

시뮬레이션에 의한 저장 벼의 곡온 예측

금동혁 김재열 김 훈

Simulation of Temperature Changes of Rough Rice Stored in Round Steel Bin (I) - Development of a Simulation Model -

D. H. Keum J. Y. Kim H. Kim

Abstract

A one-dimensional heat conduction problem in cylindrical coordinate system was solved using Crank-Nicolson finite difference method to predicting the temperature distribution in rice storage bin with wall insulator. The model can simulate the grain temperatures in insulated round bins using the input data of initial grain temperature, ambient air temperature, wind velocity, solar radiation on a horizontal surface, and thermal properties of grain, bin wall, wall insulator, insulator cover, and air. Temperatures were collected at the bin center, 0.65 m in radial direction from the center, and near the bin wall in 2.7 m diameter bin filled with rough rice to depth of 3.0 m were used to validate the simulation model. Grain temperatures predicted by the model were in very good agreement with the measured temperatures. The residual mean square error between measured and predicted grain temperatures at the bin center was 1.38°C.

Keywords : Simulation, Rough rice storage

1. 서론

저장 벼의 품질변화에 영향을 주는 해충과 미생물의 발생 및 성장속도에는 곡온과 함수율이 가장 중요한 영향 요인이다. 곡온은 벼의 호흡작용에 의하여 상승하게 되며, 또한 외기온의 영향을 받아 변하게 된다. 따라서, 산물 저장고 내의 곡온은 저장고내의 위치에 따라 다르게 분포된다. 이러한 불균일한 곡온분포는 저장고 내에서 자연 대류현상을 유발하여 국부적인 함수율 증가와 응축현상을 초래하여 벼의 품질을 손상하게 된다(Keum and Kim, 1991). 해충의 번식은 곡온과 매우 밀접한 관계가 있는데 15°C 이하일 때는 매우 느리거나 나타나지 않으며, 40°C 이상일 때는 대개 생존할 수 없으나, 30°C에서는 최대로 번식하게 된다(Chang et al., 1993).

벼의 안전저장을 위해서는 곡온의 관리가 매우 중요하다. 일반적으로 저장 중인 벼의 곡온이 20°C를 상회하면 벼의 품질손상이 일어나는 증후로 간주하게 된다. 벼를 안전하게 저장하기 위해서는 저장 벼의 곡온이 일정 수준이하로 유지되고, 또한 곡물 전체가 균일한 곡온분포를 유지하도록 관리해야 한다.

국내 미곡종합처리장의 벼 저장 시설로는 원형철제빈이 이용되고 있다. 이 빈은 파형 강철재의 벽체와 벽체 둘레에 40~50 mm의 우레탄 단열층, 강철재의 단열층 덮개로 이루어진 원통이다.

본 연구의 목적은 원형철제빈에 저장된 벼의 곡온 변화를 예측할 수 있는 단순 시뮬레이션 모델을 개발하고, 저장 실험을 통하여 개발된 모델을 검증하는데 있다.

The article was submitted for publication in July 2006, reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in August 2006. The authors are Dong Hyuk Keum, Professor, KSAM member, Dept. of Bio-Mechatronic Engineering, SungKyunKwan University, Suwon, Korea, Jea Youl Kim, Professor, KSAM member, Dept. of Mechanical Engineering, Sangju National University, Sanju, Korea, Hoon Kim, Researcher, KSAM member, Korea Food Research Institute, Seongnam, Korea. The corresponding author is Jea Youl Kim, Professor, Dept. of Mechanical Engineering, Sangju National University, Sangju, 540-742, Korea; E-mail: <jykim@sangju.ac.kr>

2. 수학적모델

원형철제빈은 곡물층, 벽체, 단열층 및 덮개로 이루어진 동심의 원통이다. 빈 내의 곡온 변화가 가장 심한 곳은 남쪽 벽 근처이며, 깊이 방향으로 변화는 거의 무시할 수 있으며, 곡물층 내의 자연대류에 의한 열 및 수분이동도 무시할 수 있을 정도로 미세한 것으로 보고되고 있다(Lo et al., 1975). 따라서, 저장 곡물의 곡온 변화는 반경방향으로 주로 나타나는 것으로 간주할 수 있다.

빈 내의 곡온 변화를 반경방향으로만 가정하면 원통좌표계의 1차원 비정상 열전도 방정식인 식 (1) 및 식 (2)로 표시된다. 식 (1)은 빈내부의 온도변화, 식 (2)는 중심부($r=0$)의 온도변화를 나타낸다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{k} g(r,t) \right) \text{ for } r \neq 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 2\alpha \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\alpha}{k} g(r,t) \text{ for } r = 0 \quad (2)$$

- 여기서, g = 저장 벼의 호흡에 의한 열발생률($\text{kJ/hr}\cdot\text{m}^3$)
- k = 열전도계수($\text{kJ/hr}\cdot\text{m}\cdot\text{K}$)
- r = 반경방향 좌표(m)
- T = 온도($^{\circ}\text{C}$)
- t = 시간(s)
- α = 열확산계수(m^2/hr)

식 (1)의 초기조건과 경계조건은 다음과 같이 표시된다.

