

碩士學位論文

亂流管流動에서 高分子化合物
添加에 의한 摩擦抵抗減少效果測定



濟州大學校 大學院

제주대학교 중앙도서관
에너지공학과

李 寶 安

1999年 12月

亂流管流動에서 高分子化合物
添加에 의한 摩擦抵抗減少效果測定

指導教授 金 信

李 寶 安

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

1999年 12月



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

李寶安의 工學碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 박재우

委 員 이윤준

委 員 김 신



濟州大學校 大學院

1999年 12月

Measuring the Effects of Drag Reduction by Polymer Added to Turbulent Flow in Pipe

Bo-An Lee

(Supervised by professor Sin Kim)



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF NUCLEAR AND ENERGY ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

1999. 12.

목 차

List of Figures	iii
List of Tables	iv
SUMMARY	v
I. 서 론	1
II. 연구 동향	4
1. 연구 동향	4
2. 마찰저항 감소 첨가제	5
1) 고분자 첨가제	5
2) 고체입자 분산체	7
3) 분해성을 가진 첨가제	7
4) 계면활성제	8
5) 마찰저항 감소제의 활용	11
3. 고분자 화합물의 퇴화 현상에 관한 연구	12
4. 용 용	13
1) 원유수송 시스템	13
2) 하수 시스템	13
3) 개수 시스템	14
4) 지역 냉난방	14
5) 고체물질 전송	15
6) 소방 분야	16
7) 기타	16
III. 이론적 배경	18
1. 마찰저항 감소	18
1) 마찰저항	18

2)마찰저항 감소 효과	20
2. 비-Newton 유체	20
1) 선형 탄성(Hookean solid)	22
2) 선형 점성(Newtonian fluid)	22
3) Maxwell 유체(Maxwellian fluid)	22
3. 마찰저항 감소의 현상학적 해석	23
4. 마찰저항 감소의 이론적 해석	24
1) 초기의 모델	24
2) 길이 척도(length scale)	25
3) 시간 척도(time scale)	26
4) 에너지 모델(energy model)	27
5) 탄성이론	28
IV. 실험 장치 및 실험 방법	29
1. 순환회로의 구성	29
2. 실험장치	36
1) 펌프	36
2) 초음파 유량계	36
3) 차압 측정기	42
4) 온도 측정기	44
5) 데이터 습득 장치	44
6) 마찰인자 계산	44
3. 실험방법	48
V. 결 론	50
1. 물에 대한 기초 실험	50
2. 마찰저항 감소 실험 결과	51
VI. 참 고 문 헌	66

List of Figures

Fig. 1. Schematic diagram of the drag reduction test loop	30
Fig. 2. Front view of the drag reduction test loop	31
Fig. 3. Side view of the drag reduction test loop	32
Fig. 4. The circuit for differential pressure measurement	34
Fig. 5. Surge Tank	35
Fig. 6. Moineau pump	37
Fig. 7. Ultrasonic flowmeters: (a) pulse type; (b) doppler-shift type	39
Fig. 8. Doppler flow meter	40
Fig. 9. The sensor of Doppler flow meter	41
Fig. 10. The circuit for differential pressure measurement(Photo.)	43
Fig. 11. Flow chart on data aquisition	45
Fig. 12. Data acquisition system	46
Fig. 13. Photo. of weighing balance, polymers(PEO) and hot plate magnetic stirrer ..	49
Fig. 14. Friction factors for pure water	53
Fig. 15. (a) Friction factor with PEO ($M_w: 2 \times 10^5$)	54
Fig. 15. (b) Drag reduction with PEO ($M_w: 2 \times 10^5$)	55
Fig. 16. (a) Friction factor with PEO ($M_w: 4 \times 10^5$)	56
Fig. 16. (b) Drag reduction with PEO ($M_w: 4 \times 10^5$)	57
Fig. 17. (a) Friction factor with PEO ($M_w: 9 \times 10^5$)	58
Fig. 17. (b) Drag reduction with PEO ($M_w: 9 \times 10^5$)	59
Fig. 18. (a) Friction factor with PEO ($M_w: 4 \times 10^6$)	60
Fig. 18. (b) Drag reduction with PEO ($M_w: 4 \times 10^6$)	61
Fig. 19. (a) The effect of DR according to molecular weight (1 wppm)	62
Fig. 19. (b) The effect of DR according to molecular weight (5 wppm) ...	63
Fig. 19. (c) The effect of DR according to molecular weight (10 wppm) .	64
Fig. 19. (d) The effect of DR according to molecular weight (20 wppm) .	65

List of Tables

Table 1. Drag reducing polymer solutions	6
Table 2. Drag reducing solid suspension drag reducers	9
Table 3. Drag reducing biological additives	9
Table 4. Molecular Weights and concentrations of PEO	48



SUMMARY

Drag forces is a relative motion between fluid and the body in the fluid. The drag forces can be divided into the skin friction and the pressure drag. There have been many researches on the drag reduction because it is very useful in many industrial fields. If effective drag reduction methods can be found, the methods will be used to reduce pumping power in the transportation of crude oil and district heating fluids and in the hydrotransport of coal.

In this study, we used polyethylene oxides as a drag reducing additive. In order to study the effect of concentration and molecular weight of the polymer on the drag reduction, four molecular weights(2×10^5 , 4×10^5 , 9×10^5 , 4×10^6) and four concentrations (1, 5, 10, 20 wppm) of PEO were selected for the experiments. Also, the hydraulic conditions were varied from Reynolds number 30,000 ~ 60,000.

The drag reduction effect rate was more than about 20% for all molecular weights and constructions of PEO within the range investigated in this study, and the maximum drag reduction rate was 50% for 4×10^6 of molecular weight and 20wppm of concentration. Finally, we obtained the results that the drag reduction effect tends to be higher as molecular weight and Reynolds number increase.

The experimental data from this study for the drag reduction phenomenon by polymer additives can be useful for the studies to reduce pumping power in nuclear district heating system.

I. 서 론

우리는 주위에서 흔히 마찰 저항을 느끼며, 마찰 저항의 영향을 받으며 생활하고 있다. 특히 공기 중 혹은 수중에서 고속으로 운동하는 비행기, 자동차 및 해상 운송에 있어 마찰이 작용한다. 또한 원유의 수송 계통이나 폐열의 이용을 위한 지역 냉난방 계통에서 대량의 유체를 수송할 때도 유체와 관과의 마찰 저항이 동력에 큰 비중을 차지하고 있다. 따라서 우리가 이러한 것들을 이용하는 데 있어서 마찰 저항을 감소시키는 방법을 찾아내는 것은 매우 중요한 일이라 하겠다. 실제 관을 통한 유체의 수송에 고분자를 사용한 저항감소 방법은 길이가 256km에 이르는 Belovo-Novosibir나 석탄수송시스템(coal slurry system)에서 이용되고 있으며, 알래스카 원유수송 관에서도 소량의 고분자를 사용하여 수송능력을 향상시킨 것으로 보고되어 있다

지금까지 연구된 마찰 저항 감소 방법은 다음과 같은 것들이 있다 그 첫 번째로는 물체의 구조나 표면에 특별한 처리(코팅)를 하여 유체 유동을 안정시키도록 하는 것이다. 이는 보통 수동적 방법(passive device)이라고 말한다 이 방법은 항공기 표면, 선박 표면 그리고 자동차 표면에 응용하는 등 활발히 연구 중에 있다 그리고 두 번째 방법으로는 유체에 첨가제를 투입함으로써 유체의 물리학적 및 유변학적 특성(rheological characteristics)을 조절함으로써 유체의 유동 특성을 변화시켜 항력 감소 효과를 얻는 방법이다. 유체에 첨가물을 투입하는 방법은 마찰저항을 일으키는 난류 유동장에서 매우 적은 양의 첨가제를 투입하여 마찰저항 감소효과를 일으키는 것을 말한다. 이 때 첨가제를 백만분의 일(ppm) 단위의 매우 적은 양을 투입하여 그 효과를 얻을 수 있는데, 용매의 종류, 유동의 조건 등에 따라 적절한 첨가제를 선택하고 첨가제의 양을 조절함으로써 필요로 하는 마찰 저항감소의 효과를 얻을 수 있는 것이다. 이 같은 마찰 저항에 영향을 주는 첨가제는 여러 가지가 있는데 그 특징에 따라 고분자, 용매에 녹지 않는 고체입자 분산체, 생분해성 첨가제, 계면활성제 등으로 분류할 수 있다.

마찰저항 감소 현상은 1948년 Toms가 선형 고분자(linear polymer)를 용매에 첨가하여 난류 상태에서 원관내의 유동에 관한 실험을 한 결과, 용매에 소량의 첨가제를 첨가함으로써 현저한 마찰저항 감소 효과를 얻을 수 있다고 보고하였다(Toms, 1948). 이 유동형태

는 점탄성 특성을 가지는 것으로 알려졌으며, 그후 1970년대 초기에 이르러 이 현상의 실용적 의의에 주목한 유체 공학자들에 의해 활발한 연구가 시작되었다.

그러나 유체역학적인 측면에서 난류 유동이 완전히 규명되지 않았고, 또한, 고분자 용액의 동력학적 해석이 완전하지 않으므로 인해 이 두 가지가 결합되어 발생하는 고분자 화합물의 첨가에 의한 마찰저항 감소 현상은 그 동안의 많은 연구에도 불구하고, 정확한 생성 기구가 정량적으로 완전히 설명이 되고 있지 못하고 있다. 따라서 많은 연구자들이 마찰저항 감소 현상의 생성 메커니즘을 설명하기 위해 몇 가지의 마찰저항 감소 현상의 생성 메커니즘 모델을 제시하였으나 제한된 범위에서만 생성 메커니즘의 설명이 가능하여 일반적인 모델로는 받아들여지지 않고 있다. 이처럼 마찰저항 감소의 연구는 정량적인 설명이 어려워 실험을 통한 용매와 첨가제의 종류 및 특성, 유동조건 그리고 기하학적 형상 등 실험 조건에 따른 개별적 연구가 이루어져야 한다는 난점을 가지고 있다.

최근 마찰저항 감소 효과는 에너지 이용의 극대화를 위한 지역 냉난방(Direct Heating and Cooling, DHC) 시스템 분야, 상수 시스템 분야 그리고 의공학 분야 등으로 응용 분야가 확대됨에 따라 새로운 첨가제의 개발과 첨가제의 인체 유해성, 환경공해 그리고 첨가제 투입 및 회수 등의 관점에서 많은 연구가 이루어지고 있다. 고분자화합물은 마찰저항 감소 효과를 얻을 수 있는 첨가제로서 매우 우수한 면을 가지고 있다. 반면에, 산업적 응용 단계에서 고분자화합물은 그 특성상 열 에너지 및 전단력 등에 의한 퇴화(degradation)가 반드시 발생하여 시간이 지남에 따라 마찰저항 감소 효과가 급격히 줄어드는 문제를 가지고 있다. 따라서 고분자의 퇴화를 억제하고자 계면활성제의 혼합 투입 및 합성 고분자의 개발 등의 연구가 활발히 이루어지고 있다. 또한 섬유 부유물(fiber suspension) 등 다양한 마찰저항 감소 효과를 얻을 수 있는 물질들이 개발되고 있고, 계면활성제, 안정제 및 섬유 부유물 등을 용매에 투입할 때 발생하는 마찰저항의 거동에 관한 연구가 계속 진행되고 있다. 또한 환경 문제의 대두로 환경 친화적이며 인체에 무해한 첨가제의 개발이 절실히 요구됨에 따라 고분자의 유해성에 대한 검토가 요구되고 있다.

본 연구에서는 고분자 화합물인 폴리에틸렌옥사이드(polyethylene oxide : PEO)를 난류관 유동에 첨가하여 마찰저항 감소 효과를 측정하였다. 순수한 물에서 마찰저항 정도를 우선적으로 실험하였고, 같은 유동조건에서 고분자화합물을 첨가하여 마찰저항 감소효과를 측정하였다. 여기서 사용한 고분자화합물인 PEO는 4가지 분자량(2×10^5 , 4×10^5 , 9×10^5 , 4×10^6)과 4가지 농도(1, 5, 10, 20 wppm)를 사용하였다. 그리고 각각의 농도와 분자량을

가지고 실험하여 측정된 마찰저항과 순수 물에 대한 마찰저항을 비교하여 마찰저항 감소율을 계산하였다

이 연구를 통해 얻은 실험 데이터는 원자력 지역 난방을 위한 펌프일 감소와 같이 동력 일을 줄일 수 있는 산업현장에 기초적인 자료로 쓰일 수 있다.



II. 연구 동향

1. 연구 동향

Toms는 흐르는 유체에 매우 적은 양의 선형고분자를 첨가함으로써 마찰 저항이 급격히 감소하는 현상을 발견하였다(Toms, 1948). 즉 monochlorobenzene의 난류 파이프 흐름 상에서 소량의 poly(methyl methacrylate)를 첨가함으로써 마찰계수가 감소될 수 있다고 보고하였다. 이와 같이 용매에 소량의 첨가제를 투입하였을 때 마찰저항이 감소하는 효과를 Toms 효과(Toms' effect)라 한다.

Toms 효과가 발견된 이후, 활발한 연구가 이루어졌는데 Mysels은 용매를 gasoline으로 알루미늄 비누(aluminum soaps)를 첨가제로 사용함으로써 Toms의 실험결과와 동일한 현상을 관찰하였다(Mysels, 1949). 마찰저항 감소에 대한 정의는 Savins에 의해 제안되었다. 그는 유체의 펌핑력 증가에서 마찰저항 감소의 정의를 내렸는데 이는 난류상태로 흐르고 있는 유체에 소량의 첨가물을 첨가 할 경우 마찰저항 감소 효과를 얻을 수 있다고 정의하였다(Savins 등 1964). Virk는 폴리에틸렌옥사이드(polyethylene oxide, PEO), 폴리아크릴아마이드(polyacrylamide), 폴리메틸메타크릴레이트(polymethylmetacrylate)등의 고분자 첨가제의 다양한 농도, 다양한 분자량, 관 직경, Reynolds 수 등에 따라 마찰 감소 효과에 어떤 극한이 존재한 다는 사실을 제시하였다. 이를 Virk의 최대 마찰 저항 점근선(Maximum Drag reduction Asymtote)이라 한다(Virk 등 1970). Patterson 등은 Polyethylene oxide 수용액을 카르복실산 비누(carboxylate soap) 용액에 첨가하여 난류 유동에서 마찰저항 감소를 측정하였다. 이 연구의 결과에 따르면 카르복실산 비누의 농도가 증가할수록 마찰저항 감소율이 높아짐을 밝혔다(Patterson 등 1975)

2. 마찰저항 감소 첨가제

앞에서 언급되었듯이 마찰저항 감소의 효과를 얻을 수 있는 첨가제는 그 특징에 따라 고분자, 용매에 녹지 않는 고체입자 분산체, 생분해성 첨가제, 계면활성제 등 크게 4 종류로 분류할 수 있으며 각 첨가제에 따른 마찰저항 감소 효과의 특성은 다음과 같다

1) 고분자 첨가제

마찰저항 감소 효과를 얻을 수 있는 첨가제로서 고분자는 고분자 용액을 일정한 범위 내에서 백만 분의 일 단위의 매우 극소량을 첨가하여도 마찰저항감소 효과를 얻을 수 있기 때문에 가장 많은 연구 대상이 되고 있다. 그리고 실제의 산업에서도 이용되고 있으며, Belovo-Novosibirsk 석탄 수송 시스템(coal slurry system), Trans-Alaska Pipeline System(TAPS)등 기존의 산업 시스템에 있어서 소량의 고분자를 첨가함으로써 마찰저항 감소 효과가 향상된다고 보고되어 있다. 고분자를 마찰저항 감소제로 사용함에 있어, 고분자는 물이나 유기 용매에 녹을 수 있어야 하며 높은 분자량을 가져야 한다. 위의 조건을 만족시키고 있고, 기존의 연구와 실제 응용에서 많이 사용되고 있는 고분자 첨가제들은 Table 1에 나타나 있다.

Table 1에 열거된 고분자들에서 알 수 있듯이 마찰저항 감소제로 쓰일 수 있는 고분자들은 대개 선형 구조를 가져야 하며 높은 분자량(적어도 분자량이 500,000 이상)을 가져야 한다는 조건을 만족하여야 한다 이러한 고분자 용액은 매우 적은 양으로도 마찰저항 감소 효과를 나타낼 수 있다는 장점을 가지고 있으나, 기계적인 퇴화 및 고분자 자체가 가지고 있는 특성 때문에 고온에서 열적 퇴화에 매우 약하다는 결점을 가지고 있어 요즘은 고분자 단독으로 쓰이지 않고 고분자-유화제 복합체를 형성하거나 계면활성제 등을 혼합하여 사용하는 등 고분자 용액이 가진 단점을 보완하는 방법들이 제시되고 있다(Patterson과 Abernathy, 1970).

기계적 퇴화에 관한 연구로 고분자 첨가제와 섬유 부유물을 각각 첨가했을 때보다 같이 첨가하였을 때 마찰저항 감소 효과가 증가하며, 이러한 섬유 부유물의 첨가는 직경이 작을수록 마찰저항 감소 효과를 증대시킨다고 보고하였다(Lee 등 1974). 고분자 화합물의 퇴화에 대해서는 따로 자세히 알아보도록 할 것이다

Table 1. Drag reducing polymer solutions

Solute	Solvent	Solute	Solvent
PEO	water	PMMA	toluene
PEO	sea water	PVA	water
PEO	water containing on electrolyte	sodium polystyrene sulfonate	water
PEO	hydrocarbons	PS	toluene
PEO	blood transfusion fluids	PS	benzene, methyl ethyl ketone
Polyacrylamide	water	PS	cyclohexane
Hydroxyethyl cellulose	water	Guargum	water
Polyisobutylene	toluene, benzene, cyclohexane	Guargum	sea water
Polyisobutylene	decalin, kerosene	certain rubbers	organic solvent

그리고 고분자 첨가제인 폴리에틸렌옥사이드(polyethylene oxide : PEO)가 폴리아크릴아마이드(polyacrylamide)보다 기계적 퇴화에 더욱 민감하게 나타남을 보고하였다(Cho와 Hartnett 1982). 이러한 기계적 퇴화는 밀폐된 계에서 장기간 사용하거나 유체의 장거리 수송 등 많은 전단력을 받는 경우 매우 크게 문제시되고 있다.

