

역류식 충전탑에서 이산화탄소 탈착과 수력학적 거동에 관한 연구

김 석 택
동아대학교 환경문제연구소

A Study on Hydraulic Behavior and Desorption of CO₂ Gas in the Counter-current Packing Tower

Seuk-Taek Kim

Environmental Problems Research Institute, Dong-A University

Abstract

This study was carried out to interpret hydraulic behavior and CO₂ gas desorption in counter-current packing tower which packed 50mm plastic Hiflow-ring. The results are as follows : To compare with conventional packing, 50mm Hiflow-ring could save energy because of low pressure drop under high load. As relative error between calculated value and investigated value was less than 6% in the loading point and flooding point we found that we can predict results mathematically which occur in packing tower. The unique magnitude of packing which was used are as follows. $C_L = 2.1 \times 10^{-4}$, $n = 0.787$ so we can predict efficiency which occur

Key words : Pressure drop, Loading point, Gas capacity factor, HTU, NTU

I. 서 론

대기오염 방지시설에서 사용되고 있는 충전탑은 탑 내에 금속, 세라믹 및 플라스틱으로 만든 충전물을 충전시켜 기체와 액체간의 접촉면적을 크게 하여 효율적인 물질전달이 일어나게 하는 장치로서, 그 효율 면에서 우수성이 증명되고 있다.¹⁾ 환경보전의 측면에서는 흡수공정을 통해서 산업활동과 각종 생산공정에서 배출되는 폐 gas와 폐기물의 소각에서 발생하는 소각gas와 암모니아와 같은 악취 및 독성물질을 제거하고, 탈착과 액체와 액체의 추출을 통해서 폐수내의 gas를 탈착 원리를 적용해서 처리한다.²⁾ 석유화학공업 분야에서는

충전탑이 종류에 널리 사용되고 있고, 폐 gas로부터 생성물을 추출하는 과정에서도 아주 많이 사용되고 있다. 장치의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 충전물에 관한 연구는 오늘날에도 계속적으로 연구가 진행되고 있으며, 특히 충전물의 재질과 크기, 형태에 대한 연구도 활발히 진행되는데 Raschig-ring, Berl saddle, Intalox saddle와 Pall-ring 같은 재래식 충전물이 있으며, 격자형 충전물로는 Hiflow-ring, Envi-pac, Hakette, Top-pac, Vas-ring, Montz-packing, Sulzer sx 등이 있다.^{3,4)} 이러한 격자형 충전물은 재래식 충전물보다 높은 공극율을 가지므로 압력손실이 적고 액 분포가 균일해서 수력학적 및 물질전달에 많은 장점을 가지고

있으며, 따라서 충전탑을 경제적으로 운전할 수 있게 한다. 충전탑 기술을 적용하는데 있어서 특히 고려되어야 하는 것은 목표하는 최대 효율까지 도달할 수 있는 공정상의 기술개발, 장치 설비의 비용과 에너지손실에 대한 것이 될 것이다.^{5,6)} 본 연구에서는 충전탑을 사용한 수력학적인 연구를 통해 충전탑 설계에 필요한 공정상의 조작변수와 충전물의 유체역학적인 특성과 분리공정의 특성에 따른 에너지손실을 중심으로 충전탑에 관한 기술을 확립하고 충전탑의 운전기법을 익히고 에너지를 절약하는 방법을 찾을 수 있다.⁷⁾ 또한 이산화탄소의 탈착 실험을 통해서 액체 상에서 기체 상으로의 물질전달 현상을 관찰해서 50mm Hiflow-ring, pp.의 특성을 연구하였다.^{8,9)}

