

벼 퇴적층 냉각 시뮬레이션[†]

Cooling Simulation for Fixed-Bed of Rough Rice

김 동 철*	김 의 응*	금 동 혁**
정회원	정회원	정회원
D. C. Kim	O. W. Kim	D. H. Keum

ABSTRACT

The objective of this study were to develop a cooling simulation model for fixed-bed of rough rice and to analyze the factors affecting cooling time of rough rice.

A computer simulation model based on equilibrium conditions between grain and air was developed to predict temperature and moisture content changes during cooling of rough rice. The result of t-test showed that there were no significant differences between predicted and measured temperature changes on significance level of 5%. Therefore, it appeared that temperature changes predicted by the cooling simulation model agreed well with measured values.

This cooling simulation model was applied to analyze the effect of some factors, such as air flow rate, cooling air temperature and humidity, initial grain temperature and moisture content, and bed depth, on cooling time of rough rice.

Cooling rate increased with increase of air flow rate and bed depth whereas it decreased with increase of cooling air temperature and humidity and initial grain temperature. Among these factors, the most important factor was air flow rate. Specific air flow rate of $0.35 \text{ m}^3/\text{min}/\text{m}^3$ was required for cooling rough rice in 24 hours.

주요용어(Key Words): 벼(Rough rice), 곡물냉각시스템(Grain cooling system), 냉각속도(Cooling rate), 시뮬레이션모델(Simulation model)

1. 서 론

곡물냉각의 목적은 수분이동 및 미생물에 의한 부패방지이며, 냉동을 이용한 곡물냉각의 장점은 계절이나 외기에 무관하게 곡물의 냉각에 필요한 온도의 공기를 얻을 수 있다는 점과 공기의 상대습도를 조절할 수 있다는 점이다(Sauer, 1992).

외기를 냉각하여 냉각된 공기로 곡물을 냉각하는 곡물냉각시스템(grain cooling system)은 압축기, 증발기, 응축기, 재열기 및 송풍팬 등으로 구성되어 있는데(Sulzer-Escher Wyss, 1984), 이러한 곡물냉각시스템을 이용하여 곡물을 냉각할 때 냉각 소요시간에 영향을 미치는 인자로는 송풍량, 냉각공기 온도 및 상대습도, 곡물의 초기곡온 및 함수율, 퇴적높이 등

[†] 본 연구는 농림기술개발사업의 연구비 지원에 의해 수행되었음.

* 한국식품개발연구원 특수연구사업단 쌀연구사업부

** 성균관대학교 생명자원과학대학 생물기전공학과

을 들 수 있다.

송풍량은 냉각 소요시간을 결정하는 주요한 인자(ASHRAE, 1991)로서 송풍량이 증가할수록 냉각 소요시간이 단축되며, 송풍량은 외기의 온도 및 상대습도와 냉각공기의 온도 및 상대습도의 영향을 받게 된다. Sauer(1992)는 송풍량에 따라 냉각 소요시간이 달라지는데, 곡물의 온도를 송풍공기의 온도까지 냉각시키는데 필요한 송풍량은 공기의 분포가 균일한 경우는 곡물 체적의 600배~750배 정도이나, 공기의 분포가 균일하지 않을 경우에는 곡물 체적의 약 1,000배 정도의 냉각공기가 필요하다고 보고하였다. 또한, 냉각에 필요한 운전시간은 계절에 따라 수천 시간까지 다양하며, 낮과 밤의 냉각부하가 대단히 큰 차이가 있으므로 저온의 공기를 얻기 위해서는 낮의 최대부하에 맞는 냉동기를 선정하거나 곡물 냉각시스템을 통과하는 송풍량을 제어할 수 있어야 한다고 보고하였다. 곡물을 1일에 냉각할 수 있는 풍량비에 대해서는 Shove(1966) 등은 $0.50 \sim 1.1 \text{ m}^3/\text{min}/\text{ton}$ 정도가 필요하다고 보고하였으며, ASHRAE (1991)은 $0.4 \text{ m}^3/\text{min}/\text{m}^3$ 정도가 적합하다고 보고하였다.

냉각공기의 온도 및 상대습도는 곡물의 함수율에 따라 달라지게 되는데 Ihen(1971)은 독일에서 10년간 최초의 상용적인 곡물 냉각시스템을 사용한 경험을 바탕으로 함수율 15%, w.b. 미만의 곡물은 곡물의 온도가 20°C 미만일 때는 냉각할 필요가 없었으며, 21%, w.b. 미만은 $8 \sim 10^\circ\text{C}$, 25%, w.b. 미만은 $4 \sim 5^\circ\text{C}$ 로 냉각하여 저장하여야 한다고 보고하였다. 한편, Sulzer-Escher Wyss사(1989)에서는 함수율과 냉각 저장온도 및 안전 저장기간에 대하여 함수율 15%, w.b. 이하의 곡물은 $9 \sim 12^\circ\text{C}$ 로 저장할 경우 영구히 저장할 수 있으며, 15~16.5%, w.b.의 곡물은 $8 \sim 10^\circ\text{C}$ 로 저장할 경우 안전 저장기간은 1~1.5년 정도이며, 함수율 16.5~18%, w.b.인 곡물은 $5 \sim 7^\circ\text{C}$ 로 저장할 경우 안전 저장기간은 4~6개월 정도이며, 그 이상의 함수율을 가진 곡물은 5°C 에서 저장할 경우 함수

율에 따라 1주에서 3개월동안 안전하게 저장할 수 있다고 보고하였다.

