

암모니아수 흡수제를 사용하는 분무탑의 이산화탄소 포집 기본특성에 관한 실험적 연구

임영복* · 최문경* · 이진원*†

* 포항공과대학교 기계공학과

Experimental Study on the Characteristics of CO₂ Capture with Spray Towers Using Ammonia Solution

Youngbok Lim*, Munkyoung Choi* and Jinwon Lee*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Pohang Univ. of Science and Technology,

(Received August 28, 2013 ; Revised November 4, 2013 ; Accepted November 30, 2013)

Key Words: Spray Tower(분무탑), Solvent(흡수제), CO₂ Capture(이산화탄소 포집), CO₂ Saturation(이산화탄소 포화도), Regeneration Energy(재생 에너지), NH₃ to CO₂ Flowrate Ratio(암모니아 이산화탄소 유량비)

초록: 단일 노즐을 이용하는 CO₂ 포집용 분무탑의 기본적 특성을 실험적으로 구하였다. 다양한 조건 - 주입 기체 유량 및 농도, 주입 흡수제 유량 및 농도 등 - 에서 얻어진 포집성능을 포집효율 뿐만 아니라 재생에너지의 주요 결정요인인 CO₂ 포화도 측면에서 검토하였다. 다양한 조건들에서의 포집효율 변화는 흡수제(NH₃)와 CO₂의 상대적 유량비만의 단조증가함수로 잘 표현되었다. 포집후의 흡수제의 CO₂ 포화도 또한 NH₃/CO₂ 유량비만의 함수로 잘 정리가 되었으나, 포집효율과는 다르게 단조감소함수를 보였으며, 특히 CO₂ 포화도와 포집효율과의 상관관계를 보면 기존의 모든 연구들에서 포집효율이 증가할수록 CO₂ 포화도가 감소하였다. CO₂ 포화도는 낮은 포집효율 조건에서 최대 20-25% 수준이었으나, 90% 이상의 고효율에서는 10% 미만으로 매우 낮았다. 이는 높은 포집효율을 위해 사용되는 흡수제의 양이 과도하며, 다시 재생에너지가 과도하게 필요함을 의미한다.

Abstract: Experiments were conducted to identify basic characteristics of CO₂ capture using a spray tower with a single nozzle. Results were evaluated in terms of CO₂ saturation which is the main determining factor of regeneration energy, and capture efficiency under various operating conditions. Changes in the capture efficiency under various conditions are well expressed as a monotone increasing function of the relative solvent (NH₃):CO₂ flow rate. Although changes in CO₂ saturation are also well described as a function of the NH₃/CO₂ flow rate ratio, these are expressed as a monotone decreasing function, in contrast with the increasing function of CO₂ efficiency. In recent research on the relationship between CO₂ saturation and capture efficiency, CO₂ saturation was found to decrease when capture efficiency increased. In conclusion, the results show that the amount of solvent used for achieving high capture efficiencies is excessive, as is the amount of regeneration energy needed.

- 기호설명 -

η : 포집효율 (%)

$\dot{m}_{CO_2,i}$: 흡수탑 입구 이산화탄소 유량 (kg/s)

$\dot{m}_{CO_2,o}$: 흡수탑 출구 이산화탄소 유량 (kg/s)

ε : 흡수제의 이산화탄소 포화도 (%)

Y_{CO_2} : 흡수제의 이산화탄소 질량분율

$Y_{CO_2,0}$: 흡수제의 최대 흡수 이산화탄소 질량분율

Q_G : 주입 기체 유량 (l/min)

C_G : 주입 기체 농도 (vol%)

Q_L : 주입 흡수제 유량 (l/min)

C_L : 주입 흡수제 농도 (wt%)

† Corresponding Author, jwlee@postech.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서 론

온실가스 중에서 이산화탄소는 질량당 온실효과는 메탄, 염화불화탄소(CFC, 프레온가스) 등 보다 작지만 대기 중에 존재하는 막대한 양 때문에 지구온난화에 60% 정도의 영향을 미친다고 알려져 있다.⁽¹⁾ 현재 산업 시설의 배가스로부터 CO₂를 포집할 수 있는 기술들로는 기체 흡수법(absorption), 흡착법(Adsorption), 저온분리법(cryogenic separation), 막분리법(Membrane separation) 등이 있으며, 이 중 알카놀아민(alkanolamine) 수용액을 이용한 기체흡수법이 현재로서는 CO₂ 포집을 위해 사용할 수 있는 가장 잘 완성된 기술이기는 하지만,⁽²⁾ 실제적인 적용을 위한 포집비용이 여전히 상당히 비싼 것이 문제이다.⁽³⁾

