

지역냉방시스템에의 적용을 위한 마찰저항감소 첨가물 특성 연구

윤 석 만†, 김 중 보*

인하대학교 기계기술공동연구소, *인하대학교 기계공학과

Characteristics of Drag Reduction Additives in the Application of District Cooling System

Seok-Mann Yoon†, Chong-Bo Kim*

Research Institute for Mechanical Eng., Inha University, Incheon 402-751, Korea

*Department of Mechanical Eng., Inha University, Incheon 402-751, Korea

(Received August 25, 1999; revision received December 8, 1999)

ABSTRACT: District heating and cooling systems offer highly efficient energy utilization and maintenance by centralizing heat management. More pumping power, however, is required because the water has to travel long distance from heat source to the users. In the present study, a trace of drag reduction additives is added to the District Cooling system to achieve a significant drag reduction and save pumping power. Water-soluble polymers, surfactants, and environment-friendly degradable polymers are used as effective drag reducing additives. Time dependent percent drag reductions are compared for various additive solutions at 100 wppm concentration for different water velocity. Without as an anionic surfactant, copolymer was most effective in percent drag reduction. It is found that there exists an optimal condition when copolymer is mixed with SDS. An environment-friendly degradable polymer, xanthan gum, is found to be a significant drag reduction additive. Ice slurry systems, can give less pressure drops compared with chilled water system for certain condtions. Drag reduction additives were also effective for the ice slurry system.

Key words: District cooling(지역냉방), Drag reduction additive(마찰저항감소 첨가물), Pressure drop(압력강하), Pumping power(펌핑동력), Degradation(퇴화)

기 호 설 명

C : 첨가물의 농도 [wppm]

D : 시험관의 내경 [mm]

$DR(\%)$: 마찰저항감소율 [%]

f : Fanning의 마찰계수

L : 시험부의 길이 [m]

ΔP : 차압 [kPa]

Re : 레이놀즈수 [vD/ν]

U : 총괄열전달계수 [$W/m^2\text{ }^\circ\text{C}$]

† Coressponding author

Tel.: +82-32-862-7313; fax: +82-32-868-1716

E-mail address: smyoon1215@hanmail.net

u : 속도 [m/s]

그리스 문자

τ_w : 벽면전단응력 [kPa]
 ρ : 밀도 [kg/m³]
 ϕ : 빙분율 [%]

하첨자

W : 물로만 이루어진 경우,
 즉 첨가물이 없는 경우
 $'$: 첨가물이 투입된 경우

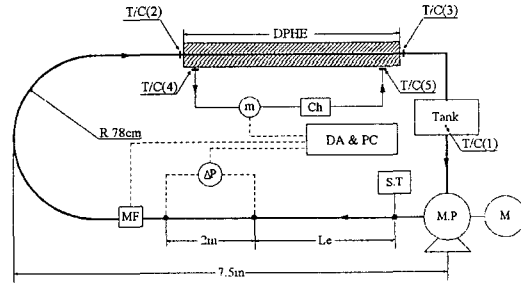
1. 서 론

지역냉난방은 집중적인 열관리를 통한 열효율 증대와 경비절감, 에너지절감, 유지 및 보수관리 면에서의 잇점등 많은 장점으로 특히 밀집된 지역에서는 매우 각광을 받고 있다. 또한 현재 심각히 고려되고 있는 환경에의 영향을 고려한다면, 개별적인 냉난방시스템보다는 환경오염원을 집중적으로 관리할 수 있고 환경오염을 감소시킬 수 있는 장점까지 지니고 있어 더욱 매력적이다.

지역냉방(district cooling)에 있어서는 현재 냉수(chilled water) 시스템이 보편적이라 할 수 있는데, 근래 개선방법으로서 얼음입자를 혼합하여 사용하는 아이스슬러리(ice slurry) 시스템이 제기되었으며 첨예한 냉방부하를 갖는 경우(sharply-peaked cooling loads), 수송관 설치비용이 큰 경우, 저장비용(저장용량, 설치공간)이 큰 경우에 냉방능력을 향상시킴으로서 그 적용이 더욱 효과적이다. 그러나 이러한 집단에너지 시스템은 열원과 사용자간의 먼 거리에 따른 막대한 펌핑동력이 요구된다.

