

쌀보리와 겉보리의 유동층 건조에서의 유동화 연구

김희연 · 허종화* · 조덕제**

국립보건원, *경상대학교 식품공학과, **동서공과대학 식품공학과

Fluidization Study in the Fluidized Bed Drying of Naked and Husked Barley

Hee-Yun Kim, Jong-Hwa Hur* and Duk-Jae Cho**

National Institute of Health

*Department of Food Science and Technology Gyeongsang National University

**Department of Food Science and Technology Dongseo Engineering College

Abstract

To keep up with urgent need of continuous, effective and rapid drying unit, a fluidized bed drying system with computer controlling air temperature, velocity and relative humidity was designed. This study was attempted to determine physical properties and some basic experiments of fluidized bed drying of barley. Also experimental data of the designed fluidized bed drying system using the barely were compared with those of published equations to confirm the reliability of the system and the following results were obtained. The physical dimension husked barley were shown larger than that of naked barley from the experiment. When air temperature, relative humidity and charged amount were 35°C, 30% and 300g respectively, the minimum fluidization velocity of naked and husked barley were found 1.5 m/s and 1.7 m/s. And the optimum fluidization velocity was shown as 3.0 m/s from the experiment. The empirical equation of U_{mf} in this fluidized system was obtained as follow;

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

Where HK=0.4881 for naked barley, 0.6649 for husked barley

Key words: fluidized bed drying system, barley, optimum fluidization velocity, physical properties, minimum fluidization velocity, empirical equation

서 론

식품의 건조방법은 자연건조에서 출발하여 1700년대에 인공건조가 고안되었으며, 현재는 과학기술의 발달과 더불어 더욱더 발전되어가고 있는 실정이다.

곡물의 건조방법에는 고온고속건조장치와 저온저속건조장치로 나눌 수 있는데, 전자는 일반적으로 고온의 열풍이 요구됨으로 집열기의 장치 설계비용이 많이 들어 경제적 문제가 야기되고, 후자는 상온의 공기를 통풍하거나 저밀도의 불안정한 태양열을 이용하기 때문에 기상조건에 영향을 받고 건조하는데 장시간이 소요된다⁽¹⁾.

유동화는 유동층 장치에 송풍하여 항력에 의해 분립체를 부유시켜 열 및 물질을 전달하여 원하는 공정을 실시하는 방법⁽²⁾ 이 유동화 현상은 옛날부터 이미 알려져 생활에 이용되어 왔으며 Winkler가 1921년에 갈탄을 gas화 하는데 처음 응용하였다⁽³⁾.

유동화 기술은 물질전달 및 열전달을 급속히 증가시켜 주는 잇점 때문에 최근에는 건조, 제련 및 석유화학공업 등에 널리 연구 개발되고 있으며, 특히 식품공업분야의 건조공정과 동결공정에서 그 응용의 필요성이 증대되어 해당분야의 연구활동이 활발해지고 있다⁽⁴⁾.

유동층 장치는 공기와 입자가 완전 혼합류로 흐르기 때문에 층내 온도는 높이에 따라 큰 차이가 없이 균일하며 전열속도가 크다. 이 점을 이용하여 자신이 유동화되지 않는 대형 고체식품을 분립체의 유동층내에 충전시켜 건조하는 새로운 방법을 Shirai⁽⁵⁾는 보고한 바가 있다.

보리는 우리나라에서 쌀 다음가는 주곡으로서 널리 이용되고 있으며, 그 품종에 따라 차이는 있으나 일반 성분이 대체로 65% 전분, 10% 단백질, 2% 내외의 지방과 2.5%의 섬유질로 되어 있는 중요한 식량자원이다.

한편 우리나라에서의 맥류생산량은 겉보리와 쌀보리가 1983년에 각각 25만톤과 48만톤에서 1988년에 13만톤과 28만톤으로서 감소하는 추세인데⁽⁶⁾ 식량자급율을 높이기 위해서는 보리의 증산과 수확 후의 건조, 저장 및 가공방법의 개선이 요구된다.

Corresponding author: Hee-Yun Kim, Masan Branch, National Institute of health, San 1, Kapo-dong, Habpo-gu, Masan, Kyungnam 630-320, Korea

보리의 수확 직후 초기 함수율은 30~35%이며, 이것의 함수율을 감소시키기 위해서 보통 자연건조에 많이 의존한다. 그 결과로 품질손상 및 저하가 발생된다. 그러므로 기상조건에 영향을 받지 않고 빠른 건조와 노동의 중첩으로 인한 peak 발생을 억제할 수 있고 많은 량을 연속적이고 효과적으로 신속히 건조할 수 있는 새로운 방법이 요구되고 있다.

본 연구에서는 자동기록이 가능한 마이크로컴퓨터 시스템과 유입 공기의 유속 및 상대습도를 조절할 수 있는 유동층 건조장치를 제작하고 유동화 특성을 실험하여 이론식과 비교 검토하였으며, 유동층 장치와 자동제어 장치의 신뢰성을 확인하여 산업응용의 기초자료로 활용하고자 한다.

이 론

최소 유동화 속도(U_{mf})

유동화 현상이 시작되는 점은 상향으로 움직이는 기체에 의한 drag force와 입자들이 미치는 중량과 같은 경우며, 유동층내의 압력강하, ΔP 에 유동층의 단면적을 곱한 것은 유동층의 체적에 입자의 체적분율과 비중을 곱한 것을 아래 수식으로 나타내었다.

$$\Delta P A_t = \bar{W} = (A_t L_{mf}) (1 - \epsilon_{mf}) \left[(\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c} \right] \quad (1)$$

식 (1)을 정리하면

$$\frac{\Delta P}{L_{mf}} = (1 - \epsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c} \quad (2)$$

최소 유동화 속도는 고정층과 유동층의 경계 즉 유동화가 시작되는 시점의 유속이므로 모양이 일정한 고상물질의 고정층을 통한 압력강하를 나타낸 Ergun 식⁽⁷⁾으로 구하여진다.

$$\begin{aligned} \frac{\Delta P}{L_{mf}} g_c = 150 \cdot \frac{(1 - \epsilon_{mf})^2}{\epsilon_{mf}^3} \cdot \frac{\mu_k U_{mf}}{(\phi_s d_p)^2} \\ + 1.75 \cdot \frac{1 - \epsilon_{mf}}{\epsilon_{mf}^3} \cdot \frac{\rho_k U_{mf}^2}{\phi_s d_p} \end{aligned} \quad (3)$$

식 (2)의 $\Delta P/L_{mf}$ 항에 식 (3)을 대입하여 양변에 $(d_p^3 \rho_k / \mu_k^2)$ 을 곱하면,

$$\begin{aligned} \frac{1.75}{\phi_s \epsilon_{mf}^3} \cdot \left(\frac{d_p U_{mf} \rho_k}{\mu_k} \right)^2 + \frac{150(1 - \epsilon_{mf})}{\phi_s^2 \epsilon_{mf}^3} \cdot \frac{d_p U_{mf} \rho_k}{\mu_k} = \\ \frac{d_p^3 \rho_k (\rho_s - \rho_g) g}{\mu_k^2} \end{aligned} \quad (4)$$

로 표시된다.

