

스크리버를 이용한 주류공정 내 고농도 이산화탄소 제거효율 평가

박일건[†] · 박영식

(주)평화엔지니어링 연구원

(2017년 11월 16일 접수: 2017년 11월 28일 수정: 2017년 12월 10일 채택)

Evaluation of CO₂ Removal Efficiency in Liquor plant by scrubber

Il Gun Park[†] · Yeong Sik Park

Pyunghwa Engineering Consultants R&D Institute

(Received November 16, 2017; Revised November 28, 2017; Accepted December 10, 2017)

요약 : 본 논문에서는 주류공정의 고농도 CO₂ 제거를 위한 스크리버의 CO₂ 흡수 성능평가를 진행하였다. Lab-scale 실험을 통해서 설계인자인 액가스비(18 L/m³), 공탑속도(0.14 m/s)를 산정하였다. 설계인자를 기반으로 제작한 5 m³/min 급 CO₂ 흡수 반응기로 실험한 결과, 풍량이 1, 2, 3, 4, 5 m³/min 증가시 CO₂ 제거율은 98.47%, 96.46%, 92.95%, 89.71%, 85.49%로 감소하는 경향을 보였다. 또한 스크리버를 사용하기 전 후의 에너지 개선율(5.4%) 평가 및 에너지 절감량(11.5 TOE/year), 온실가스 감축량(6.5 TC/year)를 산정하였다.

주제어 : 이산화탄소, 스크리버, 흡수제, 작업환경, 에너지 개선

Abstract : In this paper, CO₂ absorption of scrubber was tested for removal of high concentration CO₂. Liquid to gas ratio(18 L/m³) and Superficial velocity(0.14 m/s) was determined through Lab-scale test. As flow rates increase 1, 2, 3, 4 and 5 m³/min, CO₂ removal efficiency decrease 98.47%, 96.46%, 92.95%, 89.71% and 85.49%. Also, the scrubber operation made energy improvement(5.4%), energy saving(11.5 TOE/year) and greenhouse gases reduction(6.5 TC/year).

Keywords : CO₂, Scrubber, Absorbent, Working environment, Energy improvement

[†]Corresponding author
(E-mail: igpark@pec.kr)

1. 서론

산업혁명 이후 산업의 발전과 동시에 화석연료 사용 증가로 인해 대기 중 온실가스 농도가 급격히 증가되어 온실효과로 인한 지구온난화현상이 극대화되고 있다[1]. 온실가스 배출량의 증가는 세계 주요 에너지 사용량의 증가에 따른 에너지 공급과 수송부문의 배출량 급증이 주요 원인으로 이 중 CO₂는 지구 온난화지수가 낮지만, 규제가 가능한 가스이면서 전체 온실가스 배출량 중 약 80% 이상을 차지하여 6대 온실가스 중 가장 중요한 온실가스로 분류되고 있다. 에너지 공급부분의 전체 배출 온실가스 중 화석 연료 사용에 의한 CO₂ 배출이 57% 이상을 차지하고 있으며, 에너지 공급(26%), 산업(19%)부문에서 많이 배출되는 것으로 나타났다[2,3].

현재 지구상 평균 CO₂ 농도는 390 ppm[4]이며, 질량으로는 3조톤에 이르고, 매년 150억톤의 CO₂가 대기 중으로 배출되어 평균 2 ppm씩 증가하고 있다. 현재의 추세대로 라면, 2040년에는 450 ppm을 상회할 것으로 보이며 CO₂ 배출의 증가로 급속한 지구의 온난화가 초래되었으며, 전 세계적으로 기후변화에 따른 피해는 앞으로 더욱 심각해질 것으로 전망하고 있다[5,6].

또한 에너지 사용 잠재량, 사용의 용이성, 에너지 밀도, 에너지 사용량의 증가 등을 고려할 때 화석연료의 사용은 불가피하며, 그 사용량도 급격히 증가할 것으로 예상하고 있다. 따라서 지속성장가능사회를 구현하기 위해서는 화석연료 사용은 필수불가결한 요소로 부각되고 있으며, 이에 따른 온실가스 배출량이 증가하는 실정이다[7]. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 경제적이고 효율성있는 신재생에너지가 개발될 때까지 인류사회의 지속적인 발전 가능성을 감안하여 안정된 화석연료 사용을 위해서는 CO₂ 분리, 회수 및 저장 기술 개발이 필요하다[8].

