

망사 충전 고정층 반응기의 특성 —농도 분포—

김봉현* · 박권필 · 임종성 · 전해수

고려대학교 화학공학과

*한국원자력안전기술원

(1991년 10월 16일 접수, 1992년 1월 20일 채택)

Characteristics of a Screen-Packed Fixed Bed — Concentration Distribution —

Bong-Hyun Kim*, Gwun-Pil Park, Jong-Sung Lim and Hai-Soo Chun

Department of Chemical Engineering, Korea University

*Korea Institute of Nuclear Safety

(Received 16 October 1991; accepted 20 January 1992)

요 약

망사 충전물을 삽입한 촉매고정층 반응기에서 농도분포에 대하여 연구하였다. 에탄올 탈수 반응이 일어나는 활성알루미나 입자고정층 및 망사 충전물을 삽입한 고정층을 설치하여 유속분포가 다른 조건하에서 농도분포를 측정하였다. 기벽 인접 영역에서의 공극율의 불균일로 인해 유체유속분포와 농도분포가 불균일하지만 고정층에 망사 충전물을 삽입함으로써 농도분포를 균일하게 할 수 있었다. 공극율 및 망사 충전물의 삽입효과를 고려한 고정층 내 운동량 및 물질전달 지배방정식의 수치해로 구한 에탄올 출구농도는 에탄올 검류관으로 측정한 실험치와 비슷한 값을 보였다.

Abstract—The concentration distribution in a catalytic packed bed with packing was studied. The resistance to flow in the bed, packed with activated alumina particles to catalyze ethanol dehydration reaction, varied by inserting screen-packing and different size particle section. It was found that the velocity- and concentration-profiles were non-uniform due to the variation of void fraction near the wall. The effect of inserting the screen-packing in the bed enabled velocity- and concentration-profiles to be uniformly distributed over the bed. The governing equations for momentum- and mass-transport in the fixed bed and the fixed bed containing a screen-packing were numerically solved to demonstrate the effects of the void fraction and the screen-packing inserted in the bed. Effluent ethanol concentrations, measured by ethanol detector tube, were found to be varied with radial position in a manner consistent with the modeling equations.

1. 서 론

고정층은 촉매 반응기, 흡착여과기, 이온교환막, 열 교환기 등에 많이 이용되고 있으나 층 내부 유체흐름의

불균일성(channeling, wall effect), 큰 압력강하 등이 문제점으로 남아 있다. 특히 고정층 반응기의 경우 소요전화를 또는 소요체류시간을 충족시키려면 고정층고가 높아져야 하는데 이에 따라 큰 압력강하가 따를 뿐만

아니라 통과유체의 불균일 흐름이 나타나 반응기 성능을 저하시킨다.

그래서 고정층 내 재분배판을 설치하여 균일 유체흐름을 피하거나 여러 형태의 충전물을 삽입하여 유체흐름 상태를 개선하고 압력강하를 감소시킨다.

