

발 간 등 록 번 호

11-1541000-001215-01

저에너지 다목적 곡물 및 유채씨
건조기 개발

Development of high-efficiency
multipurpose grains and rapeseed dryer

연 구 기 관
성균관대학교

농 립 수 산 식 품 부

제 출 문

농림수산식품부부 장관 귀하

본 보고서를 “저에너지 다목적 곡물 및 유채씨 건조기 개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2011년 12월 19일

주관연구기관명 : 성균과대학교

총괄연구책임자 : 금 동 혁

세부연구책임자 : 금 동 혁

협동연구기관명 : 한국식품연구원

협동연구책임자 : 김 훈

위탁연구기관명 : 한성공업(주)

위탁연구책임자 : 강 성 열

요 약 문

I. 제 목

저에너지 다목적 곡물 유채씨 건조기 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

현재 국내에서 일반적으로 사용되는 순환식 횡류형 건조기는 단일 곡종에만 제한되어 있어 연중 특정 곡물의 수확 철에만 가동함으로 인하여 보급률이 낮은 원인이 되었으며, 곡종 별 건조기 구입은 농가에 큰 부담이 되고 있다. 그러나 이미 유럽 및 미국 등의 국가에서는 여러 곡종을 건조할 수 있는 건조기의 개발로 인하여 연중 건조기의 사용이 가능해 활용도를 높이고 있다.

국내에서 보리, 콩, 옥수수 및 유채종자의 건조는 자연건조를 함으로 인하여 발아율 감소, 노동력증대 및 해충 등의 2차 품질 저하가 발생이 증가하므로 기계건조방법의 확대가 시급한 실정이다. 따라서, 우리나라의 대표적인 곡물에 대한 품질향상을 위해서는 기계건조방법이 확대 보급되어야 하며, 건조기의 활용도를 높여 효율성을 증대하기 위해서는 보리, 콩, 옥수수 및 유채종자 뿐만 아니라 식량자원인 벼의 건조도 가능한 다목적 곡물건조기 개발이 필요하다.

III. 연구개발 내용 및 범위

본 연구의 개발 내용 및 범위를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 다목적 건조 시뮬레이션 프로그램 개발
- 2) 다목적 건조기 최적 설계 프로그램 개발
- 3) 실험용 다목적 건조기 작동 조건 및 제어방안 결정

- 4) 실험용 다목적 건조기를 상세 설계 및 제작하여 모델의 적합성을 검증하고, 건조영향인자를 구명
- 5) 다목적 건조기 본기를 설계, 제작 개발하여 성능평가를 통해 적정 운영방법의 개발 및 경제성 분석

IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

본 연구 결과를 요약하며 다음과 같다.

다목적 건조기 시뮬레이션 프로그램을 위해 벼, 보리, 옥수수, 콩 및 유채종자의 수확모델 및 건조기 설계에 기초가 되는 물리적 특성, 건조모델 및 품질예측모델을 구명하였다.

다목적 건조 시뮬레이션 프로그램은 MATLAB 7.3.0 (R2006b version)을 사용하여 개발하였으며, 기본 구조는 Main program 및 5개의 곡물의 기본 정보 Program과 13개의 Sub program으로 구성하여 개발하였다. 개발한 시뮬레이션 모델의 적합성을 검증한 결과 시뮬레이션 예측한 결과와 실험 결과가 비교적 일치하였으며, 함수율의 실측치와 예측치의 결정계수는 0.9665이상으로 일치하는 것으로 나타났다.

최적화의 목적함수를 결정한 후 Box의 Complex 알고리즘을 이용하여 벼, 유채종자, 보리, 옥수수 및 콩의 적정 작동조건을 결정하였으며, 설계요인은 건조실 높이 0.5m와 건조실 : 템퍼링실의 비 1:4~6을 고려하여 건조기의 기초 설계 요인을 결정하였다.

용량 70kg 규모의 실험용 다목적 건조기를 설계·제작하여 시뮬레이션 실험 결과의 조건을 이용하여 실험한 결과 유채종자, 보리, 옥수수, 콩 및 벼의 건조속도는 기존 횡류형 순환식 건조기보다 높았으며, 품질은 동일한 수준으로 나타났다.

그리고, 20,000kg의 농가용 다목적 건조기를 설계, 제작하였으며, 기본성

능, 제어능력, 건조실험을 통해 평가한 결과 유채종자의 건조속도는 2.0%,w.b./h, 보리는 1.65%,w.b./h 및 벼의 경우 0.98%,w.b./h로 나타났으며, 소요에너지는 기존 건조기에 비하여 10%이상 절감되었으며, 품질은 기존 건조기 동일한 하였다. 비용분석결과 현행 횡류형 건조기보다 우수한 것으로 판명되었다.

SUMMARY

(영문요약문)

I. Title

Development of high-efficiency multipurpose grains and rapeseed dryer

II. Objectives and significance of the research

Circulating cross-flow dryer was used to single seed of grain only in domestic generally and limited to distribution rate due to operating in harvest time of specific grain.

Drying of barley, bean, corn and rapeseed in the country was depended on natural drying mostly. Thus, it is a necessity to expand a mechanical drying method due to a decrease of germination percentage, workforce increase and quality loss of harmful insects and to improve a quality of main grain especially rough rice. Also, it is a necessity to develop a multipurpose dryer in several seeds of grain that is for efficiency utilization about barley, bean, corn and rapeseed drying as well as rough rice drying.

III. Contents and scope

- 1) To develop the simulation program of multipurpose dryer
- 2) To develop the optimal design program of multipurpose dryer
- 3) To determine the operating conditions of experimental multipurpose dryer and control
- 4) To design the testing model, verify the conformity of the model and

investigate the drying factor

- 5) To develop the pilot scale dryer, actual scale dryer and investigate the optimal operating method with the efficiency test and economic analysis

IV. Results and suggestions

The results were summarized as follows:

The simulation model to predict the multipurpose dryer characteristics was developed and was validated through the drying tests for rough rice, barley, corn, bean and rapeseed.

By using MATLAB 7.3.0 (R2006b version) to be developed simulation program of multipurpose dryer that basic structure was consisted of main program, basic information of five grains program and sub program of thirteen.

The verification of developed simulation model that predicted result was accordance with measured result. That is, R squared value was more than 0.9665 accorded well.

Basic design factor of dryer was determined that by using Box and Complex algorithm after object function determination of optimization to determine proper operating conditions about rough rice, rapeseed, barley, corn and bean by considering 0.5m height of drying room and rate of between drying room and tempering room 1:4~6.

The analysis of the drying rate in multipurpose dryer with a capacity of 70kg was higher than circulating cross-flow dryer.

The analysis of performance in multipurpose dryer with a capacity of

20,000kg was performed that drying rate of grain was experimented to 2.0%,w.b./h. of rapeseed, barley 1.65%,w.b./h. and rough rice 0.98%,w.b./h respectively and used energy was reduced more than 10% than before dryer.

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

Overall, multipurpose dryer was proved to good dryer than circulating cross-flow dryer.

CONTENTS
(영 문 목 차)

Chapter 1. Introduction	1
A. Significance	1
B. Objectives	5
Chapter 2. Research development status	6
Chapter 3. Results and discussions	9
I Study on physical properties of grain and rapeseed, drying model, predicting model of quality	9
1. Introduction	9
2. Physical properties of rapeseed	10
2.1 Materials	10
2.2 Methods and results	10
3. Physical properties of barley, bean and corn	24
4. Development of equilibrium moisture content in rapeseed and bean and thin layer drying model	28
4.1 Development of equilibrium moisture content model	28
4.2 Development of thin layer drying model	36
5. Drying condition and germination percentage relation of rapeseed	46
II Simulation program of multipurpose drying	52
1. Introduction	52

2. Simulation program	52
2.1 Drying model	52
2.2 Numerical analysis	55
2.3 Simulation program	57
3. Verification of multipurpose dryer simulation	62
4. Results and summary	67
III Optimal design and drying condition of multipurpose dryer simulation	69
1. Optimization of multipurpose dryer	69
2. Drying and quality properties by design factors	71
3. Determination of optimal design factor	74
4. Optimal operating conditions in grain and rapeseed of multipurpose dryer	75
4.1 Operating conditions of rapeseed drying	75
4.2 Operating conditions of barley drying	79
4.3 Operating conditions of corn drying	82
4.4 Operating conditions of bean drying	85
5. Results and summary	88
IV Construction and performance evaluation of experimental multipurpose dryer	90
1. Introduction	90
2. Methods	91
2.1 Basic design	91

2.2	Details design and construction	95
2.3	Preliminary experiment and supplementation	99
3.	Results and suggestion	100
3.1	Analysis of rapeseed drying	100
3.2	Analysis of barley drying	105
3.3	Analysis of corn drying	109
3.4	Analysis of bean drying	114
3.5	Analysis of rough rice drying	119
4.	Results and summary	119
V	Trial production and performance evaluation of multipurpose dryer	121
1.	Development of a trial product	121
1.1	Basic design	121
1.2	Details design and construction	127
2.	Drying experiment	130
2.1	Materials	130
2.2	Methods	130
3.	Results and suggestion	133
3.1	Rapeseed drying	133
3.2	Barley drying	137
3.3	Rough rice drying	141
4.	Economic analysis of multipurpose dryer	145
4.1	Domestic production and status of market	145
4.2	International production and status of market	146

Chapter 4. Research goal attainment and contribution to related area	148
Chapter 5. Plan for application of research results	151
Chapter 6. Informations of foreign science technology	153
Chapter 7. References	155

목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요	1
제 1 절 서론	1
제 2 절 연구목적	5
제 2 장 국내외 기술개발 현황	6
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	9
제 1 절 곡물 및 유채종자에 관한 물리적 특성, 건조모델, 품질예측모델 구명	9
1. 서언	9
2. 유채종자의 물리적 특성	10
가. 공시재료	10
나. 실험 방법 및 결과	10
3. 보리, 콩 및 옥수수 등의 물리적 특성	24
4. 유채종자 및 콩의 평형함수율 및 박층건조 모델 개발	28
가. 평형함수율 모델 개발	28
나. 박층건조 모델 개발	36
5. 유채종자의 건조조건과 발아율 관계 규명	46
제 2 절 다목적 건조 시뮬레이션 프로그램	52
1. 서언	52
2. 시뮬레이션 프로그램	52

가. 건조모델	52
나. 수치해석	55
다. 시뮬레이션 프로그램	57
3. 다목적 건조기 시뮬레이션 검증	62
4. 결과 및 요약	67
제 3 절 다목적 건조기 시뮬레이션에 의한 최적 설계 및 적정 건조조 건	69
1. 다목적 건조기 최적화	69
2. 설계인자에 따른 건조 및 품질특성	71
3. 최적 설계요인 결정	74
4. 다목적 건조기의 각 곡물 및 유채종자 적정 작동조건	75
가. 유채종자 건조의 작동조건	75
나. 보리 건조의 작동조건	79
다. 옥수수 건조의 작동조건	82
라. 콩 건조의 작동조건	85
5. 결과 및 요약	88
제 4 절 실험용 다목적 건조기 제작 및 성능평가	90
1. 서언	90
2. 실험방법	91
가. 기본설계	91
나. 상세설계 및 제작	95
다. 예비실험 및 보완	99
3. 결과 및 고찰	100

가. 유채종자 건조실험	100
나. 보리 건조실험	105
다. 옥수수 건조실험	109
라. 콩 건조실험	114
마. 벼 건조실험	119
4. 결론 및 요약	119
제 5 절 다목적 건조기 시작기 제작 및 성능평가	121
1. 시작기 개발	121
가. 기본설계	121
나. 상세설계 및 제작	127
2. 건조실험	130
가. 공시재료	130
나. 실험방법	130
3. 결과 및 고찰	133
가. 유채종자 건조	133
나. 보리 건조	137
다. 벼 건조	141
4. 다목적 건조기 경제성 분석	145
가. 국내 제품생산 및 시장 현황	145
나. 국외 제품생산 및 시장 현황	146
제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도	148
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	151

제 6 장 연구개발과정에서의 수집한 해외과학기술정보 · 153

제 7 장 참고문헌 155

제 1 장 연구개발과제의 개요

제 1 절 서론

건조는 재료에서 적정한 수분을 제거하여 건조제품을 생산하는 공정을 말하며, 장기저장, 가공성 증대, 포장 및 수송의 효율성 증대, 상품성 증대 등을 목적으로 건조를 수행한다(Keum 등, 2008).

벼 생산의 경우 소요되는 화석 에너지는 건조가 56.5%, 경운·쇄토 17.0%, 수확 14.7%, 이앙이 6.1% 및 방제가 4.8%로 건조공정에서 가장 많은 에너지가 소요된다. 그 외에도 생산에 투입되는 총 에너지 중에서 건조에 소요되는 에너지는 콩은 24%, 옥수수는 60%이상이 소요에너지 집약적이며, 중요한 단계이다(Bake and Vas, 1994; Brooker 등, 1992; Keum 등, 2002; Sosle 등, 2003).

현재 국내의 곡물 건조의 기계화율은 2006년 현재 53%로 다른 농작업의 98%이상의 기계화율에 비해 상대적으로 기계화율이 낮다. 그러나 지속적인 기계화를 통하여 1990년 이후에는 15%씩 증가추세를 보이고 있다(국립농산물 품질관리원, 2007).

곡물의 건조방법은 자연건조 및 기계건조로 구분되며, 자연건조 중 대표적인 방법으로 천일건조가 있다. 천일건조는 전통적인 방법으로서 태양열을 이용하므로 불균일 건조, 동할율 증가 및 비나 이슬에 의한 재 흡습으로 인하여 오염뿐만 아니라 해충에 의한 피해가 발생할 가능성이 높다. 그런 이유로 외기의 영향이 없고 건조 품질이 균일한 기계적 건조 방법을 선호하고 있지만 기계적 건조에 사용되는 초기 비용으로 인하여 사용을 꺼리고 있다. 기계적 건조의 장점으로 인하여 자연건조 방법은 감소하는 추세에 있으나 아직도 국

내 건조작업의 50%정도가 자연건조방법을 사용하고 있다(Han 2006).

건조기는 여러 가지 형태 및 방법이 있으며, 곡물과 공기류의 상대적인 유동방향 열원의 종류, 건조온도의 고저, 곡물의 취급 방법 등에 따라서 분류하는데, 곡물과 공기류의 유동방향에 따라 크게 5가지 형태로 구분할 수 있다. 곡물은 정지되어 있고 열풍만 이동하는 고정층형(固定層型, fixed-bed type), 일반적인 건조 형태인 열풍과 곡물이 직각인 횡류형(橫流型, cross flow type), 그 외 곡물 방향과 열풍의 흐름이 동일한 방향인 병류형(竝流型, concurrent flow type), 반대방향인 향류형(向流型, counter flow type), 이들이 혼합된 혼합류형(混合流型, mixed flow)이 있다. 또한 곡물을 취급하는 방법에 따라 일정량의 곡물을 건조기에 투입하여 목표수분까지 건조한 후 배출하는 배치식(batch type)과 곡물을 연속적으로 공급받아 건조하는 연속식(continuos flow type)으로 구분할 수 있다.

기존 국내에서 널리 사용되고 있는 건조기형식은 배치식 횡류형 건조기가 주로 사용되고 있으며, 구조는 건조실(drying chamber), 템퍼링실(tempering chamber), 곡물 순환용 버킷엘리베이터, 곡물 배출장치, 가열기, 가열송풍기, 배진 송풍기 및 조작반으로 구성되어 있다. 그러나 기존 배치식 횡류형 건조기는 벼 전용 건조용으로 주로 사용되어 왔으며, 연중 벼가 수확되는 15일 전후로만 사용되어져 왔다. 또한 건조기 내부의 타공망의 개공율이 낮아 열풍이 원활하지 못하므로, 유채종자 및 콩과 같이 외형이 구(求)에 가까운 곡물은 타공망에 막힘으로 건조가 불가능한 단점이 있다.

우리나라에서 주요 생산되는 곡물 및 바이오에너지 연료원인 유채종자의 건조현황은 다음과 같다.

유채종자의 경우 2007년 유채생산 시범사업시행으로 인하여 지속적인 생산량의 증가에도 불구하고 일반적으로 자연건조에 의존하고 있다. 그러나 유채종자는 고수분 및 고온으로 인하여 수확 후 바로 건조가 필요하며, 조금만

지체되면, 형질의 변화 및 발아가 되는 현상이 나타난다. 유채종자의 기하학적 특성 및 건조연구의 부족으로 기계건조 적용에 어려움이 있으며, 최근에 기계건조가 적용되고 있으나 단순히 기존 배치식 횡류형 건조기의 타공망의 크기를 축소하여 건조함으로 인하여 건감율이 낮으며, 품질도 떨어지는 단점이 있다.

보리건조방법은 주로 천일건조에 의존하고 있어 노동 집약적인 공정일 뿐만 아니라 건조과정에서 양적, 질적 손실이 매우 크게 발생한다. 또한, 천일건조방법으로는 단기간 내에 많은 양의 보리를 저장 가능한 안전 함수율까지 건조하는데 현실적으로 불가능하다(금, 1990). 보리의 기계건조방법은 주로 벼 건조에 사용하고 있는 순환식 또는 연속식 건조기를 이용하고 있지만, 이 건조기는 벼 건조기로서 송풍량, 버너용량, 건조부 구조 등이 보리 건조에 효율성이 낮고 사용에 어려움이 있다.

콩은 정부에서는 식용콩 자급을 제고대책의 일환으로 콩 재배면적을 확대하고 있으며, 최근에 콩 재배면적은 78.4ha(2001)에서 105.4ha(2005)에 이르고 있다. 콩의 생산량이 증가함에 따라 수확에서부터 건조까지 콩 수확 후 기계화의 필요성이 제기되고 있다(농진청, 2006). 콩의 건조는 일반적으로 수확 후 2~3일 노지에서 말린 후 탈곡(수분 15%이하일 때)을 하며, 탈곡 후 수분함량이 11.5 ~ 13.5% 정도로 건조를 해야 장기저장이 가능하다(농진청, 2008). 그러나, 우리나라 기상여건상 자연건조로 저장에 적합한 함수율로 건조하기에는 현실적으로 불가능하다.

옥수수의 일반적인 건조 방법은 건조기를 이용한 기계건조방법과 음지 및 양지에서 건조하는 자연건조방법 등이 있으나 기계건조를 이용하는 농가는 극히 제한적이다. 따라서, 일반적으로 자연건조를 실시하고 있으며, 양지에서 건조 시 급속건조가 발생하고 외기가 불순할 경우 건조가 지연되는 등 비효율적이다. 특히, 자연건조로 인한 발아율 저하 등의 발생되는 품질저하는 심각한

수준으로 보고되고 있다(작물시험장, 1999)

따라서, 국내에서 보리, 콩, 옥수수 및 유채종자의 건조는 자연건조를 함으로 인하여 발아율 감소, 노동력증대 및 해충발생 등의 2차 품질 저하가 발생이 증가하므로 기계건조방법의 확대가 시급한 실정이다. 그러나, 곡물건조의 경우 건조기간이 짧아 건조기 활용도가 매우 낮아 보급에 제한적이다. 따라서, 우리나라의 대표적인 곡물에 대한 품질향상을 위해서는 기계건조방법이 확대 보급되어야 하며, 건조기의 활용도를 높여 효율성을 증대하기 위해서는 보리, 콩, 옥수수 및 유채종자 뿐만 아니라 식량자원인 벼의 건조도 가능한 다목적 곡물건조기 개발이 필요하다.

제 2 절 연구목적

본 연구의 목적은 기존 단일 곡종에만 제한적으로 사용되는 곡물건조기의 비경제성을 개선하기 위하여 다양한 종류의 곡물 및 유채 종자의 건조에 이용되면서, 건조에너지 및 비용 절감을 최소화할 수 있는 저에너지 고품질의 다목적 건조기 개발 및 적정건조방법 구명에 있다.

연구의 구체적인 목적은 다음과 같다.

- 1) 다목적 건조 시뮬레이션 프로그램 개발
- 2) 다목적 건조기 최적 설계 프로그램 개발
- 3) 실험용 다목적 건조기의 작동 조건 및 제어방안 결정
- 4) 실험용 다목적 건조기를 상세 설계 및 제작하여 모델의 적합성을 검증하고, 건조영향인자를 구명
- 5) 다목적 건조기 본기를 설계, 제작 개발하여 성능평가를 통해 적정 운영 방법을 개발 및 경제성 분석

제 2 장 국내외 기술개발 현황

곡물 및 유채종자는 일정한 공기조건에 노출되면 곡물 수증기압과 공기전압 중 수증기 분압이 평형 이루게 되어 곡물은 일정한 함수율을 유지하게 된다(Brooker 등, 1992). 이와 같은 현상을 평형함수율(Equilibrium Moisture Content, EMC)이라 한다. 평형함수율은 곡물의 건조와 저장 과정의 해석, 시스템 설계 및 운영에 기초가 되는 매우 중요한 요인 중의 하나이다(Gustafson and Hall, 1974; Kameoka, 1988).

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

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

Kim(2003)은 초기함수율 3수준, 건조온도 40.4~60.9℃ 범위의 3수준에 대하여 열풍노출시간 5~120분 동안에 계속적인 시료채취를 통하여 동할율을 측정하여 초기함수율, 건조온도에 따른 sigmoid 모델을 실험모델로 개발하였다.

국내 다목적 곡물 건조기에 대한 연구는 기초단계이며, 상용 다목적 순환식 건조기의 개발에 관한 연구는 전무한 실정이다.

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

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

Barrozo 등(2001)은 강낭콩을 열풍의 흐름과 콩의 흐름을 동일하게 건조 속도 및 품질을 예측할 수 있는 시뮬레이션 모델을 개발하고 실험을 통해 시뮬레이션을 검증하였다.

Courtois 등(2001)은 벼 및 옥수수를 연속식 혼합류형(Mixed flow type)의 건조기를 이용하여 건조를 수행하고 품질을 측정하였다.

Doymaz(2004)는 터키에서 생산되는 녹색콩의 박층건조모형을 개발하였으며, 콩 건조에 필요한 기초자료를 제공하였다.

Markowski 등(2007)은 보리를 이용하여 고정층형(Fix-bed type) 건조방법으로 열풍건조기와 원적외선 건조방법으로 품질을 평가하였으며, 적정 범위에서는 각각의 테스트 결과 품질 및 에너지 소비에는 큰 차이가 없었다.

Soponronnarit 등(2001)은 강낭콩을 유동층 열풍흐름 건조기에서 110~140℃의 고온에서 건조한 결과 27%의 동할 및 1.7%의 파손과 6.8MJ/kg-water의 에너지 소비율을 나타내었다.

Brook 등(1978)은 연속식 건조기를 이용하여 타공망이 없는 구조에서 옥수수건조가 가능하다고 보고하였다.

Correa 등(1999)은 유채종자 *B. napus* L종을 이용한 평형함수율(Equilibrium Moisture Content, EMC)모형을 개발하였다.

Schoenau 등(1993)은 유채씨를 이용한 건조 시뮬레이션을 이용하여 건조함수율에 따른 건조시간 및 소요에너지를 예측하였다.

Calisir 등(1993)은 유채종자 중 *B. napus* L종을 이용한 물리적 특성(지름, 산물밀도, 부피등)을 측정하여 유채종자를 이용한 기계화에 기초자료를 제공하였다.

Correa 등(1999)은 유채종자 중 *B. napus* L종을 이용한 온도 및 상대습도별 박층건조모형을 구명하였다.

Bakker-Arkema (1981)는 옥수수를 이용하여 다단 연속식 병류형 건조기

실험을 하였다. 옥수수 건조 시 열풍온도를 232~288℃를 사용하였으며, 기존의 상용 횡류형 건조기 보다 소요에너지가 절감되었고, 품질에도 변화가 없다고 보고하였다.

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

다목적 곡물 건조기의 국외 연구는 주로 유럽에서 이루어졌으며, 대상 곡물은 벼 이외에도 밀, 콩, 땅콩, 커피콩 등을 대상으로 이뤄졌으나, 대부분 연속식 건조기 형태로 인하여 국내의 건조기 형태와 다른 형식으로 연구가 이루어졌다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 곡물 및 유채종자에 관한 물리적 특성, 건조모델, 품질예측모델 구명

1. 서언

곡물의 물리적 특성은 기하학적 특성, 천립중, 산물밀도, 정지마찰계수, 안식각, 종말속도 등이 있으며, 곡물은 일반적으로 최종 소비될 때까지에는 여러 가지 크고 작은 처리 또는 가공공정을 거치게 되는데 이들 각 공정에서 최적의 작동조건을 설정하고 처리, 가공되는 곡물의 품질을 최상으로 유지시키기 위해서는 각 곡물의 물리적 특성에 대한 연구가 중요하다(Kim 등, 2006)

시뮬레이션 프로그램 개발 및 건조기 설계에 기초가 되는 물리적 특성(기하학적특성, 천립중, 산물밀도, 정지마찰계수, 안식각, 종말속도), 평형함수율, 박층건조모델 및 품질예측모델 등의 자료가 요구된다.

그러나 국내에서 생산된 유채종자의 착유(窄油)를 목적으로 생산한 품종인 “선망”은 다수성인 유채종실용 F1 hybrid 품종을 육성하기 위해 1996년에 개발한 추과형 웅성불임계통인 목포CGMS의 종자친에 화분친인 84055-B-10-3-1-6을 교배하여 F1 hybrid 조합을 양성한 신품종으로 기존 해외에서 생산된 품종과 기존 국내에서 생산된 유채종자와는 차이가 있으므로 새로운 물리적 특성 측정 및 새로운 모델 등이 필요하다.(작물과학원 목포시험장).

며, 보리, 콩 및 옥수수는 기존 측정된 물리적 특성과 기존 개발된 모델을 시뮬레이션 프로그램에 적용하였으며, 기초자료 및 열적특성 자료를 이용하여 물리적 특성, 건조모델, 품질예측 시뮬레이션 모델에 이용하였다

따라서, 다목적 곡물건조기의 후층건조를 예측할 수 있는 수확모델 및 건

조기 설계 자료로 사용되는 곡물 및 유채종자의 물리적 특성, 건조모델 및 품질예측모델을 구명하였다.

2. 유채종자의 물리적 특성

가. 공시재료

착유(搾油)를 목적으로 현재 국내에서 생산되는 유채종은 「선망」 종으로 다수성인 유채 종실용 F1 hybrid 품종을 육성하고자 1996년에 개발한 추파형 융성불임계통인 목포CGMS의 종자친에 화분친인 84055-B-10-3-1-6을 교배하여 F1 hybrid 조합을 양성하였다(작물과학원 목포시험장). 1997~1998년 2년간 생산력검정을 실시하였고, 1999~2001년 3개년 간 제주도와 전남 무안의 2개 지역에서 지역적응시험을 실시한 결과 기존의 고정종인 한라유채보다 50%이상 증수된 광지역적응, 다수성으로 인정되어 2001년 12월 농작물직무육성 신품종선정위원회에서 국가품종목록 등재품종으로 선정되었다. 선망은 1997년부터 2개년 간 목포시험장(무안)에서 생산력을 검정한 결과 종실수량이 369~486 kg/10a로 나타났다.

2009년 전라남도 영광군에서 생산된 선망(F1-hybrid) 유채종자를 실험에 사용되었으며, 초기 함수율은 상압정온측정법을 이용하여 130℃-10g-4시간법(ASAE standard, 2004)으로 측정하였으며, 초기함수율은 31.3%,w.b.이며, 실험별 함수율을 조정하기 위하여 음지에서 건조하여 유채종자 함수율 10.03, 14.91, 20.07, 25.06, 30.12 %w.b.로 6수준을 준비하였다.

나. 실험 방법 및 결과

유채종자의 기하학적 특성은 1회 측정 시 함수율별 유채시료에서 충실한

50립을 임의로 선택하여 평판위에 올려놓고 측정하였으며, 각 측정은 5회 반복하여 측정하였다. 기하학적 특성에 사용된 계측기는 디지털 버니어 캘리퍼스(CD-15CP, Mitutoyo, Japan)로 장경과 단경을 측정한 후 이를 이용하여 구형율, 종자 단립의 체적 및 표면적을 계산하였다(Nelson, 2002).

종자의 크기를 결정하기 위하여 측정값 중 최대값을 장경(L)으로 정의하고 최소값을 단경(D)으로 정의하였으며, 측정된 장경과 단경 값을 이용하여 평균 직경, 구형률, 체적, 표면적을 다음과 같은 식3-1~4를 이용하여 계산하였다(Mohsenin, 1970; Jain and Bal, 1997; Sedat 등., 2005; Dursuna 등., 2007).

기하평균직경(D_g) :

$$D_g = (D^2L)^{\frac{1}{3}} \quad (mm) \quad (3-1)$$

구형(Φ) :

$$\Phi = \frac{D_g}{L} \quad (dec.) \quad (3-2)$$

체적(V) :

$$V = \frac{\pi DL^3}{6[2L - (DL)^{1/2}]} \quad (mm^3) \quad (3-3)$$

표면적(S)(McCabe 등., 1986) :

$$S = \pi D_g^2 \quad (mm^2) \quad (3-4)$$

여기서, D = 종자 직경(단경)(mm)

L = 종자 길이(장경)(mm)

평균직경은 함수율이 증가함에 따라 2.17~2.31mm로 증가하는 것으로 나타났으며, 이와 같은 결과는 Baryeh(2001)의 기장 실험과 Karababa(2006)의 옥수수 및 Mwithiga and Sifuna(2006)의 사탕수수 실험과 유사하게 나타났다. 유채종자의 회귀방정식은 식3-5로 나타내었다(그림 3-1).

$$D_b = 1.9761 + 0.0219M_c - 0.0004M_c^2 \quad (R^2 = 0.984) \quad (3-5)$$

여기서, D_b : 유채 종자의 평균직경(mm)

M_c : 유채 종자의 함수율(%w.b.)

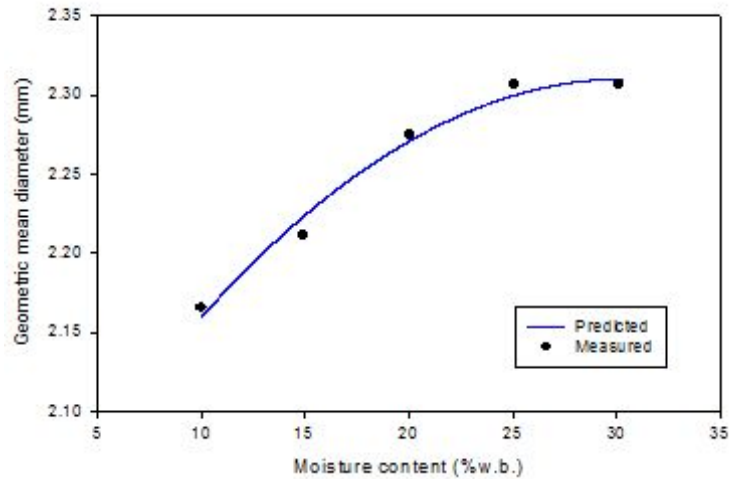


그림 3-1. 함수율 변환에 따른 기하평균직경

구형율은 함수율이 증가함에 따라 0.946~0.927로 감소하는 것으로 나타났으며, 함수율이 증가함에 따라 표면적의 증가와는 관계가 없었다. 구형비를 계산하는 회귀방정식은 식3-6과 같다(그림 3-2).

$$\Phi = 0.9613 - 0.0016M_c + 1.55 \times 10^{-5}M_c^2 \quad (R^2 = 0.972) \quad (3-6)$$

여기서, ϕ : 유채 종자의 구형비

M_c : 유채 종자의 함수율(%w.b.)

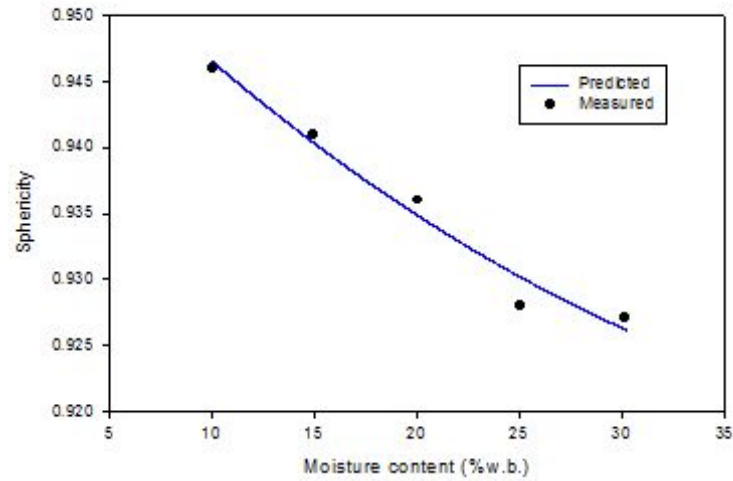


그림 3-2. 함수율에 따른 구형변화

단립체적은 함수율이 증가함에 따라 유채 종자 단립의 체적은 5.58~6.88 mm³로 비선형적으로 증가하는 것으로 나타났으며, 유채 종자의 함수율과 단립 체적의 관계는 식3-7과 같은 2차 회귀방정식으로 나타내었다(그림 3-3).

$$V = 3.9612 + 0.1859M_c - 0.0029M_c^2 \quad (R^2 = 0.984) \quad (3-7)$$

여기서, V : 유채 종자 단립의 체적(mm³)

M_c : 유채 종자의 함수율(%w.b.)

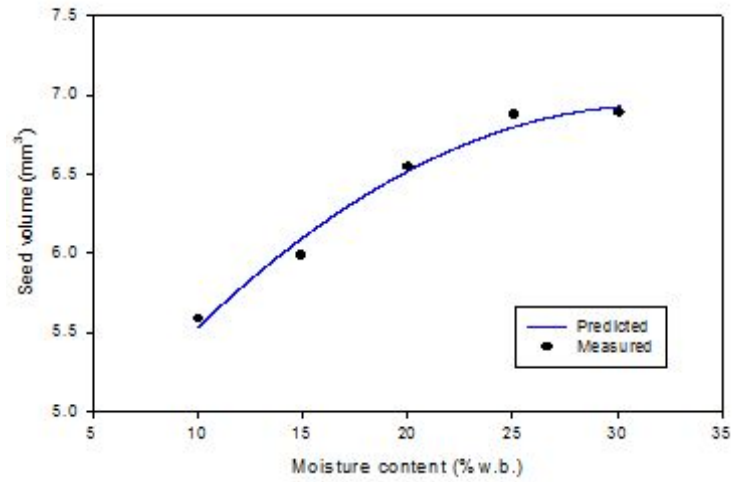


그림 3-3 함수율에 따른 곡립의 체적변화

단립 표면적은 함수율이 증가함에 따라 유채 종자 단립의 표면적은 14.76~16.77mm²로 비선형적으로 증가하는 것으로 나타났으며, 유채 종자의 함수율과 단립 표면적의 관계는 식3-8과 같은 2차 회귀방정식으로 나타내었다(그림 3-4).

$$S = 12.1074 + 0.308M_c - 0.005M_c^2 \quad (R^2 = 0.986) \quad (3-8)$$

여기서, S : 유채 종자 단립의 표면적(mm²)

M_c : 유채 종자의 함수율(%w.b.)

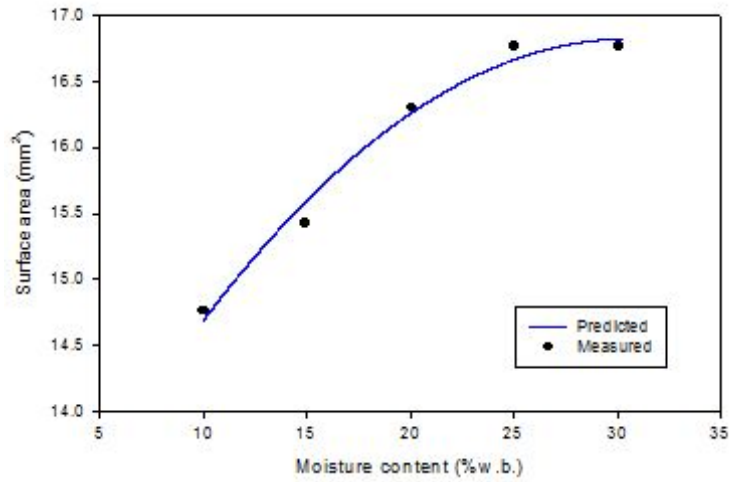


그림 3-4 함수율에 따른 곡립의 표면적 변화

유체 종자의 평균직경, 단립의 체적과 표면적은 함수율이 증가함에 따라 2차원적으로 증가하는 것으로 나타났으며, 구형비는 함수율이 증가함에 따라 2차원적으로 감소하는 것으로 나타났다(표 3-1).

