

급수가 다른 아민 혼합에 따른 이산화탄소 흡수 특성

최수현¹, 유정균¹, 박기태¹, 백일현¹, 박소진^{2*}
¹한국에너지기술연구원 온실가스연구단, ²충남대학교 화학공학과

Carbon dioxide absorption characteristics according to amine mixtures with different order

Soo-Hyun Choi¹, Jong-Kyun You¹, Ki-Tae Park¹, Il-Hyun Baek¹ and So-Jin Park^{2*}

¹Greenhouse Gas Research Center, Korea Institute of Energy Research

²Department of Chemical Engineering, Chungnam National University

요약 화력발전소로부터 배출되는 이산화탄소를 분리하기 위하여 급수가 다른 아민을 혼합한 개선 흡수제를 개발하고자 하였다. 급수가 다른 1, 2, 3급 아민을 혼합한 후 이산화탄소 부분압에 따른 이산화탄소 흡수능을 조사하였다. 동일한 압력에서 이산화탄소 흡수능은 3DMA1P 30wt% > 3DMA1P 27wt% + MEA 3wt% > 3DMA1P 27wt% + DEA 3wt% 순으로 나타내었으며, 이는 3급인 3DMA1P에 2급인 DEA보다는 1급인 MEA를 혼합하는 것이 우수한 흡수능을 보이고 있다. 따라서 흡수능이 우수한 3급 아민에 흡수속도를 높이기 위하여 1급 아민을 혼합하는 것이 유리함을 알 수 있다. 최종적으로 준경험 기액 평형모델을 이용하여 실험 결과를 계산한 결과 실험치와 잘 일치하였다.

Abstract The advanced absorbent that used amine mixture with different order were developed to separate carbon dioxide emitted from fossil fuel power plant. The carbon dioxide absorption capacity for mixtures with different amine(primary, secondary and tertiary) were investigated according to CO₂ partial pressure. The carbon dioxide absorption capacity at the same pressure is ordered as 3DMA1P 30wt% > 3DMA1P 27wt% + MEA 3wt% > 3DMA1P 27wt% + DEA 3wt%. The result indicates that mixing tertiary amine with primary amine yields more efficient carbon dioxide absorbent than mixing tertiary with secondary amine does. Finally, the predicted semi-empirical gas-liquid equilibrium model fitted with experimental results.

Key Words : Absorbent, Amine, Carbon dioxide, Separation

1. 서론

지구온난화의 원인으로 간주되는 온실가스로는 이산화탄소, 메탄, 아산화질소, 불화물 등 여러 종류가 있는데 IPCC(International Panel on Climate Change)가 제시한 지구온난화지수(Global Warming Potential:GWP)를 보면 이산화탄소를 1로 보았을 때, 메탄은 21, 아산화질소 310, 프레온 가스는 1,300~23,900에 이른다. 이산화탄소는 지구온난화지수는 낮지만, 규제 가능한 가스로서 전

체 온실가스 배출량의 80%이상을 차지 하고 있기 때문에 가장 중요한 온실가스로 분류되고 있다. 온실가스는 지구가 방출하는 복사열을 흡수하여 지구온난화를 유발하여 건강, 농업, 산림, 수자원, 해안, 생물종 및 자연생태계 등에 변화를 야기시키고 있다.

온실가스의 대량 배출에 의해 발생하는 온난화 현상을 방지하기 위하여 많은 지구안정화 시나리오가 제시되고 있다. 그 중에서 2007년 국제에너지기구(IEA, International Energy Association)에서 발표된 전 세계 에너지 소비구

본 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 (재)한국이산화탄소포집 및 처리연구개발센터의 지원을 받아 수행된 연구임 (지원과제번호:2011-0031969)

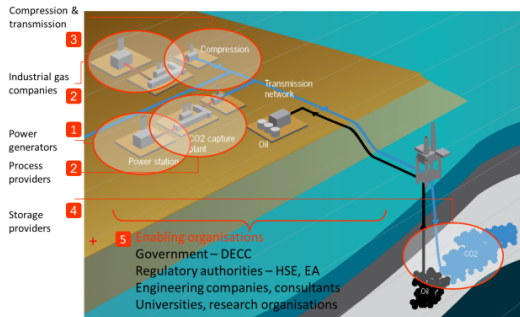
*Corresponding Author : So-Jin Park(Chungnam Univ.)

