

충전물의 기하학적 형태가 체류량에 미치는 영향

김 종 득* · 이 원 국

한국과학원

(접수 1977. 5. 21)

Dependence of Liquid Holdup on the Geometrical Shape of Packing Materials

Chong-Deuk Kim* and Won Kook Lee

Korea Advanced Institute of Science, Seoul 131, Korea

(Received May 21, 1977)

요 약

10cm 내경의 충전탑에서 충전물의 기하학적 형태 및 크기가 액체의 체류량에 미치는 영향을 저울을 이용하여 직접 측정해서 고찰하였다. 체류량은 액체와 기체의 유량, 충전탑의 특성 및 용액의 성질에 대한 함수이었다. 또 힘의 균형에서 다음과 같은 이론적 모델을 유도하였다.

$$Y = \phi_l / \phi + (\phi_g / \phi) \cdot X$$

여기서 $X = 2gd_e \gamma_l^2 Z_o^3 / G_l^2$

$$Y = \left(\frac{G_g}{G_l} \right)^2 \left(\frac{\gamma_l}{\gamma_g} \right) \left(\frac{Z_o}{e - Z} \right)^3$$

이며 ϕ 는 $\Delta P_p = (1 - \phi) \gamma_l$ 에서 정의된 것과 같다.

실험치에 맞도록 위식을 변형하여 다음과 같은 일반식을 얻을 수 있었다.

$$Y / (\phi_{ln} \cdot G_l^{0.45} \cdot S^{2.51}) = 0.0013 + 0.0028 \frac{\phi_{gn}}{\phi_{ln}} \cdot X$$

여기서 ϕ_{ln} , ϕ_{gn} 는 Ergun식에서 정의 될 수 있는 마찰계수이다.

Abstract

Dependence of liquid holdup on the geometrical shape and size of the packing materials in 10 cm-ID column was studied by direct measurement of the holdup data with a lever arm. The holdup was a function of flow rate of both fluids, characteristics of bed, and properties of solutions. And from force balance the following theoretical model was developed;

$$Y = \phi_l / \phi + (\phi_g / \phi) \cdot X$$

where $X = 2gd_e \gamma_l^2 Z_o^3 / G_l^2$

* 현주소 : 한국과학기술연구소

$$Y = \left(\frac{G_g}{G_l} \right)^2 \left(\frac{\gamma_l}{\gamma_g} \right) \left(\frac{Z_o}{e-Z} \right)^3$$

and ϕ is defined as in $\Delta P_p = (1-\phi)\gamma_l$

For the equation modified to fit the experimental data, it was shown as

$$Y/(\phi_{ln} \cdot G_l^{0.45} \cdot S^{2.51}) = 0.0013 + 0.0028 \frac{\phi_{gn}}{\phi_{ln}} \cdot X$$

where ϕ_{ln} , ϕ_{gn} are the friction factor defined by the Ergun equation.

서 론

화학공정에서 충전탑은 흡착, 증류, 추출등에 가장 널리 사용되고 있는 장치중의 하나이다. 이 장치의 운전조건과 효율에 관한 문제는 다각도로 연구되어 왔다^{1, 2, 13, 14}.

오늘날 유체역학적으로 충분한 설명은 못하고 있지만 액체 체류량(liquid holdup), 압력강하, 액체분포, 기액의 혼합, 그리고 일류점(flooding point)에서의 유속에 관한 연구는 많이 진척되어 있으며, 동시에 좋은 운전조건, 탑의 효율을 높이는 연구도 계속되고 있다^{3~10}.

또한 이 충전탑에 사용되고 있는 충전물은 20여종이 넘지만 여러가지 제약들 즉 전표면에 걸쳐서 얇은 층을 만들 것, 젖음성이 좋을 것(good wettability), 가벼울 것, 압력강하가 적을 것, 벽측으로의 편류가 적을 것, 배수가 빠를 것, 값싼것, 부식에 강할 것, 그리고 유체의 분포가 고를 것 등을 만족스럽게 해결하지 못하고 있다. 이 가운데서 액체 체류량이 적고 물질 전달면적이 넓은 것일 수록 탑효율을 증가시킬 것이라는 점에서 공통된 결론을 얻고 있다^{12~16}.

본 연구의 목적은 충전탑내의 체류량에 크게 영향을 미치는 여러가지 인자를 분리하여, 특히 충전물의 기하형태에 따른 영향(geometrical shape effect)을 밝히고 나아가 용액의 성질, 유체역학적 특성 및 충전층의 충전 특성을 포함하는 식을 얻어 그 제반현상을 설명하려는데 있다.

이론적 배경

충전층의 조작조건 중에서, 기체의 유속이

zero인 점에서 일류점에 이르는 범위에 대하여 일반적인 이론을 얻기 위하여, 충전층의 유체와 충전물 사이의 힘 균형을 이용하였다^{4, 10}.

