

최 종
연구보고서

고품질쌀 생산을 위한 저온곡물건조기 개발

Development of low temperature grain dryer
for produce of high quality rice

연 구 기 관
성 균 관 대 학 교

농 립 부

최 종
연구보고서

고품질쌀 생산을 위한 저온곡물건조기 개발

Development of low temperature grain dryer
for produce of high quality rice

연 구 기 관
성 균 관 대 학 교

농 립 부

제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “고품질쌀 생산을 위한 저온곡물건조기 개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2005년 11월 14일

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

위탁연구기관 : 한국식품연구원
위탁연구책임자 : 김 의 응
연 구 원 : 김 동 철
연 구 원 : 이 세 은
연 구 원 : 김 훈
연 구 원 : 김 상 숙

참 여 기 업 : 모아기연(주)
연 구 원 : 이 희 철
연 구 원 : 박 영 광
연 구 원 : 박 광 호

요 약 문

I. 제 목

고품질쌀 생산을 위한 저온곡물건조기 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

우리나라 쌀산업의 국제경쟁력 강화를 위해서는 차별화된 고품질 쌀 생산이 긴요하며, 수확 후 처리기술 중에서 건조기술은 쌀의 품질유지에 관건이 되는 기술이다. 따라서, 우리나라의 기상조건과 벼의 특성에 적합하면서 건조소요에너지를 절감하고 고품질 쌀 생산을 지향하는 저온 곡물건조기의 개발과 적정운영방법에 관한 연구가 필요하다.

III. 연구개발 내용 및 범위

본 연구의 개발 내용 및 범위를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 벼의 저온건조속도를 측정하여 저온 박층건조모델을 개발한다.
- 2) 건조온도 20~50℃범위에서 벼의 저온 건조, 품질 및 저장특성을 구명한다.
- 3) 횡류형 저온 곡물건조기 시뮬레이션 모델을 개발하여 건조실험을 통하여 모델의 적합성을 검증하고, 건조영향인자를 구명한다.
- 4) 저온 곡물건조기 최적화 프로그램을 개발하여 벼의 품질을 높일 수 있는 최적 건조운영조건을 구명한다.
- 5) 저온 곡물건조기 시작기 및 본기를 설계, 제작 개발하여 성능평가를 통해 적정 운영방법을 개발한다.

IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

저온 건조온도 15℃, 25℃ 및 35℃ 3수준, 상대습도 30% 및 50% 2수준에 대하여 벼의 박층건조속도를 측정하여, Page 모델에 근거한 저온 박층건조 모델을 개발하였다.

저온공기 발생장치를 부착한 용량 150kg의 순환식 횡류형 실험용 건조기를 설계·제작하여 건조온도 별 건조실험을 수행하여, 건조온도가 동할율, 발아율 및 식미에 미치는 영향을 구명하였다. 식미 관능검사의 결과를 종합적으로 판단해볼 때 건조온도 21.9℃와 30.7℃에서 식미가 높았으며, 건조온도가 가장 높은 48.7℃에서는 식미가 상대적으로 낮았다.

횡류형 후층건조를 예측할 수 있는 저온 곡물건조기 시뮬레이션 모델을 개발하였고, 벼의 건조실험을 통하여 적합성을 검증하였으며, 개발한 모델은 함수율·동할율·곡온·공기의 상태·건조소요에너지를 잘 예측하였다.

시뮬레이션 방법으로 건조온도, 송풍량 및 곡물순환속도가 동할율, 건조속도 및 건조소요에너지에 미치는 영향을 구명하였다.

최적화 기법을 이용하여 벼 저온 곡물건조기의 건조소요에너지를 최소화하는 최적 건조온도, 송풍량 및 곡물순환속도를 결정하였다.

용량 150kg의 저온곡물건조기 시작기와 용량 3,800kg의 저온곡물건조 본기를 설계, 제작하였으며, 기본성능, 제어능력, 건조실험을 통해 성능을 평가하였다. 또한, 저온곡물건조와 열풍건조의 소요에너지, 건조 처리능력, 비용분석을 수행하였다.

SUMMARY

(영문요약문)

I. Title

Development of low temperature dryer

II. Objectives and significance of the research

This study was conducted to determine the optimal design criteria and operational conditions of low temperature grain dryer with heat pump considering weather conditions during rice harvesting season, drying energy consumptions, and dried rice qualities.

III. Contents and scope

1) To develop thin layer rice drying models at low drying temperatures in the range of 15 °C to 35 °C.

2) To investigate the drying characteristics and qualities of rough rice in low temperature drying.

3) To develop simulation model for low temperature cross-flow rice dryer with heat pump, and to validate the model, and to analyse the effects of design and operational parameters on the dryer performance.

4) To develop an optimization model of the low temperature dryer, and to determine the optimal design criteria and operational conditions to minimize drying energy consumptions.

IV. Results and suggestions

The results were summarized as follows;

Thin layer drying tests were conducted at three temperature levels of 15°C, 25°C and 35°C, and two relative humidity levels of 30% and 50%. Thin layer drying model of Page's type was developed.

The taste values evaluated by panels for cooked rice with different drying temperatures were high at drying temperature of 12.9 °C and 30.7 °C, and low at 48.7 °C.

The simulation model of low temperature rice dryer predicted satisfactorily moisture contents, crack ratios, grain temperatures, air conditions and energy consumptions. The effects of design and operational parameters on the dryer performance were analyzed by simulation method.

Optimal air flow rate, grain flow rate, and drying temperature for low temperature rice dryer with heat pump were determined to minimize drying energy consumptions constraining rice crack and drying rate.

CONTENTS

(영 문 목 차)

Chapter 1. Introduction	15
A. Significance	15
B. Objectives	17
Chapter 2. Research development status	18
A. Drying equation	18
B. Characteristics of drying and quality	26
C. Low temperature grain drying	29
Chapter 3. Results and discussions	31
A. Low temperature thin layer drying model of rough rice	31
1. Preface	31
2. Material and method	32
a. Material	32
b. Method	32
c. Analysis	35
3. Results and discussion	36
a. Drying rate	36
b. Low temperature thin layer drying model	43
4. Conclusion	52
B. Characteristics of low temperature drying	54

1. Preface	54
2. Material and method	55
a. Material	55
b. Test apparatus	55
b. Method	63
3. Result and discussion	70
a. Drying characteristics	70
b. Quality characteristics	77
c. Sensory characteristics	80
d. Storage characteristics	84
4. Conclusion	102
C. Simulation program of low temperature grain dryer	104
1. Preface	104
2. Simulation programming	106
a. Mathematical model	106
b. Numerical method	107
c. Aid equations	110
d. Method of condensation process	111
e. Requirement energy	113
f. Simulation program	114
3. Verification of simulation model	117
a. Material	117
b. Method	117

c. Result and discussion	119
4. Conclusion	124
D. Effect of design on the low temperature grain dryer	126
1. Design factor and conditions	126
2. Drying temperature	128
3. Airflow rate	130
4. Grain flow rate	132
5. Result and discussion	134
E. Optimization of low temperature drying system	135
1. Preface	135
2. Object function and constraint	136
a. Object function	136
b. Control variable	136
c. State variable	137
d. Constraint conditions	137
3. Optimization conditions	138
4. Optimization program	139
5. Result and discussion	143
6. Conclusion	145
F. Development and evaluation of low temperature grain dryer for pilot scale ...	147
1. Development	147

a. Design	147
b. Manufacture of heat pump	152
c. Test circulation grain dryer	158
2. Evaluation	159
a. Basic performance	159
b. evaluation	162
3. Drying test	165
a. Ambient conditions	165
b. Drying and gran temperature	166
c. Drying time, drying rate, requirement energy	173
d. Quality	175
G. Development and evaluation of low temperature grain dryer	177
1. Design	177
2. Manufacture	179
3. Evaluation	184
a. Basic performance	184
b. Temperature control capacity	184
4. Drying test	186
a. Material	186
b. Method	186
c. Drying characteristics	189
5. Expense analysis	195
a. Method	195

b. Result	198
Chapter 4. Research goal attainment and contribution to related area	201
Chapter 5. Plan for application of research results	203
Chapter 6. Informations of foreign science technology	204
Chapter 7. References	207

목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요	15
제 1 절 서 론	15
제 2 절 연구목적	17
제 2 장 국내외 기술개발 현황	18
제 1 절 박층건조방정식	18
제 2 절 건조와 품질특성	26
제 3 절 저온 곡물건조	29
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	31
제 1 절 벼의 저온박층건조모델	31
1. 서언	31
2. 재료 및 방법	32
가. 공시재료	32
나. 실험방법	32
다. 분석방법	35
3. 결과 및 고찰	36
가. 건조속도	36
나. 저온 박층건조모델	43
4. 결론 및 요약	52
제 2 절 벼의 저온건조특성	54

1. 서언	54
2. 재료 및 방법	55
가. 공시재료	55
나. 실험장치	55
다. 실험방법	63
3. 결과 및 고찰	70
가. 건조특성	70
나. 품질특성	77
다. 식미특성	80
라. 저장특성	84
4. 결론 및 요약	102
제 3 절 저온곡물건조기 시뮬레이션 프로그램	104
1. 서언	104
2. 시뮬레이션 프로그래밍	106
가. 수학모델	106
나. 수치해석	107
다. 보조방정식	110
라. 응축과정의 해석	111
마. 소요에너지	113
바. 시뮬레이션 프로그램	114
3. 시뮬레이션 모델 검증	117
가. 공시재료	117
나. 실험방법	117

다. 결과 및 고찰	119
4. 결론 및 요약	124
제 4 절 저온 곡물건조기의 설계인자 구명	126
1. 설계인자 및 조건	126
2. 건조온도	128
3. 송풍량	130
4. 곡물 유하속도	132
5. 결론 및 요약	134
제 5 절 저온곡물건조기 최적화	135
1. 서언	135
2. 목적함수 및 제한조건	136
가. 목적함수	136
나. 제어변수	136
다. 상태변수	137
라. 제한조건	137
3. 최적화의 조건	138
4. 최적화 프로그램	139
5. 결과 및 고찰	143
6. 결과 및 요약	145
제 6 절 저온곡물건조기 시작기 개발 및 성능평가	147
1. 시작기 개발	147

가. 기본설계	147
나. Heat pump 제작	152
다. 실험용 순환식건조기	158
2. 시작기 성능평가	159
가. 건조기 기본성능	159
나. 성능평가	162
3. 시작기 건조실험	165
가. 외기조건	165
나. 건조온도 및 곡온변화	166
다. 건조소요시간, 건감률 및 소요에너지	173
라. 건조 벼의 품질변화	175
제 7 절 저온곡물건조기 본기 개발 및 성능평가	177
1. 기본설계	177
2. 본기 제작	179
3. 본기 성능평가	184
가. 기본성능	184
나. 출구 공기조건 제어능력	184
4. 본기 건조실험	186
가. 공시재료	186
나. 실험방법	186
다. 건조특성	189
5. 비용분석	195
가. 분석방법	195

나. 분석결과	198
제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도	201
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	203
제 6 장 연구개발과정에서의 수집한 해외과학기술정보	204
제 7 장 참고문헌	207

제 1 장 연구개발과제의 개요

제 1 절 서 론

쌀의 품질에 영향을 주는 주요 요인은 벼의 품종, 재배방법 및 수확후처리 기술 등이 있는데, 최근에 많은 품종육종과 재배방법의 개선으로 품종별, 재배 방법간의 차이는 점차적으로 감소하는 추세이다. 수확후처리공정에는 건조·저장·가공·포장·유통공정 등이 있으며, 이 중에서 건조공정은 수확후처리공정의 첫 번째 기술로 건조공정이 적절치 못하면 저장, 가공 및 포장 등 후속 공정에 악영향을 줌으로 건조공정은 쌀의 품질유지에 관건이 되는 기술이다.

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).

건조 중 발생하는 식미저하의 주요 원인은 미립내의 호분층에 있는 과립이 열화되거나 손상되면서 지질이 방출되어 효소작용 또는 산화작용이 발생하기 때문이다. 이러한 현상은 발아율 감소와 지방산가의 증가를 촉진시켜 저장성

의 저하로 이어지게 된다. 특히, 건조온도와 초기함수율이 높을수록 이러한 현상은 증대하게 된다(Zhang and Bekki, 1993).

우리나라의 관행의 자연건조는 외기의 조건에 따라 곡물이 수분을 흡수 또는 방출하게 되는데 이 과정에서 곡립내부의 온도차 및 수분차에 의한 응력이 과대하게 발생한다(Yamaguchi 등, 1980). 또한, 강우 등 외기조건이 불리할 경우 건조 지연 등으로 품질열화가 촉진되고, 낮은 노동 생산성 등으로 점차 감소하는 추세이다.

우리나라의 벼 건조방법은 상온의 공기를 이용한 상온통풍건조방법과 화석연료를 이용한 열풍건조방법으로 구분된다. 상온통풍건조방법은 상온 또는 이를 5°C 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 저능력(low-capacity) 건조방법으로 건조소요시간이 길고 특히, 강우 등 외기조건이 불리할 경우 건조속도가 저하되어 벼의 품질저하가 우려된다. 열풍건조는 45~55°C의 고온 열풍을 이용하여 건조속도를 증대시키는 고능력(high-capacity) 건조방법으로 처리능력에 우선권을 둔 건조방법이다. 따라서, 열손상에 의한 동할 증가, 발아율의 감소 및 식미저하 등 품질저하의 우려가 높다(Ishibashi, 1969; Keum 등, 2002).

일본, 미국 등에서는 Heat Pump를 이용하여 건조공기를 주변 온도보다 약간 가열하고, 곡물의 평형함수율 보다 낮게 제습하여 건조속도를 일정 이하로 유지하는 저온건조방법이 이용되고 있다. Heat Pump를 이용한 저온건조는 전기에너지를 이용하는 건조방법으로 전통적인 화석연료를 이용하는 건조방법에 비해 에너지 절감과 외기조건에 관계없이 운영할 수 있는 장점이 있으며, 건조 중 가스나 연기 등을 배출하지 않는 환경 친화적인 건조방법이라 할 수 있다(Strommen and Kramer, 1994; Wang and Chang, 2001). 또한, 저온에서

건조가 이루어짐으로 건조 중의 열손상을 최소화하여 동할 억제와 식미 향상 등 고품질의 쌀 생산에 가장 적합한 건조방법이라고 할 수 있다(Ishibashi 등, 1971; Zhang and Bekki, 1993).

우리나라 쌀산업의 국제경쟁력 강화를 위해서는 차별화된 고품질 쌀 생산이 긴급하며, 수확 후 처리기술 중에서 건조기술은 쌀의 품질유지에 관건이 되는 기술이다.

따라서, 우리나라의 기상조건과 벼의 특성에 적합하면서 건조소요에너지를 절감하고 고품질 쌀 생산을 지향하는 저온 곡물건조기의 개발과 적정운영방법에 관한 연구가 필요하다.

제 2 절 연구목적

본 연구의 목적은 우리나라의 기상조건과 벼의 특성에 적합하면서 건조소요에너지를 절감하고 고품질 쌀 생산을 지향하는 저온 곡물건조기의 개발에 있으며, 구체적인 연구목적은 다음과 같다.

1. 벼의 저온건조온도별 품질 및 저장특성 구명
2. 벼의 저온박층건조 실험 및 모델 개발
3. 저온곡물건조기 시뮬레이션 프로그램 개발
4. 저온곡물건조기 최적설계 프로그램 개발
5. 저온곡물건조기 설계 및 제작
6. 저온곡물건조기 성능평가 및 경제성 분석

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 박충건조방정식

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.

곡물 중의 수증기압이 공기 중의 수증기압보다 크면 곡물 중의 수분이 증발하면서 공기와 평형을 이루게 되는데 이 때의 함수율을 방습평형함수율(desorption EMC)이라 하며, 반대로 곡물 중의 수증기압이 주위 공기 중의 수증기압보다 낮으면 곡물은 주위 공기로부터 수분을 흡수하여 평형을 이루는 함수율을 흡습평형함수율(adsorption EMC)이라 한다. 방습평형함수율은 흡습평형함수율 보다 항상 높은 값을 나타내는데 이와 같이 차이가 나타나는 현상을 이력(hysteresis)현상이라 한다.

평형함수율은 곡물의 건조와 저장 과정의 해석, 시스템 설계 및 운영에 기초가 되는 매우 중요한 요인 중의 하나이다(Gustafson and Hall, 1974; Kameoka, 1988).

곡물의 평형함수율을 측정하는 방법은 동적방법(dynamic method)과 정적방법(static method)이 있는데, 주로 곡물을 정지되어 있는 일정한 온도와 상대습도에 오랜 시간 방치하여 함수율을 평형에 이루도록 하는 정적방법으로 측정하고 있다. 정적방법은 상대습도가 높을 경우 곡물에 곰팡이 등이 발생하는데 Dunstan 등(1972)은 곡물에 acetic acid 등으로 곰팡이의 성장을 억제하는 방법을 사용하였다. 그러나, 근본적으로 높은 상대습도 영역에서의 곰팡이

의 성장을 억제하는 것은 불가능하다(Chen and Morey, 1989).

식 (2-1)의 Henderson(1952) 모델은 Gibbs의 흡습이론에 기초하여 농산물의 평형함수율을 예측하기 위하여 개발되었다.

$$1 - (P_v/P_{vs}) = \exp(-h \cdot T_k \cdot M^i) \dots\dots\dots (2-1)$$

M : 평형함수율(%d.b.)

P_v/P_{vs} : 상대습도(dec)

T_k : 절대온도(K)

h, i : 실험상수

Day와 Nelson(1965)은 밀과 옥수수의 평형함수율을 예측하기 위하여 $1 - (P_v/P_{vs}) = \exp(-h \cdot T_k \cdot M^i)$ 의 형태로 변형하고 매개변수 i 와 k 를 온도의 함수로 표현하였다. Zurits 등(1979)은 10~40°C의 온도에서 벼의 흡습 평형함수율을 예측하기 위하여 Henderson 모델을 사용하였고, Koh(1978)는 11개 품종의 벼에 대하여 동적인 방법으로 평형함수율을 측정하고, Henderson 모델의 매개변수를 결정하였다.

포텐셜이론과 상태방정식에 기초하여 Chung과 Pfof(1967)에 의해 개발된 Chung-Pfof 모델은 다음 식 (2-2)와 같다.

$$\ln(P_v/P_{vs}) = [-A/(R \cdot T_k)] \exp(-B \cdot M) \dots\dots\dots (2-2)$$

R : 기체상수

A, B : 실험상수

BET이론의 제한성을 극복하려고 개발된 Halsey 모델은 Chirife와

Iglesias(1978)에 의해 단순화되었으며, Pappas와 Rao(1987)는 Halsey 모델이 상대습도 10~80% 범위에서 식품의 흡습특성을 잘 나타내 준다고 보고하였다. 수정된 Halsey 모델은 다음 식 (2-3)과 같다.

$$RH = \exp(-A \cdot M^{-C}) \dots\dots\dots (2-3)$$

RH : 상대습도(%)

M : 평형함수율(dec,d.b.)

A, C : 실험상수

Harkins와 Jura(1944)는 어떤 물질에 흡수된 수분의 체적을 구하기 위하여 식 (2-4)의 모델을 제안하였으며, Gustafson과 Hall(1974)은 이 모델을 이용하여 30%이상의 상대습도에서 옥수수에 흡수된 수분체적을 예측한 결과는 실험치와 잘 일치한다고 보고하였다.

$$\ln(P_v/P_{vs}) = B - A/M^2 \dots\dots\dots (2-4)$$

Oswin(1946)에 의해 개발된 Oswin 모델은 다음 식 (2-5)와 같다.

$$M = A[RH/(1 - RH)]^B \dots\dots\dots (2-5)$$

RH : 상대습도(dec)

Gustafson 등(1974)은 50~155℃ 범위에서 염용액을 이용하여 방습평형 함수율 실험을 하여 4개의 모델에서 그 적합성을 검정하였다. Harkins-Jura, Smith 모델은 상대습도 30%이상에서 적합하였으며 Henderson 모델은 전 범위에서 방습평형함수율을 예측하는데 적합하다고 보고하였다. 또한 높은 상대

습도에서 시료에 부패가 생기는 것을 방지하기 위하여 40% propionic acid 와 60% acetic acid의 혼합물을 시료에 첨가하는 방법을 사용하였지만 95% 이상의 높은 상대습도에서는 시료의 부패가 발생하였다고 보고하였다.

Zuritz 등(1979)은 온도 10~40°C, 상대습도 11.2~87.9% 범위에서 염기성 용액을 이용하여 버의 방습평형함수율을 측정하였으며, Day-Nelson모델이 가장 실험치와 적합하다고 보고하였다. 90%이상의 높은 상대습도는 시료의 부패와 시료상자의 부식으로 오차가 심하여 높은 상대습도에서는 동적 방법이 필요하다고 보고하였다.

Jung과 Keum(1987)은 염용액을 이용하여 상대습도 46.3~97.2%범위의 단립종 버의 흡습 평형함수율을 Gustafson과 Hall(1974)이 사용한 방법과 동일하게 곰팡이의 성장을 억제하여 온도 27.5°C와 32.5°C에서 측정하였다. 92%이상의 상대습도범위에서는 흡습평형함수율의 값이 큰 오차를 보였으며, 이는 시료의 부패가 원인 이었다고 보고하였다. 실험치를 Henderson, Chung- Post, Day-Nelson 모델 및 2차식 실험모델을 최소자승법으로 검정한 결과 Henderson과 실험모델은 1%수준에서 유의성이 검증되었다고 보고하였다.

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

Hustrulid 등(1959)은 옥수수의 박층건조모델로 식 (2-6)의 수분확산모델이 적합하다고 보고하였다. 여기서 D 는 수분확산계수로 Arrhenius 형태의 식으로 표시된다.

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 D}{R^2} \theta\right) \dots\dots\dots (2-6)$$

$$D = C_1 \exp\left(\frac{-C_2}{T_a}\right) \dots\dots\dots (2-7)$$

MR : 함수비(dec)

D : 수분확산계수(m^2/hr)

R : 구의 반경(m)

θ : 건조시간(hr)

T_a : 온도(K)

C_1, C_2 : 실험상수

식 (2-6)의 수분확산모델에서 제 1항만을 취한 유사수분확산모델이 많은 연구자들에 의해 농산물의 건조모델로서 사용되었으며, 유사수분확산모델은 다음 식 (2-8)과 같다.

$$MR = A \cdot \exp(-k \cdot t) \dots\dots\dots (2-8)$$

A, k : 실험상수

Yoshitomi(1986)는 차엽의 수분확산계수를 구하기 위하여 이 모델을 사용하였으며, Noomhorm과 Verma(1986)는 벼의 건조모델로 유사수분확산모델의 적합성을 검정하였다. Wang과 Singh(1978)도 장립종 벼의 박층건조모델로 이 모델의 적합성을 검정하였으며, Henderson과 Pabis(1961)는 옥수수건조에서 이 모델의 매개변수와 확산계수의 관계에 온도가 미치는 영향에 대하여 보고하였다.

식 (2-6)에서 2개의 항으로 표현되는 건조모델이 Glenn(1978)에 의하여 보고되었다. Keener 등(1978)은 이 모델이 다양한 건조조건하에서 곡물의 건조속도의 예측에 적합하다고 보고하였다. Glenn 모델은 다음 식 (2-9)와 같다.

$$MR = A_0 \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + A_1 \cdot \exp(-k_1 \cdot t) \dots\dots\dots (2-9)$$

t : 건조시간(hr)

A_0, A_1, k_0, k_1 : 실험상수

Hukill(1947)은 건조공기에 완전히 노출된 흡습성물질은 수분을 주위 공기로 방출 또는 흡습하는데, 이 때 수분 이동량은 다음과 같은 식으로 추정할 수 있다고 보고하였다(Anderson and Alock, 1953).

$$dM/dt = -C(P_g - P_a) \dots\dots\dots (2-10)$$

M : 함수율(dec,d.b.)

t : 건조시간(hr)

P_g : 재료내의 수증기압(Pa)

P_a : 공기중의 수증기 분압(Pa)

C : 실험상수

Lweis(1921)는 Newton의 생각법칙에 기초하여 다음 식 (2-11)의 박층건조모델을 제시하였다.

$$MR = \exp(-k \cdot t) \dots\dots\dots (2-11)$$

k : 실험상수

Page(1949)는 식 (2-8)을 변형하여 옥수수 건조과정을 예측하는 다음의 식 (2-12)를 보고하였다. Page 모델은 Misra와 Brooker(1980), Li 등(1987) 및 Li와 Morey(1987) 등의 농산물 건조실험에서 적합성이 검증되었

다.

$$MR = \exp(-k \cdot t^N) \dots\dots\dots (2-12)$$

k, N : 실험상수

Thompson 등(1968)은 식 (2-11)을 건조시간 t 에 관하여 풀고 $\ln(MR)$ 의 2차항을 추가하는 다음 식 (2-13)을 제시하고, 옥수수의 박층건조모델로 적합하다고 보고하였다.

$$t = A[\ln(MR)] + B[\ln(MR)]^2 \dots\dots\dots (2-13)$$

$$A = -1.862 + 0.00488T$$

$$B = 427.4 \exp(0.033T)$$

T : 건조온도(°C)

Wang과 Singh(1978)은 함수비가 건조시간의 2차 함수로 표현한 식 (2-14)를 제시하였으며, 벼의 건조실험을 통하여 검증하였다. 이 모델은 건조시간이 30분 이하의 짧은 경우에 매우 적합한 것으로 보고되었다.

$$MR = 1 + w_1 \cdot t + w_2 \cdot t^2 \dots\dots\dots (2-14)$$

w_1, w_2 : 실험상수

Keum 등(1997)은 건조온도 35~55°C, 상대습도 30~60%범위에서 단립종 벼의 박층건조실험을 수행하여 Page 모델과 Thompson 모델이 가장 적절한 모델이라고 보고하였다.

Tanaka 등(2000)은 온도 5~20°C 범위, 상대습도 6.3~87.1%범위에서 벼

의 저온건조실험을 수행하여 건조속도는 구(球)모델이 평형함수율은 Chen-Clayton 모델이 가장 적합하다고 보고하였다.

제 2 절 건조와 품질특성

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).

벼는 적당한 온도와 수분을 유지하면, 수분을 흡수하여 배아가 세포분열을 일으키고 성장 즉, 발아를 시작한다. 따라서, 발아율은 벼의 생명력의 지표라 할 수 있다. 함수율이 높은 벼를 고온으로 건조하면 배아내의 성장물질의 생명력이 감소되고, 전분층의 가수분해로 인해 발아력이 저하된다(Ishibashi 등, 1971). 발아율은 정립 100개를 소독한 후 물로 세척하고, 직경 9~18cm 샐레에 여과지를 깔고 현미를 올려놓고, 20℃의 항온기에서 7일 이내에 발아한 미립수를 측정한다.

Yamashita(1993)는 초기함수율과 건조온도가 높을수록 발아율은 저하한다고 보고하였다. 초기함수율 24%(w.b.)의 벼는 건조온도 40℃, 초기함수율 20%(w.b.)는 50℃까지를 발아율 허용기준으로 보고하였다. 특히, 발아율과 식미는 상관관계가 높아 품질 및 식미 평가기준으로 이용할 수 있으며, 식미와 발아율의 관계식을 다음 식 (2-15)와 같이 보고하였다.

$$Y = 59.6 + 0.07x \quad (R^2 = 0.93) \dots\dots\dots (2-15)$$

여기서, Y : 식미계에 의한 식미치

x : 발아율(%)

쌀의 품질은 주로 외관에 의한 평가 즉, 형질이 좋은 완전립을 기준으로 평가가 이루어져 왔으나, 최근 식미를 중요시하면서 내부 품질을 평가하는데 많은 연구가 이루어지고 있다(Sugiyama, 1998).

쌀의 식미를 측정하는 방법은 관능검사, 이화학적 평가 및 계측기에 의한 평가로 구분할 수 있다. 관능검사는 식미평가자(panel)에 의한 평가방법으로 인간의 감각은 의외로 정확하여 기계보다 감도가 높을 수도 있다. 그러나, 개 개인의 기호도가 차이가 있는 만큼 관능검사와 병행한 이화학적 또는 계측기에 의한 평가로 객관적인 근거를 제시하는 조합적인 식미평가 방법이 이루어져야 한다(Ohtsubo, 1998).

단백질의 함량은 지역 및 품종에 따라 다르지만 국내 쌀의 경우 현미는 6~10%, 백미는 5~9%정도가 함유되어있다. 단백질의 함량이 높으면 전분이 물을 흡수하는 것을 어렵게 하여 호화가 억제되어 밥의 끈기가 저하되므로 단백질 함량은 식미의 중요한 인자이다.

전분은 쌀의 주성분으로 70%이상 함유되어 있다. 전분은 아밀로스와 아밀로펙틴으로 구성되어 있는데, 아밀로스 함량은 15~35%이다. 전분의 성질은 밥의 끈기와 관련이 있어 식미와 밀접한 관계가 있다. 특히, 아밀로스의 함량이나 아밀로그래프의 호화온도 등은 식미의 중요한 지표가 된다.

무기질은 왕겨, 미강 및 배아에 집중되어있고, 백미에는 미세한 양이 함유되어있다. 쌀에 함유되어있는 무기질은 주로 P, K, Mg, Cl, Ca 및 Si이며, Mg의 함량은 쌀의 물성 및 식미와 상관성이 높은 것으로 보고되고 있다.

지질은 지방산과 글리세린의 화합물로 대부분 미강과 배아에 존재한다. 배유내의 지질함량도 단백질, 무기질과 마찬가지로 외층에 많이 함유되어 있으며, 백미의 중심부에는 적게 함유되어 있다.

건물 100g 중의 유리지방산도를 중화시키는데 필요한 수산화칼륨의 mg수로 나타나는 지방산가는 저장상태의 중요한 지표로써, 20이상이면 품질의 저하가 발생한 것으로 간주할 수 있다(Ishibashi 등, 1971; Kim, 1999).

Iwasaki 등(1970)은 함수율 23~29%(w.b.)의 벼를 50℃에서 2시간 건조한 후 품질을 측정하였다. 함수율이 높을수록 발아율은 저하되어 29%(w.b.) 벼의 경우 75%로 감소하였으며, 환원당은 함수율이 높을수록 증가하였다고 보고하였다. 또한, Maes 유출법으로 단백질의 용해성을 측정한 결과, 50℃에서 건조한 벼는 고온에 의해 단백질 변성이 발생하여 단백질 용해성이 감소하는 등 품질변화가 발생하였다고 보고하였다.

Zhang과 Bekki(1991)는 벼를 음건한 쌀과 순환식건조기로 열풍건조한 쌀 및 제습건조한 쌀의 식미특성을 구명하기 위하여 제습건조한 쌀을 기준시료로 두고 관능검사를 수행하였다. 실험에서 음건한 쌀은 유의적인 차이가 발생하지 않았으며, 열풍건조한 쌀의 맛과 품질은 종합평가에서 유의적인 차이가 발생하였다고 보고하였다. 또한, 이들은 일본에서 제습건조기를 이용하여 건조한 벼의 식미실험 결과를 수집하여 검토하였는데, 건조속도는 식미와 밀접한 관계가 있다고 보고하였다. 건조속도를 크게 3가지 즉, 저건조속도(0.04%/hr이하), 중건조속도(0.3%/hr이하) 및 고건조속도(0.8%/hr이상)로 구분하여 중건조속도이하에서는 식미의 유의적인 차이가 없으며, 고건조속도에서는 유의적인 차이가 있다고 보고하였다.

제 3 절 저온 곡물건조

곡물의 품질 유지와 건조소요에너지의 절감효과가 기대되는 저온 곡물건조는 주로 Heat Pump를 이용하여 저온의 공기를 발생시킨다.

Heat Pump는 낮은 저온 열원에서 고온 열원으로 열에너지를 방출하는 장치이다. Heat Pump는 응축기에서 방출된 열이 단순히 대기중으로 소산되는 대신에 냉각장치에 다시 사용하여 연속적으로 냉각과 가열을 수행할 수 있어서 다양하게 응용되고 있다.

Hogan 등(1983)은 Heat Pump를 이용하여 저장빈에서 옥수수를 10~15°C 건조온도로 건조실험을 수행하여 전기히터를 이용한 건조방법과 비교하였다. Heat Pump의 압축기의 용량은 17.6kW, 송풍팬은 7.5kW를 사용하여 함수율 22.8%(w.b.)에서 14.2%(w.b.)로 건조하는데 소요되는 에너지는 0.557kW/kg이었으며, 전기히터를 이용한 건조방법은 0.905kW/kg으로 39%의 에너지 절감효과를 가져왔다고 보고하였다.

일본의 저온제습건조기는 벼의 상온통풍건조 시 강우 등 외기조건이 불리할 경우 건조효율이 저하되는 문제를 해결하고 식미와 품질이 우수한 쌀 생산을 위해 1990년대 초부터 보급되었다. 29%(w.b.) 함수율의 벼를 송풍량 0.024cmm/kg이상, 건조속도는 0.2%,w.b./hr의 조건으로 건조할 때 발아율 등 품질이 우수하고 열풍건조에 비해 저장성도 우수하다고 보고하였다. 저온제습 건조기의 소요에너지는 1588kJ/kg으로 순환식건조기의 5689kJ/kg에 비해 28%의 에너지만 소요된다고 보고하였다(Yamashita, 1993).

Bak(1981)은 덴마크의 수확시기의 외기조건(온도 15°C, 상대습도 82%)을 고려한 제습건조기를 개발하고, 이를 DAG(Dehumidified Air Generator)라고 하였다. DAG를 이용한 보리 건조에서 소요에너지는 740kJ/kg이 소요되었으며, 상업용 저장빈(4000kJ/kg)에 비해 80%의 에너지가 절감되었다고 보고하

였다.

Daikoku 등(2000)은 순환식건조기에서 초음파가습장치와 배기의 재순환등을 이용할 수 있도록 개량한 콩 저온제습건조기를 개발하였다. 건조실험에서 열풍건조에 비해 연료소비량은 40%, 전력소비량은 20% 절감되었으며, 콩의 피해율은 초기함수율 29%(w.b.)에서는 7%, 초기함수율 21%(w.b.)에서는 2%가 발생하여 열풍건조에 비해 70% 감소하였다고 보고하였다.

Rossi 등(1992)은 Heat Pump를 이용한 양파 건조실험에서, Prasertsan과 Saen(1998)은 고무나무 건조실험에서 전기히터와 유류를 이용한 건조보다 에너지 절감효과가 매우 높았다고 보고하였다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 벼의 저온박층건조모델

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). 건조 모델은 박층(Thin layer)건조모델과 후층(Deep layer)모델로 구분할 수 있다.

얇은 두께의 곡물층의 건조속도를 나타내는 방정식을 박층건조모델이라 하고, 많은 박층으로 이루어진 후층에서의 건조과정을 해석할 수 있는 방정식을 후층건조모델이라고 한다.

곡물의 건조과정을 해석하고 건조조건을 구명하는 데 있어서 가장 중요한 기초 요소가 박층건조방정식이다. 박층건조방정식은 후층건조시물레이션 모델 개발에 가장 기본이 되는 요소이다(Basunia and Abe, 1998). 또한, 벼의 저온건조과정을 해석하고 건조 조건을 구명하는데 있어서 가장 중요한 기초 요소가 박층건조방정식이다.

따라서, 본 연구에서는 저온 건조온도 3수준, 상대습도 2수준에 대하여 건조속도를 측정하고, 곡물의 건조방정식으로 많이 이용되는 4개의 건조방정식의 적합성을 검정하여 벼의 저온 박층건조모델을 개발하는데 목적이 있다.

2. 재료 및 방법

가. 공시재료

실험에 사용한 벼는 2002년 10월에 충북 음성지역에서 수확한 추청벼이며, 초기함수율은 26.81%(d.b.)이었다. 수확한 벼를 산물상태로 구입하여 쪽정미, 이물 등을 정선한 후 함수율 변화를 최소화하기 위하여 밀폐하여 2℃의 저온저장고에 보관하였다.

실험시작 12시간 전에 벼를 저온저장고에서 꺼내 밀폐상태로 상온에 방치하여 주위 공기온도와 평형을 이루도록 한 후 실험에 사용하였다. 함수율은 10g-135도-24시간 상압정온건조법으로 측정된 후 105도법으로 환산하였다(山下律也, 1975).

나. 실험방법

실험장치는 그림 3-1 및 3-2와 같이 공기조화장치, 공기충만실, 건조실, 송풍기, 온·습도 측정장치, 중량측정장치 및 시료대 등으로 구성하였다. 공기조화장치(MTH4100, SANYO, UK)는 온도 $-45\sim 105^{\circ}\text{C}(\pm 0.3^{\circ}\text{C})$, 상대습도 $0\sim 99\%(\pm 2.5\%)$ 범위의 공기를 발생할 수 있으며, 조성된 공기는 상부에 설치된 송풍기에 의해 공기충만실과 건조실로 이송되며, 건조실을 통과한 공기는 다시 공기조화장치로 되돌아가도록 구성하였다. 건조실내에 온도(Thermocouple, T type, OMEGA, USA) 및 상대습도(HMP45D, VAISALA, Finland)센서를 설치하였으며, 측정된 온·습도는 주 제어장치로 전송되어 공기조화장치를 제어하도록 하였다. 건조실은 직경 28cm, 높이 40cm의 원통형으로 하부에 정류격자를 설치하여 공기분포가 일정하도록 하였다. 건조실 내의 풍속은 하부 10지점에 대하여 풍속계(ANO6141, KANOMAX, Japan)를 이용하여 측정하였으며, 평균 0.54m/s(표준편차 0.04)로 나타났다.

다공판으로 구성된 직경 30cm의 원통형 시료대에 약 100g의 벼를 박층으로 퇴적하고, 시료대 상부에 설치된 전자저울(LC4200, SARTORIUS, GER)과 자료수집장치(7327, DataScan, UK)을 이용하여 시료의 무게 변화를 측정하여 PC에 기록하였다(그림 3-1). 실험 시작 후 20분 간격으로 1분 동안 6회 무게를 측정하여 평균값을 기록하였으며, 함수율이 0.2에 도달할 때까지 건조를 수행하였다.

건조온도는 15°C, 25°C 및 30°C의 3수준, 상대습도는 30% 및 50%의 2수준에 대하여 3회 반복 실험을 하였다.