곡물의 초기온도 및 함수율은 곡물의 냉각저장이 일시저장인지 또는 장기저장인지에 따라 달라지게 되며, 퇴적높이는 원형철제빈, 사각빈, 콘크리트빈 등에 따라 달라진다.

이러한 인자들은 냉각속도 뿐만 아니라 냉각에 소요되는 비용 및 벼의 품질에도 영향을 미치게 된다. 따라서 곡물 냉각시스템의 효율적인 설계와 운영을 위해서는 냉각속도를 예측하고, 이와 관련된 인자들의 영향을 파악하는 것은 대단히 중요하다.

따라서 본 연구의 목적은 벼 고정퇴적층의 곡물변화를 예측할 수 있는 냉각 시뮬레이션 모델을 개발하여, 이를 실험을 통하여 검증하고, 시뮬레이션 방법을 이용하여 냉각속도와 관련된 영향인자를 구명하는데 있다.

2. 시뮬레이션 모델링

가. 수학 모델

곡물의 후층을 많은 박층으로 나누고 각각의 박층에서 일어나는 곡물의 온도와 함수율, 곡물층 통과공기의 온도와 절대습도의 변화를 연속적으로 계산하여 조합하는 방법을 벼의 퇴적층 냉각모델의 기본 개념으로 하였다. 벼의 냉각에 사용되는 풍량비가 보통 $0.5 \text{ m}^3/\text{min}/\text{m}^3$ 이하로 낮은 수준이고, 냉각공기의 조건이 급격하게 변화하지 않고 거의 일정하게 유지된다. 따라서, 곡물의 박층에서 곡물과 통과공기간에 평형이 이루어지는 것으로 가정할 수 있다.

곡물층에서 곡물과 통과공기가 평형을 이룬다는 것은 냉각 후 곡온과 배출공기의 온도가 같게 되며, 곡물의 평형상대습도와 배출공기의 상대습도가 같아지는 것을 의미한다. 따라서, 곡물 박층의 냉각과정에서 미지항은 배출공기의 건구온도(T)와 배출공기의 절대습도(H) 및 냉각 후의 함수율(M)이 되므

로 기본적으로 3개의 방정식이 필요하게 된다.

Δt 시간 동안 Δx 두께의 곡물층에 대한 에너지 평형 및 물질평형과, 곡물과 통과공기의 평형 조건을 고려하면 다음의 3개 방정식이 유도된다(금 등, 1996).

$$T_f = \frac{(c_a + c_v H_o) T_o + R(1 + M_o) c_{po} \theta_o - (H_f - H_o) h_{fg}}{c_a + c_v H_f + R(1 + M_f) c_{pf}} \dots\dots\dots (1)$$

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

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

- 여기서 c_a : 건공기의 비열(1.007 kJ/kg · K)
 c_v : 수증기의 비열(1.876 kJ/kg · K)
 c_{po} : 냉각 전 곡물의 비열(kJ/kg · K)
 c_{pf} : 냉각 후 곡물의 비열(kJ/kg · K)
 ERH : 곡물의 평형상대습도(dec.)
 G_a : 건공기 유동율(kg/hr · m²)
 h_{fg} : 곡물 수분의 증발잠열(kJ/kg)
 H_o, H_f : 유입 및 배출공기의 절대습도(kg/kg)
 M_o, M_f : 냉각 전후의 곡물함수율(dec., d.b)

$$R : \text{곡물건물 대 건공기비} \left(\frac{\rho_p \Delta x}{G_a \Delta t} \right)$$

RH_f : 배출공기의 상대습도(dec.)

T_o, T_f : 유입 및 배출공기의 온도(°C)

Δt : 시간중분(hr)

Δx : 곡물의 박층두께(m)

θ_o : 곡물의 초기곡온(°C)

ρ_p : 곡물의 건물산물밀도(kg/m³)

식 (1) 및 (2)는 각각 에너지 및 수분평형 방정식이며, 식 (3)은 곡물과 배출공기의 평형조건으로, 이들 3개의 방정식을 이용하여 곡물의 냉각과정에서 곡물의 함수율, 곡온 및 공기상태 변화를 예측하였다.

