

곡류의 유동층 건조에 관한 연구(1)

허 종 화* 서 길 덕**

Study on the Fluidized Bed Drying of Grains (1)

- Fluidization characteristics of Rough Rice -

Jong Wha Hur* Gil Duk Suh**

ABSTRACT

For the purpose of drying high moisture rough rice effectively, from the view point of pre-drying, some basic experiments of fluidized bed drying of rough rice were carried out.

The minimum fluidization velocities (U_{mf}) for both rough rice and glass bead were analyzed to find out fluidizing characteristics. The main results obtained were as follows;

1) Minimum fluidization velocity of rough rice and glass bead were 2.01m/s and 4.07m/s, respectively, when using the distributor with 16% opening ratio.

2) U_{mf} calculated by Shirai's empirical equation and that calculated by Wen's modified equation were inconsistent with experimental data, while U_{mf} calculated by Ergun's equation was consistent with the experimental data.

3) The following equations, on the basis of Leva's equation, were obtained.

$$C_{mf} = 1.19 \times 10^{-4} (Re_p)^{-0.0318} \quad (\text{rough rice})$$

$$C_{mf} = 1.02 \times 10^{-4} (Re_p)^{-0.0047} \quad (\text{glass bead})$$

* : 정희원, 경상대학교 식품가공학과

** : 부산대학교 화학공학과

1. 서 론

유동화는 열전달속도 및 물질전달 속도가 빠르며, 입자가 부드러운 유체와 같이 부유하여 이동하기 때문에 조작이 쉽고 연속적인 제어가 쉬운 특성 때문에 공업적으로 건조, 가열, 냉각, 연소, 폐수처리, 수송 등에 광범위하게 이용되고 있으며^{1)~6)}, 최근에는 식품공업 등에서도 유동화 기법을 도입하여 유동층 건조와 유동층 동결 등을 널리 이용하고자 시도하고 있다.^{7), 8)}

유동층의 열 및 물질전달에 관한 연구로서, Wamsley⁹⁾ 등은 열풍 속에서 유동하는 냉입자와 기체사이의 열 전달 특성을 구하여 유동층 장치의 over-all performance 를 측정하였으며, Pfofflin 등¹⁰⁾ 은 유동층 장치의 열 및 물질전달 응답을 추정하는 모델을 제시하였다. Kato 등¹¹⁾ 은 활성 알루미늄의 젖은 입자를 회분식 및 연속식 유동층 장치에서 건조하여 항률건조 및 감률건조 기간의 건조속도상수는 유속, 층고, 입구가스온도 및 입자의 평균 체류시간에 영향을 받음을 보고하였다.

또한 유동화때의 최소 유동화속도 (U_{mf}) 에 관하여는 Ergun¹²⁾, Leva⁶⁾, Wen 과 Yu¹³⁾ 등의 연구결과가 있으며, 곡류의 건조와 냉각 저장에 관해서 Henderson 등의 비교적 많은 보고가 있다.^{14)~22)} 곡류의 유동층 건조에 관한 연구로서, Iwamoto 등²³⁾ 은 곡류를 유동층 건조하여 최소 유동화 속도의 실험치와 Leva 의 실험식이 잘 일치함을 밝혔으며, Murata²⁴⁾ 는 박청의 이론을 써서 비의 혼합층 건조특성을 해석하여 이를 유동층 건조 등에 활용할 수 있게 하였다.

우리나라 식품의 대종을 이루는 쌀은, 벼를 수확하여 건조, 저장하는 과정에서 대부분이 벼를 논에서 벼후 며칠간 방치하여 예비건조시킨 후 탈곡하고 다시 햇볕에 말리므로써 자연의 기상조건에 따라 비의 건조가 크게 영향을 받는 실정인데, 앞으로 콤바인 등의 사용으로 벼를 생탈곡하는 경우가 늘어날 것이 예상된다. 이에 따

라 예비건조를 거치지 않게 되는 벼는 그 수분함량이 높아서 수확초기에 안전하고 효율적인 인공건조 방법이 요구된다.

본 연구에서는 고수분 비의 초기건조에 적합한 방법의 하나인 유동층 건조를 실시하기 전에 유동층 건조장치를 제작하고, 분산관의 선정과 최소 유동화 속도 U_{mf} 등의 유동 특성을 실험하여 제시한 이론식들과 비교 검토하여 실험치와 잘 일치하는 실험식을 구하였다.

기호설명

- A : constant, [-]
- A_t : cross-sectional area of tower or bed, [cm]
- C_{mf} : coefficient of minimum fluidization, [-]
- C_p : specific heat, kcal/kg C, [KJ/kgK]
- d_p : particle diameter, [cm]
- d_t : tower or bed diameter, [cm], [m]
- G : superficial mass air velocity, [kg/m min]
- g : acceleration of gravity, [980 cm/s]
- g_c : conversion factor, [980 gcm/(-wt)s]
- h : heat transfer coefficient, [kcal/m mm C]
- h_s : saturated vapor pressure, [mmHg]
- h_v : vapor pressure, [mm Hg]
- L : height, [cm]
- L_e : length, [cm]
- L_f : height of a fluidized bed, [cm]
- L_m : height of fixed bed, [cm]
- L_{mf} : bed height of minimum fluidizing conditions, [cm]
- Ng_o : Galileo number, [-]
- ΔP : pressure drop, [mmAg]
- ΔP_f : pressure drop of fluidized bed, [mm Ag]

- Re_{mf} : Reynolde number at minimum fluidization, [-]
- Re_p : particle Reynolds number, [-]
- T : temperature, [C], [K]
- T_a : air temperature, [C], [K]
- T_p : particle temperature, [C], [K]
- U_{mf} : superficial fluid velocity at minimum fluidizing conditions, [cm/s]
- U_{mf} : hypothetical U_{mf} , [cm/s]
- U_{ms} : superficial fluid velocity at optimum fluidizing conditions, [cm/s]
- W_p : weight of particle, [g]
- W_s : weight of solids, [g]
- W_w : weight of water, [g]
- ϵ : voidage, [-]
- ϵ_m : voidage of fixed bed, [-]
- ϵ_{mf} : voidage of fluidized bed, [-]
- ρ_s : density of solids, [g/cm]
- ρ_g : fluid density, [g/cm]
- μ : viscosity, [g/cm.s]
- μ_g : viscosity of gas, [g/cm.s]
- ϕ_d : diameter of opening, [cm]
- ϕ_s : sphericity of a particle, [-]
- ν : kinetic viscosity of air, [cm/s]
- θ : time, [hr], [min]

