Korean Chem. Eng. Res., 60(4), 582-587 (2022)
https://doi.org/10.9713/kcer.2022.60.4.582
PISSN 0304-128X, EISSN 2233-9558

젖은 벽탑을 이용한 디에틸렌트리아민과 디에틸에탄올아민 수용액의 CO_2 흡수속도 측정

유정균 · 이 준* · 홍연기*,†

한국에너지기술연구원 온실가스연구단,
34129 대전광역시 유성구 가정로 152
*한국교통대학교 응용화학에너지공학부,
27469 충북 충주시 대학로 50
(2022년 6월 20일 접수, 2022년 7월 5일 수정본 접수, 2022년 7월 5일 채택)

Kinetics of CO_2 Absorption in Aqueous DETA and DEEA Solutions by Wetted-Wall Column

Jong Kyun You, Jun Lee* and Yeon Ki Hong*,†

Greenhouse Gas Research Department, Korea Institute of Energy Research, Daejeon, 34129, Korea
**School of Chemical and Materials Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju, Chungbuk, 27469, Korea*
(Received 20 June 2022; Received in revised from 5 July 2022; Accepted 5 July 2022)

요 약

연소 배가스 중 CO_2를 포집하기 위한 에너지 저감형 흡수제로 상분리 흡수제가 주목 받고 있다. 본 연구에서는 2종의 아민을 혼합한 상분리 흡수제 중 하나인 디에틸렌트리아민(diethylenetriamine, DETA)과 디에틸아미노에탄올(diethylaminoethanol, DEEA) 흡수제를 구성하는 DETA와 DEEA 각각의 흡수 속도를 측정하기 위해 젖은 벽탑을 사용하였다. 총괄 물질전달 계수에 대한 DETA 및 DEEA의 농도와 조업 온도에 따른 영향을 고찰하였다. 그 결과 DETA 농도에 따라 총괄 물질전달 계수는 비례하였지만 DEEA 농도의 경우 그 영향이 적었고 일정 농도를 넘어설 경우 총괄 물질전달 계수가 감소하였다. DETA 수용액은 조업 온도에 따라 총괄 물질전달 계수의 변화가 적었던 반면 DEEA 수용액은 조업 온도에 따라 총괄 물질전달 계수가 증가하였다. 의사 1차 반응 가정 하에서 관찰 반응 속도 상수를 구한 결과 DETA 수용액에서의 관찰 반응속도 상수는 DETA 농도에 따라 비례하는 관계를 가지나 DEEA는 의사 1차 반응 가정에 맞지 않는 것으로 나타났다.

Abstract – Biphasic solvents are attracting attention as energy-reducing solvents for capturing CO_2 from flue gas in combustion process. In this study, considering diethylenetriamine (DETA) and diethylethanolamine (DEEA) mixed solvents, one of the biphasic solvents by blending of two types of amines, the CO_2 absorption rates of DETA and DEEA was measured by wetted wall column. The effects of DETA and DEEA concentrations and operating temperature on the overall mass transfer coefficient were investigated. As a result, the overall mass transfer coefficient was proportional to the DETA concentration. However, in the case of the DEEA concentration, the effect was small and when the concentration was exceeded, the overall mass transfer coefficient decreased. The DETA aqueous solution showed little change in the overall mass transfer coefficient with the operating temperature, whereas the DEEA aqueous solution increased the overall mass transfer coefficient with the operating temperature. As a result of obtaining the observed reaction rate constant under the pseudo-first-order reaction assumption, it was found that the observed reaction rate constant in DETA aqueous solution was proportional to the DETA concentration, but DEEA did not fit the pseudo-first-order reaction assumption.

Key words: Diethylenetriamine, Diethylaminoethanol, Biphasic solvent, Wetted wall, Overall mass transfer coefficient

1. 서 론

아민 흡수제에 의한 CO_2 흡수공정은 화력 발전소에서 배출되는 배가스를 포함한 다양한 온실가스 배출원으로부터 CO_2를 포집하기 위한 효과적인 수단이 되어왔다. 그러나 아민용매 기반 CO_2 포집은

†To whom correspondence should be addressed.
E-mail: hongyk@ut.ac.kr
‡이 논문은 광운대학교 고재욱 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

용매 재생과정에서 상당한 열에너지가 필요하다는 단점을 갖고 있다. 예를 들어 30 wt% 모노에탄올아민(monoethanolamine, MEA)을 사용한 CO_2 포집 공정의 경우 용매 재생과정에서 용매 가열을 위해 재생탑에 설치된 재비기의 열부하(heat duty)가 3.1-3.75 GJ/tCO_2에 달하는 것으로 알려져 있다. 따라서 아민 흡수제에 의한 CO_2 포집 공정을 보다 효율적으로 만들기 위해 용매 재생에 따른 재생 에너지 저감이 필요하다[1,2].