온실가스 감축제도인 온실가스-에너지 목표관리제가 시행된 2012년 이후에 온실가스 배출량 증감률은 지속적으로 국내총생산 증감률보다 낮게 나타나고 있으며, 2014년에는 GDP가 3.3% 증가하였지만 온실가스 배출량은 0.8% 감소하였다[9,10]. 우리나라의 경우 온실가스 연간 총 배출량은 이산화탄소 배출량 세계 10위권이지만 교토 의정서에서 1차 의무감축국에 포함되지 않았으나 선진개발도상국으로서의 국가위상, 높은 온실가스

배출량에 의해 온실가스를 감소시키라는 압박을 받고 있다. 결과적으로 우리나라도 온실가스 감축을 위해서 적극적으로 참여해야하며 다양한 연구를 통해 국내 온실가스 배출량을 줄이도록 노력해야 한다[11].

고농도의 CO₂를 배출하는 산업시설인 주류공정 내의 작업환경은 실내 CO₂ 농도가 20,000 ppm을 넘어서는 것으로 나타나, 주류공정의 특성상 장시간 실내에서 작업을 하는 인력에게 매우 가혹한 조업 환경을 제공하고 있다. 이에 대한 법적기준치는 5,000 ppm 이하로 규정되어 있으나, 환경 개선을 위한 기술적 적용 사례가 없는 상태가 지속되고 있다.

주류공장에서는 이를 해결하기 위해서 작업장 내의 이산화탄소 농도 저감을 위한 공여지책으로 외기를 도입한 환기의 방법을 이용할 수 밖에 없는 상황이며, 이로 인해 주류공장의 제품생산을 위한 실내적정 온도인 10℃를 유지하기 위해서는 추가 도입되는 외기를 포함한 실내 공기량에 대한 온도 제어가 되어야 하므로 냉난방 장비가동을 위한 상당한 에너지 손실이 발생하는 문제가 발생하고 있다.

본질적인 문제를 해결하기 위해서 가장 선행적으로 달성하여야하는 기술은 이산화탄소를 효율적으로 포집이 가능한 흡수제의 개발이다. 우수한 흡수제를 사용할 경우, 에너지 절감 및 설비의 수명연장이 가능한 장점이 있기 때문에 주류공정 내 이산화탄소 분리·회수비용 최소화에 직접적으로 기여할 수 있다.

이에 본 연구에서는 높은 반응열, 열화물 생성, 부식문제와 흡수제를 재생할 때 많은 에너지 소모를 가진 기존 아민 흡수제의 단점을 극복하기 위한 아미노산염 흡수제를 적용한 친환경이며 에너지효율적인 저감기술개발을 통하여 생산성 향상 및 에너지절감 기술을 개발하고자 하였고, 기존 문헌연구 결과의 비교·분석을 통하여 고농도 CO₂ 저감 가능성을 평가하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 흡수제 선정 기준

대표적인 흡수제인 MEA(Monoethanolamine)는 높은 반응열, 열화물 생성, 부식문제와 흡수제를 재생할 때 많은 에너지가 소모되는 단점을 가지고 있다[12-14]. MEA 흡수제에 의한 재료의

부식은 약 100°C부터 시작하여 약 120°C에서 탄소강과 스테인레스강에 대하여 0.2~1 mm/yr의 재료 부식이 있는 것으로 알려지고 있다. 부식 방지제를 첨가하여 부식을 막고 있지만 자체 휘발도에 의한 손실도 불가피하게 나타난다. 흡수제의 부식, 열화 및 재생 시 발생하는 높은 재생에너지 등과 같은 문제를 해결하기 위한 방법으로 아미노산염 흡수제를 적용한 연구가 활발히 진행되고 있다[15-19].

