

## 난류유동층에서 고속유동층으로의 전이유속에 대한 온도의 영향

배달희 · 류호정<sup>†</sup> · 선도원 · 진경태 · 이동규\*

한국에너지기술연구원

\*충북대학교 공업화학과

(2001년 4월 26일 접수, 2001년 6월 5일 채택)

## Effect of Temperature on Transition Velocity from Turbulent Fluidization to Fast Fluidization in a Gas Fluidized Bed

Dal-Hee Bae, Ho-Jung Ryu<sup>†</sup>, Dowon Shun, Gyoung-Tae Jin and Dong-Kyu Lee

Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea

\*Dept. of Industrial Chemistry Engineering, Chungbuk National University, Chongju 361-763, Korea

(Received 26 April 2001; accepted 5 June 2001)

### 요 약

난류유동층에서 고속유동층으로의 전이유속에 미치는 온도의 영향을 고찰하기 위해 증분질로 모래(평균입경: 0.256 mm, 입자밀도: 2,617 kg/m<sup>3</sup>)를 사용한 고온 순환유동층(내경 0.02 m, 높이 2.0 m)에서 emptying time method에 의해 고속유동층으로의 전이유속( $U_{tr}$ )을 측정 및 고찰하였다. 측정된 고속유동층으로의 전이유속은 온도가 증가함에 따라 증가하였다. 본 실험의 측정값 및 문헌의 보고들과 기존 상관식을 비교하였으며 기존 상관식들 중 Chehbouni 등[19]의 상관식이 측정값들과 가장 유사한 결과를 나타내었다.

**Abstract** – Transition velocity from turbulent to fast fluidization has been measured by emptying time method in a high temperature circulating fluidized bed(0.02 m i.d. and 2.0 m high) of sand particle(specific surface mean diameter: 0.256 mm, particle density: 2,617 kg/m<sup>3</sup>) with variation of temperature(15-600 °C). Measured transition velocity from turbulent to fast fluidization increased with increasing temperature. The previous correlations on transition velocity to fast fluidization compared with the measured values. Among the previous correlations, correlation of Chehbouni et al.[19] shows relatively good results.

Key words: Gas-Solid Fluidization, Transition Velocity, Fast Fluidization, Temperature Effect

### 1. 서 론

난류유동층(turbulent fluidized bed)에서 유속이 더욱 증가하면 입자의 비산유출이 급격히 증가하게 되고, 유속이 입자수송속도를 넘으면 층내 모든 입자는 비산유출되며 사이클론 등에 의한 재순환이 없는 층내 입자밀도를 유지할 수 없는 상태에 이르게 되는데 이를 고속유동층(fast fluidized bed)이라 한다. 고속유동층에서 층내 입자농도는 재순환되는 고체의 유량에 따라 변화하며 축방향 높이에 따라 고체농도가 거의 일정하게 유지되고 층내 고체량의 유지를 위해서는 원활한 고체순환이 요구된다. 고속유동층 조업은 고체의 역혼합에 의해 연소로의 경우 온도분포가 균일해질 뿐 아니라 주입된 차가운 고체 및 공기가 빠르게 조업온도로 가열될 수 있는 특징이 있어서 순환유동층연소로, 가스화 반응기 및 기타 화학반응기에 널리 사용되고 있다[1, 2].

난류유동층에서 고속유동층으로 전이되는 유속은 증분질이 재순환되지 않는 회분식 조업에서 유속을 높일 수 있는 한계유속이 되며 비산된 증분질이 재순환되는 연속조업의 경우 농후상과 회박상의 경계

(dense-dilute interface)가 없어지는 가장 낮은 유속이 된다[2].

고속유동층으로의 전이유속을 측정하는 방법은 크게 고체농도(solid concentration)를 이용하여 측정하는 방법과 입자비산속도를 이용하여 측정하는 방법으로 나눌 수 있다. 고체농도를 이용하는 방법은 유속에 따라 층팽창을 측정하는 방법, 일정한 고체순환속도에서 유속변화에 따른 유동층 축방향 단위길이당 압력강하를 도시하여 결정하는 방법, 일정한 고체순환속도에서 유속변화에 따른 층내 공극률의 변화를 도시하여 결정하는 방법, 유속변화에 따른 층의 겉보기 밀도(bulk density)를 도시하여 결정하는 방법, 유속변화에 따른 층내 압력요동의 변화를 이용하여 결정하는 방법, 유속변화에 따라  $U_s(1-\epsilon)$ 을 도시하여 결정하는 flooding point method 등으로 나눌 수 있으며 입자비산특성을 이용하는 방법은 증분질의 재순환을 막아서 증분질이 모두 비산되는데 걸리는 시간(emptying time)을 측정하고 이 값을 유속변화에 따라 도시하여 결정하는 방법(emptying time method), 유속변화에 따른 최대 고체순환량(maximum  $G_s$ )을 도시하여 결정하는 방법, 입자크기에 따른 비산가능성(elutriability)을 도시하여 결정하는 방법, 유속 변화에 따른 포화 고체순환량(saturated  $G_s$ )을 도시하여 결정하는 방법, 유속변화에 따라 입자비산속도를 도시하여 결정하는 방법 등으로 나눌 수 있다. Table

<sup>†</sup>E-mail: hjryu@kier.re.kr

**Table 1. Methods for determining transition velocity from turbulent to fast fluidization**

Type	Methods	Symbol in Table 4	Authors
Solid concentration	Bed expansion versus U	1	Lewis et al.[3] Yerushalmi et al.[4] Avidan and Yerushalmi[5] Schnitzlein and Weinstein[6]
	$-\Delta P/\Delta Z$ -U- $G_s$ phase diagram	2	Yerushalmi and Cankurt[7] Horio et al.[8] Bi et al.[9] Jiang and Fan[10] Horio et al.[11] Adánez et al.[12] Tsukada et al.[13]
	Voidage-U- $G_s$ phase diagram	3	Chen et al.[14] Li and Kwauk[15] Kwauk et al.[16] Perales et al.[17] Li et al.[50]
	Bed bulk density versus U	4	Chehbouni et al.[18, 19]
	Pressure fluctuation	5	Leu et al.[20] Yang et al.[21]
	Flooding point method $U_s(1-\epsilon)$ versus U diagram	6	Adánez et al.[12] Namkung et al.[22]
Entrainment	Emptying time versus U	7	Lee and Kim[23] Shin et al.[24] Han et al.[25] Perales et al.[17] Adánez et al.[12] Chehbouni et al.[18, 19] Delebarre et al.[26] Namkung et al.[22]
	Maximum $G_s$ versus U	8	Schnitzlein and Weinstein[6] Adánez et al.[12]
	Elutriability versus $d_p$	9	Le Pauld and Zenz[27]
	Saturated $G_s$ versus U	10	Bi et al.[28]
	Entrainment rate versus U	11	Yi et al.[29]

1은 고속유동층으로의 전이유속을 측정하는 방법을 분류하여 나타내고 있으며 각각의 측정방법을 사용한 연구결과들을 요약하여 나타내고 있다. Table 1에 나타난 바와 같이 기존 보고들 중에서 층물질이 모두 비산되어 층이 비워지는데 걸리는 시간(emptying time)을 유속변화에 따라 도시하여 그 기울기가 변하는 유속을 고속유동층으로의 전이유속으로 결정하는 emptying time method가 가장 많이 사용되었다. 하지만 기존 보고들에서는 층내 고체가 모두 비산되는데까지 걸리는 시간을 물마노미터(water manometer) 등의 압력계를 시각적으로 관찰하는 방법에

의해 측정 한 경우가 많았으며 특히, 유속이 높아서 emptying time이 수 초 이내인 경우에는 정확한 측정이 어려운 단점이 있다. 따라서 emptying time method에 의해 고속유동층으로의 전이유속을 측정하기 위해서는 보다 정확하게 emptying time을 측정할 수 있는 방법을 사용해야 한다.

