

곡물냉각기의 개발⁺

Development of a New Commercial Grain Cooler

김동철*, 김의웅*, 금동혁**, 한종규***

정회원 정회원 정회원 정회원

D. C. Kim, O. W. Kim, D. H. Keum, J. K. Han

1. 서 론

인공적으로 곡물을 냉각시킨다는 아이디어는 1917년 독일의 기술자인 Dienst에 의해 처음 제안되었으나, 당시에는 곡물의 저장에 적용시킨다는 것이 너무 고가이고 비현실적인 것으로 판단되었다. 최초의 상용 곡물냉각기가 생산되기 시작한 것은 1961년경으로 독일 Escher-Sulzer Wyss사에서 송풍기, 압축기(compressor), 증발기(evaporator), 응축기(condenser) 등으로 구성된 1일 냉각능력 50톤 규모를 생산, 판매하였다. 그러나 인공적인 냉각이 곡물산업에 의해 받아들여진 것은 독일에서 150대, 그 외 5개국에서 곡물냉각기가 판매된 1963년경이었다. 상용적인 곡물냉각기가 1961년에 개발된 이후 세계적으로 곡물냉각기를 제조하고 있는 주요업체만도 독일, 미국, 스웨덴 등의 나라에 약 7개사 정도이며, 1961년부터 1989년까지 보급된 곡물냉각기는 3,500대 이상으로 연간 약 2,500만톤 이상의 곡물이 냉각저장되고 있다(Maier, 1992).

그러나 이들 시스템은 대단히 고가이면서도, 지금까지 대상 곡물이 밀, 콩, 옥수수, 유채 씨앗 등이 대부분으로 벼의 대한 연구보고가 적다. 또한, 우리나라 기상조건하에서 처리능력 및 성능에 대한 측정결과도 없는 상태이다. 본 연구의 목적은 벼를 대상으로 국내의 기상조건 및 수확후 처리여건에 적합한 상용적인 곡물냉각기를 개발하고, 이의 성능을 측정하여 설계조건에 적합한지를 분석하는데 있다.

2. 곡물냉각기의 개발

가. 설계목표

- 1) 우리나라 벼의 수확후 관리체계에 적합한 기능 구축
- 2) 국내의 기상여건에 적합한 제어시스템 개발
- 3) 냉각부하의 변화에 적합한 에너지 절약형

+ 본 연구는 농림기술개발사업의 연구비 지원에 의해 수행되었음

* 한국식품개발연구원 특수연구사업단 쌀연구사업부

** 성균관대학교 생명자원과학대학 생물기전공학과

*** 한성공업(주) 기술연구소

- 5) 안전한 운전을 위한 착상방지 기능 구축
- 6) 조작의 간편성

나. 시스템의 구성

곡물냉각기는 크게 압축기, 증발기, 응축기, 팽창밸브 등 기본적인 냉동기와 외기공기를 도입하는 필터, 댐퍼 및 송풍기, 상대습도 조절을 위한 재열기와 이들을 연결하는 배관, 밸브류 및 제어판넬로 구성하였다. 곡물냉각기의 기본 흐름도는 그림 1과 같다.

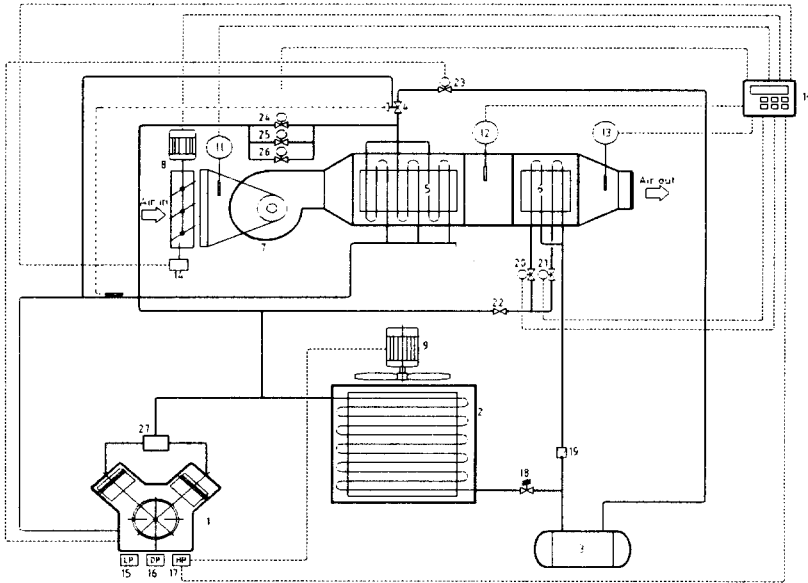


Fig. 1 Schematic diagram of prototype grain cooler.

