

최 중
연구보고서

초고속 · 대용량 병류형 곡물건조기 개발
Development of a Rice Circulating
Concurrent-flow Dryer

연구기관
한성공업(주)

농림부

최 중
연구보고서

초고속 · 대용량 병류형 곡물건조기 개발
Development of a Rice Circulating
Concurrent-flow Dryer

연 구 기 관
한 성 공 업(주)

농 립 부

제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “초고속·대용량 병류형 곡물건조기 개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2006년 07월 14일

주관연구기관명 : 한성공업(주)
총괄연구책임자 : 한 종 규
연 구 원 : 강 성 열
연 구 원 : 김 동 선
연 구 원 : 조 성 우
연 구 원 : 한 승 훈

위탁연구기관명 : 성균관대학교
위탁연구책임자 : 금 동 혁
연 구 원 : 한 재 응
연 구 원 : 홍 상 진
연 구 원 : 이 효 재

위탁연구기관명 : 한국식품연구원
위탁연구책임자 : 김 의 응
연 구 원 : 김 동 철
연 구 원 : 김 훈
연 구 원 : 이 세 은

요 약 문

I. 제 목

초고속·대용량 병류형 곡물건조기 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

현재 국내에서 널리 사용되고 있는 횡류형 순환식 건조기는 벼를 건조할 경우 건조속도가 0.7~0.9%(w.b.)범위이며, 동할율은 5%이내, 건조소요에너지는 5,000~7,000kJ/kg-H₂O 정도이다. 일반적으로 횡류형 건조기는 곡물이 균일하게 열풍에 노출되지 않는 단점이 있다. 이러한 단점 때문에 건조속도를 향상시키거나 소요에너지를 절감하는데 한계가 있다. 건조속도를 초고속화 하는 동시에 에너지를 절감하고 곡물의 품질을 유지하기 위해서는 신개념의 병류형 곡물건조기 개발이 필요하다.

III. 연구개발 내용 및 범위

본 연구의 개발 내용 및 범위를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 병류형 순환식 곡물건조기 시뮬레이션 프로그램 개발한다.
- 2) 실험용 순환식 곡물건조기를 이용하여 시뮬레이션 모델을 검증한다
- 3) 병류형 순환식 곡물건조기 최적 설계 프로그램 개발한다.
- 4) 병류형 순환식 곡물건조기 최적 설계 요인 및 작동조건 결정한다.
- 5) 병류형 순환식 곡물건조기 시작기 및 본기를 설계, 제작 개발하여 성능 평가를 통해 적정 운영방법을 개발한다.

IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

본 연구 결과를 요약하며 다음과 같다.

병류건조모델은 Simpson의 적분식과 Runge-Kutter방법을 이용하여 유한 차분식으로 표현되는 수치해를 구하고, 동할 예측모델(Kim 등, 2003)과 평형 함수열 모델(Keum 등, 2002) 등의 보조방정식으로 구성하는 시뮬레이션 프로그램을 개발하였고 건조실험을 통하여 적합성을 검증 결과 잘 일치하였다.

최적화의 목적함수를 선정한 후 Box의 Complex 알고리즘을 이용하여 개발하였으며, 메인프로그램과 6개의 서브 프로그램과 건조기 시뮬레이션 프로그램으로 병류형 순환식 곡물건조기의 성능목표를 설정하고 개발한 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 설계인자에 따른 건조기의 건감률, 연료효율 등 건조 특성과 동할율 등 품질특성을 구명하였으며, 이와 병행하여 개발된 최적화 프로그램을 이용하여 최적설계 요인을 결정하였다.

700kg의 실험용 병류형 순환식 곡물 건조기의 곡물 유입방법 및 배풍형태에 따른 3종류의 건조기를 이용하여 건조실험 수행하여 건조 및 품질특성을 분석한 결과 Type-1(크로스 형태)의 배기형태가 가장 우수한 것으로 판명되었다.

용량 800kg의 병류형 순환식 곡물건조기 시작기를 제작 설계하여 3수준의 열풍온도와 2수준의 풍량에 3회 실험을 한 결과 모두 건감율 1.0%(w.b.) /hr이상 이었으며 품질면에서도 만족할 수준의 결과를 얻었다.

12,000kg의 본기를 설계, 제작하였으며, 기본성능, 제어능력, 건조실험을 통해 평가한 결과 건감율 1.0%(w.b.) /hr이상 이었으며 최종 동할증가율 2.8%로 결과를 얻었다. 비용분석결과 현행 횡류형 건조기보다 우수한 것으로 판명되었다.

SUMMARY

(영문요약문)

I. Title

Development of a rice circulating concurrent-flow dryer

II. Objectives and significance of the research

Rice circulating cross-flow dryers with the drying rate of 0.7~0.9%(w.b.) and with the crack ratio of less than 5% and the energy consumption of 5,000~7,000kJ/kg-H₂O are widely used. Generally, these dryers have the disadvantage that the rice is not exposed to the heated air evenly. This causes the limitation of increasing the dry rate and decreasing the energy consumption. So, new concurrent-flow dryer is necessary to overcome these disadvantages and maintenance the quality of the rice.

III. Contents and scope

- 1) To develop the simulation program of the concurrent-flow dryer.
- 2) To validate the simulation program using a test dryer
- 2) To develop the optimal design program of the concurrent-flow dryer.
- 3) To select the optimal design factor and operating condition.
- 4) To design the testing model, verify the conformity of the model and investigate the drying factor.
- 5) To develop the pilot scale dryer and actual scale dryer and

investigate the optimal operating method with the efficiency test.

IV. Results and suggestions

The results were summarized as follows:

The simulation model to predict the concurrent-flow drying characteristics was developed and was validated through the drying tests for rough rice.

The drying and quality characteristics for rough rice were analyzed from the drying tests for 3 types of dryers according to the inlet and exhaust air duct types.

The effect of the dryer design parameters and operation factors on the performance was analyzed using the simulation program.

Optimal design parameters and operational conditions to minimize drying energy consumptions were determined by optimization methods

The analysis of performance of the concurrent-flow test dryer with a capacity of 800kg was performed at 3 levels of drying temperature and 2 levels of air flow rate.

The analysis of performance of the concurrent-flow dryer with a capacity of 1,200kg was performed.

CONTENTS
(영 문 목 차)

Chapter 1. Introduction	14
A. Significance	14
B. Objectives	19
Chapter 2. Research development status	20
Chapter 3. Results and discussions	24
A. Simulation program of Circulation concurrent-flow dryer	24
1. Preface	24
2. Simulation programming	25
a. mathematical model	28
b. Crack ratio equation and aid equations	30
c. Simulation program	32
3. Verification of simulation model	33
a. Material	33
b. Method	33
c. Result and discussion	35
4. Conclusion	40
B. Development and evaluation of circulation concurrent-flow dryer for test	41
1. Preface	41
2. Material	42
3. Method	42

a. Design	42
b. Detailed design	45
c. Manufacture	52
d. Test circulation concurrent-flow dryer	56
4. Result and discussion	60
a. Evaluation	60
b. Drying time	71
c. Requirement energy	72
d. Quality	73
5. Conclusion	75
C. Effect of design on the circulation concurrent-flow dryer	77
1. Design factor and conditions	77
2. Airflow rate	79
3. Grain flow rate	79
4. Drying temperature	82
5. Drying chamber height	84
6. Result and discussion	86
D. Optimization of circulation concurrent-flow dryer and control method	87
1. Preface	87
2. Optimization of circulation concurrent-flow dryer	88
a. Object function and constraint conditions	88
b. Optimization conditions	89
c. Optimization program	91
d. Result and discussion	96
3. Control method	98

a. Present circulation dryer control method and problem	98
b. Decision of circulation dryer control method	98
4. Conclusion	103
E. Development and evaluation of circulation concurrent-flow dryer for pilot Scale	104
1. Development	104
a. Design	104
b. Manufacture	106
2. Test circulation concurrent dryer	113
a. Material	113
b. Method	113
c. Drying and grain Temperature	115
d. Outlet air and Tempering chamber grain temperature	120
e. Drying time, drying rate and requirement energy	125
f. Quality	127
F. Development and evaluation of circulation concurrent-flow dryer	128
1. Design	128
2. Manufacture	137
3. Drying test	148
a. Material	148
b. Method	148
c. Drying and grain Temperature	151
d. Outlet air and Tempering chamber grain temperature	155
e. Drying time, drying rate and requirement energy	159
f. Quality	161

4. Expense analysis	162
a. Method	162
b. Result	164
Chapter 4. Research goal attainment and contribution to related area	167
Chapter 5. Plan for application of research results	170
Chapter 6. Informations of foreign science technology	172
Chapter 7. References	174
APPENDIX	178
A. Simulation program of Circulation concurrent-flow dryer	178
B. Optimization program of Circulation concurrent-flow dryer	188

목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요	14
제 1 절 서론	14
제 2 절 연구목적	19
제 2 장 국내외 기술개발 현황	20
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	24
제 1 절 병류형 순환식 곡물건조기 시뮬레이션 프로그램	24
1. 서언	24
2. 시뮬레이션 프로그래밍	25
가. 수학적모델	28
나. 동할 예측모델 및 기타 보조 방정식	30
다. 시뮬레이션 프로그램	32
3. 시뮬레이션 모델 검증	33
가. 공시재료	33
나. 실험방법	33
다. 결과 및 고찰	35
4. 결론 및 요약	40
제 2 절 실험용 병류형 순환식 곡물건조기 제작 및 성능평가	41
1. 서언	41
2. 공시재료	42

3. 실험방법	42
가. 기본설계	42
나. 실험용 건조기 상세 설계	45
다. 건조기제작	52
라. 건조 방법	56
4. 결과 및 고찰	60
가. 건조특성	60
나. 건조속도	71
다. 소요동력 및 소요에너지	72
라. 건조비 품질	73
5. 결론 및 요약	75
제 3 절 병류형 순환식 곡물건조기의 설계인자 구명	77
1. 설계인자 및 조건	77
2. 송풍량	79
3. 곡물유하속도	79
4. 건조온도	82
5. 건조실 높이	84
6. 결론 및 요약	86
제 4 절 병류형 순환식 곡물건조기 최적화 및 제어방안	87
1. 서언	87
2. 병류형 순환식 곡물건조기 최적화	88
가. 목적함수 및 제한조건	88
나. 최적화의 조건	89

다. 최적화 프로그램	91
라. 결과 및 고찰	96
3. 제어방안 결정	98
가. 현행 순환식 건조기의 제어방법 및 문제점 분석	98
나. 병류형 건조기의 제어방안 결정	98
4. 결과 및 요약	103
제 5 절 병류형 순환식 곡물건조기 시작기 개발 및 성능평가	104
1. 시작기 개발	104
가. 기본설계	104
나. 상세설계 및 제작	106
2. 시작기 건조실험	113
가. 공시재료	113
나. 실험방법	113
다. 건조온도 및 곡온변화	115
라. 배출공기 및 템퍼링실의 곡온	120
마. 건조소요시간, 건감률 및 소요에너지	125
바. 건조 벼의 품질변화	127
제 6 절 병류형 순환식 곡물건조기 본기 개발 및 성능평가	128
1. 기본설계	128
2. 상세설계 및 제작	137
3. 본기 건조실험	148
가. 공시재료	148
나. 실험방법	148

다. 건조온도 및 곡온변화	151
라. 배출공기 및 템퍼링실의 곡온	155
마. 건조소요시간, 건감률 및 소요에너지	159
바. 건조 벼의 품질변화	161
4. 비용분석	162
가. 분석방법	162
나. 분석결과	164
제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도	167
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	170
제 6 장 연구개발과정에서의 수집한 해외과학기술정보 ..	172
제 7 장 참고문헌	174
부 록	178
A. 병류형 순환식 곡물건조기 시뮬레이션 프로그램	178
B. 병류형 순환식 곡물건조기 최적화 프로그램	188

제 1 장 연구개발과제의 개요

제 1 절 서론

건조기술은 수확 후 관리공정 중에서 첫 번째 공정으로, 이 공정이 적절치 못하면 저장, 가공 및 유통 등의 후속 공정에 악영향을 줌으로 건조공정은 쌀의 품질향상에 매우 중요한 공정이다.

곡물의 건조는 안전저장을 위하여 품질 손상없이 함수율을 줄이는 과정으로 곡물과 같은 생물재료의 수분을 제거하기 위해서는 막대한 양의 에너지가 소요된다. 곡물 생산에 투입되는 총 에너지 중에서 건조에 소요되는 에너지는 콩은 24%, 벼는 50% 및 옥수수는 60%이상이 소요되는 에너지 집약적인 공정이다(Bake and Vas, 1994; Brooker 등, 1992; Keum 등, 2002; Sosle 등, 2003). 따라서, 곡물 생산에 소요되는 총 에너지를 절감하기 위해서는 건조과정에서의 에너지 절감 없이는 그 효과를 기대하기 어렵다.

벼를 건조하는 동안에는 동할립 증가, 발아율 감소, 환원당 증가 및 효소력 저하 등으로 식미 저하가 발생하게 된다. 또한, 건조온도가 높을수록 미립내부의 온도 및 함수율의 차이에 의해 열응력 및 수분차에 의한 응력이 증대되며, 응력이 과대하게 발생되면 낱알에 금이 가는 동할이 발생하게 된다(Yamaguchi 등, 1980; Yamashita, 1976).

벼의 건조기 기본형식은 벼와 열풍의 흐름방향에 따라 크게 5가지 형태로 구분할 수 있다. 벼와 열풍의 흐름이 동일한 방향인 병류형(竝流型, concurrent flow type), 반대방향인 향류형(向流型, counter flow type), 직각방향인 횡류형(橫流型, cross flow type)과 이들이 혼합된 혼합류형(混合流型, mixed flow)과 벼는 정지되어 있고 열풍만 이동하는 고정층형(固定層型,

fixed-bed type)이 있다.

벼의 건조방법은 주로 자연건조 및 기계건조로 구분할 수 있으며, 자연건조 또는 천일건조는 과거부터 내려오던 전통적인 방법으로서 태양에 의존하는 건조방법으로 주로 농가에서 이용하고 있으며, 불균일 건조와 동할율이 급격히 증가하고, 비나 이슬에 의한 재흡습과정에서 손상이 심하며, 오염뿐만 아니라 해충에 의한 피해가 심각하다. 자연건조 방법은 점차 감소하는 추세에 있지만 여전히 국내 건조작업의 50%를 담당하고 있다.

국내 벼농사의 주요 농작업의 기계화율은 2003년 경운작업은 98.8%, 이앙작업은 98.4%, 수확작업은 99.1%이나 건조작업은 48.6%에 불과하다. 특히, 일본의 경우 건조작업의 기계화율은 92%를 상회한다. 곡물건조기는 1970년대 초부터 공급되기 시작하여 1986년까지 연간 100~700대가 지속적으로 공급되었고, 반값 공급 정책기간에는 연간 3.6~7.5천대 수준으로 공급되었으나, 그 이후 2.5~4.0천대로 급감하였다. 2001년에는 곡물건조기는 58,213대가 공급되었다.

미곡종합처리장(Rice Processing Complex, RPC)은 수확한 물벼를 산물(bulk) 상태로 반입, 건조, 저장, 가공 및 유통하는 공정을 일괄 자동화, 기계화한 시설로, 1991년 2개소 RPC가 설치된 이래 RPC 328개소가 보급되었다. 또한, 물벼를 건조 및 저장하는 시설인 건조저장시설(Drying and Storage Center, DSC)이 639개소 보급되었다.

RPC(Rice Processing Complex, 미곡종합처리장)에 보급되어 있는 건조시설은 상온통풍건조시설과 열풍건조시설로 구분할 수 있다. 상온통풍건조시설은 사일로, 사각빈 등을 이용하는 건조방법이다. 상온통풍건조방법은 상온 또는 이를 5℃ 이하로 가열한 공기를 통풍하여 건조하는 방법으로 벼의 품질 손상을 최소화 할 수 있고, 에너지 효율이 높은 건조방법이다(Keum, 1980; Sharp, 1982). 그러나, 자연상태의 공기를 이용하므로 건조속도가 낮은 저능

력(low-capacity) 건조방법으로 건조소요시간이 길고 특히, 강우 등 외기조건이 불리할 경우 건조속도가 저하되어 벼의 품질저하가 우려된다.

열풍건조시설은 순환식건조기와 연속식건조기로 크게 구분되며, 열풍건조는 45~55℃의 고온 열풍을 이용하여 건조속도를 증대시키는 고능력(high-capacity) 건조방법으로 처리능력에 우선권을 둔 건조방법이다. 따라서, 열손상에 의한 동할 증가, 발아율의 감소 및 식미저하 등을 고려한 적정한 열풍온도의 선정이 중요하다. 순환식 건조기는 40~54℃의 열풍을 이용하는 방법으로 열풍의 흐름이 주로 횡류형이다. 초기에는 4~6톤 규모가 보급되었으나, 최근에는 10~20톤 규모가 개발되어 보급되고 있으며, 향후 30톤 이상이 보급 될 전망이다. 연속식건조기는 열풍흐름이 주로 혼합류형 형태로서 국내에는 10톤 규모가 보급되어있다.

RPC 및 DSC의 건조능력은 2004년 벼 생산량 6,736천톤(조곡기준)의 41.1%수준에 불과하다(표 1-1).

Table 1-1 건조시설의 건조능력(농관원, 2005)

구분	순환식 건조기	연속식 건조기	사각빈	평타입 사일로	계
보급수	1,690	182	2,690	2,227	6,789
건조능력(톤)	975,316	662,453	159,430	973,744	2,770,943
건조능력 비율(%)	35.2	23.9	5.8	35.1	100

또한, 농협 미곡종합처리장(RPC)의 물벼 건조실적은 1996년에 940천석, 2001년에 3,475천석으로 급격히 증가하고 있다. 그러나, RPC는 건조시설의 부족으로 수확기 반입물량 대비 야적비율이 16.9%로 개소당 820톤에 이르고

있으며, 야적에 따른 벼의 손실율은 20%이상으로 보고되고 있다.

따라서 고품질의 쌀 생산을 위해서는 건조능력의 증대가 필요한 실정이며, 건조시설의 부족과 수확기 반입물량의 증대로 보다 큰 규모의 건조기가 요구되고 있는 실정이며, 건조기의 처리 능력 향상, 건조소요에너지의 절감, 건조벼의 품질향상 등의 획기적인 개선이 요구되고 있다.

그러나, 열풍건조시설의 대표적인 시설인 횡류형 순환식 곡물건조기는 건조 및 건조원리상 건조속도의 증대, 건조에너지 절감, 건조곡물 품질 개선 등 성능을 향상시키기는 어려운 실정이다. 따라서 건조속도를 초고속화 하는 동시에 소요에너지를 절감하고 곡물의 품질을 유지하기 위해서는 신개념의 건조기 개발이 필요하다.

병류형 곡물건조기는 열풍의 흐름과 곡물의 흐름이 동일한 병류흐름으로 모든 곡물이 동일조건의 열풍에 노출되며, 초기에는 고온에 노출되지만 배출시에는 곡온이 저하하게 된다. 이 형식은 고온의 열풍(100~120℃)으로 초고속으로 건조하면서 동할의 발생을 기존 건조기와 비슷한 수준으로 억제하고 소요에너지를 절감할 수 있는 신개념의 건조기이다.

횡류형 순환식 건조기는 벼의 흐름과 열풍의 흐름이 횡류흐름(Cross flow)으로서, 건조속도는 10톤의 경우 0.69%,w.b./hr로 수분 26%의 벼를 16%까지 건조시키는데 약 14.5시간이 소요되며, 소요에너지는 4631kJ/kg이 소요된다. 연간 처리능력은 1기당 약 375톤을 처리할 수 있다.

병류형 순환식 곡물건조기는 열풍의 흐름을 곡물과 동일하게 흐르게 하는 병류흐름(Concurrent flow)을 이용한 건조기이다. 열원과 송풍기의 성능을 고려하여 80~120℃의 고온의 열풍을 이용할 수 있다. 고온의 열풍을 이용하지만 병류흐름으로 인하여 곡온의 상승을 최대한 억제할 수 있어 건조부에서 배출시 곡온을 35℃ 내외로 제한할 수 있다. 따라서 동할의 발생을 기존의 횡류형 순환식 건조기와 비슷한 수준으로 유지할 수 있다. 특히, 병류형 순환식 곡

물건조기의 건조속도는 1.0~1.2%,w.b./hr까지 증가시킬 수 있어 횡류형 순환식 건조기에 비해 45~74% 증대가 기대된다. 또한, 함수율 26%의 벼를 16%까지 건조시키는데 약 8.3~10.0시간이 소요되며(31~43% 절감), 연간 처리 능력은 1기당 약 522~610톤으로 횡류형 순환식건조기에 비해 39~63%의 건조능력 증대효과를 기대할 수 있다.

국내 병류형 순환식 곡물건조기에 대한 실험은 매우 미비하며, 특히 상용 병류형 순환식 곡물건조기의 개발에 관한 연구는 전무한 실정이다.

병류형 곡물건조기에 대한 연구는 주로 미국 등을 중심으로 이루어져 왔으며, 대상 곡물은 중장립종 벼와 옥수수를 이용하였다. 또한 병류형건조기의 구조는 우리나라, 일본, 동남아시아 등에서 주로 사용하는 순환식 형태에 대한 연구보다는 대부분 연속식 형태로 이루어졌다.

따라서 기존 건조기에 비해 건조속도가 빠르고, 건조소요에너지를 절감하는 동시에 품질을 유지할 수 있는 병류형 순환식 곡물건조기 최적설계인자의 구명과 건조기 개발 및 적정 운영방법에 관한 연구가 필요하다.

제 2 절 연구목적

본 연구의 목적은 기존 건조기에 비해 건조속도가 빠르고, 건조소요에너지를 절감하는 동시에 품질을 유지할 수 있는 병류형 순환식 곡물건조기 최적설계인자의 구명과 건조기 개발 및 적정 운영방법의 정립에 있다.

연구의 구체적인 목적은 다음과 같다.

- 1) 병류형 순환식 곡물건조기 시뮬레이션 프로그램 개발
- 2) 병류형 순환식 곡물건조기 최적 설계 프로그램 개발
- 3) 병류형 순환식 곡물건조기 최적설계요인 및 작동조건 결정
- 4) 실험용 병류형 순환식 곡물건조기 상세 설계 및 제작하여 모델의 적합성을 검증하고, 건조영향인자를 구명
- 5) 병류형 순환식 곡물건조기 시작기 및 본기를 설계, 제작 개발하여 성능평가를 통해 적정 운영방법을 개발 및 경제성 분석

제 2 장 국내외 기술개발 현황

곡물을 일정한 조건의 공기 중에 장시간 노출시키면 곡물 중의 수증기압과 주위 공기 중의 수증기 분압이 평형을 이루게 되어 곡물은 일정한 함수율에 도달하게 된다(Brooker 등, 1992). 이와 같이 곡물이 주위 공기와 평형을 이루었을 때 그 곡물의 함수율을 주어진 주위 공기 조건에 대한 평형함수율(Equilibrium Moisture Content, EMC)이라 한다. 평형함수율은 곡물의 건조와 저장 과정의 해석, 시스템 설계 및 운영에 기초가 되는 매우 중요한 요인 중의 하나이다(Gustafson and Hall, 1974; Kameoka, 1988).

Keum과 Kim(2002)은 건조온도 15℃, 25℃ 및 30℃ 3수준, 상대습도 30% 및 50% 2수준에 대하여 벼의 건조속도를 측정하고, 곡물 건조모델로 많이 이용되고 있는 4개의 건조방정식에 대하여 예측치와 함수율비의 실험치 간의 RMSE와 결정계수로 건조방정식의 적합성을 검정하였다. Page 모델의 경우 결정계수는 0.995이상, RMSE는 0.018이하로 나타났고, Thompson 모델은 결정계수가 0.992이상, RMSE는 0.038이하로 나타났으며, Lewis 모델과 축소수분확산모델의 결정계수는 0.932이상, RMSE는 0.084이하로 나타나 Page 모델과 Thompson 모델에 비해 다소 적합성이 떨어지는 것으로 보고하였다. 따라서, 함수율비(MR)의 값이 0~1사이의 값을 고려할 때 RMSE를 기준으로 Page 모델의 적합성이 인정된다고 보고하였다.

벼는 건조 또는 흡습과정에서 미립내부의 온도 및 함수율의 구배에 의해 응력이 발생하게 되며, 이 응력이 과대하게 되면 낱알에 금이 가는 동할이 발생한다(Yamaguchi 등, 1980).

벼의 동할은 주로 건조과정 또는 건조 후에 발생하게 되는데 벼의 중요한 품질 지표중의 하나이다(宏之進, 1983). 동할은 저장성 및 도정수율 저하의

원인이며, 또한 식미저하의 원인이 된다.

건조에서 동할을 측정할 때는 건조 후 벼를 밀폐하여 상온에서 48시간 이상 보관하여야 한다. 이는 건조직후에는 동할은 잘 나타나지 않고, 보관시간이 경과할수록 동할이 점차 증가하여 48시간 후면 최대에 도달하기 때문이다. 벼의 동할은 수작업으로 왕겨를 제거한 후 현미를 대상으로 육안으로 측정한다 (山下律也, 1976; Sharma and Kunze, 1982).

Kim(2003)은 초기함수율 3수준, 건조온도 40.4~60.9℃ 범위의 3수준에 대하여 열풍노출시간 5~120분 동안에 발생하는 벼의 동할율을 측정하여 초기함수율, 건조온도 및 열풍노출시간의 함수로 표시되는 동할율 예측모델을 열풍노출시간이 경과함에 따라 동할의 발생형태는 S자형으로 나타나는 경향을 감안하여 sigmoid 모델을 실험모델로 개발하였다.

Keum(1988)은 시뮬레이션 방법을 이용하여 횡류형 순환식 건조기의 설계 및 성능을 평가하고 벼의 품질을 유지하면서 건조소요에너지를 최소화하고 건조능력을 최대로 할 수 있는 적정 작동조건에 대하여 연구를 수행하였다.

Keum(1993)은 실험용 병류형 건조기에서 2톤의 벼를 열풍온도는 110-100-90-80℃로 변화시키면서 건조실험을 수행하였는데 건조속도는 2.1%,w.b./hr, 동할율은 2.1% 증가하는 것으로 보고하였다.

국내 병류형 순환식 건조기에 대한 실험은 Keum(1993)의 자료이외에는 전무한 실정이다. 특히, 상용 병류형 순환식 건조기의 개발에 관한 연구는 전무한 실정이다.

Öholm(1955)은 병류형 건조의 원리를 처음으로 제시하였다.

Bakker-Arkema 등(1977)은 순환 병류형 곡물건조기에 대한 시뮬레이션 모델을 개발한 바 있고, 이 모델은 다단 병류형 곡물건조기의 설계에 이용할 수 있는 것으로 보고하였다.

Walker (1977)는 2단, 3단의 병류형 벼 건조에서 송풍온도, 곡물순환속도,

송풍공기가 에너지 효율에 미치는 영향을 분석하였고, 품질에 영향을 주지 않고 송풍온도를 120℃까지 올릴 수 있다고 보고하였다.

Thompson 등(1969)은 횡류형과 병류형 건조의 특성을 성능그래프를 이용하여 비교하여 보고하였다.

Baughman 등(1973)은 옥수수립을 구로 가정하고 수분확산이론에 근거하여 병류 건조 과정을 시뮬레이션한 결과를 보고하였다.

Farmer (1972)는 병류형 냉각장치가 부착된 1단 병류형 건조기의 최적설계를 위하여 동적 계획법에 의한 프로그램을 개발한 바 있으며 목적함수로는 에너지비용을 제한요소로 하는 곡물의 품질을 사용하였다. 그 결과 배기의 상대습도를 높이기 위해서는 송풍공기의 온도를 높이고 송풍량을 적게 하여야 한다고 보고하였다.

Brook 등(1978)은 병류형 건조기의 비용 측면으로 기존건조기와 비교하였다. 연료소비량은 기존의 건조기에 비해 약 49% 절감되었다고 보고하였다.

Bakker-Arkema (1981)는 옥수수를 이용하여 다단 연속식 병류형 건조기 실험을 하였다. 옥수수 건조시 열풍온도를 232~288℃를 사용하였으며, 기존의 상용 횡류형 건조기 보다 소요에너지가 절감되었고, 품질에도 변화가 없다고 보고하였다.

Bakker-Arkema 등(1977)은 1단 2단 및 3단 연속식 병류형 건조기를 이용하여 장립종 벼의 건조 실험을 수행하였다. 함수율 17%(w.b.)인 벼를 13%까지 건조실험 한 결과 2단식 병류형이 가장 적합하였으며, 소요에너지도 가장 절감되었다고 보고하였다. 또한, 완전미수율은 0.6~3.6%정도 감소하였다고 보고하였다.

병류형 건조기의 국외 연구는 주로 미국에서 이루어졌으며, 대상 곡물은 중장립종 벼와 옥수수를 대상으로 하였다. 그러나 대부분 연속식 건조기 형태에 대한 연구가 이루어졌다.

병류형 곡물건조기는 열풍의 흐름과 곡물의 흐름이 동일한 병류흐름 (Concurrent Flow)으로 모든 곡물이 동일조건인 열풍에 노출되며, 초기에는 고온에 노출되지만 배출시에는 저온에 노출된다. 이 형식은 고온의 열풍(100~120℃)으로 초고속 건조하면서 동할의 발생을 억제하고 에너지를 절감할 수 있는 신개념의 건조기이다.

횡류형 순환식 건조기의 건조속도는 10톤의 경우 0.69%,w.b./hr로 수분 26%의 벼를 16%까지 건조시키는데 약 14.5시간이 소요되며, 소요에너지는 4631kJ/kg이 소요된다. 연간 처리능력은 1기당 약 375톤을 처리할 수 있다 (농업기계화연구소 건조기 형식검사 자료, 1999년).

병류형 순환식 건조기의 경우 80~120℃의 고온의 열풍을 이용하는 방법으로 열풍의 흐름을 곡물과 동일하게 흐르게 하여 곡온의 상승을 막고 배출시 곡온을 35℃ 내외로 억제시켜 동할의 발생을 기존의 횡류형 순환식 건조기와 비슷한 5.0%를 유지할 수 있다.

병류형 순환식 건조기는 고온의 열풍을 이용하므로 주로 대용량의 순환식 건조기에 적합하며, 이는 최근 대용량을 선호하는 국내 건조기 시장의 여건에 부합되며, 인도네시아, 인도 등 쌀 생산량이 많은 동남아시아의 수출 전략형 건조기로의 활용이 가능하다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 병류형 순환식 곡물건조기 시뮬레이션 프로그램

1. 서언

건조란 열과 수분이 동시에 이동하는 과정으로 열은 수분을 증발시키는데 필요하며 재료 표면에서 증발된 수분은 공기에 의하여 주위로 방출된다.

곡물은 건조방법에 따라서 품질이 크게 좌우되므로 건조과정을 해석하고 적정 건조조건을 구명하는 것이 무엇보다도 중요하다(Keum 등, 1997).

곡물의 건조속도를 나타내는 건조모델은 박층건조모델과 후층건조모델로 구분할 수 있다. 박층건조모델은 얇은 두께의 곡물층의 건조과정을 나타내고, 후층건조모델은 많은 박층으로 이루어진 건조과정을 해석한다.

곡물건조는 일정한 퇴적을 이루고 있는 곡물층에 건조공기를 통과시키는 후층건조과정으로 건조기의 성능을 분석하거나 설계를 위해서는 반드시 후층 건조과정을 해석해야 한다.

건조공기는 곡물층을 통과하는 동안 곡물로부터 수분을 흡수하여 습도는 높아지고 온도는 하강하는 반면, 곡물은 수분을 잃고 곡온은 상승하게 된다. 따라서 후층에서의 함수율, 곡온 및 건조공기의 조건들의 변화를 예측할 수 있어야 한다. 후층건조과정을 해석하기 위해서는 곡물의 평형함수율, 수분증발 잠열, 박층건조방정식, 열 및 물리적 성질 및 공기의 상태에 따른 습공기 성질 등의 자료가 요구된다.

따라서 병류형 후층건조를 예측할 수 있는 수확모델을 이용하여 병류형 순환식 곡물건조기 시뮬레이션 모델을 개발하고, 벼의 건조실험을 통하여 시뮬레이션 모델의 적합성을 검증하였다.

2. 시뮬레이션 프로그래밍

병류형 순환식 건조기의 건조과정은 그림 3-1과 같다. 그림에서와 같이 곡물이 열풍과 함께 건조실을 하강하는 동안 건조가 이루어지며 건조실을 통과한 곡물은 템퍼링실을 지나는 동안 곡물 내부의 수분 및 온도구배가 완화되는 템퍼링 과정을 거치게 된다.

템퍼링 과정을 거친 곡물은 건조실에 들어가 순환하게 되므로 건조-순환-템퍼링 과정을 반복하면서 목표로 하는 함수율에 도달하게 된다. 따라서 순환 병류형 건조과정의 해석을 위해서는 건조모델과 템퍼링 모델이 필요하다.

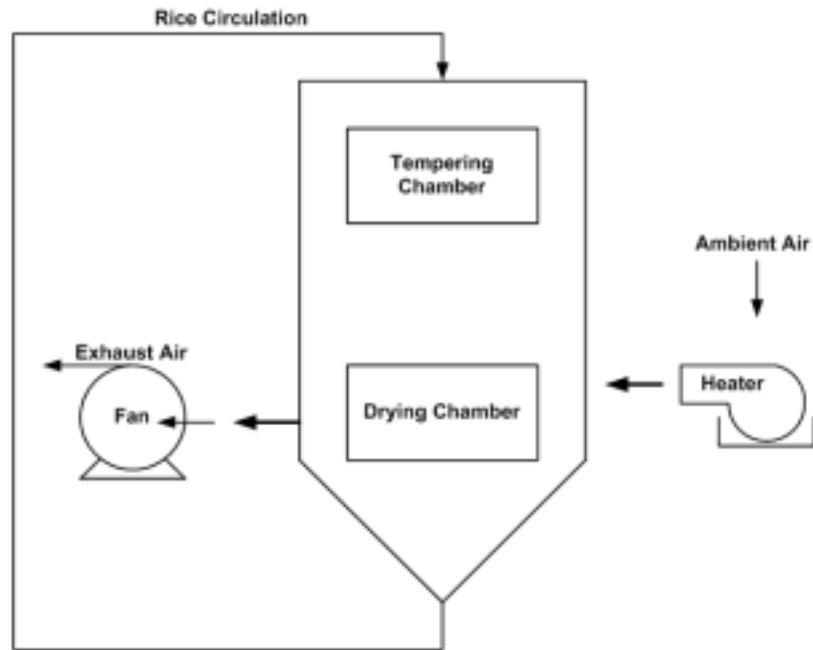


Fig. 3-1 Block diagram of a rice circulating concurrent-flow dryer.

곡물의 박층 Δx 를 통과하는 온도 T , 절대습도 H 인 건조공기는 Δt 시간 동안 함수율 M , 온도 θ 인 곡물로부터 ΔM 의 수분을 증발시켜 건조공기에 첨가

시킴으로써 건조공기의 절대온도는 $H+\Delta H$ 로, 곡물의 함수율은 $M-\Delta M$ 으로 변화한다.

또한 건조공기의 온도는 곡물의 온도상승 및 수분의 증발에 의한 냉각효과에 비례하여 $T-\Delta T$ 가 된다. 하나의 박층을 통과한 공기의 상태는 다시 다음 박층을 통과할 공기의 초기 건조공기상태로 주어지며 Δt 시간동안의 건조과정이 끝난 박층은 Δy 만큼 이동하여 다시 위의 과정을 되풀이하게 된다. 따라서 이러한 해석에 의한 병류형 순환식 곡물건조기의 시뮬레이션 모델을 설정하기 위하여 다음과 같이 가정하였다.

- ① 건조과정 중에서 곡물의 체적변화는 없다.
- ② 곡립내부에서의 온도와 수분의 구배는 없다.
- ③ 곡물과 곡물사이의 열전달은 무시한다.
- ④ 송풍량과 곡물순환율은 일정하다.
- ⑤ 건조기의 벽체로부터 열손실과 곡물 순환과정의 곡물 온도 하강은 무시한다.
- ⑥ $\partial T/\partial y$ 와 $\partial H/\partial y$ 는 $\partial T/\partial x$ 에 비하여 미소하므로 무시한다.
- ⑦ Δt 시간 동안의 건조공기와 곡물의 열용량은 일정하다.

사용기호

a	벼의 비표면적(m^2/m^3)
c_a	공기의 비열($\text{kJ}/\text{kg K}$)
c_p	곡물의 비열($\text{kJ}/\text{kg K}$)
c_v	수증기의 비열($\text{kJ}/\text{kg K}$)
D	곡물의 수분확산계수(m^2/hr)
G_a	공기의 유동율($\text{kg}/\text{hr m}^2$)
G_g	곡물순환율($\text{kg}/\text{hr m}^2$)
h	대류열전달계수($\text{kJ}/\text{m}^2 \text{ hr}$)
h_c	곡물의 열전달계수($\text{kJ}/\text{m}^2 \text{ K hr}$)
H	공기의 절대습도($\text{kg H}_2\text{O}/\text{kg dry air}$)
h_{fg}	곡물수분의 증발잠열($\text{kJ}/\text{kg H}_2\text{O}$)
M	곡물의 함수율(decimal, d.b.)
\overline{M}	곡물의 평균 함수율(decimal, d.b.)
M_e	곡물의 평형 함수율(소수, d.b.)
M_o	곡물의 초기 함수율(소수, d.b.)
M_f	곡물의 최종 함수율(소수, d.b.)
ΔP	압력강하(Pa)
r	반경방향 좌표(m)
R	곡물의 좌표(m)
q	풍량비($\text{m}^3/\text{min m}^3$)
RH	상대습도(decimal)
t	시간(hr)
T	공기온도($^{\circ}\text{C}$)
V_P	곡물유하속도(m/hr)
x	공기의 흐름방향(m)
X_c	건조실 높이(m)
y	곡물의 흐름방향(m)
θ	곡물온도($^{\circ}\text{C}$)
ρ	곡물의 산물밀도(kg/m^3)
ρ_p	공기의 밀도(kg/m^3)

가. 수학모델

병류건조모델은 다음과 같으며, 식 (3-4)와 (3-5)는 곡물을 구로 간주하고 유도한 곡립의 건조속도를 나타내는 수분확산모델이다. 여기서, $M(r,x)$ 은 곡립내부의 수분분포를 나타내며, $\bar{M}(x)$ 는 곡립의 평균함수율이다. 식 (3-1)~(3-3)은 1계 상미분방정식이며, 식 (3-4)는 2계 편미분방정식이다.

$$\frac{dT}{dx} = \frac{-h_c a}{G_a c_a + G_a c_v H} (T - \theta) \dots\dots\dots (3-1)$$

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{h_c a}{G_p(c_p + M c_w)} (T - \theta) - \frac{h_{fg} + c_v(T - \theta)}{G_p(c_p + c_w M)} G_a \frac{dH}{dx} \dots\dots\dots (3-2)$$

$$\frac{dH}{dx} = -\frac{G_p}{G_a} \frac{d\bar{M}}{dx} \dots\dots\dots (3-3)$$

$$\frac{d\bar{M}}{dx} = \frac{3}{R^3} \int_0^R \frac{\partial M}{\partial x} r^2 dr \dots\dots\dots (3-4)$$

$$\frac{\partial M}{\partial x} = \frac{D}{V_p} \left(\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right) \dots\dots\dots (3-5)$$

식 (3-4)를 연립 1계 상미분방정식으로 변환하기 위하여 구형의 곡립의 반경을 N 등분하고, $\frac{\partial M}{\partial r}$ 및 $\frac{\partial^2 M}{\partial r^2}$ 를 중앙차분식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial M_i}{\partial r} = \frac{M_{i+1} - M_{i-1}}{2\Delta r} \dots\dots\dots (3-6)$$

$$\frac{\partial^2 M_i}{\partial r^2} = \frac{M_{i+1} - 2M_i + M_{i-1}}{\Delta r^2} \dots\dots\dots (3-7)$$

식 (3-6)과 식 (3-7)을 식 (3-4)에 대입하면, 다음의 식 (3-8)이 된다.

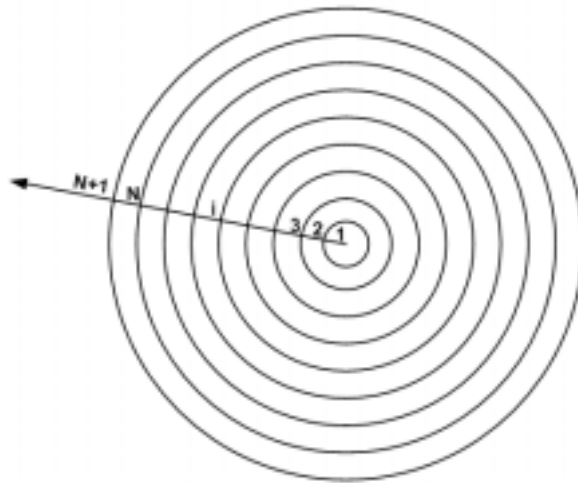


Fig. 3-2 Spherical representation of short rough rice kernel.

