

신작동매체를 이용한 헬리컬 흡수기의 열물질전달 특성

권오경*, 임종극*, 윤정인**

Characteristic of Heat and Mass Transfer on Helical Absorber Using New Working Fluid

Oh Kyung Kwon, Jong Keuk Lim and Jung In Yoon

Key Words : Absorption Chiller/Heater, Helical Absorber, Heat and Mass Flux, LiBr Solution
LiBr+LiI+LiNO₃+LiCl Solution

Abstract

An experimental study has been performed regarding heat and mass transfer in a falling film absorber of domestic small-sized absorption chiller/heater. Components were concentrically arranged in cylindrical form : from the center, with a series of low temperature generator, absorber and evaporator. The arrangement of such helical-typed heat exchangers allows to make the system more compact as compared to conventional one. Experimental measurements were conducted with a helical absorber using LiBr+LiI+LiNO₃+LiCl and LiBr solutions. As a result, the heat and mass flux performance of LiBr+LiI+LiNO₃+LiCl solution shows the tendency of 2~5% increase. Therefore, LiBr+LiI+LiNO₃+LiCl solution can be taken consideration into applying to small-sized absorption chiller/heater because of using without crystal through high concentration as 4wt% comparing with LiBr solution.

1. 서론

흡수식 냉난방기는 하절기의 전력수요를 경감시킬 수 있고 오존층 파괴의 주요인인 CFC를 사용하지 않는 장점이 있어서 대형건물의 냉난방에 널리 사용되고 있으며, 최근에는 가정용으로 소형 흡수식 냉난방기를 개발하려는 노력이 활발하게 진행되고 있다.

흡수식 시스템은 4개의 주요 구성기기(재생기, 응축기, 증발기, 흡수기)로 이루어져 있으며, 이 중에서 흡수제를 이용하여 증발기에서 발생된 냉매증기를 흡수하는 흡수기는 흡수식 냉난방기의

총전열면적 중 약 33%를 차지하고 체적은 약 27%를 차지하며, 전체 성능에 미치는 영향이 매우 큰 중요한 구성기기이다⁽¹⁻⁴⁾. 그러나 흡수기의 중요성에도 불구하고 흡수식 시스템중 흡수기를 제외한 주요 구성기기는 이미 소형화, 경량화 된 반면 흡수기의 구조 및 크기는 흡수기 내부의 흡수현상 및 유동의 복잡성과 흡수기구(mechanism)에 아직까지 별다른 개선없이 사용되고 있다. 따라서 전체시스템의 소형화, 고성능화, 그리고 효율적인 설계를 위해 흡수기내의 유동 및 열전달 현상을 파악하고 흡수현상을 예측하기 위한 연구가 필수적이다.

가정용 소형 흡수식 냉난방기 개발을 위해서는 현재 중·대형 흡수식 냉난방기에 사용되는 수평전열관군 방식으로는 구조상 기기의 크기 및 중량을 소형화 하는데 한계가 있다고 생각되어 이와 같은 문제점을 해결하기 위한 방안으로 고온 재생기 및 저온재생기가 돔(dome)형태이고 저온 재생기 외부에 헬리컬 형태로 흡수기 및 증발기

* 회원, 부경대학교 대학원 냉동공조공학과

** 회원, 부경대학교 냉동공조공학과

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

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

를 배치시킨 방식의 시스템 개발이 필수이다. 이러한 관점에서 채택하게 된 것이 헬리컬 형태의 흡수 열교환기이다.

