

계면활성제가 첨가된 관내 난류의 열유동 특성에 관한 고찰

신 광 호, 윤 형 기^{*†}, 장 기 창^{*}, 나 호 상^{*}

충남대학교 대학원, *한국에너지기술연구원

Fluid and Heat Transfer Characterization of Surfactant Turbulent Pipe Flows

Kwang-Ho Shin, Hyung-Kee Yoon^{*†}, Ki-Chang Chang^{*}, Ho-Sang Ra^{*}

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

^{*}Unutilized and Geothermal Energy Research Center, Korea Institute of Energy Research(KIER), Yoosung P.O Box 103, Daejeon 305-600, Korea

ABSTRACT: The fluid mechanics and heat transfer of surfactant turbulent pipe flows are characterized with particular emphasis on the effects of surfactant concentration and solution temperature on drag reduction and heat transfer reduction. The test fluids are the surfactant solutions of DR-IW616 supplied by Akzo Nobel Chemical in concentration of 100~3000 ppm. The solution temperatures studied are 5°C to 50°C. The critical values of surfactant concentration and solution temperature are clearly identified for drag reduction phenomena.

Key words: Drag reduction(마찰감소), Heat transfer reduction(열전달 감소), Surfactant(계면활성제), Turbulent Pipe flows(관내 난류유동)

기 호 설 명

D : 수력직경(m)
 L : 길이(m)
 k : 표면조도(mm)
 v : 평균속도(m/s)
 h : 대류열전달계수(kW/K·m²)
 P : 압력(kPa)
 Re : Reynolds 수($\rho v D/\mu$)
 DR : 마찰감소율(%)
 HTR : 열전달감소율(%)

ρ : 밀도(density)
 μ : 점도(viscosity)
 f : 마찰계수(friction factor)
 τ : 전단력(shear stress)

하첨자

w : 벽(wall)
 c : 임계점(critical point)
 wat : 물(water)
 ad : 첨가제(additives)

그리스 문자

1. 서론

†Corresponding author

Tel.: +82-42-860-3225; fax: +82-42-860-3133

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

온수나 냉수를 관내수송할 때 펌프 동력을 절감하는 것은 열에너지 수송의 에너지 절약화와

관련하여 매우 중요하다. 최근 마찰저항 감소 효과는 에너지 이용의 극대화를 위한 지역 냉난방(District Heating and Cooling, DHC) 시스템 분야, 상수 시스템 분야 그리고 의공학 분야 등으로 응용 분야가 확대됨에 따라 새로운 첨가제의 개발과 첨가제의 인체 유해성, 환경공해 그리고 첨가제 투입 및 회수 등의 관점에서 많은 연구가 이루어지고 있다.

고분자 화합물에 의한 유동저항 경감은 톰스 효과(Tom's effect)라 불리는 난류의 층류화 현상에 의해 일어나는 것으로 설명되고 있다. 현재 톰스효과는 폴리아크릴라미드 등과 같은 사슬모양 고분자화합물이 불규칙적으로 연결되어 실모양이 되고, 점성저층에서 발생하는 난류덩어리들이 실모양 물질이 변형하면서 잘 흡수하며, 난류영역 밖에서 그 변형을 복원함으로써 주위 유체로 일에서 열에너지로 방출되기 때문에 난류의 발생이나 발달을 억제한다고 하는 가설에 의해 설명되고 있다.

저분자 물질인 계면활성제의 경우 분자구조가 친수성 그룹과 친유성 그룹으로 구성되어 특정 농도 이상에서 콜로이드성 회합체인 미셀이 형성된다. 내부에 탄화수소가 액상인 상태로 존재하고, 주변은 계면활성제가 만든 이온성을 띤 미셀이 강한 전기장을 형성하게 되는데, 임계 미셀 농도(critical micelle concentration) 이상에서 단일분자 또는 이온으로 미셀이라는 집합체를 형성할 때 낮은 자유에너지를 갖게 되고, 이로 인하여 다른 콜로이드에서 볼 수 없는 특이한 역할을 하게 된다. 미셀의 형상이 봉상(섬유상)인 형태에

서 톰스 효과가 잘 발현되는 것으로 알려졌다.

