

열펌프를 이용한 벼의 저온건조성능평가

김 훈¹ · 한재웅*

¹한국식품연구원, 성균관대학교 생명공학부

Performance Evaluation of Rough Rice Low Temperature Drying Using Heat Pump

Hoon Kim¹ and Jae-Woong Han^{1*}

Faculty of Life Science and Technology, Sungkyunkwan University

¹Food Marketing Research Group, Korea Food Research Institute

Abstract

This study was conducted to design and fabricate a heat pump that can produce some weather conditions similar to those of the dry season of the rough rice in Korea, and to investigate basic performances of the apparatus. During the drying test, the amount of energy consumption and drying characteristics were measured at four different temperature levels ranging between 20°C and 50°C. In the psychrometric chart, the freezing capacity and refrigerant circulation ratio of the heat pump were 173 kJ/kg and 49.6 kg/hr, respectively. Therefore, coefficient of performance was 5.5, which was superior to that of refrigerant R-22 (4.0) in standard refrigeration cycle. In addition, the time to reach target drying temperature (30°C) and relative humidity (40%) were 6 minutes and 7 minutes, respectively. Temperature differences between the drying temperature and the rice were 1.5°C and 8.5°C at the drying temperatures of 21.9°C and 48.7°C, respectively. This result demonstrated that the increased temperature of the rice in the drying section decreased sufficiently in the tempering section. At the drying temperatures of 21.9, 30.7, 38.8, and 48.7°C, drying rates were 0.29, 0.61, 0.85, and 1.26%/hr, respectively, which were similar to those of commercial dryer. In addition, the amounts of energy consumption were 325, 667, 692, and 776 kJ/kg, respectively. These results showed that this dryer saved up to 86% of energy consumption compared with the commercial dryer, which uses 4,000-5,000 kJ/kg of fossil fuel.

Key words: Heat pump, low temperature drying, energy consumption, rough rice

서 론

곡물의 건조는 안전저장을 위하여 품질 손상 없이 함수율을 줄이는 과정으로 곡물과 같은 생물재료의 수분을 제거하기 위해서는 막대한 양의 에너지가 소요된다. 곡물 생산에 투입되는 총 에너지 중에서 건조에 소요되는 에너지는 콩은 24%, 벼는 50% 및 옥수수 60% 이상이 소요되는 에너지 집약적인 공정이다(Bake & Vas, 1994; Brooker et al., 1992; Keum et al., 2002; Sosle et al., 2003). 따라서, 곡물 생산에 소요되는 총 에너지를 절감하기 위해서는 건조과정에서의 에너지 절감 없이는 그 효과를 기대하기 어렵다.

벼의 건조방법에는 상온통풍건조, 열풍건조 및 저온건조

방법이 있다. 상온통풍건조는 상온 또는 이를 5°C 이하로 가열한 공기를 통풍하여 건조하는 방법으로 벼의 품질 손상을 최소화 할 수 있고, 에너지 효율이 높은 건조방법이다(Keum & Park, 1996; Sharp, 1982). 그러나, 자연상태의 공기를 이용하므로 건조속도가 낮은 저능력(low-capacity) 건조방법으로 건조소요시간이 길고 특히, 강우 등 외기조건이 불리할 경우 건조속도가 저하되어 벼의 품질저하가 우려된다. 열풍건조는 45-55°C의 고온 열풍을 이용하여 건조속도를 증대시키는 고능력(high-capacity) 건조방법으로 처리능력에 우선권을 둔 건조방법으로서 건조소요에너지가 높고 열손상에 의한 동할 증가, 발아율의 감소 및 식미저하 등 품질저하의 우려가 높다(Ishibashi et al., 1969; Keum et al., 2002).

일본, 미국 등에서는 곡물 및 농산물의 건조에 열펌프를 이용하여 건조공기를 주변 온도보다 약간 가열하고, 곡물의 평형함수율 보다 낮게 제습하여 건조속도를 일정 이하로 유지하는 저온건조 또는 저온제습건조방법이 이용되고 있다. 열펌프를 이용한 저온건조는 전기에너지를 이용하는

Corresponding author: Jae-Woong Han, Faculty of Life Science and Technology, Sungkyunkwan University, Suwon Gyeonggi 440-740, Korea

