

기체유동층에서 온도와 높이가 난류흐름영역으로의 전이속도에 미치는 영향

류호정 · 최정후[†] · 김상돈* · 손재익** · 선도원** · 이창근**

진국대학교 화학공학과

*한국과학기술원 화학공학과

**한국에너지기술연구소

(1998년 7월 9일 접수, 1998년 12월 29일 채택)

Effects of Temperature and Height on the Transition Velocity to Turbulent Flow Regime in a Gas Fluidized Bed

Ho-Jung Ryu, Jeong-Hoo Choi[†], Sang-Don Kim*, Jae-Ek Son**,
Do-Won Shun** and Chang-Keun Yi**

Department of Chemical Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

*Department of Chemical Engineering, KAIST, Taejeon 305-701, Korea

**Korea Institute of Energy Research, Taejeon 305-343, Korea

(Received 9 July 1998; accepted 29 December 1998)

요 약

난류유동층 전이유속(U_t)에 미치는 온도와 분산판으로부터의 높이영향을 이해하기 위해서 기체유동층(직경 0.1 m, 높이 2.1 m)에서 온도(15-500 °C), 압력요동 측정지점의 높이(0.02-0.10, 0.10-0.15, 0.15-0.24, 0.24-0.29, 0.02-1.97 m), 입자 크기(평균입경 0.134 mm, 0.256 mm)의 변화에 따른 난류유동층 전이유속을 측정하였다. 난류유동층 전이유속은 온도가 증가함에 따라 증가하였으며, 분산판으로부터 높이가 증가함에 따라 감소하였다. 본 실험결과와 기존에 보고된 난류유동층 전이유속에 관한 상관식들을 비교하였다. 기존 상관식들은 난류유동층 전이유속에 미치는 온도와 높이의 영향을 해석하기에 미흡하였다.

Abstract—Qualitative effects of temperature and height from the distributor plate on the transition velocity to turbulent flow regime(U_t) have been measured in a gas fluidized bed(0.1 m i.d. and 2.1 m height) using sand as bed material. Bed temperature(15-500 °C), height from the distributor plate(0.02-0.10, 0.10-0.15, 0.15-0.24, 0.24-0.29, 0.02-1.97 m), and mean particle size(0.134, 0.256 mm) were considered as experimental variables. The transition velocity to turbulent flow regime increased with increasing bed temperature, however, decreased with increasing height from the distributor plate. The previous correlations on transition velocity to turbulent flow regime compared with the measured values. Most correlations reported in the literature appeared inadequate to determine the effects of temperature and height from the distributor plate on transition velocity to turbulent flow regime.

Key words: Gas Fluidization, Transition Velocity, Turbulent Flow Regime, Height Effect, Temperature Effect

1. 서 론

기체유동층은 조업조건에 따라 서로 다른 흐름특성을 갖게 되며 유동화형태의 구분 및 전이유속의 정의는 유동층 반응기의 합리적인 이해에 큰 도움이 된다. 유동화형태는 고체와 기체의 특성, 온도, 압력, 장치규격 등에 따라 달라지며 순환유동층의 경우에는 고체순환 속도나 블로우, 고체주입장치와 같은 기체 및 고체주입설비의 능력에 의해 달라지기도 한다.

기포유동층 또는 슬러깅 유동층에서 유속이 계속적으로 증가하면 층 전체에 걸쳐 기포가 분쇄되어 작은 기포 또는 공극(void)이 되는

현상을 보이는데, 이 유속이 난류유동층으로의 전이유속(U_t)으로 정의되며, 이때에 층의 압력요동이 최대값을 보인 후 다시 감소하는 것으로 보고되고 있다. 난류유동층에서는 층표면의 구분이 어려워지며 고체혼합과 입자의 비말동반현상이 격렬하게 일어난다.

U_t 를 측정하는 방법은 크게 X-ray 사진촬영이나 육안을 통한 시각적인 관찰에 의한 방법, 정전용량 탐침(capacitance probe)을 이용하여 국부 공극 요동(local voidage fluctuation)을 측정하는 방법, 절대압(absolute pressure) 또는 차압(differential pressure)의 압력요동(pressure fluctuation)을 이용하는 방법, 유속변화에 따른 공극률 변화의 기울기를 이용하는 방법 등으로 나눌 수 있다[1].

지금까지 여러 연구자들에 의해 난류유동층 전이유속에 미치는 여러 가지 인자들의 영향을 해석하기 위한 연구가 진행되어 왔으며

[†]E-mail: choijhoo@kkucc.konkuk.ac.kr

Table 1. Factors influencing the onset of turbulent fluidization

Variable increased		Effect on U_c Source	
Bed geometry	Distance above distributor(H)	Decrease	Grace and Sun[2] Sun[3] Bi[4] Bi and Grace[5] Kehoe and Davidson[6] Thiel and Potter[7] Cai[8] Sun and Chen[9] Judd and Goosen[10] Rhodes and Geldart[11] Chehbouni et al.[12-14]
		Increase	Shin et al.[15] Han et al.[16] Jin et al.[17] Subbarao and Basu[18] Rhodes and Geldart[11] Lancia et al.[19] Mori et al.[20] Sun and Chen[9] Lee and Kim[21] Perales et al.[22] Chehbouni et al.[13, 14]
	Bed diameter(D_b)	Decrease	Judd and Goosen[10]
		Increase	Grace and Sun[2] Chehbouni et al.[13]
Particle properties	Mean particle diameter(d_p)	Decrease	Grace and Sun[2] Chehbouni et al.[13]
		No effect	Yang and Chitester [23] Saito et al.[24] Cai et al.[25]
	Shericity of particles(ϕ_p)	Decrease	Cai et al.[25, 27] Chehbouni et al.[14]
		Increase	
Operating conditions	Breadth of particle size distribution	Decrease	
		No effect	
	Pressure(P)	Decrease	
		Increase	
	Temperature(T_b)	Increase	
		Vary with particles	

Table 1은 기존의 연구결과를 요약하여 나타내고 있다.

U_c 에 미치는 측정위치(분산판으로부터의 높이)의 영향은 그 결과가 일부 연구팀[2-5]에 국한되어 있는 실정이지만 높이가 증가함에 따라 감소하는 것으로 보고된 바 있다.

