

PEO가 첨가된 원형관 난류유동에서의 마찰저항 감소 측정

이 보 안* · 이 동 원** · 김 신* · 현 명 태** · 천 원 기*

Measurement of Drag Reduction in PEO Added Turbulent Flow through a Circular Tube

Bo-An Lee*, Dong-Won Lee**, Sin Kim*, Myung-Taek Hyun** and Won-Gee Chun*

ABSTRACT

The drag reduction by polymer additive is a well-known phenomenon and has been widely studied due to its high usefulness. In this study, in order to obtain the fundamental data on the drag reduction by polymer additive, we measured the friction factors in the polymer added turbulent flow through a circular pipe for Reynolds number ranging 10000~50000. As polymer additive, PEO (polyethylene oxide: molecular weight 4×10^6) was used. We also performed the experiments varying the concentration of PEO from 3 to 24 wppm to investigate the effect of the PEO concentration on the drag reduction.

We observed more than 25% drag reduction under the above experimental conditions and the most effective drag reduction was found at 6 wppm (31% drag reduction).

Key words : Drag reduction, Turbulent flow, PEO (polyethylene oxide)

1. 서 론

최근에 들어 공기 중 혹은 수중에서 고속으로 운동하는 비행기, 자동차 및 해상 운송 수단 등이 급격히 발달하고, 원유의 수송 계통이나 폐열의 이용을 위한 지역 냉난방 계통에서 대량의 유체를 수송하는

것이 필요하게 됨에 따라 유체의 수송 일을 줄일 수 있는 항력 감소 방법을 강구하는 것은 매우 중요한 일이 되고 있다.

이러한 항력은 마찰저항(skin friction)과 압력항력(pressure drag)으로 나뉘어진다. 본 연구에서 다루고자 하는 고분자에 의한 마찰저항 감소란 유체가 난류 상태로 매끈한 원형관을 흐를 때 분자량이 매우 높은(약 $10^5 \sim 10^7$) 고분자 첨가제를 유체에 극소량 첨가시켜 줌으로써 유동 중의 난류를 억제시켜 마찰저항이 감소되는 것을 말한다. 따라서 수송에 필요한 펌

* 제주대학교 에너지공학과
Department of Nuclear and Energy Eng., Cheju Nat'l Univ.
** 제주대학교 기계공학과
Department of Mechanical Eng., Cheju Nat'l Univ.

프의 용량을 줄일 수 있으며, 단위 시간당 유량의 증가 효과를 관 직경을 감소시키는데 활용할 수 있다. 고분자 첨가제에 의한 마찰저항 감소(drag reduction: DR) 현상은 용매로 물을 사용하였을 경우 최대 80%까지 마찰저항 감소 효과를 주는 것으로 보고되고 있다.¹⁾

그러나 유체역학적인 측면에서 난류 유동이 완전히 규명되지 않았고, 또한 고분자 용액의 동력학적 해석이 완전하지 않으므로 이 두 가지가 결합되어 발생하는 고분자 화합물의 첨가에 의한 마찰저항 감소 현상은 그 동안의 많은 연구에도 불구하고, 정확한 생성 기구가 정량적으로 완전히 설명되고 있지 못하다. 초기에는 마찰저항 감소 효과의 해석을 위하여 용액이 점탄성(viscoelasticity) 특성으로 인하여 이방성(non-isotropic) 점도를 가지므로 난류의 요동(turbulence fluctuation)이 방지되어 마찰저항 감소 효과가 나타난다고 제안되었으나²⁾, 마찰저항 감소 첨가제 용액에서 첨가제의 농도가 매우 작아서 마찰저항 감소 첨가제를 포함하는 유체의 점탄성 성질 및 활동도 사이의 관계를 밝히기가 매우 어렵다. 최근, Morgan과 McCormick³⁾은 고분자가 난류 교란(turbulence disturbances)의 생성, 성장 또는 전파에 간섭함으로써 마찰저항 감소 효과를 가져온다고 설명하는 등 많은 모델들이 제안되고 있으며, 이러한 다양한 모델과 실험을 통해 마찰저항 감소는 용액의 점탄성 특성과 관련이 있다는 주장이 일반적으로 받아들여지고 있다. 따라서 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.