그림 3-2와 같이 벼 낱알의 반경을 등 간격으로 N등분하고, 중심노드 (i=1)에 대하여는 다음 식 (3-9)와 같이 나타낼 수 있으며, 곡립의 표면 즉 i=N+1 노드에 대하여는 곡립외부에 건조공기의 평형함수율과 일치하는 가상 점(N+2)을 가정하여 것으로 가정하여 다음 식 (3-10)으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dM_i}{dx} = \frac{D}{V_p \Delta r^2} \left[\left(1 + \frac{1}{i-1}\right) M_{i+1} - 2M_i + \left(1 - \frac{1}{i-1}\right) M_{i-1} \right], \quad i=2, 3, \dots, N$$

.....(3-8)

$$\frac{dM_1}{dx} = \frac{6D}{V_p \Delta r^2} (M_2 - M_1) \quad \text{.....(3-9)}$$

$$\frac{dM_{N+1}}{dx} = \frac{D}{V_p \Delta r^2} \left[\left(1 + \frac{1}{N}\right) M_e - 2M_{N+1} + \left(1 - \frac{1}{N}\right) M_N \right] \quad \text{.....(3-10)}$$

곡립 낱알의 평균함수율의 변화율은 나타내는 식 (3-5)는 Simpson의 적

분식을 사용하면 다음 식으로 표시된다.

$$\frac{d\bar{M}}{dx} = \frac{\Delta r}{R^3} \left[F_1 + 4 \sum_{i=2,4,6}^N F_i + 2 \sum_{i=1,3,5}^{N-1} F_i + F_{N+1} \right] \dots\dots\dots(3-11)$$

$$\text{여기서, } F_i = \frac{\partial M_i}{\partial x} (i-1)^2 \Delta r^2$$

따라서 병류건조모델은 식 (3-1)~(3-3) 및 식 (3-8)~(3-11)로 구성된 1계 연립상미분방정식이며, 이 방정식의 초기 및 경계조건은 다음과 같으며, 상미분방정식의 해를 구하는 Runge-Kutter방법을 사용하여 구하였다.

$$T_{x=0} = T_{in}$$

$$\theta_{x=0} = \theta_{in}$$

$$H_{x=0} = H_{in}$$

$$\overline{M}_{x=0} = M_o$$

$$\frac{\partial M}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0$$

나. 보조 방정식

건조 중 동할의 발생은 Kim 등(2003)이 초기함수율, 노출시간 및 건조온도의 함수로 개발한 동할 예측모델을 사용하였다. 동할 예측모델은 다음의 식 (3-12)와 같다.

$$CR = \frac{A}{1 + \exp \left(- \frac{(t - t_0)}{B} \right)} \dots\dots\dots(3-12)$$

여기서, CR : Crack ratio of brown rice

t : Exposure time(min)

$$A = -1699.55 + 15947.7(M_0) - 1.28524(T_0) - 37529.3(M_0)^2 + 0.05792(T_0)^2 - 3.19993(M \cdot T)$$

$$B = -1047.04 + 11200.98(M_0) - 3.79331(T_0) - 30744.8(M_0)^2 - 0.03895(T_0)^2 + 34.33586(M_0 \cdot T_0)$$

$$t_0 = -3087.95 + 31193.31(M_0) - 4.54745(T_0) - 74834.1(M_0)^2 - 0.03861(T_0)^2 + 23.63469(M_0 \cdot T_0)$$

M_0 : Moisture content(dec,w.b.)

T_0 : Drying air temperature(°C)

벼의 평형함수율은 Keum 등(2002)이 개발한 단립종벼의 평형함수율 식 (3-13)을, 벼에 대한 산물밀도는 다음의 Kim과 Koh(1981)의 식 (3-14)를, 벼의 비열은 Morita 등(1979)의 식 (3-15), 벼의 수분증발잠열은 식 (3-13)의 평형상대습도를 근거로 다음의 식 (3-16)을 유도하여 이용하였으며, 벼의 대류열전달계수는 Wang 등(1979)의 식 (3-17)을 사용하였다.

$$M_e = 0.01 \left[\frac{\ln(1-RH)}{-0.00007836(T+13.058)} \right]^{\frac{1}{2.1581}} \dots\dots\dots(3-13)$$

$$\rho = 537.5873 + 1.2227 \cdot M_w \dots\dots\dots(3-14)$$

$$C_g = 1.2692 + 0.0349 \cdot M_w \dots\dots\dots(3-15)$$

$$h_{fg} = (2502.5 - 2.386 \theta)(1 + 2.4263 \exp(-18.3816 \cdot M)) \dots\dots\dots(3-16)$$

$$h_c = 0.00718 \cdot G_a^{1.3} \dots\dots\dots(3-17)$$

다. 시뮬레이션 프로그램

표 3-1은 개발한 시뮬레이션 프로그램의 입력 및 출력 데이터를 나타낸 것이다. 본 시뮬레이션 모델은 Main program 및 13개의 Sub program으로 구성하였다. 본 프로그램은 실행창에 프로그램을 실행 후 입력 자료를 입력받은 후 곡물의 함수율이 원하는 최종함수율에 도달하였을 때 정지하도록 하였다.

Table 3-1 Simulation program of input and output data

Input data	Output data
<ul style="list-style-type: none"> • Initial mc and grain temperature • Ambient air temperature and relative humidity • Final moisture content and bulk density • Drying air temperature and bed depth • Tempering length and head rice yield • Grain flow rate and Air flow rate 	<ul style="list-style-type: none"> • Number of pass • Final moisture content(%w.b.) • Drying rate(%w.b./hr) • Fan power(kW) • Water removed(kg/kg) • Total energy consumption(kJ/kg-water) • Head rice yield(%)

3. 시뮬레이션 모델 검증

가. 공시재료

실험에 사용한 벼는 경기 화성지역에서 수확한 추청벼이며, 초기함수율은 23.0%(w.b.)이었다. 수확한 벼를 정선한 후 40kg포대에 담아 함수율 변화를 최소화하기 위하여 1℃의 저온저장고에 보관하였다. 실험시작 24시간 전에 벼를 저온저장고에서 꺼내어 상온에서 주위 공기온도와 평형을 이루도록 한 후 실험에 사용하였다.

나. 실험방법

검증실험에 사용한 건조기는 본 보고서에서 제작한 용량 800kg 건조기 시작기를 이용하였다.

표 3-2는 2회(Test-1 및 Test-2)의 검증실험 조건을 나타낸 것이다. 표에서와 같이 초기곡온은 Test-1은 5.4℃, Test-2는 7.0℃, 평균 외기온도는 Test-1은 4.5℃, Test-2는 13.4℃, 평균외기습도는 Test-1은 35.0%, Test-2는 28.5%로 하였다. 또한, 곡물순환속도는 4.5m/hr, 송풍량은 Test-1은 8.1cmm/m³, Test-2는 16.1cmm/m³로 하였다.

외기 온도를 측정하기 위해 외부 2지점, 열풍온도를 측정하기 위하여 열풍유입부 5지점 및 배기부 6지점, 곡온을 측정하기 위하여 템퍼링실내의 높이별 4지점, 건조실의 폭방향 12지점, 깊이방향 7지점 및 배풍덕트하단에 6지점에 대하여 열전대(T-type, OMEGA, USA)를 설치하고 자료 수집장치(7327, DATASCAN, UK)로 30초 간격으로 온도를 측정하여 PC에 저장하였다. 또한 외기 습도를 측정하기 위해 배기부에 습도계(TR-72, TANDD, JAPAN)를 이용하여 2지점에서 측정하였다. 또한 건조공기유입부 1지점, 공기 배출부에 1지점씩 습도계를 두어 1분 간격으로 습도를 측정하였다.

Table 3-2 Drying conditions used for validation test of the simulation program

Items	Condition	
	Test-1	Test-2
Ambient air temperature(°C)	4.5	13.4
Ambient relative humidity(%)	35.0	28.5
Drying depth(m)	0.5	0.5
Initial m.c.(%,d.b.)	28.5	27.0
Initial grain temperature(°C)	5.4	7.0
Drying air temperature(°C)	114	126
Air flow rate(cmm/m ³)	8.1	16.1
Grain flow rate(m/hr)	4.5	4.5
Tempering time(min)	34	34

소요전력은 적산전력계(3166, HIOKI, JAPAN)를 이용하여 측정하였으며, 송풍량은 열선풍속계(VELOCICALC-PLUS, TSI, USA)를 이용하여 배풍부에서 측정하였다. 연료소비량은 전자저울(A-200, CASS, KOREA)을 이용하여 사용된 연료량을 30분 간격으로 측정하였다.

초기중량 약 700kg을 투입하였으며, 건조시작 후 30분 간격으로 버킷엘리베이터에서 일정량의 시료를 채취하여 함수율 및 동할율을 측정하였다. 함수율은 10g-135°C-24시간 상압정온건조법으로 측정한 후 105도법으로 환산하였다(식 3-18).

동할율은 채취한 벼를 밀봉하여 72시간 상온에서 보관한 후 수작업으로 왕겨를 제거하여, 현미 250립에 대하여 동할립 판별기(DC-50, S.SEIKI, JAPAN)를 이용하여 육안으로 측정하였다.

$$M_{105} = 100 - \alpha (100 - M_{135}) \dots\dots\dots(3-18)$$

$$m_{105} = \frac{1}{\alpha} (100 + m_{135}) - 100$$

여기서, M_{105} , M_{135} : 105°C 건조법 및 135°C 건조법에 의한 습량기준함수율(%)

m_{105} , m_{135} : 105°C 건조법 및 135°C 건조법에 의한 건량기준함수율(%)

α : 곡물에 따른 환산계수

벼 : 1.0121, 밀, 보리 : 1.0086, 맥주보리 : 1.0071

현미 : 1.0122, 백미 : 1.0133

다. 결과 및 고찰

표 3-3은 성능평가의 실측치(Test-1)와 시뮬레이션에 의한 예측치를 비교한 표이다. 표에서와 같이 실험치와 예측치의 건조소요시간은 8.5 및 8.6시간, 동할율은 3.6% 및 4.2%로 잘 일치하였다. 건감률은 1.09 및 1.35(%d.b./hr), 최종함수율은 2%(d.b.)의 차이를 보였다. 체수율은 5.3 및 3.7(kg/hr)로 나타났다.

Table 3-3 Comparison of the experimental and simulated results data for Test-1

Items	Experiment	Simulation
Drying time(hr)	8.5	8.6
Resident time(min)	6.3	6.3
Final moisture content(%d.b.)	18.9	17.2
Drying rate(%d.b./hr)	1.09	1.35
Crack ratio(%)	3.6	4.2
Total water removed(kg/hr)	5.3	3.7

그림 3-3은 함수율의 성능평가 실험치(Test-1)와 시뮬레이션에 의한 예측치를 건조시간 별로 비교한 것이다. 그림에서와 같이 초기함수율은 28.5%(d.b.)로 건조 3시간 후 실측치 및 예측치는 각각 23.4% 및 23.6%(d.b.)로 잘 일치하였으며, 건조종료 시점인 8시간 후에는 각각 17.2% 및 18.6%(d.b.)로 나타났다.

함수율의 실측치와 예측치의 결정계수는 0.9665로 나타나 잘 일치하는 것으로 판단되었다.

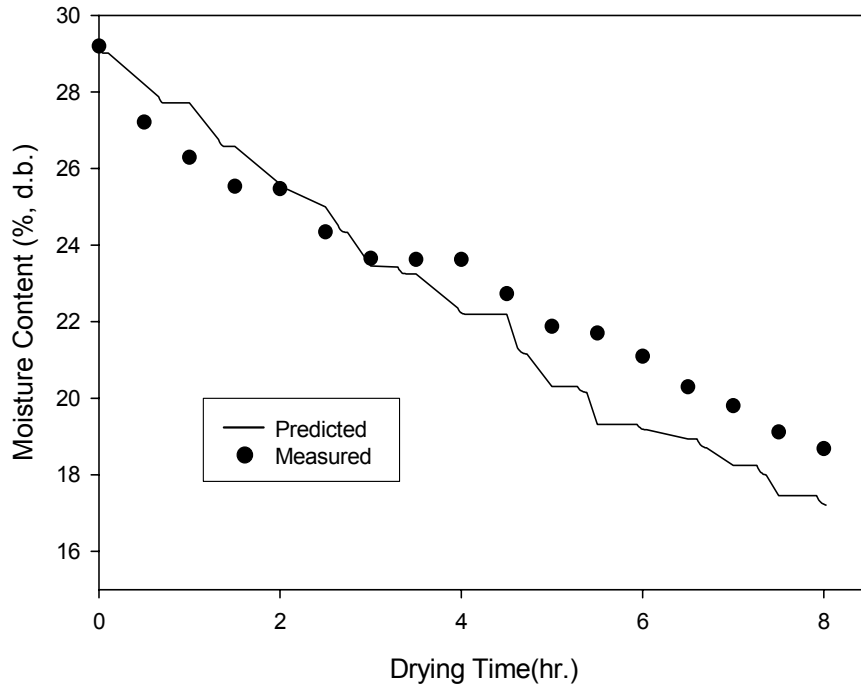


Fig. 3-3 Comparison of the experimental and simulated moisture contents for Test-1.

표 3-4는 성능평가 실측치(Test-2)와 시뮬레이션에 의한 예측치를 비교한 표이다. 건조소요시간은 4.0시간으로 비교적 정확하게 나왔으며, 최종함수율도 비슷한 수치를 보였다. 동할증가율은 다소 차이를 나타내는데 이는 Test-2의 실험이 시료 초기 동할율이 높았기 때문이라고 판단된다(초기 동할율 1.2%).

Table 3-4 Comparison of the experimental and simulated result data for Test-2

Items	Experiment	Simulation
Drying time(hr)	4.0	4.2
Resident time(min)	6.3	6.3
Final moisture content(% , d.b.)	19.2	19.7
Drying rate(% , d.b./hr)	2.2	2.2
Crack ratio(%)	8.4	3.2
Total water removed(kg/hr)	9.8	7.4

그림 3-4는 함수율의 성능평가 실측치(Test-2)와 시뮬레이션에 의한 예측치를 건조시간 별로 비교한 것이다. 그림에서와 같이 초기함수율은 27.0% (d.b.)로 건조 3시간 후 실측치 및 예측치는 각각 20.9% 및 21.5%(d.b.)로 잘 일치하였으며, 건조종료 시점인 8시간 후에는 각각 19.2% 및 19.7%(d.b.)로 나타났다.

함수율의 실측치와 예측치의 결정계수는 0.9847로 잘 일치하는 것으로 판단되었다.

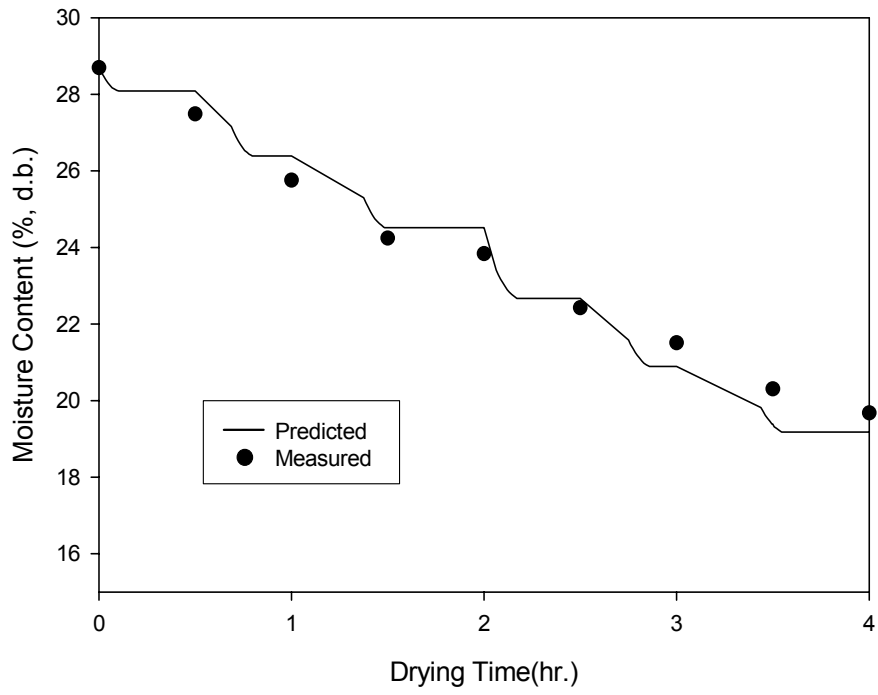


Fig. 3-4 Comparison of the experimental and simulated moisture content for Test-2.

4. 결론 및 요약

본 연구는 병류형 후층건조를 예측할 수 있는 병류형 순환식 곡물건조기 시뮬레이션 모델을 개발하여, 벼의 건조실험을 통하여 적합성을 검증하였다.

본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 가. 병류 순환식 곡물건조기에서 함수율·곡온·배출공기의 온도와 습도·동할율·건조소요에너지를 예측할 수 있는 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 개발하였다.
- 나. 벼 건조실험을 통하여 실험치와 시뮬레이션에 의한 예측치를 비교하여 모델의 적합성을 검증하였다.
- 다. 함수율의 실측치와 시뮬레이션에 의한 예측치의 결정계수는 Test-1에서 0.9665, Test-2에서 0.9847로 나타나 잘 일치하는 것으로 판단되었으며 함수율의 경시적 변화도 잘 일치하였다.
- 라. 건조시간은 Test-1은 실측치 8.5시간 시뮬레이션 8.6시간, Test-2는 실측치 4.0시간 시뮬레이션은 4.2시간으로 전체적으로 잘 일치하였다.
- 마. 동할증가율은 Test-1은 실측치 3.6% 시뮬레이션 4.2%, Test-2는 실측치 8.4% 시뮬레이션은 3.2%으로 Test-1은 전체적으로 잘 일치하였으나 Test-2는 초기동할율이 높은 이유로 일치하지 않았다.
- 바. 제수율은 함수율의 차이를 보이므로 두 실험 실측치와 시뮬레이션의 차이를 나타냈다.

제 2 절 실험용 병류형 순환식 곡물건조기 제작 및 성능평가

1. 서언

건조란 열과 수분이 동시에 이동하는 과정으로 열은 수분을 증발시키는데 필요하며, 재료 표면에서 증발된 수분은 공기에 의하여 주위로 방출된다. 곡물은 건조기의 형태, 건조 방법 등에 따라서 품질이 크게 좌우되므로 건조과정을 해석하고 적정 건조조건을 구명하는 것이 무엇보다 중요하다(Keum 등, 1977).

순환식건조기는 건조부, 템퍼링부, 순환부, 송풍기, 버너 및 제어반 등이 하나로 구성되어있어, 건조와 템퍼링이 반복하면서 건조가 진행된다. 별도의 템퍼링실이 필요하지 않고 건조기내부에서 이루어지기 때문에 건조부와 템퍼링부의 적절한 설계가 필요하다. 또한, 벼가 건조부를 유하하면서 건조가 이루어지기 때문에 건조부 통과시간 즉, 벼의 유하속도에 따라 건조특성이 크게 달라진다. 따라서 순환식건조기에서 건조부와 템퍼링부의 비, 유하속도, 송풍량, 건조부 통과시간 등은 건조에 미치는 중요한 설계인자로서 적절한 설계기준이 요구된다.

따라서 본 연구의 목적은 실험용 병류형 순환식 곡물건조기를 설계, 제작하고 이를 이용하여 벼의 건조실험을 수행하고 품질특성을 구명하는데 있으며, 구체적인 목적은 다음과 같다.

- 가. 용량 700kg 규모의 실험용 병류형 순환식 곡물건조기를 설계·제작하여 실험을 수행한다.
- 나. 곡물유입방법 및 배풍형태에 따른 3종류의 실험용 병류형 순환식 곡물 건조기에 대하여 성능을 평가한다.
- 다. 병류형 순환식 곡물건조기의 실험을 수행한 벼의 품질특성을 구명한다.

2. 공시재료

실험에 사용한 공시재료는 철원지역에서 2003년 10월에 수확한 오대벼이며, 초기함수율은 22.9%(w.b.)이었다. 물벼상태의 톤백으로 구입하여 1℃ 저온저장고에 보관하였다. 실험시작 24시간전에 벼를 저온저장고에서 꺼내 상온에 방치하여 주위 공기온도와 평형을 이루도록 한 후 실험에 사용하였다. 함수율은 10g-135℃-24시간 상압정온건조법으로 측정한 후 105℃법으로 환산하였다.

3. 실험용 병류형 순환식건조기 설계 및 제작

가. 기본설계

실험용 건조기의 용량(건조부+템퍼링부+배출부)은 최대 700kg수준으로 하였으며, 총 용적은 다음 식 (3-19)을 이용하여 구한 결과 1.27m³이었다. 건조부와 템퍼링부의 비율(1 : 4~6)과 배출(냉각포함)부의 규격을 고려하여 건조부 용량을 설계한 결과 약 0.1836m³이었으며, 벼의 산물밀도 550kg/m³을 고려할 경우 벼로 환산 시 101kg이었다(식 3-20).

$$\text{건조기 용적} = \frac{\text{건조기용량}(kg)}{\text{벼의산물밀도}(kg/m^3)} \dots\dots\dots(3-19)$$

$$\begin{aligned} \text{건조부 용적} &= (\text{건조부 전체 용적} - \text{사면각용적}) + (\text{배기부용적} - \\ &\quad \text{배기관 및 사면각용적}) \\ &= 0.18365(m^3)\dots\dots(3-20) \end{aligned}$$

$$\text{벼로 환산} = 0.18365 \times 550 = 101.01kg$$

템퍼링부 1단(0.5×0.7×0.25m, L×W×H)의 용적은 0.08575m³이었으며, 벼 중량으로 환산하면 47.16kg이었다. 따라서 총 10단으로 설계할 경우 벼의 중량은 471.6kg이었으며, 이 때 건조기의 높이는 4.3m이었다. 따라서 벼의 배출 및 템퍼링부의 전체 용적은 0.1818m³로 벼 100kg을 템퍼링 할 수 있도록 설계하였다.

건조부 통과시간을 7~12분까지 가능하도록 하였으며, 이 때 유하속도는 6.42~3.75m/hr 수준이었으며, 순환량은 다음의 표 3-5와 같았다.

Table 3-5 Estimated grain flow rate

Grain velocity (m/hr)	Resident time(min)	Grain mass flow rate (kg/hr)	Grain volume flow rate (m ³ /hr)
6.42	7	865.80	1.574
5.63	8	757.58	1.377
5.00	9	673.40	1.224
4.49	10	606.06	1.101
4.09	11	550.96	1.001
3.75	12	505.05	0.918

송풍량은 풍량비 30m³/min·m²을 기준으로 하였으며, 벼의 중량 700kg에 대하여 10.5cmm으로 결정하였다. 건조기의 송풍저항은 벼 퇴적층의 송풍저항으로 구분할 수 있는데, 벼 층의 두께 0.45m, 풍속 0.5m/s일 때, 다음 식(3-21)에 의해 계산한 결과는 148.77mmAq이었다. 또한, 송풍량 10.5cmm과 정압 148.77mmAq를 갖는 송풍기의 축동력을 효율 60%에서 다음 식(3-22)로 계산한 결과, 0.47kW이었다.

$$\Delta P = 9.81 \times 653.54 \times V^{1.2727} \times (D + \alpha) \dots \dots \dots (3-21)$$

여기서, $V =$ 건조부 겉보기 속도 $= \frac{10.5}{0.35 \times 60} = 0.5 \text{ m/sec}$

$A =$ 건조기 단면적 $= 0.5 \times 0.7 = 0.35 \text{ m}^2$

건조부 체적 $= 0.1575 \text{ m}^3$

$D =$ 건조부 곡물층 높이 $= \frac{0.1575}{0.35} = 0.45 \text{ m}$

$\alpha =$ 부가적 손실(덕트, 후드) $= 0.1$

$$\begin{aligned} \text{송풍기 축동력} &= \frac{P_s Q}{0.6} = \frac{1457.94 \times 10.5}{0.6 \times 60} \\ &= 425.2325 \text{ W} \approx 0.43 \text{ kW} \dots \dots \dots (3-22) \end{aligned}$$

여기서, P_s : 전압(Pa)

Q : 송풍량(m^3/min)

실제 사용동력 $= 0.43 \times 1.1 = 0.47 \text{ kW}$

버너는 최대 약 110℃ 정도를 상승시킬 수 있는 용량을 기준으로 하였으며, 외기온도를 10℃로 가정할 경우 최대 가열 열량은 22,176kcal/hr이며, 현행 횡류형에서 적용하는 이론적인 최대 열량에 대한 실 버너열량 비율 75%를 적용하여 식 (3-23)로 계산한 결과, 16,632kcal/hr의 가열용량이 필요하였으며, 백등유(8,400kcal/ℓ)를 사용 시 연료소모량을 다음 식 (3-24)으로 구한 결과 1.98 ℓ/hr 정도가 필요하였다.

$$\text{버너의 실 가열열량} = \frac{60Qc_p \Delta T}{\eta} = 16,632 \text{ kcal/hr} \dots \dots \dots (3-23)$$

$$\text{연료소모량} = \frac{16632 \text{ kcal/hr}}{8400 \text{ kcal/l}} = 1.98 \text{ l/hr} \dots\dots\dots(3-24)$$

여기서, Q = 송풍량(m³/min)

ρ = 공기밀도(kg(1.2 kg/m³))

C_p = 공기의 정압비열(0.24 kcal / kg °C)

Δt = 가열온도

η = 버너효율(소수)

나. 실험용 건조기 상세 설계

병류형의 경우 고온의 열풍을 사용하므로 곡물의 흐름과 열풍의 흐름이 병류가 이루어져야 한다. 따라서 실험용 건조기의 설계 중에서 가장 중요한 부분은 곡물과 열풍의 흐름이 병류가 되도록 열풍덕트와 배기덕트를 설계하는 것이다.

열풍덕트는 제작 및 설치가 비교적 용이한 산형형태를 우선적으로 고려하였다. 산형덕트 형태는 현재 보급되고 있는 연속식 건조기에서 많이 사용하고 있는 형태로서 산형형태의 공기흐름을 예측하기 위하여 Brooker equation (1961)을 이용하여 Matlab으로 프로그램을 작성하여 위치별 열풍의 흐름을 예측한 결과 그림 3-5와 같이 건조실 하부에서 일부 횡류흐름이 예측되었다.

일부 횡류흐름이 발생하는 산형덕트를 개선하기 위하여 Y형태 덕트를 2열로 3개씩, 총 6개로 구성된 벌집(Beehive)구조를 설계하였다. Y형 덕트 상부로는 벼가 유입되도록 하였고, Y형 덕트 사이로는 공기충만실이 형성되어 열풍이 균일하게 공급되도록 설계하였다.

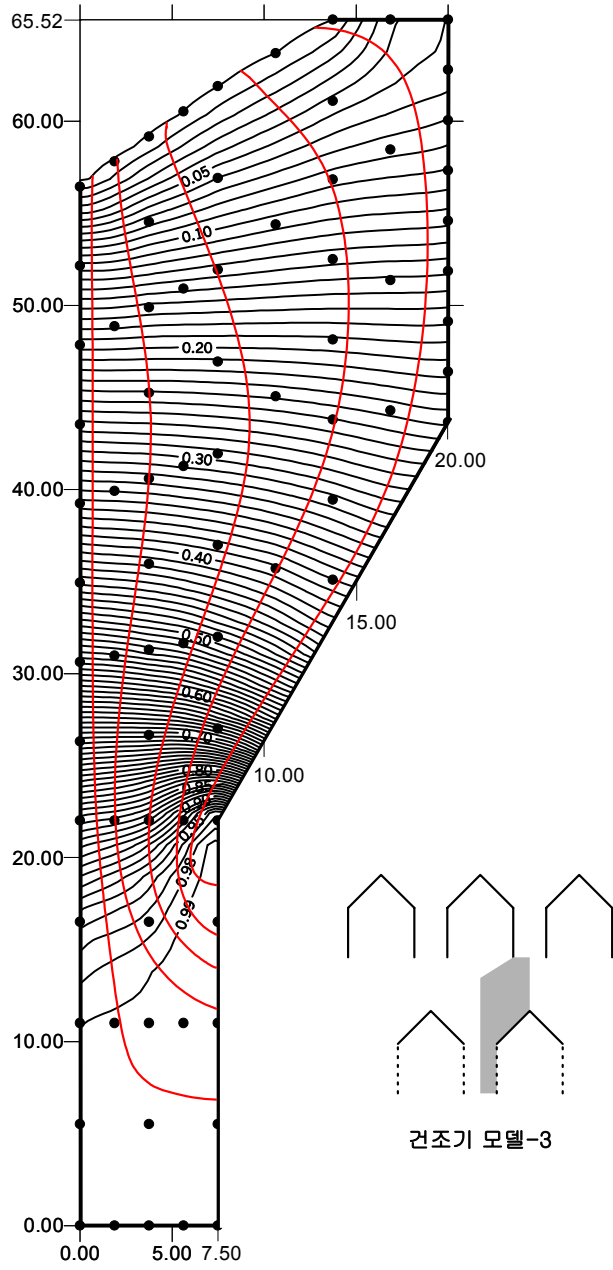


Fig. 3-5 Air flow of multi-duct dryer.

배기부는 삼각형 형태의 덕트를 상부에 2열, 하부에 Cross방향으로 3열을 각각 설치한 형태와 삼각형 형태의 덕트를 2열-1단으로 설치한 형태로 설계하였다. 덕트는 열풍흐름과 정압을 고려하여 송풍기에서 먼 방향에서부터 단면적을 적게 하고 점차 단면적을 크게 테이퍼형태로 설계하였다.

열풍덕트 및 배기덕트의 형태를 고려하여 다음의 그림 3-6~3-8 (Type-1~3)과 같이 건조부, 템퍼링부, 순환부, 배출부 등으로 구성된 실험용 병류형 순환식건조기를 설계하였다.

그림 3-9는 건조기 제어부의 제어 및 전기회로도를 나타낸 것이다.

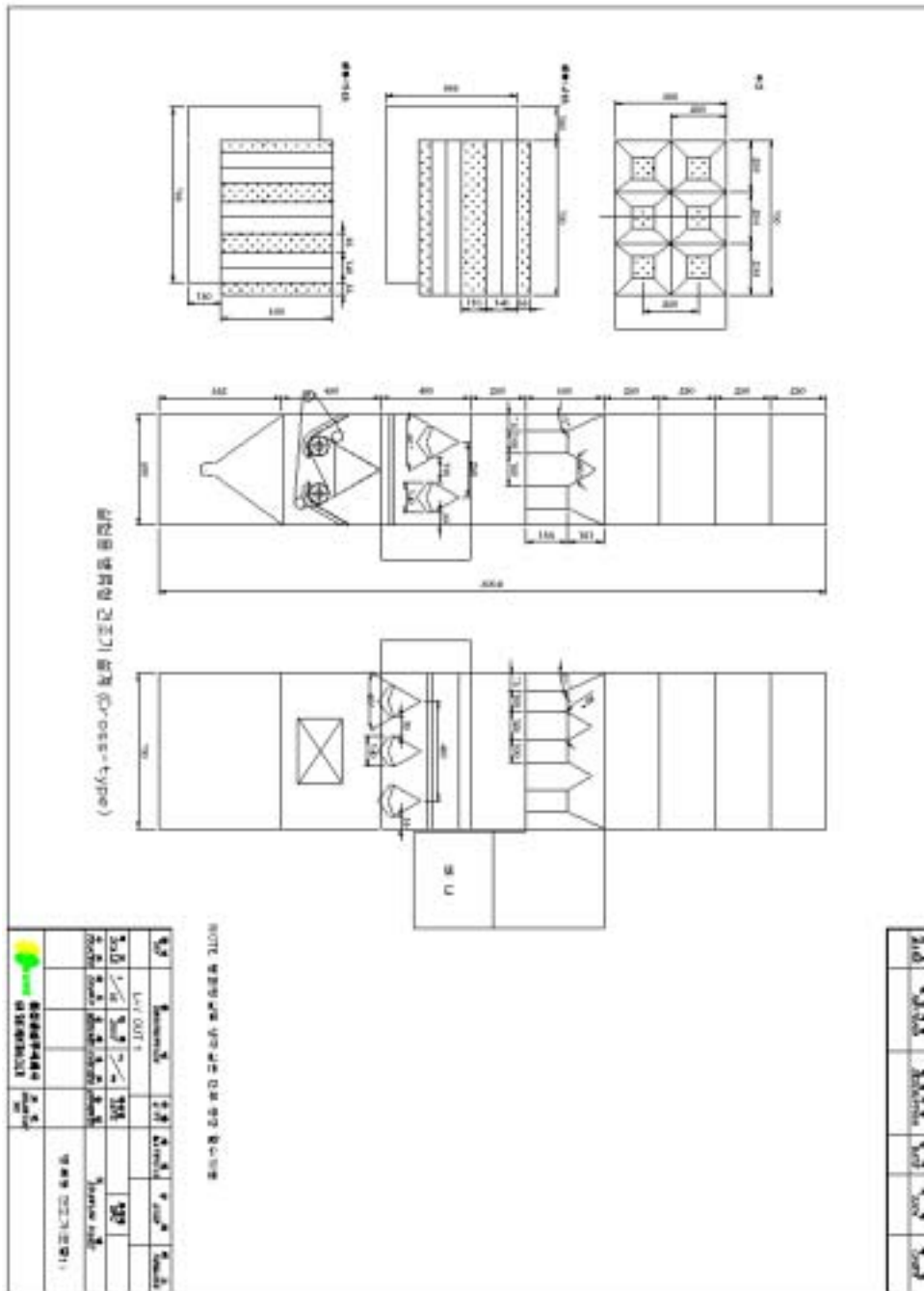


Fig. 3-6 Schematic diagram of the test dryer(Type-1).

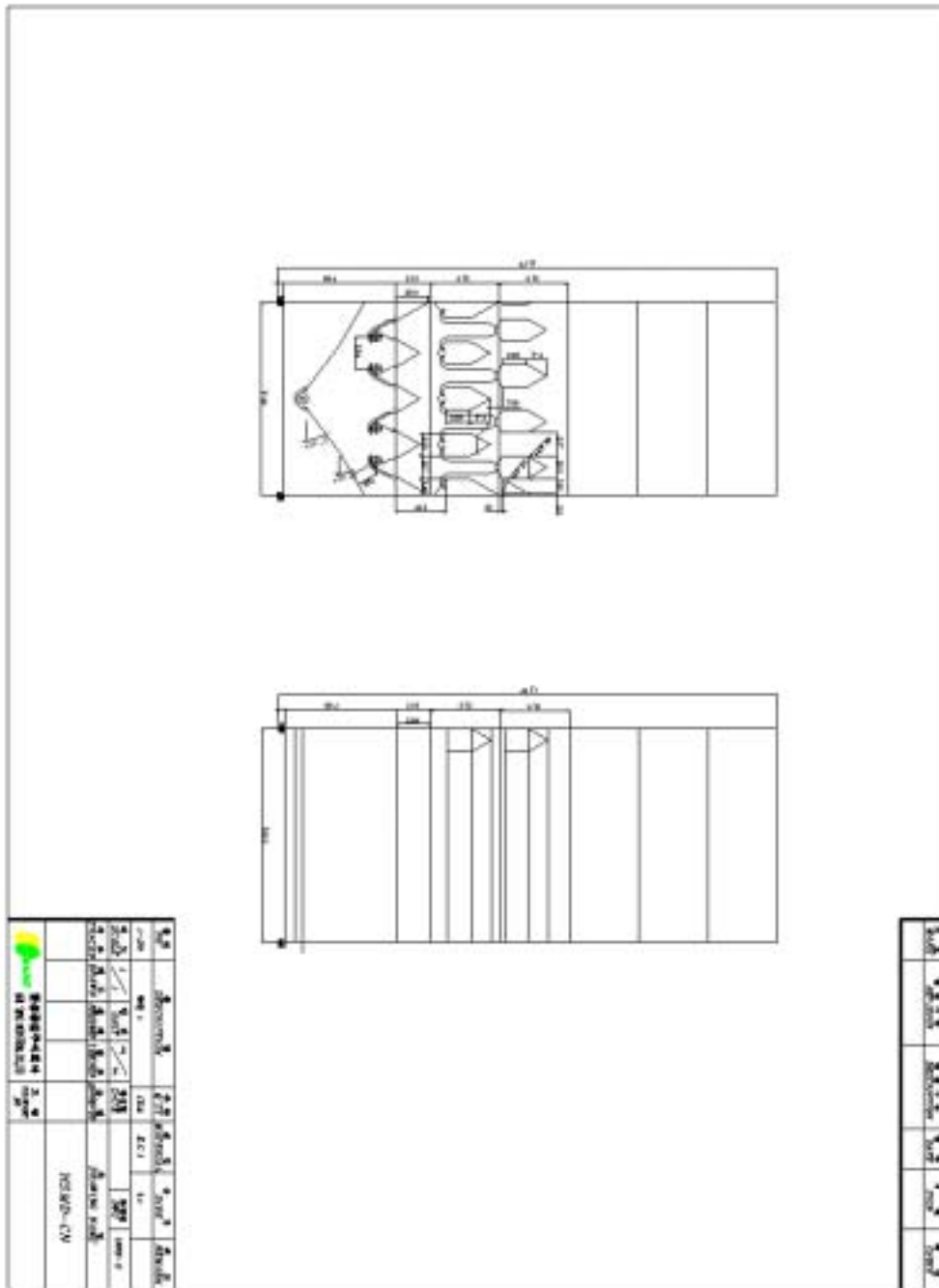
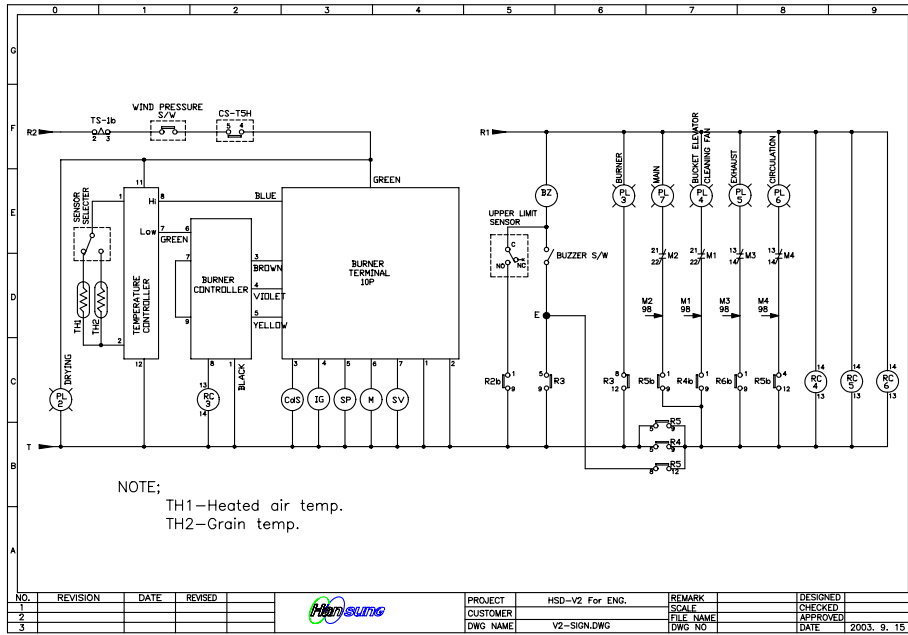
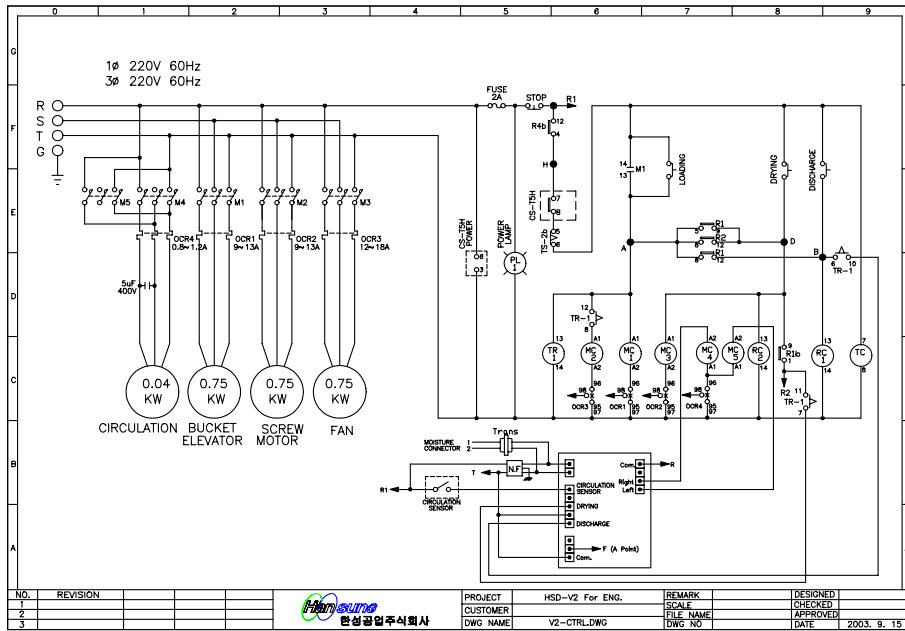


Fig. 3-8 Schematic diagram of the test dryer(Type-3).



a) Control circuit diagram



b) Electric circuit diagram

Fig. 3-9 Circuit diagram of the test dryer.

다. 건조기 제작

그림 3-10은 제작한 실험용 병류형 순환식건조기를 제작한 모습이다. 그림에서와 같이 건조부(열풍유입부 및 배기부), 피드부와 배출부, 템퍼링부, 제어부, 이송기기 및 주변기기로 구성하였다.

