

## 겉보리의 유동층 건조특성에 영향을 미치는 인자

김희연\* · 한상배 · 권용관<sup>1</sup> · 이광호<sup>2</sup> · 정청송<sup>3</sup> · 하상철<sup>4</sup>  
김성태<sup>5</sup> · 송승구<sup>6</sup> · 조재선<sup>3</sup> · 허종화<sup>7</sup>

식품의약품안전청 식품규격과, <sup>1</sup>식품의약품안전청 천연첨가물과,  
<sup>2</sup>식품의약품안전청, <sup>3</sup>경희대학교 식품공학과

<sup>4</sup>대구미래대학 제과제과코레이션과, <sup>5</sup>경상대학교 생물산업기계공학과  
<sup>6</sup>부산대학교 화학공학과, <sup>7</sup>경상대학교 식품공학과

## Influencing Factors in Drying Characteristics of Fluidized Bed Drying of Husked Barley

Hee-Yun Kim\*, Sang-Bae, Han, Yong-Kwan Kwon<sup>1</sup>, Kwang-Ho Lee<sup>2</sup>, Chung-Sung, Jung<sup>3</sup>, Sang-Chul Ha<sup>4</sup>, Sung-Tae Kim<sup>5</sup>, Seung-Koo Song<sup>6</sup>, Jae-Sun Cho<sup>3</sup> and Jong-Hwa Hur<sup>7</sup>

Division of Food Standard, Korea Food and Drug Administration

<sup>1</sup>Division of Natural Food Additives, Korea Food and Drug Administration

<sup>2</sup>Division of Packaging, Korea Food and Drug Administration

<sup>3</sup>Department of Food Science and Technology, Gyeonghee University

<sup>4</sup>Department of Confectionary Decoration, Taegu Future College

<sup>5</sup>Department of Food Science and Technology, Gyeongsang National University

<sup>6</sup>Department of Chemical Engineering, Pusan National University

<sup>7</sup>Department of Bio-Industrial machinery Engineering, Gyeongsang National University

The influencing factor in drying characteristics of fluidized bed drying with different drying conditions for husked barley were carried out. This fluidized drying mechanism of husked barley was consisted of consecutive two falling rate parts, first falling rate period and second falling rate period without showing constant rate period. The drying rate constant was increased with decreasing charged amount and relative humidity and increasing air temperature and air velocity. Since the drying rate constant expressed by Arrhenius type equation in the falling rate period showed good linearity, the falling rate period was considered as the controlling step. The activation energy of first falling step was 1,100 cal/gmol, while for second falling step the values showed 1,600 cal/gmol.

**Key words:** husked barley, drying characteristics, two falling rate parts, Arrhenius type equation, activation energy

### 서 론

식품의 건조방법은 자연건조에서 출발하여 1970년대에 인공건조가 고안되었으며, 현재는 과학기술의 발달과 더불어 더욱더 발전되어가고 있는 현실이다.

곡물의 건조방법에는 고온건조와 저온건조로 크게 나눌 수 있는데, 식품의 경우는 여러종류의 고분자 성분으로 구성되어 있기 때문에 화학적 및 물리학적 성질이 단순하지 않

으므로 수분 이동기구 등이 복잡하여 건조 특성을 묘사할 경우 임계함수율에 의해 항률건조기와 감률건조기로 구분된다<sup>(1)</sup>. 그리고 일반고체(inert matter)의 건조와는 달리 일정한 건조 조건에서는 항률건조기간(constant drying rate period)이 일반적으로 존재하지 않고, 대부분 감속 건조기간(falling rate period)으로 진행되며, 감속건조기간은 초기의 모세관 현상에 의한 제 1 감속 건조기간(primary falling rate period)과 수분층의 확산에 기인하는 약간 더 느린 제 2 감속건조기간(secondary falling rate period)이 있다.

그러나 식품은 건조과정중 수축으로 인해 표면적이 변화하기 때문에 임계함수율을 정확히 측정한다는 것은 매우 어려운 일이며 또한 표면적 변화로 인해 재료면의 압력구배를 생기게 하기 때문에 건조속도에도 상당한 영향을 미친다<sup>(2)</sup>. 실제의 건조과정에서는 건조조건이 부적당하기 때문에 급격한

\*Corresponding author : Hee-Yun Kim, Division of Food Standard, Korea Food and Drug Administration, 5 Nokbun-Dong, Eungpyung-Ku, Seoul 122-704, Korea  
Tel: 82-2-380-1664  
Fax: 82-2-380-4892  
E-mail: pmheekim@kfda.go.kr

불균일한 수축을 일으켜서 균열 및 변곡 등을 수반하여 제품의 품질을 손상시키는 일이 있다<sup>(3,4)</sup>. 그러므로 예비건조를 거치지 않고 초기수분함량이 많은 보리를 안전하고 효율적으로 인공건조하는 방법의 하나로 유동층 기술을 생각할 수 있다.

유동층기술<sup>(5-12)</sup>은 1941년 미국에서 유동층매식 석유분해법으로 gasoline 제조에 응용된 이후 석탄건류, 석회석의 소성, 유화광의 배소, 금속표면으로의 plastic 피복, 흡착장치, 고온 균일 가열용 매체등의 물리적 조작으로 널리 이용되어 왔으며 식품공업에서는 비교적 최근에 활용되어 유동층 냉동, 냉동건조, 건조, 조립 등 다방면으로 용도가 개발되고 있으며 국내에서도 라면용 soup 건조나 제분, 제약공업에서 이용되고 있다<sup>(5-8)</sup>. 그러나 이 건조방법은 분립체 건조에 있어서는 상당히 유효한 반면 고수분함량의 물체나 고점성물체 그리고 유동화되지 않는 대형고체물체의 경우는 단점도 있다.

