

체단탐에서의 이성분계 혼합물의 거품발생현상에 관한 해석

윤호병 · 홍원희[†] · 이태용 · 김창식* · 송익수*

한국과학기술원 화학공학과

*현대중공업 플랜트사업본부

(1997년 10월 13일 접수, 1998년 3월 14일 채택)

Analysis of Foaming Phenomena of Binary Mixtures in Sieve Plate Columns

Ho Byung Yoon, Won Hi Hong[†], Tai Yong Lee, Chang Sik Kim* and Ick Soo Song*

Department of Chemical Engineering, KAIST, Taejeon 305-701

*Industrial Plant Division, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.

(Received 13 October 1997; accepted 14 March 1998)

요 약

증류나 흡수조작 중에 발생하는 거품을 해석하기 위해서 직경이 2 in인 체단탐을 이용해서 모의 실험을 행하였다. 공기의 유속변화에 따른 거품의 높이 변화를 측정하였으며 액체의 유량을 변화시키면서도 실험을 하였다. 표면장력, 밀도, 점도와 같은 물리적 성질이나 기체속도, 액체유량과 같은 조업조건이 거품의 높이에 미치는 영향에 대해서 알아보기 위해서 차원해석을 하였고, 차원해석의 결과로부터 거품의 높이를 Weber수나 Reynolds수와 같은 무차원수로 나타낼 수 있었다.

Abstract—For analysis of the foaming in distillation and absorption tower the simulated distillation in a sieve tray column was performed. The 2 inch-diameter sieve tray was used. Foam height was measured for various air flow and liquid flow rates. Foam height data were correlated by dimensional analysis. The physical properties such as surface tension, density and viscosity and the operating conditions such as vapor velocity and liquid flow rate were used as variables. The results of dimensional analysis show that the foam height could be expressed as a function of Weber number and Reynolds number.

Key words: Foam Height, Sieve Tray

1. 서 론

증류나 흡수 같은 분리장치에서 발생하는 범람이 설계하여 얻은 장치의 범람값보다 낮은 용량에서 발생하는 것이 관찰되었고 이러한 현상이 장치내에서 발생하는 거품발생에 의해서 야기된다는 것을 알게 되었다[1-2]. 분리장치에서 발생하는 거품은 그 정도에 따라서 분리에 도움이 될 수도 있으며, 반대로 거품의 발생에 의해 전혀 분리가 되지 않을 수도 있다[3-5]. 즉, 거품이 적게 발생하는 혼합물의 경우에는 거품으로 인해서 기체와 액체의 접촉면적이 증가하게 되어서 탑효율이 증가될 수 있지만 거품이 지나치게 많이 발생되면 범람을 일으켜 분리를 할 수 없게 된다. 증류조작 중에 거품의 영향을 알아보기 위해서 모의 증류 실험을 통해서 거품을 발생시키는 실험이 연구되었으며[6-10] 증류탑내를 수력학적으로 해석해서 포말 높이를 계산하였다[12-15]. 이런 연구들을 통해서 혼합물이 표면장력 정제일 때 거품이 더 잘 발생한다는 것이 밝혀졌다[3, 16-17].

체단탐에서 거품이 발생하는 조업영역은 포말(froth)영역이며 이 영

역내에서 기체유속 증가는 거품높이를 증가시키게 된다. 그러나 기체 유속이 계속 증가하여서 조업영역이 분무(spray)영역으로 바뀌면 거품은 거의 발생되지 않는다. Rennie와 Evans[18]에 의하면 체단구멍을 기준으로한 Reynolds 수가 2,100보다 크게 되면 거품이 깨진다고 하였고, De Goederen[19]은 기체의 유효속도가 0.5 m/s 보다 클 경우 거품이 깨진다고 하였다. 그리고, 혼합포말(mixed-froth)영역이나 분무영역에서도 하강 관에서도 거품이 발생한다. 현재 거품문제를 해결하는 방법으로 가장 많이 사용되는 것은 거품억제제를 첨가하여 거품이 발생하는 것을 억제하는 방법을 사용하고 있다.

분리하고자 하는 두 혼합물의 상대 휘발도와 표면장력의 차이가 분리조작 중에 발생하는 거품높이를 결정하게 된다. 혼합물에서 상대 휘발도가 큰 성분의 표면장력이 큰 경우를 표면장력 부계(negative system)라고 하며, 표면장력이 작은 경우를 표면장력 정계(positive system)라고 한다. 두 경우 모두 상대 휘발도가 충분히 커서 구배가 생길 수 있다. 그리고 표면장력의 차가 거의 없거나 상대 휘발도가 매우 작은 경우를 표면장력 중성 계(neutral system)라고 한다.

Table 1에는 실험에 사용한 2성분계의 순수 성분들에 대한 끓는점과 이때에 표면장력을 나타내었다. Table 1의 예 중에 표면장력 부계는

[†]E-mail : whhong@hanbit.kaist.ac.kr

Table 1. Physical properties of testing materials[3]

Reagent	Density (g/cm ³)	Surface tension (mN/m)	Viscosity (mPa·s)	Boiling point(°C)
n-Heptane	0.6837	21.12(25 °C)	0.42	98.4
Cyclohexane	0.7785	28.48(25 °C)	0.98	80
Toluene	0.866	28.5(25 °C)	0.59	110.8
Water	0.99697	73.49(25 °C)	1	100
Methycyclohexane	—	15(b.p)	—	101
Benzene	—	21(b.p)	—	80.1
Methanol	0.7914	20.14	0.55	64.7
Ethanol	0.78983	19.89	1.074	78.4
2-Propanol	0.7855	16.98	2.86	82.5