- 1. compressor, 2. condenser, 3. receiver, 4. expansion valve, 5. evaporator, 6. reheater, 7. fan, 8. damper, 9. condenser fan, 10. controller, 11. 12. 13. thermocouple, 14. limit switch, 15. low pressure switch, 16. oil pressure switch, 17. high pressure switch, 18. condensing pressure regulator, 19. check valve, 20. 21. 23. 24. 25. 26. solenoid valve, 22. stop valve, 27. unloading solenoid valve

다. 주요 기기의 설계 및 제작

1) 최대송풍량 및 냉각능력

곡물냉각기의 최대냉각능력은 수확기에 200톤(345m³)을 24시간이내에 냉각할 수 있도록 풍량비를 0.35m³/min/m³으로 하여 최대송풍량은 120m³/min, 250mmAq을 기준으로 하였다. 외기 온습도조건은 울산지역의 15.8℃, 68%(성균관대, 1998), 냉각공기는 수확기에는 함수율 18%,w.b.를 기준으로 5℃, 95%로 하였으며, 냉각부하는 35,681kcal/hr였다.

2) 주요기기의 설계

- 가) 압축기 : 사용냉매 R-22, 반밀폐형 왕복동식, 무부하전자변이 부착된 냉각능력 42,914kcal/hr(49.9kW)인 15HP(독일 BOCK, 모델 HG 4/555-4s)으로 설계하였다.
- 나) 송풍기 및 댐퍼 : 송풍기는 최대송풍량 120m³/min, 정압 250mmAq를 갖는 터보팬 10HP(7.5kW)으로, 댐퍼는 IVC(inlet volume control)방식으로 설계하였다.
- 다) 증발기, 응축기 : 증발기 전열면적 101.6m²인 5/8"×12R×16S×720EL(관경×열×단×유효관길이), 전열면적 121.1m²인 3/4"×10R×40S×850EL로 설계하였다

라. 제어시스템 설계 및 제작

1) 시스템의 기본제어

- 가) 냉각능력 : 외기의 온습도 변화에 따라 송풍기의 댐퍼, 압축기의 무부하전자변, 재열기 및 증발기에 공급되는 고온고압의 냉매가스량을 이용하여 냉각능력을 조절하였다.
- 나) 상대습도 : 증발기에서 냉각된 공기를 재열기에서 가열하여 조절하였다.
- 다) 응축압력 및 착상방지

2) 원칩 마이크로 프로세서를 이용한 제어시스템

곡물냉각기의 “냉각건조”, “냉각저장” 및 “통풍”의 기능에 적합하도록 외기조건 변화에 따라 송풍기 댐퍼, 압축기 무부하전자변, 재열기 및 증발기의 고온고압 냉매가스 공급관에 부착된 5개의 전자변의 자동운전이 가능하도록 하였다. 이를 위해 원칩 마이크로 프로세서인 AT89C52과 PIC16C74를 이용하여 시스템을 제어하였다.

3. 성능실험

가. 실험방법

개발된 곡물냉각기의 성능은 냉각능력, 재열능력, 가열능력, 소요전력 및 성적계수 등을 측정하고 설계조건에 적합한지를 분석하였다. 이를 위해 냉각공기 온도 및 상대습도, 송풍량, 소요전력을 측정하고, 곡물냉각기 각 지점에서의 냉매의 온도를 측정하였다. 냉각공기의 온도 및 냉매의 온도는 열전대(K-type)로, 상대습도는 상대습도 센서(HD8607)로, 송풍량은 $\varnothing 0.35\text{m}$ 의 플로노즐을 사용하여 측정하였다. 측정치는 자료수집장치(Datascan, 7327, U.K.)로 기록하였다. 적산전력계를 이용하여 곡물냉각기 전체의 소요전력과 압축기의 소요전력에 대해 각각 측정하였다.

