

LiBr계 용액을 사용한 수직관 흡수기의 열 및 물질 전달에 관한 연구

A Study on Heat and Mass Transfer in a Vertical Tube Absorber Using LiBr Family Solutions

조 현 철*, 김 증 보**, 정 시 영****, 강 상 우***, 이 춘 식****
H.C.Cho, C.B.Kim, S.Y.Jeong, S.W.Kang, C.S.Lee

Key Words : LiBr, vertical tube absorber(수직흡수관), falling film(액막), concentration(농도)

Abstract

Experimental investigations on heat and mass transfer characteristics in a vertical tube absorber have been carried out. Three different copper tubes with a length of 1.5m have been tested using LiBr solution and LiBr-CaCl₂ solution. The effects of solution flow rate, cooling water temperature, solution inlet temperature and evaporation temperature have been investigated in detail.

It is found that heat transfer coefficient increases gradually with the increase of solution flow rate, but decreases rapidly for the flow rates less than 0.02kg/ms. The grooved tube generally shows better heat transfer performances than the smooth tube. LiBr solution shows almost no absorption capability for the cooling water temperatures over 40°C. LiBr-CaCl₂ gives less decreasing rate in absorption capability at these temperatures and the heat transfer coefficient becomes less dependent on the types of tubes in use. Considering heat and mass transfer rates, LiBr-CaCl₂ solution is found to be more suitable than LiBr solution for air cooled absorber, which operates at higher temperature than water cooled absorber.

기호설명

A_1 : 관내 전열 면적 (= πdL)	[m ²]	d_o : 흡수기의 외경	[m]
C_1 : 흡수 용액 입구 농도	[wt%]	h_i : 관내(흡수 용액측) 열전달 계수	[kW/m ² °C]
C_2 : 흡수 용액 출구 농도	[wt%]	h_o : 관외(냉각수측) 열전달 계수	[kW/m ² °C]
c_p : 비열	[kJ/kg °C]	k : 열전도 계수	[kW/m °C]
d_a : 흡수기 바깥튜브의 내경	[m]	k_F : 스케일 층의 열전도 계수	[kW/m °C]
d_i : 흡수기의 내경	[m]	k_M : 관 재료의 열전도 계수	[kW/m °C]
		L : 흡수기의 높이	[m]
		m_{cw} : 냉각수 질량 유량	[kg/s]
		m_s : 흡수 용액의 질량 유량	[kg/s]
		m_v : 수증기의 질량 유량	[kg/s]
		P : 압력	[Pa]

* (주)LG전자 생활시스템 연구소

** 정회원, 인하대학교 기계공학과

*** 정회원, 서강대학교 기계공학과

**** 정회원, 한국과학기술연구원

Q	: 열전달량	[kW]
q	: 열유속(heat flux)	[kW/m ²]
$T_{cw,1}$: 냉각수 입구 온도	[°C]
$T_{cw,2}$: 냉각수 출구 온도	[°C]
$T_{eq,1}$: 흡수 용액 입구의 평형 온도	[°C]
$T_{eq,2}$: 흡수 용액 출구의 평형 온도	[°C]
T_{ph}	: 기액 경계면의 온도	[°C]
U	: 총괄열전달계수	[kW/m ² °C]
x_F	: 스케일 층의 두께	[m]
x_M	: 관의 두께	[m]
μ	: 점성계수	[kg/m s]
ν	: 동점성계수	[m ² /s]
Γ	: 용액의 접액 길이 당 질량 유량	[kg/m s]
ΔT_m	: 평균 온도차	[°C]

무 차 원 수

$Re_{cw} = v d / \nu$: 냉각수의 Reynold 수
$Re_f = 4\Gamma / \nu$: 흡수용액측 막 Reynolds 수
$Pr = \mu c_p / k$: Prandtl 수
$Nu = h d / k$: Nusselt 수

1. 서 론

최근 하절기의 냉방 수요 증가에 따른 전력 수급 불균형 문제를 완화시키기 위하여 흡수식 냉온수기의 이용이 권장되고 있으며, 흡수식 냉온수기의 성능을 향상시키기 위한 연구도 활발히 진행되고 있다. 현재 사용되는 흡수식 냉난방기는 20RT 이상의 증대형이 대부분이고 흡수기와 응축기는 수냉 방식으로 냉각이 되고 있다. 그러나, 냉방 기기의 수요는 소형 부문에서 크게 증대되고 있으므로 흡수식 냉온수기를 전기 구동 냉방기와 경쟁력이 있게 하기 위해서는 공냉 방식의 소형 기기의 개발이 필요하다. 소형 공냉방식의 흡수식 냉온수기는 기존의 수냉식 기기와 여러면에서 설계가 달라지는데 특히 흡수기는 수직관내 흡수 형식이 주로 사용되므로 이에 대한 연구가 필요하다.

흡수기에서의 열 및 물질 전달에 관한 연구로서는 많은 이론적 해석^(1, 2, 3)과 실험적 연구^(4, 5, 6)들이 수행되어 왔다. 그러나, 지금까지의 흡수식 냉온수

기의 흡수기는 수냉 방식으로 구성되어 왔으므로 연구의 대부분이 수평관외 또는 수직관외 흡수에 관한 것이다. 현재, LiBr계 용액을 이용한 흡수기의 공냉화에 필수적인 수직관내 흡수에 대해서는 열 및 물질 전달의 정성적, 정량적 관계가 아직 충분히 연구되지 못한 상태이다.

