

합성고분자첨가제의 난류마찰저항 감소효과 연구

The Effects of Copolymer Additives for Drag Reduction on Turbulent Flow

김남수* · 김종보** · 김인석*** · 최형진****
 N. S. Kim, C. B. Kim, I. S. Kim, H. J. Choi

Key words : Turbulent Flow Drag Reduction(난류마찰저항 감소현상), Copolymer Additives(고분자첨가제), Degradation(퇴화)

Abstract

Experimental investigations have been carried out to find the effect of drag reduction caused by effective polymer additives in turbulent flows. The experiments were undertaken with a test section of 9.8mm pipe diameter and 3500 mm pipe length(L/D=357) in a closed loop, and Copolymer-X and Polyacrylamide(PAAM) were used as polymer additives for comparisons. The tests were carried out under different polymer concentrations, and the temperatures of the flow considered were 26°C, 60°C at the flow velocity of 5.3 m/s.

The rate of drag reduction obtained by Copolymer-X is found to be considerably higher than that of PAAM in turbulent flows. Copolymer-X is also found to be very reliable for mechanical degradation, which has not been the case in any other additives. It is concluded that Copolymer-X is considered to be one of the most effective agents as an additive especially for long time hydraulic transports. It is also found that polymer degradation is more likely at lower polymer concentrations in the turbulent flows.

1. 서 론

액체상태의 유체가 난류상태로 매끈한 원형관을 흐를 때 섬유부유물(fiber suspensions)이나 표면활성제(surfactants), 또는 고분자첨가제(polymer additives)를 유동중에 첨가시켜 줌으로써 유체의 난류를 억제시켜 마찰저항을 감소시키는 것을 난류마찰저항 감소현상이라 한다. 이는 1906년에 최초로 Blatch에 의해 발견된 이후 1948년에 B.A. Toms⁽¹⁾가 원형관내를 유동하는 물과 같은 뉴톤유체에 소량의 폴리메틸 메타크릴산(Polymethyl methacrylate)을 모노크로로벤젠(Monochloroben-

zene)속에 용해 시켰을 때 원관 내에서 마찰저항 감소효과를 크게 얻을 수 있다는 사실로써 그 현상을 확인하여 'Toms phenomenon'이라고도 알려지고 있다.

Toms의 연구 이후에 많은 연구자들에 의하여 고분자첨가물에 의한 마찰저항 감소현상과 고분자첨가제와 같은 점탄성 유체(Viscoelastic Fluids)에 대하여 다각적인 연구가 이루어져 왔다. 대부분의 연구자들은 주로 폴리에틸렌 옥사이드(Polyethylene oxide)와 폴리아크릴아마이드(Polyacrylamide)의 고분자첨가제를 사용하였으며 뉴톤 유체인 물을 용매로 실험하였다. 그 결과 폴리에틸렌 옥사이드는 기계적 퇴화에 민감하여 시간이 경과함에 따라 마찰저항 감소율이 폴리아크릴아마이드 보다 현저히 감소함을 보여 주고 있으며, 초기 마찰저항 감소율은 폴리에틸렌 옥사이드가 폴리아크릴아마이드 보다 우수하다고 알려지고 있다.

*인하대학교 대학원

**정회원, 인하대학교 기계공학과

***정회원, 명지대학교 기계공학과

****인하대학교 고분자공학과

이러한 고분자첨가제의 첨가에 의한 난류마찰저항 감소현상은 소방차의 방수능력(pumpability) 향상이나 선박과 잠수함의 항행속도의 상승, 폭우 후의 범람 방지를 위한 하수시스템, 원유수송 및 각종 유체수송에 있어서의 펌프력향상, CWM과 같은 고체연료수송 및 냉난방 순환 시스템에의 적용, 인체의 혈액순환 시스템 치료를 위한 적용 등 응용분야가 방대하여 그 성과 여부에 따라 획기적 성과를 기대할 수 있다.^(2~5)

특히, 액상 유체의 원거리 수송에는 난류마찰로 인하여 높은 동력의 펌프와 큰 직경의 관이 요구되며 시스템의 설치와 유지에는 큰 비용과 에너지 소모가 요구된다. 이때 시스템의 큰 에너지 소모를 방지하기 위하여 분자량이 높은 고분자를 유체유동중에 첨가한다면 유체의 유동성이 증가하여 수송에 필요한 펌프의 용량을 대폭 줄여서 에너지를 절약할 수 있으며, 따라서 단위 시간당 용량의 증가 효과는 관직경의 감소 효과로도 활용할 수 있다. 실제로 관을 이용한 유체의 수송방법은 길이가 256 km에 달하는 소련의 Belovo-Novosibirsk coal slurry system의 경우에서 원거리 수송의 실용성을 입증하고 있으며, 알래스카 원유수송관에서도 소량의 고분자를 첨가하여 원유의 수송능력을 향상시킬 수 있었다. 그러나, 관을 통한 유체의 장거리 수송 시에는 고분자첨가제의 기계적퇴화에 의한 마찰저항 감소율의 저하가 발생하기 때문에 이를 방지하기 위해서는 주기적으로 고분자첨가제의 투입을 필요로 한다.^(6,7)

따라서, 기계적 퇴화에 안정한 폴리아크릴아마이드와 높은 초기 마찰저항 감소율을 가진 폴리에틸렌 옥사이드의 장점만을 살린 새로운 합성고분자첨가제의 사용이 가능하다면 높은 초기 난류마찰저항 감소율과 지속적인 효과를 기대할 수 있을 것이다. 아직도 높은 난류마찰저항 감소현상을 일으키는 잠재력을 가진 첨가물질들이 발견되지 않은 것들이 많이 있겠지만, 지금까지 알려진 난류마찰저항 감소 첨가제로는 일반적으로 합성유기고분자들이 효과적인 것으로 알려져 있다. 그 중에서도 가장 효과적인 고분자첨가제 분자량이 매우 크고(10^5 이상) 선형구조(linear structure)의 특성을 갖는 수용성 고분자들로 주로 Poly(acrylamide), Poly(ethylene oxide), Poly(acrylic acid)가 사용되어 왔다. 만약, Poly(ethylene oxide)의 높은 초기 마찰저항 감소율과 Poly(acrylamide)의 기계적 퇴화에 대한 안정

성 등의 장점만을 고루 갖춘 합성고분자첨가제를 얻을 수 있다면 난류마찰저항 감소현상의 연구에 큰 발전의 계기가 될 것이다.

