

단 신

Vortex Tube 형 흡수장치에서 MEA와 혼합흡수용액을 이용한 CO₂ 제거 효율 고찰

류우정 · 한근희[†] · 최원길 · 이종섭 · 박소진*

한국에너지기술연구원
305-343 대전시 유성구 장동 71-2
*충남대학교 화학공학과
305-764 대전시 유성구 공동 220
(2009년 8월 12일 접수, 2009년 10월 6일 채택)

A Study on the CO₂ Removal Efficiency with Aqueous MEA and Blended Solutions in a Vortex Tube Type Absorber

Woo-Jung Ryu, Keun-Hee Han[†], Won-Kil Choi, Jong-Sub Lee and So-Jin Park*

Korea Institute of Energy Research, 71-2 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

*School of Chemical Engineering, Chungnam National University, 220 Gung-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-764, Korea

(Received 12 August 2009; accepted 6 October 2009)

요 약

본 연구는 Vortex tube 형 이산화탄소 흡수장치에서 연소배가스 중 CO₂ 흡수 특성을 고찰한 것이다. 연소배가스로는 석탄(유연탄)을 연료로 하는 중기발생량 12 ton/hr 규모의 순환유동층 연소보일러에서 발생한 것을 이용하였으며 이산화탄소농도는 11~13 vol% 내외이다. 흡수 용액은 MEA 20 wt%를 기준으로 AMP, HMDA, 강염기계 KOH를 혼합하였다. 본 연구의 목적은 CO₂ 흡수장치를 Scrubbing 방식보다 소형화하고, 흡수용액을 절감하는 것이다. 흡수장치는 연소배가스 유량 20 Nm³/hr를 처리할 수 있는 직경 17 mm, 길이 250 mm의 Vortex tube 형을 사용하였다. 연소배가스와 흡수용액의 혼합 분무를 통한 CO₂ 제거율을 측정하였다. 실험조건은 흡수용액 농도(20~50 wt%), 흡수용액 유량(1.0, 3.0 l/min)과 연소배가스 유량(6~15 Nm³/hr)을 변화시켰다. 결과적으로, MEA에 HMDA를 혼합한 흡수용액의 CO₂ 제거율이 가장 우수(약 43% 제거율)하였으며, Vortex tube 장치에서 고속유동의 기·액 접촉효과 및 기·액 분리 특성을 이용하여 CO₂ 흡수가 가능하였다. 그러나 CO₂ 흡수 효율 향상을 위한 추가적인 공정개발이 요구된다.

Abstract – In this study, the CO₂ removal characteristics of the Vortex tube type absorption apparatus were investigated to enhance the compactness of CO₂ absorption process and to reduce the amount of absorbing solution of the CO₂ separation process. The Vortex tube with the diameter of 17 mm and the length of 250mm was introduced in the experimental apparatus to treat 20 Nm³/hr of CO₂ containing flue gas. The flue gases for experiments containing 11~13 vol% of CO₂ were supplied from the coal-firing CFBC power plant with 12 ton/hr of steam producing capacity. The mixed solutions of 20 wt% of MEA as base solution with the adding solutions like HMDA, AMP and KOH were used as absorbents. The experiments were executed under the various conditions like the absorbing solution concentrations in the range of 20 to 50 wt%, the flow rate of CO₂ containing flue gases in the range of 6 to 15 Nm³/hr and the flow rate of absorbing solution in the range of 1.0 to 3.0 l/min. As a results, the CO₂ removal efficiency of mixed absorbent of 20 wt% of MEA with HMDA was remarkable. From this study, we concluded that the efficient separation of CO₂ from flue gases using the features of the Vortex tube type absorbing unit for gas/liquid contact and the separation of gas/liquid be possible. But more works are needed to increase the CO₂ removal efficiency of Vortex tube process.

Key words: Vortex tube, Absorption, Carbon Dioxide, Alkanol Amine, Blended Absorbent

1. 서 론

화석 에너지의 사용에 의한 온실가스의 배출은 지구 온난화에 큰 영향을 미치게 되었다, 이에 전 세계적으로 화석연료의 연소로부터

배출되는 이산화탄소의 제거 처리를 위한 많은 기술이 개발되고 있으며, 가장 효과적인 저비용, 저에너지화를 추구하고 있다.

대표적인 CO₂ 분리회수 공정 기술은 분리특성에 따라 크게 흡수법, 흡착법, 심냉법(증류법), 산소부화 연소법(순산소연소법) 및 막 분리법 등으로 구분할 수 있다. 이 중 상용화되어 발전소와 같이 대규모의 발생원에서 배출되는 이산화탄소를 저장하는데 가장 적합한

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: heehan@kier.re.kr

공정은 화학흡수법으로, 이는 연소배가스에 포함된 CO_2 농도와 압력이 비교적 낮은 조건에 적합하며[1], 대표적인 화학 흡수제로는 알칸올아민계 흡수제들로 알려져 있다.

