

시뮬레이션에 의한 散物 貯藏 벼의 溫度, 含水率 및 品質變化의 豫測

Prediction of Temperature, Moisture Content and Quality Changes in Stored Bulk Rough Rice.

琴 東 赫*, 金 在 烈**
D. H. Keum, J. Y. Kim

Summary

A numerical model was developed to predict grain temperature, moisture content, and drymatter loss of rough rice in a grain storage bin.

This model simulated conduction, natural convection, and mass transfer occurring inside a storage bin.

The results obtained from the study were as follows.

1. The predicted results agreed well with the measured results.
2. Rough rice could be stored safely for one year in Suweon, Dajeon, and Jingu area.
3. Aeration of 5-day was required to control grain temperature and moisture content rise early in Jun and July, respectively.

1. 緒 論

현재 우리나라의 농가 단위의 수확-건조-저장-도정 시스템에는 상당량의 곡물손실이 지적되고 있으며, 이러한 손실을 줄이고 효과적인 에너지 및 노동력관리를 위하여 마을 또는 지역 단위 혹은 도정공장 중심의 종합적인 미곡의 건조 및 저장시설 도입의 타당성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

이러한 연구에서는 산물유통의 타당성을 지적하고 있으며, 저장시설로 30~100평 규모의 산물 저장 평창고와 원통형 빈을 추천하고 있다(박, 1986). 더우기 건조와 저장을 겸하는 개량 곳간이 85년말 현재 2만 여동이 보급되고 있는 실정이다.

벼를 산물로 4개월내지 1년간 장기 저장할 경우 지역적인 기상조건, 저장고의 특성(형태, 크기, 벽의 재료 등), 통풍방법등이 곡물의 품질에 영향을 주게 된다.

저장곡물의 품질에 영향을 주는 미생물의 발생 및 성장속도는 저장곡물의 온도와 함수율에 가장 크게 좌우된다. 따라서, 곡물의 안전 저장을 위해서는 곡물의 온도와 함수율을 일정 수준 이하로 유지하여야 한다.

저장곡물의 온도는 기상조건 특히 기온의 계절적 변화에 따라 변하게 되며 저장고 내의 위치에 따라 다르게 된다. 이러한 불균일한 온도분포는 자연 대류현상을 유발하고 수분이동을 야기시킨다. 이러한 수분이동은 국부적으로 함수율증가와 응축현상을 초래하여 곡물의 품질을

* 본 논문은 한국과학재단의 '88년도 연구비 지원에 의하여 수행 되었음. (과제번호 881-1501-004-1)

* 성균관대학교 농업기계공학과 교수

** 상주산업대학 농업기계공학과 부교수

손상시키게 된다.

따라서 안전저장을 위해서는 환경조건의 변화에 따른 곡물의 온도와 함수율 및 품질변화, 저장고 내의 상태변화를 이론적으로 분석하여 예측할 수 있어야 한다.

그러나 아직 우리나라의 지역적인 기상조건하에서 벼를 산물저장할 경우 안전저장을 위한 저장고의 설계자료, 통풍방법 및 벼의 품질변화에 대한 연구가 미진한 실정이다.

따라서 본 연구의 목적은 다음과 같다.

- 가. 외기조건 및 저장고내의 자연대류 현상에 기인한 저장벼의 온도, 함수율 및 품질변화를 예측할 수 있는 수학적 모델과 시뮬레이션 프로그램을 개발한다.
- 나. 벼 저장실험을 수행하여 저장벼의 온도 및 함수율을 측정하여 시뮬레이션 모델을 검증한다.
- 다. 지역적 기상조건 및 통풍방법의 영향을 분석한다.

2. 수학적 모델

1. 기본 방정식

곡물저장고 내에서의 자연대류에 의한 공기의 유동속도 u, v 와 공기의 절대습도 H , 곡온 T , 곡물의 함수율 M 의 변화를 예측하기 위해서는 5개의 기본 방정식이 필요하다.

그림 2-1과 같이 길이 L , 높이 H 인 곡물저장고의 경우 5개의 기본 방정식 중 u, v, H 및 T 의

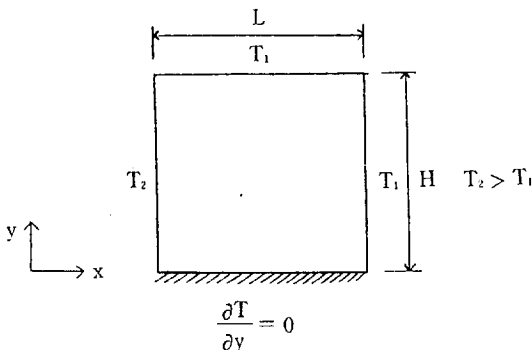


Fig. 2-1 Schematic of numerical model.

변화에 대한 방정식은 운동량 보존의 법칙, 에너지 보존의 법칙 및 질량보존의 법칙을 적용하여 구할 수 있으며, 함수율 변화는 수분확산 방정식으로 표시할 수 있다.