보리는 우리나라에서 쌀 다음 가는 주곡으로서 널리 이용되고 있으며 그 품종에 따라 차이는 있으나 일반성분이 대체로 전분 65%, 단백질 10%, 지방 2%와 섬유질 2.5% 정도로 되어 있는 중요한 식량 자원이다.

한편 우리나라의 맥류생산량은 감소하는 추세인데 식량자급율을 높이기 위해서는 보리의 증산과 수확 후의 건조, 저장 및 가공 방법의 개선이 요구된다.

보리는 수확 직후 초기 함수율이 30~35%인데, 이것의 함수율을 감소시키기 위해서 보통 자연건조에 많이 의존한다. 그러나 자연건조법은 비능률적이고 비위생적이므로 건조효율의 향상을 위해서는 기계적인 인공건조법의 도입이 절실하다.

본 연구에서는 전보<sup>(9)</sup>와 같은 유동층건조기를 제작하여 겉보리를 건조할 경우 품질과 능률면에서 우수한 인공건조법을 도입하기 위한 기초실험으로서 유동층 건조특성에 영향을 미치는 외적요인에 대해서 실험을 행하였다.

## 재료 및 방법

### 실험재료

실험에서 사용된 시료는 경상남도 농촌진흥원 시험장에서 재배한 겉보리(알보리)를 대상으로 실험하였다. 함수율은 평형상태에 도달한 시료를 저울병에 넣고 135±1°C에서 24시간 dry oven에 건조시킨 후 데시케이터에서 30분 동안 방냉한 후 건조 중량을 측정하였다.

### 실험장치

본 실험에 사용한 유동층 건조장치는 전보<sup>(9)</sup>에서와 같은 장치로 건조용 공기, 가열온도 및 습도 등을 조절할 수 있도록 제작하였으며, 유동층 원통은 투명 아크릴 수지 파이프를 사용하였고 원통의 높이에 따라 6개의 열전대를 설치하여 디지털 온도계로서 유동층 내부의 온도를 측정하였다. 열선 풍속계(Anemometer, Kanomax, 24-6111)로 원통 상부의 풍속과 풍운을 측정하였다. 건습구 온도계를 부착하여 입구와 출구의 상대습도를 측정하였다. 무게 측정을 위해 proving ring과 스트레인 게이지를 장치하였고, 백금선을 이용해서 온도를 측정하였는데 온도와 무게의 자동 기록을 위해서 자체 제작한 접속회로를 이용하였다<sup>(10)</sup>.

### 확산과 건조속도식

Sherwood<sup>(11,12)</sup>는 열확산계수가 일정한 이상적인 경우에 평판고체 중의 수분변화와 시간과의 관계를 다음 식으로 나타내었다.

$$\frac{W - W_e}{W_c - W_e} = \frac{8}{\pi^2} \left\{ \exp \left[ -D_v \left( \frac{\pi}{2d} \right)^2 \right] + \frac{1}{9} \exp \left[ -9D_v \left( \frac{\pi}{2d} \right)^2 \right] + \dots \right\} \quad (1)$$

t값이 큰 경우에는 다음과 같다.

$$t = -\frac{4d^2}{\pi^2 D_v} \left[ \ln \frac{W - W_e}{W_c - W_e} - \ln \frac{8}{\pi^2} \right] \quad (2)$$

윗 식은  $\frac{W - W_e}{W_c - W_e} < 0.6$ 에서 적용된다.

또한 함수율이 포화점이하 또는 평형수분 범위 내에 있을 때 균일 물질의 수분이동은 확산에 의하여 이루어진다. 이와 같은 현상기구는 고체내의 열전도와 비슷하며 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial W}{\partial t} = D_v \left( \frac{\partial^2 W}{\partial X^2} \right) \quad (3)$$

$$-D_v \left( \frac{\partial W}{\partial X} \right) = SK_o (W_s - W_e) \quad (4)$$

식(3)은 고체내부의 확산에 관한 식이며, 식(4)는 고체표면에서의 경계조건이다. 유동층이 박층으로 구성된다고 가정하면<sup>(13)</sup> 박층은 입자 집합체의 최소 단위이며, 박층의 두께는 단일 입자의 두께로 정의된다. 또한 박층에서의 건조가 감률 건조 2단계 상태라고 가정하면 2단계에서 얻어지는 박층의 건조 방정식과 유동층내의 입자와 유체간의 열전달식에서 기초방정식이 성립된다. 유동층 건조법의 건조속도를 정량적으로 표현하기 위해 Henderson과 Pabist<sup>(14)</sup>는 박층의 건조에 있어서 충분한 시간이 경과한 건조방정식은 다음 식으로 표시하였다.

$$\frac{W_t - W_e}{W_o - W_e} = A e^{-kt} \quad (5)$$

초기에서는  $W_o$  및  $W_1$ 에 비하여  $W_e$ 는 적으므로  $(W_t - W_e) / (W_o - W_e)$ 는  $W_t / W_o$ 로 표시할 수 있으므로 식 (5)는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{W_t}{W_o} = A e^{-kt} \quad (6)$$

식 (6) 의 양변을 대수로 취하면

$$\ln \frac{W_t}{W_o} = \ln A - kt \quad (7) \text{로 된다.}$$

**Table 1. Physical properties of drying air at atmospheric pressure**

$T_a$ (C)	$\rho_a$ ( $Kg/m^3$ )	$\mu_a \times 10^5$ ( $Kg/m, s$ )	$C_p$ ( $KJ/Kg, ^\circ K$ )	$\kappa$ (W/M, $^\circ K$ )
25	1.1085	1.8461	1.0125	0.02545
35	1.1095	1.9803	1.0135	0.02615
45	1.0745	1.9319	1.0150	0.02685
55	1.0410	1.9711	1.0165	0.02755
65	1.0105	2.0153	1.0175	0.02825

상수 K는 식 (7)에서 좌변을 대수 눈금으로 표시하고 우변의 시간(t)을 보통 눈금으로 도시한 직선의 기울기에서 구할 수 있다. 감률건조 단계는 수분의 확산속이며, 수분확산은 활성화 과정으로 생각할 수 있으므로 건조속도는 Arrhenius형의 관계식으로 표시할 수 있다.

$$\ln K = -\frac{E_a}{RT} + \ln A$$

여기서  $E_a$ 는 활성화에너지를 나타낸다.