본 연구는 연소배가스 중 이산화탄소의 제거를 위한 흡수장치의 소형화 및 흡수용액의 재생에너지를 절감하기 위한 목적으로 기존의 Scrubbing 방식이 아닌 간단한 구조의 Vortex tube 형식의 흡수장치를 사용하였다. Scrubbing에 의한 이산화탄소 흡수공정은 흡수장치내에서 흡수제가 물줄기형태로 배가스와 접촉하면서 CO_2 를 흡수하는 방식이지만, Vortex tube는 흡수제를 미세액적형태로 분무하여 배가스와 접촉하는 방식으로 기액접촉면적을 극대화하는 방식이다. 장점으로는 접촉면적이 커서 장치의 크기를 최소화할 수 있으며, 고 농도의 흡수용액을 사용할 수 있고, 충전제가 필요 없다는 장점이 있다. 단점으로는 배가스의 운전압력이 높아야 한다는 것과 반응시간을 길게 지속할 수 없다는 것이다.

이에 본 연구에서는 CO_2 제거에 널리 사용되고 있는 알칸올아민계 흡수제인 MEA(Mono ethanolamine)를 기본으로 하여 MEA에 AMP(2-amino-2-methyl-1-propanol)와 HMDA(Hexamethylenediamine) 그리고 강염기계 흡수제인 KOH(Potassium hydroxide)를 적당하게 혼합한 흡수용액으로 Vortex tube 형 흡수 장치에서 연소배가스 유량, 흡수용액의 유량, 흡수제 농도를 변화시켜 석탄연소로부터 발생 한 연소배가스 중의 CO_2 흡수 반응 특성을 고찰하였다.

2. 이론적 고찰

2-1. Vortex tube의 CO_2 흡수 장치 적용 원리

Vortex tube는 Ranque-Hilsh 볼텍스 튜브라고도 불리며 관내에 고압의 기체를 분사하여 발생하는 와류(vortex)를 이용, 압축공기를 저온과 고온으로 에너지 분리가 가능한 간단한 구조를 가진 장치이다[2,3]. 또 기체와 액체가 혼합된 유체를 tube에서 고속으로 유동함으로써 혼합유체의 원심력의 작용으로 비중차를 이용하여 기·액 분리가 가능하다[3,4].

Fig. 1에 Vortex tube의 개략도를 나타냈다. Vortex tube는 상업적으로는 에너지 분리와 기·액 분리에 이용되고 있으나, 자동차 배기가스로부터 먼지(dust) 분리[5], CO_2 분리[6,7,8] 등에 관한 기초적인 연구가 진행되고 있다. Vortex tube에서 기하학적 형상이 성능에 영향을 미치는 요소를 보면, tube의 직경(D), 직경과 길이의 비(L/D), 와류 생성기(vortex generator)의 노즐 형태와 노즐 수 그리고 노즐 면적비(Dn) 등이다.

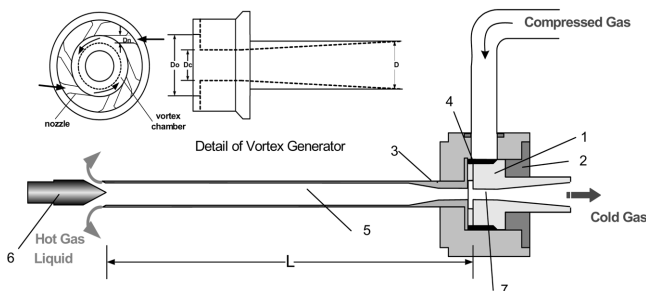


Fig. 1. Schematic diagram of vortex tube.

- | | |
|---------------------|-------------------|
| 1. Vortex generator | 5. Tube |
| 2. Holder | 6. Throttle valve |
| 3. Sleeve | 7. Orifice |
| 4. Nozzle | |

Vortex tube 형 장치는 기체에 혼합된 액체의 분리가 가능하고, 혼합된 액체는 고속유동으로 인하여 작은 액적으로 형성된다. 또 소규모장치에서 대량의 혼합가스를 처리할 수 있는 장점이 있다. 이러한 특성을 이용하여 연소배가스 중의 이산화탄소를 흡수처리공정에 적용할 수 있다. 연소배가스 중에 이산화탄소를 흡수제거하는 공정에서 흡수반응에 가장 영향을 미치는 요인은 연소배가스와 흡수제의 접촉시간이다. 기·액 접촉시간과 흡수제의 성능에 따라 흡수제거율에 차이가 있다. Vortex tube 장치에서 기·액 접촉시간은 매우 짧다. 그러나 압축상태의 기체가 고속유동을 하면서 흡수제가 미세한 액적(drop)으로 유동할 수 있으므로 연소배가스 중의 이산화탄소가 흡수제와의 흡수반응시간이 짧게 될 수 있다는 점을 고려하였다. Vortex tube 흡수장치는 튜브에서 발생하는 고속의 와류로 인하여 흡수제의 액적이 작아져 흡수반응시간을 줄일 수 있고, 튜브를 지난 혼합기체는 기·액 분리가 가능하다[4]는 특성을 가진다. 그러므로 Vortex tube에서 유동하는 연소배가스와 흡수용액을 동시에 분무하여 튜브에서 기·액 접촉시켜 반응하게 하고, Vortex tube의 끝단에서 원심력에 의해 액체가 유출될 수 있도록 유속을 현저하게 감소시키는 공간을 두어 기·액 분리를 하는 것이다.