따라서, 본 연구에서는 가장 일반적으로 사용되어진 폴리아크릴아마이드와 새로운 합성고분자첨가제인 Copolymer-X(분자량 : 1400~1500만)를 사용하여 뉴톤유체인 물과 비뉴톤유체의 특성을 지니고 있는 고체-액체 서스펜션인 CWM에 대하여 난류마찰저항 감소현상이 고분자의 농도, 고분자의 종류, 유체, 유속, 용매의 온도, CWM의 농도 등에 따라 어떻게 변화하는가를 비교 분석하고, 새로운 합성고분자첨가제의 퇴화 특성을 실험적 방법으로 규명하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 고분자의 기계적 퇴화

고분자 퇴화란 고분자 사슬내의 결합이 끊어지는 화학반응에 의해 물리적 성질이 변화하는 현상을 말한다. 고분자 퇴화의 종류는 개시반응의 형태에 따라 열적 퇴화, 기계적 퇴화, 광화학적 퇴화, 화학적 퇴화, 생물학적 퇴화 등으로 구분되는데 여기서는 주로 용액중에 가해진 기계적인 힘에 의해서 발생하는 기계적 퇴화에 대해 논하고자 한다.⁽⁸⁾

고분자에 가해진 응력은 두가지 형태로 완화된다. 하나는 비화학적 완화 과정으로 고분자 chain이 주위 분자와의 미끄러짐(enthalpy relaxation)에 의한 것과 chain의 구조(conformation)의 변화 과정으로 화학결합이 끊어지는 것이다. 이러한 두가지 과정은 서로 경쟁하게 된다고 볼 수 있다. 고분자가 기계적인 힘을 받을 때 화학결합이 끊어지기 위한 임계 조건은 하나의 고분자에 저장될 수 있는 탄성에너지 양과 고분자 변형을 받은 상태가 지속되는 시간에 의존하며, 가해진 에너지가 결합해리 에너지(bond dissociation energy)보다 크게 될 때 화학결합은 끊어지게 된다.

이와같은 고분자의 기계적 퇴화는 고분자첨가제에 의해 발생하는 난류마찰저항 감소현상에 있어 저항감소값이 시간이 경과함에 따라 점진적으로 저하되는 중요한 원인이 되고 있다.

2.2 마찰저항 감소현상의 기구

마찰저항 감소현상을 설명하는 기구의 하나는 점탄성 특성과 에너지 소비의 관계에서 찾아 볼 수

있다. 플라스틱 용융물, 단백질 용액 등에서의 응력은 변형구배 이력(history of deformation gradation)의 비선형 함수로 표시되는 데, 이런 유체들을 "기억유체(memory fluid)" 또는 "점탄성 유체(viscoelastic fluid)"라고 한다. 이러한 점탄성 유체가 난류로 원형관을 흐를 때의 유동 특성은 뉴턴 유체나 단순점성 비뉴턴유체와는 매우 다른 특성을 보이고 있는데, 난류 유동시 점탄성유체의 마찰계수는 뉴턴유체나 단순점성 비뉴턴유체의 경우보다 낮게 관찰된다. 이것을 저항 감소현상이라고 한다.

난류현상과 고분자동역학 사이의 관계 자체가 아직 완전히 규명되지 못한 상태이므로 난류에서의 마찰저항 감소현상에 대한 이론적 해석은 현재도 연구가 진행되고 있다.

난류에 의한 에너지 소비의 기구에 바탕을 둔 설명은 다음과 같이 될 수 있는데, 즉 mean flow의 운동에너지는 난류 유동장내의 큰 eddy에 의해 흡수되어 작은 eddy로 전달되는데 최종적으로 가장 작은 Kolmogorov eddy에 이르러 분자 마찰에 의해 소비된다. 한편, 관내를 흐르는 난류의 경계층은 Lumley⁽¹⁴⁾에 의하면 크게 관성층(inertial layer)과 점성 저층(viscous sublayer)의 두 영역으로 구분할 수 있으며, 이때 mean flow로부터 에너지를 흡수하여 소비시키는 여러 크기의 eddy들은 관성층에 존재한다. Lumley가 제안한 마찰저항 감소 이론은 점성 저층 바깥부분에 존재하는 고분자에 의해 점성 저층의 두께가 증가한다는 이론을 바탕으로 하고 있다. 그의 이론에 따르면 점성 저층에 고분자는 연신되지 않고 단지 회전만을 하기 때문에 이 부분에서의 점도는 본질적으로 변하지 않게 되어 상대적으로 점도의 감소를 가져온다는 것이다. 이를 분자신장-점성저층의 확대 이론(Molecular Stretching Thickening of Viscous Sublayer)이라고 한다.

Lumley가 제안한 마찰감소 이론은 관 벽의 효과가 존재하는 상황을 그 전제로 하고 있지만, 최근에 유체가 난류상태로 흐르는 관중심부에 고분자를 주입시킨 실험에서 벽면 효과가 존재하지 않는 조건에서도 마찰 감소현상이 발생하는 것이 관찰되었다. 이에 de Gennes⁽¹⁵⁾는 완전히 다른 방식으로 마찰 감소현상을 설명하는 새로운 이론을 제안하였다. 그의 이론의 핵심은 small scale에서 일어나는 고분자 효과는 점성이 아니라 탄성에 의해서 설명

되어진다는 탄성이론(Elastic theory)에 있다.