본 논문에서는 가정용 소형 흡수식 냉난방기의 개발을 위한 연구로 헬리컬 흡수기의 열 및 물질 전달에 관한 특성을 실험적으로 평가하였다. 실험에 사용된 용액은 국내에서 개발되어⁽⁵⁾ 4wt% 정도의 결정완화가 있는 LiBr+LiI+LiNO₃+LiCl(몰비 5:1:1:2)과 기존 LiBr 수용액을 이용하여 성능을 비교평가하고 설계자료를 도출함으로써 궁극적으로 가정용 소형 흡수식 냉난방기의 개발 및 고성능화를 위한 기초 설계자료를 제공하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치의 구성 및 방법

Fig. 1은 실험장치의 개략도를 나타낸 것으로 흡수기, 증발기/응축기, 재생기/농축액탱크, 희용액탱크, 냉매회수탱크, 계측부 및 이들을 연결하는 배관으로 구성되어 있다. 이 장치는 증발기/응축기의 역할도 할 수 있는 특징을 갖고 있으며, 재생과정에서는 응축기, 흡수과정에서는 증발기의 역할을 하게 된다.

Table 1은 본 실험에 사용된 실험조건을 나타낸 것이다. 흡수기는 흡수현상의 가시화를 위해 케이스는 아크릴을 사용하였으며 상부플랜지, 흡수열전달관 본체, 하부플랜지로 구성되어 있다. 상부플랜지, 본체 및 하부플랜지는 O링을 이용하여 볼트로 체결하였으며, 상하부 플랜지는 SUS304로 제작하였다. 흡수기내 용액 분배는 용액의 모세관력에 의하여 트레이를 통해서 용액을 상부에서 하부로 분배되도록 하였다. 트레이 직경은 238 mm, 노즐의 수량은 38개이다. 실험에 사용된 헬리컬 흡수기는 외경 15.88 mm, 두께 1.0 mm, 코일직경 236 mm, 길이 7,420 mm인 평활 동관으로 제작되었으며, 상부에는 저압의 압력을 측정할 수 있는 진공용 디지털압력계를 설치하였다. 흡수기와 연결된 증발기는 흡수기의 경우와 마찬가지로 아크릴과 플랜지를 이용하여 체결하였으며 증발관의 외부로 흐르는 냉매는 트레이를 통해서 상부에서 하부로 분배되도록 하였다. 증발관은 외경 15.88 mm, 두께 1.0 mm, 코일 직경 238 mm, 1열 7단의 동관으로 제작되어 있다.

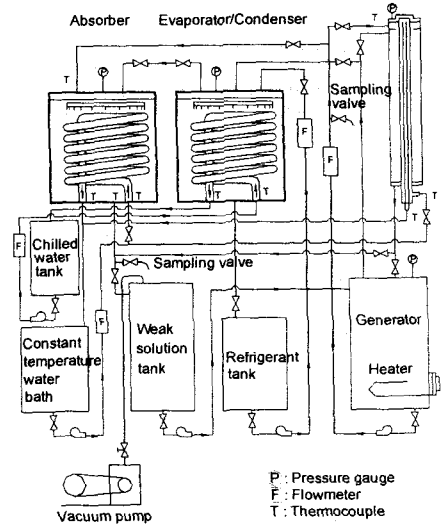


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

재생기는 체적이 32리터인 SUS304의 강성용기로 제작되었다. 흡수용액의 농도를 높이기 위하여 수용액 증발용의 가열용 히터(2kW)가 재생기의 하부에 설치되어 있고 용액의 온도를 조절하기 위하여 온도조절기와 연결되어 있다.

실험방법은 배치식(batch type)으로 흡수용액의 재생과정과 흡수과정으로 나누어 실시하였으며, 실험시작전 불응축가스로 인한 수증기 흡수저하를 방지하기 위하여 시험시작전 진공펌프(0.5PS)로 시험장치를 3mmHg이하로 진공을 유지한 후 실험을 시작하였다. 재생과정에서는 응축기내의 압력을 감압시킨 상태에서 그 압력에 상당하는 포화온도이하의 냉각수를 응축기내에 순환시킨다. 그후 재생기내의 히터에 의해 용액을 가열하여 발생한 냉매증기는 응축기로 유입하여 응축기내에 흐르는 냉각수로 응축시켜 냉매탱크로 보낸다. 재생기내 용액의 농도는 샘플링하여 굴절률계를 통하여 용액의 온도와 굴절율을 측정하여 구하였다. 용액의 농도는 수시로 샘플링하여 실험농도가 되었을 때 가열을 정지하고 실험조건 온도도 될 때까지 용액을 냉각시킨다.

