

계면활성제를 이용한 수평관군 흡수기의 전열촉진

설원실* · 권오경* · 문춘근* · 윤정인**
(2000년 3월 10일 접수)

Heat Transfer Enhancement with Surfactants in Horizontal Bundle Tubes on Absorber

Won Sil Seol, Oh Kyung Kwon, Choon Geun Moon and Jung In Yoon

Key Words: Absorber(흡수기), Enhancement of Heat Transfer(전열촉진), Surfactant(계면활성제), Heat Transfer Coefficient(열전달계수)

Abstract

This research was concerned with the enhancement of heat transfer by surfactant added to the aqueous solution of LiBr. Different horizontal tubes were tested with and without an additive of normal octyl alcohol. The test tubes were a bare tube, floral tube and hydrophilic tube. The additive mass concentration was about 0.05~5.5%. The heat transfer coefficient was measured as a function of solution flow rate for the range of 0.01~0.034 kg/ms. The experimental results were compared with cases without surfactant. The enhancement of heat transfer by Marangoni convection effect generated by the addition of the surfactant is observed in each test tube. The increase of heat transfer coefficient by surfactant addition is about 35~90% for bare tube, 40~70% for the floral tube, 30~50% for the hydrophilic tube and was higher for the cases with smaller a little solution flow rates.

기호설명

c_p	: 비열[kJ/(kg·K)]
d	: 전열관 지름[m]
G	: 질량유량[kg/s]
h	: 대류열전달계수[kW/(m ² ·K)]
L	: 전열관 길이[m]
N	: 산수(플로럴관)
Nu	: 너셀수
P	: 전열관수
Pr	: 프란틀수
Q	: 교환열량[kW]
Re	: 레이놀즈수

T	: 온도[°C]
U	: 총괄열전달계수[kW/(m ² ·K)]
λ	: 열전도도[kW/(m·K)]
Γ	: 용액유량[kg/s]

하첨자

A	: 흡수기
co	: 냉각수
i	: 입구(내부)
lm	: 대수평균
o	: 출구(외부)
s	: 흡수용액

* 부경대학교 대학원 냉동공조공학과

** 회원, 부경대학교 냉동공조공학과

E-mail : yoonji@dolphin.pknu.ac.kr

TEL : (051)620-6446 FAX : (051)620-6446

1. 서론

최근 들어 프레온계 냉매에 의한 지구환경파괴 방지와 여름철 전력수요 경감과 천연가스 소비촉

진 방안의 하나로 공조분야를 중심으로 흡수식 냉난방기의 사용이 적극 권장되고 있으며, 이 분야에 대한 연구개발 또한 활발히 진행되고 있다. 흡수식 냉난방기는 흡수기, 증발기, 응축기, 재생기, 용액열교환기 등으로 구성되며 이들 구성요소 중 흡수기가 차지하는 비중이 제일 커서 전열면적으로는 약 33%, 체적으로는 약 27%를 차지한다.⁽¹⁾ 그러므로 흡수식 냉난방기의 소형·경량화 및 고효율화를 위해서는 흡수기에 대한 특성 파악과 이 부분에 대한 성능개선이 매우 중요하다.

흡수기에는 일반적으로 압력손실로 인한 성능저하가 적은 유하액막식 열교환기를 많이 사용하는데, 흡수기의 고성능화 방법으로는 고성능 전열관의 개발과 적절한 계면활성제를 첨가하는 방법이 있다. 양자 모두 흡수기에서 일어나는 열 및 물질이동을 촉진시켜 흡수기의 성능을 향상시키는 것으로 보고되고 있다.^(2~6) 관련업계에서는 이들 두 가지 방법을 동시에 적용하는 경우도 있지만, 고성능 전열관의 개발은 신규투자를 수반하고 또 생산단가의 상승을 초래하는 경우가 많으므로 주로 계면활성제 첨가에 의한 성능향상을 꾀하는 경우가 많다.

