

이산화탄소 흡수제의 화학구조별 반응열량 특성 연구

곽노상 · 이지현 · 엄용석 · 김준한 · 이인영 · 장경룡 · 심재구[†]

한전전력연구원 녹색성장연구소
305-760 대전시 유성구 문지로 105
(2011년 6월 2일 접수, 2011년 7월 26일 채택)

Analysis of the Heat of Absorption Based on the Chemical Structures of Carbon Dioxide Absorbents

No Sang Kwak, Ji Hyun Lee, Yong Seok Eom, Jun Han Kim, In Young Lee, Kyung Ryoung Jang and Jae-Goo Shim[†]

Green Growth Laboratory, KEPCO Research Institute, 105 Munji-Ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-760, Korea
(Received 2 June 2011; accepted 26 July 2011)

요 약

반응열량계를 사용하여 1, 2, 3차 아민 수용액과 이산화탄소의 반응열을 각각 측정하였다. 이를 통해 MEA (monoethanolamine, 1차 아민), EAE(2-(ethylamino) ethanol, 2차 아민), MDEA (N-methyldiethanolamine, 3차 아민) 30 wt% 수용액이 40 °C에서 이산화탄소와 반응시 발생하는 반응열을 측정하고 이를 CO₂의 loading ratio에 따라 어떻게 변화하는지 평가하였다. 또한, 입체장에 구조를 가지는 AMP(2-amino-2-methyl-1-propanol, 1차 아민), DEA (diethanolamine, 2차 아민), TEA(triethanolamine, 3차 아민) 30 wt% 수용액의 반응열을 각각 측정하여 입체장에 구조가 반응열에 미치는 영향을 살펴보았다. 그 결과, 흡수제의 입체장에 유무와 관계없이 1차 > 2차 > 3차 아민 순으로 반응열이 증가함을 확인하였다. 그리고 입체장에 아민이 동일 차수의 비 입체장에 아민보다 상대적으로 반응열이 낮지만 그 차이는 크지 않음을 확인하였다.

Abstract – In this study, the heats of absorption of CO₂ with aqueous solutions of primary, secondary and tertiary amine aqueous solutions were measured in the commercial reaction calorimeter SIMULAR (HEL, UK). The heats of absorption of 30 wt% amine aqueous solutions of MEA (monoethanolamine, primary amine), EAE(2-(ethylamino)ethanol, secondary amine), and MDEA (methyldiethanolamine, tertiary amine) were measured as function of the CO₂ loading ratio at 40 °C, in each case. In addition, the heats of absorption of sterically -hindered amine aqueous solutions of AMP(2-amino-2-methyl-1-propanol, primary amine), DEA(diethanolamine, secondary amine) and TEA(triethanolamine, tertiary amine) were measured to observe the steric hindrance effect. The heat of absorption is high in the following order regardless of the steric hindrance: primary amine > secondary amine > tertiary amine. The heats of absorption of amines having sterically-hindered substituents surrounding nitrogen atoms are relatively low compare to that of sterically- free amines, although the difference is very small.

Key words: CO₂ Capture, Chemical Absorption, Enthalpy, Amine, Steric hindrance

1. 서 론

대기 중 온실가스의 농도 증가로 인해 발생하는 지구 온난화 문제를 방지하기 위하여 발전소 등 산업 현장에서의 이산화탄소 배출 저감은 이미 전 세계적 이슈가 되었다. 대표적인 이산화탄소 포집 방법으로, 발전소 배가스에 포함되어 배출되는 이산화탄소를 아민 계열 흡수제를 이용하여 포집하는 방법, 석탄가스화복합발전(IGCC, Integrated coal gasification combined cycle)을 통한 연소전 이산화탄소 포집 방법 그리고 순산소 연소를 통해 이산화탄소의 농도를 높

인 후 이를 포집하는 방법이 있다.

이 기술들 중에 특히 아민 흡수제를 이용한 연소 후 습식 이산화탄소 포집 공정은 상용화에 가장 근접한 기술로 알려져 있다. 하지만 이 기술은 타 기술에 비해 경제성이 가장 우수하다고 평가되는데 불구하고 타 기술들처럼 흡수제의 재생에 열에너지를 필요로 하여 그로 인한 발전 효율의 저하가 불가피하다. 따라서 이를 극복하기 위해 흡수제의 재생에너지를 감소시키기 위한 지속적인 연구가 활발히 진행 중이다.