흡수과정의 실험은 증발기의 냉매온도를 냉수 순환기에 의해 7~8℃에 상당하는 포화온도까지 강하시켜 냉매를 흘려주면 냉매는 관내를 흐르는 냉수로부터 증발잠열을 빼앗아 증발하고 발생한

Table 1 Experimental conditions

Investigated conditions		LiBr	New solution
Pressure of absorber (mmHg)		8± 0.5	8± 0.5
Solution	Concentration(wt%)	57, 60	58, 61, 64
	Temperature(℃)	40~50	45~59
	Mass flow rate(kg/ms)	0.01~0.04	0.01~0.04
Cooling water	Temperature(℃)	30, 35	30, 35
	Mass flow rate(kg/h)	420~960	420~960

냉매증기는 흡수기내로 들어간다. 이때 재생기의 농용액은 소정의 온도 및 농도로 유지되어 있으며, 용액펌프에 의해 흡수기 상부헤더에 유입시키면 내부의 트레이에 장착된 노즐을 통해서 전열관의 외부표면을 따라서 유하하면서 증발기로부터 유입하는 냉매증기를 흡수하고 농도가 저하한다. 용액의 유량은 부자식 유량계의 니들밸브로 조절하고, 용액의 흡수기 입·출구온도는 흡수기내 온도 및 압력을 관찰하여 정상상태에 도달하였을 때 상·하부에 부착한 열전대에 의해서 데이터 로그에서 측정하며 유하한 용액은 회용액탱크로 돌아간다. 출구의 용액농도는 회용액탱크로 들어가기전 샘플링트랩에서 전술한 방법에 의해서 측정하였다.

2.2 열 및 물질전달에 대한 해석

냉각수가 얻은 열량 Q 는 총괄열전달계수 U , 관외측의 열전달면적 A_o 및 대수평균온도차 ΔT_{lm} 의 함수로써 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = \dot{m}_c \cdot c_{p,c} \cdot (T_{c,out} - T_{c,in}) = U \cdot A_o \cdot \Delta T_{lm} \quad (1)$$

식 (1)에서 관외측의 열전달면적 A_o 및 대수평균온도차 ΔT_{lm} 는 식 (2)와 식 (3)으로부터 구한다.

$$A_o = \pi d_o L \quad (2)$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{s,in} - T_{c,out}) - (T_{s,out} - T_{c,in})}{\ln(T_{s,in} - T_{c,out}) / (T_{s,out} - T_{c,in})} \quad (3)$$

관내의 냉각수측 열전달계수 h_i 는 Yang⁽⁶⁾이 제시한 헬리컬 코일관의 난류열전달계수를 구하는 대류열전달식을 사용하였다.

$$h_i = 0.023 \frac{\lambda_c}{d_i} Re_c^{0.8} Pr_c^{0.4} \left[1 + 82.4 \left(\frac{d_i}{d_{coil}} \right)^3 \right] \quad (4)$$

관외의 흡수용액측 열전달계수 h_o 는 식 (5)로부터 구하였으며, 전열관벽의 열저항은 무시하였다.

$$h_o = \left[\frac{1}{U} - \frac{d_o}{d_i} \cdot \frac{1}{h_i} \right]^{-1} \quad (5)$$

전열관 표면위를 흘러내리는 단위길이당 액막 유량 Γ ($kg/m \cdot s$)은 식 (6)과 같이 나타내었다.

$$\Gamma = \dot{m}_s / 2\pi d_{coil} \quad (6)$$

흡수과정중 흡수되는 수증기의 흡수율(kg/s)은 수용액의 질량보존으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{m}_v = \dot{m}_{s,in} \left(\frac{C_{in}}{C_{out}} - 1 \right) \quad (7)$$