계면활성제 첨가에 의한 성능향상 원인으로는 흡수용액의 표면장력 감소와 마랑고니 대류(marangoni convection)에 의한 계면교란 등으로 주장되고^(7~11) 있으나 아직 정확한 메카니즘은 밝혀져 있지 않다. 그리고 적정 계면활성제 첨가농도에 관한 몇몇 연구가 있기는 하지만 대부분 소형 장치에 의한 것이어서 실제 대형기기에 적용하기는 어렵다. 그러므로 관련업계에서는 대부분 경험에 의존하여 첨가농도를 설정하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 실제 국내에서 사용되고 있는 흡수기의 모델과 유사한 수평관균형 흡수기를 가지는 실험장치를 이용하여 계면활성제 첨가농도에 따른 열전달특성을 정성적 및 정량적으로 평가함으로써 실제 산업현장에서 계면활성제 첨가농도를 결정하는 데 기준이 되는 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

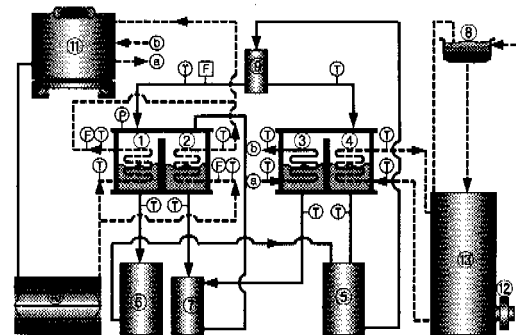
Fig. 1은 본 연구에 사용한 실험장치의 개략을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 장치는 흡수기

(①), 증발기(②), 응축기(③), 재생기(④), 농용액·희용액 탱크(⑤·⑥), 냉매탱크(⑦), 정수두 탱크(⑧), 냉각수 탱크(⑩), 냉각탑(⑪), 히터(⑫) 및 온수탱크(⑬)와 이들을 연결하는 배관으로 구성되어 있으며, 각 열교환기 및 용기류에는 내부를 관찰할 수 있도록 1~3개의 사이트 글라스가 설치되어 있다. 흡수기에는 길이 400mm의 수평관이 6열 8단으로 총 48개가 설치되어 있으며, 흡수기 입구측에는 흡수기에 공급되는 용액펌프의 맥동현상에 의한 용액의 유량의 변화를 방지하게 하기 위해 정수두 탱크를 설치하여 용액흐름을 일정하게 하였고, 배관 및 각종 탱크류는 단열재로 단열되어 있다. 그리고 장치내의 진공을 유지하기 위하여 진공펌프(0.5PS)가 설치되어 있다. 또한 흡수기에는 냉각수를, 증발기에는 냉수를 순환시키기 위하여 물 순환용 펌프가 설치되어 있다. 흡수기, 증발기, 재생기, 응축기 및 탱크류의 물 및 용액 배관의 입·출구에 온도측정을 위한 열전대를 설치하였고 냉각수, 냉수 및 용액의 유량을 측정하기 위하여 플로트식 물 유량계 및 디지털식 전자용액유량계를 설치하였다.

2.2 실험방법

실험은 성능 측정과정과 실험조건 설정과정으로 나누어 배치(batch)식으로 진행하였다.

성능 측정과정은 농용액탱크의 농용액을 용액 펌프로 흡수기 상부에 설치된 트레이를 통하여 흡수기 수평관군 외표면에 유하시켜 액막상으로



⑤ Water flow meter ⑥ Solution flow meter ⑦ Thermo couple ⑧ Pressure gauge

- | | | |
|--------------|------------------------|-----------------------|
| 1 Absorber | 5 Strong solution tank | 9 Steady head tank |
| 2 Evaporator | 6 Weak solution tank | 10 Cooling water tank |
| 3 Condenser | 7 Refrigerant tank | 11 Cooling tower |
| 4 Generator | 8 Expansion tank | 12 Heater |
| | | 13 Hot water tank |