아민 흡수제의 재생에너지는 크게 반응열, 현열, 잠열로 이루어져 있으며, 그 중 반응열이 50% 이상을 차지한다고 알려져 있다[1]. 따라서 아민 흡수제가 이산화탄소를 흡수 시 발생하는 반응열에 대한

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: jgshim@kepri.re.kr

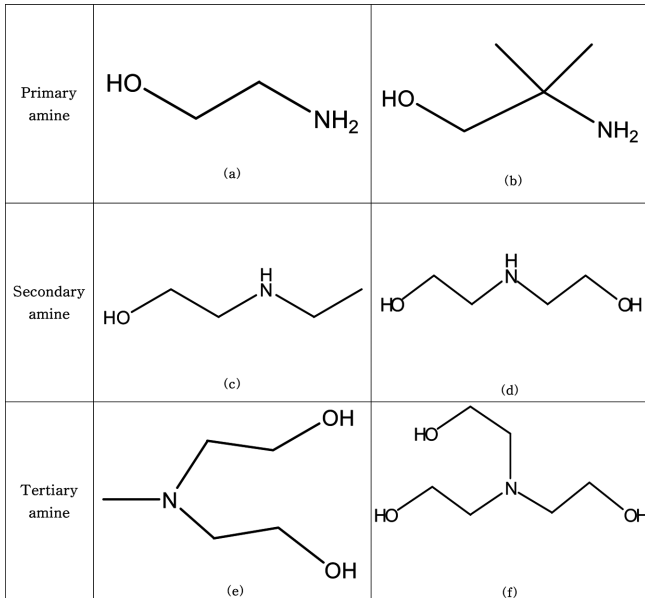


Fig. 1. Structures of the absorbents used in this study : (a) MEA (Monoethanolamine); (b) AMP (2-Amino-2-methyl-1-propanol); (c) EAE(2-(Ethylamino)ethanol); (d) DEA(Diethanol amine); (e) MDEA(N-Methyldiethanolamine); (f) TEA(Triethanolamine).

측정은 아민 흡수제의 재생에너지를 예측하는데 반드시 필요한 자료이다.

한편, Carson et al.(2000)는 25 °C에서 30 wt%의 MEA(monoethanolamine), DEA(diethanolamine) 그리고 MDEA(N-methyldiethanolamine)의 반응열을 측정하였다[2]. 또한 Kim과 Svendsen은 40 °C와 120 °C 온도 범위에서 MEA(monoethanolamine), DEA(diethanolamine), MDEA(methyldiethanolamine), AEEA(2-((2-aminoethyl)amino)-ethanol), DETA(diethylenetriamine), AMP(2-amino-2-methyl-1-propanol) 그리고 Pz(piperazine)의 반응열을 측정하였다[3]. 이 연구 결과들을 통해 반응온도가 높을수록 이산화탄소와 반응하는 아민 흡수제의 반응열이 높고 이산화탄소의 흡수능은 낮은 반면, 고압에서 아민 흡수제의 이산화탄소 흡수능은 증가함을 확인하였다.

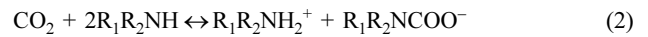
하지만, 아민흡수제의 구조와 반응열에 대한 충분한 이해를 위해서는 아직까지 아민의 치환기 및 입체장애와 반응열의 상관관계에 대한 연구가 부족한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 Fig. 1의 아민들을 사용하여 40 °C에서 1, 2, 3차 아민들과 이산화탄소의 반응열 측정을 통해서 화학구조 차이에 따른 반응열의 크기를 분석하였다. 또한, 1, 2, 3차 입체장애아민(Sterically hindered amine)들의 반응열 측정을 통해 입체 장애가 반응열에 미치는 영향에 대해 분석하였다.

2. 이 론

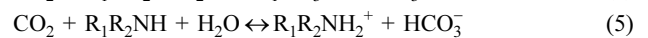
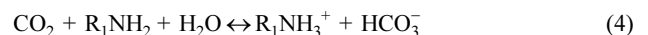
2-1. 아민 흡수제와 이산화탄소의 반응

아민 흡수제의 이산화탄소 흡수 반응은 약염기인 알칸올아민과 약산성의 이산화탄소의 반응으로 수용성의 염을 생성하는 반응에 기반을 두고 있다. 이 반응은 가역반응이며 평형상태의 방향은 온도 및 아민 흡수제의 농도에 의존한다. 1차 아민의 경우 식 (1)처럼 반응이 일어나며, 저온 및 고 농도에서는 정반응이, 고온 및 저 농

도에서는 역반응이 주로 일어나게 된다. 2차 아민의 경우에는 1차 아민과 유사하게 식 (2)와 같이 반응이 일어나서 저온 및 고 농도에서는 정반응이, 고온 및 저 농도에서는 역반응이 주로 일어나게 된다. 3차 아민의 경우에는 1, 2차 아민과 반응 형태가 상이하다. 즉, 식 (3)처럼 아민 흡수제가 이산화탄소와 직접 반응하지 않고 H₂O의 H⁺를 deprotonation한 후 OH⁻가 이산화탄소와 반응하여 bicarbonate를 생성한다[8].



