

마찰감소유체의 저하현상에 관한 연구

노태호, 박종성, 김종엽, 윤형기*, 서항석*
충남대학교 고분자공학과, 한국에너지기술연구소 건물연구부

Studies on the degradation of drag reducing fluid

Tae Ho Roh, Jong Seong Park, Chongyoun Kim, Hyungkee Yoon*, Hangsuk Suh*
Dept. of Polymer Engineering, Chungnam National University,
Building Energy Department, Korea Institute of Energy Research*

서론

마찰감소현상(drag reduction phenomena)이란 ppm단위의 미량의 고분자를 첨가한 용액이 관내부를 난류로 흐를 때 벽면에서의 마찰이 현저히 감소되는 현상이다. 마찰감소현상은 1948년에 처음으로 발견되어 여러 부문에서 이의 응용에 관한 연구가 진행되고 있다. 특히 TransAlaska Pipeline의 원유수송에는 시스템 개발이 완료되어 사용중에 있으며, Union Carbide의 화재진화용의 Rapid water등도 시판되고 있다.

대단위 건물이나 지역냉난방시스템의 열수송유체를 순환시키는데 있어서도 고분자물질을 첨가한 마찰감소유체를 사용하면 열손실 및 유체순환에 소요되는 비용을 수십 퍼센트 줄일 수 있을 것으로 예상되고 있다. 그러나 냉난방 시스템의 경우에는 장기간 사용할 때 열 및 기계적에너지에 의하여 첨가되는 고분자의 사슬이 끊어지는 문제가 가장 큰 문제중의 하나로 지적되고 있다. 마찰감소 현상은 우선 그 메카니즘이 확립되어 있지 못하여 지난 수십년간 논쟁의 대상이 되어 왔으며, 따라서 마찰감소유체내의 고분자의 사슬이 분해됨에 따라 생기는 저하현상(degradation)은 그 원인을 정확히 규명하는데 한계가 있으므로 우선적으로 저하현상에 대한 현상파악이 이루어 져야 할 것이다. 특히 시스템개발을 위하여는 사용조건, 첨가제의 종류 및 농도에 대한 연구를 통하여 적절한 운전조건을 결정하고 장기사용에 따른 문제점을 파악하여야 할 필요가 있다.

본 연구에서는 고분자의 저하현상이 단순한 기계적인 에너지에 의하여 사슬이 끊어지는 현상이 아니라 기계적인 에너지에 의한 사슬의 끊김과 이에 연속하여 유도되는 화학적인 메카니즘에 의한 저하현상이 동시에 작용한다는 가정을 기본으로 실험연구를 수행하였다. 이를 위하여 실험실규모의 마찰감소현상 실험장치를 제작하여 여러 운용조건(operating condition), 첨가제의 종류와 첨가량에 따른 고분자의 저하현상을 실험적으로 검토하였다.

실 험

마찰감소유체로서 polyacrylamide(PAAm) 수용액을 사용하였다. PAAm으로는 일반적으로 널리 사용되고 있는 Aldrich Chem.의 Polyacrylamide - co - polyacrylic acid 시약을 후처리 없이 사용하였다. 용매인 물은 증류장치에서 1차 증류된 것을 사용하였다. 고분자용액(마찰감소유체)은 먼저 10,000ppm(1%)의 진한 master solution을 제조하고, 이를 원하는 농도로 묽혀서 제조하였다. 산화방지제로는 isopropyl alcohol($\text{CH}_3\text{CHOHCH}_3$)과 sodium sulfite (Na_2SO_3)를 용액중의 고분자의 양과 관계하여 4배까지 첨가하였다.

실험장치는 유체가 흐르는 스테인리스스틸관과 이 관의 양쪽에 원통형 스테인리스스틸 저장용기로 구성하고 여기에 저장용기와 관사이의 연결부분, 질소분배

를 이용한 가압장치, 유량측정부, 차압력계(differential pressure transducer), 데이터 획득장치(data logger), computer 등을 부착 또는 연결하여 제작하였다. 스테인리스 스틸 실험관은 내경 4.25mm, 총 길이 5.15m의 것을 사용하였다. 관내부에서의 전단응력 이외의 다른 contraction이나 boundary layer growth 등에 의한 연신 유동 등의 효과가 배제되도록 관경의 급격한 변화를 피하였다.