흡수과정에서의 물질전달계수는 식 (5.13)의 식을 사용하였다.

$$\beta = \frac{\dot{m}_v}{\rho_m \cdot \Delta C_{lm} \cdot A} \quad (8)$$

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2와 3은 냉각수유량의 증가에 따른 열전달량의 변화 및 냉매증기 흡수량의 변화를 나타낸 것이다. LiBr과 LiBr+LiI+LiNO₃+LiCl의 용액유량은 $\Gamma = 0.0288$ 로 일정하게 고정하였으며, 냉각수유량이 증가함에 따라 열전달량 및 흡수량은 점차 증가되는 것을 알 수 있었다. 이것은 냉각수유량의 증가에 따라 흡수기 관내의 열전달률을 촉진시키므로 관외측이 가지고있는 흡수열이 벽면을

통하여 많이 제거되기 때문이라 생각된다. 그러나 냉각수유량이 일정량 이상이 되면 증가율은 용액과의 열교환능력이 한계에 다달아서 열전달량 및 증기흡수율 모두 둔화됨을 알 수 있다. 또한 기준조건에서 LiBr+LiI+LiNO₃+LiCl 수용액이 LiBr수용액보다 같은 냉각수유량에서 열전달량 및 증기흡수율이 크게 나타났다. 본 실험범위내에서의 냉각수 유량은 열전달량 및 증기흡수율의 증가율과 전열관의 내구성 및 펌프동력 등을 감안하여 780kg/h(유속 1.43m/s)로 설정하여 이후의 실험을 수행하였다.

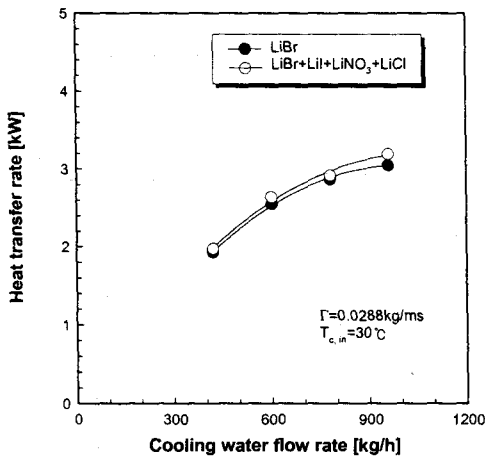


Fig. 2 Effect of cooling water flow rate on heat transfer rate.

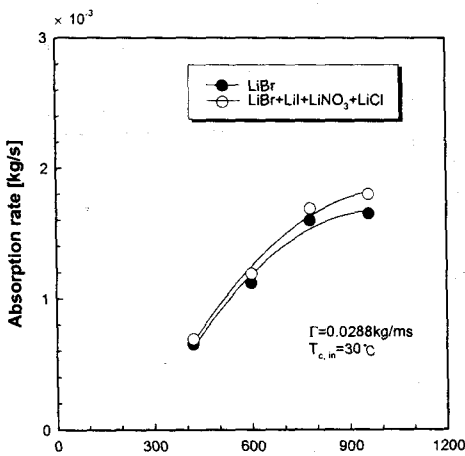


Fig. 3 Effect of cooling water flow rate on vapor absorption rate.

Fig. 4는 냉각수 입구온도를 변화시켰을 때 단위길이당 액막유량에 따른 열유속을 나타낸 것이다. 냉각수 입구온도 30°C인 경우가 35°C보다 흡수기에서의 열유속이 커지는 것을 알 수 있다. 이는 냉각수 입구온도가 낮은 경우일수록 흡수기에 유입되는 흡수용액과의 온도차가 크므로 흡수용액으로부터 냉각수측으로의 열전달이 활발히 이루어지기 때문이다. 한편, 흡수용액의 액막유량이 증가할수록 흡수기에서의 열유속이 증가하고 있음을 볼 수 있는데, 이는 흡수용액의 액막유량의 증가에 따른 열용량이 커지기 때문이라 판단