건조부는 열풍유입부, 중앙건조부, 열풍배기부 등 각 1단씩 총 3단으로 구성하였고, 피드부 및 배출부는 각 1단, 템퍼링부는 8단 등 총 13단으로 제작하였고, 각각 실험조건에 맞게 분리와 설치가 용이하도록 제작하였다. 배출부에서 배출되는 곡물은 버킷엘리베이터를 이용하여 건조기 상부 템퍼링부로 이송이 가능하도록 제작하였다.

건조부의 일부에 대하여 투시창으로 제작하여 곡물의 퇴적형태, 흐름 등을 측정할 수 있도록 하였다. 곡물의 투입을 위하여 배출부 옆면에 별도의 투입장치를 설치하였으며, 곡물의 배출을 위하여 버킷엘리베이터 상부에 배출구를 설치하였다.

피드부는 직경 0.0093m, 길이 0.7m의 철제 원형봉에 높이 0.0043m의 안내깃 4개를 4방향으로 설치하여 AC 모터(1hp, 감속비 1:50)와 인버터를 이용하여 1회전시 배출 곡물량이 약 5.5kg이며, 유하속도는 3.75~6.42m/hr 범위가 조정 가능하도록 인버터를 이용해 유하속도를 제어하도록 제작하였다. 배출부는 스크류콘베이어를 설치하고 AC 모터(1hp, 감속비 1:30)를 체인으로 연결하였으며, 650rpm으로 회전속도를 조정하였다.

그림 3-11은 건조실의 열풍유입덕트를 나타낸 것으로 Y-형태의 250×233mm의 직사각형 형태로 제작하여 2열로 3개씩 구성하였다. Y형 덕트내의 곡물이 유하되는 하부의 관은 10×10×150mm(D×L×H)로 제작하여 곡물의 흐름이 원활하도록 하였다.

그림 3-12는 Type-1과 Type-2의 삼각형 형태 1단 및 2단 배기부를 나타낸 사진이다.



Fig. 3-10 View of test rice circulating concurrent-flow dryer.



Fig. 3-11 View of rice inlet(Y-type chute).



a) Type-1(cross air exhaust)



b) Type-2(taper air exhaust)

Fig. 3-12 View of air outlet.

라. 건조 방법

상온의 공기와 벼의 곡온이 일치하도록 한 후 벼 700kg을 건조기에 투입하였으며, 벤킷엘리베이터, 배출부, 피드부를 작동한 후 송풍기와 버너를 작동시켜 건조를 시작하였으며, 최종함수율이 19.0%(d.b.)에 도달할 때 실험을 종료하였다.

표 3-6은 건조실험의 조건을 나타낸 것으로 Type-1과 Type-2에 동일하게 적용하였다. 건조실험의 조건은 시뮬레이션 결과를 이용하여 동할율 5%이내, 건조소요에너지 4,500kJ/kg이내에서 작동이 가능하도록 하여, 건조온도는 110℃, 송풍량 28.5(cmm/m²)을 기준으로 하였다. Type-1에 대하여 건조실험을 실시한 후 Type-1의 배기부를 Type-2의 배기부로 교체하는 형태로 Type-1과 Type-2에 대하여 건조실험을 실시하였다.

Table 3-6 Drying conditions for the drying tests

Drying air temperature (°C)	Air flow rate (cmm/m ²)	Grain flow rate (m/h)	Resident time/pass (min)	Tempering time/pass (min)
110	28.5	4.5	6.27	37.00

건조과정 중 벼의 곡온 및 공기의 온도를 측정하기 위하여 그림 3-13과 같이 건조실과 템퍼링실에서 열전대(T-type, OMEGA, USA)를 설치하여 온도를 측정하였다. 그림에서와 같이 외기 2지점, 열풍유입부 5개 지점 및 배기부 6개 지점, 곡온을 측정하기 위하여 템퍼링실내의 높이별 4개 지점, 건조실의 폭방향 12개 지점, 길이방향 7개 지점 및 배풍덕트하단에 6개 지점에 대하여 온도를 측정하고 자료 수집장치(7327, DATASCAN, UK)를 이용하여 30초 간격으로 PC에 저장하였다. 또한 외기 습도를 측정하기 위해 습도계

(TR-72, TANDD, JAPAN)를 설치하였으며, 건조공기유입부 1개 지점, 공기 배출부에 1개 지점씩 습도계를 두어 30초 간격으로 습도를 측정하였다. 그림 3-14는 건조부와 열풍유입부에 열전대를 설치한 사진이다.

소요전력은 건조과정에서 제어반에 공급되는 소비전력을 적산전력계(3166, HIOKI, JAPAN)를 이용하여 측정하였으며, 송풍량은 열선풍속계(VELOCICAL C-PLUS, TSI, USA)를 이용하여 배풍부에 송풍량 측정을 위한 덕트에서 측정하였다.

연료소비량은 전자저울(A-200, CASS, KOREA)을 이용하여 버너에 사용된 연료량을 30분 간격으로 실중량을 측정하였다.

건조 시작 후 30분 간격으로 버킷엘리베이터 상부에 설치된 곡물채취구에 서 약 500g의 시료를 채취하여 함수율과 동할율을 측정하였다. 함수율은 10g-135℃-24h 상압건조법으로 측정한 후 105℃건조법으로 환산(식 3-18)하였으며, 3회 반복 측정하였다. 또한, 건조과정 중 함수율의 경시적인 변화를 측정하기 위하여 단립수분계(CR-300, S.SEIKI, JAPAN)를 이용하여 100립씩 3회 반복 측정하였다.

동할율은 채취한 벼를 밀봉하여 72시간 상온에서 보관 후 수작업으로 정립을 선별하고 왕겨를 제거하여, 현미 250립에 대하여 동할립 판별기(DC-50, S.SEIKI, JAPAN)를 이용하여 육안으로 측정하였다.

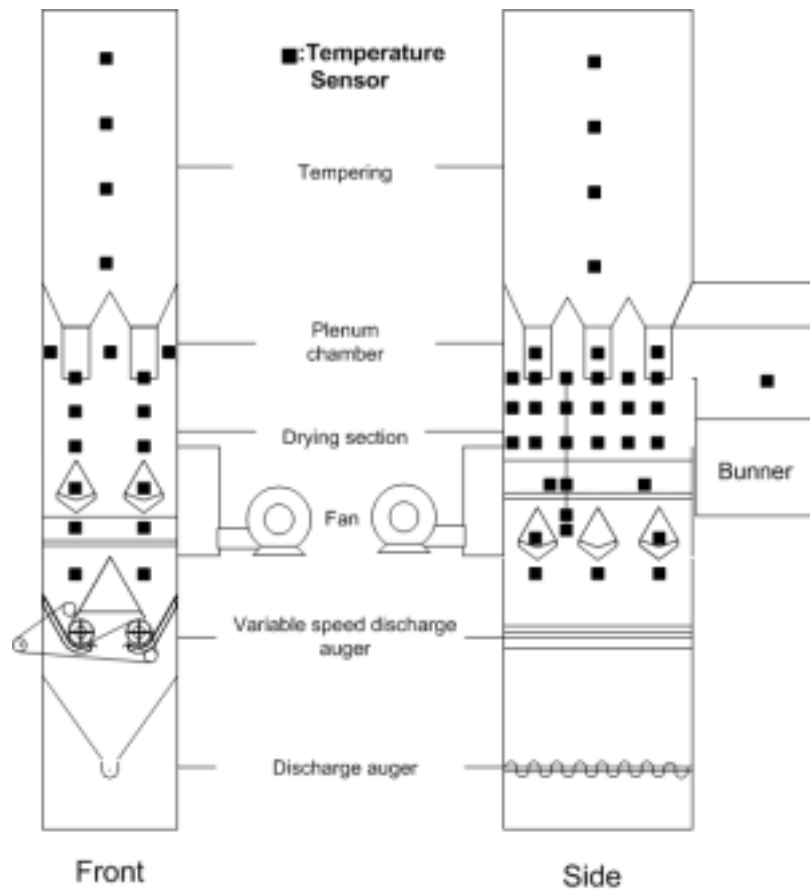


Fig. 3-13 Locations of temperature sensors in the dryer



a) View of temperature sensor positions in drying section



b) View of temperature sensor positions in hot air inlet

Fig. 3-14 View of temperature sensor positions in dryer.

4. 결과 및 고찰

가. 건조특성

1) Type-1의 건조특성

그림 3-15는 건조온도의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 열풍온도는 평균 101.7°C ($37.0\sim 108.1^{\circ}\text{C}$)로 나타났다. 그러나 초기에 목표온도까지 도달하는 시간이 다소 필요하므로 초기 약 15분을 제외하면 평균 105.1°C ($101.8\sim 108.06^{\circ}\text{C}$)로 나타났다. 열풍온도의 편차는 $\pm 4.8^{\circ}\text{C}$ 로 만족할 수준으로 판단되었다.

건조온도는 설정온도(110°C)에 비해 다소 낮게 나타났으며, 이는 높은 열풍온도를 제어하기 위해서 버너의 잦은 On/Off로 인한 것으로 판단되었다.

그림 3-16은 건조실 내의 곡온변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 실험 초기 곡온은 17.5°C 이었으며, 건조가 진행되면서 점차 증가하여 최대 29.8°C 까지 증가하였으며, 평균 26.7°C ($21.4\sim 29.8^{\circ}\text{C}$)로 나타났다. 건조 중 동할을 증가를 고려하여 곡온의 상승치를 35°C 정도로 제한하고 있는데 본 실험 결과에서 곡온은 평균 26.7°C 로써 대단히 만족한 수준으로 판단된다.

그림 3-17은 건조실험 중 텀퍼링실의 곡온변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 평균 23.1°C ($18.1\sim 27.2^{\circ}\text{C}$)로 나타났다.

그림 3-18은 건조실험 중 배기부의 온도변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 평균 28.1°C ($18.9\sim 32.6^{\circ}\text{C}$)로 나타났다. 따라서 건조실 내의 곡온과 비슷한 수준으로 나타나 건조실 내의 열풍흐름이 병류상태에서 비교적 만족할 만한 수준인 것으로 판단된다.

건조실험 중 배기부의 상대 습도 변화는 그림 3-19와 같다. 그림에서와 같이 배기구의 상대 습도는 초기에 90%이상으로 나타났으며, 이 후 점차 감

소하여 60%이하로 낮아지는 것으로 나타났다.

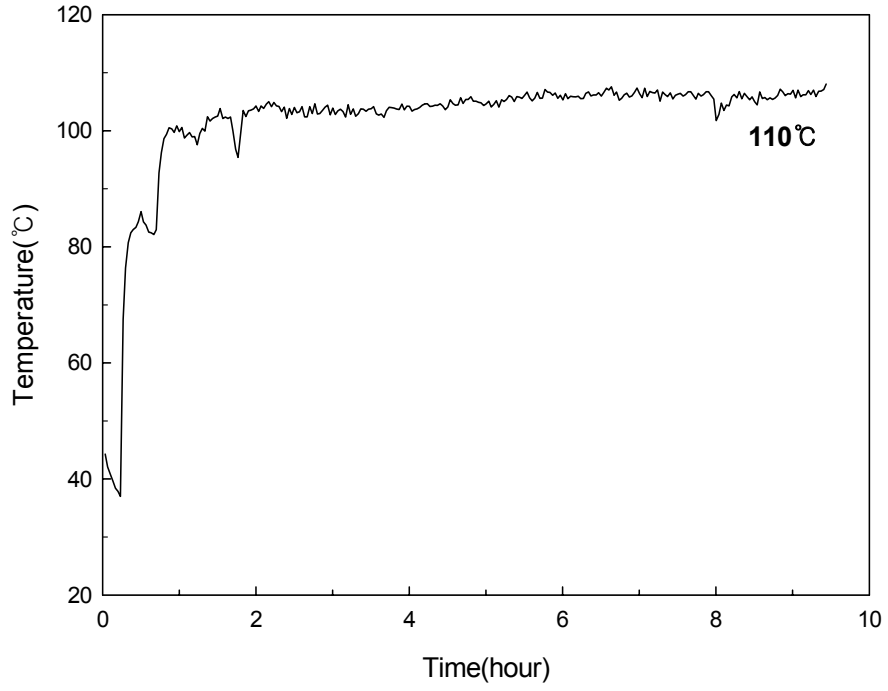


Fig. 3-15 Changes of drying air temperatures(Type-1).

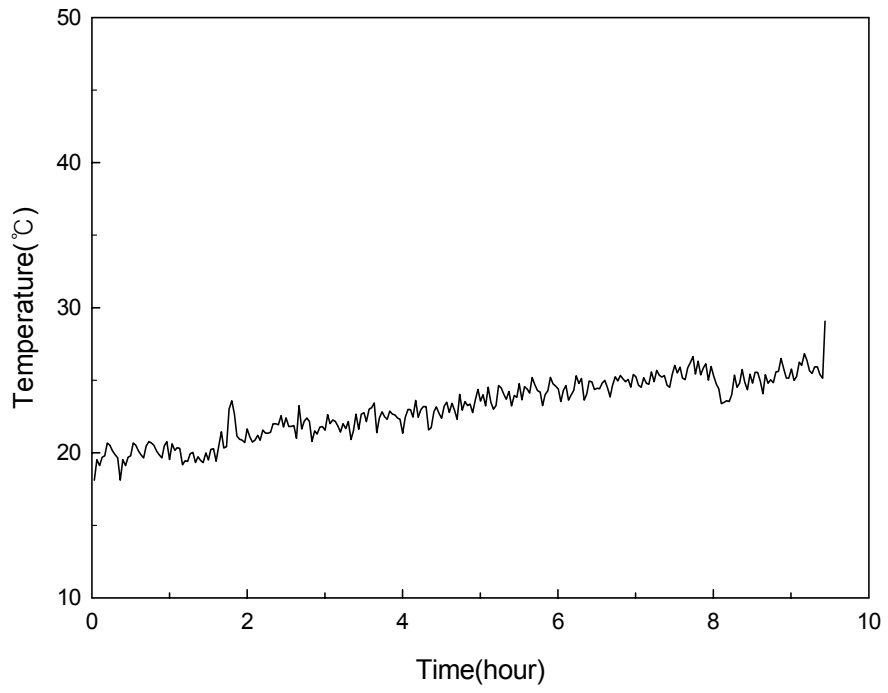


Fig. 3-16 Changes of grain temperatures in drying chamber (Type-1).

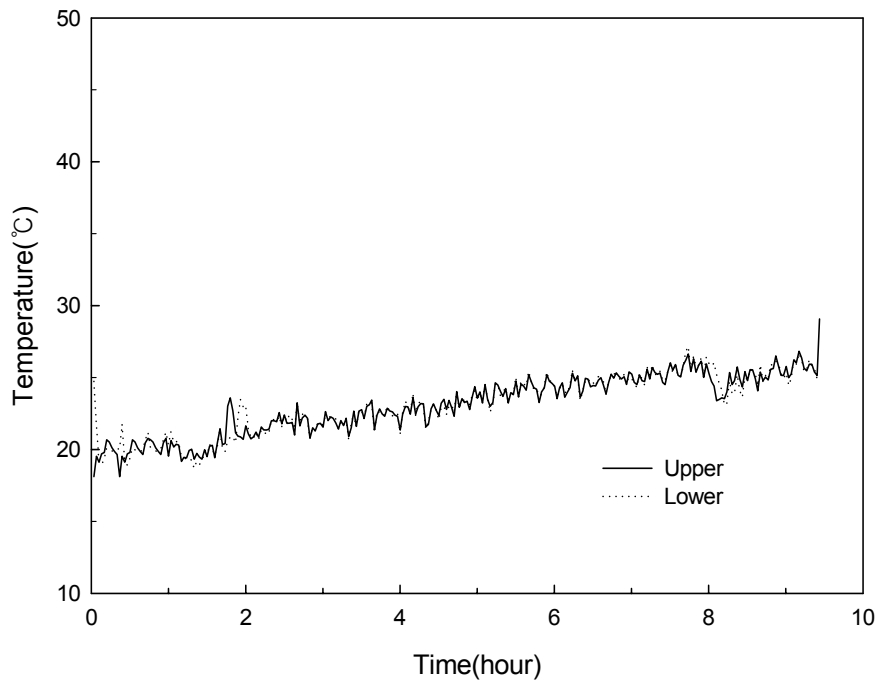


Fig. 3-17 Changes of grain temperatures in tempering chamber (Type-1).

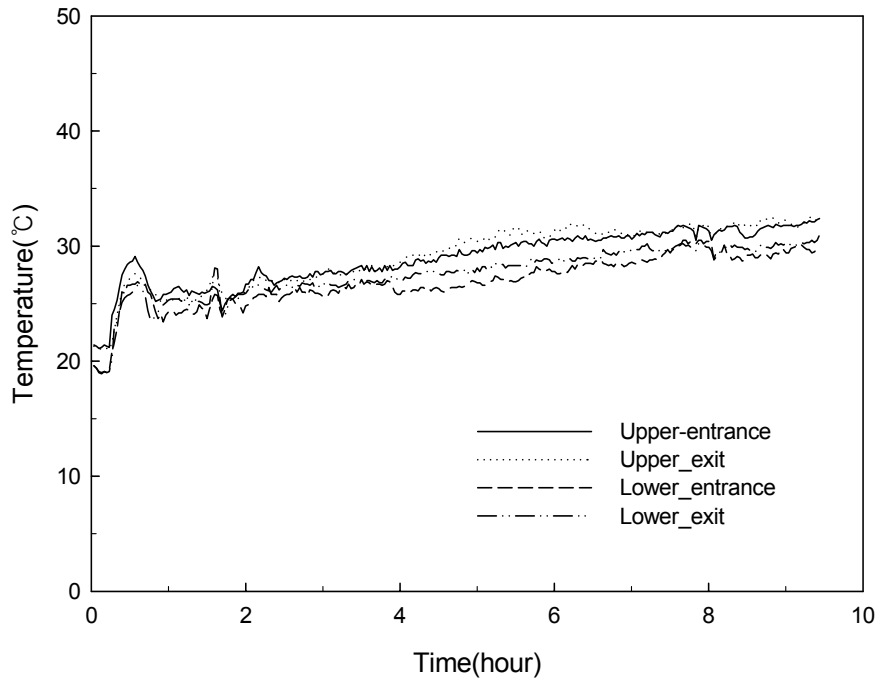


Fig. 3-18 Changes of air temperatures in air outlet(Type-1).

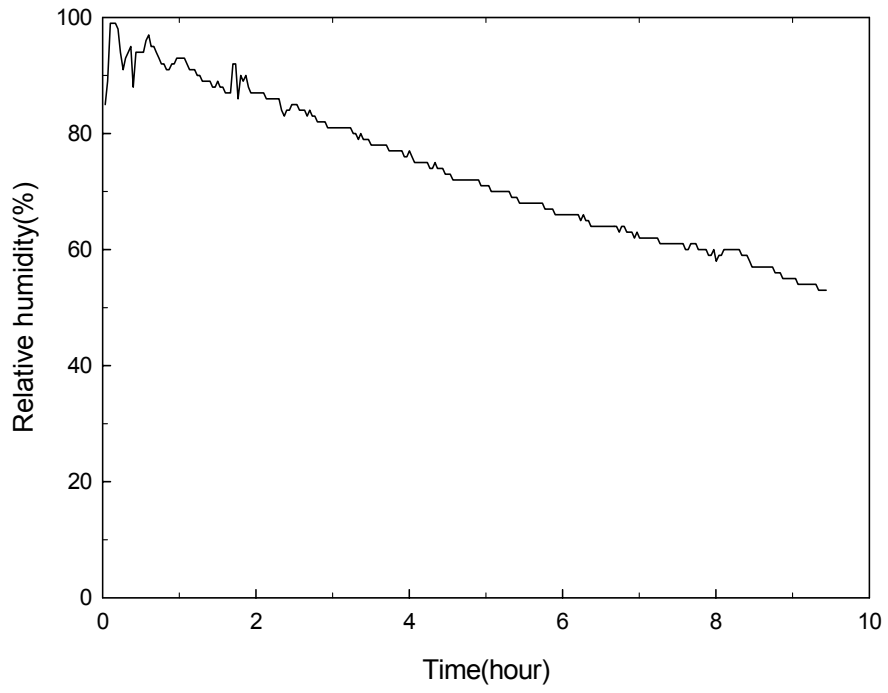


Fig. 3-19 Changes of relative humidity of exhaust air(Type-1).

2) Type-2의 건조특성

그림 3-20은 Type-2의 건조온도 변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 열풍온도는 평균 111.5°C ($92.2\sim 120.4^{\circ}\text{C}$)로 나타났다. 열풍온도의 편차는 $\pm 14.1^{\circ}\text{C}$ 로 Type-1에 비하여 온도편차가 크게 나타났다. 이는 배풍덕트의 구조상 배풍이 원활하지 않은 것으로 판단된다.

그림 3-21은 건조실 내의 곡온변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 실험초기 곡온은 16.9°C 이였으며, 이 후 점차 증가하여 최대 32.1°C 까지 증가하였으며, 평균은 27.7°C 로 나타났다.

그림 3-22는 건조실험 중 배기부의 온도변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 평균 32.1°C 로 나타났다. 따라서 건조실 내의 곡온과 비슷한 수준으로 나타나 건조실 내의 열풍흐름이 병류상태에서 비교적 만족할 만한 수준인 것으로 판단된다.

건조실험 중 배기부의 상대 습도 변화는 그림 3-23과 같다. 그림에서와 같이 배기구의 상대 습도는 초기에 90%이상으로 나타났으며, 이 후 점차 감소하여 60%이하로 낮아지는 것으로 나타났다.

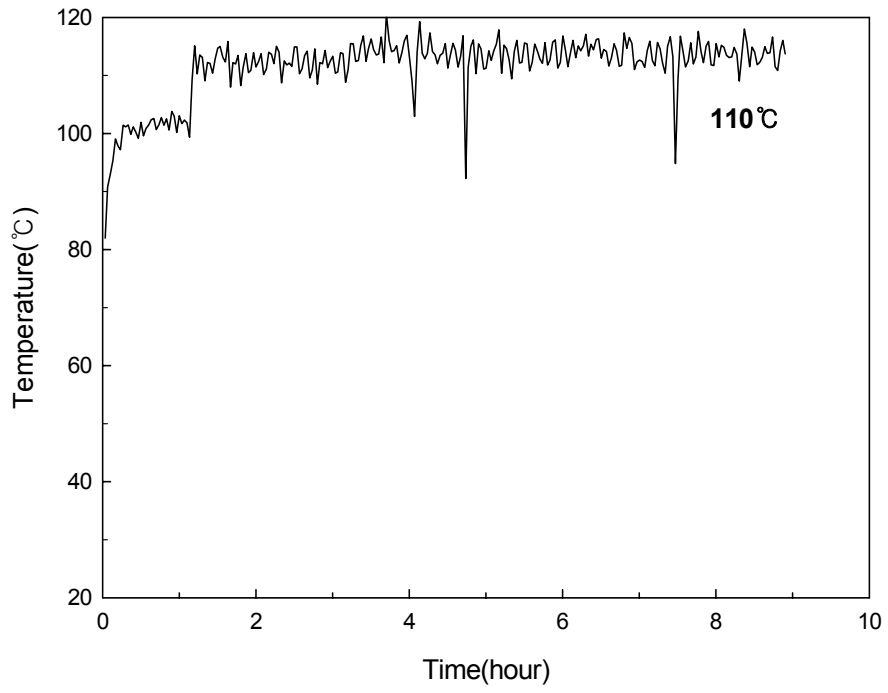


Fig. 3-20 Changes of drying air temperatures(Type-2).

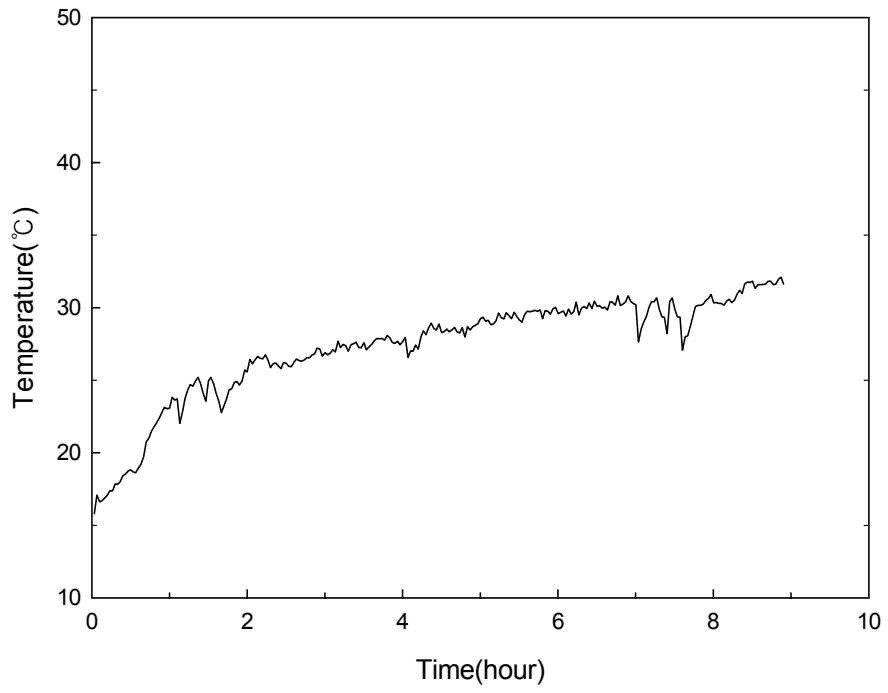


Fig. 3-21 Changes of grain temperatures in drying chamber (Type-2).

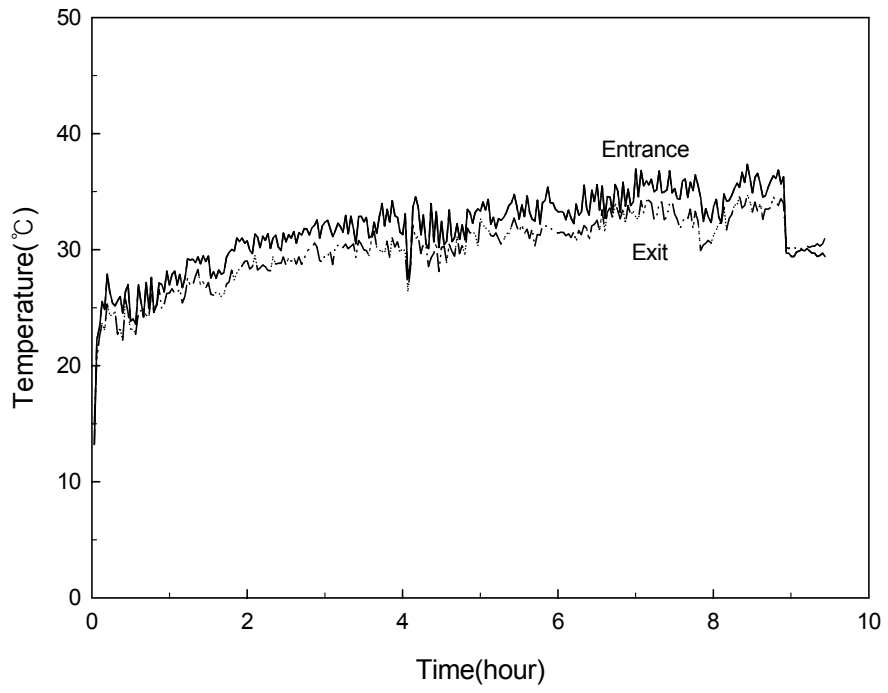


Fig. 3-22 Changes of exhaust air temperatures(Type-2).

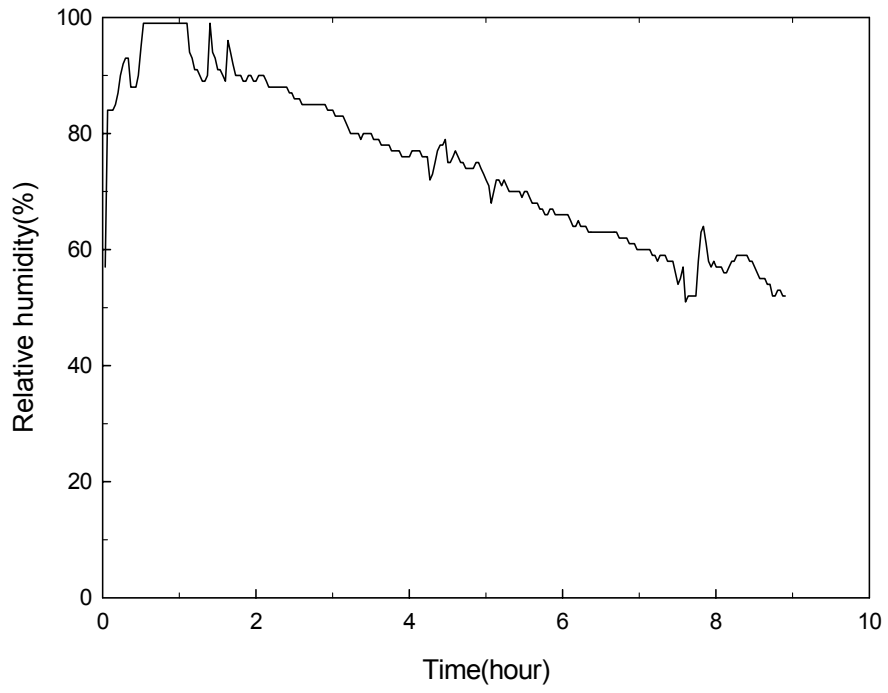


Fig. 3-23 Changes of relative humidity of exhaust air(Type-2).

나. 건조속도

표 3-7은 Type-1과 Type-2의 건조속도를 나타낸 것이다. 표에서와 같이 Type-1은 초기함수율 22.9%에서 최종함수율 16.3%까지 건조하는데 7.0시간이 소요되어, 건조속도는 1.0%(w.b./hr)로 나타났다.

Type-2는 초기함수율 24.2%에서 최종함수율 17.1%까지 건조하는데 7.0시간이 소요되어, 건조속도는 1.0%(w.b./hr)로 나타났다, 두 Type 모두 건조기 개발 목표 범위(1.0%,w.b./hr이상)에 만족하였다.

Table 3-7 Drying rates and drying times for the types of exhaust air duct

Type No.	Initial moisture content (%w.b.)	Final moisture content (%w.b.)	Drying time (hr)	Drying rate (%w.b./hr)
Type-1 (Cross air exhaust)	22.9	16.3	7.0	1.0
Type-2 (Taper air exhaust)	24.2	17.1	7.0	1.0

다. 소요동력 및 소요에너지

표 3-8은 건조소요에너지를 나타낸 것이다. 표에서와 같이 건조소요에너지는 Type-1은 시간당 연료 소비량이 0.31 l/h와 전력소비량 17.3kW로 나타났으며, Type-2는 시간당 연료 소비량이 0.30 l/h와 전력소비량 17.5kW로 나타났다.

Type-1이 Type-2보다 에너지 소비량이 다소 높게 나타났으며, 이는 Type-1의 배풍이 원활한 관계로 열풍 유지를 위해 에너지 소비량이 다소 높게 나타난 것으로 판단된다.

Table 3-8 Comparison of drying energy consumptions for the type of air exhaust duct

Type No.	Fan energy consumption (kW)	Fan energy consumption per hour (kW/hr)	Fuel energy consumption (ℓ)	Fuel energy consumption per hour (ℓ/h)
Type-1 (Cross air exhaust)	17.3	2.0	10.2	0.31
Type-2 (Taper air exhaust)	17.5	2.0	9.7	0.30

라. 건조벼 품질

그림 3-24는 건조시간에 따른 동할증가율을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 동할율은 Type-1과 Type-2는 건조 90분까지는 1.2%, 건조 2시간부터 5시간까지는 2.2% 증가하였다. 이 후 Type-1은 건조 6시간 후에는 3.4%, 건조 종료 후에는 5.4%까지 증가하였다. 그러나 Type-2는 건조 6시간 5.1%, 건조 종료 후에는 10.2%까지 급격히 증가하였다. Type-1과 Type-2가 전체적으로 동할 증가율이 높게 나타났는데 이는 건조온도의 제어와 고수분 벼의 장기 저장으로 인한 품질손상(초기 동할율 1.2%)이 원인인 것으로 판단된다. Type-2는 Type-1보다 동할율이 높게 나타났는데 이는 열풍의 흐름이 원활하지 못하여 곡온상승의 원인으로 인하여 나타난 것으로 판단된다.

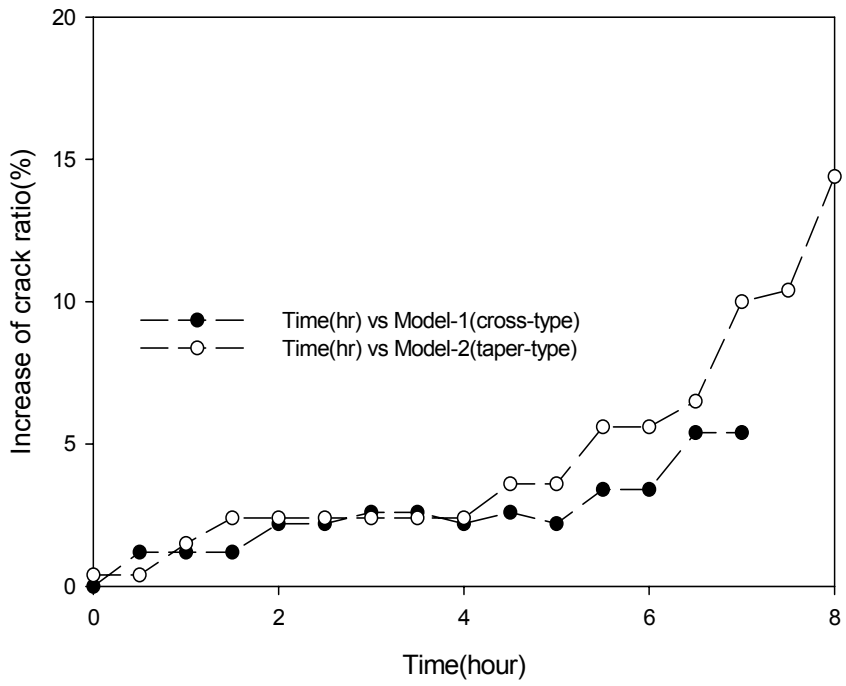


Fig. 3-24 Comparison of crack generation according to the types of exhaust air duct.

5. 결론 및 요약

본 연구에서는 곡물 유입방법 및 배풍형태에 따라 3가지 형태의 건조부 및 배풍부를 고려하여 실험용 순환식건조기를 설계, 제작하고, 각 형태에 따른 건조 및 품질특성을 수치해석적 방법과 건조실험을 통하여 분석하기 위해 수행되었다.

본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 가. 용량 700kg 규모의 실험용 병류형 순환식 곡물건조기를 설계·제작하였다. 실험용은 설계된 Type-1을 기준으로 제작하였고, Type-2의 배기부를 별도로 제작하여 교체가 가능하도록 하였다. 건조부(열풍유입부, 배기부), 피드부와 배출부, 템퍼링부, 제어부 및 주변기기로 구성되었으며, 분리와 설치가 용이하도록 제작하였다.
- 나. 곡물유입방법 및 배풍형태에 따른 3종류의 실험용 병류형 순환식 곡물건조기를 설계·제작하였다. Type-1의 배기부는 삼각형 형태의 덕트를 상부에 2열, 하부에 Cross방향으로 3열을 각각 설치하였으며, Type-2는 배기부 덕트는 병류 흐름을 고려하여 Taper형태로 설계하였다. Type-3건조실 내의 유입부 및 배출부는 산형으로 각각 4열 및 5열로 구성하였다.
- 다. Type-3은 산형덕트 형태는 Brooker equation(1961)을 이용하여 Matlab으로 프로그램을 작성하여 위치별 열풍의 흐름을 예측한 결과 국부적으로 횡류가 나타나고 있는 것을 확인하였으며, 효과적인 방법은 아닌 것으로 판단되었다.

라. 따라서 Type-1과 Type-2에 대해서 건조실험을 수행한 결과 Type-2는 열풍의 원활하지 않는 흐름으로 인하여 동할 증가율이 높게 나타나는 것을 알 수 있었다. 따라서 Type-1이 건조특성 및 건조비의 품질이 우수한 것으로 판단되었다.

제 3 절 병류형 순환식 곡물건조기의 설계인자 구명

1. 설계인자 및 조건

병류형 순환식 곡물건조기의 주요 설계인자로는 건조공기의 온도, 송풍량 및 곡물 유하속도 및 건조실 높이 등이 있으며, 이들 인자는 함수율, 동할율 등 품질특성과 건감률, 소요에너지 등 건조특성에 지배적인 영향을 미친다. 따라서, 병류형 순환식 곡물건조기를 설계하기 전에 주요 설계인자가 건조 및 품질에 미치는 영향을 구명하는 것이 필요하다.

본 연구에서 개발할 병류형 순환식 곡물건조기의 성능목표는 건감율 1.0~1.2%/hr범위로 기존 횡류형 순환식 건조기의 0.7%/hr에 비해 45~74% 정도 증대되면서 건조 소요에너지가 절감되고, 동할율은 열풍건조기 성능검사 규격(농업공학연구소, 1998)과 동일한 2.0% 이하(허용 가능 동할율 5.0% 이내)를 설계 목표로 선정하였다.

병류형 순환식건조기 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 병류형 건조기의 설계인자 즉, 송풍량, 유하속도, 건조온도 및 건조실 높이 등이 건감율(%/hr), 제수율(kg/kg) 및 소요에너지 등 건조특성과 동할율(%) 등 품질특성에 미치는 영향을 분석하였다.

분석을 위한 건조조건은 다음 표 3-2와 같이 설정하였다. 표에서와 같이 외기조건은 수원지역 기상을 기준으로 온도13.4, 상대습도 72.7%이었으며, 벼의 초기함수율은 24.0%(w.b.), 초기곡온은 20.0℃로 하였다. 건조기의 기본조건은 곡물유하속도를 2.0(m/hr), 건조온도는 120-110-100-90℃로 건조가 진행되면서 건조온도를 10℃씩 감소하도록 하였다. 송풍량은 23.0(m³/min·m²)을 기준으로 분석하였다.

Table 3-9 Drying conditions used for the validation test of the simulation program

Ambient air condition (Suwon, October average temp.)	
Temperature(°C)	13.4
Relative humidity(%)	72.7
Rice condition	
Initial moisture content(% w.b.)	24.0
Initial grain temperature(°C)	20.0
Initial head rice yield(%)	65.0
Dryer design condition	
Grain flow rate(m/hr)	2.0
Drying air temperature(°C)	120-110-100-90
Drying section size(m)	1.72×2.0×0.5
Tempering height(m)	2.71
Air flow rate(m ³ /min·m ²)	23.0

2. 송풍량

그림 3-25는 송풍량의 변화에 따른 동할율, 건조속도 및 소요에너지에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 송풍량이 증가할수록 소요에너지, 송풍기 동력, 건감률 및 동할율이 증가하는 것으로 나타났다. 풍량비가 높을수록 건조속도는 다소 증가하였지만 소요에너지는 증가하였다. 동할율은 증가하였으며 송풍량이 $25\text{m}^3/\text{min}\cdot\text{m}^2$ 을 초과할 때 목표 동할율 5.0%를 초과하였다.

따라서 송풍량이 증가하면 소요에너지는 급격히 증가하는 반면, 건조속도는 완만하게 증대되어 건조능력의 저하가 우려되므로 소요에너지를 고려한 송풍량의 결정이 필요하였다.

3. 곡물유하속도

곡물 유하속도가 동할율, 건조속도 및 소요에너지에 미치는 영향을 그림 3-26에 나타내었다.

그림에서와 같이 유하속도가 증가할수록 건감률과 동할율은 낮아지고 제수율은 크게 감소하는 것으로 나타났다. 이는 유하속도가 증가할수록 건조부에서 충분한 열풍이 노출 되지 않아 나타나는 현상으로 판단된다. 따라서 병류형 순환식 곡물건조기에서는 적절한 유하속도는 2.0~3.0m/h 범위로 판단되었다.

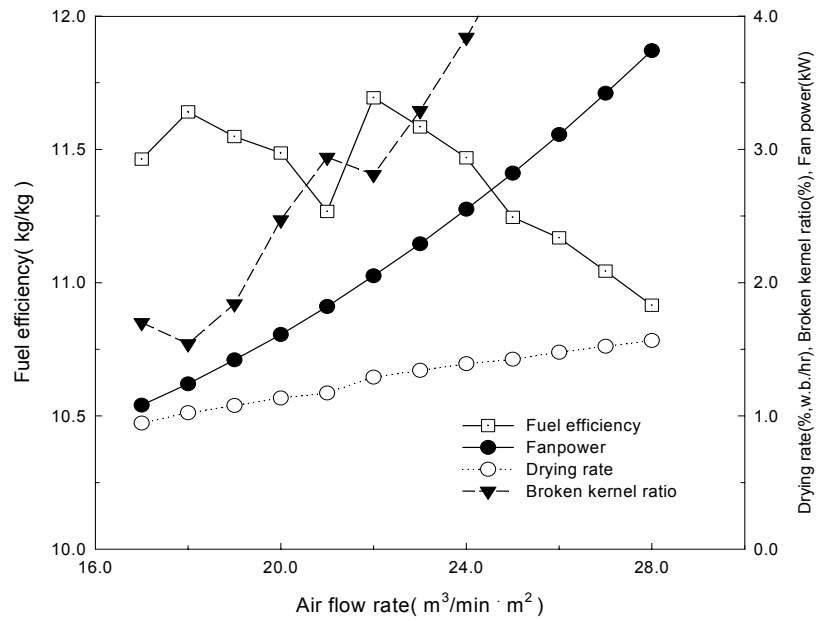


Fig. 3-25 Effect of airflow rate on crack ratio, drying rate and energy consumption.

