교반식 원형철제빈에 의한 벼의 누적 혼합저장·건조에 관한 연구

In-bin layer drying of rough rice with storage

금동혁* 한충수** 박춘우* 차영욱***

정회원 정회원 정회원 정회원

D.H. Keum C.S. Han C.W. Park Y.O. Cha

1. 서론

수확기간 동안 개별 농가에서 미곡종합처리장에 반입되는 물벼는 원형철제빈에 투입되어 교반장치에 의해 상하층이 혼합되면서 상온의 공기를 통풍하여 건조가 이루어지게 되며, 어느 정도 건조가 이루어진 벼 위에 새로운 물벼가 투입되어 교반혼합되면서 건조가 진행된다. 즉, 벼가 계속 누적투입되어 교반혼합되면서 상온통풍건조가 이루어진다. 이와 같은 건조과정을 누적혼합 저장(상온통풍)건조라고 한다.

우리나라에서 상온통풍건조에 관한 연구가 많이 수행되었으나, 대부분 소규모(2~4톤)의 빈을 이용한 만량건조(full bin drying)방법에 관한 연구였으며, 100~300톤 규모의 원형철제빈을 이용한 누적혼합건조에 관한 연구는 거의 이루어지지 못하고 있는 실정이다.

따라서, 미곡종합처리장에 설치된 교반식 원형철제빈을 효율적으로 이용할 수 있는 저장건조방법에 대한 연구가 긴요한 실정이다. 연구의 구체적인 목적은 다음과 같다.

1. 벼의 누적혼합 상온통풍건조실험을 수행하여 함수율변화, 곡온변화 및 곡물 품질변화 특성을 분석한다.
2. 퇴적깊이에 따른 송풍량과 소비동력 변화특성을 구명한다.
3. 함수율, 곡온, 곡물품질 및 건조 소요에너지를 예측할 수 있는 시뮬레이션 프로그램을 개발하여 이를 검정한다.
4. 시뮬레이션방법에 의해 기상조건 및 반입벼의 상황에 따른 적절한 운영방법을 제시한다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 공시재료

본 실험은 1994년 10월 14일부터 11월 9일까지 충북 진천읍 진천농협 미곡종합처리장에서 실시하였으며, 실험에 사용된 벼는 진천군내의 일반 농가에서 재배한 추청벼였다.

2.2. 실험장치

1994년 5월에 충북 진천읍 진천농협 미곡종합처리장에 설치한 300톤 저장용량의 2중강판재 교반식 저장건조빈을 실험에 사용 하였으며, 그 구조는 그림1과 같다.

* 성균관대학교 생명자원과학대학 생물기전공학과

** 충북대학교 농과대학 농업기계공학과

*** 한성공업 신흥기업사 신흥기술연구소

빈은 파형강판재의 본체, 다공통기마루 및 송풍기로 구성되어 있으며, 내부에 곡물분산장치와 교반장치가 설치되어 있다.

2.3. 실험 및 측정방법

건조시험 초기에 반입된 벼는 빈내에서 교반이되지 않은채 진행시켰으며, 이후에 반입된 벼는 수분을 이동하며 누적교반 건조를 진행하였다.

교반오거의 작동은 벼 sampling을 위해 입고시 이외는 건조가 끝날 때 까지 항상 구동시켰다.

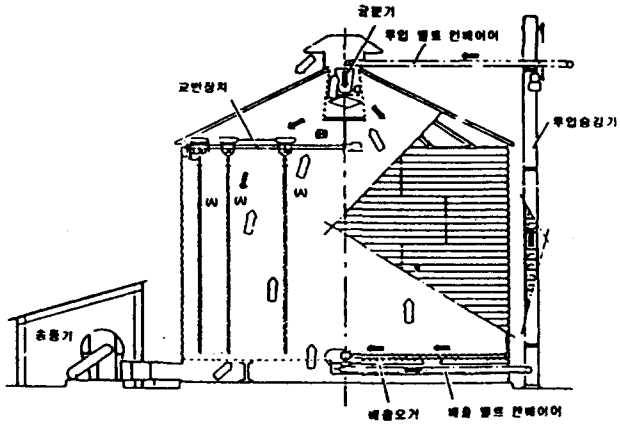

그림1. 교반식 원형철제 저장건조빈의 구조

생산자별로 미곡종합처리장에 반입되는 물벼는 조선기에서 정선되어 호퍼형 무게 계량장치에서 무게를 계량하고 시료가 채취된 후 빈에 투입되었다. 시료의 채취는 생산자별로 행하였으며, 채취된 시료는 함수율 측정과 품질판정에 이용하였다. 함수율은 10g 입자-135℃-24시간법의 상압정온건조법을 이용하였으며, 이를 표준건조법인 5g분쇄-105℃-5시간 건조법으로 환산하였다.