식(8)은  $\ln K$ 와  $1/T$ 을 반대수 방안에 표시하면 직선으로 나타나고, 이 직선의 기울기로부터 활성화에너지를 구할 수 있다.

$$\text{Slope} = -\frac{E_a}{R} \quad (9)$$

### 건조조건

시료는 20°C의 수온에 10시간 침지한 후 꺼내어 표면수분을 제거한 후 음지에서 30분간 방냉하여 초기수분을 일정하게 하였다. 이렇게 한 시료를 Table 1의 물성치를 갖는 열풍을 거쳐 공기온도 35°C, 45°C 및 55°C로, 시료 충전량은 전보<sup>(9)</sup>와 동일하게 하고 공기의 유속은 1.5 m/s, 2.0 m/s 및 3.0 m/s, 상대습도는 20%, 30% 및 40%로 각각 변화시키면서 건조하였다.

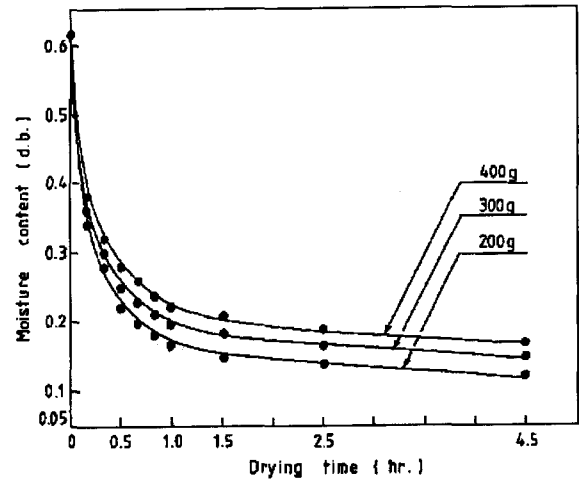
### 건조속도 상수

시간에 따른 수분함량과의 관계를 건조곡선으로 나타내고, 이 건조곡선에서 Shirai식<sup>(15)</sup>을 이용하여 건조속도 상수를 구하였다. 즉  $\ln W_t/W_0 = -kt$  관계에서 Y축에  $\ln W_t/W_0$ , X축에 t를 반대수 방안에 plot하여 그 기울기에서 건조속도상수를 구하였다 또 건조속도 곡선을 건조곡선에서 도식 미분법<sup>(16,17)</sup>을 사용하여 함수율로서 나타내었다.

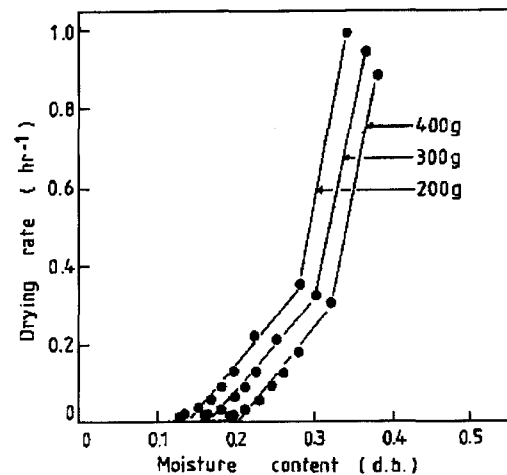
## 결과 및 고찰

### 충전량의 영향

Kim과 Hur<sup>(10)</sup> 등이 건조용 공기, 가열온도 및 습도 등을 조절할 수 있도록 제작한 건조장치를 이용하여 공기의 온도, 속도 및 상대습도를 각각 35°C, 3.0 m/s 및 30%로 고정하고 충전량을 200 g, 300 g 및 400 g으로 변화시킨 경우의 건조시간에 따른 수분함량의 변화를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서 나타난 것처럼 충전량이 많을수록 수분함량의 감소가 적게 나타났으나 큰 차이는 없었는데, 이는 일단 유동



**Fig. 1. Moisture content vs. drying time at various charged amount for fluidized bed of husked barley.**  
( $U_0 = 3.0$  m/s, RH = 30%,  $T_a = 35^\circ C$ )



**Fig. 2. Drying rate vs. moisture content at various charged amount for fluidized bed of husked barley.**  
( $U_0 = 3.0$  m/s, RH = 30%,  $T_a = 35^\circ C$ )

화된 입자가 부유되는 상태이므로 난류에 의한 열전달 계수 및 온도분포가 거의 같아지기 때문이라 생각되며 Hur와 Suh<sup>(18)</sup>, Park<sup>(19)</sup>도 벼와 팥에 대한 연구에서 비슷한 보고를 하였다. 또 Umeda는 곡류의 유동화 처리법에 관한 연구에서 충전량보다는 충전상태 및 공극률에 의해 다르게 나타난다고 보고한 바 있다<sup>(20)</sup>. Fig. 2는 건조속도를 수분함량에 따라 plot한 결과를 나타낸 것이며, 항률건조기가 없이 감률건조 1단계 및 감률건조 2단계로 진행됨을 나타내고 있다. 이것은 Hosokawa와 Motohashi의 소맥의 건조 특성에서 일반적으로 항률건조기가 존재하지 않는다는 보고와 일치하고 있다<sup>(20)</sup>. Cho 등은 표고버섯의 열풍건조 속도에 관한 연구에서 식품의 건조는 일반 고체의 건조와는 달리 일정한 건조조건에서는 항률건조기간이 일반적으로 존재치 않고 대부분 감률건조기간으로 진행되며, 감률건조기간은 초기의 모세관 현상에 의한 감률건조 1단계와 수분층의 확산에 기인하는 약간 더 느린 감률건조 2단계 구간이 있다고 보고한 바 있다<sup>(23)</sup>. 이