이 때 벽체로부터의 열 전달은 무시하였고, 곡물의 각층에서의 초기 곡온 및 함수율은 일정한 것으로 가정하여 미지항인 평형상대습도, 공기 및 곡물의 성질은 다음과 같이 계산하였다.

평형상대습도는 방습과 흡습이 일어날 경우를 동시에 고려하였으며, 벼의 방습 및 흡습 평형상대습도는 다음의 식 (4)를 이용하였다(금 등, 1997).

$$ERH = \exp \left[\frac{-A}{1.987(T_f + C)} \exp(-BM_f) \right] \dots (4)$$

여기서, 실험상수 A, B 및 C의 값은 다음과 같다.

- A : 940.84 (방습), 1741.87 (흡습)
 B : 16.724(방습), 18.796(흡습)
 C : 56.190(방습), 123.297(흡습)

배출공기의 상대습도는 식 (5)로 나타낼 수 있다(ASAE Standard, 1997).

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

여기서, P_{am} : 대기압(kPa)

P_s : 온도 T_f 에서의 포화수증기압(kPa)

포화수증기압의 계산은 다음 식 (6)을 사용하였다(ASAE Standard, 1997).

$$\ln \left(\frac{P_s}{R} \right) = \frac{A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4}{FT - GT^2} \dots\dots (6)$$

- 여기서, R = 22,105,694.25, A = -27,405.526,
 B = 97.5413, C = -0.146244,
 D = 0.12558 × 10⁻³, E = -0.48502 × 10⁻⁷,
 F = 4.34903, G = 0.39381 × 10⁻²

벼의 수분 증발잠열 h_{fg} 의 계산은 다음 식 (7)을 이용하였다(금 등, 1998).

$$h_g = (2,502.5 - 2.3867) (1. + 1.2356 \exp (-16.7255M)) \dots\dots\dots (7)$$

여기서 h_g : 비의 수분 증발잠열(kJ/kg)
 T : 비의 곡온(℃)
 M : 함수율(dec., db)

비의 비열은 다음 식(8)을 이용하였다(Morita and Singh, 1979).

$$c_p = 1.2692 + 3.49M \dots\dots\dots (8)$$

여기서, c_p : 단립중 비의 비열(kJ/kg · K)
 M : 비의 함수율(dec., w.b.)

나. 수확모델의 해석과 프로그래밍

식(1), 식(2) 및 식(3)으로 구성된 수확모델은 비선형방정식으로 할선법(secant method)을 이용하여 해를 구하였다. 먼저 H_r 의 초기치를 가정하고, 이를 식(2)과 식(1)에 대입하여 각각 M_r 와 T_r 를 구하였다. M_r 와 T_r 를 각각 식(4)와 식(5)에 대입하여 ERH와 RH_r를 구하여 ERH-RH_r의 값이 0에 가까운 허용치 이하가 되도록 할선법을 이용하여 반복 계산하였다.

시뮬레이션 프로그램은 FORTRAN 77으로 작성하였으며, 주 프로그램과 평형상대습도 및 습공기의 성질을 계산하기 위한 부프로그램, 할선법의 부프로그램으로 구성하였다. 입력자료는 냉각공기의 건구온도 및 상대습도, 곡물의 초기함수율 및 곡온, 곡물층의 퇴적고 및 송풍량이었으며, 출력자료는 퇴적깊이별 곡온 및 함수율로 구성하였다. 곡물층의 미소두께는 0.1m, 시간의 증분은 0.1hr로 하였다.

3. 모델의 검증

가. 검증 실험

(1) 공시재료

검정실험용으로 사용한 벼는 함수율 23.2%, w.b.의 중만생종인 동진벼로서, 울산시 농소 미곡종합처리장에서 '97년 10월 21일 구입하여 공시하였다.

(2) 실험장치 및 방법

사용된 빈은 직경 1.1m, 높이 2.3m의 원통형으로 철판으로 제작하였으며, 단열은 실시하지 않았다. 원통형 빈의 바닥에서 0.3m 높이에 다공의 통기마루를 설치하였으며, 통기마루로부터 각각 0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5, 1.8m의 높이에 $\phi 0.017m$ 의 시료 채취구를 설치하였다. 또한, 빈내에 시료 채취구와 동일 높이에 각각 3개씩 총 18개의 열전대(K-type)를 설치하여 곡온을 측정하였으며, 측정치는 자료수집장치(Datascan, 7327, U.K.)로 기록하였다.

냉각공기는 온도조절이 가능한 저온저장고의 냉기를 사용하였다. 빈을 저온저장고 외부에 설치하고, 저온저장고의 벽체를 타공한 다음 $\phi 0.06m$ 의 플로노즐로 빈의 공기압력실과 저온저장고를 연결하였다. 저온저장고내에는 플로노즐에 연결하여 송풍기(0.2kW, 3.5m³/min)을 설치하고, 송풍량 제어를 위하여 변속모터를 부착하였다. 송풍량은 플로노즐을 사용하여 측정하였으며, 송풍량 측정덕트는 한국공업규격(KS A 0612)에 준하여 설치하였다.

