

곡물냉각기를 이용한 벼 건조 및 저장시스템의 최적화

김동철[†], 김의웅
한국식품개발연구원

Optimization of Drying and Storage System for Paddy Using the Grain Cooler

Dong-Chul Kim[†], Oui-Woung Kim

Korea Food Research Institute, Sunghnam 463-420, Korea

Abstract

This study was conducted to develop an optimization model using Box's Complex Algorithm, and to determine optimum operating conditions to minimize costs for the drying and storage system using the grain cooler. To minimize the system operation cost, the optimum moisture contents after the first drying were found to be from 17.2 to 19.8 %. And optimum drying and cooling capacities were obtained. The combination of the dryer and grain cooler was found to be economical, showing enhancement of the drying capacity over 50%, and decrease of drying cost over 10%. When the circulating grain dryers of 6 and 20 ton/batch were used in conjunction with the grain cooler, the cost required for drying and storage system for paddy were 28,464~33,317won/ton and 20,588~26,511 won/ton, respectively, which was from 2.6 to 27.3% lower than that of conventional drying and storage system.

Key words : paddy, optimization, grain cooler, dryer, cost

서 론

곡물냉각은 세계 제2차 대전 이후 곡물의 수확방법이 전통적인 수확방법에서 콤파인을 사용하는 대규모 수확방법으로 전환됨에 따라 대규모로 반입되는 고풍수율의 곡물을 처리하여 곡물을 품질저하없이 안전하게 저장하는 것은 물론이며, 건조능력을 향상시키는 효율적인 방법으로 주목받게 되었다(1, 2, 3, 4).

특히, 곡물냉각기와 화력건조기의 조합사용으로 인해 건조능력은 크게 향상되는 것으로 알려져 있는데 Hellemar(4)는 유럽에서 건조기와 곡물냉각기를 조합하여 사용한 결과 건조능력이 30~50%정도 향상되었다고 보고하였으며, Chek(5)는 말레이시아에서 벼의 건조 및 저장에 연속식건조기와 곡물냉각기를 조합하여 사용한 결과, 1일 건조기 용량은 21%정도 향상시킬 수 있었으며, 완전미수율은 3.5%, 전력량은 23.4%정도 절감할 수 있었다고 보고하였다.

우리나라 RPC(미곡종합처리장, Rice Processing Complex)의 운영비중 50~60%를 고정비가 차지하고 있어 운영의 효율성 향상을 위해 고정비의 절감이 요구되고 있다. 반면, 최근 산물(bulk) 벼 수매가 본격화됨에 따라 건조능력이 매우 부

족한 실정이지만 현실적으로 약 25일 이내에 불과한 짧은 수확기간을 감안할 때, 단기간 이용을 위해 막대한 고정비의 증가를 초래하는 건조시설의 증설은 쉽게 결정하기 어려운 실정이다. 또한, 국제 경쟁력제고를 위해서는 식미가 우수한 고품질 쌀 공급체계를 구축해야 하며, 이를 위해서는 15.5~16.5%의 함수율로 연중 안전저장이 가능한 벼의 냉각 저장기술의 도입 필요성은 더욱 높아지고 있다.

따라서, RPC에서 곡물냉각기와 화력건조기를 이용하여 수확기간중 반입되는 물벼를 건조, 냉각저장하는 건조 및 저장시스템의 도입은 벼의 품질저하의 최소화는 물론이며, 기존에 설치된 건조기를 최대한 활용하면서 건조 및 저장비용을 최소화하고, 새로운 시설의 경우에도 건조시설의 투자비용을 최소화하는데 크게 기여할 것으로 기대되고 있다. 그러나, 이와 같은 시스템의 도입을 위해서는 건조기와 곡물냉각기의 효율적인 운영조건의 확립이 필수적이나, 우리나라의 기후조건과 벼 수확후 관리체계하에서 운영조건의 확립에 관한 연구는 전무한 상태이다.

따라서, 본 연구의 목적은 최적화기법을 사용하여 곡물냉각기를 이용한 벼 건조 및 저장시스템의 최적 운영조건을 구명하는데 있다.

[†] Corresponding author. E-mail : krpck@kfri.re.kr, Phone : 82-31-780-9170, Fax : 82-31-780-9059

재료 및 방법

최적화 대상시설

RPC에서 곡물냉각기를 사용하는 건조 및 저장시스템의 운영체계는 반입되는 물벼를 건조기로 빠르게 1차 건조하고, 곡물냉각기로 벼를 1차 냉각하여 약 1개월 정도 안전하게 저장한 다음, 물벼 반입기가 끝나 건조기에 여유가 있을 때 2차 건조하여, 2차 냉각하여 장기저장하는 것으로 정립하였다.