수직관 흡수기에 관한 연구로서는 엄기찬 등⁽⁷⁾은 평활관(bare tube)을 사용하여 수직관내 열 및 물질 전달에 관한 실험을 수행하였고, Ogawa 등⁽⁸⁾은 여러 종류의 수직 튜브들에 대한 열전달 특성을 측정했다. Kashiwagi 등⁽⁹⁾은 수직관내 전열관의 형태로서 평활관, 주름관(corrugated tube), 나선형관(grooved tube), 스프링 삽입관에 대한 열 및 물질 전달 촉진에 관한 연구를 수행하였다. 이들의 연구 결과를 보면 평활관인 경우보다 관내에 나선형 핀이 가공되어 있거나 스프링이 삽입되어 있는 경우에 열전달이 우수한 것으로 나타나고 있다. 그러나 Kashiwagi 등의 연구에서는 실험 조건(예를 들면, 그들의 증발기의 냉수 입구조건이 18°C로서 실제 냉동기의 운전조건인 12°C보다 크게 높으므로 증발기내의 증기압이 실제 운전조건보다 크게 증가하여 흡수기에서 흡수가 활발하여 지므로 열전달계수가 크게 나타나게 된다.)들이 실제 흡수식 냉동기의 운전조건과 서로 다르므로 그 실험결과를 공냉식 흡수기의 설계에 직접 사용하는 데는 무리가 있다. 또한 엄기찬 등의 연구에서는 연구결과가 LiBr수용액을 사용한 평활관에 한정되어 있다. 본 연구에서는 실제 공냉형 흡수기의 운전조건에서 전열 성능이 우수할 것으로 예상되는 나선형관을 포함하여 LiBr 수용액과 LiBr-CaCl₂ 혼합수용액에 대한 실험을 하였으며, 공냉형 흡수기의 실제 작동 조건에서 열 및 물질 전달 특성을 연구하여 이를 공냉식 흡수기의 설계에 직접 활용하는 것을 목적으로 실시되었다.

본 연구에서는 흡수관의 형상, 냉각수의 온도, 흡수 용액의 과열 및 과냉도, 그리고 증발기에서의 증발 온도가 열 및 물질전달 성능에 미치는 영향을 파악하였고, 흡수 용액으로서 기존의 LiBr수용액 뿐만 아니라 공냉식 흡수식 냉온수기의 흡수제로 기대되고 있는 LiBr-CaCl₂ 혼합수용액(질량혼합비 LiBr : CaCl₂ = 2 : 1)을 이용하여 전열 성능 실험을 실시하였다.

LiBr-CaCl₂ 혼합수용액은 LiBr수용액에 비해 전열 성능은 약간 떨어지지만, 용해도를 상승시켜서 결정 석출에 대한 염려를 줄일 수 있기 때문에 공냉화에 사용하려는 연구들이 보고되고 있다.^(10, 11)

기존의 수평관의 흡수기에서 전열 촉진 첨가제가 성능에 미치는 영향은 상당히 연구되어 있으나 수직관내 흡수에서 전열 촉진 첨가제의 영향은 아직 많은 연구를 필요로 한다. 본 연구에서는 전열 촉진 첨가제의 농도 변화에 따른 부정확성을 피하기 위하여 전열 촉진 첨가제를 사용하지 않고 실험을 수행하였다.^(5, 12, 13)

2. 열 및 물질 전달 해석

Fig.1은 수직관 흡수기의 축 방향 단면에서의 열 전달, 물질 전달, 용액 및 냉각수의 흐름을 도식적으로 나타낸다. 흡수 용액은 수직관내에 얇은 액막(falling film)을 이루며 흘러내리고 관의 상부로 유입된 증기는 증기의 압력이 흡수 용액 표면의 포화 압력보다 높으면 용액에 흡수된다. 증기가 용액에 흡수됨에 따라 발생된 흡수열은 관외 냉각수로 전달이 된다. 기액 경계면(vapor-liquid interface)에서는 흡수에 의하여 온도가 급격히 상승하고 LiBr 농도는 급격히 감소한다. 본 연구에서의 액막 유동은 층류로서 층류 액막에서는 질량확산계수(mass diffusion coefficient)가 열확산계수(thermal diffusivity)보다 상당히 작으므로 열 경계층(thermal boundary layer)이 농도 경계층(concentration boundary layer)보다 상당히 빨리 발달하는 특성을 지닌다.

2.1 열전달계수

흡수관내 용액 층의 열전달계수를 구하기 위해서는 관에서의 열전달량, 관 벽에서의 온도, 그리고 기액 경계면에서의 온도, T_m 가 필요하다. 기액 경계면에서의 온도는 흡수기에서의 열전달과 물질 전달을 해석하는데 있어서 중요한 값이나 실제 관내에서 이 온도를 측정하기는 거의 불가능하기 때문에 기액 경계면에서 열전달계수가 상당히 크다는 것에 착안하여 기액 경계면의 온도를 용액의 평형 온도(용액의 평균농도와 흡수기내 압력으로부터 구한 가상적 온도)로 가정하였다.⁽⁵⁾

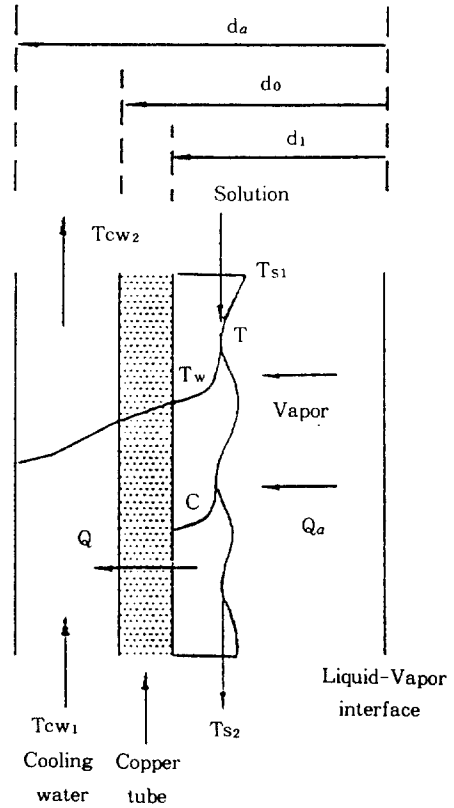


Fig.1 Model of absorption

몇몇 연구^(7, 9)에서는 흡수기 출입구의 용액 평균 온도(bulk temperature)와 열전달계수를 구하기 위해 관벽에서의 온도차이로부터 열전달계수를 구한 결과도 있는데, 이는 흡수기내에서의 온도가 흡수기 입출구온도만으로 결정되지 않음을 고려할 때 적절한 방법이라 생각할 수 없다.⁽¹⁴⁾ 흡수 과정이 정상 상태로 진행된다는 가정을 하면 흡수기에서의 열 평형식은 냉각수의 입출구 온도와 흡수 용액의 입출구의 평형온도로서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= \dot{m} c_p (T_{cw,2} - T_{cw,1}) \\ &= UA_i \Delta T_m \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,

$$\Delta T_m = \frac{(T_{eq,1} - T_{cw,2}) - (T_{eq,2} - T_{cw,1})}{\ln[(T_{eq,1} - T_{cw,2}) / (T_{eq,2} - T_{cw,1})]} \quad (2)$$