Tel: +82-31-290-7832; Fax: +82-31-290-7830

E-mail: hanwoong@empal.com

Received October 12, 2009; revised November 12, 2009; accepted November 14, 2009

건조방법으로 전통적인 화석연료를 이용하는 열풍건조방법에 비해 에너지가 소비가 적고, 상온통풍건조와는 달리 외기조건에 관계없이 운영할 수 있는 장점이 있으며, 가스나 연기 등을 배출하지 않는 환경 친화적인 건조방법이라 할 수 있다(Strommen & Kramer, 1994; Wei et al., 1994; Wang & Chang, 2001). 또한, 저온에서 건조가 이루어짐으로 건조 중의 열손상을 최소화하여 동할 억제와 식미 향상 등 품질유지도 기대할 수 있는 건조방법이다(Ishibashi et al., 1971; Zhang & Bekki, 1993).

Hogan et al.(1983)은 24 kW용량의 열펌프와 전기히터를 이용하여 원형빈에서 함수율 22.9%의 옥수수 약 100톤을 14.2%까지 건조하여 소요에너지를 비교하였다. 열펌프 소요에너지는 0.557 kW/kg으로 전기히터의 소요에너지 0.905 kW/kg에 비해 39%의 에너지 절감효과를 가져왔다고 보고하였다. Bak(1981)은 건조공기의 온도 15°C, 상대습도 82%의 제습건조기를 개발하고, 이를 DAG(Dehumidified Air Generator)라고 하였다. DAG를 이용한 보리 건조에서 740 kJ/kg의 에너지가 소요되었으며, 기존의 건조방법에 비해 80%의 에너지가 절감되었다고 보고하였다.

Yamashita(1993)는 저온제습건조기를 이용하여 함수율 29%의 비를 송풍량 0.024 cmm/kg 이상, 건조속도는 0.2%/hr의 조건으로 건조할 때 발아율 등 품질이 우수하고 열풍건조에 비해 저장성도 우수하다고 보고하였다. 또한, 저온제습건조기의 소요에너지는 1588 kJ/kg으로 기존의 건조방법인 순환식건조기의 5689 kJ/kg에 비해 28%의 에너지만 소요된다고 보고하였다. Daikoku et al.(2000)은 순환식건조기에서 건조열원으로 사용할 수 있는 가습 및 배기 재순환장치 등으로 구성된 저온제습건조기를 개발하여 콩의 건조 실험에서 열풍건조에 비해 연료소비량은 40%, 전력소비량은 20% 절감되었으며, 품질손상은 열풍건조에 비해 70% 감소하였다고 보고하였다.

국내의 비 건조방법은 기계건조방법인 상온통풍건조와 열풍건조방법이 약 60%, 나머지는 천일건조에 의존하고 있으며, 기계건조방법이 매년 증가하고 있고 천일건조는 점차 감소추세에 있다. 국내에서 상온통풍건조와 열풍건조에 관한 연구는 지속적으로 이루어져 왔으나 건조비의 품질이 우수하고, 건조소요에너지를 절감할 수 있는 저온건조에 관한 연구는 전무한 실정이다.

따라서, 본 연구는 저온제습의 공기를 발생할 수 있는 열펌프를 설계, 제작하여 기본 성능을 평가하고, 비 저온건조실험을 통하여 건조특성 및 소요에너지를 구명하는데 목적이 있다.

재료 및 방법

재료

건조실험에 사용한 시료는 강원도 철원지역에서 수확한

오대벼로 수확후 조선기로 이물질을 선별한 후 40 kg 포대에 담아 함수율 변화를 최소화하기 위하여 2°C 저온저장고에 보관하였으며, 실험 24시간 전에 상온에 방치한 후 실험에 사용하였다. 비의 초기 함수율은 25.4-26.6%이었다.

열펌프

열펌프의 송풍량은 풍량비 30 m³/min · ton을 기준으로 건조 비의 용량 150 kg과 송풍손실을 고려하여 6 m³/min으로 하였다. 비 퇴적층의 송풍저항은 Kim & Kim(1986)의 식을 이용하여 비층의 두께 0.08 m, 풍속 0.29 m/s 일 때 32.1 mmAq이었다.

열펌프의 가열 및 냉각부하를 결정하기 위한 외기조건은 비 건조시기 인 10-11월 기상자료를 이용하여 가열시 온도 -5°C, 상대습도 70%, 냉각시 온도 25°C, 상대습도 70%를 기준으로 계산하였다. 토출공기의 조건은 최고 온도 50°C일 때 상대습도 50%, 최저 온도 20°C일 때 상대습도 35%를 목표로 설계하였다. 이 때의 습공기선도상(ASHRAE, 1989)에서 공기상태는 Fig. 1과 같다.