표 3-1 함수율 변화에 따른 기하학적 특성

항 목	함수율(%w.b.)				
	10.03	14.91	20.07	25.06	30.12
단경(mm)	2.11±0.114	2.15±0.123	2.20±0.132	2.22±0.139	2.22±0.145
장경(mm)	2.29±0.098	2.35±0.114	2.43±0.117	2.48±0.127	2.49±0.133
평균(mm)	2.17±0.106	2.21±0.117	2.27±0.126	2.31±0.132	2.31±0.141
구형	0.946±0.017	0.941±0.018	0.936±0.015	0.928±0.018	0.927±0.012
체적(mm ³)	5.58±0.786	5.98±0.901	6.54±1.041	6.87±1.102	6.88±1.182
표면적(mm ²)	14.76±1.448	15.40±1.641	16.30±1.806	16.77±1.892	16.77±2.017

천립중은 충실한 1,000립을 무작위로 선택하여 각 함수율별로 측정하였으며, 측정은 함수율별로 5회 반복하여 측정하였으며, 전자저울(R420P, sartorius, Germany)을 이용하여 천립중을 측정하였다. 유채종자는 함수율이 증가함에 따라 5.04~6.46g으로 선형적으로 증가하는 것으로 나타났으며, (표 3-2) 유채 종자의 함수율과 천립중의 관계는 식3-9와 같은 1차 회귀방정식으로 나타내었다.

$$G_{1000} = 4.5287 + 0.0433M_c + 0.0007M_c^2 \quad (R^2 = 0.998) \quad (3-9)$$

여기서, G_{1000} : 유채 종자의 천립중(g)

M_c : 유채 종자의 함수율(%w.b.)

표 3-2. 함수율 변화에 따른 천립중

구 분	함수율(%w.b.)				
	10.03	14.91	20.07	25.06	30.12
천립중(g)	5.04±0.080	5.29±0.098	5.71±0.072	6.04±0.087	6.46±0.063

산물밀도는 미 농무성(USDA) 산물밀도 측정방법을 이용하여 제작된 장치를 이용하여 측정하였다. 그림3-5와 같이 상부 직경 240mm, 하부 직경 32mm, 높이 140mm의 깔때기에 유채 종자를 채우고, 깔때기 아래 50mm 떨어진 곳에 직경 110mm, 깊이 100mm, 용량 1000 ml의 컵을 준비한 후 깔때기 하부에 있는 슬라이드 게이트를 열어 종자를 자유 낙하시켜 1000 ml 컵에 가득 채우고 남은 종자는 제거하였다. 컵 질량을 제외한 종자의 무게를 측정하여 산물밀도를 계산한다. 산물밀도는 4수준의 함수율(10.03, 14.91, 20.07, 25.06%w.b.)에 대하여 5회 반복 측정하였다. 유채종자의 산물밀도는 함수율이 증가함에 따라 579.3~549.2kg/m³으로 선형적으로 감소하는 것으로 나타났으며(표 3-3), 유

채 종자의 함수율과 산물밀도의 관계는 식3-10과 같은 1차 회귀방정식으로 나타내었다.

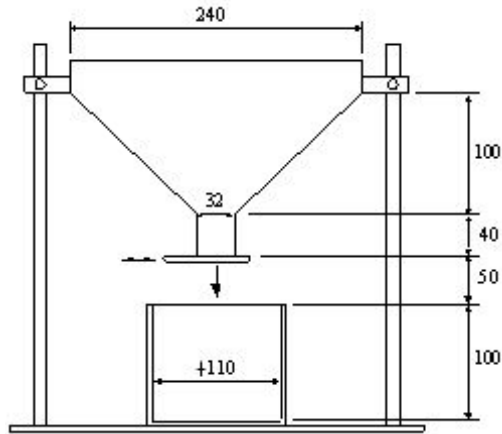


그림 3-5. 산물밀도 측정장치 사진 및 단면도

$$\rho_{bulk} = 601.4134 - 2.0544M_c \quad (R^2 = 0.995) \quad (3-10)$$

여기서, ρ_{bulk} : 유채 종자의 산물밀도(kg/m³)

M_c : 유채 종자의 함수율(%w.b.)

표 3-3. 함수율 변화에 따른 산물밀도

구 분	함수율(%w.b.)			
	10.03	14.91	20.07	25.06
산물밀도(kg/m ³)	579.3 ± 2.06	573.0 ± 1.31	560.1 ± 1.93	549.2 ± 1.65

정지마찰계수는 그림 3-6과 같은 장치를 이용하여 측정하였다. 측정 평균

이 수평면과 0~70° 범위로 조절 가능한 레버가 설치된 장치에 갈바늄 강판, 스테인레스 강판 및 아크릴판 등 3종의 평판을 대상으로 함수율별로 측정하였다. 측정은 함수율별로 5회 반복하여 측정하였으며, 반복 측정할 때마다 새로운 시료를 이용하여 측정하였다. 정지마찰계수(μ_s)는 식3-11을 이용하여 계산하였다.

$$\mu_s = \tan(\phi) \quad (3-11)$$

여기서, ϕ : 마찰각(°)

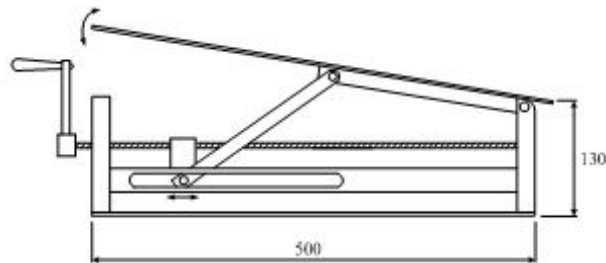


그림 3-6. 마찰각 측정장치 사진 및 단면도

마찰각 및 정마찰계수는 함수율과 바닥면 재질에 따라 다르게 나타났다. 표3-4는 함수율 및 재질에 따른 마찰각과 정마찰계수를 나타내었으며, 정마찰계수는 함수율이 증가함에 따라 0.337~0.432로 증가하였으며, 스테인레스 강판, 갈바늄 강판, 아크릴판 순으로 마찰각 및 정마찰계수가 증가하였다.

표 3-4. 함수율 변화에 따른 마찰각 및 정마찰계수 측정값

구 분	함수율 (%,w.b.)	스테인레스 강판	갈바늄 강판	아크릴판
마찰각 (degrees)	10.03	15.26 ± 0.329	16.50 ± 0.308	18.64 ± 0.416
	14.91	16.08 ± 0.217	17.20 ± 0.442	19.58 ± 0.460
	20.07	17.52 ± 0.396	18.58 ± 0.512	21.08 ± 0.295
	25.06	18.36 ± 0.351	19.46 ± 0.456	22.20 ± 0.308
	30.12	19.46 ± 0.365	20.90 ± 0.381	23.34 ± 0.422
정마찰계수	10.03	0.273 ± 0.0062	0.296 ± 0.0058	0.337 ± 0.0081
	14.91	0.288 ± 0.0041	0.310 ± 0.0084	0.356 ± 0.0090
	20.07	0.316 ± 0.0076	0.336 ± 0.0100	0.385 ± 0.0059
	25.06	0.332 ± 0.0068	0.353 ± 0.0089	0.408 ± 0.0063
	30.12	0.353 ± 0.0072	0.382 ± 0.0076	0.432 ± 0.0087

유채종자의 마찰각과 정마찰계수의 관계식은 표 3-5에서 보는바와 같이 1차 회귀방정식으로 구할 수 있었으며, 그림 3-7은 함수율에 따른 정마찰계수의 변화를 그래프로 나타낸 것이다.

표 3-5. 유채종자 함수율 변화에 따른 마찰각 및 정마찰계수의 관계식

구 분	마찰각	R ²	정마찰계수	R ²
스테인레스강판	$\phi = 13.0820 + 0.2123MC$	0.994	$\mu S = 0.2309 + 0.0041MC$	0.995
갈바늄강판	$\phi = 14.1219 + 0.2199MC$	0.986	$\mu S = 0.2498 + 0.0043MC$	0.985
아크릴판	$\phi = 16.1807 + 0.2389MC$	0.997	$\mu S = 0.2877 + 0.0048MC$	0.997

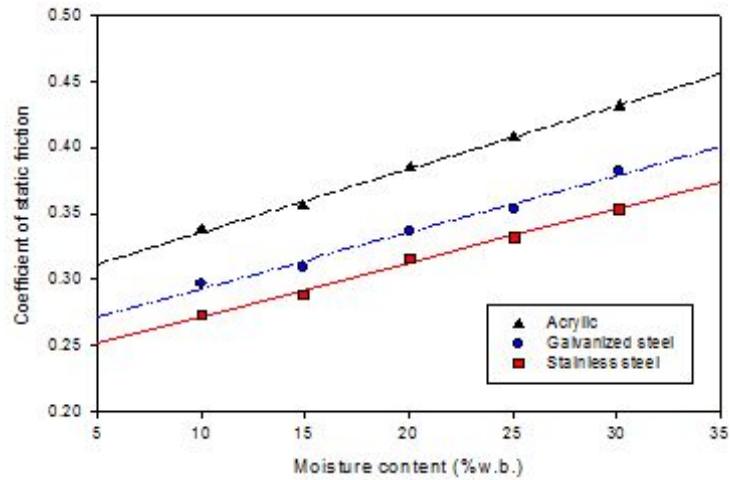


그림 3-7 함수율 변화에 따른 정마찰계수

안식각 측정 장치는 상자 길이 700mm, 폭 400mm, 높이 900mm인 직육면체에 내부를 관찰할 수 있도록 투명하게 제작하였다. 그림 3-8에서 보는바와 같이 상단부에 유체종자를 채우고 개폐기를 개방하면 유체는 하단부로 떨어지면서 산형(Δ)을 형성하게 되고, 상단부에서 하단부로 떨어지면서 각이 형성된다. 이때 바닥면에서 형성되는 각을 채움 안식각(Filling angle), 상단부에서 형성되는 각을 비움 안식각(Emptying angle)이라고 한다(Kim 등, 2006). 안식각 계산은 유체가 떨어지면서 형성된 바닥면의 길이와 높이를 측정하여 마찰각과 같은 방법으로 구하였고, 5수준의 함수율을 동일한 조건에서 5회 반복 실험하였다.

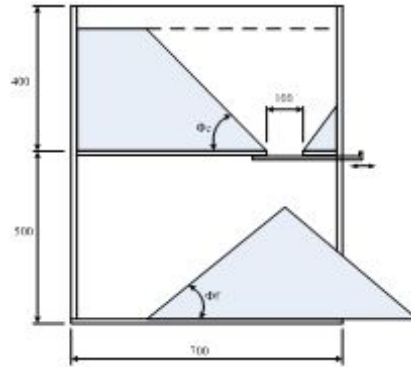


그림 3-8. 안식각 측정장치 사진 및 단면도

표 3-6은 함수율 변화에 따른 유채종자의 채움 및 비움 안식각을 나타낸 것이며, 유채종자는 함수율이 증가함에 따라 비움 안식각은 26.12~29.62°로 증가하였으며, 채움 안식각도 23.83~27.05°로 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 동일한 함수율인 경우 비움 안식각이 채움 안식각보다 큰 것으로 나타났다.

표 3-6. 함수율 변화에 따른 유채종자의 채움 및 비움 안식각

안식각 (degree)	함수율(%w.b.)				
	10.03	14.91	20.07	25.06	30.12
비움	26.12±0.340	27.04±0.269	28.03±0.563	28.51±0.414	29.62±0.296
채움	23.83±0.528	24.29±0.326	25.06±0.534	26.33±0.381	27.05±0.390

표 3-7은 채움 및 비움 안식각과 함수율관계를 회귀방정식으로 나타낸 것이며, 그림 3-9에서 보는바와 같이 두 인자의 관계식은 1차회귀식으로 충분히 예측이 가능하였다.

표 3-7. 곡립 함수율과 안식각의 회귀방정식

구분	회귀방정식	R2
비움 안식각	$\Phi_e = 24.49170 + 0.1683MC$	0.986
채움 안식각	$\Phi_f = 21.9345 + 0.16863MC$	0.978

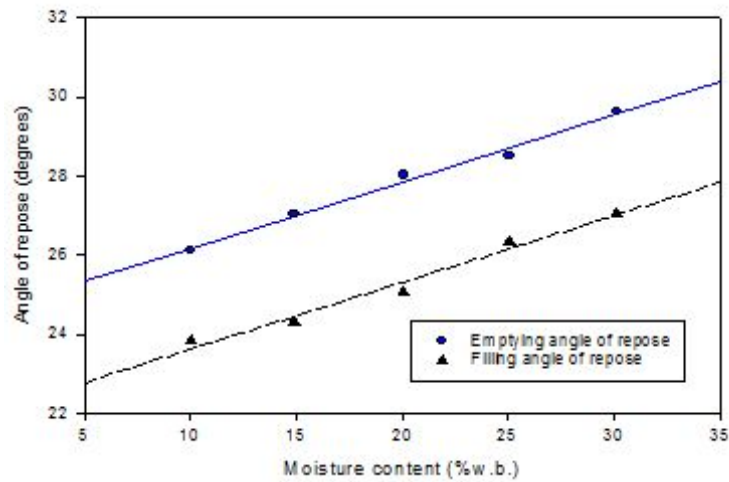


그림 3-9. 함수율 변화에 따른 안식각

종말속도는 그림 3-10과 같은 윈드 컬럼(wind column)을 이용하여 측정하였다. 종말속도 측정시스템은 수직직관을 이용하였으며, 한국공업규격(KS B : 송풍기 실험방법)에 근거하여 풍동을 설계·제작된 장치를 이용하여 종말속도 측정 시 외기온도는 18°C이었으며, 함수율별 5회 반복하여 측정하고 그 평균값을 이용하였다. 항력계수를 구하기 위해서 사용된 유체의 단면적은 유체의 구형율이 0.927~0.946으로 거의 구와 유사하기 때문에 유체의 평균직경을 이용하여 단면적을 계산하였다(Duc 등, 2008). 무차원 항력계수는 식 3-12를 이용하였다(Güner, 2007).

$$C_d = \frac{2mg}{v_i^2 \rho_a A} \quad (3-12)$$

여기서, C_d : 항력계수(무차원)

m : 질량(kg)

g : 중력 가속도(m/s²)

ρ_a : 공기 밀도(kg/m³)

A : 단면적(m²)

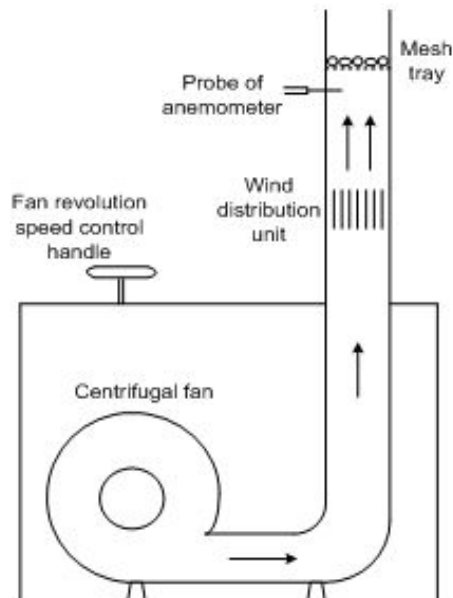


그림 3-10. 종말속도 측정 장치 단면도

유채종자는 함수율이 증가함에 따라 종말속도가 3.47~3.91 m/s로 선형적으로 증가하는 것으로 나타났으나, 항력계수는 1.84~1.64로 비선형적으로 감소하는 것으로 나타났다.

표 3-8은 함수율별 종말속도와 항력계수의 측정 결과를 나타낸 것이다.

표 3-8. 유채종자의 함수율별 종말계수 및 항력계수

	함수율 (%w.b.)				
	10.03	14.91	20.07	25.06	30.12
종말속도(m/s)	3.47±0.054	3.59±0.020	3.71±0.071	3.78±0.071	3.91±0.074
항력계수	1.84±0.057	1.74±0.020	1.67±0.064	1.65±0.062	1.64±0.061

함수율과 종말속도와의 관계식은 식 3-13과 같으며, 함수율과 항력계수와의 관계식은 식 3-14와 같았다.

$$v_t = 3.2715 + 0.0211 \times M_c \quad (R^2 = 0.991) \quad (3-13)$$

$$C_d = 2.152 - 0.0374 \times M_c + 0.0007 \times M_c^2 \quad (R^2 = 0.999) \quad (3-14)$$

여기서, M_c : 함수율(%w.b.)

v_t : 종말속도(m/s)

C_d : 항력계수(무차원)

3. 보리, 콩 및 옥수수 등의 물리적 특성

보리, 콩, 옥수수 및 벼의 물리적 특성은 기존 자료를 이용하여 후층건조를 예측할 수 있는 시뮬레이션 프로그램의 자료 및 건조기 설계의 기초자료에 사용하였다.

1) 보리의 물리적 특성

보리의 물리적 특성은 김(1987)이 국내에서 생산되는 보리의 물성 및 열적 특성에 대한 연구 자료를 이용하였다. 물리적 특성 측정에 사용된 보리 품종은 경남 농촌진흥원 작물시험장에서 1985년도에 재배하여 수확한 겉보리(Husked barley, 알보리)와 쌀보리(Naked barley, 새쌀보리)이며, 실험실 내의 온·습도($20\pm 5^{\circ}\text{C}$, $70\pm 10\%$ R.H.)에서 산물 저장하면서 실험에 사용하였다고 보고하였다.

보리의 수분함량을 변화시키면서 보리의 크기(길이, 너비, 두께), 무게, 부피, 진밀도, 등가입경, 구형도, 비중, 겉보기 밀도, 다공도 등의 물성을 측정된 결과는 표 3-9와 같으며, 물성치와 수분함량과의 상관관계를 알기 위해 각 수분함량에서의 특성 값을 회귀 분석하여 구한 회귀방정식을 표 3-10으로 나타내었다. 물리적 특성은 유체종자 측정과 동일한 방법으로 수행하였으며, 관련 식도 동일하게 사용하였다.

길이, 너비, 두께의 경우 겉보리가 쌀보리보다 값이 컸으며 겉보리와 쌀보리 모두 수분함량의 증가에 따라 그 값이 커졌는데, 이와 같은 경향은 Wratten 등과 Morita와 Singh의 벼에 대한 연구결과와 유사하게 나타났으며 겉보리에 비하여 쌀보리가 그 값의 증가율이 더욱 크게 나타났다고 보고하였다.

표 3-9. 겉보리 및 쌀보리의 함수율별 물성특성

Moisture content (%w.b.)		14.82	19.11	24.49	29.31	36.84		13.71	17.73	24.66	33.85
길이 (cm)		0.808	0.81	0.812	0.816	0.821		0.603	0.612	0.619	0.628
너비 (cm)		0.353	0.357	0.363	0.368	0.374		0.317	0.332	0.355	0.359
두께 (cm)		0.274	0.279	0.28	0.285	0.292		0.267	0.273	0.278	0.285
무게 (g)		0.038	0.039	0.042	0.045	0.052		0.031	0.034	0.035	0.04
부피 (cm ³)	겉보리 (Al - bor i)	0.032	0.035	0.038	0.041	0.048	쌀보리 (Sa ess al - bor i)	0.024	0.028	0.03	0.036
진밀도 (g/cm ³)		1.188	1.114	1.105	1.098	1.083		1.292	1.214	1.167	1.111
등가 입경 (cm)		0.427	0.432	0.435	0.441	0.448		0.371	0.381	0.394	0.401
구형도 (-)		0.529	0.533	0.536	0.54	0.546		0.614	0.623	0.636	0.638
비중 (-)		1.378	1.352	1.29	1.271	1.264		1.356	1.35	1.342	1.283
겉보기 밀도 (g/cm ³)		0.703	0.679	0.666	0.659	0.671		0.844	0.751	0.718	0.716
다공도 (%)		40.83	39.05	39.73	39.98	38.04		34.68	38.14	38.48	35.55

표 3-10. 겉보리 및 쌀보리의 물성치와 함수율의 회귀방정식

Property	Husked barley	Naked barley
길이(cm)	0.7980 + 0.00060 M (R=0.9849)	0.5892 + 0.00117 M (R=0.9872)
너비(cm)	0.3380 + 0.00099 M (R=0.9986)	0.2934 + 0.00209 M (R=0.9309)
두께(cm)	0.2618 + 0.00081 M (R=0.9873)	0.2554 + 0.00090 M (R=0.9927)
무게(g)	0.0275 + 0.00063 M (R=0.9891)	0.0261 + 0.00039 M (R=0.9846)
부피(cm ³)	0.0212 + 0.00071 M (R=0.9938)	0.0169 + 0.00056 M (R=0.9850)
진밀도(g/cm ³)	1.2167 - 0.00398 M (R=-0.8377)	1.3845 - 0.00838 M (R=-0.9652)
등가입경(cm)	0.4136 + 0.00092 M (R=0.9938)	0.3537 + 0.001457 M (R=0.9676)
구형도(-)	0.5181 + 0.00074 M (R=0.9964)	0.6013 + 0.00117 M (R=0.9330)
비중(-)	0.7108 - 0.00141 M (R=-0.7180)	0.8811 - 0.00551 M (R=-0.8094)
겉보기밀도(g/cm ³)	1.4492 - 0.005541 M (R=-0.9315)	1.4125 - 0.00356 M (R=-0.9288)

2) 옥수수 및 콩의 물리적 특성

옥수수 및 콩의 물성특성은 김(2006)이 국내 생산되는 옥수수 및 콩의 물리적 특성 및 열 특성에 관한 연구 자료를 이용하였으며, 옥수수와 콩의 기하학적 특성, 산물밀도 및 안식각은 표3-11과 같다. 옥수수와 콩의 기하학적 특성은 함수율 15%,w.b.를 기준으로 하였으며, 밀도는 옥수수는 15%,w.b. 콩은 안전 저장이 가능한 함수율인 7%,w.b.를 기준으로 측정하였다. 옥수수와 콩은 기하학적 특성에는 다소 차이가 있지만 산물밀도 및 안식각은 물리적 특성이 비슷한 것으로 나타났다.

표 3-11 옥수수 및 콩의 기하학적 치수, 밀도, 안식각

	길이 (cm)	폭 (cm)	두께 (cm)	표면적 (mm ²)	체적 (mm ³)	진밀도 (g/cm ³)	산물 밀도 (g/cm ³)	공극 률 (%)	퇴적시 안식각 (deg.)	배출시 안식각 (deg.)
옥수수	-	-	-	-	-	1300	721	40	16	27
콩	0.897	0.797	0.638	193.18	237.53	1130 ~1180	772	48	16	29

4. 유채종자 및 콩의 평형함수율 및 박층건조 모델 개발

가. 평형함수율 모델 개발

평형함수율은 포화 염용액과 항온기(한국종합기기제작소, HK-BI025, Korea)를 이용하여 조성된 정온·정습의 공기 중에 시료를 노출시키는 정적방법(static method)을 이용하여 측정하였으며, 표 3-12는 실험에 사용된 염용액의 종류와 포화 염용액 주위의 온도별 상대습도를 나타낸 것이다 (Greenspan, 1977).

표 3-12. 실험에 사용된 염용액의 종류와 염용액주위의 온도별 상대습도

Temp. (°C)	Relative humidity(%)							
	<i>LiCl</i>	<i>CH₃COOK</i>	<i>MgCl₂</i>	<i>K₂CO₃</i>	<i>Mg(NO₃)₂</i>	<i>KI</i>	<i>NaCl</i>	<i>KCl</i>
30	11.3	21.6	32.4	43.1	51.4	67.9	75.1	83.6
40	11.2	20.4	31.6	43.2	48.4	66.1	74.7	82.3
50	11.0		30.5	43.2	45.4	64.5	74.4	81.2

염용액은 일정한 온도를 유지하는 항온기(한국종합기기제작소, HK-BI025, Korea)속에 증류수가 들어 있는 유리병을 넣고 일정한 온도에 이르게 한 후 증류수에 염류를 넣어 혼합하면서 완전히 포화시켜서 사용하였다. 그림 3-11은 유채종자 시료를 넣은 데시케이터의 구조를 나타낸 것이며, 데시케이터 이음에는 진공 구리스를 사용하여 완전한 밀폐가 되도록 하였다.

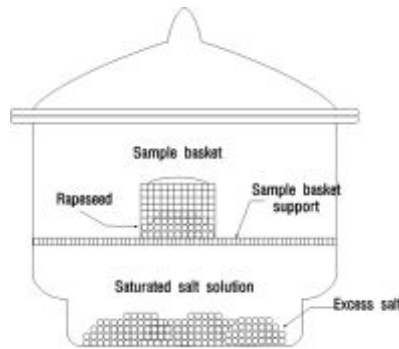


그림3-11. 유채종자 시료를 넣은 데시케이터의 구조

온도는 열전대(T-TYPE, OMEGA, USA)를 설치하고 자료 수집장치(7327, DATASCAN, UK)로 측정하였으며, 표 3-12에서와 같이 30, 40 및 50°C의 3수준의 온도별 8종류의 염류를 포화시켜 유리병 내의 공기가 8수준의 상대습도(11.0~83.6%)를 유지하도록 하였다. 상대습도와 온도가 일정하게 유지되는 유리병 내의 공간에 시료 10 g을 담은 시료 접시를 배치하고, 실험 시작 후 2~3일 간격으로 $\pm 0.001\text{g}$ 정밀도의 전자저울(R420P, Sartorius, Germany)을 이용하여 무게를 측정하였다. 시료의 무게 변화가 2주간 연속해서 0.002g이하의 변화를 보일 때를 평형함수율에 도달한 것으로 간주하였으며, 시료의 함수율은 10g-130°C-4시간(ASAE standard, 2004) 건조법으로 측정하였다. 평형함수율 자료를 적합 시키는데 이용되는 많은 모델을 검토한 후 곡물의 평형함수율 모델로 가장 많이 이용되고 있으며, 3개의 매개 변수를

포함하고 있어 적합성이 높고, 함수율을 온도와 상대습도의 양함수로 또는 상대습도를 온도와 함수율의 양함수로 쉽게 표현할 수 있는 특성을 지닌 Chung-Pfost, Modified Halsey, Modified Henderson 및 Modified Oswin 모델을 선택하였다.

(1) Chung-Pfost Equation :

$$RH = \exp\left[-\frac{A}{(T+C)} \exp(-BM)\right]$$

$$M = E - F \ln[-(T+C) \ln(RH)] \quad (3-15)$$

(2) Modified Halsey Equation :

$$RH = \exp(-\exp(A+BT)M^{-C})$$

$$M = [\exp(A+BT)]^{\frac{1}{C}} (-\ln RH)^{-\frac{1}{C}} \quad (3-16)$$

(3) Modified Henderson Equation :

$$RH = 1 - \exp[-K(T+C)(100M)^N]$$

$$M = 0.01 \left[\frac{\ln(1-RH)}{-K(T+C)} \right]^{\frac{1}{N}} \quad (3-17)$$

(4) Modified Oswin Equation :

$$RH = \frac{1}{(A+BT/M)^{\frac{1}{N}} + 1}$$

$$M = (A+BT) \left(\frac{RH}{1-RH} \right)^N \quad (3-18)$$

여기서, M = 평형함수율(dec., d.b.)

$RH =$ 상대습도(dec.)

$T =$ 온도($^{\circ}C$)

$A, B, C, E, F, K, N =$ 실험상수

각 모델의 실험상수들은 SAS(Ver. 9.1.3)의 비선형회귀분석 프로그램을 이용하여 결정하였으며, RMSE(Root Mean Square Error)를 모델의 비교 검토에 이용하였다. 모든 시료는 실험 시작 후 2주 내에 무게가 급격히 감소하였으며, 4~6주 내에 평형함수율에 도달하였다. 온도 3수준, 상대습도 8수준의 공기에 대한 유채종자의 평형함수율은 표 3-13과 같으며, 표에서와 같이 방습 평형함수율은 온도가 높을수록, 상대습도가 낮을수록 낮게 나타났다.

표 3-13. 유채종자의 방습평형함수율

온도 ($^{\circ}C$)	상대습도 (%)	평형함수율 (%, d.b.)
30	11.3	3.79
	21.6	4.59
	32.4	5.41
	43.1	6.23
	51.4	6.97
	67.9	9.24
	75.1	10.95
	83.6	14.53
40	11.2	3.36
	20.4	4.20
	31.6	5.03
	43.2	5.80
	48.4	6.20
	66.1	8.97
	74.7	10.57
	82.3	12.98
50	11.0	3.24
	30.5	4.65
	43.2	5.41
	45.4	5.54
	64.5	7.46
	74.4	9.86
	81.2	10.91

4개의 평형함수율 모델 즉, Modified Henderson, Chung-Pfost, Modified Halsey 및 Modified Oswin 모델의 회귀계수(실험상수)와 RMSE는 표 3-14와 같으며, 평형함수율의 실험치와 각 모델에 의한 예측치 사이의 RMSE는 Modified Halsey 모델의 경우 0.281%(d.b.)를 나타내어 4개 모델 중 가장 낮은 값을 나타내었다. 함수율의 측정정도를 고려하여 실측 및 예측 함수율 사이의 RMSE의 허용수준을 0.5%,d.b.로 설정할 때, Modified Halsey 모델과 Modified Oswin 모델은 허용수준을 만족하였으나, Modified Henderson과 Chung-Pfost 모델은 허용수준에 도달하지 못하므로 두 모델은 제외하였다. 평형함수율 모델의 결정계수(R^2)는 Modified Halsey 모델의 경우 0.99 이상의 높은 값을 나타내었으며, 그 외 모델들도 0.95 이상으로 나타났으나 전자의 모델이 적합성이 높았다.

평형상대습도의 실험치와 예측치 사이의 RMSE는 표 3-14에서와 같이, Modified Halsey 모델이 1.909%를 나타내어 적합성이 매우 높게 나타났으며, Chung-Pfost 모델의 경우는 4.479%, Modified Henderson 모델의 경우는 4.661%, Modified Oswin 모델의 경우는 2.986%의 값을 나타내어 Modified Halsey 모델에 비하여 다소 높은 값을 나타내었다. 결정계수는 4개의 모델 중 Modified Halsey 모델이 0.99이상을 나타내었다.

표 3-14. Chung-Pfost, Halsey, Modified-Henderson, Modified-Oswin
 모델 식에 관한 실험상수 및 RMSE분석 결과

모델식	실험상수					RMSE		R ²	
						RH (%)	EMC (%d.b.)	RH	EMC
Chung-Pfost	A 391.7	B 27.885	C 44.1262	E 0.2196	F 0.0385	4.479	0.653	0.9667	0.9559
수정 Halsey	A -4.9758		B -0.0132	C 1.8755		1.909	0.281	0.9936	0.9925
수정 Henderson	K 0.000282		C 38.3729	N 1.7844		4.661	0.682	0.9619	0.9564
수정 Oswin	A 0.0861		B -0.00048	N 0.3775		2.986	0.496	0.9846	0.9816

그림 3-12~14는 온도 30, 40 및 50℃에서 유채종자의 평형함수율 실험치와 수정 Halsey 모델에 의한 예측치를 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 온도 30℃의 경우 상대습도에 따른 수정 Halsey 모델로 예측한 평형함수율은 전체적으로 실험치와 잘 일치하였으며, 40℃에서는 상대습도 50~80%에서 약간의 오차가 나타났으나, 전반적으로는 잘 일치하였고 50℃에서도 40℃에서와 비슷한 경향이 나타났다.

평형함수율의 실험치와 예측치 사이의 RMSE가 가장 작은 값을 나타내고 넓은 상대습도 범위에서 잘 적합하는 수정 Halsey 모델이 가장 적합한 모델임을 알 수 있었다.

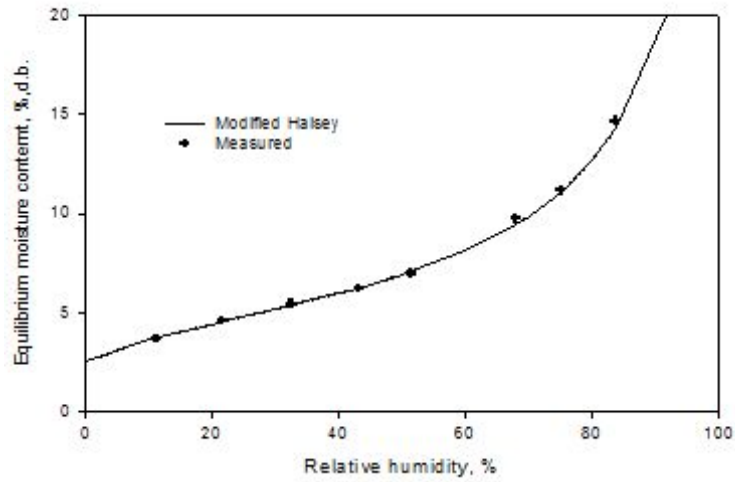


그림 3-12. 온도 30에서 유채종자의 평형함수율 실험치와 수정 Halsey 모델에 의한 예측치를 비교

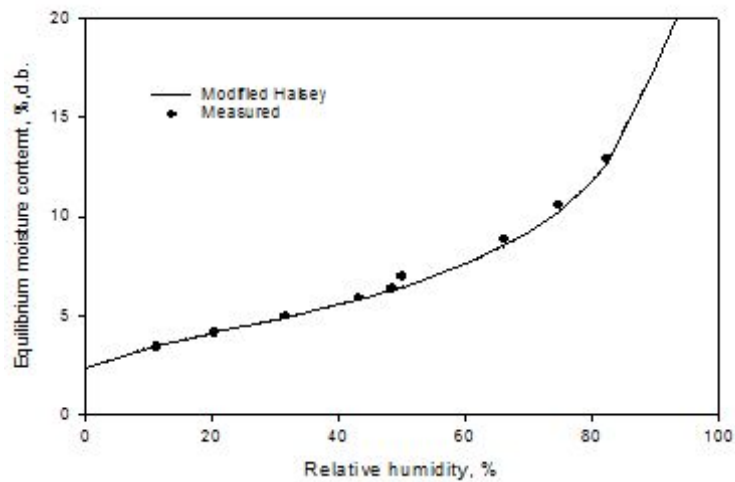


그림 3-13. 온도 40°C에서 유채종자의 평형함수율 실험치와 수정 Halsey 모델에 의한 예측치를 비교

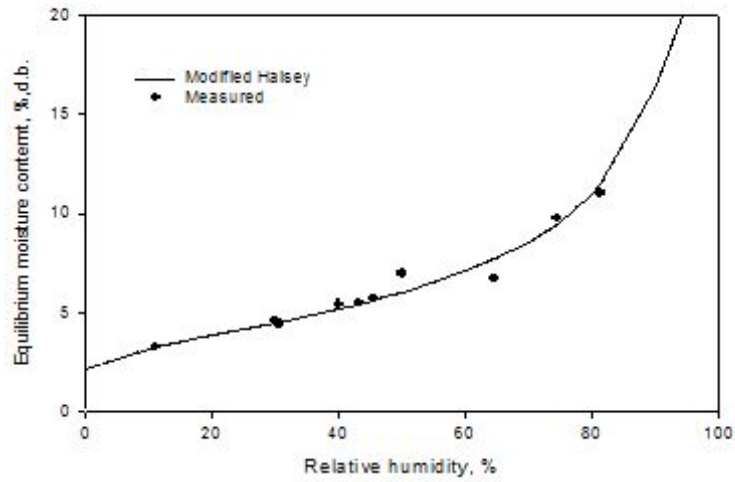


그림 3-14. 온도 50°C에서 유채종자의 평형함수율 실험치와 수정 Halsey 모델에 의한 예측치를 비교

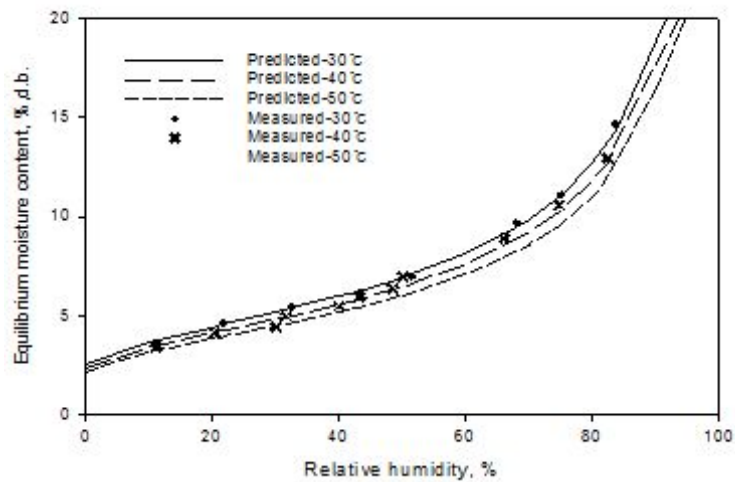


그림 3-15. 수정 Halsey 모델의 30, 40 및 50°C의 온도에서의 예측치와 실측치를 비교

그림 3-15는 수정 Halsey 모델의 30, 40 및 50°C의 온도에서의 예측치와 실측치를 비교한 그림이며, 전체적으로 실험치 온도가 높을수록 평형함수율이 낮게 나오는 경향은 예측치에서도 비슷한 경향으로 나타났다.

나. 박층건조 모델 개발

박층건조실험은 Keum등(2002)이 이용한 공기조화장치(MTH4100, SANYO, UK)를 사용하였으며, 공기조화장치는 온도 20~70°C($\pm 0.3^\circ\text{C}$), 상대습도 30~98%($\pm 2.5\%$)범위의 건조공기를 발생할 수 있다. 조성된 공기는 송풍기에 의해 공기충만실과 건조실로 이송되며, 건조실을 통과한 공기는 다시 공기조화장치로 되돌아가도록 구성되어있다. 건조실은 직경 280mm, 높이 400mm의 원통형으로 하부에 정류격자를 설치하여 공기분포가 일정하도록 하였다. 건조실은 직경 280mm, 높이 400mm의 원통형으로 하부에 정류격자를 설치하여 공기분포가 일정하도록 하였으며, 건조실 내의 풍속은 5개 지점에 대하여 풍속계(VELCICALC-PLUS, TSI, USA)로 측정하였으며, 0.56m/s(표준편차 0.06)로 나타났다. 건조실 내부에 설치된 직경 300mm의 다공판으로 제작된 시료대에 초기중량 160g의 유채종자를 박층으로 퇴적하였으며, 시료대의 중량은 전자저울(LC4200, SARTORIUS, Germany)을 이용하여 10분 간격으로 중량을 측정하여 PC에 기록하였다. 평형함수율에 도달할 때까지 건조를 수행하였으며, 건조온도는 30, 40 및 50°C의 3수준, 상대습도 30, 45 및 50% 3수준에 대하여 3회 반복 실험하였다.