고분자화합물은 마찰저항 감소 효과를 얻을 수 있는 첨가제로서 매우 우수한 반면 산업적 응용에는 열에너지 및 전단력 등에 의한 퇴화(degradation) 등의 문제를 가지고 있다. 고분자 물질은 펌프와 같은 높은 전단 환경하에서 비가역적으로 절단되어 지역 냉난방 순환 루프와 같은 폐쇄 순환 시스템에는 부적합하다. 계면활성제의 경우 마찰저항 감소와 가역적 퇴화를 보인다. 계면활성제도 높은 전단 영역에서는 퇴화를 일으키지만, 이 퇴화 과정은 가역적이어서 낮은 전단 영역에 들어감에 따라 다시 마찰저항 감소의 능력을 회복하기 때문에 지역 냉난방루프 같은 순환 시스템에 사용하는데 적합하다.

본 연구는 Akzo Nobel사의 계면활성제인 DR-IW 616을 사용하여 열펌프의 냉·난방 열에너지 수송을 위한 에너지 절약화의 일환으로 연구되었다. 냉·난방 공급온도를 고려한 온도범위(5~60°C)에서 농도에 따른 계면활성제의 마찰 및 열전달 감소 현상에 대한 거동을 살폈다.

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 열펌프와 15kW 히터를 수조와 연결하였다. 계면활성제

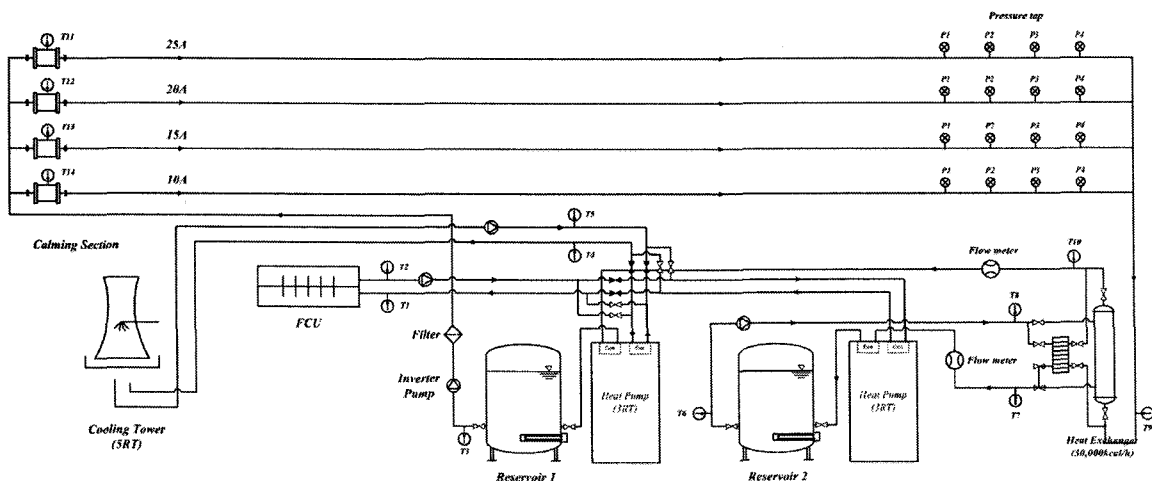


Fig. 1 Schematic diagram of drag reduction additives performance test facilities

수용액의 열수송을 위한 펌프는 원심 다단펌프 (Grundfos CRN4-20 A-P-G-BULE)를 사용하였고, 유량조절을 위해 인버터를 설치하였다.

계면활성제 첨가에 의한 마찰저항 감소 효과의 정확한 측정을 위해서는 시험부 내 유동 조건이 일정하여야 하므로 차압 측정 영역으로 완전 발달된(fully developed) 유동 영역을 확보할 필요가 있는데, Cho와 Hartnett(1982)의 보고에 의하면 고분자 수용액의 경우 입구 길이(entrance length)는 직경의 110배 정도이나 시험부의 충분한 입구길이 확보를 위해 본 실험에서는 15A(16.1 mm)인 관에서 직경의 559.0 이후에서 차압을 측정하였다. 시험부의 압력 탭을 1 m 간격으로 직경 1.0 mm($d/D=0.062$)로 가공하여 제작하였다. 따라서 시험부의 길이는 입구부 9 m, 차압 측정부 3 m, 그리고 혼적류(wake) 영향을 방지하기 위한 출구부 0.5 m로 전체 12.5 m이다. 계면활성제 수용액을 순환 회로에 공급 및 귀환을 위한 수조는 직경 500 mm, 높이 950 mm으로 하였고, 계면활성제 오염을 방지하기 위해 인발 제조된 스테인리스 관을 사용하여 제작하였다. 열전달 변화를 관찰하기 위해 34.8 kW 용량의 관형 열교환기를 설치하였다.