흡수식 CO₂ 포집에서 포집비용은 흡수기와 재생기에 대한 설치비용과 운전비용으로 구성되는데, 장치의 제작비용과 함께 흡수제의 사용비용, 그리고 재생시에 소모되는 재생에너지가 가장 중요한 요소이다. CO₂ 흡수를 위해 주로 사용되는 흡수제는 알카놀아민 계열인데, 이러한 흡수제는 높은 재생온도(~140 °C)와 열화, 부식 그리고 상대적으로 높은 흡수제 비용 및 낮은 CO₂ 흡수용량 등의 문제점들을 가지고 있다. 최근에는 낮은 재생에너지 비용과 화학적 안정성 및 높은 CO₂ 흡수용량 등으로 인해 암모니아(Ammonia) 수용액을 사용하기도 한다.⁽⁴⁾

기-액 접촉 반응이 일어나는 흡수탑은 크게 두 가지 형태로 분류할 수 있는데, 하나는 흡수탑 내부에 흡수반응에 직접 관여하지 않는 물질인 충전물(Packing material)로 채우고 그 사이를 흡수제와 CO₂ 혼합기체가 흐르도록 하는 충전탑(Packed tower)이고, 다른 하나는 내부에 다른 물질이 전혀 없이 흡수반응에 직접 관여하는 흡수제와 CO₂ 함유기체만을 공급하는 분무탑(Spray tower)이다. 충전탑을 이용한 CO₂ 흡수에 대해서는 다양한 형태의 흡수제와 충전재를 이용한 연구가 많이 발표되었고,⁽⁵⁻¹²⁾ 현재로서는 가장 안정된 성능특성을 보이지만, 높은 기체 압력강하, 흡수제의 채널링(Channeling) 및 범람(Flooding), 높은 기체 온도에 의한 충전재의 분열, 충전재료의 퇴적, 고체가 풍부한 기체에 의한 빈 공간의 막힘 등 다양한 문제점이 상존하며, 대용량장치의 설치 및 운전이 소요되는 비용이 매우 높다.

반면에 분무탑은 충진을 위한 공간 및 충전재가 필요하지 않기 때문에, 낮은 기체 압력강하, 넓은 범위의 기-액 부하도>Loading ratio), 단순한 장치

구성, 낮은 장치설치 및 유지 비용 등의 상대적인 장점이 있다.^(13,14) CO₂ 제거에 있어서 분무탑을 이용한 연구는 대부분 흡수제의 성능 향상에 관한 내용이었으며,⁽¹⁴⁻¹⁷⁾ 분무탑 내부의 저농도(~3 vol%) 기체 유동장의 변화에 따른 물질전달 특성의 변화에 관한 연구⁽¹⁸⁾와 작동 조건에 따른 포집 효율 특성을 확인한 연구⁽²⁰⁾ 등이 일부 있었다. 그러나 화력발전소 등의 배가스인 고농도(~20 vol%) CO₂의 포집에 대한 연구는 상대적으로 적어 세부적인 특성이 아직 잘 확립되어 있지 못하다.

본 연구는 분무탑을 이용한 고농도 CO₂ 포집의 기본특성을 확인하기 위한 실험적 연구이다. 사용된 흡수제는 암모니아수이며, 분무 생성을 위해 단일 노즐을 사용하였다. 암모니아수를 이용한 CO₂ 포집반응은 여러 가지 중간 반응과 중간산물들이 연결된 복잡한 반응구조이지만, 최종적으로는 식 (1)과 같이 중탄산암모늄(Ammonium bicarbonate, NH₄HCO₃)이 생성된다.⁽¹⁹⁾

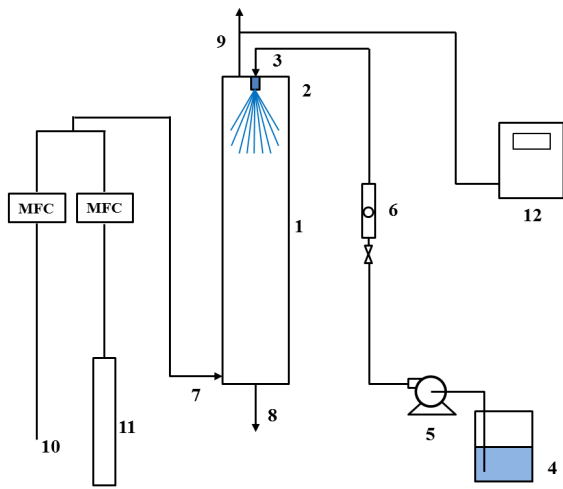


분무탑의 성능은 일차적으로 CO₂ 포집효율이 중요하지만, 포집효율은 CO₂ 대비 흡수제의 유량과 농도를 높이면 항상 증가시킬 수 있는 것이므로, 실질적인 기술의 수준은 가급적 적은 양의 흡수제를 사용하여 높은 포집효율을 얻는 것이며, 이런 측면에서 장치의 실질적 포집성능은 포집후의 흡수제의 CO₂ 포화정도가 나타낸다고 볼 수 있다. 동일한 기체처리조건 및 포집효율에서 흡수제의 포집후 CO₂ 포화도가 높으면 흡수제의 사용량을 줄일 수 있고 이는 바로 재생에너지를 줄일 수 있음을 의미하며, 결과적으로 전체적인 경제성이 향상됨을 의미한다.