이상과 같은 마찰저항 감소현상의 기구는 여러가지 이론으로 알려지고 있지만 종합적으로 정리하면 크게 완화설과 전단설로 나누어 설명할 수 있다. 전단설이라는 것은 고속류에 있어서 경계층의 바깥쪽 흐름으로부터 경계층 또는 점성저층으로 주입하는 에너지를 고분자가 절단합에 의해 흡수한다는 견해이다. 또한, 고분자의 완화적인 변형에 의해서 난류에너지를 흡수한다는 견해이다. 또한, 고분자의 완화적인 변형에 의해서 난류에너지를 흡수한다는 견해가 완화설이다. 물론, 고분자는 층류에 있어서도 절단하는 가능성을 충분히 가지고 있기 때문에 '전단설'도 버리기가 어렵지만, 여기서는 쇄상 고분자 용액의 점탄성에 대한 분자적 이론에 기인하여, 분자의 변형에 의한 에너지 축적에 착안한 M. C. Kohn⁽¹⁶⁾의 고찰을 보면, 층류에 있어서는 분자의 운동량 확산이 전단응력의 본체이며, 이 기구에 의해서 유체의 운동에너지가 마찰열로의 소멸(dissipation)이 달성되지만, 유속이 크게 되고 경계층내의 속도구배가 크게 되면 유체의 작은 덩어리가 돌출하여 큰 운동량 수송 즉 큰 전단 저항이 발생하는 난류에로의 이행이 이루어진다.

이때, 경계층 내에 쇄상 고분자의 랜덤 코일(random coil)이 존재한다면 이것이 용이하게 변형하여 경계층 내로 주입되는 에너지를 흡수하여 준다. 결국 랜덤 코일이 일종의 부가적인 에너지를 빨아들이는 임의 역할을 수행하게 된다. 점성 저층으로부터 유체의 작은 덩어리가 돌출해 가는 대신에 고분자의 변형에 의해 에너지를 흡수하는 것이다 결과적으로 흐름은 안정화되고, 랜덤코일의 완화적인 변형에 의한 에너지 손실은 난류 혼합에 의한 것보다 훨씬 작기 때문에 보다 좋은 효율을 얻게 된다.

따라서, 난류유동저항은 대폭적으로 저하되고, 고분자의 변형에 의한 에너지 흡수 또는 전단 속도가 가장 큰 곳, 즉 벽면에서 난류 억제가 실시된다. 그러므로, 고분자는 벽면에서 최고로 난류의 성장을 억제한다는 것이다. 변형 분자는 다른 곳에서 원형을 회복하고, 벽면으로 와서 또 저항감소를 돕는다.

이상과 같이 난류마찰저항 감소현상의 기구에 대해 알아보았지만 이것은 확립된 이론이 아니라 어디까지나 학설에 불과하며 정성적, 정량적인 연구가 계속 이루어지고 있다.

2.3 저항 감소현상을 설명하기 위한 방정식의 정의

난류유동에서 점탄성유체의 마찰계수는 뉴턴유체의 마찰계수보다 훨씬 작게 관찰되고 있다. 그러나, Virk(17)는 마찰저항 감소율은 한계가 있어, 마찰저항이 최소가 되는 한계를 나타내는 점근선을 최소저항점근선(maximum friction reduction asymptotes)이라고 정의하였다. 식(1)과 같이 표현되는 최소저항점근선은 겔보기점도에 바탕을 둔 레이놀즈수(Re_a)와 무차원길이(L/D)만의 함수이지만 완전히 발달된 난류유동에서는 오로지 레이놀즈수만의 함수가 된다.

$$1/\bar{f} = 19.0 \log(Re_a \bar{f}) - 32.4 \quad (1)$$

Cho와 Hartnett⁽¹⁸⁾는 실험적 연구를 통해 식(1)을 보다 간략하게 식(2)와 같이 정리했다.

for $6000 < Re < 60000$
 $f = 0.20 Re^{-0.48} \quad (2)$

최근 Weissenberg수(W_s)라는 무차원 변수가 고분자의 종류, 농도, 분자량, 퇴화의 정도, 용매의 화학적 성분 등의 변수들이 난류 마찰성능에 미치는 영향을 설명하는데 사용되어지고 있다.⁽¹⁹⁾ 이 Weissenberg수는 유체의 특성시간 λ 와 유동의 특성시간 D/V 와의 비로 정의되며 식(3)와 같이 나타낸다.

$$W_s = (\lambda V) / D \quad (3)$$

완전히 발달된 유체의 마찰계수는 아래의 식과 같다.

$$f = f(Re_a, W_s) \text{ for } W_s < W_{sc} \quad (4)$$

W_{sc} 는 최소저항점근선에서의 Weissenberg수로서의 미한다. 이 식은 Weissenberg수가 임계값보다 작을 때 난류의 마찰계수는 Re_a 와 W_s 의 함수임을 나타내고 있다. 반대로 Weissenberg수가 임계값보다 클 때의 난류의 마찰계수는 오로지 Re_a 수만의 함수가 된다.

점탄성 물질의 구성방정식(constitutive equation)중에서 관유동의 연구에 주로 사용되는 것이 Powell-Eyring의 식⁽²⁰⁾으로 다음과 같다.

$$\eta^\infty = \eta^\infty + (\eta^0 - \eta^\infty) (\sinh^{-1} \lambda R) / \lambda R \quad (5)$$

여기서, η^∞ 는 무한전단을 점성계수이고, η^0 는 영전단을 점성계수이며, γ 는 전단율이다.

본 연구에서의 실험 결과를 사용하여 마찰저항 감소율(DR)을 결정하는 식⁽²¹⁾은 다음과 같이 정의된다.

$$DR(\%) = [1 - \frac{\Delta P_p}{\Delta P_s}] \times 100 \quad (7)$$

여기서,

ΔP_p : 유체중에 고분자를 첨가했을 때의 압력강하

ΔP_s : 고분자를 첨가하지 않았을 때의 압력강하

3. 실험 장치 및 실험 방법

Fig. 1은 본 연구를 위하여 사용한 실험장치의 개략도이다. 본 실험장치는 난류마찰저항 감소현상과 고분자의 퇴화실험을 위한 장치로써 직경이 9.8 mm이고 길이가 3500 mm인 Stainless Steel관을 Test section으로 구성하였다. Test section 상류쪽의 90° 곡관으로 인한 2차류의 영향을 최소화시키며, 난류유동에 있어서 충분히 발달된(fully-developed) 속도분포를 얻기 위해 곡관으로부터 입구길이 L_e (25-40D)보다 큰 100D(98cm)를 주었다. 유체가 순환하는 전체 Loop의 길이는 16 m로 계속하여 순환하도록 구성하였다.

