

# 알카놀아민 수용액을 이용한 저농도 CO<sub>2</sub> 흡수 특성 Low Concentration CO<sub>2</sub> Absorption Performance of Aqueous Alkanolamine Solutions

박일건<sup>†</sup> · 홍민선 · 김범석 · 김흥래\*

IL-Gun Park<sup>†</sup> · Min-Sun Hong · Beom-Seok Kim · Heung-Lea Kim\*

아주대학교 환경공학과 · \*평화엔지니어링 기술연구원  
Department of Environmental Engineering, Ajou University  
\*Pyunghwa Engineering Technique Research Institute

(2013년 4월 3일 접수, 2014년 3월 4일 채택)

**Abstract :** In this paper, absorption and reaction characteristics of low CO<sub>2</sub> and alkanolamines were investigated. As MEA concentrations increase 1, 2 and 3 wt%, CO<sub>2</sub> loadings decrease 0.34 mol-CO<sub>2</sub>/mol-absorbent, 0.32 mol-CO<sub>2</sub>/mol-absorbent and 0.3 mol-CO<sub>2</sub>/mol-absorbent, respectively. Also, CO<sub>2</sub> loadings decrease from 0.32 mol-CO<sub>2</sub>/mol-absorbent, 0.30 mol-CO<sub>2</sub>/mol-absorbent and 0.28 mol-CO<sub>2</sub>/mol-absorbent as AMP concentrations increase 1, 2 and 3 wt%. Experimental results with blending solutions show that CO<sub>2</sub> loading was the highest, 0.52 mol-CO<sub>2</sub>/mol-absorbent, when 0.5 wt% MEA and 0.5 wt% AMP were blended.

**Key Words :** Alkanolamine, Carbon Dioxide Absorption, Absorption Capacity, Absorbent, Low Concentration CO<sub>2</sub>

**요약 :** 본 논문에서는 저농도 CO<sub>2</sub> 조건에서 알카놀아민 흡수제 별 CO<sub>2</sub> 흡수 특성을 도출하였다. 단일흡수제의 경우 MEA 농도가 1 wt%, 2 wt%, 3 wt% 증가 시 CO<sub>2</sub> 흡수량은 0.34 mol-CO<sub>2</sub>/mol-absorbent, 0.32 mol-CO<sub>2</sub>/mol-absorbent, 0.30 mol-CO<sub>2</sub>/mol-absorbent로 감소하였고, AMP 농도가 1 wt%, 2 wt%, 3 wt% 증가 시 CO<sub>2</sub> 흡수량은 0.32 mol-CO<sub>2</sub>/mol-absorbent, 0.30 mol-CO<sub>2</sub>/mol-absorbent, 0.28 mol-CO<sub>2</sub>/mol-absorbent로 감소하였다. 혼합흡수제의 경우 MEA 0.5 wt%와 AMP 0.5 wt%을 혼합했을 때 0.52 mol-CO<sub>2</sub>/mol-absorbent로 최대치를 나타냈다.

**주제어 :** 알카놀아민, 이산화탄소 흡수, 흡수능, 흡수제, 저농도 CO<sub>2</sub>

## 1. 서론

화석 연료의 사용 증가로 인한 이산화탄소 배출의 증가로 급속한 지구의 온난화가 초래되었으며, 전 세계적으로 기후 변화에 따른 폐해는 앞으로 더욱 심각해질 것으로 전망하고 있다. 이와 같이 지구온난화로 인한 기후변화는 범 지구적인 환경문제로 이에 대한 대처가 시급한 실정이다. 국제 에너지기구(International Energy Agency, IEA)는 전 세계가 신 재생에너지를 주 에너지원으로 사용한다고 가정해도 2050년 이후 대기 중 이산화탄소 농도가 우려할 만한 수준으로 높아진다고 보고하고 있다.<sup>1)</sup> 이처럼 지구온난화와 기후변화는 인류의 미래에 지대한 영향을 미칠 것이며 이에 대한 대비책으로 대기 중 이산화탄소 농도를 혁신적으로 저감할 수 있는 기술 개발이 시급히 요구되고 있다. 현재 지구상 평균 CO<sub>2</sub> 농도는 390 ppm<sup>2)</sup>로 매년 2 ppm씩 증가하는 추세이며, 특히, 비점오염원에서 배출되는 CO<sub>2</sub>가 전체 50%에 육박하는 실정이다. 발전소와 같이 대규모의 점오염원에서 배출되는 고농도 CO<sub>2</sub> 포집기술은 많은 연구자들에 의해 연구가 진행되어 왔고<sup>3,4)</sup> 특히, Xu 등<sup>5)</sup>은 알카놀아민류를 이용한 CO<sub>2</sub>의 선택적 제거 성능평가에 대한 연구를 통해 알카놀아민류 계열의 흡수제가 CO<sub>2</sub> 흡수제로 가장 적합하다는 결과를 도출하였고, Austgen<sup>6)</sup>와 Song<sup>7)</sup> 그리고 Jou 등<sup>8)</sup>은

CO<sub>2</sub> 분압 조건에 따른 알카놀아민의 흡수 특성을 비교·평가하였다. 하지만 비점오염원에서 배출되는 저농도의 CO<sub>2</sub>를 제거하는 기술은 미비한 실정으로 대기 중 낮은 분압의 CO<sub>2</sub>를 효율적으로 제거하는 기술(Direct Air Capture technology, DAC)이 미국,<sup>9)</sup> 캐나다,<sup>10,11)</sup> 유럽,<sup>12,13)</sup> 중국<sup>14)</sup> 등에서 일부 제안되었으며 국내에서는 시작 단계이다.

