

암모니아-물 기포분사형 흡수과정에서의 흡수열 제거를 위한 열전달 특성 연구

이재철 · 이기봉 · 전병희 · 이관호 · 하종주 · 김성현*

고려대학교 화학공학과

A Study on Heat Transfer Characteristics for Removal of Absorption Heat in Absorption Process of Ammonia-Water Bubble Mode.

Jae-Cheol Lee, Ki-Bong Lee, Byung-Hee Chun, Chan-Ho Lee, Jong-Joo Ha, Sung-Hyun Kim*
Dept. of Chemical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, KOREA

요 약

흡수기는 흡수식 열펌프 시스템에서 중요한 구성요소일 뿐만 아니라 흡수기의 성능은 전체 시스템에 중요한 영향을 미친다. 본 연구에서는 기포분사형 흡수기에서의 암모니아기체의 흡수열의 효과적 제거를 위한 냉각수 방향으로의 열전달에 대해 실험적 연구를 수행하였다. 흡수기에 유입되는 암모니아 기체의 유속, 암모니아 수용액의 유속, 농도, 온도, 흡수기의 지름, 높이, 기체와 용액의 유입 방향등 여러 가지 변수에 대하여 열전달 성능의 특성을 살펴본 결과, 기체의 주입량, 용액의 주입량 증가는 열전달 성능 향상에 기여하며, 용액의 온도나 농도의 상승은 열전달 성능에 방해요소로 작용하였으며 흐름방향이 향류인 경우 열전달 성능에 향상이 있었다. 본 실험의 데이터를 이용하여 상관관계식을 유도하여 열전달에 대한 복잡한 관계를 일반화 하였다.

ABSTRACT : An absorber is a major component in the absorption refrigeration systems and its performance greatly affects the overall system performance. In this study, experimental analyses on heat transfer characteristics for removal of absorption heat in ammonia-water bubble mode absorber were performed. Heat transfer coefficients were estimated as the variations of input gas flow rate, solution flow rate, temperature, concentration, absorber diameter and height, and input flow direction. The increase of gas and solution flow rate affects positively in heat transfer. However, the increase of solution temperature and concentration affects negatively. Moreover, under the same Reynolds Numbers, countercurrent flow is superior to cocurrent flow in heat transfer performance. In addition, from these experimental data, empirical correlations which can explain easily the characteristics of heat transfer are derived.

Keywords: Absorption Process, Absorption Heat Pump, Heat Transfer, Bubble Mode, Ammonia-Water

1. 서 론

1992년 몬트리올 협정에서는 CFC 및 HCFC의 사용을 각각 1997과 2002년부터 전면 금지시키기로 하였고, 1997년에는 2008~2012년까지 전세계 온실가스 배출량을 5.2% 줄이는 것을 골자로 하는 교토 선언이 합의되었다. 이러한 상황을 타개하기 위한 많은 연구 중 흡수식 열펌프는 환경 친화적인 자연냉매를 사용하는 열구동 시스템으로 다시 주목을 받고 있다. 특히 흡수식 열펌프의 구성요소 중 흡수기는 냉매와 용액간의 활발한 물질전달과 냉각수방향으로의 열전달이 동시에 일어나는 핵심요소이다. 그러나 일반적인 흡수공정에 사용되는 충전탑 형태의 흡수장치로는 흡수열을 제대로 제거할 수 없어 열펌프 시스템에 적용하기 어렵다. 즉 열펌프 시스템에 대한 적용을 위해서는 흡수과정에 대한 연구 또한 필요하겠지만 흡수열 제거를 극대화 할 수 있는 흡수기 제작이 필수적이다. 흡수식 열펌프에 사용되는 일반적인 흡수기 형태로는 박막모드와 기포분사모드가 있으며 이 두 방식 모두 열전달의 극대화를 이룰 수 있는 형태이다. 박막모드 흡수방식에 대해서는 물질전달 뿐만 아니라 열전달에 있어서도 많은 연구가 진행되었으나, 기포분사 흡수방식에 대해서는 연구가 상대적으로 미약한 상황이다. 특히 기포분사 흡수방식에 대한 수학적 모사와 물질전달 실험에 대한 연구결과는 여러 논문을 통해 발표되고 있으나 기포분사 방식으로 흡수가 진행될 경우의 흡수열 제거를 위한 열전달에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다.