열펌프의 냉각부하는 습공기선도에서 ①-②-③-④의 흐름으로 외기온도 25°C, 상대습도 70%(h₁, 60.6 kJ/kg, v₁ 0.863 m³/kg)를 토출공기온도 20°C, 상대습도 35%(h₄ 33.0 kJ/kg, v₄ 0.837 m³/kg)로 냉각할 때 소요되는 냉각열량은 11,513 kJ/hr이며, 가열열량은 6,245 kJ/hr가 요구되었다. 또한, 외기온도 -5°C, 상대습도 70%(h₅, -0.4998 kJ/kg, v₅ 0.762 m³/kg, H₅ 0.00182 kg/kg)를 토출공기온도 50°C, 상대습도 50%(h₆ 154.8 kJ/kg, v₆ 0.974 m³/kg, H₆ 0.0403 kg/kg)로 가열할 때 소요되는 가열열량(⑥-⑤)은 57,370 kJ/hr, 상대습도를 제어하기 위한 가습량은 14.23 kg/hr가 요구되었다.

따라서, 냉각 및 가열시 소요되는 열량을 고려하여 열펌프의 압축기는 2.3 kW(CRJQ-0300-TF5, Copeland, USA) 용량으로 선정하였으며, 압축기의 최대능력은 응축온도 48.9°C, 증발온도 -1.1°C에서 37,113 kJ/hr이었다. 따라서, 건

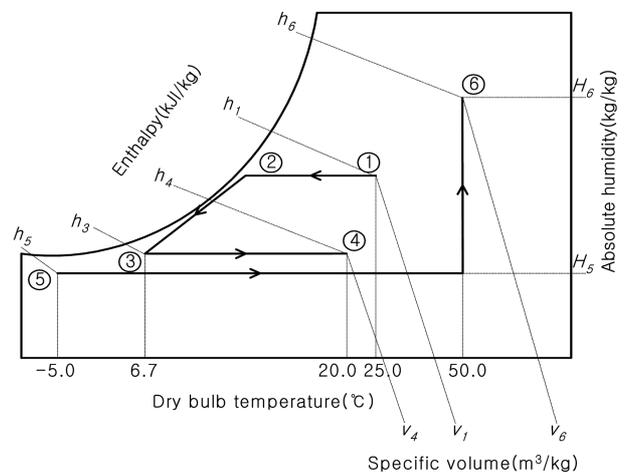


Fig. 1. Process air on psychrometric chart

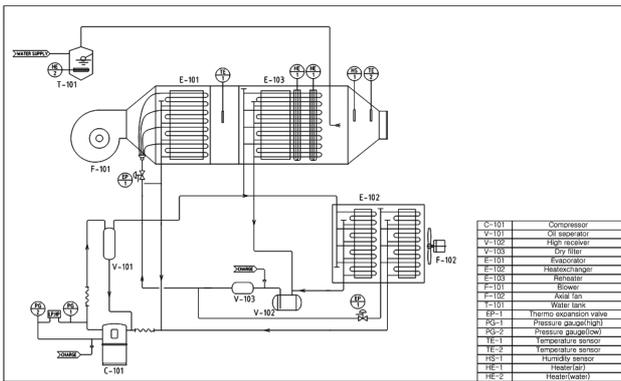


Fig. 2. Schematic diagram of heat pump

조에 요구되는 가열열량 57,370 kJ/hr에 비해 부족한 20,257 kJ/hr의 열량은 전기히터를 보조열원으로 사용하였다.

Fig. 2는 설계, 제작한 열펌프의 흐름도를 나타낸 것으로 건조공기의 온도편차를 최소화하기 위하여 주·보조 냉각 시스템으로 구성된 2단 냉각시스템으로 개발하였다. 상단의 냉각시스템은 증발기, 응축기, 재열기 및 팽창변을 각각 1개씩 병렬로 구성하여 주 냉각시스템으로 사용하였으며, 하단의 냉각시스템은 증발기 및 응축기를 일체형으로 제작하여 보조 냉각시스템으로 사용하도록 하였다. 냉각시스템의 증발기에서 냉각된 공기가 응축기에서 가열이 되도록 하였으며, 상대습도를 조정할 수 있도록 응축기후에 재열기를 설치하였다. 증발기에 설치된 온도센서(TE-1)와 토출공기의 온도를 측정하도록 온도센서(TE-2)를 설치하여 TE-1과 TE-2를 비교해서 제습량을 결정하도록 하였다. 건조공기의 상대습도를 조절할 경우는 건조공기 공급부에 노즐을 설치하고 가열식 가습기로 수분을 공급하도록 하였다. 송풍기 입구에는 댐퍼를 설치하여 송풍량을 조절할 수 있도록 하였으며, 냉매는 R-22를 사용하였다. 열펌프의 주요 단위기기의 제원은 Table 1과 같다.

