

Alkanolamine계 수용액을 이용한 이산화탄소 흡수에 관한 연구

A Study on the Absorption of CO₂ Using Alkanolamine Solution

이성남 · 송호철 · 현재휴 · 박진원*
연세대학교 화학공학과 환경공학연구소
(2001년 5월 29일 접수, 2001년 9월 20일 채택)

Seongnam Lee, Hocheol Song, Jaehyu Hyun and Jinwon Park*
Environmental Eng. Lab., Dept. of Chem. Eng., Yonsei University

(Received 29 May 2001; accepted 20 September 2001)

Abstract

In this study, the absorption kinetics of CO₂ onto a mixture of AMP (2-amino-2-methyl-1-propanol) MEA (monoethanolamine) water were investigated at 30 and 40°C using a packed absorption tower. Solubility and absorption rate of CO₂ into alkanolamine solutions and optimal condition of CO₂ absorption process were investigated.

The experimental conditions are as follows; temperature of 30 and 40°C, gas flow rate of 3 l/min for the absorption tower, and liquid flow rate of 0.1 l/min. Feed gas was a mixture of 85% N₂ and 15% CO₂.

The experimental results showed that AMP had greater solubilities and faster absorption rates than MEA and DEA. In addition, MEA had the fastest initial reaction rate. To improve the properties of AMP which have low initial reaction rate and high cost, AMP was used with MEA. The mixing ratio was also changed in constant total molarity of 1, 2, 3 and 4.

The experimental results can be summarized as follows: (1) in solubility experiment, the addition of MEA in constant total molarity decreased the solubility of CO₂ in AMP/MEA mixture. (2) from 0 to about 0.3 in mixing ratio, the solubility of CO₂ in AMP/MEA mixture had little differences compared with the sum of solubility of AMP only and solubility of MEA only. (3) mixing ratio of 0.3 was found to be an optimal point with the fastest CO₂ absorption rate.

Key words : alkanolamines, AMP, MEA, CO₂, mixing, solubility, absorption rate

1. 서 론

* Corresponding author
Tel : +82-(0)2-364-1807, E-mail : jwpark@yonsei.ac.kr

산업의 발달에 의해 야기된 환경 문제 중 지구 온난화 문제는 최근 들어 그 문제의 심각성이 더욱

부각되고 있다. 지구 온난화에 가장 큰 영향을 미치는 기체 중 하나가 이산화탄소이다(에너지경제연구원, 1992). 따라서 근래에 이르기까지 natural gas의 정제, 수소의 정제 등과 같은 생산 기체의 품질 향상을 위해 제거되는 대상으로서의 이산화탄소는 온실 기체 발생량의 제어라는 측면에서 다루어져야 할 필요가 생긴 것이다.

지금까지 상용화 또는 연구개발되고 있는 이산화탄소의 분리 방법 중 흡수법은 대량의 가스처리가 가능하고, 낮은 이산화탄소 분압에서도 처리가 가능하다는 장점이 있다.

공정의 선정과 흡수제의 선택에 대한 오랜 연구 결과 이산화탄소 흡수공정에 있어 알카놀아민류(alkanolamines)가 물에 대한 용해도 및 낮은 휘발도, 그리고 천연가스와 같은 탄화수소 세정 공정에서 이산화탄소의 선택적 제거 능력 등으로 인하여, 이산화탄소 흡수제로 가장 적합하다는 결론에 이르렀다.

대표적인 흡수제가 1차아민인 MEA(monoethanolamine)와 2차아민인 DEA(diethanolamine), 그리고 3차아민인 MDEA(n-methyldiethanolamine)등이 있다(Kohl and Riesenfeld, 1979). 이 중 MEA가 높은 흡수능과 반응성 그리고 재생이 용이하다는 점 때문에 가장 널리 사용되고 있지만 농도가 높으면 장치 부식 등의 문제를 일으키는 단점을 가지고 있으며, MDEA도 부하능은 높지만 반응성이 MEA에 비해 낮으므로 흡수효율이 저하되는 문제점을 안고있는 것으로 나타났다(Hagewiesche *et al.*, 1995). 이후 흡수액 자체의 물성을 향상시키기 위해 흡수액 간의 혼합을 형성하는 연구가 많이 진행되어 MEA와 MDEA, MEA와 DEA같은 혼합물들이 CO₂제거를 위해 제시되어 왔다(Shen and Li, 1992).