근래의 마찰저항 감소 효과에 대한 연구에서는 단순히 고분자만을 첨가하는 것이 아니라 계면활성제 및 안정제 등을 혼합하여 사용하고 있으며, 또한 섬유 부유물(fiber suspension) 등 다양한 마찰저항 감소 효과를 얻을 수 있는 물질들이 개발되고 있고, 이들 물질을 용매에 투입할 때 발생하는 마찰저항의 거동에 관한 연구가 계속 진행되고 있다.

본 연구에서는 마찰저항 감소제로 PEO(polyethylene oxide)가 첨가된 원형관 난류유동에서 마찰저항 감소

효과를 측정하고자 한다.

II. 마찰저항과 마찰저항 감소

2.1. 마찰저항

관 유동에서 Newton 유체와 비-Newton 유체의 Darcy의 마찰인자(friction factor) f 는 평균속도와 관에서의 압력 강하(pressure drop)항으로 다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$f = \frac{8\tau_w}{\rho v^2} = \frac{2D}{\rho v^2} \frac{\Delta P}{L} \quad (1)$$

여기서 D 와 L 은 시험부(test section)의 직경 및 길이, ρ 는 유체의 밀도, v 는 관내에서 유체의 평균 속도 그리고 ΔP 는 시험부 두 지점 사이의 압력차(differential pressure)이다. 정확한 압력 구배를 얻기 위해서는 입구로부터 입구길이(entrance length) L_e 를 지난 완전히 발달된 유동 영역 내에서 두 지점 사이의 압력 강하를 측정해야 한다.

Newton 유체의 층류 유동에서의 입구길이 L_e 는 일반적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다⁴⁾:

$$\frac{L_e}{D} = \frac{Re}{20} \quad (2)$$

Newton유체의 층류 유동에서 입구 길이 L_e 의 최대 값은 직경 D 의 100배 정도이며 난류 유동인 경우 직경 D 의 20배 정도로 극히 작은 값으로도 충분한 반면, 비-Newton 유체의 경우 Cho와 Harnett⁵⁾에 의하면 입구길이 L_e 는 직경의 110배 정도로 매우 크게 나타난다고 보고되고 있다.

일반적으로 층류 마찰인자는 완전히 발달된 Newton 유체의 Reynolds 수의 함수 관계로 나타낼 수 있으며 $f=64/Re$ 이 된다. 그리고, Prandtl에 의해 유도되었듯이 Newton 유체의 완전히 발달한 난류 영역에서 마찰인자는 흔히

$$f^{-1/2} = 2.0 \ln(Re f^{1/2}) - 0.8 \quad (3)$$

로 표현된다. 그러나, 실제 유로에서는 표면거칠기 (roughness)가 존재하고 난류 유동의 마찰인자에 영향을 주므로 표면거칠기에 의한 영향이 고려되어야 한다. Moody 선도에서는 Colebrook의 상관식이 채택되고 있으나 사용이 불편하여 흔히 Haaland에 의해 제시된 상관식이 사용된다⁶⁾:

$$\frac{1}{f^{1/2}} \approx -1.8 \log \left[\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{\epsilon/d}{3.7} \right)^{1.11} \right] \quad (4)$$

여기에서 ϵ/d 는 관 직경에 대한 표면거칠기 높이 비를 나타낸다.

점탄성 유체의 난류 유동에서 마찰인자는 Newton 유체에 비해 현격히 작게 관찰되고 있으며, Virk⁷⁾는 마찰 저항 감소율은 한계가 존재한다는 최소 저항 점근선(maximum friction reduction asymptotes)을 다음과 같이 정의하였다:

$$f^{-1/2} = 19.0 \log(Re_a f^{1/2}) - 32.45 \quad (5)$$

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

2.2. 마찰저항 감소

일반적으로 난류 상태의 유체에 소량의 첨가물을 첨가하여 얻을 수 있는 압력강하 감소 효과로 마찰저항 감소의 효과를 정의할 수 있다:

$$DR = \frac{\Delta P_S - \Delta P_A}{\Delta P_S} \quad (6)$$

여기서 ΔP_S 는 용매만 존재할 때 마찰 때문에 생기는 관의 단위길이 당 압력 강하이며, ΔP_A 는 마찰저항 감소제를 첨가한 상태에서 마찰 때문에 발생하는 관의 단위길이 당 압력 강하이다.

또 마찰저항 감소는 다음과 같은 식을 이용해서도 표현할 수 있는데,

$$DR = 1 - f_a/f_s \quad (\text{at constant flow rate}) \quad (7)$$

여기서 f_a 는 마찰저항 감소제가 포함된 유체동의 마

찰인자이고, f_s 는 용매만 존재할 때의 마찰인자이다.

