

# 보리의 상온 통풍건조 시뮬레이션( I )

— 실험치와 예측치의 비교 —

## Simulation of Natural Air Drying of Barley

— Comparison of Experimental and Simulated Results —

금 동 혁\*, 이 선 덕\*  
D. H. Keum, S. D. Yi

### Summary

Four models in current use for cereal grain drying, equilibrium model, Morey model, partial differential equation model and simplified partial differential equation model, were modified to be suitable for natural air drying of barley.

The predicted by the four models and experimental results were compared.

Three models except equilibrium model predicted moisture content and grain temperature very well. But equilibrium model overpredicted moisture content and grain temperature of bottom layer.

The degree of prediction of the four models for relative humidities of exhaust air didn't differ much from one another and equally the four models predicted relative humidity satisfactorily.

Morey model took much shorter computing time than any other models.

Therefore, considering the degree of prediction and computing time Morey model was the most suitable for natural air drying of barley.

### I. 서 언

관행의 보리건조방법은 주로 천일건조방식으로 이  
는 상당한 노동력이 요구되며, 벼 이앙시기와의 노동  
경합, 강우나 쥐의 피해로 인한 질적, 양적 손실이 크  
므로 관행의 천일건조방법으로는 단기간내에 많은 양  
의 곡물을 저장 가능한 수준까지 건조시킬 수 없다.

곡물을 건조하는 데는 열풍건조방식과 상온통풍건  
조방식이 있으며, 현재까지 우리나라에 소개된 평면식  
이나 순환식 건조기는 모두 열풍건조방식에 속한다.

상온통풍건조방법은 열풍건조에 비하여 시설비용  
과 이용비용이 저렴하며 관리가 편리하고 곡물의 품  
질손상이 적은 잇점이 있는 반면, 기상조건의 제약을  
받는 단점이 있다.

이와 같은 상온통풍건조방법을 보리의 건조에 이용  
하기 위해서는 보리의 건조기간인 6월과 7월의 기상  
조건하에서 보리의 상온통풍건조가 가능한지를 판단  
할 필요가 있으며 또한 건조기 성능인자의 영향을 구  
명할 필요가 있다. 이를 위해서는 보리의 상온통풍건  
조과정을 해설할 수 있는 적절한 시뮬레이션 모델의  
개발이 우선되어야 한다.

본 연구는 보리의 상온통풍건조 시뮬레이션 모델을  
비교, 선정하기 위하여 수행되었으며, 그 구체적 목적  
은 다음과 같다.

1. 기존의 건조 시뮬레이션모델중 평형모델, Mo-  
rey모델, 편미분방정식 모델 및 축소편미분방정식모델  
을 보리의 상온통풍건조에 적합하도록 수정한 시뮬레  
이션 프로그램을 개발한다.

\* 성균관대학교 농과대학 농업기계공학과

2. 건조실험을 수행하여 상기의 모델의 타당성을 검증하고 적절한 모델을 선정한다.

## II. 시뮬레이션 모델

### 1. 평형모델

평형모델(equilibrium model)은 Bloome(1970)가 개발한 것으로 곡물의 후층을  $\Delta x$ 의 많은 박층으로 나누고, 이 박층에서 미소의  $\Delta t$ 시간 동안에 곡물과 공기 사이에 완전한 평형이 이루어 진다고 가정하고, 박층에서 일어나는 변화를 연속적으로 계산하여 이들을 조합함으로써 후층건조를 해석하는 건조모델이다.

평형모델은 박층에서 배출된 공기의 온도  $T_f$ 와 곡은  $G_f$ 가 같아지며, 배기와 곡물이 평형을 이룬다고 가정하고 있으므로, 기지의 향으로 초기함수율( $M_o$ ), 초기곡은( $G_o$ ), 유입공기온도( $T_o$ ) 및 절대습도( $H_o$ )가 주어지며, 계산이 요구되는 미지항은 배출공기의 온도( $T_f$ )와 절대습도( $H_f$ ), 건조후의 함수율( $M_f$ )이 된다. 따라서 요구되는 3개 방정식은 열 및 물질평형에 기초하여 유도되며, 다음과 같이 표시된다.

$$c_a T_o + (i_g + c_v T_o)H_o + R(1 + M_o) c_{po} T_o \dots (2-1)$$

$$= c_a T_f + (i_g + c_v T_f)H_f + R(1 + M_f) c_{pf} T_f$$

$$H_f - H_o = R(M_o - M_f) \dots (2-2)$$

$$ERH = RH_f \dots (2-3)$$

여기서  $c_a$  : 건공기의 비열(1.007 kJ/kg, K)