본 연구에서는 마찰저항감소 첨가물을 소량 첨가하여 작동유체 수송에 소비되는 막대한 펌핑동력을 감소시킨다면 에너지 절감 또는 설비이용의 확대로 연계될 것이므로 그 적용적합성을 연구하고자 하였다.

마찰저항감소현상에 대한 배경을 살펴보면, 1948년에 Toms⁽¹⁾에 의한 연구이후 Virk는⁽²⁾ 고분자 첨가제의 다양한 농도, 관의 지름 등을 실험 변수로 하는 마찰저항감소 실험결과를 종합하



M: motor MP: mono pump ST: surge tank Le: entrance length ΔP: differential pressure transmitter Ch: chiller T/C: thermocouple MF: magnetic flowmeter DPHE: double pipe heat exchanger m: mass flowmeter DA: Data Acquisition

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus-chilled water system(5.5°C).

여 마찰저항 감소효과는 극한이 존재함을 규명하였고 최대마찰저항감소점근선(maximum drag reduction asymptote)이라 하였다. Hartnett 등은⁽³⁾ 점탄성유체를 뉴턴유체나 순수한 점성 비뉴턴 유체와 비교했을 때 그 유동현상은 아주 다른 특성을 보이며, 난류 유동장내에서 마찰계수는 훨씬 낮은 수치를 보이고 있음을 확인하였다. Kenis⁽⁴⁾는 PEO 수용액과 PAAM 수용액의 기계적 퇴화에 있어 초기에는 PEO 수용액의 경우는 PAAM 수용액보다 마찰저항감소효과가 크게 나타났으나, 실험시간이 경과함에 따라 PAAM 수용액이 PEO 수용액보다 우수함을 규명하였다. Choi 등은⁽⁵⁾ PAAM 수용액이 PEO 수용액보다 기계적 퇴화가 안정적이며, PAAM 수용액은 일정 기간 기계적 퇴화된 후 더 이상의 퇴화가 없는 것을 보였고 고온일수록 초기의 퇴화가 급격하게 일어나며, 마찰과 열전달감소가 점근값에 접근함을 관찰하였다.

또한 알라스카 원유수송관(Trans-Alaska Crude Oil Pipeline)에서 소량의 고분자 물질을 수송관내에 투입하여 원유의 수송능력을 제고할 수 있었고⁽⁶⁾, 소방차의 방수능력(pumpability)향상이나 선박과 잠수함의 항해속도의 상승, 원유수송, 각종 유체수송에 있어서의 펌프력 향상, CWM과 같은 고체연료수송 및 냉난방 순환시스템에의 적용 및 인체의 혈액순환 시스템 치료를 위한 적용 등에서 크게 기대되고 있으며, 이 현상의 실용적인 적용 분야는 점차 넓어질 것으로

Table 1 Particle sizes of ice

Class of ice particle	diameter of ice particle (unit:mm)
large size	$6.5 \leq d_L < 13.0$
small size	$0 < d_s < 6.5$
mixed size	$0 < d_M < 13.0$

기대된다.

본 연구에서는 냉방시스템으로 기존의 냉수시스템과 아이스슬러리 시스템을 구성하였다. 냉수시스템에서는 수용성 고분자 및 계면활성제 그리고 환경친화적인 분해성 고분자에 의한 마찰저항감소효과를 첨가물의 종류, 작동 유체의 유속, 순환시간에 따른 마찰저항감소율로 비교하였다. 아이스슬러리 시스템에서는 빙분율, 작동유체의 유속, 얼음입자 직경의 변화 및 첨가물 유무에 따른 압력강하의 변화를 관찰하였고 냉수 시스템과 비교하였다.

2. 마찰저항

Fanning의 마찰계수는 다음과 같다.