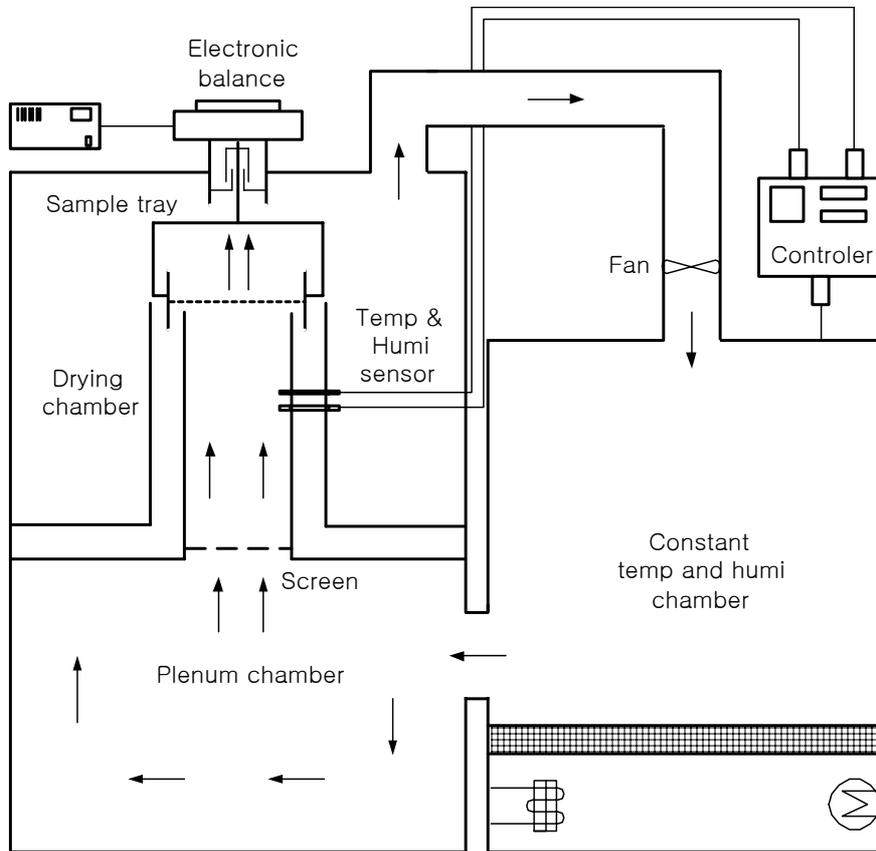


Fig. 3-1 Schematic diagram of experimental apparatus for the drying.



Fig. 3-2 View of experimental apparatus for the drying.



Fig. 3-3 View of data accumulation apparatus for temperature, relative humidity and weighting.

다. 분석방법

벼의 저온 박층건조방정식을 결정하기 위하여 기존의 곡물 건조방정식 중에서 정확도와 이용 편의성이 우수한 4개의 건조모델을 선정하였다(Keum 등, 1997).

Lewis의 Newton 냉각법칙을 이용한 건조모델, Page의 옥수수 박층건조실험에 적용한 모델, Henderson의 수분확산법칙 해에 기초한 건조 모델, Thompson의 건조모델을 선정하였으며, 이들 모델들은 다음의 식 (3-1)~(3-4)와 같다. 벼의 평형함수율은 본 논문에서 개발한 식을 이용하였다.

$$\text{Lewis 모델 : } MR = \exp(-k_1 \cdot t) \dots\dots\dots (3-1)$$

$$\text{Page 모델 : } MR = \exp(-P \cdot t_o^Q) \dots\dots\dots (3-2)$$

$$\text{축소수분확산모델 : } MR = A \exp(-k_2 \cdot t) \dots\dots\dots (3-3)$$

$$\text{Thompson 모델 : } t = A \cdot \ln(MR) + B \cdot (\ln MR)^2 \dots\dots\dots (3-4)$$

여기서, $MR(t) = \frac{M(t) - M_e}{M_o - M_e}$: 함수율비

$M(t)$: 함수율(dec,d.b.)

M_e : 평형함수율(dec,d.b.)

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

M_o : 초기함수율(dec,d.b.)

t : 건조시간(hr)

t_o : 건조시간(min)

A, B, k_1, k_2, P, Q : 실험상수

함수율비의 실험치를 모델에 적합시켜 SAS의 비선형 회귀분석 프로그램을 이용하여 실험상수를 결정하였다. 건조모델의 실험상수 A, B, k_1, k_2, P 및 Q 는 건조온도와 상대습도의 함수로 가정하고 다음의 식으로 설정하였다.

$$A, B, k_1, k_2, P, Q = a_0 + a_1(T_0) + a_2(RH_0) + a_3(T_0)^2 + a_4(T_0 \cdot RH_0) \dots\dots\dots (3-5)$$

여기서, a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 : 실험상수

T_0 : 건조온도(°C)

RH_0 : 상대습도(dec)

식 (3-5)에서 실험상수들의 조합은 SAS의 PROC STEPWISE를 이용하여 선정하였다. 함수율비 실험치와 모델에 의한 예측치 사이의 결정계수와 RMSE(Root Mean Square Error)를 모델의 검정에 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 건조속도

그림 3-4와 그림 3-5는 상대습도 30% 및 50%에서 건조온도 별 함수율비의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 건조속도는 지수함수의 경향으로 감소하는 것으로 나타났다. 건조속도의 지표가 되는 반건조시간(MR=0.5

에 이르는 시간)은 상대습도가 30%일 때 건조온도 15℃에서 13.3시간, 건조온도가 25℃일때는 6.7시간으로 나타났으며, 건조온도 30℃에서는 3.7시간으로 나타났다. 따라서, 건조온도가 15℃에서 25℃로 10℃ 증가할 때 반건조시간은 급격히 감소되었으며, 30℃에서도 온도의 증가에 따른 건조시간의 단축 정도는 다소 줄어들었다. 상대습도 50%의 경우, 건조온도 15℃에서는 20.3시간, 건조온도 25℃에서는 7.0시간으로 급격히 감소하였으며, 건조온도 30℃에서는 4.0시간으로 나타났다. 건조온도의 증가에 따른 건조시간의 단축 정도는 상대습도 30%에서와 유사한 경향으로 나타났다.

그림 3-6에서 그림 3-8은 건조온도 15℃, 25℃ 및 35℃에서 상대습도별 함수율비의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 건조온도 15℃에서는 상대습도가 30%일 때 반건조시간은 13.3시간으로 나타났고, 상대습도가 50%일 때는 20.3시간으로 상대습도가 낮을수록 반건조시간도 크게 감소하였다. 그러나, 건조온도 25에서는 반건조시간에 도달할 때까지 상대습도에 따른 건조속도의 차이는 크지 않았고, 반건조시간 이후는 다소 차이가 나타났다. 건조온도 30℃에서는 상대습도 따른 반건조시간은 크게 영향을 미치지 않았다. 이와 같이 건조속도의 지표가 되는 반건조시간은 온도와 상대습도의 영향을 받는 것으로 나타났으며 특히, 온도의 영향이 지배적인 것으로 나타났다. 상대습도에 따른 반건조시간은 건조온도가 높을수록 차이가 적게 나타났다.

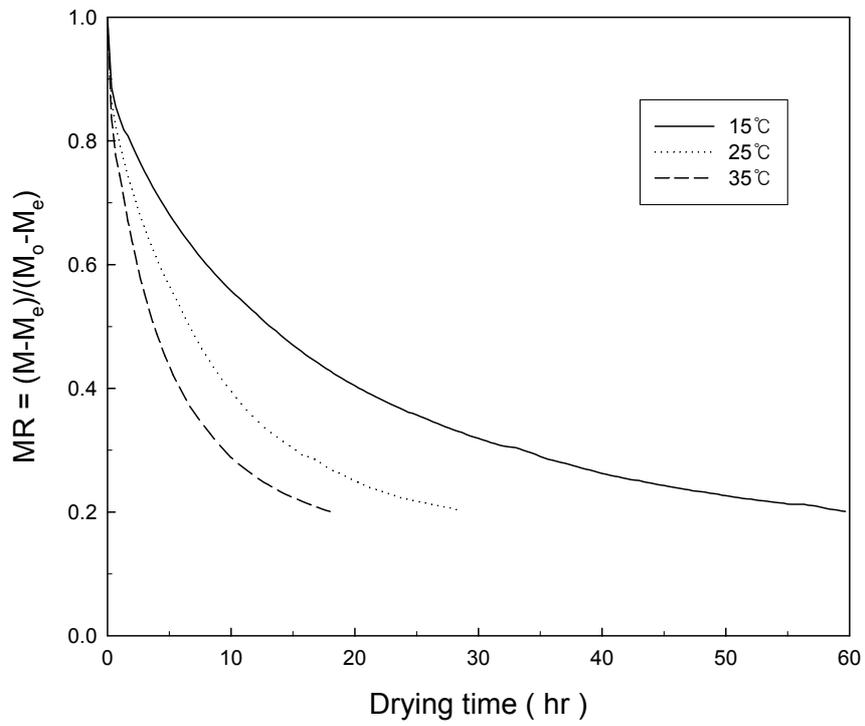


Fig. 3-4 Drying curves of rough rice at the drying air temperatures and relative humidity 30%.

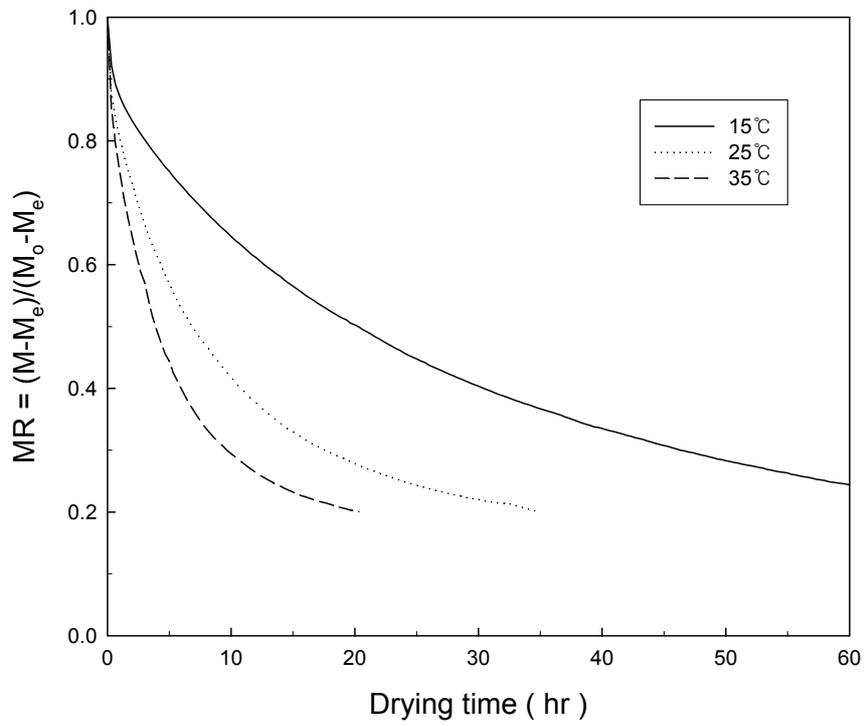


Fig. 3-5 Drying curves of rough rice at the drying air temperatures and relative humidity 50%.

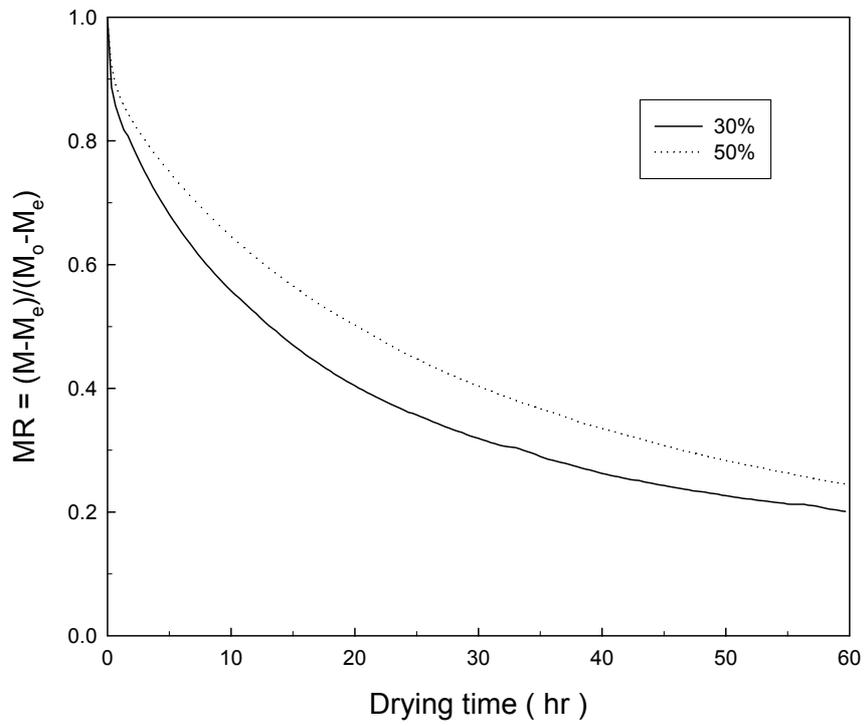


Fig. 3-6 Drying curves of rough rice at the relative humidity and air temperature 15°C.

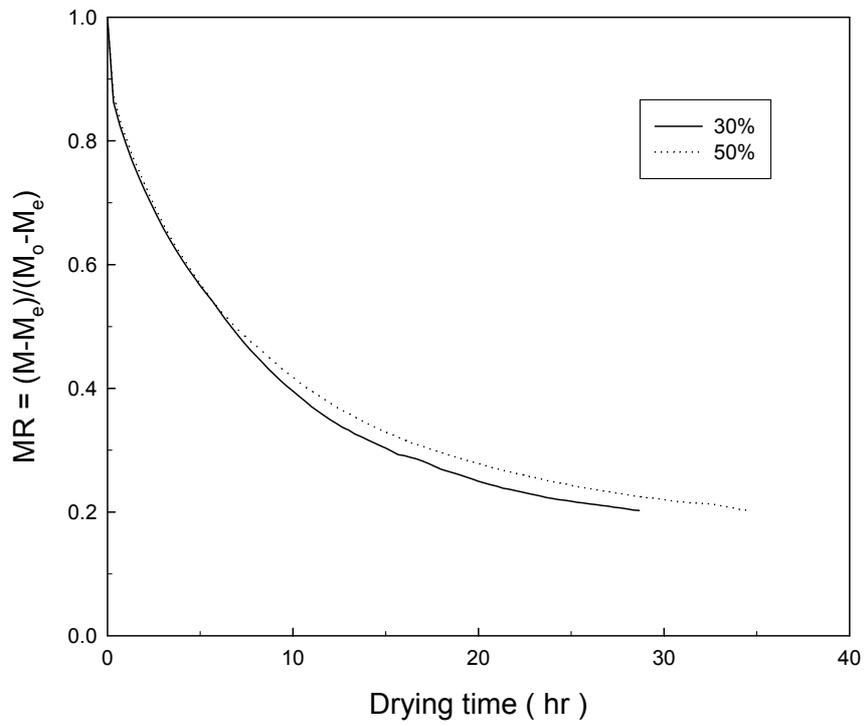


Fig. 3-7 Drying curves of rough rice at the drying air temperatures and relative humidity 25°C.

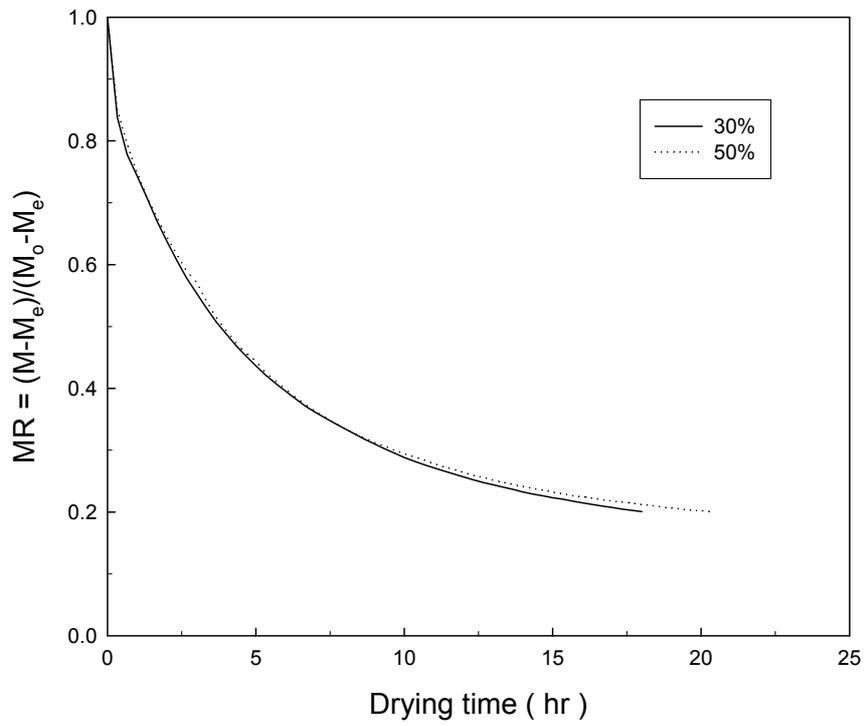


Fig. 3-8 Drying curves of rough rice at the drying air temperatures and relative humidity 35°C.

나. 저온 박층건조모델

건조실험 3회 중에서 2회의 결과치를 평균치로 구하여 모델의 실험상수를 결정하는데 이용하였으며, 1회의 건조실험 결과치를 모델의 검증에 이용하였다. 4개의 건조방정식 즉, Page, Thompson, Lewis 및 축소수분확산모델의 실험상수와 결정계수는 다음의 표 3-1과 같이 나타났다. 표에서와 같이 실험상수는 건조온도와 상대습도의 함수로 나타났다. 실험상수의 결정계수는 Page 및 Thompson 모델에서 0.96이상으로 나타났으며, Thompson 모델과 수분확산모델의 A 는 다소 낮게 나타났다.

4개 건조방정식의 적합성을 검증하기 위하여 온도별 함수율비의 실험치와 예측치 간의 RMSE와 결정계수를 표 3-2에 나타내었다. 표에서와 같이 Page 모델의 경우 결정계수는 0.995이상, RMSE는 0.018이하로 나타났다. 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 나타났다. 따라서, 함수율비(MR)의 값이 0~1사이의 값을 고려할 때 RMSE를 기준으로 Page 모델이 다른 3개 건조방정식에 비해 적합성이 인정되었다.

Table 3-1 Estimated values of coefficients for selected drying models

Models	Experiment coefficients	R^2
Page	$P = 0.01932 - 0.0002115(T_0) - 0.0692(RH_0) - 0.00000882(T_0)^2 + 0.00283(T_0 \cdot RH_0)$	0.9616
	$Q = 0.47652 + 0.0218(T_0) + 0.54742(RH_0) + 0.0001065(T_0)^2 - 0.02225(T_0 \cdot RH_0)$	0.9998
Thompson	$A = -1.56637 + 1.11379(T_0) - 91.10758(RH_0) - 0.03812(T_0)^2 + 3.15455(T_0 \cdot RH_0)$	0.8921
	$B = 43.18647 - 1.98255(T_0) - 5.03908(RH_0) + 0.02255(T_0)^2 + 0.52125(T_0 \cdot RH_0)$	0.9777
Lewis	$k_1 = 0.00883 + 0.00221(T_0) - 0.04967(RH_0) + 0.0000505(T_0)^2$	0.9989
Simplified diffusion	$A = 0.70516 + 0.00166(T_0) + 0.35596(RH_0) + 0.00007175(T_0)^2 - 0.01432(T_0 \cdot RH_0)$	0.5583
	$k_2 = 0.01043 + 0.00148(T_0) - 0.04217(RH_0) + 0.0000395(T_0)^2$	0.9987

Table 3-2 Estimated coefficients of determination and root mean square error of moisture ratio for selected drying models

Models	R ²			RMSE		
	15°C	25°C	30°C	15°C	25°C	30°C
Page	0.9986	0.9962	0.9950	0.01203	0.01845	0.01607
Thompson	0.9978	0.9946	0.9929	0.01588	0.02246	0.03872
Lewis	0.9788	0.9721	0.9628	0.07531	0.08216	0.08470
Simplified diffusion	0.9581	0.9451	0.9326	0.03472	0.04365	0.04941

그림 3-9과 그림 3-10은 건조온도 15°C, 상대습도 30 및 50%에서의 함수율비의 실험치와 각 모델에 의한 예측치를 비교한 것이다. 그림에서와 같이 Page 모델과 Thompson 모델에 의한 예측치는 전체 건조시간에 걸쳐서 함수율비의 실험치와 잘 일치하는 것으로 나타났지만 수분확산모델과 Lewis 모델은 상당한 오차를 나타내었다. 그림 3-11와 그림 3-12은 건조온도 25°C, 상대습도 30 및 50%에서의 함수율비의 실험치와 각 모델에 의한 예측치를 비교한 것이다. 그림에서와 같이 Page 모델에 의한 예측치는 함수율비의 실험치와 전체 건조온도에서 잘 일치하는 것으로 나타났으나 Thompson 모델의 예측치는 건조온도 15°C에서와는 달리 다소 오차를 나타내었다. 그림 3-13과 그림 3-14는 건조온도 35°C, 상대습도 30 및 50%에서의 함수율비의 실험치와 각 모델에 의한 예측치를 비교한 것이다. 그림에서와 같이 Page 모델에 비해 Thompson, Lewis 및 수분확산모델은 상당한 오차를 나타내었다.

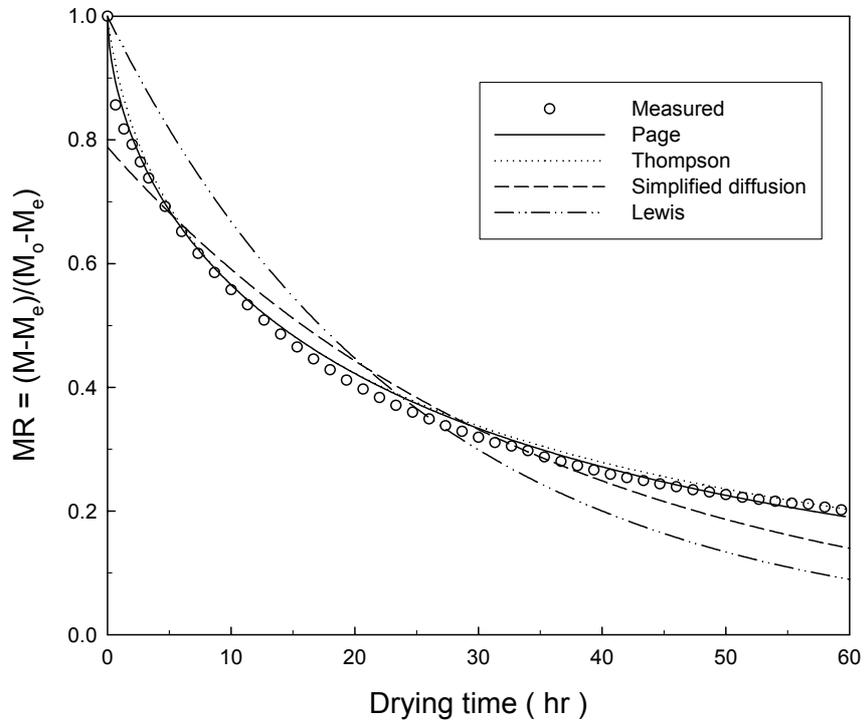


Fig. 3-9 Comparison of measured and predicted moisture ratio by four different drying models at 15°C and 30% rh.

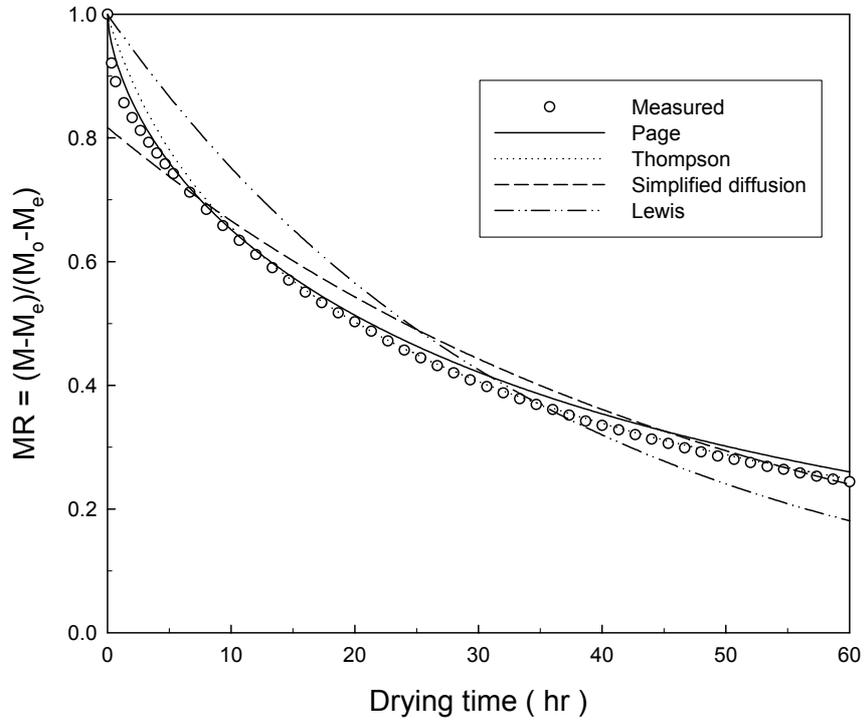


Fig. 3-10 Comparison of measured and predicted moisture ratio by four different drying models at 15°C and 50% rh.

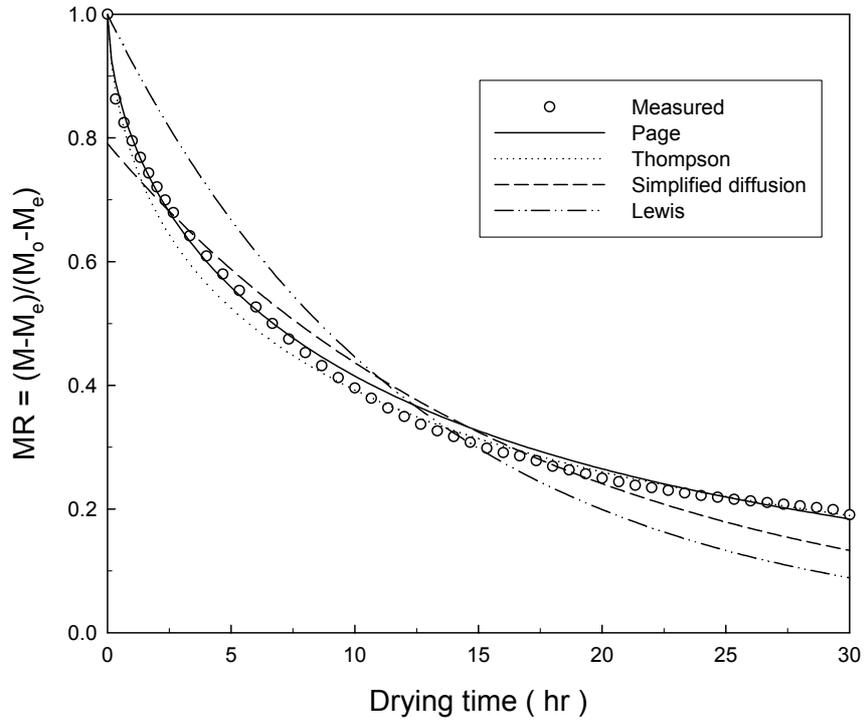


Fig. 3-11 Comparison of measured and predicted moisture ratio by four different drying models at 25°C and 30% rh.

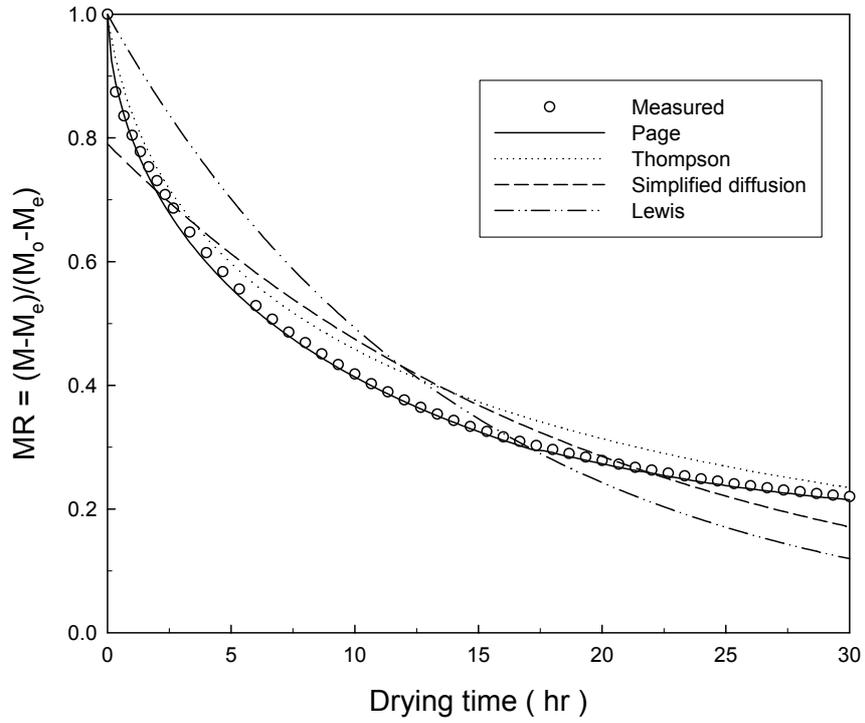


Fig. 3-12 Comparison of measured and predicted moisture ratio by four different drying models at 25°C and 50% rh.

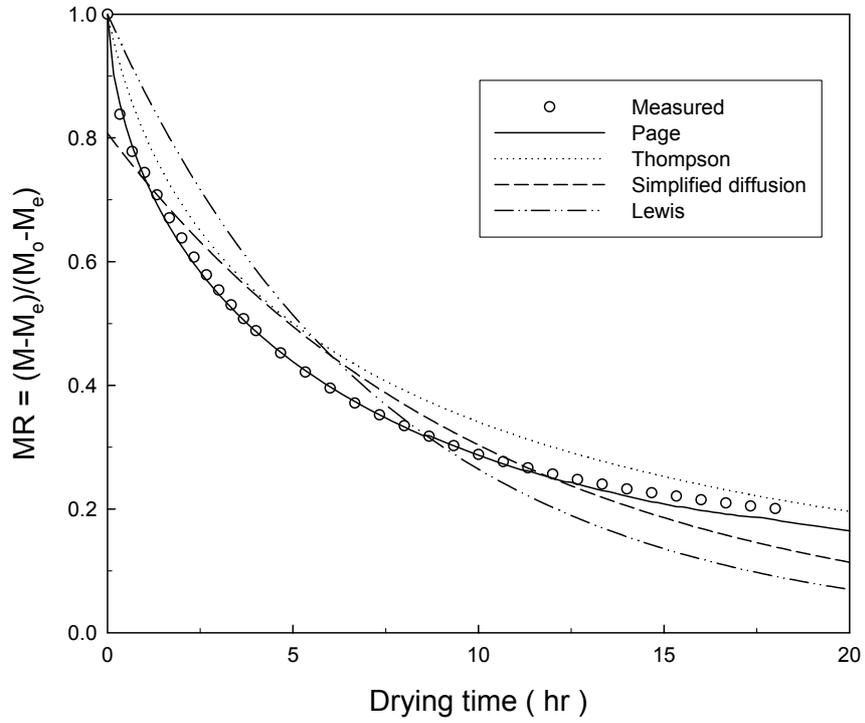


Fig. 3-13 Comparison of measured and predicted moisture ratio by four different drying models at 35°C and 30% rh.

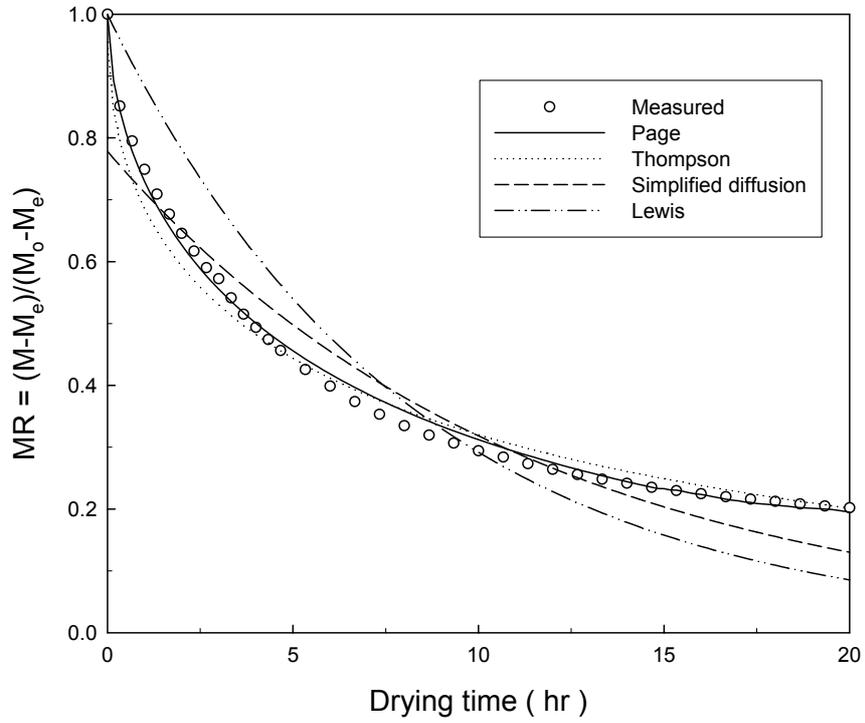


Fig. 3-14 Comparison of measured and predicted moisture ratio by four different drying models at 35°C and 50% rh.

4. 결론 및 요약

본 연구는 저온 건조온도 15℃, 25℃ 및 30℃ 3수준, 상대습도 30% 및 50% 2수준에 대하여 벼의 건조속도를 측정하고, 곡물 건조모델로 많이 이용되고 있는 4개의 건조방정식에 대하여 적합성을 검정하여 저온 박층건조모델을 개발하기 위하여 수행되었다.

본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

가. 건조속도는 모든 온도 및 상대습도 영역에서 지수함수로 감소하는 것으로 나타났다.

나. 건조속도의 지표가 되는 반건조시간은 온도와 상대습도의 영향을 받는 것으로 나타났으며, 상대습도의 영향보다는 건조온도의 영향이 지배적인 것으로 나타났다. 상대습도에 따른 반건조시간은 건조온도가 높을수록 차이가 적게 나타났으며 특히, 건조온도가 낮은 15℃에서는 상대습도가 건조속도에 미치는 영향이 크게 나타났다.

다. 건조실험 3회 중에서 2회의 결과치를 평균치로 구하여 모델의 실험상수를 결정하는데 이용하였으며, 1회의 건조실험 결과치를 모델의 검증에 이용하였다. 4개의 건조방정식의 실험상수는 건조온도와 상대습도의 함수로 나타났다.

라. 4개의 건조방정식의 예측치와 함수율비의 실험치 간의 RMSE와 결정계수로 건조방정식의 적합성을 검정하였다. Page 모델의 경우 결정계수는 0.995이상, RMSE는 0.018이하로 나타났다. Thompson 모델은 결정계수가 0.992이상, RMSE는 0.038이하로 나타났으며, Lewis 모델과 축소수분

확산모델의 결정계수는 0.932이상, RMSE는 0.084이하로 나타나 Page 모델과 Thompson 모델에 비해 다소 적합성이 떨어지는 것으로 나타났다.

따라서, 함수율비(MR)의 값이 0~1사이의 값을 고려할 때 RMSE를 기준으로 Page 모델의 적합성이 인정되었다.

제 2 절 벼의 저온건조특성

1. 서언

쌀의 품질에 영향을 주는 주요 요인은 벼의 품종, 재배방법 및 수확후처리 기술 등이 있는데, 최근에 많은 품종육종과 재배방법의 개선으로 품종별, 재배방법간의 차이는 점차적으로 감소하는 추세이다. 수확후처리공정에는 건조·저장·가공·포장·유통공정 등이 있으며, 이 중에서 건조공정은 수확후처리공정의 첫 번째 기술로 건조공정이 적절치 못하면 저장, 가공 및 포장 등 후속 공정에 악영향을 줌으로 건조공정은 쌀의 품질유지에 관건이 되는 기술이다.

우리나라에서는 열풍건조방법과 상온통풍건조방법이 벼의 건조에 이용되고 있다. 열풍건조방법은 순환식건조기 또는 연속식건조기를 이용하여 45~55℃의 고온 열풍으로 건조하는 방법이다. 이 방법은 건조속도가 0.6~1.2%(w.b./hr) 범위인 고능력(high-capacity) 건조방법으로 식미보다는 처리 능력에 우선을 둔 건조방법이다. 따라서, 열손상에 의한 동할미 증가와 과건조의 위험이 높아 식미 저하의 우려가 높다.

상온통풍건조방법은 사일로 또는 사각빈에 상온의 공기를 통풍하여 건조하는 방법으로 벼의 품질 손상을 최소화 할 수 있지만 건조속도가 0.01~0.04%(w.b./hr) 범위인 저능력(low-capacity) 건조방법으로 건조소요시간이 길고 특히, 강우 등 외기조건이 불리할 경우 건조속도가 저하되어 벼의 품질 저하가 우려된다.

저온건조는 10~30℃ 범위의 저온의 제습된 공기를 이용하여 곡물을 건조하는 방법으로 저온제습건조방법이라고도 한다. 저온에서 건조가 이루어짐으로 건조 중의 열손상을 최소화하여 동할의 억제와 식미 향상 등 고품질의 쌀 생산에 가장 적합한 건조방법으로 보고되고 있다(Ishibashi 등, 1971).

따라서, 본 연구의 목적은 저온의 정온정습공기를 이용하여 벼의 건조실험

을 수행하고 품질특성을 구명하는데 있으며, 구체적인 목적은 다음과 같다.

가. 벼 건조기간의 기상조건을 고려하여 정온정습의 공기를 발생할 수 있는 열펌프(heat pump)와 용량 150kg 규모의 실험용 순환식건조기를 설계·제작하여 실험을 수행한다.

나. 벼의 정온정습건조를 수행하여 건조속도와 동할율을 측정하고 식미의 관능검사를 실시하여 품질특성을 구명한다.

다. 벼의 건조온도별 저장실험을 수행하여 저장특성을 구명한다.

2. 재료 및 방법

가. 공시재료

실험에 사용한 시료는 2003년 9월 강원도 철원지역에서 수확한 오대벼로 40kg 포대에 담아 실험 전까지 2℃ 저온저장고에 보관하였다. 초기 함수율은 25.41~26.63%(w.b.) 범위였다.

나. 실험장치

저온의 공기를 발생할 수 있는 Heat pump와 실험용 순환식건조기를 기본 실험장치로 사용하였으며, 구체적인 설계 및 제작 자료는 제 5절에 기술하였다. Heat pump는 상단의 냉각시스템은 증발기, 응축기, 재열기 및 팽창변을 각각 1개씩 병렬로 구성하여 주 냉각시스템으로 사용하였으며, 하단의 냉각시스템은 증발기 및 응축기를 일체형으로 개발하여 보조 냉각시스템으로 사용하도록 하였다. 상단 냉각시스템의 증발기에서 냉각된 공기가 응축기에서 가열이 되도록 하였으며, 상대습도를 조정할 수 있도록 응축기후에 재열기를 설치하였다. 증발기에 설치된 온도센서(TE-1)와 토출 공기의 온도를 측정하도록 온도센서(TE-2)를 설치하여 TE-1과 TE-2를 비교해서 제습량을 결정하도록

록 하였다. 외기조건에 따라 가습량이 요구될 경우 건조공기의 상대습도를 조절하기 위하여 건조공기 공급부에 노즐을 설치하고 가열식 가습기로 수분을 공급하도록 설계하였다.

Heat Pump의 송풍량 (Q)은 풍량비 $30 \text{ m}^3/\text{min} \cdot \text{ton}$ 을 기준으로 건조기 용량 150kg 에 대하여 $4.5 \text{ m}^3/\text{min}$ 으로 계산되어 손실을 고려하여 $6 \text{ m}^3/\text{min}$ 으로 하였다.