입체 장애가 있는 1차 및 2차 아민은 식 (4) 및 (5)의 반응식을 따른다.



2-2. 반응열 측정

열량계를 통한 반응열의 측정은 식 (6)과 같은 열수지식을 활용한다.

$$Q_r = Q_{\text{flow}} + Q_{\text{accumulation}} + Q_{\text{dosing}} \quad (6)$$

여기서 Q_r =열 생성 속도(J/S)

Q_{flow} =시스템으로 부티의 열흐름

$Q_{\text{accumulation}}$ =누적 열량

Q_{dosing} =반응물의 가열이나 냉각에 의한 열손실

위의 식 (1)의 Q_r 을 적분하여 식 (7)와 같이 반응열 H_r 을 구할 수 있다.

$$\Delta H_r(J) = \int (Q_r - Q_b) dt \quad (7)$$

여기서 ΔH_r =반응 엔탈피(J or J/mole)

Q_r =열 생성 속도(J/S)

Q_b =반응전과 후에 등온 유지를 필요한 열량

dt =반응시간

이 열수지식은 등온반응(Isothermal operation, reactor의 온도가 일정한)의 실험을 진행하면 heat generation rate이 식 (8)과 같이 표현 될 수 있다.

$$Q_r \cong Q_{\text{flow}} \quad (8)$$

Q_{flow} 는 반응열량계의 측정 방식에 따라 다르게 표현 될 수 있다.

2-2-1. Heat Flow Calorimetry(HFC)

이 방법은 반응기 자켓 온도와 반응기 내부 온도와의 차를 이용하여 반응열을 측정하는 장치로 Fig. 2와 같은 형태를 갖는다. 이 반응기의 열전달 Driving force는 (반응기 내부 온도(T_r)-반응기 자켓 온도(T_j))이고 calibration factor와의 곱을 사용하여 반응열량을 측정한다. 이 반응열량계의 Type을 통해 Q_{flow} 는 식 (9)와 같이 표현 된다.

$$Q_{\text{flow}} = UA\Delta T \quad (9)$$

여기서 U =열흐름 상수

ΔT =반응기 자켓과 반응기의 온도차

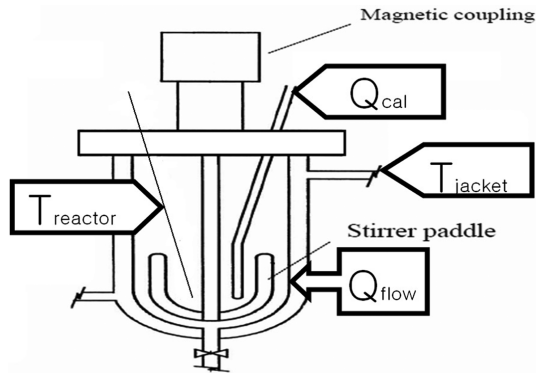


Fig. 2. Schematic diagram of heat flow calorimeter.

2-2-2. Heat Balance Calorimetry(HBC)

이 방법은 반응기 자켓을 순환하는 오일의 자켓 입구온도와 출구 온도의 차이를 측정하는 방법이다. 즉, 온도 차이와 오일 유량, 오일 밀도, 오일 C_p 의 정보들로 에너지를 계산하며, 식 (10)과 같이 표현된다.

$$Q_{flow} = mC_p\Delta T \quad (10)$$

여기서 m =오일의 물질흐름 속도

C_p =오일의 비열

ΔT =오일 자켓을 통과하는 열흐름

2-2-3. Power Compensation Calorimeter(PCC)

이 방식은 Fig. 3과 같이 전기 히터를 반응기 속에 넣고 열을 반응시스템에 가하여 줌으로써 반응기 자켓의 온도를 일정하게 유지시키는 방식으로, 열량은 전기 히터에 의해 소비된 에너지로부터 계산된다. 이 반응열량계의 type을 통해 Q_{flow} 는 식 (11)과 같이 표현된다.

$$Q_{flow} = \text{Power of electrical heater that is supplied between reaction} \quad (11)$$

본 연구에서는 가장 측정이 용이하고 변수가 적은 power compensation 방식으로 반응열을 측정하였다.

