

회전원판장치를 이용한 계면활성제의 마찰저항감소

김 철 암 · 최 형 진 · 윤 형 기* · 박 성 룡* · 김 중 업**

인하대학교 고분자공학과, *한국에너지 기술연구소, **충남대학교 고분자공학과
(1997년 11월 12일 접수, 1997년 12월 15일 채택)

Drag Reduction Characteristics of Surfactant by a Rotating Disk Apparatus

C. A. Kim, H. J. Choi, H. K. Yoon*, S. Y. Park*, and J. Y. Kim**

Department of Polymer Science and Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

*Korea Institute of Energy Research, Taejon 305-343, Korea

**Department of Polymer Engineering, Chungnam National University, Taejeon 305-764, Korea

(Received November 12, 1997, Accepted December 15, 1997)

요 약 : 양이온 계면활성제를 이용하여 마찰저항 감소의 특성과 유변학적 거동을 규명하였다. 양이온 계면활성제는 CMC이상의 농도에서 미세구조의 변화가 일어나 미셀의 형태가 구형에서 실린더형 또는 디스크형 미셀로의 전이가 일어난다. 마찰저항감소는 이러한 미셀의 전이가 일어나게 하는 농도 이상에서 발현된다. 따라서 농도 변화에 따른 마찰저항감소를 측정하였으며, 이러한 마찰저항 감소를 규명하기 위하여 유변학적 특성을 조사하였다. 미셀은 non-Newtonian 거동을 보이며, 구조의 전이가 일어남에 따른 증거로 shear thickening 현상을 보였다. 그리고 양이온 계면활성제중의 하나인 DOBON-G의 경우에는 counter-ion의 첨가에 의해 이러한 구조의 전이거동이 변화되는 것을 관찰하였다.

Abstract : The characteristics of drag reduction and rheological behaviors were investigated using cationic surfactants, whose microstructures are known to change when concentration of the surfactant exceeds CMC. The firstly formed spherical micelles change to rodlike or disklike micelles because of packing between surfactants micelles, and of thermodynamic preference. The drag reduction becomes significant when the concentration increases over this micellar transient point. Drag reductions were measured as a function of concentration, and rheological characteristics of the surfactant were further investigated to understand the correlation between their rheological properties and drag reduction. Micelles show the non-Newtonian behavior, and shear thickening behaviors were observed due to the structural development. In addition, structural developments were determined by adding the counter-ion in case of DOBON-G.

1. 서 론

액체상태의 유체가 난류상태로 매끈한 원형관을 흐를 때 섬유부유물(fiber suspensions), 계면활성제(surfactants) 또는 고분자 첨가제(polymer additives)를 유동중에 첨가시켜 줌으로써 유체의 난류를 억제시켜 크기는 약 80%의 마찰저항을 감소시키는 것을 난류마찰저항 감소현상이라 한다. 실제로 적용되는 유체 유동의 대부분의 거동인 난류는 고체 표면의 부근에서 발생하고 그 유체의 유동에 대한 주요한 마찰은 이 난류와 연관이 있다. 난류마찰에 의한 에너지 손실의 양은 그 값이 크므로, 마찰감소를 위한 연구가 다양하게 진행되어 왔다. 그 중 이러한 마찰저항 감소제의 첨가에 의한 난류마찰저항 감소현상은 소방차의 방수능력(pumpability) 향상[1], 선박과 잠수함의 항해속도의 상승[2], 폭우 후 범람 방지를 위한 하수시스

템[3], 원유수송 및 각종 유체수송에 있어서의 펌프력향상[1], CWM과 같은 고체연료수송[4] 및 냉난방 순환 시스템의 적용[5], 인체의 혈액순환 시스템 치료를 위한 적용[6] 등 응용분야가 방대하여 그 성과 여부에 따라 획기적 성과를 기대할 수 있다. 한편 이 분야의 대부분의 연구들은 상온에서 연구되고 있는데 그 이유는 해양 조선분야, 소방, 원유수송 분야 등 대부분의 응용이 고온을 요구하지 않기 때문이다. 그러나, 폐쇄순환계에서 고온의 물을 사용하는 지역난방계와 같은 계에 쓰이는 마찰저항감소제는 펌프비용을 절감시키거나, 다른 추가의 펌프없이 순환계의 크기를 확장시킬 수 있는 경우로서, 일반적으로 고분자 마찰저항 감소제가 가장 많이 알려져 있지만[7], 이 물질은 펌프의 전단력에 의해 급격히 활성성을 상실하고 열전달 계수의 변화가 일어난다. 따라서 고분자 마찰저항감소제는 이와 같은 폐순환계에서는 그 사용에 있어서 제한을 받

게 된다.

이러한 마찰저항 감소 현상은, 아직까지도 정확한 생성기구가 완전히 정량적으로 설명이 되고 있지 못한 형편이다. 그러나 마찰저항감소는 용액의 점탄성 특성과 관련이 있다고 일반적으로 받아들여진다. 따라서 지역냉난방분야에 그 필요성이 증가하고 있는 계면활성제의 물성을 측정하고, 그 점탄성적 거동을 결정하는 연구가 많이 시도되어지고 있다.

