

## 벼 냉각저장용 곡물냉각기의 개발

정중훈 · 이종욱\*

전남대학교 생물산업공학과, \*전남대학교 식품공학과

### Development of a Grain Chiller for Cool Storage of Paddy

Jong-Hoon Chung and Chong-Ouk Rhee\*

Department of Biosystems & Agricultural Engineering, Chonnam National University

\*Department of Food Science & Technology, Chonnam National University

#### Abstract

This study was carried out to develop a grain chiller for drying and cool storage of grain in a silo. The developed grain chiller was evaluated and applied to the cooling of paddy. The results of this study were as follows. A grain chiller with cooling power of minimum 25 kW was developed through the theoretical analysis of the refrigeration cycle, considering the refrigeration load of grain. The grain chiller was composed of a 5.6 kW compressor, a condenser with corrugated plate fins of 92 m<sup>2</sup>, an evaporator with plate fins of 70 m<sup>2</sup>, an expansion valve, a 3.7 kW suction fan, and control panel. The max. cooling capacity of the chiller was 33 kW and its coefficient of performance was about 2.6. It was enough to cool grain of 15 t/day from 25°C to 15°C. The temperature of chilled air was adjusted by controlling the chilled air flow rate with an automatic air damper. The flow rate of chilled air could be adjusted automatically using a temperature controller and also manually. The relative humidity of chilled air was adjusted by a reheater coil, which was operated with some of the hot refrigerant compressed in the compressor. The minimum flow rate of the chilled air was about 11 cm. The temperature of the chilled air was controlled in the range of 8-13°C, and the relative humidity was controlled in the range of 50-95%. When the chiller was operated during the summer of about 32°C, it was stabilized in 7 minutes after starting, showing the set temperature of 13°C and the set relative humidity of 65 to 75%. In a chilling experiment of rough rice, it was capable of cooling rough rice of 5 ton with chilled air temperature of 13°C and air flow rate of 0.2 cm/m<sup>3</sup>, maintaining 15% moisture content.

Key words: grain chiller, development, performance evaluation, cool storage

#### 서 론

우리 나라의 주곡인 쌀의 품질 향상을 위해서 그동안 많은 연구를 지속적으로 수행해 왔다. 최근에는 벼 수확후 처리의 신기술 개발로 쌀의 고품질화에 대한 연구를 많이 하고 있으며, 이 일환으로 곡물 냉각저장이 우리나라에도 도입되고 있다.

곡물을 안전하게 저장관리하는 방법으로 상온통풍과

냉각공기를 이용하여 곡물을 환기시키는 냉각통풍 그리고 곡물 순환방법 등이 있다. 곡물을 순환시키는 방법은 관리비용이 많이 들고 곡물의 양적 및 질적 손실을 야기할 수 있으며, 상온통풍 방법은 재래의 관행 방법으로 외기에 따라 크게 영향을 받아 평균 상대습도가 80%이상이고 대기온도가 높은 여름철에는 많은 제약을 받고, 통풍하더라도 곡온이 높아 곡물의 저장성이 떨어지게 된다. 특히 벼는 온도가 10~15°C, 상대습도가 약 70% 이하가 되었을 때 곡물호흡이 억제되고 곤충이나 진드기, 곰팡이 등의 발생을 줄일 수 있다. 이에 곡물의 중저온 저장은 곡물호흡을 억제시켜 곡물의 건물손실을 막고 품질을 그대로 유지시킬 수

Corresponding author: Jong Hoon Chung, Department of Biosystems & Agricultural Engineering, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea

있으며, 곡물저장에 치명적인 해충 및 균을 발생하지 못하게 하는 방법 중의 하나로서 곡물저장방법으로 이용하고 있는 추세이다.

특히 국내에서는 최근에 고품질의 쌀을 생산하기 위해서 전국적으로 미곡종합처리시설을 건설하여 곡물 건조저장시설로서 곡물사일로를 설치하고 있다. 이러한 사일로에 적절한 단열처리가 필수적인 사항이 되고 있으며 여름철 사일로 내의 공기온도가 40°C 이상이 되고 곡물의 온도도 30°C 이상까지 상승하므로 사일로에서의 중저온 저장시스템의 개발이 절대적으로 필요하다. 이에 쌀을 고품질화하기 위한 방법의 일환으로 곡물 사일로에 냉각된 공기를 직접 공급하여 강제 통풍시키는 장치로서 곡물냉각기의 개발이 요구되었다.