층직경의 영향은 보고자들에 따라 서로 다른 경향을 나타내었는데 Kehoe와 Davidson[6], Thiel과 Potter[7], Cai[8], Sun과 Chen[9], Judd와 Goosen[10]의 경우에는 층직경이 증가함에 따라 U_c 가 감소하는 것으로 보고한 반면 Rhodes와 Geldart[11], Chehbouni 등[12-14]은 증가하는 것으로 보고하였다. 하지만 기존의 보고들 중 Kehoe와 Davidson[6]의 결과는 층직경이 변화할 때 서로 다른 측정방법(X-ray, capacitance probe)을 사용하였으며, 같은 실험조건(D_b : 0.1 m, d_p : 26 μ m, ρ_p : 1,100 kg/m³)에서도 측정방법에 따라 U_c 가 다르게 나타났다(capacitance probe: 0.18 m/s, X-ray: 0.32 m/s). 또한 층직경이 변화할 때 같은 측정방법을 사용하더라도 U_c 가 거의 일정한 것으로 나타났으며, 서로 다른 측정방법을 사용하였을 경우에도 층직경 변화에 따른 U_c 의 변화폭이 0.05-0.06 m/s 정도로 작게 나타났다. 이와 같은 결과로 미루어 그들의 실험결과에서 층직경의 영향과 측정방법의 영향을 구분하여 해석하기에는 부적합하였다. Thiel과 Potter[7]의 결과에서는 층직경이 증가함에 따라 측정점의 위치(분산판으로부터의 높이)가 증가하였으며 이는 앞서 살펴본 바와 같이 분산판으로부터 높이증가에 따른 U_c 감소 경향이 내포되어 있으므로 층직경의 영향과 구분하여 고려하기에는 부적합하였다. 한편 Sun과 Chen[9]은

층직경이 0.5 m 이상인 경우에는 층직경의 영향을 무시할 수 있는 것으로 보고한 바 있으며, Cai[8]는 Geldart 분류 A 입자와 층직경이 0.1 m 이상인 경우에는 층직경 변화에 따른 U_c 의 변화가 없는 것으로 보고하였다.

U_c 에 미치는 입자특성의 영향으로 평균입경이 증가함에 따라 증가하는 것으로 보고되어 왔으며[9, 11, 13-22], 입자의 구형도가 증가함에 따라 감소하는 것으로 보고되었다[10]. U_c 에 미치는 입도분포폭의 영향에 대해 Grace와 Sun[2]은 입도분포폭이 증가함에 따라 U_c 가 감소하는 것으로 보고한 반면 Chehbouni 등[13]은 영향을 미치지 않는 것으로 보고하였다. 기존의 보고들 중 U_c 에 미치는 입도분포폭과 입자구형도의 영향은 실험결과가 매우 제한적인 실정으로 실험 결과의 축적과 함께 보다 세밀한 연구가 필요한 실정이다.

U_c 에 미치는 조업조건의 영향으로는 층의 압력이 증가함에 따라 감소하는 것으로 보고되어 왔으며[23-26], 층온도의 영향은 Cai 등[25, 27]의 경우에 Geldart 분류 A, B 입자계 모두에 대해 온도가 증가함에 따라 증가하는 것으로 보고한 반면 Chehbouni 등[14]의 경우에는 FCC 입자(Geldart 분류 A 입자, 78 μ m, 1,450 kg/m³)는 온도가 증가함에 따라 U_c 가 감소하며, 모래입자(Geldart 분류 B 입자, 250 μ m, 2,650 kg/m³)의 U_c 는 온도증가에 따라 증가하는 것으로 보고하였다.

기존의 연구들을 종합적으로 고려하면 온도와 분산판으로부터의 높이변화에 따른 U_c 의 변화에 대한 보고는 일부 연구자들에 제한되어 있으며, 특히 U_c 에 미치는 온도의 영향은 입자종류에 따라 서로 다른 경향을 나타내는 것으로 보고되어 왔다. 따라서 U_c 에 대한 온도와 높이변화의 영향을 보다 분명하게 규명하기 위해서는 넓은 실험범위에서 보다 광범위한 연구를 통한 확인 및 실험자료의 축적이 필요한 실정이다.

본 연구에서는 난류유동층으로의 전이유속에 미치는 층온도와 분산판으로부터의 높이의 영향을 고찰하기 위하여 층물질로 모래입자를 사용하여 상온에서부터 500 $^{\circ}$ C까지의 온도변화와 분산판으로부터의 높이(0.02-0.10, 0.10-0.15, 0.15-0.24, 0.24-0.29, 0.02-1.97 m) 및 입자크기(평균입경 0.134, 0.256 mm)를 변화시키며 난류유동층 전이유속의 변화경향을 측정 및 고찰하였다.

2. 실험

2-1. 실험장치

Fig. 1은 본 실험에 사용된 고온유동층 실험장치의 개략적인 흐름도를 나타내고 있다. 고온유동층은 직경 0.1 m, 총 높이 2.1 m인 스테인레스관(SUS 316)으로 제작되었다. 층가열장치로는 외부가열방식의 전기히터(용량 6 KW, max. 800 $^{\circ}$ C) 2대를 사용하였다. 유동화 기체는 공기를 사용하였으며 플레넘(plenum)에 위치한 수평관(0.032 m-I.D.)으로 주입되어 기체분배기를 통하여 유동층에 공급되었다. 기체분배기는 multi-tuyere 형으로 직경 20 mm의 tuyere 4개에 각각 3 mm의 구멍 12개를 배치하였으며 입자의 통과를 방지하기 위해서 체(ASTM 200 mesh)를 깔았다.

측방향 온도분포는 분배기로부터 높이 -0.05, 0.02, 0.19, 0.53, 0.84, 1.29, 1.97 m에 설치된 7개의 K-형(chromel-alumel) 열전대(thermocouple)와 data logger(Molytek, Model 2702)에 의해서 연속적으로 측정되었다.

