

구형 망사 충전물의 특성

권승범* · 위정호 · 이정훈 · 전해수 · 이희철**

고려대학교 공과대학 화학공학과

**인하대학교 공과대학 화학공학과

(1991년 1월 16일 접수, 1991년 4월 24일 채택)

Characteristics of Spherical Screen Packings

Seung-Beom Kwon, Jung-Ho Wee, Jung-hun Lee, Hai-Soo Chun and Hee-Cheol Lee**

Dept. of Chemical Engineering, Korea University, 1 Anam-dong, Seoul 136-701, Korea

***Dept. of Chem. Eng., Inha Univ., 253 Yonghyen-dong, Inchun 402-751, Korea*

(Received 16 January 1991; accepted 24 April 1991)

요 약

산업충전물로서 응용 가능성이 큰 망사 충전물의 특성을 파악하기 위하여 차아염소산소다 촉매를 함유한 탄산칼륨-중탄산칼륨 완충용액으로 이산화탄소 흡수 속도를 측정하여 물질전달계수, 기-액간 접촉계면을 살펴보고 액체 체류량, 압력강하 등의 특성을 살펴 보았다. 사용한 망사개공 크기는 검증용 완충용액의 물성을 감안하여, 50, 60 mesh의 스테인레스 망사를 사용하였고, 그 형태는 충전물의 표면적을 산출할 수 있도록 구형으로 제작하였다. 구형 망사 충전물은 기존 충전물에 비하여 더 높은 물질전달속도를 보였고, 본 검증용액 물성에 대해서는 60 mesh가 더 유리하고 큰 개공의 것이 불리하였다.

Abstract—To investigate the characteristics of screen-packing for industrial application, measurements of absorption rates of carbon dioxide into potassium carbonate-bicarbonate buffer solution containing sodium hypochlorite as a catalyst in the screen packing column were carried out. The mass transfer coefficient and gas-liquid interfacial area of the screen packings were obtained, and also the pressure drop and liquid hold-up in the screen packing column were measured. In consideration of physical properties of the solution, 50 and 60 mesh spherical packings were used. It was found that the spherical screen packing showed the higher mass transfer rate than the ordinary commercial packings, and that the 60 mesh spherical packings was better than 50 mesh packings for the absorption.

1. 서 론

기-액 접촉 공정은 화학공업, 폐기물 처리, 기타 여러 분야에서 널리 이용되고 있고, 반응이 비교적 빠른 흡수조작의 경우 특히 기-액간 접촉계면이 크게 유지되

어야만 유리하다. 이러한 공정에 쓰이는 반응기로는 여러 가지 있지만 충전탑이 가장 많이 이용되고 있다. 이에 쓰이는 충전물은 큰 접촉계면이 요구될 뿐만 아니라 액막 두께와 액 통과 길이, 젖음성, 고체 표면에 서의 분산 및 혼합 등이 양호해야 하고, 적당한 액체 체류량과 압력 손실이 작고 가격이 저렴해야 한다. 이러한 조건에 맞추어 여러 종류의 충전물이 개발되었고 최근에는 조립구성 충전물(structured packings)과 제

