

고분자물질 및 계면활성제의 유동마찰 저감 특성 비교 연구

조 성 환[†], 유 재 성^{*}, 김 성 수^{*}, 정 상 훈^{*}, 윤 석 만^{**}
전주대학교 기계자동차공학과, ^{*}전주대학교 대학원, ^{**}한국지역난방공사 기술연구소

A Comparison Study on Drag Reduction Characteristics of Polymer and Surfactant as Drag Reduction Additive

Sung-Hwan Cho[†], Jae-Sung Ryu^{*}, Seong-Su Kim^{*}, Sang-Hoon Jung^{*}
Seok-Mann Yoon^{**}

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

^{}Graduate student, Jeonju University, Jeonju 560-759, Korea*

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

(Received October 22, 2009; revision received April 20, 2010)

ABSTRACT: The drag reduction(DR) of non-ionic surfactant and polymer according to the variation of fluid velocity, temperature and surfactant concentration was investigated experimentally. For this experiment, the kind of surfactant was non ionic amine-oxide and the kinds of polymer were polyacrylamide and xantan gum. An experimental apparatus equipped with one water storage tanks was built and two flow meters, two pressure gauges for data logging system was installed.

Results showed that the kinds of polymer, polyacrylamide and xantan gum, had DR of below 20% for below 500 ppm in fluid temperature of 50~80°C. But the kind of surfactant, amine oxide, had DR of above 40% for 500~1000 ppm in fluid temperature of 50~80°C. As a result, amin oxide showed better materials to use to the district heating system.

Key words: Surfactant(계면 활성제), Polymer(고분자), Drag reduction(마찰저감)

기 호 설 명

T : 온도 [°C]
 P : 압력 [kgf/cm²]
 DR : 압력 강하율 [%]
 v : 유속 [m/s]

하첨자

W : 물
 A : 첨가제

[†] Corresponding author

Tel.: +82-63-220-2663; fax: +82-63-220-2663

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

1. 서 론

최근 에너지소비의 증가로 공급과 소비의 부조화가 발생되고 있으며 이에 따라 에너지 가격의 급등이 발생되고 있다. 이러한 에너지 소비의 증가는 환경오염문제 발생의 원인 중의 하나가 되고 있다. 이에 따른 대처방안의 하나로서 집단에너지 사업이 고려될 수 있다. 집단에너지 사업은 효율적인 에너지 이용과 환경 친화적인 시설로서 에너지의 효율 측면에서 매우 효과적인 사업 중의 하나이다.

국내 집단에너지 사업의 대표적인 지역난방 시스템은 전체 배관망이 약 3,000 km에 이르고 있다. 이러한 장거리 배관망을 통한 열수송에서는 마찰저항으로 인해 많은 펌프동력이 필요하게 된다. 효율적

인 장거리 열수송을 위한 연구로서 대표적인 방법 중 하나가 마찰저감제를 투입하는 것이다. 이러한 마찰저감제는 파이프 내 표면의 마찰 저항을 감소시킴으로써 유체의 유동을 향상시키게 되는 것이다.⁽¹⁻²⁾

일반적으로 마찰저감제로는 고분자 화합물과 계면활성제가 검토되고 있다

고분자 화합물에 의한 유동저항 감소는 톰스효과(Tom's effect)라 불리는 난류의 층류화 현상에 의하여 발생하는 것으로 알려져 있다. 톰스효과는 사슬모양의 고분자 화합물이 점성 저층에서 발생하는 난류덩어리를 잘 흡수함으로써 난류의 발달을 억제하는 것에 의하여 발생하는 것으로 알려져 있다.⁽³⁻⁴⁾

저분자 물질인 계면활성제의 경우는 분자구조가 친수성 그룹과 친유성 그룹으로 구성되어 지는데 특정 농도 이상에서 콜로이드성 화합체인 미셀(Micelle)이 형성되어 마찰저감이 발생되는 것으로 알려져 있다. 이때 미셀의 형상이 봉상(섬유상)인 형태에서 톰스효과가 잘 발달되는 것으로 알려져 있다.⁽⁵⁻⁶⁾

