HWAHAK KONGHAK Vol. 26, No. 3, June 1988, pp. 314-322
(Journal of the Korean Institute of Chemical Engineers)

디스크형 망사 충전탑에서의 반응흡수 특성

차운오·전해수

고려대학교 화학공학과
(1988년 2월 29일 접수, 1988년 5월 12일 채택)

Absorption of CO_2 in a Screen-Disc Packing Column

Woon-Ou Cha and Hai-Soo Chun

Dept. of Chem. Eng., Korea University, Seoul 136-701, Korea
(Received 29 February 1988; accepted 12 May 1988)

요 약

망사 충전물상에서의 물질전달과 유효접촉계면 특성을 파악하기 위하여 동일형태의 망사 디스크 충전탑과 매끈한 금속 디스크 충전탑을 설치하고, 차아염소산소다 촉매를 함유한 탄산칼륨-중탄산칼륨 완충용액과 탄산가스와의 1차 반응흡수계에서 습윤속도 변화에 따른 탄산가스 흡수량을 측정하였다. 그리고 충전물상에서의 액체혼합정도와 액체 체류량관계를 알기위하여 추적자 순간주입기법에 의해 체류시간분포를 측정하였다.

액체 습윤속도가 증가함에 따라 액측물질전달계수, 유효접촉계면 및 액체체류량은 증가하였고, 유효접촉계면은 액체체류량의 영향을 받았으며, 그리고 망사 충전물상의 액체체류량과 액체 혼합도는 금속 충전물의 것보다 각각 1.8배 및 1.5배 크게 나타났다.

Abstract—The absorption of carbon dioxide accompanied by first order reaction into potassium carbonate-bicarbonate buffer solutions, containing sodium hypochlorite as the catalyst, was used to evaluate liquid film mass transfer coefficients and effective interfacial areas in a screen(60 mesh) disc packing column and a smoothed face metallic disc packing column, respectively. The residence time distributions using a tracer pulse input-response technique were measured to find the extent of mixing of liquid on the disc packings.

It was found that liquid film mass transfer coefficients, effective interfacial areas and the holdup of liquid for both packings increased with increase of liquid wetting rate, that the effective interfacial areas depended on the holdup of liquid, and that the holdup of liquid and the extent of liquid mixing on the screen disc packing increased 1.8 and 1.5 times as high as that on the metallic disc packing, respectively.

1. 서 론

증류, 흡수, 추출과 같은 분리조작에서 그 분리효율은 많은 요인의 영향을 받지만 가장 중요한 것은 상간 접촉계면임으로 이 접촉계면을 증진시키기 위해 이용되는 충전물의 특성은 공업적으로 아주 중요하여 상간 접촉비표면적, 액막두께 및 통과길이, 젖음성, 고체표면에서의 분산 및 혼합, 그리고 액체체류량 등이 적당하거나 양호해야 하며 압력손실이 적고 저렴한 것이어야 한다. 따라서 공업용 충전물은 이러한 조건에 접근되도록 그 형태나 그 특성이 발전되고 있어, 최근에는 고가의 포종탑대신 특수 충전물요소, 소위 조립구성 충전물

(structured packing)을 사용하게 되면 그 성능이 월등히 우수한 것으로 보고되고 있다[1-4]. 이 같은 조립구성 충전물은 증기부하에 대한 척도로서 C-factor=0.01-0.45, F-factor=0.1-3.6 범위에서 HETP=3-40 in.의 좋은 물질전달성능을 나타낸다고 보고되고 있다[1]. 그리고 제작이 아주 용이한 개방 원통형 망사 충전물(screen packing)을 충전한 흡수탑, 충전층, 또는 기포탑 성능의 우수성에 관하여도 많이 보고되고 있다[5, 6]. 이러한 조립구성 충전물이나 망사 충전물들은 여러 재질의 망사가 포함되어 있어 그 장점을 이용한 것이다.

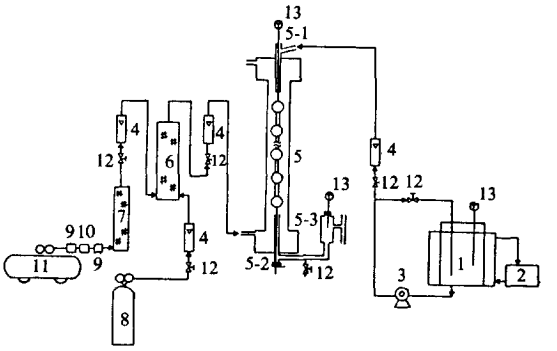
망사재질로 된 디스크형 또는 구형 충전물은 마치 속이 빈 다공성 충전물에 상당됨으로 충전물로서의 여러 장점을 지니게 되고 또 망사개공(opening)내에서의 액체보유량이 월등히 크게 되여 film conversion parameter 값이[7] 낮은 반응흡수의 경우 아주 유리하리라 기대됨으로 이의 특성 규명은 바람직 하다고 여겨진다.