주어진 높이에서 유동층의 압력요동을 측정하기 위하여, 분산판으로부터 측방향으로 12개(-0.05, 0.02, 0.10, 0.15, 0.24, 0.29, 0.34, 0.39, 0.53, 0.84, 1.29, 1.97 m)의 압력점을 설치하였으며, 각 압력점에서의 압력신호는 압력변환기(차압형, Validyne, P24D Model)를 사용하여 전기신호(± 5 V)로 바꾸어 자료수집계(data acquisition system, Real time devices Inc., AD2110 Model)를 거쳐서 PC에 저장하였다. 각

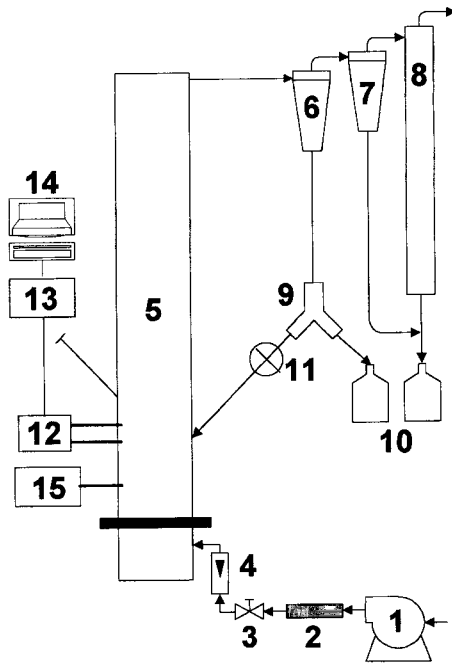


Fig. 1. Schematic diagram of hot-model fluidized bed.

- | | |
|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 1. Air compressor | 8. Bag filter |
| 2. Filter | 9. Diverter |
| 3. Pressure regulator | 10. Sample pot |
| 4. Flowmeter | 11. Rotary valve |
| 5. Electrically heated fluidized bed | 12. Differential pressure transducer |
| 6. Cyclone 1 | 13. A/D converter |
| 7. Cyclone 2 | 14. Personal computer |
| | 15. Data logger |

실험조건에서 압력신호는 1 kHz의 주파수로 10,000개를 수집하였다.

2-2. 실험재료

Table 2는 충물질로 사용된 모래의 대표적인 입도분포와 물성을 나타낸다. 난류유동층 전이유속에 미치는 입자크기의 영향을 고려하기 위하여 평균입경이 다른 두 가지의 모래를 충물질로 사용하였으며 0.134 mm 입자는 넓은 입도분포를, 0.256 mm 입자의 경우에는 좁은 입도분포를 갖도록 선정하였다.

2-3. 실험방법

Table 2. Properties and sieve analysis of sand

Particle	Sand I	Sand II
Specific surface mean particle diameter(mm)	0.134	0.256
Apparent density(kg/m ³)	2679	2575
Size distribution		
Sieve size(μm)	weight fraction	weight fraction
- 425+300	0.041	-
- 300+212	0.107	1.000
- 212+150	0.320	-
- 150+106	0.320	-
- 106+75	0.152	-
- 75+53	0.055	-
- 53+0	0.004	-

먼저 입도분포와 무게가 측정된 충물질을 실험조건에 고정충높이 (0.3 m)로 유동층에 채웠다. 재순환관의 diverter를 순환위치로 하고, 로터리밸브를 작동시켰다. 압력조절기의 압력을 약 199 kPa로 유지하고, 유량조절밸브와 유량계로 일정 유량의 공기를 공급하면서 충가열장치를 서서히 작동시켰다. 유동층과 1차 싸이클론 포집입자의 재순환이 정상적으로 이루어져 유동층의 압력분포가 안정되고, 층내 온도가 일정한 실험조건에 도달되었을 때를 정상상태로 간주하였다. 정상상태에서 각 측정점에 위치한 차압형 압력변환기를 이용하여 유동층내 압력요동을 측정하였으며 자료수집계를 거쳐서 PC에 기록하였다. 측방향 온도분포는 data logger를 사용하여 연속적으로 기록하였다.

실험변수로는 온도(15-500 °C), 압력요동 측정지점의 높이(0.02-0.10, 0.10-0.15, 0.15-0.24, 0.24-0.29, 0.02-1.97 m), 입자크기(평균입경 0.134, 0.256 mm)를 고려하였으며 각 실험조건에서 측정된 압력요동신호의 평균값(mean), 평균진폭(mean amplitude), 표준편차(standard deviation), 정규화된 표준편차(normalized standard deviation, standard deviation/mean)를 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 최소유동화속도

Fig. 2는 상온에서 0.256 mm 입자의 경우에 유속변화에 따라 측정된 층의 압력강하(bed pressure drop), 평균진폭(mean amplitude), 표준

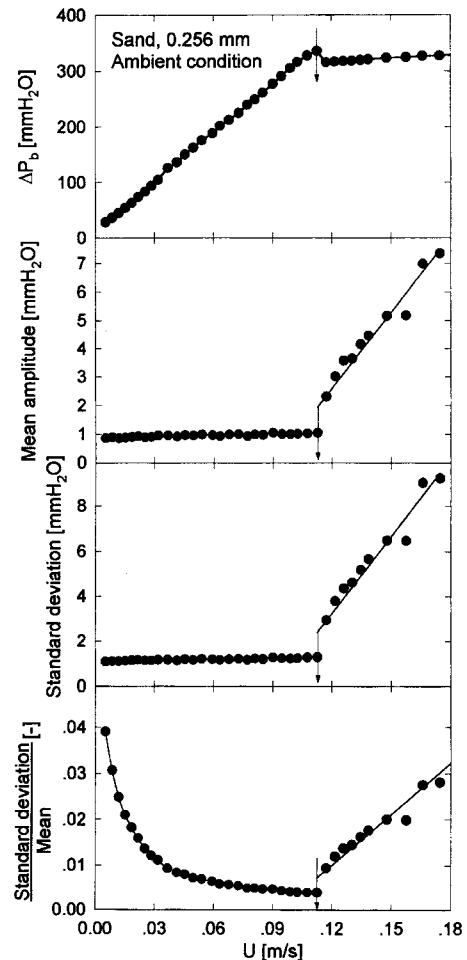


Fig. 2. Variations of bed pressure drop, mean amplitude, standard deviation, and normalized standard deviation with gas velocity.