본 연구에서는 지금까지 연구되지 않은 물과 암모니아간의 물질전달이 실제 기포모드 흡수과정으로 진행될 경우의 벽면을 통해 냉각수로 전달되는 열전달 특성을 주입가스, 주입용액, 가스-용액간의 온도차, 가스-용액간의 농도차, 가스-용액의 흐름 방향, 흡수기 길이, 흡수기 지름 등 다양한 작동 변수의 변화에 대하여 분석하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

열전달 실험용으로 흡수기 벽면에 냉각수가 흐를 수 있도록 이중자켓으로 이루어진 지름과 높이가

각각 3cm-70cm, 3cm-40cm, 2cm-70cm, 4cm-70cm인 실린더 형태를 가진 네가지의 스테인레스 흡수기를 제작하였다. 기체는 흡수기 하단의 3mm의 기포분사부를 통하여 분사되며, 용액은 흡수기 하단 또는 상단으로 유입 될 수 있도록 설계하였다. 열전달의 특성을 파악하기 위해 냉각수 주입과 출구라인, 암모니아 용액 주입과 출구라인 그리고 내부등 총 6개의 열전대(Thermocouple)를 설치함으로써 온도분포상태를 확인하였다. 흡수기에 유입되는 용액은 가열기 3개가 설치된 용액탱크에서 예열시키고 주입라인에 가열기를 설치하여 원하는 온도로 조절하였다. 또한 용액의 유량을 조절하기 위해 흡수기 입구부에 Metering valve, 주입라인에서 By-pass를 행하였다. 냉각수는 항온조로부터 일정유량이 지속적으로 유입되며 흡수기를 거쳐 다시 항온조로 유입되어 순환한다. 실험장치에서 측정된 온도는 데이터 축적 시스템에 의하여 컴퓨터에 온라인으로 저장하였고, 암모니아 샘플의 농도는 전기전도도를 측정하여 실험으로 구한 Standard curve로부터 분석하였다.

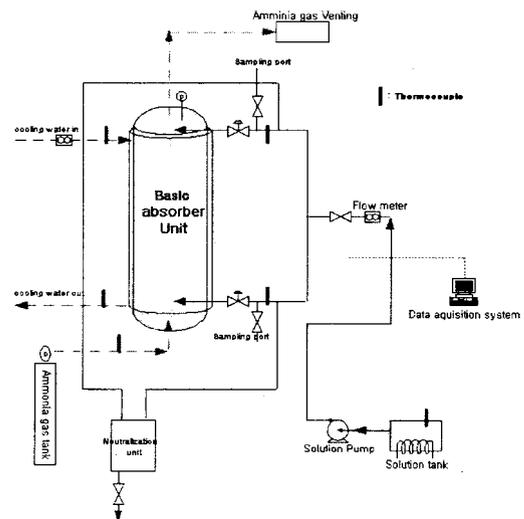


Fig. 1. Experimental Bubble Mode Absorber System for Heat Transfer Experiments.

상압(1atm)의 조건에서 용액의 농도(0~28%), 온도(15-60℃), 유속(0.2~0.8kg/min), 유입방향 및 기체의 유속(1~9L/min)을 변화시키며 설치된 열전대를 통하여 얻은 냉각수의 온도변화와 흡수기와 냉각

수사이의 온도차에 의해 열전달계수를 계산하였다. 흡수기 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 또한 실험을 통한 결과 해석의 원리에 대한 이해를 돕기 위해 간단한 모식도로 표현해 Fig. 2에 나타내었다.

