

# 벼 건조 및 저장용 곡물 사일로 시스템의 개발 및 자동화<sup>1)</sup>

Development and Automation of Grain Silo System  
for Drying and Storage of Rough Rice

정 종 훈<sup>2)</sup>  
정희원  
J. H. Chung

## 1. 서론

고품질의 쌀을 생산하기 위해서 전국적으로 미곡종합처리장을 건설하고 있다. 이들 미곡처리장의 건조저장시설로서 곡물 사일로(빈)를 많이 설치하여 사용하고 있다. 그러나 곡물 사일로를 외국에서 그냥 도입하여 자동화된 미곡종합처리장에 사용하고 있기 때문에 우리 실정에 맞지 않는 등 많은 애로사항을 느끼고 있다. 특히 곡물 사일로는 외기의 영향을 많이 받고 있기 때문에 적정 단열처리가 요구되어지고, 곡물 적정 건조 및 저장 그리고 이송을 위해서는 자동화된 계측, 건조, 저장 및 이송 시스템들의 개발이 요구되고 있다.

최근에 곡물 사일로에서 많이 곡물을 건조하고 저장하고 있으나 곡물의 상태를 연속적으로 측정할 수 있는 장치들이 설치되지 않아서 곡물을 적정 함수율까지 건조하지 못하고 저장관리하는 데에도 많은 문제점을 느끼고 있다. 이에 사일로내에서 곡물을 반입, 건조 및 저장하는 중에 곡물의 퇴적고, 온도와 함수율, 평형상대습도 등을 연속적으로 모니터링하고 송풍기, 히터, 교반기 및 기타 부속장치들을 자동제어할 수 있는 시스템의 개발이 요구된다. 그리고 사일로가 외기의 영향을 많이 받아 곡온이 상승하기 때문에 일부에서는 우레탄으로 단열처리 하고 있으나 많은 노동력과 시설비용을 요하고 있어 이에 적절한 대체 단열방법의 개발이 시급하다. 또한 사일로 부속장치로서 고품질의 쌀을 생산하기 위해서는 중저온에서 벼를 저장할 수 있는 곡물냉각기의 개발과 사일로내의 잔곡을 완전히 배출시킬 수 있는 흡인식 공기이송장치의 개발도 절실히 요구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 곡물 사일로 사용상의 문제점들을 해결하고 벼 적정 건조 및 저장을 위해서 대체 단열방법, 자동 건조저장시스템, 곡물냉각기, 흡인 및 압송식 공기이송장치들을 개발하고자 하였다. 본 연구의 구체적 목적은 다음과 같았다.

- 1) 초음파 센서를 이용해 곡물 퇴적고를 연속적으로 자동 측정하는 장치를 개발한다.
- 2) 곡물 함수율, 곡온, 평형상대습도를 연속적으로 모니터링하는 자동 계측시스템을 개발한다.
- 3) 곡물 자동 건조 및 저장관리를 위해 PLC 및 PC를 이용한 건조저장시스템을 개발한다.
- 4) 사일로내의 잔량 처리를 위한 흡인 및 압송식 공기이송장치를 개발한다.
- 5) 사일로 단열처리를 위해 우레탄 대체 단열처리방법을 개발한다.
- 6) 곡물을 사일로에서 중저온으로 저장할 수 있도록 곡물 냉각기를 개발한다.

## 2. 재료 및 방법

전남대학교 농과대학 농장에 설치한 50톤 규모의 철제 원형 사일로를 연속식 곡물 건조 및 저장시설로 사용할 수 있도록 다음과 같이 사일로 시스템을 개발하고 자동화하였다. 이 개발된 사일로시스템을 사용하여 곡물 건조 및 저장실험을 실시함으로써 개발된 시스템을 검증하고자 하였다. 본 실험의 시료로서 전남대학교 봉황농장에서 재배되어 수확된 동진벼를 사용하였다.

### 가. 곡물 사일로의 부속장치

플랫형의 철제 원형 사일로(50톤 용량)에 부속장치들로서 곡물 균분기, 3개의 오거가 달린 교반기, 양날개식의 동력스위프오거, 교반기의 작동 가능 시점과 곡물 파반입을 알려주는 곡물 레벨러, 사일로내의 곡물의 온도 및 함수율을 측정하는 센서 및 모니터, 다공철판 밑의 배출오거, 32 kW의 히터와 5마력의 원심식 송풍기, 공기실의 온도와 습도를 측정하여 자동으로 제어하는 제어기 등을 설치하였다. 사일로에 부된한 송풍기는 풍량이 190 cmm이고 정압이 76 mmAq인 원심식 팬이다. 또한 32 kW의 히터는 8 kW의 히터 4개로 구성되어 있으며 각각 개별적으로 작동되도록 되어 있다.

### 나. 곡물 퇴적고 자동측정장치 개발

초음파 센서(Vegason 73-1, 33kHz, 최대 10m, 반사각 12도, 출력 4-20mA)를 사일로 내부의 상단부에 설치하고 이를 12bit의 자료수집장치(A/D Converter) 및 컴퓨터에 연결하여 연속적으로 곡물의 퇴적고를 모니터링하고 저장할 수 있는 곡물 퇴적고 자동측정장치를 개발하였다(그림 1). 그리고 곡물 퇴적고 자동측정장

1) 본 연구는 농림부 특별연구(첨단)비 및 선일기계공업사의 참여기업연구비로 수행됨

2) 전남대학교 농과대학 농공학과 농업기계전공 부교수

치의 성능을 평가하고자 하였다.