뉴턴유체인 물과 더불어 실험에 사용되는 CWM은 석탄과 물의 혼합물로 고체-액체 서스펜션이며

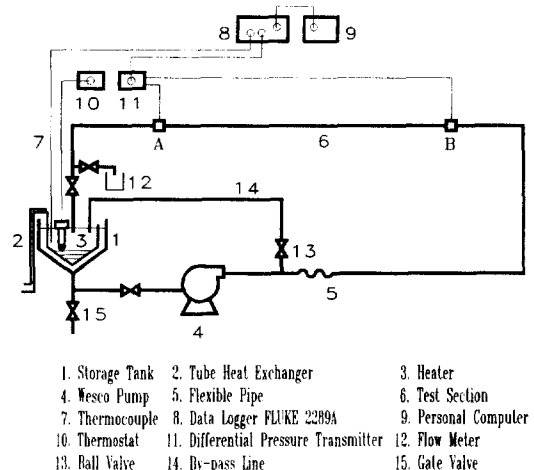


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

특히 물에 비해 점도가 높고 비뉴턴유체의 성격을 띠고 있고, 최근 대체연료의 하나로 주목받고 있는 것으로 상업적으로 구입가능한 CWM연료를 사용하였으며, 입자의 유동을 촉진시켜주기 위한 소량의 계면활성제가 포함되어 있다. CWM중에 포함된 석탄은 매우 고운 분말형태로 평균 입자 크기는 40 micrometer (200 meshpass 82%)이고 밀도는 1.417 g/cm³이다.

본 실험에서 첨가제로 사용되는 고분자물질은 분자량이 약 500~600만인 Polyacrylamide(Separan AP-273)와 분자량 1400~1500만인 Copolymer-X의 두가지이다.

실험에 필요한 고분자첨가용액은 실험전에 상온에서 screw mixer를 사용하여 장시간 섞어 고분자 분말이 용매에 완전히 용해될 수 있도록 하여 고농도의 Stock 용액을 만든 후, 이것은 저장탱크(1) 내에서 물 또는 CWM과 혼합하여 각각의 농도로 희석하여 제조하였다. 고분자를 첨가하지 않았을 때의 유체수송에서 나타나는 압력 손실을 차압계(11)로 먼저 측정 한 후에, 고분자첨가제를 첨가한 경우의 발생하는 압력 손실을 측정하였다. 이때, 발생하는 난류마찰저항 감소율은 관계식(7)로 구한다. 실험중에 관을 흐르는 유체의 온도는 관 마찰열로 인하여 상승하므로 열에 의한 고분자의 퇴화가 일어날 수 있다. 이것을 방지하기 위해 열교환기(2)로 온도를 일정하게 유지했으며, 정확한 온도 값을 열전대를 사용하여 Data Logger(8)로 신호를 받아 Personal Computer(8)로 자동 기록하였다. 그리고, 실험 도중에는 일정한 유량을 유지하기 위해 볼밸브(13)와 펌프(4)의 회전 속도를 변화시켜 조절하였고 유량계(12)를 통해 10초간 반아서 측정하였다.

사용된 고분자의 농도는 100, 200, 400, 600, 1000 ppm이고, CWM중의 석탄의 농도는 유동성을 고려하여 5%와 10%의 두가지 농도를 사용하였다.

4. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 뉴턴유체인 물과 비뉴턴유체인 CWM을 용매로 사용하였을 때 마찰저항 감소현상과 고분자의 퇴화에 영향을 미치는 주요 인자인 고분자의 종류, 고분자의 농도, 용매의 온도, CWM의 농도 등이 난류마찰저항 감소현상과 고분자의 퇴화에 미치는 영향에 대하여 실험적으로 고찰하여

보았다.

4.1 고분자의 농도에 따른 마찰저항 감소율의 비교

Fig. 2와 Fig. 3에서는 수용액에 고분자 농도를 각각 100, 200, 400, 600, 1000ppm으로 하였을 때 농도의 변화에 따라 난류마찰저항 감소율이 어떻게 변화하는가를 보여주고 있다.

Fig. 2는 Copolymer-X를 고분자첨가제로 사용하여 유속 5.3 m/s에서 실험한 경우이다. 극히 소량인 100ppm의 Copolymer-X를 유동중에 첨가했을 때 75%라는 높은 초기 마찰저항 감소율이 나타났으며 약 180분이 경과한 후에는 47%의 저항 감소율을 유지하고 있었다. 이 값은 지금까지 알려진 다른 고분자첨가제(Polyethylene oxide, Polyacrylamide, Polyacrylic acid)에 비교해 볼 때 매우 높은 것이다.

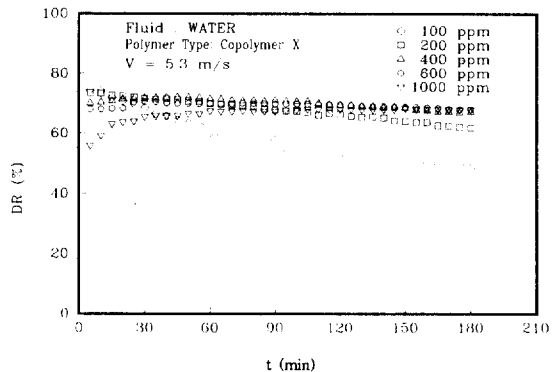


Fig. 2 Influence of Copolymer-x coconcentrations on Drag Reduction for WATER at V=5.3 m/s

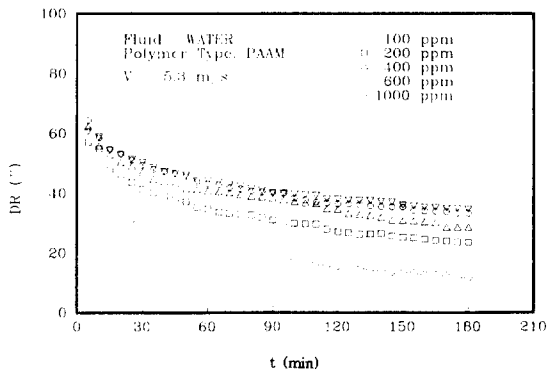


Fig. 3 Influence of Copolymer-x concentrations on Drag Reduction for WATER at V=5.3 m/s

그림에서 볼 수 있듯이 고분자첨가제의 농도를 높일수록 마찰저항 감소율이 초기에는 낮은 값을 보이고 있다. 그러나, 이러한 경향은 40분이 경과한 후부터 변화하기 시작하여 고분자의 농도가 높아질수록 큰 마찰저항 감소율을 나타낸다. 농도가 400ppm 이상에서는 마찰저항 감소율이 약 70%에 이르는 매우 높은 값을 보이고 있으며, 이 이상의 농도인 600, 1000ppm에서는 고분자 농도의 증가에 따른 난류마찰저항 감소율의 증가가 미소함을 알 수 있다.

