

탄소격리기술 중 화학 흡수법의 최근 연구 동향과 공정 시스템 공학의 역할

김영황* · 류준형† · 이인범*

동국대학교 에너지환경대학 에너지환경시스템학과
780-714 경북 경주시 석장동 707
*포항공과대학교 화학공학과
794-784 경북 포항시 남구 효자동 산31
(2009년 2월 11일 접수, 2009년 8월 14일 채택)

Recent Research Trends of Chemical absorption in CCS(Carbon dioxide Capture and Storage) and the role of Process Systems Engineering

YoungHwang Kim*, Jun-hyung Ryu† and In-Beum Lee*

Department of Energy, Systems and Environment, Dongguk University, 707 Seokjang-dong, Geoyngjoo, Gyeongbuk 780-714, Korea

*Department of Chemical Engineering, POSTECH, San 31, Hyoja-dong, Pohang, Gyeongbuk 790-784, Korea

(Received 11 February 2009; accepted 14 August 2009)

요 약

무분별한 화석연료 사용에 따른 온실가스 배출의 영향으로 지구 온난화 현상과 이와 연계된 환경 재해들이 발생하고 있다. 대표적 온실가스인 이산화탄소를 방출하지 않고 포집하여 저장하는데 관련된 일련의 기술들을 CCS(carbon dioxide capture and storage)라 하여 최근 매우 큰 주목을 받고 있다. CCS 기술 중에서 화학 흡수법(chemical absorption)은 대규모 처리가 가능하다는 측면에서 그 중에서 가장 많이 상용화된 기술이다. 하지만 발생하는 이산화탄소를 경제적으로 처리할 수 있기까지는 아직도 많은 부분들을 개선할 필요가 있다. 본 논문에서는 공정 시스템 공학 측면에서 화학 흡수법에 대하여 최근 연구 동향을 살펴보고 향후 연구 방향에 대해 살펴 보고자 한다.

Abstract – Climate changes including environmental disasters after reckless industrialization have been globally witnessed. Considerable attention on the imminent need for developing CCS(Carbon dioxide Capture and Storage) methodologies to minimize the emission thus has been given. Chemical absorption is particularly regarded important because of its commercial availability and applicability to large scale plants. This paper addresses recent trends of chemical absorption technologies and the need for the further research on the topic from the perspective of process systems engineering(PSE).

Key words: CCS(Carbon dioxide Capture and Storage), Chemical Absorption, CO₂ Capture

1. 서 론

경제 발전과 개발을 위한 광범위한 화석연료 사용에 따른 CO₂, CH₄, NO₂와 같은 온실가스 배출로 인하여 지구온난화 현상이 발생하였고 이와 연관된 기후이변 문제가 최근 큰 이슈가 되고 있다. 국제적으로도 교토 의정서(Kyoto Protocol)와 같은 다자간 협의를 통해 전지구적인 문제인 온실가스 감축의 필요성을 인식하고 그 해결책을 강구하고 있다. 교토 의정서의 결과로 OECD 국가 중 한국과 멕시코를 제외한 대부분의 선진국들은 온실가스 감축의무를 가지게 되었다.¹

이산화탄소 배출을 저감하는 것이 경제적, 환경보호적 당위성이 명확하다면, 이산화탄소를 분리하는 방법론에 대한 연구는 그 보급

을 통한 전 지구적 문제 해결에 가장 중요한 이슈라고 말할 수 있다. 석탄과 같은 화석연료를 사용하는 화력 발전 공정, 철강 산업 공정, 석유 화학 공정, 시멘트 공정 및 차량의 배기 가스에서 배출되는 것과 같은 이산화탄소가 다양한 산업 공정 및 일상 생활에서 발생하기 때문에 이를 해결하기 위한 해법 또한 매우 다양할 것이다.

가장 대표적인 대안으로 CCS(carbon dioxide capture and storage)라고 불리는 직접적인 이산화탄소 저감 기술과 신 재생 에너지원이 CO₂를 줄이기 위한 방법으로 큰 관심을 받고 있다. 연료전지, 태양 전지, 풍력발전과 같은 신 재생 에너지는 친환경적이어서 매력적이지만 기술적인 완성도나 경제적 타당성 문제로 당장 기존 화석연료

2007년 기준으로 한국은 온실가스 배출량이 세계 10위권이며 연간 약 6억톤의 CO₂를 배출하고 있는 실정이기 때문에 교토 의정서에서 정하지 않은 2012년 이후에 대해서는 새로운 협상이 예상되며 한국도 의무감축 이행 대상국이 될 것이 확실시 되고 있다.

† To whom correspondence should be addressed.
E-mail: jhryu@dongguk.ac.kr

기반의 설비를 대체할 수는 없다. 이에 따라 화석연료를 사용하는 산업사회의 근간은 상당 기간 유지되어야 하기 때문에 이를 극복하기 위한 기후 변화 대응책으로써 CCS 기술의 중요성이 새삼 강조되고 있다.

이산화탄소를 분리하기 위한 CCS는 세부적으로는 매우 다양한 방법들을 포함하고 있다. 이를 우선 이산화탄소 처리 특성에 따라 몇 가지로 나눌 수 있다. 예를 들어 혼합 기체에서 한 성분을 분리할 수 있는 방법으로는 그 혼합 가스의 물리적 특성을 이용한 선택적 분리가 있을 수 있다. 즉 이산화탄소만 선택적으로 흡착할 수 있는 막을 이용하거나 흡착제를 사용하는 고체 흡착 방법을 이용할 수도 있다. 수증기나 물을 매개로 하여 흡수제를 통하여 CO₂만을 선택적으로 흡수하는 습식 흡수제를 사용하여 분리한 다음에 그 흡수제를 다시 재사용하거나 폐기하는 방법이 있을 수 있다. 촉매를 기반으로 하여 이산화탄소를 화학적 반응을 통해 분리해 내거나 아니면 다른 고부가 물질을 만들어내는 방법도 있을 수 있다. 여기서 촉매를 기반으로 할 때 기체, 액체, 고체의 삼상계(three phase)를 어떻게 처리하는가가 중요한 이슈가 될 것이다. 아니면 생물학적 특성을 이용하여 이산화탄소를 소모하는 미생물을 유전공학을 통하여 변형시켜 만들어내고 대량 배양하여 이산화탄소를 처리하는 방법을 이용할 수도 있을 것이다.