가. 운동 방정식

투과율 K_0 , 공극율 ϵ 의 곡물층에서의 공기의 운동방정식은 (1)식 및 (2)식으로 유도된다.

$$\frac{1}{\epsilon} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{\epsilon^2} (u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}) = -\frac{1}{\rho_l} \frac{\partial P^*}{\partial x} - v \frac{u}{k_0} \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{1}{\epsilon} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{\epsilon^2} (u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P^*}{\partial y} - \beta g(T - T_0) - v \frac{v}{k_0} \dots\dots (2)$$

여기서

- g : 중력 가속도 (m/s^2)
- k_0 : 곡물층에서의 공기의 투과율 (m/s)
- P^* : 변동 압력 (P_s)
- u : x방향의 속도 성분 (m/s)
- v : y방향의 속도 성분 (m/s)
- T : 공기의 온도 ($^{\circ}C$)
- T_0 : 공기의 초기온도 ($^{\circ}C$)
- t : 시간 (s)
- ρ_l : 공기의 밀도 (kg/m^3)
- ϵ : 곡물층의 공극율
- β : 공기의 열팽창 계수 (k^{-1})
- v : 공기의 동 점성계수 (m^2/s)

나. 에너지 평형 방정식

곡물층내에서의 곡온과 주위 공기의 온도가 같다고 가정하고, 곡물의 호흡열을 라고 할 때 에너지 평형 방정식은 다음의 (3)식으로 유도된다.

$$(\rho c)_e \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho c)_l (u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y}) = k_c (\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}) + q + \rho_s (1 - \epsilon) h_{fg} \frac{\partial M}{\partial t} \dots\dots\dots (3)$$

여기서

- $(\rho c)_e$: 유효 열용량 ($\epsilon \rho_i c_i + (1 - \epsilon) \rho_s c_s$)
($J/m^3 K$)
- c_i : 공기의 비열 ($= c_{a_i} + c_{v_i} H$) ($J/kg K$)
- c_s : 곡물의 비열 ($J/kg \cdot K$)
- ρ_s : 곡물의 밀도 (kg/m^3)
- k_e : 유효 열전도율 ($\epsilon k_i + (1 - \epsilon) k_s$)
($W/m k$)
- k_i : 공기의 열전도율 ($w/m K$)
- k_s : 곡물의 열전도율 ($w/m K$)
- h_{st} : 곡물의 수분 증발 잠열 ($kJ/kg - 수분$)
- M : 곡물의 함수율 (d.b.)
- q : 곡물의 호흡열 ($J/m^3 \cdot s$)

다. 수분 평형 방정식

곡물층내에서의 확산에 의한 수분전달과 대류에 의한 수분전달을 고려하면 수분평형 방정식은 다음의 (4)식으로 유도된다.

$$\epsilon \frac{\partial H}{\partial t} + u \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial H}{\partial y} = \epsilon D_{fc} \left(\frac{\partial^2 H}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial Y^2} \right) - \gamma \frac{\partial M}{\partial t} \dots \dots \dots (4)$$

여기서

- D_r : 공기중에서의 수증기 확산 계수 (m^2/s)
- f_c : 수정계수 (0.4)
- H : 공기의 절대습도 ($kg - 수분/kg - 건공기$)

$$\gamma = \rho_s (1 - \epsilon) / \rho_i$$

상기의 (1)~(4)식을 무차원 형태로 표시하기 다음의 무차원 변수를 정의하였다.

$$X = \frac{x}{L}, \quad Y = \frac{y}{L}$$

$$\theta = \frac{T - T_0}{\Delta T}, \quad \tau = \frac{vt}{L^2}$$

$$U = u \frac{L}{v}, \quad V = v \frac{L}{v}$$

$$P' = \left(\frac{L^2}{\rho v^2} \right) P'', \quad P_r = \frac{v}{\alpha}$$

$$Gr = \frac{g \beta L^3 \Delta T}{v^2}, \quad R_a = Pr \cdot Gr$$

(1)~(4)식의 앞의 정의에 의하여 무차원 형태로 표시하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{\epsilon} \frac{\partial U}{\partial \tau} + \frac{1}{\epsilon^2} \left\{ U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} \right\} = - \frac{\partial P'}{\partial X} - L^2 \frac{U}{K_o} \dots \dots \dots (5)$$

$$\frac{1}{\epsilon} \frac{\partial U}{\partial \tau} + \frac{1}{\epsilon^2} \left\{ U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} \right\} = - \frac{\partial P'}{\partial Y} - G_r \cdot \theta - L^2 \frac{V}{K_o} \dots \dots \dots (6)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + \sigma \left\{ U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right\} = \frac{\sigma}{Pr} \left\{ \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right\} + \frac{\sigma L^2 q}{(\rho c)_i v \Delta T} + \frac{\sigma \rho_s (1 - \epsilon)}{(\rho c)_i \Delta T} \frac{\partial M}{\partial \tau} \dots \dots \dots (7)$$

$$\epsilon \frac{\partial H}{\partial \tau} + U \frac{\partial H}{\partial X} + V \frac{\partial H}{\partial Y} = \frac{\epsilon D_{fc}}{v} \left\{ \frac{\partial^2 H}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial Y^2} \right\} - \gamma \frac{\partial M}{\partial \tau} \dots \dots \dots (8)$$

- 여기서 G_r : Grashop 수
- P_r : Prandtl 수
- R_a : 수정 Rayleigh 수
- $\sigma = (\rho c)_i / (\rho c)_e$
- α : 열 확산계수 (m^2/s)
- γ : 동점성 계수 (m^2/s)

