

히트펌프를 이용한 농산물 건조 및 저온저장 시스템 (I) - 건조 성능 -

강연구 한충수 금동혁

Drying and Low Temperature Storage System for Agricultural Products Using the Air to Air Heat Pump (I) - Drying Performance -

Y. K. Kang C. S. Han D. H. Keum

Abstract

Korean farmers have purchased agricultural dryer and low temperature storage system apart. In this study, the system was designed and constructed to investigate the practical application possibility of the air to air heat pump as drying and low temperature storage system for agricultural products with providing basic data. The performance and drying characteristics of the system evaluated by drying red pepper. The value of coefficient of performance of the system for heating was from 1.8 to 2.2 when ambient air temperature varied from 13°C to 23°C. For operating the heat pump as dryer for drying red pepper by setting three drying air temperature of 50, 55 and 60°C, specific moisture extraction rates meaning amount of energy consumption for removing moisture of 1kg from red pepper were 1.095, 1.017 and 1.094 kg_{water}/kWh, respectively. The drying period up to moisture ratio of 0.02 were 31, 26 and 21 hour, respectively. The lightness, redness, yellowness and chroma differences of red pepper dried by the heat pump dryer were lowered than those of red pepper dried by conventional heated air dryer except for yellowness difference at drying air temperature of 60°C.

Keywords : Heat pump, Drying, COP, Red pepper, Heating and cooling

1. 서론

농산물 열풍건조기의 대표적 형태인 곡물건조기의 보급 대수는 1973년 약 730대에 불과했으나 농촌노동력 부족현상 심화와 더불어 수확작업의 기계화에 의한 생탈곡 확대 등으로 급속히 증가하여 2005년에는 약 70,363대가 보급되었다. 그리고 고추 및 잎담배 건조에 주로 사용되고 있는 농산물 열풍건조기는 약 184,097대가 보급되어 있다(통계청, 2005). 이러한 열풍건조기는 유류를 사용하기 때문에 지금과 같은 고유

가 시대에서는 이용농가의 경제적 소득에 심한 타격을 줄 수 있다. 또한 건조기는 피건조물이 생산되는 시기에만 사용되기 때문에 활용기간이 짧아지게 된다. 이를 해결할 수 있는 방안으로 여기에서는 히트펌프를 고려하였다. 히트펌프는 저열원으로부터 고열원으로 열을 펴 올리는 장치로 고열원은 농산물 등의 건조, 감자, 고구마 등과 같은 구근류의 큐어링(curing), 농업시설의 난방, 급탕 등에, 저열원은 저온저장, 냉방, 일부 화훼의 저온처리 등에 쓰일 수 있다.

김과 임(1997)은 HFC134a를 냉매로 사용한 배치형 히트

This study was conducted by the research fund supported by Ministry of Agriculture and Forest. The article was submitted for publication in January 2007, reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in February 2007. The authors are Youn Ku Kang, Post-Doctoral Researcher, KSAM member, National Institute of Agricultural Engineering, Chung Su Han, Professor, KSAM member, Dept. of Mechatronic Engineering, SungKyunKwan University, Suwon, Korea. Corresponding author: Y. K. Kang, Energy and Resources Engineering Laboratory, NIAE, Suwon, 441-100, Korea; Fax: +82-31-290-1945; E-mail: <ykk0977@rda.go.kr>.

펌프 건조기를 설계, 제작하고 실험적인 방법으로 장치의 성능에 관한 연구를 수행하였다. 한 등(1994, 1995)은 냉매가 R22인 히트펌프 건조기로 표고버섯 건조실험을 수행하여 전기히터건조의 비수분제거율(Specific Moisture Extraction Rate: SMER)이 평균 0.65 kg_{water}/kWh인 것에 비해 히트펌프건조는 평균 0.85 kg_{water}/kWh로 약 3% 높았으며, 히트펌프 제조건조에 의해 고품질 표고버섯을 얻었다고 보고하였다. Teeboonma 등(2003)은 히트펌프 건조기를 이용하여 파파야와 망고를 건조하고, 건조 수치 모델을 개발, 실험적으로 검증하였으며, 히트펌프 건조기의 최적 조건을 밝혔다. Best 등(1996)은 히트펌프 건조시스템이 기존 건조 시스템의 좋은 대체 시스템이 될 수 있음을 시사하였으며, Thebaud 등(1997)은 히트펌프 건조기로 완두콩을 건조하여, 등온방습에 대한 Norrish, Peleg와 Gab모델의 매개 변수를 20~60°C 범위에서 산정하였고, 이 자료는 실제 규모의 히트펌프를 설계하거나 시뮬레이션을 수행함에 있어 중요하게 사용될 수 있을 것이라고 보고하였다. Chua 등(2001)은 건조 온도를 35°C, 30°C, 25°C, 20°C로 각각 1시간씩 유지하며 단계적으로 상승시키거나 혹은 하강시켜 편절 바나나를 히트펌프로 건조한 결과, 초기 온도 20°C에서 최종 온도 35°C로 건조 온도를 변화시킴으로써 40%정도의 색도저하를 감소시켰으며, 초기 온도 35°C에서 최종 온도 20°C로 온도를 내림으로써, 3시간 정도의 건조 시간 단축 및 23%정도의 색도저하를 막을 수 있었다고 보고하였다. 히트펌프 건조기로 생선을 건조하여 증류 열풍 건조기보다 14~26%의 운전비 절약이 가능하였다는 보고가 있으며(Strommen, 1983), 비수분제거율이 3 kg_{water}/kWh일 때 스팀 열원 열풍건조기는 열효율이 77%가 되어야 하나 히트펌프 건조기는 열효율이 58%만으로도 충분하며, 히트펌프의 성능계수는 항상 1보다 크므로 건조에서 히트펌프를 사용하는 것이 에너지 절약 측면에서 보다 유리하다는 보고가 있다(Hodgett, 1976). Prasertan과 Saen-saby(1997)는 히트펌프 건조기를 제작하여 편절 바나나와 각종 고무나무를 건조하여 전기히터건조기의 가동비는 1.92 \$/h, 열풍 건조기는 0.46 \$/h, 히트펌프 건조기는 0.38 \$/h로 히트펌프 건조기가 경제성면에서 앞선다고 하였다.