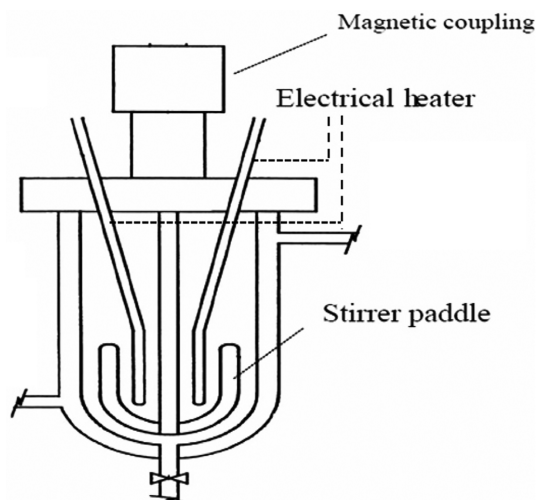


Fig. 3. Schematic diagram of power compensation calorimeter.

3. 실험

실험에 사용된 이산화탄소는 순도 99.999% 이상의 고순도 이산화탄소를 사용하였고, 아민 흡수제는 아민 30 wt%와 증류수 70 wt% 비율로 혼합하여 준비하였다. 그리고 실험에 사용된 아민 목록 및 실험 조건을 Table 1에 표시하였으며, Fig. 4에는 반응열 측정에 사용된 SIMULAR(HEL, England) 반응기의 모식도를 나타내었다. 이산화탄소와 아민 흡수제의 반응열 측정은 실제 공정에서 이산화탄소 흡수 반응 시 보편적으로 운전되는 온도인 40 °C에서 진행하였다.

반응열 측정 장치인 SIMULAR는 1 리터의 시료 주입이 가능하고, 압력센서와 pH센서가 설치되어 있으며 2,000 rpm까지 교반이 가능한 장치이다. 그리고 최대 운전압력은 2 bar이고, 최대 운전온도는 200 °C이다. SIMULAR의 반응열 측정은 heat flow 검출 및 power compensation 방식 모두 측정 가능하다. 이번 반응열 측정 실험에서는 등온조건(Isothermal operation, reactor의 온도가 일정)에서 power compensation 방식을 통해 아민 흡수제와 이산화탄소의 반응열을 측정하였다.

반응열량계 운전 절차는 흡수제(약 500 g)를 반응기에 주입하고, 초기 안정화를 위해 가스 vent 라인을 열고 질소로 purge한다. 그리고 vent 라인을 잠근 후 반응기 온도를 반응온도인 40 °C까지 상승시킨 후 반응기 온도 및 압력의 변화가 관찰되지 않고 전기 히터의 power 공급이 일정하게 유지되었을 때 고순도 이산화탄소를 0.25 liter/min로 11분간 주입하여(약 0.123 mol) 흡수제가 이산화탄소를 전량 흡수해서 상압(보통 1.5 bar까지 증가 후 1 bar로 떨어짐)으로 유지되고 전기 히터의 power 공급이 일정하게 유지되었을 때까지 안정화 시간을 갖는다. 이런 과정을 반복적으로 수행하여 α (mol-CO₂/mol-amine) 값이 0.5에 이를 때까지 실험하였다. 여기서 α (mol-CO₂/mol-amine) 값은 흡수용액의 단위 부피당 흡수되는 이산화탄소

Table 1. Heats of absorption of CO₂ with MEA(30 wt%)

Author	Year	반응열 (kJ/mol-CO ₂)	CO ₂ loading (mol-CO ₂ /mol-MEA)
Goto et al.[11]	2009	85	-
Kim et al.[5]	2007	82	0.084
Kohl et al.[10]	1985	84	-
This study	2011	84	0.100

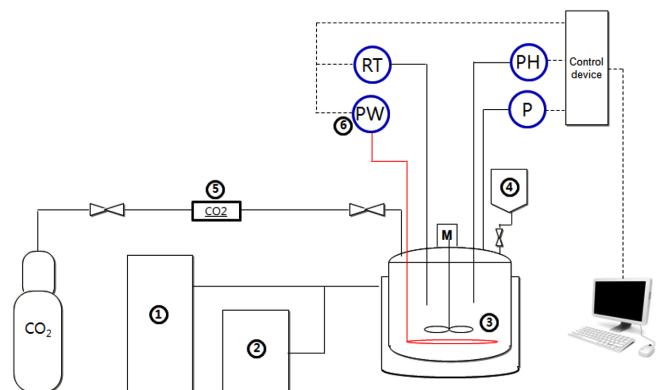


Fig. 4. Experimental setup: ①-main temperature controller; ②-sub temperature controller; ③-reaction calorimeter; ④-amine solution feed bottle; ⑤-CO₂ mass flow controller; ⑥-electric heater.