벤젠/헵탄 혼합물이 되고, 헵탄/톨루엔 혼합물은 표면장력 정계가 되며 상대 휘발도가 매우 작은 헵탄/메틸사이클로헥산 혼합물이 표면장력 중성 계가 된다. 증류를 하는 동안에 발생하는 기포사이에는 얇은 막에는 주위보다 상대 휘발도가 작은 성분이 많아지게 되고 따라서 표면장력 정계의 경우에는 막에서의 표면장력이 증가하게 되고, 표면을 따라서 표면장력 구배가 생기게 되므로 막 안으로 액체의 표면 흐름이 발생된다. 이러한 현상으로 인해서 표면장력 정계는 거품이 발생된다. 반대로 표면장력 부계는 막 밖으로 표면 흐름이 생기고 이러한 흐름이 막을 깨게 된다. 따라서 표면장력 부계와 표면장력 중성 계에서는 거품이 심하게 발생되지 않는다[3].

거품의 발생이 증류조작의 효율에 미치는 영향은 긍정적인 면과 부정적인 면이 있는데 긍정적인 면은 거품이 심하게 발생되지 않았을 때 거품으로 인해서 액체와 기체의 접촉면적이 증가하여 단 효율이 증가된다. 부정적인 면은 거품이 너무 심하게 발생되면 범람을 일으켜서 단 효율이 급격하게 감소하게 된다[3].

체단탐을 이용하여 분리조작을 할 때에 발생하는 거품에 영향을 미치는 인자들은 크게 탐의 조업조건과 분리하고자 하는 물질들의 물리적 성질로 나눌 수 있다. 조업조건으로는 온도, 기체유속 그리고 체단구멍 직경 등이 있다. 이 중에서 거품 높이에 가장 크게 영향을 미치는 것은 온도로서 저온에서 거품이 안정화되며 온도가 상승하게 되면 불안정해져서 높이가 감소하게 된다. 그러나 온도에 의해서 거품 높이가 변하는 온도영역은 매우 좁으며 이 영역에서 급격하게 변화하고는 거품의 높이가 일정하게 유지된다[8]. 그리고 거품 높이에 영향을 미치는 물리적 성질로는 점도, 밀도, 그리고 표면장력 등이 있다.

본 연구에서는 이러한 물리적 성질이나 조업조건들이 거품 높이에 어느 정도 영향을 미치는지에 대해서 실험을 통해서 알아보았다.

2. 실험장치 및 방법

거품 높이를 측정하기 위한 실험을 세 부분으로 나누어서 실행하였다. 첫 번째는 액체의 흐름이 없는 상태에서 탐에 액체를 채운 후 공기를 주입하여 거품이 발생하는 것을 측정하였고, 두 번째는 액체 흐름이 거품 높이에 미치는 영향을 관찰하기 위해서 사용하는 액체를 순환시켜서 그 순환 속도를 조절해가면서 실험을 하였으며, 마지막으로는 회분증류를 실행하여 발생하는 거품을 측정하였다.

거품모사 실험을 위한 체단탐은 직경이 5cm이고 단간 거리를 20cm 정도로 하여서 거품이 심하게 발생되어도 범람이 발생하지 않고 거품을 관찰할 수 있게 유리로 제작하였으며 Fig. 1은 장치의 개략도이다. 실험대상 액체를 통과하는 기체로는 공기를 사용하였고, 탐 안

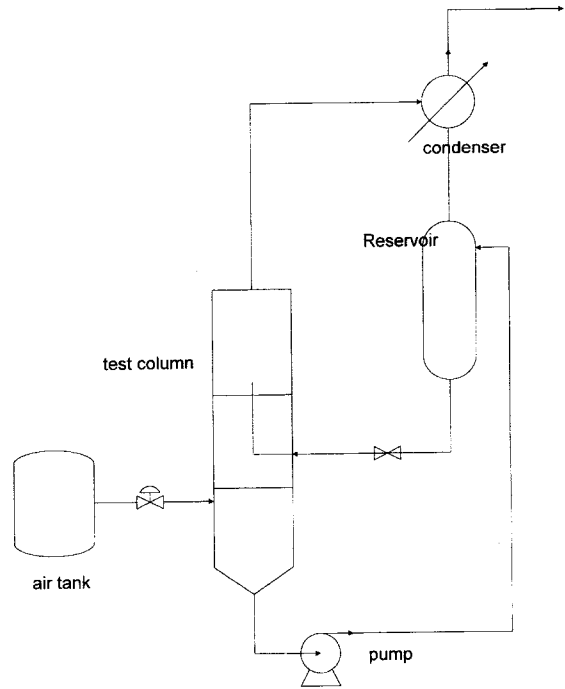


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

으로 유입되기 전에 유량계를 이용해서 유속을 측정한 후에 탐의 하부로 공급하였다.

실험할 때마다 탐 안의 액체높이는 일정하게 맞추어서 실험을 하였다. 저장조와 탐의 액체 수위가 같아지게 되면 거품 높이를 측정하였다. 그리고 공급하는 공기에 유량을 변화시켜서 공기유속 변화에 따른 거품 높이변화를 측정하였다. 이때 거품의 출렁거림으로 인해서 거품 측정이 쉽지 않기 때문에 여러 번 반복해서 실험을 하였다. 공급되는 공기의 유속은 21.36 cm/s로부터 36.48 cm/s까지 변화를 시켜가면서 거품의 변화를 측정하였다. Table 2는 실험조건을 나타낸 것이고 사용한 시약과 각 물질의 물리적 성질을 Table 1에 나타내었다.