총괄 열관류 계수 U 는 관내 흡수 용액 측의 열전달계수 h_i , 관외 냉각수 측의 열전달계수 h_o , 관 벽의 전열 저항 (x_M/k_M), 그리고 오염계수 (fouling factor, x_F/k_F)로 부터 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o} + \frac{d_i}{k_M} + \frac{x_F}{k_F} + \frac{x_M}{k_M} \quad (3)$$

위의 식에서 관벽의 전열 저항은 재료의 물성치로부터 쉽게 구할 수 있고, 오염 계수는 흡수식 냉온수기 설계에 사용되는 표준 값인 $0.00009 \text{ m}^2\text{C}/\text{W}$ 을 택하였다. 냉각수 측 열전달 계수 h_o 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Nu = \frac{h_o d_h}{k} \quad (4)$$

여기서, $d_h = d_a - d_i$ 이며 Nusselt수는 참고 문헌상의 동심원상에서의 층류식을 사용하였다.⁽¹⁵⁾

$$Nu_1 = 3.66 + 1.2 (d_i/d_a)^{-0.8} \quad (5)$$

$$Nu_2 = f_g [\text{RePr } d_h/L]^{1/3} \quad (6)$$

여기서,

$$f_g = 1.615 [1 + 0.14 (d_i/d_a)^{-1/2}] \quad (7)$$

$$Nu_3 = [2 / (1 + 22\text{Pr})]^{1/6} (\text{RePr } d_h/L)^{1/2} \quad (8)$$

$$Nu = (Nu_1^3 + Nu_2^3 + Nu_3^3)^{1/3} \quad (9)$$

이상에서와 같이 관외 냉각수 측의 열전달계수 h_o , 관벽의 전열 저항 (x_M/k_M), 그리고 오염계수 (fouling factor, x_F/k_F)를 알고, 총괄 열전달 계수 U 는 (1) 식으로 구해지므로 (3)식에서 흡수 용액

측의 열전달 계수 h_i 를 구할 수 있다.

2.2 물질 전달

흡수기내의 단위시간당 냉매의 흡수량 m_v 는 흡수 용액중의 용질이 흡수기내에서 보존되는 것에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{m}_s C_1 = (\dot{m}_s + \dot{m}_v) C_2$$

$$\dot{m}_v = \dot{m}_s (C_1/C_2 - 1) \quad (10)$$

3. 실험 장치 및 실험 방법

3.1 실험장치

Fig.2는 본 연구를 위하여 사용한 실험 장치의 개략도이다. 실험 장치는 크게 재생기[1], 농용액 탱크[2], 흡수기[3], 응축기[4], 증발기[6], 용액 펌프[9]와 그들을 연결하는 배관으로 구성되어 있다. 흡수기는 상부와 하부에서 분리 가능하도록 제작하여 다양한 실험을 수행할 수 있도록 하였다. 각각의 흡수기는 동심원 형태이며 흡수관의 내측으로는 흡수 용액이 흘러내리며 흡수관의 외측으로는 냉각수가 하부에서 상부로 흐르며 흡수열을 제거한다. 흡수 용액이 관내로 흘러내릴 때 가능하면 원주방향으로 고르게 분포되도록 흡수기 입구 부분의 가공과 흡수기의 설치에 특별히 유의하였으며, 별도의 간단한 실험에서 입구 부분에서 용액분포가 흡수 용액 유량이 상당히 적은 경우에도 만족할 만큼 균일한 것을 확인하였다. 본 실험에서 사용된 세종류의 흡수관의 사양은 Table 1에 나타내었다. 나선형관 관은 전열 면적과 기액 접촉 면적을 증가시키고 용액의 관내 체류시간을 증가시키며 용액의 흐름을 교란시켜 주기 때문에 평활관에 비해 전열 성능이 우수한 것으로 보고되고 있다. 그리고 공냉식 흡수기에서의 관의 직경은 관 바깥에 부착되는 환면적과 관 내에서의 증기의 유동을 고려하여 결정해야 하는데 관 직경이 크면 관 외부에 부착할 수 있는 환 면적이 줄어들게 되고 관 직경이 작아지면 증기 유동에 대한 압력손실이 커지게 되므로 적절한 관 직경을 택하는 것이 중요하다.

응축기의 전열관으로는 흡수기와 같은 형태로서

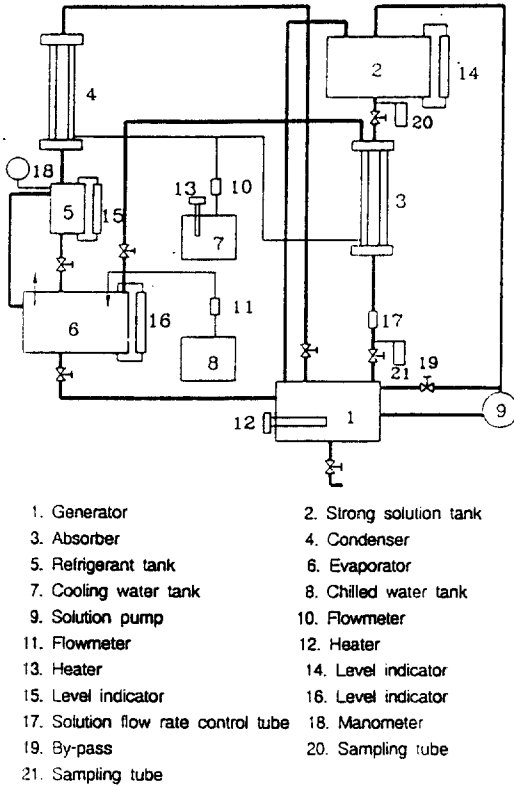


Fig.2 Experimental apparatus

Table 1. specification of test tubes

	d,(m)	d,(m)	d,(m)	θ (deg)	L(m)
bare tube	1.6×10^{-2}	1.46×10^{-2}	0.7×10^{-3}	0	1.5
grooved tube	1.6×10^{-2}	1.46×10^{-2}	0.7×10^{-3}	18	1.5
bare tube	2.54×10^{-2}	2.34×10^{-2}	1.0×10^{-3}	0	1.5

외경 25.4mm, 두께 10mm, 높이 1.5m의 동관을 사용하였으며, 외측에는 동심원상의 관(내경 31.6mm, 높이 1.5m)을 설치하여 냉각수를 흐르게 하였다. 재생기는 용액을 재생하기 위하여 2kW용 히터(heater)를 장착하였으며, 재생후에 흡수기 입구에서 원하는 용액 온도로 냉각 시키기 위하여 냉각 코일을 설치하였다. 농용액 탱크와 냉매 탱크, 증발기의 외측에는 용액과 냉매의 양을 알 수 있게 액면계[14,15,16]를 설치하였다.