이처럼 흡수제의 포화정도가 경제성에의 가장 직접적인 요소임에도 불구하고 이제까지의 모든 연구들에서는 포집효율만을 제시하고 흡수제의 포화도에 대한 보고는 거의 없었다. 따라서 본 연구에서는 분무탑의 포집효율과 포화도를 동시에 고려한 성능특성을 파악하고자 하였다. 배가스의 유량 및 CO₂ 농도, 흡수제의 유량 및 농도 등을 포함한 공정 파라미터의 영향을 나타낼 수 있는 다양한 조건하에서 포집성능이 실험적으로 평가되었다.

2. 실험 장치 구성

분무탑을 이용한 이산화탄소 포집에 관한 실험



1. Spray tower, 2. Nozzle, 3. Solvent inlet, 4. Solvent tank, 5. Pump
6. Liquid rotameter, 7. Gas inlet, 8. Liquid outlet, 9. Gas outlet,
10. Compressed air supply, 11. CO₂ cylinder, 12. CO₂ analyser

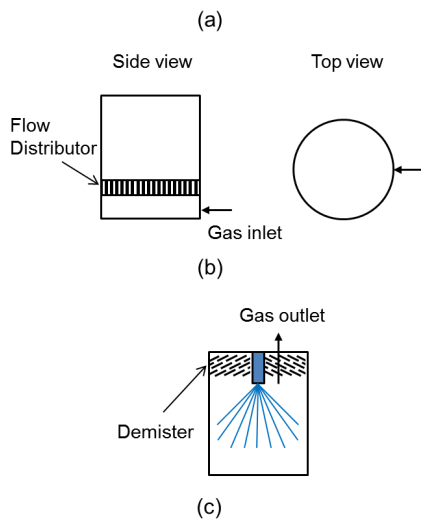


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental set-up: (a) overall layout; (b) gas distributor; (c) demister

은 실험실 규모 반응기(Fig. 1(a))에서 수행되었다. 흡수탑은 분사되는 흡수제 액적의 직관적인 관찰을 위해 아크릴재질로 제작하였으며, 공기와 CO₂의 혼합기체는 흡수탑의 하단으로 주입시키고, 흡수제인 암모니아수는 상단에서 노즐을 이용하여 분무시켜 두 유동이 대향류를 형성하도록 하였다. 흡수제 분사에 사용되는 노즐은 압력식 스웰 분무기(TGO.3, Teejet Spraying Systems)로서, 오리피스 직경은 0.5 mm 이고 분사각은 50-61° 로 원추형 분무를 형성한다. 흡수제는 원심 펌프를 통해 스프레이 노즐로 공급되고 유량은 보정된 면적 유량계로 측정된다. 주입하는 혼합기체는 MFC(Mass flow controller)를 통해서 제어되고, 주입관을 길게 하여 충분히 혼합된 후 흡수탑에 주입되도록 하였

Table 1 Characteristic conditions of the experimental system

Geometry	Tower diameter (m)	0.2
	Tower height (m)	1.0
Operating conditions	Gas flow rate (l/min)	25 – 150
	Gas concentration (vol%)	6.6 – 37.5
	Liquid flow rate (l/min)	0.20 – 0.65
	Liquid concentration (wt%)	5 – 20
	Temperature (°C)	15

다. 흡수탑 내부로 주입되는 혼합기체가 흡수탑 내부에서 균일유동(Uniform flow)을 형성하도록 하기 위하여 하단에 유동 분배기(Flow distributor)를 설치하였으며(Fig. 1(b)), 상단에는 데미스터(Demister, polypropylene type)를 설치함으로써(Fig. 1(c)) 분사 액적과 반대방향으로 움직이는 기체 유동에 팔려 나가는 액적을 방지하였다.

실험이 진행되는 동안, 기체의 입구와 출구에서 적외선 CO₂ 분석기(IR600, Hitech Instruments)를 이용하여 기체 중 CO₂ 농도를 측정하였다. 적외선 CO₂ 분석기의 측정 오차는 2%이고, 각 실험마다 결과의 재현성을 검증하기 위해 동일한 실험을 3회 이상 진행하였다.

3. 실험 조건

분무탑을 이용한 CO₂ 포집의 기본적인 특성을 파악하기 위해 Table 1 과 같은 조건으로 실험이 수행되었다. 주입 기체의 유량은 25-150 l/min 이며, 이때의 흡수탑 내부에서의 평균 속도는 0.0196-0.0796 m/s 로 해당 조건에서 Reynolds 수는 167-1000 이다. 전체 시스템의 온도는 15°C 로 일정하게 유지하여 온도 변화에 의한 성능의 변화는 생기지 않도록 하였다.

