

고리형 아민과 이산화탄소의 반응에서 온도와 흡수능이 반응열에 미치는 영향

최정호 · 장종탁 · 윤성희 · 조원희 · 정진영 · 윤여일[†]

한국에너지기술연구원

Effect on the Heat of Reaction to Temperature and Absorption Capacity in the Reaction of Cyclic Amines with Carbon Dioxide

JEONG HO CHOI, JONG TACK JANG, SOUNG HEE YUN, WON HEE JO, JIN YOUNG JUNG,
YEO IL YOON[†]

Greenhouse Gas Laboratory, Climate Change Research Division, Korea Institute of Energy Research, 152 Gajeong-ro,
Yuseong-gu, Daejeon 34129, Korea

[†]Corresponding author :
21yoon@kier.re.kr

Received 10 September, 2018
Revised 29 October, 2018
Accepted 30 October, 2018

Abstract >> The effect of temperature and absorption capacity on heat of reaction, which is one of the characteristic studies of CO₂ absorption, were investigated in a differential reaction calorimeter (DRC) by using piperazine (PZ) and 2-methylpiperazine (2-MPZ). For all absorbents, CO₂ loading capacity decreased with increasing the temperature, while the heat of reaction increased, it figured out that these had a linear correlation between CO₂ loading capacity and/or heat of reaction and the temperature. The heat of reaction of all absorbents increased with increasing CO₂ loading capacity, especially 2-MPZ rapidly increased at 70°C. The reason for increase in the heat of reaction was occurred the regeneration of CO₂, which is a reverse-reaction, simultaneously with the absorption.

Key words : Heat of reaction(반응 열), Piperazine(피페라진), Carbon dioxide(이산화탄소), Climate change(기후 변화), CO₂ loading (CO₂ 흡수능)

1. 서 론

이산화탄소 배출로 발생되는 기후 변화는 자연과 인간 시스템의 위험을 증폭시키고, 기반 및 공공시설의 훼손시킬 뿐만 아니라, 식량 및 물 부족 등의 다양한 사회적 역기능을 발생시키고 있다¹⁾. 특히, 이산화탄소의 지구 온난화지수(global warming potentials, GWP)는 6대 주요 온실가스 중에서 가장 낮지만, 온

실가스 총 배출량의 약 70%를 차지하기 때문에 이에 대한 처리가 시급하다. 따라서 국제 정부 간 기후 변화 패널(intergovernmental panel on climate change, IPCC)에서는 기후 변화 문제에 대응하기 위하여 온실가스 배출을 억제하고, 전 지구 평균 온도 상승을 2°C 이내로 제한하기를 권고하고 있다¹⁾. 이를 위해서는 온실가스의 누적 배출량이 3,200 Gt_{CO₂}를 넘어서지 않아야 하기 때문에, 21차 유엔기후변화협약 당

사국 총회(Conference of Parties 21, COP21)에서는 2030년까지 온실가스 배출량을 단계적으로 감축하기 위한 협정을 체결하였다^{2,3)}. 국내에서도 2030 국가 온실가스 감축 기본로드맵을 수립하고, 850.8백만 톤의 배출전망치(business as usual, BAU) 대비 536백만 톤의 온실가스를 감축하기 위한 노력을 시도하고 있다⁴⁾. 536백만 톤의 온실가스 중 10.3백만 톤은 이산화탄소 포집·저장(CO₂ capture and storage, CCS)과 이산화탄소 포집·저장 및 자원화(CO₂ capture, utilization and storage, CCUS) 기술을 통하여 처리되므로, CCS 기술의 필요성은 더욱 증가하고 있다.

CCS 기술은 크게 순산소 연소, 연소 전 포집, 연소 후 포집으로 나뉘는데, 이 중에서 연소 후 포집기술은 가장 오랜 노하우를 바탕으로 상용화에 근접한 기술이다⁵⁾. 하지만 연소 후 포집 기술(100 US \$ per tonne CO₂)은 지열발전(-25 US \$ per tonne CO₂), 수력발전(-20 US \$ per tonne CO₂), 원자력(35 US \$ per tonne CO₂) 등의 기술들에 비하여 더 높은 이산화탄소 처리 비용이 요구된다⁶⁾. 따라서 많은 연구자들은 CO₂ ton 당 소요되는 금액을 감소시키기 위하여 효율적인 공정개발 및 이산화탄소 포집 흡수제를 연구하고 있으며, 포집된 이산화탄소를 이용한 고부가가치 물질 생산을 시도하고 있다. 이 중에서 흡수제의 개량 및 혼합, 신규 물질 발굴 등의 흡수제의 연구가 지속적으로 진행되고 있다.

