Korean Chem. Eng. Res., Vol. 47, No. 2, April, 2009, pp. 185-189

교반셀에서 측정한 아민첨가 암모니아수 흡수제의 이산화탄소 흡수 반응 속도 측정

박호석* · 유정균* · 홍원희*,† · 김종남**

*한국과학기술원 생명화학공학과
305-701 대전시 유성구 구성동 373-1
**한국에너지기술연구원
305-343 대전시 유성구 장동 71-2
(2008년 6월 19일 접수, 2009년 2월 18일 채택)

Absorption Rate of Carbon Dioxide into Blended Ammonia Solution with Amine Additives in a Stirred Cell Reactor

HoSeok Park*, Jong Kyun You*, Won Hi Hong*,† and Jong Nam Kim**

**Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Kaist, 373-1 Guseong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-701, Korea*
***Chemical Research Center, Korea Institute Energy Research, 71-2 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea*
(Received 19 June 2008; accepted 18 February 2009)

요 약

10 wt% 암모니아수 흡수제에서 이산화탄소 흡수속도를 교반셀 반응기를 이용하여 293~337 K 범위에서 측정하였다. 암모니아 흡수제와 이산화탄소의 반응속도를 아레니우스 식으로 나타내었으며 활성화에너지는 50.42 kJ/mol였다. 2-Amino-2-methyl-1-propanol(AMP), 2-amino-2-methyl-1,3-propandiol(AMPD), 2-amino-2-ethyl-1,3-propandiol(AEPD)의 입체장애아민 첨가제가 1 wt% 함유된 흡수제에서의 이산화탄소 흡수속도를 측정하였다. 아민 첨가제들은 흡수속도에 영향을 주었으며 1 wt%의 AMP를 첨가한 경우 반응속도 상수는 약 53% 증가하였다.

Abstract – Absorption rate of carbon dioxide into aqueous ammonia absorbent(10 wt%) was measured in the temperature range from 293 K to 337 K using a stirred-cell reactor. The reaction rate constant was correlated with the Arrehnius equation and the activation energy was 50.42 kJ/mol. CO_2 absorption rate into modified ammonia absorbent was also investigated. For the modified ammonia absorbent, 1 wt% sterically hindered amines of 2-amino-2-methyl-1-propanol(AMP), 2-amino-2-methyl-1,3-propandiol(AMPD) and 2-amino-2-ethyl-1,3-propandiol(AEPD) were used as additives. The CO_2 absorption rate increased by adding 1 wt% of the amine additive, in the case of AMP additive, the absorption rate enhanced by about 53%.

Key words: CO_2 Removal, Absorption, Ammonia, Kinetics, Blending

1. 서 론

이산화탄소는 지구 온난화의 주요원인으로 알려져 있다. 여러 가지 이산화탄소 처리 방법 중, 액상 흡수제를 이용한 화학흡수법은 배가스 중의 이산화탄소를 처리하는데 가장 효과적인 공정으로 알려져 있다. 화학흡수법을 이용한 이산화탄소 처리공정에서 monoethanolamine (MEA), diethanol amine(DEA), N-methyldiethanolamine(MDEA), 2-amino-2-methyl-1-propanol(AMP) 등의 알카놀아민(alkanolamine) 흡수제가 일반적으로 사용된다. 최근 암모니아 수용액이 상용 아민계 흡수제를 대체할 흡수제로서 제안되고 있다. 암모니아 흡수제는 아민 흡수제에 비해 경제성을 가지고, 이산화탄소 흡수능이 높으며, 탄화수소암모늄(ammonium bicarbonate)의 분해 온도가 낮아 재생에 유리하며, 부식성이 적다는 장점을 가진 것으로 보고되고 있다[1-6].

배가스 CO_2 처리에 암모니아수 사용이 제안되면서 흡수장치 설계에 필수적인 자료인 암모니아수의 CO_2 흡수속도에 대한 자료가 필요하게 되었다. 아민계 흡수제에 대하여 방대한 양의 반응속도 자료가 보고된 것에 비하면 암모니아수 흡수제의 경우, 보고된 반응속도 자료가 많지 않다. Andrew[7]는 세라믹 디스크가 설치된 흡수탑(disk absorption tower)에서 CO_2 분압 및 암모니아수 농도별 흡수실험을 수행하여 반응속도를 보고하였다. Diao 등[4]은 흡수탑에서 암모니아수 흡수제의 CO_2 제거효율을 측정하면서 306~310 K 사이에서의 반응속도를 아레니우식(Arrhenius equation) 형태로 보고한 바 있다.