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

여기서, L 는 ΔP 시험부(test section)의 길이, ΔP 는 시험부 두 지점 사이의 압력차, D 는 관 직경, ρ 는 유체의 밀도, v 는 유체의 관내 평균속도이다. 첨가물없는 물만을 순환시킬 경우의 압력강하를 각각 ΔP_w 라 하고, 첨가물을 투입한 경우의 압력강하를 ΔP_A 라 하면 마찰저항감소율(percent drag reduction), $DR(\%)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$DR(\%) = \left(\frac{\Delta P_w - \Delta P_A}{\Delta P_w} \right) \times 100 \quad (2)$$

3. 실험

3.1 실험장치

Fig. 1은 냉수시스템에 대해 구성된 실험장치의 개략도이다. 용매는 수돗물을 사용하였으며, 스테인리스로 만들어진 250 l 용량의 물탱크로부터 모노펌프[(주)대봉, 10 m³/hr용량]를 통해 배

관으로 공급된다. 모노펌프는 3.7 kW 용량의 전동기로 구동되며 전동기는 가변속도 조절기로 제어되었다. 완전히 발달된 유동(fully developed flow)을 얻기 위해 3 m의 입구 길이를 지나 2m의 차압시험부(differential pressure test section)에 도달한다. 입구길이부터의 배관은 내경 26.04 mm, 외경 28.58 mm의 동관을 사용하였다. 차압시험부 양단에 압력탭을 설치하고 차압계[differential pressure transmitter, ABB-kent Taylor 621Model, Italy]로 차압을 측정하고 전기적 신호로 변환된 차압 신호를 data 수집장치[HP 3852 data acquisition system, USA] 입력시켜 컴퓨터에 저장시켰다. 차압시험부를 지나 자기식 유량계[magnetic flowmeter, FM-100MG, (주)정 Eng., 대한민국]에서 유량을 측정하고 이중관열교환기(double pipe heat exchanger)를 지나 물탱크로 되돌아가는 폐쇄회로(closed loop)를 구성한다. 이중관열교환기의 내관(inner pipe)은 순환회로 주배관이 되고 외관(outer pipe)은 길이 4 m, 내경은 38.24 mm, 외경은 41.28 mm 구성되었다. 이중관열교환기 외관에 연결된 회로에는 5 RT 용량의 냉각기를 설치하여 일정한 온도를 유지하면서 내관과의 지속적인 열교환을 하도록 하였으며, 내관의 온도를 일정하게 유지시켜 시간에 따른 퇴화를 관찰할 수 있었다. Fig. 2는 아이스슬러리 시스템에 대한 실험장치의 개요도이다. 기본적인 구조는 냉수시스템과 동일하며 냉각기는 작동되지 않는다. 물탱크 내에는 얼음의 밀도가 작으므로, 원심력을 주는 장치를 설치하여 귀환되는 아이스슬러리에 얼음이 잘 혼합되어 관 내로 유입될 수 있도록 하였다. 약 27 cm²의 육각형 얼음을 빙삭기를 이용하여 분쇄하였고 6.5 mm 및 13.0 mm의 mesh를 이용하여 얼음입자 크기를 선별하였다. 선별된 얼음입자 크기는 Table 1과 같다.

3.2 첨가물 재료

마찰저항감소 첨가물로 PEO(PolyEthylenOxide), PAA(PolyAcrylicAcid), PAAM(PolyAcrylAMide)와 Copolymer 및 분해성 고분자로 Xanthan gum과 Guar gum이 사용되었고 양이온성 계면활성제(cationic surfactant)로는 STAC[Stearyltrimethylammonium Chloride, CH₃(CH₂)₁₇N(CH₃)₃Cl]와

Table 2 Molecular weights of additives

	Additives	Molecular weight
Homo Polymer	PEO	5×10^6
	PAA	4×10^6
	PAAM	$(5 \sim 6) \times 10^6$
Copolymer	Copolymer	$(14 \sim 15) \times 10^6$
(-)anionic surfactant	SDS	288.4
Degradable polymer	Xanthan Gum	$1 \times 10^6 \sim$
	Guar Gum	$(3 \sim 4) \times 10^5$
(+)Cationic surfactant	STAC	351
	CTAC	320
Counter-ion	Nasal.	160.10

CTAC[Cethyltri-methylammoniumChloride, $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{15}\text{N}(\text{CH}_3)_3\text{Cl}$]을 사용하였다. Counter-ion으로서 Nasal.(Sodium Salicylate)가 사용되었으며 중량비 1:1의 비율로 혼합하였다. 한편 Copolymer와의 혼합효과를 알기 위하여 음이온성 계면활성제(anionic surfactant)는 SDS(Sodium Dodecyl Sulfate, $\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{O}_4\text{SNa}$)를 사용하였다. 각 첨가물에 대한 분자량은 Table 2에서 보여진다.