건조전 벼의 품질과 건조 종료후의 품질을 비교하기 위하여 건조 전후의 동할율을 측정하였다. 호퍼스케일에서 반입벼의 시료를 약600g 채취하여 상온통풍시료건조기에서 15~16%(w.b)까지 상온통풍건조 한후 시험용 현미기로 제현하고 품질판정기로 동할율을 측정하였다.

물벼의 반입은 오전 11시부터 오후 8시 사이에 이루어졌다. 실험초기 5일 동안 반입된 물벼의 양은 교반장치를 가동시킬 수 있는 약70cm의 깊이에 이르지 못하여 교반하지 않고 송풍기만을 가동하여 건조하였다.

송풍기는 오전 9시부터 오후 9시까지 가동하는 것을 원칙으로 하였으며, 건조상황과 반입물량에 따라서 송풍시간을 조정하였다. 교반오거는 송풍기를 가동하는 동안에만 연속가동하였다. 과건조가 우려되어 송풍공기의 가열은 실시하지 않았다.

빈내의 벼의 시료채취, 퇴적높이, 풍량, 정압 및 소요전력량 등의 측정은 매일 오전 9시부터 10시 사이에 실시하였으며, 일별집계는 오전 9시부터 다음날 오전 9시까지를 1일 구분하여 계산하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 벼 반입 상황

10월 14일부터 11월7일까지 24일 동안 총164톤이 반입되었으며, 개별농가의 1회 평균반입량은 2.9톤이었다. 우리나라에서는 산물벼의 건조·저장시스템의 초기상태라서 최대 21톤이 반입된 반면 무반입일이 4일, 최소 반입량이 1.1톤 정도로 변화가 심하게 나타났다.

10월에 반입된 벼는 함수율이 18.3% 이상이었으며, 11월에 반입된 벼의 함수율은 17.2%

이하이었다. 반입된 벼 중에서 함수율 18% 이상의 벼가 전체의 71.2%를 차지하였다.

반입벼의 동할율은 초기에 반입되는 함수율 22%(w.b)이상의 벼는 4~7%범위로 비교적 낮은 수준이었으나, 후기에 반입된 함수율 20%미만의 벼는 7~18%의 높은 동할율을 나타냈다.

3.2 외기 및 유입공기의 온도와 습도

실험기간 동안 외기의 평균온도와 평균상대습도는 각각 10.2℃ 및 67.0%였으며, 이에 대한 벼의 평형함수율은 14.7%(w.b.)로 좋은 기상조건으로 판단할 수 있다.

3.3 곡물온도의 변화

그림2와 같이 10월 중에는 비교반층과 교반층간의 곡온이 모두 유입공기 온도와 거의 차이가 없었으며, 10월 28일 이후에는 비교반층의 온도는 유입공기 온도와 차이가 없었으나 교반층의 온도는 낮게 나타났다. 비교반층의 평균곡온은 12.0℃, 교반층의 평균곡온은 7.1℃로 나타났다.

