

망사 충전 고정층 반응기의 특성 -유속 및 온도 분포-

김봉현* · 전해수

고려대학교 공과대학 화학공학과
(1987년 6월 9일 접수, 1987년 7월 21일 채택)

Characteristics of a Screen-Packed Fixed Bed —velocity and temperature distributions—

Bong-Hyun Kim* and Hai-Soo Chun

Department of Chem. Eng., College of Eng., Korea University, Seoul 136, Korea
(Received 9 June 1987; accepted 21 July 1987)

요 약

균일 입자 고정층에서 층 공극률 분포에 따른 유체 유속 분포, 망사 충전물 삽입으로 인한 유체 흐름에 미치는 영향, 그리고 층 공극률 분포와 망사 충전물로 인한 층 온도 분포에 미치는 영향을 검토하고자 균일 유리구 입자 고정층 및 환형 망사 충전물을 삽입한 고정층을 설치하고 등온 또는 비 등온 조건에서 층 뒷 표면에서 국소 유속과 온도를 열선 유속계로 정밀히 측정하였다.

균일 입자 고정층 내 위치에 따른, 특히 기벽 인접 영역에서 층 공극률 분포를 조사한 결과 기벽에서부터 안쪽으로 감쇄진동형태로 나타났다. 또한 균일 입자 고정층과 망사 충전물을 삽입한 고정층에서 층 내 공극률 분포, 유체 유속 분포, 그리고 층 온도 분포와의 관계를 알았고 이로부터 망사, 충전물이 삽입되면 기벽 인접 영역으로의 편류 현상이 감소되어 균일 유속 및 온도 분포가 이루어짐을 확인하였다. 그리고 공극률 분포식을 이용한 이론적인 모델식의 수치해를 실험치와 비교 검토한 결과 잘 일치하였다.

Abstract—To investigate the effects of void fraction and the screen-packing in the fixed bed on radial velocity and temperature distributions of the bed, local velocities and temperatures of fluid on the glass bead fixed bed and on that inserting the screen-packing are measured by using the two-channel hot-wire anemometer at the isothermal or transient conditions.

It is found that the radial velocity and temperature profiles are non-uniform due to the variation of void fraction near the wall. The screen-packing in the bed enables fluid-flow to be uniformly distributed over the bed and to bring about the uniform radial temperature profile over the bed. The differential equations which govern the velocity and temperature distributions of the fixed bed are numerically solved to demonstrate the effects of the void fraction and the screen-packing inserted in the bed.

1. 서 론

일반적으로 고정층이나 유동층 반응기 내에서 기벽효

과 및 불균일한 공극률로 인한 편류현상 그리고 큰 압력강하가 나타난다. 그래서 각종 망사 충전물(구형, 원통형, 환형)을 층 내에 삽입하여 유속 분포의 균일화,

* 원주소 : 한국에너지연구소

압력 강하의 감소 및 물질전달과 열전달의 촉진 등을 꾀한다. 그리고 망사 충전물 흡수탑의 경우 접촉계면의 증진, 균일 기포 분산 등으로 그 성능을 증진시키기도 한다.

충진 고정층에서 Schwartz 등[1]은 $D_c/d_p > 30$ 의 경우 기벽인접 영역의 유속은 본체 영역의 유속보다 30~100% 정도 큰데 그 이유는 기벽에 가까이 갈수록 공극률이 증가하기 때문이라 밝혔다. Bennenati 등[2]은 구형 입자가 충전된 고정층에 epoxy 수지를 녹여 부어 그 epoxy 양으로 부터 기벽 인접 영역의 공극률 분포를 측정한 결과 기벽에서 입자 직경의 5~7배 거리까지 감쇄 진동 형태의 공극률 분포가 나타남을 보였다. 그리고 Ridway[3], Pillai 등[4]은 반응기 반경에 따른 공극률 분포 관계를 수식화시켜 비교적 성공적인 관계를 얻어냈다. 그리고 충전 고정층에서의 유속 분포에 관한 연구를 살펴보면, Schwartz 등[1]은 고정층 윗 표면에서의 국부속도로 부터 벽면에서 $1 \sim 1.5 d_p$ 되는 지점에서 최대 유속이 나타남을 밝혔고, 층 윗 표면에서의 유체 유속 분포는 층 내의 분포와 유사하다고 보고하였다. 최근들어 Szekely 등[5]의 수치해석 결과도 Schwartz 등[1]의 실험결과와 비슷한 결과임을 보였다. Drahos 등[6]은 여러 모양의 충전물을 채운 고정층 표면에서의 국부 속도로 부터 입자 모양에 관계없이 기벽효과 및 불균일한 공극률이 유속에 영향을 준다고 보고한 바 있다. McIlhinney 등[7]과 Kang 등[8]은 원통형 망사 충전물을 삽입한 충전탑에서 혼합효과를 연구한 바 있다. 그리고 충전 고정층 내의 온도분포에 관한 연구로서는 Mickley 등[9], Carbery 등[10], Froment 등[11]의 실험 이후 수치해법을 이용한 결과가 발표되었다. 그런데 정확한 층 내의 온도분포를 구하려면 층 내의 공극률 분포, 국부 실제온도 및 유효열전도도 값 등이 필요하게 된다.

본 연구는 충전 고정층 성능 규명상 층 내 기벽인접 영역의 유체 유속분포와 공극률과의 정확한 관계, 그리고 고정층 내 망사 충전물 삽입시 반경 방향으로의 유속 및 온도분포의 균일화에 미치는 영향을 규명하고 이론식과 실험치와의 비교 검토하고자 한다.

2. 이론적 배경 및 수치해석

2-1. 층 공극률 분포식

구형입자로 채워진 고정층 내의 입자 배열은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 벽면에 가까운 영역에서는 정돈이 잘 되어 있지만 벽에서 멀어질수록 점점 불규칙하게 배

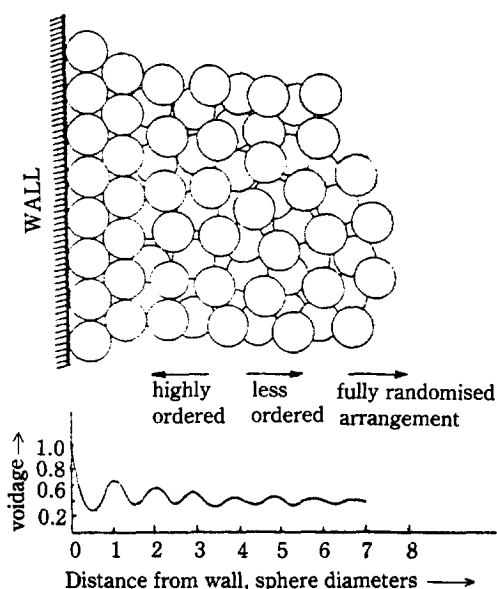


Fig. 1. Voidage variation for randomly packed spheres on the cylindrical wall.