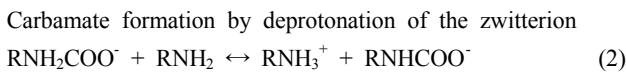
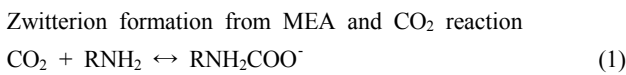
이에 본 연구에서는 대표적인 알카놀아민 중에서 1급 아민인 MEA, 2급 아민인 DEA, 3급 아민인 MDEA 그리고 입체장애 아민인 AMP를 이용하여 대기 중 저농도 CO<sub>2</sub> 저감을 위한 적용 가능성을 도출하고자 실험실 규모에서 저농도 CO<sub>2</sub> 흡수성능을 도출하였고, 도출된 결과와 기존 문헌연구 결과의 비교·분석을 통하여 저농도 CO<sub>2</sub> 저감 가능성을 평가하였다.

## 2. CO<sub>2</sub> 흡수 메커니즘

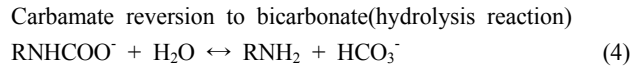
CO<sub>2</sub> 흡수제로 많이 사용되는 알카놀아민은 분자 내에서 수산기(-OH)와 아민기(-NH<sub>x</sub>)를 동시에 가지는 물질이다. 이 알카놀아민과 CO<sub>2</sub>의 흡수반응은 산-염기 중화반응과 CO<sub>2</sub> 가수분해 염기촉매 반응 메커니즘으로 해석되고 있다. 1, 2급 알카놀아민이 CO<sub>2</sub>와 반응할 때는 carbamate 생성 반

<sup>†</sup> Corresponding author E-mail: park1302@ajou.ac.kr Tel: 031-219-2407 Fax: 070-7500-5350

응이 일어나며, 이 반응은 zwitterion 메커니즘을 따르는 것으로 알려져 있다.<sup>15,16</sup> MEA (MonoEthanolAmine)와 같은 대표적인 1, 2급 알카놀아민에 포함되어 있는 질소의 lone pair(고립전자쌍; 비금속과 금속간의 공유 결합을 하였을 때 두 원소가 전자를 공유하지 않는 쌍을 말하며, 다른 원소와 공유되어 있는 공유 전자쌍 보다 강한 힘을 가져 공유 전자쌍을 밀어내게 된다. 그렇게 하여 H<sub>2</sub>O 등의 굵은형 화합물을 만들어 내게 된다.) 전자가 CO<sub>2</sub>와 일시적으로 결합하면 carbamate가 생성된다. 이 반응은 비교적 낮은 온도에서 일어나며 가열 시 아민과 CO<sub>2</sub>의 해리가 일어난다. 제1, 2급 알카놀아민의 CO<sub>2</sub> 흡수반응을 표현하는 총괄 반응식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.<sup>17)</sup>



일반적인 조건 하에서 식 (3)과 같이 MEA와 CO<sub>2</sub>의 반응에 의해 생성된 carbamate (RNHCOO<sup>-</sup>)는 안정하여 MEA의 CO<sub>2</sub> 부하능이 양론적으로 0.5를 넘지 못하게 된다.<sup>18)</sup> 그러나 CO<sub>2</sub>의 압력이 증가하면 평형부하가 0.5를 넘어서게 되는데 이는 carbamate가 식 (4)와 같이 가수분해 되면서 생성된 자유아민(RNH<sub>2</sub>)이 CO<sub>2</sub>와 추가적으로 반응하기 때문이다. carbamate의 가수분해에 의한 bicarbonate의 생성반응은 다음과 같다.



또한, MDEA (MethylDiethanolAmine) 등의 3급 알카놀아민과 AMP (2-Amino-2-Methyl-1-Propanol) 등의 입체장애 아민(sterically hindered amine)이 CO<sub>2</sub>와 반응하여 생성된 carbamate는 입체장애 효과로 인해서 불안정하여 식 (3), (4)의 반응이 동시에 일어나 마치 carbamate가 생성되지 않는 것 같은 반응특성을 보이고, CO<sub>2</sub> 부하능이 1 mol-CO<sub>2</sub>/mol-amine에 근접할 수 있다. 이런 불안정한 입체구조는 아민과 CO<sub>2</sub>가 낮은 온도에서 분리할 수 있게 작용하므로 CO<sub>2</sub> 분리 시 에너지를 저감시킬 수 있는 반면 MEA와 같이 입체장애가 없는 1급 아민의 경우 입체적으로 안정하여 아민과 CO<sub>2</sub>를 분리하는데 에너지가 더 소요된다.<sup>19)</sup> AMP의 흡수특성은 MEA에 비해 흡수속도는 낮으나 흡수능력은 우수한 것으로 알려져 있다.