곡물 냉각기는 1958년 독일에서 최초로 제작되었다 (Escher Wyss, 1960). Macune *et al.* (1963)은 곡물 냉각에 대한 연구를 최초로 보고하였다. 그들은 Texas에서 19%(w.b.)의 수수를 6개월간 10°C에서 성공적으로 저장하였다. Burrell과 Laundon(1967)은 곡물에 진드기나 곰팡이의 침입을 막기 위해서는 냉각저장에 대한 연구를 수행하였다. 이들은 냉각기 냉각공기의 상대습도를 조절을 위해서 약 2~4°C 정도의 온도를 상승시키기 위해서 압축된 냉매의 일부를 사용하여 재가열하였다. 곡물냉각은 수확한 곡물을 건조할 때까지 저장을 하는 데 있어서 발생할 수 있는 손실을 줄일 수 있고, 냉각시 필요한 냉각공기의 양은 곡물체적의 750~1,120배라고 보고하였다. 냉각공기의 상대습도를 조절하기 위해서 냉각기에 재가열기 및 자동제어장치를 설치하였다(Sulzer-Escher Wyss, 1970)

Maier *et al.* (1988)은 태국에서 상온통풍을 이용하여 저장할 경우 곡물의 온도를 25°C 이하로 낮춰 저장하기가 어렵다고 하였다. 그러나 다단계 방법을 이용한 곡물냉각기를 사용하여 증발기의 공기온도를 처음엔 12.5°C까지 낮춘 다음 곡물의 상대습도를 조절하기 위해 재가열기를 사용하여 17.5°C까지 증가시킨 후, 다시 냉각된 공기온도를 증발기에서 8.5°C로 낮춰 재가열코일로 최종 14°C의 냉각된 공기온도를 만들었다. 이러한 냉각공기로 1,000톤의 저장고에서 곡물을 완전히 냉각시킬 수 있었고, 상층부와 하층부의 온도차이는 냉각공기에 의해서 최소화할 수 있었다. 미국의 Purdue 대학에서는 1992년에 상업용 냉각기를 제작하였다. 이 냉각기는 냉각공기의 온도 및 상대습도가 자동으로 조절되도록 하였으며, 이를 위해 증발기 다음에 재가열기를 설치하였다. Purdue-AAG 냉각기는 증발기 후에 독립적인 글리콜 열교환장치로 냉각공기에 열을 가해, 복잡한 냉매의 흐름제어와 바이패스 기구

를 없애으로써 냉각기를 단순화하였다. 또한 증발기를 통과하는 공기량을 조절하기 위해서 공기흡입구에 모터를 단 댐퍼를 사용하여 공기량과 냉각공기 온도를 최적화하였다(Maier *et al.*, 1992). IKZ(1993) 냉각기 제작사는 증발기 출구쪽에 자동댐퍼장치를 설치해 일정량의 냉각공기를 곡물빈에 공급할 수 있도록 하였다. Maier와 Rulon(1996)은 독일의 Escher-Wiss사가 제작한 냉각기(KK140)의 냉각공기 온도와 상대습도의 변화를 실험한 결과, 두 가지 모두 설정한 범위에서 출구공기 온도는 표준편차가  $\pm 1.8^\circ\text{C}$  이었고, 출구공기 상대습도는 표준편차가  $\pm 3\%$ 로서 작동이 잘 되었다고 하였다. 곡물을 냉각시키기 위한 냉각공기의 송풍량은 최소한 곡물 1 m<sup>3</sup> 당 0.08 cm에서 최고 0.8 cm 이하가 권장되고 있다(고학균 등, 1995).

따라서 본 연구에서는 50톤 용량의 곡물 사일로에서 곡물을 중저온으로 저장하기 위해 약 25 kW 이상의 냉각능력을 갖는 소형 곡물냉각기를 설계하고 개발하여, 곡물 냉각실험을 함으로써 곡물냉각기의 성능을 평가하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 냉각기 제작

곡물 사일로에서 곡물을 약 15°C 정도의 중저온으로 냉각저장하기 위해 압축기, 응축기, 증발기, 팽창밸브 등으로 구성되는 곡물냉각기를 Fig. 1과 같이 설계해 제작하였다. 적정 통풍비로 40톤의 곡물을 25°C에서 15°C 이하의 중저온으로 냉각하기 위해서 필요한 냉각부하와 안전율을 고려하여 냉각능력이 25 kW 이상인 곡물 냉각기를 제작하고자 하였다. 이에 냉각기가 외기의 최고온도가 35°C일 때 냉각공기 온도 15°C 이하, 상대습도는 50~95% 내외에서 작동될 수 있도록 제작하였다.

### 곡물냉각기의 성능실험

#### 냉각기의 성능평가

냉각기 주요부의 온도 및 냉각공기의 온습도를 측정해 냉각기의 냉각능력 및 냉각공기 온습도의 제어 성능을 평가하고자 하였다. 그리고 냉각 중에 가능한 곡물의 함수율이 변하지 않도록 곡물의 평형상대습도로 냉각공기의 습도를 조절해 공급한다고 가정해 냉각시간을 다음과 같은 식으로 산출하였다.

$$t = \frac{W_g C_g (\theta_{\text{initial}} - \theta_{\text{final}})}{G_a \rho_a C_a (\theta_{\text{initial}} - T_{\text{inlet}})}$$

