

수직관내 리튬브로마이드 수용액의 열 및 물질전달 특성에 관한 실험적 연구

강 인석, 유 승광*, 이 동진, 김 태진
금성사 생활시스템 연구소

An Experimental Study on Heat and Mass Transfer Characteristics of the LiBr-Water Solution Film inside a Vertical Tube

InSeak Kang, SeungKwang Yoo, DongJin Lee, TaeJin Kim
Living System Laboratory, GoldStar Co., Ltd.

요약(Summary)

리튬브로마이드 수용액이 수직관내면을 따라 액막의 형태로 흘러 내릴때 수증기와의 흡수과정에 대하여 열 및 물질전달 특성을 실험하였다. 실험에서 열 및 물질전달계수는 막레이놀즈수를 30에서 200까지 변화시키면서 실시하였다. 일정한 냉방능력에서 시스템 압력을 변화시켰을 때의 열 및 물질전달계수를 측정하였다. 액막의 열전달계수는 레이놀즈수가 증가함에 따라 감소하였다. 최대 질량유량에서 최적의 막레이놀즈수가 존재하였다.

1. 서 론

최근 생활수준의 향상으로 쾌적한 주거공간을 추구함에 따라 냉방기기의 설치율이 증가하고 있다. 이로 말미암아 하절기의 냉방용 전력소비가 급증하여 전력에 비율이 하한선을 밑도는 결과를 낳아 국가적인 문제로 대두하였다. 이러한 문제점의 해결방안의 하나로 기존의 증기압축식 냉방시스템을 빙축열 설비나 흡수식 냉난방기로 대체하는 것을 들 수 있다.

한편 날로 심각하여지는 환경오염문제는 국제적인 규제의 구체화로 나타나고 있으며 지구 온난화를 파괴하는 CFC 냉매에 의한 냉방설비의 운전은 크게 제한될 것이다. 흡수식 냉난방기는 물을 냉매로 사용하므로 이러한 문제점을 완벽하게 해결할 수 있는 기기로 환경보호 측면에서도 요구되고 있다.

그러나 흡수식 냉난방기를 대용량만이 아니라 중소용량으로 개발하여 일반에게 널리 보급하기 위하여 선결되어야할 여러 문제점의 하나로 흡수식 냉난방기의 효율 증가와 소형화를 들 수 있다. 흡수식 냉난방기의 소형화 및 고효율화는 흡수과정의 성능 향상을 통하여 가능하며 흡수과정의 고성능화등의 연구가 진행되고 있다.

최근에 들어 수직관내 유해액막의 흡수과정에 대한 연구가 일본을 중심으로 활발하게 진행되었다. Kurosawa등[1]은 수직관내의 리튬브로마이드 수용액막의 수증기 흡수 특성을 실험적으로 연구하였다. 이들은 내부 주름관(Inner Grooved Tube)와 평관(Plain Tube)의 성능을 비교, 실험하였다.

Ohm, Kashiwagi[2]는 유해액막식 수직 흡수관내의 흡수과정에 대하여 열 및 물질전달특성을 연구하였다. 이들은 내경이 25mm, 길이 1m인 구리관내에서 액막의 Reynolds수가 35~130일 때 흡수관 입구에서 리튬브로마이드/물 용액의 상태가 과냉인 경우와 과열상태의 용액에 대하여 상관식을 제시하였다.

조현철등[3]은 LiBr-CaCl₂ 혼합흡수제(혼합비 LiBr/ CaCl₂ = 2:1)를 사용한 수직관 흡수기의 열 및 질량전달에 대한 실험을 수행하였다. 혼합흡수제는 LiBr에 비해

전열 성능은 떨어지나 용해도를 상승시켜서 결정석출의 위험을 줄일 수 있는 것으로 제시하고 있다.

본 연구에서는 리튬 브로마이드 수용액이 수직관의 내벽을 따라 액막의 형태로 흘러내릴 때 수증기와 흡수전열과정을 실험적으로 해석하고자 하였다. 흡수전열 특성에 영향을 주로 미치는 주요 변수로 흡수기의 압력, 흡수기 입구에서 리튬 브로마이드 수용액의 유량을 고려하였다.

2. 실험

2.1 실험 장치

흡수전열과정에 대한 실험적 해석은 Fig. 1의 실험장치를 제작하여 수행하였다. 실험장치는 리튬 브로마이드 수용액의 재생기, 흡수기, 용액 탱크, 그리고 증발기 구성되어 있다.

