

기체유동층의 스플래쉬 영역에서 축방향 고체체류량 분포의 감쇄상수에 대한 온도의 영향

최정후[†] · 마상찬 · 선도원* · 손재익* · 김상돈**

건국대학교 화학공학과

*한국에너지기술연구소

**한국과학기술원 화학공학과

(1996년 10월 5일 접수, 1996년 12월 24일 채택)

Effect of Temperature on the Decay Constant of the Axial Solid Holdup Profile in the Splash Region of a Gas Fluidized Bed

Jeong-Hoo Choi[†], Sang-Chan Ma, Do-Won Shun*, Jae-Ek Son* and Sang-Done Kim**

Department of Chemical Engineering, Kon-Kuk University, Seoul 143-701, Korea

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

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

(Received 5 October 1996; accepted 24 December 1996)

요 약

직경 0.1 m, 높이 2.1 m의 전기가열방식의 유동층에서 충물질로 모래를 사용하여 온도(24-600 °C) 및 기체유속(0.5-2.0 m/s)의 변화에 따른 전이영역에서 축방향 고체체류량 분포의 감쇄상수를 측정하였다. 전이영역에서 고체체류량 분포의 감쇄상수는 유속이 증가함에 따라 감소하였고, 유속의 영향은 온도가 증가할수록 완만해지는 경향을 보였다. 일정 유속에서 감쇄상수는 온도가 증가함에 따라 증가하였으며, 온도의 영향은 유속이 증가함에 따라 증가하였다. 본 연구의 결과와 타 연구자들의 결과를 사용하여 감쇄상수에 대한 온도의 영향이 고려된 다음의 상관식을 제시하였다.

$$ad_p = \exp \left(-11.2 + 210 \frac{d_p}{D_t - d_p} \right) \left(\frac{d_p \rho_g (U - U_{mf})}{\mu} \right)^{0.49} \cdot \left[\frac{\rho_p g d_p}{\rho_g (U - U_{mf})^2} \right]^{0.725} \left(\frac{\rho_p - \rho_g}{\rho_g} \right)^{0.731} C_D^{1.47}$$

Abstract—Effects of temperature(24-600 °C) and gas velocity(0.5-2.0 m/s) on the decay constant of axial solid holdup profile of the splash region have been measured in a gas fluidized bed(0.1 m-i.d., 2.1 m height) equipped with an electric heater. Sand was used as a bed material. The decay constant of axial solid holdup profile in the splash region decreased with an increase of the gas velocity. As the temperature increased, the effect of the gas velocity decreased slightly. The decay constant increased with the temperature at a certain gas velocity. The effect of the temperature on the decay constant increased as the gas velocity increased. Based on results of this study and previous studies, a correlation on the decay constant that considers the effect of temperature was proposed as follows:

$$ad_p = \exp \left(-11.2 + 210 \frac{d_p}{D_t - d_p} \right) \left(\frac{d_p \rho_g (U - U_{mf})}{\mu} \right)^{0.49} \cdot \left[\frac{\rho_p g d_p}{\rho_g (U - U_{mf})^2} \right]^{0.725} \left(\frac{\rho_p - \rho_g}{\rho_g} \right)^{0.731} C_D^{1.47}$$

Key words: Decay Constant, Axial Solid Holdup Profile, Gas Fluidized Bed

1. 서 론

유동층내의 고체체류량 분포(solid holdup profile)는 수력학적성, 열전달특성, 반응기 성능 등의 해석을 위한 기본정보로서 많이 고려되고 있다. 고체체류량 분포에 영향을 주는 인자로는 기본적으로 고체의 입도 및 밀도, 기체유속, 기체의 밀도 및 점도, 유동층의 직경 및 높이, 층내 고체부하 등으로 고려될 수 있다. 지금까지 보고된 대부분의 연구들은 주로 기체의 밀도와 점도가 변화되지 않는 가운데

상온의 유동층에서 수행되었다.

유동층의 축방향 고체체류량 분포는 하부의 농후상(dense phase), 상부의 희박상(dilute phase), 농후상과 희박상 사이의 전이영역인 스플래쉬(splash) 영역으로 구분될 수 있다. 이 형태를 일반화하여 Li와 Kwauk[1]은 일정한 공극률을 갖는 하부의 농후상과 상부의 희박상, 그리고 이들 사이의 전이영역으로 나타내지는 S자 형태의 모델을 제시하였다. Kunii와 Levenspiel[2]은 이를 간략화하여 전이영역에서 높이가 증가함에 따른 고체체류량의 변화가 단순히 지수적인

Table 1. Summary of previous studies on the decay constant

Authors	Experimental apparatus	Bed material	Particle density [kg/m ³]	Particle diameter [mm]	Gas velocity [m/s]	Correlation
Kunii & Levenspiel[2]	-	-	-	-	-	$aU = \text{constant}$
Adanez et al.[3]	0.1 m I.D., 4 m high	Sand Coal	2600 1400	0.06-1.0	3.5-6.5	$a(U - U_c)^{0.8} D_p^{0.8} = 0.88 - 420 d_p$
Cho et al.[4]	0.1 m I.D., 5.3 m high	FCC	1720	0.02-0.15	1.5-3.5	$a = 0.15 U^{2.0} G_c^{0.88} (1 - f_{m0})^{0.66} \times [(H_c / Z_c) H_c]^{1.35}$

로 감소하는 형태로 나타내지는 모델을 제시하였다. 이 모델에서 농후상의 고체채류량은 유동층의 흐름형태에 따라서 거의 일정한 범위의 값을 가지며, TDH이상에서 회박상의 고체채류량은 입자의 비산속도와 종발속도로 결정될 수 있다고 간주하였다. 그러나 전이영역에서 고체채류량의 감소속도에 대해서는 자료가 미흡한 것으로 보고하였다.