Table 2는 고속유동층으로의 전이유속에 미치는 여러 변수들의 영향에 대한 기존 연구들을 요약하여 나타내고 있다. 유동층 형태의 영향으로 Chehbouni 등[19]의 실험결과에서 층직경이 증가함에 따라 고속유동층으로의 전이유속이 증가하는 것으로 나타났다. 입자특성의 영향에

**Table 2. Factors influencing on the transition velocity from turbulent to fast fluidization.**

Variable increased		Effect on $U_{tr}$	Source
Bed geometry	Bed diameter( $D_b$ )	Increase	Chehbouni et al.[19]
Particle properties	Mean particle diameter( $\bar{d}_p$ )	Increase	Shin et al.[24] Han et al.[25] Perales et al.[17] Jiang and Fan[10] Adánez et al.[12]
	Particle density( $\rho_p$ )	Increase	Yerushalmi and Cankurt[7] Avidan and Yerushalmi[5]
Operating condition	Pressure(P)	Decrease	Tsukada et al.[13]

**Table 3. Summary of correlations on the transition velocity from turbulent to fast fluidization**

Authors	Correlations
Lee and Kim[30]	$Re_{tr} = 2.916 Ar^{0.354}$
Perales et al.[17]	$Re_{tr} = 1.41 Ar^{0.483}$
Bi and Fan[31]	$Re_{tr} = 2.28 Ar^{0.419}$
Adánez et al.[12]	$Re_{tr} = 2.078 Ar^{0.463}$
Tsukada et al.[13]	$Re_{tr} = 1.806 Ar^{0.458}$
Chehbouni et al.[19]	$Re_{tr} = 0.169 Ar^{0.545} (D_r/d_p)^{0.3}$

대해 Shin 등[24], Han 등[25], Perales 등[17], Jiang과 Fan[10], Adánez 등[12]은 입자크기가 증가함에 따라 고속유동층으로의 전이유속이 증가하는 것으로 보고하였으며 Yerushalmi와 Cankurt[7], Avidan과 Yerushalmi[5]는 입자밀도가 증가함에 따라 고속유동층으로의 전이유속이 증가하는 것으로 보고하였다. 조업조건의 영향으로 Tsukada 등[13]은 0.1-0.7 MPa의 압력범위에서 실험한 결과 압력이 증가함에 따라 고속유동층으로의 전이유속이 감소하는 것으로 보고하였다.

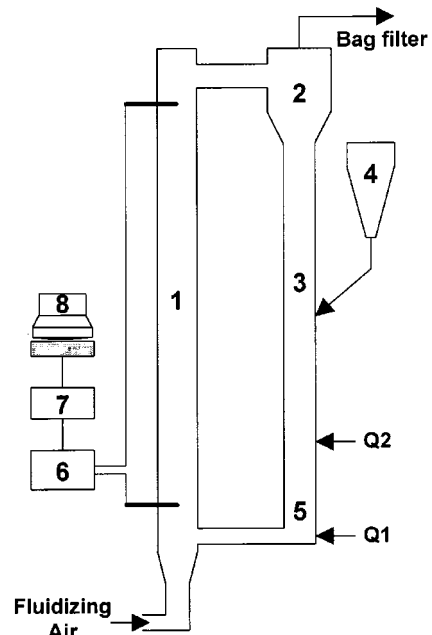
Table 3은 고속유동층으로의 전이유속을 예측하기 위해 제시된 기존의 상관식들을 요약하여 나타내고 있다. 표에 나타난 바와 같이 모든 상관식이 레이놀즈 수( $Re_{tr}$ )와 아르키메데스 수( $Ar$ )의 함수로 표현되었다. 하지만 Tsukada 등[13]의 상관식 이외의 상관식들은 상온, 상압 조건의 실험자료를 바탕으로 제시된 상관식으로서 레이놀즈 수와 아르키메데스 수에 포함된 기체밀도와 기체점도의 변화가 없는 조건에서 제시된 상관식이며 단지 식의 형태를 무차원군(dimensionless group) 형태로 표현하기 위해 기체밀도와 기체점도의 항을 포함시킨 상관식이다. 또한 Tsukada 등[13]의 경우에는 압력의 영향을 고려하였으나 압력이 변화할 경우 기체점도는 거의 일정하게 유지되며 기체밀도만 변화한 경우이기 때문에 기체점도의 변화를 함께 고려하기 위해서는 온도변화에 따른 고속유동층으로의 전이유속에 대한 실험과 함께 온도영향에 대한 기존 상관식들의 해석 가능성에 대한 검토가 필요하다.

기존의 연구들을 종합적으로 재고하면 순환유동층연소로의 조업조건과 같은 고온유동층 조건에서, 고속유동층으로의 전이유속에 미치는 온도의 영향에 대해서는 보고된 바 없으며 제시된 상관식들도 레이놀즈 수( $Re_{tr}$ )와 아르키메데스 수( $Ar$ )에 기체밀도와 기체점도의 항이 포함되어 있으나 기존 실험들은 대부분 상온, 상압의 실험조건에서 수행된 결과이기 때문에 고온에서의 적용 가능성에 대해서는 실험결과와의 비교를 통한 확인이 필요하다. 또한 여러 상관식들이 제시되어 있기 때문에 기존 상관식들과 실험결과와의 비교, 검토를 통해 고속유동층으로의 전이유속을 가장 적합하게 예측할 수 있는 상관식을 선정하는 것이 고속유동층 전이유속을 이해하는데 도움을 줄 수 있다.

본 연구는 기체유동층에서 온도의 변화에 따른 고속유동층으로의 전이유속의 변화를 해석하기 위해 모래를 충물질로 사용하여 층온도를 변화시키면서 고속유동층으로의 전이유속을 측정 및 고찰하였다.

