

고분자물질 및 계면활성제의 유동마찰 저감 특성 비교 연구

하재순[†], 유재성, 김성수*, 조성환*, 윤석만**, 엄재식**

전주대학교 대학원, 전주대학교 기계자동차공학과, 한국지역난방공사 기술연구

A Comparison Study on Flow-Friction Characteristic of Polymer Solution and Surfactant as Drag Reduction Additive

Jae-Sun Ha[†], Jae-Sung Ryu, Seong-Su Kim*, Sung-Hwan Cho*,
Seok-Mann Yoon**, Jae-Sik Eom**

Graduate student, Jeonju University, Jeonju 560-759, Korea

*Department of Mechanical and Automotive Engineering, Jeonju University, Jeonju 560-759, Korea

**District Heating Technology Research Institute, Korea District Heating Corp, Seoul 135-886, Korea

ABSTRACT: The drag reduction(DR) for Betaine+Amin and Xantan Gum as kinds of surfactant and Polyacrylamide as kinds of polymer solution according to the fluid velocity, temperature and surfactant concentration were compared experimentally. For this study, two kinds of experimental apparatus for short time and long time measurement were established. Each experimental apparatus was equipped with hot water storage tanks, pumps, testing pipe network, flowmeter, two pressure gauges and data logging system was built for them.

Results showed that Betaine+Amin and Xanthan Gum as kinds of surfactant had appeared optimal DR around 200-500 ppm and their DR tended to be decreased when flow velocity increased but Polyacrylamide as kinds of polymer solution showed the opposite trend to be increased when flow velocity increased.

The both of them showed above 40% DR in the case of better condition by the short term measurement. But Polyacrylamide as kinds of polymer solution showed more degradation than Betaine+Amin and Xanthan Gum as kinds of surfactant by the long term measurement. As a result, Betaine+Amin and Xanthan Gum as kinds of surfactant showed better materials to use to the district heating system.

Key Words: Surfactant(계면활성제), Pressure Reduction(압력강하율)

기호설명

T : 온도 [°C]
 P : 압력 [kgf/cm²]
 $P.R.$: 압력강하율 [%]
 v : 유속 [m/s]

하첨자

W : 물
 A : 첨가제

1. 서론

최근 에너지 가격의 급등으로 에너지에 대한 관심이 증폭되고 있으며 소비에 비해 적절한 공급이 이루어지지 않아 심각한 부족현상과 더불어 환경오염 문제도 발생하고 있다. 이에 따른 대처

[†] Corresponding author

Tel.: +82-63-220-2907; fax: +82-63-220-3241

E-mail address: shcho@jj.ac.kr

방안의 하나로써 집단에너지 사업이 고려될 수 있다. 집단에너지 사업은 효율적인 에너지 이용과 환경 친화적인 시설로서 에너지의 효율 측면에서 매우 효과적인 사업이다.

국내 집단에너지 사업의 대표적인 지역난방 시스템은 전체 배관망이 약 2,800km에 이르고 있다. 이러한 장거리 배관망을 통한 열수송에서는 마찰 저항으로 인해 많은 펌프동력이 필요하게 된다. 효율적인 장거리 열수송을 위한 연구로서 대표적인 방법 중 하나가 마찰 저감제를 투입하는 것이다. 이러한 마찰 저감제는 파이프 내 표면의 마찰 저항을 감소시킴으로써 유체의 유동을 향상시키게 되는 것이다.⁽¹⁻²⁾

고분자 화합물에 의한 유동저항 감소는 톰스효과(Tom's effect)라 불리는 난류의 층류화 현상으로, 톰스효과는 사슬모양의 고분자 화합물(Polyacrylamide)이 점성 저층에서 발생하는 난류 덩어리를 잘 흡수함으로써 난류의 발달을 억제한다는 가설이다.⁽³⁻⁴⁾