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1. 실험재료 및 장치

본 실험에서 흡수제로 사용된 알카놀아민은 Dae Jung 사의 순도 99% MEA와 Aldrich 사의 99% DEA, MDEA 그리고 95% AMP로 흡수용액은 1차 증류수를 사용하여 실험 조건에 맞게 농도를 조절하여 제조하였다. 실험에 사용된 실험장치는 Fig. 1에 나타내었으며, sparger 형태의 흡수장치로 가스주입부, 흡수반응기, 가스분석계측부로 구성되어 있다. 흡수반응기는 200 mL 크기의 흡수병으로 반응기 내부에 각각 150 mL의 흡수제 용액을 충전 하였다. 본 실험에 사용

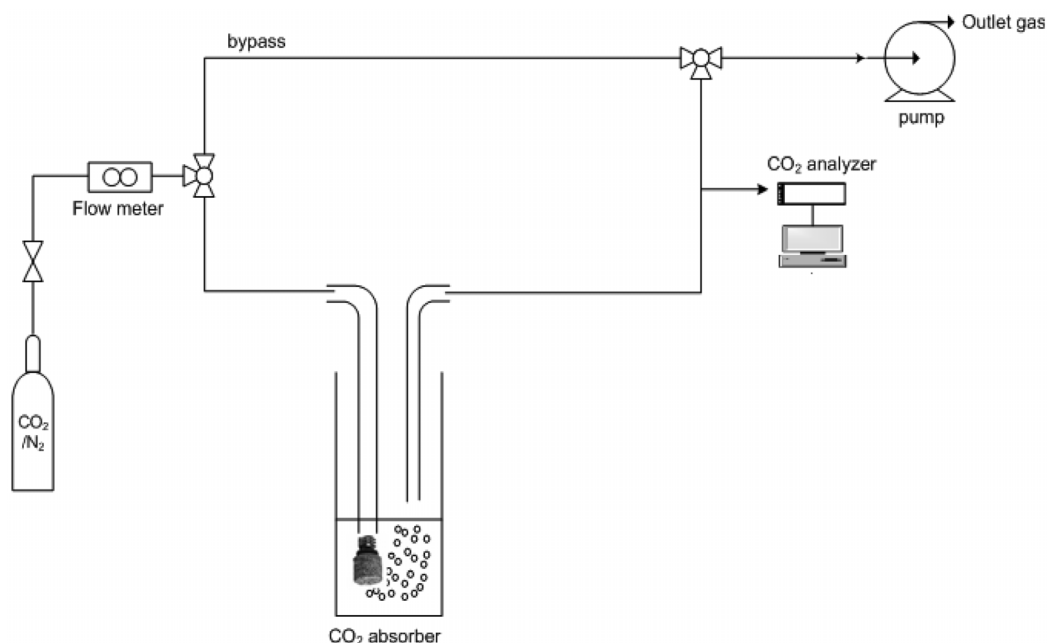


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

Table 1. Specifications of CO<sub>2</sub> standard gas used in experiment

| Components      | Specifications |
|-----------------|----------------|
| CO <sub>2</sub> | 650 ppm        |
| N <sub>2</sub>  | balance        |

Table 2. Experiment conditions

| Absorbent | Concentration       | Absorbent | Concentration       | Gas flow rate |
|-----------|---------------------|-----------|---------------------|---------------|
| MEA       | 1 wt%               | MEA+DEA   | 0.5 wt% + 0.5 wt%   | 3 L/min       |
|           | 2 wt%               |           |                     |               |
|           | 3 wt%               |           |                     |               |
| DEA       | 1 wt%               | MEA+MDEA  | 0.5 wt% + 0.5 wt%   |               |
| MDEA      | 1 wt%               | MEA+AMP   | 0.5 wt% + 0.5 wt%   |               |
| AMP       | 1 wt%               | MEA+AMP   | 1 wt% + 0 wt%,      |               |
|           | 2 wt%               |           | 0.75 wt% + 0.25 wt% |               |
|           | 3 wt%               |           | 0.67 wt% + 0.33 wt% |               |
|           | 0.5 wt% + 0.5 wt%   |           |                     |               |
|           | 0.33 wt% + 0.67 wt% |           |                     |               |
|           | 0.25 wt% + 0.75 wt% |           |                     |               |
|           | 0 wt% + 1 wt%       |           |                     |               |

된 흡수장치는 sparger를 통해 주입된 가스가 흡수제와 미세액적형태로 접촉하게 되어 기-액 접촉면적을 극대화하는 형태로 구성되었다.

### 3.2. 실험방법

본 실험에서는 저농도 조건에서 흡수제의 흡수 특성을 도출하기 위하여 질소를 balance로 한 저농도의 표준가스(Deokyang Co.)를 사용하였고, 반응기에 유입되기 전에 유량계를 통해 일정하게 공급하였다. Table 1은 흡착물질로 사용된 표준가스의 조성을 나타낸다.

저농도 CO<sub>2</sub> 흡수 특성은 흡수용액인 MEA, DEA, MDEA, AMP를 1 wt%로 제조하여 단일흡수제의 흡수 특성을 확인하였고, MEA 0.5 wt%에 DEA, MDEA, AMP를 각각 0.5 wt% (1:1 비율)로 하여 전체 농도를 1 wt%로 조절하여 혼합흡수제의 흡수 특성을 도출하였다. 또한, MEA와 AMP의 첨가 비율에 따른 CO<sub>2</sub>의 흡수 특성을 도출하였다. Table 2는 알카놀아민을 이용한 저농도 CO<sub>2</sub> 흡수 특성 연구를 위한 실험조건을 정리한 것이다.