연소 후 CO₂ 포집공정에서 일반적으로 사용되는 흡수제는 monoethanolamine (MEA)이지만, 이는 높은 재생에너지, 흡수제의 열화, 장치의 부식 등 단점이 있다^{7,8)}. 따라서, diethanolamine (DEA)과 N-methyl-diethanolamine (MDEA)과 같은 흡수제들이 고려되었으나, 이들 또한 반응속도가 느린 단점을 가진다^{9,10)}. 이러한 단점을 극복하고자 빠른 반응속도, 높은 CO₂ 흡수능, 낮은 흡수제의 변성을 가지는 piperazine (PZ)나 2-methylpiperazine (2MPZ)와 같은 고리형 아민이 검토되었다^{11,12)}.

연소 후 포집 공정에서 흡수제의 재생에너지는 전체 CCS 비용의 약 70%를 차지하는 핵심 요소 중 하나이므로, 흡수제를 연구하기 위해서는 재생에너지를

필수적으로 고려해야 한다. 재생에너지는 흡수된 이산화탄소를 다시 탈거시키는데 소모되는 에너지로써, 혼열 · 잠열 · 탈거열과 같은 3가지의 에너지의 합으로 표현할 수 있다. 이 중 탈거열은 총 재생에너지에서 약 40-50%를 차지하므로 가장 우선적으로 고려되어야 할 부분이다¹³⁾. 따라서 비용 효율적인 연소 후 포집 공정개발을 위해서는 흡수제의 탈거열을 감소시키는 것이 무엇보다 중요하다

이산화탄소와 흡수제 사이의 반응은 가역 반응이기 때문에, 반응열은 탈거열을 예측하는데 사용된다. 따라서 많은 연구자들이 흡수제의 탈거열을 측정하기 위하여 이산화탄소와 흡수제 사이의 반응열을 중점적으로 연구하였다.

반응열은 통계 열역학적 계산이나, 분자들의 양상블(ensemble) 모델을 이용하여 편리하게 계산되어지고 있으나, 실제 공정에 적용하기 위해서는 실험에서 얻은 실측값으로 모델 연구가 검증되어야 한다. 또한, 신규 흡수제들의 열역학적 데이터 도출은 이산화탄소 포집 기술을 연구하는 연구자들에게 중요한 자료이며, 흡수제들의 이산화탄소 흡수량과 흡수 온도 그리고 엔탈피의 상관관계 연구도 여전히 요구되고 있는 실정이다. PZ는 많은 연구자들에 의하여 연구되었으나 반응열의 성능 평가가 주로 연구되었고, 2-MPZ는 속도와 흡수능의 관점에서 연구되었으나 반응열에 대한 연구가 부족한 실정이다.

성능 평가 위주가 아닌 흡수제와 반응열의 상관관계를 파악하는 것은 흡수제의 개발 방향을 선택할 수 있는 중요한 척도가 된다. 따라서 본 연구에서는 고리형 아민 흡수제들의 흡수능과 반응열을 측정하였고, 이들 간의 상관관계를 조사하였다. 또한, 반응열에 따른 흡수제와 이산화탄소의 거동을 확인하여 흡수제 연구를 위한 기틀을 마련하고자 하였다.

2. 실험

본 실험의 흡수제는 PZ (piperazine 99.0%, SAMCHUM chemical Co.)와 2-MPZ (2-methylpiperazine 98.0%, ACROS Co.)를 사용하였고, 각 흡수제들은 별도의

정제 없이 탈이온수(distilled water)와 혼합하여 30 wt%로 사용하였다. 반응열은 반응열 측정 장치(differential reaction calorimeter, DRC, SETARAM Co.)를 이용하여 측정하였고, 30 vol.% CO₂ (N₂ balance, Special gas Co.)의 혼합가스를 사용하여 흡수 실험을 실시하였다.

2.1 반응열 측정 장치

반응열 측정 장치의 모식도는 Fig. 1에 나타내었다. 반응열 측정 장치는 250 mL의 이중자켓을 가진 두 개의 반응기로 구성되어 있으며, 두 반응기에 약 150 mL의 흡수제를 채워 실험하였다. 이중자켓의 외부는 물이 순환될 수 있도록 설계하였으며, 이는 반응 동안의 온도를 일정하게 유지하는 역할을 한다. 두 개의 반응기는 이산화탄소와 반응하는 측정 반응기(measurement reactor)와 이산화탄소와 반응하는 동안 온도 차이를 측정할 수 있는 비교 반응기(reference reactor)로 구성되어 있다. 측정 반응기에는 온도 측정 장치, 이산화탄소 분산기, 에너지 탐침기 그리고 교반기가 장착되어 있고, 비교 반응기는 온도 측정 장치와 교반기로 구성되어 있다.