준편차(standard deviation), 정규화된 표준편차(normalized standard deviation)의 변화를 나타내고 있다. 최소유동화속도는 정의에 따라 층의 압력강하가 일정해지기 시작하는 유속으로 결정할 수 있으며, 그림에 나타난 바와 같이 최소유동화속도보다 유속이 증가하면 평균진폭, 표준편차, 정규화된 표준편차가 급격히 증가하는 경향을 나타내었으며 정규화된 표준편차의 경우에는 최소유동화속도에서 최소값을 나타내었다. 이러한 경향은 최소유동화상태보다 유속이 증가하면 기포가 출현하고 고체들이 움직이기 시작하여 층의 압력요동이 급격히 증가하기 때문으로 사료되었다. 결과적으로 유속변화에 따라 층의 압력강하를 도시하여 최소유동화속도를 측정하는 방법 이외에도 압력요동신호의 분석을 통해 최소유동화속도를 측정할 수 있었으며, 유속에 따라 층의 압력강하를 도시하는 방법보다는 압력요동신호의 분석, 특히 유속에 따른 정규화된 표준편차의 변화를 도시하여 결정하는 방법이 보다 분명하게 최소유동화속도를 결정할 수 있는 것으로 사료되었다.

측정된 최소유동화속도는 온도가 증가함에 따라 감소하였고(0.134 mm : 0.039-0.033 m/s, 0.256 mm : 0.113-0.067 m/s), 입자크기가 증가함에 따라 증가하였으며, Ergun 식[28]의 계산결과(0.134 mm : 0.037-0.023 m/s, 0.256 mm : 0.113-0.071 m/s)와 유사한 반면 Wen과 Yu[29]의 상관식에 의해 계산된 최소유동화속도(0.134 mm : 0.013-0.008 m/s, 0.256 mm : 0.050-0.031 m/s)는 측정값보다 작게 예측되었다.

3-2. 난류유동층 전이유속의 결정

본 실험에서 유속변화에 따라 측정된 압력요동 신호는 낮은 유속에서 비교적 주기적인 요동을 보이는 반면 유속이 증가하면 압력요동이 불규칙해지며 진폭이 감소하는 경향을 나타내었다. 이와 같은 경향은 U_c 이후에서부터 기포 또는 공극(void)이 분쇄되어 층의 내

부흐름이 난류유동층으로 전이되는 것을 나타낸다 할 수 있다.

Fig. 3은 0.134 mm 입자의 경우 상온, 높이 0.24-0.29 m, 0.256 mm 입자의 경우 100 °C, 높이 0.02-0.10 m의 조건에서 유속변화에 따라 측정된 압력신호의 평균진폭, 표준편차 및 정규화된 표준편차의 변화를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 평균진폭, 표준편차 및 정규화된 표준편차 모두 유속이 증가함에 따라 증가하여 최대점을 보인 후 다시 감소하는 경향을 나타내었으며 기존의 보고와 마찬가지로 각 특성값이 최대점을 보이는 유속을 U_c 로 결정하였다. 실험 조건에 따라 평균진폭, 표준편차 및 정규화된 표준편차가 최대점을 보이는 유속이 다소 다르게 나타난 경우도 있었으나 그 차이는 0.05 m/s 이하였으며 최대점을 보이는 유속이 다를 경우에는 Bereton과 Grace[1]의 보고에서 추천된 바와 같이 정규화된 표준편차값이 최대점을 보이는 유속을 U_c 로 간주하였다.

3-3. U_c 에 대한 온도의 영향

Fig. 4는 0.134, 0.256 mm 입자에 대해 온도변화에 따른 난류유동층 전이유속의 변화를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 두 입자 모두에 대해 모든 높이에서 온도와 입자크기가 증가함에 따라 U_c 가 증가하였다. 이와 같은 경향은 Stubington 등[30], Geldart와 Kapoor[31]의 보고에 나타난 바와 같이 온도가 증가함에 따라 기포크기가 감소하여 최대안정기포크기에 도달하기 어려워지므로 더 높은 유속에서 기포의 분쇄가 시작되기 때문으로 사료되었다.

유동층 전체에 걸쳐 압력을 측정한 경우(0.02-1.97 m)의 U_c 는 두 입자 모두에 대해 0.02-0.10 m와 0.10-0.15 m에서 측정된 값 사이에 속하는 것으로 나타났다.

그림에 나타난 바와 같이 온도가 증가함에 따라 높이변화에 따른 U_c 의 변화폭이 감소하였는데 이와 같은 경향은 Kai와 Furusaki[32]의 보고에 나타난 바와 같이 온도가 증가함에 따라 유동층 내부흐름

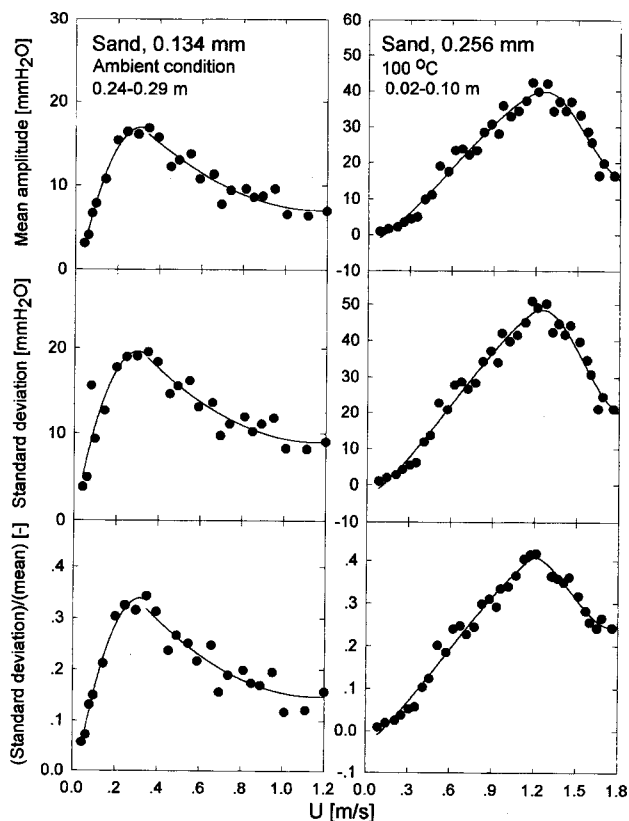


Fig. 3. Mean amplitude, standard deviation, and normalized standard deviation versus superficial gas velocity.