2-2. CO_2 흡수 메커니즘

일반적으로 알칸올아민의 이산화탄소 흡수특성은 흡수용액의 pH 변화와 더불어 알칸올아민과 이산화탄소의 산-염기 중화반응 메커니즘 또는 알칸올아민과 이산화탄소의 직접반응에 의하여 생성된 알킬 카바메이트의 안정도 등 반응 메커니즘에 의존한다.

MEA와 같은 제 1, 2급 알칸올아민의 경우, 산-염기 중화반응과 더불어 이산화탄소와의 직접 반응에 의한 카바메이트 생성 반응도 일어난다. 제 1, 2급 알칸올아민의 이산화탄소 흡수반응을 표현하는 총괄 반응식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.



위 식에서 볼 수 있듯이, 제 1, 2급 알칸올아민의 경우 알칸올아민 단위 몰당 흡수된 이산화탄소의 몰비로 정의되는 평형 부하는 화학양론적 제한에 의하여 0.5를 넘지 못한다[9]. 그러나 이산화탄소의 압력이 증가하면 1급 또는 2급 알칸올아민도 평형부하가 0.5를 넘어서게 되는데, 이는 식 (1)에서 생성된 카바메이트가 식 (2)와 같이 가수분해되면서 유리아민을 생성하여 이산화탄소와 추가적으로 반응하기 때문이다[10,11].

강염기계 KOH와 CO_2 흡수 반응은 아래 식 (3)과 같이 이산화탄소와 반응하여 탄산칼륨과 물을 생성한다. 그러나 재생하는 과정에서 강염을 발생시킬 수 있어 연속적으로 흡수와 재생공정으로 이루어지는 흡수장치에 사용하는 것은 문제가 될 수 있다.



한편, sterically hindered amine인 AMP의 경우, 제 1급 아민과 같은 반응메커니즘으로 CO_2 와 반응하며, HMDA는 $\text{NH}_2(\text{CH}_2)_6\text{NH}_2$ 의 구조를 갖는 물질로 2개의 아민기를 가지고 있다. HMDA와 CO_2 의 반응 메커니즘은 아직 발표되지 않았지만, 2개의 제 2급 아민기를 가지는 piperazine의 이산화탄소 흡수반응 메커니즘과 동일할 것으로 가정할 수 있다[12].

3. 실험

3-1. 실험 장치

본 실험에 사용된 실험 장치는 Fig. 2에 나타내었으며, 가스 저장부, 반응부, 측정부로 구성되었다. Vortex tube에서 와류를 형성하기 위하여 일정한 압력이 필요하다. 이를 위해 연소배가스 저장조(압력 5~6 kgf/m², 용적 0.75 m³)에 가압펌프에 의해 연소배가스를 충전한다.

이산화탄소 흡수반응을 위한 Vortex tube는 직경(D) 17 mm, 길이(L) 250 mm로 제작되었다. 연소배가스와 흡수용액은 Vortex tube에 공급하기 전에 분무장에서 제어된 유량으로 혼합된다. 혼합된 연소배가스와 흡수용액이 Vortex tube에 유입되면서 와류유동을 통해 연소배가스 내에 이산화탄소 흡수반응이 일어나게 된다. Vortex tube의 반응기의 가스출구라인에 CO₂ 분석기(Horiba, VA-3000)가 설치되어, CO₂ 농도 변화를 측정하고, 컴퓨터에 모니터링 되어 저장하도록 하였다.

3-2. 실험 방법

본 연구는 순환유동충연소시스템에서 석탄(유연탄)을 연소하여 발생한 연소배가스를 사용하는데, 가스의 CO₂ 농도는 11~13 vol%로 가스유량계를 통해 Vortex tube 형 흡수 장치에 주입되었다.

실험 조건은 Table 1과 같으며, 흡수용액은 1차 증류수를 사용하여 제조하였고, 알칸올아민계 흡수제인 MEA, AMP, HMDA와 강염기계 KOH를 사용하였다. 흡수용액은 저장조에서 펌프에 의해 유량계를 통해 Vortex tube 형 흡수 장치에 공급된다. 이는 분무장(spray chamber)에 nozzle를 통해 분무되고 연소배가스와 흡수용액이 혼합되어 Vortex tube에 유입되며, tube 내에서 기·액 접촉에 의해 흡수용액 내에 CO₂가 흡수된다. 배가스와 흡수용액은 tube에서 유동하면서 비중 차에 의한 원심력으로 기·액 분리가 되는 원리로 tube 끝단의 확장부에서 기체와 액체가 분리되어 배출된다. 이산화탄소가 제거된 배가스 출구에서 CO₂ 측정이 이루어지며, 흡수반응 진행에 따라 CO₂ 농도가 감소하는 정도를 가스 분석기를 통해 측정하게 되는데, 더 이상의 농도변화가 없으면 평형상태에 도달했다고 판단하고, 시간에 따른 흡수 제거율과 흡수부하를 산출하였다.