II. 실험

1. 장 치

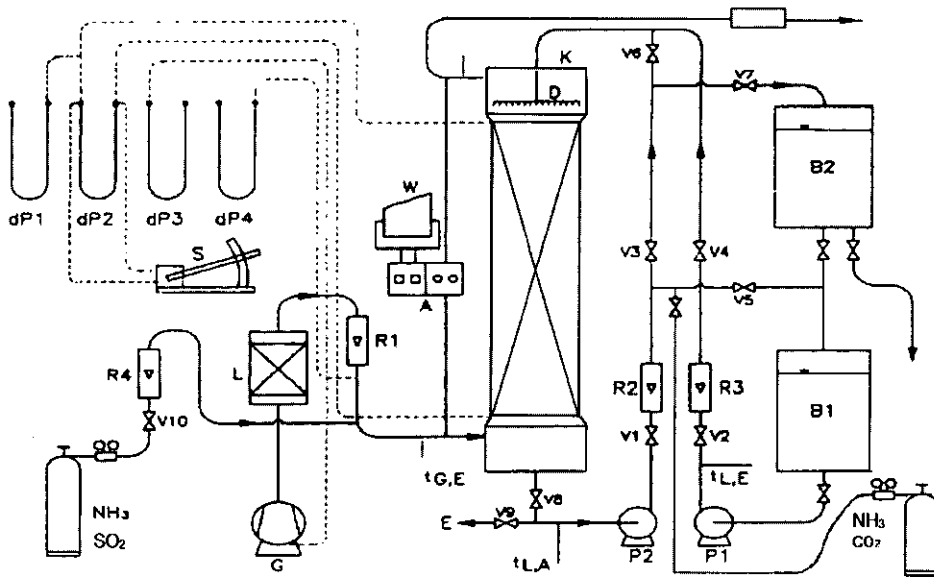
본 실험에 사용한 충전탑은 Pilot규모의 실험장치이며, 충전탑의 직경은 300mm이고 높이는 1400mm

이다. 또한 액체 분배기는 관 분배기를 사용하였고, 분배밀도는 600 l/m^2 로 조절하여 실험하였으며, 충전한 충전물은 50mm Hiflow-ring, pp.이고 이 충전물의 비 표면적 a 는 $131.1 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 이며, 충전밀도는 7640 l/m^2 , 공극율은 $0.916 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 의 물리적인 특성을 가진다.¹⁰⁾

2. 실험 방법

2.1. 압력차 측정방법

흡입송풍기로 공기를 오리피스를 통과시켜 충전탑 하부로 유입시킬 때 정상상태에 도달하면 오리피스 전·후의 압력손실을 마노메타(Manometer)를 이용하여 확인하고 그 값으로부터 공기의 유량을 측정하였고, 또한 액체의 유량이 없을 때 공기를 통과시킨 후 충전탑의 상단과 하단의 압력차를 U-마노메타를 이용하여 확인하고 그 차이로부터 건조 압력손실을 측정하였다. 건조압력차의 측정이 끝난 후, 일정 유량의 액체를 충전탑 상부의 액체 분배기를 통해 충전탑 내부로 균일하게 공급시키



dP₁~dP₄: U-manometer, S: Inclined-manometer, R₁~R₄: Rota-meter, L: Humidifier, G: Gas blower, W: Recorder, A: Gas analyzer, K: Column(Tower) V₁~V₁₀: Valve, P₁, P₂: Pump, B₁, B₂: Liquid storage vessel, D: Distributor

Fig. 1. Scheme of desorption investigation plant

고 일정 유량의 공기를 충전탑 하부로 공급시키다가 정상상태에 도달하면 그때의 압력차를 측정하였다. 측정은 공기의 유량을 변화시키면서 압력차를 측정하였고, 측정이 끝난 후 액체 유량을 증가시키면서 반복하여 각각의 압력차를 측정하였으며 이때의 압력손실을 수력학적 압력손실이라 한다.

2.2. 액체 체류량의 측정실험

일정 유량의 물과 공기를 충전탑의 상부와 하부로 각각 공급하다가 정상상태에 도달하면 저장조로 순환되는 밸브를 잠그고 배수밸브를 열어 충전탑 내부에 액체가 고여있지 않도록 계속 외부로 배출시키다가 액체의 유입을 중단함과 동시에 배수밸브를 잠근 후 그 때부터 떨어지는 액체의 량으로부터 액체의 체류량을 측정하였으며 이때 주입공기와 물의 량을 변화시키면서 반복하여 실험하였다.

2.3. 이동단위 수와 물질전달계수의 측정실험

이산화탄소를 저장조에서 완전히 포화시킨 후 물질전달실험을 하였으며, 이때 충전탑 상부로 유입되는 물속에 녹아있는 유리탄산과 충전탑 하부에서 배출되는 유리탄산을 각각 100ml 씩 채취하여서 페놀프탈레인(phenolphthalein) 시약을 3-4방울 떨어뜨린 뒤 0.02N NaOH 용액으로 적정한 후 옅은 분홍색이 남을 때까지 확인 후 총 산도(pH)를 확인하였다.