위와 같이 국내외적으로 히트펌프를 이용하여 농산물을 건조한 사례는 많이 볼 수 있으나 농산물 건조와 저온저장을 동시에 행하는 경우는 많지 않다.

그러므로 본 연구에서는 히트펌프를 이용하여 농산물 건조와 저온저장을 결합할 수 있는 다목적시스템을 개발하여 농산물을 건조함으로써 본 시스템의 실제 적용가능성을 모색하고 기초 자료를 제공하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

가. 장치 및 이론 분석

그림 1은 본 연구에서 개발한 히트펌프를 이용한 농산물 건조 및 저온저장 시스템(건조가 주목적으로 이하 히트펌프 건조기라 함)의 개략도이며, 표 1은 주요 사양이다.

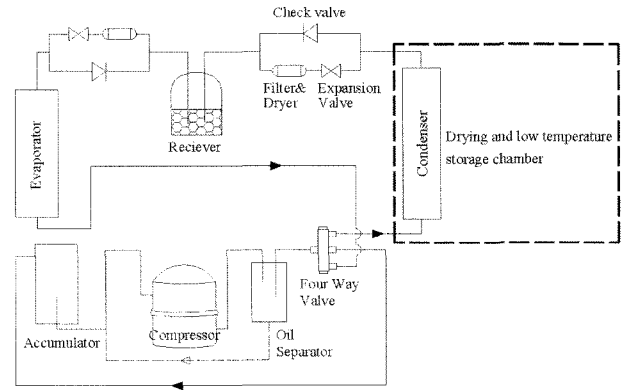


Fig. 1 Schematic of drying and low temperature storage system for agricultural products using the air to air heat pump.

Table 1 Specifications of heat pump dryer

| Items | Specifications |
|--|--|
| Drying and low temperature storage chamber | Size: 5.77×2.18×2.20 m (L×W×H) Wall thickness: 100 mm Insulation material: Styrofoam |
| Installation space of heat pump | Size: 1.00×2.18×2.20 m (L×W×H) |
| Compressor | Size: 7.5 kW for heat pump Type: Reciprocating Manufacturer: Kyoungwon Century, Korea |
| Condenser | Size: 0.71×0.175×0.45 m (L×W×H) Tube diameter: 15.88 mm (5/8") Tube arrangement: 6 column×8 row Heat transfer area of tube: 17.0 m ² |
| Evaporator | Size: 2.00×0.175×0.75 m (L×W×H) Tube diameter: 10 mm (3/8") Tube arrangement: 6 column×18 row Heat transfer area of tube: 67.86 m ² |
| Drying cart | Size: 0.80×0.90×1.775 m (L×W×H) The number of drying cart: 4 EA The number of drying shelf: 10 EA/cart |

히트펌프 건조기의 구조는 크게 히트펌프 시스템, 건조 및 저온저장실(이하 건조실)로 구성된다. 건조실 내에는 건조대차가 4개 놓이고, 1개의 건조대차에는 10개의 건조상자가 장착된다. 건조상자는 서랍식으로 만들어 탈착이 용이하도록 하여 건조시 농산물의 적재 및 하역이 간편하도록 하였으며,

건조상자의 타공은 10 mm×10 mm의 철망으로 구성하여 공기의 흐름이 용이하도록 하였다.

그림 2는 히트펌프 건조기의 건조실 내 열량과 공기흐름을 나타낸 것이다. 히트펌프 건조기의 발생 열량은 응축기 발생 열량과 팬모터 발생 열량이다. 팬모터 발생 열량은 응축기 발생 열량에 포함되므로 발생 열량은 응축기 발생 열량만으로 표현할 수 있다. 또한 응축기 발생 열량은 건조 소요 열량과 손실 열량의 합으로도 표현할 수 있다. 손실 열량은 건조기의 벽면을 통해 외기로 빠져나가는 벽면 관류 열량과 부재(部材) 가열 열량의 합이 된다. 그런데 부재 가열 열량은 건조초기에만 필요하고 미약하기 때문에 무시할 수 있으며 벽면 관류 열량은 건조기간 동안 발생하므로 손실 열량은 벽면 관류 열량

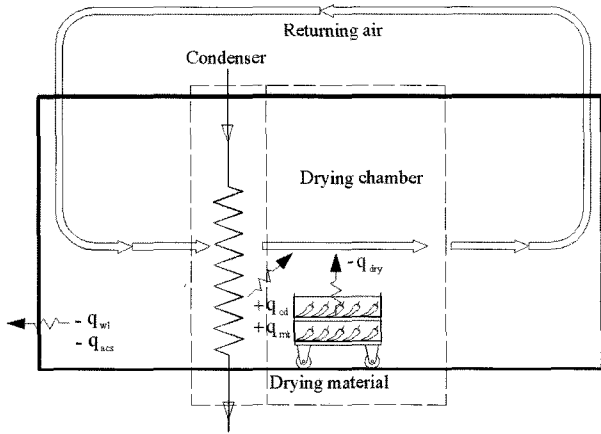


Fig. 2 Heat and air flow in drying chamber of heat pump dryer.

으로 볼 수 있다.