Degradation 실험은 고분자 용액이 양쪽 저장용기로 관을 통하여 반복적으로 왕복하도록 하여 shear degradation이 생기도록 실시하였다. 이 경우에는 용액이 지나가는 모든 valve는 완전히 열어 valve내에서 기하학적으로 복잡한 부분을 지나지 않도록 하고, 유량은 질소분배에 부착한 압력조절계를 이용하여 조절하였다. 저하현상실험에서는 밀어주는 질소의 압력을 일정하게 하고, 이 때 정량의 유체가 흘러 나오는 시간을 측정하였다. 관 내부에 기포가 들어가지 않도록 하기 위하여 용기에 채운 30 liter 중 1 liter는 매 실험에서 저장용기에 남아 있도록 하였다. 저하현상의 원인의 하나인 산소와의 산화반응을 억제하기 위하여 용액표면은 질소분위기를 유지하여 주었다. 용액이 모두 15번 왕복하도록 반복실험하였다.

저하 현상실험의 대상으로는 PAAm 200 ppm 용액을 기준용액으로 설정하고, 여기에 IPA(iso-propyl alcohol) 또는 SS(sodium sulfite)를 800 ppm 까지 첨가한 용액을 선택하였다. 온도는 섭씨 60도로 고정하였으나, 온도의 효과를 검토하기 위하여 기준용액에 대하여 15 - 70도 범위에서도 실험하였다.

난류로 흐르는 마찰감소유체내의 고분자의 저하현상은 용액의 성질 뿐만 아니라 유동조건에 따라서도 달라진다. 열유체의 수송시스템은 일반적으로 관경이 크고, Reynolds 수가 큰 조건에서 운용되나 실험실적으로 이러한 조건을 만족시키면서 실험할 수는 없다. 따라서 본 연구에서는 관벽에서의 전단응력을 고려하여 Reynolds수가 20,000일때를 초기값으로 하여 실험을 하였다. 또한 온도는 기포발생에 의한 문제를 배제하기 위하여 섭씨 60도로 정하였다.

결과 및 고찰

농도 10 - 150ppm의 PAAm 용액을 대상으로 마찰감소의 효과를 검토하기 위한 실험을 실시하였으며, 그림 1에 결과를 도시하였다. Reynolds수를 계산하기 위한 점도값은 용액의 점도값을 사용하지 않고 용매인 증류수의 값으로서 계산하였다. 그림에서 용액의 농도가 진하여짐에 따라 마찰감소효과는 점점 더 커지며, 150 ppm 이상이 되면 농도가 더 진하여 지더라도 더 이상의 마찰감소가 증가하지 않는 Virk의 MDR (maximum drag reduction)에 다다르는 것을 확인할 수 있다. 용액의 농도가 진하여짐에 따라 층류영역의 f 값이 뉴턴성유체보다 크게 나타나고 층류에서 난류로의 전이점도 Re 가 큰 값으로 이동되는 것을 볼 수 있는데, 이는 Re 를 계산할 때 용액의 점도가 아닌 용매의 점도를 사용하였기 때문이다. 10 - 200ppm 용액을 대상으로한 마찰감소실험결과에서 충분한 마찰감소를 얻기 위하여는 200ppm 이상임을 알 수 있다. 저하현상에 관한 연구가 목적인 본 연구에서는 충분한 마찰감소효과를 얻되 고분자가 퇴화되면 MDR을 나타내지 못하여 저하정도를 알 수 있도록 낮은 농도의 용액을 대상으로 실험하는 것이 저하현상을 추적하는 데 가장 적절할 것으로 판단되었다. 이는 용액의 농도가 너무 높으면 퇴화현상이 생기더라도 특히 초기단계에는 계속적으로 MDR을 나타내게 되기 때문이다. 따라서 상온에서는 MDR을 나타내고 고온에서는 MDR로 부터 벗어나는 200 ppm 용액을 저하현상실험을 위한 표준용액의 조성으로 정하였다.