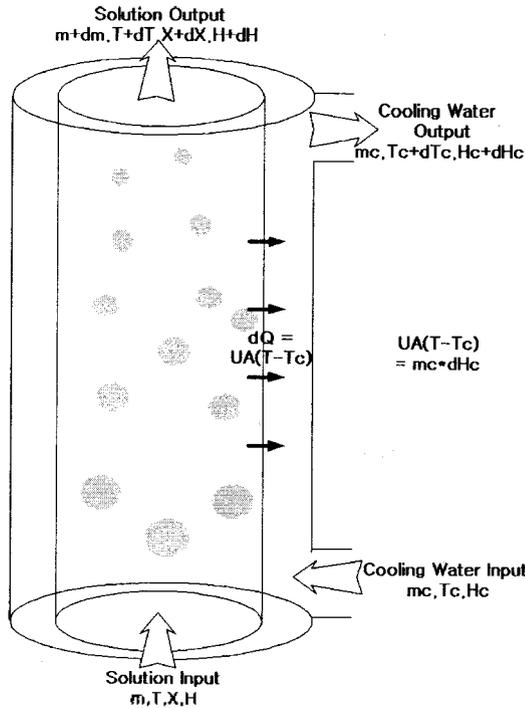


Fig. 2. Theoretical Schematic for Heat Transfer

3. 실험 결과 및 해석

3.1. 실험 결과 해석 방법

3.1.1. 총괄 열전달 계수 산출 방법

관속을 흐르는 유체와 관 외부로 흐르는 냉각수 간의 열전달 메카니즘에서 총괄 열전달 계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_{all} \cdot A \cdot dT = \dot{m} \cdot C \cdot dT_c \quad (1)$$

U_{all} = 총괄 열전달계수

A = 열전달 면적

dT = 흡수용액과 냉각수 사이의 온도차

\dot{m} = 냉각수의 질량유속

C = 냉각수의 비열

dT_c = 냉각수의 총 온도변화

즉 냉각수의 주입부와 출구의 온도 변화를 통하여 흡수기에서 전달된 열량이 계산되며 흡수기 벽면의 단면적과 흡수기와 냉각수 사이의 평균 온도차를 알 수 있으므로 총괄 열전달 계수(U_{all})를 쉽게 구할 수 있다.

3.1.2. 내부 열전달 계수(h_{abs}) 산출 방법

흡수기내의 열전달 현상의 변화를 측정하기 위해서는 흡수기 내부 벽면의 열전달 계수(h_{abs})의 측정이 가장 중요한 일이다. 총괄 열전달 계수와 흡수기 내부 벽면의 열전달 계수와의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_{all} = \frac{1}{1/h_{abs} + \delta_w/k_w + 1/h_c} \quad (2)$$

$$h_{abs} = \frac{1}{1/U_{all} - \delta_w/k_w - 1/h_c} \quad (3)$$

δ_w = 벽면의 두께

k_w = 벽면의 열전도도

h_{abs} = 흡수기 내부 벽면의 열전달 계수

h_c = 냉각수 벽면의 열전달 계수

특히 다양한 종류의 흡수기 형태를 사용하였으므로 냉각수를 동일한 양으로 주입하더라도 냉각수 벽면의 열전달계수 (h_c)는 조금씩 변화할 수 밖에 없다. 그러나 정확한 흡수기내의 열전달 계수(h_{abs})의 변화를 알아 내기 위해서는 각각의 흡수기 마다 h_c 의 추정이 필수적이다. 그러나 총괄 열전달 계수로부터 냉각수 벽면의 열전달 계수 h_c 를 구해 내는 일야 쉬운 일은 아니다. 본 연구에서는 다음과 같은 방법으로 h_c 를 추정을 시도하였다. 원통형 파이프 안쪽 벽면에 일어나는 열전달에 대한 경험식으로부터 열전달 계수와 Reynolds number의 관계를 추정할 수 있다. 다음은 파이프 안을 유체가 층류로 흐를 경우 벽면 내부의 열전달 계수에 대한 관계식이다.

$$Nu \propto Gz^{1/3} \tag{4}$$

$$Gz = mCp/kL = (\pi \rho VD^2Cp)/4kL$$

$$= (\rho DV/\mu) (\pi CpD\mu/4kL) = Re (\pi CpD\mu/4kL) \tag{5}$$

$$\therefore h_{abs} = aRe^\beta \tag{6}$$

$$1/U_{all} - \delta_w/k_w = 1/h_{abs} + 1/h_c \tag{7}$$

$$Y(=1/U_{all} - \delta_w/k_w) = a'Re^{-\beta} + y0(=1/h_c) \tag{8}$$

- Nu = Nusselt Number ($h_{abs}D/k$)
- Gz = Graetz Number (mC_p/kL)
- Re = 유체의 Reynolds Number($\rho DV/\mu$)
- m = 파이프 내부 유체의 질량유속
- Cp = 유체의 비열
- k = 유체의 열전도도
- L = 파이프의 길이
- ρ = 유체의 밀도
- V = 유체의 선속도
- D = 파이프의 내경
- μ = 유체의 점도

