HWAHAK KONGHAK Vol. 25, No. 2, April 1987, pp. 201-207
(Journal of the Korean Institute of Chemical Engineers)

기포탑내에서의 n-프로판올과 iso-프로판올 수용액의 기체체류량에 관한 연구

김상렬 · 목연수

동아대학교 공과대학 화학공학과

(1986년 12월 13일 접수, 1987년 2월 24일 채택)

A Study on Gas Holdup for Aqueous Solutions of n-Propanol and iso-Propanol in a Bubble Column

Sang-Yul Kim and Yun-Soo Mok

Dept. of Chem. Eng., College of Eng., Dong-A University, Pusan 600-02, Korea

(Received 13 December 1986; accepted 24 January 1987)

요 약

n-프로판올과 iso-프로판올의 제조에서 얻어지는 수용액을 증류할 때 각각 72%(wt)와 88%(wt) 농도에서 공비혼합물을 형성한다. 따라서, 이것들을 공비증류에 의하여 효과적으로 분리하기 위해서는 이것들이 기-액 접촉을 할 때 생성되는 기체의 체류량(holdup)을 아는 것이 중요하며, 이를 위해 이들 수용액의 농도, 점도, 온도, 그리고 표면장력과 기체분산판의 형태 및 기체유속변화에 따른 기체체류량을 측정하였다.

실험결과로 부터 기체체류량에 대한 수용액의 표면장력, 점도, 기체유속, 분산판의 형태 등과의 상관성을 다음과 같이 수식화하였다.

$$\varphi\left(\frac{\delta}{D}\varepsilon\right)\left(\frac{\mu_L u_G}{\sigma_L}\right)\times 10^{10}=KR_{eG}^{n}$$

Abstract—When aqueous solutions obtained from the production of n-propanol and iso-propanol are distilled, azeotropes are formed at the concentrations of 72 wt% and 88 wt% respectively. So it is important to predict the gas holdup in an aqueous solution with gas-liquid contact for the effective separation by the azeotropic distillation. In this study, the gas holdup of the solution was measured at the different concentration and temperature to investigate the effect of variable physical and temperature to investigate the effect of variable physical properties such as viscosity and surface tension along with different patterns of distribution plate and different gas velocity.

From the experimental result, a correlation between the gas holdup and surface tension and viscosity of aqueous solution, gas velocity, and pattern of distribution plate was found as follows;

$$\varphi\left(\frac{\delta}{D}\varepsilon\right)\left(\frac{\mu_L u_G}{\sigma_L}\right)\times 10^{10}=KR_{eG}^{n}$$

1. 서 론

기포탑은 구조가 아주 간단하고 기-액 접촉면적이 비교적 큰 특징을 가지고 있어 물질전달에 의한 기-액 간의 반응을 수반하는 흡수탑, 탈취탑, 발효조 등의 화학공업 분야에 널리 이용되어지고 있다. 따라서 기-액

간의 반응을 수반하는 반응조나 폭기조 등의 최적설계의 기초 자료인 기-액 접촉효과를 측정하기 위해 탑내에서의 기체체류량과 용액의 물성(밀도, 표면장력, 점도 등), 탑의 기하학적 특성(탑경, 기체분산판의 공경, 공경과 분산판의 면적비 등), 그리고 벽면효과 등의 관계에 대한 많은 연구가 행하여지고 있다[1-4].

Tadaki와 Maeda[5]는 기포탑내에서 형성되는 기포와 유체의 혼합특성에 관하여 보고했으며, Akida와 Yoshida[6]는 여러가지 기-액계에서 용액의 물성과 기체체류량 사이의 관계를 무차원화하였고 Koide[7] 등은 무기염 용액에 있어서의 분산판의 기하학적 형태 즉, 공경과 면적비가 기체체류량에 미치는 영향을 보고했다. 최근에 와서 Kawasaki와 Tanaka[8]는 병류흐름 기포탑내에서의 글리세린 수용액 중의 기체체류량을 측정하여 이것과 기체의 용적유량분율과의 관계를 밝혔다. 또한 Kim[10]은 무기염 수용액, 물, 에틸알콜, 그리고 메칠알콜 수용액에서의 기체체류량을 측정하여 그 결과를 용액의 물성치와 기포탑의 기하학적 특성에 대해 하나의 무차원식을 얻은 바 있다.