의 mol 수로 정의되는 이산화탄소 흡수능(loading capacity)을 나타낸다. 이 값은 일반적으로 흡수제의 흡수특성을 비교하기 위해 많이 사용한다.

하지만 3차 아민의 경우 아민 흡수제의 이산화탄소 흡수 속도가 느려서 이산화탄소를 0.25 liter/min로 11분간 주입하게 되면 반응기의 압력이 2 bar 이상으로 증가하게 되어 반응기의 최대 압력을 초과하게 된다. 따라서, 3차 아민의 경우 이산화탄소를 반응기의 압력이 1.5 bar로 유지되는 범위 내에서 11분간 최대한 주입하고 상압 및 전기 히터의 power 공급이 일정하게 유지되었을 때까지 안정화 시간을 갖도록 하였다. 이런 과정을 반복적으로 수행하여 $\alpha(\text{mol-CO}_2/\text{mol-amine})$ 값이 0.5에 이를 때까지 실험하였다. 그리고 모든 아민 흡수제와 이산화탄소의 반응열 측정 실험은 3회 이상 반복 측정하여 재현성을 확인하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 반응열량계의 baseline 결과

Power compensation calorimeter 실험 결과의 신뢰성을 확인하기 위해서 가장 일반적인 이산화탄소 흡수제인 MEA의 반응열을 측정하고, 이를 heat flow calorimetry와 heat balance calorimetry로 반응열량을 측정한 문헌 결과와 비교해 보았다. 그 결과 Table 1과 같이 power compensation calorimeter로 MEA 반응열을 측정한 값이 문헌 값과 유사한 결과를 보였다.

4.2. 아민 흡수제 실험의 결과 및 고찰

1, 2, 3차 아민(MEA, EAE, MDEA) 및 1, 2, 3차 입체장애아민(AMP, DEA, TEA)을 40 °C에서 이산화탄소와 반응시켜 발생하는 반응열을 측정하였다.

Fig. 5는 입체 장애가 없는 아민계열 흡수제 MEA, EAE 및 MDEA의 반응열 측정 결과를 보여주고 있다. 그래프에서 보여 지듯이 이산화탄소와 아민흡수제 반응열은 1차 아민(MEA) > 2차 아민(EAE) > 3차 아민(MDEA) 순으로 감소하고, $\alpha(\text{mol-CO}_2/\text{mol-amine})$ 값이 증가함에 따라 반응열이 감소하는 경향을 보였다. 이런 감소 경향은 1, 2차 아민보다는 3차 아민에서 크게 나타나고 있다. $\alpha(\text{mol-CO}_2/\text{mol-amine})$ 값이 증가할수록 반응열이 감소하는 원인으로는

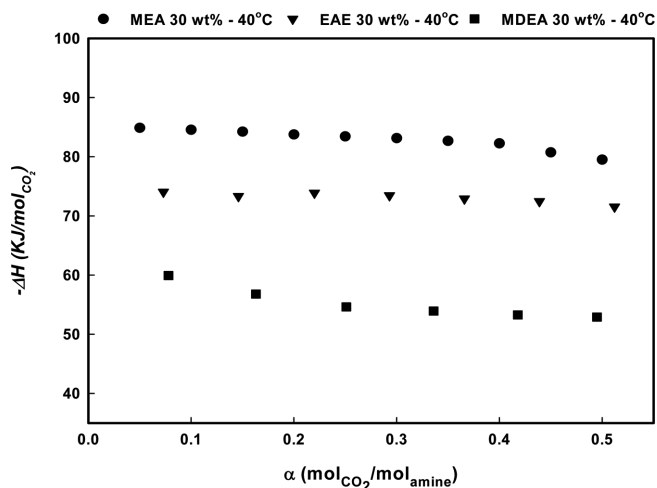


Fig. 5. Heats of absorption of CO₂ with MEA, EAE and MDEA at 40 °C.