II. 이 론

1. 최소 유동화 속도 (U_{mf})

고정층과 유동층의 경계, 즉 고체입자가 유동화되기 시작하는 유속 U_{mf} 에 관하여 유속에 따라 증대하는 고정층의 압력강화 (DP) 에 대한 이론식은 Ergun 식¹²⁾ 이 쓰인다. 즉,

$$\frac{DP}{L} g_c = 150 \frac{(1-\epsilon_m)^2}{m} \cdot \frac{\mu \cdot U_o}{(\phi_s \cdot d_p)^2} + 1.75 \frac{1-\epsilon_m}{\epsilon_m^2} \cdot \frac{\rho_g \cdot U_o}{\phi_s \cdot d_p} \dots\dots\dots (1)$$

$$DP_f = W/A = \rho_s L_f(1-\epsilon_{mf}) \dots\dots\dots (2)$$

여기서,

$$\epsilon_m = 1 - W/A \cdot L_m \cdot \rho_s \dots\dots\dots (3)$$

$$\epsilon_{mf} = 1 - W/A \cdot L_{mf} \cdot \rho_s \dots\dots\dots (4)$$

Ergun 식은 random 하게 충전된 구형입자에 대하여 $\pm 25\%$ 오차 이내로 실험결과를 잘 나타낸다고 알려져 있다.¹²⁾

최소유동화 조건에서 힘의 수지는 다음과 같다.

$$DP \cdot A_f = W = (A_s \cdot L_m) (1 - \epsilon_{mf}) \times [(\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c}] \dots\dots\dots (5)$$

식 (5)를 정리하면

$$\frac{DP}{L_{mf}} = (1 - \epsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c} \dots\dots\dots (6)$$

식 (6)을 식 (1)에 대입하고, 양변에

$(d_p^3 \rho_g / \mu^2)$ 를 곱하여 정리하면,

$$\frac{1.75}{\phi_s \cdot \epsilon_{mf}^3} \left(\frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right)^2 + \frac{150(1 - \epsilon_{mf} \rho_g)}{\phi_s^2 \cdot \epsilon_{mf}^3} \times \left(\frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu} \right) = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \dots\dots (7)$$

즉,

$$U_m = \frac{(\phi_s \cdot d_p)^2}{150} \cdot \frac{\rho_s - \rho_g}{\mu} g \left(\frac{\epsilon_{mf}^3}{1 - \epsilon_{mf}} \right), \quad Re_p < 20 \dots\dots\dots (8)$$

$$U_{mf}^2 = \frac{\phi_s \cdot d_p}{1.75} \cdot \frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_g} \cdot g \cdot \epsilon_{mf}^3, \quad Re_p > 1,000 \dots\dots\dots (9)$$

여기서 ϵ_{mf} 는 U_{mf} 의 함수이고, U_{mf} 는

Re_{mf} 의 함수이다. 따라서 $\left(\frac{\phi_s}{150} \right)^2 \frac{\epsilon_{mf}^3}{1 - \epsilon_{mf}}$ 는

Re_{mf} 의 함수이므로 이항을 Re_{mf} 의 함수인 C_{mf} 의 함수로 표시하면 식 (8)은 다음과 같이 된다.

$$U_m = C_{mf} \cdot g \cdot d_p^2 (\rho_s - \rho_g) / \mu_g \dots\dots\dots (10)$$

한편, $\rho_s \gg \rho_g$, 이므로 식 (10)은 다음과 같이 표시된다.⁶⁾

$$U_{mf} = C_{mf} \cdot g \cdot d_p^2 \cdot \rho_s / \mu_g \dots\dots\dots (11)$$

Shirai 는 C_{mf} 에 관한 다음의 실험식을 보고하였다.²⁾

$$C_{mf} = a Re_{mf}^b \dots\dots\dots (12)$$

여기서, a 와 b 의 값은 각각 2.20×10^{-3} , -0.555 이다.

또 Wen 과 Yu¹³⁾ 는 보다 간소화하기 위하여 다음의 간이식을 도입하였다.

$$Re_{mf} = \sqrt{(33.7)^2 + 0.0408 \cdot N_{Ga}} - 33.7 \dots\dots (13)$$

$$N_{Ga} = d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) - g / \mu^2 \dots\dots (14)$$

$$\frac{1}{\phi_s \cdot \epsilon_{mf}} \doteq 14, \frac{1 - \epsilon_{mf}}{\phi_s^2 \cdot \epsilon_{mf}^3} = 11 \dots (15)$$

식 (14) 를 식 (8) 및 식 (9) 에 대입하면, 각각 다음과 같이 된다.

$$U_{mf} = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho_g)}{1650 \mu}, Re_p < 20 \dots\dots (16)$$

$$U_{mf} = \frac{d_p (\rho_s - \rho_g) g}{24.5 \rho_g}, Re_p < 1000 \dots\dots (17)$$

과 같이 층고에 무관한 식이 얻어진다.

III. 실험장치와 방법

1. 실험장치

본 실험에 사용한 유동층 건조장치는 Fig.1 과 같다.

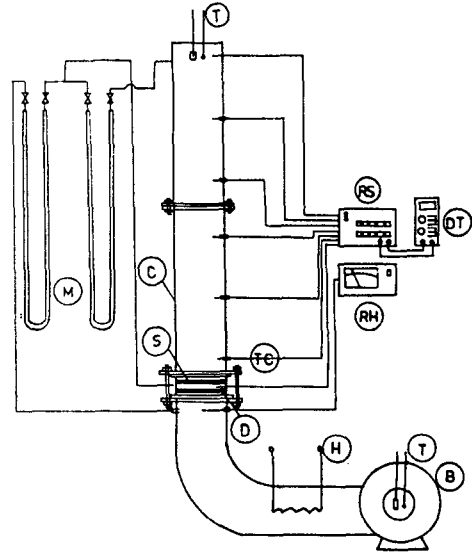
내경 117.2mm, 외경 130.7mm, 길이 90cm 의 투명 아크릴 수지 원통 2개를 사용하여 높이 180cm 의 column 을 만들었으며, 단열을 위하여 5cm 의 스티로 폼을 보강하였다.