Fig. 1 Experimental apparatus

Table 1 Experimental conditions

Items	Parameters	Conditions
Refrigerant	Evaporating temperature(°C)	6
	Inlet concentration(wt%)	60
LiBr solution	Inlet temperature(°C)	45
	Mass flow rate(kg/ms)	0.01 ~ 0.034
Cooling water	Inlet temperature(°C)	32
	Velocity(m/s)	1.0
Surfactant	n-octanol(ppm)	500 ~ 5500

흐르게 하고, 냉매탱크에 저장된 냉매(물)를 냉매 펌프로 증발기 전열관 외표면에 흐르게 하였으며, 증발기 전열관 내부에는 냉수를 흐르게 하여 냉각부하를 주었다. 증발기에서 증발한 냉매증기는 증발기와 흡수기 사이의 엘리미네이트를 거쳐 흡수기로 유입되며, 증발하지 못한 냉매는 다시 냉매탱크로 유입되게 하였다. 흡수기는 약 7mmHg의 진공압력을 유지하고 있으며 용액온도는 용액농도에 따른 포화온도에 맞추어 공급하였다. 농용액은 흡수기의 수평관군을 유하하면서 증발기에서 발생한 냉매증기를 흡수한다. 이때 흡수기 입구의 용액유량, 흡수기 입구 및 출구의 용액온도, 흡수기 출구의 용액농도를 각각 측정하였다. 농용액을 흡수기에 공급할 때에는 흡수기 입구측에 정수두 탱크를 설치하여 유량이 일정하게 흐르도록 하였으며, 여분의 농용액은 바이패스관을 통하여 농용액 탱크로 되돌아가게 하였다. 냉매를 흡수하여 농도가 묽어진 회용액은 회용액 탱크에 저장되며, 흡수기 출구의 샘플링 밸브에서 회용액을 취출하여 용액농도를 측정하였다. 냉각수 탱크의 냉각수는 펌프에 의해 증발기 및 흡수기로 공급되며, 흡수기에 공급된 냉각수는 전열관내를 흐르면서 흡수용액과 열교환한다. 흡수기에서 열을 얻은 냉각수와 증발기에서 열을 빼앗긴 냉수는 출구에서 합쳐져 냉각탑에서 다시 적정온도로 냉각된다. 이때 흡수기에 흐르는 냉각수의 유량 및 입·출구 온도를 측정하여 이것으로부터 냉각수로 전달되는 열량을 계산하였다.

실험 조건설정 과정은 회용액탱크의 회용액을 용액펌프로 농용액 탱크로 이송시킨다. 모든 회용액이 농용액탱크로 이송되면 농용액펌프로 농용액탱크에 고인 회용액을 재생기에 순환시켜 온수에 의해 가열되도록 하였으며, 재생기 출구측에 있는 샘플링 밸브에서 용액을 수시로 샘플링하여 적정농도가 될 때까지 용액을 재생기로 계속 순환시켜 재생하였다. 온수에 의해 가열된 회용액은 냉매가 분리되어 농용액이 되고, 분리된 냉매는 응축기에서 냉각탑에서 공급되는 냉각수에 의해 냉각·응축되어 냉매탱크에 저장되게 된다. 응축기로 유입되는 냉각수는 냉각수 펌프에 의해 장치 내를 순환한 후 다시 냉각탑으로 보내져 냉각된다. 온수는 전기히터로 가열하며 써모스탯으로 온도를 측정하여 조정한다. 일정 농도로 맞추어진 농용액은 용액펌프로 온수 및 냉각수가 흐르는 열교환기를 순환하면서 실험조건에 적합한 온도로 맞추어져 농용액탱크에 저장된다. 또한 냉매탱크 내의 냉매 증기압이 증발기 내의 압력에 영향을 미치는 것을 방지하기 위하여 칠러를 이용하여 냉매 탱크내의 냉매를 실험 압력에 상당하는 포화온도까지 냉각하였다.