실험용 건조기

곡물건조기의 종류는 곡물의 투입 및 배출방식에 따라 배치식, 순환식 및 연속식으로 구분하며, 열풍의 흐름방향

Table 1. Specifications of the heat pump

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

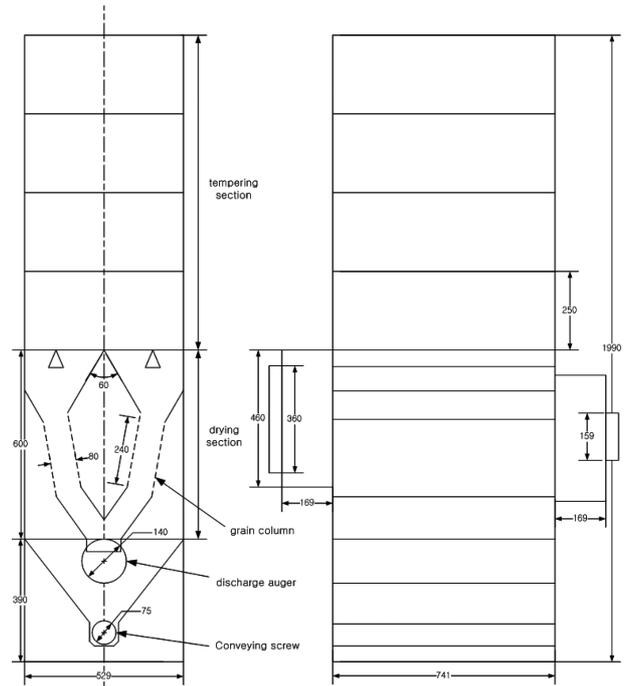


Fig. 3. Schematic diagram of the test dryer

에 따라 병류형, 향류형, 횡류형 및 혼합류형으로 구분한다 (Brooker et al., 1992). 실험용 건조기는 투입된 벼가 배출오거에 의해 건조부를 통과한 후 승강기를 통해 건조부로 다시 투입되는 방식으로 순환하면서 건조, 템퍼링이 이루어지며, 건조부 내의 벼와 열풍의 흐름이 서로 직각방향인 횡류형 순환식으로 제작하였다.

Fig. 3은 실험용 건조기의 개략도로써 용량은 벼 150 kg을 기준으로 하였으며, 이 때 건조기의 용적(건조실+템퍼링실 용적)은 0.2727 m³이었다. 건조실과 템퍼링실의 비를 1:9로 하였으며, 이 때 건조실 용적은 0.0272 m³이었다. 건조실을 통과하는 곡물층(grain column)은 2열로 하였고, 곡물층의 두께는 0.08 m, 건조부의 길이는 0.24 m로 하였다.

실험용 건조기는 두께 1 mm 강판을 사용하여 템퍼링실 4단, 건조실 및 배출부 각각 1단씩 총 6단으로 연결하여 제작하였다. 건조실내의 곡물층은 타공율 40%의 다공철판으로 제작하였다. 건조공기가 유입·배기되는 공기유입부 및 공기배기부는 직경 150 mm 및 340 mm로 제작하였다. 건조실을 통과한 벼를 배출하는 배출오거는 직경 140 mm의 원통으로 중앙을 중심으로 배출구 2개를 대칭으로 구성하였다. 배출속도의 조정이 가능하도록 구동모터(0.4 kW)에 인버터(S500, Mitsubishi, Japan)를 설치하였으며, 회전속도는 1.2-2.9 m/hr(벼 순환량 75-180 kg/hr) 범위에서 조정이 가능하였다. 또한, 균일 배출을 위해 배출오거를 정·역회전이 반복해서 작동하도록 하였다. 배출오거를 통해 배출된 벼는 직경 75 mm 스크류컨베이어를 통해 버킷엘리베이터로 이송되어 곡물이 순환할 수 있도록 하였다. 벼의 집

진을 위해 템퍼링실 상부의 곡물 투입부에 집진기(송풍량 4.2 m³/min)를 설치하였다.