각부의 온도를 측정하기 위하여 검증된 구리-콘스탄탄(copper-constantan) 열전대를 12 지점

에 설치하였으며 측정된 신호는 개인용 컴퓨터에 자동 기록되도록 하였다. 기내의 압력은 진공 마노미터를 이용하여 증발기에서 측정하였다. 흡수기 입출구에서의 용액 농도는 샘플링 관으로부터 흡수 용액을 미소량 추출하여 굴절률계를 사용하여 농도를 측정하였다.⁽¹⁶⁾

3.2 실험방법

본 실험에서 고려한 주요 변수는 흡수기 튜브의 직경, 흡수 용액의 유량, 흡수기 입구의 용액 온도, 냉각수 입구 온도등이다. 단위 접액 길이 당 흡수 용액의 질량 유량은 0.001-0.035kg/ms 범위를 택하였고, 흡수기 입구의 용액 온도는 60% LiBr 용액에서는 물의 증발 온도 5°C에 해당하는 포화 온도인 45°C와 과열 상태를 고찰하기 위하여 53°C 근처에서 실험을 하였다. 그리고, 65% LiBr-CaCl₂혼합 용액에서는 물의 증발 온도 5°C에 해당하는 포화 온도인 55°C와 과냉 상태를 살펴보기 위하여 45°C 근처에서 실험을 실시하였다. 냉각수 온도는 30-40°C 범위에서 조절하였다. 실험조건에 대한 상세한 내용은 Table 2에 나타내었다.

실험은 batch식으로 실시하였는데, 원하는 흡수 용액의 조건을 맞추기 위하여 재생기내 용액을 가열하면 발생한 증기는 응축기 내에서 응축되어 냉매 탱크로 들어간다. 재생기내의 용액을 샘플링관으로부터 미소량 추출하여 굴절률계를 사용하여 농도를 측정하여 실험 조건에 부합되는 농도가 되었을 때 가열을 중지하고, 흡수기 입구 온도의 조건이 될 때까지 냉각수 순환 코일을 사용하여 온도를 낮춘다. 이 용액을 용액 펌프에 의해 농용액 탱크로 보내면 흡수 과정을 실험하기 위한 준비가 완료된다.

이렇게 준비된 흡수 용액을 천천히 원하는 유량에 맞춰 수직 흡수관내로 흘러주며 증발기로부터의 통로를 개방하면 용액은 수증기를 흡수하여 희용액으로 되면서 재생기[1]로 들어간다. 한편, 증발기에서는 흡수과정 초기에는 증발기의 압력은 급격히 감소하다가 냉수의 순환량을 적절히 조절하면 일정한 증발 압력을 유지하게 되는데 증발 압력이 일정한 상태로 유지되면 실험 데이터를 받는다.

실험 도중 각부의 온도는 수초간격으로 자동적으로 기록되므로 이를 보면 흡수과정이 정상 상태로

Table2. condition of experiment

LiBr solution	absorber inlet temperature(°C) : 45-50 absorber inlet concentration(wt%) : 60 solution flow rate(m ³ /h) : 0.002-0.014
LiBr/CaCl ₂ solution	absorber inlet temperature(°C) : 45-55 absorber inlet concentration(wt%) : 65 solution flow rate(m ³ /h) : 0.002-0.014
cooling water	absorber inlet temperature(°C) : 30-40 flow rate(m ³ /h) : 0.054

진행되는지를 확인할 수 있다. 흡수 용액의 유량은 농용액 탱크하부의 밸브로 조절할 수 있으며 흡수기 하부의 밸브를 짧은 시간 동안 닫아 용액 유량 측정관[17]에 모이는 용액 량을 측정하여 용액 유량을 결정하였다. 냉각수와 냉수의 유량은 플로트형 유량계[10,11]를 사용하여 대략적인 값을 조절한 후 중량법에 의하여 측정하였다. 흡수기 입출구에서의 용액 농도 측정에서는 샘플링 관에서 용액을 추출할 때 배관상에 남아 있던 용액이 일부 섞여 나오게 되므로 어느정도 양을 미리 추출하여 버리고 샘플링을 실시하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 용액 유량의 영향

Fig.3은 LiBr수용액에서 열전달계수에 대한 용액 유량의 영향을 보여 주고 있다. 열전달계수는 단위 접액 길이 당 용액 유량이 0.02kg/ms 이상에서는 전체적으로 완만하게 증가하는 경향을 나타내며, 0.02kg/ms 이하에서는 급격하게 감소하는 경향을 나타낸다. 이 유량은 막 레이놀즈 수(film Reynolds number, $Re_f=4I/\mu$)약 15 정도에 해당하는 값인데 이 이하에서는 전열 성능이 급격히 감소하므로 사용하기 부적합한 것으로 판단되며 이는 필름 두께가 너무 얇으면 표면의 젖음성이 좋지 않으며 용액이 흡수기 출구에 다다르기 전에 포화 상태 가까이 도달하여 흡수능력이 저하되기 때문인 것으로 생각된다. Fig.4는 혼합수용액에서 열전달 계수에 대한 용액유량의 영향을 보여주고 있다. 혼합수용액에서도 LiBr 단일수용액에서와 비슷하게 전체

