

난류 관유동에서 마찰저항감소 첨가제에 대한 펌프와 온도의 영향

Pump and Temperature Effects on Drag Reducing Additives in Turbulent Pipe Flows

박 성 룡*, 서 항 석*, 윤 형 기*
S. R. Park, H. S. Suh, H. K. Yoon

Key words : Turbulence(난류), Drag reduction(마찰저항 감소), Polymer(고분자), Surfactant(계면활성제), Critical micelle concentration(임계교질농도)

Abstract

The effects of pump and temperature on drag reducing characteristics were investigated with a polymer(PAAM : Polyacrylamide) and three kinds of surfactants(CTAC, STAC, Habon-G) in fully developed turbulent pipe flows with various experimental parameters such as additive concentration(30~500ppm), pipe diameter(4.65mm, 10.85mm), Reynolds number($4 \times 10^4 \sim 10^5$) and working fluid temperature(20~80°C). The pump effect on PAAM was severe such that the drag reduction rates obtained with pump were decreased upto 30% as compared with those obtained with compressed air in 4.65mm test section. The temperature effect on PAAM was noticeably considerable, that is, the higher temperature, the less drag reduction rate. On the other hand, no significant pump effect on the surfactants was observed. The drag reducing effectiveness of CTAC was totally lost in the temperature range of 60 to 80°C, whereas STAC and Habon-G kept their distinct drag reducing capability at a temperature of 80°C. This study clearly elucidated that for DHC application of drag reducing additives, the pump and temperature effects as well as additive concentration and pipe diameter should be carefully taken into consideration.

기 호 설 명

C : 마찰저항 계수
 D : 관 직경
 dP : 유동 방향의 압력공사이의 압력 강하
 dx : 유동 방향의 압력공사이의 거리

l : 채널 입구에서 시험부까지의 거리
 R_m : 관유동의 Reynolds 수 ($\equiv \frac{U_m d}{\nu}$)
 U_m : 혼합 평균 속도(bulk mean velocity)

그리스 문자

ρ : 작동 유체의 밀도
 τ_w : 벽에서의 전단력

* 정회원, 한국에너지기술연구소, 지역냉난방연구팀

ν : 동점성계수

하 첨 자

m : 평균

a : 첨가물

w : 여과된 물 또는 벽

1. 서 론

국민 생활 수준의 향상으로 주거 공간의 쾌적한 열환경에 대한 중요성이 인식되면서 에너지의 효율적인 이용 및 환경 보호를 위해 1987년 남서울지역을 효시로 시작한 지역 냉난방 사업은 현재 분당, 일산 등 신도시를 비롯하여 전국으로 확대 보급되고 있다. 지역 냉난방(DHC, District Heating and Cooling)은 집중적인 열관리를 통한 열효율 증대와 경비 절감, 에너지 절감, 유지 및 보수 관리 등에서 많은 장점으로 인해 건물이 밀집된 지역에서 매우 각광을 받고 있는 기술이다.

지역 냉난방 시스템에서는 파이프를 통한 열의 장거리 이동으로, 파이프에서 마찰저항의 감소는 에너지의 절약에 직접적인 효과가 크다. 적은 양의 마찰감소 물질(고분자 또는 계면활성제)을 순수 용액에 첨가해서 얻어지게 되는 난류의 마찰저항 감소에 대한 연구는 기존 장치를 변화시키지 않고 직접 이용이 가능하여 매우 효율적이므로 첨가물을 이용한 마찰저항 감소 연구는 매우 중요하다.

고분자 물질은 낮은 농도에서 마찰 감소 효과가 매우 우수하나 열 및 기계적 에너지에 의하여 성능 저하가 쉽게 일어나는 단점이 있다^{(1)~(3)}. 한편 계면활성제는 고분자 물질에 비하여 사용할 때 거품을 발생시키는 것과 같은 단점은 있지만, 마찰 감소 효과가 크고 열적 저하가 작을 뿐만 아니라, 임계 전단력(critical shear stress)이상에서는 micelle 구조가 파괴되어 마찰감소효과가 저하되나 임계 전단력이하가 되면 손상된 micelle 구조가 다시 결합하여 새것과 같은 역할을 하여, 장기간 사용할 수 있는 장점으로 인하여 냉난방 시스템에 실제적인 사용을 위한 연구가 진행 중에 있다^{(4)~(5)}.