Heat pump의 송풍저항은 증발기와 응축기의 송풍저항과 벼 퇴적층의 송풍저항으로 구분할 수 있다. 벼의 퇴적층에서의 송풍저항을 고려하여 벼층의 두께 $D=0.08\text{m}$, 풍속 $v=0.29\text{m/s}$ 일 때 32.1 mmAq 이었다.

Heat pump의 가열 및 냉각부하를 결정하기 위한 외기조건은 기상청의 수원지역 10~11월 기상자료를 이용하였으며 가열시 온도 -5°C , 상대습도 70%, 냉각시 온도 25°C , 상대습도 70%를 기준으로 계산하였다.

Heat pump의 설계를 위한 습공기의 성질은 ASHRAE(1989)를 기준으로 하였으며, Heat pump의 토출공기의 조건은 최고 온도 50°C 일 때 상대습도 50%, 최저 온도 20°C 일 때 상대습도 35%를 목표로 설계하였다.

외기공기(온도 25°C , 상대습도 70%)를 토출공기(온도 20°C , 상대습도 35%)로 냉각하는 과정에서 소요되는 냉각열량은 11991.2kJ/hr 이었으며, 소요되는 가열열량은 6244.5kJ/hr 로 나타났다.

또한, 외기공기(온도 -5°C , 상대습도 70%)를 토출공기(온도 50°C , 상대습도 50%)로 가열하는 과정에서 가열열량은 57411.4kJ/hr 로 나타났다.

상대습도를 제어하기 위한 가습량은 14.23kg/hr 로 나타났다.

따라서, 냉각 및 가열시 소요되는 열량을 고려하여 Heat pump의 압축기는 Copeland사(USA)의 2.3kW (CRJQ-0300 -TF5)로 선정하였다. 압축기의 최대능력은 응축온도 48.9°C , 증발온도 -1.1°C 에서 37112.8kJ/hr 이며 따라서, 건조에 요구되는 총 열량 57411.4kJ/hr 을 고려하면 보조열원의 열량은

20298.6kJ/hr로 나타났다.

Heat pump의 크기는 1629×840×1400mm(L×W×H)로 전면에 제어부를 설치하였으며, 이동이 용이하도록 개발하였다. Heat Pump는 압축기, 증발기, 응축기 및 팽창밸브 등 냉각장치와 외기공기를 유입하는 필터, 댐퍼 및 송풍기로 구성하였다.

송풍기 입구에는 댐퍼를 설치하여 송풍량을 조절할 수 있도록 하였다. 상대습도와 온도 조절을 위해 재열기와 가열식 가습기를 설치하였다. 냉매는 R-22를 사용하였다.

제어부는 수동 및 자동 모드로 선택할 수 있도록 하였으며, 상대습도를 제어하지 않을 경우 가습기와 재열기를 독립적으로 선택할 수 있도록 하였다.

벼의 건조온도별 건조 및 품질특성을 구명하기 위하여 실험용 건조기를 설계 및 제작하였다. 실험용 건조기의 주요 설계조건은 다음의 표 3-3과 같다. 표에서와 같이 실험용 건조기의 용량은 150kg으로 하였으며, 순환식 횡류형 건조기로 설계하였다.

Table 3-3 Specifications of the test dryer

Items	Specifications
Type	Grain circulating cross-flow type
Capacity	150kg
Dimensions of drying column	
Number of row	2
Grain depth	0.08m
Volume	0.0272m ³
Width	0.7m
Height	0.24m
Capacity	15kg
Tempering chamber	
Volume	0.2455m ³
Capacity	135kg
Air flow rate	0.04m ³ /min·kg(6m ³ /min)
Grain flow rate	75~180kg/hr(1.2~2.9m/hr)

그림 3-15는 실험용 건조기의 설계도이다. 건조기의 용적은 산물밀도 $550\text{kg}/\text{m}^3$ 을 기준으로 0.2727m^3 이다. 건조기의 용적은 건조실과 템퍼링실 용적의 합으로, 건조실과 템퍼링실의 비를 1:9로 하였을 때 건조실 용적은 0.0272m^3 이다. 건조실의 곡물층 열수 (*row*)는 2열로 하였으며, 1열의 용적은 0.0136m^3 이다. 곡물층의 두께 (*D*)는 0.08m , 건조부의 폭 (*W*)은 0.7m 로 하였다. 건조실 1열의 용적을 고려하여 건조부의 높이 (*H*)를 0.24m 로 하였다. 따라서, 건조실의 용량은 15kg , 템퍼링실의 용량은 135kg 으로 설계하였다.

실험용 건조기는 두께 1mm 강판을 사용하여 템퍼링실 4단, 건조실 및 배출부 각각 1단씩 총 6단으로 하였다. 곡물의 순환을 위해 버킷엘리베이터를 설치하였고(그림 3-16), 템퍼링실 상부의 곡물 투입부에 집진기(송풍량 $4.2\text{m}^3/\text{min}$)를 설치하였다.

건조실은 벼의 원활한 유하를 위하여 벼의 안식각(Kim 등, 1998)을 고려하였으며, 타공율 40%의 다공철판으로 제작하였다. 건조실을 통과하기 전에 균일한 유하를 위해 삼각덕트를 설치하였다(그림 3-17). 건조공기가 유입되는 공기유입부는 직경 150mm , 공기배풍부는 340mm 로 제작하였다.

곡물이 배출되는 피드부는 직경 140mm 의 원통으로, 중앙을 중심으로 $350\times 120(\text{L}\times\text{W})\text{mm}$ 의 배출구 2개를 대칭으로 두고, 피드부가 모터(0.4kW)에 의해 회전하면서 곡물이 배출되도록 하였다. 또한, 곡물의 균일한 배출을 위하여 피드부의 회전을 정·역회전하도록 제어하였으며, 인버터(S500, Mitsubishi, Japan)를 이용하여 피드부의 회전속도를 조정하여 순환속도를 $1.2\sim 2.9\text{m}/\text{hr}$ (순환량 $75\sim 180\text{kg}/\text{hr}$) 범위에서 조정이 가능하도록 하였다. 이때 각 배출구의 1회전시 용량은 1.4kg 이었다. 배출부는 직경 75mm 스크류콘베이어와 AC 모터(0.75kW)를 이용하여 벼를 배출할 수 있도록 구성하였다(그림 3-18).

실험용 건조기의 주 콘트롤러는 주 전원, 집진부, 피드부, 배출부 및 순환 부로 구분하여 독립적으로 제어되도록 하였다(그림 3-19).

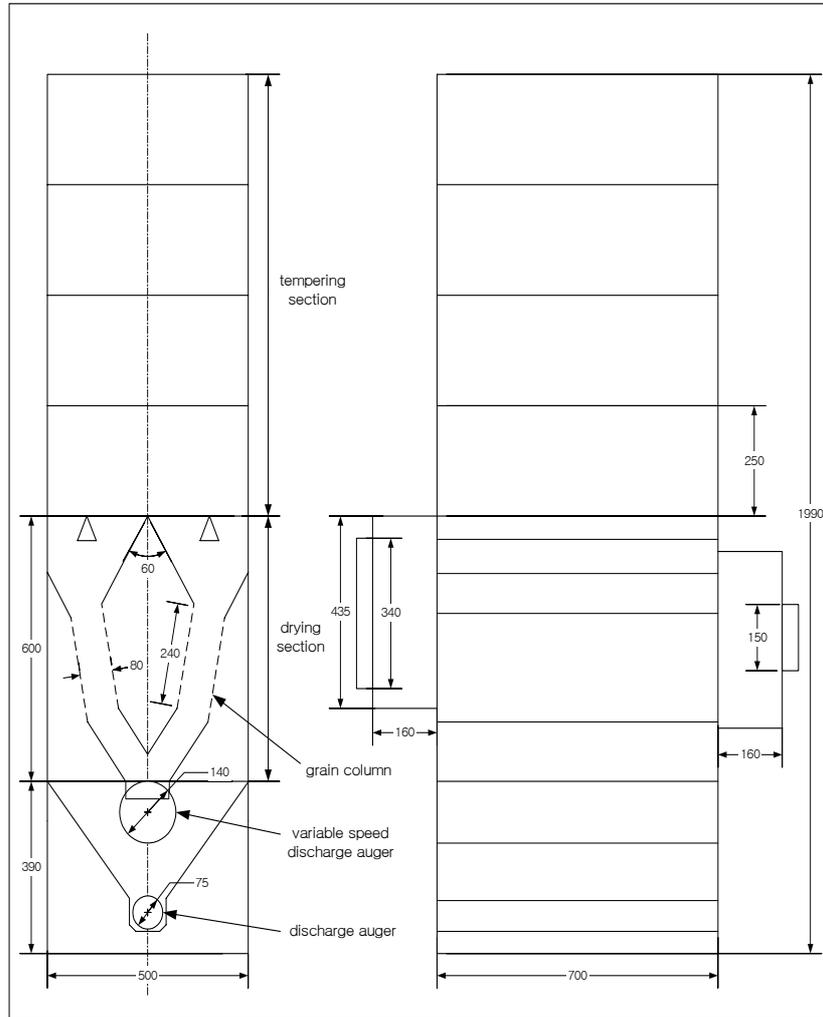


Fig. 3-15 Schematic diagram of the test dryer.



Fig. 3-16 View of the test dryer.



Fig. 3-17 View of the drying section.



Fig. 3-18 View of the drying exhaust and feeder section.



Fig. 3-19 View of the controller section.

다. 실험방법

1) 건조방법

건조온도는 20℃, 30℃, 40℃ 및 50℃의 4수준으로 하였다. 그림 3-20은 Heat pump를 실험용 건조기의 공기유입부에 부착한 사진이다. 건조온도 20℃ 및 30℃에서는 상대습도를 40%, 40℃에서는 35%로 설정하였으며, 50℃에서는 상대습도를 조정하지 않았다. 각각의 건조온도에 대하여 벼 150kg을 실험용 건조기에 투입하고 최종함수율 15.5~16.5%(w.b.)까지 건조를 실시하였다.

실험용 건조기의 건조공기 유입부 1지점, 배기부 1지점, 건조실 4지점, 템퍼링실 2지점 및 외기 등 총 9지점에 Thermocouple(T type, OMEGA, USA)를 설치하고 자료수집장치(7327, Datascan, UK)를 이용하여 2분 간격으로 온도를 측정하여 PC에 저장하였다. 또한, 상대습도는 건조공기 유입부, 배기부 및 외기 각각 1지점에서 습도계(TR-72S, Japan)를 이용하여 측정하였다.

건조중 송풍량 측정은 배기부에 길이 200mm의 원형덕트를 연결하여 풍속계(ANO6141, KANOMAX, Japan)를 이용하여 측정하였다.

실험 시작 후 2시간 간격으로 시료를 채취하여 함수율 및 동할율을 측정하였으며, 건조 중 함수율의 경시적 변화는 단립수분계(CTR-800E, S.SEIKI, Japan)를 이용하여 측정하였다.



Fig. 3-20 View of drying test.

2) 품질 측정

건조온도에 따른 품질 및 식미 특성을 구명하기 위하여 함수율, 동할율, 발아율 및 식미 관능검사를 수행하였다.

함수율은 10g-135℃-24시간 상압정온건조법으로 3회 반복 측정 후 105도법으로 환산하였다.

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.

발아율은 벼의 정립 100립을 물로 충분히 세척한 후 직경 15cm 페트리디쉬에 여과지를 깔고 여과지가 충분히 젖을 정도로 물을 가하여 벼 정립을 올려놓은 다음 온도 20℃, 상대습도 60%의 항온항습기에서 7일간 배양한 후 발아한 미립수를 3회 반복 측정하였다.

백미의 식미 관능검사를 위해 벼를 실험용 현미기(THU, Satake, Japan)로 2회 탈부하여 현미를 제조하였으며, 압력조절이 가능한 마찰식 정미기(VP-31T, Yamamoto, Japan)를 이용하여 동일한 백도를 기준으로 2~3회 반복 투입하여 백미를 제조하였다. 제조한 백미는 색채선별기(ACS, A-MECS, Korea)로 착색립 및 복백립을 선별하였고, 최종적으로 흡선별기(TRG, Satake, Japan)를 이용하여 싸라기를 선별한 후 완전립을 제조하였다.

백미의 색도는 원통형 용기(41×12.5mm)에 백미를 담아 흑색 패드에서 색차계(Minolta, CR 200, Japan)를 이용하여 L, a, b값을 5회 반복 측정하였다. 백도는 백도계(CR 300-3, Kett, Japan)를 이용하여 5회 반복 측정하였다.

식미 관능검사는 패널요원 30명이 관능적 특성(윤기, 색, 밥 이외의 냄새 강도, 밥 특유의 맛 강도, 경도, 탄력성, 낱알의 응집성, 부착성)과 외관, 향, 맛, 조직감 및 전반적인 품질을 2회 반복 평가하였다.

백미 1000g을 수압수세미(PR-7J, Aiho, Japan)를 이용하여 세미한 후 백

미의 수분함량에 따라 가수량(백미 수분함량 14%기준, 가수량 1.45배)을 조정하여 30분간 침지한 후 전기밥솥(Samsung 850J, Korea)을 이용하여 취반하였다.

취반이 끝난 후 15분간 뜸을 들인 후 혼합하여 상온에서 냉각한 후 뚜껑이 있는 시료제시용 용기(8.5×4.5cm, D×H)에 약 50g의 밥시료를 cream scoop를 사용하여 분배하였다.

표 3-4는 밥의 관능검사에 사용된 검사표이다. 표에서와 같이 평가항목은 총 13가지이며, 평가방법은 9점 항목척도(1=대단히 낮음, 5=보통정도, 9=대단히 높음)를 사용하였다.

각 시료는 SAS(ver 7.0)을 이용하여 시료간의 유의적인 차이를 검증하기 위해 분산분석을 하였으며, 시료간의 차이가 있는 경우 SNK(Studentized Newman Keul)의 다중비교를 실시하여 시료군의 평균값을 비교 분석하였다.

3) 저장특성

건조온도에 따른 건조 벼의 저장특성 실험을 위해 건조온도 30℃ 및 48℃의 2수준, 상온통풍건조 1수준 총 3수준의 시료를 이용하여 4℃와 25℃ 저장구에 보관하였다. 실험을 실시하기 전에 시험용 임펠러형 현미기(HSMC-4C, Hansung, Korea)를 이용하여 벼에서 현미로 도정한 후, 시험용 마찰식 정미기(VP-31T, Yamamoto, Japan)를 이용하여 도정한 백미를 실험에 사용하였다.

건조온도 30℃ 및 48℃, 상온통풍건조한 건조벼를 각각 폴리에틸렌 용기(Ziploc, 한국존슨쥬)에 담아 4℃ 냉장 저장고와 25℃ 항온기에서 8개월 동안 저장하였다. 저장 0, 4, 8, 12, 16, 24, 32주 간격으로 일정량의 시료를 채취하여 품질을 측정하였다.

품질측정 항목은 시료를 대상으로 함수율, 발아율, 지방산가, 아밀로오스, 호화특성 및 밥의 물리적 특성을 측정하였다.

지방산가는 곡물 100g중의 유리지방산의 중화에 필요한 KOH의 양을 mg로 나타낸 것으로, A.A.C.C.법(1983)에 따라 정량하였다. 40mesh로 사별한 쌀가루 10g을 셀룰로오스 원통여지(26×100mm, Whatman, England)에 넣은 후에, soxhlet 추출 방법을 이용하여 petroleum ether로 16시간 추출하였다. 추출한 후에 용매를 제거하여 지방 성분을 농축하고 50mL 0.02% BAP(Benzene-alcohol-phenolphthalein) 용액으로 녹여 0.0178N KOH 용액으로 적정하였다. 지방산가는 다음 식에 의하여 측정하였다.

$$\text{Fat acidity value} = \frac{(T-B) \times 100}{100 - W} \times 100 \quad (\text{mL KOH}/100\text{g})$$

T : 시료의 0.0178N KOH 적정량 (mL)

B : 공시료의 0.0178N KOH 적정량 (mL)

W : 시료 100g의 수분 함량 (g)

아밀로오스 함량은 Juliano법(1971)에 의하여 측정하였다. 쌀가루를 50℃의 dry oven에서 24시간 동안 건조시키고, 쌀가루 100mg에 95 % ethanol 용액 1mL, 1N NaOH 용액 9mL를 첨가하여 가열 수조에서 10분간 반응시킨 후 실온 냉각하고 증류수로 100mL로 정용시켜 전분 용액을 얻었다. 전분 용액 5mL에 1N acetic acid 1mL, 0.2% iodine 용액(0.2% I₂ + 2.0% KI) 2mL을 첨가한 후 증류수로 다시 100mL로 정용하여 20분간 방치한 다음 620nm에서 흡광도를 측정하여 아밀로오스 함량을 측정하였다. 표준곡선은 아밀로오스(Type III from potato, Sigma, Co., USA)와 아밀로펙틴(from potato, Sigma, Co., USA)을 일정 비율로 혼합한 다음 위와 같은 방법으로 흡광도를 측정하여 작성하였으며, 이로부터 건조시료의 아밀로오스 함량을 계산하였다.

호화 특성은 아밀로그래프(RVA, Rapid Visco Analyzer, Newport Scientific Pty, Ltd., Australia)를 이용하여 측정하였다. 쌀을 40mesh 되게 쌀가루로 만든 다음 3g을 평량하여 Sample can에 넣어 증류수 25mL에 잘 분산시킨 후, 50℃에서 95℃까지 가열하여 호화시키고 다시 50℃로 냉각하여 호화 특성을 측정하였다.

밥의 물리적 특성을 측정하기 위해 취반하여 Texture analyzer (TA-XT2, Stable Microsystems Ltd., England)를 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 건조특성

1) 외기온습도

벼의 건조온도와 건조기간('03. 9. 25~10. 6) 중 외기온도는 다음의 표 3-5와 같다. 표에서와 같이 건조기간 중 외기온도는 평균 20.2~23.1℃이었으며, 상대습도는 평균 50.6~71.6%로 나타났다. 건조온도 30.7℃에서 평균 외기온도와 상대습도가 가장 낮은 20.2℃와 50.6%로 나타났으며, 건조온도 21.9℃에서는 외기온도가 평균 23.1℃로 가장 높게 나타났다. 또한, 건조온도 48.7℃에서는 상대습도가 가장 높은 평균 71.6%로 나타났다.

Table 3-5 Ambient air temperatures and relative humidity during drying test

Drying air temperature (℃)	Ambient air temperature(℃)	Ambient relative humidity(%)
21.9	23.1(19.0~28.1)	59.8(42.0~74.0)
30.7	20.2(17.5~23.3)	50.6(42.0~63.0)
38.8	20.8(19.0~25.4)	67.3(53.0~74.0)
48.7	21.2(19.5~22.5)	71.6(63.0~80.0)

그림 3-21은 건조기간 중 유입되는 건조공기의 온도 변화를 나타낸 것이다. 건조온도는 21.9℃(20.3~23.2℃), 30.7℃(29.5~31.5℃), 38.8℃(36.2~39.4℃) 및 48.7℃(47.6~50.1℃)로 나타났다. 각 온도별 표준편차는 건조온도 21.9℃에서 가장 높은 0.82℃로 나타났으며, 건조온도 48.7℃에서는 0.74℃, 건조온도 30.7 및 38.8℃에서는 각각 0.46 및 0.41℃로 비슷한 경향이였다. 따라서, 건조온도는 건조기간 중 대단히 균일하게 유지되었다. 유입되는 건조공기의 상대습도는 건조공기 21.9℃, 30.7℃, 38.8℃ 및 48.7℃에서 각각 41.3%, 38.6%, 33.8% 및 10.4%로 나타났다. 건조공기 48.7℃에서는 상대습도를 임의로 조정하지 않아 낮게 나타났다. 각 온도별 상대습도 편차는 3.2, 2.4, 2.7 및 0.4%로 나타나 균일하게 유지되는 것으로 판단된다.

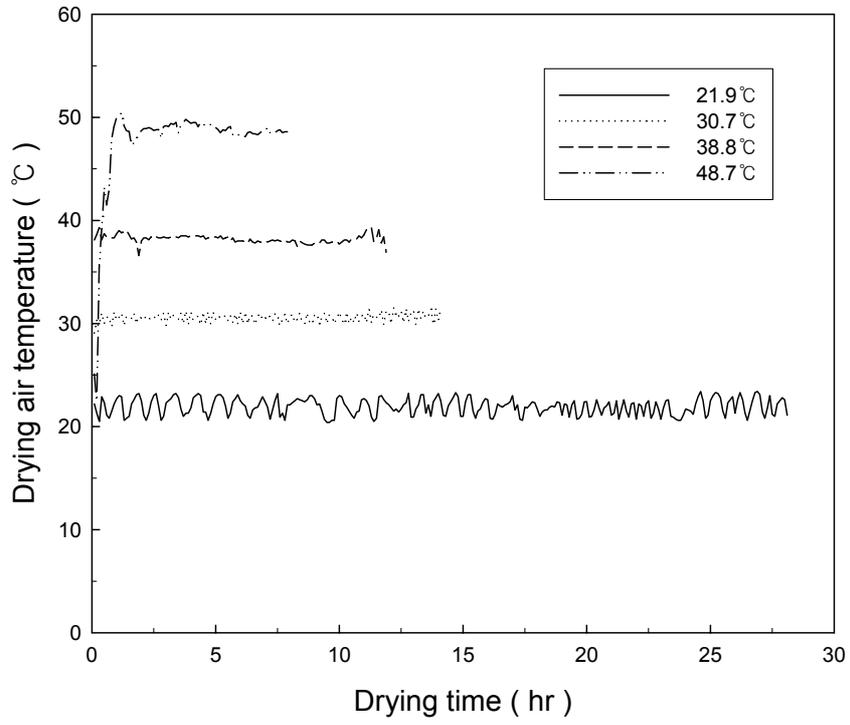


Fig. 3-21 Changes of drying air temperatures during drying.

그림 3-22는 건조기간 중 건조실의 곡물온도 변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 곡물온도는 건조온도 21.9℃에서 초기에 평균 17.0℃이었으며, 건조 5시간 후부터 건조종료까지 평균 20.4℃를 유지하였다. 건조온도 30.7℃에서는 건조 3시간 후부터는 평균 24.6℃를 유지하였다. 건조온도 38.8℃에서는 건조초기부터 4시간까지는 30.0℃이하였으며, 이 후 건조종료까지 평균 30.8℃로 나타났고, 최고 곡온상승은 33.8℃로 나타났다. 건조온도 48.7℃에서는 건조초기에 곡온이 다소 증감을 반복하는 경향을 보였으며, 건조 3시간에는 35.0℃에 도달했고, 이후 건조시간이 경과할수록 다소 증가하여 최대 40.5℃를 나타내었다.

그림 3-23은 건조기간 중 텀퍼링실의 곡물온도를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 텀퍼링실의 곡물온도는 건조온도 21.9℃에서는 건조실의 곡물온도와 비슷한 경향으로 나타났고, 건조온도 30.7℃에서는 초기에는 건조실의 곡물온도보다 0.5℃정도 낮게 나타났지만 건조중반부터는 비슷한 경향으로 나타났다. 건조온도 38.8℃에서는 건조초기에 25.0℃에서 점차 증가하여 31.0℃까지 증가하였다. 건조온도 48.7℃에서는 건조 2시간 후에 30.2℃로 나타났고, 이후 증가하여 최대 35.0℃까지 증가하였다.

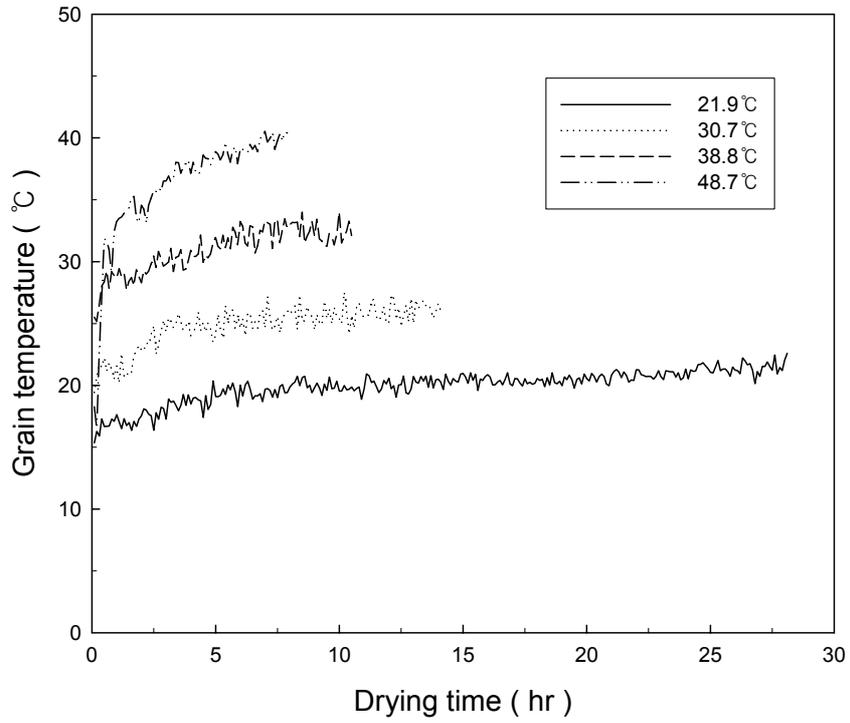


Fig. 3-22 Changes of grain temperatures in drying chamber during drying.

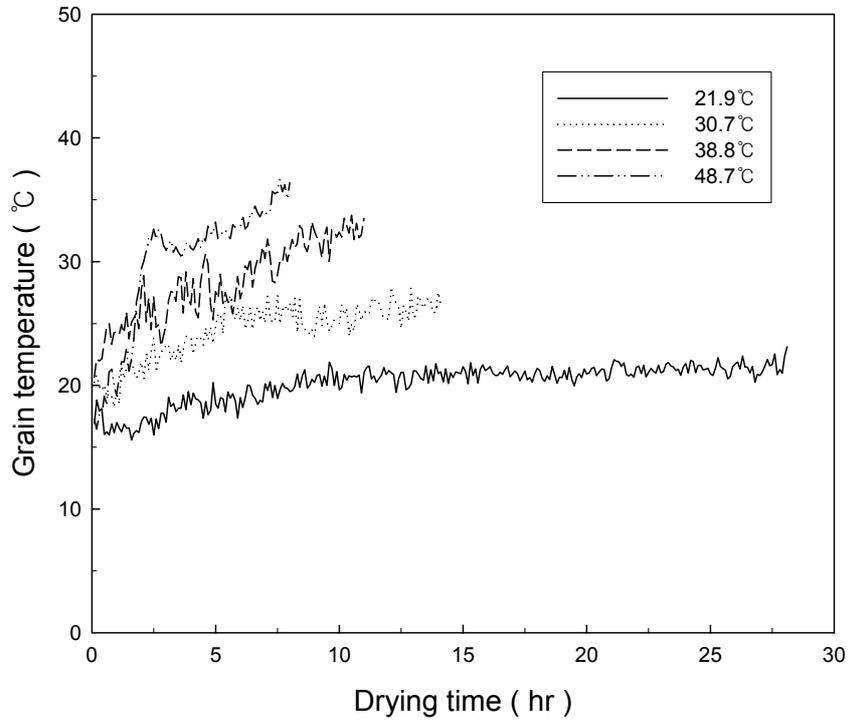


Fig. 3-23 Changes of grain temperatures in tempering chamber during drying.

3) 건조속도

표 3-6은 건조온도에 따른 건조속도를 나타낸 것이다. 표에서와 같이 건조온도 21.9℃에서는 함수율 25.41%(w.b.)를 16.82%(w.b.)까지 건조하는데 29.4시간이 소요되었으며, 건조속도는 0.29%(w.b./hr)로 나타났다. 건조온도 30.7℃, 38.8℃ 및 48.7℃의 경우에서 건조 소요시간은 각각 14.8, 12.0 및 8.1시간으로 나타났고, 건조속도는 0.61, 0.85 및 1.26%(w.b./hr)로 나타났다.

Table 3-6 Drying rates and drying times by drying air temperatures

Drying air temperature (°C)	Initial moisture content (%w.b.)	Final moisture content (%w.b.)	Drying time (hr)	Drying rate (%w.b./hr)
21.9	25.41	16.82	29.4	0.29
30.7	25.63	16.65	14.8	0.61
38.8	26.52	16.32	12.0	0.85
48.7	26.23	16.14	8.1	1.26

나. 품질특성

그림 3-24는 건조온도 별 건조 중 동할율의 경시적 변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 건조온도 21.9℃의 경우 건조 중 동할이 발생하지 않았다. 건조온도 30.7℃의 경우 건조 8시간 후에 0.4%의 동할이 발생하였으며, 건조종료 후에는 1.6%로 증가하였다. 건조온도 38.8℃의 경우 건조 10시간 후에 3.6%의 동할이 발생하였으며, 건조종료 후에는 6.8%로 증가하였다. 건조온도가 가장 높은 48.7℃의 경우 건조 4시간 후 동할율이 6.4%로 급격히 증가하였으며, 건조종료후에는 24.2%까지 증가하였다.

따라서, 건조온도가 증가할수록 동할의 발생이 증가하였다. 특히, 동할율이 급격히 증가한 건조온도 48.7℃의 경우 건조실의 곡온이 건조 4시간 후에 35.0℃ 이상으로 증가하여 곡온의 증가는 동할율과 밀접한 관계가 있는 것으로 나타났다.

그림 3-25는 건조온도 별 건조전·후의 발아율 변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 건조온도 21.9℃의 경우 발아율은 96.2%에서 94.3%, 건조온도 30.7℃의 경우 92.6%에서 85.3%, 건조온도 38.8℃의 경우 96.1%에서 89.4%로 감소하였다. 또한, 건조온도 48.7℃의 경우 93.4%에서 83.4%로 감소하였다. 따라서, 발아 감소율은 건조온도 21.9℃, 30.7℃, 38.8℃ 및 48.7℃에서 각각 2.0%, 7.9%, 7.0% 및 10.7%로 나타났으며, 건조온도가 가장 높은 48.7℃에서 유의적인 차이가 나타났다.

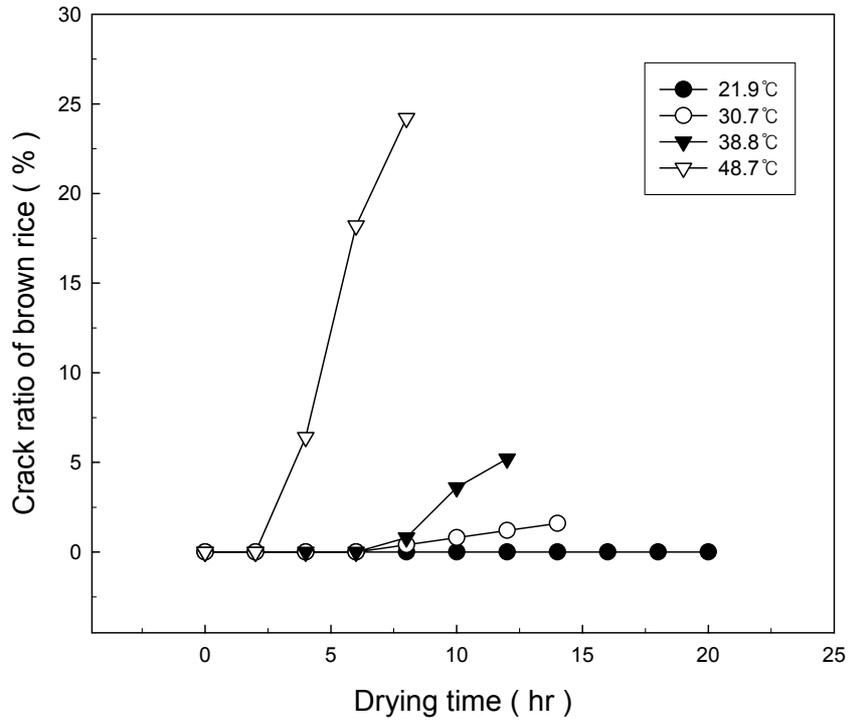


Fig. 3-24 Influence of drying air temperature on crack ratio of brown rice.

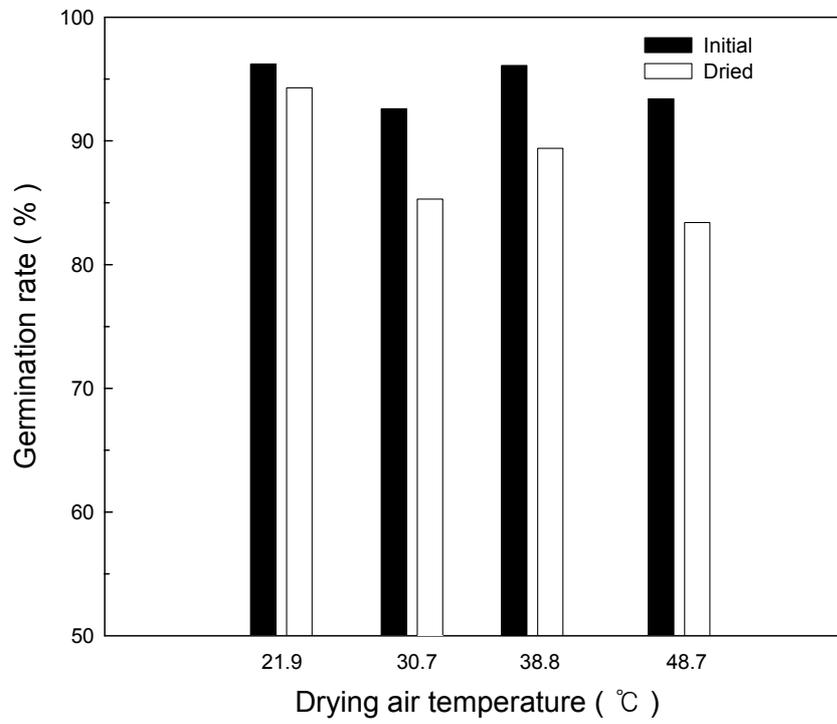


Fig. 3-25 Comparison of initial and dried germination rates of rough rice by drying air temperature.

다. 식미특성

벼의 건조온도에 따른 식미특성을 구명하기 위하여 건조한 벼를 동일한 조건으로 도정하여 선별하였다. 표 3-7은 도정 후의 건조온도 별 백미의 함수율과 외관품위를 나타낸 것이다. 건조온도 별 백미의 외관품위는 유의적인 차이가 나타나지 않았다.

Table 3-7 Moisture contents and appearance properties of milled rice used sensory evaluation

Drying air temperature (°C)	Moisture content (%w.b.)	Whiteness	Broken rice	Chalky rice	Colored rice
21.9	16.7	38.9	0.3	2.3	1.0
30.7	16.2	38.9	0.2	3.7	0.8
38.8	16.8	38.4	0.4	2.6	0.9
48.7	15.8	37.8	0.7	3.9	1.2

그림 3-26은 종합적인 식미지표인 전반적인(Overall) 품질·외관(Appearance)의 품질·맛(Taste)의 품질·냄새(Order)의 품질·조직감(Texture)의 품질을 건조 온도 별로 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 건조온도가 높을수록 5가지의 식미지표는 낮게 나타났다.

표 3-8은 건조온도에 따른 전체 조사표의 관능검사 결과를 나타낸 것이다. 표에서와 같이 밥 이외의 냄새 강도(Off-odor)는 21.9℃와 30.7℃에서 다른 건조온도 영역에 비해 유의적인 차이가 나타났고, 윤기의 정도(Glossiness), 색의 강도(Color) 및 탄력성(Springiness)는 21.9℃, 30.7℃ 및 38.8℃에서 48.7℃에 비해 유의적인 차이가 나타났다. 밥 특유의 맛강도(Taste) 및 거칠음성(Roughness)은 21.9℃에서 다른 건조온도 영역에 비해 유의적인 차이가 나타났다.

경도(Hardness), 낱알의 응집성(Cohesiveness) 및 부착성(Adhesiveness)은 건조온도에 따른 유의적인 차이가 나타나지 않았다.

식미 관능검사의 결과를 종합적으로 판단해볼 때 건조온도 21.9℃와 30.7℃에서 식미가 높게 나타났으며, 건조온도가 가장 높은 48.7℃에서는 상대적으로 낮게 나타났다.

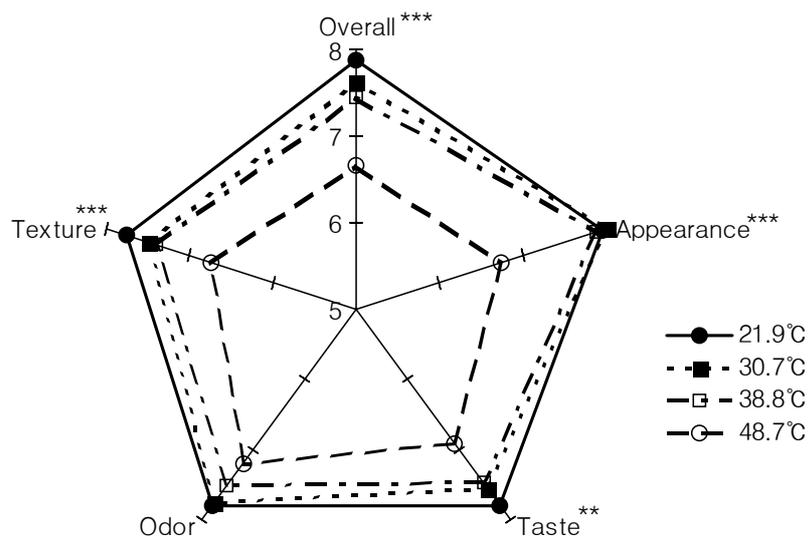


Fig. 3-26 Results of sensory evaluation scores of cooked rice by drying air temperature.

Table 3-8 Results of sensory evaluation for cooked rice by drying air temperature

Sensory Characteristics		21.9°C	30.7°C	38.8°C	48.7°C
Odor	off-odor*	2.13 ^b	2.13 ^b	2.34 ^{ab}	2.71 ^a
Appearance	glossiness***	8.02 ^a	7.93 ^a	7.31 ^a	7.25 ^b
	color***	1.91 ^c	1.96 ^c	2.09 ^c	3.38 ^a
Taste	taste***	7.89 ^a	7.57 ^{ab}	7.52 ^{ab}	6.96 ^c
Textures	roughness*	2.16 ^a	2.41 ^{ab}	2.48 ^{ab}	2.80 ^b
	hardness	4.43	4.79	4.61	4.35
	springiness*	7.16 ^a	6.98 ^a	6.91 ^a	6.20 ^b
	cohesiveness	6.71	6.52	6.54	5.88
	adhesiveness	5.63	5.91	5.57	5.62
Quality of odor		7.80	7.77	7.52	7.20
Quality of appearance***		7.96 ^a	8.02 ^a	7.89 ^a	6.75 ^c
Quality of taste**		7.80 ^a	7.55 ^a	7.48 ^a	6.93 ^b
Quality of texture***		7.77 ^a	7.50 ^{ab}	7.41 ^{ab}	6.75 ^c
Quality of overall***		7.88 ^a	7.63 ^a	7.45 ^{ab}	6.66 ^c

*, **, *** Significantly different at the $P < 0.05$, $P < 0.01$, $P < 0.001$, respectively.

^{abc} Values followed by the same letter in the same row are not significantly different.

라. 저장특성

1) 함수율 변화

건조온도에 따른 벼의 함수율 변화는 표 3-9와 같다. 함수율은 저장 기간이 경과함에 따라 감소하였고, 건조온도 30℃, 상온통풍건조, 건조온도 48℃ 순으로 높게 나타났다. 또한, 4℃에서 저장구는 25℃ 저장구에 비해 함수율이 높은 것으로 나타났다.