이러한 충전물의 실 유효접촉계면이나 물질전달계수 등의 결정방법으로 여러가지[8-10]가 제안되어 쓰여왔으나 특히 Danckwerts의 표면갱신모델에 1차반응 흡수계를 적용하여 이들 값을 결정하는 방법[11, 12]은 최근 비교적 많이 쓰이고 있다. 본 연구에서는 망사 충전물의 특성을 검토하기 위해 망사 디스크 충전물(screen disc packing)과 표준형 금속표면 디스크 충전물(smoothed-face metallic disc packing)의 실 유효접촉계면과 액측물질전달계수를 1차반응흡수계를 이용하여 각각 측정하여 상호비교분석하고, 망사개공(opening)내에 머무는 액체부하량(liquid loading)이 매끈한 표면의 충전물에 비해 월등히 크므로 망사 디스크 충전물에서의 액체부하량 관계와 체류시간분포(RTD)를 각각 구하여 상호비교검토하고자 한다.

2. 실 험

2-1. 실험장치 및 시약

실험장치의 배열은 Fig. 1과 같고 탑은 직경 2.5 cm, 높이 90 cm의 아크릴관이며, 디스크형 충전물은 매끈한 금속표면의 것과 망사재질로 된 것 두가지 형태이다. 금속 디스크 충전물은 액측물질전달계수를 연구하는데 적합한 표준형(Stephens and Morris Type)으로 39개 디스크(직경 1.59 cm, 두께 0.476 cm)가 지지선(0.2cm 스텐레스 스틸)에 디스크면이 서로 직각이 되게 연결되어 있다. 이 금속 디스크의 총습윤면적(wetted area)은 238.7 cm^2(3.85×1.59×39)이고 충전물 단위 길이당 면적은 3.85 cm^2/ cm of length이다(이 면적은 디스크와 디스크 접합면적 $(0.476)^2$(76)을 빼고 산출한 것임).



1. Feed tank
2. Constant temperature circulator
3. Feed pump
4. Rotameter
5. Disc column
5-1. Liquid feed tube
5-2. Liquid run-off tube
5-3. Lute vessel
6. Humidifier
7. CO_2 removal column from air
8. CO_2 bomb
9. Air regulator
10. Air filter
11. Compressor
12. Valve
13. Thermometer

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

그리고 망사 디스크 충전물은 금속 디스크 충전물과 그 크기, 배열은 모두 같고 단지 재질만 60 mesh 스텐레스 스틸망으로 제작하였다. 이 충전물의 총습윤면적은 468.7 cm^2(7.43×1.59×39)이고 충전물 단위 길이당 면적은 7.43 cm^2/ cm of length이다[16].

이들 디스크 충전물은 액체 하강관(Fig. 1에서 5-1) 끝에서 5 cm 밑에 위치시켰고 지지선은 액체 배출관(Fig. 1에서 5-2) 밑에서 고무패킹과 나사캡으로 고정시켰다. 배출액 준위를 일정히 하고 시료 채취구로 쓰기 위한 Lute 용기(직영 5 cm, 일류관까지 높이 15 cm인 아크릴 원통관)가 탑하부에 설치되었다.

압축공기중의 CO_2 제거용 NaOH 용액조와 증습기가 설치되었고, NaOH 용액조를 통과한 압축공기는 고압통으로부터 나오는 CO_2와 증습기에서 혼합되어 공기-CO_2 혼합기체가 흡수탑으로 공급되도록 배치되었다. 용액은 펌프에 의해 10l 정온조로부터 공급되고 그 유량은 밸브와 우회량으로 조절할 수 있게 되어 있다.

액체체류시간 분포 측정시는 탑하부에 전기전도도계용 cell(Beckman CEL-BB1 with flow chamber k=1.38)을 설치할 수 있도록 하였다. 실험용액은 타

Table 1. Liquid properties and operating conditions.

K_2CO_3	0.6 gmol/*l*
$KHCO_3$	0.25 gmol/*l*
KCl	1.94 gmol/*l*
NaOCl	0.02-0.18 gmol/*l*
CO_3''/HCO_3'	2.4
pH of solution	10.2 + 0.2
Liquid density	1.0464 g/cm^3
Liquid viscosity	1.0366 cp
Liquid temperature	21 ± 1 ℃
Total pressure	1 atm
CO_2-partial pressure	0.2 atm
Gas flow rate	5 cm^3/min
Liquid flow rate	50-250 cm^3/min

실험자의 결과[12, 17, 21]와 비교하기 위하여 Table 1과 같이 사용하였으며 모든 시약은 특급을 사용하였다.

2-2. 실험 조작

2-2-1. 흡수실험 조작

정온조의 용액온도를 21±1℃로 조정한 후 탑상단 일류관으로 공급하여 디스크 충전물을 타고 하강시켰고, 동시에 공기-CO_2 혼합기체(CO_2 대 공기비는 4)를 5 m*l*/min의 속도로 탑하부로 공급하였다. 이때 액체 유량은 50, 100, 150, 200 및 250 m*l*/min별로 하강시켰다. 액체시료는 Lute 용기내에서 20 m*l*씩 채취하여 0.1 N HCl 표준용액으로 전위적정 및 specific ion meter에 의하여 탄산염과 중탄산염 농도를 구하였다. 이때 기록계에 나타나는 전위곡선중 첫 변곡점으로부터 탄산염농도, 둘째 변곡점으로부터 중탄산염농도를 구하였는데, 이 변곡점은 9개 data를 입력시켜 3rd-order polynomial regression에 의하여 구하였다(여기서 사용한 컴퓨터기종은 IBM PC XT). 또한 Lute 용기내에서 25 m*l*씩 시료를 별도로 취하여 요오드법에 의하여 촉매(OCl^-)을 정량하였다. 모든 실험자료는 같은 조건에서 3-5개를 얻어 그 평균치를 택하였다.