3.3 실험조건 및 실험방법

각 첨가물의 농도는 실용적인 응용을 고려하여 모두 100 wppm으로 고정하였고, 유속은 2.5 m/s, 5.0 m/s에 대하여 실험하였고 해당하는 레이놀즈수는 36,000에서 87,000이었다. 순환시간(circulation time)은 200분을 최대로 하여 마찰저항감소율이 10% 미만이 되면 실험을 중단하였다. 작동유체에 투입후 분산이 원활하도록 기계식 교반기(mechanical stirrer)를 사용하여 2000 wppm(0.2w%) stock-solution을 제조하였다. 실험

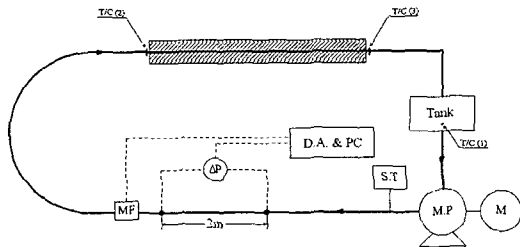


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus - ice slurry system.

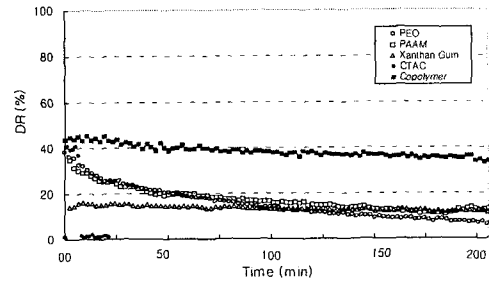


Fig. 3 Percent drag reduction of additives without SDS for 100 wppm solutions at 5.5°C chilled water - water velocity 2.5 m/s ($Re_w = 43,000$).

힘이 종료된 후 다음 실험을 위한 세척은 최소 30분 이상, 물만의 경우의 비교기준 값에 차압이 도달할 때까지로 하여 두 가지 조건을 모두 만족시키도록 순환회로를 세척하였다.

아이스슬러리 시스템에서는 초기 빙분율을 18%로 투입하고 전부 물로 녹는 경우를 빙분율 0으로 하여 빙분율 변화에 대한 압력강하를 비교하였다. 빙분율(ice fraction) ϕ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\phi = \frac{m_s}{m_s + m_f} \quad (3)$$

여기서 m_s 는 얼음의 질량이고 m_f 는 유체의 질량이다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 냉수 시스템

Fig. 3에서는 2.5 m/s 유속의 경우 단일성 고분자 (Homo-polymer)들과 SDS를 혼합하지 않은 Copolymer의 마찰저항감소율을 비교하였다. 단연 Copolymer의 마찰저항감소효과가 뛰어난 것을 알 수 있다. 또한 Xanthan gum의 경우 초기 효과는 크지 않지만 퇴화에 지속적으로 잘 견디는 것을 상대적으로 알 수 있다. 따라서 환경을 고려하는 경우 환경친화적인 분해성 고분자 Xanthan gum의 사용적합성을 알 수 있다.

Fig. 4에는 5.0 m/s 유속의 경우 단일성고분자들과 SDS를 혼합하지 않은 Copolymer의 마찰저항감소율을 비교하였다. 초기에는 PEO, PAAM,

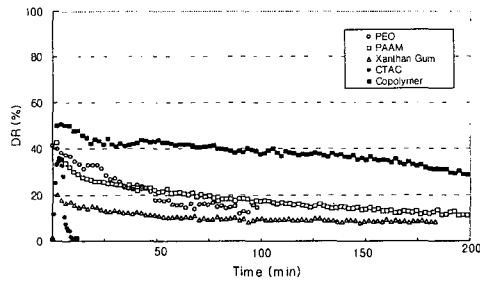


Fig. 4 Percent drag reduction of additives without SDS for 100 wppm solutions at 5.5°C chilled water - water velocity 5.0 m/s ($Re_w = 87,000$).