이상향류(two-phase countercurrent flow)의 복잡한 공정에서, 이론적 전개를 위하여 몇가지 가정을 세워보면

- i) 충전층의 모든 충전물은 모두 같은 유효단면적을 갖고, 충전층의 각부분에 고르게 분포되어 있다.
- ii) 두 유체는 충전층 전체에 고르게 분포되어 편류가 일어나지 않는다.
- iii) 유동 유체의 입구 및 출구에서의 운동량 전달은 거의 무시할 수 있다.
- iv) 충전층을 흐르는 액체는 충전층의 공극물에서 정적 체류량(static hold-up)을 뺀공간을 흐르며 기체는 전체 체류량(total hold-up)을 뺀공간을 흐른다.
- v) 이 정적 체류량과 전체 체류량은 충전물의 외부에 고르게 분포되어 있다.

이러한 가정아래 충분히 유체에 잠긴 구의 경우에 힘 균형식에서 Broz는 다음과 같은 식을 유도 하였다⁴.

$$\Delta P_g + \Delta P_l + \Delta P_p = \gamma_l \quad (1)$$

이 식에서 ΔP_p 는 마찰력을 제외한 충전물에 작용하는 drag force로서, 주로 충전물의 기하형태의 함수이며 동시에 제면장력의 함수이며 G_l , G_g 의 함수이다⁴. 이 경우 비중량의 한 분율로 표시해 보면

$$\Delta P_p = (1-\phi)\gamma_l \quad (2)$$

로 두어, ϕ 를 압력손실과 표면 마찰력과의 평형이 되는 물체 중력의 한 분율로 보면, 이 ϕ 는 전기한 기하형태, 표면장력과 유체의 유속의 어떤 함수임이 알려져 있다⁴.

그리고 이들 압력손실과 표면속도 및 유효직경들은, 가정으로 부터 다음과 같이 표시된다.

$$\Delta P_p = (\phi_l/d_{el}) \cdot \gamma_l \cdot (U_l^2/2g) \quad (3)$$

$$\Delta P_g = (\phi/d_{eg}) \cdot \gamma_g \cdot (U_g^2/2g) \quad (4)$$

$$U_g = G_g / [\gamma_g \cdot (e - Z_t)] \quad (5)$$

$$U_l = G_l / [\gamma_l \cdot Z_o] \quad (6)$$

$$d_{el} = V/F \cdot Z_o / (1 - e) = d_e \cdot Z_o \quad (7)$$

$$d_{eg} = V/F \cdot (e - Z_t) / (1 - e) = d_e \cdot (e - Z_t) \quad (8)$$

식 (2), (3), 및 (4)를 (1)식에 대입하여

$$(\phi_g/d_{eg}) \gamma_g U_g^2 + (\phi_l/d_{el}) \gamma_l U_l^2 = 2g \gamma_l \Phi \quad (9)$$

식 (9)에 (5)~(8)를 대입하여

$$2g \gamma_l^2 Z_o^3 / G_l^2 = \phi_l / \phi d_e + (\phi_g / \phi d_e) \cdot (G_g / G_l)^2 \cdot (\gamma_l / \gamma_g) \cdot [Z_o / (e - Z_t)]^3 \quad (10)$$

여기에서 ϕ_l 와 ϕ_g 는 Reynolds수의 함수이며, Φ 는 액체의 표면장력, 충전물의 기하형태 및 유체의 유속의 함수이다. 유체의 속도가 영이면, 물론 액체 체류량은 계면장력만의 함수이며 Φ 는 0이 된다.

이상의 두 인자를 분석하기 위하여, 마찰계수를 실험적으로 결정하거나 혹은 Ergun의 일반식을 이용할 수 있고, Φ 는 이것에 영향을 끼치는 인자들의 지수함수로 표시할 수 있다. 마찰계수는 실험적으로 결정되어야 하는데, 압력강하의 실험을 병행하여 그 자료로 ϕ_l 를 결정한다. 다음, 두 무차원군으로 그림표를 그려 교점과 기울기를 이용하여, Φ 를 결정하거나 ϕ_g 를 결정할 수 있다. 여기서 Ergun의 식¹¹⁾

$$\frac{\Delta P \rho}{G_o^2} \cdot \frac{d_p}{L} \cdot \frac{e^3}{1 - e} = 150 \frac{1 - e}{(R_c)_p} + 1.75 = f_p \quad (11)$$

에서 이를 f_p 라 두면, 가정 (iv)에서 공극물의 값이 기체는 $e - Z_t$, 액체는 $e - Z_s$ 로 가정하였으므로 이 값으로 (11)식의 e 를 보정하면

$$\phi_{ln} = f_p \frac{1 - e + Z_s}{(e - Z_s)^3} \quad (12)$$

$$\phi_{gn} = f_p \frac{1 - e + Z_t}{(e - Z_t)^3} \quad (13)$$

이고, 또 가정 (v)에서 수정된 직경 d_p' 는

$$d_p' = 3 \sqrt{\frac{Z + 1 - e}{1 - e}} \cdot d_p \approx \left[1 + \frac{Z}{3(1 - e)} \right] \cdot d_p \quad (14)$$

이므로 이 식으로 (12), (13)을 보정하면

$$\phi_{ln} = \left\{ \frac{(1 - e + Z_s) \cdot 150}{(R_c)_p \left\{ 1 + \frac{Z_s}{3(1 - e + Z_s)} \right\}} + 1.75 \right\} \cdot \frac{(1 - e + Z_s)}{(e - Z_s)^3} \quad (15)$$

$$\phi_{gn} = \left\{ \frac{(1 - e + Z_t) \cdot 150}{(R_c)_p \left\{ 1 + \frac{Z_t}{3(1 - e + Z_t)} \right\}} + 1.75 \right\} \cdot \frac{(1 - e + Z_t)}{(e - Z_t)^3} \quad (16)$$