열되며 벽으로 부터 입자직경의 5배 이상 떨어진 영역에서는 거의 불규칙한 배열을 하게 된다. 그래서 층 공극률 분포는 1(구형입자가 벽에 점으로 접하게 됨으로 벽 인접부분의 공극률은 거의 1이다)로 부터 시작하여 중심부를 향해 감쇄진동 형태를 보인다(Fig. 1 참조). 특성상 벽으로 부터 $0.25 d_p$ 까지를 wall region, $5 \sim 8 d_p$ 이상의 영역을 bulk region, 그 중간 영역을 transient region이라 구분하여 해석한 triregional model[12]이 발표된 바 있다. 즉

$$\frac{1-\epsilon}{1-\epsilon_b} = 4.5 \left(x - \frac{7}{9} x^2 \right), \quad x \leq 0.25$$

$$\frac{\epsilon - \epsilon_b}{1 - \epsilon_b} = a_1 e^{-a_2 x} \cos(a_3 x - a_4) \pi, \quad 0.25 < x < 8$$

$$\epsilon(x) = \epsilon_b, \quad 8 \leq x < \infty$$

$$a_1 = 0.3463; \quad a_2 = 0.4273; \quad a_3 = 2.4509;$$

$$a_4 = 2.2011$$

이 모델의 계수를 본 실험조건에서 시행오차법으로 다시 결정한(Table 1 참조)다음 운동 방정식 및 에너지 방정식에 대입하여 사용하였다.

2-2. 충전 고정층내의 유체 흐름 방정식

충전 고정층 통과 유체를 비압축성 유체라고 가정하고 다음의 무차원 매개변수 및 흐름 함수를 도입하여 연속 방정식과 Ergun 식을 이차원적 유도 결과는 다음

과 같다.

$$\begin{cases} V = V'/V_o', & a = R/L, & r = r'/R', & z = z'/L \\ \xi = f_1/(f_2 V_o') \end{cases} \quad (1)$$

$$V_z = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r}, \quad V_r = \frac{a}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \left[\left(\frac{\partial \psi}{\partial z} \right)^2 + \frac{2}{a^2} \left(\frac{\partial \psi}{\partial r} \right)^2 + \frac{\xi V_r^2}{a^2} \right] \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + [2a^2 \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} \right)^2 \\ & + \left(\frac{\partial \psi}{\partial r} \right)^2 + \xi V_r^2] \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \{ \left(\frac{\partial \psi}{\partial r} \right)^2 + a^2 \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} \right)^2 \} \\ & \left\{ \frac{1}{a^2} \left(\frac{\partial \ln f_{20}}{\partial r} - \frac{2}{r} \right) \right\} + \frac{1}{a^2} \{ -\xi V_r + V_r^2 \frac{\partial \xi}{\partial r} \\ & + \xi V_r^2 \frac{\partial \ln f_{20}}{\partial r} \} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \{ \left(\frac{\partial \psi}{\partial r} \right)^2 + a^2 \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} \right)^2 \} \\ & \frac{\partial \ln f_{20}}{\partial z} + \{ V_r^2 \frac{\partial \xi}{\partial z} + \xi V_r^2 \frac{\partial \ln f_{20}}{\partial z} \} \frac{\partial \psi}{\partial z} \\ & + 2 \frac{\partial \psi}{\partial r} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial z} \cdot \frac{\partial^2 \psi}{\partial r \partial z} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

그리고 본 실험 조건에서 적용될 경계 조건은 다음과 같다.

$$r=0 \text{ 에서 } \psi=0$$

$$r=1 \text{ 에서 } \psi=-0.5$$

$$z=0 \text{ 와 } z=1 \text{ 에서 } \frac{\partial \psi}{\partial z} = 0$$

위 수식들은 문헌 13에 상세히 유도되어 있다.

2-3. 비등온 고정층 내 에너지 수지식

유리구 고정층에서의 유효 열 전도도를 다음과 같이 가정[14]하자.

$$\lambda_e = \lambda_p(1 - \varepsilon) + V_z \lambda_g \varepsilon \quad (4)$$

여기서, λ_p = 입자의 열 전도도

λ_g = 유체의 열 전도도

$\varepsilon = (1), (2), (3)$ 식에서 구한, 각 영역에

해당하는 거리에 따른 공극률

$V_z = (3)$ 식에서 구한, 각 지점에 해당하는 무차원 국부 실제 속도

본 실험은 비등온 유리구 고정층에서 수행되며, 이 고정층을 pseudohomogeneous medium이라 가정하면 이에 적용되는 에너지수지식[15]은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \rho_f' C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V_r \frac{\partial T}{\partial r'} + \frac{V_o'}{r'} \frac{\partial T}{\partial \theta} + V_z' \frac{\partial T}{\partial z'} \right) = \\ & \left[\frac{1}{r'} \frac{\partial}{\partial r'} \left(-\lambda_e \frac{\partial T}{\partial r'} \right) + \frac{1}{r'} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(-\lambda_e \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) \right. \\ & \left. + \frac{\partial}{\partial z'} \left(-\lambda_e \frac{\partial T}{\partial z'} \right) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 T' 는 층 내 각 지점의 온도이다. 축에 대칭이며, 축 방향의 전도를 무시하면 정상상태에서 (5)식은 다음과 같다.

$$\rho_f' C_p V_z' \frac{\partial T'}{\partial z'} = \frac{1}{r'} \frac{\partial}{\partial r'} \left(\lambda_e r' \frac{\partial T'}{\partial r'} \right) \quad (6)$$

(6)식에 다음 무차원항을 도입하면

$$\begin{aligned} V_z &= \frac{V_z'}{V_{zo}}, & r &= \frac{r'}{R}, & P_{er} &= \frac{V_{zo}' \cdot R}{\lambda_p / C_p \rho_f'} \\ \xi &= \frac{Z}{R \cdot P_{er}}, & A_{(r)} &= \frac{\lambda_e}{\lambda_p}, & T &= \frac{T_w - T'}{T_w - T_g} \\ V_z \frac{\partial T}{\partial \xi} &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r A(r) \frac{\partial T}{\partial r}] \end{aligned} \quad (7)$$

본 실험에 적용될 경계조건은 다음과 같다.

$$\xi = 0, \quad T = 1 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \xi > 0, & \quad r = 1, \quad T = 0 \\ & \quad r = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

(8)과 (9)식의 경계조건과 (7)식의 3-2 절에서 구한 각 지점의 interstitial velocity를 연결하여 수치해법으로 층 내부의 온도 분포를 얻는다.