분무탑 흡수성능의 평가 지표로는 주입 기체 유량, 주입 흡수제 유량 등의 조작변수 대비 포집효

율과 흡수제의 CO₂ 포화도를 사용하였으며, 포집 효율과 CO₂ 포화도는 각각 식 (2) 및 식 (3)과 같이 구하였다. 흡수제의 CO₂ 질량분율은 장치 입출구에서 측정된 배출기체중 CO₂ 농도로부터 CO₂ 포집량을 계산하고 여기에 흡수제 유량을 고려하여 계산으로 구하였다.

$$\eta(\%) = \frac{\dot{m}_{CO_2,i} - \dot{m}_{CO_2,o}}{\dot{m}_{CO_2,i}} \times 100 \quad (2)$$

$$\varepsilon(\%) = \frac{Y_{CO_2}}{Y_{CO_2,0}} \times 100 \quad (3)$$

4. 실험 결과 및 고찰

다양한 작동 조건에서의 흡수탑의 CO₂ 포집의 기본특성을 파악하기 위해 각 실험 조건에 따른 포집성능을 포집효율 및 흡수제의 CO₂ 포화도의 관점에서 확인하였다. 그리고 타 연구와의 비교를 통해 분무탑을 이용한 CO₂ 포집장치의 기본특성을 고찰하였다.

4.1 작동 조건에 따른 포집효율

CO₂ 흡수장치의 기본적인 성능지표인 포집효율을 주입 기체와 주입 흡수제의 작동 조건에 따라 실험적으로 측정하였다. Fig. 2는 작동 조건에 따른 포집 효율을 나타낸 것으로써, 주입 기체의 유량 및 농도가 증가할 때 포집효율은 감소하고, 주입 흡수제의 유량 및 농도가 증가할수록 포집효율은 증가한다. 이러한 정성적 특성은 기존 연구들⁽¹⁹⁻²¹⁾과 잘 일치하는 것이며, 더 나아가 정량적인 성능지표들도 유사한 범위에 있음을 확인할 수 있다.

이러한 기본특성은 다음과 같이 설명될 수 있다. 주입 기체 유량이 증가하면 혼합기체의 속도가 증가하면서 CO₂와 흡수제 액적간의 접촉시간이 감소하여 포집효율이 낮아지는 것이며, 주입 기체의 농도가 증가하면 초기에는 흡수제 액적으로의 CO₂ flux가 증가하지만 액적 내표면에서의 암모니아 농도를 급속히 저하시켜(화학반응속도가 흡수속도보다 훨씬 느리므로) 결국 긴 시간에서는 액적으로의 CO₂ flux를 감소시킴으로써 포집효율이 낮아지는 것이다. 주입 흡수제 유량의 증가는 주입되는 액적의 양을 증가시킴으로써, 혼합기체와 반응하는 단위 체적당 계면적을 증가시켜 포집효율을 증가시키고, 흡수제 농도의 증가는 기/액 접촉면으로 확산되어 CO₂와 반응하는 암모니아 양의 증가를 의미하며, 이는 흡수제의 CO₂ 흡수율을 증가시켜 포집효율을 증가시키는 것으로 볼 수

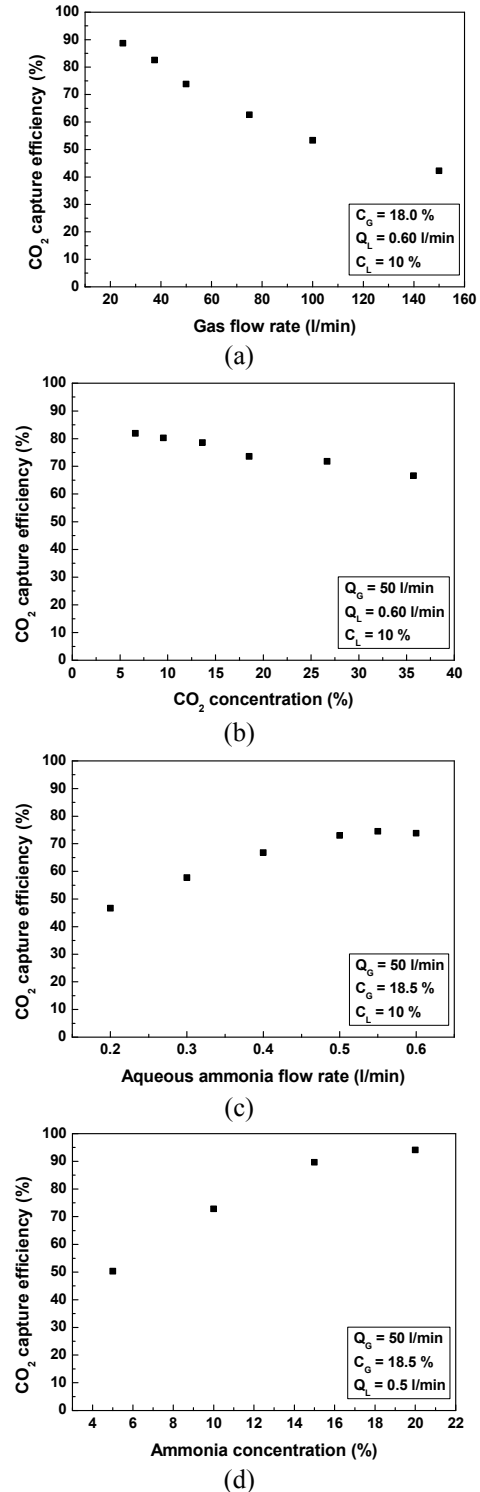


Fig. 2 Effect of the operating conditions on the CO₂ capture efficiency: (a) gas flow rate; (b) CO₂ concentration; (c) aqueous ammonia flow rate; (d) ammonia concentration.