액체 흐름의 영향을 측정하기 위해서 거품발생 모사실험에서 사용한 장치를 수정하여 실험하였다. 저장조에서 액체를 탐 위로 연속적으로 공급해서 실험 판으로 흘러 들어가게 하였다. 하강 관으로 배출되는 액체는 다시 저장조로 순환시키고 이때 순환되는 액체의 유량을 조절해가면서 실험을 하여 액체 흐름에 미치는 영향을 측정하였다. 순환하는 액체의 유량은 0.3 ml/s로부터 1.48 ml/s까지 변화시켰다.

한편 증류실험은 2 in 회분식 체단탐을 사용하여 전환류하에서 수행되었으며 Fig. 2에는 증류실험장치의 개략도를 나타내었다. 재비기에 공급되는 열량을 조절함으로써 발생하는 기체의 유속을 변화시켰으며, 기체 유속은 응축기에서 응축된 액체의 유량을 측정함으로써 간접적으로 측정하였다.

Table 2. Operation conditions and column specifications

Temperature(°C)	10-20
Pressure(atm)	1
Flow gas	Air
Gas flow rate(cm/s)	3.684-2.136
Liquid flow rate(ml/s)	1.48-0.30
Column diameter(cm)	5.08
Hole diameter(cm)	0.2

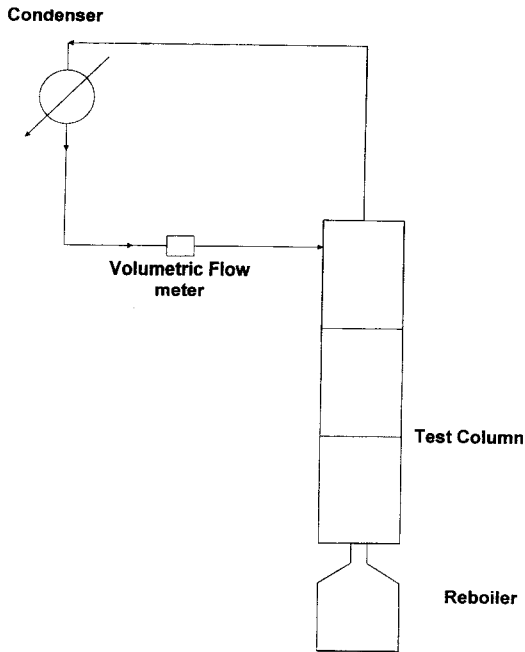


Fig. 2. Experimental apparatus for batch distillation.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 거품발생 모사 실험

3-1-1. 순수 물질만을 사용한 실험

거품이 발생하는데 영향을 미치는 물성들을 알아보기 위해서 우선적으로 순수 물질을 이용해서 실험을 하였다.

Fig. 3은 헵탄, 싸이클로헥산, 톨루엔 그리고 물에 대해서 실험한 결과이다. 이때 사용한 판의 체단구멍의 직경은 두 경우 모두 0.2 cm이다. Fig. 3에 나타난 것처럼 표면장력이 비교적 큰 물보다는 표면장력이 작은 헵탄이 많은 거품을 발생시킨다는 것을 알 수 있다. 톨루엔 같은 경우에는 작은 기체 유속에도 상당한 높이의 거품이 발생하였다. 그리고 거품 높이에 최대값이 존재하게 되는데 이것은 비교적 낮은 기체유속에서 안정하게 생성되어 있던 거품이 기체유속

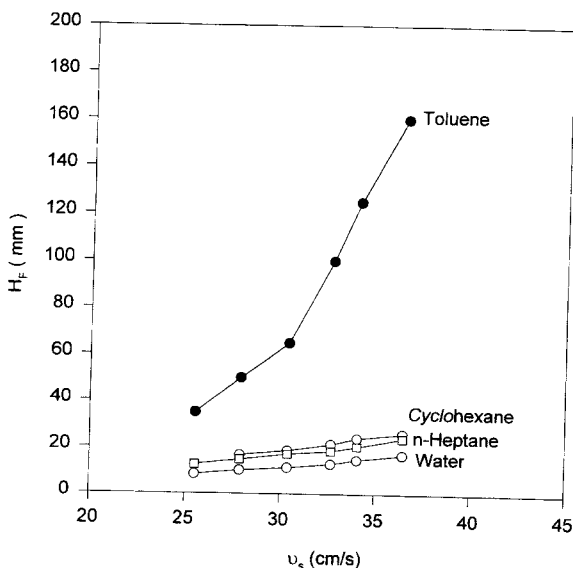


Fig. 3. Foam height for pure compounds.

화학공학 제36권 제3호 1998년 6월

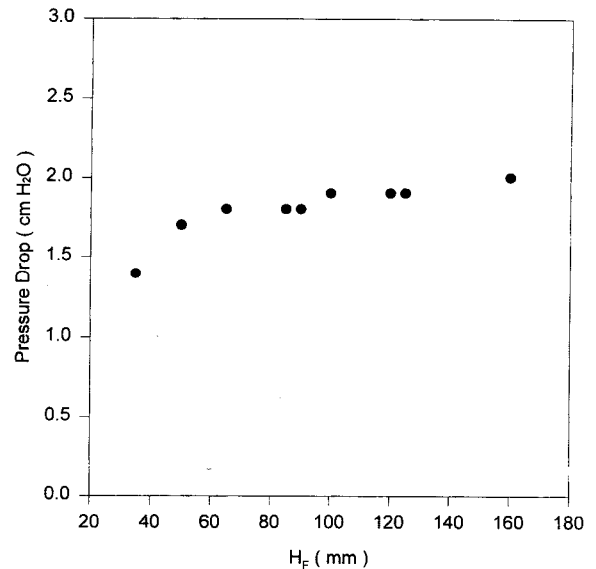


Fig. 4. Influence of foam height on pressure drop.