그러므로 히트펌프 채습 건조기에서의 열수지 평형은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$q_{cd} + q_{mt} = q_{dry} + q_{wl} + q_{acs} \quad (1)$$

$$q_{cd} = q_{dry} + q_{wl} \quad (2)$$

여기서, $q_{cd} + q_{mt} = q_{cd}$, $q_{wl} + q_{acs} = q_{wl}$, q_{cd} : 응축기 발생 열량(kW), q_{mt} : 팬모터 발생 열량(kW), q_{dry} : 건조 소요 열량(kW), q_{wl} : 벽면 관류 열량(kW), q_{acs} : 부재 가열 열량(kW)

난방 성능계수는 기계에너지 입력에 대한 고열원으로의 열에너지 출력비로 정의되며, 이론적으로 항상 1이상이고 히트펌프시스템의 성능을 평가하는 중요한 지표이다. 또한 고열원으로 출력되는 열에너지 q_H 는 응축기 발생 열량 q_{cd} 과 같다.

$$COP_H = \frac{q_H}{P_{HP}} \quad (3)$$

여기서, COP_H : 히트펌프의 난방 성능계수, q_H : 고열원으로 출력되는 열에너지(kW) P_{HP} : 히트펌프의 소비전력(kW)

건조 소요 열량은 다음 식으로 표현된다.

$$q_{dry} = W_{dm,i} \cdot q_r \quad (4)$$

여기서, $W_{dm,i}$: 피건조물의 초기 중량(kg), q_r : 피건조물의 건조 소요 열량(kW/kg)

또한 피건조물의 건조 소요 열량 q_r 은 총 건조 소요 열량을 피건조물의 초기 중량으로 나눈 값이다. 건조실의 벽면 관류열량은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$q_{wl} = U_{wl} \cdot A_{wl} \cdot (T_{chm} - T_{amb}) \quad (5)$$

여기서, U_{wl} : 건조실 벽면의 총열전달계수(kW/m²·°C), A_{wl} : 건조실 벽면의 면적(m²), T_{chm} , T_{amb} : 건조실 및 외기의 온도(°C)벽면의 관류열량

계산에서 외기온도 T_{amb} 는 30년간 우리나라 중부지방의 8, 9, 10월의 평균기온인 20°C로 하고, 건조실내공기온도 T_{chm} 는 55°C로 설정하였다. 식 (3)과 (4)를 식 (2)에 대입하면 피건조물량에 대한 히트펌프의 압축기 소요 동력을 구할 수 있다.

$$P_{HP} = \frac{W_{dm,i} \cdot q_r + q_{wl}}{COP_H} \quad (6)$$

히트펌프 건조기의 피건조물량에 따른 압축기 소요 동력과 건조 소요 열량을 분석하기 위하여 상용 열풍건조기(COPP-5S/10DS, Shinheung, Korea)를 이용한 실제 건조실험 자료를 이용하였으며, 건조 소요 열량 q_r 은 고추의 경우 0.041 kW/kg이며, 표고버섯은 0.094 kW/kg이었다.

본 연구에서는 왕복동식 히트펌프용 압축기를 사용하였으며, 피건조물의 종류는 고추를 기준으로 하고, 초기 함수율은 84.5%(w.b), 최종함수율은 15%(w.b), 건조시간은 36시간으로 하였다. 표본 조사 농가의 1회 평균 고추 생산량(통계청, 2005)과 변동율을 고려하여 1회 건조량은 약 270 kg 수준으로 하였다. 난방 성능 계수는 예비실험을 통해 확인한 결과 1.6 수준으로 나타났다.

나. 실험방법

응축기 송풍팬은 6개 안내익으로 되어있기 때문에 예비 실험을 통하여 평균온도와 평균풍속이 되는 지점을 찾아 대표

온도와 대표 풍속으로 선택하였다. 응축기 입·출구 공기 온도는 건조실 온도를 55℃로 설정하고 피건조물이 없는 상태에서 대표온도를 나타내는 지점에 열전대(K-type)를 설치하여 측정하였으며, 응축기 출구의 풍량은 열선풍속계(Velociplus, TA instrument, USA)로 측정하였다. 순간 전력은 전력량계(VIP system, Elcontrol, Italy)를 사용하여 측정하였으며 응축기 입·출구 공기 온도, 풍량, 순간 전력을 이용하여 난방성능계수를 구하였다.

온도분포는 건조실의 온도를 55℃로 설정하고 건조실을 응축기로부터 건조실 끝까지 길이 방향으로 전(1.2 m), 중(2.6 m), 후(4.0 m)의 3개 단면으로 나누어 한 단면당 25개소(측점과 측정사이의 거리 0.35 m)의 측정점에 열전대를 설치하여 피건조물이 없는 상태에서 측정하였으며, 풍속분포는 온도분포와 같은 지점, 같은 조건에서 열선풍속계를 이용하여 온도분포와 동시에 측정하였다. 풍속은 5회를 측정하여 평균값을 사용하였다. 측정된 온도는 데이터 수집 장치(DA 100, Yokokawa, Japan)를 통하여 실시간으로 PC에 기록하였으며, Winsurf 프로그램을 이용하여 풍속 및 온도분포를 나타내었다.

건조실험에 사용한 고추는 경남 진주시 문산에서 생산된 녹광을 사용하였으며, 시료의 초기 함수율은 약 84%(w.b)이었고 약 14%(w.b)까지 건조하였다.

건조온도는 50, 55, 60℃의 3 수준으로 건조하였으며, 건조온도는 컨트롤러(DCC-4WV, Dae cheong control, Korea)를 이용하여 건조 초기부터 건조 최종시까지 유지하였다.