난류유동에서 에너지는 점성력에 의해서 발산한다. 그런데 마찰저항 감소제를 포함하는 유체의 점탄성 성질과 그것의 마찰감소의 활동도 사이의 관계를 얻는데에 대한 어려움은 마찰저항감소제 용액이 매우 희박하여 측정 가능한 점탄성 거동을 나타내는 것이 어렵기 때문이다. 계면활성제에 의해서 발현되는 마찰감소현상에 대한 연구는 많은 연구자들에 의해서 수행되어 왔다.[8] 점탄성 거동을 보이는 계면활성제 용액의 마찰저항 감소 연구는 상대적으로 넓은 온도 범위에 걸쳐서 행하여 지고, 주로 양이온성 계면활성제를 가지고 연구를 수행하고 있다. 계면활성제들을 크게 대별하면 친수성 부분에 따라서 음이온성, 양이온성과 비이온성 계면활성제로 나눌 수가 있다. 그 중 음이온성 계면활성제는 기포성이 크면, counter-ion이 필요하지 않으므로 인해 미셀의 모양과 크기를 변화시키는 것이 난해하고, 비이온성 계면활성제는 소수 연구되어지고 있지만[9] 기계적 안정성과 열 안정성이 비교적 낮은 단점을 가지고 있다. 이에 비해 양이온성 계면활성제는 기포성이 적어서 세제의 적용이 어려우며, 여러 counter-ion과 결합하여 미셀의 모양과 크기를 변화시킬 수가 있어서 전단 유도 구조체(shear induced structure, SIS)를 형성하는 것이 용이하여 계면활성제 마찰저항감소 첨가제로 적당하다. 특히 마찰저항감소에 쓰이는 양이온 계면활성제로서 가장 많이 연구되어진 물질은 cetyl trimethyl ammonium bromide(CTAB)이다. Nash[10, 11]는 CTAB와 naphthalene의 유도체들의 혼합물들이 물속에서 점탄성 성질을 가지는 젤을 만드는 것을 처음으로 관찰하였다. Rose와 Foster[12]는 4가 암모늄염의 구조를 가지는 계면활성제, cethyl trimethyl ammonium salicylate (CTASal)과 상대이온으로 sodium salicylate (NaSal)를 혼합한 용액을 사용하여 유변학적 거동과 마찰저항 감소 실험을 관 유동에 대하여 연구하였다. 그는 마찰저항감소의 효능이 온도가 증가함에 따라 감소해서 임계값을 보임을 Fanning 마찰계수를 가지고 관찰하였다. 그리고 NaSal을 과량 첨가하는 경우가 첨가하지 않는 경우에 비해 마찰저항 감소 효능을 떨어뜨리는 임계 레이놀즈수와 임계온도 모두를 향상시키는 것을 관찰하였다. 이러한 결과는 Ohlendorf[13]등이 주장하는 것처럼 점탄성 계면활성제가 구조적인 변화를 겪기 때문이라고 알려져 있다. 근래에 들어서, Zakin등[14]도 역시 CTAB-naphthol 혼합물의 마찰감소 능력을 연구하였다. 이와 같은 CTAB-naphthol 용액과 poly(ethylene oxide) 용액들로부터의 결과를 비교했을 때, 두 종류의 마찰 감소 거동의 유형이 대별된다. 계면활성제 용액은 낮은 벽면 전단 응력값에서 마찰감소를 보여주고 어떠한 임계수치 이후에서는 급격히 보통의 난류거동으로 환원되는 것을 발견할 수 있었다. 그러나, PEO용액의 경우 낮은 레이놀즈수에서는 비교적 적은 양의 마찰감소가 있고 높은 레이놀즈수에서는 마찰의 감소가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이러한 두 가

지 거동의 차이는 미셀 유형의 마찰저항 감소제와 고분자 유형의 마찰저항 감소제 사이에 증대한 형태학적인 차이의 결과이다. 그에 따라 많은 영역에서 연구자들에 의해 미셀의 모양과 크기에 대한 연구가 진행되어 지고 있다.

용액의 농도가 증가함에 따라서 구형의 미셀보다 lamellar 형태가 열역학적으로 안정되게 존재한다. Ohlendorf등[13]은 sodium salicylate 존재 하에서 hexadecyl trimethyl ammonium bromide ($C_{16}TASal$)의 막대형 미셀의 길이를 electric birefringence로 측정하였는데, 온도가 증가할 수록 길이는 감소하고 계면활성제의 농도가 증가하면 길이도 증가하는 결과를 보였다. Hoffmann등도[15] 역시 과량의 sodium salicylate 없이 점탄성이 있는 계면활성제 용액의 정상상태의 전단상태를 측정하였고, 점탄성 계면활성제의 cylindrical 미셀의 길이를 측정하여, 온도가 증가함에 따라 미셀의 길이가 감소한다는 것을 발견하였다. 이것으로부터 특정 계에 존재하는 구형에서 벗어나는 미셀의 구조들은 전적으로 계의 인자들-계면활성제의 화학적 구조, 용매, 염의 존재여부, 용해도 향상제, 온도 및 각 성분의 농도-에 의존한다고 확인할 수 있다. 대부분의 유동에서 관찰된 마찰저항감소는 용액 내에 막대형의 미셀이 존재할 때에 발현되는 것으로 알려져 있다.

