

## 계면활성제를 이용한 합성고분자 수용액의 마찰저항감소 및 퇴화 특성 향상 연구

이 동 민, 김 남 진, 윤 석 만\*, 김 종 보\*\*

인하대학교 대학원, \*인하대학교 기계기술공동연구소, \*\*인하대학교 기계공학과

### The Study on Drag Reduction Rates and Degradation Effects in Synthetic Polymer Solution with Surfactant Additives

Dong-Min Lee, Nam-Jin Kim, Seok-Mann Yoon\*, Chong-Bo Kim\*\*

Graduate School, Inha University, Incheon 402-751, Korea

\*Research Institute for Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

\*\*Department of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

(Received March 2, 2000; revision received December 6, 2000)

**ABSTRACT:** The turbulent flow resistance of water solution with polymer is reduced as compared with that of pure water. This effect is named the drag reduction and offers the significant reduction of the pumping power and the energy consumption. But the intense shear forces and the high temperature experienced by the polymer solution when passing through the pipes cause the degradation a loss of drag reduction effectiveness. Especially, the degradation behavior is found to be strongly dependent on temperature. This mechanical and thermal degradation can be 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 they were mixed in 10 different mixture ratios, while total concentration was fixed as 100 wppm. Degradation of Copolymer-SDS mixture solutions was investigated experimentally in closed loop at the temperature of 10°C and 80°C with various flow average velocities of 1.5 m/sec, 3.0 m/sec, and 4.5 m/sec. Degradation characteristics of polymer solution without surfactant show a radical loss of drag reduction effectiveness at high temperature. Degradation alleviation ability of surfactant is especially effective at high temperatures. Consequently, this results show that the addition of surfactant to the polymer solution can control unfavorable degradation phenomena for high temperature systems.

**Key words:** Drag reduction(마찰저항감소), Degradation(퇴화), Copolymer(합성고분자), Surfactant(계면활성제)

#### 1. 서 론

산업적으로관을 통한 유체수송의 예는 수 없이 많다. 수송시 관내 마찰저항을 효과적으로 줄일 수 있다면, 펌프동력을 줄일 수 있고, 같은 동력으로 더 많은 유체의 수송이 가능해질 것이다.

† Corresponding author

Tel.: +82-32-860-7313; fax: +82-32-868-1716

E-mail address: cbkim@inha.ac.kr

그리고 도관의 직경축소 등으로 인한 경제적 이익을 얻을 수 있다. 이에 대한 연구들은 여러 방면에서 진행되어 왔으며, 특히 첨가제를 이용하는 방법이 타 방법에 비하여 높은 마찰저항감소 효과를 갖는 것으로 알려져 있다. 지금까지 고분자(polymer), 계면활성제(surfactant), 섬유 및 고체입자(fiber and solid particle) 등이 첨가제로 연구되어 왔다. 여기서 고분자 첨가제는 극소량으로도 높은 초기 마찰저항감소 효과를 나타내므로 관심의 대상이 되고 있다. 고분자를 이용한 마찰저항감소 효과의 연구는 1948년 Toms<sup>(1)</sup>에 의해서 시작되었으며, 그 후 다양한 연구를 통해서 분자량이 큰 선형고분자(linear polymer)가 높은 마찰저항감소 효과를 보인다는 것을 알게 되었다. 이러한 마찰저항감소방법은 여러 방면에서 응용이 가능하다. 선박의 항행 속도 상승, 고체연료 수송, 냉난방 순환시스템, 원유수송 및 각종 유체수송에서 응용될 수 있다. 실제로 원유수송 알라스카 파이프라인에서 고분자를 마찰저항감소의 목적으로 사용하고 있다.<sup>(2)</sup> 그 외에도 제트 커팅, 소방차의 방수능력 향상, 배수시스템, 그리고 인체의 혈액순환시스템에도 응용될 수 있다.

