

# 시물레이션에 의한 저장 벼의 곡온 예측

## Simulation of Temperature Changes in Stored Rough Rice

금 동 혁\*    김 동 철\*\*    김 의 웅\*\*    김    훈\*

정회원                  정회원                  정회원                  정회원

D. H. Keum    D. C. Kim    O. W. Kim    H. Kim

### 1. 서론

저장 중 벼의 품질에 영향을 주는 해충 및 미생물의 발생과 성장속도는 곡온과 함수율이 가장 중요한 요인이다. 곡온은 기온의 계절적 변화에 따라 변하게 되며 저장고내의 위치에 따라 다르게 분포된다. 이러한 불 균일한 온도분포는 자연 대류현상을 유발하고 수분이동을 발생시켜, 함수율 증가와 응축현상을 초래하여 벼의 품질을 손상시키게 된다(Keum and Kim, 1991). 해충의 번식은 온도와 매우 밀접한 관계가 있는데 15°C이하일 때는 매우 느리거나 나타나지 않고, 40°C이상일 때는 대개 생존할 수 없다. 그러나, 30°C에서는 최대로 번식하게 된다(Chang et al., 1993).

벼는 저장 중 호흡작용에 의하여 곡온이 상승하고 건물중량이 손실되며, 상승된 곡온은 호흡속도를 가속시켜 급격한 품질저하를 초래하게 된다. Kim 등(1998)은 벼의 호흡속도는 온도의 상승에 따라 지수 함수적으로 증가한다고 보고하였다. 따라서, 벼의 안전저장을 위해서는 무엇보다도 곡온의 관리가 중요하다. 저장 중인 벼의 온도가 일정 수준으로 상승하게 되면 품질에 손상이 일어나는 것으로 간주해야 하며, 특히 함수율이 높은 벼의 경우 세심한 관리가 요구된다. 국내의 벼 저장 시설은 원형철제빈이 설치 운영중에 있으며 곡온을 측정하기 위하여 벽체에 온도센서가 설치되어 있으나, 품질손상이 주로 발생하는 중앙 등의 곡온은 측정하지 못하고 있는 실정이다. 따라서, 벼의 저장 중 품질을 유지하기 위해서는 곡온의 변화가 매우 중요한 요인이며, 이를 이론적으로 분석하여 예측할 수 있어야 한다.

본 연구는 유한차분법을 이용하여 원형철제빈에 저장 중인 벼의 곡온 예측 시물레이션 모델을 개발하고, 저장 실험을 통해 시물레이션 모델을 검증하는데 있다.

---

\* 성균관대학교 생명공학부 바이오메카트로닉스 전공

\*\* 한국식품개발연구원 쌀연구팀

## 2. 수학적 모델

빈 내의 곡은 변화는 다음의 식과 같이 비정상 열전도방정식으로 나타낼 수 있다. 식(1)은 원통의 내부에 적용되며, 식(2)는 원통의 중심에 적용된다. 곡물은 호흡에 의하여 건물중량이 손실되면서 열을 발생하여 곡온을 상승시키고 전도, 대류 및 복사에 의하여 열교환을 하는 것으로 간주하였다.

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

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

여기서,  $g$  = 열발생률( $W/m^3$ )  $k$  = 열전도계수( $W/m \cdot K$ )  $r$  = 반경방향 좌표(m)

$T$  = 온도( $^{\circ}C$ )  $t$  = 시간(s)  $a$  = 열확산계수( $= \frac{k}{\rho c}$ ,  $m^2/s$ )  $c$  = 비열( $J/kg \cdot K$ )

## 3. 수치해석

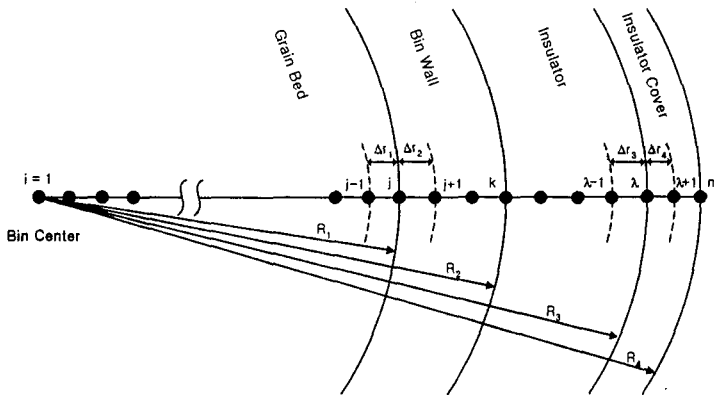


Fig 1. A sector of a cylindrical grain bin.