라. 건조 방정식

저장고내에서의 곡물의 함수율 변화를 수분확산에 기인하는 것으로 간주하면 다음 식으로 표시할 수 있다. (Steffe and Singh, 1980)

$$\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left(- \frac{n^2 \pi^2}{a^2} Dt \right)$$

여기서

- M : 건량 기준 함수율 (소수)
- M_e : 평형 함수율 (d.b., 소수)
- a : 곡물의 상당구반경 (m)
- D : 수분확산계수 (m^2/hr)

계산의 편의를 위하여 상기식의 제1항만을 고려하면 건조 방정식은 다음 (9)식으로 표시한다.

$$\frac{dM}{dt} - D \left(\frac{\pi}{a} \right)^2 (M - M_e) \dots\dots\dots (9)$$

여기서 $D(m^2/hr)$ 는 수분확산계수로 다음(10)식으로 표시한다.

$$D = A \cdot \exp(B/T_k) \dots\dots\dots (10)$$

단립중 벼의 경우 $A = 33.6$, $B = -6420$ 이며
현미의 경우 $A = 0.141$, $B = -4350$ 이다(Steffe and Singh, 1980)

여기서
 y = 건물중량손실율(소수)
 t = 저장시간(hr)
 $k = A \cdot \exp\{D \cdot (1.8 T - 28)\} \cdot \exp\{E \cdot (M - 0.14)\}$
 M = 함수율(소수, w.b.)
 $A = 9.976 \times 10^{-6}$
 $C = 0.6540$
 $D = 0.03756$
 $E = 33.61$

호흡열은 다음 (8)식으로 표시할 수 있다.

$$q = 15,740 K C t^{-1} (1-y) [kJ/kg \text{ drymatter, hr}]$$

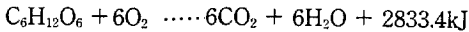
$$= 15.740 \rho_s (1-\epsilon) K C t^{-1} (1-y) [kJ/m^3 \cdot hr] \dots\dots\dots (12)$$

2. 기타 관련 방정식

가. 저장곡물의 품질과 호흡열

곡물을 저장할 때 일어나는 품질저하의 정도는 저장중에 호흡에 의해 발생한 건물중량손실율로 판단할 수 있다.

곡물의 호흡은 탄수화물이 분해되어 이산화탄소와 물 및 열이 발생하는 과정으로 다음과 같이 표시된다.



윗식에서 알 수 있는 바와 같이 탄수화물(건물) 1g이 분해하면 1.47g의 이산화탄소와 0.6g의 물 및 15.47kJ의 열이 발생하게 되므로 곡물저장중에 발생하는 이산화탄소의 양이나 열량을 측정하여 건물 중량 손실율을 계산할 수 있다.

벼의 건물중량손실은 다음 (11)식으로 표시된다. (Seib, et. al., 1980)

$$y = 1 - \exp(-kt^c) \dots\dots\dots (11)$$

나. 평형 함수율 방정식

평형 함수율 방정식은 Kato(1985)의 단립중 벼에 대한 실험자료를 식(13)과 식(14)의 Chungpfof의 방정식에 적합하도록 상수값을 정하여 이용하였다.

$$ERH = \exp\left(\frac{-A}{1.987(T+C)} \cdot \exp(-B M_e)\right) \dots\dots (13)$$

$$M_e = E - F \ln(-1.987 (T+C) \ln ERH) \dots\dots (14)$$

여기서
 ERH = 평형상대습도(소수)
 M_e = 평형함수율(소수, d.b.)

상수 A, B, C, E, F의 값은 표 1-1과 같다.

Table 1-1. Constants in Eqn (13)and Eqn (14)

		Constants					RMSE R H (%)
		A	B	C	E	F	
Rough rice	Desorption	940.84	16.724	56.190	0.409396	0.059794	1.68
	Adsorption	1741.87	18.796	123.297	0.397048	0.053204	1.60
Brown rice	Desorption	995.74	16.766	54.068	0.411765	0.059646	1.60
	Adsorption	1807.16	19.140	109.260	0.391832	0.052248	1.68

다. 벼와 공기의 열 및 물성값

분석에 사용한 벼와 공기의 열 및 물성값은 각각 표 1-2 및 표 1-3과 같다.

곡물층에서의 공기의 투과율 K_0 는 입상 농산물의 퇴적층에서의 공기 흐름에 대한 Ergun 방정식과 Darcy의 방정식을 비교하여 다음 (15)식으로 산출하였다.

Table 1-2. Physical and thermal Properties of rough rice

Bulk density of dry grain	$\rho_s(\text{kg/m}^3)$	550
Void fraction	ε (decimal)	0.45
Thermal conductivity	$k_s(\text{W/mk})$	0.117
Specific heat	$c_s(\text{KJ/kg K})$	1.336
Heat of vaporization	$h_{fg}(\text{KJ/kg k})$	2500.0

Table 1-3. Physical and thermal properties of air

Density	$\rho_i(\text{kg/m}^3)$	1.164
Thermal conductivity	$k_i(\text{W/m k})$	0.0251
Specific heat of dry air	$c_a(\text{KJ/kg k})$	1.006
Specific heat of water vapor	$c_v(\text{KJ/kg k})$	1.876
Coefficient of thermal expansion	$\beta(1/\text{k})$	3.41×10^{-3}
Dynamic viscosity	$\mu(\text{N.s/m}^2)$	18.24×10^{-6}

$$K_0 = \frac{\varepsilon^3 d^2}{150(1-\varepsilon)^2 k_e} \dots\dots\dots (15)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial Y^2} = \xi \dots\dots\dots (17)$$

단립중 벼의 상당구반경이 1.77×10^{-3} m, Ergun 상수 $K_e = 4.5$, $\varepsilon = 0.45$ 로 하여 K_0 값을 구하면 $K_0 = 0.0013981 \times 10^{-6}$ m/s이다.