일반적으로 앞에서와 같이 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 Xanthan Gum, 계면활성제인 Amine Oxide를 활용하여 온도 영역 50℃~80℃ 범위에서 단기간 동안에 마찰저감 특성을 비교하고 장기간 동안 마찰저감능이 소멸되는 퇴화현상을 비교 평가함으로써 향후 지역난방 시스템에서 적용 가능성을 평가하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서는 첨가제의 마찰저감률을 측정하기 위하여 Fig. 1과 같은 시스템으로 설계 제작하였다. 축열조는 60 L 용량의 Bath(항온조)를 이용하여 55 L의 물을 채운 후 공급온도를 일정하게 유지하였다. 펌프는 3,750 RPM, 0.45 kW 출력의 속도 가변 펌프를 사용한 후 유량조절이 가능하도록 하였다. 본 시스템에서 배관 부분은 총 길이는 9.5 m이며, 내경은 15 mm이다. 이때 배관의 재질은 SUS관을 사용하여 Scale 오염이 최소화 되도록 하였다. 실험

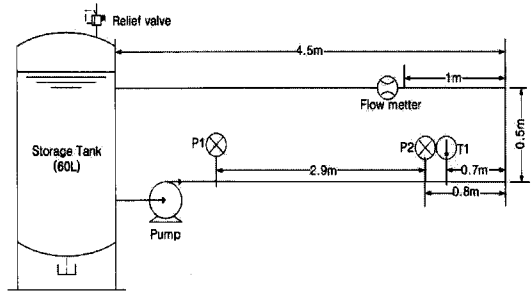


Fig. 1 Diagram of experimental apparatus.

장치의 배관 부분에 1개의 유량센서와 일정한 간격을 두고 2개의 압력센서를 설치하였다. 이때 유량센서의 제조사는 KOMETER(모델 KTR-550)이며 측정범위는 0~4 m³/hr, 정확도는 ±0.25%이다, 압력계의 제조사는 SIEMENS(모델 SISTRAN-PDS III)이며 측정범위는 0.05~5 bar, 정확도는 ±0.25%이다. 이와 같은 센서로 측정된 아날로그 신호들은 데이터 로거(Agilent 34970A)를 통하여 수집한 후 디지털 신호로 변환하여 PC로 저장하여 분석하였다.

2.2 성능평가 방법

난방 시스템의 파이프에서 마찰저감제의 투입에 따른 마찰저감률(Drag Reduction)을 나타낸 식(1)과 같다.

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

여기서 ΔP_A 는 마찰저감제를 투입한 경우의 압력 강하를 나타내며, ΔP_W 는 마찰저감제를 첨가하지 않은 경우의 압력강하를 나타낸 값이다. 이때 D.R.의 수치가 높을수록 마찰저감제의 효과가 높은 것을 의미한다.

3. 실험 조건 및 방법

마찰저감제의 단기성능 평가를 위한 실험 조건은 Table 1에 나타내고 있는 것과 같이 계면활성제인 Amine Oxide와 고분자 물질인 Polyacrylamide 및 Xanthan Gum를 마찰저감제로 사용하였다. 첨가제의 농도는 50~1000 ppm 범위에서 실험하였다. 데이터 측정방법은 관내의 차압 변화를 1초 간격으로

Table 1 Experimental conditions

Classification	Experimental conditions
Hot Water Temp.(°C)	50/ 60/ 70/ 80
Velocity (m/s)	0.8/ 1.1/ 1.4/ 1.7
Density (ppm)	50/ 100/ 200/ 500/ 1000
Polymer	Polyacrylamide Xanthan Gum
Surfactant	Amine Oxide

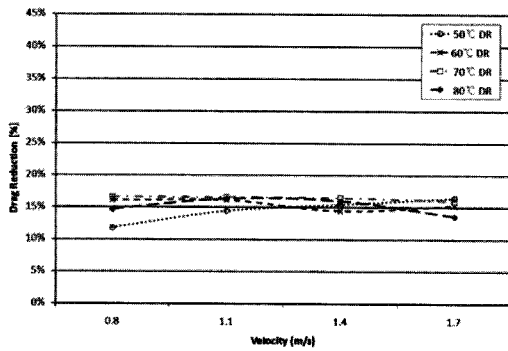


Fig. 2 DR of polyacrylamide on the variation of supply temperature.

측정한 후 5분 동안의 평균값을 사용하였다. 실험 오차와 센서 오차를 줄이기 위하여 수차례 측정된 실험 데이터를 확보하여 분석하였다.

장기성능 평가를 위한 실험 조건은 단기성능 실험과 동일한 마찰저감제를 사용하였고 80°C의 공급 온수에서 유속을 0.28 m/s로 고정한 뒤 퇴화가 발생할 때까지 파이프내의 차압을 측정 후 분석하였다.

4. 실험 결과

4.1 Polyacrylamide 실험 결과

고분자 물질인 Polyacrylamide의 온도에 따른 마찰저감률 실험 결과를 Fig. 2에 나타내고 있다. 첨가제의 농도가 500 ppm일 때, 공급수의 온도를 50~80°C로 하여 실험하였다. 온도를 변화시켜도 각각의 온도에서 유속을 변화 시켜도 큰 변화 없이 유사한 마찰저감률을 나타내었다. 전체적으로는 마찰저감률이 12~17%의 범위에서 나타났다.