#### 다. 곡온, 함수율, 상대습도 자동계측시스템 개발

곡물 사일로에 반입되는 곡물의 무게를 정확히 측정하기 위해서 최대 100kg 용량의 호퍼식 계량기를 설치하였다. 이 호퍼식 계량기는 정량식으로 2단으로 조절하고 각 배치당 무게와 총무게를 알 수 있도록 하였고, 각 배치당 원하는 무게를 설정하여 허용 오차도 조절 가능하도록 계기판을 설치하였다. 사일로에 반입되는 곡물의 온도와 함수율을 알 수 있도록 호퍼식 계량기에 곡온 및 수분 측정 센서 및 장치를 설치하였다. 정전용량식 수분센서를 120° 간격으로 3곳에 설치하여 계량기내의 3지점에서 수분을 연속적으로 측정하고 비교하며 기록하도록 하였다(그림 2). 그리고 이들 곡물온도 및 함수율이 전부 제어판넬에 나타나도록 하였다. 곡물 사일로 내의 곡물의 온도를 측정하기 위해서 pt 100Ω의 열전대를 사일로 하부(다공철판으로부터 약 20cm)의 3지점(사일로 중앙, 양쪽벽으로부터 1m 지점 2곳)에 설치하였다. 또한, 사일로내의 곡물 함수율(온도 포함)을 자동으로 측정하기 위해서 사일로 벽면 2지점(다공철판으로부터 30cm지점과 90cm지점)과 사일로 중앙(높이 조절가능, 그림 3)에 정전용량식 수분센서를 설치하였다. 그리고 사일로 다공철판 밑에 설치되어 있는 곡물 배출용 스크루오거의 튜브에 또하나의 정전용량식 수분센서를 설치해 배출되는 곡물의 함수율과 온도를 자동으로 측정하여 제어판넬에 나타내도록 하였다. 또한 사일로 외부 및 내부와 다공철판 밑의 공기실에 온도와 상대습도를 측정하는 장치를 설치해 곡물의 평형상대습도 및 평형온도 그리고 외기 및 공기실의 온,습도를 측정하도록 하였다. 따라서 곡물 및 공기 온도, 함수율 등의 모든 계측치들이 PLC와 PC에 접속되어 자동으로 모니터링되고 저장되도록 계측시스템을 개발하였다.

#### 라. 자동 건조 및 저장 시스템의 개발

사일로내의 곡물 상태 및 외기조건들을 연속적으로 측정하기 위해 설치된 센서들로부터 얻어진 곡물의 온도와 함수율 그리고 대기조건 등을 PLC 및 PC에 설정된 온도 및 함수율값 등의 건조 및 저장기준치들과 비교하여 사일로에 설치된 팬, 히터, 교반기, 냉각기가 자동으로 작동되도록 시스템을 개발하였다. 즉 사일로 내 곡물의 온도와 함수율 그리고 외기 온도 및 상대습도들을 연속적으로 계측하고, 이를 자료를 기초로 평형상대습도, 평형함수율(Henderson식 이용), 공기부폐지수를 산출하여 건조 및 저장기준에 의하여 사일로의 부속장치들을 자동으로 제어하도록 PLC와 PC를 이용한 사일로 건조저장시스템을 개발하였다.

#### 마. 고성능 곡물배출장치 설치 및 공기이송장치 개발

곡물 사일로에서 곡물 배출이 가장 큰 문제점의 하나이다. 일부에서는 사일로내에 필요에 따라 설치하는 수동식 스위프오거를 선택했으나 사일로내에 이것을 고정 설치함으로써 배출이 잘되지 않고 전선이 꼬여 화재도 발생하는 등 많은 문제점들을 야기하였다. 이에 대신해서 설치한 동력 스위프오거도 곡물부하에 의해 제대로 배출을 시키지 못하며, 배출하더라도 많은 잔곡을 남기는 문제점을 갖고 있다. 이에 강력한 구동력을 갖는 양날개식의 고성능의 동력스위프오거(twin power sweep auger)를 국내 최초로 설치해 곡물을 어느정도 사일로내에 퇴적되어 있더라도 연속적으로 곡물을 균일하게 배출시키고, 최종 곡물 반출시 잔곡을 최소화하도록 하였다. 그리고 최종적으로 사일로에 남는 곡물은 흡인 및 압송·겸용의 공기이송장치를 개발하여 완전 배출하고자 하였다. 공기이송장치는 약 15ton/h의 처리능력을 갖고서 사일로내의 잔량곡물을 흡인하여 자체 부착된 계량기로 무게를 쟁 후에 원하는 장소에 곡물을 이송할 수 있도록 제작하였다(그림 5).

#### 바. 사일로시스템의 자동제어장치

##### 1) PLC 제어시스템

곡물의 반입, 조선, 계량, 이송 등의 공정들과 계측 및 제어과정을 한 번에 쉽게 볼 수 있도록 칼라 그래픽보드와 96채널의 PLC를 이용한 중앙집중제어반을 개발하였다. 중앙집중제어반에서는 곡물처리를 자동과 수동의 두가지 형태(mode)에서, 곡물처리를 자동으로 할 경우에는 자동반입, 자동건조, 자동반출 등이 가능하도록 하였으며, 수동으로 처리할 경우에는 승강기, 조선기, 계량기에 부착된 에어실린더의 개폐장치, 이중댐퍼, 곡물 균분기, 교반기, 동력스위프오거, 공기실 밑의 반출오거, 팬, 히터 등의 모든 사일로 부속장치들을 푸시버튼을 사용하여 수동으로 조작할 수 있도록 하였다. 또한 그래픽보드에 매회 측정되는 호퍼스케일의 계량치와 곡물의 온도 등이 자동으로 나타나도록 되어 있으며, 곡물 건조시 원하는 함수율과 일정의 온도도 그래픽보드에서 설정할 수 있도록 하였다. 그러나 호퍼스케일과 사일로내의 곡물 함수율과 온도는 별도의 모니터에서 나타나도록 하였다.

##### 2) PC 제어시스템

사일로에 설치된 모든 센서들을 PLC에 연결하여 PLC 제어도 가능하고 또는 선택적으로 이들 센서들이 PC에도 연결되도록 하여 PC에서도 모든 곡물의 상태 및 외기 조건 그리고 부속장치들의 작동상태들을 모니터링하고 제어할 수 있는 시스템을 개발하였다.



