

계면활성제에 의한 난류 관내 유동의 마찰감소 현상

윤형기, 신광호*, 장기창, 나호상, 유성연**
한국에너지기술연구원, *충남대학교 대학원, **충남대학교 BK21 메카트로닉스 사업단

Drag Reduction Phenomena of Surfactant Turbulent Pipe Flows

Hyung-Kee Yoon, Kwang-Ho Shin*, Ki-Chang Chang, Ho-Sang Ra, Seong-Yeon Yoo**

Korea Institute of Energy Research(KIER), Yoosung P.O Box 103, Daejeon 305-343, Korea

*Graduate School of Mechanical Design Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

**BK21 Mechatronics Group in Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

(Received July 13, 2006; revision received November 9, 2006)

ABSTRACT: This is to characterize the fluid mechanics of surfactant water solutions, which exhibit drag reduction in the turbulent flow as compared to pure water. The emphasis is placed on those fluid characteristic aspects of drag reducing solutions which are relevant for application in closed circulation loops for the purpose of pumping power savings, like hydronic cooling and heating systems in buildings. The experiments are carried out with the solutions of the surfactant Beraid DR-IW 616 in concentration of 100~3,000 ppm.

The following key parameters are focused in this study: surfactant concentration, solution temperature and pipe diameter.

Key words: Drag reduction(마찰감소), Surfactant(계면활성제), Pipe flows(관내 유동)

기 호 설 명

D : 수력 직경 [m]
 DR : 마찰감소율
 f : 마찰계수
 L : 길이 [m]
 P : 압력 [Pa]
 Re : Reynolds 수, $\rho v D / \mu$
 v : 평균 속도 [m/s]

ρ : 밀도 [m^3/kg]
 τ : 전단력 [Pa]

하첨자

add : 첨가제
 c : 임계점
 w : 벽
 wat : 물

그리스 문자

μ : 점도 [$kg/m \cdot s$]

1. 서 론

관내의 유체의 유동저항을 감소하여 유체이동에 필요한 펌프동력을 절약하거나 관 설비비용을 줄이는 것을 목적으로 특정 고분자 물질이나 계면활성제를 첨가한 기능성 유체에 많은 연구가 수행되었다. 고분자 물질을 수십 ppm 수준으로 첨

† Corresponding author

Tel.: +82-42-860-3022; fax: +82-42-860-3133

E-mail address: shinkh@kier.re.kr

가하면 수십 % 정도까지 마찰감소 효과를 나타내기 때문에 많은 연구⁽¹⁻³⁾가 수행되었으나, 실제로 폐회로가 대부분인 산업 분야의 응용에는 열적 퇴화(thermal degradation) 및 전단력 등에 의한 기계적 퇴화(mechanical degradation) 등의 문제로 인하여 매우 제한적으로 사용되어 왔다. 계면활성제는 마찰저항 감소의 거동과 가역적인 퇴화를 보인다. 한편 계면활성제도 높은 전단응력 영역에서는 퇴화현상이 발생하지만, 이 퇴화현상은 가역적이어서 퇴화현상이 일어난 유체가 임계 전단응력(τ_c) 이하의 영역에 들어가면 다시 마찰저항감소의 능력을 완전히 회복되어 산업 분야에서 폐회로 순환시스템에 사용하는 데 적합한 것으로 평가되고 있다.⁽⁴⁻⁷⁾