아미노산염 흡수제(L-lysine, L-alanine, L-proline)는 아민흡수제에 비하여 휘발도가 낮고 손실이 작으며, 부식이 거의 없고, 재생에 필요한 에너지가 낮은 친환경적 흡수제로 평가받고 있다. 아미노산염 흡수제에 대한 연구는 Lab-scale 규모에서 주로 연구가 진행되었으며, 실제 공정에 적용한 사례는 미비한 실정이다. TNO(Netherlands Organisation for Applied Scientific Research)에서 분무탑을 이용한 연속식 공정에 대한 연구가 진행 중이며, 기존 흡수탑에 비하여 약 20%의 효율이 감소하는 것으로 보고되고 있다[20].

Shen 등[21], Lim 등[22]의 선행연구에 의하면, L-lysine, L-alanine, L-proline을 친환경 아미노산 흡수제로 이산화탄소 흡수 실험을 통하여 각 흡수제에 대한 특성을 평가하였다. L-lysine은 흡수용량은 크고 흡수속도가 느린 특성을 나타냈고, L-alanine은 흡수용량은 작지만 흡수속도가 빠른 특성을 나타냈다. 다만 L-proline은 흡수용량과 흡수속도는 낮은 것으로 연구되었다. L-lysine의 이산화탄소 흡수 실험한 결과에 따르면, 거품 발생으로 인한 역류 및 단백질 냄새 등의 문제점이 발생하였고, L-alanine의 경우에는 L-lysine에 비하여 흡수용량은 낮지만 흡수속도가 빠르고, 거품이 발생하지 않으며 특유의 단백질 냄새가 없는 특성으로 나타났다.

따라서, 본 연구에서는 주류 및 식품공정에 적용하기 위한 친환경 흡수제로 L-alanine을 선정하였다.

2.2. 실험재료

이산화탄소 흡수 성능평가를 위해 인체에 무해한 아미노산 흡수제인 L-alanine을 사용하였으며 분자구조는 Fig 1과 같다. L-alanine($C_3H_7NO_2$)은 단백질의 합성에 사용되는 아미노산으로 인체에서 합성 할 수 있기 때문에 음식으로 섭취해야 하는 필수 아미노산이 아니며, 거의 모든 단백질 성분에 존재한다. 백색 가루로 물에 용해되면 투명하고, 특유의 단백질 냄새가 없으며 이산화탄소 흡수 용량은 낮지만 흡수 속도가 빠르고 밀도, 점도가 낮아 기액 접촉 효율이 우수한 특성을 가지고 있다.(Fig. 1)

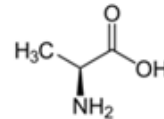


Fig. 1. Molecular structure of L-alanine.

L-alanine 제조를 위한 시약은 Table 1과 같다. 제조하는 방법으로는 L-alanine (Daejungchem, >99%) 45 g을 물 500 ml에 용해한 시약(A)와 KOH(Daejungchem, >85%) 30 g을 물 425 ml에 용해한 시약(B)를 1:1로 혼합하여 흡수제 1 kg을 제조하는 것으로 시약(A)에 시약(B)를 천천히 넣으면서 교반하였다.

2.3. 이산화탄소 흡수 성능평가

5 L/min(Lab-scale) CO_2 흡수 반응기는 Fig. 2와 같은 습식스크리버로 가스주입부, 흡수반응기, 흡수탱크, 가스분석계측부로 구성되어 있다. 흡수 반응기는 길이 80 cm, 직경 9 cm 크기의 아크릴로 제작하였고, 반응기 내부에 노즐 4개를 연결하였다.

흡수물질로 사용된 CO_2 표준가스(Deokyang Co.)는 고농도에서 흡수제의 흡수 성능을 도출하기 위하여 주류공정 내 고농도의 CO_2 조건을 고려하여 질소를 balance로 한 고농도의 표준가스를 사용하였고, 반응기에 유입되기 전에 유량계를

Table 1. Description of chemical samples used in this study.