유량의 가변 방법은 인버터(inverter)를 사용하여 펌프의 회전 속도를 가변하는 방법으로 실험을 수행하였다. 순환회로 내부를 순환하는 계면활성제 수용액의 순환량과 시스템의 2차수 순환량 측정은 페러데이(Faraday) 전자유도법칙을 응용한 마그네틱 유량계(magnetic flowmeter, Toshiba LF400)를 사용하였고, 차압은 다이어프램 형식의 차압계(Honeywell TSD110)를 사용하였다. 온도측정은 열전대(thermocouple T type)를 사용하였다.

Table 1은 실험에 사용한 Akzo Nobel사에서

Table 1 Composition of DR-IW 616
Component

Substance name	EU number	Concentration	Risk phrases
Butan-1-ol	200-751-6	20~40%	R10,22,37/38,41,67
Sodium decyl sulphate	205-568-5	1~15%	R22,38,41
Myristylamido-propylbetaine	261-684-6	20~40%	R36
Water	231-791-2	30~50%	

개발한 DR-IW 616의 성분을 나타낸다.

2.2 실험방법

관 유동에서 Newton 유체와 비-Newton 유체의 Fanning의 마찰인자는 평균속도와 관에서의 압력 강하(pressure drop) 향으로 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.

Newton 유체의 완전 발달한 난류 유동에 대해 Prandtl이 적용한 식은 식(2)와 같다.

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

여기서 Re 는 레이놀즈수를 나타낸다.

점탄성 유체의 난류 유동에서 마찰인자는 Newton 유체에 비해 현격히 작게 관찰되고 있으며, Virk(1967)는 마찰저항 감소율은 한계가 존재한다는 최소 저항 점근선(maximum friction reduction asymptotes)을 식(3)과 같이 정의하였다.

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

표면조도(roughness rate)와 마찰계수와의 관계를 나타내는 Haaland 상관식은 식(4)와 같다.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -3.6 \log \left[\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{k/D}{3.7} \right)^{10/9} \right] \quad (4)$$

여기서 k 는 표면조도를 나타낸다.

마찰 감소율(drag reduction) 및 열전달 감소율(heat transfer reduction)에 대한 상관식은 식(5), 식(6)과 같다.

$$DR(\%) = \frac{f_{wat} - f_{ad}}{f_{wat}} \times 100 \quad (5)$$

$$HTR(\%) = \frac{h_{wat} - h_{ad}}{h_{wat}} \times 100 \quad (6)$$

여기서 DR 은 마찰감소율, f_{wat} 는 물에서, f_{ad} 는

첨가제를 넣은 경우의 마찰계수, HTR 은 열전달 감소율, h_{wat} 은 물에서, h_{ad} 는 첨가제를 넣은 경우의 물에서의 대류열전달계수를 나타낸다.

마찰감소 효과를 알기 위해 우선적으로 물(수돗물)에 대한 실험을 하였다. 물에서의 관로마찰을 조사한 후, 표면조도와 마찰계수 관계식을 구하였다. 계면활성제의 농도를 100~3000 ppm로 변경하면서 5°C~60°C 온도조건에서 마찰감소 및 열전달감소 실험을 진행하였다. 측정은 1초 간격으로 30초 평균값을 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

물을 이용한 기초 실험에서는 표면조도는 0.002 mm로 측정되었다. 마찰저항 감소율을 계산하기 위해 사용할 물의 마찰인자는 표면조도가 0.002 mm일 때의 Haaland식인 식(4)를 이용하여 다음과 같은 상관식인 식(7)을 얻었다.

$$f = -0.002956 \log(Re) + 0.01923 \quad (7)$$

식(7)을 이용하여 마찰저항 감소율(DR)을 계산하였다.