계면활성제는 500ppm, 1500ppm, 2500ppm, 3500ppm, 4500ppm, 5500ppm 총 6가지 농도에 대하여 실험하였다.

본 연구에 사용된 전열관은 평활관, 폴리릴관 및 친수성 코팅관 3종류이며 실험조건은 Table 1과 같다. 평활관은 현재 시중에 일반적으로 사용되고 있는 외경 15.88mm, 내경 14.05mm의 것을 사용하였으며, 폴리릴관은 외경 15.88mm, 내경 13.88mm, 골수 11개의 것을 사용하였다. 친수성 코팅관은 퍼짐성을 향상시키기 위해 기존의 평활관 표면을 플라즈마 처리하여 친수성을 증대시킨 것으로 일종의 표면개질 동관이며 관의 규격은 평활관과 동일하다.

용액의 농도는 비중계와 굴절율계(ATAGO R5000)를 이용하여 측정하였으며 측정오차는 $\pm 0.2\%$ 이내에 있었다. 또한 온도 측정에 사용된 C-C열전대 온도보정 결과 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 범위내에 있었으며, 계내 진공압 측정에는 MKS(128AA-00100D)를 사용하였으며 측정오차는 $\pm 0.25\%$ 이내이다.

Fig. 2와 Fig. 3은 본 실험에 사용된 전열관의 개략도와 실제 사진을 나타낸 것이다.

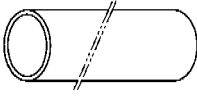

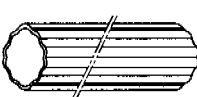
Type	Appearance	Dimensions
Bare tube		$d_o=15.88$ $d_i=14.05$ $L=400$
Hydrophilic tube		$d_o=15.88$ $d_i=14.05$ $L=400$
Floral tube		$d_o=15.88$ $d_i=13.88$ $N=11$ $L=400$

Fig. 2 Specification of test tubes

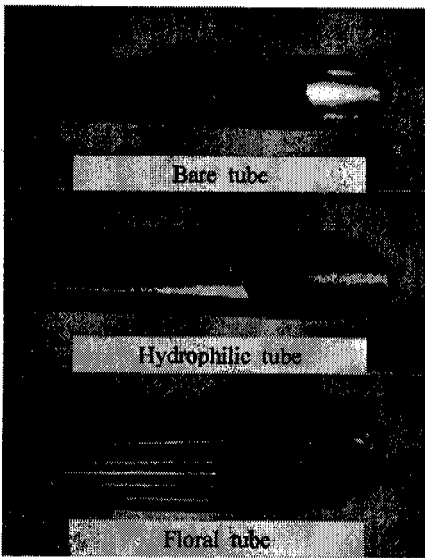


Fig. 3 Photo of test tubes

2.3 열전달계수의 산출

열교환기의 대수평균온도차 ΔT_{lm} 은 식 (1)과 같이 정의하였다.

$$\Delta T_{lm} = \frac{\{(T_{Asi} - T_{Acoo}) - (T_{Aso} - T_{Acoi})\}}{\ln\{(T_{Asi} - T_{Acoo}) / (T_{Aso} - T_{Acoi})\}} \quad (1)$$

냉각수로 전달되는 열량 Q는 식 (2)으로부터 구하였다.

$$\begin{aligned} Q &= G_{co} \cdot c_{pco} \cdot (T_{coo} - T_{coi}) \\ &= U \cdot A_T \cdot \Delta T_{lm} \end{aligned} \quad (2)$$

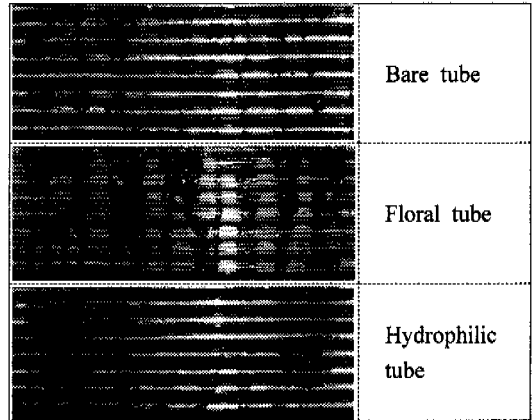


Fig. 4 Photograph of flow pattern

여기서, $A_T = \pi \cdot d_o \cdot L_T$ 로 계산한다.