3. 분석

유입가스 량의 부하조절은 유입구에 있는 댐퍼로 하고, 기체의 풍량은 오리피스를 이용하여 측정하고 액체의 유량은 로타-메타로 측정하였다. 충전탑 내의 압력손실은 U-마노 메타와 경사-마노 메타를 이용하여 측정하였으며, 액체함량은 일정한 가스부하인수와 액체부하에서 약 10분간의 안정기가 경과 후 다음 gas와 액체의 흐름을 완전히 중단한 후 충전탑 하부에 모인 액체량을 메스실린더로 정량 측정한다. 이때 물 속에 녹아있는 이산화탄소, 즉 유리탄산의 농도는 0.02N NaOH을 이용해서 총 산도(pH)를 결정한 후 다음 식을 이용해서 결정하였다.

총 산도 (CaCO₃ mg/ℓ)

$$= a \times \frac{1000}{\text{시료ml}} \quad (a=0.02N \text{ NaOH 소비량(ml)})$$

유리탄산(CO₂ mg/ℓ)

$$= \text{총 산도 CaCO}_3(\text{mg}/\ell) \times 0.88$$

실험 조건은 수온이 16-21℃이고, 공기온도는 17-22℃, 실험실의 대기압은 950-1200mbar이었다.

Table 1. The physical properties of investigated conditions

Items	Values
F_G (kg ^{1/2} m ^{-1/2} s ⁻¹)	0.2 - 4.5
u_L (m ³ /m ² hr)	0 - 50
X_u (ppm)	300 - 320
X_o (ppm)	3 - 10
ρ_L (kg/m ³)	997
$10^6 \cdot \nu_L$ (m ² /s)	0.97
$10^3 \cdot \sigma_L$ (kg/s ²)	72.4
ρ_G (kg/m ³)	1.19
$10^6 \cdot \nu_G$ (m ² /s)	15.1

Ⅲ . 결과 및 고찰

1. 압력손실

50mm Hiflow-ring, pp.의 충전단위 높이 당 건조압력손실은 액체유량이 일정할 때 가스부하인수의 함수로서 Fig. 2에 나타내었다. 액체(물)를 통과시켰을 때의 액체가 분사된 충전층에서는 액체의 분사로 인해 충전층 내의 공극은 액체 함량만큼 적어지게 된다. 따라서 유입공기의 통과 면적이 그만큼 줄어들게 되므로 액체가 분사된 충전탑에서 압력손실은 건조 압력손실에 비해서 줄어들게 되고 Fig. 3에 나타내었으며 이때 가스부하인수 F_G 는 다음 식으로 구하였다.¹¹⁾

$$F_G = u_G \sqrt{\rho_G} \tag{1}$$

건조압력손실

$$\frac{\Delta P_0}{H} = \phi \frac{1-\epsilon}{\epsilon^3} \frac{F_V^2}{d_p K} \tag{2}$$

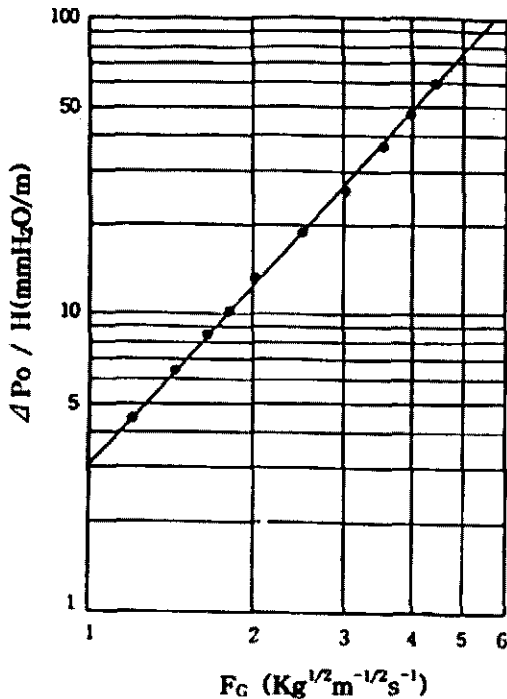


Fig. 2. Pressure drop per in of dry packing height as a function of gas capacity factor