건조 전후 고추 시료의 함수율은 시료 20개를 임의로 추출하여 세절하여 전자저울(HF-200GD, AND, Japan)로 약 15 g을 계량한 후, 실험용 건조기(WFD600ND, Eyela, Japan)에서 105℃로 24시간 건조한 후 중량비를 계산하여 습량기준함수율로 나타내었다.

건조속도는 함수율비로 표시하였다. 함수율비는 약 3 kg의 시료를 전자저울(LC5207, AND, Japan)에 매달아 중량을 30분 간격으로 측정하였으며, 측정된 중량을 함수율비로 환산하여 나타내었다. 에너지 소비량은 전력량계(VIP system, Elcontrol, Italy)를 사용하여 히트펌프의 소비 전력량을 측정하였다. 고추의 색도는 시료 20개를 임의 추출하여 고추의 꼭지, 중간, 끝부분으로 나누어 사방에 대한 L(명도), a(적색도), b(황색도)를 색도계(CR-200, Minolta Co. Japan)로 측정하여 평균값으로 나타내었다.

전체 색차를 나타내는 ΔE의 값은 다음 식으로 구하고 비교하였다.

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (7)$$

여기서, ΔL: 건조 전, 후의 명도값(L)의 차, Δa: 건조 전, 후의 적색도값(a)의 차, Δb: 건조 전, 후의 황색도값(b)의 차

또한 색의 선명도를 나타내는 채도를 다음 식으로 구하고, 건조 전, 후의 채도차를 비교하였다.

$$c = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (8)$$

여기서, c: 채도(chroma value), a: 적색도, b: 황색도

고추의 색도 측정값들을 windows용 SAS 통계 프로그램의 일원배치 분산분석(one-way ANOVA)방법을 이용하여, 유의수준 0.05에서 각 건조 조건간 유의성을 분석하였다.

일반 열풍건조는 상용 열풍 건조기(COPP-10S, Shinheung, Korea)를 이용하였으며, 건조초기 5시간 동안은 건조온도를 65℃를 유지하고 1시간 배습한 후 60℃로 7시간 동안 건조하고 1시간 환기 후 건조온도를 55℃로 유지하여 건조하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 제습 건조시의 압축기 소요 동력 분석

그림 3에 고추, 표고버섯 건조시 피건조물량에 따른 히트펌프 건조기의 압축기 소요 동력의 변화를 나타내었다. 피건조물량에 대한 히트펌프 건조기의 압축기 동력은 식 (6)을 이용하여 고추, 표고버섯에 대해 구하였다. 그림에서 보는 바와 같이 피건조물량이 증가함에 따라 히트펌프 건조기의 압축기 동력은 비례하여 증가하고 있다.

고추의 경우, 피건조물 중량이 약 27 kg에서 565 kg으로 증가함에 따라 히트펌프 건조기의 압축기 동력은 0.74 kW에

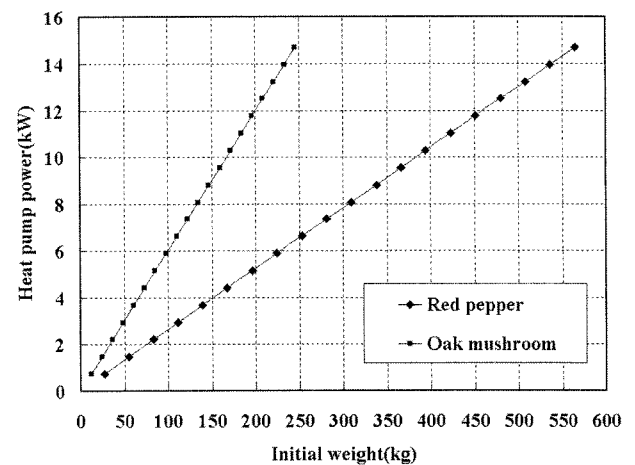


Fig. 3 Variation of heat pump power by initial weight of red pepper and oak mushroom.

서 14.71 kW로 증가하는 것으로 분석되었다. 히트펌프 동력에 따른 단위 시간당 건조 물량은 평균 1.12 kg/kWh로 분석되었다. 또한, 피건조물량 281.34 kg일 때 히트펌프 건조기의 압축기 동력은 7.35 kW로 분석되었으며, 이 피건조물량은 한 농가가 1회 생산하는 고추의 최대 수확량 270 kg과 거의 같은 수준이다. 표고버섯의 경우, 피건조물 중량이 약 11.88 kg에서 245.87 kg으로 증가함에 따라 히트펌프 건조기의 압축기 동력은 0.74 kW에서 14.71 kW로 증가하였다. 또한, 히트펌프 동력에 따른 단위 시간당 평균 건조 물량은 약 1.36 kg/kWh로 분석되었다.

나. 성능 계수

히트펌프 건조기에서 개방형(open loop)이라 함은 건조를 마친 공기를 외기로 배출시키는 형태를, 밀폐형은 건조를 마친 공기를 응축기에서 재가열하여 건조를 행하는 형태를 말한다. 그림 4에 히트펌프 건조기를 개방형과 밀폐형으로 가동하는 경우의 난방 성능계수를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 히트펌프를 개방형으로 가동하는 경우 외기온도 9~14°C에서 난방 성능계수는 1.9~2.0이었으며, 밀폐형으로 가동하는 경우 외기온도 8~11°C에서 난방 성능계수는 1.2~1.9로 밀폐형이 개방형보다 성능계수가 낮았다. 이것은 히트펌프를 개방형으로 가동하는 경우 낮은 온도의 외기가 응축기입구에 유입되어 응축기를 통과하는 공기의 입·출구 온도차가 큰 반면, 밀폐형은 건조실내의 공기가 재순환되는 형태이므로 응축기를 통과하는 공기의 입·출구 온도차가 크지 않기 때문인 것으로 생각된다.