## 2. 실험

Fig. 1은 본 실험에 사용된 고온 순환유동층 실험장치를 나타내고 있다. 전체 장치는 상승관(riser), 사이클론, downcomer와 L-valve로 구성되어 있다. 상승관과 downcomer는 내경 0.02 m, 높이 2.0 m의 투명한 석영관(quartz tube)으로 제작되었고 downcomer 상부에는 사이클론을 설치하였다. 유동화기체는 공기가 사용되었으며 가스미터로 보정된 디지털 유량계(McMillan Co., Model 100-12)로 정량되어 상승관 하부로 주입되도록 하였다. 층내 압력신호는 L-valve를 통해 고체가 재주입되는 위치로부터 높이 0.05 m와 1.7 m에 위치한 압력점을 차압형 압력변환기와 연결하여 측정하였다. 상승관과 downcomer의 온도조절을 위

**Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.**

1. Riser
2. Cyclone
3. Downcomer
4. Feed hopper
5. L-valve
6. Differential pressure transducer
7. A/D converter
8. Personal computer

해 상승관은 4 kW의 용량을 갖는 전기히터 4개, downcomer는 6 kW의 전기히터 2개를 사용하여 가열하였으며 온도조절기로 원하는 온도를 유지시켰다. 비산된 고체는 사이클론에서 포집되어 downcomer와 L-valve를 통해 상승관으로 재주입되었다.

실험에 사용된 입자는 모래로서 평균입径은 0.256 mm, 입자밀도(apparent density)는 2,617 kg/m<sup>3</sup>, 벌크밀도 1,222 kg/m<sup>3</sup>이다.

각 유속조건에서의 압력요동 특성을 측정하기 위해 먼저 입도와 무게가 측정된 충물질을 downcomer에 위치한 고체시료 주입구에 넣은 후 Fig. 1의 Q1과 Q2 부분에 공기를 주입하여 상승관 쪽으로 고체가 순환되도록 하였다. 상승관으로 재주입되는 고체량은 Q1의 유량을 변화시켜 조절할 수 있었다.

원하는 유속과 온도조건에서 층내 압력요동이 주기적인 경향을 보일 때를 정상상태로 고려하였으며 정상상태에서 층의 압력요동 신호를 측정하였다. 고속유동층으로의 전이유속은 Table 1에 나타난 emptying time method를 이용하여 결정하였다. 원하는 유속과 온도조건에서 정상상태를 유지하다가 L-valve를 통해 상승관으로 재순환되는 고체의 흐름을 막으면 상승관에서는 고체의 비산유출이 일어나 층내 고체량이 감소하게 되며 이때의 층내 압력강하도 시간이 지남에 따라 감소하게 된다. 상승관으로의 고체 재순환을 막은 순간부터 입자 비산에 의해 층내 고체량이 감소하여 층내 압력강하 신호가 감소한 후 거의 일정해질 때까지의 시간을 emptying time으로 결정하였다[24, 25]. Emptying time의 정확한 결정을 위해 층내 압력강하를 차압형 압력변환기와 A/D converter에 의해 디지털 신호로 측정하였다. 고속유동층으로의 전이유속 측정을 위한 실험은 주어진 조건에서 3회 반복실험을 통해 재현성을 고찰하였다.

각 실험조건에서의 압력신호는 압력변환기(차압형, validyne, P24D Model)를 사용하여 전압( $\pm 5$  V)-시간 신호로 바꾸어 자료수집계(data acquisition system, Real time devices Inc., AD2110 Model)를 거쳐서 PC에 저장하였다. 각 실험조건에서 압력신호는 100 Hz의 주파수로 10,000개를 수집하였다.

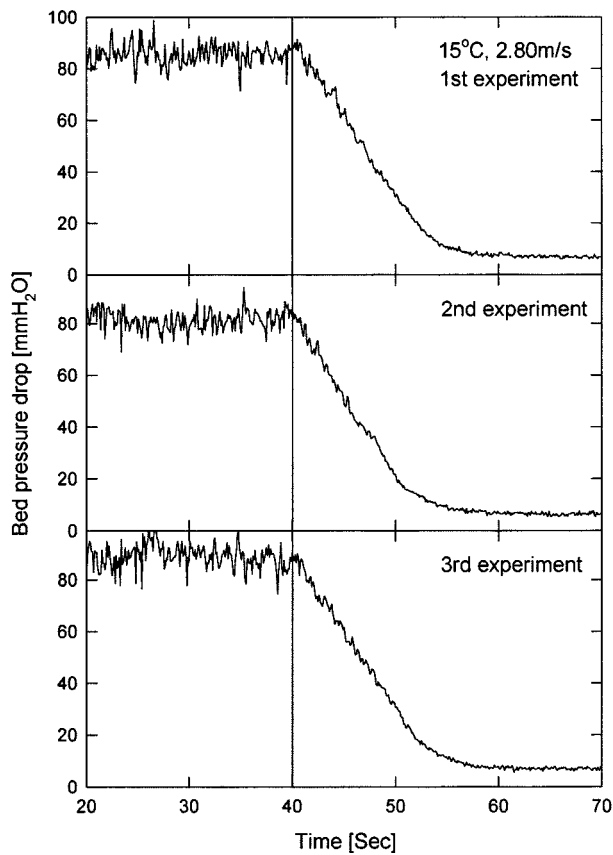


Fig. 2. Bed pressure drop versus time-emptying time determination.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3-1. 고속유동층으로의 전이유속 결정

Fig. 2는 본 연구에서 emptying time 결정에 사용된 방법을 나타내고 있다. 본 연구에서는 층내 압력강하를 차압형 압력변환기를 이용하여 측정하였다. 그림에서 40초까지는 상승관에서 비산된 고체가 L-valve를 통해 상승관으로 다시 주입되는 정상상태의 압력신호를 나타낸다. 이러한 정상상태 조건에서 상승관으로의 고체 재주입을 막으면 상승관으로의 고체 보충이 없으므로 입자비산에 의해 층내 고체량이 감소하게 되며 상승관에서의 압력강하도 감소하게 된다. Fig. 2는 정상상태에서부터 압력신호를 측정하기 시작한 후 40초가 되었을 때부터 고체를 재순환시키지 않은 경우의 압력신호를 나타내고 있으며 그 시간 이후부터 층내 압력강하가 감소한 후 대부분의 입자가 비산유출되면 압력신호가 일정해졌다. 본 연구에서는 층의 압력강하가 감소한 후 일정해지기 시작하는 시간을 emptying time으로 결정하였다. 압력변환기로 층내 압력요동 신호를 측정하여 emptying time을 결정하는 방법은 압력계의 시각적 관찰에 의해 결정하는 방법에 비해 정확한 값을 측정할 수 있는 것으로 사료되었다. 그림에 나타난 바와 같이 주어진 조건에서 3회에 걸쳐 반복실험을 하였으며 3회의 실험에서 얻은 emptying time 값은 거의 유사하였고 편차는 최대 1초 이내였다.

Fig. 3은 각각의 온도에서 유속변화에 따른 emptying time의 변화를 나타내고 있다. 그림에 나타난 emptying time 값은 3회 실험의 평균값을 사용하였다. 그림에 나타난 바와 같이 유속이 증가함에 따라 상승관내의 고체를 모두 비산시키는데 걸리는 시간인 emptying time이 급격히 감소한 후 감소 경향이 둔화되었다. 기존 보고에 나타난 바와 같이 유속변화에 따른 emptying time의 감소 기울기가 변하는 유속을 고속유동층으로의 전이유속,  $U_{tr}$ 로 결정하였다[12, 17-19, 22-26].

