

# Pilot규모에서 계면활성제용액의 장기 마찰저항감소에 관한 연구

## Long term drag reduction experiments of surfactant solutions in a pilot-scaled system

박 성 룡\*, 이 상 남\*, 문 승 현\*, 윤 형 기\*  
S. R. Park, S. N. Lee, S. H. Moon, H. K. Yoon

**Key words :** District heating(지역난방), Surfactant(계면활성제), Drag reduction(마찰저항 감소), Degradation(저하)

### Abstract

The long term drag reduction characteristics of Habon-G solution were investigated in the KIER pilot-scaled district heating simulation system. Test runs were implemented for 30 days without interruption. Pressure drop, flow rate and power consumption of surfactant (Habon-G) solution were regularly observed and compared with those of plain water. The experimental results suggest that the surfactant can be effectively applied to the DH transmission system for considerably long period without significant loss of its drag reduction capability even though the concentration of the additive may gradually decrease in the first stage of the experiment because of absorption.

### 1. 서 론

난류 유동장에 소량의 첨가제를 투입하면 용매만 존재할때 발생하는 표면마찰보다 마찰저항이 크게 감소되어 유체의 흐름이 향상되는데 이 현상을 "마찰저항감소현상"이라 칭하며, 이것을 원유수송, 지역 냉·난방 등의 수송시스템과 같은 에너지 절약시스템에 적용하기 위해서 많은 연구가 진행되었고, 첨가제로는 고분자물질<sup>1)~3)</sup> 및 계면활성제등이 사용되었고, 특히 계면활성제는 폐회로에서 이용이 가능한 것으로 보고되었다.<sup>4)~6)</sup> 또한 국내에서도 일산, 분당 등 신도시에서 지역난방 시스템이 이미

상용화된것을 감안할 때, 지역난방 시스템에 첨가제에 의한 마찰저항감소 메커니즘을 이용하면 설치비 및 운용비의 획기적인 절감이 예상되므로 이에 대한 연구가 시급하다고 할 수 있다.<sup>7)~10)</sup>

첨가제들에 관하여는 이론과 실험적 측면에서 집중적인 연구가 활발히 진행되어 왔지만, 아직까지 마찰저항감소 현상에 관한 정확한 메커니즘이 설명되고 있지 못한 실정이다. 그래서 본 연구에서는 장시간 운용이 가능한 계면활성제 Habon-G를 이용하여 상온 및 고온에서 마찰감소 현상을 정확히 규명하기 위한 연구를 수행하기 위하여, 온도조절이 가능한 pilot 규모의 실험장치에서 장시간 사용에 따른 마찰저항감소 특성과 농도 등의 변화, 그리고 마찰감소저하를 발생시키는 원인 등에 대하여 고찰하였다.

\* 한국에너지기술연구소

2. 실험장치 및 방법

본 실험은 계면활성제의 특성을 규명하기 위한 실험실 규모의 실험과 실제 시스템에 적용을 대비한 pilot 규모의 실험으로 나누어 실행되었다. 먼저 Fig.1(a)는 첨가제에 의한 마찰저항감소 및 저하 현상에 미치는 영향을 고찰하기 위한 실험장치이다. 그림에서 보는 바와 같이 유체는 저장탱크(0.6

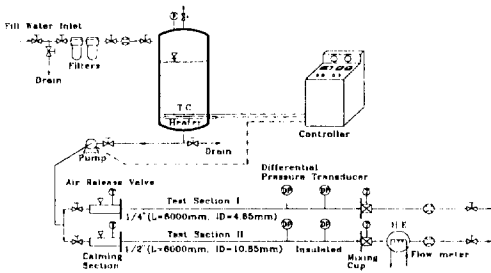


Fig.1(a) The lab-scaled experimental apparatus

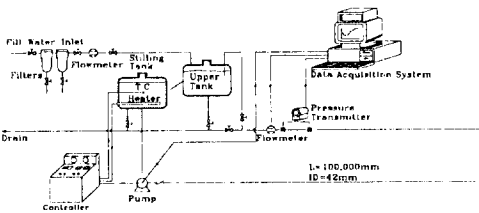


Fig.1(b) The pilot-scaled experimental apparatus equipped with a uncompressed tank

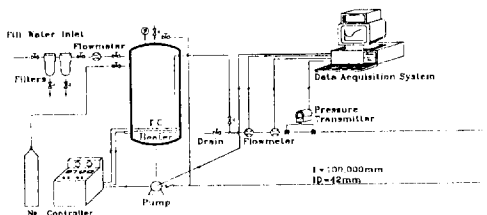


Fig.1(c) The pilot-scaled experimental apparatus equipped with a compressed tank filled by Nitrogen gas