이 되므로, 이 관계에서 얻을 수 있는 값들을 (10)식의 ϕ_l , ϕ_g 에 대입하고 이 때의 미확정 함수를 η , ξ 로 하면 (10)식은

$$2gd_e \gamma_l^2 Z_o^3 / G_l^2 = \phi_{ln} \left[\eta + \xi \frac{\phi_{gn}}{\phi_{ln}} \left(\frac{G_g}{G_l} \right)^2 \left(\frac{\gamma_l}{\gamma_g} \right) \left(\frac{Z_o}{e - Z_t} \right)^3 \right] \quad (17)$$

과 같이 된다. 이식에 나타난 무차원군을 각각

$$Y = 2gd_e \gamma_l^2 Z_o^3 / G_l^2 \quad (18)$$

$$X = \left(\frac{G_g}{G_l} \right)^2 \left(\frac{\gamma_l}{\gamma_g} \right) \left(\frac{Z_o}{e - Z_t} \right)^3 \quad (19)$$

으로 두고 이 식으로 식 (17)을 간략히 표시하면

$$Y = \phi_{ln} \left(\eta + \xi \frac{\gamma_{gn}}{\gamma_{ln}} \cdot X \right) \quad (20)$$

이 된다. 이 식에서 η , ξ 는 충전물의 기하형태, 표면장력 및 액체와 기체의 유속에 따라서 달라지는 복합된 특수함수이며, 이들은

$$\eta = \eta(G_l, G_g, S, \sigma) \quad (21)$$

$$\xi = \xi(G_l, G_g, S, \sigma) \quad (22)$$

로 표시되며, 이 식에서 S 는 기하형태를 나타내는 sphericity로서 다음과 같이 정의한다.

$$S = \frac{\text{충전물의 표면적}}{\text{같은 부피의 구가 갖는 표면적}} \quad (23)$$

그리고 (21), (22) 식은 표면장력의 영향을 고려하지 않을 경우

$$\eta = \alpha G_l^\beta G_g^\gamma S^\delta \quad (24)$$

$$\xi = \alpha' G_l^{\beta'} G_g^{\gamma'} S^{\delta'} \quad (25)$$

로 표시된다.

이러한 η , ξ 의 값을 Y/ϕ_{ln} vs. $\frac{\phi_{gn}}{\phi_{ln}} \cdot X$ 의 그림표에서 구할 수 있다. 이때 η 는 $X=0$ 인 경우의 값이며, $X=0$ 인 경우는 $G_g=0$ 인 경우의 값이므로 이 식에서 η 에 대한 G_g 의 영향은 무시

된다. 따라서

$$\eta = \alpha G_I^\beta S^\delta = G_I^\beta \cdot \eta'(S) \quad (26)$$

이며, 이 경우 G_I 에 의한 영향을 분리하면 기하 형태에 의한 영향을 분리할 수 있다. 또 ξ/G_I^β 를 ξ' 라면 ξ' 는 (25)식에서 보는바와 같이 G_I , G_g , 및 S 의 function이고, 또 식 (20)는 이들을 대입하면

$$Y/(\phi_{ln} \cdot G_I^\beta) = \eta'(s) + \xi'(S, G_g, G_I) - \frac{\phi_{gn}}{\phi_{ln}} \cdot X \quad (27)$$

로 표시된다. (27)식은 액상유속, 용액의 물리적 성질, 충전층의 특성 그리고 충전물의 특성의 함수로 표시되어 있으며, 이 식으로 기하 형태에 의한 영향을 알 수 있다. 충전물의 기하 형태에 따라서 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ 를 구할 수 있고, 이들을 식 (27)에 대입함으로써 식 (27)의 계수를 구체적으로 구할 수 있다.

따라서, 본 연구는 기상의 흐름이 없는 경우에 실험을 하여, η 를 정의하고 이 값으로 기상, 액상의 항류탑에서 식 (27)이 하나의 식이 될 수 있음을 밝힐 수 있도록, 다음과 같이 실험을 하였다.

실험방법 및 실험재료

1. 실험장치

충전층의 액체 체류량을 결정하기 위하여, 충전물을 포함한 탑을 저울로 달아서, 조작하기 전의 탑의 무게와 조작중의 탑의 무게 차이를 구하여 체류량을 얻었다. 그 중요한 실험장치의 계통도는 Fig. 1과 같다.

용기 (11)에서 용액을 펌프로 tank (7)으로 보내고, 이 tank에서 rotameter (9)로 유체를 측정하였다. 이 용액은 탑 상층부에 있는 액체 distributor (3)으로 탑 (1)로 분산시켜 흐르게 하였다. 이 distributor는 유리관과 아크릴판(methyl methacrylate; MMA)과 MMA tube로 만들어졌으며, 작은 유리관을 구멍뚫린 MMA판에 Epoxy 수지로 고정 접착시켰다. 그리고 탑상층부에서 이 탑에 접촉되지 않도록 고정하고, rotameter를 통해 오는 유체를 탑에 분무시키도록 하였다.