*현주소: (주)유공 인천고분자연구소 재료·가공연구실
인천시 남구 용현동 604-8

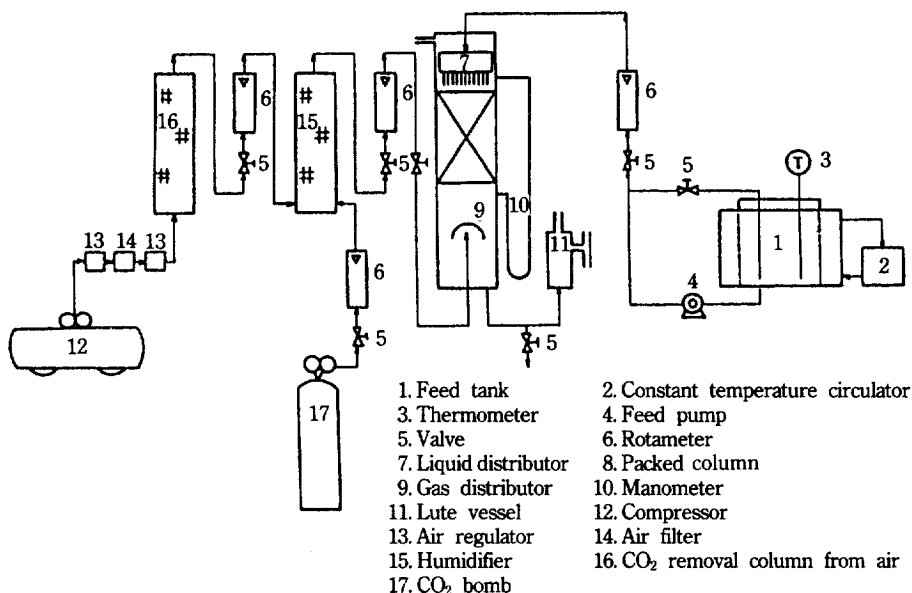


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

작이 아주 용이한 망사 충전물(screen packings or knit mesh packings)을 충전한 흡수탑, 기포탑 등의 성능이 우수하다고 보고되고 있다[1]. 이러한 종류의 충전물은 형태가 다른 망사가 중첩되어 있어 결국 망사의 장점들을 이용한 것에 해당된다. 망사로 된 구형 충전물은 유효접촉면적이 크고, 탑내 압력손실이 작고, 망사 개공내에서의 액체 보유량이 단순히 매끈한 표면의 충전물보다 크게 되고, 부하 중량이 가벼운 잇점 등이 있어 기존 충전물의 단점들을 개선할 수 있는 여러 장점을 지니고 있다[2-8].

본 실험에서는 이러한 망사 구조물의 충전물로서의 특성을 알아보기 위하여 스테인레스 스틸로 된 구형 망사 충전물을 제작하여 탑내 압력강하, 액체 체류량, 물리 흡수와 반응흡수 실험 등을 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2-1. 실험장치

본 실험을 수행하는데 필요한 실험장치의 개략도는 Fig. 1에 나타낸 바와 같다. 충전 흡수탑은 탑 내부에서의 현상을 관찰하기 위하여 내경 6.7 cm, 길이 80 cm의 투명한 아크릴 원통관으로 제작하였고 액체 배출관 부분에는 액체의 수면을 일정하게 유지할 수 있도록 lute vessel을 설치하여 기체의 비산을 방지하면서 액체 시료채취를 할 수 있도록 하였다. 액체 분산판은 개공비 0.0295의 삼각형 배열 다공판이고, 기체 상승분산판은

기체 유입관 위에 cap을 씌워 액체가 기체 유입관으로 들어가는 것을 방지하였다.

한편 흡수기체는 공기-CO₂ 혼합기체(CO₂ 조성은 20 mol %)인데 이 혼합기체의 공급 과정은 다음과 같다. 공기는 압축기로부터 조절기, 여과기, NaOH 용액을 거쳐 불순물을 제거한 후 증습기에서 고압통으로부터 나오는 일정 온도의 CO₂와 혼합되어 흡수탑으로 유입된다 [9, 18]. 흡수용액은 탄산염 완충용액에 촉매(NaOCl)를 첨가한 것이고[10, 12, 13, 22] 1차 반응을 유도하기 위해 가해진 촉매량은 0.018-0.35 M 범위를 유지하였다. 이의 조성과 물성은 Table 2에 주어져 있다. 이 완충용액은 저장조(액체 용량 13 l)로부터 정온 순환기[Haake D1]와 우회 밸브를 거쳐 일정 온도(21°C), 일정 유량(범위: 0.60-1.64 cm³/s)을 유지시켜 탑 상부의 액체 분산판으로 보내어진다. 액체 유량 1.64 cm³/s는 기체 유량 1.45 g/cm²min에서 범람속도(flooding velocity)에 해당되었다. 탑 옆에는 압력강하 측정을 위한 manometer를 설치하였으며 액체 체류량 측정과 충전물 교환이 용이하도록 탑의 분리가 가능하게 제작하였다.

2-2. 충전물

충전물은 50과 60 mesh 스테인레스 강철망으로 외경 8.5 mm의 반구를 제작하여 두 반구를 맞붙여 구를 만들고 탑 내경과의 비를 1:8로 하여 channeling을 최소화 할 수 있는 조건을 갖추었고[10], 이 구는 기체의 흐름을 원활히 하기 위하여 구 양쪽에 2 mm의 구멍을

Table 1. Characteristics of packings

Type (Material)	Size (mm)	Opening size (mm)*	Wire dia. (mm)*	Bulk density (g/cm ³)	G. S. A.*** (cm ² /cm ³)	Void fraction
60 mesh(steel)	8.5	0.250	0.180	0.1876	4.013	0.92
50 mesh(steel)	8.5	0.297	0.215	0.1647	3.933	0.96
60 mesh with internals (steel & beads)	3.75(8.5)	0.250	0.180	0.5307	5.422	0.63
Berl saddle(ceramic)**	#0.5			0.8650	4.6588	0.62
Intalox saddle(ceramic)**	#0.5			0.7369	6.2336	0.71
Raschig ring(ceramic)**	#0.5			0.8810	3.6745	0.64
Sphere(ceramic)****	5.0				2.51	

denotes inch

*** Geometrical Surface Area

* from Reference[15]

The area based on the surface

** from Reference[16]

area of screen wires.

**** from Reference[19]

from Reference[18]

뚫었다. 이 구의 양면(외부와 내부 표면) 비표면적은 50 mesh 충전물의 경우 대략 $3.489 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$ packed vol, 60 mesh 충전물의 경우 $3.522 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$ packed vol이다. 그리고 액체 흐름 특성을 파악하기 위해 60 mesh 망사 구 안에 유리구(직경 3.75 mm) 5개씩을 삽입하여 제작한 것도 사용하였다.