나. 결과 및 고찰

1) 냉각능력

송풍기의 최대정압은 415mmAq, 송풍량 150m³/min에서는 184mmAq를 나타내었으며, 송풍

량과 정압과의 관계는 다음 식(1)과 같았다($r^2 = 0.993$).

$$\Delta P = 412.1138 + 0.5348Q - 0.0137Q^2 \dots\dots\dots (2)$$

여기서 ΔP : 정압(mmAq)

Q : 송풍량(m^3/min)

냉각공기온도를 5℃로 설정하였으며, 측정시간중 외기의 평균온도 및 상대습도는 20.0℃, 58.2%이었다. 냉각공기온도가 정상상태에 도달하는데 소요된 시간은 약 0.12시간으로 나타났다. 응축/증발압력은 16.5/3.6kgf/cm²(게이지압)이었으며, 냉각공기의 평균온도 및 상대습도는 5.3℃, 94.8%, 송풍량은 88.0m³/min로 나타났다. 외기공기와 냉각공기의 열물성치로부터 냉각능력을 구한 결과 35,284.2kcal/hr로서 동일 응축/증발압력하에서 이론적인 냉각능력 34,271kcal/hr의 약 100.3%로 나타났다.

2) 재열능력

재열기를 통하여 냉각공기의 온도는 8.6℃상승하였고, 상대습도는 32.8%가 강하하였다. 이때 송풍량은 118.9m³/min로서 증발기에서 제거된 열량은 43,253.7kcal/hr였으며, 재열기에서 공급된 재열량은 23,154.9kcal/hr로서 증발기에서 냉각된 열량의 약 53.5%를 차지하였다.

그림 2는 냉각공기온도를 6.5℃, 재열기를 통한 온도상승을 3.5℃로 설정하고 0.5시간동안 냉각공기온도변화를 측정된 결과를 나타낸 것으로서 재열기 출구온도 즉, 곡물냉각기의 냉각공기온도는 약 0.25시간후에 설정온도와 동일한 6.5℃로 유지되었으며, 증발기 및 재열기 출구의 냉각공기온도차는 재열온도 3.5℃ 범위에서 제어되고 있음을 알 수 있었다.

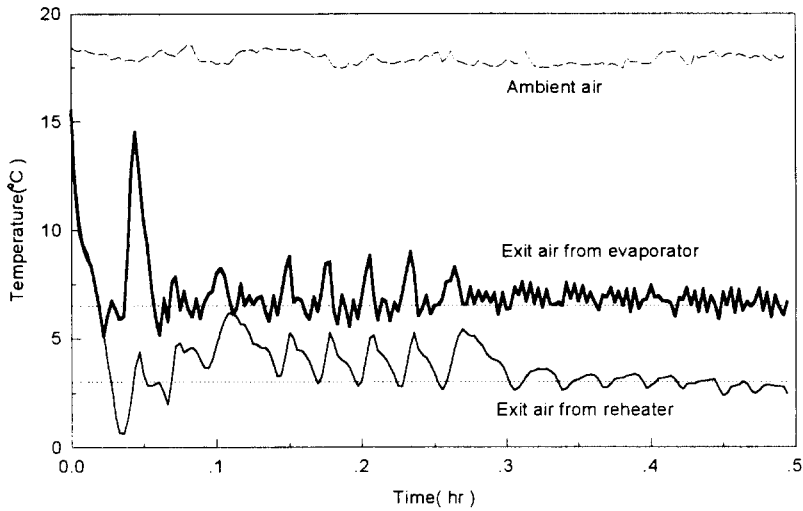


Fig. 2 Changes of temperatures of ambient and exit air from evaporator and reheater.

3) 가열능력

외기의 온도 및 상대습도가 18.9℃, 61.2%일 때 압축기의 무부하전자변이 가동되고 재열기 및 증발기에 고온고압의 냉매가스가 공급될 때 증발기 및 재열기 출구공기의 온도 및 상대습도는 각각 14.6℃, 71.3% 및 24.5℃, 46.8%였다. 이 때 송풍량은 131.0m³/min로서 총 냉각열량은 15,227.3kcal/hr, 가열능력은 32,276.7kcal/hr로 나타났다. 또한, 재열기 및 증발기출구 공기온도차는 9.9℃, 재열기출구 공기온도와 외기온도 차는 5.6℃로 나타났다. 이 때 응축/증발압력이 16.2/6.2kgf/cm²로서 이론적인 압축기 냉각능력은 28,208kcal/hr인 반면 실제 냉각능력은 15,227.3kcal/hr로서 이론적인 냉각능력의 54.0%에 불과하였다. 이는 증발기에 냉매액과 고온고압의 냉매가스가 동시에 공급되기 때문으로 판단되었다.