실험에 사용된 충전탑은 약 10cm직경의 MMA tube이며 높이 88cm를 사용하였다. 이 충전탑은 양끝에 테두리를 달아서 아래로는 짧은 column에 연결시키고, 또 탑 support를 고정시킬 수 있는 8 mm의 구멍을 뚫어, 여기에 support 막대를 끼워 저울에 매달 수 있도록 하였다. 두 탑의 접합부에는 충전물 support를 두고, 이 충전물 support에는 5 mm의 구멍이 있어 액체와 기체가 통과할 수 있도록 하였다. 그리고 아래탑은 순전히 빈관으로서 hydraulic sealer (2)에 잠기게 하였다.

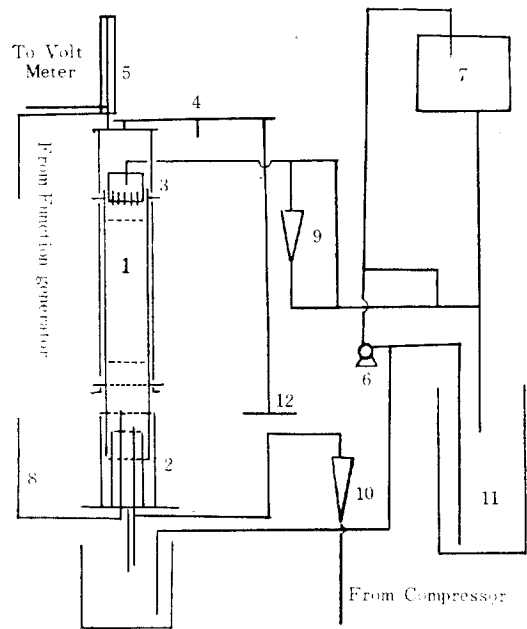


Fig. 1. Flow diagram of the experimental apparatus.

1. Packed column 100mm ID
2. Hydraulic seal
3. Liquid distributor
4. Lever arm
5. Variable inductance type transducer
6. Pump
7. Constant head vessel
8. Manometer
9. Liquid flow meter
10. Gas flow meter
11. Reservoir tank
12. Weighing index

Table 1. Characteristics of the packing materials.

Shape	Size (inch)	Volume/ piece (ft ³ /piece)	Area/piece (ft ² /piece)	Particle diameter (ft)	Pieces/ volume (N/ft ³)	Void fraction	Sphericity	Static holdup (ft ³ /ft ³)
Sphere	1/2	3.58×10^{-5}	0.0052	0.0408	16700	0.4021	1	0.031
	3/8	1.48	0.0029	0.0305	40200	0.4051	1	0.0273
	1/4	0.45	0.0013	0.0206	129800	0.4159	1	0.025
Half-sphere	1/2	1.80	0.0040	0.0273	33400	0.3988	1.16	0.029
	3/8	0.74	0.0022	0.0203	81300	0.3914	1.19	0.034
	1/4	0.21	0.0009	0.0134	284700	0.4021	1.19	0.036
						Average	1.19	
Square	1/2	3.61	0.0134	0.0162	9100	0.6715	2.52	0.024
	3/8	1.79	0.0074	0.0146	18300	0.6724	2.23	0.026
	1/4	0.6	0.0036	0.010	54700	0.6718	1.60	0.039
						Average	2.11	
Half-square	1/2	2.17	0.0077	0.0169	18600	0.5964	2.05	0.0318
	3/8	0.91	0.0044	0.0125	44000	0.5996	2.08	0.0346
	1/4	0.35	0.00212	0.01	114500	0.5992	1.90	0.0469
						Average	2.01	

이 hydraulic sealer는 5 inch, 3 inch 두 MMA tube로서 MMA plate 위에 동심원을 이루도록 하여 정착시켰고, 가운데는 기체 distributor 배수의 도관, 그리고 manometer 입구가 놓여 있고, 두 관의 높이는 각각 50cm, 30cm이며 그 사이에는 물로써 sealing되어 있게 하였다.

그리고, 이상항류접촉을 위하여 압축공기를 rotameter로 측정하여 탭에 보내면, 잠시후 정상 상태가 되게 하여 압력을 측정하고 무게를 달아 자료를 얻었다. 동시에 hydraulic sealer의 부력을 측정하여 체류등을 보정하였다. 측정장치는 저울과 weighing index (12)가 쓰였고, 저울대는 각 원에서 중앙까지의 거리가 22cm, 받침대는 열 처리된 강철로서 약 45°의 각으로 만들었다.

이 외에 영점 pointer는 variable inductance type transducer (5)을 사용하였는데, 충전 탭의 상부관에 부착하였다. function generator에서 일정한 signal을 보내면 충전 탭의 위치 변화에 따라서 유도된 전압으로 그 지표로 삼았다.