관내의 냉각수측 대류열전달계수 h_i 는 평활관의 난류 열전달계수를 구하는 데 일반적으로 많이 사용되는 다음의 Dittus-Boelter식을 이용하여 산출하였다.

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} = \frac{h_i L}{\lambda} \quad (3)$$

흡수용액측의 관외열전달계수 h_o 는 식 (4)로부터 구할 수 있으며 이때 흡수관 벽의 열저항은 무시하였다.

$$h_o = 1 / \{1/U - d_o / (d_i \cdot h_i)\} \quad (4)$$

그리고 단위 길이 당 액막유량 Γ_s 는 식 (5)와 같이 정의하였다.

$$\Gamma_s = G_s / (2 \cdot L \cdot P) \quad (5)$$

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 가시화에 의한 접수율 검토

Fig. 4는 대기압 상태에서 물-잉크 혼합물에 의해 각 흡수전열관의 접수 실험에서 유량이 30/h 일 경우를 나타내고 있으며 접수면적을 유량에 따라 관찰하여 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 평활관과 친수성 코팅관(hydrophilic tube)을 비교하여 보면, 유량이 적은 구간(15/h)에서는 친수성

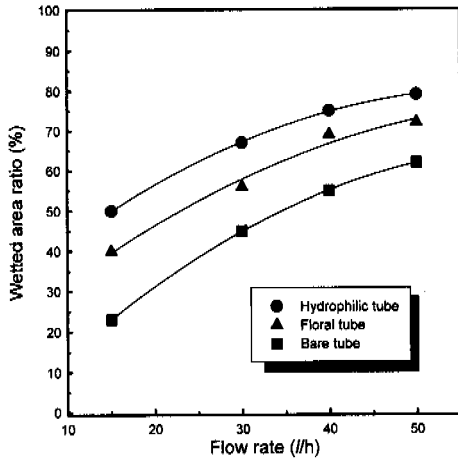


Fig. 5 The variation of wetted area ratio on flow rate

코팅관이 약 110% 정도 접수율이 높지만 유량이 증가할수록 증가율이 둔화되어 유량 50l/h에서는 30% 정도 증가하는 것으로 관찰되었다. 그리고 플로럴관(floral tube)은 평활관보다 유량감소에 따라 20~70% 정도 접수율이 높은 것으로 관찰되었다. 이 실험으로 친수성 코팅관이 퍼짐성에 있어서는 다른 관보다 우수하다는 것을 알 수 있다.

3.2 흡수전열관의 전열특성

Fig. 6은 용액유량의 변화에 따른 각 흡수전열관의 열전달특성을 계면활성제를 첨가한 경우와 첨가하지 않은 경우에 대하여 나타낸 것이다. 실험에 사용한 전열관은 평활관, 플로럴관, 코팅관 3종류이며 실험시에는 흡수기에 공급되는 용액의 온도는 흡수기내 압력과 평형조건이 되게 설정하였으며 계면활성제 첨가량은 3500ppm이다.

각 흡수전열관 모두 실험범위 내에서 용액유량이 증가함에 따라 관외열전달계수가 증가하고 있음을 알 수 있다. 이것은 용액유량이 증가할수록 접수면적이 증가하고 또 액막의 교란효과가 증가하기 때문이라 생각된다.