2-2-2. 액체체류량 및 체류시간분포 측정

흡수실험 조작시와 같은 조건에서 액체를 디스크 충전물을 다라 하강시키다가 밸브를 잠가 우회시키고 즉시 배출관으로부터 나오는 액체량으로부터 체류량을 측정하였다.

그리고 체류시간분포(RTD) 측정시는 앞 실험조건과 같으나 단지 완충용액 대신 증류수를 사용하였으며 검출물질로서는 0.05 N KCl 용액을 탑상부 유입관에 순간 주입(10 m*l*)하였고, 그 응답은 전기전도도값의 도식 적분값을 이용하되 총 면적으로 나누어 무차원 응답곡선을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 반응흡수

충전물상에서, NaOCl 촉매를 포함한 탄산칼륨-중탄산칼륨 완충용액과 CO_2간 1차반응흡수계의 속도론 영역은 액측물질전달 율속이므로(이에 대한 판별조건은 부록에 약술되었음) 이를 이용하여 상간 유효접촉계면 a와 액측물질전달계수 k를 동시에 구할 수 있는 Danckwerts' model [11] 수식은 다음과 같다.

$$[(\bar{R}v/A^*\sqrt{D})]^2 = a^2k_1 + (k_La/\sqrt{D})^2 \quad (1)$$

여기서 A^*는 CO_2의 평형농도, D는 CO_2의 용액내 확산계수, k_1은 반응속도 상수이다. 그런데 k_1은 촉매(NaOCl)량에 따라 변하는 1차반응속도 상수이고 이 값은 Pohorecki가 제시한 방법[12]에 따라 비교적 정확히 산출할 수 있으므로 본 실험에서 이를 적용하였다. 기체 유속 5 cm^3/min인 조건에서 액체 유량을 매개변수로 하여 금속 디스크 충전물과 망사 디스크 충전물 각각에 대한 Danckwerts' plot가 Fig. 2와 3에 표시되었다. 이로부터 얻은 액측물질전달계수(k_L)와 유효접촉계면(a)값은 Fig. 4에 도시되었는데 이것은 충전

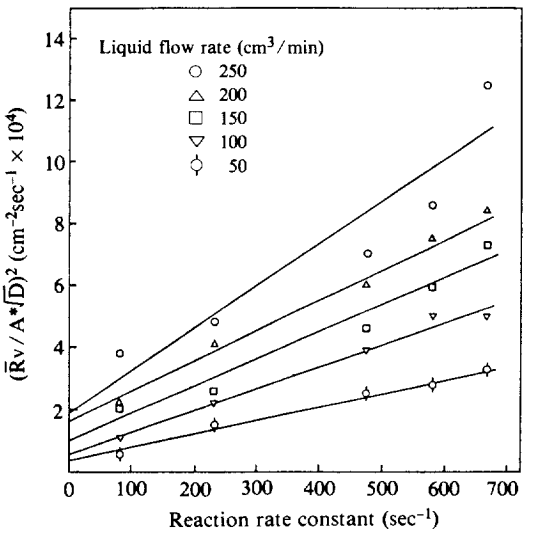


Fig. 2. The Danckwerts' plots for metallic disc packing (gas flow rate: 5 cm^3/min).

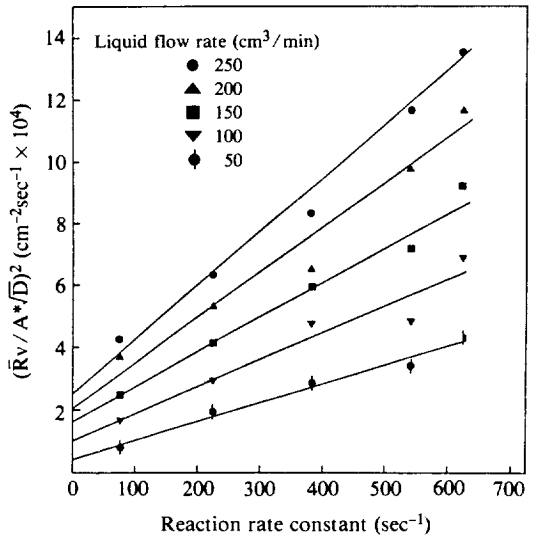


Fig. 3. The Danckwerts' plots for screen disc packing (gas flow rate: 5 cm³/min).