최근 CO_2 포집 공정 중 아민 재생 과정에서의 재생열을 저감하기 위한 여러 방법 중에서 상분리(phase splitting) 흡수제가 큰 주목을 받고 있다. 상분리 흡수제는 CO_2가 흡수되는 과정에서 단일상(single phase)인 흡수제가 액-액 또는 고-액으로 상이 분리되고 이 중 CO_2 농축(CO_2-rich)상만을 탈거탑으로 이송함으로서 재생에 따른 에너지를 줄일 수 있을 뿐 아니라 탈거탑의 크기를 줄일 수 있다. 흡수제의 상분리는 CO_2 흡수에 따른 CO_2 로딩 값의 증가 혹은 흡수제의 온도 변화에 따라 이루어진다. 상분리 흡수제는 주흡수제인 아민에 물이 아닌 비아민 성분을 첨가하거나 2종 이상의 아민을 블랜딩하여 만들 수 있다[3].

최초의 상분리 흡수제는 Hu[4]가 아민에 이소옥탄올(isooctanol) 또는 데실알콜(decylalcohol)을 혼합하여 개발했다. 프랑스의 IFPEN (French Institute of Petroleum Energies Nouvelles)는 LCST(Lower Critical Solution Temperature)에 의한 상분리 원리에 기초하여 N,N-dimethylbenzylamine(DMBzA)과 N,N,N',N'-tetramethyl-1,6-hexane-diamine(TMHDA)이 혼합된 DMX^{TM} 흡수제를 CO_2 포집에 적용한 결과 기존 모노에탄올아민(monoethanolamine, MEA) 흡수제에 비해 에너지 소비량을 약 22%를 줄일 수 있었다고 보고하였다[5]. 아민 블랜딩에 의한 상분리 흡수제는 아민 흡수제의 특성에 의한 CO_2와의 반응 생성물 차이와 이에 따른 반응 속도 차이를 이용한 것이다. CO_2 흡수에 이용되는 아민들은 구조적인 특성에 따라 1차 및 2차 아민과 3차 아민 그리고 입체 장애 아민으로 구분되며 하이드록시 기의 존재 유무에 따라 알킬 아민과 알카놀 아민으로 구분된다. 이 중 알킬아민과 3차 알카놀아민 조합의 상분리 흡수제가 CO_2 포집에 효과적인 것으로 알려져 있으며 대표적으로는 3-메틸아미노프로필아민(3-methylaminopropylamine, MAPA)과 디에틸에탄올아민(DEEA) 조합[6]과 디에틸렌 트리아민(DETA)과 DEEA 조합[7]을 들 수 있다.

본 연구진은 아민 블랜딩에 의한 CO_2 포집용 상분리 흡수제로서 DETA와 DEEA를 조합한 수용액에 대한 흡수 성능에 대한 결과를 이미 보고한 바 있다[8]. DETA/DEEA 조합에서의 상분리는 DETA와 DEEA의 CO_2에 대한 반응속도 차이, 그리고 DEEA의 용해도 제한에 따른 것이다. CO_2가 흡수됨에 따라 반응속도가 빠른 DETA가 CO_2와 반응하여 반응생성물인 카바메이트로 전환되는데 이는 높은 밀도로 인해 하부상 즉, CO_2 농축상으로 이동하게 된다. 한편 반응속도가 느린 DEEA는 밀도 차에 의해 상부상으로 이동하게 된다. 흡수 초기에는 대부분 DETA가 CO_2와 반응하지만 흡수 시간이 경과함에 따라 DEEA가 CO_2 흡수에 참여하게 됨에 따라 DEEA가 하부상으로 이동하게 된다. 이와 같은 반응속도의 차이는 아민의 구조적 특성인 1차, 2차 아민기 혹은 3차 아민기의 보유 여부에 따라 해석하였다.

본 연구의 목적은 선행연구[7,8]에서 개발한 DETA/DEEA 조합 상분리 흡수제의 흡수특성을 해석하는데 사용한 DETA와 DEEA의 구조적 특성에 따른 흡수속도 차이를 젖은 벽탑(wetted-wall column)을 이용한 실험을 통해 측정하는 것이다. 상분리 흡수제를 구성하는 개별 아민 수용액의 흡수 속도 측정은 향후 상분리 이성분 아민의 흡수 속도 예측 및 포집 공정 설계를 위한 기초 자료가 될 수 있다. 젖은 벽탑을 이용하여 측정한 CO_2 플럭스 값을 통해 아민의 농도 및 조업 온도에 따른 총괄 물질전달 저항 및 관찰 반응속도 상수(observed reaction rate constant)를 구하여 DETA/DEEA 상분리 흡수제를 구성하는 각 아민 성분의 흡수 특성을 해석하였다.