유동층 또는 기포탑에 양끝 개방형 망사 충전물을 삽입하게 되면 channeling이나 slugging 현상이 제거되고 또 큰 기포를 작은 기포로 분산시켜 접촉면적이 증진되는 효과를 얻는다[1-3]. 균일입자로 된 고정층 내 유속분포를 보면 기벽효과 및 공극율 변이[4-6]로 인하여 유체유속이 난류범위라 해도 그 유속분포는 균일치 못하다[7]. 그런데 고정층 내 망사 충전물을 삽입하게 되면 층 내 유속분포는 보다 균일하게 된다[8]. 이러한 결과로 보아 높은 고정층고가 요구될 경우 층 내 망사 충전물을 삽입하게 되면 재분배판 또는 다단 고정층의 효과를 얻을 수 있게 될 뿐만 아니라 유체흐름도 비교적 균일하게 유지시켜 반응기 성능이 향상되고 열전달도 촉진되리라 본다. 고정층 반응기에서 유체유속분포와 반응기 성능과의 관계에 대한 현재까지의 연구결과를 살펴보면, 균일화성알루미나 충전 고정층 반응기에서 n-butene의 이성화 반응을 이용하여 층 내의 농도분포와 유속분포가 큰 연관이 있음을 보고[9]된 바는 있지만, 유체흐름을 균일하게 하는 충전물을 고정층 반응기 내 삽입시켜 유체흐름과 반응기 성능과의 관계를 검토한 연구는 보고된 바 없다. 본 연구는 촉매 충전 고정층 반응기에서 층 내 기벽 인접 영역의 공극율 분포와 유체흐름 분포가 농도분포에 미치는 영향을 검토하고, 반응기 내 망사 충전물을 삽입시켜 망사 충전물이 반응기 성능에 미치는 영향을 규명하고자 한다. 이를 위해 균일 유리구입자 고정층 및 환형망사 충전물을 삽입한 고정층에서 국소유속을 전보[10]에서 측정하였으며, 이와 유사한(같은 고정층에 유체의 접근유속은 같으나 고정층의 온도가 다름) 유속분포 조건하에서 에탄올 탈수 반응이 일어나는 활성알루미나 충전 고정층 반응기 및 환형망사 충전물을 삽입한 고정층 반응기를 설치하여 층 윗 표면에서 통과유체의 국소농도를 측정하였다.

2. 이 론

실제 촉매 반응기에서 촉매 내 온도나 농도 구배 및 외부 경막에서의 저항을 무시하고, 반응이 등온에서 진행된다면 미분소에서의 물질수지식 (1)이 성립된다.

$$\varepsilon \frac{\partial \rho_A'}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{n}_A = (1 - \varepsilon) r_A' \quad (1)$$

정상상태라 가정하고 Fick's first law와 연속방정식을

(1)식에 대입하고 다음 항들을 이용하여 원통좌표에서 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \partial \rho' v_r' &= G_r', \quad \varepsilon \rho' v_z' = G_z', \quad y_A' = \rho_A' / \rho' \\ G_r' \frac{\partial y_A'}{\partial r'} + G_z' \frac{\partial y_A'}{\partial z'} &= \frac{D_r}{r'} \frac{\partial}{\partial r'} \left(\varepsilon r' \rho' \frac{\partial y_A'}{\partial r'} \right) \\ &+ \varepsilon \rho' \frac{\partial y_A'}{\partial r'} \frac{\partial D_r}{\partial r'} + D_z \frac{\partial}{\partial z'} \left(\varepsilon \rho' \frac{\partial y_A'}{\partial z'} \right) + \varepsilon \rho' \frac{\partial y_A'}{\partial z'} \frac{\partial D_z}{\partial z'} \\ &+ (1 - \varepsilon) r_A' \end{aligned} \quad (2)$$

그리고 다음과 같은 무차원 매개변수를 도입하고 ($G_o' y_{Af}' / R$)로 나누면 (2)식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} G_r &= G_r' / G_o', \quad G_z = G_z' / G_o', \quad y_A = y_A' / y_{Af}' \\ \rho &= \rho' / \rho_f', \quad r = r' / R, \quad z = z' / L, \quad r_A = r_A' / r_{Af}' \\ a &= R / L \\ G_r \frac{\partial y_A}{\partial r} + a G_z \frac{\partial y_A}{\partial z} &= \frac{D_r \cdot \rho_f'}{G_o' \cdot R} \cdot \frac{\rho}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \varepsilon \frac{\partial y_A}{\partial r} \right) \\ &+ \varepsilon \frac{\partial y_A}{\partial r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{D_r \cdot \rho_f'}{G_o' \cdot R} \right) + \frac{D_z \cdot \rho_f'}{G_o' \cdot L} a \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon \frac{\partial y_A}{\partial z} \right) \\ &+ a \varepsilon \frac{\partial y_A}{\partial r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{D_z \cdot \rho_f'}{G_o' \cdot L} \right) + \frac{(1 - \varepsilon) r_{Af}' L}{G_o' \cdot y_{Af}'} a r_A \end{aligned} \quad (3)$$