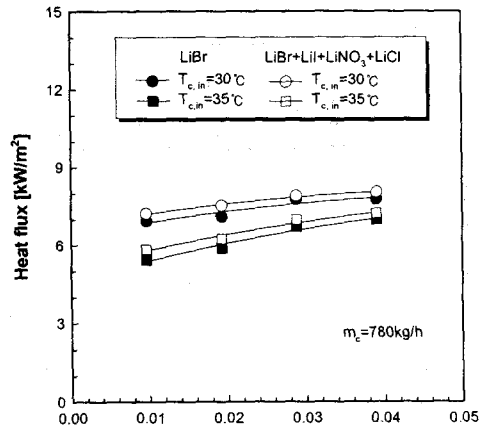


Fig. 4 Effect of cooling water temperatures on heat flux.

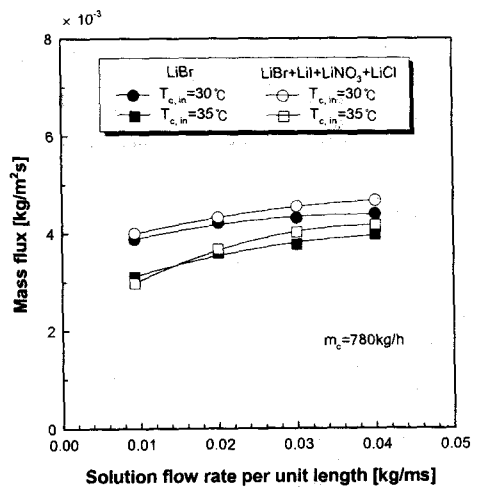


Fig. 5 Effect of cooling water temperatures on mass flux.

된다. 냉각수온도에 따라 LiBr+Li+LiNO₃+LiCl 수용액이 LiBr수용액보다 같은 냉각수온도에서 열유속이 크게 나타났다.

Fig. 5는 냉각수 입구온도를 변화시켰을 때 단위길이당 액막유량에 따른 질량유속을 나타낸 것이다. 질량유속 역시 열유속의 경향처럼 액막유량이 증가함에 따라 질량유속은 증가하였다. 또한 냉각수 입구온도 30℃인 경우가 35℃보다 질량유속이 커지는 것을 알 수 있다. 이것은 냉각수온도가 높을수록 냉각수의 냉각능력이 떨어져 흡수용액의 포화압력을 향상시키는 결과를 가져와 흡수할 수 있는 구동력이 떨어지기 때문에 냉

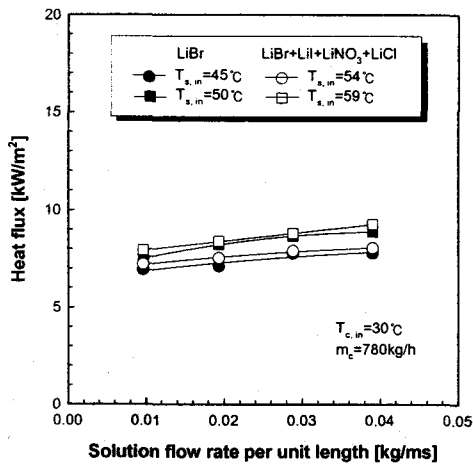


Fig. 6 Effect of solution temperatures on heat flux.

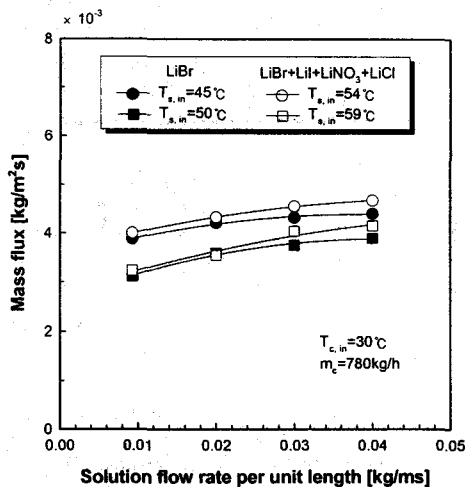


Fig. 7 Effect of solution temperatures on mass flux.

