

연소 전 조건에서 음이온이 Sulfite계인 이온성 액체의 CO₂ 흡수 특성

백근호¹, 장현태², 차왕석^{3*}

¹(주)진올바이오테크놀로지, ²한서대학교 화학공학과, ³군산대학교 토목·환경공학부

Absorption characteristic of carbon dioxide in Ionic Liquids based sulfite anion in the pre-combustion condition

Geun Ho Baek¹, Hyun Tae Jang², Wang Seog Cha^{3*}

¹Geneall Biotchnology Co. LTD

²Department of Chemical Engineering, Hanseo University

³School of Civil and Environmental Engineering, Kunsan National University

요약 본 연구는 지구 온난화 현상의 주원인인 이산화탄소의 제거를 목적으로 최근에 주목 받고 있는 물질인 이온성액체를 실험실 규모로 제조하였다. 음이온이 Sulfite계인 이온성 액체의 이산화탄소 흡수능, 초기흡수속도 그리고 재생성을 조사하기 위하여 기-액 흡수평형장치를 이용하여 연구하였다. 그 결과 음이온이 Sulfite계인 이온성액체 중 높은 흡수능을 갖는 이온성액체는 음이온이 ethyl sulfite인 경우이며, 특히 [beim] ethyl sulfite의 경우 흡수평형압력이 22 bar인 조건에서의 흡수력은 1.1 mol CO₂/mol IL로 가장 높은 흡수력을 나타냈다. 재생성 연구에서 음이온이 Sulfite계인 이온성액체는 모두 재생후의 흡수력이 약 7%정도 감소하였으며, 이로부터 재생성이 우수함을 알 수 있다. 점도 감소를 목적으로 두 종류의 희석제를 첨가하였을 때 희석제는 단지 이온성액체의 흡수력을 감소시키는 희석효과로 작용하였으며 희석제 첨가에 따른 흡수력의 증가는 없었다. 흡수실험에 따른 점도변화의 정도를 조사하기 위해 흡수반응 전과 흡수 실험 후 재생한 시료의 점도를 측정하였으며, 실험결과 흡수실험 후 시료의 점도가 흡수실험 전보다 약 8% 정도 감소하는 경향을 보였다. 그러나 흡수제 합성은 1단계에서 이루어지며 사용되는 원료물질 또한 저렴한 장점이 있으며 흡수능에서는 우수한 재생성과 높은 안정성을 가지고 있음을 알 수 있었다.

Abstract In this study, ionic liquids were synthesized to remove carbon dioxide (CO₂) on a laboratory scale. The vapor-liquid absorption equilibrium device (VLE) was used to investigate the carbon dioxide absorption capacity. In the regeneration study, the absorption capacity after regeneration was reduced by approximately 7% for all ionic liquids, in which the anion was sulfite-based, showing excellent regeneration. Ethyl sulfite showed the highest absorption capacity of CO₂ among the ionic liquids based on the sulfite anion. In particular, the absorption capacity of [beim] ethyl sulfite was 1.1 mol CO₂ / mol IL at an absorption equilibrium pressure of 22 bar. In the regeneration study, the absorption capacity after regeneration was reduced by approximately 7% for all ionic liquids, in which the anion was sulfite-based, from which regeneration is outstanding. After the absorption experiment, the viscosity of the sample tended to decrease by approximately 8% compared to that before the absorption experiment. On the other hand, the absorbent was synthesized in the first step. Moreover, the raw material used is also inexpensive and has excellent reproducibility and highly stable absorbent capacity.

Keywords : Ionic Liquid, Sulfite Anion, Absorption, Regeneration, Viscosity

*Corresponding Author : Wang SeogCha(Kunsan Univ.)