이산화탄소와 흡수제를 반응시키기 전, N₂ (99.999 vol.%) 가스를 이용하여 충분히 잔여가스를 제거시킨 다음에 흡수 반응을 진행하였다. 질소가스를 이용하여 약 30분간 퍼지(purge)한 측정 반응기에 30

vol.%의 이산화탄소 가스를 150 mL/min로 일정하게 주입하였다. 흡수제는 이산화탄소와 반응하는 동안 교반기를 이용하여 250 rpm으로 계속 교반하였다. 반응 후 배출되는 가스는 반응기 내부의 압력이 상승하는 것을 방지하기 위하여 우회로를 이용하여 일부 배출하였고, 나머지 가스는 실시간으로 이산화탄소의 농도를 측정하기 위하여 각 2분마다 GC로 분석하였다.

반응열 측정 장치를 이용한 흡수제의 반응열 계산 과정은 이전 논문에서 확인할 수 있다¹⁴⁾.

3. 결과 및 고찰

3.1 반응시간에 따른 온도 변화

일반적으로 반응열(Q : J)은 식 (1)과 같이 나타낸다.

$$Q = m \times C_p \times (T - T_o) \quad (1)$$

여기에서, m은 반응물의 질량(g), C_p는 열용량(J g⁻¹ K⁻¹)을 나타내고, T(K)와 T_o(K)는 반응 후 온도와 초기 온도를 각각 의미한다. 반응열은 열용량과 온도에 따라 차이를 보이는데, 같은 온도 조건에서 C_p는 상수이기 때문에 질량이 같을 경우 반응열은 온도에 의존한다. 따라서 반응시간에 따른 온도의 변화는 생성된 반응열을 간접적으로 확인할 수 있는 중요한

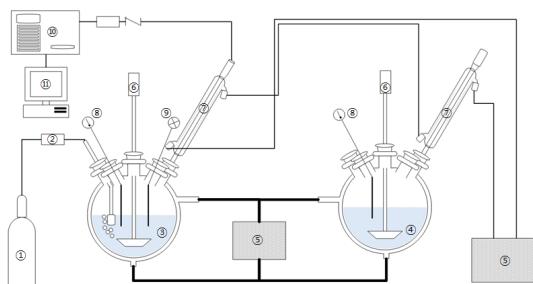


Fig. 1. The differential reaction calorimeter (DRC); ① Mixed gas (30 vol.%/N₂ balance), ② Mass Flow Controller (MFC), ③ Reactor, ④ Reference, ⑤ Water bath, ⑥ Stirrer, ⑦ Liebig-Graham condenser, ⑧ Thermocouple, ⑨ Calibration probe, ⑩ GC-TCD, ⑪ Recorder

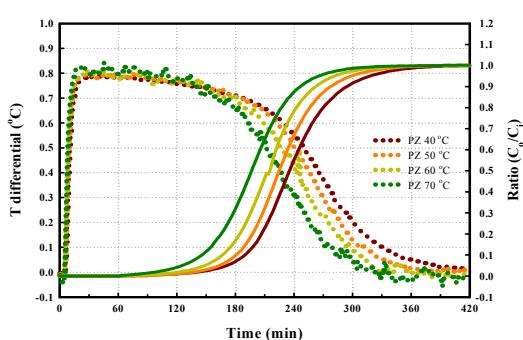


Fig. 2. Break through of PZ for various temperature. Dotted line: T differential, line: CO₂ ratio (output CO₂ concentration/input CO₂ concentration)

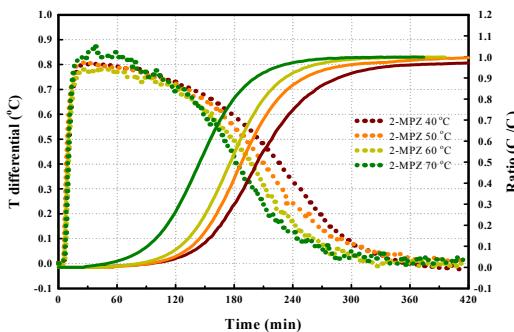


Fig. 3. Break through of 2-MPZ for various temperature. Dotted line: T differential, line: CO_2 ratio (output CO_2 concentration/ input CO_2 concentration)

