

원형철제빈용 벼 자동관리 장치 개발(Ⅱ)[†]

-벼의 건조저장시설 운영 프로그램 개발-

Automatic Management System for Rough Rice Stored and Dried in Bin

-Operation Program for Drying and Storage Facilities of Rough Rice-

금동혁* 한재웅* 김 훈*

정희원 정희원 정희원

D. H. Keum J. W. Han H. Kim

1. 서론

미곡종합처리장은 개소 당 평균 30억이 투자되는 방대한 시설로 수확된 산물상태의 벼를 수집·건조·저장·가공 및 포장공정이 일괄적으로 처리되는 농업의 첨단기술이 결집된 시설이라 할 수 있다. 미곡처리장은 약 80개의 단위기계와 100여종의 부대시설로 구성되어 있다. 미곡종합처리장은 거의 모든 과정이 중앙제어기에 의해 제어 가능하다. 그러나 미곡종합처리장의 상온통풍건조시설은 기상조건, 투입벼의 함수율 및 반입량에 따라서 송풍기와 히터의 운전방법을 달리해야 하며, 또한 투입벼의 함수율에 따라서 벼의 퇴적고를 달리해야 하는 등 시설의 운전이 세심한 주의가 필요하다. 상온통풍건조는 일시에 빈에 벼가 가득 채워지는 것이 아니라 5 ~ 10일에 걸쳐 누적되며 교반기에 의해 투입된 벼가 혼합되므로 누적혼합건조라고 할 수 있다. 누적혼합건조시에는 매일 투입할 벼의 양이 제한된다. 투입된 벼의 퇴적고 및 함수율, 투입할 벼의 함수율에 따라서 투입할 벼의 양이 결정된다. 따라서, 투입된 벼의 함수율을 측정하거나 예측이 가능해야 한다.

원형철제빈에는 벼를 장기 저장한다. 저장벼는 자체의 호흡, 저장고 내외의 환경조건에 따라서 곡온과 함수율이 변한다. 장기 저장벼의 곡온의 변화를 미리 예측할 수 있으면 위험에 대비하여 사전에 조치를 취할 수 있어 관리가 용이할 수 있다.

국내 미곡종합처리장의 건조저장 시설의 전문적인 연구는 확보된 상태이나 건조저장시설의 운영은 국내의 농업인구의 감소와 기피현상, 그리고 전문교육의 미비로 현장에서 전문적인 지식을 가진 전문가의 운영하는 힘든 현실이다. 따라서, 건조저장시설의 단위기계의 자동화 및 건조 및 저장 벼의 자동관리 프로그램 개발이 절실한 실정이다.

[†] 본 연구는 1999년도 농림 기술개발사업의 연구비 지원에 의해 수행되었음

* 성균관대학교 생명공학부 바이오메카트로닉스 전공

2. 프로그램 구성

상온통풍건조 및 저장 시설의 적절한 운영방법은 실험 또는 시뮬레이션 방법으로 결정한다. 그러나 실험에 의한 방법은 많은 시간과 경비가 소요되므로 거의 이용되지 않고 있으며, 시뮬레이션에 의한 방법을 사용한다. 그러므로 기존에 개발되어진 상온통풍건조 시뮬레이션, 저장비의 곡은 예측 및 누적혼합건조 시뮬레이션을 이용하여 본 프로그램에서 사용하였다.

가. 상온통풍건조 시뮬레이션 프로그램

본 프로그램에 사용한 상온통풍건조 시뮬레이션은 금(1979)이 개발한 방법을 기초로 사용하였으며 상온통풍건조 모델의 기본개념은 곡물의 후층을 많은 박층으로 나누고 각각의 박층에서 일어나는 변화를 연속적으로 계산하여 조합하는 방법이다.

후층을 n 개의 박층으로 나누고 I 번째 박층에서 일어나는 변화를 고려해 보자. I 층 곡물의 함수율을 M_o , 곡온을 θ_o , I 층에 유입되는 공기의 건구온도를 T_o , 절대습도를 H_o 라고 하면, 건조가 진행됨에 따라 I 층 곡물의 함수율은 감소하여 M_f 가 되며, 곡온은 상승하여 θ_f 가 된다. I 층에서 배출되는 공기의 상대습도는 증가하고 온도는 하강하게 된다. I 층에서 배출된 공기는 $I+1$ 층의 유입공기가 된다. 이러한 과정을 전체 곡물층에 대하여 연속적으로 적용하면 후층건조를 해석할 수 있다.