위 식에서 알 수 있듯이 Nusselt Number 는 Graetz Number와 비례관계를 가지고 있으므로 이를 용액의 Reynolds Number 와의 관계로 변환 할 수 있다. 냉각수는 일정한 유량으로 계속 흘러주면서 흡수기 내의 용액 주입량을 변화 시켜 용액의 Reynolds number를 변화 시키면서 총괄 열전달 계수를 구한다. 이를 이용하여 a, β , y0를 Plot를 통하여 얻는다. y 절편인 y0의 역수는 결국 hc가 된다. 다음은 본 실험에 사용한 흡수기에 대하여 hc를 추정 한 결과를 나타낸 것이다.

- height 70cm, Diameter 3cm 흡수기인 경우

$$Y(=1/U_{all} - \delta_w/k_w) = 9.17873e^{-3} Re^{0.26} + 9.49908e^{-4}(=1/h_c)$$

$$\therefore h_c = 1052.734 [J/(s \cdot K \cdot m^2)]$$

- height 70cm, Diameter 2cm 흡수기인 경우

$$Y(=1/U_{all} - \delta_w/k_w) = 0.01122 Re^{0.26} + 1.60228e^{-3}(=1/h_c)$$

$$\therefore h_c = 624.1099 [J/(s \cdot K \cdot m^2)]$$

위와 같이 총괄 열전달 계수 U_{all} 와 h_c 를 구한 후, 식 (3)에 의해 열전달계수(h_{abs})를 구할 수 있다.

3.2. 연구 결과 해석

3.2.1. 주입 가스의 영향

Fig. 3은 지름 3cm 흡수기에 암모니아 수용액(흡수제)의 Reynolds number를 184로 일정하게 주입시키는 조건에서의 주입되는 암모니아가스(흡수가스)의 변화에 대한 열전달계수의 변화를 나타내는 것이다. 주입 가스의 Reynolds Number의 증가 즉 주입량의 증가에 따라 열전달계수가 증가함을 볼 수 있다. 이는 층류로 흘러가는 관 안의 액상 속으로 주입되는 기체는 액상흐름에 와류, 난류를 형성하여 열경계층을 효과적으로 파쇄 시킬 수 있기 때문이다.

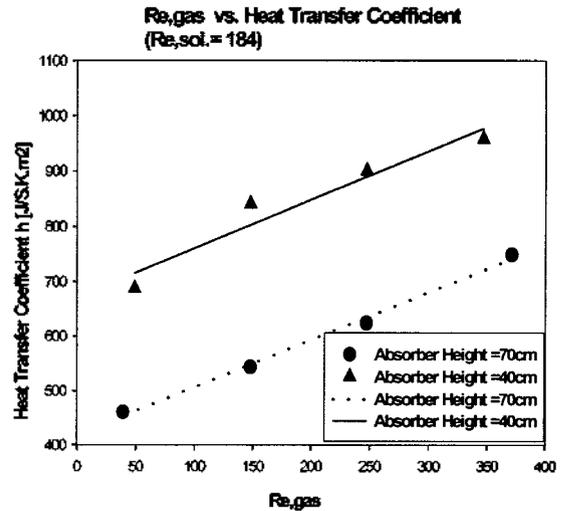


Fig. 3. Effect of Gas Flow Rate on Heat Transfer Coefficient

3.2.2. 주입용액의 영향

Fig. 4는 지름 3cm 흡수기에 암모니아 주입가스 Reynolds number를 248로 일정하게 주입시키는 조건에서의 주입용액, 즉 암모니아 수용액(흡수제)의 변화에 대한 열전달계수의 변화를 나타내는 것이다. 일반적인 관 흐름에서 층류의 액상의 Nusselt Number는 (Graetz number)^{1/3}에 비례하므로 유속이

빠를수록 열경계층의 형성이 얇게 된다. 직접적인 와류, 난류의 형성은 아니지만 용액의 유속 증가로 생기는 작은 와류 및 얇은 열경계층의 형성이 열전달 효과를 증진 시킴을 확인할 수 있다.

