

Diethylene Glycol Monobutyl Ether (DEGMBE)를 포함한 2-(Ethylamino)ethanol (EAE) 저수계 흡수제의 CO₂ 포집 특성

류시완 · 홍연기[†]

국립한국교통대학교 화공생명공학과
27469 충북 충주시 대학로 50
(2026년 3월 19일 접수, 2026년 5월 4일 수정본 접수, 2026년 5월 7일 채택)

CO₂ Capture Characteristics of Water-lean 2-(Ethylamino)ethanol (EAE) Absorbents Containing Diethylene Glycol Monobutyl Ether (DEGMBE)

Siwan Ryu, Yeon Ki Hong[†]

Department of Chemical and Biological Engineering, Korea National University of Transportation,
Chungju, Chungbuk, 27469, Korea

(Received 19 March 2026; Received in revised from 4 May 2026; Accepted 7 May 2026)

요 약

본 연구에서는 2-(ethylamino)ethanol(EAE), diethylene glycol monobutyl ether(DEGMBE) 및 물로 구성된 저수계 흡수제를 이용하여 소형 충전 흡수탑에서 CO₂를 포집하였다. EAE (2-5M)와 DEGMBE (0-40 wt%) 조성이 흡수제의 점도, CO₂ 로딩, 흡수 속도 및 총괄 물질전달계수에 미치는 영향을 고찰하였다. CO₂ 흡수 후 용매의 점도는 DEGMBE 함량이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였으나, 충전 흡수탑에서 조업 가능한 범위 내에서 유지되는 것으로 나타났다. CO₂ rich 로딩은 EAE 농도가 증가할수록 반응 가능한 아민기의 증가로 인해 CO₂ rich 로딩은 증가한 반면 DEGMBE 함량이 증가함에 따라 용매의 극성이 감소하여 rich 로딩은 감소하였다. 순환 로딩은 EAE 농도가 증가함에 따라 증가하였으며, DEGMBE 함량 증가에 따른 감소 폭은 비교적 제한적으로 나타났다. 또한 CO₂ 흡수 속도와 총괄 물질전달 계수는 흡수제로 유입되는 CO₂ lean 로딩이 증가함에 따라 감소하였는데, 이는 자유 아민 농도의 감소와 액상 물질전달 저항 증가에 기인하는 것으로 해석된다. EAE/DEGMBE 기반 저수계 흡수제는 안정적인 흡수 성능을 유지하면서 CO₂ 포집 공정에서 재생 에너지 저감 가능성을 갖는 흡수제로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Abstract – In this study, the CO₂ capture characteristics of water-lean absorbents composed of 2-(ethylamino)ethanol (EAE), diethylene glycol monobutyl ether (DEGMBE), and water were investigated using a laboratory-scale packed absorption column at 40°C. The effects of EAE (2–5 M) and DEGMBE (0–40 wt%) concentration on solvent viscosity, CO₂ loading, absorption rate, and overall mass transfer coefficient were systematically examined. The viscosity of the solvent increased after CO₂ absorption and with increasing DEGMBE content; however, the viscosity remained within the operable range for packed column operation. The rich CO₂ loading increased with increasing EAE concentration due to the higher availability of reactive amine groups, whereas it decreased with increasing DEGMBE content as a result of reduced solvent polarity. The cyclic CO₂ loading increased with EAE concentration, while the decrease with increasing DEGMBE content was relatively moderate. The CO₂ absorption rate and overall mass transfer coefficient decreased with increasing lean CO₂ loading because of the reduction in free amine concentration and the increase in liquid-phase mass transfer resistance. Overall, the EAE/DEGMBE water-lean solvent system showed stable absorption performance and potential for reducing regeneration energy in CO₂ capture processes.

Key words: CO₂ capture, Water-lean solvent, 2-(Ethylamino)ethanol, Diethylene glycol monobutyl ether

1. 서 론

에너지와 관련된 각종 산업 공정에서의 과도한 CO₂ 배출은 지구적 기후변화를 유발하는 온실 효과의 1차 적인 원인으로 인식되고 있다 [1]. 현재까지 탄소 포집, 활용 및 저장(Carbon capture, utilization and storage, CCUS)은 이러한 기후변화에 대응하기 위한 가장 효과적인

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: hongyk@ut.ac.kr

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.

인 수단으로 받아들여지고 있다[2]. 화학 흡수법은 CO₂ 포집 기술 중에서 가장 주목 받아온 기술이며 천연가스 처리에서부터 각종 연소 배가스로부터의 CO₂ 포집에 실제로 사용되고 있는 성숙된 기술로 알려져 있다[3]. 화학 흡수 공정은 크게 흡수탑에서의 CO₂ 흡수와 용매 재생탑에서의 흡수제 재생과 CO₂ 탈거로 구성된다. 5M 모노에탄올아민(monoethanolamine, MEA) 수용액은 CO₂와의 높은 반응성과 가격적인 장점으로 인해 현재까지 화학 흡수법에 의한 CO₂ 포집에 가장 널리 사용되고 있으며 각종 CO₂ 포집 흡수제 개발에 있어 기준이 되고 있다. 그러나 MEA 수용액 흡수제는 CO₂를 포함한 흡수제의 재생 과정에서 약 3.5 GJ/tCO₂에 달하는 에너지가 필요하다는 단점을 갖고 있다[4,5].

일반적으로 CO₂ 화학 흡수법에서의 재생 에너지는 반응열, 현열 그리고 잠열로 구성된다. 물은 상대적으로 높은 비열과 증발 잠열을 갖고 있음에도 불구하고 CO₂ 흡수제인 알카놀아민에는 다량의 물을 혼합하게 되는데 이는 흡수제가 흡수탑 및 탈거탑에서 조업 가능한 수준의 점도를 유지할 수 있도록 하기 위함이다. 흡수제 내 과량의 물은 열에 의한 CO₂ 탈거 및 흡수제 재생 시 상당한 에너지를 요구하게 한다. 또한 CO₂가 포함된 아민 수용액에서는 아민에 의한 흡수 장치를 구성하는 재료의 부식도 무시할 수 없게 된다. 따라서 화학 흡수에 의한 CO₂ 흡수 공정의 재생 에너지 및 조업 비용 저감을 위해서는 수계 흡수제를 구성하는 물을 대체할 필요가 있다[6, 7].