2. 실 험

상분리 흡수제를 구성하는 아민인 DETA(>99 wt%)와 DEEA (>99 wt%)는 Sigma-Aldrich에서 구매하였으며 추가적인 분리 없이 사용하였다. 질소(99.99 vol%)와 이산화탄소(99.99 vol%)를 이용하여 3-9 vol%의 CO_2 비율로 혼합기체를 만들어 이를 젖은 벽탑이 포함된 셀로 공급하였다. 셀로 공급되는 혼합 기체의 부피 유속은 3,000 mL/min이다.

흡수제의 흡수속도 측정을 위해서 Fig. 1과 같은 젖은 벽탑 셀을 이용하였다. 흡수탑의 길이와 외경은 각각 90 mm와 12.6 mm이며 스테인리스 스틸로 제작되었다. 탑은 실린더 형태의 유리 용기로 둘러싸여 있으며 이들 용기의 항온 유지를 위해 water jacket이 장착되었다. 젖은 벽탑이 포함된 흡수 셀에서 흡수제는 탑의 하부로 공급되어 탑의 상단을 통해 흘러나와 탑의 외벽을 따라 하강하면서 얇은 액체 경막을 형성한다. 흡수제의 유속은 150 mL/min이다. 공급 기체는 장치의 하부를 통해 공급되며 액체와 맞교환 접촉하도록 하였고 셀 내부의 기체 압력 조절을 위해 기체 유출부에 니들 밸브를 장착하였다. 기체의 압력은 압력 센서를 통해 측정되며 정확도는 0.01 kg/cm^{2}이다. 기체 흐름에서의 CO_2 농도는 비분산 적외선 검출기(Non Dispersive Infra Red-NDIR, ZKJ, Fuji)를 이용하여 분석하였다. 실험 온도는 흡수 공정에서의 온도를 고려하여 30-60 ℃로 하였다. 관

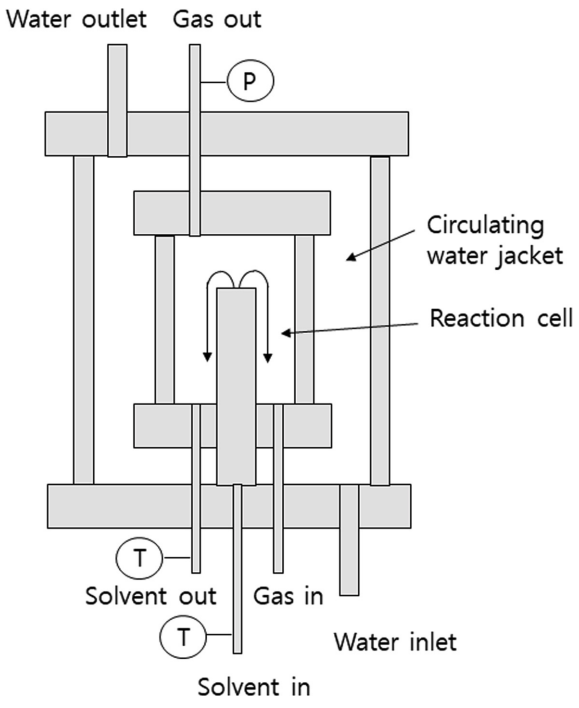

Fig. 1. Schematic diagram of the wetted-wall column contactor.

찰 반응속도 상수(observed kinetic constant) 계산을 위해 필요한 흡수제의 밀도는 밀도계(Mettler Toledo Co.)를 이용하여 측정하였고 점도는 점도계(DV2T, Brookfield Co.)를 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 젖은 벽탑에서의 플럭스 및 총괄 물질전달 계수의 결정

젖은 벽탑에서 흡수제로의 CO_2흡수 속도는 플럭스 N_{CO_2} (mol/cm^2·s)로 나타낼 수 있다.

$$N_{CO_2} = K_{ov}(p_{CO_2} - p^{eq}_{CO_2}) \quad (1)$$

여기에서 K_{ov}는 총괄 물질전달 계수(mol/cm^{2}kPa·s)이며 p_{CO_2} 와 $p^{eq}_{CO_2}$ 는 각각 젖은 벽탑에서 CO_2의 조업 부분압력과 평형압력이다. p_{CO_2} 는 젖은 벽탑으로 유입되는 CO_2의 부분압력과 유출되는 CO_2 부분압력의 로그 평균으로부터 구할 수 있다.

$$p_{CO2} = \frac{p_{CO_2,in} - p_{CO_2,out}}{\ln\left(\frac{p_{CO_2,in}}{p_{CO_2,out}}\right)} \quad (2)$$