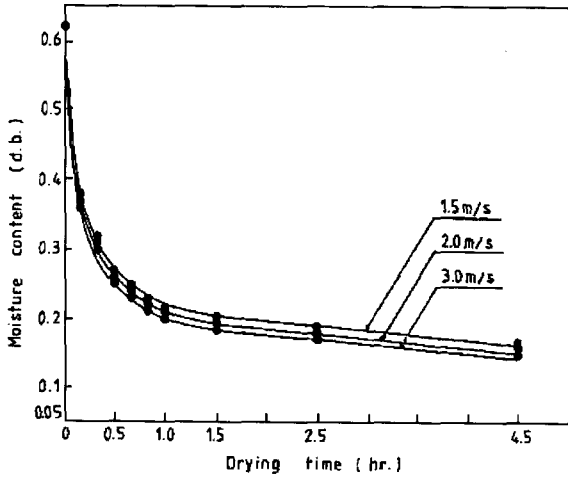


Fig. 3. Moisture content vs. drying time at various air velocity for fluidized bed of husked barley. (RH = 30%,  $T_a = 35^\circ\text{C}$ ,  $b = 300\text{ g}$ )

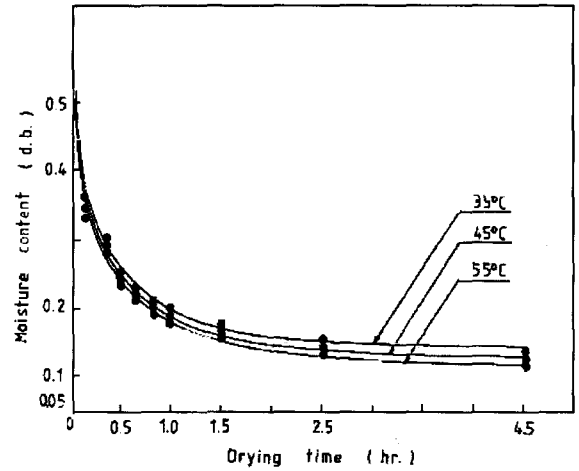


Fig. 5. Moisture content vs. drying time at various air temperature for fluidized bed of husked barley. ( $b = 300\text{ g}$ ,  $U_0 = 3.0\text{ m/s}$ , RH = 30%)

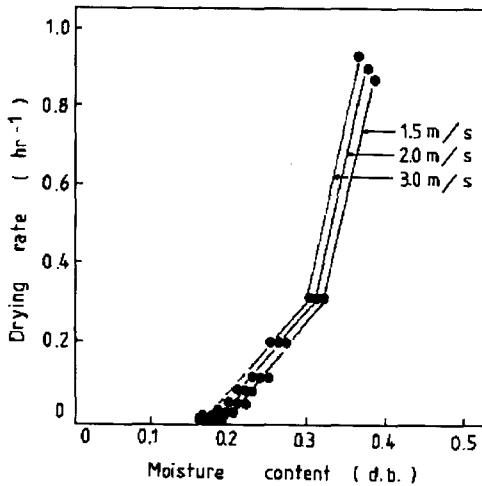


Fig. 4. Drying rate vs. moisture content at various air velocity for fluidized bed of husked barley. (RH = 30%,  $T_a = 35^\circ\text{C}$ ,  $b = 300\text{ g}$ )

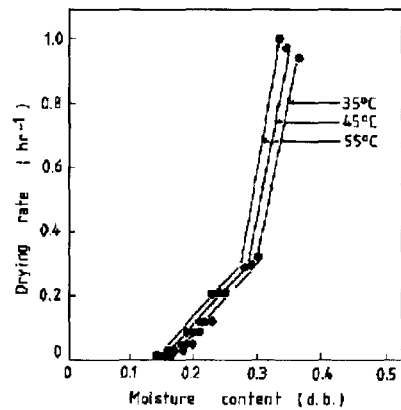


Fig. 6. Drying rate vs. moisture content at various air temperature for fluidized bed of husked barley. ( $b = 300\text{ g}$ ,  $U_0 = 3.0\text{ m/s}$ , RH = 30%)

러한 현상은 겉보리를 박층으로 하였기 때문에 항률건조기간이 없이 감률건조 단계로 진행되었다고 생각된다.

또한, Kim 등의 연구에서 쌀보리의 경우도 항률건조기가 없이 감률건조 1단계 및 감률건조 2단계로 진행한다고 보고하여 쌀보리와 겉보리는 비슷한 결과를 나타내었다<sup>(28)</sup>.

### 공기속도의 영향

충전량, 공기의 온도 및 상대습도를 각각 300 g, 35°C 및 30%로 고정하고 공기속도를 1.5 m/s, 2.0 m/s 및 3.0 m/s로 변화시킨 경우의 건조시간에 따른 수분함량의 변화 및 수분함량에 따른 건조속도를 Fig. 3과 4에 각각 나타내었다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 공기속도에 따른 수분함량의 감소에는 큰 차이가 없었다. 이는 Tojo와 Okamura<sup>(21)</sup>의 대두의 유동층 건조 특성에서 공기속도를 0.6~1.65 m/s로 변화시키면서 건조속도를 측정된 결과 큰 차이가 없었다고 보고한 바와 일치함을 알 수 있었다. 또 Umeda는 곡류의 유동화 처리법에 관한 연구에서 최소 유동화속도 이상에서는 Channeling이 발생

된다고 하였으며<sup>(26)</sup>, Hosokawa와 Motohashi도 소맥의 건조특성에서 건조속도에 미치는 공기속도의 영향은 없다고 보고하고 있다<sup>(20)</sup>.