톤)로부터 원심펌프에 의해 고요부(calming section) 상단부를 통해 시험관내로 유입된다. 유입되는 과정에서 생성될 수 있는 공기는 공기밸브에 의하여 제거한 후, 유체의 흐름조건을 일정하게 유지하여 시험부에 들어가도록 설계하였다. 시험관은 이음새없는 스테인레스 강관(seamless stainless steel)으로 길이 6m, 내경 4.65mm와 10.85mm로서, 입구에서부터 시험부까지의 길이에 대한 관 직경의 비(I/D)는 1260, 550 이상으로, 시험부에서 충분히 온도 및 속도분포가 완전히 발달할 것으로 판단된다. 시험관 하단부에서 각각 20cm되는 지점에서부터 직경 1mm인 압력공을 20cm와 30cm 간격으로 설치하여 유동방향으로의 압력변화를 측정하였다.

마찰저항감소 첨가제로는 양이온 계면활성제인 Habon-G(독일 Hoechst : AG사 제품)를 사용하였다. 본 실험장치에는 직경이 다른 관을 사용하여 첨가제의 관 직경의 영향을 직접 관찰할 수 있도록 하였다. 첨가제를 넣기 전에 먼저 정화된 물을 이용하여 측정에 대한 정확도 및 계기의 작동여부를 형성하기 위하여 유동방향으로의 압력변화율과 유동의 난류상태를 관찰 확인하였다. 첨가제의 마찰저항감소 특성실험은 일정농도의 실험유체를 지정된 실험관을 통하여 일회성으로 통과시켜, 주어진 실험조건들, 즉 물질의 농도(100, 250, 500, 100 ppm), 관 내경(4.65mm, 10.85mm), 작동유체의 온도(30~90°C) 등이 마찰저항감소현상에 미치는 영향을 분석하였다. 유동방향으로의 압력강하는 차압계(differential pressure transmitter, Smar LD301)로 측정하여 분석하였고, 유량은 전자유량계를 이용하여 측정하였다. Reynolds수는 사용된 농도가 대체로 낮고, 측정시에 발생하는 오류에 의한 비교를 최소화 하기위하여 작동유체의 속도 및 용매의 동점성계수를 기준으로 계산하였다. 실험유체의 저장조의 체적은 같은 농도 및 온도의 경우에 필요한 충분한 용액을 준비하도록 하여, 용액의 차이에서 나타날 수 있는 영향을 배제하였다. 실험유체의 온도는, 저장조 하단부에 3kW 용량의 열선을 6개 설치하여 제어하였다. 측정된 온도 및 압력의 변화 신호는 HP 워크스테이션에 의하여 수집·저장된 후, 분석되었다. 정화된 물을 사용한 예비실험결과 발생할 수 있는 실험오차는 마찰계수로 표시할 때,

최대 2.9%였다.

계면활성제가 첨가된 용액을 장기간 사용할 때 발생할 수 있는 특성의 변화는 Fig.1 (b)·(c)와 같이 pilot규모의 실험장치에 의하여 관찰되었다. Fig.1(b)에서 보는 바와 같이 실험장치는 2개의 저장탱크, 온도제어장치, 압력 및 속도측정장치, 폐순환실험장치(closed loop test section) 및 자료 수집장치 등으로 구성되었다. 실험부는 내경 42mm의 강관으로 제작되었고, 그 길이는 100m로 하였다. 관내부의 작동유체는 원심펌프(25마력, 180m<sup>3</sup>/h)로 구동하였고, 이 유체의 온도는 저장탱크 하단부에 설치된 3kW의 열선에 의하여 ±2°C까지 정확하게 제어하였다. 본 연구에서 1차실험에 사용된 저장탱크(Fig.1(b) 경우)는 폴리에틸렌으로 제작되었기 때문에 작동유체의 온도는 40°C로 설정하였다. 실험장치의 유동방향의 압력차를 측정하기 위하여 차압계(Smar 301, FS : 5000mmH<sub>2</sub>O)를 사용하였고, 속도측정을 위하여 와류유량계(oval vortex flow meter, 48m<sup>3</sup>/h)를 사용하였다. 첨가된 첨가물의 농도는 첨가물과 물의 중량을 기준으로 하여 1000ppm로 하였다. 운전시간에 따른 실험관내의 농도변화를 측정하기 위하여 50ml의 샘플을 일정한 간격으로 채취하였다. 실험값은 HP 워크스테이션에 의하여 일정시간 간격으로 자동 측정, 분석하였다.