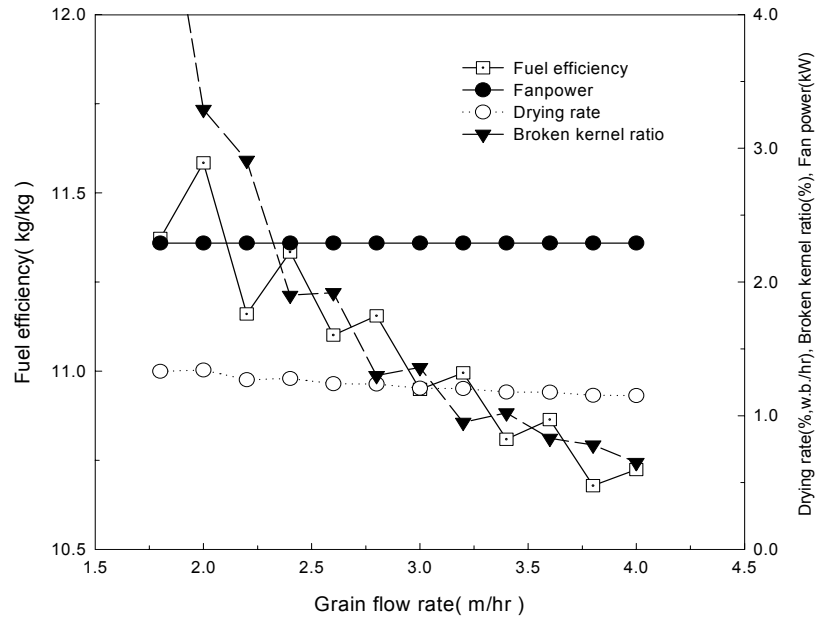


Fig. 3-26 Effect of grain flow rate on crack ratio, drying rate and energy consumption.

4. 건조온도

건조온도는 벼의 동할율에 영향을 주는 가장 중요한 요인으로서 건조온도가 증가할수록 동할율도 증가하게 된다. 또한, 건조온도가 높을수록 건조속도도 증가하게 된다.

송풍기 동력은 건조온도와 상관없이 일정하게 유지되었다.

그림 3-27은 건조온도에 따른 동할율과 건조속도를 비교한 것이다. 그림에서와 같이 건조온도가 증가할수록 동할율도 증가하였는데 110℃이하에서는 4.0%이하를 유지하였으며, 건조온도가 110℃를 초과할 때 동할율은 급격히 증가하여 5.0%이상으로 나타났다. 이는 건조온도에 따라 동할율이 빠르게 증가 하였다.

따라서 건조기의 열풍온도는 동할율 5%미만을 유지하기 위하여 건조속도를 고려했을 때 120℃이하가 적당한 것으로 나타났다.

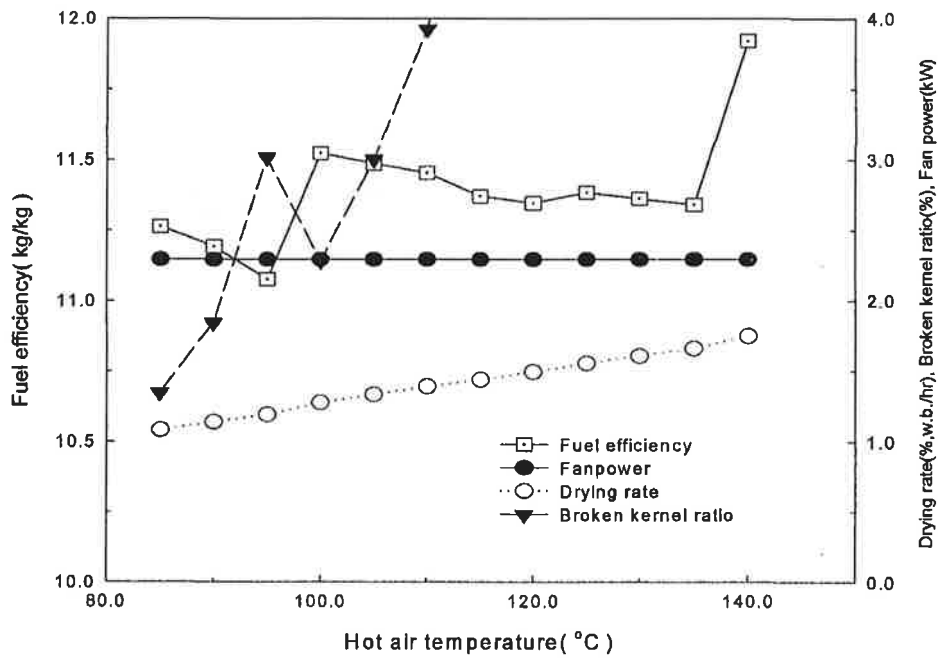


Fig. 3-27 Effect of air temperature on crack ratio, drying rate and energy consumption.

5. 건조실 높이

병류형 순환식 건조기에서 건조실의 높이는 열풍에 노출되는 곡물의 시간을 의미하므로 중요한 요인 중 하나이다.

그림 3-28은 건조실 높이 변화에 따른 건조특성을 나타낸 것으로서 건조실 높이가 증가할수록 건감율 및 제수율은 감소하고 송풍기 동력 및 동할율은 증가하는 것으로 나타났다.

제수율(除水率, kg/kg)은 연료 1kg으로 제거되는 수분중량으로서 연료효율(fuel efficiency)을 나타내는 방법 중 하나이다. 제수율은 외기온도조건, 건조 후 곡물 최종함수율에 따라 차이가 발생하나 일반적으로 외기온도가 높을수록 제수율이 증가하는 것으로 나타났으며, 일본 매직 건조기는 13.4~15.2kg/kg (외기 27.9~28.6℃), 일본산 횡류형 순환식건조기는 10.5~11.6kg/kg로서 본 연구에서 적정한 조건을 탐색할 경우 이보다 높은 제수율을 나타낼 수 있을 것으로 판단되었다.

한편, 열풍온도가 대단히 높으므로 1회 통과시마다 건감률이 높게 나타나 최종함수율을 16%이하로 설정할 때 13.3~15.6% 정도를 보여 최종함수율을 조정하기 어려운 실정이다. 따라서 통과회수(함수율)에 따라 열풍온도조절이 필요함을 알 수 있었다.

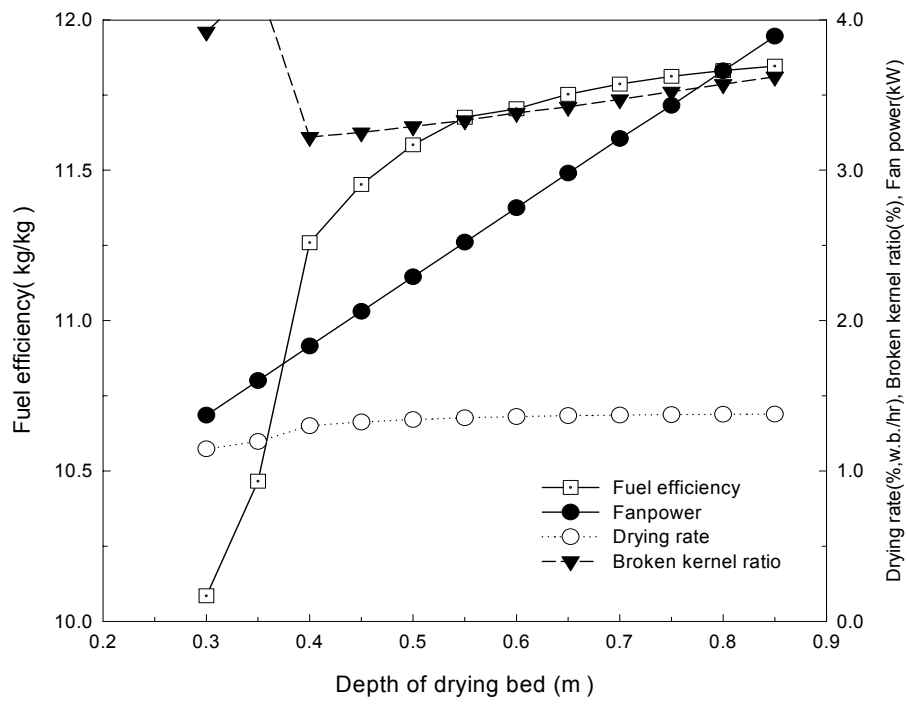


Fig. 3-28 Effect of drying section height on crack ratio, drying rate and energy consumption.

6. 결론 및 요약

본 연구에서는 병류형 후층건조를 예측할 수 있는 병류형 순환식 곡물건조기 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 시뮬레이션 기법으로 병류형 순환식건조기 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 병류형 건조기의 설계인자 즉, 송풍량, 유하속도, 건조온도 및 건조실 높이 등이 건감율(%/hr), 제수율(kg/kg) 및 소요 에너지 등 건조특성과 동할율(%) 등 품질특성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 수행되었다.

본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 가. 시뮬레이션 방법으로 송풍량의 변화에 따른 동할율, 건조속도 및 소요 에너지에 미치는 영향을 분석하였으며, 동할의 허용치를 5.0%로 할 때 적정 송풍량은 $18\sim 25\text{m}^3/\text{min}\cdot\text{m}^3$ 범위였다.
- 나. 유하속도가 증가할수록 건감률이 약간 낮아지고 제수율 및 동할율이 크게 감소하는 것으로 나타났다. 적정한 유하속도는 $2.0\sim 3.0\text{m/h}$ 범위였다.
- 다. 건조온도가 높을수록 건조속도 및 동할율도 증가하였다. 건조기를 열풍온도는 동할율 5.0%이하를 유지하면서 건감률의 최대치를 보이는 $70\sim 120^\circ\text{C}$ 가 적정 범위였다.
- 라. 건조실 높이가 증가할수록 건감률 및 제수율은 감소하고 송풍기 동력 및 동할율은 증가하는 것으로 나타났다.

제 4 절 병류형 순환식 곡물건조기 최적화 및 제어방안

1. 서언

병류형 순환식 곡물건조기의 주된 목적은 건감률의 최대화, 소요에너지의 최소화 및 품질의 극대화 등이 있다. 병류형 순환식 곡물건조기의 운전 조건 중 가장 중요한 요인은 건감률이다. 건감률은 건조온도, 곡물유하속도, 건조실의 높이 및 공기 유속에 의해 결정되며, 동할율 및 소요에너지에도 영향을 미치는 중요한 인자가 된다.

또한 종래의 횡류형 순환식 건조기는 구조가 복잡하고 특히, 다공관 부분의 정밀기술이 요구되어 개발에 한계가 있었으나, 앞으로 개발될 병류형 순환식 건조기의 경우 구조의 단순함이나 건조기 효율을 극대화 할 수 있는 강점이 있으나, 횡류형 순환식 곡물건조기의 제어방법으로는 함수율이 목표치에 도달하였을 때 정지 방법에 문제가 있다. 이에 따라 병류형 순환식 건조기는 다른 제어 방법이 필요하였다.

따라서 본 연구의 목적은 다음과 같다.

- 가. 최적화 기법을 이용하여 적절한 건감률, 동할율 및 소요에너지를 결정하는데 있다.
- 나. 현행 횡류형 순환식 곡물건조기의 제어방법을 분석하고 문제점을 도출하며, 병류형 순환식 곡물건조기의 제어방안을 결정하는데 있다.

2. 병류형 순환식 곡물건조기 최적화

가. 목적함수 및 제한조건

병류형 순환식 곡물건조기의 최적화 목표가 될 수 있는 것은 건감률 최대화, 소요에너지 최소화 및 품질 극대화 등 3가지로 구분할 수 있으나, 건감률 최대화를 목적함수로 두고 품질 극대화와 소요에너지 최소화는 제한조건으로 두었다.

명시적 제한조건은 목적함수 즉, 건감률 최대화에 영향을 미치는 변수로서 건조실 크기, 송풍량, 건조온도 및 곡물유하속도로 선정하였고, 암시적 제한조건은 제어변수에 의해 결정되는 동할율 및 소요동력으로 선정하였으며, 상황에 따라 선택적으로 가변 할 수 있도록 하였다.

개발된 최적화 프로그램을 이용하여 최적설계요인을 결정하였다. 이를 위해 설계인자에 따른 건조 및 품질특성 결과를 이용하여 최적화 제한조건을 다음 표 3-10과 같이 설정하였다.

Table 3-10 Optimization constraint condition

Explicit constraint	Implicit constraint
Drying section height : 0.3~0.8m Air flow rate : 18.0~25.0m ³ /min·m ² Grain flow rate : 2.0~3.5m/hr Drying air temperature : 70~120°C	Crack ratio : 2.0% ↓ Fan power : 2.2kW ↓

나. 최적화의 조건

벼의 병류형 순환식 곡물건조기 최적화를 위하여 최적화의 초기 조건은 다음의 표 3-11과 같다.

표에서와 같이 외기조건은 수원지역의 10월 평균외기를 사용하였으며, 벼의 조건을 초기함수율 24.0%(w.b.), 초기곡온을 20.0℃로 설정하였다. 건조기 설계조건은 곡물유하속도는 2.0m/h와 열풍온도는 120-110-100-90℃로 설정하였다. 건조실규격은 1.72×2.0×0.5m(W×L×H)이며, 송풍량은 23.0m³/min·m²로 설정하였다.

Table 3-11 Hypothetical initial conditions for drying optimization

Ambient air condition (Suwon, October average temp.)	
Temperature(°C)	13.4
Relative humidity(%)	72.7
Rice condition	
Initial moisture content(% w.b.)	24.0
Initial grain temperature(°C)	20.0
Initial head rice yield(%)	65.0
Dryer design condition	
Grain flow rate(m/hr)	2.0
Drying air temperature(°C)	120-110-100-90
Drying section size(m)	1.72×2.0×0.5
Tempering height(m)	2.71
Air flow rate(m ³ /min·m ²)	23.0

다. 최적화 프로그램

최적화는 주어진 상황에서 최선의 결과를 얻고자 하는 행위로서 문제를 함수의 형태로 표시했을 때 그 함수의 최소치 또는 최대치를 얻을 수 있는 조건을 찾는 과정으로 정의될 수 있다(Cho, 1991).

최적화 알고리즘은 다변수 최적화 문제의 목적함수에 대한 최소치를 구하는 Box의 Complex 알고리즘을 사용하였다. 이 알고리즘은 강인성 및 효율성이 입증되어있고 계산상 도함수가 불필요하고 알고리즘이 간단하여 사용이 편리한 장점이 있다(Keum, 1991; Kim, 1999).

본 연구에서 사용한 알고리즘은 크게 7단계로 구분할 수 있다. 1단계는 제어변수가 n 개일 경우 $k \geq n+1$ 의 관계를 만족하며, 각각의 독립변수에 대하여 k 개의 최고점을 갖는 완전 임의의 complex를 만든다, 이 때 첫 번째 최고점은 제한조건을 만족하는 유용한 출발점이어야 하며, $k-1$ 개의 최고점은 다음 식 (3-25)에 의해 임의로 발생시킨다.

$$x_{i,j} = G_i + r_{i,j}(H_i - G_i) \dots \dots \dots (3-25)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

$$j = 1, 2, \dots, k-1$$

2단계는 임의로 발생된 최고점은 제한조건을 만족해야 하며, 만족하지 않을 경우 다음과 같이 수정한다. 먼저 명시적 제한조건을 위배하는 경우에는 제한조건을 만족할 때까지 매우 작은 거리 δ 만큼 제한조건 안으로 이동시키며, 암시적 제한조건을 위배하는 경우는 다음 식 (3-26)와 같이 남은 최고점의 중간까지 1/2을 이동한다.

$$x_{i,j}(\neq w) = a \frac{(x_{i,j}(old) + \bar{x}_{i,c})}{2} \dots\dots\dots (3-26)$$

$$\bar{x}_{i,c} = \frac{1}{k-1} [\sum_{j=1}^k x_{i,j} - x_{i,j}(old)]$$

a = reflection factor

3단계는 k 개의 최고점 각각에 대한 목적함수를 계산한다. 4단계는 수렴여부를 다음 식 (3-27) 및 식 (3-28)에 의해 판단하여 수렴된 k 개의 목적함수 중 최소치를 선택하여 이 때의 제어변수 값과 목적함수 값을 출력하며, 수렴되지 않을 경우 다음 단계로 계속 진행한다.

$$d : \text{distance between any two vertices in complex} \leq \varepsilon_1 \dots\dots\dots (3-27)$$

$$SD = \left[\sum_{j=1}^k (f(\bar{x}_{i,j}) - (f(x_{i,j}))^2) \right]^{-1} \leq \varepsilon_2 \dots\dots\dots (3-28)$$

5단계는 k 개의 목적함수값 중 가장 큰 값을 탐색하여 다음 식 (3-29)과 같이 반향과정을 실시한다.

$$x_{i,r} = (1+a) \bar{x}_{i,j} - ax_{i,h} \dots\dots\dots (3-29)$$

$$\bar{x}_{i,j} = \frac{1}{k-1} \sum_{j=1}^{\infty} x_{i,j}$$

6단계는 반향과정에서 개선된 최고점이 제한조건을 만족하지 않으면 제 2단계와 유사하게 process of moving half way를 실시한다. 7단계는 개선된 최고점이 제한조건을 만족할 경우 개선된 최고점에서의 목적함수값이 가장 큰

목적함수보다 작으면 $x_{i,h}$ 대신 $x_{i,r}$ 를 채택하여 4단계로 진행하며, 만족하지 않을 경우 process of moving half way를 실시한 후 6단계의 과정을 다시 수행한다. 이와 같은 complex algorithm의 흐름도는 그림 3-41과 같으며, k와 a는 보편적인 값인 $k=2n$ 을 반향계수인 a는 1.3을 사용하였다. Box의 Complex 알고리즘을 기본으로 MS Fortran으로 메인 프로그램을 작성하였으며(그림 3-29), 입력치는 외기조건, 곡물조건(함수율, 곡물량, 초기곡은 등), 건조기 조건(건조실 치수, 송풍량, 유하속도 등)이었으며, 출력값은 최적 건조실 치수, 송풍량, 유하속도 조건, 건조후 벼의 품질, 함수율, 소요에너지 등이 다.

최적화 알고리즘을 이용하여 작성된 프로그램의 수행능력은 건조와 관련된 부프로그램 대신 알고 있는 최소치를 갖는 목적함수와 제한조건을 설정하여 사용하여 검정하였으며, 검정결과는 다음 표 3-12와 같아 주어진 제한조건에서 목적함수의 최소치를 탐색할 수 있음을 알 수 있었다.

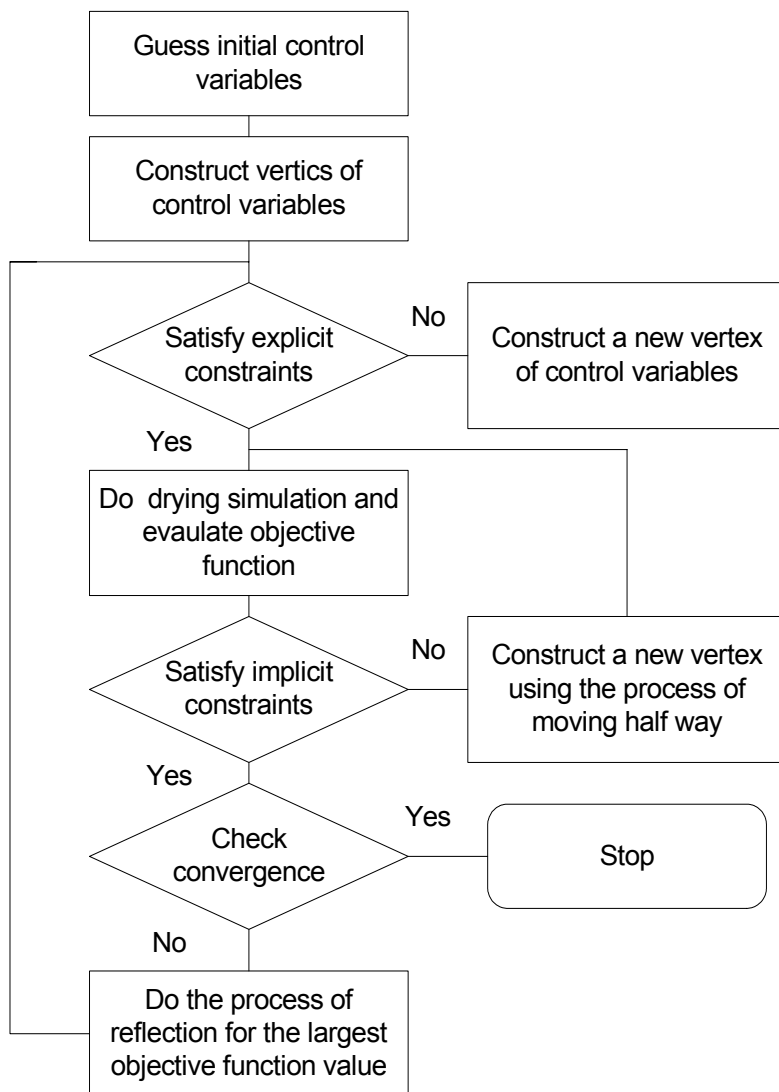


Fig. 3-29 Flow chart for optimization of rice circulating concurrent-flow dryer.

Table 3–12 Input data and results for validation of optimization program by Box's complex algorithm.

Input data	
No. of control variables	3
No. of implicit constraints	1
Reflection factor	1.3
Convergence parameter	
Distance between any two points	0.001
Distance deviation of function values	0.0001
Initial guess of a feasible point	
x_1	5
x_2	5
x_3	5
Results	
Minimum object value	11.0
Optimum values of control variables	
x_1	0.000065523
x_2	1.00001
x_3	3.00013
No. of iteration	126
Maximum distance between any two vertices	0.000145
Standard deviation of function values	0.0000946

라. 결과 및 고찰

표 3-13은 각 경우(Case 1~3)에 따른 최적화 결과를 나타낸 것으로서 목적함수인 건감률, 명시적 제한조건인 건조실 높이, 송풍량, 유하속도 및 열풍온도와 암시적 제한조건인 동할율과 송풍기 동력, 그리고 이에 따라 결정되는 건조기 통과회수 및 제수율 등을 나타낸 것이다.

- Case 1 : 송풍기동력에 무관하게 건감율을 최대화하는 설계
- Case 2 : 송풍기동력을 2.2kW로 제한하고 건감율을 최대화하는 설계
- Case 3 : Case1,2의 설계치 조건하에서 건감율을 최대화하는 열풍온도

따라서 송풍기동력을 제한하는 경우 최적 설계는 송풍량은 $24.2\text{m}^3/\text{min}\cdot\text{m}^2$, 곡물유하속도는 $2.9\text{m}/\text{hr}$, 건조실높이는 0.42m 정도로 나타났으며, 이때 최대 건감율은 $1.25\%/hr$ 정도로 나타났으며, 열풍온도는 $120-109.2-97.8-106.0^\circ\text{C}$ 정도가 적정한 것으로 나타났다.

Table 3-13 Results of optimization rice circulating concurrent-flow dryer

	Case 1	Case 2	Case 3
○ Maximum drying rate(%w.b./hr)	1.41	1.25	1.34
○ Optimization design result			
- Air flow rate(m ³ /min·m ²)	25.000	24.207	
- Grain flow rate(m/hr)	2.642	2.895	
- Drying section height(m)	0.626	0.421	
- 2-pass drying air temperature(°C)			109.2
- 3-pass drying air temperature(°C)			97.8
- 4-pass over drying air temperature(°C)			106.0
○ Number of Circulation	5	6	6
○ Final moisture content(%w.b.)	15.45	15.65	15.3
○ Maximum rice temperature(°C)	51.5	49.0	49.1
○ Crack ratio(%)	1.88	1.35	2.00
○ Removed water(kg/kg)	11.47	10.75	10.48
○ Fan power(kW)	3.53	2.2	2.2

3. 제어방안 결정

가. 현행 순환식 건조기의 제어방법 및 문제점 분석

RPC등에서 사용중인 현행 횡류형 순환식 건조기의 제어방법을 분석한 결과, 송풍기, 버너 등 각종 단위기계의 작동에는 문제가 없었으나, 함수율이 목표치에 도달하였을 때의 정지방법에는 문제가 있었다.

즉, 함수율 측정시간 간격이 약 20분 정도이며, 건조완료를 위한 정지방법은 측정된 함수율치가 초기 설정치(목표치)와 동등 또는 이하가 되면 바로 1회 추가 측정하고, 추가 측정치가 목표치와 동등 또는 이하이면 3분 후 정지하도록 구성되어 있다. 순환식 건조기의 1회 평균 순환시간은 약 1.9시간(=114분) 수준(6톤규모 기준)으로, 함수율 24%인 벼를 15.6%로 건조하기 위해서는 열풍온도가 50℃일 때 건조에 6회 순환이 필요하며, 6회 건조가 끝난 하층부가 먼저 수분치 측정후 3분후에 정지하므로 대부분 벼는 5회밖에 건조되지 않아 실제 함수율은 설정치보다 높아지는 문제점이 있었으며, 이의 해결이 필요하였다. 1회 순환시 평균 건감률은 약 1.4%/pass 수준이며, 시간당 평균 건감률은 0.74%/hr 수준이다.

나. 병류형 건조기의 제어방안 결정

병류형의 경우 1회 통과당 건감률이 높아(함수율 17% 기준, 약 2.0%/pass) 최종 함수율치 접근이 더욱 어려우므로 최종 pass의 열풍온도를 제어해야 한다. 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 함수율 17.5%기준에서 열풍온도 및 곡온에 따른 1pass당 동할 증가율(%)과 건감율(%)을 예측한 결과는 다음 표 3-14, 15와 같았으며, SAS의 REG PROC을 이용하여 건감율차에 따른 열풍온도를 예측한 결과는 다음 식 3-30과 같았다.

$$\text{열풍온도}(^{\circ}\text{C}) = -1.92 \times \text{곡온}(^{\circ}\text{C}) + 68.64 \times \text{건감율차}(\%) + 40.6$$

.....(3-30)

따라서 건조기 처리능력별 최적 열풍온도를 최적화 프로그램을 통해 구한 결과는 표 3-16과 같았으며, 최종 pass에서의 열풍온도만 조절할 경우 각 pass별 열풍온도는 처리능력에 무관하게 거의 일정한 값을 나타내었다. 이는 동일 모델에서 투입량이 다소 변화하더라도 열풍온도를 변화시킬 필요가 없다는 것을 나타내고 있다.

병류형 순환식 곡물건조기를 작동하기 위해서 필요한 작동은 크게 순환체계, 가열방식 및 동력 등으로 구분할 수 있다. 순환체계 및 가열방식은 생산비용과 제작원가 등을 고려하여 기존의 횡류형 순환식 건조기에서 사용하고 있는 기기 등을 병류형 건조기의 크기와 특성에 맞춰 일부 수정사용이 가능한 것으로 판단되었다.

Table 3-14 Crack ratio per 1-pass by hot air temperature and grain temperature

Hot air temperature (°C)	Grain temperature (°C)			
	20	25	30	35
120	1.18	1.77	2.63	3.87
115	0.96	1.45	2.17	3.20
110	0.78	1.18	1.77	2.63
105	0.63	0.96	1.44	2.15
100	0.50	0.77	1.16	1.74
95	0.40	0.61	0.93	1.40
90	0.31	0.48	0.74	1.12
85	0.25	0.38	0.58	0.89
80	0.19	0.30	0.46	0.70
75	0.15	0.23	0.35	0.54
70	0.11	0.18	0.27	0.42
65	0.09	0.13	0.21	0.32
60	0.06	0.10	0.16	0.24
55	0.05	0.08	0.12	0.18
50	0.03	0.06	0.09	0.14
45	0.03	0.04	0.06	0.10
40	0.02	0.03	0.05	0.07

Table 3–15 Drying rate per 1–pass by hot air temperature and grain temperature

Hot air temperature (°C)	Grain temperature (°C)			
	20	25	30	35
120	1.70	1.84	1.99	2.14
115	1.63	1.78	1.92	2.07
110	1.56	1.71	1.85	2.00
105	1.50	1.64	1.78	1.93
100	1.43	1.56	1.71	1.85
95	1.36	1.49	1.63	1.77
90	1.29	1.42	1.56	1.70
85	1.21	1.35	1.48	1.62
80	1.14	1.27	1.41	1.54
75	1.07	1.20	1.33	1.46
70	1.00	1.12	1.25	1.38
65	1.09	1.05	1.17	1.30
60	1.02	0.97	1.10	1.22
55	0.95	1.06	1.02	1.14
50	0.87	0.99	1.11	1.06
45	0.80	0.91	1.03	0.98
40	0.72	0.83	0.95	1.06

Table 3-16 Hot air temperature optimization value by dryer capacity

	3.8Ton	4.4Ton	5.0Ton	5.5Ton	6.0Ton	7.0Ton	Average
1-pass	120	120	120	120	120	120	120
2-pass	113.8	113.8	114.1	114.0	114.0	114.1	113.9
3-pass	101.7	102.1	102.4	102.6	102.7	102.5	102.3
4-pass	97.9	98.9	98.2	98.6	98.8	99.2	98.6
5-pass	$-1.92 \times \text{Grain temp.}(\text{°C}) + 68.64 \times \text{Drying rate gap}(\%) + 40.6$						

4. 결과 및 요약

본 연구는 최적화 기법을 이용하여 병류형 순환식 곡물건조기의 건감률, 동할율 및 소요에너지를 결정하고 적절한 제어방안을 결정하기 위해 수행되었다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

가. 최적화의 목적함수는 건감율의 최대화로 하였으며, 제어변수는 건조실 크기, 송풍량, 건조온도 및 곡물 유하속도로 선정하였다. 제한조건으로는 동할율 및 소요동력으로 선정하였다.

나. 최적화 결과 송풍기 동력을 제한하는 경우 최적 설계는 송풍량은 $24.2\text{m}^3/\text{min}\cdot\text{m}^2$, 곡물유하속도는 2.9m/hr , 건조실높이는 0.42m 로 나타났으며, 이때 최대 건감률은 $1.25\%/hr$ 도로 나타났으며, 열풍온도는 $120-109.2-97.8-106.0^\circ\text{C}$ 가 적정한 것으로 나타났다.

다. 건조기 처리능력별 최적 열풍온도를 최적화 프로그램을 통해 구한 결과는 최종 pass에서의 열풍온도만 조절할 경우 각 pass별 열풍온도는 처리능력에 무관하게 거의 일정한 값을 나타내었다. 이는 동일 모델에서 투입량이 다소 변화하더라도 열풍온도를 변화시킬 필요가 없다는 것을 나타내고 있다.

제 5 절 병류형 순환식 곡물건조기 시작기 개발 및 성능평가

1. 시작기 개발

가. 기본설계

병류형 순환식건조기 시작기의 송풍량은 시뮬레이션 및 최적설계 프로그램을 이용하여 선정된 최대 풍량비 13.25m³/min·ton을 기준으로 건조기 용량 800kg을 고려하여 10.5cmm 선정하였다.

병류형 순환식건조기 시작기는 건조실 및 배풍실의 구조와 곡물의 흐름을 고려하여 0.5×0.7m을 기준하였으며, 건조기 용적은 건조실의 용적과 템퍼링실의 용적으로 구분하고 벼의 산물밀도(550kg/m³)를 고려하였을 때 1.455m³이었다(식 3-31).

$$\text{건조기 용적} = \frac{\text{건조기용량}(kg)}{\text{벼의산물밀도}(kg/m^3)} \dots\dots\dots(3-31)$$

건조실의 곡물의 유입부는 병류흐름을 최대화하고, 열풍의 편차를 최소화하기 위하여 길이 350mm의 Y형 덕트로 설계하였다. 각 덕트는 233×250mm로 곡물 유입부는 안식각을 고려하여 60°의 100×100mm의 정사각형으로 설계하였으며, 열풍 유입부의 폭은 150mm로 하였다.

건조실과 템퍼링실의 비는 1 : 4~6을 기준으로 하였으며, 템퍼링실의 높이가 0.25m일 때 용적은 0.0875m³이며 벼로 환산 시 50kg이다. 따라서 템퍼링실은 건조실 : 템퍼링실의 비를 고려하여 약 10~15단이다(식 3-32).

$$\text{템퍼링실(1단)} = 0.7 \times 0.5 \times 0.25 = 0.0875m^3 (L \times W \times H) \dots\dots\dots(3-32)$$

▷ 벼로 환산 시 $0.0875(m^3) \times 550(kg/m^3) = 50kg$

시작기의 배풍실은 병류흐름이 가능하고 특히 배풍실의 구조에 따라 열풍 온도의 편차가 발생하므로 기존의 1단 구조에서 가로 및 세로가 교차되는 2단 구조로 설계하였다. 또한, 2단의 덕트는 3방향에서 배풍이 이루어지도록 하였다.

유하속도는 건조부 통과시간을 고려하여 3.0~5.0m/hr 범위를 기준으로 하였다. 건조부 통과시간 6~10분 범위일 때 순환속도는 5.0~3.0m/hr이었으며, 순환량은 1,008~606kg/hr이었다.

시작기 송풍기의 송풍저항은 곡물 퇴적층의 송풍저항식 (식 3-33)을 이용하여 계산하였으며, 곡물층의 높이(건조층) 0.5m일때 162mmAq로 계산되었다(식 3-34).

$$\begin{aligned} \Delta P &= 9.8 \times 653.54 \times V^{1.2727} \times (D + \alpha) \dots\dots\dots(3-33) \\ &= 9.8 \times 653.54 \times 0.51^{1.2727} \times (0.5 + 0.1) \\ &= 1590 \text{ Pa}(162 \text{ mmAq}) \end{aligned}$$

여기서, $V = \text{건조부 걸보기 속도} = \frac{10.5}{0.35 \times 60} = 0.5 \text{ m/s}$

$A = \text{건조기 단면적} = 0.7 \times 0.5 = 0.35 \text{ m}^2$

$D = \text{건조부 곡물층 높이} = 0.5 \text{ m}$

$\alpha = \text{부가적 손실(덕트, 후드)} = 0.1$

축동력 = $\frac{P_s Q}{0.6} = \frac{1457.94 \times 10.5}{0.6 \times 60} = 425.2325 \text{ W} \approx 0.43 \text{ kW}$

실제 사용동력 = $0.43 \times 1.1 = 0.47 \text{ kW} \dots\dots\dots(3-34)$

버너는 외기온도 평균 10℃를 열풍온도 120℃까지(상승온도: 110℃) 조정이 가능하도록 설계하였다. 따라서 버너의 최대 열량은 22176kcal/hr이며, 버너의 효율을 75%로 가정하였을 때 16,632kcal/hr가 가능한 버너를 설계하였다(식 3-35).

$$\text{버너의 최대열량} = \frac{60Q\rho C_p \Delta T}{\eta} = 22176\text{kcal/hr} \dots\dots\dots(3-35)$$

버너의 실 적용열량 : 16632kcal/hr

$$\frac{16632}{8400} = 1.98 \ell/\text{hr} = 0.52\text{USgal/hr}$$

여기서, Q = 송풍량(m³/min)

ρ = 공기밀도(kg/m³)

C_p = 공기의 정압비열(kcal/kg °C)

Δt = 가열온도(°C)

η = 버너효율(소수)

나. 상세설계 및 제작

주요 설계요인을 고려한 시작기의 상세 설계도는 다음의 그림과 같다. 그림에서와 같이 시작기는 500×700×2000(L×D×H, mm) 구조로 곡물유입부는 350mm, 배풍부 400mm, 건조실 250mm으로 설계하였으며, 피드부는 450mm, 배출부는 552mm로 설계하였다(그림 3-30).

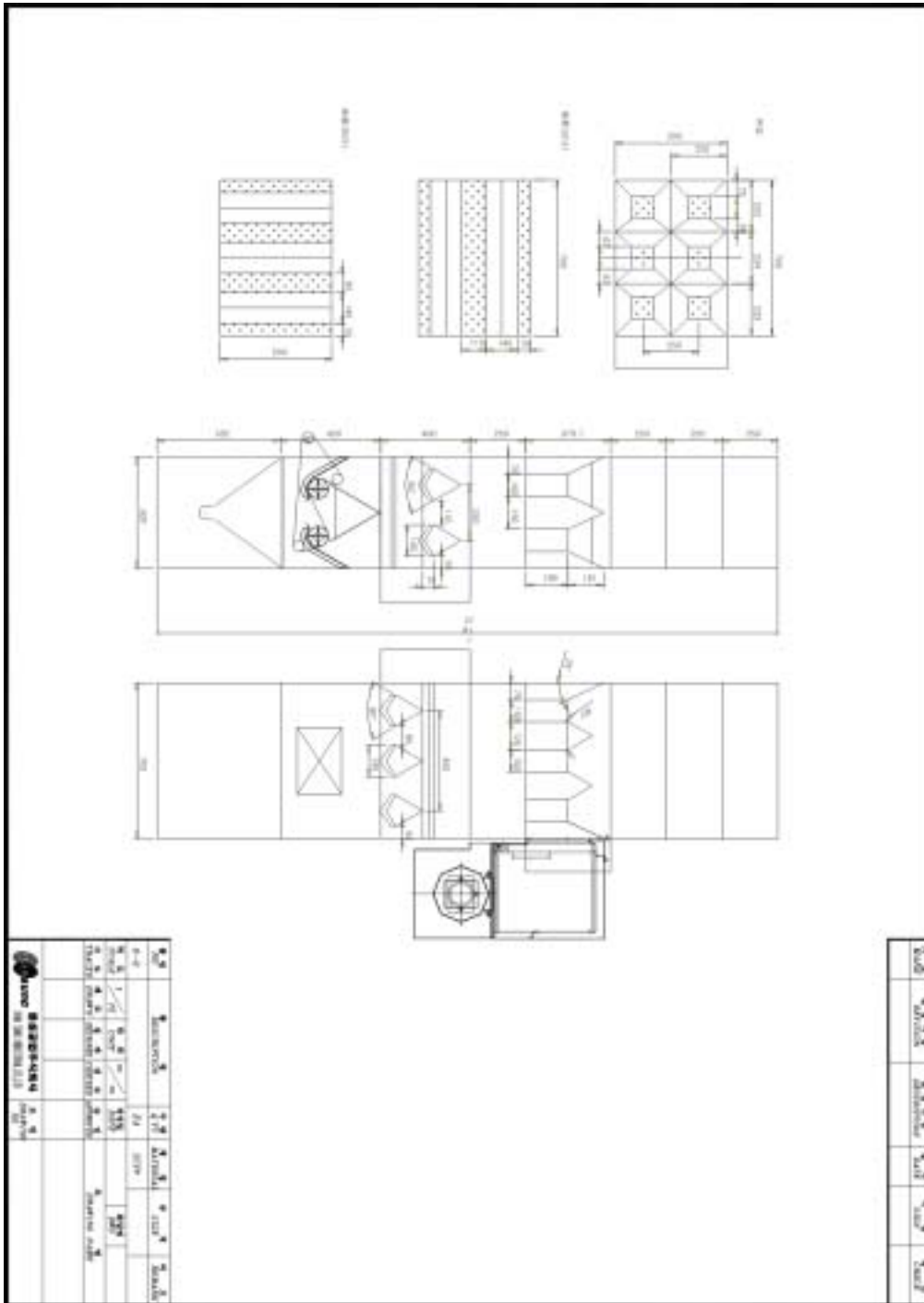


Fig. 3-30 Drawing of pilot scale dryer.

그림 3-31은 건조실의 단면도이다. 건조실 용적은 0.193m^3 , 템퍼링실의 용적은 0.875m^3 로 하여, 건조실과 템퍼링실의 용적비를 1대 4.5로 하였다. 곡물의 건조실 통과시간은 6분, 템퍼링 시간은 37분으로 하였다.

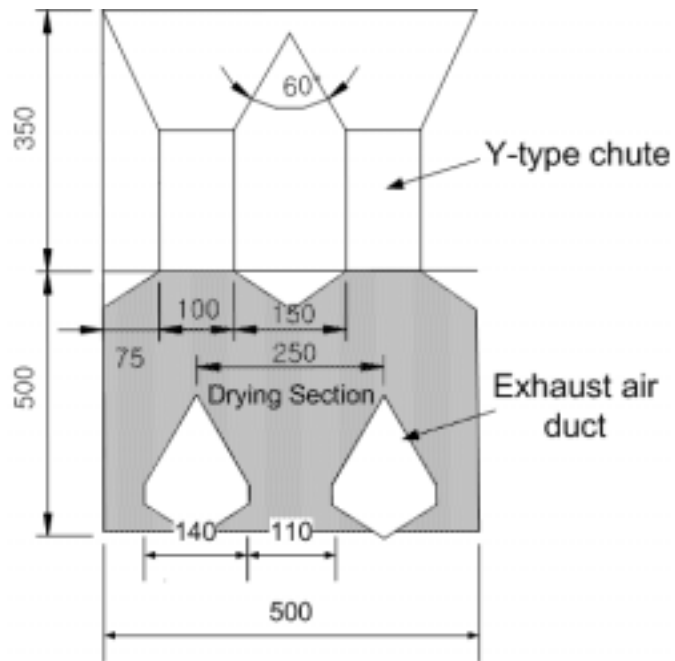


Fig. 3-31 Schematic diagram of drying section.