2.3. 마찰저항 감소 첨가제

마찰저항 감소의 효과를 얻을 수 있는 첨가제는 그 특징에 따라 고분자, 용매에 녹지 않는 고체입자 분산체, 생분해성 첨가제, 계면활성제 등 크게 4종류로 분류할 수 있다.

고분자는 일정한 범위 내에서 백만 분의 일 단위의 매우 극소량을 첨가하여도 마찰저항 감소 효과를 얻을 수 있기 때문에 가장 많이 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 마찰 저항 감소제로 사용함에 있어, 고분자는 대개 선형 구조를 가져야 하며 물이나 유기 용매에 녹을 수 있어야 하고 높은 분자량(5×10^5 이상)을 가져야 한다.

이러한 고분자 용액은 매우 적은 양으로도 마찰저항 감소효과를 나타낼 수 있다는 장점을 가지고 있어 다양한 고분자의 종류와 농도 및 유로의 형상, 그리고 Reynolds 수에 따른 마찰저항 감소 효과에 관한 많은 연구가 이루어지고 있다. 그러나, 기계적인 퇴화 및 고분자 자체가 가지고 있는 특성 때문에 고온에서 열적 퇴화에 매우 약하다는 결점을 가지고 있어⁸⁾ 최근에는 고분자 단독으로 쓰이지 않고 고분자-유화제 복합체를 형성하거나 계면활성제 등을 혼합하여 사용하는 등 고분자 용액이 가진 단점을 보완하는 방법들이 제시되고 있다.

고분자는 그 특성상 분해와 퇴화(degradation)를 일으킴에 따라 마찰저항 감소 효과가 급격히 감소하게 된다. 퇴화란 용액중의 고분자의 분해로 인하여 그 용액이 가지고 있는 저항감소 효과의 저하를 가져오는 현상을 말한다. 이러한 고분자의 퇴화의 원인으로는 관벽과의 전단력 및 유체 진동 등과 같은 역학적인 힘(기계적)에 의한 고분자의 분해, 자외선 등과 같은 광학적인 원인에 의한 고분자의 분해 그리고 열 에너지에 의한 분해 등 매우 방대하며, 전적으로 고분자의 사슬 구조에 의존한다. 이러한 요인들은 마찰

저항 감소 효과를 위한 고분자의 기술적 이용에 많은 제약을 주고 있다. 특히, 열원의 장거리 수송은 유체와 벽과의 마찰에 기인하는 전단력에 의한 기계적 퇴화뿐만 아니라 열원에 의한 열적 퇴화가 동반하여 퇴화가 일어나므로 인해 열병합 발전의 효율성을 증대시킬 수 있는 지역 냉난방(DHC) 시스템 등의 적용에 많은 제약이 되고 있다. 따라서 이러한 고분자의 퇴화에 의한 마찰저항 감소 현상의 거동에 대한 영향을 조사하고 개선방법을 찾기 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 기계적 퇴화에 관한 연구로 Lee등은⁹⁾ 고분자 첨가제와 섬유 부유물을 각각 첨가했을 때보다 같이 첨가하였을 때 마찰저항 감소 효과가 증가하며, 이러한 섬유 부유물의 첨가는 직경이 작을수록 마찰저항 감소 효과가 증대된다고 보고하였다. 그리고 Cho와 Hartnett는⁵⁾ 고분자 첨가제인 폴리에틸렌옥사이드(polyethylene oxide)가 폴리아크릴아마이드(polyacryl amide)보다 기계적 퇴화에 더욱 민감하게 나타남을 보고하였다. 이러한 기계적 퇴화는 밀폐된 계에서 장기간 사용하거나 유체의 장거리 수송 등 전단력을 많이 받는 경우 매우 크게 문제시되고 있다. 그리고 열에너지에 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 사용¹⁰⁾, 안정화 첨가제(stabilizing additive)의 첨가¹¹⁾, 계면활성제의 첨가 등이 제안되고 있다.