최근 입체장애아민인 AMP(2-amino-2-methyl-1-propanol)는 가장 많이 연구되고 있는 흡수제 중의 하나로 이산화탄소와의 반응 중간 생성물인 카바메이트(carbamate)가 분자의 구조적 특성에 의하여 매우 불안정하여 급속한 가수분해(hydrolysis)를 유발한다. 따라서 1차아민인 MEA에 비해서 2배의 이산화탄소 흡수능을 나타내고(Dawodu and Meisen, 1994), MDEA에 비해서 높은 반응속도를 가진다(Yih and Shen, 1988; Sharma, 1965). 또한 기존 흡수제의 문제점인 부식성에 있어서도 50~70%의 감소

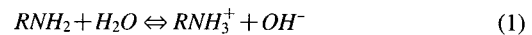
효과를 나타낸다고 한다(Veawab *et al.*, 1997).

그러나 AMP는 위와 같은 장점에도 불구하고 비교적 비싼 가격과 현저히 떨어지는 초기 반응 속도 때문에 단독으로 흡수공정에 이용하기는 어려운 점이 있다. 따라서 초기 반응 속도가 빠른 1차 아민과의 혼합을 통하여 AMP의 단점을 보완하는 연구가 활발히 진행중이다. 1차 아민 중에는 주로 MEA가 많이 쓰이고 있는 실정인바 최근에 AMP+MEA+H₂O시스템이 많이 연구되고 있다(Li and Chang, 1994).

2. 이 론

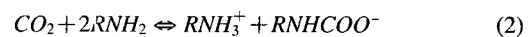
2.1 흡수 이론(CO₂ 흡수법-이산화탄소와 AMP의 반응)

수용액 안에서, AMP는 hydroxyl, aminobase ion을 형성하기 위해 다음과 같이 분해된다.

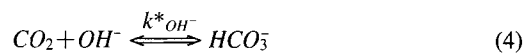
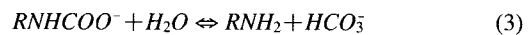


이산화탄소가 AMP 수용액에 흡수될 때의 일반적인 조건하에서 핵심적인 반응은 다음과 같이 일어난다.

- carbamate 형성 반응:



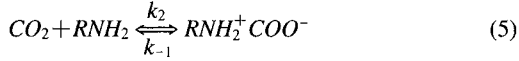
- bicarbonate 형성 반응:



Amine에 붙어 있는 alkyl기의 영향으로 인하여 carbamate는 매우 불안정하고 이것은 급속한 hydrolysis를 유발한다. Carbamate의 농도는 amine 농도보다 10⁻⁴배 정도 낮다(Xu *et al.*, 1991).

(4)번 반응의 이산화탄소 흡수에 대한 영향은 용액 중의 hydroxyl ion의 농도에 의존한다.

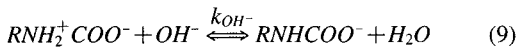
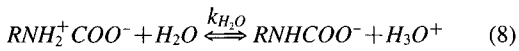
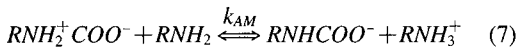
일반적으로 zwitterion mechanism은 일차와 이차 amine의 carbamate 형성을 지배한다고 알려져 있다(Bosch *et al.*, 1990). 따라서 AMP와 이산화탄소의 반응 중 첫 번째 단계는 zwitterion 중간체의 형성이다.



그러면 zwitterion은 carbamate ion과 양성을 띤 염을 생산하기 위해 용액 중에 존재하는 어떤 염에 의해서 양성을 잃어버린다.



이 mechanism에 따라서 다음의 deprotonation 반응이 AMP 수용액 상에서 일어난다.



Nonaqueous 용매에 대해서는 (7)번 반응만이 적용 가능하다. Zwitterion mechanism과 의사 정상 상태 (quasi-steady-state)에 기초하여, zwitterion의 농도에 대한 표현식은 이산화탄소 반응 속도에 대해서 다음과 같이 표현된다.

$$r_{CO_2} = \frac{k_2 [CO_2][RNH_2]}{1 + k_{-1}/\sum k_b[B]} \quad kmol \ m^3 \ s^{-1} \quad (10)$$

$k_{-1}/\sum k_b[B] \ll 1$ 이면 분석은 이차 속도식으로 단순화되고 다음 식이 사용될 수 있다.

$$r_{CO_2} = k_2 [CO_2][RNH_2] \quad kmol \ m^3 \ s^{-1} \quad (11)$$

한편, $k_{-1}/\sum k_b[B] \gg 1$ 이면 속도식은 다음과 같아진다.

$$r_{CO_2} = k_2 [CO_2][RNH_2](\sum k_b[B])/k_{-1} \quad kmol \ m^{-3} \ s^{-1} \quad (12)$$

따라서 두 개의 경계 부근에서의 전이 지역에서 amine의 반응 차수는 1차 또는 2차일 것이다.

