

## 저온에서 계면활성제를 첨가한 합성고분자 수용액의 퇴화완화에 대한 연구

김남진 · 이재용 · 윤석만\* · 김종보\*\*

인하대학교 대학원, \*인하대학교 기계기술연구소

\*\*인하대학교 기계공학과

### Study on the Degradation Alleviation of Synthetic Polymer Solution Using Addition of Surfactant Additives at Low Temperature

Nam Jin Kim, Jae Yong Lee, Seok Mann Yoon\* and Chong Bo Kim\*\*

Graduate School, Inha University,

\*Research Institute for Mechanical Engineering, Inha University

\*\*Department of Mechanical Engineering, Inha University

#### 요 약

난류상태로 유동중인 고분자 수용액은 순수 용매만의 경우와 비교할 때 동일유량에서 초기에 높은 마찰저항감소효과를 보이며, 이러한 마찰저항감소효과는 펌프의 펌핑능력 증대로 큰 경제적 이익을 가져다준다. 그러나, 고분자 수용액은 그 극적인 마찰저항감소효과에도 불구하고 유동 중에 가해지는 기계적 에너지, 열에너지 등에 의해서 초기의 높은 마찰저항감소효과를 점차적으로 상실하게 되기 때문에, 고분자 수용액의 퇴화를 완화시키기 위한 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 기계적 퇴화특성이 비교적 강한 합성고분자와 계면활성제의 농도합계를 100 wppm으로 고정하고 비율을 11가지로 세분화하여 10°C의 온도에서 유속 1.5 m/sec, 3.0 m/sec 및 4.5 m/sec에 대한 퇴화경향을 알아보는 실험을 수행하였으며, 각 조건에서 합성고분자와 계면활성제의 적정비율을 관찰하였다. 실험 결과, 각 속도에서 시간에 따른 퇴화경향은 고속에서 기계적 에너지에 의한 퇴화를 볼 수 있었고, 계면활성제와 합성고분자를 혼합하여 첨가했을 경우 저온에서도 퇴화완화효과가 있음을 확인하였다.

**Abstract** — The turbulent flow friction of water solution with polymer dramatically reduced compared with that of pure water. This effect named the drag reduction and offers significant reduction in pumping power and energy consumption. However, in spite of dramatic drag reductions, intense shear forces and high temperature in the flow cause a loss in drag reduction effectiveness due to degradation in polymer solutions. These degradation behaviors are found to be strongly dependent on temperature. In the present investigation, mechanical and thermal degradation studied to avoided by adding materials such as surfactant to the polymer solution, which enhance the bonding force between molecules. In the present study, Copolymer and SDS were utilized and mixed in 11 different mixture ratios, which total concentration was fixed at 100 wppm. Degradation of Copolymer-SDS mixture solutions was experimentally investigated with various flow average velocities of 1.5 m/sec, 3.0 m/sec and 4.5 m/sec in closed loop at the temperature of 10°C. Degradation characteristics of polymer solution without surfactant show a radical loss of drag reduction rates at high velocity. It confirmed that the relievable effect of degradation of surfactant at low temperatures.

#### 1. 서 론

유동 중인 유체는 주위 물체와의 상대운동에 의해서 항력이 발생하게 된다. 항력은 유체와 물체사이의 마찰

등에 의해서 생기는 저항으로 유체나 물체의 운동을 구속하게 된다. 이러한 현상은 자연에서 쉽게 발견될 수 있는 현상으로 항력을 줄이기 위한 다양한 노력이 행해져 왔다 만약 관내에서 항력에 의한 유체의 마찰저항을 효

과적으로 줄일 수 있다면, 유량을 공급하는 펌프동력을 줄일 수 있고, 같은 동력으로 더 많은 유체를 수송할 수 있어 큰 경제적 이익을 얻을 수 있다. 이에 대한 많은 연구가 진행되어 왔는데 리블렛(riblet)의 이용, 관에 조도(roughness)를 주는 수동적인 방법과 유체에 첨가제를 사용하여 유체의 유동특성을 변화시켜 마찰저항을 감소시키는 능동적인 방법이 있다. 특히 첨가물을 이용하는 방법은 타 방법에 비하여 높은 마찰저항감소효과를 갖는다. 지금까지 첨가제로써 연구되어온 물질은 고분자, 계면활성제, 섬유 및 고체입자 등으로 이 중에서 고분자 첨가제는 극소량으로도 높은 초기 마찰저항감소효과를 나타내므로 관심의 대상이 되고 있다.