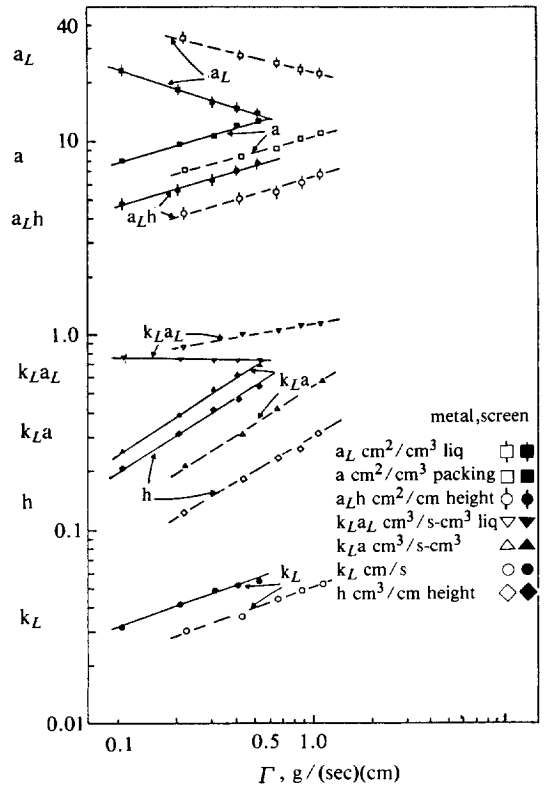


Fig. 4. The dependence of k_La_L, a, a_L and h on liquid wetting rate in the metallic and screen disc column.

물 단위체적당 흡수속도($\bar{R}v$)를 기준으로 나타낸 것이다(충전물 체적 : 36.86 cm³). 또한 충전물상의 액체 체류량(h)을 이용하여 액체 단위면적당 흡수속도($\bar{R}v'$)를 기준으로 한 Danckwerts' plot로부터 물질전달계수 값과 유효접촉계면(a_L)을 구할 수 있다. 이때 어느 것을 기준으로 하든 물질전달계수 값은 같은 값을 얻을 수 있으나 유효접촉계면 값은 서로 다르다.

a값은 일반 충전흡수탑에서의 특성을 나타낼 때 주로 쓰이는 표시방법이고 a_L값은 포종탑이나 다공판탑에서 그 특성 설명 때 쓰이게 된다.

3-1-1. 금속 디스크 충전물

유체 유량 50-250 ml/ min 범위에서 Danckwerts' plot에 의해 구한 복합물질전달계수 값(k_La)은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 0.18-0.57 sec^{-1}, 액측물질전달계수(k_L) 값은 0.026-0.050 cm/ sec, 그리고 유효접촉계면(a) 값은 7.04-11.56 cm^2/cm^3 범위에 들었다. 이들 자료의 습윤속도(wetting rate) Γ와의 관계는 $k_La \propto \Gamma^{0.64}$, $k_L \propto \Gamma^{0.33}$ 및 $a \propto \Gamma^{0.31}$로 나타나 a도 습윤속도에 크게 영향 받음을 알 수 있다. a값은 습윤속도에 따라 충전물 표면적 6.47 cm^2/cm^3보다 1.05배 이상 더 크게 나타나는데 이는 물결현상과 요소와 요소사이의 혼합현상 때문이다. 디스크 요소간의 연결부분에서 혼합 정도를 고려한 Andrew의 rejuvenation 이론[20]에 의한 물리흡수실험자료 분석결과인 $k_L \propto \Gamma^{0.55}$, $a \propto \Gamma^{0.4}$에 비하면 본 반응흡수의 결과는 습윤속도에 적게 영향을 받고 있다. Joosten[21]의 결과를 보아도 그가 선정한 매개변수 γ값이 아주 큰 경우 화학반응흡수시 k_La값은 물리흡수시 k_La값보다 액체공탑속도에 따라 1.3-2.1배 크게 나타나고 있다. 이의 결과는 k_La는 충전물 크기, 종류, 점도 등에 따라 액체공탑속도에 0.24-0.60승에 비례하는 것으로 보고되었다.

그리고 디스크 충전물 표면적을 기준으로 물질전달계수 값을 산출하면 액체습윤속도가 낮은 경우는 Danckwerts' plot에 의한 값과 거의 같지만 습윤속도가 큰 경우 상당히 큰 값(액체유량 250 cm^3/min일 경우 약 2배)이 나타난다. 이로부터 충전물 표면보다는 물질전달 유효표면이 월등히 큼을 알 수 있다. 따라서 기-액간 물질전달계에서 유효접촉계면 대신 충전물 표면적을 기준한 산출방법은 습윤속도가 클 경우 부적당함을 알 수 있다.

본 실험장치와 동일한 장치에서 Stephens의 물리흡수 실험결과[13], $k_L \propto \Gamma^{0.7}$에 비교하기 위해 본 실험결과의 k_L값을 enhancement factor(E)로 보정하면 $(k_L/E) \propto \Gamma^{0.61}$로 나타나 Stephens의 결과

에 접근한다. 그리고 Fig. 4에서 보는 바와 같이 k_La선과 액체체류량(h)선은 그 기울기가 같아 이들은 서로 대략 비례하는데 이는 물리흡수나 순간반응흡수와 다른 특성이라 볼 수 있다.