Tel: +82-42-821-5684 email: sjpark@cnu.ac.kr

Received August 10, 2013 Revised September 4, 2013 Accepted September 6, 2013

조 예측에 따르면, 화석연료에 대한 수요가 여전히 증가할 것으로 전망되고 있다. 화석연료를 대체할 수 있는 신재생에너지 개발이 지구온난화로 인한 기후변화 문제를 풀 수 있는 열쇠인 것은 사실이나, 경제성 있는 신재생에너지가 개발될 때까지 인류의 지속가능발전을 감안한 안정적 화석연료의 사용을 위해서는 이산화탄소 포집 및 저장(CCS, Carbon Capture and Storage) 기술 개발이 절실한 상황이다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이, CCS는 화석연료 사용에 따라 발생하는 이산화탄소를 분리하고 회수하는 포집, 포집된 이산화탄소를 저장소까지 이동하는 수송 및 수송된 이산화탄소를 지중 또는 해양에 주입하여 영구적으로 저장하는 기술로 구분할 수 있다[1]. CCS의 전체 비용 중에서 이산화탄소 포집비용이 75~85%를 차지하고 있어, 저비용 포집 기술이 CCS의 상용화에 매우 중요한 부분임을 알 수 있다.

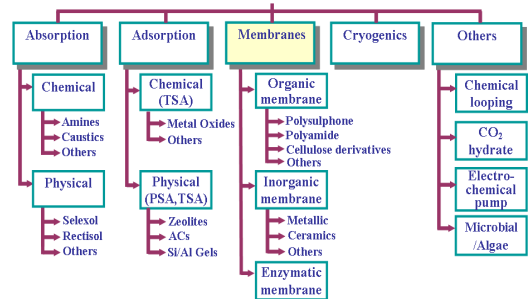


[Fig. 1] Schematic diagram of CCS chain

또한 CCS는 포집 방법에 따라 연소전, 연소후 및 순산소연소로 구분할 수 있다. 연소전 기술은 IGCC 발전과 연계된 고농도 이산화탄소를 분리하고 수소를 생산하는 기술로, 발전 기술의 상용화를 고려할 때 장기적인 활용이 요구된다.

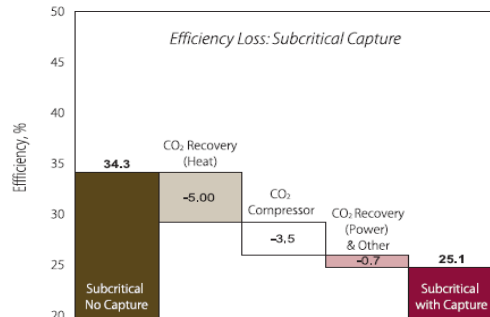
반면에 연소후 기술은 현재 대부분의 발전소에서 적용하고 있는 미분탄화력발전이 연계되어 적용할 수 있으므로 단기적 적용이 가능하여 현재 전 세계적으로 2020년 조기 실용화를 위한 연소후 기술의 실증 연구가 활발히 진행되고 있다. 연소후 기술은 보일러에서 공기를 이용하여 석탄을 연소한 후 배출되는 연소배가스(이산화탄소 농도 3~15%) 중 질소산화물, 먼지 및 황산화물을 제거하고 대기 중으로 방출하기 전에 분리 장치를 이용하여 이산화탄소를 분리하는 방법이다. 이산화탄소 분리 방법으로 Fig. 2 와 같이 흡수, 흡착, 막분리, 저온냉각 등의 기술로 구분할 수 있으며, 대량의 이산화탄소를 처리할 수 있는 방법으로는 현재 상용화 기술로 활용되고 있는

흡수 기술이 이용되고 있다. 흡수기술은 MEA(Mono Ethanol Amine) 흡수액을 이용하는 기술이 대표적으로 이용되고 있는데, 초기에는 MEA 20%의 흡수액을 이용한 ABB Lummus 공정이 이용되었으나, 부식 첨가제의 개발과 더불어 MEA 30%를 흡수액으로 하는 Fluor Daniel 공정이 개발되어 현재 대표적인 기준 아민 공정으로 활용되고 있다[2].