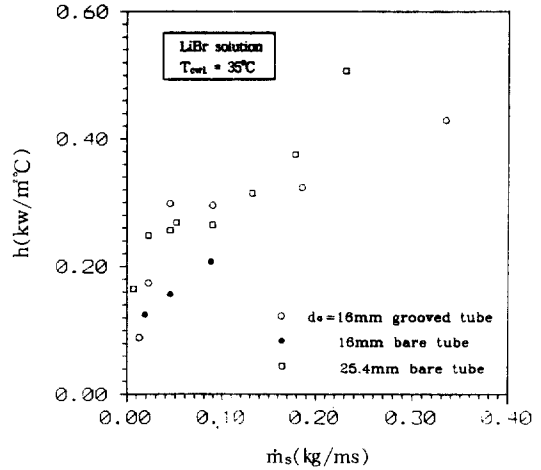


Fig.3 Effect of solution flow rate on heat transfer coefficient for LiBr solution

적으로 용액 유량이 증가할 수록 완만하게 증가하는 경향을 나타낸다. 흡수기에서의 열전달계수가 용액 유량에 따라 어떻게 변하는가하는 것은 지금까지의 몇몇 연구에서는^(7,15) 용액 유량이 증가할 수록 열전달계수가 감소한다는 결과도 있으므로 상당히 논란의 여지가 있다. 본 실험의 범위에서는 용액 유량이 일정 값 이상인 경우 열전달 계수는 크게 증가하지 않으므로 열전달 계수를 증가시키고자 용액 유량을 과도하게 늘릴 필요는 없는 것으로 생각된다. 이러한 결론은 Fig.5에서 뒷받침 되는데 이 그림은 LiBr용액에서 흡수기 단위 면적당의 흡수량(absorption mass flux)에 대한 용액 유량의 영향을 보여주고 있다. 용액 유량이 증가할수록 흡수량이 증가하다가 0.05kg/ms 이상에서는 오히려 완만하게 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 용액 유량이 증가함에 따라 액막 두께가 두꺼워지면서 열저항이 증가하기 때문으로 생각되며 지금까지의 연구에서도 이와 유사한 결과가 보고 되고 있다.⁽⁷⁾

이상으로부터 용액 유량은 젖음성, 액막 두께, 그리고 용액 순환에 필요한 동력을 고려하여 약 0.04-0.15kg/ms 정도를 택하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

4.2 냉각수 온도의 영향

Fig.6과 Fig.7은 각각 LiBr 수용액과 혼합수용

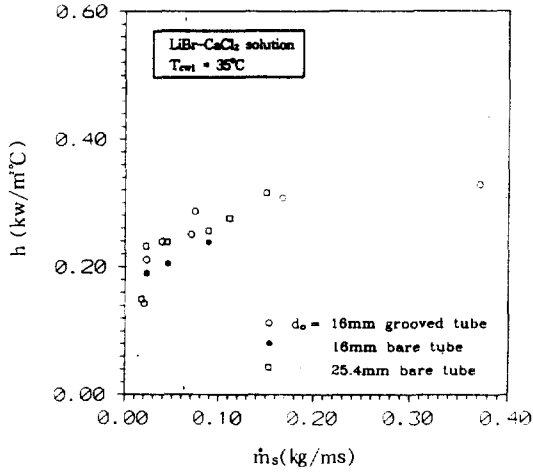


Fig.4 Effect of solution flow rate on heat transfer coefficient for LiBr-CaCl₂ solution

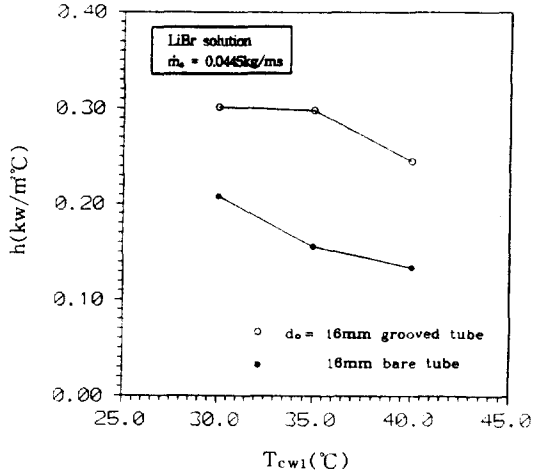


Fig.6 Effect of cooling water temperature on heat transfer coefficient for LiBr solution

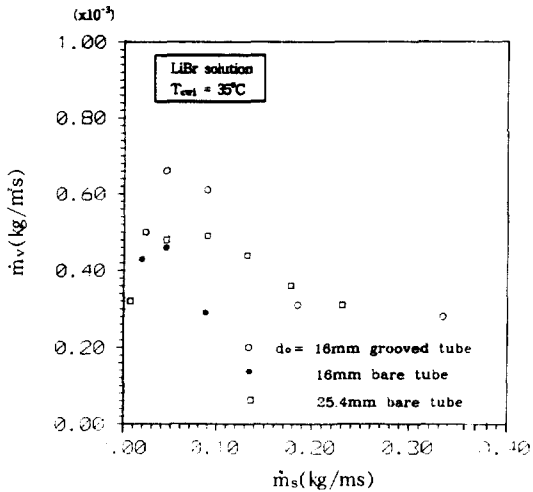


Fig.5 Effect of solution flow rate on absorption mass flux for LiBr solution

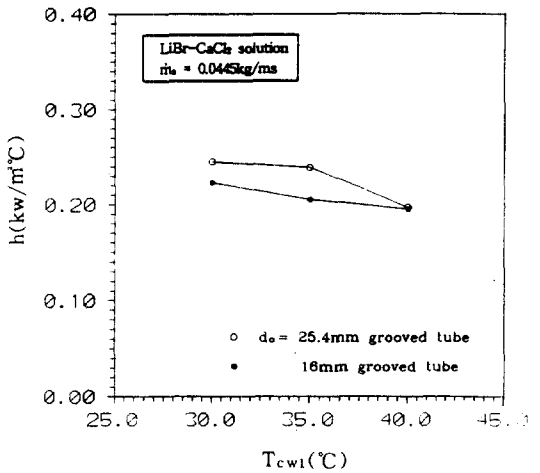


Fig.7 Effect of cooling water temperature on heat transfer coefficient for LiBr -CaCl₂ solution

액에서 열전달 계수에 대한 냉각수 온도의 영향을 보여준다. 두 경우 모두 냉각수 온도가 낮을수록 완만하게 열전달계수가 증가하는 경향을 보이는데 이는 냉각수 온도가 낮을수록 흡수 현상이 활발해지기 때문인 것으로 생각된다. LiBr수용액의 경우 평활관과 나선형관 관에서는 열전달 계수의 차이가 상당한 반면 혼합수용액의 경우 관경의 크기는 열전달계수에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타

났다.