마찰저항감소와 정상상태의 유변학적 성질의 측정 결과와는 서로 상관관계를 설정할 수 있다. 예를 들면, 점탄성이 있는 계면활성제는 대표적으로 정상상태의 전단이나 층류유동 하에서 점도가 전단에 의해 유도되어 증가한다. 이러한 전단에 의해 유도되는 점도의 증가는 Ohlendorf 등[13]에 의해 자세히 기술되었다. 그리고 Hoffmann과 동료들[13~18]은 점탄성 계면활성제의 성질을 결정하기 위하여 동적 유변학적 실험을 수행하였다. 이러한 과정으로 Rose와 Foster[12]는 CTASal 용액의 동적거동을 측정하였는데, 이 경우 손실 탄성률이 주파수가 증가함에 따라서 증가하여 최고값을 가지며 다시 감소하는 것을 관찰하였다. 그리고 저 주파수 영역에서는 저장 탄성률이 손실 탄성률 보다 항상 작은 값을 가짐을 확인하였다. 그러나 저장 탄성률의 기울기가 더 크기 때문에 고주파수 영역에서는 큰 값을 갖는다. 그리고 이러한 반전을 일으키는 주파수를 crossover frequency라고 명명하였다.

최근 들어, 실험 측정 방법의 발전에 따라 계면활성제 용액의 성질을 결정하기 위한 방법의 개발이 많이 이루어지고 있다. 분광학적 방법과 유변학적인 거동을 살펴거나 flow birefringence에 의해서 마찰저항감소 계면활성제의 물성을 결정할 수 있다. Hofmann 등[19]은 유변학적 성질과 flow birefringence 거동으로 tallow-(tris-hydroxyethyl)-ammonium acetate와 counter-ion으로 sodium salicylate의 거동을 유기염과 계면활성제의 몰비의 함수로 측정하였다. 측정의 결과로 shear induced structure(SIS)가 형성되며 이러한 구조는 높은 탄성과 점성을 나타내어서 결과적으로 점탄성이 크게 증가하고, 점탄성이 크게 증가하는 유체가 마찰저항감소 효과가 증대되는 것을 확인하였고, 이러한 결과를 갖게 하는 유체는 전단 속도가 증가함에 따라서 점도가 증가하는 shear thickening의 거동을 나타낸다는 것을 관찰하였다. 이러한 shear thickening이 나타나는 임계농도는 계면활성제의 종류, counter-ion의 종류, 농도와 계의 온도등 여러 가지 인자들의 함수로 알려져 있

다. 그리고 젤과 같은 SIS는 전기적 또는 유동복굴절 측정을 통하여 미셀이 nonisometric하다는 것을 직접적으로 보여준다. 한편 순수한 계면활성제를 이용한 마찰저항감소 연구 외에도 고분자-계면활성제의 복합체를 이용한 연구도 활발히 진행되고 있다[20, 21].

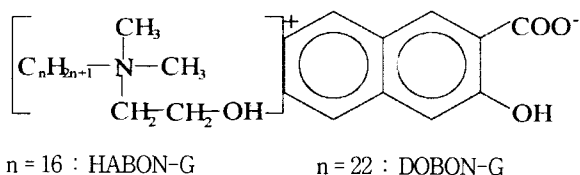
이와 같이 마찰저항감소제로 계면활성제를 사용하고자 하면 그 계의 점탄성 거동을 살피는 것이 요구된다. 본 연구에서는 지역냉난방분야에 많은 잠재력을 가지고 있는 계면활성제인 HABON-G와 DOBON-G의 마찰저항감소와 점탄성 거동을 온도, 전단속도와 counter ion의 농도 등의 함수로 측정하여, 상호관련성을 연구하였다.