3. 실험방법

3.1 반회분 반응기

본 연구에서는 이산화탄소의 알카놀아민계 수용액에 대한 용해도 및 파과 곡선을 구하기 위해 반

회분 반응기를 제작하였다. 반회분 반응기는 알카놀아민류에 의한 부식 방지를 위해 stainless steel로 제작되었고 총 부피는 약 1.5 l이다. 온도는 temperature controller-relay system으로 조절되며 기·액 접촉 면적의 증대를 통한 빠른 흡수를 위하여 magnetic bar를 이용해 1,600 rpm으로 교반하였다. 반회분 반응기의 개략도는 그림 1과 같다.

반회분 반응기에는 1l의 흡수액이 충전된 후 온도 제어기를 이용하여 원하는 반응 온도로 온도를 맞춘다. 반회분 반응기 내로 유입된 혼합 기체는 최하단에서 분배기에 의해 도입되며 교반기에 의하여 충분히 수용액과 섞여 흡수가 일어나게 된다. 반응 후의 기체는 배출구를 통하여 반응기 최상단의 sampling port로 나가게 된다. 기체가 최상단의 sampling port로 나가기 전에 CaCl₂가 충전된 impinger를 설치하여 기체 중의 수분을 제거하여주는데, 이것은 G.C. 분석의 경우 수분이 결과에 많은 영향을 미치기 때문이다. 도입과 배출 기체의 농도를 G.C.로 분석함으로써 파과 곡선을 얻을 수 있고 도입 농도와 배출 농도가 같아지는 시점의 액상을 적정법에 의해 구함으로써 이산화탄소의 용해도를 구할

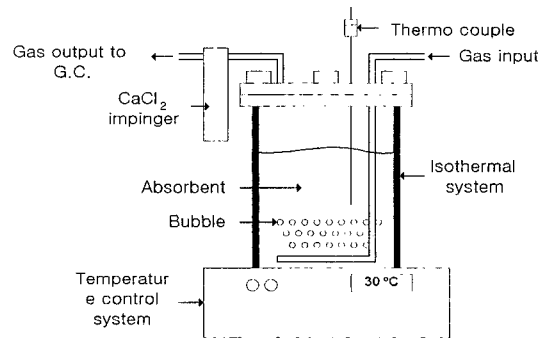


Fig. 1. Schematic diagram of semi-batch reactor.

Table 1. Operating conditions of semi-batch reactor.

실험 변수	범 위
기체 온도	30, 40°C
기체 유량	3.0 l/min
액체 온도	30, 40°C
교반 속도	1,600 rpm
흡수제 농도	0.5, 1.0, 3.0 M
흡수제 종류	AMP, MEA, DEA, AMP/MEA mixture

수 있다. 반회분 반응기에서의 실험 변수들을 표 1에 나타내었다.

3.2 충전흡수탑

또한 이산화탄소의 알카놀아민에 대한 흡수 속도를 측정하기 위하여 실험실 규모의 흡수탑을 제작하였다. 흡수탑을 흡수 속도 측정에 이용한 이유는 반회분 반응기가 비정상 상태에서 반응이 진행되는 반면, 흡수탑은 실험 시작 후 일정 시간이 지난 후에 정상 상태에서 실험이 진행되므로 흡수 속도를 측정할 수 있기 때문이다. 본 연구에서 사용된 충전 흡수탑의 개략도를 그림 2에 나타내었다. 흡수탑은

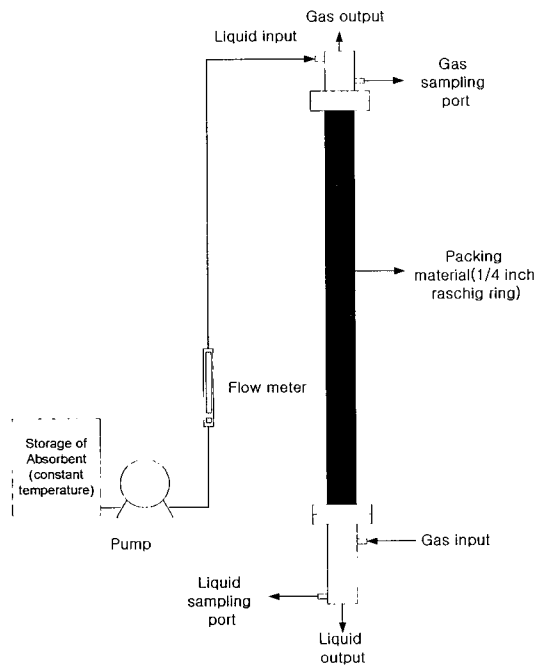


Fig. 2. Schematic diagram of packed-absorption tower.

Table 2. Operating conditions of absorption tower.