등은 과정에서 비가역 1차반응[11-13]이 일어나면 $r_A = -y_A$ 라 할 수 있고, $G_o' = G_{o\alpha}' \varepsilon_{av}$ 라하면 (3)식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} G_r \frac{\partial y_A}{\partial r} + a G_z \frac{\partial y_A}{\partial z} &= \frac{1}{P_{\sigma}} \frac{1}{\varepsilon_{av}} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\varepsilon r \frac{\partial y_A}{\partial r} \right) \\ &+ \frac{a}{P_{\sigma}} \frac{1}{\varepsilon_{av}} \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon \frac{\partial y_A}{\partial z} \right) - \varepsilon \frac{\partial y_A}{\partial r} \frac{1}{\varepsilon_{av}} \frac{1}{(P_{\sigma})^2} \frac{\partial P_{\sigma}}{\partial r} \\ &- a \varepsilon \frac{\partial y_A}{\partial z} \frac{1}{\varepsilon_{av}} \frac{1}{(P_{\sigma})^2} \frac{\partial P_{\sigma}}{\partial z} - D_a (1 - \varepsilon) y_A \end{aligned} \quad (4)$$

그리고 본 실험조건에서 적용될 경계조건은 다음과 같다.

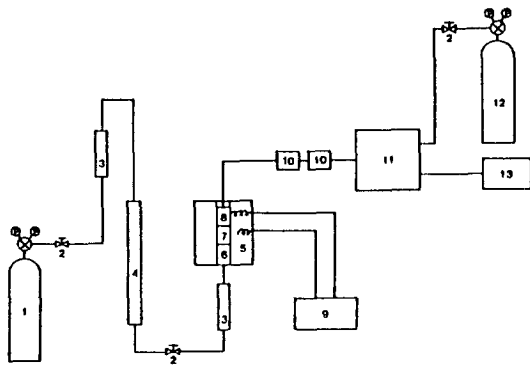
$$r=0 \text{에서 } \frac{\partial y_A}{\partial r} = 0 \quad (5a)$$

$$r=1 \text{에서 } \frac{\partial y_A}{\partial r} = 0 \quad (5b)$$

$$z=0 \text{에서 } G_o(y_A - 1) = \frac{1}{P_{\sigma}} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{av}} \frac{\partial y_A}{\partial z} \quad (6a)$$

$$z=1 \text{에서 } \frac{\partial y_A}{\partial r} = 0 \quad (6b)$$

(5), (6)식의 경계조건과 (4)식에 전보[10]에서 구한 각 영역의 공극율 관계식을 대입한다. 그 결과와 전보



- | | |
|----------------------|---------------------------|
| 1. Nitrogen cylinder | 8. Reaction zone |
| 2. Valve | 9. Temperature controller |
| 3. Rotameter | 10. Gas trap |
| 4. Ethanol feed tank | 11. Gas chromatograph |
| 5. Electric furnace | 12. Helium cylinder |
| 6. Flow straightener | 13. Recorder |
| 7. Preheating zone | |

Fig. 1. Schematic diagram of the micro-reactor experimental apparatus.

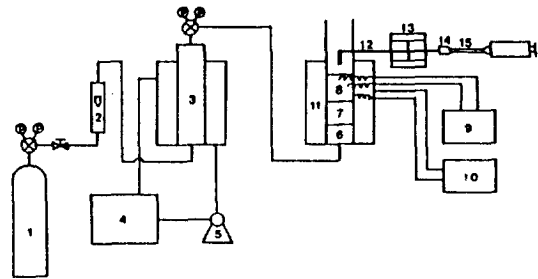
[10]에서 구한 각 지점의 interstitial velocity를 연결하여 수치해법(전보 참조)으로 층 내부의 농도 분포를 구한다.