$c_v$  : 수증기의 비열(1.876 kJ/kg, K)

$c_{po}$  : 초기 곡물의 비열(kJ/kg, K, Wet grain)

$c_{pf}$  : 건조후 곡물의 비열(kJ/kg, K, Wet grain)

ERH : 곡물의 평형상대습도(소수)

$G_a$  : 건공기 유동율(kg/hr, m<sup>2</sup>)

$H_o$  : 유입공기의 절대습도

$H_f$  : 배출공기의 절대습도

$i_g$  : 물의 증발 잠열(kJ/kg)

$M_o$  : 초기 곡물함수율(소수, d.b.)

$M_f$  : 건조후 곡물함수율(소수, d.b.)

R : 건물 대 건공기 비( $\frac{\rho_p \Delta x}{G_a \Delta t}$ )

$RH_f$  : 배출공기의 상대습도(소수)

$T_o$  : 유입공기온도(°C)

$T_f$  : 배출공기온도(°C)

$\Delta t$  : 시간중분(hr)

$\Delta x$  : 곡물 박층 두께(m)

$\rho_p$  : 곡물 건물의 산물밀도(630kg/m<sup>3</sup>)

(2-1)식과 (2-2)식은 각각 열 및 물질 평형 방정식이며, (2-3) 식의 보리의 평형상대습도(Bowdes, et. al, 1983)와 배출공기의 상대습도(ASAE Standard, 1987)는 각각 다음 (2-4)식과 (2-5)식으로 표시된다.

$$ERH = 1.0 - \exp\{ (0.143 - 0.016 \ln(T_f) - M_f) / 0.079 \} \dots (2-4)$$

$$RH_f = \frac{P_{atm} H_f}{P_s(0.6219 + H_f)} \dots (2-5)$$

여기서  $P_{atm}$  : 대기압(kPa)

$P_s$  : 온도  $T_f$ 에서의 포화수증기압(kPa)

(2-1)~(2-3)식의 해는 Thompson 등 (1968)이 제안한 방법을 이용하여 구하였다.

### 2. Morey 모델

Morey 모델(Morey, et. al., 1981)은 평형모델에서 곡물과 송풍공기가 평형을 이룬다는 가정이 불합리한 경우가 있으므로 이를 수정하기 위하여 건조속도를 반영하는 박층건조 방정식을 도입한 수정평형모델이다.

Morey 모델에서  $M_f$ ,  $H_f$ ,  $T_f$ 를 구하는 방법과 같다.

1)  $H_o$  와  $T_o$ 를 이용하여 다음의 보리의 박층건조방정식(Bowdes, et. al., 1983)으로부터  $M_f$ 를 구한다.

$$M_f = (M_o - M_e) \exp(-kt) + M_e \dots (2-6)$$

여기서  $M_e$  : 평형함수율(소수, d.b.)

$$k = \exp\left(20.95 \frac{6942}{T_o + 273.16}\right)$$

2) (2-2)식으로부터  $H_f$ 를 구한다.

3) (2-1)식으로부터  $T_f$ 를 구한다.

### 3. 편미분방정식 모델

Bakker-Arkema(1974)에 의하여 개발된 건조 모델로 열 및 물질 평형에 기초하여 유도되었으며, 다음 식으로 표시된다.

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{-ha(T-\theta)}{G_a(c_a + c_v H)} \dots\dots\dots(2-7)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{ha(T-\theta)}{\rho_p(c_a + c_w M)} - \frac{h_{fg} + c_v(T-\theta)}{\rho_p(c_s + c_w M)} \cdot G_a \cdot \frac{\partial H}{\partial x} \dots\dots(2-8)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} = - \frac{\rho_p}{G_a} \frac{\partial M}{\partial t} \dots\dots\dots(2-9)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -k(M-M_e) \dots\dots\dots(2-10)$$

상기 방정식에서 초기 및 경계조건은 다음과 같다.