실험방법

건조공기의 온도는 20-50°C 범위의 4수준, 상대습도는 30-40%로 조정하였으며, 각각의 건조온도에 대하여 비 150 kg을 실험용 건조기에 투입하고 함수율 16.5%까지 건조를 실시하였다.

실험용 건조기의 건조공기 유입부 1지점, 배기부 1지점, 건조실 4지점, 템퍼링실 2지점 및 외기 등 총 9지점에 thermocouple(T type, OMEGA, USA)를 설치하고 자료수집장치(7327, Datascan, UK)를 이용하여 2분 간격으로 온도를 측정하여 PC에 저장하였으며, 건조공기 유입부에서 측정된 온도를 건조온도로 하였다. 또한, 상대습도는 건조공기 유입부, 배기부 및 외기 각각 1지점에서 습도계(TR-72S, TAND-D Japan)를 이용하여 측정하였다. 건조중 송풍량 측정은 배기부에 길이 200 mm의 원형덕트를 연결하여 풍속계(ANO6141, KANOMAX, Japan)를 이용하여 측정하

였다.

건조속도는 초기함수율 및 최종함수율을 측정하여 총건조시간에 따른 평균 건조속도 산출하였으며, 함수율은 단립수분계(CTR-800E, S.Seiki, Japan)로 측정하였다.

건조 중 열펌프에 소요되는 전력은 적산전력계(3166, HIOKI, Japan)를 이용하여 측정하였으며, 측정된 전력(kW)을 건조소요에너지(kJ/kg-water)로 산출하였다.

결과 및 고찰

열펌프 성능

건조공기의 온도 30.5°C, 상대습도 41.2%에서 열펌프의 최대건조능력을 측정하였다. 외기 평균온도 및 상대습도는 20.2°C 및 50.6%이었으며, 송풍량은 6.2 m³/min으로 설계치와 유사하게 나타났다. 따라서, 외기 및 건조공기의 열물성치로부터 건조능력을 계산한 결과 8,616 kJ/hr로 나타났다. Fig. 4의 건압축 냉동 사이클에서와 같이 냉동효과는 173.8 kJ/kg이었으며, 이 때 냉매순환량은 49.6 kg/hr이었다. 따라서, 성능계수는 5.5로 표준냉동사이클(ASHRAE, 1989)에서 냉매 R-22의 성능계수 4.0에 비해 높은 값을 나타냈다.

외기온도 및 상대습도가 19.6°C 및 52.3%일 때 열펌프의 건조공기의 조건(온도 30°C, 상대습도 40%)이 정상상태에 도달하는 시간은 Fig. 5와 같이 온도는 6분, 상대습도는 7분 정도로 만족할 만한 수준으로 판단되었다.

건조온도 및 곡온변화

건조실험 중 외기온도는 20.2-23.1°C 범위, 상대습도는 50.6-71.6% 범위이었다. 건조온도를 20, 30, 40 및 50°C로 설정하고 건조실험을 수행하면서 실측한 건조공기의 온도변화는 Fig. 6과 같다. 설정온도 20, 30, 40 및 50°C일 때 실측된 건조온도는 21.9°C(20.3-23.2°C), 30.7°C(29.5-31.5°C),