곡물이 퇴적된 원형빈은 그림 1과 같이 곡물, 벽체, 단열층 및 단열층 덮개로 이루어진 동심의 원통이다. 그림에서 내부 절점에 대해서는 식(1)이 적용되며, 중심 절점(i=1)에 대해서는 식(2)가 적용된다. 각 재료의 경계층(j, k, l)에 대해서는 열평형조건을 고려한 별도의 절점 방정식이 필요하다. 외부의 대기에 노출된 절점(m)에 대해서는 대류와 복사 경계조건이 적용된다.

출된 절점(m)에 대해서는 대류와 복사 경계조건이 적용된다.

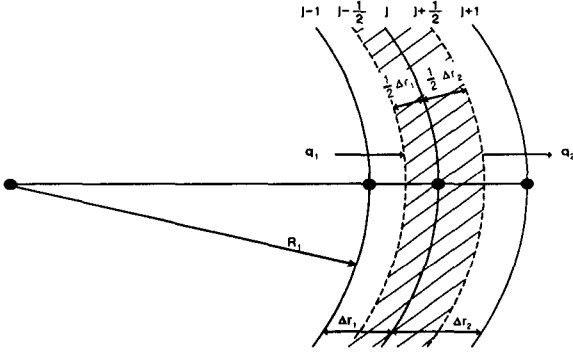
빈의 중심(i=1, r=0)에 대한 식(2)의 수치해를 구하기 위하여 Crank-Nicolson방법을 적용하여 유한차분식으로 나타내면 다음의 식(3)과 같다.

$$(S_{1+2})T_1^{n+1} - 2T_2^{n+1} = (S_{1-2})T_1^n + 2T_2^n + \frac{\Delta r^2}{2k_1} (g_1^{n+1} + g_1^n) \quad \dots \dots (3)$$

곡물층 내부에 대한 식(1)의 수치해를 구하기 위하여 Crank-Nicolson방법을 적용하면 다음의 식(4)와 같다.

$$AT_{i-1}^{n+1} - BT_i^{n+1} + CT_{i+1}^{n+1} = -AT_{i-1}^n - B'T_i^n - CT_{i+1}^n - \frac{\Delta r_1^2}{k_1}(g_i^{n+1} + g_i^n) \quad \dots\dots (4)$$

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



곡물층과 벽체의 경계면에 대하여 열평형을 고려하여 경계방정식을 유도하였다. 그림 2에서  $q_1$ 과  $q_2$ 를 각각  $j-1/2$  및  $j+1/2$ 점에서의 열전달율로 하고  $\dot{Q}$ 를 미소체적내의 에너지 변화율이라 하면 다음의 식(5)와 같다.

$$q_1 - q_2 = \dot{Q} \quad \dots\dots (5)$$

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

$q_1, q_2$  는 다음과 같이 표시된다.

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

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

에너지 변화율( $\dot{Q}$ )은 다음 식으로 표시된다.

$$\rho_1 2\pi \left(R_1 - \frac{\Delta r_1}{4}\right) \left(\frac{\Delta r_1}{2}\right) c_1 \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{j-1/4, n+1/2} + \rho_2 2\pi \left(R_1 + \frac{\Delta r_2}{4}\right) \left(\frac{\Delta r_2}{2}\right) c_2 \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{j+1/4, n+1/2}$$

대입하여 정리하면,

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

같은 방법으로 벽체와 단열층의 경계점에 대한 절점 방정식은 다음 식으로 표시된다.