재생기(Generator)는 체적 65리터, SUS 304의 재질로 제작되었으며 흡수액의 농액화를 위하여 용액농축용의 가열기(Screw Plug Heater) 4개가 설치되어 있다. 가열기에 공급되는 전력은 용액의 온도와 가열기의 온도를 측정하면서 온도조절기(PID Temp. Controller)에 의해 공급된다.

증발기(Evaporator)는 재생기에 연결되며 직경 100mm, 높이 300mm의 실린더형으로 하부에 흡수과정중 필요한 수증기를 발생시키는 데 사용되는 4개의 잠입가열기(Immersion Heater)가 설치되어 있다. 가열기에 공급되는 전력은 슬라이드스케에 의한 전압조정으로 조절된다. 흡수 과정중 흡수기의 압력을 일정하게 유지하기 위하여 잠입 가열기에 대한 공급전력을 조절함으로써 증기 생성률을 제어한다. 증발기는 수증기의 보유공간에 설치된 코일내를 통과하는 냉수에 의해 재생과정중에 응축기로서 작용한다. 수증기의 응축과정중 요구되는 냉수는 항온조로부터 공급된다.

흡수기(Absorber)는 상부헤더, 흡수부, 그리고 하부헤더로 나뉘어진다. 수직 스테인레스관이 흡수관으로 사용되었다. 재생기에서 그 농도의 조정과정을 거친 리튬브로마이드 용액은 자기식 기어펌프(Magnetic Gear Pump), 필터(Filter), 질량유량계(Mass Flowmeter), 유량조절용 미터링 밸브(Metering Valve)를 통과한후 흡수기 상부헤더에 공급된다. 공급된 리튬브로마이드 농용액은 상부헤더에 모이게 되며 수직관내로 오버플로우(Overflow)하게 된다. 수증기는 상부헤더 측면의 증기 공급관을 통해 공급된다. 리튬브로마이드 용액이 수증기를 흡수할 때 발생하는 흡수열은 흡수관의 외면의 유로를 흐르는 냉각수에 의해 제거되며 그 유량과 온도상승으로부터 전열률을 산정할 수 있다. 이 때 수용액과 냉각수의 유동은 상반류(counter flow)이다. 또한 SUS 흡수관의 6곳에 흡수관 표면으로부터 0.5 mm 깊이에 열전대를 설치하여 흡수 전열과정중 측정된 흡수벽의 온도로 부터 흡수 열전달 계수의 산정을 용이하게 하였다. 흡수과정후의 리튬브로마이드 희용액은 다시 하부헤더에 모인 후 리튬브로마이드 용액탱크로 보내어진다.

용액탱크(Solution Tank)는 체적이 47리터이며 SUS303로 제작되었다. 흡수기에서 배출된 희용액은 용액탱크에 모이게 되며, 보유량의 관측을 위한 투명 관측 튜브가 설치되어 있다.

전 실험은 Batch Type으로 진행되며 일회실험이 2시간 정도 진행 될 수 있도록 각 용기의 체적이 설계되었다. 매 실험에 앞서 각 용기는 진공펌프에 의해 추기되며 추기과정중 배출되는 수증기는 Cold Trap과 Molecular Sieve에 의해 회수된다.

2.2 실험 조건 및 계측

실험조건(Experimental Condition) 실험의 범위와 조건은 Table 1과 같다.

계측(Measuring Devices) 흡수 과정에 유입, 유출되는 수용액은 흡수기의 입, 출구에 설치된 채취구(Sampler)로부터 추출하여 밀도계(Density Meter)와 Pycnometer에 의해 그 밀도를 측정하며 온도와 함께 농도를 계산할 때 사용된다. 재생기, 증발기, 흡수부의 압력은 Convectron Gauge에 의해 측정되며 수증기의 경우에 적용하기 위하여 McLeod Gauge로 먼저 교정하였다. 실험에서 측정되는 흡수부 입, 출구에서 리튬브로마이드용액의 유량, 온도와 밀도, 냉각수의 유량과 입, 출구

온도, 흡수부의 압력, 흡수액의 온도의 측정치들은 온도기록계(Temp. Recorder)와 A/D 변환기(A/D Converter)를 사용하여 개인용 전산기(Computer)에 기록, 저장되며 실험후 물질 및 열전달 계수의 산정을 위한 자료로 활용하였다.

본 실험에서는 흡수기의 압력을 7, 8, 9.2mmHg로 변화시켰을 때 흡수과정에 대한 리튬브로마이드 수용액의 유량의 영향을 연구하고자 하였다.