그런데, n-프로판올과 iso-프로판올의 경우, 이것들을 제조하는 과정에서 얻어지는 수용액은 각각 72% (wt)와 88%(wt)에서 각각 88℃와 80℃의 공비물을 형성하는 것으로 나타나고 있으나[11] 이들의 효율적인 분리를 위한 기초 자료인 기체체류량에 관해서는 연구된 바가 거의 없다. 따라서 Kim의 무차원식을 n-프로판올과 iso-프로판올 수용액에 적용시킬 경우 실측치와의 벗어남이 매우 크므로 본 연구에서는 이에 관해 수정된 무차원식을 유도하였으며 이를 위해 20%~100% 용액에 있어서 25℃, 35℃ 그리고 45℃의 온도에서 수용액의 표면장력, 밀도, 점도 및 가스유속변화에 따른 기체체류량을 측정하여 기체체류량에 영향을 주는 이들 인자들과의 상관관계를 검토하였다.

2. 실험장치

본 연구에서 사용한 실험장치는 Fig. 1과 같다. 기포탑 ①은 내경 5.52 cm, 외경 11.3 cm, 높이 152.4 cm의 유리로 만든 이중관이며, 기포탑 하부에 설치한 다공분산판 ③은 두께 0.2 mm의 동판으로써 공경 0.3 mm, 구멍수 25개로 제작하여 사용하였다. 실험에 사용한 n-프로판올과 iso-프로판올은 일본 Hayashi제 특급시약이며 물은 증류수를 사용하였고 각 용액의 점도는 Ostwald 점도계로, 비중은 Baume 비중계로,

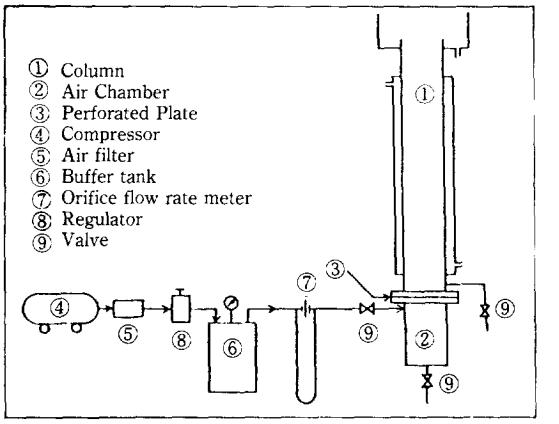

Fig. 1. Shematic diagram of experimental apparatus.

표면장력은 Du Noüy식 표면장력계로 각각 측정하였다. 용액은 25℃, 35℃ 그리고 45℃로 각각 항온시켜 사용하였으며 공기는 압축기에서 나오는 가스를 buffer tank ⑥에서 기포탑내의 액체의 농도와 같은 액 속을 통과시켜 포화되도록 하고 유량계를 통해서 기포탑의 하부에 설치된 다공분산판을 통해 유입시켰다. 기포의 상승에 따른 기체체류량은 용액의 함량, 온도, 표면장력 및 가스의 유속변화에 따라 식(1)에 의해 각각 측정하였다.

$$\varphi = \frac{l_G}{l} = \frac{l - l_L}{l} \tag{1}$$

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 용액의 점도, 표면장력 및 비중

n-프로판올과 iso-프로판올의 농도에 따라 측정한 점도, 표면장력 및 비중을 Fig. 2, 3, 4에 나타내었다. Fig. 2는 용액의 점도가 알코올의 농도가 50% 이하에서는 농도의 증가에 따라 커지고 50% 이상에서는 다시 감소하는 경향을 보이고 있으며 온도에 대한 영향은 일반적인 다른 용액과 같이 온도의 증가에 따라 감소하고 iso-프로판올 수용액의 경우가 n-프로판올 수용액의 경우보다 크게 나타남을 보이고 있다.

Fig. 3은 용액의 표면장력이 농도 증가에 대해 감소하고 iso-프로판올의 경우가 큰 변화를 나타냄을 보이고 있으며 용액의 비중이 농도의 증가에 따라 미소하게 감소함을 보이고 있는 Fig. 4는 알콜의 비중이 물의 그것보다 작음으로써 연유되는 현상을 나타내고 있다.