Fig. 4는 항률건조기가 없이 바로 감률건조 1단계 및 2단계로 진행되며, 감률건조 1단계에서는 건조속도가 빠르나 감률건조 2단계에서는 건조속도가 완만함을 나타내었으며, 또 수분함량에 따른 건조속도에 미치는 공기속도의 영향은 거의 없음을 나타내고 있다. 이와 같은 현상은 건조후반기의 건조속도는 공기속도와 같은 외부조건보다는 고체내부의 수분이동조건에 지배되기 때문이라고 생각되는데, 이는 본 실험 결과와 Brennan 등의 보고<sup>(22)</sup>와 일치함을 알 수 있었다.

### 공기온도의 영향

충전량 300 g, 공기속도 3.0 m/s 및 상대습도 30%로 고정하고 입구의 공기온도를 35°C, 45°C 및 55°C로 변화시킬 때 시간에 대한 수분함량, 수분함량에 대한 건조속도 및 층내 온도변화를 Fig. 5, 6 및 7에 각각 표시하였다.

Fig. 5는 겉보리의 건조곡선을 나타낸 것으로 온도가 높을수록 건조속도가 빠름을 알 수 있으며, 수분함량을 16%(건

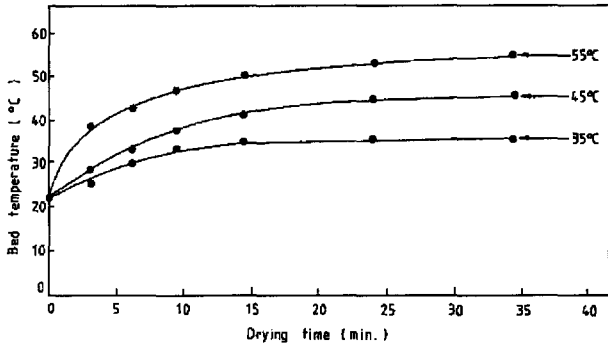


Fig. 7. Bed temperature vs. drying time at various inlet air temperature fluidized bed of husked barley. (b = 300 g,  $U_o = 3.0$  m/s, RH = 30%)

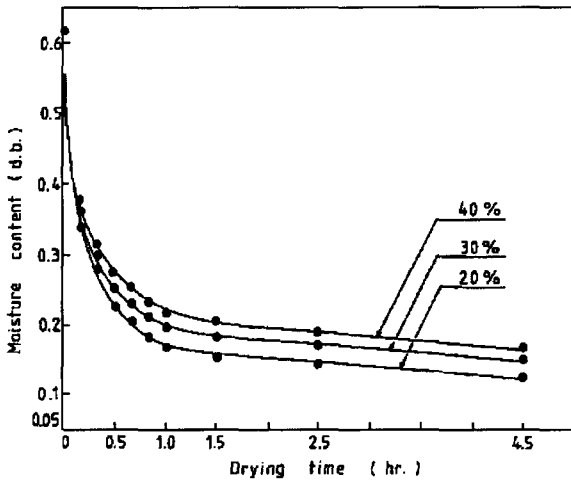


Fig. 8. Moisture content vs. drying time at various relative humidity for fluidized bed of husked barley. (b = 300 g,  $U_o = 3.0$  m/s,  $T_a = 35^\circ\text{C}$ )

물기준)까지 감소시키는데는 유입공기 35°C, 45°C 및 55°C에서 각각 145분, 80분 및 40분이 소요되어 쌀보리에 비해 약간 빠름을 알 수 있었다. 그러나 온도가 높을수록 건조는 빠르나 보리가 갈라지는 현상을 관찰할 수 있었고, 또한 영양분의 파괴가 예상되어 공기의 온도는 35°C가 적합할 것으로 생각된다. Iwamoto와 Chuma는 곡류의 유동층건조에서 40°C 이상의 온도에서는 평균건조속도가 3%/hr 정도로 크지만 동할미(胴割米)가 많이 생기기 때문에 온도가 가급적 낮은 30°C 정도에서 건조하면 건조속도는 2.5%/hr로 되고 동할률도 5% 이하로 억제시킬 수 있다고 보고하였다<sup>(24)</sup>.

Fig. 6은 겉보리의 유입 공기온도에 따른 수분함량에 대한 건조속도를 표시한 것으로 공기온도가 높을수록 건조속도가 상승되었으며, 항률건조기가 없이 감률건조 1단계 및 2단계로 구분되고 있다. Hosokawa와 Motohashi의 벼에 관한 연구에서도 항률건조기간이 매우 짧아서 엄밀히 항률건조기간이 불분명하다고 보고하였으며<sup>(20)</sup>, 또 Saravascos와 Charm 등의 과실과 야채의 건조기작에 관한 보고에서도 감률건조 기간이 두 단계로 구분된다고 하였다<sup>(16)</sup>. 본 연구에서도 항률건조기가 없이 바로 두단계의 감률건조기로 진행됨을 알 수 있었으며, 이들 불균일 물질은 내부 수분의 확산속도가 표면을

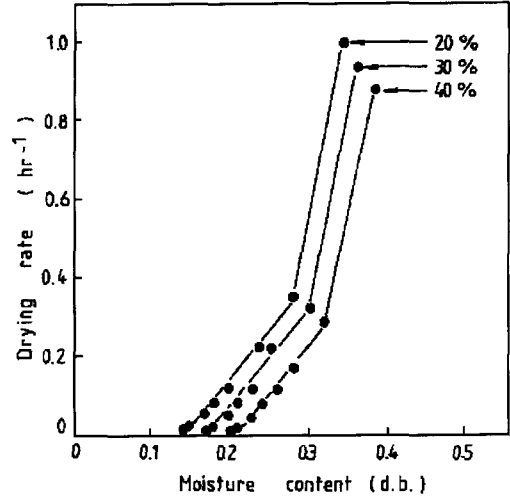


Fig. 9. Drying rate vs. moisture content at various relative humidity for fluidized bed of husked barley. (b = 300 g,  $U_o = 3.0$  m/s,  $T_a = 35^\circ\text{C}$ )

