

《報文》 HWAHAK KONGHAK Vol. 21, No. 2, April 1983, pp. 71-78
(Journal of the Korean Institute of Chemical Engineers)

充填塔에 관한 研究 : 物質傳達係數에 미치는 充填物の 길이의 影響

朱 東 豹

亞洲大學校 化學工學科

(1983년 2월 28일 접수)

Simulation of a Packed Column: Effect of Packing Material Length on Mass Transfer Coefficient

Dong-Pyo Ju

*Department of Chemical Engineering, College of Engineering,
Ajou University, Suwon 170, Korea*

(Received; February 28, 1983)

要 約

工業的인 充填塔 内の 流動現象을 再現하도록 考案된 小規模의 塔을 使用하여 acetone-ethylformate의 二成分系에 對한 蒸溜實驗을 함으로써 物質傳達係數에 미치는 원주형 充填物の 길이의 影響을 考察하였다. 實測된 總括物質傳達係數와 充填物の 길이 사이의 關係가 定量的인 式으로 導出되었으며 物質傳達에 對한 液相의 抵抗은 무시될 정도의 크기였고 物質傳達係數의 값이 充填物の 길이에 따라 달라져 가는 舉動은 penetration theory를 氣相에 適用함으로써 잘 說明되었다.

ABSTRACT

The effect of packing material length on mass transfer coefficient was studied for distillation experiments of binary system, acetone-ethylformate, in a 26 mm I.D. laboratory column designed to simulate the flow characteristics of an industrial packed column. Overall mass transfer coefficients were obtained from the experiments on 4 different types of packings and an empirical correlation was proposed between overall coefficient and packing size. The analysis of the experimental result showed that the resistance in liquid phase was negligible and that the variation of individual mass transfer coefficients owing to different packing size could be well explained by an application of penetration theory to gas phase.

I. 序 論

工業적으로 氣・液系의 分離에 널리 使用되고 있는 充填塔은 塔內의 流動現象이 복잡하고 物質傳達 表面積이 확실치 않음으로 인하여 解析에 많은 問題點이 있음은 周知의 사실이다. 充填塔의 性能을 表示하는 物質傳達係數에 영향을 미치는 要因은 여러가지가 있으나 지금까지의 研究結果를 종합해 볼때 物質傳達係數과 充填物의 길이 사이에는 反比例의 關係가 있는 것으로 보인다. 그러나 이러한 관계는 定性的인 것일뿐 이들 사이의 定量的인 關係에 對하여는 아직 밝혀진 바가 없다. 本 研究은 따라서 物質傳達係數에 미치는 充填物의 길이의 영향을 定量的으로 나타내어 보고자 시도되었다. 工業的 規模의 充填塔 內部的 流動形態에 관한 하나의 모델로서 充填物의 表面을 laminar flow 로 흐르던 液體가 充填物과 充填物사이의 接點에서 混合(mixing)된 뒤 다시 分散되는 現象의 반복을 가정할 때 充填物의 크기에 따라 物質傳達係數가 變한다는 事實은 바로 인접한 두 개의 mixing point 사이의 거리 또는 塔上部로 流入된 液體가 塔下部로 부터 流出될 때까지 경험하게 되는 mixing point 數가 重要な 역할을 한다는 것을 의미한다.

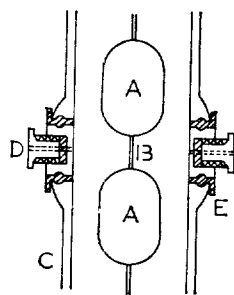
充填塔의 性能을 實驗室에서 研究하기 위하여는 여러가지의 model column 들이 使用되고 있다. Wetted-wall column 이나 小規模의 充填塔은 간단하기는 하나 塔內의 流動現象이 工業的인 充填塔의 그것과는 달라 부적당함이 일찍부터 알려져 있다. 이러한 결점을 보완하기 위하여 고안된 disc column¹⁾은 流動現象은 만족스럽게 再現하였으나 disc 表面으로의 液體의 分散이 不均一함이 지적되었다. 근래에 Danckwerts²⁾ 등은 sphere column 을 고안하고 그 實驗結果가 工業的인 充填塔에 직접 적용될 수도 있다고 보고하였으나 이들의 實驗은 化學反應이 일어나는 吸收操作에 局限되었다는 아쉬움이 있다. 本 研究에서는 充填塔의 流動現象을 再現하면서 mixing point 의 영향을 實測할 수 있는 特別한 形

態의 充填物을 使用한 model column 이 利用되었으며 증류에 관한 研究 data 가 不足한 실정을 감안하여 二成分系의 증류실험을 하였다.