있다.

여러 작동 조건에 따른 포집효율의 결과를 비교할 수 있는 대표적인 성능평가가 조건이 필요한데,

암모니아를 이용한 CO₂ 포집에서는 반응속도가 느린 화학반응이 결정적 요소이고, 화학반응속도는 액적 내의 암모니아 대 CO₂의 농도비가 주요 변수이므로, 액적 내외의 CO₂ 농도가 비례한다는 Henry의 법칙을 상기하면, 포집성능을 결정하는 일반적 변수로서 순 암모니아와 순 CO₂의 질량유량비(kg NH₃/kg CO₂)가 적절한 대표변수일 것으로 유추된다.

이와 같은 논리에 따라, 포집효율을 암모니아와 이산화탄소의 질량비의 함수로 나타내 보면 Fig. 3과 같으며, 결과에서 알 수 있듯이 암모니아와 이산화탄소의 질량비에 따라 포집효율이 다양한 작동조건에서 비슷한 값을 갖는 것을 알 수 있으며, 이는 암모니아와 이산화탄소의 질량비가 다양한 작동조건에서의 대표변수로 이용이 가능함을 보여준다. 대표변수인 암모니아와 이산화탄소 질량비가 증가할수록 포집효율은 증가하는 것을 알 수 있으며, 그 값이 8 이상일 때는 더 이상의 성능향상의 효과는 없는 것을 알 수 있다. 특정 값 이상에서 더 이상의 포집효율의 증가가 없는 것은 흡수제의 흡수능과 흡수탑의 기/액 접촉의 구조적 한계 때문으로 보인다.

4.2 작동 조건에 따른 CO₂ 포화도

포집성능을 나타내는 또 하나의 성능지표로써 흡수제의 CO₂ 포화도를 들 수 있는데, CO₂ 포화도는 동일한 포집효율일 경우 이 값에 의해 흡수제의 사용량이 결정되기 때문에 포집과정 뿐 만 아니라 재생과정에서의 에너지 비용에도 직접적인 영향을 미치는 지표이다. 주입 기체와 주입 흡수제의 작동 조건에 따른 흡수제의 CO₂ 포화도의 변화를 실험적으로 측정하였다. Fig. 4는 작동 조

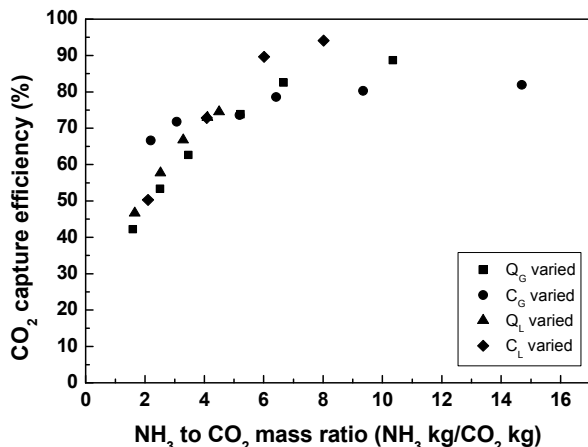


Fig. 3 Effect of the ammonia to carbon dioxide mass ratio on the CO₂ capture efficiency

건에 따른 CO₂ 포화도를 나타낸 것으로써, 주입 기체의 유량 및 농도가 증가할 때의 CO₂ 포화도는 증가하고, 주입 흡수제의 유량 및 농도가 증가할수록 CO₂ 포화도는 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 기체의 유량이나 농도가 증가하면 포집효율이 감소하기는 하지만 효율의 감소가 유량이나 농도의 증가분보다는 작아서 절대적인 CO₂ 포집량은 더 커지므로 흡수제의 CO₂ 포화도가 증가하는 것이고, 흡수제의 유량이나 농도가 증가하면, 반대로, 포집효율이 증가하기는 하지만 효율 또는 절대적인 CO₂ 포집량의 증가가 흡수제 유량이나 농도의 증가분보다는 작아서 흡수제의 CO₂ 포화도가 감소하는 것이다.

