

이상 유동층 반응기의 동특성에 관하여

서명교 · 서정호* · 강준수

동의공업전문대학 식품공업과, *(주)서릉 재료 개발연구소

The Dynamic Characteristics of a Two Phase Fluidized Beds

Myung-Gyo Suh, Jung-Ho Suh* and Jun-Soo Kang

Department of Food Industry, Dongeui Technical Junior College

*Materials Development Research Institute, Suhryung Co., Ltd.

Abstract

The purpose of this research was to investigate fluidization characteristics of three solid particles, correlations between voidage and superficial velocity. The inside diameter of a column did not affect the fraction void-superficial velocity relationship for fluidization systems which was obtained as follows:

$$\frac{u}{u_t} = \epsilon^{3.703} \text{ — Sea Sand}$$

$$\frac{u}{u_t} = \epsilon^{3.5665} \text{ — Ion Exchange}$$

$$\frac{u}{u_t} = \epsilon^{4.066} \text{ — GAC}$$

And the spherical type media is good for fluidized systems as it maintains low voidage. Actually, if biofilm attached to media (bioparticle), the density became lower in fluidized bed biofilm reactor. Therefore, as the density of media become higher, it is easy to maintain fluidized beds.

Key words: fluidization systems, voidage, superficial velocity, biofilm, bioparticle, fluidized bed biofilm reactor, density of media, fluidized beds

서 론

유동화 공정은 식품 및 화학공업에서 널리 이용되어 지고있는 공정으로, 기-고 액-고 등의 이상 및 기-액-고 삼상인 유동층 반응기는 다른 반응기에 비해 고체표면에서 액상과 기상간의 혼합과 반응을 증대시키는데 효과가 커 최근 산업적으로 많이 이용되고 있다.

유동화 공정은 공업적 응용이 선도하여 발달하였고 학문적 연구는 그 뒤를 떠 받치는 경우의 대표적인 예라고 할 수 있으며 유동층이 이용되는 주요공정으로 식품가공의 造粒공정⁽¹⁾, 건조공정⁽²⁾, 곡물의 가열처리공정⁽¹⁾, 산업폐수처리의 미생물 산화공정^(3,4) 등과 최근에는 미생물 반응기의 발효조^(5,6)로도 이용되고 있다.

유동층이란 장치의 하부에서 유체를 불어올려 고체입자를 부유현탁 상태로 유지한 층으로 고체층과 유체층의 중간상태에 있다. 이 상태에서는 고체입자와 유체와의

균일한 혼합물이 일종의 유체로서 취급된다는 잇점이 있어 입자의 전 표면적이 유효하게 사용되므로 유체와의 접촉이 밀접하고도 균일하게 되며 열의 교환도 좋고 국부과열의 우려도 없으며 쉽게 온도조절도 되나, 유동 입자의 동특성이 매우 복잡하게 나타나므로 반응기의 조작조건을 적절한 수식으로의 묘사나 해석적인 해를 구하지 못하고 있는 실정이다. 반응기로서의 유동층의 효율은 그 수력학적 동특성에 의해 크게 좌우되므로 유동층의 성능을 평가하고 효율적으로 응용하기 위해서는 수력학적 동특성을 알아야 한다.

따라서 본 실험에서는 유동층의 수력학적 현상에 따른 동특성을 고찰하고자 한다.

재료 및 방법

수력학적 동특성

자유 낙하계에서 입자가 중력과 가속도에 의한 힘과 유체의 friction drag와 균형을 이루어서 일정한 속도로 떨어질 때를 terminal 또는 free-settling velocity u_t 라 하며 다음과 같다⁽⁷⁾.

Corresponding author: Myung-Gyo Suh, Department of Food Industry, Dongeui Technical Junior College, Yangjeong-dong San 72, Pusanjin-gu, Pusan 614-715

$$u_t = \frac{g D_p^2 (\rho_s - \rho)}{18 \mu} \quad \text{Re}_p < 2 \quad (1)$$

$$u_t = \frac{0.153 g^{0.71} D_p^{1.14} (\rho_s - \rho)^{0.71}}{\rho^{0.29} \mu^{0.43}} \quad 2 < \text{Re}_p < 500 \quad (2)$$

$$u_t = 1.74 \left[\frac{g D_p (\rho_s - \rho)}{\rho} \right]^{0.5} \quad 500 < \text{Re}_p < 2 \times 10^5 \quad (3)$$

입자들 간의 상호 거리가 커질수록 입자들 간의 간섭은 현저히 감소하므로 유동층을 통한 정상상태에서 액체의 상향유속 u 는 공극률 ε 의 지수함수에 비례한다고 할 때 다음과 같이 된다.

$$u = u_t (k' \varepsilon^{b'}) \quad (4)$$

여기서 k' 와 b' = constant of particular system

속도구배에 대한 어떠한 영향도 무시된다고 가정하면 유체의 속도는 공극률로 나눈 superficial liquid velocity u_0 와 같다.