따라서, 건조온도에 따른 함수율의 변화는 뚜렷한 경향이 나타나지 않았다.

Table 3-9 Influence of drying air temperatures on moisture content

Storage temperature (℃)	Storage period (weeks)	moisture content(%w.b.)		
		drying air temperature 30℃	Nature air drying	drying air temperature 48℃
4	0	14.75	14.70	14.37
	4	15.39	15.02	15.19
	8	14.86	14.75	14.75
	12	14.86	14.84	14.64
	16	15.12	14.93	14.89
	24	15.00	15.25	14.58
	32	13.52	13.39	13.49
25	0	14.75	14.70	14.37
	4	14.95	14.93	14.63
	8	14.57	14.74	13.72
	12	14.08	13.96	13.89
	16	14.32	14.55	13.87
	24	13.76	13.78	13.11
	32	12.19	11.93	11.88

2) 발아율 변화

발아율은 쌀의 신선도를 예측할 수 있는 척도로서, 고온에서 건조하는 벼는 발아율이 저하되고, 발아가 되지 않는 쌀은 죽은 쌀과 마찬가지로 신선도가 떨어지고 식미도 저하된다. 건조 온도에 따른 벼의 발아율 변화는 그림 3-27과 같다. 저장 전의 발아율은 건조온도 30℃ 91%, 상온통풍 86%, 건조온도 48℃ 85%이었는데, 4℃에서 저장한 건조벼의 발아율은 저장 32주 후에 건조온도 30℃에서 1.1배(80%), 상온건조벼 1.1배(79%), 열풍건조벼 1.1배(76%)의 완만한 감소를 보인 반면, 25℃에서 저장한 건조벼의 발아율은 급격히 저하되어 저장 32주 후에 건조온도 30℃ 1.9배(49%), 상온건조벼 3.2배(27%), 열풍건조벼 4.3배(20%) 감소되었다. 즉, 저장 기간이 지남에 따라 발아율은 감소하였고, 건조 방법에 따라서 건조온도 30℃, 상온통풍, 건조온도 48℃ 순으로 발아율이 높았으며, 4℃에서 저장한 건조벼가 25℃에서 저장한 건조벼보다 발아율이 높게 나타났다.

본 연구에서는 건조 온도가 높은 열풍건조벼의 발아율이 낮고, 25℃에서 저장한 건조벼의 발아율이 낮은 결과를 보였는데, 발아율의 저하는 온도에 의한 열손상이 효소 활성의 저하, 유리지방산 생성 등의 결과를 유도하여 나타난 결과로 판단된다.

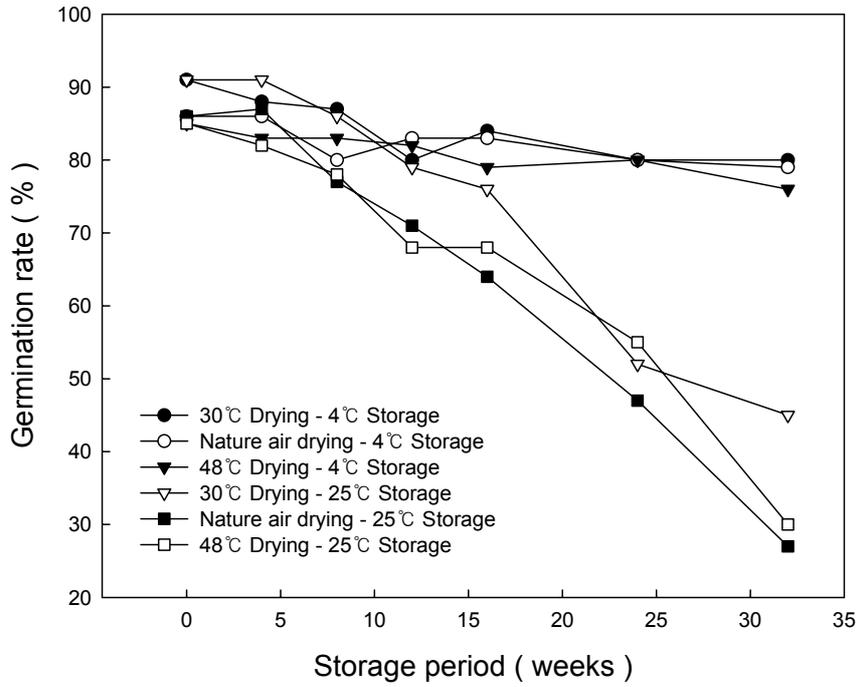


Fig. 3-27 Influence of drying air temperatures on germination rate.

3) 지방산가 변화

곡물의 저장중 품질의 열화를 일으키고 묵은 쌀의 냄새를 생성하는 유리지방산에 의한 변패의 척도인 지방산가는 저장 중 지질의 산화에 의해 증가한다고 하였으며(Moritaka, S. et al., 1972), 김영배 등(1985)은 저장미의 품질에 가장 큰 영향을 미치는 인자중의 하나는 지방질로 저장중 쌀의 지방질 가수분해 효소와 자동산화에 의한 각종 가수분해물 및 산화물의 증가가 나타나는데 결합지질보다는 유리 지질의 변화가 더 심하고, n-hexanal 등의 카르보닐 화합물에 의한 고미취가 발생한다고 보고하였다.

건조온도 별 저장온도 및 기간에 따른 지방산가의 변화는 그림 3-28과 같다. 저장 전 초기 시료의 지방산가는 건조온도 30℃에서 9.0mg KOH, 상온통풍건조 및 건조온도 48℃에서 11.0 및 12.0mg KOH이었는데, 저장 32주 후 4℃에서 저장한 건조쌀의 지방산도는 건조온도 30℃ 1.7배(16.0mg KOH), 상온통풍건조 1.5배(17.0mg KOH), 건조온도 48℃ 1.5배(18.0mg KOH)의 완만한 증가를 보인 반면, 저장 32주 후 25℃에서 저장한 건조쌀의 지방산도는 건조온도 30℃ 3.4배(31.0mg KOH), 상온통풍건조는 3배(34.0mg KOH), 건조온도 48℃은 2.9배(35.0mg KOH)의 급격한 증가를 보였다. 또한 건조 방법에 따른 건조시료의 지방산가를 보면, 4℃에서 저장한 건조쌀의 지방산가는 저장 초기부터 저장 32주까지 건조온도 48℃, 상온통풍건조, 건조온도 30℃의 순서로 높았으며, 25℃에서 저장한 건조쌀의 지방산가는 저장 16주까지 건조온도 48℃, 건조온도 30℃, 상온통풍건조의 순서로 높았고, 그 이후에는 건조온도 48℃, 상온통풍건조, 건조온도 30℃의 순서로 커지는 경향을 보였다. 즉, 저장 기간, 건조 방법, 저장 온도에 따라 건조시료의 지방산가에 차이를 보였으며, 이러한 결과는 온도가 높아질수록 지방 산화가 촉진된다는 사실을 미루어 볼 때, 수확 후의 건조 온도, 저장 온도, 저장 기간이 건조쌀의 지방 산화에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

벼 품질 지표로서 현미의 지방산가가 20.0mg KOH에 달하면 품질이 저하된 것으로 간주할 수 있다. 저장 32주 동안, 4℃에서 저장한 건조온도 30℃은 지방산가 기준치를 초과하지 않았으나 상온통풍건조는 저장 24주부터, 건조온도 48℃은 저장 4주째부터 초과하였다. 또한, 25℃에서 저장한 모든 건조쌀은 저장 4주째부터 지방산가가 기준치를 넘었기 때문에 열풍 건조방법과 고온 저장조건에서 지방 산패로 인한 쌀의 품질 저하가 클 것임을 알 수 있다.

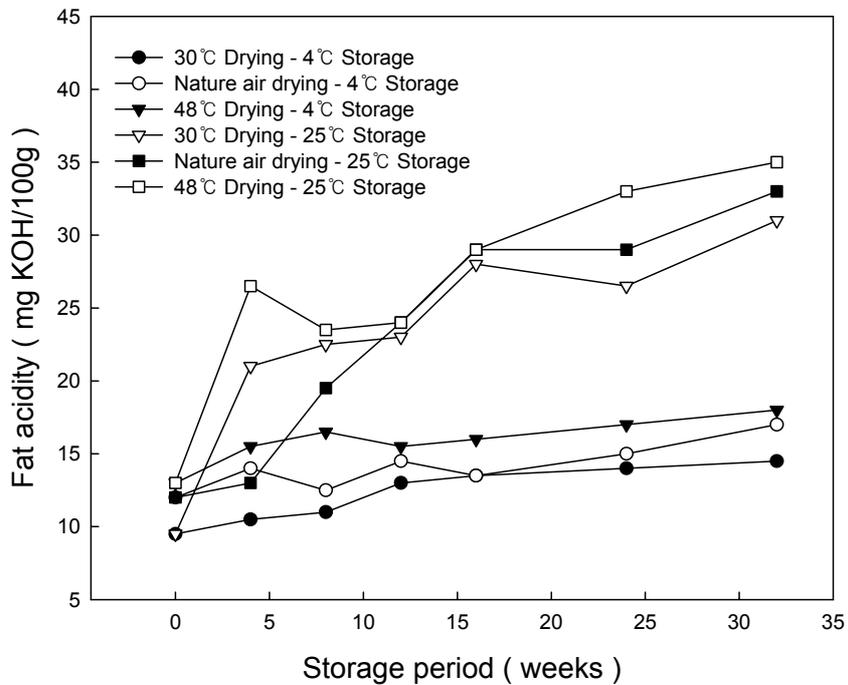


Fig. 3-28 Influence of drying air temperatures on fat acidity.

4) 아밀로오스 함량

건조온도 별 저장온도 및 기간에 따른 아밀로오스 함량의 변화 표 3-10과 같다. 초기 건조쌀의 아밀로오스 함량은 건조온도 30℃ 2.04%, 상온통풍건조 3.10%, 건조온도 48℃ 3.33% 이었는데, 저장 32주 후 4℃에서 저장한 건조쌀의 아밀로오스 함량은 건조온도 30℃ 2.7배(5.38%), 상온통풍건조 3.2배(9.96%), 건조온도 48℃ 3.5배(11.76%)로 증가했고, 25℃에서 저장한 건조쌀의 아밀로오스 함량은 건조온도 30℃ 2.9배(5.75%), 상온통풍건조는 3.2배(10.01%), 건조온도 48℃은 4.1배(13.51%)로 증가했다. 특히, 4℃ 저장시료는 저장 8주에, 25℃ 저장시료는 저장 24, 32주에 건조 방법에 따라 유의적인 차이를 보였다. 즉, 저장 기간, 건조 방법, 저장 온도는 아밀로오스 함량에 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

소규호 등(1999)에 의하면 저장기간이 길어질수록 아밀로오스의 함량이 증가한다고 보고한 결과와 일치하였다.

아밀로오스는 밥의 품질을 결정하는 중요한 인자 중 하나로, 아밀로오스 함량에 따라 0~5%는 찹쌀(waxy), 5~12%는 아주 낮은 아밀로오스, 12~20%는 저아밀로오스, 20~25%는 중간 아밀로오스, 25% 이상이면 고아밀로오스로 분류되는데(Juliano, B.O., 1992), 우리나라 사람들은 아밀로오스 함량이 낮은 미곡을 선호하는 것으로 보고되었다(김정옥 등, 1996). 아밀로오스 함량은 쌀의 조리 특성과 밥의 조직감이나 광택 등 식미를 결정하는 가장 중요한 요인이다(Juliano, B.O., 1965 ; Goodman, D.E. et al., 1984). 또한 쌀의 아밀로오스 함량은 찰기를 결정하는 가장 주된 인자이며 쌀의 평균 수분함량과 높은 부의 상관관계가 있다는 보고(Kongseree, N. et al., 1972 ; Antonio, A.A et al, 1973 ; Kato, S., 1979)가 있다.

본 연구에서 측정된 아밀로오스 함량은 2~13%로 비교적 낮은 아밀로오스를 함유하고 있는 것을 알 수 있으며, 건조 온도와 저장 온도가 낮을수록 아

밀로오스 함량이 낮아졌으므로 이와 같은 건조, 저장 조건으로 행한 쌀의 식미가 더욱 우수할 것으로 사료된다.

Table 3-10 Influence of drying air temperatures on amylose content

Storage temperature (°C)	Storage period (weeks)	Amylose content (%)			
		drying air temperature 30°C	Nature air drying	drying air temperature 48°C	F-Value
4	0	2.04±3.41	3.10±0.69	3.33±1.72	0.28 ^{1)N.S}
	4	3.63±1.99	5.22±3.09	5.67±0.57	0.75 ^{N.S}
	8	1.81±0.69 ^c	3.70±0.79 ^b	5.30±0.39 ^a	21.78 ^{2)**}
	12	4.92±1.33	6.81±3.54	7.27±1.91	0.78 ^{N.S}
	16	5.07±2.58	6.89±1.18	7.80±1.04	1.90 ^{N.S}
	24	4.80±0.01	8.71±4.79	5.99±0.50	2.16 ^{N.S}
	32	5.38±0.12	9.96±6.23	11.76±3.86	1.81 ^{N.S}
25	0	2.04±3.41	3.10±0.69	3.33±1.72	0.28 ^{N.S}
	4	5.22±2.58	7.11±1.80	5.84±0.66	0.81 ^{N.S}
	8	4.84±0.01	6.20±1.57	7.57±2.17	1.49 ^{N.S}
	12	6.43±1.36	8.25±2.02	8.40±1.05	1.54 ^{N.S}
	16	6.73±2.10	8.40±0.47	8.55±1.14	1.54 ^{N.S}
	24	6.61±0.39 ^c	8.56±0.03 ^b	11.20±1.27 ^a	27.27 ^{**}
	32	5.75±0.01 ^c	10.01±0.37 ^b	13.51±0.12 ^a	929.70 ^{***}

N.S : Not significant

*, ** and *** mean significant at p=0.05, 0.01 and 0.001, respectively. Different superscripts are significantly different at α=0.05 level

5) 호화특성

건조온도 별 저장온도 및 기간에 따른 호화특성 중 setback, 최고 점도, 최종 점도, breakdown의 변화는 표 3-11~14와 같다. setback은 50℃로 냉각한 후 측정된 최종 점도에서 최저 점도를 뺀 값으로, Juliano 등(1964)은 단백질, 아밀로오스 함량과 정의 상관 관계를 갖고, 식미와 부의 상관 관계를 갖는 값으로 보고했다. 표 3-11은 건조쌀의 setback을 나타낸 결과로서, 저장 기간이 지남에 따라 증가하는 경향을 보였고, 건조 방법에 따라 건조온도 30℃의 setback이 다른 조건보다 작았다. 이는 건조온도 30℃이 다른 건조쌀에 비해 아밀로오스 함량이 낮은 것과 연관지어 생각해볼 때, 식미가 좋은 것으로 판단할 수 있다. 또한 저장 온도가 높을수록 setback이 높은 결과를 보였다.

표 3-12는 최고 점도를 나타낸 것이다. 저장 기간에 따라 증가하였고, 건조 방법에 따라서는 건조온도 30℃, 건조온도 48℃, 상온통풍건조의 순서로 낮았으며, 4℃ 저장쌀에서 저장 4주와 32주에 유의적인 차이를 보였다. 25℃ 저장쌀은 건조온도 30℃, 상온통풍건조, 건조온도 48℃의 순서로 낮았고, 저장 0, 12, 16, 24, 32 주에 유의적인 차이를 보였다. 최고 점도의 증가는 저장 중에 일어나는 쌀의 노화에 의해 저장 초기의 신선한 쌀에 비해 전분 입자간의 결합력이 커지면서 팽윤에 대한 저항이 증가되어 나타나는 현상으로 해석할 수 있다.

표 3-13은 최종 점도를 나타낸 결과로서, 50℃로 냉각한 후 측정된 최종 점도는 높을수록 노화가 촉진되는 경향이 있다. 저장 기간이 지남에 따라 최종 점도값이 증가했고, 건조 방법에 따라 건조온도 30℃이 다른 건조쌀보다 낮은 값을 나타냈으며, 4℃에서 저장한 건조쌀의 최종 점도가 25℃ 저장군보다 훨씬 낮은 결과를 나타냈다. 미국의 저장 온도가 높을수록 쌀의 아밀로그래프 점도가 증가했다는 보고(Hamaker, B.R, 1993)가 있으며, 또한 고온 저

장에서 저장 3개월에 아밀로그래프 점도가 증가한다고 했다(Juliano, B.O, 1985).

Breakdown은 전분 입자의 붕괴와 가열된 paste의 안정성과 관계되는 값이며, 표 3-14와 같이 4℃ 저장시료의 경우에 저장 기간이 지남에 따라 감소하였고, 25℃의 저장시료는 뚜렷한 증감의 경향성을 나타내지 않았다. 저장 온도에서는 25℃의 저장시료가 4℃ 저장시료보다 breakdown이 훨씬 높게 나타났다.

Table 3-11 Influence of drying air temperatures on setback

Storage temperature (°C)	Storage period (weeks)	Setback (RVU)			
		drying air temperature 30°C	Nature air drying	drying air temperature 48°C	F-Value
4	0	80.55±1.94 ^b	93.25±0.71 ^a	88.88±1.35 ^a	40.94 ^{1)**}
	4	78.34±4.72	85.71±0.53	78.84±1.18	4.25 ^{2)N.S}
	8	84.54±4.65	91.96±15.38	85.75±1.53	0.36 ^{N.S}
	12	106.96±14.20	93.05±3.71	93.42±10.37	1.17 ^{N.S}
	16	75.13±4.07	86.71±7.60	85.59±5.54	2.33 ^{N.S}
	24	103.13±7.25	105.04±2.53	105.09±6.48	0.07 ^{N.S}
	32	84.13±2.54	87.33±1.06	78.54±9.49	1.22 ^{N.S}
25	0	83.00±1.53 ^c	93.25±0.71 ^a	88.88±1.35 ^b	34.08 ^{**}
	4	89.58±5.30	97.79±6.42	97.63±1.12	1.87 ^{N.S}
	8	128.29±6.66	116.00±22.98	101.25±0.82	1.92 ^{N.S}
	12	136.05±22.45	135.25±23.45	157.55±6.19	0.88 ^{N.S}
	16	92.84±0.23 ^b	98.75±0.47 ^a	96.30±1.94 ^{ab}	13.07 [*]
	24	135.00±2.47	129.63±16.44	150.50±0.35	2.55 ^{N.S}
	32	99.29±2.88	105.79±0.06	105.54±1.47	7.76 ^{N.S}

*, ** and *** mean significant at p=0.05, 0.01 and 0.001, respectively.

Different superscripts are significantly different at α=0.05 level

N.S : Not significant

Table 3–12 Influence of drying air temperatures on peak viscosity

Storage temperature (°C)	Storage period (weeks)	Peak viscosity (RVU)			
		drying air temperature 30°C	Nature air drying	drying air temperature 48°C	F–Value
4	0	120.71±4.30 ^b	146.21±3.13 ^a	139.05±1.94 ^a	32.40 ¹⁾ **
	4	110.59±2.35 ^b	123.88±1.35 ^a	113.38±4.07 ^b	12.33*
	8	111.13±9.72	114.34±0.47	119.42±9.43	0.57 ²⁾ N.S
	12	101.83±0.71	107.38±4.66	102.50±1.53	2.24 ^{N.S}
	16	103.96±9.25	121.84±5.18	116.71±3.59	4.06 ^{N.S}
	24	102.63±21.15	120.00±3.42	115.50±8.49	0.92 ^{N.S}
	32	135.04±0.41 ^b	143.63±1.83 ^a	137.21±0.53 ^b	31.45**
25	0	126.50±3.89 ^b	146.21±3.13 ^a	139.05±1.94 ^a	20.83*
	4	132.38±7.25	153.75±9.19	143.13±1.59	4.91 ^{N.S}
	8	152.84±2.24	164.54±2.53	157.17±6.24	4.17 ^{N.S}
	12	131.42±0.12 ^b	136.67±2.24 ^a	125.83±0.35 ^c	34.11**
	16	149.75±2.94 ^b	165.13±1.24 ^a	156.54±4.19 ^{ab}	12.86*
	24	151.71±0.06 ^{ab}	170.63±4.53 ^a	136.71±10.08 ^b	14.20*
	32	188.34±0.83 ^b	208.58±3.89 ^a	194.00±0.71 ^b	40.13**

*, ** and *** mean significant at p=0.05, 0.01 and 0.001, respectively.

Different superscripts are significantly different at α=0.05 level

N.S : Not significant

Table 3–13 Influence of drying air temperatures on final viscosity

Storage temperature (°C)	Storage period (weeks)	Final viscosity (RVU)			
		drying air temperature 30°C	Nature air drying	drying air temperature 48°C	F–Value
4	0	140.63±4.53 ^c	182.71±1.00 ^a	167.17±5.42 ^b	53.31 ^{1) **}
	4	142.46±8.43	165.09±6.95	145.71±2.88	7.03 ^{2) N.S}
	8	152.13±2.41	162.25±3.54	157.42±6.24	2.69 ^{N.S}
	12	149.13±5.37	148.92±7.54	148.38±5.72	0.01 ^{N.S}
	16	137.38±7.95	161.25±11.67	160.96±3.24	5.37 ^{N.S}
	24	144.96±15.73	155.38±4.18	157.38±8.90	0.78 ^{N.S}
	32	185.05±4.07 ^b	199.13±0.29 ^a	192.17±1.29 ^{ab}	16.26 [*]
5	0	146.54±3.83 ^c	182.71±1.00 ^a	167.17±5.42 ^b	43.79 ^{**}
	4	165.50±6.83	191.34±18.26	181.55±0.18	2.68 ^{N.S}
	8	211.34±2.00	211.54±4.19	202.29±13.02	0.88 ^{N.S}
	12	186.17±9.19	186.13±7.60	190.42±4.01	0.23 ^{N.S}
	16	188.04±4.89	200.75±1.65	193.46±4.07	5.65 ^{N.S}
	24	196.34±0.94 ^b	217.05±3.71 ^a	195.50±7.42 ^b	12.81 [*]
	32	246.84±2.00	257.13±9.37	250.46±0.65	1.77 ^{N.S}

*, ** and *** mean significant at p=0.05, 0.01 and 0.001, respectively.

Different superscripts are significantly different at α=0.05 level

N.S : Not significant

Table 3-14 Influence of drying air temperatures on breakdown

Storage temperature (°C)	Storage period (weeks)	Breakdown (RVU)			
		drying air temperature 30°C	Nature air drying	drying air temperature 48°C	F-Value
4	0	60.63±1.70	56.75±2.83	60.75±6.01	0.66 ¹ N.S
	4	46.46±1.36	44.50±5.06	46.50±2.36	0.24 ^{N.S}
	8	43.55±2.65	44.04±12.32	47.75±1.65	0.20 ^{N.S}
	12	59.67±9.55	51.50±0.82	47.55±6.19	1.76 ^{N.S}
	16	41.71±5.36	47.29±1.12	41.34±5.18	1.17 ^{N.S}
	24	60.79±1.82	69.67±1.77	63.21±6.89	2.34 ^{N.S}
	32	34.13±7.01	31.84±0.47	23.59±7.66	1.71 ^{N.S}
25	0	62.96±1.59	56.75±2.83	60.75±6.0	1.27 ^{N.S}
	4	56.46±5.71	60.21±2.65	59.21±2.88	0.47 ^{N.S}
	8	69.80±6.89	69.00±21.33	56.13±5.95	0.66 ^{N.S}
	12	81.29±13.14	85.80±13.61	92.96±1.82	0.58 ^{N.S}
	16	54.54±2.18	63.13±3.36	59.38±2.06	5.49 ^{N.S}
	24	90.38±1.48	83.21±15.61	91.71±3.01	0.49 ^{N.S}
	32	40.80±4.07	57.25±5.42	49.09±1.53	8.42 ^{N.S}

N.S : Not significant

6) 밥의 물리적 특성

취반 과정은 열에 의한 쌀의 구성 성분과 수분과의 반응으로 쌀알 표면에서 내부로 수분이 흡수된다. 즉, 취반시 온도가 상승함에 따라 배유부로 수분과 열이 충분히 스며들게 되면 전분립이 느슨해지기 시작하여 호화되고 온도가 더 상승하면 팽윤되어 붕괴되기 시작하는 것이다. Okabe(1979)는 쌀밥의 텍스처가 소비자의 기호도를 결정짓는 요인이고, Meullenet(1998) 등은 아시아 지역에서 가장 중요하게 생각하는 것은 쌀밥의 경도(hardness)라고 보고했다.

건조온도 별 저장온도 및 기간에 따른 밥의 기계적 텍스처 측정치는 그림 3-29~32와 같다. 경도는 저장 기간이 지남에 따라 증가했으며, 건조 방법에 따라서 건조온도 48℃이 가장 높았고, 경도의 증가폭도 건조온도 48℃이 가장 컸다. 또한 저장 온도가 높을수록 경도가 커졌다. 이러한 결과는 저장 기간, 높은 온도의 원인으로 인해 수분 함량이 감소하면서 경도가 증가했을 것으로 생각되며, 과건조미의 경우 쌀알을 구성하는 세포 조직 사이에 있는 자유수 외에도 분자결합을 하고 있는 결합수가 제거되어 경도가 높아진 것으로 생각된다. 또한 위의 결과는 쌀의 저장 중 쌀알의 인장강도 혹은 파쇄 경도가 증가되므로 저장미로 취반한 밥은 햅쌀로 취반한 밥에 비해 경도가 증가한다는 보고(Okabe, M., 1979)와 일치하였다. Juliano(1985)는 경도가 아밀로오스 함량과 정의 상관 관계를 가진다고 보고하였는데, 본 연구에서는 건조온도 30℃의 아밀로오스 함량과 경도가 가장 낮고, 건조온도 48℃이 가장 높은 것으로 보아 아밀로오스와 경도가 정의 관계를 갖는 결과가 나타났다. 탄성력과 응집성은 저장 기간, 건조 방법, 저장 온도에 따라 일정한 경향성을 나타내지 않았으며, 검성력은 저장 기간에 따라 증가하였고, 건조 방법에 따라서 건조온도 48℃이 가장 높았으며, 저장 온도에 따라서는 차이를 보이지 않았다.

쌀밥의 텍스처는 저장 기간, 저장 온도(Lima, I. et al., 1993), 품종, 아밀

로오스 함량, 호화 개시 온도, 가공방법 등의 요인에 의해 영향을 받는다는 보고(Z.Zhout et al., 2002)가 있다.

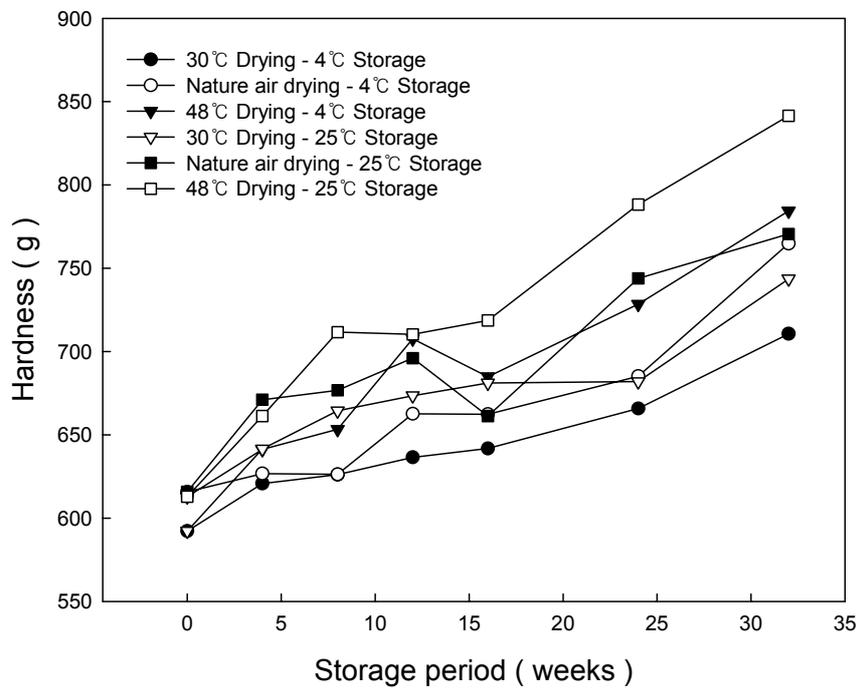


Fig. 3-29 Influence of drying air temperatures on hardness.

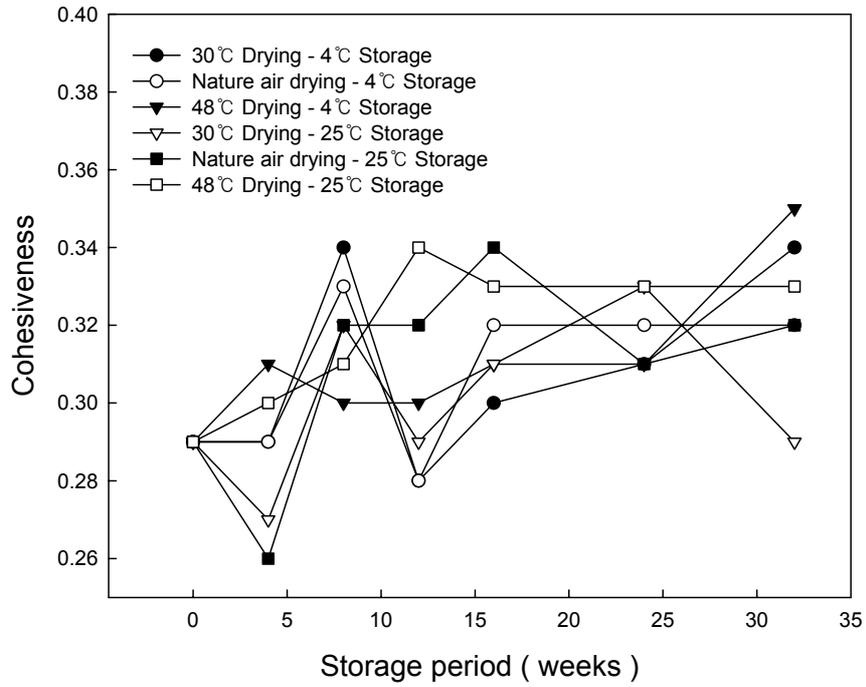


Fig. 3-30 Influence of drying air temperatures on cohesiveness.

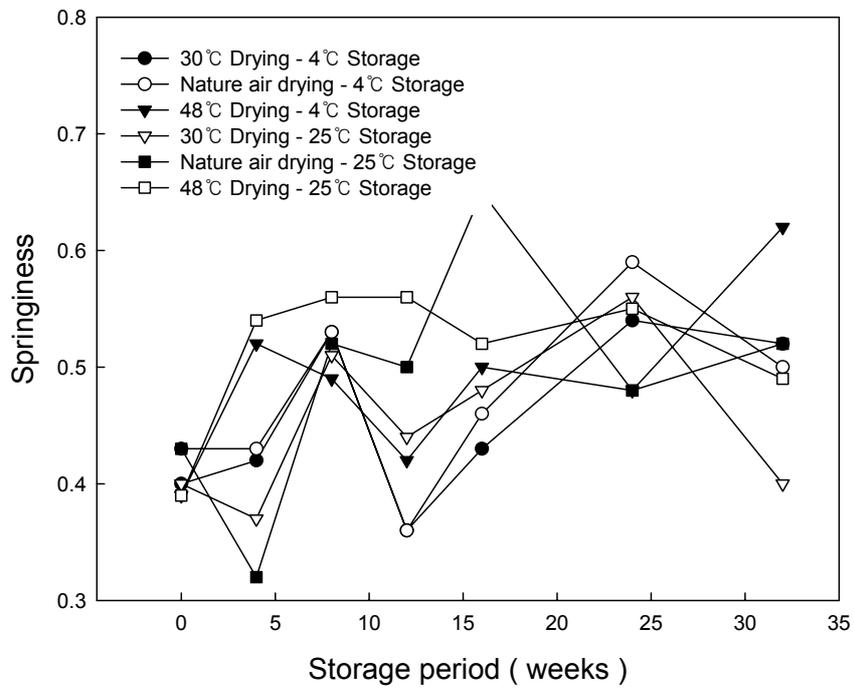


Fig. 3-31 Influence of drying air temperatures on springiness.

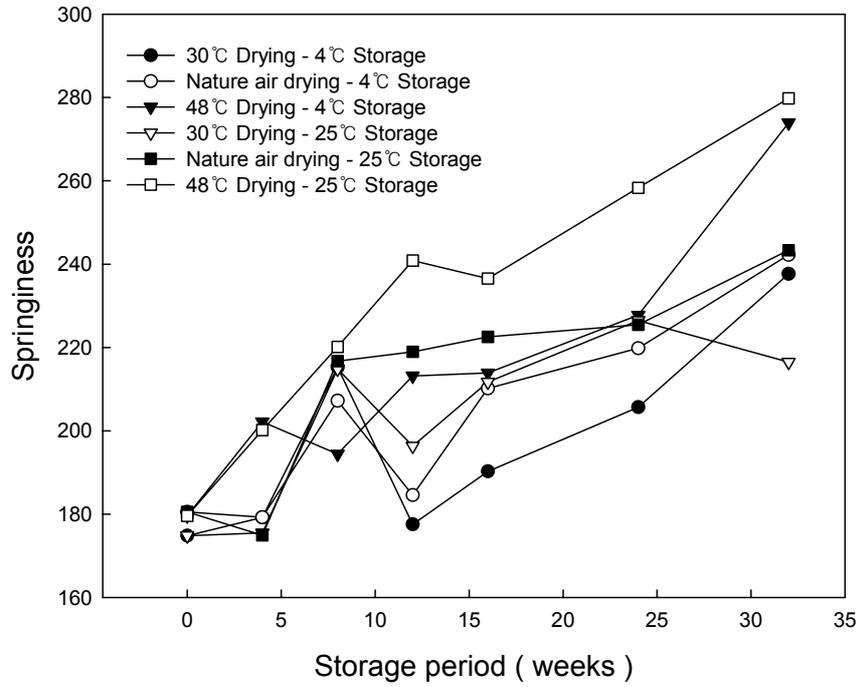


Fig. 3-32 Influence of drying air temperatures on springiness.

4. 결론 및 요약

본 연구는 저온의 정온정습공기를 발생할 수 있는 Heat pump와 실험용 순환식건조기를 이용하여 건조온도 별 벼의 건조실험을 수행하여 벼의 저온건조 특성과 건조 벼의 품질특성을 비교 분석하였다.

본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

가. 건조온도 21.9℃, 30.7℃, 38.8℃ 및 48.7℃에서 온도 편차는 각각 0.82℃, 0.46℃, 0.41℃ 및 0.74℃로 나타났고, 상대습도 편차는 2.4~3.2%범위로 나타나 실험용 건조기는 건조온도와 상대습도가 매우 만족한 수준으로 균일하게 유지되었다.

나. 건조온도 21.9℃, 30.7℃, 38.8℃ 및 48.7℃에서 건조속도는 각각 0.29%, 0.61%, 0.85% 및 1.26%(w.b./hr)로 나타났다.

다. 건조온도가 21.9℃일 때 벼의 동할이 발생하지 않았다. 건조온도 30.7℃ 및 38.8℃에서 각각 1.6% 및 6.8%의 동할이 발생하였다. 건조온도가 가장 높은 48.7℃에서는 24.2%의 동할이 발생하였다.

라. 건조온도가 증가할수록 동할 발생이 증가하였는데 특히, 동할율이 급격히 증가한 건조온도 48.5℃의 경우 곡온이 건조 4시간 후에 35.0℃ 이상으로 증가하여 곡온상승이 동할율과 밀접한 관계가 있는 것으로 나타났다.

마. 건조 전후의 발아율 감소는 건조온도 21.9℃, 30.7℃, 38.8℃ 및 48.7℃에서 각각 2.0%, 7.9%, 7.0% 및 10.7%로 나타났으며, 건조온도가 가장 높은 48.7℃에서 유의적인 차이가 나타났다.

바. 식미 관능검사에서 건조온도 21.9℃와 30.7℃에서 밥의 식미가 높게 나타났으며, 건조온도가 가장 높은 48.7℃에서는 식미가 상대적으로 낮게 나타났다.

제 3 절 저온곡물건조기 시뮬레이션 프로그램

1. 서언

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, 본 연구의 목적은 횡류형 후층건조를 예측할 수 있는 저온 곡물건조기 시뮬레이션 모델을 개발하여 벼의 건조실험을 통하여 그 적합성을 검증하고, 시뮬레이션 방법으로 저온 곡물건조기 설계 및 작동인자가 건조기의 성능에 미치는 영향을 구명하는데 있다.

사용기호

A_s	벼의 비표면적(m^2/m^3)
C_a	공기의 비열($kJ/kg\ K$)
C_g	곡물의 비열($kJ/kg\ K$)
C_v	수증기의 비열($kJ/kg\ K$)
C_w	물의 비열($kJ/kg\ K$)
G_a	공기의 유동율($kg/hr\ m^2$)
G_g	곡물순환율($kg/hr\ m^2$)
g	곡물의 산물밀도(kg/m^3)
h_c	곡물의 열전달계수($kJ/m^2\ K\ hr$)
H	공기의 절대습도($kg\ H_2O/kg\ dry\ air$)
h_{fg}	곡물수분의 증발잠열($kJ/kg\ H_2O$)
M	곡물의 함수율(decimal,d.b.)
q	풍량비($m^3/min \cdot m^3$)
RH	상대습도(decimal)
t	시간(hr)
T	공기온도($^{\circ}C$)
x	공기의 흐름방향(m)
y	곡물의 흐름방향(m)
θ	곡물온도($^{\circ}C$)
ρ_p	공기의 밀도(kg/m^3)

2. 시뮬레이션 프로그래밍

곡물건조기는 저온공기발생장치인 Heat pump를 부착한 횡류형 순환식건조기로 가정하였다. 벼가 건조실을 통과할 때 저온의 건조공기가 벼층을 횡류방향으로 통과하면서 건조가 이루어지며, 건조실을 통과한 벼는 스크류콘베이어와 버켓엘리베이터에 의하여 탬퍼링실로 이송되어 일정시간 탬퍼링 과정을 거치게 된다. 이와 같이 저온 곡물건조기는 건조-순환-탬퍼링의 과정이 반복되면서 최종 함수율에 도달하게 된다. 따라서, 저온 곡물건조기에서의 건조과정은 건조실 내에서의 건조과정과 탬퍼링실에서의 탬퍼링이 일어나는 과정으로 나누어 해석할 수 있다.

저온 곡물건조기의 시뮬레이션은 Keum 등(1987)이 횡류형 간헐건조과정을 해석한 건조모델을 이용하였으며, 벼의 평형함수율, 수분증발잠열, 박층건조 및 동할 예측모델은 본 논문에서 개발한 모델을 이용하였다.

가. 수학모델

횡류건조과정을 해석하기 위한 수학모델은 다음과 같이 표현된다 (Bakker-Arkema 등, 1974).