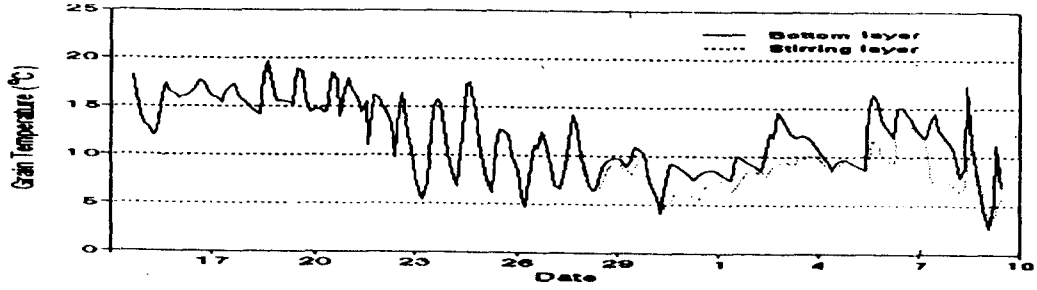

그림 2. 일별 곡물온도 변화

3.4 송풍량의 적합성

빈에 설치된 송풍기의 성능곡선을 이용하여 정압과 송풍량의 관계식을 유도하였으며, 이는 다음 (1)식으로 나타냈다.

$$\Delta p = 143.258 + 0.315115\ V - 3.88172 \times 10^{-4}\ V^2 \quad \cdots\cdots\cdots (1)$$

$$(R^2 = 0.99968,\ 400 \le V \le 1100)$$

여기서, Δp = 송풍기 정압(mmAq) , V = 송풍량(m^3/min)

Newton-Raphson방법으로 퇴적깊이(D)의 변화에 따른 작동점의 송풍량을 구하여, 송풍량과 퇴적깊이와의 관계를 함수로 나타냈으며, 다음 식(2)로 표시 하였다.

$$V = 1105.17\ e^{-0.0897\ D} \quad (r^2 = 0.9951) \quad \cdots\cdots\cdots (2)$$

식(2)로 계산한 퇴적고별 계산 송풍량이 실측 송풍량과 잘 일치(r^2=0.99968)하는 것으로 나타났다.

3.5 함수율 변화

그림3은 빈 바닥 비교반층과 상부 교반층의 평균함수율 변화를 일별로 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 비교반층의 함수율은 벼 반입 6일 이후에는 15%이하로 건조되었으며, 그 이후에는 유입공기의 조건에 민감하게 반응하면서 13.0 ~ 16.2% 범위를 오르내렸다. 최종일에는 13.9%의 함수율을 나타내었다. 교반층의 경우는 벼 반입 9일 후에는 18%이하로 건

조되어 최종일에는 15.2%의 함수율을 나타냈다.

건조속도는 반입벼의 함수율이 높고 퇴적고가 낮은 건조초기에 최고 시간당 0.28 %(w.b.)로 부터 시작하여 퇴적고가 높고 반입벼의 함수율이 낮은 건조후기에 일반적인 상온통풍건조 속도의 수준으로 하강하여 시간당 0.023 %(w.b.)로 나타났다.

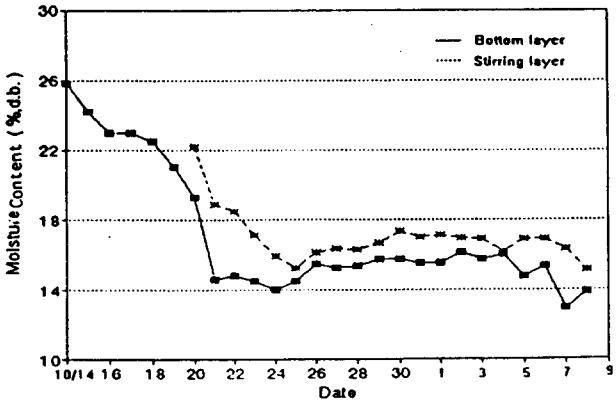

그림 3. 일별 함수율 변화

3.6 품질평가

반입벼에서 시료를 채취하여 시료건조기로 상온통풍건조한 벼의 동할율(시료 동할율)과 본 건조실험 후의 동할율을 비교하였다. 비교반층의 벼는 시료 동할율이 5.2%, 건조 후의 동할율이 6.6%로 1.4% 증가한 것으로 나타난 반면, 교반층의 경우는 시료 동할율이 8.3%, 본 건조실험 후의 동할율이 7.9%로 오히려 0.4% 낮은 값을 나타냈다.

3.7 건조소요 에너지

누적혼합 상온통풍건조에서 건조 소요에너지는 송풍기 구동에너지와 교반장치 구동에너지로 나눌 수 있다. 표 1에 소요 전력량과 건조 에너지효율(벼 수분 1kg을 증발시키는 데 소요된 총에너지)을 나타내었다.