고분자를 이용한 마찰저항감소효과의 최초 연구는 1948년 Toms<sup>[1]</sup>에 의해 시작되었다. 그는 유기용매인 클로로벤젠에 소량의 폴리메타크릴산을 용해시켜 난류유동의 마찰저항이 크게 감소함을 보였는데, 이러한 효과를 Toms 효과라고 한다. 첨가제를 이용한 마찰저항감소방법은 이미 섬유입자나 펄프 등에서 관찰되었지만 극히 미량의 첨가제를 이용하여 유동저항의 극적인 저하를 가져온 최초의 연구로서 이 이후로 다양한 연구가 진행되는 계기가 되었다. Elata<sup>[2]</sup>에 따르면 고분자의 마찰저항감소효과의 원인은 난류유동에서 점성저층의 두께가 증가하여 유동이 층류화되기 때문이라고 발표하였다. Goren 등<sup>[3]</sup>이 고분자첨가제(WSR 301) 10 wppm을 직경 2 inch 관에 유동시킨 결과, Re수가  $1.5 \times 10^5$ 에서 최고 71%의 마찰저항감소율을 얻었다. 그는 마찰저항감소효과의 원인 중의 하나는 고분자첨가제가 벽면에서 에디점도를 감소시켜 난류를 억제하기 때문이라고 예측하였다. Virk<sup>[4]</sup>에 의하면 마찰저항감소효과는 고분자의 종류, 농도, 관의 직경 등 많은 변수들의 함수이지만 마찰저항감소효과의 극한은 이러한 변수들에 의존하지 않음을 규명하였다. Lee 등<sup>[5]</sup>은 분자첨가제(PAAM)와 마찰저항감소효과를 갖는 섬유부유물을 직경 24 mm, 45 mm 및 70 mm의 관내에 800 wppm 고분자와 200 wppm 섬유를 첨가하였을 때 같은 Re에서 직경이 작을수록 효과가 크며, 두 첨가제를 동시에 사용하는 경우가 각각 사용하는 경우보다 효과가 더 우수하고 퇴화도 완만해지는 결과를 얻었다. Patterson 등<sup>[6]</sup>은 폴리에틸옥사이드를 카복실비누 수용액에 넣어 난류조건하에서 마찰저항감소효과를 측정 한 결과, 비누의 농도가 증가함에 따라 마찰저항감소효과가 강화되는 결과로부터 고분자와 계면활성제를 함께 첨가하면 마찰저항감소효과를 향상시킬 수 있음을 보고하였다. Choi 등<sup>[7]</sup>은 Separan 용액을 사용하여 7.2°C와 87.8°C의 온도 조건에서 퇴화경향을 실험한 결과, 7.2°C에서 30일 동안 50% 이상의 마찰저항감소효과를 보인 반면, 87.8°C에서는 약 8시간만에 10% 이내로 떨어짐을 관찰하였다. 따라

서 고온에서의 퇴화는 저온에서보다 급격히 일어나며 기계적 퇴화보다는 열적퇴화가 지배적인 특성임을 규명하였다. Durst 등<sup>[8]</sup>은 아크릴레이트 100 wppm 용액을 사용하여 40°C와 90°C에서 실험한 결과, 90°C에서 퇴화가 급격히 진행되어 마찰저항감소효과를 4시간만에 상실한다고 보고하였으며, 이러한 열적퇴화를 방지하기 위해 고분자 수용액 중 자유산소와 자유금속이온을 제거시켜주는 안정화첨가제를 사용하여 40°C의 퇴화경향과 일치시켰다. Myska 등<sup>[9]</sup>에 따르면 고분자 수용액은 높은 전단응력에 의해서 퇴화되어 마찰저항감소효과를 상실하지만, 양이온 계면활성제인 Harbon-G를 이용하여 실험한 결과, 고분자와 마찬가지로 높은 전단응력때문에 퇴화되지만 전단응력이 제거되면 다시 마찰저항감소특성을 회복한다고 보고하였다. 김남수 등<sup>[10]</sup>은 CWM과 물에 폴리아크릴아마이드(PAAM)와 합성고분자(Copolymer)를 첨가하여 재순환실험을 수행한 결과, 폴리아크릴아마이드보다 합성고분자가 기계적퇴화에 우수한 특성을 보였다. 윤석만 등<sup>[11]</sup>은 합성고분자에 계면활성제(SDS, Sodium Dodecyl Sulfate)를 첨가함으로써 고온에서의 열적퇴화를 완화시킬 수 있음을 보였다.