최적화 대상시설으로는 수확기간중 총반입물량이 1,200톤, 2,100톤, 3,000톤 및 4,500톤인 RPC로 하였으며, 건조기는 주로 사용되는 6톤, 20톤 용량의 순환식건조기를 대상으로 하였으며, 건조된 벼는 300톤 규모의 단열된 원형철제빈(6.23 × 19 m, Ø × H)에서 저장되는 것으로 하였다. 실반입기간은 10월중 25일로, 반입되는 벼의 함수율은 24%, 1일 반입량은 평균 반입량으로 하였다.

목적함수

최적화의 목표는 건조·저장에 소요되는 비용의 최소화라고 두고, 이에 따른 제어변수로 1차 건조후 함수율, 건조기 및 곡물냉각기를 설정하였다. 비용은 크게 건조기와 곡물냉각기의 구입 및 설치에 필요한 고정비(fixed cost)와 변동비(variable cost)의 합으로 다음과 같이 구하였다.

고정비

고정비는 부지, 건물 및 설비의 감가상각비와 구입 및 설치비용에 대한 금리, 건조작업에 필수적인 기사의 인건비의 합으로 계산하였다.

6톤 및 20톤 건조기의 설치에 필요한 부지는 7.1평과 12.7 평이며, 부지구입비는 평당 100천원, 건물공사비는 평당 2,000천원을 기준으로 하였으며(6), 법인세법 시행규칙에 의거하여 부지의 잔존가액은 불변가격으로 구입가격의 100%를, 건물의 내용년수는 20년, 잔존가액은 구입가격의 10%를 기준으로 하였다. 건조기 및 부대설비, 곡물냉각기의 내용년수는 10년, 10년후 잔존가액은 구입가격의 10%이며, 금융비용은 연리 5%(정부 지원사업)를 기준으로 하였다. 곡물냉각기 1대의 구입 및 설치가격은 60,000천원, 건조기의 구입 및 설치가격은 6톤, 20톤에 대해 각각 8,150천원 및 34,800천원으로 하였다. 부대설비는 투입 및 배출용 체인콘베어, 게이트 등으로 6톤 및 20톤 건조기의 체인콘베어의 길이는 2.66 m, 4.15 m를 기준으로 하였으며, 단위 미터당 가격은 168천원으로 하였다. 게이트는 건조기 대당 1개로 하였으며, 가격은 개당 500천원(6)으로 하였다.

인건비는 기사 1인이 1개월간 작업하는 것으로 하고 임금에 상여금을 포함하여 1,875 천원/월을 기준으로 하였다.

변동비

변동비는 건조기와 곡물냉각기의 운전에 필요한 전력비와 연료비, 수선유지비와 임시적 인건비의 합으로 계산하였다.

건조기에서 변동비는 배풍 송풍기와 순환 및 투입배출에 필요한 버킷엘리베이터 및 스크류콘베어의 가동에 소요되는 전력비와 버너의 가동에 필요한 연료비의 합으로 계산하였으며, 곡물냉각기는 가동에 필요한 전력비로 계산하였다. 등유가격은 438 원/L, 전력비는 농가용(병)을 적용하여 36.7 원/kW, 계약전력비는 1,070 원/kW으로 하였다. 건조기 배풍송풍기, 버킷엘리베이터 및 스크류콘베어의 소요전력과 건조기에서 등유소비량은 고 등(7)에 의거하여 계산하였다.

건조기의 건조소요시간은 횡류건조모델을 이용하여 구하였다. 순환식건조기에서 건조공기는 x방향, 곡물은 y방향으로 흐르며, 질량유동율은 각각 G_a 및 G_b 이므로, 유동공기층의 임의의 지점에서 미소체적(dx dy)에 대하여 에너지 및 수분평형을 고려하면 다음 식 (1)~(4)와 같은 횡류건조모델을 유도할 수 있다. 또한, 식 (5)과 (6)은 벼를 구로 간주하여 유도한 수분확산모델이다. 모델의 수치해석해는 금 등(8)과 동일한 방법을 이용하여 구하였다.

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{-ha}{G_a c_a + G_a c_v H} (T - \theta) \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{d\theta}{dy} = \frac{ha(T - \theta)}{G_b(c_b + Mc_w)} + \frac{h_{fg} + c_v(T - \theta)}{G_b(c_b + Mc_w)} G_a \frac{\partial H}{\partial x} \dots\dots\dots(2)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} = -\frac{G_b}{G_a} \frac{\partial M}{\partial x} \dots\dots\dots(3)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \text{Thin layer drying equation} \dots\dots\dots(4)$$

$$\frac{\partial M}{\partial x} = \frac{D}{V_p} \left[\frac{\partial^2 M}{\partial \gamma^2} + \frac{2}{\gamma} \frac{\partial M}{\partial \gamma} \right] \dots\dots\dots(5)$$

$$\frac{\partial M}{\partial x} = \frac{3}{R^3} \int_0^R \frac{\partial M}{\partial x} \gamma^2 dr \dots\dots\dots(6)$$