III. 실험

3.1. 실험 장치 개요

그림 1은 본 실험에서 사용한 실험장치의 개략도이다. 실험장치는 수조, surge tank, 차압계, 초음파 유량계, 모노펌프(Moineau pump), PC등으로 구성하였다. 이 시스템은 순환회로로 구성하였는데 이는 다양한 첨가물의 투입과 교체를 가능하게 하고 유동조건을 조절할 수 있게 하기 위함이다. 1200mm×650mm×600mm의 비교적 큰 수조를 사용하여 펌프의 흡입/토출에 의한 영향을 최대한 줄였다. 시험부는 내경 17.1mm인 동관을 사용하였다. 고분자 화합물 첨가에 의한 마찰저항 감소를 정확히 측정하기 위

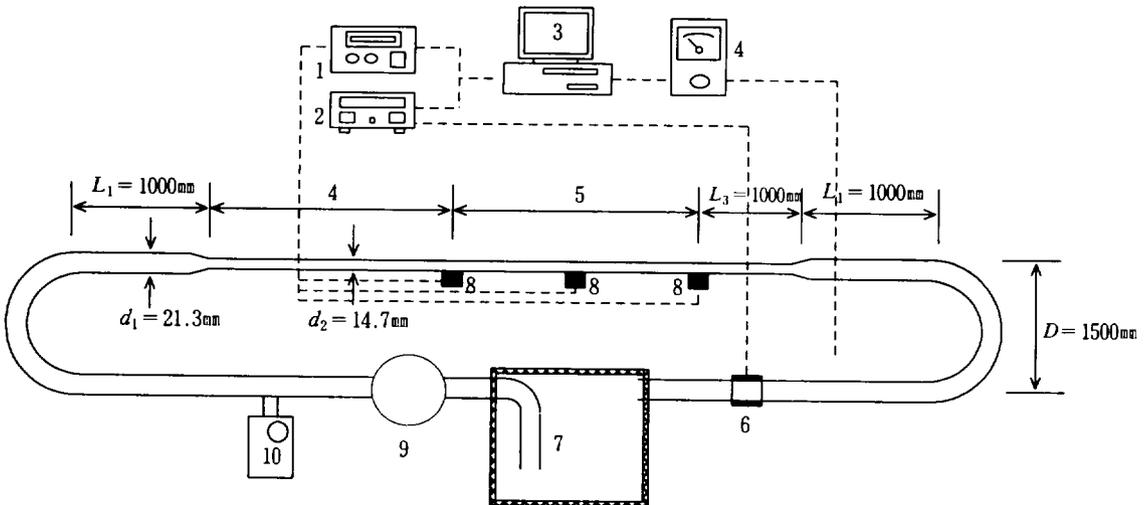


Fig. 1 Schematic diagram of the drag reduction test loop

1. differential pressure transducer 2. doppler flow meter 3. PC 4. entrance length (L2=2000mm)
5. test section (L2=2000mm) 6. doppler flow meter sensor 7. water tank 8. pressure sensor
9. pump 10. surge tank

해서는 완전히 발달된(fully developed) 유동영역을 충분히 확보해야 한다. 그런데 고분자 화합물과 같은 비-Newton 유체의 경우에는 난류유동의 경우에도 층류와 비슷하게 입구길이(entrance length)가 긴 특징이 있다. Cho와 Hartnett⁵⁾의 보고에 의하면 입구길이 직경의 약 110배 정도이다. 따라서 이 조건을 만족하기 위해 2000mm의 입구부를 확보하였다. 이는 지름의 117배의 입구영역을 확보한 것이므로 시험부는 완전히 발달된 난류 유동장으로 생각할 수 있다.

3.2. 유량 조절 및 측정 장치

유량을 제공하기 위하여 본 실험에서는 펌프를 사용하였다. 그런데 일반적으로 사용하는 원심펌프는 고분자 용액의 퇴화를 잘 일으키는 것으로 알려져 있다. 그래서 본 실험에서는 고분자 화합물의 기계적 퇴화에 영향이 매우 적은 것으로 알려진 모노펌프를 사용하였다.

펌프의 구동 때문에 발생하는 진동과 맥동을 줄이고 안정된 유동과 일정한 유량을 얻기 위하여 펌프와 순환 회로와의 연결 부위를 플렉시블호스(flexible hose)로 연결하여 진동을 흡수 할 수 있도록 하였다. 그리고, 순환회로 입구에 유동안정 탱크를 설치하여 펌프에 의한 맥동과 진동을 완화시키고 차압을 측정할 때 차압의 떨림을 최소화하였다. 유동안정 탱크는 최대 6기압까지 견딜 수 있는 것을 사용하였다.