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

단열층과 덮개의 경계점에 대한 절점 방정식은 식으로 표시된다.

$$(L_{10}-0.25L_{12}T_{i-1}^{n+1}-(L_{10}+L_{11}+0.75L_{12}+0.75L_{13})T_{ik}^{n+1}+(L_{11}-0.25L_{13})T_{i+1}^{n+1})$$

$$=-(L_{10}+0.25L_{12})T_{i-1}^n+(L_{10}+L_{11}-0.75L_{12}-0.75L_{13})T_i^n-(L_{11}+0.25L_{13})T_{i+1}^n$$

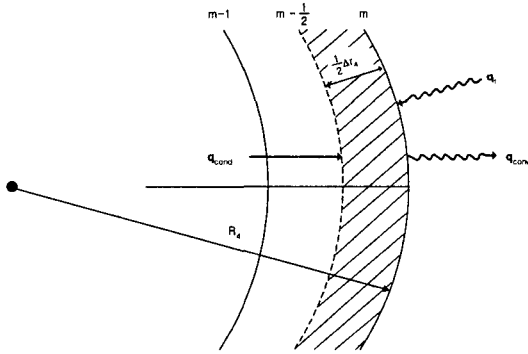


Fig 3. Heat transfer at bin surface.

대기에 노출되는 벽면은 그림 3과 같이 대류와 복사 열전달이 일어난다. 벽면에 대한 열평형 방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$(L_{14}-0.25L_{16})T_{m-1}^{n+1}-(L_{14}+L_{15}+0.75L_{16})$$

$$T_m^{n+1}=(L_{14}+0.25L_{16})T_{m-1}^n-(L_{14}-0.25L_{16})$$

$$T_{m-1}^{n+1}-(L_{14}+L_{15}+0.75L_{16})T_m^{n+1}=(L_{14}$$

$$+0.25L_{16})T_{m-1}^n+(L_{14}+L_{15}-0.75L_{16})T_m^n$$

$$-L_{16}(T_a^{n+1}+T_a^n)-R_4\frac{1}{2}(q_r^{n+1}+q_r^n)$$

여기서,  $L_{14}=\frac{k_4}{2\Delta r_4}(R_4-\frac{\Delta r}{2})$      $L_{15}=\frac{hR_4}{2}$      $L_{16}=\rho_4c_4(R_4-\frac{\Delta r_4}{4})\frac{\Delta r_4}{2\Delta t}$

#### 4. 시뮬레이션 모델

##### 가. 호흡열

건물중량 손실률과 벼의 호흡속도는 다음 식으로 표시된다(Kim et al., 1998).

$$DML=0.068182 \times 10^{-3} R$$

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

여기서,  $R$  = 호흡속도(CO<sub>2</sub> mg/hr · kg-drymatter)     $DML$  = 건물중량손실률(%/hr)

$M$  = 함수율(% , d.b.)     $T$  = 벼의 곡온(K)

##### 나. 태양복사열

빈 벽체의 복사열 전달율은 다음 식과 같다.

$$q_r=q_e+q_s+q_f+q_d-q_o$$

일직산 수평면 일사량의 일변동곡선은 다음의 Munroe(1980)의 식을 이용하였다.

$$I_{HOL}=I_{Hmax}\left[1-\exp\left(-\left(\frac{t_d/2-|12-t_{as}|}{b}\right)^2\right)\right]$$

$$I_{Hmax} = \frac{H_{dxy}\sqrt{\pi}}{3,600t_d} \quad b = t_d \left( \frac{\sqrt{\pi}-1}{\pi} \right)$$

시간별 수평면일사량에서 법선면 직달일사량을 추정하기 위해 宇田川光弘(1978)의 직산 분리법을 이용하였다. 법선면 직달일사량( $I_{DN}$ )은 다음 식으로 표시된다.