박층건조모델을 결정하기 위하여 기존의 곡물건조방정식 중에서 널리 사용되고 있는 13개의 건조모델을 선정하였다(식 3-19~30). 평형함수율은 실험중 측정한 최종함수율을 이용하였다.

– Lewis (Lewis, 1921)

$$MR = \exp(-kt) \quad (3-19)$$

– Page (Page, 1949)

$$MR = \exp(-kt^n) \quad (3-20)$$

– Modified Page (Overhults $\frac{1}{\sigma}$, 1973).

$$MR = \exp(-kt)^n \quad (3-21)$$

– Henderson and Pabis (Henderson and Pabis, 1961)

$$MR = A \exp(-kt)$$

– Modified Henderson and Pabis (Karathanos, 1999)

$$MR = A \exp(-kt) + B \exp(-gt) + C \exp(-ht) \quad (3-22)$$

– Thompson (Thompson, 1967).

$$t = A (\exp(-kt) + B \ln[(MR)]^2) \quad (3-23)$$

– Approximation of diffusion (Sharaf-Eldeen $\frac{1}{\sigma}$, 1980).

$$MR = A \exp(-kt) + (1-A) \exp(-Bkt) \quad (3-24)$$

– Logarithmic (Temple and Boxtel, 1999).

$$MR = A \exp(-kt) + C \quad (3-25)$$

- Two term (Glenn, 1978).

$$MR = A \exp(-k_1 t) + B \exp(-k_2 t) \quad (3-26)$$

- Two term exponential (Sharaf-Eldeen 등, 1980).

$$MR = A \exp(-kt) + (1-A) \exp(-Akt) \quad (3-27)$$

- Wang and Singh (Wang and Singh, 1978).

$$MR = 1 + At + Bt^2 \quad (3-28)$$

- Verma 등 (Verma 등, 1985).

$$MR = A \exp(-kt) + (1-A) \exp(-gt) \quad (3-29)$$

- Moisture diffusion (Crank, 1975).

$$MR = (6/\pi^2) \sum_{n=1}^{\infty} (1/n^2) \exp(-n^2 D_{eff} \pi^2 t / r^2) \quad (3-30)$$

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

M : 함수율 (% , dry basis)

M_e : 평형함수율(dec,d.b.)

M_o : 초기함수율(dec,d.b.)

t : 건조시간(s 또는 h)

$A, B, C, g, h, n, k, k_1, k_2$: 매개변수

D_{eff} : 수분확산 계수($m^2 \cdot s^{-1}$)

r : 종자반지름 (m)

함수율비의 실험값을 모델에 적합시켜 SAS의 비선형 회귀분석 프로그램을 이용하여 매개변수를 결정하였으며, 건조모델의 매개변수 $A, B, C, g, h, n, k, k_1, k_2$ 및 Q 는 건조온도와 상대습도의 함수로 가정하고 식 3-31로 설정하였다.

$$\text{매개변수} = a_0 + a_1(T_0) + a_2(RH_0) + a_3(T_0)^2 + a_4(T_0 \cdot RH_0) \quad (3-31)$$

여기서, a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 : 실험상수

T_0 : 건조온도(°C)

RH_0 : 상대습도(dec)

실험상수들의 조합은 SAS의 PROC STEPWISE를 이용하여 선정하였으며, 함수율비 실험값과 모델에 의한 예측값 사이의 결정계수와 RMSE(Root Mean Square Error)를 모델의 검정에 이용하였다.

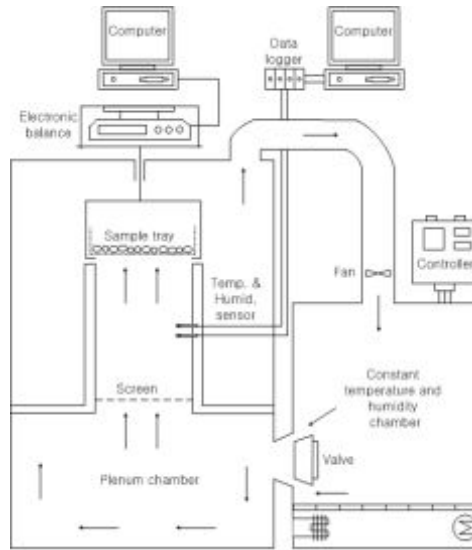


그림 3-16. 박충건조실험을 위한 공기조화장치의 구조도



그림 3-17. 박충건조실험을 위한 공기조화장치

그림 3-18은 상대습도 및 건조온도별 함수율비의 변화를 나타낸 것이며, 그림에서와 같이 유채종자의 함수율이 매우 높아 건조시간 30분까지 함수율

비가 0.6수준까지 급격히 감소하였다. 건조속도는 지수함수의 경향으로 감소하는 것으로 나타났으며, 건조속도의 지표가 되는 반건조시간(MR=0.5에 이르는 시간)은 대부분 건조시간 1시간이 되기 전에 모두 도달하였으며, 건조온도의 증가에 따른 건조시간의 단축정도는 상대습도 30%에서 유사한 경향으로 나타났다.

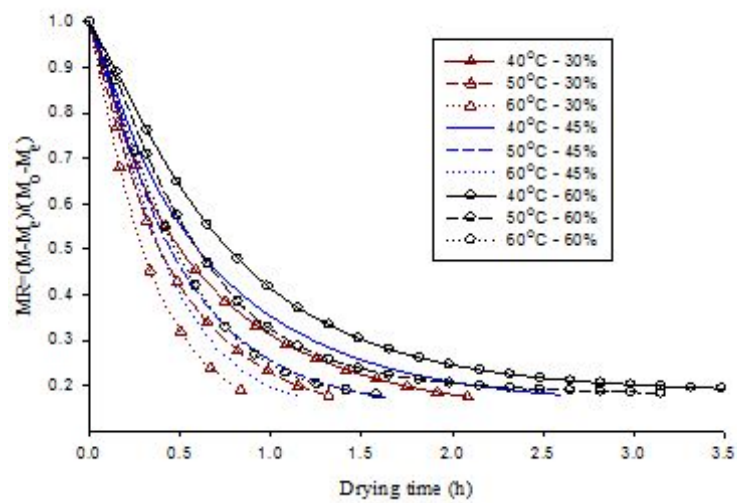


그림 3-18. 유채 종자의 상대습도 및 건조온도별 함수율비의 변화

표 3-15는 각각의 건조모델들의 R^2 및 $RMSE$ 를 나타낸 것이며, 13개의 모델 중에서 page모델이 결정계수(R^2)의 값이 가장 높고(범위 0.9924 ~ 0.9966) $RMSE$ 의 값이 가장 낮게 나타났다(범위 0.0169 ~ 0.0296).

표 3-15. 13개 건조모델 각각의 결정계수(R^2) 및 $RMSE$

Drying condition	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE
	Lewis		Modified Page		Page		Henderson and Pabis	
40°C-30%	0.9807	0.0503	0.9821	0.0511	0.9930	0.0219	0.9758	0.0449
40°C-45%	0.9696	0.0565	0.9713	0.0548	0.9932	0.0201	0.9613	0.0481
40°C-60%	0.9299	0.0828	0.9610	0.0895	0.9966	0.0227	0.9076	0.0729
50°C-30%	0.9917	0.0319	0.9922	0.0324	0.9962	0.0169	0.9887	0.0294
50°C-45%	0.9832	0.0408	0.9833	0.0406	0.9924	0.0239	0.9775	0.0426
50°C-60%	0.9504	0.0776	0.9765	0.0984	0.9927	0.0232	0.9332	0.0718
60°C-30%	0.9932	0.0263	0.9928	0.0274	0.9963	0.0186	0.9934	0.0255
60°C-45%	0.9937	0.0226	0.9928	0.0249	0.9943	0.0296	0.9938	0.0229
60°C-60%	0.9939	0.0258	0.9965	0.0608	0.9945	0.0222	0.9939	0.0290
	Modified Henderson and Pabis		Approximation of diffusion		Thompson		Logarithmic	
40°C-30%	0.9954	0.0383	0.9981	0.0168	0.9975	0.0152	0.9917	0.0390
40°C-45%	0.9958	0.0875	0.9974	0.0244	0.9769	0.0464	0.9968	0.0194
40°C-60%	0.9684	0.0911	0.9931	0.0213	0.9471	0.1184	0.9961	0.0246
50°C-30%	0.9994	0.0962	0.9970	0.0687	0.9958	0.0211	0.9966	0.0327
50°C-45%	0.9981	0.0898	0.9971	0.0791	0.9926	0.0274	0.9971	0.0149
50°C-60%	0.9437	0.0675	0.9755	0.0839	0.9570	0.0971	0.9935	0.0244
60°C-30%	0.9976	0.1010	0.9916	0.0311	0.9923	0.0281	0.9980	0.0291
60°C-45%	0.9941	0.0856	0.9910	0.0346	0.9915	0.0407	0.9879	0.0421
60°C-60%	0.9931	0.1415	0.9884	0.0479	0.9726	0.0629	0.9857	0.0599
	Two term		Wang and Singh		Two term exponential		Verma 등	
40°C-30%	0.9995	0.0337	0.9782	0.0451	0.9942	0.0309	0.9985	0.0242
40°C-45%	0.9996	0.0354	0.9796	0.0657	0.9882	0.0298	0.9916	0.0489
40°C-60%	0.9909	0.0689	0.9420	0.0724	0.9533	0.0601	0.9855	0.0782
50°C-30%	0.9927	0.0618	0.9920	0.0324	0.9983	0.0185	0.9985	0.0245
50°C-45%	0.9901	0.0989	0.9895	0.0369	0.9929	0.0244	0.9907	0.0644
50°C-60%	0.9810	0.0715	0.9510	0.0828	0.9567	0.0570	0.9546	0.0592
60°C-30%	0.9948	0.0563	0.9943	0.0238	0.9985	0.0158	0.9978	0.0799
60°C-45%	0.9929	0.0638	0.9972	0.0240	0.9950	0.0212	0.9926	0.0656
60°C-60%	0.9883	0.0888	0.9986	0.0112	0.9944	0.0265	0.9922	0.0270
	Moisture diffusion model							
40°C-30%	0.9942	0.0243						
40°C-45%	0.9893	0.0294						
40°C-60%	0.9415	0.0558						
50°C-30%	0.9885	0.0362						
50°C-45%	0.9833	0.0439						
50°C-60%	0.9480	0.0584						
60°C-30%	0.9801	0.0457						
60°C-45%	0.9598	0.0663						
60°C-60%	0.9647	0.0684						

표 3-16. 회귀방정식을 이용한 Page 모델의 매개변수

$MR = \exp(-kt^n)$			
T (°C)	RH (%)	k	n
40	30	1.09401	0.75798
	45	0.98914	0.71620
	60	0.79361	0.59702
50	30	1.47942	0.83385
	45	1.28340	0.83001
	60	0.99671	0.74876
60	30	1.99099	0.90972
	45	1.70381	0.94381
	60	1.32597	0.90050

표 3-16은 회귀방정식을 이용하여 Page 모델의 매개변수를 구한 값을 나타낸 것이며, 온도별 습도별 k 및 n 의 값을 나열하였다. 실험계수들의 측정된 값들은 다음과 같았다(식 4-18~19).

$$k = 0.02246 + 3.2428 \cdot RH + 0.0006308 \cdot T^2 - 2.01481 \cdot RH^2 - 0.06077 \cdot T \cdot RH$$

$$(R^2 = 0.9949) \quad (3-32)$$

$$t = 0.60932 - 1.72018 \cdot RH^2 + 0.02529 \cdot T \cdot RH \quad (R^2 = 0.9864) \quad (3-33)$$

그림 3-19는 상대습도 30%, 건조온도 40, 50 및 60°C 건조온도에서의 함수율비의 실험값과 각 모델에 의한 예측값을 비교한 것이며, 그림과 같이 전체영역에서 비교적 잘 일치하였으며, 낮은 건조에서는 실험값과 예측값이 약간의 차이가 있었다. 그림 3-20~21은 상대습도 45%, 건조온도 40, 50 및 60°C 건조온도에서의 함수율비의 실험값과 각 모델에 의한 예측값을 비교한 것이며, 그림과 같이 전체영역에서 비교적 잘 일치하였다. 40°C의 건조온도에

서는 건조초기에는 예측값이 함수율비가 빠르게 감소되며, 건조후반에는 실험 값보다 늦는 것을 알 수 있었다.

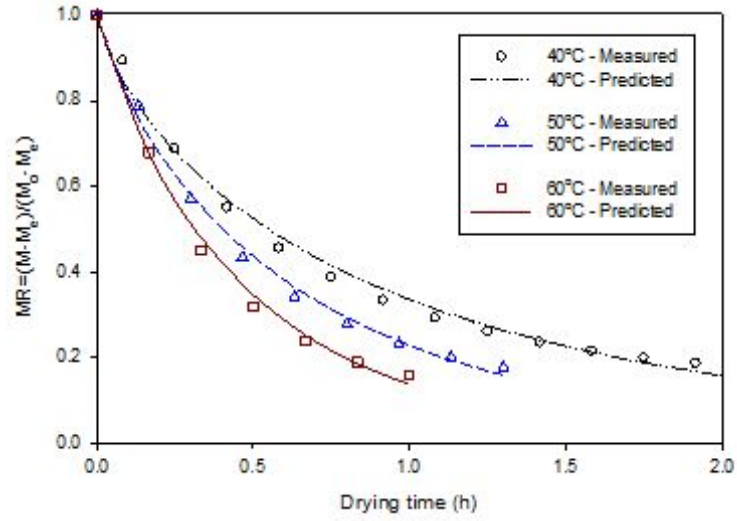


그림 3-19. 건조온도 40, 50 및 60°C, 상대습도 30%에서의 함수율비의 실험값과 예측값 비교

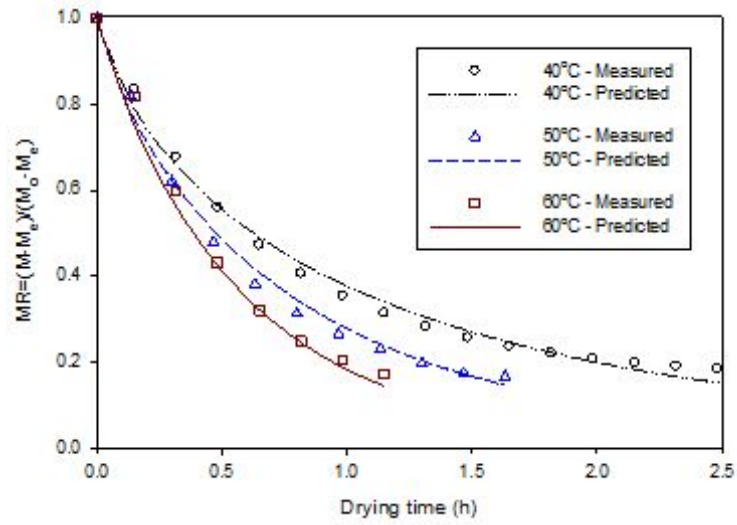


그림 3-20. 건조온도 40, 50 및 60°C, 상대습도 45%에서의 함수율비의 실험값과 예측값 비교

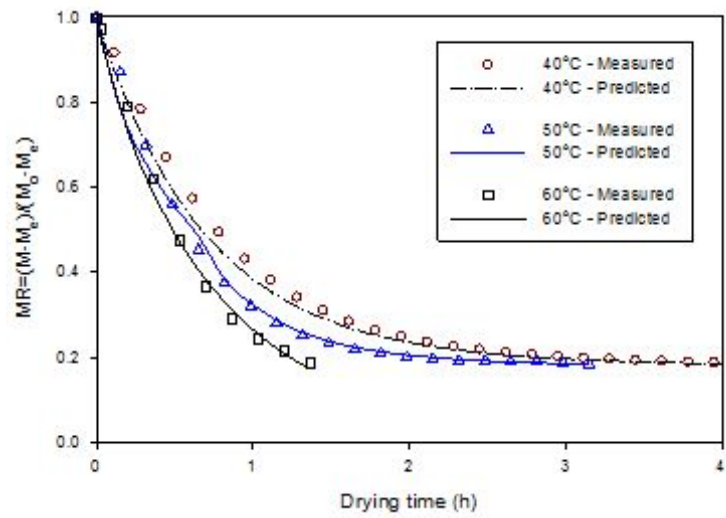


그림 3-21. 건조온도 40, 50 및 60°C, 상대습도 60%에서의 함수율비의 실험값과 예측값 비교

콩의 박층건조실험은 유채박층건조와 동일한 방법으로 수행하였으며, 콩은

국내에서 생산되는 2개의 품종(신팔달, 태광)을 이용하였다. 일반적으로 곡물에 적용하여 건조모델을 사용하는 Page모델, Thompson, 축소수분확산모델 및 Lewis모델 등 4개의 건조모델을 선정하여 실험에 사용하였으며, 평형함수율은 실험 중 측정된 최종함수율을 이용하였다. 4개의 건조 모델 중 Page모델이 건조방정식에 가장 적합하였으며, 상수는 아래의 식과 같이 나타났다

- Page (Page, 1949)

$$MR = \exp(-kt^n) \quad (3-34)$$

$$k = 0.033 + 0.0003 \cdot T$$

$$n = 0.3744 + 0.00916T \cdot rh$$

5. 유채종자의 건조조건과 발아율 관계 규명

유채종자는 열적특성이 전무한 실정이므로 발아율과의 관계를 규명하여 건조시뮬레이션 프로그램에 기초자료로 이용하였다. 유채종자의 발아율을 측정하기 위하여 건조온도수준 40, 50 및 60°C 3수준 및 상대습도수준 30, 45, 60%로 목표함수율 10%,w.b.까지 건조된 시료를 사용하여 발아율 측정을 하였다.

발아율 측정 방법은 International Seed Testing Association(1976) 규정에 따라 건설한 유채종자 100립을 물로 충분히 세척한 후 유리접시에 여과지를 깔고, 유채종자를 고르게 분포시킨 후 여과지가 충분히 젖을 정도로 물을 가하여 20°C의 항온기에 7일 이내에 발아한 미립수를 측정하였다.

표 3-17. 유채종자의 건조 온도 및 상대습도에 따른 발아율

건조온도(℃)	상대습도(%)	발아율(%)
40	30	91.1
	45	92.8
	60	95.9
50	30	86.0
	45	88.7
	60	93.2
60	30	74.3
	45	79.8
	60	86.6

표 3-17은 유채종자의 건조 온도 및 상대습도에 따른 발아율을 나타낸 것이며, 발아율은 건조온도 50℃이상에서는 발아율이 90%이하로 나타났다. 발아율(g)은 식 3-35로 구하며, 발아율비(G)는 다음 식 3-36에 의해 결정되었다.

$$g = \frac{\sum n}{N} \quad (3-35)$$

여기서, n : 발아된 씨앗의 수

N : 초기 실험 시료의 개수

$$G = \frac{g}{g_i} \cdot 100 \quad (3-36)$$

여기서, g_i : 초기 시료 발아율(%)

온도와 상대습도로 인하여 시료의 발아율을 예측하기 위해서, 통계학적 모

텔을 사용하였다.

$$G_{ij} = a_0 + a_1 \cdot T_i + a_2 \cdot RH_j + a_3 \cdot T_i^2 + a_4 \cdot RH_j^2 + a_5 \cdot (T \cdot RH)_{ij} + E_{ij} \quad (3-37)$$

여기서, G_{ij} : 발아율(%)값; 온도(i) , 상대습도(j) ($i = 1, \dots, 3; j = 1, \dots, 3$)

$a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$: 매개변수

T_i : 건조온도(°C)

RH_i : 상대습도(dec, w.b.)

E_{ij} : 오차

반발아시간은 발아율 50%가 발아하는데 걸리는 시간으로 반발아는 발아 실험 결과에 의해 발아된 것이며, 발아속도 비교에서 중요한 인자로 사용된다. 반발아시간(MGT)은 다음의 식3-38에 의해 계산되었다.

$$MGT = \frac{\sum(D \cdot n)}{\sum N} \quad (3-38)$$

여기서, n : D 동안 발아된 시료의 수

D : 발아시험을 시작한 날로부터의 날짜 수

발아율은 온도가 증가할수록 감소되고 상대습도가 낮아질수록 감소되었으며, 발아율의 평균값, 평균발아시간 그리고 변이계수를 측정하였다(표 3-18). 건조되기 전 초기발아율은 97.33%. 건조조건 중에서 건조온도 40°C 및 상대습도 60%에서 4%로 나타났다. 평균발아시간은 온도가 증가함에 따라 증가되었고, 상대습도가 높아짐에 따라 감소하였으며, 건조온도 40°C 및 상대습도 60%에서 발아시간이 2.37로 가장 짧은 것으로 나타났다.

표 3-18. 건조조건에 따른 발아비율 및 반발아시간의 평균값

건조조건		발아비율 (G)		반 발아 시간 (MGT)	
Temp. (°C)	RH (%)	Mean (%)	CVa(%)	Mean (day)	CVa(%)
40	30	92.00	1.30	2.82	2.53
	45	94.00	1.33	2.60	2.68
	60	95.44	1.65	2.37	2.32
50	30	86.22	1.47	3.12	1.96
	45	88.78	1.33	3.04	2.57
	60	91.00	1.28	2.89	2.24
60	30	75.00	0.86	3.47	2.29
	45	80.22	1.37	3.38	2.48
	60	84.00	1.18	3.28	2.33

※ 참고 $CV_a = \left(\frac{\text{표준편차}}{\text{평균}} \right) \times 100 (\%)$

발아 유채종자의 발아 특징이 전체데이터 범위(P-value<0.001)에 대한 건조조건에 영향을 받는다는 것을 보여주며, 온도와 상대습도의 영향을 받는 발아는 식 3-39로 정의되었다.

$$G = 88.3917 + 0.784167 \times T - 26.7222 \times RH - 0.019 \times T^2 + 0.916667 \times T \times RH$$

$$(R^2 = 0.996, \quad RMSE = 0.00352) \quad (3-39)$$

그림 3-22는 발아율 예측모델을 이용하여 실험값과 예측값의 비교를 나타낸 것이며, 전반적으로 예측된 값과 실험값과 동일한 경향을 나타내고 있다. 다목적 건조기 개발 목표인 유채종자의 최소 발아율 85%이상을 목표로 할 경우 상대습도 30, 45, 60%일 경우 건조온도는 51, 54.5 및 58.7°C 보다 낮아야 한다. 목표 발아율에 따라 적정한 조건은 건조온도와 상대습도 사이에 의해 결정되며, 유채종자의 최소발아율을 위한 건조 온도는 식 3-40과 같으며,

적합한 건조온도는 그림 3-23에 나타내었다.

$$T_{85} \leq T = 46.1 + 11.667 \cdot RH + 15.556 \cdot RH^2 \quad (R^2 = 1) \quad (3-40)$$

반발아시간 모델은 식 3-41에 의하여 결정이 가능하며, 평균발아시간은 또한 건조온도, 상대습도, 그리고 온도와 상대습도의 상호관계에 의해 영향을 받았다(P -value <0.05).

$$MGT = 1.16167 + 0.07283 \cdot T - 3.1222 \cdot RH - 0.00053 \cdot T^2 + 0.04333 \cdot T \cdot RH \quad (R^2 = 0.995, RMSE = 0.00024) \quad (3-41)$$

그림 3-24는 온도와 상대습도가 유채종자의 반발아시간에 미치는 영향을 나타낸 것이다.

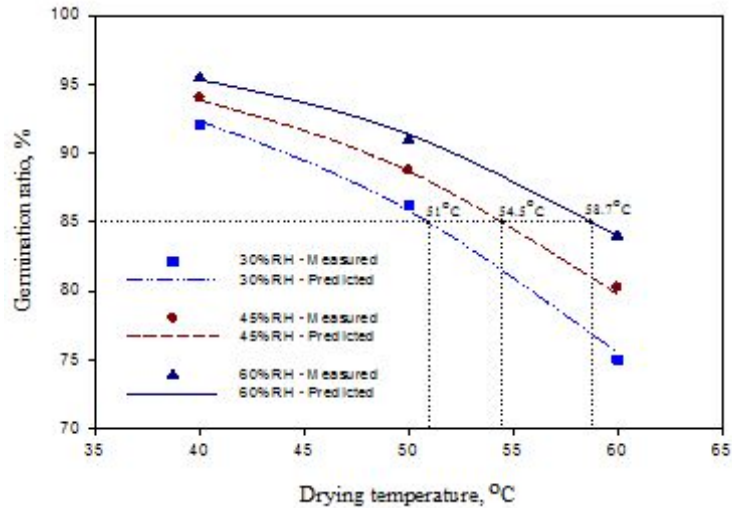


그림 3-22. 발아율 예측모델을 이용하여 실험값과 예측값의 비교

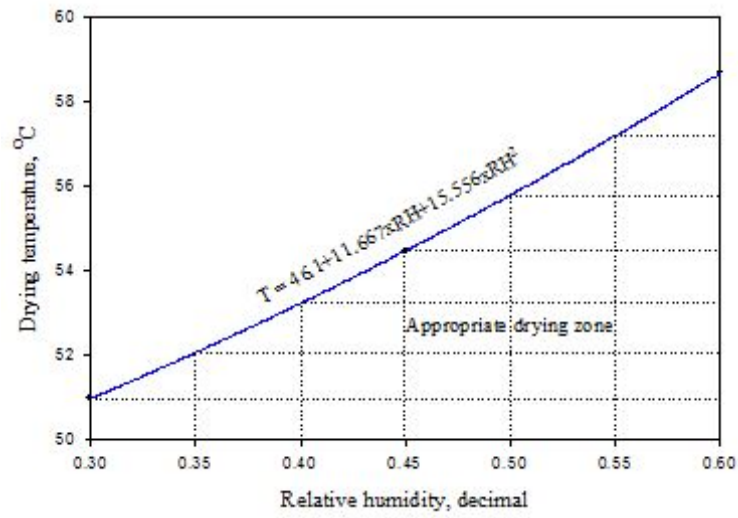


표 3-23. 목표 발아율에 적절한 건조온도 및 상대습도

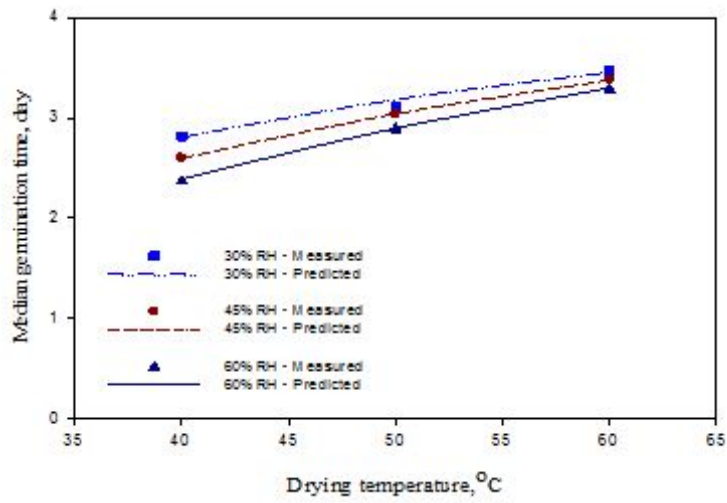


그림 3-24. 온도와 상대습도가 유채종자의 반발아시간에 미치는 영향

제 2 절 다목적 건조 시뮬레이션 프로그램

1. 서언

곡물은 건조조건에 따라 품질이 결정되므로 건조과정 모델을 분석하고 적정 건조조건으로 건조해야 한다.(Keum 등, 1997).

곡물의 건조모델은 일반적으로 박층건조모델과 후층건조모델로 구분할 수 있으며, 박층건조모델은 얇은 층의 곡물 건조과정을 나타낸 것이고 후층건조모델은 박층건조모델의 중복으로 일반적인 건조과정을 나타낸 것이다.

기계적 건조는 일정한 두께의 곡물퇴적을 이루고 있는 건조공기를 통과시키는 후층건조과정으로 시뮬레이션 모델을 개발하기 위해서는 후층과정의 해석이 필요하다.

후층건조과정은 건조공기가 곡물층을 통과하는 동안 곡물로부터 열에너지는 상실하고 수분을 흡수하여 습도는 높아지는 반면, 곡물은 열에너지를 흡수하여 온도는 상승되고 수분을 잃게 된다. 건조과정에서의 함수율변화, 곡온예측, 공기의 조성 등을 예측 가능해야 한다. 시뮬레이션 모델을 개발하기 위해서는 곡물의 건조모델, 수분증발잠열, 열, 물리적 성질 및 공기의 조성변화 등의 자료가 필요하다.

따라서, 다목적 건조 시뮬레이션 모델을 개발하고 건조실험을 통하여 시뮬레이션 모델의 적합성을 검증하였다.

2. 시뮬레이션 프로그램

가. 건조모델

다목적 건조기의 건조과정은 그림 3-25와 같으며, 그림에서와 같이 곡물이 열풍과 함께 건조실을 하강하는 동안 건조가 이루어진다. 건조실을 통과한 곡물은 템퍼링실을 지나는 동안 곡물 내부의 수분 및 온도구배가 완화되는 템

퍼링 과정을 거치게 된다. 템퍼링 과정을 거친 곡물은 건조실에 들어가 순환하게 되므로 건조-순환-템퍼링 과정을 반복하면서 목표로 하는 함수율에 도달하게 되며, 다목적 건조기의 건조과정의 해석을 위해서는 건조모델과 템퍼링 모델이 필요하다.

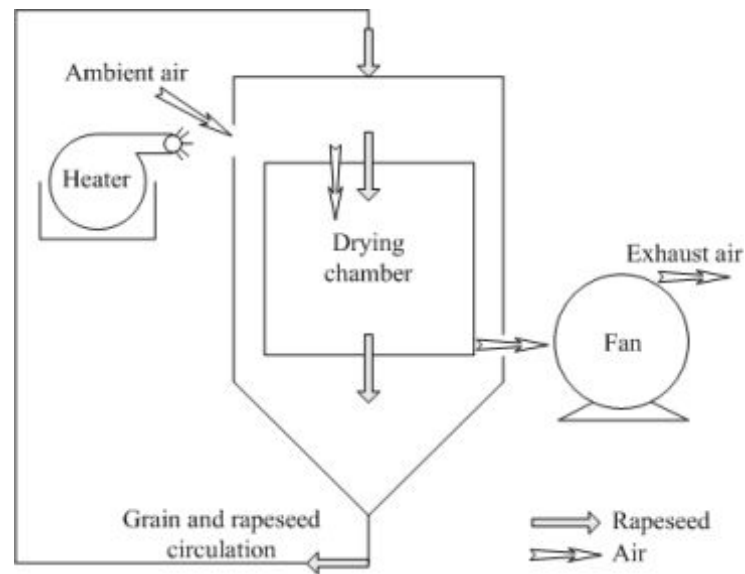


그림 3-25. 다목적 건조기의 건조과정

곡물의 박층 Δx 를 통과하는 온도 T , 절대습도 H , 건조공기 Δt , 함수율 M , 곡물온도 θ 인 곡물로부터 ΔM 의 수분을 증발시켜 건조공기에 첨가시킴으로써 건조공기의 절대온도는 $H + \Delta H$ 로, 곡물의 함수율은 $M - \Delta M$ 으로 변화하였다. 또한, 건조공기의 온도는 곡물의 온도상승 및 수분의 증발에 의한 냉각효과에 비례하여 $T - \Delta T$ 가 되며, 하나의 박층을 통과한 공기의 상태는 다시 다음 박층을 통과할 공기의 초기 건조공기상태로 주어진다. Δt 시간동안의 건조과정이 끝난 박층은 Δy 만큼 이동하여 다시 위의 과정을 되풀이하게 되며, 따라서

이러한 해석에 의한 다목적 곡물 및 유체중자 건조기의 시뮬레이션 모델을 설정하기 위하여 다음과 같이 가정하였다.

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

다목적 건조모델은 다음과 같으며, 식 3-45~46은 곡물을 구로 간주하고 유도한 곡립의 건조속도를 나타내는 수분확산모델이다. $M(r,x)$ 은 곡립내부의 수분분포, $\bar{M}(x)$ 는 곡립의 평균함수율, 식 3-42~44는 1계 상미분방정식, 식 3-45는 2계 편미분방정식이다.

$$\frac{dT}{dx} = \frac{-h_c a}{G_a c_a + G_a c_v H} (T - \theta) \quad (3-42)$$

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{h_c a}{G_p(c_p + \bar{M} c_w)} (T - \theta) - \frac{h_{fg} + c_v(T - \theta)}{G_p(c_p + c_w \bar{M})} G_a \frac{dH}{dx} \quad (3-43)$$

$$\frac{dH}{dx} = -\frac{G_p}{G_a} \frac{d\bar{M}}{dx} \quad (3-44)$$

$$\frac{d\bar{M}}{dx} = \frac{3}{R^3} \int_0^R \frac{\partial M}{\partial x} r^2 dr \quad (3-45)$$

$$\frac{\partial M}{\partial x} = \frac{D}{V_p} \left(\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right) \quad (3-46)$$

나. 수치해석

식 3-45를 연립 1계 상미분방정식으로 변환하기 위하여 구형의 곡립의 반경을 N 등분하고, $\frac{\partial M}{\partial r}$ 및 $\frac{\partial^2 M}{\partial r^2}$ 를 중앙차분식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial M_i}{\partial r} = \frac{M_{i+1} - M_{i-1}}{2\Delta r} \quad (3-47)$$

$$\frac{\partial^2 M_i}{\partial r^2} = \frac{M_{i+1} - 2M_i + M_{i-1}}{\Delta r^2} \quad (3-48)$$

식 3-47과 식 3-48을 식 3-45에 대입하면, 다음의 식 3-49가 된다.

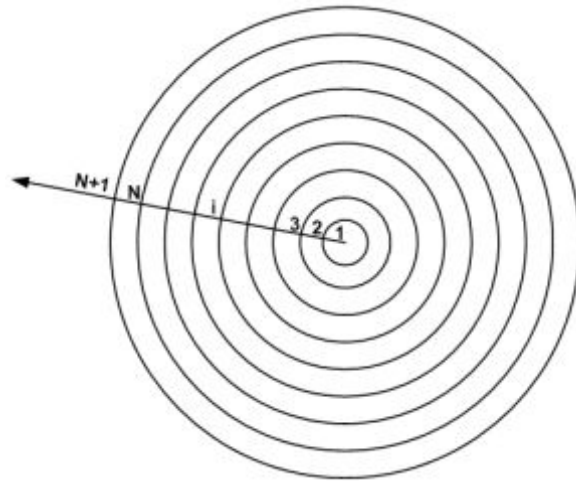


그림3-26. 곡물 및 유체 낱알을 등 간격 등분

그림 6-2와 같이 베타 낱알의 반경을 등 간격으로 N등분하고, 중심노드

($i=1$)에 대하여는 다음 식 3-50과 같이 나타낼 수 있으며, 곡립의 표면 즉 $i=N+1$ 노드에 대하여는 곡립외부에 건조공기의 평형함수율과 일치하는 가상 점($N+2$)을 가정한 것으로 다음 식 3-51로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dM_i}{dx} = \frac{D}{V_p \Delta r^2} \left[\left(1 + \frac{1}{i-1}\right) M_{i+1} - 2M_i + \left(1 - \frac{1}{i-1}\right) M_{i-1} \right], \quad i=2, 3, \dots, N \quad (3-49)$$

$$\frac{dM_1}{dx} = \frac{6D}{V_p \Delta r^2} (M_2 - M_1) \quad (3-50)$$

$$\frac{dM_{N+1}}{dx} = \frac{D}{V_p \Delta r^2} \left[\left(1 + \frac{1}{N}\right) M_e - 2M_{N+1} + \left(1 - \frac{1}{N}\right) M_N \right] \quad (3-51)$$

곡립 난알의 평균함수율의 변화율을 나타내는 식 3-46은 Simpson의 적분 식을 사용하면 다음 식으로 표시된다(식 3-52).

$$\frac{d\bar{M}}{dx} = \frac{\Delta r}{R^3} \left[F_1 + 4 \sum_{i=2,4,6}^N F_i + 2 \sum_{i=1,3,5}^{N-1} F_i + F_{N+1} \right] \quad (3-52)$$

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

따라서, 다목적 건조모델은 식 3-42~44 및 식 3-49~52로 구성된 1계 연립상미분방정식이며, 이 방정식의 초기 및 경계조건은 다음과 같으며, 상미분방정식의 해를 구하는 Runge-Kutter방법을 사용하여 구하였다.