분산관은 두께 1mm인 황동관에 개공율이 각각 4% ($\phi_d = 2.0$ mm), 8% ($\phi_d = 2.5$ mm) 16% ($\phi_d = 5.0$ mm), 32% ($\phi_d = 7.0$ mm) 되게 가공한 다공판과 screen (12mesh) 및 유리구슬 ($\phi_d = 16$ mm, 층고=9cm) 및 강철구 ($\phi_d = 11$ mm, 2층)로 각각 충전시켜 공기흐름을 균일하게 하였다.

건조용 공기는 송풍량 11m³/min 의 송풍기에서 입구 댐퍼의 각도에 따라 풍량을 조절하였으며, 니크롬선을 슬라이탁에 연결한 가열기로 온도를 조정하였다.

또한 column 의 입구에서 각각 10,40,70,

100,130,160cm인 위치와 column 벽 내외의 같은 높이에 CA열전대를 설치하여 디지털 온도계를 유동층 내부 및 벽체의 온도를 측정하였으며, 열선풍속계로 column 상부의 출구근처에서의 풍속과 풍운을 측정하였다.



- | | | |
|--------------------|--------------------------|--------------------------|
| (B) Blower | (T) Thermometer | (H) Heater |
| (D) Distributor | (TC) Thermocouple | (S) Screen |
| (C) Column | (M) Manometer | (RH) Relative Hygrometer |
| (RS) Rotary Switch | (DT) Digital Thermometer | |

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

건조공기의 상대습도는 분산관 아래에 부착시킨 자기습도계와 송풍기입구와 탑상부에 설치한 건습구 온도계를 측정하고, 증류수를 채운 U자 마노미터로 유동층을 통한 압력차이를 측정하였다.

2. 실험방법

1) 시 료

실험에 사용된 시료는 경상대학교 시험장에서 채배한 벼 (진주 26호)이며, 그 물성치는 Table 1과 같다.

2) 등가 입경 (d_p)

100 알의 벼를 길이 (L_e), 폭 (W), 두께

(T_h)를 측정하여, 타원체로 보고 체적을 계산한후, 같은 체적의 球의 직경으로 구하였다.

3) 구형도 (ϕ_s) 측정

100 알의 벼를 측정하여 실용적 구형도 (ϕ_s')를 구하였다.

$$\phi_s = \left(\frac{\text{구의 표면적}}{\text{입자 표면적}} \right) \text{ 동일체적}$$

$$\text{실용적 구형도 } \phi_s' = \frac{12.8 \times \sqrt{p^2 \cdot q}}{1 + p(1+q) + 6 \sqrt{1+p^2(1+q^2)}} \dots (18)$$

여기서 $p = T_h/W_i$, $q = W_i/L_e$

4) 공극율 (ϵ_m)

메스 실린드에 벼 1,000 알씩을 넣어 충전층의 전체적을 구한 후, 시료의 체적과 공극의 체적을 구하여 계산하였다.

$$\text{공극율} = \frac{\text{공극체적}}{\text{전체적}} [-]$$

5) 진밀도 (ρ_s)

벼 1,000 알씩 취하여 무게를 잰후 평균부피로 나누어 계산하였다.

6) 최소 유동화 속도 (U_{mf})와 최적 유동화 속도 (U_{ms})

벼의 최소 유동화 속도는 벼의 충전층 무게를 각각 200g (2.5cm), 400g (5.3cm), 600g (8.0cm), 800g (10.8cm), 1,000g (14.0cm), 1,500g (22.3cm), 2,000g (29.4cm)으로 하여 각 층고에 따라 유속(U)과 압력강화 (Δp)를 측정하고, 특히 유동화 개시 전후를 집중적으로 실험하여 Δp 가 최고치에 달했을때의 U 를 U_{mf} 로 정하고, 계속하여 유속을 증가시키다가 유동상태가 가장 좋은 상태를 관찰하여 이때의 U 를 U_{ms} 로 정하였다.

열풍의 온도영향이 유동화에 미치는 영향을 검토하기 위하여 충전량과 유속을 각각 2,000g, 2.4m/s로 고정하고, 벼의 초기수분을 일정하게 (35d.b.%) 조절한후, 풍온을 20°C, 30°C, 40°C, 50°C로 변화시키고, 유속의 영향을 보기 위하여 충전량과 풍온을 각각 2,000g, 20°C로

고정하여 유속을 0~5 m/s 범위에서 단계별로 변화시켜 유동특성을 관찰하였다.

또 벼의 형상에 따른 오차와 영향을 배제하기 위하여 유리구슬을 시료로 사용한 실험에서는 벼와 비슷한 방법으로 풍온(20°C, 30°C, 40°C, 50°C)과 유속(0~5m/s) 및 충전량(315~1,890g)을 변화시켜 유동화에 미치는 영향을 관찰하였다.

7) 최소 유동화 속도의 a, b 계산

벼의 유동층에 대한 U_{mf} 의 실험치에 잘맞는 a, b를 구하기 위하여 식 (17)에서

$$Re_{mf} = \frac{d_p \rho_g}{\mu} \cdot C_{mf} \frac{gd_p^3 \rho_g \rho_s}{\mu^2} \text{로 두면,}$$

$$C_{mf} = a Re_{mf}^b = a \left[C_{mf} \frac{gd_p^3 \rho_g \rho_s}{\mu^2} \right]^b$$

$$= a C_{mf}^b \left(\frac{gd_p^3 \rho_g \rho_s}{\mu^2} \right)^b \dots \dots \dots (19)$$

의 관계에서 시행오차범위로 실험치와 가장 접근하는 a와 b 값을 구하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. 분산판의 선정과 풍온의 영향

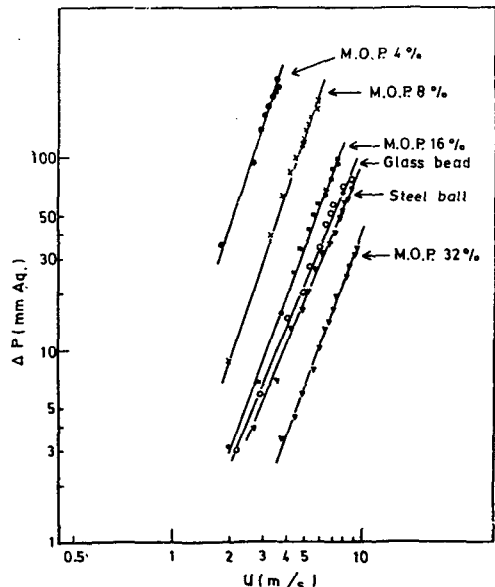


Fig. 2. Relationship between pressure drop and superficial velocity of various distributors.