실험 변수	범 위
기체 온도	30, 40°C
기체 유량	3.0 l/min
액체 온도	30, 40°C
액체 유량	0.1 l/min
흡수제 농도	혼합 흡수제 총 1.0, 2.0, 3.0 M (혼합 비율은 [MEA]/[solution]=0.1, 0.3, 0.5)
흡수제 종류	AMP/MEA mixture

아크릴로 제작되었으며 탑의 규격은 직경 3 cm, 탑의 총 길이는 35 cm, 그리고 충전물의 높이는 26 cm이다. 충전물로는 1/4 inch raschig ring을 사용하였고 계산된 유효 단면적은 667.4 cm²이다 (Perry and Green, 1999). 항온조 안에서 일정한 온도로 유지되는 흡수액은 무맥류 펌프를 통해 일정한 유속으로 탑의 상부에서 도입되고, 탑하단에서는 혼합 기체가 도입된다. 흡수탑의 상, 하단에는 기체 포집을 위한 sampling port와 액체 시료를 채취하기 위한 sampling port가 각각 부착되어있다. 반응한 후의 액체는 탑의 하부에 따로 설치되어 있는 저장고에 저장된다. 흡수탑에서의 실험 조건 및 변수들을 표 2에 나타내었다. 흡수탑 실험 중에는 범람(flooding) 등의 이상 현상을 주의하였으며, 흡수탑 운전 조건의 설정 근거는 본 흡수탑의 시험 운전 중 이상 현상이 발생하지 않은 조건이었다.

본 실험을 위한 흡수 기체는 국내의 화력 발전소에서 발생하는 배출 기체의 주요 조성이 약 N₂ 79%, CO₂ 15%, O₂ 4%, 그리고 기타 미량의 HCl, SO_x, NO_x, H₂O인 것으로부터 N₂와 CO₂의 비율이 85:15가 되도록 하였다(안성우, 1996).

4. 결 과

4.1 용해도 실험결과

우선 단위 흡수제 당 흡수하는 이산화탄소의 양을 알아보기 위하여 단위 흡수제 당 흡수되는 이산화탄소의 양인 CO₂ loading을 다음과 같이 정의하였다.

$$\alpha = CO_2 \text{ loading} = \frac{\text{moles of } CO_2 \text{ absorbed}}{\text{moles of absorbent used}}$$

30°C에서의 농도에 따른 α 값의 변화를 그림 3에 나타내었다. α 는 낮은 농도 영역에서는 농도가 증가함에 따라서 급격하게 감소하는 경향을 보였다. 그러나 4~5 M 이상의 영역에서는 감소 폭이 현저히 줄어드는 것을 알 수 있다. α 값이 일정하다는 것은 단위 흡수액이 흡수하는 이산화탄소의 양이 일정하다는 의미를 가진다. 따라서 α 값을 기준으로 생각하여 볼 때 4 M 이상의 영역에서의 흡수는 경제적인 면에서 의미가 없다고 생각된다. 흡수제 농

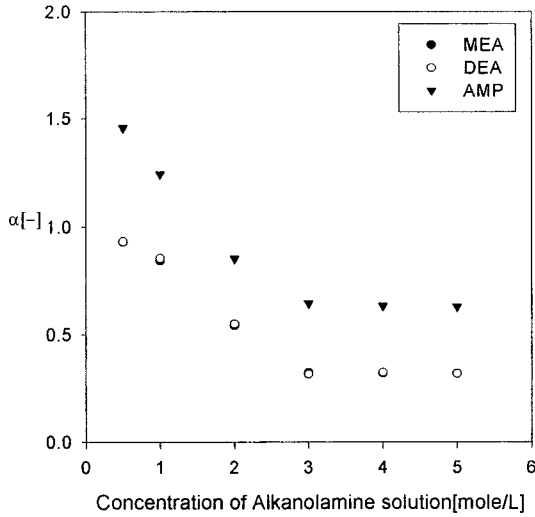


Fig. 3. CO₂ loading value in 30°C Alkanolamine solutions.

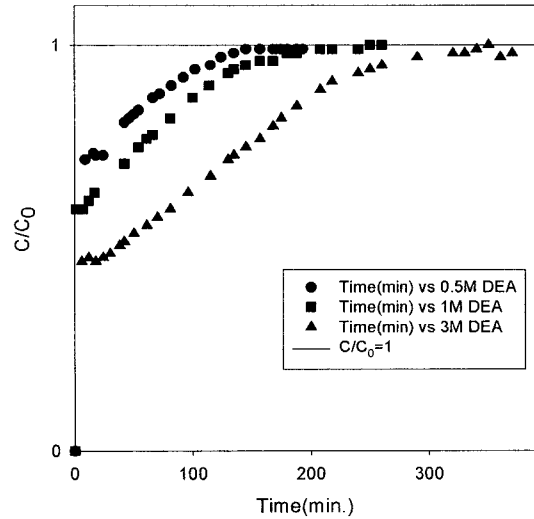


Fig. 5. Breakthrough curve of CO₂ in 30°C DEA solution.