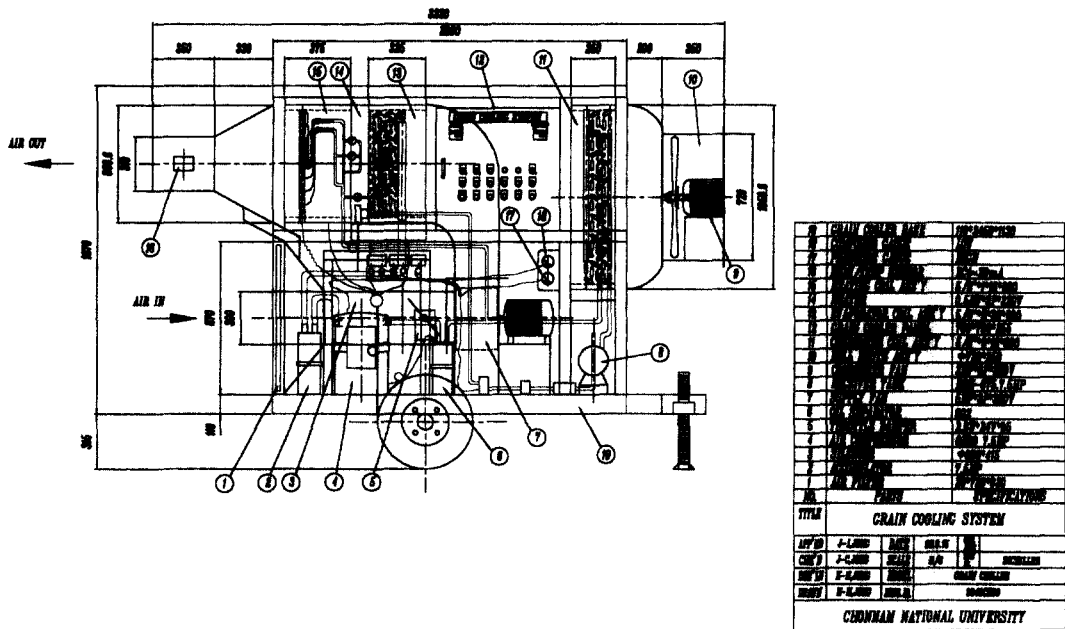


Fig. 1. Structure of a grain chiller.

여기서,  $t$ : 냉각시간(min),  $W_g$ : 곡물의 질량 (kg),  $C_g$ : 벼의 비열(kJ/kg°C),  $G_a$ : 풍량(m<sup>3</sup>/min),  $\rho_a$ : 공기의 밀도(kg/m<sup>3</sup>),  $Ca$ : 공기의 비열(kJ/kg°C),  $\theta_{initial}$ ,  $\theta_{final}$ : 곡물의 초기 및 최종온도(°C),  $T_{inlet}$ : 냉각공기 온도(°C).

**냉동사이클의 이론적 분석**

냉각기의 표준 냉동사이클을 기초로 비가역성과 압축기의 효율을 고려하고, 각 지점의 냉매온도와 공기의 상태를 실제로 측정하여 냉동사이클을 EES(Engineering Equation Solver)프로그램을 이용하여 이론적으로 분석하였다. 이는 각 주요장치의 냉매상태를 예측하여 냉각기의 냉각능력, 성적계수, 압축기에서의 일, 응축기에서의 발열량 등을 구하도록 하였다.

**곡물의 냉각실험**

개발된 냉각기를 약 5.6톤의 곡물이 저장된 사일로에 설치하여 곡물 냉각실험을 수행하였다. 이때 대기의 최대온도는 30°C이었고, 냉각기의 온도는 13°C, 상대습도는 65%~75%의 범위로 설정하였다. 사일로내에 습습도센서를 곡물하부에서 약 30 cm 정도의 깊이 에 설치해 냉각저장 동안 곡온 변화를 조사하였다. 이 냉각실험에서 냉각공기의 풍량비는 최소 약 0.2 cm<sup>3</sup>이었다.

**결과 및 고찰**

**냉각기의 개발**

**압축기(Compressor)**

압축기는 Copelaweld사의 저소음 압축기로서 모델은 QR90KI-TFC(7.5R/T)이고 동력은 5.6 kW이었다. 응축기의 응축온도가 43°C이고 증발기의 증발온도가 4°C 일 때 냉각능력이 약 28.8 kW인 압축기를 선택하였다. 압축기는 한 회전당 배출하는 용량이 177.44 cm<sup>3</sup> 이고 회전속도는 3,500 rpm이며, 네 개의 실린더와 알루미늄으로 만들어진 피스톤, 요크(yoke) 등으로 구성된 반밀폐의 왕복식이다. 압축기는 최대 25 kg/cm<sup>2</sup> 이하의 압력에서 작동하도록 하였으며, 그 이상이 되면 냉각기가 자동으로 정지하도록 하였다. 선정된 압축기의 냉매의 최대 유동량(G)은 다음과 같았다.

$$G = \eta_v \frac{V_{dis} RPM}{v_1 \cdot 60} : \text{질량 유량 [kg/s]} \tag{1}$$

$$\eta_v = 1 - 0.045 \left( \frac{v_1}{v_2} - 1 \right) : \text{체적효율} \tag{2}$$

$V_{dis}$ =행정체적[m<sup>3</sup>/rev.], 압축기의 공극비( $\lambda$ )=0.045  
 $v_1, v_2$ =압축기 입출구 냉매 비체적 [m<sup>3</sup>/kg]

따라서,

$$G = 0.924 \times \frac{177.44 \times 10^{-6}}{0.04403} \times \frac{3500}{60} = 0.217[(\text{kg})/\text{s}]$$

이것은 25 kW의 냉각능력에 필요한 이론적인 냉매 유량(0.163 kg/s)보다 크므로 압축기 냉각능력은 충분 하리라 사료되었다.