Fig.8은 LiBr용액에서 흡수량에 대한 냉각수 온도의 영향을 보여주고 있다. 흡수량은 냉각수 온도에 크게 영향을 받는데 냉각수 온도가 35°C에서 40°C로 5°C 증가하면 흡수량은 반 이하로 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 흡수기의 입구에서 용액의 포화 온도가 45°C 정도의 값을 갖는다는 것을 생각할 때 흡수 용액의 포화 온도에 냉각수

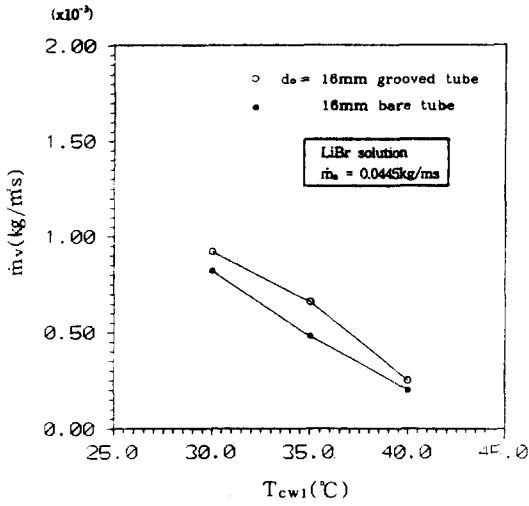


Fig.8 Effect of cooling water temperature on absorption mass flux for LiBr solution

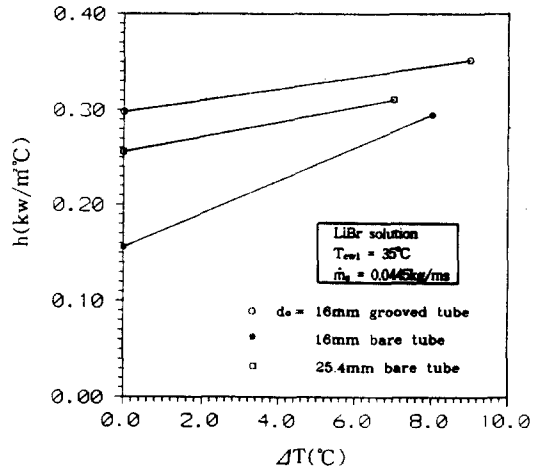


Fig.10 Effect of degree of superheating on heat transfer coefficient for LiBr solution

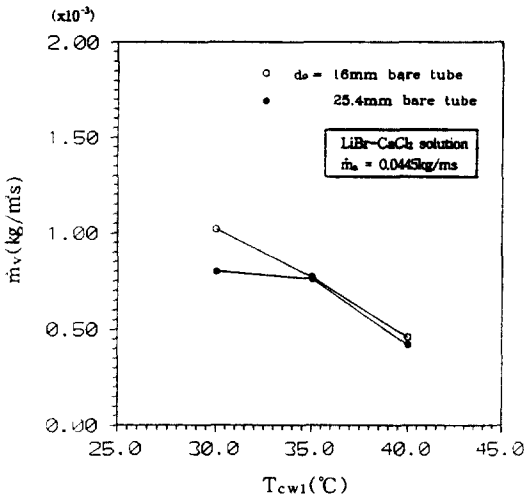


Fig.9 Effect of cooling water temperature on absorption mass flux for LiBr-CaCl₂ solution

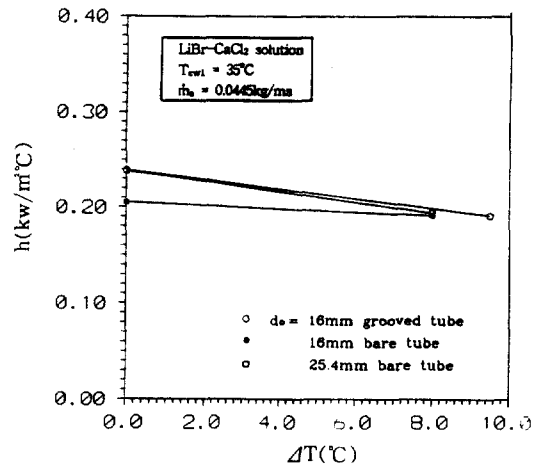


Fig.11 Effect of the degree of subcooling on heat transfer coefficient for LiBr-CaCl₂ solution

온도가 접근함에 따라 흡수 능력이 거의 없어지는 것을 잘 보여준다. Fig.9는 혼합수용액에서 흡수량에 대한 냉각수 온도의 영향을 보여주고 있다. 역시 냉각수 온도가 높아질수록 감소하는 경향을 나타낸다. 그러나 혼합 수용액에서는 LiBr용액에 비하여 흡수량의 감소 정도가 덜한데 이는 혼합 수용액에서는 흡수기 입구 포화 온도가 55°C 정도로서 LiBr에 비하여 10°C 정도 높기 때문에 냉각수 온

도가 40°C로 증가하더라도 용액을 냉각시킬 수 있는 능력이 상당히 남아있기 때문이다. 이 결과로부터 주변 공기의 온도가 높은 경우 혼합수용액을 사용하는 것이 유리하다는 것을 알 수 있다.