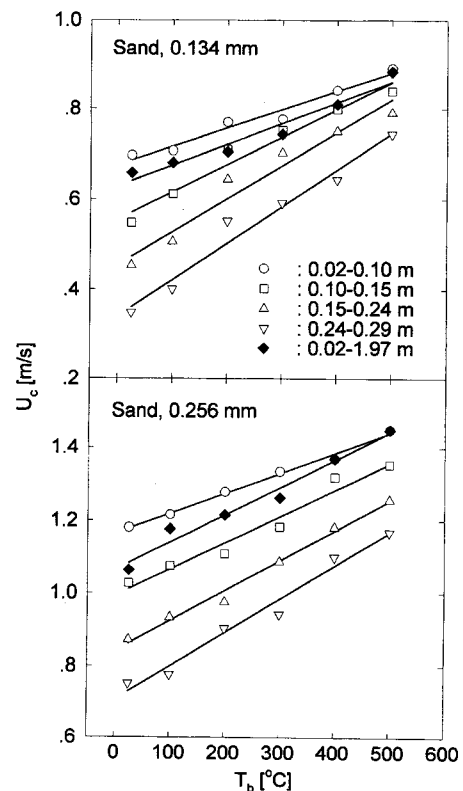


Fig. 4. Effect of bed temperature on transition velocity to turbulent flow regime at various heights from distributor plate.

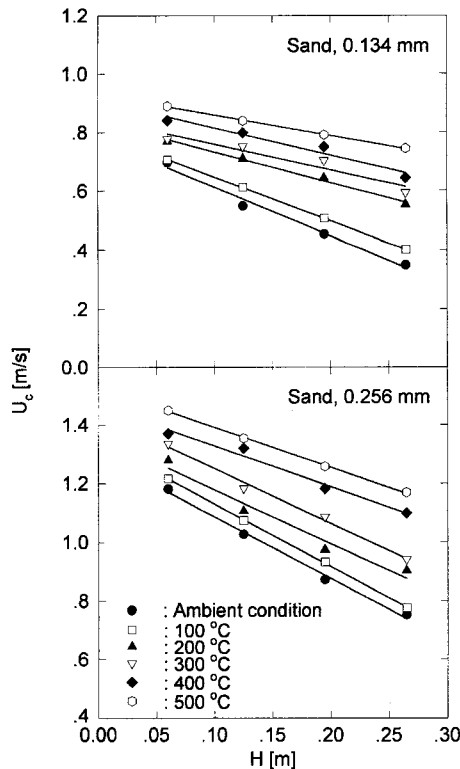


Fig. 5. Effect of height from distributor plate on transition velocity to turbulent flow regime at various bed temperatures.

의 균일성(homogeneity)이 증가하기 때문으로 사료되었다.

3-4. U_c 에 대한 높이의 영향

Fig. 5는 0.134, 0.256 mm 입자에 대해 주어진 온도에서 분산판으로부터의 높이변화에 따른 난류유동층 전이유속의 변화를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 모든 온도범위에서 분산판으로부터의 높이가 증가함에 따라 U_c 가 감소하였다. 이와 같은 경향은 같은 유속에서도 분산판으로부터의 높이가 증가함에 따라 기포크기가 증가하여 최대안정기포크기(maximum stable bubble size)에 가까워지므로 더 낮은 유속에서 기포가 분쇄되기 때문으로 사료되었다.

분산판으로부터 높이변화에 따라 U_c 가 감소하는 현상을 일으킬 수 있는 다른 원인으로 입도분리현상(segregation)을 고려할 수 있다. 특히 0.134 mm 입자의 경우 혼합입도를 사용하였으므로 입도분리현상이 일어날 수 있으며, 이런 경우에는 분산판 부근에는 굵은 입자가, 층의 상부에는 고운 입자가 존재하게 되어 분산판으로부터의 높이가 증가함에 따라 그 높이에 존재하는 입자의 크기가 감소하므로 U_c 가 감소할 수 있다. 또한, 넓은 입도분포를 갖는 입자의 경우 높이에 따른 기포크기 증가와 함께 입도분리의 영향이 복합적으로 작용하므로 좁은 입도분포를 갖는 입자에 비해 높이에 따라 U_c 가 급격히 감소할 것으로 예측할 수 있다.

본 연구에서는 입도분리현상의 영향을 고려하기 위해 Table 2에 나타난 바와 같이 0.134 mm 입자의 경우에는 넓은 입도분포(0-0.425 mm)를 갖도록 선정하였으며 0.256 mm 입자의 경우에는 좁은 입도분포(0.212-0.300 mm)를 갖도록 선정하였다.

Fig. 5에 나타난 바와 같이 입도분포폭이 다른 두 입자에 대해 분산판으로부터 높이변화에 따른 U_c 의 감소기울기는 입도분포폭과 관계없이 유사하거나, 좁은 입도분포를 갖는 0.256 mm 입자의 경우가 감소기울기가 크게 나타났으며, 이와 같은 경향으로 미루어 높이 증

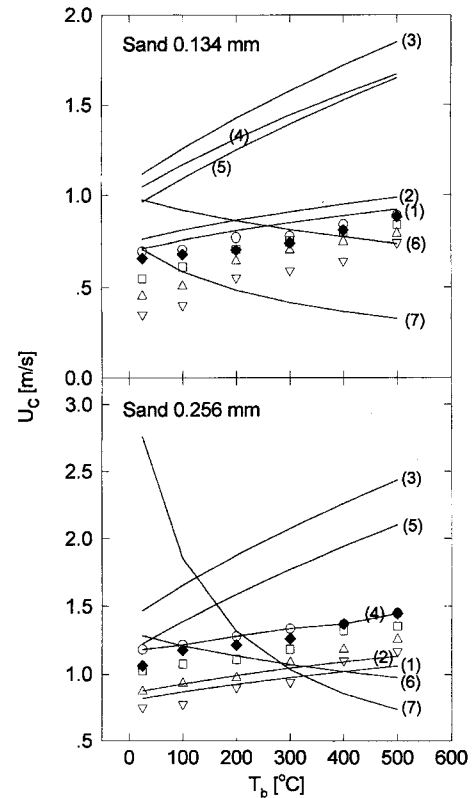


Fig. 6. Comparison between measured U_c and calculated values by previous correlations.

symbols: measured values, ○: 0.02-0.10 m, □: 0.10-0.15 m, △: 0.15-0.24 m, ▽: 0.24-0.29 m, ◆: 0.02-1.97 m
lines: calculated values, (1) Jin et al.[17], (2) Cai et al.[25], (3) Lee and Kim[36], (4) Lee and Kim[21], (5) Nakajima et al.[37], (6) Chehbouni et al.[13], (7) Bi et al.[40]

가에 따른 U_c 의 감소경향은 입도분리현상의 영향보다는 높이증가에 따른 기포크기의 증가가 주된 영향을 미치는 것으로 사료되었다.