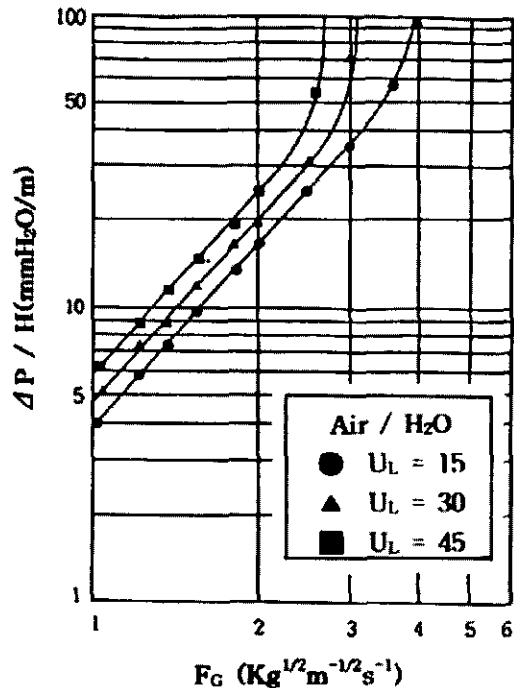


Fig. 3. Pressure drop per in of wetted packing height as a function of gas capacity factor

수력학적 압력손실

$$\frac{\Delta P}{H} = \phi_L \frac{1 - (\epsilon - h_L)}{(\epsilon - h_L)^3} \frac{F_V^2}{d_p K} \quad (3)$$

위 식에서 벽 효과계수 K 는 식(3)에 의해 구하고, 직경 d_p 는 식(4)에 의해 구하며 저항계수 ϕ 와 ϕ_L 은 가스 상 레이놀드 수와 액체 레이놀드 수의 함수관계이다. 또한 건조압력손실인 경우는 평균오차가 2.5%이고, 수력학적 압력손실인 경우는 6.0%이다.

2. 액체함량

액체의 체류량은 액체유량에 많은 영향을 받는다. 즉 가스부하인수를 일정하게 하고 액체 유량을 변동시키면서 실험을 했을 때 액체의 체류량은 비례적으로 증가하는 것을 보았으며, Fig. 4에 나타내었다. 액체의 체류량은 $F_G < 0.7 \cdot F_{G,FI}$ 의 범

위에서 가스부하에 거의 독립적 이었고 Fig. 5에 나타내었으며, 또한 범람점이 70%이상으로 증가할 때, 즉 공기와 접촉하는 액체표면의 액체함량이 속도가 0 일 때 증가하고 따라서 물질전달에 대한 계면면적의 증가 때문에 액체 상에서 체적물질 전달계수가 증가하게 된다.

3. 물질전달단위 높이와 부하의 관계

$CO_2 - H_2O / Air$ 계에서 액체의 부하가 일정할 때, 가스부하인수 F_G 의 변화에 따른 전달 단위높이 HTU_L 의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 또한 가스부하인수 F_G 가 일정할 때 액체 부하에 따른 HTU_L 의 변화는 Fig. 7에 나타내었으며, 이와 같이 가스 부하점 아래에서는 가스의 부하가 증가해도 HTU_L 의 값에는 영향을 주지 않았으나 액체의 부하가 증가하는데 따라 HTU 가 증가하였으므로 효율은 감소하게 된다.

