항현상이 발생되고 상실하는 것에 대한 해석은 좀더 관찰이 필요하며, 특히 작은 농도의 차이에서도 마찰저항 감소 효과가 매우 달라짐을 볼 수 있는데 이 현상을 규명하기 위해서는 난류의 특성을 측정하는, 정성적 분석이 뒷받침되어야 할 것으로 사료된다.

Reynolds 수의 증가에 관계없이 Virk의 최대 저항 점근선에 접근하게 됨을 알 수 있었다.

3) 채널(channel)에서 STAC의 사용시, 교질물질의 형성될 수 없는 임계농도 이하에서, 마찰저항감소 효과가 나타난 것에 대한 것은 추후의 관찰이 필요할 것으로 사료된다.

4. 결 론

후 기

완전 발달된 난류의 관과 채널(channel)에서, 마찰저항 감소효과에 대한 정량적 특성을 구하기 위하여, 균일 혼합농도의 PEO와 STAC 용액을 이용해서, 낮은 Reynolds 수와 임계농도 또는 그보다 작은 농도에서 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

이 연구에 많은 도움을 준 H. Usui, N. Kasagi 교수님, 그리고 인하대학교 김종보 교수님께 감사 를 드립니다.

참 고 문 헌

- 1) 계면활성제(STAC)의 경우, 관과 채널(channel)에서 모두 Virk에 의해서 제한된 최대 마찰저항 점근선보다 큰 마찰 저항 감소를 얻을 수 있었으며, Reynolds 수가 증가함에 따라 마찰저항 감소가 최대가 된 후, Reynolds 수를 더욱 더 증가시키면 마찰저항 감소 효과는 점점 줄어들어서 결국 그 효과는 상실되었다.
- 2) 고분자 용액(PEO)을 이용한 관에서의 유동의 경우, Reynolds 수가 증가함에 따라 그 효과는 점점 증가하게 되며 결국은 포화상태가 된 후

1. Toms, B. A., 1948, "Some Observations on the Flow of Line Polymer Solution Through Straight Tube at Large Reynolds Numbers", in *Proc, First Intern. Congr. on Rheology*, Vol. II, pp. 135 ~ 141, North Holland, Amsterdam.
2. Donohue, G. L., Tiederman W. G., Reischman, M. M., 1972, "Flow visualization of the near-wall region in a drag-reducing channel flow", *J. Fluid Mech*, Vol. 56,

- part 3, pp. 559~575.
3. Reischman, M. M. and Tiederman W. G., 1975, "Laser-Doppler anemometer measurements in drag-reducing channel flows", *J. Fluid Mech.*, Vol.70, part 2, pp. 369~392.
 4. Thomas, J et al., 1977, "Turbulent fluctuations in the viscous wall region for Newtonian and drag reducing fluids", *The Physics of Fluids*, Vol. 20, No. 10 Pt II, s112~s118.
 5. Berman, N. S. and Sinha, P.K., 1984, *Proc. 3rd Int. Conf. on Drag Reduction*, ed. by R. H. J. Sellin and R. T. Moses, Univ. of Bristol, B-3.
 6. Bewersdorff, H. W. 1984, *Proc. 3rd Int. Conf. on Drag Reduction*, ed. by R. H. J. Sellin and R. T. Moses, Univ. of Bristol, B-4.
 7. Thomas, J et al., 1977, "Turbulent fluctuations in the viscous wall region for Newtonian and drag reducing fluids", *The Physics of Fluids*, Vol. 20, No. 10 Pt II, s112~s118.
 8. Hoyt, J. W., 1972, "The Effect of Additives on Fluid Motion", *Trans ASME: J. Basic Eng.*, Vol. 94, p. 258.
 9. Virk, P. S., 1975, "Drag Reduction Fundamentals", *AICHE Journal*, Vol.21 No. 4, pp. 625~656.
 10. Bewersdorff, H. W., 1989, *Drag Reduction in fluid flows: Techniques for Friction Control*, ed. by R. H. J. Sellin and R. T. Moses, Ellis Horwood Limited.
 11. Usui, H., Maeguchi, K., and Sano Y., 1988, "Drag Reduction caused by the Injection of Polymer Thread into Turbulent Pipe Flow", *Phys. Fluids*, 31 (9), p. 2515.
 12. Dean, R. B., 1978, *ASME, J. Fluids Eng.*, Vol. 100, pp. 215~223.