II. 實驗裝置

model column 의 구조를 Fig. 1 에 나타내었다. 黃銅으로 제작된 充填物들은 中央部分은 圓柱形이나 양 끝을 직경이 14.8 mm 인 半球形으로 처리한 것으로 support wire 에 부착시킴으로서 充填物의 表面을 laminar flow 로 흘러 내리는 液體가 노출된 wire 部分을 지나는 동안 mixing 이 된 뒤 아래쪽 充填物 위로 흐르도록 하였다. 物質傳達係數에 미치는 mixing point 의 數 또는 充填物의 길이의 영향을 조사하기 위하여 4가지 길이의 充填物이 使用되었으며 support wire 에 부착시키는 充填物의 수효를 조절함으로써 形態에 관계없이 塔內의 物質傳達面積이 同一하도록 하였다. 네가지 充填物의 特性을 Table 1 에 수록하였다. 塔은 內徑이 26 mm 이고 높이가 200 mm 인 유리관 4개를 연결하여 使用하였고 연결부분 및 塔의 上下端에서 氣相 및 液相의 溫度와 組成을 測定하였다.

한편 유리관의 外部에 二重管을 설치하고 그 사이로 가열된 공기를 통과시킴으로서 塔으로부터의 熱損失을 최대한 억제하였다. 試料로서는



- A Packings
- B Support wire
- C Column wall
- D Sampling and temperature measuring device
- E Teflon joint

Fig. 1. Details of model column

Table 1. Characteristics of packings

Type	Length(mm)		Surface area (cm ²)	Number of packings used	Total transfer area* (cm ²)
	Total	Cylinder			
A	17.9	3.1	8.32	28	259.6
B	21.6	6.8	9.73	24	259.6
C	25.1	10.3	11.67	20	259.6
D	125.5	110.7	58.35	4	259.6

* This counts the exposed surface area of support wire which is the same for each type of packings. The geometry of packing permits the same surface area if the total height of packings in the column is identical.

acetone-ethylformate 의 二成分系가 선정되었는 바 이들은 증발잠열이 비슷하면서 bubble point 가 거의 一定한 外에 평형 data³⁾가 알려져 있어 本 實驗의 遂行에 適合하였다. 上記 二 成分의 混合液은 bubble point 까지 豫熱된 후 塔上部로 流入되어 充填物의 表面을 흘러 내리고 reboiler 에서 發生한 飽和蒸氣는 塔下部로 導入되어 塔內의 空間을 上昇하면서 下降하는 液體와 物質 交換을 하게 되는데 各相의 流量은 다음의 操作 條件下에서 매번 임의로 調停되었다.

$$15 < G < 80 \text{ moles/hr}$$

$$15 < L < 80 \text{ moles/hr}$$

$$0.2 < L/G < 4$$

또한 氣相과 液相의 溫度 및 組成은 設置된 thermocouple 및 gas chromatography 에 依하여 實測, 分析되었다.

Ⅲ. 物質傳達係數

1. 總括物質傳達係數

特定 操作條件下에서 實測된, 塔內의 다섯군 데의 相異한 位置에서의 二 相의 組成과 이에 따른 操作線 및 塔의 無次元높이에 對한 液相의 組成變化를 Fig. 2 에 例示하였다. 總括物質傳達係數 K_g 는

$$K_g = \frac{G}{a'(y^* - y)} \frac{dy}{dz}$$

로 計算되므로 편의상 塔의 높이를 20 個의 小區間으로 分할하고 各 小區間에 對하여 K_g 및 K_L 을 다음과 같이 計算하였다.