벼는 빈바닥에서 1.9m 높이로 퇴적하였으며, 이때 시료량은 1.8m³이었다. 실험에 사용한 냉각공기의 평균 온도 및 상대습도는 8.5(±1.5)℃, 87.7(±5)%였으며, 풍량비는 0.58m³/min/m³, 원통형 빈에 투입된 비의 초기 곡온은 평균 26.3℃이었다. 또한, 실험기간중 빈이 위치한 저온저장고 외부의 평균 온도 및 상대습도는 17.0℃, 60.8%였다.

나. 모델의 검증

벼 곡온의 실측치와 냉각 시뮬레이션 모델에 의한 예측치를 비교한 결과는 그림 1과 같았다. 그림은

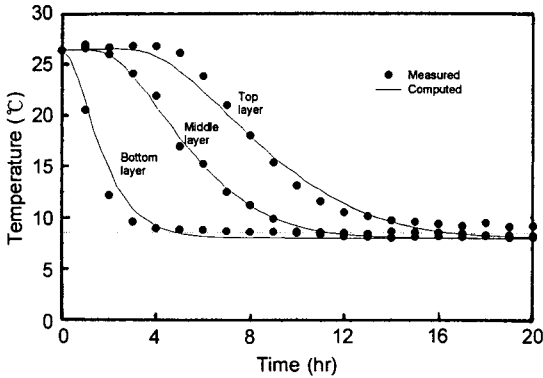


Fig. 1 Comparison of measured and computed temperature changes for fixed bed of rough rice.

퇴적층에서 약 0.3m (하층), 0.9m (중간층), 1.5m (상층) 지점의 벼 곡온의 예측치와 실측치를 비교한 것이다. t-test 결과 곡온의 실측치와 예측치간에 $p = 0.05$ 수준에서 유의적인 차이가 없었으며, RMSE는 0.75°C 였다. 또한, 냉각을 시작하여 24 시간 후의 평균 함수율은 22.3%, w.b.로서 예측치 22.34%, w.b.와 잘 일치하였다. 따라서 이러한 예측정도는 곡물냉각시스템의 분석에 유용할 것으로 판단되었다.

한편, Maier 등(1990)은 옥수수 냉각과정중 옥수수의 곡온이 냉각공기온도 이하로 강하하였으며, 이는 냉각과정중 옥수수로부터의 수분 증발에 따른 증발잠열의 영향이라고 보고하였다. 본 연구에서도 동일하게 냉각과정중 벼의 곡온이 냉각공기온도 이하로 강하하였는데 이는 냉각과정중 벼로부터의 수분 증발에 의한 영향으로 판단되었다.

4. 냉각속도 관련 인자의 영향

송풍량, 냉각공기 온도 및 상대습도, 초기 벼의 곡온 및 함수율, 퇴적높이가 벼의 냉각속도에 미치는 영향을 개발한 시뮬레이션 모델을 사용하여 분석하였다. 빈은 원통형으로 직경 6.2m, 높이 12.6m이며, 퇴적가능한 용량이 약 380m^3 인 200톤 규모의 빈을

Table 1 Hypothetical operating conditions for cooling simulation

Bed depth (cm)	12.6
Initial temperature of rough rice ($^{\circ}\text{C}$)	25.0
Initial moisture content of rough rice (% , w.b.)	18.0
Cooling air temperature ($^{\circ}\text{C}$)	7.0
Cooling air humidity (%)	75.0
Air flow rate ($\text{m}^3/\text{min}/\text{m}^3$)	0.35

대상으로 하였으며, 작동조건을 표 1과 같이 설정하였다.

Sulzer-Escher Wyss사(1984)는 냉각 종료시간을 곡물 상층표면에서 약 30~50cm 깊이의 곡물의 온도가 냉각 공기온도보다 약 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ 높게 측정되면 냉각을 종료하는 것이 바람직하다고 하였다. 그러나 퇴적높이가 낮을 경우 냉각이 불충분할 수 있으므로 본 연구에서는 Sauer(1992)의 결과와 동일하게 냉각 종료시간을 곡물 상부표면에서 30cm 깊이의 곡물온도가 유입되는 냉각공기 온도와 동일하게 측정되는 시간으로 하였다.

가. 송풍량

송풍량은 벼의 냉각속도에 영향을 주는 가장 주요한 설계인자로서 송풍량이 클수록 높은 열 전달이 이루어져 빠른 냉각속도를 얻을 수 있으나, 외기를 냉각하는 곡물 냉각시스템에서 송풍량은 냉동능력과 외기온도 및 습도 조건, 냉각공기의 온도 및 습도 조건에 영향을 받게 된다. 동일 냉동능력하에서 송풍량은 외기온도 및 상대습도가 높을수록, 냉각 공기온도 및 상대습도가 낮을수록 적어지게 된다.