2. 실험

2.1. 시 약

HABON은 이온교환과정으로 전해질을 제거한 CTAB(cetyl trimethyl ammonium bromide)와 sodium 3-hydroxy-2-naphthoate의 1:1 혼합물로 상업적으로 생산되는 계면활성제이다. HABON은 counter ion없이 사용하여 1500 ppm 기준으로 40℃에서 100℃의 영역에서 주로 효력을 나타내는 것으로 알려져 있다. HABON-G는 HABON의 methyl기를 oxyethylene 단위로 치환한 양이온 계면활성제(즉, hexadecyl-dimethyl-hydroxyethyl ammonium 3-hydroxy-2-naphthoate)로서 alkyl 기에 따라서 n = 16일때는 HABON-G, n = 18일때는 OBON-G, 및 n = 22일때는 DOBON-G로 불리우기도 한다. 이러한 HABON-G의 화학식량은 501이고, Hoechst AG사로부터 공급받았다. 용액에서 salicylate는 긴 rod-like micelle를 형성시키는 것을 가능케 한다고 알려져 있다. 이것의 원인으로서는 salicylate의 carboxylic group과 electron-rich group인 benzene ring이 계면활성제의 head group의 positive charge간의 반발력을 줄여주기 때문이다. 이러한 계면활성제의 마찰저항감소의 효력을 나타내는 온도범위는 alkyl group의 chain의 길이에 따라 다양하게 변화한다.

한편 DOBON-G (n-docosyl-dimethyl-hydroxyethyl-ammonium 3-hydroxy-2-naphthoate)은 NaSal과 혼합하면 40℃에서 130℃의 범위에서 효력을 나타내고 화학식량은 585이다. Counter ion으로 NaSal을 사용하였다. Counter ion을 첨가하면 naphthoate와 benzoate간의 ion교환 반응이 일어나서 micelle형태에 변화가 생긴다. HABON-G와 DOBON-G의 분자 구조식은 다음과 같다.



2.2. 실험기구

회전원판 장치는 본 연구실에서 제작한 것으로 고분자의 마찰저항감소 연구에 사용된 것과 동일한 것이다[22~24]. 계면활성제의 마찰저항감소 실험을 위하여 사용한 회전원판장치를

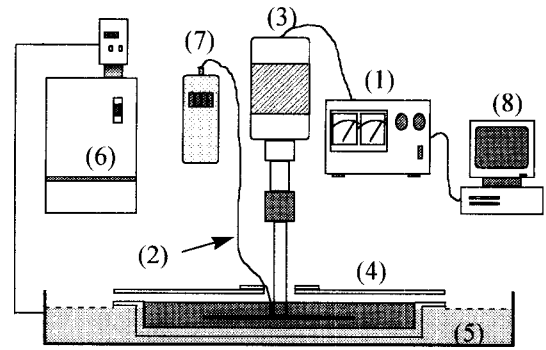


Fig. 1. Schematic diagram of rotating disk apparatus.

(1) speed controller, (2) thermocouple, (3) motor, (4) solution container, (5) water bath, (6) water circulating system, (7) thermometer, (8) AD converter & PC

Fig. 1에 나타내었다. 회전원판장치는 stainless steel로 만들어진 직경 14.5 cm, 두께 0.3 cm인 stainless steel disk가 회전하는 형태로 되어있다. 용기를 채우는데 필요한 용액의 양은 약 1,040 ml이었으며, 회전속도 controller(Cole Parmer Master Servodyne Unit)와 직류형 변속모터를 이용하여 원판에 걸리는 부하를 토크로 변환하고 이 값들을 AD converter를 이용하여 computer에 저장하였다. 유체의 온도는 항온조를 이용하여 오차범위 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 내에서 일정하게 유지하였으며 원판의 회전속도는 digital tachometer를 사용하여 측정하였다.

계면활성제의 유변학적 물성 중 전단점도를 측정하기 위해서 Physica사의 UM/MC-120 rheometer를 사용하였다. 이용한 geometry는 double gap geometry를 채용하였고, 전단속도는 최대 4000(1/s)까지 확장하였다.

2.3. 실험방법

용액을 균일하게 하기 위해서 제조일로부터 최소 하루동안 방치한 후 사용하였다. 마찰저항 감소특성은 먼저 마찰저항감소제가 첨가되지 않은 순수 용매만의 상태에서 주어진 회전속도로 원판을 회전시킬 때 요구되는 토크를 측정 후, 같은 속도에서 마찰저항 감소제를 첨가했을 때 요구되는 토크를 측정하여 다음의 식으로 정의된 percent drag reduction DR(%)로 알 수 있다.

$$DR(\%) = (T_o - T_p) / T_o \times 100 \quad (1)$$

여기에서 T_o 는 첨가제를 첨가되지 않았을 때의 토크, T_p 는 첨가제가 첨가되었을 때의 토크를 나타낸다.

이 실험에 사용된 회전원판장치 내에서의 Reynolds수 난류 영역은 약 300,000이상이므로 실험장치에서 원판의 회전속도가 약 1050 rpm 이상의 회전속도를 가질 때 유체는 난류상태에 있게 된다.