흡수제의 CO₂ 포화도를 성능의 대표변수인 암모니아와 이산화탄소의 질량비에 따라 나타내면 Fig. 5와 같다. 결과에서 알 수 있듯이 CO₂의 포화도 또한 모든 작동 조건에서 암모니아와 이산화탄소의 질량비에 따라 비슷한 값을 가지며, 그 값이 증가할수록 CO₂의 포화도는 감소하는 경향을 보이는데 이는 포집효율과는 반대의 경향이다. 현재 해당 실험의 작동조건에서 흡수제의 CO₂ 포화도는 이론적인 최대흡수 가능량의 20%를 넘지 못하는 것을 알 수 있으며, 이러한 결과는 다시 현재의 분무탑을 이용한 CO₂ 포집이 흡수제를 효율적으로 사용하지 못하고 있음을 의미한다.

4.3 포집효율과 CO₂ 포화도

이산화탄소 포집을 위한 흡수탑의 성능향상을 위해서는 포집효율을 증가시키는 것이 가장 큰 요소라고 할 수 있다. 포집효율을 증가시키기 위해서는 흡수제가 CO₂를 최대한 많이 흡수해야 하는데, 위의 실험결과를 포집효율과 포화도의 상관관계로 재구성해 보면, 포집효율을 증가시키는 작동조건하에서 CO₂의 포화도가 오히려 감소하는 것을 알 수 있다(Fig. 6(a)). 이러한 경향은 분무탑을 이용한 타 연구에서도 동일한 결과를 보였으며, 분무탑 뿐만 아니라 충전탑에서도 비슷한 경향을 보이는 것을 알 수 있다(Fig 6(b)).⁽²⁰⁾ 현재의 기술 수준으로는 포집효율이 비교적 높게 얻어지는 충전탑의 경우도 현재 작동 조건에서 최고 약 25%의 CO₂ 포화도를 보이는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 기존의 흡수탑에서 여러가지 제약 조건들에 의해 포집효율을 증가시키기 위해 CO₂ 포화도는 떨어지더라도 흡수제의 사용량을 늘리거나 CO₂ 처리용량을 줄이는 방식을 채택했기 때문이다. 이와 같이 비 효율적인 흡수제의 사용을 줄이

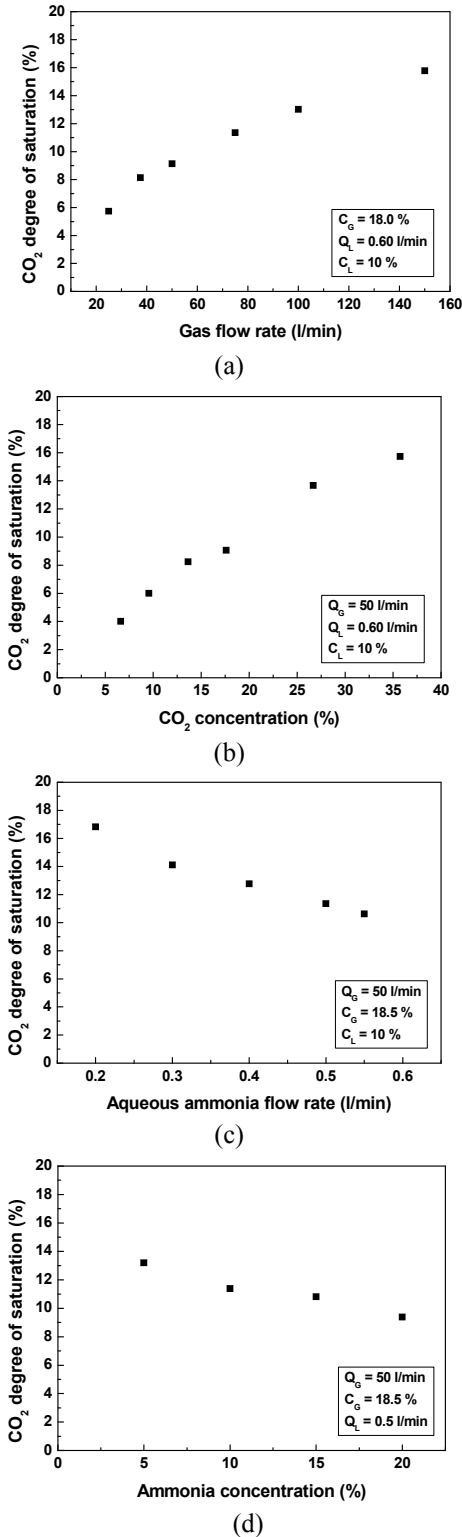


Fig. 4 Effect of the operating conditions on the CO₂ degree of saturation: (a) gas flow rate; (b) CO₂ concentration; (c) aqueous ammonia flow rate; (d) ammonia concentration