email: wscha@kunsan.ac.kr

Received October 22, 2020

Accepted March 5, 2021

Revised November 26, 2020

Published March 31, 2021

1. 서론

전세계적으로 경제 발전 및 산업화의 급속한 진행으로 에너지 사용이 증가되고 있으며, 이에 따라 에너지의 주요 공급원인 화석연료의 사용도 함께 증가되고 있다. 2030년경에는 화석연료의 사용으로 이산화탄소의 배출량이 40.2GT에 이를 것이라고 예상하고 있다. 그러므로 대량으로 이산화탄소를 포집 저장할 수 있는 기술 개발이 매우 중요하다. 현재 실험실, 파이롯트, 혹은 상용 규모 수준에서 연구 및 이용되고 있는 이산화탄소 포집 기술은 물리적 혹은 화학적인 방법으로 흡착[1], 막분리[2], molecule sieve[3], carbamation[4], 아민 이용 물리적 흡착[5], 아민 이용 건식흡착[6], 이온성 액체 이용 흡수기술[7] 등이 있다. 상기 기술 중에서 아민용액을 이용한 습식포집기술이 현재 수준으로는 상업적으로 가장 폭넓게 적용되고 있다. 아민용액을 이용한 기술은 이산화탄소 포집과정 중 높은 조업온도에 의한 아민 용액의 증발 유출, 포집 과정 중 열화 및 유해한 부산물 생성, 높은 부식성으로 인하여 장치 손상 등이 발생하고 있다. L. Cuccia 등[8]은 화력발전소에서 이산화탄소를 포집하기 위하여 아민계 흡수제를 적용할 때 공정운전 과정에서 아민계 흡수제의 열화과정에서 다양한 종류의 유해 부산물이 생성됨을 보고하였다. 아민용액을 이용한 이산화탄소 포집 및 재생과정에서는 비교적 높은 조업온도로 에너지 비용에 의한 상대적으로 과다한 운전비 문제점이 있다. 특히 1차 아민을 이용한 흡수액의 경우 재생과정에서 많은 에너지가 소요된다. 따라서 이산화탄소를 포집할 때 높은 흡수능과 낮은 재생 에너지 및 안정성 그리고 경제성 등의 여러 가지 조건을 고려한 흡수제의 개발을 위해 여러 가지 연구가 진행되고 있으며, 최근에 유사한 흡수 기작을 나타내는 이산화탄소의 흡수제로 주목받는 물질이 이온성액체이다. 아민계의 문제점을 해결하기 위한 이온성 액체에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이온성 액체는 100℃ 이하에서 액체상태이며 음이온과 양이온을 가지며, 비교적 안정하고, 적정온도 범위에서 매우 낮은 증기압을 나타내며, 물리적 또는 화학적인 흡착특성을 나타내고 있다. R. krupiczka 등[9]은 Imidazole계 이온성 액체와 MEA(Methly ethanol Amine) 용액을 packed column에서 흡수능을 비교하였으며, Imidazole계 이온성 액체와 MEA 용액이 흡수능력에서는 거의 같은 수준이나 이온성 액체가 최대 흡수능까지 도달하는데 소요되는 시간이 많이 소요된다는 문제점이 있음을 보고하였다. 이온성액체의 흡수능을 증진시키기 위해 비교적

낮은 점도를 가지는 Imidazole계 이온성 액체를 합성한 후 이를 amine계와 혼합한 흡수제를 사용하여 이산화탄소 흡수능, 안정성, 점도변화 등에 관해 연구 발표하였다 [10]. 흡수능, 재생성 등이 우수한 것으로 보고하였으나 사용한 이온성액체의 경우 음이온이 다소 고가의 불소화합물로 이루어져 있다.