3-5. 기존 상관식과의 비교

U_c 에 대한 기존 상관식들에 대해 온도와 높이변화에 따른 U_c 의 예측가능여부를 해석하기 위해 본 연구의 측정값과 기존 상관식들(Table 3)을 비교하였다.

Fig. 6은 0.134, 0.256 mm 입자에 대해 온도변화에 따라 측정된 U_c 와 기존 상관식들에 의해 예측된 값을 비교하여 나타내고 있다. Fig. 6에서 온도변화에 따라 U_c 가 증가하는 것으로 예측되지만 측정값에 비해 과도하게 예측되는 상관식(Yang[34]: 2.43-5.45 m/s, Horio[35]: 1.39-3.04 m/s, Sun과 Chen[9]: 2.73-17.55 m/s, Bi와 Fan[38]: 2.58-5.62 m/s, Bi와 Grace[39]: 1.65-3.59 m/s)과 기체밀도 및 점도의 영향을 고려하지 않아서 온도변화에 따라 U_c 가 일정한 것으로 예측되는 Yershalmi와 Cankurt[33], Han 등[16]의 상관식은 측정값과의 비교에서 제외하였다. Bi 등[40]의 상관식 중에서는 압력요동을 기반으로 유도된 (a)식을 사용하여 비교하였다. 그림에 나타난 바와 같이 Lee와 Kim[36], Nakajima 등[37]의 상관식은 측정값에 비해 과도하게 예측되었다. Lee와 Kim[21]의 상관식은 0.256 mm 입자의 경우에는 측정값과 유사한 경향을 나타내었으나 0.134 mm 입자의 경우에는 측정값에 비해 과도하게 예측되었다. 한편, Chehbouni 등[13], Bi 등[40]의 상관식은 온도가 증가함에 따라 U_c 가 감소하는 반대의 경향을 나타내었다. 기존의 상관식들 중 Jin 등[17], Cai 등[25]의 상관식이 측

Table 3. Summary of correlations for the calculation of U_c .

Authors	Correlations	Applicable range
Yerushalmi and Cankurt[33]	$U_c = 3(\rho_p d_p)^{0.5} - 0.17$	$\rho_p d_p = 0.05 - 0.7 \text{ kg/m}^2$
Yang[34]	$U_c = U_i(\epsilon_c)^m$, $U_i/U_c = 25.49 \text{Re}_i^{-0.485}$ $m = 2.31 \text{Re}_i^{-0.0457}$, $\epsilon_c = (m-1)/m$	$33 \leq d_p \leq 49 \mu\text{m}$ $1070 \leq \rho_p \leq 1450 \text{ kg/m}^3$
Han et al.[16]	$U_c = 60 \rho_p^{0.58} d_p^{0.29} D_i^{0.53}$ in CGS	$24 \leq d_p \leq 2600 \mu\text{m}$ $1070 \leq \rho_p \leq 2920 \text{ kg/m}^3$
Horio[35]	$\text{Re}_c = 0.936 \text{Ar}^{0.472}$	$0.0779 \leq D \leq 0.305 \text{ m}$
Jin et al.[17]	$U_c = (g d_p)^{0.5} [(KD_f)(\rho_p - \rho_g)/(d_p \rho_g)]^{0.27}$ $KD_f = 0.00367$ (for free bed)	$54 \leq d_p \leq 2600 \mu\text{m}$ $50 \leq d_p \leq 1050 \mu\text{m}$ $700 \leq \rho_p \leq 2600 \text{ kg/m}^3$
Lee and Kim[36]	$\text{Re}_c = 0.70 \text{Ar}^{0.485}$	$0.44 \leq \text{Ar} \leq 4.4 \times 10^7$
Sun and Chen[9]	$U_c = 1.74 d_p^2 \left(\frac{\rho_p - \rho_g}{\rho_g} \right)^2 \left(\frac{\frac{\rho_p}{\rho_g} - \epsilon_{mf}}{1 - \epsilon_{mf}} \right)^2 \frac{g^{0.5}}{Z_c^{1.5}} + U_{mf}$ $Z_c = a \sqrt{\frac{0.6 D_i}{d_{b,max} + 0.6 D_i}} d_{b,max}$ $a = 2.25$	
Cai et al.[25]	$\frac{U_c}{(g d_p)^{0.5}} = \left(\frac{\mu_{20}}{\mu} \right)^{0.2} \left[K \left(\frac{\rho_{g,20}}{\rho_g} \right) \left(\frac{\rho_p - \rho_g}{\rho_g} \right) \left(\frac{D_f}{d_p} \right) \right]^{0.27}$ $D = D_f$, $K = \left(\frac{0.211}{D_i^{0.27}} + \frac{2.42 \times 10^{-3}}{D_i^{1.27}} \right)^{\frac{1}{0.27}}$ free bed $KD_f = (1.64-2.32) \times 10^{-3}$ bed with vertical tubes $KD_f = 3.42 \times 10^{-4}$ bed with pagoda type internal baffles $KD_f = 4.69 \times 10^{-3}$ two dimensional bed (12×300 mm)	$50 \leq T_b \leq 450^\circ\text{C}$ $100 \leq P \leq 800 \text{ kPa}$ $53 \leq d_p \leq 1057 \mu\text{m}$ $706 \leq \rho_p \leq 2580 \text{ kg/m}^3$
Lee and Kim[21]	$\text{Re}_c = 0.598 \text{Ar}^{0.5} + \text{Re}_{mf}$	
Nakajima et al.[37]	$\text{Re}_c = 0.663 \text{Ar}^{0.467}$	
Bi and Fan[38]	D_i effect not considered $\text{Re}_c = 0.601 \text{Ar}^{0.695}$ (a) $\text{Re}_c = 2.28 \text{Ar}^{0.419}$ (b)	$\text{Ar} \leq 125$ $\text{Ar} \geq 125$
	D_i effect considered (for Geldart group A particles) $\text{Re}_c = 16.31 \text{Ar}^{0.136} (U_i/\sqrt{g D_i})^{0.941}$ (c) $\text{Re}_c = 2.274 \text{Ar}^{0.419} (U_i/\sqrt{g D_i})^{0.0015}$ (d)	$\text{Ar} \leq 125$ $\text{Ar} \geq 125$
Bi and Grace[39]	$\text{Re}_c = 1.24 \text{Ar}^{0.45}$	$2 < \text{Ar} < 1 \times 10^8$
Chehbouni et al.[13]	$\text{Fr}_c = 0.463 \text{Ar}^{0.145}$, $\text{Fr}_c = U_c/(g D_i)^{0.5}$	$0.4 \leq \text{Ar} \leq 123316$ $0.05 \leq D_i \leq 0.2 \text{ m}$
Bi et al.[40]	$U_c = U_{mf} + 1.2 \text{Ar}^{0.04} (g v_d)^{1/3} (Y - 0.3 \text{Ar}^{0.04})$ (a) $U_c' = U_{mf} + 2.75 \times 10^4 v_d^{2/3} / (z + 4 S_0)^{1/2} g^{1/3}$ (b)	Pressure fluctuation Bubble size

정값과 유사한 값을 나타내었다.