고분자는 높은 초기마찰저항감소 효과를 보이지만 쉽게 분해를 일으켜 시간이 흐르면서 점차적으로 효과를 상실하는 단점을 가지고 있다. 이러한 현상을 고분자용액의 퇴화(degradation)라고 한다.<sup>(3)</sup> 퇴화의 원인은 여러 가지가 있지만 그중에서도 관벽의 전단력(shear stress) 등에 의한 기계적 퇴화와 고온에 의한 열적 퇴화가 주된 원인이다. Choi et al.<sup>(4)</sup>은 Separan 용액을 사용, 7.2°C와 87.8°C의 온도조건에서 퇴화경향을 실험한 결과, 고온의 열원수송유체에서 퇴화가 급격히 일어나며 기계적 퇴화보다 열적 퇴화가 지배적인 특성임을 규명하였다. Durst et al.<sup>(5)</sup>은 고분자용액이 고온일수록 퇴화가 급격히 일어나며 안정화 첨가제(stabilizing additives)를 이용하여 완화될 수 있음을 보였다.

본 연구에 대한 지금까지의 선행연구에서 김남수 등<sup>(6)</sup>은 합성고분자(Copolymer)가 기계적 퇴화 특성이 우수하다고 발표하였으며, 윤석만 등<sup>(7,8)</sup>은 합성고분자에 계면활성제(Sodium Dodecyl Sulfate, SDS)를 첨가할 경우 합성고분자 퇴화방지에 효과적이라는 결과를 제시하였다. 계면활성제는 단독으로도 마찰저항감소 특성을 보이는 경우

도 있지만, 실제적 응용을 고려하여 교질입자(micelles)를 생성하지 않는 작은 농도의 계면활성제를 이용하였다. 만약 퇴화를 억제하면서 마찰저항감소 효과를 장시간 유지할 수 있다면 실제 응용에 바람직할 것이다. 본 연구의 목적은 계면활성제의 고분자 퇴화 완화효과를 온도와 속도에 따라서 알아보고 최적 비율을 제시하는 데 그 목적이 있다.

## 2. 마찰저항감소

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

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

여기서,  $L$ 은 시험부(test section)의 길이,  $D$ 는 파이프 직경,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $V$ 는 유체의 관내 평균속도,  $\Delta P$ 는 시험부 두 지점 사이의 압력차(differential pressure)이다.

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.

$$DR(\%) = (1 - \Delta P_A / \Delta P_w) \times 100 \quad (2)$$

## 3. 실험장치 및 실험방법

### 3.1 실험장치

Fig. 1은 실험장치의 개략도로써 펌프를 사용한 순환회로(closed loop)로 구성하였으며 저온과 고온에서 각각 실험이 가능하도록 구성하였다. 시스템을 구성하는 배관은 차압측정을 위한 2m 길이의 차압시험부(differential pressure test section)와 시스템 내 온도제어를 위한 4m 길이의 이중관 열교환기(double pipe heat exchanger) 등을 포함한 총 18m의 길이로 구성되었다.