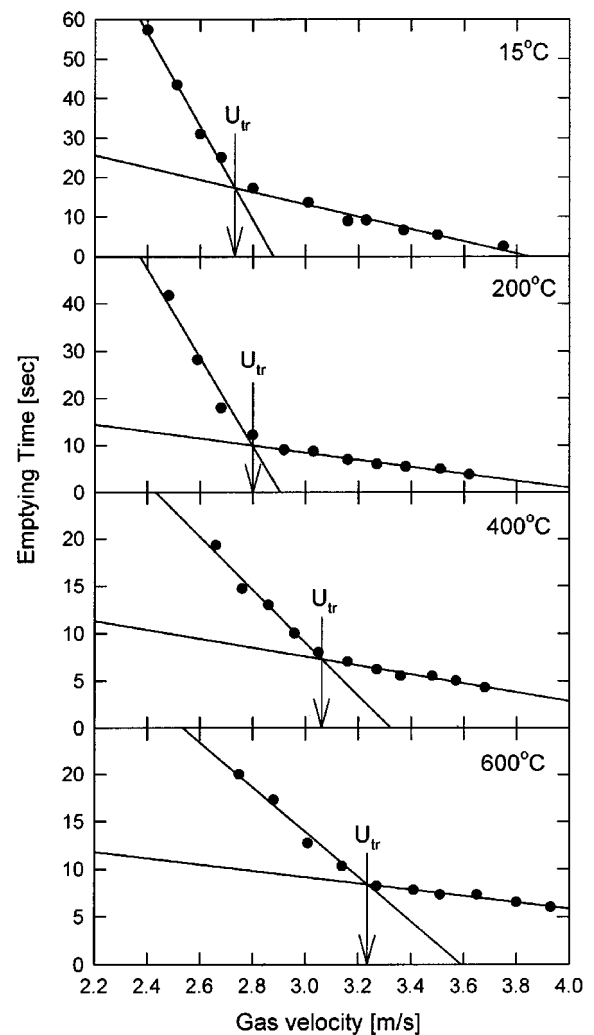


Fig. 3. Emptying time versus gas velocity- $U_{tr}$  determination.

#### 3-2. 고속유동층으로의 전이유속에 미치는 온도의 영향

Fig. 4는 상온부터 600 °C까지의 온도변화에 따른 고속유동층으로의 전이유속 변화를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 온도가 증가함에 따라 고속유동층으로의 전이유속이 증가하는 경향을 나타내었다. 이와 같은 경향은 온도변화에 따른 입자비산속도의 변화경향과 관련하여 해석할 수 있다. 입자비산속도에 미치는 온도의 영향에 대한 기존 연구를 살펴보면 연구자들에 따라 온도증가에 따라 입자비산속도가 감소한다는 보고[32-38]와 증가한다는 보고[39, 40] 및 온도의 영향이 거의 없다는 보고[41, 42] 등 서로 다른 결과가 제시된 바 있다. 이렇게 서로 다른 연구결과에 대해 Choi 등[43]과 Ryu와 Choi[44]는 온도변화에 따른 입자비산속도의 변화경향이 주어진 유속이 그 입자의 종말속도(terminal velocity)와 같아지는 임점( $d_{pr}$ )의 변화로 정성적으로 나타낼 수 있다고 보고하였다. 즉,  $d_{pr}$ 의 증가는 입자에 가해지는 항력의 증가를 의미하고 이어서 입자비산속도의 증가를 예측할 수 있으며, 역으로  $d_{pr}$ 의 감소는 입자비산속도의 감소를 예측할 수 있다고 보고하였다. 또한 그들은 모래입자(평균입경 0.172 mm, 입자밀도 2,509 kg/m<sup>3</sup>)를 사용하여 측정된 실험결과에서 낮은 유속(0.8 m/s)에서는 온도가 증가함에 따라 총괄입자비산속도가 증가하고, 중간유속(1.0-1.6 m/s)에서는 온도증가에 따라 감소한 후 다시 증가하며, 높은 유속(2.1 m/s)에서는 온도가 증가함에 따라 계속적으로 감소하는 것으로 보고한 바 있다.

Fig. 5는 본 실험에 사용한 모래입자(평균입경 256  $\mu$ m, 입자밀도

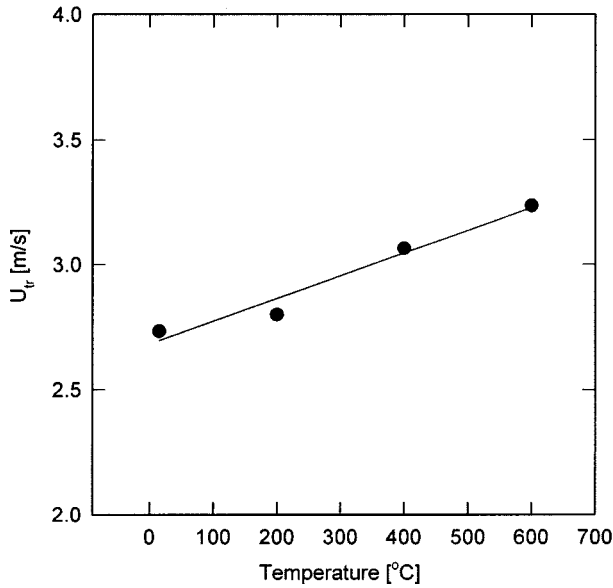


Fig. 4. Transition velocity from turbulent to fast fluidization versus temperature.

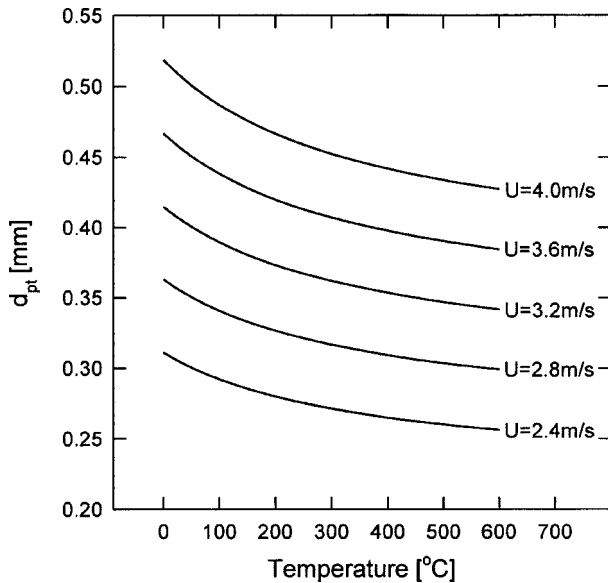


Fig. 5. Effect of temperature on particle diameter whose terminal velocity is equal to the fluidizing velocity.

2,617 kg/m<sup>3</sup>)에 대해 본 실험의 유속범위와 온도범위에서 계산된  $d_{pt}$ 의 변화를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 emptying time을 측정 한 모든 유속에서 온도가 증가함에 따라  $d_{pt}$ 가 감소하였으며 결과적으로 본 연구의 유속범위에서는 일정 유속에서 온도가 증가함에 따라 입자비산속도가 감소하는 것을 예측할 수 있다. 따라서 온도가 증가하면 입자비산속도가 감소하므로 고속유동층으로의 전이가 이루어지기 위해서는 더 높은 유속이 필요한 것으로 사료되었다.