이 일정한 임계속도를 지나게 되면 거품이 깨지게 되어서 높이가 감소하게 되었다가 더욱더 기체유속이 증가하게 되면 조업영역이 분무영역으로 바뀌게 된다. 즉, 최대값 이상에서 측정되는 것은 안정화된 거품이 아니라 기체와 함께 올라오는 액체방울들의 높이가 된다[8]. 또, 거품이 형성됨에 따라서 발생하는 압력강하를 측정하였는데 거품 높이가 증가하게 되면 압력강하도 증가하게 되지만 거품이 어느 정도 높이에 도달하게 되면 압력강하의 변화는 거의 없어진다. Fig. 4는 톨루엔을 사용하였을 때에 거품 높이의 변화에 따른 압력강하를 나타낸 것이다. 하지만 전체적인 압력강하의 변화량이 미세하기 때문에 거품 높이가 증가하여서 압력 강하가 발생하였다고 말하기는 힘들다.

순수물질에 대한 실험결과를 해석하기 위해서 거품 높이에 영향을 미칠 것이라고 예상되는 여러 인자들을 가지고 차원해석을 해보았다. 거품 높이에 영향을 미치는 물성으로 밀도와 표면장력을 고려하였고 조업조건으로는 기체의 유효속도와 체단구멍 직경을 고려하여서 차원해석을 해보면

$$\frac{H_f}{d} = C \left(\frac{dv^2 \rho}{\sigma} \right)^a \quad (1)$$

로 표현할 수 있으며, 여기서 C는 상수이고 오른쪽 항의 괄호 안은 Weber 수로서, 순수한 물질인 경우에는 거품 높이의 변화를 Weber 수의 함수로 표현할 수 있다는 것을 의미한다.

Table 1에 나타낸 물성치를 토대로 Weber 수를 구해서 거품 높이에 대해서 도식한 것이 Fig. 5이다. 이 그림으로부터 실험한 물질에 대해서는 한 직선으로 표현이 가능하다는 것을 알 수 있다.

3-1-2. 혼합물을 사용한 실험

실제 증류에서는 2성분계 이상의 혼합물이 분리되고 이때에 거품의 영향이 중요하기 때문에 일부 선정된 탄화수소 혼합물을 사용해서 거품 높이를 측정하였다. 사용한 혼합물은 헵탄-싸이클로헥산, 헵탄/톨루엔, 그리고 싸이클로헥산/톨루엔 혼합물 등이다.

Fig. 6에 각 혼합물에 대한 거품발생 높이를 기체유속 변화에 대해서 나타내었다. 헵탄/톨루엔 혼합물은 탑의 아래로 내려갈수록 표면장력이 증가하는 표면장력 정제로서 거품이 어느 정도 심하게 발생되는 것이 관찰되었다. 안정화 지수(stabilization index)[11]가 최대가

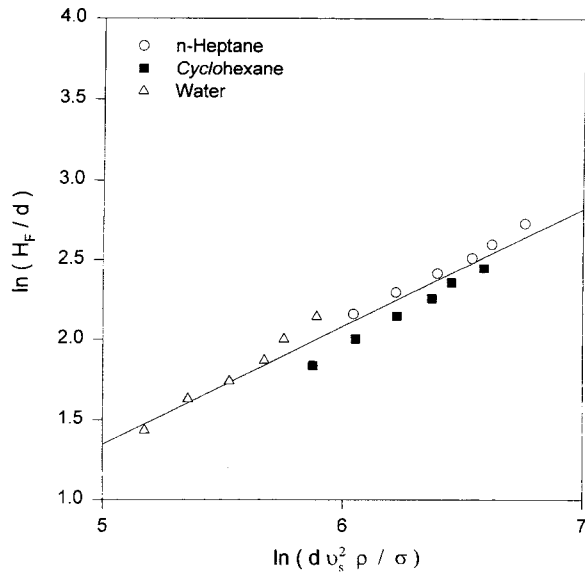


Fig. 5. Weber number vs foam height plot for pure compounds.

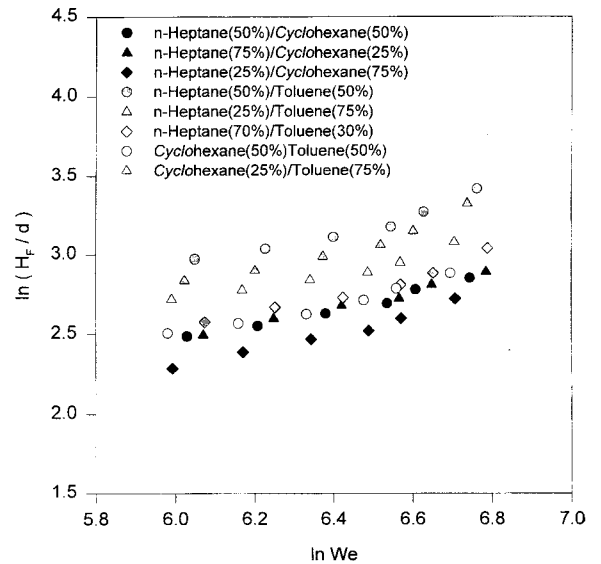


Fig. 7. Weber number plot for various mixtures.