여기서

$$\xi = \frac{\partial U}{\partial Y} - \frac{\partial V}{\partial X}, U = \frac{\partial \psi}{\partial Y}, V = - \frac{\partial \psi}{\partial X}$$

공기층에서의 수증기의 확산계수 $D_s = 2.59 \times 10^{-5}$ m²/s를 사용하였다.

기본방정식(4)~(7) 및 (16) (17)식의 수치해를 구하기 위하여 시간에 관한 도함수는 전진차분식으로 나타내고, 공간 좌표계에 관한 도함수는 중앙차분식으로 표시한 유한차분법을 이용하였다. 이와 같은 방법으로 표시된 유한차분식을 ADI (Alternating Direction Implicit)법으로 해를 구하였으며 Stream function 방정식은 SOR(Successive Over Relaxation)법으로 해를 구하였다.

3. 수치해석 방법

운동방정식 (5)와 (6)식에서 압력항을 제거하여 다음 (16)식과 (17)식의 Vorticity-transport 방정식과 Stream function 방정식으로 나타내었다.

초기조건 및 경계조건은 다음과 같다.

$$\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial \xi}{\partial \tau} + \frac{1}{\varepsilon^2} \left(U \frac{\partial \xi}{\partial X} + V \frac{\partial \xi}{\partial Y} \right) = Gr \cdot \frac{\partial \theta}{\partial X} - \frac{L^2}{K_0} \xi \dots\dots\dots (16)$$

온도의 초기 및 경계조건 :

$$T(x, y, 0) = T_0$$

$$\begin{aligned} T(o, y, t) &= T_1 \\ T(L, y, t) &= T_2 \dots\dots\dots (18) \\ T(x, H, t) &= T_1 \end{aligned}$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial Y} \right|_{x, y=0, t=0}$$

여기서

T_G = 초기 곡물 온도(°C)
 T_1 = 저장고 북쪽벽면 온도(°C)
 T_2 = 저장고 남쪽 벽면 온도(°C)

절대습도의 초기 및 경계조건 :

$$H(x, y, 0) = H_e$$

$$\left. \frac{\partial H}{\partial X} \right|_{x=0, y, t} = \left. \frac{\partial H}{\partial X} \right|_{x=L, y, t} = 0 \dots\dots\dots (19)$$

$$\left. \frac{\partial H}{\partial Y} \right|_{x, y=0, t} = \left. \frac{\partial H}{\partial Y} \right|_{x, y=H, t} = 0$$

여기서

H_e : 저장고내의 초기 평형 절대습도

또한 stream function과 유속은 벽면 경계에서는 항상 0으로 간주하였으며, 경계에서의 vorticity는 다음의 second-order방정식으로 구하였다.

$$\xi = \frac{3(\psi_{v+1} - \psi_w)}{h^2} - \frac{1}{2} \xi_{w+1} \dots\dots\dots (20)$$

여기서 w는 경계면의 노오드를 나타내며 h는 mesh의 크기를 나타낸다.

4. 상온 통풍 시뮬레이션

저장비에 통풍을 할 경우 송풍량이 대단히 적고 조건의 변화가 급격하지 않으므로, 평형모형을 수정한 Morey 모델을 이용하였다.

Morey 모델(Morey, et, al, 1981)에서 미지수는 Δt 시간 후의 Δx 두께의 곡물층의 함수율 M_t , 배출공기의 절대습도 H_t 및 배출공기의 온도 T_t 이므로 3개의 방정식이 요구되며, 이들 3값을 다음의 순서로 계산하였다.

1) 벼의 박층 건조 방정식으로 부터 미소두께

Δx 에 유입되는 공기의 절대습도(H_0)와 온도(T_0)를 이용하여 함수율(M_t)를 구한다.

2) 미소 곡물층에서 배출되는 공기의 절대습도(H_t)는 수분 평형에 기초하여 다음(21)식으로 계산한다.

$$H_t = H_0 + R(M_0 - M_t) \dots\dots\dots (21)$$

여기서

$$R = \frac{\rho_s \Delta x}{G_a \Delta t}$$

G_a : 건공기 유동율(kg/hr.m²)

ρ_s : 곡물의 산물 밀도(kg/m³)

Δx : 미소 곡물층 두께(m)

Δt : 시간 증분(hr)

3) 에너지 평형에 기초하여 배출공기의 온도(T_t)는 다음 (22)식으로 계산한다.

$$T_t = \frac{C_a T_0 + (i_g + c_v T_0)H_0 + R(1 + M_0) c_{po} T_0 - i_g H_t}{c_a + c_v H_t + R(1 + M_t) c_{pf}} \dots\dots\dots (22)$$

여기서

C_{pf} : 건조후 곡물의 비열(KJ/kg · k)

C_{po} : 건조전 곡물의 비열(KJ/kg · k)

i_g : 물의 증발 잠열(KJ/kg)

III. 저장실험

1. 실험장치

직경 2.0m, 높이 2.2m의 원통형 철재면을 제작하고, 밑바닥에서 0.2m 높이에 다공철판을 설치하였다. 다공철판으로 부터 높이 0.3m 간격으로 시료 채취공를 설치하였다.