2-4. 수치 해법

(3)식과 (7)식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & a_1 \frac{\partial^2 G}{\partial r^2} + a_2 \frac{\partial^2 G}{\partial r \partial z} + a_3 \frac{\partial^2 G}{\partial z^2} + a_4 \frac{\partial G}{\partial r} + a_5 \frac{\partial G}{\partial z} \\ & = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, G 는 ψ 또는 T

윗 식에서 $a_2^2 - 4a_1 a_3 < 0$ 본 연구에 적용된 흐름 함수식, 에너지 수지식은 elliptic형이다. (3)식과 (7)식의 해를 얻기 위하여 Successive overrelaxation method를 사용하였으며, 다음과 같은 유한 미분 방정식으로 만들어, 계속적으로 relax하여 각 격자의 수치 해를 얻었다.

$$\begin{aligned} \psi_{i,j,k+1} &= (1 - \omega) \psi_{i,j,k} + \frac{\omega}{x E_{i,j}} (x A_{i,j} \psi_{i-1,j+1,k} \\ &+ x B_{i,j} \psi_{i,j+1,k} + x C_{i,j} \psi_{i+1,j+1,k} + x D_{i,j} \psi_{i-1,j,k} \\ &+ x F_{i,j} \psi_{i+1,j,k} + x G_{i,j} \psi_{i-1,j-1,k} + x H_{i,j} \psi_{i,j-1,k} \\ &+ x I_{i,j} \psi_{i+1,j-1,k}) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} T_{i,j,k+1} &= (1 - \omega) T_{i,j,k} + \frac{\omega}{D5_{i,j}} (D1_{i,j} T_{i,j+1,k} \\ &+ D2_{i,j} T_{i-1,j,k} + D3_{i,j} T_{i+1,j,k} + D4_{i,j} T_{i,j-1,k}) \end{aligned} \quad (12)$$

(11)식과 (12)식의 해는 문헌 [13]에 자세히 유도되어 있다.

본 계산에 사용된 수렴 범위는 다음과 같다.

$$\frac{\sum_j \sum_i |\phi_{i,j,k+1} - \phi_{i,j,k}|}{\sum_j \sum_i |\phi_{i,j,k}|} < 0.001 \quad (13)$$

$$\frac{\sum_j \sum_i |T_{i,j,k+1} - T_{i,j,k}|}{\sum_j \sum_i |T_{i,j,k}|} < 0.01 \quad (14)$$

3. 실험

3-1. 충전 고정층의 유속분포 측정장치 및 조작

실험에 사용된 장치의 개략도는 Fig. 2와 같다. 충전탑은 내경이 6cm, 두께가 0.57cm인 아크릴 관으로 제작하였으며 이 충전탑은 분배판과 재 충전을 위한 플랜지 그리고 충전물을 지지하는 스크린으로 구성되며 플랜지와 플랜지 사이의 O-ring은 접착력이 좋은 실리콘 고무를 사용하였다.

충전층은 공기 분배판으로부터 10cm 간격이고 이는 균일 유속을 나타내는 위치이다. 충전층 하부에는 24 mesh screen을 플랜지로 고정시켜 충전물을 지지했으며, 상부에는 충전물의 유동화를 방지하기 위해 100 mesh screen을 플랜지에 고정시켰다. 감지단자를 반경 방향 그리고 상하로 움직일 수 있게 만든 stainless

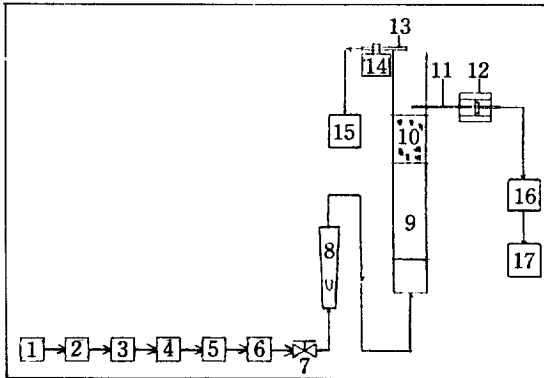


Fig. 2. Schematic diagram of a fixed bed.

- | | |
|--|----------------|
| 1. Compressor | 2. Regulator |
| 3. Air filter | 4. Regulator |
| 5. Regulator | 6. Humidifier |
| 7. Valve | 8. Rotameter |
| 9. Disengaging section | 10. Packed bed |
| 11. Anemometer probe support | |
| 12. Anemometer probe support holder & traverse | |
| 13. Anemometer probe support | |
| 14. Anemometer probe support holder | |
| 15. Anemomaster | |
| 16. Anemometer sets (2-channel) | |
| 17. Dual channel recorder | |

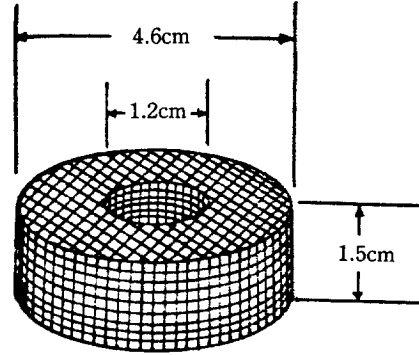


Fig. 3. Geometry of the annular-screen packing.

steel 지지대를 탑 상부에 설치하였다. 충전층에 유입되는 공기중의 먼지를 제거하기 위해 3개의 공기 여과기를 사용했고, 공기의 온도와 습도를 일정하게 유지시키기 위해 증습기를 사용했다. 충전층에 유입되는 접근 속도를 알기 위해 로터미터를 설치했고 이 로터미터와 열선 유속계(Kanomax co., Japan, 7224) 감지단자를 보정하기 위해 anemomaster(Kanomax co., Japan, 24-6111)를 사용했다. 압축기로 부터 상온의 공기를 충전 고정층에 0.2 m/s의 접근 속도로 유입시켰다. 이때 anemomaster로 열선 유속계 감지단자를 보정했다. 반경 방향의 혼합 효과가 가장 적은 층 윗 표면에서 1.5cm 높이[5]에 사용하고자 하는 감지단자를 위치시키고 벽면에서 층 중심 방향으로 1mm씩 이동시키며 국부 속도를 측정하였다. 그리고 고정층 입자는 직경이 평균 4mm와 2mm인 유리구를 사용하였으며, 이 유리구 고정층고를 10cm, 15cm, 20cm로 변화시키며 반경 방향에 따른 축 방향 유속을 측정하였다. 고정층고 10cm에서 고정층 내의 유리구 입자 크기를 인위적으로 다르게 충전하고 또 층 내부에 망사 충전물을 삽입하여 층 윗 표면에서 국부 유속을 측정하였다. 이때 망사 충전물의 모양은 Fig. 3과 같이 환형으로 만들었다. 그리고 그 망사 충전물의 위치는 Fig. 4에 나타낸 바와 같다.