3.1 농도효과

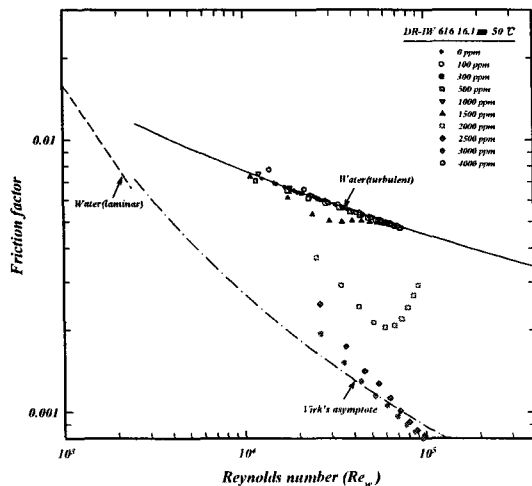
냉방(5°C) 및 난방(50°C) 공급온도에 대한 영향을 알아보기 위하여 계면활성제 DR-IW 616의 첨가량을 순수한 물에서부터 3000 ppm까지 증가시키며 측정된 결과, 냉방온도인 5°C 부근의 저

온 영역에서는 적은 농도인 300 ppm에서부터 마찰저감효과가 나타나기 시작하였다. 난방온도인 50°C에서의 농도별 마찰계수의 변화는 Fig. 2과 같이 측정되었다. 마찰감소 효과는 순수한 용매(물)인 경우와 비교하게 되므로 실험결과와 Reynolds 수는 물인 경우를 나타낸다.

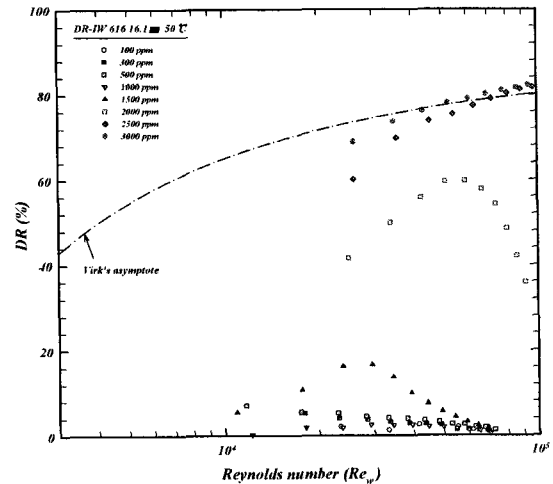
실험결과 2000 ppm 이상부터 마찰계수 감소 효과를 나타내기 시작하여, 2500 ppm 이상에서 마찰저감제로서의 기능을 보였다. Fig. 2 (a)와 같이 농도가 높아질수록 그래프는 우하향으로 이동하게 된다. 농도가 높을수록 임계전단응력(critical shear stress, $\tau_{w,c}$)은 작아지는 경향을 보인다. 계면활성제에 의해 층류화된 유동은 Reynolds 수가 커지면 Virk의 점근선과 유사하게 거동하게 된다. Reynolds 수가 임계전단응력을 넘어서면 난류화되어 급격히 난류영역(turbulence zone)으로 들어가게 된다. 즉 계면활성제의 분자구조가 끊어져 마찰저감제로서의 기능을 수행하지 못하게 된다. (b)는 같은 조건에서의 Reynolds 수에 따른 마찰감소효과를 나타낸다. Reynolds 수가 증가함에 따라 마찰감소 효과도 증가하는 경향을 나타내는데 15A(16.1 mm) 관경에서 50°C일 때 2500 ppm 이상에서는 최대 83%의 마찰감소효과를 보였다.