[Fig. 2] CO₂ capture technologies

그러나 대표적으로 사용되고 있는 MEA 흡수액을 이용한 아민 공정은 이산화탄소를 포집하기 위하여 많은 에너지가 소비된다는 단점을 가지고 있으며, 이에 따른 포집 비용 상승은 상용화에 장애가 되고 있다. 현재 MEA 흡수액을 이용한 포집 공정은 1톤의 이산화탄소를 포집하는데 4.0GJ의 흡수제 재생 에너지가 소비되고 있다. 이와 같은 에너지 소비는 Fig. 3 에서 보는 바와 같이 이산화탄소 포집 공정을 포함한 아임계 미분탄 발전(subcritical pulverized coal with post-combustion CO₂ capture)에서는 효율을 기존 발전 34.3%에서 포집공정을 포함시 25.1%로 9.2%까지 저감시키고 있음을 보여주고 있다[3].



[Fig. 3] Parasitic energy requirements for a subcritical pulverized coal unit with post-combustion CO₂ capture

상기와 같이 기존 포집 기술을 적용한 이산화탄소 처리 시 발전 효율의 저하로 상용화 기술로 활용할 경우 많은 어려움을 내포하고 있다. 따라서 이와 같은 단점을 극복하기 위하여 흡수제 및 공정 기술 개발이 수행되어야 한다.

현재 상용화 기술로 활용되고 있는 대표적인 MEA 기반의 아민 기술을 극복하기 위하여 선진국을 중심으로 많은 연구가 수행되고 있다.

대표적인 연구로 일본의 MHI사 입체장에 아민을 기반으로 한 KS 시리즈 흡수제에 대하여 연구를 '90년대 초반부터 수행하고 있으며, 2011년 2월에는 미국의 "Advanced amine plant(KS series)"로써 알라바마 발전소의 James M. Barry Electric Generating Plant에 운전을 시작하여 기존 보다 우수한 성능을 보인다고 보고하고 있다[4].

이와 같이 미국, 일본, 유럽 등 선진국을 중심으로 포집 비용 저감을 위한 흡수제 및 공정 기술 개발에 박차를 가하고 있다. 특히, MEA 기반의 흡수제는 열화(degradation) 및 부식(corrosion), 높은 장치비(CAPEX) 및 조업비(OPEX), 높은 에너지 소비 등으로 인하여 이산화탄소 포집 비용의 상승을 유발하고 있어 이를 극복하기 위한 다양한 방법이 시도되고 있다.

아민 기반의 흡수제를 개선하기 위하여, 아민의 차수에 따라 물리, 화학적 특성이 다를을 이용하여 기존 상용 공정에서 활용되고 있는 아민 흡수제의 한계를 극복하고자 하는 연구가 진행되고 있다. 따라서 본 연구에서도 차수가 다른 아민을 혼합한 흡수제를 제조하여 흡수특성을 파악하였으며, 이를 위해 흡수능 실험과 평형 계산을 통하여 차수가 다른 아민의 혼합 특성을 조사하고자 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 시료

본 연구에서는 차수가 다른 아민을 선정하여 실험을 수행하였으며, 시료는 1급인 MEA (monoethanolamine, 99%, ALDRICH), 2급인 DEA (diethanolamine, 99%, ALDRICH), 3급인 3DMA1P(3-dimethylamino-1-propanol, 99%, ALDRICH)을 사용하였다. 이산화탄소는 순도 99.99%를 사용하였다. 흡수제로 사용된 시료의 특성은 Table 1과 같다.

[Table 1] Properties of used absorbent

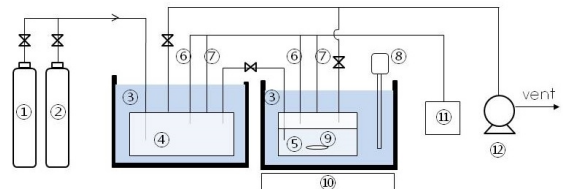
Chemical	Formula	M.W. [g/mol]	m.p. [°C]	b.p. [°C]	Description
3-Dimethyl amino-1-propanol	C ₅ H ₁₃ NO	103.16	-	163	light yellow
Monoethanolamine	C ₂ H ₇ NO	61.08	10	170	colorless
Diethanolamine	C ₄ H ₁₁ NO ₂	105.14	28	217	colorless

2.2 실험장치

본 연구에서 사용된 기액 흡수 평형장치는 Fig. 4와 같이, 가스 주입장치, 가스 예비 저장조, 기액 평형 반응기, 부속 장치로 구분할 수 있다.

가스 주입 장치로는 기액 평형 반응기에 측정가스를 주입하기 위한 가스 저장조로써 이산화탄소 가스 저장조로 구성되어 있으며 부수적으로 압력 조절기가 부착되어 있어 일정한 압력을 가스 예비 저장조에 주입할 수 있다.