저분자 물질인 계면활성제(Surfactant)의 경우 분자구조가 친수성 그룹과 친유성 그룹으로 구성되어 특정 농도 이상에서 콜로이드성 화합체인 미셀(Micelle)이 형성된다. 미셀의 형상이 봉상(섬유상)인 상태에서 톰스 효과가 잘 발달되는 것으로 알려져 있다.⁽⁵⁻⁶⁾

일반적으로 장거리 열수송에 소요되는 수송 동력을 감소시키기 위해서는 고분자 화합물과 계면활성제가 효과가 있는 것으로 알려져 있었다. 그러나 지금까지 이것들이 어느 영역의 온도 범위에서 유리하게 활용되는가에 대한 비교 평가 연구는 없었다. 따라서 본 연구에서는 고분자 물질로서 Polyacrylamide와 계면 활성제인 Betaine+Amine Oxide 및 Xanthan Gum을 활용하여 온도 영역 50℃~80℃ 범위에서 단기간 동안에 마찰 저감 특성을 비교하고 장기간 동안 퇴화 현상을 비교 평가 함으로서 향후 지역난방 시스템에서 적용 가능성을 평가하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서는 첨가제의 압력 강하율을 측정하기 위하여 Fig. 1과 같은 시스템으로 설계 제작하

였다. 축열조는 20L 용량의 Bath(항온조)를 이용하여 15L의 물을 채운 후 공급온도를 일정하게 유지하였다. 펌프는 3,750RPM, 0.75kW 출력의 가변펌프를 사용한 후 유량조절이 가능하도록 하였다. 본 시스템에서 배관 부분은 총 길이는 7.3m이며, 내경은 8mm이다. 이때 배관의 재질은 SUS관을 사용하여 Scale 오염이 최소화 되도록 하였다. 실험장치의 배관 부분에 1개의 유량센서와 일정한 간격을 두고 2개의 압력센서를 설치하였다. 이때 유량센서의 측정범위는 1~20lpm, 압력센서는 0~20 kgf/cm²이다. 이와 같은 센서로 측정된 아날로그 신호들은 데이터 로거(Agilent 34970A)를 통하여 수집한 후 디지털 신호로 변환하여 PC로 저장하여 분석하였다.