마찰저항감소 첨가물을 이용한 열수송동력 저감

기술개발에 관한 국내 현황을 살펴보면, 학계를 중심으로 마찰저항감소 물질의 특성에 관한 기초 연구가 수행 중이나 실용화를 위한 연구는 전무한 실정이며, 마찰저항의 감소에 대한 기구(mechanism)는 아직도 확실하게 밝혀지지 않고 있고, 대부분 첨가제에 관한 연구는 정성적으로 완충층에서의 난류 구조의 변화에 의해서 대부분 설명되어 왔다.

본 연구는 관유동에서 고분자 물질(PAAM, Polyacrylamide)과 계면활성제(CTAC; Cethyltrimethyl Ammonium Chloride, STAC; Styletrimethyl Ammonium Chloride, Habon-G)를 폐쇄 회로 및 지역 냉난방 시스템에 적용할 경우, 발생할 수 있는 산업용 전단응력 기기인 펌프와 작동유체의 온도변화가 첨가제의 마찰저항감소 특성에 미치는 영향을 정략적으로 분석하는데 그 목적이 있다.

2. 실험 장치 및 방법

첨가물의 마찰저항 감소 특성을 분석하기 위한 실험 장치의 흐름도는 Fig.1에 제시되었다. 유량은 체적이 0.64m³(0.8m×0.8m×1m)인 저장용기로부터 시험부에 압축공기 및 원심펌프에 의하여 공급되도록 하였다. 실험관 입구에 공기밸브를 설치하여 실험관 내에 유입, 생성될 수 있는 공기를 제거하므로써 공기로 인한 측정기기의 오차를 최소화 하였다. 또한 실험관 상단부에 고요부(calming section)를 설치하여 배관에서 발생하는 난류성분을 최소화하여, 유체흐름조건을 일정하게 유지한 상태에서 길이가 6m이고 내경이 4.65mm와 10.85mm의 이음새 없는 강관(seamless stainless steel)을 통하여 시험부에 들어가도록 설계되었다. Matthys⁽⁶⁾에 의하면 마찰감소유체는 속도 및 온도 분포가 완전히 발달되기 위해서는 입구길이(l/D)가 500 이상이 필요한데, 본 연구의 실험장치는 입구에서 시험부까지의 길이에 대한 관직경의 비(l/D)는 각각 1260과 550이상으로 하여, 시험부에서 온도 및 속도 분포가 완전발달된 상태에서 마찰저항감소 특성을 분석할 수 있도록 하였다. 유동방향으로의 압력변화를 측정하기 위하여 시험관 하단부

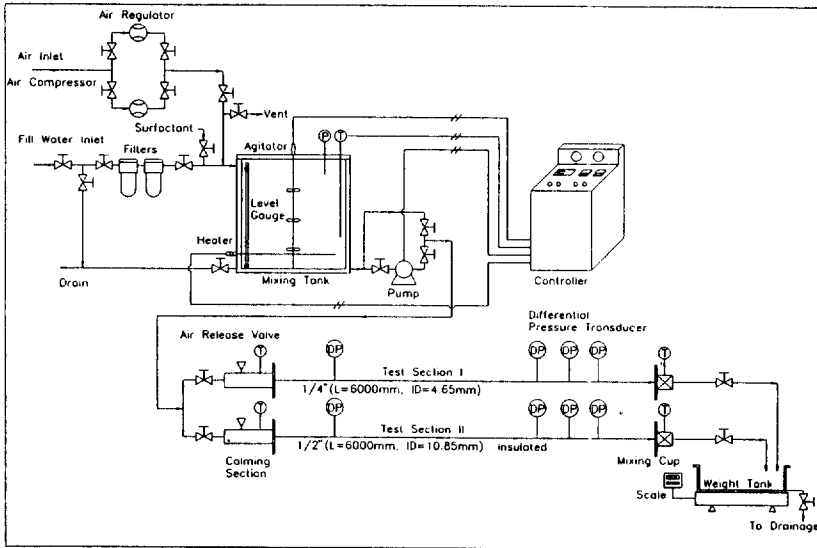


Fig.1 Flow diagram of thermal transportation experimental facilities

에서 끝효과(end effect)가 최소가 되도록 하단부에서 0.2m 되는 지점에서부터 직경 1mm인 압력공을 0.2m와 0.3m 간격으로 각각 설치하였다.