그림 1 곡물 퇴적고 측정용  
회음파 센서

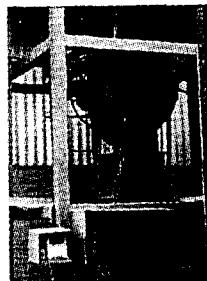


그림 2 호퍼스케일에 부착된  
정전용량식 수분센서



그림 3 사일로 중앙에 설치된  
정전용량식 수분센서

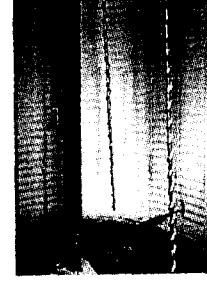


그림 4 사일로 내벽이  
단열재로 코팅됨

#### 사. 사일로 단열처리 대체 방법 개발

사일로는 시설비용이 적고 관리하기에는 편리하나 대기의 영향을 많이 받아 사일로내의 곡물 온도가 상승하고 일교차가 심할 때에는 결로현상이 생길 수 있다. 이에 사일로에 우레탄과 철판으로 단열처리하고 있으나 시설비용이 많이 들고 많은 노동력을 요하고 있다. 또한 일부에서는 사일로 용접에 의한 부주의로 우레탄에 불이 붙어 사일로내의 곡물이 타버린 경우도 있다. 특히 사일로를 단열하지 않을 경우에는 여름철에는 사일로내의 공기온도가 50°C 이상이 되고 곡물의 온도도 25-35°C까지 상승하므로 사일로에 적절한 단열처리가 절대적으로 요구되고 있다. 이에 고비용과 고노동력을 요하는 우레탄 단열처리를 대체할 수 있는 방법을 개발하고자 하였다.

이에 미 NASA 등에서 액체산소 배관의 단열에 사용되고 있는 단열 코팅제(Temp coat, SW-270)가 학성 및 내마모성이며 경량이며 저렴한 액상형 단열재로서 곡물 사일로 단열에 사용 가능하리라 생각되었다. 또한, 이 액상형 단열재는 성능시험 결과 물리적으로 표면접착력이 높고 단열효과가 좋으며, 부식방지 및 결로방지 그리고 무독성의 우수한 효과가 있는 것으로 보고되고 있다. 특히 0.8 mm두께의 이 단열재로 코팅한 결과 50 mm 두께의 스티로폼보다 단열효과가 있다고 보고된 바 있다.(Applied Technical Services, INC. 1993) 따라서 본 연구에서는 이 대체 단열재를 곡물 사일로에 처리하여 그 단열효과를 구명함으로써 이용 가능성을 판단하고자 하였다(그림 4).

#### 아. 곡물 냉각기의 개발

곡물을 안전하게 저장하고 품질을 최상으로 유지하기 위해서는 곡물의 중저온 저장이 필수적으로 필요하다. 특히 최근에 곡물 저장시설로서 곡물 철제사일로를 많이 설치하고 있어서 곡온의 관리가 매우 중요하다. 왜냐하면 여름철에는 우리나라 평균 상대습도가 80%이상이고 곡물의 온도가 25-30도 정도로 상승하여 곡물이 부패하기 쉽기 때문이다. 이에 곡물 사일로의 중저온저장시스템을 개발하기 위해서 곡물 냉각기를 개발하고자 하였다. 곡물을 중저온으로 냉각하기 위해서 25 kW의 냉동능력을 가진 곡물냉각기를 설계하였다(그림 6). 냉매로는 냉매22를 사용하고, 응축온도는 43°C, 증발온도는 4°C에서 작동하는 것으로 설계하였다. 다음은 냉각기 주요부의 사양 및 이론적 산출근거이다.

- 1) 냉각능력 : 벼40 ton/day을 냉각시키고, 25 kW(21,430 kcal/h)의 냉각능력
- 2) 흡입팬 : - 동력 : 2 kW, 송풍량 : 40 cmm, 풍압 : 150 mmAq
- 3) 압축기(Compressor) :

- 모델 : QR85KI-TFC(7.5R/T), 발생 열량 :  $7.5 \times 860 = 6,450 \text{ kcal/h}$   
동력 : 7.5 HP(8번 항목 참조), 형식 : 왕복식(밀폐식)

- 4) 응축기(Condenser) :

- 형식 : 공냉식, 응축기 온도 : 43 °C, U값 : 28 kcal/m³h°C  
- 응축기 팬 풍량: 140 cmm

- 공기 평균온도차(LMTD) :  $\Delta t_m = \frac{16.9 - 8.9}{\ln(\frac{16.9}{8.9})} = 12.5 \text{ °C}$ ,

- 통과 풍속 =  $\frac{140}{0.79348 \times 60} = 2.94 \text{ m/s}$

- 팬으로 방출할 열량:  $0.27(\text{kcal}/\text{m}^3 \cdot \text{°C}) \times 140(\text{cmm}) \times 60 \times 12.5(\text{°C}) = 28,350 \text{ kcal/h}$

- 냉각기에서 발생되는 열량 :  $6,450 + 21,430 = 27,880 \text{ kcal/h}$

- 필요한 응축기코일의 면적 :  $27,880 / (28 \times 12.5) = 80 \text{ m}^2$

- 사용한 응축기코일의 크기 및 면적 :  $5/8" \phi \times 5R \times 26S \times 800L, 93 \text{ m}^2$

- 5) 가열기(Heater) :