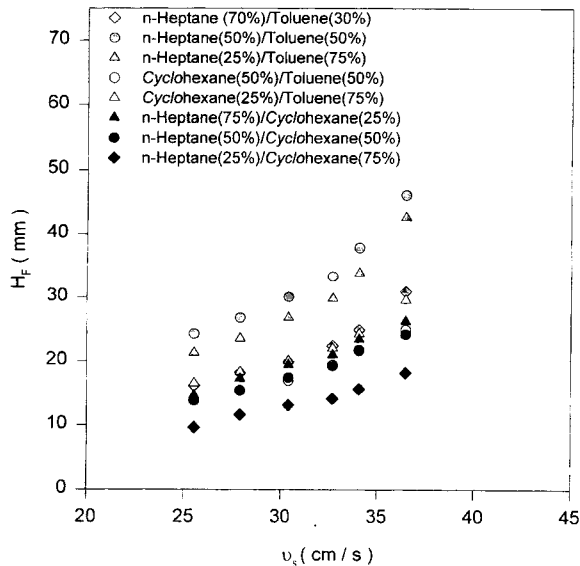


Fig. 6. Foam height for various hydrocarbon mixtures.

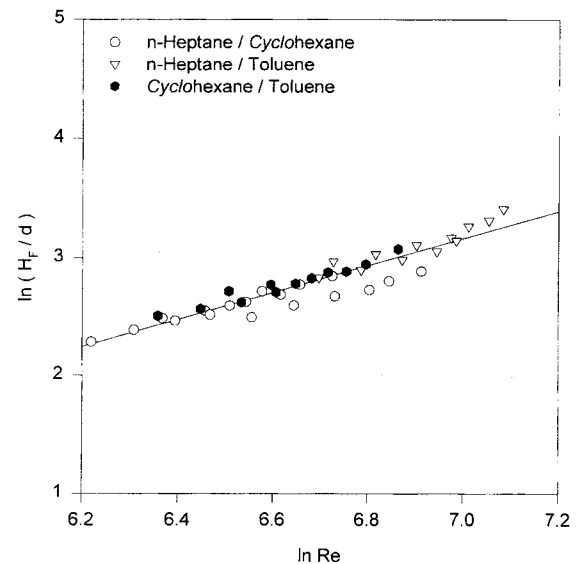


Fig. 8. Reynolds number vs foam height for various mixtures.

되는 두 혼합물의 농도가 비슷한 영역에서 거품발생 역시 최대가 되는 것을 볼 수 있다. 여기서 안정화지수는 표면장력 정계인 경우에 positiveness의 정도를 의미한다. 싸이클로hex산/톨루엔의 혼합물은 두 물질의 표면장력이 매우 비슷한 표면장력 중성계로서 표면장력 정계인 헵탄/톨루엔 혼합물에 비해서 발생하는 거품의 양이 적은 것을 볼 수 있다. 그리고 거품이 보다 많이 발생하는 톨루엔의 농도가 증가할수록 거품 높이도 증가하는 것이 관찰되었다. 표면장력 부계의 예로서 헵탄/싸이클로hex산 혼합물에 대해서는 표면장력 중성계와 같은 결과를 보여 주고 있는데 거품이 보다 많이 발생하는 헵탄의 농도가 증가하면 거품 높이가 증가하는 것이 관찰되었다.

혼합물의 경우에도 순수물질에서처럼 거품 높이를 Weber 수로 나타낼 수 있는지를 알아보기 위해서 각 혼합물에 대해서 Weber 수를 구해서 도시한 것이 Fig. 7이다. 이 그림에서와 같이 혼합물의 경우에는 한 직선으로 표현할 수 없다는 것을 보여주고 있다. 따라서 거품 높이에 영향을 미치는 다른 인자가 있다는 것을 알게 되었고 새

로운 물성으로 점도를 고려해서 해석하였다. 따라서 거품 높이와 영향을 미치는 인자들은 채단구멍의 직경, 기체의 유효속도(superficial velocity), 혼합물의 밀도, 표면장력, 그리고 점도 등이 있다.

점도를 첨가하여서 차원해석을 다시 해 보면 거품 높이는 (2) 식처럼 표현할 수 있다.

$$\frac{H_F}{d} = \alpha \left(\frac{v^2 d \rho}{\sigma} \right)^\alpha \left(\frac{d v \rho}{\mu} \right)^b \quad (2)$$

(2) 식에서 나타난 것처럼 거품 높이를 Weber 수와 Reynolds 수의 곱으로 표현할 수 있다. 그리고, α 는 임의의 상수로서 실험으로 결정해 주어야 할 값이다. Fig. 8은 Reynolds 수에 대한 거품 높이의 변화를 나타낸 것으로 Reynolds 수에 대해서는 각 혼합물을 하나의 직선으로 나타낼 수 있음을 알 수 있다. 따라서 Fig. 8의 기울기로부터 (2) 식에 지수 b를 결정하였으며 그 값은 0.115이다. 그리고 Fig. 7에서처럼 Weber 수에 대해서는 하나의 직선으로 표현이 되지 않기 때

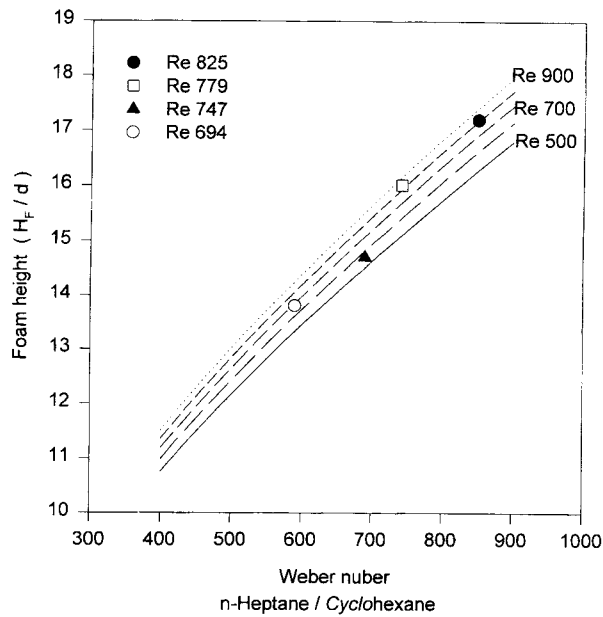


Fig. 9. Weber number correlation for hydrocarbon mixture.