계면활성제를 첨가하지 않은 경우 전열관별로 관외열전달계수를 비교하여 보면, 용액유량 0.01kg/ms에서 친수성 코팅관이 평활관보다 약 35% 정도 성능이 우수하였지만 0.034kg/ms에서는 10% 정도의 차이만 나타내고 있다. 이것으로부터 전열관에 친수성 코팅을 하는 것은 용액유량이 적은 영역에서는 효과가 높지만 용액유량이 증가

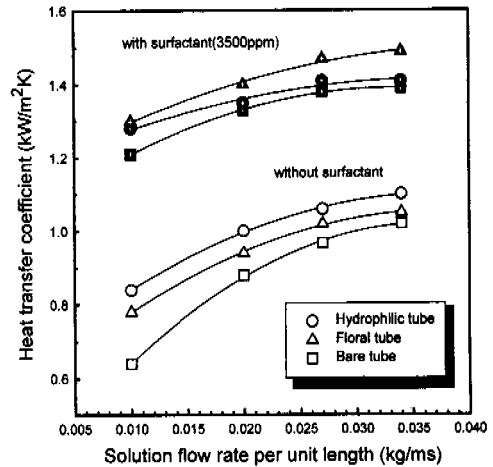


Fig. 6 Comparison of heat transfer coefficients for three types of tubes

하여 감에 따라 효과가 줄어든다는 것을 알 수 있다. 플로럴관(floral tube)은 용액유량에 따라 5~25% 정도의 증가가 있었으며 이것 또한 용액 유량이 증가함에 따라 증가의 정도는 감소하였다. 이것은 용액유량이 적은 영역에서는 관의 요철이 용액의 퍼짐성이나 용액 액막표면 교란에 많은 영향을 미치나 용액유량이 증가함에 따라 그 영향이 줄어들기 때문이라 생각된다.

계면활성제를 첨가함에 따른 전열관 종류별 관외열전달계수의 변화는, 평활관의 경우 약 35~90%, 플로럴관의 경우 약 40~70%, 코팅관의 경우 약 30~50% 정도의 증가가 있었으며 모두 용액유량이 적은 영역이 많은 영역보다 증가율이 높았다. 그리고 계면활성제를 첨가하지 않은 경우에는 친수성 코팅관이 플로럴관보다 관외열전달계수가 높게 나타났으나 계면활성제를 첨가(3500ppm)한 후에는 플로럴관이 더 높게 나타났다.

Fig. 7은 용액 유량이 0.027kg/ms일 때 계면활성제 첨가농도에 따른 각 흡수전열관의 관외 열전달계수 변화를 나타낸 것이다. 계면활성제 첨가농도는 실제 흡수식냉수기 제조회사 따라 다소 차이는 있지만, 2000~3000ppm 정도의 농도를 첨가하고 있음을 감안하여 500ppm, 1500ppm, 2500ppm, 3500ppm, 4500ppm, 5500ppm 총 6가지 농도에 대하여 실험하였다. 3종류 전열관 모두 계면활성제 첨가농도 3500ppm까지는 첨가농도가 증가함에 따라 관외 열전달계수가 증가하는 경향