**응축기(Condenser)**

응축기로 직교류형의 판핀이 부착되고 총괄열전달 계수(U)가 28 kcal/m<sup>2</sup> h<sup>o</sup>C인 코일을 사용하였다. 응축기 코일의 크기는 5/8"Φ×5R×26S×800L로서 코일의 직경이 5/8인치이다. 응축기 코일에 의해 방출할 열량은 압축기에 행해진 일인 약 5.6 kW의 열량과 증발기에서 흡수된 약 28 kW의 열량으로 총열량은 33 kW이고, 응축기의 냉매와 응축기를 통과하는 공기사이의 대수평균온도차이를 기초 자료에 의해 약 14<sup>o</sup>C로 가정하였다. 직교류형 열교환기에 대한 수정 계수(F)에 의해 필요한 응축기의 표면적(A)을 다음과 같이 산출하였다.

q=33 kW, ΔT=14<sup>o</sup>C 수정계수: F=0.85(이정오, 박희용, 1992)

$$\text{핀의 면적: } A = \frac{Q}{UF\Delta T} \approx 90 \text{ m}^2 \quad (3)$$

따라서 최소한 90 m<sup>2</sup>이상의 면적이 요구되어 92 m<sup>2</sup>의 표면적을 갖는 직교류형의 핀이 부착된 코일을 설치하였다.

**증발기(Evaporator)**

증발기로 총괄열전달계수(U)가 28kcal/m<sup>2</sup>h<sup>o</sup>C인 직교류형 판 핀들이 부착된 코일을 사용하였으며, 코일의 크기는 5/8"Φ×6R×16S×800L이었다. 곡물냉각기의 증발기 냉각능력이 25 kW정도인 냉각기를 만들기 위해 증발기 표면적을 결정하고자 하였다. 냉각능력 25 kW의 부하를 갖는 냉각기의 냉각부하량(q)은 22,429 kcal/h이고, 증발기의 온도변화를 실험자료에 의해 약 14<sup>o</sup>C로 가정할 때, 직교류 열교환기이고 두 유체가 혼합되지 않는 경우에 대한 수정계수(F)를 고려하여 필요한 증발기의 표면적(A)은 다음과 같이 계산하였다.

$$q=UFA\Delta T=28(\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^{\circ}\text{C})\times 0.83A(\text{m}^2)\times 14(^{\circ}\text{C}) \quad (4)$$

$$F=0.83 \text{ (이정오와 박희용, 1992), } \Delta T=14^{\circ}\text{C} \quad (5)$$

$$\text{핀의 면적: } A = \frac{q}{UF\Delta T} \approx 69 \text{ m}^2$$

따라서 적어도 25kW의 냉각능력을 갖도록 핀 표면

적이 약 70 m<sup>2</sup> 되는 코일을 선정하여 설치하였다.

**팽창밸브(Expansion valve)**

팽창밸브는 증발기에서 증발속도에 비례하여 액체 냉매의 유량을 조절하는 온도조절형 팽창밸브를 선택 하였다. 작동원리는 센서부분이 증발기 출구에 장착되어 있어서 증발기의 온도를 감지하여 증발기로 들어 가는 냉매유량을 조절한다. 팽창밸브의 모델은 ALCO사의 TCLE 7-1/2 HW 100 64 type이었다.

**재가열기와 히터**

재가열기는 증발기 바로 다음에 설치하여 냉각공기의 온도를 올림으로써 높은 상대습도를 조절하도록 하였다. 즉 압축기에서 나오는 고온의 냉매일부를 재가열기로 보내는 관에 병렬로 두개의 솔레노이드 밸브를 설치하고, 이 밸브를 자동제어기에서 보내는 신호에 의해 개폐를 반복함으로써 냉각공기의 습도를 조절하도록 하였다. 직교류형 판 핀들이 부착되어 있는 재가열기 코일의 총표면적은 약 11 m<sup>2</sup>이며 그 크기는 5/8"Φ×1R×16S×800L이다. 증발기를 거친 냉각공기의 상대습도를 압축기의 일부 냉매열을 이용하여 조절할 때, 그 가열량이 부족할 경우 냉각공기를 직접 가열해 습도를 조절하도록 3 kW 용량의 전기히터를 보조가열기로 설치하였다.

**흡입팬**

냉각기에 사용될 공급팬은 실외공기를 냉각기로 흡입하여 이를 다시 증발기로 보내주는 장치로서 적절한 풍량과 풍압이 요구되었다. 그리고 곡물 건조시에는 상온통풍의 송풍비로 약 2b cm/m<sup>3</sup>이 사용되므로 곡물 40톤(66 m<sup>3</sup>) 건조시 필요한 송풍량을 공급해 줄 수 있는 흡입팬이 요구되었다. 이에 흡입팬으로 최대 송풍량이 120 cm이고, 최대풍압이 100 mmAq인 3.7 kW의 동력을 갖는 원심팬을 선정하였다. 냉각기 출구의 냉각공기 온도에 따라 온도조절기에 의해 공기조절뎀퍼를 자동으로 제어함으로써 흡입되는 공기의 양을 조절하도록 하였다.