3. 결과 및 토의

3.1. 마찰저항감소

HABON-G를 사용하여 마찰저항감소 실험을 실시하였다. 회

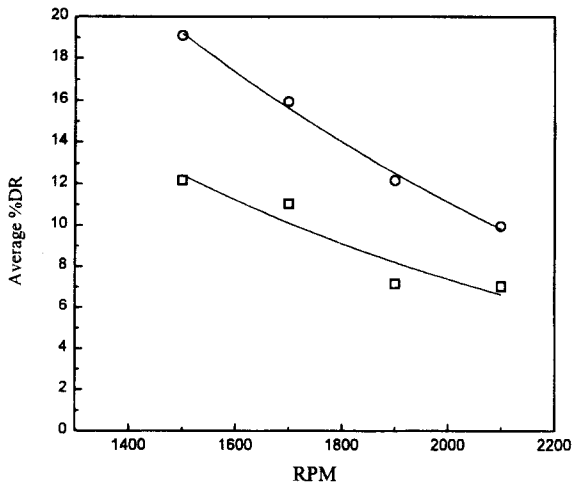


Fig. 2. Drag reduction dependence on flow rate as a function of temperature with 500 ppm of HABON-G. (□ : 60°C, ○ : 80°C)

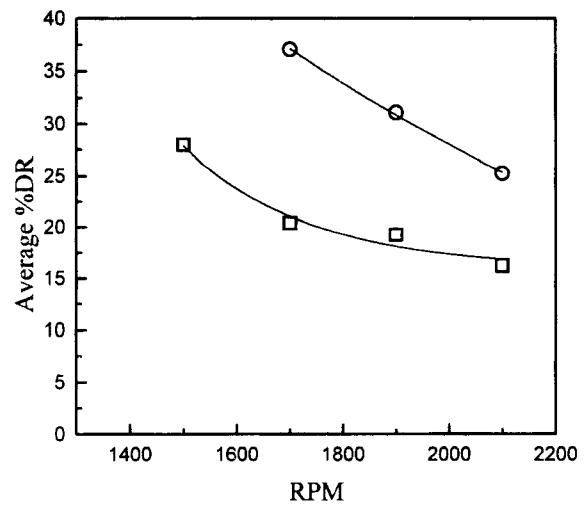


Fig. 3. Drag reduction dependence on flow rate as a function of temperature with 1000 ppm of HABON-G. (□ : 60°C, ○ : 80°C)

전원판장치는 소량의 시료를 가지고 유동의 시간에 대한 영향을 볼 수 있는 특징이 있다. 본 실험에서의 결과로 구한 percent DR은 90분 동안에 얻어진 결과를 평균한 값이다.

Fig. 2는 HABON-G 500 ppm 용액의 마찰저항값이 전단속도에 따라 어떻게 변화하는 지를 나타낸 것이다. 회전수가 증가함에 따라 마찰저항 값은 감소하는데 이는 미셀의 구조가 파괴되는 것이 외력이 증가함에 따라 빨라지기 때문이다. 그리고 온도가 증가함에 따라서 마찰저항의 값은 증가하는 것을 볼 수가 있다. Fig. 3은 HABON-G 1000 ppm 용액에 대한 전단속도의 영향으로 500 ppm 용액의 결과와 같은 경향을 보여 준다. Fig. 2와 비교하여서 Fig. 3의 결과가 마찰저항의 값이 큰 것을 알 수가 있다. 즉 계면활성제의 농도가 증가할수록 마찰저항값은 증가한다. 농도의 영향은 Fig. 4에서도 관찰할 수 있는데, 농도가 증가함에 따라서 마찰저항 값이 증가한다. 그리고 전단속도가 증가함에 따라 마찰저항이 감소하는 것 역시 Fig. 4로 확인할 수 있다. 온도에 따른 마찰저항 감소값은 미셀의 구조변화와 연관이 있는 임계 에너지와 함수관계가 있다. 이 결과는 전단속도에 따른 점도변화에서 확인하였다.

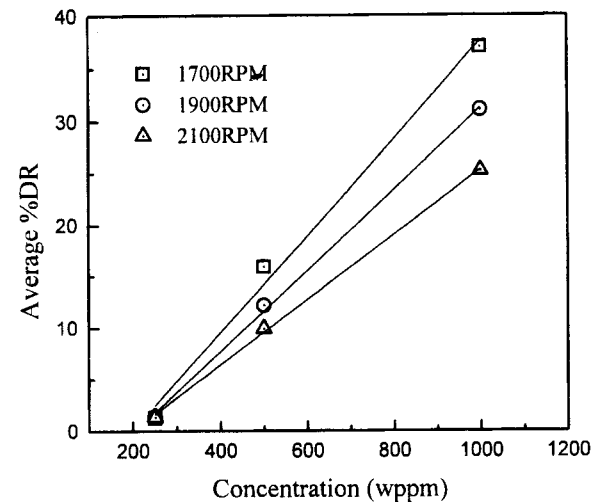


Fig. 4. Drag reduction as a function of concentration of HABON-G at 80°C with various rpm.

3.2. 전단점도 측정

Micellar 용액은 계면활성제 분자들이 미셀(micelle)이라고 불리는 고분자와 같은 규모가 큰 구조를 만들기 위하여 서로 응집하는 self-assembling 계이다. 이와 같은 micellar 계는 suspension계의 한 종류인 emulsion계로 고분자 용액과 같은 양상을 나타낸다. 그러나 micellar계는 용액이 나타내는 점탄성 거동으로 인하여 복잡한 유변학적 거동을 나타낸다.