여러 가지 흡수속도 측정 장치 중 교반셀 반응기(stirred cell reactor)를 사용한 방법은 회분식으로 조업하기가 쉽고 기상 압력 변화로부터 비교적 간단한 방법으로 반응속도에 대한 자료를 얻을 수 있기 때문에 기체 흡수속도를 측정하는데 많이 사용되는 방법이다[8]. 본

†To whom correspondence should be addressed.
E-mail: whhong@kaist.ac.kr

연구에서는 교반셀 반응기를 이용하여 암모니아수에서 CO_2 흡수속도를 측정하였다.

일반적으로 흡수제 성능을 개선하기 위하여 다양한 종류의 첨가제를 추가하거나 여러 종류의 흡수제를 혼합한다. You 등[9]은 암모니아 흡수제가 가진 휘발성을 감소시켜 암모니아가 기상으로 손실되는 단점을 개선하기 위하여 아민기와 수산화기를 가진 첨가제를 사용하였다. 본 연구에서는 2-amino-2-methyl-1-propanol(AMP), 2-amino-2-methyl-1,3-propandiol(AMPD), 2-amino-2-ethyl-1,3-propandiol (AEPD)의 아민류 첨가제를 포함한 암모니아 흡수제에서 CO_2 흡수속도를 측정하여 암모니아 단독 흡수제와 비교하였다.

2. 이 론

Fig. 1과 같은 교반셀 형태의 흡수속도 측정장치에서 기액계면에서 액상 흡수제로 흡수된 CO_2 양은 기상에서 사라진 CO_2 양과 동일하다. 경막 이론(Film theory)에 따라서 흡수속도는 기상 압력감소로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다[10].

$$R_{CO_2} = -\frac{1}{aRT}\frac{V_G dp_{CO_2}}{dt} \quad (1)$$

여기서 R_{CO2}는 단위시간, 단위면적 당 흡수속도(kmol/m^2·s), a는 기액계면 면적(m^2), V_G는 반응 교반셀의 기상부 부피(m^3)이다.

CO_2가 암모니아 수용액에 흡수될 때 화학반응을 동반하며, 다음과 같은 화학평형이 알려져 있다[11].

$$NH_3 + CO_2 + H_2O \leftrightarrow NH_4^+ + HCO_3^- \quad (2)$$

$$NH_3 + HCO_3^- \leftrightarrow NH_2COO^- + H_2O \quad (3)$$

$$NH_3 + HCO_3^- \leftrightarrow NH_4^+ + CO_3^{2-} \quad (4)$$

CO_2가 흡수됨에 따라 흡수제에는 NH_4^+, H^+, NH_2COO^-, HCO_3^-, CO_3^{2-}, OH^-의 이온과 NH_3, CO_2, H_2O의 분자가 존재한다. 총괄반응속도는 CO_2와 NH_3의 농도에 대하여 각기 1차인 것으로 알려져 있다[7]. 빠른 유사 1차 반응 영역(fast pseudo -first order reaction regime)의 촉진계수(enhancement factor)를 사용하여 CO_2 흡수속도는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다[10].

$$R_{CO_2} = \sqrt{D_{CO_2} k_{ov}}\left(\frac{p_{CO_2}}{H_{CO_2}}\right) \quad (5)$$

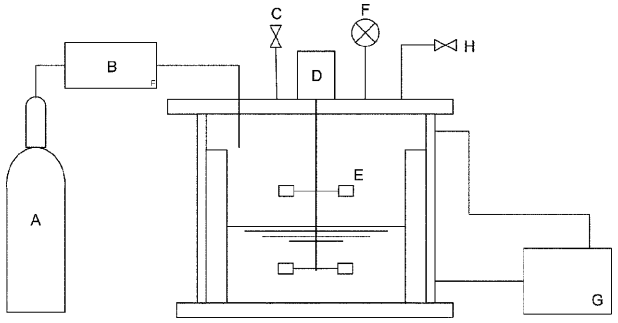

Fig. 1. Schematic diagram of the stirred cell for the measurement of CO_2 absorption rate.