2. 실험방법

전기한 실험장치에서 다음과 같은 방법으로 액체 체류량을 측정하였다. 먼저 충전 탭에 1/2"

sphere (square를 실험할 때는 1/2" square)를 약 9 cm가량 채워서 실험하였다. 이때 압력손실과 부력을 측정하여 보정하고 탭의 액체 체류량을 산출한 다음, 약 54cm의 다른 여러가지 충전물을 채워서 실험을 하여 전체의 체류량을 구하고, 같은 방법으로 보정하여, 이 값에서 앞에서 구한 즉, 9 cm로 실험한 경우의 값을 빼주면, 다른 여러가지 충전물의 액체 체류량을 얻을 수 있었다. 9 cm로 실험을 한 경우는, 아래 탭을 흘러 내리는 액체의 벽에 흘러내려가는 영향과 충전물 support에 걸리는 체류량을 보정해 주기 위해서였다.

충전하는 방법은 여러가지가 있는데, 이 중에서 건조한 충전물을 탭에 그냥 쏟아 넣은 방법을 이용하였다. 충전하는 방법에 따라서 충전층의 공극률이 달라지고, 액체 체류량이 달라지므로 모든 실험을 통하여 동일한 방법을 사용하였다. 처음에는 용체의 유속을 크게하여, 거의 일류점 상태로 하여 건조한 충전물을 젖게 만들어 실험을 시작하였다. 잘 젖었으면 유체의 유량을 줄여서 실험하려는 유량에 고정시키고, 기체 valve를 들어서 항류로 접촉시켜, 영점에 큰 변화가 없게되면 저울대에 걸린 무게를 달고,

액체 체류량을 측정하였다.

영점은 앞서 기술한 variable inductance type transducer를 포함한 장치로서, sine wave를 보내어서 저울대가 수평이 되는 점을 영점으로 삼고 조작한 다음, 다시 체류량을 구하기 위하여 실험을 하면서 저울대가 수평이 되면 weighing index의 무게를 읽어 그 무게를 재는데, 이 경우 영점 pointer는 1g까지 읽을 수 있도록 민감하다. 이상과 같은 방법으로 각각의 충전물에 대하여 여러가지 조작 조건에서 실험을 하였다. 처음 물에 대해서 각 유량을 조정하여 실험을 실시하고, 다음에 20% glycerol 및 35% glycerol로 용액을 바꾸어서 위와 똑같은 방법으로 실험을 계속하였다.

결 과

1. 액체 체류량에 대한 유속의 영향

1/2" sphere를 tower에 충전하였을때의 체류량을 기체의 유속과 액체의 유속에 따라서 그림표를 그려보면 Fig. 2와 같다. 이러한 자료의 정리를 이미 Shulman¹⁾이 한바 있는데 그 경향이 같았다. Fig. 2는 1/2" sphere의 경우이나 이 외에 다른 형태와 크기에서도 같은 경향을 보이고 있다. 즉 기체의 유속이 증가해도 액체 체류량이 변하지 않는 범위가 존재하며, 기체속도가 증가하면 액체의 체류량이 크게 증가하는 두 범위가 존재하였다. 후자의 경우는 일류점 근처에서 체류량은 급격히 증가하여 충전탑은 불안정하게 되었다. 그 이하에서는 기체유속이 증가해도 액체 유속의 영향이 커져서 액체유속이 충전층의 조작조건을 지배하게 되었다. 그리고 액체의 유속이 많아질 수록 부하점이 기체 유속이 낮은 쪽으로 이동하며, 액체의 유속이 적은 경우에는 기체의 유속이 상당히 크더라도 그 부하점에는 도달하지 않았다.

또한 같은 액체 유속의 경우에도 square나 half-square 경우보다 sphere나 half-sphere처럼 충전층의 공극률이 적은 경우에 훨씬 빨리, 그리고 급격히 부하점에 도달하는 것이 관측되었다.

본 실험의 경우 액체의 유속이 4800 lb/ft²·hr인 air-water system과 5220lb/ft²·hr인 air-glycerol system 일때의 실험의 결과는 Fig. 3 및 4에 도시되어 있는 바와 같다.

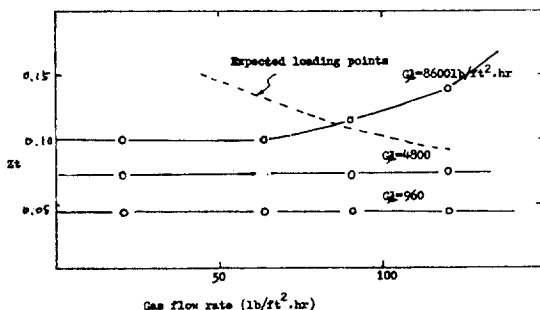


Fig. 2. Dependence of the liquid holdup on liquid flow rate (1/2" sphere).