마찬가지로 Fig. 3은 유속 5.3 m/s로 순환할 때 Polyacrylamide를 첨가한 경우이다. 우선, 농도 100 ppm의 경우를 보면 초기 저항감소율은 54.6%로 비교적 높은 값을 나타내지만 Copolymer-X의 경우와는 그 값이 약 20%의 차이가 있다. 또한, 시간이 경과함에 따라 마찰저항 감소율의 값이 급하게 감소하여 180분이 경과한 후에는 처음의 1/5에 해당하는 11.5%의 낮은 값을 보였다. 100 ppm의 농도에서 Polyacrylamide를 Copolymer-X와 비교했을 때 초기 저항감소율의 미소했던 차이는 점점 커져서 180분이 경과한 후에는 약 35%의 큰 차이를 나타내고 있다. 이 경우에도 전반적인 경향에 있어서는 고분자농도가 증가할수록 마찰저항 감소율이 높은 값을 보이고 있다. 400 ppm 이상의 농도에서는 Copolymer-X의 경우와 마찬가지로 난류마찰저항 감소율의 증가가 미소하게 나타나고 있다.

Fig. 2와 Fig. 3에 의하면 수용액에서 Copolymer-X는 초기 마찰저항 감소율에서 특이한 성향을 나타내고 있지만 전체적으로 고분자첨가제의 농도가 클수록 난류마찰저항 감소율이 증가하며 그 저항 감소율의 값은 Copolymer-X가 Polyacrylamide에 비해 월등히 우수함을 알 수 있다.

Fig. 4와 Fig. 5는 10% CWM을 용매로 사용하여 농도가 각각 100, 400, 600, 1000 ppm의 고분자를 첨가한 경우이다. Fig. 4는 Copolymer-X를 첨가한 것으로 고분자의 농도에 따른 마찰저항 감소율의 경향성은 수용액에서와 같이 초기에는 농도가 낮을수록 높은 저항감소율을 나타내고 있다. 하지만, 저항 감소율의 절대값은 수용액에서 보다 약간 낮은 것을 알 수 있다. 특히, 100 ppm의 경우 저항감소율의 급격한 저하를 볼 수 있다.

Fig. 5는 Polyacrylamide를 10% CWM에 첨가한 경우이다. 수용액에 Polyacrylamide를 첨가한

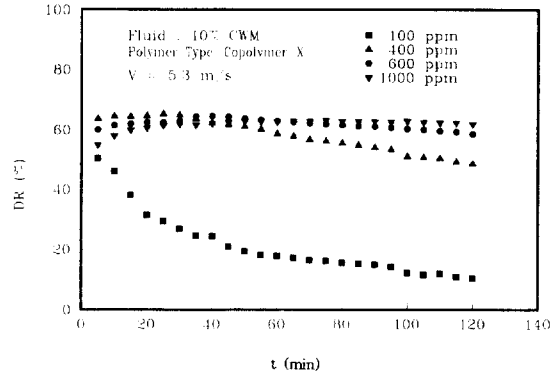


Fig. 4 Influence of Copolymer-X concentrations on Drag Reduction for 10% CWM

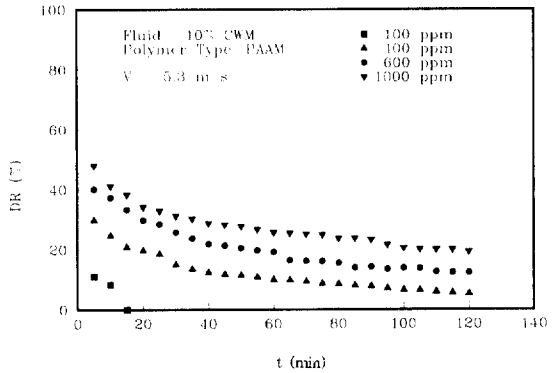


Fig. 5 Influence of Polyacrylamide concentrations on Drag Reduction for 10% CWM

경우와 같이 고분자의 농도가 증가할수록 마찰저항 감소율의 값이 증가하고 있다. 한편, 고분자농도가 100 ppm인 경우에는 마찰저항 감소율의 값이 시간의 경과에 따라 매우 큰 폭으로 감소하여 15분이 경과한 후에는 전혀 저항 감소효과가 나타나지 않고 있다.

Fig. 4와 Fig. 5를 비교해보면, 10% CWM을 용매로 사용한 경우에도 수용액에서와 마찬가지로 Copolymer-X가 초기 마찰저항 감소율도 더 높고, 뿐만 아니라 시간이 경과한 후에도 지속적으로 Polyacrylamide보다 높은 저항 감소효과를 유지하고 있음을 알 수 있다.

이상과 같은 결과를 통해 Copolymer-X는 용매에 관계없이 Polyacrylamide보다 더 우수한 첨가제임을 알 수 있다.