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

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

#### 다. 외기온도

외기의 건구온도는 일 최고 및 최저 온도의 기상 관측치를 이용하여 매시 외기온도를 추정하여 이용하였다. 이를 위해 Degelman(1970)의 방법을 수정한 宇田川光弘(1986)의 방법을 사용하였다. 당일( $n$ 일)의 기온을 추정하는데 당일의 최고 및 최저 기온, 전일( $n-1$ 일)의 최고 기온 및 익일( $n+1$ 일)의 최저기온을 사용하였다. 오전 0시부터 최저기온 발생시각( $t_{mn}$ )까지는 식(6), 최저기온 발생시각부터 최고기온( $t_{mx}$ ) 발생시각까지는 식(7), 최고기온 발생시각부터 24시까지 식(8)을 사용하여 기온을 계산하였다.

(1)  $0 \leq t \leq t_{mn}$  일 때

$$T_a = T_{\min,n} + (T_{\max,n-1} - T_{\min,n})(a_0 + a_1 \cos \omega + a_2 \cos(2\omega + a_3)) \quad \dots\dots (6)$$

(2)  $t_{mn} \leq t \leq t_{mx}$  일 때

$$T_a = T_{\min,n} + (T_{\max,n} - T_{\min,n})(b_0 + b_1 \cos \omega + b_2 \cos(2\omega + b_3)) \quad \dots\dots\dots (7)$$

(3)  $t_{mx} \leq t \leq 24$ 일 때,

$$T_a = T_{\min,n+1} + (T_{\max,n} - T_{\min,n+1})(a_0 + a_1 \cos \omega + a_2 \cos(2\omega + a_3)) \quad \dots\dots (8)$$

#### 라. 열 및 물리적 성질

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

$$k = 0.10000 + 0.00111 M$$

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

$$c_p = 1.269 + 0.0349 M$$

빈 벽체 외부의 열전달계수는 다음 식을 사용하였다.

$$Nu = 0.227 Re^{0.633}$$

## 5. 시뮬레이션 모델 검증

### 가. 재료 및 방법

공시재료는 1999년 10월 경기도 용인지역에서 수확한 추정벼로 초기함수율은 14.4%(w.b.)이었다. 실험에 사용한 저장빈은 직경 2.7, 높이 4.8 및 두께 0.05m의 비단열 원통형 철제빈으로 바닥에서 0.8m 높이에 다공통기마루를 설치하였다. 벼는 3m 높이로 퇴적하였으며, 시료량은 9.8ton이었다. 곡은은 저장 벼의 수직·수평방향의 중앙과, 중앙에서 수평방향으로 0.65m 및 벽체에 Thermocouple(T-type, OMEGA, USA)를 설치하고 자료수집장치(DATASCAN 7327, U.K)를 이용하여 30분 간격으로 측정하였다. 일 최고 및 최저온도, 일적산 수평면일사량, 풍속 및 노점온도는 기상청 자료를 이용하였다. 저장실험은 1월 19일부터 익년 8월 21일 까지 약 7개월 간 성균관대학교(수원)에서 수행하였다.

### 나. 실험결과

그림 4는 저장빈 중앙에서의 곡은 예측치와 실측치를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 외기온도는 1월 하순경에  $-7^{\circ}\text{C}$ 에서 점차 상승하여 5월 초에는  $15^{\circ}\text{C}$ 까지 상승하였으며, 6월 하순경에는  $25^{\circ}\text{C}$ 까지 상승하였다. 곡은은 저장초기인 1월 하순에서 3월 초순까지  $0 \sim 9^{\circ}\text{C}$  범위로 나타났으며, 5월 하순까지는  $10 \sim 20^{\circ}\text{C}$  범위까지 상승하였다. 6월 하순에서 저장 종료까지는  $25 \sim 30^{\circ}\text{C}$ 까지 상승하였다. 동절기에는 외기온도가 낮고 하절기로 가면서 외기온도가 상승하면서 곡은도 비슷한 경향을 나타내었지만, 외기온도의 비해 완만한 경향으로 나타났다. 그러나, 하절기의 곡은은 동절기에 비해 외기온도의 영향이 많은 것으로 나타났다.

