

# 메탄올-글리세린계를 작동유체로 하는 흡수열펌프에서 흡수기 연구

민 병 훈†

수원대학교 화공생명공학과  
(2005년 12월 1일 접수, 2005년 12월 22일)

## A Study on Absorber in Absorption Heat Pump with Methanol-Glycerine System as a Working Fluid

Byong-Hun Min†

Department of Chemical & Biochemical Engineering, University of Suwon, Kyongki 440-600, Korea  
(Received December 1, 2005; accepted December 22, 2005)

냉·난방 수요에서 일어나는 환경오염의 최소화화 화석연료 소비를 감소시키기 위해서 에너지보존을 개선시키는 것은 필수적이다. 이러한 점에서 흡수식 열펌프기술은 에너지 절약을 위해서 많은 가능성을 가지고 있다. 흡수식 열펌프는 에너지를 주입하지 않고 폐열의 이용을 높일 수 있는 방법이다. 흡수식 열펌프는 흡수기에서 흡수된 양의 증가가 매우 중요하기 때문에 흡수기 성능이 매우 중요하다. 본 연구에서는 흡수기의 성능을 개선시키기 위해서 메탄올과 글리세린을 작동유체로 하는 두 종류의 흡수기에 관한 연구를 수행하였다. 전자는 흡수기 내에 액상을 접선방향으로 공급하는 것이고 후자는 흡수기 내벽에 나선형 관을 설치하여 액상을 접선방향으로 공급하는 것이다. 실험 결과 후자가 흡수기에서 발생하는 열 및 물질전달이 향상되어 흡수성능이 증가되었음을 알 수 있었다.

The improvement of energy conservation mandates decrease consumption of fossil fuels and minimize negative impacts on the environment, which originates from large cooling and heating demand. The absorption heat pump technology has a large potential for energy saving in this respect. Absorption heat pump is a means to upgrade waste heat without addition of extra thermal energy. The increase of absorbed amount is of great importance for absorption heat pump cycle. In this study, in order to improve the performance of absorber, the absorbers of two different types have been investigated using methanol-glycerine as a working fluid. The former was tangential feed of liquid phase without spiral tube in the absorber and the latter was with spiral tube in the absorber. The latter was found to be more effective in enhancing the mass and heat transfer to increase the absorption performance.

**Keywords:** absorption heat pump, absorber, energy saving, tangential feed, spiral tube

### 1. 서 론

교토의정서 발효에 의한 이산화탄소 배출규제 조치, 유가의 상승 등 여러 가지 문제점이 화석 에너지 사용이 증가함에 따라 발생되기 때문에 이에 대한 해결책으로 대체에너지 개발과 에너지의 효율적인 이용에 대한 관심이 증대되고 있는데 이의 한 방안으로 흡수식 열펌프 기술이 이용되고 있다. 기존 냉동 사이클에 이용되어 왔던 압축식 열펌프와 구별되는 흡수식 열펌프의 내부에 순환되는 물질(working fluid)은 열매체, 흡수제(absorbent), 열매체와 흡수제의 혼합용액(solution)으로 이루어져 있는데, 열매체의 혼합용액에 흡수에 따른 흡수열 및 열매체의 상변화에 따른 잠열을 이용하는 것으로서 조압 조건이 기-액 열역학적 상평형 관계에서 이루어진다.

열역학 제1법칙과 제2법칙을 적용시킨 열펌프 사이클은 LiBr-H<sub>2</sub>O를 이용한 Whitlow[1]의 흡수 열펌프 연구 이후로 에너지의 효율적인

이용 방안으로서 많은 관심을 끌고 있다[2-10]. 흡수식 열펌프는 이용 온도에 따라 두 종류로 나누어진다. 첫 번째 종류는 고온의 에너지로부터 저온의 에너지를 방출하여 이용하는 흡수 열펌프(absorption heat pump)와 두 번째 종류는 저온의 에너지로부터 고온의 에너지를 방출하여 이용하는 변형 흡수 열펌프(absorption heat transformer)[11-13]와 재흡수열펌프(resorption heat pump)[14-18]이다. Figure 1에서 위의 설명을 비교 나타내었다. 즉 분리기(고온, T<sub>h</sub>)와 기화기(저온, T<sub>c</sub>)에 열(Q<sub>h</sub>, Q<sub>c</sub>)을 가하여 중간온도(T<sub>i</sub>)의 에너지(Q<sub>i</sub>)를 얻는 흡수 열펌프와 분리기와 기화기에 중간온도(T<sub>i</sub>)의 열(Q<sub>i</sub>)을 가하여 흡수기에서 고온(T<sub>h</sub>)의 에너지(Q<sub>h</sub>)를 얻는 변형 흡수 열펌프를 말한다.