따라서 본 연구에서는 기계적 퇴화특성이 우수한 합성고분자를 이용하여 온도 10°C와 80°C에서 유속 1.5 m/sec, 3.0 m/sec 및 4.5 m/sec에 따른 마찰저항감소효과의 퇴화특성을 알아보고, 저온 10°C에서 계면활성제가 합성고분자의 퇴화를 얼마나 보완할 수 있는지와 최적비율을 제시하는데 그 목적이 있다.

## 2. 마찰저항감소

뉴턴유체와 비뉴턴유체의 관내 유동에서 마찰계수는 일반적으로 평균속도와 압력강하의 항으로써 표시하며 Fanning의 마찰계수는 다음과 같다.

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

여기서, L은 시험부의 길이, D는 파이프 직경,  $\rho$ 는 유체의 밀도, V는 유체의 관내 평균속도,  $\Delta P$ 는 시험부 두 지점 사이의 압력차이다.

마찰계수는 무차원 압력구배와 완전히 발달된 유동지역 내에서 두 지점 사이의 압력강하를 측정해야 한다. 뉴턴유체의 층류유동에서의 입구길이  $L_c$ 는 Kays와 Crawford<sup>[12]</sup>에 의해 정의된 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

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

입구길이  $L_c$ 의 최대값은 층류유동의 경우 직경의 100배

정도이다. 뉴턴유체의 난류유동에 대한 유체역학적 입구 영역은 직경의 20배 정도로 극히 작은 값으로도 충분하지만, Cho와 Hartnett<sup>13)</sup>는 비뉴턴유체의 경우  $L_e$ 의 값이 직경의 110배에 해당한다고 보고하였다. 이런 이유로 본 연구에서는 시험부의 상단에 115D의 충분한 거리를 두고 압력강하를 측정하였다.

첨가물이 없는 물만을 순환시킬 경우의 압력강하를  $\Delta P_w$ 라 하고, 첨가물을 투입한 경우의 압력강하를  $\Delta P_a$ 라 하면 마찰저항감소율(percent drag reduction) DR(%)은 다음과 같이 정의된다.

$$DR(\%) = (1 - \Delta P_a / \Delta P_w) \times 100 \quad (3)$$

### 3. 실험

#### 3-1. 실험장치 및 재료

Fig. 1과 같이 실험장치는 펌프를 사용한 순환회로로 구성하였다. 시스템을 구성하는 배관은 차압측정을 위한 2 m 길이의 차압시험부, 시스템 내 온도제어를 위한 4 m 길이의 대향류 이중관 열교환기, 펌프의 동력손실과 2 차류의 영향을 감소하기 위한 반경 0.78 m의 U자 곡관을 포함한 총 18 m의 길이로 구성되었다. 시험부의 배관 및 열교환기 내관은 내경 26.04 mm, 외경 28.58 mm의 동관을 사용하였고, 이중관 열교환기의 외관은 내경 38.24 mm, 외경 41.28 mm의 동관을 사용하였다. 작동유체는 수돗물을 사용하였으며 스테인레스로 만들어진 250 l 용량의 물탱크로부터 펌프를 통해 배관으로 공급된다. 펌프는 모노펌프(주) 대봉, 10 m<sup>3</sup>/h 용량)를 사용하였고 3.7 kW 용량의 전동기로 구동되며 전동기는 가변속도조절기로 제어된다. 산업적으로 많이 사용되고 있는 원심 펌프는 고분자용액의 급속한 퇴화를 유발하므로 상대적