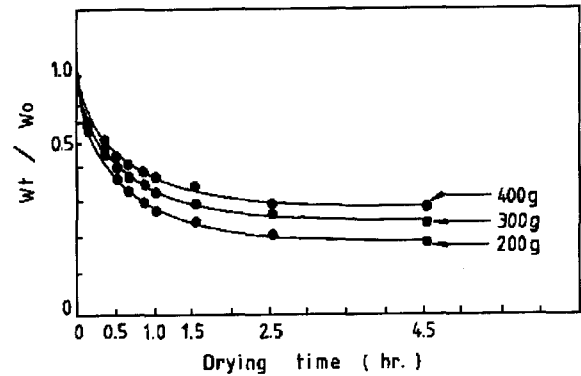


Fig. 10. In  $W/W_0$  vs. drying time at various charged amount for fluidized bed of husked barley. ( $T_a = 35^\circ\text{C}$ ,  $U_o = 3.0$  m/s, RH = 30%)

충분히 포화시켜줄 만큼 빠르지 못하기 때문에 물질표면 수증기압이 시간의 흐름에 따라 낮아지므로 항률건조기가 존재하지 않는다고 생각된다.

한편 Cho, Hur와 Kim의 근채류의 건조특성에 관한 연구에서 무우 및 고구마의 건조속도는 항률건조기 및 감률건조기로 나누어지고 감률건조기는 다시 감률건조 1단계와 2단계로 구분되어 나타났으며 감률건조 2단계는 다시 감률건조 2단계 a 및 b로 구분된다고 하였다. 이는 보리등 곡류와는 달리 수분을 충분히 함유한 얇은 섬유질 재료의 건조에 있어서는 4단계의 건조속도 구간이 나타날 수 있다고 보고하였다<sup>(27)</sup>.

Fig. 7은 겉보리의 유동층 내부공기의 시간에 따른 온도변화를 나타낸 것으로 건조초기부터 유동층 내부공기가 증가함을 볼 수 있는데 이것은 표면수분증발인 항률건조기가 매우 짧고 건조초기부터 입자내 수분확산인 감률건조기가 진행됨을 나타내고 있다. 이는 Hur와 Suh의 벼의 유동층 건조에 관한 실험 결과와도 잘 일치함을 알 수 있다<sup>(18)</sup>. 또 Pabis와 Henderson은 곡류건조 이론에서 공기와 곡류의 온도관계를 연구하기 위하여 공기온도를 71°C로 하고 곡류온도를 20°C

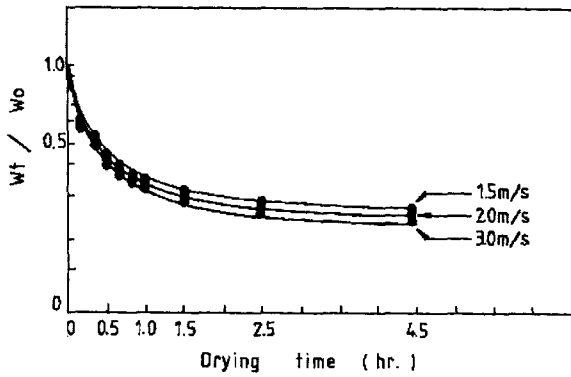


Fig. 11. In  $W_t/W_o$  vs. drying time at various air velocity for fluidized bed of husked barley. ( $T_a = 35^\circ\text{C}$ ,  $\text{RH} = 30\%$ ,  $W_b = 300\text{ g}$ )

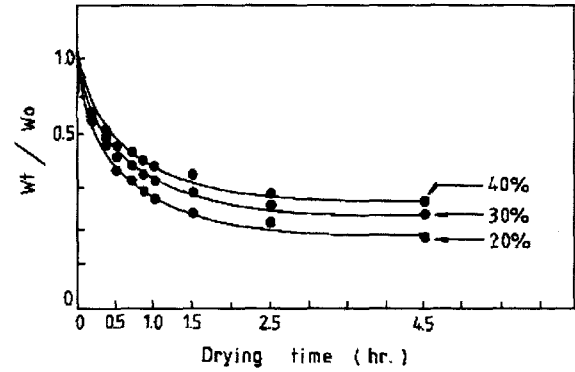


Fig. 13. In  $W_t/W_o$  vs. drying time at various relatively humidity for fluidized bed of husked barley. ( $T_a = 35^\circ\text{C}$ ,  $b = 300\text{ g}$ ,  $U_o = 3.0\text{ m/s}$ )

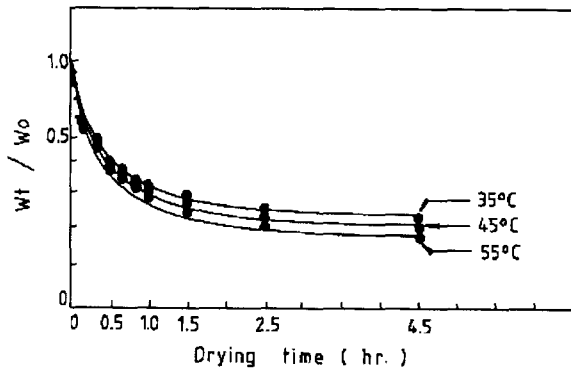


Fig. 12. In  $W_t/W_o$  vs. drying time at various air temperature for fluidized bed of husked barley. ( $\text{RH} = 30\%$ ,  $b = 300\text{ g}$ ,  $U_o = 3.0\text{ m/s}$ )

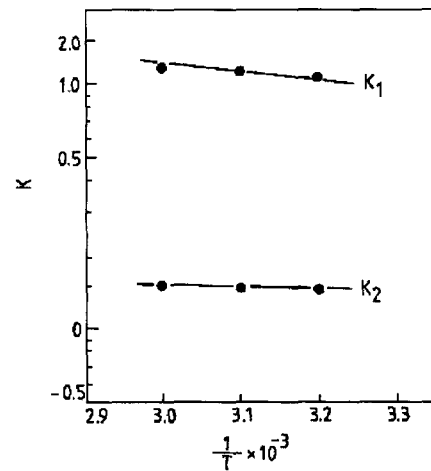


Fig. 14. In  $k$  vs. inverse of temperature on drying rate constant ( $k_1$ ,  $k_2$ ) of husked barley. ( $b = 300\text{ g}$ ,  $U_o = 3.0\text{ m/s}$ ,  $\text{RH} = 30\%$ )

로 하였을 때 초기부터 온도가 증가하여 30분 후에는 공기의 온도가 완만하게 증가한다고 보고하였으며, 본 연구에서도 초기부터 유동층이 공기온도가 증가함을 알 수 있었다<sup>(25)</sup>.