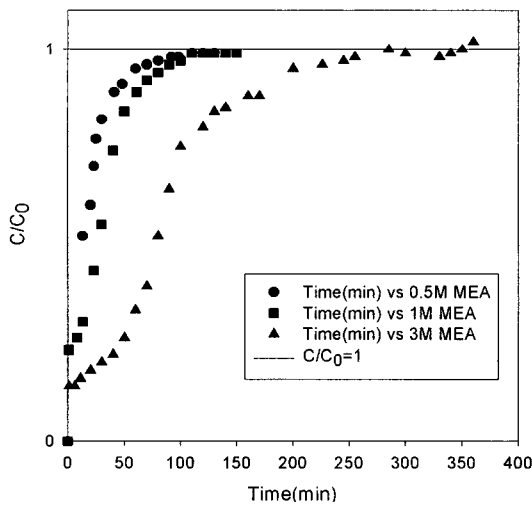


Fig. 4. Breakthrough curve of CO₂ in 30°C MEA solution.

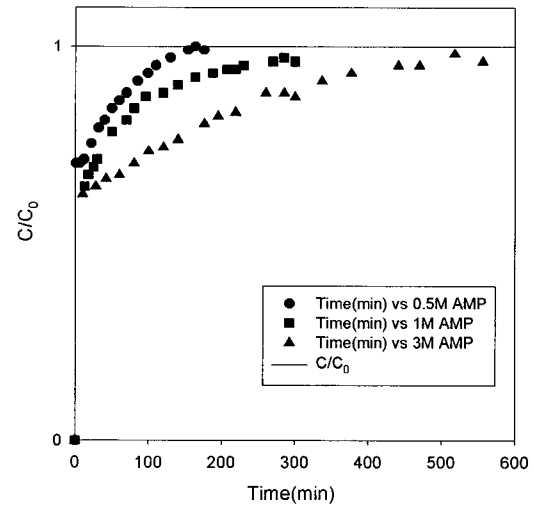


Fig. 6. Breakthrough curve of CO₂ in 30°C AMP solution.

도 증가에 따른 α 값의 감소는 알카놀아민계 수용액의 농도 증가에 따른 흡수 부하의 증가 효과 보다 점도 증가에 따른 물질 전달 계수의 감소 효과가 더 크게 작용하였기 때문이라고 생각된다. 또한 4 M 이상의 흡수제 농도는 흡수 장치의 열화 및 부식을 유발한다고 알려져 있다(엄문호, 1998). 따라서 본 연구에서의 흡수제 최대 농도는 3 M로 하였다.

4.2 흡수제 단독 사용시의 용해도 실험 결과
 MEA, DEA, AMP의 30°C에서의 농도에 따른 파과 실험 결과를 그림 4~6에 나타내었다. 흡수 기초 실험 중 파과 곡선을 구하는 목적은 반회분 반응기에서 각 흡수제의 흡수 거동 및 흡수 특성을 파악하기 위한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 MEA의 파과 곡선은 S자 형태를 나타내었고 AMP의 파과

곡선은 로그(logarithm) 곡선 형태를 나타내었다. DEA의 경우에는 MEA와 AMP의 중간 형태를 보이지만 AMP의 파과 곡선 형태에 더 가깝다는 결론을 내릴 수 있다. 같은 농도 및 온도 조건에서 MEA는 초기에 많은 양이 흡수되는 특성을 보이고 있지만 AMP와 DEA의 경우에는 반응 초기에 각각 70%, 60% 정도의 이산화탄소가 흡수되지 않고 빠져나가는 것을 알 수 있다. MEA의 경우에는 초기에 15~20%의 이산화탄소만이 흡수되지 않고 빠져나가는 것을 알 수 있다. 이로부터 MEA가 초기에 같은 조건에서 가장 많은 양의 이산화탄소와 반응한다는 것을 알 수 있다. 결국 MEA의 초기 반응 속도가 가장 빠르다는 것을 알 수 있다. 따라서 AMP, DEA의 경우에는 충분한 접촉 시간이 없다면 흡수 공정 개발에 이용하기 어렵다는 단점이 나타난다.

30, 40°C에서의 흡수제 종류, 농도에 따른 포화 용해도를 그림 7에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 AMP의 용해도가 기존 흡수제에 비해서 20~50%의 향상을 보였다. 이것은 AMP와 이산화탄소의 반응 중간 생성물인 카바메이트가 매우 불안정하여 급속한 가수분해를 유발함으로써 MEA, DEA 등 기존의 흡수제보다 높은 이산화탄소 흡수능을 보이기 때문이다 (Xiao *et al.*, 2000; Dawodu and Meisen, 1994). 따라서 용해도와 부식성에서 장점을 가지고 있는 AMP와 빠른 초기 흡수 속도와 경제적인 면에서 장점을 나타내는 MEA를 혼합하여 최적의 농도 및 혼합 비율을 찾아내는 것이 필요하다고 생각된다.