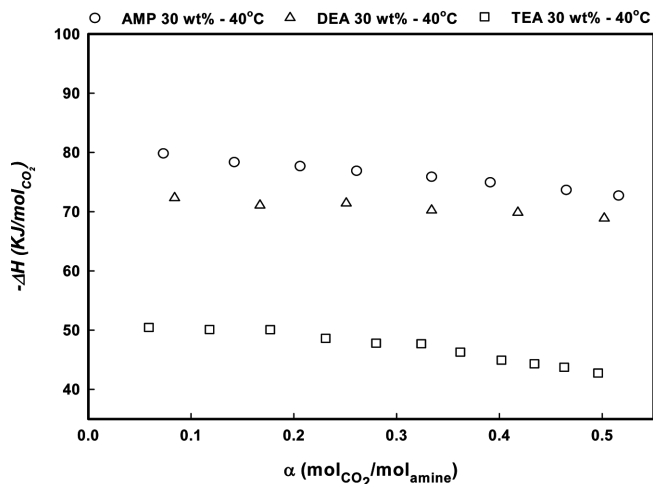


Fig. 6. Heats of absorption of CO₂ with AMP, DEA and TEA at 40 °C.

전체 아민 분자중 이산화탄소와 반응 가능한 분자가 α 값이 증가함에 따라서 감소하므로 반응열이 감소하게 되는 것으로 판단되며, Kim과 Svendsen[3]의 실험결과 또한 동일한 경향을 보이고 있다. 입체장애 아민인 AMP, DEA, TEA의 경우에도 Fig. 6처럼 이산화탄소와 아민흡수제 반응열의 크기는 1차아민(AMP) > 2차 아민(DEA) > 3차 아민(TEA) 순으로 나타나고, $\alpha(\text{mol-CO}_2/\text{mol-amine})$ 값이 증가함에 따라서 반응열이 감소하는 경향을 보였다. 반응열이 높다는 것은 아민흡수제와 이산화탄소의 결합에너지가 높다고 해석할 수도 있으므로, 아민 흡수제와 이산화탄소를 분리하는 흡수제 재생 반응에 많은 에너지가 소비될 것으로 예상된다. 하지만, 흡수제에 따라서 현열과 잠열의 크기가 다르기 때문에 반응열만으로 아민 흡수제의 전체 재생에너지를 판단하기는 불가능하다.

Fig. 7a는 1차 아민인 MEA와 입체 장애가 있는 1차 아민 AMP의 반응열을 비교한 그래프이다. 이 그래프를 통해서 입체 장애가 있는 AMP가 동일 물 당 동일 이산화탄소를 흡수하는데 필요한 반응열이 입체 장애가 없는 MEA보다 낮음을 확인할 수 있다. 또한 두 흡수제의 반응열의 차이는 $\alpha(\text{mol-CO}_2/\text{mol-amine})$ 값이 증가함에 따라서 소폭 증가하는 경향을 보이지만, 큰 차이를 보이지는 않는다.

Fig. 7b는 2차 아민인 EAE와 입체장애가 있는 2차 아민 DEA의 반응열을 비교한 그래프이다. 이 또한 상대적으로 입체 장애도가 큰 DEA가 입체장애도가 작은 EAE보다 낮은 반응열을 보이고 있지만, 그 차이는 매우 작다. 이와 같이 2차 아민들이 동일한 반응열을 보이는 이유는 다른 차수의 아민들과 달리 EAE와 DEA의 분자구조가 모두 긴 체인 형태로 구성되어 질소원자 주변에 결합된 치환기들의 차이가 이산화탄소와의 반응 시 상대적으로 작은 영향을 주는 것으로 판단된다. Fig. 7c에 나타난 3차 아민의 경우 또한 입체 장애가 큰 TEA가 입체 장애가 없는 MDEA보다 낮은 반응열을 보이고 있다. 이와 같은 결과들을 통해서 입체 장애를 갖는 아민 흡수제가 동일 차수의 비 입체장애 아민흡수제에 비해 반응열이 낮은 것을 확인할 수 있었다. 이는 아민 흡수제와 이산화탄소의 결합 시 입체장애 유무에 따른 반응 메커니즘의 차이 때문이라고 생각된다. 또한, 이산화탄소가 입체장애가 있는 아민 흡수제와 결합 시 상대적으로 질소원자 주변의 치환기들과 많은 상호작용이 발생하여 반응열량에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