CCS에 대한 방법을 적용 위치 측면에서 살펴본다면 CO₂를 배출원에서 분리 및 회수하는 회수 기술과 반영구적으로 저장시켜 대기로부터 격리시키는 저장과 관련된 저장기술의 두 가지로 구분된다. 세부적으로 CO₂ 회수기술에는 기존 공정에서 발생(대부분 연소 반응을 통해서)한 이후에 포집 기술하거나, 기존 공정을 변경하여 연소 전에 탄소와 산소의 반응이 일어나지 않도록 하는 탈 탄소화 기술을 통해 이산화탄소 발생을 사전에 막거나, 순산소 연소 기술의 세 가지가 있다. CO₂ 저장 기술은 크게 enhanced oil recovery(EOR), 지중저장 또는 해저저장 방법이 있다. 현재 CO₂를 감소시키는 방법으로 CCS가 가장 확실하지만 CCS 기술을 실제 현장에 적용할 수 있을 정도로 경제적 타당성이나 이에 따른 연구 개발이 완성된 것은 아니다.

국내뿐만 아니라 기후 변화 문제로 인하여 CCS 분야에 대해 많은 연구가 진행되어 그 안에서 상당한 연구 주제의 세분화가 이루어졌다. 본 논문은 CCS 공정 전반적인 부분보다는 그 중에서 가장 상용화까지 연구가 많이 진행되어 실제 공정 모델로까지 발전되어 있는 습식 흡수 공정에 대하여 그와 관련된 연구들을 살펴 보는데 집중하였다. CCS 기술이 실질적으로 구현되기에 가장 근접한 기술인 습식 흡수 공정을 살펴 보면서 향후 발전 가능성을 살펴 보는 것이 주 목적이었다. 지금까지의 연구가 CCS 기술의 도입을 개별적으로 연구가 되어 왔지만 전체적인 관점에서 살펴보는 연구가 지금까지 되지는 못하였다. 따라서 본 논문에서는 가능한 관련된 여러 연구들을 살펴보고자 한다.

2. 습식 흡수 공정

연소 후 포집 기술 또는 사후처리 기술에 속하는 화학 흡수법은 흡수제를 사용하여 CO₂를 제거하는 방법이다. 화학 흡수법의 장점이라고 한다면 현재 상용화가 가능한 기술이고 대규모 처리가 가능하며 CCS 기술 중에 상대적으로 앞선 기술이라고 할 수 있다. 천연가스 산업에서 CO₂를 제거하기 위해 흡수제를 사용하는 방법은

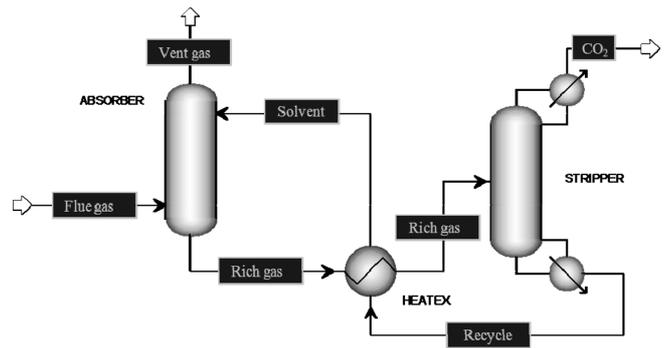


Fig. 1. Simplified Diagram of CO₂ capture/stripper process.

1930년대부터 사용되기 시작하여 잘 알려져 있고 오래된 방법이다[2].

Fig. 1은 습식 흡수제를 사용하는 CO₂ 흡수의 전형적인 공정도를 개념적으로 나타낸다. Flue gas가 흡수탑 하단부에 들어가서 흡수제와 반응하여 수용액 상태로 하단부에 나오게 되고 상단부에는 질소가 대부분인 가스가 나와서 버려지게 된다. CO₂를 포함한 흡수제는 재생탑으로 가게 되고 여기서 열에 의해 CO₂와 흡수제가 분리된다. 여기서 분리된 CO₂는 저장지로 가게 되고 흡수제는 다시 재생되어 사용된다. 이 방법은 재생에 많은 열을 필요로 하기 때문에 CO₂ 처리비용이 증가하게 된다. 현재 화학 흡수법 관련 연구는 주로 에너지 비용을 줄이기 위한 모델링, 공정 설계, 최적화와 관련된 연구들 [3-22,29,32-35]과 첨가제(Promoter) 첨가를 통한 흡수제의 성능을 향상시키려는 연구들[8,11,32-35]이 또한 많았다. 공정 개발 자체보다는 전체 성능을 향상시키기 위해서는 가장 중요한 것 중의 하나가 흡수제의 성능일 것이다. 가장 널리 알려진 물질로는 Amine 계열과 암모니아가 있다. 따라서 다음으로 이 두 흡수제에 대하여 조금 더 자세히 살펴 보겠다.