- $T(x,0) = \theta_0$
- $H(x,0) = H_{in}$
- $\theta(x,0) = \theta_0 \dots\dots\dots(2-11)$
- $M(x,0) = M_0$
- $T(0,t) = T_{in}$
- $H(0,t) = H_{in}$

- 여기서  $a$  : 보리의 비표면적(1508.5 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>)
- $c_a$  : 건조보리의 비열(1.398 kJ/kg, k)
- $c_w$  : 물의 비열(4.09KJ/kg, k)
- $h$  : 공기와 보리층 사이의 대류열전달 계수  
( $h=0.00718 G_a^{1.2997}$ )
- $h_{fg}$  : 보리수분의 증발잠열(kJ/kg, H<sub>2</sub>O)
- $H_{in}$  : 건조기 유입공기의 절대습도
- $T_{in}$  : 건조기 유입공기의 온도(℃)
- $\theta$  : 곡물 온도(℃)
- $\theta_0$  : 초기 곡온(℃)

상기 방정식의 해는 Von Rosenberg 등 (1977)의 유한차분법을 이용하여 구하였다.

### 4. 축소편미분방정식 모델

상온통풍건조는 열풍건조에 비하여 송풍온도가 현저히 낮고 송풍량이 대단히 적기 때문에 곡물층을

통과하는 공기의 온도와 곡물 온도가 같다고 가정할 수 있다. 공기와 곡물온도가 같으면 편미분방정식에서 이용된 4개의 편미분 방정식은 3개로 축소된다. 3개의 방정식은 다음 식으로 표시된다.(Rumsey, et al. 1984)

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{-G_a(c_a + c_v H)}{\rho_p(c_a + c_w M)} \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{G_a h_{fg}}{\rho_p(c_a + c_w M)} \frac{\partial H}{\partial x} \dots\dots(2-12)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} = - \frac{\rho_p}{G_a} \frac{\partial M}{\partial t} \dots\dots\dots(2-13)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -k(M-M_e)$$

상기 방정식의 해는 편미분방정식모델에서와 같은 방법으로 구하였다.

## III. 건조실험

### 1. 공시재료

본 상온통풍건조실험에서 사용된 시료는 을 보리로서 농촌진흥청 맥류연구소에서 1988년 6월 15일에 수확한 것으로 이물질을 제거한 후 천일명석건조를 하여 곡물의 함수율이 19.6(% , w.b.)에 이르렀을 때 본실험을 시작하였으며, 시료의양은 200kg으로 1회 실험을 수행하였다.

### 2. 실험장치

본 실험에 이용된 곡물빈은 그림 3-1과 같이 0.15cm

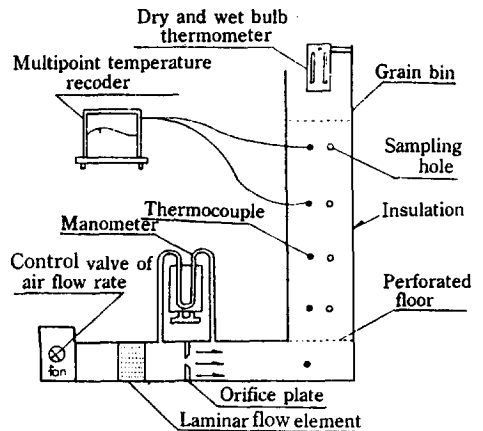


Fig. 3-1. Schematic diagram of barley drying experiment arrangement.

두께의 양철판으로 직경 60cm, 높이 120cm의 원통형 구조로 제작하였다. 밑 바닥에서 20cm 높이에 다공철판을 설치하였으며, 철판에서 부터 15, 30, 75, 105cm의 높이에 각각 시료 채취공(직경 2.5cm)을 설치하였다.

건조실험에 사용된 보리의 퇴적 두께는 1m 이었으며, 건조실험 중 일사의 영향을 배제하기 위하여 건조 장치를 실내에 설치하였다.

### 3. 측정 방법

#### 1) 함수율의 측정

곡물빈의 다공철판으로부터 15, 45, 75, 105cm 높이에 있는 각종의 곡물을 15g 씩 채취봉으로 1일 3회 채취하였다. 보리의 함수율은 정도 0.00001g 의 디지털 전자저울을 사용하여 건조 oven에 의한 130℃ 정온법으로 측정하였다.

#### 2) 송풍량의 측정

곡물빈에 부착된 송풍기의 송풍량은 KSA 0612, KSB 6311의 송풍기의 시험 및 검사방법에 따라 직경 20cm, 길이 3.85m 의 원형관에 오리피스판을 설치하여 측정하였다.

실험중에 송풍량을 일정하게 유지하기 위하여 액주계의 수주차가 일정하게 유지되도록 송풍기 입구에 설치한 풍량조절판을 미세하게 조정하였다.