가스 예비 저장조는 가스 저장 볼베에서 주입된 가스를 기액 평형 반응기로 주입하기 전에 일정한 온도와 압력을 유지하는 장치로써 저장조내에 온도와 압력 측정기가 부착되어 있으며, 일정한 온도를 유지하기 위하여 수조내에 저장조를 장착하였다.



- 1. Bomb (CO₂)
- 2. Bomb (N₂)
- 3. Water bath
- 4. Reservoir
- 5. Reactor
- 6. Thermocouple
- 7. Pressure transducer
- 8. Immersing Heater
- 9. Magnetic
- 10. Magnetic stirrer
- 11. Data collector
- 12. Vacuum pump

[Fig. 4] Schematic diagram of experimental apparatus.

기액 평형 반응기는 온도와 압력 측정기가 부착된 소형 반응기로써, 반응기를 일정한 온도를 유지하기 위하여 수조에 장치하였으며 온도 제어를 위하여 수조내에 immersing heater를 장착하였다.

부속장치로는 저장조와 반응기의 온도 및 압력을 측정하고 저장하는 데이터 저장소와 실험전에 진공 상태를 유지하기 위하여 진공펌프로 구성되어 있다.

2.3 실험방법

급수가 다른 아민 기반의 흡수제에 대하여 흡수능 평가를 위하여 기액 평형 실험을 수행하였으며, 실험 조건은 Table 2와 같으며 구체적인 실험방법은 다음과 같다.

실험에 앞서 저장조와 흡수 평형기의 부피를 측정하기 위하여 99.99% 질소가스와 물을 이용하였다.

CO₂는 반응기에 주입되기 전 공급기에 채워져 항온 수조에 의해 40℃로 예열된 후 주입하였다.

[Table 2] Operation conditions for VLE test

Feed gas	99.99vol.%CO ₂	
Absorbent	3-Dimethylamino-1-propanol Monoethanolamine, Diethanolamine	
Temperature	CO ₂ reservoir	40℃
	Reactor	40, 60℃
Concentration	3-Dimethylamino-1-propanol	30,27,24,21 wt%
	Monoethanolamine	3,6,9wt%
	Diethanolamine	3,6,9wt%

저장조 및 반응기 내부의 온도 측정에는 T-type의 열전대, 압력측정에는 0.15%의 분해능을 가지는 Sensys사의 PSHFC 모델 (range: 15~150 psig) 압력 센서를 사용하였다. 흡수액의 부피는 100ml로 동일하게 하였으며, 반응기에 흡수액을 넣은 후 이산화탄소를 주입하기 전 진공펌프를 이용하여 반응기 내부의 잔존 기체를 제거하였다. 또한 이산화탄소와 흡수액의 혼합 효과를 최대화하여 물질전달 계면 저항을 최소화하기 위해 기액 흡수 반응이 진행되는 동안에 흡수액을 일정한 속도로 교반시켜 주었다.

흡수액만 있는 흡수 평형기에 저장조에 있는 이산화탄

소를 일정 압력으로 평형기에 주입한다. 반응기 내부의 압력이 변하지 않는 평형 상태에 도달하면 온도 및 평형 압력을 측정하는데, 이때의 평형압력은 실험온도에서의 흡수액 증기압 가정하고 실험 후 최종 평형 압력에서 흡수액 증기압을 빼줌으로써 이산화탄소의 평형압력을 계산하였다.