2-1. 아민 계열 흡수제

흡수제로 가장 잘 알려져 있는 것이 alkanamine 계열의 물질들이다. 잘 알려진 것이 MEA(MonoEthanolAmine)과 DEA(DiEthanolAmine)인데 Primary alkanamine(MEA)와 secondary alkanamine(DEA)의 장점으로 빠른 CO₂ 흡수속도를 말할 수 있다. 대신에 흡수 후에 다시 사용하기 위한 재생에 에너지가 많이 든다는 것이 단점이라 할 수 있다. 또한 상대적으로 낮은 CO₂ 흡수용량(0.5 mol CO₂/mol Amine)을 가지고 있다. 이와 다르게 Tertiary alkanamine 계열(주로 MDEA; MethylDiEthanolAmine)은 CO₂ 흡수속도가 느린 대신 재생에 에너지가 적게 든다는 장점이 있고 또한 높은 CO₂ 흡수용량(1 mol CO₂/mol Amine)을 가지고 있다. 그럼에도 불구하고 느린 CO₂ 흡수속도로 인해 실제 공정에 적용할 수 없다고 한다[3]. 마지막으로 sterically hindered amine 계열은 기존 아민계열 흡수제에 비해 더 좋은 성능을 보여준다고 한다[4].

Mohammad 등[14]은 다양한 parametric study를 통해 에너지 비용을 줄일 수 있다고 주장하였고(Table 1 참조) 또한 최적인전조건을 제시하였다. Mohammad 등[15]은 이후에 발표된 논문에서 전체

Table 1. Mohammad's results[14] and comparison of other literature[24]

| | Chapel et al. [24] | Mohammad et al.[14] (using 30 wt% MEA) | Mohammad et al.[14] (using 30 wt% MEA) |
|--------------------|----------------------------|--|--|
| Energy requirement | 4.2 GJ/ton CO ₂ | 3.3 GJ/ton CO ₂ | 3.0 GJ/ton CO ₂ |

Table 2. MEA's advantage and disadvantage

| Advantage | Disadvantage |
|----------------------|--------------------------------------|
| High absorption rate | Low CO ₂ loading capacity |
| For a large scale | Equipment corrosion |
| For a dilute system | Amine degradation |
| | High energy requirement |

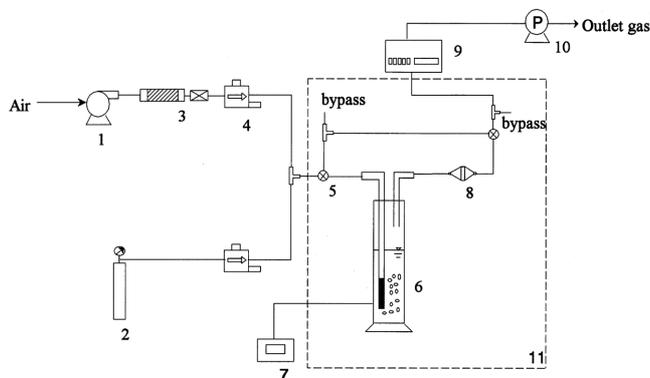
비용을 줄이기 위해 운전비용, 장치비 등을 총체적으로 고려한 연구를 발표하였다. 전체적으로 비용(장치비, 운전비용, 에너지 비용)을 줄이기 위한 공정 모사(simulation)나 모델링 관련[3-22] 연구가 많았다. Luis 등[23]은 에너지 비용을 줄이기 위해 power plant와 CO₂ 흡수공정의 integration 관련 연구를 하였다. MEA와 CO₂ 반응에 대한 정확한 메커니즘은 밝혀지지 않았지만 일반적으로 다음과 같은 반응으로 알려져 있다.



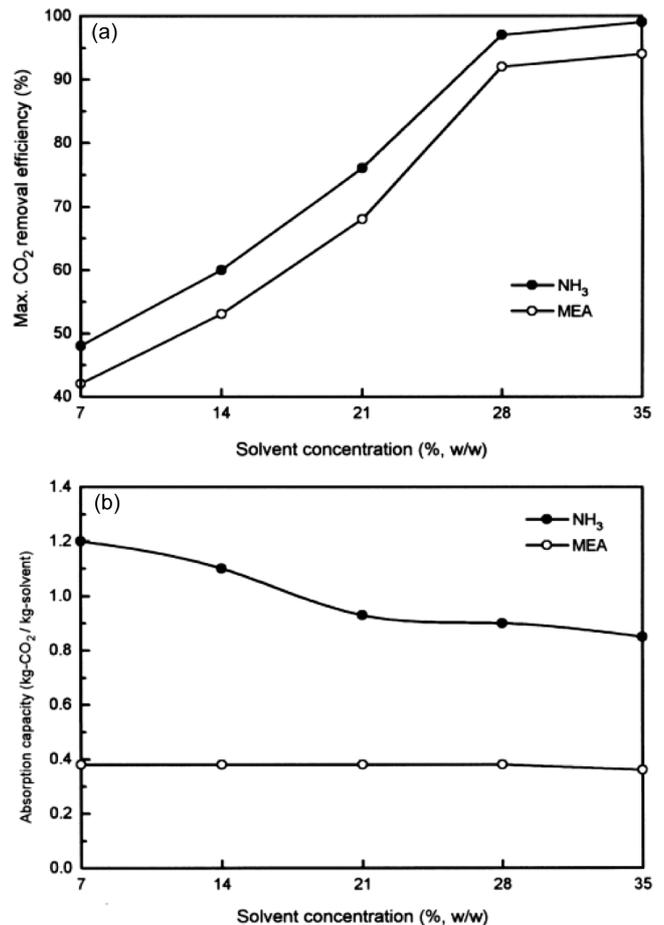
위의 반응에서 알 수 있듯이 1몰의 CO₂를 제거하기 위해 2몰의 MEA가 필요하다는 것을 알 수 있다. 이것은 MEA의 흡수용량이 낮다는 것을 의미한다. Table 2에 MEA의 장단점을 요약하였다. 이러한 MEA의 단점을 극복하기 위해 다른 흡수제[25-35]나 기존의 흡수제에 promoter를 첨가하는 연구[32-35]도 진행되고 있다.