충전 높이는 탑 내경의 0.5-7배 높이에서 wall effect와 flow pattern이 상쇄된다는 실험결과[10]에 따라 본 실험에서는 1000개의 충전물로 충고 31.0 cm가 되게 하여 탑 내경 대 충고비를 4.6으로 유지하였다. 각 충전물에 대한 형태는 Fig. 2, 그리고 그 특성은 Table 1에 나타내었다.

2-3. 실험방법

물리흡수 실험에는 순수로 채운 저장조(13 l)에 연결된 정온 순환기[Haake D1]에 의해 21°C 로 유지된 후 $0.60\text{-}1.64 \text{ cm}^3/\text{s}$ (20-55 gal/hr)의 범위에서 주어진 유량으로 탑 상단 분산판으로 보내어 CO_2 -공기 혼합물과

향류로 접촉시킨다. 이 때 CO_2 공기 혼합물은 순수 CO_2 와 공기의 용적비가 2:8이 되게 혼합시켜 $1.45 \text{ g}/\text{cm}^3$ min의 일정한 질량유속으로 gas 도입부를 통하여 유입시킨다. 이 질량유속은 부하점(load condition) 이하이므로 기체유속에 따른 흡수변화가 거의 무시될 수 있는 값이다[9]. 액체 시료는 lute vessel을 통해 각 액체유속에 대해 삼각 플라스크에 200 ml씩 채취하여 밀봉한 후 적정 분석하였다. 또한 배출기체중 CO_2 농도를 Gas Chromatograph[Shimadzu GC-8A]로 분석하여 흡수된 CO_2 양을 재검하였다. 액체와 기체의 질량속도비가 클수록 액체의 불균일 분배(maldistribution) 영향을 줄일 수 있으므로[11], 본 실험에서는 충분한 유속비를 가지도록 하였다.

화학반응흡수 실험은 물리흡수 실험방법과 동일하고 순수 대신, Pohorecki[12]가 속도상수값을 구하기 위해

Table 2. Buffer solution composition and operating conditions

K_2CO_3	0.60 M
KHCO_3	0.25 M
KCl	1.96 M
NaOCl	0.018-0.35 M
$[\text{CO}_3^{2-}]/[\text{HCO}_3^-]$	2.4
pH	10.46 ± 0.06
Packed height	31.0 cm
Packing density	$0.91495 \text{ pieces}/\text{cm}^3$
Solution density	$1.161\text{-}1.204 \text{ g}/\text{cm}^3$
Solution viscosity	$1.182\text{-}1.472 \text{ cP}$
Temperature	21°C
Total pressure	1 atm
CO_2 partial pressure	0.2 atm
Gas mass velocity	$1.4496 \text{ g}/\text{cm}^2\text{min}$
Superficial liquid velocity	$0.5965\text{-}1.6407 \text{ cm}/\text{sec}$

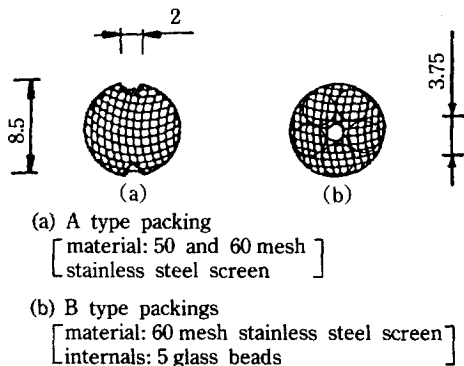


Fig. 2. Dimensions of spherical screen packings(unit: mm).

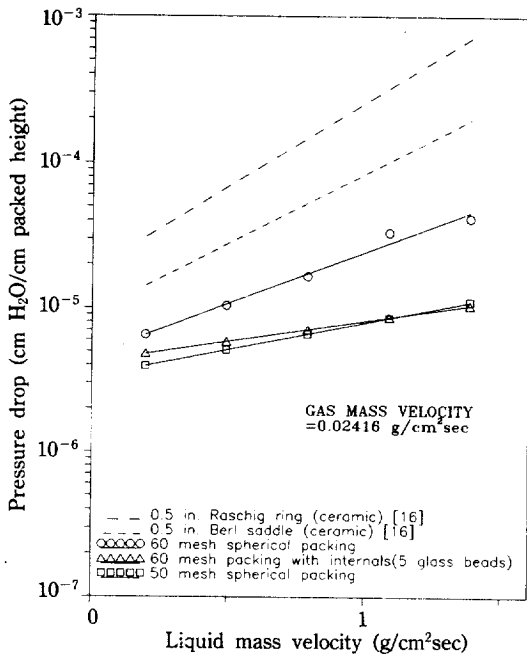


Fig. 3. Comparison of pressure drop with other packings based on pressure drop correlation.