또한, 대기 중 조건을 고려하여 상온(25°C), 상압(1 atm)에서 실험을 수행하였고, CO<sub>2</sub>는 가스측정기(KIMO-AQ200)를 반응기 출구에 설치하여 by-pass를 통해 입구농도와 출구농도를 실시간으로 측정하였다. 흡수제에 흡수된 CO<sub>2</sub>의 흡수량은 파과곡선(breakthrough curve)을 이용해서 흡수면적을 적분해서 구하였고, mol-CO<sub>2</sub>/mol-absorbent로 나타내었다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1. 단일흡수제의 CO<sub>2</sub> 흡수 특성

단일흡수제의 CO<sub>2</sub> 흡수 특성 평가를 위해 각각의 흡수제

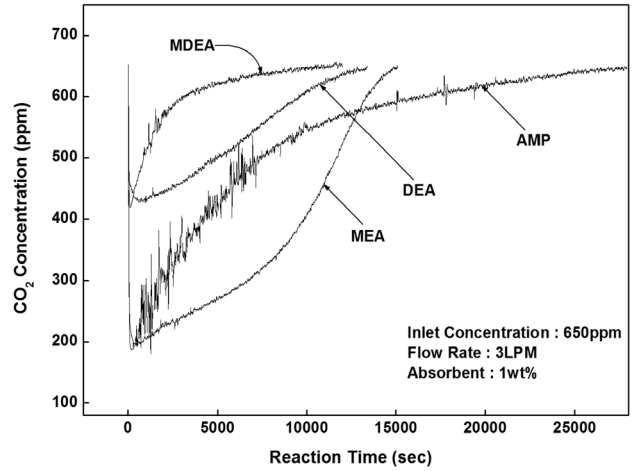


Fig. 2. Temporal variation of CO<sub>2</sub> absorbency on different absorbents.

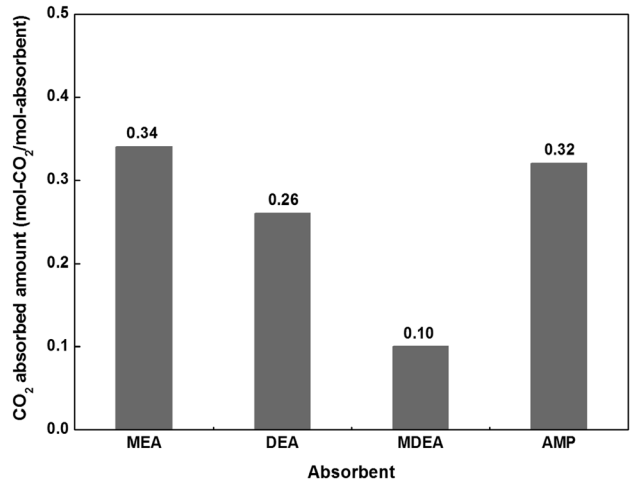


Fig. 3. Absorbed CO<sub>2</sub> on various alkanolamine.

를 1 wt%로 하여 CO<sub>2</sub> 가스를 3 L/min으로 유입시켰다. Fig. 2는 각각의 흡수제에 대한 CO<sub>2</sub> 흡수 특성을 나타낸 것으로 저농도 CO<sub>2</sub> 조건에서 MEA 흡수제가 DEA, MDEA, AMP보다 흡수 성능이 우수한 것으로 나타났다. MEA와 AMP의 경우 초기 CO<sub>2</sub> 저감 효율은 비슷하게 나타났지만 시간이 지날수록 MEA가 AMP보다 빠르게 반응이 진행되는 것을 알 수 있다. 이는 MEA의 경우 1몰의 CO<sub>2</sub>와 2몰의 아민이 반응하므로 화학양론적 제한에 의하여 평형부하가 0.5 이상에서는 반응이 빠르게 나타나 급격한 기울기 변화를 보이는 것으로 판단된다. Fig. 3은 각각의 흡수제의 CO<sub>2</sub> 흡수량을 나타낸 것으로 MEA가 0.34 mol-CO<sub>2</sub>/mol-absorbent로 DEA, MDEA, AMP보다 높은 것으로 나타났다. AMP 용액의 경우 MEA에 비해 흡수속도는 낮으나 화학양론적(1 mol-CO<sub>2</sub>/mol-amine)으로 흡수능력은 우수한 것으로 알려져 있으나 저농도 CO<sub>2</sub> 흡수에 있어서는 0.32 mol-CO<sub>2</sub>/mol-absorbent로 MEA보다 다소 낮은 흡수능력을 보이는 것으로 나타났다. Hook<sup>20)</sup>의 연구결과에 의하면 저농도의 CO<sub>2</sub> 흡수에 있어 MEA 흡수제가 0.5 mol의 CO<sub>2</sub>를 흡수하는 조건에서 AMP

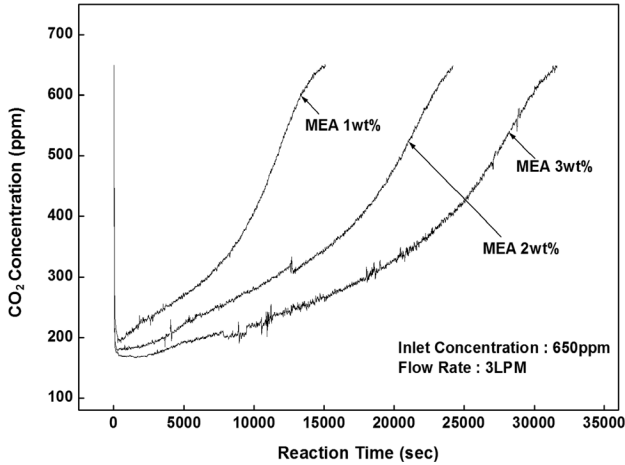


Fig. 4. Temporal variation of CO<sub>2</sub> absorptency on various concentrations of aqueous MEA solution.

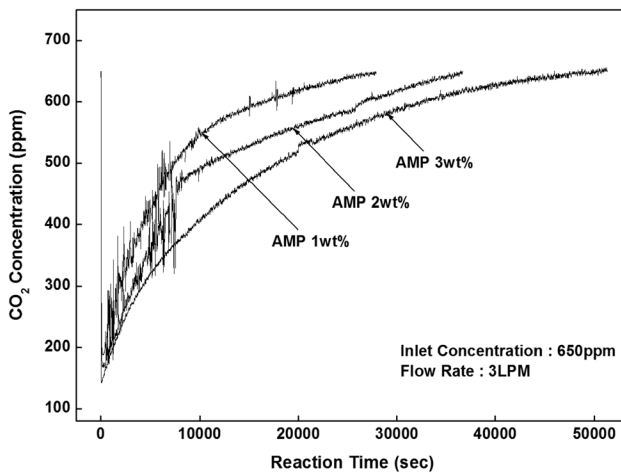


Fig. 5. Temporal variation of CO<sub>2</sub> absorptency on various concentrations of aqueous AMP solution.