유체유동의 구동원으로 압축공기(7기압까지 조절가능)와 원심펌프(190RPM까지 조절가능)를 사용하여 원심펌프 사용시의 마찰감소율을 압축공기 사용시의 마찰감소율과 상대 비교함으로써 원심펌프의 기계적 저하를 측정할 수 있도록 하였고, 서로 다른 관 직경을 사용하여 관 직경의 영향도 상대비교 관찰할 수 있도록 하였다.

마찰저항감소 첨가물의 경우, 고분자물질로는 마찰저항감소 효과가 뛰어나고, 저하에 대한 성능이 비교적 우수한 것으로 평가되는 polyacrylamide (Aldrich Chemical Co., polyacrylamide copolyacrylicacid)를 사용하였고, 계면활성제로는 CTAC(Cethyltrimethyl Ammonium Chloride, 선진화학 제조, SUNQAT-CM29), STAC(Styletrimethyl Ammonium Chloride, 미원상사 제조), Habon-G(Hoechst Co.)를 사용하였다. 용매는 일반 수도물(tap water)을 정수하여 사용하였다. 또한 고분자 물질의 첨가시 작동유체의 산화방지 및 응착(aggregation)을 줄이기 위하여, 10wt%의

isopropyl alcohol을 첨가하였다. 계면활성제의 경우 CTAC와 STAC는 화학적 퇴화현상을 줄이기 위하여, 반대 이온(counter-ion)으로 살리실산 소다(sodium salicylate, NaSal)를 wt%로 같은 양을 첨가하였다. Habon-G의 경우는 반대이온을 첨가하지 않고 저장조내에서 균일 혼합되어 사용되었다. 고분자 물질은 물에 쉽게 용해되지 않는 특성으로 인하여 균일한 농도의 작동유체를 만들기 위하여, 먼저 2000ppm의 고농도 용액을 준비한 후, 저장조내의 정화된 물에 넣어 희석시켜 원하는 농도(30~300ppm)의 작동유체를 만들고, 저장조내에 있는 회전장치를 이용하여 완전히 혼합하여 사용하였다.

마찰저항감소 첨가유체를 이용하여 특성분석 실험을 수행하기 전에 측정에 대한 정확도 및 계기의 신뢰성을 점검하기 위한 예비실험을 수행하였다. 물을 사용한 실험오차는 Kays⁽⁹⁾, McAdams⁽¹⁰⁾의 실험방정식과의 비교하여 마찰계수로 표시할 때 최대 2.9%로 분석되었다. 첨가제의 마찰저항감소 특성실험은 일정농도의 실험유체를 지정된 실험관을 통하여 일회성으로 통과시켜 물질의 농도(30, 50, 100, 250, 300, 500ppm), 관 직경(4.65mm, 10.

85mm), 작동유체의 온도(20~80℃), 펌프 등이 마찰저항감소현상에 미치는 영향을 분석하였다. 유동방향으로의 압력강하를 차압계(differential pressure transmitter, Smar LD301, Accuracy 0.1% F.S)로 측정하여 분석하였으며, 유속은 초시계를 사용하여 일정시간(60초) 동안 저장조에 수집된 유량을 평균하여 혼합 평균유속(bulk mean velocity)를 산정하였다. 첨가물로 인한 작동유체의 밀도, 점도 등을 포함하여 물성치의 변화가 예측되나 본 연구에서와 같이 수백 ppm의 농도에서는 물성치의 변화가 매우 미소하여⁽¹¹⁾ 물의 물성치를 기준하여 Reynolds 수를 포함한 실험치를 계산하였다.

실험유체의 저장조 체적은 한 실험에 필요한 충분한 용액을 준비하도록 하여, 용액의 차이에서 나타날 수 있는 영향을 완전 배제하였다. 실험유체의 온도는 저장도 하단부에 3kW 용량의 열선을 6개 설치하여 제어하였고, 측정된 온도 및 압력의 변화 신호는 컴퓨터에 의하여 수집, 저장된 후 Sun 시스템에 의하여 분석되었다.