2-2. 암모니아 흡수제

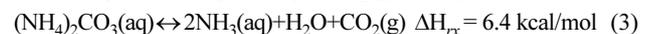
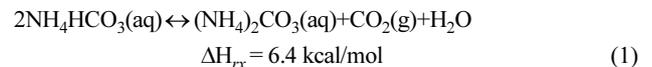
최근에 MEA를 대체할 수 있는 물질로써 Bay와 Yeh[25,26]에 의해 흡수제로써 암모니아의 가능성이 부각되었다. Fig. 2와 같이 흡수장치를 통해 실험하였고 MEA와 암모니아를 비교하여 암모니아의 상대적 우수성을 보여주었다. Fig. 3은 암모니아가 MEA보다 더 좋은 CO₂ 제거 효율과 흡수 용량을 가지고 있다는 것을 보여주고 있다. Fig. 4는 다양한 흡수제 조성에 대해 시간 대 반응 온도 그래프를 보여주고 있다. MEA는 단순히 발열반응만 일어나는 반면 암모니아는 28% 이상의 농도에서는 흡열반응, 발열반응이 차례로 일어남을 알 수 있다는 것이 특이하다. 또한 암모니아의 온도 증가량이 MEA에 비해 낮기 때문에 재생에 필요한 에너지가 적다는 것을 예측할 수 있다.

**Fig. 2. Schematic diagram of the experiment setup[25,26]**

- Air compressor
- CO₂ cylinder
- Dehumidifier and HEPA filter
- Mass flow controller
- Three-way valve
- CO₂ absorber
- Temperature recorder
- 47 mm membrane filter
- CO₂ analyzer
- Pump
- Constant temperature controller

**Fig. 3. The effects of solvent concentration on (a) CO₂ removal efficiency and (b) MEA temperature variations[26].**

Rensnik 등[27]은 암모니아의 장점을 다음과 같이 지적하였다. 우선 첫째로 high loading capacity, 둘째로 equipment corrosion 문제가 없다는 것, 셋째로 degradation problem이 없다는 것, 넷째로 재생에 에너지가 적게 든다고 언급하였다. 재생 반응은 크게 3가지 반응이 있을 수 있다.



재생에 필요한 에너지를 heat of reaction, sensible heat, heat of vaporization 3가지를 통해 예측한 것을 Table 3에서 보여주었다. MEA의 경우 재생을 위해 스팀을 넣어주기 때문에 heat of vaporization이 필요하지만 실제로 암모니아를 이용할 경우 스팀이 필요 없기 때문에 heat of vaporization이 0이고 sensible heat도 낮은 편이어서 에너지 측면에서 MEA보다 재생에너지가 50~60% 적게 든다고 예측하였다.

이러한 장점에 불구하고 암모니아를 흡수제로 사용하려는 연구는 최근에 이루어져 MEA 연구에 비해 아주 미미한 실정이다. 국내 철강 산업과 관련된 곳에서 이와 관련된 파이프 연구가 시작하였다고 한다. 암모니아도 강한 휘발성, CO₂와 반응해 침전물(주로 ammonium bicarbonate)을 생성한다는 단점이 존재한다. Rensnik 등[27]은 흡수제 손실과 관련하여 Table 4와 같은 언급이 있었다. 표를 통해 흡수

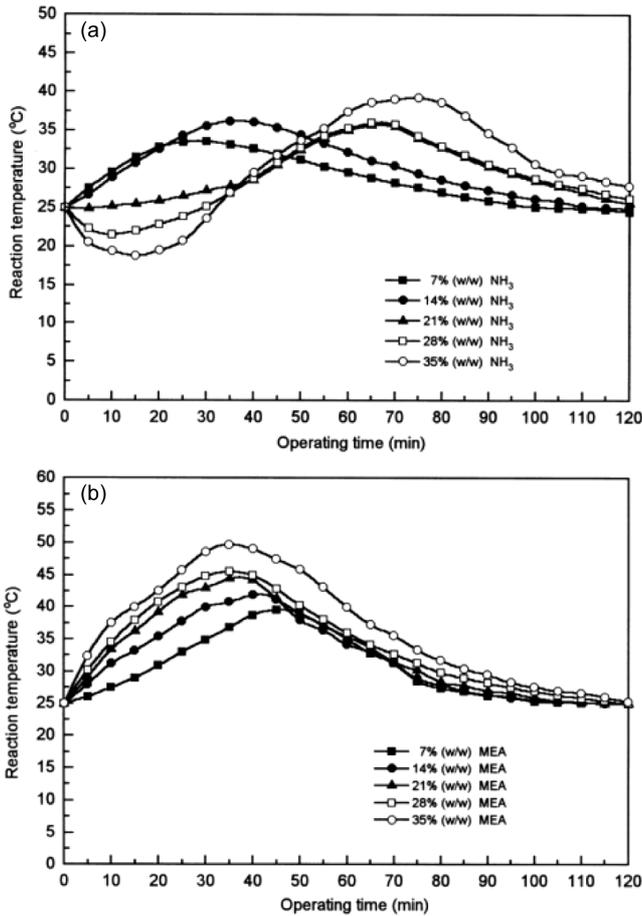


Fig. 4. The effects of solvent concentration on (a) NH₃ and (b) solvent absorption capacity[26].