$$T(r,0) = T_0 \quad (3)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (4)$$

$$-kA \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R} = q_r + q_c \quad (5)$$

- 여기서, A = 빈의 단위 높이당 열전달면적(m^2/m , $2\pi R$)
- q_r = 빈의 벽면의 태양복사에너지($\text{kJ/hr}\cdot\text{m}^2$)
- q_c = 빈 벽면에서의 대류전달에너지($\text{kJ/hr}\cdot\text{m}^2$)
- R = 빈의 반경(m)
- T_0 = 초기 곡온($^{\circ}\text{C}$)

식 (4)와 식 (5)의 경계조건은 빈의 중앙과 빈의 표면에서의 경계조건이다. 빈은 곡물층, 벽체, 단열층 및 단열층 덮개로 이루어져 있으므로 이들 재료의 경계층에 대한 경계조건이 또한 필요하다. 이 경계조건은 시뮬레이션 모델링의 수치

해석 방법에서 논하도록 한다.

곡물빈 내에서는 곡물의 호흡에 의하여 열이 발생하며, 빈의 벽체는 태양복사 에너지를 받는 동시에 외기와 대류에 의한 열교환을 한다.

3. 시뮬레이션 모델링

가. 수치해석

곡물이 퇴적된 원형빈은 곡물, 벽체, 단열층 및 단열층 덮개로 이루어진 동심의 원통이다. 유한차분법을 이용하여 식 (1)과 식 (2)의 해를 구하기 위하여 빈 단면의 반경방향으로 그림 1과 같이 절점을 구성하였다. 빈의 내부 절점에 대해서는 식 (1)이 적용되며, 빈의 중심부 절점($i=1$)에 대해서는 식 (2)가 적용된다. 각 재료의 경계층(절점 j, k, l)에 대해서는 열평형조건을 고려한 별도의 절점 방정식이 필요하다. 대기에 노출된 절점(m)에 대해서는 대류와 복사 경계조건이 적용된다.

빈의 중심($i=1, r=0$)에 대한 식 (2)에 Crank-Nicolson의 음적방법(implicit method)을 적용하여 유한차분식으로 표시하면 식 (6)과 같다.

$$(S_1 + 2)T_1^{n+1} - 2T_2^{n+1} = (S_1 - 2)T_1^n + 2T_2^n + \frac{\Delta r^2}{2k_1}(g_1^{n+1} + g_1^n) \quad (6)$$

여기서, Δr_1 : 곡물층의 반경방향 거리중분(m)

Δt : 시간중분(hr)

α_1 : 곡물층의 열확산계수(m^2/hr)

$$S_1 = \frac{\Delta r_1^2}{\alpha_1 \Delta t}$$

온도 T 의 아래첨자 i 는 반경방향의 절점을 나타내며, 윗첨자 n 은 시간중분을 나타낸다.

빈의 내부에 대한 식 (1)을 Crank-Nicolson방법을 적용하여

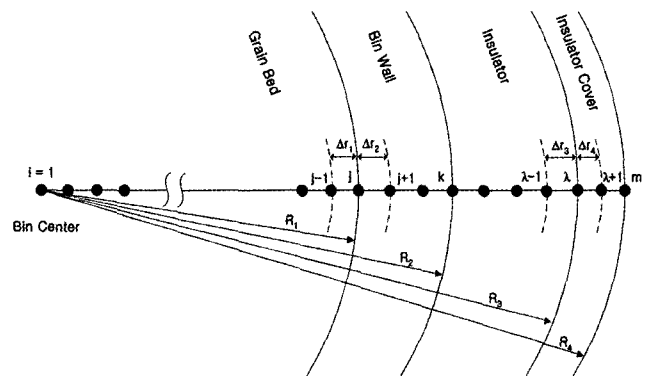


Fig. 1 A sector of a cylindrical grain bin.

유한차분식으로 나타내면 면 다음 식 (7)과 같다.

$$AT_{i-1}^{n+1} - BT_i^{n+1} + CT_{i+1}^{n+1} = -AT_{i-1}^n - BT_i^n - CT_{i+1}^n - \frac{\Delta r_1^2}{k_1}(g_i^{n+1} + g_i^n) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } A &= 1 - \frac{\Delta r_1}{2r_i} \\ B &= -(2 + S_1) \\ C &= 1 + \frac{\Delta r_1}{2r_i} \\ B' &= 2(S_1 - 1) \end{aligned}$$

식 (7)은 곡물층·벽체·단열층·단열층 덮개에서 내부절점에 적용된다. 따라서, 식 (7)에서 Δr , k 및 α 의 값이 각각의 재료에 해당되는 값이 이용된다.