그리고 열 에너지에 의한 고분자의 퇴화는 열원 등의 수송에 있어 기계적 퇴화보다 크게 나타나고 있어 고분자의 퇴화의 주된 원인이 되고 있다. 이러한 고분자의 분해와 퇴화를 방지하는 방법으로는 합성고분자(co-polymer)의 사용(김남수 등, 1983), 안정화 첨가제(stabilizing additive)의 첨가(Durst 등, 1989), 계면활성제의 첨가 등이 제안되고 있다.

2) 고체입자 분산체

정확한 마찰저항 감소의 생성 메커니즘은 알 수 없지만 일반적으로 마찰저항 감소는 용액의 점탄성 특성과 관련이 있다고 알려져 있으며, 따라서 유체가 점탄성 특성을 갖도록 유체에 고체입자 분산체를 첨가하여 마찰저항 감소 효과를 얻고자 하였다. 마찰저항 감소 효과를 얻을 수 있는 고체입자 분산체는 그 특성에 따라 구형 모양의 입자와 섬유부유물로 크게 두 종류로 나눌 수 있다.

고분자 용액에 비하여 고체입자 분산체는 고체입자로서 첨가되어서 유체를 전송한 후 유체로부터 쉽게 분리할 수 있어서 재사용이 가능하다는 점과 고분자 용액과 달리 대부분의 고체입자 분산체는 기계적 퇴화가 일어나지 않는다는 점등 여러 가지 이점을 가지고 있다. 마찰저항 감소 효과를 얻을 수 있는 고체입자 분산체는 carbon black, SiO₂, kaolin 및 fly ash 등이 있으며 유체의 종류에 따라 사용될 수 있는 고체입자 분산체는 Table 2와 같다.

3) 분해성을 가진 첨가제

분해성을 가진 첨가제에 대한 연구는 물고기, 뱀 그리고 식물 등의 점액이나 생분해성 생장물에서도 효과적인 마찰저항 감소 현상이 발견된다는 사실에 근거하여 의학용 및 식수 등에서 이용할 수 있다는 가능성에 기대를 두고 연구가 시작되었다. 분해성을 가진 첨가제에 대하여 효과적인 마찰저항 감소 효과를 얻을 수 있는 생분해성 첨가제들을 Table 3에

나타내었다.

아직까지 분해성을 가진 첨가제의 응용에 관한 연구는 매우 미흡하며 미래에 식수의 수송, 인체에 사용을 위한 의학용 등에 응용을 위한 첨가제의 개발이 필요하다. 또한, 최근에 들어 환경문제가 대두됨에 따라 고분자 물질의 환경친화적 요소가 요구되고 있으며 인체에 무해하면서 분해가 용이한 생분해성 고분자의 개발이 절실히 요구되고 있다. 이와 관련하여 식물 및 동물에서 추출할 수 있는 생분해성 고분자는 대량 생산이 어렵고 추출 기술이 까다롭다는 단점을 가지고 있어 마찰저항 감소 첨가제로서의 응용에 한계가 있는 반면, 미생물을 이용한 생분해성 고분자의 개발은 대량 생산이 가능하며 추출 기술이 평이하고 생산 설비 등에서 경제성을 가지고 있어 앞으로 미생물에 의해 합성된 생분해성 고분자에 관한 연구가 필요하다고 판단된다.

4) 계면활성제

계면활성제는 물이나 물과 유사한 성질을 가지는 protonic 용매에 용해되어 특정 온도 이상에서 분자들이 화합하여 집합체(aggregate)를 구성한다. 이 집합체는 작은 콜로이드(colloid)로서 특이한 구조를 형성하게 된다. 즉, 내부에는 탄화수소가 액상인 상태에서 존재하고, 주변은 계면활성제가 만든 이온성을 띤 마이셀이 강한 전기장을 형성한다. 이로 인하여 마이셀이라는 콜로이드는 다른 콜로이드에서 볼 수 없는 특이한 역할을 담당하게 된다. 계면활성제는 임계 마이셀 농도(critical micelle concentration) 이상에서 단일분자 또는 이온으로 마이셀이라는 집합체를 형성할 때 낮은 자유 에너지를 갖는데, 이는 열역학적으로 안정된 콜로이드를 의미한다. 이러한 임계 마이셀 농도는 소수성 부분(hydrophobic part)과 친수성(hydrophilic)의 이온에 따라 의존한다.

(1) 음이온 계면활성제

음이온 계면활성제란 계면활성제가 물이나 기타 유기용매에 녹았을 때 친수성과 소수성 부분으로 나뉘어지며 이때 소수성 부분이 음이온을 띠는 계면활성제를 말한다. 음이온 계면활성제는 carboxylic산염, 황산염(sulfate), 술폰산염(sulfonate), 그리고 인

Table 2. Drag reducing solid suspension drag reducers

Suspension	Fluid	Suspension	Fluid
sand	water	nylon fibers	water
coal, ash, clay, charcoal	water	nylon fibers	polymer solution
wood and wood pulp	solution of guar gum	rayon fibers	water
fibers wood pulp	solution of guar gum	asbestos fibers	water
emery	water	asbestos fibers	polymer solution
thoria	water	asbestos fibers	aerosol solution


 제주대학교 중앙도서관
 Table 3. Drag reducing biological additives

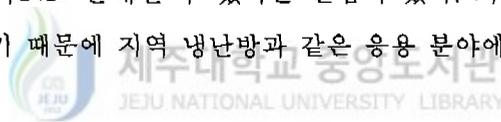
Biological additives
Porphyridium Aerugieum
Prophyridium Cruentum
Xanthomonas Compestris
Chaetoceros Didymus
Protocentrum Micans
Fish Slines

산염(phosphate) 등으로 구분된다. 위에서 언급된 유화제들은 오랜 기간 동안에도 사용할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 일반적으로 사용되는 이러한 유화제들은 상대적으로 경제적이며 기계적인 퇴화에 비교적 안정하다. 그러나 칼슘(calcium)이나 다른 이온의 첨가에 의해서 침전될 수 있다는 결점이 있어 실제 산업 현장에 적용하기에는 많은 제약이 있다

(2) 양이온 계면활성제

양이온 계면활성제란 계면활성제가 물이나 기타 유기 용매에 녹았을 때 소수성 부분이 양이온인 경우를 말한다. 양이온 계면활성제는 아민염(amine)과 암모니아염(ammonium)으로 구분되며, 양이온 계면활성제로서 가장 널리 사용되는 것은 cethyl trimethyl ammonium bromide(CTAB)이다. Nash(1958)는 CTAB와 나프탈렌(naphthalene) 유도체와의 혼합물에서 점탄성 성질을 나타내는 젤이 생성됨을 보였다 이러한 젤의 형성은 유체의 특성을 점탄성이 되도록 함으로써 마찰저항 감소 효과를 얻을 수 있다

양이온 계면활성제가 가지고 있는 가장 두드러진 특징은 칼슘 이온이 존재하더라도 침전되지 않는다는 것이다. 그러나 음이온 계면활성제와 비교해서 상대적으로 비경제적이며 수용액 상태에서 화학적으로 분해될 수 있다는 결점이 있다. 기계적으로는 매우 안정하지만 고온에서는 분해되기 때문에 지역 냉난방과 같은 응용 분야에는 사용할 수 없다는 결점이 있다.



(3) 비이온성 계면활성제

비이온성 계면활성제로서 쓰이는 대표적인 물질은 PEO(polyethylene oxide)계와 polyoxy계이다. PEO계로는 polyoxyethylene alkyl ether, polyoxyethylene alkyl phenol ether가 있으며, polyoxy계로는 polyoxy ethylene fatty acid ester, polyoxyethylene sorbitane ester, polyoxyethylene alkylamine 등이 있다.

비이온성 계면활성제는 마찰저항 감소제가 가지고 있는 대부분의 장점들을 가지고 있다. 기계적으로나 화학적으로 안정하며 칼슘 이온이나 기타 다른 이온이 존재하더라도 침전되지 않아서 불순물이 많은 물이나 바닷물, 농도가 매우 진한 염수(鹽水)등에 쓰일 수 있다.

5) 마찰저항 감소제의 활용

이러한 여러 가지 마찰저항 감소제중 일반적으로 고분자가 마찰저항 감소제로서 가장 효과적이라고 알려져 있고, 가장 많은 연구가 수행되었다. 어떤 고분자는 0.02ppm ~ 0.03ppm의 저농도에서도 인지할 수 있을 정도의 마찰저항 감소를 보여준다(Patterson과 Abernathy, 1970) 그러나 고분자 물질은 기계적인 전단력에 대한 저항성이 비교적 낮고, 이에 따라 표면 마찰에 의한 고분자 사슬의 절단이 일어나고 온도에 대해서도 민감하기 때문에 이러한 고분자량의 고분자들은 고온의 지속적인 순환계에서는 사용이 부적당하다. 한편 계면활성제는 기본적으로 한 개의 분자 내에 친수기(hydrophilic group)와 친유기(hydrophobic group)를 가지고 있는 저분자 물질로, 용매에 용해되어 어느 정도 이상으로 농도가 커지면 과량의 분자가 서로 집합하여 마이셀이라고 부르는 소집단을 형성한다. 계면활성제는 용액 중에 소량 첨가되어서 분자 경계면에 배양 흡착되어 각각의 계면 에너지를 현저히 감소시킨다.

한편 근래 고분자량의 고분자 마찰저항 감소제가 많은 관심을 끌고 있지만, 이러한 고분자들은 펌프같은 높은 전단 환경하에서 비가역적으로 절단이 되므로 지역 냉난방 순환 루프와 같은 폐쇄 순환 시스템에는 부적합하다. 하지만 저분자량의 계면활성제도 마찰저항 감소의 거동과 가역적인 퇴화를 보이는 것이 증명되었으며, 이러한 마이셀계도 높은 전단 영역에서 퇴화를 일으키지만, 이 퇴화 과정은 가역적이고 용액은 낮은 전단 영역에 들어감에 따라 다시 마찰저항 감소의 능력을 회복하기 때문에 지역냉난방 루프 같은 순환 시스템에 사용하는데 적합하다.

다수의 양이온성 계면 활성제 중 마찰저항 감소제로서 사용하기 적합한 것이 있으며, 이러한 계면활성제의 마찰저항 감소에 영향을 미치는 변수들로는 온도, 농도(계면활성제 및 counter ion), 계면활성제의 화학적 구조(탄화수소의 개수와 친수성기), counter ion의 화학적 구조와 다른 첨가제들(염, 부식 방지제 등)이 있다. 구형 마이셀은 마찰저항 감소제로 아무런 효과를 주지 못하고, 막대형의 마이셀이 마찰저항 감소의 조건을 만족시킨다고 알려져 있다. 그러나 마찰저항 감소의 기구와 계면활성제 시스템의 화학적 구조의 효과가 마이셀 구조에 미치는 영향과 이러한 영향이 마찰저항 감소 등에 얼마나 미치는지는 아직까지 연구가 되어있지 않은 실정이다.

3. 고분자 화합물의 퇴화 현상에 관한 연구

Toms가 발견한 마찰저항 감소 현상은 산업현장의 많은 분야에서 매우 유익한 연구 결과임에는 확실하다. 그러나 시간이 경과함에 따라 마찰저항 감소율이 감소한다는 결점이 있다. 그 원인이 고분자의 퇴화에 의한 것임 밝혀졌다(Brostow, 1983).

용액중의 고분자는 물리적, 화학적 작용에 의해 중합체사슬이 끊어지는 고분자 분해현상을 보인다. 또한 용액 중에서도 분해가 일어나는 데 노즐에서 일어나는 난류 현상도 분해를 일으키며, 유동 중의 벽과의 전단력이나 초음파 진동과 같은 역학적 힘, 자외선과 같은 광학적 에너지, 열에 의한 분해, 화학적 분해 등이 있다(안과이, 1986). 이와 같은 고분자의 분해는 전적으로 사슬구조에 따라 다르다.

Tung 등은 2500wppm의 polyacrylamide 수용액을 오랜 시간에 걸쳐 재순환 하는 실험을 수행하였다. 그들은 이 실험을 통해 마찰저항 감소효과는 시간이 지나면서 점차 감소하다가 특정 시간이후부터는 더 이상 감소하지 않는다는 사실을 관찰하였다(Tung 등 1978). 그리고 전단력에 의한 퇴화는 여러 조건(농도, 유동조건, 첨가제의 종류)에 따라 퇴화의 경향이 다르게 나타난다 또한 Durst 등은 고분자의 신장속도(elongation rate)가 유체의 Reynolds 수와 연관이 있기 때문에 고분자의 퇴화는 Deborah number(De)와 연관성이 있다고 하였다. De는 두 연신률 사이의 시간에 대한 고분자의 이완시간의 비로 정의한다.

$$De = \tau \dot{\epsilon} . \quad (1)$$

이러한 퇴화 현상 때문에 산업 응용에서 실제적인 제약을 줄 수 있다. 따라서 퇴화 방지에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 복합 고분자(co-polymer), 섬유 부유물(fiber suspension), 계면 활성제(surfactant)등이 고분자 퇴화 방지에 효과가 있는 것으로 밝혀졌다.

Zankin 등은 마찰저항 감소 효과가 점탄성 특성과 관련되므로, 양이온 계면활성제인 cetyl trimethyl amonium Bromide(CTAB)-naphthol 혼합물을 이용하여 마찰저항 감소 효과를 관찰하였다(Zankin 등 1971). 이 연구에서 그들은 CTAB-naphtol 혼합물이 수용액에서 생성하는 점탄성 젤이 마찰저항 감소 효과를 발생시킨다고 하였다.

4 응용

마찰 저항 감소 효과는 넓은 산업에서 매우 중요한 역할을 할 수 있다. 초기에는 원유, 석탄의 수송, 소방 호스, 하수 시스템, 홍수 시 배수 시스템 등 다양하게 산업적 응용을 목표로 연구가 수행되었다. 그리고 최근 열병합 발전 시설 및 폐기물 소각 등에서 발생한 폐열의 열원 수송, 고체물질의 전송 등에도 이 Toms 현상을 이용하는 실험을 하는 등 그 응용의 범위가 확대되고 있다.

1) 원유수송 시스템

원유 수송 시스템의 경우 장거리이고 대용량이기 때문에 펌프의 일에 대한 비용을 작은 비율로 줄일 지라도 엄청난 에너지 효율을 얻을 수 있다. 1970년대 말에는 Conoco Chemical Co.에서 알래스카 원유수송을 위해 마찰저항 감소를 일으키는 고분자를 직접 개발하기도 하였다(Burger 등 1980a, 1980b). Lescarbourea 등은 오일에 대한 장거리 수송(45km, 51km) 실험을 수행하여 다양한 고분자 농도에 대해서 16%~25%의 마찰저항 감소 효과를 얻었다(Lescarbourea 등 1971). 그리고 유동 속도와 고분자 농도에 따른 상관관계를 제시하였다. 최근에는 알래스카 원유수송관(TAPS, Trans-Alaska Pipeline System)에서 소량의 고분자 물질을 투입하여 원유의 수송일 감소 효과를 얻었다고 보고된바 있다(Burger 등 1980c)

2) 하수 시스템

하수 시스템에 이용하는 경우 마찰 저항 감소 첨가제의 사용 시간이 짧기 때문에 퇴화 및 분해의 영향을 덜 받는다 이는 퇴화 현상에 영향을 받는 응용에 비해 경제적이다. 이뿐 아니라 홍수 시 배수 시스템으로의 전환이 가능하고 하수관의 직경 및 펌프의 용량을 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다. Sellin은 실제 운영하고 있는 Avonmouth의 하수 시스템에서 마찰저항 감소효과를 조사하였다(Sellin, 1974). 그는 직경 200mm, 길이 4000m의 관에 대한 펌프의 특성 실험을 수행하였다. 또한 그는 하수(sewers) 시스템의 하수 능력을 개선시키기 위한 연구에서 고분자 투입 방법을 개발하였고 펌프 일의 감소 효과를 조사하였으며 고분

자 투입 시 경제성에 대해 보고하였다(Sellin, 1977)

고분자 화합물의 보관과 사용에 관련하여 Sellin과 Ollis는 유제(liquid emulsion) 형태의 고분자 첨가제를 사용하여 난류가 매우 심한 유동 조건하에서($Re > 600,000$) 10 wppm의 농도를 갖는 고분자를 사용하여 20~25% 마찰저항 감소 효과를 얻었다(Sellin 등 1981). 유제 상태의 고분자 첨가제는 저장 부피가 작고, 농축용액에 비해 장기간 저장 가능(2년 이상)하며 주입 장비가 간단하다. 또한 미세 분말이 날릴 염려가 없으므로 취급이 쉽다는 장점을 가지고 있다

3) 개수 시스템

개수 시스템에서는 크게 홍수 시 배수 시스템과 수력 발전 시스템 등에 적용을 위하여 연구가 진행되었다. Peterson 등은 크기가 150mm×9m 인 사각형 유로 첨가제로 Separan AP-30을 이용하여 실험하였다(Peterson 등 1973). 그들은 depth-charge data를 Prandtl-von Karma 방정식을 이용하여 해석하고, 마찰저항 개시점은 농도에 무관하고 최대 농도(100 wppm)에서 67%의 마찰저항 감소 효과를 얻었다고 보고하였다

Mashelkar는 Wisconsin주 Milwaukee의 수력발전 시스템에서 다양한 고분자 첨가제를 사용하여 마찰저항 감소 효과를 조사하였다. 그 이외에 홍수 시 배수 시스템과 수력발전 시스템에 적용을 위한 개수 시스템에서의 마찰저항 감소 효과 연구는 Derick과 Logie, Tullis 등 많은 연구가 진행되어 왔다(Derick 등 1973)(Tullis 등 1974).

4) 지역 냉난방

지역 냉난방(district heating and cooling · DHC)은 건물 공간의 냉난방, 온수공급, 산업 공정 등 에너지를 필요로 하는 최종 사용자에게까지 장거리 파이프를 통해 열을 전송하는 기술로서 열 효율을 극대화시킬 수 있고, 집중적인 에너지의 관리로 에너지 발생원으로부터 발생하는 환경 오염물(즉 이산화탄소, NOx, SOx)을 줄이거나 제거하는데 용이하며 열원으로 고품 폐기물 쓰레기를 태울 수 있는 열병합 발전이 가능하게 되어 쓰레기 환경 오염원의 감소 등 여러 가지 장점이 있으므로 현재 여러 나라에서 지대한 관심을 갖고 있다.