3. 실험

촉매 충전 고정층 반응기에서 기벽 인접 영역의 공극율 분포와 유체유속분포가 농도분포에 미치는 영향을 검토하고, 반응기에 망사 충전물을 삽입하여 그 반응기성능에 미치는 영향을 규명하기 위해, 균일 유리구 입자 고정층 및 환형망사 충전물을 삽입한 고정층을 설치하여 층 윗 표면에서 국소유속을 측정하고 이론식의 수치해와 비교 검토하여 고정층에서 유체유속분포의 특성을 전보에서 비교 분석한 바 있고, 이와 유사한 유체유속분포 조건 하에서 에탄올 탈수반응이 일어나는 활성 알루미늄 충전 고정층 반응기 및 환형망사 충전물을 삽입한 고정층 반응기에 에탄올을 7% 함유한 유체를 급송하여 층 윗 표면에서 통과유체의 국소 농도를 측정하여 농도분포 특성을 비교 분석했다.

3-1. 소형 반응기에서의 실험

소형 반응기는 본 실험에 사용될 활성알루미늄 촉매(평균 직경 0.507 mm, 표면적 30 m²/g)의 활성화 단계에 이르는 시간 및 전화를 얻어 실제 실험조건을 결정하고, 본 실험조건(309°C, 0.2 m/sec)에서 비가역 표면 일차반응으로 알려져 있는 에탄올 탈수 공정[11-13]의



- | | |
|---|----------------------------------|
| 1. Nitrogen cylinder (carrier gas) | 8. Reaction zone |
| 2. Rotameter | 9. Thermometer |
| 3. Ethanol evaporator | 10. Temperature controller |
| 4. Water bath with temperature controller | 11. Electric furnace |
| 5. Pump | 12. Pitot tube |
| 6. Flow straightener | 13. Pitot tube holder & traverse |
| 7. Preheating zone | 14. Septum |
| | 15. Gas detector |

Fig. 2. Schematic diagram of the macro-reactor experimental apparatus.

반응속도 상수를 구하기 위한 것으로 그 흐름도는 Fig. 1과 같다. 반응기는 두께 0.089 cm, 외경 0.635 cm인 stainless steel관에 하단에서 8 cm까지 유리구를 채워 예열부(preheating zone)로 하고, 그 위 12 cm를 반응부(reaction zone)로 구성했다. 반응부에 활성알루미늄 1.9 g을 채우고, 반응기를 전기로 안에서 500°C에서 2시간 정도 가열하여 활성알루미늄 촉매에 함유된 수분을 제거한 후 반응기의 온도를 309±1°C로 일정하게 유지시켰다. 질소 cylinder로부터 공급되는 질소 기체를 이용하여 원료 저장조 내의 에탄올을 압축시켜 0.3 cc/min의 유량으로 반응기에 에탄올(liquid)을 급송하고, 반응기로부터 유출되는 생성물 기체를 응축기를 통과시켜 응축된 에탄올과 물의 함량을 20분마다 gas chromatography로 분석하여 에틸렌 생성에 소모된 에탄올의 양을 구했다. 이 분석 결과로부터 전화를 산출함으로써 본 실험에 사용된 활성알루미늄 촉매의 활성화 단계에 이르는 시간 및 등은 반응속도 상수를 구해 실제 촉매 반응기에서의 조작 조건을 결정했다.

3-2. 실제 촉매 충전 고정층 반응기에서의 실험

등온 과정에서의 반응기 성능을 검토하기 위한 실험의 개략도는 Fig. 2와 같다. 촉매 충전탑은 내경이 6 cm, 두께가 0.2 cm인 stainless steel관으로 제작하였으며, 이 탑은 흐름 조정부(flow straightener), 예열부와 반응부로 구성되어 각 부의 연결은 stainless steel 플랜지(두께 : 1 cm)를 이용하였고, 플랜지와 플랜지 사이에는 석면 o-ring을 사용하였다. 촉매 충전부에 유입되는 에

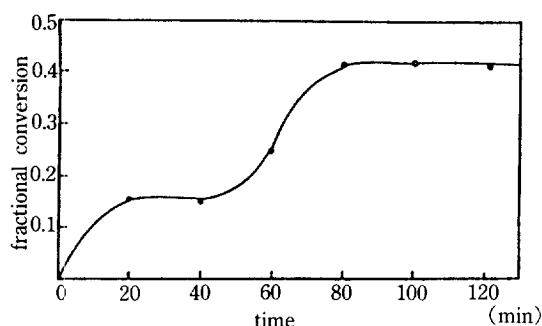


Fig. 3. Study of catalytic activity at 309°C.