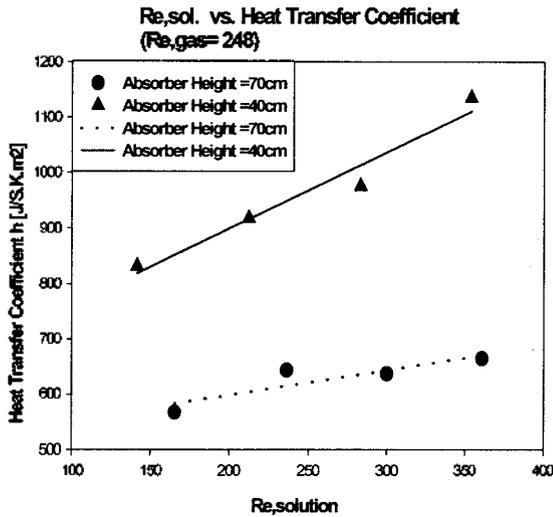


Fig. 4. Effect of Solution Flow Rate on Heat Transfer Coefficient

3.2.3. 가스-용액간의 온도차의 영향

Fig. 5는 지름 3cm 흡수기에 주입용액과 주입 가스의 Reynolds number를 각각 184, 248로 일정하게 주입시키는 조건에서 가스-용액간의 온도차 변화에 대한 열전달계수의 변화를 나타내는 것이다. 가스-용액간의 온도차에 의한 영향은 박막모드 흡수기에서 특히 잘 나타나는데 이 원인을 살펴보면, 냉각수와 용액 사이의 직접적인 열전달 계면과 함께 똑같은 물질전달 계면이 이 열전달 계면과 같은 방향으로 용액과 기체사이에 형성되게 되어 있으므로 기체의 온도가 높을 경우는 열이 냉각수 방향으로만 전달되며 기체방향으로는 현열이 전달되지 않는다. 그러나 그 반대의 경우 기체 계면 쪽으로의 현열로 인한 열손실이 많이 발생하게 된다. 이러한 현상은 기포모드에 있어서도 비록 계면이 불규칙적으로 형성될 수는 있으나 그대로 영향이 나타남을 확인할 수 있었다. 주입 기체의 온도가 아주 낮다고 한다면 냉각수 방향으로의 열전달에 방해 요소로 작용할 가능성이 있다.

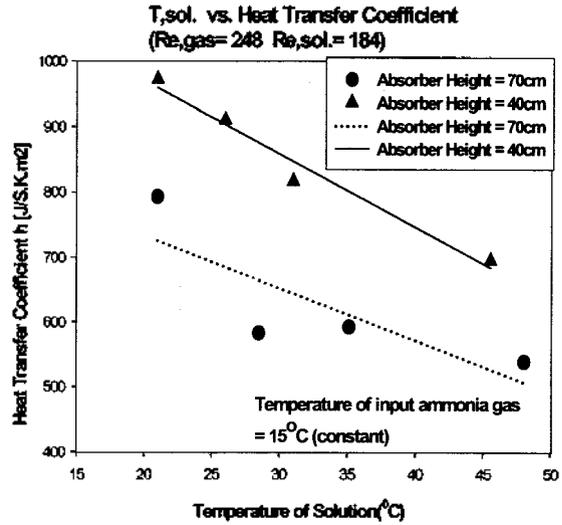


Fig. 5. Effect of Temperature Difference between Input Gas and Solution on Heat Transfer Coefficient

3.2.4. 가스-용액간의 농도차의 영향

Fig. 6은 지름 3cm 흡수기에 주입용액과 주입 가스의 Reynolds number를 각각 184, 248로 일정하게 주입시키는 조건에서 가스-용액간의 농도차 변화에 대한 열전달계수의 변화를 나타내는 것이다. 기포분사형 흡수 형태에서 기포는 다음과 같이 열전달 향상에 기여할 수 있다. 우선 흡수기 하단부에서 분사되는 기포가 난류형성을 유도하여 Mixing zone을 형성시킨다. 또한 흡수되지 않은 기포의 상승으로 인한 용액의 유동을 유도한다. 분사되는 기체의 양이 일정한 상태에서 용액의 농도를 변화시킨 뒤 실험에서는 기포분사에 의한 Mixing zone의 형성은 거의 동일하다고 예상할 수 있다. 그러나 농도의 변화로 인하여 기포의 존재높이가 각 실험마다 달라 기포의 상승으로 인한 열전달 효과가 각각 다르다고 할 수 있다. 즉 위 실험은 기포의 열전달 향상효과 중 기포의 상승으로 인한 향상 효과에 대한 것이라고 할 수 있다. 그러나 Fig. 6의 결과에서 알 수 있듯이 용액의 농도가 높아 기포의 존재높이가 증가하여도 열전달 효과 향상은 크게 나타나지 않는 것을 알 수 있다. 이는 기포에 의한 열전달 향상 효과가 기포 분사에 의한 흡수기 하부의 mixing zone에 집중되어 있음을 잘 알 수 있는 결과이다. 오히려 용액의 농도 증가로 인