2. 실험방법

가. 시료

벼의 품종은 미네하끼리로 화력건조기에서 15% w.b.까지 건조한 후 이물질은 풍선하여 제거하였다. 상온에서 1일간 보관한 후 곡온이 상온

과 함께 한 후 저장빈에 2m 높이까지 채웠다. 저장기간은 88년 11월부터 89년 8월 까지 10개월 간이었다.

나. 온도 측정

그림 3-1은 저장빈의 남-북 방향의 중앙단면에서의 곡온 측정 부위를 나타낸 것이다. 온도는 측정부위에 온도 측정 센서를 삽입하여 자기 온도 기록계로 연속 측정하였다. 저장고 주위의 온도와 상대습도는 자기온습도 기록계로 측정하였다.

다. 함수율 측정

그림 3-2은 저장빈의 남-북 방향의 중앙 단면에서의 곡물 수분 측정용 시료 채취공의 위치를 나타낸 것이다. 곡물의 함수율은 월 2회 각 시료 채취공에서 20g의 시료를 채취하여 건조온 분으로 측정하였다.

3. 실험치와 예측치의 비교

가. 곡온의 비교

그림 3-3은 저장고 중앙지점의 곡온의 실험치와 예측치 및 외기온도 변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 실험치와 예측치의 변화가 비슷한 경향을 나타내어 2월 하순에서 3월 중순 사이에 곡온이 최저치를 나타내었으며, 9월 하순에 최고치를 나타낸 것으로 나타났다. 이는 곡온이 외기의 온도 보다 약 45일 정도 늦게 최저 및 최고점에 도달한 것으로 볼 수 있다.

곡온의 예측이 외기온도가 낮은 경우에는 비교적 잘 일치하였으나, 외기온도가 곡온보다 높은 3월 이후에는 예측치가 실측치보다 모두 낮게 나타났다. 전반적으로 실측치와 예측치의 차이는 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 이하로 비교적 예측정도가 높은 것으로 판단할 수 있다.

그림 3-4는 그림 3-1의 8번 지점 즉, 남향 벽면에서 30cm 내측에 위치한 지점의 곡온 변화를 나타낸 것이다. 이 지점의 곡온은 외기 온

도의 변화에 민감하였으며, 대부분 외기 온도보다 높은 값을 나타내었다.

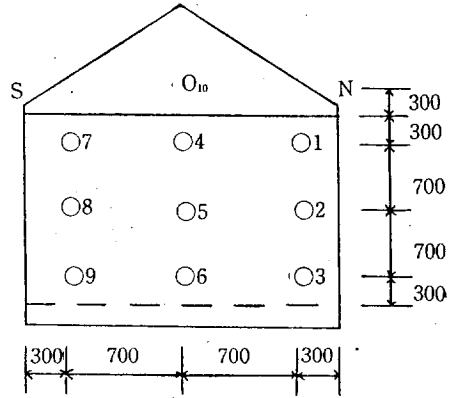


Fig. 3-1 Measuring locations of grain temperature.

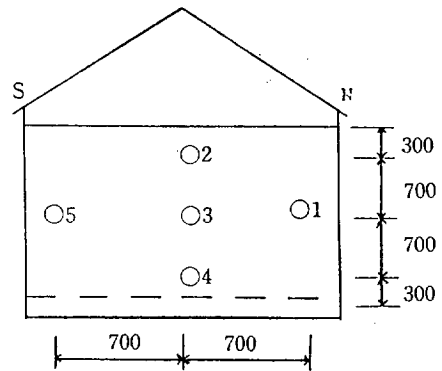


Fig. 3-2 Measuring locations of moisture content.

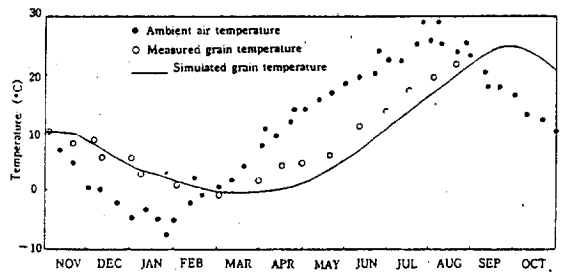


Fig. 3-3 Comparison of measured and simulated grain temperature at the center of the grain bin.

나. 함수율 비교

그림 3-5는 곡물빈 중앙지점의 함수율 변화의 예측치와 실측치를 나타낸 것이다. 예측치와 실측치의 차이는 $\pm 0.8\%$ w.b.이내로 비교적 잘 일치하였다.