- 히터(Heater)용량 : 3 kW, 종류 : Electromagnetic 히터, 제어방식 : 솔레노이드식

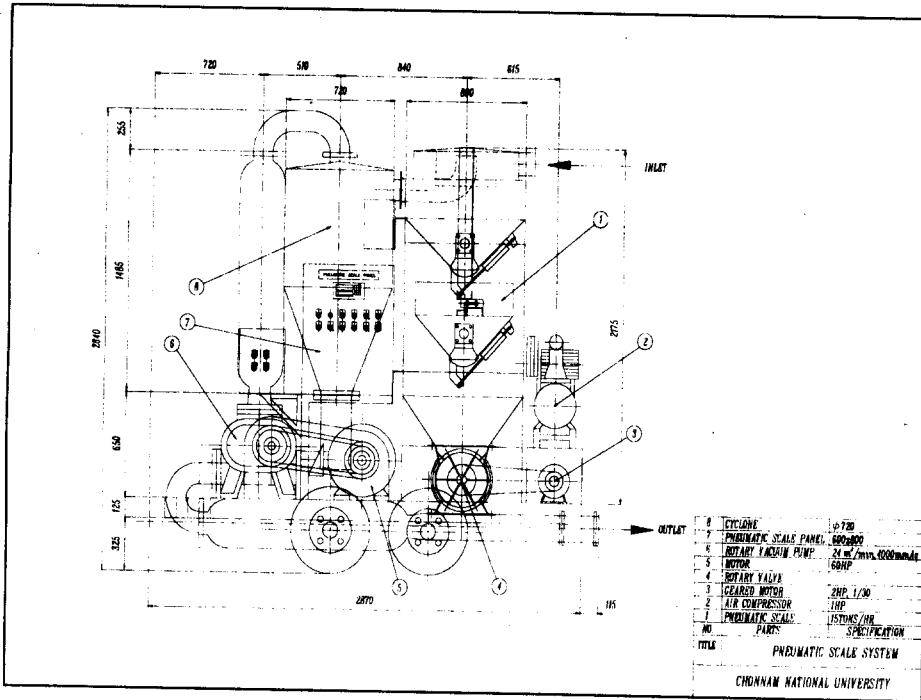


그림5. 개발된 곡물 공기이송계량 시스템의 구조도

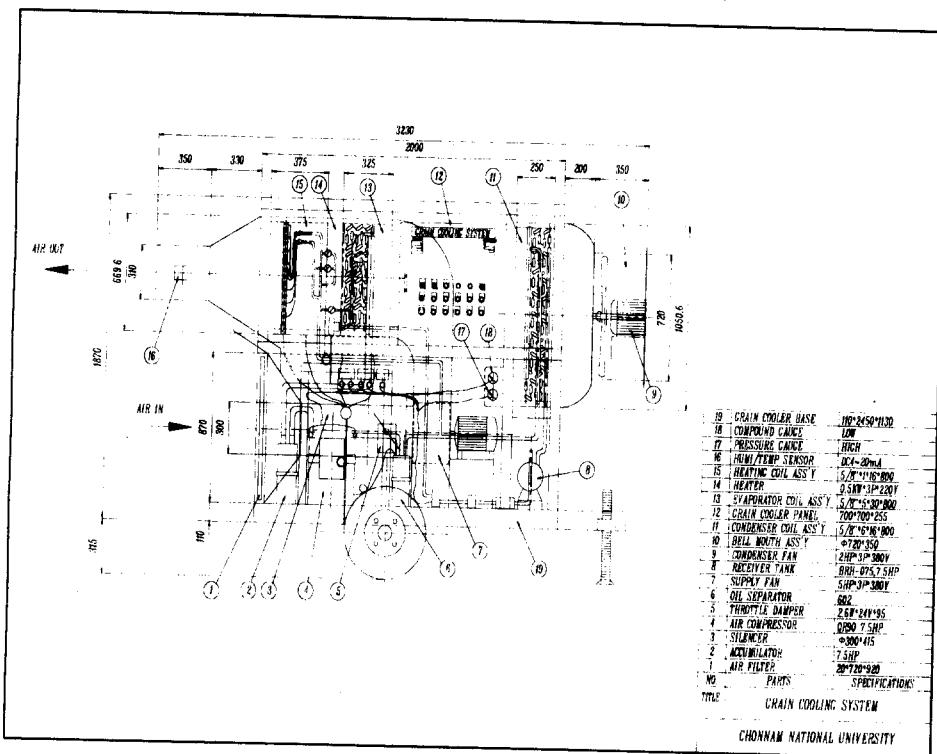


그림6. 개발된 곡물 냉각기의 구조도

#### 6) 증발기(Evaporator) :

- 형식 : 공냉식 직접팽창증발기, 증발온도 : 4°C, 냉각능력: 21,430 kcal/h,
- 증발기 코일의 크기 : 5/8"φ × 6R × 16S × 800L

#### 7) 냉각기 제어 :

- (1) 공기펌프 (흡입부용, 냉각공기 재순환용)를 설치하여 공기온도를 조절한다.
- (2) 냉각공기 온도 및 습도를 자동조절할 수 있도록 한다.
  - 곡물 냉각에 필요한 최종 공기온도 및 습도 : 10 - 12°C, 70%
  - (3) 전기식 팽창밸브를 사용하여 냉매는 자동 조절되도록 함.

#### 8) 성적계수, 냉매 질량유량

냉매 22를 사용하고 압축기(Condenser) 온도가 43°C, 증발기(Evaporator) 온도가 4°C, 냉각능력 25 kW일 때, 표준증기압축사이클에서 냉각기의 각지점에서의 엔탈피를 구하여 냉동효과 및 성적계수를 산출하고, 필요한 압축기 동력, 냉매 질량유량 및 냉각능력에 대한 압축기의 비인 냉각동력비 등을 구하였다.

다음과 같은 각 지점에서의 엔탈피를 도표와 표에서 구한다.

$$h_1 = 406.8, \quad h_2 = 427, \quad h_3 = h_4 = 253.7$$

$$(1) \text{ 냉동효과} : h_1 - h_4 = 406.8 - 253.7 = 153.1 \text{ kJ/kg}$$

$$(2) \text{ 냉매 질량유량} : 25/153.1 = 0.163 \text{ kg/s},$$

$$\text{용적유량} = 0.163(\text{kg/s}) \times 0.048(\text{m}^3/\text{kg}) = 7.824(\text{m}^3/\text{s}) = 7,824 \text{ L/s}$$

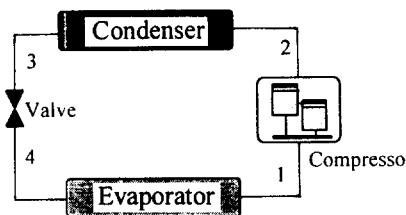
$$(3) \text{ 압축기 동력} : 0.163 \times (427 - 406.8) = 3.3 \text{ kW}, \text{ 효율을 감안하면}$$

$$3.3/0.6 = 5.5 \text{ kW} = 7.4 \text{ HP}$$

$$(4) \text{ 성적계수} : \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} = \frac{406.8 - 253.7}{427 - 406.8} = 7.6,$$