하여 열전달 효과가 감소하는 결과를 보이고 있는데 이는 흡수로 인한 흡수열로 용액의 온도가 상승하여 용액속의 암모니아가 다시 기체로 증발하여 잠열 손실이 발생하기 때문이라 할 수 있다.

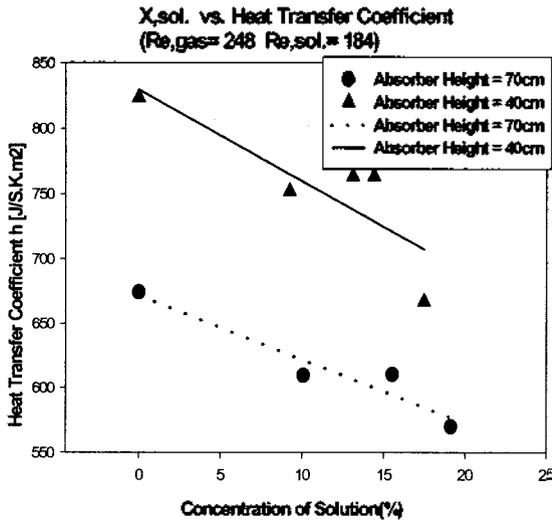


Fig. 6. Effect of Solution Concentration on Heat Transfer Coefficient

3.2.5. 흡수기의 길이의 영향

기포가 존재하는 영역까지 흡수기 길이가 충분히 확보되어야 하겠지만, 열전달을 위해 물질전달에 필요한 흡수기 길이 이상으로 더 필요한지에 대한 실험결과이다. 위 실험에서 실험영역 상 흡수기 길이가 충분한 70cm와 상대적으로 물질전달에 있어 불필요 영역이 거의 없는 40cm를 비교 해보았다. Fig. 3, 4, 5, 6에서 알 수 있듯이 짧은 길이의 흡수기인 40cm가 열전달에 있어 더 우수한 것으로 나타나고 있다. 기포에 의해 발달하는 열전달 향상층이 대부분 기체 유입부에 있으므로 필요이상으로 열전달 면적을 늘리기 위해 높이를 늘리는 것은 바람직하지 않음을 알 수 있다.

3.2.6. 흡수기의 지름의 영향

Fig. 7은 70cm 흡수기에서 용액의 Reynolds number가 184일 경우 기체의 Reynolds number 변화에 따른 열전달 계수의 변화를 나타낸 것이다.

용액과 기체의 Reynolds number가 동일한 경우에 흡수기 지름이 더 작은 흡수기의 열전달 계수가 우수한 것으로 측정되었다.

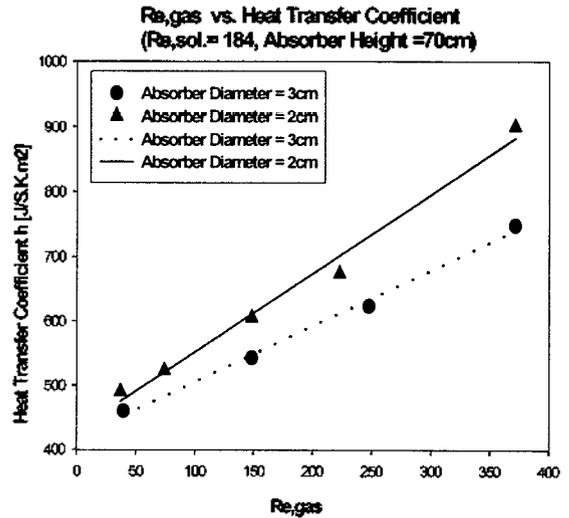


Fig. 7. Effect of Absorber Diameter on Heat Transfer Coefficient

이는 동일한 기체와 용액의 Reynolds number 하에서도 흡수기의 모양이 열전달에 영향을 줄 수 있으며, 흡수기의 지름이 작을수록 용액 및 기체의 와류와 난류의 영향이 벽면에 미치는 효과가 더 우수하다는 결과이다.