Table 1은 Kunii와 Levenspiel[2]의 모델과 같이 전이영역에서 고체채류량이 지수적으로 감소되는 것으로 간주하여 감쇄상수(decay constant)를 보고한 자료를 요약하여 나타냈다.

Kunii와 Levenspiel[2]은 미세 입자계와 굵은 입자계에 대해서 보고된 여러 연구자들의 실험결과에 그들의 모델을 적용하여 감쇄상수를 역산하였다. 감쇄상수는 기체유속과 종직경에 반비례하며 입자크기에 비례하는 것으로 보고하였다. 또 전이영역에서 입자비산속도가 높이에 따라 지수적으로 감소하는데, 이때의 감쇄상수가 고체채류량 분포의 감쇄상수와 동일하게 고려될 수 있음을 제안하였다. Adanez 등[3]은 상온의 순환유동층에서 얻어진 그들의 실험결과를 바탕으로 기체유속, 입자의 종발속도, 종직경, 입자크기가 고려된 감쇄상수에 관한 상관식을 보고하였다. 이들의 상관식은 유속이 종발속도보다 큰 조건에서 적용된다. Cho 등[4]은 2차공기가 주입되는 상온의 순환유동층에서 얻어진 그들의 실험결과를 바탕으로 기체유속, 고체순환속도, 2차공기분율, 유동층높이, 2차공기 주입높이가 변수로 고려된 감쇄상수에 관한 상관식을 제시하였다.

이와 같이 전이영역에서 고체채류량 분포의 감쇄상수에 관한 보고는 제한적이며, 상온의 유동층에 한정되어 있다. 한편 유동층연소로와 같이 고온에서 조입되는 실제 반응기에서는 기체의 성질이 상온의 기체와 크게 다르며, 연구결과가 실제 반응기에 적용되기 위해서는 이에 따른 영향이 고려되어야 한다.

본 연구에서는 전이영역에서 고체채류량 분포의 감쇄상수에 대한 온도의 영향을 고찰한다. 실험실 규모의 기체유동층에서 종온도와 기체유속을 변화시키며 축방향 고체채류량 분포를 측정하고, Kunii와 Levenspiel[2]의 모델을 적용하여 전이영역에서 높이에 따른 고체채류량의 감쇄상수를 구한다. 아울러 본 연구의 실험결과와 보고된 실험결과에서 얻어진 감쇄상수를 근거로 적절한 상관식을 재고한다.

2. 실험

2-1. 실험장치

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험장치의 개략적인 흐름도를 나타낸다. 실험공정은 압축기와 유량계로 구성된 공기주입설비, 유동층, 종가열장치, 두 개의 사이클론과 재순환설비, 백필터로 구성되었다.

유동화 기체로는 공기가 사용되었으며, 75 Nm³/hr(15 HP)의 용량을 갖는 압축기로 공급되고, 압력조절기와 수분제거용 prefilter를 거친 후, 적절한 유량계(flow cell type; 최대유량 60 Nm³/hr, 10 Nm³/hr, 1 Nm³/hr)로 정량되어 수평관(32 mm-i.d.)을 통하여 plenum으로 주입되도록 하였다. 유동층은 직경 0.1 m, 두께 6 mm, 총 높이 2.1 m이며 스테인레스강(SUS 316)으로 제작되었다. 종가열장치로는 내경 0.185

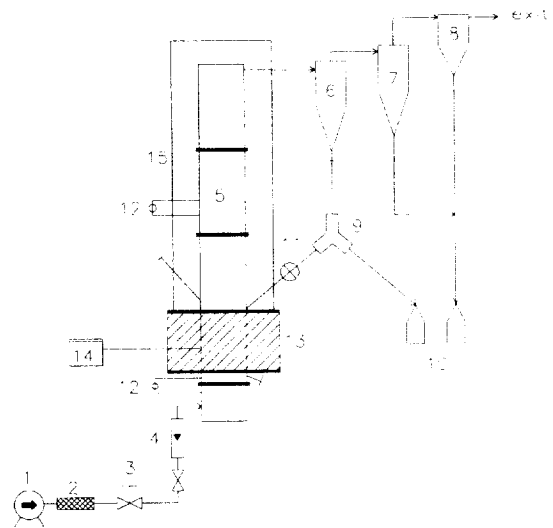


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus.