젖은 벽탑에서 경막의 두께 f(cm)는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$f = \left(\frac{3\mu\upsilon}{\pi g d \rho}\right)^{1/3} \quad (3)$$

여기에서 μ와 ρ는 각각 흡수제의 점도(mPa·s)와 밀도(g/cm^3), υ는 흡수제의 부피 유속(ml/s), d는 젖은 벽탑의 외경(cm)이며 기체와 흡수제의 접촉 면적은 벽탑의 외부 표면의 면적으로 정의된다. 접촉시간 t(s)동안 단위면적당 흡수되는 기체의 양을 Q(t)(mol/cm^2)라고 하면 시간당 단위면적당 평균 흡수속도는 Q(t)/t가 된다. 기체에 노출되는 흡수제 경막의 총면적이 πdh이므로 흡수제 경막으로의 전체 흡수속도 q(mol/s)는 Q(t)와 다음과 같은 관계를 가진다[9].

$$N_{CO_2} = \frac{Q(t)}{t} = \frac{q}{\pi dh} \quad (4)$$

본 연구에서는 젖은 벽탑으로 유입, 유출되는 기체 흐름의 농도를 측정하고 탑 외부 표면에서의 흡수제 흐름을 균일하게 유지함으로써 물질전달 면적을 일정하게 하여 윗 식들에 의해 플럭스와 이에 따른 총괄물질전달 계수를 구할 수 있다.

Fig. 2에서는 CO_2의 부분압에 따른 젖은 벽탑에서의 CO_2 흡수 플럭스를 나타내었다. 동일한 CO_2 분압에 대해서 DETA가 DEEA에 비해 CO_2 흡수 플럭스가 더 큰 것으로 나타났다. DETA와 DEEA의 CO_2와의 반응은 각각 다음과 같다.

$$2DETA + CO_2 \rightleftarrows DETACO_2^- + DETAH^+ \quad (5)$$

$$DEEA + H_2O + CO_2 \rightarrow DEEAH^+ + HCO_3^- \quad (6)$$

DETA는 2개의 1차 및 1개의 2차 아민기를 가진 폴리알킬아민이고 DEEA는 3차 아민기를 가진 알카놀 아민이다. DETA는 CO_2가 반응할 수 있는 아민기가 DEEA에 비해 많아서 CO_2와 반응을 빠르게 할 수 있을 뿐 아니라 1차와 2차 아민기 만을 갖고 있기 때문에 3차 아민기 만을 가진 DEEA에 비해 빠르게 CO_2와 반응할 수 있게 된다.

총괄 물질전달 계수의 증가는 물질전달 저항의 감소와 함께 CO_2

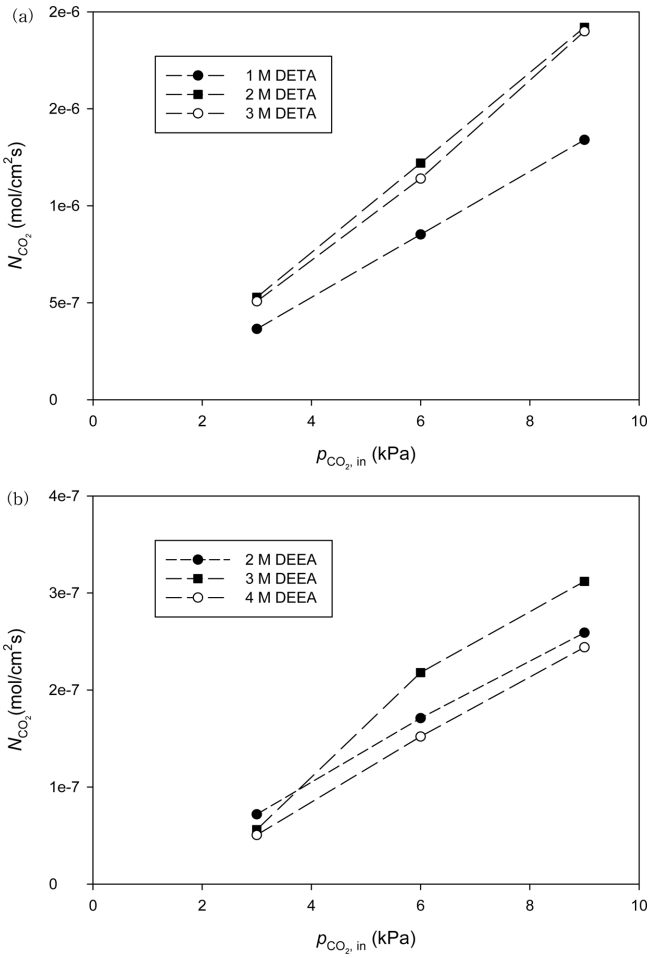

Fig. 2. Plot of CO_2 flux vs. CO_2 partial pressure: (a) DETA, (b) DEEA.