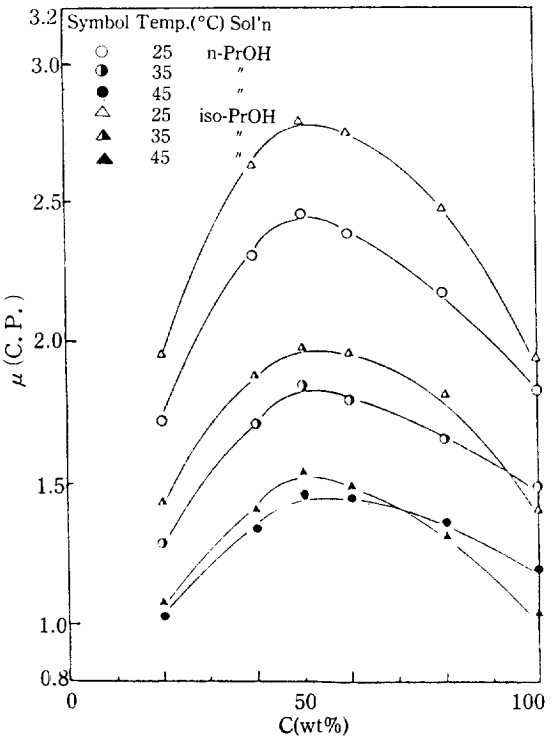

Fig. 2. The relation between viscosity and content of n-PrOH-H_2O and iso-PrOH-H_2O mixtures.

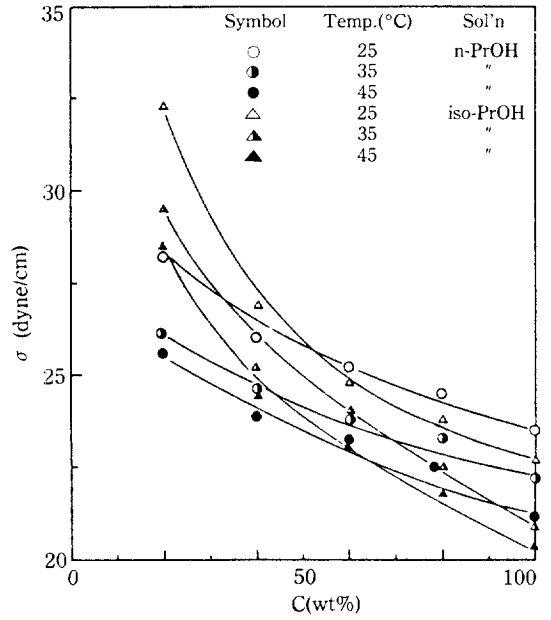

Fig. 3. The relation between surface tension and content for n-PrOH-H_2O and iso-PrOH-H_2O mixtures.

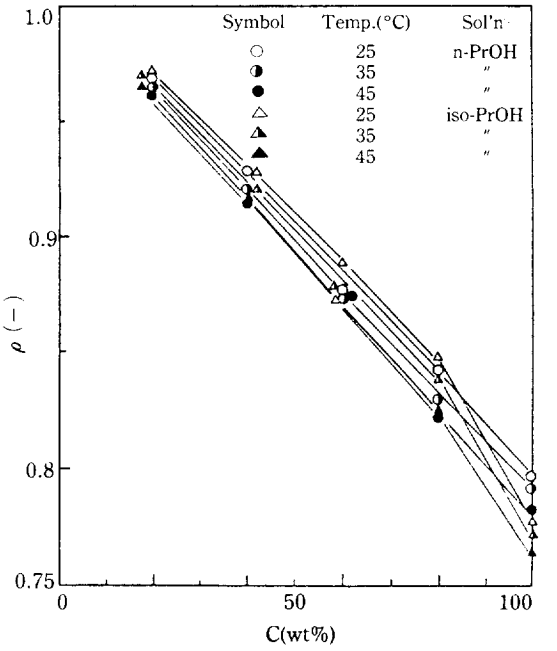

Fig. 4. The relation between specific gravity and content for n-PrOH and iso-PrOH-H_2O mixtures.