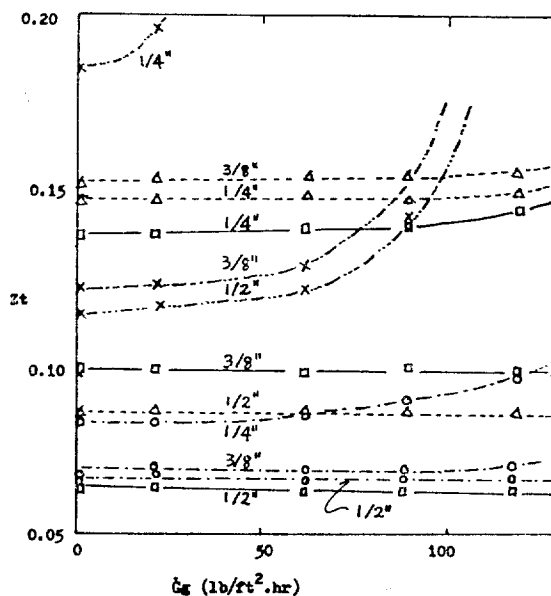


Fig. 3. Dependence of the liquid holup on the geometrical shape of the packing materials $G_g: 4,800 \text{ lb/ft}^2\text{-hr}$, Air-water system

□—square △···half-square
○···sphere ×···half-sphere

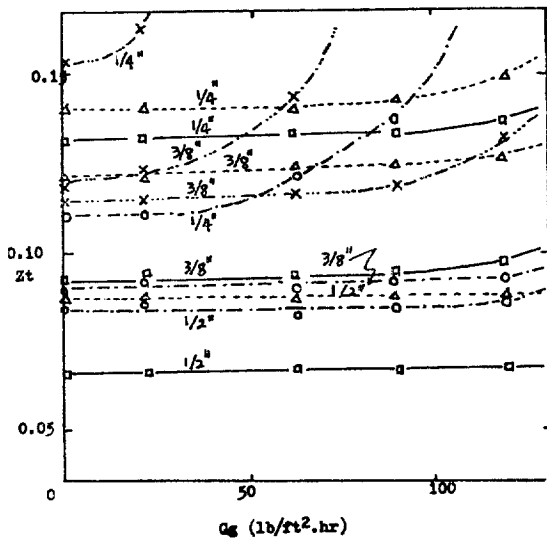


Fig. 4. Dependence of the liquid holdup on the geometrical shape of the packing materials. G_g : 5, 220 lb/ft²·hr, Air-glycerol (20%) system
 □—square, △—half-square
 ○—sphere, ×—half-sphere

2. η , ξ 에 대한 액체속도의 영향

η , ξ 에 영향을 끼치는 여러가지 인자중에서 유체의 유속의 영향이 가장 크며, 이 영향은 식 (10) 및 (20)에서 알수 있는 바와 같이, $\phi_l/d_e\Phi$ 중에서 일반화된 Ergun의 식과 d_e 의 값을 제외하고 남은 값이지만, 순수한 $1/\Phi$ 의 값은 아니다. 그래서 이 값을 η , ξ 로 표시하였으며 이 속에는 액체의 유속과 기체의 유속의 영향을 포함하고 있다. 그러나 충전층의 조작조건중에서, 기체의 유속에 영향받지 않는 범위에서는 액체의 유속만의 함수이다. 액체유속에 의한 변화를 알기 위해서 기체유속이 zero인 경우의 실험치를 Table 2에 표시하였다.

각각의 액체 유속에 따라서 평균값을 충전물 크기에 상관없이 구하여 액체 유속과 위의 평균값을 log-log 그림표에 그려 그 기울기에서 다음 표와 같은 값을 얻었다.

Table 2. Liquid holdup at zero gas flow rate.

Water				20% Glycerol					35% Glycerol				
Li- Sphere quid size flowrate	1/2''	3/8''	1/4''	Li- Sphere quid size flowrate	1/2''	3/8''	1/4''	Li- Sphere quid size flowrate	1/2''	3/8''	1/4''		
960	0.007	0.007	0.004	1040	0.014	0.014	0.017	1080	0.020	0.016	0.039		
4800	0.021	0.033	0.022	5220	0.028	0.027	0.034	5400	0.050	0.039	0.10		
8600	0.034	0.057	0.059	9350	0.053	0.045	0.051	9680	0.063	0.063	0.099		
H-sphere													
960	0.070	0.041	0.123	1040	0.004	0.033	0.025	1080	0.031	0.165	0.306		
4800	0.096	0.086	0.139	5220	0.028	0.031	0.049	5400	0.120	0.306	0.424		
8600	0.102	0.111	0.19	9350	0.058	0.051	0.089	9680	0.167	0.349	0.580		
Square													
960	0.023	0.214	0.401	1040	0.043	0.149	0.322	1080	0.029	0.135	0.317		
4800	1.005	0.499	0.656	5220	0.101	0.287	0.447	5400	0.092	0.396	3.629		
8600	0.158	0.863	0.927	9350	0.200	0.433	0.514	9680	0.132	0.569	0.594		
H-square													
960	0.061	0.265	0.091	1040	0.014	0.075	0.164	1080	0.033	0.020	0.036		
4800	0.148	0.595	0.267	5220	0.083	0.185	0.226	5400	0.054	0.042	0.053		
8600	0.189	0.802	0.392	9350	0.127	0.257	0.314	9680	0.056	0.054	0.065		

	Sphere	H-sphere	Square	H-square
기울기	0.68	0.35	0.38	0.40

이 각각의 기울기의 값을 평균하여 $\beta=0.45$ 이 되었으며, 따라서 sphere, h-sphere, square 그리고 h-square에 대하여

$$Y/\varphi_{ln} = \eta'(S) \cdot G_l^{0.45} \quad (28)$$

임을 알았다. 이 경우 $\eta'(s)$ 는 각 shape에 따라서 정해지는 함수일 것이다. 그런데 식 (27)에 의하여

$$Y/(\varphi_{ln} \cdot G_l^{0.45}) = \eta'(S) + \xi'(S, G_g, G_l) \cdot \frac{\varphi_{gn}}{\varphi_{ln}} \cdot X \quad (29)$$

으로 표시할 수 있을 것이다.