따라서 본 연구에서는 기존 흡수제의 단점을 보완하기 위하여 이온성액체의 양이온과 음이온의 다양한 조합을 통해 이온성액체를 설계한 후 실험실 규모로 제조하였다. 합성된 음이온이 Sulfite계인 이온성액체의 이산화탄소에 대한 흡수력을 평가하기 위해 기-액 흡수평형장치를 이용하여 흡수능을 연구하였다. 또한 초기흡수속도 및 재생성 그리고 희석제에 첨가에 따른 흡수력의 변화 및 흡수제의 물성 변화를 연구하여 효율적인 흡수제를 제시하고자 연구를 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서 이온성 액체의 이산화탄소 흡수능 및 재생능에 대한 실험을 수행하기 위해 사용한 기체-액체 흡수평형장치의 모식도는 Fig. 1에 나타내었다. 기체-액체 흡수평형장치는 기체-액체 상평형 원리를 이용하여 이산화탄소 흡수량을 측정하며, 가스 저장기, 흡수 반응기, 데이터 측정 및 기록기로 구분된다. 가스 저장조와 반응기는 항온수조 내에 설치되어 일정하게 온도를 유지할 수 있게 하였다. 또한 가스 저장조 내에 압력 측정장치(pressure transducer, Sensys pressure transmitter Co., N/M:PSHFC 100K CAG, 0~100bar, 오차범위 $\pm 0.005\%$)와 온도 측정장치(temperature indicator, $-40\sim 180^{\circ}\text{C}$, K-type thermocouple, 오차범위 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$)를 설치하여 반응기 및 가스저장기의 온도 및 압력을 정확히 측정할 수 있도록 하였다. 반응기는 일정한 온도 유지를 위해 가열 순환기(Heating Circulator)가 설치된 항온수조 안에 설치되어 있으며 정확한 압력과 온도의 측정을 위해 압력 측정기와 온도 측정기를 설치하였다. 반응 시작 전에 압력 용기내 잔존가스의 제거와 흡수실험 후 재생과정을 수행하기 위하여 진공펌프를 설치하였으며, 흡수반응기내에 마그네틱 바를 이용하여 반응 중 흡수액과 이산화탄소의 혼합이 원활하도록 하였다. 데이터 기록기는 압력과 온도 자료를 온라인으로 수집하는 장치와 수집된 자료를 저장 및 처리하는 컴퓨터 부분으로 구성되어 있다.

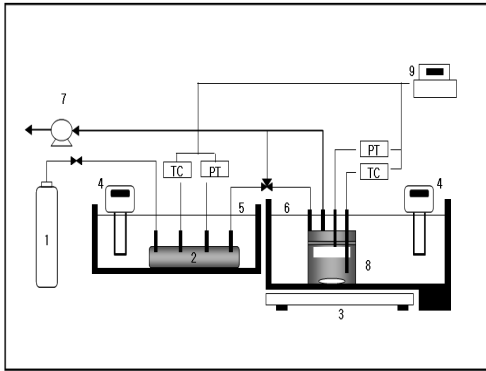


Fig. 1. The scheme of experimental apparatus for chemical absorption of CO₂.

2.2 실험방법

이온성 액체를 이용한 이산화탄소 흡수능 및 재생능을 측정하기 위한 실험을 위하여 가스 저장기 및 흡수제를 넣은 반응기 내부의 잔존 가스는 진공 펌프를 이용하여 제거하였다. 가스 저장기와 반응기가 각 실험조건 온도에 도달하면 가스 저장기와 반응기 사이에 연결된 밸브를 열어 일정량의 이산화탄소를 반응기에 공급하였다. 이산화탄소 공급 후 반응시간에 따른 반응기 내 온도와 압력을 1분 단위로 측정하였으며, 충분한 시간이 경과한 후 반응기 내에 압력 변화가 더 이상 없을 때 흡수 실험을 종료하였다. 재생실험은 흡수제에 흡수된 이산화탄소 기체를 탈기하는 방법으로 흡수 반응이 종료되면 반응기의 온도를 항온수조 온도를 95℃ 까지 상승시킨 후 vacuum pump를 사용하여 약 90분 동안 이산화탄소 기체를 탈기하였다. 탈기 과정이 종료되면 흡수평형 반응기의 온도를 흡수실험 온도인 40℃로 낮춘 후 흡수실험과 동일한 조건과 방법으로 재생된 이온성 액체를 대상으로 흡수능을 측정하여 재생 횟수에 따른 흡수능 변화를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 [sulfite]계 음이온 이온성 액체 재생특성

배기가스 중 이산화탄소를 선택적으로 흡수하기 위해 사용되는 액상 흡수제는 주로 아민기가 유도된 흡수제이며, 아민계 흡수제는 산성가스에 의한 피독, 고온에서 산소 접촉에 의한 열화, 순환운전 중 휘발에 의한 연속적인 손실 등의 단점이 있다. 상기의 단점을 극복할 수 있는

액상 흡수제 중 하나가 이온성 액체이나, 이온성 액체의 경우 휘발 및 산성가스에 대한 내구성은 있으나 상대적으로 가격이 높은 단점이 있다. 이러한 흡수제 비용 문제점은 내구성에 의한 장기적 운전 안정성이 확보되면, 새로운 흡수제로 사용 가능성이 제시될 수 있다.