고분자 화합물은 기계적 퇴화에 민감하므로 가능한 한 유동에 방해가 주지 않도록 하기 위해, 유량 측정에 흔히 사용되는 오리피스형 유량계나 터빈 유량계 등을 유로 내에 설치하는 대신에 초음파 유량계(EIT사 MODEL 2410)를 사용하여 유량을 측정하였다. 초음파 유량계는 초음파를 발진시켜 유동장에 보내고 반사되어 나오는 초음파의 파장을 측정하고 Doppler 효과를 이용해 유동 속도를 측정하는 장비이다. 본 실험에서 채택한 장비는 측정 범위가 유속을 기준으로 0.03 ~ 9.1 m/sec로 본 실험에서 수행하고자 하는 실험 범위(0.5~2.3 m/sec)를 충분히 지원한다. 그리고, 자체적으로 유속 정보를 유량 정보로 환산하여 제공하도록 되어있다. 초음파 유량계에서 나온 유량 신호는 A/D 변환기에서 변환을 거쳐 PC에 저장할 수 있도록 하였다.

유량 측정 센서는 유량 측정의 안정성을 위해 순환 회로 출구 측에 설치하였다. 마찰저항 감소 효과 실험에서 정확한 유량의 측정과 설정된 유량이 실험 중 일정하게 유지하는 것은 매우 중요하다. 유량을 조절하는 방법은 펌프 구동 모터의 회전수(rpm)을 변화시키는 방법과 탱크를 밀폐시키고 탱크 내의 수위와 압력을 질소나 공기 가스압을 이용하여 유량에 진동이 있는 경우에도 일정하게 압력을 유지할 수 있도록 하는 방법, 그리고 펌프에서 나오는 유량을 요구된 유량에 알맞게 바이패스(bypass)시키는 방법 등이 있다. 본 연구에서는 모노 펌프(대봉엔지니어링 MODEL DSF 40-1)를 구동할 때 인버터(현대중공업 MODEL HV-3.5LD)를 연결하여 출력을 일정하게 유지시키고, 동시에 일정한 1800rpm을 펌프에 제공함으로써 펌프 자체에서 유체의 속력을 안정적으로 제어할 수 있도록 하였다.

3.3. 차압 측정 장치

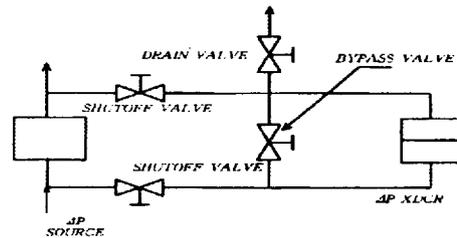


Fig. 2 Differential pressure measuring circuit

차압의 측정은 시험부 상단과 하단 사이에 그림 2와 같은 압력측정 회로를 구성하고, 차압계를 이용하여 측정하도록 하였다. 바이패스 밸브(bypass valve) 및 차단 밸브(shutoff valve) 모두가 개방되었을 때는 차압이 발생하지 않고, 이 상태에서 바이패스 밸브만을 폐쇄시키면 차압이 걸리게 된다. 여기서 배수 밸브(drain valve)는 작동 유체를 교체하여 실험하고자 할 때 측정 회로에 남아 있는 고분자 화합물 용액을 세척하기 위해 사용되었다.

본 실험에 사용될 차압계는 Validyne 사의 Model DP15-7L로 다이아프램 교체식이어서 측정하는 차압에 범위에 따라 다이아프램을 선택하고 교체하였다.

유량계에서와 마찬가지로 차압기에서 나온 신호는 A/D 변환기를 거쳐 PC에 저장되도록 하였으며 동시에 모니터로 볼 수 있도록 프로그램 하였다.

차압을 측정하기 위해 시험부에 2m 간격으로 작은 구멍을 뚫었다. 본 실험에서는 무엇보다도 정확한 차압의 측정이 요구되기 때문에 실험 조건이 변화할 때마다 압력 보정기(pressure calibrator)를 이용하여 차압을 보정하여 사용하였다. 여기에서 사용된 압력 보정기는 Beamex사의 DC-104로 0~4bar 범위의 차압에 대한 보정이 가능하다. 그리고 차압의 떨림을 방지하기 위해서 중간에 유동안전 탱크를 설치하였다.