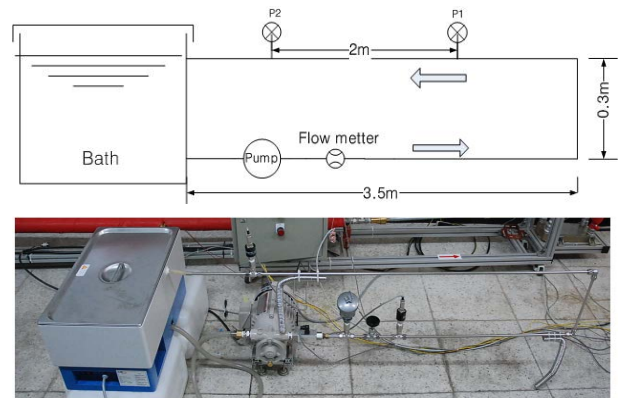


Fig. 1 Short-term performance measurement system

2.2 장기성능 실험장치

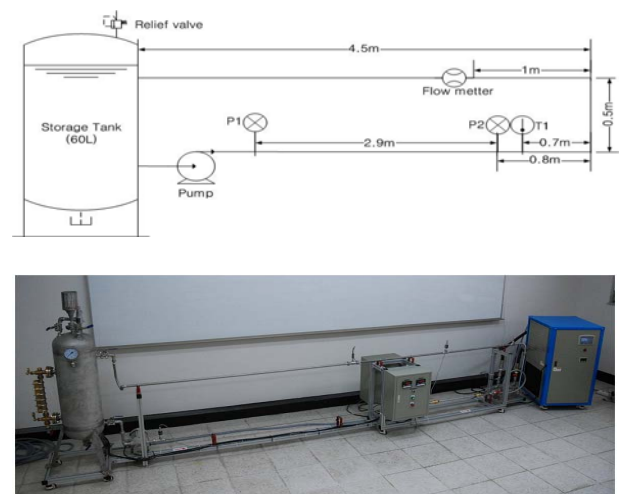


Fig. 2 Long-term performance measurement system

마찰 저감제를 이용한 장기성능 평가를 위하여 80℃~120℃까지의 실험이 가능하도록 설계 제작하였다. Fig. 2는 장기성능 실험 장치의 간략도와 전경 사진이다. 이 실험 장치는 60L의 축열조를 사용하며 7.5 kW 전기식 Heater 2개를 이용하여 120℃까지 가열이 가능하도록 설계되었다. 상부에는 20 kgf/cm²의 릴리프밸브를 설치하여 고압에서도 안전 제작되었다. 펌프는 3,450 RPM, 0.4 kW 출력의 속도 가변 펌프를 사용하였다. 이때 본 시스템에 채택된 총 배관의 길이는 9.5m이며, 내경이 15mm SUS관을 사용하여 제작하였다.

2.2 성능평가 방법

난방 시스템의 파이프에서 마찰 저감제의 투입에 따른 압력 강하율(Pressure Reduction)을 나타낸 식은 (1)과 같다.

$$P.R.(%) = \left(1 - \frac{\Delta P_A}{\Delta P_W}\right) \times 100 \quad (1)$$

여기서 ΔP_A 는 마찰 저감제를 투입한 경우의 압력강하를 나타내며, ΔP_W 는 마찰 저감제를 첨가하지 않은 경우의 압력강하를 나타낸 값이다. 이때 P.R.의 수치가 높을 수록 마찰 저감제의 효과가 높은 것을 의미한다.

Table 1 Experimental conditions

구분	실험 조건
온수온도(℃)	50/ 60/ 70/ 80
유속 (m/s)	0.99/ 1.99/ 2.98/ 3.98/ 4.97
고분자 물질	Polyacrylamide
계면 활성제	Betaine+Amine Oxide, Xanthan Gum

3. 실험 조건 및 방법

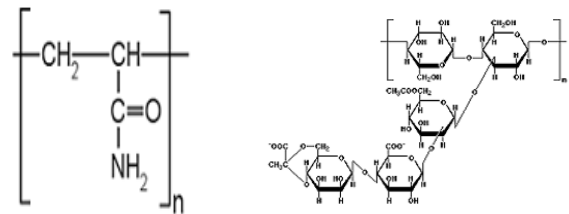
3.1 단기성능 실험 조건 및 방법

마찰 저감제의 단기성능 평가를 위한 실험 조건은 Table. 1에 나타내고 있는 것과 같이 계면활성제인 Betaine+Amine Oxide와 Xanthan Gum 및 고분자 물질인 Polyacrylamide를 마찰 저감제

로 사용하였다. 첨가제의 농도는 100~500ppm으로 실험하였다. Data 측정방법은 관내의 차압 변화를 1초 간격으로 측정한 후 5분 동안의 평균값을 사용하였다. 실험 오차와 센서 오차를 줄이기 위하여 수차례 측정된 실험 Data를 확보하여 분석하였다.

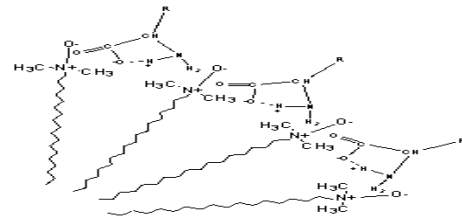
3.2 장기성능 실험 조건 및 방법

장기성능 평가를 위한 실험 조건은 단기성능 실험과 동일한 마찰 저감제를 사용하였고 80℃의 공급 온수에서 유속을 0.28 m/s로 고정한 뒤 5시간 동안 파이프내의 차압을 측정 후 분석하였다.