Polyacrylamide의 농도 변화에 따른 마찰저감률 실험 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 80°C의 공급 온

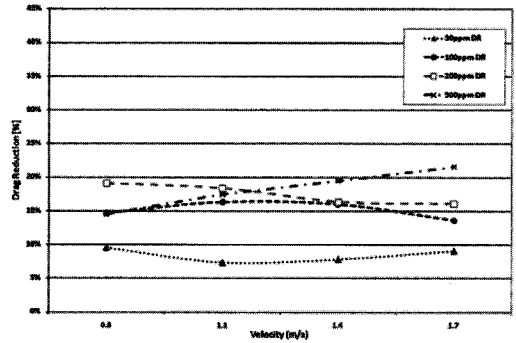


Fig. 3 DR of polyacrylamide on the variation of concentration.

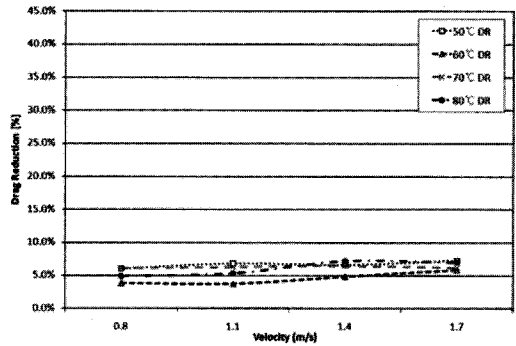


Fig. 4 DR of xanthan gum on the variation of supply temperature.

도에서 첨가제의 농도 변화를 50~500 ppm으로 하였다. 여기에서는 첨가제의 농도가 50 ppm에서는 유속이 높아져도 10% 미만의 마찰저감률을 보였지만, 100~500 ppm의 농도에서는 50 ppm에서의 마찰저감률보다 다소 높은 14~20%의 마찰저감률을 보였다. Polyacrylamide의 가장 높은 마찰저감률은 최대유속인 1.7m/s에서 23%의 마찰저감률을 나타내었다.

4.2 Xanthan Gum 실험 결과

본 연구에서 사용한 고분자합성 물질 중 Xanthan Gum의 온도에 따른 마찰저감률과 농도에 따른 마찰저감률을 분석하기 위하여 측정된 결과는 아래와 같다. Fig. 4는 Xanthan Gum의 온도에 따른 마찰저감률의 변화를 나타내고 있다. Xanthan Gum의 농도는 100 ppm으로 하고 공급수 온도는 50°C~80°C의 범위에서 실시하였다. 그림에서 보는바와

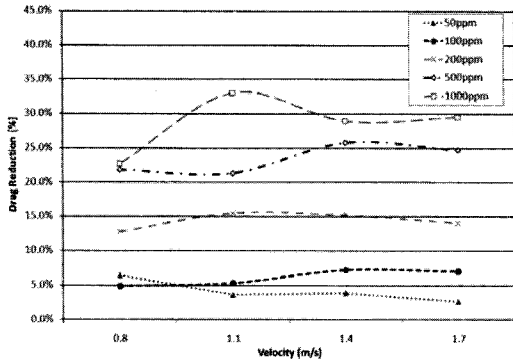


Fig. 5 DR of xanthan gum on the variation of concentration.

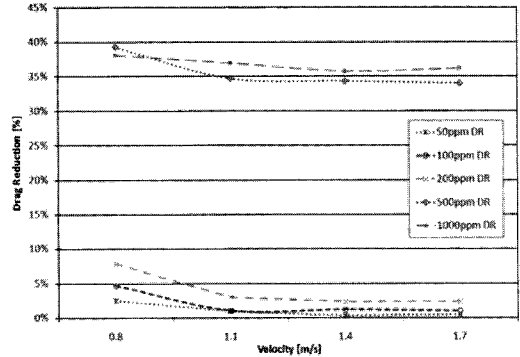


Fig. 7 DR of Amin oxide on the variation of concentration.

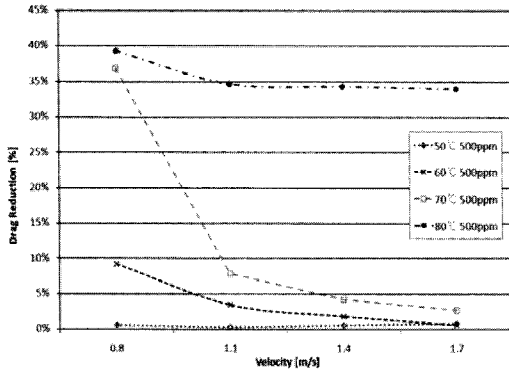


Fig. 6 DR of Amin oxide on the variation of temperature.