실험한 것과 동일한 농도 범위의 완충용액으로 수행되었으며 그 조성과 실험조건은 Table 2와 같다. 본 실험에 사용한 흡수용액과 CO_2 는 1차 비가역 반응으로 확인된 바[12, 13], 다음식에 따른 Danckwerts의 plot에 의해 기울기로부터 유효점촉계면, 절편으로부터 액측 물질 전달계수를 각각 구하였다.

$$\left[\frac{Ra}{A^* \sqrt{D}} \right]^2 = a^2 k_1 + \left[\frac{k_L a}{\sqrt{D}} \right]^2 \quad (1)$$

여기에 필요한 속도상수값(k_1)은 다음의 Pohorecki 실험결과[12]를 이용하였다.

$$k_1 = k_{H_2O} + [OCI^-] (1518 + 1381 \frac{[CO_3^{2-}]}{[HCO_3^-]}) \quad (2)$$

3. 결과 및 고찰

3-1. 압력강하

충전물의 random packing시 그 충전방법에 따라 충전밀도(=충전 부피당 충전물 개수)가 변하는데 본 실험에 사용한 구형 망사 충전물에 대해 충전밀도(packing density)에 따른 압력강하를 측정해 본 결과 밀도가 클수록 압력강하도 크게 걸림을 알 수 있었다. 충전밀도가 다르게 되면 액체 흐름 형태의 변화[4]로 흡수 속도에 영향을 주게 된다. 따라서 본 실험에서는 언제나 1000개의 충전물을 같은 높이가 되도록(이 때 충전밀도는 0.915 pcs/cm^3) 유지하여 수행하였다.

Fig. 3에는 60 mesh 그리고 50 mesh 구형 충전물에 대한 압력강하값이 표시되었다. 같은 크기의 충전물이고 단지 개공 크기만이 다르기 때문에 이들간의 압력강하값의 차는 오직 개공 크기의 영향이다. 기체 질량 유속 $1.45 \text{ g/cm}^2\text{min}$ 에서 흡수 액체 속도 증가에 따라 압력강하도 증가하나 그 값은 일반적 공업용 충전물에 비해서는 1/10 이하의 적은 값에 속한다[16, 21]. Fig. 3에 인용된 것은 부하점 이하에서의 관계식[16]에 Table 3의 값을 이용하여 도식된 것이다. 그리고 망사 충전물 상에서의 액체 흐름 특성을 파악하기 위해 60 mesh 망사 충전물 구 안에 유리구(5개) 삽입한 것을 충전했을 경우 압력강하를 보면, 60 mesh 충전물내에 유리구가 없는 경우보다 압력강하값이 낮게 나타나고 있다. 유리구가 삽입됨으로 인하여 탑 단면의 공극률이 훨씬 줄어들

Table 3. Correlation constants used[18]

	60 Mesh packing	50 Mesh packing	Glass bead packing		60 Mesh packing	50 Mesh packing	Glass bead packing
$\Delta P = \alpha (10^{0.2}) (G^2 / \rho_c)$				$k_L a = \alpha u^\beta (\text{chemical})$			
α	0.7866	0.7236	1.0001	α	0.1390	0.1250	0.06113
β	0.3313	0.1827	0.1382	β	0.2959	0.1912	0.4480
$h_r = \alpha u^\beta / D_p^2$				$a = \alpha u^\beta$			
α	4.69×10^{-6}	1.31×10^{-6}	7.33×10^{-6}	α	0.1402	2.6355	2.4208
β	0.3597	0.4762	0.3428	β	0.2659	0.06691	0.06918
$k_L a = \alpha u^\beta (\text{physical})$				$k_L = \alpha u^\beta$			
α	0.02677	0.02532	0.02454	α	0.04865	0.04743	0.02525
β	0.3799	0.3747	0.3244	β	0.1817	0.1243	0.3789
$k_L a / D_v = \alpha N_{Re}^\beta N_{Sc}^{0.5} (\text{physical})$				$k_L a / D_v = \alpha N_{Re}^\beta N_{Sc}^{0.5} (\text{chemical})$			
α	11.682	11.470	13.585	α	105.04	131.37	20.06
β	0.3246	0.3699	0.3244	β	0.2658	0.1912	0.4480

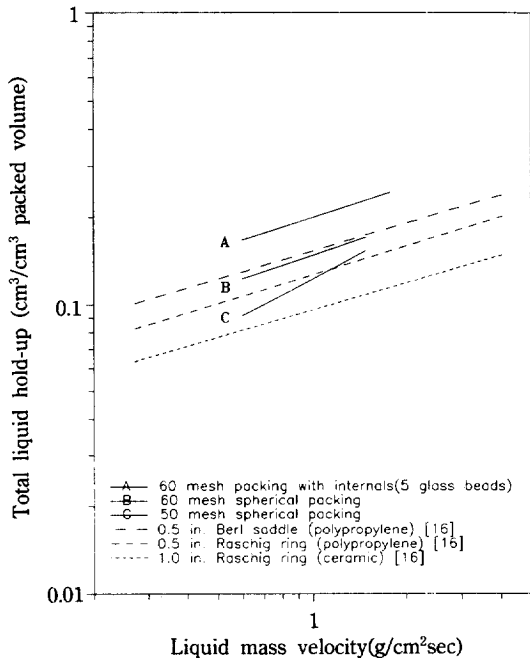


Fig. 4. Total liquid hold-up vs. liquid mass velocity.