비가역성을 20%로 가정하면 성적계수는 약 6

$$(5) \text{ 냉각동력비} = 5.5 \text{ kW} / 25 \text{ kW} = 0.22 \text{ kW/kW}$$

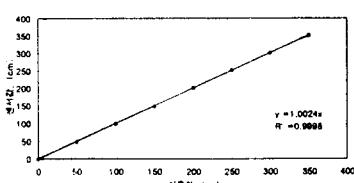


#### 자. 개발한 사일로시스템에서의 곡물 건조 및 저장실험

개발한 사일로 시스템을 검증하기 위해 건조 및 저장실험을 실시하였다. 우선적으로 상온통풍건조시험에 서 온도 및 함수율센서들의 계측장치 정확도 및 건조의 균일성 등을 분석하고자 하였다. 저장시험에서는 곡온 및 함수율의 변화, 평형상대습도 및 공기부폐지수 예측 그리고 곡물의 품질변화를 보고자 하였다. 곡물교반기는 작동상 별 문제가 없도록 하기위해 반입량이 약 5톤에 달했을 때부터 작동하도록 하였다. 건조시간에 따라 곡물 반입량, 사일로내 각 지점에서의 곡물의 온도 및 함수율 그리고 대기의 온도 및 습도 등을 3-6시간 간격으로 측정하였다. 그리고 건조시 밤에는 재흡습을 줄이기 위해서 주간에의 송풍량의 30% 수준으로 송풍기를 연속적으로 작동시켰다. 함수율을 측정은 사일로에 부착한 정전용량식 수분센서들을 보정하기 위해서 간이 전기저항식 수분측정기를 사용하여 각 지점들의 함수율을 측정였으며, 또한 이 전기저항식 수분측정기의 정확도를 검증하기 위해서 전기오븐을 사용해 동시에 시료들의 함수율을 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 가. 곡물 퇴적고 자동측정장치 개발



곡물 사일로내에 곡물 퇴적고를 자동으로 측정하기 위해서 사일로 상부(4.36m)에 초음파 센서를 설치하였고, 디지털 지시계(indicator)는 사일로 외부에 설치하였으며, 초음파 센서의 신호는 자료수집장치 보드에 연결하여 컴퓨터에서 자동으로 곡물 퇴적고를 알 수 있도록 하였다. 실제로 측정한 곡물 퇴적고와 초음파 센서를 사용해 측정한 곡물 퇴적고간의 상관관계는 0.9999이상으로 매우 높아서 곡물 퇴적고를 자동으로 정확하게 측정할 수 있었다.

그림 7. 초음파센서에 의한 곡물퇴적고와 실측치와의 상관관계

#### 나. 사일로 건조저장시스템의 자동화

##### 1) 정전용량식 함수율센서의 특징

곡물 함수율을 측정하기 위해 사용된 정전용량식 센서는 곡물과 센서의 접촉에 따라 정전용량의 변화를 전압으로 변환하여 수분을 추정하도록 되어 있다. 센서의 하부에 젤리로 코팅된 부분은 약 1MHz의 수정발진자와 콘덴서, 증폭기 등으로 구성되어 있으며, 그 보드의 회로는 센서 신호의 연산 및 처리회로, LCD 구

동회로로 구성되어 있다. 이 센서에 대해 성능시험한 결과 센서의 응답성은 약 3초이고 안전성도 매우 양호하였다. 그리고 센서 주위환경 및 측정시 센서위치 변경으로 인한 신호값의 변화는 거의 없었으며 산물밀도에 의한 변화도 무시할 만 하였다. 또한 센서의 함수율 정확도는 약 0.5%이내 이었다.

## 2) 개발한 '건조저장시스템'의 특징

사일로에서의 곡물건조 및 저장의 자동화를 위해서 곡물사일로의 자동 건조저장시스템을 센서, 자료수집장치, PLC시스템(그림 8) 및 PC시스템(그림 9, 10) 등으로 구성하여 하드웨어를 개발하였다. 그리고 시스템의 프로그램은 다음과 같이 메뉴선택 화면 및 제어방법으로 구성하여 개발하였다(그림 9). 그림 10은 "모니터링/기본화면"으로 설치되어져 있는 사일로의 모습을 화면에 나타내고 각 센서로부터 받아들여지는 값을 화면에 TEXT문자나 BAR, 또는 FILL의 기능으로 알아보기 쉽게 표시하여 주는 기능을 갖도록 하였다. 사일로내의 곡물 상태 및 외기조건 등이 자동으로 계측되고 저장되며, 이를 자료를 기초로 사일로의 모든 부속장치들이 자동 또는 수동으로 작동되도록 개발되었다.