유체내에서 침강하는 고체입자에는 항력, 부력 및 중력이 작용하게 되며 이 세 가지 힘에 의해 고체입자의 종말속도(terminal velocity)가 결정된다. 입자의 종말속도는 아래의 식 (1)과 같이 표현된다.

$$U_t = \left[ \frac{4gd_p(\rho_p - \rho_g)}{3\rho_g C_D} \right]^{1/2} \quad (1)$$

여기서  $C_D$ 는 실험적으로 결정되는 항력계수(drag coefficient)이며 흐

름영역에 따라 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \quad \text{for } Re_p < 5.76 \quad (2)$$

$$C_D = \frac{10}{Re_p^{1/2}} \quad \text{for } 5.76 < Re_p < 541 \quad (3)$$

$$C_D = 0.43 \quad \text{for } 541 < Re_p < 200,000 \quad (4)$$

항력계수( $C_D$ )는  $Re_p$ 의 함수이며 식 (2)부터 (4)에서와 같이 흐름영역에 따라 다르게 표현된다. 결과적으로 온도변화에 따른 종말속도의 변화경향은 ( $C_D \rho_g$ )의 변화로 집약될 수 있으며 입자의 레이놀즈 수( $Re_p$ )에 따라 각 흐름영역에서 다음과 같이 표현된다.

$$C_D \rho_g \propto \mu \quad \text{for } Re_p < 5.76 \text{ Stokes' region} \quad (5)$$

$$C_D \rho_g \propto (\rho_g \mu)^{0.5} \quad \text{for } 5.76 < Re_p < 541 \text{ Intermediate region} \quad (6)$$

$$C_D \rho_g \propto \rho_g \quad \text{for } 541 < Re_p < 200,000 \text{ Newton's region} \quad (7)$$

한편, 온도가 증가함에 따라 공기의 밀도는 감소하고, 점도는 증가한다.  $Re_p$ 가 작은 Stokes' region에서는  $C_D \rho_g$ 가 기체점도에 비례하므로 온도증가에 따라 선형적으로 증가하며, Newton's region에서는  $C_D \rho_g$ 가 기체밀도에 비례하므로 온도증가에 따라 감소하고 intermediate region에서는  $C_D \rho_g$ 가  $(\rho_g \mu)^{0.5}$ 에 비례하며,  $(\rho_g \mu)^{0.5}$ 는 온도증가에 따라 감소하여 최소점을 보인 후 다시 증가하는 경향을 보인다. 결과적으로 고속유동층으로의 전이유속과 같은 높은 유속범위(Newton's region)에서는  $C_D \rho_g$ 가 기체밀도에 비례하여 온도증가에 따라 감소하므로 종말속도가 증가하고 입자비산속도는 감소하므로 더 높은 유속에서 고속유동층으로 전이되는 것으로 사료된다.

압력 증가에 따라 고속유동층으로의 전이유속이 감소한다는 Tsukada 등[13]의 결과도 입자비산속도와 관련하여 해석할 수 있다. 일정 유속에서 입자비산속도는 압력이 증가함에 따라 증가하기 때문에[45-49], 더 낮은 유속에서도 고속유동층으로의 전이가 가능해지는 것으로 사료되었다.

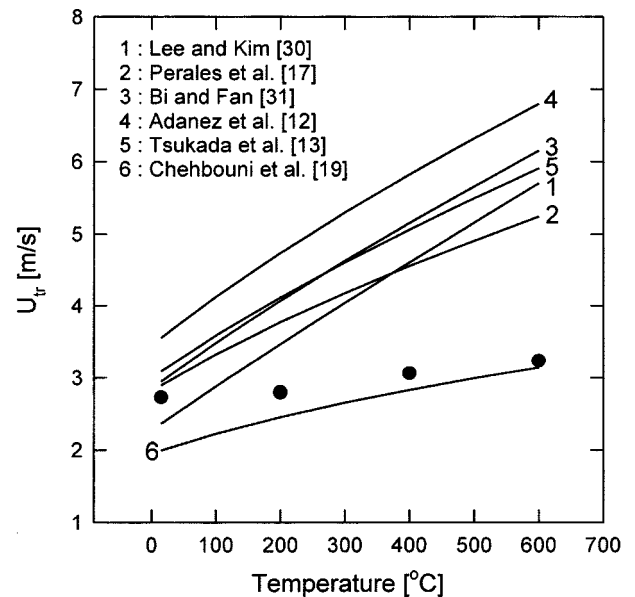


Fig. 6. Comparison between measured  $U_t$  and calculated values by previous correlations.

symbols: measured values, lines: calculated values

### 3.3. 기존 상관식과의 비교

Fig. 6은 본 연구에서 온도변화에 따라 측정된 고속유동층으로의 전이유속과 기존 상관식에 의해 예측된 결과를 비교하여 나타내고 있다. 각 상관식의 형태는 Table 3에 나타나 있다. 그림에 나타난 바와 같이 Chehbouni 등[19]의 상관식에 의해 계산된 고속유동층으로의 전이유속 값이 본 연구에서 측정된 값과 가장 유사하였으며 다른 상관식들에 의해 계산된 값들은 측정값에 비해 과도하게 예측되었다. 이와 같은 경향은 본 실험에 사용된 순환유동층의 층직경과 관련하여 고려할 필요가 있다. Chehbouni 등[19]은 층직경이 증가함에 따라 고속유동층으로의 전이유속이 증가하는 것으로 보고한 바 있으며 그들의 상관식에도 층직경의 영향이 포함되어 있다. 본 실험에 사용된 순환유동층의 직경

은 기존 연구들에서 사용된 실험장치에 비해 다소 작기 때문에 고속유동층으로의 전이유속이 낮게 나타나는 반면 기존 상관식들은 본 연구의 실험장치에 비해 층직경이 큰 유동층에서 실험한 결과를 바탕으로 제시된 상관식이므로 본 실험결과에 비해 고속유동층으로의 전이유속을 크게 예측하는 것으로 사료되었다. Chehbouni 등[19]의 상관식이 본 연구에서 측정된 고속유동층으로의 전이유속을 비교적 잘 예측하는 이유도 다른 상관식들과는 달리 그들의 상관식에서 층직경의 영향을 고려했기 때문으로 사료된다. 결과적으로 고속유동층으로의 전이유속을 정확히 예측하기 위해서는 층직경의 영향을 함께 고려하는 것이 적합한 것으로 사료되었다.