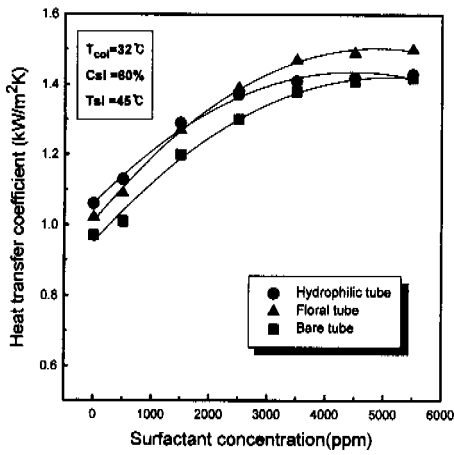


Fig. 7 Effect of surfactant concentration on heat transfer coefficient

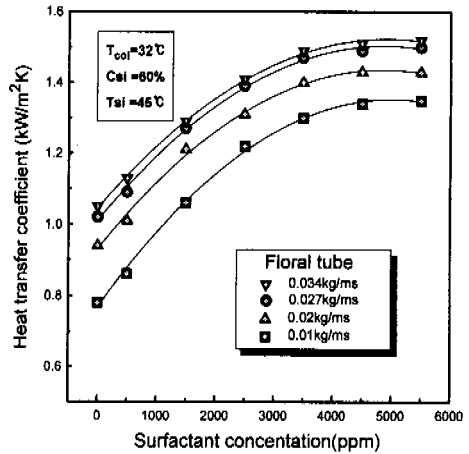


Fig. 9 Effect of surfactant concentration for floral tube

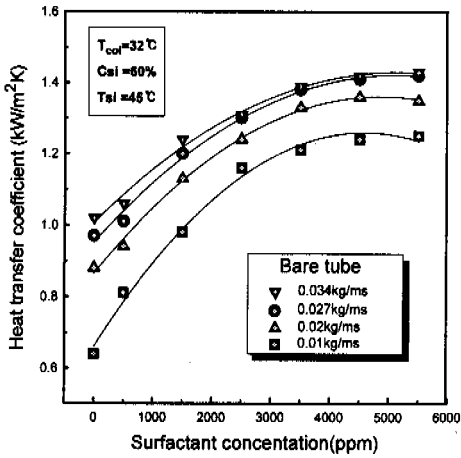


Fig. 8 Effect of surfactant concentration for bare tube

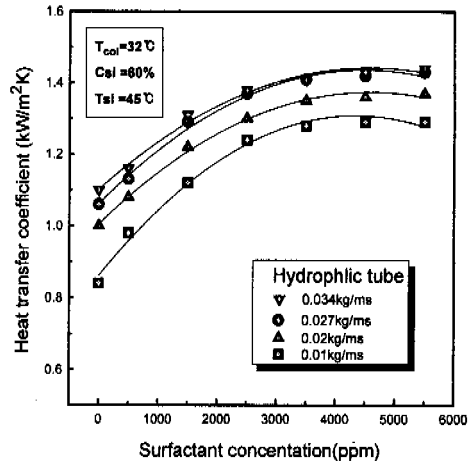


Fig. 10 Effect of surfactant concentration for hydrophilic tube

을 보이고 있으나 3500ppm 이상에서는 거의 변화가 없는 경향을 보이고 있다. 전열관 종류별로는 첨가농도 1500ppm 이하에는 친수성 코팅관이 플로럴관에 비해 관외열전달계수가 높았으나 1500ppm 이상에서는 플로럴관이 더 높게 되는 경향을 나타낸다. 그리고 친수성 코팅관의 경우에는 첨가농도가 증가할수록 평활관의 차이가 적어져서 3500ppm 이상부터는 거의 같거나 조금 높은 값을 보이고 있다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 계면활성제를 첨가하지 않았거나 첨가농도가 적은 범위에서는 친수성 코팅이 용액의 퍼짐성

향상에 도움이 되지만 첨가농도가 많아지면 친수성 코팅에 의한 용액 퍼짐 효과보다는 계면활성제에 의한 퍼짐 효과가 지배적 영향을 미치기 때문이라 생각된다.

Fig. 8, Fig. 9 및 Fig. 10은 평활관, 플로럴, 및 코팅관 3가지 전열관에 대해 용액유량별로 계면활성제 첨가농도에 따른 관외열전달계수의 변화를 나타낸 것이다. 용액유량이 0.01kg/ms에서 0.02kg/ms, 0.027kg/ms, 0.034kg/ms로 증가하여 값에 따라 관외열전달계수의 증가율은 평활관의 경

우는 7%, 5%, 1%로, 플로럴관의 경우는 8%, 6%, 2%로, 코팅관의 경우는 5%, 4%, 1%로 각각 감소하였다. 이것으로부터 계면활성제 첨가 효과는 용액유량이 적을수록 첨가효과가 높다는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

평활관, 플로럴관, 및 친수성 코팅관의 3종류 흡수기용 전열관에 대해 가시화장치를 이용한 집수율 측정과 계면활성제 첨가농도에 따른 열전달 특성에 대하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 3종류의 전열관 중 친수성 코팅관이 퍼짐성이 가장 우수하여 유량에 따라 평활관보다는 4~73%, 플로럴관보다는 10~22% 정도 집수율이 높았다.