(a) Polyacrylamide

(b) Xanthan gum



(c) Betaine+Amine oxide

Fig. 3 Chemical structure of additives

Fig. 3은 본 연구에서 사용된 고분자 물질인 Polyacrylamide와 계면 활성제인 Xanthan Gum 및 Betaine+Amine Oxide의 화학 구조를 나타내고 있다.

4. 실험 결과

4.1 Betaine+Amine Oxide 실험 결과

계면활성제인 Betaine+Amine Oxide의 최적 혼합비율을 결정하기 위한 실험의 결과를 Fig. 4에 나타내고 있다. 실험조건은 공급수 온도를 80℃로 하고, 첨가제의 농도를 100ppm으로 하여 Betaine

+Amine Oxide의 혼합비율을 3:1에서6:1로 증가시켰다. 그림에서 보는바와 같이 전체적으로 유속이 증가 할수록 압력강하율이 감소하였다. 혼합비율이 3:1과 4:1에서 유속이 적을 때 압력 강하율은 약 30% 정도로 나타났으나 혼합비율이 5:1과 6:1에서는 50% 이상으로 높게 나타났다. 여기에서 계면활제인 Betaine+Amine Oxide의 최적 혼합비율은 5:1일 때 마찰 저감효과가 큰 것으로 나타났다.

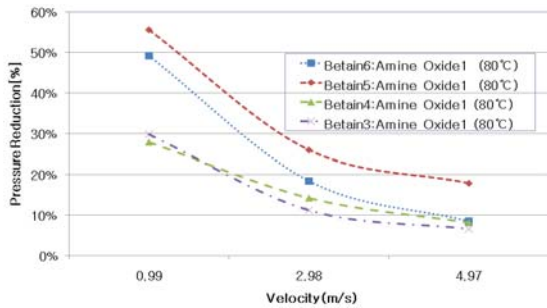


Fig. 4 P.R. on the variation of composition ratio of Betaine+Amine Oxide

계면활성제인 Betaine+Amine Oxide의 최적의 혼합비율인 5:1에서 압력 강하율은 농도를 500 ppm으로 고정하고 온도를 변화시키면서 알아보았다. Fig. 5는 Betaine+Amine Oxide의 각각의 온도에서 압력 강하율을 나타내고 있다. 그림에서 보는바와 같이 저속인 0.99 m/s의 유속에서는 온도에 따라 45~58%의 압력 강하율의 차이를 보이나, 1.99 m/s이상 유속 에서는 온도에 따른 압력 강하율의 차이가 미비하게 나타났다. 여기에서는 공급수온도가 60°C이고, 유속이 0.99 m/s일 때 58%로 가장 큰 압력 강하율을 보였다.

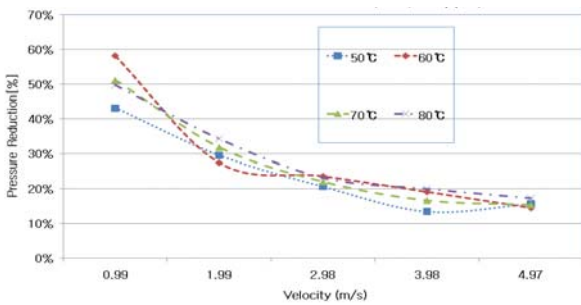


Fig. 5 P.R. on the variation of supply temperature of Betaine+Amine Oxide

계면활성제인 Betaine+Amine Oxide의 농도에

따른 압력 강하율 실험 결과를 Fig. 6에 나타내고 있다. 실험 조건은 공급수의 온도를 60°C로 하고첨가제의 농도를 100~500ppm으로 변화 시켜가며 실험하였다. 이 결과에서는 계면 활성제인 Betaine+Amine Oxide의 경우 농도에 상관없이 일정한 압력 강하율을 보였다.