4.3 혼합 흡수제 사용시의 용해도 실험

AMP와 MEA의 혼합시 최적의 조건을 찾아내기 위하여 AMP/MEA 혼합물의 온도, 총 농도, 혼합비에 따른 용해도 실험을 하였다. 30, 40°C에서의 혼합물의 총 농도, 혼합비에 따른 용해도 실험 결과를 그림 8에 나타내었다. 온도에 따른 용해도를 비교하면 흡수제를 단독으로 사용하는 경우와는 달리 온도 증가에 따라 용해도가 약 5~10% 정도 증가함을 알 수 있다. 기체의 물리 흡수인 경우에는 온도와 용해도가 반비례하지만 기체의 화학 흡수인 경우에는 온도 증가에 따른 반응 속도 상승의 영향을 고려해야만 한다. 따라서 혼합 흡수제인 경우 물리

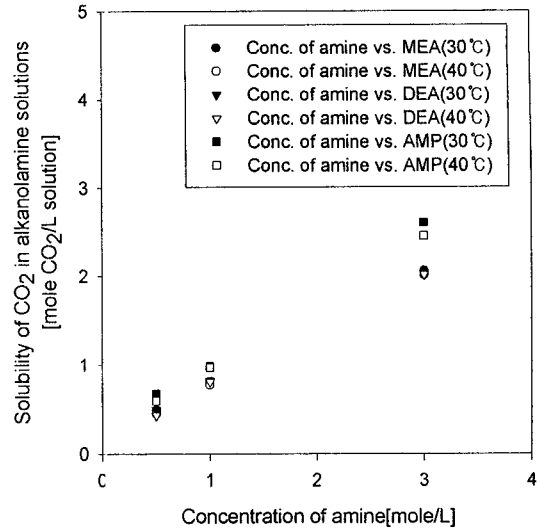


Fig. 7. Solubility of CO₂ in Alkanolamine solutions.

흡수의 영향보다는 화학 흡수의 영향이 크게 작용하여 용해도가 온도에 비례하는 것으로 생각된다. 그러나 온도를 계속 높일 경우 탈거 반응이 일어나기 때문에 적절한 온도 범위가 있을 것으로 생각된다.

또한 모든 혼합비 및 온도 조건에서 MEA의 첨가량 증가에 따라서 용해도가 감소함을 알 수 있다. 이것은 이산화탄소 흡수능이 큰 AMP의 농도가 낮아지면서 나타나는 현상이다.

30°C에서의 총 1, 3M 흡수액의 혼합 비율에 따른 용해도를 그림 9에 나타내었다. 여기서 혼합 비율이 0인 지점은 순수 AMP만이 존재하는 상태이고 혼합 비율이 1인 지점은 순수 MEA만이 존재하는 상태이다. 그림에서 알 수 있듯이 MEA의 첨가량이 증가할수록 용해도는 감소하는 경향을 보이고 있다. 그림에서 symbol이 없는 실선과 점선은 흡수액 단독 사용시의 AMP, MEA의 개별 농도 합에 대한 용해도 합을 나타낸 것이고 기호(symbol)가 있는 실선은 혼합 흡수제 사용시의 용해도 값을 나타낸다. 저농도 영역에서는 혼합 흡수제의 용해도가 단독 흡수제 용해도의 합보다 최대 20% 정도 감소함을 나타내지만, 고농도 영역에서는 최대 15% 정도 감소함을 보인다. 여기서 주목할 것은 고농도 영역에서 혼합 비율이 0~0.3 사이에서는 혼합 흡수제의 용해도와 단독 흡수제 용해도의 합과 거의 차이

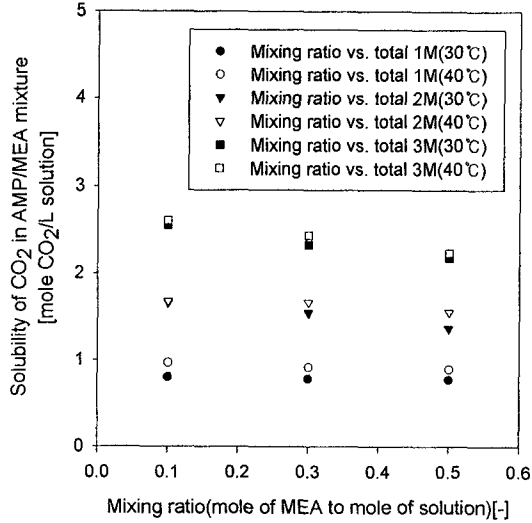


Fig. 8. Solubility of CO₂ in AMP/MEA mixtures.