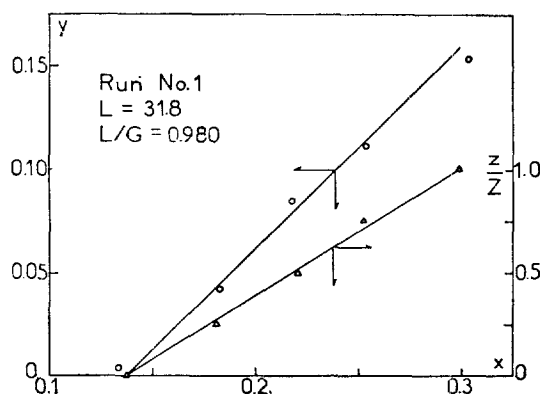


Fig. 2. Operating line and concentration profile in liquid phase (Type C packings)

$$K_g = \frac{G \Delta y}{a(y^* - y)} \quad (1)$$

$$K_L = \frac{L \Delta x}{a(x - x^*)} \quad (2)$$

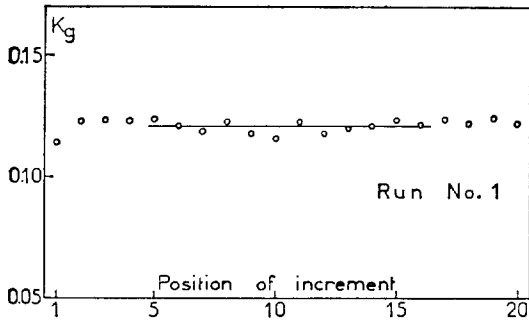
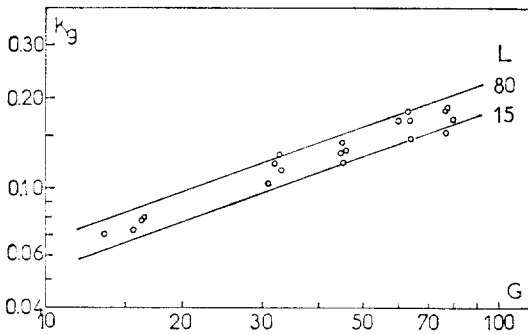
여기서 Δy , Δx 등은 各 小區間 內의 組成變化이며 y , x 등은 各 小區間의 組成의 平均値이다. Fig. 3 에 各 小區間에 對한 K_g 의 값을 圖示하였다. 한편 end effect 를 제거하기 爲하여 操作 條件에 對應하는 K_g 및 K_L 값은 20 個 小區間中 中央 12 個 小區間만의 平均値를 취하였다.

2. 流量의 影響

總括物質傳達係數 K_g 를 流量에 關하여 圖示한 Fig. 4 를 보면 蒸氣의 流量變化가 液體의 그것 보다 훨씬 더 K_g 에 影響이 큼을 알 수 있다.

$$K_g = bG^r L^s \quad (3)$$

로 가정하고 最小自乘法을 써서 指數 r 및 s 를

Fig. 3. Variation of K_g (Type C packings)Fig. 4. Effect of flow rates on K_g (Type C packings)

計算한 결과 다음의 값일때 가장 좋은 相關關係가 얻어졌다.

$$r = 0.53$$

$$s = 0.11$$

結果의 타당성을 나타내기 위하여 實驗에 使用한 네가지의 充填物에 對하여 $K_g/L^{0.11}$ 을 G 의 함수로 하여 Fig. 5에 圖示하였다.

3. 充填物의 길이의 영향

위의 結果로 부터 式(3)은 實驗에 使用된 네가지 充填物에 對하여 다음과 같이 表示되었다.

$$K_g = A \cdot 10^{-2} \left(\frac{G}{S_c} \right)^{0.53} \left(\frac{L}{P_w} \right)^{0.11} \quad (4)$$

즉 充填物의 길이 또는 mixing point 사이의 길이(l)의 變化에 依한 K_g 의 變化는 式(4)의 常數 A 의 變化로 나타내어질 수 있으며 實驗 data의 分析結 A 와 l 사이의 關係는