있음에도(Table 1 참조) 압력강하값이 오히려 낮은 것은 액체가 망사 충전물 외부 표면만을 따라 하강하는 것이 아니고 유리구를 타고 rivulet를 형성하며 지름길로 내려오는 현상때문이 큼을 알 수 있다.

3-2. 액체 체류량

액체 유속에 따른 액체 총 체류량을 Fig. 4에 도시하여 비교하였다. 60 mesh의 액체 체류량이 50 mesh 것 보다 약간 크게 나타나는데 이는 본 실험조건의 액체에 대해서는 스크린의 개공이 작은 것이 더 높다. 그러나 이것은 액체 물성에 크게 의존되리라 본다. 그리고 60 mesh 망사 구내에 유리구를 삽입한 충전물의 경우 액체 체류량은 유리구 삽입되지 않은 경우보다 더 크다. 이는 액체가 스크린 개공만을 덮는 것이 아니고 유리구를 따라 rivulet를 형성하며 하강하고 유리구와 망사 접촉 부분에 고이는 액체량 때문이다. 앞부분에서 살펴 본 바와 같이 유리구 삽입의 경우 오히려 압력강하가 낮은 점을 감안하면 망사표면을 따라 흐르는 액체량보다 지름길로 흘러내리는 양이 상당히 큼을 알 수 있다. 본 실험에 사용한 구형 망사 충전물의 액체 체류량은 공업용 소형(0.5 인치) 라시링, 벌새들의 것과 거의 유사하였다.

3-3. 물질전달계수 및 유효접촉면적

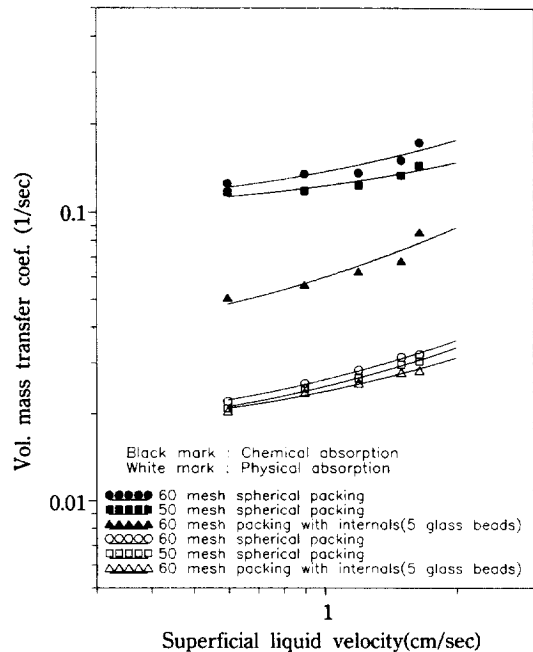


Fig. 5. Volumetric mass transfer coefficients for chemical absorption and physical absorption(21°C).

3-3-1. 물리흡수

망사 구형 충전물에서의 물리흡수 실험결과는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 그 체적물질전달계수($k_L a$) 값은 소형(0.5 인치) 세라믹 라시링이나 인탈록스새들과 같은 일반 산업용 충전물에 비하여 월등히 크게 나타나는데 이는 망사 충전물의 유효접촉면적의 증가에 해당된다. 일반 공업용 충전물의 유효접촉면적은 충전물 총 면적의 70%이하인데 비하여[1, 20, 21], 망사충전물은 액체 유량에 따라 약간 차가 있으나 74-90% 범위(Fig. 7 참조) 상당히 크다. Fig. 6은 Sherwood의 관계식[16]을 Table 3의 계수를 이용하여($k_L a/D_p = \alpha N_{Re}^{0.8} N_{Sc}^{0.5}$) 프롯트하여 본 실험의 것과 상호 비교한 것이다. 그리고 Fig. 5에서 물리흡수의 경우를 보면 60 mesh의 것이 50 mesh의 것에 비해 약간 큰 체적물질전달계수값을 보인다. 이는 60 mesh 구형 충전물에 유리구 삽입된 경우는 더 낮은 값을 보이는데, 이는 앞에서 지적한 바와 같이 액체가 망사표면 뿐 아니라 삽입물을 따라 흘러 유효하게 접촉된 액체량이 오히려 적어지기 때문이다.