으로 퇴화에 영향이 작은 모노펌프를 사용하였다. 펌프를 구동할 때 발생하는 진동과 유량의 맥동을 방지하기 위하여 펌프의 출구에 유동안정탱크를 설치하였으며, 3 m의 입구길이를 지나 차압시험부에 도달되도록 하였다. 이는 Cho와 Harnette<sup>14)</sup>가 제시한 비뉴턴유체의 입구길이 110D 보다 긴 약 115D의 길이로써 완전히 발달된 유동을 얻기에 충분하다고 판단된다. 차압시험부의 상단과 하단에 압력탭을 설치하고 6.35 mm의 동관과 압력을 안정시키기 위한 모세관을 통해 차압계(ABB-Kent Taylor, 621 model)로 차압을 측정하였다. 측정된 차압은 전기적 신호로 변환되어 데이터 수집장치(HP 3852 model)에 입력시켜 컴퓨터에 저장되었다. 차압시험부를 지나 자기식 유량계(Magnetic Flowmeter, (주) 정 Eng., FM-100MG)에서 유량을 측정하고 전기적 신호로 변환되어 데이터 수집장치를 통해 컴퓨터에서 유량과 유속을 계산하고 저장하였다. 반경 0.78 m의 곡관을 지나 시스템 내 온도 제어를 위한 4 m 길이의 이중관 열교환기를 지나 물탱크로 되돌아가는 순환폐쇄회로를 구성하였다. 이중관 열교환기의 내관은 굽힘으로 인한 변형을 방지하기 위하여 내관의 길이 방향 중앙부분 외벽에 가는 관을 용접하여 설치하였고 내관과 외관의 입출구에 T-type 열전대를 설치하여 온도를 측정하였다. 저온실험의 경우 외관에 5RT 용량의 냉각기를 설치하여 온도를 제어하였고, 고온실험의 경우는 물탱크에 12 kW 용량의 전열기를 설치하여 온도를 제어하였다. 그리고 전체 배관 및 물탱크는 25 mm 유리섬유를 이용하여 단열하였다.

#### 3-2. 첨가물재료

본 연구에 사용되어진 고분자는 폴리아크릴아마이드계의 합성유기고분자로 분자량 약  $15 \times 10^6$ 의 수용성고분자이다. 사용된 계면활성제는 Sodium Dodecyl Sulfate

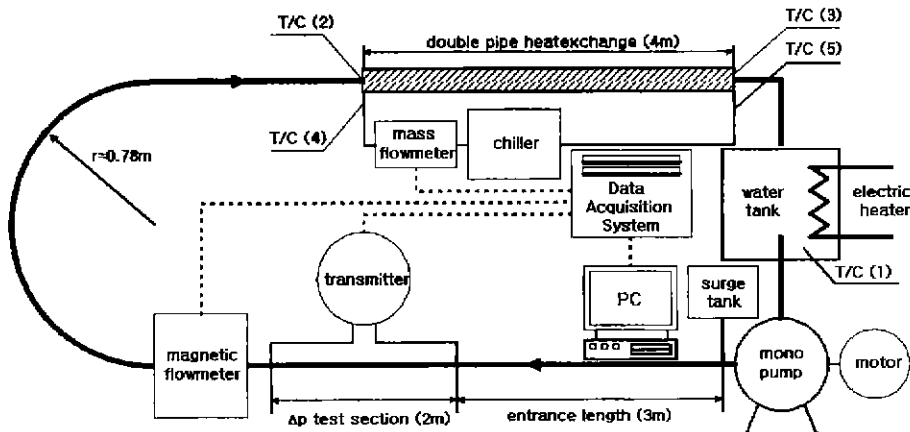


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

**Table 1. The Reynolds number based on the solvent (water) viscosity.**

	1.5 m/sec	3.0 m/sec	4.5 m/sec
10°C	30,100	60,200	90,300
80°C	107,000	214,000	321,000

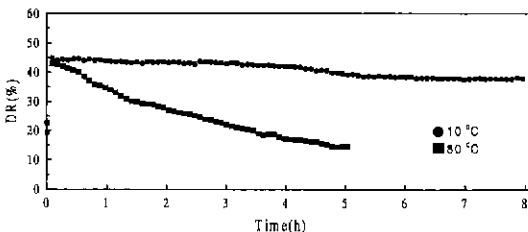
(C<sub>17</sub>H<sub>35</sub>O<sub>4</sub>SNa, SDS)로써 분자량 288.4 g/mol인 백색분말 형태로 물에서 음이온으로 해리되고, 임계미셀농도(CMC, critical micelle concentration)는 35°C에서 0.008 M이다.