- 여기서, a : 비표면적(m^2/m^3)
 c_a : 건공기의 비열(1.007 kJ/kg · K)
 c_v : 수증기의 비열(1.876 kJ/kg · K)
 c_w : 물의 비열(kJ/kg · K)
 c_b : 곡물의 비열(kJ/kg · K)
 D : 곡립내부의 수분확산계수(m^2/hr)
 G_a : 건공기 유동율($kg/hr \cdot m^2$)
 G_b : 곡물유량($kg/hr \cdot m^2$)
 h : 공기와 곡물사이의 대류열전달계수($kJ/m^2 \cdot hr$)
 h_{fg} : 곡물 수분의 증발잠열(kJ/kg)

- H : 절대습도(kg/kg)
- M : 곡물함수율(dec., d.b)
- r : 곡립의 반경방향 좌표(m)
- R : 곡립의 반경(m)
- t : 시간(hr)
- T : 송풍공기의 온도(°C)
- V_p : 곡립의 유하속도(m/hr)
- x : 곡립의 유하위치 좌표(m)
- θ : 곡립의 온도(°C)

곡물냉각기의 시간당 소비전력은 수확기에 17.4 kW, 하절기에 22.1 kW로서 평균 19.8 kW이었다(9). 따라서 곡물냉각기의 평균 소비전력을 수확기의 평균소비력인 17.4 kW로 설정하였으며, 저장빈 댐퍼 등에서의 냉각공기 누설이 보완된 것으로 가정하고 냉각공기량중 80%를 유효냉각공기량으로 가정하였다.

곡물냉각기에 의한 냉각소요시간은 Kim 등(10)의 시뮬레이션 방법을 이용하였으며, 이 때 냉각공기량은 다음과 같이 구하였다.

곡물냉각기에서 냉각되어 저장빈에 공급되는 냉각공기량은 곡물냉각기의 냉각능력과 송풍기능력에 의해 결정되는데, 냉각부하가 곡물냉각기의 냉각능력보다 큰 경우에는 냉각공기량은 냉각능력에 의해 결정되며, 송풍기의 댐퍼가 제어된다. 곡물냉각기의 냉각능력은 이론적인 냉각능력의 100.3%정도이므로(9), 이론적인 냉각능력을 곡물냉각기의 냉각능력으로 사용하였다. 곡물냉각기의 이론적인 냉각능력은 장 등(11)의 보고와 동일하게 증발온도와 응축온도에 따라 압축기 제조회사의 상용적인 프로그램(VAP 6.1, BOCK Co., Germany)을 이용하여 구한 결과는 다음 식(7)로 나타낼 수 있었다($r^2 = 0.999$).

$$Q_c = a + bT_e + cT_c + dT_e T_c + eT_e^2 + fT_c^2 \dots\dots\dots(7)$$

여기서, Q_c : 압축기의 냉각능력(kcal/hr)

- T_e : 증발온도(°C)
- T_c : 응축온도(°C)
- $a = 50186.0, b = 2050.17, c = -108.14,$
- $d = -14.78, e = 21.30, f = -4.11$

냉각부하가 냉각능력보다 적은 경우에는 댐퍼의 개도율은 100%를 유지하며 냉각능력이 제어된다. 이 때 냉각공기량은 송풍기의 능력에 의해 결정되며, 송풍기의 송풍량은 저장빈의 퇴적고에 의해 결정된다. 곡물냉각기 송풍기의 송풍량과 정압의 관계는 식 (8)와 같으며, 저장빈에서 퇴적고에 따른 송풍량과 정압과의 관계는 식 (9)와 같다. 따라서 식 (8) 및 (9)에서 저장빈의 곡물퇴적고에 따른 냉각공기량을 환산법

을 이용하여 구하였다.

$$\Delta P = 412.1138 + 0.5348Q - 0.0137Q^2 \dots\dots\dots(8)$$

여기서, ΔP : 정압(mmAq)

Q : 송풍량(m³/min)

$$\Delta P = 653.54 \times v^{1.2727} \times (H + 0.1) \dots\dots\dots(9)$$

여기서 ΔP : 송풍저항(mmAq)

v : 벼층 통과공기의 겉보기풍속(m³/sec/m²)

H : 벼 퇴적높이(m)

외기조건은 수원지역 10월 평균기온인 13.4°C, 72.7%(12)를 기준으로 하였다. 또한, 1차 냉각된 곡물의 온도는 함수율 16.5%이하는 9°C, 16.5~18.0%는 7°C, 18.0%이상은 5°C로 설정하였다.

인건비는 임시직 임금으로 하였으며, 연간처리능력 1200톤, 2,400톤, 3,000톤 및 4,500톤 시설에서 소요되는 임시직은 각각 2명, 4명, 5명, 6명(13)을 기준으로 하였다. 임시직의 임금은 농촌 성인 1인의 평균임금인 36,156 원/일을 기준으로 하였다. 또한, 수선유지비는 고정비용의 1%로 하였다.

제한조건

제한조건은 명시적 제한조건(explicit constraint)과 암시적 제한조건(implicit constraint)으로 구분하였으며, 명시적 제한조건은 1차 건조후 함수율, 건조능력, 냉각능력이며, 암시적 제한조건은 처리시간으로 설정하였다.