**상대습도의 영향**

충전량 300 g, 공기온도 35°C 및 공기속도 3.0 m/s로 고정하고 유입공기의 상대습도를 20%, 30% 및 40%로 변화시켰을 때 시간에 대한 수분함량 및 수분함량에 대한 건조속도를 Fig. 8과 9에 각각 표시하였다. Fig. 8은 겉보리의 건조시간에 따른 수분함량의 변화를 나타낸 곡선으로 상대습도가 낮을수록 수분함량의 감소가 컸으나 큰 차이는 없었다. Fig. 9는 겉보리의 건조곡선을 이용하여 건조속도곡선을 수분함량에 따라 도시한 결과로서 항률건조기가 없이 바로 감률건조 1단계, 감률건조 2단계로 진행됨을 알 수 있으며, 또한 상대습도가 낮을수록 건조속도가 큼을 나타내고 있다. 한편, 공기속도나 공기온도의 영향과 마찬가지로 상대습도의 영향 역시 Kim 등의 연구결과에서도 알 수 있듯이 쌀보리와 겉보리는 거의 비슷한 결과를 나타내었다<sup>(28)</sup>.

**건조속도상수**

건조속도 상수는 편의상 2구간, 즉 감률건조 1단계( $k_1$ ), 감률건조 2단계( $k_2$ )로 나누어 측정하였다. 건조시간에 따른 건조속도상수를 구하기 위해서 Shirai식<sup>(15)</sup>을 사용하여 반대수

방안지에 Plot한 결과를 Fig. 10-13에 나타내었고, 측정된 건조속도상수를 Table 2에 나타내었다. 여기서 보면 건조속도상수는 충전량이 적을수록, 공기속도가 클수록, 공기속도가 높을수록, 상대습도가 낮을수록 증가하였으며 또한 감률건조

Table 2. Drying rate constant of naked barley ( $\text{hr}^{-1}$ )

Drying variables	Drying constants	constants	
		$K_1$	$K_2$
Charged amount (g) <sup>a)</sup>	200	1.171	0.061
	300	1.049	0.053
	400	0.967	0.040
Air velocity (m/s) <sup>b)</sup>	1.5	0.967	0.040
	2.0	0.994	0.050
	3.0	1.049	0.053
Air temperature ( $^\circ\text{C}$ ) <sup>c)</sup>	35	1.049	0.053
	45	1.108	0.057
	55	1.273	0.068
Relative humidity (%) <sup>d)</sup>	20	1.171	0.061
	30	1.049	0.053
	40	0.967	0.040

1단계가 감율건조 2단계보다 높은 값을 나타내었다. 그리고 Kim<sup>(28)</sup> 등의 연구결과와 비교해볼 때 어느경우에서나 겉보리가 쌀보리 보다 건조속도 상수가 큰 것은 쌀보리는 찰보리로서 Pectin질 함량이 많으므로 쌀보리 내부의 수증기의 확산을 억제시키기 때문이라고 생각된다.

### 건조속도상수의 온도의존성

앞에서 구한 건조속도상수를 Arrhenius형의 방정식을 이용하여 plot한 결과를 Fig. 14에 표시하였으며, 그림에서 보는 바와 같이 직선관계를 잘 만족한다. 따라서 감률건조는 활성화 과정임을 알 수 있으며 이것은 감률건조 제 1 단계 및 제 2 단계가 확산을속단계임을 입증하고 있다. 이 직선의 기울기로부터 구한 활성화 에너지는 감률건조 제 1 단계 및 제 2 단계에서 각각 1,100 cal/gmol, 1,600 cal/gmol이었다<sup>(17)</sup>.

## 요 약

겉보리를 시료로 하여 건조조건을 다르게 하여 유동층 건조특성에 영향을 미치는 외부요인에 대해서 조사한 결과를 요약하면 다음과 같다. 겉보리의 유동층건조는 항률건조기가 없이 감률건조 1단계, 감률건조 2단계의 두 단계로 일어남을 알 수 있었다. 또한 건조속도상수는 충전량이 적을수록, 공기속도가 클수록, 공기온도가 높을수록, 상대습도가 낮을수록 컸으며, 감율건조단계에서 건조속도상수는 Arrhenius형의 plot에서 좋은 직선관계를 나타내어 이 단계가 활성화 과정임을 알 수 있으며, 감률건조 제1단계의 활성화 에너지는 1,100 cal/gmol, 감률건조 제2단계의 활성화 에너지는 1,600 cal/gmol을 각각 나타내었다.

## 감사의 글

본 연구논문은 김희연의 이학박사 학위논문의 일부로서 본 논문이 나올 수 있도록 지도하여 주 신 경상대학교 허종화 교수님, 부산대학교 송승구 교수님, 경상대학교 김성태 교수님과 지금은 고인이 되신 부산대학교 서길덕 박사님께 머리 숙여 깊은 감사를 드립니다.