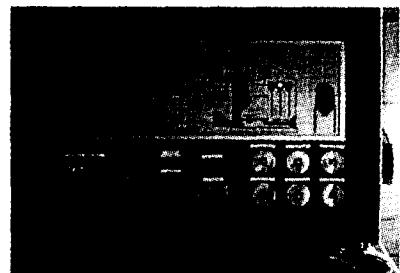


그림 8 개발된 사일로 PLC시스템

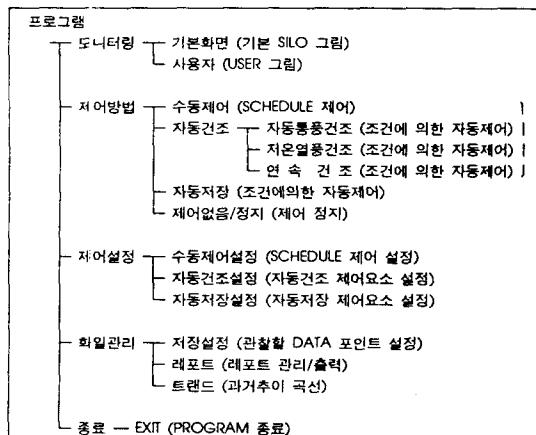


그림 9 메뉴 구성표

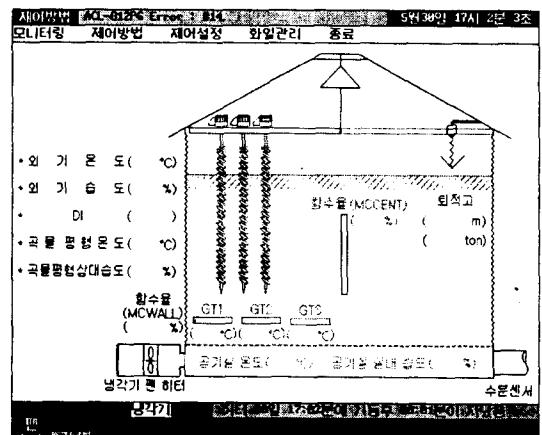


그림 10 모니터링 / 기본화면

## 다. 흡인 및 압송식 공기이송계량시스템의 개발

사일로내의 곡물을 공기로 흡인하여 계량한 후 곡물을 하는 장소로 이송시킬 수 있는 흡인 및 압송 겸용의 공기이송계량치를 개발하였다. 60HP의 구동모터, 24mm의 풍량과 4000mmAq의 풍압을 갖는 로터리식 진공펌프, 로터리밸브, 공기컴퓨터, 호퍼식 계량기, 사이클론, 제어판넬 등으로 구성된 본 시스템의 외형은 다음 그림과 같다. 본 장치로 곡물을 흡인하여 압송할 때 1단계로 성능을 평가한 결과, 약 10-15톤/시간의 처리능력을 갖고 있으며, 흡인식으로 사용하지 않고 압송식으로만 사용할 경우에는 약 20톤/시간의 처리능력을 갖었다. 또한 본 시스템은 이송되는 곡물의 양을 자체부착된

호퍼식 계량기로 60-100 kg/회로 계량하며 최대 20톤/시간의 처리능력을 갖고 있으며, 이동형이어서 어느 장소에서도 자유롭게 곡물을 이송시킬 수 있는 장점을 갖고 있다. 특히 사일로내의 1-2톤의 잔곡을 손쉽고 빠르게 배출시킬 수 있었다.



그림 11 개발된 공기이송계량시스템

## 라. 사일로 단열처리 대체방법 개발

백색의 단열코팅제를 스프레이어를 사용하여 사일로 내벽에 약 0.8 mm로 도포하였고, 사일로 밑부분인 공기실은 사일로 외벽에 단열코팅제를 도포하였다. 외부공기가 약 31°C일때 단열처리 되지 않은 사일로 외

벽의 온도는 약 46°C이고 사일로 내부 벽온도는 약 49°C로서 내부공기가 환기되지 않아 더 높게 나타났다. 그러나 사일로 내벽에만 단열재를 코팅한 결과 외벽의 온도가 46°C 일 때 내벽의 온도는 39°C로 약 7°C 감소하였다. 그리고 외벽에만 단열재를 코팅한 공기실의 경우 양지에 있는 외벽의 온도는 39°C, 그늘에 있는 외벽의 온도는 32°C를 나타내었고 공기실 안쪽의 공기온도는 25°C를 나타나었다. 이처럼 사일로 내벽에 단열재를 코팅한 결과 약 7°C의 온도를 줄일 수 있었으나 사일로 외벽에 코팅을 하지 않아 단열효과가 떨어졌다. 사일로 외벽에만 질한 공기실의 경우에는 흰색 코팅으로 반사되어 양지 외부벽의 온도가 39°C로 코팅하지 않은 경우에 비해 약 7°C가 감소하였고 공기실내의 온도도 25°C를 유지하고 있어서 더 높은 단열효과를 얻을 수 있었다. 이에 사일로 내벽보다는 외벽을 코팅하는 것이 더욱 더 높은 단열효과를 얻을 수 있으리라 사료되었다. 다음 표는 단열처리한 결과를 나타낸 것이다.

표 1 단열재를 사일로에 코팅한 결과

구 분	사일로 외벽온도	사일로 내벽온도/ 공기온도	단열 효과	비 고
무처리	46 °C	내부공기온도 49 °C		
내부만 코팅	46 °C	내벽온도 39 °C	7 °C	0.8 mm 코팅
외부만 코팅	39 °C			양지쪽 외벽
외부만 코팅	32 °C	내부공기온도 25 °C	7 °C	음지쪽 외벽

참고:외기온도: 30°C

### 마. 곡물 냉각기의 개발

곡물 사일로에서 곡물을 약 15°C의 중저온으로 저장하기 위해서 곡물 냉각기를 다음 그림과 같이 제작하여 개발하였다. 개발된 곡물 냉각기의 주요 특징 및 성능은 다음 표와 같이 약 최대 32,000 kcal/h의 냉동능력을 갖으며 냉각공기의 온도는 약 13°C, 상대습도 70~80% 내외에서 작동하였다. 개발된 곡물 냉각기의 구체적 성능평가는 현재 진행중이다.

표 2 곡물냉각기의 특징 및 성능

구 분	특 징 또는 성 능	비 고
냉각능력	최대 32,000 kcal/h	냉매: R-22
냉각공기 온습도	온도: 10~13°C, 습도: 60~95%	
압 축 기	반밀폐형, 5.6kW, 모델 QR90	
용 축 기	Coil 5/8" x 5x26x800, arca 93m <sup>3</sup> Fan: 2 HP, 140cm <sup>3</sup>	압력계 설치
증 발 기	Coil 5/8" x 5x16x800	압력계 설치
공기 여과기	20x720x920, EK-165	
가열기	0.5kWx6, 220V	슬레노이드제어
공기 냄비	2.6Wx24Vx95	흡입용, 냉각공기 재순환용
제어 판넬	자동/수동, 버튼방식, 700x700x255	
전원 및 규격	220/380x3p, 3230x1130x1870	총 동력: 15kW