1974년 석유파동이후, 미국에서는 DHC 시스템을 새로운 국가 정책으로 채택하여 더욱

활발한 연구를 수행하고 있다. 그 예로 1976년에 에너지 연구 개발의 일환으로 국가 정책적으로 연구되었으며, 1978년 에너지성(Department of Energy, DOE)이 생긴 후 이의 연구 및 개발을 맡고 있다. Minnesota주의 St. Paul, New York주의 Jamestown시 등에서 성공적으로 지역난방 기술이 작동되고 있으며, 유럽의 여러 나라에서도 설치되었고 국내에서도 지역난방 공사가 있어 본격적으로 가동이 되고 있는 실정이므로 더욱 그 개발의 필요성이 현재 대두되고 있다.

Povch 등은 열분배 시스템(heating distribution system)에서 온도 조건이 30~80°C에서 실험을 수행하였는데, 51°C에서 42.3%의 최대 마찰저항 감소 효과를 얻었다(Povch 등 1978). Fitzgerald는 가정용 중압 집중 난방 시스템에 마찰 저항 감소현상을 적용하여 연구를 하였다. 그는 가정용 radiators에서 펌프 일과 열전달의 관점에서 실험을 수행한 결과 층류 조건 하에서는 전열 효과가 떨어지는 결과를 얻었다. 그 원인으로 낮은 Re 수에서는 관 직경이 작고, 많은 연결 부위(bends), 밸브(valve) 등을 가지므로 shear velocities를 유발시켜 고분자가 퇴화되기 때문이라고 하였다.

Choi 등은 200 ppm의 폴리아크릴아마이드(Separan AP-273)와 폴리에틸렌옥사이드(Polyox WSR-301)의 수용액을 폐회로(closed-loop) 지역 냉난방 시스템에 적용하여 장시간 사용할 경우에 대해 고온과 저온에서의 기계적 퇴화 경향을 조사하였다(Choi 등 1989). 이 연구에서 Separan AP-273이 Polyox WSR-301보다 기계적 퇴화가 적게 나타나며, Separan AP-273를 장시간 사용할 때 마찰저항 감소 효과는 31% 값에서 유지됨을 보였다.

그후 계속된 실험에서 Separan AP-273 수용액을 사용하여 고분자의 기계적 및 열적 퇴화 실험을 한 결과 7.2°C에서 30일 동안 순환시켰을 때에는 50%의 저항감소 효과를 얻었으나, 82.8°C에서 8시간동안 순환시켰을 때 10% 이내의 저항감소 효과를 얻음으로써 고온에서 열적 퇴화에 의한 마찰저항 감소가 급격히 줄어들고 있음을 밝혔다(Choi 등 1989).

5) 고체물질 전송

고체물질 전송은 유체와 전송하고자 하는 고체물질 혼합하여 슬러리(slurry) 상태로 만들고 펌프에 의해 이 혼합물을 전송하는 시스템을 말하며, 석탄, 철광석, 모래 등의 수송 시스템에서 사용되고 있다

슬러리를 수송하는데 요구되는 수송일 감소시킬 뿐만 아니라 슬러리에서 고체 물질의

양을 증가시키는데 마찰저항 감소 효과의 적용 가능성에 대해 Herod와 Tiederman가 제시하였다(Herod와 Tiederman, 1974). 사용된 고분자는 Separan AP 273이고 100 wppm 농도에서 70% 마찰저항 감소 효과가 얻을 수 있었다. Porch 등은 석영 모래를 전송하는 실험을 수행하면서 CTAP, 1-Naphthol 용액을 0.15% 첨가하여 실험하였다(Porch 등 1970) 그러면 압력 강하에 의해 임계 속도(critical velocity)가 감소하며 슬러리를 수송하는데 요구되는 에너지는 물만 사용할 경우보다 30%의 효율을 나타낸다고 보고하였다.

6) 소방 분야

소방 분야에서는 고분자 첨가제를 이용하여 소화관에서 유량과 노즐(nozzle) 압력을 증가시켜 방수 능력을 향상시키기 위한 많은 연구가 있어왔다. Union Carbide에서는 100m, 52mm 소방 호스(fire hose)에서 유량이 700 l/min에서 AEG 장치를 이용하여 실험한 결과 60%의 마찰저항 감소 효과를 얻었다. 또한 New York 소방서와 Union Carbide(1969)에서는 폴리에틸렌옥사이드를 첨가하여 실험한 결과, 고분자 용액이 더 멀리 분사됐으며 고층 건물의 화재진압에 유리하다는 결과를 얻었다



7) 기타

마찰저항 감소제를 이용한 생의학적 연구가 70년대초에 행해졌다(Greene 등 1970)(White 등 1969). 부분적으로 막혀있는 정맥에서 피의 흐름 향상이나 이에 연관된 순환기계통의 질병예방등이 의학적 연구의 동기가 되었으며 실험실뿐만 아니라 생체내에서의 연구도 보고되었다(Greene 등 1980).

마찰저항 감소 현상은 식수 공급 시스템에서도 적용할 수 있다. 그런데 식수 공급 시스템에 적용하기 위해서 인체 무해성에 관한 실험과 고분자 희석으로 인해 발생할 수 있는 환경 오염 문제에 대한 연구의 필요성에 의해 이에 대한 연구가 진행되고 있다. Wade는 환경에 대한 유독성과 그 밖의 악영향에 대한 문제를 다루기 위해, 마찰저항 감소제로 흔히 사용되는 고분자 화합물의 영향을 관찰하였다(Wade, 1973). 그는 생체기관과 고등 동물에 대한 영향을 연구하였는데, 개와 쥐에 대해 폴리에틸렌옥사이드(각각 2%와 5%)를 투입하여 2년간 관찰하고 250 wppm의 같은 고분자화합물을 물고기에 대해 실험하여 무해성을

밝혔다. 그리고 작은 새우(shrimp)에 대해 15세대를 키운 결과 아무런 역효과가 없음을 관찰하여 유전적 문제 역시 이상이 없음을 보고하였다. 수력학적 기계, 모터 기어 케이스, 프로펠러, 베어링등 마찰이 걸리는 부분에도 고분자 첨가제가 사용되고 있다(Latto 등 1974).



III. 이론적 배경

1. 마찰저항 감소

난류유동을 한마디로 명확히 정의하는 것 자체도 매우 어렵기 때문에 난류 유동과 복합적으로 일어나는 마찰저항 감소에 대한 연구는 아직도 미비하다고 할 수 있다. 그러므로 마찰저항과 마찰저항 감소효과에 대해 논할 필요가 있을 것이다.

1) 마찰저항

관 유동에서 Newton 유체와 비-Newton 유체에 관한 Fanning의 마찰 인자는 평균속도와 관에서의 압력 강하(pressure drop) 항으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_F = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho v^2} = \frac{D}{2\rho v^2} \frac{\Delta P}{L} \quad (2)$$

여기서 f_F 는 Fanning의 마찰 인자(friction factor), D 와 L 은 시험부(test section)의 직경 및 길이, ρ 는 유체의 밀도, v 는 관내에서 유체의 평균속도 그리고 ΔP 는 시험부 두 지점 사이의 압력차(differential pressure)이다.

여기서 주의 할 것은 Darcy의 마찰계수(f_D)이다. Darcy의 마찰계수는 다음 식과 같다.

$$f_D = \frac{4\tau_w}{\frac{1}{2}\rho v^2} \quad (3)$$

로 정의되고, 두 마찰계수간에는

$$f_D = 4f_F \quad (4)$$

의 관계가 있어 주의를 필요로 한다

압력 변화값을 정확히 구하려면 완전히 발달된 두 지점 사이의 압력 강하를 측정해야 한다. Newton 유체의 층류 유동에서의 입구길이 L_e 는 Kay에 의해 다음과 같이 정의된다 (Kays 등 1980)

$$\frac{L_e}{D} = \frac{Re}{20} . \quad (5)$$

Newton 유체의 층류 유동에서 입구 길이 L_e 의 최대값은 직경 D 의 100배 정도이며 난류 유동인 경우 직경 D 의 20배 정도로 극히 작은 값으로도 충분한 반면, 비-Newton 유체의 경우 Cho와 Harnett는 입구길이 L_e 가 직경의 110배 정도로 매우 크게 나타난다고 보고한 바 있다(Cho 등 1982).

일반적으로 마찰 계수는 무차원 압력 구배와 완전히 발달된 비-Newton 유체의 Reynolds 수의 함수 관계로 나타낼 수 있으며, 관계식은 다음과 같다.

$$f_F = \frac{16}{Re} . \quad (6)$$

Prandtl은 Newton 유체의 완전 발달한 영역에서 마찰 계수에 관한 식을 다음과 같이 표현하였다

$$f_F^{-1/2} = 2.0 \ln(Re f_F^{1/2}) - 0.8 . \quad (7)$$

점탄성 유체의 난류 유동에서 마찰 계수는 Newton 유체에 비해 현격히 작게 관찰되고 있으며, Virk는 마찰저항 감소율에는 한계가 존재한다는 최소 저항 점근선(maximum friction reduction asymptotes)을 발표하였으며 이 최소 저항 점근선에 대해 다음과 같이 정의하였다(Virk 등 1967).

$$f_F^{-1/2} = 19.0 \log(Re_a f_F^{1/2}) - 32.4 . \quad (8)$$

완전히 발달된 난류유동에서 최소 저항 점근선은 고분자의 종류나 관의 직경 등에 관계하지 않으며 단지 겉보기 점도(apparent viscosity)를 기초로 한 Reynolds (Re_a)만에 의존한다

2) 마찰저항 감소 효과

Savins가 정의한 마찰저항 감소 효과에 대한 식이 일반적으로 널리 적용되고 있다 (Savins, 1964). Savins는 유체의 펌핑력 증가에서 마찰저항 감소의 정의를 내렸는데, 난류 상태의 유체에 소량의 첨가물을 첨가하여 얻을 수 있는 펌핑력의 감소 효과로 마찰저항 감소의 효과를 정의하였다. 관 유동에서 마찰저항 감소(drag reduction : DR)를 기호로 정의하면 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$DR = (\Delta P_s - \Delta P_a) / \Delta P_s . \quad (9)$$

여기서 ΔP_s 는 용매만 존재할 때 마찰 때문에 생기는 시험부 두 지점사이의 압력 강하이며, ΔP_a 는 마찰저항 감소제가 첨가된 상태에서 마찰 때문에 발생하는 압력 강하이다.

한편 마찰저항 감소는 다음과 같은 식을 이용해서도 표현할 수 있는데,


$$DR = 1 - f_a / f_s \quad (10)$$

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

여기서 f_a 는 마찰저항 감소제가 포함된 유체에서 관의 마찰 인자이고, f_s 는 용매만 존재할 때 관의 마찰 인자이다(단, 유량이 일정할 때). 여기서 마찰 인자 f_F 는 식 (2)에 나타나 있고 Darcy의 마찰인자(f_D)를 사용한다.

2. 비-Newton 유체

마찰저항 감소 현상은 용매에 첨가제가 투입될 때 발생한다. 첨가제가 투입된 유체가 갖는 특성은 일반적으로 Newton 유체(Newtonian fluid)의 특성과는 다르다.

유탁액(emulsion), 현탁액(suspension), 고분자 용액(polymer solution) 및 고분자 용융액(polymer melt) 등과 같이 실제 응용되고 있는 유체의 유동은 Newton 유체와 달리 응력과 속도구배 사이의 선형적 관계가 성립되지 않으므로 온도가 일정할 경우에도 Newton의 점성 법칙에 의해 전단력을 예상할 수 없다. 또한, 유변학적 특성(rheological

characteristics)이 점성계수의 측정만으로 파악할 수 없는 등 Newton 유체와는 유변학적 및 물리학적으로 많은 차이점을 가지고 있다. 이러한 유체를 통틀어 비-Newton 유체(non-Newtonian fluid)라 한다. 그러므로 마찰저항 감소 효과를 얻을 수 있는 유체의 상태는 비-Newton 유체의 특성을 띠게 된다.

비-Newton 유체의 정상 단순 전단유동(steady simple shear flow)에서 점성 전단응력, 전단율 그리고 점성계수 사이에는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\eta = \frac{\tau_{12}}{\dot{\gamma}} \quad (11)$$

여기서 η 는 점성계수(viscosity), τ_{12} 는 전단응력(shear stress) 그리고 $\dot{\gamma}$ 은 전단율(rate of strain)이며, 점성계수는 전단율($\dot{\gamma}$)의 크기에 의존한다 따라서 점성계수와 전단율의 관계를 다음과 같이 나타낼 수 있다

$$\eta = \eta(\dot{\gamma}) \quad (12)$$

또한, 전단율의 변화에 따라 유체의 구조가 조정되며, 따라서 유체의 점성계수는 전단율 뿐만 아니라 시간에 따라서도 변하게 된다.

$$\eta = \eta(\dot{\gamma}, t). \quad (13)$$

식 (13)과 같이 점성 함수(viscosity function)만으로 유변학적 특성이 알려진 유체를 “일반화된 Newton 유체(generalized Newtonian fluid)”라 한다. 위와 같이 비-Newton 유체인 경우 마찰 인자는 전단율과 시간에 의존하며 시간과 전단율의 변화에 따른 특성에 따라 전단연화(shear-thinning), 전단후화(shear-thickening), 씩소트로픽(thixotropic), 리오펙틱(rheopectic) 그리고 기억 유체(memory fluid)로 구분할 수 있다. 여기서, 전단연화는 전단율이 증가함에 따라 점성계수가 감소하는 유체로 위소성(pseudo-plastic)이라고도 하며, 전단후화는 전단율이 증가함에 따라 점성계수가 증가하는 유체로 팽창성(dilatant)이라고도 한다. 또한, 씩소트로픽은 시간에 따라 점성계수가 증가하고 리오펙틱은 위와 반대로 점성

계수가 감소하는 유체이다. 한편 기억 유체는 응력과 변형구배 이력(history of deformation gradient)이 비선형적으로 나타나는 유체이며, 플라스틱 용융물, 단백질 용액 등에서 볼 수 있다

기억 유체 중에서 점성계수의 거동이 탄성과 같이 나타나는 유체를 점탄성 유체(viscoelastic fluid)라 하고 점탄성 유체에서 선형 점탄성 응답(linear viscoelastic response)을 나타내는 기계적 모형은 다음과 같다.

1) 선형 탄성(Hookean solid)

선형 탄성을 응력, 전단, 그리고 시간과의 관계로 나타낼 수 있으며, 이들의 관계를 나타내는 구성 방정식(constitutive equation)은 다음과 같다.

$$\tau = G\gamma . \quad (14)$$

여기서 τ 는 전단응력이며, G 는 전단 탄성 계수(shear modulus) 그리고 γ 는 전단 변형도이다.



2) 선형 점성(Newtonian fluid)

선형 점성은 일반적인 Newton 유체에서 나타나는 특성으로 다음과 같다.

$$\tau = \eta \dot{\gamma} . \quad (15)$$

3) Maxwell 유체(Maxwellian fluid)

Maxwell 유체 모델은 유체의 점성 거동과 탄성 거동의 적절한 조합으로 나타나며 그 구성 방정식은 다음과 같다.

$$\tau = \eta \dot{\gamma} - \lambda \dot{\tau} . \quad (16)$$

여기서 $\lambda = \eta/G$ 는 시간의 차원을 나타내고 있어 이완 시간(relaxation time)이라 한다. 그 이외에 점탄성 유체의 선형 점탄성 응답을 나타내는 모델로는 Voigt 모델 및 Maxwell 모델과 Voigt 모델을 조합한 모델 등이 있다.

이와 같이 점탄성 유체는 Newton 유체와는 달리 등봉 효과(rod climbing effect)나 마찰 저항 감소(drag reduction) 등의 현상들이 발생할 수 있으며, 정량적인 유체 유동의 해석이 매우 어렵다. 특히, 고분자 및 현탁액을 포함하는 유체의 정량적 해석 및 공학적 이용을 위해서는 점탄성 유체의 유동 현상에 관한 연구가 필요하며, 점탄성 유체의 광범위한 응용성으로 인하여 많은 연구가 수행되고 있다.

3. 마찰저항 감소의 현상학적 해석

초기에는 분자량이 증가함에 따라 마찰저항 감소효율이 증가한다고 생각은 하고 있었지만 정량적으로 이해하지는 못했다. 다시 말하면, 난류 유동과 고분자 동력학 자체가 아직 완벽하게 설명되지 못하고 있을 뿐만 아니라, 고분자의 마찰저항 감소의 기구를 설명하는 여러 이론들이 제안되고 있지만 광범위하고 보편적으로 받아들일 수 있는 모델이 나타나지 않고 있어 마찰저항 감소 현상은 연구의 여지가 많다고 할 수 있다. 초기의 연구에 의하면 마찰저항 감소의 개시점(고분자 용액이 첨가된 후에 처음으로 마찰저항 감소현상이 나타나는 지점)은 고분자의 종류, 측정 방법 및 실험의 기하학적 조건(testing geometry) 등의 차이에 따라 변하게 된다.

Hoyt(1972)는 상대적으로 낮은 Reynolds 수 부근에서 마찰저항 개시점이 발생한다고 하였고, 어떤 경우에는 층류와 난류의 천이 영역에서도 발생할 수 있다고 하였다.

고분자 용매 계가 유동 조건, 고분자 및 농도 사이에 특별한 조합으로는 더 이상 마찰저항 감소 효율을 증대시킬 수 없는데, 이를 최대 저항 감소 현상이라 한다. 즉, 유동 조건, 고분자 및 농도에 관계없이 최대 저항 감소의 경계점이 존재한다(Virk 등 1970). 그후 새로운 첨가제의 개발과 계속된 실험을 통해 이러한 최대 저항 감소 현상이 절대적인 현상으로는 받아들여지지 않고 있다(Berman 등 1978). 또한 응집된 시스템(aggregating system) 혹은 묽은 고분자 용액에 섬유 부유물을 첨가함으로써 Virk가 제시한 최대 저항 감소 효과보다 큰 마찰저항 감소 효과를 얻을 수 있다(Lee 등 1974).