4.2 고분자의 종류에 따른 퇴화 경향의 비교

Fig. 6은 수용액에 Copolymer-X와 Polyacrylamide의 고분자를 첨가하여 유속 5.3 m/s로 재순환할 경우 난류마찰저항 감소현상에 미치는 고분자첨가제의 기계적 퇴화에 관하여 고분자농도를 각각 100과 1000 ppm으로 하여 관찰할 것이다. 고분자의 농도가 100 ppm일 경우에 Polyacrylamide는 43%의 초기 저항 감소율을 발생시키지만 약 10시간이 경과한 후에는 초기 값의 1/10에 불과한 6%의 효과만을 보이고 있다. 반면에, Copolymer-X는 초기의 73%라는 높은 마찰저항 감소율이 10시간이 경과한 후에도 처음 값의 1/2 수준인 33.2%를 유지하고 있다. 이것으로 Polyacrylamide가 Copolymer-X에 비해 기계적 퇴화에 훨씬 민감함을 알 수 있다. 또한, 마찰저항 감소율의 크기에 있어서도 Copolymer-X가 월등히 우수함을 보여주고 있다.

고분자농도가 1000 ppm일 경우에 마찰저항 감소율의 초기 값들은 Polyacrylamide가 62%, Copolymer-X가 58%로써 Polyacrylamide가 Copolymer-X보다 오히려 약간 높게 나타나고 있다. 이것은 앞의 Fig. 2에서 보여준 Copolymer-X의 초기 난류마찰저항 감소현상의 특이한 성향에 따른 것이다. 이와 같이 난류마찰저항 감소현상이 Polyacrylamide가 Copolymer-X보다 높게 나타나는 현상은 약 20분이 경과한 후부터 역전되기 시작한다. 그리하여, 10시간이 경과된 후 Copolymer-X는 Polyacrylamide의 27.8%의 저항 감소율의 2배가 넘는 65%의 높은 마찰저항 감소율을 여전히 유지하고 있다. Fig. 6에 의하면, 고분자 농도가 1000 ppm일 경우에 Polyacrylamide도 비교적 완만한 기계적 퇴화 경향을 보이고 있지만, Copolymer-X는 퇴화에 더욱 안정하여 거의 변화 없는 난류마찰저항 감소율을 유지하고 있다.

Fig. 7은 10% CWM에서의 고분자첨가제의 기계적 퇴화에 관한 그림이다. 고분자의 농도가 100 ppm일 경우 Polyacrylamide는 마찰저항 감소율의 초기값이 12%에 불과하고, Copolymer-X는 45%이다. 이처럼 초기값에서 Copolymer-X와 Polyacrylamide는 약 30% 가량의 차이를 나타내고 있으며, 기계적 퇴화의 영향도 Copolymer-X에 비교할 때 Polyacrylamide는 매우 급한 퇴화 경향을 보여 15분이 경과한 후에는 마찰저항 감소현상이 완전히 사라졌음을 알 수 있다.

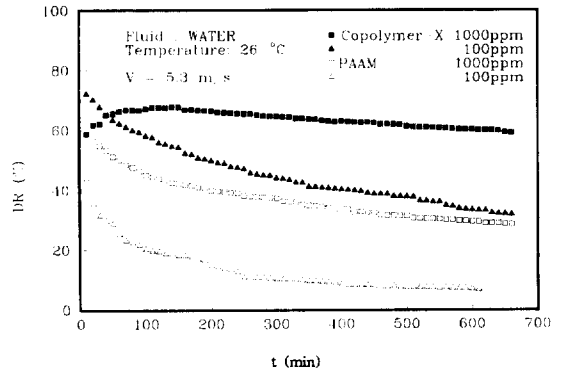


Fig. 6 Comparisons of Polymer Degradation for Copolymer-X and Polyacrylamide in water

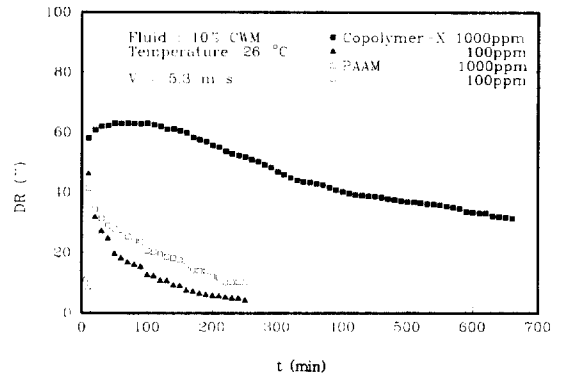


Fig. 7 Comparisons of Polymer Degradation for Copolymer-X and Polyacrylamide in 10% CWM

한편, 1000 ppm의 경우에는 Polyacrylamide는 41%, Copolymer-X는 58%로 약 20% 차이의 초기 마찰저항 감소율을 기록하고 있다. 그러나, 시간이 경과하면서 Copolymer-X는 마찰저항 감소율이 약간 증가하다가 서서히 감소하는 경향을 나타내지만, Polyacrylamide는 급한 퇴화경향을 보이고 있다. 그리하여, 마찰저항 감소율은 시간이 경과하면서 그 값의 차이의 폭이 커지면서 약 250분이 경과한 후에는 Polyacrylamide에 의한 저항 감소율은 10%이하로 떨어진다. 반면에, Copolymer-X는 51.4%로 초기치와 거의 같은 저항 감소율을 유지하고 있다. 또한, Copolymer-X의 경우는 약 11시간이 경과한 후에도 31.4%의 마찰저항 감소율을 나타내고 있다.

이러한 결과로 고분자첨가제의 기계적 퇴화의 경

항은 용매에 관계없이 고분자의 농도가 높을수록 안정하고, Copolymer-X가 Polyacrylamide보다 퇴화에 매우 안정함을 알 수 있다. 물론, 저항감소값은 비뉴턴유체인 CWM에서 보다는 뉴턴유체인 수용액에서 높게 나타나고 있다. 이는 CWM이 고체-액체 서스펜션으로 작은 분말을 함유하고 있어 그것이 유체유동에 영향을 미치고 있으며, 고분자의 완전한 용해를 방해하여 일어나는 현상일 것이라고 사료된다.

이러한 현상에 대한 유변학적 특성(rheological property)과 분자이론(molecular theory) 등에 관한 이론적고찰이 이루어진다면 난류마찰저항 감소현상을 연구하는데 큰 발전의 계기가 될 것이다.