그림 5는 저장빈 벽체에서의 곡은 예측치와 실측치를 나타낸 것이다. 벽체는 외기온도의 직접적인 영향을 받는 곳으로 그림에서와 같이 곡은의 변화는 외기온도와 같이 변화 폭이 크게 나타났다.

곡은의 예측치와 실측치간에 RMSE는 중앙에서  $1.78^{\circ}\text{C}$ , 벽체에서는  $2.43^{\circ}\text{C}$ 로 나타나 개발한 시뮬레이션 프로그램으로 저장빈의 곡은을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

## 6. 결론 및 요약

본 연구는 유한차분법을 이용하여 원형철제빈에 저장 중인 벼의 곡은 예측 시뮬레이션 모델을 개발하였으며, 일 최고 및 최저온도, 일적산 수평면일사량, 풍속 및 노점온도는 기상청의 자료를 이용하였다. 개발한 시뮬레이션 모델의 검증을 위해 직경 2.7, 높이 4.8 및 두께 0.05m의 비단열 원통형 철제빈에서 퇴적고 3m, 시료량 9.8ton을 약 7개월 간 저장 실험을 수행하였다.

곡물층과 벽체에서의 비정상열전달방정식을 유한차분법을 이용하여 해석하였으며, 곡물의 호흡식을 이용하여 원형철제빈에 저장 중인 벼의 곡은을 예측할 수 있는 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다.

벼의 곡온은 중앙에서 외기온도에 비해 완만한 변화를 보였으며, 동절기에 비해 하절기의 변화폭이 크게 나타났다. 벽체의 곡온은 중앙에 비해 변화폭이 크게 나타나 외기온도의 영향이 많은 것으로 나타났다.

시뮬레이션에 의한 곡온의 예측치와 실측치간에 RMSE는 중앙에서 1.78℃, 벽체에서는 2.43℃로 나타나 개발한 시뮬레이션 프로그램으로 저장 중 벼의 곡온을 예측할 수 있을 것으로 판단되었다.

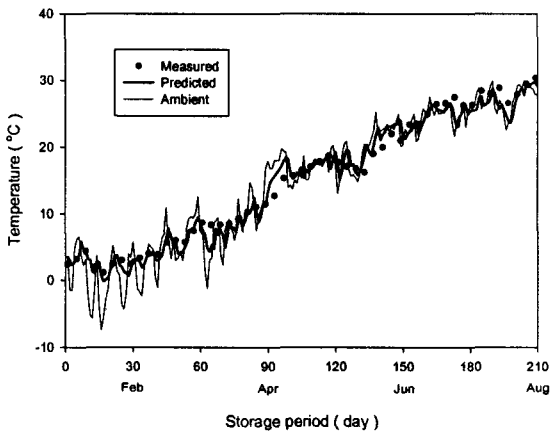


Fig 4. Comparison of measured and predicted grain temperature at the center of storage bin.

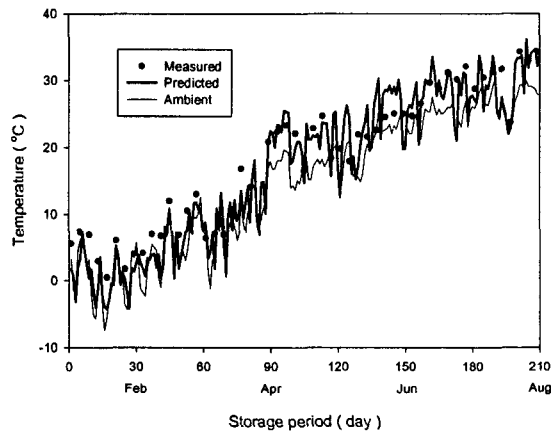


Fig 5. Comparison of measured and predicted grain temperature at the wall of storage bin.

## 7. 참고문헌

1. ASAE STANDARDS. 1996. Moisture relationships of plant-based agricultural products. ASAE D245.5:452-464.
2. Chang, C.S., H.H. Converse. and J.L. Steele. 1993. Modeling of temperature of grain during storage with aeration. Trans. ASAE 36(2):509-519.
3. 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).
4. 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).
5. 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.