탄올 증기의 흐름이 반경 방향의 거리에 따라 균일하도록 흐름 조정부에 직경 1 mm인 유리구를 채우고 예열부에는 유리솜을 균일하게 채웠다. 충전부 하부에는 24 mesh 망사를 플랜지로 고정시켜 충전물을 지지했으며, 상부에는 충전물의 유동화를 방지하기 위해 100 mesh 망사를 플랜지에 고정시켰다. 층 윗표면에서 1.5 cm 높이에 피토판 형 흡입관을 설치하였고, 반응부 벽면에는 4개의 열전대(bare thermocouple, T type)를 삽입하여 온도를 측정하였다.

반응부에 구형 활성알루미나(평균 직경 : 4 mm, 2 mm)를 채우고, 활성알루미나 촉매에 함유된 수분을 제거한 후 반응기 온도를 $309 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지시켰다. 그리고 일정 온도(28°C)로 유지된 에탄올 증발기에 질소 기체를 통과시켜 에탄올을 7% 함유한 유체를 0.2 m/s의 속도로 촉매 반응기에 공급했다. 피토판에 septum을 설치하고 이 septum에 에탄올 검류관(Bukcheuk Co., Japan)을 부착하여 가스 채취 펌프로 일정량의 통과유체를 흡입하여 그 통과유체의 농도를 측정하였다. Traverse를 이용해 피토판을 반응기 윗표면으로부터 1.5 cm 높이에서 3 mm씩 이동시키며 국소농도를 측정하였다.

한편, 반응이 일어나지 않은 상태에서 즉 촉매 충전 고정층을 가열하지 않고 7%의 에탄올을 함유한 기체를 반응기로 유입시켜 층 윗표면에서 통과 유체 중 에탄올의 국소 농도를 측정하여 반경 방향의 농도 분포를 구한 결과 균일한 에탄올 농도 분포(7%)가 됨을 확인하였다.

전보의 Fig. 4B, C와 같이 반응부에 활성알루미나 입자 크기 분포(중심부와 환형부)를 변화시키거나, 전보의 Fig. 3과 같은 환형망사 충전물을 삽입하여 위와 같이 반복 실험했다.

4. 결과 및 고찰

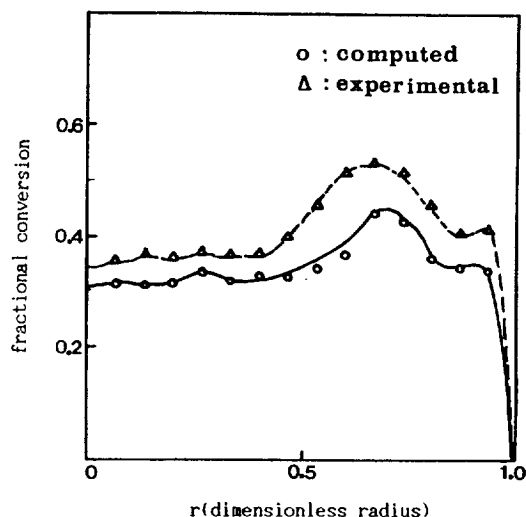


Fig. 4. Comparison of computed and experimental radial conversion profiles on the surface of the bed [uniform activated alumina packed bed ($D_p = 4$ mm, $L = 10$ cm)].

4-1. 활성알루미나의 활성도 및 반응속도 상수

에탄올 탈수반응($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} \rightarrow \text{C}_2\text{H}_4 + \text{H}_2\text{O}$)의 시간에 따른 전화를 변화는 Fig. 3과 같다. 그림에서 보여주듯이 본 실험의 에탄올 탈수 공정에 사용된 활성알루미나의 활성도는 최소 1시간 20분에서 2시간 사이에는 변하지 않음을 알 수 있고, 실험결과 반응속도 상수는 309°C 에서 216.2 cc/min·cc of catalyst이다.