본 연구에서는 음이온이 methyl sulfite인 이온성 액체의 재생성을 평가하기 위하여 기-액 흡수 평형 반응기를 사용하여 이산화탄소의 흡수 및 탈기 실험을 반복 수행하였다. Fig. 2와 Fig. 3은 [emim(N-ethyl-N-methylimidazolium)] methyl sulfite와 [bmim(N-butyl-N-methylimidazolium)] methyl sulfite의 재생특성을 나타낸 그림이다.

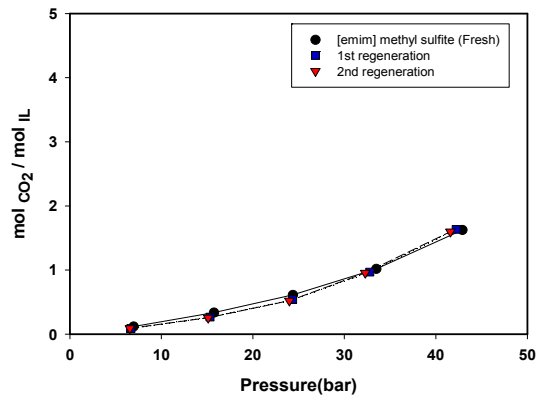


Fig. 2. Efficiency of CO₂ absorption of [emim] methyl sulfite with operating pressure.

그림에서 [emim] methyl sulfite의 경우 압력에 따른 흡수평형 실험을 수행한 압력 범위에서 최초 실험시 이산화탄소 흡수능과 탈기 재생 2회를 수행한 이온성 액체의 흡수능 차이는 약 0.07mol CO₂/mol IL 정도로 매우 작게 나타난다. 이러한 반복운전에 의한 감소량 결과로부터 2회 재생한 이온성 액체의 흡수능이 매우 작은 감소를 나타내며, 흡수능이 우수하게 유지됨을 알 수 있었다. [bmim] methyl sulfite의 경우 적용한 압력범위에서 탈기 전의 흡수능과 탈기 후의 흡수능 차이는 약 0.04 mol CO₂/mol IL 정도로 [emim] methyl sulfite 보다 상대적으로 작게 나타났으며, 반복 운전시 최초 운전시 성능 대비 약 95% 수준의 흡수능을 보였다. 2회 재생 실험한 경우를 비교하면 재생한 횟수에 대한 이온성 액체의 이산화탄소 흡수능의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 이러한 균일성이 유지되는 결과로부터 음이온으로 methyl sulfite를 사용한 두 종류의 이온성 액체 모

두 재생 후 흡수능은 최초 흡수능의 약 90 ~ 95% 수준을 유지함을 보였다.

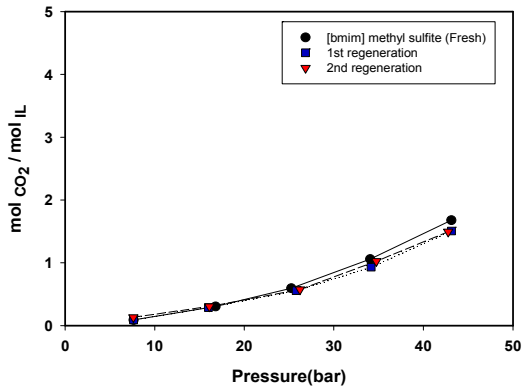


Fig. 3. Efficiency of CO₂ absorption of [bmim] methyl sulfite with operating pressure.