가 흡수제에 빠르게 흡수됨을 의미하며 그 결과 실제 흡수탑의 높이도 줄어들게 한다. CO_2와 아민과의 순간적인 반응이 발생할 경우 총괄물질전달 저항이 액상에서의 물질전달 저항과 같다고 할 수 있다. CO_2 분압이 낮은 경우에 대해서는 CO_2 흡수에 따른 아민 수용액의 점도 변화가 총괄물질전달 저항에 미치는 영향이 거의 없으므로 이 영역에서는 아민의 농도에 따라 총괄물질전달 계수가 증가하게 된다. 그러나 아민 농도에 비해 상대적으로 CO_2 분압이 높은 경우에는 아민에 로딩되는 CO_2의 양이 증가함에 따른 흡수제 점도의 증가로 인해 아민의 농도에 따라 오히려 총괄물질전달 계수가 감소할 수도 있다. 그러나 본 연구의 경우 사용된 혼합기체에서의 CO_2의 혼합비가 3-9 vol%이므로 CO_2 부분압력 증가에 따른 CO_2 로딩 증가로 인한 흡수제의 점도 증가는 크지 않다고 할 수 있다.

Fig. 3에서는 흡수제에서 DETA와 DEEA의 농도 변화에 따른 총괄 물질전달 계수의 변화를 보여주고 있다. DETA의 경우 DETA의 농도에 따른 총괄 물질전달 계수가 증가함을 보여준다. 이와 같은 관계는 DETA의 농도가 증가할수록 CO_2와 반응할 수 있는 DETA의 양이 증가하기 때문이다. 그러나 DEEA의 경우 DETA에 비해 상대적으로 높은 점도를 갖고 있어 아민 농도 증가에 따른 점도의 영향으로 인해 일정 농도를 넘어설 경우 총괄물질전달 계수가 낮아질 수 있다.

Fig. 4에서는 온도에 따른 총괄물질전달 계수의 변화를 나타내고

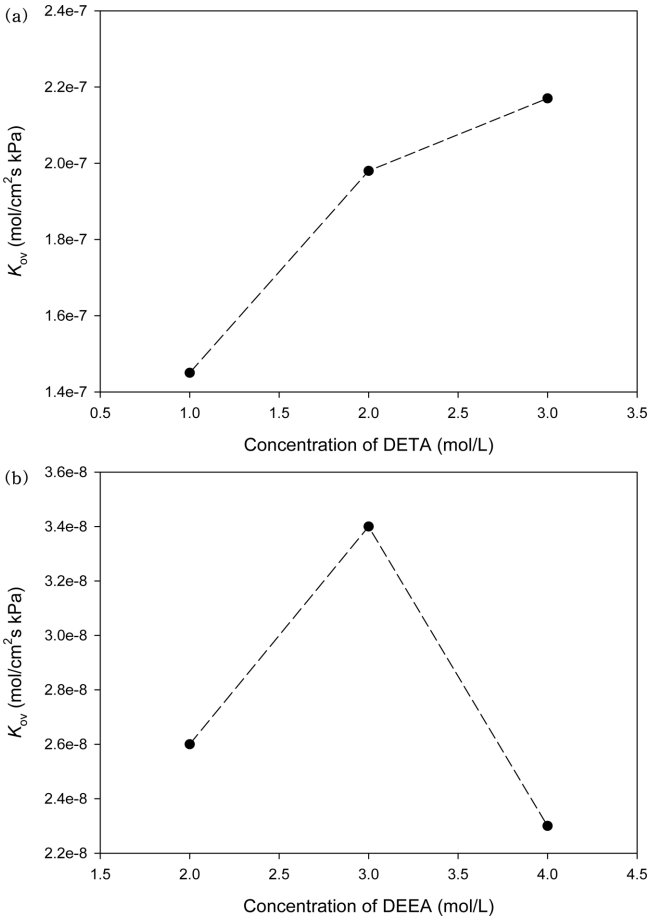

Fig. 3. Effect of the concentration of amines on the overall mass transfer coefficients: (a) DETA, (b) DEEA.