1. Air compressor
2. Filter
3. Pressure regulator
4. Flowmeter
5. Fluidized bed
6. Cyclone 1
7. Cyclone 2
8. Bag filter
9. Diverter
10. Sample pot
11. Rotary valve
12. Micro-manometer
13. Heater
14. Data logger
15. Insulation

m, 높이 0.38 m, 두께 0.16 m, 용량 6 KW(max. 800 °C) 규격을 갖는 원통형 매몰식 전기히터를 사용하여 분배기로부터 0.38 m 높이까지 가열하였으며, 열손실을 최소화하기 위하여 유동층 외벽은 ceramic wool로 단열한 후 함석판으로 마감하였다. 분배기는 multi-tuyere형으로 직경 20 mm의 tuyere 4개에 각각 직경 3 mm의 구멍 12개를 배치하였다.

유동층의 축방향 압력분포를 측정하기 위하여, 분배기로부터 축방향으로 9개(0.04, 0.02, 0.08, 0.18, 0.27, 0.57, 0.87, 1.29, 1.97 m)의 압력점을 두고 마이크로 마노미터를 연결하여 각 압력점 사이의 차압(ΔP)을 측정하였다. 축방향 온도분포는 분배기로부터 높이 0.04, 0.02, 0.13, 0.57, 0.87, 1.29, 1.97 m에 설치된 K-형(chromel-alumel) 열전대(thermocouple) 7개와 data logger(Molytek Model 2702)에 의해서 연속적으로 측정되었다.

기체출구(0.05 m-i.d.)는 분배기로부터 1.93 m 높이에 위치하며, 기체는 직렬로 연결된 1, 2차 사이클론(표준비율; 각 직경은 0.1 m, 0.075 m)과 백필터를 거쳐서 대기로 배출되도록 하였다. 1차 사이클론의 하부 배출관(0.05 m-i.d.)은 고체시료의 채취를 위한 diverter에 연결되고, 다음으로 로터리밸브를 거쳐서, 분배기로부터 높이 0.42 m에 설치된 재순환관(0.05 m-i.d.)을 통하여 유동층과 연결되었다. 로터리밸브는 약 15 rpm의 고정된 속도로 회전하였다. 백필터로는

Table 2. Physical properties of bed material

Bed material	Apparent density [kg/m ³]	Bulk density [kg/m ³]	Sieve size [mm]	Mean diameter [mm]	Sphericity of a particle[-]	Bed voidage at minimum fluidizing condition[-]
Sand	2636	1377	0.212+0.15	0.181	0.94	0.48

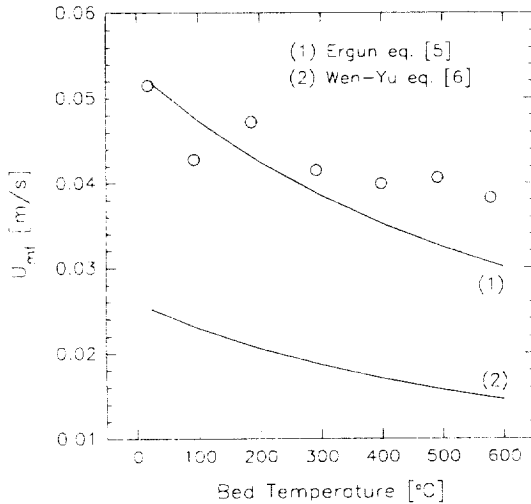


Fig. 2. Minimum fluidizing velocity with bed temperature.

상업용으로 사용되는 필티(Nomex filter) 1개를 배출구에 연결하여 사용하였다.

충물질로는 입도구간 평균입경이 0.181 mm인 모래를 사용하였다. Table 2는 본 연구에서 충물질로 사용된 모래의 특성치를 나타내며, Fig. 2는 충물질의 최소유동화속도를 충온도 변화에 따라 나타낸다. 측정된 최소유동화속도는 온도가 증가함에 따라 감소하였으며, 0.052~0.038 m/s 범위로 나타났다. 구형도(0.94)와 최소유동화상태에서 유동층의 공극률(0.48)을 적용한 Ergun 식[5]의 결과와 유사하였으며, Wen과 Yu[6]의 상관식에 의해 계산된 최소유동화속도는 측정값에 비해 작게 예측되었다. 이는 Wen과 Yu[6]의 식에서 사용된 상수값 ($K=24.5$, $K_1=1651.3$)에 비해 본 연구에 사용된 입자의 상수값은 $K_1=16.8$, $K=798.2$ 로 작게 나타났기 때문으로 사료되었다.

2-2. 실험방법

충물질로 사용된 모래의 무게를 측정하고, 실험조건의 고정층 높이(0.3 m)로 유동층에 채웠다. 마이크로 마노미터의 영점을 조정하고, 재순환관의 diverter를 순환위치로 한 후, 로터리밸브를 작동시켰다. 압력조절기의 압력을 약 1 kg/cm²-G로 유지하고, 유량조절밸브와 유량계로 일정 유량의 공기를 공급하면서 증가열장치를 서서히 작동시켰다.

유동층과 1차 사이클론 포집입자의 재순환이 정상적으로 이루어져 유동층의 압력분포가 안정되고, 층내 온도가 일정실험조건에 도달되었을 때 유동층의 정상상태로 간주하여 정상상태에서 마이크로 마노미터로 층내 압력분포의 변화추이를 관찰 및 기록하였으며, data logger를 통하여 층내 온도분포를 연속적으로 관찰하였다. 재순환관의 diverter를 일정시간 동안(5~200 sec) 켜서 고체를 포집하여 고체순환속도를 결정하였다. 실험변수로는 공압유속(0.5~2.0 m/s), 유동층온도(24~600 °C)가 고려되었다.