한편, 본 연구에서 주 흡수제는 알칸올아민계 흡수제 중 이미 상용화된 MEA를 선정하여, MEA 20 wt%를 기준으로 농도별 흡수

Table 1. Experimental conditions

Parameter	Conditions
	MEA 20, 30, 40, 50
Concentration of Absorbent (wt%)	15 MEA + 5 AMP 15 MEA + 5 HMDA 15 MEA + 5 KOH
Flow rate of Flue Gas (l/min)	100, 150, 200, 250
Flow rate of Absorbent (l/min)	1.0, 3.0

반응을 검토하고자 MEA 30, 40, 50 wt%의 단일흡수제와 MEA 15 wt%에 각각 AMP, HMDA, KOH를 5 wt% 첨가한 혼합흡수용액을 제조하여 실험 수행하였다.

4. 결과 및 고찰

Vortex tube 장치를 이용하여 연소배가스로부터 이산화탄소 제거 효율과 흡수부하는 다음과 같이 식 (4), (5)로 계산하였다.

$$E_1(\%) = \left(\frac{y_{CO_2, in} - y_{CO_2, out}}{y_{CO_2, in}} \right) \times 100 \quad (4)$$

$$E_2(\text{loading ratio}) = \frac{\left(\left(y_{CO_2, in} - y_{CO_2, out} \right) \times \frac{1}{100} \times \frac{1}{22.4} \right) \times F_{gas}}{(M_{amine} \times F_{absorb})} \quad (5)$$

식 (5)에서 흡수부하 값의 도출은 각 흡수제 MEA, AMP, HMDA, KOH가 갖는 몰농도(M) 값을 적용하여 계산되었다. 각 단일, 혼합 흡수제의 농도별 몰농도 값의 적용은 Table 2와 같다.

Table 2. Molarity of Absorbent

Concentration of Absorbent (wt%)	Molarity
MEA 20	3.274
MEA 15 + AMP 5	3.016
MEA 15 + HMDA 5	2.886
MEA 15 + KOH 5	3.347

4-1. 가스 및 흡수제 유량 변화에 따른 흡수효율

Fig. 3, 4는 연소배가스 유량 변화에 따라 흡수용액 MEA 20 wt%와 MEA 15+AMP 5 wt% 그리고 MEA 15+HMDA 5 wt%의 혼합

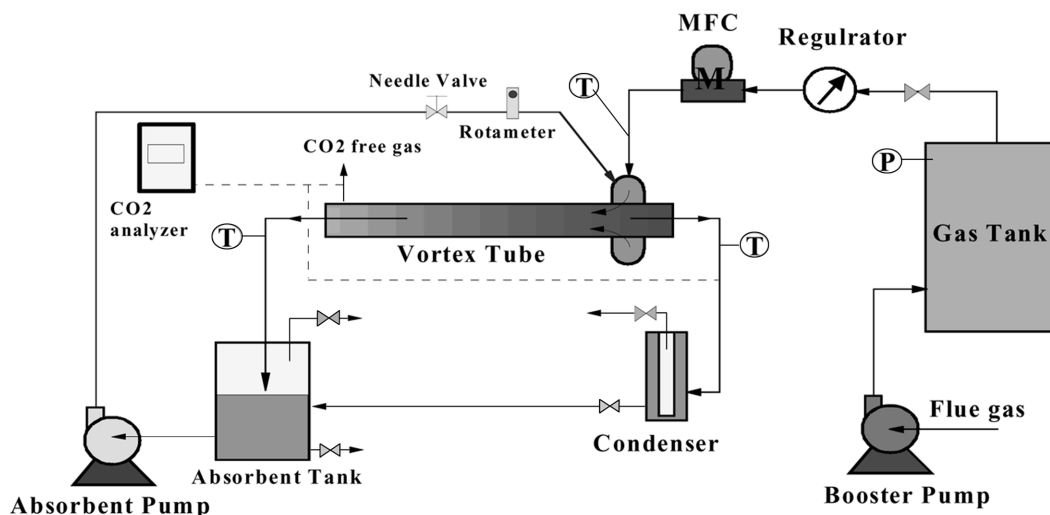


Fig. 2. Schematic diagram of absorption apparatus with vortex tube.