곡물층과 벽체의 경계면에 대하여 열평형을 고려하여 경계 방정식을 유도하였다. 그림 2에서 q_1 과 q_2 를 각각 $j - \frac{1}{2}$ 및 $j + \frac{1}{2}$ 점에서의 열전달율로 하고 \dot{Q} 를 미소체적내의 에너지 변화율이라 하면 다음의 식 (8)과 같다.

$$q_1 - q_2 = \dot{Q} \quad (8)$$

q_1 , q_2 는 다음과 같이 표시된다.

$$q_1 = -k_1 2\pi \left(R_1 - \frac{\Delta r_1}{2} \right) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{j-1/2, n+1/2} + 2\pi \left(R_1 - \Delta r_1/4 \right) \frac{\Delta r_1}{2} g_{j-1/4}^{n+1/2} \quad (9)$$

$$q_2 = -k_2 2\pi \left(R_1 + \frac{\Delta r_2}{2} \right) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{j+1/2, n+1/2} \quad (10)$$

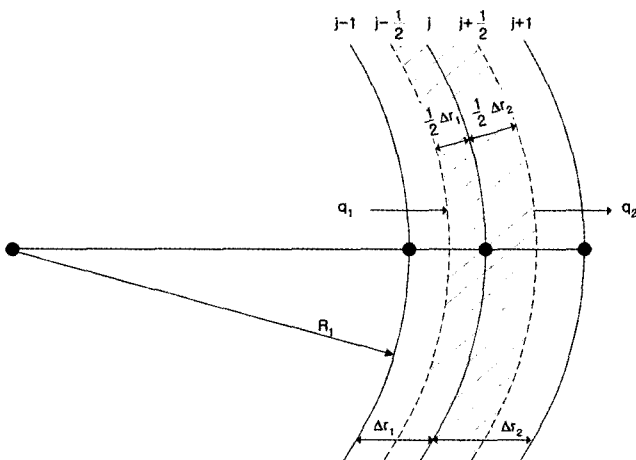


Fig. 2 Heat transfer at the boundary layer of grain and bin wall.

식 (9)와 식 (10)의 차이를 유한차분식으로 나타내면,

$$\begin{aligned} q_1 - q_2 &= -k_1 2\pi \left(R_1 - \frac{\Delta r_1}{2} \right) \frac{T_j^{n+1/2} - T_{j-1}^{n+1/2}}{\Delta r_1} \\ &\quad + k_2 2\pi \left(R_1 + \frac{\Delta r_2}{2} \right) \frac{T_{j+1}^{n+1/2} - T_j^{n+1/2}}{\Delta r_2} \\ &\quad + 2\pi \left(R_1 - \frac{\Delta r_1}{4} \right) \frac{\Delta r_1}{2} g_{j-1/4}^{n+1/2} \end{aligned} \quad (11)$$

에너지 변화율(\dot{Q})은 다음 식으로 표시된다.

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= \rho_1 2\pi \left(R_1 - \frac{\Delta r_1}{4} \right) \left(\frac{\Delta r_1}{2} \right) c_1 \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{j-1/4, n+1/2} \\ &\quad + \rho_2 2\pi \left(R_1 + \frac{\Delta r_2}{4} \right) \left(\frac{\Delta r_2}{2} \right) c_2 \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{j+1/4, n+1/2} \end{aligned} \quad (12)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{j-1/4, n+1/2} &= \frac{3}{4} \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{j, n+1/2} + \frac{1}{4} \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{j-1, n+1/2} \\ \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{j+1/4, n+1/2} &= \frac{3}{4} \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{j, n+1/2} + \frac{1}{4} \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{j+1, n+1/2} \end{aligned}$$

식 (11)과 식 (12)를 식 (8)에 대입하여 정리하면,

$$\begin{aligned} (L_1 - 0.25L_3) T_{j-1}^{n+1} - (L_1 + L_2 + 0.75L_3 + 0.75L_4) T_j^{n+1} \\ + (L_2 - 0.25L_4) T_{j+1}^{n+1} = - (L_1 + 0.25L_3) T_{j-1}^n \\ + (L_1 + L_2 - 0.75L_3 - 0.75L_4) T_j^n - (L_2 + 0.25L_4) T_{j+1}^n \\ - L_5 (g_{j-1}^{n+1} + g_{j-1}^n + 3g_j^{n+1} + 3g_j^n) \end{aligned} \quad (13)$$

여기서, $L_1 = \frac{k_1}{2\Delta r_1} \left(R_1 - \frac{\Delta r_1}{2} \right)$

$$L_2 = \frac{k_2}{2\Delta r_2} \left(R_1 + \frac{\Delta r_2}{2} \right)$$

$$L_3 = \frac{\rho_1 c_1 \Delta r_1}{2\Delta t} \left(R_1 - \frac{\Delta r_1}{4} \right)$$

$$L_4 = \frac{\rho_2 c_2 \Delta r_2}{2\Delta t} \left(R_1 + \frac{\Delta r_2}{4} \right)$$

$$L_5 = \left(R_1 - \frac{\Delta r_1}{4} \right) \frac{\Delta r_1}{16}$$

k_1, k_2 = 각각 곡물층 및 벽체의 열전도계수(kJ/hr·m·°C)

c_1, c_2 = 각각 곡물층 및 벽체의 비열(kJ/kg·°C)

ρ_1, ρ_2 = 각각 곡물층 및 벽체의 밀도(kg/m³)

$\Delta r_1, \Delta r_2$ = 각각 곡물층 및 벽체에서 거리중분

R_1 = 곡물층의 반경(m)