Fig. 3은 본 실험의 측정영역에서 축방향 온도분포를 나타낸다. 모든 실험조건에서 층내 온도분포와 감쇄상수를 결정하는 고체체류량이 급격히 감소하여 일정해지는 전이영역(분배기로부터 0.2~0.7 m

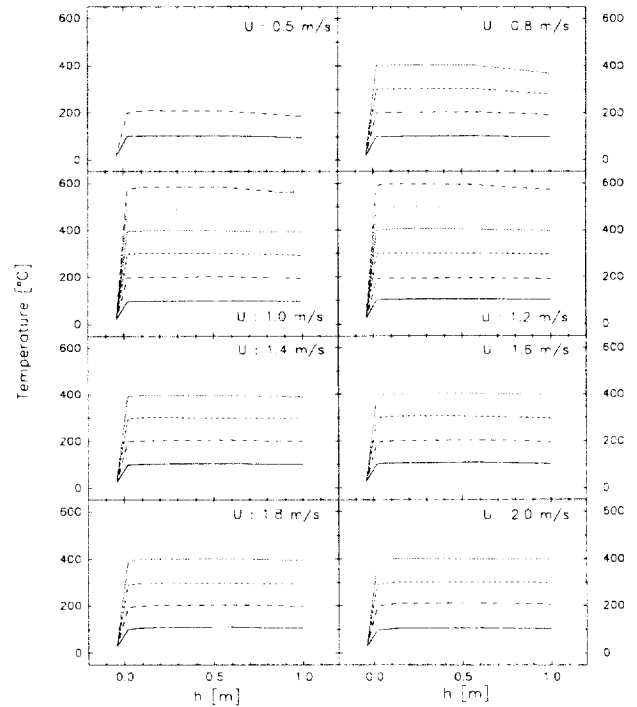


Fig. 3. Axial temperature profiles in the fluidized bed.

높이)의 온도분포는 거의 균일하게 유지되었다. 각 압력점 사이의 고체체류량은 아래의 식 (1)을 사용하여 압력점 사이의 차압으로부터 계산되었으며, 축방향 고체체류량 분포로부터 감쇄상수를 계산하였다.

$$\epsilon_s = \frac{g}{g} \left(- \frac{\Delta P}{\Delta h} \right) \frac{1}{\rho_p} \quad (1)$$

3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 본 연구에서 측정된 대표적인 형태로써 유속이 1.2 m/s일 때의 축방향 고체체류량 분포를 나타낸다. 그림에 나타난 것과 같이 고체체류량 분포는 일정 공극률을 나타내는 층하부의 농후상과 층상부의 희박상, 농후상과 희박상 사이의 전이영역이 존재하는 전형적인 S자 형태의 분포를 나타내었으며, 전이영역에서의 고체체류량은 높이가 증가함에 따라 지수적으로 감소하였다. 기체출구높이에서는 출구효과로 고체체류량이 미소하게 증가하는 현상이 나타났다.

모든 실험조건에서 농후상이 뚜렷하게 관찰되었으며, 농후상의 고체체류량은 0.37~0.43으로 Kunii와 Levenspiel[2]에 의해 요약된 기포유동층 및 난류유동층에서 층하부 농후상의 고체체류량의 범위(기포유동층: 0.55~0.40; 난류유동층: 0.40~0.22)에 속하였다. Lee와 Kim[7]의 상관식으로 본 실험조건에서 예측되는 유동화영역도 이와 매우 유사하였다. 전이영역에서 고체체류량은 분배기로부터 대략 0.2~0.7 m 사이에서 급격하게 감소하여 거의 일정해지는 경향을 나타냈다.

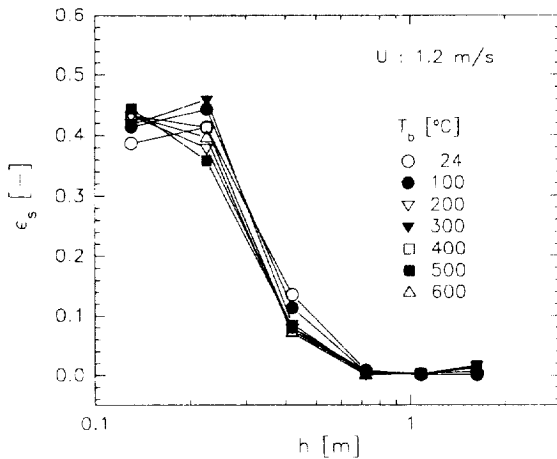


Fig. 4. Typical axial solid holdup profiles in the fluidized bed.