3-2. 비등온 고정층의 유체 온도분포 측정장치 및 조작

실험 장치 및 흐름도는 유속 분포 측정시와 같지만, 충전탑의 재료는 stainless steel 관(Type S 304)으로 제작하여 그 주위에 자켓을 설치하고, 물중탕 내의 물을 온도 조절기를 이용해 $85 \pm 0.1^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지시키며 자켓 내로 순환시켰다. 압축기로 부터 상온의

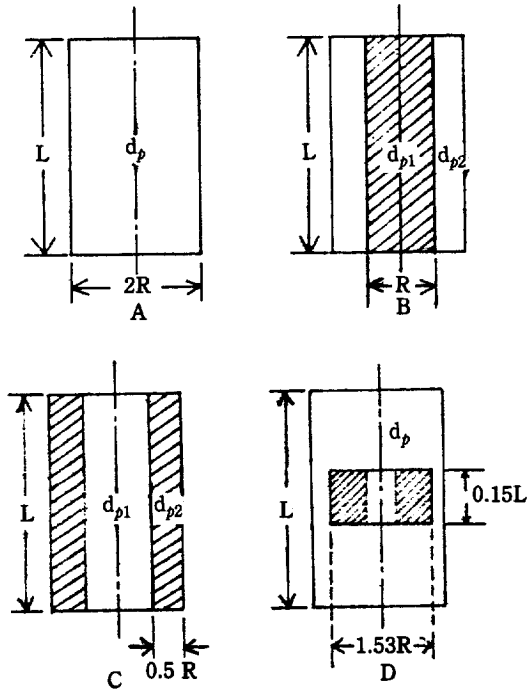


Fig. 4. Packing configuration used in experiments.

A: uniform glass bead fixed bed.
($d_p = 4\text{mm}$, $L = 10, 15, 20\text{cm}$)
B: glass bead fixed bed with a high resistance central core ($d_{p1} = 2\text{mm}$, $d_{p2} = 4\text{mm}$, $L = 10\text{cm}$)
C: glass bead fixed bed with a high resistance annulus ($d_{p1} = 4\text{mm}$, $d_{p2} = 4\text{mm}$, $L = 10\text{cm}$)
D: annular-screen packing (OD: 4.6cm, ID: 1.2cm, H: 1.5cm) inserted in the center of the bed ($d_p = 4\text{mm}$, $L = 10\text{cm}$)

Fig. 4. Packing configuration used in experiments.

공기를 충전 고정층에 0.2 m/s 의 접근 속도로 유입시키고 반경 방향의 혼합 효과가 가장 적은[5] 층 위 1.5 cm 높이에 온도 감지단자를 위치시켜 벽면에서 중심 방향으로 1 mm 씩 이동시키며 정상상태에 이를 때까지 계속 반복 측정하여 온도분포를 구했다. 충전부내의 유리구 크기 분포 및 망사 충전물의 위치는 유속 분포 측정결과와 같다.

4. 결과 및 고찰

4-1. 층 공극률 분포식

본 실험 조건에서 triregional 모델식의 상수를 시행 오차법[13]으로 구한 결과는 Table 1과 같고 이 값을 이용한 층 공극률 분포식의 프로트는 Fig. 5에,

Table 1. The values of the constants a_1 through a_4 with variation of D_c/d_p .

D_c/d_p	a_1	a_2	a_3	a_4
5	0.412	0.451	2.222	0.444
14	0.412	0.451	2.353	0.472
20	0.412	0.451	2.500	0.502
	0.412	0.451	2.532	0.506

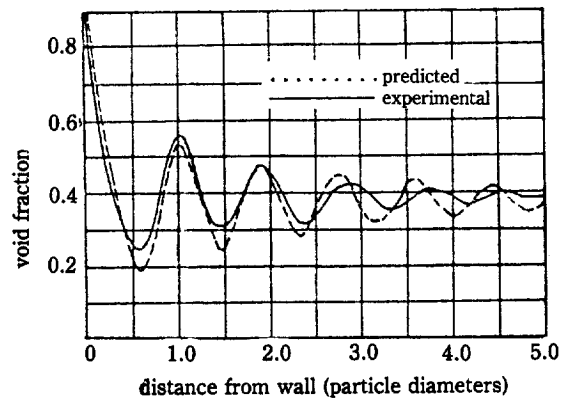


Fig. 5. Comparison of predicted and experimental void fraction in the bed of uniform spheres ($D_c/d_p = 14$).

Benenati 등[2]의 결과와 함께 표시되었다. 진폭이 낮은 중심부 쪽에서는 서로 엇갈리는 경향이 기벽 영역에서는 서로 잘 일치함을 알 수 있다.

4-2. 고정층 내 유체 유속 분포

유리구로만 채워진 고정층을 통과하는 유체 흐름에 대한 반경 방향의 유속 분포는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 벽면에서 입자직경의 $1 \sim 1.5$ 배되는 지점에서 최대 국부 속도가 나타나며 중심 방향으로 감쇄 진동 형태의 분포가 나타나고 있다. 이와 같이 고정층의 기벽 부근에서는 층 내부에 비해 공극률이 크기 때문에 벽 근처에서의 유체 흐름은 편류 현상을 보인다. 이 결과는 Marivoet 등[14] 및 Froment 등[11]의 측정 결과와 비슷한 경향을 보였다. 그리고 Fig. 7에서 보여주듯이 고정층고가 높아질수록 기벽효과는 커져 기벽 부근의 최대 국부 속도가 커지는 반면 그외 부분은 진폭이 작아짐을 보인다. 이러한 기벽 쪽으로의 편류 현상과 진폭을 감소시키기 위해 유리구 고정층 내부에 망사 충전물을 삽입하여 유속 분포를 조사해 본 결과는 다음 절에 논하였다. 단일 입자 고정층 내 유속의 실측치와 수치해를 비교해 보면 Fig. 8에서 나타낸 바와 같이 비

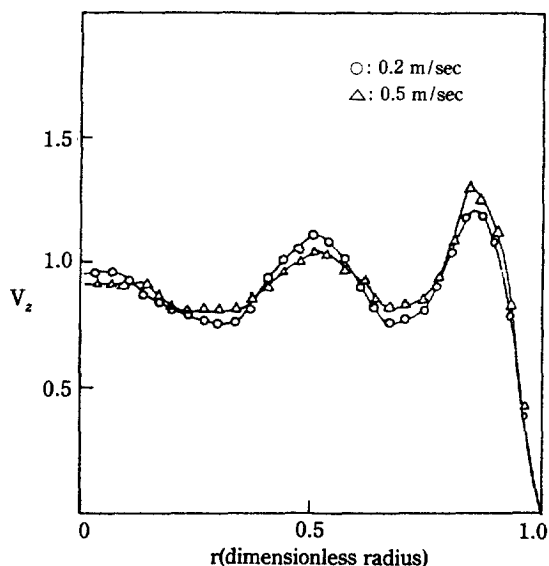


Fig. 6. Experimental radial velocity profiles on the surface of the glass bead fixed bed with variation of the approach velocities ($d_p = 4\text{mm}$, $L = 10\text{cm}$).