저수계(water-lean) 흡수제는 수계 흡수제에 포함된 과량의 물로 인한 재생 에너지를 저감하기 위해 수계 아민 흡수제를 구성하는 물의 일부를 유기 용매로 대체한 흡수제를 말한다. 저수계 흡수제에서는 물의 일부를 물보다 비열은 낮고 끓는점이 더 높은 유기 용매로 대체하여 재생 에너지를 낮추면서 CO₂에 대한 흡수 선택도와 흡수 용량을 유지할 수 있도록 설계된다. 저수계 흡수제 개발 초기에는 CO₂에 대한 물리 용해도가 높은 용매를 이용하여 수계 흡수제의 물을 대체하려는 시도가 이루어졌다. Henni와 Mather는 N-methyldiethanolamine(MDEA)를 주 흡수제로 하고 희석을 위한 용매로 메탄올을 사용한 저수계 흡수제의 CO₂ 흡수 성능을 평가하였다[8]. 그러나 이와 같은 수용성 알콜 용매의 경우 용매의 끓는점이 낮아 흡수 조업 중 상당한 용매 손실이 발생하거나 이를 방지하기 위한 응축기 조업에 따른 에너지 소비가 크다는 단점이 있다. Bougie 등은 에틸렌 글라이콜과 1-프로판올 혼합물, diethylene glycol monoethyl ether (DEGMEE), N-methylformamide (NMF)를 기반으로 한 MEA 흡수제를 이용하여 CO₂ 흡수 특성을 고찰하였다. 그 결과 DEGMEE를 사용한 경우 5M MEA 수용액에 비해 높은 순환 흡수 용량과 낮은 재생 에너지를 얻었다고 하였다. 그러나 NMF를 제외한 나머지 용매의 경우 CO₂가 흡수된 흡수제의 점도가 충전탑에서 조업 가능한 범위를 초과하였으며 NMF의 경우는 상대적으로 흡수 속도는 빨랐지만 재생 성능이 좋지 않은 것으로 나타났다[9]. Zhang 등은 dimethyl sulfoxide (DMSO)를 용매로 한 2-ethylhexylamine (EHA)와 N,N-dimethylethylenediamine (DMEDA) 저수계 흡수제의 CO₂

포집 성능을 측정하고 포집 메커니즘을 분자 동력학적으로 해석하였다. 그 결과 5M MEA 수용액에 비해 흡수 용량은 64% 증가했으며 재생 에너지는 65% 감소한 것으로 보고하였다. 그러나 일부 조합에서는 점도 증가에 따른 젤화가 발생하는 것으로 나타났다[10]. 산업적으로 벤치마크 기준이 되는 5M MEA 수용액이 40°C에서 CO₂로 포화되면 약 3-4 cP의 점도를 나타내는데 비해 대부분의 저수계 혹은 비수계 흡수제의 CO₂ 흡수 후 점도는 이 값을 크게 초과하는 것으로 알려져 있다[11]. 이와 같은 점도의 증가는 충전탑 내부에서의 물질전달 및 열전달 효율 저하와 동시에 유체 이송에 따른 동력 사용을 증가시키게 된다.

본 연구에서는 저수계 흡수제 사용함에 있어 주 흡수제인 아민의 재생 성능 저하를 방지하고 유기 용매 사용에 따른 CO₂ 흡수 후 급격한 점도 상승을 억제하기 위해 주 흡수제로 2-(ethylamino)ethanol(EAE)를 사용하였고 유기 용매로는 diethylene glycol monobutyl ether (DEGMBE)를 사용하였다. EAE는 CO₂ 흡수 성능이 우수한 선형 구조의 2차 아민(linear secondary amine)으로 알려져 있으며, 일반적인 입체장에 아민과 달리 CO₂와 반응하여 카바메이트를 형성할 수 있는 구조적 특성을 갖는다[12]. 또한 EAE 수용액은 MEA 수용액에 비해 열 안정성이 우수한 것으로 알려져 있다[13]. 본 연구그룹의 이전 연구[14]에 따르면, DEGMBE는 긴 사슬 구조를 갖는 글라이콜 에터 용매로써 아민과 혼합된 저수계 흡수제를 구성할 경우 CO₂ 흡수 후에도 점도 상승이 충전탑 조업 가능한 범위 내에 있음을 확인하였다. 본 연구의 목적은 소형 흡수탑을 이용하여 EAE/DEGMBE/물로 구성된 저수계 흡수제에 대해서 흡수제 구성 성분의 조성에 따른 흡수 및 탈거 성능과 흡수 속도 변화를 고찰하여 이들 흡수제의 실제 흡수탑으로의 적용 가능성을 살펴보았다.

2. 실험

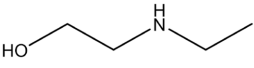
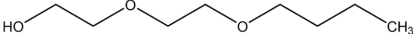
2-1. 흡수제

본 연구에서 사용한 EAE (>98 wt%)는 시그마-알드리치(Sigma-Aldrich, USA)에서 구입하였고 DEGMBE (>99 wt%)는 TCI (Tokyo, Japan)에서 구매하였다. EAE와 DEGMBE 모두 추가적인 분리정제 없이 사용하였다. 본 연구에서 사용된 물은 2차 증류수를 사용하였다. 본 연구에서 사용한 흡수제 구성 성분의 구조와 주요 물성은 Table 1에 나타내었다. CO₂ (99.99%) 및 N₂ (99.999%) 가스는 가스테크코리아에서 구입하였다.

2-2. 실험 방법

본 연구에서 사용한 저수계 흡수제에서 아민은 EAE 단독으로 구성되며, EAE 농도는 2-5 M 범위를 갖는다. DEGMBE의 농도 범위는 0-40 wt%이다. 흡수 성능을 평가하기 위해 사용된 소형 충전 흡수탑은 이전 연구에서 사용한 것과 동일하다[7]. 흡수탑은 내경 1.0 in, 높이 0.6 m이며 일정 온도에서의 조업을 위해 탑 주위에 물

Table 1. Structure and properties of materials used for solvent preparation

Compound	Structure	Viscosity at 40°C (cP)	Boiling point (°C)
EAE		1.97 ^[15]	169
DEGMBE		3.22 ^[16]	230-231