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

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

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

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

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

다. 시뮬레이션 프로그램

표 3-19는 개발한 시뮬레이션 프로그램의 입력 및 출력 데이터를 나타낸 것이며, 본 시뮬레이션 모델은 Main program 및 5개의 곡물의 기본 정보 Program과 공기의 조성을 변경할 수 있는 13개의 Sub program으로 구성하였다. 다목적 건조 시뮬레이션 프로그램은 실행창에 프로그램을 실행 후 건조 기본 자료를 입력받은 후 곡물의 함수율이 원하는 최종함수율에 도달하였을 때 정지하도록 하였다.

표 3-19. 시뮬레이션 프로그램의 입력 및 출력 데이터

입력데이터	출력데이터
<ul style="list-style-type: none"> • 초기함수율 및 곡온 • 외기온도 및 상대습도 • 목표함수율 • 열풍온도 및 건조실 높이 • 탬퍼링부 크기 • 유하속도 및 송풍량 	<ul style="list-style-type: none"> • 순환횟수(회) • 최종함수율(%w.b.) • 건감률(%w.b./hr) • 소요동력(kW) • 제수율(kg/kg) • 소요에너지(kJ/kg-water) • 동할율 및 발아율(%)

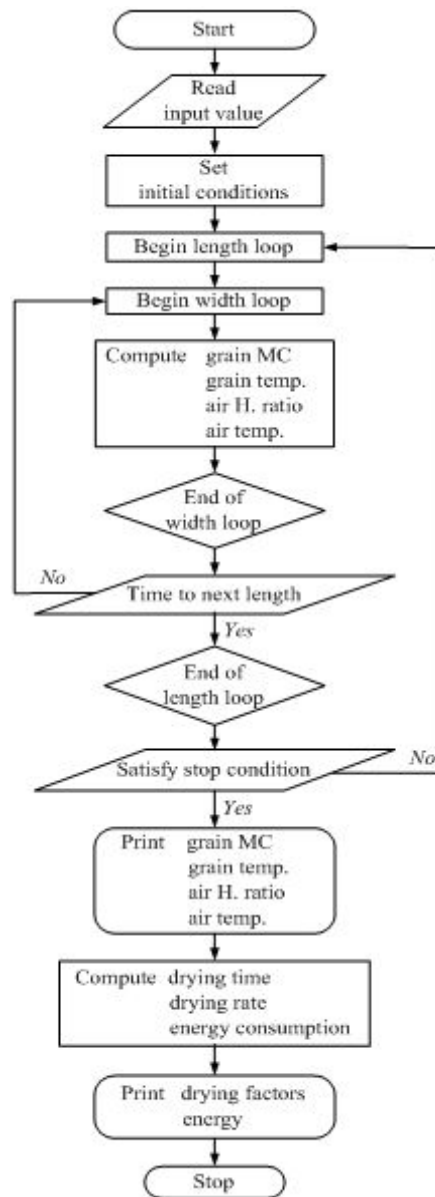


그림 3-27. 시뮬레이션 프로그램의 플로우 차트

그림 3-27에는 다목적 건조 시뮬레이션 프로그램의 플로우차트를 나타낸 것이며, MATLAB 7.3.0 (R2006b version)를 사용하여 GUI (Graphical User Interface)를 강조하여 사용자의 편의성 제공하였다.

그림 3-28은 다목적 건조 시뮬레이션 프로그램의 메인화면을 나타낸 것이며, 곡물종류에서 벼, 유채, 보리, 콩 및 옥수수의 곡물 종류를 먼저 선택할 수 있도록 하였다. 곡물의 종류가 선택되면 곡물의 기본정보를 이용하여 건조 시뮬레이션 프로그램이 구동하도록 하였다.

그림 3-29는 다목적 건조 시뮬레이션 프로그램의 입력화면을 나타낸 것이며, 곡물 종류를 선택한 후 입력데이터(초기함수율 및 곡온, 외기온도 및 상대 습도, 목표함수율 및 산물밀도, 열풍온도 및 건조실 높이, 템퍼링부 크기, 유 하속도 및 송풍량)를 입력받는 화면이다.

그림 3-30은 다목적 건조 시뮬레이션의 프로그램의 결과화면을 나타낸 것이며, 화면 오른쪽 하단에 시뮬레이션 결과(순환횟수, 최종함수율, 건감률, 소요동력, 제수율, 소요에너지, 동할율 및 발아율)를 나타내었다.

그림 3-31은 다목적 건조 시뮬레이션 프로그램의 결과 보고서를 나타낸 것이며, 결과화면의 자세한 내용을 가공하기 편한 EXCEL(Microsoft, USA)과 일로 제공하여 결과화면만으로 부족한 건조의 순환별 건조조건 및 품질에 대해서 자세한 내용을 표현하였다.



그림 3-28. 다목적 건조기 시뮬레이션 프로그램 메인 화면



벼 건조 시뮬레이션 프로그램 화면



유채종자 건조 시뮬레이션 프로그램 화면



보리 건조 시뮬레이션 프로그램 화면



콩 건조 시뮬레이션 프로그램 화면



옥수수 건조 시뮬레이션 프로그램 화면

그림 3-29. 다목적 건조기 시뮬레이션 프로그램 입력 화면



그림 3-30. 다목적 건조기 시뮬레이션 프로그램 결과 화면

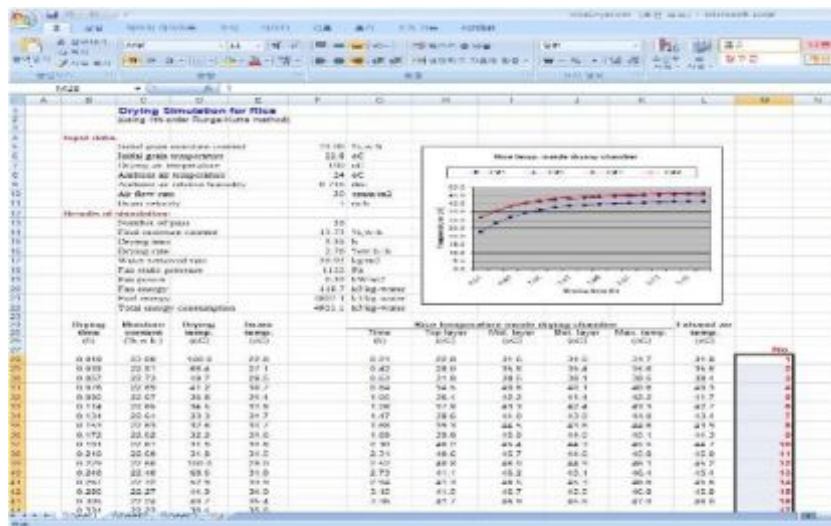


그림 3-31. 다목적 건조기 시뮬레이션 결과 보고서 화면

3. 다목적 건조기 시뮬레이션 검증

표 3-20은 다목적 건조기 시뮬레이션 프로그램의 검증을 위해 베틀 실험 조건을 나타낸 것이며, 건조온도 110℃, 초기곡온 5.4℃, 평균 외기온도 4.5℃ 및 외기습도 35.0%였다. 또한, 곡물순환속도는 4.5m/h, 송풍량은 16.1cmm/m³로 하였다.

표 3-20. 시뮬레이션 검증을 위한 건조 조건

구분	
외기온도(℃)	4.5
외기습도(%)	35.0
건조실높이(m)	0.5
초기함수율(%d.b.)	28.5
초기 곡온(℃)	5.4
열풍온도(℃)	110
송풍량(cmm/m ³)	16.1
곡물유하속도(m/h)	4.5

표 3-21은 성능평가의 실측데이터와 시뮬레이션에 의한 예측데이터를 비교한 표이며, 표에서와 같이 실험데이터와 예측데이터는 건조소요시간은 8.5 및 8.6시간, 동할율은 3.6% 및 4.2%, 로 잘 일치하였으나 건조속도는 1.09 및 1.35%,d.b./h, 최종함수율은 2%,d.b.의 차이 및 제수율은 5.3 및 3.7kg/h로 약간의 차이가 나타났다.

표 3-21. 시뮬레이션 검증을 위한 건조 조건

구분	실험결과	시뮬레이션결과
건조시간(h)	8.5	8.6
최종함수율(%d.b.)	18.9	17.2
건조속도(%d.b./h)	1.09	1.35
동할율(%)	3.6	4.2
제수율(kg/h)	5.3	3.7

그림 3-32는 함수율의 성능평가 실험데이터와 시뮬레이션에 의한 예측데이터를 비교한 것이며, 그림에서와 같이 초기함수율은 28.5%로 건조 3시간 후 실측데이터 및 예측데이터는 각각 23.4% 및 23.6%로 잘 일치하였으며, 건조종료 시점인 8시간 후에는 각각 17.2% 및 18.6%,d.b.로 나타났다. 함수율의 실측치와 예측치의 결정계수는 0.9665로 나타나 잘 일치하는 것으로 나타났다.

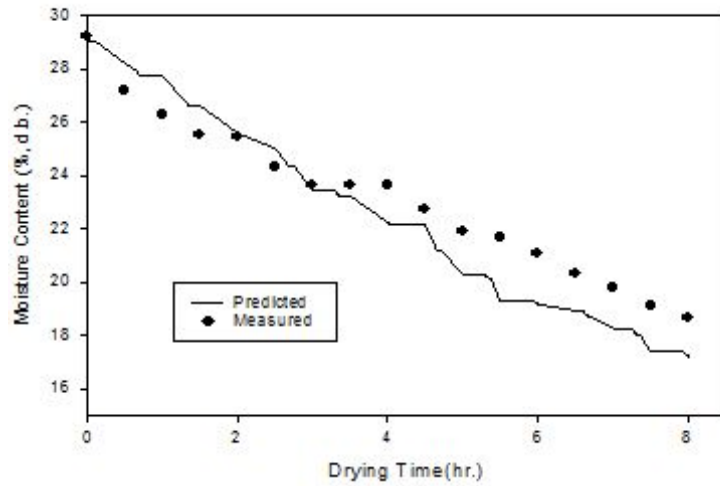


그림 3-32. 건조 중 벼의 함수율 실험데이터와 예측데이터의 비교.

표 3-22는 다목적 건조기 시뮬레이션 프로그램의 검증을 위해 유채종자 실험 조건을 나타낸 것이며, 건조온도는 110℃, 초기곡온은 20.0℃, 평균 외기온도는 25.4℃, 외기습도는 71.6%로 하였다. 또한, 곡물순환속도는 4.5m/h, 송풍량은 8.1cmm/m³로 하였다.

표 3-22. 시뮬레이션 검증을 위한 건조 조건

구분	
외기온도(°C)	25.4
외기습도(%)	71.6
건조실높이(m)	0.5
초기함수율(%d.b.)	23.0
초기 곡온(°C)	20.0
열풍온도(°C)	110
송풍량(cmm/m ³)	8.1
곡물유하속도(m/h)	4.5

표 3-23은 성능평가의 실측데이터와 시뮬레이션에 의한 예측데이터를 비교한 표이며, 표에서와 같이 실험데이터와 예측데이터는 건조소요시간은 4.25시간으로 동일하였으며, 건조속도는 2.80 및 2.95%_{d.b.}/h로 잘일치하였으나 발아율감소는 5.3% 및 3.5% 및 소요에너지는 4,831 및 4,417kg/h로 약간의 차이가 나타났다. 발아율은 초기 시료의 이동거리 먼 관계로 인하여 초기 발아율이 낮아 전체적으로 실험 발아율이 낮고 소요에너지도 차이가 나타난 것으로 판단된다.

표 3-23. 시뮬레이션 검증을 위한 건조 조건

구분	실험결과	시뮬레이션결과
건조시간(h)	4.25	4.25
최종함수율(%d.b.)	11.4	10.8
건조속도(%d.b./h)	2.80	2.95
발아율(%)	94.7	96.5
소요에너지(kJ/kg-water)	4831	4417

그림 3-33은 함수율의 성능평가 실험데이터와 시뮬레이션에 의한 예측데이터를 비교한 것이며, 그림에서와 같이 초기함수율은 23.0%로 유채 종자의 건조가 전체적으로 잘 일치 하였으며, 건조종료 시점인 4.25시간 후에는 각각 11.4% 및 10.8%로 최종함수율도 비교적 비슷한 값을 나타냈다. 함수율의 실측치와 예측치의 결정계수는 0.997 및 RMSE는 0.9506%로 잘 일치하는 것으로 나타났다.

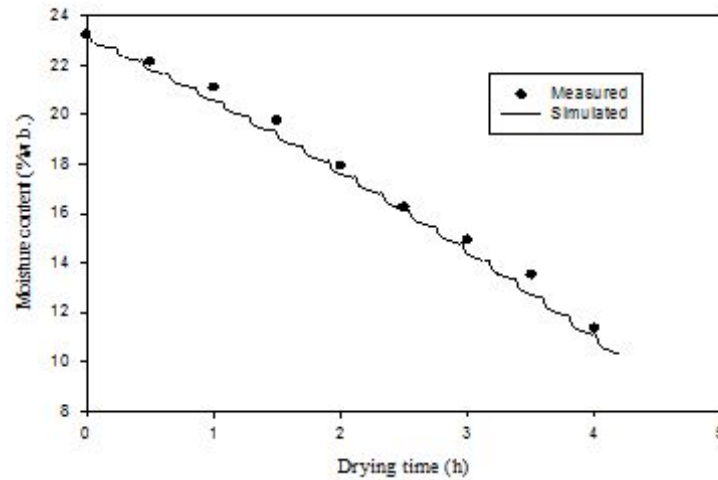


그림 3-33. 건조 중 유채 종자의 함수율 실험데이터와 예측데이터의 비교.

전체적인 곡물 및 유채종자의 시뮬레이션과 실험데이터는 비교적 잘 일치하였으며, 개발된 시뮬레이션을 이용하여 다목적 건조기의 설계인자를 구명하는데 이용하였다.

4. 결과 및 요약

다목적 건조 시뮬레이션 프로그램은 MATLAB 7.3.0 (R2006b version)와 GUI (Graphical User Interface)를 사용하여 사용자의 편의성을 강조하였다. 시뮬레이션 프로그램의 기본 구조는 Main program 및 5개의 곡물의 기본 정보 Program과 공기의 조성을 변경할 수 있는 13개의 Sub program으로 구성되어 개발하였다.

곡물종류를 선택 후 입력데이터(초기함수율 및 곡온, 외기온도 및 상대습도, 목표함수율 및 산물밀도, 열풍온도 및 건조실 높이, 템퍼링부 크기, 유하속도 및 송풍량)를 입력받아 시뮬레이션 결과(순환횟수, 최종함수율, 건감률,

소요동력, 제수율, 소요에너지, 동할율 및 받아들)를 나타내었다.

개발한 시뮬레이션 모델의 적합성을 검증하기 위하여 벼 및 유채종자를 실험용 건조기를 이용하여 건조실험을 수행하였다. 실험 결과 시뮬레이션 프로그램의 예측한 결과와 실험 결과가 잘 일치하였으며, 함수율의 실측과 예측의 결정계수는 0.9665이상으로 잘 일치하는 것으로 나타났다.

제 3 절 다목적 건조기 시뮬레이션에 의한 최적 설계 및 적정 건조조건

1. 다목적 건조기 최적화

개발할 다목적 곡물 및 유채종자건조기는 주요곡물인 벼 이외에 유채종자, 보리, 옥수수 및 콩의 건조를 위한 것이며, 주요 곡물인 벼의 설계인자에 중점을 두어 건조기의 건조실의 높이 및 템퍼링실/건조실비를 결정하여 설계에 사용하였다. 다목적 순환식 곡물건조기의 최적화 목표가 될 수 있는 것은 건조속도 최대화, 소요에너지 최소화 및 품질 극대화 등 3가지로 구분할 수 있으나, 건조속도 최대화를 목적함수로 두고 품질 극대화와 소요에너지 최소화는 제한조건으로 두었다. Box의 Complex 알고리즘을 기본으로 프로그램을 작성하였으며, 다목적 순환식 곡물건조기 시뮬레이션 프로그램을 서브프로그램으로 구성하였다. 입력데이터는 외기조건, 곡물조건(함수율, 곡물량, 초기곡온 등), 건조기 조건(건조실 치수, 송풍량, 유하속도 등)이었으며, 출력값은 최적 건조실 치수, 송풍량, 유하속도 조건, 건조 후 품질, 함수율, 소요에너지 등이다.

최적화 알고리즘을 이용하여 작성된 프로그램의 수행능력은 건조와 관련된 부프로그램 대신 알고 있는 최소치를 갖는 목적함수와 제한조건을 설정하여 검증하였으며, 검증결과는 다음 표 3-24와 같아 주어진 제한조건하에서 목적함수의 최소치를 탐색할 수 있었다.

표 3-24. Box's Complex을 이용한 최적화 프로그램의 검정결과

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

2. 설계인자에 따른 건조 및 품질특성

개발할 다목적 곡물 및 유채종자 건조기의 성능목표는 건조속도 벼 기준 1.0~1.2%/h 범위로 기존 횡류형 순환식 건조기의 0.7%/h에 비해 45~74% 정도 증대되면서 에너지 소비가 적고, 동할율은 열풍건조기 성능검사 규격과 동일한 5.0%이하를 설계 목표로 선정하였다.

그림 3-34는 송풍량의 변화에 따른 건조특성을 나타낸 것으로서, 그림에서와 같이 송풍량이 증가할수록 소요에너지, 송풍기 동력, 건조속도 및 동할율이 증가하는 것으로 나타났으며, 풍량비가 높을수록 건조속도는 다소 증가하였지만 소요에너지는 증가하였다. 동할율은 증가하였으며 송풍량이 25m³/min·m²을 초과할 때 목표 동할율 5.0%를 초과하였다. 따라서, 송풍량이 증가하면 소요에너지는 급격히 증가하는 반면에 건조속도는 완만하게 증가되어 건조능력의 저하가 발생되며, 소요에너지를 고려한 송풍량 결정이 필요하다.

그림 3-35는 곡물유하속도의 변화에 따른 건조특성을 나타낸 것으로서 그림에서와 같이 유하속도가 증가할수록 건조속도와 동할율은 낮아지고 제수율은 크게 감소하는 것으로 나타났다. 유하속도가 증가할수록 건조부에서 충분한 열풍이 노출되지 않아 나타나는 현상으로 판단되며, 따라서 다목적 곡물건조기에서의 적절한 유하속도는 3.0~4.0 m/h 범위가 적절하였다.

그림 3-36은 열풍온도 변화에 따른 건조특성을 나타낸 것으로서 그림에서와 같이 건조온도가 증가할수록 동할율은 증가하였는데 110℃이하에서는 4.0%이하를 유지하였으며, 건조온도가 110℃를 초과할 때 동할율은 급격히 증가하여 5.0%이상으로 나타났다. 따라서, 건조기의 열풍온도는 동할율 5%미만을 유지하기 위하여 건조속도를 고려해봤을 때 120℃이하가 적당한 것으로 나타났다.

그림 3-37은 건조실 높이 변화에 따른 건조특성을 나타낸 것으로서 건조실 높이가 증가할수록 건조속도 및 제수율은 감소하고 송풍기 동력 및 동할율

은 증가하는 것으로 나타났다.

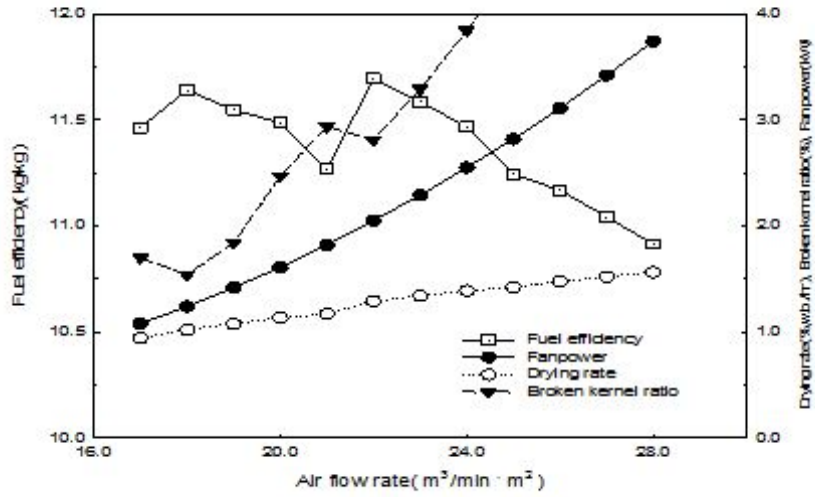


그림 3-34. 송풍량의 변화에 따른 건조특성.

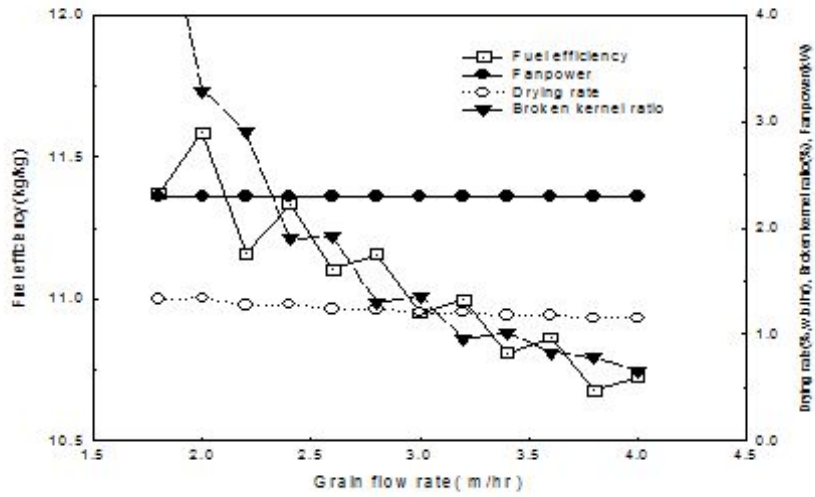


그림 3-35. 곡물 유하속도의 변화에 따른 건조특성.

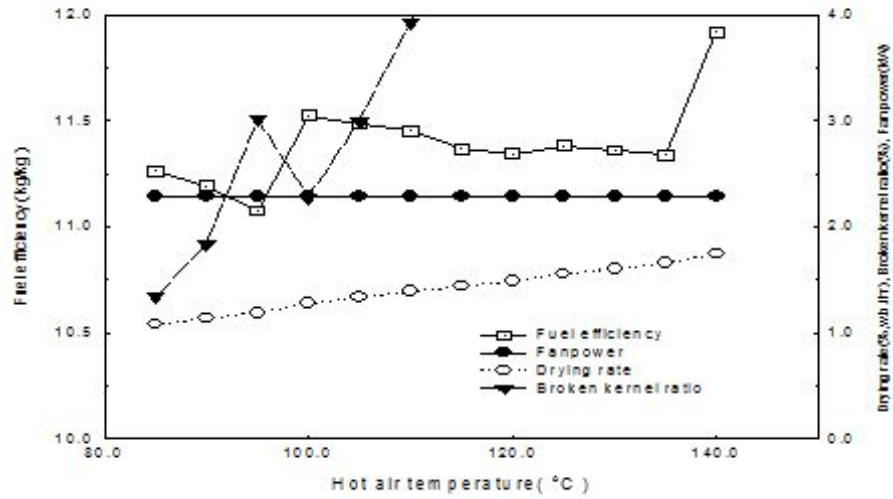


그림 3-36. 열풍온도변화에 따른 건조특성.

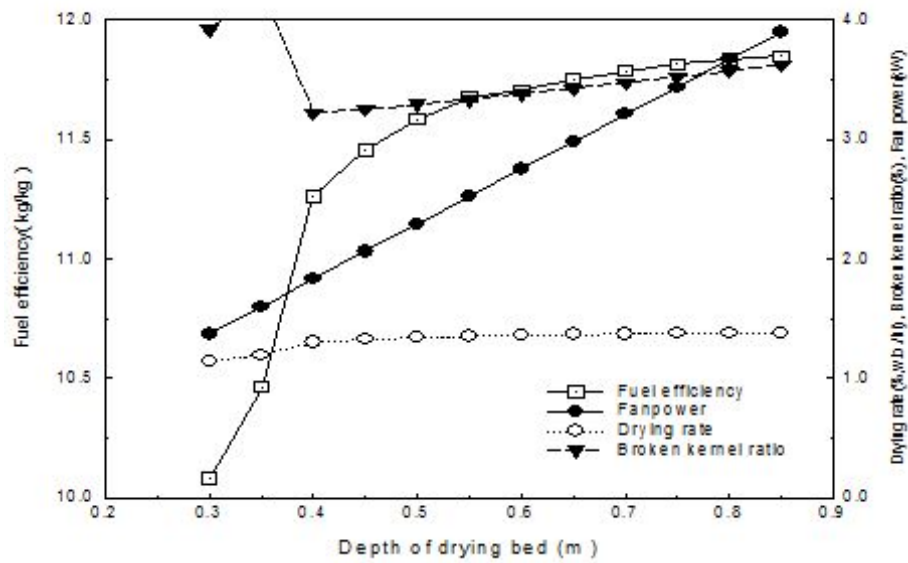


그림 3-37. 건조실 높이에 따른 건조특성.

3.최적 설계요인 결정

최적화의 목표는 건조속도를 기준으로 하였으며, 건조속도를 최대화하는 설계인자를 결정하였다. 동할율을 5.0%이하로 하는 제한 조건을 설정하고 설계인자를 결정하였으며, 명시적 제한 조건과 암시적 제한조건을 다음 표 3-25와 같이 설정하였다. 본기 다목적 건조실의 높이는 0.4~0.7m가 가장 이상적으로 최적 설계요인으로 결정되었으며, 또한 템퍼링 비 / 건조실 비는 1 : 4~6을 사용할 경우 템퍼링실의 용량 결정이 가능하였다.

표 3-25. 최적화 제한조건.

명시적 제한조건	암시적 제한조건
$0.4 \leq \text{건조실 높이} \leq 0.7\text{m}$ $15 \leq \text{송풍량} \leq 30\text{cmm/m}^2$ $3.0 \leq \text{곡물 유하속도} \leq 4.0\text{m/h}$	동할율 $\leq 5.0\%$

다목적 건조기 최적 설계요인의 결정은 벼를 목적으로 하였으며, 다목적 건조기의 벼의 작동조건은 표 3-26과 같으며, 송풍량은 24.99 cmm/m^2 , 적정 곡물유하속도는 2.99m/h , 적정 건조실 높이는 0.512m 로 건조할 경우 건조속도는 $1.21\%,\text{w.b./h}$ 로 나타났으며, 이는 순환식 횡류형 건조기의 $0.8\%,\text{w.b./h}$ 에 비하여 약 50%증가된 수준이었다.

표 3-26. 다목적 건조기의 벼의 작동조건 결정 결과.

○ 최대건조속도(%w.b./h)	1.21
○ 건조기 설계 최적화	
- 송 풍 량(cmm/m ²)	25.0
- 곡물 유하 속도(m/h)	3.0
- 열 풍 온 도(°C)	0.5

4. 다목적 건조기의 각 곡물 및 유채종자 적정 작동조건

가. 유채종자 건조의 작동조건

그림 3-38은 다목적 건조기 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 유채종자의 건조 시 송풍량 20~40cmm/m²의 변화에 따른 건조특성을 나타낸 것으로서 건조속도는 송풍량이 커지면 증가하나 에너지 소비율이 커지게 되므로 에너지 소비율과 건조속도를 고려할 경우 송풍량은 30cmm/m²이 가장 적절한 것으로 판단되며, 건조속도는 2.76%/h 및 발아율 95.1%가 가능하였다.

그림 3-39는 다목적 건조기 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 유채종자의 유하속도 2.5~5.5 m/h의 변화에 따른 건조특성을 나타낸 것으로서 유하속도가 빠를수록 건조속도 및 발아율은 증가하고 에너지소비율 및 건조시간이 길어지는 결과가 나타났다. 유채종자의 다목적 건조기의 적절한 유하속도는 4.5m/h가 적절한 것으로 판단되며, 건조속도는 2.73%/h 및 발아율이 95%이상 결과를 나타낼 것으로 예상되었다.

그림 3-40은 건조 열풍온도의 변화에 따른 건조특성을 나타낸 것으로서 건조온도는 80~125°C로 변화에 따라 열풍온도가 증가할수록 건조속도는 증가하였고, 소요에너지는 건조시간이 짧아짐으로 인하여 소요에너지는 작게 증

가하였으나, 발아율은 현저히 감소한다는 것을 알 수 있었다. 건조속도 및 소요에너지를 고려할 경우 열풍온도는 110~115℃가 가장 적절한 것으로 판단되었다.

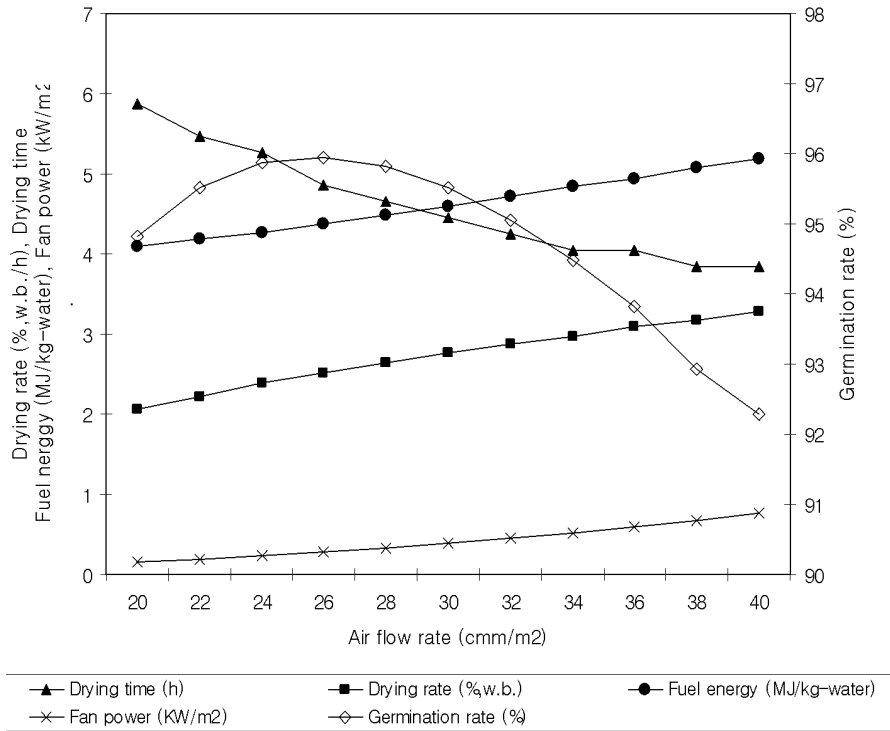


그림 3-38. 송풍량의 변화에 따른 유채종자의 건조특성.

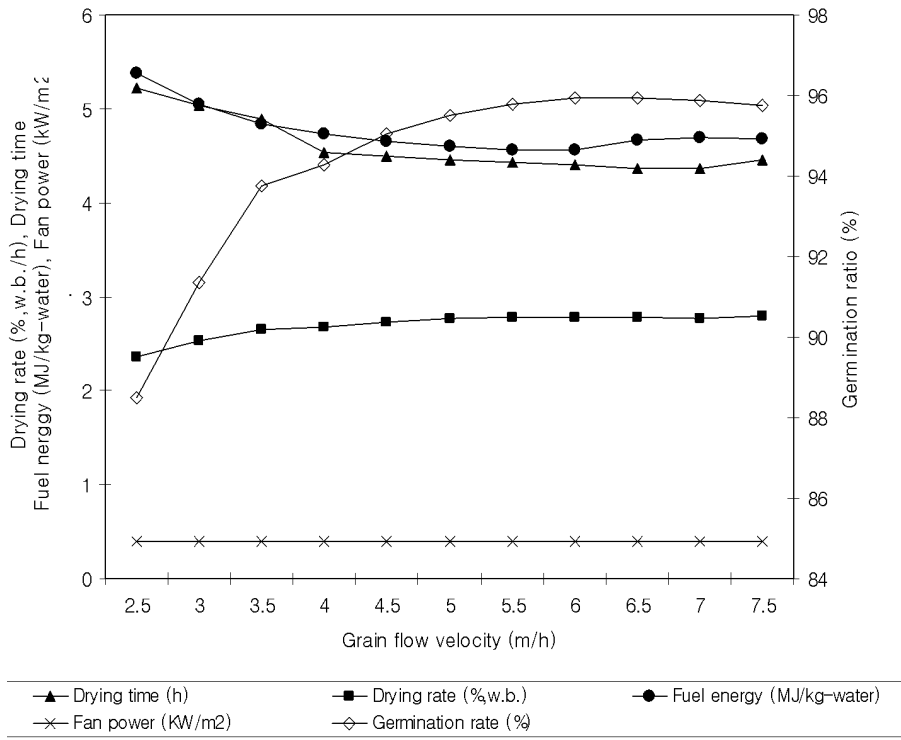


그림 3-39. 유하속도의 변화에 따른 유채종자의 건조특성.

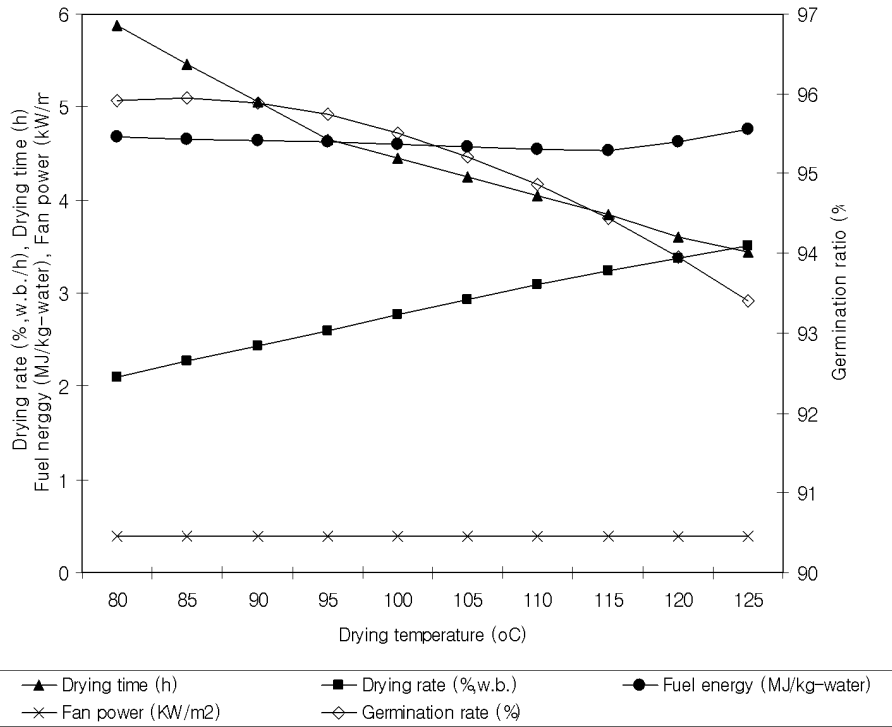


그림 3-40. 열풍온도의 변화에 따른 유채종자의 건조특성.

표 3-27은 다목적 건조기 유채종자 작동조건 결정 결과를 나타낸 것이며, 송풍량 30.0cmm/m², 유하속도 4.5m/h 및 열풍온도 110°C가 최고 건조속도, 낮은 소요에너지 및 높은 발아율 결과를 나타낼 것으로 판단된다.

표 3-27. 다목적 건조기 유채종자 작동조건 결정 결과

○ 건조기 설계 최적화	
- 송 풍 량(cmm/m ²)	30.0
- 곡물 유하 속도(m/h)	4.5
- 열 풍 온 도(°C)	110

나. 보리 건조의 작동조건

그림 3-41은 다목적 건조기 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 보리의 건조시 송풍량 20~35cmm/m²의 변화에 따른 건조특성을 나타낸 것으로서 건조속도는 송풍량이 커지면 증가하나 에너지소비율 및 순환량이 증가하게 된다. 에너지 소비율과 건조속도를 고려할 경우 송풍량은 26cmm/m²이 가장 적절한 것으로 판단되며, 건조속도는 2.29%/h가 가능하였다.

그림 3-42는 다목적 건조기 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 보리의 유하속도 2.0~8.0 m/h의 변화에 따른 건조특성을 나타낸 것으로서 유하속도가 빠를수록 건조속도 및 순환량은 증가하였다. 순환량이 증가되면 열풍과의 접촉시간이 짧게 되어 순환속도는 증가되었다. 보리의 다목적 건조기의 적절한 유하속도는 5.0m/h가 적절한 것으로 판단되며, 건조속도는 2.48%/h의 결과를 나타낼 것으로 예상되었다.

그림 3-43은 건조 열풍온도의 변화에 따른 건조특성을 나타낸 것으로서 건조온도는 80~150℃로 변화에 따라 열풍온도가 증가 할수록 건조속도는 증가하였고 소요에너지는 건조시간이 짧아짐으로 인하여 소요에너지는 작게 증가하였으며, 열풍온도는 110~115℃가 가장 적절한 것으로 판단되었다.