본 연구는 마찰감소 계면활성제를 지역냉난방(district cooling and heating)시스템에 적용하는 것을 목적으로 폐회로에서의 계면활성제가 첨가된 유체의 난류 관흐름에서의 유동특성을 고찰하였다. 연구에 사용된 계면활성제는 Akzo Nobel사가 지역냉난방시스템 적용을 목적으로 개발한 음이온계 계면활성제로써 마찰감소 효과가 크고 기계적 퇴화에 안정할 뿐 아니라 누설시 쉽게 분해되는 특징을 갖고 있어 환경적인 위험이 적어 산업 분야 적용시 적합한 것으로 평가되었다. 따라서 Akzo Nobel사와 공동으로 미활용에너지이용 히트펌프시스템에 적용을 목적으로 연구를 추진 중에 있다. 본 연구는 계면활성제의 농도, 유체 온도, 관 직경 등이 마찰감소 현상에 미치는 영향에 대하여 분석하였다. 또한 관 직경과 임계전단응력에 대한 상관관계를 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 계면활성제 실험장치를 개략적으로 나타낸 그림이다. 실험장치는 크게 온도조절부, 유량조절부, 시험부로 구성되어 있다. 온도조절부는 냉·온수 제조 및 제어를 위해 3RT급 열펌프 2대와 15kW 히터를 수조와 연결하였다. 계면활성제 수용액의 열수송을 위한 펌프는 원심 다단펌프(Grundfos CRN4-20)를 사용하였고, 유량조절을 위해 인버터를 설치하였다.

본 연구에서는 시험관으로 인발 제조된 스테인리스 강관을 사용하였으며, 관 직경은 공칭 직경이 10A, 15A, 20A, 25A인 4개의 관을 사용하였다. 계면활성제 첨가에 의한 마찰저항 감소효과의 정확한 측정을 위해서는 시험부 내 유동조건이 일정하여야 하므로 차압 측정 영역으로 완전 발달된(fully developed) 유동 영역이 확보되도록, 본 연구에서는 입구 길이(entrance length)는 9m로 하여 입구 길이 대 관 직경의 비(L/D)가 325에서 700 정도가 되도록 하였다.⁽⁵⁾ 또한, 압력 탭 직경(d)의 경우, 일반적으로 관 직경(D)에 비해 3/10 이내로 가공해야 하는 것으로 알려져 있으므로, 시험부의 압력 탭을 1m 간격으로 직경 1.0mm로 가공하여 제작하였다. 따라서 시험부의 전체 길이는 입구부 9m, 차압 측정부 3m, 그리고 혼적류(wake) 영향 방지를 위한 출구부 0.5m로 전체 12.5m이다. 계면활성제 수용액을 순환회로에 공급 및 귀환을 위한 수조는 직경 500mm, 높

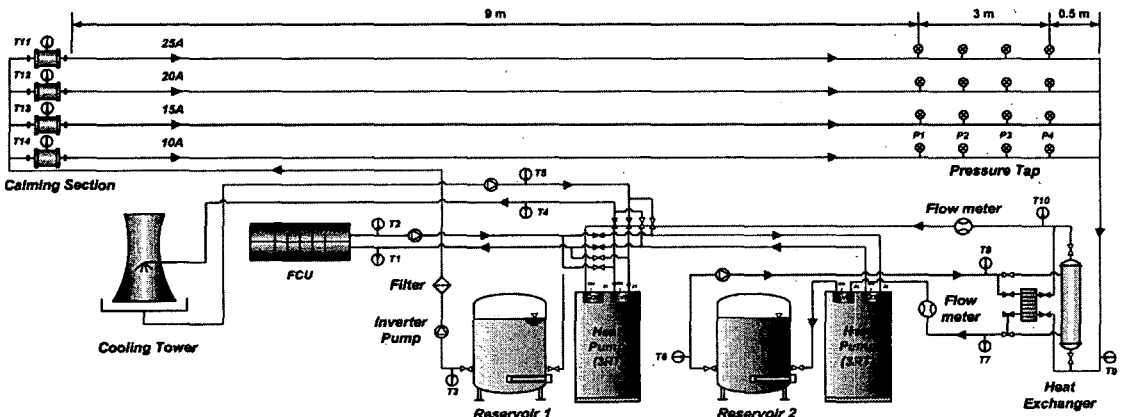


Fig. 1 Schematic diagram of drag reduction additives experimental facilities.