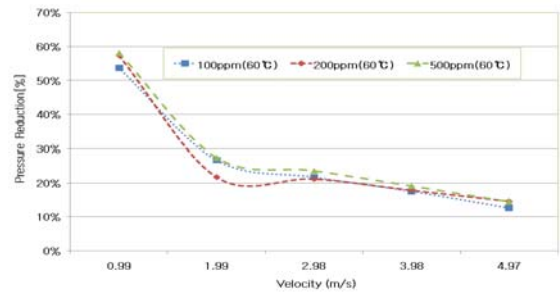


Fig. 6 P.R. on the Variation of concentration of Betaine+Amine Oxide

4.2 Xanthan Gum 실험 결과

본 연구에서 사용한 2가지 계면 활성제중 Xanthan Gum의 온도에 따른 압력 강하율과 농도에 따른 압력 강하율을 알아보았다. Fig. 7은 Xanthan Gum의 온도에 따른 압력 강하율에 변화를 나타내고 있다. Xanthan Gum의 농도는 200ppm으로 하고 공급수 온도는 50°C~80°C의 범위에서 실시하였다. 그림에서 보는바와 같이 유속이 증가할수록 압력 강하율은 낮아지는 경향을 보였으며 온도에 따른 압력 강하율은 차이가 미비하게 나타났다.

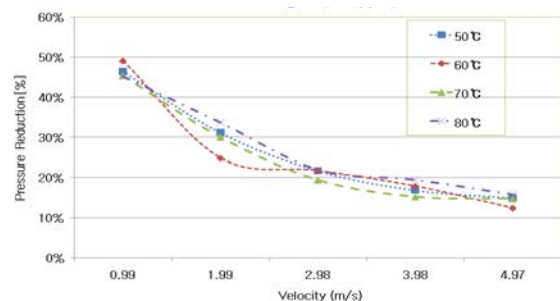


Fig. 7 P.R. on the variation of supply temperature of Xanthan Gum

다음은 계면활성제인 Xanthan Gum의 농도가 압력 강하율에 미치는 영향을 알아보기 위해 공

급수 온도를 60℃에서 실험한 결과이며, 이를 Fig. 6에 나타내었다. Xanthan Gum의 농도는 100~500ppm으로 하였다. 그림에서 보는 바와 같이 농도에 따른 압력 강하율은 저속인 0.99m/s의 유속에서는 200ppm의 농도일 때 49%로 가장 높은 압력 강하율이 나타났고 유속이 2.98m/s에서는 농도가 높아져도 비슷한 압력 강하율을 보였다. 또한 유속이 3.98m/s에서는 500ppm의 농도일 때 높은 압력강하율을 보이는 특징이 있었다.

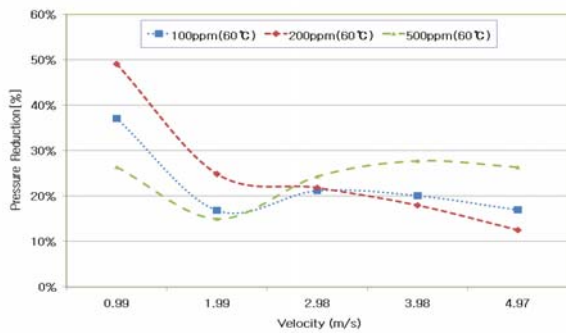


Fig. 8 P.R. on the variation of concentration of Xanthan Gum

4.3 Polyacrylamide 실험 결과

고분자 물질인 Polyacrylamide의 온도에 따른 압력 강하율 실험 결과를 Fig. 9에 나타내고 있다. 첨가제의 농도가 500ppm일 때, 공급수의 온도를 50~80℃로 하여 실험하였다. 그림에서 보는바와 같이 계면활성제인 Betaine+Amine Oxide이나 Xanthan Gum의 실험과 달리 유속이 증가함에 따라 압력 강하율 감소가 큰 변화 없이 일정한 경향을 보였다. 전체적으로는 압력 강하율이 35~45%의 범위에서 나타났다.