그리고, 레이저를 이용한 난류 유동 연구(laser doppler anemometry, LDA)와 유동의 가시화를 통하여 마찰저항 감소제가 큰 척도(large scale)의 난류 운동뿐만 아니라 작은 척도(small scale)의 난류 운동에 동시에 영향을 주는 것을 보여주고 있는데, 일반적으로 관에서의 난류 유동은 관 벽과 인접한 곳에서 나타나는 층류 아층(laminar sublayer), 천이 영역(transient zone, buffer layer) 그리고 난류 중심 영역(turbulent core)으로 구분할 수 있으며, 고분자를 첨가함으로써 다른 두 층 사이에 존재하는 천이 영역의 두께를 증가시켜 벽 근처에 생성되고 성장하는 작은 교란과 반응한다(Virk 1975). 또한, 난류 유동에서 burst는 낮은 속도로 운동하고 있는 streak들의 들어올림(lift-up), 진동(oscillation) 그리고 분쇄(break-up)의 과정을 연속적으로 거치게 되는데 고분자를 첨가함으로써 streak와 burst 같이 규모가 비교적 큰 교란을 감소시켜 streak 사이의 간격을 증대시킨다(Elkelmann, 1985). 그 외에 유동 과정에서 기포 생성을 억제하고 진공부(cavitation)의 양을 감소시키며 열 및 물질 전달이 묽은 고분자 용액에서 급격히 감소하는 등 진공부, 신장 흐름 그리고 열 및 물질 전달에 영향을 줄 수 있다.

마찰저항 감소가 전적으로 벽 근처의 현상에 의한 것인지 혹은 유동 전체에 영향을 미쳐서 발생한 것인지에 대하여서는 논란의 여지가 있다. 이와 같이 마찰저항 감소제의 다양한 성질 및 고분자 용액의 동력학적 특성 그리고 아직 명확히 규명되지 않은 난류의 성질들로 인하여 마찰저항 감소 현상을 정확히 설명하기 위한 생성 메커니즘을 얻기는 매우 어렵다. 따라서 모델을 설정하고 거시적 유체역학에서 관찰된 변화의 특성과 분자적 관점에서 다양한 변수들의 관계를 나타내야 한다

4 마찰저항 감소의 이론적 해석

1) 초기의 모델

초기에는 벽면효과를 이용해서 마찰저항 감소 모델을 설명하고자 했다. 즉 벽에서의 미끄러짐, 벽 부근의 shear-thinning 층 혹은 벽에 흡착된 고분자 층의 효과로 마찰저항 감소 효과가 발생한다는 설명이었다. 그러나 이 벽면 효과 이론은 다양한 실험 조건에서 마찰저항 감소 효과를 설명하지 못했다. 고분자 용액은 이방성(non-isotropic) 점도를 가지므로 유

동 방향으로의 점성이 작게 나타나고 그 이외의 방향으로는 점성이 상대적으로 크게 나타나 난류의 요동(fluctuation)을 막아줌으로써 마찰저항 감소 효과를 얻을 수 있다. 그러나 이와 같은 이론은 법선 응력의 저항 감소를 설명하지는 못하고 있다. 일반적으로 분자가 응집된 덩어리(molecular aggregates)들에 의해 마찰저항 감소가 발생한다는 것은 명백히 밝혀졌으나, Virk 등(1967)에 따르면 극히 높은 독립된 거대 분자(macromolecular) 용액에서도 저항 감소가 일어난다.

고분자들이 잡아 늘려 지면서(stretching) 발생하는 저항으로 인해 난류가 억제되며, 거대 분자가 잡아 늘려 지거나 끊어지면서 난류 소용돌이(vorticity)의 운동 에너지를 흡수한다고 추론되고 있다(Peterin, 1971). 이와 같이 난류 유동에서의 고분자의 첨가는 난류 교란(turbulence disturbances)의 생성, 성장 또는 전파와 관련이 있다. 그리고 난류 유동장에서 고분자 사슬이 강하게 신장되면서 난류에서 발생하는 burst와 마찰저항을 감소시킨다. 즉, 거대 분자 등의 인장(extension)이 난류 억제에 관련이 있다는 이론이 최근의 연구에서 발표되고 있다. 이와 관련하여 Durst 등(1989)은 고분자의 신장과 마찰저항 감소의 관계를 FENE dumbbell model(Finitely Extendable Nonlinear Elastic dumbbell model)을 이용하여 설명하였다. 그러나 마찰저항 감소가 고분자의 인장에만 관계한다는 관점에서 마찰저항 감소를 설명하기에는 아직 미비한 점이 많다.

또한, 마찰저항 감소의 개시점 및 척도에 관련하여 길이, 시간 그리고 에너지의 관점에서 인위적인 모델을 설정할 수 있으며, 길이는 고분자 사슬의 길이 또는 관성 반경(radius of gyration)과 연관되고, 시간은 고분자의 이완 시간(relaxation time)과 연관되며, 에너지는 난류유동의 에너지 균형(energy balance)을 변화시키는 고분자의 특성과 관련된다.

2) 길이 척도(length scale)

길이 척도는 고분자 사슬의 길이 또는 관성 반경(radius of gyration)과 연관되는데, 마찰저항 감소의 개시점이 관성반경 R_g 에 관계한다고 보고 다음과 같이 제안하였다(Virk, 1975).

$$R_g^3 \tau_w^* = \Omega_1 \quad (17)$$

여기서, Ω_1 은 각각의 고분자-용매계에 대한 개시점 상수이고, τ_w^* 는 벽에서의 전단응력이다. 저항 감소의 개시점은 고분자와 난류 길이척도의 비(Γ)가 어떤 특정한 값에도 달할 때 저항 감소가 발생한다고 하였다

$$\Gamma = (2R_g/\eta)(\tau_w^*/\rho) \approx 0.0015 . \quad (18)$$

여기서 ρ 는 밀도(density), η 는 점성계수(viscosity)이다.

3) 시간 척도(time scale)

시간 척도(time scale) 이론은 고분자와 난류 유동의 시간 척도의 비가 1인 지점에서 마찰저항 감소가 시작된다는 것이며, 그 관계식은 다음과 같다(Lumley, 1973).

$$\tau_1 \gamma^* = \frac{M \eta_s [\eta]}{2.367 RT} = 1.0 . \quad (19)$$



여기서 τ_1 은 고분자 완화 시간, γ^* 는 개시 벽에서의 전단응력, M 은 고분자량, η_s 는 용매의 점도, $[\eta]$ 는 고분자의 고유 점도(intrinsic viscosity), R 은 기체상수, T 는 온도를 나타낸다. 위 관계식은 마찰저항 감소 메커니즘이 앞에서 언급하였던 거대 분자의 인장(extension)과 관련된다는 것을 설명하고 있다

시간 척도 이론을 통하여 거대 분자가 변형율 요동(fluctuating strain rate)으로 인하여 팽창되는 벽 전단응력의 임계값을 구하였다(Lumley, 1973). 그리고 거대 분자의 팽창이 점성의 증가를 극대화하고 작은 와류(eddy)의 확산을 방지하며 천이 영역으로부터의 운동량 전달을 방지한다고 보았다. 천이 영역에서의 와류 확산의 억제에는 층류 아층의 두께를 증가시켜 마찰저항을 감소시킨다 이와 같이 Lumley의 이론은 저항감소의 양상, 개시점, 분자량과의 관계, 속도 분포의 변화와 최대 저항감소 등을 설명할 수 있지만, 고분자와 용매의 상호작용과 고분자의 구조(back born)나 유연성(flexibility)과 같은 고분자 첨가제의 특성에 따른 마찰저항 감소 효과를 설명하지 못하고 있다. 또한 인장(extension)의 일시적인 성

질을 고려한 이론을 발표하였다(Ryskin, 1987).

4) 에너지 모델(energy model)

Walsh는 고분자가 난류 유동장에서 에너지 균형에 미치는 영향을 예측하기 위하여 Rouse 모델을 사용하였다(Walsh, 1967). 벽 근처의 점성 아층 끝에서 미세 교란이 발생하는 과정에서 와류는 고분자와 충돌하게 되며, 이때 고분자와 인접한 용매의 에너지 수용 능력은 미세 교란의 에너지 균형을 바꾸어 주며 약화된 교란은 주변의 용매에 의해 점성 소산(viscous dissipation)되어 사라진다. 즉, 고분자의 첨가로 미세 교란의 발생과 성장을 억제함으로써 벽 부근에서의 난류 유동을 변화시킨다. Walsh는 벽 근처에서 난류의 확산비에 대한 고분자 첨가제의 효과인 무차원 수 H 를 다음과 같이 정의하여 나타내었다.

$$H = \frac{\text{에너지 균형에 대한 고분자의 기여}}{\text{점성저층으로부터 천이영역까지의 에너지확산비}} \quad (20)$$

$$= \frac{8cM[\eta]^2\tau_w}{RT}$$



여기서 c 는 고분자 농도, M 은 분자량, $[\eta]$ 는 고유 점도, τ_w 는 벽에서의 전단응력, R 은 기체상수 그리고 T 는 온도를 나타낸다. Walsh는 $H \approx 0.01$ 일 때에 마찰저항 감소가 발생하고 난류 발생 비율과 고분자 에너지 저장 능력이 같아질 때, 즉 $H=1$ 에서 마찰저항 감소 효과가 최대값을 갖는다고 예상하였다. 또한, 폴리에틸렌옥사이드(polyethylene oxide · PEO) 수용액과 폴리이소부틸렌(polyisobutylene)을 용매로 하여 시클로헥산(cyclohexane)을 첨가한 용액의 실험에서 에너지 모델과의 잘 부합됨을 보였다.

한편, 3개의 모델에서 얻은 마찰저항 감소의 개시점을 실험 결과와 비교한 결과 적절하지 않다는 결론을 얻었으며, 고분자는 에너지 소멸원(energy sink)으로서 난류 유동의 국부적 응력과 반응한다고 제안하였다(Kohn, 1973). 고분자들은 변형을 통하여 난류 에너지를 저장하여 유동을 안정시키고, 고분자가 난류 영역을 벗어나면 이완되어 난류 에너지를 방출하는 과정을 반복하게 된다.

5) 탄성이론

De Gennes(1986)는 마찰저항 감소의 캐스케이드(cascade)이론을 통하여 Lumley 이론이 완전히 인장된 거대 분자의 강체 막대(rigid rod)와 같은 특정한 마찰저항 감소계에서만 적용된다는 문제점을 지적하고, 마찰저항 감소 효과가 발생할 수 있는 몇 가지 가설을 제안하였다. Gennes는 난류 에너지 소모에 대한 고분자 길이와 변형에 관련된 척도 이론(scaling theory)인 Kolmogorov 에너지 캐스케이드(energy cascade) 모델(Tennekes and Lumley, 1972)을 바탕으로 마찰저항 감소를 설명하려 하였다. 그리고 고분자의 점성 효과 보다는 탄성의 성질을 이용하여 이론적 해석을 시도하였다(de Gennes, 1990).

탄성 이론에 의하면, 각각의 고분자 코일의 탄성 에너지가 알려져 있다면 스프링과 같은 거동을 하며 분자의 탄성 에너지가 난류 교란에 의한 에너지와 같아지면 캐스케이드는 절단된다. 따라서 고분자의 국부 반경 정도의 국부 영역에서 난류를 억제하는 작용을 한다. 즉, 고분자가 포함되어 있는 와류의 크기를 r 이라 하고, 유체역학적 진동수와 고분자가 갖는 Zimm 이완율이 같아질 때의 와류의 크기를 r^* 이라 하였을 때 와류의 Reynolds 용력은 $r < r^*$ 인 조건에서 신장되어 탄성 에너지로 저장되고 고분자는 용력을 가지게 된다. r 의 크기가 작아지면 와류가 갖는 Reynolds 용력은 작아지고 고분자의 신장과 용력은 커지게 되며, 어떤 와류의 크기 r^{**} 에 이르면 두 용력은 같게 되어 r^{**} 보다 작은 와류의 생성은 억제된다. 여기서 r^{**} 를 탄성 한계라 한다.

De Gennes의 모델은 몇 가지의 가정을 포함하고 있는데, 먼저, 고분자는 부분적으로만 인장되며 가장 작은 Kolmogorov 와류들과 상호 작용하고, 분자가 완전히 늘어난 경우가 상대적으로 큰 규모의 교란과 상호 작용한다는 것이다. 이 경우는 Lumley의 시간 척도 이론과 일치한다 또한, 작은 방울(droplet)들이 일정하게 깨지고, 난류 영역에서 재형성된다는 two-phase 모델을 추론하였다. 작은 방울들의 탄성은 난류를 억제한다. 이와 같은 가정은 교질 입자의 시스템(micellar system)에 적용이 가능하다. De Gennes의 이론은 정량적인 해석보다는 정성적인 해석이며 실험에 의해 직접적인 측정이 불가능하다는 단점을 가지고 있으나 다양한 첨가물에 대한 마찰저항을 정성적으로 추측할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

이상에서 제안된 몇 가지의 마찰저항 감소 모델들은 개별적인 조건하에서의 실험을 통해 각각의 모델들을 뒷받침하고는 있지만 아직도 통일적이고 일반적인 마찰저항 감소 현상의 생성 메커니즘을 명백히 규명해주지는 못하고 있다.

IV. 실험 장치 및 실험 방법

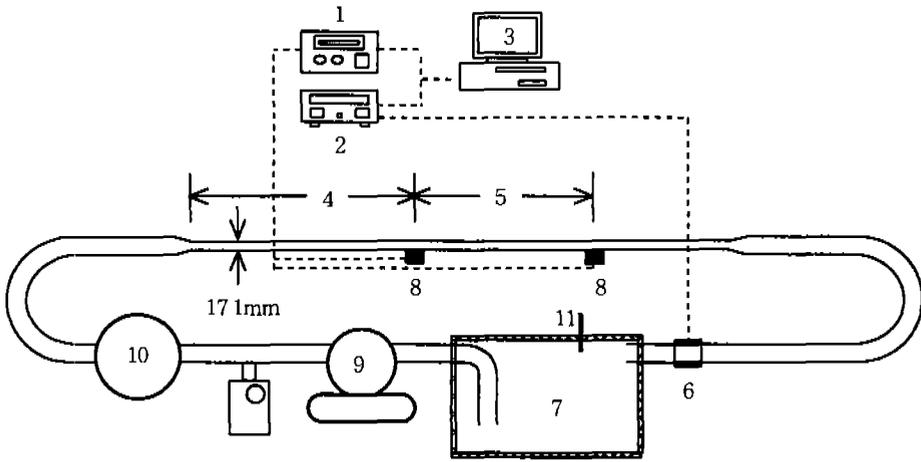
1. 순환회로의 구성

본 논문에서는 마찰저항 감소 효과를 측정하기 위해서 순환회로를 구성하였다. 순환회로를 구성함으로써 다양한 첨가물의 투입과 교체를 가능케 한다 그리고 유동조건을 조절이 용이하다. 본 연구에서는 유량을 공급하기 위한 펌프, 유량의 진동과 맥동을 안정화 시켜주기 위한 유동 안정화 탱크(surge tank), 플렉시블 호tm, 차압을 측정하기 위한 시험부(test section), 고분자 수용액의 순환에 있어 공급과 귀환을 위한 수조와 앞의 장치들을 연결하는 관으로 구성했다.

순환 회로는 크게 4부분으로 나눌 수 있는데 차압 측정을 하는 시험부, 시험부에 완전히 발달된 난류 유동장을 만들기 위해 확보하는 입구부, 유체를 순환시키기 위한 곡관부 그리고 펌프를 통해 유체의 속도를 제어할 수 있는 동력부로 나눌 수 있다

그런데 순환 회로는 고분자의 고착 등으로 인한 유동환경 변화가 없어야 하고 고분자 수용액의 종류를 자주 바꾸기 위해서는 세척이 용이해야 하며, 유량을 공급하는 펌프가 고분자 퇴화에 커다란 영향이 되어서는 안되며 유량을 안정적으로 공급할 수 있어야 한다

본 연구에서 구성한 순환회로는 Fig. 1과 같다. 그림을 통해서 수조에 담겨진 PEO를 펌프로 흡입하고 유동화 안전 탱크를 통해 진동과 맥동이 안정적이 되어 플렉시블 호스를 통과하고 시험부를 통해 차압이 측정되며 곡관부를 지나 수조로 돌아오기 전에 유량 센서를 통해 유속을 측정한다는 것을 알 수 있다.



1. differential pressure transducer 2. Doppler flow meter 3. PC
 4. entrance length (2000mm) 5. test section (2000mm)
 6. doppler flow meter sensor 7. water tank 8. pressure sensor
 9. Moineau pump 10. surge tank 11. Thermo meter

Fig. 1. Schematic diagram of the drag reduction test loop



Fig. 2. Front view of the drag reduction test loop



Fig. 3. Side view of the drag reduction test loop

시험부는 직경이 17.1mm인 동관을 사용하였고 차압을 측정하기 위해 3곳에 탭(tap)을 뚫었다. Fig. 4는 시험부를 도시한 것이다. 그런데 시험부 내의 유동 조건이 일정할 때 고분자 첨가에 의한 마찰저항 감소효과를 정확히 조사할 수 있으므로, 시험부 전 영역에 걸쳐 완전히 발달된(fully developed) 유동 영역을 확보해야 할 것이다. 보통 Newton 유체의 경우 층류 조건하에서는 입구길이(entrance length)가 지름의 100배 정도이나 난류에서는 지름의 20배 정도로 줄어든다. 그러나 고분자 화합물과 같이 비-Newton 유체의 경우에는 난류 유동의 경우일 지라도 입구길이가 매우 긴 특징을 가지고 있다. Cho와 Hartnett(1982)은 고분자의 경우 입구길이가 직경의 약 110배 정도가 되어야 한다고 보고하였다. 따라서 본 실험에서는 시험부의 입구 길이를 2000mm로 하였는데 이것은 직경의 약 116배가되므로 실험조건에 맞는다는 것을 알 수 있다. 그리고 탭 직경(d)은 관 직경(D)에 3/10(0.3) 이내로 가공해야 하는 것으로 알려져 있다. 본 실험에서는 탭을 직경 1.5mm($d/D=0.09$)로 가공하여 제작하였고 1000mm의 간격으로 탭을 뚫었다. 따라서 본 실험의 시험부의 전체 길이는 입구부 3000mm, 차압 측정부 2000mm 그리고 출구부 1000mm를 합친 6000mm이다. 출구부를 1000mm로 한 이유는 혼적류(wake)의 영향을 방지하기 위해서 이다.

유량을 가변하기 위해서는 펌프에 내장된 RPM 조절 장치를 이용하였다. 그리고 펌프를 구동 할 때 자체적으로 맥동이 생성된다. 이는 유량을 측정할 때 진동 현상을 일으키게 된다. 따라서 이런 진동 현상을 완화시키기 위해서 유동 안정화 탱크(surge tank)를 설치하였으며 (Fig. 5참조), 시험부를 제외한 부분을 플렉시블 호스를 이용하여 맥동의 전달을 최소화하였다.

수조의 크기는 650×1200×600mm로 하였으며 재질은 스테인레스 스틸을 사용하여 고분자 수용액의 오염을 방지하였다.