3. 결과 및 고찰

만약 유동 방향의 압력의 변화를 측정한다면, 마찰저항계수(C_f)는 벽 전단응력(τ_w)에 의해서 아래와 같이 유도 될 수 있다.

$$\tau_w = C_f \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_m^2 = \frac{D}{4} \frac{dP}{dx}$$

$$\therefore C_f = \tau_w / \frac{1}{2} \rho U_m^2 = \frac{D}{4} \frac{dP}{dx} / \frac{1}{2} \rho U_m^2 \quad (1)$$

여기서, U_m 은 혼합 평균속도(bulk mean velocity)를 나타내며 ν 는 순수물의 동점성을 나타낸다. 만약 시험부에 똑같은 유량이 통과할 경우, 마찰저항 감소율(DR %)은

$$DR\% = \left(1 - \frac{\Delta p_w}{\Delta p_w}\right) \times 100\%$$

$$= \left(1 - \frac{C_{f0}}{C_{f0}}\right) \times 100\% \quad (2)$$

와 같이 정의 할 수 있는데 Δp_w , C_{f0} 와 Δp_w , C_{f0} 는 각각 뉴우톤(Newtonian) 유체 및 마찰저항 감소

유체에서의 압력공 사이의 압력 강하와 마찰저항계수를 나타낸다.

3.1 고분자 물질

고분자 첨가물의 농도가 마찰감소에 미치는 영향을 조사하기 위하여 30, 50, 100, 300ppm의 농도에 대하여 측정한 마찰계수(C_f)와 Reynolds 수의 관계를 두 직경에 관에 대하여 Fig.2에 제시하였다. 정화된 물을 사용하여 측정한 마찰계수가 관유동의 난류특성식들^{(9),(10)}과 비교하여 잘 일치하고 있기 때문에 실험치의 신뢰성을 확인할 수가 있다. 그림에서 보는바와 같이 관 직경에 관계없이, 첨가물의 농도가 높을수록 마찰저항 감소효과는 증가하고 있는 것을 알 수가 있다. 기계적 저하가 적은 압축공기 사용시에는 10.85mm의 내경의 경우

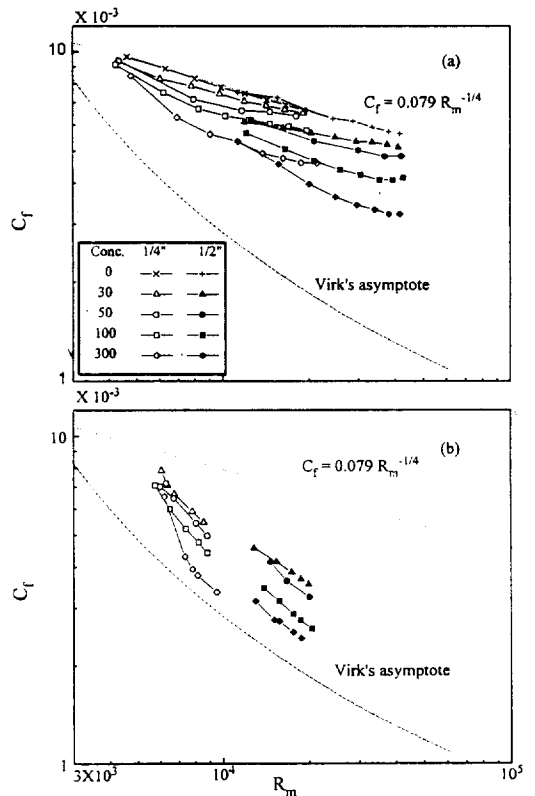


Fig.2 Pump effects on PAAM solution ($T_f=20^\circ\text{C}$)
(a) centrifugal pump, (b) compressed air.

100ppm 정도의 고분자농도에서 50~60%의 마찰저항 감소를, 300ppm 농도에서는 60%내외의 마찰저항감을 얻을 수 있었다.

온도의 영향을 관찰하기 위하여, 작동유체의 농도는 300ppm으로 고정하여 측정된 Reynolds 수에 대한 마찰저항계수와 DR%에 관한 결과를 Fig.3에 제시하였다. 실제 지역난방 주배관을 통하여 열원시설에서 수용시설까지 공급되는 온수의 온도는 110℃내외이나 실험장치의 제약으로 인하여 110℃이상에서 실험을 수행하지 못하고, 작동유체의 온도를 20, 40, 60, 80℃로 하여 고분자 물질의 온도에 대한 영향을 분석하였다. 그림에서 보는 바와 같이 작동유체의 온도가 증가할수록 마찰저항 감소 효과는 줄어들고 있으며 높은 온도에서는 감소현상이 더욱 현저하였다. 또한 관 직경이 큰 경

우 마찰저항 감소효과는 작은 관과 비교할 때 더 크게 줄어드는 것을 알 수가 있는데, 이것은 온도에 따른 난류의 확산이 큰 관에서 더 활발하게 일어나기 때문으로 사료되나, 전단력의 변화에 따른 점성의 영향이 고려된 분석이 뒷받침되어야 할 것이다.