3-2. 기체체류량에 미치는 여러가지 인자의 영향

3-2-1. n-프로판올과 iso-프로판올의 농도

가스의 유속이 일정할 때 iso-프로판올과 n-프로판올 수용액에서의 기체체류량은 이 용액들의 농도가 증가함에 따라 감소한다(Fig. 5). 이는 표면장력과 비중이 농도의 증가에 따라 감소하는 데 기인된다(Fig. 3, 4). 또한 iso-프로판올 수용액이 n-프로판올 수용액보다 기체체류량이 큰 것은 점도, 표면장력, 비중 등이 n-프로판올보다 iso-프로판올이 큰 데 기인되는 것으로 사료된다(Fig. 2, 3, 4).

3-2-2. 가스의 유속 및 용액의 온도

가스 유속의 증가에 따른 기체체류량은 iso-프로판올 수용액이나 n-프로판올 수용액이 모두 커지며(Fig. 6), 이는 다른 용액에 대해서 지금까지 보고된 바와 잘 일치한다. 특히, iso-프로판올 수용액의 기체체류량이 큰 것은 Fig. 2, 3, 4에서 설명한 것과 꼭 같은 이유에 기인된다. 알코올의 농도가 20%인 경우에는 온도의 상승에 따라 기체체류량이 급격히 커지지만 80%용액에서는 이러한 경향이 완만한 것은 온도의 증가에 따라 20%와 80%에서 표면장력의 변화 차이가 큰 데 기인하는 것으로 사료된다(Fig. 3).

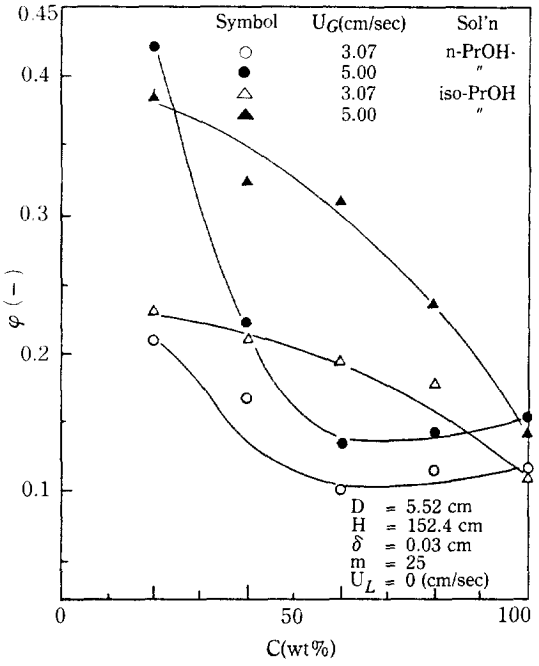

Fig. 5. Gas holdup for n-PrOH-H_2O and iso-PrOH-H_2O mixtures at different gas velocities (at 25°C).

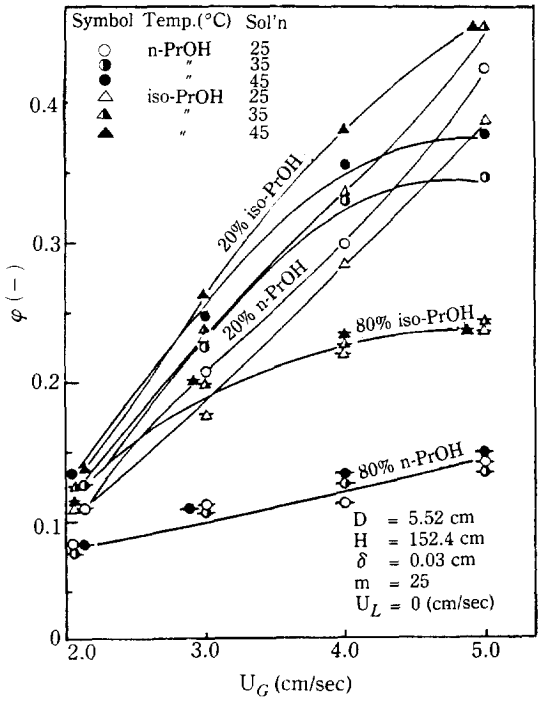

Fig. 6. Relation between gas holdup and gas velocities for n-PrOH-H_2O and iso-PrOH-H_2O mixtures at different temperatures.