이온성 액체의 음이온 종류에 따른 흡수 및 재생 특성 변화를 조사하기 위해 음이온이 ethyl sulfite인 이온성 액체를 사용하여 운전 압력변화에 따른 흡수 및 탈기 특성을 조사하여 Fig. 4에 나타내었다. 이때 사용된 이온성 액체 중 양이온은 [beim(N-bthyl-N-ethyl-imidazolium)] 이었다. 그림에서 실험 압력조건인 5~40bar 조건에서 탈기 전 흡수능과 탈기 후 흡수능 차이는 약 0.06 mol CO₂/mol IL로 탈기 전 대비 약 97%의 흡수능을 나타내므로 탈기 후의 재생성능은 매우 우수한 편이었다. 압력 변화에 따른 이산화탄소 흡수능 변화는 전체적으로 사용한 이온성 액체의 종류 즉 재생 유무 및 재생 횟수에 관계없이 적용 압력이 증가할수록 흡수능은 급격하게 증가하는 경향을 보이고 있다.

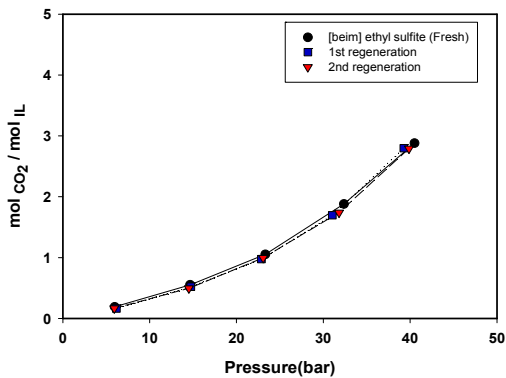


Fig. 4. Efficiency of CO₂ absorption of [bmim] ethyl sulfite with operating pressure.

3.2 희석제 첨가에 따른 이온성 액체의 흡수 특성

이온성 액체를 이용한 이산화탄소 흡수에 있어 주요 장애 요인 중 하나가 이온성 액체의 경우 상업적으로 사용되는 아민계 액상 흡수제에 비하여 상대적 점도가 다소 높다는 점이다. 이는 습식 공정의 경우 흡수제의 이송에 필요한 에너지 비용 증가 및 기-액의 접촉효율의 감소가 나타날 수 있기 때문이다. 동력비와 이산화탄소 흡수 공정에서 사용되는 흡수제의 점도가 높으면 기체-액체 간의 물질 전달의 장애로 작용하여 흡수능에 지장을 줄 뿐만 아니라 흡수 및 재생 과정을 반복적으로 수행하는 공정 특성 상 각종 펌프의 작동과 액체의 이송에 보다 많은 에너지의 소모가 요구되는 단점이 대두 된다. 이러한 단점을 저감시키기 위해 이온성 액체와의 혼합성이 우수하고 이온성 액체와의 반응성이 없는 희석제를 선정하여 흡수능과 재생 특성을 조사하였다. 이러한 방법은 아민법에서도 사용된다[4]. 따라서 희석제에 의한 영향을 연구하고자 DMSO(Dimethyl sulfoxide)와 sulfone(Tetramethylene sulfone)를 사용하여 영향을 고찰 하였다. Fig. 5와 6은 희석제인 DMSO와 sulfone의 조압 압력에 따른 흡수능 및 재생능력의 변화를 나타낸 그림이다. Fig. 5에서 DMSO의 경우 운전 압력 범위의 중간 수준의 압력 범위인 22~32bar의 조건에서 약 0.3~0.5mol CO₂/mol diluent의 흡수력을 보였으며, 흡수 및 탈기 과정을 반복한 재생은 운전 압력 범위에서 매우 높은 재생 능력을 보였다. 2차 재생 후 희석제의 흡수능은 최초 대비 약 95% 이상의 수준을 보였다.

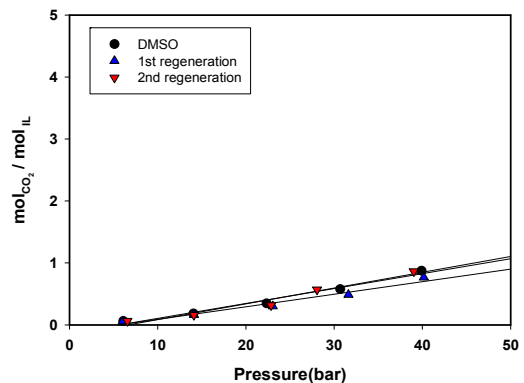


Fig. 5. Efficiency of CO₂ absorption of DMSO with operating pressure.