저하현상실험 대상의 표준용액을 결정한 후, 이 용액에 저하억제를 위하여 IPA 또는 SS를 첨가할 때 마찰감소효과에 미치는 영향을 조사하였으며 고분자의 농도와 유사한 범위내에서는 저하억제제를 첨가하여도 마찰감소효과는 변화가 없

음을 볼 수 있었다.

먼저 표준용액, 즉 안정제를 첨가하지 않은 200ppm의 PAAm 수용액을 대상으로 난류에 의한 고분자의 저하현상을 검토하였다. 그림 2에는 유체가 난류로 관내부를 왕복할 때, 왕복횟수에 따라 유체에 첨가된 고분자의 저하현상에 의하여 마찰감소 효과가 감소되는 결과를 도시하였다. 그림의 가로축에는 왕복횟수를, 세로축에는 뉴튼성유체의 난류에서의 마찰계수를 100으로 볼때 시료용액이 나타내는 마찰계수와 뉴튼성유체가 나타내는 마찰계수의 차이를 % friction reduction 이라 정의하여 도시하였다. 유체가 계속적으로 난류로 흐르면 마찰감소효과가 감소되는 것을 볼 수 있으며, 이는 다른 유동조건이 모두 일정하게 유지되고 있으므로 고분자의 저하 현상에 의하여 생기는 것에 기인하는 것으로 판단된다. 마찰감소효과는 초기상태로 부터 거의 같은 비율로 감소되는데, 왕복횟수가 훨씬 더 많아지면 감소의 비율은 줄어들 것으로 예상되나 결국에는 마찰감소의 효과가 거의 나타나지 않을 것임을 유추할 수 있다. 따라서 이러한 효과를 지속적으로 유지시키기 위하여는 적절한 안정제를 첨가하여야 할 것이다.

그림 2에서 IPA 또는 SS를 200 ppm 첨가한 용액은 첨가되지 않은 용액에 비하여 초기단계에서는 거의 비슷한 저하현상이 관찰되지만 왕복횟수가 커짐에 따라서 마찰감소효과가 감소되는 비율이 현저히 작은 것을 볼 수 있다. IPA와 SS는 모두 200ppm이상에서는 더 이상의 안정화 효과가 나타나지 않았다.

온도에 따른 저하현상을 파악하기 위하여 섭씨 15 - 70도범위에서 200 ppm의 SS를 첨가한 용액을 사용하여 등온으로 일정한 Reynolds수에서 저하현상 실험을 수행하였으며, 그림 3에 결과를 도시하였다. 유체가 계속적으로 shear를 받음에 따라 생기는 저하현상은 낮은 온도일수록 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 다음과 같이 설명될 수 있다. 온도가 낮으면 점도가 크고, 따라서 같은 Reynolds수값을 갖기 위하여는 유속이 커야한다. 따라서 온도가 낮은 경우에는 높은 경우보다 더 높은 전단응력을 받게되며, 결국 낮은 온도에서는 높은 온도에서보다 저하현상이 크게 나타난다. 한편 온도가 올라가면 전단응력에 의하여 일단 생긴 radical이 전파반응에 의하여 저하현상을 가속화 할 수 있으나 본 실험에서의 경우 앞의 안정제의 효과에서 논의 되었듯이 첨가된 200 ppm의 SS에 의하여 radical이 전파되는 것이 충분히 억제되었기 때문에 온도가 높다고 하더라도 화학적인 원인으로 저하가 진행되지는 않을 것이다. 즉 본 실험에서 관찰한 저하현상은 대부분의 연구에서와는 달리 전단력에 의한 기계적인 저하현상으로 판단된다.