려면 사용하는 분무 액적의 크기 및 분사위치 등의 제어를 통해 단위 액적이 흡수할 수 있는 CO₂

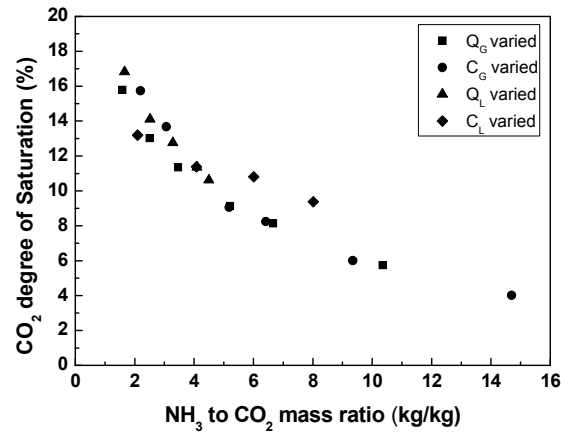


Fig. 5 Effect of the ammonia to carbon dioxide mass ratio on the CO₂ degree of saturation

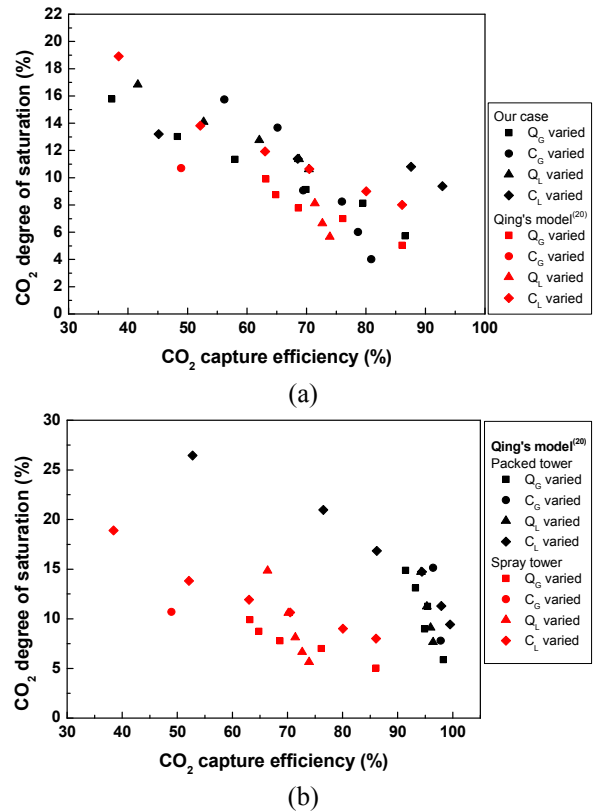


Fig. 6 The relation between the ammonia to carbon dioxide mass ratio and the CO₂ degree of saturation: (a) comparison of our case and Qing's model; (b) comparison of packed tower and spray tower

의 양을 최고로 하여 포화도를 늘리면서, 액적의 크기와 주입 혼합기체 유량에 의해 결정되는 액적과 CO₂의 접촉 면적 및 접촉 시간을 늘리는 등의 방식으로 효율도 함께 증가시킬 수 있는 최적의 방식을 도출해야 할 것이다.

현재 충전탑이건 분무탑이건 CO₂ 흡수탑기법에서 실용화기술을 위해 가장 중요한 요소는 재생에

너지의 저감이며, 재생에너지는 흡수용액의 사용량에 거의 비례하는 점을 고려한다면, 포집후 흡수제의 CO₂ 포화도가 동일포집을 위해 필요한 흡수제 사용량에 반비례하므로, 앞으로 재생에너지의 저감을 위해서 포화도의 증가가 가장 핵심적인 지표로 이용될 수 있을 것으로 생각된다.

5. 결 론

단일 노즐을 이용하는 CO₂ 포집용 분무탑의 기본적 특성을 실험적으로 구하였다. 다양한 조건 - 주입 기체 유량 및 농도, 주입 흡수제 유량 및 농도 등 - 에서 얻어진 포집성능을 포집효율 뿐만 아니라 재생에너지의 주요 결정요인인 CO₂ 포화도 측면에서 검토하였다.

다른 연구들과 마찬가지로, 포집효율은 기체의 유량과 농도가 증가할수록 감소하고 흡수제의 유량과 농도가 증가할수록 증가하는데, 다양한 조건들에서의 포집효율 변화는 흡수제(NH₃)와 CO₂ 의 상대적 유량비만의 단조증가함수로 잘 표현되었다.

포집후의 흡수제의 CO₂ 포화도 또한 NH₃/CO₂ 유량비만의 함수로 잘 정리가 되었으나, 포집효율과는 다르게 단조감소함수를 보였으며, 특히 CO₂ 포화도와 포집효율과의 상관관계를 보면 기존의 모든 연구들에서 포집효율이 증가할수록 CO₂ 포화도가 감소하였다. CO₂ 포화도는 낮은 포집효율 조건에서 최대 20-25% 수준이었으나, 90% 이상의 고효율에서는 10% 미만으로 매우 낮았다. 이는 높은 포집효율을 위해 사용되는 흡수제의 양이 과도하며, 다시 재생에너지가 과도하게 필요함을 의미한다.