흡수식 열펌프의 실용화를 위해서 높은 성능계수를 얻기 위한 공정 개선과 내부에 순환시키는 이상적인 물질을 찾기 위하여 많은 연구가 진행되었다[19-25]. Whitlow가 LiBr-H<sub>2</sub>O로 연구를 시작한 이래 LiBr의 용해도와 부식성 때문에 다른 salt 물질(LiCl이나 CaCl<sub>2</sub>)로 대체하기 위한 연구를 하였으나 성능계수가 특별히 향상되지 않고 역시 용해도

† 주 저자(e-mail: bhmin@suwon.ac.kr)

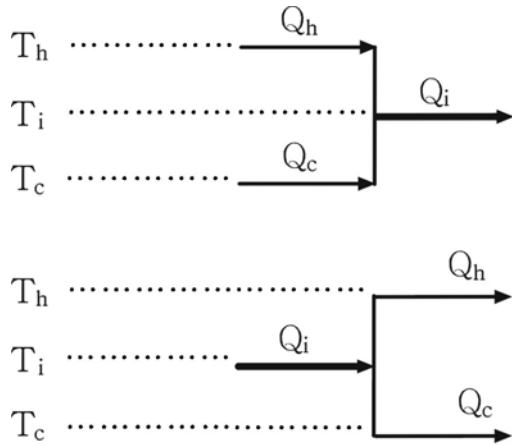


Figure 1. Different types of revaluation.

문제 때문에 조업조건이 제한됨을 보였다[26-29]. Cacciola 등[30]은 NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O에 대한 실험을 하였으나 salt 결정화 문제는 없으나 NH<sub>3</sub>의 유독성과 조업조건이 고압이 되는 단점이 있다. R21 (dichlorofluoromethane)과 Dimethyl-ether-tetra-ethylene-glycol (DMETEG)를 이용한 사이클[31,32]은 좋은 조업조건을 가졌으나 지구온난화 문제 등으로 R21의 사용규제가 있다. Bennani 등[33]은 salt의 결정화 문제가 없는 물-글리세린을 이용한 연구를 수행하였으나 물과 글리세린의 비등점 차이가 크지 않기 때문에 조업조건에 따라 이중분리기를 이용하는 단점이 있다. 그래서 물-글리세린 시스템의 단점을 줄이기 위해 열매체로 물 대신에 비등점이 낮은 물질을 이용하면 조업 조건이 개선될 것이다. 메탄올은 물에 비하여 증발열이 작지만 비등점이 낮아서 분리기에서 글리세린과 상평형 분리를 할 때 이중분리기를 사용할 필요가 없기 때문에 조업조건이 제약이 감소된다. 그러므로 본 실험에서는 메탄올-글리세린 시스템에서 실험을 수행하였다.

상평형 조건에서 연속적으로 작동되는 4기관(흡수기, 분리기, 응축기, 기화기)으로 이루어지는 흡수 열펌프 사이클은 흡수기의 성능을 향상시키는 것이 중요하다[34-37]. 흡수기에서 일어나는 기상과 액상의 물질전달과 열전달의 효과를 증대시키면 흡수를 최대화시켜 열효율을 높일 수 있다. 흡수기 내에 충전체를 주입시켜 기-액상의 접촉면적을 증대시키는 방법은 충전체에 의한 열손실이 크고 압력강하가 발생하기 때문에 대부분 흡수기 벽면을 따라 액상을 흘러 보내는 습벽탑(wetted wall tower) 방법[38-43]을 이용하고 있으나 이 방법은 벽면을 따라 흐르는 액상의 두께가 일정하지 않고 기체의 흡수효율이 떨어지기 때문에 본 연구에서는 액상을 흡수기 내에 접선방향으로 주입시키고 흡수기 내에 spiral 관을 설치하여서 열 및 물질전달 효율을 증대시키는 난류현상을 일으키고 기-액상의 접촉면적을 증대시킴으로서 습벽탑에 의한 흡수공정을 개선시키고자 하였다.

## 2. 흡수 열펌프 사이클

상평형 조건에서 연속적으로 작동되는 흡수기, 분리기, 기화기, 응축기의 4기관으로 구성되어 있는 흡수 열펌프 다이어그램을 Figure 2에 도시하였다.

응축기에서 나온 액체 열매체①은 감압 valve를 통하여 기화기에 주입된다. 기화기에 주입된 액체 열매체②는 외부로부터 열을 받아 상변화가 일어나면서 기체 열매체가 된다. 기화기에서 발생된 기체 열매체③은 분리기에서 발생된 열매체의 농도가 낮은 용액(poor so-

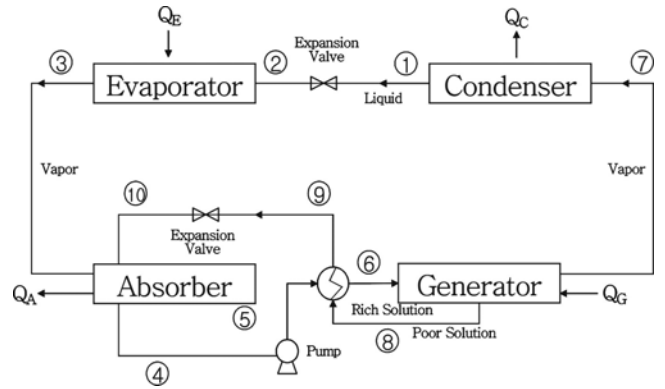


Figure 2. Schema of absorption heat pump cycle.