제 손실이 큼을 알 수 있다. 최근에는 Yoo 등[29]은 침전이 생성되지 않는 조업조건을 찾는 연구를 하기도 하였다. 아직 암모니아에 대한 연구는 전체적으로 미미하지만 암모니아의 가능성으로 인해 연구가 더 진행되어야 한다고 본다.

2-3. Potassium Carbonate/Piperazine(PZ)

아민계 흡수제는 CO₂ 흡수율이 빠른 대신 heat of absorption이 크다. 반면 Potassium Carbonate는 흡수 속도는 느린 대신 heat of absorption이 physical solvents와 비슷하다고 한다. 따라서 재생에 필요한 에너지가 적을 것으로 예상된다. 이 것을 Table 5에서 간략하게 요약하였다. Potassium Carbonate의 단점을 해결하기 위해 piperazine을 promoter로 첨가함으로써 Potassium Carbonate의 문제를 해결할 수 있을 것으로 예상된다.

CO₂와 Piperazine의 반응에 의해 여러 가지 물질이 생길 수 있는

Table 4. Solvent loss [27]

| | | | |
|---------------------|---------------|----------------|----------------|
| Solvent composition | 7 wt% Ammonia | 14 wt% Ammonia | 21 wt% Ammonia |
| Solvent Loss | 30% | 32% | 43% |

Table 5. Comparison between amines and Potassium Carbonate

| | | |
|--------------------|--------|------------------------------|
| | Amines | Potassium Carbonate |
| Absorption Rate | Fast | Slow |
| Heat of Absorption | high | Similar to physical solvents |

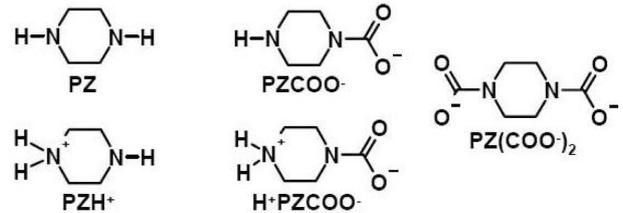


Fig. 5. Various piperazine's structures in presence of CO₂[32].

Table 6. Comparison of literature that are concerned with Potassium Carbonate

| | | | |
|--------------------|----------------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| Processes | Conventional process (Using MEA) | Babatunde et al. [33] | Jochen et al. [35] |
| Reboiler heat duty | 3.8-4.2 GJ/ton CO ₂ | 3.2-3.7 J/ton CO ₂ | 2.4 GJ/ton CO ₂ |

데 그 구조들은 Fig. 5에서 살펴 볼 수 있다. Potassium Carbonate에 promoter로 piperazine을 첨가함으로써 여러 가지 장점을 가질 수 있다[32]. Piperazine은 diamine이기 때문에 1몰 Amine에 대해 2몰의 CO₂가 반응한다. Potassium Carbonate가 같이 존재하기 때문에 추가적인 CO₂ 저장소 역할을 할 수 있다. 따라서 다른 아민계 흡수제에 비해 더 큰 capacity를 가진다. 또한 2개의 amine functional group은 반응속도를 더욱더 증가시켜 준다. 또한 용액에 많은 양의 carbonate/bicarbonate 이온들은 buffer 역할(amine들의 protonation을 막기 때문에 amine들이 원래 상태로 존재)을 한다.

Potassium Carbonate/Piperazine에 대한 모델링 및 시뮬레이션 관련 연구[32-35]가 있었다(Table 6 참조). 두 논문 모두 재생에너지는 적으나 실제로 추가되는 piperazine의 가격에 대한 고려가 없다. 따라서 solvent 가격과 에너지비용까지 고려하는 등 경제성 비교 측면에서 추가적인 연구가 필요할 것으로 본다.

3. 이외의 방법들

일반적으로 CO₂를 처리하는 첫 단계는 CO₂를 흡수/재생하는 단계, 두번째 단계는 분리한 CO₂를 수송 저장시키는 단계로 나눌 수 있다. 첫 단계가 전체에 차지하는 비용이 약 2/3~3/4 정도라고 한다

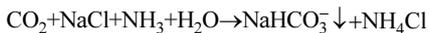
Table 3. Regeneration heat required. Comparison of a 14% aqueous Ammonia solution to current MEA technology [26]

| Process | Heat of reaction | Sensible heat | Heat of vaporization | Total | % reduction from MEA process |
|------------------------|------------------|---------------|----------------------|-------|------------------------------|
| MEA | 20.0 | 79.4 | 18.9 | 118.3 | 0 |
| NH ₃ (Eq.1) | 6.4 | 36.0 | 0 | 42.4 | 64% |
| NH ₃ (Eq.2) | 24.1 | 36.0 | 0 | 60.1 | 49% |
| NH ₃ (Eq.3) | 15.3 | 36.0 | 0 | 51.3 | 57% |

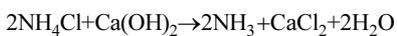
(unit: kcal/mol)

[40]. 대안으로 생각되는 것이 CO₂를 carbonate salts 형태로 변환해서 주위 환경에 배출하는 것이다. Carbonate salts는 주위환경에 무해하다고 한다. CO₂를 carbonate salts로 변환하는 연구가 몇 가지 [37-40]가 있다. Kojima 등[37]은 alkaline mineral을 분쇄시키고 용해시켜 CO₂와 반응시켜 magnesium carbonate와 calcium carbonate를 생성시킬 수 있다고 제안하였다. Lackner 등[38]은 carbonate 형성을 촉진시키기 위한 thermodynamics 관련 연구를 하였다. Rau 등[39]은 carbonate 형성을 더 촉진시키기 위해 CO₂ 반응기를 사용하였다. Huang 등[40]은 Solvay 프로세스를 이용하여 CO₂ 처리하려는 연구를 하였다.