각종 분산판을 사용하여 공탑에서의 분산판을 통한 압력강하를 공기유속에 대하여 측정한 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

분산판 대신에 유리구슬 충전층 및 강철구 충전층을 사용한 경우의 결과도 같이 표시하였다.

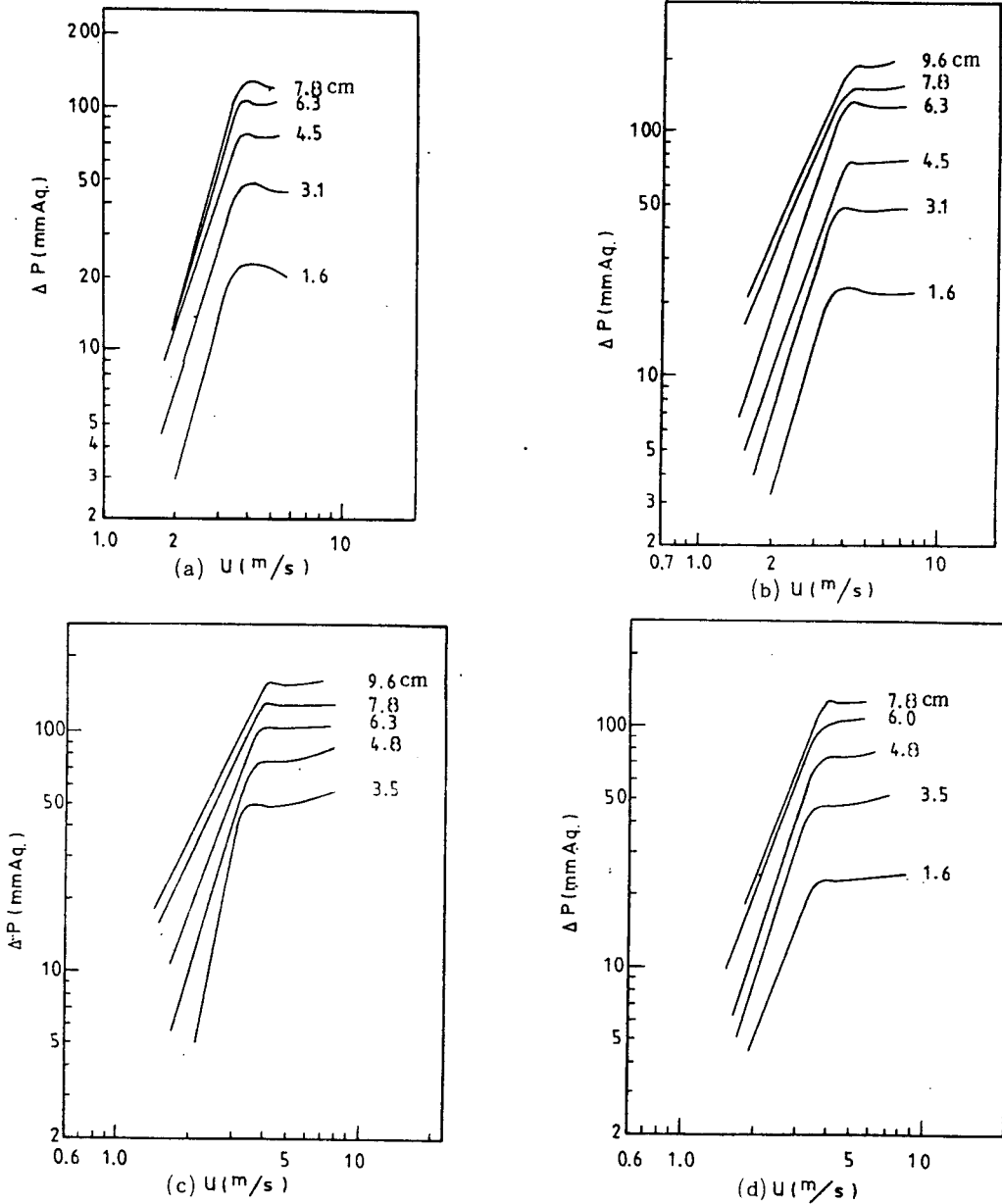


Fig. 3. Δp vs U in fluidized bed of glass bead (db = 5.9 mm) using variable distributors ($T_a = 20^\circ C$, $L_b = 9$ cm)
 (a) M. O. P. 8 % (b) M.O.P. 16 %
 (c) steel ball ($d_p = 11$ mm , 2 layer)
 (d) glass bead ($d_p = 16$ mm , $L_b = 9$ cm) distributor

여기서 보면 Δp 는 분산판의 종류와 개공율에 관계없이 U 에 직선적으로 비례함을 알 수 있으며, 일정한 U 값에서는 Δp 는 분산판의 개공율이 작을 수록 커지고 있으며, 유리구슬 충전층과 강철구 충전층의 Δp 는 개공율이 16%나 32%인 경우의 중간값에 있다.

각각의 분산판에 유리구슬을 무게별로 충전시켜 20°C의 공기를 유입시켜 속도에 따른 Δp 를 측정 한 결과 개공율 8%, 16%, 강철구, 유리구슬 충전 분산판에 따라 각각 Fig. 3 (a)~(d)로 나타났고, 16%개공율의 분산판을 사용하여 풍온을 30°C, 40°C, 50°C로 변화시킨 결과를 각각 Fig. 4 (a)~(c)로 나타났는데, 최소 유동