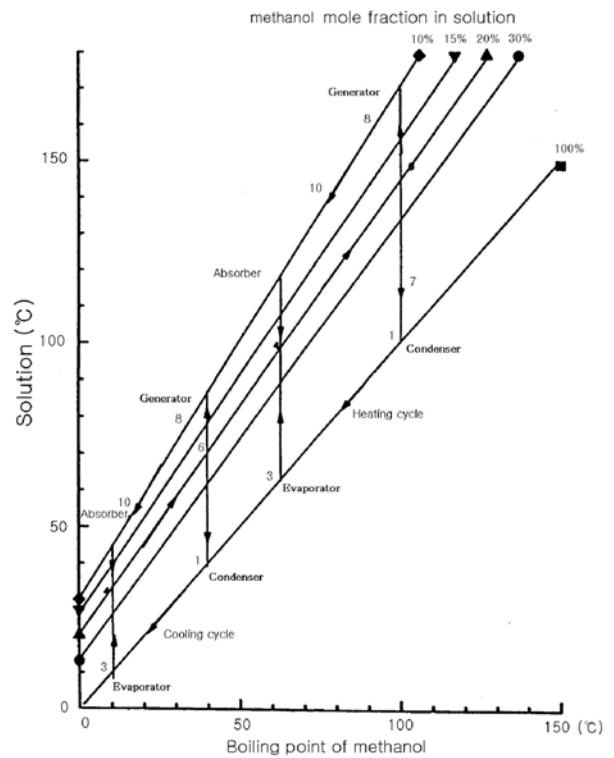


Figure 3. Absorption heat pump cycle on Dühring curve.

lution)⑩에 흡수기에서 흡수되면서 열을 발생한다. 흡수기에서 나온 열매체의 농도가 진한 용액(rich solution)④은 열교환기와 펌프를 통하여 분리기에 주입된다. 외부에서 가한 열에 의해 분리기에서는 상분리가 일어나서 기체 열매체⑦은 응축기로 주입되고 농도가 낮은 용액⑧은 열교환기와 감압 valve를 통하여 흡수기에 주입된다. 농도가 낮은 용액과 농도가 진한 용액은 각 기관에 주입되기 전에 열교환기를 통하여 농도가 낮은 용액은 냉각이 되어 흡수기에서 냉매체의 흡수 능력이 높아지고 농도가 진한 용액은 가열되기 때문에 분리기에 가해 줄 영향을 줄일 수 있다.

4기관의 압력과 온도 조건은 다음과 같다.

$$P_G = P_C : \text{고압}$$

$$P_A = P_E : \text{저압}$$

$$T_E < T_C < T_A < T_G$$

위의 순환과정을 메탄올과 글리세린의 상평형 데이터를 이용하여 Duhring 곡선에 도시한 것이 Figure 3이다.

2.1. 흡수기에서 열역학 제한 조건

흡수기에서 나오는 용액의 열역학적 조건은 다음과 같다.

$$P_A = P_E \tag{1}$$

$$\ln P_E = \ln P_A^{sat} + \ln \gamma_A X_A$$

여기서  $\gamma_A$ 와  $X_A$ 는 각각 흡수기 내의 용액에서 메탄올의 활동도계수와 메탄올의 몰분율을 나타낸다.

Clausius-Clapeyron 식에서

$$-\lambda/RT_E + B = -\lambda/RT_A + B + \ln \gamma_A X_A \tag{2}$$

여기서  $\lambda$ 는 메탄올의 증발열,  $B$ 는 상수를 나타낸다.

윗식을 정리하면

$$(\lambda/R)(1/T_A - 1/T_E) = \ln \gamma_A X_A \tag{3}$$

$T_E < T_A$ 이므로  $\gamma_A X_A < 1$ 이어야 한다.

3. Peclet 수를 구하는 방법

흡수기 내의 난류현상을 관찰하기 위하여 일반적으로 추적자(tracer)의 체류시간분포(residence time distribution)를 이용하여 Peclet 수를 구한다. 추적자를 dirac delta function 형태로 흡수기 입구에 순간적으로 주입하는 흡수기 내에서 추적자에 대한 물질수지식을 세우면 다음과 같다[44].

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -U \frac{\partial C}{\partial x} + D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \tag{4}$$

여기서  $C$ 는 추적자의 농도,  $U$ 는 유속,  $D$ 는 분산계수(dispersion coefficient),  $x$ 는 입구에서부터 거리,  $t$ 는 시간을 나타낸다.

경계조건을 닫힌 용기로 가정하여 Danckwert 경계조건을 이용하면 다음과 같다.

초기치 at  $t=0, C=0$  (5)

경계치 at  $x=0$ (입구),

$$AU\delta(t) = AUC |_{x=0} - AD \frac{\partial C}{\partial x} |_{x=0} \tag{6}$$

at  $x=L$ (출구),  $\frac{\partial C}{\partial x} |_{x=L} = 0$  (7)

여기서  $A$ 는 흡수기의 단면적을 나타낸다.