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{h_c a}{G_a(G_a + C_v H)} (T - \theta) \dots\dots\dots (3-6)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{h_c a}{G_g(C_g + C_w M)} (T - \theta) + \frac{h_{fg} + C_v(T - \theta)}{G_g(C_g + C_w M)} G_a \frac{\partial H}{\partial x} \dots\dots\dots (3-7)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} = -\frac{G_g}{G_a} \cdot \frac{\partial M}{\partial y} \dots\dots\dots (3-8)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} = \text{박층건조방정식} \dots\dots\dots (3-9)$$

박층건조방정식은 식 (3-9)를 사용하였으며, 실험상수는 표 3-1과 같다.
 위 식들의 초기 및 경계조건은 다음의 식 (3-10)과 같다.

$$\begin{aligned}
 T &= T_0, \quad x=0, y \geq 0 \\
 \theta &= \theta_0, \quad x \geq 0, y=0 \\
 H &= H_0, \quad x=0, y \geq 0 \\
 M &= M_0, \quad x \geq 0, y=0 \dots\dots\dots (3-10)
 \end{aligned}$$

나. 수치해석

건조모델의 수치적 해석을 위하여 유한차분법(finite difference method)을 적용하였다.

건조공기의 온도변화식 (3-6)을 임의의 점 $x + \frac{\Delta x}{2}$, $y + \Delta y$ 에 대하여 유한차분식으로 나타내면 다음 식 (3-11)과 같이 표현된다.

$$\frac{T_{x+\Delta x, y+\Delta y} - T_{x, y+\Delta y}}{\Delta x} = - \frac{h_c a}{G_a \cdot (C_a + C_w H_{x+\frac{1}{2}\Delta x, y+\Delta y})} \cdot (T_{x+\frac{1}{2}\Delta x, y+\Delta y} - \theta_{x+\frac{1}{2}\Delta x, y+\Delta y}) \dots\dots\dots (3-11)$$

$T_{x+\frac{1}{2}\Delta x, y+\Delta y}$ 는 $\frac{T_{x+\Delta x, y+\Delta y} + T_{x, y+\Delta y}}{2}$ 라고 간주하면 다음 식 (3-12)로 표현된다.

$$T_{x+\Delta x, y+\Delta y} = 2 \cdot (T_{x+\Delta x, y+\Delta y} - T_{x, y+\Delta y}) \dots\dots\dots (3-12)$$

위의 식 (3-12)를 식 (3-11)에 대입하여 정리하면 다음 식 (3-13)과 같이 표현된다.

$$T_{x+\frac{\Delta x}{2}, y+\Delta y} \left[1 + \frac{h_c a}{2G_a \cdot (C_a + C_w H_{x+\frac{1}{2}\Delta x, y+\Delta y})} \cdot \Delta x \right] + \theta_{x+\frac{\Delta x}{2}, y+\Delta y} \left[\frac{-h_c a}{2G_a \cdot (C_a + C_w H_{x+\frac{1}{2}\Delta x, y+\Delta y})} \cdot \Delta x \right] = T_{x, y+\Delta y} \dots\dots\dots (3-13)$$

식 (3-13)을 정리하면 다음의 식 (3-14)로 표현된다.

$$C_1 T_{x+\frac{\Delta x}{2}, y+\Delta y} + C_2 \theta_{x+\frac{\Delta x}{2}, y+\Delta y} = T_{x, y+\Delta y} \dots\dots\dots (3-14)$$

여기서, $C_1 = 1 + \frac{h_c a}{2G_a \cdot (C_a + C_w H_{x+\frac{1}{2}\Delta x, y+\Delta y})} \cdot \Delta x$

$$C_2 = \frac{-h_c a}{2G_a \cdot (C_a + C_w H_{x+\frac{1}{2}\Delta x, y+\Delta y})} \cdot \Delta x$$

곡물의 온도변화식 (3-7)을 $x+\frac{\Delta x}{2}$, $y+\Delta y$ 에 대하여 유한차분식으로 나타내면 다음 식 (3-15)과 같이 표현된다.

$$\frac{\theta_{x+\frac{1}{2}\Delta x, y+\Delta y} - \theta_{x+\frac{1}{2}\Delta x, y}}{\Delta y} = \frac{h_c \cdot (T_{x+\frac{1}{2}\Delta x, y} - \theta_{x+\frac{1}{2}\Delta x, y})}{G_g \cdot (C_g + C_w M_{x+\frac{1}{2}\Delta x, y})} - \frac{h_{fg} \cdot G_a}{G_g \cdot (C_g + C_w M_{x+\frac{1}{2}\Delta x, y})} \cdot \frac{H_{x+\Delta x, y} - H_{x, y}}{\Delta x} \dots\dots\dots (3-15)$$

식 (3-15)를 $\theta_{x+\frac{1}{2}\Delta x, y+\Delta y}$ 에 관하여 풀면 다음의 식 (3-16)과 같이 표현된다.

$$\theta_{x+\frac{1}{2}\Delta x, y+\Delta y} = \theta_{x+\frac{1}{2}\Delta x, y} + \left[h_c \cdot \Delta y \cdot \left(\frac{T_{x+\frac{1}{2}\Delta x, y} + T_{x, y}}{2} - \theta_{x+\frac{1}{2}\Delta x, y} \right) - h_{fg} \cdot \Delta y \cdot G_a \cdot \frac{H_{x+\Delta x, y} - H_{x, y}}{\Delta x} \right] G_g \cdot (C_g + C_w M_{x+\frac{1}{2}\Delta x, y}) \dots (3-16)$$

공기의 절대습도 변화식 (3-8)을 $x+\frac{\Delta x}{2}$, $y+\Delta y$ 에 대하여 유한차분식으로 표현하면 다음의 식 (3-17)과 같다.

$$\frac{H_{x+\Delta x, y+\Delta y} - H_{x, y+\Delta y}}{\Delta x} = -\frac{G_g}{G_a} \cdot \frac{M_{x+\frac{1}{2}\Delta x, y+\Delta y} - M_{x+\frac{1}{2}\Delta x, y}}{\Delta y} \dots (3-17)$$

식 (3-17)을 $H_{x+\Delta x, y+\Delta y}$ 에 관하여 풀면 다음 식 (3-18)으로 표현된다.

$$H_{x+\Delta x, y+\Delta y} = H_{x, y+\Delta y} - \frac{G_g \cdot \Delta x}{G_a \cdot \Delta y} \cdot (M_{x+\frac{1}{2}\Delta x, y+\Delta y} - M_{x+\frac{1}{2}\Delta x, y}) \dots (3-18)$$

식 (3-9)는 다음과 같이 표현된다.

$$M_{x+\frac{1}{2}\Delta x, y+\Delta y} = \exp(-P \cdot (t+\Delta t)^Q) \cdot (M_0 - M_e) + M_e \dots (3-19)$$

식 (3-19)는 곡물함수율과 평형함수율로부터 주어진 상태의 함수비(MR_t)

가 결정되면 건조초기의 곡물함수율로부터 현재의 함수율에 도달하기 위한 시간(t)를 구하여 시간증분(Δt)을 더한다. 시간증분이 합산된 건조시간 ($t+\Delta t$)과 현재의 공기온도 및 상대습도로부터 건조시간 후의 함수비 ($MR_{t+\Delta t}$)을 산출하고, 이 함수비를 이용하여 건조시간($t+\Delta t$) 후의 곡물함수율 ($M_{x+\frac{1}{2}\Delta x, y+\Delta y}$)을 결정하였다.

다. 보조방정식

며 건조 중 발생하는 동할율 예측모델(CR) 및 평형함수율모델(M_e)은 식 (3-20) 및 식 (3-21)을 이용하였다.

$$CR = \frac{A}{1 + \exp\left(-\frac{(t - t_0)}{B}\right)} \dots\dots\dots (3-21)$$

여기서, CR : 동할율(%)

t : 열풍노출시간(min)

A, B, t_0 : 실험상수

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

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

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

여기서, $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$: 실험상수

M_0 : 함수율(dec,w.b.)

T_0 : 건조온도(°C)

$$M_e(\text{dec,d.b.}) = 0.01 \left[\frac{\ln(1-RH)}{-0.00007836(T+13.058)} \right]^{\frac{1}{2.1581}} \dots (3-22)$$

벼의 수분증발잠열은 식 (3-20)의 평형상대습도식을 이용하여 Othmer 방법
 으로 유도한 다음 식 (3-22)를 이용하였다.

$$h_{fg} = (2502.5 - 2.386\theta)(1 + 2.4263\exp(-18.3816 \cdot M)) \dots (3-22)$$

벼에 대한 산물밀도는 Kim과 Koh(1981)의 식을 이용하였다.

$$g = 537.5873 + 1.2227 \cdot M_w \dots (3-23)$$

벼의 비열은 다음 식을 이용하였다(Morita와 Singh, 1979).

$$C_g = 1.2692 + 0.0349 \cdot M_w \dots (3-24)$$

벼의 대류열전달계수는 다음 식을 이용하였다(Wang 등, 1979).

$$h_c = 0.00718 \cdot G_a^{1.3} \dots (3-25)$$

라. 응축과정의 해석

곡물로부터 많은 양의 수분을 빼앗은 건조공기가 낮은 온도의 곡물층을 통
 과하면 건조공기중의 수분이 응축되어 곡물함수율을 증가시키고 곡물층을 통
 과한 공기의 온도는 더욱 하강하게 된다. 따라서 응축현상이 발생하면 각각

얻어진 공기의 온도와 곡물함수율을 수정하여야 한다.

응축현상의 발생여부를 판단하기 위하여 공기의 온도와 절대습도로부터 상대습도를 구한다. 상대습도가 0.9999보다 클 경우, 그때의 공기를 포화상태로 보아 응축현상이 발생한 것으로 간주하였다.

응축현상이 발생한 상태의 공기의 포화절대습도 H' 를 구한 다음 응축현상 전후의 공기중의 수분량과 곡물중의 수분량의 합이 같으므로 다음 식 (3-26)가 성립된다.

$$G_a \cdot \Delta y \cdot H + G_g \cdot \Delta x \cdot M = G_a \cdot \Delta y \cdot H' + G_g \cdot \Delta x \cdot M' \dots\dots\dots (3-26)$$

식 (3-26)을 정리하면 응축현상 후의 곡물 함수율은 다음 식 (3-27)로 유도된다.

$$M' = M + \frac{G_a \cdot \Delta y}{G_g \cdot \Delta x} \cdot (H - H') \dots\dots\dots (3-27)$$

또한, 에너지평형의 관계로부터 응축현상 전후의 공기와 곡물의 에너지 합은 같으므로 다음 식이 성립한다.

$$\begin{aligned} T \cdot G_a \cdot \Delta y \cdot (C_a + C_v \cdot H) + \theta \cdot G_g \cdot \Delta x \cdot (C_g + C_w \cdot M) = \\ T' \cdot G_a \cdot \Delta y \cdot (C_a + C_v \cdot H') + \theta' \cdot G_g \cdot \Delta x \cdot (C_g + C_w \cdot M) + \\ G_a \cdot \Delta y \cdot h_{fg} \cdot (H - H') \dots\dots\dots (3-28) \end{aligned}$$

여기서, 응축현상 전후의 곡물 온도변화를 무시($\theta = \theta'$)하면 응축현상 후의 공기온도는 다음 식 (3-29)로 표현된다.

$$T' = T \cdot \frac{C_a + C_v \cdot H}{C_a + C_v \cdot H'} - h_{fg} \cdot (H' - H) \dots\dots\dots (3-29)$$

마. 소요에너지

곡물건조기의 작동에 투입되는 에너지는 건조공기를 발생하는데 소요되는 에너지, 곡물의 순환을 위한 스크류콘베이어와 버켓엘리베이터의 구동에너지로 나눌 수 있다.

건조공기를 발생하는데 소요되는 에너지는 건조공기의 유동율에 의해 구할 수 있으며 다음 식 (3-30)으로 표시된다.

$$P_a = \frac{C_a(V \times q \times \rho_p)(\Delta T)}{COP} \dots\dots\dots (3-30)$$

여기서, P_a : 건조공기를 발생하는데 소요되는 에너지(ps)

C_a : 공기의 비열(kJ/kg·K)

V : 체적(m³)

q : 풍량비(m³/min·m³)

ρ_p : 공기의 밀도(kg/m³)

ΔT : 온도차(°C)

스크류콘베이어와 버켓엘리베이터의 구동에너지는 장치의 효율을 50%로 가정하고 다음 식 (3-31)과 식 (3-32)로 표시된다.

$$P_s = \frac{c l Q}{270} \dots\dots\dots (3-31)$$

여기서, P_s : 스크류콘베이어의 소요동력(ps)

c : 계수(0.005)

l : 스크류콘베이어의 길이(m)

Q : 반송능력(ton/hr)

$$P_b = \frac{QH}{270\eta} \dots\dots\dots (3-32)$$

여기서, P_b : 버킷엘리베이터의 소요동력(ps)

Q : 반송능력(ton/hr)

H : 양정(m)

η : 전효율(0.4~0.5)

바. 시뮬레이션 프로그램

시뮬레이션 프로그램의 순서도는 다음의 그림 3-33과 같다. 프로그램은 FORTRAN으로 작성하였으며, 평형함수율을 계산하기 위한 부프로그램, 완전미수율을 계산하기 위한 부프로그램 및 습공기의 성질을 계산하기 위한 부프로그램으로 구성되어있다.

시뮬레이션 프로그램의 초기 입력값은 크게 건조기의 제원, 건조할 벼의 조건, 외기공기의 조건 및 건조공기의 조건으로 구분할 수 있다. 건조기의 제원은 건조실의 주요 제원으로 하였으며, 건조할 벼의 조건은 초기 투입중량, 초기함수율, 최종함수율 및 유하속도로 하였다. 외기공기의 조건은 외기온도 및 상대습도, 건조공기의 조건은 건조온도 및 송풍량 등을 입력하도록 하였다. 입력값에 따라 프로그램이 실행되고 순환횟수, 템퍼링 시간, 건조공기 노출시간, 건조함수율, 건조속도, 곡물온도, 완전미수율 및 소요에너지가 산출되도록 하였다.

표 3-15는 시뮬레이션 프로그램의 입력값 및 출력값을 나타낸 것이다.

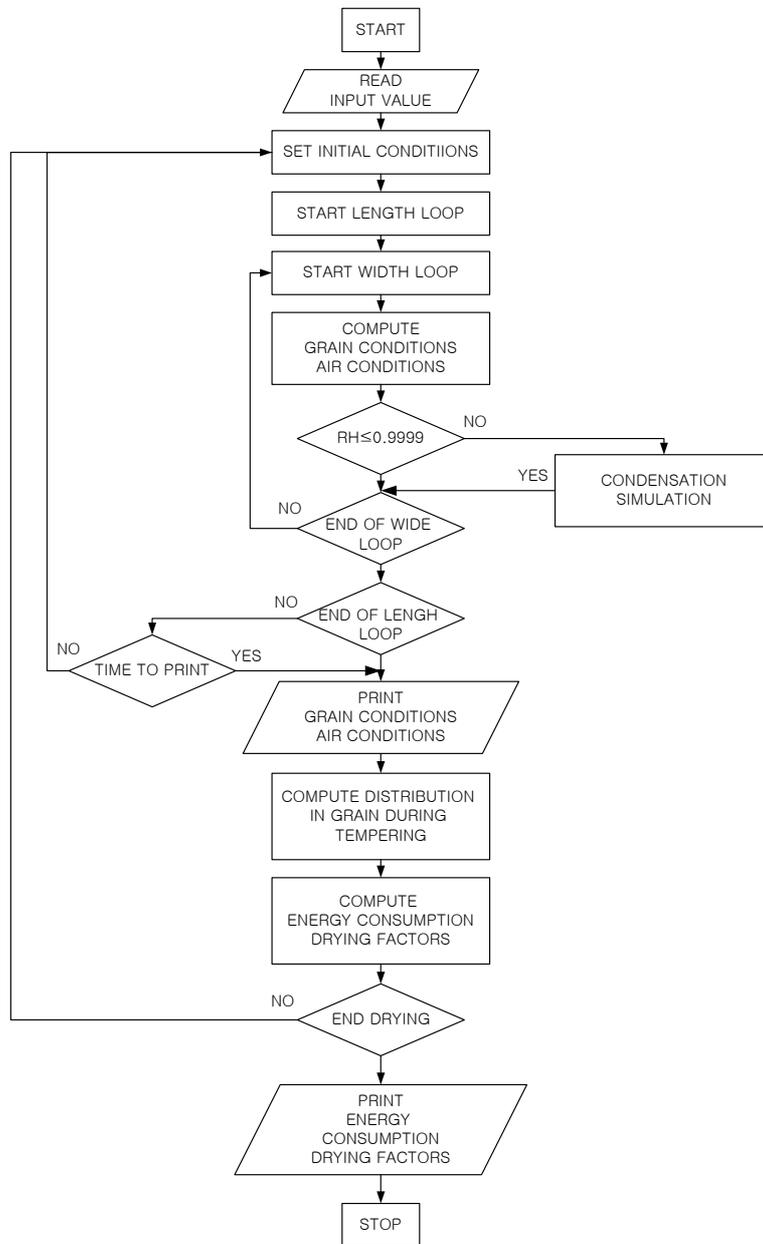


Fig. 3-33 Flowchart of simulation program.

Table 3-15 Input and output values of simulation program

Input values	Output values
Dryer specifications	
Height(m)	
Length(m)	Circulation time(hr)
Width(m)	Drying time(hr)
Grain flow rate(kg/hr)	Tempering time(hr)
Air conditions	Final Moisture content(% ,w.b.)
Drying air temperature (°C), RH(%)	Moisture content during Δt
Ambient temperature(°C), RH(%)	Drying rate(% ,w.b./hr)
Grain conditions	Grain temperature(°C)
Initial moisture content(dec,w.b.)	Head rice yield(%)
Initial grain temperature(°C)	Water remove rate(kg)
Final moisture content(dec,w.b.)	Total energy(kJ/kg)
Grain weight(kg)	

3. 시뮬레이션 모델 검증

가. 공시재료

검증실험에 사용한 벼는 2003년 10월 경기도 화성지역에 수확한 추청벼이다. 수확한 벼를 산물상태로 구입하여 40kg 포대에 담아 실험 전까지 2°C 저온저장고에 보관하였으며, 실험시작 전에 벼를 저온저장고에서 꺼내 상온에 방치하였다. 곡온이 주위 공기온도와 평형에 도달한 후 소형 풍동을 이용하여 쪽정이, 이물 등을 제거한 후 실험에 사용하였다. 벼를 투입할 때 일정량을 채취하여 초기함수율을 측정하였으며, 24.7%(w.b.)로 나타났다.

나. 실험방법

검증실험에 사용한 건조기와 공기발생장치는 본 논문에서 제작한 용량 150kg 실험용 건조기와 Heat pump를 이용하였다.

표 3-16은 검증실험의 조건을 나타낸 것이다. 표에서와 같이 초기투입벼의 중량은 150kg으로 하였다. 초기곡온은 19.6°C, 평균 외기온도는 19.6°C, 평균 외기상대습도는 50.2%이었다. 건조온도는 30.3°C, 곡물순환속도는 0.25 m³/hr, 송풍량은 6.4m³/min이었다.

곡물 및 외기온도를 측정하기 위하여 건조실과 탬퍼링실에 각각 2지점, 외기 1지점에 Thermocouple(T type, OMEGA, USA)를 설치하고, 자료수집장치(7327, Datascan, UK)를 이용하여 2분간격으로 측정하여 PC에 저장하였다.

외기 및 건조공기 유입부 및 배기부에 상대습도 센서(TR72, Japan)를 설치하여 같은 방법으로 PC에 저장하였다. 건조 중 Heat pump의 소요에너지는 디지털 전력계(3166, HIOKI, Japan)를 이용하여 실시간 측정하였다.

건조시작 후 2시간 간격으로 버킷엘리베이터에서 일정량의 시료를 채취하

여 함수율 및 동할율을 측정하였다. 함수율은 10립-135도-24시간 상압정온 건조법으로 측정한 후 105도법으로 환산하였다. 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.

Table 3-16 Drying conditions used for the validation test of the simulation program

Variety of rough rice	Chuchung(short grain)
Input grain weight(kg)	150
Initial moisture content(%w.b.)	24.7
Initial grain temperature(°C)	19.6
Ambient temperature(°C)	19.6
Ambient relative humidity(%)	50.2
Drying air temperature(°C)	30.3
Drying air relative humidity(%)	42.3
Grain flow rate(m ³ /hr)	0.25
Airflow rate(m ³ /min)	6.4

다. 결과 및 고찰

그림 3-34는 건조시간에 따른 함수율의 실측치와 시뮬레이션에 의한 예측치를 비교한 것이다. 그림에서와 같이 실측치와 예측치는 잘 일치하였으며, 함수율의 RMSE가 0.273%(w.b.)로 나타났다. 따라서, 시뮬레이션 모델은 함수율 변화를 매우 만족스럽게 예측할 수 있는 것으로 판단된다.

그림 3-35는 건조시간에 따른 동할율의 실측치와 예측치를 비교한 것이다. 건조종료 후 동할율은 실측치에서 0.8%, 예측치에서 0.4%로 실측치에서 다소 높게 나타났다. 동할율의 실측치와 예측치간의 RMSE는 0.153%로 나타났다.

그림 3-36은 건조시간에 따른 토펙퍼링실의 곡온 실측치와 예측치를 비교한 것이다. 그림에서와 같이 건조초기에 다소 오차가 나타났으나, 건조 중반이 후에는 실측치와 예측치가 잘 일치하는 것으로 나타났다. 실측치와 예측치간의 RMSE는 0.712°C로 허용가능한 수준으로 판단된다.

그림 3-37은 배기공기의 상대습도의 실측치와 예측치를 비교한 것이다. 그림에서와 같이 건조초기에 다소 오차가 나타났으나, 비교적 잘 예측하는 것으로 나타났다. 실측치와 예측치간의 RMSE는 2.084%로 나타났다.

시뮬레이션에 의한 건조소요에너지의 예측치는 1456.9kJ/kg, 실측치는 1521.6kJ/kg으로 나타나 상대오차는 4.3% 정도로 매우 만족스럽게 예측할 수 있는 것으로 판단된다. 따라서, 시뮬레이션에 의한 함수율, 동할율, 곡물온도, 배기 상대습도 및 건조소요에너지의 예측치와 검증실험에서의 실측치를 종합적으로 비교해볼 때 시뮬레이션 모델의 적합성이 검증되었다.

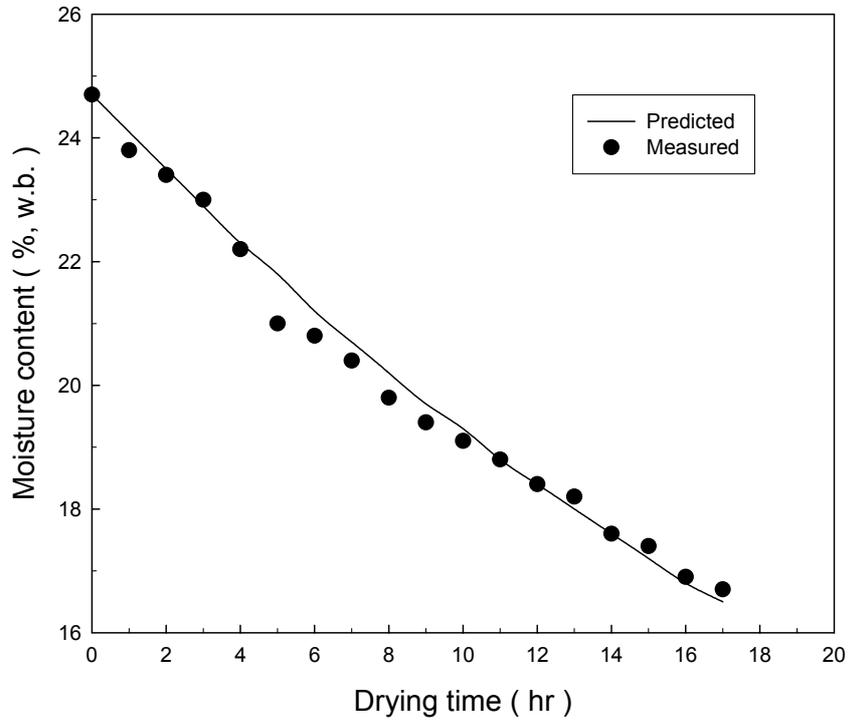


Fig. 3-34 Comparison of measured and predicted moisture contents.

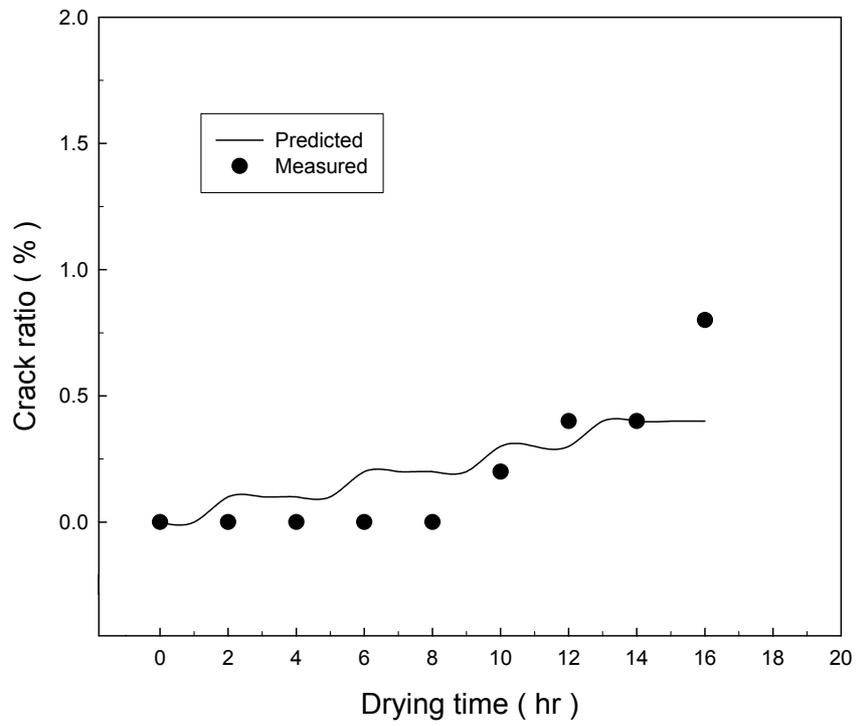


Fig. 3-35 Comparison of measured and predicted crack ratios.

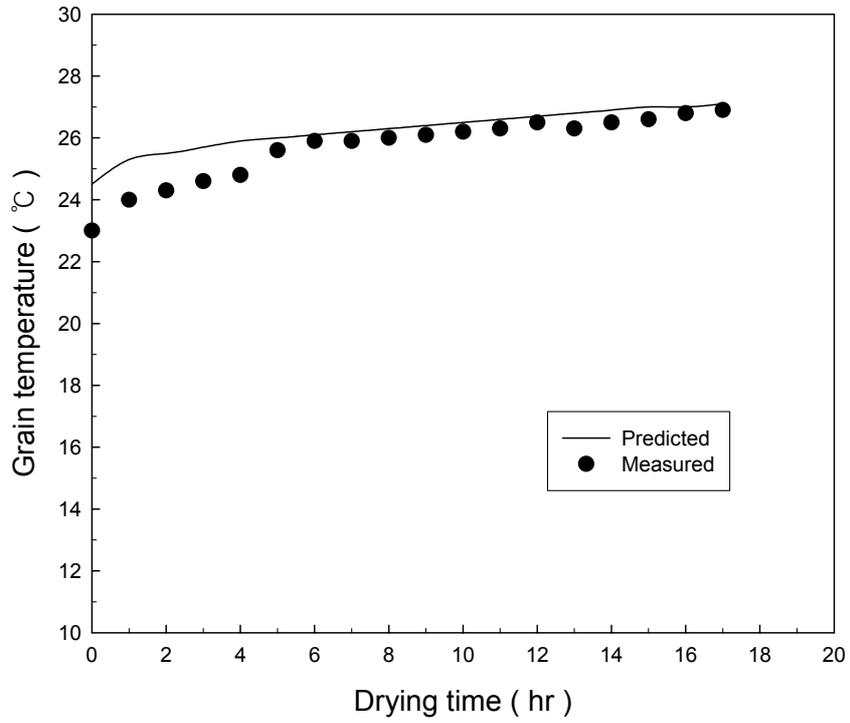


Fig. 3-36 Comparison of measured and predicted grain temperatures in tempering chamber.

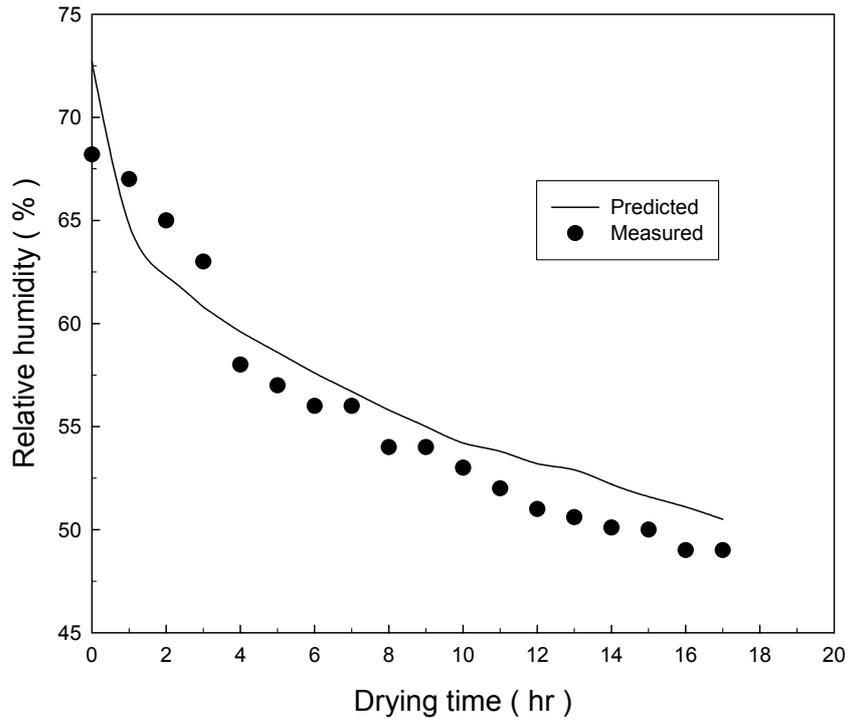


Fig. 3-37 Comparison of measured and predicted relative humidities of exhaust air.

4. 결론 및 요약

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

본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

가. 횡류 순환식 저온 곡물건조기에서 함수율·곡온·배출공기의 온도와 습도·벼의 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 RMSE는 0.273%(w.b.)로 나타났으며, 함수율의 경시적 변화도 잘 일치하였다.

라. 건조종료 후 동할율은 실측치에서 0.8%, 예측치에서 0.4%로 실측치에서 다소 높게 나타났다. 실측치와 예측치간의 RMSE는 0.153%로 나타났다.

마. 곡온의 실측치와 예측치는 건조초기에 다소 오차가 나타났으나, 건조 중반 이후부터는 잘 일치하였으며, RMSE는 0.712℃로 허용가능한 수준으로 판단된다.

바. 배기의 상대습도 실측치와 예측치는 건조초기에 다소 오차가 나타났으나, 전체적으로 잘 일치하였으며, 실측치와 예측치간의 RMSE는 2.084%로 나타났다.

사. 시뮬레이션에 의한 건조소요에너지의 예측치는 1456.9kJ/kg, 실측치는 1521.6kJ/kg으로 나타나 상대오차는 4.3% 정도로 매우 만족스럽게 예측할 수 있는 것으로 판단된다.

제 4 절 저온 곡물건조기의 설계인자 구명

1. 설계인자 및 조건

벼의 저온 곡물건조기 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 저온 곡물건조기의 설계인자 즉, 건조공기의 온도, 송풍량 및 유하속도 등이 벼의 동할율, 건조속도 및 소요에너지에 미치는 영향을 분석하였다.

분석을 위한 건조조건은 표 3-17과 같다. 표에서와 같이 건조기의 용량은 3800kg, 초기곡온 및 외기온도는 19.0℃이며, 초기 및 최종함수율은 26.0% (w.b.) 및 16.5%(w.b.)로 설정하였다. 건조온도는 25℃, 30℃, 35℃ 및 40℃의 4수준으로 하였으며, 비교 기준온도는 30℃로 하였다. 곡물 유하속도는 3~8m³/hr 범위의 6수준으로 하였으며, 비교 기준값은 5m³/hr로 하였다. 풍량비는 14~30m³/min 범위의 5수준으로 하였으며, 비교 기준값은 22m³/min로 하였다.

비교 기준온도 30℃는 동할의 허용치를 0.5%이하로 설정하고, 건조온도가 동할율에 미치는 영향을 분석하여 결정하였다.

Table 3-17 Drying conditions for low temperature drying simulation

Capacity of grain dryer(kg)	3800
Size of drying chamber(m)	0.877×2.0×0.125(H×L×W)
Initial moisture content(%w.b.)	26.0
Final moisture content(%w.b.)	16.5
Initial grain temperature(°C)	19.0
Ambient temperature(°C)	19.0
Drying air temperature(°C)	25, 30, 35, 40
Drying air relative humidity(%)	50.0
Grain flow rate(m ³ /hr)	3, 4, 5, 6, 7, 8
Airflow rate(m ³ /min·ton)	14, 18, 22, 26, 30

Standard conditions : drying air temperature 30°C, grain flow rate 5m³/hr
airflow rate 22m³/min·ton

2. 건조온도

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

그림 3-38은 건조온도에 따른 동할율과 건조속도를 비교한 것이다. 그림에서와 같이 건조온도가 증가할수록 동할율도 증가하였는데 30℃이하에서는 0.3%를 유지하였으며, 건조온도가 30℃를 초과할 때 동할율은 급격히 증가하여 35℃ 및 40℃에서 각각 0.5% 및 0.8%이었다.

따라서, 고품질 쌀의 기준을 동할율 0.5%이하로 설정한다면 건조온도를 30~35℃범위에서 조정하는 것이 적당한 것으로 판단되며, 그 이하의 온도에서는 동할율은 비슷하나 건조속도가 지연되는 것으로 나타났다.

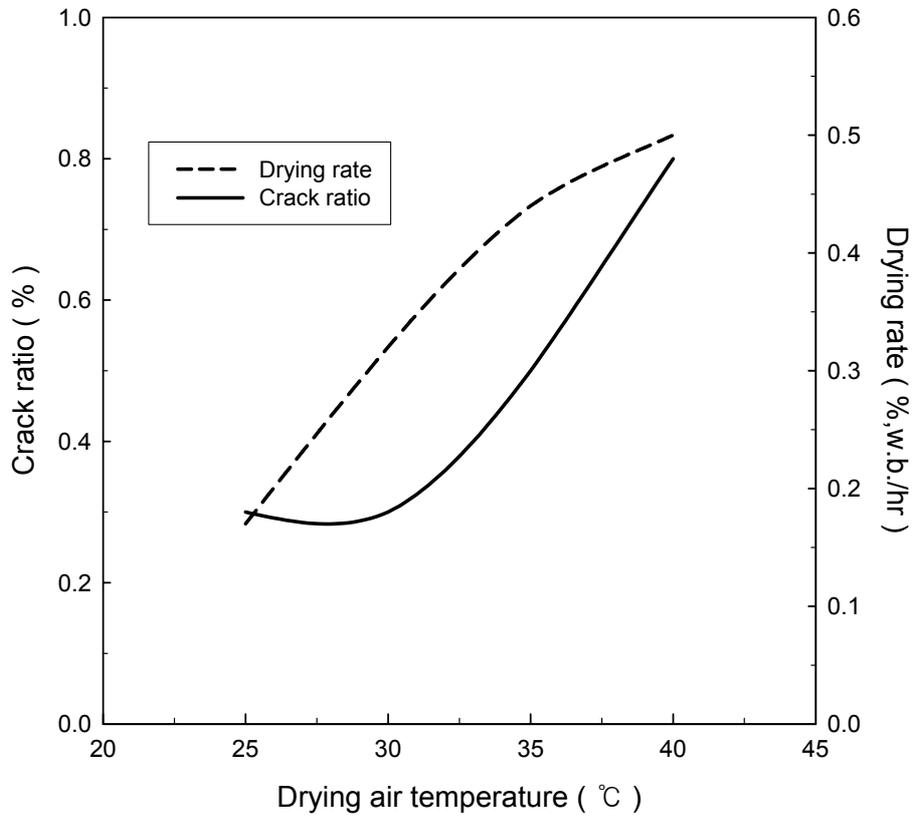


Fig. 3-38 Effect of drying air temperature on crack ratio and drying rate.

3. 송풍량

그림 3-39는 풍량비가 동할율, 건조속도 및 소요에너지에 미치는 영향을 나타낸 것이다.

그림에서와 같이 풍량비가 높을수록 건조속도는 다소 증가하였지만 소요에너지는 급격히 증가하였으며, 동할율은 0.3% 정도의 일정값을 유지하다가 풍량비가 34m³/min·ton을 초과할 때 동할율은 증가하였다.

따라서, 풍량비가 증가하면 소요에너지는 급격히 증가하는 반면, 건조속도는 완만하게 증대되어 건조능력의 저하가 우려되므로 소요ener지를 고려한 풍량비의 결정이 필요하다.

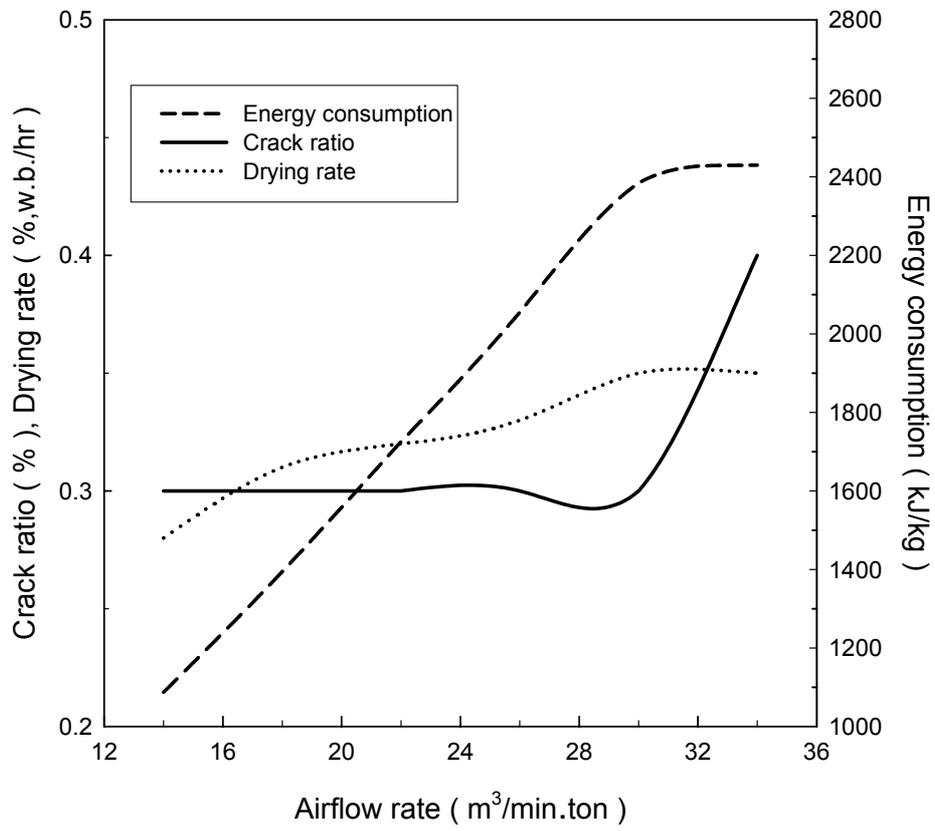


Fig. 3-39 Effect of airflow rate on crack ratio, drying rate and energy consumption.