Table 1 Composition of Beraid DR-IW 616

Substance name	EU number	Concentration
Butan-1-ol	200-751-6	20~40%
Sodium decyl sulphate	205-568-5	1~15%
Myristylamido-propylbetaine	261-684-6	20~40%
Water	231-791-2	30~50%

이 950 mm인 스테인리스 강 수조를 사용하였다.

유량의 가변방법은 인버터(inverter)를 사용하여 펌프의 회전속도를 가변하는 방법으로 실험을 수행하였다. 또한 펌프의 구동에 의해 맥동이 발생하는데, 이로 인해 유량이 일정한 주기를 가지고 진동하게 된다. 따라서 이러한 진동현상을 완화시키기 위해 유동 안정화 탱크를 설치하여 맥동을 최소화하였다. 유량의 변화가 실험에 주는 영향을 지속적으로 관찰하기 위하여 유량계에서 나오는 신호를 데이터 측정시스템(data acquisition system)을 통하여 시간에 따른 신호변화를 조사하였다. 순환회로 내부를 순환하는 계면활성제 수용액의 순환량과 시스템의 2차수 순환량 측정은 페러데이(Faraday) 전자유도법칙을 응용한 마그네틱 유량계(magnetic flowmeter, Toshiba LF400)를 사용하였고, 차압은 다이어프램(diaphragm) 형식의 차압계(Honeywell TSD 110)를 사용하였다. 온도측정은 열전대(thermo couple T type)를 사용하였다.

Table 1은 실험에 사용한 계면활성제(Akzo Nobel사 Beraid DR-IW 616)의 화학성분을 나타낸다.

2.2 실험방법

관 유동에서 유체의 Fanning의 마찰인자는 평균 속도와 관에서의 압력강하(pressure drop) 항으로 다음의 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 f 는 마찰계수, τ_w 은 벽면에서의 전단력, ρ 는 밀도, v 는 유속, D 는 수력 직경, ΔP 는 차압, L 는 길이를 나타낸다.

실험장치 및 계측기기의 신뢰성을 검증하기 위

해 식(1)을 사용하여 물에서의 레이놀즈수에 따른 마찰계수를 측정하였다. 비교자료는 Newton 유체의 완전 발달한 난류유동에 대해 Prandtl이 적용한 식(2)를 사용하였다.^(8,9)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 4.0 \log(\text{Re} \sqrt{f}) - 0.4 \quad (2)$$

물을 이용한 관경별 마찰계수 측정은 모든 실험값들이 식(2)와 비교하여 $\pm 5\%$ 이내에서 일치하였고, 실험결과를 그래프에 0 ppm으로 나타내었다.

점탄성 유체의 난류유동에서 마찰인자는 Newton 유체에 비해 현저히 작게 관찰되고 있으며, Virk (1967)는 마찰저항 감소율은 한계가 존재한다는 최대마찰감소 점근선(maximum friction reduction asymptotes)을 식(3)과 같이 정의하였다.⁽¹⁰⁾

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 19.0 \log(\text{Re} \sqrt{f}) - 32.4 \quad (3)$$

마찰감소율(drag reduction)에 대한 상관식은 식(4)와 같다.

$$DR(\%) = \frac{f_{wat} - f_{add}}{f_{wat}} \times 100 \quad (4)$$

여기서, DR 은 마찰감소율, f_{wat} 는 물에서의 마찰계수, f_{add} 는 첨가제를 넣은 경우의 마찰계수를 나타낸다.

계면활성제의 농도를 100, 300, 500, 1,000, 1,500, 2,000, 2,500, 3,000 ppm으로 변경하면서 실험을 진행하였고, 실험결과는 500, 1,000, 1,500, 2,000, 2,500, 3,000 ppm에 대하여 정리하였다. 일정 농도 조건에서 온도는 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60°C로 변경하면서 유체온도 변화가 마찰감소에 미치는 영

향을 조사하였으며, 공칭관경이 10A, 15A, 20A, 25A인 4개의 스테인리스 강관을 사용하여 관경의 크기가 마찰감소에 미치는 영향을 관찰하였다. 실험치는 측정은 1초 간격으로 하였으며, 30초 동안의 평균값을 사용하였다.