Chemical name	Molar mass	Source	Purity (mass fraction)
L-alanine	89.09 g	Daejungchem	99%
KOH	56.11 g	Daejungchem	85%

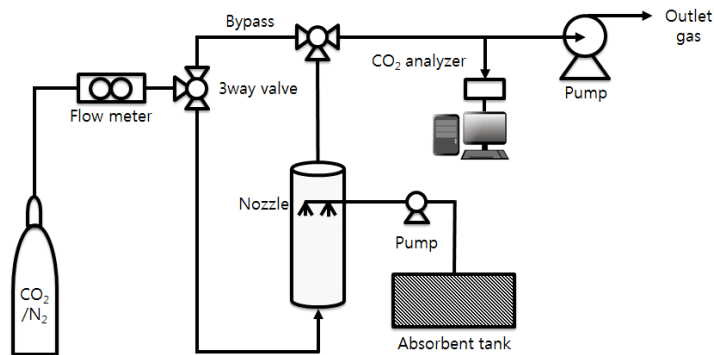


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus.

통해 일정하게 공급하였다. Table 2는 흡수물질로 사용된 표준가스의 조성을 나타낸다.

Table 2. Specifications of CO₂ standard gas used in this experiment.

Components	Specifications
CO ₂	2%
N ₂	balance

또한, 상온(25°C), 상압(1 atm)에서 흡수실험을 수행하였고, CO₂ 가스 농도는 AQ200(KIMO Co.)을 반응기 출구에 설치하여 by-pass를 통해 입구농도와 출구농도를 실시간으로 측정하였다.

5 m³/min 급 CO₂ 흡수 반응기의 설계 및 제작을 위하여 설계조건인 액가스량 및 공탑속도에 대하여 실험을 수행하였다. 액가스량 산정을 위하여 가스 유량 3 L/min, 흡수제 0.5 M, CO₂ 농도 2% 조건으로 실험을 수행하였고, 공탑속도 산

정을 위하여 액가스비 18 L/m³, 흡수제 0.5 M, CO₂ 농도 2% 조건으로 실험을 수행하여 스크러버의 설계인자(액가스량, 공탑속도)를 도출하였다.

Lab-scale 실험에서 도출된 설계인자를 기반으로 제작한 5 m³/min 급 CO₂ 흡수 반응기의 제원은 Table 3과 같다. 스크러버와 흡수제 탱크를 연결하여 스크러버 가동 시 사용한 흡수제는 다시 흡수제 탱크로 이송될 수 있도록 제작하였으며, 2개의 층에 각각 4개의 노즐을 구성하여 다량의 흡수제를 분사시켜 기액접촉량을 증가시킬 수 있도록 하였다.

또한 유입팬의 풍량은 0~1700 rpm 범위 내에서 조절할 수 있게 제작하였다. 스크러버의 유출구에서 풍속을 측정하고, 유출구 단면적을 곱하여 풍량을 계산하였다. Fig. 3은 유입팬의 rpm과 풍량의 상관식을 나타낸 자료이다.

스크러버의 이산화탄소 흡수 성능평가를 위해 흡수제가 고르게 분사될 수 있도록 흡수제 탱크에 흡수제를 약 760 L(전체 탱크의 약 70%) 주입하였다. 풍량 1~5 m³/min, 주류공정의 환경조건인

Table 3. Scrubber characteristic.

Components	Specifications
Max. Flow rates	1700 rpm
Number of Nozzles	4x2(4 per floor)
Volume of Absorbent tank	1,000 L
Fan Inlet Damper	ø 200
Inlet Duct	180x220
Scrubber Cone	ø 900x450H
Scrubber Base	ø 1000+(700Wx1,100L)
Scrubber Body	ø 900x5,500H

온도(15°C), 상압(1 atm), CO₂(2.4%)를 유지한 상태로 스크리버의 전 후단에 CO₂ 측정기기를 설치하여 스크리버의 제거효율 실험을 수행하였다.

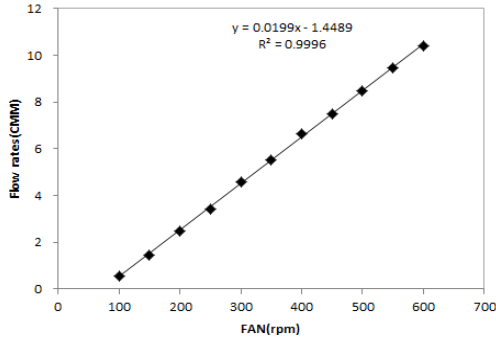


Fig. 3. Flow rates(CMM) according to FAN(rpm).