4. 곡물 유하속도

곡물 유하속도가 동할율, 건조속도 및 소요에너지에 미치는 영향을 그림 3-40에 나타내었다.

그림에서와 같이 유하속도가 증가할 때 동할율과 건조속도는 거의 일정하게 유지하였으며, 소요에너지는 유하속도가 5m³/hr 초과할 때 증가하는 것으로 나타났다.

열풍건조기의 경우 유하속도가 증가할수록 건조속도가 증대되어 소요에너지의 절감효과를 가져오지만, 건조온도 30℃ 정도의 저온건조에서는 이러한 경향이 나타나지 않았다.

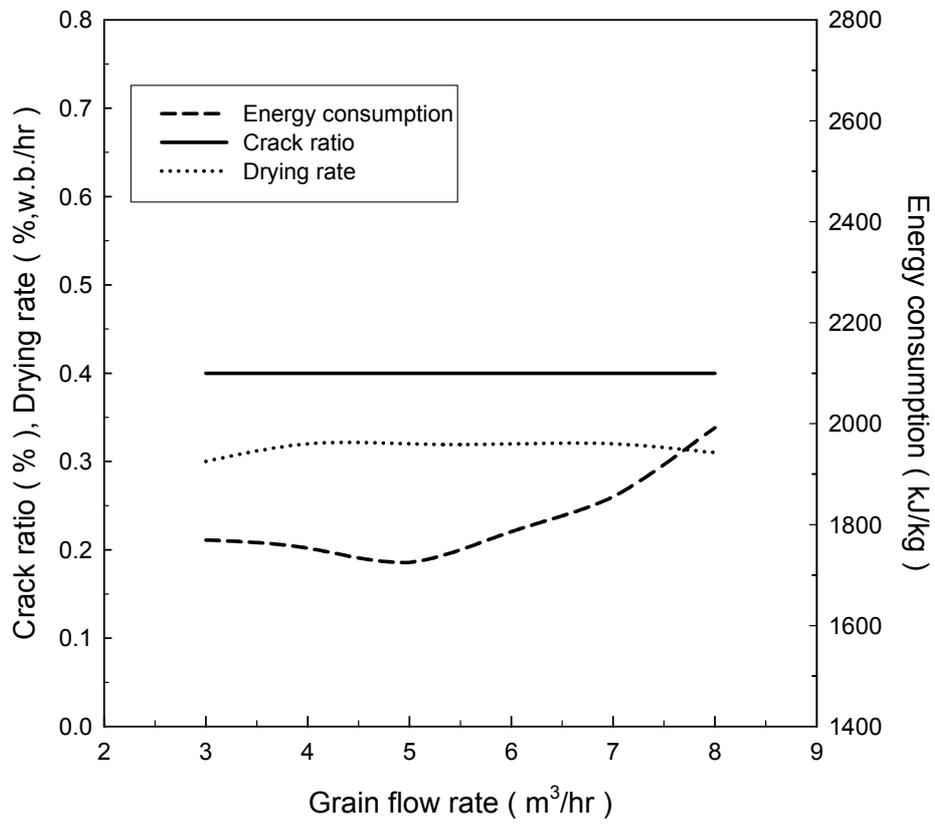


Fig. 3-40 Effect of grain flow rate on crack ratio, drying rate and energy consumption.

5. 결론 및 요약

본 연구는 횡류형 후층건조를 예측할 수 있는 저온 곡물건조기 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 시뮬레이션 기법으로 저온 곡물건조기의 주요 설계 및 작동인자가 성능에 미치는 영향을 분석하였다.

본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

가. 시뮬레이션 방법으로 건조공기의 온도가 동할율, 건조속도 및 소요에너지에 미치는 영향을 분석하였으며, 동할의 허용치를 0.5%로 할 때 적정 건조온도는 30~35℃ 범위였다.

나. 풍량비가 높을수록 건조속도는 다소 증가하였지만 소요에너지는 급격히 증가하였으며, 동할율은 0.3% 정도의 일정값을 유지하다가 풍량비가 34m³/min·ton을 초과할 때 동할율은 증가하였다.

다. 유하속도가 증가할 때 동할율과 건조속도는 거의 일정하게 유지하였으며, 소요에너지는 유하속도가 5m³/hr 초과할 때 증가하는 것으로 나타났다. 열풍건조기의 경우 유하속도가 증가할수록 건조속도가 증대되어 소요에너지의 절감효과를 가져오지만, 건조온도 30℃ 정도의 저온건조에서는 이러한 경향이 나타나지 않았다.

제 5 절 저온곡물건조기 최적화

1. 서언

벼를 저온건조하는 주된 목적은 건조 중에 발생하는 동할율의 최소화, 발아율 극대화 및 식미 최상의 고품질 쌀 생산에 있다. 저온 곡물건조기는 저온의 건조공기를 이용하므로 비교적 고가의 냉각장치를 도입하지만, 건조소요에너지를 절감할 수 있으며, 건조 중 발생하는 동할율을 최소화 할 수 있는 장점이 있다.

저온 곡물건조기의 운전 조건 중 가장 중요한 요인은 적정 건조온도의 설정이다. 건조온도는 건조소요에너지와 건조속도 등에 미치는 영향뿐만 아니라 동할율에 절대적인 영향을 미친다. 또한, 저온 곡물건조기의 설계에는 건조소요에너지와 건조속도에 영향을 미치는 벼의 유하속도와 송풍량의 적정한 결정이 중요하다.

따라서, 본 연구의 목적은 최적화 기법을 이용하여 적정한 건조온도, 벼의 순환속도 및 송풍량을 결정하는데 있다.

2. 목적함수 및 제한조건

가. 목적함수

저온 곡물건조기의 최적화는 저온공기발생장치를 부착한 순환식건조기를 대상으로 하였다.

최적화 목표로는 품질 최대화, 건조소요에너지 최소화 및 건조시간 최소화 등 3가지로 구분할 수 있다. 그러나, 3개의 목표는 서로간의 모순점이 존재하게 된다. 즉, 품질을 최대화하기 위해서는 건조온도를 낮추어 건조시간을 증대시켜야 하며, 건조소요에너지를 최소화하기 위해서는 건조시간을 단축해야하는 모순점이 있다. 또한, 건조시간을 최소화하기 위해서는 건조속도를 증대시켜야 하는데, 건조속도가 증대되면 품질 유지에 매우 불리하게되는 모순점이 존재하게 된다.

이러한 최적화 목표들의 상호 모순점을 해결하기 위해서는 최적화 목표를 하나의 함수 즉, 목적함수로 규정하고, 나머지 목적들은 제한조건으로 부여하는 방법이 있다.

본 연구에서는 건조소요에너지 최소화를 최적화의 목적함수(Object function)로 설정하였다.

나. 제어변수

제어변수(Control variable)는 최적화의 목적함수에 영향을 미치는 변수이다. 저온 곡물건조기의 최적화 목적 즉, 건조소요에너지 최소화에 영향을 미치는 변수로는 건조온도 및 상대습도, 곡물 유하속도, 송풍량 및 초기함수율등이 있다. 여러 변수들 중에서 초기함수율은 최근 물벼의 산물수매가 정착되어 있고, 농가 등에서 1차 건조한 벼(18~20%,w.b.)는 건조방법 등에 따라 품질 확보에 장애요인으로 판단하여 제외하고, 초기조건은 26%,w.b.를 기준으로 하

였다. 또한, 상대습도는 저 또는 고 영역을 제외하고는 건조에 미치는 영향이 미비하다고 판단하여 제외하고 상대습도를 50%를 기준으로 하였다.

따라서, 목적함수에 영향을 미치는 제어변수를 건조온도, 곡물 유하속도 및 송풍량으로 결정하였다.

다. 상태변수

상태변수(State variable)는 제어변수에 의해 결정되는 변수이다. 따라서, 건조온도, 곡물 유하속도 및 송풍량의 조건에 따라 영향을 받는 동할율, 건조속도 및 건조소요에너지를 상태변수로 설정하였다.

라. 제한조건

제한조건은 명시적 제한조건(Explicit constraint)과 암시적 제한조건(Implicit constraint)으로 구분할 수 있다. 명시적 제한조건은 송풍량, 유하속도 및 건조온도로 하였으며, 암시적 제한조건은 동할율과 건조속도로 설정하였다.

명시적 제한조건 중에서 송풍량과 유하속도는 시뮬레이션 결과를 토대로 결정하였는데, 송풍량은 풍량비를 기준으로 $18\sim 30\text{m}^3/\text{min}$ 범위로 하였으며, 유하속도는 $1.5\sim 7\text{m}^3/\text{hr}$ 로 범위를 설정하였다. 또한, 건조온도는 시뮬레이션 결과와 품질특성(제 5 장)실험의 결과를 토대로 $25\sim 35^\circ\text{C}$ 범위로 설정하였다.

암시적 제한조건인 동할율은 0.5%로 제한하였는데, 이는 열풍건조 중의 동할율 2~5%범위에 비해 10~25%수준이다. 건조속도는 0.25%,w.b./hr이상으로 제한하였는데, 이는 0.25%,w.b./hr이하의 건조속도는 건조능력이 매우 저하될 것으로 판단되었기 때문이다.

3. 최적화의 조건

벼의 저온 곡물건조기 최적화를 위하여 기존의 순환식 건조기를 대상 건조 시설로 결정하였으며, 최적화의 초기조건은 다음의 표 3-18과 같다.

표에서와 같이 순환식건조기의 용량은 2200kg, 3800kg 및 4800kg으로 결정하였으며, 각 건조기의 주요 설계치는 보고된 자료를 이용하였다(한성공업, 1998).

벼의 투입량은 순환식건조기의 최대용량으로 하였으며, 초기함수율 26.0%(w.b.)를 16.5%(w.b.)까지 건조하는 조건으로 설정하였다. 초기 곡물온도 및 외기온도는 각각 19.0℃로 설정하였다.

Table 3-18 Hypothetical initial conditions for low temperature drying optimization

Capacity of grain dryer(kg)	2200, 3800, 4800
Input grain weight (kg)	Full capacity
Initial moisture content(%w.b.)	26.0
Final moisture content(%w.b.)	16.5
Initial grain temperature(℃)	19.0
Ambient air temperature(℃)	19.0

4. 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 최적화문제의 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 완전임의의 complex를 만든다, 이 때 첫 번째 최고점은 제한조건을 만족하는 유용한 출발점이어야 하며, $k-1$ 개의 최고점은 다음 식 (3-33)에 의해 완전 임의로 발생시킨다.

$$x_{i,j} = G_i + r_{i,j}(H_i - G_i) \dots\dots\dots (3-33)$$

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

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

2단계는 완전 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 (3-34)와 같이 남은 최고점의 중간까지 1/2을 이동한다.

$$x_{i,j}(\neq w) = a \frac{(x_{i,j}(old) + \bar{x}_{i,c})}{2} \dots\dots\dots (3-34)$$

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

a = reflection factor

3단계는 k 개의 최고점 각각에 대한 목적함수를 계산한다. 4단계는 수렴여부를 다음 식 (3-35) 및 식 (3-36)에 의해 판단하여 수렴된 k 개의 목적함수 중 최소치를 선택하여 이 때의 제어변수 값과 목적함수 값을 출력하며, 수렴되지 않을 경우 다음 단계로 계속 진행한다.

$$d : \text{distance between any two vertices in complex} \leq \varepsilon_1 \dots\dots (3-35)$$

$$SD = \left[\sum_{j=1}^k (f(\bar{x}_{i,j}) - (f(x_{i,j}))^2) \right]^{-1} \leq \varepsilon_2 \dots\dots\dots (3-36)$$

5단계는 k 개의 목적함수값 중 가장 큰 값을 탐색하여 다음 식 (3-37)과 같이 반향과정을 실시한다.

$$x_{i,r} = (1+a) \bar{x}_{i,j} - ax_{i,h} \dots\dots\dots (3-37)$$

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

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 algorithm을 기본으로 메인 프로그램과 알고리즘과 관련있는 6개의 서브 프로그램을 구성하였으며, 저온 곡물건조 시뮬레이션 서브 프로그램과 열풍 순환식 건조기의 소요에너지를 산출하는 서브 프로그램을 구성하였다.

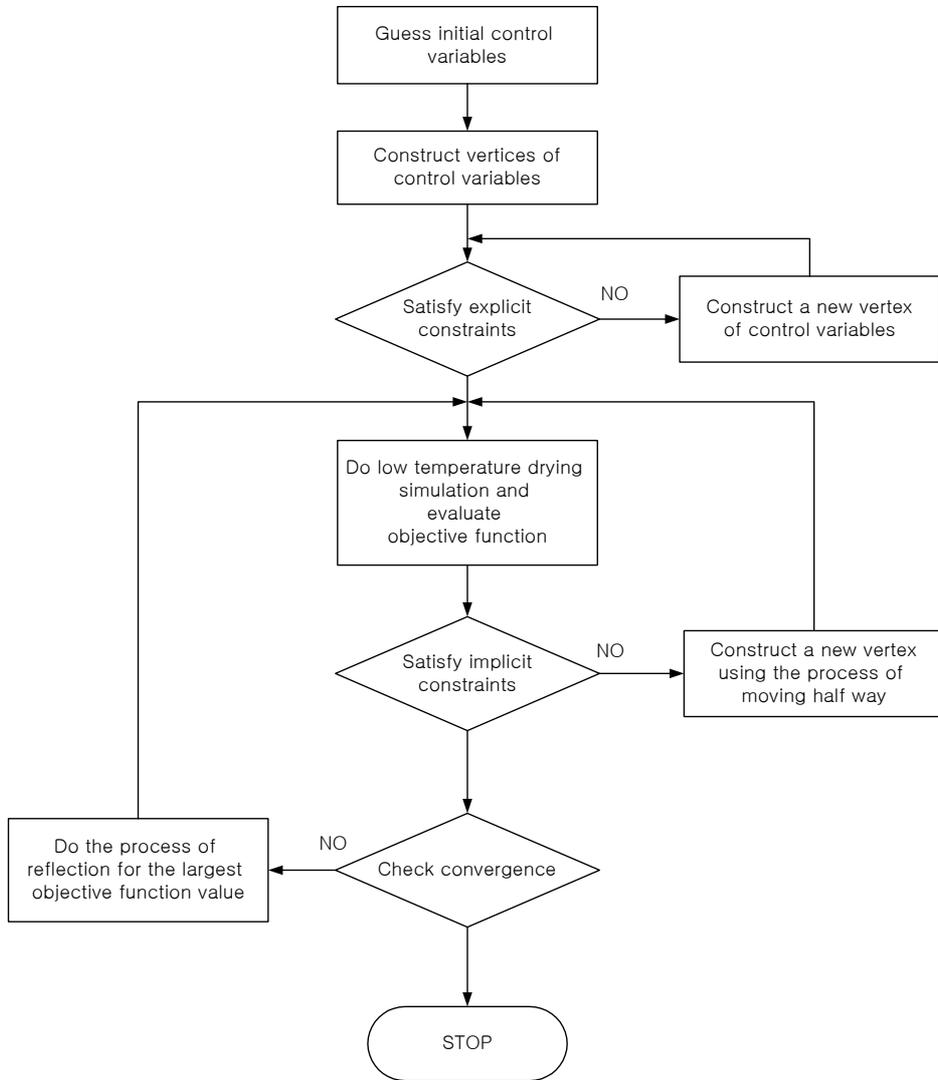


Fig. 3-41 Flowchart for optimization of low temperature grain dryer.

5. 결과 및 고찰

표 3-19는 순환식건조기의 용량 별 최적화 결과이다. 용량 2200kg 건조기의 경우 적정 건조온도는 31.8℃, 적정 송풍량은 61.6m³/min, 적정 곡물순환속도는 2.52m³/hr이다. 이 때의 동할율은 0.48%, 건조소요시간은 24.78시간, 건조속도는 0.38%,w.b./hr로 나타났으며, 건조소요에너지는 1337.9kJ/kg으로 나타났다.

용량 3800kg 건조기의 경우 적정 건조온도는 30.9℃, 적정 송풍량은 79.8m³/min, 적정 곡물순환속도는 5.84m³/hr이다. 이 때의 동할율은 0.44%, 건조소요시간은 33.11시간, 건조속도는 0.30%,w.b./hr로 나타났으며, 건조소요에너지는 1635.1kJ/kg으로 나타났다.

용량 4800kg 건조기의 경우 적정 건조온도는 32.1℃, 적정 송풍량은 91.9m³/min, 적정 곡물순환속도는 6.31m³/hr이다. 이 때의 동할율은 0.47%, 건조소요시간은 38.24시간, 건조속도는 0.25%,w.b./hr로 나타났으며, 건조소요에너지는 1721.8kJ/kg으로 나타났다.

최적화 결과 용량 2200kg, 3800kg 및 4800kg 순환식건조기에서 건조후 동할율은 각각 0.48%, 0.44% 및 0.47%로 비슷한 수준으로 나타났다. 건조소요시간은 24.78시간, 33.11시간 및 38.24시간, 건조속도는 0.38%, 0.30% 및 0.25%(w.b./hr)로 나타나 순환식건조기의 용량이 증가할수록 건조소요시간도 증가하였으며, 건조속도는 감소하였다.

송풍량은 각각 61.6m³/min, 79.8m³/min 및 91.9m³/min, 곡물유하속도는 2.52m³/hr, 5.84m³/hr 및 6.31m³/hr로 나타나 순환식건조기의 용량이 증가할수록 송풍량 및 곡물유하속도는 크게 증가하였다.

건조소요에너지는 각각 1337.9kJ/kg, 1635.1kJ/kg 및 1721.8kJ/kg으로 나타나 순환식건조기의 용량이 증가할수록 건조소요에너지는 증가하였다.

Table 3–19 Results of optimization for low temperature rice dryer

Drying conditions	Capacity of dryer(ton)		
	2200	3800	4800
Input grain weight (kg)	2200	3800	4800
Initial moisture content(%w.b.)	26.00	26.00	26.00
Drying air temperature(°C)	31.8	30.9	32.1
Drying air relative humidity(%)	50.0	50.0	50.0
Final moisture content(%w.b.)	16.41	16.21	16.50
Crack ratio of brown rice(%)	0.48	0.44	0.47
Airflow rate(m ³ /min)	61.6	79.8	91.9
Grain flow rate(m ³ /hr)	2.52	5.84	6.31
Drying time(hr)	24.78	33.11	38.24
Drying rate(%w.b./hr)	0.38	0.30	0.25
Energy consumption(kJ/kg)	1337.9	1635.1	1721.8

6. 결과 및 요약

본 연구는 최적화 기법을 이용하여 벼 저온 곡물건조기의 적정 건조온도, 벼의 순환속도 및 송풍량을 결정하기 위하여 수행되었다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

가. 최적화의 목적함수는 건조소요에너지 최소화로 하였으며, 제어변수는 건조온도, 곡물 유하속도 및 송풍량, 상태변수는 동할율, 건조속도 및 건조소요에너지로 선정하였다. 제한조건으로는 풍량비는 18~30m³/min, 유하속도는 1.5~7m³/hr, 건조온도는 25~35℃범위로 제한하였으며, 동할율은 0.5% 미만, 건조속도는 0.25%,w.b./hr 이상으로 제한하여 최적화를 수행하였다.

나. 최적화 결과 용량 2200kg 건조기의 경우 적정 건조온도는 31.8℃, 적정 송풍량은 61.6m³/min, 적정 곡물순환속도는 2.52m³/hr로 나타났다.

다. 용량 3800kg 건조기의 경우 적정 건조온도는 30.9℃, 적정 송풍량은 79.8 m³/min, 적정 곡물순환속도는 5.84m³/hr로 나타났다.

라. 용량 4800kg 건조기의 경우 적정 건조온도는 32.1℃, 적정 송풍량은 91.9 m³/min, 적정 곡물순환속도는 6.31m³/hr로 나타났다.

마. 최적화 결과 용량 2200kg, 3800kg 및 4800kg 순환식건조기에서 건조후 동할율은 각각 0.48%, 0.44% 및 0.47%로 비슷한 수준으로 나타났으며, 건조소요시간은 24.78시간, 33.11시간 및 38.24시간, 건조속도는 0.38%, 0.30% 및 0.25%(w.b./hr)로 나타나 순환식건조기의 용량이 증가할수록 건조소요시간도 증가하였으며, 건조속도는 감소하였다.

바. 송풍량은 각각 $61.6\text{m}^3/\text{min}$, $79.8\text{m}^3/\text{min}$ 및 $91.9\text{m}^3/\text{min}$, 곡물유하속도는 $2.52\text{m}^3/\text{hr}$, $5.84\text{m}^3/\text{hr}$ 및 $6.31\text{m}^3/\text{hr}$ 로 나타나 순환식건조기의 용량이 증가할수록 송풍량 및 곡물유하속도는 크게 증가하였다.

사. 건조소요에너지는 각각 $1337.9\text{kJ}/\text{kg}$, $1635.1\text{kJ}/\text{kg}$ 및 $1721.8\text{kJ}/\text{kg}$ 으로 나타나 순환식건조기의 용량이 증가할수록 건조소요에너지는 증가하였다.

제 6 절 저온곡물건조기 시작기 개발 및 성능평가

1. 시작기 개발

가. 기본설계

저온곡물건조기는 RPC의 대표적인 열풍건조시설인 순환식건조기에서 Heat pump를 이용하여 건조공기를 발생하여 건조할 수 있는 구조로 기본 설계를 하였다.

저온곡물건조 시작기는 Heat Pump의 송풍량 (Q)은 풍량비 $30 \text{ m}^3/\text{min} \cdot \text{ton}$ 을 기준으로 건조기 용량 150kg 에 대하여 $4.5 \text{ m}^3/\text{min}$ 으로 계산되어 손실을 고려하여 $6 \text{ m}^3/\text{min}$ 으로 하였다.

Heat pump의 송풍저항은 증발기와 응축기의 송풍저항과 벼 퇴적층의 송풍저항으로 구분할 수 있다. 벼의 퇴적층에서의 송풍저항은 다음 식 (3-38)을 이용하여 계산하였으며, 벼층의 두께 $D=0.08\text{m}$, 풍속 $v=0.29\text{m/s}$ 일 때 32.1 mmAq 이었다.

$$\Delta P = 9.81 \times 653.54 \times v^{1.2727} \times (D+0.15) \dots\dots\dots (3-38)$$

여기서, ΔP : 송풍저항(mmAq)

v : 곡물층의 풍속(m/s)

$$= \frac{Q}{60 \times A}$$

Q : 송풍량(m^3/min)

A : 건조부 단면적(m^2)

D : 곡물층의 두께(m)

Heat pump의 가열 및 냉각부하를 결정하기 위한 외기조건은 기상청의 수원지역 10~11월 기상자료를 이용하였으며 가열시 온도 -5°C , 상대습도 70%, 냉각시 온도 25°C , 상대습도 70%를 기준으로 계산하였다.

Heat pump의 설계를 위한 습공기의 성질(ASHRAE, 1989)은 다음의 표 3-20과 같다. Heat pump의 토출공기의 조건은 최고 온도 50°C 일 때 상대습도 50%, 최저 온도 20°C 일 때 상대습도 35%를 목표로 설계하였으며, 이 때의 습공기의 성질은 표 3-21과 같다.

Table 3-20 Ambient air conditions and psychrometric properties for design of heat pump

	Ambient	Conditions
Heating	-5°C , 70% rh	<ul style="list-style-type: none"> ○ Specific volume $0.762 \text{ m}^3/\text{kg}$ ○ Enthalpy -0.4998 kJ/kg ○ Absolute humidity 0.00182 kg/kg
Cooling	25°C , 70% rh	<ul style="list-style-type: none"> ○ Specific volume $0.844 \text{ m}^3/\text{kg}$ ○ Enthalpy 46.0038 kJ/kg ○ Absolute humidity 0.01021 kg/kg

Table 3-21 Design criteria for exhaust air conditions from heat pump

	Drying air	Conditions
Maximum temperature	50°C, 50% rh	○ Specific volume 0.974 m ³ /kg ○ Enthalpy 154.8295 kJ/kg ○ Absolute humidity 0.0403 kg/kg
Minimum temperature	20°C, 35% rh	○ Specific volume 0.837 m ³ /kg ○ Enthalpy 32.5476 kJ/kg ○ Absolute humidity 0.00510 kg/kg

표 3-20과 표 3-21의 공기의 상태를 습공기선도상에 나타낸 것이 그림 3-42이다. 그림에서와 같이 외기공기(온도 25°C, 상대습도 70%)를 토출공기(온도 20°C, 상대습도 35%)로 냉각하는 과정은 ①-②-③-④와 같으며, 이때 ①-②-③과정에서 소요되는 냉각열량은 식 (3-39)와 같이 11991.2kJ/hr이며, ③-④과정에서 소요되는 가열열량은 식 (3-40)과 같이 6244.5kJ/hr로 나타났다.

$$Q_c = \frac{Q \times 60}{v_1} \times (h_1 - h_3) \dots\dots\dots (3-39)$$

$$Q_h = \frac{Q \times 60}{v_2} \times (h_4 - h_3) \dots\dots\dots (3-40)$$

여기서, Q_c : 냉각열량(kJ/hr)

Q_h : 가열열량(kJ/hr)

Q : 송풍량(m³/min)

또한, 외기공기(온도 -5°C, 상대습도 70%)를 토출공기(온도 50°C, 상대습

도 50%)로 가열하는 과정은 ⑤-⑥과 같으며, 이 때 가열열량은 다음의 식 (3-41)와 같이 57411.4kJ/hr로 나타났다.

$$Q_h = \frac{Q \times 60}{v_3} \times (h_5 - h_6) \dots \dots \dots (3-41)$$

상대습도를 제어하기 위한 가습량은 식 (3-42)와 같이 14.23kg/hr로 나타났다.

$$Q_H = \frac{Q \times 60}{v^3} \times (H_6 - H_5) \dots \dots \dots (3-42)$$

여기서, Q_H : 가습량(kg/hr)

따라서, 냉각 및 가열시 소요되는 열량을 고려하여 Heat pump의 압축기는 Copeland사(USA)의 2.3kW(CRJQ-0300 -TF5)로 선정하였다. 압축기의 최대능력은 응축온도 48.9℃, 증발온도 -1.1℃에서 37112.8kJ/hr이며 따라서, 건조에 요구되는 총 열량 57411.4kJ/hr을 고려하면 보조열원의 열량은 20298.6kJ/hr로 나타났다.

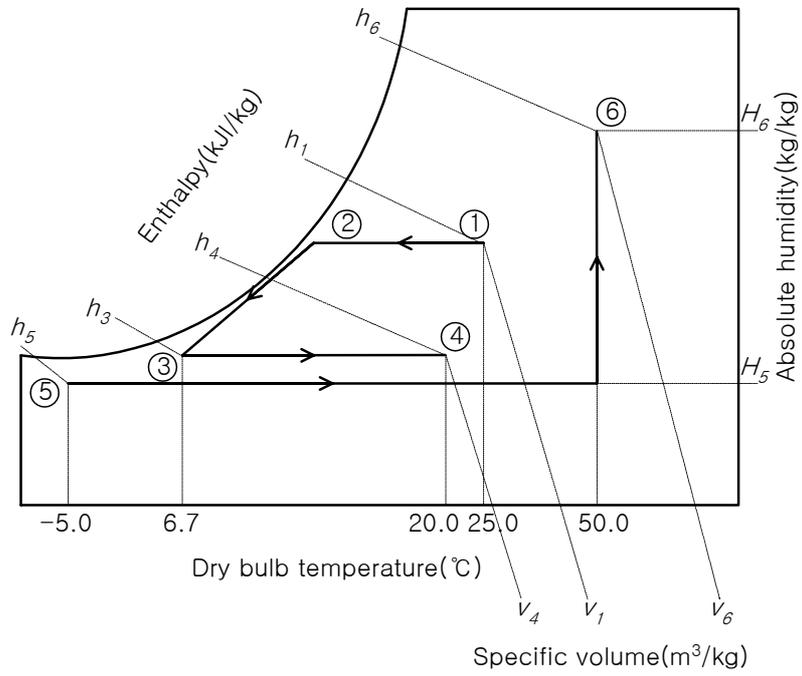


Fig. 3-42 Process air on psychrometric chart.

나. Heat pump 제작

그림 3-43은 2단의 냉각시스템으로 구성된 Heat pump의 흐름도를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 상단의 냉각시스템은 증발기, 응축기, 재열기 및 팽창변을 각각 1개씩 병렬로 구성하여 주 냉각시스템으로 사용하였으며, 하단의 냉각시스템은 증발기 및 응축기를 일체형으로 개발하여 보조 냉각시스템으로 사용하도록 하였다.

상단 냉각시스템의 증발기에서 냉각된 공기가 응축기에서 가열이 되도록 하였으며, 상대습도를 조정할 수 있도록 응축기후에 재열기를 설치하였다. 증발기에 설치된 온도센서(TE-1)와 토출 공기의 온도를 측정하도록 온도센서(TE-2)를 설치하여 TE-1과 TE-2를 비교해서 제습량을 결정하도록 하였다. 외기조건에 따라 가습량이 요구될 경우 건조공기의 상대습도를 조절하기 위하여 건조공기 공급부에 노즐을 설치하고 가열식 가습기로 수분을 공급하도록 제작하였다.

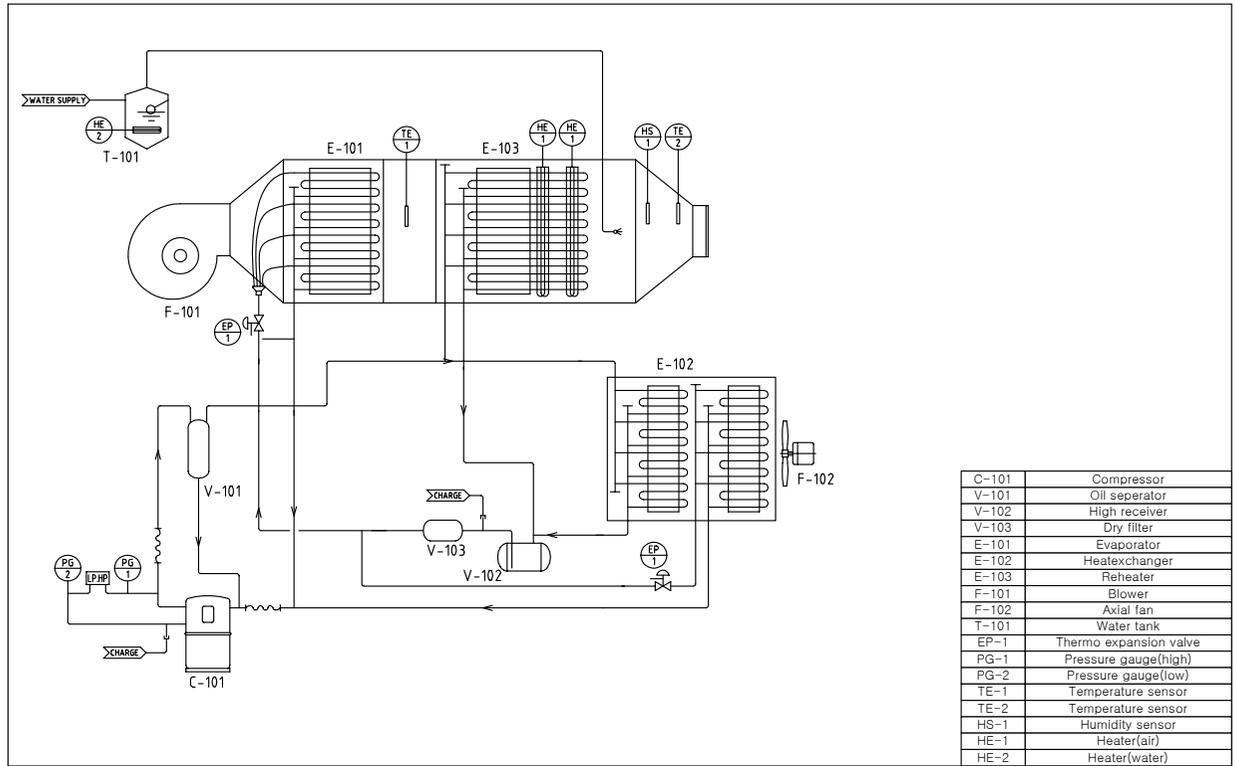


Fig. 3-43 Schematic diagram of heat pump.

그림 3-44와 3-45는 개발한 Heat pump를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 크기는 1629×840×1400mm(L×W×H)로 전면에 제어부를 설치하였으며, 이동이 용이하도록 개발하였다. Heat Pump는 압축기, 증발기, 응축기 및 팽창 밸브 등 냉각장치와 외기공기를 유입하는 필터, 댐퍼 및 송풍기로 구성하였다.

송풍기 입구에는 댐퍼를 설치하여 송풍량을 조절할 수 있도록 하였다. 상대습도와 온도 조절을 위해 재열기와 가열식 가습기를 설치하였다. 냉매는 R-22를 사용하였다.

제어부는 수동 및 자동 모드로 선택할 수 있도록 하였으며, 상대습도를 제어하지 않을 경우 가습기와 재열기를 독립적으로 선택할 수 있도록 하였다. 표 3-22는 Heat pump의 주요기기의 제원을 나타낸 것이다.



Fig. 3-44 View of heat pump(front).



Fig. 3-45 View of heat pump(side).

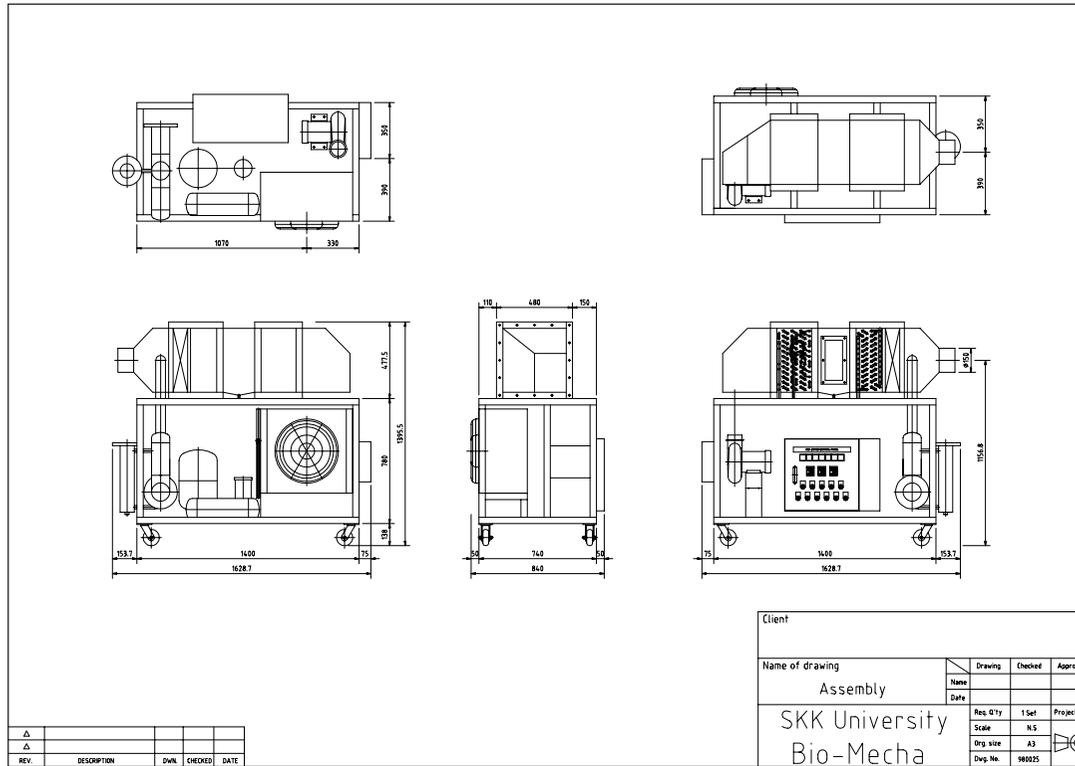


Fig. 3-46 Drawing of heat pump.

Table 3-22 Specifications of the heat pump

Compressor	power : 2.3kW capacity : 37112.8kJ/hr at condensing/evaporating temperature 48.9°C/-1.1°C
Condenser	coil : 1/2"×11R×12S×400EL transfer area : 30.8m ²
Evaporator	coil : 1/2"×8R×12S×400EL transfer area : 16.5m ²
Reheater	coil : 1/2"×6R×12S×400EL transfer area : 17.1m ²
Fan	power : 0.6kW capacity : 60m ³ /min at 110mmAq
Refrigerant	R-22

다. 실험용 순환식건조기

벼의 건조온도별 건조 및 품질특성을 구명하기 위하여 실험용 건조기를 설계 및 제작하였다. 실험용 건조기의 주요 설계조건은 다음의 표 3-23과 같다. 표에서와 같이 실험용 건조기의 용량은 150kg으로 하였으며, 순환식 횡류형 건조기로 설계하였다.

Table 3-23 Specifications of the test dryer

Items	Specifications
Type	Grain circulating cross-flow type
Capacity	150kg
Dimensions of drying column	
Number of row	2
Grain depth	0.08m
Volume	0.0272m ³
Width	0.7m
Height	0.24m
Capacity	15kg
Tempering chamber	
Volume	0.2455m ³
Capacity	135kg
Air flow rate	0.04m ³ /min·kg(6m ³ /min)
Grain flow rate	75~180kg/hr(1.2~2.9m/hr)

2. 시작기 성능평가

가. 건조기 기본성능

공방상태에서 건조기의 이송장치, 제어장치 및 집진장치의 적정 가동여부를 측정하였다. 이송장치 중 버킷엘리베이터의 경우 회전속도 1450rpm으로 적정하였으며, 배출부의 스쿠류콘베이어는 340~1250rpm범위로 조정이 가능하여 적정한 것으로 판단되었다. 제어장치의 자동모드는 집진부-피드부-배출부-순환부로 동력이 자동으로 전달되는 모드로 배출부(스쿠류콘베이어)의 동작시 다소 지연되는 관계로 과부하의 발생이 우려되어 동력전달 체계를 체인으로 교체하여 이를 방지하였다. 수동모드의 경우 적정하게 작동되었으며, 집진장치의 이상유무는 발생하지 않았다.

건조실(2열)의 풍속분포는 건조온도, 송풍량 등과 직접적인 관계가 있어 건조실내에는 균일한 풍속이 유지되어야 한다. 2열의 건조실내의 풍속을 1차 측정(1분간격으로 30회 측정)한 결과 다소 편차가 발생하여 건조실 유입측에 V자형 안내가이드를 보완하여 편차를 최대한 보완하였다.

곡물이 건조실(2열)을 통과할 때 균일한 양으로 통과되어야 건조의 불균일을 방지할 수 있다. 따라서, 건조실 2열에 설치된 투명창으로 곡물이 10cm 통과할 때 시간을 초시계로 10회씩 각각 측정하여 순환속도로 환산하여 균일성을 측정하였다. 측정결과 2열에서 각각 5.8m/s, 5.7m/s로 균일하게 나타났다. 유하속도를 측정하기 위하여 건벼 400kg을 투입하고 10분간 배출되는 양을 저울로 측정하였으며, 설계치에 만족하는 것으로 나타났다.

