

Wetted-Wick Column을 이용한 탄산가스의 물에 의한 흡수

이 광 래

강원대학교 공과대학 공업화학과
(1988년 3월 8일 접수, 1988년 6월 15일 채택)

Absorption of Carbon-Dioxide in Water with Wetted-Wick Column

Kwang Rae Lee

Department of Chemical Technology, College of Engineering, Kangweon National University,
Chuncheon 200-701, Korea

(Received 8 March 1988; accepted 15 June 1988)

요 약

화학공정의 주요 분리 정제과정 중의 하나인 흡수공정에 있어서, 새로이 고안한 Wetted-Wick Column의 성능을 기존의 충전탑(packed tower)의 운전조건과 동일한 운전조건에서의 실험결과인 총괄 물질전달용량계수($K_{OG}a$)와 이동단위 높이(HTU_{OG})를 비교함으로써 Wetted-Wick Column의 효율이 우수함을 보이고, 다른 운전인자들의 영향을 분석했다.

본 연구에서 채택한 물에 의한 탄산가스의 흡수공정에 있어서의 실험결과에 의하면, 흡수제인 물의 유량이 1/10에서도 총괄물질전달용량계수($K_{OG}a$)가 기존의 충전탑의 경우보다 1.5배이므로 흡수제의 재생에 필요한 에너지의 양을 1/10로 줄일 수 있음을 의미한다.

이러한 Wetted-Wick Column의 높은 효율은 기존의 충전탑의 단점들을 보완하는 여러가지 장점들인 높은 기체 액체간의 접촉면적, 100% 습포면(wetting surface), no backmixing, no excess wall flow of liquid, 보다 긴 기체 액체간의 접촉기간 등에 기인한다.

Abstract—A newly designed Wetted-Wick Column was constructed and studied to investigate its usefulness as an alternative to a conventional packed tower in gas purification processes. Absorption of carbon dioxide in water for physical absorption was employed for this investigation. A comparison was made with the packed tower based on overall volumetric mass transfer coefficient ($K_{OG}a$) and height of transfer unit (HTU_{OG}) and the same range of operating conditions. The newly designed Wetted-Wick Column exhibited higher efficient volumetric mass transfer coefficient ($K_{OG}a$) and smaller height of transfer unit.

1. 서 론

기체정제 공정중의 가장 중요한 기술중의 하나인 기체를 액체에 흡수시키는 흡수공정은 천연가스 처리공정, 정유공정, 합성가스생성 및 촉매독을 방지하기 위

한 정제 공정 등에 널리 이용되고 있으며, 기체정제 공정에 이용되고 있는 흡수탑의 종류로는 충전탑(packed tower), 플레이트 탑(plate tower) 또는 분무탑(spray tower) 등이 있다. 이중에서도, 여러가지의 이점을 가진 충전탑이 많이 이용되고 있으나 충전탑

이 갖는 여러가지 고유의 제한 조건들이 여전히 상존하고 있다.

1-1. 충전탑이 갖는 고유의 제한 조건들

충전탑의 성능을 저하시키는 고유한 제한 조건들로서는 낮은 기체-액체 접촉면적(낮은 습포면율), 균일하지 못한 액체의 분배(channeling), 범람(flooding)[1], 되섞임(backmixing)[2, 3], 탑벽면을 따라 흐르는 과도한 액체의 흐름[4] 등이 있으며, 이러한 요인들로 인하여 기체정제에 소요되는 액체-기체 유량의 비율을 높게 유지해야 되므로 흡수제인 액체를 재생시키는데 많은 열(에너지)이 소요되게 된다. Amine Guard III를 이용하는 암모니아 공장에서는 연간 총 유틸리티 비용의 약 88%가 흡수제(액체) 회수에 필요한 에너지(열) 비용임을 Buttwell 등[5]이 보고한 바 있다.