그림 3-32는 건조실에 곡물을 골고루 분배하기 위한 Y형 슈트의 치수와 제작된 사진이다. 상단 직사각형의 크기는 233×250(L×W)mm이며, 하단은 100×100mm(L×W)정사각형으로 하였다. Y형 슈트는 가로 2열, 세로 3열 총 6개이며, 슈트상부 깔대기부의 경사각은 안식각을 고려하여 60°로 하여 벼의 흐름을 원활하게 하였다. 슈트사이의 간격은 150mm로 하여, 열풍의 균일한 흐름과 건조실내의 공기흐름을 병류흐름에 최대한 가깝게 되도록 제작하였다.

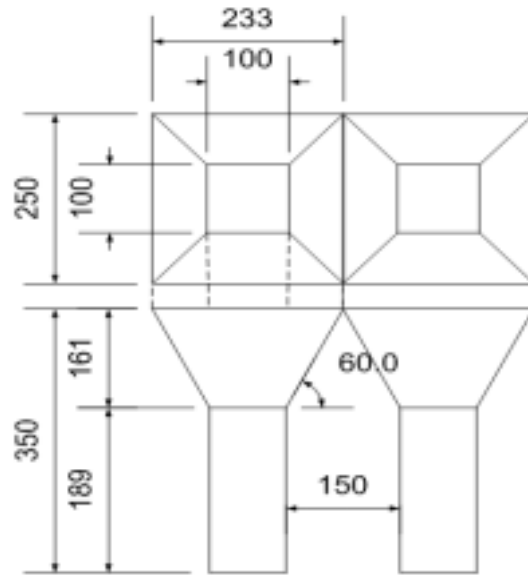


Fig. 3-32 View of rice inlet(Y-type chute).

그림 3-33는 배풍덕트의 치수와 제작된 사진이다. 배풍덕트는 상단 2열과 하단 3열을 서로 직교되게 설치하였다. 배풍덕트는 곡물의 흐름에 영향이 없도록 안식각을 고려하여 정삼각형으로 제작하였다. 상단 2열의 덕트는 앞면, 하단 3열의 덕트는 측면이 개방되어 배기가 유출되도록 하였다. 덕트의 단면적은 공기 풍속이 2.91m/s가 넘지 않도록 하여 곡물이 비산을 방지하도록 하였다.

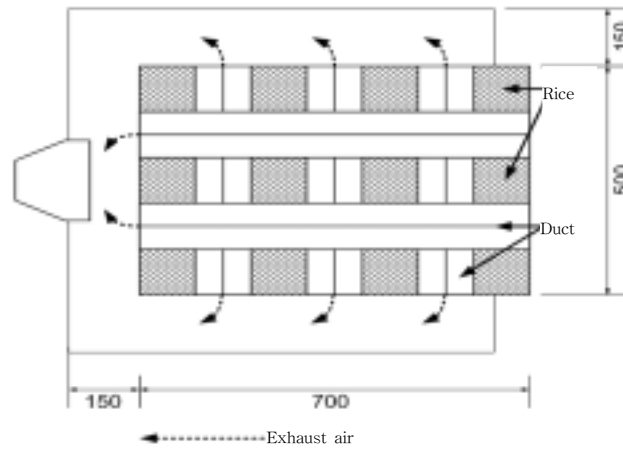


Fig. 3-33 View of air outlet.

그림 3-34는 직경 43mm의 축에 높이 26mm, 폭 4mm의 안내깃 4개를 설치한 배출장치로 1회전에 약 5.5kg의 벼가 배출된다. 이러한 배출장치를 2열로 설치하였으며, 피드부의 중심축은 인버터(S500, MITSUBISHI, J메무)로 회전수를 제어하여 배출속도 조정이 가능하도록 제작하였다.

버킷엘리베이터는 원심식 버킷엘리베이터를 사용하였으며, 높이는 4,800mm로 제작하였다. 건조기 상부(곡물투입지점)에는 송풍기(0.5hp, SAMWHA, KOREA)를 설치하여 투입되는 곡물에서 분진 및 이물질 등을 집진하도록 하였다.

건조기에 사용된 버너(OL-3, 대원버너, KOREA)로서, 0.4~1.5 USgal/h의 용량을 가진 버너를 설치하였다. 노즐은 분무각이 60°에 0.5USgal/h의 노즐을 사용하였으며, 연료는 백등유를 사용하였다.

건조기의 제어부(HSD-V2, HANSUNG, KOREA)는 자동모드 및 수동모드로 구분하였으며, 설정된 시간에 따라 자동으로 건조가 종료되는 자동모드와 건조온도, 곡물유하속도, 배출속도 및 송풍량 등을 각각 개별적으로 제어할 수 있는 수동모드로 제작하였다.

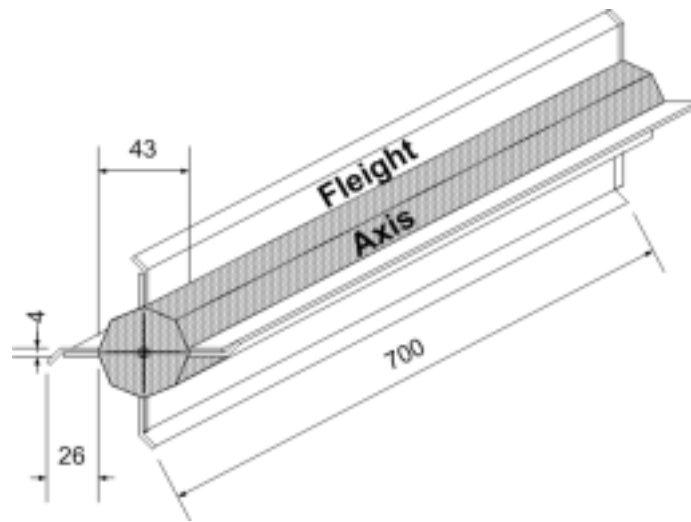


Fig. 3-34 Schematic diagram of rice discharging device.

그림 3-35는 제작된 병류형 순환식 곡물건조기 시작기 모습이다. 템퍼링부 10단, 건조부 2단, 배풍부, 피드부, 배출부 각 1단으로 총 15단으로 구성하였으며, 각 단별로 분리 및 설치가 용이하도록 하였다. 템퍼링부는 실험조건에 따라 12단까지 조정이 가능한 구조로 제작하여 다양한 성능평가 실험이 가능하도록 제작하였다.



Fig. 3-35 View of the rice circulating concurrent-flow dryer.

2. 시작기 건조실험

가. 공시재료

실험에 사용한 벼는 경기 화성지역에서 수확한 추청벼이며, 초기 함수율은 23.0%(w.b.)이었다. 수확한 벼를 정선한 후 함수율 변화를 최소화하기 위하여 1℃의 저온저장고에 40kg 포대로 보관하였다. 실험시작 24시간 전에 벼를 저온저장고에서 꺼내 상온에서 주위 공기온도와 평형을 이루도록 한 후 실험에 사용하였다.

나. 실험방법

표 3-17은 건조 실험조건을 나타낸 것이다. 표에서와 같이 열풍온도는 3수준, 송풍량은 2수준으로 조절하였다. 건조 시작후 매 30분 간격으로 약 500g 시료를 채취하여 함수율과 동할율을 측정하였다. 함수율이 19.0%(d.b.)에 도달할 때 실험을 종료하였다. 함수율은 10g-135℃-24h 상압건조법으로 측정한 후 105℃ 건조법으로 환산하였으며, 3회 반복 측정하였다. 동할율은 채취한 벼를 밀봉하여 72시간 상온에서 보관 후 수작업으로 왕겨를 제거하고, 현미 250립에 대하여 동할립 판별기(DC-50, S.SEIKI, JAPAN)를 이용하여 육안으로 측정하였다.

Table 3-17 Drying conditions for the drying tests

Test No.	Drying air temperature (°C)	Air flow rate (cmm/m ²)	Grain flow rate (m/h)	Resident time/pass (min)	Tempering time/pass (min)
Test-1	98	28.5	4.5	6.27	37.00
Test-2	114	28.5	4.5	6.27	37.00
Test-3	126	57.1	4.5	6.27	37.00

외기 온도를 측정하기 위해 외부 2개 지점, 열풍온도를 측정하기 위하여 열풍유입부 5개 지점 및 배기부 6개 지점, 곡온을 측정하기 위하여 템퍼링실 내의 높이별 4개 지점, 건조실의 폭방향 12개 지점, 깊이방향 7개 지점 및 배풍덕트 하단에 6개 지점에 대하여 열전대(T-TYPE, OMEGA, USA)를 설치하고 자료 수집장치(7327, DATASCAN, UK)로 30초 간격으로 온도를 측정하여 PC에 저장하였다. 또한 외기 습도를 측정하기 위해 배기부에 습도계(TR-72, TANDD, JAPAN)를 이용하여 2지점에서 측정하였으며, 또한 건조 공기 유입부 1개 지점, 공기 배출부에 1개 지점씩 습도계를 두어 30초 간격으로 습도를 측정하였다. 소요전력은 적산전력계(3166, HIOKI, JAPAN)를 이용하여 측정하였으며, 송풍량은 열선풍속계(VELOCICAL C-PLUS, TSI, USA)를 이용하여 배풍부에서 측정하였다. 연료소비량은 전자저울(A-200, CASS, KOREA)을 이용하여 사용된 연료량을 30분 간격으로 측정하였다.

표 3-18은 2005년 2월말부터 3월초까지 실시한 건조실험중의 외기온습도의 측정치이다. Test-1은 평균 외기온도 7.1°C, 평균 상대습도 46%, Test-2는 평균 외기온도 4.5°C, 평균 상대습도 35%, Test-3은 평균 외기온도 13.4°C, 평균 상대습도 28.5%이었다.

Table 3-18 Ambient air temperatures and relative humidity during drying tests

Test No.	Ambient air temperature(°C)	Ambient relative humidity(%)
Test-1	7.1(5.5~8.3)	46.0(39.0~56.0)
Test-2	4.5(3.2~5.8)	35.0(28.0~43.0)
Test-3	13.4(12.6~14.2)	28.5(23.0~33.0)

다. 건조온도 및 곡온변화

그림 3-36은 건조실에 유입되는 열풍온도의 변화를 나타낸 것이다. 초기에 설정한 열풍온도에 도달하는 시간은 약 30분이었다. Test-1의 평균 열풍온도는 98.2°C(83.5~113.5°C), Test-2의 평균열풍온도는 113.6°C(97.9~131.6°C), Test-3의 평균 열풍온도는 126.4°C(146.4~111.8°C)로 나타났다. 건조실에서 유입열풍과 곡물이 합류되는지점의 온도분포를 보면, Test-1은 전면 좌우의 차이는 차이가 없었으며, 전후 최대 5°C정도의 차이를 보였다. Test-2는 좌우는 거의 차이가 없으나, 전후는 최대온도차는 8°C정도의 차이를 보였다. Test-3은 좌우는 온도는 차이가 없으나, 전후의 최대온도차는 9°C정도의 차이를 보였다. 비교적 좌우의 온도차가 작게 나타났으며, 전후는 5~10°C정도의 차이를 보였다. 3면 배기에 의해 좌우는 온도차가 없었으나, 열풍유입시 배기부 방향으로 약간의 쓸림이 있었다.

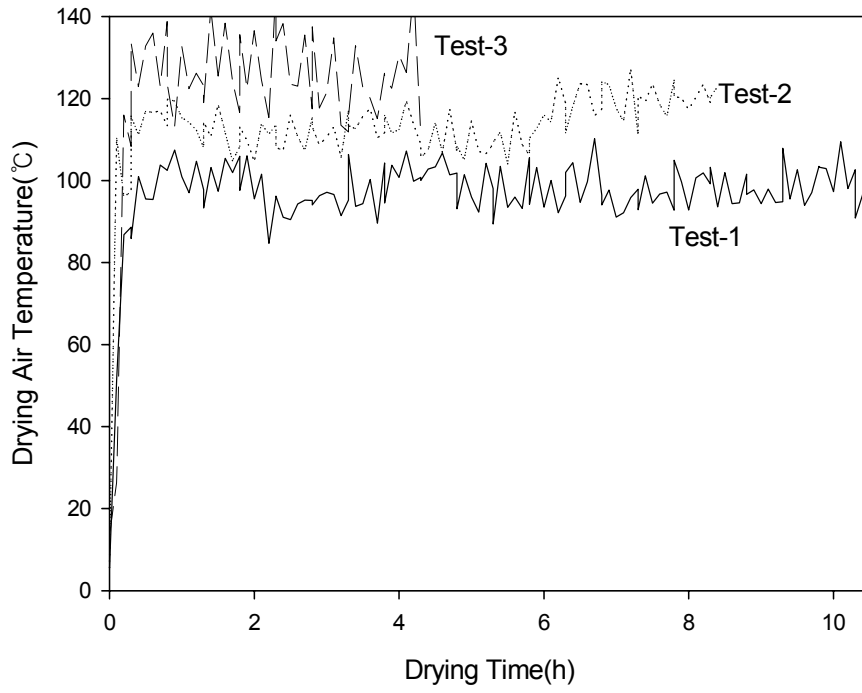
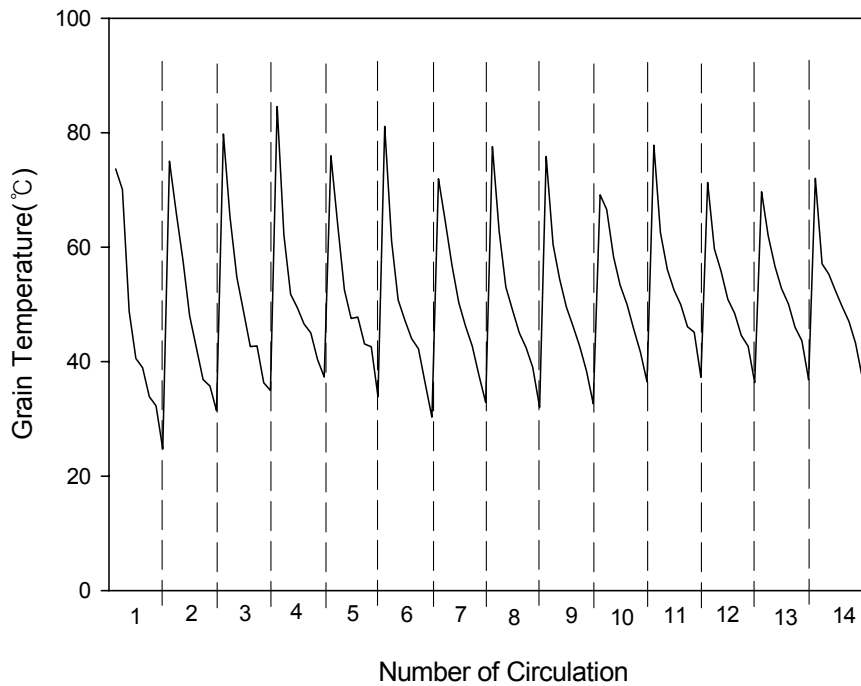
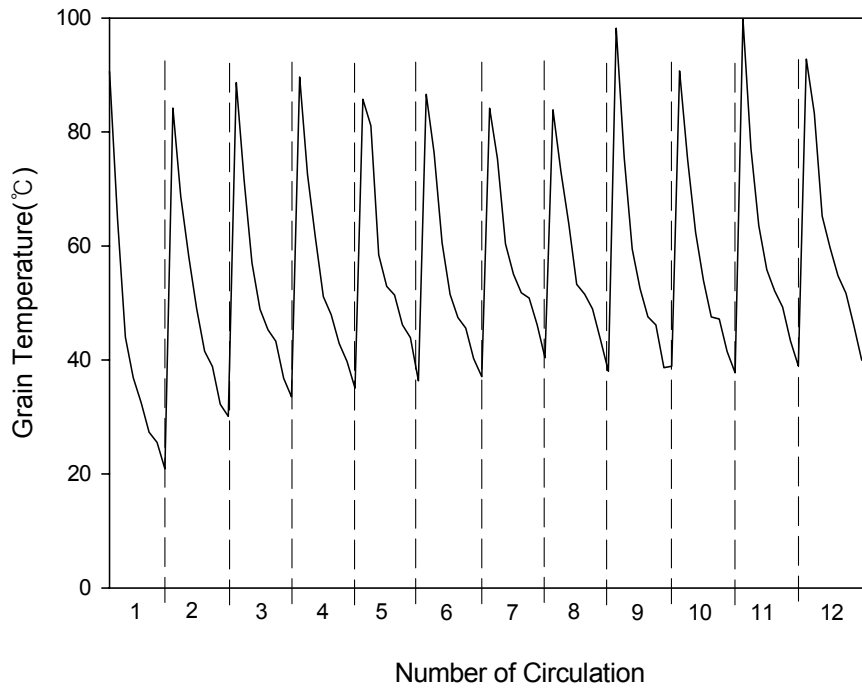


Fig. 3-36 Changes of drying air temperature during drying.

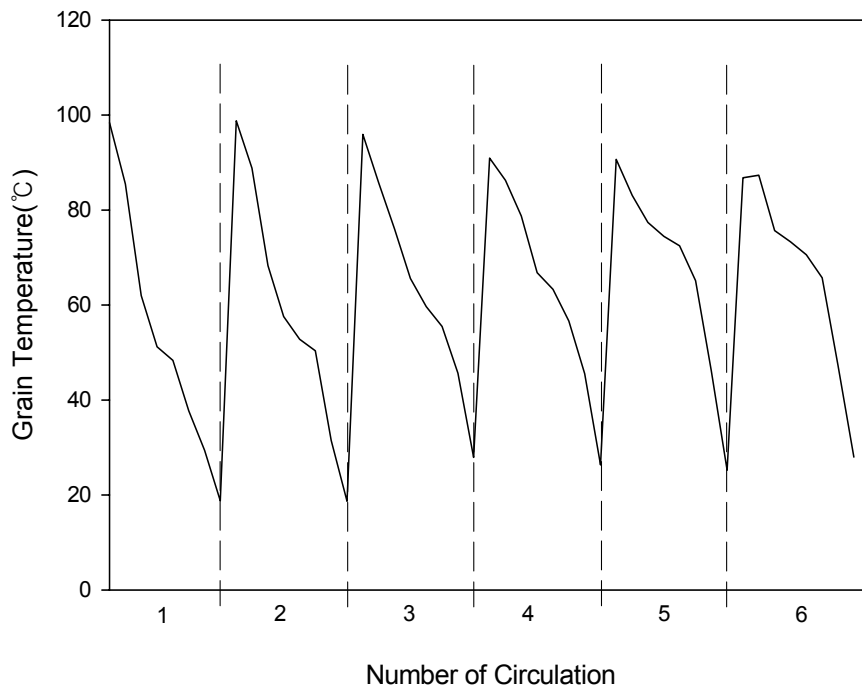
그림 3-37((a)~(c))은 곡물이 건조실을 유하하면서 곡온의 변화를 나타낸 것이다. 열풍노출시 급격히 상승한 곡온은 건조실을 유하하면서 하강하여 건조실에서 배출될 때의 곡온은 35℃이하가 되어야만 동할 발생을 억제할 수 있는 것으로 보고되고 있다. Test-1의 경우 곡온은 열풍유입부에서 평균 76.8℃까지 상승한 후 건조실을 유하하면서 하강하여 평균 32.3℃로 건조실에서 배출되었다. Test-2의 경우는 평균 87.3℃까지 상승한 곡온은 평균 35.3℃로 배출되었으며, Test-3의 경우는 평균 96.3℃까지 상승한 곡온은 평균 23.1℃로 배출되었다. 모든 실험에서 곡온이 평균 35.0℃이하로 품질에 영향을 주는 온도 이하로 배출되었다.



(a)Test-1



(b)Test-2



(c)Test-3

Fig. 3-37 Changes of grain temperature during drying.

라. 배출공기 및 텀퍼링실의 곡온

그림 3-38은 건조실에서 배출되는 공기의 온도변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 배기온도는 Test-1에서 평균 30.7°C(15.5~40.6°C), Test-2에서 평균 34.9°C(22.7~43.7°C), Test-3에서 평균 30.8°C(14.9~39.0°C)로 나타났다. 배출공기의 온도는 배출곡온과 거의 비슷한 값을 나타내었다.

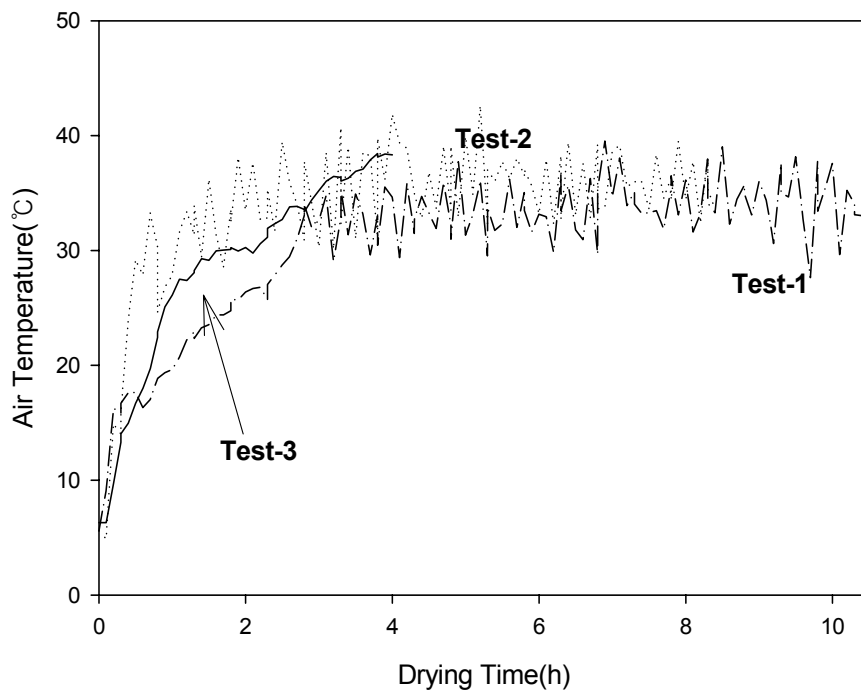
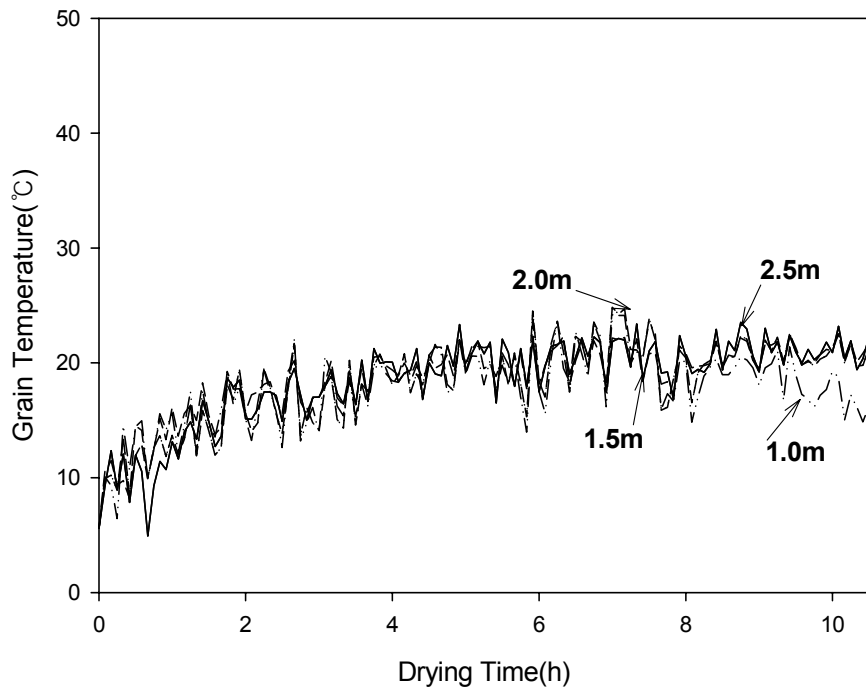
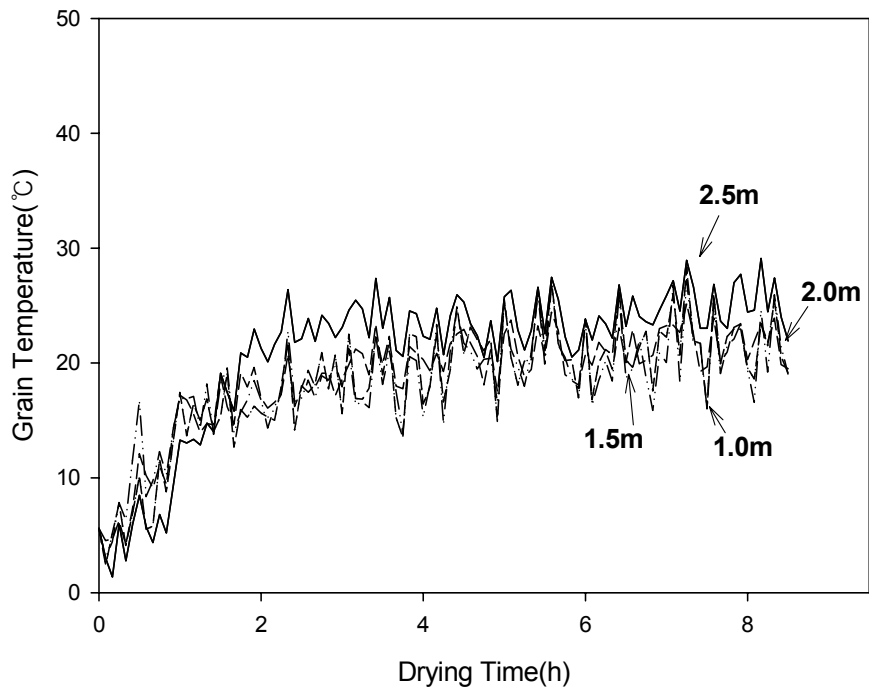


Fig. 3-38 Changes of exhaust air temperature during drying.

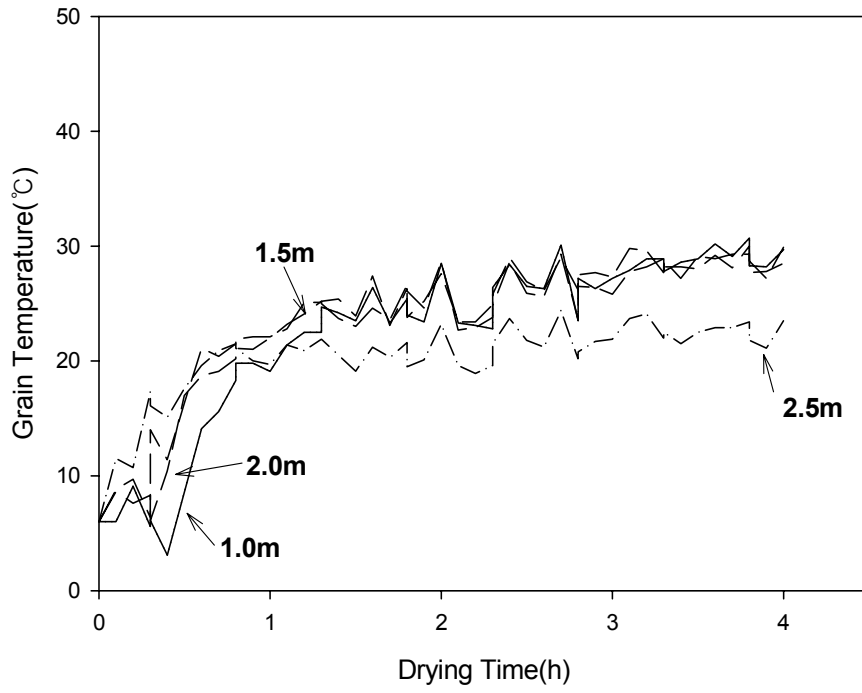
그림 3-39((a)~(c))는 건조 중 토펙퍼링실의 곡온변화를 나타낸 것이다. 토펙퍼링은 건조기 상단 1.0m부터 0.5m 간격으로 건조기 중심부에 곡온을 측정하였다. 그림에서와 같이 Test-1은 건조 중 평균 18.7(4.3~29.1)℃로 나타났으며, Test-2는 건조 중 평균 19.9(4.9~24.8)℃로 나타났고 Test-3은 건조 중 평균 23.5(10.4~30.7)℃로 나타났다. 각각의 건조온도와 송풍량에 따라 토펙퍼링의 곡온의 차이는 큰 차이가 없었으며, 깊이별 곡온의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 배기부 및 버킷엘리베이터에 이송되는 과정에 곡온이 감소되었다. 단 상단에서부터 2.5m에 가까운 곡물은 건조실 열풍유입덕트와 근접하므로 약간의 곡온 상승이 있었다.



(a)Test-1



(b) Test-2



(c)Test-3

Fig. 3-39 Changes of tempering grain temperature during drying.

그림 3-40은 배기의 상대 습도 변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 Test-1, Test-2는 배기의 상대습도가 초기에 90%이상으로 상승하였다가 점차 감소하여 50%이하로 낮아졌다. Test-3은 초기 87%에서 점차 감소하여 56%까지 낮아졌다.

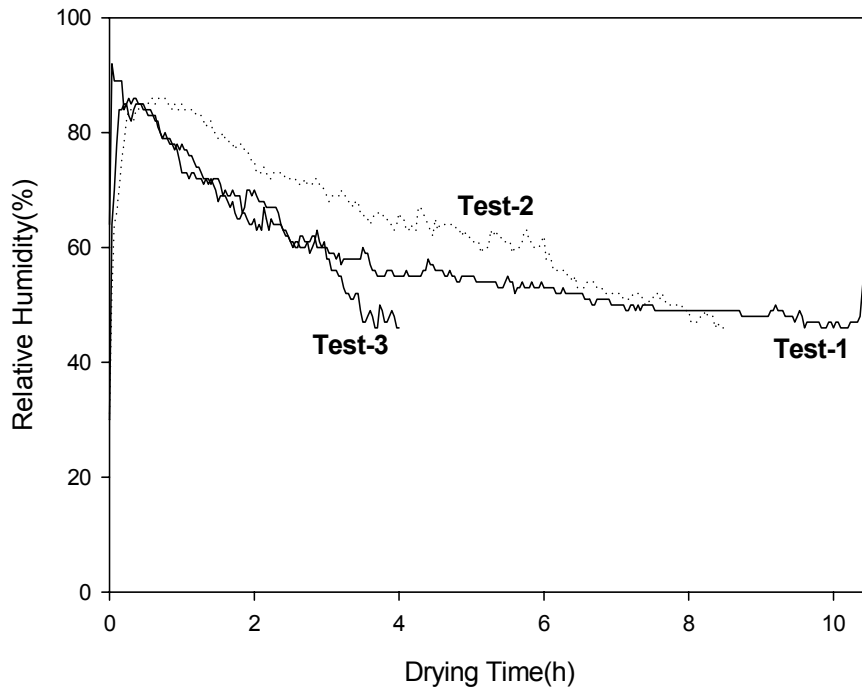


Fig. 3-40 Changes of relative humidities of exhaust air.

마. 건조소요시간, 건감률 및 소요에너지

그림 3-41은 건조 중 함수율 변화를 나타낸 것이며, 표 3-19는 건조소요 시간, 건감률 및 곡물순환회수를 나타낸 것이다. Test-1은 건조 시 초기함수율 29.2% (d.b.)에서 최종함수율 17.7%(d.b.)까지 건조하는데 10.5시간이 소요되었으며, 건조속도는 1.09%(d.b./hr)로 나타났으며, Test-2에서는 초기함수율 28.5%(d.b.)에서 최종함수율 18.9%(d.b.)까지 건조하는데 8.5시간이 소요되어, 건조속도는 1.12%(d.b./hr)로 나타났으며, Test-3에서는 초기함수율 27.0(d.b.)에서 최종함수율 18.2%(d.b.)까지 건조하는데 4.0시간이 소요되어, 건조속도는 2.20%(w.b./hr)로 나타났다.

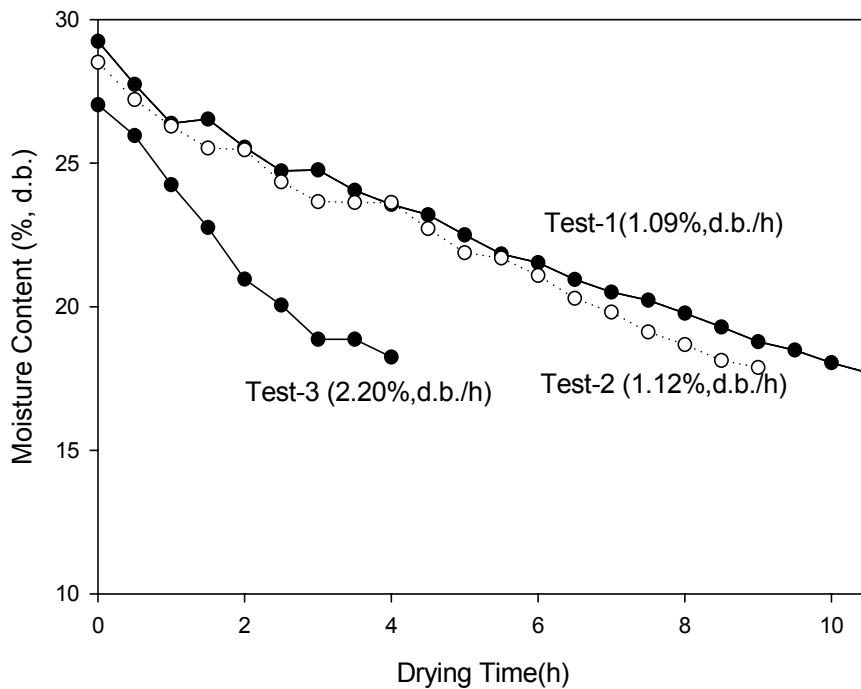


Fig. 3-41 Variations of moisture contents of rice by drying tests.

Table 3-19 Drying rates and drying times

Test No.	Initial moisture content (%d.b.)	Final moisture content (%d.b.)	Drying time (h)	Drying rate		Number of circulation
				(%d.b./h)	(%w.b./h)	
Test-1	29.2	17.7	10.5	1.09	0.79	14.5
Test-2	28.5	18.9	8.5	1.12	0.9	12.0
Test-3	27.0	18.2	4.0	2.20	1.46	5.5

표 3-20는 건조소요에너지를 나타낸 것이다. 소요에너지는 Test-1에서 6,224kJ/kg, Test-2에서 6,898kJ/kg, Test-3에서 6,992kJ/kg으로 나타났다. 에너지소비량이 비교적 큰 값을 나타낸 것은 건조실험 중 외기온도가 2~5℃로 매우 낮아 연료에너지 소비량이 많았기 때문이다.

Table 3-20 Drying energy consumptions

Test No.	Fan energy consumption (kJ/kg-water)	Fuel energy consumption (kJ/kg-water)	Total energy consumption (kJ/kg-water)
Test-1	1,152	5,072	6,224
Test-2	630	6,246	6,894
Test-3	396	6,596	6,992

바. 건조 벼의 품질변화

그림 3-42는 건조 중의 동할 증가율을 나타낸 것이다. Test-1의 최종 동할증가율은 2.4%이었으며, 건조 초기 4시간 동안에는 동할이 1%미만으로 증가하였으며, 이후 6.5시간동안 1.4% 증가 하였다. Test-2는 최종 동할증가율은 3.6%로 초기 3시간동안 동할증가율이 Test-1과 비슷하였으나 이후 빠른 증가를 나타내었다. Test-3은 최종 동할증가율이 8.4%로 초기부터 빠른 동할증가율을 나타내었다. Test-1, Test-2는 설계목표 5%미만이나, Test-3는 5%를 초과하여 나타났다.

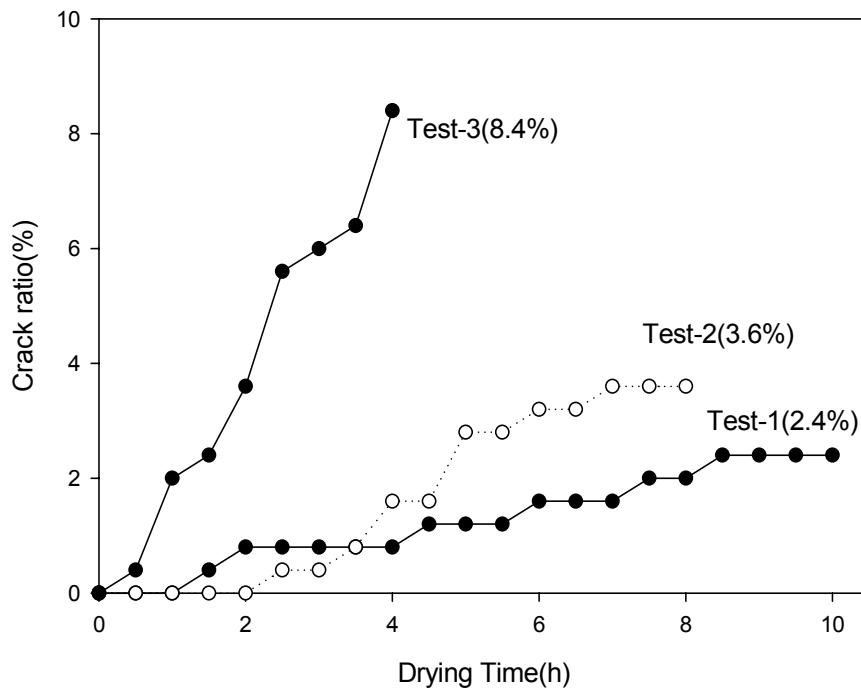


Fig. 3-42 Variations of crack ratio of brown rice.

제 6 절 병류형 순환식 곡물건조기 본기 개발 및 성능평가

1. 기본설계

병류형 순환식 건조기 상용 건조기는 12톤 규모로 전체 건조기의 용적을 건조실의 용적과 템퍼링실의 용적으로 구분하고 벼의 산물밀도($550\text{kg}/\text{m}^3$)를 고려하여 결정하였다. 송풍기는 벼 퇴적층의 송풍저항과 곡물의 체적당 송풍량을 고려하여 설계하였다. 건조기의 성능목표는 건감율은 $1.0\sim 1.2\%$ w.b./hr로 소요에너지는 $4000\text{ kJ}/\text{kg-water}$ 와 건조별의 품질은 동할율 5%이내를 목표로 설계하였다. 건조기 용적은 건조부와 템퍼링부를 합한 용적이며 다음의 식 (3-36)과 같으며, 건조실과 템퍼링실비는 1 : 4~6로 하였다.

$$\text{건조기 용적} = \frac{\text{건조기용량}(\text{kg})}{\text{벼의산물밀도}(\text{kg}/\text{m}^3)} \dots\dots\dots(3-36)$$

벼(단립중)의 산물밀도 (kg/m^3)

$$\rho_p = 537.59 + 1.222 M(\%, \text{w.b.}) \text{ (추청. Kim)}$$

$$\text{함수율 } 15\% : \rho_p = 556$$

$$\text{함수율 } 24\% : \rho_p = 567$$

$$\text{함수율 } 15\%(\text{건벼})\text{를 기준으로 하여 } \rho_p = 550 \text{ (kg}/\text{m}^3)$$

그림 3-43은 음영 부분이 순건조면적을 나타낸 그림이다. 식(3-37)은 건조실 용적을 나타낸 식이다. 순건조면적은 건조실 용적에 곡물 유입 Y형 덕트에 유하하면서 발생한 사면각용적을 제거한 용적과 배기실에서 배기덕트가 차지하는 용적을 제거한 면적을 더하여 순건조면적으로 정의하였으며 순건조면적은 2.47m^3 이며 이를 벼로 환산시 $1,359\text{kg}$ 의 곡물이 건조된다.

건조부 부피 + 배기실 배기관을 제외한 건조 부피.....(3-37)

$$= [\text{건조 부피 } (L \times W \times H)] +$$

$$[\text{배기실 부피 } (L \times W \times H) - (\text{배기관면적} \times \text{길이} \times \text{개수})]$$

$$= [2.00 \times 1.65 \times 0.5] + [(2.00 \times 1.65 \times 0.4) - (0.058 \times 1.65 \times 5)] = 2.49 m^3$$

$$\triangleright \text{벼로 환산시 } 2.49 \times 550 = 1370 \text{ kg}$$

그림 3-44는 건조실내의 곡물 유입덕트는 Y형그림이다. 상단에는 안식각을 고려하여 60°로 하였으며, 하단은 170×170(L×W)mm 정사각형으로 설계하였다. 곡물 유입덕트 Y형은 가로 6열, 세로 6열 총 36개로 설계하였으며, 덕트간에 열풍흐름이 용이하도록 덕트간의 간격은 230mm로 하였다.

식(3-38) Y형 곡물유입덕트의 제원을 나타냈으며, ①은 Y형 곡물유입덕트 상단부의 제원을 산출한 것이며 ②는 Y형 곡물유입덕트의 하단의 제원을 산출한 것이다. Y형 곡물유입덕트 상단인 ①은 단면적 5.76m²이며 0.4×0.41(L×W)m인 Y형 곡물유입덕트가 총 36개로 설계하였다.

Y형 곡물유입덕트의 하단②의 170×170(L×W)mm 정사각형구조로 36개이며, 총면적은 1.04m²이며 이는 건조실 단면적과 비교 1: 5.5배이다.