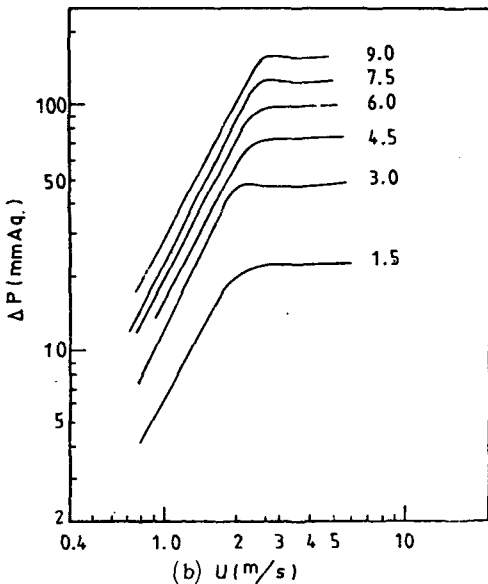
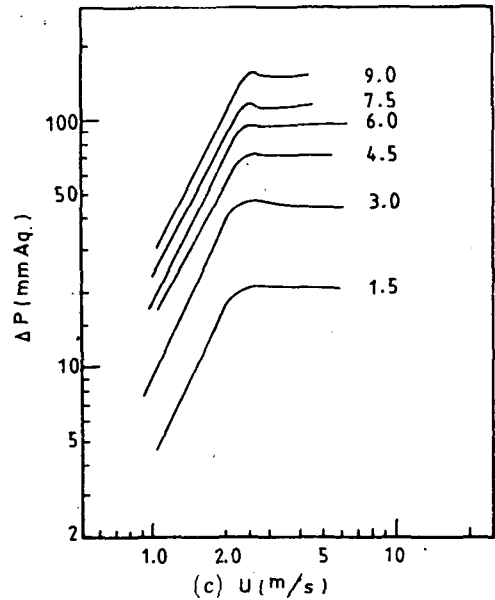
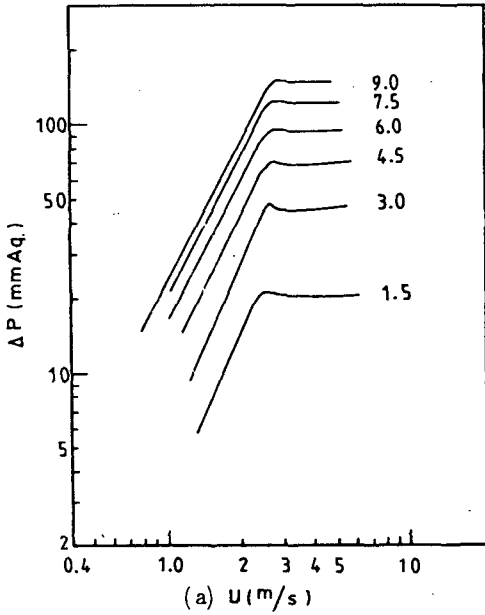


Fig. 4 Δp vs U in fluidized bed of glass bead using M.O.P. 16% distributor with air temperature fluctuation.
(a) $T_a = 30^\circ\text{C}$ (b) $T_a = 40^\circ\text{C}$
(c) $T_a = 50^\circ\text{C}$

화 속도는 분산판 종류와 개공율에 따른 차이가 거의 없었으나 풍온이 높아질수록 U_{mf} 값이 감소하는 경향을 보였다 [Table 3 (a)]. 유리구슬의 U_{mf} 는 개공율 16% 분산판에서 4.07 m/s ($W_b = 1,890\text{g}$, $T_a = 20^\circ\text{C}$)로 나타났다.

또한 버를 층고별로 유동화 시킨 결과는 개공율 4%, 8%, 16%, 유리구슬, 강철구 충전, 스크린의 분산판 종류에 따라 각각 Fig. 5 (a)~(f)로 나타났는데, 분산판의 종류와 개공율에 따른 U_{mf} 의 값의 변화는 거의 없었으나, 개공율 4%와 8% 다공판은 층고가 높아지면 유

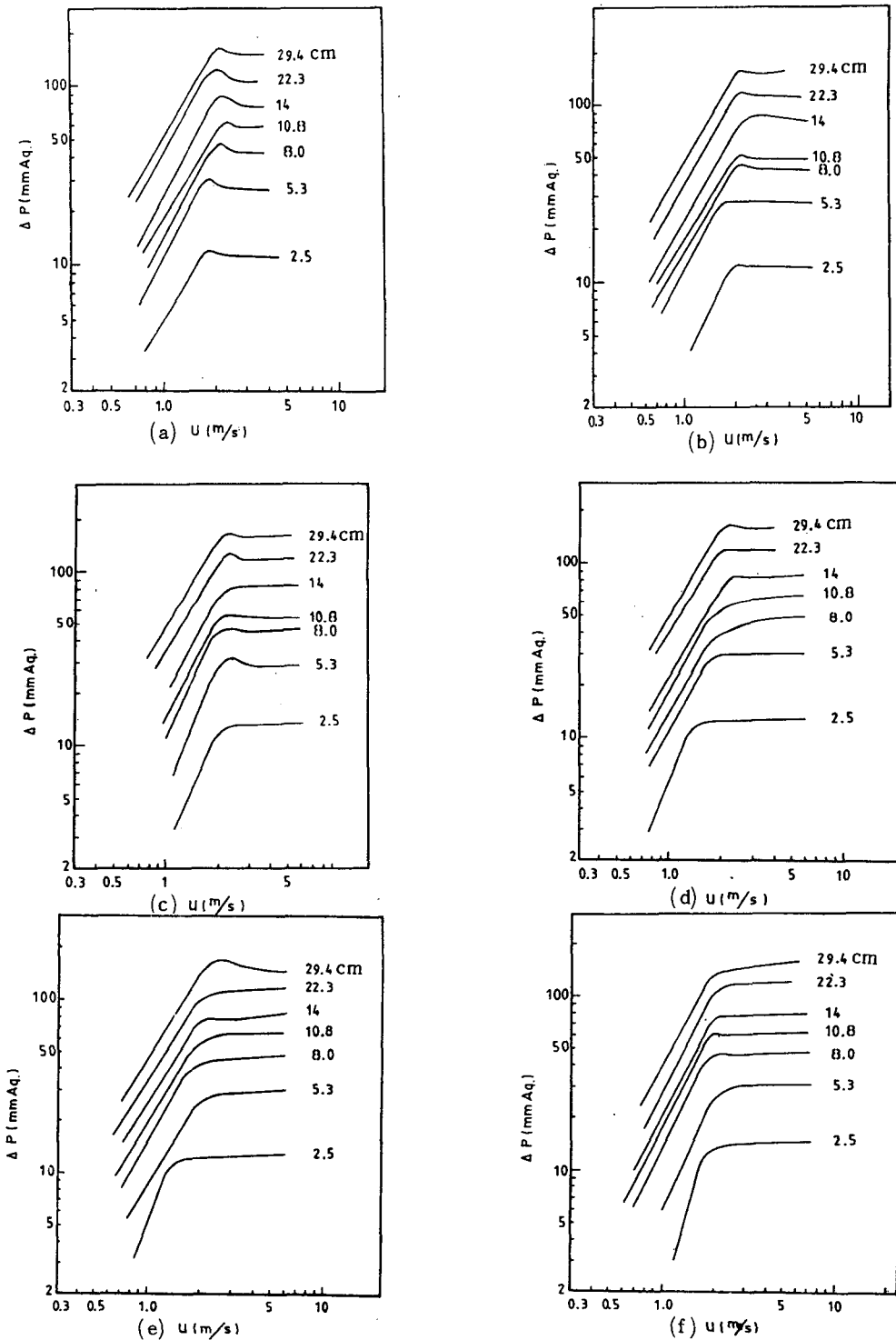


Fig. 5. Δp vs U of rough rice fluidized beds using variable distributors ($T_a = 20^\circ \text{C}$)
 (a) M.O.P. 4% (b) M.O.P. 8% (c) M.O.P. 16% (d) glass bead
 (e) steel ball (f) screen distributor