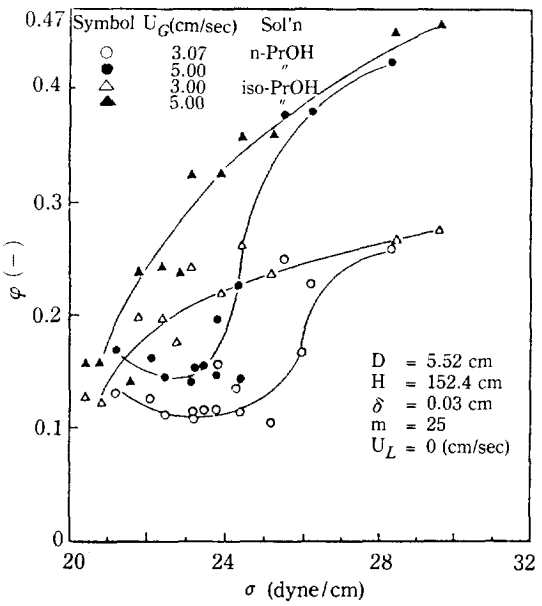

Fig. 7. Relation between gas holdup and surface tension for n-PrOH-H_2O and iso-PrOH-H_2O mixtures at different gas velocities.

3-2-3. 용액의 표면장력

용액의 표면장력이 증가하면 기체체류량은 전반적으로 커지며(Fig. 7) 이는 Fig. 3에서와 같이 용액의 농도 증가에 따라 표면장력이 감소하는 데 기인된다. 또한 iso-프로판올 수용액에서의 기체체류량이 훨씬 큰 증가폭을 보이는 것은 iso-프로판올이 측쇄구조로 되어 있는 데 기인된다(Fig. 3, 4). 이는 이미 Kim[10] 등이 밝힌 바와 같이 이성체의 경우 구조의 복잡 정도에 따라 기체체류량이 커지는 것과 잘 일치한다.

3-2-4. 농도에 따른 표면장력 변화율

농도에 대한 표면장력의 변화율인 $\frac{d\sigma}{dc}$ 값이 커지면 기체체류량은 증가하는 경향을 나타낸다(Fig. 8, 9). 이는 $\frac{d\sigma}{dc}$값이 커지면 기포 상호간의 반발력이 증가하여 기포의 합체현상을 방해하기 때문이다[9]. 뿐만 아니라 iso-프로판올 수용액이 동일 농도의 n-프로판올 수용액보다 기체체류량이 더 큰 것은 $\frac{d\sigma}{dc}$값이 더 큰 데 연유된다.

3-3. 기체체류량과 여러가지 인자의 상관관계

기체체류량에 영향을 미치는 인자는 일반적으로 용액의 표면장력, 비중, 점도, 분산판의 공경과 구멍 면적비, 분산가스의 점도, 밀도 그리고 분산가스의 유속 등이며[식(2)]

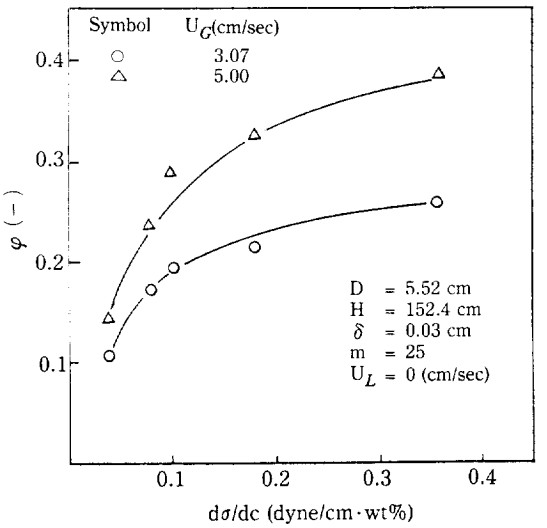

Fig. 8. φ vs. dσ/dc on aqueous iso-propanol solution at different velocities (25°C).

$$\varphi = F(\sigma_L, g, \delta, \mu_L, \mu_G, D, U_G, \rho_L, \rho_G, \varepsilon) \quad (2)$$

이 관계로 부터 Kim[10]은 무기염수용액, 물, 메틸알코올 및 에틸알코올 수용액에서의 기체 체류량을 측정하여 다음과 같은 무차원 식(3)을 얻었다.