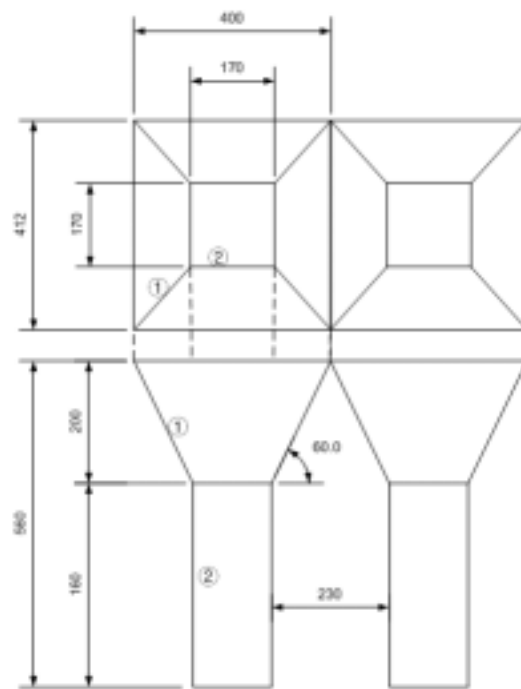


Fig 3-44. View of rice inlet(Y-type chute).

▷Y형 곡물유입덕트하단②의 제원 : $0.17 \times 0.17 = 0.0289m^2 \dots \dots \dots (3-38)$

▷Y형 곡물유입덕트하단② 간의 거리 : $230mm$

▷총Y형 곡물유입덕트 하단 단면적 : $0.0289 \times 36 = 1.04m^2$

(Y형 곡물유입덕트하단 단면적 : 건조실 단면적 = 1 : 5.5)

▷Y형 곡물유입덕트 상단 단면적 : $0.4 \times 0.41 = 0.164m^2$

▷Y형 곡물유입덕트 수량

건조기 단면적① : $2.4 \times 2.4 = 5.76m^2$

▷ Y형 곡물유입덕트 개수 : $0.4 \times 0.41 = 0.164m^2$

(가로 6열, 세로 6열 = 총 36개)

그림 3-45는 배기실 상세 설계도이다. 배기덕트는 Cross형으로 상단 6열과 하단 6열로 설계하였으며, 곡물의 흐름에 영향이 없도록 안식각을 고려하여 상단이 60°의 각이 있는 삼각형 덕트로 설계하였으며, 배기실 3면에서 배기함으로 원활하도록 설계하였다.

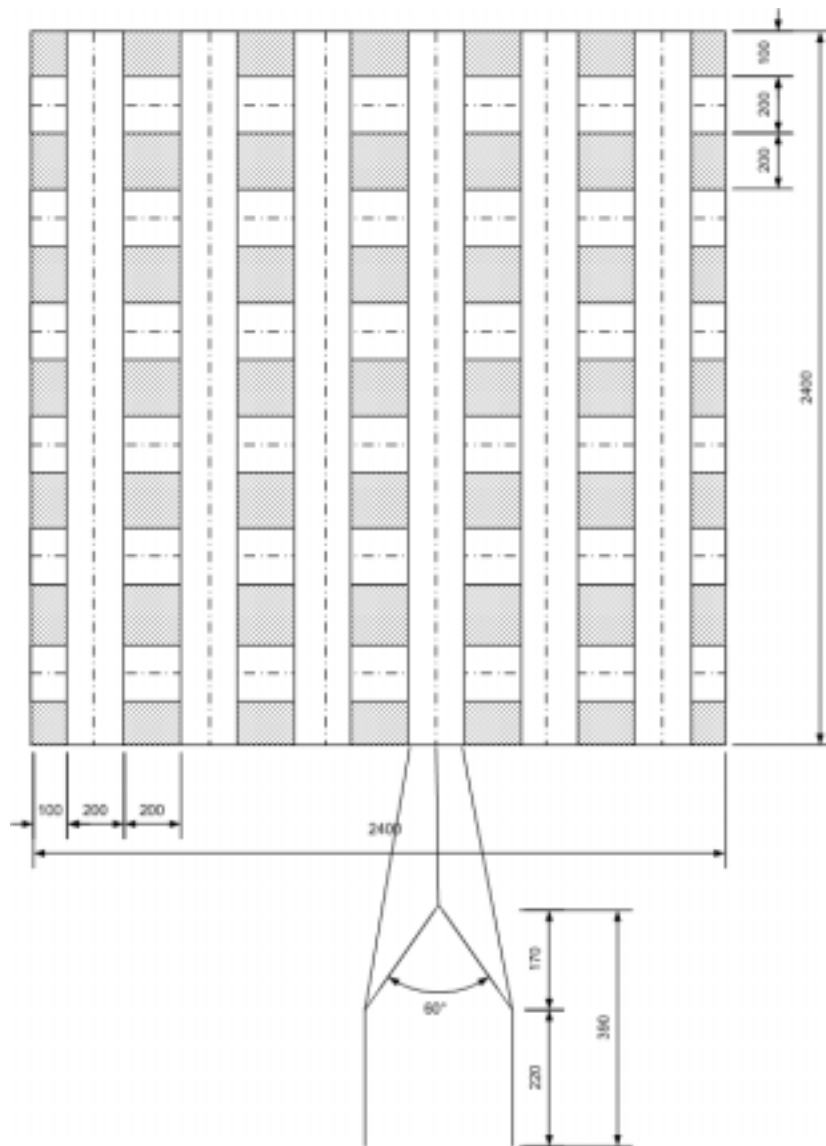


Fig 3-45. View of air outlet.

식(3-39) 배기덕트 종말 속도를 계산한 식이다. 배기덕트의 면적을 계산하기 위해 삼각형인 덕트위의 면적 $0.190 \times 0.170 \times 0.5(L \times W \times 0.5)m$ 와 배기덕트하단의 사각면적 $0.190 \times 0.220(L \times W)m$ 의 합으로 면적을 산출한 후 총 송풍량으로 산출하면 종말속도는 2.76m/s로 종말에 곡물의 동요 없이 건조가 가능할 것으로 판단된다.

$$[(0.190 \times 0.170 \times 0.5) + (0.190 \times 0.220)] = 0.058m^2 \dots\dots\dots(3-39)$$

$$\triangleright \text{총 단면적 } 0.058 \times 18 = 1.044m^2$$

$$\triangleright \text{송풍량 : } 30 \times (2.4 \times 2.4) = 172.8cm^3$$

$$\triangleright \text{종말속도 } v = \frac{Q}{A} = \frac{172.8(m^3/min)}{60 \times 1.044} = 2.76m/s$$

식(3-40)는 템퍼링실 용적을 계산한 식이다. 템퍼링실은 1단에 용적은 3.23m³이며 벼로 환산시 1776kg이다. 건조실 : 템퍼링실 = 1 : 4~6을 고려하여 약 10~15단으로 설계하였다.

$$1\text{단} = 2.4 \times 2.4 \times 0.56 = 3.23m^3 (L \times W \times H) \dots\dots\dots(3-40)$$

$$\triangleright \text{벼로 환산시 } 3.23(m^3) \times 550(kg/m^3) = 1,776.5kg$$

$$\triangleright \text{건조실 용적 } 2.47m^3$$

$$(\text{건조실 용적} : \text{템퍼링실 용적} = 1 : 4 \sim 6)$$

$$2.47m^3 : 9.9 \sim 14.9m^3 (\text{약 } 10 \sim 15\text{단})$$

유하속도는 순건조시간(건조부 통과시간)을 고려하여 3.0~5.0m/hr 범위에서 설계를 하였다(표 3-21). 순건조 시간은 6~10분사이에 건조실을 통과하는 시간으로 순환속도(m/hr) 및 용량 순환량(kg/hr)을 산출하였다.

Table 3-21 Estimated grain flow rate and circulation volume

Drying time(min)	Grain flow rate(m/hr)	Circulation volume(kg/hr)
6	5.0	9075
7	4.29	7778
8	3.75	6806
9	3.33	6050
10	3.00	5445

송풍량은 최대 풍량비가 13.25m³/min·ton을 기준으로 용량 8~12톤에 대하여 172.8cmm 선정하였다. 건조기의 송풍저항은 곡물 퇴적층의 송풍저항으로 구분할 수 있으며, 벼 층의 두께 0.556m일때 162mmAq로 계산되었다(식 3-41). 또한 축동력 산출시 송풍기 효율을 60%로 가정시 실제 사용동력은 7.6kW의 송풍기로 산출되었다(식 3-42).

$$\begin{aligned} \Delta P &= 9.8 \times 653.54 \times V^{1.2727} \times (D + \alpha) \dots\dots\dots(3-41) \\ &= 9.8 \times 653.54 \times 0.51^{1.2727} \times (0.5 + 0.1) \\ &= 1590 \text{ Pa}(162 \text{ mmAq}) \end{aligned}$$

여기서, V= 건조부 겉보기 속도 = $\frac{172.8}{5.76 \times 60} = 0.5 \text{ m/sec}$

A= 건조기 단면적 = $2.4 \times 2.4 = 5.76 \text{ m}^2$

D = 건조부 곡물층 높이 = 0.556 m

α = 부가적 손실(덕트, 후드) = 0.1

$$\triangleright \text{축동력} = \frac{P_{st}Q}{0.6} = 1590 \times \frac{172.8}{0.6 \times 60} = 4372.5 \text{ W} \dots \dots \dots (3-42)$$

$$\approx 7.6 \text{ kW}$$

(송풍기의 효율 60%)

$$\triangleright \text{실제 사용동력} = 7.6 \times 1.1 = 8.4 \text{ kW}$$

$$= 30,205 \text{ kJ/hr}$$

버너는 외기온도 평균 10℃에서 120℃까지 (상승온도: 110℃) 조정이 가능하도록 설계하였다. 따라서, 버너의 최대 열량은 209,088kcal/hr이며, 버너의 효율을 75%로 가정하였을 때 156,816kcal/hr가 가능한 버너를 설계하였다 (식 3-43).

$$\triangleright \text{버너의 최대열량} = \frac{60Q\rho C_p \Delta T}{\eta} = \frac{60 \times 172.8 \times 1.2 \times 0.24 \times 110}{0.9} \dots \dots (3-43)$$

$$= 364,953 \text{ kcal/hr}$$

$$\triangleright \text{버너의 실 적용열량} : 255,467 \text{ kcal/hr}$$

$$\frac{255467}{8690} = 29.4 \text{ } \ell / \text{hr} = 7.7 \text{ USgal/hr}$$

여기서, Q = 송풍량(m³/min)

ρ = 공기밀도(kg(1.2 kg/m³))

C_p = 공기의 정압비열(0.24 kcal / kg °C)

Δt = 가열온도

η = 버너효율(소수)

2. 상세 설계 및 제작

그림 3-46은 배기실 상세 설계도이다. 배기덕트는 Cross형으로 상단 6열과 하단 6열로 설계하였으며, 곡물의 흐름에 영향이 없도록 안식각을 고려하여 상단이 60°의 각이 있는 삼각형 덕트로 설계하였으며, 배기실 3면에서 배기함으로 원활하도록 설계하였다.

그림 3-47은 열풍유입부 및 Y형 덕트 설계도이다. 상부는 안식각을 고려하여 60°로 하였으며, 하단은 1700×170(L×W)mm 정사각형으로 설계하였다. 곡물 유입덕트 Y형은 가로 6열, 세로 6열 총 36개로 설계하였으며, 덕트 간에 열풍흐름이 용이하도록 덕트간의 간격은 230mm로 하였다.

그림 3-48은 본기 전체 설계도이다. Y형 곡물유입덕트는 가로 6열 세로 6열 총 36개로 설계하였으며, 배기덕트는 상단 6열 하단 6열로 설계하였으며, 피드부는 6개의 원통으로 하여 원활한 순환이 이뤄지도록 하였다.

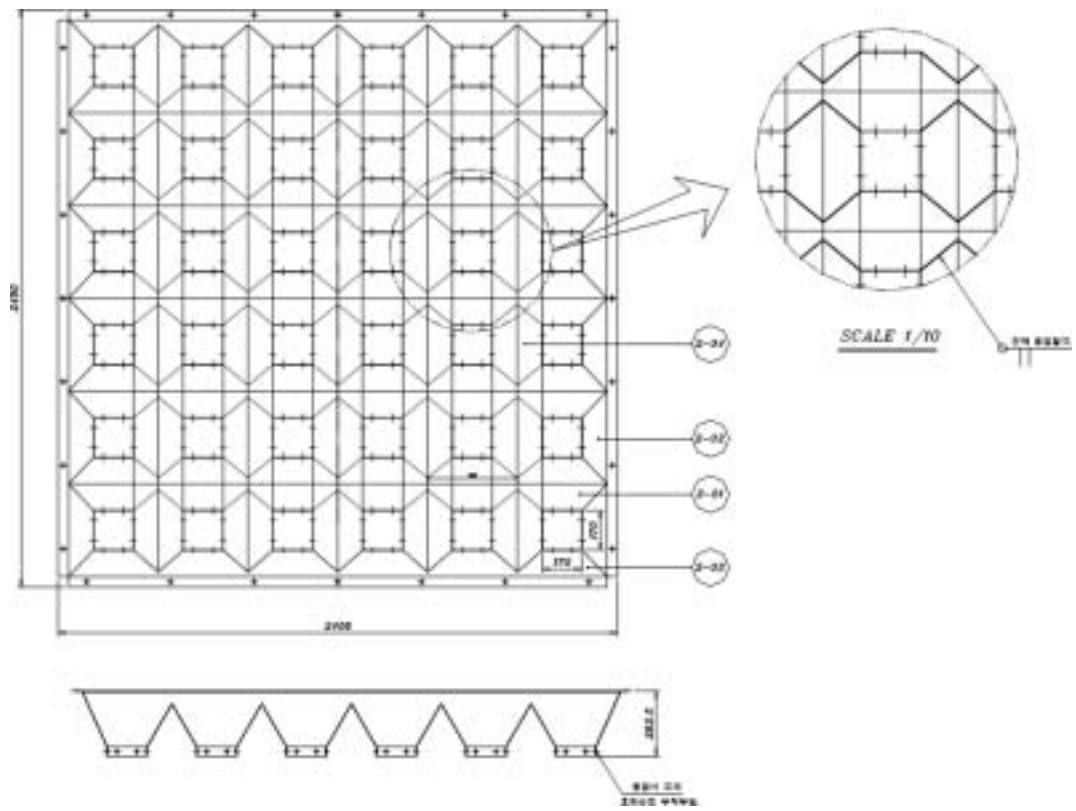


Fig. 3-47 Schematic diagram of rice inlet(Y-type chute).

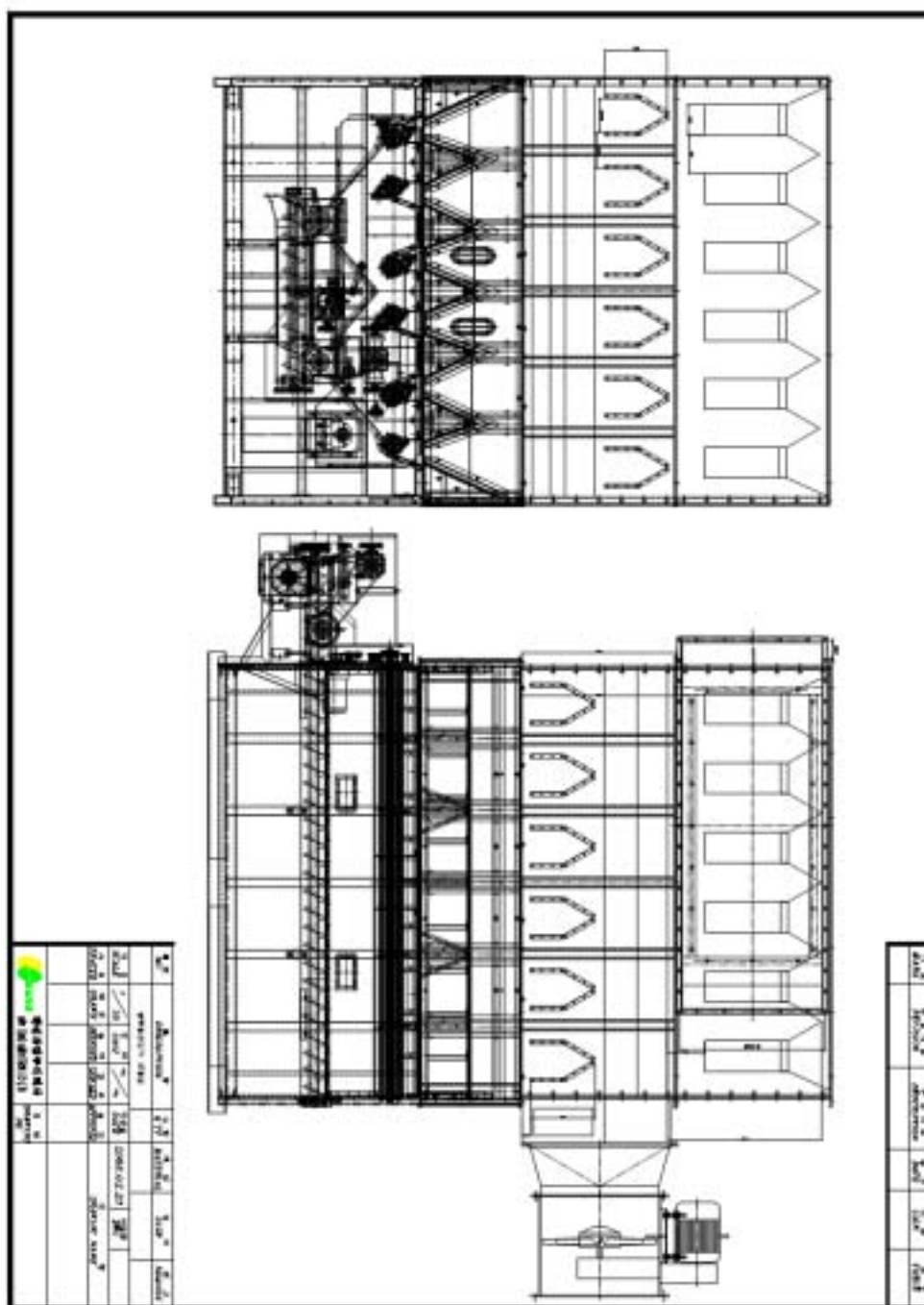


Fig. 3-48 Schematic diagram of rice circulating concurrent-flow dryer.

그림 3-49는 제작된 피드부이다. 그림과 같이 총 6개의 피드 원통에 의해 곡물이 원활하게 배출되게 제작하였다. 배출부는 최대 1시간에 1,500kg까지 벼가 배출되며 곡물 유하속도는 4.7m/h까지 가능하다. 컨트롤 박스에 의해 조절이 4.0m/h까지 조절이 가능하다. 배출부 앞부분에 버킷엘리베이터가 부착되며 버킷엘리베이터로 이송되는 관 밑에 곡온을 측정할 수 있도록 하였다.



Fig. 3-49 View of discharge section.

그림 3-50은 제작된 배기부이다. 그림3-50(a)은 배기부는 양면 양쪽과 후면 한 방향에서 3면에서 배기가 원활하게 이뤄지도록 제작하였다. 그림 3-50(b)은 배기부를 위쪽에서 본 그림이다. 상단에 6열에 배기부가 있으며 하단에 6열의 배기로 인해 배기가 이뤄지도록 제작하였다. 그림3-50(c)은 배기부의 후면의 그림이다. 송풍기를 2대를 설치하여 한 대의 송풍기가 한쪽 측면과 반쪽 후면을 배기하도록 하였다.



(a) Side



(b) Up-side

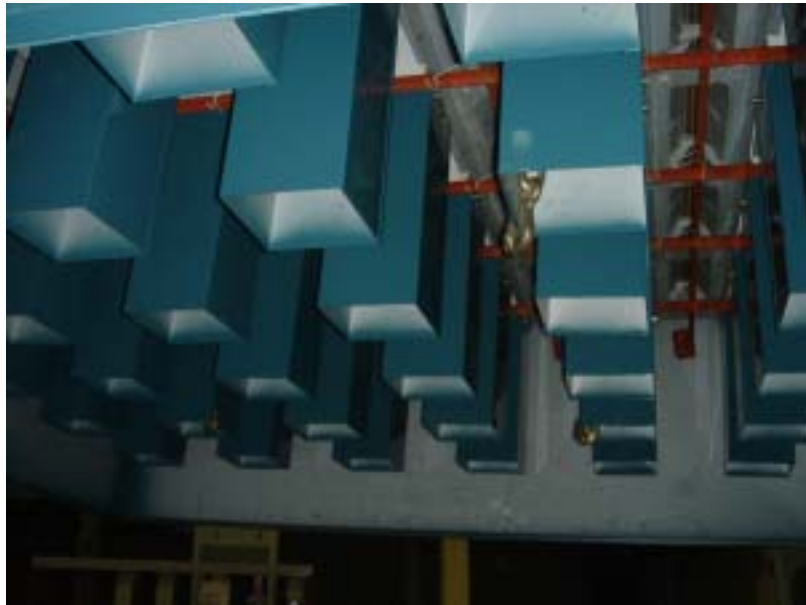


(c) Air outlet fan

Fig. 3-50 View of air outlet section.

그림 3-51은 제작된 건조실이다. 그림3-51(a)은 열풍유입부의 Y형 슈트 하단의 그림이다. 가로 6개 세로 6개로 총 36개로 제작하였다. Y형 곡물유입 덕트의 하단은 170×170(L×W)mm 정사각형구조로 곡물이 건조실로 유입되도록 제작하였다. 공기층만실인 열풍유입부는 덕트간에 열풍흐름이 용이하도록 덕트간의 간격은 230mm로 하였다.

그림3-51(b)은 열풍유입부의 그림이다. 그림에서와 같이 벌집구조로 제작하였으며 각각의 깔대기 모양으로 제작된 상단에는 안식각을 고려하여 60°로 하였다.



(a)Down-side



(b)Up-side

Fig. 3-51 View of air inlet section(Y-Y-type chute).

그림 3-52는 제작된 건조실제어부이다. 목표함수율까지 건조가 자동으로 되는 자동모드와 투입, 건조, 배출 등 수동모드가 있다. 병류형 순환식건조기에 적합하도록 온도 컨트롤이 0~199℃까지 설정이 가능한 온도 컨트롤을 부착하였다. 또한 타이머가 부착되어 있어 타이머에 의한 건조가 가능하도록 하였다. 각 단위기계의 작동 여부 및 이상여부를 알려주는 알람 기능 추가 제작하였다.



Fig. 3-52 View of control box.

그림 3-53은 제작된 병류형 순환식 곡물건조기이다. 건조기는 전남 익산 한성공업(주) 공장내에 설치를 하였다. 건조실 높이는 8.7m이며 버킷엘리베이터의 높이는 9.7m이다. 가로폭은 2.4m이며 세로 폭은 2.4m이다.



Fig. 3-53 View of the rice circulating concurrent-flow dryer.

3. 본기 건조실험

가. 공시재료

실험에 사용한 벼는 전북 익산에서 수확한 추청벼이며, 초기함수율은 22.9%(d.b.)이었다. 8,000kg의 수확한 벼를 정선한 후 함수율 변화를 최소화하기 위하여 1℃의 저온저장고에 40kg 포대로 보관하였다. 실험시작 48시간 전에 벼를 저온저장고에서 꺼내 상온에서 주위 공기온도와 평형을 이루도록 한 후 실험에 사용하였다.

나. 실험방법

표 3-22는 건조 실험조건을 나타낸 것이다. 표에서와 같이 열풍온도 105℃이며, 송풍량은 25cm³/m³이며 곡물유하속도는 4.5m/h로 하였으며, 이는 곡물유하속도에 인한 건조실 556mm를 통과하는 시간인 건조시간은 8.5분이며 또한 템퍼링실을 통과하는 시간은 51.5분으로 하였다. 건조 시작후 매 30분 간격으로 약 500g 시료를 채취하여 함수율과 동할율을 측정하였다. 함수율이 19.0%(d.b.)에 도달할 때 실험을 종료하였다. 함수율은 10g-135℃-24h 상압건조법으로 측정한 후 105℃ 건조법으로 환산하였으며, 3회 반복 측정하였다. 동할율은 채취한 벼를 밀봉하여 72시간 상온에서 보관 후 수작업으로 왕겨를 제거하고, 현미 250립에 대하여 동할립 관별기(DC-50, S.SEIKI, JAPAN)를 이용하여 육안으로 측정하였다.

Table 3-22 Drying conditions for the drying tests

Drying air temperature (°C)	Air flow rate (cmm/m ²)	Grain flow rate (m/h)	Resident time/pass (min)	Tempering time/pass (min)
105	25	4.5	8.5	51.5

그림 3-54는 건조과정 중 벼의 곡온 및 공기의 온도측정하기 위하여 설치된 온도센서의 그림이다. 외기 온도를 측정하기 위해 외부 1개지점, 열풍온도를 측정하기 위하여 열풍유입부 9개 지점 및 배기부 10개 지점, 곡온을 측정하기 위하여 건조실내의 높이별 7개 지점 및 배기덕트하단에 10개지점에 대하여 열전대(T-TYPE, OMEGA, USA)를 설치하고 자료 수집장치(7327, DATASCAN, UK)로 30초 간격으로 온도를 측정하여 PC에 저장하였다. 또한 외기 습도를 측정하기 위해 배기부에 습도계(TR-72, TANDD, JAPAN)를 이용하여 2개 지점에서 측정하였으며, 건조실의 유속을 측정하기 위하여 풍속계(640-0, DWYER INSTRUMENTS, USA)를 사용하여 3개지점에서 측정하였다. 또한 건조공기유입부 1개 지점, 공기 배출부에 1개 지점씩 습도계를 두어 30초 간격으로 습도를 측정하였다. 소요전력은 적산전력계(3166, HIOKI, JAPAN)를 이용하여 측정하였으며, 송풍량은 열선풍속계(VELOCICALC-PLUS, TSI, USA)를 이용하여 배기부에서 측정하였다. 연료소비량은 전자저울(A-200, CASS, KOREA)을 이용하여 사용된 연료량을 30분 간격으로 측정하였다.

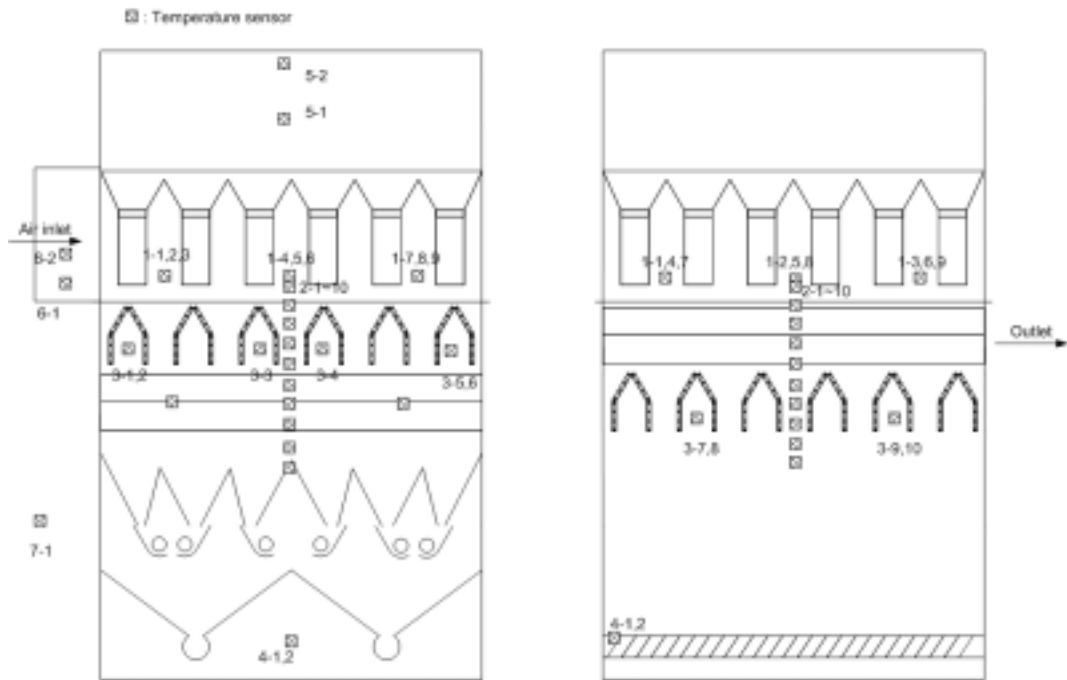


Fig. 3-54 Locations of temperature sensors in dryer.

건조실험중의 평균 외기온도 26.2℃(24.8~27.9℃), 평균 상대습도 73.0%(68.0~77.0%)이었다.

다. 건조온도, 풍속 및 곡온변화

그림 3-55는 건조실에 유입되는 열풍온도의 변화를 나타낸 것이다. 초기에 설정 열풍온도에 도달하는 시간은 약 3분이었다. 평균 열풍온도는 102.7℃(71.7~140.0℃)로 나타났다. 송풍량이 큰 이유로 버너의 Off시 열풍의 온도가 급격히 하강하므로 온도편차가 크게 나왔으나, 건조실로 유입되는 공기는 유입덕트의 온도상승으로 인하여 건조에 사용되는 열풍의 온도는 크게 차이를 보이지 않았다. 건조실에서 유입열풍 온도분포는 9개 지점에서 좌우의 온도 5℃ 차이는 없었으며, 전후 최대 20.1℃ 정도의 차이로 보였다. 비교적 좌우의 온도차는 작게 나타났으며, 이는 3면배기에 의해 좌우는 온도차가 없었었다. 열풍유입시 배기부 측면방향으로 약간 온도의 불균형이 나타났다.

그림 3-56은 건조실내의 풍속의 변화를 나타낸 것이다. 평균풍속은 0.8m/s(0.5~1.3m/s)로 나타났다. 이는 건조실내의 설계값인 풍속 0.5m/s보다 평균값이 높게 나왔다.

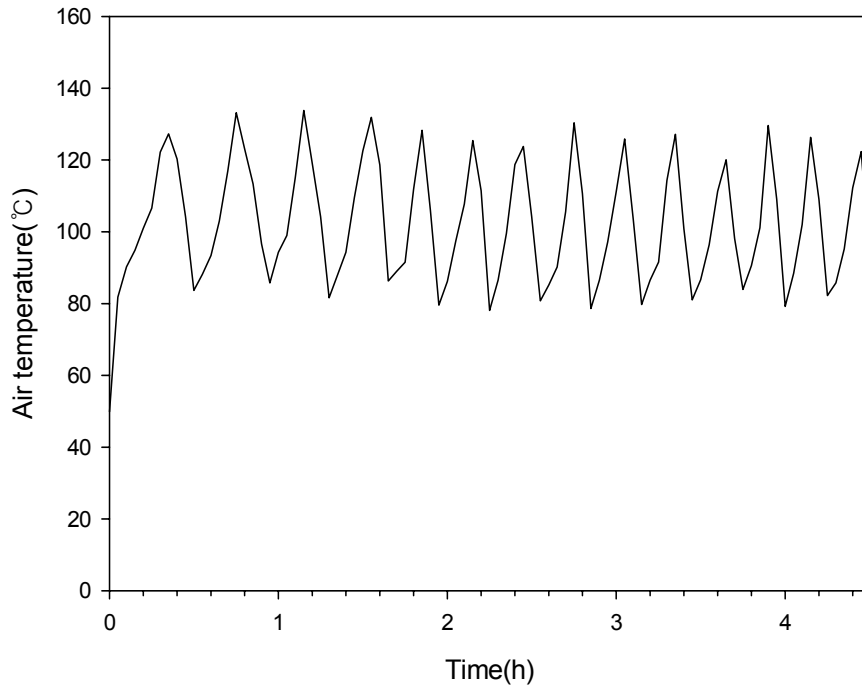


Fig. 3-55 Changes of drying air temperature during drying.

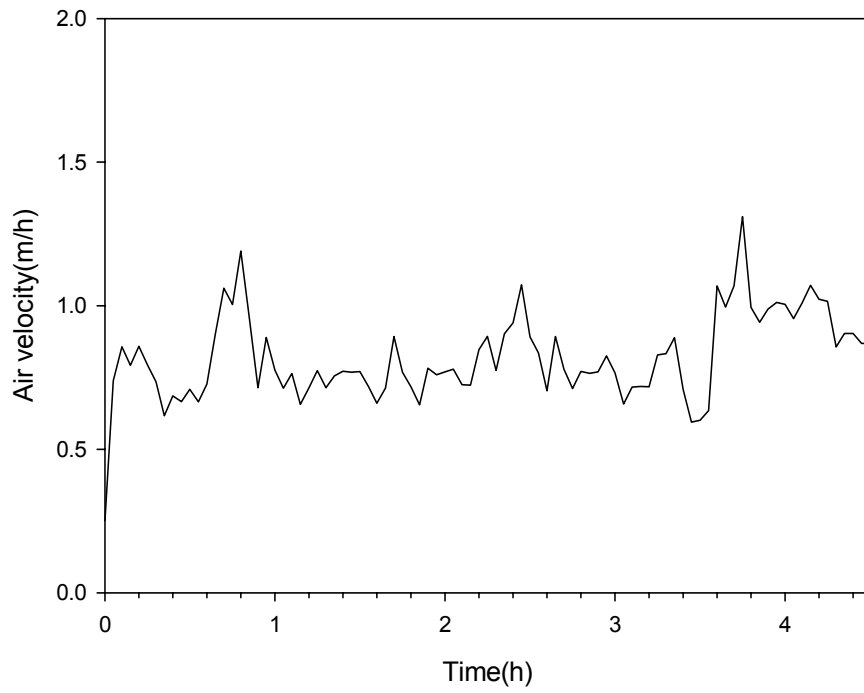


Fig. 3-56 Changes of drying air velocity during drying.

그림 3-57은 곡물이 건조실을 유하하면서 곡온의 변화를 나타낸 것이다. 열풍노출시 급격히 상승한 곡온은 건조실을 유하하면서 하강하여 건조실에서 배출될 때의 곡온은 41℃이하가 되었다. 곡온은 열풍유입부에서 평균 85℃까지 상승한 후 건조실을 유하하면서 하강하여 평균 41℃로 건조실에서 배출되었다.

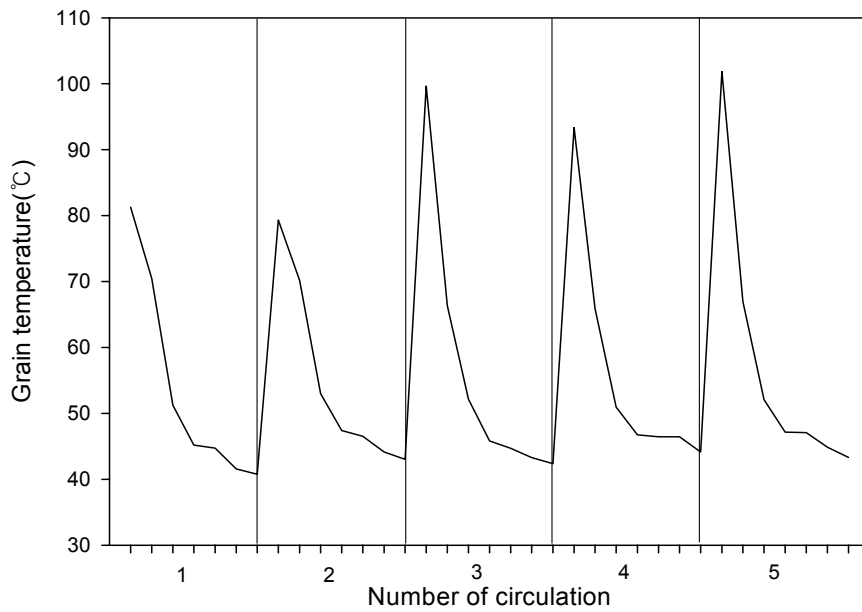


Fig. 3-57 Changes of Grain Temperature during drying.

라. 배출공기 및 텀퍼링실의 곡온

그림 3-58은 건조실에서 배출되는 공기의 온도변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 배기온도는 평균 38.3℃(32.6~40.6℃)로 나타났다. 배출공기의 온도를 측정했던 10개 측정점 모두 온도 편차가 1℃미만으로 배출공기는 쓸림 없이 배출되는 것으로 나타났다. 배출공기의 온도는 배출곡온과 거의 비슷한 값을 나타내었다.

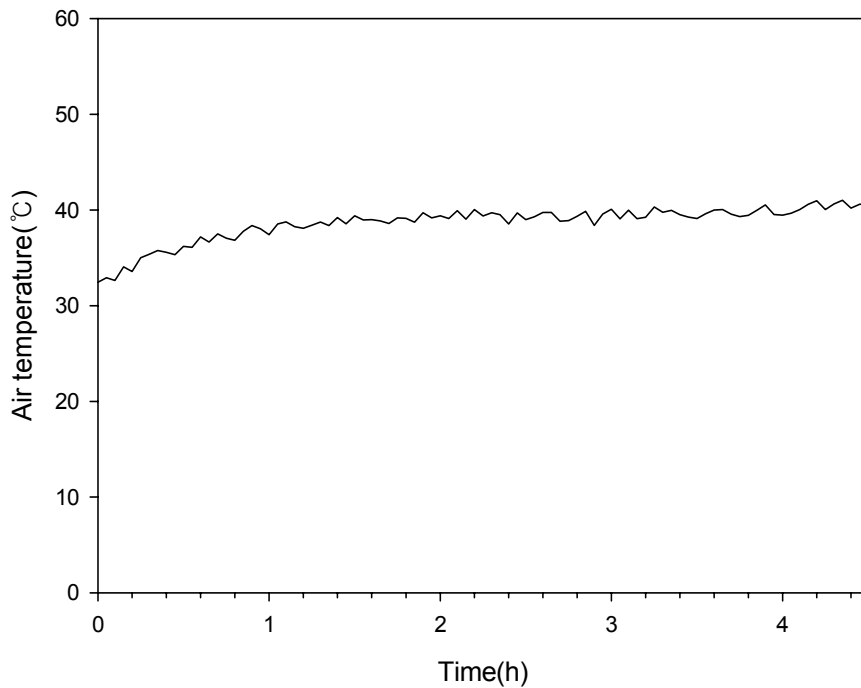


Fig. 3-58 Changes of Exhaust air Temperature during drying.

그림 3-59는 건조 중 템퍼링실의 곡온변화를 나타낸 것이다. 템퍼링은 건조기 상단 건조기 중심부에 곡온을 측정하였다. 그림에서와 같이 건조 중 평균 37.9(31.5~40.0)℃로 나타났다. 건조온도와 송풍량에 따라 템퍼링의 곡온의 차이는 큰 차이가 없었으며, 배기부 및 버킷엘리베이터에 이송되는 과정에 곡온이 안정화가 된 것으로 판단된다.

그림 3-60은 건조 중 배출부의 곡온변화를 나타낸 것이다. 배출곡온은 평균 35.2(30.1~38.3)℃로 나타났다. 배출곡온은 배기하단의 곡온 및 템퍼링실 곡온과 거의 일치하였다. 이는 배기부에서 충분한 냉각이 이뤄진 것으로 판단된다.

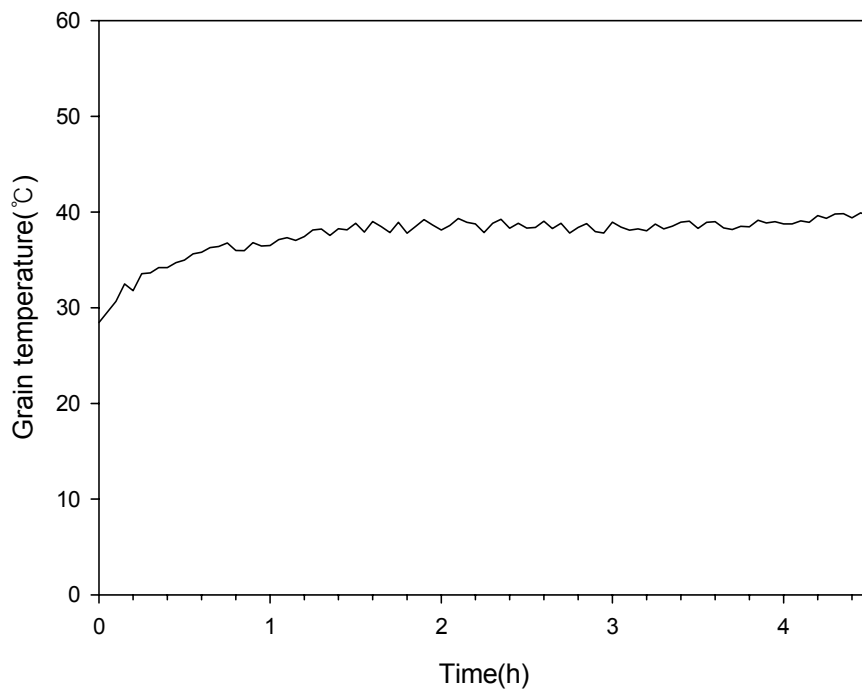


Fig. 3-59 Changes of tempering grain temperature during drying.