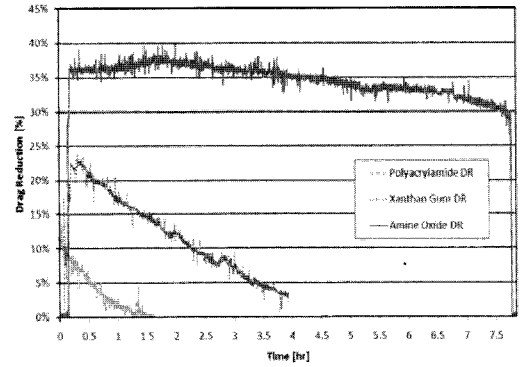


Fig. 8 Long term experiment for the of each additives.

같이 유속이 증가할수록 마찰저감률은 약간 증가하는 경향을 보였으며 온도에 따른 마찰저감률은 차이가 크게 나타나지 않았다. Xanthan Gum의 100 ppm 농도에서는 4~7%로 대체적으로 비슷한 마찰저감률이 나타났다. 즉 이것은 50°C~80°C의 온도 범위에서는 Xanthan Gum의 마찰저감 능력이 크게 변화되지 않는 것으로 나타났다. Fig. 5은 고분자 물질인 Xanthan Gum의 농도가 마찰저감률에 미치는 영향을 알아보기 위해 공급수 온도를 80°C에서 실험한 결과이다. Xanthan Gum의 농도는 50~500 ppm으로 하였다. 그림에서 보는 바와 같이 Xanthan Gum의 경우 농도의 영향이 마찰저감률에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이에 따라 농도가 50 ppm에서는 5% 미만의 마찰저감률을 나타내었으나 100 ppm에서는 약 15%, 500 ppm에서는 약 25%를 나타내다가 1000 ppm의 농도일 때 33%까지도 높은 마찰저감률을 나타냈다.

4.3 Amine Oxide 실험 결과

계면활성제인 Amine Oxide의 특성을 분석하기 위하여 500 ppm의 농도에서 온도를 변화시키면서 마찰저감률을 측정된 결과를 아래에 나타내었다. Fig. 6은 Amine Oxide의 50°C~80°C 온도 범위에서 마찰저감률을 나타내고 있다. 그림에서 보는바와 같이 50°C의 공급수 온도에서 1~2%의 낮은 마찰저감률이 발생하였으며, 온도가 높아질수록 마찰저감률 역시 높아져 80°C에서는 34~39%의 마찰저감률을 나타내었다. 이때 50~70°C의 마찰저감률은 80°C의 마찰저감률에 비해 현저히 낮은 값으로 나타났다. 결과적으로 Amine Oxide의 경우 유속이 저속인 0.8 m/s인 경우를 제외하면 80°C이상의 온도에서 마찰저감 효과가 크게 발생하는 것으로 나타났다.

계면활성제인 Amine Oxide의 농도에 따른 마찰저감률 실험 결과를 Fig. 7에 나타내고 있다. 실험

조건은 공급수의 온도를 80℃로 하고 첨가제의 농도를 50~1000 ppm으로 변화 시켜가며 실험하였다. 이 결과에서는 계면 활성제인 Amine Oxide의 경우 50 ppm부터 200 ppm은 10% 미만의 마찰저감률을 보였다. 그러나 500 ppm과 1000 ppm에서는 33~39%까지 마찰저감률이 나타났다. 이는 특정 온도 이상에서 계면활성제가 효과를 나타낸다는 결과를 보여주고 있다. 본 실험에서 사용한 Amine Oxide의 경우 500 ppm 이상에서 마찰저감 효과가 크게 발생하는 것으로 실험 결과에서 나타났다.

4.4 장기성능 실험 결과

장기성능 실험에서는 각각의 마찰저감제를 500 ppm의 농도로 혼합하여 실험하였다. 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 고분자화합물인 Polyacrylamide와 Xanthan Gum의 경우 마찰저감 효과가 각각 약 1.5 hr과 4 hr정도 지속하는 것으로 나타났다. 계면활성제인 Amine Oxide의 경우에는 고분자 화합물보다 지속되는 시간이 길게 나타났으며, 1회 투입 후 약 7.5시간 이상의 지속시간을 가지는 것으로 나타났다. 또한 고분자화합물의 경우 투입 후 마찰저감 효과가 바로 감소하기 시작한 반면 계면활성제인 Amine Oxide의 경우 서서히 감소하기 시작해서 마찰저감 효과가 순간적으로 사라지는 현상을 보였다.