참고문헌

(1) Yamasaki, A., 2003, "An Overview of CO₂ Mitigation Options for Global Warming - Emphasizing CO₂ Sequestration Options," *J. Chem. Eng. Jpn.*, Vol. 36, No. 4, pp. 61~375.
 (2) Stewart, C. and Hessami M., 2005, "A Study of Methods of Carbon Dioxide Capture and Sequestration—the Sustainability of a Photosynthetic Bioreactor Approach," *Energ. Convers. Manage*, Vol. 46, pp. 403~420.
 (3) Nuchitprasittichai, A. and Cremaschi, S., 2013, "Sensitivity of Amine-Based CO₂ Capture Cost: The Influences of CO₂ Concentration in Flue Gas and Utility Cost Fluctuations," *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Vol. 13, pp. 34~43.
 (4) Yeh, J.T., Resnik, K.P., Rygle, K. and Pennline, H.

W., 2005, "Semi-Batch Absorption and Regeneration Studies for CO₂ Capture by Aqueous Ammonia," *Fuel Process. Technol.*, Vol. 86, No. 14~15, pp. 1533~1546.
 (5) Treybal, R. E., 1980, *Mass-Transfer Operations*, 3rd ed., McGraw-Hill, Singapore.
 (6) Strigle, R. F., 1987, *Random Packings and Packed Towers, Design and Applications*, Gulf Publishing Company, Houston.
 (7) Aroonwilas, A., 1996, "High Efficiency Structured Packing for CO₂ Absorption Using 2-Amino-2-Methyl-1-Propanol (AMP)," M.A.Sc. Thesis, University of Regina, Regina, Saskatchewan, Canada.
 (8) Aroonwilas, A., Veawab, V. and Tontiwachwuthikul, P., 1999, "Behavior of the Mass-Transfer Coefficient of Structured Packings in CO₂ Absorbers with Chemical Reactions," *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 38, pp. 2044~2050.
 (9) Aroonwilas, A., Tontiwachwuthikul, P. and Chakma, A., 2001, "Effects of Operating and Design Parameters on CO₂ Absorption in Columns with Structured Packings," *Sep. Purif. Technol.*, Vol. 24, pp. 403~411.
 (10) Aroonwilas, A. and Veawab, A., 2004, "Characterization and Comparison of CO₂ Absorption Performance into Single and Blended Alkanolamines in Packed Column," *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 43, No. 9, pp. 2228~2237.
 (11) Yeh, J. T., Pennline, H. W. and Resnik, K. P., 2004, "Study of CO₂ Absorption and Desorption in a Packed Column," *Energy Fuels*, Vol. 15, No. 2, pp. 74~278.
 (12) DeMontigny, D., Tontiwachwuthikul, P. and Chakma, A., 2005, "Comparing the Absorption Performance of Packed Columns and Membrane Contactors," *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 44, No. 15, pp. 5726~5732.
 (13) Mehta, K.C. and Sharma, M.M., 1970, "Mass Transfer in Spray Columns," *Br. Chem. Eng.*, Vol. 15, No. 11, pp. 1440~1444.
 (14) Taniguchi, I., Takamura, Y. and Asano, K., 1997, "Experimental Study of Gas Absorption with a Spray Column," *J. Chem. Eng. Jpn.*, Vol. 3, No. 3, pp. 427~433.
 (15) Mehta, K. C. and Sharma, M. M., 1970 "Mass transfer in spray columns," *Br. Chem. Eng.*, Vol. 15, No. 12, pp. 1556~1558.
 (16) Fukunaka, Y., Inada, A., Ogawa, A. and Asaki, Z., 1992, "Absorption of CO₂ Gas into Falling Droplets of Aqueous NaOH Solution," *Metall. ReV. MMLJ*, Vol. 9, No. 1, pp. 33~50.
 (17) Yeh, N. K. and Rochelle, G. T., 2003, "Liquid-Phase Mass Transfer in Spray Contactors," *AIChE J.*, Vol. 49, No. 9, pp. 363~2373.

- (18) Javed, K. H., Mahmud, T. and Purba E., 2010, "The CO₂ Capture Performance of a High-Intensity Vortex Spray Scrubber," *Chem. Eng. J.*, Vol. 162, No. 2, pp. 448~456.
- (19) Liu, J., Wang, S., Zhao, B., Tong, H. and Chen, C., 2009, "Absorption of Carbon Dioxide in Aqueous Ammonia," *Energy Procedia*, Vol. 1, No. 1, pp. 933~940.
- (20) Qing, Z., Yincheng, G. and Zhenqi, N., 2011, "Experimental Studies on Removal Capacity of Carbon Dioxide by a Packed Reactor and a Spray Column Using Aqueous Ammonia," *Energy Procedia*, Vol. 4, pp. 519~524.
- (21) ZhenQi, N., YinCheng, G. and WenYi, L., 2010, "Experimental Studies on Removal of Carbon Dioxide by Aqueous Ammonia Fine Spray," *Sci. China Tech. Sci.*, Vol. 53, pp. 117~122.