각수온도가 낮은 경우에 질량유속이 더 큰 것으로 생각된다.

Fig. 6은 용액 입구온도를 변화시켰을 때 단위 길이당 액막유량에 따른 열유속을 나타낸 것이다. 액막유량이 증가함에 따라 열유속은 증가하였으며, 용액온도가 과열상태인 경우가 평형상태인 경우보다 열유속이 크게 나타났다. 이것은 냉각수온도가 일정한 경우에 흡수용액온도와 냉각수온도의 차가 클수록 열유속이 증대하기 때문이다. 또한 동일한 냉각수온도조건에서는 용액입구온도가 높은 경우에 냉매증기가 흡수용액에 흡수될 때 발생하는 잠열 뿐만 아니라 현열에 의한

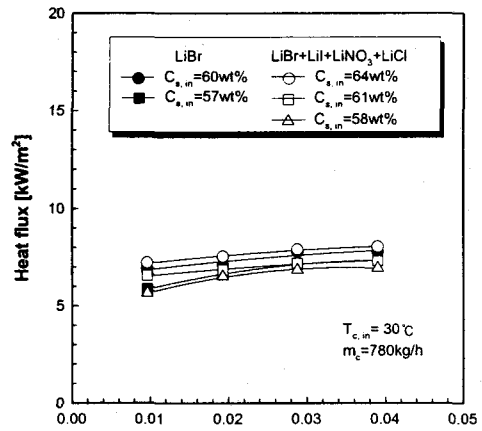


Fig. 8 Effect of solution concentration on heat flux.

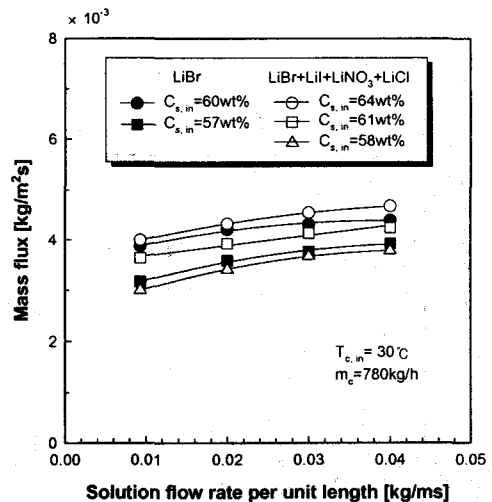


Fig. 9 Effect of solution concentration on mass flux.

열교환량도 있으므로 열유속 자체는 용액온도가 과열상태인 경우가 평형상태인 경우보다 크게 나타났으며, $\text{LiBr}+\text{LiI}+\text{LiNO}_3+\text{LiCl}$ 수용액의 경우가 LiBr 수용액보다 용액온도의 영향이 더 큼을 알 수 있다.

Fig. 7은 용액 입구온도를 변화시켰을 때 단위 길이당 액막유량에 따른 질량유속을 나타낸 것이다. 액막유량이 증가함에 따라 질량유속은 증가하고 있으며, 열유속의 경향과는 반대로 용액온도가 평형상태인 경우가 과열상태인 경우보다 질량유속이 크게 나타났다. 이것은 용액온도가 과열상태인 경우에는 흡수용액의 포화압력이 상승하기 때문에 유입초기에 흡수용액이 잠시 증발이 일어나면서 흡수로 전환하는 데는 어느 정도의 시간 및 구간이 소요되므로 결국 흡수기간 및 흡수구간이 평형상태에 비해 감소하기 때문에 질량유속이 감소하는 것으로 판단된다.