채킷을 장착하였다. 흡수탑 내부는 0.16 in×0.16 in의 다공 충전물로 채웠다. 흡수제는 연동 펌프(peristaltic pump, Roller pump rp-100, Eyela)를 이용하여 흡수탑 상단으로 10 mL/min의 유량으로 유입된다. 혼합기체는 CO₂와 N₂로 구성되며 CO₂의 농도는 9 vol%이다. 혼합기체는 흡수탑 하단으로 1.0 L/min의 유량으로 유입되는데 이때 혼합기체의 유량은 질량 흐름 제어기(mass flow controller, 5850E Brooks, USA)에 의해 조절된다. 흡수탑을 통해 유출되는 기체 흐름에서의 CO₂ 농도는 충전탑 상단과 연결된 CO₂ 분석기(Infrared gas analyzer, ZRJ-6, Fuji Electric Co., Ltd., Japan)를 이용하여 측정하였다. 각 실험에 앞서 CO₂ 분석기를 이용하여 N₂ 가스로 영점 보정을 수행한 후, CO₂ 9 vol% 혼합가스를 이용하여 스캔 보정을 진행하였다. 보정 이후 흡수탑 내부에 잔존하는 CO₂를 제거하기 위하여 N₂ 가스로 충분히 퍼지한 후, 흡수탑 출구에서의 CO₂ 농도가 0 vol%에 도달한 것을 확인한 후 실험을 시작하였다. 흡수 과정 동안 흡수탑 상단에서 배출되는 기체의 CO₂ 농도를 연속적으로 측정하였으며, 출구 CO₂ 농도가 유입 농도인 9 vol%에 도달한 이후 1시간 이상 변화 없이 일정하게 유지되는 경우 평형에 도달한 것으로 간주하고 흡수 실험을 종료하였다. CO₂ 흡수 전과 흡수 후의 점도는 점도계(DV2T, Brookfield, USA)를 이용하여 측정하였다. 흡수가 완료된 후 얻어진 CO₂ 농축상은 단증류를 통해 재생하였다. 재생 온도는 100°C 였으며 단증류 장치에 응축기를 설치하여 흡수제 손실을 방지하였다. 재생이 완료된 흡수제와 CO₂가 흡수된 흡수제에서의 CO₂ 농도는 표준 HCl 용액에 의한 적정법을 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 40°C에서 EAE/DEGMBE/물 저수계 흡수제에서 조성 변화에 따른 흡수제의 점도 변화를 CO₂ 흡수 전후로 비교한 결과를 나타낸다. 유기 용매가 없는 아민 수용액의 경우 CO₂ 흡수가 진행되는 동안 카바메이트 및 양성자화된 아민과 같은 이온 종이 형성이 증가함에 따라 점도가 증가한다. 이러한 카바메이트 및 양성자화된 아민 이온 종의 형성에 따른 점도 증가는 기존 아민 기반 CO₂ 흡수제에서도 일반적으로 보고된 바 있다[17]. 수계 흡수제에서 물은 극성이 높아 형성된 이온 종을 쉽게 용해시키므로 수계 환경에서는 CO₂ 흡수 과정에서 발생한 이온 종의 이온쌍이나 클러스터 형성은 제한적이므로 이에 따른 흡수제의 점도 증가가 상대적으로 크지 않다. 그러나 본 연구에서와 같이 유기 용매가 포함된 저수계 흡수제의 경우 유기 용매 도입으로 인해 흡수제의 극성이 감소함에 따라 EAE와 CO₂ 사이의 반응으로 형성된 카바메이트 및 양성자화된 EAE 이온 간의 정전기적 상호작용이 증가하게 된다. 이러한 용매 극성 및 수소결합 특성의 변화는 이온 종의 해리 및 상호작용에 직접적인 영향을 미치는 것으로 보고되어 있다[18]. 또한 물에 비해 상대적으로 극성이 낮아진 저수계 환경에서는 이와 같은 이온 쌍 사이의 이온쌍 및 이온 클러스터 형성이 촉진된다. 그러나 DEGMBE는 분자 내 2개의 에테르기를 갖는 유연한 사슬 구조와 함께 친수성과 소수성을 동시에 갖는 양친매성 구조이므로 카바메이트와 양성자화된 EAE 분자를 효과적으로 분산시켜 이온쌍 및 이온 클러스터 형성을 억제할 수 있게 된다. 그 결과 저수계 조건임에도 불구하고 CO₂ 흡수 후 점도 증가가 다른 저수계 흡수제에 비해 완만하게 나타나는 것으로 사료된다.

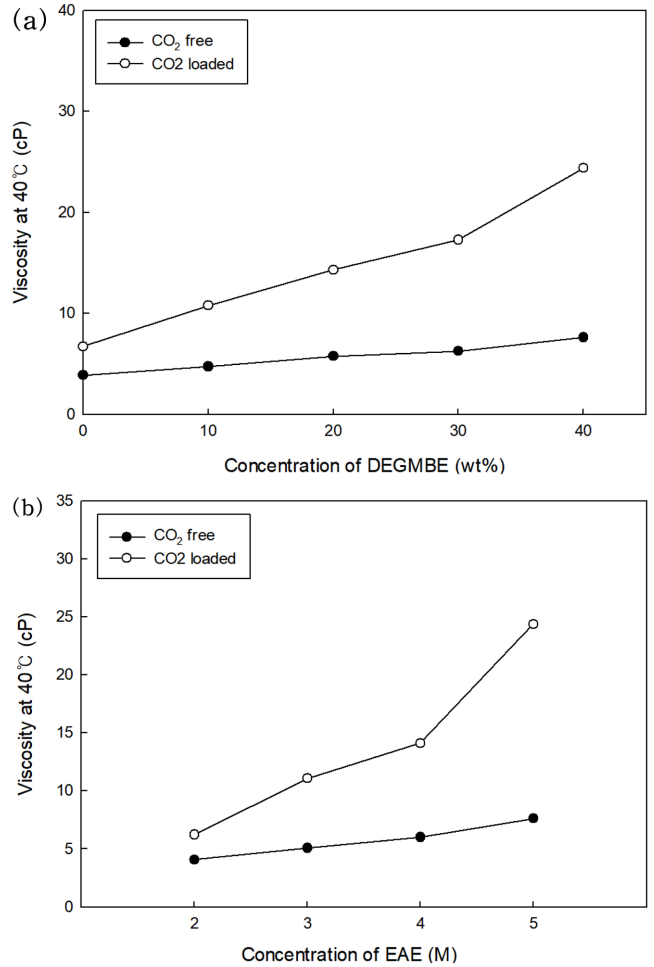


Fig. 1. Effect of solvent composition on the viscosity of EAE/DEGMBE water-lean solvents at 40°C before and after CO₂ absorption: (a) effect of DEGMBE concentration at 5M EAE, and (b) effect of EAE concentration at 40 wt% DEGMBE.

Fig. 2에서는 40°C에서 EAE/DEGMBE/물 저수계 흡수제에서 EAE 및 DEGMBE의 조성변화에 따른 CO₂ rich 로딩 변화를 보여 주고 있다. EAE 농도가 2M에서 5M로 증가함에 따라 rich 로딩은 증가하였다. EAE 농도를 증가시키면 단위 흡수제 부피당 CO₂와 반응이 가능한 아민기의 수가 증가함에 따라 CO₂와 반응하여 형성되는 카바메이트 및 양성자화된 EAE 이온 종의 생성량이 증가하게 된다. 이는 아민 농도에 의해 rich 로딩이 결정되는 전형적인 화학 흡수의 특성이다. 반면 DEGMBE의 조성이 증가함에 따라 rich 로딩 값은 지속적으로 감소하였다. DEGMBE가 없는 수계 EAE 흡수제의 경우 약 107 gCO₂/Lsolvent인 로딩 값이 DEGMBE가 40 wt%에 이르면 약 75 gCO₂/Lsolvent로 감소하였다. CO₂ 포집 연구에서 벤치마크 대상인 5M MEA 수용액의 CO₂ 로딩은 약 110 gCO₂/Lsolvent으로 확인되었으며, 본 연구에서의 EAE 기반 저수계 흡수제는 MEA와 유사한 수준의 흡수 용량을 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 DEGMBE 도입에 따라 흡수제의 극성 감소로 인해 CO₂와 아민 간 반응 평형이 상대적으로 불리하게 이동하기 때문으로 해석된다. 또한 저수계 조건에서 물 함량이 줄어들어 따라 카바메이트 종이 불안정화되어 CO₂의 화학적 흡수 능력이 저하되는 것으로 판단한다. 그러나 카바메이트 이온 종의 불안정성은 흡수제