Fig.2와 Fig.3에서 보듯이 동일 실험조건(농도, 온도, 관직경, Reynolds 수)에서 고분자첨가물 유체를 펌프를 사용하여 반송시에는, 압축공기를 사용하는 경우에 비하여 마찰감소 효과가 현격히 감소하였으며, 특히 고분자 농도가 낮을수록, 수송관 직경이 작을수록 그 현상은 분명하였다. 특히 관 직경에 비하여 큰 용량의 펌프가 선택될 경우, 펌프의 영향은 관 직경이 작을수록 심하여, 알맞은 용량의 펌프의 선택이 필요하며, 펌프의 전단력에서도 마찰저항감소현상을 유지할 수 있는 고분자첨가제의 개발이 있어야 될 것으로 사료된다.

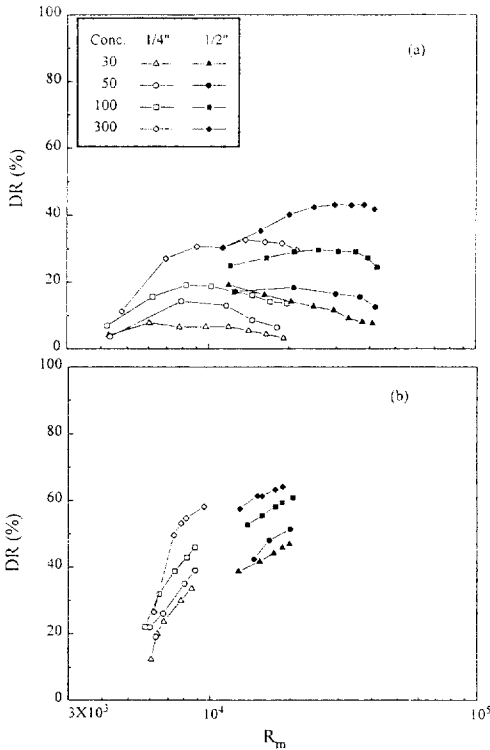


Fig.3 Temperature effects on PAAM solution (Conc.=300ppm)
(a) centrifugal pump, (b) compressed air.

3.2 계면활성제

계면활성제(CTAC)의 경우 100, 250, 500ppm의 농도의 변화에 따른 마찰저항감소의 특성은 Fig.4에서 관찰할 수 있다. 농도와 관 직경의 변화에 대한 Reynolds 수와 마찰계수(C_f)의 관계에서 보듯이 100ppm 이상에서는 첨가물의 농도가 증가하여도 DR%의 큰 차이를 관찰할 수가 없어서, 이미 주어진 농도가 임계교질농도(critical micelle concentration)에 도달하여 포화 상태에 이른 것

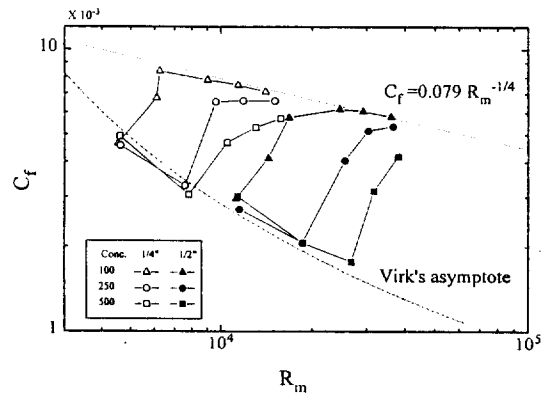


Fig.4 Drag reducing characteristics of CTAC solution ($T_f=20^\circ\text{C}$, centrifugal pump)

으로 사료된다. 같은 그림에서 보는 바와 같이 높은 Reynolds 수에서는 마찰저항감소의 효과를 상실하게 되는데, 이것은 유동속도가 빨라지면서 생성되는 큰 전단력에 의해 교질입자가 파괴되기 때문에 야기된 것 같다. 또한 농도가 증가할수록 높은 Reynolds 수에까지 DR효과가 나타나고 있는 것을 분명하게 알 수가 있고, 그 크기도 고분자물질의 경우 최대 값을 얻는 경우보다 다소 크거나 비슷한 값을 얻고 있음을 관찰할 수 있다.