본 논문에서 측정한 1, 2, 3차 아민의 반응열은 Fig. 8과 같이 나

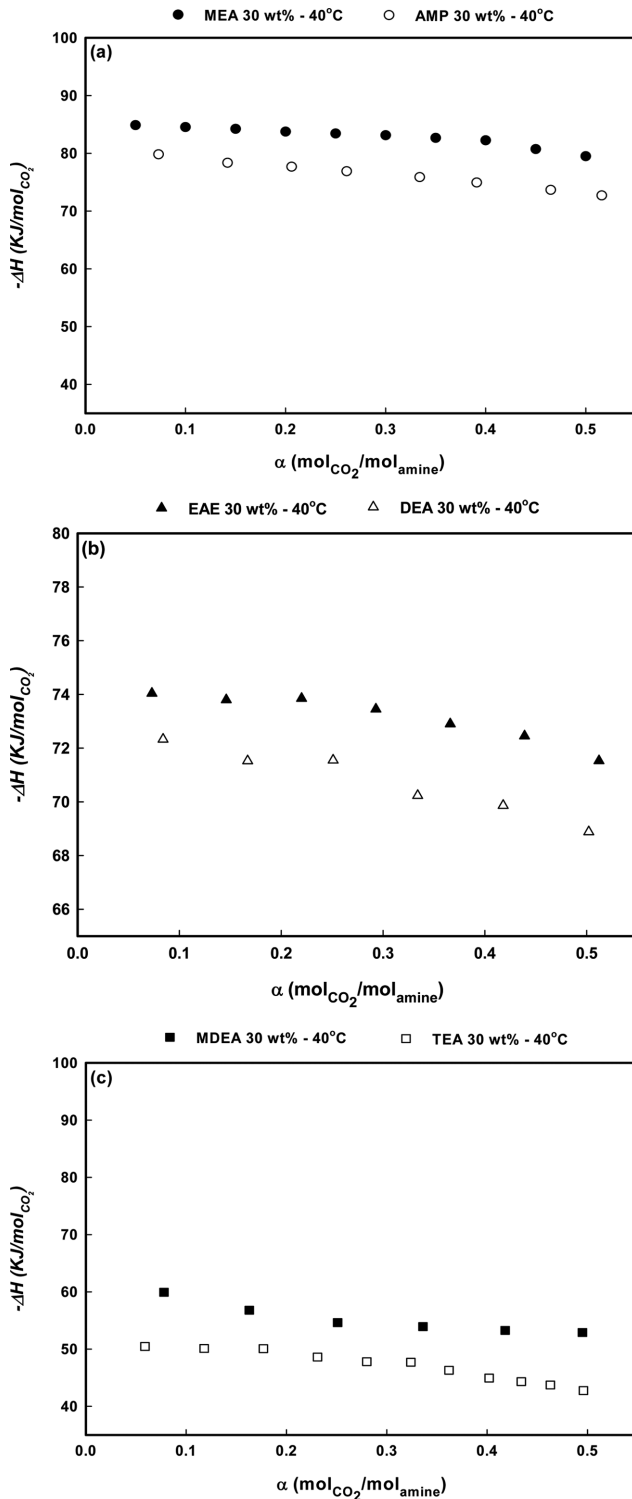


Fig. 7. Heats of absorption of CO₂ at 40 °C between sterically-free amine and sterically hindered amine: (a) primary amine(MEA, AMP) comparison; (b) secondary amine(EAE, DEA) comparison; (c) tertiary amine(MDEA, TEA) comparison.

타났으며, 이 결과를 통해서 입체장애의 유무와 관계없이 아민 흡수제와 이산화탄소의 반응 시 반응열의 크기는 1차 아민(MEA, AMP) > 2차 아민(EAE, DEA) > 3차 아민(MDEA, TEA) 순으로 나타남을 확인할 수 있다. 그리고, 동일 차수 아민흡수제의 이산화탄소 반응열은 입체장애가 존재할수록 감소함을 확인할 수 있었다. 1차 아민

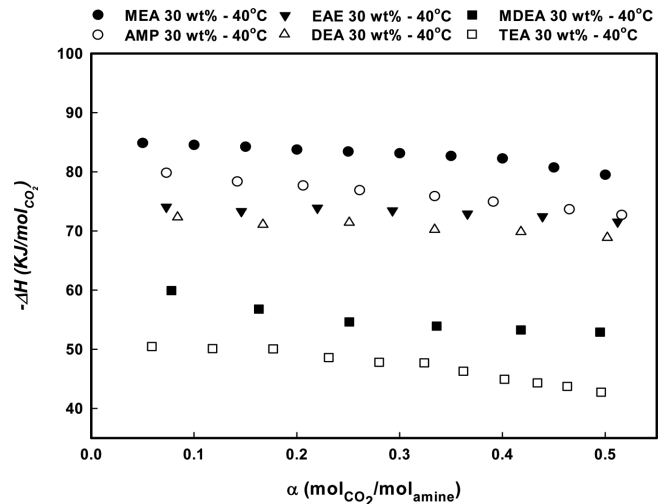


Fig. 8. Heats of absorption of CO₂ with the different absorbents (MEA, AMP, EAE, DEA, MDEA, and TEA) at 40 °C.