Danckwerts' plot시 흡수속도를 액체 단위체적당 표시된 값을 이용할 경우 물질전달계수 값은 앞에서 지적한 바와 같이 충전물 단위체적당으로 구한 값과 동일하나 액체 단위체적당 유효접촉계면(a_L)은 a와 서로 그 값이 다르다. a_L은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 액체 습윤속도가 증가함에 따라 감소하는데 이는 액체 증가량만큼 유효접촉계면은 증가치 못하기 때문이다. 이러한 현상은 sieve plate에서 액체두 증가에 따라 a_L가 감소하는 현상과 같은 것이다. 그리고 k_La_L값은 대략 1.1 sec^{-1}로서 거의 일정하나 충전물 단위길이당 유효접촉계면, 즉 a_Lh(cm^2/ cm of disc length) 값은 본 실험범위에서 습윤속도 증가에 따라 4.04-6.87까지 증가하는 데 이는 앞에서 설명된 충전물 단위체적당으로 표시될 때 유효접촉계면 증가추세와 동일한 것이다. Table 2에서 보는 바와 같이 a_t와 a_{Lt}는 같기 때문에 충전물 단위체적을 기준하든 액체 단위체적을 기준하든 특징치 변화추세는 같게 나타남을 알 수 있다.

그리고 물질전달계수의 무차원 상관식은 지금까지 k_Ld/D, 또는 k_La/D 형태로 표시되어 왔으나 앞의 것은 무차원이기는 하나 a가 포함되어 있지 않아서 a가 Γ의 함수인 것을 고려한다면 부적절하고, 뒤의 형태는 복합물질전달계수(k_La)가 내포되어 있기는 하나 무차원이 아닌 것이 좋지 않은 점이다. 그런데 a_Lh는 충전물 단위길이당 액체 유효표면적임으로 유효젖음길이(effective wetted perimeter)에 상당된다. 따라서 k_La_Lh/D는 차원적으로 타당하며 액체체류량 자료를 알 경우 표기 가능한 항임으로 이 항을 이용하여 상관식을 Galileo수 변화없는 조건에서 실험했으므로 이를 무시하고 Norman 과 Sammak[22], Morris[13] 및 Mangers[23] 등의 결과를 참고로 하여 본 실험결과를 나타내면 다음과 같다.

$$k_La_Lh/D = 17.33\ Sc^{0.5}\ Re^{0.64} \quad (2)$$

이때 상관계수 값은 0.99이다.

3-1-2. 망사 디스크 충전물

앞의 금속 디스크 충전물과 동일 유속범위에서 망사 디스크 충전물에 대해 Danckwerts' plot에 의해 구한 k_La, k_L 및 a값은 Table 2에 표시되었고 유효접촉계면(a) 값은 7.99-13.01 cm^2/cm^3(충전물 체적 기준)로서 금속 디스크 충전물에서의 값보다 약 12-17% 크게 나타났다. 본 실험범위에서의 액체흐름은 디스크 전체면을 덮고 하강하기 때문에 디스크 내부 표면은 실제 기체와 효과적으로 접촉되지 못하고 외부 표면만이 유효했던 관계로 기대했던 만큼 유효표면이 크지 못하였다.

Table 2. Operating conditions and results obtained.

Q	metallic disc packing								screen disc packing						
	Γ	h	k_L	a	a_L	a_t	a_{Lt}	E	Γ	h	k_L	a	a_L	a_t	a_{Lt}
250	1.08	0.306	0.0501	11.56	22.44	426	426	1.79	0.521	0.537	0.0516	13.01	14.40	480	480
200	0.866	0.261	0.0487	10.27	23.07	378	374	1.95	0.417	0.475	0.0503	12.00	15.13	442	446
150	0.649	0.223	0.0440	9.32	24.84	343	343	2.10	0.313	0.411	0.0483	10.75	15.60	396	397
100	0.433	0.181	0.0360	8.38	28.19	309	315	2.47	0.209	0.315	0.0404	9.82	18.61	341	342
50	0.217	0.123	0.0306	6.79	32.79	246	246	2.79	0.105	0.203	0.0323	7.99	23.33	283	283

Q : Volumetric flow rate of liquid (cm^3/min)
Γ (wetting rate) = liquid flow rate / wetted perimeter, g/s-cm
a : effective interfacial area per volume of disc string, cm^2/cm^3
a_L : effective interfacial area per liquid volume, cm^2/cm^3
a_t : (a)(volume of disc string)
a_{Lt} : (a_L)(total liquid holdup)
E : Enhancement factor
Wetted perimeter for metallic disc string = 3.58 cm^2/cm of length
Wetted perimeter for screen disc string = 7.48 cm^2/cm of length
Total length of disc string: 39 × 1.59 = 62.01 cm
Volume of disc string = 36.86 cm^3
Total surface area of disc string = 238.4 cm^2
Total liquid holdup = (h)(total length of disc string)

여기에서 습윤속도와의 관계는 Fig. 4에 표시된 바와 같이 $k_La \propto \Gamma^{0.6}$, $k_L \propto \Gamma^{0.3}$ 및 $a \propto \Gamma^{0.3}$의 관계를 얻었다. 이때 습윤속도(Γ) 산출시 젖음길이(wetted perimeter)는 요소와 요소접촉면을 제외하고 망사 양 표면을 고려한 7.43 cm^2/ cm of length 값을 이용하였다[16].

금속 디스크 충전물에서의 $k_La \propto \Gamma^{0.64}$에 비하여 약간 낮은 값을 보이는 것은 유체가 망사표면을 타고 하강할 때 망사개공(opening)내에서의 체류관계로 하강 유체 표면속도는 같은 유량에서 금속 충전물에 비하여 낮기 때문이라 생각된다. 그리고 유효접촉계면과 습윤속도와의 관계는 금속 충전물이나 망사 충전물 모두 거의 같은 관계를 보이고 있다. 그러나 a의 값은 7.99-13.01 cm^2/ cm^3(충전물 체적 기준)로서 금속 충전물보다는 큰데, 액체 유량이 낮은 경우는 망사 자체 구조에 따른 잔물결 때문에 약 18% 유량이 큰 경우는 약 12% 증가하였다.