4.3 용액 입구 온도의 영향

Fig.10은 LiBr용액에서 용액의 입구 온도가 과열 상태인 경우에 열전달 계수에 어떠한 영향을 미

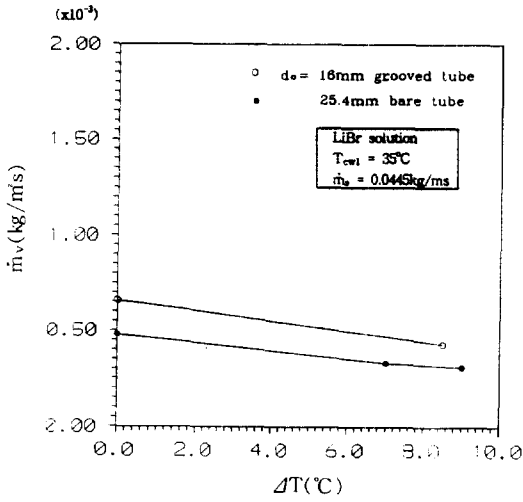


Fig.12 Effect of the degree of superheating on absorption mass flux for LiBr solution

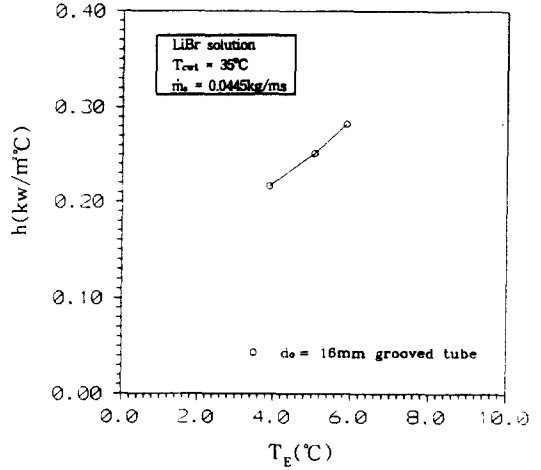


Fig.14 Effect of evaporating temperature on heat transfer coefficient for LiBr solution

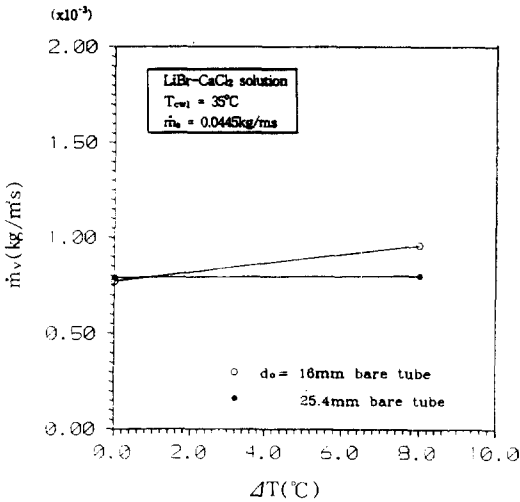


Fig.13 Effect of the degree of subcooling on absorption mass flux for LiBr-CaCl₂ solution

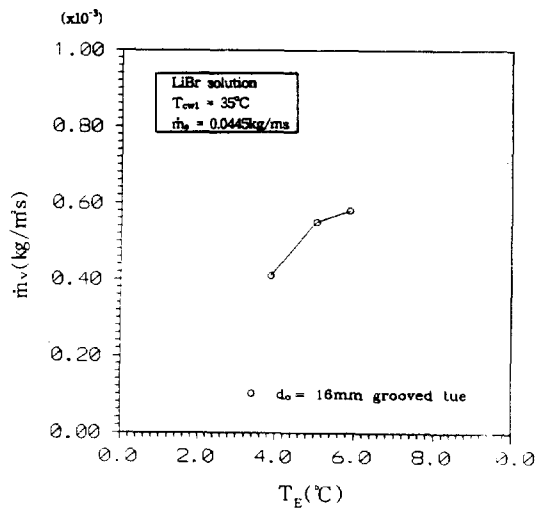


Fig.15 Effect of evaporating temperature on absorption mass flux for LiBr solution

치는지의 영향을 보여주고 있다. 과열 상태에서는 과열도가 높을수록 열전달 계수가 증가하지만, 이것은 실제로 증가한 것이 아니라, 열전달 계수를 계산하는 과정에서 식(1)과 (2)에서와 같이 평균 온도차는 용액의 평형 온도를 기준으로 계산하기 때문이다. 즉, 일정한 전열량에 대하여 실제보다 ΔT_m 이 작게 계산되므로 U값이 크게 보이는 겉보기 값이다.

Fig.11은 혼합 수용액에서 용액 입구 온도가 과냉인 상태에서의 영향을 보여주는데 과냉도가 증가할수록 열전달 계수는 전체적으로 완만하게 감소하지만, 이것도 역시 열전달 계수가 실제로 감소한 것이 아니라, 과열 상태의 경우와 마찬가지로, 실제보다 ΔT_m 이 크게 계산되어 U값이 작게 되기 때문이다. 이상으로부터 본실험에서 택한 용액의 과열 및 과냉도(용액 포화 온도의 10°C 이내)

는 전열 성능에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

Fig.12는 LiBr수용액에서 흡수량에 대한 과열 상태의 영향을 보여주고 있다. 과열도가 클수록 감소하는 경향을 나타낸다. 이것은 과열상태로 들어 오게 되면 포화온도가 될 때까지는 흡수를 하지 않으므로 흡수량이 감소하는 것으로 생각된다. 흡수량에 대한 용액 입구온도의 영향은 지금까지의 연구에서도 찾아볼 수 있는데⁽⁷⁾ 그 경향이 본 연구에서의 결과와 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다. Fig.13에서는 혼합 수용액의 경우인데 과열 상태와는 반대로 과냉도가 증가할수록 흡수기 입구에서 흡수가 활발해지므로 전체적으로 흡수량이 증가하는 경향을 보여주나 그 정도는 그다지 크지 않은 것으로 나타났다.

4.4 증발 온도의 영향

증발온도가 증가하는 것은 증발기에서 흡수기로 이동하는 증기 유동의 압력차가 증가하는 것을 의미하며 흡수 현상을 이 압력차의 변화에 직접적으로 영향을 받기 때문에 실험에서 항상 증발 온도를 정확히 유지하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 다른 모든 실험에서는 흡수식 냉온수기의 실제 설계 온도에 가깝게 증발 온도를 5°C로 유지 하였다. Fig.14와 15는 LiBr수용액을 사용한 나선형관에서의 증발 온도의 변화가 열전달계수와 흡수량에 어떻게 영향을 미치는가를 보여주고 있다. 실험 범위 내에서는 증발 온도가 높아질수록 열전달계수와 흡수량이 거의 선형적으로 증가하는 경향을 보인다.