의 경우 0.25 mol의 CO<sub>2</sub>를 흡수하는 것으로 나타나 AMP와 같은 입체장애아민은 높은 CO<sub>2</sub> 분압 조건에 더 적합한 것으로 보고되었다. 따라서 저농도 CO<sub>2</sub> 흡수에 있어서는 MEA가 AMP보다 흡수능력이 우수한 것으로 판단된다.

흡수제 농도에 따른 CO<sub>2</sub> 흡수 특성을 알아보기 위하여 단일흡수제에서 흡수 능력이 우수한 MEA와 AMP를 일정 유량(3 L/min)에서 농도를 1 wt%~3 wt%로 변화시켜 CO<sub>2</sub> 흡수 특성을 조사하였다. Fig. 4와 5에 나타난 바와 같이 MEA의 경우 농도가 1, 2, 3 wt%로 증가할 경우 CO<sub>2</sub> 흡수량은 0.34 mol-CO<sub>2</sub>/mol-absorbent, 0.32 mol-CO<sub>2</sub>/mol-absorbent 그리고 0.30 mol-CO<sub>2</sub>/mol-absorbent로 감소하였다. AMP의 경우도 MEA와 동일하게 농도가 증가할수록 CO<sub>2</sub> 흡수량은 다소 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 6은 MEA와 AMP의 농도 변화에 따른 CO<sub>2</sub> 흡수능을 나타낸 것으로 농도가 증가할수록 CO<sub>2</sub> 흡수량이 감소하는 것으로 나타났다. Oh 등<sup>21)</sup>은 흡수제의 농도 증가에 따른 흡수량 감소는 알카놀아민을 이용한 CO<sub>2</sub> 흡수는 기-액 계면에서 CO<sub>2</sub>의 물리적 흡수에 따른 액상에서의 화학반응 과

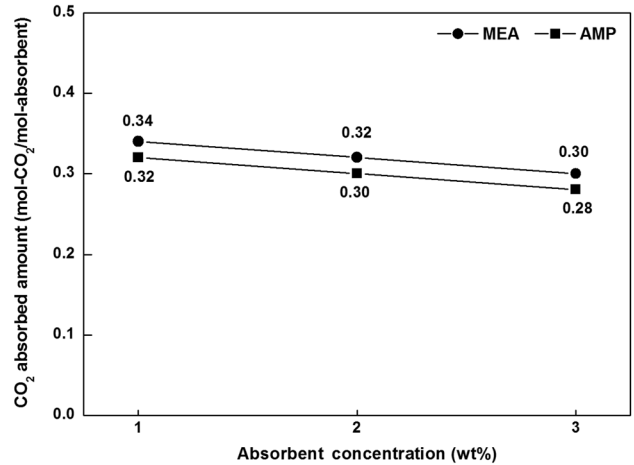


Fig. 6. Absorbed CO<sub>2</sub> on various concentrations of MEA and AMP.

정으로 이루어지며 화학반응은 알카놀아민과 CO<sub>2</sub>의 화학양론적 반응이므로 흡수제 몰당 CO<sub>2</sub>의 흡수량을 표시하는 흡수 평형 부하량은 포화점에 도달할 때까지는 이론적으로 흡수제의 농도에 영향을 받지 않는다고 하였고, 본 실험 결과와도 일치하는 것으로 나타났다.

#### 4.2. 혼합흡수제의 CO<sub>2</sub> 흡수 특성

혼합흡수제의 CO<sub>2</sub> 흡수 성능을 알아보기 위하여 단일흡수제 조건에서 흡수 능력이 가장 우수한 MEA를 기준으로 MEA 0.5 wt%에 AMP, DEA, MDEA를 각각 0.5 wt% 혼합한 혼합흡수용액을 제조하여 흡수 성능을 비교하였다. Fig. 7은 혼합흡수용액의 CO<sub>2</sub> 흡수 특성을 나타낸 결과이다. MEA 0.5 wt%에 AMP 0.5 wt%를 혼합한 흡수제가 가장 우수한 흡수 제거율을 보이는 것으로 나타났다. 또한, Table 3에 나타났듯이 CO<sub>2</sub> 흡수량에서도 MEA 0.5 wt%에 AMP 0.5 wt%를 혼합한 흡수제가 0.52 mol-CO<sub>2</sub>/mol-로 가장 우수한 흡수능을 나타냈고, 그 다음으로 MEA 0.5 wt%에 DEA 0.5 wt%를 혼합한 흡수제가 0.46 mol-CO<sub>2</sub>/mol-

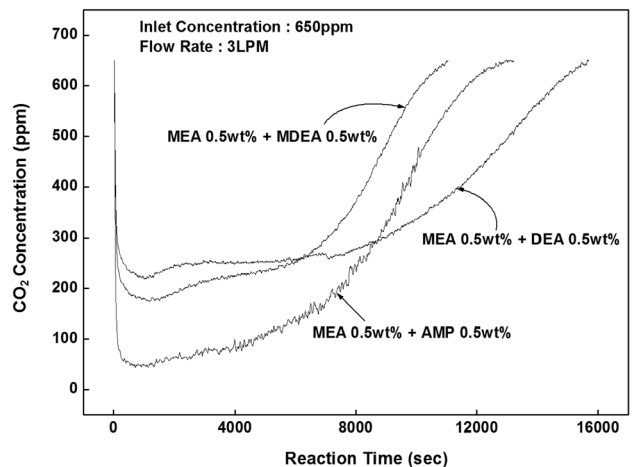


Fig. 7. Temporal variation of CO<sub>2</sub> absorptency on various blended absorbents.