1차 건조후 함수율의 하한치는 16.5%로 상한치는 20%로 설정하였으며, 건조능력은 6톤, 20톤 용량의 순환식건조기의 소요대수로서 다음 식 (10)에 의해 산출하였으며, Table 1과 같았다. 이 때, 1일 건조작업시간은 20시간, 용적율은 80%, 벼 투입 및 배출시간은 2.0시간, 평균건감율은 0.8%를 기준으로 하였다. 건조능력의 하한치는 함수율 15%까지 건조하는데 필요한 건조기 대수를, 상한치는 20%까지 건조하는데 필요한 건조기 대수로 하였다.

Table 1. Required maximum and minimum numbers of dryer for different annual drying capacities of drying facility in Rice Processing Complex

Annual drying capacity (ton/year)	Holding capacity of dryer(ton)			
	6		20	
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
1,200	3	9	1	2
2,100	5	15	2	4
3,000	8	22	2	5
4,500	11	33	3	8

$$Q_d = \frac{VNTn}{t + \frac{M_1 - M_2}{\alpha_1}} \dots\dots\dots(10)$$

- 여기서, Q_d : 1일 건조능력(ton/day)
- V : 건조기 1대의 용량(ton)
- N : 건조기 대수(대)
- T : 1일 건조작업시간(hr)
- n : 용적율(decimal)
- t : 벼 투입 및 배출 소요시간(hr)
- M_1 : 건조전 함수율(%)
- M_2 : 건조후 함수율(%)
- α_1 : 평균건감율(%/hr)

냉각능력은 곡물냉각기의 소요대수로서 1일 최대 200톤을 냉각할 수 있는 곡물냉각기(9)를 사용하는 것으로 하였으며, 곡물냉각기 대수의 하한치는 1대, 상한치는 3대를 기준으로 하였다.

암시적 제한조건에서 처리시간은 고 등(7)에 의거하여 순환식건조기의 1일 건조시간은 20시간을 기준으로 하였다. 곡물냉각기는 외기온도가 설정온도보다 2.0℃이하로 저하하면 시스템이 일시 정지되고, 저장빈간의 이동에 시간이 소요되므로 순환식건조기와 동일하게 1일 20시간을 기준으로 하였다.

최적화 프로그램의 개발

곡물냉각기를 이용한 벼 건조 및 저장중 여러 조건하에서 소요비용을 최소화하는 최적 운영조건을 구명하기 위하여 Box의 Complex algorithm(14)를 근간으로 하는 최적화 알고리즘을 설정하고 이를 실행시키기 위한 컴퓨터 프로그램을 개발하였다.

이 프로그램은 1개의 주프로그램과 21개의 부프로그램으로 구성하였으며 부프로그램중 Complex알고리즘과 관련이 있는 부프로그램은 BOX, CENT1, CENT2, CENT3, EXPL 및 IMPL이다. 부프로그램중 OBJECT는 목적함수인 소요비용 산정용이며, CROSS는 횡류건조모델에 의한 순환식건조기의 건조소요시간, 건조후 함수율 및 건조소요에너지 계산용, COOL은 냉각 시뮬레이션 모델에 의한 벼 퇴적층에서의 곡물 냉각시간 예측용 부프로그램이다. 또한, XTIME은 암시적 제한조건인 처리시간 산정용 프로그램이다. 프로그램은 MS FORTRAN으로 작성하였으며, 프로그램의 구성도는 Fig. 1과 같았다.

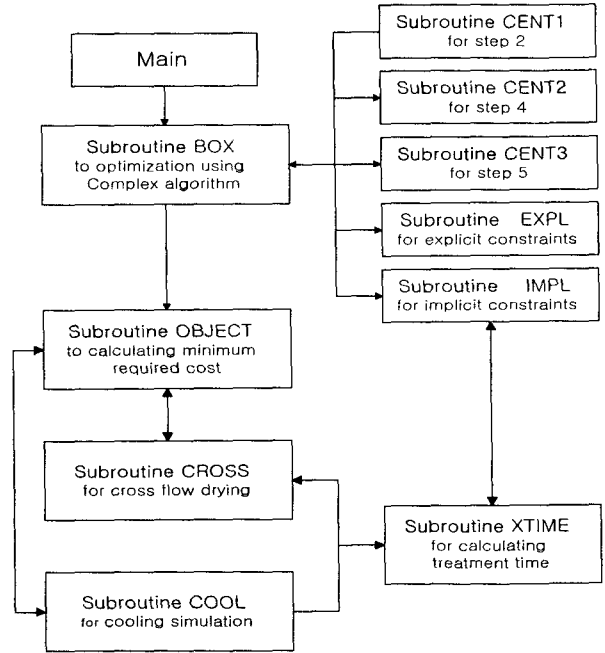


Fig. 1 Diagram of program structure for optimization of drying and storage system using the grain cooler for paddy.