IV. 결 과

4.1. 물에 대한 기초 실험

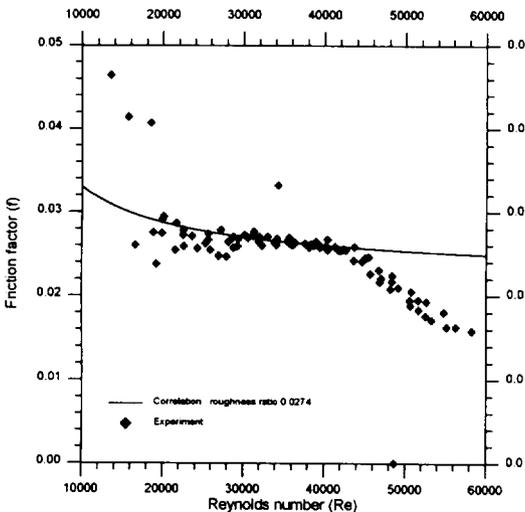


Fig. 3 Friction factors for pure water

계측기를 포함하여 실험장치의 구성과 실험 절차가 제대로 되어있는지를 검증하고, 실험에 사용된 시험부의 표면조도(roughness)에 대한 정보를 얻기 위해서 우선 물을 작동유체로 한 실험을 수행하였다.

작동유체로 물을 사용하여 마찰인자를 측정하여 식 (4)의 Haaland 상관식과 비교한 결과 한 결과, 그림 3에서 보듯이 본 시스템 시험부의 표면조도가

0.0274mm이 됨을 보여주고 있다. 그림 3을 보면 Reynolds 수가 30000과 40000사이를 벗어난 영역에서는 Haaland 상관식과 많은 차이를 보이고 있는데, 이는 본 연구팀이 사용하는 차압계 다이아프램의 측정한도가 0.03~0.06bar 이기 때문이다. 본 연구팀은 앞으로 더 넓은 범위의 Reynolds 수에서도 측정이 가능하도록 다른 범위의 다이아프램을 가지고 계속 실험을 할 예정이다.

차압계 다이아프램의 측정범위 제약으로 비록 보다 다양한 Reynolds 수에 대한 실험을 수행하지는 못하였지만 본 예비실험을 통해 실험 방법을 검증하고 시험부의 표면조도를 얻을 수 있었다.

4.2. 농도에 따른 마찰저항 감소효과 고찰

PEO(분자량 4×10^6)의 농도에 따른 마찰저항 감소 효과를 분석하기 위해, 본 연구에서는 PEO 농도를 3, 6, 12, 24 wppm으로 변화시켜가면서 실험을 수행하였다. 그림 4는 농도에 따른 마찰인자를 보여주고 있으며 점들 사이의 검은 선은 각 농도에서의 마찰인자를 curve fitting 한 것이다. 그림 4에서 각 경우에 대한 평균 마찰저항 감소(DR)은 3 wppm인 경우에 28.2%, 6 wppm은 31.0%, 12 wppm은 26.7%, 24 wppm은 28.6%이다. 그리고, 그림 4에서 curve fitting 된 식을 이용하여 식 (7)로 정의된 마찰저항 감소 정도를 나타내면 그림 5와 같다.

본 실험에서 수행한 측정 범위에서는 그림 5에서 보듯이 Reynolds 수가 10000~50000 사이에서 PEO 농도가 6 wppm일 때 높은 DR(약 31%)를 얻을 수 있었다. 그러나 Reynolds 수에 따른 DR의 변화 경향으로 보아 50000이상의 Reynolds 수에서는 농도가 높을수록 마찰 감소 효과가 더 클 것으로 예측된다. 한편, Reynolds 수가 10000 근처의 저속의 범위(약 0.8~1.2m/s)에서는 농도가 낮을수록 더 큰 마찰감소 효과를 나타내고 있어 보다 낮은 농도에서 최대 DR이 얻어질 것으로 예상된다.

Reynolds 수에 따른 DR의 변화 경향을 살펴보면, 농도 6, 12, 24 wppm에서는 Reynolds 수에 따라 DR이 증가하나 농도 3 wppm에서는 다른 농도에 대한 것과 비교해 볼 때 반대의 경향을 보인다. 그러나 농도 3 wppm에서 DR 변화 폭이 상대적으로 작아 현