Ergun식은 점성에 의한 에너지 손실항과 운동에너지에 의한 손실항으로 구성되어 있으므로 식 (4)는 Re_p 값에 따라 식 (5), (6)으로 표시된다.

$$U_{mf} = \frac{(\phi_s d_p)^2}{150} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_g) g}{\mu_k} \cdot \frac{\epsilon_{mf}^3}{1 - \epsilon_{mf}}, \quad Re_p < 20 \quad (5)$$

$$U_{mf}^2 = \frac{\phi_s d_p}{1.75} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_g) g \epsilon_{mf}^3}{\rho_k}, \quad Re_p > 1000 \quad (6)$$

유동층에서의 압력강하는 고체밀도에 비하여 공기밀도는 무시할 수 있으므로 식 (2)를 간략화하면

$$\Delta P = \bar{W} / A_t = \rho_s L_t (1 - \epsilon_t) \quad (7)$$

로 표시되며, 여기서 유동층의 공극율은 다음과 같다.

$$\epsilon_t = 1 - [(\bar{W} / (A_t L_t \rho_s))] \quad (8)$$

ϵ_{mf} 는 U_{mf} 의 함수이고 U_{mf} 는 Re_p 의 함수이므로 $\phi_s^2 / 150 \cdot \epsilon_{mf}^3 / 1 - \epsilon_{mf}$ 는 Re_p 의 함수가 된다. 이 항을 Re_p 의 함수인 C_{mf} 의 함수로 나타내면 식 (5)는 식 (9)로 표시된다.

$$U_{mf} = C_{mf} \cdot g \cdot d_p^2 (\rho_s - \rho_g) / \mu_k \quad (9)$$

여기서 C_{mf} 는 층류의 Re_p 범위에서 Shirai⁽⁵⁾의 실험식에 의하면 쌀보리 및 걸보리가 각각 1.17×10^{-4} , 0.97×10^{-4} 이다⁽⁸⁾. 또 공기의 밀도를 무시하면 식 (9)는 식 (10)과 같은 Leva식⁽⁹⁾으로 나타난다.

$$U_{mf} = C_{mf} \cdot g \cdot d_p^2 \cdot \rho_s / \mu_k \quad (10)$$

한편 Wen과 Yu⁽¹⁰⁾는 다음과 같은 관계식을 발표하였으므로

$$\frac{1}{\phi_s \epsilon_{mf}^3} \div 14 \quad \text{및} \quad \frac{1 - \epsilon_{mf}}{\phi_s^2 \epsilon_{mf}^3} \div 11 \quad (11)$$

식 (11)을 식 (5) 및 식 (6)에 대입하면 식 (12)와 식 (13)이 얻어진다.

$$U_{mf} = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho_g) g}{1650 \mu_k}, \quad Re_p < 20 \quad (12)$$

$$U_{mf}^2 = \frac{d_p (\rho_s - \rho_g) g}{24.5 \rho_k}, \quad Re_p > 1000 \quad (13)$$

한편 입자의 Reynolds number는 식 (14)로 구했으며

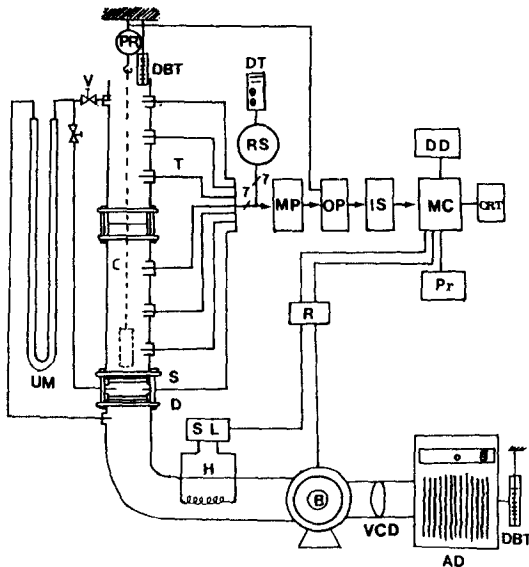
$$Re_p = \frac{d_p U_{mf} \rho_k}{\mu_k} \quad (14)$$

공탑에서의 Reynolds number는 식 (15)로 구하였다.

$$Re = \frac{D_t U_{mf} \rho_g}{\mu_k} \quad (15)$$

실험장치

본 실험에 사용한 유동층 건조장치의 개략도는 Fig. 1과 같다⁽¹⁾. 건조용 공기는 송풍기에 재동자를 연결하여



- | | |
|-------------------------------|------------------------------|
| RS : Rotary switch | C : Column |
| DT : Digital thermometer | UM : U-manometer |
| MP : Multiplexer | S : Screen |
| OP : Operational Amplifier | D : Distributor |
| IS : Interface system | SL : Slide type transformer |
| DD : Disk driver | H : Heater |
| MC : Micro computer(Apple II) | B : Blower |
| CRT: Monitor | AD : Automatic dehumidifier |
| Pr : Printer | VCD: Velocity control damper |
| R : Relay | Pr : Proving ring |
| V : Valve | DBT: Dry-wetbulb thermometer |
| T : Thermocouple | |

Fig. 1. Schematic diagram of experimental system

풍량을 조절하였으며, 가열온도 조절은 슬라이드 변압기에 연결하여 만든 가열기를 사용하였다. 습도는 자동제습기를 사용하여 조절하였다. 분산판은 1 mm 두께의 동판을 사용하여 다공도가 각각 5%, 10%, 15%, 20% 및 30%되게 제작한 다음 망을 충전시켜 유입공기의 속도 분포를 균일하게 유지하였다.