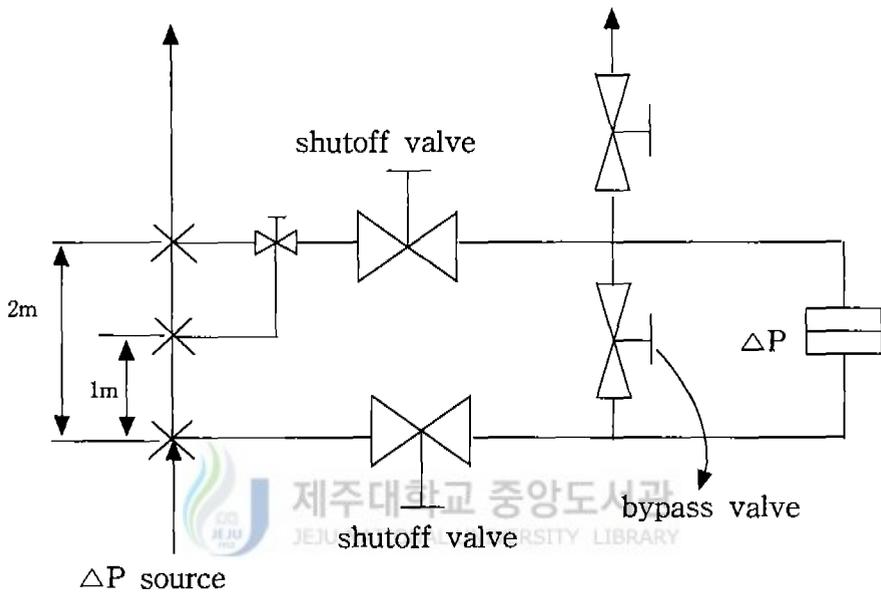


Fig. 4. The circuit for differential pressure measurement



Fig. 5. Surge tank

2. 실험장치

1) 펌프

펌프는 고분자 퇴화에 영향이 적은 것으로 알려진 모노 펌프(Moineau pump)를 사용하였다(참고 Fig. 6). 이 펌프는 추진 공동형(Progressing Cavity) 펌프로써 정지해 있는 stator 내부에 나선형의 금속 rotor가 stator와 정밀한 공차를 유지하며 회전한다. 즉 stator와 rotor에 에워싸여진 체적공간들이 이동하며 액체를 이송하고 새롭게 발생한 공간이 진공으로 형성되어 다음 액체를 흡입한다.

이 펌프의 특징은 다음과 같다.

- ① 정량성과 가변용량이 용이하다.
- ② 강력한 자흡력이 있다. (수주 약 10m)
- ③ 고농도액, 고점도액, 고형물을 함유한 액을 이송한다.
- ④ 정, 역 방향 모두를 자유로이 사용할 수 있다.
- ⑤ 공기도 함께 흡입하여 송출할 수 있다.
- ⑥ 유체의 입자에 손상이 적다.
- ⑦ 소음이 거의 없다.
- ⑧ 구조가 간단하며 부품이 적어 분해조립이 용이하다.

특히 ⑥ 항의 특징은 본 연구에서 고분자 퇴화를 방지하는 역할을 할 수 있게 해준다.

2) 초음파 유량계

고분자 화합물을 첨가한 유체의 속도를 측정하고자 할 때 고분자 화합물의 퇴화를 최소한으로 줄일 수 있는 유량 측정장치가 필요하다. 일반적으로 유량 측정시 오리피스형 유량계나 터빈 유량계의 사용이 일반적이다. 그러나 본 실험에서 유동에 방해가 주면 안되기 때문에 유동 물질과 접촉하지 않는 방식이 가장 적절하다. 이러한 조건을 만족하는 유량계로는 초음파를 이용한 유량계가 적절할 것이다. 초음파 유량계는 펄스식 유량계와 도플러식 유량계가 있다. 펄스식 유량계(Fig. 7 (a))는 상류지점 A에서

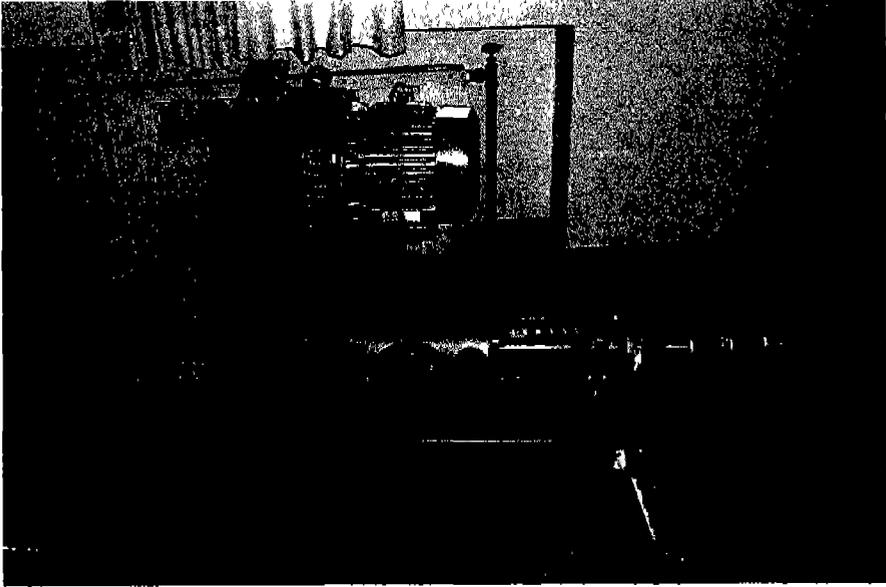


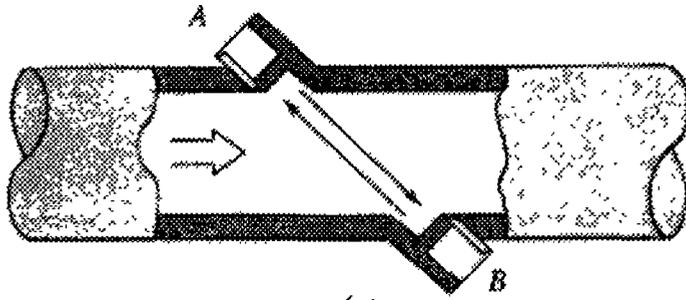
Fig. 6. Moineau pump

압전변환기에 의해 음파가 발생되고 유체를 지나 하류지점 B에 보내진다. B에 도착한 음파는 A에서 또 다른 음파를 발생하여 주파수 f_A 인 음파가 계속 발생한다 이와 같은 방법으로 B에서도 주파수 f_B 의 음파가 발생된다. 이때 $f_A - f_B$ 는 유량에 비례하게 된다. (Fig. 7 (b))에는 도플러식 배열을 보이고 있으며 음파는 발생기 T에서 발생되어 유체 내의 이물질에 의해 산란된 후 집음기 R에 도착된다. 이때, 도플러 원리에 의해 주파수는 변하게 되어 유량에 비례하게 된다. 초음파 유량계는 삼입식이 아니고 파이프에 고정된다. 계측의 불확실성은 $\pm 1\sim 2\%$ 이나 속도 분포의 특성, 유체온도, Reynolds 수에 따라 $\pm 5\%$ 정도 증가하기도 한다.

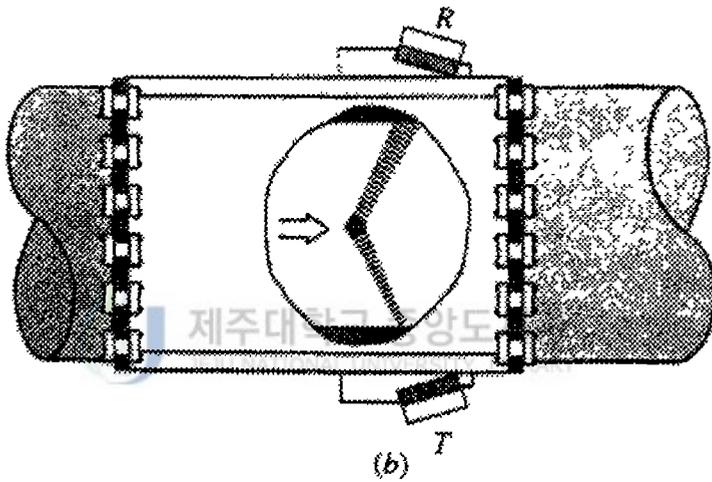
본 실험에서 사용한 초음파 유량계는 측정범위가 0.03~9.1m/sec 이며 크게 초음파 발생부, 신호 습득을 위한 센서부와 신호를 해석하고 유량을 보여줄 수 있는 모니터 부분으로 나뉜다(Fig. 8, 9 참고)

도플러 초음파 유량계는 초음파의 도플러 현상을 이용하여 유량을 측정하는 방식이기 때문에 특성상 유동 물질에 따라 초음파 신호의 반사량이 다르기 때문에 유량 측정에 있어 반드시 보정이 필요하다. 유량계의 보정은 유량이 안정되도록 일정 시간이 흐른 후 용량이 표시된 수조에 일정 시간동안 고분자 수용액을 저장하고 유량계의 유량과 수조의 유량을 비교하여 같은 값이 될 때까지 유량계의 각종 변수들을 변화시키면서 보정과정을 수행하였다.

유량계의 센서 부분의 설치는 순환회로에서 출구 측의 관에 설치하여 측정하였다. 또한 전자 기기의 전자 신호에 의한 간섭이 예상되므로 초음파 신호에 최대한 영향을 주지 않기 위해 각종 계측 장비 및 전자기기를 1m 이상 멀리 설치하여 사용하였다. 유량 측정 센서 부분은 관의 크기에 따라 설치 방법이 달라지는데 관의 직경이 8in(200mm) 이상인 경우에는 두 개의 센서를 파이프의 같은 위치에 같은 방향을 향하도록 설치 해야 하며 8in 이하인 경우에는 두 개의 센서 헤드의 방향의 유량의 중심을 향하도록 맞춘다(3시 방향의 위치나 9시 방향의 위치) 본 실험에서는 관의 직경이 22.3mm로 8in 이하이다. 따라서 Fig. 9에서 보듯이 센서가 서로 마주보도록 설치하였다.



(a)



(b)

Fig. 7. Ultrasonic flowmeters: (a) pulse type; (b) doppler-shift type

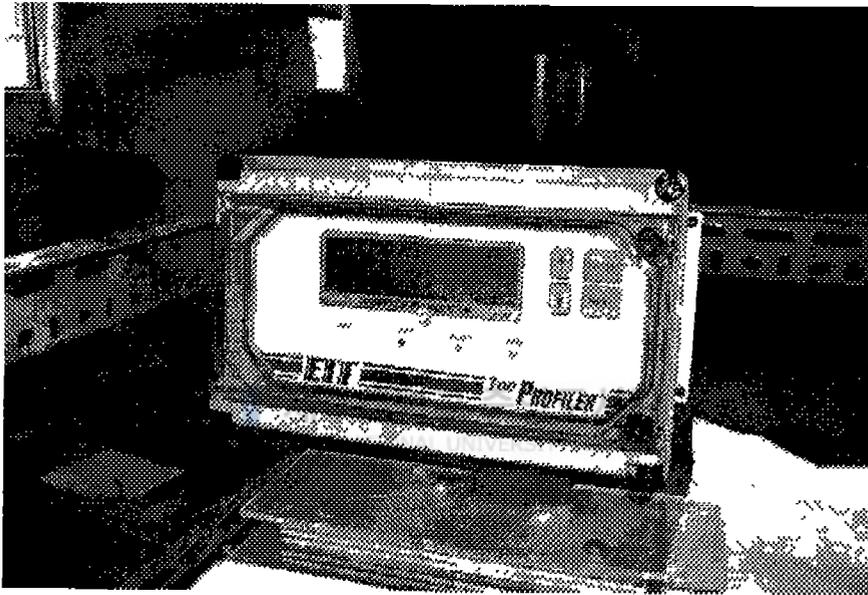


Fig. 8. Doppler flow meter

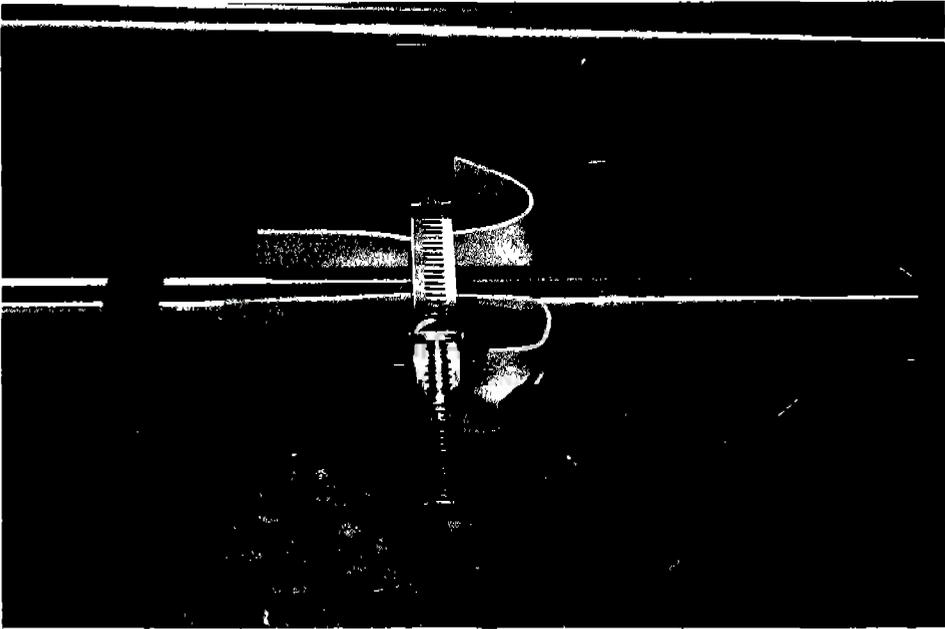


Fig. 9. The sensor of Doppler flow meter

3) 차압 측정기

본 실험에서는 Validyne 사(Model DP15-TL)의 다이어프램(diaphragm)식 차압계를 사용하였다. 이 차압계는 차압의 범위에 따라 다이어프램(diaphragm)을 교체하여 사용하도록 설계되어있다. Fig. 10에서 Pressure port를 통해 나온 압력의 차는 diaphragm을 낮은 압력 쪽으로 편향시키는데 이때 한쪽의 공백은 감소하고 나머지는 증가하게 한다. 이런 현상으로 인해 자기저항이 변하고 또 각각의 coil의 inductance 값이 변하면서 결국 diaphragm 편향이 증가하면 한쪽 coil의 inductance는 증가하고 나머지는 감소하게 한다. 이 차를 통해서 차압을 측정할 수 있다.

본 실험에서 차압을 측정하기 위해 순환회로의 시험부에 압력 탭(tap)을 3곳에 뚫고 차압계에 탭에 연결된 호스를 연결하고 차압을 측정하였다. 각각의 탭간의 거리는 1m, 2m로 하여 두 곳에서 차압을 측정 할 수 있도록 하였다. 이 두 차압을 비교하면 측정된 차압을 검증할 수도 있다.

Fig. 4와 Fig. 10은 실제 차압을 측정할 때 필요한 회로를 나타낸 그림과 사진이다. 이 차압측정 회로를 보면 바이패스 밸브(bypass valve) 및 차단 밸브(shutoff valve)가 동시에 개방되었을 때는 차압계에 차압이 발생하지 않는다. 바이패스 밸브를 닫았을 때 양쪽 탭(tap)사이의 차압이 생기는데 이때 차압을 측정할 수 있다. 그리고 배수 밸브(drain valve)는 작동유체를 교체 할 때 잔류하고 있는 유체를 세척하기 위해 사용된다. 본 실험에서는 고분자화합물을 세척할 때 사용한다.

본 실험에서 사용한 차압계는 차압을 측정하기 전에 시험부에서 발생하는 압력 강하를 예상하고 그에 따른 다이어프램의 level을 선택하여 사용해야 한다. 그리고 차압을 측정하기 전에 압력 보정기(pressure calibrator)를 사용하여 차압계를 보정해야 한다. 사용한 압력보정기는 Beamex 사 PC-104와 PG 300V를 사용하여 압력을 보정하였다. 압력의 보정범위는 0~4bar로 하였으며 측정된 차압은 인디케이터(Validyne 사 Mode CD15)를 설치해서 직접 볼수 있도록 하였다. 또한 동시에 차압계의 신호를 A/D 변환 및 PC와 인터페이스 기능을 가진 PCL-818HG를 이용하여 실시간으로 PC에 저장하였다.



Fig. 10. The circuit for differential pressure measurement(Photo.)

4) 온도 측정기

고분자 화합물은 온도가 증가할수록 그 퇴화정도도 증가한다 그리고 온도는 점성계수와 같은 물질의 물성에 많은 영향을 끼친다. 따라서 실험 과정에서 온도의 영향을 고려하였다. 그런데 마찰저항 감소 현상을 관찰하기 위한 실험 수행 시간은 3분 이내였고 이때의 온도 변화는 1°C 미만으로 매우 작게 나타났다 따라서 온도에 의한 영향은 거의 무시할 수 있었다. 본 실험에서 사용한 온도계는(Autonics 사 Model TZ4SP)를 이용하여 측정하였다

5) 데이터 습득 장치

실험 과정 중 생산되는 데이터를 저장하고 신호를 필요한 변수로 변환하기 위하여, A/D 변환 기능과 인터페이스 기능을 가진 PCL-818HG를 PC에 내장하고 데이터 습득 및 저장을 위한 프로그램을 작성하여 차압, 유량 등의 데이터를 모두 실시간으로 저장하였다. 각각의 실험 조건에 따라 유량 및 차압을 0.5초 간격으로 300번의 데이터를 취득하여 이를 평균하여 사용하였다.

측정된 유량 및 차압을 이용하여 시험부 내의 유속, Reynolds 수, 마찰 인자 등을 계산하였으며 프로그램의 순서도는 Fig. 11과 같다. 그리고 Fig. 12는 유량계, 차압계, inverter 등이 연결된 데이터 습득 장치를 보여주고 있다.

6) 마찰인자의 계산

마찰인자(friction factor)를 계산하기 위해서는 시험부내의 유속과 이를 바탕으로 Re 수를 계산하고 Darcy 마찰 인자 식에 대입한다.