#### 3) 곡온 및 공기의 온도와 습도 측정

thermocouple, multi-point temp. recorder를 사용하여 곡온과 외기 및 plenum chamber의 온도를 측정하였다. 배출공기의 온도와 습도는 정도 0.2℃ 의 건습구 온도계를 이용하여 측정하였다.

### 4. 건조조건

건조실험에 사용된 건조조건은 표 3-1과 같다.

외기는 송풍기 및 송풍량 측정관을 통과하면서 온도가 평균 3.82℃ 증가한 상태로 건조실로 유입되었다.

Table 3-1. Grain and air conditions used in validation test.

Variety of barley	Olbori
Initial moisture content(% , w.b.)	19.6
Initial grain temperature (℃)	22.0
Initial grain bed depth(m)	1.0
Airflow rate(m <sup>3</sup> /min.m <sup>2</sup> )	4.21
Temperature rise of inlet air due to fan (℃)	3.82

## IV 결과 및 고찰

### 1. 실험치와 예측치의 비교

#### 가. 곡물의 함수율

건조실험에서 얻은 평균함수율과 각 모델의 시뮬레이션에서 얻은 예측평균함수율을 비교한 결과는 그림 4-1과 같다.

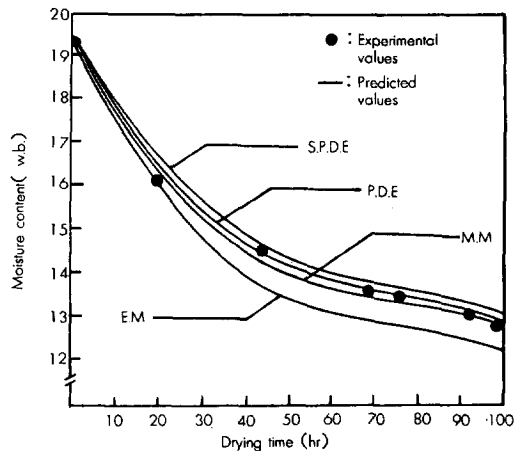


Fig. 4-1. Comparison of the experimental and predicted average moisture content (E.M ; Equilibrium Model, M.M ; Morey Model, P.D.E ; Partial Differential Equation Model, S.P.D.E ; Simplified Partial Differential Equation Model).

그림에서와 같이 평형모델에서는 평균함수율이 실험치보다 훨씬 낮게 나타났으며, 다른 3가지 모델에서

는 거의 비슷한 경향을 나타냈으나, Morey 모델, 편미분방정식모델, 축소편미분방정식모델 순으로 예측치가 약간 증가하였다.

평형모델에서 예측치의 값이 현저하게 낮은 현상은 곡물층의 통과 공기와 곡물이 완전한 평형을 이룬다는 가정이 송풍량이 많은 경우와 곡물의 하층에서는 성립되지 않기 때문인 것으로 해석된다.

실험치와 예측치의 평균함수율의 차이는 평형모델에서 최대 0.66%, w.b., 축소미분방정식모델에서 0.58%, w.b.로 나타났다.

그림 4-2는 수평축에 Morey 모델에 의한 각 곡물층에서의 예측함수율을, 수직축에 실험함수율을 찍지어 나타낸 것이다. 예측치와 실험치가  $Y=X$ 의 직선상에 나타내어지면 예측치와 실험치가 잘 일치하는 것으로 판단할 수 있다.

표 4-1은 각 모델에 의한 예측치와 실험치의 직선회귀분석 결과를 나타낸 것이다.

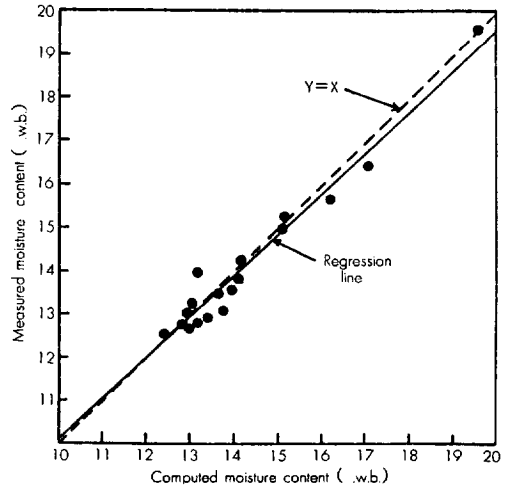


Fig. 4-2. Comparison of the moisture content for measured versus computed values by Morey model.