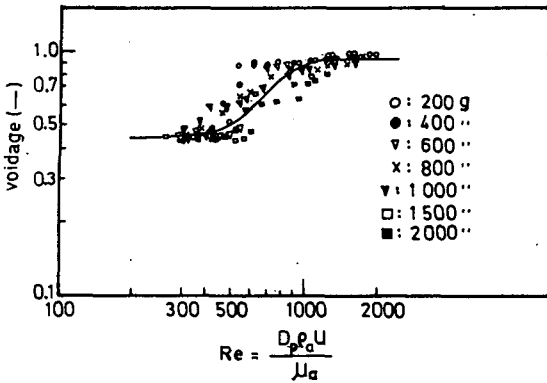


Fig. 6. Relationship between Reynolds No. and Voidage of rough rice with M.O.P. 16% distributor.

동화 능력이 부족하였으며 개공율 32%는 비말 동반이 심하여 본실험에서 벼의 유동화에 사용할 수 없었다. 여러가지 분산판에 의한 유동화상태를 관찰한 결과 개공율 16%인 분산판이 유속 변화에 따른 Δp 를 측정, 비교하기 쉬웠다. 따라서 벼의 건조실험에 사용한 분산판(개공율 16%)은 적정함을 알 수 있다 [Table 3(b)].

벼의 U_{mf} 는 개공율 16% 분산판에서 2.01 m/s ($W_b = 2,000$ g, $T_a = 20^\circ\text{C}$)로 나타났으며, U_{mf} 는 2.4 m/s로 나타났다.

2. 층고와 유속에 따른 유동특성치의 변화

벼를 층고에 따라 충전시키고, 유속을 변화시키면서 측정된 레이놀즈 수 (Re_p)와 층고 (L_b) 및 공극율 (ϵ_{mf})의 변화를 Table 4에 나타내었다.

Re_p 의 값은 유속에 따라 층고가 작을 때는 유속이 5 m/s에서 $Re_p > 1000$ 되기도 하였으나 충전량 2000 g인 경우 유속을 3 m/s까지 올려도 $Re_p < 1000$ 을 나타내었으며, 유동층 높이 (L_b)는 60 cm 미만, 공극율은 0.7 이하로 나타났는데, 대체로 이들 유동화 특성값들은 대체로 유속에 따라 증가하는 경향을 보였다.

충전비에 유속을 증가시킬때 그 풍속에 따른 Re 수와 공극율 관계를 Fig 6에 나타내었다.

고정층인 U_{mf} 이하에서는 공극율 (ϵ_m)이 거의 일정하였으나 차츰 유동화 되면서 공극율이 증가하는 경향을 보이다가 유동화된 후에는 다시 일정하게 나타났다.

3. 최소 유동화 속도 (U_{mf})와 a, b 값

유동층 장치에서 시료를 유동화 시키는 최소 유동 속도 U_{mf} 에 대하여 현재까지 많은 보고가 있으며 몇가지 실험식도 제시되어 있다.

곡류에 대해서도 Iwamoto²³⁾, Umeda²⁵⁾, Sasao²⁶⁾ 등의 보고에서 벼의 경우 U_{mf} 를 각각 1.08 m/s, 1.0 m/s로 보고하였으며, Iwamoto 등²³⁾은 1.08 m/s로 측정된 실험치를 Leva 식⁶⁾을 이용한 Shrai의 실험식⁵⁾에서 제시한 $C_{mf} = 2.20 \times 10^{-3} (Re_p)^{-0.555}$ 즉, $a = 2.20$ $a = -0.555$ 계산한 결과인 1.06 m/s와 잘 일치한다고 보고하였다.

그러나 본 실험에서는 사용한 유동층 장치에서 진주 26호 벼의 유동화 실험에서는 2.01 m/s가 측정되었으며, Ishiashi 등은³⁷⁾ 벼의 U_{mf} 를 2 m/s로 측정된 바 있고, 벼의 U_{mf} 에 대한 Leva의 이론이 분명히 성립되지 않는다고 하였으며 Ishbashi는 Wen과 Yu¹³⁾의 간이식을 사용한 값인 1.20 m/s가 $\pm 34\%$ 표준편차인 $1 < U_{mf} < 2$ [m/s]의 범위에서 일치한다고 보고하였다.

그러나 저자는 Leva 식을 사용하고, Shiari의 실험식의 a, b 값을 바꿈으로서 실험치와 일치하는 실험식을 구하고자 시도하여 시행오차법으로 벼에 대해서는 $a = 1.19 \times 10^{-4}$, $b = 0.0318$ 를 사용한 결과, 풍온 20°C, 충전량 2000 g의 실험에서 U_{mf} 측정치가 2.01 m/s인데 비하여 계산치 1.97 m/s의 일치를 나타내었으며 이는 Shiari의 상수인 $a = 2.20$, $b = -0.555$ 를 사용한 계산치 = 1.39 m/s보다 잘 맞음을 나타낸다. [Table 5 (a)]

또한 벼의 공극율 (ϵ_{mf})을 포함하는 Ergun

식을 사용한 결과에서도 계산치는 1.97m/s 를 나타내었으므로 비의 유동층 건조에 있어서 Leva 식을 이용한 실험식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{mf} = 1.19 \times 10^{-4} (Re_p)^{-0.0318} \dots\dots\dots (20)$$

한편, 유리구슬을 시료로한 경우, 풍온 20 °C, 충전량 1890 g의 U_{mf} 실험치는 4.07m/s, Leva 식에 Shirai의 a, b를 사용한 실험식의 계산값은 1.24m/s, Wen과 Yu의 간이식에 의한 계산치는 1.42m/s로 되어 유리구슬에 대한 U_{mf} 의 Shirai 실험식과 Wen과 Yu의 간이식은 실험치와의 오차가 큼을 나타내고 있다.