Fig.1(b)의 실험장치를 사용하여 장기간 실험한 결과, 첨가제와 산소와의 화학반응으로 인하여 첨가물의 저하현상이 일어나는 가능성이 관측되었다. 따라서 첨가제와 산소와의 산화작용 현상을 확인하기 위하여 실험장치를 질소 분위기 하에서 운전할 수 있도록 Fig.(b)의 실험장치를 보완하여 Fig.1 (c)과 같은 실험장치에서 동일 실험을 반복 실시하였다. 다만 초기실험의 저장탱크가 가압·가열할 수 없는 것에 반하여, 2차 실험에서는 저장탱크(0.6ton)를 가압·가열할 수 있도록 하였고, 보다 정확한 유량의 측정을 위하여 와류유량계의 전단부에 정확성에서 매우 뛰어난 질량유량계(Oval Co., 1300kg/min)를 설치하였다. 실험장치를 가압한 이유는 Fig.1(b)의 탱크내부에서 작동유체와 산소의 접촉가능성에 의한 저하현상이 발생하였는지를 규명하기 위함이고, 질량유량계를 설치한 이유는

와류유량계의 내부에 와류를 생성하는 생성기(vortex generator)의 표면에 첨가제의 흡착에 의한 유속의 산출시 측정오차를 분석하기 위함이다. 수집된 실험값들은 비교분석을 위하여 첨가제를 첨가하지 않은 상태, 즉 여과된 수돗물을 이용한 경우의 값들과 비교하였다.

### 3. 계면활성제의 농도측정 방법

NMR로 분석한 첨가제 계면활성제인 Habon-G의 화학구조식은 Fig.2와 같다. pilot 규모의 실험에서 일정시간별로 채취된 50ml 용액을 첨가제가 첨가된 작동유체의 농도가 시간에 따라서 변화하는지를 분석하였다. 수집된 용액의 농도변화는 다음과 같은 원리 및 방법에 의하여 분석하였다. 먼저 Habon-G의 순수용액을 UV-visible spectro photometer를 이용하여 흡광과광을 분석하면 첨가제의 최대 흡광 파장은 233nm부근이었다. 이것은 Fig.2에서의 구조식에서 음이온부분인 3-hydroxy-2-naphthoate 부분에 의해 나타나는 것이다. 농도분석에서 이 음이온부분을 대상으로 UV-spectro

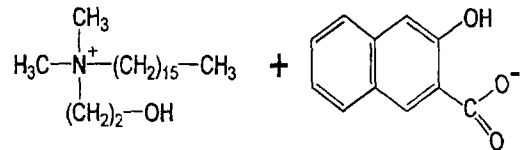
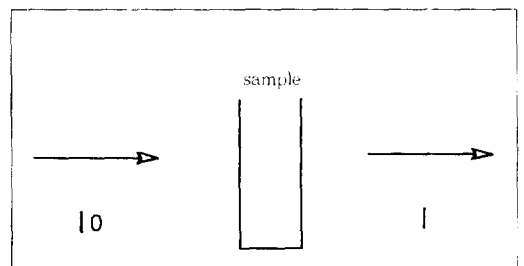


Fig.2 The structure of Habon-G analyzed by NMR



$$\log_{10}(I_0/I) = kcb = A$$

Fig.3 Theory of Lambert-Beer

photometer(Shimadze UV-260)를 사용해 Habon-G를 정량하였다. 정량분석이론은 아래와 같다.

3.1 원 리

사용된 분석법의 주된 이론적 근거는 Lambert-Beer법칙이며 개략적인 내용은 다음과 같다.

여기서

A = 흡광도(absorbency)

b = 통과길이  
(path length through the sample)

c = 용질의 농도(concentration of solute)

I = 세기(intensity)

k = 용질특성상수  
(a constant characteristic of the solute)

이다.

그러나 농도 c가 moles/liter단위이고 b가 cm 단위일때는 위 식은  $A = \epsilon bc$ 로 표시할 수 있고, 이때  $\epsilon$ 은 몰흡광도(molar absorptivity) 혹은 몰흡광계수(molar extinction coefficient)라 한다. 여기서 흡광도(absorbency)가 농도와 직접 비례관계에 있다는 사실을 알 수 있고 이 관계를 정량분석에 이용한다. 이 법칙은 A가 1이하 일때 잘 적용된다.