그러므로 식 (4)는 다음과 같이 된다.

$$u = \frac{u_0}{\varepsilon} = u_t (k' \varepsilon^{b'}) \quad (5)$$

여기서 층류영역 즉 $\text{Re}_p < 2$ 에서는 식 (5)와 식 (1)로부터 다음과 같은 공극률과 흐름특성과의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\varepsilon = k [K_s]^b \quad (6)$$

$$\text{여기서 } K_s = \frac{u_0 \mu}{g D_p^2 (\rho_s - \rho)}$$

Intermediate region 즉 $2 < \text{Re}_p < 500$ 에서는 다음과 같다.

$$\varepsilon = k'' [K_i]^d \quad (7)$$

$$\text{여기서 } K_i = \frac{u_0 \rho^{0.29} \mu^{0.43}}{g^{0.71} D_p^{1.14} (\rho_s - \rho)^{0.71}}$$

Newton's law region 즉 $500 < \text{Re}_p < 2 \times 10^5$ 에는

$$\varepsilon = c [K_N]^n \quad (8)$$

$$\text{여기서 } K_N = u_0 \sqrt{\frac{\rho}{g D_p (\rho_s - \rho)}}$$

과 같이 공극률과 흐름특성의 관계식을 얻을 수 있다. 공극률과 유동층 높이의 관계는 다음과 같다.

$$\varepsilon = \frac{h A_c - h_0 A_c}{h A_c} = 1 - \frac{h_0}{h} \quad (9)$$

한편 Richardson과 Zaki⁽⁸⁾는 액체의 상향유속 u 와 입자의 공극률 ε 는 다음과 같다.

$$\frac{u}{u_t} = \varepsilon^n \quad (10)$$

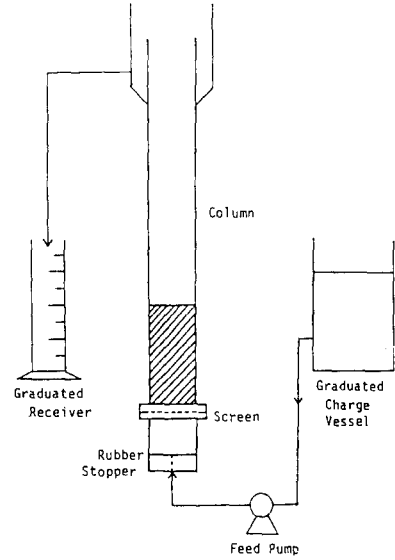


Fig. 1. Apparatus for fluidization experiments

실험장치

수리학적 실험에 사용된 장치는 Fig. 1과 같다. Column은 내경이 각각 3, 5, 8.9 및 10 cm이고 높이가 약 80 cm인 투명한 아크릴 원형관으로 제작하였으며 column측면에 눈금자를 부착하였다. 유동에 사용된 입자는 비중이 2.639 g/cm³이고 직경이 0.35 mm인 모래, 비중 1.182 g/cm³, 직경 0.5 mm인 이온 교환수지 및 함침되었을 때의 비중이 2.0 g/cm³이고 직경이 0.6~1.2 mm인 granular activated carbon(GAC)을 사용하였다. 실험에 사용한 유체는 수도수를 사용하였고 유출되어 나오는 유체를 효율적으로 받기위해 column상부에 corn형태로 이중관을 설치하였다. 유동입자의 지지와 고른 층팽창을 위해 screen을 column하부에 설치하였다.