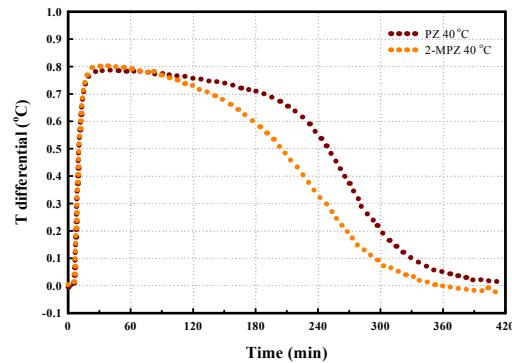


Fig. 4. Change in the heat of reaction of each absorbents at 40°C

척도이다. PZ와 2-MPZ를 이용한 이산화탄소의 반응 시간에 따른 온도를 Fig. 2과 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 2과 Fig. 3에서 ΔT (T differential)가 증가한 후 다시 초기 온도(0°C)로 돌아갈 때까지의 총 시간이 반응시간이다. 30 wt%의 PZ는 이산화탄소와 반응하여 ΔT 가 약 0.8°C까지 상승하였으며, 150분간의 반응 시간 동안 약 0.1°C가 감소하였다. 이후 250분부터 ΔT 가 급격하게 감소하였고, 약 400분에서 반응이 종결되었다. 반응열의 특성은 Fig. 2과 Fig. 3의 CO_2 의 농도 비 결과와 비교하여 더욱 자세히 파악할 수 있다. Fig. 2과 Fig. 3의 우측 y축은 주입가스내 이산화탄소 농도 대비 배출가스내 이산화탄소 농도의 비율(C_o/C_i)이며, 여기에서 C_i 는 반응기로 주입된 CO_2 의 농도(vol%)이며, C_o 는 반응 후 배출된 CO_2 의 농도(vol%)이다. 이 비율이 0.10이 되는 점을 파과점, 0.95가 되는 점을 포화점이라고 판단하였다. 각 흡수제들은 온도가 증가할수록 더 빠르게 파과점에 도달 하며, 포화점에 도달하는 시간 또한 빨라졌다. 이러한 경향은 ΔT 에서 보였던 경향과 동일하였다. 즉, 이산화탄소와 흡수제의 반응은 발열 반응(exothermic reaction)이며, 온도가 증가할수록 반응이 더욱 빨리 종결된다. 본 실험의 특이한 점은 70°C 2-MPZ에서 나타났다. 2-MP는 70°C에서의 초기 구간(0-90 minutes)에서 온도 차이가 40-60°C보다 높았는데, 이는 PZ에서 나타나지 않은 결과였다. 이것은 깁스-헬름홀츠(Gibbs-Helmholtz equation)의 온도와 반응열의

상관관계에서 온도가 높을수록 반응열이 높아지는 특성과 연관이 있다. 즉, 초기 구간에서 온도가 더 높게 나타난 것은 상대적으로 고온에서 2-MPZ의 반응 속도가 더욱 활발하게 일어난 것으로 판단된다.

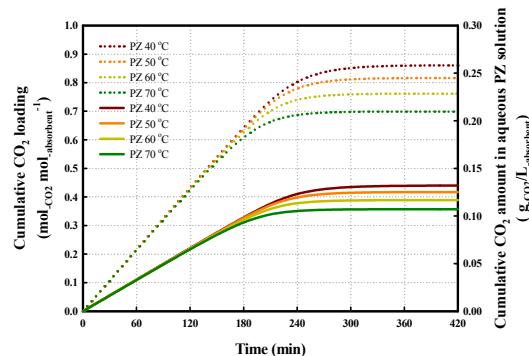
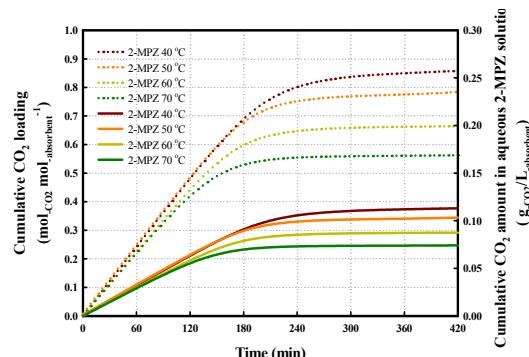
이산화탄소 포집 공정에서 이산화탄소와 흡수제의 반응은 일반적으로 약 40°C에서 반응하므로, 40°C에서 PZ와 2-MPZ의 온도 차이를 Fig. 4에서 비교하여 특성을 확인하였다. 2-MPZ는 약 120분이 지난 후에 반응열이 낮아지는 것이 비하여 PZ는 더 오랜 시간 동안 이산화탄소와 반응한 것을 확인할 수 있다. 이것은 각 흡수제들의 반응속도와 흡수량에 관계가 있으며, 특히 PZ가 이산화탄소와의 반응성이 2-MPZ 보다 더 좋은 것을 알 수 있다.