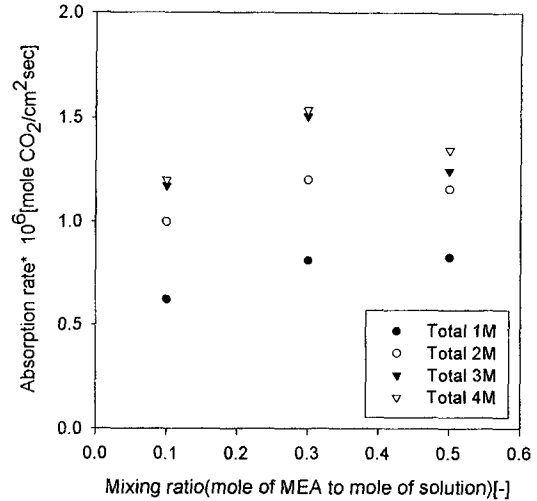


Fig. 10. Absorption rate of CO₂ in 30°C AMP/MEA mixture.

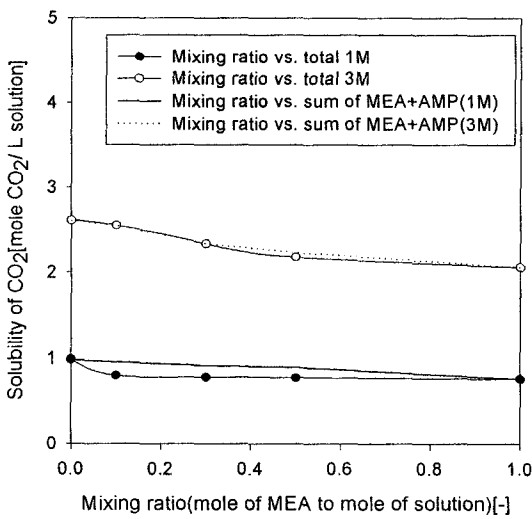


Fig. 9. Solubility of CO₂ according to mixing ratio in 30°C Alkanolamine solutions.

가 없다는 점이다. 따라서 경제성이 떨어지는 AMP에 MEA를 혼합했을 경우 개별 흡수제의 이산화탄소 흡수 부하의 손실이 없는 0~0.3 사이의 혼합 비율에서 최적의 혼합 흡수 조건이 존재할 것으로 생각된다. 또한 이것은 AMP/MEA의 혼합 흡수제가 AMP의 대체 흡수제로서의 가능성을 제시한다고 할 수 있다. 40°C에서의 총 1, 3M 흡수액의 혼합 비

율에 따른 용해도는 30°C에서의 용해도와 비교해서 거의 변화가 없었다.

4. 4 흡수속도 실험 결과

흡수제 AMP, MEA를 혼합하였을 경우의 30°C에서의 총 농도에 따른 혼합 흡수제의 흡수 속도를 그림 10에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 총 흡수제의 농도가 3M에서 4M 정도에 도달하면 흡수 속도의 뚜렷한 증가가 없어진다. 이는 alkanolamine계 흡수제의 일반적인 현상으로 점도가 커짐에 따라 기체의 액상에서의 물질 전달 계수가 감소하기 때문에 나타나는 현상이다. 또한 비록 저농도에서 고농도로 이동할수록 최적의 혼합 비율이 왼쪽으로 옮겨지는 경향이 있지만 대체적으로 혼합 비율이 0.3인 부근에서 최대의 흡수 속도를 나타내는 것을 알 수 있다.

또한 여기서 주목해야 할 결과는 흡수 이론에서 밝혔듯이 최적의 흡수 비율이 존재한다는 것이다. 모든 경우에서 혼합 비율([MEA]/[solution])이 0.3~0.4인 범위에서 최적의 조건이 존재함을 알 수 있다. 이 혼합비는 초기 반응 속도가 빠른 MEA가 충분히 반응한 후 바로 이산화탄소 흡수 부하가 큰 AMP의 반응이 시작되는 비율이라고 생각된다. 이는 MEA가 너무 많으면 즉, 혼합 비율이 너무 크면 흡수 부하가 큰 AMP가 반응할 수 있는 확률이

줄어들어 오히려 흡수 속도가 감소하고, 너무 적으면 즉, 혼합 비율이 너무 작으면 초기 반응 속도가 느린 AMP가 초기 반응에 주로 참여하기 때문에 역시 흡수 속도가 감소하는 것으로 생각된다. 따라서 MEA와 AMP를 대략 1:2의 비율로 혼합하는 것이 흡수 속도의 관점에 있어서 가장 좋다고 할 수 있다. 40°C에서의 총 농도에 따른 혼합 흡수제의 흡수 속도 역시 혼합 비율이 0.3~0.4인 범위에서 최적의 조건을 나타냈고 30°C에서의 흡수 속도에 비해서 약간의 증가를 나타냈으나 뚜렷한 차이를 나타내지는 않았다.