3.2 농도측정실험

먼저 Habon-G원액을 건조기에서 건조시켜 표준물질로 사용하여 각각 1ppm, 5ppm, 10ppm, 25ppm, 33.3ppm의 농도를 가진 표준용액을 제조하여, 각각의 농도에서의 흡광도를 233nm(max)에서 측정하면 Table 1의 값을 얻을 수가 있다. 이 값을 이용하여 농도에 대한 흡광도를 그림으로 표

Table 1 Calibration table of Habon-G

concentration(ppm)	absorbency
1	0.103
5	0.501
10	0.771
25	1.767
33.3	2.591

시하여 보정곡선을 Fig.4에 표시하였다.

보정곡선에서 얻어진 관계식을 이용하여 측정하고자 하는 용액의 흡광도를 측정하여 역으로 농도를 계산하는 것이다. 본 실험에서 사용된 농도곡선  $f(x) = 13.597 \times - 0.7310(x : \text{흡광도})$ 의 일차함수

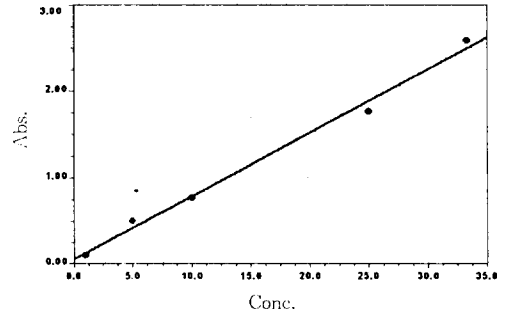


Fig.4 Calibration curve of Habon-G

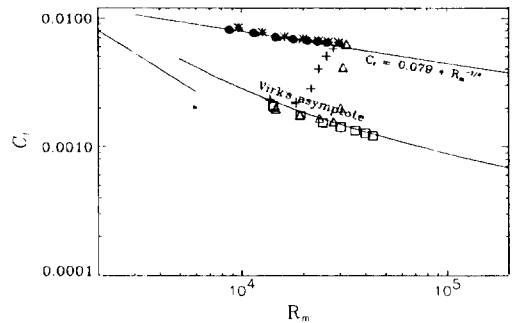


Fig.5 Effects of additive concentration on DR.

● : plain water  
(Temp. = 60°C, I. D. = 1/2")

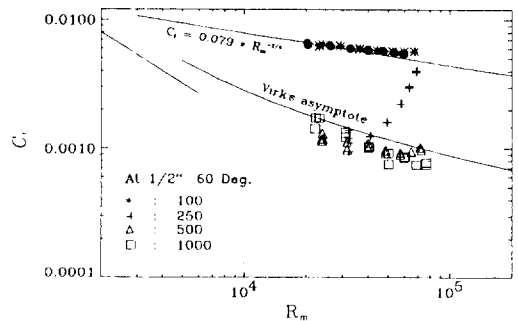


Fig.6 Effects of additive concentration on DR at Temp. = 60°C, I. D. = 1/4" (symbols are same as Fig.5)

로 표시될 수 있고, 이를 이용하여 시간별로 수집된 시료를 정량분석하였다. 일정 시간간격으로 수집된 용액을 각각 70배로 희석(0.714ml/50ml H<sub>2</sub>O)한 후, 이를 3ml를 취하여 UV cell에 옮겨 UV-spectro photometer로 233nm의 흡광도를 측정하였고, 앞의 calibration curve를 이용하여 농도를 계산하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 Lab. 규모의 실험

###### 4.1.1 첨가물의 농도에 의한 영향

계면활성제의 농도가 마찰저항감소에 미치는 영향은 100ppm, 250ppm, 500ppm, 1000ppm의 경우에 대하여 관찰하였다. 그러나 본 실험의 고찰에서는 60°C의 경우만을 살펴보기로 한다. Fig.5와 6은 각각 1/2"와 1/4" 관에서의 농도의 변화에 따른 Reynolds수에 대한 마찰계수(C<sub>f</sub>)를 보여주는데, 그림에서 보는바와 같이 첨가물의 농도가 증가할수록 DR%는 증가함을 알 수 있다. 한편 어떤 농도 이상인 경우 DR%는 큰 차이를 관찰할 수가 없어서, 이미 주어진 농도가 임계교질농도(critical micelle concentration)에 도달하여 포화상태에 이른 것으로 사료된다. 또한 어느 Reynolds 수에서는 마찰저항감소의 효과를 상실하는 것을 볼 수 있게 되는데, 이것은 속도가 빨라지면서 생성되는 큰 전단력에 의한 교질입자의 파괴때문에 야기된 것으로 사료된다.