3.2 CO_2 흡수능 비교

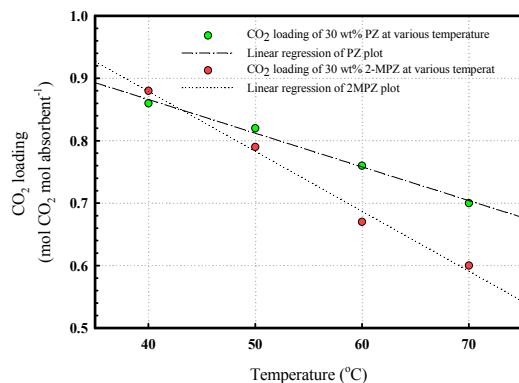
고리형 아민의 누적 CO_2 흡수능은 이상기체 상태 방정식을 이용하여 계산하였고, 그 결과를 Table 1에 나타내었다. 이 누적 CO_2 흡수능은 Fig. 5과 Fig. 6의 시간에 따른 흡수능과 비교하면, 그 차이를 더욱 확연하게 파악할 수 있다. 모든 흡수제의 이산화탄소 흡수능은 온도가 증가할수록 감소하는 경향을 보였는데, 이는 흡수제가 CO_2 를 흡수하는 반응과 탈거하는 반응이 동시에 진행되기 때문이다(일부 역반응 발생). 40°C에서 2-MPZ의 CO_2 흡수량은 0.88 (mol CO_2 /mol absorbent)로 PZ (0.86 mol CO_2 /mol absorb-

Table 1. CO₂ loading of PZ and 2-MPZ at the various temperature

	Temp. (°C)	CO ₂ loading	
		(mol _{CO₂} /mol _{absorbent})	(g _{CO₂} /L _{absorbent})
PZ	40	0.86	131.88
	50	0.82	124.97
	60	0.76	116.70
	70	0.70	107.09
2-MPZ	40	0.88	116.45
	50	0.79	104.00
	60	0.67	87.84
	70	0.60	78.45

**Fig. 5.** Break through of PZ for various temperature. Dotted line: T differential, line: CO₂ ratio (output CO₂ concentration/ input CO₂ concentration)**Fig. 6.** Break through of 2-MPZ for various temperature. Dotted line: T differential, line: CO₂ ratio (output CO₂ concentration/ input CO₂ concentration)

ent)보다 높게 나타났지만, 온도가 증가할수록 2-MPZ의 CO₂ 흡수량(70°C, 0.60 mol CO₂/mol absorbent)이 급격하게 감소하고 PZ의 CO₂ 흡수량(70°C, 0.70 mol CO₂/mol absorbent)은 완만하게 감소하였다. 실험 결

**Fig. 7.** Correlation between absorbent and CO₂ loading with increasing temperature.

과에서 2-MPZ의 온도에 대한 흡수능의 차이가 PZ보다 크다는 것은 고온에서 2-MPZ의 반응성이 낮다는 것을 의미하며, 가역 반응인 흡수제와 CO₂의 관계를 고려해볼 때, 2-MPZ의 재생 특성이 PZ보다 좋을 것으로 예상할 수 있다.

고리형 아민의 흡수능과 온도의 상관관계는 Fig. 7과 같이 표현할 수 있다. 각 흡수제들의 이산화탄소 흡수량은 온도가 증가할수록 감소하는데, 이러한 경향은 아레니우스 식으로 확인할 수 있다. 일반적으로 평형 상수는 식 (2)-(5)와 같이 아레니우스의 법칙의 온도에 의존하며, 온도가 증가하면 정반응의 평형값이 낮아진다. 이는 온도가 증가할수록 흡수능이 낮아지는 본 연구 결과와 잘 일치한다.

$$K = \frac{k}{k^{-1}} \quad (2)$$

$$K = Ae^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (3)$$

$$E_a - E_a' = \Delta H \quad (4)$$

$$K = e^{-\frac{\Delta H}{RT}} \quad (5)$$

각 물질에서 온도와 CO₂ 흡수능에 대한 상관관계를 1차식에 적용하면, PZ의 신뢰도는 R²=0.96, 2-MPZ의 신뢰도는 R²=0.99의 상관관계를 보였다.