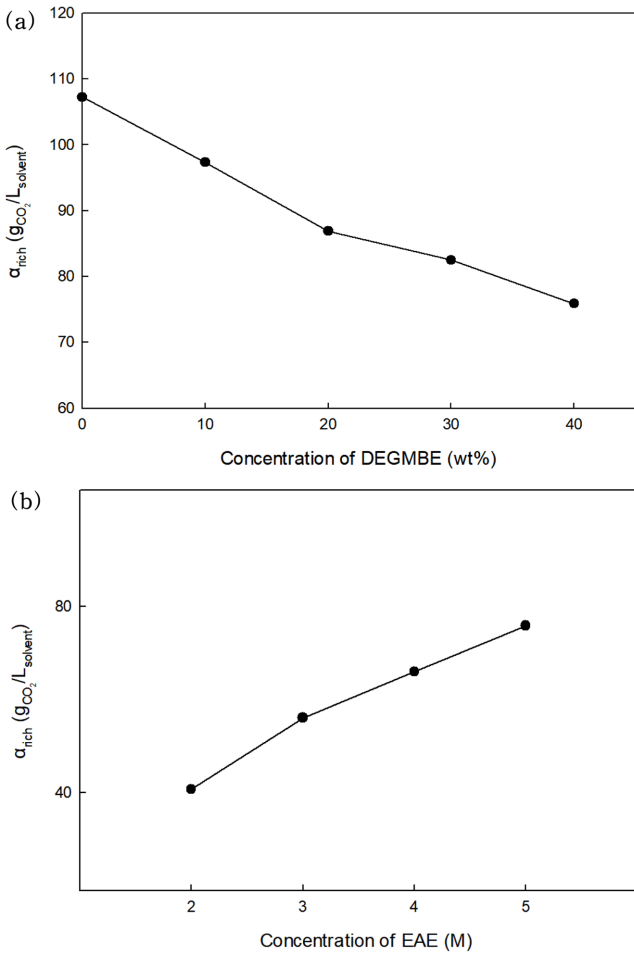


Fig. 2. Effect of solvent composition on the rich CO₂ loading of EAE/DEGMBE water-lean solvents at 40°C: (a) effect of DEGMBE concentration at 5M EAE, and (b) effect of EAE concentration at 40 wt% DEGMBE.

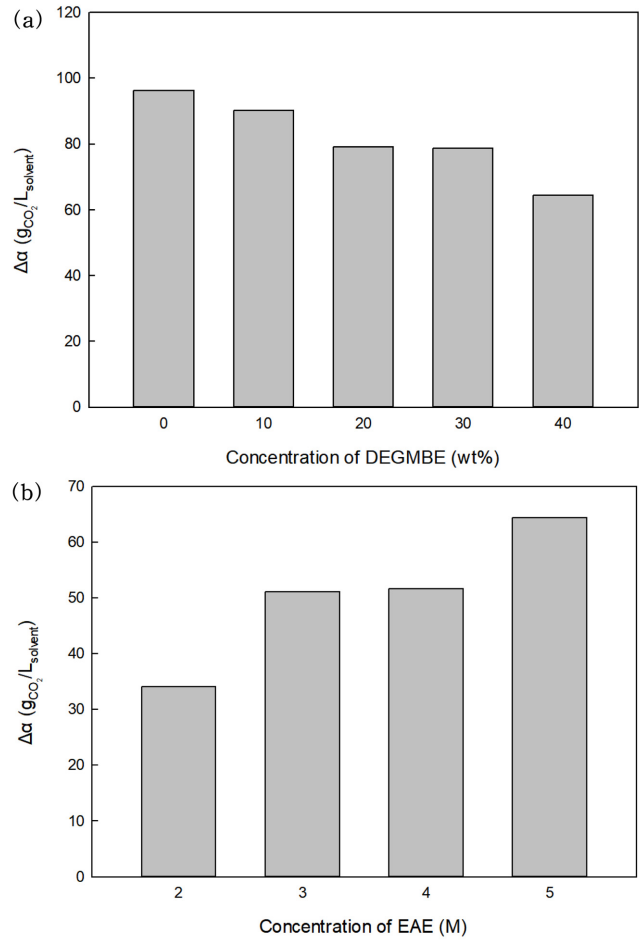


Fig. 3. Effect of solvent composition on cyclic CO₂ loading of EAE/DEGMBE water-lean solvents: (a) effect of DEGMBE concentration at 5M EAE, and (b) effect of EAE concentration at 40 wt% DEGMBE.

재생에 따른 CO₂ 탈거율을 증가시킬 수 있는 것으로 알려져 있다[19].

CO₂를 흡수한 흡수제는 단증류를 이용하여 재생하였다. 재생에 따른 흡수제의 순환 로딩(cyclic loading, $\Delta\alpha$)은 CO₂ 9 vol% 혼합 가스를 40°C에서 흡수 후 포화 된 흡수제에서의 CO₂ 로딩(α_{rich})과 100°C에서 CO₂가 탈거된 흡수제에서의 CO₂ 로딩(α_{lean})의 차로 나타낼 수 있다. 전체 압력은 1 atm 조건에서 수행되었다.

$$\Delta\alpha = \alpha_{rich} - \alpha_{lean} \quad (1)$$

Fig. 3는 EAE 및 DEGMBE 조성변화에 따른 순환 로딩을 보여 주고 있다. EAE 농도가 증가할수록 순환 로딩은 뚜렷하게 증가하는데, 이는 반응 가능한 아민기 수 증가에 따른 rich 로딩 증가를 그대로 반영한 것이다. 반면, DEGMBE 조성 증가에 따른 순환 로딩의 감소 폭은 rich 로딩의 감소 폭에 비해 상대적으로 작았다. 즉, DEGMBE 증가에 따른 rich 로딩의 감소에 비해 실제 rich 로딩과 lean 로딩의 차이의 감소는 그보다 제한적이었다. 이는 DEGMBE 증가로 인해 카바메이트 이온의 안정성이 낮아지면서 CO₂와 EAE와의 결합은 다소 감소하지만 CO₂ 탈거는 용이해짐에 따라 lean 로딩 역시 낮아지기 때문으로 해석할 수 있다. 다시 말해 저수계 환경에서의 흡수제의 극성 감소는 카바메이트-암모늄 이온쌍의 안정화를 약화시키므로 rich 로딩은 줄어들지만 재생 후 lean 로딩 감소는

rich 로딩의 감소보다 더 커서 순환 로딩의 감소 폭은 줄어들게 된다. 이러한 메커니즘 상 이점으로 인해 본 연구에서 사용된 흡수제는 기존 5M MEA 수용액의 순환 로딩인 약 50 gCO₂/Lsolvent 보다 우수한 결과를 얻을 수 있었다.