4-2. 촉매 충전 고정층 반응기 내 농도분포

반응부에 활성알루미나 촉매만 충전한 경우, 층 윗표면에서 반경 방향의 농도 분포는 Fig. 4와 같다. 이 경우 전보에 게재한 반경 방향의 유속 분포(309°C 에서 열선유속계로 유속을 측정하기 곤란해 전보의 유속분포와 유사한 유속분포를 갖는다고 가정함)와 비교 검토해 보면, 최대 국소속도는 벽면에서 입자직경의 1-1.5 배 만큼 떨어진 영역에서 나타났고, 최저속도는 입자 직경의 2-3배 만큼 떨어진 영역에서 나타났다(전보). 최저속도가 나타난 영역에서 전화율은 최대값을 보였고, 최대속도 영역에서는 이보다 훨씬 낮은 전화율을 보였다. 층 중앙 부근에서 전화율은 비교적 균일한 분포를 보이고 있다. 이는 농도분포가 유체의 편류 현상에 크게 영향을 받으며, 벽면에서 입자 직경의 2-3배 만큼 떨어진 영역에서 유체의 체류 시간이 길어져 유체와 촉매와의 반응 시간이 길어짐으로써 다른 영역보다 비교적 높은

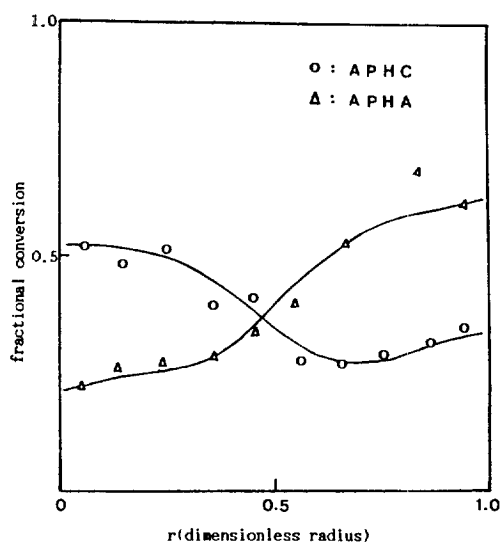


Fig. 5. Comparison of experimental radial concentration profiles on the surface of the bed in the case of APHC and APHA.

APAC=activated alumina packed bed with a high resistance central core(annulus : $D_p=4$ mm, center : $D_p=2$ mm)

APHA=activated alumina packed bed with a high resistance annulus(annulus : $D_p=2$ mm, center : $D_p=4$ mm)

전화를 분포를 보인다고 생각된다. 그리고 층 중앙 부근에서 일어나는 흐름 분포의 감쇄 진동이 농도 분포에 미치는 영향은 적음을 알 수 있다. Fig.4에서 보는 바와 같이 본 연구에 적용한 물질 수지식을 수치 해법으로 풀 수치해와 실측치가 5-7%의 차이는 있지만 비슷한 경향을 보여주고 있다. 수치해와 실측치와의 오차의 원인은 촉매고정층을 등온상태의 pseudo-homogeneous medium이라 가정하여 물질수지식을 세웠기 때문이다. 본 촉매반응은 발열반응이어서 온도조절기로 반응기 온도를 일정온도로 가열하였지만 반응기 내의 각 지점간에 약간의 온도차($1-3^{\circ}\text{C}$)가 있었다.

그리고 층 내 유체 흐름이 물질전달에 미치는 영향을 검토하기 위해 전보의 Fig.4B, C와 같이 환형부와 중심부에 크기가 다른 활성알루미나 입자를 충전시켜 실험한 결과는 Fig.5와 같다. 이 경우의 유속 분포[10]와 비교 검토해 보면 유체 흐름 저항이 작은 부분이 큰 부분보다 유속은 아주 크지만 전화율은 낮아짐을 보인다. 이는 반응기 입구에서 유체 흐름의 재분배가 일어나 공극율이 큰 영역 즉 유체 흐름 저항이 적은 영역으로 유체 흐름량이 많아져 그 부분은 공극율이 작은 부분