Table 3. Absorbed amount of CO<sub>2</sub> on blended absorbents

| Absorbent                  | CO <sub>2</sub> absorbed amount (mol-CO <sub>2</sub> /mol-absorbent) |
|----------------------------|--|
| MEA 0.5 wt% + AMP 0.5 wt%  | 0.52   |
| MEA 0.5 wt% + DEA 0.5 wt%  | 0.46   |
| MEA 0.5 wt% + MDEA 0.5 wt% | 0.34   |

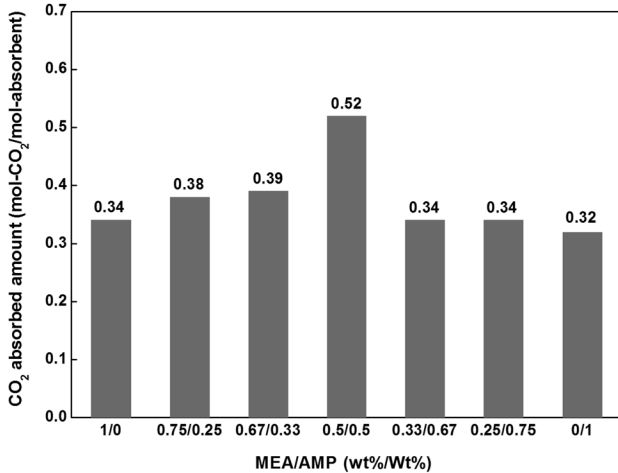


Fig. 8. Absorbed CO<sub>2</sub> on different MEA and AMP concentration ratios.

absorbent, MEA 0.5 wt%에 MDEA 0.5 wt%를 혼합 흡수제가 0.34 mol-CO<sub>2</sub>/mol-absorbent 순으로 나타났다.

Fig. 8은 MEA와 AMP의 첨가 비율에 따른 CO<sub>2</sub> 흡수량을 나타낸 것이다. MEA와 AMP의 첨가 비율이 0.5 wt%/0.5 wt% (1:1)일 때 0.52 mol-CO<sub>2</sub>/mol-absorbent로 가장 우수한 흡착성능을 나타냈다. MEA와 AMP 모두 단일흡수제 일 때보다 혼합흡수제일 때 흡착량이 증가하는 것을 알 수 있다. 저농도 CO<sub>2</sub> 흡수에 있어서는 MEA와 AMP의 최적 혼합비는 1:1 비율로 혼합 시 최적일 것으로 결론지을 수 있으나 흡수제의 CO<sub>2</sub> 제거 효율 및 흡수성능에 영향을 미치는 실험 변수를 고려하여 최적 비율을 선정하는 추가적인 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

### 4.3. 저농도 CO<sub>2</sub> 저감 가능성 평가

Fig. 9는 본 연구에서 도출한 단일흡수제의 저농도 CO<sub>2</sub> 저감 특성 결과와 기존 문헌연구 결과와의 비교를 나타낸 것이다. 문헌연구는 40℃에서 15 wt% MEA 단일흡수제의 분압 별 CO<sub>2</sub> 흡수성능을 나타낸 결과이다. MEA의 경우 Austgen<sup>6)</sup>은 CO<sub>2</sub> 분압 0.0934 kPa에서 흡수량이 0.354 mol/mol, Jou 등<sup>8)</sup>은 0.0677 kPa에서 0.365 mol/mol으로 나타났다. 본 연구에서는 CO<sub>2</sub> 분압 0.0065 kPa에서 흡수량이 0.34 mol/mol로 문헌연구 결과와 비슷한 흡수량을 보이는 것으로 조사되었고, 낮은 분압 조건에서도 CO<sub>2</sub> 흡수성능이 우수한 것으로 판단된다. 또한, AMP의 경우 본 연구 결과 CO<sub>2</sub> 분압 0.0065 kPa에서 0.32 mol/mol의 흡수량을 나타내는 것으로 조사 되었으나 흡수제의 종류가 달라 문헌연구 결과와 직

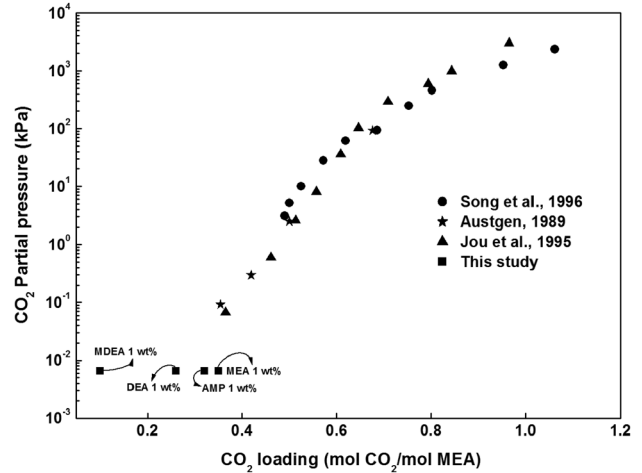


Fig. 9. Comparison of loading of CO<sub>2</sub> among other works; literature data is that loading of CO<sub>2</sub> in 15 wt% MEA aqueous solution at 40℃.