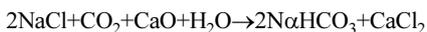
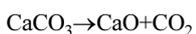
Solvay 프로세스는 소다회로 알려진 공업용 알칼리 탄산나트륨을 제조하는 근대적 공법으로 에르네스트 솔베이가 고안한 방법으로 상업적으로 이용되었다[41]. 솔베이는 1865년 벨기에의 쿠에에 공장을 세웠으며, 1870년대에 독일 태생 영국의 화학자 루트비히 문트가 이 공정을 개선했다. 암모니아-소다법에서 염화나트륨을 암모니아(primary alkali, 촉매로 사용됨)로 처리하고 매우 세심하게 조절된 조건에서 이산화탄소로 처리하면 탄산수소나트륨과 염화암모늄이 생성된다. 탄산수소염을 가열하면 원하는 생성물인 탄산나트륨을 얻을 수 있다. 반응식은 다음과 같다.



염화암모늄을 석회로 처리하면 암모니아와 염화칼슘이 얻어지는데 이때 생성되는 암모니아는 다시 사용한다.



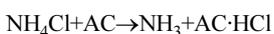
이 공정이 도입된 몇 년 동안은 전에 사용되던 르블랑법과 경쟁이 심했으나 나중에는 보다 값싸게 소다회를 얻을 수 있는 암모니아-소다법을 널리 사용되었다. Solvay 프로세스를 바로 CO₂ 처리에 사용할 수 없다. 왜냐하면 첫째로 에너지 소모가 크고 2몰의 CO₂를 흡수하지만 석회석의 calcination으로 인해 1몰의 CO₂가 다시 방출된다.



Huang et al.은 Solvay process를 CO₂ 처리에 이용하기 위해 modified Solvay process를 연구하였다. 암모니아 대신 primary alkali로 효율적인 MAE(methylAminoEthanol) 사용하였다.



또한 석회석을 사용하여 암모니아를 재생하는 대신 Activated Carbon(AC)을 사용하였다. 이러한 modified Solvay process 통해 CO₂를 bicarbonate 형태로 변환시킬 수 있음을 보여주었고 또한 암모니아 재생에 석회석 대신 AC를 사용할 수 있음을 보여주었다.



4. 향후 연구 방향

전세계적으로 CO₂ 문제를 해결해야 한다는 공감대는 형성되어 있고 그 중에 CCS 기술이 주목을 받고 있다. CCS 기술 중 chemical

absorption은 대규모 처리가 가능하다는 장점으로 상용화가 다른 어떤 기술보다 가장 가능성 있는 기술로 평가되고 있다. 그러나 앞에서 살펴본 것과 같이 흡수제로서의 성능이나 재생 에너지가 많이 든다는 단점은 여전하다. 따라서 아민 계열 흡수제의 문제점을 해결하려는 노력이 많았으며 주로 비용을 줄이기 위한 연구가 많았다. 저비용으로 고효율을 낼 수 있는 물질 개발에 많은 노력들이 지금도 시도되고 있으며 첨가제(promoter) 첨가를 통한 흡수제 향상을 위한 연구도 많았다. 하지만 완전한 해결하기 위해서 지속적인 연구가 필요하다.

이산화탄소를 제거해야 하는 필요성에도 불구하고 이들 개발된 물질들을 프로세스화하여 대표적인 이산화탄소 발생 산업인 석탄 화력 발전소나 제철 산업, 석유 화학 산업, 시멘트 산업 등 실제 현장에 설치하여 가시적인 절감 효과를 얻기 위해서는 해결해야 할 많은 문제들이 있다. 본 논문에서 언급되지 못했던 부분들, 예를 들어 기존 산업 현장에 제거 시설이 설치에 따른 장소 제약을 해결할 수 있을 정도의 규모(scale) 문제 해결, 또한 현실적으로 제거하기 위한 이산화탄소 흡수제가 가지고 있는 다른 환경 오염 문제는 혹시 없는지, 즉 2차적인 문제점이 없는지에 대한 문제점이라던가 분리제를 재사용하기 위한 비용이나 방법론에 대하여 추가적인 연구가 계속되어야 할 것이다. 공정 모사를 통한 이행 가능성 있는 공정을 개발하고 이를 적용하기 위해서는 실제 공정 운영자와 공정 시스템공학 측면의 지속적인 상호 교류가 필요하다고 하겠다.

경제성 측면에서 조금 더 확장한다면 정부 보조금과 최근 주목 받고 있는 탄소 배출권 가격을 어떻게 산정하는 것이 적합한 것인가, 또한 이를 고려한 이산화탄소 처리 비용이 얼마나 되어야 실제적인 산업 현장에서 채산성이 맞는 것인가, 또한 외국과의 국제 협상에서 한국의 탄소 배출권과 연계된 향후 목표치를 어떻게 선정하는가와 이에 따른 기술 개발 우선 순위를 어떻게 하는가 등등은 매우 실제적이면서도 화학공학 및 공정 시스템 공학에서 상당한 실제적인 기여를 할 수 있는 분야가 될 수 있을 것이다.

공정 시스템 분야 측면에서는 우선 거시적 측면에서 살펴본다면 연구실 단위에서 개발된 물질이나 프로세스를 실제 운영 중인 프로세스에 설치하기 전에 개발된 물질, 촉매, 프로세스의 성능을 사전에 확인해 보고 잠재적인 문제점들이 있을 수 있는가에 대한 확인을 할 수 있는 공정 모사를 수행한다. 이산화탄소를 저감하려는 특정 목적에 대한 정확한 반응 모델을 반영하는 모델들이 아직까지 정확하게 구현되어 있는지에 대한 확인이 필요하다. 이 확인 작업을 통하여 경제성을 검토하기 위하여 현장 상황을 반영할 수 있는 데이터를 확보하는 등 실험실과 실제 현장 사이에서 다리 역할을 할 수 있는 연구가 필요하다.