Table 3-24 Test of velocity for drying chambers

Items	Test-1		Test-2	
	1th row	2th row	1th row	2th row
Average velocity(m/s)	3.02	6.27	4.66	4.96
Standard deviation	0.856	1.558	0.377	0.622

저온곡물건조기에 사용한 송풍기의 성능곡선은 다음 그림 3-47과 같으며, 그림에서와 같이 90cmm일 때 정압은 89.4mmAq로 송풍기의 설계치 90cmm, 56.2mmAq에서 필터, 증발기 등 열교환기의 저항을 고려한다고 가정해도 만족한 수준이었다.

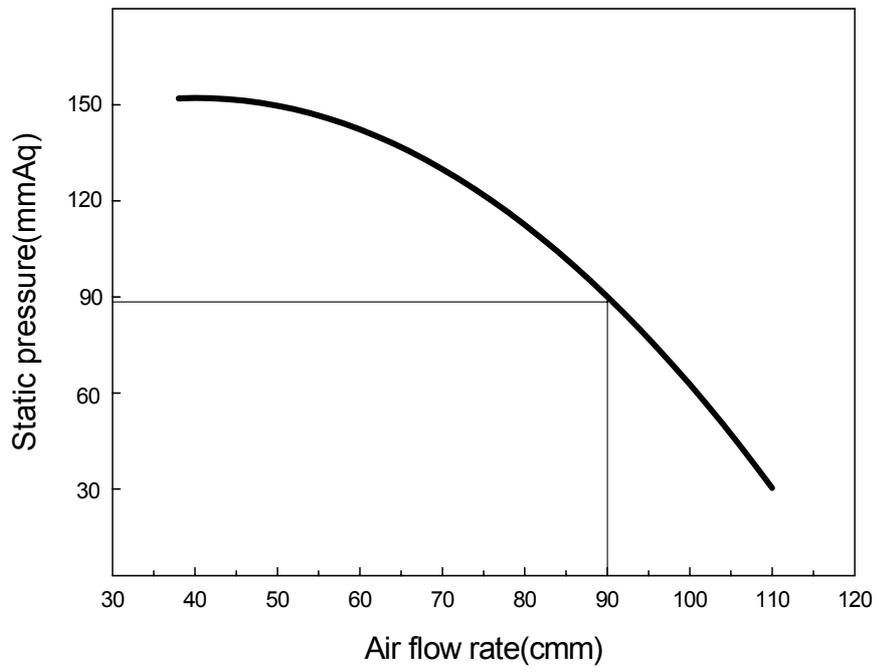


Fig. 3-47 Performance curve of fan for low temperature grain dryer.

나. 성능평가

1) 출구 공기조건 제어능력

외기온도 및 상대습도가 19.6℃ 및 52.3%일 때 Heat pump의 출구 공기조건(30℃, 40%)이 정상상태에 도달하는 시간을 그림 3-48에 나타내었다. 그림에서와 같이 출구공기의 온도는 6분, 상대습도는 7분 정도에 정상상태에 도달하였으며, 이후 온도는 0.2℃, 상대습도는 0.5%범위에서 제어가 가능하여 출구 공기조건의 제어능력은 만족스러운 것으로 판단된다.

2) 성능계수

공방상태에서 건조공기 30℃ 조건에서 최대냉각능력을 측정하였다. 이때의 외기 평균온도 및 상대습도는 20.2℃ 및 50.6%이었으며, 건조공기의 평균온도 및 상대습도는 30.5℃ 및 41.2%, 송풍량은 85.2m³/min으로 나타났다. 따라서, 외기 및 건조공기의 열물성치로부터 냉각능력을 계산한 결과 8616kJ/hr 이었다.

그림 3-49는 공기발생장치의 건압축 냉동 사이클을 나타낸 것으로 그림에서와 같이 냉동효과는 173kJ/kg이므로 냉매순환량은 49.6kg/hr로 나타났으며, 성능계수는 5.5로 표준냉동사이클에서 냉매 R-22의 성능계수 4.0에 비해 높은 값을 나타내었다.

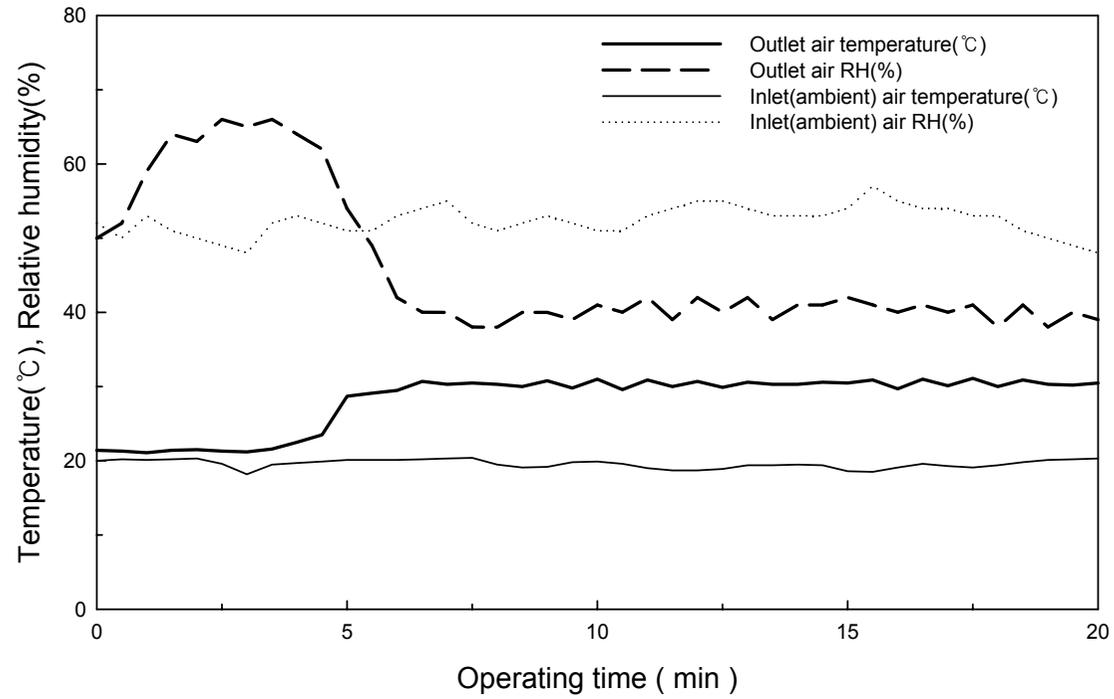


Fig. 3-48 Change of temperatures and relative humidities at inlet and outlet of heat pump.

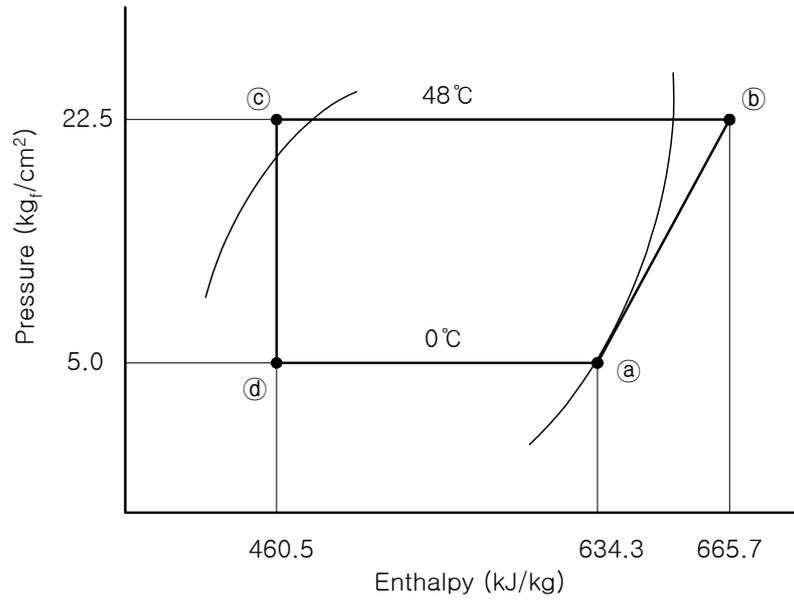


Fig. 3-49 Dry compression refrigeration cycle of low temperature dryer(heat pump).

3. 시작기 건조실험

가. 외기조건

벼의 건조온도별 건조 및 품질특성 실험은 '03. 7. 20에 시작하였으며, 건조온도 20~40℃범위에서 실험중 외기온도 및 상대습도는 다음의 표 3-25와 같다. 건조온도 40℃ 실험에서 외기온도는 평균 30.3℃로 가장 높았으며, 건조온도 20℃에서 가장 낮은 평균 24.2℃로 나타났다.

상대습도는 평균 56.2~73.2%범위였으며, 20℃ 및 30℃ 실험에서 우천으로 인하여 상대습도가 다소 높게 나타났다.

실험중 저온곡물건조기의 Heat pump는 송풍량을 10.2CMM으로 설계 송풍량 6CMM보다 다소 높게 나타났다. 송풍량은 공기유입부에 댐퍼를 두어 최대 30CMM까지 조정이 되도록 하였는데, 초기에는 설계 송풍량 6CMM으로 조정하고 실험을 하였지만 건조 중 집진과 건조로 인한 곡물중량의 감소로 인하여 송풍량이 10.2CMM으로 증가하였다.

Table 3-25 Ambient air temperature and relative humidity during drying test

Drying temperature (°C)	Ambient temperature(°C)	Relative humidity(%)
20	24.2(20.6~30.9)	73.2(35.0~93.0)
30	27.3(23.4~29.7)	71.8(63.0~88.0)
40	30.3(27.6~31.8)	56.2(27.6~67.0)

나. 건조온도 및 곡온변화

그림 3-50은 건조공기 유입부의 온도변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 설정온도 20℃에서는 평균 20.1℃(17.3~23.4℃)로 나타났으며, 설정온도 30℃에서는 평균 28.7℃(22.3~30.7℃)로 나타났다. 설정온도 40℃에서는 평균 36.8℃(25.3~39.1℃)로 나타났다.

설정온도 20℃ 및 30℃에서는 건조공기 유입부의 온도와 설정온도간의 편차는 비교적 적었으나, 설정온도 40℃는 평균 3.2℃정도의 차이를 보였다. 이는 제습정은 발생장치의 설계조건에서 가열열량 설계시 외기조건을 10~11월을 기준으로 하였으나 실제 실험은 7월로 외기조건이 차이로 장치의 열량이 다소 부족한 것으로 판단된다. 건조공기 유입부의 상대습도는 32.9~53.7%범위로 나타났다.

그림 3-51은 건조실험 중 건조실의 곡온변화를 나타낸 것이다. 설정온도 20℃에서는 평균 21.1℃(17.5~26.1~)였으며, 설정온도 30℃에서는 평균 30.4℃(22.0~34.3℃)로 나타났다. 설정온도 40℃에서는 평균 39.9℃(38.3~41.3℃)로 나타났다. 건조실의 곡온은 변화폭은 다소 있지만 건조공기 유입부의 온도와 비슷한 경향으로 나타났다. 건조실의 곡온이 건조공기 유입부의 온도에 비해 변화폭이 큰 이유는 곡물배출시 연속배출이 아닌 간헐배출 즉, 배출-정지를 반복해서 배출하기 때문인 것으로 판단된다.

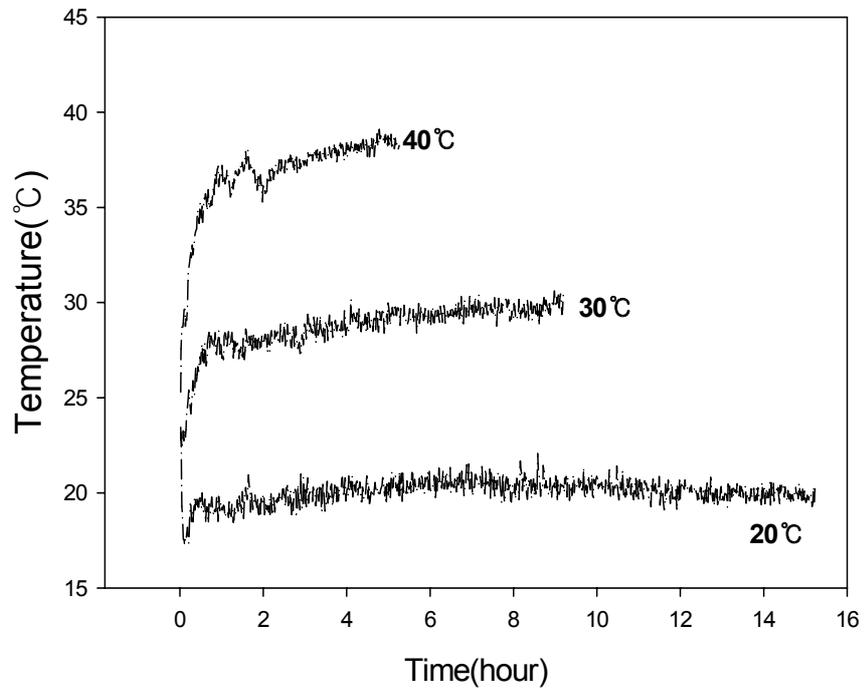


Fig. 3-50 Changes of drying air temperature during drying test.

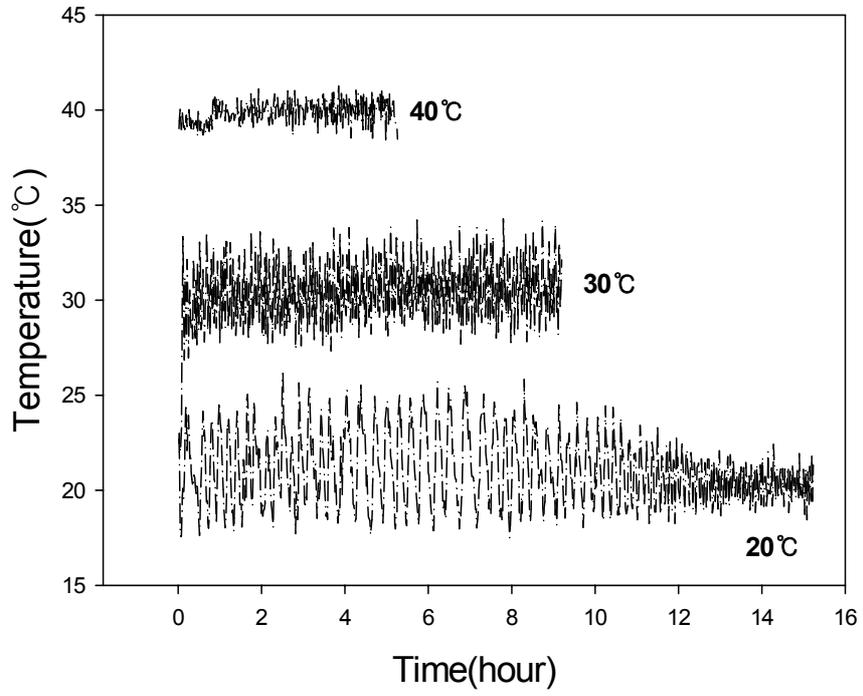


Fig. 3-51 Changes of grain temperature in drying chamber during drying.

그림 3-52는 건조실험 중 텀퍼링실의 곡온변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 설정온도 20℃에서는 평균 19.8℃(15.9~24.0℃), 설정온도 30℃에서는 평균 25.7℃(19.7~28.5℃), 설정온도 40℃에서는 평균 29.1℃(17.8~33.5℃)로 나타났다.

건조실을 통과하면서 상승된 곡온은 순환과 텀퍼링으로 인하여 곡온이 냉각되는 것으로 나타났는데 건조실과 텀퍼링실의 온도차는 설정온도 30, 40 및 50℃에서 각각 1.3, 4.7 및 10.8℃로 나타나 설정온도가 높을수록 크게 나타났다.

보고에 의하면 곡물의 온도가 35℃이상 상승할 경우 동할율이 크게 증가하는 것으로 알려져 있는데, 설정온도 40℃에서의 텀퍼링실 곡온은 29.1℃로 동할율의 위험이 없는 것으로 나타났다.

그림 3-53은 건조실험 중 배풍부의 온도변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 설정온도 20℃에서는 평균 20.4℃(17.8~23.4℃), 설정온도 30℃에서는 평균 29.2℃(22.1~30.7℃), 설정온도 40℃에서는 평균 37.9℃(24.9~39.3℃)로 나타났다.

건조실험 중 배풍구의 상대습도 변화는 그림 3-54와 같다. 그림에서와 같이 배풍구의 상대습도는 초기에 대부분 90%이상으로 나타났으며, 건조가 진행되면서 상대적으로 상대습도도 60%이하로 낮아지는 것으로 나타났다.

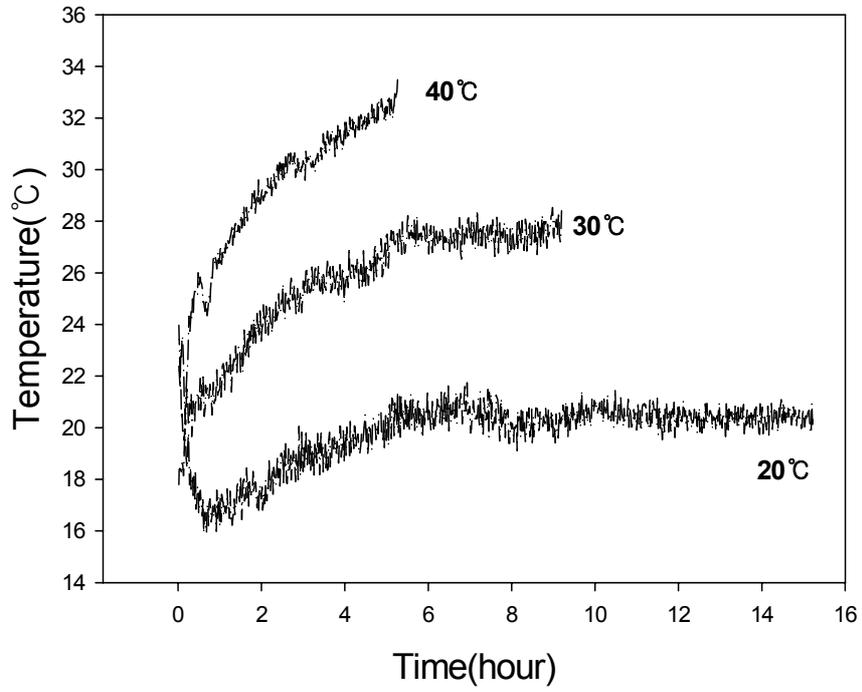


Fig. 3-52 Changes of grain temperature in tempering chamber during drying.

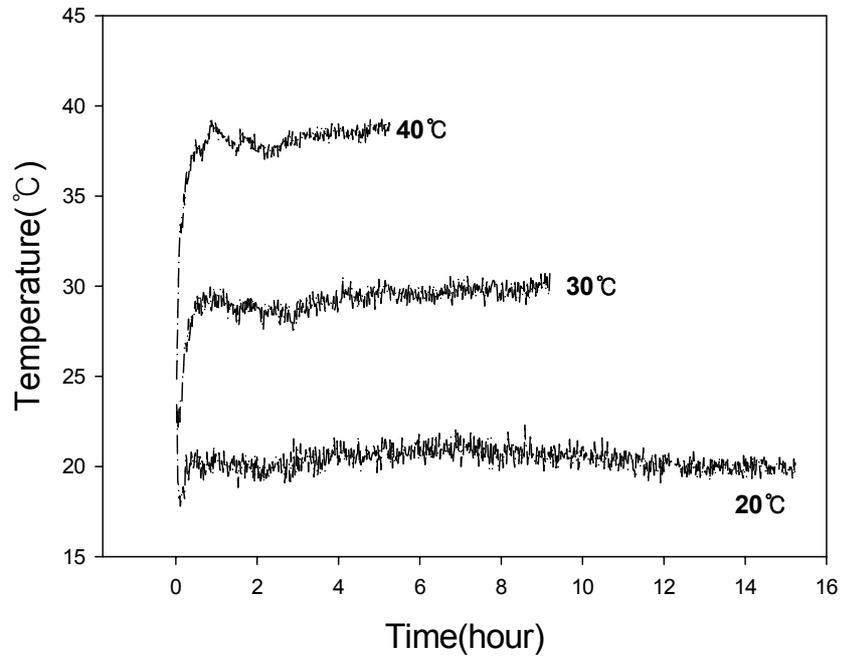


Fig. 3-53 Changes of air temperature after exhaust chamber during drying.

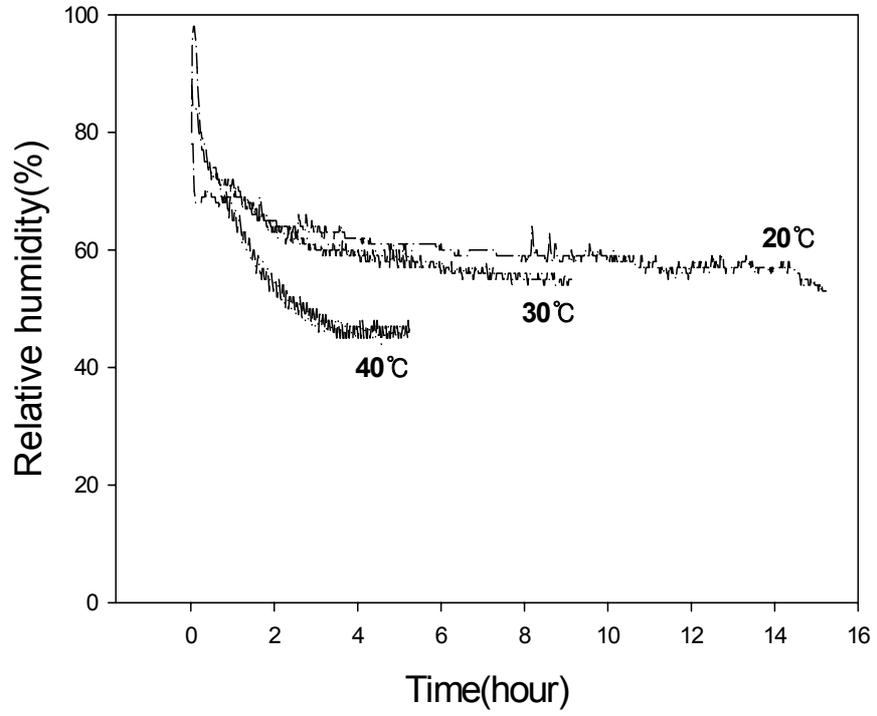


Fig. 3-54 Changes of air relative humidity after exhaust chamber during drying.

다. 건조소요시간, 건감률 및 소요에너지

건조 중 함수율이 15.5~16.0%(w.b.)범위에 도달했을 때 실험이 종료되도록 하였다. 건조온도 20℃에서는 초기함수율 19.0%(w.b.)에서 최종함수율 15.5%(w.b.)까지 소요시간은 15시간으로 나타났고, 건조온도 30℃에서는 초기함수율 20.0%(w.b.)에서 최종함수율 15.4%(w.b.)까지 소요시간은 9시간으로 나타났다. 건조온도 40℃에서 초기함수율 19.9%(w.b.)에서 최종함수율 15.5%(w.b.)까지 소요시간은 5시간이었다. 이때 건조온도 20, 30 및 40℃에서 건감률은 각각 0.23, 0.47 및 0.84(%w.b./hr)로 나타났다(표 3-26).

표 3-27은 건조 중 건조온도에 따른 소요전력을 나타낸 것이다. 소요전력은 건조시간이 가장 긴 40℃에서 58.2(Kw)로 가장 많았고, 30℃에서는 37.2(Kw), 20℃에서 가장 적은 21.3(Kw)로 나타났다. 시간당 전력소비량은 냉각부하가 가장 많은 20℃에서 4.0(Kw/h)으로 가장 많았고, 30 및 40℃에서는 3.8(Kw/h)로 비슷하게 나타났다. 이는 40℃에서는 가열부하로 인하여 전력소비량이 30℃와 비슷한 것으로 판단된다.

Table 3-26 Drying rates and drying times by drying air temperatures

Drying temperature (°C)	Initial moisture content (%w.b.)	Final moisture content (%w.b.)	Drying time (hr)	Drying ratio (%w.b./hr)
20	19.0	15.5	15	0.23
30	20.0	15.4	9	0.47
40	19.9	15.5	5	0.84

Table 3-27 Energy requirement by drying test

Drying temperature (°C)	Energy requirement (kW)	Energy requirement (kW/h)
20	21.3	4.0
30	37.2	3.8
40	58.2	3.8

라. 건조 벼의 품질변화

그림 3-55는 건조온도별 건조 중 함수율 변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 건조온도 20℃에서는 초기 19.0%(w.b.)에서 2시간 후 18.4%(w.b.), 5시간 후 17.4%(w.b.), 11시간 후 16.2%(w.b.) 및 최종 15시간 후 15.5%(w.b.)로 완만하게 감소되었다. 건조온도 40℃는 초기 20.0%(w.b.)에서 1시간 후 17.7%(w.b.) 감소한 18.3%(w.b.)로 나타났으며, 3시간 후 17.1%(w.b.) 및 최종 5시간 후 15.5%(w.b.)로 급격히 감소하였다.

표 3-28은 건조 전 및 건조 후 동할율을 나타낸 것이다. 표에서와 같이 건조 전 동할율은 0.0%이었으며, 건조 후 동할율은 20℃의 경우 발생하지 않았으며, 30℃의 경우 0.4%, 40℃는 0.8% 증가하였다. 건조온도 40℃는 저온 곡물건조기의 개발 목표인 동할율 0.5%미만을 충족하지 못하는 것으로 나타났다.

Table 3-28 Changes of drying air temperature on crack ratio of brown rice

Drying temperature (℃)	Crack ratio before drying(%)	Crack ratio after drying(%)	Increase of crack ratio(%)
20	0.0	0.0	0.0
30	0.0	0.4	0.4
40	0.0	0.8	0.8

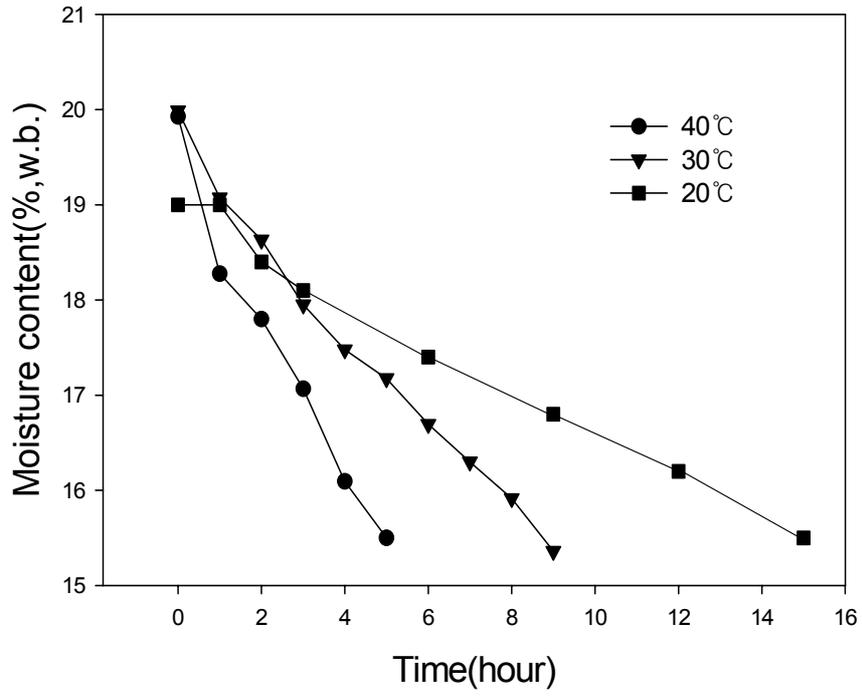


Fig. 3-55 Changes of drying air temperature on moisture content.

제 7 절 저온곡물건조기 본기 개발 및 성능평가

1. 기본설계

저온곡물건조기는 RPC의 대표적인 열풍건조시설인 3.4톤 용량의 순환식건조기에서 Heat pump를 이용하여 건조공기를 발생하여 건조할 수 있는 구조로 기본 설계를 하였다.

저온곡물건조 시작기는 Heat Pump의 송풍량 (Q)은 풍량비 $25 \text{ m}^3/\text{min} \cdot \text{ton}$ 을 기준으로 건조기 용량 4,000kg에 대하여 $85 \text{ m}^3/\text{min}$ 으로 설계하였다.

Heat pump의 송풍저항은 증발기와 응축기의 송풍저항과 벼 퇴적층의 송풍저항으로 구분할 수 있다. 벼의 퇴적층에서의 송풍저항은 식 (3-38)을 이용하여 계산하였으며, 56.5 mmAq 이었다.

Heat pump의 가열 및 냉각부하를 결정하기 위한 외기조건은 기상청의 수원지역 10~11월 기상자료를 이용하였으며 가열시 온도 6°C , 상대습도 70%, 냉각시 온도 20°C , 상대습도 70%를 기준으로 계산하였다.

Heat pump의 설계를 위한 습공기의 성질(ASHRAE, 1989)은 다음의 표 3-29와 같다. Heat pump의 토출공기의 조건은 최고 온도 40°C 일 때 상대습도 10%, 최저 온도 20°C 일 때 상대습도 35%를 목표로 설계하였으며, 이 때의 습공기의 성질은 표 3-30과 같다.

Heat pump의 건조열량은 외기 온도 6°C , 상대습도 70%에서 건조공기 온도 40°C , 상대습도 10%일 때가 건조열량이 최대로 소요되는 조건으로서 식 (5-2)를 이용하여 $56,029\text{kcal/hr}$ 로 계산하였다. 따라서,

따라서, 가열시 소요되는 열량을 고려하여 Heat pump의 압축기는 BOCK사(USA)의 6.1kW(HG3/235-4S) 로 선정하였다. 이때 압축기의 최대능력은 응축온도 62.5°C , 증발온도 -9.6°C 에서 $14,789\text{kcal/hr}$ 이었다. 따라서, 건조에 요구되는 총 열량을 고려하여 보조열원의 열량을 36.2kW 로 설계하였다.

Table 3–29 Ambient air conditions and psychrometric properties for design of heat pump

	Ambient	Conditions
Heating	6°C, 70% rh	<ul style="list-style-type: none"> ○ Specific volume 0.796 m³/kg ○ Enthalpy 3.865 kcal/kg
Cooling	20°C, 70% rh	<ul style="list-style-type: none"> ○ Specific volume 0.844 m³/kg ○ Enthalpy 10.988 kcal/kg

Table 3–30 Design criteria for exhaust air conditions from heat pump

	Drying air	Conditions
Maximum temperature	40°C, 10% rh	<ul style="list-style-type: none"> ○ Specific volume 0.893 m³/kg ○ Enthalpy 12.125 kcal/kg
Minimum temperature	20°C, 35% rh	<ul style="list-style-type: none"> ○ Specific volume 0.837 m³/kg ○ Enthalpy 32.5476 kJ/kg

2. 본기 제작

그림 3-56은 2단의 냉각시스템으로 구성된 Heat pump의 흐름도를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 냉각시스템은 증발기, 응축기, 재열기 및 팽창변을 각각 1개씩 병렬로 구성하여 하였다.

상단 냉각시스템의 증발기에서 냉각된 공기가 응축기에서 가열이 되도록 하였으며, 상대습도를 조정할 수 있도록 응축기후에 재열기를 설치하였다.

그림 3-57과 3-58은 개발한 Heat pump를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 크기는 2305×1020×1772mm(L×W×H)로 전면 상단에 제어부를 설치하였으며, 이동이 용이하도록 개발하였다. Heat Pump는 압축기, 증발기, 응축기 및 팽창밸브 등 냉각장치와 외기공기를 유입하는 필터, 댐퍼 및 송풍기로 구성하였다.

송풍기 입구에는 댐퍼를 설치하여 송풍량을 조절할 수 있도록 하였으며, 필터를 통해서 공기가 유입되도록 하였다(그림 3-59). 냉매는 R-22를 사용하였다.

제어부는 수동 및 자동 모드로 선택할 수 있도록 하였으며, 공급공기, 외기 온도, 소요전력 등의 정보를 제공하도록 하였다(그림 3-60).

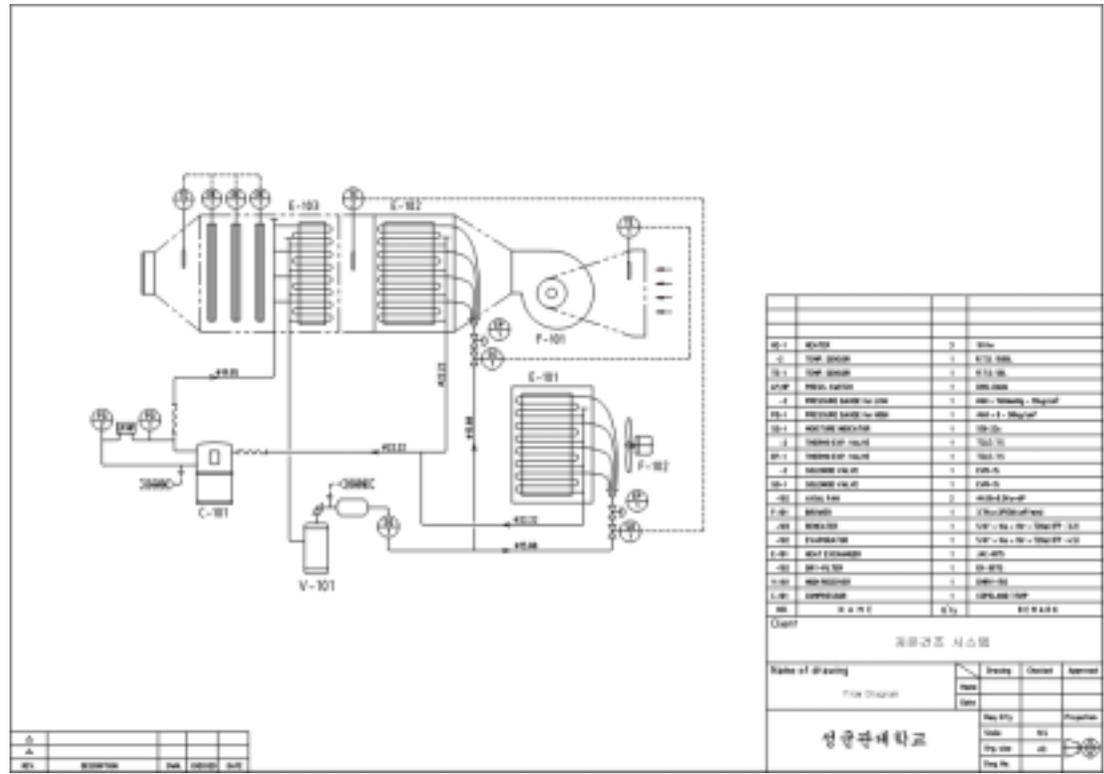


Fig. 3-56 Schematic diagram of heat pump.



Fig. 3-57 View of heat pump(front).



Fig. 3-58 View of heat pump(side).



Fig. 3-59 View of controller.



Fig. 3-60 View of fan and filter.

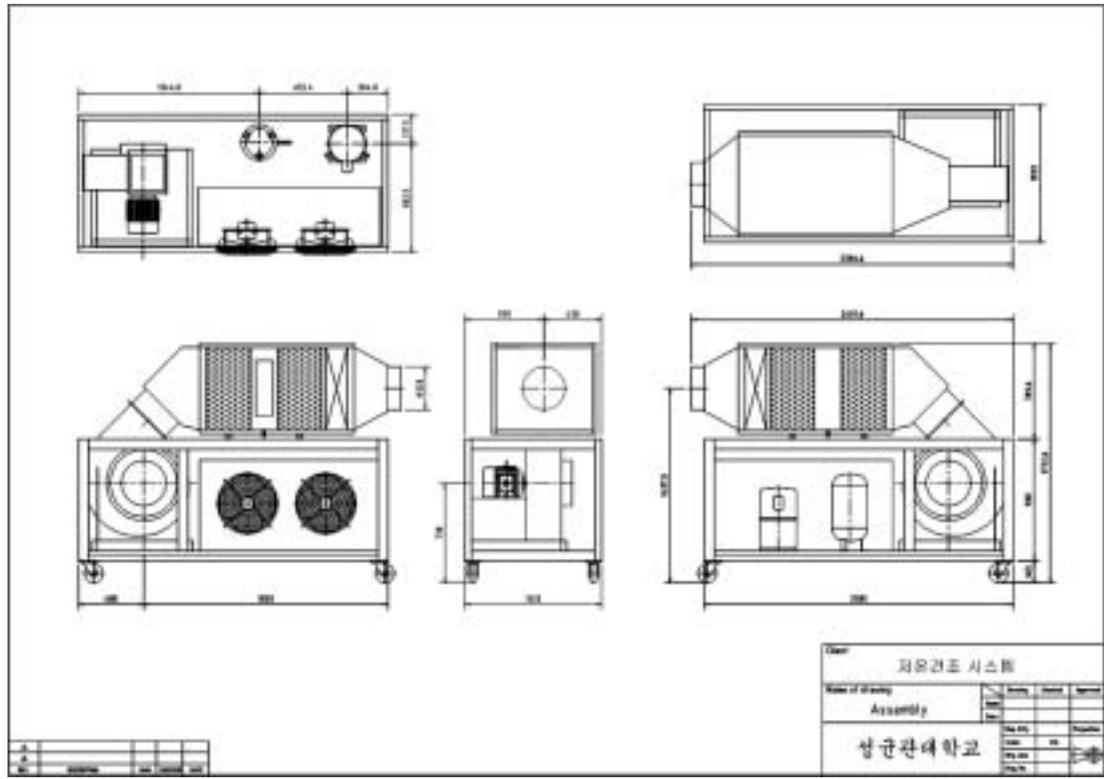


Fig. 3-61 Drawing of heat pump.

3. 본기 성능평가

가. 기본성능

저온곡물건조기에 사용한 송풍기(1.5kW)는 최대송풍량 120cmm일 때 정압은 54.0mmAq이었으며, 송풍량 85cmm에서는 68.0mmAq로 송풍기의 설계치 85cmm, 56.5mmAq를 만족하였으며, 냉각시스템의 필터, 증발기 등 열교환기의 저항을 고려한다고 가정해도 만족한 수준이었다.

나. 출구 공기조건 제어능력

외기온도 및 상대습도가 17.1℃ 및 51.8%일 때 Heat pump의 출구 공기조건 35℃가 정상상태에 도달하는 시간을 그림 3-62에 나타내었다. 그림에서와 같이 출구공기의 온도는 5분 정도에 정상상태에 도달하였으며, 상대습도는 7분 정도에 12%에 도달하였으며, 이후 온도는 0.5℃, 상대습도는 2%범위에서 제어가 가능하여 출구 공기조건을 제어능력은 만족스러운 것으로 판단된다.

Fig. 3-62 Change of temperatures and relative humidities at inlet and outlet of heat pump.

4. 본기 건조실험

가. 공시재료

공시재료는 전북 김제지역에서 2005년 10월에 수확한 동진벼로서 초기함수율은 23.5%(w.b.)이었다. 40kg 포대로 수확한 벼를 담아 0℃ 저온저장고에 6일간 보관하였으며, 실험 24시간 전에 저온저장고에서 꺼내 상온에 방치하여 외기와 평형을 이루도록 한 후 실험을 시작하였다. 실험전 초기곡온은 16.6℃이었다.