결과 및 고찰

벼의 건조비용 특성

최적화 대상시설에서 벼의 최종함수율별 건조소요시간, 건조기 소요대수 및 톤당 건조에 소요되는 에너지비용을 산출한 결과는 Table 2와 같았으며, 반입되는 함수율 24.0%의 물벼를 15~16%까지 건조할 때 연간처리능력 1,200 톤, 2,400 톤, 3,000 톤 및 4,500 톤 시설에 소요되는 6톤 건조기는 각각 9대, 15대, 22대 및 33대였으며, 에너지비용은 14,882 원/톤이었다. 또한, 20톤 건조기의 소요대수는 각각 2대, 4대, 5대 및 8대였으며, 에너지비용은 8,804 원/톤으로 나타났다. 반면, 약 19%내외로 건조할 때 건조기 소요대수 및 건조비용이 약 절반정도로 감소하는 것으로 나타났다.

한편, 권 등(15)은 연간건조능력이 1,000 톤인 미곡종합처리장시설에서 복합건조시 건조비용은 34,711 원/톤 정도였다고 보고하였으며, 김 등(13)은 건조비용이 49,750 원/톤 정도가 소요된다고 보고하였다.

Table 3은 반입되는 함수율 24.0%의 물벼를 15~16%내외까지 건조할 때 소요되는 건조비용을 나타낸 것으로서, 연간처리능력 1,200 톤, 2,400 톤, 3,000 톤 및 4,500 톤 시설에 소요되는 건조비용은 6톤 건조기를 사용하는 경우에는 36,950~38,928 원/톤으로 연간처리능력이 증가할수록 건조비용은 낮아지는 것으로 나타났다. 또한, 20 톤 건조기를 사용하는 경우에는 24,017~26,433 원/톤으로 나타났다.

Table 2. Estimated numbers of dryer and capacity for paddy drying according to final moisture contents.

Dryer (ton /batch)	Final moisture content (%)	Required drying time(hr)	Annual drying capacity (ton/year)				Energy cost(₩/ton)		
			1,200	2,400	3,000	4,500	total	fuel	electricity
6	21.7	3.1	3	5	7	10	4,252	1,997	2,255
	20.4	4.6	4	7	10	14	6,378	2,995	3,383
	19.2	6.1	5	9	13	19	8,504	3,994	4,510
	18.0	7.6	7	11	16	23	10,630	4,992	5,638
	16.9	9.2	8	13	18	28	12,756	5,991	6,765
	15.8	10.7	9	15	22	33	14,882	6,989	7,893
	14.8	12.2	10	18	25	37	17,009	7,988	9,021
20	21.6	2.8	1	2	2	3	2,934	1,554	1,380
	20.1	4.3	1	2	3	4	4,402	2,331	2,071
	18.7	5.7	2	3	4	6	5,870	3,109	2,761
	17.3	7.1	2	3	5	7	7,337	3,886	3,451
	15.9	8.5	2	4	5	8	8,804	4,663	4,141
	14.5	9.9	3	5	6	9	10,272	5,440	4,832

6 톤 건조기를 사용하는 경우 건조비용은 권 등(15)의 연구결과와 유사한 경향을 나타냈으나, 김 등(13)의 연구결과보다는 낮은 값을 나타냈다. 그러나, 20 톤 건조기를 사용하는 경우에 소요되는 건조비용은 이들의 연구결과보다 낮게 나타났다.

건조에 필요한 톤당 고정비용과 변동비용 모두 20톤 건조기를 사용하는 경우가 6 톤 건조기를 사용하는 경우에 비해 낮게 나타났다. 이는 고정비용에서 건조기 구입비용은 20톤 건조기가 6 톤 건조기보다 높지만 건조기 설치에 필요한 부지구입비, 건축비 및 부대시설비가 낮고, 변동비용에서는 Table 2와 같이 에너지비용이 낮아지는데 원인이 있는 것으로 판단되었다.

Table 3. Estimated drying cost of paddy

Dryer (ton/batch)	Annual drying capacity(ton/year)	Total drying cost(₩/ton)	Fixed cost (₩/ton)	Variable cost (₩/ton)
6	1,200	38,928	22,018	16,910
	2,400	37,526	20,374	17,152
	3,000	37,522	20,626	16,896
	4,500	36,950	20,418	16,532
20	1,200	25,018	14,264	10,754
	2,400	26,433	15,409	11,024
	3,000	24,071	13,326	10,745
	4,500	24,354	13,964	10,390

벼의 냉각비용 특성

Table 4는 수확기간중 총반입물량이 1,200 톤, 2,400 톤, 3,000 톤 및 4,500 톤 시설에서 1 일에 반입되는 물량을 1대의 곡물냉각기로 냉각할 때의 냉각시간과 톤당비용을 예측한 것으로서, 총반입물량이 3,000 톤 (1일 평균반입물량 120

톤)이하의 시설에서는 1대의 곡물냉각기로 1일만에 반입되는 물량을 냉각할 수 있으나, 4,500 톤 시설(1일 평균반입물량 180톤)에서는 1대의 곡물냉각기로 처리할 수 없는 것으로 나타났다.