한편 Aspen Plus와 같은 공정 모사 소프트웨어를 통하여 chemical absorption 공정을 모사할 때 많이 발생하는 어려운 점은 이산화탄소를 흡수하고 나서 재생하여 다시 투입하는 재순환(recycle)되는 공정 흐름을 어떻게 하여 정상 상태를 유지시킬 수 있는지에 따라 방법론 개발이 성공적인 모사를 위해 매우 필요하다.

미시적으로는 실제 산업 현장에서 이산화탄소를 분리하기 위해서는 실제 공정에서는 기체-액체-고체의 세 가지 상태를 동시에 고려한 반응을 고려해야 하는데 이를 정확하게 나타내 주는 열역학적 모델을 정확하게 구현할 수 있는 방법론을 개발해야 한다. 또한 기존에 개발된 모델들도 대부분이 목적 제품의 생산량이나 수율 최대화나 오염성 있는 폐기물 발생을 최소화하는 등의 목적에 특화되었

기 때문에 여기에 이산화탄소 발생을 최소화시킨다는 새로운 목적 함수를 대응시키기 위해서 취해져야 하는 공정 변동을 적절하게 준비해야만 한다.

5. 결론(Concluding Remarks)

본 논문이 다루고 있는 습식 공정은 가장 경제적으로 저렴하면서도 대규모로 설치가 가능하다는 현실적으로 가장 대표적인 CCS 기술이다. 따라서 대표적인 분야에 대해서 이완 관련된 다양한 분야들을 개별적이지 않고 통합적이며 전반적인 관점에서 살펴보는 것은 의미있다고 판단된다. 이러한 전체적 관점에서 본 논문의 가치를 분석할 필요가 있을 것이다.

감 사

본 연구는 포항제철 주식회사의 재정 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC), Carbon Dioxide Capture and Storage, *Cambridge University Press*.
- Kohl, A. L. and Nielsen, R. B., Gas Purification, *Gulf Publishing Company*, fifth ed.(1997).
- Jostein, G., Svendsen, H. F., Michelsen, M. L., Stenby, E. H. and Kontogeorgis, G. M., "Experimental Validation of a Rate-based Model for CO₂ Capture Using an AMP Solution," *Chem. Eng. Sci.*, **62**, 2397-2413(2007).
- Francis, B. and Iliuta, M. C., "Kinetics of Absorption of Carbon Dioxide into Aqueous Solutions of 2-amino-2-hydroxymethyl-1,3-propanediol," *Chem. Eng. Sci.*, **64**, 153-162 (2009).
- Abanades, J. C., Rubin, E. S. and Anthony, E. J., "Sorbent Cost and Performance in CO₂ Capture Systems," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **43**(13), 3462-3466(2004).
- Aboudheir, A., Tontiwachwuthikul, P. and Idem, R., "Rigorous Model for Predicting the Behavior of CO₂ Absorption into AMP in Packed-bed Absorption Columns," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **45**(8), 2553-2557(2006).
- Bello, A. and Idem, R. O., "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**(8), 2569-2579(2006).
- Lawal, A. O. and Idem, R. O., "Kinetics of the Oxidative Degradation of CO₂ Loaded and Concentrated Aqueous MEA-MDEA Blends During CO₂ Absorption from Flue Gas Streams," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **45**(8), 2601-2607(2006).
- Ma'mun, S., Jakobsen, J. P., Svendsen, H. F. and Juliussen, O., "Experimental and Modeling Study of the Solubility of Carbon Dioxide in Aqueous 30 mass% 2-((2-aminoethyl)amino)ethanol Solution," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **45**(8), 2505-2512(2006).
- Oyeneke, B. A. and Rochelle, G. T., "Energy Performance of Stripper Configurations for CO₂ Capture by Aqueous Amines," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **45**(8), 2457-2464(2006).
- Ramachandran, N., Aboudheir, A., Idem, R. and Tontiwachwuthikul, P., "Kinetics of the Absorption of CO₂ into Mixed Aqueous Loaded Solutions of Monoethanolamine and Methyldiethanolamine," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **45**(8), 2608-2616(2006).
- Tanthapanichakoon, W., Veawab, A. and McGarvey, B., "Electrochemical Investigation on the Effect of Heat-stable Salts on Corrosion in CO₂ Capture Plants Using Aqueous Solution of MEA," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **45**(8), 2586-2593(2006).
- Tobiesen, F. A. and Svendsen, H. F., "Study of a Modified Amine-based Regeneration Unit," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **45**(8), 2489-2496(2006).
- Mohammad, R. M., Leon, A.-Z., Schneiders, H. J. and John, P. M., "Niederer, CO₂ Capture from Power Plants: Part I. A Parametric Study of the Technical Performance Based on Monoethanolamine," *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **1**, 37-46(2007).
- Mohammad, R. M., Abu-Zahra, John P.M. Niederer, Paul H.M. Feron and Versteeg, G. F., "CO₂ Capture from Power Plants: Part 2. A Parametric Study of the Economical Performance Based on Monoethanolamine," *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **1**, 135-142(2007).
- Majeed, S. J. and Gary, T. R., "Innovative Absorber/Stripper Configurations for CO₂ Capture by Aqueous Monoethanolamine," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **45**, 2465-2472(2006).
- Hsuan, C. and Shih, C.-M., "Simulation and Optimization for Power Plant Flue Gas CO₂ Absorption-Stripping Systems," *Sep. Sci. Technol.*, **40**, 877-909(2005).
- Umberto, D. and Alberto Paolucci, "Performance Modeling of a Carbon Dioxide Removal System for Power Plants," *Energy Conv. Manag.*, **40**, 1899-1915(1999).
- Alie, C., Backham, L., Croiset, E. and Douglas, P. L., "Simulation of CO₂ Capture Using MEA Scrubbing: A Flowsheet Decomposition Method," *Energy Conv. Manag.*, **46**, 475-487(2005).
- Stefano, F. and Gary, T. R., "Modeling of CO₂ Capture by Aqueous Monoethanolamine," *AIChE J.*, **49**(7), 1676-1686(2003).
- Rao, A. B. and Rubin, E. S., "A Technical, Economic and Environmental Assessment of Amine-base CO₂ Capture Technology for Power Plants Greenhouse Gas Control," *Environ. Sci. Technol.*, **36**, 4467-4475(2002).
- Kvamsdal, H. M., Jakobsen, J. P. and Hoff, K. A., "Dynamic Modeling and Simulation of a CO₂ Absorber Column for Post-combustion CO₂ Capture," *Chemical Engineering and Processing*, In Press(2008).
- Luis, M. R., Irene, B. and Jesus, M. E., Integration of Power Plant and Amine Scrubbing to Reduce CO₂ Capture Costs.
- Chapel, D., Ernst, J. and Mariz, C., "Recovery of CO₂ from Flue Gases: Commercial Trends," *Can. Soc. Chem. Eng.*
- Hsuling, B. and Yeh, A. C., "Removal of CO₂ Greenhouse Gas by Ammonia Scrubbing," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **36**, 2490-2493(1997).
- Yeh, A. C. and Hsuling, B., "Comparison of Ammonia and Monoethanolamine Solvents to Reduce CO₂ Greenhouse Gas Emissions," *The Science of the Total Environment*, **228**, 121-133(1999).
- Resnik, K. P., Yeh, J. T. and Pennline, H. W., "Aqua Ammonia Process for Simultaneous Removal of CO₂, SO₂, NO_x," *Int. J. Environ. Technol. Manag.*, **4**, 89-104(2004).
- Yeh, J. T., Resnik, K. P., Rygle, K. and Pennline, H. W., "Semi-batch Absorption and Regeneration Studies for CO₂ Capture by