2.3 열 및 물질전달 계수의 계산

Fig. 2에 리튬브로마이드 수용액 유하액막의 수증기 흡수 모델이 주어져 있다. 리튬브로마이드 수용액막이 과냉상태일 때 수증기의 액막으로의 흡수 과정이 진행되며, 이에 따라 액막으로부터 냉각수의 온도 분포는 모델과 같이 감소한다. 리튬브로마이드 수용액의 농도도 액체/증기의 계면으로부터 벽쪽으로 감소하나 계면 가까이에서 큰 감소율을 보인다. 흡수과정 중 냉각수로의 열전달률은 흡수부 입, 출구에서 냉각수의 온도 증가량과 냉각수 유량에 의해 식(1)과 같이 계산되며 여기서 대수평균온도차는 식(2)와 같이 정의된다.

$$Q = \dot{m}_c C_{p,c} (T_{c,out} - T_{c,in}) = UA \Delta T_{lm} \quad (1)$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{s,in} - T_{c,out}) - (T_{s,out} - T_{c,in})}{\ln \left[\frac{T_{s,in} - T_{c,out}}{T_{s,out} - T_{c,in}} \right]} \quad (2)$$

흡수벽면의 온도가 주어져 있을 때 수용액막의 대류열전달 계수는 다음과 같다.

$$h_s = \frac{Q}{A(T_s - T_w)} \quad (3)$$

흡수과정의 열전달을 대변하는 Nusselt수는 식(4)로 유도되며 여기서 특성길이는 식(5)에 의해 계산된다.

$$Nu = \frac{h_s L_s}{k_s} \quad (4)$$

$$L_s = \left[\frac{\mu_{s2}}{\rho_{s2} g} \right]^{1/3} \quad (5)$$

흡수과정 중 단위시간당 흡수되는 수증기의 흡수율은 수용액의 질량보존으로부터 다음과 같이 유도된다.

$$\dot{m}_a = \dot{m}_s \left[\frac{C_{in}}{C_{out}} - 1 \right] \quad (6)$$

유하액막에서 액체/증기의 계면은 흡수기의 압력과 평형상태에 있다. 액체/증기의 계면에서 물의 농도(ξ_i)와 유하액막의 물의 평균농도(ξ) 사이의 대수평균농도차는

$$\Delta \xi = \frac{(\xi_{in,i} - \xi_{in}) - (\xi_{out,i} - \xi_{out})}{\ln \left[\frac{\xi_{in,i} - \xi_{in}}{\xi_{out,i} - \xi_{out}} \right]} \quad (7)$$

로 주어질 수 있으므로 흡수과정의 질량전달계수는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\beta = \frac{\dot{m}_a}{\Delta \rho A} = \frac{\dot{m}_a}{\rho \Delta \xi_{lm} A} \quad (8)$$

여기서 ρ 는 입, 출구에서 수용액의 밀도의 평균값이며 결국 계면과 액막내의 밀도의 차이는 식(9)로 주어질 수 있다.

$$\Delta \rho = \Delta c (1-c) \rho \quad (9)$$

액막으로부터의 질량 전달 특성을 대변하는 Sherwood수는

$$Sh = \frac{\beta L_s}{D_s} \quad (10)$$

이다. 여기서 D_s 는 용액의 물질확산계수(diffusivity)를 나타낸다.

3. 결과 및 논의

Fig. 3은 각각의 흡수기 압력에서 흡수부에 공급되는 리튬브로마이드 수용액의 질량유량이 열전달에 미치는 영향을 도시한 것이다. 흡수기 압력에 관계없이 수직관내 수용액의 질량유량이 증가하면 열유속은 미세하게 증가하나, 일정 질량유량 이상에서는 열유속이 일정하거나 오히려 감소한다. 넓은 범위의 질량유량에 대하여 열전달률에 미치는 영향을 유량증가에 따라 수직관내에 형성되는 수류(rivulet)의 수와 폭, 그리고 두께가 복합적으로 변화한다. 기본적으로 수용액의 질량유량이 증가할 때 수류(rivulet)의 수와 폭이 증가하고 이에 따라 열전달율이 증가하게 될 것이다. 하지만 수류의 수와 폭 증가와 함께 그 두께도 증가하므로 이는 오히려 열전달에 악영향을 미치게 되리라 생각된다. 따라서 일정유량 이상에서는 열전달율은 감소하는 것으로 생각된다. 동일유량에서 흡수기압력 상승에 따라 열유속은 크게 증가한다. 이 현상은 공급 용액의 온도가 일정하게 유지되고 있어 흡수기 압력이 증가하면 용액의 과냉도(degree of subcooling)가 증가하기 때문이다. 따라서 용액의 흡수율 및 열전달율을 증가하게 된다.