이를 통하여, CO_2 흡수는 온도와 매우 밀접한 상관관계가 있음을 알 수 있다.

3.3 온도 및 CO_2 흡수능에 대한 엔탈피의 변화

온도에 대한 엔탈피의 변화는 Fig. 8에 나타내었다. Kim과 Svendsen¹⁵⁾은 MEA 흡수제의 반응열을 연구하였으며, 반응열이 온도에 의존하는 것을 확인하였다. 본 연구에서도 Kim과 Svendsen¹⁵⁾의 연구와 유사하게 온도가 증가할수록 PZ와 2-MPZ의 반응열이 모두 증가하는 것을 확인하였다. 온도와 흡수능의 상관관계에서 반응온도가 증가함에 따라 PZ와

2-MPZ의 흡수능이 일정하게 감소한 것과는 반대로, 반응열에서는 온도가 증가함에 따라 반응열이 일정하게 증가하였다. PZ의 반응열은 온도가 증가함에 따라 2-MPZ보다 서서히 증가하였는데, 이는 반응열이 CO_2 흡수능에 의존하기 때문이다. 이산화탄소와 흡수제 사이의 반응열(ΔH)은 식 (6)과 같이 이산화탄소와 흡수제 사이에서 발열된 열량(Q_{exo})을 CO_2 의 몰 수(mol CO_2)로 나누어 계산한다.

$$\Delta H = \frac{Q_{\text{exo}}}{\text{mol } \text{CO}_2} \quad (6)$$

그러나 2-MPZ는 고온에서 역반응이 활성화되어 CO_2 의 mol 수가 낮아지기 때문에, 반응열이 상대적으로 높게 나타났다. 각 물질에서 온도와 반응열은 1차 상관관계를 가지고 있으며, PZ의 신뢰도는 $R^2=0.99$, 2MPZ의 신뢰도는 $R^2=0.96$ 으로 나타났다.

추가적으로 이산화탄소 흡수량에 대한 반응열의 변화를 확인하였고, 그 상관관계를 Fig. 9과 Fig. 10에 나타냈으며, 각 구간에서의 상세한 값은 Table 2에 나타내었다. 약 0.2 이하의 낮은 loading에서의 PZ는 60-70 사이의 엔탈피($\Delta H : \text{kJ/mol}$)를 보였으며, 반응이 진행됨에 따라 서서히 상승하다가 반응이 종결되는 지점에서 급격하게 증가하는 경향을 보였다. 2-MPZ 또한 PZ와 유사한 거동을 보였으나, 70°C의 2-MPZ는 PZ보다 더욱 급격한 변화폭을 보였다. 이

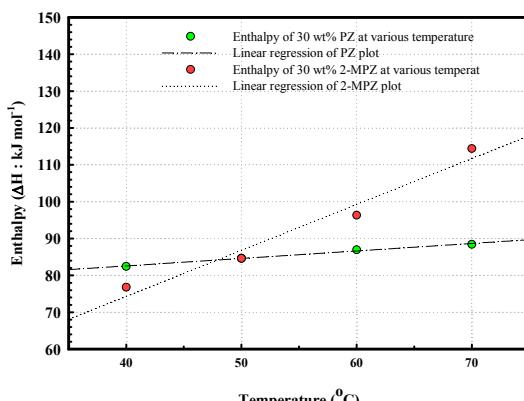


Fig. 8. Correlation between enthalpy and CO_2 loading with increasing temperature.