- Aqueous Ammonia' *Fuel Processing Technology*, **86**, 1533-1546 (2005).
29. Yoo, J. K., Park, H. S., Hong, W. H., Park, J. and Kim, J.-N., "Effect of Precipitation on Operation Range of the CO₂ Capture Process using Ammonia Water Absorbent," *Korean Chem. Eng. Res.*, **45**(3), 258-263(2007).
 30. Pazuki, G. R., Pahlevanzadeh, H. and Ahooei, A. M., "Solubility of CO₂ in Aqueous Ammonia Solution at Low Temperature," *Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry*, **30**, 27-32(2006).
 31. Diao, Y.-F., Zheng, X.-Y., He, B.-S., Chen, C.-H. and Xu, X.-C., "Experimental Study on Capturing CO₂ Greenhouse Gas by Ammonia Scrubbing," *Energy Conv. Manag.*, **45**, 2283-2296(2004).
 32. Cullinane, J. T., "Thermodynamics and Kinetics of Aqueous Piperazine with Potassium Carbonate for Carbon Dioxide Absorption," *Ph. D. Dissertation*. University of Texas at Austin(2005).
 33. Babatunde, A. O. and Gary, T. R., "Rate Modeling of CO₂ Stripping from Potassium Carbonate Promoted by Piperazin," *International Journal of Greenhouse Gas Control*. In press(2005).
 34. Cullinane, J. T. and Gary, T. R., "Carbon Dioxide Absorption with Aqueous Potassium Carbonate Promoted by Piperazin," *Chem. Eng. Sci.*, **59**, 3619-3630(2004).
 35. Oexmann, J., Hensel, C. and Kather, A., Post-combustion CO₂-Capture from Coal Fired-power Plants: Preliminary Evaluation of An Integrated Chemical Absorption Process with Piperazine-promoted Potassium Carbonate,' *International Journal of Greenhouse Gas Control.*, **2**, 539-552(2008).
 36. Yang, H., Xu, Z., Fan, M., Gupta, R., Slimane, R. B., Bland, A. E. and Wright, I., "Progress in Carbon Dioxide Separation and Capture: A Review," *J. Environ. Sci.*, **20**, 14-27(2008).
 37. Kojima, T., Nagamine, A., Ueno, N. and Uemiya, S., "Absorption and Fixation of Carbon Dioxide by Rock Weathering," *Energy Conv. Manag.*, **38**, 461-466(1997).
 38. Lackner, K. S., Wendt, C. H., Butt, D. P., Joyce, E. L. and Sharp, D. H., "Carbon Dioxide Disposal in Carbonate Minerals," *Energy (Oxford).*, **20**, 1153-1170(1995).
 39. Rau, G. H. and Calderia, K., "Enhanced Carbonate Dissolution: A Means of Sequestering Waste CO₂ as Ocean Bicarbonate," *Energy Convers Manage.*, **40**, 1803-1813(1999).
 40. Huang, H. P., Shi, Y., Li, W. and Chang, S. G., "Dual Alkali Approaches for the Capture and Separation of CO₂," *Energy & Fuels.*, **15**, 263-268(2001).
 41. <http://enc.daum.net/dic100/contents.do?query1=b14a4029a>.