그림에 나타난 바와 같이 대부분의 상관식이 온도증가에 따른 고속

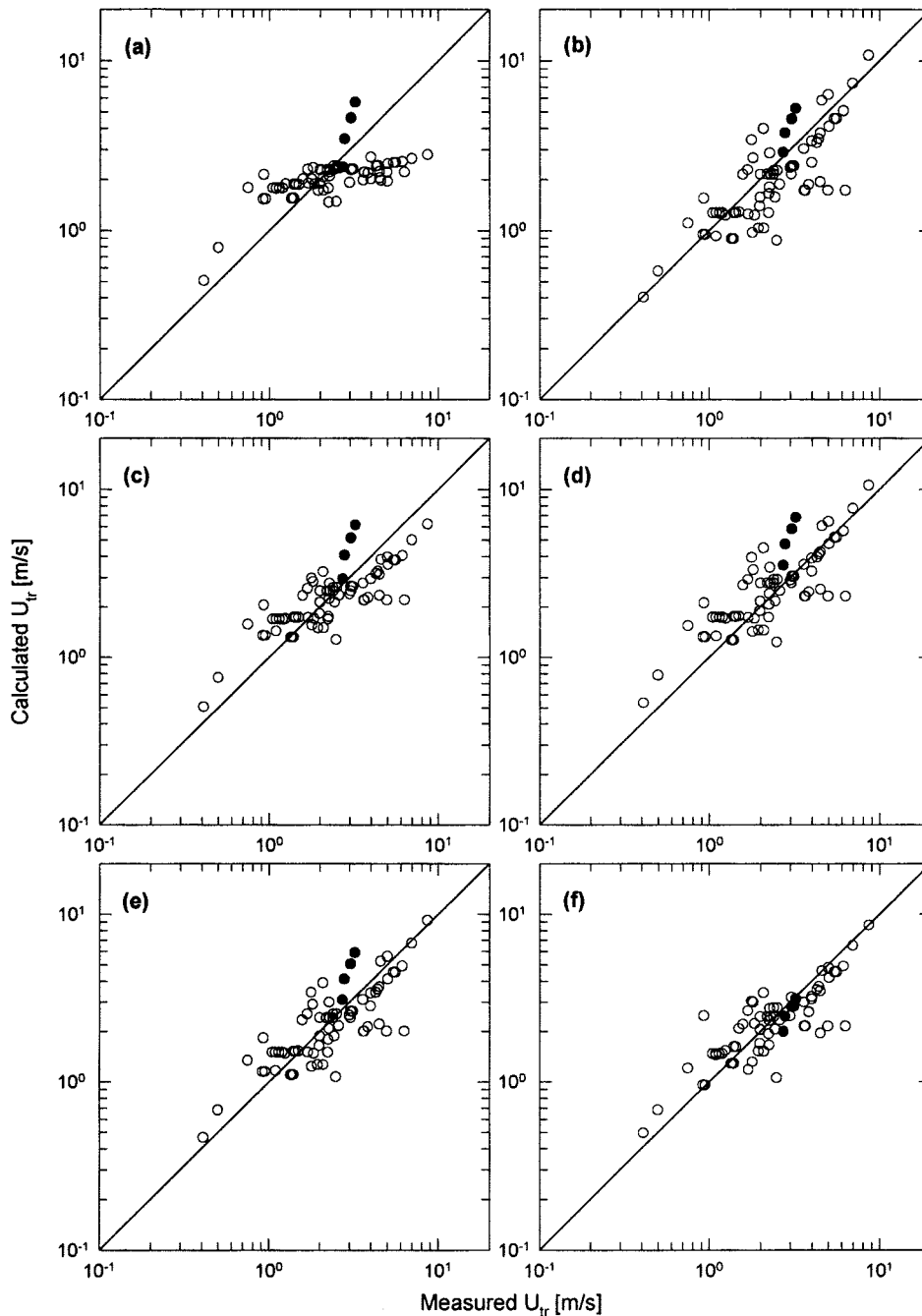


Fig. 7. Comparison between measured transport velocity from turbulent to fast fluidization and calculated values by previous correlations.

●: measured values in this study, (a) Lee and Kim[30], (b) Perales et al.[17], (c) Bi and Fan[31], (d) Adánez et al.[12], (e) Tsukada et al.[13], (f) Chehbouni et al.[19].

**Table 4. Summary of experimental conditions and results of previous studies on the transition velocity from turbulent to fast fluidization**

Authors	$D_t$ [m]	$H_t$ [m]	Particles	$d_p$ [ $\mu$ m]	$\rho_p$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Geldart's group	T[°C]	P[kPa]	$U_{tr}$ [m/s]	$U_{tr}$ Determining method*
Yerushalmi and Cankurt[7]	0.152	8.5	FCC	49	1070	A	A.C.	A.C.	1.37	2
			HFZ-20	49	1450	A			2.10	2
			Alumina	103	2460	B			3.85	2
Chen et al.[14]	0.09		FCC	58	1780	A	A.C.	A.C.	1.25	3
			Alumina	54	3160	A			2.0	3
			Alumina	81	3090	B			2.6	3
			Iron ore	56	3050	A			2.0	3
			Iron ore	105	4510	B			4.0	3
Li and Kwauk[15]	0.09	8.0	Alumina	54	3160	A	A.C.	A.C.	2.45	3
Lee and Kim[23]	0.078		Cement	23.6	2500	A	A.C.	A.C.	1.80	7
			Raw meal							
Avidan and Yerushalmi[5]	0.152	8.5	FCC	49	1070	A	A.C.	A.C.	1.40	1
			Dicalite	33	1670	A	A.C.	A.C.	1.10	1
			HFZ-20	49	1450	A	A.C.	A.C.	1.82.1	1
Shin et al.[24]	0.0762	2.5	Coal	205	1720	B	A.C.	A.C.	1.58	7
				395	1720	B	A.C.	A.C.	2.28	7
Han et al.[26]	0.078	2.6	Coal	730	1400	B	A.C.	A.C.	1.78	7
				1030	1400	D	A.C.	A.C.	2.09	7
Kwauk et al.[16]	0.30	4.0	FCC	58	1780	A	A.C.	A.C.	1.85	3
Li et al.[50]	0.09		FCC	54	930	A	A.C.	A.C.	2.50	3
Horio et al.[8]	0.05		FCC	60	1000	A	A.C.	A.C.	0.92	2
			Sand	106	2600	A			4.50	
Le Palud and Zenz[27]	0.15	3.25	FCC	49	1070	A	A.C.	A.C.	1.2-1.5	9
			HFG-20	49	1450	A			1.7-2.5	9
			Alumina	103	2460	B			3.7-4	9
Leu et al.[20]	0.108		Sand	~90	~2600	~B	A.C.	A.C.	~2.27	5
Yang et al.[21]	0.224		FCC	67	1700	A	A.C.	A.C.	1.5	5
Perales et al.[17]	0.092	2.9	FCC	80	1715	A	A.C.	A.C.	1.99	3, 7
			Sand	120-177	2650	B			1.69	
				177-250	2650	B			1.82	
				250-400	2650	B			3.67	
				250-500	2650	B			3.63	
				500-750	2650	B			4.98	
				750-1200	2650	B			6.31	
Bi et al.[9]	0.102		Polyethylene	~325	660	B	A.C.	A.C.	2.25	2
Jiang and Fan[10]	0.102	6.32	Polyethylene	3400	1010	D	A.C.	A.C.	4.6	2
			Polyethylene	4500	920	D			5.02	2
			Glass beads	2160	2500	D			6.99	2
			Glass beads	5000	2500	D			8.65	2
Horio et al.[11]	0.05		Sand	106	2600	B	A.C.	A.C.	4.50	2
			FCC	60	1000	A			0.95	2
Adánez et al.[12]	0.10	3.9	Sand	170	2600	B	A.C.	A.C.	3.05	6
				170	2600	B			3.1-3.2	2
				170	2600	B			3.0-3.2	8
				170	2600	B			3.15	7
				387	2600	B			4.40	7
				561	2600	B			5.05	7
				710	2600	B			5.45	6
				710	2600	B			5.60	2
				710	2600	B			5.4-5.8	8
				710	2600	B			5.6	7
				894	2600	B			6.15	7
				344	2600	B			4.30	7
			Coal	316	1400	B	A.C.	A.C.	3.00	7
				561	1400	B			3.60	7
				710	1400	B			4.00	7
				894	1400	B			4.50	7