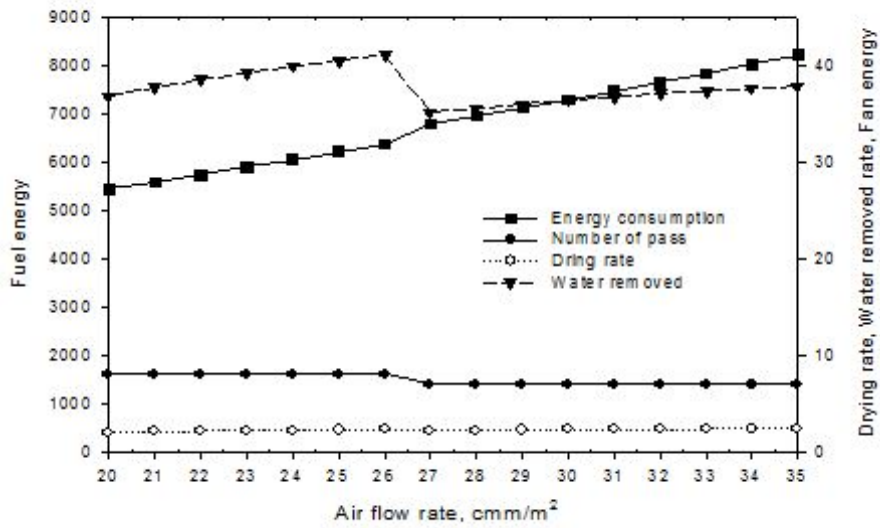


그림 3-41. 송풍량의 변화에 따른 보리의 건조특성.

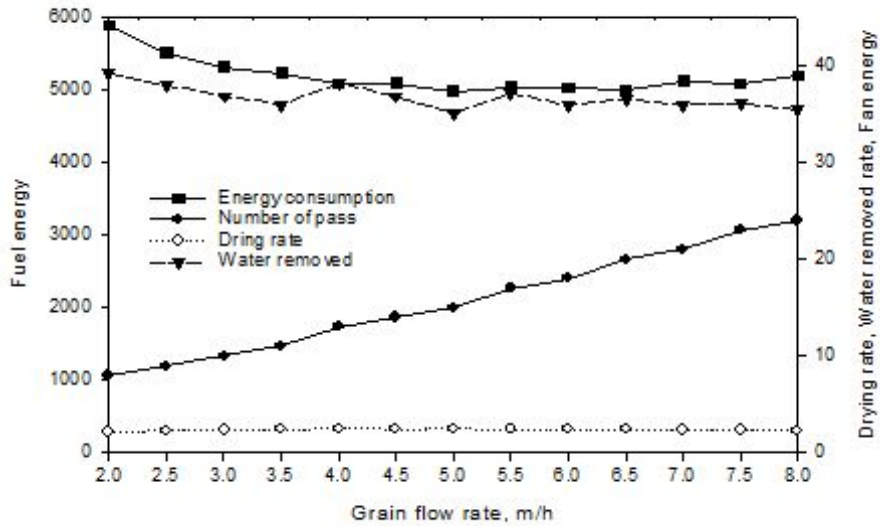


그림 3-42. 유하속도의 변화에 따른 보리의 건조특성.

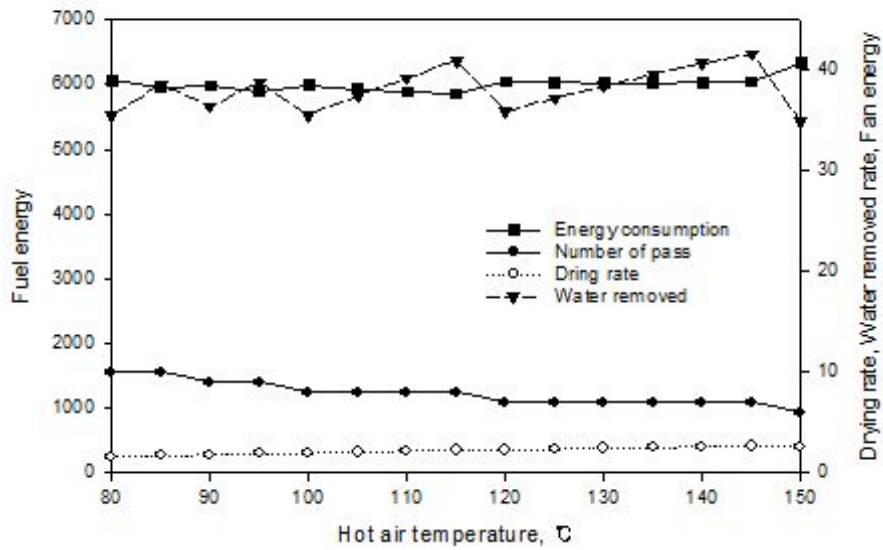


그림 3-43. 열풍온도의 변화에 따른 보리의 건조특성.

표 3-28은 다목적 건조기 보리 작동조건 결정 결과를 나타낸 것이며, 송풍량 26.0cmm/m², 유하속도 4.5m/h 및 열풍온도 110°C가 최고 건조속도, 낮은 소요에너지 및 높은 발아율 결과를 나타낼 것으로 판단된다.

표 3-28. 다목적 건조기 보리 작동조건 결정 결과.

○ 건조기 설계 최적화	
- 송 풍 량(cmm/m ²)	26.0
- 곡물 유하 속도(m/h)	4.5
- 열 풍 온 도(°C)	110

다. 옥수수 건조의 작동조건

옥수수는 낱알의 표면적 및 무게가 가장 큰 곡물로 인하여 소요에너지에 비하여 제수율이 높게 나타났으며, 수확 직후 초기 함수율이 높은 특징이 있다.

그림 3-44는 다목적 건조기 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 옥수수의 건조 시 송풍량 20~35 cmm/m²의 변화에 따른 건조특성을 나타낸 것으로서 건조속도 및 에너지 소비량 등 모든 조건이 증가하는 경향을 나타냈으며, 소요 에너지를 고려할 경우 송풍량은 25cmm/m²미만으로 하는 것이 가장 적절한 것으로 판단되며, 건조속도는 2.67%/h가 가능하였다.

그림 3-45는 다목적 건조기 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 옥수수의 유하속도 2.0~8.0 m/h의 변화에 따른 건조특성을 나타낸 것으로서 유하속도가 빠를수록 건조속도 및 순환량은 증가하였다. 옥수수 다목적 건조기의 적절한 유하속도는 3.5m/h가 적절한 것으로 판단된다.

그림 3-46은 건조 열풍온도의 변화에 따른 건조특성을 나타낸 것으로서 건조온도는 80~150°C로 변화에 따라 열풍온도가 증가할수록 건조속도는 증가하였고 열풍온도는 120°C가 가장 적절한 것으로 판단되었다.

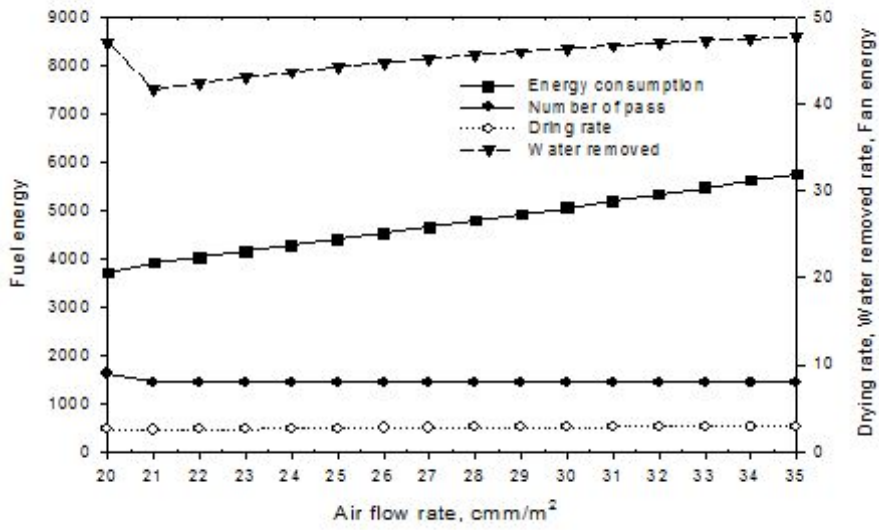


그림 3-44. 송풍량의 변화에 따른 옥수수의 건조특성.

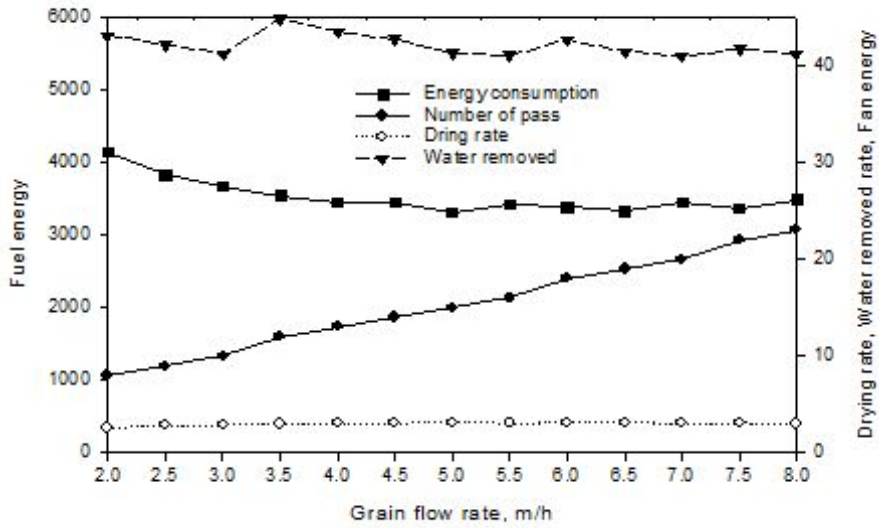


그림 3-45. 유하속도의 변화에 따른 옥수수의 건조특성

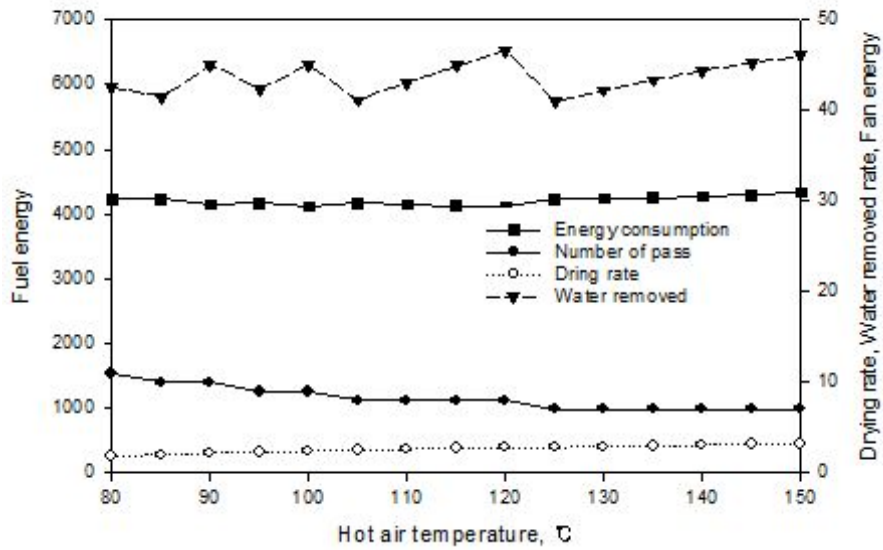


그림 3-46. 열풍온도의 변화에 따른 옥수수의 건조특성.

표 3-29는 다목적 건조기 옥수수 작동조건 결정 결과를 나타낸 것이며, 송풍량 25.0cmm/m², 유하속도 3.5m/h 및 열풍온도 120°C가 최고 건조속도, 낮은 소요에너지 및 높은 발아율 결과를 나타낼 것으로 판단된다.

표 3-29. 다목적 건조기 옥수수 작동조건 결정 결과

○ 건조기 설계 최적화	
- 송 풍 량(cmm/m ²)	25.0
- 곡물 유하 속도(m/h)	3.5
- 열 풍 온 도(°C)	120

라. 콩 건조의 작동조건

그림 3-47은 다목적 건조기 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 콩의 건조시 송풍량 $20\sim 35\text{cm}^3/\text{m}^3$ 의 변화에 따른 건조특성을 나타낸 것으로서 옥수수의 건조조건과 비슷한 경향을 나타낸다. 소요에너지를 고려할 경우 송풍량은 $25\text{cm}^3/\text{m}^3$ 미만으로 하는 것이 가장 적절한 것으로 판단되며, 건조속도는 $2.79\%/h$ 가 가능하였다.

그림 3-48은 다목적 건조기 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 콩의 유하속도 $2.0\sim 8.0\text{ m/h}$ 의 변화에 따른 건조특성을 나타낸 것으로서 소요에너지를 고려할 경우 콩의 다목적 건조기의 적절한 유하속도는 5.0m/h 가 적절한 것으로 판단된다.

그림 3-49는 건조 열풍온도의 변화에 따른 건조특성을 나타낸 것으로서 건조온도는 $80\sim 150^\circ\text{C}$ 로 변화에 따라 열풍온도가 증가 할수록 건조속도도 증가하지만 콩은 열에 약한 곡물이므로 열손상을 최대한 줄일 수 있는 낮은 열풍온도는 105°C 가 가장 적절한 것으로 판단되었다.

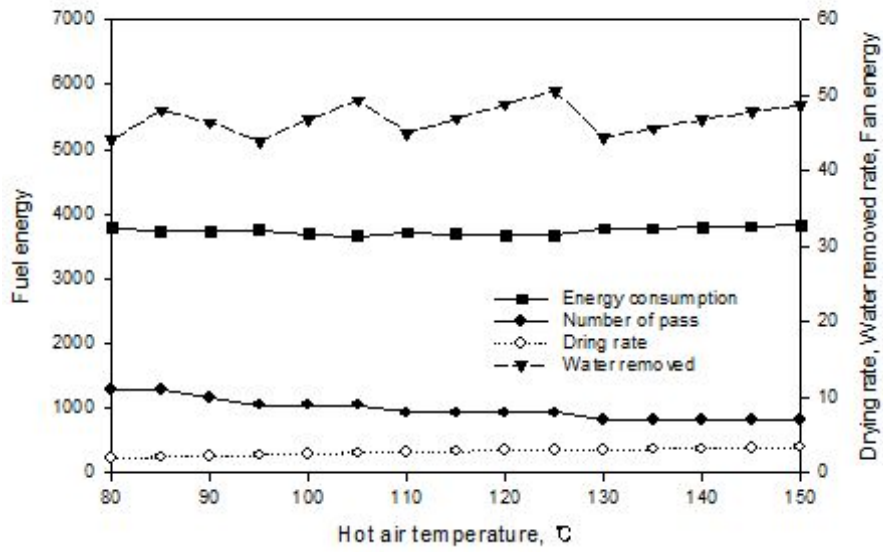


그림 3-47. 송풍량의 변화에 따른 콩의 건조특성

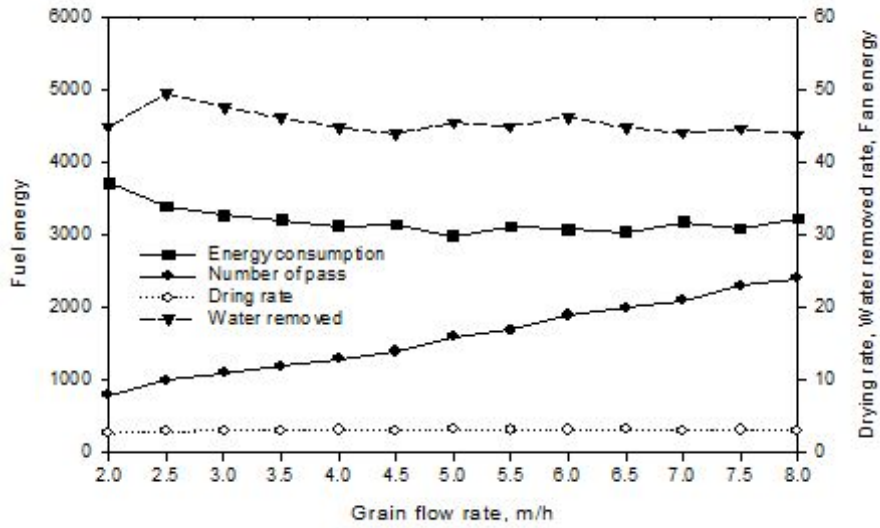


그림 3-48. 유하속도의 변화에 따른 콩의 건조특성

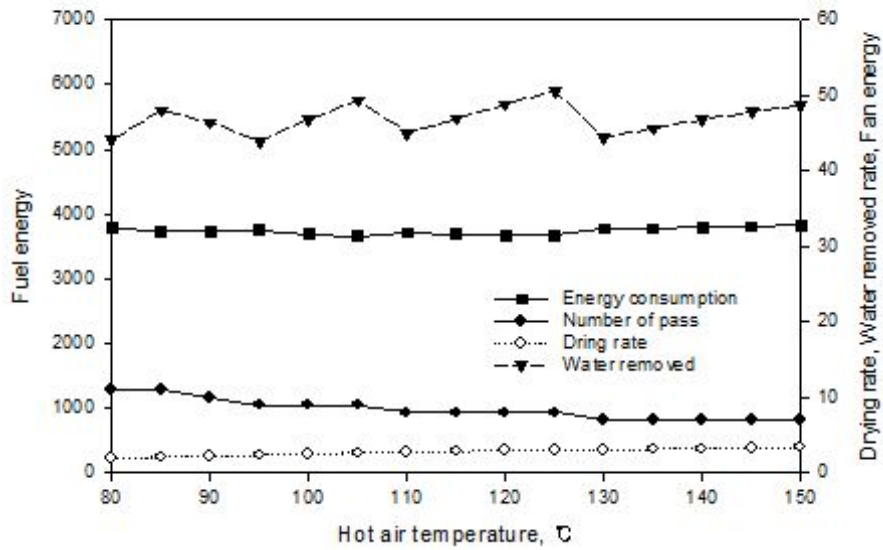


그림 3-49. 열풍온도의 변화에 따른 콩의 건조특성

표 3-30은 다목적 건조기 콩 작동조건 결정 결과를 나타낸 것이며, 송풍량 25.0cmm/m², 유하속도 5.0m/h 및 열풍온도 105℃가 최고 건조속도, 낮은 소요에너지 및 높은 발아율 결과를 나타낼 것으로 판단된다.

표 3-30. 다목적 건조기 콩 작동조건 결정 결과

○ 건조기 설계 최적화	
- 송 풍 량(cmm/m ²)	25.0
- 곡물 유하 속도(m/h)	5.0
- 열 풍 온 도(℃)	105

5. 결과 및 요약

개발할 다목적 곡물 및 유채종자건조기는 주요곡물인 벼 이외에 유채종자, 보리, 옥수수 및 콩의 건조를 위한 것이며, 주요 곡물인 벼를 설계인자에 중점을 두어 건조기 건조실의 높이 및 템퍼링실/건조실비를 결정하여 설계에 사용하였다.

개발할 다목적 곡물 및 유채종자 건조기의 성능목표는 건조속도가 벼 기준 1.0~1.2%/h 범위로 기존 횡류형 순환식 건조기의 0.7%/h에 비해 45~74% 정도 증대되면서 에너지 소비가 적고, 동할율은 열풍건조기 성능검사 규격과 동일한 5.0%이하를 설계 목표로 선정한 결과 송풍량 25m³/min·m²이하, 적정 유하속도는 3.0~4.0 m/h 범위 및 열풍온도는 120℃이하가 적당하였다.

그림 3-37은 건조실 높이 변화에 따른 건조특성을 나타낸 것으로서 건조실 높이가 증가할수록 건조속도 및 체수율은 감소하고 송풍기 동력 및 동할율은 증가하는 것으로 나타났다.

표 3-31은 다목적 건조기 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 벼, 유채종자, 보리, 옥수수 및 콩의 작동조건을 나타낸 것이며, 건조기의 설계요인은 건조실 높이 0.5m와 건조실 : 템퍼링실의 비 1:4~6을 고려하여 건조기 외형을 결정해야 한다.

표 3-31. 다목적 건조기의 곡물 및 유채종자의 작동조건 결과

	벼	유채종자	보리	옥수수	콩
건조온도 (°C)	110	110	110	120	105
송풍량 (cmm/m ²)	25.0	30.0	26.0	25.0	25.0
곡물유하속도 (m/h)	3.0	4.5	4.5	3.5	5.0

제 4 절 실험용 다목적 건조기 제작 및 성능평가

1. 서언

국내에서 널리 사용되고 있는 건조기형식은 배치식 횡류형 건조기가 주로 사용되고 있으며, 건조와 템퍼링이 반복하면서 건조가 진행된다. 건조기의 구조는 건조실(drying chamber), 템퍼링실(tempering chamber), 곡물 순환용 버킷엘리베이터, 곡물 배출장치, 가열기, 가열송풍기, 배진 송풍기 및 조작반으로 구성되어 있다.

건조기는 템퍼링실부터 건조기까지 중력에 의해 유하하면서 건조가 이루어지기 때문에 건조부의 통과시간 즉, 곡물의 유하속도에 따라 건조특성이 크게 달라진다. 따라서 순환식 건조기에서 건조실 용량 및 템퍼링실 용량의 비율, 곡물의 유하속도, 송풍량, 건조실 통과 열풍온도 등은 건조에 미치는 중요한 설계인자로서 적절한 설계기준이 요구된다.

따라서 본 연구의 목적은 실험용 다목적 건조기를 설계·제작하고 이를 이용하여 유채종자, 보리, 옥수수, 콩 및 벼를 대상으로 건조실험을 수행하여 품질 특성을 구명하는데 있으며, 구체적인 목적은 다음과 같다.

가. 용량 약 70kg 규모의 실험용 다목적 건조기를 설계·제작하여 실험을 수행한다.

나. 곡물의 종류별 유채종자, 보리, 옥수수, 콩 및 벼를 대상으로 성능을 평가한다.

2. 실험방법

가. 기본설계

그림 3-50은 실험용 다목적 건조기 설계도의 기본 계략도를 나타낸 것이며, 높이를 최대한 낮게 하여 실험실 내부에서도 실험이 가능하도록 설계하였다. 그림에서와 같이 템퍼링실을 통하여 곡물이 하강하여 건조실에서 열풍과 곡물의 합류되어 건조가 이루어지며, 열풍은 배출되고 하강하여 버킷엘리베이터를 이용하여 목표함수율에 도달할 때까지 순환하며 건조를 마치도록 설계하였다.

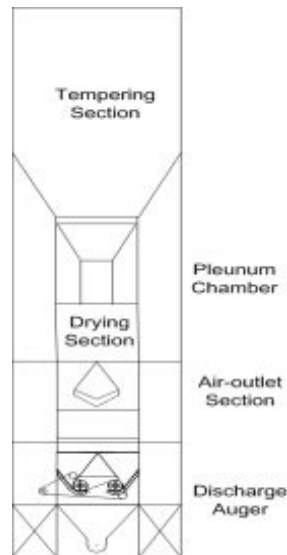


그림 3-50. 다목적 건조기 기본 구조

실험용 건조기의 용량(건조부+템퍼링부)은 곡물 및 유채종자 70kg수준으로 하였으며, 총 용적은 다음 식 3-53을 이용하여 구한 결과 같은 수준이었다. 건조부와 템퍼링부의 비율(1 : 4~6)과 배출부의 용량을 감안하여 건조부

용량을 설계한 결과 약 0.036 m³ 수준이었으며, 기준 벼의 산물밀도 550 kg/m³일 경우 환산 시 20.0 kg, 유채종자로 환산시 560 kg/m³일 경우 20.3 kg수준이었다.

$$\text{건조기 용적} = \frac{\text{건조기용량}(kg)}{\text{벼의산물밀도}(kg/m^3)} \quad (3-53)$$

$$\begin{aligned} \text{건조부 용적} &= (\text{건조부용적}) + (\text{배풍실용적} - \text{배풍관사면각용적}) \\ &= [0.25 \times 0.25 \times 0.25] + [(0.4 \times 0.25 \times 0.25) - \\ &\quad (0.14 \times 0.121 \times 0.5 \times 0.25 \times 2)] \\ &= [0.015625] + [0.025 - 0.004235] \\ &= 0.03639(m^3) \end{aligned}$$

▷ 벼로 환산시 $0.03639 \times 550 \approx 20.0\text{kg}$

▷ 유채종자로 환산시 $0.03639 \times 560 \approx 20.3\text{kg}$

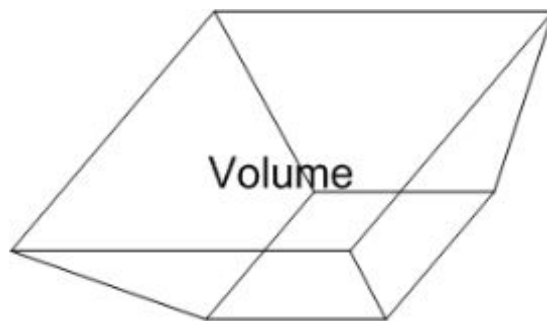


그림 3-51. 템퍼링부의 건조실 연결 구조

템퍼링부 (0.375×0.375×0.25 m, L×W×H)의 용적은 0.046(m³)이었으며, 벼 및 유채종자 중량으로 환산하면 53 kg 수준이었다(그림 3-51).

템퍼링단 확대 용적 = 큰사각뿔 - 작은사각뿔 = 0.010713 (m³)

▷ 벼 및 유채종자로 환산시 ≒ 18 kg

템퍼링 1단 용적 = 0.375×0.375×0.25(D×L×H)=0.0352

▷ 벼 및 유채종자로 환산시 ≒ 35 kg

유하속도는 다양한 유하속도 하에서 실험이 가능하도록 건조부 통과시간을 10분 기준으로 하여 설계하였다.

표 3-32. 유하속도에 따른 벼의 순환량

건조부 통과시간(분)	순환속도(m/hr)	순환량(kg/hr)
7	6.42	171.4
8	5.63	150
9	5	133.3
10	4.49	120
11	4.09	109
12	3.75	100

최적 송풍량은 약 24~25m³/min·m² 수준이었으나, 실험용은 송풍기의 효율을 고려하여 풍량비 30m³/min·m²을 기준으로 하였으며, 곡물 및 유채종자의 중량 70kg에 대하여 1.87cmm 수준으로 결정하였다. 건조기의 송풍저항은 벼 퇴적층의 송풍저항으로 구분할 수 있는데, 벼 층의 두께 0.45m, 풍속 0.5m/s 일 때 다음 식 3-54에 의해 계산한 결과, 148.77mmAq 수준이었다. 또한, 송풍량 1.87cmm과 정압 148.77mmAq를 갖는 송풍기의 축동력을 효율 60%수준에서 다음 식 3-55로 계산한 결과, 0.1kW 수준이었다.

▷ 단위 면적당 송풍량 : 30 m³/minm²

▷ 송풍량 : 30×(0.25×0.25) = 1.875 cmm

▷ 압력손실

$$\begin{aligned}\Delta P &= 9.8 \times 653.54 \times V^{1.2727} \times (D + \alpha) & (3-54) \\ &= 9.8 \times 653.54 \times 0.51^{1.2727} \times (0.45 + 0.1) \\ &= 1457.94 \text{ Pa}(148.77 \text{ mmAq})\end{aligned}$$

여기서, V= 건조부 겉보기 속도 = $\frac{1.875}{0.0625 \times 60} = 0.5 \text{ m/sec}$

A= 건조기 단면적 = 0.25 × 0.25 = 0.0625 m²

건조부 체적 = 0.03639 m³

D = 건조부 곡물층 높이 = 0.45 m

α = 부가적 손실(덕트, 후드) = 0.1

▷ 송풍기 동력

$$\text{-축동력} = \frac{P_{st}Q}{0.6} = \frac{1457.94 \times 1.875}{0.6 \times 60} = 75.9 \text{ W} \quad (3-55)$$

(송풍기의 효율 60%)

-실제 사용동력 = 75.9 W × 1.1 ≒ 0.1 kW

버너는 최대 약 110℃ 정도를 상승시킬 수 있는 용량을 기준으로 하였으며, 외기온도를 10℃로 가정할 경우 최대 가열열량은 3,960 kcal/hr이다. 현행 횡류형에서 적용하는 이론적인 최대 열량에 대한 실 버너열량 비율 75%를 적용하여 식3-56로 계산한 결과, 2,970 kcal/hr의 가열용량이 필요하였으며, 백등유(8,400kcal/L)를 사용하는 것으로 가정하고 연료소모량을 다음 식3-57로 구한 결과 0.35 L/hr정도가 필요하였다.

▷ 버너열량

-가열온도 : 10℃에서 120℃까지(ΔT : 110℃)

$$\begin{aligned} \text{-버너의 최대열량} &= \frac{60Q\rho C_p \Delta T}{\eta} = \frac{60 \times 1.875 \times 1.2 \times 0.24 \times 110}{0.9} \\ &= 3,960 \text{ kcal/hr} \end{aligned} \quad (3-56)$$

-버너의 실 적용열량 (75%적용): 2,970 kcal/hr

$$\frac{2,970}{8,400} = 0.35 \text{ L/hr} = 0.093 \text{ USgal/hr} \quad (3-57)$$

여기서, Q = 송풍량(m^3/min)

ρ = 공기밀도($\text{kg}(1.2 \text{ kg}/\text{m}^3)$)

C_p = 공기의 정압비열($0.24 \text{ kcal} / \text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}$)

Δt = 가열온도

η = 버너효율(소수)

나. 상세설계 및 제작

그림 3-52는 실험용 다목적 건조기 템퍼링실 탱크의 상세설계도, 건조실 내부에 건조가 이뤄지는 건조실의 상세설계도, 열풍과 곡물 및 유체종자의 건조 후 열풍만 배출 가능하도록 한 배기부 상세설계도 및 곡물의 유하속도 조정이 가능한 피드부오거의 상세설계도를 나타낸 것이다.

그림 3-53은 실험용 다목적 건조기 제어부 회로도를 나타낸 것이다.

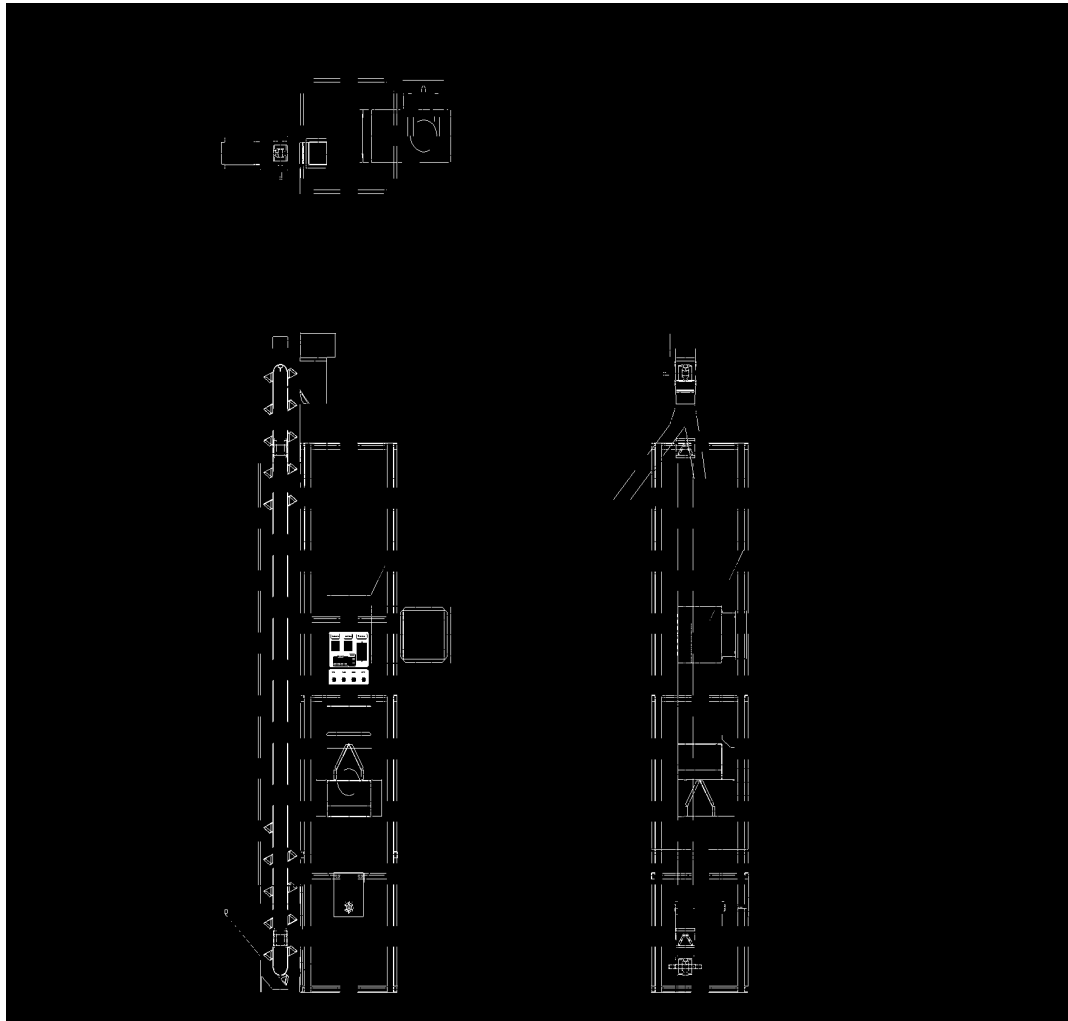
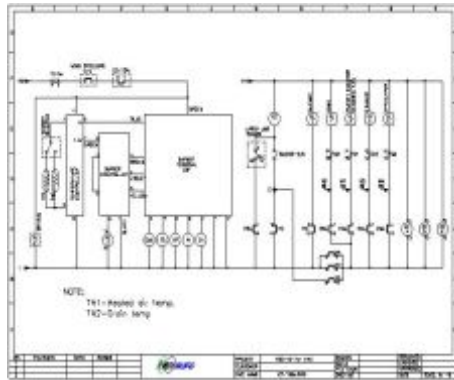
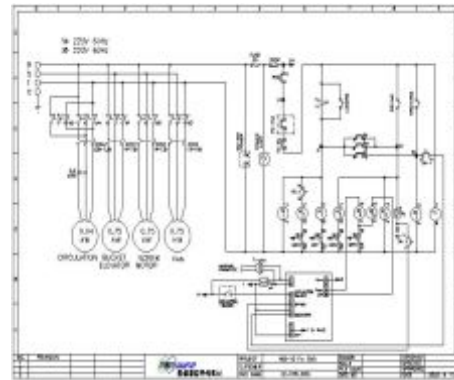


그림 3-52. 실험용 다목적 건조기 상세 설계도



a) 제어 회로도



b) 전기회로도

그림 3-53. 실험용 다목적 건조기 제어부 회로도

그림 3-54는 상세설계를 이용하여 제작한 실험용 다목적 건조기이며, 그림과 같이 건조기 전체를 스테인레스 강관을 이용하여 제작하였으며, 템퍼링실에 안내창을 설치하여 건조 중 곡물의 건조상태를 확인할 수 있었다.



그림 3-54. 제작된 실험용 다목적 건조기

다. 예비실험 및 보완

예비 건조실험을 유채종자를 이용한 2차례 실험 결과 건조속도는 만족할 수준으로 건조가 가능하였다. 그러나 건조 품질 분석 중 발아율이 급격히 낮아지는 문제점이 도출되었으며, 원인을 분석한 결과 열풍발생 장치 부근의 열전도로 인하여 건조부 외벽의 온도가 약 70℃ 이상이 되었다. 그런 이유로 건조기 내부에 벽면과 접촉한 곡물은 급격한 곡온 상승으로 품질이 저하되는 것으로 나타났다.

위와 같은 문제점을 해결하기 위하여 건조기 내벽에 단열재를 이용하여 열풍 외에 다른 열원이 접촉되지 못하도록 하였다. 그림 3-55는 건조기 내부의 열전도를 차단할 수 있는 단열재(3mm 두께의 나무판)를 설치한 그림이며, 건조부의 외벽 및 슈트내부에 단열재를 설치하여 실험에 사용하였다.

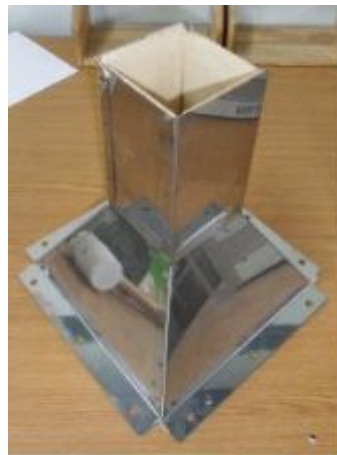


그림 3-55. 건조기에 단열재를 보강한 내부.

3. 결과 및 고찰

가. 유채종자 건조실험

공시재료는 전남 영광지역에서 수확한 “선망”품종의 유채종자를 사용하였으며, 초기 함수율은 24.6%,w.b.이었다. 건조 전 상태의 유채종자를 -10°C 이하의 냉동고에 보관하였으며, 실험 시작 48시간 전에 외부에 방치하여 주위 온도와 평형을 이루도록 한 후 실험에 사용하였다.

유채종자의 함수율 측정은 $130^{\circ}\text{C}-4\text{h}-10\text{g}$ 상압정온건조법(ASAE S352.2, 2004)을 이용하여 측정하였다. 건조열풍온도, 유하속도 및 송풍량은 건조 시 플레이션 프로그램을 이용한 조건으로 110°C , 4.5m/h 및 $30\text{m}^3/\text{min}\cdot\text{m}^2$ 로 건조 실험을 수행하였다.