$$A = 6.506 - 0.133l + (1.65 \times 10^{-2})^{1/2}$$

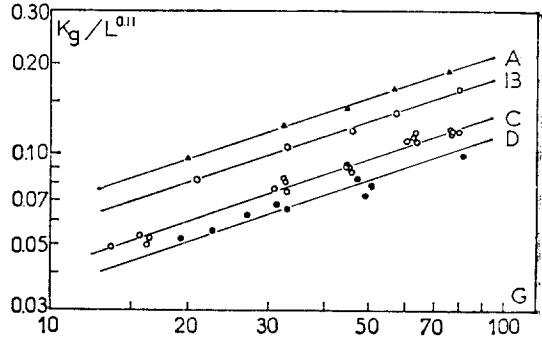
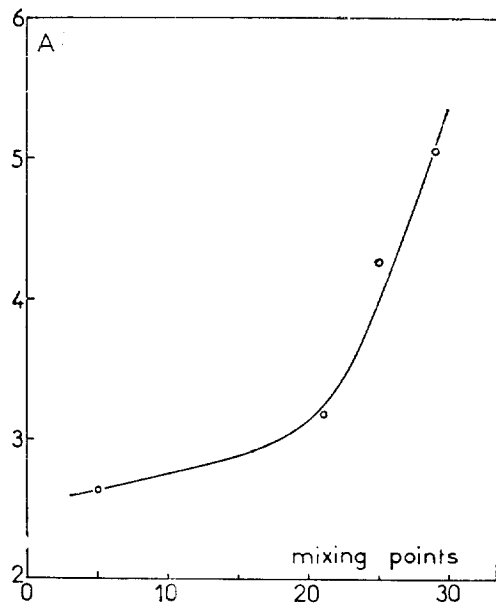


Fig. 5. Comparison of the values: experimental and calculated

$$- 0.83l + 10.41)^{1/2} \quad (5)$$

로 나타났다. 充填物의 길이가 짧아짐에 따라 증가된 K_g 의 變化를 常數 A 를 mixing point數에 對하여 Fig. 6에 圖示함으로써 나타내었다. Fig. 6을 보면 K_g 는 mixing point數가 많은 비교적 짧은 充填物의 경우는 길이에 거의 反比例하나 이들 사이의 直線的인 關係는 充填物의 길이가 길어짐에 따라 더 이상 成立치 않음을 알 수 있다.

Fig. 6. Variation of A as a function of number of mixing points

4. Film Coefficients

Film coefficient 와 流量사이의 關係는 一般的으로 다음과 같다. ^{4, 5, 6, 7)}

$$k_g = cG^n L^p$$

$$k_l = dL^q$$

따라서 總括物質傳達係數 K_g 는

$$\frac{1}{K_g} = \frac{1}{k_g} + \frac{m}{k_l} = \frac{1}{cG^n L^p} + \frac{m}{dL^q} \quad (6)$$

로 代置될 수 있다. 한편 系의 평형곡선이 實驗에 使用된 組成區間 內에서는 거의 直線이므로 ($m = \text{const}$) 液相의 流量이 一定할 경우 式 (6)의 右邊의 마지막 項은 常數가 된다. 이 경우 式 (6)을 G 에 對해 微分하면

$$-\frac{d(1/K_g)}{dG} = \frac{n}{cL^p} G^{-(n+1)} \quad (7)$$

이 되므로 式 (7)의 左邊을 G 에 對해 圖示하면 기울기가 切片으로부터 c, n 및 P 가 決定되어 k_g 와 流量사이의 關係가 確定된다. Fig. 7은 이 과정을 나타낸 것으로 G 形 充填物의 경우 k_g 는 다음과 같았다.