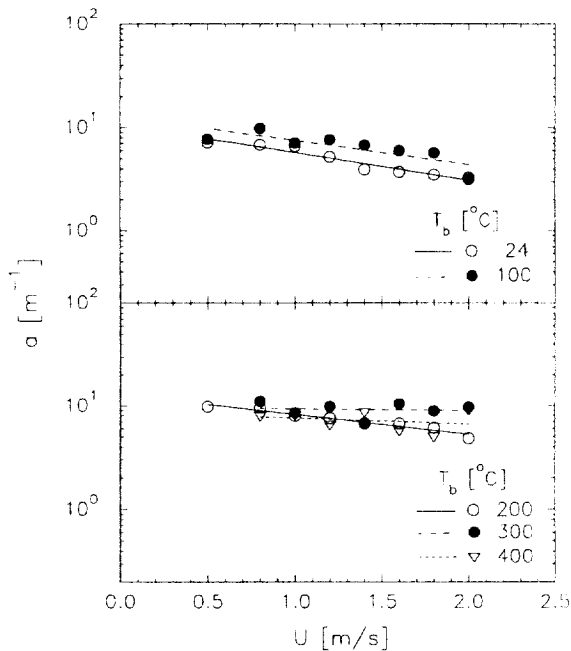


Fig. 5. Effect of the gas velocity on the decay constant at given temperatures.

측정된 축방향 고체체류량 분포를 해석하기 위해서 Kunii와 Levenspiel[2]의 모델을 적용하였다. Kunii와 Levenspiel[2]의 모델에서는 프리보드 높이가 TDH보다 낮은 경우 각 높이에서의 고체체류량이 완전환류(complete reflux)일 때의 고체체류량에서 일정 상수만큼 감소한다. 그러나 본 실험조건에서는 입자비산속도가 작아서 이 효과에 의한 고체체류량의 감소가 무시될만큼 작았으며 Adánez 등[3]의 방법에 의하면 약 0.002 이하였다. 따라서 전이영역에서 축방향 고체체류량 분포에 관한 모델식은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있고, 측정된 축방향 고체체류량 분포로부터 식 (2)의 감쇄상수 a 를 결정할 수 있다.

$$\frac{\epsilon_s - \epsilon'_s}{\epsilon_{sl} - \epsilon'_s} = \exp(-ah_s) \quad (2)$$

식 (2)에서 ϵ_{sl} 는 축방향 고체체류량 분포에서 관찰된 농후상의 고체체류량을 사용하였다. ϵ'_s 는 고체체류량이 프리보드에서 높이에 따라 감소하여 일정해지는 것으로 가정하고 수렴하는 값으로 하였

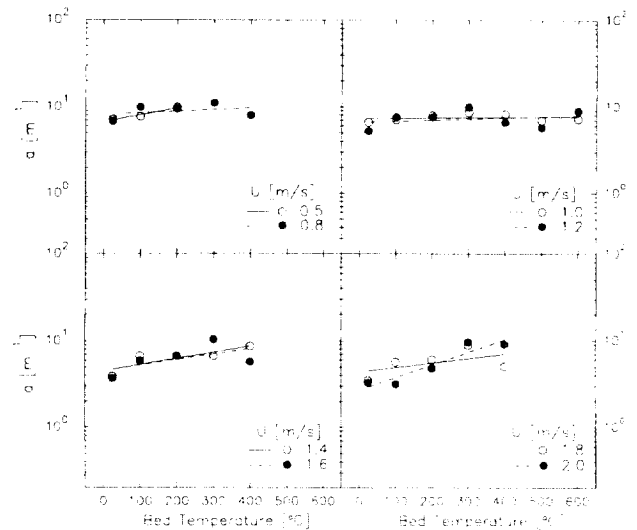


Fig. 6. Effect of the temperature on the decay constant at given gas velocities.

다. 따라서 ϵ'_s 는 Fig. 4에서 나타나는 것과 같이 분배기로부터 1.08 m와 1.61 m 높이에서의 고체체류량 중에서 결정하였으며, 높이 1.61 m에서 고체체류량이 상승하는 것은 무시되었다. 결정된 ϵ'_s 의 범위는 0-0.008로 거의 0에 가까웠다. 식 (2)에서 h_s 의 기준점은 분배기로부터 0.225 m 높이를 사용하였다.

Fig. 5는 일정한 층온도에서 유속의 변화에 따른 감쇄상수의 변화를 나타낸다. 기존의 보고들[2,4]과 마찬가지로 감쇄상수는 유속이 증가함에 따라 감소하는 일반적인 경향을 보였다. 이는 유속이 증가함에 따라 증표면에서 입자비산속도가 증가하여 증상부 회박상의 고체체류량이 증가하기 때문이다. 그러나 유속이 증가함에 따라 감쇄상수가 감소하는 경향은 온도가 증가할수록 분화되었다. 즉, 층온도가 낮을 때에는 감쇄상수에 대한 유속의 영향이 크며, 층온도가 높을수록 유속의 영향이 분화되었다. 이는 온도의 증가에 따른 기체밀도의 감소로 입자에 가해지는 기체의 운동량이 감소하는 것이 지배적이기 때문으로 사료되었다.