앞 부분에서와 마찬가지로 액체 단위체적당 유효접촉계면 값(a_L)은 망사개공내 액체체류량이 큰 관계로 금속 충전물보다는 낮지만 그 변화 경향은 서로 같다. 그러나 k_La_L과 a_Lh값은 습윤속도 증가에 따라 증가되고 있다. 이 관계를 앞 부분과 마찬가지로 무차원 상관식으로 표시하면 다음과 같다.

$$k_La_Lh/D = 38.87\ Sc^{0.5}\ Re^{0.40} \quad (3)$$

이때 상관계수값은 0.99이다. 이 식이 식 (2)와 Re의 승수가 다른 것은 망사개공(opening)내의 유체 체류현상 때문이라 생각된다. Fig. 5에서 보듯이 두 충전물에 대한 상관식이 서로 합치되지 않는 것은 각 충전물의 젖음길이(wetted length)값의 차 그리고 망사구조의 특성 때문이다.

3-2. 액체체류량과 체류시간분포

액체의 충전물상의 체류량은 실제 물질전달에 기여하는 활성체류량(operating holdup)과 기-액 평형상태를 이루는 사영역체류량(static holdup)으로 고려할 수 있고 이들 양은 실제 충전 흡수탑의 경우 액체점도, 표면장력, 밀도, 충전물 크기(동일 표면적에 해당되는 구의 직경으로 표시됨), 액체 질량속도 등의 복잡한 함수관계[10]이지만 간단히 액체체류량과 습윤속도와의 관계를 살펴보면 금속 디스크 충전물의 경우 h는 $\Gamma^{0.56}$에 비례하고 있어 Fig. 6에서 보는 바와 같이 물질전달계수($k_L \propto h^{0.59}$)와 유효접촉계면($a \propto h^{0.55}$)에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 망사 충전물의 경우도 h는

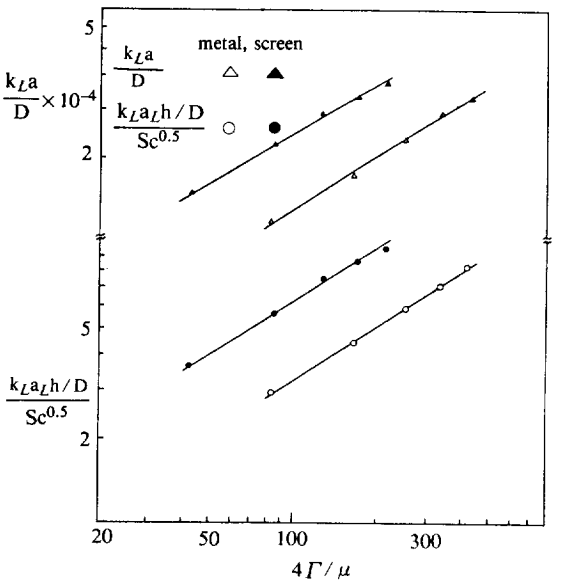


Fig. 5. Correlation of results for the absorption of carbon dioxide in carbonate buffer solutions.

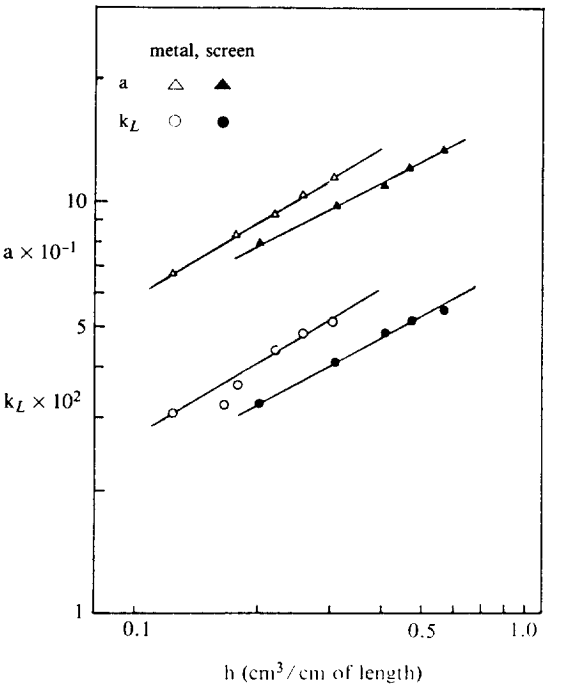


Fig. 6. The dependence of liquid film mass transfer coefficient and interfacial area based on volume of packing on liquid holdup.