일반적으로 저수계 아민 흡수제에서의 CO₂ 흡수 속도는 전통적인 수계 아민 흡수제와 비교했을 때 CO₂ 흡수 초기에는 유사하나 CO₂ 흡수가 진행됨에 따라 흡수제의 점도 증가로 인한 액상 내 물질전달 저항으로 제한될 수 있다. 즉, 흡수탑으로 유입되는 흡수제의 CO₂ 로딩이 증가하면 흡수 속도가 낮아지게 된다. Fig. 4는 흡수 속도를 흡수탑으로 유입되는 흡수제의 CO₂ 로딩에 대해 나타낸 결과로써 낮은 CO₂ 로딩 구간에서는 높은 흡수 속도가 유지되다가 일정 로딩 이후 급격히 감소함을 보여준다. DEGMBE 40 wt% 조건에서는 EAE 농도가 증가할수록 흡수 속도가 급감하는 지점이 더 높은 CO₂ 로딩 영역으로 이동하는데, 이는 반응 가능한 자유 아민 농도가 증가함에 따라 더 높은 로딩까지 CO₂를 지속적으로 흡수할 수 있기 때문이다. 이에 반해 EAE의 농도를 5M로 일정하게 유지하면서 DEGMBE 조성을 증가시키면 흡수 속도의 급격한 저하가 더 낮은 CO₂ 로딩에서 시작되므로 조절 가능한 CO₂ 로딩 구간이 줄어들음을 알 수 있다. 이는 비반응성 용매 증가에 따른 유효 아민 농도 감소와 함께 저수계 환경에서의 점도 상승 및 이온 중 형성에 따

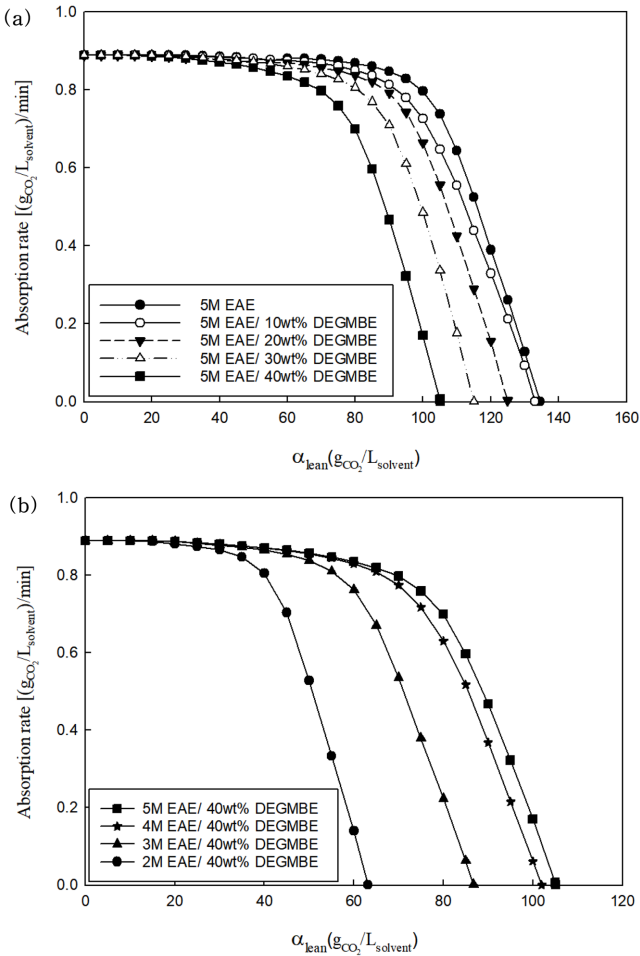


Fig. 4. CO₂ absorption rate as a function of lean loading in EAE/DEGMBE water-lean solvents: (a) effect of DEGMBE concentration and (b) effect of EAE concentration.

른 흡수제 상에서의 물질전달 저항 증가로 해석할 수 있다. 즉, EAE 농도 증가는 흡수 속도 유지 구간을 확장시키는 반면, DEGMBE 함량 증가는 속도 제한을 조기에 유발하는 방향으로 작용한다는 것이다.

EAE/DEGMBE/물 흡수제로의 CO₂ 흡수에 따른 물질전달 성능을 EAE 및 DEGMBE의 농도 변화에 따른 총괄 물질전달계수($K_{OG}a$)를 이용하여 평가하였다. 총괄 물질전달 계수는 다음과 같이 계산하였다.

$$N_{CO_2} = K_{OG}a\Delta p_{CO_2,lm} \quad (2)$$

여기에서 N_{CO_2} 는 기-액 계면을 통한 CO₂의 몰 플럭스[mol/sec]이며 은 로그 평균 압력 차로써 다음과 같이 계산된다[7].

$$\Delta p_{CO_2,lm} = \frac{(p_{CO_2} - p_{CO_2}^*)_{bot} - (p_{CO_2} - p_{CO_2}^*)_{top}}{\ln \left[\frac{(p_{CO_2} - p_{CO_2}^*)_{bot}}{(p_{CO_2} - p_{CO_2}^*)_{top}} \right]} \quad (3)$$

$(p_{CO_2} - p_{CO_2}^*)_{bot}$ 과 $(p_{CO_2} - p_{CO_2}^*)_{top}$ 는 각각 흡수탑 하부와 상부에서 혼합기체 내 이산화탄소 부분압과 평형 부분압과의 차이이다. 총괄 물질전달 저항은 액상에서의 물질전달 저항과 기상에서의 물질전달 저항으로 나눌 수 있다. 본 연구에서와 같이 기체상에서의

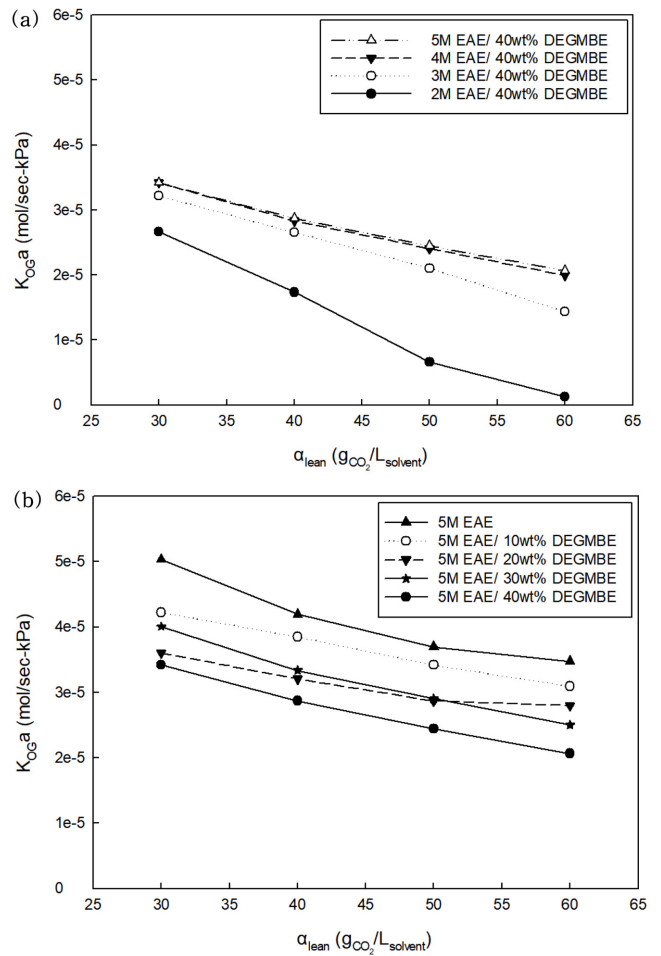


Fig. 5. Overall mass transfer coefficient ($K_{OG}a$) as a function of lean CO₂ loading for EAE/DEGMBE water-lean solvents: (a) effect of EAE concentration and (b) effect of DEGMBE concentration.