Bewersdorff등⁽¹¹⁾은 관 직경이 작은 경우가 관 직경이 큰 경우보다 낮은 속도에서 난류의 마찰계수가 층류의 값과 비교하여 매우 크게 떨어져 있음을 보고하였다. 따라서 shear viscosity가 관직경에

따라서 증가하는 것이 아닌가하는 의문을 제기하였는데, 실제로 임계 전단력(critical shear stress)은 관의 직경에 관계가 없음을 후에 보고하였다. 본 연구의 경우에도 관 직경이 증가함에 따라서 마찰감소현상이 일어나는 Reynolds 수는 증가함을 알 수가 있으나, 임계전단력의 값은 유체의 온도가 40℃의 경우, 관 직경이 4.65mm에서 2.35Pa이며, 관직경이 10.85mm에서는 2.39Pa임을 보여서 큰 차이가 없음을 확인되었다.

500ppm CTAC용액에 대하여 펌프가 계면활성제 첨가 유체의 마찰감소특성에 미치는 영향이 Fig.5에 제시되었다. 펌프를 사용하여 구동시의 마찰저항감소율이 압축공기 구동시와 비교하여 동일

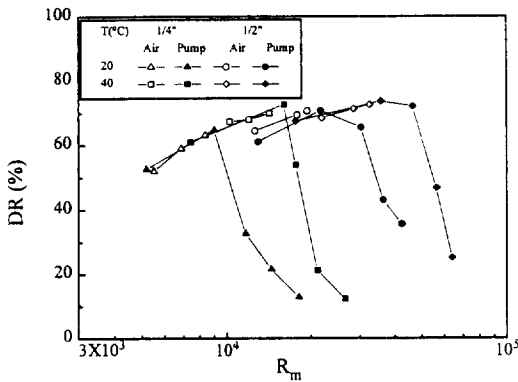


Fig.5 Pump effect on CTAC solution (Conc. = 500ppm)

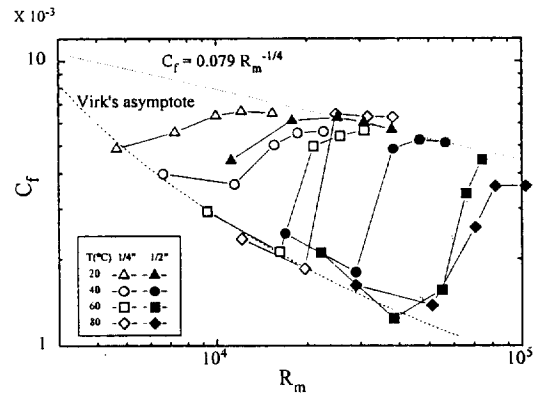


Fig.7 Temperature effect on STAC solution (Conc : 250ppm)

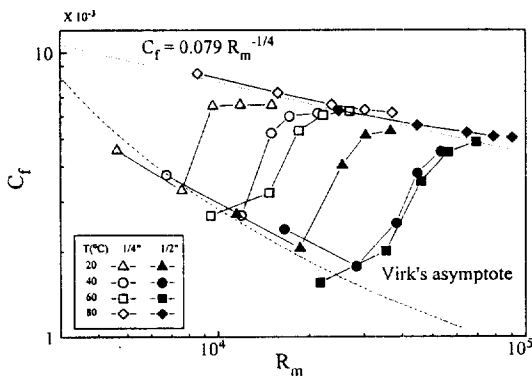


Fig.6 Temperature effect on CTAC solution (Conc : 250ppm)

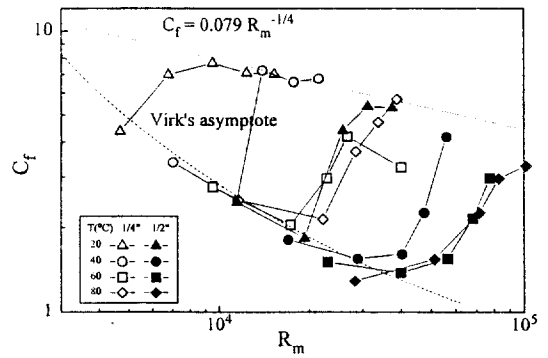


Fig.8 Temperature effect on Habon-G solution (Conc : 250ppm)