유동층 원통은 투명 아크릴수지 파이프를 사용하였으며, 열손실을 막기 위해 두께 2.5 cm의 스티치폴로 단열하였다. 원통의 위치에 따른 온도를 측정하기 위해 입구에서 각각 10 cm, 40 cm, 70 cm, 100 cm, 130 cm 및 170 cm인 위치와 원통벽 내외의 같은 높이에 열전대를 설치하고 로타리 스위치를 연결하여 디지털온도계로서 유동층내부의 온도를 측정하였으며, 열선 풍속계로(Ane-mometer, Kanomax, 24~6111)로 원통상부의 풍속과 풍운을 측정하였다. 또 장치내의 상대습도를 측정하기 위해 장치의 입구와 출구에 건습구 온도계를 부착하였으며, 입구와 출구의 압력차를 측정하기 위해 U자 압력계를 설치하였다.

무게측정을 위해 proving ring에 스트레인게이지를 부착하였고, 또 백금선을 이용한 온도측정장치로 온도를

측정하였는데 온도와 무게의 자동기록을 위해서 자체 제작한 접속회로를 이용하여 유동층 건조기에 접속시켰다.

재료 및 방법

실험 재료

실험에 사용된 시료는 경상남도 농촌진흥원 시험장에서 1990년에 재배한 쌀보리(새쌀보리) 및 겉보리(알보리)를 대상으로 실험하였다.

실험 방법

함수율(W)은 평형상태에 도달한 시료 3~5g을 평균하여 저울병에 넣고 135±1°C 에서 24시간 dry oven에서 건조시킨 후 데시케이터에서 30분 동안 방냉한 후 건조중량을 측정하였다.

시료무게는 무작위로 평균크기의 입자 1000개를 측정 후 평균하였으며, 부피는 250 ml 메스실린더에 증류수를 채운 후 낙하시켜 그 부피를 측정하였다.

등가 입경(d_p)은 시료 1000개를 길이(L_e), 폭(L_w) 및 두께(L_t)를 버니어 캘리퍼스 측정하고 시료를 타원체로 가정된 체적을 계산하여 같은 체적의 구의 직경으로 가정하여 Mohsenin⁽¹¹⁾의 방법으로 구하였다.

구형도(ϕ)는 등가입경 측정시와 동일한 방법으로 구한 타원체의 표면적과 등가입경으로 계산한 구의 표면적으로부터 Mohsenin⁽¹¹⁾의 방법으로 구하였다.

진밀도(ρ_p)는 시료 1000개의 무게를 측정 후 증류수 100 ml 채운 250 ml 메스실린더에 자유낙하시켜 늘어난 부피에서 밀도를 Mohsenin⁽¹¹⁾의 방법으로 구하였다.

공극율(ϵ)은 시료 1000개를 메스실린더에 넣어 충전층의 전체적을 구한 후 시료의 체적과 공극의 체적을 구하여 Kunii 등⁽¹²⁾의 방법으로 구하였다.

최소 유동화 속도(U_{mf})와 최적 유동화 속도(U_{ms})는 충전량 시료로 쌀보리 100g(1.8 cm), 200g(3.3 cm), 300g(5.1 cm), 400g(7.0 cm), 500g(8.8 cm), 600g(10.5 cm), 700g(12.2 cm) 및 겉보리 100g(2.3 cm), 200g(4.3 cm), 300g(6.8 cm), 400g(8.8 cm), 500g(10.7 cm), 600g(12.9 cm), 700g(14.8 cm)을 유동층 column에 충전시켜 각 층고에 따른 공기의 유속(U_c)과 압력강하(ΔP)를 측정하였으며, 특히 유동화 개시 전후를 집중적으로 실험하여 ΔP 가 최고치에 달했을 때의 공기의 속도를 최소 유동화 속도로 정하고 계속 유속을 증가시켜 유동층 상태를 관찰하여 최적 유동화 속도에서 건조실험을 행하였다.

컴퓨터를 이용한 무게 및 온도측정 방법과 컴퓨터프로그래밍은 김 등⁽¹⁾의 방법에 따라 행하였다.

결과 및 고찰

보리의 물리적 특성

쌀보리와 겉보리의 물리적 특성을 Table 1에 나타내었다. 보편적으로 큰 차이는 없었으나 겉보리가 쌀보리

Table 1. Physical properties of barley

Item	Variety	
	Naked barley (Saessal bori)	Husked barley (Al bori)
Length(L _e , cm)	0.6034	0.8081
Width(L _w , cm)	0.3165	0.3526
Thickness(L _t , cm)	0.2666	0.2736
Weight(\bar{W} , g)	0.0313	0.0377
Volume(V, cm ³)	0.0244	0.0322
Density(ρ_s , g/cm ³)	1.2828	1.1708
Sphericity(ϕ_s , -)	0.6142	0.5286
Voidage(ϵ , -)	0.3493	0.4351
Diameter(d _p , cm)	0.3706	0.4272
Moisture(W _w , %)	11.07	10.03

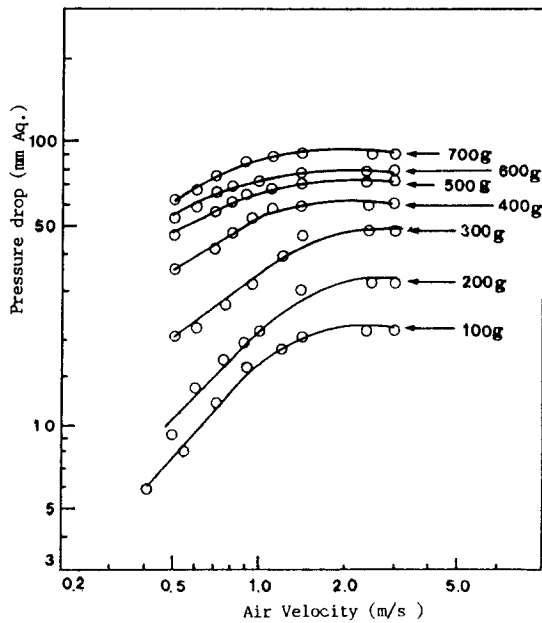


Fig. 2. Pressure drop vs. air velocity at various charged amount of naked barley for fluidized bed
(T_a=35°C, RH=30%)

보다 약간 큰 수치를 보여주고 있다.