같은 방법으로 벽체와 단열층의 경계점에 대한 절점 방정

식은 다음 식 (14)로 표시된다.

$$\begin{aligned} & (L_6 - 0.25L_8) T_{k-1}^{n+1} - (L_6 + L_7 + 0.75L_8 + 0.75L_9) T_k^{n+1} \\ & + (L_7 - 0.25L_9) T_{k+1}^{n+1} = - (L_6 + 0.25L_8) T_{k-1}^n \\ & + (L_6 + L_7 - 0.75L_8 - 0.75L_9) T_k^n - (L_7 + 0.25L_9) T_{k+1}^n \end{aligned} \quad (14)$$

여기서, $L_6 = \frac{k_2}{2\Delta r_2} (R_2 - \frac{\Delta r_2}{2})$

$$L_7 = \frac{k_3}{2\Delta r_3} (R_2 + \frac{\Delta r_3}{2})$$

$$L_8 = \frac{\rho_2 c_2 \Delta r_2}{2\Delta t} (R_2 - \frac{\Delta r_2}{4})$$

$$L_9 = \frac{\rho_3 c_3 \Delta r_3}{2\Delta t} (R_2 + \frac{\Delta r_3}{4})$$

k_3, c_3, ρ_3 = 각각 단열층의 열전도계수, 비열 및 밀도
 R_2 = 벽체외부까지의 반경
 Δr_3 = 단열층에서의 거리증분

같은 방법으로 단열층과 덮개의 경계점에 대한 절점 방정식은 식 (16)으로 표시된다.

$$\begin{aligned} & (L_{10} - 0.25L_{12}) T_{l-1}^{n+1} - (L_{10} + L_{11} + 0.75L_{12} + 0.75L_{13}) T_l^{n+1} \\ & + (L_{11} - 0.25L_{13}) T_{l+1}^{n+1} = - (L_{10} + 0.25L_{12}) T_{l-1}^n \\ & + (L_{10} + L_{11} - 0.75L_{12} - 0.75L_{13}) T_l^n - (L_{11} + 0.25L_{13}) T_{l+1}^n \end{aligned} \quad (15)$$

여기서, $L_{10} = \frac{k_3}{2\Delta r_3} (R_3 - \frac{\Delta r_3}{2})$

$$L_{11} = \frac{k_4}{2\Delta r_4} (R_3 + \frac{\Delta r_4}{2})$$

$$L_{12} = \frac{\rho_3 c_3 \Delta r_3}{2\Delta t} (R_3 - \frac{\Delta r_3}{4})$$

$$L_{13} = \frac{\rho_4 c_4 \Delta r_4}{2\Delta t} (R_3 + \frac{\Delta r_4}{4})$$

k_4, c_4, ρ_4 = 각각 단열층 덮개의 열전도계수, 비열 및 밀도
 R_3 = 단열층 외부까지의 반경
 Δr_4 = 단열층 덮개에서의 거리증분

대기에 노출되는 벽면에서는 그림 3과 같이 대류와 복사 열전달이 일어난다.

벽면에서 열평형은 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} & -k_4 2\pi (R_4 - \frac{\Delta r_4}{2}) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{m-1/2}^{n+1/2} - h 2\pi R_4 (T_m^{n+1/2} - T_a^{n+1/2}) + 2\pi R_4 q_r^{n+1/2} \\ & = \rho_4 c_4 2\pi (R_4 - \frac{\Delta r_4}{4}) \frac{\Delta r_4}{2} \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{m-1/4}^{n+1/2} \end{aligned} \quad (16)$$

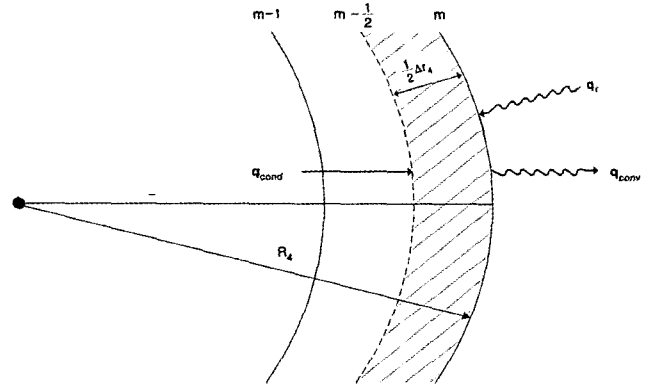


Fig. 3 Heat transfer at bin surface.