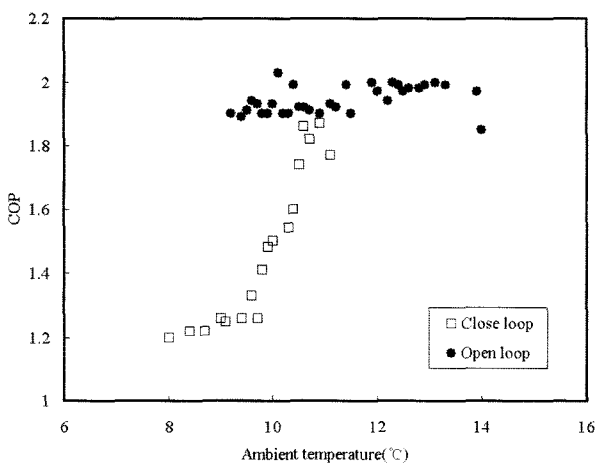


Fig. 4 Comparison of COP of heat pump dryer for open or closed loop operation at drying air temperature of 55°C.

그림 5는 히트펌프의 난방 성능계수를 정시적으로 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 외기온도가 23°C에서 13°C로

변함에 따라 난방 성능계수는 2.2~1.6 수준으로 비교적 낮게 나타났다. 이것은 건조실이 협소하여 응축기에서 유출된 공기가 빠른 시간에 건조실을 순환한 후 응축기에 유입되어 응축기 입, 출구의 공기 온도차가 크지 않았기 때문으로 판단되었다.

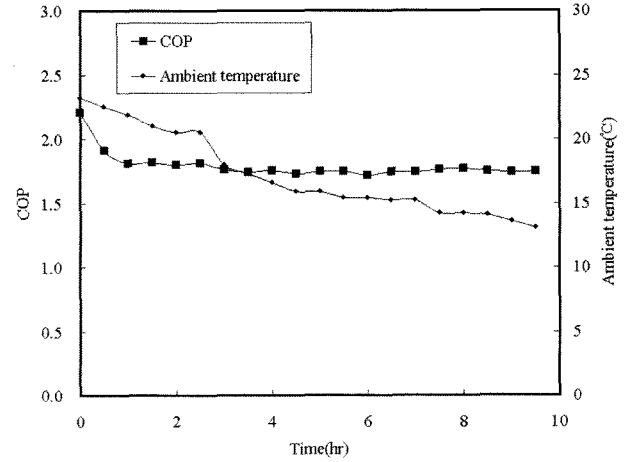


Fig. 5 Variation of COP of heat pump dryer at drying air temperature of 55°C.

다. 건조실 내 온도 분포

건조실내 공기온도와 풍속은 건조속도와 건조물의 품질에 중요한 영향을 미친다. 공기온도가 너무 높으면 피건조물의 색소분해로 색택이 변하거나 풍미가 떨어진다. 또한 건조실 내의 온도와 풍속이 고르지 않으면 불균일한 건조가 발생한다.

그림 6(a)~(c)는 건조실의 온도를 55°C로 설정한 경우 전면(A-A), 중간면(B-B), 후면(C-C)의 온도 분포를 나타낸 것이다. 그림 6(a)는 건조실의 전면 즉 응축기로부터 1.2 m 떨어진 A-A단면의 온도 분포이다. A-A단면은 응축기에서 고온 공기가 배출되는 중앙 하단의 공기온도가 다른 곳에 비해 높았으며, 우측 상단면의 온도가 비교적 낮은 것으로 나타났다. A-A 단면에서 최고 온도는 56.4°C, 최저온도는 53.4°C로 온도편차가 3°C 정도였으며, 3개의 단면 중 가장 불균일한 온도 분포를 보였다. 그러나 비 건조시 탬퍼링실의 온도편차가 2.5°C인 것(김 등, 2002)과 비교해 볼 때, 온도편차가 그다지 크지 않기 때문에 온도분포면에서는 기존의 건조기와 큰 차이가 없는 것으로 생각된다.

응축기로부터 2.6 m 떨어진 B-B단면에서는 일부분이 온도가 높은 것으로 나타났으나, 건조실 내에 건조대차를 배치하면 공기 흐름이 고르게 되어 온도분포가 더 균일해질 것으로 예상된다. 한편, 응축기로부터 4.0 m 떨어진 C-C단면의 온도 분포는 다른 단면에 비해 균일하였으며, A-A단면에 비해 중앙 하단의 공기온도가 약 1°C 정도 낮은 것으로 나타났다.