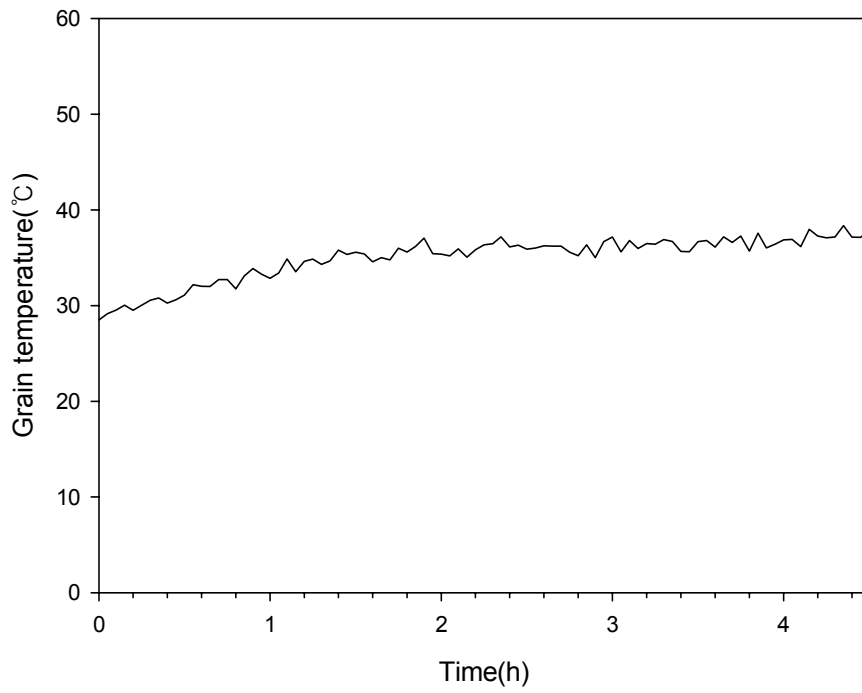


Fig. 3-60 Changes of outlet grain temperature during drying.

그림 3-61은 배기의 상대 습도 변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 배기의 상대습도가 초기에 78%이상으로 상승하였다가 점차 감소하여 65% 이하로 낮아졌다.

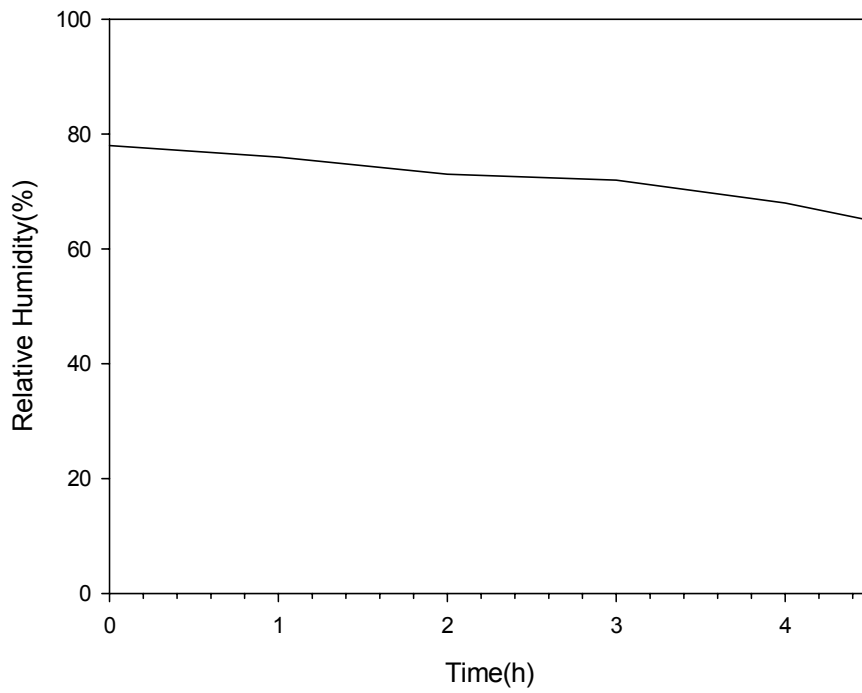


Fig. 3-61 Changes of relative humidities at outlet.

마. 건조소요시간, 건감률 및 소요에너지

그림 3-62는 건조 중 함수율 변화를 나타낸 것이다. 표 3-23은 건조소요 시간, 건감률 및 곡물순환회수를 나타낸 것이다. 건조 시 초기함수율 22.9% (d.b.)에서 최종함수율 16.5%(d.b.)까지 건조하는데 4.5시간이 소요되었으며, 건조속도는 1.42%(d.b./hr)로 나타났다. 건조초기의 22.9%(d.b.)에서 $\pm 4.1\%$ 의 편이를 보였으나 4.5시간 건조 이후에 2.7%(d.b.)까지 편이의 폭이 감소하였다. 이는 건조 중 토펙퍼링 및 냉각이 균일하게 되는 것을 알 수 있었다.

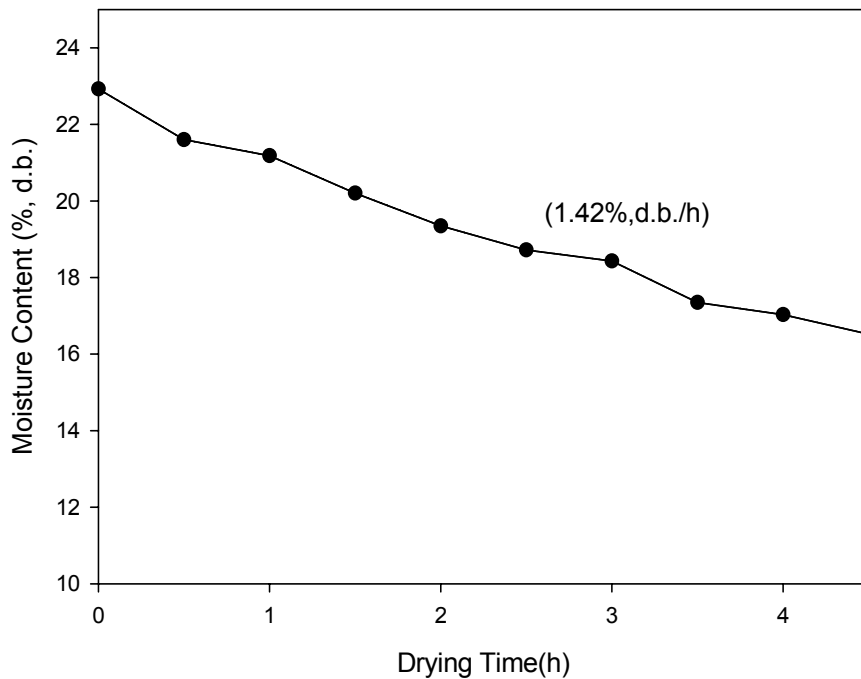


Fig. 3-62 Variations of moisture contents rice by drying tests.

Table 3-23 Drying rates and drying times

Initial moisture content (%d.b.)	Final moisture content (%d.b.)	Drying time (h)	Drying rate		Number of circulation
			(%d.b./h)	(%w.b./h)	
22.9	16.5	4.5	1.42	1.00	4.5

표 3-24는 건조소요에너지를 나타낸 것이다. 소요에너지는 5,117kJ/kg으로 나타났다. 에너지소비량이 목표 소비량보다 27% 높게 나왔다(기존 횡류형 순환식건조기는 약 6,000kJ/kg, 농업공학연구소 성능자료, 1998). 이는 버너의 큰 온도편차가 원인이라고 판단된다. 병류형 순환식 곡물건조기는 편차를 온도 편차를 줄이기 위해 2개의 버너를 이용하여 일정한 온도를 유지한다면 에너지소비율을 크게 줄일 수 있다고 판단된다.

Table 3-24 Drying energy consumptions

Fan energy consumption (kJ/kg-water)	Fuel energy consumption (kJ/kg-water)	Total energy consumption (kJ/kg-water)
1,283	3,834	5,117

바. 건조 벼의 품질변화

그림 3-63은 건조 중의 동할증가율을 나타낸 것이다. 초기 동할은 없었으며, 건조종료 후 최종동할율은 2.8%로 나타났다. 건조 초기 1.5시간 동안에는 동할이 없었으며, 이후 1.5시간동안 0.4%씩 4시간까지 증가하였다. 최종동할율이 2.8%로 목표설계값에 만족하였다.

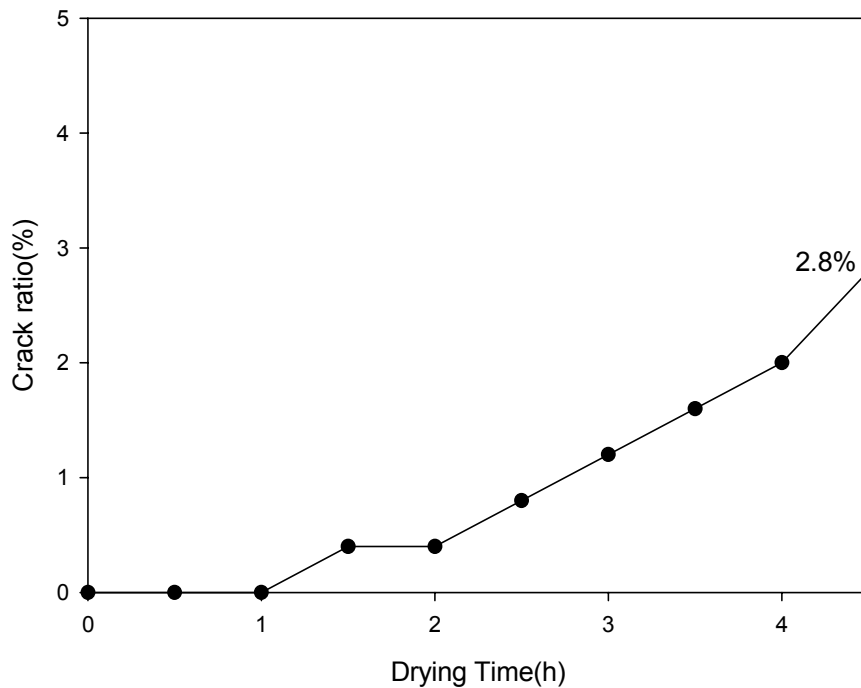


Fig. 3-63 Variations of crack ratio of brown rice by drying tests.

4. 비용분석

가. 분석방법

병류형 순환식건조기의 비용분석을 위하여 기존의 RPC에서 설치 운영중인 황류형 순환식건조기와 비교분석하였다. 비용분석을 비교하기 위한 조건은 다음의 표 3-25와 같이 설정하였다.

비용분석의 비교를 위해서 동일한 조건으로 건조하는 것을 우선적으로 가정하여 건조용량은 16톤으로 하였으며, 병류형 순환식 건조기의 시뮬레이션 결과와 황류형 순환식건조기의 성능평가 자료(농업공학연구소, 1998)를 기준으로 하였다. 송풍량은 16톤 규모의 병류형 건조기는 145CMM, 황류형 건조기는 223CMM으로 하였다. 초기함수율 24.5%(w.b.), 목표함수율 14.5%(w.b.), 연간건조일수 30일 및 일일작업일수 20시간은 농협 RPC 설계기준(농협중앙회, 2003)을 근거로 선정하였다. 건조속도는 황류형 순환식건조기의 건조속도는 성능평가 결과를 근거로 0.93%(w.b./hr)로 선정하였고, 병류형 순환식건조기의 건조속도는 시뮬레이션 결과에 근거하여 1.41%(w.b./hr)로 선정하였다.

황류형 순환식건조기에 요구되는 건조소요열량은 성능평가 자료를 이용하였으며, 병류형 순환식건조기에 요구되는 건조소요열량 본 연구에서 검증된 병류형 순환식건조기 시뮬레이션 프로그램을 이용하였다.

건조 처리능력은 농협RPC 설계기준(농협중앙회, 2003)을 근거로 다음의 식(3-44)와 같이 계산하였다.

$$Q = \frac{VT}{(t_1+t_2) + \frac{M_o - M_f}{a}} \dots\dots\dots(3-44)$$

여기서, V = 건조기 용량(톤)

T = 1일작업시간(시간)

M_o = 초기함수율(% , *w.b.*)

M_f = 최종함수율(% , *w.b.*)

a = 건조속도(% , *w.b./hr*)

$t_1 + t_2$ = (투입 + 배출) 시간(1.5시간)

Table 3-25 Drying Conditions for cost analysis

Items	Conditions(cross/concurrent)
Capacity(ton)	16ton
Airflow rate(CMM)	223/145
Initial moisture content(% , <i>w.b.</i>)	24.5
Final moisture content(% , <i>w.b.</i>)	14.5
Drying date(day)	30
Drying time(hr)	20
Drying rate(% , <i>w.b.</i>)	0.93/1.41

나. 분석결과

병류형 순환식건조기와 횡류형 순환식건조기의 소요에너지는 다음의 표 3-26과 같이 병류형 순환식건조기는 3,147 kJ/hr로 나타나 횡류형 순환식건조기의 4,631 kJ/hr에 비해 68% 수준으로 약 32%의 에너지 절감 효과가 있었다.

병류형 순환식건조기와 횡류형 순환식건조기의 건조일수 별 건조 처리능력은 다음의 표 3-27과 같이 병류형 순환식건조기는 횡류형 순환식건조기의 건조 처리능력에 비해 약 143% 수준이었다.

Table 3-26 Comparison of energy consumption between the concurrent-flow dryer and cross flow dryer

Energy consumption(kJ/kg)		note
Concurrent flow dryer	Cross flow dryer	
3,147	4,631	

Table 3-27 Comparison of drying capacity between concurrent flow dryer and cross flow dryer

Operating time (days)	Drying capacity(ton)	
	Concurrent flow dryer	Cross flow dryer
30	1,117	784
60	2,235	1,567
90	3,352	2,351
120	4,469	3,134

표 3-28은 병류형 순환식건조기 및 횡류형 순환식건조기의 고정비와 변동비에 따른 비용분석을 나타낸 것으로 병류형 건조기는 기존 횡류형 건조기에 비하여 열풍이 통과하는 다공판이 필요없는 구조로 되어있으나, 다수의 Y-형 슈트의 제작비에 의해 기존 횡류형에 비하여 16톤 기준으로 초기 구입비용이 4,000,000원 비싸다. 병류형 건조기의 연간 고정비가 5,775,000원으로 횡류형 건조기의 고정비 5,115,000원에 비해 10%의 비용이 더 요구되었다. 그러나, 병류형 건조기의 변동비는 4,293원으로 횡류형 건조기의 변동비 6,188원의 약 30% 이상 절감되었다.

Table 3-28 Drying cost analysis of concurrent flow dryer and cross flow dryer

		횡류형건조기	병류형건조기
고정비	구입비(원)	31,000,000	35,000,000
	내구년한(년)	10	10
	이자(원)	1,240,000	1,400,000
	감가상각(원/년)	2,945,000	3,325,000
	수리비 등(원)	930,000	1,050,000
	합계(원)	5,115,000(100%)	5,775,000(110%)
변동비	연료(전력)비(원/ton)	6,188(100%)	4,293(69.3%)

- * 건조기 용량은 16톤 기준
- * 감가상각은 정액법 기준 잔존가격 5%
- * 이자 4%, 수리비 등 3%
- * 전력 36.7원/kW, 등유(면세유) 446원/ℓ

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

우리나라는 건조시설의 부족과 수확기 반입물량의 증대보다 큰 규모의 건조기가 요구되고 있다. 또한, 건조기의 처리 능력 향상, 건조소요에너지의 절감, 건조벼의 품질향상 등의 획기적인 개선이 요구되고 있다. 그러나, 횡류형 순환식 곡물건조기는 구조 및 건조원리상 건조속도의 증대, 건조에너지 절감, 건조곡물 품질 개선 등의 주요 목표를 현재 수준 이상으로 크게 향상시키기는 어려운 실정이다.

따라서, 건조속도를 초고속화 하는 동시에 에너지를 절감하고 곡물의 품질을 유지하기 위해서는 신개념의 건조기 개발을 위해서 본연구가 수행 되었다.

주요연구결과	달성도	평가방법
<ul style="list-style-type: none"> ○ 병류형 순환식 곡물건조기 시뮬레이션 모델 개발 및 검증 - 병류형 후층건조를 예측하는 시뮬레이션 프로그램 개발 - 함수율, 건감율, 동할율, 건조소요에너지를 예측 - 벼 건조실험을 통해 실험치와 시뮬레이션에 의한 예측치를 비교하여 적합성을 검증 	●	<ul style="list-style-type: none"> ○ 전문 학술지 논문투고 1편(10월 예정) ○ 산업화를 위한 설계 기술 확보 ○ 효율적인 건조운영 방법 확립

주요연구결과	달성도	평가방법
<ul style="list-style-type: none"> ○ 실험용 병류형 순환식 곡물건조기제작 및 성능평가 - 용량 700kg규모의 실험용 병류형 순환식 곡물건조기 설계 및 제작 - 곡물유입방법 및 배기형태에 따른 3종류의 건조기에 대한 성능평가 - 벼의 건조 및 품질특성을 구명 	●	<ul style="list-style-type: none"> ○ 전문 학술대회 논문 발표 1편 ○ 전문 학술지 논문투고 1편
<ul style="list-style-type: none"> ○ 병류형 순환식 곡물건조기의 최적설계 - 시뮬레이션 기법을 이용하여 설계인자구명 - 건조공기의 온도, 송풍량, 유하속도 및 건조실의 높이에 따른 건조특성 구명 - 벼의 동할율, 제수율, 건조속도 및 소요에너지 구명 	●	<ul style="list-style-type: none"> ○ 산업화를 위한 설계 기술 확보 ○ 공학박사 학위논문 1편 제출(예정)
<ul style="list-style-type: none"> ○ 병류형 순환식 곡물건조기 최적화 및 제어 방안 - 최적화 기법을 이용하여 적절한 건감율, 동할율, 소요에너지 결정 - 병류형 순환식 곡물건조기 제어방안 결정 	●	<ul style="list-style-type: none"> ○ 산업화를 위한 설계 기술 확보 ○ 전문 학술지 논문투고1편(예정)
<ul style="list-style-type: none"> ○ 병류형 순환식 곡물건조기 상세설계 - 용량 800kg의 병류형 순환식 곡물건조기 시작기 설계 - 용량 12,000kg의 병류형 순환식 곡물건조기 본기 설계 	●	<ul style="list-style-type: none"> ○ 산업화를 위한 설계 기술 확보 ○ 산업화를 위한 제작 기술 확보

주요연구결과	달성도	평가방법
<ul style="list-style-type: none"> ○ 병류형 순환식 곡물건조기제작 및 성능평가 - 용량 800kg의 병류형 순환식 곡물건조기 시작기 제작 - 용량 12,000kg의 병류형 순환식 곡물건조기 본기 제작 - 시작기 기본성능, 성능계수, 제어능력등 건조실험을 통해 성능평가 및 보완 - 본기 기본성능, 건조실험을 통해 성능평가 - 현행 횡류형 건조기와 병류형 순환식 곡물건조기의 소요에너지, 건조처리능력, 비용분석을 비교분석 	●	<ul style="list-style-type: none"> ○ 효율적인 건조운영 방법 확립 ○ 현장실험 등 운영체계 정립

주) ● : 달성도 100%

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

현재 국내의 곡물건조기는 2001년 현재 58,213대가 보급되었으며, 2010년에는 70,000대가 국내에 보급될 것으로 예측된다. 그러나 건조작업의 기계화율이 2004년 현재 53.2%(일본 2002년 91.8%)에 불과하고, 정부의 고품질쌀 생산정책과 물벼 수매의 지속적인 증가로 인하여 예측 보급대수에 비해 20% 이상 증가할 것으로 예상된다.

- 정부의 건조저장시설 지원(농림부, 2006) : 2005년까지 689개소 → 2010년까지 619개소 추가설치계획

RPC 93개소를 대상으로 선호하는 건조 방식에 대한 설문조사에서 열풍곡물건조기를 73.7% 선호하였으며(김명환, 고학균 등 농림부 보고서, 2001년), 대형 순환식 건조기의 보급이 계속적으로 증가하는 추세이므로, 연간 2,500 ~ 3,000대가 보급될 것으로 기대된다.

해외에는 벼, 보리, 밀 및 옥수수의 아시아 생산량은 세계생산량 대비 각각 91%, 13%, 43% 및 25%에 이르고 있다. 인도의 벼 건조방법은 대부분 적정 수분이 될 때까지 수확하지 않거나, 고수분 상태로 수확된 경우 들이나 도로에서 천일건조되고 있다(김동철, 김의웅 등 한국식품개발연구원 보고서, 2000년). 아시아 주요국가들의 곡물 건조방법은 인도와 비슷한 열악한 상황이다.

최근 주요 아시아 국가들의 수확 후 관리기술 연구자 및 정부 담당자의 우리나라 방문이 증가하고 있는 등 수확 후 관리기술의 현대화에 지대한 관심을 가지고 있으며, RPC에 대하여 국책사업으로 추진되고 있는 상황이다. 따라서, 향후 연간 1,000대 이상의 수출이 가능할 것으로 기대된다. 또한, 해외에 현지법인을 설립할 경우 연간 2,000 ~ 3,000대가 보급될 것으로 기대된다.

이를 위해 2006년 현장 시험사업을 통해 2007년에는 상업화가 가능할 것으

로 판단하고 있으며, 향후 특허 등 산업화를 위한 체계를 점검할 예정이다.

본 연구는 3년간 진행되었으며 비의 건조는 수확기(약 20일)에 실험 등이 제한되는 환경에도 불구하고, 전문학술지 논문게재 예정 1편 , 학술대회 논문 발표 1편, 공학박사 학위 예정 1편 등의 연구활용을 통해 학술적 가치도 인정 되었다. 또한 향후 전문학술지 논문게재 2편 정도를 준비 중에 있다.

제 6 장 연구개발과정에서의 수집한 해외과학기술정보

기술정보	기술정보명	출처
○ 병류형 곡물건조기와 횡류형 건조기의 성능비교	Comparative evaluation of cross-flow and concurrent flow grain dryers.	ASAE paper 72-849 (1972)
○ 연속 다단 병류형 곡물건조기 최적조건 구명	Design of multi stage grain dryers using computer optimization	ASAE Paper no.77-3529(1977)
○ 상업용 다단 병류형 곡물 건조기의 시뮬레이션 개발	Simulation for design of commercial concurrentflow grain dryers	Transactions of the ASAE 978:981(1978)
○ 병류형 건조기의 소요에너지 분석	Energy efficiency in concurrent flow rice drying	Transactions of the ASAE 1352:1356 (1981)
○ 옥수수립을 구로 가정 병류 건조 과정을 시뮬레이션 분석	Experimental study and simulation of concurrent flow dryers	Transactions of the ASAE 16: 890-894 (1973)
○ 횡류형과 병류형 건조의 특성을 성능그래프를 이용하여 비교	Compersion of concurrent flow, cross flow and counter flow grain drying methods	Market Res, Ret. 841. USDA, Washington D.C.(1969)
○ 병류 건조의 원리 제시	Method and arrangement for drying grain and the like in drying silo provided with direct heat supply	US patent No : 2, 706, 343 (1955)

기술정보	기술정보명	출처
○ 소형 1단 병류형 건조기로 품질 특성 구명	Operating characteristics of two kinds of portable grain dryers	Proc. 13th Rice Tech. Work Group, U.S.Dept. Agric., Beaumont, Tx. Feb. 24-26 (1970)
○ 병류형 건조기의 에너지비용을 제한요소로 하는 최적화 프로그램 개발	Optimization techniques for grain dryer design and analysis	Ph. D. thesis, Mich. State Univ., E. Lansing, MI(1972)
○ 병류형 건조기와 횡류형 건조기의 건조조건 비교	Concurrent flow rice drying	ph.D. Thesis Mich. State Univ., E.Lansing, MI(1977)
○ 실험용 1단 병류형 건조기 실험	Farbmetrische schnellmethode zum Erkennen einer proteinschadignung bei der Trocknung von Maiskornern mit hohen Temperaturen	Grundl Landtechnik 26, Nr. 4.S. 128-134 (1976)
○ 역방향의 냉각 장치를 갖춘 상업용 1단 병류형 건조기 설계	Commercial countercurrent-flow heating counterflow cooling dryer - Anderson medel	ASAE paper No. 72-846 (1972)

제 7 장 참고문헌

1. 고헌균, 금동혁, 김동철, 김만수, 김명환, 김용현, 박경규, 박호석, 이종호, 장동일, 정정훈, 조영길, 한충수. 1995. 미곡종합처리시설 -이론과 실제 -.문운당
2. 고헌균, 금동혁, 김동철, 박호석, 한충수. 2001. 농협미곡종합처리장 설계 기준. 농협중앙회 미곡종합처리장 자문단.
3. 금동혁, 김동철, 박호석, 한충수 등. 1994. 미곡종합처리장 이론과 실무. 농협전문대학
4. 금동혁, 1978. 태양열을 이용한 곡물건조에 관한 연구. 한국농업기계학회지 3(1)
5. 금동혁, 1984. 곡물건조기의 배기열 재이용 및 열효율 개선에 관한 연구. 9(12)
6. 금동혁, 1986. 시뮬레이션에 의한 순환식 곡물건조기의 성능분석. 성균관대학교 논문집 37(1)
7. 금동혁, 1987. 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 순환식 곡물건조기의 적정 건조방법. 농사 논문집(농산학 협동편) : 373-390
8. 금동혁, 1988. 벼의 순환병류건조기의 시뮬레이션. 한국농업기계학회지, Vol.13, No.3, 59
9. Anderson, R.J. 1972. Commercial countercurrent-flow heating counterflow cooling dryer - Anderson medel. ASAE paper No. 72-846
10. ASAE year book, 1983.
11. Baker-Arkema, F.W. Brook, R.C. Walker, L.P. Kalchik, S.J., and Adna dnia, A.1977
Concurrent flow grain drying grain quality aspects.
Com Quality Res. Conf. Proc., Univ. oof ILL., Urbana, IL.

12. Baker–Arkema, F. W., Brooker, D.B., and Hall, C.W. 1972.
Comparative evaluation of cross–flow and concurrent flow grain dryers. ASAE paper 72–849.
13. Brook. R. C., F. W. Bakker–Arkema, 1977. Design of multi stage grain dryers using computer optimization. ASAE Paper no.77–3529
14. Brook. R. C., F. W. Bakker–Arkema, Concurrent flow drying of food grains. Agricultural engineering department Michigan State University.
15. Bakker–Arkema. F. W., 1982, Concurrent–flow rice drying, ASAE Paper no. 82–3068
16. Brook. D. B., 1961, Pressure patterns in grain–drying systems established by numerical methods, Transactions of the ASAE 72:74
17. Brook, R.C., Bakker–Arkema, F.W. 1978. Simulation for design of commercial concurrent flow grain dryers. Trans. ASAE 21 : 978–981
18. Brook, R.C. 1977. Design of multi–stage grain dryers. Ph.D. Thesis, Mich. State Univ., E. Lansing. MI.
19. Baughman, G.R., Barre, H.J., and Hamdy, M.V. 1973.
Experimental study and simulation of concurrent flow dryers.
Trans. ASAE 16: 890–894
20. Calderwood, D.L. 1970. Operating characteristics of two kinds of portable grain dryers. Proc. 13th Rice Tech. Work Group, U.S.Dept. Agric., Beaumont, Tx. Feb. 24–26
21. Farmer, D.M. 1972 Optimization techniques for grain dryer design and analysis, Ph. D. thesis, Mich. State Univ., E. Lansing, MI.
22. Ingram, G.W. 1976. Deep bed dryer simulation with intra–particle moisture diffusion. J.Agric. Engr.Res. 21 : 262–272
23. Keum, D.M. and R.P. Singh. 1986, Continuous flow rice drying

using simulation KSAM 11 (2)

24. Koro Kato., 1985. An equilibrium moisture content equation for grain in 0% to saturated conditions and experimental results of rice. Research report on Agricultural machinery. No.15
25. Marchant. J. A., 1976, Prediction of fan pressure requirements in the drying of large hay bales, Japan agricultural engineering research, vol(21) 333:346
26. Öholm, G.V. 1955. Method and arrangement for drying grain and the like in drying silo provided with direct heat supply.
US patent No : 2, 706, 343
27. Rumsey, T.R. and R.P. Sin᳚. 1978. Pressure drop through a bed of food grains. ASAE paper No. 78-6546.
28. Schmidt, J.L. and E.H. Jebe. 1959. The effect of head rice and the germination of Rice Trans, ASAE 2: 26-29, 31.
29. Sitipe, D.R., E.T. Wratten, and M.F. Miller. 1973.
Rice drying and processing. Qnnual report of Louisiana Rice Experiment Station.
30. Steffe, J.F. and R.P. Singh. 1980 a. Liquid diffusivity rough rice components. Trans. ASAE 23(3) : 767-774, 782.
31. Steffe, J.F. and R.P. Singh. and A. S. Bakshi. 1979. Influence of tempering time and cooling on rice milling yields and moisture removal. Trans. ASAE 22(5) : 1214-1218, 1224.
32. Thompson, T.L., Foster, G.H., and Pert, R.M. 1969.. Compersion of concurrent flow, cross flow and counter flow grain drying methods. Market Res, Ret. 841. USDA, Washington D.C.
33. Walker, L.P. 1977. Concurrent flow rice drying. ph.D. Thesis Mich. State Univ., E.Lansing, MI.
34. Walker. L. P., F. W. Bakker-Arkema. 1981. Energy efficiency in concurrent flow rice drying. Transactions of the ASAE 1352:1356

35. Wang, C.Y. 1978. Simulation of thin-layer and deep bed drying of rough rice. ph. D. Thesis U.C.D.
36. Wratten, F.T., W.D. Poole, J.L. Cheseness, S. Bal, and V. Banarao. 1969. Physical and thermal properties of rough rice. ASAE paper No. 68-909
37. Zahed, A. H. 1982. Simulation of drying and air channeling in concurrent flow rice dryer. ph. D. Thesis. U.C.D.
38. Zuritz, C. A. 1978. Equilibrium moisture content of rough rice from 10°C to 40°C. M. S. Thesis. U.C.D.
39. Zuritz, C. A. 1979. Unpublished. equilibrium moisture content for rough rice at 60°C Dept of Agric. Eng., U.C.D.
40. Mülbauer, W., W Huss and H. Kuppinger. 1976. Farbmetrische schnellmethode zum Erkennen einer proteinschadigung bei der Trocknung von Maiskornern mit hohen Temperaturen. Grun Landtechnik 26, Nr. 4.S. 128-134

부 록

A. 병류형 순환식 곡물건조기 시뮬레이션 프로그램

```
C THIS PROGRAM IS TO SIMULATE CONCURRENT FLOW RICE DRYING.L
C CONCURRENT FLOW RICE DRYER IS CONSIST OF DRYING SECTION,TEMPERING
C SECTION.
PROGRAM CON1D
COMMON/BLOCK1/CON1,CON2,CON3,CON4,CON5,CON6
COMMON/BLOCK2/GA,GFR,DELR,HFG,AME,NNEQ
COMMON/ESOCOM/NEQ,XI,YI(15),X,Y(15),TR,H,KSTP,DY(15)
EXTERNAL F
DIMENSION DIS(11),DMW(15)
CHARACTER*30 FNAME,TESTNO,GRAIN
DATA RHC/.99999999/
DATA NBP/2/
DATA DBTPRX,TBPRT/0.05,0.05/
DATA CA,CV,NOCIR/1.0069,1.87568,0/
FC(T)=T+273.16
FMD(XMW)=XMW/(1.-XMW)
FMW(XMD)=XMD/(1.+XMD)
C
WRITE(*,*) ' ENTER OUTPUT FILE NAME'
READ(*,'(A)') FNAME
OPEN(6,FILE=FNAME,STATUS='NEW')
C
C INPUT CONDITIONS OF DRYER
C
WRITE (*,*) ' ENTER TEST NUMBER (LESS THAN 30 CHARACTERS)'
READ (*,*) TESTNO
WRITE (*,*) 'ENTER KIND OF ROUGH RICE,SHORT OR MEDIUM(30CHAR)'
READ (*,*) GRAIN
WRITE (*,*) 'ENTER NUMBER FOR SELECTING GRAIN TYPE'
WRITE(*,*) ' 1 FOR SHORT, 2 FOR MEDIUM RICE'
READ (*,*) NKIND
WRITE (*,*) ' ENTER INITIAL MC (DECIMAL,WB)'
READ (*,*) XMO
WRITE (*,*) ' ENTER INITIAL GRAIN TEMP.(C)'
READ (*,*) THIN
WRITE (*,*) ' ENTER DESIRED FINAL MC (DECIMAL,WB)'
READ (*,*) XMEND
WRITE (*,*) ' ENTER BULK DENSITY OF DRY RICE(KG/M3)'
READ (*,*) DDENS
C
WRITE (*,*) ' ENTER AMBIENT AIR TEMP (C)'
READ (*,*) TAMB
WRITE (*,*) ' ENTER AMBIENT RELATIVE HUMIDITY (DECIMAL)'
READ (*,*) RHAMB
C
```

```

WRITE (*,*) ' ENTER DRYING AIR TEMP FOR EACH PASS,TIN1,...,TIN4'
READ (*,*) TIN1,TIN2,TIN3,TIN4
WRITE (*,*) 'ENTER AIRFLOW RATE (M**3/MIN.M**2)'
READ (*,*) CMM
WRITE (*,*) ' ENTER GRAINFLOW RATE (M/HR)'
READ (*,*) GFR
C
WRITE (*,*) ' ENTER HEIGHT OF DRYING CHAMBER (M)'
READ (*,*) XLENG
C
WRITE (*,*) ' ENTER NUMBER FOR SELECTING LENGTH OF TEMPERING
*SECTION OR INDEX ,1=LENGTH ,2=INDEX'
READ (*,*) NTP
IF(NTP.EQ.2) GO TO 1
WRITE (*,*) ' ENTER LENGTH OF TEMPERING SECTION'
READ (*,*) TLENG
GO TO 2
1 WRITE (*,*) ' ENTER REQUIRED TEMPERING INDEX'
READ (*,*) RTIDEX
C
2 WRITE (*,*) ' ENTER INITIAL HEAD RICE YIELD(%)'
READ (*,*) HYR
H=0.002
C
C PHYSICAL AND THERMAL PROPERTIES FOR MEDIUM GRAIN
IF(NKIND.EQ.1) GO TO 80
IF(NKIND.EQ.2) GO TO 81
80 SA=1844.
CP=1.2692
CW=3.49
RAH=0.177E-02
GO TO 15
81 SA=1040.
CP=0.9213
CW=5.45
RAH=0.166E-02
C
C CONVERT MCWB TO MCDB
15 XMM=XMO
XMO=FMD(XMO)
XMEND=FMD(XMEND)
DELR=RAH/10.
C
C COMPUTE ABSOLUTE HUMIDITY OF AMBIENT AIR
HIN=HADBRH(FC(TAMB),RHAMB)
C COMPUTE RESIDENT AND TEMPERING TIME PER PASS
RESTIM=XLENG/GFR*60.
IF(NTP.EQ.1) TPTIME=TLENG/GFR*60.
C INITIALIZE SOME VALUES
C
TWATER=0.
PTIME=0.0
TENG=0.

```

```

C INITIALIZE INITIAL MOISTURE WITHIN A KERNEL
DO 10 I=1,12
10 Y(I)=XMO
C
DO 6 I=1,11
6 DIS(I)=(I-1.)*DELR
C
C COMPUTE GRAIN FLOW RATE (KG,DRY GRAIN/HR,M**2)
GP=GFR*DDENS
DELT=H/GFR
C
C PRINT HEADER PAGE OF CONDITIONS AND PROPERTIES
WRITE (*,300)
WRITE (6,300)
300 FORMAT ('** CONCURRENT FLOW RICE DRYING-SHORT GRAIN **//)
WRITE (6,301)
301 FORMAT ('* INPUT CONDITIONS */)
WRITE (6,320) GRAIN
320 FORMAT (6X,'KIND OF GRAIN : ',A)
WRITE (6,88) TESTNO
88 FORMAT (6X,'TEST NUMBER : ',A)
WRITE (6,302)
302 FORMAT (/6X,'AIR CONDITIONS ')
WRITE (6,303) TAMB,RHAMB
303 FORMAT (
*10X,'AMBIENT AIR TEMP(C)=' ,F7.1,3X,'AMBIENT AIR RH(DEC) =' ,F7.4/
WRITE (6,304)
304 FORMAT (6X,'GRAIN CONDITIONS')
WRITE (6,305) XMM,THIN,HYR
305 FORMAT (
*10X,'INITIAL MC(DEC,WB) =' ,F7.4,3X,'INITIAL GRAIN TEMP(C)=' ,F7.1/
*10X,'INITIAL HEAD RICE YIELD =' ,F7.2/
WRITE (6,306)
306 FORMAT (6X,'DRYER SPECIFICATIONS')
WRITE (6,307) XLENG,CMM,GFR,RESTIM
307 FORMAT (
*10X,'HEIGHT OF DRYER (M)=' ,F7.2/
*10X,'AIR VEL (CMM/M2)=' ,F7.2/
*10X,'GRAIN VEL(M/HR) =' ,F7.2/
*10X,'RESIDENT TIME(MIN) =' ,F7.2/
WRITE (6,308)
308 FORMAT (/6X,'AIR AND GRAIN PROPERTIES')
WRITE (6,309) CA,CV,CW,CP,DDENS,SA
WRITE (6,319) RAH
309 FORMAT (
*10X,'SP AIR(KJ/KG,K) =' ,F7.4,3X,'SP H2O VAR(KJ/KG ,K) =' ,F7.4/
*10X,'SP H2O LIQUID =' ,F7.4/
*10X,'SP DRYRICE(KJ/KG,K)=' ,F7.4/
*10X,'DRY BUL DENS(KG/M3)=' ,F7.3,3X,'SURF AREA(M2/M3) =' ,F7.2/
*)
319 FORMAT (
*10X,'ROUGH RICE RADIUS(M)=' ,E11.3)
IF(NTP.EQ.2) GO TO 350

```

```

WRITE (6,353) TLENG,TPTIME
GO TO 351
350 WRITE (6,352) RTIDEX
353 FORMAT(/,10X,'LENGTH OF TEMPERING SECTION (m) =',F7.3/
*      10X,'TEMPERING TIME(MIN)          =',F7.2)
352 FORMAT(/,10X,'TEMPERING INDEX(DEC)    =',F7.3)
C COMPUTE CONSTANTS USED BY DERIVATIVES EQUATIONS
351 CON4=GP*CP
CON5=GP*CW
Y(14)=THIN
GTMAX=Y(14)
C
C BEGIN CIRCULATION LOOP
43 NOCIR=NOCIR+1
NEQ=10
NNEQ=NEQ
WRITE (*,100) NOCIR
WRITE (6,100) NOCIR
100 FORMAT (///6X,'RESULT OF ',I2,'--DRYING PASS')
GO TO (91,92,93,94),NOCIR
IF(NOCIR.GT.4) GO TO 94
91 TIN=TIN1
GO TO 95
92 TIN=TIN2
GO TO 95
93 TIN=TIN3
GO TO 95
94 TIN=TIN4
95 GA=60.*CMM/VSDBHA(FC(TIN),HIN)
HC=0.00718*GA**1.2997
AFGF=GA/GP
CON1=GA*CA
CON2=GA*CV
CON3=HC*SA
CON4=1./AFGF
CON5=GA*(CA+CV*HIN)*(TIN-TAMB)
WRITE (6,230) TIN,AFGF,HC
230 FORMAT (10X,'DRY AIR TEMP(C)          = ',F7.1/
*      10X,'AIR TO GRAIN FLOW RATE      = ',F7.4/
*      10X,'HEAT TRANS COEFF(KJ/m2HRk)= ',F7.2)
WRITE (*,220)
WRITE (6,220)
220 FORMAT (10X,'DEPTH',6X,'TIME',3X,'AIR TEMP',3X,'ABS HUM',3X,
1'REL HUM',2X,'PROD TEMP',3X,'MC WB',5X,'WATER'/)
PRL=0.0
IEXIT=0
IPRINT=0
Y(13)=TIN
Y(15)=HIN
DO 11 I=1,15
11 YI(I)=Y(I)
XI=0.
KSTP=0

```

```

KODE=1
C
C SOLVE CONCURRENT FLOW DRYING MODEL
4 CALL ESODEQ(KODE,G)
KODE=3
TTR=Y(14)
CALL HEAD(TTR,DELT,DELHYR)
HYR=HYR*(1.-DELHYR)
IF(GTMAX.LT.Y(14)) GO TO 101
GO TO 102
101 GTMAX=Y(14)
XMAX=X
XMTIME=XMAX/GFR*3600.
C
C COMPUTE RH AND CHECK FOR CONDENSATION
102 TABS=FC(Y(13))
RH=RHDBHA(TABS,Y(15))
IF(RH-RHC) 9,8,8
C
C CONDENSATION SIMULATOR
8 PS=PVHA(Y(15))
HS=Y(15)
C T=WETBULB TEMP ,H= HUMIDITY RATIO
DP=DBPS(PS)
TWBA=WDBBDP(TABS,DP)
Y(13)=TWBA-273.15
Y(15)=HADBRH(TWBA,RHC)
RH=RHC
Y(12)=Y(12)+(HS-Y(15))*GA/GP
9 CONTINUE
C CHECK IF LONG ENOUGH OR DRY ENOUGH OR TIME TO SAVE FOR PRINTING
C IF NONE OF THESE, GO TO BEGINNING OF LENGTH LOOP
IF(Y(12).LE.XMEND) IEXIT=1
IF(X-XLENG) 7,14,14
14 IPRINT=1
GO TO 13
7 IF(X.LT.PRL) GO TO 4
13 PRL=PRL+DBTPRX
C
C MAKE FINAL CALCULATIONS AND PRINT
WMC=FMW(Y(12))
ETIME=X/GFR
WATER=(XMO-Y(12))*DDENS*X
XTIME=ETIME+(TPTIME+RESTIM)*(NOCIR-1.)/60.
C
WRITE (*,218) X,XTIME,Y(13),Y(15),RH,Y(14),WMC,WATER
WRITE (6,218) X,XTIME,Y(13),Y(15),RH,Y(14),WMC,WATER
IF(IPRINT-1) 4,5,4
5 ENERGY=CON7*ETIME
RATE=(FMW(XMO)-WMC)/ETIME*100.
XKJH2O=ENERGY/WATER
DELPS=10357.8*(CMM/60.)**1.3877*XLENG
FANPO=DELPS*(CMM/60.)/0.35/1000.