A: CO_2 cylinder	E: Impeller
B: Mass flow controller	F: Pressure transducer
C: Gas inlet	G: Water circulator
D: Magnetic drive	H: Gas outlet

여기서 k_{ov}는 총괄 반응속도상수, H_{CO2}와 D_{CO2}는 CO_2의 암모니아수 수용액에 대한 헨리상수와 확산계수이다. 흡수 초기에는 액상과 평형을 이루는 CO_2 분압(p_{CO2}^*)이 무시할 만큼 작으므로 흡수 구동력(driving force, p_{CO2}-p_{CO2}^*)은 기상 CO_2 분압이다. 식 (1)과 (5)로부터 흡수속도는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있으며 직선 기울기로부터 반응속도상수 k_{ov} 값을 얻을 수 있다.

$$\ln\left(\frac{p_{CO_2,o}}{p_{CO_2,t}}\right) = \frac{\sqrt{D_{CO_2} k_{ov}}}{H_{CO_2}}\frac{aRT}{V_G}t \quad (6)$$

3. 실 험

3-1. 재료

암모니아수(28 wt%)는 Junsei로부터 공급받았고 3차 증류수로 희석하여 원하는 농도의 흡수제를 제조하였다. 2-Amino-2-methyl-1-propanol(AMP, 분자량:89.14), 2-amino-2-methyl-1,3-propandiol(AMPD, 분자량: 105.14), 2-amino-2-ethyl-1,3-propandiol(AEPD, 분자량: 119.16)는 첨가제로 사용되었고 Acros사의 99% 제품을 추가 정제 없이 사용하였다. 암모니아수 단독 흡수제 농도는 10 wt%로 고정하였다. 첨가제 혼합 암모니아수 흡수제는 10 wt% 암모니아수에 1 wt%의 아민 첨가제를 추가하여 흡수제로 사용하였다.

3-2. 실험 장치 및 방법

암모니아수 흡수제에서 CO_2 흡수속도를 측정하기 위한 장치 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 교반셀(stirred cell) 반응기는 안지름 0.105 m, 높이 0.2 m로 유리로 제작하였다. 반응기 전체부피 1,731.8 mL이었고 액상을 400 mL 주입하였다. 임펠러는 지름 0.015 m의 8-flat-blade turbine 형태를 사용하였다. 2개 임펠러의 수직 위치를 조절하여 기상과 액상을 각각 교반하였다. 기상 유실 방지를 위해서 자성 드라이브(magnetic drive)를 사용하였다. Vortex를 방지하고 평판형 기액 계면을 유지하기 위해서 반응기 내벽에 4개의 수직 방해판(baffle)을 설치하였다. 교반속도는 평판형 기액 계면이 유지되는 범위 내에서 120 rpm으로 고정하여 기액계면은 0.00865 m^{2}로 일정하게 유지하였다. 교반셀 외벽의 water jacket으로 설정온도의 물을 순환시켜 반응기 내부 온도를 설정온도 ±0.5 K로 조절하였다.

반응기에 먼저 400 mL의 흡수 용액으로 채우고 비활성 분위기를 만들기 위해 질소 퍼징하였다. 반응기 내부를 원하는 온도로 조절한 후, 모든 밸브를 닫은 후 CO_2, N_2 혼합기체를 빠르게 주입하면서 압력을 측정하였다. 압력이 설정 값(500 KPa)에 도달하면 빠르게 기체 공급을 중지하였고, 이 상태를 초기 상태(t=0)로 간주하였다. 흡수제에 의해서 N_2 기체가 감소하지 않고 CO_2 흡수에 의해 압력이 감소한다는 가정 하에서 흡수시간에 따른 압력변화를 측정하였다. 압력계는 SM-210(Instech digital indicator)을 사용하였다.

3-3. 가정 및 오차 확인

식 (6)은 빠른 유사 1차 반응영역(fast pseudo-first order reaction)의 촉진계수를 사용한 식이므로 실험이 이 영역에서 진행되는지를 확인하였다[12].

$$E_i = 1 + \left(\frac{D_{NH3}}{D_{CO2}}\right)\left(\frac{C_{NH3,liquid}}{C_{CO2,\text{int}erface}}\right)$$

$$H_a = \frac{\sqrt{kD_{CO2}C_{NH3,liquid}}}{k_l^0} \quad (7)$$

식 (7)의 순간반응 촉진계수와 Hatta 수(Hatta number)를 구하면, Ha>3, $E_i \gg$Ha를 만족하여 빠른 유사 1차반응 영역에서 실험이 진행됨을 확인할 수 있었다.