여기서,

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{m-1/2}^{n+1/2} &= \frac{T_m^{n+1/2} - T_{m-1}^{n+1/2}}{\Delta r_4} \\ &= \frac{1}{2\Delta r_4} (T_m^{n+1} + T_m^n - T_{m-1}^{n+1} - T_{m-1}^n) \\ \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{m-1/4, n+1/2} &= \frac{3}{4} \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{m, n+1/2} + \frac{1}{4} \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{m-1, n+1/2} \\ &= \frac{1}{4\Delta t} (3T_m^{n+1} - 3T_m^n + T_{m-1}^{n+1} - T_{m-1}^n) \end{aligned}$$

식 (16)을 정리하면 다음 식 (17)과 같다.

$$\begin{aligned} & (L_{14} - 0.25L_{16}) T_{m-1}^{n+1} - (L_{14} + L_{15} + 0.75L_{16}) T_m^{n+1} \\ & = - (L_{14} + 0.25L_{16}) T_{m-1}^n + (L_{14} + L_{15} - 0.75L_{16}) T_m^n \\ & - L_{16} (T_a^{n+1} + T_a^n) - R_4 \frac{1}{2} (q_r^{n+1} + q_r^n) \end{aligned} \quad (17)$$

여기서, $L_{14} = \frac{k_4}{2\Delta r_4} (R_4 - \frac{\Delta r_4}{2})$

$$L_{15} = \frac{h_c R_4}{2}$$

$$L_{16} = \rho_4 c_4 (R_4 - \frac{\Delta r_4}{4}) \frac{\Delta r_4}{2\Delta t}$$

R_4 = 단열층 덮개 외부까지의 반경

h_c = 단열층 덮개 외부와 공기 사이의 대류열전달 계수

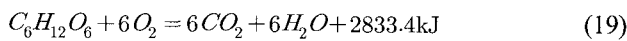
나. 호흡열

비의 호흡속도는 다음 식 (18)로 표시된다(Kim 등, 1998).

$$R = (a + bM + cM^2) \exp\left(-\frac{d + eM + fM^2}{T}\right) \quad (18)$$

여기서, R = 호흡속도(CO_2 mg/hr·kg-drymatter)
 M = 함수율(% , d.b.)
 T = 벼의 곡온(K)
 $a = 9.9617421 \times 10^{17}$
 $b = -6.451326 \times 10^{16}$
 $c = 1.1005771 \times 10^{15}$
 $d = 18,183.170515$
 $e = -457.9114417$
 $f = 6.6894676201$

곡물의 호흡은 식 (19)와 같이 탄수화물이 분해되어 이산화탄소, 열 및 물을 발생하는 과정이다.



식 (19)에서 탄수화물 1 g이 분해하면 1.47 g의 이산화탄소, 0.6 g의 물 및 15.74 kJ의 열이 발생한다. 건물 1 kg중에서 이산화탄소 1 g이 발생하면 0.68182 g 즉, 0.068182%의 탄수화물이 손실되며, 10.73 kJ의 열이 발생하는 것을 의미한다. 따라서, 건물중량 손실률과 발생열은 각각 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$DML = 0.068182 \times 10^{-3} R \quad (20)$$

여기서, DML = 건물중량손실율(%/hr)

곡물호흡에 의한 열 발생률은 다음 식으로 표시된다.

$$Q = 10.73 \times 10^{-3} R = 157.4 DML \quad (21)$$

여기서, Q = 열 발생률(kJ/hr·kg-drymatter)

곡물의 단위 체적당 열발생률로 나타내면 다음 식으로 표시된다.

$$g = \rho_p 10.73 \times 10^{-3} R = \rho_p 157.4 DML \quad (22)$$

여기서, g = 단위체적당 열발생율(kJ/hr·m³-drymatter)
 ρ_p = 건조벼 산물밀도(kg/m³)

건물 1 kg 중에서 10 g의 탄수화물 즉 1%의 건물중량이 손실되면 6 g의 수분이 증가하고 157.4 kJ의 열이 발생한다. 따라서, 호흡에 의한 함수율 및 곡온의 증가는 각각 식 (23) 및 식 (24)로 표시된다.

$$M_f = \frac{M_o + 0.006 DML}{1 - 0.01 DML} \quad (23)$$

여기서, DML : 건물중량손실율(%)
 M_o : 건물중량손실 전의 함수율(dec, d.b.)
 M_f : 건물중량손실 후의 함수율(dec, d.b.)

$$\Delta T = \frac{0.1574 DML}{(1 - 0.01 DML)(1 + M_f) c_g} \quad (24)$$

여기서, ΔT : 건물중량손실로 인한 곡온 상승분(°C)
 c_g : 곡물의 비열

다. 태양복사열

빈 벽체의 복사열 전달율은 다음 식 (25)으로 표시된다.

$$q_r = q_e + q_s + q_f + q_d - q_o \quad (25)$$

여기서, q_r = 순복사열(W/m²)
 q_e = 지면에서 벽체로 복사전달열 = $\sigma \beta F_{be} T_a^4$ (W/m²)
 q_f = 벽체에 흡수되는 산란일사량(W/m²)
 q_d = 벽체에 흡수되는 직달일사량(W/m²)
 q_o = 벽체에서 대기로 복사전달열 = $\sigma \epsilon T_w^4$ (W/m²)
 q_s = 천공에서 벽체로 복사전달열 = $\sigma \beta F_{bs} T_s^4$ (W/m²)
 β = 벽체의 장파 흡수율(0.23)
 σ = Stefan-Boltzman 상수(5.67×10^{-8} W/m²·K⁴)
 ϵ = 벽체의 장파 방사율(0.28)
 T_a = 외기온도(K)
 T_s = 천공 온도(K, 210K)
 T_w = 벽체 표면온도(K)
 F_{be} = 벽체와 지표간 형상계수(0.5)
 F_{bs} = 벽체와 천공간 형상계수(0.5)