###### 4.1.2 온도에 의한 영향

Habon-G에 대한 온도의 영향은 30, 60, 90°C 일 때 농도의 변화와 함께 관찰되었지만, 250ppm의 경우가 Fig.7과 Fig.8에서 보여지고 있고 이 실험결과는 용액의 온도가 증가함에 따라 마찰저항감소효과가 증가하다가, 계속 온도를 가열하면 마찰저항감소 효과를 점차적으로 상실하게 되는 것을 관찰할 수 있다. 따라서 실제로 적용하고자하는 곳의 온도범위에서 작동하는 계면활성제를 사용하는 것이 필요하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 첨가제가 첨가된 용액을 이용하여 열전달의 특성이 실험·관찰되었으나, 자세한 사항에 관해서는 추후 실험이 요구된다고 하겠다.

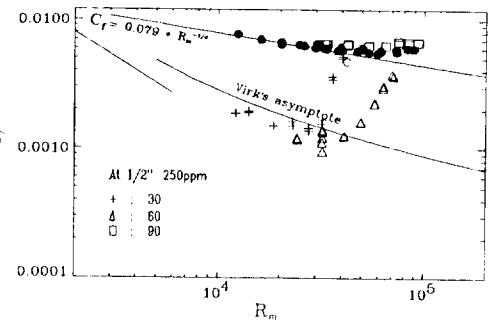


Fig.7 Effects of solution temperature on DR. at Conc.=250ppm, I. D.=1/2" (● : plain water)

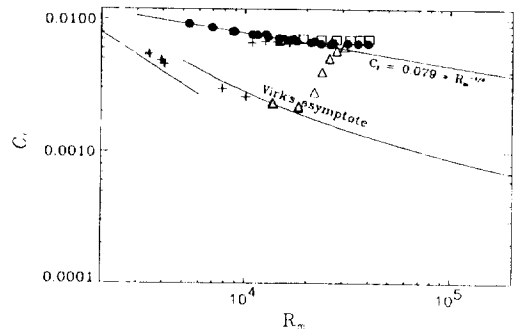


Fig.8 Effects of solution temperature on DR. at Conc.=250ppm, I. D.=1/4" (symbols are same as Fig.7.)

###### 4.1.3 유속 및 직경의 영향

온도의 영향을 나타낸 Fig.7과 8은 관 내부에서의 벽전단력(wall shear stress)의 함수로써 표시하면 Fig.9와 10과 같다. Fig.9, 10에서 보는바와 같이 직경에 관계없이 교질입자가 파괴될때 벽에서 발생하는 전단력은 거의 동일하나 직경이 증가하면 조금씩 감소함을 유추할 수 있다. 왜냐하면 벽전단력이 1/4" 관에서는 농도가 증가하면 전단력이 계속 증가하였는데, 1/2" 에서는 벽전단력이 농도의 증가에 관계없이 같은 것을 관찰할 수 있었다. 따라서 직경이 작은 경우가 DR%에는 다소 큰 효과를 나타내지만 그 정도는 매우 미약하다고 할 수 있다. 또한 온도차이에 의한 벽면의 전단력은 임계

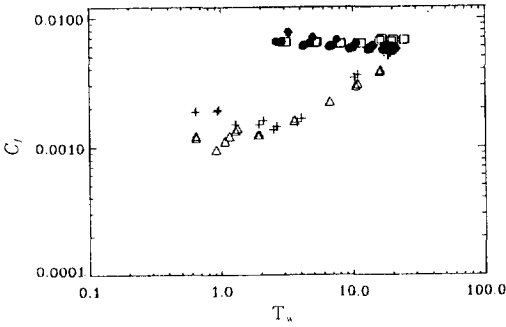


Fig.9 Friction coefficient vs wall shear stress depending on temperature at 250 ppm 1/2" inner pipe diameter (symbols are same as Fig.7.)