양이온 계면활성제가 counter ion과 강력하게 결합된 수용액 계는 젤과 같은 거동을 나타낸다. 본 연구 결과에서는 정적 유변학적 거동의 성질을 측정하였다.

계면활성제 용액의 점탄성을 유동이 시작된 후의 transient 거동의 측정으로 조사하였다. Fig. 5는 HABON-G 1500 ppm의 용액을 각각 온도의 함수로 점도를 측정한 결과이다. 점도가

전단속도 200(1/s) 이하에서 대체로 최대값을 보여주고 있다. 즉, 미셀의 엉킴(entanglement)의 정도가 최대이다[25]. 그 후 전단속도를 증가함에 따라 shear thinning 거동을 보여주고 있다. 그러나 특정 전단속도 이상에서는 shear thickening현상을 나타낸다. 농도가 250 ppm인 용액은 매우 낮은 희박용액의 범위이다. 이러한 낮은 농도에서도 shear thickening 현상을 보여주는 것을 관찰하였다.

Fig. 7는 DOBON-G 1000 ppm 용액의 온도변화에 따른 점도의 변화를 나타내고 있는데, shear thinning현상을 볼 수가 있다. 이와 같은 shear thinning은 유동에 따른 구조의 점진적인 형성과 미셀들이 유동방향으로 배열하기 때문에 기인된다.

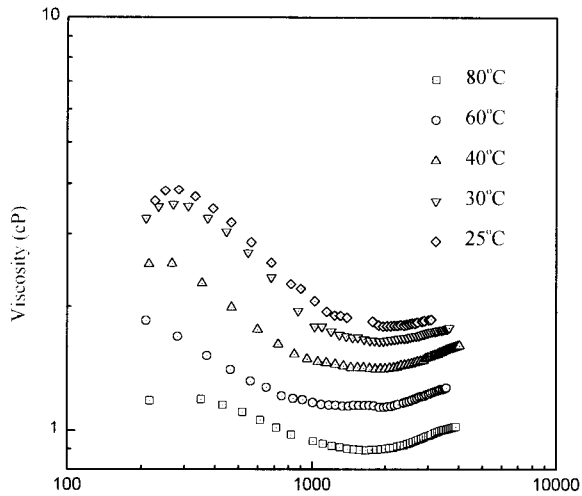


Fig. 5. Shear viscosity vs. shear rate of 1500ppm HABON-G for various temperatures.

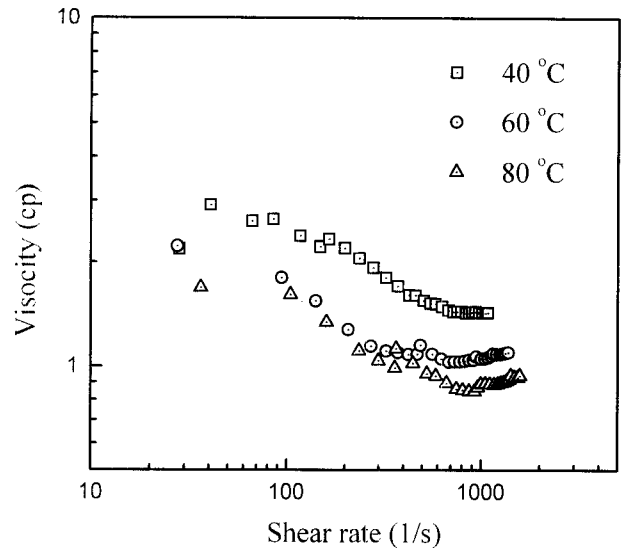


Fig. 7. Shear viscosity dependence on shear rate of DOBON-G 1000 ppm at various temperatures.

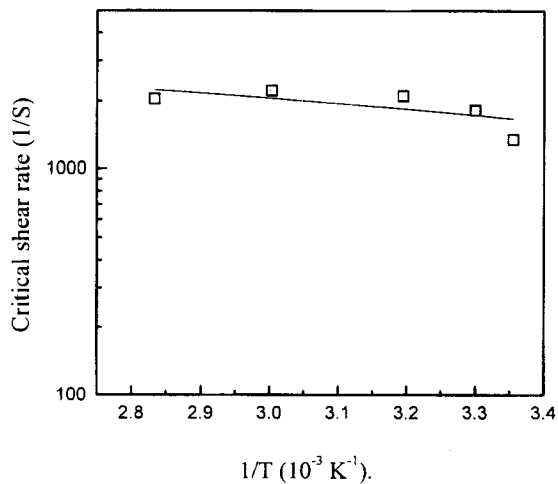


Fig. 6. Critical shear rate of HABON-G 0.004 M solution plotted against the reciprocal temperature, $1/T$.