Fig. 6은 일정한 유속에서 층온도의 변화에 따른 감쇄상수의 변화를 나타낸다. 유속 0.5-1.2 m/s의 경우에는 온도가 증가함에 따라 감쇄상수는 다소 증가한 후 감소하거나 거의 일정한 경향을 나타내었다. 유속 1.4-2.0 m/s의 경우에는 온도가 증가함에 따라 감쇄상수는 뚜렷한 증가경향을 나타내었다. 결과적으로 감쇄상수에 대한 온도의 영향은 유속이 증가함에 따라 증가함을 알 수 있었다. 이는 유속이 작은 경우에는 입자의 비산속도에 중력의 영향이 지배적이지만 유속이 증가하면 항력의 영향이 증가하여 기체밀도의 감소효과가 증가되기 때문으로 생각된다.

감쇄상수의 변화는 증표면에서 입자비산속도의 변화의 역으로 고려될 수 있다. 즉, 입자비산속도가 증가하면 감쇄상수는 감소하며, 입자비산속도가 감소하면 감쇄상수는 증가한다. 한편 입자비산속도의 변화는 Choi 등[8]의 보고와 같이 유속이 증발속도인 임경(d_w)의 변화로 정성적으로 나타낼 수 있으며, 본 연구에서 나타난 감쇄상수에 대한 온도의 영향은 d_w 에 대한 온도의 영향의 역으로 설명될 수 있다.

감쇄상수에 대한 온도의 영향을 d_w 에 대한 온도의 영향의 역으로 고려하면, 온도가 증가함에 따라 감쇄상수는 증가하여 최대값을 보인 후 다시 감소하며 최대값을 보이는 온도는 유속이 증가함에 따라 조금씩 증가하는 것으로 예측될 수 있다. 이와 유사한 경향은 Fig.

6에서 나타내는 것과 같이 일부 측정결과에서 관찰되고 있다. 그러나 보다 구체적인 해석을 위해서는 좀더 넓은 입도 및 온도범위에서 측정결과가 필요한 것으로 판단된다.

Fig. 7은 본 실험결과와 상온유동층에서 얻어진 타 연구자들[1, 4, 9-19]의 결과들을 분할의 상관식[3]에 의해서 계산된 감쇄상수와 비교하여 나타낸다. 타 연구자들의 결과로는 보고된 자료들 중에서 총 하부의 농후상이 뚜렷하게 나타난 경우만을 인용하였으며, Table

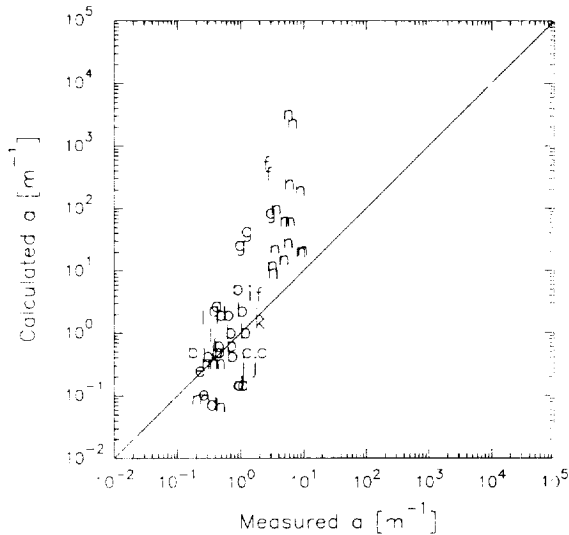


Fig. 7. Comparison between the measured and calculated values of decay constants by means of the previous correlation of Adánez et al.[3].

[(a) Li & Kwauk[1]; (b) Cho et al.[4]; (c, d) Arena et al.[9, 10]; (e) Bai et al.[11]; (f) Choi et al.[12]; (g) Choi et al.[13]; (h) Hartge et al.[14]; (i) Horio et al.[15]; (j, k) Kato et al.[16, 17]; (l) Li et al.[18]; (m) Werther et al.[19]; (n) Experimental data of this study]

3은 이들의 실험조건과 장치규격을 요약하여 나타낸다.

그림에 나타나듯이 Adánez 등[3]의 상관식은 일부 상온유동층에서 측정된 결과와는 비교적 유사한 경향을 나타내었으나, 본 실험결과를 비롯하여 일부 상온유동층에서 측정된 결과와는 만족스러운 일치율을 보이지 않았다. 특히 유속이 입자의 종말속도에 접근할수록 분포의 $(U - U_m)$ 항이 0에 접근하기 때문에 예측값은 측정값보다 매우 크게 나타났다. 한편 Cho 등[4]의 상관식에 의한 예측값도 일부 상온유동층에서 측정된 결과와는 유사한 경향을 나타내었으나, 본 실험결과를 비롯하여 일부 상온유동층에서 측정된 결과와는 다소 큰 차이를 보였으며, 측정값보다 작게 예측하는 것으로 나타났다.