2.4. 에너지 개선을 평가

MI2883(Metrel Co.)를 유니트쿨러(공조기)에 설치하여 스크리버를 사용하기 전 후의 에너지 개선을 평가하였다. 시간에 따른 소비전력은 같으므로 5분간 전력량 측정을 통하여 전력량을 측정하였다. 에너지 개선율은 식 (1)을 이용하여 계산하였다.

$$\frac{A-B}{A} \times 100(\%) \tag{1}$$

여기서,

- A : 스크리버 가동 전 유니트쿨러 전력량(kWh)
- B : 스크리버 가동 후 유니트쿨러 전력량(kWh)

또한 에너지 절감량 및 온실가스 감축량은 ‘에너지 절감량/온실가스 감축량’ 산정식(2, 3)을 이용하여 산정하였다.

- 에너지 절감량(TOE/year)

$$E_a = (A-B) \times t \times U \times \alpha \tag{2}$$

여기서,

- A : 기존시스템의 소비전력(W/unit)
- B : 개발된 시스템의 소비전력(W/unit)
- t : 년간 가동시간(hr/year)
- U : 실수요량(unit)
- α : 환산인자

- 온실가스 감축량(TC/year)

$$E_b = E_a \times \beta \tag{3}$$

여기서,

E_a : 에너지 절감량(TOE/year)

β : 0.5642(TC/TOE)

3. 결과 및 고찰

3.1. 이산화탄소 흡수 성능평가

스크리버의 설계 및 제작을 위하여 5 L/min (Lab-scale) CO₂ 흡수 반응기를 이용하여 설계 조건인 액가스량 및 공탑속도 도출실험을 수행하였다. Fig. 4는 액가스량에 따른 CO₂ 제거율을 나타낸 것이다. 액가스량 산정을 위하여 가스 유량 3 L/min, 흡수제 0.5 M, CO₂ 농도 2% 조건(주류공정 기준)으로 실험을 수행하였다. 흡수제의 농도가 높으면 거품이 발생하기 때문에 본 연구에서는 0.5 M로 낮춰서 실험하였다. 액가스비 2, 5~25 L/m³(5 L/m³ 간격)으로 실험을 진행하여 액가스비가 20 L/m³일 때 CO₂가 86.4% 제거되어 가장 높은 제거율을 나타냈고, 25 L/m³에서 85.5%로 감소하는 것으로 나타났다. 주류공정에 적용하기 위한 CO₂ 제거율 85% 이상인 액가스비는 18 L/m³으로 산정되었다.

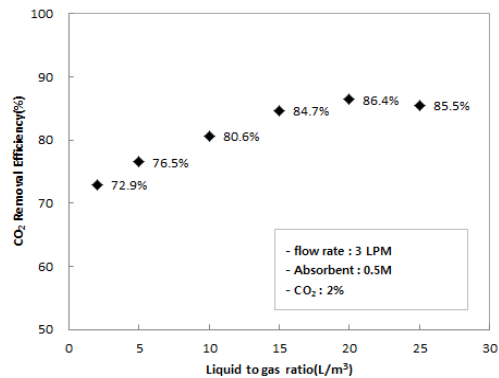


Fig. 4. CO₂ Removal Efficiency according to Liquid to gas ratio(L/m³).

Fig. 5는 공탑속도에 따른 CO₂ 제거율을 나타낸 것이다. 공탑속도 산정을 위하여 액가스비 18 L/m³, 흡수제 0.5 M, CO₂ 농도 2% 조건으로

실험을 수행하였다. 공탑속도 0.1 m/s일 때, CO₂가 86.4% 제거되어 가장 높은 제거율을 나타냈고 공탑속도가 증가할수록 CO₂ 제거율이 감소하는 것으로 나타났다. 주류공정에 적용하기 위한 CO₂ 제거율 85% 이상인 공탑속도는 0.14 m/s로 산정되었다.