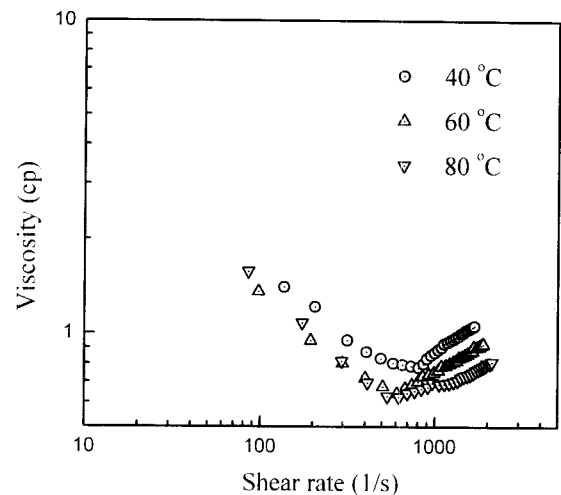


Fig. 8. Shear viscosity dependence on shear rate of DOBON-G 1000 ppm with NaSal 1500 ppm as counter ion at various temperatures.

이 거동은 birefringence와 계면활성제의 extinction 각(angle) 측정으로부터 확인되었다[19]. 그리고 Fig. 8에서는 shear thickening 현상을 볼 수가 있다. 이 그림에서부터 임계전단속도가 온도가 증가함에 따라서 HABON-G와는 다르게 감소함을 알 수 있다. 이것으로부터 SIS를 나타내는 조건이 계면활성제의 종류에 따라서 다르게 나타난다는 것을 확인할 수 있다.

SIS로의 전이를 일으키는 조건들 중의 하나가 counter-ion인데 HABON-G의 경우에는 counter-ion이 없는 경우에도 SIS 구조를 형성하는 것을 볼 수가 있다. 그러나 DOBON-G의 경우에는 counter-ion이 없는 경우에는 SIS의 거동을 나타내지 않았다. Fig. 7, 8은 1000 ppm인 DOBON-G용액에 1500 ppm의 유기염인 NaSal를 각각 첨가하지 않았을 경우와 첨가하였을 때를 비교하여 counter-ion의 영향을 살펴본 것이다.

계의 열에너지가 SIS구조 생성에 영향을 미치는 것을 판

단할 수 있었다. 즉 shear thickening이 일어나는 임계 전단속도에 대한 온도의존성은 Boltzmann 형태 $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0(\phi) e^{-\Delta E/k_B T}$ 로 나타낼 수 있다[26]. Fig. 6과 9는 이러한 Boltzmann 거동을 절대온도의 역수($1/T$)에 대하여 plot한 것으로 HABON-G와 DOBON-G의 양상이 반대로 나타나는 것을 볼 수가 있다. 이러한 거동의 차이로부터 HABON-G의 경우에는 낮은 온도범위에서 SIS의 전위가 쉬우며 DOBON-G의 경우에는 비교적 높은 온도범위에서 SIS의 발달이 용이한 것을 알 수가 있다. 즉, 계면활성제의 supermolecular 구조를 갖게 하는 여러 인자들 중의 하나는 counter-ion의 존재와 종류이다. DOBON-G의 경우 소수성인 alkyl기의 길이가 커서 마이셀의 크기 역시 증가한다. 따라서 미셀의 생성시간이 증가하고 유동하고 있는 유

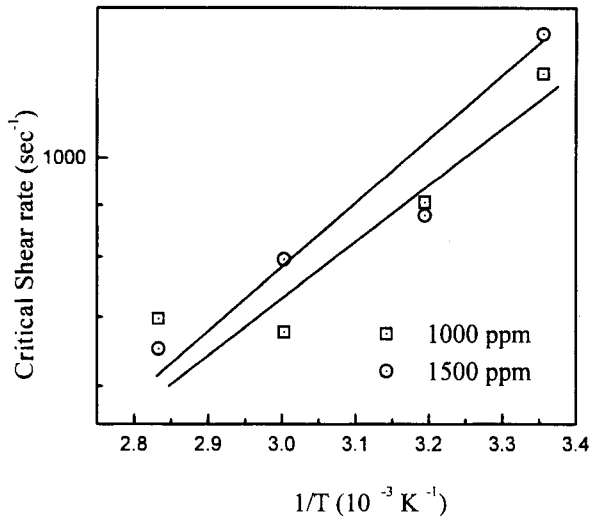


Fig. 9. Critical shear rate of DOBON-G - NaSal 1500 ppm solutions plotted against the reciprocal temperature, $1/T$ for two different concentrations.

체내에서 미셀의 엉킴(entanglement)은 적어지게 된다[27]. 따라서 크기가 큰 미셀의 감소는 점도의 증가가 적다는 것으로 추측할 수 있다. 일반적으로 미셀의 크기는 온도가 증가할수록 적어지는데, 상온에서 SIS구조를 쉽게 생성하는 시스템은 온도가 증가할수록 미셀의 크기가 줄어들어 SIS구조의 생성이 줄어들지만, 평시 미셀의 생성시간이 길어 SIS구조의 생성이 불리한 경우 온도의 증가는 오히려 SIS구조 형성에 양호한 조건으로 작용한다고 사료된다. SIS가 마찰저항감소에 영향을 미치므로 위의 결과로부터 계면활성제의 마찰저항 감소제로서의 사용에 있어서 그 적용온도의 범위가 차이가 있음을 알 수가 있다.