5. 결 론

반회분 반응기 및 흡수탑에서 알카놀아민계 수용액을 이용하여 이산화탄소 흡수 실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. MEA는 실험에 사용한 알카놀아민 흡수제 중 가장 빠른 초기 반응 속도를 나타내었고 AMP는 가장 큰 이산화탄소 흡수능을 나타내었다.

2. 본 연구의 실험 조건 내에서는 AMP/MEA 혼합 흡수제의 경우 온도 증가에 따라 이산화탄소 흡수능이 약간 증가하였다. 이는 알카놀아민계 수용액의 혼합의 경우 용매-용매간의 상호작용에 의한 결과라고 생각된다.

3. AMP/MEA 혼합 흡수제는 이산화탄소 흡수능과 흡수 속도의 결과를 바탕으로, 본 연구의 실험 조건 내에서는, 혼합 비율이 대략 0.3인 부근에서 최적의 조건을 형성한다고 생각된다. 또한 혼합 흡수제의 총농도를 4M 이상으로 높이는 것은 바람직하지 않다고 생각된다.

참 고 문 헌

- 안성우(1996) 화학흡수법에 의한 연소폐가스 중 지구온난화 가스 CO₂ 분리에 관한 연구, 연세대학교 화학공학과 석사학위논문.
 에너지경제연구원(1992) 장기 이산화탄소 배출증가 원인 분석, 정책연구자료, 92-16.
 엄문호(1998) 충전탈거담을 이용한 MEA 수용액으로부터 이산화탄소의 탈거에 관한 연구, 연세대학교 화

학공학과 석사학위논문.

- Bosch, H., G.F. Versteeg, and W.P.M. Van Swaaij (1990) Kinetics of the Reaction of CO₂ with the sterically hindered amine 2-amino-2-methyl-1-propanol a: 298K, Chem. Eng. Sci., Vol. 45, No. 5, 1167-1173.
 Dawodu, C.F. and A. Meisen (1994) Solubility of carbon dioxide in aqueous mixtures of alkanolamines, J. Chem. Eng. Data, 39, 548-552.
 Hagewiesche, D.P., Sami S. Ashour, Hani A. Al-Ghawas, and Orville C. Sandall (1995) Absorption of carbon dioxide into aqueous blends of Monoethanolamine and N-Methyldiethanolamine, Chem. Eng. Sci., Vol. 50, No. 7, 1071.
 Kohl, A.L. and F.C. Riesenfeld (1979) Gas Purification 3th ed., Gulf Publishing Co. Houston.
 Li, M.H. and B.C. Chang (1994) Solubilities of carbon dioxide in water + monoethanolamine + 2-amino-2-methyl-1-propanol, J. Chem. Eng. Data, 39, 448-452.
 Perry, R.H. and D.W. Green (1999) Perry's Chemical Engineering Handbook, 7th ed., McGraw Hill, New York.
 Sharma, M.M. (1965) Kinetics of reactions of carbonyl sulphide and solubilities of carbon dioxide with amines and catalysis by bronsted bases of hydrolysis of COS, Trans. Faraday. Soc., 61, 681-688.
 Shen, K.P. and M.H.H. Li (1992) Solubility of carbon dioxide in aqueous mixture of monoethanolamine which methyldiethanolamine. J. Chem. Eng. Data, 37, 96-100.
 Veawab, A., P. Tontiwachwuthikul, and S.D. Bhole (1997) Studies of Corrosion and Corrosion Control in a CO₂-2-Amino-2-Methyl-1-Propanol (AMP) Environment, Ind. Eng. Chem. Res., 36, 264-269.
 Yih, S.M. and K.P. Shen (1988) Kinetics of carbon dioxide reaction with sterically hindered 2-amino-2-methyl-1-propanol aqueous solutions, Ind. Eng. Chem. Res., 27, 2237-2241.
 Xiao, J., Ch h, Wei Li, and Meng-Hui Li (2000) Kinetics of absorption of carbon dioxide into aqueous solutions of 2-amino-2-methyl-1-propanol + monoethanolamine, Chem. Eng. Sci., 55, 165-175.
 Xu, S., F.D. Otto, and A.E. Mather (1991) Physical properties of aqueous AMP solutions, J. Chem. Eng. Data, 36, 71-75.