그림 2는 풍량비 $0.1\sim 1.5\text{m}^3/\text{min}/\text{m}^3$ 범위에서 풍량비가 냉각 소요시간에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 약 $0.4\text{m}^3/\text{min}/\text{m}^3$ 정도까지는 풍량비가 증가함에 따라 냉각 소요시간은 현저하게

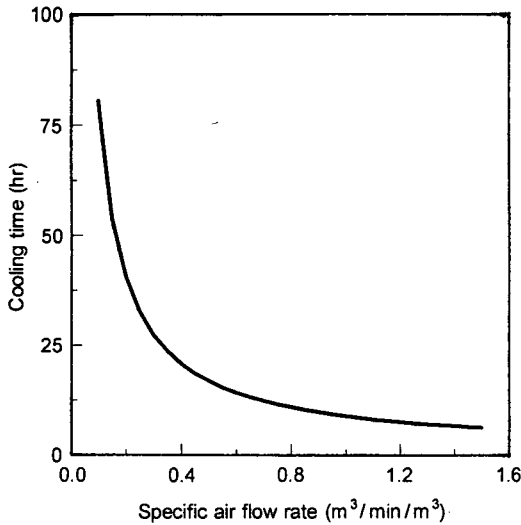


Fig. 2 Effect of specific air flow rate on required cooling time.

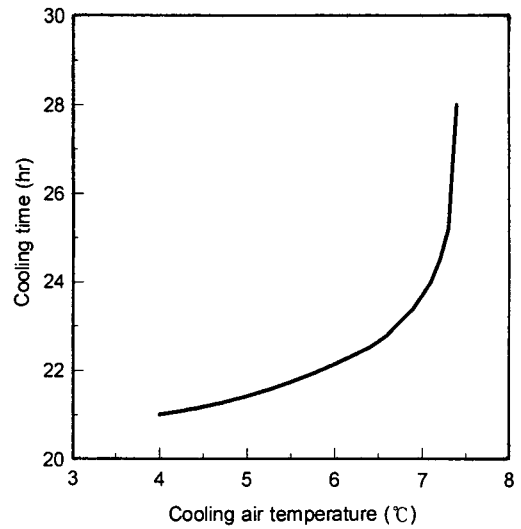


Fig. 3 Effect of cooling air temperature on required cooling time.

단축되었으나, 약 $0.4\text{m}^3/\text{min}/\text{m}^3$ 이상에서는 풍량비의 영향이 현저하게 감소하였다. 풍량비 $0.1\sim 1.5\text{m}^3/\text{min}/\text{m}^3$ 범위에서 초기함수율 18%, w.b.인 벼의 냉각 후 함수율은 17.3%, w.b.로 냉각에 의해 함수율은 약 0.7%, w.b. 정도가 낮아졌으나 송풍량의 변화에 따라서는 큰 변화는 없었다. 한편, 주어진 풍량비 범위에서 최대 냉각 소요시간은 80.5 시간이었으며, 냉각 소요시간 24시간에 냉각 공기온도까지 냉각시키기 위한 풍량비는 $0.35\text{m}^3/\text{min}/\text{m}^3$ 로서 ASHRAE (1991)의 $0.4\text{m}^3/\text{min}/\text{m}^3$ 와 유사한 결과를 나타내었다.

나. 냉각 공기온도

그림 3은 냉각 공기온도 $4.0\sim 7.4^\circ\text{C}$ 범위에서 곡물 상부표면에서 30cm 깊이의 곡물온도가 7°C 로 냉각 되는데 소요되는 시간을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 냉각 공기온도를 낮게 하여도 냉각 소요시간은 급격하게 단축되지 않았다. 또한, 냉각 후 벼의 함수율은 냉각 공기온도 $4.0\sim 7.4^\circ\text{C}$ 범위에서 17.2~17.3%, w.b.를 나타내어 벼의 초기곡온과 냉각 공기온도

의 차가 클수록 함수율 저하가 다소 커지는 것을 알 수 있었다.

한편, 냉각 공기온도가 7.4°C 일 때 벼의 곡온이 7°C 까지 냉각되었는데 이는 수분 증발에 따른 냉각의 영향으로 판단되었으며, 냉각 공기온도가 7.5°C 에서는 100시간 냉각으로도 7°C 이하로는 냉각되지 않았으며, 100시간 냉각 후 곡온은 7.09°C 를 나타내었다.

다. 냉각공기 습도

벼는 냉각과정중 냉각공기의 상대습도에 따라 건조 또는 흡습하게 된다. 냉각과정중 건조가 발생하면 수분 증발잠열이 필요하게 되며 이로 인해 벼의 품온은 냉각 공기온도보다 다소 낮은 온도로 냉각되고(Maier 등, 1990), 반대로 흡습시에는 다소 높은 온도로 냉각되며 냉각속도도 늦어진다(Sulzer-Escher Wyss, 1984).