보리의 유동화 특성 실험

공기온도 35°C, 상대습도 30%에서의 쌀보리와 겉보리의 기초적 유동화 실험으로서 공기 유속에 대한 압력강하의 측정결과를 Fig. 2와 3에 나타내었다.

Fig. 2, 3에서 보는 바와 같이 충전량에 관계없이 공기 유속이 어느 점보다 낮은 구간에서는 압력강하가 공기 유속의 증가에 따라 증가하지만 그 이상의 공기 유속에서는 일정하였다. 이 점에서의 공기 유속을 최소 유동화 속도라고 하며, 압력강하가 유속과 함께 증가하는 범위는 고정층이며, 유속에 관계없이 일정한 압력강하를

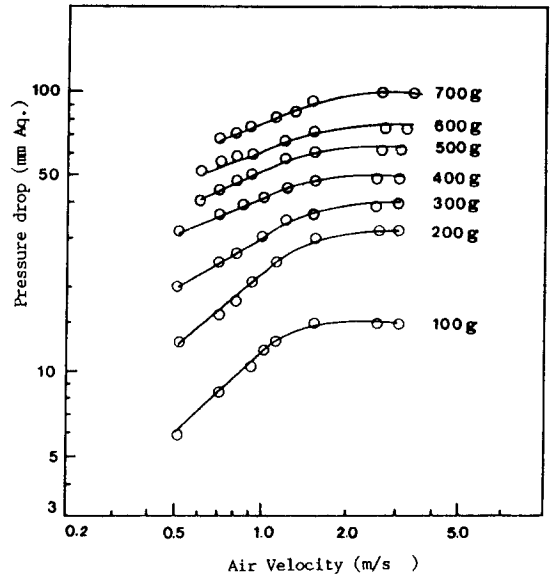


Fig. 3. Pressure drop vs. air velocity at various charged amount of husked barley for fluidized bed
(T_a=30°C, RH=30%)

나타내는 구간이 유동층이다. 즉 고정층에서는 유속이 증가하면 압력강하는 직선적으로 증가하지만 유동층에서는 일정한 값을 나타낸다. Iwamoto와 Chuma⁽⁸⁾는 곡류의 유동층 건조에서의 유동화 건조특성에 관한 실험에서 벼, 밀, 조 및 콩을 각각 100g, 200g, 300g, 400g 및 500g 충전하여 유동층의 압력강하를 측정된 결과와 본 실험에서 측정된 결과는 잘 일치하였다. 또 Umeda⁽¹³⁾도 곡류의 유동화에 관한 실험에서 충전량에 관계없이 최소 유속화 속도 이하에서는 압력강하가 증가한다고 보고하였다.

충전량 300g, 상대습도 30% 및 개공율 10%의 분산판을 사용한 유동층에서 쌀보리와 겉보리의 공기온도의 변화에 따른 공기유속과 압력강하를 Fig. 4와 5에 각각 표시하였다. Fig. 4, 5에서 보는 바와 같이 최소 유동화 속도가 공기의 온도가 증가할수록 감소하는 양상을 보여주고 있다. Baek과 Seo⁽¹⁴⁾는 유동층의 온도변화에 따른 유동특성에 관한 연구에서 온도의 증가에 따라 유동기체의 점성이 증가하기 때문에 감소한다고 보고하였다. 또 Leva⁽¹⁵⁾도 유리와 비중이 비슷한 모래를 사용하여 공기, He, CO₂가스 등으로 유동화시킨 결과 층류역에서 최소유동 질량속도(G_{m1})가 운동점도($\nu = \mu_0/\rho_0$)에 반비례하며, 따라서 U_{m1}도 유체의 점도에 반비례한다고 보고하고 있다. 본 실험의 결과도 위의 보고와 유사하고 있다.

최소 유동화 속도(U_{m1})와 최적 유동화 속도(U_{m3})

충전량 300g, 공기온도 35°C, 상대습도 30%의 조건에서 쌀보리와 겉보리의 U_{m1}와 U_{m3}를 구하기 위하여

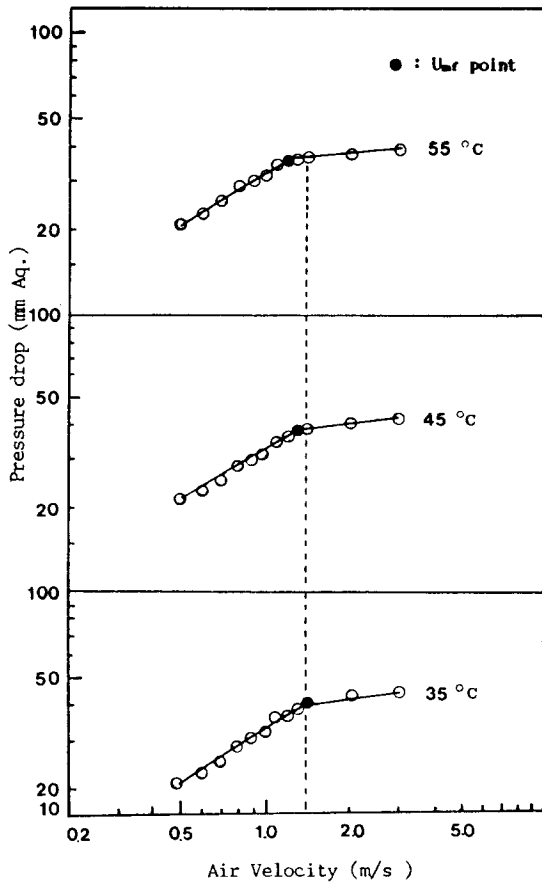


Fig. 4. Pressure drop vs. air velocity at various bed temperature of naked barley for fluidized bed at 300g of charged amount (RH=30%)