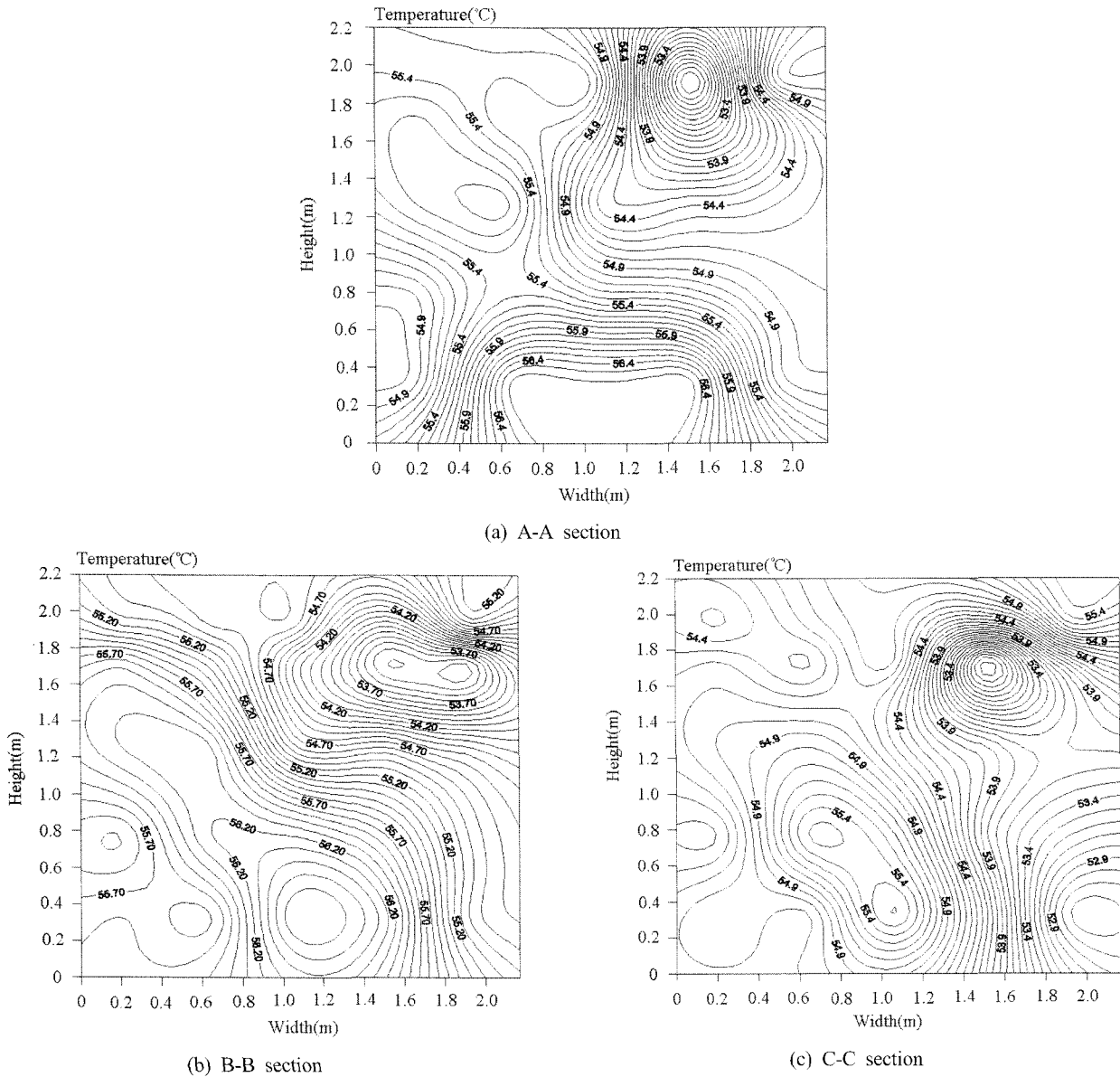


Fig. 6 Distribution of air temperature of each section in drying chamber without drying load at drying air temperature of 55°C.

라. 풍속 분포

그림 7(a)~(c)는 건조실의 온도를 55°C로 설정한 경우 각 단면의 풍속분포를 나타낸 것이다. 풍속은 건조실의 뒤쪽 단면 즉, C-C단면이 A-A단면과 B-B단면에 비해 고른 분포를 보였다. 응축기에서 1.2 m 떨어진 A-A단면의 경우 응축기 팬이 설치된 중앙 하단의 풍속이 빠른 것으로 나타나, 상하 풍속분포가 고르지 못하였다. 응축기로부터 2.6 m 떨어진 B-B 단면의 경우 A-A단면에 비해 풍속차가 줄어드는 경향을 나타내었다. 그리고 응축기에서 4.0 m 떨어진 C-C 단면은 중앙 부분의 풍속이 빠르게 나타났으며 특히, 상층부로 길게 형성되어 상층과 하층의 풍속은 비교적 고른 분포를 보였다.

A-A단면의 최고풍속은 3.7 m/s이었으며, B-B단면은 2.4

m/s, C-C단면은 약 1.4 m/s 정도였으며, 건조실 뒤쪽 방향으로 진행하면서 최고 풍속이 느려지는 것으로 나타났다. 이에 반해 건조실의 상층부로 갈수록 각 단면의 풍속은 느린 것으로 나타났으며, A-A단면의 최저 풍속은 0.45 m/s, B-B단면은 0.4 m/s, 그리고 C-C단면은 0.35 m/s로 단면별 최저풍속은 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 따라서 하층부의 최고 풍속은 농산물을 건조하는데 충분함을 알 수 있으나 상층부의 풍속은 건조에는 미흡한 것으로 판단된다.

건조실 상·하층부의 풍속이 고르지 않은 것은 응축기에 부착된 팬이 건조실의 하단에 설치되어 있기 때문으로, 상·하층의 풍속을 균일하게 하려면 응축기 출구에 빗살모양의 가이드 혹은 honey house를 설치하여 풍향을 상층부로 유도하면 건조