3.2 온도효과

Fig. 3은 본 실험목적에 부합하는 냉방(5°C) 및

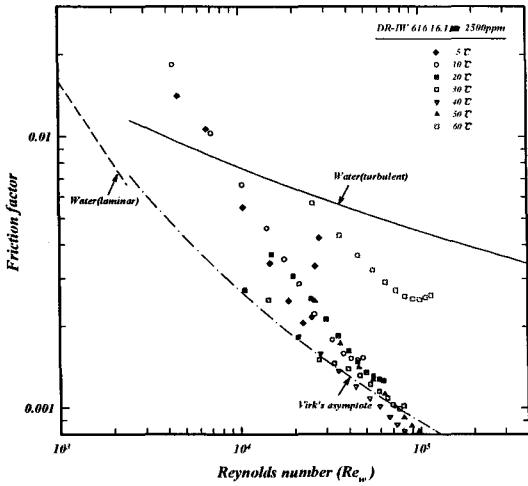


(a) Friction factor vs. Reynolds number

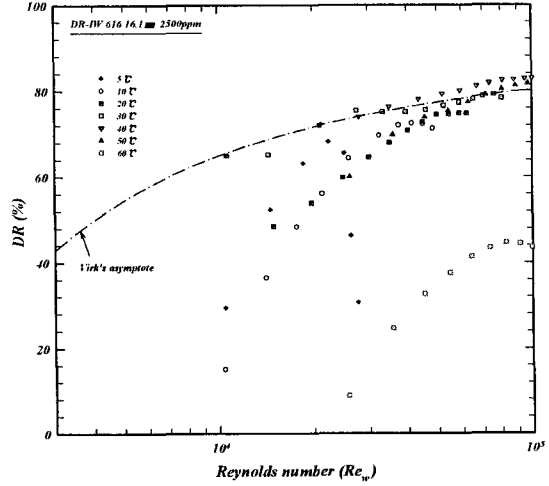


(b) Drag reduction vs. Reynolds number

Fig. 2 The concentration effect for heating temperature, 50°C(15A)



(a) Friction factor vs. Reynolds number



(b) Drag reduction vs. Reynolds number

Fig. 3 Temperature effect(15A, 2500 ppm)

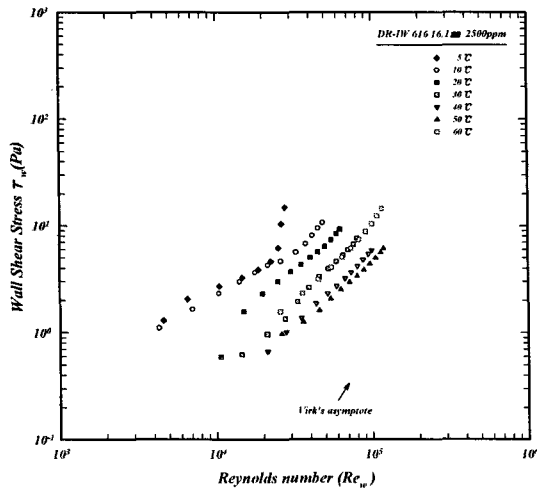
난방(50°C) 온도 조건을 고려했을 때 마찰저감제로서 그 기능을 나타내는 농도인 2500 ppm에서의 온도별 영향을 나타낸다. Fig. 3 (a)는 Reynolds 수에 따른 온도별 마찰계수 변화를 나타내고, (b)는 같은 조건하에서의 마찰감소율을 나타낸다. 2500 ppm에서 최대 83%의 마찰 감소 효과를 나타내었다.

Fig. 4 (a)는 2500 ppm에서 온도에 따른 벽면에서의 전단응력 변화를 나타낸다. 같은 Reynolds 수에서 온도가 증가에 따라 벽면에서의 전단응력은 작아지는 경향을 나타낸다. (b)는 배관내 유속이 2.0 m/s일 때 각 온도별 마찰감소율을 나타낸다. 온도 증가에 따라 마찰감소효과가

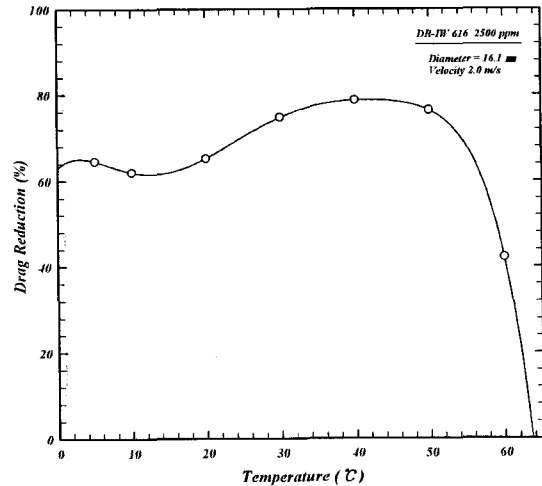
증가하는 경향을 나타내며, 40°C에서 최대 78.7%의 마찰감소율을 나타내었다. 난방온도인 50°C 부근에서도 76.4%의 마찰감소율을 보이나 그 이상의 온도에서 마찰감소제로서의 역할을 나타내지 못하였다.