시험부의 배관은 내경 26.04 mm의 동관을 사용하였다. 작동 유체는 수도물을 사용하였으며

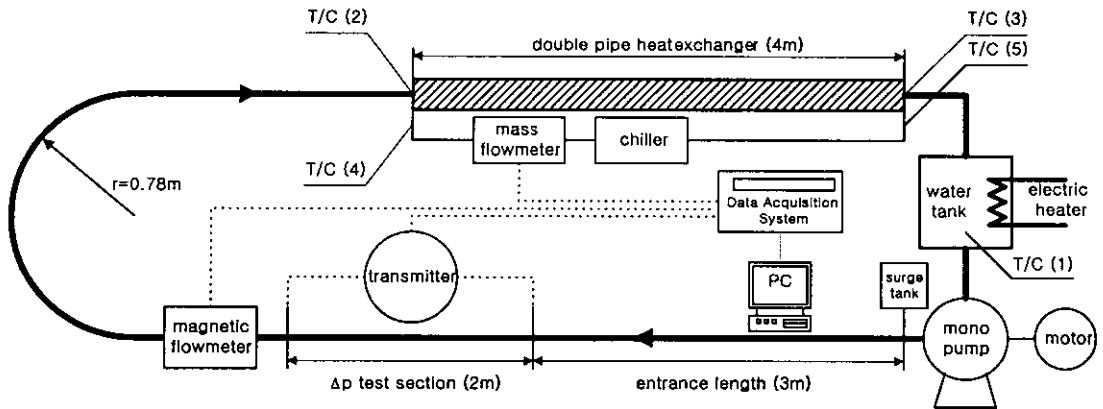


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

250 l 용량의 물탱크로부터 펌프를 통해 배관을 공급된다. 펌프는 모노펌프(주) 대봉, 10 m<sup>3</sup>/h 용량을 사용하였고 3.7 kW 용량의 전동기로 구동되며 전동기는 가변속도조절기로 제어되었다. 펌프의 출구로부터 3 m의 입구길이를 지나 차압시험부에 도달되도록 하였다. 차압시험부의 상단과 하단에 압력탭을 설치하여 차압계[differential pressure transmitter, ABB-Kent Taylor, 621 Model]로 차압을 측정하였다. 측정된 차압은 전기적 신호로 변환되어 data 수집장치[HP 3852 data acquisition system]에 입력시켜 컴퓨터에 저장되었다. 차압시험부를 지나 자기식 유량계[Magnetic Flowmeter, (주) 정 Eng., FM-100MG]에서 유량을 측정하고 전기적 신호로 변환되어 data 수집장치를 통하여 컴퓨터에서 유량과 유속을 계산하고 저장하였다. 저온시스템의 경우 외관에 5 RT 용량의 냉각기를 설치하여 온도를 제어하였고, 고온시스템의 경우는 외관에 냉각수를 흐르게 하여 열교환을 시킨 후 배수하고 온도제어는 물탱크에 12 kW 용량의 전열기를 설치하여 온도제어를 하였다.

### 3.2 첨가물재료

본 연구에 사용되어진 고분자는 폴리아크릴아마이드계의 합성유기고분자로 분자량 약  $15 \times 10^6$ 의 수용성 고분자이다. 사용된 계면활성제는 Sodium Dodecyl Sulfate(C<sub>12</sub>H<sub>23</sub>O<sub>4</sub>SNa, SDS)로서 분자량 288.4 g/mol인 백색분말 형태로 물에서 음이온으로 해리된다. 퇴화되는 고분자와 계면활성제가 서로 뭉쳐져 거대 분자량을 가지게 됨으로

써 저항감소 효과와 퇴화 특성을 향상시키는 집합체를 형성시키는데 이때 계면활성제의 농도인 임계미셀농도(critical micelle concentration, CMC)는 35°C에서 0.008 M이다.

### 3.3 실험조건 및 실험방법

온도는 10°C와 80°C, 유속은 저속(1.5 m/sec), 중속(3.0 m/sec), 고속(4.5 m/sec)으로 세분화하여 온도와 유속에 따른 퇴화특성을 비교할 수 있도록 하였다. 첨가물의 농도는 고분자와 계면활성제의 농도합계를 윤석만 등<sup>(8)</sup>이 실용적 응용을 고려하여 제시한 100 wppm으로 고정하였으며, 전체 첨가물 중에서 고분자의 비율을 10%에서 100%까지 10가지로 세분화하여 실험을 수행하였다.

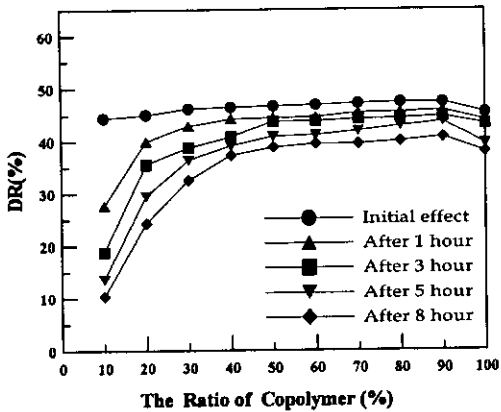
첨가물은 장치에 투입되기 전에 분산이 원활하도록 자석식교반기(magnetic stirrer)를 이용하여 2000 wppm 고농도수용액으로 제조하였다. 그 후, 고분자와 계면활성제 고농도수용액을 각각의 실험에 해당하는 비율로 섞어 다시 자석식 교반기로 혼합하여 최종의 고농도수용액을 제조하였다.

순환시간(circulation time)은 10°C는 최대 8시간, 80°C는 최대 5시간으로 하였으며 3시간이 지난 후 마찰저항감소 효과가 10% 미만으로 되었을 때 실험을 중단하였다.