Fig. 4은 흡수기 벽에서 측정된 온도를 사용하여 식(3)과 식(4)로부터 계산한 뉴셀트수(Nusselt number)를 도시한 것이다. 막레이놀즈수(Reynolds number)가 증가함에 따라 압력에 무관하게 뉴셀트수는 단순히 감소한다. 모든 실험 데이터가 하나의 상관 곡선으로 표시할 수 있을 정도 집중되어 있다. 그러나 Ohm등[2]의 결과치 보다 뉴셀트수가 높게 나타나고 있다.

Fig. 5은 흡수과정에서 흡수관의 액막 두께에 따른 흡수율 변화를 나타낸 것이다. 이것은 각각의 흡수기압력에서 흡수부에 공급되는 리튬브로마이드 수용액의 액막두께의 변화가 흡수율에 미치는 영향을 도시한 것이다. 액막두께가 증가함에 따라 흡수율은 일정한 점까지는 증가한다. 이 영역에서 흡수기의 압력의 영향은 매우 지배적이다. 9.2mmHg에서의 흡수율은 7mmHg에서와 비교했을 때 거의 2배이상 크게 나타난다. 그 이유는 열유속의 경우와 동일하게 설명되어 질 수 있다. 임계 액막두께를 넘어서면 흡수율은 감소한다. 이 현상은 증가한 액막두께가 냉각수로의 열전달을 방해하고 흡수현상을 지연시키기 때문이다. 임계 액막두께는 대략 0.45mm로 나타났다.

Fig. 6은 막레이놀즈수에 따른 식(8)과 식(10)로부터 계산한 물질전달에 대한 무차원수인 슈워드수(Sherwood number)를 도시한 것이다. 저유량일 때 막레이놀즈수가 증가하면 슈워드수는 증가한다. 레이놀즈수가 120에서 150범위를 넘어서면 슈워드수는 감소한다. 이 특성은 다른 연구자들의 결과 동일하다. 하지만 저유량일 때 정성적인 측면에서 Ohm등[2]의 결과와 반대로 나타나고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 수직 흡수관에 리튬브로마이드 수용액이 표면을 따라 액막의 형태로 흘러내릴 때 수증기와의 흡수과정에 대하여 용액 유량과 흡수기 압력이 흡수과정의 열전달율 및 물질전달율에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다.

본 연구의 결론은 다음과 같다.

- 1) 막 레이놀즈수가 증가함에 따라 액막의 열전달 계수는 감소하였다.
- 2) 최대의 물질 전달률에 대해서 최적의 막 레이놀즈수가 존재하였으며, 이 이상에서는 물질 전달율이 감소하였다.

5. 참고문헌

1. Kurosawa, S., Nagaoka, Y., Yoshida, A., Ogawa, M., Kunugi, Y., "Development of air-cooled gas-fired absorption water chiller-heater", (1989)
2. Ohm, K.C., Kashiwaki, T., "Characteristics of heat and mass transfer inside vertical type of absorber", Transaction of JSME(Part B) Vol.59, No.557, pp.169-176, (1993)
3. 조현철, 김중보, 정시영, 강상우, 이춘식, "LiBr계 용액을 사용한 수직관 흡수기의 열 및 물질전달에 관한 연구", '93 공기중하 냉동공학회 동계학술 발표회, pp.69-76, (1993)

Table 1 Range of Experimental Conditions

	Parameter	Range
Absorption Tube	Inner Diameter(mm)	13.3
	Length (mm)	800.0
	Pressure (mmHg)	7.0, 8.0, 9.2
Coolant	Temperature (°C)	30.0
	Flowrate (l/min)	0.8
LiBr-Water Solution	Temperature (°C)	40.0
	Flowrate (kg/min)	0.1 - 0.6 (Re = 30 - 120)
	Concentration	58.0
	Additive	No Surfactants