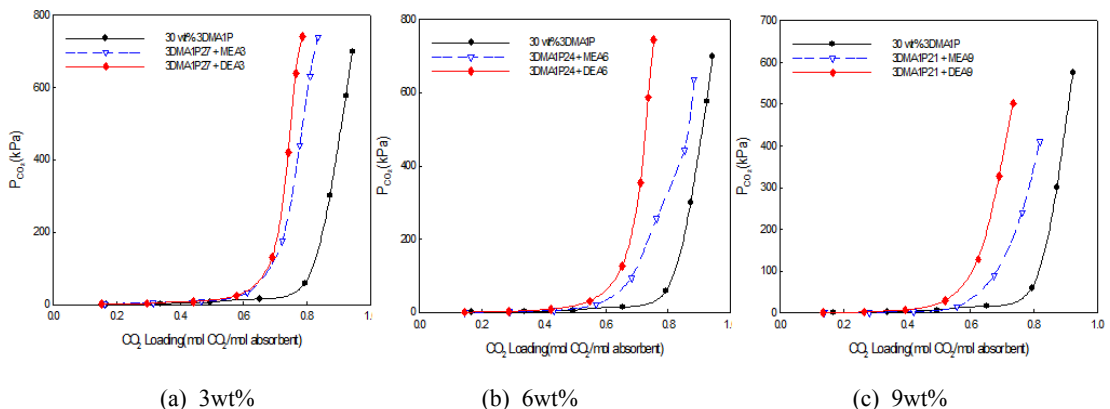
3. 실험 결과 및 고찰

3.1 이산화탄소 흡수량

본 연구에서는 급수가 다른 아민을 혼합하여 흡수제의 성능 변화를 조사하고자 하였다. 따라서 1급, 2급, 3급 아민을 선정하였으며, 1급에 MEA, 2급 DEA, 3급에 3DMA1P로 하였다.

기액 평형 실험을 통하여 급수가 다른 아민을 혼합함으로써 흡수능의 차이를 조사하였다. 조업조건으로 흡수온도를 40℃와 60℃로 선정하고, 아민의 농도를 30wt%로 정하고 3급인 흡수제 3DMA1P에 1, 2급 흡수제인 MEA, DEA를 각각 3wt%, 6wt%, 9wt%로 혼합한 후 이산화탄소 흡수 실험을 수행하였다.

Fig. 5는 40℃에서 3급인 3DMA1P와 3DMA1P에 1급과 2급을 혼합할 경우에 흡수능 변화를 나타내고 있다. 그림에서는 기액 평형압이 변화함에 따라 흡수제의 흡수능의 변화를 보이고 있다. 그림(a)에서는 3DMA1P 30wt%, 3DMA1P 27wt%+MEA 3wt%, 3DMA1P 27wt%+DEA 3wt%에 대한 실험결과로서, 이산화탄소의 압력이 15kPa 이하에서 흡수능이 0.6 mol CO₂/mol absorbent로 높은 흡수능을 나타내고 있다. 이와 같은 흡수능은 화학 흡수제의 전형적인 흡수특성을 나타내고 있



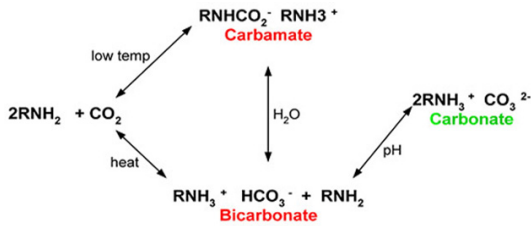
[Fig. 5] CO₂ absorption capacity according to partial pressure at 40℃ ((a),(b),(c): Mixing amount of 1,2 order amine (wt%) in the solution)

으며, 구체적으로 흡수제의 아민기 (-NH_n, n=1,2,3)에 의해 낮은 압력에서도 높은 이산화탄소 흡수능을 나타내고 있음을 알 수 있다[5,6].

동일한 압력에서 흡수능은 3DMA1P 30wt% > 3DMA1P 27wt% + MEA 3wt% > 3DMA1P 27wt% + DEA 3wt% 순으로 나타내고 있다. 이는 3급의 아민이 높은 흡수능을 보이며, 다음으로 1급, 2급 아민을 혼합한 흡수제 순이다.

이와 같은 현상은 Fig. 6의 아민, 이산화탄소, 물의 3 성분계에서 흡수 및 재생 경로[7]를 통해서 잘 알 수 있다.

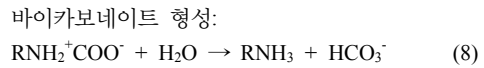
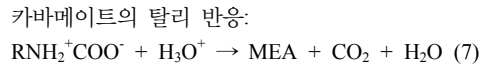
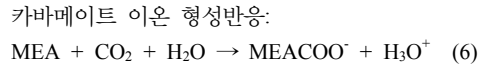
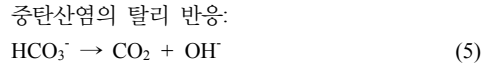
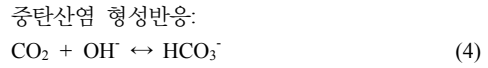
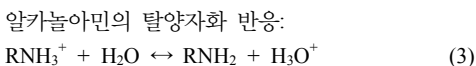
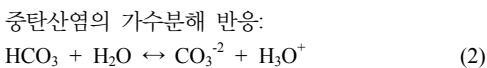
즉, 아민과 이산화탄소가 반응하여 카바메이트(carbamate)를 형성하며 2mol의 아민이 1mol의 이산화탄소를 흡수하고 있다. 다음으로 카바메이트와 물이 반응하여 바이카보네이트(bicarbonate)를 형성하며, 이때 1mol의 아민과 1mol의 이산화탄소가 반응한다. 또한 pH의 영향에 따라 바이카보네이트에서 카보네이트로 전환된다.