무차원으로 고치기 위하여 변수를 다음과 같이 치환하면

$$z = \frac{x}{L}, \theta = \frac{t}{\bar{t}} \text{ 여기서 } \bar{t} \text{는 평균체류시간}$$

(4) 식을 변수 치환하여 Laplace Transform 한 후

출구 ( $z=1$ )에서 값을 구하면

$$C^*(1, S) = \frac{4\beta e^{-\frac{Pe(1-\beta)}{2}}}{(1+\beta)^2 - (1-\beta)^2 e^{-Pe\beta}} \tag{8}$$

단  $\beta = \sqrt{1 + \frac{4S}{Pe}}$

여기서  $Pe$ (Peclet number) =  $\frac{UL}{D}$

$C(1, \theta) = \text{laplace}^{-1}[C^*(1, S)]$ 에서 Inverse Transform은 구하기가 어려우므로 Vander Laan의  $n^{\text{th}}$  moment 식을 이용하면

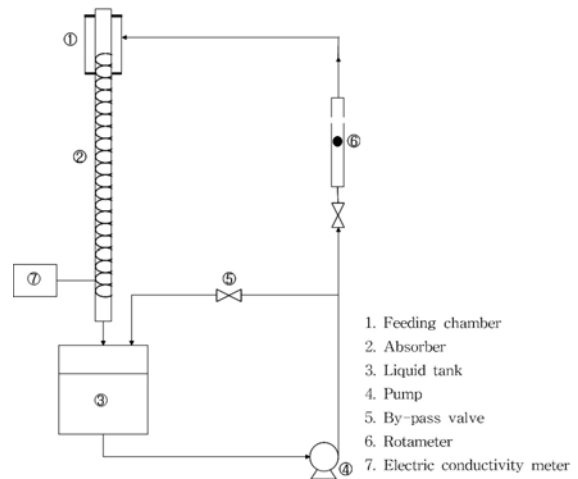


Figure 4. Experimental apparatus for the measurement of residence time distribution.

$$M_n = \int_0^\infty \theta^n C(1, \theta) d\theta = (-1)^n \lim_{s \rightarrow 0} \frac{\partial^n C^*(1, S)}{\partial S^n}$$

1차 moment

$$M_1 = \theta_m = \int_0^\infty \theta C(1, \theta) d\theta = - \lim_{s \rightarrow 0} \frac{\partial C^*(1, S)}{\partial S} = 1$$

2차 moment  $M_2 = \int_0^\infty \theta^2 C(1, \theta) d\theta = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{\partial^2 C^*(1, S)}{\partial S^2}$

$$= \frac{2}{Pe} - \frac{2(1 - e^{-Pe})}{Pe^2} + 1$$

$$\sigma^2 = \int_0^\infty (t - \bar{t})^2 C(t) dt$$

$$t = \bar{t} \theta, C(\theta) = \bar{t} C(t) \text{ 이므로}$$

$$\sigma_{\theta}^2 = \int_0^\infty (\theta - \theta_m)^2 C(\theta) d\theta = \frac{\sigma^2}{\bar{t}^2}$$

그러므로  $\frac{\sigma^2}{\bar{t}^2} = \frac{2}{Pe} - \frac{2(1 - e^{-Pe})}{Pe^2}$  (9)

흡수기 출구에서 나오는 추적자의 농도를 시간에 따라서 측정된 RTD값을 구하여 이 곡선의 표준편차( $\sigma^2$ )와 평균체류시간( $\bar{t}$ )을 계산하면 Peclet 수를 구할 수 있다.

4. 실험

4.1. 체류시간분포 실험 측정 장치

출구에서 추적자의 체류시간분포를 측정할 실험장치는 Figure 4에 나타내었다. 추적자는 2 N NaCl 수용액으로서 흡수기 상부에 상온으로 유속 40 L/h로 공급되는 액체인 물에 추적자 10 mL를 주사기로 dirac delta function 형태로 주입하여 출구에서 배출되는 용액의 전기전도도 값을 시간 변화에 따라 측정하였다. 흡수기의 주입구는 직경 1 mm의 오리피스 형태의 구멍을 관의 접선방향으로 뚫었고 흡수기 내의 나선형 관의 설치는 용이하게 하였다.

흡수기의 사양은 다음과 같다.

흡수기관 : 내경 35.5 mm, 외경 42.5 mm, 길이 110 cm

나선형관 : 지름 4 mm, 파장길이 20 mm

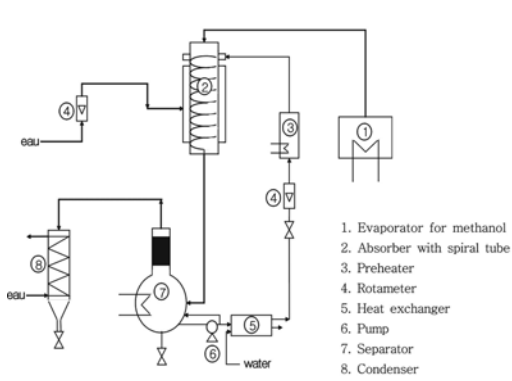


Figure 5. Experimental apparatus for the concentration measurement in the absorber.