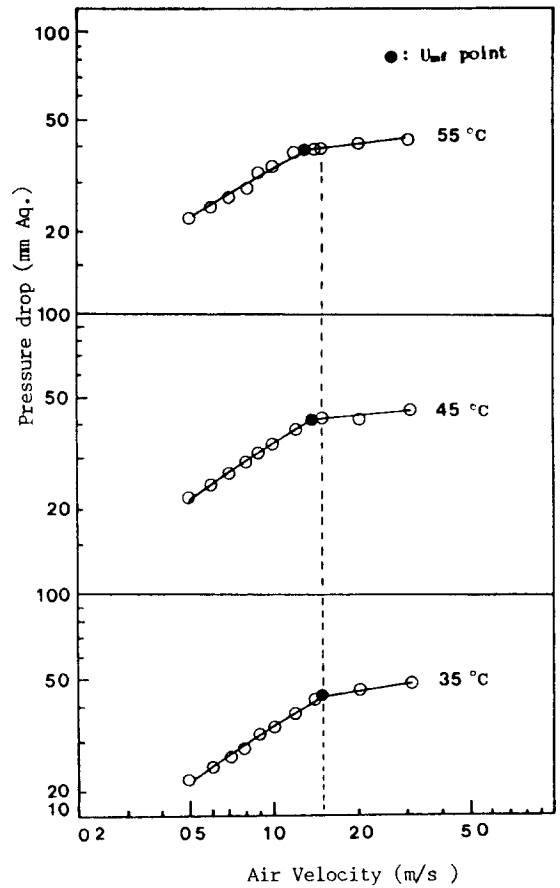


Fig. 5. Pressure drop vs. air velocity at various bed temperature of husked barley for fluidized bed at 300g of charged amount (RH=30%)

Table 2. Comparison of U_{mf} from experimental data with empirical equations

Item	$U_{mf}(m/s)$		
	Naked barley	Husked barley	
Experimental data	1.5	1.7	
Empirical equation	Modified Ergun's($Re_p > 1000$) ¹⁾	1.5	1.7
	Leva's ²⁾	1.06	1.07
	Wen and Yu's ³⁾	1.7	1.8
	Ergun's($Re_p > 1000$) ⁴⁾	0.8	1.0

$$1) U_{mf}^2 = \frac{\Phi_s d_p}{0.4881} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_g)g \epsilon_{mf}^3}{\rho_g} \text{ for Naked barley}$$

$$1) U_{mf}^2 = \frac{\Phi_s d_p}{0.6649} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_g)g \epsilon_{mf}^3}{\rho_g} \text{ for Husked barley}$$

$$2) U_{mf} = C_{mf} g d_p^2 \rho_s / \mu_c$$

$$3) U_{mf}^2 = \frac{d_p(\rho_s - \rho_g)g}{24.5 \rho_g} (Re_p > 1000)$$

$$4) U_{mf}^2 = \frac{\Phi_s d_p}{1.75} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_g)g \epsilon_{mf}^3}{\rho_g} (Re_p > 1000)$$

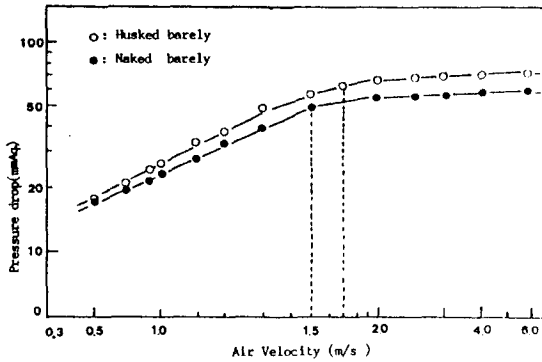


Fig. 6. Pressure drop vs. air velocity for fluidized bed at 300g of charged amount with naked and husked barley (Ta=35°C, RH=30%)

압력강하와 공기유속과의 관계를 측정된 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

곡물의 U_{mf} 에 대해서는 Iwamoto와 Chuma⁽⁸⁾, Sasao와 Endo⁽¹⁵⁾, Umeda⁽¹³⁾ 및 山田과 鈴木⁽²⁾의 보고가 있으며, Iwamoto와 Chuma⁽⁸⁾는 벼, 밀, 조 및 콩의 U_{mf} 를 각각 1.08 m/s, 1.05 m/s, 0.80 m/s 및 1.28 m/s이고 Leva식⁽⁹⁾을 이용한 계산치는 각각 1.06 m/s, 1.09 m/s, 0.79 m/s 및 1.30 m/s라고 보고하고 있다.

그러나 Ishibashi 등⁽¹⁶⁾은 벼의 U_{mf} 는 1.2 m/s로서 벼의 U_{mf} 에 대해서는 Leva의 이론식이 성립되지 않는다고 보고하고 있다.

Table 2는 본 실험장치에서의 U_{mf} 는 쌀보리 및 겉보리가 각각 1.5 m/s, 1.7 m/s이며, Leva식⁽⁹⁾에 의한 계산치는 쌀보리와 겉보리에서 각각 1.06 m/s, 1.07 m/s이고 Wen과 Yu식⁽¹⁰⁾에 의한 계산치는 쌀보리와 겉보리에서 각각 1.7 m/s, 1.8 m/s로서 실험치와 계산치간에는 큰 격차가 있음을 알 수 있었다.

본 실험에서는 Ergun식⁽⁷⁾을 변형하여 실험치와 일치하는 실험식을 얻었으며,

$$U_{mf}^2 = \frac{\phi_c d_p}{Hk} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_g) g \epsilon_{mf}^3}{\rho_g} \quad (Re_p > 1000)$$

이 실험식에서의 상수 Hk는 쌀보리와 겉보리가 각각 0.4881, 0.6649로 구해졌다.

유속과 압력 손실과의 관계에서 고정층과 유동층으로 나타낼 수 있는데 Gupta와 Mujumdar⁽¹⁷⁾는 충전량에 관계없이 공기의 유속이 증가함에 따라 고정층으로부터 유동층으로 전환되는 즉, 고정층의 압력강하곡선과 유동층의 압력강하곡선의 교차점으로부터 U_{mf} 를 구한다고 보고하였다. Fig. 6은 U_{mf} 를 구하기 위한 실험으로서 초기의 유속에 비례하여 압력 손실이 증가되는 고정층과 유속을 증가하여도 압력 손실이 일정하게 유지되는 유동층이 형성되는 것을 볼 수 있다. 또 유속이 0.5 m/s 미만일 때는 압력강하가 발생되지 않았으나 0.5 m/s될

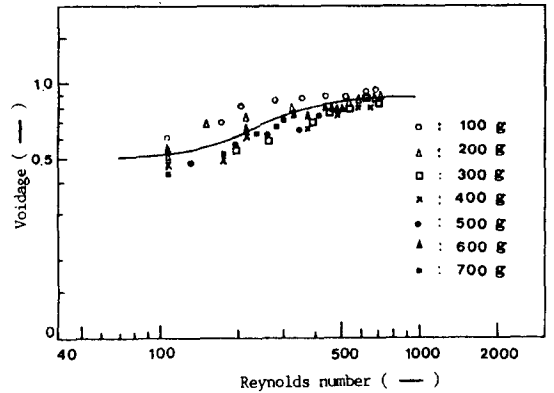


Fig. 7. Voidage vs. Reynolds number at various charged amount of naked barley with 10% opening distributor (Ta=35°C, RH=30%)