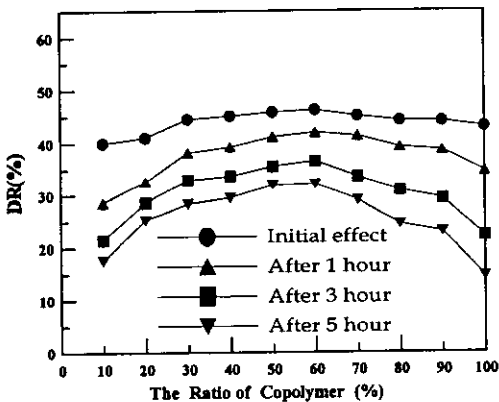
## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 저속에서 혼합비율에 따른 퇴화경향

Fig. 2의 (a)와 (b)는 유속 1.5 m/sec에서 고분



(a) 10°C, 1.5 m/sec,  $Re_w=30,100$



(b) 80°C, 1.5 m/sec,  $Re_w=107,000$

Fig. 2 Degradation for the various ratios of Copolymer and SDS.

자와 계면활성제의 혼합비율에 따른 퇴화경향을 각각 10°C와 80°C에서 나타낸 것이다.

10°C에서는 초기마찰저항감소율은 각 혼합비율에서 약 44~47%로 비슷하였다. 고분자 10 wppm과 계면활성제 90 wppm을 투입한 혼합비율 1:9의 경우는 8시간이 경과 후 약 10%, 2:8의 경우는 약 24%, 3:7의 경우는 약 32%로 저항감소 효과가 퇴화되었다. 그리고 고분자의 절대량이 40 wppm 이상이 들어간 그외의 경우는 8시간 경과 후 약 37~41%의 높은 마찰저항감소 효과를 유지했으며 그중에서 혼합비율 9:1의 경우가 약 41%로 가장 높았다. 전체적으로 저온, 저속의 퇴화경향은 완만하다. 자체적인 마찰저항감소 효과를 가지지 않는 계면활성제를 첨가함으로써 고분

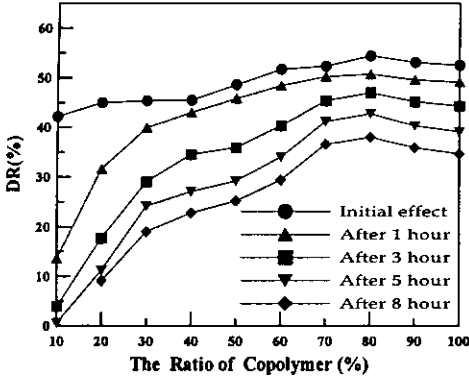
자의 절대량이 40 wppm인 혼합비율 4:6의 경우가 고분자 100 wppm만의 경우와 비슷한 퇴화특성을 보였다. 따라서 계면활성제가 고분자의 퇴화경향을 완만하게 만드는 역할을 수행하고 있음을 알 수 있다.

80°C에서의 초기마찰저항감소율은 각 혼합비율에서 약 40~46%로 비슷한 양상을 보이지만 시간이 경과하면서 퇴화경향은 혼합비율에 따라 크게 달라진다. 고분자와 계면활성제의 혼합비율 6:4의 경우가 5시간 경과 후 약 32%의 가장 높은 마찰저항감소 효과를 유지하고 있는 반면 고분자만의 경우는 약 15%로 퇴화가 급격히 진행되어 10가지 혼합비율의 결과 중에서 가장 퇴화가 급속히 진행되었다. 따라서 고온에서 계면활성제의 첨가가 고분자의 마찰저항감소 효과 퇴화특성을 크게 향상시킴을 알 수 있다.

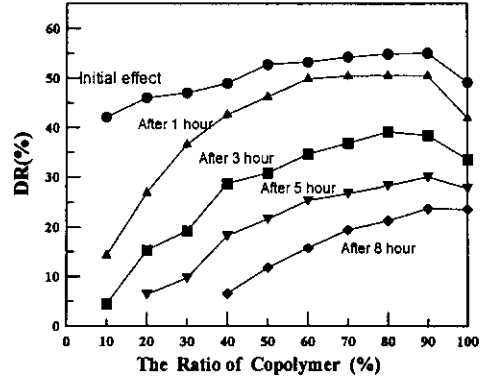
Fig. 2의 (a)와 (b)를 비교할 때 전체적으로 저온에서의 퇴화특성이 크게 우수하고 고온에서는 열적 퇴화가 크게 일어남을 알 수 있다. 특히, 고분자만을 첨가한 경우에서 열적 퇴화가 더욱 퇴화에 지배적인 특성임을 알 수 있다. 그러나 고분자의 퇴화경향은 완만하게 만드는 계면활성제의 역할은 저온에서보다 고온에서 크게 나타나는 것으로 보여졌다. 특히, 혼합비율 1:9의 경우, 5시간 경과 후 10°C에서 마찰저항감소 효과는 약 14%인 반면, 80°C에서는 약 18%로 더 우수하였다. 고온에서 열적퇴화는 크게 나타나지만 계면활성제의 퇴화억제 역할도 크게 나타난다. 따라서 일정한 혼합비하에서는 고온시스템의 퇴화경향을 저온시스템의 퇴화경향으로 향상시킬 수 있음을 보여준다.