교적 잘 일치한다. 점성력과 관성력을 모두 고려한 Ergun식의 수치해법과 실측치가 잘 일치하므로 충전물을 삽입한 고정층에도 이 해법의 적용이 가능하리라 본다. 그리고 유체 흐름 저항에 따른 뚜렷한 유속 분포를

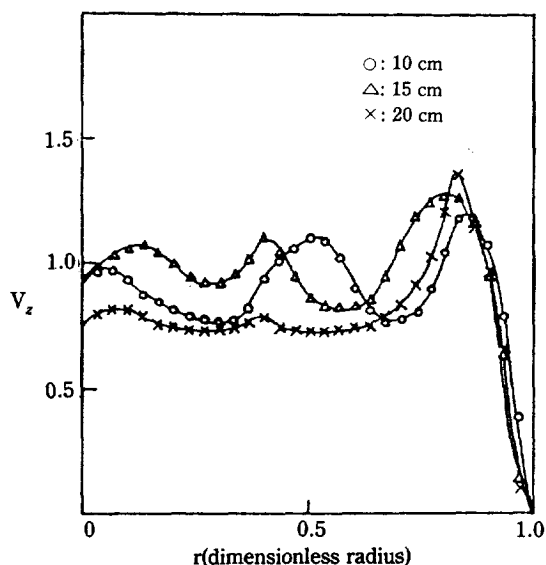


Fig. 7. Experimental radial velocity profiles on the surface of the glass bead fixed bed with variation of the bed heights.

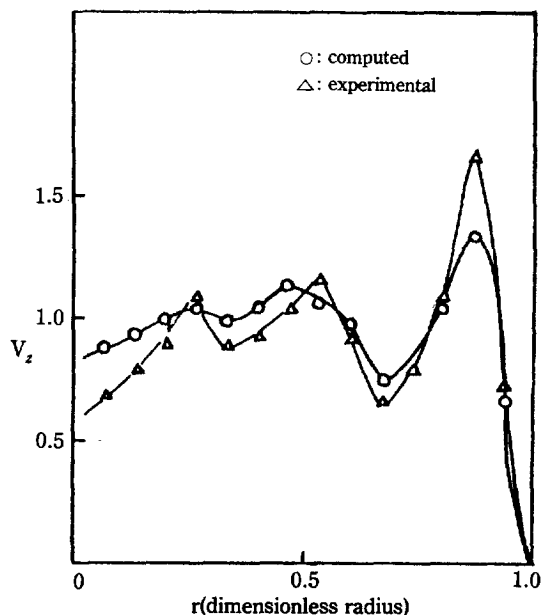


Fig. 8. Comparison of computed and experimental radial velocity profiles on the surface of the uniform glass bead fixed bed ($d_p = 4\text{mm}$, $L = 10\text{cm}$).

알아보기 위해 Fig. 4-B, C와 같이 환형부와 중심부에 입자 크기 분포를 다르게하여 실험해 본 결과, Fig. 9와 10에서 보는 바와 같이 유체 흐름 저항이 적은 부분, 즉 입자 직경이 보다 큰 부분에서 유속이 뚜렷하게 큰 것을 보여주며, 이 경우도 수치해와 실측치가 잘 일치한다. Fig. 9와 같이 중심부에 환형부 보다 유체 흐름 저항을 크게 한 경우, 본 연구에 적용한 유체 흐름 방정식을 수치해법으로 풀어 층 내부의 유체 흐름을 흐름선(streamline)으로 도시하면 Fig. 11과 같다. 그림에서 보여주듯이 공극률이 큰 영역에서는 흐름선 간의 간격이 좁은 현상을 보이고 있다. 특히 층 입구에서부터 흐름선 간의 밀집현상을 보이고 있는데, 이는 층 입구가 가까운 부근에서 유체 흐름 분포의 재 분배가 일어나 유체 흐름 저항이 작은 영역, 즉 공극률이 큰 영역으로 유체 흐름 양이 많아져 유속이 커짐을 알 수 있다.

4-3. 망사 충전물 삽입 고정층 내 유속 분포

환형 망사 충전물(Fig. 3)을 유리구 고정층 내에 Fig. 4-D와 같이 삽입시킨 경우, 유속 분포는 Fig. 12에서 보는 바와 같이 수치해와 실측치가 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. Fig. 13은 환형 망사 충전물이 층 중앙에 위치된 경우, 수치해법에 의한 층 내부의 유체

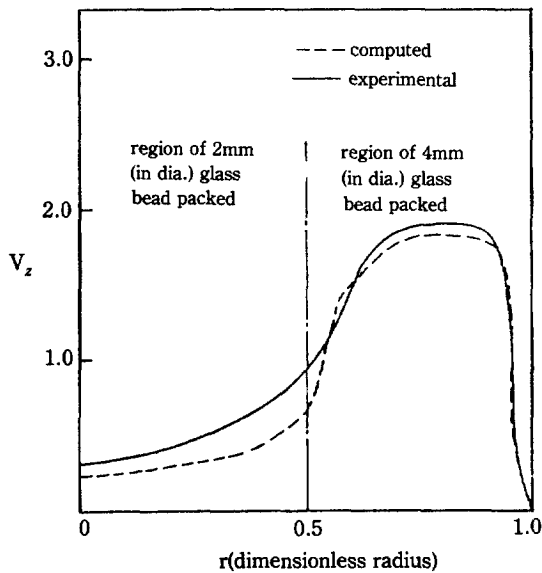


Fig. 9. Comparison of computed and experimental radial velocity profiles on the surface of the bed consisted of the different particle sizes.
(central core: 2mm, annular region: 4mm glass bead)

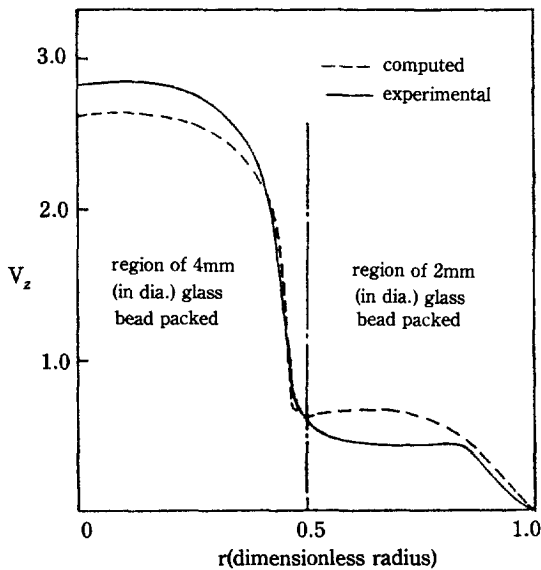


Fig. 10. Comparison of computed and experimental radial velocity profiles on the surface of the bed consisted on the different particle sizes.
(central core: 4mm, annular region: 2mm glass bead)

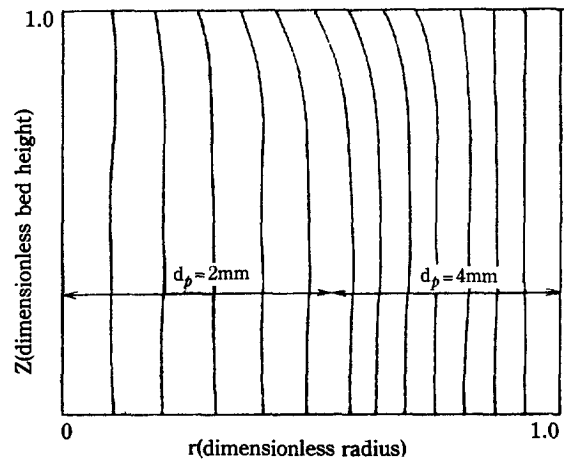


Fig. 11. Streamlines in the fixed bed consisted of the different particle sizes.
(central core: 2mm, annular region: 4mm)