**냉각공기 온도의 자동제어**

DC모터로 구동되는 공기 뎀퍼장치와 온도제어기를 사용하여 흡입되는 공기량을 자동으로 조절하도록 하였다. 이는 최종 냉각공기의 온도에 따라 제어기에 의해 외부공기 흡입량을 뎀퍼로 조절하여 냉각공기의 온도를 조절하는 방식이다. 최소량의 냉각공기량을 유지하기 위해 뎀퍼에 약 1.5%정도의 구멍을 내어 풍량이

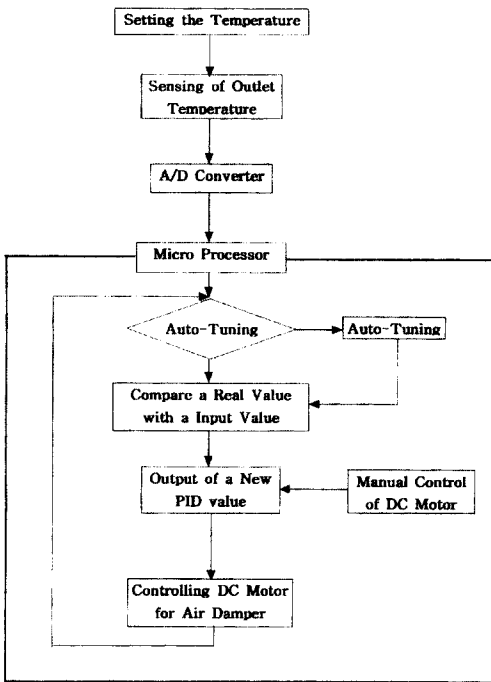


Fig. 2. Flow chart on temperature control of a grain chiller.

최소한 11 cm<sup>3</sup>/min정도가 되도록 하였다. 냉각공기의 온도에 따라 댐퍼를 조절하기 위해서 사용된 온도 조절기는 KONICS KC-33(KM97008-2000)으로서 고성능 A/D 변환기와 마이크로 프로세서(micro processor)로 구성되어 있으며, 특수기능 및 자기진단 기능 등을 가지고 있다.

제어원리는 Fig. 2에서처럼 환경조건의 큰 변화 즉 온도가 크게 바뀐 상태일 때마다 Auto-Tuning(A/T)에 의해 댐퍼의 열림정도에 따른 냉각공기의 온도변화 관계를 처음에 분석한다. 그런 후에 측정치(온도)와 설정치(온도)의 차이를 A/T에 의한 관계에 기초하여 자동연산치(PID)를 산출하여 댐퍼를 조절하도록 프로그램화되어 있어서 온도의 측정치와 설정치의 차이를 점차로 좁혀가도록 한 것이다. 여기서 PID의 값과 사이클 시간은 A/T을 실행 시킬 때마다 자동으로 결정되며 수동으로도 입력이 가능하게 하였다. 댐퍼가 자동 위치에 있을 때 냉각기 출구의 온·습도 센서에 의해 측정된 값이 입력되어 자동연산치(PID)에서 다시 계산되어진 값에 의해 자동으로 댐퍼를 조절하는 데, 댐퍼가 완전히 닫혀서 공기가 들어오지 않는 것을 방지하기 위해서 댐퍼에 구멍을 내어 풍량이 기본적으로 11 cm<sup>3</sup>정도는 나오도록 하였고, 완전히 100% 열릴 때는 상온풍통 건조를 위해 최대 120 cm<sup>3</sup>의 풍량이 나오게

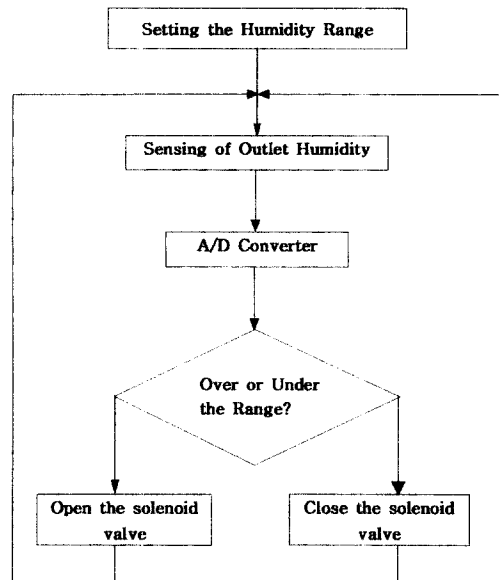


Fig. 3. Flow chart on humidity control of a grain chiller.

하였다. 댐퍼의 개폐정도는 자동상태일 때는 온도에 따라 제어장치에 의해 변화되지만, 수동상태일 때는 개폐정도를 결정할 수 있어서 송풍량을 임의로 조절할 수가 있었다.