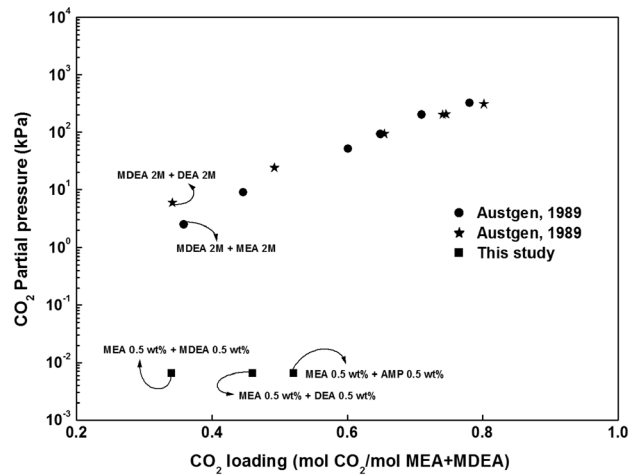


Fig. 10. Comparison of loading of CO<sub>2</sub> among other works; literature data is that loading of CO<sub>2</sub> in blended aqueous solution at 40℃.

접적인 비교·분석은 제한되지만 낮은 분압 조건에서의 흡수량을 감안할 시 CO<sub>2</sub> 흡수성능이 우수한 것으로 판단된다. 반면에 DEA와 MDEA는 상대적으로 낮은 CO<sub>2</sub> 흡수성능을 보이는 것으로 분석되었다.

Fig. 10은 본 연구에서 도출한 혼합흡수제의 저농도 CO<sub>2</sub> 저감 특성 결과와 기존 문헌연구 결과와의 비교를 나타낸 것이다. Austgen은 두 종류의 혼합흡수제를 이용하여 CO<sub>2</sub> 분압 별 흡수성능 연구를 수행하였고, CO<sub>2</sub> 분압 2.48 kPa에서 MDEA 2 M + MEA 2 M의 흡수량은 0.358 mol/mol, 5.92 kPa의 CO<sub>2</sub> 분압에서 MDEA 2 M + DEA 2 M의 흡수량은 0.341 mol/mol으로 나타났다. 본 연구에서 도출된 MEA와 MDEA의 혼합흡수제는 0.0065 kPa의 CO<sub>2</sub> 분압에서 0.34 mol/mol의 흡수량을 나타내어 문헌연구 결과와 비슷한 흡수량을 보이는 것으로 나타나 낮은 분압에서도 CO<sub>2</sub> 흡수가 가능한 것으로 판단된다. 특히, MEA와 AMP의 혼합흡수제의 경우 다른 혼합흡수제 보다 CO<sub>2</sub> 흡수 성능이 가장

우수한 것으로 나타나 낮은 분압에서도 CO<sub>2</sub> 흡수 성능이 우수한 것으로 조사되었다. 기존 문헌연구 결과와의 흡수 성능을 비교한 결과 모든 흡수제에서 저농도의 CO<sub>2</sub>를 저감하는데 적용이 가능한 것으로 나타났다. 다만 혼합흡수제가 단일흡수제보다는 흡수 성능이 더 우수한 것으로 나타나 저농도 CO<sub>2</sub>의 흡수 성능 향상을 위해서는 혼합흡수제의 적용이 더 효율적일 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 흡수성능이 우수한 알카놀아민 흡수제(MEA, DEA, MDEA, AMP)를 이용하여 실험실 규모에서 저농도의 CO<sub>2</sub> 흡수 특성을 조사함으로써 대기 중 저농도의 CO<sub>2</sub> 저감을 위한 적용 가능성을 고찰하였으며, 다음 결과를 도출하였다.

1) 단일흡수용액의 경우 MEA 흡수제가 0.34 mol-CO<sub>2</sub>/mol-absorbent (1 wt%), AMP 흡수제가 0.32 mol-CO<sub>2</sub>/mol-absorbent (1 wt%)의 CO<sub>2</sub>를 흡수하는 것으로 나타나 DEA, MDEA 보다 저농도 CO<sub>2</sub> 흡수 성능이 우수한 것으로 조사되었고, 단일흡수제의 흡수 성능이 우수한 MEA와 AMP의 농도 변화 (1 wt% ~ 3 wt%)에 따른 CO<sub>2</sub> 흡수 성능은 두 흡수제 모두 농도가 증가할수록 흡수량이 감소하는 것으로 나타났다. 흡수제의 농도가 작으면 재생에 필요한 에너지 요구량이 커지게 되어 경제적으로 불리하게 되므로 복합적인 연구를 통한 최적화가 필요할 것으로 판단된다.

2) 단일흡수제의 흡수성능이 우수한 MEA를 기준으로 DEA, MDEA 그리고 AMP를 1:1 (1 wt%) 비율로 혼합한 혼합흡수제의 CO<sub>2</sub> 흡수 특성 결과 MEA 0.5 wt%에 AMP 0.5 wt%를 혼합한 흡수제가 0.52 mol-CO<sub>2</sub>/mol-absorbent으로 흡수 성능이 가장 우수한 것으로 나타났다. 또한, 혼합흡수제의 최적 혼합 비율을 도출하기 위하여 우수한 흡수 성능을 나타낸 MEA와 AMP의 첨가 비율에 따른 CO<sub>2</sub> 흡수 성능을 조사한 결과 첨가 비율이 1:1 (MEA 0.5 wt%/AMP 0.5 wt%)일 때 가장 최적인 것으로 나타났다. 특히, 혼합흡수제가 단일흡수제에 비해 흡수 성능이 우수한 것으로 나타나 저농도 CO<sub>2</sub> 저감에 더 효과적인 것으로 판단된다.