Table 4. Estimated cooling cost and required cooling time of paddy using a grain cooler under different moisture contents before cooling

Annual drying capacity(ton/year)	Moisture content(% w.b.)		Cooling time(hr)	Cooling cost (₩/ton)
	Before cooling	After cooling		
1,200	20.0	18.8	7.1	9,848
	19.0	17.8	6.5	9,608
	18.0	16.9	6.4	9,568
	17.0	15.9	6.6	9,648
	16.0	15.0	6.6	9,648
	15.0	14.1	7.1	9,848
	2,400	20.0	18.8	11.5
19.0		17.8	11.6	6,659
18.0		16.9	11.3	6,590
17.0		15.9	10.9	6,499
16.0		15.0	10.8	6,476
15.0		14.1	11.7	6,682
3,000		20.0	18.7	16.6
	19.0	17.8	16.6	5,564
	18.0	16.9	16.2	5,500
	17.0	15.9	15.9	5,352
	16.0	15.0	15.6	5,303
	15.0	14.1	16.9	5,512
	4,500	20.0	18.7	27.2
19.0		17.8	27.2	4,777
18.0		16.8	25.7	4,616
17.0		15.9	26.2	4,670
16.0		15.0	25.6	4,606
15.0		14.1	27.7	4,830

고정비와 전력비를 합한 냉각비용은 1,200톤시설에서는 9,568~9,848 원/톤정도인데 비해 3,000톤 시설에서는 5,464~5,564 원/톤 정도로 반입물량이 증가할수록 낮아지는 경향을 나타냈다.

최적 운영조건

벼의 수확기간중 실반입일을 25일, 반입되는 벼의 초기함수율을 24%로 설정하고, 총반입물량이 1,200 톤, 2,100 톤, 3,000 톤, 4,500 톤 규모인 RPC에서 곡물냉각기를 이용한 벼 건조 및 저장시스템의 건조비용이 최소화되는 1차 건조후 함수율, 건조기 및 냉각기 소요대수를 탐색하였으며, 그 결과는 다음 Table 5와 같았다.

곡물냉각기와 6톤 건조기를 병용하여 건조공정에 사용할 때, 총반입물량에 따라 최적 1차 건조후 함수율은 18.4~19.8%, 건조기의 최적 소요대수는 3~11대, 곡물냉각기의 최적 소요대수는 1~2대로 나타났으며, 이 때 톤당 소요비용

Table 5. Summary of optimization results of the drying and cooling system using the grain cooler for paddy

Dryer (ton/batch)	Explicit constraint and object function	Annual drying capacity of facility(ton/year)			
		1,200	2,100	3,000	4,500
6	Moisture content after 1st drying(%)	19.4	18.4	19.1	19.8
	Required numbers of dryer(set)	3	6	9	11
	Required numbers of cooler(set)	1	1	1	2
	Minimum drying and cooling cost(₩/ton)	30,102	27,658	26,415	25,249
20	Moisture content after 1st drying(%)	18.1	17.2	19.4	19.2
	Required numbers of dryer(set)	1	2	2	3
	Required numbers of cooler(set)	1	1	1	2
	Minimum drying and cooling cost(₩/ton)	23,296	20,284	17,373	17,825

은 25,249~30,102 원으로 연간처리능력이 증가할수록 낮게 나타났다. 한편, Table 2, 3에 나타난 바와 같이 6 톤 건조기만을 사용하여 함수율 15.8%수준으로 건조시켰을 때의 건조기 소요대수는 9~33대였고, 톤당 건조비용은 36,950~38,929 원이었다. 따라서 곡물냉각기를 이용한 벼 건조 및 냉각시스템이 관행적인 건조시스템에 비해 건조기 소요대수는 50~66.6% 절감되었으며, 건조기 소요대수의 절감에 따라 소요에너지비용, 부지구입비 및 건축비 등의 감소로 톤당 건조비용도 29.3~46.3% 정도가 절감되는 것으로 나타났다.

곡물냉각기와 20톤 건조기를 병용하여 건조공정에 사용하였을 때, 총반입물량에 따라 최적 1차 건조후 함수율은 17.2~19.4%, 건조기의 최적 소요대수는 1~2대, 곡물냉각기의 최적 소요대수는 1~2대로 나타났다으며, 톤당 소요비용은 17,373~23,296 원으로 나타났다. 따라서 20톤 건조기만을 사용하여 15.9%까지 건조할 경우에 비해 건조기 소요대수는 50~75%, 톤당 건조비용은 약 7.4~38.5%정도가 절감되는 것으로 나타났다.

이상의 결과로부터 동일 대수의 건조기를 사용할 때 곡물냉각기를 이용한 벼의 건조방법은 건조기만을 이용한 기존방법에 비해 건조능력을 50%이상 증대시킬 수 있는 것으로 나타나 Hellemar(4)의 보고와 유사한 결과를 나타냈다. 또한, 연료 및 전기료 등 에너지비용도 10%이상 절감시킬 수 있어 Chek(5)의 결과와 유사하게 나타났다.