Table 4. Continued

Authors	$D_t$ [m]	$H_t$ [m]	Particles	$d_p$ [ $\mu$ m]	$\rho_p$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Geldart's group	T[°C]	P[kPa]	$U_{tr}$ [m/s]	$U_{tr}$ Determining method <sup>a</sup>
Tsukada et al.[13]	0.05	0.4	FCC	46	1780	A	A.C.	100	0.75	2
								350	0.50	2
								700	0.41	2
Chehbouni et al.[18]	0.082		FCC	78	1450	A	A.C.	A.C.	1.1-1.2	3, 4, 7 (APT)
									1.2	3, 4, 7 (DPT)
									1-1.1	3, 4, 7 (CP)
	0.082		Sand	130	2650	B	A.C.	A.C.	2.4	3, 4, 7 (APT)
									2.3	3, 4, 7 (DPT)
									2.0	3, 4, 7 (CP)
Chehbouni et al.[19]	0.082		Sand	130	2650	B	A.C.	A.C.	2.20	4, 7
			FCC	78	1450	A			1.10	4, 7
	0.200		Sand	130	2650	B			3.05	4, 7
			FCC	78	1450	A			2.24	4, 7
Delebarre et al.[26]	0.2	1.0	Glass bead	68	2490	A	A.C.	A.C.	0.93	7
Yi et al.[29]	0.035	4.65	KSZ1	59	1820	A	A.C.	A.C.	1.7	11
Namkung et al.[22]	0.1	5.3	FCC	65	1720	A	A.C.	A.C.	1.40	7
				65	1720	A			1.44	6
			Silica sand	125	3055	B	A.C.	A.C.	2.40	7
				125	3055	B			2.52	6

A.C.: ambient conditions, DPT: differential pressure transducer, APT: absolute pressure transducer, CP: capacitance probe

\*Symbol listed in Table 1

유동층 전이유속의 증가경향을 예측할 수 있었으나 온도증가에 따른 증가기울기를 비교하면 Chehbouni 등[19]의 상관식의 경우에는 온도증가에 따른 고속유동층으로의 전이유속 증가기울기가 측정값과 유사한 반면 다른 상관식들은 증가기울기가 측정값에 비해 크게 나타났다.

Fig. 7은 본 연구 및 기존 연구에서 측정된 고속유동층으로의 전이유속 실험자료와 문헌에 보고된 기존 상관식들과의 비교를 나타내고 있다. 그림에서 횡축은 측정값을 나타내며 종축은 각 상관식에 의해 계산된 값을 나타내고 있다. 그림에 나타난 고속유동층으로의 전이유속의 측정 조건 및 측정값들은 Table 4에 정리되어 있다. 본 연구 및 기존 보고의 실험조건을 살펴보면 층적경 0.02-0.224 m, 입자크기 23.6-4,500  $\mu$ m, 입자밀도 660-4,510 kg/m<sup>3</sup>, Geldart 입자분류 A, B 및 D 입자제, 온도 상온-600 °C, 압력 상압-7.0 기압까지로 비교적 넓은 범위의 조업조건을 포함하고 있으므로 이 실험자료들과의 비교를 통해 넓은 조업조건에서 고속유동층으로의 전이유속을 가장 잘 예측하는 상관식을 선정할 수 있다. 그림에 나타난 바와 같이 기존 상관식들중 Chehbouni 등[19]의 상관식이 측정값을 가장 잘 예측할 수 있었으며 고온에서 측정한 본 연구의 실험결과에 대해서도 좋은 일치를 나타내었다.

## 4. 결 론

본 연구의 실험범위에서 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 난류유동층에서 고속유동층으로의 전이유속에 대한 온도의 영향을 측정 및 고찰하기 위해 고온순환유동층에서 모래입자를 충출질로 사용하여 emptying time method에 의해 온도변화에 따른 고속유동층으로의 전이유속 변화를 측정 및 고찰하였다.

(2) 주어진 실험조건에서 고속유동층으로의 전이유속은 온도가 증가함에 따라 증가하였으며 온도변화에 따른 입자비산속도의 변화경향과 관련하여 해석할 수 있었다.

(3) 본 연구의 측정값 및 기존 보고에 나타난 고속유동층으로의 전이유속 실험자료와 기존 상관식들을 비교하였다. 기존 상관식들 대부분

이 온도증가에 따른 고속유동층으로의 전이유속 증가경향을 나타낼 수 있었으나 기존 상관식들중 Chehbouni 등[19]의 상관식이 측정값과 가장 유사한 값을 예측할 수 있었다.

## 감 사

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실사업의 일환으로 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

## 사용기호

Ar	: Archimedes number, $\rho_g(\rho_p - \rho_g)gd_p^3/\mu^2$ [-]
$C_D$	: drag coefficient [-]
$d_p$	: particle diameter [mm]
$\bar{d}_p$	: mean particle diameter [mm]
$d_{pt}$	: particle diameter having a terminal velocity that is equal to the superficial velocity [mm]
$D_t$	: column diameter [m]
g	: gravitational acceleration [m/s <sup>2</sup> ]
$G_s$	: solid circulation rate [kg/m <sup>2</sup> s]
$H_t$	: column height [m]
P	: pressure [kPa]
$Re_p$	: particle Reynolds number, $d_p U_{tr} \rho_g / \mu$ [-]
$Re_{tr}$	: Reynolds number at transition velocity to fast fluidization, $d_p U_{tr} \rho_g / \mu$ [-]
T	: temperature [°C]
U	: superficial gas velocity [m/s]
$U_{ms}$	: minimum slugging velocity [m/s]
$U_s$	: velocity of the solids [m/s]
$U_t$	: terminal velocity [m/s]
$U_{tr}$	: transition velocity from turbulent to fast fluidization [m/s]



$\Delta P$  : pressure drop [mmH<sub>2</sub>O]  
 $\Delta Z$  : axial distance [m]

#### 그리스 문자

$\epsilon$  : average gas holdup [-]  
 $\mu$  : gas viscosity [kg/m-s]  
 $\rho_g$  : gas density [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\rho_p$  : apparent particle density [kg/m<sup>3</sup>]