CTAC등도 효과가 좋지만 퇴화가 빠르고, 특히 CTAC의 경우 퇴화속도가 매우 빠른 것을 알 수 있다. 한편, Copolymer의 경우 실험전체구간에서 단연 우수성을 알 수 있다. 분해성 고분자 Xanthan gum의 경우 초기효과는 작지만 안정된 퇴화를 보이므로 장기간의 사용에 적합성을 알 수 있다.

Fig. 5에는 2.5 m/s 유속에서 Copolymer만의 경우와, SDS를 혼합한 경우의 마찰저항감소율을 비교하였다. 1:1로 혼합한 경우가 초기효과도 크고 퇴화에도 잘 견디는 첨가물로서, 저유속의 경우 마찰저항감소면에서 가장 우수한 첨가물이라는 것을 알 수 있다. 또한 SDS를 혼합한 경우가 혼합하지 않은 경우보다 모두 향상된 효과를 보이고 있다.

Fig. 6에서는 5.0 m/s 유속에서 Copolymer만의 경우와 SDS를 혼합하는 경우를 비교하였다. 저

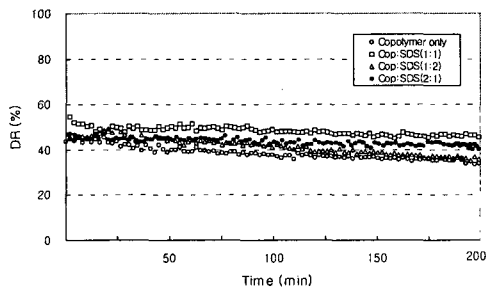


Fig. 5 Percent drag reduction for mixture of Copolymer and SDS for 100 wppm solutions at 5.5°C chilled water - water velocity 2.5 m/s ($Re_w = 43,000$).

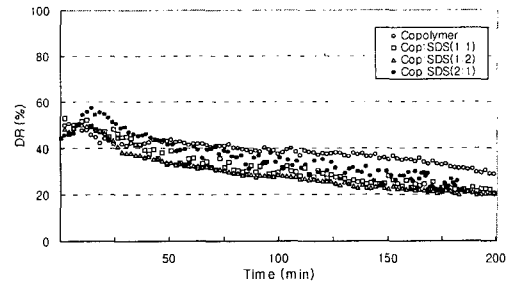


Fig. 6 Percent drag reduction for mixture of Copolymer and SDS for 100 wppm solutions at 5.5°C chilled water - water velocity 5.0m/s ($Re_w = 87,000$).

유속의 경우와는 상반된 결과로서 오히려 SDS를 혼합하지 않은 Copolymer만의 경우가 가장 우수하였다. 그밖에 근소한 차이로 2:1, 1:1, 1:2 혼합 순으로 우열이 정해진다. 이것은 현재 Copolymer의 농도가 높지 않으므로 고유속에서는 SDS 혼합비율보다 Copolymer 농도 자체가 적용조건에 따라 적합한 혼합비율이 존재한다는 것을 알 수 있다.

4.2 아이스슬러리 시스템

Fig. 7에는 물유속 2.5 m/s인 경우에 대하여 즉 얼음입자 크기에 따른 압력강하를 비교하였다. 예측과는 달리 얼음입자크기에 따라서는 별 다른 차이를 발견할 수 없었다. 이것은 후술될 고유속의 경우와 비교하여 유동속도가 작은 것에 기인하는 것으로 여겨진다.

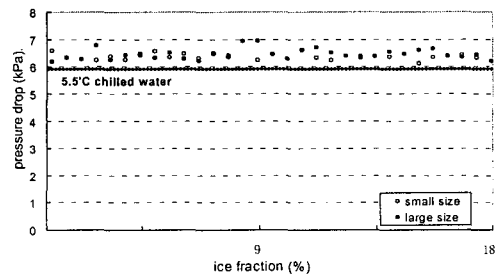


Fig. 7 The effect of particle sizes of ice for pressure drop as a function of ice fraction at water velocity 2.5 m/s ($Re_w = 36,000$).