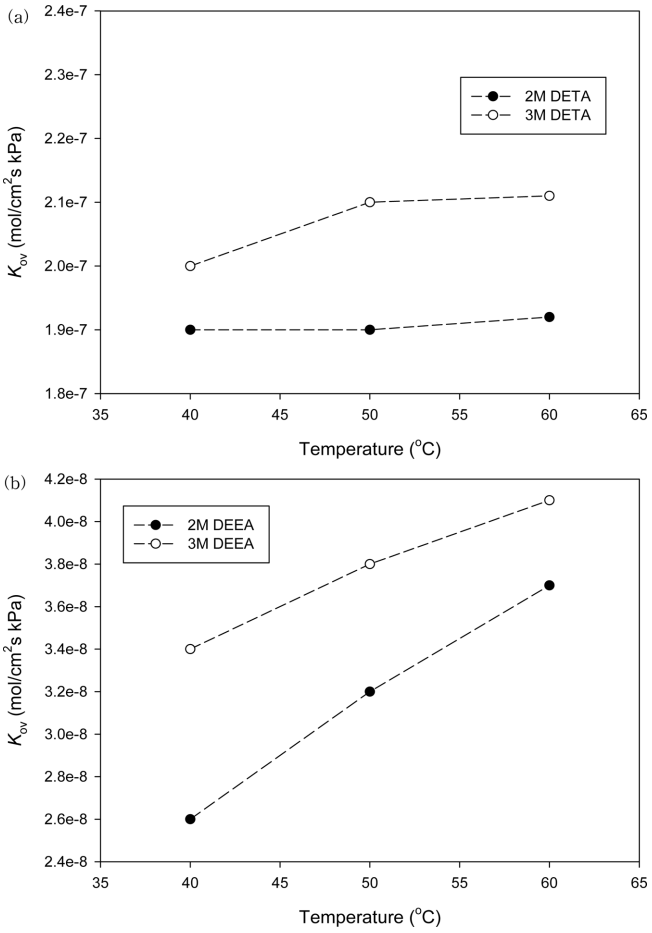

Fig. 4. Effect of the operating temperature on the overall mass transfer coefficients. (a) DETA; (b) DEEA.

있다. DETA의 경우 온도에 따른 총괄물질전달 계수의 변화가 크지 않았으나 DEEA의 경우 온도에 따라 총괄 물질전달 계수의 변화가 DETA에 비해 큰 것으로 나타났다. 아민과 CO_2와의 반응이 발열반응이므로 온도가 증가함에 따라 반응 측면에서는 유리하지 않으나 온도에 따른 흡수제의 점도가 줄어들게 되므로 액체 경막에서의 물질전달 저항은 줄어들게 된다. DETA에 비해 상대적으로 점도가 높은 DEEA는 온도에 따라 액체상의 점도가 크게 감소하는 것으로 보고된 바 있다[10,11]. 이에 따라 액체 물질전달 저항은 줄어들게 되므로 온도에 따라 총괄 물질전달 계수가 증가하게 된다.

3-2. 젖은 벽탑에서의 DETA와 DEEA의 관찰 반응속도 상수 계산

CO_2와 아민계 흡수제 사이에서는 빠른 반응이 일어나므로 흡수제에 대한 CO_2의 물리 용해도(physical solubility)는 N_2O analogy를 이용하여 계산될 수 있다. 물에 대한 CO_2와 N_2O의 헨리상수 H(Pa·m^3/mol) 및 이에 대한 N_2O analogy는 다음과 같다[12].

$$H_{H_2O,water} = \exp(158.245 - 9048.596/T - 20.860\ln T - 0.00252T) \quad (7)$$

$$H_{CO_2,water} = \exp(145.369 - 8172.355/T - 19.303\ln T) \quad (8)$$

$$H_{CO_2,amine} = H_{N_2O,amine}\left(\frac{H_{CO_2,water}}{H_{N_2O,water}}\right) \quad (9)$$

여기에서 $H_{N_2O,amine}$ 값은 Monteiro 등[13]이 구한 값을 이용한 내삽을 통해 구하였다. 물에 대한 CO_2와 N_2O의 확산계수 D(m^2/s)는 다음의 관계식을 이용하여 계산하였다[14].

$$D_{CO_2,water} = 2.35\times10^{-6}\exp(-2119/T) \quad (10)$$

$$D_{N_2O,water} = 5.07\times10^{-6}\exp(-2371/T) \quad (11)$$

윗 식들에서의 확산 계수를 이용하여 흡수제에서의 CO_2 확산계수는 수정된 스톡스-아인슈타인 관계식에 의해 다음과 같이 계산할 수 있다[14].

$$D_{CO_2,amine} = D_{CO_2,water}\left(\frac{\mu_{water}}{\mu_{amine}}\right)^n \quad (12)$$

윗 식에서 DETA 및 DEEA에 대한 n값은 각각 0.8과 0.637로 알려져 있다[13,14].