곡물층에서 배출되는 공기의 온도와 곡온이 평형을 이룬다고 가정하면, I 층에서 기지향은 M_o , θ_o , H_o 및 T_o 가 되며 미지향은 건조 후의 함수율 M_f , 배출공기의 절대습도 H_f , 배출공기의 건구온도 T_f 가 되므로 기본적으로 3개의 방정식이 요구된다.

3개의 방정식은 I 층에 대한 에너지 및 물질평형과 곡물의 건조속도를 나타내는 박층건조 방정식을 도입하여 구성하였다.

Δt 시간 동안 Δx 두께의 곡물층에 대한 에너지평형을 고려하면,

$$\begin{aligned} & (c_a + c_v H_o) T_o + R(1 + M_o)(c_p + c_w M_{ow}) \theta_o \\ & = (c_a + c_v H_f) T_f + R(1 + M_f)(c_p + c_w M_{fw}) T_f + (H_f - H_o) h_{fg} \end{aligned}$$

여기서, c_a : 건공기의 비열 (1.007 kJ/kg.K), c_v : 수증기의 비열 (1.876 kJ/kg.K)

c_p : 곡물 건물의 비열 (3.49 kJ/kg.K), c_w : 곡물층의 물의 비열 (1.2692 kJ/kg.K)

G_a : 건공기 질량유동율 (kg/hr.m²), h_{fg} : 곡물수분의 증발잠열(kJ/kg)

H_o, H_f : 유입 및 배출공기의 절대습도(kg/kg)

M_o, M_f : 건조전후의 건량기준 함수율(dec., d.b.)

M_{ow}, M_{fw} : 건조전후의 습량기준 함수율(dec., w.b.)

나. 저장비의 곡온 예측 프로그램

저장 비의 곡온 예측 프로그램에서의 기본 공식은 금(2002)이 사용했던 방법을 기본모델

로 사용하여 Windows용 프로그램화하여 사용하였다. 기본 수학모델은 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.

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

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

여기서, g = 열발생률(W/m³), k = 열전도계수(W/m·K), r = 반경방향 좌표(m),

T = 온도(°C) t = 시간(s), α = 열확산계수(= $\frac{k}{\rho c}$, m²/s), c = 비열(J/kg·K)

다. 누적혼합건조

건조저장시설 운영 프로그램은 기존에 정의되어있는 상온통풍건조시 함수율을 예측하고 이 프로그램을 이용하여 예측된 함수율과 투입된 곡물량, 새로 투입할 벼의 함수율에 따라 투입량을 결정하여 누적혼합건조를 제공한다.

누적혼합건조를 위해서는 최소풍량비와 풍량비를 이용하게 된다. 최소풍량비는 안전한계 풍량비라고도 한다. 최소풍량비는 장기적인 기상자료를 근거로 결정하여야 하므로 실험적인 방법으로 최소풍량비를 결정하기 어려우므로, 최소풍량비는 금(1996)이 개발한 시뮬레이션 방법을 사용하였다. 시뮬레이션 방법은 퇴적한 벼의 최상 10cm층의 벼가 16%(w.b.)까지 건조되는 동안의 최상층 건물중량손실율을 구하여 풍량비의 함수로 나타낸다. 건물중량손실율 예측방정식을 구하여 건물중량손실율이 0.5%가 되는 예측방정식의 근을 Newton - Raphson방법으로 구한 최소풍량비 시뮬레이션모델을 이용하였다. 전국 13개 지역의 13년간 기상조건을 분석하여 가장 불리한 연도의 기상자료를 이용하여 지역별, 수확시기별 및 초기 함수율별로 최소풍량비를 분석한 자료를 이용하였다. 벼 수확시기의 기상조건에 따라 수확 시기 10월초를 기준으로 권역별로 북부, 중부 및 남부로 나누어 최소풍량비를 구분하였다. 표 1과 같이 최소풍량비를 초기함수율의 함수로 가정하고 다음 식 (1)을 선정하여 SAS를 이용하여 실험상수를 결정하였다.

$$F' = A' - \frac{B'}{M} \quad \dots\dots\dots (1)$$

여기서, F' = 최소풍량비(cmm/m³), M = 초기함수율(% w.b.) A' , B' = 상수

Table 1 Minimum specific airflow rate requirements by regional group

지역	A'	B'	R^2
North	10.7451	190.4733	0.86068711
Center	16.6682	301.5120	0.80344359
South	16.3	291.3829	0.83231741

벼 퇴적층의 공기저항식은 식 (2)를 이용하였고 송풍기 정압과 송풍량 관계식은 식 (3)을 이용하였다.

$$\Delta p = 653.54 \left(\frac{v}{60A} \right)^{1.2727} d \quad \dots\dots\dots (2)$$