4. 결 론

마찰저항감소제로 쓰이는 계면활성제의 유변학적 거동을 살펴보았다. SIS가 생성됨에 따라서 계면활성제 계는 점탄성을 갖게되는데 그러한 점탄성을 갖게 하는 조건들은 여러 가지가 있다. 계면활성제의 농도가 증가함에 따라서 쉽게 SIS가 생성되었고, HABON-G의 경우에는 counter-ion 없이도 SIS가 생성됨을 알 수 있었다. 그러나 DOBON-G의 경우에는 counter-ion이 존재할때에 SIS가 생성되고, 이 역시 counter-ion의 함수로 측정되었다. 그리고 SIS는 온도에 대해서도 영향을 받으며 온도가 낮은 영역에서는 HABON-G가 온도가 높은 영역에서는 DOBON-G가 좀더 용이하게 SIS구조를 형성시키는 것을 확인하였다. 동적 실험을 통하여 위와 같은 점탄성 계면활성제의 용액은 외력에 의하여 탄성의 증가가 있는 것을 확인하였다.

감 사

본 연구는 과학기술처 '에너지 수송시스템연구' 지원에 의한 것으로 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. A. G. Fabula, *Trans. ASME, J. Basic Eng.*, **93**, 453(1971).
2. J. W. Hoyt, *Trans. ASME, J. Basic Eng.*, **94**, 258(1972).
3. R. H. J. Sellin, J. W. Hoyt and O. Scrivener, *J. Hydraulic Res.*, **20**, 29(1982).
4. J. Golda, *Chem. Eng. Comm.*, **32**, 43(1986).
5. R. H. J. Sellin, J. W. Hoyt, J. Pollert and O. Scrivener, *J. Hydraulic Res.*, **20**, 235(1982).
6. E. D. Burger, L. G. Chorn and T. K. Perkins, *J. Rheol.*, **24**, 603(1980).
7. H. J. Choi and M. S. Jhon, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **35**, 2993(1996).
8. A. V. Shenoy, *Colloid & Polymer Sci.*, **262**, 319(1984).
9. A. V. Shenoy, *Rheol. Acta*, **15**, 658(1976).
10. T. Nash, *Nature*, **177**, 948(1956).
11. T. Nash, *J. Colloid Sci.*, **13**, 134(1958).
12. G. D. Rose and K. L. Foster, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **31**, 59(1989).
13. D. Ohlendorf, W. Interthal and H. Hoffmann, *Rheol. Acta*, **25**, 468(1986).
14. J. L. Zakin, M. Poreh, A. Brosh, and M. Warsharsky, *AIChE Chem. Eng. Prog. Symp. Series No. 111*, 67:85(1971).
15. H. Hoffmann, H. Lobel, H. Rehage and I. Wunderlich, *Tenside detergents*, **22**, 290(1985).
16. H. Rehage and H. Hoffmann, *Faraday Discuss. Chem. Soc.*, **76**, 363(1983).
17. H. Thurn, M. Lobl and H. Hoffmann, *J. Phys. Chem.*, **89**, 517(1985).
18. M. Angel, H. Hoffmann, M. Lobl, K. Reizlein, H. Thurn and I. Wunderlich, *Prog. Colloid Polym. Sci.*, **69**, 12(1984).
19. S. Hofmann, P. Stern, and J. Myska, *Rheol. Acta*, **33**, 419(1994).
20. R. L. Patterson and R. C. Little, *J. Colloid Interface Sci.*, **53**, 110(1975).
21. H. J. Choi, C. A. Kim, J. T. Kim, C. B. Kim, K. Y. Kim and M. S. Jhon, *AIChE Topical Conf. Preprints (8A)*, 385(1996).
22. K. S. Yang, H. J. Choi, C. B. Kim and M. S. Jhon, *Korean J. Rheol.*, **3**, 76(1991).
23. K. S. Yang, H. J. Choi, C. B. Kim, I. S. Kim and M. S. Jhon, *Korean J. Chem. Eng.*, **11**, 8(1994).
24. C. A. Kim, K. Lee, H. J. Choi, C. B. Kim, K. Y. Kim and M. S. Jhon, *J. Macromolecular Sci.-Pure Appl. Chem.*, **A34**, 705(1997).
25. H. Yuntao, S. Q. Wang and A. M. Jamieson, *J. Rheol.*, **37**, 531(1993).
26. J. Myska, J. L. Zakin and Z. Chara, *Appl. Sci. Res.*, **55**, 297(1996).
27. Y. Hu and E. F. Matthys, *J. Colloid & Interface Sci.*, **186**, 352(1997).