상업화된 대부분의 충전탑은 기체-액체의 접촉효율을 높이기 위하여 향류(counter-current)로 운전하나 기체와 액체가 서로의 유로를 공유하고 있기 때문에, 상류에서부터 흘러 내리는 액체의 흐름은 탑 하부로부터 상부로 가는 기체의 흐름에 대하여 저항을 덜 받는 유로로 모이게 되고 상대적으로 기체의 흐름도 액체의 흐름이 없는 유로를 택함으로써 기-액의 channeling 현상이 불가피하게 된다. 특히 액체의 유량이 적을 경우 이러한 channeling 현상으로 인하여 충전물 표면의 대부분이 건조되어 있거나 정체된 액체막(stagnant film of liquid)으로 덮혀 있게 되어 물질전달 면적이 상당히 줄어들게 된다. Channeling 현상이 없을 경우 일정한 분리도를 성취하기 위하여 56개의 이론단수가 필요한 반면에 1%의 액체가 channeling 현상을 가질 경우 100개의 이론단수가 필요하다[6]. 즉, 액체 1%의 channeling으로 인하여 44개의 이론단수를 손실하는 결과를 가져온다.

충전물의 구조에 의한 불연속성 외에 충전물과 탑벽면과의 사이에 보다 큰 빈공간으로 인하여, 일단 흡수제(액체)가 이 공간으로 들어가기만 하면 벗어날 수가 없게 되어 벽면과 충전물 사이의 공간을 흐르는 액체의 양은 증가하게 되고 상대적으로 기체는 탑 중심부쪽으로 몰려서 통과하게 된다. 따라서 흡수제인 액체가 기체와 효과적으로 접촉할 수 없게 된다. 액체의 유량과 탑의 길이에 대한 탑의 직경의 비에 따라 다소 차이가 있겠으나, 직경 6인치의 충전탑에서 약 50%의 액체가 벽면을 따라 흘러 내린다[4].

또한 상향의 기체가 하향의 액체의 흐름을 저지함으로써 되섞임(back mixing)을 유발하여 농도 차이를

줄이게 되므로 농도차이에 의존하는 기-액 접촉면에서의 물질전달의 효율이 떨어지고 흡수속도도 낮게 된다[7, 8].

상기한 바와 같이 충전탑 자체가 가지고 고유한 제한 조건들이 기체와 액체의 유로가 공유되어 있으므로서 유발되므로, 액체와 기체의 유로를 분리시킴으로서 이러한 현상을 없애고 흡수탑의 효율을 증진시킬 수 있다.

1-2. Wetted-Wick Column

1-2-1. Wetted-Wick Column의 구조

Wetted-Wick Column의 내부벽면은 모세-다공성 물질로 라이닝(lining)을 하고 스테인레스망으로 지지를 했으며, 단위부피당 기-액 접촉면적을 높이기 위하여 모세-다공성 물질로 된 심지(wick)를 여러개 넣었다(Fig. 1 참조). 모세-다공성 물질로는 솜, 유리섬유

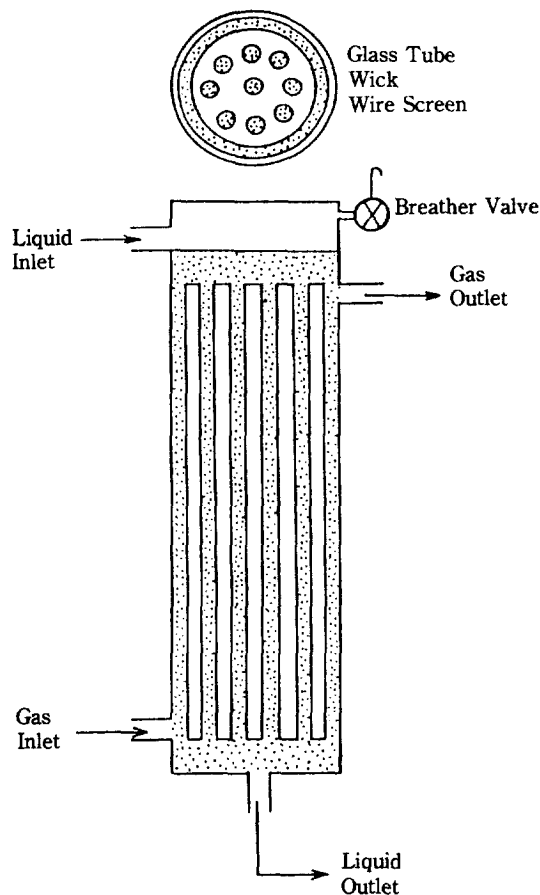


Fig. 1. Schematic diagram of wetted-wick absorption column for higher efficiency.

(fiber glass), 또는 미세한 망을 사용할 수 있다.