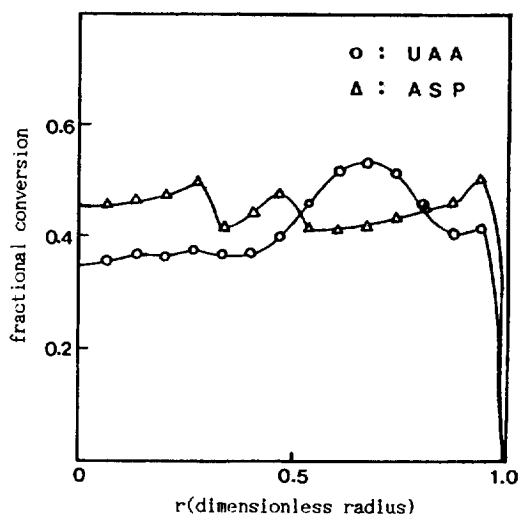


Fig. 6. Comparison of experimental radial concentration profiles on the surface of the bed in the case of UAA and ASP.

UAA=uniform activated alumina packed bed($D_p=4$ mm, $L=10$ cm)

ASP=annular screen packing packed in the center of the bed($D_p=4$ mm, $L=10$ cm)

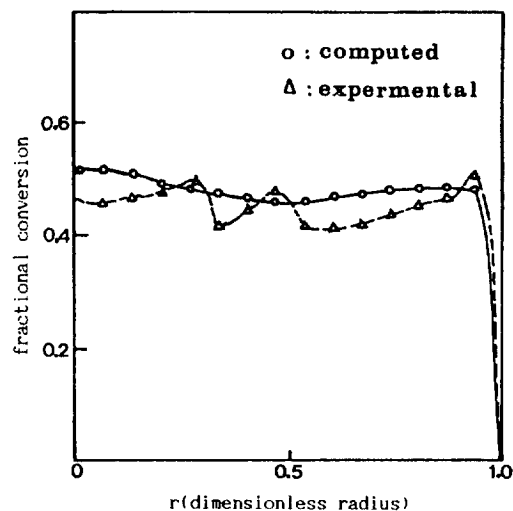


Fig. 7. Comparison of computed and experimental radial conversion profiles on the surface of the activated alumina packed bed containing an annular screen packing(screen packing packed in the center of the bed).

에서 보다 훨씬 유속이 커진다. 따라서 공극율이 큰 영역에서는 공극율이 작은 부분보다 유체의 체류시간이

짧아 공극율이 작은 부분보다 전하율이 낮아짐을 알 수 있다.

4-3. 망사 충전물 삽입 촉매 고정층 반응기 내 농도 분포

활성알루미나 충전 고정층 반응기 내에 환형망사 충전물을 전보의 Fig. 4D와 같이 위치시켜 실험한 결과, Fig. 6에서 보여주듯이 층 전반에 걸쳐 전하율이 증가했을 뿐만 아니라 비교적 균일한 분포를 보이고 있다. 이는 벽면에서 나타나는 유체의 편류를 망사 충전물 쪽으로 향하게 하여 층 전반의 유체 체류시간이 균일해졌기 때문이라고 생각한다. 망사 충전물의 삽입으로 인해 공극율의 증가 즉 유체 체류공간의 증가로 인한 유체 체류 시간의 증가가 따르지만 공극율 증가만큼의 알루미나 촉매량 감소(망사 충전물 내의 공간에 들어간 알루미나)가 있어 서로 상쇄되므로 층 전체 전하율에는 이들이 영향을 주지 않는다고 본다. 따라서 소요 전하율이나 소요 체류 시간을 충족시키기 위해 높은 고정층고가 요구될 때 고정층 내에 망사 충전물을 삽입시키면 재분배판 또는 다단 고정층의 효과를 얻을 수 있으리라 생각된다. 그리고 이 경우 수치해와 실측치를 비교해 보면 Fig. 7에서 보는 바와 같이 실측치와 수치해가 3-4%의 오차는 있지만 비교적 잘 일치함을 보였다.