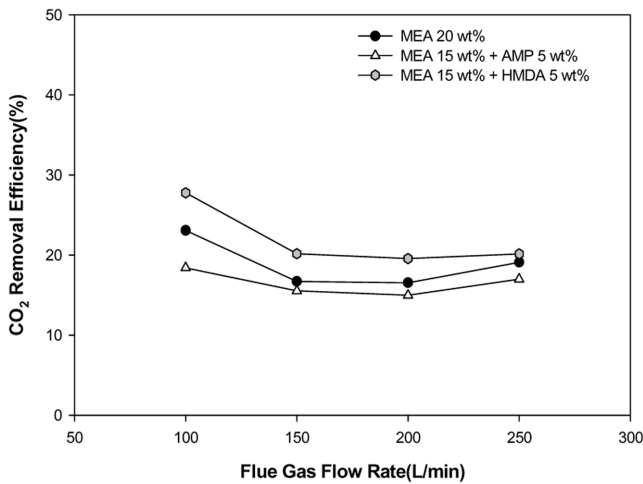


Fig. 3. Effect of gas flow rate on CO₂ removal efficiencies at absorbent flow rate of 1 l/min.

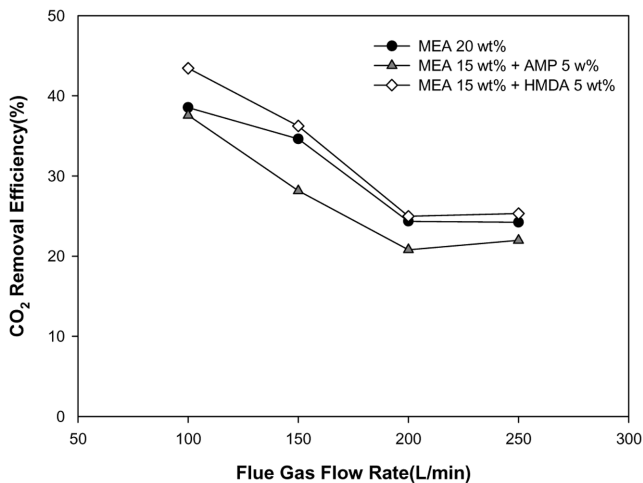


Fig. 4. Effect of gas flow rate on CO₂ removal efficiencies at absorbent flow rate of 3 l/min.

흡수용액에 대해, 흡수용액 유량 각각 1, 3 l/min일 때 CO₂ 흡수 제거율을 나타내었다.

Fig. 3에서 보는 바와 같이 연소배가스 유량이 100, 150, 200 l/min으로 증가함에 따라 CO₂ 제거율은 감소하는 경향을 보였다. 이것은 흡수용액을 일정하게 분무하고, 연소배가스 양을 증가시키면 흡수하여야 할 이산화탄소가 많아지기 때문에 제거율은 감소하게 되는 것이다. 그러나 연소배가스 유량이 250 l/min일 때 제거율이 증가하였다. 이것은 Vortex tube에서 충분히 발달한 와류유동으로 흡수용액의 액적이 미세하게 되어 반응이 용이하게 된 것으로 사료되나 좀 더 많은 실험을 통해 고찰하여야 할 것으로 사료된다.

흡수용액의 유량에 따른 CO₂ 흡수 제거율을 살펴보면, 흡수용액의 유량이 1 l/min일 때 보다 3 l/min일 때 제거 효율이 높은 것을 보였다. 연소배가스 유량 100 l/min일 때 흡수용액 유량이 1에서 3 l/min로 증가하게 되면, MEA 20 wt%는 이산화탄소 제거율이 23.01에서 38.55%로, MEA 15+AMP 5 wt%의 이산화탄소 제거율은 18.41에서 37.58%로, MEA 15+HMDA 5 wt%의 이산화탄소 제거율은 27.77에서 43.44%로 증가되었다. 이는 흡수제의 양이 증가함에 따라 흡수 제거율이 높아지는데, 알칸올아민 흡수제 중 흡수 반응 속

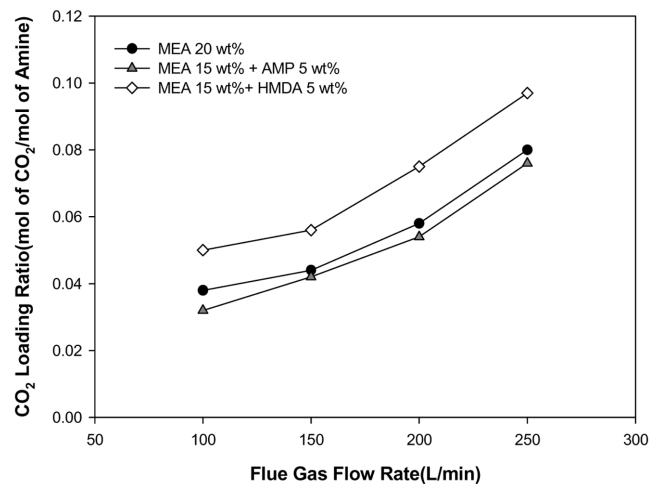


Fig. 5. CO₂ loading ratio on flue gas flow rate at absorbent flow rate of 1 l/min.