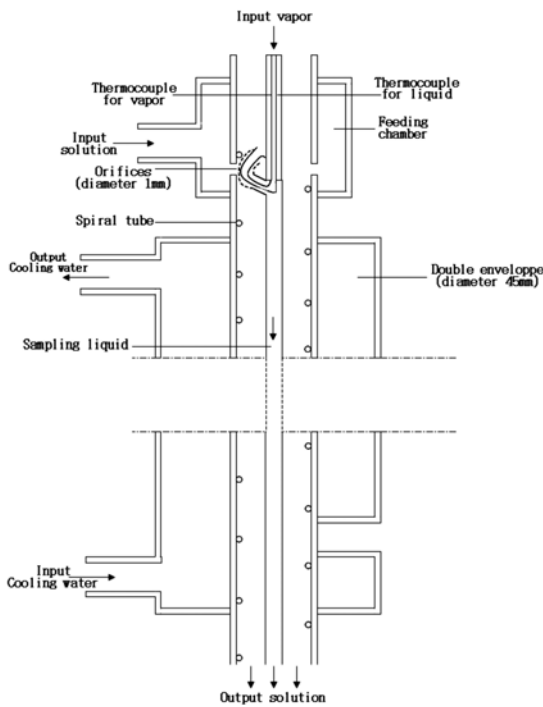


Figure 6. Schematic of absorber.

4.2. 흡수기 내의 용액의 농도 측정 실험 장치

흡수기에서 글리세린에 메탄올 증기의 흡수실험 장치는 Figure 5에 나타내었다. 나선형관이 설치된 흡수기 상부에서 글리세린 액체와 메탄올 증기가 병류 방향(co-current)으로 주입되는데 글리세린 액체는 접선방향으로 뚫린 오리피스 구멍으로, 메탄올 증기는 관의 최상부에서 주입된다. 흡수기 내부의 구조는 Figure 6에 나타내었다. 흡수기 내부에는 용액의 농도를 측정할 수 있는 직경 1 mm sampling관이 설치되었다. sampling관의 옆 부분에 갈고리 모양의 관이 있는데 이 부분의 위치가 흡수기 벽면에 부착된 나선형 관위에 정확히 일치할 경우 용액이 갈고리 관을 통하여 sampling관 내부 아래로 흐른다. 이 용액을 채취하여 굴절계를 이용하여 용액의 메탄올 농도를 측정할 수 있다. sampling관은 흡수기 아래에 특수 제작된 압축 고무 링으로 부착되어 누수(leakage)도 없고 이동이 용이하기 때문에 흡수기 각 위치에서 용액의 농도를 측정할 수 있었다. sampling 관의 구조는 Figure 7에 나타내었다.

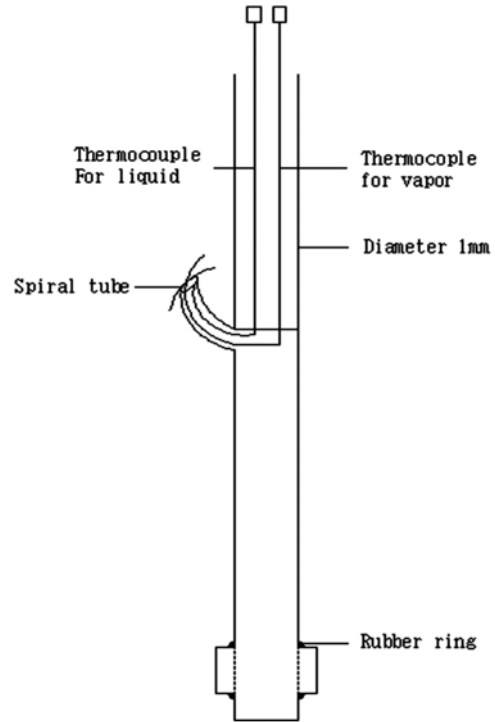


Figure 7. Schematic of sampling tube.

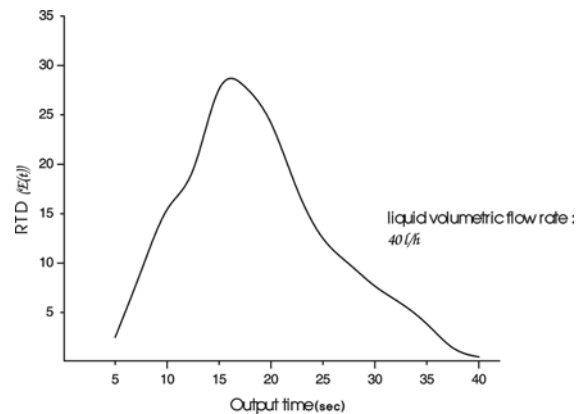


Figure 8. Residence time distribution curve without spiral tube

5. 결과 및 고찰

5.1. 체류시간분포도 측정실험

체류시간분포도 곡선을 Figure 8과 Figure 9에 나타내었다. spiral관을 설치한 것이 체류시간이 길고 곡선의 표준편차가 작은 것을 알 수 있었다. 이것은 spiral관이 액체의 난류현상을 일으켜 분산계수 D값을 감소시켜 Peclet 수를 증대시킴을 알 수 있었다. 또한 흡수기에 주입된 액체가 spiral관이 없는 경우 흡수기 내부 벽면을 따라 흐르는 반면에 spiral이 설치된 경우 spiral관을 따라 흐르기 때문에 액체가 흡수기에 머무는 체류시간이 길어져서 기체와 접촉할 수 있는 시간이 많아지기 때문에 흡수력이 증가함을 알 수 있다.