3. η , ξ 에 대한 기하형태의 영향

이 실험에 사용된 각각의 형태의 영향을 앞에

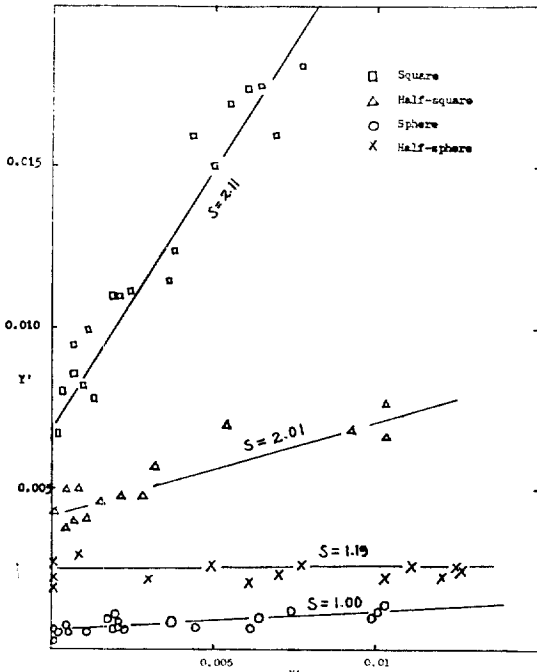


Fig. 5. Dependence of Y' on X' .

Packing materials, 1/2'', 3/8'', 1/4'' sphere ($S=100$)
 1/2'', 3/8'', 1/4'' half-sphere ($S=1.19$)
 1/2'', 3/8'', 1/4'' half-square ($S=2.01$)
 1/2'', 3/8'', 1/4'' square ($S=2.11$)

서 정의한 sphericity 개념¹³⁾을 사용하여, η , ξ 에 대한 각각의 영향을 분리하기 위하여 (30)식을 사용하여, sphere, h-sphere, square 그리고 h-square의 경우에 대하여, $Y/(\varphi_{ln} \cdot G_l^{0.45})$ v. s. $\frac{\varphi_{gn}}{\varphi_{ln}} \cdot X$ 의 그림표를 그려서, 식 (30)의 $\eta'(S)$ 형태를 결정하였다.

각 충진물에 대한 결과를 그림표로 그려 보면 Fig. 5와 같고, 각각의 경우에 대하여 $Y/(\varphi_{ln} \cdot G_l^{0.45}) = Y'$, $(\varphi_{gn}/\varphi_{ln}) \cdot X = X'$ 라 놓으면

Sphere에서는

$$Y' = 0.0005 + 0.064 \cdot X' \quad (30)$$

H-sphere

$$Y' = 0.0025 + 0.0117 \cdot X' \quad (31)$$

Square

$$Y' = 0.0060 + 0.04 \cdot X' \quad (32)$$

H-square

$$Y' = 0.0041 + 0.304 \cdot X' \quad (33)$$

을 얻었다. 이들로부터 $\eta'(s)$ 의 값은

$$S=1.0 \text{ 일때 } \eta'(S) = 0.00055$$

$$S=1.19 \quad \eta'(S) = 0.0025$$

$$S=2.11 \quad \eta'(S) = 0.0060$$

$$S=2.01 \quad \eta'(S) = 0.0041$$

이므로 이로 부터

$$\eta'(S) = 0.00092 \cdot S^{2.51} \quad (34)$$

을 얻었다. 또 $X=0$ 인 경우에 식 (29)에서

$$Y' = 0.00092 \cdot S^{2.51} \quad (35)$$

을 얻을 수 있었다. 또 $S^{2.51}$ 의 값으로 위의 식들을 나누어서 $Y'/S^{2.51}$ v. s. X' 로 그림표에 나타냄으로

$$Y'/S^{2.51} = 0.0013 + 0.0028 \cdot X' \quad (36)$$

로 일반화 할 수 있음을 알 수 있었다.

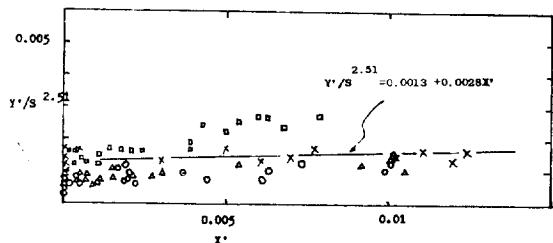


Fig. 6. Dependence of $Y'/S^{2.51}$ on X' .

□ square △ half-square
 ○ sphere × half-sphere

한편 부하점 이상의 범위에 대하여도 같은 방법으로 실험치에 대한 식을 구해보면 .

Sphere

$$Y' = 0.0013 + 0.0115 \cdot X' \quad (37)$$

Square

$$Y' = 0.0128 + 0.80 \cdot X' \quad (38)$$

H-square

$$Y' = 0.0044 + 0.078 \cdot X' \quad (39)$$

을 얻었다.