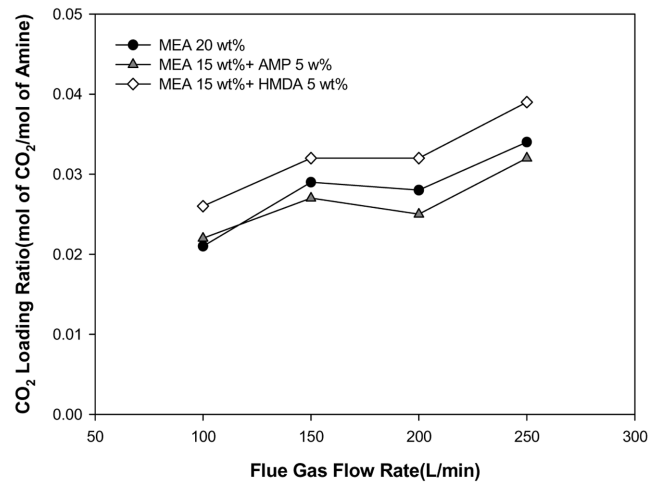


Fig. 6. CO₂ loading ratio on flue gas flow rate at absorbent flow rate of 3 l/min.

도가 빠르다고 알려진 MEA에 첨가제로써 HMDA를 혼합한 흡수제의 제거효율이 우수함을 나타낸다.

Fig. 5와 6은 연소배가스 유량변화에 따른 CO₂ 제거율을 CO₂ 흡수부하로 나타낸 것이다. 일정한 유량의 흡수용액 상태에서 연소배가스의 양이 증가함에 따라 흡수부하는 증가하는 것을 볼 수 있다. 이렇게 연소배가스 유량이 증가함에 따라 흡수부하가 증가하는 것은 흡수반응에 작용하는 CO₂의 몰수가 증가하였기 때문이다[13].

4-2. MEA 농도 변화에 따른 영향

이산화탄소를 흡수 처리하는 알칸올아민계 흡수제 중 빠른 흡수 속도를 보이는 MEA의 농도를 변화(20, 30, 40, 50 wt%)시켜 CO₂ 흡수제거율 변화 추이와 흡수부하 값의 변화를 고찰하였다.

Fig. 7, 8은 동일한 흡수용액 유량(1 l/min)에서 MEA 흡수용액의 농도 변화에 따른 CO₂ 흡수 제거율과 흡수부하를 나타낸 것이다. MEA의 농도가 증가할수록 제거율은 증가하였다. 연소배가스 유량 100 l/min일 때 MEA 20 wt%에서는 23.08%를 보였으나, MEA 농도 30, 40, 50 wt%에서는 각각 30.5, 30.8, 32.2%로 증가하였다. 이렇게 MEA 농도를 증가시켜도 CO₂ 흡수 제거율이 크게 개선되지

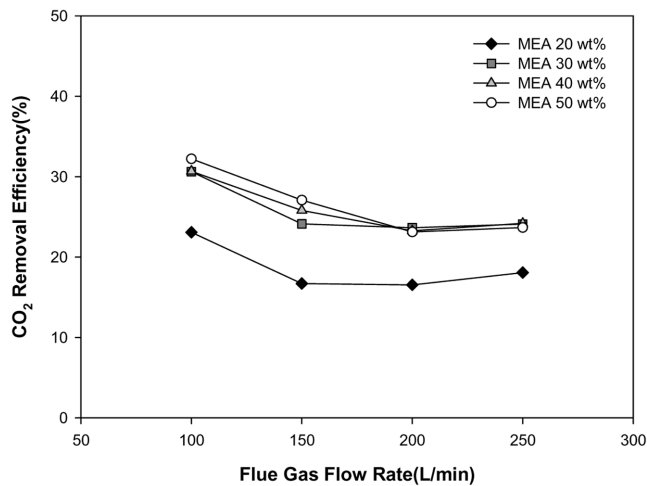


Fig. 7. CO₂ removal efficiencies on flue gas flow rate at various concentrations.

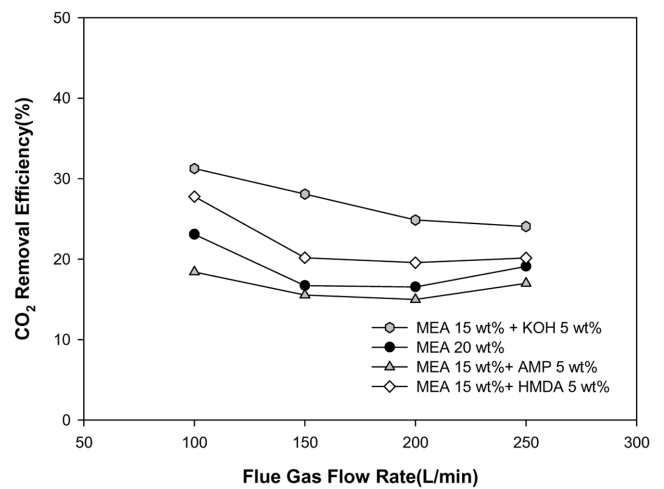


Fig. 9. CO₂ removal efficiency with the gas flow rate for each absorbent.