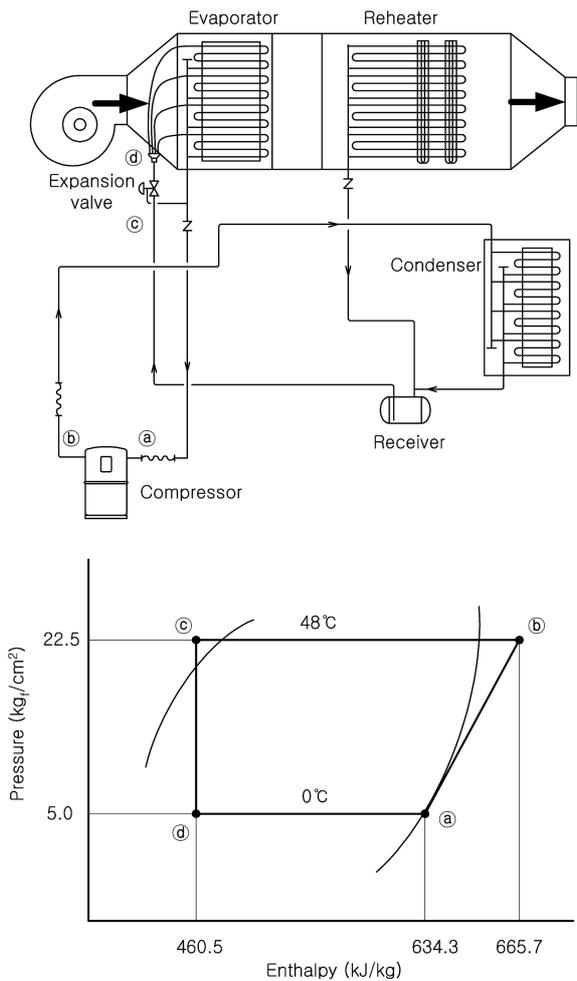


Fig. 4. Dry compression refrigeration cycle of heat pump during performance test

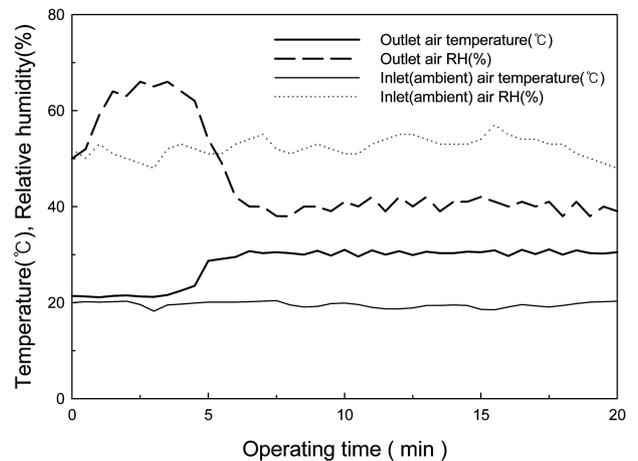


Fig. 5. Changes of temperature and relative humidity of inlet ambient air(T=19.6°C, RH=52.3%) and outlet drying air (T=30.0°C, RH=40.0%) from heat pump

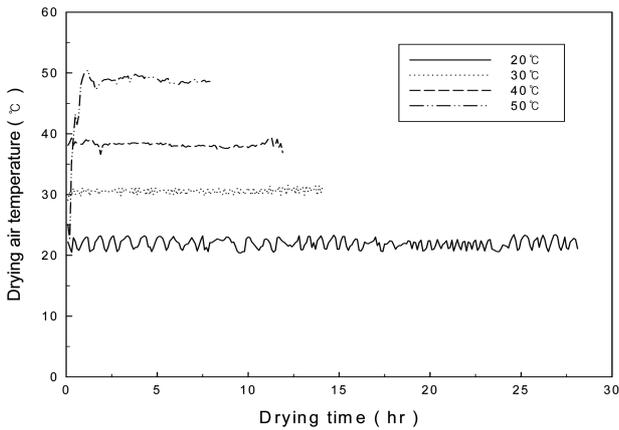


Fig. 6. Changes of drying air temperatures during drying

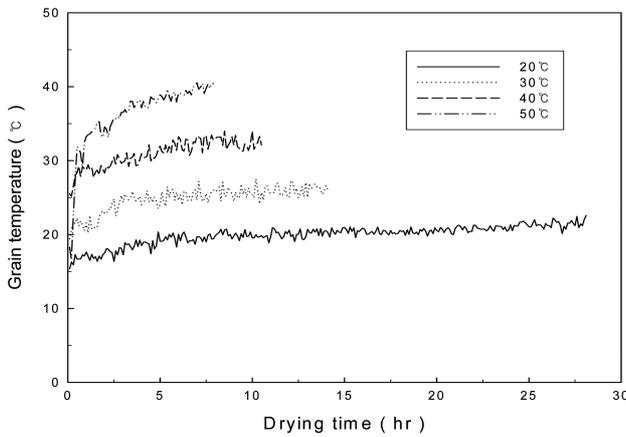


Fig. 7. Changes of grain temperatures in drying chamber during drying

38.8°C(36.2-39.4) 및 48.7°C(47.6-50.1°C)로 나타났다. 각 온도별 표준편차는 건조온도 21.9°C에서 가장 높은 0.82°C로 나타났으며, 건조온도 48.7°C에서는 0.74°C, 건조온도 30.7 및 38.8°C에서는 각각 0.46 및 0.41°C로 비슷한 경

향이였다. 따라서, 건조온도는 건조기간 중 균일하게 유지 되는 것으로 판단되었다. 건조공기의 상대습도는 34-41% 범위에였으며, 건조온도 별로 비슷한 수준이었다. 표준편차는 2.7-3.5% 범위로 상대습도 제어가 만족할 만한 수준 이었다.