CO₂ 분압이 낮고 CO₂와 흡수제 간의 반응이 존재하는 경우 총괄 물질전달 저항은 액상에서의 물질전달 저항과 같다고 할 수 있다.

Fig. 5는 다양한 조성을 가진 EAE/DEGMBE/물 저수계 흡수제에서 흡수탑으로 유입되는 흡수제에서의 CO₂ 로딩에 따른 총괄 물질전달계수의 변화를 나타내었다. 모든 경우에서 CO₂ 로딩이 증가할수록 $K_{OG}a$ 는 감소하는 경향을 나타내었다. CO₂ 로딩 증가에 따른 물질전달계수 감소 현상은 기존 아민 기반 흡수제에서도 보고된 바 있으며[20], 본 실험에서 또한 CO₂ 로딩 증가에 따라 흡수제 내 카바메이트 및 암모늄 이온 형성이 증가하고 그 결과 CO₂와 반응할 수 있는 자유 EAE 농도가 감소하기 때문이다. 이는 흡수제 상에서 EAE와 CO₂와의 반응 속도를 감소시키고 화학반응에 의한 증진인자(enhancement factor)를 감소시켜 액상에서의 물질전달 저항이 증가한 것으로 해석할 수 있다. 또한 CO₂ 흡수에 따라 형성된 이온 중 간의 수소결합으로 흡수제의 점도가 증가하게 되면 흡수제 상에서의 CO₂의 확산저항이 증가하여 액상에서의 물질전달 저항이 증가하게 된다. 한편 동일한 CO₂ 로딩에서는 EAE 농도가 증가할수록 $K_{OG}a$ 가 감소하게 되는데 이는 EAE 농도가 높을수록 CO₂와 반응할 수 있는 자유 아민기의 수가 증가하여 흡수제 상에서의 반응 속도가 빨라지기 때문이다. 따라서 고농도 EAE 흡수제는 더 넓은

CO₂ 로딩 범위에서 비교적 높은 총괄 물질전달계수를 유지하는 반면 아민 농도가 낮은 경우 CO₂ 로딩 증가에 따른 자유 아민기 감소의 영향이 크게 나타나 K_{OGa}가 상대적으로 급격히 감소하게 된다. 또한 동일한 EAE 농도에서 DEGMBE의 조성이 증가하게 되면 총괄 물질전달계수는 감소하게 된다. DEGMBE가 물보다 점도가 높고 극성은 낮기 때문에 DEGMBE의 조성이 높을수록 CO₂와 EAE 반응에 따른 이온종 간의 이온쌍 형성이나 수소결합이 상대적으로 강화되어 CO₂ 흡수 과정에서 흡수제 상에서의 확산저항이 증가하기 때문으로 판단된다.

흡수탑 설계와 흡수 공정에서 서로 다른 파라미터를 변화시킴에 따른 영향을 예측하고자 할 때 물질전달 계수에 대한 상관관계는 유용하다. Manecintr 등은 4-diethylamino-2-butanol (DEAB) 흡수제를 흡수탑에 적용한 경우 총괄 물질전달계수에 대한 상관관계를 다음과 같이 제안하였다[21].

$$K_{OGa} \propto L^{0.5} \frac{(\alpha^* - \alpha)C}{P_{CO_2}} \quad (4)$$

여기에서 L은 흡수제의 유량, α*은 p_{CO₂}와 평형을 이루는 흡수제에서의 CO₂ 로딩이며 C는 흡수제에서의 아민 농도이다. 이 관계식은 Fig. 6과 같이 흡수 구동력에 해당하는 [(α* - α)C/p_{CO₂}]에 대해 K_{OGa}/L^{0.5}를 플롯하여 풀 수 있다. 그 결과 도출된 상관관계식은 다음과 같다.

$$K_{OGa} = 4.00 \times 10^{-5} L^{0.5} \frac{[(\alpha^* - \alpha)C]}{P_{CO_2}} + 1.43 \times 10^{-5} \quad (5)$$

식 (5)와 같이 두 변수에 대한 선형적 상관관계는 구동력이 증가함에 따라 화학반응에 의해 물질전달이 촉진됨을 의미한다. 또한 구동력이 0에 접근하는 경우에도 K_{OGa} 값이 0이 아닌 것은 화학 흡수가 지배적인 CO₂ 포집 공정에서의 물리 흡수 및 흡수탑 자체의 물질전달 저항으로 해석할 수 있다. 이러한 상관관계는 충전물의 형태, 용매의 종류 및 농도 등에 따라 영향을 받을 수 있다. 또한 구동력에 따른 정규화된 물질전달 계수가 완전한 선형성을 보이지 않는 것은 흡수탑에서 흡수제의 흐름 특성, 용매 물성 및 확산 계수 등의 추가적인 영향이 존재함을 의미한다.

일반적으로 흡수법에 의한 CO₂ 포집에 필요한 재생 에너지는 반

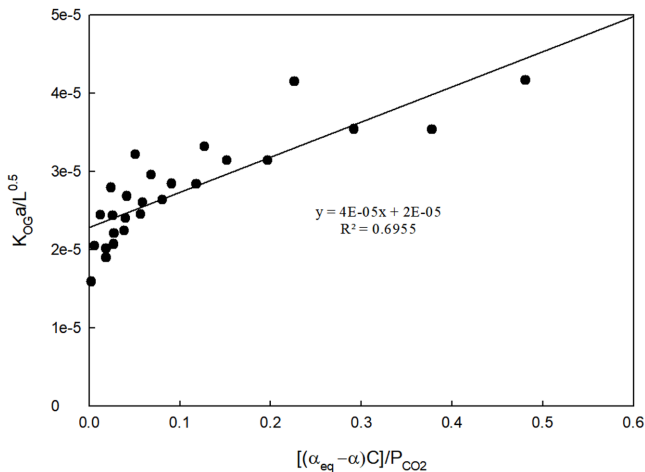


Fig. 6. Relationship between K_{OGa}/L^{0.5} and [(α* - α)C/p_{CO₂}].