Fig. 6은 sulfone을 희석제로 사용한 경우이며, DMSO의 경우 동일 운전 압력 범위 22~32bar에서 약 0.4~0.7mol

CO₂ mol diluent의 흡수력을 보이며, 이는 같은 희석제로 사용된 DMSO보다 흡수 능력에서 0.1~0.2mol CO₂/mol diluent 정도 더 높은 수준이었다. 그리고 흡수 및 탈기 과정을 반복한 재생 능력에서는 DMSO의 경우와 유사하게 조업한 압력 범위에서 매우 높은 재생 능력을 보였다. 2차 재생 후 희석제의 흡수능은 최초 대비 약 97% 이상의 높은 수준을 나타내었다.

사용한 희석제 DMSO와 sulfone는 적용한 전 압력 범위에서 조업 압력이 증가할수록 희석제의 이산화탄소 흡수능 또한 증가하였으나, 증가 형태는 희석제를 혼합하지 않은 이온성 액체와 다르게 조업 압력에 따라 선형적으로 증가하였다. 상기의 결과로부터 본 연구에 사용된 두 종류의 희석제 모두 흡수능은 순수 이온성 액체보다 다소 낮은 편이나, 재생능력에서는 매우 우수함을 알 수 있었다.

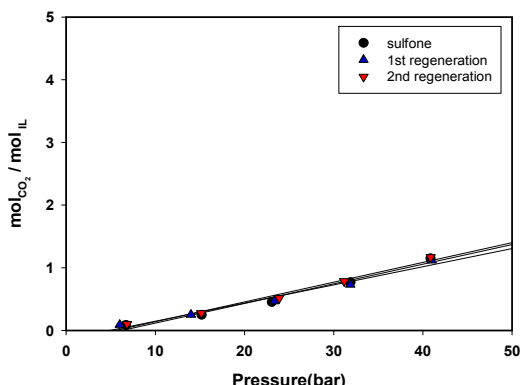


Fig. 6. Efficiency of CO₂ absorption of sulfone with operating pressure.

Fig. 7은 이온성 액체의 점도를 일정 부분 감소시키기 위해 음이온이 sulfite계인 이온성 액체에 희석제를 무게 비로 1:1의 비율로 제조한 혼합 흡수액을 사용하여 조업 압력에 따른 이산화탄소 흡수 능력 변화를 나타낸 그림이다. 이때 DMSO와 sulfone을 희석제로, 음이온이 ethyl sulfite인 이온성 액체를 사용하였다.

그림에서 [eem(N-ethyl-N-ethyl-imidazolium)] ethyl sulfite에 희석제인 DMSO를 희석한 경우 중간 범위의 압력 조건인 22~32bar의 조건에서 0.4~0.7mol CO₂/mol IL의 흡수력을 보였고, 희석제인 sulfone을 희석한 경우 0.5~0.9mol CO₂/mol IL의 흡수력을 보였다. 그리고 [beim] ethyl sulfite에 DMSO의 희석제를 사용한 경우 중간 범위의 압력 조건인 22~32bar의 조건에서 0.6~1.0mol CO₂/mol IL의 흡수력을 보였으며,

sulfone을 사용한 경우 0.7~1.2mol CO₂/mol IL의 흡수력을 보였다. 음이온이 ethyl sulfite인 이온성 액체에 희석제인 DMSO와 sulfone을 사용하였을 때 DMSO를 희석한 경우 보다 sulfone을 희석한 경우가 약 25% 정도 높은 흡수능력을 보였다. 음이온이 ethyl sulfite인 이온성 액체에서 양이온이 달라질 때 이온성 액체의 흡수능 또한 달라짐을 알 수 있었는데, 실험한 두 경우 모두 양이온이 [beim]인 경우가 [eem]인 경우 보다 높은 흡수능을 나타냈다.