여기서, Δp = 벼 퇴적층의 공기저항(mmAq)

$$\Delta p = A_0 + A_1 V + A_2 V^2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

여기서, Δp = 정압(mmAq), V = 송풍량(cmm), A_{0-2} = 상수

퇴적고와 풍량비의 관계식에서 풍량비에 지역, 함수율, 수확시기별 최소풍량비를 대입하여 구한 퇴적고를 안전퇴적고로 하였다. 안전풍량비는 송풍기의 성능곡선과 벼 퇴적층의 공기 저항식의 교점을 Newton-Raphson 방법으로 구하여 퇴적고에 따른 풍량비를 구하고, 퇴적고와 풍량비의 관계식을 빈의 용량 및 송풍기 동력별로 유도하였다.

안전풍량비와 최소풍량비의 관계는 안전풍량비는 최소풍량비 이상이어야 한다.

$$\text{안전풍량비}(F) = A + \frac{B}{D} \geq \text{최소풍량비}(F') = A' - \frac{B'}{M}$$

여기서 $D = D_o + D_d$ (D_o = 투입된 퇴적고(m), D_d = 투입할 퇴적고(m))

M = 함수율(% w.b), A, B, A', B' = 상수

최소풍량비의 함수율(M')은 투입된 곡물의 함수율과 투입할곡물의 함수율의 퇴적량에 의해 함수율을 산출하였다.

$$M = \frac{(Q \times M_o + X \times M_d)}{(Q + X)}$$

여기서, M = 초기함수율(% w.b.) , Q = 투입된 곡물량(ton), X = 투입할 곡물량(ton),

M_o = 투입된 곡물 함수율(%), M_d = 투입할 곡물 함수율(% w.b.)

안전풍량비의 퇴적고는 투입된 곡물량과 새로 투입할 벼의 총 퇴적고이며 투입된 곡물량은 기지값 Q 가 되며 새로 투입할벼는 미지값 X 가 된다. 그러므로 퇴적고 D 는 $Q+X$ 의 합으로 산출된다. 양변의 미지값 X 를 산출하게 되면 투입할량을 결정하게 되고 또한 이를 빈의 크기로 환산을 하며 퇴적고를 산출하였다.

3. 프로그램 구현

건조저장시설 운영 프로그램의 기본 방향은 사용자의 편의성을 고려하여 사용자 인터페

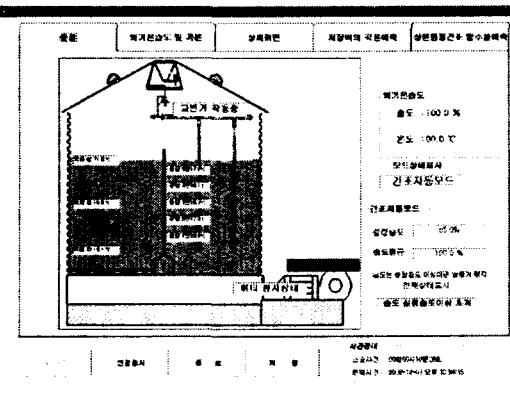
이스를 메뉴(Menu), 서식(Forms), 그래픽(Graphics) 및 아이콘(Icons) 등의 복합된 형태로 개발하였다. 운영체제는 Windows 환경으로 개발하였으며, 사용자 인터페이스는 Visual Basic(ver 6.0)으로 개발하였다.

초기화면은 그림 1-(a)와 같다. 건조저장시설 운영 프로그램은 실시간으로 빈의 상태를 표시한다. 외기 온·습도 및 각 축점의 곡온을 표시하며, 지금 현재 빈의 작업이 건조자동모드, 저장자동모드, 수동모드등 어떤 작업을 수행하는지 사용자에게 알려준다.

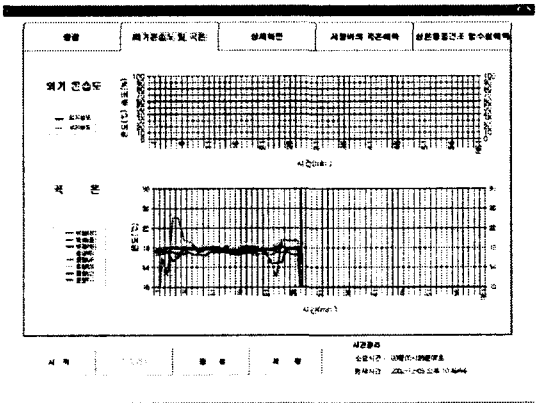
빈의 상황을 일정한 시간간격으로 저장이 가능하게 하여 운영 프로그램이 수행 시작 후 빈의 상태 즉 송풍기, 히터, 교반기 등이 작동여부와 각 곡온센서와 외기온·습도 평균값등과 현재 년, 월, 일, 시, 분이 자세히 기록되도록 하였다.