$$k_g = 1.125 \times 10^{-2} G^{0.528} L^{0.141} \quad (8)$$

그러나 Fig. 7 또는 式 (8)에 나타난 바와 같은 相對的으로 G 보다 작은 L 의 影響을 무시하

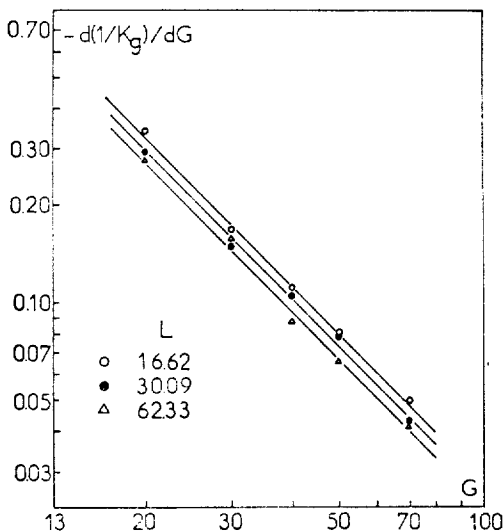


Fig. 7. Gas-phase mass transfer coefficient K_g

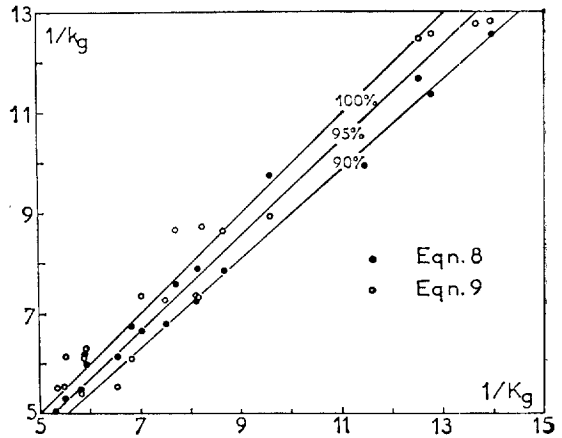


Fig. 8. Localization of transfer resistances

기로 한다면

$$k_g = 1.825 \times 10^{-2} G^{0.528} \quad (9)$$

도 可能하다. Fig. 8은 總括抵抗을 氣相內에서의 抵抗에 對해 比較한 것으로 本 實驗에 使用된 系의 경우 대략 95%가량의 抵抗이 氣相에 存在함을 알 수 있다.

IV. Penetration theory로 본 物質 傳達係數

物質傳達에 對한 저항이 대부분 氣相에만 존재하는 것으로 나타났으므로 物質傳達係數의 變化學動인 Fig. 6에 對한 理論的인 考察은 氣相의 流動現象으로부터 찾아져야 할 것이다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 充填物이 위치하는 部分의 空隙率은 0.67가량인 반면 wire 部分의 그것은 거의 1이므로 上昇하는 蒸氣는 wire 部分에서 mixing이 된다. mixing point의 影響은 Fig. 6에 이미 나타내었으며 氣相으로의 物質傳達에 關하여 다음과 같은 理論的인 考察이 可能하다. 氣液 接觸面으로부터 氣相쪽으로 얇은 laminar gas film이 형성되고 계속하여 組成이 一定한 turbulent zone이 존재한다. 만일 두 mixing point 사이를 지나는 蒸氣의 residence time이 充分히 못하다면 液相으로부터 氣相으로

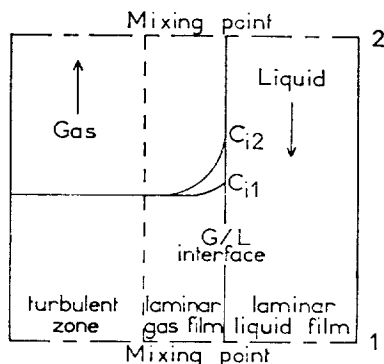


Fig. 9. Contact of gas/liquid between two mixing points

傳達되는 物質은 turbulent zone 까지 침투되기 이전에 蒸氣가 混合되고 말것이며 物質傳達係數는 Penetration theory 를 적용하여 계산될 수 있을 것이다. 두 mixing point (添數 1 및 2) 사이에 형성될 수 있는 組成의 profile 을 Fig. 9 에 나타내었다. 反面에 mixing point 사이의 길이가 相對적으로 긴 充填物의 경우는 物質의 침투는 蒸氣가 混合되기 前에 이미 turbulent zone 까지 도달할 것이므로 이때의 物質傳達係數는 前者의 경우보다는 감소하리라는 것을 豫測 할 수 있다. laminar gas film 內의 組成은 따라서 氣·液 境界面으로부터의 거리 및 氣液의 접촉시간의 函數가 되는데 物質의 氣相으로의 침투길이 (penetration length)가 充填物의 半徑에 비하여 무시될 수 있는 경우라면 直交座標軸을 써서 微分方程式을 풀 수가 있고 이때의 物質傳達係數는 다음과 같이 表示된다.

$$k_g = 2 \frac{\rho}{M} \left(\frac{\gamma}{\pi t} \right)^{0.5} \quad (10)$$

實測된 K_g 로부터 95%의 抵抗이 氣相에 存在하는 것으로 하여 計算한 k_g 와 式 (10)을 써서 計算한 k_g 를 Fig. 10에 比較하였다. 實測值의 경우 접촉시간 t 는 두流體의 相對速度를 취하여 計算하였으며 이 경우 液體의 下降速度는 tracer를 使用하여 測定하였다. Fig. 10의 結果를 보면

—充填物의 길이가 比較的 짧은 A 및 B 形의 경우는 實測值과 理論值가 一致된다.