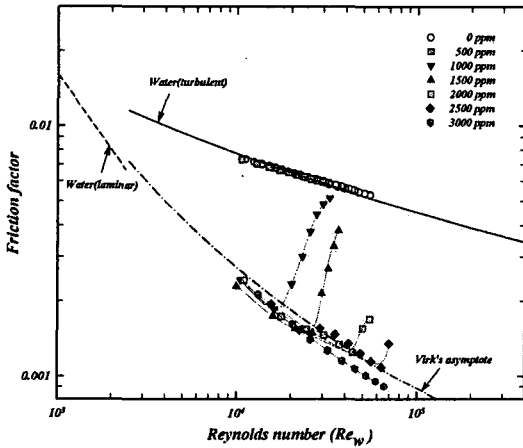
3. 결과분석

마찰감소 계면활성제를 실제 폐회로시스템에 적용하는 데에 있어 가장 기본적인 항목은 (1) 최적의 계면활성제 농도, (2) 계면활성제가 마찰감

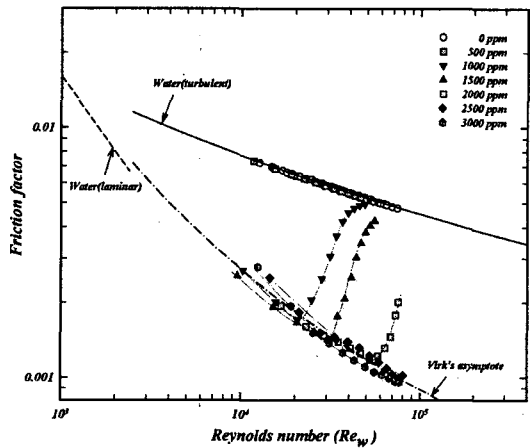
소를 발현하는 온도범위, (3) 실험실(직경이 작은 관 사용)의 자료가 실제 시스템(직경이 매우 큰 관 사용)에 적용이 가능한지 등이다. 본 연구는 5~50°C 영역에서의 열이용시스템에 적용을 목적으로 하고 수행하였다.

3.1 첨가제 농도

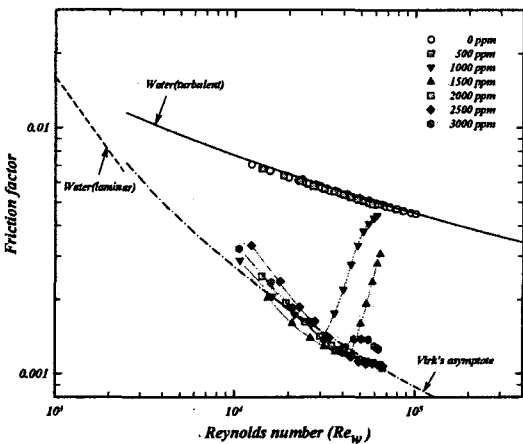
유체(물)에 첨가한 계면활성제의 농도가 마찰감소에 미치는 영향은 첨가한 계면활성제의 조성에 따라 상이할 것으로 예측되지만, 계면활성제의 농



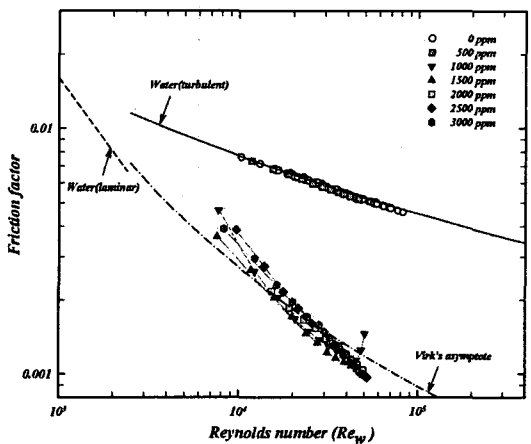
(a) Beraid DR-IW 616 10A, 30°C.