그림 3-56은 유채종자 건조기에 온도센서 위치를 나타낸 것이며, 공기의 온·습도 및 유채 온도 측정지점은 표 3-33과 같다. 외기의 온도를 측정하기 위하여 외기 1지점, 열풍 유입부 1지점, 배기부에 1지점, 유채종자 건조 시 곡온을 측정하기 위하여 건조실 5지점 및 배출 부 3지점에 대하여 열전대(T-type, OMEGA, USA)를 설치하고 자료 수집 장치(7327, DATASCAN, UK)로 5분 간격으로 측정하여 PC에 저장하였다.

습도측정을 위해 외기유입구 및 배습팬에 온습도센서(TR-72, Tand-D, Japan)를 설치하여 습도를 측정하여 총 12지점의 온도와 습도를 측정하였다. 에너지 소비율은 적산전력계(3166, HIOKI, Japan)를 이용하여 측정하였으며, 송풍량은 열선풍속계(VELOCICALC-PLUS, TSI, USA)를 이용하여 배기부에서 측정하였다.

유채종자의 건조 후 품질 측정을 위해 발아율 측정을 하였으며, 발아율 측정은 정립 100립을 옥시폴로 소독한 후 물로 세척하여 직경 10cm 샬레에 여과지를 깔고 유채종자를 올려놓고 20°C 의 항온기에 넣고 7일 이내에 발아한

미립수를 측정하였다.(금 등, 2008)

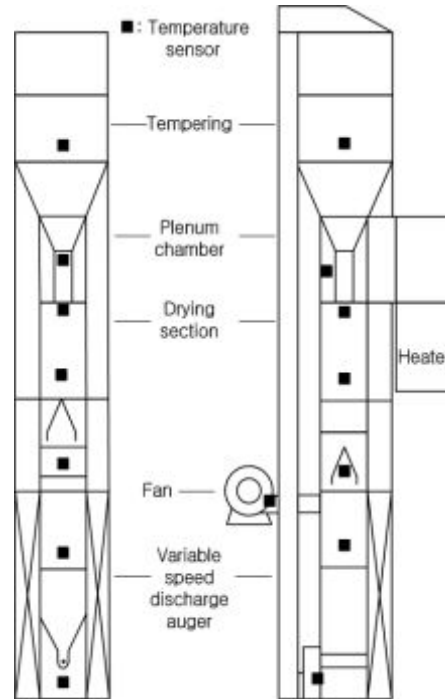


그림 3-56. 실험용 다목적 건조기내에서 온도, 습도센서 위치

표 3-33. 외기 온·습도 및 건조기 내의 열풍 및 유체 온도 측정 지점

구 분		측정지점	비 고
온 도	열풍유입부	1	
	배기부송풍구	1	
	외기	1	
	소계	3	
품 온	건조부	3	
	배출부	2	
	소계	5	
습 도	외기	1	
	송풍구 출구	1	
	소계	2	
계		12	

그림 3-57은 건조시간에 따른 열풍의 온도 변화를 나타낸 것이며, 그림에서와 같이 열풍온도는 평균 111.8℃(107.1~117.0℃)로 나타났으며, 목표 건조온도까지 도달하는 시간은 약 20분 정도 소요되었고 총 건조 시간은 8.5시간이며, 열풍온도 편차는 ±2.6℃로 만족한 수준이었다.

그림 3-58은 건조실내의 유채종자의 곡온 변화를 나타낸 것이며, 그림에서와 같이 실험 초기 곡온은 23.3℃이었으며, 건조가 진행되면서 점차 증가하여 최대 32.0℃까지 증가하였으며, 평균 28.2℃(23.3~32.0℃)로 나타났다.

그림 3-59는 건조실험 중 배기부의 상대습도를 나타낸 것이며, 그림에서와 같이 배기구의 상대습도는 초기에 87%이상으로 나타났으며, 이 후 점차 감소하여 63%까지 감소하였다.

그림 3-60은 건조 중 함수율 변화를 나타낸 것으로 초기 함수율 28.4%에서 최종함수율 11.1%까지 건조하는데 8.5시간이 소요되었으며, 건조속도는 2.01%/h로 나타났다. 건조 초기에는 건조속도가 매우 빠르게 나타났으며 건조 시간 7.5시간 경과 후에는 건조속도가 완만하게 나타났다.

기존 유채종자 건조기로 사용하고 있는 타공망 형식 건조기의 건조속도는 1.0%/h이하에 비하여 최소 2배 이상 빠른 것으로 나타났다.

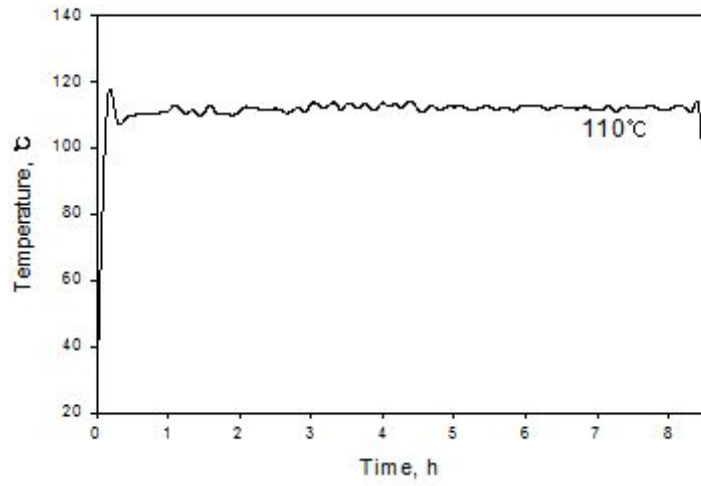


그림 3-57. 건조 중 열풍온도의 변화.

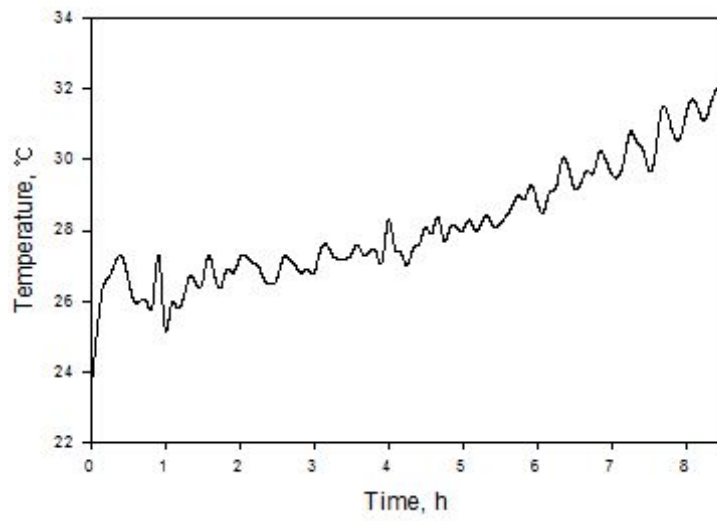


그림 3-58. 건조 중 유채종자 온도의 변화.

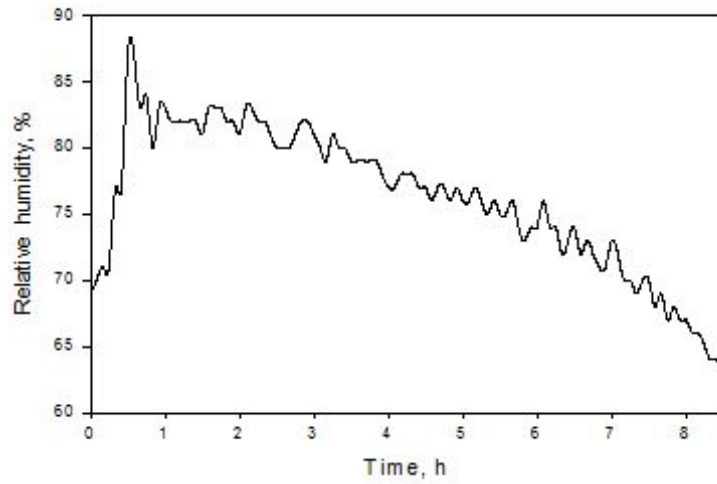


그림 3-59. 건조 중 배기부의 상대습도 변화.

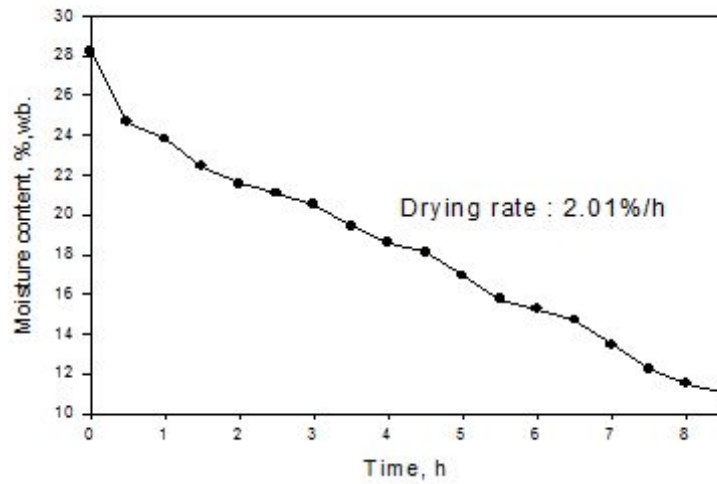


그림 3-60. 건조 중 함수율의 변화.

건조소요에너지는 1,537kJ/kg-water로 나타났으며, 일반 곡물건조기의 예

너지 소비량이 5,000kJ/ kg-water이상 소요에 비하여 약 3.25배 정도 에너지 절약 효과가 나타났다. 기존 횡류형 흐름의 건조방식에 비해 병류형 흐름이 건조온도는 높으나 송풍량이 적어 에너지 절약효과가 높으며, 유채종자 실험 결과 에너지 절약 효과가 나타났다. 표 3-34는 발아율 변화를 나타낸 것으로서, 표에서와 같이 발아율은 95%로서, 기존 유채종자 건조기의 평균 발아율 79%(2007, 국립농업과학원)보다 높게 나타났다.

표 3-34. 건조 후 발아율의 변화

Germinated seeds		
	개수	백분율
건조 전	97	-
건조 후	92	95%

나. 보리 건조실험

공시재료는 충남 예산지역에서 수확한 걸보리를 사용하였으며, 초기 함수율은 28.8%이었다. 건조 전 상태의 보리를 -10°C 이하의 냉동고에 보관하였으며, 실험 시작 48시간 전에 외부에 방치하여 주위 온도와 평형을 이루도록 한 후 실험에 사용하였다.

보리의 함수율 측정은 $130^{\circ}\text{C}-20\text{h}-10\text{g}$ 상압정온건조법(ASAE S352.2, 2004)을 이용한 측정을 기준으로 사용하였으며, 실험 중 경시적 변화는 단립수분계(PQ-510, KETT, Japan)를 이용하여 실험 종료시점을 판단하였다. 건조열풍온도, 유하속도 및 송풍량은 110°C , 4.5m/h 및 $26\text{m}^3/\text{min}\cdot\text{m}^2$ 로 건조실험을 수행하였으며, 건조 중 30분마다 시료를 100g씩 채취하여 함수율측정을

하였다. 유채종자와 동일한 건조조건에서 실험을 수행하였으며, 외기의 온도를 측정하기 위하여 외기 1지점, 열풍 유입부 1지점, 배기부에 1지점, 유채종자 건조시 곡온을 측정하기 위하여 건조실 5지점 및 배출 부 1지점에 대하여 열전대(T-type, OMEGA, USA)를 설치하고 자료 수집 장치(7327, DATASCAN, UK)로 5분 간격으로 측정하여 PC에 저장하였다.

습도측정을 위해 외기유입구 및 배습팬에 온습도센서(TR-72, Tand-D, Japan)를 설치하여 습도를 측정하여 총 12지점의 온도와 습도를 측정하였다. 에너지소비율은 적산전력계(3166, HIOKI, Japan)를 이용하여 측정하였으며, 송풍량은 열선풍속계(VELOCICALC-PLUS, TSI, USA)를 이용하여 배기부에서 측정하였다. 건조 중 외기온도는 19.5°C ($19.0\sim 20.4^{\circ}\text{C}$), 상대습도는 41.8% ($35.0\sim 44.0$)로 나타났다.

그림 3-61은 건조시간에 따른 열풍의 온도 변화를 나타낸 것이며, 그림에서와 같이 열풍온도는 평균 109.4°C ($103.1\sim 112.0^{\circ}\text{C}$), 온도편차는 $\pm 0.85^{\circ}\text{C}$ 로 나타났고 목표 건조온도 110°C 에서 매우 근접한 것으로 나타났으며, 목표 건조온도까지 도달하는 시간은 약 10분 정도 소요되었고 총 건조 시간은 10시간이 소요되었다.

그림 3-62는 건조실내의 보리의 곡온변화를 나타낸 것이며, 그림에서와 같이 실험 초기 곡온은 21.4°C 이었다. 건조가 진행되면서 점차 증가하여 최대 33.4°C 까지 증가하였으며, 평균 27.8°C ($21.4\sim 33.4^{\circ}\text{C}$)로 나타나 품질 변화에 영향을 줄 정도의 온도상승 전에 건조가 종료되었다.

그림 3-63은 건조실험 중 배기부의 상대습도를 나타낸 것으로서 그림에서와 같이 배기구의 상대습도는 초기에 77%이상에서 건조가 진행되었으나 이후 점차 감소하여 31%까지 감소하였으며, 건조 종료시점까지 동일한 감소율을 나타냈다.

배기부의 상대습도는 건조초기 30분 동안 상승되다가 건조 종료 시점까지

계속적인 감소를 나타냈다.

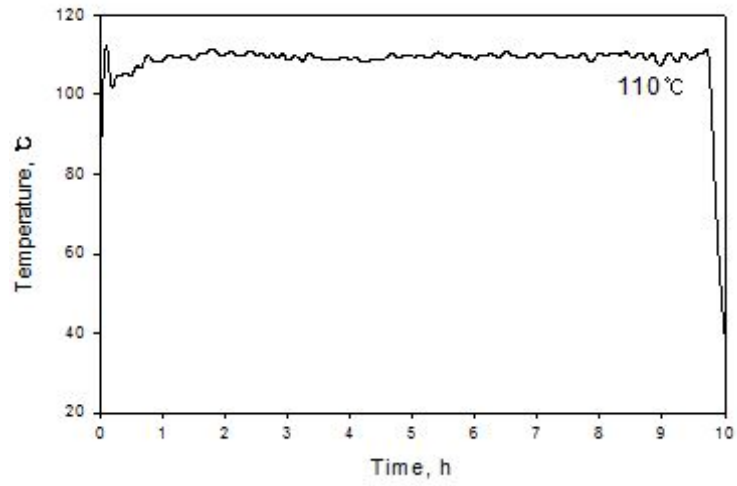


그림 3-61. 건조 중 열풍온도의 변화.

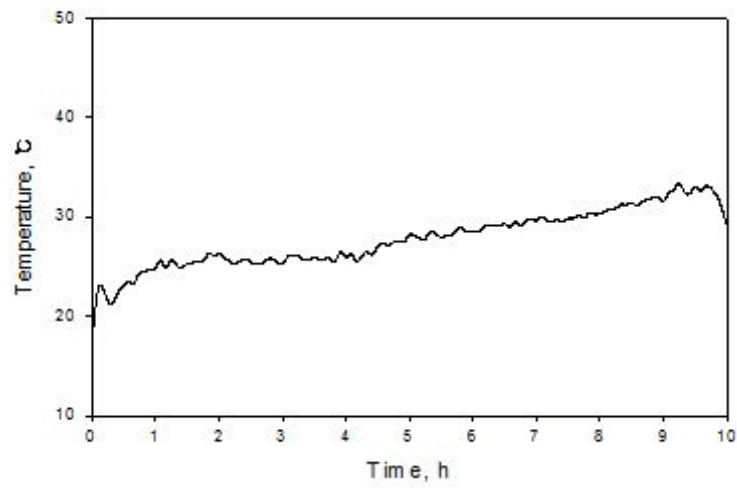


그림 3-62. 건조 중 유체중자 온도의 변화.

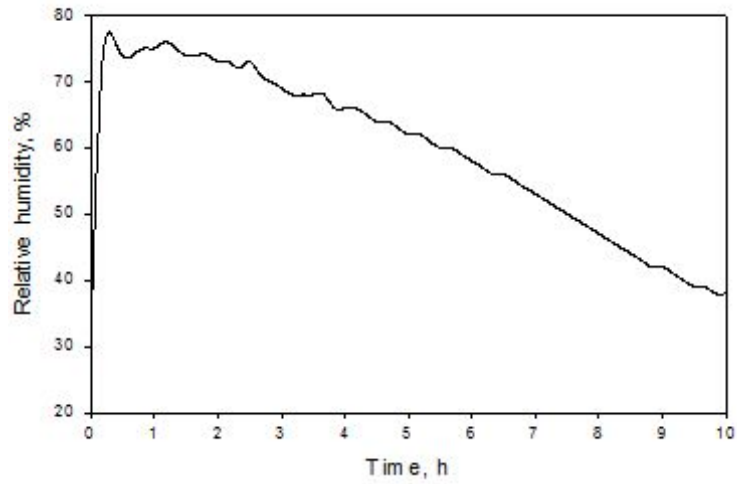


그림 3-63. 건조 중 배기부의 상대 습도 변화.

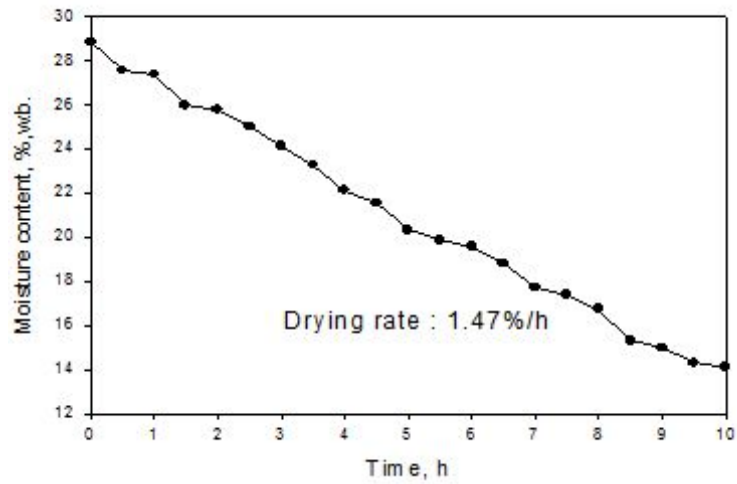


그림 3-64. 건조 중 함수율의 변화.

그림 3-64는 건조 중 함수율 변화를 나타낸 것으로 초기 함수율 28.2%에서 최종 함수율 14.1%까지 건조하는데 10.0시간이 소요되었으며, 건조속도는

1.47%/h로 나타났다. 건조 전 보리의 함수율 편차는 $\pm 3.83\%$ 였으나 건조 종료 후 함수율 편차는 $\pm 0.83\%$ 까지 감소하였으며, 함수율 편차가 감소하는 것으로 건조기 내부 곡물의 건조가 균일하게 건조되었다. 벼와 보리를 동시에 건조가 가능한 기존건조기의 건조속도는 일반 벼와 동일한 1.0%/h이하(국립농업과학원)이며, 개발된 다목적 건조기는 약 47%가 더 빠른 것으로 나타났다.

표 3-35는 건조소요에너지는 1,240kJ/kg-water로 나타났으며, 일반 곡물 건조기의 에너지 소비량이 3,640kJ/kg-water이상 소요에 비하여 약 1.37배 정도 에너지 절약 효과가 나타났다. 보리의 발아율 변화는 96%로 발아율 감소는 4%로 기존 건조기의 평균 발아율 5%보다 낮게 나타났다.

표 3-35. 보리건조 소요에너지

	총 소요전력소비량 (kW)	총 전력소비율 (kW/h)	제거된 수분량 (kg)	총에너지소비량 (kJ/kg-water)
소비 에너지 (kJ/kg)	58.9	5.9	17.1	3,640

다. 옥수수 건조실험

공시재료는 충남 예산지역에서 수확한 옥수수를 사용하였으며, 초기 함수율은 38.5%,w.b.이었다. 일반적으로 옥수수 건조는 7월에 수확하지만 바로 열풍건조기를 사용하지 않으므로 자연건조하여 건조 후 장기간 보관할 경우에만 기계건조를 한다.

그림 3-65는 옥수수를 자연건조하는 사진을 나타낸 것이며, 사진에서와

같이 음지에서 약 50일 건조하였다. 함수율 15.41%까지 건조가 가능하였고, 약 2주 동안 함수율 변화가 없었으며, 외기와 평형함수율에 도달 후 자연건조를 중지하였다. 자연건조 된 옥수수를 낱알로 분리한 후 다목적 건조기를 이용하여 목표함수율까지 건조하였으며, 옥수수 장기보관용에서 적용하는 10% 미만을 목표로 하였다.



그림 3-65. 옥수수를 실내에서 자연건조.

열풍건조 전 옥수수를 -10°C 이하의 냉동고에 보관하였으며, 실험 시작 48시간 전에 외부에 방치하여 주위 온도와 평형을 이루도록 한 후 실험에 사용하였다. 옥수수의 함수율 측정은 $130^{\circ}\text{C}-72\text{h}-10\text{g}$ 상압정온건조법(ASAE S352.2, 2004)을 이용한 측정 기준을 사용하였으며, 실험 중 경시적 변화를 보기 어려우므로 건조는 평형함수율에 도달할 때까지 건조실험을 수행하였다.

건조열풍온도는 120°C 로 벼, 보리 및 유채종자보다 낱알의 크기가 커서 시플레이션 결과와 비교하여 높은 건조온도를 사용하였으며, 유하속도 및 송풍량은 $3.5\text{m}/\text{h}$ 및 $25\text{m}^3/\text{min}\cdot\text{m}^2$ 로 건조실험을 수행하였으며, 건조 중 30분마다

시료를 100g씩 채취하여 함수율측정을 하였다.

유채종자와 동일한 건조방법으로 실험을 수행하였으며, 외기의 온도를 측정하기 위하여 외기 1지점, 열풍 유입부 1지점, 배기부에 1지점, 유채종자 건조시 곡온을 측정하기 위하여 건조실 5지점 및 배출 부 1지점에 대하여 열전대(T-type, OMEGA, USA)를 설치하고 자료 수집 장치(7327, DATASCAN, UK)로 30초 간격으로 측정하여 PC에 저장하였다.

습도측정을 위해 외기유입구 및 배습팬에 온습도센서(TR-72, Tand-D, Japan)를 설치하여 습도를 측정하여 총 12지점의 온도와 습도를 측정하였다. 에너지소비율은 적산전력계(3166, HIOKI, Japan)를 이용하여 측정하였으며, 송풍량은 열선풍속계(VELOCICALC-PLUS, TSI, USA)를 이용하여 배기부에서 측정하였다. 건조 중 외기온도는 19.6℃(18.5~20.3℃), 상대습도는 37.2%(33.0~46.0)로 나타났다.

그림 3-66은 건조시간에 따른 열풍의 온도 변화를 나타낸 것이며, 그림에서와 같이 열풍온도는 평균 118.1℃(102.7~123.5℃), 온도편차는 ±1.54℃로 나타났고 목표 건조온도 120℃에 근접한 것으로 나타났다. 목표 건조온도까지 도달하는 시간은 약 15분 정도 소요되었고 총 건조 시간은 9시간이 소요되었으며, 건조 8시간 후 평형함수율에 도달하여 함수율 변화가 없었으므로 실건조 시간은 8시간이라고 판단된다.

그림 3-67은 건조실 내의 옥수수의 곡온변화를 나타낸 것이며, 그림에서와 같이 실험 초기 곡온은 26.0℃이었다. 건조가 진행되면서 점차 증가하여 최대 50.9℃까지 증가하였으며, 옥수수의 건조는 건조 품질의 영향과는 다르게 옥수수 가루나 장기보관용으로 건조의 목적이 있어 건조 중 곡온 상승에 의한 영향은 큰 의미가 없다.

그림 3-68은 건조실험 중 배기부의 상대습도를 나타낸 것이며, 그림에서와 같이 배기구의 상대습도는 초기에 60%이상으로 나타났으며, 이미 외기에

서 건조된 옥수수를 사용함으로 인하여 급격히 배기부의 상대습도는 감소하여 건조 종료 시점에는 11%까지 감소하였다.

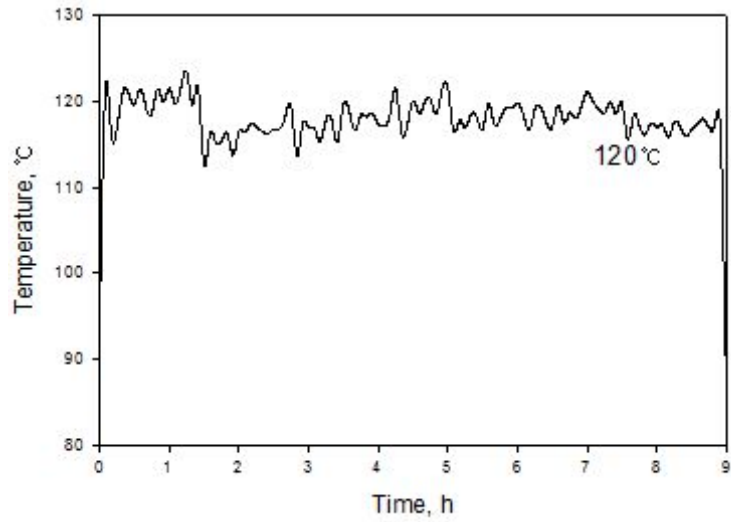


그림 3-66. 건조 중 열풍온도의 변화.

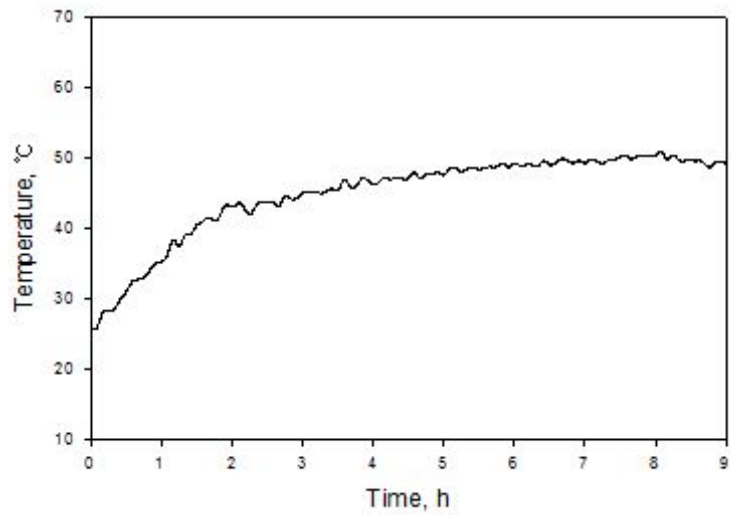


그림 3-67. 건조 중 옥수수온도의 변화.

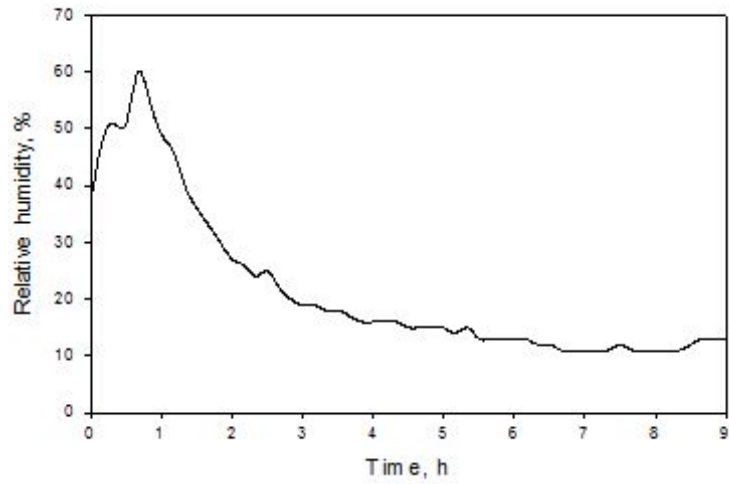


그림 3-68. 건조 중 배기부의 상대 습도 변화.

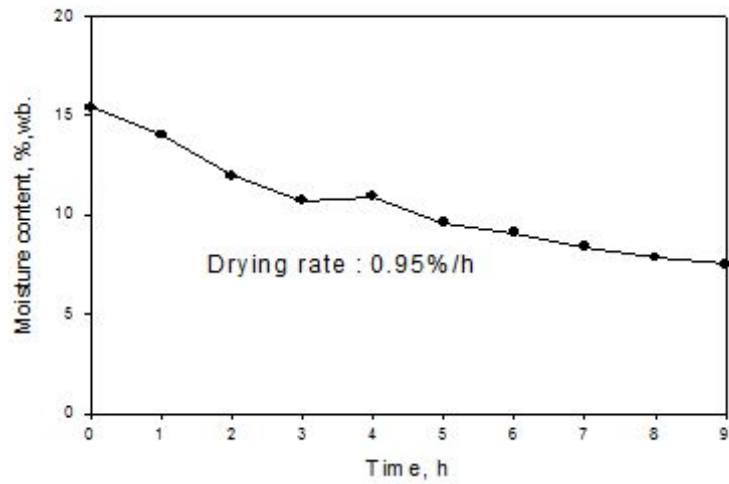


그림 3-69. 건조 중 함수율의 변화.

그림 3-69는 건조 중 함수율 변화를 나타낸 것으로 초기 함수율 15.4%에서 최종함수율 7.85%까지 건조하는데 9시간이 소요되었으며, 건조속도는

0.95%/h로 나타났으며, 평형함수율에 도달하는 건조시간을 8시간으로 단축하면 건조속도는 0.97%/h로 나타났다.

표 3-36은 건조소요에너지는 3,994kJ/kg-water으로 나타났으며, 옥수수의 경우 표면적 및 낱알의 무게가 다른 곡물에 비하여 크므로 건조에너지가 많이 소요되었으나 일반 곡물건조기의 에너지 소비량이 5,000kJ/kg-water보다 에너지 소비율이 더 작게 나타났다.

표 3-36 옥수수건조 소요에너지

	총 소요전력소비량 (kW)	총 전력소비율 (kW/h)	제거된 수분량 (kg)	총에너지소비량 (kJ/kg-water)
소비 에너지 (kJ/kg)	26.0	2.9	4.17	3,994

라. 콩 건조실험

공시재료는 충남 예산지역에서 수확한 콩을 사용하였으며, 초기 함수율은 13.5%,w.b.이었다. 일반적으로 콩 건조는 10월말에서 11월 초순에 수확하지만 바로 열풍건조기를 사용하지 않고 자연건조 후 콩깍지와 분리하여 사용한다. 하지만 자연건조가 불가능할 경우 및 장기간 보관할 경우에만 기계건조를 한다.

그림 3-70은 콩을 자연건조하는 사진을 나타낸 것이며, 사진에서와 같이 양지에서 약 20일 건조한 콩을 구매하여 실험에 사용하였다. 콩은 장기보관용에서 적용하는 10%미만을 목표로 하였다.



그림 3-70. 자연건조 중인 콩

열풍건조 전 콩을 -10°C 이하의 냉동고에 보관하였으며, 실험 시작 48시간 전에 외부에 방치하여 주위 온도와 평형을 이루도록 한 후 실험에 사용하였다. 옥수수의 함수율 측정은 $103^{\circ}\text{C}-72\text{h}-10\text{g}$ 상압정온건조법(ASAE S352.2, 2004)을 이용한 측정을 기준으로 사용하였으며, 실험 중 경시적 변화를 보기 어려우므로 건조는 평형함수율에 도달할 때까지 건조실험을 수행하였다.

건조열풍온도는 105°C 로 벼, 보리 및 유채종자보다 낱알의 크기가 크며 시물레이션 결과와 같은 온도를 사용하였으며, 유하속도 및 송풍량은 5.0m/h 및 $25\text{m}^3/\text{min}\cdot\text{m}^2$ 로 건조실험을 수행하였으며, 건조 중 30분마다 시료를 100g 씩 채취하여 함수율을 측정하였다.

유채종자와 동일한 건조방법으로 실험을 수행하였으며, 외기의 온도를 측정하기 위하여 외기 1지점, 열풍 유입부 1지점, 배기부에 1지점, 유채종자 건조시 곡온을 측정하기 위하여 건조실 5지점 및 배출 부 1지점에 대하여 열전대(T-type, OMEGA, USA)를 설치하고 자료 수집 장치(7327, DATASCAN, UK)로 30초 간격으로 측정하여 PC에 저장하였다.

습도측정을 위해 외기유입구 및 배습팬에 온습도센서(TR-72, Tand-D,

Japan)를 설치하여 총 12지점의 온도와 습도를 측정하였다. 에너지소비율은 적산전력계(3166, HIOKI, Japan)를 이용하여 측정하였으며, 송풍량은 열선풍속계(VELOCICALC-PLUS, TSI, USA)를 이용하여 배기부에서 측정하였다. 건조 중 외기온도는 14.3℃(18.2~13.4℃), 상대습도는 24.9% (27.0~21.0)로 나타났다.

그림 3-71은 건조시간에 따른 열풍의 온도 변화를 나타낸 것이며, 그림에서와 같이 열풍온도는 평균 108.1℃(103.2~113.5℃)로 나타났고 목표 건조 온도 108℃에 근접한 것으로 나타났다. 목표 건조온도까지 도달하는 시간은 약 10분 정도 소요되었고 총 건조 시간은 4.5시간이 소요되었다.

그림 3-72는 건조실 내의 콩의 곡온 변화를 나타낸 것이며, 그림에서와 같이 실험 초기 곡온은 23.8℃이었다. 건조가 진행되면서 점차 증가하여 최대 40.2℃까지 증가하였다.

그림 3-73은 건조실험 중 배기부의 상대습도를 나타낸 것이며, 그림에서와 같이 배기구의 상대습도는 최대 55%로 나타났으며, 이미 외기에서 건조된 콩을 사용함으로 인하여 급격히 배기부의 상대습도는 감소하여 건조 종료 시점에는 15%까지 감소하였다.

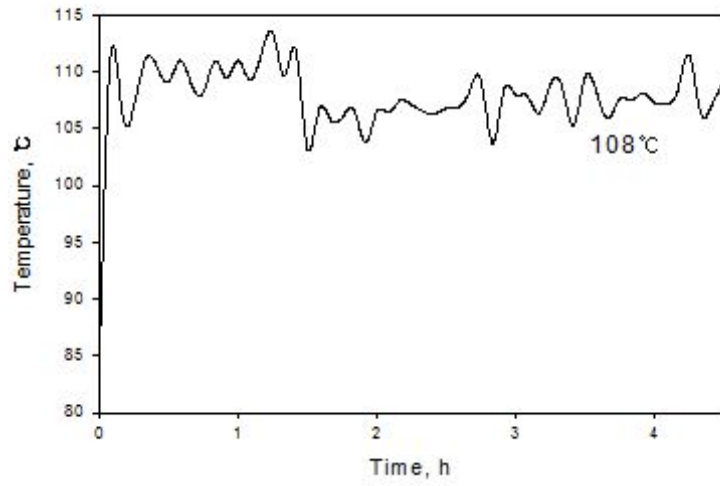


그림 3-71. 건조 중 열풍온도의 변화.

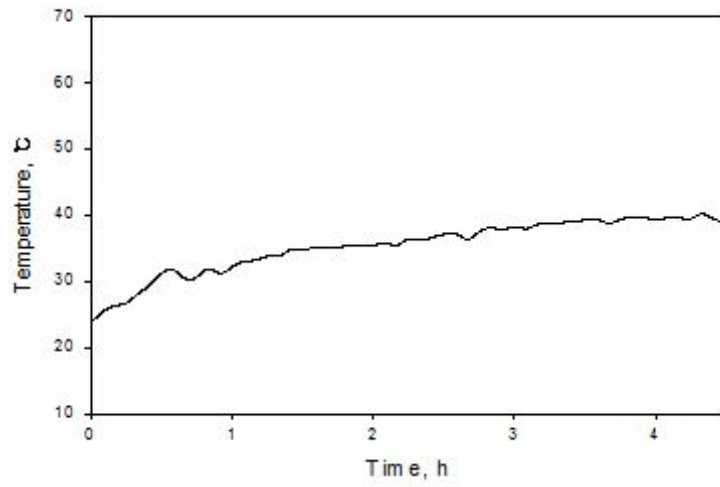


그림 3-72. 건조 중 옥수수온도의 변화.

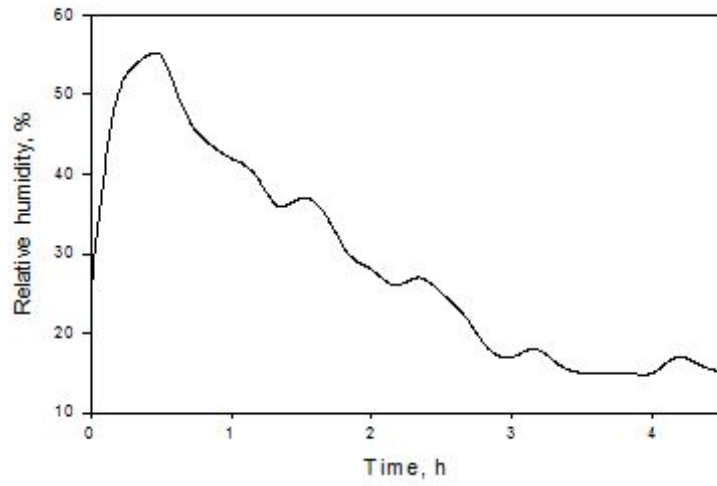


그림 3-73. 건조 중 배기부의 상대 습도 변화.