곡물냉각기와 6 톤 건조기를 병용하여 사용하는 경우에 비해 20 톤 건조기를 병용하여 사용하는 경우의 톤당 건조비용이 낮게 나타났으며, 이 결과는 Table 3의 예측결과와 동일하였다. 또한, 곡물냉각기의 최적 소요대수는 Table 4에 나타난 예측결과와 동일하게 총반입량이 3,000 톤까지는 1대, 그 이상에서는 2대가 소요되는 것으로 나타났다.

Table 6은 건조공정중 최적 운영조건에서의 톤당 비용을 항목별로 나타낸 것으로서, 톤당 소요비용에서 건조기의 소요비용은 68.0~79.0%, 곡물냉각기 소요비용은 21.0~32.0% 정도를 차지하였다. 또한, 건조기의 소요비용중 고정비는 6

톤 및 20 톤 건조기에서 각각 37.7~42.2% 및 26.2~35.1%로서 6톤 및 20톤 용량의 건조기만을 사용하여 15.8% 내외로 건조할 때의 고정비 비율인 54.3~56.6% 및 55.4~58.3%(Table 3)에 비해 14.4~29.2%정도 낮아지는 것으로 나타났다.

Table 6. Composition of minimum cooling and drying cost

Dryer (ton/batch)	Annual drying capacity of facility (ton/year)	Minimum drying and cooling cost(₩/ton)	Drying cost(₩/ton)			Cooling cost(₩/ton)		
			Total	Fixed	Variable	Total	Fixed	Variable
6	1,200	30,102	20,474	8,381	12,093	9,628	7,000	2,628
	2,100	27,658	21,009	8,685	12,324	6,649	4,000	2,649
	3,000	26,425	20,862	8,807	12,055	5,553	2,800	2,753
	4,500	25,249	18,769	7,084	11,685	6,480	3,733	2,747
20	1,200	23,296	13,678	4,804	8,874	9,618	7,000	2,618
	2,100	20,284	13,697	4,597	9,100	6,587	4,000	2,587
	3,000	17,373	12,034	3,218	8,816	5,339	2,800	2,539
	4,500	17,825	11,472	3,010	8,462	6,353	3,733	2,620

곡물냉각기를 이용한 벼 건조 및 저장시스템에서 2차 마무리 건조가 끝난 벼는 300 톤 저장빈으로 이송되어 장기저장을 위해 냉각되는 것으로 가정하였다. 이 때, 벼 300 톤 냉각에 소요되는 시간은 약 50.1시간, 톤당 냉각비용은 3,215 원이었다.

반면, 관행적인 저장방법에서는 저장빈으로 이송된 벼의 곡온을 낮추기 위해 통풍이 실시되는 것으로 가정하였다. 이 때, 송풍량 70 m³/min인 송풍기(3.7 kW)로 통풍할 때 풍량비는 0.135 m³/min · m³이고, 통풍에 소요되는 시간(11.798/풍량비)은 87.3시간이 된다. 따라서 3.7 kW 용량의 송풍기 설치에 따른 고정비(구입비 2,160천원)와 변동비의 합인 톤당 통풍비용은 2,199원으로 나타났다.

Table 7은 건조 및 저장공정에서 곡물냉각기를 이용한 새로운 벼 건조 및 저장시스템의 톤당 소요비용과, 건조기로 건조한 후 저장빈에서 통풍을 실시하는 관행적인 건조 및 저장시스템의 톤당 소요비용을 나타낸 것으로서, 곡물냉각기를 이용한 건조 및 저장시스템에서 6 톤 및 20 톤 건조기를 사용할 때 톤당 평균 소요비용은 28,464~33,317원 및 20,588~26,511 원이었으며, 관행적인 건조 및 저장시스템에서 톤당 평균 소요비용은 39,149~41,127 원 및 26,270~28,632 원이었다. 따라서 곡물냉각기를 이용한 새로운 건조 및 저장시스템은 관행적인 건조 및 저장시스템에 비해 약 2.6~27.3%정도의 비용 절감효과가 있는 것으로 나타났다.

따라서, 곡물냉각기를 이용한 벼 건조 및 저장시스템은 관행적인 건조 및 저장시스템에 비해 저장후 최종품질, 중량의 증가에 따른 이윤을 제외하고도 건조능력의 향상, 톤당 건조 및 저장비용의 절감 등의 절감을 기할 수 있어 경

제적임을 알 수 있었다.