3.3 열전달 변화

Fig. 5는 DR-IW 616의 관형 열교환기에서 유량변화에 따른 열전달량 변화를 나타낸다. (a)는 유량에 따른 열관류율의 변화를 농도별로 나타냈다. 2차수의 온도를 15°C, 1.8 m³/h(30 LPM)으로 고정한 후, 1차수 온도를 30°C, 50°C로 열교환시

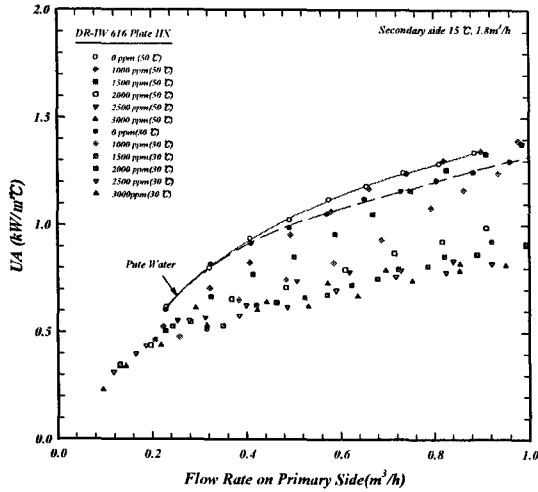


(a) Wall shear stress

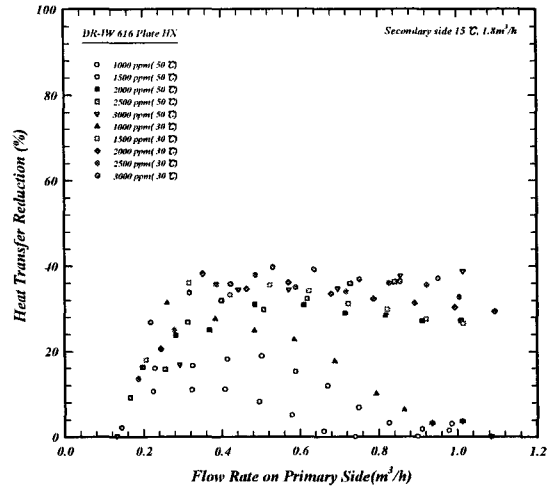


(b) Drag reduction

Fig. 4 Function of Reynolds number(15A, 2500 ppm)



(a) UA vs. flow rate



(b) HTR vs. flow rate

Fig. 5 Heat transfer reduction on plate type heat exchanger

켜 실험하였다. (a)에서 볼 수 있듯 30°C와 50°C 인 경우 모두 열전달 감소 효과는 1000 ppm부터 관찰되었고, 농도 증가에 따라 열관류율 또한 감소하는 현상을 보이나 감소폭은 크지 않았다. (b)는 같은 조건에서의 열전달 감소량을 나타내는데 마찬가지로 농도 증가에 따라 열전달 감소율도 증가하나 증가폭은 크지 않았고 약 38% 수준을 넘지 않았다.

4. 결론

본 연구에서는 난류 유동장에 계면활성제 (Akzo Nobel사의 DR-IW 616)를 첨가하였을 때 발생하는 마찰 및 열전달 감소 효과를 조사하였다. 실험결과에 의해 냉·난방에 사용할 계면활성제의 사용 온도 조건 및 유동조건에 따라 사용량 및 마찰감소 효과를 예측할 수 있게 되었다. 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 냉방(5°C)·난방온도(50°C)를 고려하였을 때 계면활성제 첨가량은 2500 ppm 정도가 적당하다.
- (2) 마찰 감소 효과는 2500 ppm의 농도에서 최대 83%로 측정되었다.
- (3) 판형 열교환기에서 2500 ppm일 때 최대 38% 열전달 감소가 나타났다.

후기

본 연구는 과학기술부가 지원하고 있는 21세기 프론티어 사업 중 한국에너지기술연구원이 주관하여 수행하고 있는 “미활용에너지이용 네트워크 플랫폼 최적화 기술개발” 과제의 일부 결과이며, 이를 지원하는 관계자 여러분들께 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

1. Gasljevic K., 1995, Experimental investigation of drag reduction by surfactant solutions and of its implementation in hydronic systems, Ph.D. thesis, University of California, Santa Barbara, U.S.A
2. Gasljevic K. and E. F. Matthys, 1993-a, "On saving pumping power in hydronic thermal distribution systems through the use of drag-reducing additives", Energy and Buildings, Vol. 20, pp. 45-56.
3. 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.