3-3-2. 화학반응흡수

유효접촉면적과 물질전달계수를 분리 산출하는 방법으로 화학흡수에 의한 Danckwerts의 plot법은 잘 정립되어[10, 12, 13], 본 실험에도 기체측 물질전달저항이

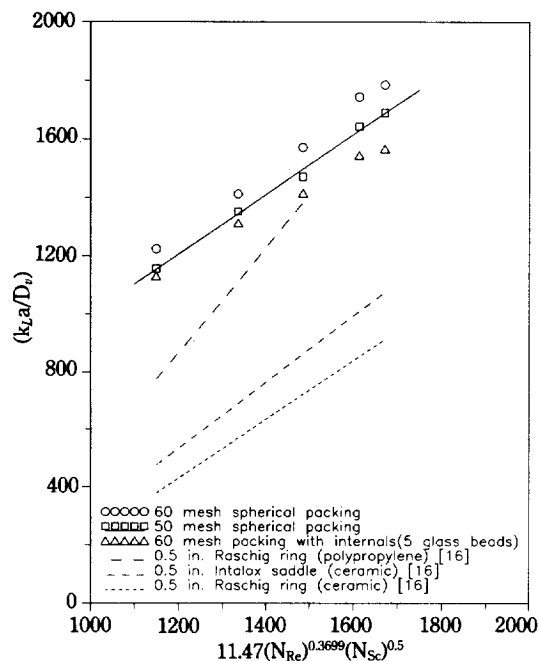


Fig. 6. Sherwood and Holloway correlation based on 50 mesh sphere packings for physical absorption and comparison with other packings.

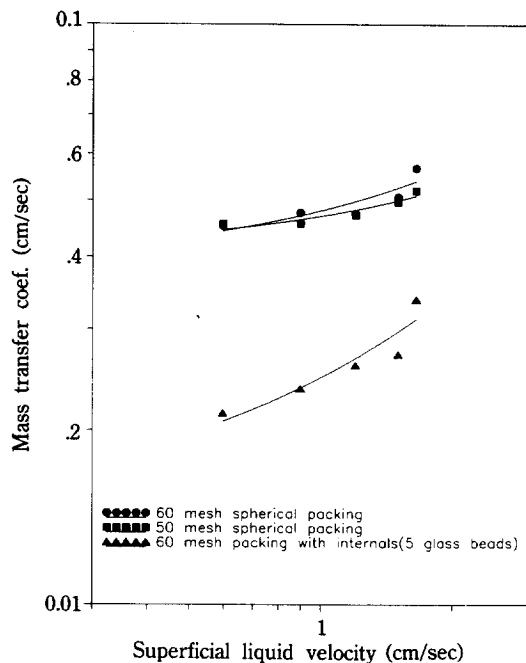


Fig. 8. Comparison of liquid phase mass transfer coefficients for chemical absorption(21°C).

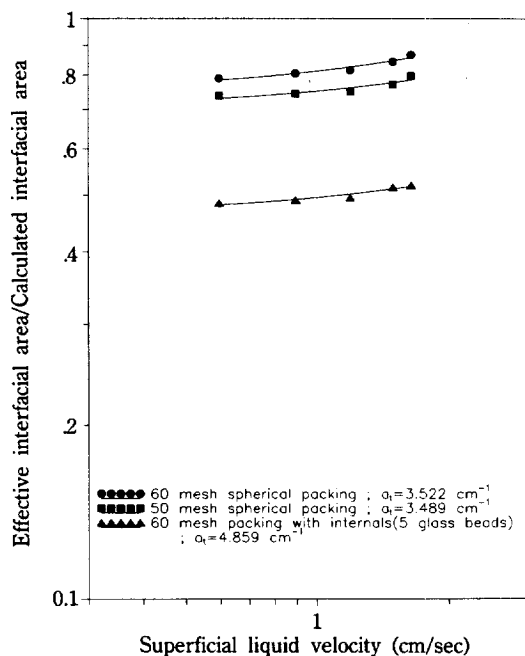


Fig. 7. Fractional effective interfacial areas for chemical absorption(21°C).

무시될 수 있는 제[10, 12, 13]를 이용하였다. 그 결과 Fig. 5에는 물리흡수의 경우와 화학흡수의 것이 비교되었고, Fig. 7에는 유효접촉비표면적이 충전물의 전체면적(Table 1 참조)에 대한 분율로 표시되었다. Fig. 5에서 화학흡수시 체적물질전달계수값이 물리흡수의 것보다 더 큰 것은 화학반응으로 인한 흡수촉진 효과 때문이다. 이 때 증진인자(enhancement factor)는 5.6-7.0범위로서 나타났다[22-26]. 본 논문이 이 인자에 미치는 영향을 검토하려는 것이 아니기는 하지만, Fig. 5에서의 두 값이 정확히 비교될 만큼 두 액체의 물성이 동일한 것은 아니다. 그리고 Fig. 5에서 보는 바와 같이 60 mesh의 것이 50 mesh의 것보다 약간 큰 체적물질전달계수값을 보이는데, 이는 망사개공이 본 실험에 사용된 액체 물성에 대해서는 더 큰 유효접촉면적을 주기 때문이다. 망사개공과 액체 점도 및 표면장력과의 관계는 밀접하겠지만, 본 실험에서 사용한 완충용액에 촉매를 넣어 1차 반응에 해당되도록 조제해서 사용할 경우 제 3의 물질을 가하여 점도나 표면장력 변화를 가져오게 할 수 없어(촉매와 제 3의 물질이 상호 영향을 받기 때문에), 이의 영향은 검토하지 못하였다. Fig. 5에서 60 mesh 망사구 안에 유리구를 삽입한 충전물에 대한 화학흡수의 경우, 유리구가 삽입 안된 충전물에 비해 전체 표면적이 약 35% 증가(Table 1) 되었음에도 불구하고 오히려 체적