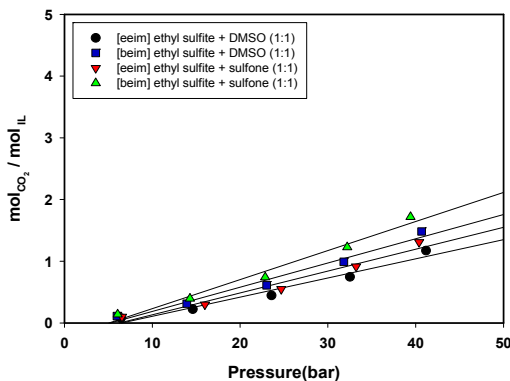


Fig. 7. CO₂ absorption capacity of mixed solution of ionic liquid and dilutant with operating pressure.

[beim] ethyl sulfite의 이온성 액체와 [beim] ethyl sulfite 이온성 액체에 희석제인 sulfone을 혼합한 혼합 흡수액의 이산화탄소 흡수능을 비교하면, 희석제를 첨가한 혼합 흡수액의 흡수력이 대체적으로 낮은 수준을 보이는데 이는 희석제가 이온성 액체 보다 이산화탄소 흡수능에서 낮기 때문이며 혼합에 의한 상호 상승작용은 일어나지 않는 것으로 판단된다.

Table 4. Viscosity of ionic liquids and mixture of ionic liquids and diluent.

samples	Temp.(°C)	Vis. before absorption (cp)	Vis. after absorption (cp)
[beim]ethylsulfite	22°C	125	119.7
[beim]ethylsulfite + DMSO (1:1)	22°C	38.8	36.7
[beim]ethylsulfite + Sulfone (1:1)	22°C	48.1	45.6

그러나 이온성 액체에 희석제 첨가로 인한 점도 감소 효과는 뚜렷이 나타났다. 이온성 액체 [beim] ethyl sulfite를 사용하여 이산화탄소 흡수실험을 실시한 후 측정된 흡수액의 점도는 약 120cp 이었으나 [beim] ethyl sulfite와 sulfone을 동일한 비율로 혼합한 혼합 흡수액을 사용하여 이산화탄소 흡수실험을 실시한 후 측정된 혼합 흡수액의 점도는 약 46cp로 나타났다.

4. 결론

음이온이 sulfite계인 이온성 액체를 1 단계 반응과정을 거쳐 제조하였으며, 제조된 이온성 액체를 사용하여 기체-액체 흡수 평형장치에서 이산화탄소 흡수 및 재생 특성을 조사한 결과는 다음과 같다.

1. 음이온이 methyl sulfite계인 이온성 액체의 경우 재생 후 흡수능은 최초 흡수능의 약 90 ~ 95% 수준을 유지함을 보였으며 또한 재생한 횟수에 대한 이온성 액체의 이산화탄소 흡수능의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.
2. 음이온이 ethyl sulfite인 이온성 액체의 경우 흡수 및 탈기 과정을 거쳐도 탈기 전 대비 약 97%의 흡수능을 보여 탈기 후의 재생성능은 매우 우수한 편이었다.
3. 희석제 DMSO와 sulfone 공히 적용한 전 압력 범위에서 조업 압력이 증가할수록 희석제의 이산화탄소 흡수능 또한 증가하였으나, 증가 형태는 이온성 액체와는 다르게 조업 압력에 따라 선형적으로 증가하였으며, 재생 능력에 있어서는 2차 재생 후 희석제들의 흡수능은 최초 대비 약 95~97% 수준을 보였다.
4. [beim] ethyl sulfite의 이온성 액체와 [beim] ethyl sulfite 이온성 액체에 희석제인 sulfone을 혼합한 혼합 흡수액의 이산화탄소 흡수능을 비교 하면, 희석제를 첨가한 혼합 흡수액의 흡수력이 대체적으로 낮은 수준을 보이는데 이는 희석제의 이산화탄소 흡수능이 이온성 액체 보다 낮기 때문이며 혼합에 의한 상호 상용작용은 일어나지 않는 것으로 판단된다.