본 실험결과와 기존의 상온유동층에서 얻어진 타 연구자들[1, 3, 4, 9-19]의 결과들을 토대로 감쇄상수에 미치는 온도의 영향이 고려된 다음의 상관식을 구하였다(상관계수, $r^2=0.91$).

$$ad_p = \exp \left(11.2 + 210 \frac{d_p}{D_r - d_p} \right) \left(\frac{d_p \rho_g (U - U_{mf})}{\mu} \right)^{-0.492} \left[\frac{\rho_g g d_p}{\rho_g (U - U_{mf})^2} \right]^{0.725} \left(\frac{\rho_p - \rho_g}{\rho_g} \right)^{0.731} C_p^{-1.47}$$

Fig. 8은 본 연구결과를 비롯하여 타 연구에서 측정된 감쇄상수와 본 상관식에 의한 예측값을 비교하여 나타낸다. 그림에 나타난 것과 같이 측정된 감쇄상수와 본 상관식에 의한 계산값은 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구의 실험범위에서 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 유속이 증가함에 따라 고체체류량 분포에 의한 감쇄상수는 감소하는 경향을 나타내었으며, 층온도가 낮을수록 유속의 영향이 증

Table 3. Summary of previous studies considered in the present correlation for the decay constant

Authors	Experimental apparatus $D_r \times H$ [m]	Particle	ρ_p [kg/m ³]	\bar{d}_p [mm]	U_{mf} [m/s]	U [m/s]	G [kg/m ² s]
Li & Kwauk[1]	0.09×8.0	FCC	1780	0.058	0.0017	1.30	16
		Pyrite cinder	3050	0.056	0.0028	1.50	129
Adánez et al.[3]	0.1×4.0	Coal	1400	0.35	0.0864	4.0	41.7
				0.65	0.2124	4.4	38.6
		Sand	2600	0.18	0.0448	3.5, 4.0	54.4, 100.1
				0.40	0.1362	4.9, 5.5	59.0, 97.5
				0.57	0.2446	5.5	53.5
				0.72	0.3504	5.5, 5.7, 6.2	32, 38, 79.4
Cho et al.[4]	0.1×5.3	FCC	1720	0.065	0.0021	1.5-3.5	10-50
Arena et al.[9]	0.12×5.75	Ballotini	2543	0.090	0.0080	5.0	215-251
	0.40×10.5				0.0080	5.0	92-115
Arena et al.[10]	0.12×5.75	Ballotini	2540	0.089	0.0080	3.0	80-133
Bai et al.[11]	0.186×8.0	FCC	1545	0.054	0.00132	3.43-5.23	60-120
	0.14×10.0						
Choi et al.[12]	0.1×2.4	Sand	2598	0.247	0.0090	0.81-2.8	0.005-7.8
Choi et al.[13]	0.05×3.8	Silica gel	1000	0.046	0.0013	0.3-0.5	0.12-1.70
Hartge et al.[14]	0.4×7.8	Quartz sand	2630	0.056	0.0024	4.9	118
Horio et al.[15]	0.05×2.79	FCC	1000	0.060	0.0011	1.2	13.6
Kato et al.[16]	0.066×3.0	FCC	1700	0.061	0.0018	4.0	113-149
Kato et al.[17]	0.15×3.0	FCC	1770	0.074	0.0028	1.4-1.6	1.9-3.6
Li et al.[18]	0.09×10.0	FCC	929.5	0.054	0.0008	1.52-2.10	14.3-24.1
Werther et al.[19]	0.4×9.0	Sand	2600	0.130	0.02	3.1-5.0	31-70

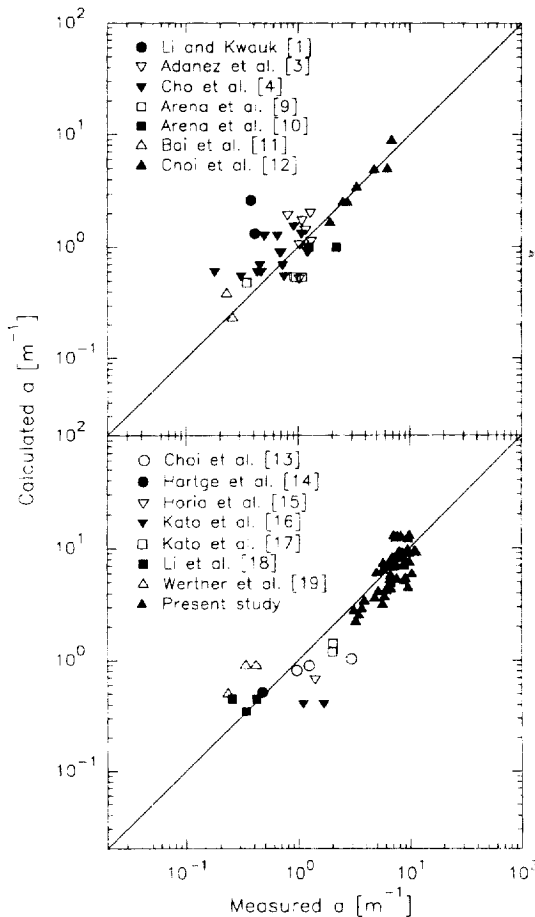


Fig. 8. Comparison between measured and calculated values of decay constants by means of the correlation of this study.

가하였다.

(2) 감쇄상수는 온도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었으며, 유속이 증가함에 따라 온도의 영향이 증가하였다.

(3) 상온 및 고온유동층에서 적용가능한 감쇄상수에 관한 상관식을 제시하였으며, 상관식에 의한 계산값과 측정값은 비교적 만족스러운 일치율을 보였다.