Fig. 7은 0.134, 0.256 mm 입자에 대해 주어진 온도에서 분산판으로부터의 높이변화에 따라 측정된 U_c 와 Table 3에 나타난 Bi 등[40]의 상관식 중 기포크기를 기반으로 유도된 (b)식과의 비교를 나타내고 있다. Bi 등[40]의 (b)식 이외의 상관식들은 분산판으로부터 높이의 영향을 고려하지 않았으므로 높이변화에 따른 U_c 의 변화를 예측할 수 없었다.

그림에 나타난 바와 같이 Bi 등[40]의 상관식에 의한 예측값은 분산판으로부터의 높이가 증가함에 따라 U_c 가 감소하는 경향은 일치하였으나 측정값에 비해 작게 예측되었으며 측정된 U_c 는 온도가 증가함에 따라 증가하는 반면 Bi 등[40]의 상관식에 의해 예측된 U_c 는 온도가 증가함에 따라 감소하는 반대의 경향을 나타내었다.

Fig. 6과 7에 나타난 바와 같이 기존의 상관식들은 온도와 분산판으로부터의 높이변화에 따른 난류유동층 전이유속의 변화경향을 중

합적으로 해석하기에는 미흡하였으며 기존의 실험결과를 바탕으로, 난류유동층 전이유속에서의 수력학적특성을 고려한 새로운 모델의 개발이 필요한 것으로 사료되었다.

4. 결 론

본 연구의 실험범위에서 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 난류유동층 전이유속은 온도가 증가함에 따라 증가하였다.
- (2) 난류유동층 전이유속은 분산판으로부터 높이가 증가함에 따라 감소하였으며 온도가 증가함에 따라 높이의 영향이 감소하였다.
- (3) 문헌에 보고된 상관식들은 온도와 높이변화에 따른 난류유동층 전이유속의 변화경향을 표현할 수 없었으며, 새로운 해석의 제시가 필요하였다.

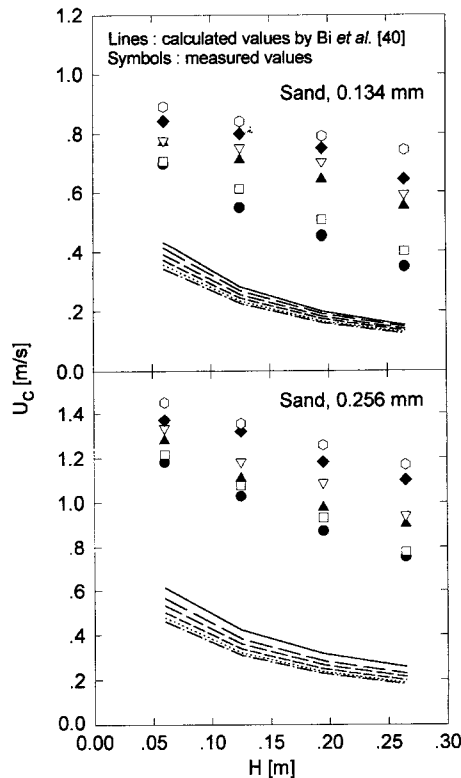


Fig. 7. Comparison between measured U_c and calculated values by previous correlations.

symbols : measured values

● : ambient condition, □ : 100 °C, ▲ : 200 °C, ▽ : 300 °C, ◆ : 400 °C, ○ : 500 °C

lines : calculated values by Bi et al.[40], Eq. (b)

— : ambient condition, - - - : 100 °C, ····· : 200 °C, - · - · : 300 °C, - · - · - : 400 °C, - · - · - · : 500 °C

감 사

본 연구는 대체에너지기술개발사업(G7)의 일환으로 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

사용기호

- a : constant in the equation of Sun and Chen[9], 2.25 [-]
 Ar : Archimedes number, $\rho_g(\rho_p - \rho_g)gd_p^3/\mu^2$ [-]
 $d_{b,max}$: maximum stable bubble size [m]
 D_f : equivalent diameter of fluidized bed [m]
 d_p : particle diameter [mm]
 D_i : column diameter [m]
 Fr_c : Froude number based on transition velocity to turbulent flow regime, $U_c/(gD_i)^{0.5}$ [-]
 g : gravitational acceleration, 9.8 [m/s²]
 H : height from distributor plate [m]
 K : constant in equation of Jin et al.[17], Cai et al.[25]
 m : exponent in the modified Richardson and Zaki equation, defined in Table 3 [-]
 P : pressure [kPa]
 Re_c : Reynolds number based on transition velocity to turbulent flow regime, $d_p U_c \rho_g / \mu$ [-]

- Re_t : Reynolds number based on terminal velocity of single particle, $d_p U_{t,p} \rho_g / \mu$ [-]
 S_o : catchment area for a bubble stream at the distributor plate [m²]
 T_b : bed temperature [°C]
 U : superficial gas velocity [m/s]
 U_c : transition velocity to turbulent flow regime [m/s]
 U_c' : superficial gas velocity required to bring bubbles to their maximum stable size [m/s]
 U_i : terminal velocity of cluster [m/s]
 U_{mf} : minimum fluidizing velocity [m/s]
 U_t : terminal velocity of single particle [m/s]
 Z : height from distributor plate [m]
 Z_c : parameter in the equation of Sun and Chen[8] to represent the geometric character of bed [m]