### 냉각공기 상대습도의 제어

상대습도를 제어하기 위해서 DX7 디지털 제어기와 습도센서를 냉각기에 설치하였다. Fig. 3에서 처럼, 재가열기에 부착된 솔레노이드 밸브를 ON/OFF 하여 상대습도를 제어하도록 DX7 제어기에 상한값과 하한값의 상대습도의 범위를 설정하였다. 고온의 압축된 일부 냉매를 통과시켜 재가열 코일을 가열시킴으로써 상대습도를 감소하게 하고, 설정값(상대습도) 범위 이하로 떨어지면 솔레노이드 밸브를 닫히도록 하여 습도의 상승을 야기시켜 설정범위 내에서 상대습도를 유지하도록 솔레노이드 밸브의 개폐를 자동으로 제어하였다.

### 제어 패널(panel)

냉각기의 정면에 설치한 제어 패널은 냉각기를 자동과 수동으로 조절하도록 제작하였다. 각 제어계는 온도와 습도의 변화 및 설정치를 표시해 주거나 설정치를 입력할 수 있도록 하였다. 패널 중앙에는 냉각기의 자동과 수동 선택 스위치, 가열기 스위치, 전원 스위치 그리고 수동상태일 때 ON/OFF 시킬 수 있는 버튼등으로 구성하였다. 또한 중발기에서의 자동제빙을 위

Table 1. Specification and performance of the grain chiller

Item	Specification/Performance	Remarks
Chilling power	Maximum 28000 kcal/h (33 kW)	
Temp. and RH of chilled air	Temperature: 8~13°C Relative humidity: 50~95%	
Total Power	15 kW	
Refrigerant	R-22	
Compressor	Semi-seal type, 5.6 kW Model: QR90	
Condenser	Coil 5/8"×5×16×800, area 93 m <sup>3</sup> Fan: 2HP, 140 cm	With pressure gauge
Evaporator	Coil 5/8"×5×16×800	With pressure gauge
Air filter	20×720×920, EK-165	
Heater	0.5 kW×6 220V	Control by solenoid
Air damper	2.6W×24V×95, auto-control	For supply fan
Control panel	Auto/Manual, Button type 700×700×255	
Electricity, size	220/380×3p, 3230×1130×1870	

해 타이머를 부착하여 자동으로 압축기를 일정시간 동안 중단할 수 있게 하였다.

#### 냉각기 성능평가

##### 냉각능력 및 냉각시간

사일로에서 곡물을 약 15°C의 중저온으로 저장하기 위해 개발한 곡물 냉각기의 주요 특징 및 성능은 Table 1과 같다. 냉각기는 최대 28,000 kcal/h의 냉각능력을 가지며 냉각공기의 온도는 대기 상태에 따라 약 8~13°C, 상대습도 50~95% 내외에서 작동되도록 개발하였다. 특히 재가열기 코일로 냉각공기의 상대습도를 충분히 조절할 수 있었다. 그리고 본 냉각기를 사용하여 곡물을 냉각할 경우 냉각시간은, 13°C의 냉각 공기 11 cm의 풍량으로 초기온도 25°C의 곡물 40톤을 15°C이하로 냉각하기 위해서는 약 70시간이 소요될 것으로 추정되었다.

본 냉각기의 냉각능력은 목표로 한 냉각부하 25 kW를 초과하였지만, 냉각공기의 풍량비가 약 0.2 cm/m<sup>3</sup>으로 작아서 실제 냉각시간은 다소 증가한 것으로 사료되었다. 이론적 계산으로 본 곡물냉각기로 약 0.2 cm/m<sup>3</sup>의 풍량비에서 25°C의 곡물을 하루에 15°C이하로 냉각시킬 수 있는 곡물량은 약 15톤 정도임을 알 수 있었다.

##### 냉각공기의 제어

냉각공기의 온도와 상대습도는 각각 KONICS KC-33과 DX7 디지털제어기에 의해 자동 조절되었다. 냉각기의 온도를 13°C에 설정하였고 상대습도를 65~75%

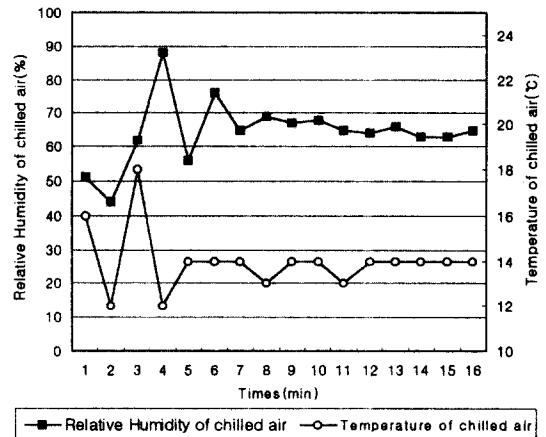


Fig. 4. Change of chilled air according to time at 31°C temperature and 82% relative humidity of ambient air.