4.3 CWM의 농도에 따른 마찰저항 감소율의 비교

Fig. 8은 5%와 10%의 CWM의 경우에 Copolymer-X를 400 ppm 첨가하여 5.3 m/s의 일정한 유속으로 순환시킬 때 CWM의 농도가 저항 감소현상에 미치는 영향을 관찰한 것이다. 이때, 고분자첨가제의 첨가 초기에는 5%CWM이나 10%CWM의 마찰저항 감소율이 각각 63.5%와 63.1%로 거의 비슷한 값을 보이고 있다. 그러나, 시간이 경과하여 40분을 전후하여 저항 감소율의 차이가 발생하고 있으며, 약 120분이 경과한 후에는 5%CWM은 60%, 10%CWM은 48.1%의 마찰저항 감소율을 나타내고 있다. 이는 고분자가 고체의 표면에 흡착(adsorption)하는 성질을 가지고 있기 때문에 석탄의 농도가 증가할수록 고분자가 흡착할 수 있는 면적이 넓어져 많은 흡착이 이루어지는 것이라

추정된다. 그 결과, 석탄농도의 증가가 고분자첨가제의 퇴화율을 증가시키고 아울러 초기 마찰저항 감소율도 감소시키고 있음을 알 수 있다. 새로운 합성고분자첨가제인 Copolymer-X의 경우에는 고분자가 석탄 표면에 흡착하기 때문에 발생하는 퇴화 현상이 매우 미소하게 나타나고 있다고 할 수 있다 뿐만 아니라, 석탄농도의 증가에 따른 고분자의 기계적 퇴화의 경향도 매우 완만함을 보이고 있다. 이것으로, Copolymer-X는 대체 연료종의 하나로 연구되고 있는 CWM의 장거리수송에도 매우 적합한 고분자첨가제가 될 수 있을 것이다.

4.4 동일 유속에서의 온도변화에 따른 마찰저항 감소율의 비교

Fig. 9는 수용액에 200 ppm의 고분자첨가제를 첨가하여 유속 5.3 m/s로 순환하였을 때 온도 변화에 따른 마찰저항 감소현상을 관찰한 것이다. Fig. 9에 의하면 고분자의 종류에 관계없이 온도가 상승하면서 마찰저항 감소율의 크기는 미소하게 저하되는 경향을 나타내고 있다. 한편, 고분자첨가제의 기계적 퇴화의 경향성을 보면 온도의 영향은 거의 나타나고 있지 않다.

Fig. 10은 400 ppm을 첨가했을 경우에 난류마찰저항 감소현상에 미치는 온도의 영향을 알 본 것이다. 이 경우에도 Fig. 9에서와 마찬가지로 고분자의 기계적 퇴화는 상온에서와 거의 일치하고 있으며, 또한, 온도의 상승이 저항 감소율에 미치는 영향도 극히 미소하게 나타나고 있다.

Fig. 9와 Fig. 10을 분석해 볼 때, 고분자의 농도가 증가하면서 난류마찰저항 감소현상에 미치는 온

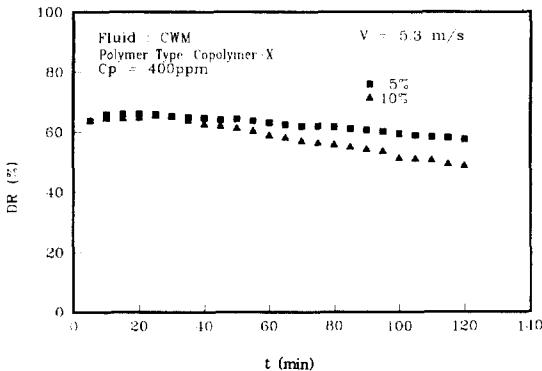


Fig. 8 Influence of Coal concentrations on Drag Reduction with Copolymer-X at 400 ppm

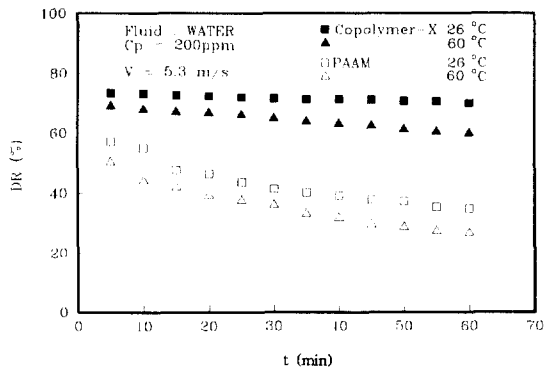


Fig. 9 Influence of temperature on Drag Reduction for WATER at 200 ppm

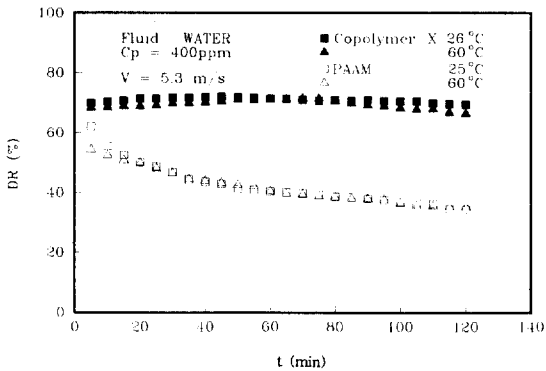


Fig. 10 Influence of temperature on Drag Reduction for WATER at 400 ppm

도의 영향이 작아지고 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 고분자의 농도를 400 ppm까지만 실험하였으나 그 이상의 고분자 농도에 대한 결과를 예측한다면 농도가 증가할수록 온도의 변화에 따른 마찰저항 감소율의 저하는 더욱 미소하여 난류마찰저항 감소현상에 영향을 미치지 않을 것이라고 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 뉴턴유체인 물과 비뉴턴유체인 CWM을 용매로 사용하여 마찰저항 감소현상과 고분자의 퇴화에 영향을 미치는 주요 인자인 고분자의 종류, 고분자의 농도, 용매의 온도 등이 난류마찰저항 감소현상과 고분자의 퇴화에 미치는 영향에 대하여 실험적으로 고찰하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 수용액과 10% CWM에서 모두 고분자첨가제의 농도가 높아질수록 더 높은 난류마찰저항 감소현상이 발생하였으며 기계적 퇴화에도 안정함을 보이고 있다.
- (2) 수용액의 경우 각 농도에서 Copolymer-X는 이미 안정한 고분자로 알려진 Polyacrylamide보다도 월등히 높은 마찰저항 감소율을 나타냈으며 장시간(11시간)이 경과한 후에 그 우수성은 더욱 뚜렷하게 나타나고 있다.
- (3) 10% CWM을 용매로 사용한 경우에도 모든 농도에서 Copolymer-X는 Polyacrylamide보다 매우 높은 마찰저항 감소율을 나타내고 있다. 즉, 수용액에서와 마찬가지로 Copolymer-X가 Poly-

acrylamide보다 기계적 퇴화에 대한 안정성은 물론이고 난류마찰저항 감소효과에서도 뛰어나다.