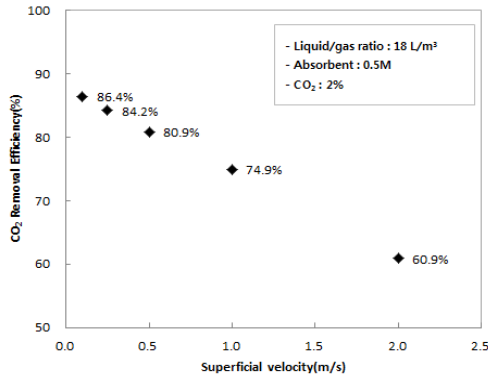


Fig. 5. CO₂ Removal Efficiency according to Superficial velocity(m/s).

설계인자를 기반으로 제작한 5 m³/min 급 CO₂ 흡수 반응기로 FAN의 풍량을 1 m³/min 부터 5 m³/min 까지 1단계씩 증가시켜 CO₂ 제거율 실험을 수행하였다. FAN 작동 후 안정화시간 5분 이후부터 30분 동안 실험을 수행하였으며, GASTIGER2000 (YANTSTAR Instrument Co.)을 사용하여 CO₂를 측정하였다. CO₂ 제거율 실험결과는 Fig. 6와 같다.(유입 CO₂ 농도는 약

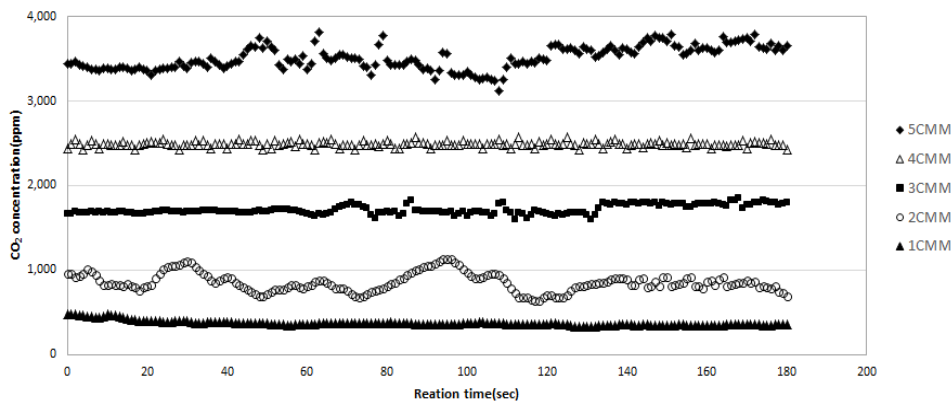


Fig. 6. CO₂ concentration according to Flow rates.

24,000 ppm으로 분석되었다.)

풍량이 1, 2, 3, 4, 5 m³/min으로 증가할 경우 CO₂ 제거율은 98.47%, 96.46%, 92.95%, 89.71%, 85.49%로 감소하는 경향을 보였다. Fig. 7은 풍량별 5회 측정을 통하여 스크리버의 재현성 테스트한 결과이며, 풍량에 따른 CO₂ 제거 실험을 반복적으로 수행한 결과 표준편차는 0.63~0.94 사이로 분석되었다. 본 연구에서 사용하는 L-alanine의 흡수 재현성이 높은 것으로 확인되었다. 풍량 증가할수록 기액 접촉 감소에 따른 CO₂ 제거율이 감소할 것으로 판단되며, 실험에서 사용된 흡수제의 농도 증가 및 배합방법의 변경이 필요할 것으로 사료된다.

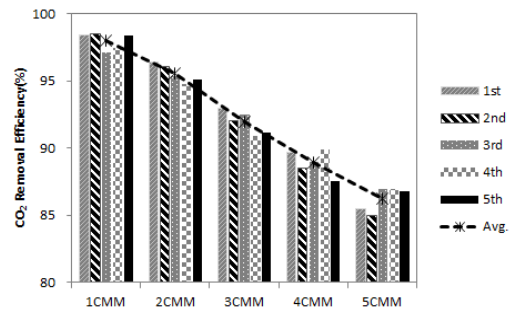


Fig. 7. CO₂ Removal Efficiency according to Flow rates.

3.2. 에너지 개선을 평가

MI2883(Metrel Co.)를 이용하여 스크리버를 사용하기 전 후의 에너지 개선을 평가하였다.