$$\varphi = K\left(\frac{DU_G\rho_G}{\mu_G}\right)^{n}\left(\frac{\sigma_L}{\mu_L g^{1/2}\delta^{1/2}\varepsilon}\right) \quad (3)$$

식(3)을 바꾸어 나타내면 식(3)′와 같고

$$\varphi\left(\frac{\sigma_L}{\mu_L g^{1/2}\delta^{1/2}\varepsilon}\right)^{-1}\times 10^{8} = KRe_G^{n} \quad (3)'$$

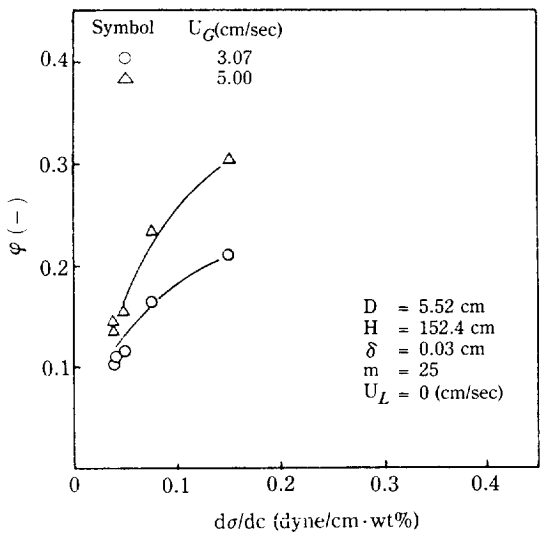

Fig. 9. φ vs dσ/dc on aqueous n-propanol solution at different velocities (25°C).

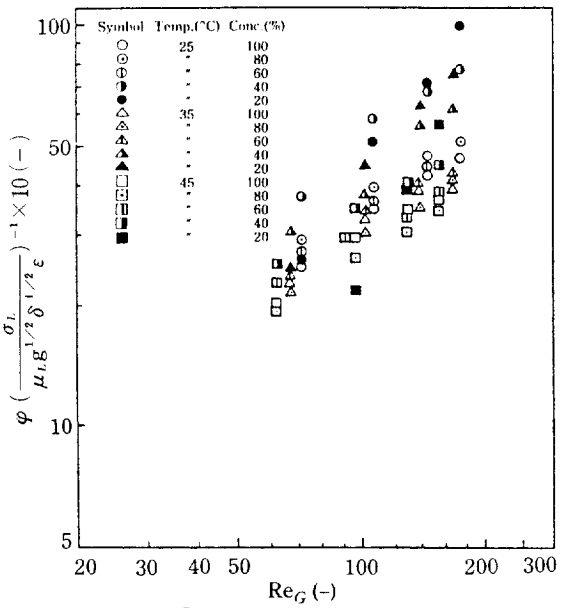

Fig. 10. $\varphi\left(\frac{\sigma_L}{\mu_L g^{1/2}\delta^{1/2}\varepsilon}\right)^{-1}$ vs. Re_G for n-PrOH-H_2O mixtures.

이 식(3)′를 n-프로판올과 iso-프로판올 수용액에 적용하면 Fig. 10 및 Fig. 11과 같이 된다. 즉, 식(3)′에 의한 산출치와 실험치는 분산도가 커서 일정한 상관성

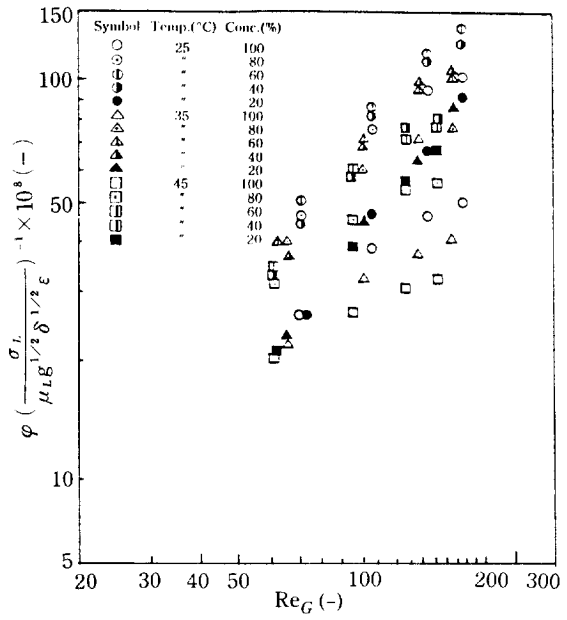

Fig. 11. $\varphi\left(\frac{\sigma_L}{\mu_L g^{1/2}\delta^{1/2}\varepsilon}\right)^{-1}$ vs. Re_G for iso-PrOH-H_2O mixtures.