그림 3-6은 각각 저장기간 10주 및 5개월 이후의 실측치와 예측치의 함수율 분포를 나타낸 것이다. 실측치는 상변과 밑변의 곡물의 함수율의 증감이 심하게 나타난 반면 예측치는 남향의 상 하부에서 심한 변화를 나타내었다. 그러나 전반적으로 예측치와 실측치가 거의 일치하는 것으로 판단할 수 있다.

4. 종합고찰

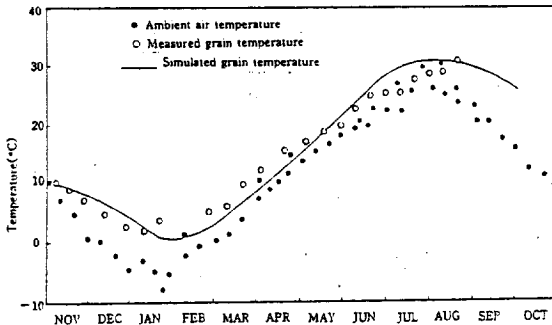


Fig. 3-4 Comparison of measured and simulated grain temperature at the point 8 in the Fig. 3-1.

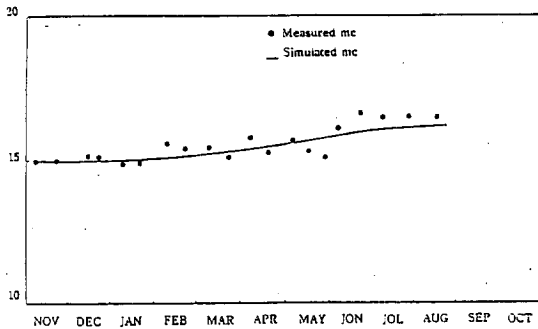
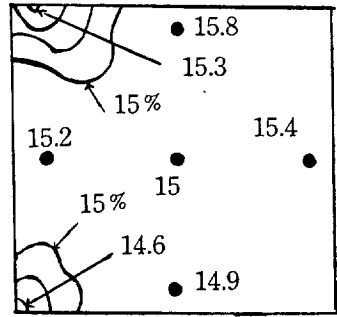
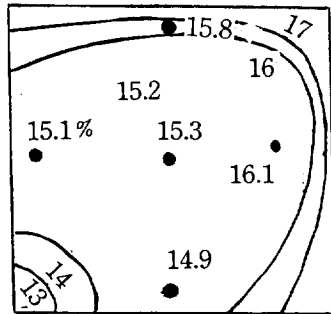


Fig. 3-5 Comparison of measured and simulated moisture content at the center of the grain bin.

벼 저장 시뮬레이션 모델은 저장 중인 벼의 온도와 함수율 변화를 정확히 예측할 수는 없으나 상당한 정도 (곡온 $\pm 5^{\circ}\text{C}$, 함수율 $\pm 0.8\%$ w. b.)로 예측이 가능하며, 저장 곡물의 영향인자를 분석하는 데는 타당하게 이용 될 수 있는 것으로 판단된다.



10 weeks



5 Months

Fig. 3-6 Comparison of measured and simulated moisture content.

(● : measured mc, ~ : Simulated mc)

IV. 저장 시뮬레이션

수원, 대전 및 진주지역에서 벼를 1년 동안 곡물빈에 저장 할 경우의 곡온, 함수율 및 품질 변화의 정도를 분석하고 적절한 통풍방법 및 시기를 결정하기 위하여 일련의 저장 시뮬레이션을 수행하였다.

1. 기상조건

그림 4-1은 수원, 대전 및 진주 지방의 30년

간 (1951~1980)의 일평균 온도를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 5월 부터 11월 사이의 온도 변화는 3 지역간에 차이가 거의 없으며, 12월에서 4월 까지 기온이 낮은 겨울철에는 남쪽에 위치한 진주 지방이 가장 높게 나타나고 다음이 대전, 수원순으로 나타났다. 그러나 이러한 정도의 차이는 곡물저장에는 큰 차이를 나타내지 못할 것으로 판단되어 수원 지역의 기상 조건을 중심으로 하여 저장 시물레이션을 수행하였다.

시물레이션에 이용된 기상자료는 수원 지방의 30년 간의 평균 온도와 상대습도이었다.

2. 곡온의 변화

그림 4-2는 수원 지방에서 함수율 15% w.b.,

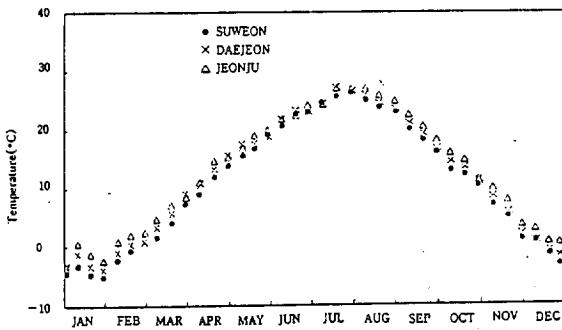


Fig.4-1 Daily average ambient air temperature (1951~1980).

곡온 10°C의 벼를 11월 부터 저장할 경우의 곡온 분포를 나타낸 등온선이다.