그림 1-(b)는 모든 빈의 상황을 한화면에 간략하게 표시한 총괄화면과 외기온·습도와 곡온을 사용자에게 그래픽으로 제공하는 화면이다. 그림 1-(c)는 저장벼의 곡온예측을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 화면의 상단은 곡온예측을 위한 사용자 입력 영역이며, 하단영역은 결과를 제공하는 출력 영역으로 구분하였다. 입력값은 지역, 빈의 단열 유무, 빈의 직경, 초기 함수율, 초기곡온 및 저장시작일 등을 입력하도록 하였다. 출력값으로는 1일 간격으로 저장 벼의 위치별 곡온 예측값이 제공되도록 하였다. 예측지점 콤보박스를 두어 빈의 중앙부 및 반경별로 사용자의 설정에 따라 화면에 제공하도록 하였다.

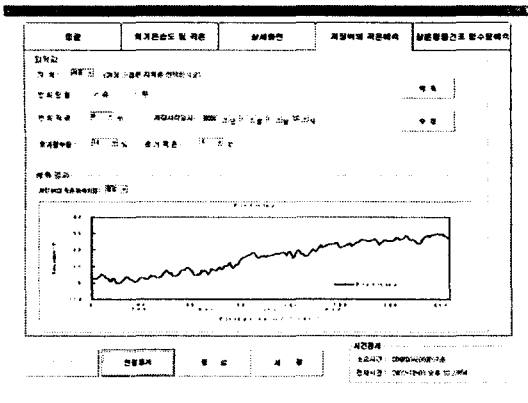
누적혼합건조 투입량 예측은 그림 1-(d)와 같이 구성하였다. 상온통풍건조시 함수율 예측 초기입력창에서 빈의 크기 및 빈의 퇴적고등의 기본자료를 이용하며, 빈내의 벼의 함수율은 예측된 자료를 이용하여 사용한다. 또한 누적혼합건조 투입량 예측화면에서 투입할 벼의 함수율을 입력하도록하여 누적혼합건조시 안전량을 표시하도록 하였다. 그래프에서 풍량비와 최소풍량비를 사용자에게 그래프로 제시하여 기존량과 투입가능량을 그래프에서 보여주도록 하였다. 그래프 하단에는 수치화하여 보여줌으로 사용자가 쉽게 현장에서 적용할 수 있도록 하였다.



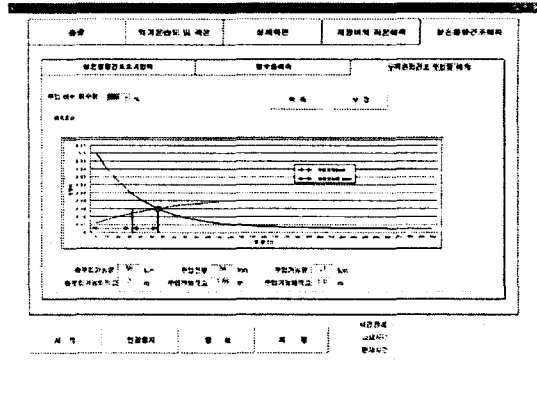
(a) Main frame.



(b) Grain temperature and ambient temperature , humidity



(c)Simulation of temperature changes in storage



(d)Simulation of accumulation mixed natural-air Drying

Fig. 1 Operation Program for Drying and Storage Facilities of Rough Rice

4. 요약 및 결론

건조저장시설 운영 프로그램은 Windows환경에서 사용이 용이한 Visual Basic으로 개발 하였으며, 실시간으로 건조저장시설 자동관리장치와 통신을 하여 bin의 상황을 제공하며, 사용자의 입력과 건조저장시설 자동관리장치에서 송신해온 자료를 이용하여 저장 중 벼의 곡 은 예측과 상온통풍건조시 함수율 변화를 예측하고 이를 이용하여 투입된 곡물량, 새로투입 할 벼의 함수율에 따라 누적혼합건조시 투입량을 결정할 수 있도록 개발 하였다.

5. 참고문헌

1. Keum, Choi, Koh. 1979. Simulation of Drying Grain with Natural Air. KSAM 4(2): 32~42
2. Keum, Park. 1986. Minimum Specific Airflow Rate Requirements for Natural Air Drying of Rough Rice in Korea. KSAM 21(1) : 60~71
3. Keum, Kim. 2002. Simulation of Temperature Changes in Stored Rough Rice. The KSAM Conference 7(2) : 169~171