범위로 설정하였을 때, 냉각공기는 Fig. 4에서 볼 수 있는 것처럼 점차로 온도와 상대습도가 설정값에 도달하고 있음을 알 수 있다. Fig. 4에서와 같이 냉각기 내에서 증발기를 통과한 냉각공기 온도 및 상대습도는 외기온도가 약 32°C인 여름철에 자동설정시 시동 후 약 7분만에 설정온도 13°C와 설정상대습도 65~75%의 범위에 도달한 후 ±1°C의 온도오차와 설정된 상대습도 범위에서 지속적으로 정확하게 조절됨을 알 수 있었다. 특히 냉각공기의 상대습도는 재가열기의 고온의 냉매로 자동으로 조절하였는데, 증발기를 바로 통과한 냉각공기의 온도는 약간 상승하고 상대습도는 설정치에 도달하는 것을 알 수 있었다. 설정값에 도달했

을 때 냉각기 출구에서의 풍량은 약 11 cm 정도로 최소의 풍량을 나타냈다. 그러나 이 풍량은 곡물 40톤(약 66 m<sup>3</sup>)에 대해 풍량비가 약 0.17 cm/m<sup>3</sup>로서 냉각통풍의 풍량비로는 충분하였다. 그러나 위와 같은 설정조건에서는 냉각공기의 풍량이 약 11 cm으로 제한되기 때문에 곡물량이 많아 풍량을 증가시킬 필요가 있는 경우에는 압축기와 흡입팬의 용량 증가가 요구되었다. 그리고 공기가 공급팬을 지나면서 갑자기 확대되는 덕트를 통하는 동안에 압력손실이 발생하였고, 증발기 핀을 통과할 때 핀과 코일에 의한 압력손실이 많이 발생한 것으로 나타났다. 그러나 냉각공기의 풍압은 약 20 mmAq로서, 곡물을 냉각통풍할 때에는 적은 풍량이 사용되기 때문에 압력감소도 매우 작아 별 문제는 되지 않았다.

본 냉각기에서 최종 냉각공기의 최저온도는 외기 조건과 풍량 그리고 상대습도에 따라 약 8~13°C까지 가능하였고, 상대습도는 50~95% 범위에서 조정이 가능하였다. 따라서 본 냉각기는 압축기 용량, 증발기 및 응축기 핀의 면적, 재가열기 용량, 흡입 팬 등이 곡물 40톤을 냉각시키는 데에 충분한 것으로 사료되었다. 그러나 공기가 증발기코일을 균일하게 통과해 코일에 성애가 생기지 않도록 설계가 보다 더 개선되어야 할 것으로 판단되었다.

**냉각기 냉동사이클 분석**

냉각기 주요부의 온도 및 압력을 실제로 측정해 냉동사이클을 이론적으로 분석한 결과, 냉각기의 성적계수, 냉매압력, 냉각능력, 압축기의 일, 냉각공기의 특성, 각 지점에서 냉매의 특성치 등을 예측할 수가 있었다. 예측된 냉각기의 최대냉각능력은 약 33 kW이었으며 성적계수는 약 2.56으로 나타났다. 그리고 재가

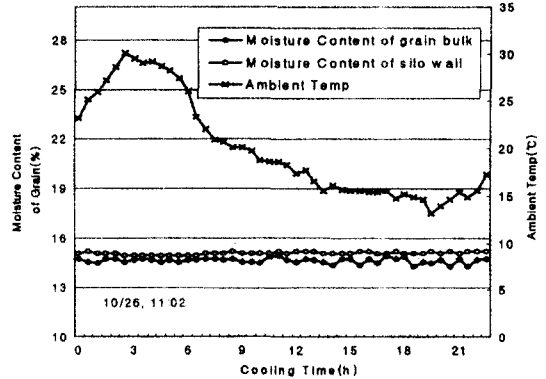


Fig. 6. Change of ambient temperature and moisture content of grain in silo according to cooling time.

열기 이전의 냉각공기의 상대습도는 거의 100%로 나타났다고, 공기에서 제거되는 수분량은 공기 1 kg당 약 0.0011 kg이었다. 압축과정에서의 마찰에 따른 비가역성으로 압축기 효율을 70%로 가정해 냉동 표준사이클을 분석한 결과 냉매의 온도가 112°C까지 상승하였으나 압축후 실제 냉매 온도는 약 107°C이었다. 본 압축기의 이론적인 냉매 최대유량은 0.2017 kg/s로서 소요되는 냉매유량보다 많아 냉각기의 최대냉각능력이 이론적으로 33 kW까지 발생하는 것으로 분석되었으나, 실제 냉매유량은 마찰에 때문에 적어 냉각능력은 이보다 낮을 것으로 예상되었다.

**곡물의 냉각실험 결과**

개발한 곡물냉각기를 단열처리된 사일로에 설치하고 약 5.6톤의 곡물을 냉각실험 한 결과 Fig. 5와 6과 같은 결과를 얻었다. 냉각기의 설정온도를 13°C로 하고 상대습도를 65%~75%로 설정한 후 냉각기를 가동한 결과, 사일로내 곡물의 온도는 20°C에서 점차 떨어져 약 9시간 후에 13~14°C에서 유지하였다. 이때 냉각기의 평균 소비동력은 시간당 약 9 kWh이었다. Fig. 6은 냉각시간에 따른 대기온도와 사일로내 곡물의 함수율 변화를 나타낸 것으로서, 정전용량식 수분센서로부터 측정된 곡물 함수율은 거의 변화됨이 없이 약 15% 정도를 유지하였다.