(MEA, AMP)의 평균반응열 차이는 6.7 kJ/mol-CO₂, 2차 아민(EAE, DEA)의 경우에는 평균반응열 차이는 2.4 kJ/mol-CO₂, 3차 아민의 평균반응열 차이는 8.3 kJ/mol-CO₂로, 2차 아민에서 평균반응열의 차이가 1, 3차 아민의 평균반응열 차이보다 다소 낮게 나타났다.

5. 결 론

Power compensation calorimeter를 사용해서 40 °C에서 아민 흡수제와 이산화탄소의 반응열을 측정하였다. 그 결과 반응열은 α(mol-CO₂/mol-amine) 값 0.5까지의 평균값을 기준으로 1차 아민(MEA 83 kJ/mol CO₂, AMP 76 kJ/mol-CO₂) > 2차 아민(EAE 73 kJ/mol-CO₂, DEA 71 kJ/mol-CO₂) > 3차 아민(MDEA 55 kJ/mol-CO₂, TEA 47 kJ/mol-CO₂) 순으로 크게 나타났다. 그리고 입체장애 아민이 동일 차수의 비 입체장애 아민보다 상대적으로 반응열이 낮으며, 동일차수 아민들의 평균반응열 차이는 2차 아민(EAE, DEA)이 1, 3차 아민의 평균반응열 차이보다 다소 낮음을 확인하였다.

이러한 아민 흡수제와 이산화탄소의 반응열 측정은 낮은 재생에너지에 갖는 흡수제의 선별 및 개발을 위한 참고 자료로 사용될 수 있다. 하지만, 반응열은 흡수제 재생과정에서의 흡수제와 이산화탄소가 dissociation되는데 필요한 재생에너지와는 차이가 있다. 왜냐하면, 흡수제의 재생에너지는 반응열뿐만 아니라 현열, 잠열을 포함하고 있고, 여러 공정 변수의 변화에 민감하게 반응하므로 다각적이고 종합적인 해석이 필요하다.

감 사

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 2010201020006A).

참고문헌

1. Lee, J. H., Kim, J. H., Lee, I. Y., Jang, K. R. and Shim, J. G., "Bench Scale Carbon Dioxide Recovery from the Flue Gas by

- Monoethanolamine," *J. Chem. Eng. Jpn.*, **43**, 720-726(2010).
2. Dallos, A., Altsach, T. and Kotsis, L., "Enthalpies of Absorption and Solubility of Carbon Dioxide in Aqueous Polyamine Solutions," *J. Thermal Anal. Cal.*, **65**, 419-423(2001).
 3. Kim, I. and Svendsen, H. F., "Comparative Study of the Heats of Absorption of Postcombustion CO₂ Absorbents," *Int. J. Greenhouse Gas Control*, **5**, 390-395(2011).
 4. Carson, J. K., Marsh, K. N. and Mather, A. E., "Enthalpy of Solution of Carbondioxide in (water+monoethanolamine, or diethanolamine, or N-methyldiethanolamine) and (water+monoethanolamine +N-methyldiethanolamine) at T=298.15K," *J. Chem. Thermodyn.*, **32**, 1285-1296(2000).
 5. Kim, I., Hoff, K. A., Hessen, E. T., Haug-Warberg and Svendsen, H. F., "Enthalpy of Absorption of CO₂ with Alkanolamine Solutions Predicted from Reaction Equilibrium Constants," *Chem. Eng. Sci.*, **64**, 2027-2038(2009).
 7. Song, H. J., Lee, S., Park, K., Lee, J., Spah, D. C., Park, J. W. and Filburn, T. P., "Simplified Estimation of Regeneration Energy of 30 wt% Sodium Glycinate Solution for Carbon Dioxide Absorption," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **47**, 9925-9930(2008).
 8. Feron, P. H. M., "Exploring the Potential for Improvement of the Energy Performance of Coal Fired Power Plants with Post-combustion Capture of Carbon Dioxide," *Int. J. Greenhouse Gas Control*, **4**, 152-160(2010).
 9. Meisen, A. and Shuai, X., "Research and Development Issues in CO₂ Capture," *Energy Convers. Manage.*, 37-38(1997).
 10. Kohl, A. L. and Nielsen, R., *Gas Purification*, 5th ed., Gulf Publishing Co., Houston, U.S.A.(1997).
 11. Goto, K., Okabe, H., Shimizu, S., Onoda, M. and Fujioka, Y., "Evaluation Method of Novel Absorbents for CO₂ Capture," *Energy Procedia*, **1**, 1083-1089(2009).