문에 (2) 식에서 상수 α 를 모든 혼합물에 대해서 일정한 값으로 결정할 수 없고 각 혼합물에 대해서 그 값을 결정해야 한다. 또, Fig. 7에서 각 혼합물들의 절편은 다르지만 그 기울기는 거의 비슷한 값을 가지므로 이 기울기를 (2) 식의 지수 a 로 사용할 수 있으며 그 값은 0.55가 된다. 따라서 (2) 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{H_F}{d} = \alpha \left(\frac{v^2 d \rho}{\sigma} \right)^{0.55} \left(\frac{v d \rho}{\mu} \right)^{0.115} \quad (3)$$

(3) 식에서 상수 α 를 각 혼합물에 대해서 구해 보면 헥탄/싸이클로헥산 혼합물의 경우에는 0.195이며, 헥탄/톨루엔 혼합물은 0.31, 그리고 싸이클로헥산-톨루엔 혼합물은 0.21이 된다.

표면장력 정제인 헥탄/톨루엔 혼합물의 α 가 다른 혼합물에 비해서 크며 나머지 두 계는 비슷한 값을 갖는다. Fig. 9는 헥탄/싸이클로헥산 혼합물에 대해서 Reynolds 수를 매개변수로 사용해서 (3) 식을 도식한 것이다. 위 식을 이용할 때 필요한 혼합물의 표면장력은 각 순수물질의 표면장력에서 물분율을 곱해서 얻은 값들을 사용했다.

순수물질의 경우에도 Weber 수만으로 표현이 가능하기는 하나 점도가 거품의 성질에 영향을 미치기 때문에 [20] Reynolds 수에 대한 영향을 고려해야만 할 것이다.

3.2. 액체 흐름의 영향

증류조업 중에 환류비(reflux ratio)에 따라 탑안에서의 액체의 양이 변하게 된다. 이렇게 변화하는 액체의 유량이 탑안에서 발생하는 거품에 어떠한 영향을 미치는가를 알아보기 위해서 실험을 하였다. Fig. 10은 싸이클로헥산/톨루엔 혼합물에 대해서 실험 판으로 유입되어 오는 액체유속을 변화시켜서 측정한 거품 높이와 액체흐름이 없을 때에 실험한 결과를 비교한 것이다. 액체의 흐름이 있을 때 더 많은 거품이 발생하는 것을 볼 수 있고, 액체의 흐름이 증가함에 따라서 거품 높이도 증가하였다. 액체의 흐름이 없을 때에는 저장조의 높이를 조절해서 판내 액체 체류량(liquid hold-up)을 일정하게 유지시킬 수 있었지만 액체의 흐름이 존재하게 되면 액체 체류량을 일정하게 유지하기가 어려워진다. 하지만 실험동안에 그 변화량이 매우 적어서 액체 체류량의 변화에 의해서 거품 높이가 변했다고는 말하

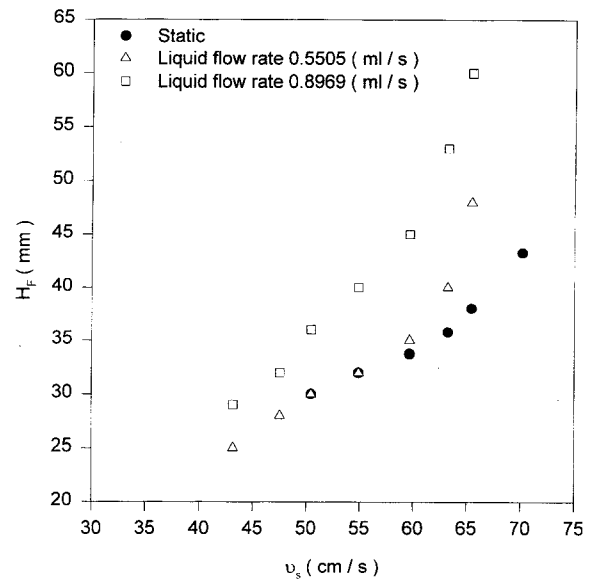


Fig. 10. Influence of liquid flow rate on foam height (Cyclohexane-Toluene mixture).

기 힘들며 액체와 기체가 서로 접촉되어지는 양이 증가되어서 거품의 발생이 많아진 것이라고 생각된다.

Fig. 10에서와 같이 기체 유속이 일정한 속도보다 크게 되면 거품 높이가 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있고, 액체의 유속이 증가함에 따라서 거품 높이 역시 증가함을 알 수 있다.

거품 높이증가 정도는 기체유속과 액체유속에 따라서 변하는 것을 알 수 있다. 따라서 두 변수의 곱으로 거품 높이를 표현할 수 있다. 그러나 기체유속과 액체유속의 log값과 거품 높이의 관계를 구해 보면 data들이 분산되어 있어서 하나의 직선으로 표현할 수 없다. 따라서 이와 같은 표현은 적합하지 않는다.