4) 소요전력

무부하전자변이 작동하지 않고 송풍기의 뎀퍼만이 제어될 때 총소요전력과 압축기의 소요축동력은 각각 22.8, 14.1kW를 나타내 설계소요전력보다 다소 높게 나타났다. 그러나 무부하전자변이 작동할 때 소요전력은 각각 15.2, 7.8kW를 나타내어 압축기 무부하전자변이 작동하지 않는 경우에 비해 총소요동력의 33.3%, 압축기 소요축동력의 44.7%가 절감되는 것으로 나타났다. 압축기의 무부하전자변이 작동할 때가 작동하지 않을 때에 비해 총소요전력은 26.7~27.5%, 압축기 소요축동력은 34.8~37.7%정도가 절감되는 것으로 나타났다.

Table 1. Required electric power of prototype grain cooler and compressor with different operating conditions.

Operating conditions	Chilled air setting point(℃)	High pressure (kgf/cm ²)	Low pressure (kgf/cm ²)	Required power (kW)	
				total	compressor
Damper	5.0	16.0	3.9	22.8	14.1
Damper+Unloading solenoid valve	5.0	13.0	4.1	15.2	7.8
Reheater	17.0	15.0	4.0	24.0	13.8
Unloading solenoid valve +Reheater	17.0	14.9	5.0	17.4	8.6
Unloading solenoid valve +Reheater+Evaporator	17.0	16.2	6.2	17.6	9.0

5) 성적계수

성적계수(C.O.P, coefficient of performance)는 4.71로서 표준냉동사이클에서 냉매 R-22의 성적계수 4.0에 비해 높은 값을 나타내었다. 이것은 12.4℃의 과냉각이 발생한데 원인이 있는 것으로 판단되었다. 곡물냉각기에서 압축기 축동력 이외에 송풍기, 응축기의 송풍기, 뎀

퍼 및 전자변 등에서 소비되는 에너지를 고려한 전성적계수(total coefficient of performance)는 1.8로 나타났다.

4. 결론 및 요약

- 가. 압축기 무부하전자변, 재열기 및 증발기에 고온고압의 냉매가스를 공급하여 냉각부하의 변화에 따라 냉각능력을 0~100%까지 제어할 수 있으며, 1일 최대 벼 200톤을 냉각할 수 있는 곡물냉각기를 개발하였다.
- 나. 개발된 곡물냉각기의 최대냉각능력은 35,284kcal/hr, 압축기 무부하전자변이 작동할 때는 21,948kcal/hr였으며, 송풍량 및 정압은 각각 120m³/min, 279mmAq였다.
- 다. 곡물냉각기의 재열기를 통한 냉각공기의 최대 온도상승 및 상대습도의 저하는 각각 7.6~8.6°C, 34.5~41.0%로서 냉각건조기능의 재열조건에 적합하였고, 재열온도범위에서 안정적으로 제어되었다.
- 라. 곡물냉각기의 소요동력은 22.8kW였으나, 압축기의 무부하전자변이 작동될 때의 소요동력은 총소요동력의 33.3%, 압축기 소요축동력의 44.7%가 절약되는 것으로 나타났다.
- 마. 곡물냉각기의 냉동시스템의 성적계수는 과냉각으로 인해 표준냉동사이클하에서의 4.0보다 높은 4.71로 나타났으며, 전성적계수는 1.8로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 김동철, 김의용, 금동혁. 1998. 벼 퇴적층 냉각 시뮬레이션. 한국농업기계학회지. 심사중
2. 성균관대. 1998. 원형철제빈을 이용한 벼의 건조 및 저장핸드북. 경기지역 컨소시엄 총서 2. P 13.
3. 日本冷凍協會. 1981. 冷凍空調便覽. 廣濟堂, 東京. P 555.
4. Burrell, N.J. 1965. Refrigeration of damp grain. Farm and country. February 1965.
5. Heidt, H. 1963. Grain chilling, a valuable aid in combine harvesting. Die Mühle und Mischfüttertechnik. 100(39) : 417-418.
6. Ihen, H. 1967. Advantages and disadvantages of chilled grain preservation. Die Mühle und Mischfüttertechnik. 104(42) : 542-544.
7. Maier, D.E. 1994. Chilled aeration and storage of U.S. crop—a review. Proceedings of the 16th Int. Working Conference on Stored-product Protection-Vol 1, Canberra, Australia : 300-311.
8. Sulzer-Escher Wyss. 1968. References list Grainfrigor. Sulzer-Escher Wyss, Lindau, Germany.