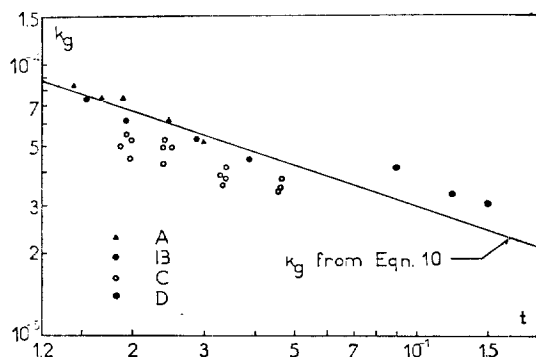


Fig. 10. Comparison of experimental K_g with that from the penetration theory

—mixing point 사이의 길이가 25.1 mm 인 C 形의 경우는 實測值가 理論值보다 작으나 이는 氣·液접촉시간이 보다 길어짐에 따라 야기되는 penetration 및 film의 混合 regime에 依한 現象으로 說明될 수 있다.

—길이가 125.5 mm 인 D 形의 경우 理論值보다 큰 實測值가 얻어졌는 바 이는 實驗中 目擊한 不安定한 液體表面 및 ripple의 生成이 傳達面積의 증가를 가져와 相對적으로 큰 k_g 값이 測定되었던 것으로 推定된다.

V. 結 論

네가지의 充填物을 model column에 장치하고 acetone-ethylformate系에 對하여 증류실험을 하여 物質傳達係數를 測定한 결과 다음의 결론을 얻었다.

1. 本 二成分系의 경우 物質傳達에 對한 液相의 抵抗은 무시할 만하다.

2. 物質傳達係數와 充填物의 크기 사이의 定量的인 關係가 本 裝置의 경우 式 (4) 및 (5)로 導出되었다.

3. 充填物의 길이에 따른 物質傳達係數의 變化를 推定하기 위하여 penetration theory의 적용을 시도하였으며 實驗值와 理論值가 잘 符合하였다.

감 사

이 논문은 1981 년도 문교부 연구비 지원에 의하여 수행되었음을 알려드리고 감사의 뜻을 표합니다.

Nomenclature

- A Constant in Eqn. (4) and (5)
 A, B, C, D Four different type of packings (cf. Table 1)
 a' Specific surface area of packings (cm^2/cm)
 a Transfer area in each section of the column (12.98 cm^2)
 b, c, d Constants
 D Diffusivity (cm^2/s) ; 5.225×10^{-2} in Eqn. (10)
 G Vapor flow rate (moles/h)
 K_g Overall gas mass transfer coefficient (moles/ cm^2h)
 k_g Gas-phase mass transfer coefficient (moles/ cm^2h or moles/ $\text{cm}^2 \text{ s}$ in Eqn. (10))
 K_L Overall liquid mass transfer coefficient (moles/ cm^2h)
 k_L Liquid-phase mass transfer coefficient (moles/ cm^2h)
 L Liquid flow rate (moles/h)
 l Distance between two adjacent mixing point (mm)
 M Molecular weight (g/mole)

- m Slope of the equilibrium curve
 n, p, q, r, s Indices
 P_w Wetted perimeter (cm)
 S Cross-sectional area of column (cm^2)
 t Time (s)
 x, y Mole fractions of ethylformate in liquid- and vapor-phase respectively
 z Height (cm)
 z/Z Dimensionless height
 In Fig. 2, 1.0 denotes the top and 0, the bottom of the column

Greek Letters

- ϵ Void fraction
 ρ Density (g/cm^3)

REFERENCES

1. E.J. Stephens and G.A. Morris, Chem. Eng. Prog., 47(1951), 232.
2. E. Alper and P.V. Danckwerts, Chem. Eng. Sci., 30(1975), 599.
3. S.V. Bablich, V.A. Minaeva, T.M. Kushner and L.A. Serafimov, Zhur. Prikl. Khim., 44(1971), 1827.
4. A. Honorat and O.C. Sandall, Chem. Eng. Sci., 33(1978), 635.
5. L. Steiner, H.P. Barendreght and S. Hartland, Chem. Eng. Sci., 33(1978), 255.
6. K. Onda, H. Takeuchi and Y. Okumoto, J. of Chem. Eng. (Japan), 1(1968), 56.
7. R. Kafesjian and C.A. Planck, A.I. Ch. E. J., 7(1961), 463.