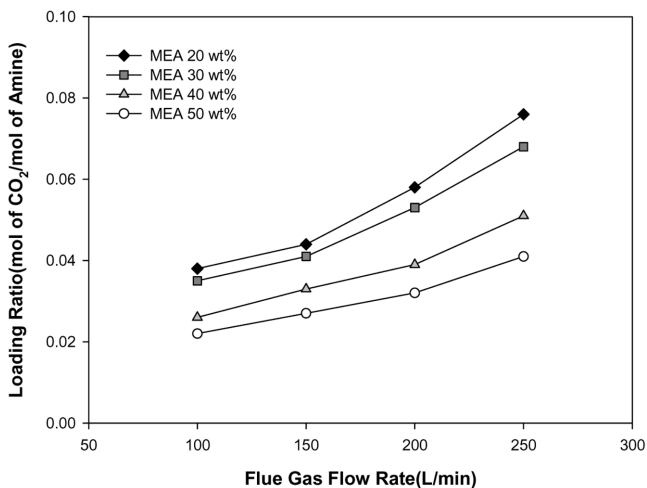


Fig. 8. CO₂ loading ratio on flue gas flow rate at various concentrations.

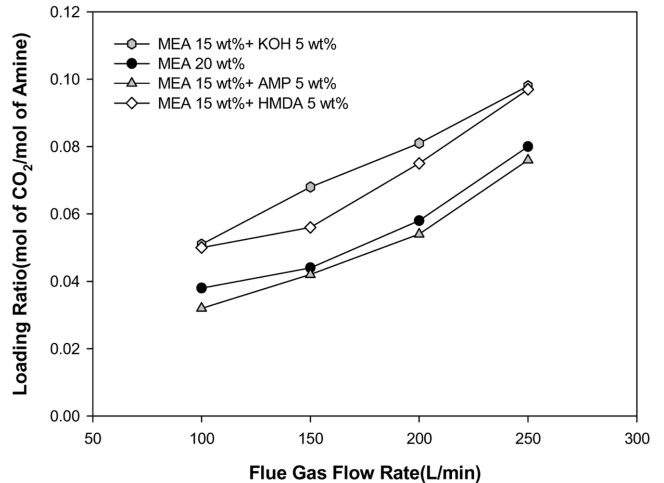


Fig. 10. CO₂ loading ratio with the gas flow rate for each absorbent.

않은 것은 본 장치에서 CO₂ 흡수 제거율에 영향을 미치는 요소가 흡수속도와 반응시간이라는 것이라는 것이다. 그러므로 제거율을 향상시키기 위해서 흡수제의 농도를 증가시키는 것이 아니라 기·액 간의 접촉시간을 늘려야 할 것으로 사료된다.

한편, MEA 20 wt%의 흡수용액은 연소배가스 유량이 100, 150, 200 l/min 증가함에 따라 CO₂ 제거율이 23.08, 16.72, 16.55%로 감소하다가 연소배가스 유량이 250 l/min일 때, 18.07%로 증가하였다. 이와 같은 흡수 특성은 다른 흡수용액의 CO₂ 제거율에서도 같은 경향을 보였다.

따라서 Vortex tube 형 흡수 반응 장치 내 동일한 운전 조건 하에서 흡수제의 농도는 CO₂ 흡수 제거에 크게 영향을 끼치지 않는 반면, Vortex tube 형 흡수 반응 장치의 기하학적 형상 및 Vortex velocity는 CO₂ 흡수 제거에 크게 영향을 미치는 것으로 사료된다.

4.3. 강염기계 KOH의 영향

Fig. 9와 10은 Vortex tube 형 흡수 반응 장치에서 알칼리 금속계 흡수제로 알려진 강염기계 KOH의 흡수 제거율을 다른 흡수제와 비교 고찰하고자, 흡수용액 유량(1 l/min)에서 연소배가스 유량 변화에

따른 MEA와 혼합흡수용액의 흡수 제거율과 흡수부하를 나타낸 것이다.

MEA 15 + KOH 5 wt%의 흡수용액 유량(1 l/min)을 분무하여 연소배가스 유량 100 l/min에서 최대 31.25%로 다른 흡수용액보다 높은 이산화탄소 제거율을 보였다. 본 실험에서 흡수제별 흡수 제거율은 MEA 15+KOH 5 wt%가 가장 높았으며, MEA 15+HMDA 5 wt%, MEA 20 wt%, MEA 15+AMP 5 wt%의 순으로 나타났다. 이것은 흡수속도에 기인한 것이고, AMP를 혼합한 흡수용액이 낮은 것은 AMP가 흡수속도가 가장 느리다는 것을 의미한다.

5. 결 론

Vortex tube형 흡수 반응 장치를 사용해 흡수제로 알칸올아민계 MEA와 MEA에 AMP, HMDA, KOH를 첨가한 혼합흡수용액을 이용하여 연소배가스에 함유된 이산화탄소의 제거 특성을 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 본 연구를 통해 기존의 Scrubbing 방식과 달리 고속유동과 기·액 접촉효과 및 기·액 분리 특성을 지닌 Vortex tube 형 흡수 반응

장치에서 CO₂ 흡수 제거 반응이 가능함을 알 수 있었다. 이에 Vortex tube의 기하학적 형상에 따른 연소배가스와 흡수제의 반응성을 높이기 위한 실험상의 최적 조건 도출을 통한 공정 개발이 요구된다.