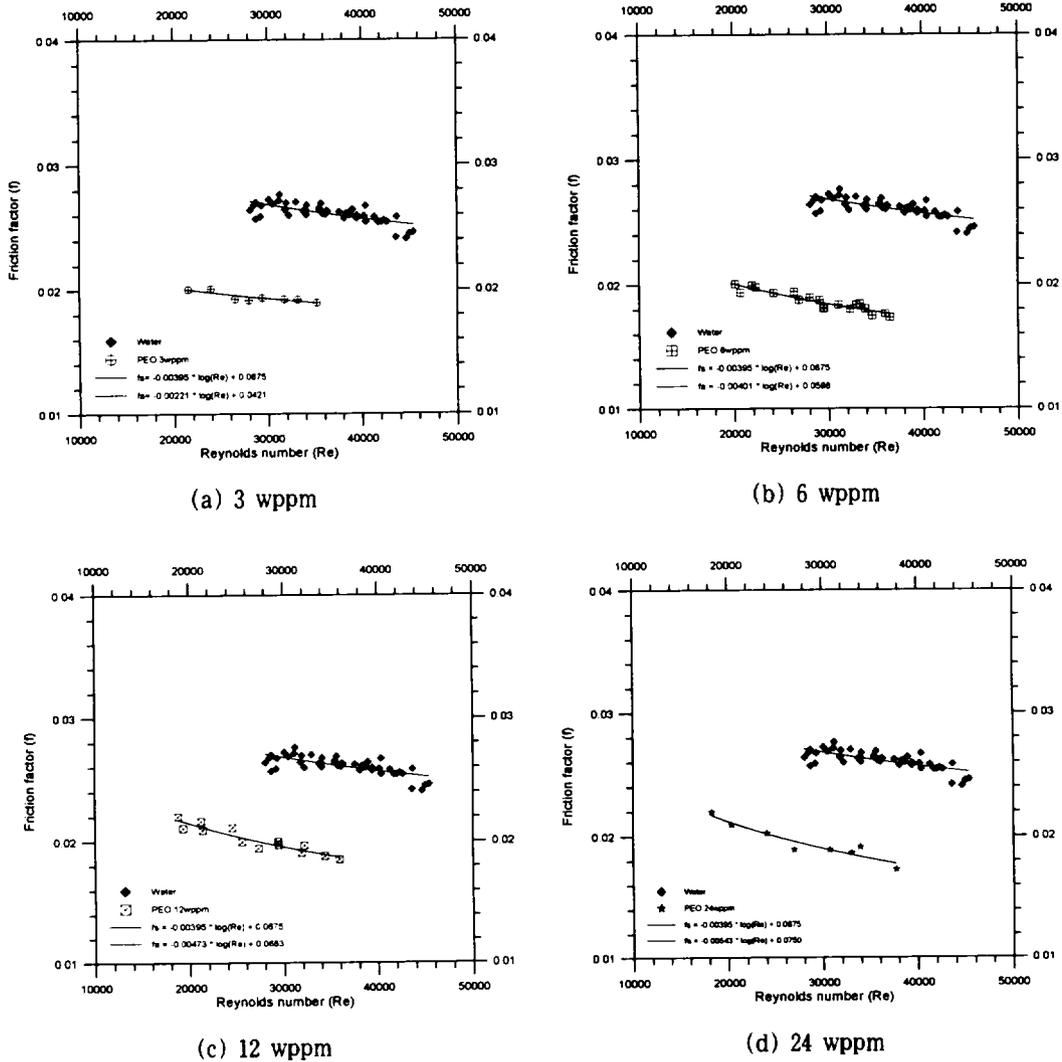


Fig. 4 Friction factors for various PEO concentrations

재로서는 그 원인을 규정하기 힘들며 보다 넓은 범위의 Reynolds 수에 대한 측정이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

V. 결 론

본 연구에서는 PEO(분자량 : 4×10^6)를 원형관 난류유동에 첨가하여 난류 마찰저항 감소를 측정하였

다. 본 실험에서는 Reynolds 수가 10000~50000사이에서 그리고 PEO 농도는 3, 6, 12, 24 wppm으로 변화시켜가면서 마찰저항을 측정하였다. 측정 결과, 모든 범위에서 25% 이상의 마찰저항 감소 효과를 관찰하여 PEO가 마찰저항 감소제로 유용하며 펌프 동력의 절감에 활용될 수 있음을 확인하였다.