$\Gamma^{0.6}$에 비례하며 $k_L \propto h^{0.5}$, $a \propto h^{0.5}$ 관계를 보이고 있다. 따라서 $k_L a$는 h에 거의 정비례하고 있음을 알 수 있다. 그리고 실제 망사 충전물에서의 액체체류량은 Table 2에 표시된 바와 같이 금속 충전물에 비해 약 1.8배 크게 나타났다. 디스크 충전물에서의 사영역체류는 디스크 요소와 요소사이의 연결부분의 혼합영역 그리고 망사개공 내부 영역 등에서 일어날 수 있으나 물리흡수계와는 달리 완충용액내의 1차반응흡수에 대해서는 평형을 이루는 사영역표면이 있을 수 없으므로 혼합현상과 물결현상으로 인한 영향만이 있을 것으로 본다. 느린 반응흡수계에서는 액체체류량 증가의 영향이 아주 클 것이므로 이에 대한 것은 좀 더 규명하여야 할 것이다.

액체반응물의 체류시간분포(RTD)를 추적자 순간주입에 의한 응답곡선해석에 의해 구한 결과를 Fig. 7과 Table 3에 나타내었다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 액체유속 250 m*l*/ min의 경우 금속 디스크 충전물과 망사 디스크 충전물에 대한 추적자 응답곡선으로부터 얻은 분산(variance)값에 따라 tanks-in-series 모델[7]에 의한 탱크의 수는 각각 2.4와 3.6에 상당된다. 즉 망사 충전물은 망사개공으로 인해 국소혼합현상이 1.5배 큼을 알 수 있다. 1차반응흡수의 경우 이 정도의 혼합정도 차이에 의해 물질전달속도에 12-17% 증가시키는 영향이 있었음을 알 수 있다. 액체유속이 낮은 경우도 이와 비슷한 경향이나 낮은 유속에서의 분산값은 더 커지는 경향을 보인다[16]. 망사 충전물의 체류시간분포곡선의 앞부분(Fig. 7)에서 굴곡이 나타나는 것은 추적자 일부가 망사개공을 거치지 않고 표면만을 타고 하강하는 우회(bypass) 현상 때문이다. 그리고 Table 3

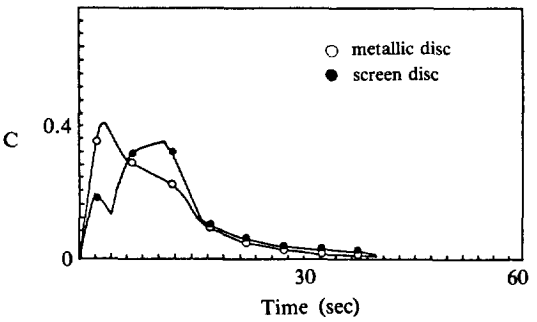


Fig. 7. The residence time distribution curves for liquid flowing through the metallic and screen disc packings.

에 표시된 바와 같이 RTD 곡선의 적분으로부터 얻은 평균체류시간을 보면 망사 디스크 충전물이 금속 충전물보다 15% 크다. 그러나 금속 디스크 충전물도 tanks-in-series 모델에 의한 탱크 수가 비교적 낮은 것으로 보아 디스크 요소와 요소사이에서의 혼합이 상당히 큼을 알 수 있다.

4. 결 론

매끈한 금속표면 디스크 충전물과 망사 디스크형 충전물에서의 차아염소산소다 촉매를 함유한 탄산칼슘-중탄산칼륨 완충용액과 이산화탄소 기체간의 1차반응 흡수계를 이용하여 액측물질전달계수와 유효접촉계면에 미치는 액체 습윤속도의 영향을 검토한 결과는 다음과 같다.

1. 액측물질전달계수와 기-액유효접촉계면은 금속 디

Table 3. Mean residence time and parameters for tanks-in-series model.

Liquid flow rate (cm^3/min)	metallic disc				screen disc			
	θ	$\bar{t}$	σ^2	N	θ	$\bar{t}$	σ^2	N
250	4.56	11.02	50.63	2.4	7.98	12.78	45.78	3.6
200	4.86	11.87	59.27	2.4	8.84	13.48	52.93	3.5
150	5.53	13.44	71.20	2.5	10.19	16.03	77.87	3.3
100	6.72	16.32	—	—	11.71	17.78	—	—
50	9.18	24.36	—	—	15.31	26.51	—	—

* θ(contact time) = $\dfrac{\text{total liquid holdup}}{\text{liquid flow rate}}$

* t(mean residence time) = $\dfrac{\int_0^\infty t c dt}{\int_0^\infty c dt}$

* σ^2 : Variance

* N: Number of tanks (tanks-in-series model)

스크 충전물의 경우 액체 습윤속도의 0.30승과 0.31승에 각각 비례하고, 망사 디스크 충전물의 경우 액체 습윤속도의 0.30승에 각각 비례하였다.

2. 액측물질전달계수에 대한 무차원 상관식은 액체체류량을 기준으로 다음과 같은 결과를 얻었다.

$$k_L a_L h/D = \alpha Sc^{0.5} Re^n$$

여기서 망사 디스크 충전물의 경우 n=0.60과 α = 38.87, 그리고 금속 디스크 충전물의 경우 n=0.64와 α =17.33이다.

3. 망사 충전물은 액체 보유량이 금속 충전물의 1.8배 정도 크게 나타났고 국소 혼합 정도값도 금속 충전물의 약 1.5배 크게 나타났다.

부 록

* 확산율속이 아닌 판별조건은 다음과 같은데

$$\sqrt{Dk_1/k_L^2} \ll a/A^*$$

본 실험범위는 $\sqrt{Dk_1/k_L^2}$ = 0.7 - 2.2, a/A^* = (1.26-2.38)×10^6이므로 확산율속이 아니다.