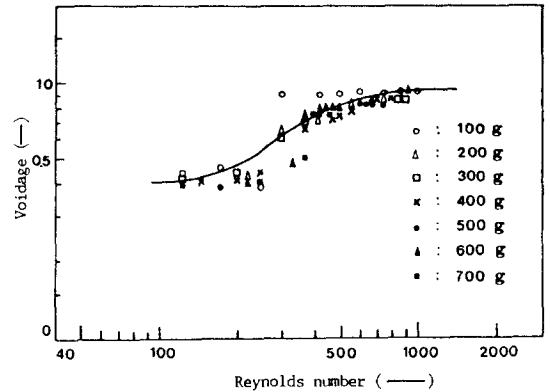


Fig. 8. Voidage vs. Reynolds number at various charged amount of husked barley with 10% opening distributor (Ta=35°C, RH=30%)

때 압력강하가 발생되어 유속에 비례하여 계속 커지고 있으나 최소 유동화가 시작되는 점에서 압력강하가 일정하게 됨을 보여주고 있는데 그 개시점을 U_{mf} 로 측정하였다. 즉, 쌀보리 및 겉보리의 U_{mf} 가 각각 1.5 m/s 및 1.7 m/s를 나타내고 있다. 일반적으로 U_{ms} 를 U_{mf} 의 1.2~2 배로 보는 경우가 많다⁽¹⁷⁾. 본 실험에서는 U_{ms} 를 1.8~2 배인 3.0 m/s로 하여 유동화 실험을 하였다. 유동층내의 시료의 공극율과 공기의 유속과의 관계를 관찰하기 위하여 여러가지 충전량에 따른 Reynolds number와 공극율과의 관계를 쌀보리와 겉보리에 대하여 Fig. 7과 8에 각각 나타내었다.

Fig. 7, 8에서 보는 바와 같이 U_{mf} 이하인 고정층에서는 공극율이 거의 일정하였으나 Re_p 의 증가에 따라 차츰 유동화되면서 공극율이 증가하다가 유동화된 후에는 다시 일정하게 나타났다.

유동층에서의 현상은 유동층이 균일하게 팽창할 때와

Table 3. Experimental values with charged amount and air velocity for fluidized bed of naked barley

(Ta=35°C, RH=30%)

Charged amount(g)	Item	Experimental values									
		0	0.5	0.8	1.0	1.3	1.7	2.0	2.4	2.8	3.2
100	U _o (m/s)	0	0.5	0.8	1.0	1.3	1.7	2.0	2.4	2.8	3.2
	L _f (-)	0.023	0.031	0.042	0.075	0.092	0.113	0.121	0.145	0.210	0.245
	Re _p (-)	0	109	174	218	283	370	435	522	609	696
	ε _f (-)	0.4897	0.6214	0.7205	0.8435	0.8724	0.8961	0.9030	0.9190	0.9441	0.9521
200	U _o (m/s)	0	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5	2.7	3.1	3.3
	L _f (-)	0.043	0.050	0.080	0.095	0.125	0.154	0.170	0.192	0.212	0.260
	Re _p (-)	0	109	152	218	326	435	544	587	674	718
	ε _f (-)	0.4541	0.5306	0.7066	0.7529	0.8122	0.8476	0.8619	0.8777	0.8893	0.9097
300	U _o (m/s)	0	0.5	0.9	1.2	1.8	2.1	2.5	2.9	3.0	3.2
	L _f (-)	0.068	0.071	0.080	0.092	0.123	0.156	0.180	0.240	0.270	0.290
	Re _p (-)	0	109	196	261	392	457	544	631	653	696
	ε _f (-)	0.4823	0.5042	0.5599	0.6173	0.7138	0.7743	0.8044	0.8533	0.8696	0.8786
400	U _o (m/s)	0	0.5	0.8	1.2	1.7	2.2	2.5	2.7	2.8	3.0
	L _f (-)	0.088	0.092	0.098	0.132	0.151	0.210	0.245	0.280	0.305	0.310
	Re _p (-)	0	109	174	216	370	479	544	587	609	653
	ε _f (-)	0.4666	0.4898	0.5210	0.6444	0.6891	0.7765	0.8084	0.8323	0.8461	0.8485
500	U _o (m/s)	0	0.6	0.9	1.2	1.5	1.9	2.2	2.4	2.6	3.0
	L _f (-)	0.107	0.115	0.135	0.155	0.170	0.240	0.290	0.300	0.325	0.325
	Re _p (-)	0	131	196	261	326	413	479	522	566	653
	ε _f (-)	0.4516	0.4898	0.5654	0.6214	0.6548	0.7555	0.7977	0.8044	0.8194	0.8194
600	U _o (m/s)	0	0.5	1.0	1.5	1.7	2.0	2.1	2.2	2.3	2.7
	L _f (-)	0.129	0.160	0.205	0.294	0.330	0.350	0.370	0.380	0.380	0.380
	Re _p (-)	0	109	218	326	370	435	457	479	500	587
	ε _f (-)	0.4542	0.5599	0.6565	0.7605	0.7866	0.7988	0.8097	0.8147	0.8147	0.8147
700	U _o (m/s)	0	0.5	0.8	1.1	1.3	1.4	1.5	1.5	1.5	1.6
	L _f (-)	0.148	0.150	0.180	0.230	0.270	0.317	0.330	0.330	0.340	0.340
	Re _p (-)	0	109	174	239	283	305	326	326	326	326
	ε _f (-)	0.4450	0.4524	0.5437	0.6428	0.6957	0.7409	0.7511	0.7511	0.7584	0.7584

bubble 현상이 지배적일 때의 2단계로 구분할 수 있다. 전자를 particulate fluidized bed라 하여 주로 고액계 유동층에서 일어나는 현상으로 알려져 있고, bubble 현상이 지배적일 때 aggregative fluidized bed라 하여, 기고계 유동층에서 많이 일어나는 현상으로 알려져 있다. 유동층의 팽창은 충전 유동층의 경우 변동이 적으므로 비교적 정확히 측정할 수 있다. 본 실험에서는 쌀보리 및 겔보리를 유동층 column에 충전시켜 실험한 것으로 유동화 개시 후에 팽창은 큰 변동이 없었다.