Table. 4-1. Summary of regression comparison for computed versus measured average moisture content.

Model*	Intercept	Slope	r <sup>2</sup>	Se	95% confidence intervals	
					Intercept	Slope
M.M	0.38	0.95	0.945	0.29	-1.67 to 1.29	0.9 to 1.22
P.E.D	0.70	0.96	0.980	0.26	-2.06 to 1.19	0.81 to 1.11
S.P.E.D	0.64	0.97	0.948	0.28	-1.77 to 1.16	0.90 to 1.20
E.M	0.37	1.10	0.925	0.83	-0.79 to 0.91	0.93 to 1.23

- \* M.M : Morey model
- P.E.D : Partial differential equation model
- S.P.E.D : Simplified partial differential equation model
- E.M : Equilibrium model

표에서와 같이 평형모델의 r<sup>2</sup>가 0.925인 반면, 다른 3모델에서는 0.945~0.980의 높은 값을 나타냈으며, 표준오차는 평형모델이 다른 3모델의 3배가 넘는 0.83%, w.b.로 나타났다. 따라서 함수율의 예측정도는 평형모델이 가장 낮으며, 다른 3모델에서는 비슷하게 높은 정도를 나타낸 것으로 판단할 수 있다.

#### 나. 곡물의 온도

그림 4-3은 15cm, 45cm, 75cm 곡물층에서의 곡물의 온도(곡물층의 통과공기의 온도)의 실험치와 Morey model에 의한 예측치를 나타낸 것이다. 다른 모델에서도 비슷한 모양을 나타냈다.

곡물온도의 예측치와 실험치의 차이는 Morey mo-

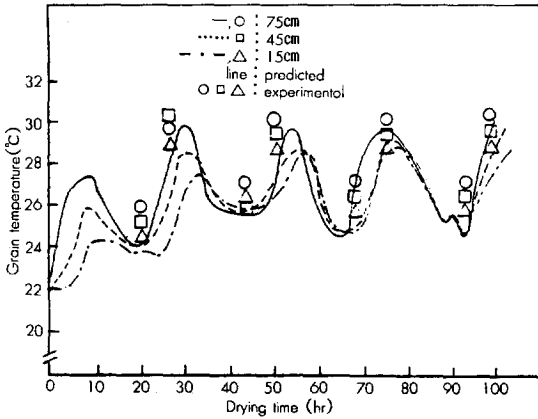


Fig. 4-3. Comparison of the experimental and predicted grain temperature. (Morey model)

del의 경우 0.2~1.4°C, 편미분방정식 모델의 경우 0.16~3.98°C, 축소편미분방정식의 경우 0.02~4.37°C로 예측치가 실측치보다 모두 약간 낮은 값을 나타내었

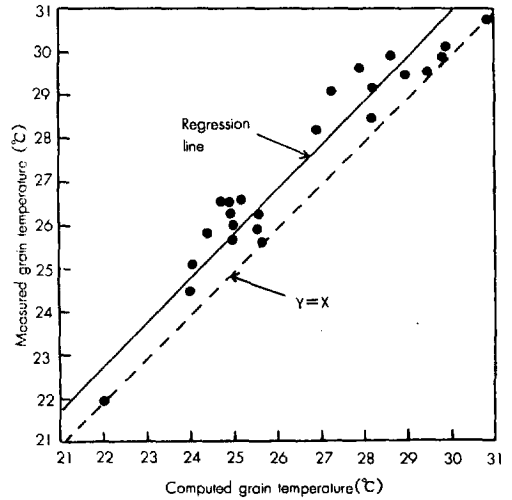


Fig. 4-4. Comparison of the grain temperature for measured versus computed values by Morey model.

Table 4-2. Summary of regression comparison for computed versus measured grain temp.

Model	Intercept	Slope	r <sup>2</sup>	Se	95% confidence intervals	
					Intercept	Slope
M.M	0.30	1.02	0.927	0.657	-3.38 to 2.77	0.86 to 1.09
P.E.D	0.87	1.00	0.934	0.645	-4.48 to 2.75	0.87 to 1.13
S.P.E.D	1.06	0.93	0.924	0.662	-0.33 to 1.79	0.90 to 0.95
E.M	-2.01	1.12	0.921	3.210	-2.61 to 4.21	1.01 to 1.23

- \* M.M : Morey model
- P.E.D : Partial differential equation model
- S.P.E.D : Simplified partial differential equation model
- E.M : Equilibrium model

으나, 비교적 잘 일치하는 것으로 판단할 수 있다.