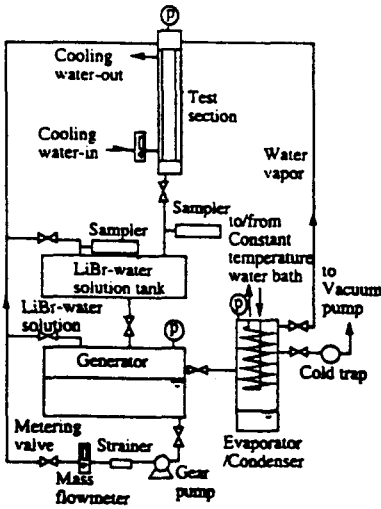


Fig. 1 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

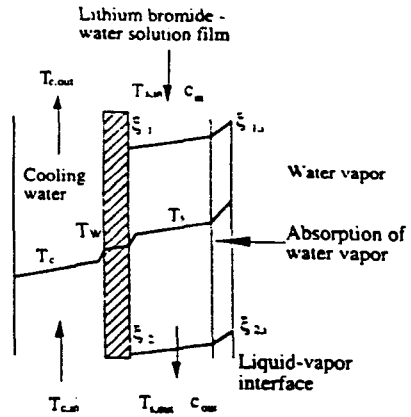


Fig. 2 Schematic Picture of Absorption Processes

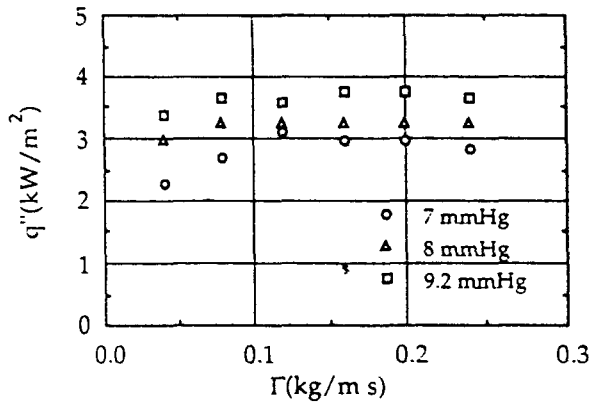


Fig. 3 Effects of solution mass flux on the heat flux

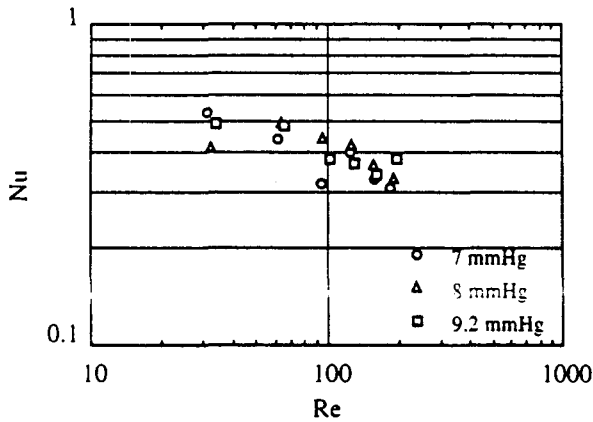


Fig. 4 Effects of film Reynolds number on the Nusselt number at different absorber pressures

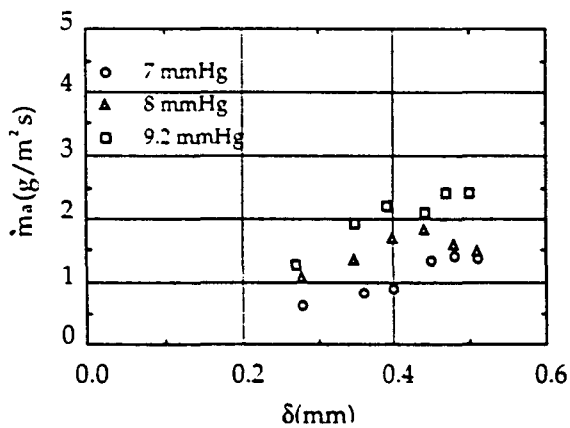


Fig. 5 Effects of solution film thickness on the absorption rate at different absorber pressure

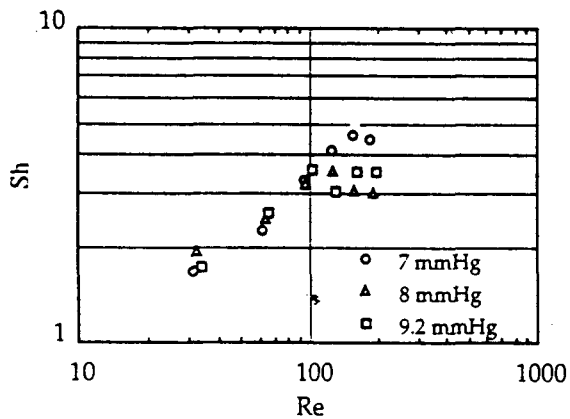


Fig. 6 Effects of film Reynolds number on the Sherwood number at different absorber pressures