위와 같은 마찰저감 효과의 지속시간은 실제 지역난방 시스템에서 마찰저감제의 투입 시 지속시간과 동일한 것은 아니다. 마찰저감제의 성능열화가 발생하는 주원인이 펌프 및 파이프의 굴곡점이 주원인인 것을 감안하면 실제 시스템에서는 마찰저감 특성이 소멸되는 퇴화 현상의 발생시기가 길어 질 수 있음을 의미한다.

5. 결 론

지역난방 시스템에 마찰저감제를 활용함으로써 수송 동력을 저감할 수 있는 평가를 위하여 고분자 물질인 Xanthan Gum 및 Polyacrylamide와 계면활성제인 Amine Oxide의 마찰저감 특성에 대해 실험 온도 범위를 50~80℃로 하여 비교 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 단기적 실험결과로 Polyacrylamide는 온도 변화에는 크게 영향을 받지 않아서 전체적으

로 온도에 따른 마찰저감률은 10% 미만으로서 크지 않게 발생하였다. 그러나 농도의 변화에는 민감한 변화를 나타내었으며 농도가 100 ppm 이상에서 마찰저감률이 상승하여 23% 정도까지 발생하였다.

- (2) Xanthan Gum의 경우 100 ppm의 혼합 비율로 온도를 변화시킨 결과 공급 온도가 마찰저감률에 미치는 영향은 미비하게 나타났으며, 유속이 증가하여도 그에 따른 마찰저감률은 약 12~18%로서 비슷한 결과를 보였다. 농도에 따른 마찰저감률은 50 ppm의 경우 10% 미만의 결과를 보였으며 100 ppm에서 마찰저감률이 증가하기 시작하여 최대 18%까지 마찰저감 효과가 발생하는 것으로 나타났다.
- (3) Amine Oxide의 경우에는 온도에 상당히 민감하게 작용하였으며 이에 따라서 공급 온도가 높아질수록 마찰저감률이 크게 발생하였으며, 가장 높은 온도인 80℃에서 최대 39%의 마찰저감률이 나타났다. 혼합 농도가 마찰저감률에 미치는 영향으로는 50~200 ppm까지의 농도에서 10% 미만의 작은 마찰저감률을 보였으며, 상대적으로 500 ppm과 1000 ppm에서는 34~39%로 높은 마찰저감률을 발생하는 것으로 나타났다.
- (4) 고분자화합물인 Polyacrylamide와 Xanthan Gum의 경우 마찰저감 효과가 각각 약 1.5 hr과 4 hr정도로 나타났다. 계면활성제인 Amine Oxide의 경우에는 고분자 화합물보다 지속되는 시간이 길게 나타났으며, 1회 투입 후 약 7.5hr 이상 마찰저감 효과가 유지되었다.

결론적으로 계면활성제인 Amine oxide가 고분자화합물질인 Polyacrylamide나 Xanthan Gum보다 단기 성능과 장기 성능 모두에서 유리한 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 2007년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.

참고문헌

1. Boutoudj, M. S., Ouibrahim, A. and Barbeu, F.,

- 2007, Local Shear Stress Measurement with Microelectrodes in Turbulent flow of Drag Reducing Surfactant Solutions, Chemical Engineering and Processing, pp. 793-798.
2. Kim, S.-S., Cho, S.-H. and Yoon, S.-M., 2008, Experimental Study on the Drag Reduction and Heat Transfer Ratio in the Circular Pipe with Swirl Generator, Proceeding of SAREK, Vol. 19, pp. 430-436.
 3. Lu B., 1998, Effect of variations in counter ion to surfactant ratio on rheology and microstructures of drag reducing cationic surfactant systems, Rheol. Acta, No. 37, p. 528.
 4. Myska, J. and Chara, Z., 2002, The effect of a Zwitterionic and cationic surfactant in turbulent flows, Experimental in Fluids Vol. 30, p. 229.
 5. Sellin, R. H. S. and Moses, R. T., 1989, Drag Reduction in fluid flows : Techniques for Friction Control, Ellis Horwood Limited Press, Chichester, England
 6. Yoon, S. M., Seo, T. B. and Kim, C. B., 1998, Characteristics of Drag Reduction Additives in the Application of District Heating System, 1998, Proceedings of the SAREK Summer Annual Conference, pp. 958-964.
 7. Final Report, 1993, Advanced Energy Transmission Fluids IEA Annex III.