1-2-2. Wetted-Wick Column의 특징

새로이 고안된 Wetted-Wick Column은 기존의 충전탑(packed tower)과는 달리, 기체와 액체가 서로 유로를 공유하지 않고, wick을 따라 흐르는 액체유로와 빈 공간을 흐르는 기체유로가 서로 분리되어 있어 종래의 충전탑이 가지는 고유한 단점들을 개선할 수 있다. 기체-액체의 유로가 서로 분리되어 있어, channeling, flooding 및 되섞임(back mixing) 현상이 발생하지 않을 뿐 아니라, 기존의 충전탑의 충전 물질이 부분적으로 액체에 젖는데 비해 Wetted-Wick Column은 심지(wick) 물질의 모세관 현상으로 액체가 심지(wick)에 전체적으로 퍼지기 때문에 100%의 습표면(wetting surface)을 갖게 된다. 이러한 모세관 현상으로 매우 적은 액체 유량에서도 100%의 습표면을 갖게 되므로 습표면을 높이기 위하여 정제해야 할 기체유량에 대한 액체의 유량을 높일 필요가 없다. 또한 모세관 현상으로 인하여 액체흐름의 균일한 배분이 이루어지고 벽면으로의 과도한 액체의 흐름이 발생하지 않는다.

기존의 충전탑은 액체의 흐름이 중력에 의존하므로 중력의 반대방향으로는 액체의 흐름이 불가능하나 Wetted-Wick Column에서는 액체의 흐름을 심지(wick)의 모세관 현상을 이용하므로 무중력 조건(우주)에서도 이용할 수 있어 미래의 우주 산업에서도 이

용 가능하다.

새로이 고안된 Wetted-Wick Column의 특징을 요약해 보면 100% 습표면, no excess wall flow of liquid, uniform liquid distribution, no backmixing, high interfacial area, and low liquid-to-gas flow ratio 등이다. 이러한 특징으로 인하여 기체정제 효율이 높게 되어 흡수제의 재생하는데 필요한 에너지(열) 절감, 흡수제의 수송(pumping)에 필요한 전력절감 및 고효율에 의하여 흡수장치의 크기가 작아질 수 있다.

2. 실험 및 방법

Wetted-Wick Column은 유리관(19.2mm 직경×150mm 길이)의 내부벽면에 유리섬유(Owens-Corning Co.)로 lining을 하고 동일한 물질로 wick을 만들어 넣었으며 스테인레스 스틸 망으로 지지를 했다. Column의 온도와 공급되는 흡수제(액체)의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 온도 제어장치가 부착된 정온순환기(circulator; Brinkman RM6)를 사용하였다. Wetted-Wick Column의 입구와 출구에서의 기체유량은 질량 유량계(Mass flow meter; Matheson model 8160)로 측정했으며, 액체는 Masterflex pump(Cole-Parmer Co.)로 공급했다. 액체와 기체의 흐름은 향류로 했으며 일정온도에서 기체의 유량을 일정하게 유지하면서 액체의 유량을 변화시켰다. 일련의 실험이 끝나면 기체의 유량을 변화시킨 후 동일한 방법으로 일련의 실험을 계속했다.

기체 유량의 측정 및 제어, 기체조성의 분석이 액체의 경우보다 용이하고 정확하기 때문에, 측정된 기체의 유량과 분석한 입구기체와 출구기체의 조성으로 흡수된 탄산가스의 양을 계산했다. 기체의 입구 및 출구에서의 조성은 열전도도기(thermal conductivity cell)와 적분기(integrator)가 장착된 크로마토그래피(Hewlett-Packart 5840 A Gas Chromatography)를 사용하였으며 porapak-S column(Supelco, Inc.)으로 기체 혼합물(탄산가스-질소)을 분석하였고 운반기체(carrier gas)로는 헬륨을 사용했다.

3. 결과와 고찰

Wetted-Wick Column의 성능을 Cantelo 등[9]이 행한 기존의 충전탑의 실험자료와 비교하기 위하여 충전탑과 동일한 범위의 운전조건, 공급기체의 조성 및

Table 1. Comparison of wetted-wick column with packed tower.

	충전탑	W. W. C
	장·단점	장·단점
Flooding	유(단점)	무(장점)
액체의 과도한 벽면으로의 흐름	유(단점)	무(장점)
Channeling	유(단점)	무(장점)
되섞임(Backmixing)	유(단점)	무(장점)
습표면	소(단점)	대(장점)
압력강하	대(단점)	소(장점)
액체의 정제현상	대(단점)	소(장점)
처리효율	소(단점)	대(장점)
액체유량	대(장점)	소(단점)
대규모 장치설계	용이(장점)	어려움(단점)
정기보수	용이(장점)	어려움(단점)

Table 2. Experimental conditions of packed tower and wetted-wick column.