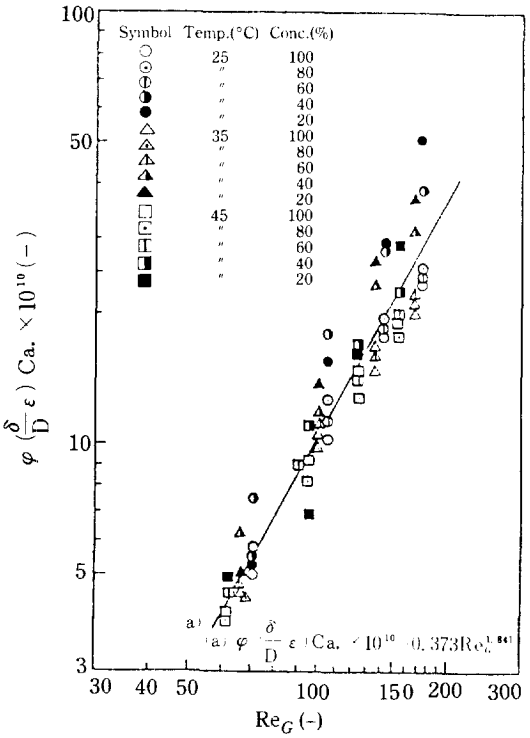

Fig. 12. $\varphi\left(\frac{\delta}{D}\varepsilon\right)$ **Ca. vs.** Re_G **for n-PrOH-H_2O mixtures.**

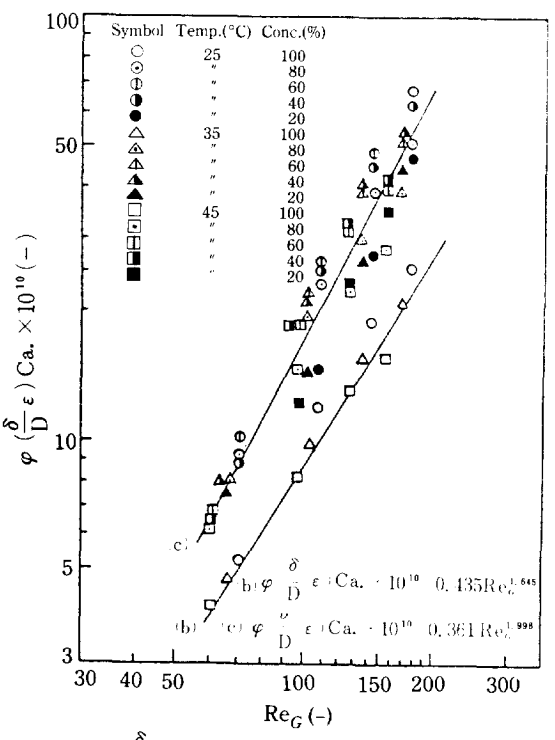

Fig. 13. $\varphi\left(\frac{\delta}{D}\varepsilon\right)$ **Ca. vs.** Re_G **for iso-PrOH-H_2O mixtures.**

을 추정할 수가 없다. 따라서 본 연구에서는 분산판의 기하학적 형태와 Capillary 수를 각각 무차원군으로 하여 새로운 식(4)를 구하였으며

$$\varphi\left(\frac{\delta}{D}\varepsilon\right)\left(\frac{\mu_L U_G}{\sigma_L}\right)\times 10^{10}=KRe_G^{n} \qquad (4)$$

식(4)를 실험결과에 적용시켜 Fig. 12, 13, 14와 같은 양호한 상관성을 얻었다. 이 결과에 의하면 n-프로판올 수용액은 전 농도에서 하나의 직선으로 나타내는 것이 가능하지만(Fig. 12) iso-프로판올 수용액의 경우는 100%와 20~80% 용액이 각각 다른 상관관계를 나타낸다. 이들 실험결과를 식(4)에 따라 정리한 결과는 Table 1과 같다.