함수율 18%, w.b.인 벼의 경우 곡온 7°C 에서 평형 상대습도는 80.6% 정도이다. 외기의 노점온도가 냉각 공기의 노점온도보다 높을 경우, 냉각코

일을 통과한 냉각공기의 상대습도는 95% 내외(김효경, 1988)가 되어 냉각공기를 재열하지 않을 경우 냉각과정중 퇴적된 벼의 하층부는 흡습하게 된다.

그림 4는 냉각공기의 상대습도가 냉각 소요시간과 벼의 함수율 변화에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 상대습도가 낮을수록 냉각 소요시간은 감소하였으며, 초기함수율 18%, w.b.인 벼의 냉각 후 함수율은 17.0~17.3%, w.b.를 나타내어 약 0.7~1.0%, w.b.정도가 낮아졌다. 그러나, 냉각공기의 상대습도가 80% 이상일 때, 초기함수율 18.0%, w.b.인 벼는 100시간 이내에 냉각공기와 동일한 온도까지 냉각되지 않았으며, 온도 7℃, 상대습도 80%, 85%, 90%, 95%의 냉각공기로 100시간 냉각 후 벼의 곡온은 각각 7.03℃, 7.44℃, 7.84℃, 8.23℃를 나타내었다. 한편 함수율 16.5%, w.b.인 벼의 경우는 상대습도 70%인 냉각공기로는 동일한 온도로 냉각이 어려웠으며, 냉각공기의 상대습도가 95%일 때 벼는 8.85℃까지 냉각되어 18%, w.b.보다 높은 곡온을 유지하였다.

따라서, 벼의 냉각시 목표 온도까지 빠른 속도로

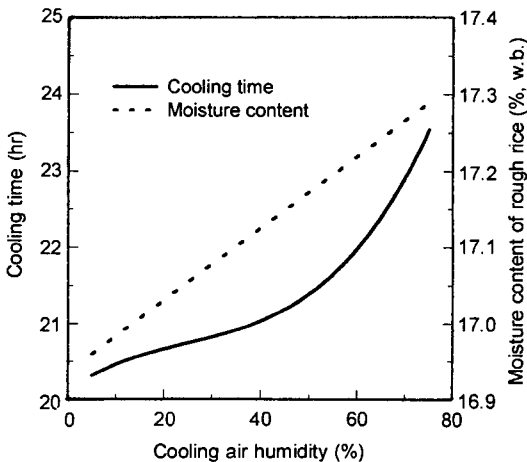


Fig. 4 Effect of cooling air humidity on required cooling time and moisture content changes of rough rice.

냉각하기 위해서는 가능한 상대습도를 낮추어야 함을 알 수 있다. 그러나 상대습도를 낮추기 위해서는 증발기에서 목표 온도보다 낮은 온도로 냉각하여 제습한 후 재열기에서 가열해야 하므로 동일 냉동능력을 갖는 곡물 냉각시스템에서는 송풍량이 저하하게 되어 소요 냉각시간은 오히려 증가하게 된다. 이러한 상대습도와 송풍량의 영향을 분석하기 위하여 응축온도 40℃, 증발온도 0℃에서 냉각능력 40,764 kcal/hr, 동력 15HP의 압축기(모델명 : HG 4/555-4S, BOCK, 1988)를 갖는 곡물 냉각시스템에서 온도 33℃, 상대습도 75%의 외기를 냉각하여 7℃, 95%로 냉각한 냉각공기와, 3.5℃, 95%로 냉각한 다음 7℃, 75%의 상대습도로 재열한 냉각공기로 함수율 18%, w.b.인 벼를 냉각하는 경우의 냉각 소요시간을 비교하였다. 곡물 상층부 30cm 지점의 곡온이 10℃까지 냉각되는데 소요되는 시간은 재열하지 않는 경우와 재열한 경우가 각각 70.2 시간 및 74.2 시간으로 나타나 재열에 의해 냉각공기의 상대습도를 낮춘 경우에 비해 재열하지 않은 경우가 빠른 냉각속도를 나타내었다. 이 때 송풍량은 각각 0.09759, 0.08938m³/min · m³였으며 냉각 후 함수율은 각각 17.4, 17.3%, w.b.로 나타났다.