	충전탑 [9]	Wetted-Wick Column
규격	8.1cm 내경 × 86cm 높이	19.2mm 직경 × 150mm 높이
충전물	유리관으로 만든 Rasching ring	유리섬유 (fiber glass)
운전온도	6.4°C - 9.2°C	6.8°C
공급기체	11.8 - 26.4 mole% CO ₂	11.06, 18.44 mole% CO ₂
기체의 체류시간	1.16min - 1.36min	0.91min - 1.58min

Table 3. Performance of wetted-wick column in 11.06 mole% CO₂-H₂O system.

Inlet Gas Rate (cc/min cm ²)	Inlet Liq. Rate (g/min cm ²)	CO ₂ Inlet (%)	CO ₂ Outlet (%)
4.953	3.738	11.06	4.30
7.642	3.738	11.06	6.19
10.094	3.738	11.06	7.24
12.432	3.738	11.06	7.89
14.798	3.738	11.06	8.35
17.202	3.738	11.06	8.70
4.953	4.532	11.06	3.75
7.642	4.532	11.06	5.64
10.094	4.532	11.06	6.76
12.432	4.532	11.06	7.43
14.798	4.532	11.06	7.95
17.202	4.532	11.06	8.36
4.953	4.995	11.06	3.42
7.642	4.995	11.06	5.29
10.094	4.995	11.06	6.50
12.432	4.995	11.06	7.20
14.798	4.995	11.06	7.75
17.202	4.995	11.06	8.18
4.953	5.522	11.06	3.13
7.642	5.522	11.06	5.04
10.094	5.522	11.06	6.17
12.432	5.522	11.06	6.96
14.798	5.522	11.06	7.56
17.202	5.522	11.06	8.00
4.953	6.452	11.06	2.90
7.642	6.452	11.06	4.72
10.094	6.452	11.06	5.94
12.432	6.452	11.06	6.68
14.798	6.452	11.06	7.30
17.202	6.452	11.06	7.76

기체의 체류 시간하에서 실험을 행하였으며 (Table 2 참조), 그때의 실험자료는 Table 3과 4에 수록한 바와 같다. 탄산가스의 물에 대한 용해도는 Buch[10], Morgan과 Maass[11], Dodds 등[12]이 구한 실험자료를 이용했다.

3-1. Wetted-Wick Column과 충전탑과의 비교

Fig. 2는 Table 2에서 보여 주듯이, 동일한 범위에 서의 공급기체의 유효속도(superficial velocity)를 기준으로, 즉, 동일한 양의 처리기체를 기준으로 기존의 충전탑과 Wetted-Wick Column에서의 액체의 유량에 따른 총괄물질전달용량계수($K_{oc}a$)의 비교이다. 액체의 유량에 따른 변화를 보면 Wetted-Wick

Table 4. Performance of wetted-wick column in 18.44 mole% CO₂-H₂O system.

Inlet Gas Rate (cc/min cm ²)	Inlet Liq. Rate (g/min cm ²)	CO ₂ Inlet (%)	CO ₂ Outlet (%)
4.843	3.713	18.44	6.89
7.476	3.713	18.44	10.16
9.877	3.713	18.44	12.06
12.122	3.713	18.44	13.18
14.531	3.713	18.44	14.03
16.882	3.713	18.44	14.62
4.843	4.247	18.44	6.07
7.476	4.247	18.44	9.49
9.877	4.247	18.44	11.45
12.122	4.247	18.44	12.67
14.531	4.247	18.44	13.60
16.882	4.247	18.44	14.25
4.843	4.594	18.44	5.56
7.476	4.594	18.44	9.18
9.877	4.594	18.44	11.12
12.122	4.594	18.44	12.40
14.531	4.594	18.44	13.32
16.882	4.594	18.44	14.04
4.843	4.915	18.44	5.17
7.476	4.915	18.44	8.75
9.877	4.915	18.44	10.86
12.122	4.915	18.44	12.14
14.531	4.915	18.44	13.10
16.882	4.915	18.44	13.80
4.843	5.417	18.44	4.77
7.476	5.417	18.44	8.30
9.877	5.417	18.44	10.44
12.122	5.417	18.44	11.77
14.531	5.417	18.44	12.80
16.882	5.417	18.44	13.52