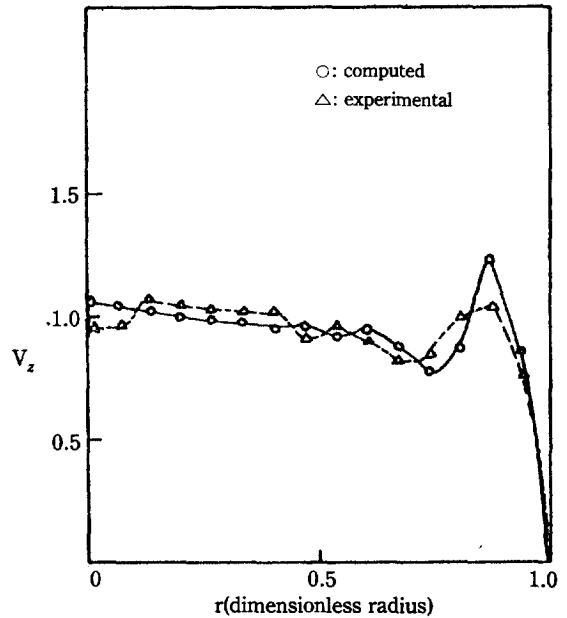


Fig. 12. Comparison of computed and experimental radial velocity profiles on the surface of the bed containing the annular-screen packing in the center of the bed.

흐름선(streamline)을 도시한 결과이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 흐름선이 망사 충전물 쪽으로 쏠리며 망사 충전물에 가까워질수록 흐름선 간의 간격이 좁아짐을 볼 수 있는데, 이는 저항이 낮은 망사 충전물 공간 쪽으로 유체 흐름이 쏠리며, 흐름양은 많아짐을 보

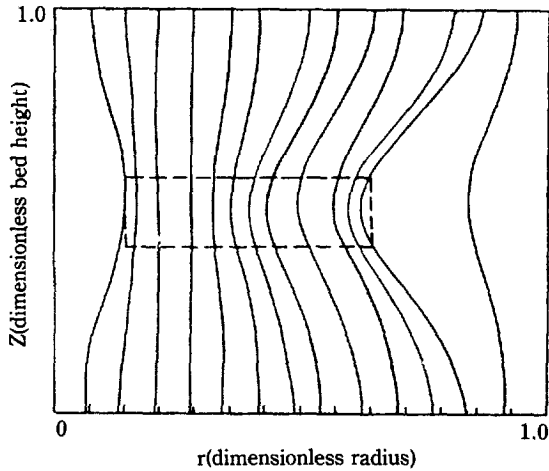


Fig. 13. Streamlines for a fixed bed containing an annular-screen packing in the center of the bed ($d_p = 4\text{mm}$, $L = 10\text{cm}$).

여주고 있다. Fig. 14는 유리구 고정층 내에 망사 충전물을 삽입시킨 경우와 안한 경우의 반경 방향의 유속 분포를 비교한 결과인데, 그림에서 보는 바와 같이 충전물을 삽입한 경우 유속 분포의 불균형성을 완전히 제거하지는 못하였지만 유리구로만 채워진 경우와 비교해

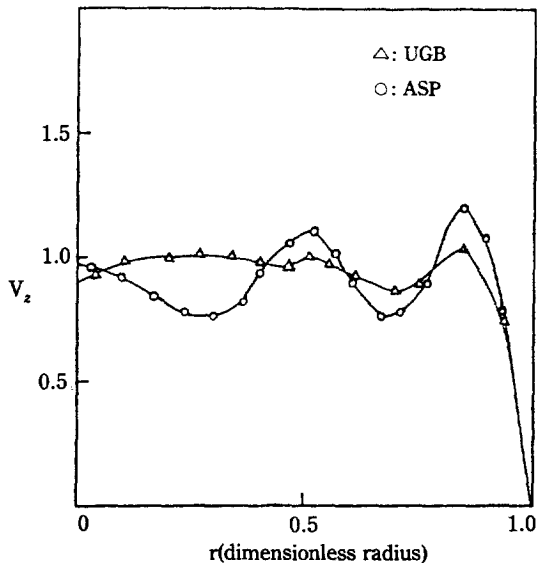


Fig. 14. Comparison of experimental radial velocity profiles on the surface of the fixed bed in cases of UGB and ASP.

UGB=uniform glass bead fixed bed. ($d_p = 4\text{mm}$, $L = 10\text{cm}$)

ASP=annular-screen packing inserted in the center of the bed. ($d_p = 4\text{mm}$, $L = 10\text{cm}$)

볼 때 많이 양호해졌음을 알 수 있다. 따라서 고정층 내에 망사형 충전물을 적당히 삽입하므로써 반응기 성능이 크게 증진된다(이에 대한 결과는 다음 제 2보에서 논의될 것임).

4.4. 고정층 내 온도 분포

유리구로만 채워진 고정층을 통과하는 유체의 반경 방향의 온도 분포는 Fig. 15에서 보는 바와 같이, 입자 직경이 4mm인 경우와 입자 직경이 2mm인 경우, 2-3개의 hump가 형성됨을 보이고 있다. Froment 등 [11]의 결과도 본 연구의 결과와 유사하다. 입자 직경이 4mm인 유리구가 채워진 경우를 살펴보면, 벽면에서 1-1.5배 입자 직경 만큼 떨어진 거리에서 급격히 온도가 떨어지는 현상을 보이며, 입자 직경의 2-3배 이상 떨어진 거리에서는 대체로 균일한 온도 분포를 보이고 있다. 이는 유속 분포와 비교해 볼 때 벽에서 입자 직경의 1-1.5배 떨어진 거리에서의 최대 국부 속도(peak velocity)의 영향 때문이라고 생각된다. 층 중앙 부근에서는 유체 온도 분포의 hump 현상이 나타나지 않는데 이는 유체 흐름 분포의 감쇄 진동의 진폭이 적기 때문인 것으로 본다. 입자 직경이 2mm인 유리구로 채워진 고정층의 경우는 앞의 경우보다 벽면에서 더 가까운 곳에서 기벽 효과에 의한 피크속도가 나타나 벽면에서 중심 방향으로의 열전달을 방해하기 때문에 그림에서

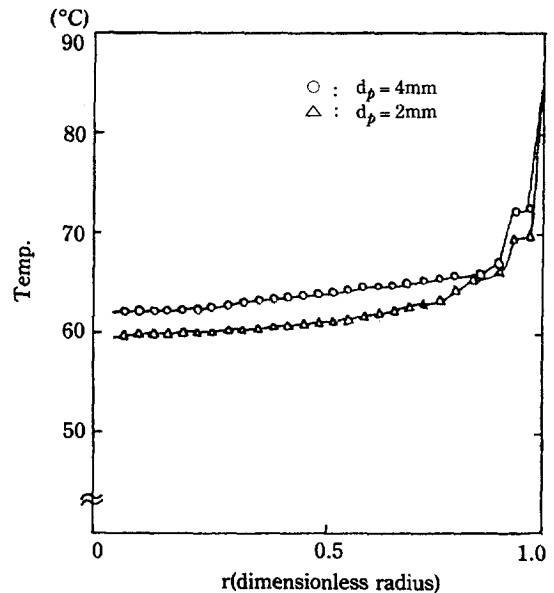


Fig. 15. Comparison of experimental radial temperature profiles on the surface of uniform glass bead fixed bed ($L = 10\text{cm}$).