#### 4.2 중속에서 혼합비율에 따른 퇴화경향

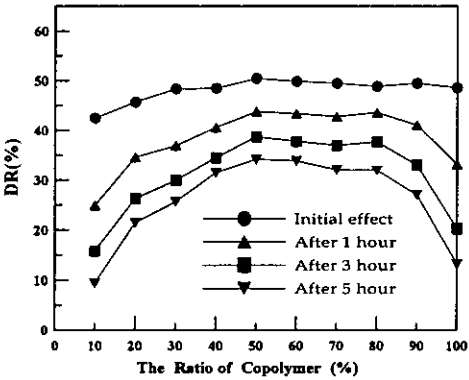
Fig. 3의 (a)와 (b)는 유속 3.0 m/sec에서 혼합비율에 따른 퇴화경향을 각각 10°C와 80°C에서 나타낸 것이다. 10°C에서는 혼합비율 8:2의 경우가 8시간 경과 후 약 38%로 가장 높은 마찰저항감소 효과를 유지하였으며, 고분자의 절대량이 감소함에 따라서 퇴화가 급속도로 진행되는 양상을 보였다. Fig. 2의 동일 온도의 저속과 비교할 때 계면활성제의 역할은 다소 작고 고분자의 절대량이 퇴화에 더 지배적인 특성으로 나타났다. 특히 혼합비율 1:9의 경우는 5시간 경과 후 저



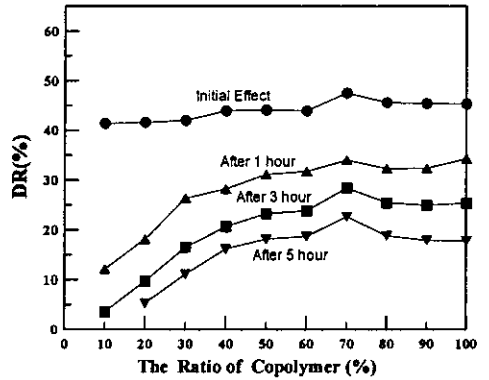
(a) 10°C, 3.0 m/sec,  $Re_w=60,200$



(a) 10°C, 4.5 m/sec,  $Re_w=90,300$



(b) 80°C, 3.0 m/sec,  $Re_w=214,000$



(b) 80°C, 4.5 m/sec,  $Re_w=321,000$

Fig. 3 Degradation for the various ratios of Copolymer and SDS.

Fig. 4 Degradation for the various ratios of Copolymer and SDS.

항감소효과가 거의 나타나지 않았고, 혼합비율 2:8의 경우는 5시간 경과 후 약 11%로 급격히 퇴화되었다.

온도 80°C, 유속 3.0 m/sec에서 혼합비율에 따른 퇴화경향을 비교한 것이다. 5시간 경과 후 혼합비율 5:5인 경우 약 34%로 가장 높은 마찰저항감소 효과를 보였으며, 혼합비율 1:9의 경우가 약 9%로 가장 낮았고, 그 다음은 고분자만을 투입한 경우에서 약 13%로 퇴화되었다. Fig. 2의 동일 온도의 저속과 비교할 때 혼합비율에 대한 경향은 비슷하게 나타났지만 계면활성제의 절대량의 의존도는 저속보다 낮게 나타났다. 그리고 5시간 경과 후 마찰저항감소 효과가 혼합비율 4:6, 5:5, 6:4, 7:3, 8:2, 9:1에서 중속에서 저속보다 높게 유지되었다.

중속에서도 저속에서와 마찬가지로 저온의 퇴

화특성이 우수함을 알 수 있다. 그러나 혼합비율 1:9, 2:8의 경우 고온에서의 퇴화경향이 저온에서보다 우수하였다. 특히 혼합비율 1:9의 경우 5시간 경과 후 저온에서는 마찰저항감소 효과를 거의 상실한 반면, 고온에서는 약 9%의 효과를 유지했다.