참고문헌

Table 7. Comparison of average managing costs(W/ton) in drying and storage process for paddy between conventional system and new drying and storage system using the grain cooler

Dryer (ton/batch)	Annual drying capacity of facility (ton/year)	Conventional system				New system using the grain cooler			
		Total	Drying	Cooling for long-term storage	Aeration	Total	Drying	Cooling for long-term storage	Aeration
6	1,200	41,127	38,928	-	2,199	33,317	30,102	3,215	-
	2,100	39,725	37,526	-	2,199	30,873	27,658	3,215	-
	3,000	39,721	37,522	-	2,199	29,630	26,415	3,215	-
	4,500	39,149	36,950	-	2,199	28,464	25,249	3,215	-
20	1,200	27,217	25,018	-	2,199	26,511	23,296	3,215	-
	2,100	28,632	26,433	-	2,199	23,499	20,284	3,215	-
	3,000	26,270	24,071	-	2,199	20,588	17,373	3,215	-
	4,500	26,553	24,354	-	2,199	21,040	17,825	3,215	-

요 약

곡물냉각기를 이용한 벼 건조 및 저장시스템의 최적 운영 조건을 구명하기 위하여 Box의 complex algorithm을 기초로 한 최적화 프로그램을 개발하였다. 개발한 최적화 프로그램을 이용하여 반입물량에 따른 시스템의 소요비용이 최소화 되는 최적 1차 건조후 함수율과 건조 및 냉각기의 최적소요 대수를 결정하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같았다.

벼의 건조비용은 최종함수율이 낮을수록 증가하였으며, 톤당 건조비용은 6 톤 건조기에 비해 20 톤 건조기를 사용하는 경우가 낮게 나타났으며, 수확기간중 총반입물량이 3,000톤이하인 시설에 필요한 곡물냉각기는 1대였으며, 그 이상의 반입물량을 갖는 시설에서는 곡물냉각기가 추가로 필요하였다.

곡물냉각기를 이용할 때 총반입물량에 따라 건조기에서 1차 건조후 최적 함수율은 약 17.2~19.8%범위로 나타났으며, 건조기 및 냉각기의 최적 소요대수를 제시하였다. 곡물냉각기를 이용함으로써 건조능력을 50%이상 향상시킬 수 있으며, 건조비용을 10%이상 절감할 수 있는 것으로 나타났다.

곡물냉각기를 이용한 벼 건조 및 저장시스템에 소요되는 톤당 최소비용은 6 톤 및 20 톤 건조기를 사용할 경우 각각 28,464~33,317 원 및 20,588~26,511 원으로 관행적인 방법에 비해 2.6~27.3%의 비용절감효과가 있는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 농림기술개발사업의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

- Saul, R. A. and E. F. Lind (1958) Maximum time for safe drying of grain with unheated air. Transactions of the ASAE, 2, 29-33
- ASHRAE (1991) ASHRAE Handbook of 1991 Fundamentals. ASHRAE, Atlanta, Georgia., P22.9
- Sauer, D. B. (1992) Storage of Cereal Grains and Their Products. American Association of cereal chemists, Inc., St. Paul, MN. p.46-48
- Hellemar, J. (1993) The big chill : a grain handling alternative. Proceed. GEAPS Exchange '93. GEAPS, Minneapolis, MN., 63-74
- Chek, T. I. (1989) Application of paddy cooling technique in Malaysia rice industry. Workshop on grain drying and bulk handling and storage systems in ASEAN, Pitsanuloke, Thailand, 17-29 October
- RPC 엔지니어링 협의회 (2000) RPC 단위기계 가격 검토 자료
- 고학균, 금동혁, 김동철, 김용현, 박경규, 박호석, 장동일, 정종훈, 한충수 (1997) 농협미곡종합처리장 설계기준. 농협중앙회 미곡종합처리장 자문단, p.1-143
- 금동혁, 이규승, 최창현 (1993) 고온고속 곡물건조기 개발에 관한 연구. 산학협동재단 보고서, 성균관대학교, p.1-25
- D.C. Kim, O.W. Kim, D.H. Keum and Han, J.K. (2004) Development of a new commercial grain cooler. Korean Journal of Food Preservation, (In printing)
- D.C. Kim, O.W. Kim and Keum, D.H. (1999) Cooling simulation for fixed-bed of rough rice. J. of Korean Society for Agricultural Machinery, 24, 31-40
- 장태현, 김민남, 김상윤 (1993) 냉동 및 공기조화. 보성각, p.235-237
- 금동혁, 한충수, 박춘우 (1998) 시뮬레이션에 의한 누적 혼합 상온통풍건조의 송풍기 및 가열기의 운영방법에 관한 연구. 한국농업기계학회지, 23, 229-244
- 김명환, 유남식, 안기옥, 이계임 (1992) 미곡종합처리장의 경제성과 운영에 관한 연구. 한국농촌경제연구원 연구보고서, 연구보고 257
- Arora, J. S (1994) Introduction to Optimization Design. McGraw-Hill, Singapore
- 권태완, 신명곤, 김동철, 박재복, 민봉기, 주용기 (1990) 미곡종합처리 가공기술 개발에 관한 연구. 한국식품개발연구원보고서, E-2062-0084, p.96-98

(접수 2004년 4월 3일, 채택 2004년 5월 8일)