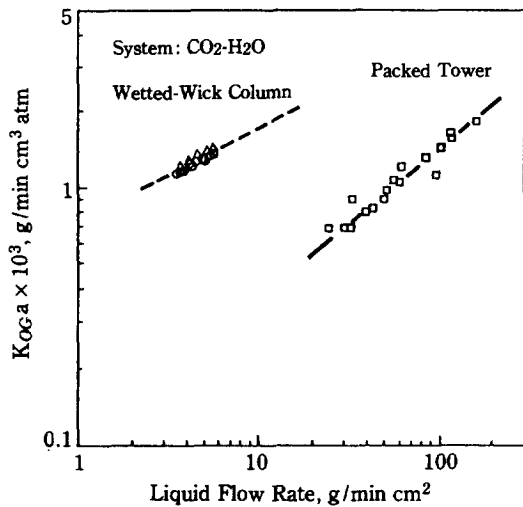


Fig. 2. Comparison of K_{OG} between the wetted-wick column and the packed tower in CO_2 - H_2O system.

- Wetted-Wick : (Δ) 11.06% CO_2 , R.T. = 1.03–1.52 min. (\circ) 18.44% CO_2 , R.T. = 0.91–1.58 min.
- Packed Tower: (\square) 11.80–26.4% CO_2 , R.T. = 1.16–1.36 min.

Column의 K_{OG} 가 충전탑의 10분의 1의 액체유량에 서도 약 1.5배임을 알 수 있다. 또한, Wetted-Wick Column의 경우 100% 습포면으로 인하여 액체유량의 다소에 관계없이 기-액 접촉면적이 동일하나 충전탑의 경우 액체의 유량이 적을 시에는 충전물의 건조한 부분이나 액체의 정체부분이 발생하므로 액체유량이 증가할 수록 건조한 부분이나 정체부분이 감소함[13]으로서 기-액 접촉면적이 증가하여 K_{OG} 의 증가율이 Wetted-Wick Column 보다 커지게 된다. 따라서, Wetted-Wick Column 보다 기존의 충전탑이 액체유량의 증가에 따른 K_{OG} 의 증가율(기율기)이 크게 된다. Fig. 3은 액체의 유량에 따른 이동단위높이(HTU_{OG})를 Wetted-Wick Column과 충전탑을 비교한 것으로 충전탑의 약 10분의 1이 됨을 보여준다. 이처럼 새로이 고안된 Wetted-Wick Column의 효율이 기존의 충전탑보다 훨씬 높은 것은 기체유로와 액체유로를 공유함으로써 발생하는 충전탑의 고유한 제한 조건들을 Wetted-Wick Column에서는 기체유로와 액체유로를 서로 분리시킴으로써 해결됨을 알 수 있으며, 또한 액체유로로 사용되는 심지(wick) 물질의 모세관 현상으로 인하여 기-액의 접촉면적이 증가함을 알 수 있다. 따라서, Wetted-Wick Column을 이용

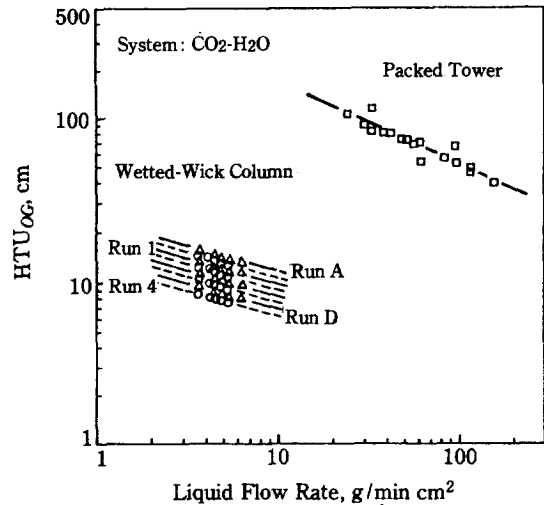


Fig. 3. Comparison of HTU_{OG} between the wetted-wick column and the packed tower in CO_2 - H_2O system.

- Wetted-Wick : (Δ) 11.06% CO_2 , Run A: R.T. = 0.88 min. Run D: R.T. = 1.52 min. (\circ) 18.44% CO_2 , Run 1: R.T. = 0.91 min. Run 4: R.T. = 1.58 min.
- Packed tower: (\square) 11.80–26.4% CO_2 , R.T. = 1.16–1.36 min.