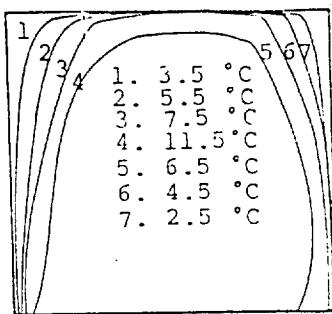
그림 4-2 (a)에서 벽면 가까이 등온선이 벽면과 거의 평행한 것은 저장초기에 열전달이 주로 전도에 의존하고 대류의 영향이 적은 것임을 나타낸 것으로 해석할 수 있다. 12월 중순까지는 저장고 중앙부의 온도는 주로 곡물의 호흡열에 의해 상승한 것으로 판단되며, 벽체에 가까울 수록 외기의 영향을 민감하게 받는 것으로 해석된다. 3월 중순의 경우 대류에 의한 열전달 현상이 뚜렷하였다. 8월 중순경에는 벽 가까운 부위의 온도는 저장 초기 온도의 2배 이상 상승하였으며 중심부의 온도는 6°C정도 상승하였다.

따라서 과도한 곡온 상승을 억제하기 위하여 7월 중하순경에 적절한 통풍이 요망된다.

3. 함수율 변화

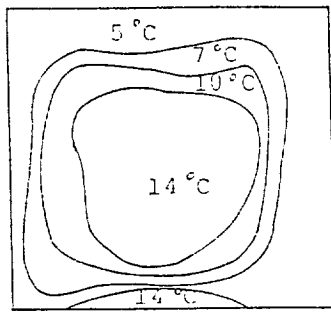
그림 4-3은 벼의 함수율 분포를 나타낸 것이다.

45일 정도의 저장후인 12월 중순경에는 남향 상부의 함수율은 약간 증가하고 남향 하부의 함수율은 약간 감소한 것으로 나타났다. 3월 중순경에는 빈 벽 주위의 함수율은 초기의 함수율보다 1~2% 증가한 반면 남향 하부의 함수율은 1~2% 감소하였다. 8월 중순에는 빈 벽 주위의



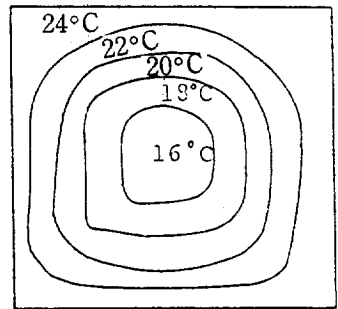
(a)

Middle of Dec



(b)

Middle of Mar.



(c)

Middle of Aug.

Fig. 4-2 Isotherms in rice storage bin.

함수율이 1~3% 증가한 반면 남향 하부의 함수율은 1~3% 감소하였다.

4. 건물 중량 손실을 변화

그림 4-4는 함수율과 곡온 변화가 심한 남향 하부와 벽 주위와 중앙부에서의 건물중량 손실율의 변화를 나타낸 것이다.

그림에서와 같이 남향하부의 건물 중량 손실율은 증가하지 않고 거의 일정한 값을 유지하였으며, 중앙부는 6월 초부터 다소 증가하여 8월말 0.15%의 값을 나타내었다. 함수율의 증가가 심한 벽 주위에서는 6월 초부터 상당히 증가하여

8월 말에 0.3%의 값을 나타내었다.

저장중에 건물 중량 손실율이 0.5%에 가까우면 곡물의 질적 손실이 있는 것으로 판단 할 수 있다.

따라서 상기의 최대 건물 중량 손실 0.3%는 낮은 값으로 안전하게 12개월 정도의 저장이 가능한 것으로 판단 할 수 있다.

5. 통풍의 영향

건물 중량 손실율과 함수율의 증가가 시작되는 6월 초부터 약 5일간, 7월 초에 약 5일간 2회 0.5m³/min으로 통풍한 경우의 함수율과 건물 중

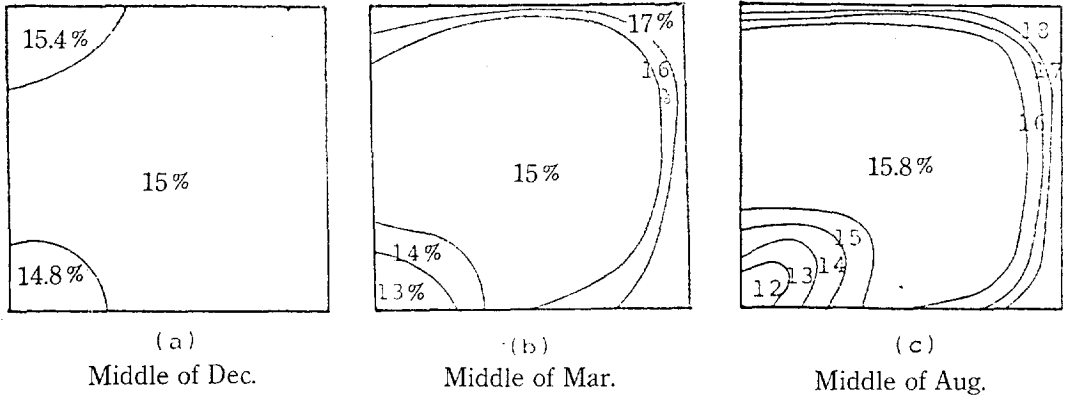


Fig. 4-3 Moisture distribution in Rice Storage bin.