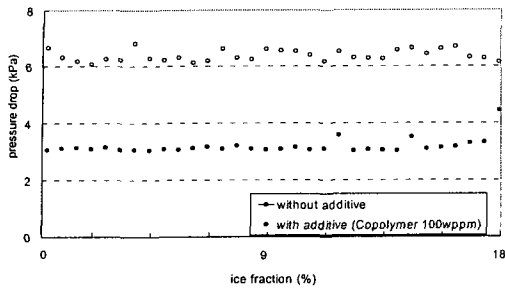


Fig. 8 The effect of drag reduction additive as a function of ice fraction at water velocity, 2.5 m/s ($Re_w = 36,000$) ; mixed size of particle.

Fig. 8에는 아이스슬러리 시스템에서 마찰저항 감소 첨가물을 투입하는 경우 그 효과를 관찰하기 위한 결과이다. 혼합크기의 얼음입자를 사용하는 아이스슬러리에 투입한 결과 앞에서 서술된 냉수 시스템에서의 결과와 유사한 마찰저항감소를 보였다.

Fig. 9에서는 물유속 5.0 m/s 일 때, 동일한 빙분율에서 입자크기에 따른 압력강하를 비교하기 위하여 입자가 큰 경우와 작은 경우를 실험하였다. 두 경우 모두 공통적인 것은 얼음이 모두 녹은 경우, 즉 빙분율 0 인 경우에 비하여 10%전후에서는 압력강하가 크게 감소되는 현상을 볼 수 있으며 이러한 현상은 고체부유물(solid suspension)이 적당량 투입될 때 나타나는 현상으로 플러그 유동(plug flow)이 형성되기 때문이다⁽⁷⁾. 입자가 작은 경우 오히려 5.5°C 냉수시스템의 경우보다도 더 작은 압력강하를 나타내어 아

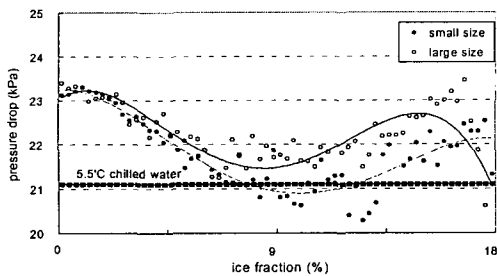


Fig. 9 The effect of particle sizes of ice for pressure drop as a function of ice fraction at water velocity 5.0 m/s ($Re_w = 73,000$).

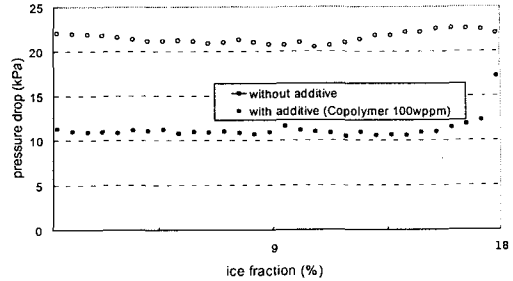


Fig. 10 The effect of drag reduction additive as a function of ice fraction at water velocity, 5.0 m/s ($Re_w = 73,000$) ; mixed size of particle.

이스슬러리 시스템이 적당한 운전조건하에서는 펌핑동력면에서 불리한 점이 없었다. 입자가 큰 경우의 압력강하가 작은 입자의 경우에 비하여 상대적으로 크게 나타나고 있는데 이것은 플러그 유동을 형성하기 위한 조건이 입자가 작은 경우보다 적합하지 않기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 10은 물유속 5.0 m/s일 때 마찰저항감소 첨가물의 아이스슬러리 시스템에 대한 마찰저항 감소효과를 보기 위한 실험의 결과이다. 전체적으로 50%정도의 마찰저항감소 효과를 나타내어 마찰저항감소 첨가물의 적용 적합성을 확인할 수 있다. 빙분율에 따라서도 안정된 마찰저항감소를 보이고 있다.

4.3 기타

그 외에 Guar gum, PAA, (STAC +NaSal.)등은 냉수 시스템에서 마찰저항감소효과가 아주 미약하거나 전혀 없었고, (CTAC +NaSal.)은 냉수 시스템에서 초기에 상당한 효과가 있었으나 매우 급격한 퇴화를 보였다.