결 론

여러가지 충전물의 형태에 따라서, air-water 계, air-glycerol 계에 대하여 ID-10cm의 충전탑에서 액체 체류량을 저울로 측정하였다.

이 실험 결과를 힉 균형에서 얻은 모델에 대입하여 반 실험식을 얻었다.

1. 액체 체류량은 G_L , G_g 에 주로 의존하며 G_g 에 영향을 거의 받지 않는 범위와 비교적 많이 받는 범위가 있으며 그 한계점은 부하점에서 일어난다.

2. 액체 체류량의 일반식은

$$Y/(\phi_{ln} \cdot G_L^\beta) = \eta'(S) + \xi'(S, G_g, G_L) \cdot \frac{\phi_{gn}}{\phi_{ln}} \cdot X$$

의 형태를 갖고, β 의 값은 각 충전물의 형태에 따라서 약간의 차이는 있으나 평균하면 0.45이다.

3. 부하점 이하에서는 sphericity의 개념을 도입하면 체류량의 식은

$$Y/(\phi_{ln} \cdot G_L^{0.45} \cdot S^{2.51}) = 0.0013 + 0.0028 \cdot \frac{\phi_{gn}}{\phi_{ln}} \cdot X$$

를 얻었다.

4. 부하점 이상에서는

$$\text{sphere : } \eta' = 0.0013, \quad \xi' = 0.0015$$

$$\text{square : } \eta' = 0.0128, \quad \xi' = 0.80$$

$$\text{h-square : } \eta' = 0.0044, \quad \xi' = 0.078$$

를 얻었으며 형태에 대해서는 일반화 할 수 없었다.

Nomenclature

A	면적, ft^2
a	물질전달면적, ft^2
d	직경, ft
e	공극율(Porosity), —
F	힘, lb
G	유체의 질량속도, $\text{lb}/\text{ft}^2 \cdot \text{hr}$
k	물질전달 계수, $\text{lb}/\text{ft}^2 \cdot \text{hr}$ (unit fraction)
ΔP	압력강하, $\text{lb}/\text{ft}^2/\text{ft}$ of bed
Re	Reynolds수, $d_p U \rho / \mu$, —
S	구형성(sphericity), ft^2/ft^2
U	표면속도, ft/hr
V	부피, ft^3
X	$2gd_e \gamma t^2 Z_o^3 / G_L^2$, —
X'	$(\phi_{gn} / \phi_{ln}) X$, —
Y	$\left(\frac{G_g}{G_L} \right)^2 \left(\frac{\gamma_t}{\gamma_g} \right) \left(\frac{Z_o}{e - Z_t} \right)^3$, —
Y'	$Y / (\phi_{ln} \cdot G_L^{0.45})$, —
Z	체류량(liquid holdup), ft^3/ft^3 of bed

Greeks

μ	점도, $\text{lb}/\text{ft} \cdot \text{hr}$
ϕ	마찰계수, —
ρ	밀도, lb/ft^3
σ	표면장력, dyn/cm
γ	비중량, lb/ft^3
η	식 (17)중의 함수, —
η'	식 (26)중의 함수, —
ξ	식 (17)중의 함수, —
ξ'	식 (27)중의 함수, —
ϕ	식 (2)중의 함수, —

Subscripts

g	기체
l	액체
p	충전물
t	전체
o	Operating
s	정적의

e 상당의

n Ergun의 식에 보인 마찰계수

References

1. H. L. Shulman, C. F. Ulrich and N. Wells, *AIChE Journal*, **1** (1955) 247.
2. H. L. Shulman, C. E. Savini and R. V. Edwin, *AIChE Journal*, **9** (1963), 479.
3. D. M. Mohunta and G. S. Laddha; *Chem. Eng. Sci.*, **20** (1965), 1069.
4. V. Kolar and Z. Broz, Collection, Czechoslovak. *Chem. Commun.*, **30** (1965), 2527.
5. Z. Broz and V. Kolar, *ibid*, **33** (1968), 349.
6. V. Kolar and Z. Broz, *ibid*, **33** (1968), 2722.
7. V. Kolar and J. Tichy, *ibid*, **33** (1968), 2728.
8. V. Kolar and Z. Broz, *ibid*, **33** (1968), 3870.
9. V. Kolar and Z. Broz, *ibid*, **35** (1970), 1665.
10. Z. Broz and V. Kolar, *ibid*, **37** (1972), 3551.
11. R. B. Bird, W. E. Stewart and E. N. Lightfoot, "Transport phenomena", John Wiley & Sons. Inc., Tokyo, (1960), 180.
12. A. S. Gupta and G. Thodos, *C. E. P.*, **58**, (1962), 62.
13. Leva, "Tower packings and packed tower design", U. S. Stoneware Corp., Tallmadge, Ohio, 1953.
14. Otake T. and Okada K., *Soc. Ch. Eng. (Japan)*, (1953), 271.
15. J. F. Davidron, *Trans. Institute Chem. Eng. (London)*, **37** (1959), 131.
16. Varrier C. B. S and K. R.; *Chem. Age. India*, **14** (1963), 345.