다음과 같이 기체유속의 제곱과 액체유속의 곱으로 표현하면

$$H_F \propto (v_s^2 Q_L) \quad (4)$$

이로 그 결과가 Fig. 11로 각 data들은 대략적으로 하나의 직선으로

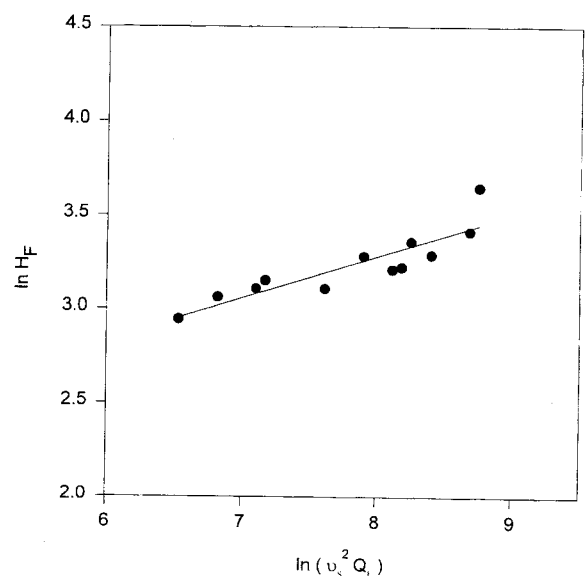


Fig. 11. Liquid flow rate correlations (Methanol/Water).

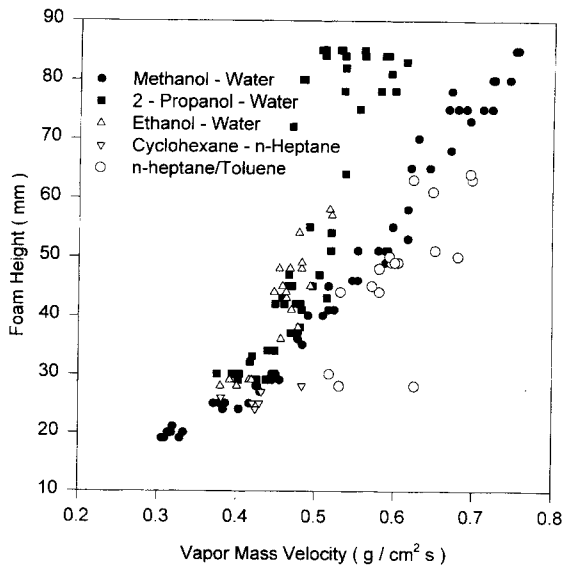


Fig. 12. Foam height graph for batch distillation.

표현될 수 있었다. 따라서 거품 높이를 기체유속의 제곱과 액체유속의 곱으로 표현할 수 있다.

3-3. 회분증류를 이용한 거품높이 측정

표면장력 정제인 헵탄/톨루엔 혼합물과 표면장력 부계인 헵탄/싸이클로헥산 혼합물에 대한 회분증류실험의 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 표면장력 부계인 헵탄/싸이클로헥산 혼합물인 경우에는 비교적 적은 기체유속에서 거품이 적게 발생하는 것을 볼 수 있다. 상승하는 기체의 유속이 증가하게 되면 거품이 깨져서 거품의 높이를 측정할 수 없었다. 그리고 표면장력 정제인 헵탄/톨루엔혼합물의 경우에는 기체의 유속이 적을 때에는 표면장력 부계와 비슷한 결과를 보이지만 기체유속이 상승하여도 거품이 깨지지 않고 안정화되어서 기체유속에 비례하여 거품높이가 증가한다는 것을 알 수 있었다. 그러나, 탄화수소 혼합물의 경우에는 발생하는 거품의 양이 매우 기복이 심해서 측정하는데 상당한 어려움이 따른다.

표면장력 차가 큰 알코올/물 혼합물을 사용해서 증류 실험 중에 발생하는 거품 높이를 측정하였다. 알코올/물 혼합물들의 경우에는 탄화수소 혼합물보다 발생하는 거품이 안정화되어서 거품 높이를 정확히 측정할 수 있었다. 실험에 사용한 혼합물들은 메탄올/물, 에탄올/물 그리고 2-프로판올/물로 Table 1에 각 물질의 물성을 나타내었다.

각 혼합물에 대해서 비교적 적은 기체유속에서는 거의 비슷한 정도에 거품이 발생하는 것을 볼 수 있다. 그러나 기체 유속이 증가하게 되면 거품이 발생하는 정도가 달라지게 된다. 즉, 메탄올이 가장 적게 발생되며 2-프로판올이 가장 심하게 발생된다. 이것은 Table 1에서 나타난 물성치를 비교해 보면 세 물질의 밀도는 거의 비슷하고, 2-프로판올의 표면장력이 가장 작은 값을 가지며, 점도는 가장 큰 값을 갖고 있다. 따라서 점도와 표면장력의 차이에 의해서 이러한 결과가 나왔다는 것을 알 수 있다.

회분증류를 이용한 실험의 결과는 거품 모사 실험을 실행하였을 때와 그 발생 양상은 매우 비슷하다는 것을 관찰할 수 있다. 그러나, 탄화수소의 경우 일정한 열량으로 가열을 하더라도 상승하는 기체의 유량이 매우 불안정하여서 거품높이가 매우 심하게 변하여 측정하기가 매우 어렵다. 따라서 회분증류 중에 실제로 판 안에서 상승하는 기체의 유속을 직접 측정할 것이 아니라 응축되는 액체의 유량을 측정하였기 때문에 액체흐름이 없는 상태에서 거품을 측정할 것의

값과 차이를 가지게 된다.