함으로써 흡수제의 재생에 필요한 에너지(열)의 절약, 흡수장치의 크기의 감소, 흡수제의 흡수탑에서 탈수탑으로, 탈수탑에서 흡수탑으로의 수송(pumping)에 사용되는 전력비의 절약 등의 효과가 기대된다.

3-2. 운전변수들의 영향

Wetted-Wick Column의 입구와 출구를 연결하여 설치한 manometer(액체:물)를 이용하여 column에 의한 압력강하를 측정하였으나 본 실험범위 내에서는 압력손실이 나타나지 않았다. 큰 압력손실을 동반하는 기존의 충전탑[14]과는 달리, 본 Wetted-Wick Column에서는 액체가 심지(wick)를 타고 흐르며 기체는 심지를 제외한 빈 공간을 흐르기 때문이다. Wetted-Wick Column은 압력손실이 거의 없다는 장점은 있으나 습식기체정제장치의 처리용량이 흡수제를 함유하는 액체유량의 증가에 달려 있으므로 단위부피당 액체에 대한 심지의 용량 및 갯수에 직접적인 제한을 받게 된다.

Fig. 4와 5는 액체의 유량에 비례하여 K_{OG} 가 증가함을 보여주며, 처리해야할 공급기체의 조성이 11.06 mole% CO_2 (Fig. 4)일 경우나 18.44 mole% CO_2 (Fig. 5)일 경우에도 동일한 액체 유량에서는 K_{OG} 값

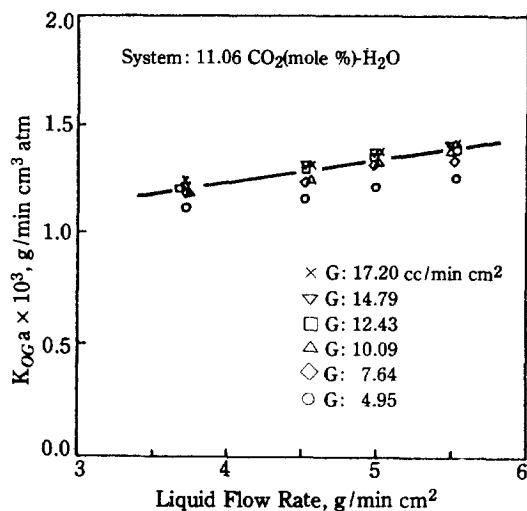


Fig. 4. Effect of liquid rate on K_{OGa} in CO₂(11.06 %)-H₂O system, with gas flow rate as parameter.

이 거의 동일함을 알 수 있다. 이는 처리해야할 공급 기체의 조성이 K_{OGa} 에는 영향을 거의 미치지 못함을 의미한다. 다시 말해서, 본 실험의 액체유량 및 탄산가스 농도범위에서는 공급기체의 탄산가스 농도에 영향을 받지않고 동일한 K_{OGa} 값을 가짐을 보여주는 동시에 물질전달에 있어서 기체측의 저항이 무시할 수 있음을 의미한다. 또한, K_{OGa} 가 액체의 유량에 비례하여 직선적으로 증가함은 탄산가스의 물에 대한 용해도가 그래프가 거의 직선으로 나타나기 때문이다.

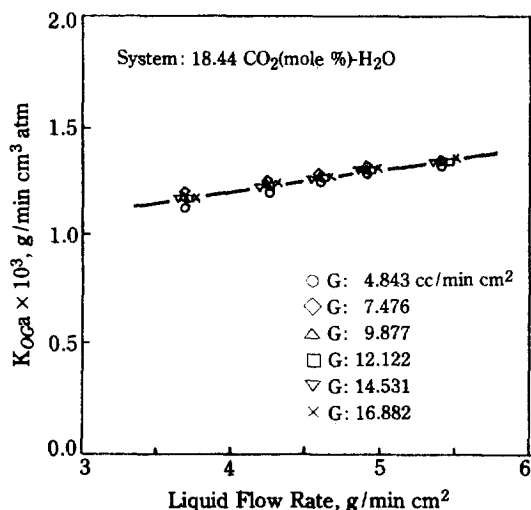


Fig. 5. Effect of liquid rate on K_{OGa} in CO₂(18.44 %)-H₂O system, with gas flow rate as parameter.