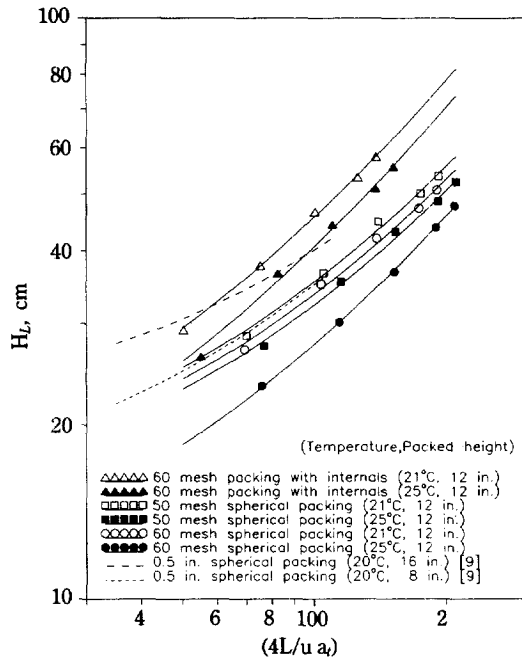


Fig. 9. Height of a liquid phase transfer unit for physical absorption vs. Reynolds number.

물질전달계수가 낮은 것은 앞절에서 지적한 바와 같이 액체가 망사표면만을 따라 하강하는 것이 아니고 액체 일부가 삼입물을 따라 흘러내려 유효접촉계면이 낮아지기 때문이다. 이는 Fig. 7에서 뚜렷이 나타남을 알 수 있다. 따라서 액체가 망사표면만을 따라 흘러야 유효접촉계면이 증진되고 액체가 충전물 표면 이외의 유도로를 따라 지름길로 하강하게 되면 국소적 불균일 분배(maldistribution) 때문에 오히려 유효접촉계면이 낮아짐을 알 수 있다. 유효접촉계면을 충전물의 전체 표면적[18]에 대한 비율로 표시된 결과가 Fig. 7에 표시되었다. 60 mesh나 50 mesh 충전물의 경우 74-90% 범위에서 유효함을 보이는데 이는 일반 공업용에 비해 월등히 큰 것이다[1, 19-21]. 비교적 소형 유리구에 대한 실험결과[21]도 사용 액체에 따라 다소 차이가 있기는 하지만 약 70% 이하를 나타내고 있다.

한편, Fig. 9와 10은 액상 전달단위높이(HTU)를 비교한 것으로 mesh 충전물의 경우가 기존 충전물들보다 낮은 HTU를 보였다.

4. 결 론

망사재질의 충전물로서의 특성을 알아보기 위하여, 외경 8.5 mm 구형 망사 충전물을 만들어 충전한 흡수

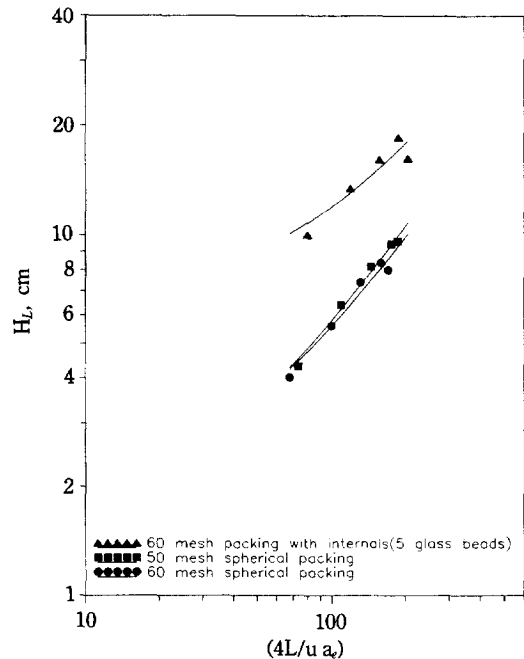


Fig. 10. Height of a liquid phase transfer unit for chemical absorption vs. Reynolds number.