(1) 시험부내의 유속

시험부 내의 관 직경과 유량 측정부 내의 관 직경이 다르기 때문에 시험부 내의 유속을 계산하기 위해서는, 다음과 같이 측정된 유속 정보를 이용하여 다음과 같이 구하여야 한다

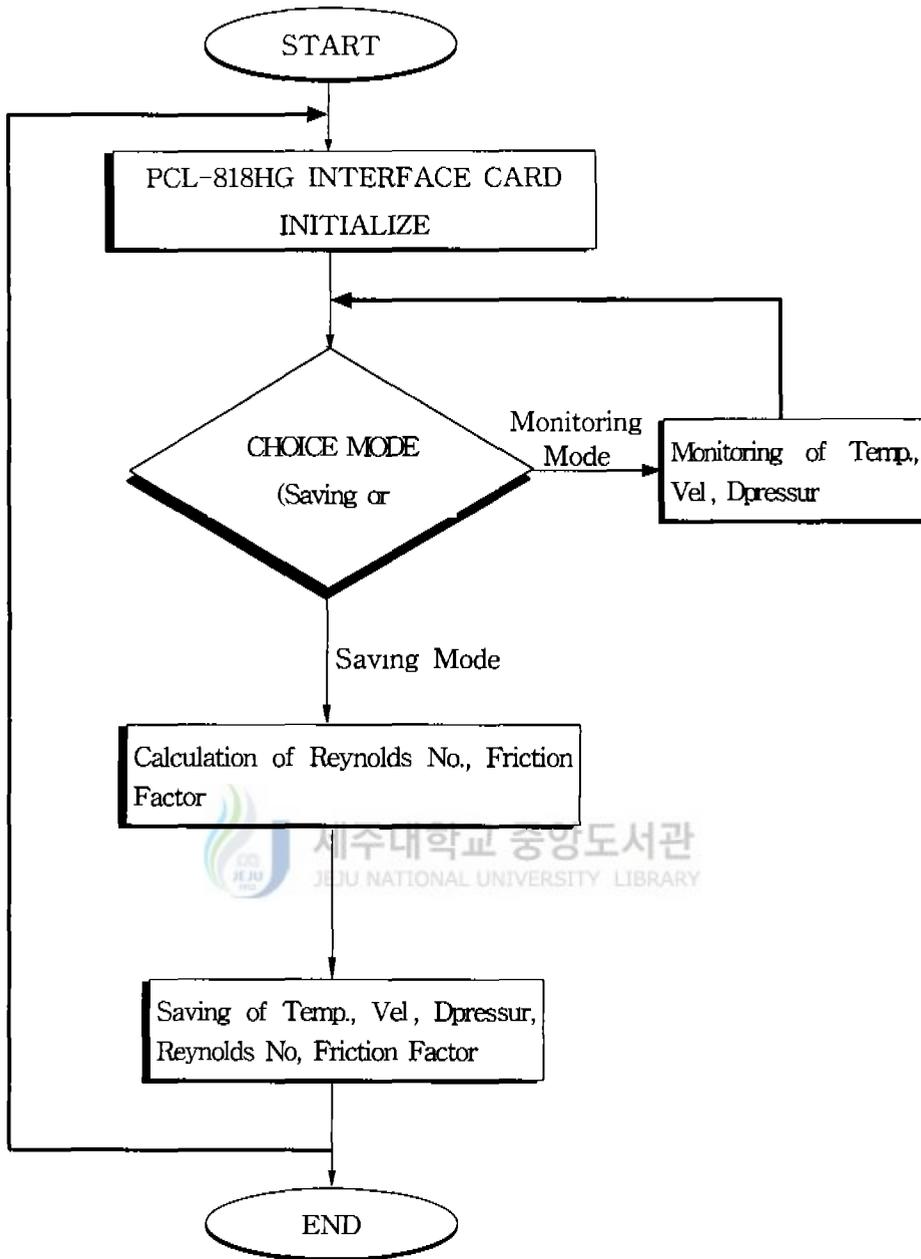


Fig. 11. Flow chart on data acquisition

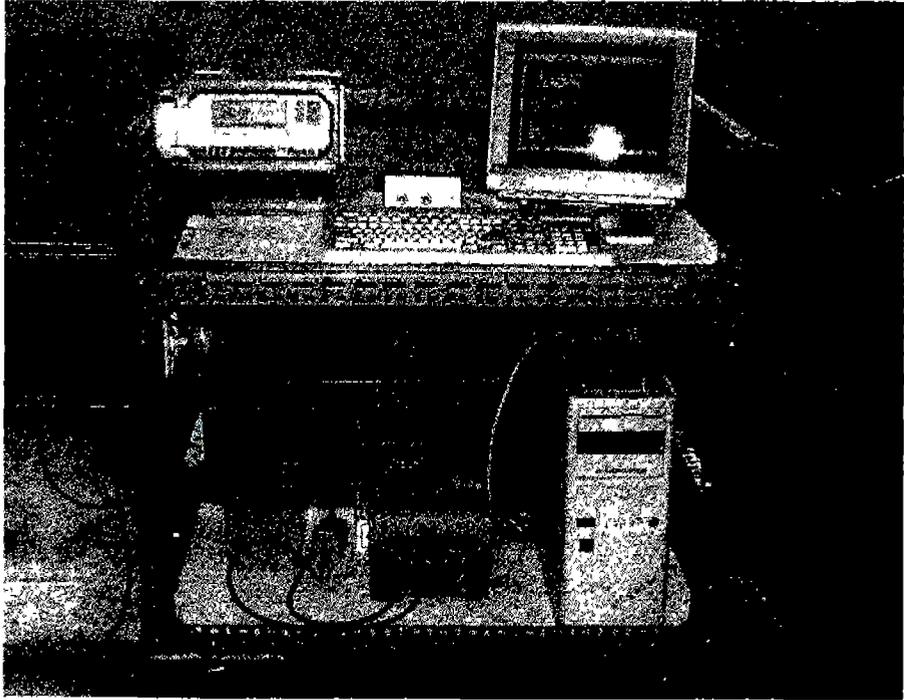


Fig. 12. Data acquisition system

$$Q = V_1 A_1 = V_2 A_2 \quad (21)$$

V_1 과 V_2 는 각각 초음파 유량계로 측정된 유속과 시험부의 유속이며, A_1 과 A_2 는 각각 측정부와 시험부에서의 유동 단면적이다

(2) Reynolds 수

Reynolds 수는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$Re = \frac{\rho V_2 D_2}{\mu} = \frac{V_2 D_2}{\nu} \quad (22)$$

위에서 보듯이 Reynolds 수를 계산하기 위해서는 동점성계수 ν , 유속 V_2 그리고 관 직경 D 가 필요한데 유속은 위의 과정에서 계산되었고 관 직경은 이미 알려져 있다. 반면 점성계수의 경우 온도의 영향이 매우 크므로, 다음의 식을 이용하여 계산하였다.

$0 \leq T \leq 100^\circ\text{C}$ 범위에서의 물에 대한 권장식 (White, 1994):

$$\rho(\text{kg}/\text{m}^3) \approx 1000 - 0.0178|T^\circ\text{C} - 4^\circ\text{C}|^{1.7} \pm 0.2\%$$

$$\ln \frac{\mu}{\mu_0} \approx -1.704 - 5.306z + 7.003z^2 \quad (23)$$

$$z = \frac{273\text{K}}{T\text{K}} \quad \mu_0 = 1.788 \text{E} - 3 \text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$$

(3) 마찰 인자

마찰저항 감소 효과는 식 (10)과 같이 계산되며 물일 때의 마찰 인자와 고분자 첨가시의 마찰 인자의 값이 필요하게 된다. 마찰 인자는 관 유동에서 Darcy의 마찰 인자(friction factor)로서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$f_D = \frac{8\tau_w}{\rho v^2} = \frac{2D}{\rho v^2} \frac{\Delta P}{L} \quad (24)$$

여기서 밀도 ρ , 직경 D , 및 길이 L 은 이미 알려진 값이며 ΔP 는 차압계에서 측정된 값이다.

3. 실험방법

마찰저항 감소 효과를 얻을 수 있는 물질로는 고분자 첨가제, 용매에 녹지 않는 고체입자 분산체, 생분해성 첨가제, 계면활성제 등이 있다. 본 연구에서는 고분자 첨가제를 사용하였는데 이는 고분자 첨가제가 마찰저항 감소 효과가 다른 물질에 비해 쉽게 관찰할 수 있고 산업적으로 이용 범위가 넓으며 쉽게 구할 수 있다는 장점이 있다. 또한 고분자 첨가제는 고분자의 종류, 분자량, 농도 등에 따라 마찰저항 감소 효과의 특성이 매우 다르다.

본 실험에서 사용한 고분자 종류는 폴리에틸렌옥사이드(polyethylene oxide: PEO) 계열이며 용매를 물로 하여 고분자 수용액을 제조하였다. 본 실험에서 사용한 고분자 수용액의 분자량 및 농도를 Table 4에 나타내었다

Table 4. Molecular Weights and concentrations of PEO

PEO 분자량	2×10^5	4×10^5	9×10^5	4×10^6
농도(wppm)	1,5,10,20	1,5,10,20	1,5,10,20	1,5,10,20

고분자의 경우 물에 잘 녹지 않는 특성을 가지고 있다. 따라서 고분자 화합물 첨가제를 직접 수조에서 희석할 경우 고분자가 완전히 녹지 않아 일정한 농도를 얻을 수 없으므로 정확한 마찰저항 감소 효과를 조사하는데 문제가 발생하게 된다. 따라서 고분자 수용액은 교반기에 물 5000ml와 5~10g 정도의 고분자를 1~2시간 정도 교반하여 고농도의 고분자 수용액을 제조하였다(Fig. 13 참조). 제조된 고농도의 고분자 수용액을 최종적으로 실험하고자 하는 농도에 알맞게 수조에 희석하여 실험을 수행하였다. 고농도 고분자 수용액의 제조에 사용한 교반기는 자석식 교반기로 Vision Scientific 사의 KMC-130SH형을 사용하였다

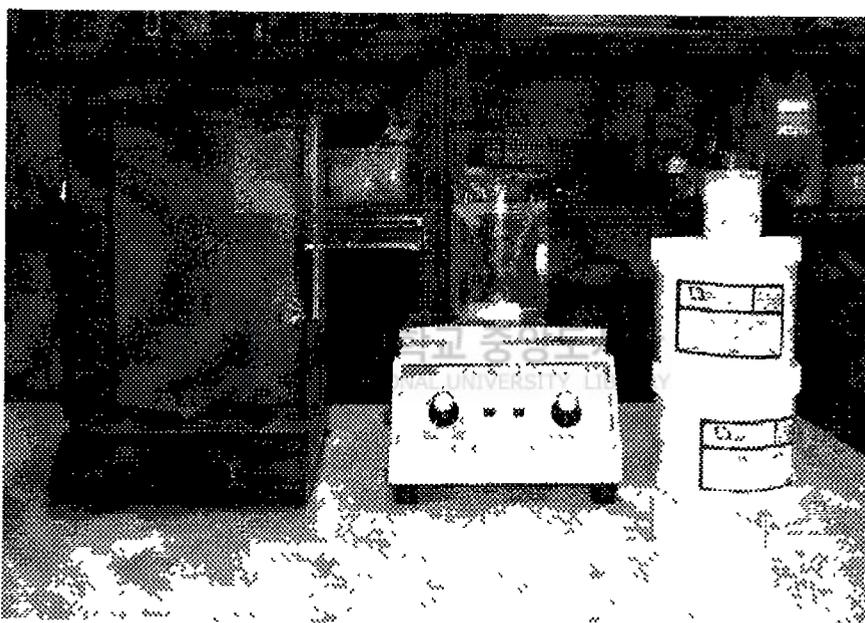


Fig. 13. Photo. of weighing balance, polymers(PEO) and hot plate magnetic stirrer

V. 결 론

본 연구에서는 고분자 수용액의 분자량, 농도 그리고 유동 조건의 변화에 따라 마찰저항 감소 효과를 조사하였다. 본 실험에 있어 가장 먼저 수행한 것은 순수 용매만을 이용해서 유량 및 유속을 측정하여 마찰 인자를 계산하였다. 그리고 이 마찰 인자를 기준으로 마찰저항 감소 효과를 비교하기 위해 다양한 고분자 수용액을 이용하여 유량 및 유속을 측정하여 마찰 인자를 구하였다.

본 연구에서 수행한 고분자 수용액의 농도 범위는 1~20wppm 이며 Reynolds 수의 범위는 30,000~60,000이었다.

1. 물에 대한 기초 실험

우선 고분자 화합물을 첨가하지 않은 순수한 물만을 가지고 기초실험을 수행하였다. 이 기초 실험을 통해 실험에 사용된 시험부의 표면 조도(roughness)를 구하고 이 실험에 쓰인 계측기와 실험 장치에 대한 검증을 하였다.

작동 유체로 물을 사용하여 Reynolds 수 30,000~60,000 범위에서 마찰 인자를 측정하여 Haaland 상관식(White, 1994)

$$\frac{1}{f_a^{1/2}} \approx -1.8 \log \left[\frac{6.9}{Re_d} + \left(\frac{\epsilon/d}{3.7} \right)^{1.11} \right] \quad (25)$$

과 비교한 결과, Fig. 14에서 보듯이 본 시스템 시험부의 표면 조도가 0.00085mm로 나타났다 따라서, 마찰저항 감소율을 계산하기 위해 사용할 물의 마찰 인자는 표면 조도가 0.00085mm일 때의 Haaland 식

$$f_s = -0.004699 \log(Re) + 0.07174 \quad (26)$$

을 이용하여 얻는다. 그리고 고분자 화합물 첨가제를 첨가하고 마찰 인자를 실험적으로

구한 다음 식 (10)을 이용하여 마찰 저항 감소율을 얻었다.

2. 마찰저항 감소 실험 결과

Fig. 15~18은 각각 PEO 분자량이 2×10^5 , 4×10^5 , 9×10^5 , 4×10^6 일 때 PEO 농도에 따른 마찰 인자와 마찰저항 감소(drag reduction : DR) 비율을 보여주고 있다. 사용된 농도는 앞에서 언급한대로 1, 5, 10, 20 wppm 이다.

그림에서 보듯이 PEO를 첨가하면 유동의 마찰 인자는 뚜렷이 감소하는 경향을 보인다. 그러나 분자량에 따라 최소 마찰 인자를 나타내는 농도가 서로 다르며, 분자량 2×10^5 , 4×10^5 , 9×10^5 , 4×10^6 에 대해 각각 10, 20, 1, 20 wppm에서 최소 마찰저항 감소 효과를 얻었다. 즉, 분자량에 따라 최적의 DR을 얻을 수 있는 농도가 존재한다고 할 수 있다

본 실험 구간에서 Reynolds 수가 증가하면 DR은 대체로 완만히 증가한다. 그러나 분자량 4×10^6 , 농도 20 wppm에서는 $Re = 50,000$ 부근에서 DR이 급격히 증가하는 것을 관찰하였다.(Fig. 17 (b))

본 실험 범위에서 DR은 대체로 20% 정도까지 얻을 수 있었으며, 분자량 4×10^6 , 농도 20 wppm에서는 최대 50%의 DR을 얻을 수 있었다.

Fig. 18에서는 (분자량 4×10^6) 대부분의 분자량에서 Reynolds 수에 관계없이 일정한 DR효과를 보이고 있으나, 농도 20wppm의 경우에는 Reynolds 수가 약 50,000을 넘어설 때 DR이 급격히 증가하는 것을 보여주고 있다. 이는 분자량이 다른 PEO 보다 4~5배정도 높기 때문일 것이다.

PEO 농도가 주어졌을 때, 분자량에 따른 마찰저항 감소 경향을 Fig. 19에 나타내었다. 농도 1 wppm에서는 분자량 분자량이 클수록 DR이 증가하나 10 wppm에서는 분자량이 낮은 2×10^5 이 최대 DR을 나타내었다 따라서 분자량이 2×10^5 인 PEO를 사용할 때는 10wppm의 비율로 수용액에 첨가할 때 가장 좋은 마찰저항 감소의 효율을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구를 통해서 전체적으로 분자량이 가장 큰 4×10^6 인 경우가 DR 효과를 크게 나타내고 있다 이를 볼 때 대체적으로 분자량이 높을수록 그리고 Reynolds 수가 높을수록, 높은 DR을 보일 것으로 예상할 수 있었다.

그러므로 산업적으로 높은 Reynolds 수(50,000 이상)를 필요로 하는 유동에서는 높은 분자량의 polymer를 이용하는 것이 energy 효율에 많은 도움이 될 것으로 기대된다.