본 실험의 측정 범위에서는 PEO를 6 wppm의 농도로 첨가했을 때 최고의 마찰저항 감소 효과를 나타내고 있음을 알 수 있었다. 그러나 Reynolds 수에 따

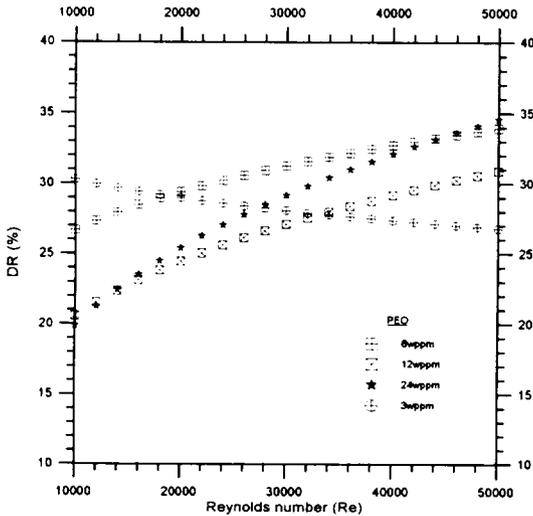


Fig. 5 Variation of DR according to PEO concentration

큰 마찰저항 감소의 변화 경향으로 보아 10000이하의 Reynolds 수에서는 보다 낮은 PEO 농도에서 마찰저항 감소효과가 더 높을 것으로 예상되고, 50000 이상에서는 보다 높은 PEO 농도에서 더 높은 마찰저항 감소효과를 나타낼 것으로 추정된다. 따라서, 마찰 감소효과는 같은 Reynolds 수에서도 농도에 따라 변화하며 Reynolds 수 영역에 따라 최적의 PEO 농도가 존재할 것으로 예측된다.

본 연구에서 수행된 측정 범위가 제한적이므로 고분자 화합물에 의한 마찰저항 감소 현상 규명과 효율적인 이용을 위해서는 앞으로 보다 넓은 범위의 조건에 대한 실험이 수행되어야 할 것으로 판단된다. 또한, 마찰저항에 중요한 영향을 미치는 것으로 알려진 퇴화에 의한 효과나 유로 형상 등에 의한 연구도 함께 병행되어야 할 것이다.

인용부호

- DR drag reduction
- f Darcy friction factor
- f_a friction factor for working fluid with drag reduction additives

- f_s friction factor for pure working fluid
- L length of the test section
- L_e entrance length
- Re Reynolds Number
- v average velocity
- ϵ/d roughness ratio
- ΔP differential pressure
- ΔP_A differential pressure for working fluid with drag reduction additives
- ΔP_S differential pressure for pure working fluid
- ρ density
- τ_w wall shear stress

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 시행한 원자력기초연구사업의 지원을 받아 수행되었습니다. 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Choi, U.S., Cho, Y.I and Kasza, K.E., 1987. "Screening and degradation tests of linear polymer additives for district heating applications". Report of Argon National Laboratory, ANL-87-49.
- 2) Dunlop, E. H. and Cox, L. R., 1977, Phys. Fluids, Vol. 20, Part II, p. 203.
- 3) Morgan, S. E. and McCormick, C. L., 1990. "Water soluble copolymers XXXI: Macromolecular drag reduction. A review of predictive theories and the effect of polymer structure." Prog. Polym. Sci., Vol. 15, pp. 507-549.
- 4) Kays, W.M. and Crawford, M.E., 1980. Convective Heat and Mass Transfer, 2nd Ed., McGraw Hill, New York.

- 5) Cho, Y.I. and Hartnett, J.P., 1982. "Non-Newtonian fluids in Circular pipe flow." Int. Advances in Heat Transfer, Vol. 15, pp. 59-141. Academic Press, New York.
- 6) White, F.M., 1994. Fluid Mechanics, 3rd Ed. McGraw Hill, New York.
- 7) Virk, P. S., Merrill, E. W., Mickley, H. S., Smith, K. A. and Mollo-Christensen, E. L., 1967. "The Toms phenomenon: Turbulent pipe flow of dilute polymer solutions." J. Fluid Mech., Vol. 30, Part 2, pp. 305-328.
- 8) Paterson, R. W. and Abernathy, F. H., 1970. "Turbulent flow drag reduction with dilute polymer solutions." J. Fluid Mech., Vol. 43, pp. 689-710.
- 9) Lee, W. K., Vaseleski, R. C. and Metzner, A. B., 1974. "Turbulent drag reduction in polymeric solutions containing suspended fibers." AIChE J., Vol. 20, pp. 128-133.
- 10) 김남수, 김종보, 김인석, 최형진, 1983. 공기조화 냉동공학논문집, 5권, 3호, p.207.
- 11) Durst, F., Schmitt, K. and Brunnm, P. O., 1989. "The critical shear stress and degradation of polymer additives in turbulent pipe flow" 4th Int. Conference on Drag Reduction, DAVOS, Switzerland.