References

[1] B.P. Mandal, M. Kundu, S.S. Bandyopadhyay, "Physical solubility and diffusivity of N2O and CO2 into aqueous

solutions of (2-amino -2-methyl-1-propanol+monoethanolamine) and (N -methyldiethanolamine+monoethanolamine)", *J. Chem. Eng. Data*, 50 pp.352-358, 2005.
DOI : <https://doi.org/10.1021/ie049826x>

- [2] A.D. Ebner, J.A. Ritter, "State-of-the-art adsorption and membrane separation processes for carbon dioxide production from carbon dioxide emitting industries", *Sep. Sci. Technol.*, 44 pp.1273-1421, 2009.
DOI : <https://doi.org/10.1080/01496390902733314>
- [3] V. Zelenak, M. Badanicova, D. Halamova, "Amine-modified ordered mesoporous silica: effect of pore size on carbon dioxide capture", *Chem. Eng. J.*, 144, pp.336-342, 2008.
DOI : <https://doi.org/10.1016/j.cej.2008.07.025>
- [4] J. Gabrielsen, M.L. Michelsen, E.H. Stenby, G.M. Kontogeorgis, "A model for estimating CO2 solubility in aqueous alkanolamines", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 44, pp. 3348-3354, 2005.
DOI : <https://doi.org/10.1021/ie04 8857i>
- [5] A.L. Chaffee, G.P. Knowles, Z. Liang, "CO2 capture by adsorption: materials and process development", *Int. J. Greenhouse Gas Control*, 1, pp.11-18, 2007.
DOI : [https://doi.org/10.1016/S1750-5836\(07\)00031-X](https://doi.org/10.1016/S1750-5836(07)00031-X)
- [6] R. Serna-Guerrero, E. Da'na, A. Sayari, "New insights into the interactions of CO2 with amine-functionalized silica", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 47, pp.9406-9412, 2008.
DOI : <https://doi.org/10.1021/ie801186g>
- [7] P. Janiczek, R.S. Kalb, G. Thonhauser, T. Gamse, "Carbon dioxide absorption in a technical-scale-plant utilizing an imidazolium based ionic liquid", *Sep. Purif. Technol.*, 97, pp.20-25, 2012.
DOI : <https://doi.org/10. 1016/j.seppur.2012.03.003>
- [8] Lorena Cuccia, Jose Dugay, Domitille Bontemps, Myriam Louis-Louisy, Jerome Vial, "Analytical methods for the monitoring of post-combustion CO2 capture process using amine solvents: a review", *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 72, pp.138-151, 2018.
DOI : <https://doi.org/10.1016/ j.ijggc.2018.03.014>
- [9] R. Krupiczka, A. Rotkegel, Z. Ziobrowski, "Comparative study of CO2 absorption in packed column using imidazolium based ionic liquids and MEA solution", *Separation and Purification Technology*, 149, pp.228-236, 2015.
DOI : <https:// doi.org/10.1016/j.seppur.2015.05.026>
- [10] Min Xiao, Helei Liu, Hongxia Gao, Wilfred Olson, Zhiwu Liang, "CO2 capture with hybrid absorbents of low viscosity imidazolium-based ionic liquids and amine", *Applied Energy*, 235, pp.311-319, 2019.
DOI : <https://doi.org/10.1016/j.ap energy.2018.10.103>
- [11] Keun Ho Baek, "Absorption characteristic of carbon dioxide in ionic liquids based on sulfite anion in the pre-combustion condition", master thesis, Kunsan national University, 2011.
<http://www.dcollection.net/handler/kunsan/000000007181>

백 근 호(Geun Ho Baek)

[정회원]



- 2009년 2월 : 군산대학교 ·환경공학
학과 (공학석사)
- 2011년 2월 : 군산대학교 토목·환
경공학부 (공학석사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : ㈜진올바이
오테크놀로지

<관심분야>

바이오 공정, 생물학적 폐기물처리, 흡착·흡수

장 현 태(Hyun Tae Jang)

[종신회원]



- 1989년 8월 : 고려대학교 화학공
학과 (공학석사)
- 1996년 2월 : 고려대학교 화학공
학과 (공학박사)
- 1997년 3월 ~ 현재 : 한서대학교
화학공과 교수

<관심분야>

분리공정, 유동층반응

차 왕 석(Wang Seog Cha)

[정회원]



- 1985년 2월 : 고려대학교 화학공
학과 (공학석사)
- 1993년 8월 : 고려대학교 화학공
학과 (공학박사)
- 1994년 3월 ~ 현재 : 군산대학교
토목·환경공학부 교수

<관심분야>

폐기물가스화 및 열분해