벽체 즉, 수직면 일사량에 벽체 재료의 단파 흡수율을 곱하여 $q_f + q_d$ 의 값을 얻을 수 있다. 기상 관측소에서 측정된 수평면 일사량을 이용하여 수직면 일사량을 계산할 수 있으며 다음 식 (26)으로 표시된다.

$$I_{90} = I_{DN} \cos \theta + \frac{1}{2} I_d + \frac{1}{2} I_{HOL} \rho \quad (26)$$

여기서, I_{90} = 수직면 일사량(W/m²)
 I_{HOL} = 수평면 일사량(W/m²)
 I_{DN} = 수평면 직달일사량(W/m²)
 I_d = 수평면 산란일사량(W/m²)
 ρ = 지면 반사율(눈 덮인 지면 0.7, 보통 지면 0.2)
 θ = 경사면에 대한 태양광선의 입사각

기상대의 일적산 수평면일사량의 관측치에서 각 시각의 수평면 일사량을 추정하고, 이를 다시 직산분리법에 의해 직달 성분과 산란성분으로 분리한다. 일적산 수평면 일사량의 태양 시별 변동곡선은 다음의 Munroe(1980)의 식을 이용하였다.

$$I_{HOL} = \frac{H_{day} \sqrt{\pi}}{3600t_d} \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{0.5t_d - |12 - t_{asl}|}{0.24588t_d}\right)^2\right)\right] \quad (27)$$

여기서, H_{day} = 일적산 수평면일사량(J/m²·day)
 t_d = 가조시간
 t_{as} = 진태양시

시간별 수평면일사량에서 법선면 직달일사량을 추정하기 위해 宇田川光弘(1978)의 직산분리법을 사용하였으며, 법선면 직달일사량(I_{DN})은 다음 식으로 표시된다.

$$I_{DN} = (-0.43 + 1.43K_T)I_o \quad (K_T \geq K_{TC}) \quad (28)$$

$$I_{DN} = (2.277 - 1.258\sin h + 0.2396\sin^2 h) K_T^3 I_o \quad (K_T < K_{TC}) \quad (29)$$

여기서, $K_T = \frac{I_{HOL}}{I_o \sin h}$

$$K_{TC} = 0.5163 + 0.333\sin h + 0.00803\sin^2 h$$

$$I_o = \text{대기권외 일사량} \left(I_{SC} \left[1 + 0.033\cos\left(\frac{2\pi n}{365}\right) \right] \right)$$

$$I_{SC} = \text{태양상수}(1,370 \text{ W/m}^2)$$

$$h = \text{태양고도(zenith angle)}$$

$$n = \text{통산일}$$

수평면 직달일사량(I_{DH})과 수평면 산란일사량(I_d)은 다음 식으로 계산하였다.

$$I_{DH} = I_{DN} \sin h \quad (30)$$

$$I_d = I_{HOL} - I_{DH} \quad (31)$$

라. 열 및 물리적 성질

벼의 열전도계수(ASAE Standards D243.3, 1996)는 다음 식을 사용하였다.

$$k = 0.10000 + 0.00111M \quad (32)$$

여기서, k = 벼의 열전도계수(W/m·K)

$$M = \text{함수율}(\%, \text{w.b.})$$

벼의 비열(ASAE Standards D243.3, 1996)은 다음 식을 사용하였다.

$$c_p = 1.269 + 0.0349M \quad (33)$$

여기서, c_p = 벼의 비열(kJ/kg·K)

대기에 노출된 빈 벽체 외부와 대기 사이의 대류열전달계수는 다음 식을 사용하여 계산하였다.

$$Nu = 0.227Re^{0.633} \quad (34)$$

여기서, Nu = Nusselt number = $\frac{h_c d}{k}$

$$Re = \text{Reynolds number} = \frac{\rho v d}{\mu}$$

$$h_c = \text{대류열전달계수}(\text{W/m}^2 \cdot \text{K})$$

$$d = \text{빈의 직경(m)}$$

$$v = \text{풍속(m/s)}$$

$$\rho = \text{공기의 밀도}(1.177 \text{ kg/m}^3)$$

$$k = \text{공기의 열전도계수}(0.0261 \text{ W/m} \cdot \text{K at } 300\text{K})$$

$$\mu = \text{공기의 점성계수}(1.85 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s})$$

단열재 폴리아레탄폼의 열전도계수는 0.0198 W/m·K, 밀도는 50 kg/m³, 비열은 700 J/kg·K를 사용하였다. 빈 벽체 재료인 아연도금강판의 열전도계수는 45.83 W/m·K, 밀도는 7,801 kg/m³, 비열은 473 J/kg·K, 단과 흡수율은 0.66, 장파 방사율은 0.23를 사용하였다.