Table 4. Wattage according to Scrubber ON/OFF

Components	Scrubber Operation	
	Scrubber ON (kWh)	Scrubber OFF (kWh)
Wattage	0.223	0.211

본 개발장치를 작동하기 전에는 유니트쿨러(공조기)와 CO₂를 외부로 배출하는 외기팬이 항상 작동되는 상황이며, 본 개발장치를 작동한 후에는 유니트쿨러와 외기팬의 작동없이 내부 온도를 낮게 유지할 수 있고, CO₂를 효과적으로 제거할 수 있었다. 본 개발장치의 작동 유/무에 따른 전력량은 Table 4와 같다.

본 개발장치를 작동했을 경우 5.4%의 에너지를 개선할 수 있으며, 흡수제의 농도를 증가시키거나 배합방법의 변경을 통한 CO₂ 제거율의 향상뿐만 아니라 본 개발장치의 작동시간이 단축되어 에너지 개선율을 증가시킬 수 있을 것으로 사료된다. 또한 '에너지 절감량/온실가스 감축량' 산정식을 이용하여, 에너지 절감량은 11.5 TOE/year, 온실가스 감축량은 6.5 TC/year로 산정되었고, 본 개발장치를 이용하여 에너지 절감뿐만 아니라 온실가스 배출량 저감에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

본 실험에서는 흡수제를 CO₂ 제거 공정에 적용하기 위하여 L-alanine을 이용한 스크리버의 CO₂ 제거효율 실험을 진행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 스크리버의 설계 및 제작을 위하여 5LPM (Lab-scale) CO₂ 흡수 반응기를 이용하여 설계조건인 액가스량 및 공탑속도 도출 실험한 결과 주류공정에 적용하기 위한 CO₂ 제거율 85% 이상인 액가스비는 18 L/m³, 공탑속도는 0.14 m/s로 산정되었다.
2. 설계인자를 기반으로 제작한 5 m³/min 급 CO₂ 흡수 반응기로 실험한 결과, 풍량이 1, 2, 3, 4, 5 m³/min 증가시 CO₂ 제거율은 98.47%, 96.46%, 92.95%, 89.71%,

85.49%로 감소하는 경향을 보였다. 풍량별 5회 측정을 통하여 스크리버의 재현성 테스트를 진행하였으며, 풍량에 따른 CO₂ 제거 실험을 반복적으로 수행한 결과 표준편차는 0.63~0.94 사이로 분석되었고, 본 연구에서 사용하는 L-alanine의 흡수 재현성이 높은 것으로 확인되었다. 풍량 증가할수록 기액 접촉 감소에 따른 CO₂ 제거효율이 감소할 것으로 판단되며, 실험에서 사용된 흡수제의 농도 증가 및 배합방법의 변경이 필요할 것으로 사료된다.

3. MI2883(Metrel Co.)를 이용하여 스크리버를 사용하기 전 후의 에너지 개선율을 평가하였고, 본 개발장치의 작동했을 경우 5.4%의 에너지를 개선할 수 있는 것으로 나타났다.
4. 에너지 절감량은 11.5 TOE/year, 온실가스 감축량은 6.5 TC/year로 산정되었고, 본 개발장치를 이용하여 에너지 절감뿐만 아니라 온실가스 배출량 저감에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

향후 본 연구를 통해 도출된 결과는 주류공정 내 고농도 CO₂ 저감 공정에 활용이 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 산업통상자원부의 '에너지기술개발사업(#20172020109230)'의 지원을 받아 수행된 연구결과입니다.