Table 1. Constant K and n of equation (4).

line	solution	K	n	correlation coefficient
a	n-PrOH(100-20%)	0.373	1.841	0.943
b	iso-PrOH(100%)	0.435	1.645	0.998
c	iso-PrOH(80-20%)	0.361	1.998	0.965

4. 결 론

n-프로판올과 iso-프로판올의 제조에서 얻어지는 수용액을 증류할 때 각각 72%와 88% 농도에서 공비혼합물을 형성한다. 이들이 기-액 접촉할 때 기본이 되는 기체체류량에 관한 자료를 얻기 위해서 기포탑내에서 n-프로판올과 iso-프로판올 수용액의 물성 및 가스유속에 따른 기체체류량과의 상관성을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. n-프로판올과 iso-프로판올 수용액의 농도가 감소함에 따라 기체체류량은 증가한다.

2. iso-프로판올 수용액이 n-프로판올 수용액보다 기체 체류량이 크다. 이는 분자 구조가 측쇄상인 데 기인되며 이들 용액의 물성 변화로써 볼 때, iso-프로판올 수용액의 경우, 농도에 대한 표면장력의 변화율이 n-프로판올 수용액보다 더 커서 기포간의 반발력을 증가시켜 기포의 합체를 방해하기 때문이다.

3. 여러가지 인자와 가스체류량과의 상관관계로 부터 식(4) 즉,

$$\varphi\left(\frac{\delta}{D}\varepsilon\right)\left(\frac{\mu_L U_G}{\sigma_L}\right)\times 10^{10}=KRe_G^{n}$$

를 얻었으며 이 식의 K, n값 및 상관계수는 Table 1과 같다.

NOMENCLATURE

C : content of solution (wt %)

Ca : $\frac{\mu_L U_G}{\sigma_L}$ Capillary number (-)

D : Diameter of column (cm)

g : gravitational acceleration (cm/sec^2)

K : intercept of nondimentional epuation by experimental data (-)

L : column length (cm)

L_G : V_G/A height of gas (cm)

L_L : V_G/A height of liquid (cm)

m : hole number

n : slope of nondimentional equation by experimental data (-)

Re_G : $\frac{DU_G\rho_G}{\mu_G}$ Reynolds number of gas (-)

U_G : gas velocity (cm/sec)

U_L : liquid velocity (cm/sec)

δ : hole diameter (cm)

ε : ratio of hole area of distributor (-)

μ_L : viscosity of solution (c.p.)

μ_G : viscosity of gas (c.p.)

ρ : specific gravity of solution (-)

ρ_G : density of gas (g/cm)

σ : surface tension of liquid (dyne/cm)

φ : average gas holdup (-)

$\varphi\left(\frac{\delta}{D}\varepsilon\right)\left(\frac{\mu_L U_G}{\sigma_L}\right)\times 10^{10}$: Nondimentional equation by experimental data (-)

$\frac{d\sigma}{dc}$: differential ratio of surface tension with respect to concentration (dyne/cm. wt%)

REFERENCES

1. Takahashi, T., Miyahara, T. and Izawa, H.: *Kagaku Kogaku*, **5**, 484 (1975).
2. Kim, J.B., Sohn, J.U. and Kim, S.Y.: *Hwahak KongHak*, **12**, 297 (1974).
3. Takahashi, T., Miyahara, T. and Izawa, H.: *Kagaku Kogaku*, **8**, 13 (1982).
4. Noda, K., Aono, Y. and Ishida, K.: *Kagaku Kogaku*, **9**, 237 (1983).
5. Tadaki, T. and Maeda, S.: *Kagaku Kogaku*, **27**, 402 (1963).
6. Akida, K. and Yoshida, F.: Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop., **12**, 76 (1973).
7. Koide, K., Sato, S., Tanada, T. and Kubota, H.: *J. Chem. Eng. Japan*, **1**, 51 (1968).
8. Kawasaki, H. and Tanaka, H.: *Kagaku Kogaku*, **9**, 695 (1983).
9. Marrucci, G. and Nicodemo, L.: *Chem. Eng. Sci.*, **22**, 1257 (1967).
10. Kim, S.Y.: Ph. D. Dissertation, Busan National Univ., Busan, Korea (1980).
11. Perry, R.H.: Chem. Eng. Handbook fifth edition, 13-38 (1973).