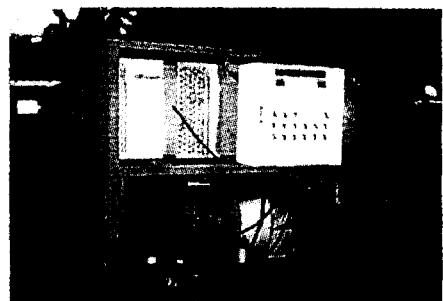


그림 12 개발된 곡물 냉각기

### 비. 건조 및 저장 실험

곡물이 일시에 반입되어 건조된 것이 아니라 3일 동안 수확된 벼를 단계적으로 50톤 용량의 사일로에 반입시켜 건조하였기 때문에 벼 약 6.6톤(곡물깊이 약 70cm)을 15%이하까지 상온통풍으로 건조시키는 데 약 80여시간이 소요되었다. 건조초기에는 각 지점에서 상하층간에 약 1~2% 이상의 함수율 차이가 있었으나 교반기를 작동하면서부터 상하층간에 거의 균일한 함수율 분포를 나타내었으며, 건조시간이 63시간 되었을 때부터는 상하층간의 함수율 차이가 약 0.5%로 줄어들었다. 본 연구에서는 시료의 양이 6.6톤밖에 되지 않아서 야간에는 보조 가열기를 작동시키지 않았으나 건조물량이 많을 때에는 야간의 대기온도가 주간에 비해 10~15도 이상 떨어지고 상대습도도 80% 이상으로 상승하기 때문에 보조열원을 사용해 주간의 건조조건과 비슷하게 맞추어 재흡습이 되지 않도록 균일하게 건조시킬 필요가 있었다. 그리고 간이 전기저항식 수분측정기에 의해 측정한 함수율 값들은 공기오븐식으로 측정한 함수율에 비해 0.5%이내에서 낮게 나타났으나, 전기저항식 수분측정기로 비교적 정확한 함수율을 측정할 수 있었다. 특히 사일로내에 설치된 정전용량식 수분센서에 의한 함수율은 전기저항식 수분측정기로 측정한 함수율에 비해 약 0.5%정도 더 낮게 나타나 이

를 보정하여 사용하였다.

2차 건조실험에서 보정한 정전용량 수분센서로 측정한 함수율과 전기저항식 수분센서로 측정한 함수율을 비교한 결과는 그림 13과 14와 같다. 그림 13은 사일로 높이 50cm 벽지점에서 측정한 함수율이고, 그림 14는 사일로 벽으로부터 150 cm, 높이 50 cm 지점에서 측정한 함수율로 두센서간의 함수율 차이는 약 0.5-1.0%내외 이었다. 이처럼 건조중에 사일로내의 곡물을 함수율과 온도를 연속적으로 측정할 수 있었으며, 사일로로부터 배출되는 건조된 벼의 함수율도 연속적으로 측정할 수 있었다. 그리고 이를 값들을 기초로 사일로 건조장치들을 자동으로 제어하면서 사일로 건조시스템을 연속식 건조기로 사용할 수 있었다.

또한 사일로에서 상온통풍으로 건조한 벼의 동활립율을 검사한 결과 약 2% 이내로 나타났다. 이 결과는 순환식 건조기에서 건조된 벼의 동활립율 3%(40°C에서 열풍건조), 5%(45°C에서 열풍건조)와 8%(55°C에서 열풍건조), 그리고 천일건조시 벗짚위 망사에서의 동활립율 약 10%와 콘크리트 위에서의 동활립율 약 16% (기계화연구소 자료)에 비해 현저히 낮게 나타났다. 따라서 건조속도 및 건조온도 등의 건조방법이 벼의 동활에 절대적으로 영향을 미치고 이러한 동활벼가 추후 도정시에 쇄미가 되기 쉽기 때문에 적정 안전한계송풍량으로 자동건조시스템을 사용하면서 적정건조 속도로 원하는 함수율까지 상온통풍 건조하는 것이 바람직하다고 사료되었다.

곡물을 건조한 후 사일로에 저장하며 곡물의 상태 및 외기조건들을 계측한 결과, 일례는 다음 그림 15, 16, 17, 18과 같다. 그림 15는 저장중 곡물온도를 나타내고 있는데 초기에는 자동으로 통풍되어 곡물온도에 변화가 있었으나 그후에는 외기온에 따라 점차 감소하는 경향을 보였으며, 그림 16은 이 기간중에 함수율은 곡온 변화에 따라 약 13%와 14% 범위내에서 변화를 하였다. 그러나 중심부의 수분센서에서는 접지가 좋지 않아 그 출력치들에 약간의 변화가 감지되어 이를 추후에 보완하였다. 그림 17은 사일로내에 있는 온,습도 센서로부터 곡물 평형공기온도 및 평형상대습도를 측정하여 Henderson의 평형함수율식으로 평형함수율을 추정값을 나타낸 것으로서, 이 저장기간 동안 평형함수율은 센서로 측정한 값과 같이 약 13%와 14% 범위내에서 변화하였다. 그림 18은 저장기간 동안에 사일로내 곡물퇴적고 자동측정으로 곡물량 추정과 외부공기의 통풍 가능성을 판단할 수 있는 공기부폐지수를 나타내고 있다. 사일로내 곡물의 총무게는 13.1톤으로 일정한 값을 보여주며, 외부공기의 부폐지수는 10을 넘는 경우 외부에서 비가 오거나 상대습도가 약 90%이상이어서 통풍할 수 없음을 뜻하고 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 곡물 사일로 시스템의 개발과 자동화를 위해서, 곡물퇴적고 자동측정장치, 온도, 함수율, 상대습도 등의 계측 및 자동건조저장시스템, 곡물 공기이송 및 사일로내 잔곡처리를 위한 공기이송계량시스템의 개발, 사일로 단열처리방법 개발, 그리고 중저온 저장을 위해 곡물 냉각기의 개발을 수행하였던 바, 그 결론은 다음과 같다.