Fig. 7은 건조실험 중 건조실의 벼 온도(곡온) 변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 벼 온도는 건조온도 21.9°C에서 초기에 평균 17.0°C이였으며, 건조 5시간 후부터 건조종료까지 평균 20.4°C를 유지하였다. 건조온도 30.7°C에서는 건조 3시간 후부터는 평균 24.6°C를 유지하였다. 건조온도 38.8°C에서는 건조초기부터 4시간까지는 30.0°C 이하였으며, 이 후 건조종료까지 평균 30.8°C로 나타났고, 최고 곡온상승은 33.8°C로 나타났다. 건조온도 48.7°C에서는 건조초기에 곡온이 다소 증감을 반복하는 경향을 보였으며, 건조 3시간에는 35.0°C에 도달했고, 이후 건조시간이 경과 할수록 다소 증가하여 최대 40.5°C를 나타내었다. 따라서, 건조온도와 곡온과의 온도차이는 건조온도 21.9°C에서는 약 1.5°C, 건조온도 48.7°C에서는 약 8.5°C로서, 건조실에서 상승한 곡온은 템퍼링실에서 충분한 냉각이 이루어지는 것으로 판단되었다.

건조속도

Table 2는 건조온도에 따른 건조속도를 나타낸 것이다. 표에서와 같이 건조온도 21.9°C에서는 함수율 25.4%를 16.8%까지 건조하는데 29.4시간이 소요되었으며, 건조속도는 0.29%/hr로 나타났다. 건조온도 30.7, 38.8 및 48.7°C의 경우에서 건조 소요시간은 각각 14.8, 12.0 및 8.1시간으로 나타났고, 건조속도는 0.61, 0.85 및 1.25%/hr로 나타났다. Regalado & Bekki(2000)는 상업용 벼건조기의 평균 건조온도 및 건조속도는 40°C 및 0.8%/hr, NAMRI (1998)는 3.8톤 순환식 벼건조기의 평균 건조온도 및 건조속도는 55°C 및 1.4%/hr로 보고하였는데, 본 연구결과에서도 유사한 경향을 보였다.

Table 2. Drying rates and drying times by drying air temperatures

Drying air temperature (°C)	Moisture content (%w.b.)		Drying time (hr)	Drying rate (%w.b./hr)
	Initial	Final		
21.9	25.4	16.8	29.4	0.29
30.7	25.6	16.7	14.8	0.61
38.8	26.5	16.3	12.0	0.85
48.7	26.2	16.1	8.1	1.25

Table 3. Drying energy consumption by drying air temperatures

Drying air temperature (°C)	Total electricity consumption (kW)	Energy consumption (kJ/kg-water)
21.9	1.4	325
30.7	2.9	667
38.8	3.5	692
48.7	3.9	776

건조소요에너지

Table 3은 건조온도 별 총 건조시간에서의 소요전력과 건조소요에너지를 나타낸 것이다. 건조온도 21.9°C에서 소요에너지는 325 kJ/kg, 건조온도 30.7, 38.8 및 48.7°C에서는 667, 692 및 776 kJ/kg로 나타났다. 열펌프는 ΔT (목표온도-외기온도)가 클수록 소요에너지가 증가하는데 실험기간 중 외기온도는 20.2-23.1°C 범위로서 본 실험에서는 건조온도가 높을수록 건조소요에너지가 증가하는 것으로 나타났다. 화석연료를 사용하는 상용 화력건조기의 벼 건조소요에너지는 4,000-5,000 kJ/kg로 보고되고 있다(Brooker et al., 1992; Keum et al., 1987). 따라서, 화력건조기에 비해 건조소요에너지는 평균 86% 절감되는 것으로 나타났다.