평형모델에서는 15cm 곡물층에서는 예측치보다 훨씬 낮게 나타났으며, 상층으로 갈수록 이러한 현상이 반전되었다. 예측치와 실측치의 차이는 -4.21~5.37°C로 다소 크게 나타났다.

그림 4-4는 수평축(x축)에 Morey모델에 의한 각 곡물층에서의 예측곡온을, 수직축(Y축)에 실측곡온을 찍지어 나타낸 것이다.

표4-2는 각 모델에 의한 실측치와 예측치의 직선 회귀분석 결과를 나타낸 것이다.

표에서와 같이 4모델에서 기울기는 1.00~1.12 범위이며 r<sup>2</sup>는 0.921~0.934의 범위로 직선성을 잘 나타내어 주고 있으나, 평형모델의 경우 절편의 값이 크게 나타났으며, 표준오차가 3.21°C로 다른 3모델에 비하여 4.8배 정도의 큰 값을 나타내었다. 따라서 곡온의 예측정도는 평형모델이 가장 낮으며, 다른 3모델은 비슷한 것으로 판단할 수 있다.

다. 배출공기의 상대습도

그림 4-5는 배출공기의 상대습도의 실측치와 Morey 모델에 의한 예측치를 나타낸 것이다. 다른 3모델에서도 이와 비슷한 경향을 나타내었다. 배출공기의

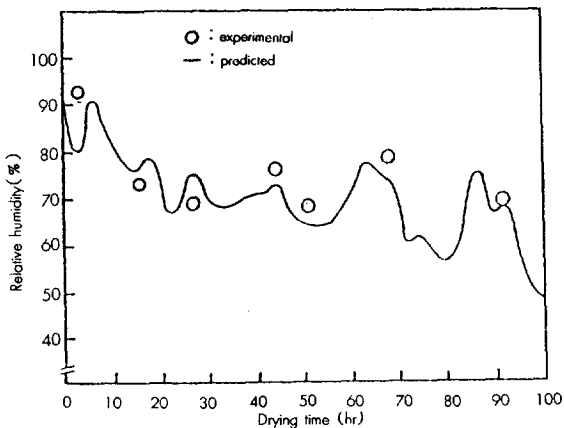


Fig.4-5. Comparison of the experimental and predicted relative humidity exhaust air (Modified equilibrium model).

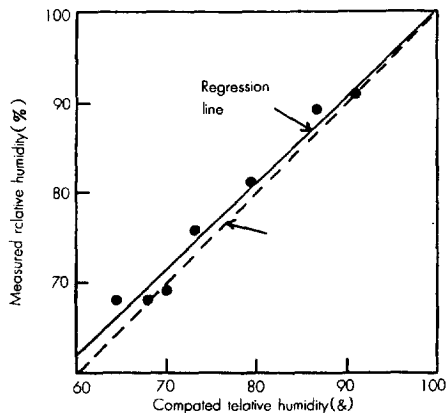


Fig. 4-6. Comparison of the relative humidity of exhaust air for measured versus computed values by Morey model.

상대습도의 실험치와 예측치의 차이는 Morey모델에서 -1.13~4.24%, 편미분방정식모델에서 -6.18~3.96%, 축소편미분 방정식모델에서 -6.24~4.37%, 평형모델에서 2.25~6.27%로 나타났다. 4모델 공히 비슷한 정도를 나타내었다.

그림 4-6은 Morey 모델에 의한 배출공기의 예측상대습도를 X, 실측상대습도를 Y로 나타낸 것이며, 표 4-3은 각 모델에 대하여 회귀분석한 결과이다.

Table 4-3. Summary of regression comparison for computed versus measured exhaust air relative humidity.

Model *	Intercept	Slope	r <sup>2</sup>	Se	95% confidence intervals	
					Intercept	Slope
M.M	5.63	0.945	0.952	2.272	-26.70 to 21.38	0.70 to 1.32
P.E.D	4.32	0.93	0.835	4.181	-27.70 to 36.34	0.51 to 1.36
S.P.E.D	4.89	0.92	0.828	4.243	-26.91 to 32.14	0.71 to 1.88
E.M	-2.01	1.12	0.921	3.210	-2.61 to 4.21	1.01 to 1.23

표에서와 같이 Morey 모델의 경우가 표준오차가 가장적은 2.27% 정도인데 반해 다른 3모델에서는 4%가 약간넘는 값을 나타내었다. 이와같은 정도는 상당히 높은 예측정도를 나타낸 것으로 판단할 수 있다.