[Fig. 6] Scheme of absorption and desorption between CO₂ and amine solution

일반적으로 1, 2급 아민과 이산화탄소 반응은 2가지 주요 메커니즘으로 반응한다[8]. ① 구핵반응(nucleophilic reaction)에 의하여 카바메이트가 형성되며, ② 산-염기 중화(acid-base neutralization)로 바이카보네이트가 형성된다. 이때 카바메이트는 물과의 가수분해(hydrolysis)에 의하여 바이카보네이트와 카보네이트로 전환된다. 3급 아민은 아미노-수소 원자(amino hydrogen atom)가 없기 때문에 카바메이트가 생성되지 않는다.

액상 아민 흡수제를 이용하여 이산화탄소 분리식 (1)~식(8)과 같은 복잡한 반응 시스템을 가지고 있다. 1급과 2급은 주 반응이 식(6)이며 부가적 반응으로 식(8), 3급은 식(4)의 반응이 이루어진다.



흡수제를 이용하여 이산화탄소 분리식 카바메이트와 바이카보네이트가 형성이 되는데, 카바메이트 반응 쪽으로 진행이 많이 될 경우에 흡수속도는 빠르나 흡수량이 낮으며, 바이카보네이트 반응 쪽으로 많이 진행될 경우에는 흡수속도는 늦으나 흡수량은 높다[8].

상기와 같은 메커니즘에 의하여, 3급 아민은 1, 2급 아민보다 높은 흡수능을 가지게 된다. 그러나 3급 아민은 흡수속도가 낮기 때문에 1급 또는 2급 아민을 혼합하여 흡수속도를 높이고 있다. 이와 같이 흡수능과 흡수 속도와의 상관 관계로부터 최적의 아민 급수의 혼합량을 조절함으로써 공정 에너지 소비를 줄일 수 있는 동시에 이산화탄소 포집 비용을 저감할 수 있는 우수한 흡수제를 개발하고자 많은 연구가 수행되고 있다.

본 연구에서도 3급 아민에 1, 2급 아민을 혼합하여 흡수량을 측정한 결과 2급보다는 1급이 우수함을 보이고 있다.

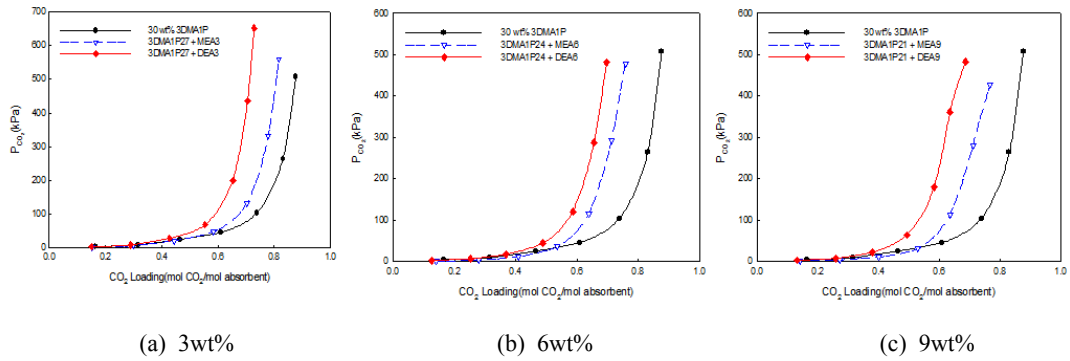
Fig. 5의 (b)와 (c)는 각각 MEA와 DEA를 6wt%, 9wt% 혼합한 흡수제로써, (a)와 유사한 경향을 보이고 있다. 그러나 1, 2급의 아민이 혼합이 증가할수록 흡수능은 감소하고 있음을 보이고 있다.