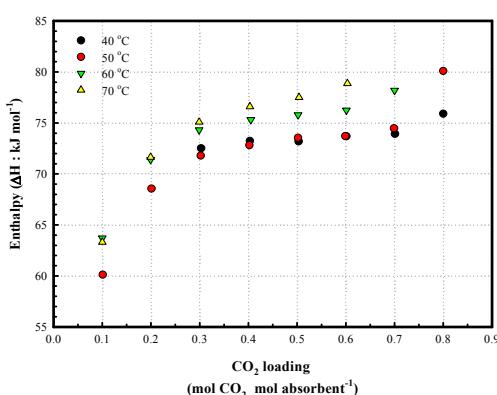


Fig. 9. Integral ΔH of CO_2 with 30 wt% PZ at various temperature

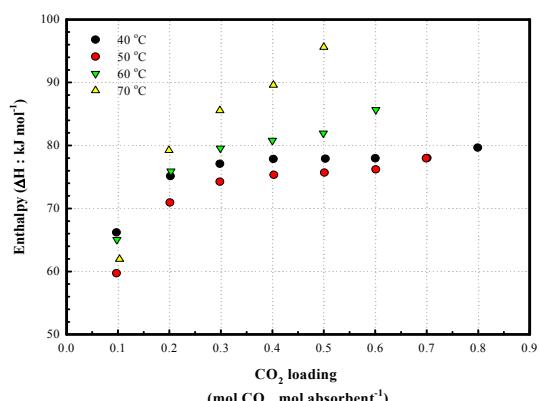


Fig. 10. Integral ΔH of CO_2 with 30 wt% 2-MPZ at various temperature

Table 2. Heat of reaction of CO₂ with 30 wt% PZ and 2-MPZ at various temperature

	Temp. (°C)	CO ₂ loading	Quantity of heat	Enthalpy
		(mol CO ₂ mol absorbent ⁻¹)	(Q : kJ)	(△H : kJ/mol)
PZ (30 wt%)	40	0.10	2.24	42.37
		0.20	5.49	49.15
		0.30	11.48	72.51
		0.40	15.44	73.23
		0.50	19.39	73.19
		0.60	23.15	73.70
		0.70	27.07	73.93
		0.80	31.71	75.90
	50	0.10	3.16	60.12
		0.20	7.21	68.55
		0.30	11.33	71.78
		0.40	15.30	72.80
		0.50	19.27	73.55
		0.60	23.05	73.71
		0.70	27.21	74.47
		0.80	33.46	80.08
2MPZ (30 wt%)	60	0.10	3.32	63.71
		0.20	7.44	71.40
		0.30	11.61	74.31
		0.41	15.93	75.31
		0.50	19.89	75.79
		0.60	23.95	76.25
		0.70	28.61	78.19
		0.10	3.30	63.30
	70	0.20	7.46	71.64
		0.30	11.71	75.08
		0.40	16.13	76.59
		0.50	20.40	77.51
		0.60	24.84	78.87
		0.10	2.88	66.20
		0.20	6.82	75.12
		0.30	10.33	77.09
40	40	0.40	14.05	77.85
		0.50	17.62	77.91
		0.60	21.00	77.97
		0.70	24.56	78.00
		0.80	26.60	79.65

Table 2. Continued

	Temp. (°C)	CO ₂ loading	Quantity of heat	Enthalpy
		(mol CO ₂ mol absorbent ⁻¹)	(Q : kJ)	(△H : kJ/mol)
2MPZ (30 wt%)	50	0.10	2.59	59.72
		0.20	6.42	70.94
		0.30	9.93	74.23
		0.40	13.57	75.34
		0.50	17.05	75.69
		0.60	20.56	76.20
		0.70	24.48	77.96
60	60	0.10	2.85	65.06
		0.20	6.91	75.91
		0.30	10.69	79.57
		0.40	14.52	80.78
		0.50	18.38	81.95
		0.60	23.14	85.67
		0.10	2.88	61.96
70	70	0.20	7.07	79.23
		0.30	11.46	85.55
		0.40	16.19	89.60
		0.50	21.46	95.60

는 온도가 증가할수록 식 (6)의 분모 항인 CO₂ 몰수가 급격하게 감소하면서 발생하는 현상이다. 이 결과로부터, 2-MPZ는 약 70°C 구간에서 흡수제와 CO₂의 역반응이 활발히 진행되는 것을 알 수 있다. 2-MPZ의 특이한 반응성은 메틸기에 의한 입체장애 때문으로 판단할 수 있다. 2-MPZ는 PZ와 다르게 분자 내에 메틸기가 존재하며, 이 메틸기는 이산화탄소와 반응하여 불안정한 카바메이트(carbamate) 종을 형성하고, 바이카보네이트(HCO₃⁻)/카보네이트(CO₃²⁻) 종의 형성을 활성화시킨다¹⁴⁾. 따라서, 탈거에 유리한 바이카보네이트 종들이 약 70°C의 구간에서 활발하게 재생되어 반응열을 높이는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 고리형 아민 흡수제들의 흡수능과 반

응열을 측정하였고, 이들 간의 상관관계를 조사하였다.

PZ와 2-MPZ는 온도가 증가할수록 흡수능이 감소하였고, 그 감소의 형태는 1차 상관관계가 있음을 확인하였다. 반응온도가 증가할수록 반응열도 증가하였으며, 이 또한 1차 상관관계를 보였다.