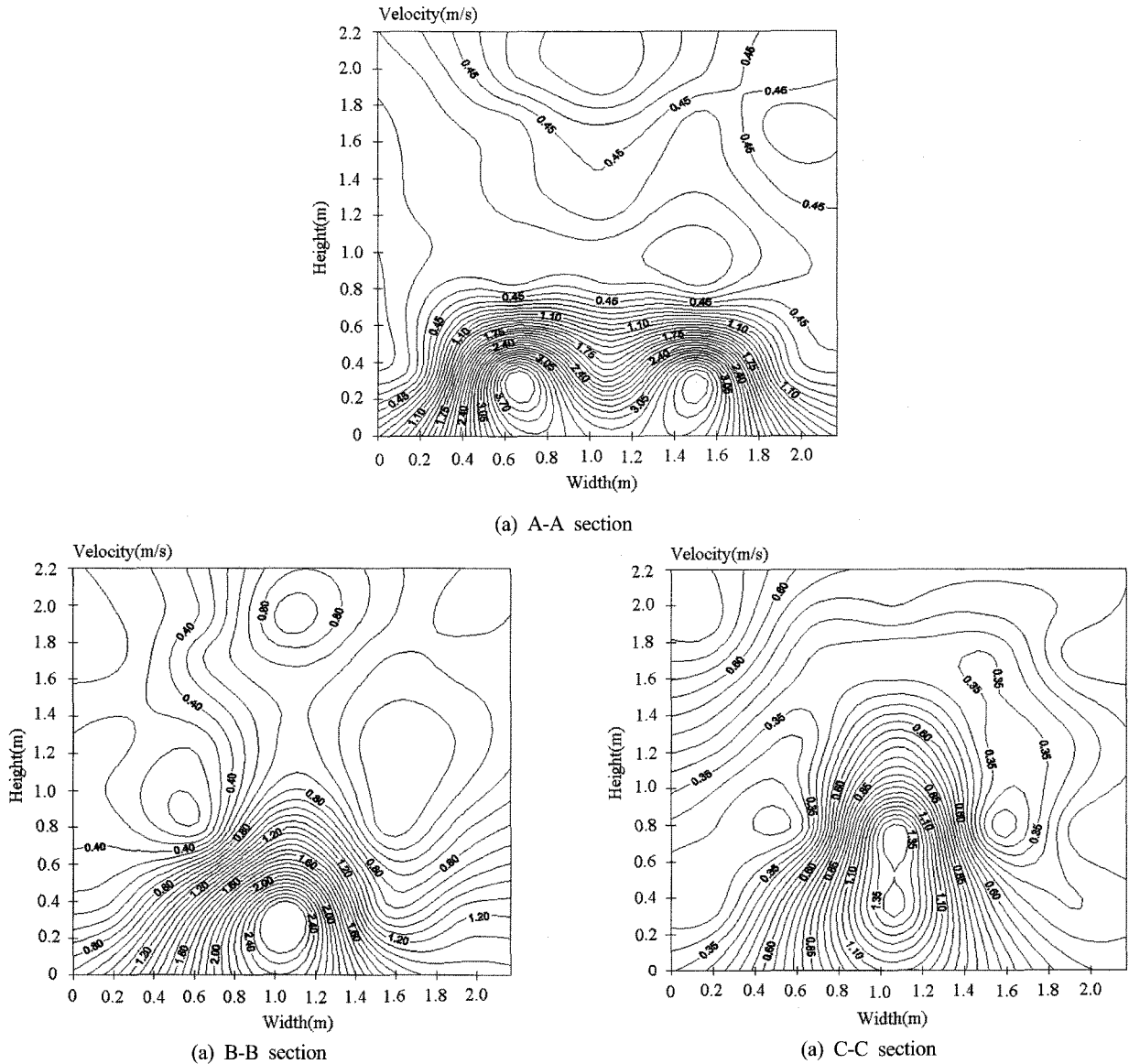


Fig. 7 Distribution of air velocity of each section in drying chamber without drying load at drying air temperature of 55°C.

실 상, 하층부의 풍속편차를 완화할 수 있을 것으로 사료된다.

마. 건조 속도

그림 8은 히트펌프 건조기를 이용한 고추 건조의 함수율비를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 건조속도는 지수함수의 경향으로 감소하는 것으로 나타났다. 함수율비 0.5까지 건조되는데 소요되는 시간을 살펴보면 건조 온도가 50°C, 55°C, 60°C일 때 각각 4.9시간, 3.8시간, 3.9시간 소요되었으며, 이 때 상대 습도는 24~34% 수준이었다.

함수율비 0.02에 도달하는 시간은 60°C 배풍건조의 경우 21시간이었으며, 55°C 배풍건조의 경우는 26시간, 50°C 배풍건조가 31시간으로 건조온도가 높을수록 건조소요시간이 단축되었다.

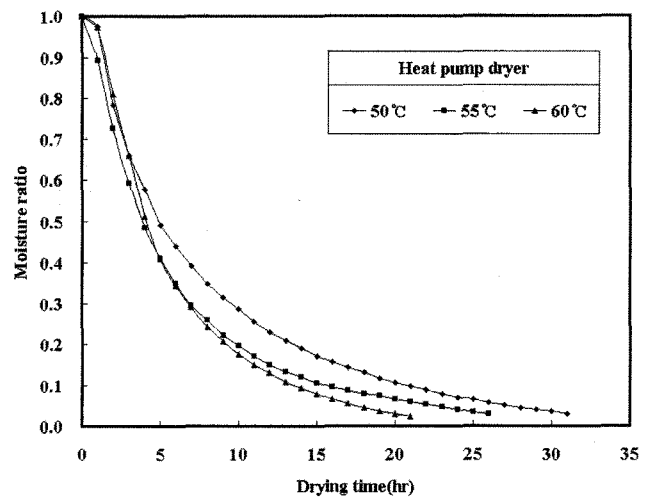


Fig. 8 Drying curves for red pepper dried by heat pump dryer.

또한, 관행의 농산물 건조기로 고추 100 kg을 건조할 경우 건조 소요 시간이 27시간인 것에 대해 60°C 배풍건조는 건조 시간을 6시간 정도 단축되었다. 같은 온도에서 히트펌프 채습 건조기로 고추를 건조하는 경우, 관행 농산물 건조기에 비해 건조시간을 약 10시간정도 단축할 수 있는 것으로 보고되어 있다(조 등, 2000).