(b) Beraid DR-IW 616 15A, 30°C.



(c) Beraid DR-IW 616 20A, 30°C.



(d) Beraid DR-IW 616 25A, 30°C.

Fig. 2 Friction coefficient for four pipe diameters(10, 15, 20, 25A) as a function of solvent Reynolds number for 0~3,000 ppm Beraid DR-IW 616 solution in tap water. The maximum drag reduction asymptote for polymers (Virk) is plotted for reference.

도가 마찰감소에 미치는 특성은 유사하리라 판단된다.

고분자물질의 경우 수 ppm에서 마찰감소 현상이 나타나 수십 ppm에서는 수십 % 정도까지의 마찰감소를 나타낸다는 많은 연구들이 있었다.⁽¹⁾

Fig. 2에서 보는 바와 같이 계면활성제는 고분자물질과는 상이하게 첨가제 농도가 수백 ppm 정도에서도 뚜렷한 마찰감소 현상이 나타나지 않고 있다. 즉, 동일 농도에서는 고분자물질이 더욱 효과적임을 알 수 있다.

첨가제의 농도가 증가됨에 따라 마찰감소율은 증가한다. 첨가제가 일정농도에 도달하면 Virk 최대마찰감소 점근선에 도달하며 그 이상 농도가 증가하여도 더 이상 마찰감소비율은 증가하지 않는다. 계면활성제 농도의 영향에 대하여 특히 주목할 점은 마찰감소가 없어지는 저하현상이 일어나는 임계 레이놀즈수는 첨가제의 농도가 증가하면 비례하여 증가함을 알 수 있다. 이러한 현상은 계면활성제가 형성한 모든 미셀이 유동이 저하가 일어나는 임계전단응력에 도달하였을 때 즉각적으로 일어나는 것이 아니라, 전단응력의 크기 및 노출시간과의 상관관계로 설명한 Gasljevic⁽⁵⁾의 주장과도 일치한다.

마찰감소 현상은 첨가제의 조성 및 농도 등 화학적 특성뿐만 아니라 유체의 온도 및 속도, 환경 등 물리적 특성에 대한 복합적 함수이다. 계면활성제의 실제 시스템 적용에 있어 주요 변수

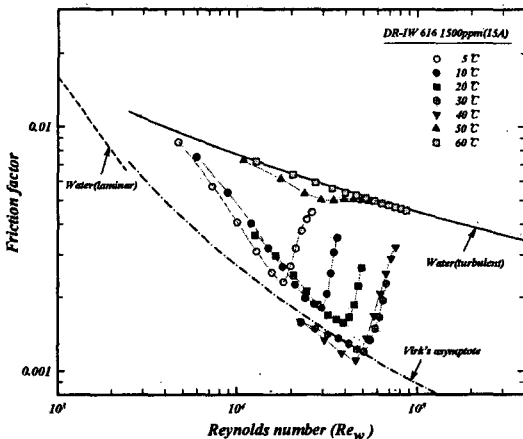
인 유체온도 및 환경에 대한 고찰은 다음 절에서 기술한다.