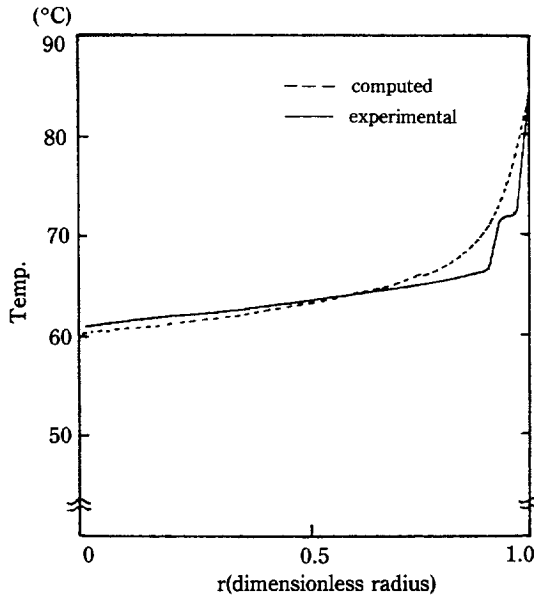


Fig. 16. Comparison of computed and experimental radial temperature profiles on the surface of uniform glass bead fixed bed ($d_p = 4\text{mm}$, $L = 10\text{cm}$).

보는 바와 같이 입자 직경이 4 mm인 유리구가 채워진 고정층 보다 열전달이 훨씬 불량함을 알 수 있다. Fig. 16은 입자 직경이 4 mm인 유리구가 채워져 있는 경우, 실측치와 본 연구에 적용된 에너지 수지식을 수치해법으로 풀 수치해와 비교한 결과이다. 비교적 경향은 일치하고 있으나 수치해와 실측치 사이에 2-4°C의 차를 보이며, 실측치에 나타나는 2개의 hump는 수치해의 결과에서는 볼 수 없는데, 이는 본 연구에 적용한 에너지 수지식이 유리구 고정층을 pseudo-homogeneous medium이라는 가정하에 세워진 수식이기 때문에 실제 유리구 고정층 내의 각 지점의 통과 유체와 유리구와는 온도차가 있을 것이라 생각된다.

한편 층 내 유체 흐름 분포가 열전달에 미치는 영향을 살펴보기 위해 Fig. 4-B, C와 같이 환형부와 중심부의 입자 직경을 다르게 하여 실험한 결과는 Fig. 17과 같다. 우선 환형부에 입자 직경이 4 mm, 중심부에 입자 직경이 2 mm인 유리구로 채워진 관제로 중심부는 환형부에 비해 유속이 낮아 열전달에 큰 방해 없어 비교적 중심부까지 비슷한 온도 분포를 보이고 있다. 그러나 환형부의 입자 직경이 2 mm, 중심부에 입자 직경이 4 mm인 유리구로 채워진 고정층의 경우, 앞의 경우보다 훨씬 벽면 가까이에서 중심 방향으로의 열전달에 방해를 받아 급격히 온도가 떨어지며 중심부의 유속은 환형

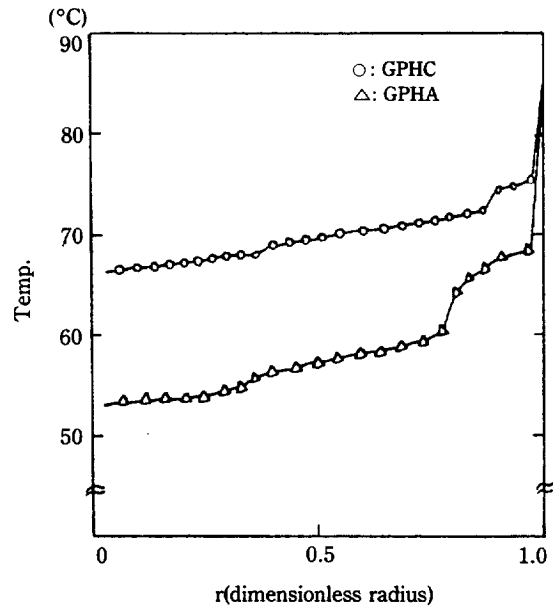


Fig. 17. Comparison of experimental radial temperature profiles on the surface of the bed in cases of GPHC and GPHA.

GPHC=glass bead fixed bed with a high resistance central core (annulus: $d_p=4\text{mm}$, center: $d_p=2\text{mm}$).

GPHA=glass bead fixed bed with a high resistance annulus (annulus: $d_p=2\text{mm}$, center: $d_p=4\text{mm}$).

부에 비해 훨씬 크므로 환형부와 중심부의 경계부근에서 뚜렷한 온도 강하도 보여주고 있다.

4-5. 망사 충전물 삽입 고정층 내 온도 분포

환형 망사 충전물을 유리구로 채워진 고정층 내에 Fig. 4-D와 같이 위치시켜 충전층 윗 표면에서 반경 방향의 온도 분포를 측정할 결과와 유리구로만 채워진 고정층에서의 실험 결과와 비교해 보면 Fig. 18에 나타낸 바와 같다. 고정층 내에 삽입시킨 경우는 유리구로만 채운 경우에 비해 훨씬 열전달이 양호하게 일어나 충전층에 걸쳐 높고 비교적 균일한 온도 분포를 보이고 있다. 이는 Fig. 18에서 보여주듯이 망사 충전물을 삽입하므로써 기벽 부근의 유체 흐름을 망사 충전물 쪽으로 향하게 하여, 벽면에서 중심 방향으로의 열전달에 가장 큰 방해 요인인 기벽 부근에서의 최대 속도에 덜 영향을 받게 하므로써 층 전반에 걸쳐 열전달이 비교적 양호해졌기 때문이라고 생각된다. Fig. 19는 유리구로만 채워진 고정층과, 구 고정층에 망사 충전물을 Fig. 4-D와 같이 위치시킨 경우를 수치해법으로 풀어 층 내

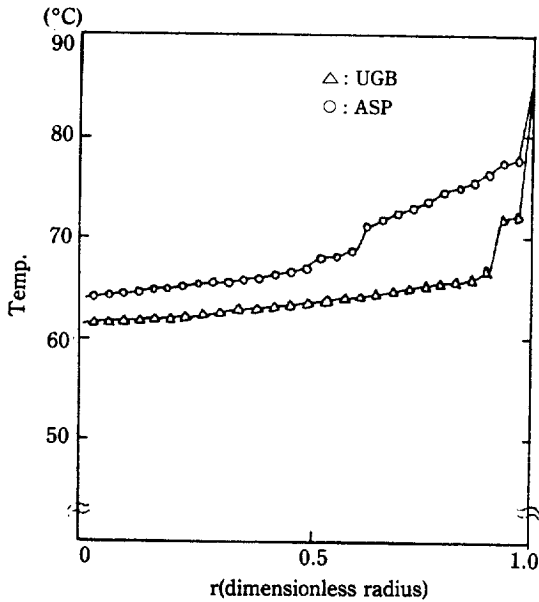


Fig. 18. Comparison of experimental radial temperature profiles on the surface of the bed in cases of UGB and ASP.