라. 벼의 초기곡온

그림 5는 벼의 초기곡온(8~32℃ 범위)이 냉각 소요시간에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 초기곡온 15~32℃ 범위에서 초기곡온이 높아져도 냉각 소요시간은 크게 증가하지 않았다. 약 12℃ 이하에서는 초기곡온이 낮을수록 냉각 소요시간이 비교적 현저하게 감소하였다. 냉각 후 벼의 함수율은 초기곡온이 32℃일 때 17.0%, w.b., 8℃일 때 17.9%, w.b.로서 벼의 초기곡온이 높을수록 냉각 후 함수율이 낮아지는 것으로 나타났다. 냉각에 의한 건조정도는 냉각공기의 상대습도에 따라 다르지만 온도 7℃, 상대습도 75%의 냉각공기로 초기곡온 17℃의 벼를 7℃까

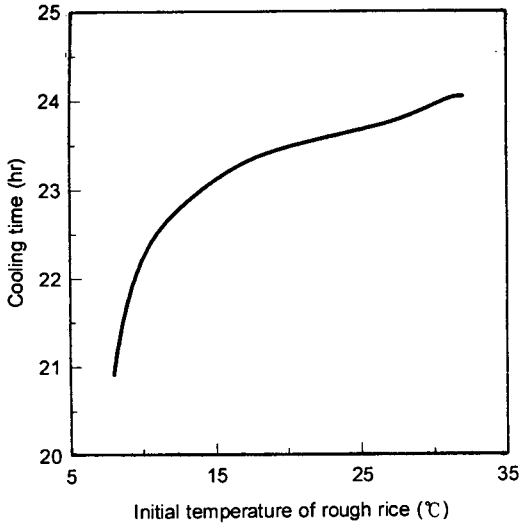


Fig. 5 Effect of initial temperature of rough rice on required cooling time.

지 냉각시킬 경우 함수율은 0.4%, w.b. 정도 낮아지는 것으로 나타났다.

마. 벼의 초기 함수율

그림 6은 벼의 초기함수율(17~27%, w.b. 범위)이 냉각 소요시간에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 초기함수율 17~20%, w.b. 범위에서는 함수율이 증가함에 따라 냉각 소요시간은 28.0 시간에서 23.4 시간으로 감소하였으나, 함수율 20%, w.b. 이상에서는 함수율의 증가에 따라 냉각 소요시간이 오히려 증가하였다. 냉각 후 함수율은 초기함수율에 비해 0.7~1.0%, w.b. 정도가 낮아졌으며, 초기함수율이 높을수록 냉각 후 함수율이 더 많이 감소하였다. 초기함수율이 증가함에 따라 소요 냉각시간이 감소하였다 증가하는 것은 호흡에 의한 발열량과 건조로 인한 증발 잠열의 영향으로서, 함수율 20%, w.b. 이상에서는 상층부의 곡은이 호흡에 의해 상승하였기 때문에 판단되었다.

바. 퇴적높이

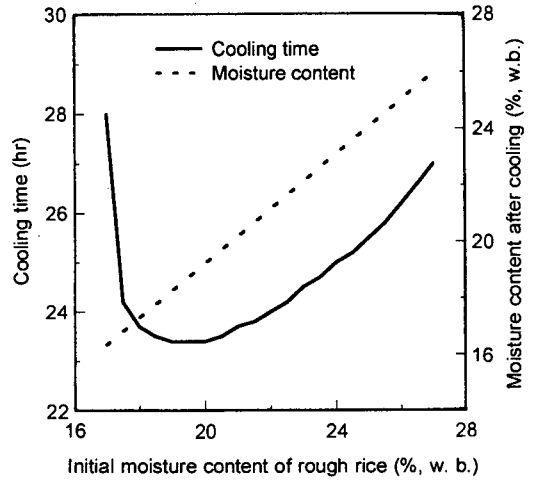


Fig. 6 Effect of initial moisture content of rough rice on required cooling time and moisture content changes of rough rice.

그림 7은 벼의 퇴적높이(5~14m 범위)가 냉각 소요시간에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 퇴적높이가 5~14m로 증가함에 따라 냉각 소요시간은 24.6 시간에서 20.5 시간으로 감소하였다. 그러나 퇴적높이 5m와 14m에서의 냉각 소요시간 차이는 0.9 시간에 불과하여 퇴적높이에 따라 냉각 소요시간의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 이때 풍량비는 0.35m³/min/m²로 같지만, 퇴적높이 5~14m 범위에서 걸보기 풍속은 1.8~4.4m³/min/m²를 나타내어 퇴적높이가 높을수록 걸보기 풍속이 증가하는데 원인이 있는 것으로 판단되었다. 또한, 퇴적높이 5~14m 범위에서 냉각 후 벼의 함수율은 17.3%, w.b. 정도로서 거의 일정하여 퇴적높이에 따른 변화는 없었다.

한편, 걸보기 풍속을 3.0m³/min/m²로 일정하게 유지하면서 퇴적높이에 따른 소요 냉각시간의 변화를 살펴본 결과, 퇴적높이 5~14m에서 냉각 소요시간은 14.7~36.5 시간으로 퇴적높이가 증가할수록 냉각 소요시간은 급격하게 증가하였다.