4. 결 론

증류조작 중에 발생하는 거품의 정보는 얻기가 매우 어렵기 때문에 모사실험을 통해서 거품에 대한 정보를 얻으려고 하는 것이며 이러한 실험을 통하여 얻은 data들이 실제 증류조작 중에서 발생하는 거품과 어느 정도 차이를 나타내는지를 알기 위해서 증류조건과 비슷하게 하기 위해서 조건이 다른 실험을 하였다. 이 결과 액체의 흐름으로 인해서 거품의 발생정도가 변하는 것을 볼 수 있었으며, 실제증류에서도 거품발생 정도가 혼합물의 특성에 따라서 모사실험과 비슷한 결과를 볼 수 있었다.

거품에 영향을 미치는 인자들을 알아보기 위해서 거품발생 모사 실험을 하였고, 액체흐름의 영향을 알아보기 위해서 액체를 순환시켜가면서 실험을 하였다. 그리고 회분증류를 하여서 발생하는 거품을 관측하였다.

(1) 거품발생 모사실험에서 발생하는 거품은 Weber 수와 Reynolds 수로 나타낼 수 있으며, 특히 탄화수소 혼합물의 경우에는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{H_f}{d} = \alpha \left(\frac{v_s^2 \rho}{\sigma} \right)^{0.55} \left(\frac{v_s d \rho}{\mu} \right)^{0.115}$$

실험상수 α 는 각 혼합물에 따라서 다른 값을 가지지만 표면장력 정제일 때는 3정도의 값을 가지며 표면장력 부계나 표면장력 중성계는 2정도의 값을 가지게 된다.

(2) 실험으로부터 액체의 유속이 증가하게 되면 거품 높이도 증가하는 것을 관찰하였다. 이러한 현상을 해석하기 위해서 거품을 기체 유속의 제곱과 액체유속과의 곱으로 나타내었다.

(3) 회분증류를 통해서 거품이 발생하는 정도를 관찰할 수 있었으나 기체유속을 정확하게 측정하기가 어려워서 그 결과를 거품발생 모사실험에서 얻은 값과 직접적인 비교가 어려웠고 거품이 증가하는 정도만을 알 수 있었다. 그러나 모사실험에서와 같이 표면장력 정제인 경우에는 거품이 안정화되어서 기체유속이 증가할 경우 많은 거품이 발생하는 것을 알 수 있었고 표면장력 부계인 경우에는 발생하는 거품의 양이 적다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 모사실험 등으로 혼합물에 대한 거품발생 정도를 알았을 경우에 그것을 실제 증류에 적용할 수 있다는 것을 알 수 있다.

감 사

본 연구는 현대중공업(주)가 지원하는 연구결과의 일부이며 지원에 감사드립니다.

사용기호

- A_H : plate hole area
- A_T : total plate area
- a : constant
- b : constant
- d : plate hole diameter
- H_f : foam height
- Q_L : liquid flow rate
- v_s : superficial velocity

R_e : Reynolds number

$$Re = \frac{dv_s \rho L}{\mu}$$

We : Weber number

$$We = \frac{v_s^2 d \rho L}{\sigma}$$

그리스 문자

α : experimental constant

μ : viscosity

ρ_L : liquid density

σ : surface tension

참고문헌

- Lockett, M.J.: "Distillation Tray Fundamentals", 1st ed., Cambridge University Press, Cambridge, pp. 44(1986).
- Ross, S.: *Chem. Eng. Prog.*, **63**(9), 41(1967).
- Zuiderweg, F.J. and Harmens, A.: *Chem. Eng. Sci.*, **9**, 89(1958).
- Ross, S. and Nishioka, G.J.: *J. Phys. Chem.*, **79**(15), 1561(1975).
- Bolles, W.L.: *Chem. Eng. Prog.*, **63**(9), 48(1967).
- Kister, H.Z.: "Distillation Operation", McGraw-Hill, New York, pp. 393(1990).
- Eckert, J.S.: *Chem. Eng. Prog.*, **61**(9), 89(1965).
- Glausser, W.E.: *Chem. Eng. Prog.*, **60**(10), 67(1964).
- Kister, H.Z., Pinczewski, W.V. and Fell, C.J.: *Ind. Eng. Chem. Res.*, **27**, 2331(1988).
- Cho, S.Y., Lee, Y.Y. and Kim, S.J.: *HWAHAK KONGHAK*, **34**, 407(1996).
- Calus, W.F. and Davise, J.E.: *AIChE J.*, **21**(3), 599(1975).
- Colwell, C.J.: *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, **20**(2), 298 (1981).
- Fair, J.R., Steinmeyer, D.E., Penney, W.R. and Crocker, B.B.: *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 6th ed., McGraw-Hill, New York, pp. 85(1984).
- Biddulph, M.W. and Thomas, C.P.: *AIChE J.*, **41**(4), 819(1995).
- Bennett, D.L., Kao, A.S. and Wong, L.W.: *AIChE J.*, **41**(9), 2067 (1995).
- Bainbridge, G.S. and Sawistowski, H.: *Chem. Eng. Sci.*, **19**, 992 (1964).
- Davies, B., Ali, Z. and Porter, K.E.: *AIChE J.*, **33**(1), 161(1987).
- Ronnie, J. and Evans, F.: *Brit. Chem. Eng.*, **7**, 498(1962).
- De Goederen, C.W.J.: *Chem. Eng. Sci.*, **20**, 1115(1965).
- Adamson, A.W.: "Physical Chemistry of Surface", 5th ed., John Wiley & Sons, pp. 544(1990).