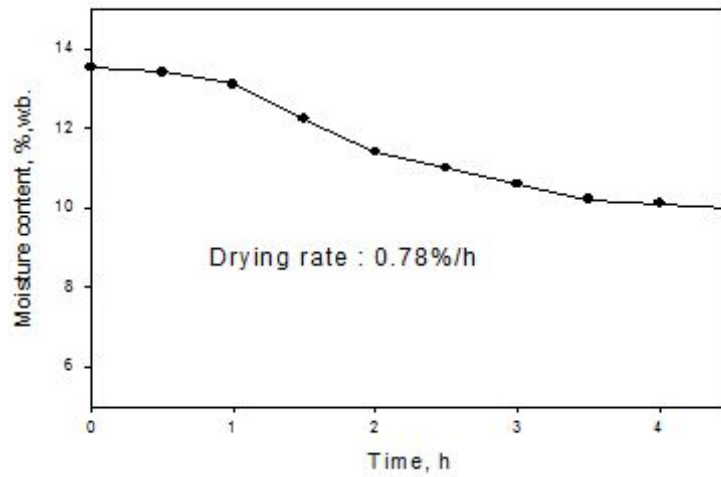


그림 3-74. 건조 중 함수율의 변화.

그림 3-74는 건조 중 함수율 변화를 나타낸 것으로 초기 함수율 13.5%에

서 최종함수율 9.8%까지 건조하는 4.5시간이 소요되었으며, 건조속도는 0.78%/h로 나타났다.

표 3-37은 건조소요에너지는 3,839kJ/kg-water로 나타났으며, 콩의 경우 표면적 및 낱알의 무게가 옥수수과 같이 크므로 건조에너지가 많이 소요되었으나 일반 곡물건조기의 에너지 소비량이 5,000kJ/kg-water보다 에너지 소비율이 더 작게 나타났다.

표 3-37. 콩의 소요에너지

	총 소요전력소비량 (kW)	총 전력소비율 (kW/h)	제거된 수분량 (kg)	총에너지소비량 (kJ/kg-water)
소비 에너지 (kJ/kg)	15.8	3.5	3.28	3,839

마. 벼 건조실험

한(2006)은 순환식 병류형 곡물건조기를 이용하여 벼를 대상으로 건조기를 개발하였으며, 개발할 건조기 형식과 동일한 결과를 다목적 건조기에 사용하였다. 실험에 사용한 벼는 700kg이며, 건조온도 113.6℃, 유하속도 및 송풍량은 4.5m/h 및 15m³/min·m²로 건조실험을 수행한 결과 건조속도는 0.90 %w.b./h로 나타났으며, 동할율 및 소요에너지는 기존 건조기와 동일하거나 좋은 수준으로 나타났다고 보고하였다.

4. 결론 및 요약

약 70kg 용량 규모의 실험용 다목적 건조기를 설계·제작하여 시뮬레이션 실험 결과의 조건을 이용하여 실험을 수행하였다.

유채종자 건조는 초기 함수율 28.4%에서 최종함수율 11.1%까지 건조하는

데 8.5시간이 소요되었으며, 건조속도는 2.01%/h로 나타났다. 기존 유채종자 건조기로 사용하고 있는 타공망 형식 건조기의 건조속도는 1.0%/h이하에 비하여 건조속도가 최소 2배 이상 빠른 것으로 나타났으며, 건조소요에너지는 1,537kJ/kg-water로 나타났고 발아율은 95%로 높게 나타났다.

보리 건조실험은 초기 함수율 28.2%에서 최종함수율 14.1%까지 건조하는데 10.0시간이 소요되었으며, 건조속도는 1.47%/h로 나타났다. 건조소요에너지는 1,537kJ/kg-water로 나타났으며, 발아율 감소는 4%로 기존 건조기의 평균 발아율 5%보다 낮게 나타났다.

옥수수 건조실험은 초기 함수율 15.4%에서 최종함수율 7.85%까지 건조하는데 9시간이 소요되었으며, 건조속도는 0.95%/h로 나타났다. 건조소요에너지는 2,494kJ/kg-water로 나타났으며, 옥수수의 경우 표면적 및 낱알의 무게가 다른 곡물에 비하여 크므로 건조에너지가 많이 소요되었으나 일반 곡물건조기의 에너지 소비량 5,000kJ/kg-water보다 에너지 소비율이 더 작게 나타났다.

콩 건조 실험은 초기 함수율 13.5%에서 최종함수율 9.8%까지 건조하는데 4.5시간이 소요되었으며, 건조속도는 0.78%/h로 나타났다. 건조소요에너지는 3,839kJ/kg-water로 나타났다.

제 5 절 다목적 건조기 시작기 제작 및 성능평가

1. 시작기 개발

가. 기본설계

건조기 용량은 2톤으로 결정하였으며, 기본 피드부 및 배출부는 기존 순환식 횡류형 건조기와 동일하게 설계하였다. 건조기의 용량은 피드부와 배출부가 기존 건조기와 병행이 가능하도록 설계하였으며, 건조부는 개발한 다목적 기본설계하고 템퍼링의 용량에 따라 2~4톤으로 조정이 가능하도록 하였다.

그림 3-75는 본기 다목적 곡물 및 유채종자 시작기의 설계를 나타낸 것이며, 16개의 슈트를 이용하여 곡물의 하강과 열풍의 혼합을 이용하여 타공망이 없는 건조 방식을 이용하여 건조가 가능하도록 설계하였다. 그림에서와 같이 템퍼링실을 통하여 곡물이 하강하여 건조실에서 열풍과 곡물이 합류되어 건조가 이루어지며, 열풍은 배출되고 하강하여 버킷엘리베이터를 이용하여 목표함수율에 도달할 때 까지 순환하며 건조를 마치도록 설계하였다.

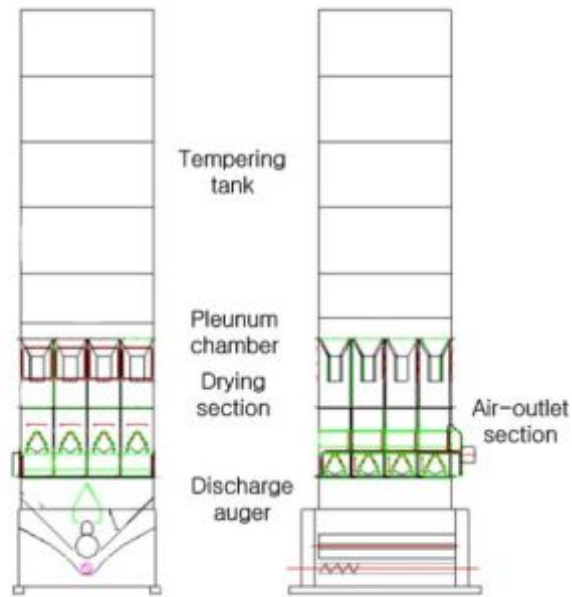


그림 3-75. 다목적 건조기 기본 구조.

본기 건조기의 용량(건조부+템퍼링부+배출부)은 곡물 및 유채 2,000kg수준으로 하였으며, 총 용적은 다음 식 3-58을 이용하여 구한 결과 수준이었다. 건조부와 템퍼링부의 비율(1 : 4~6)과 배출(냉각포함)부의 규격을 감안하여 건조부 용량을 설계한 결과 약 0.44m³ 수준이었으며, 기준 벼의 산물밀도가 550 kg/m³일 경우 환산 시 241 kg, 유채종자로 환산 시 560 kg/m³일 경우 246 kg수준이었다.

$$\text{건조기 용적} = \frac{\text{건조기용량}(kg)}{\text{벼의산물밀도}(kg/m^3)} \quad (3-58)$$

$$\begin{aligned} & \text{건조실 용적} \\ & (\text{건조부용적}) + (\text{배풍실용적} - \text{배풍관사면각용적}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= [1.0 \times 1.0 \times 0.33] + [(1.0 \times 1.0 \times 0.17) - (0.01505 \times 1.0 \times 4)] \\
&= [0.33] + [0.17 - 0.0602] \\
&= 0.4398(\text{m}^3)
\end{aligned}$$

▷ 벼로 환산 시 $0.4398 \times 550 \approx 241 \text{ kg}$

▷ 유채종자로 환산 시 $0.4398 \times 560 \approx 246 \text{ kg}$

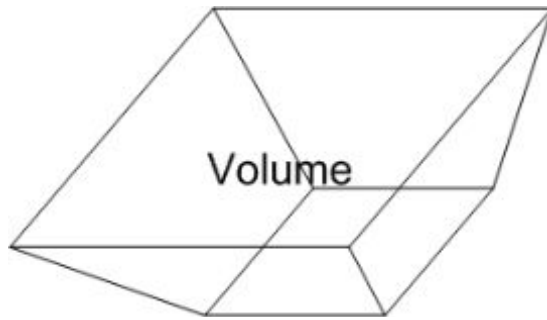


그림 3-76. 템퍼링부의 건조실 연결 구조.

템퍼링부 ($0.375 \times 0.375 \times 0.25 \text{ m}$, $L \times W \times H$)의 용적은 $0.171(\text{m}^3)$ 이었으며, 벼 및 유채종자 중량으로 환산하면 95 kg 수준이었다.(그림 3-76)

$$\begin{aligned}
&\text{템퍼링단 확대 용적} = \text{큰사각뿔} - \text{작은사각뿔} \\
&= 0.171408 (\text{m}^3)
\end{aligned}$$

▷ 벼 및 유채종자로 환산 시 $\approx 95 \text{ kg}$

$$\text{템퍼링 1단 용적} = 1.0 \times 1.0 \times 0.5 (D \times L \times H) = 0.5 \text{ m}^3$$

▷ 벼 및 유채종자로 환산 시 $\approx 277 \text{ kg}$

유하속도는 다양한 유하속도하에서 실험이 가능하도록 건조부 통과시간을 10분을 기준으로 하여 설계하였으며, 조정이 가능하도록 설계하였다.

표 3-38. 유하속도에 따른 벼의 순환량

건조부 통과시간(분)	순환속도(m/h)	순환량(kg/h)
7	4.3	2,091
8	3.8	1,830
9	3.3	1,627
10	3.0	1,464
11	2.7	1,331
12	2.5	1,220

최적 송풍량은 약 24~25m³/min·m²수준이었으나, 본기 건조기의 효율을 고려하여 풍량비 30m³/min·m²을 기준으로 하였으며, 곡물 및 유채종자의 중량 2,000kg에 대하여 30.0 cmm 수준으로 결정하였다. 건조기의 송풍저항은 벼 퇴적층의 송풍저항으로 구분할 수 있는데, 벼 층의 두께 0.45m, 풍속 0.5m/s일 때 다음 식 3-59에 의해 계산한 결과, 148.77mmAq 수준이었다. 또한, 송풍량 30.0cmm과 정압 148.77mmAq를 갖는 송풍기의 축동력을 효율 60%수준에서 다음 식 3-60으로 계산한 결과, 1.3kW 수준이었다.

▷ 단위 면적당 송풍량 : 30.0 m³/min·m²

▷ 송풍량 : 30.0×(1.0×1.0) = 30.0 cmm

▷ 압력손실

$$\begin{aligned}
 \Delta P &= 9.8 \times 653.54 \times V^{1.2727} \times (D + a) & (3-59) \\
 &= 9.8 \times 653.54 \times 0.51^{1.2727} \times (0.45 + 0.1) \\
 &= 1457.94 \text{ Pa}(148.77 \text{ mmAq})
 \end{aligned}$$

$$\text{여기서, } V = \text{건조부 겉보기 속도} = \frac{30}{1.0 \times 60} = 0.5 \text{ m/sec}$$

$$A = \text{건조기 단면적} = 1.0 \times 1.0 = 1.0 \text{ m}^2$$

$$\text{건조부 체적} = 0.4398 \text{ m}^3$$

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

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

▷ 송풍기 동력

$$\text{-축동력} = \frac{P_{st}Q}{0.6} = \frac{1457.94 \times 30}{0.6 \times 60} = 1.2 \text{ kW} \quad (3-60)$$

(송풍기의 효율 60%)

$$\text{-실제 사용동력} = 1.2 \text{ kW} \times 1.1 \approx 1.3 \text{ kW}$$

버너는 최대 약 110°C 정도를 상승시킬 수 있는 용량을 기준으로 하였으며, 외기온도를 10°C로 가정할 경우 최대 가열열량은 63,360 kcal/h이다. 현행 횡류형에서 적용하는 이론적인 최대 열량에 대한 실 버너열량 비율 75%를 적용하여 식 3-61로 계산한 결과, 84,480 kcal/h의 가열용량이 필요하였으며, 백등유(8,400kcal/L)를 사용하는 것으로 가정하고 연료소모량을 다음 식 3-62로 구한 결과 10.0 L/h정도가 필요하였다.

▷ 버너열량

-가열온도 : 10°C에서 120°C까지(ΔT : 110°C)

$$\text{-버너의 최대열량} = \frac{60Q_p C_p \Delta T}{\eta} = \frac{60 \times 30 \times 1.2 \times 0.24 \times 110}{0.9} \quad (3-61)$$

$$= 63,360 \text{ kcal/h}$$

-버너의 실 적용열량 (75%적용): 84,480 kcal/h

$$\frac{84,480}{8,400} = 10 \text{ L/h} \quad (3-62)$$

기존의 개발된 건조기에 사용하는 버너 열량은 이론상 버너 최대열량의 약 75%정도이다.

여기서, Q = 송풍량(m³/min)

ρ = 공기밀도(kg(1.2 kg/m³))

C_p = 공기의 정압비열(0.24 kcal / kg °C)

Δt = 가열온도

η = 버너효율(소수)

나. 상세설계 및 제작

템퍼링은 건조물의 건조 전 저장탱크의 역할 및 건조물의 내외부의 수분이동이 일어나는 장치로서 단부의 높이조절로 탱크의 양을 조절이 가능하도록 하였다. 총 곡물이 내려오는 가로4 ×세로4 총 16개의 슈트로 곡물이 하강하게 되면 버너에서 열풍의 흐름과 혼합되어 건조가 되는 방식으로 설계를 하였으며, 슈트는 건조물이 정체되지 않도록 50°이상의 각도를 주었다. 배기부는 건조가 된 건조물은 아래로 하강하게 되며, 건조 공기는 삼각 모양의 덕트의 아래부분으로 배기되는 방식으로 설계하였다. 배기덕은 상단 4줄 및 하단 4줄 총 8줄로 교차하도록 설계하였으며, 모든 곳에서 건조물과 건조공기를 원활하게 배출할 수 있도록 하였다. 피드부는 곡물의 유하속도 조정이 가능한 피드부오거의 상세설계도이며, 총 2개의 날개축이 지속적인 회전으로 곡물을 버킷 엘리베이터까지 이송이 가능하도록 하였다.

그림 3-77 및 3-78은 각 부분의 상세설계도 및 전기회로도를 나타낸 것이며, 버킷엘리베이터와 각각의 상세 설계도를 나타낸 것이다.

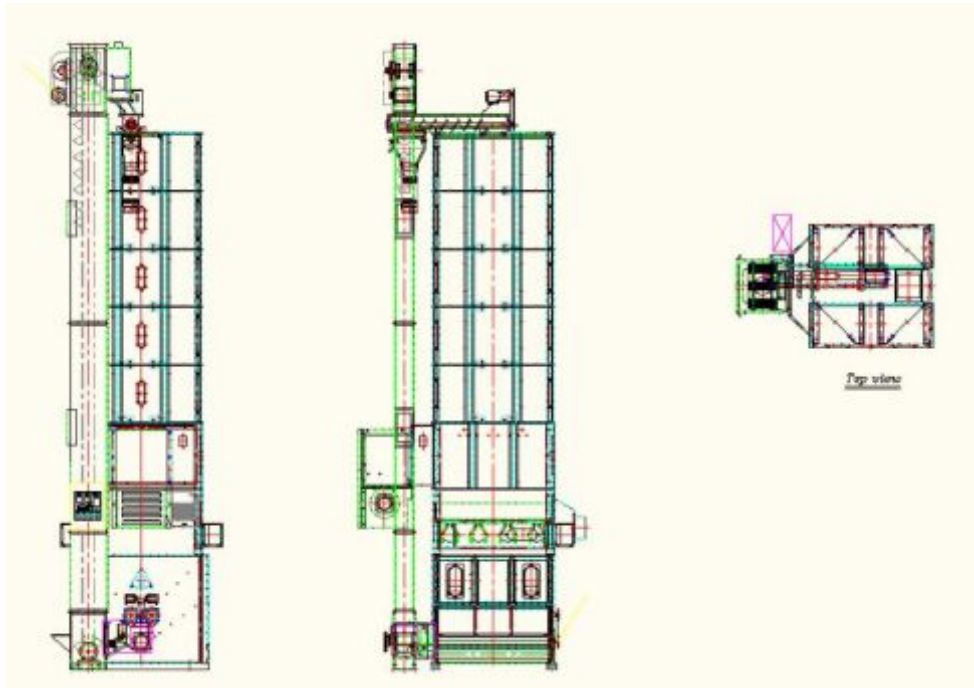
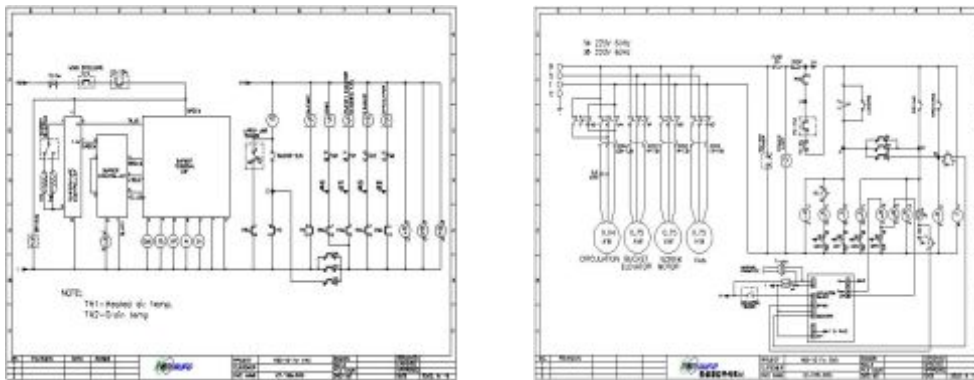


그림 3-77. 본기 다목적 건조기 상세 설계도.



a) 제어 회로도

b) 전기회로도

그림 3-78. 본기 다목적 건조기 제어부 회로도.

그림 3-79는 상세설계도를 따라 제작한 도면의 사진을 나타낸 것이며, 그림에서와 같이 템퍼링부는 5단이고 각 단에 안내창을 설치하여 투입 시 건조물의 내용을 확인이 가능하게 하였다. 배풍실에는 송풍량 조절 및 잔곡을 처리하기 위한 창을 설치하였으며, 피드부는 건조기 옆에서 곡물 투입이 가능하도록 개폐가 가능하도록 제작하였다.



그림 3-79.

2. 건조실험

가. 공시재료

실험에 사용한 유채종자는 전남 영광에서 2011년 6월에 수확한 선망품종이며, 보리는 충남 예산에서 수확한 쌀보리를 실험에 사용하였다. 벼는 충남 예산에서 구매하여 실험에 사용하였다. 재료들은 정선한 후 실험에 바로 사용하였으며, 유채종자의 초기함수율은 40.81%,w.b., 보리의 초기함수율은 24.63 및 벼의 초기함수율은 22.8%,w.b.이었다.

나. 실험방법

표 3-39는 건조실험 조건을 나타낸 것이며, 유채종자는 열풍온도 110℃, 송풍량은 30.0cmm/m², 곡물유하속도는 4.5m/h의 조건으로 건조를 수행하였으며, 보리는 유채종자와 열풍온도 및 곡물유하속도는 동일하고 송풍량은 26cmm/m²으로 하였다. 벼는 열풍온도 110℃, 송풍량은 25.0cmm/m², 곡물유하속도는 3.0m/h의 조건으로 건조를 수행하였다. 건조시작 후 매 30분 간격으로 500g 미만의 시료를 채취하여 함수율을 측정하였으며, 함수율은 유채종자가 10%,w.b., 보리 12%,w.b. 및 벼는 16%,w.b.에 도달할 때 실험을 종료하고 최종시료를 품질 측정에 사용하였다.

표 3-39. 건조실험 조건

	열풍온도 (°C)	송풍량 (cmm/m ²)	곡물유하속도 (m/h)
유채종자	110	30.0	4.5
보리	110	26.0	4.5
벼	110	25.0	3.0

그림 3-80은 곡온 및 공기의 온도를 측정하기 위하여 온도센서의 위치를 나타낸 그림이다. 외기 온도를 측정하기 위해 외부 1개 지점, 열풍온도를 측정하기 위하여 열풍유입부 1개 지점 및 배기부 3개 지점, 곡온을 측정하기 위하여 배출부에 2개 지점 및 탬퍼링에 2개 지점 8개 지점에 대하여 열전대(T-TYPE, OMEGA, USA)를 설치하고 자료 수집장치(MX100, YOKOKGAWA, Japan)로 5분 간격으로 온도를 측정하여 PC에 저장하였다. 풍속계(9555P, TSI, USA)를 사용하여 풍속의 경시적 변화를 측정하였다, 또한 건조공기유입부 1개 지점, 공기 배출부에 1개 지점에 습도계를 설치하여 5분 간격으로 습도를 측정하였다. 소요전력은 적산전력계(3166, HIOKI, JAPAN)를 이용하여 측정하였다. 연료소비량은 전자저울(A-200, CASS, KOREA)을 이용하여 사용된 연료의 무게를 매 순환마다 측정하였다.

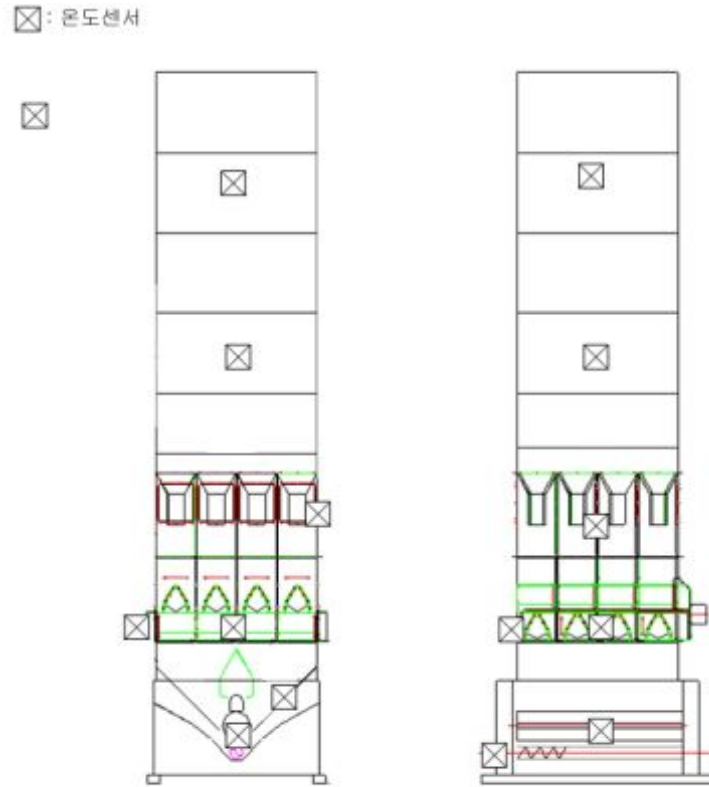


그림 3-80. 다목적 건조기 온도센서 위치

표 3-40은 건조실험중의 외기온습도를 나타낸 것이며, 건조 중 외기온도는 보리 건조 실험 중 평균 외기온도 16.9℃ (14.9~18.2℃), 유채종자는 평균 외기온도 21.1℃ (16.4~28.1℃) 및 벼는 20.0℃(10.8~26.0℃)로 나타났다. 건조 중 상대습도의 변화를 보면, 보리는 평균 상대습도 86% (72~96%), 유채종자는 52% (30~63%) 및 벼는 72.8%(28~99.0%)로 나타났다. 보리 및 벼 건조 시 우천으로 인하여 습도가 다소 높게 나타났으며, 건조 중 야간에는 습도가 높게 나타났다.

표 3-40. 건조 중 외기 온도 및 상대습도

	외기온도(℃)	외기습도(%)
유채종자	21.1(16.4~28.1)	52(30~63)
보리	16.9(14.9~18.2)	86(72~96)
벼	20.0(10.8~26.0)	73(28~99)

함수율 측정은 ASAE(S352.2)기준에 의해 유채종자, 보리 및 벼를 측정하였다. 또한 실험 중 경시적 변화를 측정하기 위해서 단립수분계(PQ-510, Kett, Japan)을 이용하였다. 유채종자 및 곡물의 건조 후 품질 측정을 위해 발아율 측정을 하였으며, 발아율 측정은 정립 100립을 옥시폴로 소독한 후 물로 세척하여 직경 10cm 샬레에 여과지를 깔고 유채종자를 올려놓은 후 20℃의 항온기에 넣고 7일 이내에 발아한 미립수를 측정하였다.(금 등, 2008)

3. 결과 및 고찰

가. 유채종자 건조

그림 3-81은 건조시간에 따른 열풍의 온도 변화를 나타낸 것이며, 그림에서와 같이 열풍온도는 평균 112.5℃(100.0~120.4℃)로 나타났으며, 열풍온도 편차는 ±10.2℃로 전기히터를 이용한 실험용 건조기보다 등유를 사용하는 버너의 온도편차가 크게 나타났다. 목표 건조온도까지 도달하는 시간은 약 35분 정도 소요되었고 총 건조 시간은 16시간이 소요되었다.

그림 3-82는 건조실내의 유채종자의 곡온변화를 나타낸 것이며, 그림에서와 같이 실험 초기 곡온은 24.8℃이었으며, 건조가 진행되면서 점차 증가하여 최대 38.8℃까지 증가하였으며, 평균 32.1℃(24.8~38.8℃)로 나타났다. 수확

후 바로 건조기에 투입하여 건조하므로 인하여 초기 폭온이 높게 나타났다.

그림 3-83은 건조실험 중 배기부의 상대습도를 나타낸 것이며, 그림에서와 같이 배기구의 상대습도는 최대 89%로 나타났으며, 건조 중 점차 감소하여 50%까지 감소하였다.

그림 3-84는 건조 중 함수율 변화를 나타낸 것으로 초기 함수율 40.8%에서 최종함수율 9.7%까지 건조하는데 16.0시간이 소요되었으며, 건조속도는 1.95%/h로 나타났다. 초기함수율이 매우 높아 건조시간이 실험용 건조보다 2배정도 더 소요 되었으나 건조속도는 2.0%/h로 나타났다. 건조속도는 전체적으로 완만하게 나타났다.

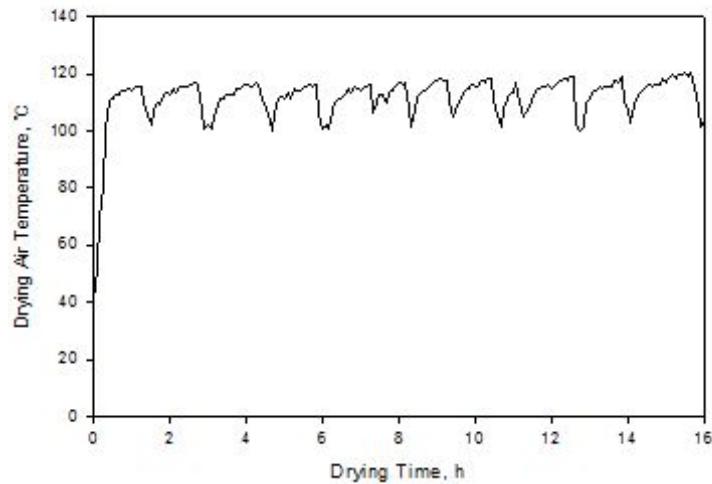


그림 3-81. 건조 중 열풍온도의 변화.

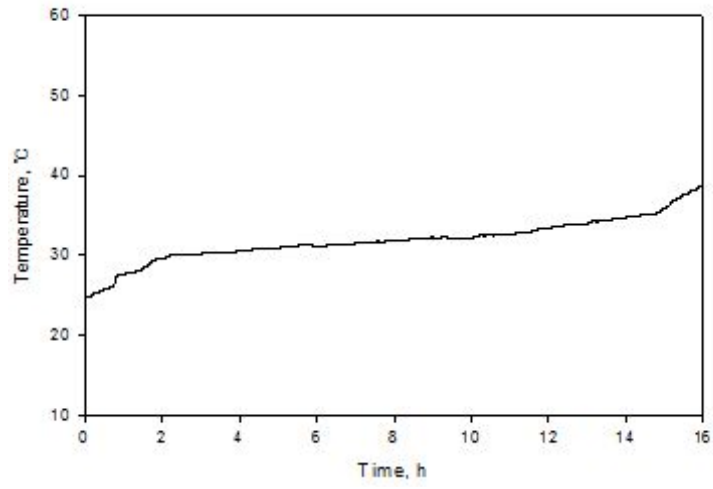


그림 3-82. 건조 중 유체중자온도의 변화.

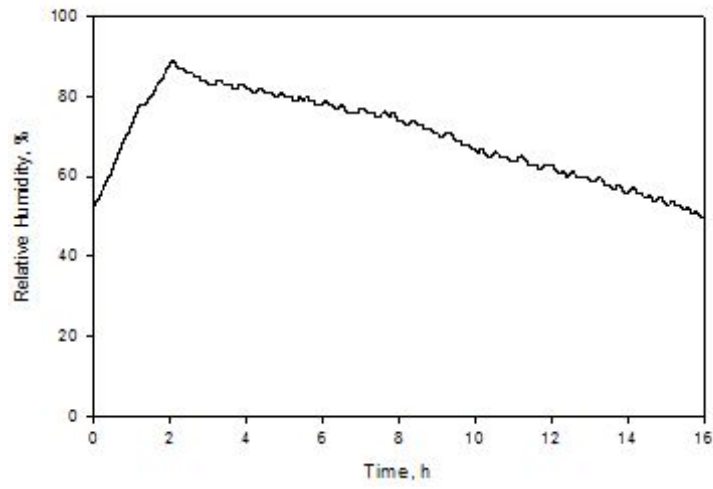


그림 3-83. 건조 중 배기부의 상대습도 변화.

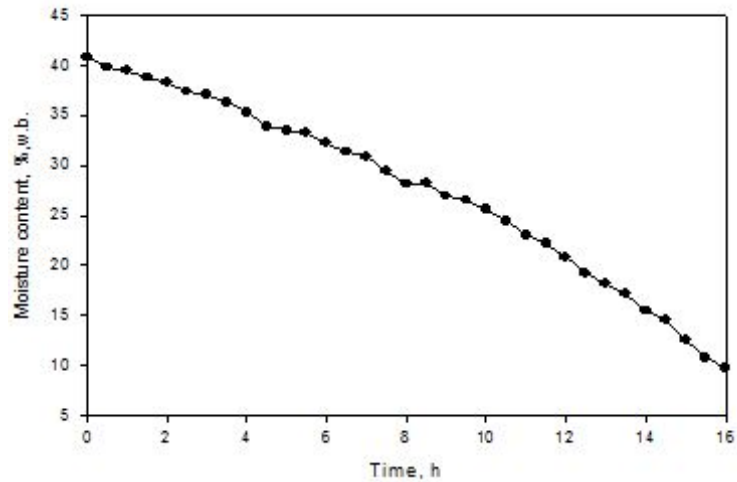


그림 3-84. 건조 중 함수율의 변화.

표 3-41은 건조소요에너지를 나타낸 것이다. 전력소비량은 11,520kJ로 나타났으며, 등유의 8,800 kJ/l를 적용한 결과 11,346,885kJ를 소비하였다. 제거된 수분량을 이용한 총에너지소비량은 3,473kJ/kg-water로 일반 곡물건조기의 에너지 소비량 5,000kJ/kg-water보다 약 30% 에너지 절감이 가능하였다.

표 3-41. 유채종자의 소요에너지

	전력소비량 (kJ)	유류소비량 (kJ)	제거된 수분량 (kg)	총에너지소비량 (kJ/kg-water)
소비 에너지 (kJ/kg)	11,520	11,346,885	378.8	3,473

표 3-42는 발아율 변화를 나타낸 것이며, 표에서와 같이 발아율은 92.1%로 발아율 감소가 7.9%로 목표 발아율 5.0%보다는 다소 좋지 않은 결과가

나타났다. 이는 이상기온으로 인한 유채의 수확 시기 지연 및 수확 후 이송시간이 길어짐에 따라 품질의 손상으로 인하여 유채종자의 초기시료의 상태가 좋지 않아서 발생한 것으로 판단된다.

표 3-42. 건조 후 발아율의 변화

Germinated seeds		
	개수	백분율
건조 전	76	-
건조 후	70	92.1%

나. 보리 건조

그림 3-85는 건조시간에 따른 열풍의 온도 변화를 나타낸 것이며, 그림에서와 같이 열풍온도는 평균 109.0℃(95.0~118.1℃)로 나타났으며, 열풍온도 편차는 ±11.6℃로 실험용 건조기보다 버너의 온도편차가 크게 나타났다. 목표 건조온도까지 도달하는 시간은 약 30분 정도 소요되었고 총 건조 시간은 8.5시간이 소요되었다.

그림 3-86은 건조실내의 보리의 곡온변화를 나타낸 것이며, 그림에서와 같이 실험 초기 곡온은 23.3℃이었으며, 건조가 진행되면서 점차 증가하여 최대 34.7℃까지 증가하였으며, 평균 30.9℃(23.3~34.7℃)로 나타났다. 수확 후 포대로 운반하여 바로 건조기에 투입하여 건조함으로 인하여 초기곡온이 실험용 건조기 곡온보다 높게 나타났다.

그림 3-87은 건조실험 중 배기부의 상대습도를 나타낸 것이며, 그림에서와 같이 배기구의 상대습도는 최대 63%로 나타났으며, 건조 중 점차 감소하여 28%까지 감소하였다.

그림 3-88은 건조 중 함수율 변화를 나타낸 것으로 초기 함수율 24.6%에서 최종함수율 10.6%까지 건조하는데 8.5시간이 소요되었으며, 건조속도는 1.65%/h로 나타났다. 건조속도는 건조 종료까지 비교적 같은 속도로 나타났으며, 초기에는 2시간까지 건조속도가 2.0%/h이상으로 건조되다가 그 이후에는 1.5~2.0%/h로 거의 동일한 건조속도를 나타냈다.

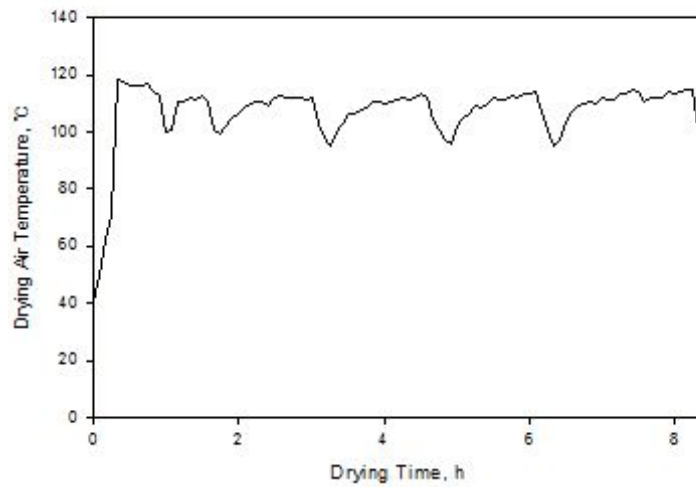


그림 3-85. 건조 중 열풍온도의 변화.

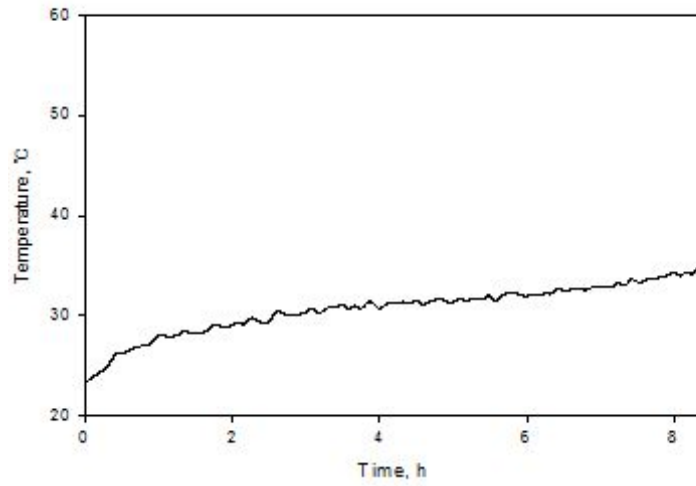


그림 3-86. 건조 중 유체중자온도의 변화.