그리스 문자

- ϵ_e : effective voidage, defined by Yang[34] in Table 3 [-]
 ϵ_{mf} : void fraction in a bed at minimum fluidizing condition [-]
 μ : gas viscosity [kg/m · s]
 μ_{20} : gas viscosity at 20 °C [kg/m · s]
 ν_d : effective kinematic viscosity of the dense phase in the equation of Bi et al.[40] [m²/s]
 ρ_g : gas density [kg/m³]
 $\rho_{g,20}$: gas density at 20 °C [kg/m³]
 ρ_p : apparent particle density [kg/m³]
 ϕ_s : sphericity of particle [-]

참고문헌

1. Bereton, C. M. H. and Grace, R.: *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **70**, Part A, 246(1992).
2. Grace, J. R. and Sun, G.: *Can. J. of Chem. Eng.*, **69**, 1126(1991).
3. Sun, G. L.: Ph. D. Dissertation, University of British Columbia, Vancouver(1991).
4. Bi, H. T.: Ph. D. Dissertation, University of British Columbia, Vancouver(1994).
5. Bi, H. T. and Grace, J. R.: *Chem. Eng. J.*, **57**, 261(1995).
6. Kehoe, P. W. K. and Davidson, J. F.: "CHEMECA'70: Inst. Chem. Eng. Symp. Ser.", Butterworths, Australia, Melbourne, **33**, 97(1971).
7. Thiel, W. J. and Potter, O. E.: *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, **16**, 242 (1977).
8. Cai, P.: Ph. D. Dissertation, Tsinghua Univ.(cooperative program with Ohio State Univ.), Beijing(1989).
9. Sun, G. and Chen, G.: "Fluidization VI", edited by Grace, J. R., Shemilt, L. W. and Bergougnou, M. A., Engineering Foundation, New York, 33(1989).
10. Judd, M. R. and Goosen, R.: "Fluidization VI", edited by Grace, J. R., Shemilt, L. W. and Bergougnou, M. A., Engineering Foundation, New York, 41(1989).
11. Rhodes, M. J. and Geldart, D.: "Fluidization V", edited by Østergaard, K. and Sørensen, A., Engineering Foundation, New York, 281(1986).
12. Chehbouni, A., Chaouki, J., Guy, C. and Klvana, D.: *Ind. Eng. Chem. Res.*, **33**, 1889(1994).
13. Chehbouni, A., Chaouki, J., Guy, C. and Klvana, D.: *Can. J. of Chem. Eng.*, **73**, 41(1995).

14. Chehbouni, A., Chaouki, J., Guy, C. and Klvana, D.: "Fluidization VIII", edited by Large, J. F. and Laguérie, C., Engineering Foundation, New York, 149(1995).
15. Shin, B. C., Koh, Y. B. and Kim, S. D.: *HWAHAK KONGHAK*, **22**, 253(1984).
16. Han, G. Y., Lee, G. S. and Kim, S. D.: *Korean J. Chem. Eng.*, **2**, 141(1985).
17. Jin, Y., Yu, Z., Wang, Z. and Cai, P.: "Fluidization V", edited by Østergaard, K. and Sørensen, A., Engineering Foundation, New York, 289(1986).
18. Subbarao, D. and Basu, P.: "Circulating Fluidized Bed Technology", edited by Basu, P., Pergamon Press, Toronto, 281(1986).
19. Lancia, A., Niro, R., Volpicelli, G. and Santoro, L.: *Powder Technol.*, **56**, 49(1988).
20. Mori, S., Hashimoto, O., Haruta, T., Mochizuki, K., Matsutani, W., Horaoka, S., Yamada, I., Kojima, T. and Tuji, K.: "Circulating Fluidized Bed Technology II", edited by Basu, P. and Large, J. F., Pergamon Press, New York, 105(1988).
21. Lee, G. S. and Kim, S. D.: *Korean J. Chem. Eng.*, **6**, 338(1989).
22. Perales, J. F., Coll, T., Llop, M. F., Puigjaner, L., Arnaldos, J. and Cassal, J.: "Circulating Fluidized Bed Technology III", edited by Basu, P., Horio, M. and Hasatani, M., Pergamon Press, New York, 73(1990).
23. Yang, W. C. and Chitester, D. C.: *AIChE Symp. Ser.*, **84**(262), 10 (1988).
24. Saito, Y., Kuwa, M. and Hashimoto, O.: *AIChE Symp. Ser.*, **84** (262), 102(1988).
25. Cai, P., Jin, Y., Yu, Z. Q. and Wang, Z. W.: *AIChE Symp. Ser.*, **85**(270), 37(1989).
26. Tsukada, M., Nakanishi, D. and Horio, M.: *Int. J. Multiphase Flow*, **19**(1), 27(1993).
27. Cai, P., Jin, Y., Yu, Z. Q. and Fan, L. S.: *Ind. Eng. Chem. Res.*, **31**, 632(1992).
28. Ergun, S.: *Chem. Eng. Prog.*, **48**, 89(1952).
29. Wen, C. Y. and Yu, Y. H.: *AIChE J.*, **12**, 610(1982).
30. Stubington, J. F., Barrett, D. and Lowry, G.: *Chem. Eng. Res. Des.*, **62**, 173(1984).
31. Geldart, D. and Kapoor, D. S.: *Chem. Eng. Sci.*, **31**, 842(1976).
32. Kai, T. and Furusaki, S.: *J. Chem. Eng. Japan*, **18**, 113(1985).
33. Yerushalmi, J. and Cankurt, N. T.: *Powder Technol.*, **24**, 187(1979).
34. Yang, W. C.: *AIChE J.*, **30**(6), 1025(1984).
35. Horio, M.: *J. Inst. Powder Technol. Japan*, **23**, 80(1986).
36. Lee, G. S. and Kim, S. D.: *J. Chem. Eng. Japan*, **21**, 515(1988).
37. Nakajima, M., Harada, M., Asai, M., Yamajaki, R. and Jimbo, G.: "Circulating Fluidized Bed Technology III", edited by Basu, P., Horio, M. and Hasatani, M., Pergamon, New York, 79(1991).
38. Bi, H. and Fan, L. S.: *AIChE J.*, **38**(2), 297(1992).
39. Bi, H. T. and Grace, J. R.: *AIChE Annual Meeting*, San Francisco, November, 13(1994).
40. Bi, H. T., Grace, J. R. and Lim, K. S.: *Ind. Eng. Chem. Res.*, **34**, 4003(1995).