Fig. 8은 용액의 입구농도를 변화시켰을 때 단위 길이당 액막유량에 따른 열유속을 나타낸 것이다. 이 때 용액의 온도는 흡수기 입구의 농도와 흡수기내 압력에 의한 평형조건으로 설정하여 각각 실험하였다. 본 실험에서 설정한 액막유량의 범위내에서는 LiBr 수용액과 $\text{LiBr}+\text{LiI}+\text{LiNO}_3+\text{LiCl}$ 수용액 모두 입구농도가 높을수록 열유속은 증대하였다. 이것은 용액의 입구농도가 증가할수록 용액의 포화온도가 높으므로 용액과 냉각수 온도와의 온도차가 높아지며, 또한 용액의 포화증기압이 농도의 증가에 따라 낮아지게 되어 냉매와의 포화수증기압과의 차가 증가하므로 냉매의 흡수열량이 증가하여 열유속이 증가하였다고 생각된다. 기준 농도에서 $\text{LiBr}+\text{LiI}+\text{LiNO}_3+\text{LiCl}$ 수용액이 LiBr 수용액보다 열유속은 액막유량에 따라 2~5%정도 증대하였다.

Fig. 9는 용액의 입구농도를 변화시켰을 때 단위 길이당 액막유량에 따른 질량유속을 나타낸 것이다. 열유속의 경향과 마찬가지로 용액의 농도가 높은 경우일수록 냉매증기의 질량유속이 큼을 알 수 있다. 또한 용액유량이 증가함에 따라 질량유속은 증가하는 경향을 나타냈다.

4. 결론

헬리컬 흡수기의 LiBr 및 $\text{LiBr}+\text{LiI}+\text{LiNO}_3+\text{LiCl}$ 수용액에 대한 열 및 물질전달 실험을 통하여 다

음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

기준농도조건에서 $\text{LiBr}+\text{LiI}+\text{LiNO}_3+\text{LiCl}$ 수용액과 LiBr 수용액의 열유속 및 질량유속 성능을 비교해 보았을 때 $\text{LiBr}+\text{LiI}+\text{LiNO}_3+\text{LiCl}$ 수용액이 LiBr 수용액보다 액막유량에 따라 2~5% 상승하는 경향을 나타내었다. 두용액에서 열유속 및 질량유속은 흡수용액 유량이 증가하고, 냉각수온도가 낮고, 용액농도가 높을수록 크게 나타났다. 그러나 두용액에서 용액의 과열상태는 평형상태보다 열유속은 향상되지만 질량유속은 감소함을 알 수 있었다. $\text{LiBr}+\text{LiI}+\text{LiNO}_3+\text{LiCl}$ 수용액은 4wt%의 결정완화효과와 기존의 LiBr 수용액과의 성능비교에 있어서도 유사한 성능을 보임으로써 신작동매체로 적용가능함을 알 수 있었다.

후기

본 연구는 산업자원부 에너지절약기술개발사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 권오경, 윤정인, 1999, "가정용 흡수식 냉난방기의 나선형 흡수기 열물질전달", 공기조화냉동공학논문집, Vol.7, No.5. pp.570~578
2. 설원실, 권오경, 윤정인, 1998, " $\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$ 계 흡수기의 흡수촉진에 관한 실험적 연구", 공기조화·냉동공학논문집, Vol.10, No.5, pp.581~588.
3. 조현철, 김종보, 정시영, 강상우, 이춘식, 1995, " LiBr 계 용액을 사용한 수직관 흡수기의 열 및 물질 전달에 관한 연구", 공기조화·냉동공학 논문집, 제7권, 제2호, pp.196~206.
4. Hoffmann, L, I. Greiter, A. Wagner, V. Weiss and G. Alefeld, 1996, "Experimental investigation of heat transfer in a horizontal tube falling film absorber with aqueous solutions of LiBr with and without surfactants", Int J. Refrig. Vol.19, No.5, pp.331~341.
5. KOGAS, 1998, "흡수식 냉난방기용 고성능 흡수용액 개발", 한국가스공사연구개발원보고서
6. Yang S. M., 1987, Heat transfer, 2nd ed., Higher Education Press, Beijing, p.203.