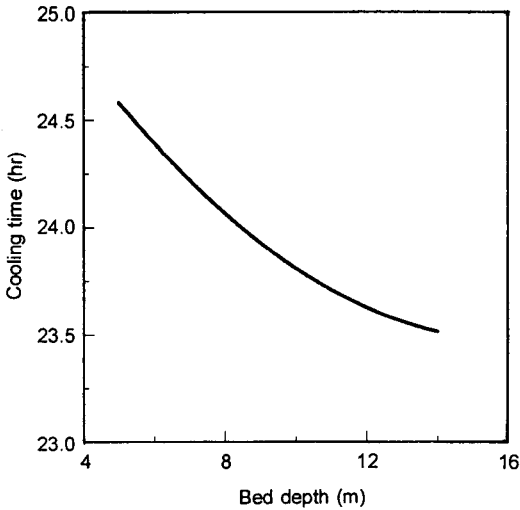


Fig. 7 Effect of bed depth of rough rice on required cooling time.

5. 결론 및 요약

벼 고정층의 곡온변화를 예측할 수 있는 냉각 시뮬레이션 모델을 개발하고, 이를 실험을 통하여 검증하였으며, 개발한 시뮬레이션 모델을 이용하여 냉각속도 영향인자를 분석하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

가. 곡물층의 에너지평형 및 물질평형과, 곡물과 통과공기의 평형조건에 기초하여 벼 고정층에서 벼의 곡온변화를 예측할 수 있는 시뮬레이션 모델을 개발하고, 이를 실험을 통해 검증하였다. t 검증결과 5%의 유의수준에서 실험치와 예측치간에는 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다. 따라서 개발한 냉각 시뮬레이션 모델은 곡물 냉각시스템의 분석에 유용할 것으로 판단되었다.

나. 개발한 시뮬레이션 모델을 이용하여 송풍량, 냉각공기 온도 및 습도, 벼의 초기곡온 및 함수율, 퇴적높이 등 벼의 냉각속도 영향인자를 분석한 결과, 주어진 작동조건하에서 냉각속도에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 송풍량으로 나타났다.

다. 풍량비가 $0.4\text{m}^3/\text{min}/\text{m}^3$ 이하에서는 송풍량

이 증가할수록 냉각 소요시간은 현저하게 단축되었으나, 그 이상의 송풍량에서는 송풍량의 영향이 현저하게 감소하였다. 냉각 소요시간 24 시간에 초기 곡온 25°C 인 벼를 냉각 공기온도인 7°C 까지 냉각시키기 위한 풍량비는 $0.35\text{m}^3/\text{min}/\text{m}^3$ 로 나타났다.

라. 냉각공기 온도 및 상대습도, 벼의 초기곡온이 낮을수록, 퇴적높이가 증가할수록 냉각 소요시간은 감소하였으나 송풍량에 비해 그 영향은 그다지 크지 않았다. 벼의 초기함수율은 20%, w.b. 미만에서는 함수율의 증가에 따라 냉각 소요시간은 감소하였지만 그 이상의 함수율에서는 함수율의 증가에 따라 냉각 소요시간이 증가하였다.

참 고 문 헌

1. 금동혁, 박선태. 1996. 벼 상온 통풍건조의 최소 송풍량비에 관한 연구. 한국농업기계학회지 21(1):60-71.
2. 금동혁, 박춘우. 1997. 곡류 및 버섯류의 평형함수율 및 박층건조방정식에 관한 연구. 한국농업기계학회지 22(1):11-20.
3. 금동혁, 한충수, 박춘우. 1998. 시뮬레이션에 의한 누적혼합 상온통풍건조의 송풍기 및 가열기의 운영방법에 관한 연구. 한국농업기계학회지 23(3):229-244.
4. 김효경. 1988. 공기조화. p. 34, 동명사. 서울.
5. 한국공업표준협회. 1992. 조임기구에 의한 유량 측정방법(한국공업규격 KS A 0612). P1, 서울.
6. ASHRAE Handbook. 1991. P 22.9.
7. BOCK. 1998. Sale brochure semi-hermetic compressors. Germany.
8. Ihen, H. 1971. Gerstenkühlung und konservierung (Barely cooling and preservation). Deutsche Brauwirtschaft 2(23):10-13.
9. Maier, D. E. 1994. Chilled aeration and storage of U.S.A crop-a review. Proceedings of the 16th

- International working conference on stored-product protection, Australia : 300-311.
10. Maier, D. E., S. G. Ilangantileke and H. Brunner. 1990. Grain cooling in southeast Asia - a comparison of conventional and chilled aeration. Int. Agr. Eng. Conference, Bangkok, Thailand : 1-30.
 11. Sauer, D. B. 1992. Storage of cereal grains and their products. p. 274, A.A.C.C., Inc., Minnesota, U.S.A.
 12. Shove, G. C. 1966. Application of dehydrofrigidation to celled corn conditioning. ASAE paper No. 70-302.
 13. Sulzer-Escher Wyss. 1984. Granifrigor grain cooling system information concerning the cooling of granular products. Lindau, Germany.
 14. Sulzer-Escher Wyss. 1989. Sale brochure Granifrigor grain cooling systems. Lindau, Germany.