(2) 계면활성제를 첨가하지 않은 경우의 관외열전달계수는 친수성 코팅관이 가장 우수하여 유량에 따라 평활관보다는 10%~35%, 플로럴관보다는 5~25% 정도가 높았다.

(3) 전열관의 종류에 관계없이 계면활성제 첨가량 3500ppm 이상에서는 관외열전달계수의 증가가 극히 완만하였다. 이것은 계면활성제 첨가량을 결정하는 데 중요한 기준이 될 것으로 생각된다.

(4) 계면활성제를 첨가한 경우 관외열전달계수는 플로럴관이 가장 우수하였다.

(5) 계면활성제 첨가에 의한 관외열전달계수의 증가는 평활관의 경우 약 35~90%, 플로럴관 약 40~70%, 코팅관 약 30~50% 정도이며 용액유량이 많은 영역보다는 적은 영역에서 더 증가율이 높았다.

참고문헌

- (1) Inoue, N.U., 1988, "Practical Studies on Absorbers in Japan," *Refrigeration Engineering Division EBARA Corporation*, pp. 18~19.
- (2) 川又治, 大谷忠男, 石塚伸明, 宮内徳雄, 1985, "吸收冷凍機の吸収器用高性能伝熱管の開発," *日本電線*, No. 8, p. 577.
- (3) 古川雅裕, 佐木直榮, 金子敏之, 野世溪精, 1993, "吸收冷水機の吸収器用伝熱促進管," *日本冷凍協會論文集*, Vol. 10, No. 2, pp. 219~226.
- (4) 永岡義一, 西山教之, 鯉坂和浩, 中村誠, 1987, "吸收冷水機の高性能に関する研究開発(第3報)," Vol. 10, No. 2, pp. 219~226.
- (5) Hoffmann, L., 1996, "Experimental Investigation of Heat Transfer in Horizontal Tube Falling Film Absorber with Aqueous Solutions of LiBr Solution Without Surfactants," *Int J. Refrig*, Vol 19, No. 5, pp. 331~341.
- (6) Yoon, J. I., et al., 1999, "The Effect of Surfactant in the Absorptive and Generative Processes," *KSME International Journal*, Vol. 13, No. 3, pp. 264~272
- (7) 윤정인, 柏木孝夫, 1994, "스프링 삼입형 유하액막식 흡수기의 열 및 물질전달 특성," *대한기계학회논문집*, 제19권, 제1호, pp. 1501~1509.
- (8) 설원실, 권오경, 윤정인, 1998, "LiBr/H₂O계 흡수기의 흡수촉진에 관한 실험적 연구," *공기 조화·냉동공학논문집*, Vol. 10, No. 5, pp. 581~588.
- (9) 김병주, 이찬우, 1998, "수직관내 리튬브로마이드 수용액막의 흡수과정에 대한 비흡수가스의 영향(1) -실험적 연구-", *대한기계학회논문집 B권*, 제22권, 제4호, pp. 489~498.
- (10) Kashiwagi, T., 1985, "The Activity of Surfactant in High-Performance Absorber and Absorption Enhancement," *Refrigeration*, Vol. 60, No. 687, pp. 72~79.
- (11) Kim, K. J., Berman, N. S., and Wood, B. D., 1993, "Experimental Investigation of Enhanced Heat and Mass Transfer Mechanisms Using Additives for Vertical Falling Film Absorber," *International Absorption Heat Pump Conference*, ASME, pp. 41~47.