(2) 동일한 운전 조건에서 연소배가스 유량이 100, 150, 200 l/min으로 증가함에 따라 흡수 제거율은 감소하다 연소배가스 유량 250 l/min에서는 제거율이 소폭 증가함을 보였다. 이는 Vortex tube의 기하학적 형상에 따른 와류 유동의 특성으로 볼 수 있으며, 본 장치의 다양한 운전 조건 중 연소배가스 유량이 이산화탄소 흡수율 제고를 위한 중요 인자임을 알 수 있다.

(3) Vortex tube 형 이산화탄소 흡수장치에서 흡수부하(loading ratio)는 제한된 흡수용액의 양에서 연소배가스 유량이 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났는데, 이것은 제한된 흡수제의 양에 대하여 연소배가스 중의 CO₂ 농도가 증가함에 따라 CO₂ 물수가 증가하기 때문이다.

(4) 동일한 흡수제 농도(20 wt%)와 흡수용액 유량(1 l/min)에서 CO₂ 흡수 제거율은 MEA에 강염기계 KOH를 혼합한 수용액이 최대 31.25%로 가장 높았고, MEA+HMDA(27.77%), MEA(23.08%), MEA+AMP(18.41%) 순으로 낮아졌다. 이는 본 실험에서 알칸올아민계 흡수제중 흡수속도가 빠르다고 알려진 MEA의 첨가제로 강염기계 KOH와 HMDA의 혼합흡수용액이 단일 흡수제로 MEA와 MEA+AMP의 혼합흡수용액에 비해 흡수 반응 정도가 우수함을 나타낸다.

감 사

본 연구는 지식경제부와 에너지기술평가원에서 지원하는 온실가스처리개발사업의 일환으로 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

사용기호

$Y_{CO_2 inlet}$: Concentration of gas phase CO₂ entering the absorber(%)
 $Y_{CO_2 outlet}$: Concentration of gas phase CO₂ leaving the absorber(%)
 M_{amine} : Mole of Absorbent (amine)
 F_{gas} : Flow Rate of Flue Gas [l/min]
 F_{absorb} : Flow Rate of Absorbent [l/min]

참고문헌

1. Chakma, A. and Tontiwachwuthikul, P., "Designer Solvents for Energy Efficient CO₂ Separation from Flue Gas Streams," *Greenhouse Gas Control Technologies*, 35-42(1999).
2. Ranque, G. J., "Method and Apparatus for Obtaining from Fluid under Pressure Two Currents of Fluids at Different Temperatures," US Patent No 1,952,281(1934).
3. Hilsch, R., "The Use of the Expansion of Gases in a Centrifugal Field as Cooling Process," *The Review of Scientific Instruments*, **18**(2), 108-113(1947).
4. Eiamsa, S. and Promvong, P., "Review of Ranque-Hilsch Effect in Vortex Tube," *Renew. Sust. Energ. Rev.*, **12**, 1822-1842(2008).
5. Hwang, Y. C., "An Experimental Study on the Separation of Dust from Air Using Vortex Tube," Master Thesis, Kyungpook National Univ.(1998).
6. Kim, C. S., Jung, Y. C., Han, K. H. and Park, S. Y., "Computational Study on the Energy Separation of the Vortex Tube for CO₂ Reduction," *J. Korean Academic Industrial Society*, **10**(4), 695-701(2009).
7. Oh, D. J., "An Experimental Study on the Characteristics of a Low Pressure Vortex Tube," Ph.D Thesis, Chungnam National Univ.(2003).
8. Kim, J. Y., "Absorption CO₂ with Vortex Tube," *Theor. Appl. Chem. Eng.*, **12**(1), (2006).
9. Yih, S. M. and Shen, K. P., "Kinetics of Carbon Dioxide Reaction with Sterically Hindered 2-amino-2-methyl-1-propanol Aqueous Solutions," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **27**, 2237-2241(1988).
10. Danckwerts, P. V., "The Reaction of CO₂ with Ethanolamines," *Chem. Eng. Sci.*, **34**, 443(1979).
11. Caplow, M., "Kinetics of Carbamate Formation and Breakdown," *J. Am. Chem. Soc.*, **90**, 6795-6803(1968).
12. Choi, W. J., Cho, K. C. and Oh, K. J., "Absorption Characteristics of Carbon Dioxide in Aqueous AMP Solution Adding HMDA," *Atmos. Environ.*, **21**(6), 605-612(2005).
13. Han, K. H., Lee, J. S. and Min, B. M., "Absorption Equilibrium of CO₂ in the Sterically Hindered Amine, AMP Aqueous Solution," *Korean Chem. Eng. Res.*, **45**(2), 197-202(2007).