반응기 내에 망사 충전물이 위치하는 높이를 변화시키며 실험한 결과, 모든 높이에서 활성알루미나 촉매만 충전된 경우보다는 전하율이 높아지고 농도 분포가 균일해졌지만 이 망사 충전물을 층 중앙에 위치시킨 경우가 가장 농도 분포가 균일해지고 높은 전하율을 보였다.

5. 결 론

활성알루미나 촉매만 충전된 고정층 반응기에서 반경방향에 따른 전하율 분포(또는 생성물 농도 분포)는 유속이 큰 지점보다 유속이 작은 지점에서 전하율이 큼을 보여 층 내의 농도 분포는 유속 분포에 크게 영향 받음을 알 수 있었으며, 환형망사 충전물을 촉매 충전 고정층 반응기 내에 삽입시킨 경우에 층 전반에 걸쳐 유속이 균일하면서 전하율은 증진(약 6%)되었다. 그리고 수치해와 실측치가 비교적 잘 일치하여 모델식을 수치 해법으로 풀어 반응기 내의 농도 분포를 잘 예견할 수 있었다.

NOMENCLATURE

a : R/L, aspect ratio [-]

D_r : radial dispersion coefficient [L^2/θ]
 D_a : Damkohler number [-]
 D_z : axial dispersion coefficient [L^2/θ]
 \vec{G}, G', G_r', G_z' : mass velocity vector, its magnitude and components [$M/L^2\theta$]
 G_o' : average mass velocity [$M/L^2\theta$]
 G_{oi}' : average interstitial mass velocity [$M/L^2\theta$]
 L : length of column [L]
 \bar{n}_A : mass flux of A [$M/L^2\theta$]
 Pe_r : radial mass Peclet number [-]
 Pe_z : axial mass Peclet number [-]
 R : radius of column [L]
 r : r'/R radius [-]
 r_A' : rate of reaction [$M/L^3\theta$]
 $r_{A'}'$: rate of reaction at feed condition [$M/L^3\theta$]
 v_r', v_z' : radial and axial components of superficial velocity vectors [L/T]
 y_A' : mass fraction of A
 $y_{A'}'$: mass fraction of A at feed condition
 z : z'/L bed height [-]
 z' : axial coordinate

Greek Letters

ε : local porosity [-]
 ε_{av} : average porosity [-]
 ρ : dimensionless density
 ρ' : density of gas [M/L^3]
 ρ_A' : mass concentration of A [M/L^3]
 ρ_g' : density of gas at feed condition [M/L^3]

Subscripts

r : radial direction
 z : axial direction

REFERENCES

1. Chen, D. H. and Jain, S. C.: *Can. J. Chem. Eng.*, **58**, 281(1980).
2. Chhabra, R. P. and Richardson, J. F.: *Chem. Eng. Sci.*, **40**(2), 313(1985).
3. Claus, G., Vergnes, F. and Goff, P. L.: *Can. J. Chem. Eng.*, **54**, 143(1976).
4. Benenati, R. F. and Brosilow, C. B.: *AIChE J.*, **8**, 359(1962).
5. Cohen, Y. and Metzner, A. B.: *AIChE J.*, **27**, 705 (1980).
6. Haughey, D. F. and Beveridge, G. S. G.: *Chem.*

- Eng. Sci.*, **21**, 905(1966).
7. Hirata, Y. and Ito, J.: *J. Chem. Eng. Japan*, **14**(4), 277(1981).
8. Kim, S. H.: M. S. Dissertation, Korea Univ., Seoul, Korea(1985).
9. Clouthary, M., Szekeley, J. and Weller, S. W.: *AIChE J.*, **22**(6), 1027(1976).
10. Kim, B. H. and Chun, H. S.: *HWAHAK KONGHAK*, **25**(5), 528(1987).
11. Winter, O. and Eng, M. T.: *Hydrocarbon Processing*, **55**(11), 125(1976).
12. Brandt, D. E.: *Oil & Gas J.*, **5**, 51(1979).
13. Butt, J. B., Bliss, H. and Walker, C. A.: *AIChE J.*, **8**(1), 42(1962).