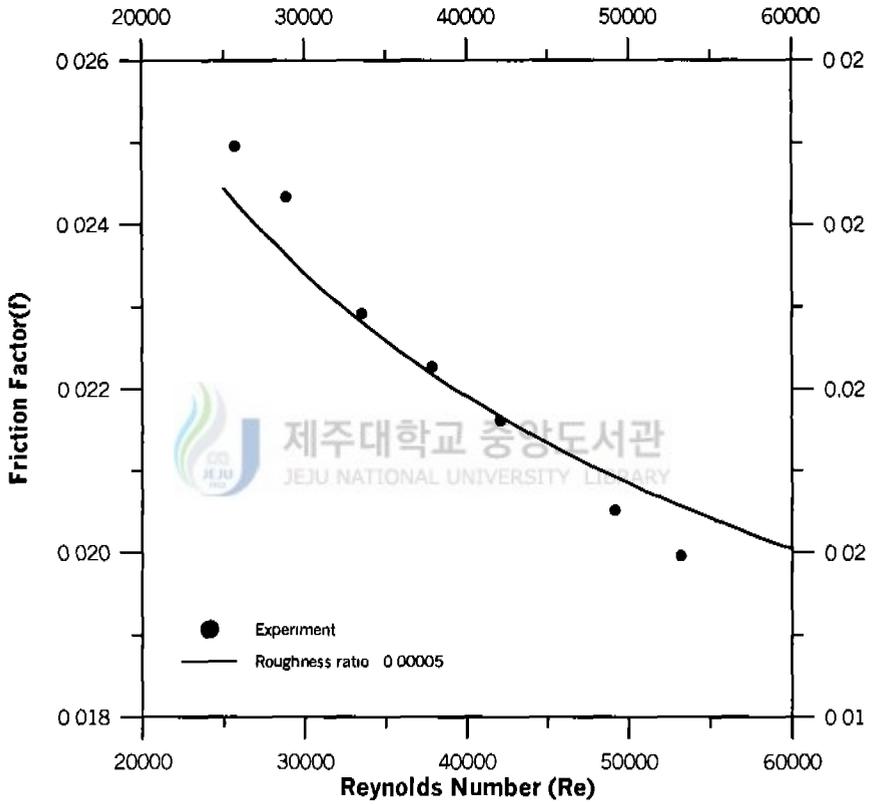


Fig. 14. Friction factors for pure water

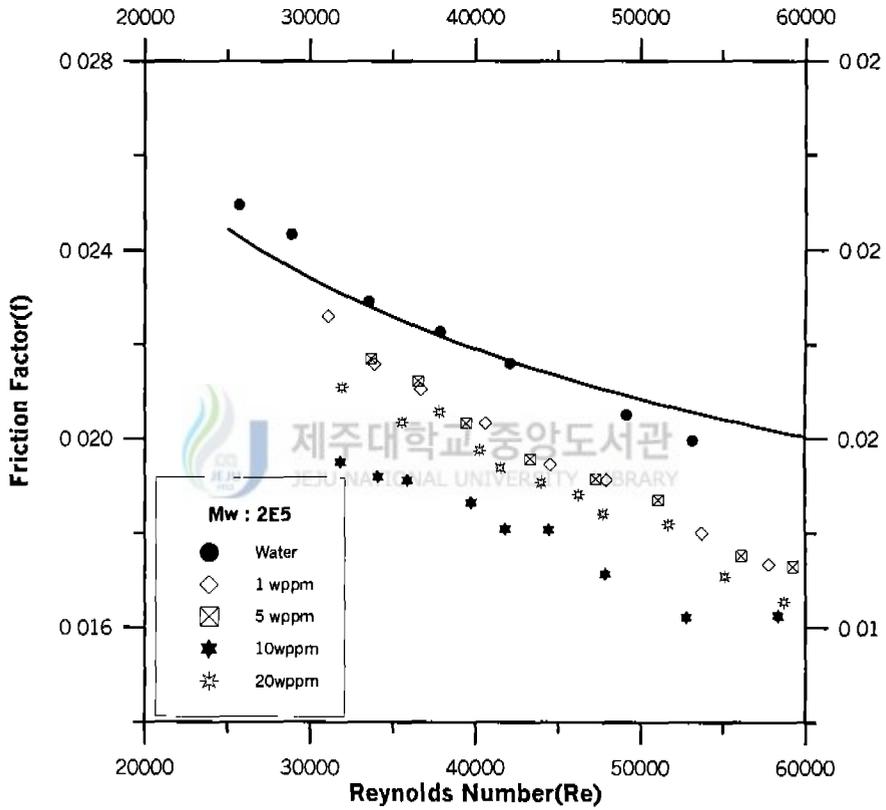


Fig. 15. (a) Friction factor with PEO ($M_w: 2 \times 10^5$)

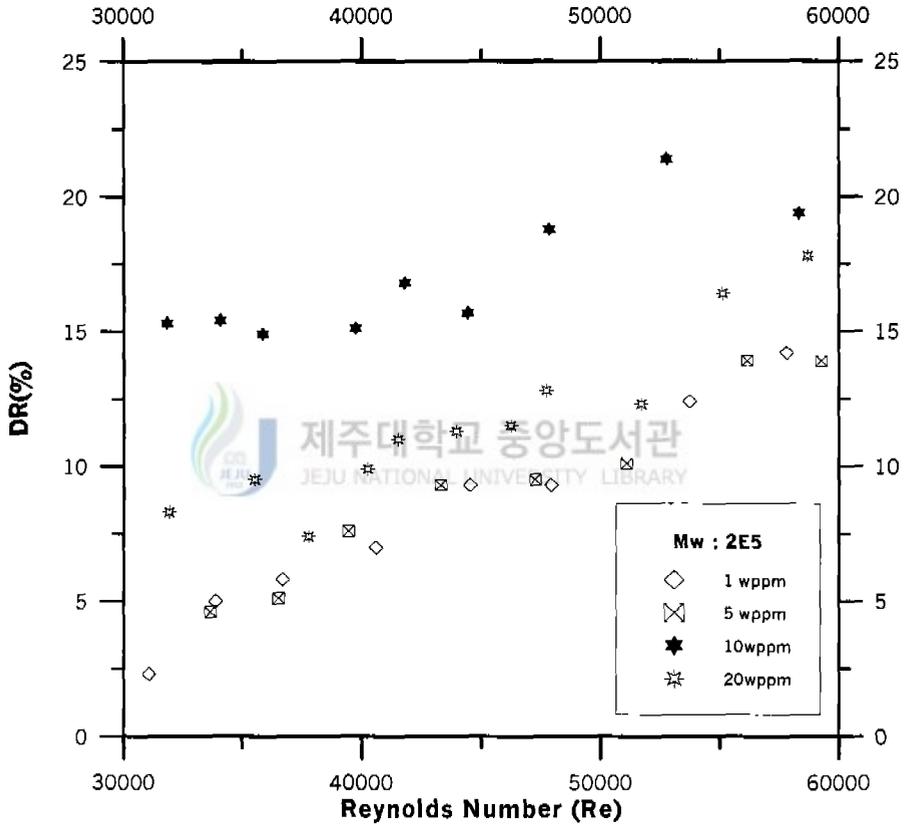


Fig. 15. (b) Drag reduction with PEO ($M_w: 2 \times 10^5$)

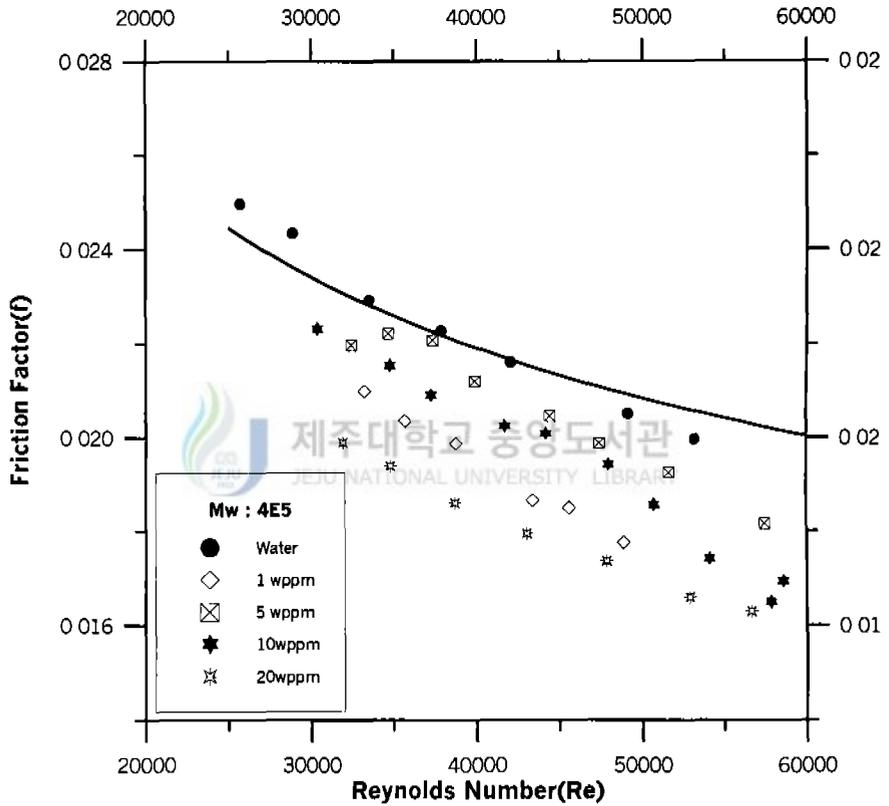


Fig. 16. (a) Friction factor with PEO (Mw: 4×10^5)

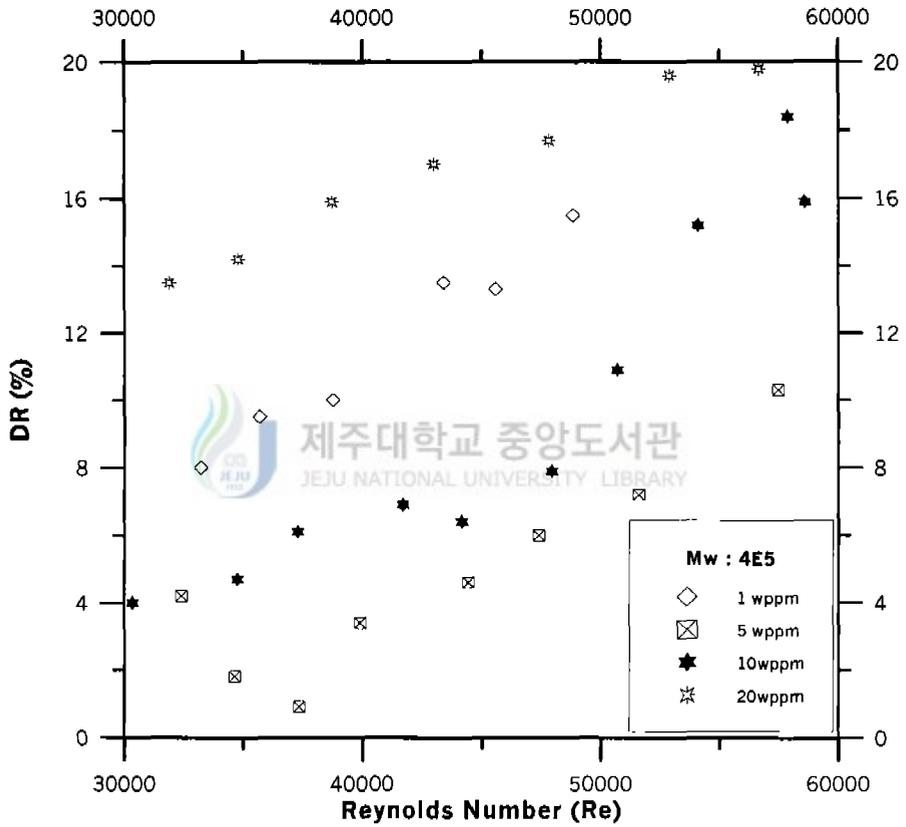


Fig. 16. (b) Drag reduction with PEO ($M_w: 4 \times 10^5$)

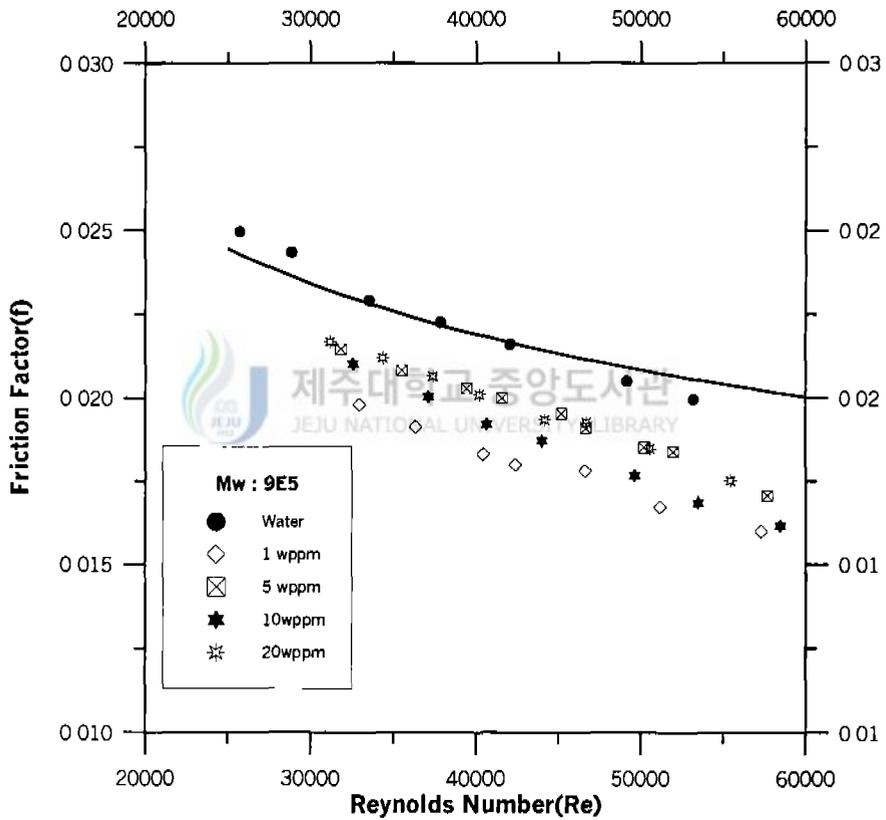


Fig. 17. (a) Friction factor with PEO ($M_w: 9 \times 10^5$)

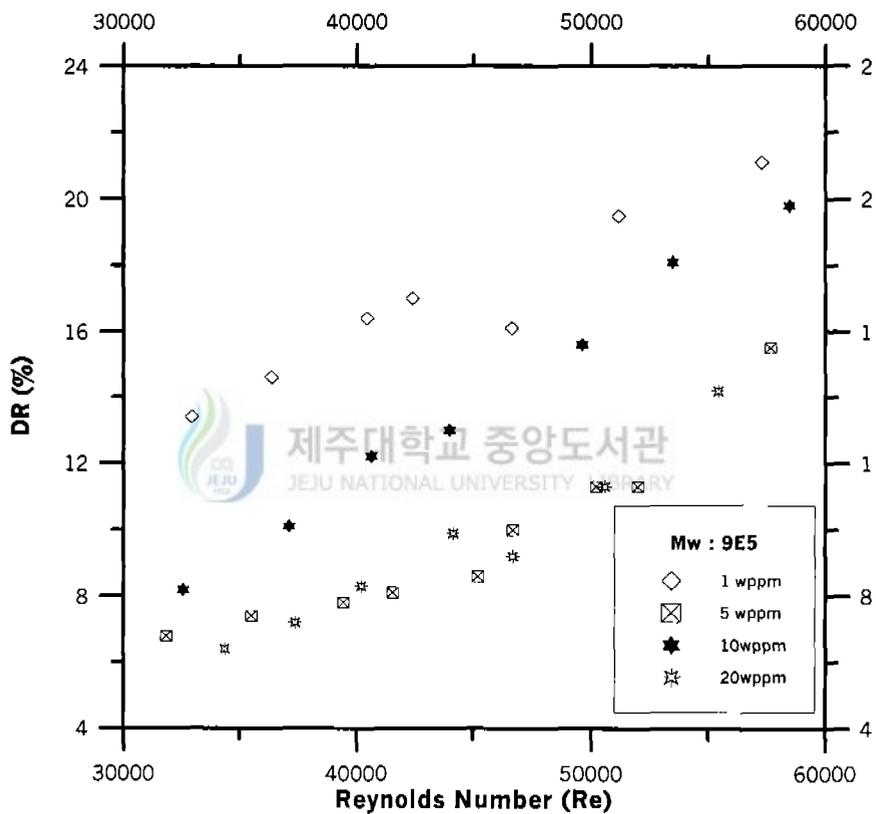


Fig. 17. (b) Drag reduction with PEO ($M_w: 9 \times 10^5$)

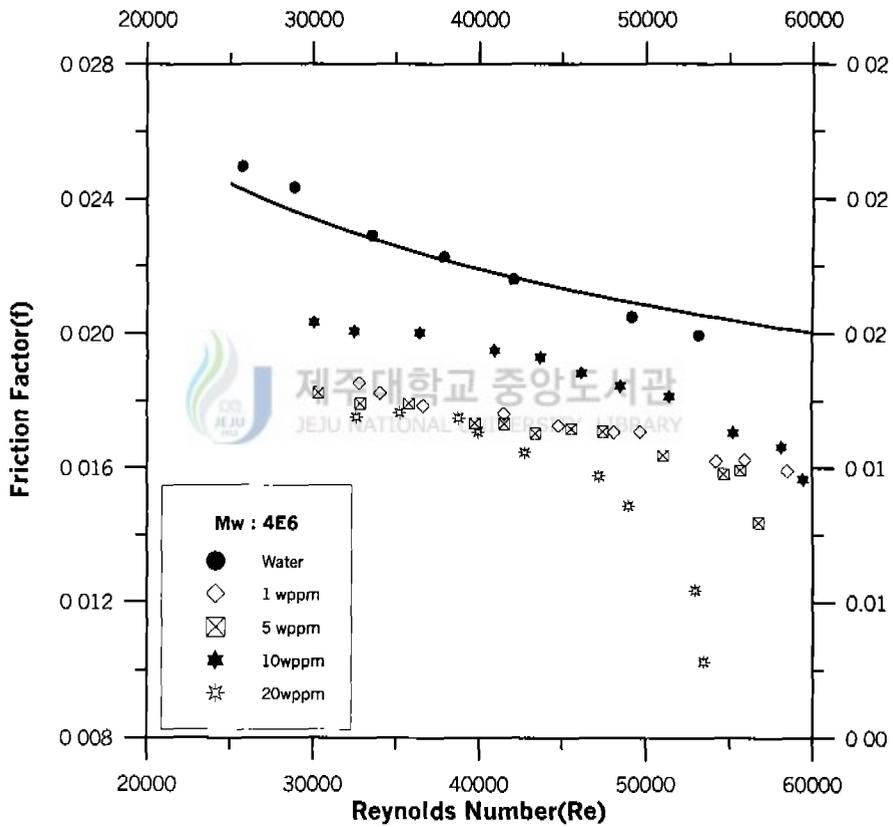


Fig. 18. (a) Friction factor with PEO ($M_w: 4 \times 10^6$)

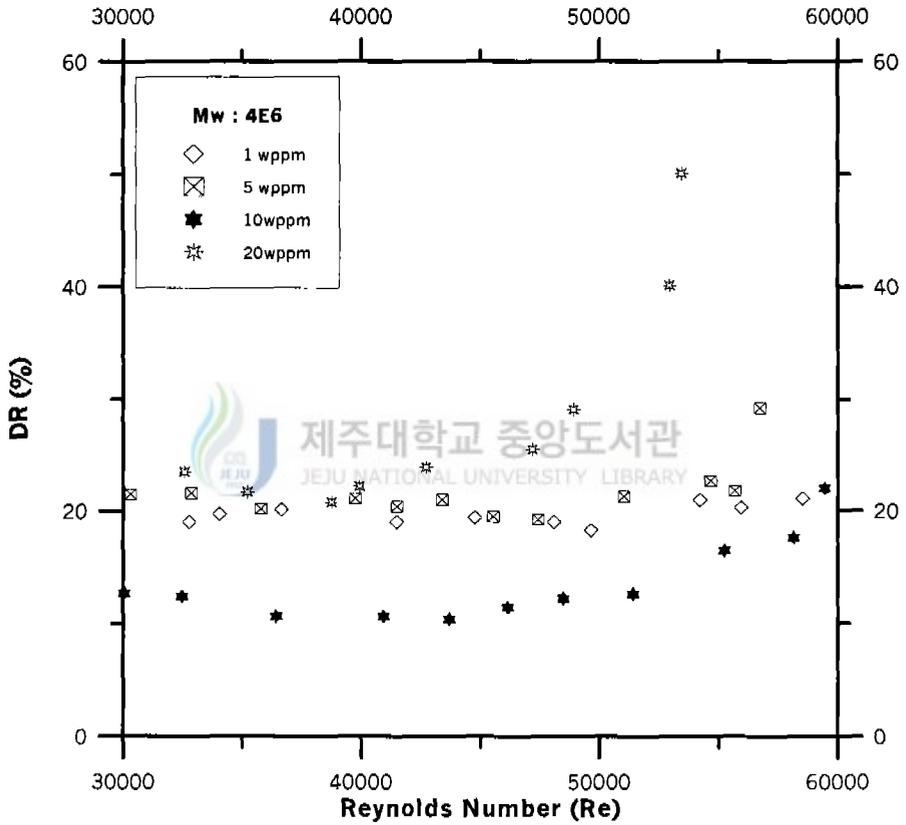


Fig. 18. (b) Drag reduction with PEO ($M_w: 4 \times 10^6$)