Figure 10은 흡수기 내에서 액체 유량에 따른 평균체류시간을 나타내었다. spiral관을 설치한 것이 2배 이상 길어짐을 알 수 있었다. Figure 11은 ⑥식을 이용하여 구한 Peclet수를 액체 유량의 변화에 따

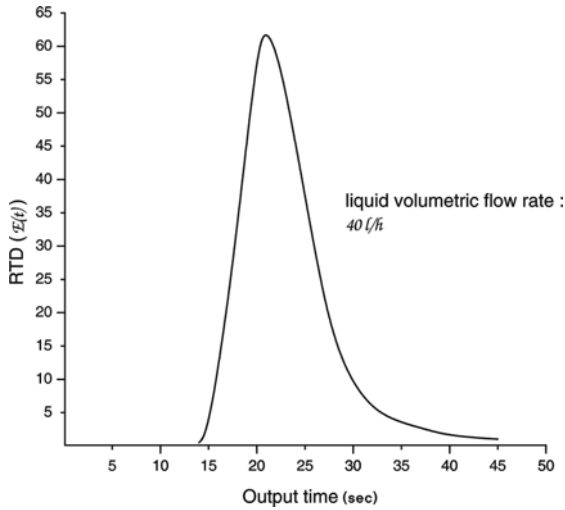


Figure 9. Residence time distribution curve with spiral tube.

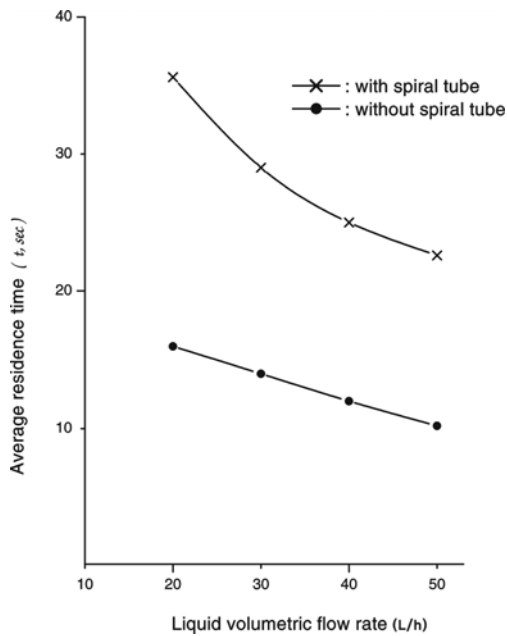


Figure 10. Average residence time against liquid volumetric flow rate.

라 나타내었다. 일반적으로 Peclet수가 100 이상인 경우 피스톤 흐름으로 간주할 수 있는데 spiral관이 설치된 경우 유량이 40 L/h 이상일 때 Peclet수가 100이 넘기 때문에 난류현상이 많이 발생한다고 볼 수 있다. 반면에 spiral관이 없는 경우 본 실험 조건에서 Peclet수가 100이 넘지 않음을 알 수 있었다.

5.2. 흡수실험

Spiral관이 설치된 흡수기 내에서 글리세린 액체에 메탄올 증기의 흡수 실험을 수행하였다. Figure 12에서 흡수기 위치에 따른 액상의 메탄올 농도 변화를 나타내었다.

흡수기 주입부분(상층부)에서 흡수가 급격히 일어남을 알 수 있는데 이는 주입부분에서 난류효과가 커지다가 흡수기 하부로 내려갈수록 난류효과가 감소되기 때문이다. 또한 흡수기 중반부에서 기-액 평형상태에 도달하기 때문에 더 이상의 흡수가 일어나지 않음을 알 수

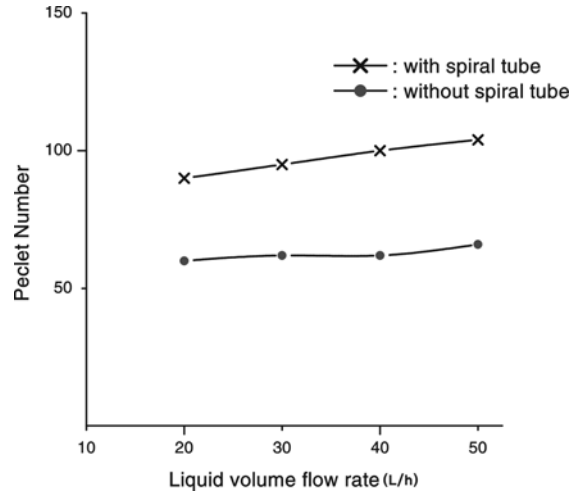


Figure 11. Peclet number against liquid volumetric flow rate.