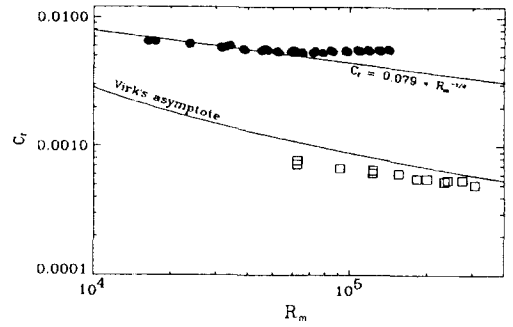


Fig.11(a) Friction coefficient vs Reynolds number in a pilot-scaled system open to atmosphere (● : plain water, □ : 1000 ppm Habon-G)

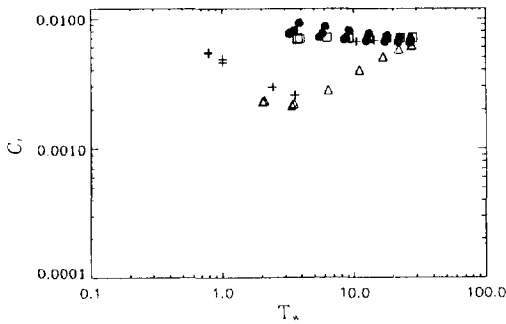


Fig.10 Friction coefficient vs wall shear stress depending on temperature at 250 ppm 1/4" inner pipe diameter (symbols are same as Fig.7.)

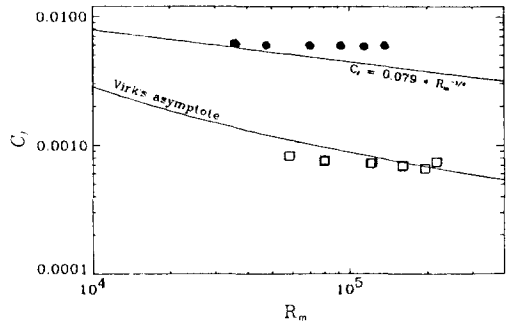


Fig.11(b) Friction coefficient vs Reynolds number in a pilot-scaled system filled with Nitrogen (symbols are same as Figure 11(a))

온도까지는 마찰저항의 정도에는 다소 차이가 있어도 전단되는 최대 전단력은 동일함을 확인할 수가 있다. 한편 Fig. 7~10을 비교 관찰하면, 임계전단력이 같은 조건하에서 유속의 관점에서는 서로 다른 곳에서 나타났지만, 임계전단력의 면에서 살펴보면 동일함을 고려할 때, 마찰저항계수는 유속의 함수로 결과를 표시하는 것보다는 임계전단력의 함수로 표시가 되어야 할 것으로 사료된다.

#### 4.2 Pilot 규모의 실험

Pilot규모의 실험이 1000ppm, 40°C에서 질소를 충전하지 않은 저장조를 사용한 경우와 질소를 충전하여 가압한 경우, 두가지 조건에서 행하여졌다.

두 경우 모두 여과된 물을 사용한 시스템의 상태가 Fig.11(a), (b)에서 보는바와 같이 시험부에서는 완전발달된 난류상태인 것을 알 수 있다. Fig.12 (a), (b)는 첨가물을 첨가한 경우의 유동방향으로의 차압측정에 의하여 계산된 마찰저항감소율(DR%)을 표시한다. 질소를 충전하지 않은 경우, 수산소와 작동유체의 산화반응 가능성이 상존하는 경우는 300시간이 지나서 마찰저항감소의 효과가 급격하게 감소하고 있음을 관찰할 수가 있다. 그러나 질소를 충전한 경우는 충전되지 않은 경우에 비하여 그 마찰감소 변화율이 거의 변화하지 않고 매우 일정하고 안정된 것을 나타낸다.

이 경우를 자세하게 분석하기 위하여 앞에서 논

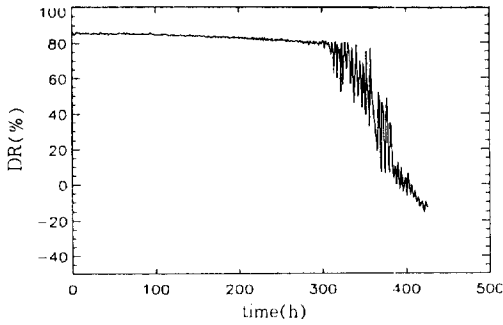


Fig.12(a) Drag reduction rate vs elapsed time with 1000 ppm Habon-G in a pilot-scaled system open to atmosphere

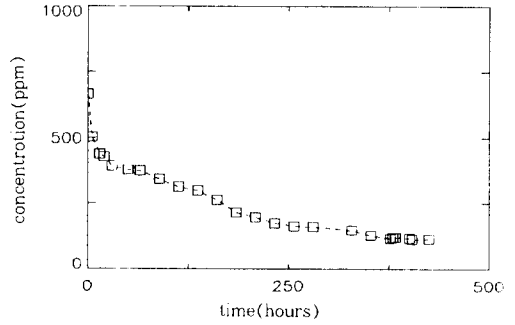


Fig.13(a) Concentration variation with 1000 ppm Habon-G in a pilot-scaled system open to atmosphere