```



```

ENFAN=FANPO*3600./WATER*ETIME
TOTEN=XKJH2O+ENFAN
TETIME=TETIME+ETIME
TENG=TENG+ENERGY
WRITE (*,219) NOCIR,WMC,RATE,GTMAX,XMAX,XMTIME,Y(14),XKJH2O,ENFAN,
*TOTEN,WATER,HYR
WRITE (6,219) NOCIR,WMC,RATE,GTMAX,XMAX,XMTIME,Y(14),XKJH2O,ENFAN,
*TOTEN,water,hyr
C
218 FORMAT (5X,F10.2,F10.3,F10.2,2F10.4,F10.2,F10.4,F10.2)
219 FORMAT (///
*5X,'NUMBER OF PASS                = ',I8/
*5X,'FINAL MC(% ,W.B)              = ',F8.4/
*5X,'DRYING RATE(% ,W.B/HR RES TIME) = ',F8.2/
*5X,'MAX. GRAIN TEMP.(C)           = ',F8.2/
*5X,'POSITION OF MAX.GRAIN TEMP(M) = ',F8.4/
*5X,'TIME FOR MAX GRAIN TEMP(S)    = ',F8.1/
*5X,'GRAIN TEMP. AT OUTLET (C)     = ',F8.2/
*5X,'FUEL ENERGY(KJ/KG H2O)       = ',F8.2/
*5X,'FAN ENERGY(KJ/KG H2O)       = ',F8.2/
*5X,'TOTAL ENERGY(KJ/KG H2O)     = ',F8.2/
*5X,'TOTAL WATER REMOVED(KG)       = ',F8.2/
*5X,'HEAD YIELD RATIO (DEC)       = ',F8.4)
C
C
C MOISTURE EVAPORATION BY COOLING DURING CIRCULATION
IF(Y(12).GE.0.282) TT=0.5*(Y(14)+TAMB)-8.
IF(Y(12).LT.0.282.AND.Y(12).GE.0.20) TT=0.5*(Y(14)+TAMB)-4.
IF(Y(12).LT.0.20.AND.Y(12).GE.0.176) TT=0.5*(Y(14)+TAMB)+3.
IF(Y(12).LT.0.176) TT=0.5*(Y(14)+TAMB)+7.
IF(TT.LT.TAMB) TT=TAMB
IF(TT.GT.Y(14)) TT=Y(14)
XA=Y(12)*(HFG-Y(14)*(CP+CW))+CP*(TT-Y(14))
XB=HFG-TT*(CP+CW)
XMDC=XA/XB
RATIO=XMDC/Y(12)
Y(12)=XMDC
DO 391 I=1,11
391 Y(I)=RATIO*Y(I)
C TEMPERING PROCESS
390 Y(14)=TT
WRITE (*,800) NOCIR,TT
WRITE (6,800) NOCIR,TT
WRITE (*,804)
WRITE (*,805) (DIS(I),I=1,11,NBP)
WRITE (6,804)
WRITE (6,805) (DIS(I),I=1,11,NBP)
399 TIME=0.
XI=0.
KSTP=0
KODE=1
DO 381 I=1,11
381 Y(I)=Y(I)

```

```

X=0.0
TPR=0.
NEQ=11
NNEQ=11
TINDEX=0.
EMCX=Y(11)
DO 433 I=1,11,NBP
433 DMW(I)=FMW(Y(I))
WRITE (6,810) XI,TIME,TINDEX,(DMW(I),I=1,11,NBP)
WRITE (*,810) XI,TIME,TINDEX,(DMW(I),I=1,11,NBP)
400 TIME=TIME+DELT
IF(NTP.EQ.1.AND.X.GT.TLENG) GO TO 450
IF(NTP.EQ.2.AND.TINDEX.GE.RTIDEX) GO TO 450
CALL ESODEQ(KODE,F)
KODE=3
TINDEX=(Y(11)-EMCX)/(Y(12)-EMCX)
IF(NTP.EQ.1) TPR=TPR+DELT*GFR
IF(NTP.EQ.2) TPR=TPR+DELT
IF(NTP.EQ.1.AND.TPR.LT.DBTPRX) GO TO 400
IF(NTP.EQ.2.AND.TPR.LT.TBPRT) GO TO 400
TPR=0.
DO 411 I=1,11,NBP
DMW(I)=FMW(Y(I))
411 CONTINUE
WRITE (6,810) X,TIME,TINDEX,(DMW(I),I=1,11,NBP)
WRITE (*,810) X,TIME,TINDEX,(DMW(I),I=1,11,NBP)
GO TO 400
450 XMO=Y(12)
PTIME=PTIME+TIME
IF(IEXIT.EQ.1) GO TO 460
GO TO 43
C
800 FORMAT (///,3X,'* MOISTURE DISTRIBUTION DURING',I2,1X,'TEMPERING
$ **//10X,'TEMPERING TEMPERATURE (C)=' ,F7.2)
804 FORMAT (//,22X,'DISTANCE FROM CENTERS(M)')
805 FORMAT (10X,'DEPTH',3X,'TIME',1X,'TINDEX',6E10.3)
810 FORMAT (8X,3F7.4,6F10.3)
460 WMC=FMW(Y(12))
TWATER=(FMD(XMM)-Y(12))*DDENS*XLENG
XKJH2O=TENG/TWATER
ENFAN=FANPO*3600.*TETIME/TWATER
TTOTEN=XKJH2O+ENFAN
RATET=(XMM-WMC)/TETIME*100.
DRATE=(XMM-WMC)/(TETIME+PTIME)*100.
WRITE (*,899) NOCIR,TETIME,PTIME,WMC,DRATE,RATET,XKJH2O,ENFAN
WRITE (6,899) NOCIR,TETIME,PTIME,WMC,DRATE,RATET,XKJH2O,ENFAN
WRITE (*,890) TTOTEN,FANPO,DELPS,TWATER
WRITE (6,890) TTOTEN,FANPO,DELPS,TWATER
899 FORMAT (///
*5X,'NUMBER OF PASS = ',I8/
*5X,'TOTAL RESIDENT TIME(HR) = ',F8.2/
*5X,'TOTAL TEMPERING TIME(HR) = ',F8.2/
*5X,'FINAL MOISTURE CONTENT(DEC.WB.)= ',F8.4/

```

```

*5X,'DRYING RATE(%WB./HR,DRY TIME) = ',F8.2/
*5X,'DRYING RATE(%WB./HR,RES TIME) = ',F8.2/
*5X,'FUEL ENERGY(KJ/KG H2O) = ',F8.2/
*5X,'FAN ENERGY(KJ/KG H2O) = ',F8.2)
890 FORMAT (
*5X,'TOT ENERGY(KJ/KG H2O) = ',F8.2/
*5X,'FAN POWER(KW) = ',F8.2/
*5X,'STATIC PRESS.(PA) = ',F8.2/
*5X,'TOT WATER REMOVED(KG) = ',F8.2)
STOP
END
C*****
C
SUBROUTINE HEAD(TR,DELT,DELHYR)
TA=TR+273.16
XK=1.9103E+21*EXP(-1.7748E+04/TA)
DELHYR=60.*XK*DELT
RETURN
END
C*****
C
FUNCTION EMC(RH,T)
C EMC EQUATION FOR MEDIUM ROUGH RICE DEVELOPED BY CARLOS ZURITZ
IF(RH.GE..99) RH=.99
TA=T+273.16
IF(T.GT.42.5) GO TO 10
A=1.-TA/647.1
B=-23.438
C=2.667E-07
D=4.E+05
E=-2.1166
FA=1./(D*TA**E)
EMC=0.01*(-TA*ALOG(1.-RH)/(A**B*C)**FA)
IF(EMC.LT.0.0) EMC=0.0
RETURN
10 EMC=(ALOG(-ALOG(RH))-ALOG(2.387E+09*TA**(-3.444)))/
*(-2.118E-02*TA**1.1852)
IF(EMC.LT.0.0) EMC=0.0
RETURN
END
C
C*****
SUBROUTINE DERFUN (Y,FM)
COMMON/BLOCK1/CON1,CON2,CON3,CON4,CON5,CON6
COMMON/BLOCK2/GA,GFR,DELR,HFG,AME,NNEQ
REAL Y(15),FM(15),FT(15)
CV=1.87568
TT=Y(14)
TTAB=TT+273.16
T1=Y(13)
T1AB=T1+273.16
DS=2.57E-03*EXP(-2.88E+03/TTAB)*0.71
DB=7.97E-01*EXP(-5.11E+03/TTAB)*0.11

```

```

DH=4.84E+02*EXP(-7.38E+03/TTAB)*0.18
DC=DS+DB+DH
HFG=(1547.84-1.46*TT)*Y(12)**(-0.346)
RHT=RHDBHA(T1AB,Y(15))
AME=EMC(RHT,T1)
S=DC/(GFR*DELR**2)
FM(1)=6.0*S*(Y(2)-Y(1))
DO 10 I=2,10
XX=I
10 FM(I)=S*((1.+1./(XX-1.))*Y(I+1)-2.*Y(I)+(1.-1./(XX-1.))*
*Y(I-1))
IF(NNEQ,EQ,11) GO TO 15
FM(11)=S*(1.1*AME-2.*Y(11)+0.9*Y(10))
GO TO 18
15 FM(11)=2.*S*(Y(10)-Y(11))
GO TO 50
18 DO 20 I=1,11
XX=I
20 FT(I)=(XX-1.)**2*DELR**2*FM(I)
RESULT=FT(1)+4.*FT(10)+FT(11)
DO 30 I=2,8,2
30 RESULT=RESULT+4.*FT(I)+2.*FT(I+1)
FM(12)=RESULT/(1000.*DELR**2)
TMTH=Y(13)-Y(14)
FM(13)=-CON3*TMTH/(CON1+CON2*Y(15))
FX=CON3*TMTH+(HFG+CV*TMTH)*GA*CON6*FM(12)
FY=CON4+CON5*Y(12)/(1.+Y(12))
FM(14)=FX/FY
FM(15)=-CON6*FM(12)
50 RETURN
END
C
C*****
FUNCTION F(I,X,Y)
REAL Y(15),FM(15)
CALL DERFUN(Y,FM)
GO TO (1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15),I
1 XX=FM(1)
GO TO 16
2 XX=FM(2)
GO TO 16
3 XX=FM(3)
GO TO 16
4 XX=FM(4)
GO TO 16
5 XX=FM(5)
GO TO 16
6 XX=FM(6)
GO TO 16
7 XX=FM(7)
GO TO 16
8 XX=FM(8)
GO TO 16

```

```
9 XX=FM(9)
GO TO 16
10 XX=FM(10)
GO TO 16
11 XX=FM(11)
GO TO 16
12 XX=FM(12)
GO TO 16
13 XX=FM(13)
GO TO 16
14 XX=FM(14)
GO TO 16
15 XX=FM(15)
16 F=XX
RETURN
END
```

B. 병류형 순환식 곡물건조기 최적화 프로그램

```

C *****
C Maximize of fuel efficiency/ kW unlimited/
C program : optmdu
C DATA N, K, IC /3, 6, 1/
C
C CALL BOX(N,K,IC)
C STOP
C END
C ~~~~~
C Subroutine for minimization by Box complex algorith
C ~~~~~
SUBROUTINE BOX(N,K,IC)
DIMENSION X(3,6), XEL(3), XEU(3), R(3,6), G(1,6), FF(6)
DIMENSION XIL(1), XIU(1), XC(3), XR(3,6), FR(6), TEMP(3)
OPEN(UNIT=6, FILE='OPTmdu3.OUT', STATUS='NEW')
DATA ALPHA, DELTA, SD, ITER /1.3, 0.01, 1.E09, 0/
WRITE(*,*) 'Initial guess of one point in complex !'
X(1,1) = 110.
X(2,1) = 100.
X(3,1) = 90.
E1=1.1
E2=0.01
ITMAX=500
R(1,2) = 0.8465
R(1,3) = 0.7848
R(1,4) = 0.1944
R(1,5) = 0.4322
R(1,6) = 0.1209
R(2,2) = 0.8063
R(2,3) = 0.1701
R(2,4) = 0.3425
R(2,5) = 0.2072
R(2,6) = 0.6151
R(3,2) = 0.2490
R(3,3) = 0.7032
R(3,4) = 0.5066
R(3,5) = 0.2937
R(3,6) = 0.2783
C
C Printing formation
C
001 FORMAT(/,21X, 'MINIMIZATION BY COMPLEX METHOD OF
1 BOX')
002 FORMAT(/,6X,'No of control variables = ',I2,/,6X,'No of points in
1 complex = ',I3,/,6X,'No of implicit constraints = ',I2)
003 FORMAT(/,6X,'Reflection factor = ',F5.2,/,6X,'Convergence parameter
1 : ',/,9X,'Distance between any two points = ',F10.5,/,9X,'Standard
2 deviation of function values = ',F10.5)
004 FORMAT(/,6X,'Random numbers',/)
005 FORMAT(3(2X,'R(',I2,',',I2,') = ',F6.4))
006 FORMAT(/,6X,'Coordinates of initial complex',/)

```

```

007 FORMAT(3(2X,'X(',I2,',',I2,') = ',1PE12.5))
008 FORMAT(/,6X,'Values of objective function',/)
009 FORMAT(3(2X,'FF(',I2,') =',1PE12.5))
010 FORMAT(/,6X,'Numbers of iteration = ',I6,)
011 FORMAT(/,6X,'Values of control variables',/)
012 FORMAT(3(2X, 'X(',I2,') =',1PE12.5))
013 FORMAT(3X,'FFmin =',1PE12.5)
014 FORMAT(/,6X'The numbers of iterations has exceed. Iteration =
1'I6)
015 FORMAT(/,1X,'INITIAL VALUES')
016 FORMAT(/,1X,'FINAL OUTPUT')
017 FORMAT(/,6X,'Failure of processing. Restart, please !')
018 FORMAT(/,6X,'Maximum distance between any two points =',
1 1PE12.5)
019 FORMAT(/,6X,'Standard deviation of function values = ',1PE12.5)
020 FORMAT(1X,'X(',I1,') = ?')
026 FORMAT(/,1X, 'Minimum value = ',1PE12.5/)
C
C          Print of parameters
C
      WRITE(*,001)
      WRITE(6,001)
      WRITE(*,002) N, K, IC
      WRITE(6,002) N, K, IC
      WRITE(*,003) ALPHA, E1, E2
      WRITE(6,003) ALPHA, E1, E2
      WRITE(*,004)
      WRITE(6,004)
      DO 101 I=1, N
          WRITE(*,005) (I, J, R(I,J), J=2, K)
          WRITE(6,005) (I, J, R(I,J), J=2, K)
101      CONTINUE
      WRITE(*,015)
      WRITE(6,015)
C
C          Generation of points of X(2) to X(k) in initial complex
C
      DO 102 I=1, N
      DO 102 J=2, K
          CALL EXPL(N, XEL, XEU)
          X(I,J)=XEL(I)+R(I,J)*(XEU(I)-XEL(I))
          500      IF(X(I,J) .LT. XEL(I)) X(I,J)=X(I,J)+DELTA
                  write(*,8020) delta
          8020      format(2x,'check1=',f12.2)
          IF(X(I,J) .GT. XEU(I)) X(I,J)=X(I,J)-DELTA
                  IF(X(I,J) .LT. XEL(I)) GO TO 500
                  IF(X(I,J) .GT. XEU(I)) GO TO 500
      102      CONTINUE
C Feasibility test regarding points in complex and process of moving half
C way
      write(*,7000) ic
7000      format(2x,'check2=',i2)
          IF(IC .EQ. 0) GO TO 503

```

```

DO 103 I1=1, IC
DO 103 J=2, K
WRITE(*,1245) J
1245 FORMAT(2X,'J=',I2)
501 CALL IMPL(IC,N,K,X,XIL,XIU,G,J)
write(*,7001) ic
7001 format(2x,'check3=',i2)
IF(G(I1,J) .LT. XIL(I1)) GO TO 502
IF(G(I1,J) .LE. XIU(I1)) GO TO 103
502 DO 104 I=1, N
CALL CENT1(N, K, X, XC, I, J)
X(I,J)=(XC(I)+X(I,J))/2.0
write(*,7002) i,ic,xc(i), x(i,j)
7002 format(2x,'i=',i2,2x,'chk4=',i2,'xc(i)=',f10.5,'x(i,j)=',f10.4)
104 CONTINUE
write(*,*) 'now passed 1'
GO TO 501
103 CONTINUE
write(*,*) 'now passed'
C Evaluation of objective function at each point in complex
503 DO 105 J=1, K
CALL OBJECT(N,K,X,FF,J)
write(*,7003)
7003 format(2x, 'check5----')
105 CONTINUE
WRITE(*,006)
WRITE(6,006)
DO 106 I=1, N
WRITE(*,007) (I, J, X(I,J), J=1, K)
WRITE(6,007) (I, J, X(I,J), J=1, K)
106 CONTINUE
WRITE(*,008)
WRITE(6,008)
WRITE(*,009) (J, FF(J), J=1, K)
WRITE(6,009) (J, FF(J), J=1, K)
C Test for convergence : distance between any two vertices among points
C n complex
504 ITER=ITER+1
DMAX=0.0
DO 107 J=1, K-1
DO 107 JJ=J+1, K
D=0.0
DO 108 I=1, N
D=D+(X(I,J)-X(I,JJ))*2
write(*,7100)
7100 format(2x,'check6-----')
108 CONTINUE
write(*,7101)
7101 format(2x,'check7-----')
D=SQRT(D)
IF(DMAX .LE. D) DMAX=D
IF(D .GT. E1) GO TO 505
107 CONTINUE

```



```

C Test for convergence ; standard deviation of function values
DO 109 I=1, N
write(*,7104)
7104 format(2x,'check8-----')
      CALL CENT2(N, K, X, XC, I)
      TEMP(I)=X(I,1)
      X(I,1)=XC(I)
109 CONTINUE
      CALL OBJECT(N,K,X,FF,1)
      FC=FF(1)
      DO 110 I=1, N
          X(I,1)=TEMP(I)
110 CONTINUE
      SD=0.0
      DO 111 J=1, K
write(*,7109)
7109 format(2x,'check9-----')
      CALL OBJECT(N,K,X,FF,J)
      SD=SD+(FC-FF(J))*2
111 CONTINUE
      SD=SD/FLOAT(K)
      SD=SQRT(SD)
505 JMIN=1
      DO 112 J=2, K
          IF(FF(JMIN) .GT. FF(J)) JMIN=J
112 CONTINUE
      WRITE(*,010) ITER
      WRITE(*,018) DMAX
      WRITE(*,019) SD
      WRITE(*,011)
      WRITE(*,012) (I, X(I,JMIN), I=1, N)
      WRITE(*,008)
      WRITE(*,013) FF(JMIN)
      IF(SD .LE. E2) GO TO 996
      IF(G(IC,JMIN) .LE. 3.+0.005) GO TO 996
      IF(ITER .GE. ITMAX) GO TO 997

C
C Process of reflection regarding the largest function value
C
      JMAX=1
      DO 113 J=2, K
          IF(FF(JMAX) .LE. FF(J)) JMAX=J
113 CONTINUE
      JXR=JMAX
      DO 114 I=1, N
114      XR(I,JXR)=X(I,JMAX)
506 DO 115 I=1, N
write(*,7111)
7111 format(2x,'check10-----')
      CALL CENT3(N, K, X, XC, I, JXR)
      XR(I,JXR)=(1.0+ALPHA)*XC(I)-ALPHA*XR(I,JXR)
115 CONTINUE
C

```

```

C   Feasibility test regarding the reflected point
C
      DO 116 I=1, N
507   IF(XR(I,JXR) .LT. XEL(I)) XR(I,JXR)=XR(I,JXR)+DELTA
      IF(XR(I,JXR) .GT. XEU(I)) XR(I,JXR)=XR(I,JXR)-DELTA
      write(*,7201)
7201  format(2x,'check11----')
      IF(XR(I,JXR) .LT. XEL(I)) GO TO 507
      IF(XR(I,JXR) .GT. XEU(I)) GO TO 507
116   CONTINUE
      IF(IC .EQ. 0) GO TO 510
      DO 117 II=1, IC
508   CALL IMPL(IC,N,K,XR,XIL,XIU,G,JXR)
      write(*,7300)
7300  format(2x,'check12-----')
      IF(G(II,JXR) .LT. XIL(II)) GO TO 509
      IF(G(II,JXR) .LE. XIU(II)) GO TO 117
509   DO 118 I=1, N
      CALL CENT3(N, K, X, XC, I, JXR)
      XR(I, JXR)=(XC(I)+XR(I,JXR))/2.0
118   CONTINUE
      GO TO 508
117   CONTINUE
C
C Comparison of the function value of the reflected point and the
C maximum function value and half way movement
C
510  CALL OBJECT(N,K,X,FF,JMAX)
      CALL OBJECT(N,K,XR,FR,JXR)
      write(*,7910)
7910  format(2x,'check20-----')
      IF(FR(JXR) .GE. FF(JMAX)) GO TO 511
      DO 119 I=1, N
      X(I,JMAX)=XR(I,JXR)
119   CONTINUE
      FF(JMAX)=FR(JXR)
      GO TO 504
511  DO 120 I=1, N
      XR(I,JXR)=(XC(I)+XR(I,JXR))/2.0
      X(I,JMAX)=XR(I,JXR)
120  CONTINUE
      CALL OBJECT(N,K,X,FF,JMAX)
      GO TO 504
C
C   Print of final output
C
996  WRITE(*,016)
      WRITE(6,016)
      WRITE(*,010) ITER
      WRITE(6,010) ITER
      WRITE(*,018) DMAX
      WRITE(6,018) DMAX
      WRITE(*,019) SD

```

```

WRITE(6,019) SD
WRITE(*,011)
WRITE(6,011)
WRITE(*,012) (I,X(I, JMIN), I=1, N)
WRITE(6,012) (I,X(I, JMIN), I=1, N)
WRITE(*,008)
WRITE(6,008)
WRITE(*,013) FF(JMIN)
WRITE(6,013) FF(JMIN)
WRITE(*,026) FF(JMIN)
GO TO 999
997 WRITE(*,014) ITMAX
WRITE(6,014) ITMAX
998 WRITE(*,017)
WRITE(6,017)
999 RETURN
END

C
C
C ~~~~~
C Subroutine CENT1 for STEP 2
C used for Process of moving half way in case of violated implicit
C constraint
C Equation  $x(i,c1) = 1/(j-1) + (k=1 \text{ to } j-1) x(i,k)$ 
C where, j : already accepted complex vertex
C ~~~~~
SUBROUTINE CENT1(N, K, X, XC, I, J)
DIMENSION X(N,K), XC(N)
XC(I)=0.0
DO 10 L=1, J-1
XC(I)=XC(I)+X(I,L)
10 CONTINUE
XC(I)=XC(I)/FLOAT(J-1)
RETURN
END

C
C ~~~~~
C Subroutine CENT2 for STEP 4
C used for evaluation Convergence ( SD )
C Equation  $x(i,c2) = 1/k + (j=1 \text{ to } k) x(i,j)$ 
C ~~~~~
SUBROUTINE CENT2(N, K, X, XC, I)
DIMENSION X(N,K), XC(N)
XC(I)=0.0
DO 10 L=1, K
XC(I)=XC(I)+X(I,L)
10 CONTINUE
XC(I)=XC(I)/FLOAT(K)
RETURN
END

C
C ~~~~~
C Subroutine CENT3 for STEP 5

```

```

C      used for Process of reflection
C      Equation  $x(i,c3) = 1/(k-1) + (j=1 \text{ to } k) x(i,j)$ 
C      where, h : coordinate of vertex having maximum object value
C      ~~~~~
      SUBROUTINE CENT3(N, K, X, XC, I, JMAX)
      DIMENSION X(N,K), XC(N)
      XC(I)=0.0
      DO 10 L=1, K
        IF(L .NE. JMAX) XC(I)=XC(I)+X(I,L)
10      CONTINUE
      XC(I)=XC(I)/FLOAT(K-1)
      RETURN
      END

C
C      ~~~~~
C      Subroutine EXPL(N, XEL, XEU, I)
C      used for setting minimum and maximum value of explicit
C      constraints
C      where, N : number of control variables
C      XEL(i) : Lower limit of explicit constraints
C      XEU(i) : Upper limit of explicit constraints
C      I : Coordinate of control variables
C      ~~~~~
      SUBROUTINE EXPL(N, XEL, XEU)
      DIMENSION XEL(N), XEU(N)
      XEL(1)=80.
      XEU(1)=120.
      XEL(2)=80.
      XEU(2)=120.
      XEL(3)=70.
      XEU(3)=120.
      RETURN
      END

C
C      ~~~~~
C      Subroutine IMPL(IC,N,K,X,XIL,XIU,G,J)
C      used for setting minimum and maximum value of implicit
C      constraints
C      ~~~~~
      SUBROUTINE IMPL(IC,N,K,X,XIL,XIU,G,J)
      DIMENSION XIL(IC), XIU(IC), G(IC,K), X(N,K)
      XIL(1)=63.0
      XIU(1)=65.0
      tin2=X(1,J)
      tin3=X(2,J)
      tin4=X(3,J)
      CALL connew(tin2,tin3,tin4,drate,xkjh2o,hyr)
      write(*,982) hyr
982  format(2x,'IMPL, hyr=',f10.4)
      G(1,J)=hyr
      RETURN
      END
C      ~~~~~

```

```

C   Subroutine OBJECT(N,K,X,FF,J)
C   used for calculation F(j)
C ~~~~~
      SUBROUTINE OBJECT(N,K,X,FF,J)
      DIMENSION X(N,K), FF(K)
      tin2=X(1,J)
      tin3=X(2,J)
      tin4=X(3,J)
      CALL connew(tin2,tin3,tin4,drate,xkjh2o,hydr)
      dratt=1./drate
      FF(J)=dratt
      write(*,911) drate, dratt
911 format(2x,'subroutine Object drate=',f10.4,2x,'dratt=',f10.5)
      RETURN
      END

c   write(6,1111) xleng,nocir,WMC,drate,sesu,ppw,delps,hyrr
c 1111 format(2x,f8.2,2x,i2,2x,f6.4,2x,f5.3,2x,f6.3,2x,f8.2,2x,f8.2,
c   * 2x,f8.2)
c   WRITE (*,899) NOCIR,TETIME,PTIME,WMC,DRATE,RATET,XKJH2O,ENFAN,
c   *           HFL,WRATE
c   WRITE (6,899) NOCIR,TETIME,PTIME,WMC,DRATE,RATET,XKJH2O,ENFAN,
c   *           HFL,WRATE
c   WRITE (*,890 ) TTOTEN,AL*BL*FANPO,DELPS
c   WRITE (6,890) TTOTEN,AL*BL*FANPO,DELPS
c 899 FORMAT (///
c   *5X,'NUMBER OF PASS           = ',i8/
c   *5X,'TOTAL RESIDENT TIME(HR)   = ',F8.2/
c   *5X,'TOTAL TEMPERING TIME(HR)  = ',F8.2/
c   *5X,'FINAL MOISTURE CONTENT(DEC.WB.)= ',F8.4/
c   *5X,'DRYING RATE(%WB,HR,DRY TIME) = ',F8.2/
c   *5X,'DRYING RATE(%WB,HR,RES TIME) = ',F8.2/
c   *5X,'FUEL ENERGY(KJ/KG H2O)   = ',F8.2/
c   *5X,'FAN ENERGY(KJ/KG H2O)    = ',F8.2/
c   *5X,'KEROSENE CONSUMPTION(L/HR) = ',F8.3/
c   *5X,'WATER REMOVAL RATE(KG/L)  = ',F8.3)
c 890 FORMAT (
c   *5X,'TOT ENERGY(KJ/KG H2O)    = ',F8.2/
c   *5X,'FAN POWER(KW)             = ',F8.2/
c   *5X,'STATIC PRESS.(PA)         = ',F8.2)
      nocir=0
      tetime=0.
      ptime=0.
      return
      END
C*****
      SUBROUTINE HEAD(TR,DELT,DELHYR)
      TA=TR+273.16
      XK=1.9103E+21*EXP(-1.7748E+04/TA)
      DELHYR=60.*XK*DELT
      RETURN
      END
C*****

```

```

FUNCTION EMC(RH,T)
C EMC EQUATION FOR MEDIUM ROUGH RICE DEVELOPED BY CARLOS
c ZURITZ
  IF(RH.GE..99) RH=.99
  C=35.703
  E=0.29394
  xy=0.046015
10 EMC=E-xy*ALOG(-(T+C)*ALOG(RH))
  RETURN
  END
C
C*****
SUBROUTINE DERFUN (Y,FM)
COMMON/BLOCK1/CON1,CON2,CON3,CON4,CON5,CON6
COMMON/BLOCK2/GA,GFRr,DELR,HFG,AME,NNEQ
REAL Y(15),FM(15),FT(15)
CV=1.87568
TT=Y(14)
TTAB=TT+273.16
T1=Y(13)
T1AB=T1+273.16
DS=2.57E-03*EXP(-2.88E+03/TTAB)*0.71
DB=7.97E-01*EXP(-5.11E+03/TTAB)*0.11
DH=4.84E+02*EXP(-7.38E+03/TTAB)*0.18
DC=DS+DB+DH
HFG=(1547.84-1.46*TT)*Y(12)**(-0.346)
RHT=RHDBHA(T1AB,Y(15))
AME=EMC(RHT,T1)
S=DC/(GFRr*delr)
FM(1)=6.0*S*(Y(2)-Y(1))
DO 10 I=2,10
  XX=I
10 FM(I)=S*((1.+1./((XX-1.))*Y(I+1)-2.*Y(I)+(1.-1./((XX-1.))*
  *Y(I-1))
  IF(NNEQ,EQ.11) GO TO 15
  FM(11)=S*(1.1*AME-2.*Y(11)+0.9*Y(10))
  GO TO 18
15 FM(11)=2.*S*(Y(10)-Y(11))
  GO TO 50
18 DO 20 I=1,11
  XX=I
20 FT(I)=(XX-1.)*2*DELR**2*FM(I)
  RESULT=FT(1)+4.*FT(10)+FT(11)
  DO 30 I=2,8,2
30 RESULT=RESULT+4.*FT(I)+2.*FT(I+1)
  FM(12)=RESULT/(1000.*DELR**2)
  TMTH=Y(13)-Y(14)
  FM(13)=-CON3*TMTH/(CON1+CON2*Y(15))
  FX=CON3*TMTH+(HFG+CV*TMTH)*GA*CON6*FM(12)
  FY=CON4+CON5*Y(12)/(1.+Y(12))
  FM(14)=FX/FY
  FM(15)=-CON6*FM(12)
50 RETURN

```

```

      END
C
C*****
      FUNCTION F(I,X,Y)
      REAL Y(15),FM(15)
      CALL DERFUN(Y,FM)
      GO TO (1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15),I
1 XX=FM(1)
  GO TO 16
2 XX=FM(2)
  GO TO 16
3 XX=FM(3)
  GO TO 16
4 XX=FM(4)
  GO TO 16
5 XX=FM(5)
  GO TO 16
6 XX=FM(6)
  GO TO 16
7 XX=FM(7)
  GO TO 16
8 XX=FM(8)
  GO TO 16
9 XX=FM(9)
  GO TO 16
10 XX=FM(10)
  GO TO 16
11 XX=FM(11)
  GO TO 16
12 XX=FM(12)
  GO TO 16
13 XX=FM(13)
  GO TO 16
14 XX=FM(14)
  GO TO 16
15 XX=FM(15)
16 F=XX
  RETURN
  END
C*****
      SUBROUTINE ESOSEQ(KODE,F)
      COMMON/ESOCOM/NEQ,XI,YI(15),X,Y(15),TR,KSTP,DY(15)
      REAL XC,YC(15),DYP(4,15),S(15)
C      THE FOLLOWING DATA STATEMENT WAS ADDED TO PREVENT THE
c VARIABLES
C      FROM DISAPPEARING.
      data h/0.002/
      DATA XC,YC(1),DYP(1,1),S(1),HO/5*0.0/
      DATA MSTP,NSTP,IN1,IN2,IN3,IN4/0,0,1,2,3,4/
      TR=-1.0
      N=NEQ
      IF(N.GT.99) GO TO 7777
      GO TO (100,200,300),KODE

```

```

C
C----INITIALIZE PROCESS TO START WITH R-K INTEGRATION ON INITIAL
c  VALUES
100 DO 101 I=1,N
    Y(I)=Y1(I)
101 DY(I)=F(I,XI,YI)
    X=XI
    IN1=1
    IN2=2
    IN3=3
    IN4=4
150 MSTP=KSTP
    NSTP=0
    HO=H
    GO TO 400

C
C----START R-K INTEGRATION WITH CURRENT X,Y VALUES
200 GO TO 150

C
C---CONTINUE INTEGRATION WITH CURRENT X,Y VALUES
300 IF(HO.NE.H) GO TO 150
    GO TO 400
301 RETURN

C
C---INTEGRATE 1 STEP
C---SAVE CURRENT DERIVATIVE VALUES
400 DO 401 I=1,N
401 DYP(IN1,I)=DY(I)

C
C---CHECK FOR R-K CONTINUATION
    IF(NSTP.LE.2) GO TO 450

C
C---USE ABM FORMULAE--PREDICTOR
    DO 402 I=1,N
402 YC(I)=Y(I)+H*((2.29166666667*DYP(IN1,I)+1.54166666667*DYP(IN3,I))
1      -(2.45833333333*DYP(IN2,I)+0.37500000000*DYP(IN4,I)))

C
C---CHECK IF CORRECTOR STEP IS DESIRED
    MSTP=MSTP-1
    IF(MSTP.LE.0) GO TO 410
    DO 403 I=1,N
403 Y(I)=YC(I)
    X=X+H
    GO TO 480

C
C---CORRECTOR
410 X=X+H
    DO 411 I=1,N
411 DY(I)=F(I,X,YC)
    DO 412 I=1,N
412 Y(I)=Y(I)+H*((0.37500000000*DY(I)+0.79166666667*DYP(IN1,I)
1      +0.0416666666667*DYP(IN3,I)-0.208333333333*DYP(IN2,I))
    MSTP=KSTP

```



```

C
C---COMPUTE ESTIMATED TRUNCATION ERROR
  TR=0.0
  DO 413 I=1,N
    413 TR=TR+(0.930*(Y(I)-YC(I)))**2
    TR=SQRT(TR)
    GO TO 480
C
C---USE R-K STEP
C---NOTATION--Y(J+1)=Y(J)+(KO+2K1+2K2+K3)/6
C---COMPUTE SUM=KO
  450 DO 451 I=1,N
    S(I)=H*DY(I)
  451 YC(I)=Y(I)+S(I)/2.0
    XC=X+H/2.0
C
C---ADD 2*K1 TO SUM
  DO 452 I=1,N
    DY(I)=F(I,XC,YC)
    S(I)=S(I)+2.0*H*DY(I)
  452 YC(I)=Y(I)+(H*DY(I))/2.0
C
C---ADD 2*K2 TO SUM
  DO 453 I=1,N
    DY(I)=F(I,XC,YC)
    S(I)=S(I)+2.0*H*DY(I)
  453 YC(I)=Y(I)+H*DY(I)
    XC=X+H
C
C---ADD K3 TO SUM AND GET NEW Y VALUE
  DO 454 I=1,N
    DY(I)=F(I,XC,YC)
    S(I)=S(I)+H*DY(I)
  454 Y(I)=Y(I)+S(I)/6.0
    X=XC
    NSTP=NSTP+1
C
C---COMPUTE CURRENT DY VALUES
  480 DO 481 I=1,N
  481 DY(I)=F(I,X,Y)
C
C---ROTATE INDICES OF DYP ARRAY
  I=IN4
  IN4=IN3
  IN3=IN2
  IN2=IN1
  IN1=I
  GO TO 301
C
C---ERROR EXIT
  777 WRITE(6,777)
  STOP
  777 FORMAT(2X,'SPECIFIED NUMBER OF EQUATIONS FOR ECODEQ IS

```

```

1 GREATER THAN 99)
END
C*****
C          PSYCHROMETRIC EQUATIONS
C          *****
C UNIT : M,KG,J,PA,K
C*****
C
C FUNCTION HADBRH(DB,RH)
HADBRH=HAPV(RH*PSDB(DB))
RETURN
END
C
C
C FUNCTION HADP(DP)
HADP=HAPV(PSDB(DP))
RETURN
END
C
C
C FUNCTION HAPV(PV)
HAPV=0.6219*PV/(101325.-PV)
RETURN
END
C
C
C FUNCTION RHDBHA(D1,D2)
A=PSDB(D1)
B=PVHA(D2)
RHDBHA=B/A
RETURN
END
C
C
C FUNCTION PVDBWB(DB,WB)
DATA PATM/101325./
A=PSDB(WB)
B=0.6219*HLDB(WB)*PATM
C=1006.9254*(A-PATM)*(WB-DB)
PVDBWB=(A*B-C*PATM)/(B+0.15577*C)
RETURN
END
C
C
C FUNCTION PVDBVS(DB,VS)
DATA PATM/101325./
PVDBVS=PATM-287.*DB/VS
RETURN
END
C
C
C FUNCTION PVHA(HA)
DATA PATM/101325./

```

```

PVHA=HA*PATM/(0.6219+HA)
RETURN
END
C
C
FUNCTION DBPS(PS)
PS=0.001*PS
IF(PS.GE.1.6E-4.AND.PS.LE.0.61074) THEN
  A=82.44543
  B=0.1164067
  C=3.056448
  D=-76.34573
ELSE
  A=33.38269
  B=0.2226162
  C=7.156019
  D=-26.39589
ENDIF
DBPS=A*PS**B+C*ALOG(PS)+D+273.16
PS=PS*1000.
RETURN
END
C
C
FUNCTION WBDBDP(DB,DP)
DATA A,B,C,D/-0.38799E-03,-0.026394,-0.76378,0.28894E-03/
DB=DB-273.16
DP=DP-273.16
TDB=A*DP**3+B*DP*DP+C*DP+D
IF(DP.GE.-18.0.AND.DP.LT.0.0) THEN
  IF(DB.GE.-18.0.AND.DB.LT.TDB) THEN
    B1=0.125896E-06
    B2=-0.476257E-02
    B3=0.463702
    B4=0.679164E-03
    B5=0.120197
    B6=0.547492
  ELSE
    IF(DB.GE.TDB.AND.DB.LE.82.0) THEN
      B1=0.118282E-04
      B2=-0.370293E-02
      B3=0.578023
      B4=-0.325391E-04
      B5=0.302971E-01
      B6=0.878100
    ELSE
      B1=0.509257E-05
      B2=-0.243035E-02
      B3=0.519673
      B4=-0.388462E-04
      B5=0.287864E-01
      B6=0.897871
    ENDIF
  ENDIF
ENDIF

```

```

        ENDIF
ELSE
    IF(DB.GE.0.0.AND.DB.LE.82.0) THEN
        B1=0.157853E-04
        B2=-0.413278E-02
        B3=0.587189
        B4=0.560380E-04
        B5=-0.197368E-01
        B6=0.115724E+01
    ELSE
        B1=0.571141E-05
        B2=-0.257305E-02
        B3=0.525065
        B4=0.293342E-04
        B5=-0.165536E-01
        B6=1.18502
    ENDIF
ENDIF
DT=DB-DP
WB=DP+(B1*DT**3+B2*DT*DT+B3*DT)*EXP((B4*DT+B5)*ABS(DP)**B6)
WBDBDP=WB+273.16
DB=DB+273.16
DP=DP+273.16
RETURN
END
C
C
FUNCTION PSDB(DB)
DATA R,A,B,C,D,E,F1,G/22105649.25,-27405.526,97.5413,-0.146244,
10.12558E-03,-0.48502E-07,4.34903,0.39381E-02/
IF(DB-273.15) 1,2,2
1 PSDB=EXP(31.9602-6270.3605/DB-0.46057*ALOG(DB))
RETURN
2 PSDB=R*EXP((A+B*DB+C*DB**2+D*DB**3+E*DB**4)/(F1*DB-G*DB**2))
RETURN
END
C
C
FUNCTION HLDB(DB)
IF(DB-273.16) 1,1,2
1 HLDB=2839683.144-212.56384*(DB-255.38)
RETURN
2 IF(DB-338.72) 3,3,4
3 HLDB=2502535.259-2385.76424*(DB-273.16)
RETURN
4 HLDB=SQRT(7329155978.E+3-15995964.08*DB*DB)
RETURN
END
C
C
FUNCTION VSDBHA(DB,HA)
DATA PATM/101325./
VSDBHA=287.*DB*(0.6219+HA)/0.6219/PATM

```

```

RETURN
END
C
C
FUNCTION ENDBDP(DB,DP)
HA=HADP(DP)
T1=1006.9254*(DB-273.16)+HLDB(DP)*HA+1875.6864*HA*(DB-DP)
IF(DP-273.16) 1,2,2
1 ENDBDP=T1-HA*(333432.1+2030.598*(273.16-DP))
RETURN
2 ENDBDP=T1+4186.8*HA*(DP-273.16)
RETURN
END
C *****

```