2. 계산시간

4개의 모델의 시뮬레이션 프로그램에서 곡물층의 두께 증분 Δx는 공히 0.1m로하였으며, 시간 증분 Δ

Table 4-4. Comparison of computer running time for simulating 100 hour-drying

Model	Computing time(sec.)
Equilibrium model	46
Morey model	31
Partial differential equation model	385
Simplified partial differential equation model	193

t는 평형모델과 Morey모델에서는 기상자료의 이용이 쉬운 3시간으로 하였다.

편미분방정식 모델과 축소편미분방정식 모델에서  $\Delta t$ 는 먼저  $\Delta x$ 를 0.1m 로 고정하고,  $\Delta t$ 의 값을 0.025 시간으로부터 2배로 증가시켜가며 시뮬레이션을 수행하여 결과치가 변화하지 않는 최대의 값을  $\Delta t$ 로 정하였다. 편미분방정식모델에서는 0.1시간, 축소편미분방정식모델에서는 0.2시간이 적절하였다.

표 4-4는 100시간 건조를 수행 할 경우에 각 모델의 계산시간을 비교한 것으로, 사용한 컴퓨터는 IBM PC /AT이다.

표에서와 같이 Morey 모델이 31초로 가장 적은 시간이 소요되었으며, 편미분방정식 모델이 가장 많은 385초가 소요되었다.

### V. 결론 및 요약

곡물건조 시뮬레이션에 많이 이용되는 평형모델, Morey 모델, 편미분 방정식 모델 및 축소편미분방정식 모델 중에서 보리의 상온 통풍 건조에 가장 적합한 모델을 선정하기 위하여 이들 4개의 모델을 보리의 상온 통풍 건조에 적합하도록 수정한 프로그램을 개발하고, 건조 실험을 통하여 이들 모델의 정도와 컴퓨터 계산 시간을 비교하였다.

Morey 모델, 편미분방정식 모델 및 축소편미분방정식 모델은 모두 곡물의 함수율 및 곡온을 잘 예측할 수 있었으나, 평형모델의 예측정도는 다른 3모델에 비하여 떨어졌다. 배출공기의 상대습도는 4모델 공히 비슷한 예측정도를 나타내었다. 정도를 고려할때 평형모델은 부적합한 것으로 판단되었다.

컴퓨터 계산시간은 Morey 모델이 비슷한 예측정도를 나타낸 편미분방정식 모델의  $\frac{1}{12.5}$ , 축소편미분방정식 모델의  $\frac{1}{6.2}$  이 소요되므로서 가장 짧은 계산시간을 나타내었다.

예측정도와 컴퓨터 계산 시간을 고려할때 보리의 상온 통풍 건조 모델로 Morey 모델이 가장 적합한 것으로 나타났다.

### 참 고 문 헌

1. Bakker-Arkema, F.W., L.E.Lerew, S.F.Deboer, and M.G.Roth. 1974. Grain Dryer Simulation. Michigan State University Agricultural Experiment Station Research Report NO. 224
2. Bloome, P.D., 1970. Simulation of Low Temperature Drying of Shelled Corn Leading to Optimization. Ph. D. Thesis. Univ. Illinois.
3. Bowed, P.J., W.J.Lamond, and E.A.Smith. 1983. Simulation of Near-ambient Grain Drying. J.Agric. Engng Res. 28, pp279-300
4. Morey, R.V., H.A.Cloud, and D.J.Hansen. 1981. Ambient Air Wheat Drying. Trans. of the ASAE, Vol.24, NO.5, pp1312-1316
5. Rumsey, T., J.Thompson, 1984. Ambient Air Drying of English Walnuts. Trans. of the ASAE Vol. 27,110. 3, pp.942-945
6. Thompson, T.L, R.M.peatr. 1968. Useful Search Techniques to Save Research Time, Trans. of the ASAE, pp 461-467
7. Von Rosenberg, D.U., R.P. Chambers, and G.A. Swan. 1977. Numerical Solution of Surface Controlled Fixed bed Adsorption. Ind. Eng. Chem., Fundamentals 1 : 154