CO_2가 흡수되면서 액상 조성이 변화하므로, $NH_3/CO_2/H_2O$ 계의 상평형 자료로부터 NH_3, CO_2의 평형분압과 흡수제의 각 성분 농도를 293~337 K, 흡수제 NH_3 농도 10 wt%에서 확인하였다. CO_2 부하(loading, CO_2 몰수/NH_3 몰수)는 실험 조건을 따라 0.1 이하의 범위에서 확인하였다. 모든 실험 조건에서 액상과 평형을 이루는 CO_2 평형분압(p_{CO2}^*)은 0.02 kPa 이하로 흡수구동력(p_{CO2}-p_{CO2}^*)에서 p_{CO2}^*는 무시하였다. 식 (6)의 k_{ov} 계산에 사용되는 NH_3 농도는 총 NH_3 농도가 아닌 미반응 NH_3 농도로서, CO_2가 흡수되면서 NH_4^+ 농도가 증가하므로 NH_3 농도는 감소하게 된다. 실험 범위에서 NH_3 농도는 초기농도에서 0.6% 이내로 변화하였으므로 데이터 처리에는 NH_3의 초기농도를 사용하였다. 헨리상수(H_{CO2})는 상평형 데이터로부터 얻었으며[6], 본 실험에서 흡수가 진행되면서 조성변화에 따른 헨리상수의 비이상성은 0.7% 이내로 무시할만큼 작아 상수로 처리하였다.

식 (6)은 반응초기에 대한 식이므로 흡수시간이 커질수록 직선에서 벗어나게 된다. 반응속도는 이 직선의 기울기로부터 결정되기 때문에 직선 기울기를 정의하는 것은 중요하다. 본 연구에서는 직선의 r^2이 99% 이상 되는 시간까지의 데이터만을 반응속도 계산에 사용하였다.

식 (2)~(4)의 총괄반응 중 CO_2 흡수 반응은 식 (8)과 (9)의 두 평행반응(parallel reaction)을 고려하였다.

$$CO_2 + NH_3 \xrightarrow{k} NH_2COOH \tag{8}$$

$$CO_2 + OH^- \xrightarrow{k_{OH^-}} HCO_3^- \tag{9}$$

총괄 반응속도상수 k_{ov}는 식 (9)와 같이 표현될 수 있다.

$$k_{ov} = kC_{NH_3} + k_{OH^-}C_{OH^-} \tag{10}$$

총괄반응속도상수에 OH^-이 기여하는 정도는 최대 14.4%였으며 무시할 수 없으므로 다음과 같이 고려하였다. 이산화탄소와 수산기 간의 반응속도 상수는 Pinsent 등[11]이 제시한 값을 사용하였다.

$$\log k_{OH^-} = 13.635 - \frac{2895}{T} + 0.08I \tag{11}$$

여기서 I는 이온세기(ion strength)이다. OH^- 농도(C_{OH^-})와 이온세기는 반응초기값을 사용하였다.

4. 결과 및 토론

10 wt% 암모니아수 단독 흡수제와 1 wt%의 AMP, AMPD, AEPD 첨가제를 포함한 암모니아수 흡수제에서 CO_2 흡수속도를 293~337 K의 온도 범위에서 측정하였다.

4-1. 암모니아 단독 흡수제

Fig. 2에 암모니아 단독 흡수제의 경우 흡수시간 동안 반응셀 기상부의 압력변화를 나타내었다. 반응시간에 따라 CO_2 흡수가 진행되면서 압력이 감소하였다. 압력 감소속도는 반응시간에 따라 감소하였다. 이는 기상 CO_2 분압이 낮아짐에 따라 흡수 구동력이 감소하기 때문이다. Fig. 3에 압력변화를 식 (6)의 형태로 흡수시간에 따른 $\ln(p_{CO2,0}/p_{CO2,t})$로 나타내었다. 흡수시간 2~3분 이내의 압력변화는 Fig. 3과 같이 직선으로 나타났다. 각 온도에서 동일한 직선을 얻을 수 있었다. 반응온도가 높을수록 CO_2 흡수가 활발히 일어나고, 압력감소가 크므로 더 급한 기울기의 직선을 얻을 수 있었다. Fig. 3의 기울기로부터 반응속도 상수 k값을 구하여 Table 1에 나타내었다. Fig. 4에 본 연구에서 얻어진 반응속도 상수와 문헌에 보고된 값을 비교하여 아레니우스 식(Arrhenius equation)으로 나타내었다. 암모니아 수용액과 CO_2의 반응에 대해 Andrew [7]가 보고한 반응속도 상수와 Y-F Diao 등[4]이 보고한 값은 상당히 상이하였고, 본 실험 결과는 Andrew와 Diao가 보고한 값들 사이의 반응속도로 나타났다. 반응속도는 식 (17)로 나타낼 수 있었으며 활성화에너지(activation energy)는 50.42 kJ/mol이었다.