유동층에서의 시료의 공극율과 Reynolds No.는 각각 식 (8) 및 식 (14)에 의하여 구하였다. 그 결과를 Table 3과 4에 나타내었다. 여기서 보면 공극율은 대체적으로 유속이 최소 유동화 속도 이상에서는 거의 일정함을 알 수 있다.

Iwamoto와 Chuma⁽⁸⁾도 벼의 충전량을 100g, 200g, 300g 및 400g으로 변화시키면서 실험한 결과 공극율은 최소 유동화 속도까지는 대체로 일정하였으나 그 이상의 공기 유속에서는 서서히 증가가 높아지기 때문에 공극율도 약간 크게 되나 직선적으로 변화되지 않는다고 보고하고 있다.

유동층내의 온도분포

최적 유동화시에 있어서 유동층내의 높이에 따른 온도분포를 공기속도 3.0 m/s, 충전량 300g, 공기온도 45°C 및 상대습도 30% 조건하에서 쌀보리에 대하여 Fig. 9에 나타내었다. 대체적으로 층내 공기온도는 높이에 따라 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 이것으로 보아 공기와 입자가 완전 혼합류로 흐름을 알 수 있다.

Otsuka 등⁽¹⁸⁾은 유동층내의 공기 흐름 상태를 알기 위한 실험에서 공기온도는 입구 부근을 제외하고는 층내의 높이에 따라 대개 일정하다고 하였으며, 이것으로부터 공기흐름은 완전 혼합류에 속한다고 보고하였다.

요 약

보리를 초기의 고수분 상태에서 연속적이고 효과적인 인공건조를 실시하기 위하여 보리의 물리적 특성을 구하였으며, 또 유동층 건조장치를 제작하여 유동화 특성을 실험하여 이론식과 비교 검토하였다.

공기의 온도 및 상대습도가 각각 35°C, 30%이고 충전량이 300g일 때 쌀보리와 겔보리의 최소 유동화 속

Table 4. Experimental values with charged amount and air velocity for fluidized bed of husked barley
($T_a=35^\circ\text{C}$, $\text{RH}=30\%$)

Charged amount(g)	Item	Experimental values									
100	$U_o(\text{m/s})$	0	0.5	0.7	1.2	1.7	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
	$L_f(-)$	0.018	0.023	0.024	0.130	0.140	0.160	0.190	0.200	0.220	0.250
	$Re_p(-)$	0	125	176	301	426	501	627	752	878	1003
	$\varepsilon_f(-)$	0.2857	0.4410	0.4640	0.9011	0.9081	0.9196	0.9323	0.9357	0.9415	0.9485
200	$U_o(\text{m/s})$	0	0.5	0.9	1.2	1.7	2.3	2.7	3.0	3.6	3.7
	$L_f(-)$	0.033	0.043	0.045	0.074	0.105	0.140	0.175	0.200	0.260	0.270
	$Re_p(-)$	0	125	226	301	426	577	677	752	903	928
	$\varepsilon_f(-)$	0.2205	0.4019	0.4285	0.6525	0.7551	0.8163	0.8530	0.8714	0.9011	0.9047
300	$U_o(\text{m/s})$	0	0.5	0.8	1.2	1.9	2.3	2.6	3.0	3.3	3.4
	$L_f(-)$	0.051	0.068	0.071	0.101	0.180	0.200	0.220	0.260	0.310	0.320
	$Re_p(-)$	0	125	201	301	476	577	652	752	827	853
	$\varepsilon_f(-)$	0.2437	0.4327	0.4567	0.6181	0.7857	0.8071	0.8246	0.8516	0.8755	0.8794
400	$U_o(\text{m/s})$	0	0.6	0.8	1.0	1.5	1.9	2.0	2.3	2.8	3.1
	$L_f(-)$	0.070	0.088	0.092	0.102	0.150	0.190	0.220	0.250	0.290	0.320
	$Re_p(-)$	0	150	201	251	376	476	501	577	702	777
	$\varepsilon_f(-)$	0.2653	0.4156	0.4410	0.4958	0.6571	0.7293	0.7662	0.7943	0.8226	0.8392
500	$U_o(\text{m/s})$	0	0.7	1.0	1.5	2.0	2.4	2.5	2.5	2.7	3.0
	$L_f(-)$	0.088	0.107	0.110	0.130	0.380	0.382	0.382	0.390	0.392	0.392
	$Re_p(-)$	0	176	251	376	501	602	627	652	677	752
	$\varepsilon_f(-)$	0.2695	0.3992	0.4156	0.5055	0.8308	0.8317	0.8317	0.8351	0.8360	0.8360
600	$U_o(\text{m/s})$	0	0.5	0.9	1.3	1.5	1.7	1.8	1.9	2.0	3.0
	$L_f(-)$	0.105	0.129	0.132	0.151	0.315	0.390	0.410	0.430	0.431	0.431
	$Re_p(-)$	0	125	226	326	376	426	451	476	501	752
	$\varepsilon_f(-)$	0.2653	0.4020	0.4156	0.4891	0.7551	0.8022	0.8118	0.8206	0.8210	0.8210
700	$U_o(\text{m/s})$	0	0.5	0.7	1.0	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	1.9
	$L_f(-)$	0.122	0.148	0.148	0.149	0.350	0.360	0.370	0.371	0.371	0.371
	$Re_p(-)$	0	125	176	251	376	401	426	451	476	476
	$\varepsilon_f(-)$	0.2623	0.3919	0.3919	0.3960	0.7428	0.7500	0.7567	0.7574	0.7574	0.7574

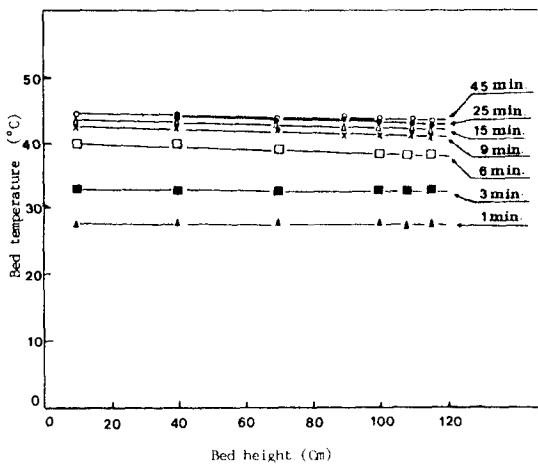


Fig. 9. Bed temperature distribution of various bed height for fluidized bed of naked barley
($T_a=45^\circ\text{C}$, $\bar{W}b=300\text{g}$, $U_o=3.0\text{ m/s}$, $\text{RH}=30\%$)

도는 1.5 m/s 및 1.7 m/s였으며, 최적 유동화 속도는 3.0 m/s였다.