3) 저농도 CO<sub>2</sub> 및 VOCs 저감 가능성 연구 결과 알카놀아민계 흡수제의 경우 기존 문헌연구와의 흡수 성능을 비교·분석한 결과 MEA와 AMP의 단일흡수제 그리고 MEA와 AMP를 혼합한 흡수제에서 낮은 CO<sub>2</sub> 분압 조건에서도 CO<sub>2</sub> 흡수 성능이 우수한 것으로 분석되었다.

향후 본 연구를 통해 도출된 결과는 대기 중 저농도 CO<sub>2</sub>를 저감은 물론 지하상가 및 실내공간의 저농도 CO<sub>2</sub>를 저감할 수 있는 기술 및 공정개발에 크게 활용될 것으로 기대된다.

## 사 사

본 연구는 국토교통부 건설기술혁신사업의 연구비 지원(과제번호 11-기술혁신A03)에 의해 수행되었습니다.

KSEE

## Reference

1. IEA, "Prospects for CO<sub>2</sub> capture and storage," Energy technology analysis, pp.27~36(2004).
2. U.S. National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA) Earth System Research Laboratory Home Page, <http://www.esrl.noaa.gov>(2013).
3. O, M. G., Park, S. J., Han, K. H., Lee, J. S. and Min, B. M., "The operational characteristics of CO<sub>2</sub> 5ton/day absorptive separation pilot plant," *Kor. Chem. Eng. Res.*, **50**(1), 128~134(2012).
4. Seo, Y. W., Moon, Y. S., Jo, S. H., Ryu, C. K. and Yi, C. K., "Effects of Steam and temperature on CO<sub>2</sub> capture using dry regenerable sorbent in a bubbling fluidized bed," *Kor. Chem. Eng. Res.*, **43**(4), 537~541(2005).
5. Xu, S., Wang, Y. W., Otto, F. D. and Mather, A. E., "Kinetics of reaction of carbon dioxide with 2-amino-2-methyl-1-propanol solution," *Chem. Eng. Sci.*, **51**(6), 841~850(1996).
6. Austgen, D. M., "A model of vapor-liquid equilibria for acid gas-alkanolamine-water systems," The University of Texas at Austin(1989).
7. Song, J. H., Yoon, J. H. and Lee, H., "Solubility of carbon dioxide in monoethanolamine + ethylene glycol + water and monoethanolamine + poly (ethylene glycol) + water," *J. Chem. Eng. Data*, **41**, 497~499(1996).
8. Jou, F. Y., Mather, A. E. and Otto, F. D., "The solubility of CO<sub>2</sub> in a 30 mass percent monoethanolamine solution," *Canadian J. Chem. Eng.*, **73**, 140~147(1995).
9. Klaus, S., L., "The thermodynamics of direct air capture of carbon dioxide," *Energy*, **50**(1), 38~46(2013).
10. Holmes, G. and Keith, D., W., "An Air-Liquid Contactor for Large-Scale Capture of CO<sub>2</sub> from Air," *Philosophical Trans. Royal Soc. A-Math., Phys. Eng. Sci.*, **370**, 4380~4403 (2012).
11. Keith, D., W., Heidel, K. and Cherry, R., "Capturing CO<sub>2</sub> from the atmosphere: Rationale and Process Design Considerations. Geo-Engineering Climate Change," Cambridge University Press, pp. 107~126(2010).
12. Vladimir, S., D., Janna, V., V., Tatyana, Y., K., Dmitry, A., T. and Aleksey, G., O., "Direct CO<sub>2</sub> capture from ambient air using K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite sorbent," *Fuel*, Article in press(2013).
13. Renato, B., Giuseppe, S. and Marco, M., "Process design and energy requirements for the capture of carbon dioxide from air," *Chem. Eng. Proc.*, **45**, 1047~1058(2006).
14. Tao, W., Jun, L., Mengxiang, F. and Zhongyang, L., "A moisture swing sorbent for direct air capture of carbon dioxide : thermodynamic and kinetic analysis," *Energy Procedia*, **37**,

- 6096-6104(2013).
15. Caplow, M., "Kinetics of carbamate formation and breakdown," *J. Am. Chem. Soc.*, **90**(24), 6795~6803(1968).
  16. Danckwerts, P. V., "The reaction of CO<sub>2</sub> with ethanalamines," *Chem. Eng. Sci.*, **34**(4), 443~446(1979).
  17. Aboudheir, A., Tontiwachwuthikul, P., Chakma, A. and Idem, R., "Kinetics of the reactive absorption of carbon dioxide in high CO<sub>2</sub>-loaded, concentrated aqueous monoethanolamine solutions," *Chem. Eng. Sci.*, **58**(23), 5195~5210(2003).
  18. Yih, S. M. and Shen, K. P., "Kinetics of carbon dioxide reaction with sterically hindered 2-amino-2-methyl-1-propanol aqueous solutions," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **27**(12), 2237~2241 (1988).
  19. Kumar, P. S., Hogendoom, J. A. and Versteeg, G. F., "Kinetics of the reaction of CO<sub>2</sub> with aqueous potassium salt of taurine and glycine" *AIChE J.*, **49**(1), 203~2013(2003).
  20. Hook, R. J., "An investigation of some sterically hindered amines as potential carbon dioxide scrubbing compounds," *Ind. Eng. Res.*, **36**(5), 1779~1790(1997).
  21. Oh, S. K., Rhee, Y. W., Nam, S. C., Yoon, Y. I. and Kim, Y. E., "Study on absorption characteristics of CO<sub>2</sub> in aqueous alkanolamine solutions," *J. Energy Eng.*, **17**(4), 251~256(2008).