$$\ln k = 25.21 - \frac{6064}{T} \tag{12}$$

암모니아수와 CO_2 간의 반응속도를 배가스 CO_2 처리에 상용되는 흡수제인 MEA, DEA, MDEA, AMP와 비교하여 Fig. 5에 나타내었다. 아민 흡수제의 경우 반응속도는 아민 차수가 올라갈수록 작아져 1차아민 MEA > 2차아민 DEA > 3차아민 MDEA 순서의 반응속도를 나타내며 입체장애아민인 AMP는 DEA보다 낮은 반응속도를 가진다. 암모니아수 흡수제의 경우 AMP보다 낮은 반응속도를 나타내었다. 흡수 반응속도가 지나치게 큰 흡수제의 경우 흡수

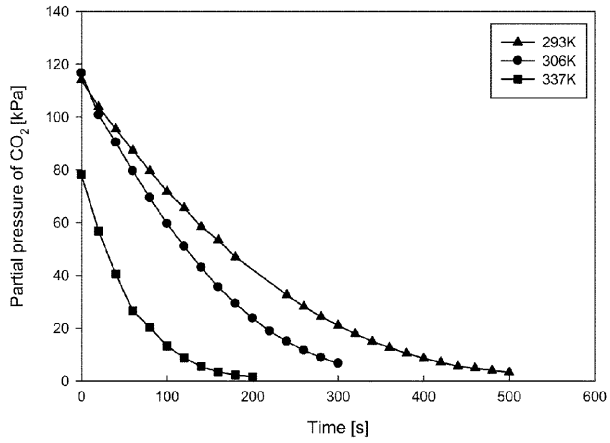

Fig. 2. Pressure change during CO_2 absorption into 10 wt% aqueous ammonia solution.

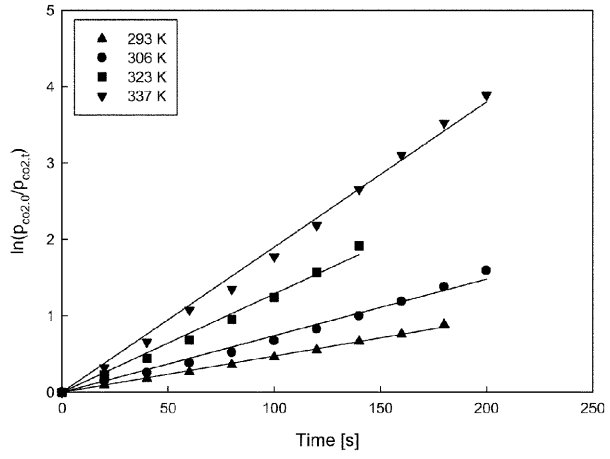

Fig. 3. Plot for equation (6). (10 wt% aqueous ammonia solution).

Table 1. Reaction rate constants between CO_2 and aqueous ammonia solution

T [K]	k [m^3/kmol-s]
293	89.61
306	227.6
313	349.3
323	613.4
337	1098

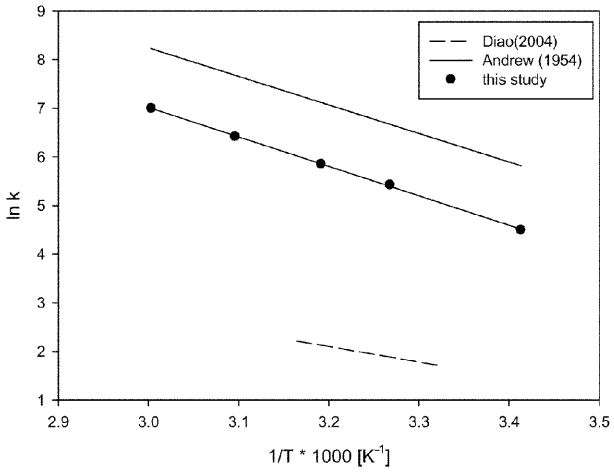

Fig. 4. Reaction rate constant between CO_2 and aqueous ammonia solution.