### 4.3 고속에서 혼합비율에 따른 퇴화경향

Fig. 4의 (a)와 (b)는 유속 4.5 m/sec에서 혼합비율에 따른 퇴화경향을 각각 10°C와 80°C에서 나타낸 것이다. 10°C에서는 혼합비율 9:1의 경우가 8시간 경과 후 약 24%로 가장 높은 효과를 보이고 있다. 그러나 고분자 100 wppm만을 첨가한 경우도 초기효과는 다소 작지만 8시간 경과 후 약 24%로 비슷한 저항감소율을 유지했다.

이 조건에서의 계면활성제의 고분자퇴화 억제효과는 저속에서보다 크게 떨어지며, 고속에서의 마찰저항감소 효과는 고분자의 절대양에 가장 크게 의존함을 알 수 있다.

온도 80°C에서는 혼합비율 7:3의 경우가 5시간 경과 후 약 23%로 가장 높은 마찰저항감소 효과를 보이고 있다. 그러나 동일 온도의 저속, 중속의 data와 달리 고분자의 절대양이 마찰저항감소 효과에 지배적인 요인으로 작용함을 알 수 있다. 이는 고속에서의 기계적 퇴화 가능성 증가에 따른 것으로 해석된다.

Fig. 4의 (a)와 (b)를 비교할 때 전체적으로 초기효과 및 퇴화경향에서 저온의 마찰저항감소 효과가 우수함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서 다음 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 합성고분자 수용액은 저온에서보다 고온에서 퇴화가 급격하게 발생하며, 이러한 경향은 저속일수록 뚜렷하다. 이는 고온의 퇴화현상은 열적퇴화가 지배적인 특성임을 의미한다.

(2) 동일 온도에서 합성고분자 수용액의 퇴화는 고속에서 빨리 진행되며, 이러한 경향은 열적 퇴화특성이 작은 저온에서 뚜렷하다. 이는 유속의 증가가 기계적 퇴화 가능성을 증가시킴을 알 수 있었다.

(3) 계면활성제는 저온에서도 고분자의 퇴화억제효과를 보이고 있음을 알 수 있으나, 그 효과는 고온에서 훨씬 크게 나타나는 것을 알 수 있었다.

(4) 대부분의 경우에서 저온의 퇴화특성이 동일 유량의 고온에서보다 우수하지만 몇몇의 경우에는 그 반대의 경우를 보인다. 여기서 계면활성제는 적절한 조건하에서 고온시스템을 저온시스템의 퇴화 정도로 향상시킬 수 있음을 보여준다.

(5) 계면활성제의 고분자의 퇴화완화특성은 고온과 저온에서 동일하게 유속이 낮을수록 크게 나타났다. 유속이 높을수록 계면활성제의 절대양보다는 고분자의 절대양이 지배적 특성임을 알 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 1999년도 인하대학교 교내연구비 지

원에 의하여 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. Toms, B. A., 1948, 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.
2. Motier, J. F. and Prilutski, D. J., 1984, Case histories of polymer drag reduction in crude oil pipelines, In Sellin & Moses F2, pp. 1-14.
3. Sellin, R. H. J., Hoyt, J. W. and Scrivener, O., 1982, The effect of drag reduction additives on fluid flows and their industrial application, Part1: Basic aspects, J. Hydraulic Res., pp. 20-29.
4. Choi, U. S. and Kasza, K. E., 1989, Long-term degradation of dilute polyacrylamide solutions in turbulent pipe flows, 4th Int., Conference on Drag Reduction, Davos, Switzerland.
5. Durst, F., Schmitt, K. and Brunn, P. O., 1989, The critical shear stress and degradation of polymer additives in turbulent pipe flows, 4th Int., Conference on Drag Reduction, Davos, Switzerland.
6. Kim, N. S., Kim, C. B., Kim, I. S. and Choi, H. J., 1993, The effects of copolymer for drag reduction on turbulent flow, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 5, No. 3, pp. 207-216.
7. Yoon, S. M. and Kim, C. B., 2000, Characteristics of drag reduction additives in the application of district cooling system, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 12, No. 3, pp. 251-257.
8. Yoon, S. M., Choi, H. J. and Kim, C. B., 1998, The degradation of the effect of drag reduction in synthetic polymer solution, Energy Engg. J., Vol. 7, No. 2, pp. 163-171.