위에서 구한 헨리 상수와 확산도와 젖은 벽탑을 통해 얻은 물질전달 계수를 이용하여 CO_2와 아민 사이의 반응을 의사 1차 반응으로 가정한 관찰 반응속도 k_{obs}(s^{-1})는 다음과 같이 구할 수 있다[16].

$$k_{obs} = \frac{H^2_{CO_2,amine}}{D_{CO_2,amine}}\left(\frac{1}{K_{ov}} - \frac{1}{k_g}\right)^{-2} \quad (13)$$

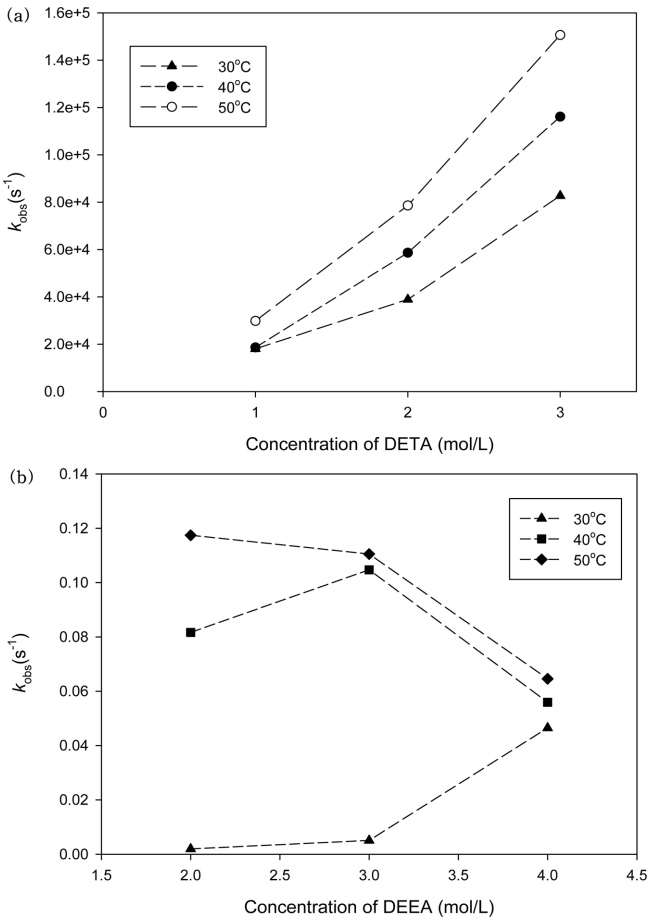

Fig. 5. Observed pseudo-first order reaction rate constant: (a) DETA, (b) DEEA.

Fig. 5에서는 DETA와 DEEA의 농도에 따른 관찰 반응속도 상수의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 k_{obs}는 아민의 농도에 따라 증가한다. 특히 DETA의 경우 DETA의 농도에 따라 k_{obs}가 비례관계가 성립하고 변화하는 선의 모양이 온도와 관계없이 1차와 2차 곡선 사이에 있으므로 DETA에 대한 의사 1차 반응 가정이 잘 맞음을 알 수 있다. 그러나 DEEA의 경우는 낮은 농도를 제외하고는 DETA와 같은 의사 1차 반응 가정이 성립하지 않는 것을 볼 수 있다. DEEA의 경우 일정 정도의 농도를 넘어서게 되면 DEEA 분자 사이에 클러스터 형성에 따라 CO_2가 이들 분자 내에 가두어 지므로 바이카보네이트 형성에 필요한 물과의 접촉이 제한되는 것으로 알려져 있다[16]. 이에 따라 관찰 반응속도 상수가 DEEA의 농도에 따라 비례하지 않는 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 젖은 벽탑을 이용하여 아민 블랜딩에 의한 상분리 흡수제인 DETA/DEEA 흡수제를 구성하는 DETA와 DEEA의 흡수속도를 측정하고 조업 변수에 따른 영향을 고찰하였다. CO_2 흡수 플럭스는 셀로 탑으로 유입되는 CO_2의 농도에 따라 증가하였다. DETA의 CO_2 흡수 플럭스 및 총괄 물질전달 계수가 DEEA에 비해 큰 것은 폴리아민인 DETA를 구성하는 아민기가 CO_2와의 빠른 반응을 통해 카바메이트를 형성할 수 있는 1차 및 2차 아민기로 구성되어 있기 때문이다. DETA와는 달리 DEEA의 경우 DEEA의 농도에 따라 총괄 물질전달 계수가 비례하지 않았는데 이는 DEEA가 DETA에 비해 상대적으로 높은 점도로 인해 CO_2 로딩에 따라 액상 물질전달 저항이 커지기 때문으로 사료된다. DETA 수용액에 비해 DEEA 수용액의 경우 조업 온도에 따라 총괄 물질전달 계수가 증가하였다. 의사 1차 반응 가정 하에서 관찰 반응속도 상수를 구한 결과 DETA 수용액에서의 관찰 반응속도 상수는 DETA 농도에 따라 증가하여 의사 1차 반응 가정을 만족하였지만 DEEA는 의사 1차 반응 가정에 맞지 않았다.