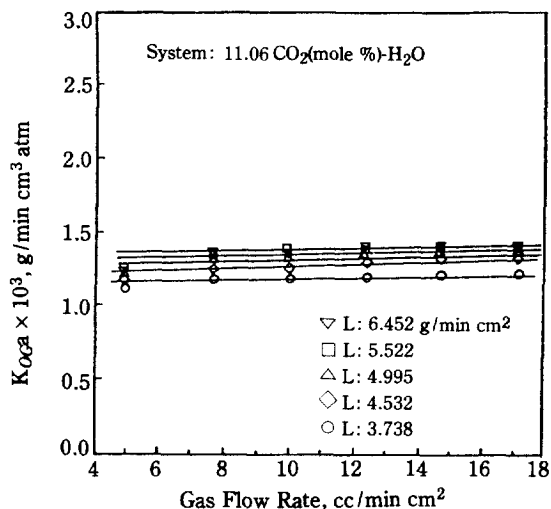


Fig. 6. Effect of gas rate on K_{OGa} in CO₂(11.06 %)-H₂O system, with liquid flow rate as parameter.

Fig. 6(11.06 mole% CO₂)과 7(18.44 mole% CO₂)은 처리해야할 기체의 유량에 대한 K_{OGa} 의 값을 나타내며 일정한 액체유량에서는 K_{OGa} 가 기체의 유량 변화에 거의 영향을 받지 못함을 보여준다. 이는 기체 상에서의 물질전달저항이 무시할 만하며 총괄물질전달 계수는 액체측의 물질전달저항에 전적으로 의존함을 의미한다[14]. 이러한 탄산가스의 물에 대한 흡수과정에서의 기체유량의 변화가 영향을 거의 미치지 못함은 탄산가스의 물에 대한 용해도가 매우 낮기 때문이며

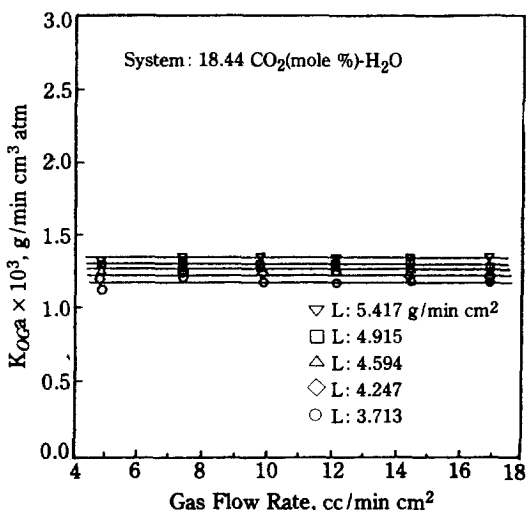


Fig. 7. Effect of gas rate on K_{OGa} in CO₂(18.44 %)-H₂O system, with liquid flow rate as parameter.

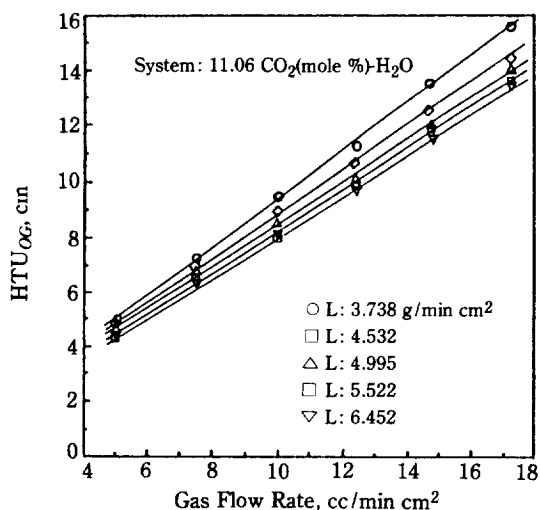


Fig. 8. Effect of gas rate on HTU_{OG} in $CO_2(11.06\%)$ - H_2O system, with liquid flow rate as parameter.

Allen[15], Sherwood 등[16, 17], Cooper 등[18]의 결과와 일치한다.

Fig. 8은 기체유량에 따른 이동단위높이 (HTU_{OG})를 나타낸 것으로 기체유량의 증가에 따라 직선적으로 증가한다. 이는 기체의 유량이 증가함으로써 흡수탑에 더 많은 부하(load)를 주기 때문이다.