#### 참고문헌

1. Arnaldos, J. and Casal, J.: *Powder Technology*, **86**, 285(1996).
2. Bi, H. T., Ellis, N., Abba, A. and Grace, J. R.: *Chem. Eng. Sci.*, **55**, 4789(2000).
3. Lewis, W. K., Gilliland, E. R. and Bauer, W. C.: *Ind. and Eng. Chem.*, **41**, 1104(1949).
4. Yerushalmi, J., Turner, D. H. and Squires, A. M.: *Ind. Eng. Chem. Proc. Des. and Dev.*, **15**, 47(1976).
5. Avidan, A. and Yerushalmi, J.: *Powder Technology*, **32**, 223(1982).
6. Schnitzlein, M. G. and Weinstein, H.: *Chem. Eng. Sci.*, **46**, 2605(1988).
7. Yerushalmi, J. and Cankurt, N. T.: *Powder Technology*, **24**, 187(1979).
8. Horio, M., Nishimuro, M. and Ishii, H.: Proc. of the 3rd SCEJ Symp. on Circulating Fluidized Beds, 54(1989).
9. Bi, H. T., Jiang, P. J. and Fan L. S.: AIChE Meeting, Paper no. 101d, Los Angeles(1991).
10. Jiang, P. J. and Fan, L. S.: AIChE Meeting, Paper #101e, Los Angeles, CA(1991).
11. Horio, M., Ishii, H. and Nishimuro, M.: *Powder Technology*, **70**, 229(1992).
12. Adánez, J., de Diego, L. F. and Gayan, P.: *Powder Technology*, **77**, 61(1993).
13. Tsukada, M., Nakanishi, D. and Horio, M.: 4th Int. Conf. on Circulating Fluidized Beds preprint volume, 248(1993)
14. Chen, B., Li, Y., Wang, F., Wang, S. and Kwauk, M.: *Chem. Metallurgy*(in Chinese), **4**, 20(1980).
15. Li, Y. and Kwauk, M.: "Fluidization," edited by Grace, J. R. and Matsen, J. M., Plenum Press, New York, 537(1980).
16. Kwauk, M., Wang, N., Li, Y., Chen, B. and Shen, Z.: "Circulating Fluidized Bed Technology," edited by Basu, P., Pergamon Press, Toronto, 33(1985).
17. 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).
18. Chehbouni, A., Chaouki, J., Guy, C. and Klvana, D.: *Ind. Eng. Chem. Res.*, **33**, 1889(1994).
19. Chehbouni, A., Chaouki, J., Guy, C. and Klvana, D.: *Can. J. of Chem. Eng.*, **73**, 41(1995).
20. Leu, L. P., Huang, J. W. and Gua, B. B.: Proc. Asian Conf. on Fluidized Bed and Three-Phase Reactors, Beijing, China, 71(1990).
21. Yang, Y. R., Rong, S. X., Chen, G. T. and Chen, B. C.: *Chem. Reaction Eng. and Technol.*, **6**, 9(1990).
22. Namkung, W., Kim, S. W. and Kim, S. D.: *Chem. Eng. J.*, **72**, 245(1999).
23. Lee, J. S. and Kim, S. D.: *HWAHAK KONGHAK*, **20**, 207(1982).
24. Shin, B. C., Koh, Y. B. and Kim, S. D.: *HWAHAK KONGHAK*, **22**, 253(1984).
25. Han, G. Y., Lee, G. S. and Kim, S. D.: *Korean J. Chem. Eng.*, **2**, 141(1985).
26. Delebarre, A., Bitaud, B. and Regnier, M. C.: *Powder Technology*, **91**, 229(1997).
27. Le Palud, T. and Zenz, F. A.: "Fluidization," edited by Grace, J. R., Shemilt, L. W. and Bergougnou, M. A., Engineering Foundation, New York, 121(1989).
28. Bi, H. T., Grace, J. R. and Zhu, J. X.: *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, **73**, 154(1995).
29. Yi, C. K., Son, J. E., Jin, G. T., Shun, D. W., Park, J. H., Han, K. H., Jo, S. H. and Lee, S. Y.: "Solid Circulation Technology for the Stable Operation of a Hot Gas Desulfurization Bench-Scale Unit," Research Report, KIER994613, 17(1999).
30. Lee, G. S. and Kim, S. D.: *Powder Technology*, **62**, 207(1990).
31. Bi, H. T. and Fan, L. S.: *AIChE J.*, **38**(2), 297(1992).
32. Choi, J. H., Son, J. E. and Kim, S. D.: *J. Chem. Eng. Japan*, **22**, 597(1989).
33. Son, J. E., Choi, J. H. and Kim, S. D.: "Fluidization VI," edited by Grace, J. R., Shemilt, L. W. and Bergougnou, M. A., Engineering Foundation, 113(1989).
34. Merrick, D. and Highley, J.: *AIChE Symp. Ser.*, **70**, 366(1974).
35. Lee, J. K., Hu, C. G., Shin, Y. S. and Chun, H. S.: *Can. J. Chem. Eng.*, **68**, 824(1990).
36. Park, S. S., Choi, Y. T., Lee, G. S. and Kim, S. D.: "Circulating Fluidized Bed Technology," edited by Basu, P., Horio, M. and Hasatani, M., Pergamon Press, Oxford, 497(1990).
37. Lee, W. J., Cho, Y. J., Kim, J. R. and Kim, S. D.: Proc. 3rd Asian Conf. on Fluidized-Bed and Three-Phase Reactors, 126(1992).
38. Wen, C. Y. and Chen, L. H.: Proc. 6th Int. Conf. on FBC, III, 1115(1980).
39. Romanova, T. T. *et al.*: Deposited Doc., Viniti 5129-80(1980).
40. Milne, B. J., Berruti, F., Behie, L. A. and Theo, J. W.: Proc. 4th Int. Conf. on CFB, 29(1993).
41. Zhang, X., Cao, Y., Ren, Y., Chen, J. and Hong, Y.: Proc. 8th Int. Conf. on FBC, I, 75(1985).
42. George, S. E. and Grace, J. R.: *Can. J. Chem. Eng.*, **59**, 279(1981).
43. Choi, J. H., Choi, K. B., Kim, P., Shun, D. W. and Kim, S. D.: *HWAHAK KONGHAK*, **33**, 580(1995).
44. Ryu, H. J. and Choi, J. H.: *HWAHAK KONGHAK*, **35**, 173(1995).
45. May, W. G. and Russel, F. R.: paper presented at the North Jersey section of the A.C.S.(Jan. 25, 1954).
46. Zenz, F. A. and Weil, N. A.: *AIChE J.*, **4**, 472(1958).
47. Chan, I. H. and Knowlton, T. M.: "Fluidization," edited by Kunii, D. and Toei, R., Engineering Foundation, 283(1984).
48. Knowlton, T. M.: "Fluidization VII," edited by Potter, O. E. and Nicklin, D. J., 27(1992).
49. Knowlton, T. M., Findlay, J. and Sishtla, C.: Final Report, DOE/MC/22061-2883, DE90 009699(1990).
50. Li, J., Li, Y. and Kwauk, M.: "Circulating Fluidized Bed Technology II," edited by Basu, P. and Large, J. F., Pergamon Press, Toronto, 75(1988).