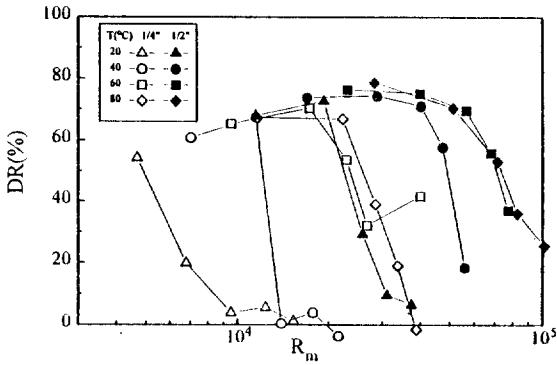


Fig.9 Temperature effect on drag reduction rates on Habon-G solution
(Conc : 250ppm)

실험조건에서 차이가 없으므로, 계면활성제 첨가 유체의 펌프구동은 큰 문제가 없는 것을 알 수가 있다.

펌프가 계면활성제에 미치는 영향이 미세하므로 펌프구동을 이용하여, 250ppm의 CTAC를 사용하여 작동유체의 온도 변화가 마찰감소유체에 미치는 영향을 측정하였으며 결과는 Fig.6에 제시되었다. 60°C 이하에서는 온도의 증가가 마찰저항감소효과에 미치는 영향은 관찰할 수 없었으나, 작동유체의 온도가 80°C에서는 마찰감소효과가 나타나는 Reynolds수(즉 전단율)의 범위가 급격히 감소되었는데, 이것은 일정 속도 이상에서는 높은 전단력에 의하여 교질입자(micelle)의 절단에 의한 마찰감소효과를 상실하는 현상과 같이 계면활성제의 종류에 따라 일정온도 범위 밖에서는 교질입자 분해 현상이 일어나는 것으로 사료된다. STAC의 마찰감소특성은 Fig.7에서 보는 바와 같이 CTAC의 경우와 비슷한 경향을 나타내는 것을 관찰할 수가 있지만, CTAC경우 작동유체의 온도가 마찰감소특성에 직접적인 영향을 미치는 80°C에서도 STAC의 마찰감소특성에는 변화가 없음을 관찰할 수가 있다. 실제 파이롯트(pilot) 실험장치에서 사용되고 있는 Habon-G의 마찰저항감소 특성은 Fig.8과 Fig.9에서 관찰할 수가 있는데, 높은 온도까지도 (80°C) Reynolds 수가 70000인 경우까지, 60~80%의 마찰감소효과를 관찰할 수가 있어서 실제

적인 응용의 가능성을 보이고 있다. 계면활성제의 종류에 따라 작동유체의 온도가 마찰감소효과가 상이하므로 적용 작동유체의 온도에 따라 적절한 계면활성제의 선택이 요청된다.

4. 결 론

난류의 관유동에서 균일 혼합농도의 PAAM, CTAC, STAC 그리고 Habon-G 용액을 사용하여 마찰 저항 감소효과에 대한 펌프와 온도의 영향을 정량적으로 실험한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 고분자첨가물 유체를 펌프를 사용하여 반송 시에는, 압축공기를 사용하는 경우에 비하여 마찰 감소 효과가 현저히 감소하였으며, 특히 고분자 농도가 낮을수록, 수송관 직경이 작을수록 뚜렷하였다. 또한 관직경에 비하여 큰 용량의 펌프가 선택될 경우, 펌프의 영향은 관 직경이 작을수록 심하여 알맞은 용량의 펌프의 선택이 필요하며, 펌프의 전단력에서도 마찰저항감소현상을 유지할 수 있는, 고분자 첨가제의 개발이 있어야 될 것으로 사료된다.

2) 고분자 첨가물의 경우 작동유체의 온도가 증가할수록 마찰저항감소 효과는 줄어들었으며 높은 온도에서는 더욱 현저하였다. 또한 관 직경이 큰 경우 마찰저항 감소효과는 작은 관과 비교할 때 더 크게 줄어드는 것을 알 수가 있는데, 이것은 온도에 따른 난류의 확산이 큰 관에서 더 활발하게 일어나기 때문으로 사료된다. 첨가물의 농도가 높을수록 마찰저항 감소효과는 증가하였다.