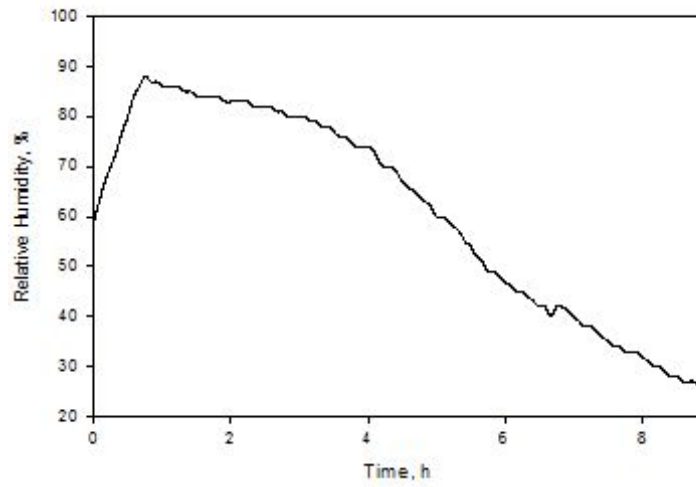


그림 3-87. 건조 중 배기부의 상대습도 변화.

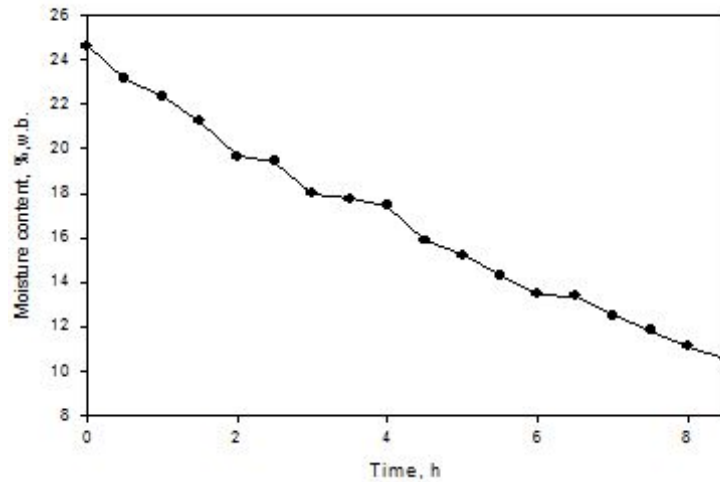


그림 3-88. 건조 중 함수율의 변화.

표 3-43은 건조소요에너지를 나타낸 것이다. 전력소비량은 6,480kJ로 나타났으며, 등유의 8,800 kJ/l를 적용한 결과 6,246,801kJ를 소비하였다. 제거된 수분량을 이용한 총에너지소비량은 4,553kJ/kg-water로 보리 건조기의 단점인 과도한 에너지가 소비되는 단점을 보완할 수 있었으며, 일반 곡물건조기의 에너지 소비량 5,000kJ/kg-water보다 약 10% 에너지 절감이 가능하였다.

표 3-43. 보리 건조의 소요에너지

	전력소비량 (kJ)	유류소비량 (kJ)	제거된 수분량 (kg)	총에너지소비량 (kJ/kg-water)
소비 에너지 (kJ/kg)	6,480	6,246,801	159.1	4,553

표 3-44는 발아율 변화를 나타낸 것이며, 표에서와 같이 발아율은 96.6%로 발아율 감소는 3.4%로 목표 발아율 5.0%보다 낮게 나타났다. 보리도 유채

종자와 같이 이상기온으로 인한 수확 시기 지연으로 인하여 초기시료의 발아율이 낮게 나타났다.

표 3-44. 건조 후 발아율의 변화

Germinated seeds		
	개수	백분율
건조 전	88	-
건조 후	85	96.6%

다. 벼 건조

그림 3-89는 건조시간에 따른 열풍의 온도 변화를 나타낸 것이며, 그림에서와 같이 열풍온도는 평균 108.5℃(91.2~121.6℃)로 나타났으며, 열풍온도 편차는 ±10.6℃로 유채종자 및 보리와 비슷한 오차가 나타났다. 목표 건조온도까지 도달하는데 약 30분 정도 소요되었고 총 건조 시간은 8.0시간이 소요되었다.

그림 3-90은 건조실내의 벼의 곡온변화를 나타낸 것이며, 그림에서와 같이 실험 초기 곡온은 17.6℃이었다. 건조가 진행되면서 점차 증가하여 목표함수율에 도달할 때 최고의 곡온이 나타났으며, 최대 36.3℃까지 증가하였고 평균 34.8℃(17.6~36.3℃)로 나타났다.

그림 3-91은 건조실험 중 배기부의 상대습도를 나타낸 것이며, 그림에서와 같이 배기구의 상대습도는 최대 99%로 나타났으며, 건조 중 점차 감소하여 65%까지 감소하였다. 건조 중 우천으로 인하여 습도가 높게 나타나 배기부의 상대습도가 전체적으로 높게 나타났다.

그림 3-92는 건조 중 함수율 변화를 나타낸 것으로 초기 함수율

22.3%,w.b.에서 최종함수율 15.0%까지 건조하는데 8.0시간이 소요되었으며, 건조속도는 0.98%/h로 나타났다. 다목적 건조기 벼의 목표 건감률 1.0%/h에 근접하였으며, 함수율 19.0%,w.b.까지는 건감율이 1.0%/h이상으로 건조되다가 그 이후에는 0.7~0.8%/h로 거의 동일한 건조속도를 나타냈다.

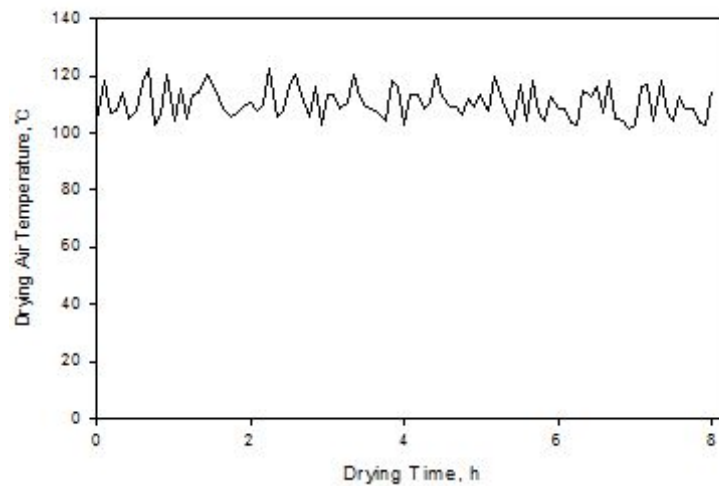


그림 3-89. 건조 중 열풍온도의 변화.

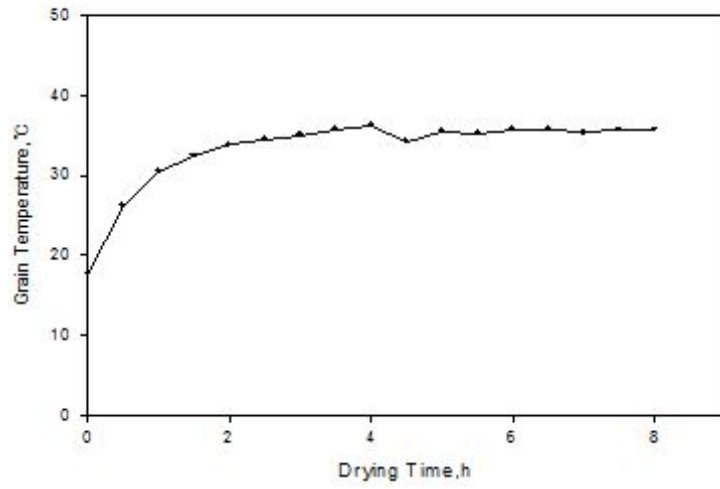


그림 3-90. 건조 중 유채종자온도의 변화.

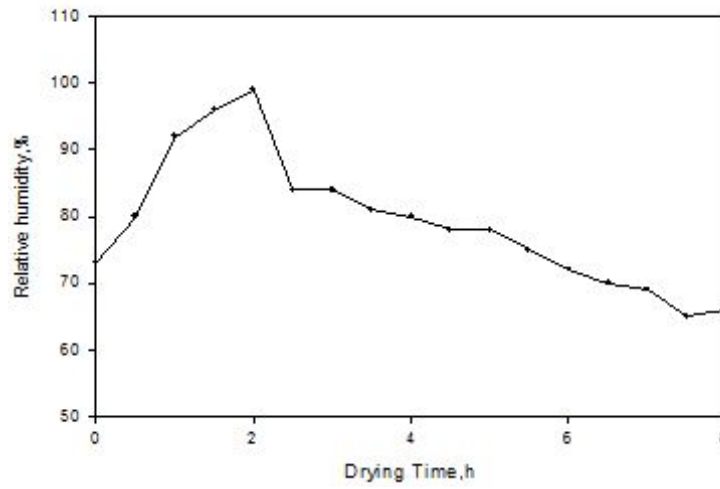


그림 3-91. 건조 중 배기부의 상대습도 변화.

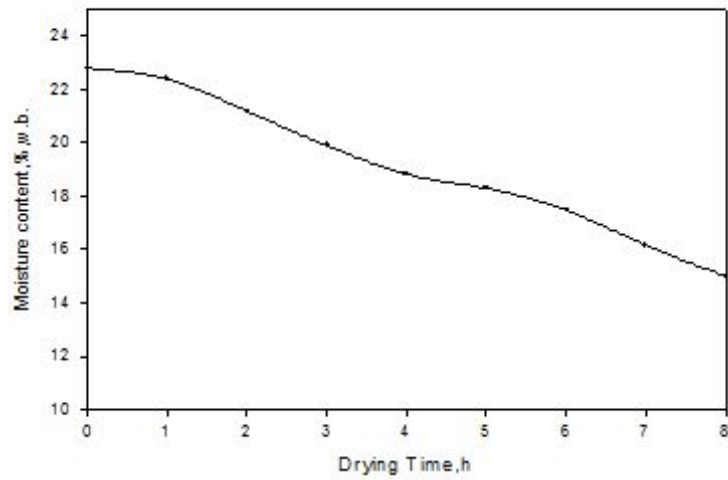


그림 3-92. 건조 중 함수율의 변화.

표 3-45는 건조소요에너지를 나타낸 것이다. 전력소비량은 6,020kJ로 나타났으며, 등유의 소요에너지는 3,287,790kJ를 소비하였다. 제거된 수분량을 이용한 총에너지소비량은 4,405kJ/kg-water로 기존 횡류형 순환식 곡물건조기의 소요에너지 5,000kJ/kg-water보다 적은 4,405kJ/kg-water로 나타났으며, 약 11% 에너지 절감이 가능하였다.

표 3-45. 보리 건조의 소요에너지

	전력소비량 (kJ)	유류소비량 (kJ)	제거된 수분량 (kg)	총에너지소비량 (kJ/kg-water)
소비 에너지 (kJ/kg)	6,020	3,287,790	87.3	4,405

표 3-46은 발아율 변화를 나타낸 것이며, 표에서와 같이 발아율은 96.7%로 발아율 감소는 3.3%로 기존 횡류형 순환식 곡물건조기와도 품질은 비슷한

수준으로 나타났다.

표 3-46. 건조 후 발아율의 변화

Germinated seeds		
	개수	백분율
건조 전	92	-
건조 후	89	96.7%

4. 다목적 건조기 경제성 분석

가. 국내 제품생산 및 시장 현황

보리, 콩, 옥수수, 유채를 대상으로 하는 다목적 곡물건조기 개발이 목표로 서 대상 건조곡물에 대한 전용 곡물건조기가 보급되지 않아 유사 건조기로 생산 및 시장현황을 추정하였다. 벼 건조에 주로 사용되고 있는 곡물건조기는 2010년 현재 77,830대가 보급되었으며, 최근 5년간 보급률은 매년 1.5% 증가되었다(농림수산식품부, 2010). 다른 농업기계는 지속적인 감소가 나타나지만 곡물건조기의 경우 보급률이 낮고 또한 기상이변으로 곡물 천일건조에 제약이 있어 기계건조를 선호하는 경향으로 인하여 약 20년 동안 지속적인 증가를 나타내고 있다. 따라서, 곡물건조기는 연간 약 1,500대가 생산·보급 될 것으로 전망된다.

보리의 기계건조에는 곡물건조기가 사용되고 있으나, 보리의 생산량은 쌀에 비해 약 3.1%에 불과하고, 실제 기계건조율도 약 50%로 추정된다. 따라서, 보리건조기 시장규모는 연간 약 700대로 추정된다(단, 연중건조가능일수

20일, 1일 1회전, 건조기 용량 5톤일 경우).

콩, 옥수수, 유채의 생산량은 113,000톤, 64,000톤, 719톤으로서, 향후 매년 기계건조율을 10%(현재 발작물 건조율 5.2%)정도 목표로 할 경우 연간 보급되는 건조기는 350대로 추정된다. 따라서, 다목적 곡물건조기의 시장규모는 연간 약 1,000대로 추정된다.

나. 국외 제품생산 및 시장 현황

유채의 주요 생산국가는 중국(28.2%) 및 인도(14.7%) 등 아시아 국가로서, 유채 건조가 가능한 건조기는 전무한 실정이다. 주요 식량자원인 벼에 대한 건조기는 최근 우리나라를 비롯한 일본, 대만 등에서 수출하고 있으며, 수출량도 증가하는 추세에 있다.

표 3-47. 주요 국가별 유채씨 생산량(단위 : 백만톤)

구 분	2002년	2003년	2004년
세 계 전 체	34,249	36,617	46,365(100%)
중 국	10,552	11,420	13,040(28.2%)
캐 나 다	4,407	6,771	7,728(16.7%)
인 도	5,083	3,918	6,800(14.7%)
독 일	3,849	3,638	5,277(11.4%)
프 랑 스	3,320	3,361	3,969(8.9%)
영 국	1,468	1,771	1,612(3.5%)

자료: 미래농정연구원, 2005

인도의 곡물 건조방법은 대부분 적정 수분이 될 때까지 수확하지 않거나,

고수분 상태로 수확된 경우 들이나 도로에서 천일건조되고 있다(한국식품연구원, 2000). 아시아 주요 국가들의 곡물 건조방법은 인도와 비슷하거나 더욱더 열악한 상황으로 인하여 심각한 곡물의 손상이 발생하고 있다.

최근 주요 아시아 국가들의 수확 후 관리기술 연구자 및 정부 담당자의 우리나라 방문이 증가하고 있는 등 수확 후 관리기술의 현대화에 지대한 관심을 가지고 있으며, 수확후처리기술에 대하여 국책사업으로 추진되고 있는 상황이다. 따라서, 향후 시장규모는 크게 증가할 것으로 기대된다. 현재 국내의 건조기 수출건수는 연간 354대로 다른 농기계보다 수출 물량이 매우 적다 하지만 현재 국내에서 생산되는 기존 순환식 횡류형 곡물 건조기는 우리나라, 일본, 중국 일부지역에서만 생산되는 자포니카 계열의 벼에 한정된 건조로 인하여 수출에 어려움이 있었다. 하지만 개발된 다목적 곡물건조기는 국외 다른 곡물 및 자포니카 및 인디카계열의 벼까지 건조가 가능함으로 지금 보다 많은 수출이 가능할 것으로 기대가 된다.

유채씨는 향후 3년간 농림부 발표에 의한 1500ha에서 생산할 경우 약 6,000톤이며, 이를 건조하기 위해서는 350대의 건조기(4~6톤규모)가 필요하다. 다목적 곡물 및 유채씨건조기는 기존 횡류형 건조기의 타공망이 없는 구조이므로 대당 가격은 약 7백만원 정도로 2백만원 저렴함으로 인하여 생산 절감 효과가 기대된다. 또한 5년 이후에 약 건조기 보급대수 증가 폭인 5.3%를 적용하게 된다면 생산 단가의 절약으로 다목적 건조기의 보급이 보다 수월할 것으로 예상된다.

기존 3.8톤 농가용 곡물건조기의 1회 평균 건조비용은 94,440원(면세유 L당 1,200원, 2008년 10월 기준)이며, 50%의 건조비용을 절감할 경우 약 47,220원이 절약될 것으로 추정되며, 작물의 건조가능일수를 평균 15일, 1일 건조 회전수를 약 1.7회로 할 경우에 421백만원의 연료절감효과가 있으며, 연료로 환산 시 연간 경유 351,198L를 절약할 수 있을 것으로 기대된다.

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

국내에서 보리, 콩, 옥수수 및 유채종자의 건조는 자연건조에 대부분 의존함으로 인하여 품질손상과 벼 건조기는 활용도가 매우 낮아 보급에 제한적이다. 따라서, 우리나라의 대표적인 곡물에 대한 품질향상을 위해서는 기계건조 방법이 확대 보급되어야 하며, 건조기의 활용도를 높여 효율성을 증대하기 위해서는 보리, 콩, 옥수수 및 유채종자 뿐만 아니라 식량자원인 벼의 건조도 가능한 다목적 곡물건조기 개발이 요구되고 있다. 그러나 기존 순환식 횡류형 곡물건조기는 구조 및 건조 원리상 벼 이외에 다른 종류의 곡물을 건조하기에는 어려운 실정이다.

따라서, 벼 이외에도 국내에서 많이 생산되는 보리, 콩, 옥수수 및 유채종자까지 건조가 되는 건조기 개발을 위해서 본 연구가 수행되었다.

주요연구결과	달성도	평가방법
<ul style="list-style-type: none"> ○ 다목적 곡물건조기의 건조 시뮬레이션 프로그램 개발 - 건조 시뮬레이션에 필요한 옥수수, 콩, 보리 및 유채종자에 관한 물리적 특성 분석 (기하학적 특성, 산물밀도, 마찰계수, 종말속도) - 옥수수, 콩, 보리 및 유채종자의 평형함수율모델 및 박층건조모델 개발 - 건조조건과 발아율 또는 동할율 관계 구명 - 적정건조조건(함수율 별 적정건조온도 및 상대습도) 구명 - 건조기 시뮬레이션 모델 개발 	●	<ul style="list-style-type: none"> ○ 전문 학술지 논문투고 1편 ○ 산업화를 위한 설계 기술 확보 ○ 효율적인 건조운영 방법 확립

주요연구결과	달성도	평가방법
<ul style="list-style-type: none"> ○ 건조기 최적 설계프로그램 개발 <ul style="list-style-type: none"> -목적함수 : 건조 소요에너지의 최소화 -제한조건 : 건조속도와 건조곡물의 품질 	●	<ul style="list-style-type: none"> ○ 전문 학술대회 논문 발표 1편
<ul style="list-style-type: none"> ○ 건조기의 최적 설계요인 결정 <ul style="list-style-type: none"> -벼, 옥수수, 콩, 보리 및 유채종자의 다목적 건조기의 최적 송풍량, 건조온도, 유하속도, 곡물층 두께, 템퍼링실/건조실 비등을 결정함 	●	<ul style="list-style-type: none"> ○ 산업화를 위한 설계 기술 확보 ○ 특허 출원 예정
<ul style="list-style-type: none"> ○ 다목적 곡물 건조기 작동조건 및 제어방안 결정 <ul style="list-style-type: none"> -온도, 함수율 및 안전장치 제어조건 결정 (발아율 90%, 동할율 3%이하) 	●	<ul style="list-style-type: none"> ○ 산업화를 위한 설계 기술 확보 ○ 산업화를 위한 제작 기술 확보
<ul style="list-style-type: none"> ○ 다목적 실험용 건조기의 상세 설계 및 제작 <ul style="list-style-type: none"> -건조기용량 : 500kg내외 -건조기 시뮬레이션 프로그램 검증 실험 	●	<ul style="list-style-type: none"> ○ 산업화를 위한 설계 기술 확보 ○ 산업화를 위한 제작 기술 확보 ○ 공학박사 학위논문 1편 제출(2008)
<ul style="list-style-type: none"> ○ 다목적 건조기의 본기 상세 설계 및 제작 <ul style="list-style-type: none"> -건조대상 : 벼, 보리, 콩, 옥수수 및 유채종자 -건조용량 : 4 ~ 6톤(농가용) 	●	<ul style="list-style-type: none"> ○ 산업화를 위한 설계 기술 확보 ○ 산업화를 위한 제작 기술 확보

주요연구결과	달성도	평가방법
<p>○ 다목적 건조기 현장실험</p> <ul style="list-style-type: none"> -대상곡물 : 벼, 보리, 콩, 옥수수 및 유채 종자 건조 -건조물량 : 4 ~ 6톤(4 ~ 5회) -건조특성실험 : 건조속도, 함수율, 제수율, 소요에너지 분석 -품질평가 : 각 곡물의 품질 특성 구명 	●	○ 현장실험 등 운영체계 정립
<p>○ 다목적 곡물건조기의 적정작동조건 및 경제성 분석</p> <ul style="list-style-type: none"> -곡물의 종류별 적정 작동조건 결정 -기존 건조기 대비 경제성 분석 	●	○ 효율적인 건조운영 방법 확립

주) ● : 달성도 100%

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

현재 국내의 곡물건조기는 2010년 현재 77,830대가 보급되었으며, 현재의 곡물건조기 증가 추세로 예측할 경우 2015년에는 85,930대가 국내에 보급될 것으로 기대된다. 그러나 건조작업의 기계화율이 2010년 현재 58.5%(일본 2002년 91.8%)에 불과하고, 벼 외에 다른 곡종에 대한 건조 조건은 더욱더 열악한 상황이다.

보리의 기계건조에는 곡물건조기가 사용되고 있으나, 보리의 생산량은 쌀에 비해 약 3.1%에 불과하고, 실제 기계건조율도 약 50%로 추정된다. 따라서, 보리건조기 시장규모는 연간 약 700대로 추정된다(단, 연중건조가능일수 20일, 1일 1회전, 건조기 용량 5톤일 경우).

콩, 옥수수, 유채의 생산량은 113,000톤, 64,000톤, 719톤으로서, 향후 매년 기계건조율을 10%(현재 발작물 건조율 5.2%)정도 목표로 할 경우 연간 보급되는 건조기는 350대로 추정된다. 따라서, 다목적 곡물건조기의 시장규모는 연간 약 1,000대로 추정된다.

유채의 주요 생산국가는 중국(28.2%) 및 인도(14.7%) 등 아시아 국가로서, 유채 건조가 가능한 건조기는 전무한 실정이다. 주요 식량자원인 벼에 대한 건조기는 최근 우리나라를 비롯한 일본, 대만 등에서 수출하고 있으며, 수출량도 증가하는 추세에 있다. 유채씨는 향후 3년간 농림부 발표에 의한 1500ha에서 생산할 경우 약 6,000톤이며, 이를 건조하기 위해서는 350대의 건조기(4~6톤규모)가 필요하다. 다목적 곡물 및 유채씨건조기는 기존 황류형 건조기의 타공망이 없는 구조이므로 대당 가격은 약 7백만원 정도로 2백만원 저렴함으로 인하여 생산 절감 효과가 기대된다. 또한 5년 이후에 약 건조기 보급대수 증가 폭인 5.3%를 적용하게 된다면 생산 단가의 절약으로 다목적 건조기의 보급이 보다 수월할 것으로 예상된다.

이를 위해 2011년 현장 시험사업을 통해 2012년에는 상업화가 가능할 것으로 판단하고 있으며, 향후 특허 등 산업화를 위한 체계를 점검할 예정이다.

본 연구는 3년간 진행되었으며 벼 외에 보리, 옥수수 및 콩의 건조를 수행함으로 제한되어 있는 시료확보에 어려움에도 불구하고, 전문학술지 논문게재 2편 , 학술대회 논문발표 1편등의 연구 활용을 통해 학술적 가치로도 인정받고 있다. 또한 향후 전문학술지 1편 및 특허출원 1편을 준비 중에 있다.

제 6 장 연구개발과정에서의 수집한 해외과학기술정보

기술정보	기술정보명	출처
○ 유채씨 B. napus L종을 이용한 EMC모델 구명	Thin layer drying rate and loss of viability modelling for rapeseed	Agricultural Engineering Research 74(1):33-39
○ 유채씨를 이용한 건조기 시뮬레이션을 이용하여 건조함수율에 따른 건조시간 및 소요에너지 예측함	Simulation and optimization of energy systems for in-bin drying of canola grain(rapeseed)	Energy Conversion and Management 36(1): 41-59
○ 횡류형과 병류형 건조의 특성을 성능그래프를 이용하여 비교	Compersion of concurrent flow, cross flow and counter flow grain drying methods	Market Res, Ret. 841. USDA, Washington D.C.(1969)
○ 강낭콩을 열풍의 흐름과 콩의 흐름을 동일하게 하강하여 건조	Simultaneous heat and mass transfer between air and soy bean seeds in a concurrent moving	Food Science and Technology:393-399, 36
○ 쌀 및 옥수수를 mixed-flow를 이용한 건조	Modeling and control of a mixed-flow rice dryer with emphasis on breakage quality	Food Engineering: 303-309, 49.

기술정보	기술정보명	출처
○ 보리의 기존 건조기의 고정층 건조와 원적외선건조기의 건조 특성비교	Drying characteristics of barley grain dried in a spouted-bed and combined IR-Convection dryers	Drying Technology :1621-1632, 25
○ 타공망이 없는 구조의 건조기를 사용하여 옥수수를 건조	Simulation for design of commercial concurrent flow grain dryers	Trans. ASAE 21 : 978-981

제 7 장 참고문헌

1. 고헌균, 금동혁, 김동철, 김만수, 김명환, 김용현, 박경규, 박호석, 이종호, 장동일, 정정훈, 조영길, 한충수. 1995. 미곡종합처리시설 -이론과 실제-문운당.
2. 고헌균, 금동혁, 김동철, 박호석, 한충수. 2001. 농협미곡종합처리장 설계기준. 농협중앙회 미곡종합처리장 자문단.
3. 금동혁, 김동철, 박호석, 한충수 등. 1994. 미곡종합처리장 이론과 실무. 농협전문대학
4. 금동혁, 1978. 태양열을 이용한 곡물건조에 관한 연구. 한국농업기계학회지 3(1)
5. 금동혁, 1984. 곡물건조기의 배기열 재이용 및 열효율 개선에 관한 연구. 9(12)
6. 금동혁, 1986. 시뮬레이션에 의한 순환식 곡물건조기의 성능분석. 성균관대학교 논문집 37(1)
7. 금동혁, 1987. 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 순환식 곡물건조기의 적정 건조방법. 농사 논문집(농산학 협동편) : 373-390
8. 금동혁, 1988. 벼의 순환병류건조기의 시뮬레이션. 한국농업기계학회지, Vol.13, No.3, 59
9. 성명환. 2008. 세계 곡물 가격 동향. KREI 한국농촌경제연구원.
10. 성명환. 2008. 세계 곡물 수급 동향. KREI 한국농촌경제연구원.
11. 조창용. 2006. 흰찰쌀보리의 품질향상방안에 관한 연구. 군산시농업기술센터. 새기술실증시험연구 제2권
12. Anderson, R.J. 1972. Commercial countercurrent-flow heating counterflow cooling dryer - Anderson medel. ASAE paper No. 72-846
13. ASAE year book, 1983.
14. Arinze, E. A., S. Sokhansanj. and G. J. Schoenau. 1993.

Development of Optimal Management Schemes for in-bin Drying of Canola Grain (Rapeseed). *Computer and Electronic in Agriculture* 9(2):159–187.

15. Baker–Arkema, F.W. Brook, R.C. Walker, L.P. Kalchik, S.J., and Adna dnia, A.197 Concurrent flow grain drying grain quality aspects. *Com Quality Res. Conf. Proc.*, Univ. oof ILL., Urbana, IL.
16. Baker–Arkema, F. W., Brooker, D.B., and Hall, C.W. 1972. Comparative evaluation of cross–flow and concurrent flow grain dryers. *ASAE paper* 72–849.
17. Brook. R. C., F. W. Bakker–Arkema, 1977. Design of multi stage grain dryers using computer optimization. *ASAE Paper* no.77–3529
18. Brook. R. C., F. W. Bakker–Arkema, Concurrent flow drying of food grains. *Agricultural engineering department Michigan State University.*
19. Bakker–Arkema. F. W., 1982, Concurrent–flow rice drying, *ASAE Paper* no. 82–3068
20. Brook. D. B., 1961, Pressure patterns in grain–drying systems established by numerical methods, *Transactions of the ASAE* 72:74
21. Brook, R.C., Bakker–Arkema, F.W. 1978. Simulation for design of commercial concurrent flow grain dryers. *Trans. ASAE* 21 : 978–981
22. Brook, R.C. 1977. Design of multi–stage grain dryers. Ph.D. Thesis, Mich. State Liniv., E. Lansing. MI.
23. Baughman, G.R., Barre, H.J., and Hamdy, M.V. 1973. Experimental study and simulation of concurrent flow dryers. *Trans. ASAE* 16: 890–894
24. Barrozo, M. A. S., A. M. Souza., S. M. Costa. and V. V. Murata. 2001. Simultaneous Heat and Mass Transfer Between Air and Soybean Seeds in a Concurrent Moving Bed. *Food Science and*

- Technology:393–399, 36.
25. Calderwood, D.L. 1970. Operating characteristics of two kinds of portable grain dryers. Proc. 13th Rice Tech. Work Group, U.S.Dept. Agric., Beaumont, Tx. Feb. 24–26
 26. Correa, P. C., J. H. Martins. and D. Christ. 1999. Thin Layer Drying Rate and Loss of Viability Modeling for Rapeseed (Canola). *Agricultural Engineering Research* 74(1):33–39.
 27. Cenkowski, S., W. E. Muir. and D. S. Jayas. 1990. Simulation of Canola and Barley Drying in a Deep Bed. *Food Process Engineering*:171–190, 12.
 28. Courtois, F., M. A. Archila., C. Bonazzi., J. M. Meot. and G. Trystram. 2001. Modeling and Control of a Mixed–Flow Rice Dryer with Emphasis on Breakage Quality. *Food Engineering*:303–309, 49.
 29. Crisp, J. and J. L. Woods. 1994. The Drying Properties of Rapeseed. *Agricultural Engineering Research* 57(2):89–97.
 30. Doymaz, I. 2005. Drying Behaviour of Green Beans. *Food Engineering*:161–165, 69.
 31. Farmer, D.M. 1972 Optimization techniques for grain dryer design and analysis, Ph. D. thesis, Mich. State Univ., E. Lansing, MI.
 32. Felipe, C. A. S. and M. A. S. Barrozo. 2003. Drying of Soybean in a Concurrent Moving Bed : Heat and Mass Transfer and Quality Analysis. *Drying Technology* 21(3):439–456.
 33. Gely M. C. and S. A. Giner, 2002. Comparison of Costs for Soybean Conventional Drying and Dryeration. A Computer Simulation Analysis. Paper No. 026080 for 2002 ASAE Annual Meeting, Chicago, Illinois, USA 28–31 July 2002. ASAE St Joseph MI USA.
 34. Ghaly, T. F. and S. W. Sutherland. 1984. Heat Damage to Grain and Seeds. *Agricultural Engineering Research*:337–345, 30.
 35. Gely, M. C. and S. A. Giner. 2007. Diffusion Coefficient

- Relationships During Drying of Soya Bean Cultivars. *Biosystems Engineering* 96(2):213–222.
36. Han, J. W. 2006. Development and optimization of circulating concurrent–flow rice dryer. Ph.D. Thesis, Sungkyunkwan University.
 37. Han, J. W., D. H. Keum., H. Kim. and S. E. Lee. 2006. Thin Layer Drying Model of Green Rice. *Biosystems Engineering* 31(5):410–415.
 38. Hong, S. J., L. A. Duc., J. W. Han., H. Kim. and D. H. Keum. 2008. Physical Properties of Rapeseed(II). *Biosystems Engineering* 33(3):173–178.
 39. Ingram, G.W. 1976. Deep bed dryer simulation with intra–particle moisture diffusion. *J.Agric. Engr.Res.* 21 : 262–272
 40. Keum, D.M. and R.P. Singh. 1986, Continuous flow rice drying using simulation *KSAM* 11 (2)
 41. Koro Kato., 1985. An equilibrium moisture content equation for grain in 0% to saturated conditions and experimental results of rice. Research report on Agricultural machinery. No.15
 42. Keum, D. H. and S. D. Yi. 1990. Simulation of Natural Air Drying of Barley. *Biosystems Engineering* 15(1):44–51.
 43. Kim, Y. H., J. W. Han. and D. H. Keum. 2007. Desorption EMC Models for Rapeseed. *Biosystems Engineering* 32(6):403–407.
 44. Kim, J. W. 1987. Determination of Bulk Physical and Thermal Properties of Barley. M.S. thesis. KyeongSang National University.
 45. Keum, D. H., H. Kim. and N. U. Hong. 2002. Equilibrium Moisture Contents and Thin Layer Drying Equations of Cereal Grain and Mushrooms(II). *The Korean Society for Agricultural Machinery* 27(1):219–226.
 46. Marchant. J. A., 1976, Prediction of fan pressure requirements in the drying of large hay bales, *Japan agricultural engineering research*, vol(21) 333:346

47. Mülbauer, W., W Huss and H. Kuppinger. 1976. Farbmétrische schnellmethode zum Erkennen einer proteinschadigung bei der Trocknung von Maiskornern mit hohen Temperaturen. Grun Landtechnik 26, Nr. 4.S. 128–134
48. Markowski, M., W. sobieski., I. Konopka., M. Tanska. and I. Bialobrzewski. 2007. Drying Characteristics of Barley Grain Dried in a Spouted–Bed and Combined IR–Convection Dryers. Drying Technology:1621–1632, 25.
49. Masoumi, A. A. and L. Tabil. 2003. Physical properties of chickpea (*C. arientinum*) cultivars. Paper No. 036058 for 2003 ASAE Annual Meeting, Las Vagas, Nevada, USA 27–30 July 2003. ASAE St Joseph MI USA.
50. Nitz, M. and O. P. Taranto. 2007. Drying of Beans in a Pulsed Fluid Bed Dryer: Drying Kinetics, Fluid–Dynamic Study and Comparisons with Conventional Fluidization. Food Engineering:249–256, 80.
51. Öholm, G.V. 1955. Method and arrangement for drying grain and the like in drying silo provided with direct heat supply.
US patent No : 2, 706, 343
52. Oliveira, C. A. and S. C. S. Rocha. 2007. Intermittent Drying of Beans in a Spouted Bed. Chemical Engineering 24(4):571–585.
53. Pixton, S. W. and S. Henderson. 1981. The Moisture Content–Equilibrium Relative Humidity Relationships of Five Varieties of Canadian Wheat and of Candle Rapeseed at Different Temperatures. Stored Products Research 17(4):187–190.
54. Qaisrani, R. and S. Beckett. 2003. Possible Use of Cross–Flow Dryers for Heat Disinfestation of Grain. Australian Postharvest Technical Conference, Canberra, 25–27 June 2003.
55. Rumsey, T.R. and R.P. Sinḡ. 1978. Pressure drop through a bed of food grains. ASAE paper No. 78–6546.

56. Schmidt, J.L. and E.H. Jebe. 1959. The effect of head rice and the germination of Rice Trans, ASAE 2: 26–29, 31.
57. Sitipe, D.R., E.T. Wratten, and M.F. Miller. 1973. Rice drying and processing. Qnnual report of Louisiana Rice Experiment Station.
58. Steffe, J.F. and R.P. Singh. 1980 a. Liquid diffusivity rough rice components. Trans. ASAE 23(3) : 767–774, 782.
59. Steffe, J.F. and R.P. Singh. and A. S. Bakshi. 1979. Influence of tempering time and cooling on rice milling yields and moisture removal. Trans. ASAE 22(5) : 1214–1218, 1224.
60. Shobana, S. and N. G. Malleshi. 2006. preparation and Functional Properties of Decorticated Finger Millet (Eleusine Coracana). Food Engineering:529–538, 79.
61. Soponronnarit, S., S. thanit., W. Somboon. and W. Wivat. 2001 Fluidised Bed Drying of Soybeans. Stored Products Research:133–151, 37.
62. Sun, D. W. and C. Byrne. 1998. Selection of EMC/ERH Isotherm Equations for Rapeseed. Agricultural Engineering Research:307–315, 69.
63. Schoenau, G. J., E. A. Arinze. and S. Sokhansanj. 1995. Simulation and Optimization of Energy Systems for In–Bin Drying of Canola Grain (Rapeseed). Energy Conversion and Management 36(1):41–59.
64. Thompson, T.L., Foster, G.H., and Pert, R.M. 1969.. Compersion of concurrent flow, cross flow and counter flow grain drying methods. Market Res, Ret. 841. USDA, Washington D.C.
65. Walker, L.P. 1977. Concurrent flow rice drying. ph.D. Thesis Mich. State Univ., E.Lansing, MI.
66. Walker. L. P., F. W. Bakker–Arkema. 1981. Energy efficiency in concurrent flow rice drying. Transactions of the ASAE 1352:1356
67. Wang. C.Y. 1978. Simulation of thin–layer and deep bed drying of

- rough rice. ph. D. Thesis U.C.D.
68. Wratten, F.T., W.D. Poole, J.L. Cheseness, S. Bal, and V. Banarao. 1969. Physical and thermal properties of rough rice. ASAE paper No. 68-909
 69. Zahed, A. H. 1982. Simulation of drying and air channeling in concurrent flow rice dryer. ph. D. Thesis. U.C.D.
 70. Zuritz, C. A. 1978. Equilibrium moisture content of rough rice from 10°C to 40°C. M. S. Thesis. U.C.D.
 71. Zuritz, C. A. 1979. Unpublished. equilibrium moisture content for rough rice at 60°C Dept of Agric. Eng., U.C.D.