3.2 유체온도

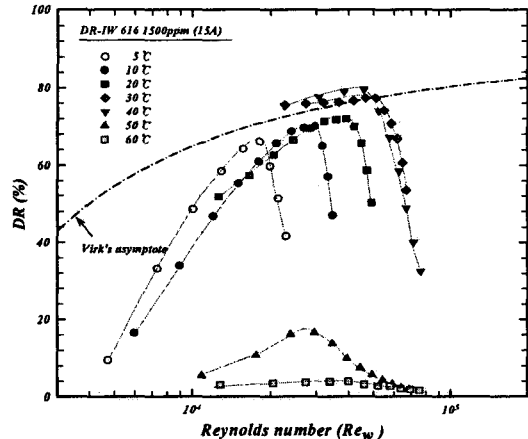
본 연구에 사용한 계면활성제는 미활용에너지 열원(하수처리수, 하천수 등)을 열펌프의 열원으로 사용하여 제조한 냉수(5°C) 및 온수(50°C)를 장거리로 수송하는 시스템에 적용을 목적으로 있다. 따라서 본 연구에 도입된 계면활성제는 냉온수시스템 적용에 필요한 온도범위에서 효과적으로 마찰감소 현상을 발현하는 것이 필요하며, 이를 목적으로 스웨덴 Akzo Nobel사에서 개발한 Beraid DR-IW 616을 사용하여 유체온도에 따른 특성을 고찰하였다.

Fig. 3의 (a)와 (b)는 계면활성제의 유체온도 변화에 따른 마찰감소 특성을 보여준다. 낮은 온도(5°C)에서는 비교적 낮은 레이놀즈수에서 마찰감소 현상이 일어나며, 온도가 증가함에 따라 계면활성제가 더 활발히 활성화되어 마찰감소가 더 넓은 레이놀즈수 영역까지 확대되어 일정온도(30~40°C 정도)에서 최대로 확대되다가, 그 이상의 온도(50°C 이상)에서는 마찰감소제로서의 기능이 급격히 저하됨을 알 수 있다. 즉, 계면활성제의 마찰감소 효과는 온도의 함수이며, 마찰감소 효과가 최대로 발현하는 온도가 존재함을 확인하였다.

또한 Fig. 4의 (a)와 (b)에서 보는 바와 같이 마

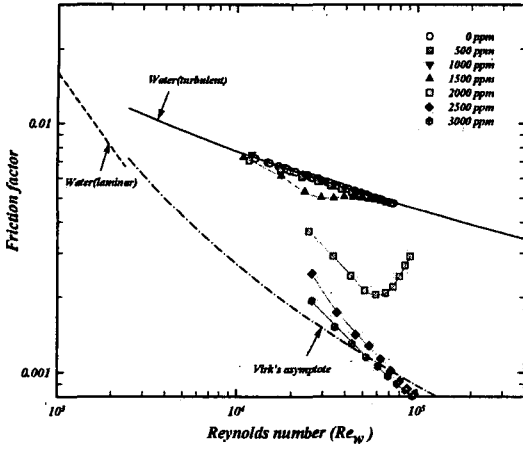


(a) Friction factor

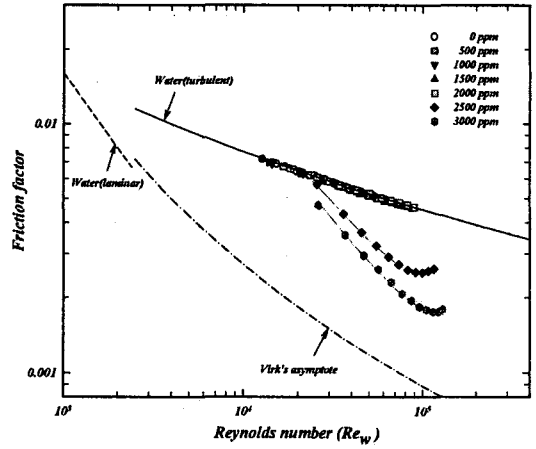


(b) Drag reduction rate

Fig. 3 Friction coefficient and drag reduction rate for temperature as a function of solvent Reynolds number for a 1,500 ppm Beraid DR-IW 616 solution in tap water.



(a) Beraid DR-IW 616 15A, 50°C



(b) Beraid DR-IW 616 15A, 60°C

Fig. 4 Friction coefficient around critical temperature as a function of solvent Reynolds number for 0~3,000 ppm Beraid DR-IW 616 solution in tap water.