References

1. E. C. Jeon, J. H. Sa, "Development of CO₂

- Emission Factor by Fuel and CO₂ analysis at Sub-bituminous Fired Power Plant.", *J. Env. Hlth. Sci.*, 36(2), 128–135 (2010).
2. G. H. Mun, "KCRC ISSUE REPORT: Necessity and prospect of CCS", *Korea Carbon Capture & Sequestration R&D Center*, vol. 01 (2015).
 3. J. A. Lim, Y. I. Yoon, S. C. Nam, S. K. Jeong, "Post-combustion CO₂ capture with potassium L-lysine", *J of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol.14, No.9, pp. 4627–4634 (2013).
 4. M. Claude, "Prospects for CO₂ capture and storage", *Energy Technology Analysis*, pp. 27–36 (2016).
 5. M. Mike, "CO₂ Earth", U.S. National Oceanic & Atmospheric Administration Earth System Research Laboratory (2015).
 6. K. Topfer, "Working Group III: 2. Greenhouse gas emission mitigation scenarios and implications", *Intergovernmental Panel on Climate Change* (2001).
 7. J. K. Lim, "UNFCCC National Communication", *Korea Energy Economics Institute* (2003).
 8. S. D. Park., "CCS: Carbon Dioxide Capture. & Storage", *Physics & High Technology*, 19–23 (2009).
 9. "National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea", *Greenhouse Gas Inventory & Research Center of Korea* (2016).
 10. K. G. Kim, J. R. Shin, H. G. Kim, H. J. Kang, "Study on optimization of liquid carbonation pilot plant (system) using sludge water of ready-mixed concrete", *J. of Korean Oil Chemists' Soc.*, Vol.33, No.2, pp. 239–246 (2016).
 11. J. H. Wee, J. L. Kim, L. S. Song, B. Y. Song, K. S. Choi, "Reduction of Carbon-Dioxide Emission Applying Carbon Capture and Storage (CCS) Technology to Power Generation and Industry Sectors in Korea", *Korean Society of Environmental Engineers*, 961–972 (2008).
 12. B. A. Oyekan, G. T. Rochelle, "Energy Performance of stripper Configurations for CO₂ Capture by Aqueous Amines", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 45, 2457–2464 (2006).
 13. A. Belld, R. O. Idem, "Comprehensive Study of the Kinetics of the Oxidative Degradation of CO₂ Loaded and Concentrated Aqueous Monoethanolamine (MEA) with and without Sodium Metavanadate during CO₂ Absorption from Flue Gases", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 45, 2569–2579 (2006).
 14. J. Garbrielsen, H. F. Svendsen, M. L. Michelsen, E. H. Stenby, G. M. Kontgeorgis, "Experimental Validation of a Rate-based Model for CO₂ Capture using an AMP Solution", *Chem. Eng. Sci.*, 62, 2397–2413 (2007).
 15. J. Zhang, S. Zhang, K. Dong, Y. Zhang, Y. Shen, X. Lv, "Supported absorption of CO₂ by tetrabutylphosphonium amino acid ionic liquids", *Chemistry.*, 12(5), 4021–4026 (2006).
 16. P. S. Kumar, J. A. Hogendoorn, P. H. M. Feron, G. F. Versteeg, "Equilibrium solubility of CO₂ in aqueous potassium taurate solutions: Part 1. Crystallization in carbon dioxide loaded aqueous salt solutions of amino acids", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 42(12) 2832–2840 (2003).
 17. P. S. Kumar, J. A. Hogendeorn, S. J. Timmer, P. H. M. Feron, G. F. Versteeg, "Equilibrium solubility of CO₂ in aqueous potassium taurate solutions: Part 2. Experimental VLE data and model", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 42(12) 2841–2852 (2003).
 18. S. Lee, H. J. Song, S. Maken, H. C. Song, J. Park, "Physical solubility and diffusivity of N₂O and CO₂ in aqueous sodium glycinate solution", *J. Chem. Eng. Data.*, 51(2), 504–509 (2006).
 19. H. J. Song, S. M. Lee, J. H. Lee, J. W. Park, K. R. Jang, J. G. Shim, J. H. Kim, "Absorption of carbon dioxide into aqueous potassium salt of serine", *KSEE.*, 31, 505–514 (2008).

20. E. S. Fernandez, E. L. V. Goetheer, "DECAB: process development of a phase change absorption process", *Energy Procedia*, 4, 868–875 (2011).
21. S. Shen, Y. Yang, Y. Wang, S. Ren, J. Han, "CO₂ absorption into aqueous potassium salts of lysine and proline: Density, viscosity and solubility of CO₂", *Fluid Phase Equilibria*, 399, 40–49 (2015).
22. J. A. Lim, D. H. Kim, Y. Yoon, S. K. Jeong, K. T. Park, S. C. Nam, "Absorption of CO₂ into Aqueous Potassium Salt Solutions of L-Alanine and L-Proline", *Energy fuels*, 26, 3910–3918 (2012).