**3-3. 실험조건 및 방법**

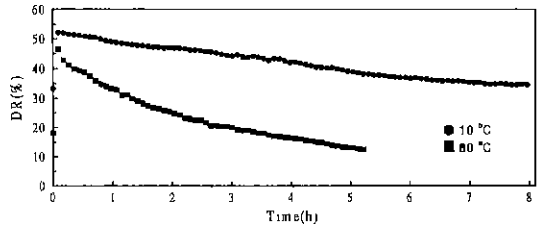
온도에 따른 퇴화경향을 관찰하기 위하여 10°C와 80°C의 두 가지 온도에서 실험하였다. 그리고 실용적 응용을 위하여 동일 Re수를 기준으로 하지 않고 동일유량(유속)에서 마찰저항감소효과를 측정하였다. 유속은 저속(1.5 m/sec), 중속(3.0 m/sec), 고속(4.5 m/sec)으로 제어하여 고속과 저속에서의 퇴화특성을 비교할 수 있도록 하였으며, 본 실험에 사용된 Re수는 Table 1에 정리하였다. 합성고분자와 계면활성제의 농도합계는 100 wppm으로 고정하였으며, 저온 10°C에서 계면활성제의 효과를 확인하기 위하여 전체 첨가물 중에서 계면활성제인 SDS의 중량비를 0%에서 100%까지 11가지로 세분화하여 실험을 수행하였다. 계면활성제만을 투입한 경우에는 있어서는 임계미셀농도에 도달하지 않는 낮은 농도이므로, 물만의 경우와 차압의 차이가 나타나지 않아 결과에서 제외하였다.

**4. 실험결과 및 고찰**

Figs. 2~4는 합성고분자 100 wppm 수용액을 유속 1.5 m/sec, 3.0 m/sec 및 4.5 m/sec에서 10°C와 80°C의 온도에 따른 퇴화경향을 비교한 것이다. Fig. 2는 유속 1.5 m/sec에서의 퇴화경향을 보인 것으로 초기효과는 10°C에서 약 45%, 80°C에서 약 43%로 비슷한 마찰저항감소



**Fig. 2. Degradation of drag reduction effect with different temperatures at 100 wppm Copolymer solution without SDS (1.5 m/sec).**

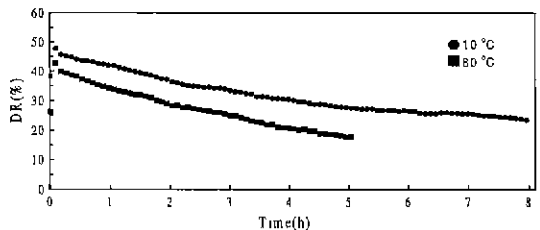


**Fig. 3. Degradation of drag reduction effect with different temperatures at 100 wppm Copolymer solution without SDS (3.0 m/sec).**

효과를 보이고 있다. 그러나 5시간이 경과된 후 80°C에서는 약 14.5%로 마찰저항감소효과가 크게 퇴화된 반면, 10°C에서는 약 39%의 높은 마찰저항감소효과를 보이고 8시간이 경과된 후에도 약 38%의 효과를 유지하고 있다. 10°C의 결과로부터 유속 1.5 m/sec의 저속에서는 기계적 퇴화정도가 크지 않음을 알 수 있으며, 80°C의 결과로부터 기계적 퇴화 가능성이 작은 저속에서도 퇴화가 크게 발생함에 따라 고온에서의 퇴화특성은 열적퇴화가 지배적임을 알 수 있었다.

Fig. 3은 유속 3.0 m/sec에서의 퇴화경향을 나타낸 것이다. Fig. 2와 마찬가지로 저온에서 보다 고온에서 급속한 퇴화경향을 보이고 있으며 온도에 따른 상대적 차이는 다소 작음을 알 수 있다. 10°C에서는 초기에 약 53%의 높은 마찰저항감소효과를 보이며 5시간이 경과된 후 약 39%, 8시간이 경과된 후에도 약 35%의 마찰저항감소효과를 유지하고 있다. 80°C에서는 초기에 약 49%의 마찰저항감소효과를 보였으나 5시간이 경과된 후에는 약 13%까지 퇴화되었다.