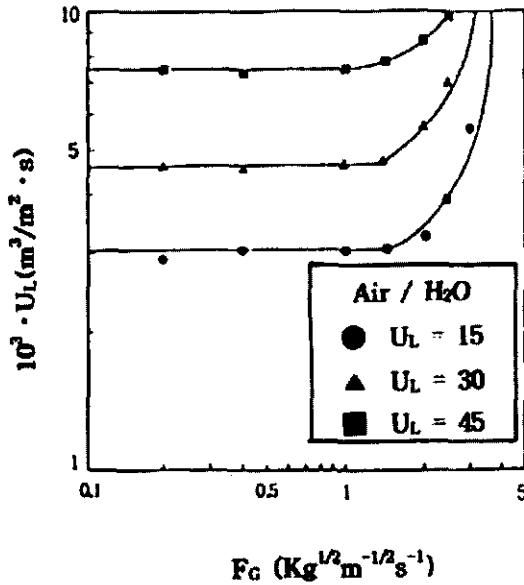


Fig. 4. Liquid hold-up data showing the effect of gas capacity factor liquid

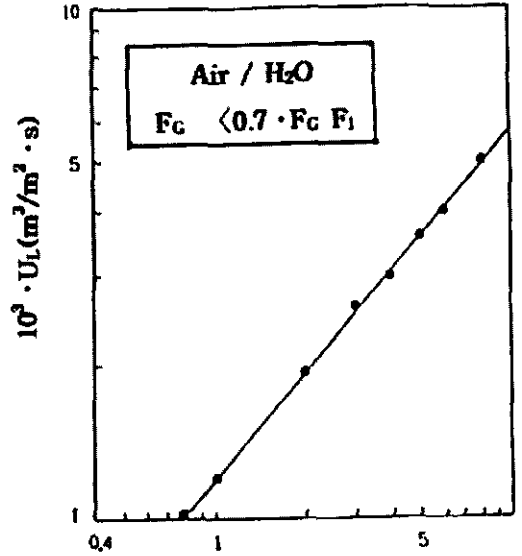


Fig. 5. Liquid hold-up data showing the effect of load

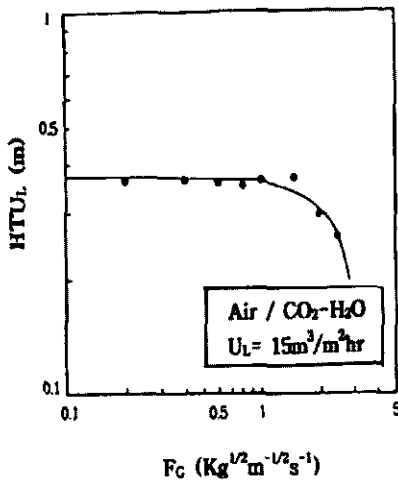


Fig. 6. Height of transfer unit as a function of gas capacity factor

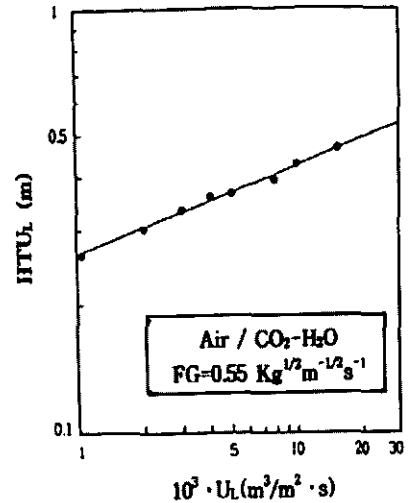


Fig. 7. Height of transfer unit as a function of liquid load

4. 물질전달계수와 부하의 관계

물질전달 단위높이 HTU_L 와 가스부하인수 F_G 을 알면 물질전달계수 $\beta_L \cdot a$ 을 알 수 있으며, 가스부하인수의 함수로서 Fig. 8에 나타내었고, 액체

부하인수로서는 Fig. 9에 나타내었다.

부하점 아래에서 물질전달계수 $\beta_L \cdot a$ 는 다음 하나의 함수로 구할 수 있다.

$$\beta_L \cdot a = C_L \cdot u_L^n \cdot D_L^{0.5} (1/s) \quad (4)$$

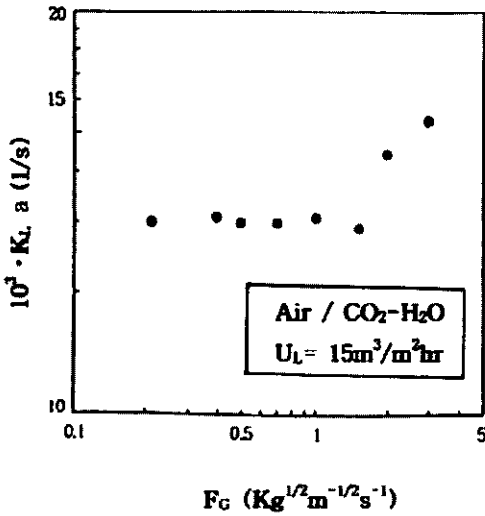


Fig. 8. Coefficient of mass transfer as a function of gas capacity factor

여기서 지수 n 과 고유 상수 C_L 은 실험에 의해 구할 수 있으며, 이 값들은 충전물의 종류와 재질에 따라 다르고, 50mm Hiflow-ring, pp.에서 C_L 은 2.1×10^{-4} 이고 n 은 0.787이다.