**요 약**

본 연구에서는 곡물 냉각기를 이론적으로 분석한 후, 냉각부하가 25 kW인 곡물 냉각기를 설계하여 제작한 후 그 성능을 평가하였다.

1. 냉동사이클의 이론적 분석을 기초로 곡물냉각기

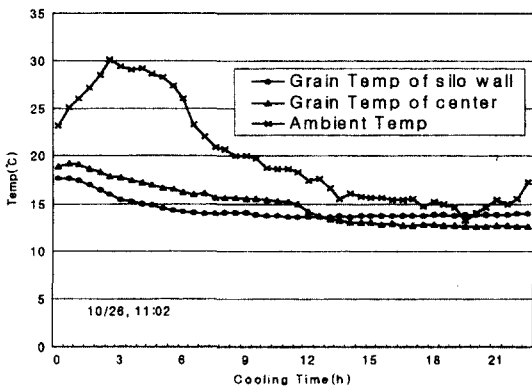


Fig. 5. Change of ambient temperature and grain temperature in silo according to cooling time.

를 5.6 kW의 압축기, 표면적 92 m<sup>2</sup>의 직교류형의 plate 핀이 부착된 응축기, 표면적 70 m<sup>2</sup>의 직교류형의 판 핀들이 부착된 증발기, 온도조절형 팽창밸브, 상대습도 조절용 재가열기, 제어판넬 등으로 구성하여 개발하였다.

2. 개발된 곡물냉각기의 최대 냉각능력은 약 33 kW, 성적계수는 약 2.6으로 나타났으며, 여름철에 약 25°C의 곡물 15톤을 하루에 15°C이하로 냉각시킬 수 있었다.

3. 냉각기의 냉각공기량은 댐퍼에 의해 자동 또는 수동으로 조절되도록 개발하였다. 공기유량을 수동으로 제어할 때는 임의로 설정할 수 있도록 하였고, 자동조절시에는 필요한 온도와 상대습도를 설정하여 중저온과 낮은 상대습도의 냉각공기를 얻을 수 있도록 하였다.

4. 공기가 들어오는 입구댐퍼에 기본적으로 약 1.5% 정도의 구멍을 뚫어 냉각공기 유량이 최소한 11 cm 정도 되게 하였으며, 이때 냉각공기온도는 외기에 따라 8~13°C정도를 나타내었고 상대습도는 50~95% 정도의 넓은 범위에서 자동조절이 가능하였다.

5. 본 냉각기는 외기온도가 약 32°C인 여름철에 자동설정시 시동후 약 7분만에 설정온도 13°C와 상대습도 65~75%의 설정범위에 도달한 후 ±1°C 온도오차와 설정된 상대습도 범위에서 지속하였다.

6. 사일로 냉각저장 실험에서 냉각공기 0.2 cm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>의 풍량비로 초기온도가 약 20°C인 약 5톤의 곡물을 함수율 약 15%를 유지하면서 약 9시간 만에 15°C이하의 온도로 냉각시킬 수 있었다.

의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## 문 헌

- 고학균, 정종훈 외 11인. 1995. 미국종합처리시설-이론과 실제-, 문운당
- 이정오, 박희용. 1992. 열전달, 개정 7판. 범한서적주식회사
- Burrell, N.J. and H.J. Laundon. 1967. Grain cooling studies. Observations during a large-scale refrigeration test on damp grain. *J. Stored Prod. Res.* **3**: 125-144
- Escher Wyss. 1960. User note for grain drying with the Escher Wyss cooling unit. Lindau, Germany
- Foster, G.H. and J. Tuite. 1982. Aeration and stored grain management. In *Storage of Cereal Grains and Their Products*. C.M. Christensen (ed). A.A.C. Chemists, St. Paul, MN
- IKZ. 1993. Sales brochure "Getreidekuhler". Zwickau, Germany
- Maier, D.E., F.W. Bakker-Arkema and S.G. Ilangantileke. 1988. Ambient and Chilled Paddy Aeration under THAI Conditions. *Agri. Engineering Journal*. **2(1&2)**(15): 33
- Maier, D.E., R.G. Moreira and F.W. Akker-Arkema. 1992. Comparison of Conventional and Chilled Aeration of Grains Under Texas Conditions. *A.S.A. Engineers* **8**(5): 661-667
- Maier, D.E. and R.A. Rulon. 1996. Evaluation and Optimization of a New Commercial Grain Chiller. *A.S. of Agricultural Engineers* 0883-8542 **12**(6): 725-730
- McCune, W.E., N.K. Person and J.W. Sorenson, Jr. 1963. Conditioned air storage of grain. *Transactions of the ASAE* **6**(3): 186-189
- Sulzer-Escher Wyss. 1970. Kernel cooling unit Granifrigor. Sales brochure. Lindau, Germany

## 감사의 글

본 연구는 농림부 특정연구사업 '95 첨단연구비에