본 연구는 폐회로 유동에서 실험시간 경과에 따른 첨가물의 퇴화 경향을 관찰하기 위하여 모노펌프를 사용하였다. 실제 응용에 있어서는 원심펌프를 많이 사용한다는 것을 고려해야 한다. 그러나 실제의 경우는 펌프를 지나는 횡수가 적다는 장점이 있으며 구체적인 정도는 추후 밝혀야 할 문제이다.

5. 결 론

본 연구에서는 지역냉방시스템에서 다량의 유체를 공급하는 펌핑동력을 감소시키기 위한 방안으로 소량의 첨가물에 의한 마찰저항감소현상과 동반되는 열전달감소현상을 연구하였으며 첨가물로는 단일성 고분자, Copolymer, 계면활성제, 및 분해성 고분자를 사용하였다. 이상과 같은 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 기존의 비교적 잘 알려진 첨가물 PAAM보다 Copolymer가 마찰저항감소 효과가 우수하며 퇴화에 대해서도 안정적인 첨가물이다.

(2) 냉수시스템에서 Copolymer와 SDS의 혼합물 100 wppm 수용액에 대하여 적용 조건에 따라 최적의 혼합비율이 존재하였다.

1) 유속 2.5 m/s에서는 Copolymer:SDS=1:1인 경우가 가장 효과적이었으며,

2) 유속 5.0 m/s에서는 SDS를 포함하지 않은 Copolymer만의 경우가 가장 효과적이고 혼합비율 2:1, 1:1, 1:2 순으로 효과적이어서 Copolymer의 농도가 지배적인 인자가 된다.

(3) 분해성 고분자 Xanthan gum의 경우, 초기 마찰저항감소효과는 크지 않지만 퇴화에 잘 견디는 냉방시스템에 적용 가능성 있는 환경친화적 첨가물이다.

(4) 아이스슬러리 시스템에서 고유속의 경우 실용범위인 빙분을 10% 전후에서는 순수한 물로만의 경우에 비하여 압력강하가 오히려 감소되는 현상이 있으며, 펌핑동력면에서 냉수 시스템에 비해 불리한 점이 없다는 것을 알 수 있었다.

(5) 아이스슬러리 시스템에서 고유속의 경우 동일한 빙분율에 대하여 얼음입자가 큰 경우 압력강하가 크게 나타났다.

(6) 아이스슬러리 시스템에서도 Copolymer와 SDS의 혼합첨가물이 큰 마찰저항감소효과를 나타내었다.

이 논문은 1997년도 에너지관리공단의 학술진흥사업에 의한 지원으로 연구된 결과의 일부이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Toms, B. A., 1948, Some observations on the flow of linear polymer solutions through straight tubes at large Reynolds numbers, Proc. 1st Intern. Congr. on Rheology, Vol. 2, North-Holland publishing Co., Amsterdam, pp. 135-141.
2. Virk, P. S., Miceley, H. S., and Smith, K. A., 1970, The ultimate asymptote and mean flow structure in Toms' phenomenon, Trans. of the ASME, pp. 488-493.
3. Tung, T. T., Ng, K. S., and Hartnett, J. P., 1978, Influence of rheological property changes on friction and convection heat transfer in viscoelastic polyacrylamide solution, Proc. 6th Int'l Heat Transfer Conference, Vol. 5, Hemisphere Publishing Co., Washington D. C., pp. 329-333.
4. Kenis, P. R., 1971, Turbulent flow friction reduction effectiveness and hydrodynamic degradation of polysaccharides and synthetic polymers, J. Applied Polymer Science, Vol. 15, pp. 607-618.
5. Choi, U. S., Cho, Y. I., and K. E. Kasza, 1987, Report of Argonne National Laboratory, ANL-87-49.
6. Motier, J. F. and Carrier, A. M., 1990, Drag reduction in fluid flow, Ellis Horwood Ltd., Chichester, England, pp. 197-204.
7. Stepanoff, A. J., 1964, Pumping solid-liquid mixture, Mechanical Eng., Sept., pp. 29-35.

후 기