탑에서 압력강하, 액체 체류량, CO₂에 대한 물리흡수와 탄산칼륨 완충용액에 의한 화학반응흡수 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 구형 망사 충전물은 탑내 압력 손실이 작고 유효접촉면적이 커져 체적물질전달계수가 기존의 충전물보다 높은 값을 가짐으로써, 충전물로서 좋은 분리 효율을 나타내었다.
- (2) 본 실험조건에서 망사개공이 커질수록 압력강하와 액체 체류량은 낮아지고 체적물질전달계수와 유효접촉계면이 감소하였다.
- (3) 액체는 망사 표면만을 타고 흘러내려야 기-액 유효접촉면적이 크게 되고 망사 이외의 수직유도로를 따라 흐르게 되면 충전물 전체 표면적이 크더라도 실제 유효접촉계면은 낮아진다.

NOMENCLATURE

- a, a_e : effective interfacial area per unit packed volume [cm^{-1}]
 a_t : total surface area of packings per unit packed volume [cm^{-1}]
 A^* : concentration of dissolved gas at bulk liquid phase and at interface in equilibrium with liquid at interface [gmol/cm^3]

D	: diffusivity of dissolved gas [cm^2/sec]
D_p	: equivalent spherical diameter [cm] or particle diameter [cm]
G	: gas mass velocity [$\text{g}/\text{cm}^2\text{sec}$]
H_L	: height of a liquid phase transfer unit [cm]
h_t	: total liquid hold-up per unit packed volume [cm^3/cm^3]
k_1	: first order reaction constant [sec^{-1}]
k_{H_2O}	: pseudo-first order reaction rate constant [sec^{-1}]
k_L	: liquid phase mass transfer coefficient [cm/sec]
k_{La}	: volumetric liquid phase mass transfer coefficient [sec^{-1}]
L	: liquid mass velocity [$\text{g}/\text{cm}^2\text{sec}$]
N_{Re}, N_{Sc}	: Reynolds and Schmidt number
ΔP	: pressure drop [cm H_2O /cm]
\bar{R}	: average rate of absorption [$\text{gmol}/\text{cm}^2\text{sec}$]
u	: superficial liquid velocity [cm/sec]
Z	: number of moles of reactant

Greek Letters

α, β	: constants
ρ_G	: density of gas [g/cm^3]

REFERENCES

- Chen, G. K.: *Chem. Eng.*, March, 40(1984).
- Chen, B. H. and Osberg, G. L.: *Can. J. Chem. Eng.*, **45**, 46(1967).
- Voyer, R. D. and Miller, A. I.: *Can. J. Chem. Eng.*, **46**, 335(1968).
- Chen, B. H. and Vallabh, R.: *Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop.*, **9**, 121(1970).
- Chen, B. H.: *Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop.*, **12**, 115(1973).
- Chen, B. H. and Jain, S. C.: *Can. J. Chem. Eng.*, **58**, 281(1980).
- Claus, G., et al.: *Can. J. Chem. Eng.*, **54**, 143(1976).
- Cha, W. O. and Chun, H. S.: *HWAHAK KONGHAK*, **26**, 314(1988).
- Yoshida, F. and Koyanagi, T.: *I & EC*, **50**, 365(1958).
- Danckwerts, P. V. and Gillham, A. J.: *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, **44**, T42(1966).
- Stanislav, J. and Gregory, G. A.: *Can. J. Chem. Eng.*, **49**, 590(1971).
- Pohorecki, R.: *Chem. Eng. Sci.*, **31**, 637(1976).
- Danckwerts, P. V.: "Gas-Liquid Reactions", McGraw-Hill, New York(1970).
- Sharma, M. M. and Danckwerts, P. V.: *British Chem. Eng.*, **15**, 522(1970).
- Perry, J. H.(ed): "Chemical Engineers' Handbook", 6th ed., pp. 21-15, McGraw-Hill, New York(1984).
- Ludwig, E. E.: "Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants", Gulf, Houston (1977).
- Sherwood, T. K. and Holloway, F. A. L.: *Trans. Amer. Inst. Chem. Engrs.*, **36**, 39(1940).
- Kwon, S. B.: M. S. Thesis, Korea Univ., Seoul, Korea(1989).
- Shende, B. W. and Sharma, M. M.: *Chem. Eng. Sci.*, **29**, 1763(1974).
- Jhaveri, A. S. and Sharma, M. M.: *ibid.*, **23**, 669 (1968).
- Charpentier, J. C.: *Int. Chem. Eng.*, **28**, 285(1988).
- Elper, E.: "Mass Transfer with Chemical Reaction in Multiphase Systems", Martinus Nijhoff, Hague (1983).
- Giavarini, C. and Moresi, M.: *Chim. & Ind., Ital.*, **63**, 921(1981).
- Hikita, H. and Asai, S.: *Int. Chem. Eng.*, **4**, 332 (1964).
- Sara, E., et al.: *Can. J. Chem. Eng.*, **54**, 97(1976).
- Sen, A. K.: *Chem. Eng. Sci.*, **42**, 2075(1987); *ibid.*, **43**, 641(1988).