Fig. 7은 60℃에서 급수가 다른 아민을 혼합에 따른 이산화탄소 흡수능을 보이고 있다. 이산화탄소에 대한 흡수능은 Fig. 5와 유사한 경향을 나타내고 있다. 60℃에서는 40℃보다 동일 압력에서 낮은 흡수능을 보이고 있다. 즉, (a)에서와 같이 1,2급 아민 3wt% 혼합시 0.6 mol CO₂/mol absorbent의 흡수능을 가지려면 40℃에서는 15kPa의 압력에서 가능하지만 60℃에서는 68kPa로 높은 압력에서 가능함을 보이고 있다.

이와 같이 조업 온도가 증가할수록 이산화탄소 흡수능은 감소하고 있음을 보이고 있다.

3.2 흡수평형 계산

다양한 모델을 이용하여 이산화탄소와 흡수제와의 흡수 평형 계산을 수행하여 왔는데, 본 연구에서는 준경험



[Fig. 7] CO₂ absorption capacity according to partial pressure at 60°C ((a),(b),(c): Mixing amount of 1,2 order amine (wt%) in the solution)

기억 평형(semi-empirical gas-liquid eq-uililibrium) 모델[8]을 이용하여 3DMA1P에 대하여 흡수 평형을 계산하였다. 본 모델은 식(9)에서 보는 바와 같이, 이산화탄소의 부분압, 흡수능과 온도와의 상관 관계를 실험 결과로부터 유추하여 도식화하였다.

$$P_{CO_2} = M \cdot Y \cdot 10^{(c+dY-e/T-b \cdot \log((1-Y)/Y))} \quad (9)$$

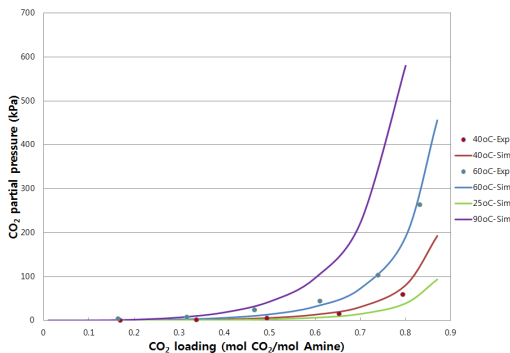
P[atm] : total pressure

M[kmol/m³] : amine molarity

Y[mol CO₂/mol absorbent] : loading

T[K] : temperature

b,c,d,e : constants determined experimentally



[Fig. 8] Equilibrium model curves(lines) compared with experimental data for 3DMA1P

Fig. 8은 3DMA1P 흡수제의 40°C와 60°C에서 식(9)의 모델을 이용하여 계산한 결과와 실험 결과를 비교하여 나타내었다. 식(9)에서 도출된 파라미터 값은 $b=1.53$, $c=6.856$, $d=1.27 \cdot e^{-12}$, $e=1,950$ 이었다.

그림에서 보면 40°C와 60°C에서 실험 결과와 식(9) 모델을 이용한 계산치와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 이와 같은 모델을 이용하여 25°C와 90°C에서 압력에 따른 흡수능을 계산하여 그림에 나타내었다.

향후 이와 같은 모델은 간단하게 아민 흡수제의 압력과 온도에 따른 이산화탄소 흡수능 계산 방법으로 유용하게 이용할 것으로 예상된다.

4. 결론

차수가 다른 아민 흡수제인 1급 MEA, 2급 DEA 및 3급 3DMA1P를 이용하여 혼합 분율에 따른 이산화탄소 흡수 특성을 조사하였으며, 3DMA1P 흡수제에 대한 흡수 평형 계산을 수행하였다.

3급에 1, 2급 아민 혼합에 따른 이산화탄소 흡수능은 3급이 흡수량이 가장 높으며, 1, 2급을 혼합함에 따라 흡수량이 낮았다. 이는 3급 아민은 산-염기 중화 반응으로 바이카보네이트가 형성되어 흡수량이 높으며, 1, 2급은 구핵반응으로 카바메이트가 형성되므로 3급보다 흡수량이 낮다.

차수가 다른 아민을 혼합한 후 동일 압력에서 이산화탄소 흡수능을 측정된 결과, 3DMA1P 30wt% > 3DMA1P 27wt% + MEA 3wt% > 3DMA1P 27wt% + DEA 3wt% 순으로 나타내었다. 흡수능은 3급 3DMA1P에 2급 DEA보다 1급 MEA를 혼합하는 것이 우수하였다. 따라서 흡수능이 우수한 3급 아민에 흡수속도를 높이기 위하여 1급 아민을 혼합하는 것이 유리함을 알 수 있다.