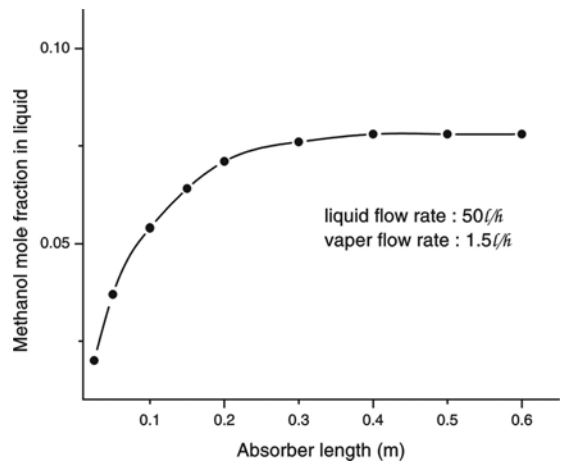


Figure 12. Absorption rate in the absorber.

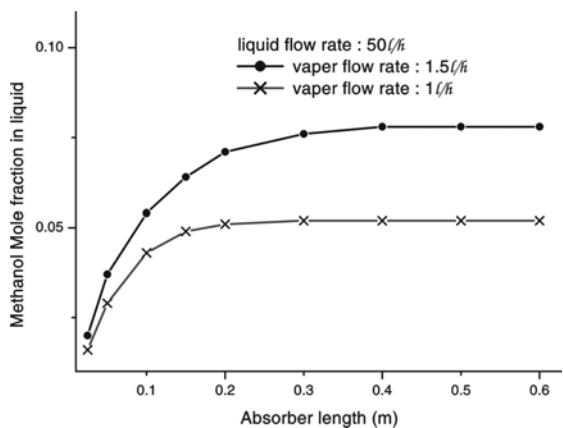


Figure 13. Absorption rate with different vapor flow rate in the absorber.

있었다. Figure 13에서 기체의 유량 변화에 따른 액상의 메탄올 농도 변화를 나타내었다. 기체 유량이 증가할수록 흡수시간이 길어지며 기-액 평형에 도달하는데 오랜 시간이 걸림을 알 수 있었다. 그러므로 흡수기 내에서는 열전달 및 물질전달이 동시에 일어나기 때문에 최적의 흡수기 설계를 위해서는 전달계수를 구해야 됨을 알 수 있었다.

## 6. 결 론

메탄올-글리세린 시스템을 이용하여 흡수열펌프에서 중요한 기관인 흡수기 연구를 수행한 결과는 다음과 같다.

(1) 흡수기 내에 spiral관을 설치한 경우 기-액 접촉시간이 길어지고 또한 액상에서 난류현상을 일으키기 때문에 흡수력이 좋아짐을 알 수 있었다. 이것은 tangential 액상 주입이 피스톤 흐름을 일으키지만 spiral관을 설치할 경우 이 흐름을 흡수기 내에서 오래 동안 유지시켜 주기 때문에 spiral관 설치가 기-액 흡수에 더 효율적임을 알 수 있었다.

(2) 흡수기의 주입부분에서 흡수속도가 빠름을 알 수 있었는데 이는 주입 부분에서 액상의 tangential 공급과 spiral관의 설치로 인하여 난류현상이 가장 커지기 때문이며 tangential 주입구를 여러 개 만든 흡수기에 액상을 병렬로 주입시키는 것이 흡수기 성능을 최대 높일 수 있다.

(3) 흡수기 설계를 위해서 필요한 조건으로서 최적의 spiral 관의 파장 및 두께, 흡수기 내에서 동시에 일어나는 열전달 및 물질전달 계수 값이 필요하다.

## 감 사

본 논문은 2005년도 환경청기술연구센터의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 표합니다.

## 사 용 기 호

A	: cross-sectional area of absorber [cm <sup>2</sup> ]
C	: concentration of tracer [gmol/cm <sup>3</sup> ]
D	: dispersion coefficient [cm <sup>2</sup> /sec]
P	: pressure [Pa]
Pe	: Peclet number
R	: gas constant [J/gmol·K]
T	: temperature [°C]
$\bar{t}$	: mean residence time of RTD
U	: velocity [cm/sec]
X	: mole fraction [%]
x	: distance [cm]
t	: time [sec]

### 그리스 문자

$\gamma$	: activity coefficient
$\lambda$	: heat of vaporization [J/gmol]
$\sigma^2$	: standard deviation of RTD