- 1) 초음파센서를 이용해 곡물퇴적고 자동측정장치를 개발하였으며, 실측치와 센서값과의 상관관계는 0.9999로 매우 정확도가 높았다.
- 2) 정정용량식 및 전기저항식 수분센서들을 호퍼스캐일에, 정전용량식 수분센서들과 온도 및 습도 센서들을 사일로에 내외부에 설치하여 곡물 및 외기의 상태를 연속적으로 계측하고 모니터링하며 자동으로 저장할 수 있는 계측시스템과 이를 자료를 기초로 사일로의 모든 부속장치들을 제어할 수 있도록 PLC와 PC를 이용한 자동 건조저장시스템을 개발하였다.
- 3) 개발한 자동건조시스템을 이용해 건조 및 저장실험을 한 결과, 건조 및 저장중 곡온, 함수율, 평형상대습도, 퇴적고 등을 정확하게 연속적으로 계측할 수 있었으며, 평형함수율 및 외부공기 부폐지수들을 추정할 수 있었다. 또한 상온통풍으로 건조시 원하는 함수율까지 자동건조시키며 상하층간의 함수율 차이를 줄일 수 있었고, 곡립의 동활율도 약2%로 품질도 우수하였다.
- 4) 사일로내 등의 곡물을 흡인하여 자동으로 계량하고 입송할 수 있는 공기이송계량시스템을 개발하였다. 이송능력은 약 10-15t/h이며, 계량능력은 약 20t/h이었다.
- 5) 사일로의 우레탄 단열처리의 대체방안으로 사일로의 벽에 단열페인트(temp-coat)로 약 0.8mm 코팅단열 처리를 한 결과, 사일로 내벽온도를 약 7°C 감소시킬 수 있었으며, 단열비용과 노동력 그리고 시간을 크게 줄일 수 있었다. 특히 외벽에 코팅한 경우는 내벽에 코팅한 경우보다 약 7°C 감소 효과가 있었다.
- 6) 곡물을 약 15°C 이하의 중저온으로 저장하기 위해 최대 32,000 kcal/h의 냉각능력을 갖는 곡물 냉각기를 개발하였다. 곡물 냉각기는 냉각공기의 온도 및 습도 그리고 풍량을 조절할 수 있도록 개발되었다.

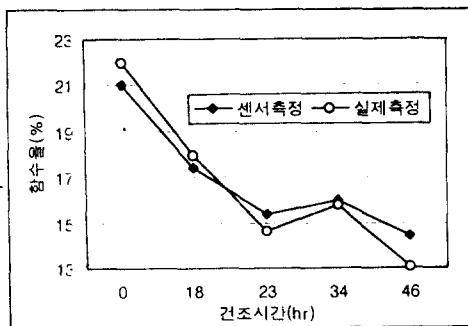


그림 13. 시간에 따른 센서와 실제측정에  
의한 벽면의 함수율 변화

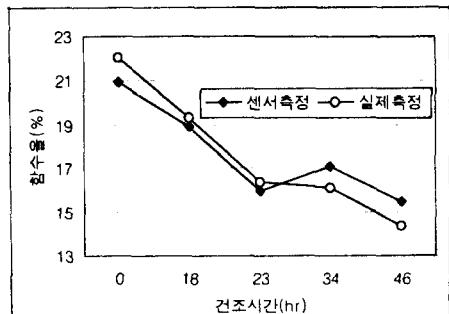


그림 14. 시간에 따른 센서와 실제측정에  
의한 중심부의 함수율 변화

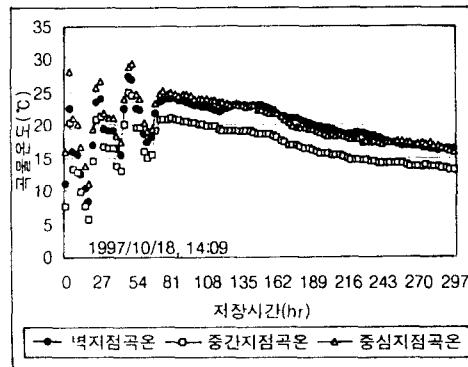


그림 15. 사일로내의 각 지점에의 곡물온도 변화

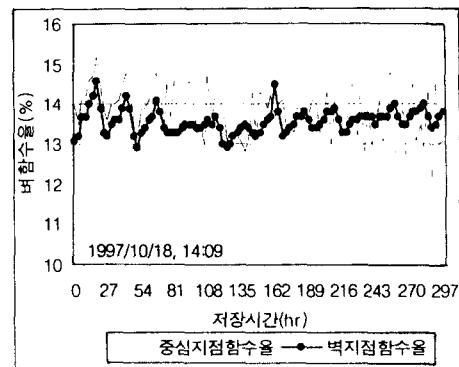


그림 16. 저장시 사일로내의 곡물함수율 변화

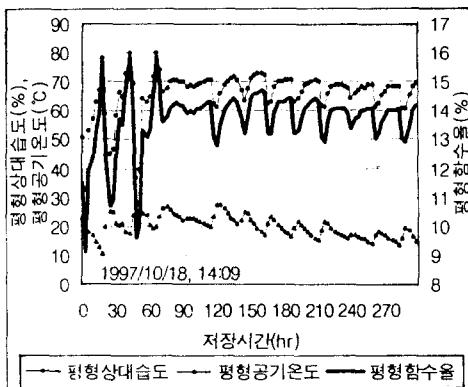


그림 17. 곡물의 평형상대습도와 평형공기온도와  
추정된 곡물평형함수율의 변화

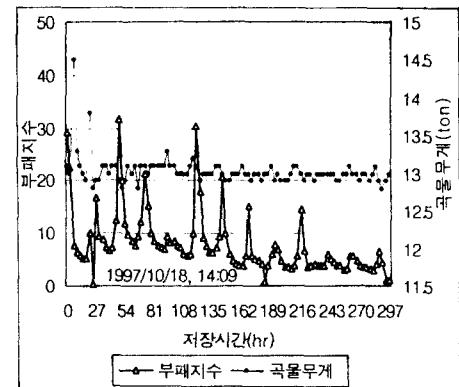


그림 18. 공기부폐지수의 변화와 곡물의 무게

#### 참고 문헌

- 고택근 외 12인, 1995. 미곡종합처리시설 -이론과 실제-. 문운당
- 고택근 외 6인, 1990. 농산가공기계학, 향문사
- 서명교, 1994. 냉동 및 공기조화, 에드텍
- Hall, C.W. 1980. Drying and storage of agricultural crops, AVI Publishing Co. Inc
- Chung, J.H. 1989 Modeling, simulation, and automatic control for optimum drying and storage of rough rice in a bin system. Ph.D. dissertation, LSU.
- Brooker, D.B., F.W. Bakker-Arkema, and C.W. Hall. 1982. Drying Cereal Grains. The AVI publishing company, Inc. W.C.
- Henderson, S.M. and R.L. Perry. 1976. Agricultural Process Engineering. AVI publishing Co., Westport, Conn. p. 284-322