최종적으로 3DMA1P 흡수제에 대한 준경험 기억 평형모델을 이용하여 계산한 결과 계산치와 실험 결과가 잘 일치하였다.

References

- [1] <http://www.psenterprise.com/power/ccs/challenges.html>
- [2] Baek, Il-Hyun, "Development of Precombustion CO₂ Capture Technology using Ionic Liquid", KIER Report, 2012
- [3] Massachusetts Institute of Technology, "The Future of Coal", ISBN 978-0-615-14092-6, 2007
- [4] Koji Kadono, Asao Suzuki, Masaki Iijima, Tsuyoshi Ohishi, Hiroshi Tanaka, Takuya Hirata, Masami Kondo, "New Energy Efficient Processes and Newly Developed Absorbents for Flue Gas CO₂ Capture", Energy Procedia, 2012
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.055>
- [5] Prachi Singh, John P.M. Niederer, Geert F. Versteeg, "Structure and activity relationships for amine based CO₂ absorbents -I", International Journal of Greenhouse Gas Control, 5-10, 2007
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1750-5836\(07\)00015-1](http://dx.doi.org/10.1016/S1750-5836(07)00015-1)
- [6] Prachi Singha, Geert F. Versteeg, "Structure and activity relationships for CO₂ regeneration from aqueous amine-based absorbents", Process Safety and Environment Protection, 86, 347 - 359, 2008
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2008.03.005>
- [7] Robert J. Hook, "An Investigation of Some Sterically Hindered Amines as Potential Carbon Dioxide Scrubbing Compounds", Ind. Eng. Chem. Res. 36, 1779-1790, 1997
DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/ie9605589>
- [8] Qi Yang, Mark Bown, Abdelselam Ali, Dave Winkler, Graeme Puxty and Moetaz Attalla, "A Carbon-13 NMR Study of Carbon Dioxide Absorption and Desorption with Aqueous Amine Solutions", Energy Procedia 1, 955-962, 2009
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2009.01.127>
- [9] Olav Erga and Havard Lidal, "Equilibrium Model for CO₂ Absorption in an Aqueous Solution of 2-Amino-2-methyl-1-propanol", Chem. Eng. Technol. 14, 394-398, 1991
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/ceat.270140606>

최 수 현(Soo-Hyun Choi)

[정회원]



- 1997년 8월 : 충남대학교 보건대학원(보건학 석사)
- 2013년 2월 : 충남대학교 공과대학원 화학공학과 (석사수료)
- 1986년 10월 ~ 현재 : 한국에너지기술연구원 선임기술원

<관심분야>
에너지환경, 온실가스

유 정 균(Jong-Kyun You)

[정회원]



- 1999년 2월 : KAIST 생명화공과 (공학석사)
- 2008년 8월 : KAIST 생명화공과 (공학박사)
- 2008년 8월 ~ 2012년 1월 : 두산중공업 기술연구원 (선임연구원)
- 2012년 2월 ~ 현재 : 한국에너지기술연구원 (선임연구원)

<관심분야>
분리기술, 물질전달, 이산화탄소포집 및 저장, 온실가스

박 기 태(Ki-Tae Park)

[정회원]



- 2011년 2월 : 고려대학교 화공생명공학과 (공학박사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 한국에너지기술연구원 온실가스연구단 선임연구원

<관심분야>
이산화탄소 포집 및 전환, 분리소재

백 일 현(Il-Hyun Baek)

[정회원]



- 1988년 2월 : 충북대학교 화학공학
학과 (공학석사)
- 1994년 2월 : 충북대학교 화학공학
학과 (공학박사)
- 1988년 3월 ~ 현재 : 한국에너지
기술연구원 책임연구원

<관심분야>

이산화탄소포집 및 저장, 온실가스, 에너지기술

박 소 진(So-Jin Park)

[정회원]



- 1981년 8월 : 충남대학교 화학공학
학과 (공학석사)
- 1987년 8월 : 충남대학교 화학공학
학과 (공학박사)
- 1984년 10월 ~ 1986년 4월 : 독일
훼스트(주), 도르트문트대 연구원
- 1989년 10월 ~ 현재 : 충남대학교
화학공학과 교수

<관심분야>

분리기술, 열역학 물성 측정 및 tool 개발