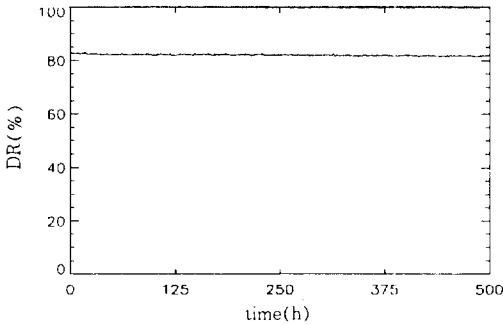


Fig.12(b) Drag reduction rate vs elapsed time with 1000 ppm Habon-G in a pilot-scaled system filled with Nitrogen

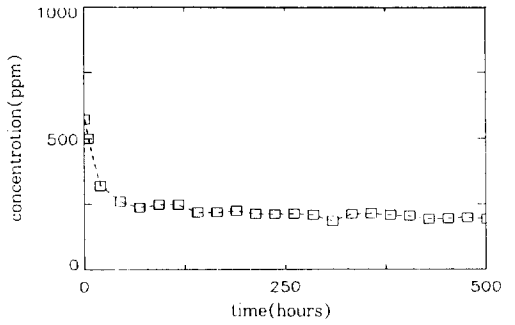


Fig.13(b) concentration variation with 1000 ppm Habon-G a pilot-scaled system filled with Nitrogen

의된 농도측정 방법에 의하여 농도를 측정된 결과를 Fig.13 (a), (b)에 표시하였다. Fig.13(a)의 경우 농도는 시간이 경과함에 따라 계속 감소하며, 특히 초기시간에 매우 급격하게 감소함을 보이고 있다. Fig.13(b)의 경우, 즉 저장조에 질소를 충전하여 산소의 영향을 배제한 경우에도 역시 초기에는 농도의 변화가 크게 감소하다가 일정시간이 지나면 일정함을 나타내고 있음을 잘 관찰할 수가 있다. 두 종류의 실험결과를 분석하면 아래와 같다. 계면활성제의 농도 및 성능에 영향을 미치는 저하현상(degradation)은 대체적으로 다음과 같은 원인들에 의하여 나타난다고 할 수 있다. : (1) 벽면의 흡착현상(absorption), (2) 산화(oxidization), (3) 화학반응(chemical reaction), (4) 진단응력

(shear stress), (5) 열응력(thermal stress)

본 실험에서 동일 온도, 농도 그리고 같은 동력 하에서 첨가제를 첨가하여 실험장치를 구동시킬 경우, 초기 마찰저항감소 효과(DR%)가 발생하여 벽면의 전단력이 감소함에 따른 유량의 증가를 얻을 수 있다. 그러나 초기농도( $C_0$ )는 초기에 벽면에서 계면에너지의 표면부상으로 인한 첨가제의 관벽면 흡착에 의하여 농도의 감소를 야기하게 된다. 이때 관 벽면의 두께가 흡착으로 인하여 다소 두꺼워짐으로 관을 통과하는 유속의 감소로 인한 유량의 감소가 야기된다. 그러나 유량의 감소는 흡착의 두께가 매우 얇기 때문에 미량이라고 할 수가 있다. 하지만 유량의 감소로 인하여 유동방향의 압력 차이는 유속의 변화에 따라서 다소 줄어들게 됨으

로 농도가 감소한다고 하여도 실제로는 DR%에 변화를 보이지 않음을 알 수가 있다. 저장조가 질소로 충전된 경우와 공기중에 열려있는 두 경우를 비교하여 보면, 두 시스템 모두 초기상태에는 농도의 감소가 비슷한 정도로 일어났음을 감안할 때, 흡착에 의한 마찰저항감소의 저하 효과보다는 산화에 의한 저하현상이 매우 큼을 알 수가 있다. 즉 질소를 충전하여 산화작용을 차단한 경우에는 초기 흡착에 의한 농도의 감소 후에는 시간이 경과함에 따라서 매우 안정적임을 알 수가 있다. 따라서 실제 시스템에는 반드시 산화작용을 차단할 수 있는 방법이 모색되어야 할 것이다.