5. 결 론

본 연구에서는 소형 공냉 흡수식 냉온수기의 개발을 위하여 세 종류의 흡수관과 두 종류의 흡수용액을 사용하여 수직관 흡수기내의 열 및 물질 전달에 대한 실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 용액 유량이 증가할수록 전체적으로 열전달 계수가 완만하게 증가한다. 0.02kg./ms 이하에서는 급격히 열 전달계수가 감소하였는데, 이는 관내부의 젖음성이 좋지 않으며 용

액이 흡수기 출구에 도달하기 전에 포화 상태에 도달하기 때문으로 생각된다. 용액 유량이 어느 범위를 넘으면 흡수량은 오히려 약간 감소하는 경향을 보이므로 용액 유량은 0.04-0.15kg./ms정도가 적당한 것으로 판단된다.

- 2) 냉각수 온도가 낮을수록 흡수 현상이 활발해지기 때문에 열전달계수와 흡수량이 증가하였다. LiBr-CaCl₂ 혼합 수용액은 LiBr 수용액에 비해 냉각수 온도가 증가함에 따라 흡수능력이 감소하는 정도가 덜하므로 냉각 공기의 온도가 높은 경우에 적합한 흡수제로 생각된다.
- 3) 흡수기 입구에서 용액이 과열 또는 과냉 상태일 때 각각 열전달 계수는 완만하게 증가, 감소하였지만 이것은 실질적인 증가, 감소가 아니라 ΔT_m 이 각각 경우에 실제보다 작거나 크게 계산되어 나타나는 걸보기 값이다. 과열 및 과냉도가 용액포화 온도의 10°C 이내에서는 열전달계수에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 흡수량은 과열 상태에서는 감소, 과냉 상태에서는 증가하였다.
- 4) 흡수관내에서의 나선형 핀은 전열면적과 기액 접촉 면적을 증가시키고 용액의 관내 체류 시간을 증가시켜서 용액의 흐름을 교란시켜 주기 때문에 나선형관이 평활관에 비해 열전달계수와 흡수량이 높게 나타났으며 같은 평활관의 경우에는 관직경이 큰 것이 작은 것보다 대체적으로 전열능력이 우수하였다. 이는 관직경이 클 경우에 수증기의 유동에 의한 압력손실이 관직경이 작은 경우보다 작기 때문인 것으로 생각된다. 이러한 경향은 LiBr 수용액의 경우에 두드러지게 나타났으며 LiBr-CaCl₂ 혼합수용액은 열전달계수가 관의 종류에 크게 영향을 받지 않았다.
- 5) LiBr-CaCl₂ 혼합 수용액은 LiBr 수용액에 비해 전체적으로 비슷한 열전달계수를 보였다. 따라서 용해도가 높아 결정 석출의 염려가 적은 LiBr-CaCl₂ 혼합용액은 공냉식 흡수식 냉온수기의 작동 유체로서 사용 가능성이 기대된다.

후 기

본 연구를 1994년도 교육부 학술연구 조성비 (기계공학 : MA94-A-07)에 의하여 수행되었으며, 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- Grossman G., 1983, "Simultaneous Heat and Mass Transfer in Film Absorption under Laminar Flow", *Int. J. Heat Transfer*, Vol.26, No.3, pp.357-371.
- 이관수, 서석청, 김영인, 박동규, 1988, "수평 원관상의 LiBr수용액에 수증기가 흡수될 때의 열 및 물질전달", "공기조화·냉동공학, 17권, 2호, pp.140-149.
- Chun K.R. and Seban R.A., 1971, "Heat Transfer to Evaporating Liquid Films", *J. Heat Transfer*, pp.391-396.
- 森岡, 清田, 1987, "垂直壁を流下する臭化リチウム水溶液膜への水蒸気の吸収実験", *日本機械學習會論文集(B編)*, 53券, 485號, pp.236-240.
- Vliet G. C. and Cosenza F.B., 1991, "Absorption Phenomena in Water-Lithium Bromide Films", *Proceedings of Absorption Heat Pump Conference '91*, Japanese Association of Refrigeration, pp.53-61.
- 功功能文, 白井三平, 大内富久, 福田民雄, 1985, "吸収冷凍機用吸収器의 傳熱性能", *日本冷凍協會論文集*, Vol.2, No.3, pp.35-41.
- 엄기찬, 柏木孝夫, 서정윤, 1993, "垂直管内를 흘러내리는 液膜式吸收器의 吸收 및 熱傳達特性(第1報, 吸收特性)", *공기조화·냉동공학*, 제 5권, 제1호, pp.1-9
- Masato O., Toshihiro H. and Yoshiya O., 1991, "Study on Heat Transfer Analysis for the Vertical Condenser/Absorber of an Air-cooling Absorption chiller/Heater", *Japanese Association of Refrigeration*, pp. 225-230.
- 柏木孝夫, 山崎努, 嚴基謙, 墨茂吉, 1992, "縱型管内吸收過程における熱及物質傳達促進", *日本冷凍協會學術講演會論文集*, pp.105-108.
- 小關康雄, 伊藤和利, 伊藤雅彦, 高橋燦吉, 1991, "LiBr-CaCl₂ 混合吸收劑を用いた吸收冷凍機의 空冷化", *日本空氣調和·衛生工學論文集*, No.47, pp.51-57.
- 小關康雄, 江原勝也, 高橋燦吉, 1991, "臭化リチウム 化カルツウム系高溶解性混合吸收媒體の研究" *日本空氣調和·衛生工學論文集*, No. 47, pp.67-73.
- Fujita T., 1993, "Falling Liquid Films in Absorption Machines", *Int. J. Refrig.* Vol. 16, No.4, pp.282-294.
- 飛原英治, 1993, "界面活性劑を添加した臭化リチウム水溶液への水蒸気の吸收", *日本空氣調和·衛生工學論文集*, Vol.68, No.788, pp.5-6.
- Yuksel M.L., Schlunder E.U., 1988, "Warme- und Stoffubergang beinichtisothermen Rie-sefilmabsorption", *Warme- und Stoffubergang* 22, pp. 209-217.
- VDI Heat Atlas, 1993, "VDI-Institution of Process and Chemical Engineering", Part Gd1-Gd5.
- 김종보, 조현철, 정시영, 이춘식, 전재학, 1993, "굴절률방법에 의한 LiBr계 흡수용액의 농도측정에 관한 연구", *공기조화냉동공학회 하계학술발표회 논문집*, pp.77-81.