### 아래첨자

A	: absorber
C	: condenser
E	: evaporator
G	: generator

## 참 고 문 헌

1. E. P. Whitlow, *Gas Age*, **30**, October, 19 (1958).

2. G. Cacciola, G. Restuccia and G. Rizzo, *Heat Recovery Systems & CHP*, **10**, 177 (1990).

3. M. Izquierdo and S. Aroca, *Int. J. Energy Research*, **14**, 281 (1990).

4. A. Jemqvist, K. Abrahamsson, and G. Aly, *Heat Recovery Systems & CHP*, **12**, 469 (1992).

5. F. Ziegler and P. Riesch, *Heat Recovery System & CHP*, **13**, 147 (1993).

6. B. Agnew, A. Alaktiwi, A. Anderson, and I. Potts, *Applied Thermal Engineering*, **24**, 1501 (2004).

7. R. J. Romero, L. Guillen and I. Pilatowski, *Applied Thermal Engineering*, **24**, 867 (2005).

8. J. P. Roberson, C. Y. Lee, R. G. Squires, and L. F. Albright, *ASHRAE Trans.*, **72**, 198 (1966).

9. K. P. Tyagi, *Heat Recovery System & CHP*, **12**, 283 (1992).

10. T. Uemura, *Refrigeration*, **42**, 2 (1967).

11. P. Le Goff and B. Schwarzer, *Entropie*, **156**, 5 (1990).

12. R. Matsuda, *3rd IEA Heat Pump Conference*, Tokyo (1990).

13. S. Iyoki and T. Uemura Rev. *Int. Froid*, **13**, May, 191 (1990).

14. S. Gabsi, Ph. D. Dissertation, I.N.P.T, Toulouse, France (1981).

15. M. B. E. Siddig, F. A. Watson, and F. A. Holland, *Chem. Eng. Res. Dev.*, **61**, 283 (1983).

16. L. L. Vasiliev, D. A. Mishkinis, A. A. Antukh, and A. G. Kulakov, *Applied Thermal Engineering*, **24**, 1893 (2004).

17. E. Lepinasse, M. Marion, and V. Gotez, *Applied Thermal Engineering*, **21**, 1251 (2001).

18. S. T. Munkejord, H. S. Mahelum, and P. Neksa, *Int. J. of Refrigeration*, **25**, 471 (2002).

19. M. A. R. Eisa, S. Devotta, and F. A. Holland, *Applied Energy*, **25**, 83 (1986).

20. M. Narodoslawski, G. Otter, and F. Moser, *Heat Recovery System & CHP*, **8**, 221 (1988).

21. M. Izquierdo and S. Aroca, *Int. J. Energy Research*, **14**, 281 (1990).

22. A. Jemqvist and G. Aly, *Heat Recovery System & CHP*, **12**, 469 (1992).

23. F. Ziegler and P. Riesch, *Heat Recovery System & CHP*, **13**, 147 (1993).

24. J. B. Castro, J. M. Corberian, and J. Gonzalez, *Applied Thermal Engineering*, **25**, 2450 (2005).

25. M. Youbi-Idrissi, J. Bonjour, and F. Meunier, *Applied Thermal Engineering*, **25**, 2827 (2005).

26. M. A. R. Eisa and R. Best, *Applied energy*, **28**, 69, (1987).

27. G. S. Grover, M. A. R. Eisa, and F. A. Holland, *Heat Recovery System & CHP*, **8**, 33 (1988).

28. K. R. Patil, M. A. R. Eisa, and M. N. Kim, *Applied energy*, **34**, 99 (1989).

29. S. H. Won and W. Y. Lee, *Heat Recovery System & CHP*, **11**, 41 (1991).

30. G. Cacciola, G. Restuccia and G. Rizzo, *Heat Recovery System & CHP*, **10**, 177 (1990).

31. B. Mohanty, Ph. D. Dissertation, I.N.P.T, Toulouse, France (1985).

32. P. D. Dan and S. S. Murthy, *Int. J. Energy Research*, **13**, 1 (1989).

33. N. Bennani and D. Prevost, *Heat Recovery System & CHP*, **9**, 257 (1989).

34. D. Daiguji, E. Haihara and T. Saito, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **40**, 1743 (1997).

35. C. Kren, H. M. Hellmann, and F. Ziegler, *Proceeding of the Int-*

- ernational Sorption Heat Pump Conference*, Munich, 375 (1999).
36. F. Ziegler and G. Grossman, *Int. J. Refrigerat*, **19**, 301 (1996).
37. Z. Zhneguo, X. Tao, and F. Xiaoming, *Applied Thermal Engineering*, **24**, 2293 (2004).
38. W. L. Cheng, K. Houda, P. Hu, and T. Kashiwagi, *Applied Thermal Engineering*, **24**, 281 (2004).
39. D. Arzo, P. Rodriuez, and M. Izquierdo, *Applied Thermal Engineering*, **25**, 797 (2005).
40. G. Grossman, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **26**, 357 (1983).
41. K. Guo, B. Shu, and L. Chen, *J. Eng. Thermophys*, **15**, 408 (1996).
42. E. Hihara and T. Saito, *Int. J. Refrigerat*, **16**, 339 (1993).
43. W. J. F. Setterwall, *Chem. Eng. Sci.*, **50**, 3077 (1995).
44. O. Levenspiel, *Chemical Reaction Engineering*, 3ed. W. Anderson, 3, 293, John Wiley and Sons, New York (1999).