유리구슬에서도 실험치와 맞는 실험식의 a, b 값과 Ergun식을 시도하여 본 결과를 Table 5 (b)에 나타내었는데,

$$a = 1.02 \times 10^{-4}, b = -0.0047 \text{ 를 사용한}$$

Leva 식의 계산치가 3.96m/s Ergun식에 의한 계산치가 4.14m/s로 이식들을 유리구슬 충전층의 U_{mf} 계산에 이용하는 것이 Wen과 Yu의 간이식과 Shirai 실험식보다 실험치에 잘 일치한다고 판단되어 유리구슬에 U_{mf} 계산에도 다음과 같이 실험식을 나타낼 수 있다.

$$C_{mf} = 1.02 \times 10^{-4} (Re_p)^{-0.0047} \dots\dots\dots (21)$$

Table 1. Physical Properties of samples

Sample	W_p (g)	V (cm ³)	ρ_s (g/cm ³)	ϕ_s (-)	ϵ_m (-)	D_p (cm)	L_e (cm)	W_i (cm)	T_h (cm)
Rough rice	0.032	0.0296	1.08	0.815	0.446	0.384	0.7165	0.3460	0.2279
Glass bead	2.842	1.2463	2.28	1	0.414	0.668	-	-	-

Table 2. Physical properties of drying air

T_a (°C)	ρ_g $\times 10^{-3}$ (g/cm)	μ_g $\times 10^{-4}$ (g/cm.s)	C_p (kj/kg k)	k (w/m k)
10	1.2442	1.753	1.010	0.0244
20	1.2017	1.802	1.012	0.0251
30	1.1621	1.805	1.013	0.0258
40	1.1249	1.898	1.014	0.0265
50	1.0901	1.945	1.016	0.0272
60	1.0550	1.997	1.017	0.0279

곡류의 유동층 건조에 관한 연구 (1)

Table 3(a). Changes of U_{mf} with bed weight of glass bead. (cm/s)

($d_p = 5.786 \text{ mm}$)

Bed weight (g) Distributor	315 (1.7cm)	630 (3.4cm)	945 (4.8cm)	1260 (6.0cm)	1575 (7.8cm)	1890 (9.2cm)
M.O.P. 8%	345	358	365	375	389	398
M.O.P. 16%	368	375	389	395	399	407
M.O.P. 32%	300	350	360	370	382	395
Steel ball (2 Layer)	305	326	345	365	373	381
Glass bead	340	345	350	370	390	401

Table 3(b). Changes of U_{mf} with bed weigh of rough rice. (cm/s)

Bed weight (g) Distributor	200 (2.5cm)	400 (5.3cm)	600 (8.0cm)	800 (10.8cm)	1000 (14cm)	1500 (22.3cm)	200 (29.4cm)
Screen	194	200	210	212	215	219	222
M.O.P. 4%	179	185	198	200	219	228	237
M.O.P. 8%	166	188	194	196	209	215	222
M.O.P. 16%	170	179	188	195	197	200	201
Steel ball (2 Layer)	137	145	156	161	168	195	212

Table 4. Experimental values with bed weight and U for fluidized bed of rough rice
($T_a = 20\text{ }^\circ\text{C}$)

Bed weight (g)	Experimental values												
200	U (cm/s)	0	124	140	170	190	210	240	300	370	420	480	500
	Re_p (-)	(-)	318	359	435	487	538	615	768	947	1075	1229	1280
	L_p (cm)	2.5	3.1	3.3	4.0	7.2	13.2	14.3	15.6	17.2	21.5	28.6	34.3
	ϵ_b (-)	0.45	0.45	0.48	0.57	0.76	0.87	0.88	0.89	0.90	0.92	0.94	0.95
400	U (cm/s)	0	140	140	160	179	210	240	270	350	410	460	500
	Re_p (-)	-	359	359	410	458	538	615	691	896	1050	1178	1280
	L_b (cm)	5.3	6.2	6.4	6.7	8.6	12.7	28.6	31.2	31.2	38.1	42.9	49.0
	ϵ_b (-)	0.45	0.45	0.46	0.49	0.60	0.73	0.88	0.89	0.88	0.91	0.92	0.93
600	U (cm/s)	0	131	152	153	171	188	214	270	301	336	363	394
	Re_p (-)	-	335	389	392	438	481	548	691	771	860	930	1009
	L_b (cm)	8.0	9.4	9.4	9.4	9.5	13.2	23.4	34.3	42.9	46.8	51.5	57.2
	ϵ_b (-)	0.45	0.45	0.45	0.45	0.46	0.61	0.78	0.85	0.88	0.89	0.90	0.91
800	U (cm/s)	0	120	125	150	180	195	205	230	280	340	410	440
	Re_p (-)	-	307	320	384	461	499	525	589	717	871	1050	1127
	L_b (cm)	10.8	12.5	12.7	13.2	15.6	18.1	19.6	21.5	32.7	26.4	26.4	29.9
	ϵ_b (-)	0.45	0.45	0.46	0.48	0.56	0.62	0.65	0.68	0.79	0.74	0.74	0.77
1000	U (cm/s)	0	110	130	150	158	197	207	216	261	328	369	412
	Re_p (-)	-	282	333	384	405	504	530	553	668	840	945	1055
	L_b (-)	14.0	15.6	15.9	17.9	20.9	23.2	23.8	24.5	27.7	39.0	50.5	57.2
	ϵ_b (-)	0.45	0.45	0.46	0.52	0.59	0.63	0.64	0.55	0.69	0.78	0.83	0.85
1500	U (cm/s)	0	96	105	116	131	156	188	200	215	232	238	265
	Re_p (-)	-	246	269	297	335	399	481	512	551	594	609	679
	L_b (-)	22.3	23.4	23.4	23.4	29.3	31.4	33.9	35.8	37.9	39.0	39.0	40.2
	ϵ_b (-)	0.45	0.45	0.45	0.45	0.56	0.59	0.62	0.64	0.66	0.67	0.67	0.68
2000	U (cm/s)	0	82	107	119	141	159	182	201	224	240	253	294
	Re_p (-)	-	210	274	305	361	407	466	515	574	615	648	753
	L_b (-)	29.4	31.2	31.2	38.1	39.9	40.9	44.0	47.7	52.0	52.0	53.6	55.4
	ϵ_b (-)	0.45	0.45	0.45	0.55	0.57	0.58	0.61	0.64	0.67	0.67	0.68	0.69

Table 5(a). Comparison of U_{mf} exp. with U_{mf} cal. at different bed weight of rough rice
($T_a = 20\text{ }^\circ\text{C}$).