본 실험에서 실험한 쌀보리와 겉보리의 U_{mf} 는 1.5 m/s 및 1.7 m/s였으며, Leva식에 의한 계산치는 각각 1.06 m/s 및 1.07 m/s로 실험치와 계산치는 잘 일치하지 않았다. 또한 쌀보리와 겉보리의 유동층 건조에서 실험치와 일치하는 다음과 같은 최소 유동화 속도에 관한 실험식을 얻었다.

$$U_{mf} = \frac{\phi_s d_p}{Hk} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_g)g \varepsilon_{mf}^3}{\rho_g} \quad (Re_p > 1000)$$

이 실험의 상수 Hk는 쌀보리 및 겉보리가 각각 0.4881, 0.6649였다.

Nomenclature

- A : contant (-)
- A_c : cross-sectional area of bed (cm^2)
- C_{mf} : coefficient of minimum fluidization (-)
- C_p : specific heat ($\text{cal/g}_m \cdot ^\circ\text{C}$)
- D : digital value (-)
- D_b : diameter of column in fluidized bed (cm)
- d_p : particle diameter (cm)
- d.b. : dry basis (-)

g	: acceleration of gravity (980 cm/s ²)
g_c	: gravitational conversion factor (980, g _m , cm/g _m , s ²)
Hk	: constant (-)
Le	: length of barley (cm)
L_f	: height of a fluidized bed (cm)
L_m	: height of a fixed bed (cm)
L_{mf}	: bed height of minimum fluidizing conditions (cm)
L_t	: thickness of barley (cm)
ΔP	: pressure drop (mmAq.)
Re	: Reynolds number (-)
Re_{mf}	: Reynolds number at minimum fluidization (-)
Re_p	: particle Reynolds number (-)
RH	: relative humidity (%)
Ta	: air temperature (°C)
U	: air velocity at entrance (m/s)
U_{mf}	: fluid velocity at minimum fluidizing conditions (m/s)
U_{ms}	: superficial fluid velocity at optimum fluidizing conditions (m/s)
U_o	: air velocity in fluidized bed (m/s)
V	: volume of varley (cm ³)
W	: moisture content of dry basis of barley (-)
Ww	: moisture content of wet basis of barley (%)
\bar{W}	: weight of barley (g)
\bar{W}_b	: charged amount (g)
ϵ	: voidage (-)
ϵ_f	: voidage of fluidized bed (-)
ϵ_m	: voidage of fixed bed (-)
ϵ_{mf}	: voidage at minimum fluidizing conditions (-)
μ_k	: viscosity of gas (g/cm, s)
ν	: kinematic viscosity of air (cm ² /s)
ρ	: density (g/cm ³)
ρ_b	: bulk density of bed (g/cm ³)
ρ_f	: fluid density (g/cm ³)
ρ_s	: density of solids (g/cm ³)
ϕ_s	: sphericity of a particle (-)

본 보의 대요는 한국식품과학회 영남지부 학술발표대회(1991. 6)에서 발표하였다.

문헌

1. 김희연, 허종화, 서재신: 보리의 유동층 건조 특성에 관한 연구, 1. 유동층 건조장치의 자동제어시스템. 냉동공조공학회지, 8, 37(1989)
2. 山田 泉, 鈴木法雄: 流動層 乾燥装置の 現状と 問題點. 工場操作シレーズ No.2, 増補乾燥, 化學工業, p.299 (1984)
3. Howard, J.R.: *Fluidized beds, Combustion & Applications*. Applied Science Publishers, p.13(1983)
4. Davidson, J.F. and Harrison, D.: *Fluidization*. Academic Press, London & New York, p.471(1971)
5. Shirai, T.: *Fluidized beds*. Kagaku-gijutsusha, p.28 (1958)
6. 농림수산통계연보: 농수산부, p.77(1991)
7. Ergun, S.: Fluid flow through packed columns. *Chem. Engng. Progr.*, 48, 89(1952)
8. Iwamoto, M. and Chuma, Y.: Study on a fluidized bed drying of cereal grains, Fluidization and drying characteristic. *J. Soc. Agr. Mach. Japan*, 32, 322(1971)
9. Leva, M.: *Fluidization*. McGraw-Hill Book Co. New York, p.15(1959)
10. Wen, C.Y. and Yu, Y.H.: A generalized method for predicting the minimum fluidization velocity. *Trans. AIChE*, 12, 610(1966)
11. Mohsenin, N.N.: *Physical properties of plant and animal materials*, vol.1, Gordon & Breach Science Publishers, p.51(1970)
12. Kunii, D. and Levenspiel, O.: *Fluidization engineering*. John Wiley and Sons Inc., p.64(1969)
13. Umeda, S.: Fluidized processing of grains-1. *J. Soc. Agr. Mach. Japan*, 32, 135(1970)
14. Back, K.K. and Seo, J.Y.: An experimenral study for fluidized bed behaviour with temperature change. *Journal of Solar Energy Society of Korea*, 6, 3(1986)
15. Sasao, A. and Endo, S.: On the conditions of fluidization of grains. *J. Soc. Agr. Mach. Japan*, 34, 51(1972)
16. Ishibashi, S., Tanaka, S. and Fukumoto, Y.: Studies on cooling and cold air drying for grain storage-IV. *J. Soc. Agr. Mach. Japan*, 36, 290(1973)
17. Gupta, R. and Mujumdar, A.S.: *Aerodynamic and thermal characteristics of vibarated fluid beds-a review*. Department of chemical engineering, McGill University, Montreal, Canada, p.141(1979)
18. Otsuka, K., Murata, S. and Chuma, Y.: Fundamental equations and the approximate solutions of fluidized bed. *J. Soc. Agr. Mach. Japan*, 38, 359(1976)

(1992년 4월 20일 접수)