응열, 현열 그리고 잠열로 구성되며 다음과 같이 계산된다.

$$Q_{req} = q_{abs} + q_{sens} + q_{vap,H_2O} \quad (6)$$

$$Q_{req} = \frac{c_p(T_{reb} - T_{feed})}{\Delta\alpha} \frac{M_{sol}}{M_{CO_2} x_{sol}} + \Delta h_{vap,H_2O} \frac{P_{H_2O}}{P_{CO_2}} \frac{1}{M_{CO_2}} + \frac{\Delta h_{abs,CO_2}}{M_{CO_2}} \quad (7)$$

여기에서 C_p는 흡수제의 몰 비열, T_{reb}와 T_{feed}는 각각 재비기(reboiler) 및 탈거탑(desorber) 유입부의 온도를 나타낸다. Δα는 흡수탑 출구(rich)와 흡수탑 입구(lean) 간의 CO₂ 순환로딩, x_{sol}는 용액 내 아민의 몰분율을 나타낸다. 또한, Δh_{vap,H₂O}는 물의 증발잠열, P_{H₂O}와 P_{CO₂}는 각각 탈거탑 출구 기상에서의 수증기와 CO₂의 부분압을 나타낸다. Δh_{abs,CO₂}는 CO₂의 흡수 반응열을 의미하며, M_{sol}과 M_{CO₂}는 각각 용액과 CO₂의 몰질량을 나타낸다. EAE의 반응열은 문헌에서 보고된 2차 알카놀아민의 값에 기초하여 약 70 kJ/mol-CO₂로 가정하였다[22].

Fig. 7(a)와 (b)는 각각 DEGMBE 농도 변화 및 EAE 농도 변화에 따른 재생 에너지 계산 결과를 보여주고 있다. DEGMBE 농도가 증가함에 따라 물의 함량이 감소하게 되어 잠열 기여도가 크게 감소하는 경향을 보였으며, 이에 따라 전체 재생 에너지는 감소하

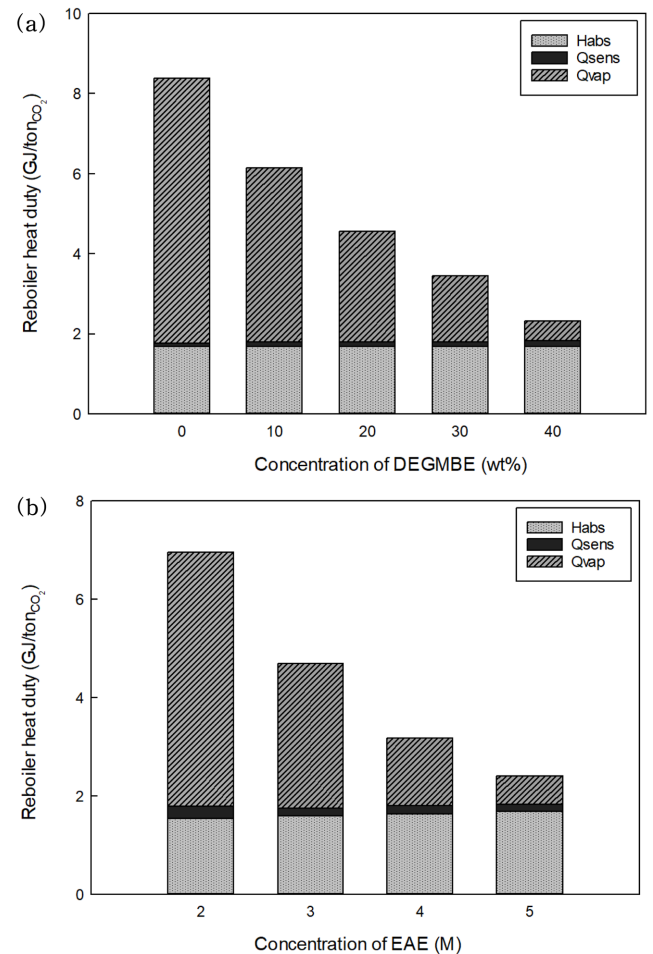


Fig. 7. Contribution of absorption heat (H_{abs}), sensible heat (Q_{sens}), and latent heat (Q_{vap}) to the total reboiler heat duty of EAE/DEGMBE water-lean solvents: (a) effect of DEGMBE concentration at 5M EAE, and (b) effect of EAE concentration at 40 wt% DEGMBE.

는 경향을 나타내었다. 저수계 환경에서 EAE 농도가 증가하면 잠열 감소 뿐 아니라 순환 흡수 용량 증가에 따른 현열 감소도 이루어지고 있는 것으로 나타났다. 5M EAE에 40 wt% DEGMBE로 구성된 흡수제의 경우 재생 에너지가 약 2.5 GJ/CO₂로 계산되었다. 이는 5M MEA 수용액의 재생에너지인 약 3.5 GJ/CO₂를 고려할 때 본 연구에서 개발된 흡수제에 대한 성능 평가가 실험실 규모의 소형 흡수탑으로 한정되나 향후 실제 공정으로의 적용 가능성이 기대된다고 하겠다.

4. 결 론

본 연구에서는 소형 충전 흡수탑을 이용하여 EAE/DEGMBE/물로 구성된 저수계 흡수제에서 EAE 및 DEGMBE 조성 변화에 따른 흡수제의 점도, CO₂ 로딩, 흡수 속도 및 총괄 물질전달계수를 고찰하였다. DEGMBE 함량이 증가함에 따라 CO₂ 흡수 후 용매의 점도는 증가하였으나 충전탑에서 조업 가능한 범위 내에서 유지되는 것으로 나타났다. EAE 농도가 증가할수록 단위 부피당 반응 가능한 아민기의 수가 증가함에 따라 CO₂ rich 로딩과 순환 로딩이 모두 증가하였다. 반면 DEGMBE 농도가 증가할수록 용매의 극성이 감소하여 CO₂-아민 반응 평형이 상대적으로 불리해지면서 rich 로딩은 감소하였다. 낮은 CO₂ 로딩 영역에서는 높은 흡수 속도가 유지되었으나 로딩이 증가함에 따라 자유 아민 농도 감소와 용매 점도 증가에 따른 액상 물질전달 저항 증가로 인해 흡수 속도가 감소하였다. 또한 총괄 물질전달계수는 흡수탑으로 유입되는 흡수제의 CO₂ 로딩 증가에 따라 감소하는 경향을 보였는데 이는 카바메이트 및 암모늄 이온 형성에 따른 자유 아민 농도 감소와 용매 내 확산저항 증가로 인한 것으로 해석된다. 결과적으로 EAE 농도의 증가는 흡수 용량과 물질전달 성능을 향상시킨 반면, DEGMBE의 도입은 점도 증가와 아민 희석 효과로 인해 흡수 성능을 일부 감소시켰다. 그러나 DEGMBE를 이용한 저수계 흡수제는 CO₂ 흡수 후에도 충전탑 조업이 가능한 점도를 유지하였으며 수계 흡수제 내 물을 비점이 높고 휘발도가 낮은 유기 용매로 대체할 수 있다는 점에서 향후 CO₂ 포집 공정에서의 재생 에너지 저감 가능성을 제시한다.