Sample weight (g)	U_{mf} exp. (cm/S)	Umf (cm/S)	Rep (-)	Leva's eq.			Ergun eq.		
				$Cmf(x10^{-4})$ $a=1.19 \times 10^{-4}$ $b=-0.00318$	Umf cal. (cm/S)	Shirei's ($x10^{-4}$) $a = 2.20 \times 10^{-4}$ $b=-0.555$	Umf cal.	Emf (-)	Umf cal. (cm/S)
200	170	171	440	0.9807	168	0.7524	129	0.5712	163
400	179	180	460	0.9791	176	0.7313	132	0.5952	174
600	188	189	480	0.9776	185	0.7118	135	0.6133	182
800	195	196	500	0.9765	191	0.6976	137	0.6201	186
1000	197	198	510	0.9762	193	0.6937	137	0.6279	192
1500	200	201	510	0.9757	196	0.6879	138	0.6337	193
2000	201	202	520	0.9757	197	0.6860	139	0.6425	197

Table 5(b). Comparison of U_{mf} exp. with U_{mf} cal. at different bed weight of glass beads ($T_a = 20\text{ }^\circ\text{C}$)

Sample Weight (g)	U_{mf} exp. (cm/S)	Rep (-)	Leva's eq.		Ergun eq.	
			$Cmf(x10^{-4})$ $a = 1.02 \times 10^{-4}$ $b=-0.0047$	Umf cal. (cm/S)	Emf (-)	Umf cal. (cm/S)
315	368	1640	0.9851	364	0.5526	385
630	375	1680	0.9850	370	0.5563	389
945	389	1740	0.9848	384	0.5662	400
1260	395	1770	0.9848	390	0.5727	407
1575	399	1770	0.9848	391	0.5747	409
1890	407	1790	0.9847	396	0.5797	414

V. 결 론

벼를 초기의 고수분 상태에서 효과적인 인공 건조를 실시하기 위하여 유동층 건조장치를 제작하여 풍온과 풍속 및 층고를 변화시켜 가면서 유동화 특성을 실험하고 이 실험치들을 비교한 결과 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 개공율 16%의 분산판을 사용한 유동화의 최소 유동화 속도 U_{mf} 는 벼의 유리구슬의 경우 각각 2.01 m/s, 4.07 m/s로 측정되었다.
- 2) U_{mf} 계산에 사용되는 Leva식을 기초로한 Shirai 실험식과 Wen의 간이식은 본 실험의 결과와 잘 맞지 않은 반면 Ergun식은 잘 일치하였다.
- 3) Leva식을 기초로 하여 실험치와 잘 일치하는 다음의 C_{mf} 실험식을 얻었다.

$$\begin{aligned} \text{벼의 } C_{mf} &= 1.19 \times 10^{-4} (Re_p)^{-0.038} \\ \text{유리구슬의 } C_{mf} &= 1.02 \times 10^{-4} (Re_p)^{-0.0047} \end{aligned}$$

參考文獻

- 1) Kuni i, D. and Levenspiel, O : 'Fluidization Engineering', John Willey and Sons, Inc. (1968).
- 2) Davidson, J.F. and Harrison, D : ' Fluidization ', Academic Press.(1971)
- 3) Nonhebel, G. et al. : 'Drying of Solid in the Chemical Industry', Butter Worth & Co.(1971).
- 4) Kearins, D. : 'Fluidization Technology' (1)·(2), Hemisphere Pub. Co.(1975).
- 5) Shirai, T : 'Fluidized Beds', Kagaku-gijutsu-sha,(1958).
- 6) Leva, M. : 'Fluidization', McGraw-Hill Book Co., New York,(1959).
- 7) Heldman, D.R. and Singh, R.P. : ' Food Process Engineering's (2nd ed.) AVI, (1981).
- 8) 남궁식, 백인기 : 화학공학 3, 159-165, (1965).
- 9) Wamsley, W.W. and Johanson, L.N. : Chem Eng. Progr., 50, 347-355, (1954)
- 10) Pfafflin, J.R., Shrider, M., and Jullien G.A. : AIChE Symposium Ser.70, 69-72, (1974).
- 11) Kato, Kunio, et al. : J.Chem. Eng. Japan, 14, 365-371, (1981).
- 12) Ergun, S. : Chem. Eng. Progr., 48, 9989, (1952)
- 13) Wen, C.Y. and Yu, Y.H. : AIChE Journal, 12, 610-612
- 14) ASHRAE : Hand Book and Product Directory 1982. Application. 22.1-22.14, (1982).
- 15) Henderson, S.M. and Padis, S : J.Agr. Eng. Res., 333 pp.2932 (1952).
- 16) Houston, D.F. : 'Rice-Chemistry and Technology', Am. Ass. Cer. Chem. Inc., (1972)
- 17) Iglesias, H.A., Violaz, P., and Chirife, J. : J.Food Tech., 14, 89-93 (1979).
- 18) Sutherland, J.W., Bankt, P.I., and Griffiths, H.J. : J.Agric. Eng. Res., 16, 368-386, (1971).
- 19) Alzamora, S.M., Chirife, J., and Violaz : J.Food Tech., 14, 369-380, (1979).
- 20) Kazarian, E.A., and Hall, C.W. : Trans. ASAE, 33-37, (1965).
- 21) Steffe, J.F., and Singh, R.P. : Trans. ASAE, 767-774, (1980).

곡류의 유동층 건조에 관한 연구(1)

- 22) Steffe, J.F., and Singh, R.P. : J. Agric. Eng. Res., 27, 489-493, (1982).
- 23) Iwamoto, M., and Chuma, Y. : J. Soc. Agric. Mach. Japan, 32, 322-327, (1970).
- 24) Murata, S. : Sci. Bull. Fac. Agr., Kyushu Univ., 27, 259-280. (1973).
- 25) Umeda, S. : J. Soc. Agric. Mach. Japan, 32, 135-139, (1970)
- 26) Sasao, A. and Endo S. : J. Soc. Agric Mach., Japan, 34, 51-56, (1972).