감 사

이 논문은 한국에너지기술연구원 2016년도 주요사업의 지원을 받아 수행된 연구임(B5-2436).

References

1. Ochedi, F. O., Yu, J., Yu, H., Liu, Y. and Hussain, A., "Carbon Dioxide Capture Using Liquid Absorption Methods: A Review," *Environmental Chemistry Letters*, **19**, 770109(2021).
2. Jang, G. G., Thompson, J. A., Sun, X. and Tsouris, C., "Process Intensification of CO_2 Capture by Low-aqueous Solvent," *Chem. Eng. J.*, **426**, 131240(2021).
3. Papadopoulos, A. I., Tzirakis, F., Tsivintzelis, I. and Seferlis, P., "Phase-Change Solvents and Processes for Postcombustion CO_2 Capture: A Detailed Review," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **58**(13), 5088-5111(2019).
4. Hu, L., "Phase Transitional Absorption Method," US Patent No. 7,541,011,B2 (2009).
5. Raynal, L., Briot, P, Dreillard, M., Broutin, P., Mangiaracina, A., Salghetti, B., Politi, M., Marca, C. L., Mertens, J., Thielens, M-L., Laborie, G. and Normand, L., "Evaluation of the DMX Process for Industrial Pilot Demonstration – Methodology and Results," *Energy Procedia*, **63**, 6298-6309(2014).
6. Pinto, D. D. D., Zaidy, S. A. H., Hartono, A. and Svendsen, H. F., "Evaluation of a Phase Change Solvent for CO_2 capture: Absorption and Desorption Tests," *Int. J. GHG Control*, **28**, 318-327(2014).
7. You, J. K., Lee, W. Y., Kim, J. Y. and Hong, Y. K., "Screening of Biphasic Solvents for Energy Efficient CO_2 Capture," *Energy Procedia*, **114**, 2096-2102(2017).
8. Lee, J., Hong, Y. K. and You, J. K., "Phase Separation Characteristics in Biphasic Solvents Based on Mutually Miscible Amines for Energy Efficient CO_2 Capture," *Korean J. Chem. Eng.*, **34**(6), 1840-1845(2017).
9. Danckwerts, P. V., Gas Liquid Reactions, McGraw-Hill, New York, NY (1970).
10. Hartono, A. and Svendsen, H. F., "Density, Viscosity, and Excess Properties of Aqueous Solution of Diethylenetriamine (DETA)," *J. Chem. Thermodyn.*, **41**(9), 973-979(2009).
11. Maham, Y., Lebrette, L. and Mather, A. E., "Viscosities and Excess Properties of Aqueous Solutions of Mono- and Diethylethanolamines at Temperatures between 298.15 and 353.15 K," *J. Chem. Eng. Data*, **47**(3), 550-553(2002).
12. Penttilä, A., Dell'Era, C., Uusi-Kyyny, P. and Alopaeus, V., "The Henry's Law Constant of N_2O and CO_2 in Aqueous Binary

and Ternary Amine Solutions (MEA, DEA, DIPA, MDEA, and AMP)," *Fluid Phase Equilibria*, **311**, 59-66(2011).
13. Monteiro, J. G. M. S., Majeed, H., Knuutila, H. and Svendsen, H. F., "Kinetics of CO_2 Absorption in Aqueous Blends of N,N-Diethylethanolamine (DEEA) and N-Methyl-1,3-Propane-Diamine (MAPA)," *Chem. Eng. Sci.*, **129**, 145-155(2015).
14. Versteeg, G. F. and van Swaaij, W. P. M., "Solubility and Diffusivity of Acid Gases (CO_2, H_2S) in Aqueous Alkanolamine Solutions," *J. Chem. Eng. Data*, **33**, 29-34(1988).
15. Hartono, A., da Silva, E. F. and Svendsen, H. F., "Kinetics of Carbon Dioxide Absorption in Aqueous Solution of Diethylenetriamine (DETA)," *Chem. Eng. Sci.*, **64**, 3205-3213(2009).
16. Monteiro, J. G. M. S, Knuutila, H., Penders-van Elk, N. J. M. C., Versteeg, G. and Svendsen, H. F., "Kinetics of CO_2 Absorption by Aqueous N,N-Diethylethanolamine Solutions: Literature Review, Experimental Results and Modelling," *Chem. Eng. Sci.*, **127**, 1-12 (2015).

Authors

Jong Kyun You: Principal Researcher, Greenhouse Gas Research Department, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 34129, Korea; jkyou@kier.re.kr

Jun Lee: Master's course, School of Chemical and Materials Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju 27469, Korea; joon3kr@naver.com

Yeon Ki Hong: Professor, School of Chemical and Materials Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju 27469, Korea; hongyk@ut.ac.kr