Fig. 4는 유속 4.5 m/sec에서의 퇴화경향을 나타낸 것이다. Figs. 2~3과 마찬가지로 고온에서의 퇴화가 더 급속함을 알 수 있다. 그러나 온도에 따른 마찰저항감소 효과의 상대적 차이는 작게 나타났다. 10°C에서는 초기에 약 49%의 마찰저항감소효과를 보이며 5시간이 경과된 후 약 28%, 8시간이 경과된 후 약 24% 정도로 유



**Fig. 4. Degradation of drag reduction effect with different temperatures at 100 wppm Copolymer solution without SDS (4.5 m/sec).**

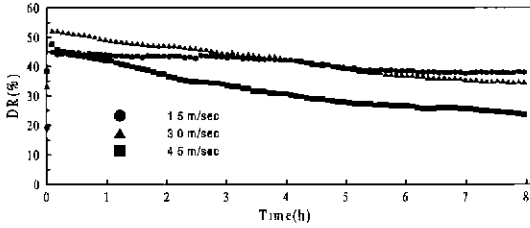


Fig. 5. Degradation of drag reduction effect with different velocities at 100 wppm Copolymer solution without SDS (10°C).

속 1.5 m/sec 및 3.0 m/sec와 비교할 때 퇴화가 크게 진행되었다. 80°C에서는 초기에 약 45%, 5시간이 경과된 후 약 18%의 마찰저항감소효과를 보였다.

Figs. 2~4의 결과로부터 고분자 수용액은 저온과 비교할 때 고온에서 퇴화가 급속도로 진행되는 것을 알 수 있으며, 초기저항감소율도 10°C에서 보다 80°C에서 약 2~4% 정도의 낮은 값을 나타내었다. 고온에서의 퇴화는 열적퇴화가 지배적 특성이며 유속이 높아질수록 기계적 퇴화의 가능성도 증가한다는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 5는 10°C에서 합성고분자 100 wppm 수용액의 퇴화경향을 각각의 유속에서 나타낸 그림이다. 유속 1.5 m/sec의 경우 초기효과는 3 m/sec의 경우보다 작지만 퇴화경향이 완만하여 약 4시간이 경과한 후부터는 더 우수한 마찰저항감소효과를 보인다. 고분자 수용액의 마찰저항감소효과는 큰 Re수에서 높은 효과를 보이지만 기계적 퇴화가 급격히 진행되는 특성을 보여주고 있다. 유속 4.5 m/sec에서는 유속 1.5 m/sec 및 3.0 m/sec 보다 퇴화가 급격히 진행되고 있으며 초기효과도 그 중간 정도의 값을 보였다. 이 조건에서 초기마찰저항감소효과의 최대값은 유속 3.0 m/sec, Re수 약  $6 \times 10^4$  전후에서 나타나는 것으로 추측된다.

Figs 6~8은 합성고분자와 계면활성제의 혼합비율을 1:9, 2:8, 3:7, 4:6, 5:5, 6:4, 7:3, 8:2, 9:1, 10:0으로 나누어

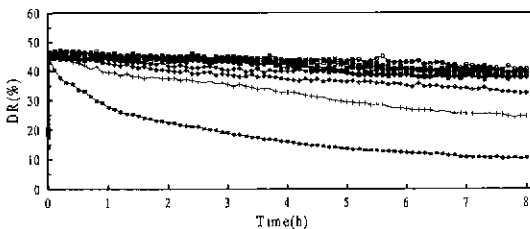


Fig. 6. Degradation of drag reduction effect with the various ratios of Copolymer and SDS (10°C, 3.0 m/sec, Rew=60,200). (Copolymer vs SDS, ● 10:0, ○ 9:1, ■ 8:2, □ 7:3, ▲ 6:4, △ 5:5, ◆ 4:6, ◇ 3:7, + 2:8, \* 1:9).

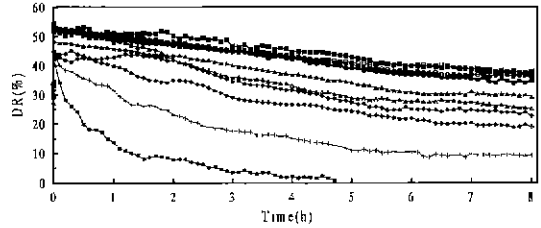


Fig. 7. Degradation of drag reduction effect with the various ratios of Copolymer and SDS (10°C, 3.0 m/sec, Rew=60,200). (Copolymer vs SDS, ● 10:0, ○ 9:1, ■ 8:2, □ 7:3, ▲ 6:4, △ 5:5, ◆ 4:6, ◇ 3:7, + 2:8, \* 1:9).