측정방법

깨끗이 세척한 유동입자를 반응기에 적당량 채우고 수도수를 반응기 하부로 주입시켜 층팽창에 의한 유동층 높이, h 를 측정하여 식 (9)에서 공극률 ε 를 계산하였다. 여기서 h_0 는 메스실린더에 일정높이의 물을 채워놓고 일정량의 매질입자를 넣어 늘어난 부피가 공극률을 뺀 진부피가 되므로 이 부피를 단면적으로 나누어 측정하였다. 유출되는 수도수를 메스실린더로 받아 유량을 측정하였고 유체의 속도는 유동층 반응기의 단면적으로 유량을 나누어 계산하였으며 밸브로써 조절하였다. 실험한 유속범위는 0~101.52 m/hr였고 세 입자 모두 intermediate 영역에서 거동하였으므로 실험은 intermediate 영역에서만 행하여 졌다. 고체의 밀도 ρ_s 는 부피와 질량을 직접 측정하여 구하였으며 점도 μ 와 다른 물리적 특성들은 화학공학편람⁽⁹⁾에서 구하였다. 식 (7)의 K_i 값과 ε 의 관계를 나타낸 그림에서 상수 k' 와 d 및 최소 유동화

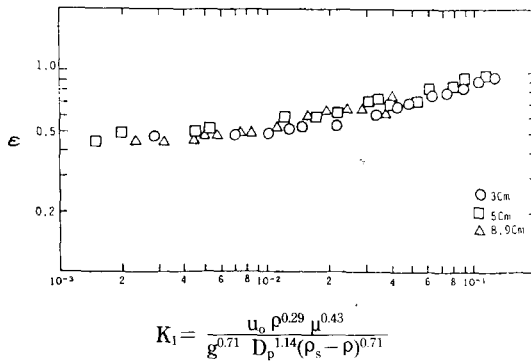


Fig. 2. Batch fluidization sea sand with water in intermediate region

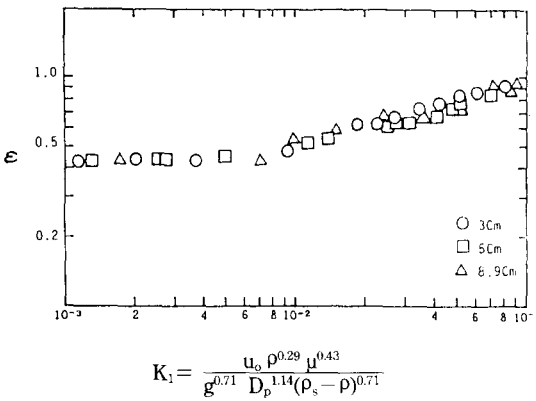


Fig. 3. Batch fluidization ion exchange with water in intermediate region

속도 u_{mf} 를 구하였다.

결과 및 고찰

공극률과 흐름특성과의 관계

Intermediate 영역($2 < Re_p < 500$)에서 공극률과 흐름특성과의 관계에 대한 결과를 Fig. 2, 3 및 4에 Lewis와 Bowerman⁽⁷⁾의 형태로 나타내었다. Fig. 2는 3 cm, 5 cm 및 8.9 cm column에서 모래를 유동입자로 사용한 실험 결과로써 공극률과 흐름특성과의 관계식이 $\epsilon = 1.6324 [K_1]^{0.2603}$ 로 나왔고 최소 유동화 속도(u_{mf})는 0.0951 cm/sec였으며 Fig. 3은 이온교환 수지의 실험결과로써 관계식은 $\epsilon = 1.54 [K_1]^{0.2354}$ 였고 최소 유동화 속도는 0.0765 cm/sec였다. GAC에 대한 실험은 앞서 모래와 이온교환수지의 실험 결과로부터 유동특성이 column의 직경에 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. Fig. 4를 보면 관계식은 $\epsilon = 3.645 [K_1]^{0.3573}$ 이며 최소 유동화 속도는 0.1653 cm/sec였다. GAC에서의 k^* 와 d 값이 모래와 이온교환수지의 값보다 훨씬 높게 나타난 것은 모래나 이

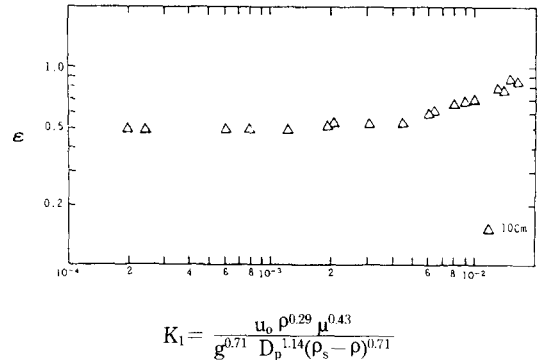


Fig. 4. Batch fluidization GAC with water in intermediate region

온교환수지는 입경이 균일하나 GAC는 입경이 균일하지 않아 저항력(resisting force)를 많이 받으므로 같은 유속에서도 공극률이 증가하기 때문인 것으로 생각되어진다.