4. 결 론

기존의 충전탑은 액체유로와 기체유로를 서로 공유하고 있음으로써 여러가지 제한조건들이 유발되므로, 기-액의 유로를 분리시키고 액체의 유로를 모세-다공성 물질로 만든 심지(wick)를 사용함으로써, 공급기체의 동일한 겉보기 속도(superficial velocity) 범위에서 충전탑의 경우의 약 1/10의 액체유량에서도 약 1.5 배의 $K_{OG}a$ 를 나타내므로 기존의 충전탑을 대체할 수 있는 가능성을 보였다. 이러한 높은 효율은 모세-다공성 물질에 의한 완전한 습포면(100% wetting surface), 벽면으로의 과도한 액체의 흐름이 없음(no excess wall flow of liquid), 균일한 액체의 흐름(uniform liquid distribution), 뒤섞임 없음(no backmixing), 넓은 기-액 접촉면적(high interfacial area), 낮은 액체-기체 유량비(low liquid-gas flow ratio)에 기인된다고 보인다. 본 실험범위에서 탄산가스의 가스측 물질전달저항이 거의 없었으며, Wetted-Wick Column에서의 압력강하는 관측되지 않을 정도로 작았으나, 액체의 유로가 심지(wick)에

한정되어 있어 액체유량이 제한될 수 밖에 없는 단점이 있으므로 단위부피당 심지(wick)의 갯수를 늘려서 기-액의 접촉면적 및 액체유량의 증가가 필요하다.

NOMENCLATURE

- a : interfacial area, cm^2/cm^3
 $K_{OG}a$: overall volumetric mass-transfer coefficient for gas phase, $g/min\ cm^3\ atm$
 HTU_{OG} : overall height of transfer unit based on gas phase, cm
L : liquid flow rate, $g/min\ cm^2$
G : gas flow rate, $cc/min\ cm^2$
R.T. : retention time based on superficial velocity, min
W.W.C. : Wetted-Wick Column

REFERENCES

- Elgin, J.C. and Weiss, F.B.: *Ind. Eng. Chem.*, **31**, 4,435 (1939).
- Stiegel, G.J. and Shah, Y.T.: *Ind. Eng. Chem. Process. Des. Develop.*, **16**(1), 37 (1977).
- Woodburn, E.T.: *AIChE J.*, **20**(5), 1003 (1974).
- Porter, K.E. and Templeman, J.J.: *Trans. Inst. Chem. Engrs.*, **46**, T86 (1968).
- Butwell, K.F., Kubek, D.J. and Sigmund, P.W.: *Chem. Eng. Prog.*, **75**(2), 75 (1979).
- Manning, R.E. and Cannon, M.R.: *Ind. Eng. Chem.*, **49**, 347 (1957).
- Brittan, M.I. and Woodburn, E.T.: *AIChE J.*, **12**, 541 (1966).
- Vermeulen, T.J., Moon, J.S., Hennico, A. and Miyauchi, T.: *Chem. Eng. Prog.*, **62**(9), 95 (1966).
- Cantelo, R.C., Simmons, C.W., Giles, E.M. and Brill, F.A.: *Ind. Eng. Chem.*, **19**(9), 989 (1927).
- Buch, K.: *Soc. Sci. Fennica Commentationes Phys. Math.*, **2**(16), 1 (1925).
- Morgan, O.M. and Maass, O.: *Can. J. Research*, **5**, 162 (1931).
- Dodds, W.S., Stutzman, L.F. and Sollami, B.J.: *Chem. Eng. Data*, **1**(1), 92 (1956).
- Bond, J. and Donald, M.B.: *Chem. Eng. Sci.*, **6**, 237 (1957).
- Eckert, J.S., Foote, E.H. and Huntington, R.L.: *Chem. Eng. Prog.*, **54**(6), 70 (1958).
- Allen, H.V.: M.S. Thesis, MIT (1938).
- Sherwood, T.K., Draenel, F.C. and Ruckman, N.E.: *Ind. Eng. Chem.*, **29**(3), 282 (1937).
- Sherwood, T.K. and Holloway, F.A.L.: *Trans. Am. Inst. Chem. Engrs.*, **36**, 39 (1940).
- Cooper, C.M., Christl, R.J. and Peery, L.C.: *Trans. Am. Inst. Chem. Engrs.*, **37**, 979 (1941).