(4) Copolymer-X를 5%와 10% CWM에 400 ppm로 첨가하였을 때, 새로운 합성고분자인 Copolymer-X는 석탄의 농도가 낮을수록 기계적 퇴화에 안정하고 더 높은 난류마찰저항 감소율을 나타내고 있다.

(5) 수용액에 Copolymer-X와 Polyacrylamide를 각각 200, 400 ppm 첨가하여 유속 5.3 m/s로 순환한 결과, 용매의 온도가 높을수록 난류마찰저항 감소율은 미소한 값이지만 저하되는 경향을 보이고 있다. 그러나, 온도의 상승이 고분자의 기계적 퇴화의 경향성에는 거의 영향을 미치지 않았다.

이상과 같은 결과로 Copolymer-X는 극히 소량으로 매우 높은 난류마찰저항 감소현상을 발생시키고, 뿐만 아니라 기계적 퇴화에도, 이미 잘 알려진 Polyacrylamide에 비교할 때 더욱 우수한 안정도를 가지고 있음을 알 수 있었다. 즉, Copolymer-X는 Poly(ethyleneoxide)의 높은 초기 마찰저항 감소율과 Polyacrylamide의 기계적 퇴화에 대한 안정성 등의 장점만을 보강한 새로운 마찰저항 감소용 고분자첨가제로써 유용성이 매우 크다고 볼 수 있다. 따라서, CWM과 같은 유체의 장거리 수송에는 물론이고, 지역 냉난방시스템, 원유수송 등에 응용할 경우에 지대한 에너지 절감 효과가 기대된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구지원과제(91-0200-05)의 연구비 일환으로 연구되었으며 관계제위에 심심한 사의를 표합니다.

참고문헌

- (1) Toms, B. A., 1948, "Some observations on the flow of linear polymer solutions through straight tubes at large Reynolds numbers," Proc. 1st Int. Congress on Rheology, Vol. 2, pp. 135~141, North Holland Publishing Co., Amsterdam.
- (2) Fabula, A. G., 1971, "Fire fighting benefits of polymeric friction reduction" Trans ASME, J. Basic Eng. pp. 453.
- (3) Hoyt, J. W., 1972, "The effect of additives on

- fluid friction" *Trans ASME, J. Basic Eng.* pp. 94 ~ 258.
- (4) Burger, E. D., Chorn, L. G. and Perkins, T.K., 1980, "Studies of drag reduction conducted over a broad range of pipeline conditions when flowing Prudhoe Bay crude oil" *J. Rheology* pp. 24 ~ 603.
- (5) Golda, J., 1986, "Hydraulic transport of coal in pipes with drag reducing additives," *Chem. Eng. Comm.* pp. 43~53.
- (6) Sellin, R. H. J., Hoyt, J. W. and Scrivener, O., 1982, "The effect of drag reduction additives on fluid flows and their industrial applications. Part 1 : Basic aspects" *J. Hydraulic Res* pp. 20~29.
- (7) Snamprogetti, S. P. A., 1986, "Hydrotransport 10", Paper A3, 10th International Conference on the Hydraulic Transport of Solid in Pipes, Innsbruck, Austria : 29~31 October.
- (8) Schnabel, W., 1981, "Polymer Degradation," pp. 64~94, Hanser, Munchen.
- (9) Astarita, G., 1965, "Possible Interpretations of the Mechanism of Drag Reduction in Viscoelastic Liquids," *Int. Eng. Chem. Fundam.*, Vol. 4, pp. 354.
- (10) Gadd, G. E., 1965, "Turbulence Damping and Drag Reduction Produced by Certain Additives in Water," *Nature*, Vol. 206, pp. 463.
- (11) Gadd, G. E., 1966, "Differences in Normal Stress in Aqueous Solutions of Turbulent Drag Reducing Additives," *Nature*, Vol. 212, pp. 1348.
- (12) Johnson, B., and Barchi, R. H., 1968, "Effect of Drag Reducing Additives on Boundary Layer Turbulence," *J. Hydronautics*, Vol. 2, pp. 108.
- (13) Paterin, A., 1971, "Molecular Model of Drag Reduction by Polymer Solutes," *Nature*, Vol. 227, pp. 598.
- (14) Lumley, J. L., 1973, *Science Macromolecular Reviews*, J. Polymer, 7, PP. 263.
- (15) de Gennes, P. G., 1990, "Introduction to Polymer Dynamics," pp. 34~54, Cambridge University Press.
- (16) Kohn, M. C., 1973, *Science Polymer Physics*, Ed., J. Polymer, 11, pp. 2339.
- (17) Virk, P. S., Mickley, H. S., and Smith, K. A., 1970, "The Ultimate Asymtote and Mean Flow Structure in Tom's Phenomenon," *Trans. ASME, J. Applied Mechanics*, Vol. 37, pp. 448 ~493.
- (18) Cho, Y. I. and Hartnett, J. P., 1982, "Non-Newtonian Fluids in Circular Pipe Flow," in *Advances in Heat Transfer*, Vol. 15, pp. 59~141, Academic Press, New York.
- (19) 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 Argonne National Laboratory, ANL-87-49.
- (20) 유상신, 엄정섭, 전찬열, 1989, "저항 감소현상을 나타내는 폴리머용액의 퇴화 영향에 관한 실험적 연구," 제17권 제 3호, pp. 14~25.
- (21) Golda, J., 1985, "Hydraulic Transport of Coal in Pipes with Drag Reducing Additives", *Chem. Eng. Commun.*, Vol. 43, pp. 53~67.