상향 액체유속과 공극률과의 관계

상향 액체유속과 공극률과의 관계는 Richardson과 Zaki가 나타낸 식 (10)으로 표시하였으며 여기에서 모래는 n 값이 3.703이었고 이온교환수지는 3.5665, GAC가 4.066으로 GAC에서의 값이 모래나 이온교환수지의 값과는 차이를 나타내었다. 위의 결과로 볼때 공극률은 입자의 구형정도(sphericity)에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.

요 약

본 실험의 목적은 공극률과 상향유속의 관계에서 세입자의 유동특성을 고찰하는 데 있다. Column 내경은 유동층의 유속과 공극률과의 관계에 큰 영향을 미치지 못했으며 유속과 공극률과의 관계는 다음과 같다.

$$\frac{u}{u_i} = \epsilon^{3.703} \text{ --- 모래}$$

$$\frac{u}{u_i} = \epsilon^{3.5665} \text{ --- 이온 교환수지}$$

$$\frac{u}{u_i} = \epsilon^{4.066} \text{ --- GAC}$$

또 유동층 매질입자는 구형을 사용하는 것이 일정유속에서 공극률을 낮게 유지할 수 있어 좋았고 실제로 미생물막 유동층 반응기에서는 미생물막이 매질에 부착되면 비중이 감소하므로 매질의 비중이 높을수록 유동층을 유지하기가 쉽다.

기호설명

- A_c : area of internal cross section of column (cm^2)
- D_p : diameter of particle (cm)
- g : acceleration due to gravity (cm/sec^2)
- h : height of bed at any instant (cm)
- h_0 : height of hypothetical bed with zero interstitial voids (cm)
- Re_p : particle Reynolds number (-)
- u : velocity of liquid past the particle in the fluidized bed (cm/s)
- u_0 : superficial velocity of liquid based upon the empty column (cm/s)
- u_{mf} : minimum fluidization velocity (cm/s)
- u_t : terminal or free-settling velocity of particle (cm/s)
- ϵ : fraction void space in solids bed at any instant (-)
- μ : dynamic viscosity of liquid ($g/cm \cdot sec$)
- ρ : density of liquid (g/cm^3)
- ρ_s : density of solid saturated with liquid (g/cm^3)

문헌

1. 赤尾 剛: 食品加工培養への流動層の應用. 化學と生物,

日本農藝化學會, 24(6), 390(1986)

2. 金喜衍: 보리의 流動層 乾燥特性에 關한 研究. 경상대학교 박사학위논문 (1987)

3. 김동석, 안갑환, 서명교, 박태주, 송승구: 생물막 유동층 반응기에서 고농도 합성폐수의 처리효율과 미생물성상. 화학공학, 29(4), 448(1991)

4. 김동석, 장희재, 안갑환, 서명교, 송승구: 생물막 유동층 반응기에 의한 주정공장의 고농도 유기성 폐수처리. 한국생물공학회지, 6(4), 345(1991)

5. Davison, B.H. and Scott, C.D.: A proposed biparticle fluidized-bed for lactic acid fermentation and simultaneous adsorption. Biotech. Bioeng, 39(3), 365(1992)

6. Han, M.S., Lee, K.S. and Chung, D.H.: Continuous Acetic Acid Production by Immobilized *Acetobacter aceti* Cells on a Fluidized Bed Reactor. 한국식품과학회 제 49 차 학술발표회 논문초록, p.34(1992)

7. Lewis, E.W. and Bowerman, E.W.: Fluidization of solid particles in liquid. Chem. Eng. Progress, 48(12), 603 (1952)

8. Richardson, J.F. and Zaki, W.N.: Sedimentation and fluidization: part I. Trans. Instn, Chem. Engrs, 32, 35 (1954)

9. Perry, R.H. and Green, D.: Perry's Chemical Engineers' Handbook. McGraw-Hill Book Co., N.Y., 6th ed., p.3-251(1984)

(1992년 11월 12일 접수)