## 5. 결 론

마찰감소 첨가물을 이용한 열수송 동력저감 기술 개발을 위해 본 연구에서는 마찰 감소효과가 탁월하고 저하에 성능이 우수한 것으로 평가되는 계면활성제를 이용하여 첨가제의 마찰감소특성과 실제 시스템에 적용을 위한 pilot규모의 예비 실험화 실험을 수행하였다. 온도와 농도에 따른 마찰저항감소에 미치는 효과를 Lab규모의 실험장치에서 관찰하였고, pilot규모를 통한 첨가제의 저하 특성분석이 수행되었다.

첨가된 계면활성제인 Habon-G의 마찰저항감소 특성 실험결과를 종합하면 다음과 같다.

- 1) 첨가물의 농도가 증가할수록 마찰저항 감소 효과는 증가하지만, 일정한 농도 이상에서는 이미 주어진 농도가 임계교질농도(critical micelle concentration)에 도달하여 포화상태에 이른 것으로 사료된다. 따라서 시스템에 가장 적절한 농도의 선택이 필요하다.
- 2) Habon-G의 온도의 영향은 용액의 온도가 증가함에 따라 마찰저항감소 효과가 증가하다가, 온도가 계속 증가하면 그 효과를 상실하게 되는 것을 관찰할 수 있다. 따라서 실제 적용설비의 온도범위에서 효과적으로 작동하는 계면활성제를 선택하여 사용하는 것이 요구된다.
- 3) 같은 농도에서 온도차이에 의한 벽면의 전단력은 임계전단 온도까지는 마찰저항의 정도

에는 다소 차이가 있어도 전단되는 최대 전단력은 동일하였다. 유속의 함수로 표시된 곳에서는 임계전단력이 유속이 서로 다른 곳에서 나타났지만, 임계전단력의 함수표시에서는 동일함을 고려할 때, 마찰저항감소 효과를 가장 적절하게 표현하기 위해서는 마찰 감소율에 대한 임계전단력의 함수로 표시가 되어야 적합한 것으로 사료된다.

- 4) 마찰저항감소율(DR%)의 산화에 대한 영향이 저장조 내부에 질소의 충전여부에 의하여 관찰되었다. 질소를 충전하여 첨가용액과 산소와의 반응을 차단한 경우가, 산소가 작동유체의 산화반응의 가능성이 상존하는 질소를 충전시키지 않은 경우에 비하여, 일정시간 경과 후에도 농도의 변화가 거의 없고, 안정된 것을 나타내고 있는 것으로 분석되었다. 따라서 첨가제의 저하현상에는 산화작용이 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.
- 5) 저장조내부의 농도의 변화는 초기상태에는 벽면의 흡착현상(absorption)에 의하여 지배를 받다가 일정시간이 경과한 후에는 산화(oxidization), 화학반응(chemical reaction) 및 전단응력(shear stress)에 의하여 지배를 받는다. 따라서 장시간 사용이 가능하려면, 초기 흡착현상에 의한 초기농도 만큼의 농도의 보상과 용액과 산소의 산화작용을 방지하기 위한 방법이 모색되어야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

1. Virk, P. S., 1975, "Drag reduction fundamentals", *AIChE, J.*, 21, pp. 625~656.
2. Berman, N. S., 1978, "Drag reduction by polymers", *Ann Rev. Fluid Mech.*, 10, 47~64.
3. Choi, U. S., Cho, Y. I. and Kasza, K. E., 1987, "Screening and Degradation Tests of Linear Polymer Additives for District Heating Applications", ANI. Report-87-49, December.
4. Pollert, J., J. Zakin, J. Myska and P.



- Kratochvil, 1994, "Use of Friction Reduction Additives in District Heating System Field Test", at Kladno-Krocehlavy, Czech Republic, Proc. Int' I. District Heating and Cooling Assoc. Conf., Seattle, p. 141.
5. Kulicke, W. M., Kotter, M. and Grager, H. 1989, *Advances in Polymer Science*, 1, 4.
  6. Steiff, A. et al., 1989, *Drag reduction in Fluid Flows*, Ellis Horwood, pp. 61~67.
  7. Ohlendrof, D., W. Interthal and H. Hoffman, 1986, "Surfactant Systems for Drag Reduction : Physico-Chemical Properties and Rheology Behaviour", *Rheol. Acta*, 25, 468.
  8. Shenoy, A. V., *Colloid Polym. Sci.*, 262, 319 (1984).
  9. Sellin, R. H., Hoyt, J. W. and Scrivener, O., 1990, *J. Hydraulic Res.*, 20, 29.
  10. Sellin, R. H. S., and R. T. Moses, 1989, "Drag Reduction in Fluid Flows : Techniques for Friction Control", Ellis Horwood limited Press, Chichester, England.