요 약

국내 벼 건조기간의 기상조건에 적합한 열펌프를 설계, 제작하여 기본 성능을 측정하고, 건조온도 20-50°C 범위에서 벼 건조실험을 통하여 건조특성 및 소요에너지를 분석하였다. 열펌프는 건압축 냉동 사이클에서 냉동효과는 173.8 kJ/kg이었으며, 냉매순환량은 49.6 kg/hr이었다. 따라서, 성능계수는 5.5로 표준냉동사이클에서 냉매 R-22의 성능계수 4.0에 비해 높은 값을 나타내었으며, 목표 건조공기의 온도 30°C 및 상대습도 40%에 도달하는 시간은 6분 및 7분으로 만족할 만한 수준이었다. 건조온도와 곡온과의 온도차이는 건조온도 21.9°C에서는 약 1.5°C, 건조온도 48.7°C에서는 약 8.5°C로서, 건조실에서 상승한 곡온은 텀퍼링실에서 충분한 냉각이 이루어지는 것으로 판단되었다. 건조온도 21.9, 30.7 38.8 및 48.7°C에서 건조속도는 0.29, 0.61, 0.85 및 1.25%/hr로 나타나 상용건조기와 유사한 수준이었다. 건조온도 21.9°C에서 소요에너지는 325 kJ/kg, 건조온도 30.7, 38.8 및 48.7°C에서는 667, 692 및 776 kJ/kg로 나타나 외기조건에 따라 건조소요에너지의 차이가 발생했지만, 화석연료를 사용하는 상용 화력건조기의 벼 건조소요에너지 4,000-5,000 kJ/kg에 비해 평균 86% 절감되는 것으로 나타났다.

참고문헌

ASHRAE. 1989. ASHRAE Handbook of Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning

- Engineers, New York, USA.
- Bak CK. 1981. Dry air generator for on-farm barley drying. ASAE paper No. 81-3023. ASAE, St. Joseph, MI, USA.
- Bake J, Vas A. 1994. Testing the drying process of shelled maize on aspects of nutritional quality and thermal efficiency. *Drying Technol.* 12: 1007-1027.
- Brooker DB, Bakker-Arkema FW, Hall CW. 1992. Drying and storage of grains and oilseeds. An Avi Book, NW, USA, pp. 7-10, 269-271.
- Daikoku M, Sawamura N, Kobayashi K, Chosa T, Sasaki Y. 2000. Controlled humidity air drying of soybean kernels with high moisture content using circulation dryer. *J. Jap. Soc. Agr. Mach.* 62: 140-148.
- Hogan MR, Ayers DL, Muller RE, Foster GH, Rall EC, Doering OC. 1983. Heat pump for low-temperature grain drying. *T. ASAE.* 26: 1234-1238.
- Ishibashi S, Tanaka S, Fukimoto Y. 1971. Studies on cooling and cold air drying for grain storage. *J. Jap. Soc. Agr. Mach.* 34: 242-251.
- Keum DH, Kim H, Hong SJ. 2002. Far-infrared ray drying characteristics of rough rice. *J. Kor. Soc. Agr. Mach.* 27: 45-50.
- Keum DH, Lee YK, Lee KS, Hwang JK. 1987. Study on the optimum operating conditions of rice circulating dryer using simulation. *Res. Rept. RDA.* pp. 373-390.
- Keum DH, Park ST. 1996. Minimum specific airflow rate requirements for natural air drying of rough rice in Korea. *J. Kor. Soc. Agr. Mach.* 21: 60-71.
- Kim MS, Kim SR. 1986. Resistance to airflow of grain as affected by grain moisture content. *J. Kor. Soc. Agr. Mach.* 11: 55-65.
- Regalado MJC, Bekki E. 2000. Varietal differences in drying rate and fissure occurrence in heated air drying of rough rice. *J. Jap. Soc. Agr. Mach.* 62: 81-91.
- Sharp JR. 1982. A review of low temperature drying simulation models. *J. Agr. Eng. Res.* 27: 169-190.
- Sosle V, Raghavan GSV, Kitter R. 2003. Low-temperature drying using a versatile heat pump dehumidifier. *Drying Technol.* 21: 539-554.
- Strommen I, Kramer K. 1994. New applications of heat pumps on drying processes. *Drying Technol.* 12: 889-901.
- Wang D, Chang CS. 2001. Energy efficiency of a new heat pump system for drying grain. *T. ASAE.* 44: 1745-1750.
- Wei CL, Tawarazako S, Morita K. 1994. Dependence of the drying rate of rough rice on drying air humidity for dehumidifying drying. *Jap. Soc. Agr. Struc.* 24: 223-229.
- Yamashita R. 1993. New technology in grain postharvesting. Farm Machinery Industrial Research Cooperation, Kyoto, Japan, pp. 36-38.