## Nomenclature

- A: constant (-)  
 Cp: specific heat (kJ/kg<sup>o</sup> K<sub>0</sub>)  
 Dv: diffusivity of water vapor (m<sup>2</sup>/min.)  
 d: thickness of slab (m)  
 d.b.: dry basis (-)  
 Ea: activation energy (cal/gmol)  
 K, K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>: drying rate constant (1/hr)  
 K<sub>v</sub>: mass transfer coefficient (kg/m<sup>2</sup>hr)  
 k: thermal conductivity of air (W/m, hr)  
 R: gas constant (cal/mol, °K)  
 RH: relative humidity (%)  
 S: surface area (m<sup>2</sup>)  
 T: absolute temperature(°K)

- T<sub>a</sub>: air temperature (°C)  
 t: time (hr)  
 U<sub>o</sub>: air velocity in fluidized bed (m/s)  
 W: moisture content of dry basis of barley (-)  
 W<sub>c</sub>: critical moisture content (-)  
 W<sub>e</sub>: equilibrium moisture content (-)  
 W<sub>o</sub>: initial moisture content (-)  
 W<sub>s</sub>: moisture content at the surface (-)  
 W<sub>t</sub>: equilibrium moisture content at a drying time (-)  
 W<sub>b</sub>: charged amount (kg)  
 X: distance from centre of eligible dried substance (m)  
 U<sub>g</sub>: viscosity of gas (kg/m, s)  
 ρ<sub>g</sub>: fluid density (kg/m<sup>3</sup>)

## 문 헌

- Sherwood, T.K. The drying of solids(I), (II). Ind. Eng. Chem. 21(1),(10), 12, : 976 (1929)
- 保坂秀明, 食品工學入門, 化學工業社, 東京, pp. 144 (1972)
- Kamei, S. and Towe, R. Studies on drying shrinkage. J. Soc. Chem. Mach. Japan. 16(11): 372 (1952)
- 木村進, 體積收縮と表面硬化, 乾燥食品事典, 朝倉書店, 東京, pp. 168 (1984)
- Vojech Vanec, Miroslav Markuart and Rad Drbohlav, Fluidized-bed drying, Leonard Hill, (1966)
- Daizo Kunii and Octave Levenspiel. Fluidization Engineering, John Wiley and Sons, Inc. pp. 1-31 (1969)
- Kil, Yu. Ho, J. Ferment. Technol. 4(11): 704 (1970)
- Brennan, J.G., Butters, J.B., Cowell, N.D. and Lilly, A.E.V, Food Engineering Operations, Elsevier pub, Co. Ltd. pp. 264-265. (1969)
- Kim, H.Y., Hur, J.W. and Cho, D.J, Fluidization Study in the Fluidized Bed Drying of Naked and Husked Barley. Korean J. Food Sci. Technol. 24(5): 414 (1992)
- Kim, H. Y., Hur, J. W. and Suh, J. S, Study on the Drying Characteristics of Fluidized Bed Drying of the Barley. J. Ref. Air Con. 8(1): 317 (1989)
- Sherwood, T.K. The drying of solids I, II. Ind. Eng. Chem. 21(12): 976 (1929)
- Sherwood, T.K. Application of theoretical diffusion equations to the drying of solids. Trans. AIChE. 27: 190 (1931)
- 村田敏, Schumann의 式の展開とその農産物冷却に関する 2, 3, の應用, 九大農學會誌, 27: 257 (1973)
- Henderson, S.M. and Pabist, S. Grain drying theory. J. Agr. Engng. Res. 6: 169 (1961)
- Shirai, T., Fluidized beds, Kangaku-gijutsu-sha. pp. 68 (1958)
- Saravacos, G.D. and Charm, S.E. A study of the mechanism of fruit and vegetable dehydration. Food Tech. 16: 78 (1962)
- Yu, J.U., Yang, H.C., Jung, T.H. and Yang, R. Experiments in food science and engineering, Vol. II. Tamgudang, pp. 17 (1962)
- Hur, J.W. and Suh, K.D. Study on the Fluidized Bed Drying of Grains(I) Fluidization Characteristics of Rough Rice. J. Soc. Air Res. Engng. Korean. 13(3): 168 (1984)
- Park, K.S. Fluidized bed drying of adzuki bean. Graduate school Gyeongsang National University. (1983)
- Hosokawa, A. and Motohashi, K. Drying characteristics of a single grain of rough rice. J. Soc. Agr. Mach. Japan, 33: 53 (1971)
- Tojo, M. and Okamura, T. A study of drying of soybean-III. J. Soc. Agr. Mach. Japan, 29: 209 (1967)
- Brennan, J.G., Butters, T.R., Cowell, N.D. and Lilly A.E.V. Food engineering operations. 2nd. ed. Applied science pub., London. England, 313(1976)
- Cho, D.B., Kim, D.P. and Choi, C.S. Kinetics of drying shitake

- mushroom, *Lentinus edodes* sanryun No. 1. *J. Korean Soc. Food & Nutr.* 10(1): 53-60 (1981)
24. Iwamoto, M. and Y. Chuma, Study on a fluidized bed drying of cereal grains. Fluidization and drying characteristic. *J. Soc. Agr. Mach. Japan* 32(4): 322-327 (1971)
25. Pabis, S. and S.M. Henderson. Grain drying theory-III. *J. Agr. Engng. Res.* 7(1): 21-26 (1962)
26. Umeda, S. Fluidized processing of grains-1. *J. Soc. Agr. Mach. Japan* 32(2): 135-139 (1970)
27. Cho, D.J., Hur, J.W. and Kim, H.Y. Influencing Factors in Drying and Shrinking Characteristics of Root Vegetables. *Korean J. Food Sci. Technol.* 21(2): 203 (1989)
28. Kim, H.Y., Cho, D.J. Chung, G.H. and Hur, J.W. Drying Characteristics of Fluidized Bed Drying of Naked Barley. *Korean J. Food Sci. Technol.* 25(5): 558 (1993)

---

(2001년 7월 26일 접수)