본 실험의 연구 결과에서 유체가 연속적으로 전단력을 받게 되면 초기에는 비교적 빨리 저하가 진행되지만 후기에는 초기보다는 저하속도가 감소하는 것을 알 수 있었다. 따라서 화학적으로 충분히 안정시킬 수 있는 안정제가 첨가되면 마찰감소현상을 실제로 적용하여 사용하고자 할 때 기계적인 저하현상은 사용초기이외에는 충분히 안정화될 것으로 생각된다. 이러한 결과는 Choi, Cho and Kasza(1992)의 연속적인 730시간의 실험결과에서도 초기에 비교적 빠른 저하를 보이다 안정화된 것과는 일치하는 것이다.

참고문헌

- Choi, S.U.S., Y.I. Cho and K.E. Kasza, 1992, "Degradation effects of dilute polymer solutions on turbulent friction and heat transfer behavior", *J. Non-Newton. Fl. Mech.*, **41**, 289-307.

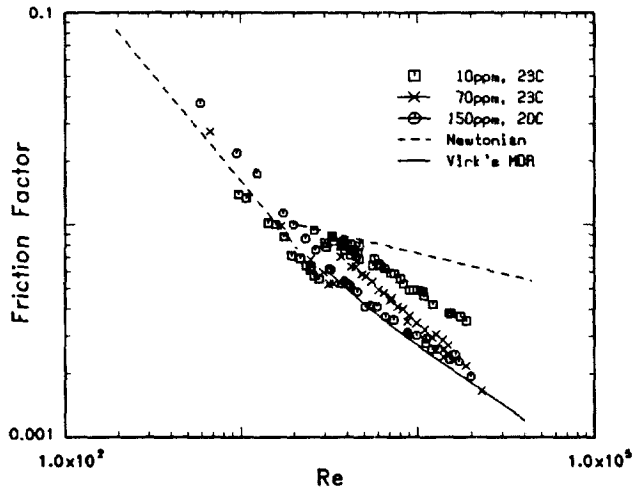


Fig. 1. Drag reduction results of undegraded polymer solutions.

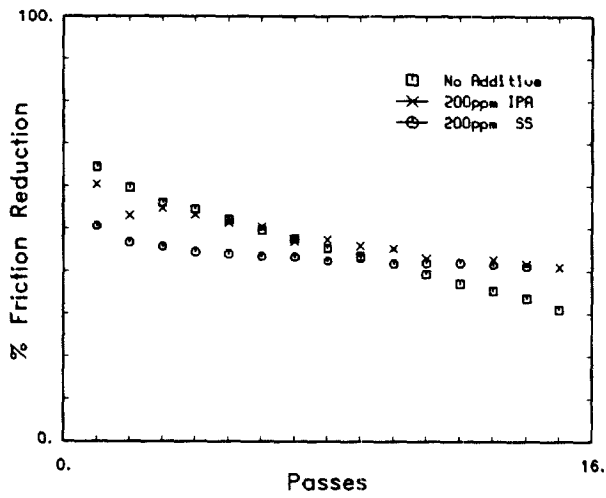


Fig. 2. Effect of stabilizers on % friction reduction as a function of pass.

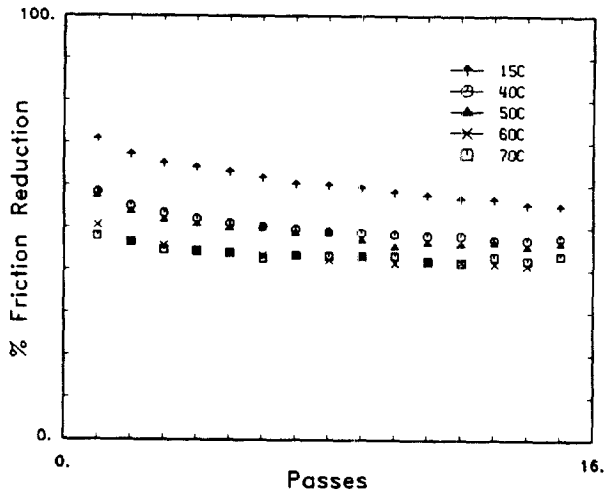


Fig. 3. Effect of temperature on % friction reduction as a function of pass.