3) 계면활성제의 경우 펌프가 작동유체의 마찰저항감소율에 미치는 영향은 거의 무시할 수가 있어서, 실제 계면활성제 첨가유체의 펌프구동은 큰 문제가 없는 것을 알 수가 있다.

4) 250ppm의 CTAC를 사용하여 작동유체의 온도 변화가 마찰감소유체에 미치는 영향을 측정하였으며 결과, 60°C 이하에서는 온도의 증가가 마찰감소효과에 미치는 영향은 관찰할 수 없었으나 작동유체의 온도가 80°C에서는 마찰감소효과가 나타나는 Reynolds수(즉 전단율)의 범위가 급격히 감소되었는데, 이것은 일정 속도 이상에서는 높은

전단력에 의하여 교질입자(micelle)의 절단에 의한 마찰감소효과를 상실하는 현상과 같이 계면활성제의 종류에 따라 일정온도 범위 밖에서는 교질입자 분해현상이 일어나는 것으로 사료된다. STAC, Habon-G는 CTAC경우 작동유체의 온도가 마찰감소특성에 직접적인 영향을 미치는 80℃에서도 마찰감소특성에는 변화가 없음을 관찰 할 수 있다. 계면활성제의 종류에 따라 작동유체의 온도가 마찰감소효과가 상이하므로 적용 작동유체의 온도에 따라 적절한 계면활성제의 선택이 요청된다.

5) 관 직경이 계면활성제의 마찰감소특성에 미치는 영향에 대하여 Bewersdorff등은 관 직경이 작은 경우가 관 직경이 큰 경우보다 낮은 속도에서 난류의 마찰계수가 층류의 값과 비교하여 매우 크게 떨어져 있음을 보고하였다. 따라서 shear viscosity가 관직경에 따라서 증가하는 것이 아닌가하는 의문을 제기하였는데, 실제로 임계 전단력(critical shear stress)은 관의 직경에 관계가 없음을 후에 보고하였다. 본 연구의 경우에도 관 직경이 증가함에 따라서 마찰감소현상이 일어나는 Reynolds수는 증가함을 알 수가 있으나, 임계전단력의 값은 유체의 온도가 40℃의 경우, 관 직경이 4.65mm에서 2.35Pa 이며, 관 직경이 10.85mm에서는 2.39Pa임을 보여서 큰 차이가 없음을 확인되었다.

후 기

본 논문은 '94년 과학기술처 출연 사업으로 수행한 “신주택 기술개발/고효율 에너지 수송개발” 연구결과의 일부를 밝히며 지원에 감사를 드리고, Habon-G를 공급해서 실험에 도움을 준 “일본기계연구소”의 Mr.Kawaguchi에게 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Virk, P. S., 1975, “Drag Reduction Fundamentals”, *AIChE Journal*, vol. 21 NO. 4, pp. 625~656.

2. Hoyt, J. W., 1972, “The Effect of Additives on Fluid Motion”, *Trans ASME: J. Basic Eng.* vol. 94, p. 258.
3. Usui, H., Kodama, M. and Sano, Y., 1987, “Drag Reduction with Heterogeneous Polymer Injection into a Turbulent Pipe Flow”, *T. R. of Yamaguchi Univ.*, vol. 4, No. 1, pp. 51~63.
4. Choi, U. S., Y. I. Cho & 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.
5. Advanced Energy Transmission fluids, 1993, IEA Programme of Research, Development and Demonstration DHC Annex III. Final Report.
6. Zakin, J. L., and D. L. Hunston, 1978, “Effects of Solvent Nature on the Mechanical Degradation of High Polymer Solutions”, *J. Appl. Polym. Sci.* 22, 1763~1766.
7. Chou. L. C., 1991, “Drag reducing cationic surfactant solutions for district heating and cooling systems”, Ph. D dissertation, The Ohio state Univ.
8. Matthys, E. F., 1991, “Heat transfer, drag reduction, and fluid characterization for turbulent flow of polymer solutions: recent results and research needs”, *J. Non-Newton. Fl. Mech.* 38, 313~342.
9. Kays, W. M., 1960, *Convective Heat and Mass Transfer*, McGraw-Hill Book Co..
10. McAdams, W. H., 1954, *Heat Transmission*, McGraw-Hill Book Co..
11. Bewersdorff, H. W., Frings, B. Lindner, P., Oberthur, R. C., 1986, “The conformation of drag reducing micelles from small-angle-neutron-scattering experiments”, *Rheologica Acta* 25, pp. 642~646.