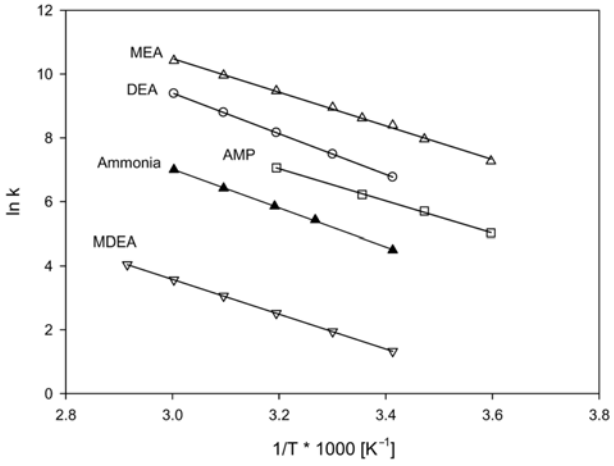

Fig. 5. Comparison of reaction rate constant between ammonia absorbent and conventional amine absorbents (MEA[13], DEA[14], MDEA[15], AMP[16]).

제 재생공정이 어려워진다. 아민계 흡수제의 개선 방향은 MEA의 반응속도를 낮추기 위해 반응속도가 상대적으로 작은 3차 아민인 MDEA와 블랜딩하여 혼합 아민 흡수제로 사용하거나, MDEA의 반응속도를 높이기 위해 피퍼라진(piperazine) 등의 반응속도 촉진제를 첨가하는 것이다. 이러한 관점에서 볼 때 MEA와 MDEA의 중간값의 반응속도를 가지는 암모니아수는 배가스 CO_2 흡수제로서 적당한 반응속도를 가진다고 볼 수 있다.

4-2. 아민 첨가제를 포함한 흡수제

Fig. 6(A)와 (B)에서 아민 첨가제를 포함한 흡수제에서 CO_2 흡수속도를 암모니아수 단독 흡수제의 경우와 비교하여 나타내었다. 흡

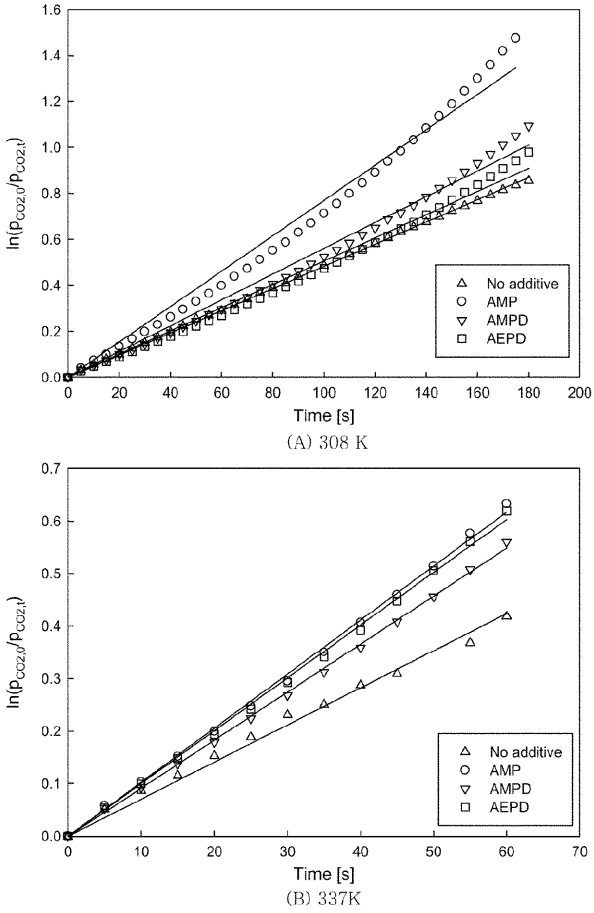

Fig. 6. Effect of 1 wt% additive on CO_2 absorption rate in 10 wt% ammonia absorbent.