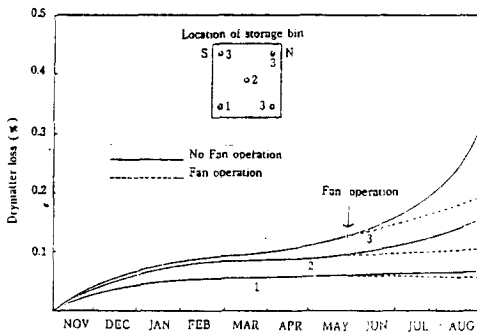


Fig. 4-4 Drymatter loss change during the storage of rough rice.

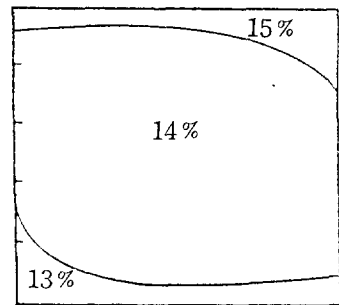


Fig. 4-5 Moisture distribution with aeration of 0.5m³/min. (5-day aeration from 1st date of Jun, 5-day aeration from 1st date of July.)

량 손실율은 각각 그림 4-4 및 4-5와 같다.

그림 4-5에서와 같이 함수율은 하층이 13%, 상층이 15%, 그외 부위가 14%를 유지하였다.

그림 4-4에서 건물 중량 손실율을 보면 통풍을 시작한 6월 초부터 건물 중량 손실율이 거의 완만하게 증가하는 것으로 나타났다.

이상의 결과에서 통풍시기를 정확히 결정 할 수는 없으나, 5월 말경에 곡은, 함수율 및 건물 중량 손실율의 증가가 시작되며, 이 때의 외기 조건이 비교적 양호하므로 (온도 18~19°C, 상대습도 70~75%), 약 0.5m³/min의 송풍량으로 5일 내외로 송풍하는 것이 적절할 것으로 판단 된다.

V. 결론 및 요약

외기조건 및 저장고내의 자연대류 현상에 기인한 저장부의 온도, 함수율 및 품질변화를 예측할 수 있는 시물레이션 모델을 개발하고 이를 실험을 통하여 검증하였으며, 시물레이션에 의하여 기상조건이 저장에 미치는 영향 및 안전저장을 위한 적절한 송풍방법을 결정하기 위하여 수행된 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 개발한 시물레이션 모델은 저장중인 벼의 온도와 함수율을 잘 예측할 수 있었다.
2. 저장 초기에는 주로 전도에 기인하여 벽체 주위에서 곡온의 변화가 나타났으며, 시간이 경과할수록 전도와 대류의 영향이 복합적으로 나타났다.
3. 11월 부터 저장할 경우 8월 중순경에 벽체 주위의 온도는 저장 초기의 곡온보다 2배 이상인 20°C를 상회 하였으며, 중심부의 온도는 약 6°C 상승하였다.
4. 함수율은 3월 중순경 벽 주위의 값이 초기 함수율 보다 1~2% 증가 하였으며, 8월 중순에는 1~3% 상승하였다.
5. 건물 중량 손실율은 곡온 및 함수율 증가가 심한 벽 주위에서 6월초부터 상당히 큰 증가 현상을 나타내었으며, 8월 말경에 최대 건물 중량 손실율은 0.3%로 나타났다.
6. 30년 간의 평균 기상 조건 하에서 11월 부터

8월까지 약 10개월간 통풍없이 초기함수율 15% w.b.의 벼를 안전하게 저장할 수 있었다.

7. 일기 불순을 고려할 때 5월 말경이나 6월 초에 약 5일간 0.5m³/min.의 송풍을 할 때 함수율의 증가를 억제하고 최대 건물 중량 손실율을 0.15%까지 줄일 수 있는 것으로 나타났다.

參 考 文 獻

1. 박경규, 1986. 한국에 있어서 미국의 건조 및 저장을 위한 시스템의 모델 개발 및 적정규모 선정에 관한 연구(1)-모델 시스템의 Layout 및 설계-한국농기계 학회지 11(2).
2. Beukema, K. J., Bruin, S. 1982. Heat and mass transfer during cooling and storage of agricultural products. Chemical engineering science, 37(2).
3. Morey, R.V., H. A. Could, and D. J. Hansen. 1981. Ambient air wheat drying. Trans. of the ASAE, Vol. 24. No. 5, pp 1312-1316
4. Kato, Koro. 1985. An equilibrium moisture content equation for grain 0% to saturated conditions and experimental results of Rice. Kansai Branch Report of the JSAM No. 59.
5. Patankar, S. V. Numerical heat transfer and fluid flow. New York, Hemisphere, 1981.
6. Seib, P. A., H. B. pfost, A. Sukabdio, and R. Burroughs. 1980. Spoilage of rough rice measured by evolution of carbon dioxide. Paper presented at the regional grains post harvest workshop, Malaysia.
7. Sinha, R. N., Muir, W. F. 1973. Grain Storage : Part of a system. Westport, Connecticut, AV I.
8. Steffe, J. F. and R. P. Singh. 1980. Parameters required in the analysis of rough rice drying. Drying '80, Vol. 2.
9. Zebib, A. and D. R. Kassory. 1978. Three dimensional natural convection motion in a confined porous medium. Phys. Fluids 21 (1).