표 1. 건조 소요에너지

소요 전력량 (kWh)			총수분증발량(kg)	건조 에너지효율 (kJ/kg.water)
송풍기	교반장치	계	9,283	2,770 (769.5 kWh/kg)
6.626 (92.8%)	517 (7.2%)	7.143 (100%)		

3.8 누적교반 저장건조 시뮬레이션

원형철제빈에서 벼를 누적투입 및 교반하면서 상온통풍건조할 경우 함수율과 곡온 변화를 예측하기 위한 시뮬레이션 프로그램을 개발하고, 개발한 모델의 검정을 위해 본 실험의 실험치와 시뮬레이션 결과치를 비교하였다. 실험치와 예측치의 상대오차는 5%미만으로 예측치는 실험치와 매우 잘 일치하는 것으로 판단된다. 컴퓨터 프로그램은 Fortran77 언어로 작성하였다.

3.9. 운영방법

상온통풍건조시설의 처리능력을 극대화하고, 건조 소요에너지를 최소화하면서 건조벼의 품질을 우수하게 유지하기 위해서는 벼의 퇴적방법, 송풍기 및 가열기의 운전방법 등의 확립이 중요하다. 미곡종합처리장에서의 벼 반입은 수확기간동안 거의 매일 이루어지며 반입변동이 심하므로, 집중반입에 대한 적응능력을 향상시켜 시설의 가동율을 높이기 위해서는 누적 투입방법을 이용하는 것이 합리적이다.

상온통풍건조에서 적절한 송풍 및 가온방법을 선택하기 위해서는 벼의 품질(건물중량 손

실율, 과건조), 건조소요일수, 건조소요에너지 및 기상상태 등을 종합적으로 고려해야 한다. 이상의 요인을 고려할 때 적정의 송풍 및 가온방법은 다음과 같다.

1) 상대습도가 75~85%이하일 경우에만 가열없이 송풍한다. 이 경우 건물중량 손실율은 0.11~0.25%(평균 0.155%), 건조소요에너지는 1,219~2,077 kJ/kg(평균 1,544 kJ/kg), 건조 소요일수는 22~53일(평균 31일) 범위이다.

2) 기상조건이 아주 불량하거나 건조소요일수를 단축할 필요가 있을 때는 연속송풍을 하되 상대습도가 85% 이상일 경우에만 1.5℃ 가온한다. 이 경우 건조소요 일수는 22~35일(평균 25일), 건조 소요에너지는 2,972~3390 kJ/kg(평균 2,900 kJ/kg), 건물중량 손실율은 0.1~0.18%(평균 0.12%) 범위이다.

4. 요약 및 결론

용량 300톤 규모의 원형철제빈을 이용한 벼의 누적혼합 저장건조실험을 충북 진천농협의 미곡종합처리장에서 1994년 10월 14일부터 11월 19일까지 수행하였다. 개별농가에서 반입되는 벼를 빈에 누적하여 투입하면서 교반장치로 혼합하는 상온통풍건조를 수행하였다. 함수율 및 곡온변화, 품질변화, 송풍량 및 소요동력을 분석하고, 시뮬레이션 프로그램을 개발하여, 적절한 운영방법을 제시함을 목적으로 하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 실험기간동안 빈에 반입된 벼의 총량은 164톤이었으며, 1일 최대 21톤, 1일 평균 7톤이 반입되었다. 10월 중에 반입된 벼의 함수율은 18.3%(w.b)이상 이었으며, 함수율 18%,(w.b)이상의 벼가 전체의 71.2%를 차지하였다.
2. 반입벼의 동할율은 초기에 반입된 벼보다 후기에 반입되는 벼에서 높은 동할율이 나타났다. 이것은 쌀의 품질향상을 위해서는 적기수확이 필수적인 요소임을 나타내는 것이다.
3. 빈의 공기층만실의 온도는 외기온도보다 평균 2.2℃ 상승하였다. 이러한 온도 상승은 상대습도를 약7% 낮추는 효과를 나타내었으며, 이에 대한 벼의 평형함수율이 13.2%(w.b)로 빈바닥의 비교반층의 벼는 과건될 우려가 있는 것으로 사료된다.
4. 건조기간동안의 곡물의 온도는 비교반층이 12.0℃, 교반층이 7.1℃로 나타났다. 비교반층의 온도는 유입공기의 온도(빈의 공기층만실 온도)와 차이가 없었으며, 교반층은 유입공기온도보다 약 5℃ 낮게 나타났다.
5. 빈에 부착된 송풍기의 정압은 송풍량의 2차함수로 표시되었으며, 송풍량은 벼 퇴적깊이의 지수함수로 나타났다.
6. 바닥층 함수율의 표준편차는 0.81%로 나타났다. 교반층의 함수율은 방향에 관계없이 균일한 분포를 나타내었으며, 표준편차가 0.5%이하로 나타났다. 따라서, 교반층은 전층이 고르게 혼합되어 균일하게 건조되는 것으로 사료된다.
7. 건조속도는 퇴적깊이가 얕은 건조초기에 최고 0.28%,w.b/hr 로부터 시작하여 퇴적깊이가 깊어 지고 반입벼의 함수율이 낮아짐에 따라 하강하여 일반적인 상온통풍건조의 수준인 0.023%,w.b/hr를 나타내었다. 건조후기에는 건조속도가 마이너스 값을 나타내는 경우가 많이 발생하여 흡습이 일어남을 알수 있었다.