* 계면에서 촉매농도가 일정하게 되는 판별조건은 다음과 같고

$$\frac{A^*\{1/[CO''_3]+2/[HCO'_3]\}\{\sqrt{1+Dk_1/k_L^2}-1\}}{1+(K_{HClO}/K_2)([CO''_3]/[HCO'_3])} \ll 1$$

본 실험조건에서 우측항 값은(5-13)×10^{-6}이므로 촉매농도는 일정하다.

* CO_2와 NaOCl 반응의 비가역성 판별조건은 다음과 같고

$$A^* \gg C_b = (K_2/K_1)([HCO'_3]^2/[CO''_3])$$

본 실험조건에서 A^* = (5.2-5.4)×10^{-3}g-mol/l이고 좌측항 값은 약 9.9×10^{-6}g-mol/l이므로 위 반응은 비가역이다.

감 사

이 논문이 한국학술진흥재단의 1986년도 연구비에 의하여 연구되어진 데 대하여 당 재단에 감사드립니다.

NOMENCLATURE

a : effective interfacial area per unit volume of packing, cm^2/cm^3
a_L : effective interfacial area per unit volume of liquid, cm^2/cm^3
A : equilibrium concentration of CO_2 at interface, g-mol/l
c : concentration, g-mol/l or normalized concentration
c-factor = (superfacial vapor velocity)(vapor density/difference btn liquid & vapor density)$^{1/2}$
d : diameter of disc element, cm
D : diffusivity of CO_2, cm^2/sec
E : enhancement factor = rate with reaction per rate for mass transfer alone
F-factor = (superfacial vapor velocity)(vapor density)$^{1/2}$
g : acceleration due to gravity, cm^2/s
h : liquid holdup per unit length of disc string, cm^3/cm
k_1 : reaction rate constant, sec^{-1}
k_L : liquid side mass transfer coefficient, cm/sec
K_1 : equilibrium value of $(H^+)(HCO_3')/(CO_2)$, g-mol/l
K_2 : equilibrium value of $(H^+)(HCO_3'')/(HCO_2')$, g-mol/l
K_{HClO} : dissociation constant of HClO, g-mol/l
l : height of disc string, cm
N : number of tanks in tanks-in-series model
Q : volumetric liquid flow rate, cm^3/min
$\bar{R}_v$: average rate of absorption of CO_2 per unit volume of packing, g-mol/(sec)(cm^3)
$\bar{R}'_v$: average rate of absorption of CO_2 per unit volume of liquid, g-mol/(sec)(cm^3)
t : time, sec
Ga : Galileo number = $l^3 g\rho^2/\mu^2$
Sc : Schmidt number = $\mu/\rho D$
Re : Reynolds number = $4\Gamma/\mu$
Γ : wetting rate, g/sec-cm of wetted perimeter
α : constant
θ : contact time, sec
μ : viscosity of liquid, g/cm-sec
ρ : density of liquid, g/cm^3
σ^2 : variance, sec^2

REFERENCES

1. Chen, G.K.: *Chem. Eng.*, March, 5, (1984).
2. Webb, C.: *Chem. Eng. Res. Des.*, **61**, 125 (1983).
3. Chen, G.K.: CEP, Sep, 46 (1983).
4. Bravo, J.L.: Hydrocarbon Processing, March, 45 (1986).
5. Voyer, R.D.: *Can. J. Chem. Eng.*, **46**, 335 (1968).
6. Montroe, A.G.: U.S. Pat. 2, 940, 168, Jan., **14**, (1966).

7. Levenspiel, O.: Chem. Reaction Eng., John Wiley, New York (1972).
8. Onda, K.: *J. Chem. Eng. Japan*, **1**, 62 (1968).
9. Weisman: IEC, **42**, 1099 (1950).
10. Shulman, H.L.: *AIChE. J.*, **1**, 247 (1955), **17**, 631 (1971).
11. Danckwerts, P.V.: Gas-Liquid Reaction, MGH, New York (1972).
12. Pohorecki, R.: *Chem. Eng. Sci.*, **23**, 1447 (1968).
13. Stephens, E.J. and Morris, G.A.: CEP, **47**, 232 (1951).
14. Alper, E.: Mass Transfer with Chem. Reaction, Martinus Co., Hague, 1983.
15. Nijsing, R.A.T.O.: *Chem. Eng. Sci.*, **10**, 88 (1955).
16. Cha, U.O.: M.S. Thesis, Korea Univ. (1986).
17. Pohorecki, R.: *Chem. Eng. Sci.*, **31**, 367 (1976).
18. Chen, B.H. and Jain, S.C.: *Can. J. Chem. Eng.* **58**, 281 (1980).
19. Danckwerts, P.V. and Sharma, M.M.: The Chem. Engr., CE 244 (1966).
20. Andrew, S.P.S.: *Chem. Eng. Sci.*, **38**, 9 (1983).
21. Joosten, G.E.H. and Danckwerts, P.V.: *ibid*, **28**, 453 (1973).
22. Norman, W.S. and Sammark, F.Y.Y.: *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, **41**, 109 (1963).
23. Mangers, R.J. and Ponter, A.B.: *IEC Chem. Proc. Des. Dev.*, **19**, 530 (1980).