마. 컴퓨터 프로그래밍

프로그램은 Fortran 77로 작성하였다. 저장빈과 관련된 입력자료는 저장빈의 직경·벽체 재료(벽체, 단열층, 단열층 덮개)의 두께·열전도계수·비열·밀도 등이다. 곡물과 관련된 입력자료는 초기함수율·초기곡온·열전도계수·비열·밀도 등이다. 입력 기상자료는 저장 연도·저장시작 및 종료 월일과 시각·일 최고 및 최저 온도·일적산 수평면 일사량·일평균 풍속 등이다. 일 최고 및 최저 온도는 Degelman(1970)의 방법을 수정한 宇田川光弘(1986)의 방법을 사용하여 일 최고 및 최저 온도로부터 1일중 시각별 기온을 계산하였다. 또한 공기의 밀도, 열전도계수 및 점성계수가 입력된다.

시간중분은 0.05 hr로 하였으며, 곡물층 두께를 100등분, 벽체, 단열층 및 단열층 덮개의 두께를 각각 3등분하여 반경 방향의 거리중분으로 하였다.

빈의 중심과 반경을 5등분한 각 지점의 곡온, 함수율 및 건물중량손실률의 변화가 1일 간격으로 출력되도록 프로그래밍하였다.

4. 시뮬레이션 모델 검증

가. 재료 및 방법

벼의 저장실험은 2000년 1월 19일부터 2001년 8월 21일 까지 약 7개월 동안 성균관대학교(수원)에서 수행하였다. 실험에 사용된 벼는 1999년 10월 경기도 용인지역에서 수확한 추청벼로 함수율 14.4%(w.b.)까지 열풍건조하여 실험에 사용하였다. 실험에 사용한 원형철제빈은 직경 2.7 m, 높이 4.8 m 이며, 빈 바닥에서 0.8 m 높이에 다공통기마루를 설치하였다. 벼는 3 m 높이로 퇴적하였으며, 저장에 사용된 벼는 9.8 ton 이었다.

곡온은 다공통기마루로부터 높이 1.5 m의 위치에서 남향 및 북향 방향으로 빈의 중앙, 중앙에서 수평방향으로 0.65 m 및 벽체 부근 등 5개 지점에 열전대(T type, OMEGA, USA)를 설치하고 자료수집장치(7327, Datascan, UK)를 이용하여 30분 간격으로 측정하였다. 일 최고 및 최저 온도, 일적산 수평면일사량, 풍속은 수원의 농업기상관측소의 자료를 이용하였다.

나. 결과 및 고찰

곡온 측정기간 동안 곡물빈의 남쪽 방향의 벼의 온도가 북쪽 방향보다 평균 5.2°C 높게 나타났다. 따라서 저장벼의 곡온은 남쪽 방향의 온도를 중심으로 고찰한다.

그림 4는 저장빈 중앙에서의 곡온 예측치와 실측치를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 외기온도는 1월 하순경에 -7°C에서 점차 상승하여 5월 초에는 15°C까지 상승하였으며, 6월 하순경에는 25°C까지 상승하였다. 곡온은 저장초기인 1월 하순에서 3월 초순까지 0~9°C 범위로 나타났으며, 5월 하순까지는 10~20°C 범위까지 상승하였다. 6월 하순에서 저장 종료까지는 25~30°C까지 상승하였다. 동절기에는 외기온도가 낮고 하절기로 가면서 외기온도가 상승하면서 곡온도 비슷한 경향을 나타내었지만, 외기온도의 비례 완만한 경향으로 나타났다. 그러나, 하절기의 곡온은 동절기에 비해 외기온도의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다.

그림 5는 저장빈의 벽체 가까운 부분(벽체에서 3 cm)의 곡온 예측치와 실측치를 비교한 것이다. 벽체 부근의 곡물은 외기온도의 직접적인 영향을 받는 지점으로 그림에서와 같이 곡온의 변화는 외기온도에 민감하게 변화하였으며 변화의 폭이 크게 나타났다.

표 1은 곡온의 예측치와 실측치 간의 RMSE와 R^2 를 비교한 결과이다. RMSE와 R^2 는 빈의 중앙 곡물의 경우 1.38°C와 0.990, 중앙에서 0.65 m 위치의 곡물의 경우 2.1°C와 0.979,

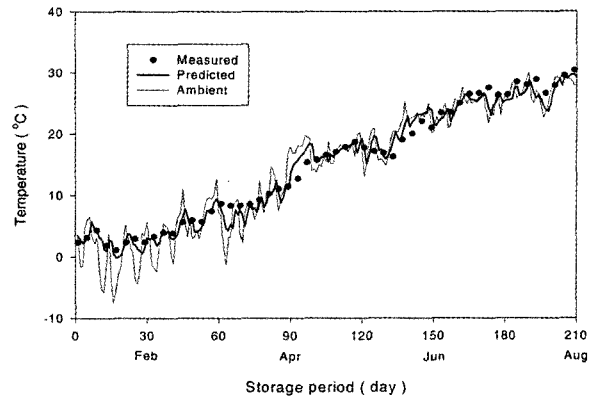


Fig. 4 Comparison of measured and predicted grain temperature at the center of storage bin.