8. 건조후의 동할율은 상온통풍 시료건조기로 건조한 시료와 비교하여 비교반층의 경우는 1.4% 높은 6.6%를 나타냈으며, 교반층은 0.4% 낮은 7.9%를 나타냈다. 따라서, 누적 교반 저장건조는 동할의 발생이 거의 없는 매우 우수한 건조방법으로 판단되었다. 비교반층의 동할율이 교반층에 비하여 낮은 것은 교반층에는 수확초기에 동할율이 낮은 고품위의 벼가 반입된 반면 후기에는 동할율이 높은 저품위의 벼가 반입됨에 따른 것이다.
9. 건조에 소요된 총소요에너지는 2771 kJ/kg으로, 이 중에서 송풍기 구동에너지가 전체의 92.8%, 교반장치 구동에너지가 7.2%를 차지하였다. 총소요에너지는 일반적인 상온통풍 건조 소요에너지에 비하여 상당히 높은 값을 나타났으나, 송풍 및 가온방법의 개선으로 상당히 줄일 수 있을 것으로 사료된다.
10. 누적 교반 저장건조 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램을 개발하여 본 실험 결과와 비교하여 검정하였다. 시뮬레이션 프로그램은 함수율 변화, 소요에너지를 매우 만족 스럽게 예측할 수 있었으며, 건조방법 및 건조비용 분석 등에 매우 유효하게 이용될 수 있는 것으로 사료된다.
11. 벼의 품질을 유지하면서 건조소요에너지를 최소로 하는 적정의 송풍 및 가온방법을 제시하였으며, 또한 기상조건이 아주 불량하거나 건조소요일수를 단축할 필요가 있을 때 송풍하는 방법을 제시하였다.

5. 참 고 문 헌

1. 고학균, 금동혁외 7인. '95 농협 미곡종합처리장 설계기준. 1994. 농협중앙회
2. 금동혁, 박선태. 벼 상온통풍건조의 최소풍량비에 관한 연구. 1996. 한국농업기계학회지 21(1)
3. 금동혁, 박춘우. 곡류 및 버섯류의 평형함수율 및 박층건조방정식에 관한 연구. 1995. 한국과학재단 연구보고서
4. 금동혁. 습공기의 성질 계산을 위한 컴퓨터 프로그램. 1989. 한국농업기계학회지 13(3)
5. 신흥기업사. 교반식 건조저장빈의 사용설명서. 1994
6. Lu, F.M. 1987. Simulation model for forced aeration of rice. Ph.D theses, UCD.
7. Murata, S. 1976. The formulae of aeration and ventilation for storage room of farm products. JSAM 38(2)
8. Smith, E.A. 1983. Microcomputer program for interactive evaluation of the control options for near ambient driers. Dept Note SIN/393, Scot Inst agric Engng, Penicuit
9. Thompson,T.L. 1972. Temporary storage of high moisture shelled corn using continuous aeration. Trans. ASAE 15