3.2.7. 가스-용액간의 흐름 방향의 영향

Fig. 8은 지름 3cm 흡수기에 주입용액과 가스의 방향이 병류와 향류일 때의 가스의 주입량의 변화에 대한 열전달계수의 변화를 나타낸 것이다. 기체와 용액의 흐름방향이 같은 경우와 반대의 경우를 비교하여 보면 흐름방향이 같은 경우에는 기포의 존재 높이가 상대적으로 더 길며, 그 반대의 경우 흐름이 정면으로 부딪히는 효과로 혼합영역의 활성이 더 크다고 할 수 있다. 기체와 용액의 흐름방향이 반대인 경우가 열전달 계수가 더 우수한 경향성을 보이고 있으며 기포의 존재높이 보다는 혼합영역의 활성이 열전달에 더 큰 영향을 줌을 알 수 있다.

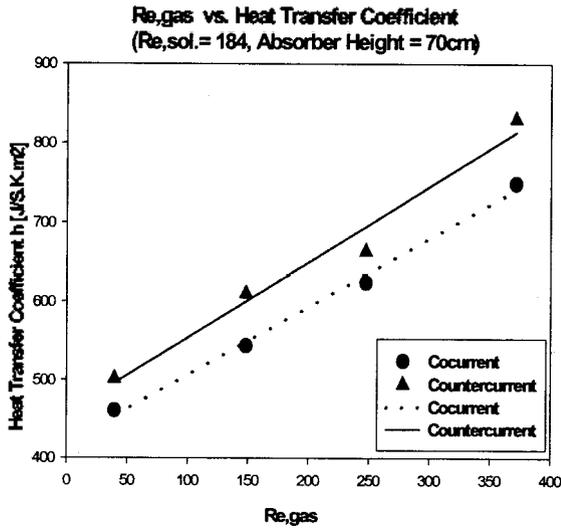


Fig. 8. Effect of Flow Direction on Heat Transfer Coefficient

3.2.8. 상관관계식 유도

흡수기 내에서의 열전달 특성을 쉽게 파악할 수 있는 상관관계식을 실험 데이터를 이용하여 유도하였다. 높이 70cm 흡수기에서의 결과값을 중심으로 Re_g , Re_{sol} , dT , dX , 흡수기 지름 변화에 대해서 식을 유도하였다. 또한 Fig. 9에서 실제 실험값과 유도된 상관관계식의 비교 결과를 나타내었다. 약 $\pm 10\%$ 이내의 오차범위에서 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 아래와 같이 유도된 식을 이용하여 실험 영역 외의 조건인 고압, 저압 또는 고온의 조건에서도 열전달에 대한 예측이 가능할 것으로 기대된다.

$$Nu = \frac{1.487(Re_g)^{0.1866}(Re_{sol})^{0.1760}(dT/T_{gas})^{-0.1146}(dX/X_{gas})^{0.6013}}{(L/d)^{0.2662}}$$

$Nu =$ Nusselt Number ($h_{abs}d/D$)

$Re_g =$ 기체의 Reynolds Number ($\rho_{gas}V_{gas}D/\mu_{gas}$)

$Re_{sol} =$ 용액의 Reynolds Number ($\rho_{sol}V_{sol}D/\mu_{sol}$)