감 사

본 논문은 2025년도 교육부 및 충청북도의 재원으로 충북RISE 센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심대학지원체계(RISE) 글로컬대학30의 결과입니다.(2025-RISE-11-004)

References

1. Abanades, J. C., Rubin, E. S., Mazzotti, M. and Herzog, H. J., "On the Climate Change Mitigation Potential of CO₂ Conversion to Fuels," *Energy Environ. Sci.*, **10**, 2491-2499(2017).
2. Sen, R., Koch, C. J., Goepfert, A. and Prakash, G. K. S., "Tertiary Amine-Ethylene Glycol Based Tandem CO₂ Capture and Hydrogenation to Methanol: Direct Utilization of Post-Combustion CO₂," *ChemSusChem*, **13**, 6318-6322(2020).
3. Zhang, Z., Borhani, T. N. and Olabi, A. G., "Status and Perspective of CO₂ Absorption Process," *Energy*, **15**, 118057(2020).
4. Moser, P., Schmidt, S., Sieder, G., Garcia, H. and Stoffregen, T., "Performance of MEA in a Long-term Test at the Post-combustion Capture Pilot Plant in Niederaussem," *Int. J. Greenh. Gas Control.*, **5**, 620-627(2011).
5. Knudsen, J., Anderson, J., Jensen, J. N. and Biede, O., "Evaluation of Process Upgrades and Novel Solvents for the Post Combustion CO₂ Capture Process in Pilot-scale," *Energy Procedia*, **4**, 1558-1565(2011).
6. Jang, G. G., Thompson, J. A., Sun, X. and Tsouris, C., "Process Intensification of CO₂ Capture by Low-aqueous Solvent," *Chem. Eng. J.*, **426**, 131240(2021).
7. Wang, S., Hong, J. H., You, J. K. and Hong, Y. K., "Absorption Characteristics of Water-lean Solvent Composed of 3-(Methylamino)propylamine and N-Methyl-2-Pyrrolidone for CO₂ Capture," *Korean Chem. Eng. Res.*, **61**, 555-560(2023).
8. Henni, A. and Mather, A. E., "Solubility of Carbon-dioxide in Methyl-diethanolamine+Methanol+Water," *J. Chem. Eng. Data.*, **40**, 493-495(1995).
9. Bougie, F., Pokras, D. and Fan, X., "Novel Non-aqueous MEA Solutions for CO₂ Capture," *Int. J. Greenh. Gas Control.*, **86**, 34-42(2019).
10. Zhang, Z., Ge, Y., Heng, X., Yang, L., Wang, Z., Liu, F., Yang, X. and Liu, K., "Diamine-based Water-lean Absorbent for CO₂ Capture: Performance and Molecular Dynamics Insights," *Energy*, **324**, 136039(2025).
11. Liu, F., Shen, Y., Shen, L., Sun, C., Chen, L., Wang, Q., Li, S. and Li, W., "Novel Amino-Functionalized Ionic Liquid/Organic Solvent with Low Viscosity for CO₂ Capture," *Environ. Sci. Eng.*, **54**, 3520-3529(2020).
12. Sutar, P. N., Jha, A., Vaidya, P. D. and Kenig, E. Y., "Secondary Amines for CO₂ Capture: A Kinetic Investigation Using N-ethylmonoethanolamine," *Chem. Eng. J.*, **207-208**, 718-724(2012).
13. Bhosale, R. R. and Mahajani, V. V., "Kinetics of Thermal Degradation of Renewably Prepared Amines Useful for Flue Gas Treatment," *J. Renew. Sustain. Energy*, **5**, 63110(2013).
14. Wang, S., Lee, J. K., You, J. K. and Hong, Y. K., "Absorption Characteristics of Water-Less Biphasic Solvent Composed of 2-(Ethylamino)Ethanol and Diethylene Glycol Diethyl Ether for CO₂ Capture," *Clean Technol.*, **30**, 337-344(2024).
15. Dong, Y., Ping, T., Shi, X., and Shen, S., "Density, Viscosity and Excess Properties for Binary Mixtures of 2-(Ethylamino)ethanol and 2-(Butylamino)ethanol with 2-Butoxyethanol at Temperatures from (293.15 to 353.15) K," *J. Mol. Liq.*, **312**, 113351(2020).
16. Li, X.-X., Fan, G.-C., Zhang, Z.-L., Wang, Y.-W. and Lu, Y.-Q., "Density and Viscosity for Binary Mixtures of Diethylene Glycol Monobutyl Ether with Monoethanolamine, Diethanolamine, and Triethanolamine from (293.15 to 333.15) K," *J. Chem. Eng. Data*, **58**, 1229-1235(2013).
17. Aminian, A. and ZareNezhad, B., "Predicting the Shear Viscosity of Carbonated Aqueous Amine Solutions and Their Blends by Using an Artificial Neural Network Model," *Energy Fuels*, **34**, 16389-16400(2020).
18. Nordness, O., Miranda, A., and Brennecke, J. F., "Effects of Polarity and Hydrogen Bonding on Physical Properties and Ion Dissociation in 1-Ethyl-3-methylimidazolium Ionic Liquid + Non-aqueous Solvent Systems," *J. Chem. Eng. Data*, **66**, 1191-1200(2021).
19. Kim, H. S. and Hong, Y. K., "Effect of Ether Group in the Diamine Structure on Carbamate Stability and Regeneration: Experimental

- and DFT Study of 2,2'-(Ethylenedioxy)bis(ethylamine);” *Korean J. Chem. Eng.*, **43**, 985-996(2026).
20. Ansaloni, L., Hartono, A., Awais, M., Knuutila, H, K., Deng, L., “CO₂ Capture Using Highly Viscous Amine Blends in Non-porous Membrane Contactors;” *Chem. Eng. J.*, **359**, 1581-1591(2019).
21. Maneeintr, K., Idem, R. O., Tontiwachwuthikul, P. and Wee, A. G. H., “Comparative Mass Transfer Performance Studies of CO₂ Absorption into Aqueous Solution of DEAB and MEA;” *Ind. Eng. Chem. Res.*, **49**, 2857-2863(2010).
22. Hwang, S. J., Kim, J. H., Kim, H. Y. and Lee, K. S., “Solubility of Carbon Dioxide in Aqueous Solutions of Three Secondary Amines: 2-(Butylamino)ethanol, 2-(Isopropylamino)ethanol, and 2-(Ethylamino)ethanol Secondary Alkanolamine Solutions;” *J. Chem. Eng. Data*, **62**, 2428-2435(2017).

Authors

Siwan Ryu: Master course, Department of Chemical and Biological Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju, 27469; siwan.ryu01@gmail.com

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