수속도의 경우, 기액 계면 면적에 따라서 변하기 때문에 상대적인 값으로써 변화를 분석하였다. 첨가제로는 AMP, AMPD, AEPD의 알카놀아민들을 사용하였다. 이 첨가제들은 모두 입체장애아민이며 암모니아수의 휘발성을 감소시키기 위한 첨가제들이다. 아민이 1 wt%의 소량이 첨가되기 때문에 반응속도 등 물성에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 예상되었으나 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 반응속도는 1 wt%의 아민을 첨가함으로써 상당히 증가하는 것으로 나타났다. 세가지 입체장애아민 첨가제들의 경우 모두 반응속도가 증가하였으며, 이러한 모든 온도에서 같은 경향을 보였다. Fig. 7에 첨가제 포함한 경우와 포함하지 않은 경우를 비교하기 위하여 두 경우의 반응속도 비(Ratio, $R_{CO2,with\ additive}/R_{CO2,without\ additive}$)로 표현하였다. AMP 첨가제를 넣은 경우가 반응속도의 촉진이 가장 두드러져 308 K과 337 K에서 각기 59%, 46% 상승하였다. 나머지 첨가제들의 경우에도 모두 흡수속도가 상승하였으며 AMPD의 경우 각기 16%, 29% 상승, AEPD의 경우 4.7%, 8.5% 상승하였다. 이는 암모니아 흡수제의 경제성에 영향을 주지 않는 범위 내에서 소량의 AMP를 첨가함으로써 효과적으로 원하는 반응속도의 개선된 암모니아수 흡수제를 제조할 수 있음을 의미한다.

5. 결 론

10 wt% 암모니아수 흡수제에서 이산화탄소 흡수속도를 교반셀 반응기를 이용하여 293에서 337 K 범위에서 측정하였다. 암모니아

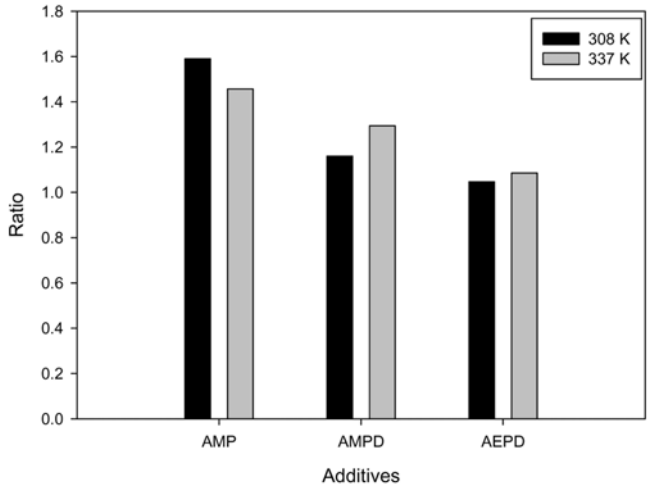

Fig. 7. Enhanced absorption rate for absorbents with 1 wt% additive.

흡수제와 이산화탄소의 반응속도를 아레니우스 식으로 나타내었으며 활성화에너지는 50.42 kJ/mol였다. 암모니아 흡수제는 1차 아민 MEA 흡수제와 3차 아민 MDEA 흡수제의 사이의 반응속도상수를 가지므로 흡수와 탈거를 고려할 때 CO_2 처리용 흡수제로서 적합한 반응속도를 가졌다고 평가할 수 있다. 또한 암모니아수 흡수제는 입체장애아민 AMP보다는 낮은 반응속도상수를 가진 것으로 나타났다. AMP, AMPD, AEPD의 입체장애아민 첨가제가 1 wt% 함유된 흡수제에서 이산화탄소 흡수속도를 측정하였다. 아민 첨가제들은 흡수속도에 큰 영향을 주었으며 1 wt%의 AMP를 첨가한 경우 반응속도 상수는 약 53% 증가하였다.