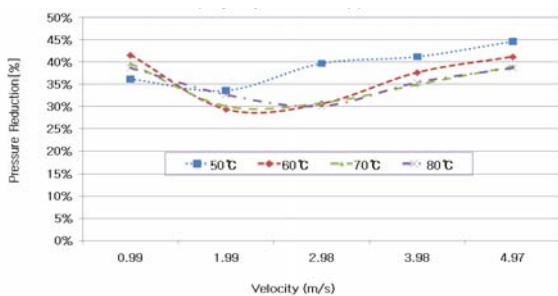


Fig. 9 P.R. on the Variation of supply temperature of Polyacrylamide

Polyacrylamide의 농도 변화에 따른 압력 강하율 실험 결과를 Fig. 10에 나타내 보였다. 50℃의 공급 온수에서 첨가제의 농도 변화를 100~500ppm으로 하였다. 여기에서는 첨가제의 농도가 100ppm과 200ppm에서는 유속이 증가하면서 압력 강하율이 낮아지는 경향을 보였으나, 500ppm의 농도에서는 유속이 증가할수록 오히려 압력 강하율이 높아져서 최대유속이 4.97m/s에서는 43% 압력 강하율을 보였다

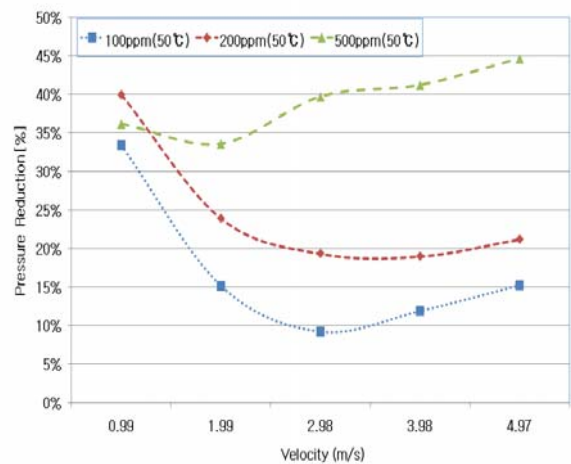


Fig. 10 P.R. on the variation of concentration of Polyacrylamide

4.4 장기성능 실험 결과

계면활성제인 Xanthan Gum과 Betaine+Amine Oxide 및 고분자 물질인 Polyacrylamide의 퇴화현상 비교 실험을 실시하였으며 그결과를 보여 주고 있다. 장기성능 실험결과 Xanthan Gum 및 Betaine+Amine Oxide의 경우에는 퇴화 발생이 별로 나타나지 않았으나, 고분자 물질인 Polyacrylamide는 퇴화 발생이 빠르게 발생하여, 지속적으로 증가하였다.

결론적으로 단기성능 실험에서는 고분자 물질인 Polyacrylamide의 압력 강하율이 500ppm의 농도일 때, 0.99~4.97 m/s의 유속에서 높게 나타나, 다른 마찰 저감제에 비하여 효과가 뛰어났다. 그렇지만 장기성능 실험에서는 퇴화가 빠르게 발생하여 지역난방 시스템에 활용하는 것은 힘들 것으로 보인다.