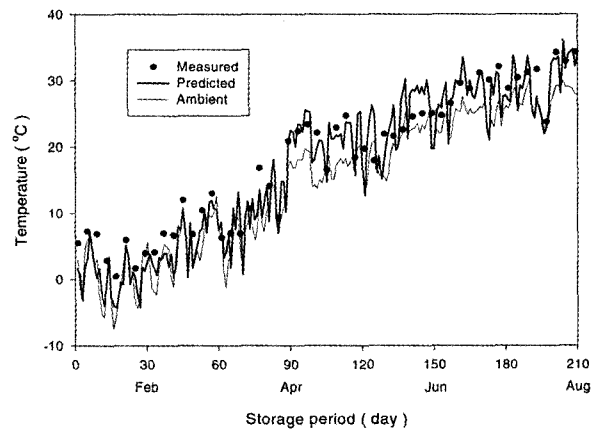


Fig. 5 Comparison of measured and predicted grain temperature near the wall of storage bin.

Table 1 Root mean square errors(RMSE) and coefficients of determination(R^2) between experimental and predicted grain temperatures

Position	RMSE	SD	R^2
Center	1.377	7.424	0.990
0.8 from center	2.096	7.393	0.979
Near wall	4.498	8.833	0.921

벽체 부근의 곡물의 경우 4.5°C와 0.921로 나타났다. 빈의 중앙 부위의 곡온이 가장 정확하게 예측되었으며, 벽체 부근의 곡온 예측이 가장 낮은 정도를 나타내었다. 그러나 전체적으로 예측정도는 저장곡물의 곡온예측관리, 외기의 영향 및 빈의 구조의 영향을 분석하는데 효율적으로 이용될 수 있는 것으로 판단되었다.

5. 결론 및 요약

본 연구는 유한차분법을 이용하여 원형철제빈에 저장 중인

벼의 곡온을 예측하기 위한 시뮬레이션 모델을 개발하고, 벼의 저장 실험을 통하여 모델의 예측 정도를 검증하였다. 모델의 검증을 위해 직경 2.7, 높이 4.8 및 두께 0.05 m의 비단열 원형철제빈에서 퇴적고 3 m, 시료량 9.8 ton을 약 7개월 간 저장 실험을 수행하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 저장벼의 곡온 변화는 비정상 1차원 열전도방정식을 이용하여 해석하였으며, 곡물의 호흡, 빈 벽체에 대한 태양복사와 대류 열전달을 포함하여 Crank-Nicolson 방법으로 수치해를 얻었다. 곡물층, 벽체, 단열층, 단열층 덮개의 경계에는 에너지 평형을 이용하여 절점방정식을 유도하였다.
- (2) 벽체 부근의 곡온은 외기온도의 변화에 민감하게 변하였으나, 빈 중앙의 곡온은 외기의 영향이 완만하게 나타났다.
- (3) 곡온의 예측치와 실측치 간의 RMSE와 R^2 는 빈의 중앙 곡물의 경우 1.38℃와 0.990, 중앙에서 0.65 m 위치의 곡물의 경우 2.1℃와 0.979, 벽체 부근의 곡물의 경우 4.5℃와 0.921로 나타났다. 빈의 중앙 부위의 곡온이 가장 정확하게 예측되었으며, 벽체 부근의 곡온 예측이 가장 낮은 정도를 나타내었다.
- (4) 그러나 전체적으로 예측정도는 저장곡물의 곡온예측관리, 외기의 영향 및 빈의 구조의 영향을 분석하는데 효율적으로 이용될 수 있는 것으로 판단되었다.

곡물의 초기곡온·빈의 직경·단열재의 두께 등의 영향과 저장 벼의 품질 변화에 대한 분석은 후속 논문(II)에서 보고할 것이다.

참고문헌

1. ASAE STANDARDS. 1996. Thermal properties of grain products. ASAE D243.3:451.
2. Chang, C. S., H. H. Converse and J. L. Steele. 1993. Modeling of temperature of grain during storage with aeration. Transactions of the ASAE 36(2):509-519.
3. Degelman, L. O. 1970. Monte carlo simulation of solar radiation and dry bulb temperatures for air conditioning purposes. Dept. of Arch. Eng., Pennsylvania State Univ. Report No. 70(9).
4. Keum, D. H and J. Y. Kim. 1991. Prediction of temperature, moisture content and quality changes in stored bulk rough rice. J. of the Korean Society for Agricultural Machinery 16(1):49-59. (In Korea)
5. Kim, D. C., O. W. Kim and D. H. Keum. 1998. Respiration characteristics of rough rice. J. of the Korean Society for Agricultural Machinery 23(4):335-342. (In Korea)
6. Lo, K. M., C. S. Chen., J. T. Clayton and D. D. Adrian. 1975. Simulation of temperature and moisture changes in wheat storage due to weather variability. J. Agric. Eng. Res. 20(1):47-53.
7. Munroe, M. M. 1980. Estimation of totals of irradiance on a horizontal surface from U. K. average meteorological data. Solar Energy. 24(3):235-238.
8. 宇田川光弘, 木村建一. 1978. 水平面全日射量觀測値よりの直達日射量の推定. 日本建築學會論文報告集. 267. pp.83-90.
9. 宇田川光弘, 小林英明. 1986. 空調負荷シミュレーション用氣象データの簡易作成法. 日本建築學會大會學術講演梗概集. pp.703-704.