나. 실험방법

개발한 저온곡물건조기를 현장(성균관대학교 RPC)에 설치하여 3.8톤 용량의 순환식건조기(ShinHeung, Korea)를 이용하여(그림 3-63) 2005년 10월에 건조실험을 수행하였다. 그림 3-63은 실험에 사용한 순환식건조기를 나타낸 것이며, 그림 3-64와 같이 열풍유입부에 설치되어 있는 히터를 제거한 후 300mm 원통형 덕트를 설치하여 그림 3-65와 같이 원형 단열관으로 저온곡물건조기 연결하여 저온곡물건조기에서 발생하는 건조공기를 공급하도록 구성하였다.

저온곡물건조기의 건조공기 유입부, 배기부, 건조실, 탬퍼링실 및 외기 등 총 10지점에 Thermocouple(T type, OMEGA, USA)를 설치하고 자료수집장치(7327, Datascan, UK)를 이용하여 5분 간격으로 온도를 측정하여 PC에 저장하였다. 또한, 상대습도는 건조공기 유입부, 배기부 및 외기 각각 1지점에서 습도계(TR-72S, Japan)를 이용하여 측정하였다.

건조중 송풍량 측정은 배기부에 길이 200mm의 원형덕트를 연결하여 풍속계(ANO6141, KANOMAX, Japan)를 이용하여 측정하였다.

실험 시작 후 3시간 간격으로 시료를 채취하여 함수율 및 동할율을 측정하

였다. 함수율은 10립-135도-24시간 측정법으로 측정한 후 105도 표준측정법으로 환산하였으며, 3회 반복 측정하여 평균치를 이용하였다. 또한, 건조 중 함수율의 경시적 변화는 단립수분계(CTR-800E, S.SEIKI, Japan)를 이용하여 측정하였다. 동할율은 채취한 시료를 밀봉상태에서 72시간 상온에 방치한 후 수작업으로 왕겨를 제거하여 현미 250립을 대상으로 동할립측정기(DC 50, Hansung, Korea)를 이용하여 육안으로 측정하였으며, 3회 반복 측정하여 평균치를 이용하였다.

건조실험에 투입된 벼는 3.2톤이었으며, 건조온도 및 초기곡물온도는 33℃ 및 16.6℃이었다. 초기함수율은 24.3%(w.b.)로 16.0%(w.b.)가 도달할 때까지 실험을 실시하였다.



Fig. 3-63 View of circulation grain dryer.



Fig. 3-64 View of a circle duct.



Fig. 3-65 View of coupling circulation grain dryer and low temperature grain dryer.

다. 건조특성

1) 외기온습도

건조실험중 외기온도 및 상대습도는 다음의 그림 3-66와 같다. 외기온도는 평균 15.6°C이었으며 상대습도는 평균 68.8%로 건조후반에 비로 인하여 상대습도가 증가하였다.

실험중 저온곡물건조기의 Heat pump는 송풍량을 90CMM으로 설계 송풍량 85CMM보다 다소 높게 나타났다. 송풍량은 공기유입부에 댐퍼를 두어 최대 85CMM까지 조정이 되도록 하였는데, 초기에는 설계 송풍량 85CMM으로 조정하고 실험을 하였지만 건조 중 집진과 건조로 인한 곡물중량의 감소로 인하여 송풍량이 90CMM으로 증가하였다.

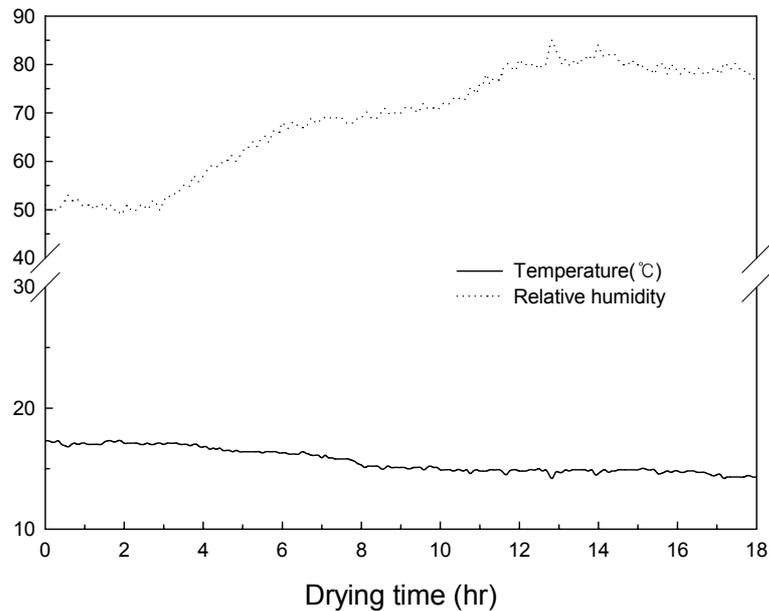


Fig. 3-66 Ambient air temperature and relative humidity during drying test.

2) 건조온도 및 곡온변화

그림 3-67은 건조공기 유입부의 온도변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 설정온도 33℃에서는 평균 32.5℃(27.8~33.6℃)로 나타났으며, 상대습도는 12%(11~17%)로 나타났다. 건조중 건조공기 온도 및 상대습도의 편차는 각각 0.5℃ 및 0.7%로 나타나 건조공기의 제어가 적정한 것으로 판단된다.

그림 3-68은 건조실험 중 건조실 및 템퍼링실의 곡온변화를 나타낸 것이다. 건조실의 곡물온도는 평균 28.2℃(22.2~30.1℃)로 건조 후반부로 갈수록 곡물온도는 증가하였다. 템퍼링실의 곡물온도는 평균 21.7℃(15.2~24.3℃)로 건조실의 곡온보다 낮게 나타나 건조실을 통과하면서 상승된 곡온은 순환과 템퍼링으로 인하여 곡온이 냉각되는 것으로 나타났다. 템퍼링실의 곡물온도도 건조실의 곡물온도와 마찬가지로 건조 후반부로 갈수록 곡온은 증가하였다. 건조실의 곡온이 건조공기 유입부의 온도에 비해 변화폭이 큰 이유는 곡물배출시 연속배출이 아닌 간헐배출 즉, 배출-정지를 반복해서 배출하기 때문인 것으로 판단된다.

보고에 의하면 곡물의 온도가 35℃이상 상승할 경우 동할율이 크게 증가하는 것으로 알려져 있는데, 건조부와 템퍼링실 곡온은 동할율의 위험이 없는 것으로 판단된다.

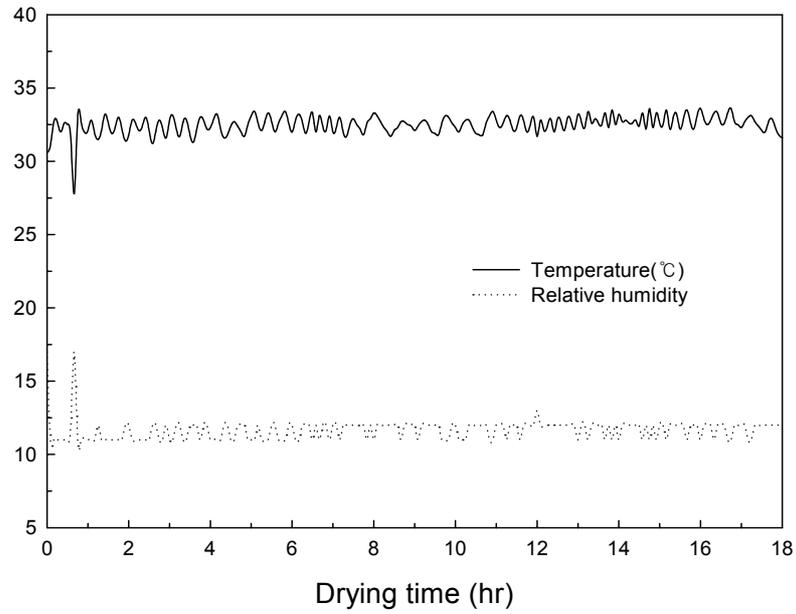


Fig. 3-67 Changes of drying air temperature and relative humidity during drying test.

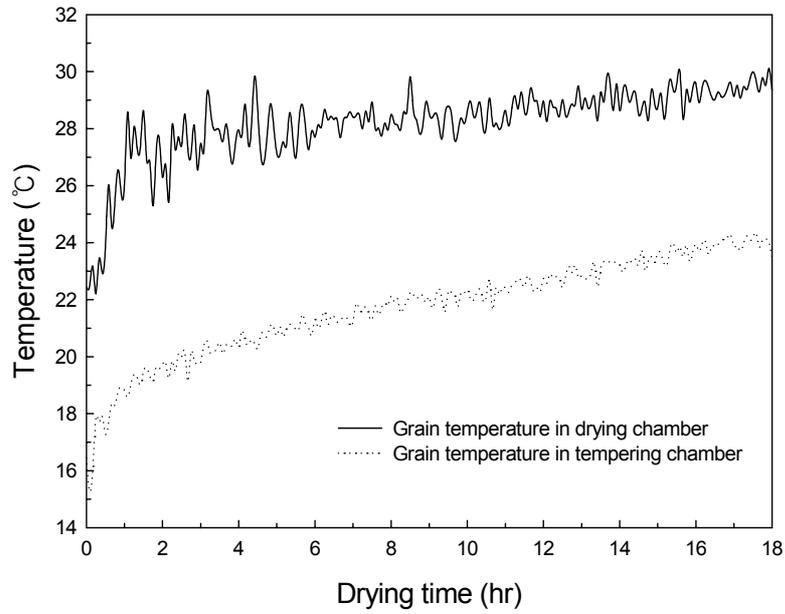


Fig. 3-68 Changes of grain temperature in drying and tempering chamber during drying.

3) 건조소요시간 및 건감률

건조 중 함수율이 16.0%(w.b.)범위에 도달했을 때 실험이 종료되도록 하였다. 초기함수율 23.5%(w.b.)에서 최종함수율 16.0%(w.b.)까지 소요되는 시간은 18시간으로 나타났고 건조속도는 0.41%(w.b.)로 나타났다.

4) 건조 벼의 품질변화

그림 3-69는 건조온도별 건조 중 함수율 변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 초기 23.5%(w.b.)에서 3시간 후 22.2%(w.b.), 6시간 후 20.6%(w.b.)로 건조초기에는 시간당 0.47%(w.b.)의 함수율이 감소하였으며, 12시간 후 18.2%(w.b.) 및 최종 18시간 후 16.0%(w.b.)로 건조후반에는 시간당 0.35%(w.b.)로 건조 후반부로 갈수록 완만하게 감소되었다.

표 3-31은 건조 전 및 건조 후 동할율을 나타낸 것이다. 표에서와 같이 건조 전 동할율은 2.0%이였으며, 건조 후 동할율은 2.7%로 0.7% 증가하였다. 따라서, 저온곡물건조기의 개발 목표인 동할율증가율 0.5%에 근접하는 결과를 나타내었다.

Table 3-31 Changes of drying air temperature on crack ratio of brown rice

Crack ratio of brown rice before drying(%)	Crack ratio of brown rice after drying(%)	Increase of Crack ratio(%)
2.0	2.7	0.7

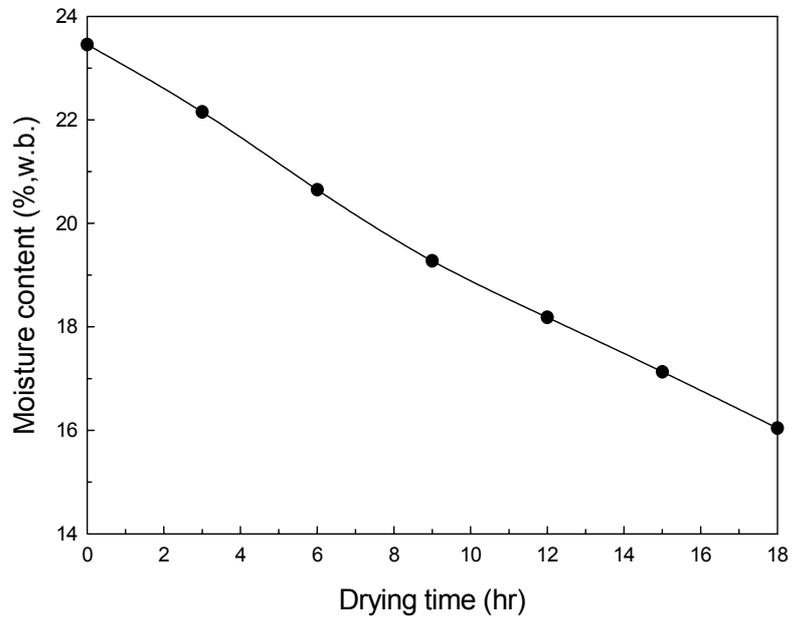


Fig. 3-69 Changes of drying air temperature on moisture content.

5. 비용분석

가. 분석방법

저온곡물건조기의 비용분석을 위하여 기존의 RPC에서 설치 운영중인 순환식건조기를 이용한 화력건조방법과 비교분석하였다. 비용분석을 비교하기 위한 조건은 다음의 표 3-32와 같이 설정하였다.

비용분석의 비교를 위해서 동일한 조건으로 건조하는 것을 우선적으로 가정하여 건조용량은 3.8톤으로 하였으며, 송풍량은 순환식건조기의 형식검사성적서(농업공학연구소)를 고려하여 120CMM으로 하였다. 초기함수율 23.0% (w.b.), 목표함수율 16.0%(w.b.), 연간건조일수 30일 및 일일작업일수 20시간은 농협RPC 설계기준(농협중앙회, 2003)을 근거로 선정하였다. 건조속도는 일반적으로 알려져 있는 버너를 이용한 순환식 건조기와 열펌프의 소요열량을 비교하기 위하여 다음과 같은 조건을 선정하였다. 열풍 순환식건조기의 건조속도는 설계기준을 근거로 0.80%(w.b./hr)로 선정하였고, 저온곡물건조기의 건조속도는 본 실험을 근거로 0.45%(w.b./hr)로 선정하였다.

순환식건조기에 요구되는 건조소요열량은 다음의 식(3-43)으로 계산하였으며, 저온곡물건조기에 요구되는 건조소요열량 본 연구에서 검증된 저온곡물 건조기 시뮬레이션 프로그램을 이용하였다.

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T \text{ [kcal/hr]} \dots\dots\dots (3-43)$$

여기서,

$$m(\text{질량유동율}[\text{kg}/\text{min}]) = V \cdot q \cdot \rho_p$$

$$V(\text{체적}) = [m^3]$$

$$q(\text{풍량비}) = [m^3/\text{min} \cdot m^3],$$

$$\rho_p(\text{밀도}) = \frac{101,300}{287.1 + (273 + \text{온도})} = 1.20423 [\text{kg}/m^3] \text{ (공기 } 20\text{CENTIGRADE)}$$

$$C_p(\text{비열}) = [\text{kcal}/\text{kg} \cdot \text{K}]$$

$$\Delta T(\text{온도차})$$

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

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

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 3-32 Conditions of expense analysis

Items	Condition
Capacity(ton)	3.8ton
Airflow rate(CMM)	120
Initial moisture content(%w.b.)	23.0
Final moisture content(%w.b.)	16.0
Drying date(day)	30
Drying time(hr)	20
Drying rate(%w.b.)	0.80/0.45

나. 분석결과

저온곡물건조기와 순환식건조기의 소요에너지는 다음의 표 3-33과 같이 저온곡물건조는 31,285kcal/hr로 나타나 순환식건조기의 85,882kcal/hr에 비해 64%정도의 절감 효과가 있었다.

저온곡물건조기와 순환식건조기의 건조일수 별 건조 처리능력은 다음의 표 3-34와 같이 저온곡물건조는 순환식건조기의 건조 처리능력에 비해 41% 수준이었다.

Table 3-33 Comparison of energy consumption between low temperature grain dryer and circulation grain dryer

Airflow rate (CMM)	Energy consumption(kcal/hr)		note
	Low temperature grain dryer	Circulation grain dryer	
120	31,285	85,882	○ ΔT - Circulation : 40°C - Low : 30°C

Table 3-34 Comparison of treatment capacity between low temperature grain dryer and circulation grain dryer

Drying date (days)	Treatment capacity(ton)	
	Low temperature grain dryer	Circulation grain dryer
30	92	222
60	184	445
90	275	667
120	367	890
150	459	1,112

표 3-35은 순환식건조기 및 저온곡물건조기의 고정비와 변동비에 따른 비용분석을 나타낸 것으로 저온곡물건조기는 초기 구입비 증가로 인하여 연간 고정비가 2,986,500원으로 순환식건조기의 고정비 1,006,500원에 비해 약 3배이상의 비용이 요구되었다. 저온곡물건조기의 변동비는 3,353원으로 순환식건조기의 변동비 17,362원의 약 20% 수준이었다.

그림 3-70은 저온곡물건조기와 순환식건조기의 건조일수별(처리량) 건조소요비용을 비교한 것이다. 순환식과 비교하여 저온곡물건조기의 손익분기사용일수는 65일(2년 사용후)이며, 3년차에는 20%, 5년차에는 50.5%의 건조비용절감이 기대된다.

Table 3-35 Expense analysis of low temperature grain dryer and circulation grain dryer

		순환식건조기	저온곡물건조기
고정비	구입비(원)	6,100,000	18,100,000
	내구년한(년)	10	10
	이자(원)	244,000	724,000
	수리비 등(원)	183,000	543,000
	합계(원)	1,006,500	2,986,500
변동비	연료(전력)비(원/ton)	17,362	3,353

* 구입비 6,100천원(건조기)+12,000천원(Heat Pump)

* 감가상각은 정액법 기준 잔존가격 5%

* 이자 4%, 수리비 등 3%

* 전력 36.7원/kW, 등유(면세유) 446원/ℓ

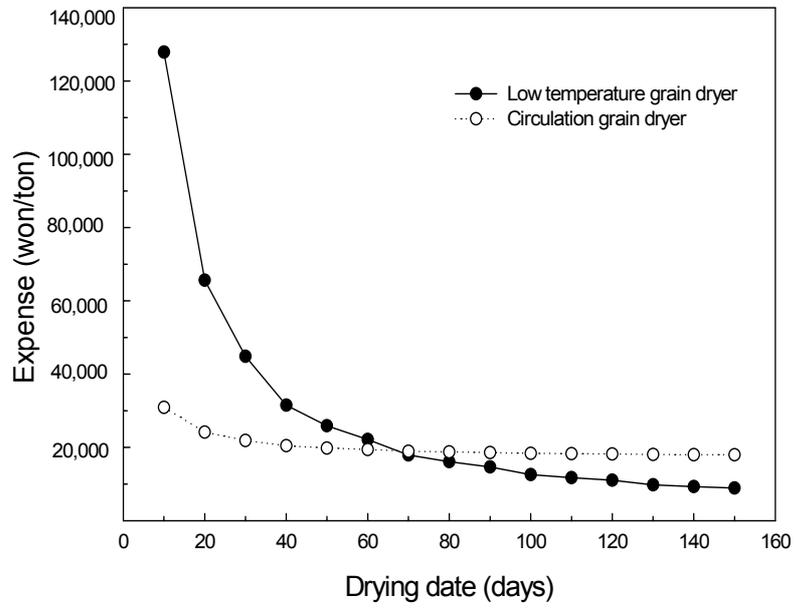


Fig 3-70. Comparison of expense analysis.

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

우리나라 쌀산업의 국제경쟁력 강화를 위해서는 차별화된 고품질 쌀 생산이 긴급하며, 벼의 수확 후 처리기술 중에서 건조기술은 쌀의 품질유지에 관련이 되는 기술이다. 따라서, 우리나라의 기상조건과 벼의 특성에 적합하면서 건조소요에너지를 절감하고 고품질 쌀 생산을 지향하는 저온 곡물건조기의 개발과 적정운영방법을 확립하기 위해서 본 연구가 수행되었다.

주요 연구결과	달성도	비고
<ul style="list-style-type: none"> ○ 벼의 저온건조온도별 품질 및 저장특성 - 건조온도 20~50℃ 범위에서 건조실험 수행 - 건조온도, 곡물온도 등 건조특성 구명 - 동할율, 발아율 등 품질특성 구명 - 관능검사를 통해 식미특성 구명 - 건조온도별 저장실험을 통해 저장특성 구명 	●	<ul style="list-style-type: none"> ○ 전문학술지 논문투고 1편(예정) ○ 전문 학술대회 논문 발표 1편 ○ 고품질의 쌀 생산을 위한 건조방법 등 교육
<ul style="list-style-type: none"> ○ 벼의 저온박층건조 모델 개발 - 건조온도 3수준, 상대습도 2수준에서 박층건조 실험 수행 - 반건조시간 등 건조속도 구명 - 저온 박층건조모델 개발 및 검증 	●	<ul style="list-style-type: none"> ○ 전문 학술대회 논문 발표 1편 ○ 전문학술지 논문투고 1편
<ul style="list-style-type: none"> ○ 벼의 저온건조 시뮬레이션 프로그램 개발 - 횡류형 후층건조를 예측하는 시뮬레이션 프로그램 개발 - 함수율, 곡온, 배출공기의 온습도, 벼의 동할율, 건조소요에너지를 예측 - 벼 건조실험을 통해 실험치와 시뮬레이션에 의한 예측치를 비교하여 적합성을 검증 	●	<ul style="list-style-type: none"> ○ 산업화를 위한 설계 기술 확보 ○ 효율적인 건조운영방법 확립

주요 연구결과	달성도	비고
<ul style="list-style-type: none"> ○ 저온 곡물건조기의 설계인자 구명 - 시뮬레이션 기법을 이용하여 설계인자 구명 - 건조공기의 온도, 송풍량 및 유하속도에 따른 건조특성 구명 - 벼의 동할율, 건조속도 및 소요에너지 구명 	●	<ul style="list-style-type: none"> ○ 전문학술지 논문투고 1편(예정) ○ 산업화를 위한 설계 기술 확보
<ul style="list-style-type: none"> ○ 저온곡물건조기 최적설계 프로그램 개발 - 최적화 기법을 이용하여 적정한 건조온도, 벼의 순환속도, 송풍량을 결정 - 저온 곡물건조기 설계를 위한 인자 구명 	●	<ul style="list-style-type: none"> ○ 산업화를 위한 설계 기술 확보 ○ 전문학술지 논문투고 1편(예정) ○ 공학박사 학위논문 1편 제출
<ul style="list-style-type: none"> ○ 저온곡물건조기 상세 설계 - 용량 150kg의 저온곡물건조기 시작기 설계 - 용량 3.800kg의 저온곡물건조기 분기 설계 	●	<ul style="list-style-type: none"> ○ 산업화를 위한 설계기술 확보 ○ 산업화를 위한 제작기술 확보
<ul style="list-style-type: none"> ○ 저온곡물건조기 제작 및 성능평가 - 용량 150kg의 저온곡물건조기 시작기 설계 - 용량 3.800kg의 저온곡물건조기 분기 설계 - 시작기 기본성능, 성능계수, 제어능력 등, 건조실험을 통해 성능평가 및 보완 - 분기 기본성능, 건조실험을 통해 성능평가 - 열풍건조와 저온건조의 소요에너지, 건조 처리 능력, 비용분석을 비교분석 	●	<ul style="list-style-type: none"> ○ 효율적인 건조운영방법 확립 ○ 현장실험 등 운영체계 정립

주) ● : 달성도 100%

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

저온곡물건조기는 국내에 설치 운영중인 328개소의 RPC와 639개소의 DSC에 설치하여 국내 쌀의 고품질 건조체계를 구축하는데 활용이 가능하다고 판단된다. 또한, 정부에서 부족한 건조저장능력을 향상시키고, 우리나라 쌀 산업의 경쟁력 강화를 위해 2010년까지 DSC 2,000개소 이상을 보급할 예정으로 본 연구결과를 충분히 활용 가능하다고 판단된다.

이를 위해 2006년 현장 시험사업을 통해 2007년에는 상업화가 가능할 것으로 판단하고 있으며, 향후 특허 등 상업화를 위한 체계를 점검할 예정이다.

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

제 6 장 연구개발과정에서의 수집한 해외과학기술정보

기술정보	기술정보명	출처
○ 열풍건조, 제습건조 등 건조방법 별 식미특성 구명 ○ 건조속도와 식미와의 관계구명	除濕乾燥米の食味評價	農業機械學會東北支部報 No 40: 47-54(1993)
○ heat pump를 이용한 벼의 제습 건조 특성 구명	Rough rice drying by heat pump dehumidification	Journal of Japanese Society of Agricultural Machinery 56(4): 13-20(1994)
○ heat pump의 소요에너지, 건조 속도 등 건조효율에 관한 연구	Energy efficiency of a new heat pump system for drying grain	Transactions of the ASAE 44(6): 1745-1750(2001)
○ 벼의 저온건조 중 건조시간에 따른 건감률 등 건조특성 연구	Low temperature drying characteristics of raw rough rice	Japan Society of Agricultural Structure 22(2): 79-85(2000)
○ 벼의 heat pump를 이용한 제습 건조시 최적조건 구명	Low-temperature drying using a versatile heat pump dehumidifier	Drying Technology 21(3): 539-554(2003)
○ 품종에 따른 건조특성 구명 ○ 열풍건조시 동할율의 발생원인에 대한 연구	Varietal Differences in drying rate and fissure occurrence in heated air drying of rough rice	Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery 62(6): 81-91(2000)
○ 동할 발생이 외기 상대습도와의 미치는 영향 연구	Relative Humidity Changes That Cause Brown Rice To Crack	Transactions of the ASAE Vol.26(1985)

기술정보	기술정보명	출처
○ 저장온도, 함수율에 따른 쌀의 이화학적 분석	Chemical and physicochemical changes of rice during at different temperatures	J. Cereal Sci., 11(1990)
○ 저장 중 벼의 저장성 판단에 관한 연구	Rice post-harvest technology	The food agency, japan(1995)
○ 건조시스템에 따른 건조특성에 관한 연구	Drying and storage of grain and oilseeds	An AVI book(1992)
○ 쌀의 전분의 구조적 특성과 구성성분간의 물리적 특성 및 식미와의 관계	Rice grain quality	Cereal foods world 35(2): 246-250(1990)
○ 쌀의 품질에 영향을 미치는 내부성분기준에 관한 연구	收穫後處理における米の品質向上のための最新技術	SIEMSTA(1994)
○ 저장조건에 따른 저장벼의 품질 변화 예측에 관한 연구	Modeling of temperature of grain during storage with aeration.	Trans. ASAE 36(2):509-519(1993)
○ 건조과정 중 건조온도, 함수율에 따른 내부 응력과 동할율과의 상관관계 구명	Experimental study on the internal stress cracking of rice kernel	J. of the JSAM 42(1):91-96(1980)
○ 건조중 발생하는 벼의 주요 품질지표 및 측정방법 구명	乾燥條件と品質	日本農業機械學會誌 44(3):525-533(1982)
○ 저장온도에 의한 쌀의 품질변화에 관한 연구	加熱操作が脂肪酸度の變化に及ぼす影響	J. Japanese Soc. Agric. Mach., 55, 51-57(1993)
○ 건조온도의 조건에 따른 완전미를 감소에 관한 연구	Quality effects of heat treatments on high moisture rice	ASAE Paper NO. 85-3010(1985)

기술정보	기술정보명	출처
○ 저장 중 지방의 가수분해 및 자동산화에 대한 연구	Storage of cereal grains and their products	The American Association of cereal chemists, Inc., St. Paul, MN., 68-71(1992)
○ 곡물의 흡습속도와 품질과의 관계 구명	Study on sorption of grain kernels while soaking in water	J. of the Japanese Society of Agricultural Machinery. 58(2):19-24(1996)

제 7 장 참고문헌

1. 고헌균, 금동혁, 김동철, 박호석, 한충수. 2000. 농협 미곡종합처리장 설계기준. 농협중앙회 미곡종합처리장 자문단.
2. 고헌균, 금동혁, 김만수, 노상하, 문성홍, 박경규, 장동일. 1990. 농산가공기계학. 향문사.
3. 금동혁, 김영복, 김태한, 노정근, 박승제, 박호석, 서상룡, 오인환, 유영선, 이홍주, 장유섭, 조성찬. 2002. 열에너지공학. 문운당.
4. 허명희. 서혜선. SAS 회귀분석. 1996. 자유아카데미.
5. Agrawal, Y. C and R. P. Singh. 1977. Thin-layer drying studies on short-grain rough rice. ASAE Paper No 77-3531, ASAE Paper No 77-3531.
6. ASAE STANDARDS. 1997. Moisture relationships of plant-based agricultural products. ASAE D245.5: 452-464.
7. ASHRAE. 1989. ASHRAE Handbook of Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
8. ASHRAE. 1989. ASHRAE Handbook of Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
9. Bak, C. K. Dry air generator for on-farm barley drying. presentation at the 1981 summer meeting ASAE No 81-3023.
10. Bake, J and A. Vas. 1994. Testing the drying process of shelled maize on aspects of nutritional quality and thermal efficiency. Drying Technology 12(5): 1007-1027.
11. Ban, T. 1971. Experimental studies on cracks of rice in artificial drying. Technology Report Institute of Agricultural Machinery. 8: 13-16.
12. Ban, T. 1971. Rice cracking in high rate drying. Japan Agricultural Research.

- 6(2): 113–116.
13. Basunia, M. A and T. Abe. 1998. Thin-layer drying characteristics of rough rice at low and high temperatures. *Drying Technology* 16(3–5): 579–595.
 14. Brooker, D. B., F. W. Bakker–Arkema and C. W. Hall. 1992. *Drying and Storage of grains and oilseeds*. New York, Van Norstrand Reinhold, Inc.
 15. Chen, C. C and R. V. Morey. 1989. Equilibrium relative humidity (ERH) relationships for yellow–dent corn. *Transactions of the ASAE* 32(3): 999–1006.
 16. Chouw, I and A. Noomhorm. 2001. Effect of drying air temperature and grain temperature of different types of dryer and operation on rice quality. *Drying Technology* 19(2): 389–404.
 17. Choi, B. M. 1992. Equilibrium moisture content and drying model of korean ginseng. Ph.D. thesis. Chonbuk National University.
 18. Daikoku, M., N. Sawamura., K. Kobayashi., T. Chosa and Y. Sasaki. 2000. Controlled Humidity air drying of soybean kernels with high moisture content using circulation dryer. *Journal of Japanese Society of Agricultural Machinery* 62(3): 140–148.
 19. Day, D. L and G. L. Nelson. 1965. Desorption isotherms for wheat. *Transactions of the ASAE* 8(2): 293–297.
 20. Flikke, A. M., H. A. Cloud and A. Hustrulid. 1957. Grain drying by heat pump. *Agricultural Engineering* 38(8): 592–597
 21. Han, D. H., T. Abe., Y. Hikida and T. Tsurusaki. 1994. Heat pump dehumidifying drying system(part 1) –Performance of heat pump unit in a closed system–. *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery* 56(6): 25–32.

22. Henderson, S. M. 1952. A basic concept of equilibrium moisture. *Agriculture Engineering* 2: 29–32.
23. Hodgett, D. L. 1976. Efficient drying using heat pumps. *Chemical Engineering*(311): 510–512.
24. Hogan, M. R., Jr. R. E. Muller., G. H. Foster and D. L. Ayers. 1979. Development and testing of a heat pump grain dryer. ASAE Paper No 79–3527.
25. Hogan, M. R., M. R. Okos, E.E. Williams, D. L. Ayers and R. M. Peart. 1976. Low–temperature heat pump grain dryer design, performance and operational experience. ASAE Paper No 76–3519, ASAE, St. Joseph, MI 49085.
26. Ishibashi, S., S. Tanaka and Y. Fukimoto. 1972. Studies on cooling and cold air drying for grain storage(III) –Effect of cooling and cold air drying for grain storage on the quality of rough rice–. *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery* 34(3): 242–251.
27. Ishibashi, S., T. Kojima and T. Kaneko. 1970. Studies on the forced air cooler(part 2) –Performance of stage type forced air cooler and cooling rate of some products–. *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery* 32(3): 215–224.
28. Jayas, D. S and S. Sokhansanj. 1988. Thin–layer drying of barley at low temperatures. *Canadian Agricultural Engineering*, 31: 21–23.
29. Jindal, V. K and L. G. Obaldo. 1985. Quality effects of heat treatments on high moisture rice. ASAE Paper No 85–3010.
30. Kameoka, T. 1988. Equilibrium moisture content of rice. *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery* 50(2): 37–45.
31. Kameoka, T. 1988. Thin layer drying characteristics of rough rice(I). *Journal*

- of the Japanese Society of Agricultural Machinery 50(3): 69–76.
32. Kameoka, T. 1988. Thin layer drying characteristics of rough rice(Ⅱ). Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery 50(3): 57–65.
 33. Keum, D. H., C. H. Choi and S. Y. Kim. 1991. Development of red pepper dryer –Simulation and optimization–. Journal of the Korean Society for Agricultural Machinery 16(3): 248–262.
 34. Keum, D. H and C. W. Park. 1997. Equilibrium moisture contents and thin layer drying equations of cereal grains and mushrooms(Ⅰ). Journal of the Korea Society of Agricultural Machinery 22(1): 11–20
 35. Keum, D. H and H. Kim. 2000. Adsorption equilibrium moisture content of rough rice, brown rice, white rice and rice hull. Journal of the Korean Society for Agricultural Machinery 26(1): 57–66.
 36. Keum, D. H., H. Kim., J. W. Han and S. J. Hong. 2002. Influence of temperature and exposure time of far–infrared drying on crack of rough rice. Proceedings of ISMAB of Agricultural and Bioproduction Systems. 293–300.
 37. Keum, D. H., H. Kim and S. J. Hong. 2002. Equilibrium moisture contents and thin layer drying equations of cerral grains and mushrooms –For oak mushroom(lentinus edodes)–. Journal of the Korean Society for Agricultural Machinery 27(3): 219–226.
 38. Keum, D. H., H. Kim and S. J. Hong. 2002. Far–infrared rad drying characteristics of rough rice –Thin layer drying equation–. Journal of the Korean Society for Agricultural Machinery 27(1): 45–50.
 39. Keum, D. H., H. Kim and Y. K. Cho. 2000. Desorption equilibrium moisture content of rough rice, brown rice, white rice and rice hull. Journal of the Korean Society for Agricultural Machinery 25(1): 47–54.

40. Keum, D. H and R. P. Singh. 1986. Continuous flow rice drying using simulation –Resident and tempering time effects–. Journal of the Korean Society for Agricultural Machinery 11(2): 41–54.
41. Keum, D. H., Y. K. Lee., K. S. Lee and J. K. Hwang. 1987. Study on the optimum operating conditions of rice circulating dryer using simulation. Research Reports Rural Development Administration (Agricultural Institutional Cooperation) 337–390.
42. Kim, D. C. 1998. Optimization of drying and storage system for rough rice using grain cooler. Ph.D. thesis. Sungkyunkwan University.
43. Kim, M. S and H. K. Koh. 1981. Physical Properties of Grain. Journal of the Korea Society of Agricultural Machinery 6(1): 73–82.
44. Kim, O. W. 1996. Optimization of pressure cooling system for fruits and vegetables. Ph.D. thesis. Sungkyunkwan University.
45. Kobayashi, Y. 1995. Rice post–harvest technology. The Food Agency, Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries.
46. Morita, R. V and R. P. Singh. 1979. Physical and thermal properties of short grain rough rice. Transactions of the ASAE 21(3): 562–567.
47. Nishiyama, Y., M. Satoh and H. Shimizu. 1979. Crack generation of rough rice after drying. J. of th Faculty of Agri(Iwate Univ, Jap) 14(3):277–288.
48. Ohtsubo, K. 1998. New technology of quality evaluation for grains –Present situation and task for the quality evaluation methods of cereal grains–. Journal of Japanese Society of Agricultural Machinery 60(1): 164–168.
49. Okubo, T., S. Tanaka., F. Tanaka., S. Tsuji., K. Morita and L. R. Urasa. 2000. Simulation of low temperature drying of raw rough rice. Journal of Japanese Society of Agricultural Machinery 62(5): 110–116.

50. Oswin, C. R. 1946. The kinetics of package life.III. isotherm. *Journal of Chemical Industry* 65: 410–421.
51. Prasertsan, S and P. Saen-saby. 1998. Heat pump drying of agricultural materials. *Drying Technology* 16(1&2): 235–250.
52. Prasertsan, S and P. Sean-saby. 1998. Heat pump dryers: research and development needs and opportunities. *Drying Technology* 16(1&2): 251–270.
53. Regalado, M. J. C and E. Bekki. 2000. Thin-layer dehumidification drying studies on rough rice(part 1)–Closed circulating air system including dehumidifier–. *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery* 62(3): 128–139.
54. Regalado, M. J. C and E. Bekki. 2000. Thin-layer dehumidification drying studies on rough rice(part 2)–Open airflow system including dehumidifier–. *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery* 62(5): 87–97.
55. Regalado, M. J. C and E. Bekki. 2000. Varietal Differences in drying rate and fissure occurrence in heated air drying of rough rice. *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery* 62(6): 81–91.
56. Sharp, J. R. 1982. A review of low temperature drying simulation models. *Journal of Agricultural Engineering Research* 27: 169–190.
57. Takeuchi, R., J. Sun., M. Doi., H. Yamamoto., H. Horio., H. Kojima and K. Toyoda. A study on application of heat pump to drying(I)–Design of the drying system with heat pump. *Japan Society of Agricultural Structure* 22(2): 79–85.
58. Tanaka, S., F. Tanaka., T. Okubo., Y. Maeda., K. Morita and L. R. Urasa. 2000. Low temperature drying characteristics of raw rough rice. *Journal of Japanese Society of Agricultural Machinery* 62(5): 104–109.

59. Tawarazako, S and Y. Miao. 1987. The dehumidification performance of a heat pump dehumidifier and its application on grain drying. Bull. Faculty Agricultural Kagoshima University No 37: 261–269.
60. Wang, D and C. S. Chang. 2001. Energy efficiency of a new heat pump system for drying grain. Transactions of the ASAE 44(6): 1745–1750.
61. Wei, C. L., S. Tawarazako and K. Morita. 1994. Dependence of the drying rate of rough rice on drying air humidity for dehumidifying drying. Japan Society of Agricultural Structure 24(4): 223–229.
62. Yamaguchi, S., S. Yamazawa., K. Wakabayashi and T. Shibata. 1980. Experimental study on the internal stress cracking of rice kernel(part 1). Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery 42(1): 91–96.
63. Yamashita, R. 1993. New technology in grain postharvesting. Farm Machinery Industrial Research Corporation.
64. 山下律也. 1976. 米の胴割れ測定方法の基準. 日本農業機械學會誌 38(2): 253–254.
65. 岩崎哲也, 竹生新治郎, 谷達雄. 1970. 高水分米を加熱した際の品質變化に関する研究. 日本食品工學 會誌 17(2): 73–76.
66. 應尾 宏之進. 1982. 乾燥條件と品質. 日本農業機械學會誌 44(3): 525–533.
67. 張 林紅, 戶次英二. 1991. 生米 乾燥にむける溫濕度の品質に及ぼす影響. 農業機械學會東北支部報 No 38: 53–58.
68. 張 林紅, 戶次英二. 1993. 除濕乾燥米の食味評價. 農業機械學會東北支部報 No 40: 47–54.
69. 田原追昭齋, 繆冶煉. 1987. ヒートポンプ 除濕機の除濕性能おちび穀類乾燥への利用. 鹿大農學術保享 37: 261–269.

주 의

1. 이 보고서는 농림부에서 시행한 농림기술개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 농림부에서 시행한 농림기술개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.