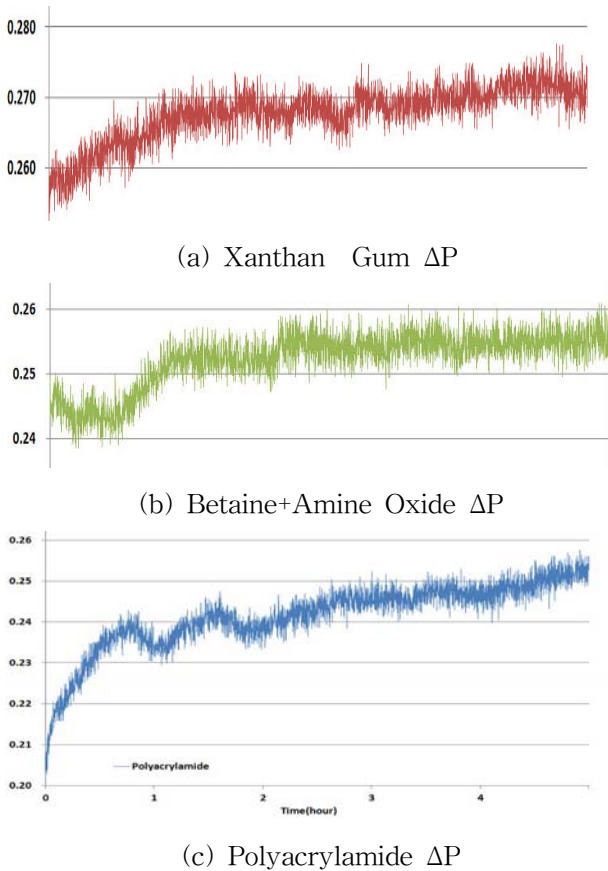


Fig. 11 Degradation of each materials under long term experiment

5. 결론

지역난방 시스템에 마찰 저감제를 활용함으로써 수송 동력을 저감할 수 있는 평가를 위하여 계면활성제인 Betaine+Amine Oxide와 Xanthan Gum 및 고분자 물질인 Polyacrylamide의 마찰 저감 특성에 대해 비교 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 계면활성제인 Betaine+Amine Oxide는 단기 성능 실험결과 저속에서 약 40%정도의 압력 강하율이 나타났지만 유속이 증가하면서 점차 감소하는 경향을 보였으며 고속의 유속에서는 약 15% 정도로 나타났다. 반면에 고분자 물질인 Polyacrylamide는 유속의 증가에 따른 압력 강하율을 감소 경향이 나타나지 않았으며, 오히려 유속이 증가할 때에도 일정한 농도에서는 계면활성제인 Betaine+Amine Oxide와 반대의 경향을 나타내는 경우도 발생하였다. 또한 전체적으로 약

45%의 압력 강하율을 나타내었다.

(2) 장기간 동안 퇴화 현상 실험결과 고분자 물질인 Polyacrylamide의 경우 퇴화 발생이 빠르게 발생하였으나, 계면 활성제인 Betaine+Amine Oxide와 Xanthan Gum에서는 퇴화 발생현상이 서서히 발생하는 것으로 나타났다.

결론으로 지역난방 시스템에 활용 가능한 마찰 저감제는 단기간에는 마찰 저감성능이 실험한 모든 마찰 저감제에서 유사한 값을 나타내었지만, 장기간에도 퇴화 발생이 낮은 Betaine+Amine Oxide와 Xanthan Gum이 유리한 것으로 나타났다.

참고 문헌

1. Lee. et al. 2006, Fluid and Heat Transfer Characterization of Surfactant Turbulent Pipe Flows, pp. 982-987
2. Seong-Su Kim, Sung-Hwa Cho, S다-Mann Yoon, Experimental Study on the Drag Reduction & Heat Transfer Ratio in the Circular Pipe with Swirl Generator , 2008, Proceeding of SARK, Vol. 19, pp
4. Lu B. et. al. "Effect of variations in counter ion to surfactant ratio on rheology and microstructures of drag reducing cationic surfactant systems", Rheol. Acta, 37, 528 (1998)
5. Myska J. and Chara Z., " The effect of a Zwitterionic and cationic surfactant in turbulent flows", Experimental in Fluids 30, 229 (2002)
6. Sellin R. H. S. and R. T. Moses, 1989, Drag Reduction in fluid flows: Techniques for Friction Control, Ellis Horwood Limited Press, Chichester, England
7. S. M. Yoon et al, Characteristics of Drag Reduction Additives in the Application of District Heating System, 1998, Proceedings of the SAREK 1998 Summer Annual Conference, pp.958~964.