IV. 결 론

이산화탄소와 같은 대기오염물질을 제거하기 위한 방법에는 여러 가지가 있으나 충전탑을 이용해서 처리하는 방법이 많이 적용되고 있으므로, 본 연구에서는 50mm Hiflow-ring, pp.을 사용한 역류식 충전탑에서 수력학적인 실험과 이산화탄소의 물질전달실험을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 수력학적 압력손실과 건조 압력손실을 측정하여 얻은 결과 50mm Hiflow-ring, pp.는 비교적 낮은 압력 손실을 나타내므로 경제적인 측면에서 효율성이 높다.
2. 압력손실과 액체함량 실험을 통하여 얻은 결과 값과 실험식에 의한 값이 6%이내의 오차를 가짐으로서 충전탑에서 수력학적인 분석이 가능하다는 것을 알았다.
3. 물질전달계수와 부하의 관계로부터 50mm Hi-

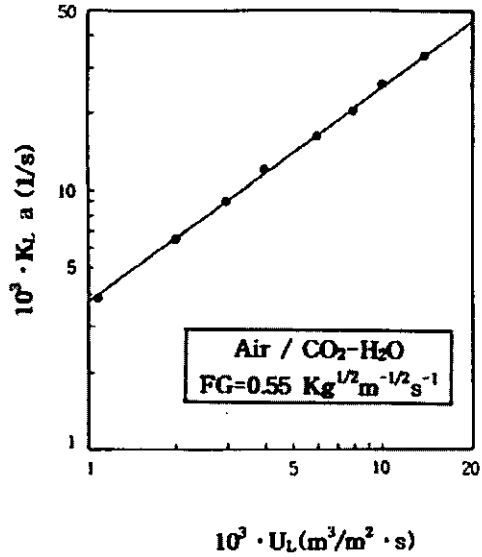


Fig. 9. Coefficient of mass transfer as a function of liquid load

flow-ring, pp. 고유상수 $C_L = 2.1 \times 10^{-4}$, $n = 0.787$ 로 밝혀졌으며, 이 결과로 50mm Hiflow-ring, pp.를 사용한 충전탑 설계와 물질전달시 발생하는 효율을 예측할 수 있다.

이상과 같이 액체부하와 기체부하에 따른 압력손실과, 액체 함류량을 측정함으로써 부하범위와 범람점을 찾을 수 있으므로 충전탑을 설계하는데 기본적인 설계자료를 공급하고, 또한 이런 수력학적인 실험을 통해서 여러 가지 충전물의 성능을 평가할 수 있다. 또한 흡수와 탈착 등의 물질전달 실험을 통해서 분리효율을 관찰할 수 있고 충전탑 설계시 물질전달 단위 수와 단위높이도 구할 수 있으며 이러한 충전탑에 관한 자료는 환경오염방지 시설분야 뿐만 아니라 석유화학 장치산업분야 등 유사한 설비에도 큰 역할을 할 것이다.

참 고 문 헌

1. R. Billet: Packed Towers in Processing and Environment Technology VCH published Inc., (1995)

2. Warren L. McCabe, Julian C. Smith, Peter Harriott: UNIT OPERATIONS OF CHEMICAL ENGINEERING
3. R. Billet, Kim Jang-Ho: 충전탑 기술, 세종 출판사, 1991
4. 김장호: 충전탑에서 흡수와 탈착에 대한 수력학적인 모델링, 동아대학교 공과대학부설 한국 자원개발연구소 제13권, 제2호, pp.131-140, 1989
5. Anthony J. Buonicore: Air Pollution Engineering Manual, 1992, pp. 15-31
6. 魏廷豪: 구형 망사 충전 흡수탑의 특성, 고려대학교, 1988
7. Kenneth Work, Cecil F. Warner: Air Pollution, 1981
8. John Wiley & Sons. Inc.: Handbook of Air Pollution Technology.
9. 한국 과학 기술원: 충전 증류탑을 이용한 다 성분계의 분리, 과학기술처, 1986
10. R. Billet: Relationship between Reside Time, Fluid Dynamics and Efficiency in Counter-current Flow Equipment, Chem. Eng. Technol., 1988, pp.139-148
11. Schultes, M., R. Billet, I. Chem. E: Symposium Series No. 104, 1987.