서 실험한 결과이다. Fig. 6은 유속 1.5 m/sec에서 합성고분자와 계면활성제의 혼합비율에 따른 퇴화경향을 비교한 것이다. 초기마찰저항감소율은 약 44~47%로 비슷하였다. 합성고분자 10 wppm과 계면활성제 90 wppm을 투입한 혼합비율 1:9의 경우는 8시간이 경과 후 약 10%, 2:8의 경우는 약 24%, 3:7의 경우는 약 33%로 마찰저항감소효과가 퇴화되었다. 그리고 합성고분자의 절대량이 40 wppm 이상의 경우는 8시간 경과 후 약 40% 이상의 높은 마찰저항감소효과를 유지했으며 그 중에서 혼합비율이 9:1의 경우가 약 41%로 가장 높았다. 자체적으로 마찰저항감소효과를 가지지 않는 계면활성제를 첨가함으로써 고분자의 절대량이 40 wppm인 혼합비율 4:6의 경우에서 합성고분자 100 wppm만의 경우와 비슷한 퇴화특성을 보였다. 따라서 저온에서도 계면활성제는 고분자의 퇴화경향을 완만하게 만드는 역할을 수행하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 유속 3.0 m/sec에서 합성고분자와 계면활성제의 혼합비율에 따른 퇴화경향을 비교한 것이다. 합성고분자 80 wppm과 계면활성제 20 wppm을 투입한 혼합비율 8:2의 경우가 8시간 경과 후 약 38%로 가장 높은 마찰저항감소효과를 유지하였으며, 합성고분자의 절대량이 60 wppm 이하로 감소하면 퇴화가 급속도로 진행되

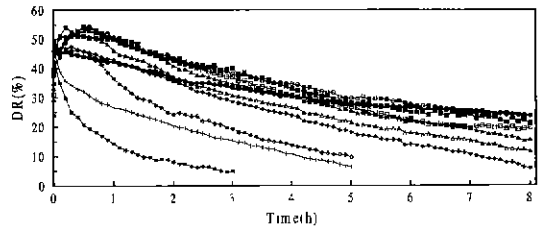


Fig. 8. Degradation of drag reduction effect with the various ratios of Copolymer and SDS (10°C, 4.5 m/sec, Rew=90,300). (Copolymer vs SDS, ● 10:0, ○ 9:1, ■ 8:2, □ 7:3, ▲ 6:4, △ 5:5, ◆ 4:6, ◇ 3:7, + 2:8, \* 1:9).

는 경향을 보였다. Fig. 6의 저속(1.5 m/sec)과 비교할 때 계면활성제의 효과가 작게 나타났으며 저속에서보다 합성고분자의 절대량이 퇴화에 더 지배적인 특성으로 나타났다. 특히 혼합비율 1:9의 경우는 5시간 경과 후 마찰저항감소효과가 거의 나타나지 않았고, 혼합비율 2:8의 경우는 5시간이 경과된 후 약 11%, 8시간이 경과된 후 약 9%까지 급격한 퇴화가 발생하였다.

Fig 8은 유속 4.5 m/sec에서 합성고분자와 계면활성제의 혼합비율에 따른 퇴화경향을 비교한 것이다. 합성고분자 90 wppm과 계면활성제 10 wppm을 투입한 혼합비율 9:1의 경우가 8시간이 경과된 후 약 24%로 가장 높은 효과를 보이고 있다. 또한 합성고분자 100 wppm을 첨가한 경우(혼합비율 10:0)에도 초기효과는 다소 작지만 7시간이 경과된 후부터 혼합비율 9:1과 거의 비슷한 마찰저항감소율을 유지했다. 그러나 혼합비율이 1:9의 경우 3시간이 경과된 후 약 5%까지 퇴화되었고, 혼합비율 2:8의 경우는 5시간이 경과된 후 약 6%까지 퇴화되었다. 저온 고속의 실험으로부터 계면활성제의 합성고분자 퇴화억제효과는 저속에서보다 고속에서 크게 떨어지는 것으로 나타났고, 마찰저항감소효과는 합성고분자의 절대양에 크게 의존함을 알 수 있다.