$dT(^{\circ}C) =$ 용액의 온도 - 기체의 온도

$T_{gas}(^{\circ}C) =$ 기체의 온도

$dX =$ 기체의 암모니아 농도 - 용액의 암모니아 농도

$L(m) =$ 흡수기 길이

$d(m) =$ 흡수기의 지름

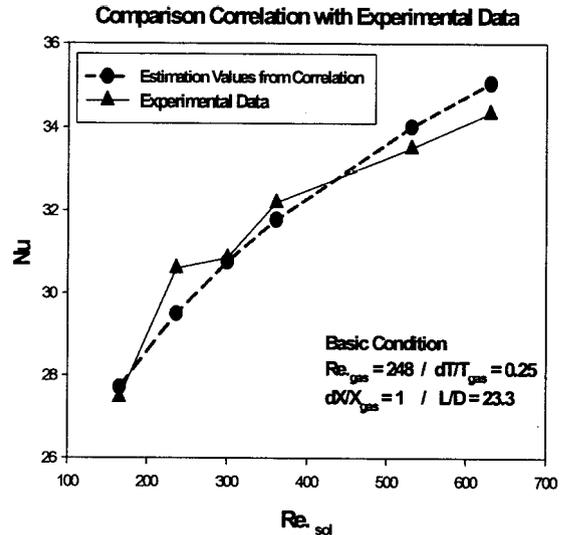


Fig. 9. Comparison between Estimation Values from Correlation and Experimental Data

4. 결 론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 실린더형 기포분사모드 흡수기에서 냉각수 방향으로의 열전달에 있어 기체의 유입량, 용액의 유입량, 농도, 온도, 기체와 용액의 흐름 방향, 흡수기의 형태가 모두 영향을 주는 인자로 작용한다.
- (2) 기체의 주입량, 용액의 주입량 증가는 열전달 성능 향상에 기여하며, 용액의 온도나 농도의 상승은 열전달 성능에 방해요소로 작용한다.
- (3) 기체와 용액의 흐름방향이 반대인 향류를 형성할 경우 열전달 성능에 향상이 있으며 흡수기 형태 또한 타 조건이 동일한 상태에서 흡수기 지름이 작을수록 높이가 낮을수록 열전달 향상 효과가 있다.
- (4) 열전달 향상의 핵심은 기포의 존재 높이와 유체의 물성변화라기 보다는 기포분사부에서부터 생성되는 난류형성영역(Mixing zone)의 발달유무라고 할 수 있다.
- (5) 본 실험을 통하여 유도된 상관관계식을 이용하

여 본 실험영역 외 조건에서의 열전달 계수에 대한 유추가 가능하며, 특히 실험에 어려움이 있는 고온, 고압조건에서의 해석에 큰 도움이 될 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 유변공정연구센터(한국과학재단 ERC)의 연구지원에 의해 수행되었으며 이에 깊이 감사드립니다.

Nomenclature

A	열전달 면적	[m ²]
C _p	비열	[J/K · kg]
d	흡수기의 지름	[m]
Gz	Graetz Number	
h _{abs}	흡수기 내부 벽면의 열전달 계수	[W/m ² · K]
h _c	냉각수 벽면의 열전달 계수	[W/m ² · K]
k	열전도도	[W/m · K]
L	흡수기 길이	[m]
m	질량유속	[kg/s]
Nu	Nusselt Number	
Re	Reynolds Number	
T	온도	[K]
U _{all}	총괄 열전달계수	[W/m ² · K]
V	선속도	[m/s]
ρ	유체의 밀도	[kg/m ³]
δ _w	벽면의 두께	[m]
μ	유체의 점도	[kg/m · s]

Reference

- [1] Kang, Y. T., Akisawa, A., and Kashiwagi, T.: International Journal of refrigeration, No. 22, pp 250-262(1999)
- [2] Sujatha, K. S., Mari, A. and Murthy, S. S.: International Community Heat Mass Transfer, Vol.26, No.7, pp 975-984(1999)
- [3] Kang, Y., Lim, W. M., and Kim, S. D.: The Korea Journal of Chemical Engineering Vol. 25, No. 5, pp 460-467(1987)
- [4] Lee, K. B., Chun, B. H., Lee, J. C., Park, C. J., and Kim, S. H.: The Korea Journal of Chemical Engineering, In Press (2001)
- [5] Lee, K. B., Chun, B. H., Lee, J. C., Park, C. J., and Kim, S. H.: Experimental heat transfer, In Press (2001)
- [6] Seader, J. D., and Henley, E. J.: "Separation Process Principles" Wiley, New York, pp 123(1998)
- [7] Lee, K. B.: "Study of the Absorber for Ammonia-Water Absorption Heat Pump", MA. Thesis, Korea University, Seoul, Korea (2001)
- [8] McCabe, W. L., Smith, J. C., and Harriott, P.: "Unit operations of chemical engineering", McGraw-Hill, Singapore, pp 115 (1993)