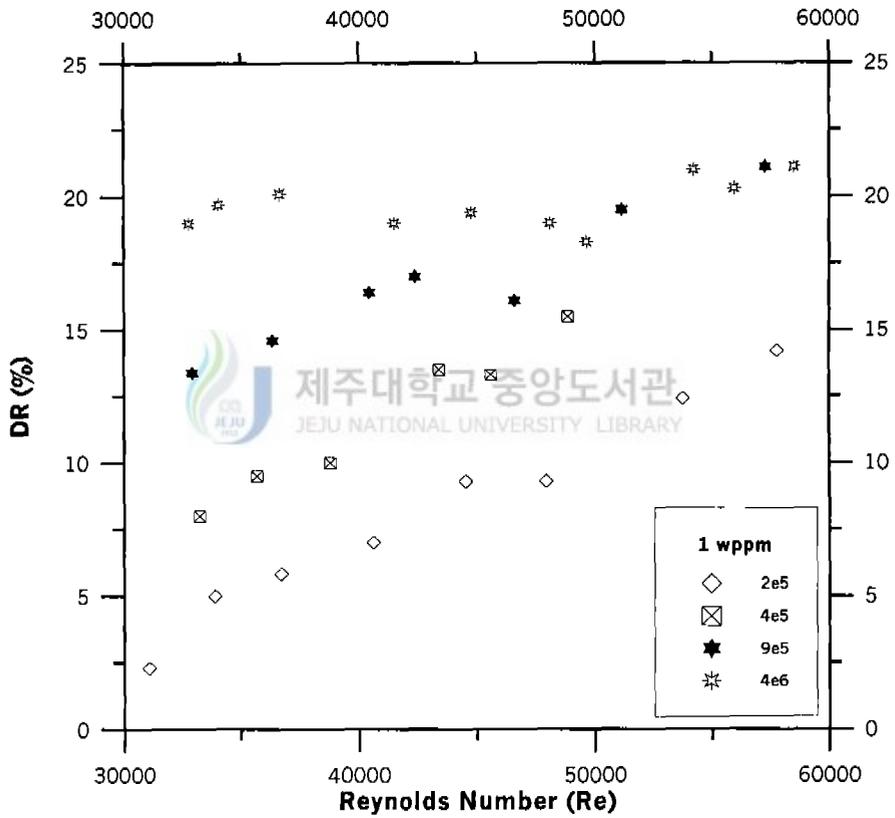


Fig. 19. (a) The effect of DR according to molecular weight (1 wppm)

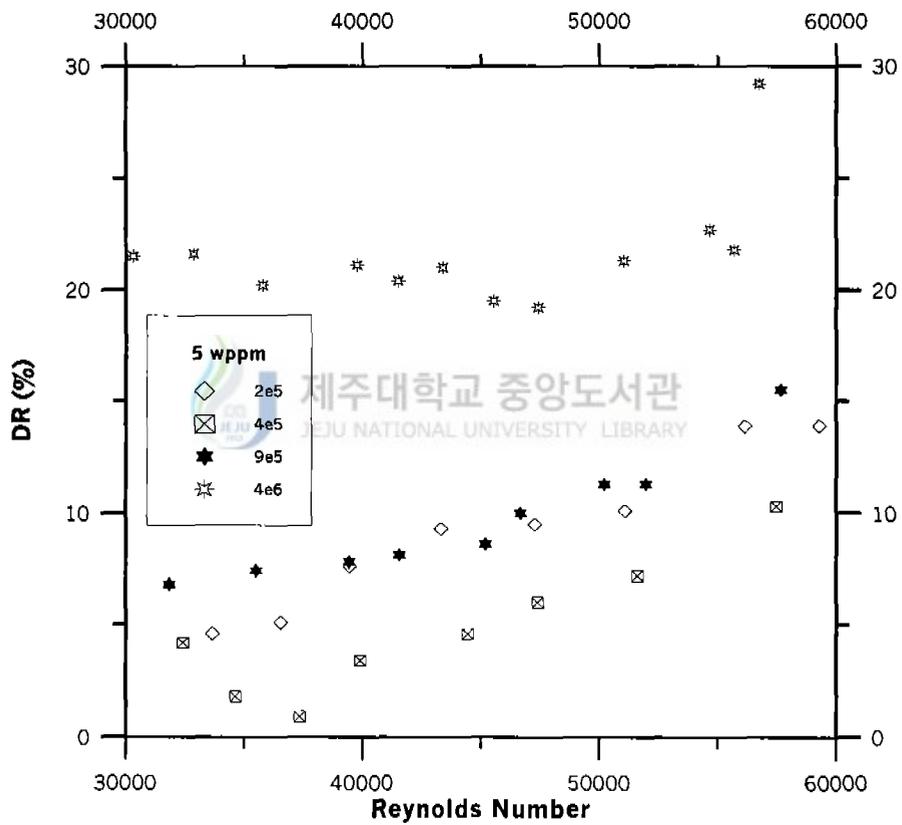


Fig. 19. (b) The effect of DR according to molecular weight (5 wppm)

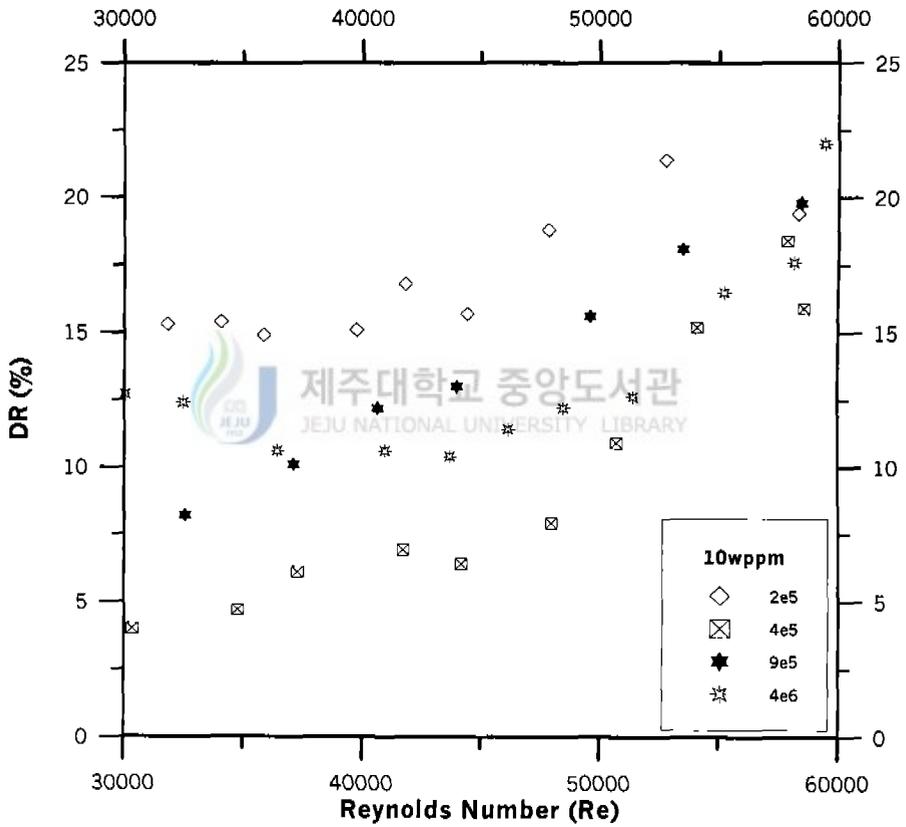


Fig. 19. (c) The effect of DR according to molecular weight (10 wppm)

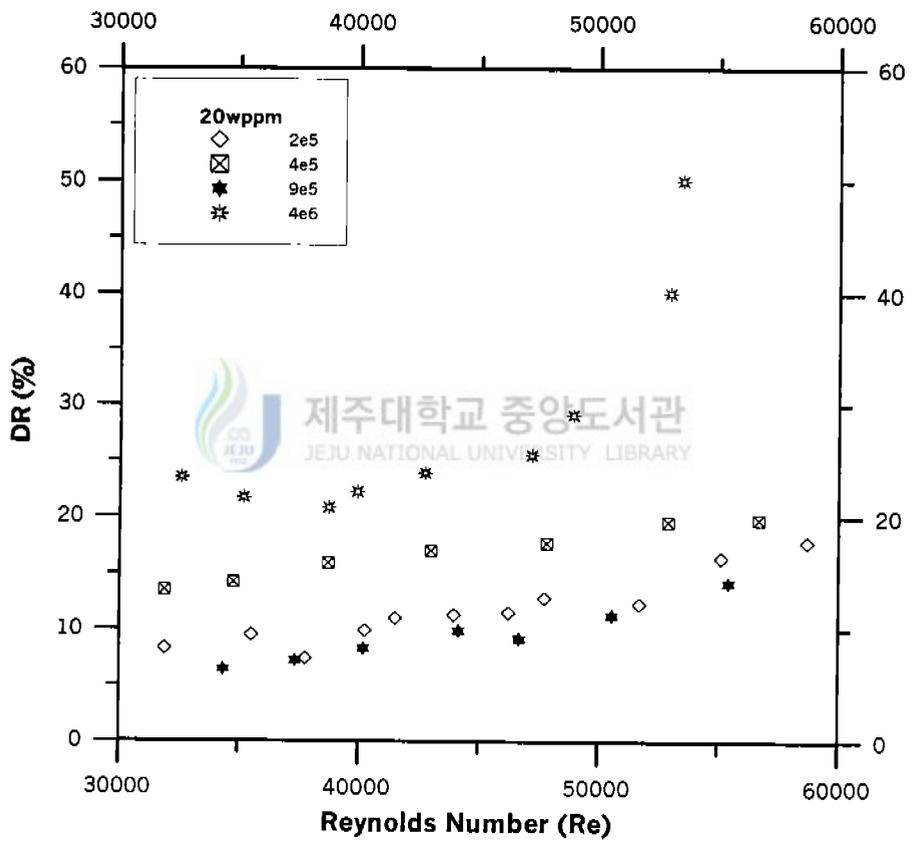


Fig. 19. (d) The effect of DR according to molecular weight (20 wppm)

VI. 참고 문헌

안태완, 이동호, 1986, "고분자 합성요론", 대광문화사, 204pp

Brostow W, 1983, *Polymer*, 24. 631

Burger E D., Munk W. R. and Wall H. A., 1980, *J. Soc. Petro. Eng.*, 34, 9419

Burger E. D, Chorn L. G. and Perkins T. K., 1980, *J. Rheol.*, 24, 603

Burger E. D, Munk W. R. and Wahl H. A., 1980, *S. P. E. Paper* p. 9419,

Cho Y I. and Hartnett J. P, 1982, "Non-Newtonian Fluids in Circular Pipe Flow",
Advances in Heat Transfer, 15, 59~141.

Choi U. S., Kasza K. E., 1987, "Screening and Degradation Test of Linear-Polymer Additives for District Heating application", *Report of Argonne National Laboratory*, ANL-87-49

Choi U. S., Kasza K. E., 1989, *Proc The Workshop on Energy conservation*, 209

Derick C. and Logie K., 1973, *Environmental Protection Agency*, Report :
EPA-R2-72-238

Greene H L., 1970, Nokes R F. and Thomas L. C., *Med. Res. Eng.*, 9, 19

Greene H L, 1980, Mostardi R. F. and Nokes R. F., *Polym. Eng Sci.*, 20, 499

Herod J. E and Tiederman W G., 1974, *J. Hydraulics Dic., Proc ASCE*, 100, HY
12, 1863

Kays W M and Crawford M E., 1980, "Convective Heat Transfer", 2nd Ed.,

McGraw-Hill, New York, pp.294~386.

Kohn M. C., 1973, *J. Polymer*, 11, 2339.

Latto B. and Czban J, 1974, *International Conference on Drag Reduction*, Cambridge, G-1

Lescarbourea J. A, Culter J D. and Wahl H. A, 1971, *J. soc. Petrol. Eng.*, 113, 229

Lumley J. L, 1973, *J. Polymer Science*, 7, 263.

Mysels K. J., 1949, *U.S. Pat*, 2, 492, 173.

Patterson R. L and Little R C., 1975, "The Drag Redution of Poly(ethylene oxide)-Carboxylate Soap Mixtures", *J. of Colloid and Interfaced Science*, 53, 1, pp. 110-114

Peterson J. P., Zielinski P. B. and Acstro W. E., 1973, *AIChE Symposium Series*, 69, 130

Porch M., Zakun J. L., Brosh A. and Warshavsky M., 1970, *J. Hydraulics Div.*, Proc. ASCE, 96, HY 4, 903.

Povch L. I. et al., 1978, *Donekij Universitet Doneck*, Research Report, 11

Ryskin G, 1987, *Phys. Review Lett.*, 59(18), pp. 2059.

Savins J G., 1964, *J. Soc. Petro. Eng.*, 4, 203

Sellin R. H. J., 1974, *Int. Conf. Drag Reduction*, Cambridge, Paper G2.

Sellin R. H J., 1977, *Proc. Instin. Civil Eng.*, Part 2, 63, 49

Sellin R. H. J and Ollis M., 1981, *AIChE Meeting*, New Orleans.

Toms B. A., 1948, "Some Observations on the Flow of Linear Polymer solutions through

Straight Tubes at Large Reynolds numbers", *Proc. 1st Intern. Congr. on Rheology*, 2, pp. 135-141, North Holland

Toms B. A., 1948, *Proc. 1st Intern. Congr. on Rheology*, II, 135.

Tullis J. P. Ramu K. L. V., 1974, *Int. Conf. Drag Reduction*, Cambridge Paper G3.

Tung T. T., Ng K. S. and Hartnett J. P., 1978, *Proc. 6th Int. Heat Transfer Conf.*, Hemisphere Publishing Co., Washington D.C., 5, 329.

Virk P. S., 1975, *J. Fluid Mech.*, 45(2), 225

Virk P. S., Mickeym H. S. and Smith K. A., 1970, "The Ultimate Asymptote and mean Flow Structure in Tom's Phenomenon", *Trans. ASME, J. Applied Mechanics*, Vol. 37, pp. 448-493

Virk P. S., Merrill E. W., Mickley H. S., Smith K. A. and Mollo-Christensen E. L., 1967, *J. Fluid Mech.*, Vol. 30, Part 2, 305.

White W. D. and Hoyt J. W., 1969, *Proc. 8th International Conference on Mechanical and Biological Eng.*, 92

Wade R. H., 1973, *Symp. on Drag Reduction in Polymer Solutions*, Part 1, Paper 13c, *AIChE*, Symposium Series 130, 69, 87.

Walsh M., 1967, *On the Turbulent Flow of Dilute Polymer Solutions*, Ph.D. Thesis, Cal. Inst. Tech., Pasadena, California.

Zakin J. L., Brosh A. and Warsharsky M., 1971, *AIChE Chem Eng., Prog. Symp.* Series No. 111, 67.

감사의 글

“항상 기뻐하라! 쉬지 말고 기도하라! 범사에 감사하라! ...”

(테살로니가 전서 5:16~18)

대학원 2년이린 기간 동안 논문을 쓸 수 있도록 정신적, 육체적 힘을 주신 하나님께 감사를 드립니다

제게 논문을 쓸 수 있도록 모든 환경과 여건을 마련해 주시고, 지도해 주신 김신 교수님께 감사를 드립니다 대학원의 길을 제안해 주시고 많은 도움을 주신 천원기 교수님께 감사를 드립니다 그리고 논문을 완성하기까지 많은 가르침과 격려를 아끼지 않으신 이윤준 교수님, 이현주 교수님, 박재우 교수님께 진심으로 감사를 드립니다. 또한 제 논문에 많은 관심을 보여 주신 한국에너지기술연구소의 강용혁 박사님께 감사를 드립니다. 논문 수정에 많은 도움을 주신 화학공학과 의 이상백 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

마음이 힘들고 어려울 때마다 도움을 주신 조마가 목사님과 강두경 목사님가정에 감사를 드립니다. 이 논문이 나오기까지 실제적인 도움을 준 경진이형과 기계공학과 의 이동원 선배님께 감사를 드립니다. 후배지만 동기처럼 대해 준 명철이 형, 동규형에게 고마움을 전합니다. 그리고 대전에서 수고하고 있을 재광이형, 현식이형, 정선이에게도 고마운 마음을 전하고, 좋은 논문 쓰시길 기도합니다 언제나 함께 해준 시우형, 문섭이형, 익환이, 영우, 창수에게 고마움을 표합니다 무엇보다 바로 옆에서 제가 해야 할 일도 아무말 없이, 내 일처럼 도와준 현종관 선생님과 박숙희 선생님께 감사합니다 중학교 때부터 지금까지 피를 나눈 형제처럼 저를 사랑해준 진훈이와 보훈이에게 감사의 뜻을 전합니다.

그리고 김영민 목사님, 최기초 목사님, 강상수 목사님, 김창림 목사님, 김홍민 목사님 그리고 저에게 많은 관심과 기도를 아끼지 않으신 대학생성경읽기선교회 형제, 자매, 목사님들 모두에게 감사의 마음을 전합니다.

그리고 제게 언제나 웃음을 선사해준 동생 진희에게 고맙다는 말을 해주고 싶습니다. 저를 위해 지금까지 고생해 오신 부모님께는 어떤 감사의 표현으로도 부족함을 느낍니다 부족하지만 이 논문을 부모님께 바칩니다.