사용기호

- a : decay constant [m^{-1}]
- C_D : drag coefficient on the particle based on the superficial gas velocity [-]
- d_p : particle diameter [m]
- d_{ps} : particle diameter having a terminal velocity that is equal to the superficial gas velocity [mm]
- \bar{d}_p : mean particle diameter [mm]
- D_c : column diameter [m]
- f_{sa} : volumetric fraction of secondary air [-]
- g : gravitational acceleration, $9.8 \text{ [m/s}^2\text{]}$
- g_c : conversion factor, $9.8 \text{ [kg-m/kg-s}^2\text{]}$
- G_s : solid circulation flux [$\text{kg/m}^2\text{-s}$]
- h : height above the distributor plate [m]
- h_b : height above the bed surface [m]
- H_s : static bed height [m]

- H_t : column height [m]
- K_1 : values of constant in Ergun equation, $1.75/(\epsilon_{mf}^3 \phi_s)$ [-]
- K_2 : values of constant in Ergun equation, $150(1 - \epsilon_{mf})/(\epsilon_{mf}^3 \phi_s^2)$ [-]
- P : pressure [kPa]
- r^2 : regression coefficient [-]
- T_b : bed temperature [$^{\circ}\text{C}$]
- U : superficial gas velocity [m/s]
- U_{mf} : minimum fluidizing velocity [m/s]
- U_t : particle terminal velocity [m/s]
- Z_{sa} : height of secondary air injection [m]

그리스 문자

- ϵ_{mf} : void fraction in a bed at minimum fluidizing conditions [-]
- ϵ_s : solid holdup [-]
- ϵ_s^* : solid holdup that can be pneumatically conveyed by gas [-]
- ϵ_{sf} : solid holdup in the lower dense region [-]
- μ : gas viscosity [kg/m-s]
- ρ_g : gas density [kg/m^3]
- ρ_p : apparent particle density [kg/m^3]
- ϕ_s : sphericity of a particle [-]

감 사

이 논문은 1996년도 건국대학교 학술진흥처 지원에 의한 논문이며, 이에 감사를 포함합니다.

참고문헌

1. Li, Y. and Kwauk, M.: "Fluidization III", edited by Grace, J. R. and Matsen, J. M., Plenum Press, New York, 537(1980).
2. Kunii, D. and Levenspiel, O.: *Powder Technol.*, **61**, 193(1990).
3. Adanez, J., Gayán, P., García, L. F. and Diego, L. F.: *Powder Technol.*, **81**, 259(1994).
4. Cho, Y. J., Namkung, W., Park, S. W. and Kim, S. D.: *J. Chem. Eng. Japan*, **27**, 158(1994).
5. Kunii, D. and Levenspiel, O.: "Fluidization Engineering", 2nd ed., Butterworth-Heinemann, 64(1991).
6. Wen, C. Y. and Yu, Y. H.: *AIChE J.*, **12**, 610(1966).
7. Lee, G. S. and Kim, S. D.: *Powder Technol.*, **62**, 207(1990).
8. Choi, J. H., Choi, K. B., Kim, P., Shun, D. W. and Kim, S. D.: *HWAHAK KONGHAK*, **33**(5), 580(1995).
9. Arena, U., Malandrino, A., Marzocchella, A. and Massimilla, L.: "Circulating Fluidized Bed Technology III", edited by Basu, P., Horia, M. and Hasatami, M., Pergamon Press, Oxford, 137(1990).
10. Arena, U., Cammarota, A., Marzocchella, A. and Massimilla, L.: Proc. of the 12th Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion, 899 (1993).
11. Bai, D. R., Jin, Y., Yu, Z. Q. and Zhu, J. X.: *Powder Technol.*, **71**, 51(1992).
12. Choi, J. H., Kim, K. J. and Kim, P.: *HWAHAK KONGHAK*, **32**(3), 489(1994).
13. Choi, J. H., Park, J. H., Choung, W. M., Kang, Y. and Kim, S. D.: *Korean J. of Chem. Eng.*, **12**(2), 141(1995).
14. Hartge, E. U., Li, Y. and Werther, J.: "Circulating Fluidized Bed Technology", edited by Basu, P., Pergamon Press, Toronto, Ont.,

- 153(1986).
15. Horio, M., Morishita, K., Tachibana, O. and Murata, M.: "Circulating Fluidized Bed Technology II", edited by Basu, P. and Large, J. F., Pergamon Press, Oxford, 147(1988).
16. Kato, K., Shibasaki, H., Tamura, K., Wang, C. and Takarada, T.: "Fluidization '87: Korea and Japan, Proc. 1st Korea-Japan Symp. on Fluidization", PangHan Pub. Co., Seoul, 229(1987).
17. Kato, K., Takarada, T., Tamura, T. and Nishino, K.: "Circulating Fluidized Bed Technology III", edited by Basu, P., Horio, M. and Hasatami, M., Pergamon Press, Oxford, 145(1990).
18. Li, J., Tung, Y. and Kwauk, M.: "Circulating Fluidized Bed Technology II", edited by Basu, P. and Large, J. F., Pergamon Press, Oxford, 193(1988).
19. Werther, J., Hartge, E. U. and Kruse, M.: *Powder Technol.*, **70**, 293(1992).