찰감소 효과를 나타내는 임계온도가 존재함을 알 수 있다. Fig. 4(a)의 경우(50°C) 2,000 ppm 이상의 농도에서 마찰감소 효과를 나타내기 시작하여 3,000 ppm에서는 뚜렷한 마찰감소가 일어남을 알 수 있다. 농도증가에 비례하여 마찰감소 또한 비례하는 경향을 보이나, Fig. 4(b)의 경우처럼 일정온도(60°C)에서는 농도증가와 무관하게 마찰감소 현상이 잘 발현되지 않는 임계온도가 존재함을 알 수 있다.

3.3 관경의 크기

실험실의 결과를 실제 시스템에 적용하기 위하여 관경의 크기가 마찰감소 계면활성제 유동에 미치는 영향을 고찰하였다. 본 연구에서는 공칭관경이 10A, 15A, 20A, 25A인 4개의 스테인리스강관을 사용하였다.

Fig. 5는 첨가제농도 1,500 ppm, 유체온도 30°C

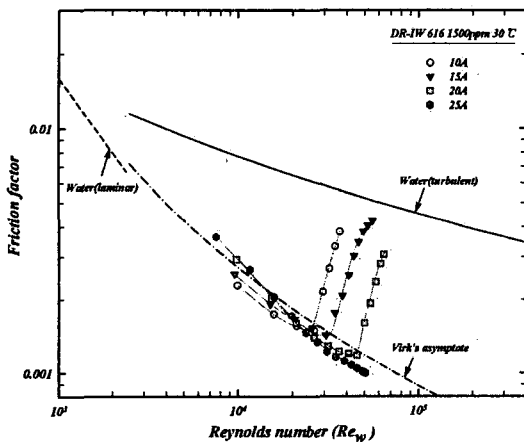


Fig. 5 Friction coefficient for pipe diameters (10, 15, 20, 25A) as a function of solvent Reynolds number for a 1,500 ppm Beraid DR-IW 616 solution in 30°C tap water.

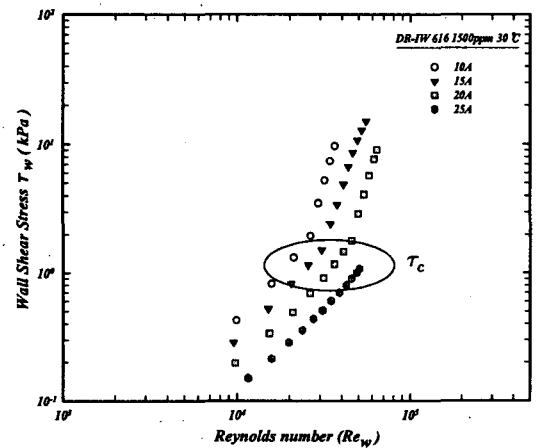


Fig. 6 Critical wall shear stress for four pipe diameters as a function of solvent Reynolds number for 1,500 ppm Beraid DR-IW 616 solution in 30°C tap water.

일 때(Virk 최대마찰감소 점근선에 도달한 경우)의 관경별 마찰계수를 레이놀즈수로 표시하였다. 마찰감소 현상이 일어나는 임계 레이놀즈수는 관경이 커질수록 증대된다.

Fig. 4의 자료를 전단응력 대 레이놀즈수로 표시하면 Fig. 6과 같다. 그래프에서 보는 바와 같이 동일한 농도 및 온도에서 임계 전단응력은 거의 같은 값을 나타냄을 알 수 있다. 계면활성제의 임계전단응력은 관경에 상관없이 주어진 농도 및 온도 조건에 의해 결정되는 것임을 알 수 있는데, 이 결과는 Gasljevic et al.⁽¹¹⁾의 결과와는 상이하나 이전의 다른 연구결과⁽⁶⁾와 일치한다.