Figs. 6~8의 결과로부터 계면활성제 첨가에 의한 합성고분자의 퇴화완화특성은 유속이 낮을수록 크게 나타남을 알 수 있다. 그리고 유속이 높을수록 계면활성제의 절대량보다는 고분자의 절대량이 지배적 특성임을 알 수 있다. 이는 계면활성제의 소수성분이 고분자에 흡착되어 고분자의 퍼짐을 양호하게 하고 고분자와 계면활성제의 합성교질입자를 만들 수 있는 확률은 저속에서 높고 고속에서는 상대적으로 낮다는 것을 의미한다.

## 5. 결 론

저온 10°C와 고온 80°C에서 유속에 따른 폴리아크릴아마이드계 합성고분자 수용액의 마찰저항감소효과 및 퇴화현상을, 그리고 저온 10°C에서 계면활성제와 합성고분자를 혼합한 수용액의 퇴화완화특성과 적정 혼합비율을 관찰한 결과, 합성고분자 수용액은 저온보다 고온에서 퇴화가 급격하게 발생하였으며, 고온의 퇴화현상은 열적퇴화가 지배적인 특성임을 확인하였다. 그리고 저온 10°C에서 합성고분자 수용액의 마찰저항감소효과는 고속일수록 퇴화가 빨리 진행되었으며, 유속이 증가할수록 기계적 퇴화가 증가함을 알 수 있었다. 또한 합성고분자에 계면활성제를 첨가했을 경우 실험초기에는 유속 3.0 m/sec에서 혼합비율 8:2의 수용액이 가장 우수한 효과를 보였지만 8시간이 경과한 후에는 유속 1.5 m/sec에

서 혼합비율 9:1의 수용액이 가장 우수하였다. 이와 같은 결과로부터 계면활성제는 저온에서도 합성고분자의 퇴화억제효과를 가지고 있음을 알 수 있었고, 유속이 낮을수록 효과는 크게 나타났으며, 유속이 높을수록 계면활성제의 절대량보다는 고분자의 절대량이 지배적인 특성임을 알 수 있었다.

## 참고문헌

1. Toms, B.A.: "Some observation 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 (1948).
2. Elata, C., Lehrer, J. and Kahanovitz, A.: Israel Journal of Technology Vol. 4, p 87 (1966).
3. Goren, Y. and Norbury, J.F.: "Turbulent flow of dilute solutions", Trans. ASME J. Basic Eng., Vol 89, pp. 8140822 (1967).
4. Virk, P.S., Mickley, H.S. and Smith, K.A.: "The ultimate asymptote and mean flow structure in Tom's phenomenon", Trans. ASME, J. Applied Mechanics, Vol. 37, pp. 448-493 (1970).
5. Lee, W.K., Vaseleski, R.C. and Metzner, A.B.: "Turbulent drag reduction in polymeric solutions containing suspended fibers", AIChE Vol. 20, No.1, pp. 128-133 (1974).
6. Patterson, R.L. and Little, R.C.: "The drag reduction of poly(ethyleneoxide)-carboxylate soap mixtures". J. of Colloid and Interface Science, Vol. 153, No. 1, pp. 110-114 (1975).
7. Choi, U.S. and Kasza, K.E.: "Long-term degradation of dilute polyacrylamide solutions in turbulent pipe flows", 4th Int. Conference on Drag Reduction, Davos, Swizeland (1989)
8. Durst, F., Schmitt, K. and Brunn, P.O.: "The critical shear stress and degradation of polymer additives in turbulent pipe flows", 4th Int. Conference on Drag Reduction, Davos, Swizeland (1989).
9. Myska J. and Zakin J.L.: "Difference in the flow behaviors of polymeric cationic surfactant drag-reducing additives", Ind. Eng. Chem. Res. Vol. 36, pp. 5483-5487 (1997).
10. 김남수, 김종보, 김인석, 최형진: "합성고분자첨가제의 난류마찰저항 감소효과 연구", 공기조화·냉동공학논문집, Vol. 5, No. 3, pp. 207-216 (1983).
11. 윤석만, 최형진, 김종보: "합성고분자첨가제에 의한 마찰저항감소효과의 퇴화에 관한 연구", 한국에너지공학

- 회지, 제 7권, 제 2호, pp. 163-171 (1998).
12. Kays, W.M. and Crawford, M.E.: "Convective Heat Transfer", 3rd Ed., McGraw-Hill, New York (1987)
  13. Cho, Y.I and Hartnett J.P.: "Non-Newtonian fluids in circular pipe flow". in *Advances in Heat Transfer*, Vol. 15, pp. 59-141, Academic Press, New York (1982).