감 사

본 연구는 이산화탄소 저감 및 처리기술 개발사업단(CDRS, Carbon Dioxide Reduction and Sequestration R&D Center, DC2-101-1-0-0)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

사용기호

a : gas liquid interfacial area [m^2]
C_i : concentration of component i [kmol/m^3]
D_i : diffusivity of component i in liquid phase [m^2/s]
E_i : enhancement factor for instantaneous reaction
H_{CO_2} : henry's law constant [kPa m^3/kmol]
H_a : hatta number
I : ionic strength [kmol/m^3]
k : reaction rate constant [m^3/kmol·s]
k_{ov} : overall reaction rate constant [m^3/kmol·s]
k_l^o : individual mass transfer coefficient for liquid film [kmol/m^2s]
p_{CO_2} : partial pressure of CO_2 [kPa]
R : gas constant
R_{CO_2} : specific rate of absorption of CO_2 [kmol/m^2·s]
t : time [s]
T : temperature [K]
V_G : volume of gas phase [m^3]

아래첨자

i : component [i]
o : initial
t : at time [t]

참고문헌

1. Bai, H. and Yeh, A. C., "Removal of CO_2 Greenhouse Gas by Ammonia Scrubbing," *Ind. Eng. Chem. Res*., **36**, 2490(1997).
2. Li, X., Hagaman, E., Tsouris, C. and Lee, J. W., "Removal of Carbon Dioxide from Flue Gas by Ammonia Carbonation in the Gas Phase," *Energy & Fuels*, **17**, 69(2003).
3. Yeh, A. C. and Bai, H., "Comparison of Ammonia and Monoethanolamine Solvents to Reduce CO_2 Greenhouse Gas Emissions," *The Science of the Total Environment*, **228**, 121(1999).
4. Diao, Y. F., Zheng, X. Y., He, B. S., Chen, C. H. and Xu, X. C., "Experimental Study on Capturing CO_2 Greenhouse Gas by Ammonia Scrubbing," *Energy Convers. Manage*., **45**, 2283(2004).
5. Meng, L., Burris, S., Bui, H. and Pan, W.-P., "Development of an Analytical Method for Distinguishing Ammonium Bicarbonate from the Products of an Aqueous Ammonia CO_2 Scrubber," *Anal. Chem.*, **77**, 5947(2005).
6. You, J. K., Park, H. S., Hong, W. H., Park, J. and Kim, J. N., "Modeling of Operating Conditions of Ammonia Water Absorbent for Removal of Carbon Dioxide in Flue Gas," *Korean Chem. Eng. Res*., **45**, 258(2007).
7. Andrew, S. P. S., "A Rapid Method of Measuring Absorption Rates and Its Application to CO_2 Absorption into Partially Carbonated Ammonia Liquor," *Chem. Eng. Sci*., **3**, 279(1954).
8. Kucka, L., Richter, J., Kenig, E. Y. and Górak, A., "Determination of Gas–liquid Reaction Kinetics with a Stirred Cell Reactor," *Sep. Purif. Tech*., **31**, 163(2003).
9. You, J. K., Park, H. S., Yang, S. H., Hong, W. H., Kang, J. K., Yi, K. B. and Kim, J.-N., "Influence of Additives Including Amine and Hydroxyl Groups on Aqueous Ammonia Absorbent for CO_2 Capture," *J. Phys. Chem. B*, **112**, 4323(2008).
10. Middleman, S., "An Introduction to Mass and Heat Transfer," Principles of Analysis and Design, Wiley(1997).
11. Krevelen, D. W. V., Hoftijzer, P. J. and Huntjens, F. J., "Composition and Vapour Pressures of Aqueous Solutions of Ammonia, Carbon Dioxide and Hydrogen Sulphide," *Rec. Trav. Chim. Pays-bas*, **68**, 191(1949).
12. Danckwerts, P. V., *Gas-liquid Reactions*; McGraw-Hill, New York (1970).
13. Pinsent, B. R. W., Pearson, L. and Roughton, F. W. J., "The Kinetics of Combination of Carbon Dioxide with Hydroxide Ions," *Trans. Faraday. Soc*., **52**, 1512(1956).
14. Hikita, H., Asai, S., Ishikawa, H. and Honda, M., "The Kinetics of Reactions of Carbon Dioxide with Monoethanolamine, Diethanolamine and Triethanolamine by a Rapid Mixing Method," *Chem. Eng. J*., **13**, 7(1977).
15. Pani, F., Gaunand, A., Cadours, R., Bouallou, C. and Richon, D., "Kinetics of Absorption of CO_2 in Concentrated Aqueous Methyldiethanolamine Solutions in the Range 296 K to 343 K," *J. Chem. Eng. Data*, **42**, 353(1997).
16. Xu, S., Wang, Y.-W., Otto, F. D. and Mather, A. E., "Kinetics of the Reaction of Carbon Dioxide with 2-amino-2-methyl-1-propanol Solutions," *Chem. Eng. Sci*. **51**, 841(1996).