4. 결 론

본 연구에서는 마찰감소 계면활성제를 실제 폐회로시스템에 적용하는 데에 있어 가장 기본적인 항목은 계면활성제 농도, 유체온도, 관경의 크기가 마찰감소 현상에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) 첨가제의 농도가 증가됨에 따라 마찰감소율이 증가한다. 첨가제가 일정농도에 도달하면 Virk 최대마찰감소 점근선에 도달하나, 그 이상 농도가 증가하여도 더 이상 마찰감소비율은 증가하지 않는다. 계면활성제 농도의 영향에 대하여 특히 주목할 점은 마찰감소 효과가 줄어드는 임계 레이놀즈수는 첨가제의 농도에 비례하여 증가함을 알 수 있다. 임계전단응력 이상에 노출된 계면활성제의 경우 형성된 모든 미셀은 즉각적인 유동 저하를 일으키는 것이 아니라, 전단응력의 크기 및 노출시간에 따라 달라진다. 이는 전단응력의 크기 및 노출시간과의 상관관계로 설명한 Gasljevic의 주장과 일치한다.

(2) 계면활성제의 마찰감소효과는 온도의 함수이며, 마찰감소효과가 최대로 발현하는 온도가 존재함을 확인하였다. 또한 일정범위 밖에서 일어나는 저하현상은 계면활성제의 농도를 증가시키면 저하현상이 일어나는 온도를 증가시킨다. 그러나 농도증가와 무관하게 저하현상이 발현하지 않는 임계온도가 존재함을 확인하였다.

(3) 관경이 작은 경우 동일 조건 하에서의 마찰감소가 현저히 컸다. 동일 첨가제, 농도, 온도에서 저하현상이 일어나는 임계 전단응력은 동일한 것으로 측정되었으며, 저하는 전단응력의 합

수입을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 과학기술부가 지원하고 있는 21세기 프론티어 사업 중 한국에너지기술연구원이 주관하여 수행하고 있는 “미활용에너지이용 네트워크 플랜트 최적화 기술개발(M102KP010004-05K1601-00410)” 과제의 일부 결과이며, 이를 지원하는 관계자 여러분들께 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

1. Matthys E. F., 1991, Heat transfer, drag reduction, and fluid characterization for turbulent flow of polymer solutions; Recent results and research needs, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 38, pp. 313-342.
2. Steiff, A., Althaus, W., Weber, M. and Weinspach, P., 1989, Application of drag-reducing additives in district heating systems, *Drag Reduction in Fluid Flow*, Ellis Horwood, Chichester, pp. 247-254.
3. Rho, T. H., Park, J. S., Kim, C. Y., Yoon, H. K. and Suh, H. S., 1996, Degradation of polyacrylamde in dilute solution, *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 51, pp. 287-293.
4. Gasljevic, K. and Matthys, E. F., 1993a, On saving pumping power in hydronic thermal distribution systems through the use of drag-reducing additives, *Energy and Buildings*, Vol. 20, pp. 45-56.
5. Gasljevic, K., 1995, Experimental investigation of drag reduction by surfactant solutions and of its implementation in hydronic systems, Ph.D. thesis of University of California, Santa Barbara.
6. Zakin, J. L., Bin, L. and Bewerslorff, H. W., 1994, Surfactant drag reduction, *Rev. Chem. Eng.*, Vol. 14, pp. 255-325.
7. Kim, C. Y., Park, S. R., Yoon, H. K. and Haw, J. R., 2004, Abrupt reduction in drag redu-

- cing ability of cationic surfactant solution, Chemical Engineering of Japan, Vol. 37, No. 11, pp. 1326-1336.
8. Kays, W.M., 1960, Convective Heat and Mass Transfer, McGraw-Hill Book, Co.
9. McAdams, W.H., 1954, Heat Transmission, McGraw-Hill Book, Co.
10. Virk, P. S., 1975, Drag reduction fundamentals, AIChE, Vol. 21, No. 4, pp. 625-656.
11. Gasljevic, K., Nan, X. and Matthys, E. F., 1993, Effect of drag-reducing surfactant additives on heat exchangers, Development in Non-Newtonian Flows, ASME, AMD-Vol. 175, pp. 101-108.