UGB = uniform glass bead fixed bed ($d_p = 4\text{mm}$, $L = 10\text{cm}$).

ASP = annular-screen packing inserted in the center of the bed ($d_p = 4\text{mm}$, $L = 10\text{cm}$).

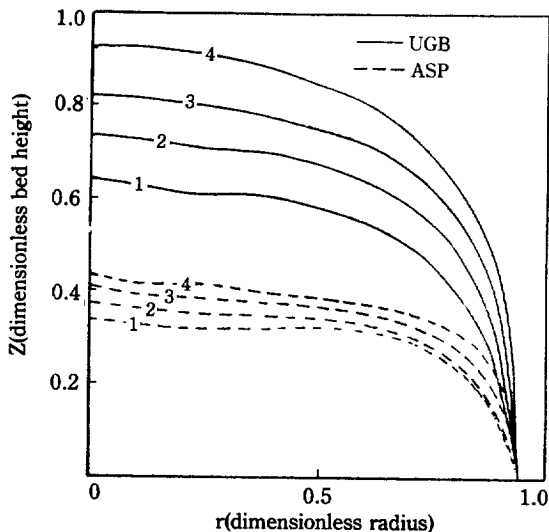


Fig. 19. Computed curves of constant temperature in cases of UGB and ASP.

(curves 1,2,3,4 correspond to temp. = 52°C , 57°C , 60°C , 62°C , respectively).

UGB = uniform glass bead fixed bed ($d_p = 4\text{mm}$, $L = 10\text{cm}$).

ASP = annular-screen packing inserted in the center of the bed ($d_p = 4\text{mm}$, $L = 10\text{cm}$).

부의 온도 분포를 비교한 결과이다. 그림에서 보여주듯이 망사충전물을 삽입시키면 유리구로만 채워진 고정층에 비해 층 하부에서부터 열전달이 훨씬 잘 이루어져 층 전반에 걸쳐 비교적 균일한 온도 분포를 보임을 알 수 있다.

5. 결 론

유리구 고정층에서 반경 방향 유체 유속과 유체 온도는 층 공극률 분포의 영향을 받고 기벽으로부터 중심 쪽으로 감쇄 진동형태의 유속 분포를 나타낸다. 고정층 내 망사 충전물을 삽입하면 기벽쪽에서의 유체 편류 현상이 감소되어 종괄적으로 균일 유체 분포를 갖게된다. 층 공극률 분포식을 이용하여 유체 유속과 유체 온도에 대한 미분식을 수치해로 풀 결과 실험치와 잘 일치하였다.

감 사

이 논문은 1986년도 문교부 자유과제 학술연구조성비에 의하여 연구되었습니다. 지원해주신 당국에 감사드립니다.

NOMENCLATURE

- a : R/L' , aspect ratio (-)
- C_p : heat capacity (Q/MT)
- D_c : column diameter (L)
- d_p : particle diameter (L)
- f_1 : $150(1-\epsilon)^2/d_p^2\epsilon^3$, resistance parameter (M/L^3T)
- f_2 : $1.75\rho'(1-\epsilon)/d_p\epsilon^3$, resistance parameter (M/L^4)
- f_{2r} : resistance parameter f calculated for some resistance values of d & ϵ (M/L^4)
- f_{20} : f_2/f_{2r} (-)
- r : r/R radius (-)
- T : $(T_w - T)/(T_w - T_s)$ = reduced temperature (-)
- T' : temperature (-)
- U : approach velocity (L/T)
- V : superficial velocity (V'/V_o') (-)
- V' : magnitude of superficial velocity vector (L/T)
- \vec{V}' : superficial velocity vector (L/T)
- V_r : V_r'/V_o' , $V_z = V_z'/V_o'$, dimensionless radial and axial components of superficial velocity(-)
- V_o' : average velocity (L/T)
- $V_r'V_z'$: radial and axial components of superficial velocity vectors (L/T)
- X : distance from the wall nondimensionalized with respect to d_p [$(R-r)/d_p$] (-)

z : z'/L bed height (—)

Greek Letters

ϵ : local porosity (—)

ξ : $z/(R \cdot P_{eff})$ = reduced axial coordinate (—)

λ_e : effective radial thermal conductivity assumed constant over entire radius (ML/T²θ)

ξ : $f_1/(f_2 V'_0)$ = ratio of viscous and inertial resistance parameters (—)

ρ : dimensionless density (—)

ρ' : density of gas (M/L³)

ρ'_A : mass concentration of A (M/L³)

ρ'_r : density of gas at feed condition (M/L³)

ψ : stream function (—)

Subscripts

b : bulk region

r : radial direction

z : axial direction

REFERENCES

1. Schwartz, C.E. and Smith, J.M.: *Ind. Eng. Chem.*, **45**, 1211 (1953).
2. Benenati, R.F. and Brosilow, C.W.: *AIChE J.*, **8**, 359 (1962).
3. Ridgway, K. and Tarbuck, K.J.: *Brit. Chem. Eng.*, **12**, 384 (1967).
4. Pillai, K.K.: *Chem. Eng. Sci.*, **32**, 59 (1977).
5. Szekely, J. and Poveromo, J.J.: *AIChE J.*, **21**(4), 769 (1975).
6. Drahos, J. and Cermak, J.: *Chem. Eng. J.*, **24**, 71 (1982).
7. McIlhinney, A.E. and Osberg, G.L.: *Can. J. Chem. Eng.*, **42**, 232 (1964).
8. Kang, W.K. and Osberg, G.L.: *Can. J. Chem. Eng.*, **44**, 142 (1966).
9. Mickely, H.S. and Lette, R.W.M.: *Can. J. Chem. Eng.*, **41**, 273 (1963).
10. Carberry, J.J.: *Chem. & Process Eng.*, **44**, 306 (1963).
11. Froment, G.F.: *Chem. Eng.*, **59**(2), 18 (1967).
12. Cohen, Y. and Metzner, A.B.: *AIChE J.*, **27**, 705 (1980).
13. Kim, S.H.: M.S. Dissertation, Korea University, Dec., 1985.
14. Marivoet, J., Teodovair, P. and Wajc, S.J.: *Chem. Eng. Sci.*, **29**, 1836 (1974).
15. Froment, G.F. and Bischoff, K.B.: "Chemical reactor analysis & design", Wiley, New York (1979).