흡수능에 따른 반응열의 변화를 조사한 결과, 2-MPZ는 약 70°C에서 흡수능이 증가할수록 반응열이 빠르게 증가하였다. 이는 이산화탄소의 흡수 반응과 역반응인 재생반응이 동시에 발생하여 반응열을 증가시키는 것으로 판단된다.

본 연구 결과로부터 각 흡수제의 흡수 온도에서 흡수능과 반응열의 상관관계를 확인하였고, 반응열은 CO₂와 흡수제와의 반응에서 재생에너지를 예상할 수 있는 척도임을 알 수 있었다.

후기

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(No. 20152010201940)의 지원을 받아 수행한 연구 과제이다.

References

- Contribution of working group I, II and III, "Climate Change 2014 Synthesis Report", Intergovernmental Panel on Climate Change, Switzerland, 2014, pp. 1-151.
- P. Friedlingstein, P. M. Andrew, J. Rogelj, G. P. Peters, J. G. Canadell, R. Knutti, G. Luderer, M. R. Raupach, M. Schaeffer, D. P. van Vuuren, and C. Le Quéré, "Persistent growth of CO₂ emissions and implications for reaching climate targets", *Nature Geoscience*, Vol. 7, 2014, pp. 709-715.
- United Nations, "Paris agreement", United Nations, Paris, 2015, pp. 1-27.
- Ministry of Environment, "2030 Greenhouse Gas Reduction Roadmap", Korea, 2018, pp. 1-24.
- R. M. Cuéllar-Franca and A. Azapagic, "Carbon capture, storage and utilisation technologies: A critical analysis and comparison of their life environmental impacts", *Journal of CO₂ Utilization*, Vol. 9, 2015, pp. 82-102.
- T. Nauclér and P. A. Enkvist, "Pathways to a low-carbon economy", *Mckinsey & Company*, 2009, pp. 1-190.
- J. G. Shim, Y. H. Jhon, J. H. Kim, J. H. Lee, I. Y. Lee, K. R. Jang, and J. Kim, "Calculated accessibilities and nucleophilicities of linear and cyclic amines for carbon dioxide absorption reactions", *Bulletin Korean Chemical Society*, Vol. 32, 2011, pp. 2813-2816.
- A. Muhammad, M. I. A. Mutalib, T. Murugesan, and A. Shafeeq, "Thermophysical properties of aqueous piperazine and aqueous (N-Methyldiethanolamine+Piperazine) solutions at temperatures (298.15 to 338.15) K", *Journal of Chemical & Engineering Data*, Vol. 54, 2009, pp. 2317-2321.
- A. Veawab, P. Tontiwachwuthikul, A. Aroonwilas, and A. Chakma, "Performance and cost analysis for CO₂ capture from flue gas streams: absorption and regeneration aspects", *Greenhouse Gas Control Technol.*, Vol. 1, 2003, pp. 127-132.
- C. Alie, L. Backham, E. Croiset, and P. L. Douglas, "Simulation of CO₂ capture using MEA scrubbing: a flow-sheet decomposition method", *Energy Conversion and Management*, Vol. 46, 2005, pp. 475-487.
- K. Robinson, A. McCluskey, and M. I. Attalla, "An ATR-FTIR study on the effect of molecular structural variations on the CO₂ absorption characteristics of heterocyclic amines, Part II", *Chem. Phys. Chem.*, Vol. 13, 2012, pp. 2331-2341.
- K. Robinson, A. McCluskey, and M. I. Attalla, "The effect molecular structural variations has on the CO₂ absorption characteristics of heterocyclic amines", *American Chemical Society*, 2012, Chapter 1, pp. 1-27.
- K. K. Li, A. Cousins, H. Yu, P. Feron, M. Tade, W. Luo, and J. Chen, "Systematic study of aqueous monoethanolamine-based CO₂ capture process: model development and process improvement", *Energy Science & Engineering*, Vol. 4, No. 1, 2016, pp. 23-39.
- J. H. Choi, S. H. Yun, Y. E. Kim, Y. I. Yoon, and S. C. Nam, "The Effect of Functional Group Position of the Piperidine Derivatives on the CO₂ Absorption Characteristics in the (H₂O-Piperidine-CO₂) System", *Korean Chem. Eng. Res.*, Vol. 53, No. 1. 2015, pp. 57-63.
- I. Kim and H. F. Svendsen, "Heat of Absorption of Carbon Dioxide (CO₂) in Monoethanolamine (MEA) and 2-(Aminoethyl)ethanolamine (AEEA) Solutions", *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 46, No. 17, 2007, pp. 5803-5809.