바. 건조 소요 에너지

히트펌프건조기의 성능은 수분 1 kg을 제거하는 데 소요된 에너지, 즉 비소요에너지 또는 비수분제거율(SMER)로 평가한다. 비수분제거율은 수분제거량(kg_{water})을 건조 소요 에너지(kWh)로 나눈 형태이며, 그 값은 1.0~3.0 kg_{water}/kWh 수준이다(송 등, 2002).

그림 9는 건조방법에 따른 건조 소요 에너지당 제거되는 수분의 양을 비교하여 나타낸 것이다.

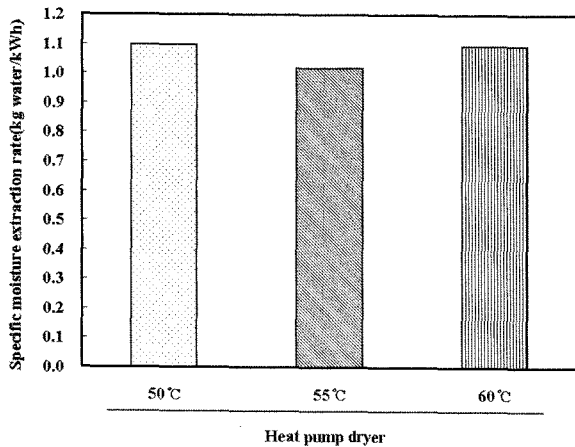


Fig. 9 Comparison of specific moisture extraction rate for different drying conditions.

히트펌프 건조 시스템을 이용하여 건조온도 50°C, 55°C, 60°C로 건조하는 경우, 에너지 소비량은 각각 94.00 kWh, 93.15 kWh, 87.64 kWh이었으며, 이때 피건조물로부터 배출된 수분의 양은 각각 102.65 kg, 94.71 kg, 95.89 kg이었다. 그러므로 건조 소요 에너지당 제거되는 수분의 양은 건조온도 50°C 히트펌프 배풍건조가 1.095 kg_{water}/kWh, 55°C는 1.027 kg_{water}/kWh, 60°C는 1.094 kg_{water}/kWh로 나타났다.

사. 색도

고추의 색도는 품질을 결정하는 중요한 인자 중 하나이다. 히트펌프 건조와 열풍 건조에 의한 건조 전, 후의 L, a, b 값 변화 및 전체 색차와 채도값 변화를 그림 10~12에 나타내었다. 그림 10~12에서 보는 바와 같이 L, a, b값의 변화는 건조 조

건에 관계없이 건조 후 모두 감소하는 경향을 나타내었다. 그림 10은 히트펌프 건조와 열풍 건조 전후의 명도차를 나타낸 것이다. 시료의 초기 L값은 각각 37.04, 35.95, 37.29, 열풍 건조는 37.27이었으며, 건조후의 L값은 각각 36.88, 34.02, 34.74, 34.26이었다. 건조 전, 후의 명도값 변화는 50°C, 55°C, 60°C로 히트펌프 건조의 경우, 각각 0.16, 1.93, 2.55, 열풍 건조는 3.01 감소하여 건조온도 50°C 히트펌프 건조의 명도값 변화가 다른 건조조건에 비해 낮았으며, 히트펌프 건조가 열풍 건조보다 건조 시료의 밝기가 양호한 것으로 나타났다. 또한 건조조건이 L값의 감소에 미치는 영향은 검정 통계량 P값이 0.0001로 유의 수준 0.05보다 매우 작기 때문에 유의성이 인정되었다.

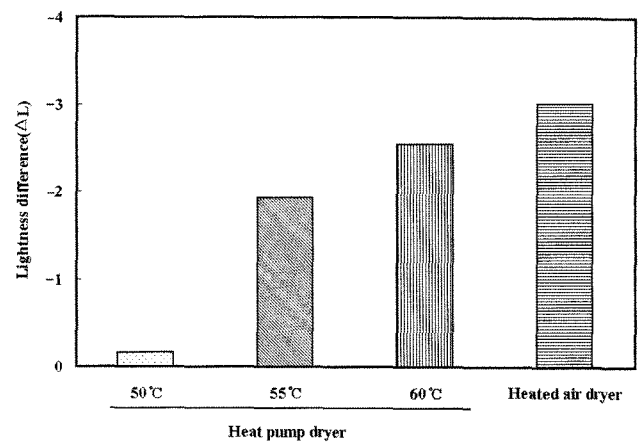


Fig. 10 Lightness difference of red pepper for different drying conditions.

그림 11과 12는 건조 전, 후의 a, b 값의 차를 나타낸 것이다. 50°C 히트펌프 건조의 a, b 변화값은 각각 5.08, 0.89, 55°C 히트펌프 건조는 각각 13.78, 5.68, 60°C 히트펌프 건조는 각각 13.88, 6.07, 열풍 건조는 각각 15.01, 5.69로 감소하

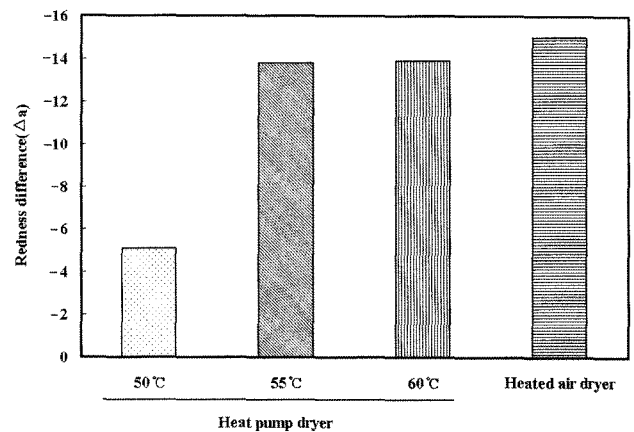


Fig. 11 Redness difference of red pepper for different drying conditions.

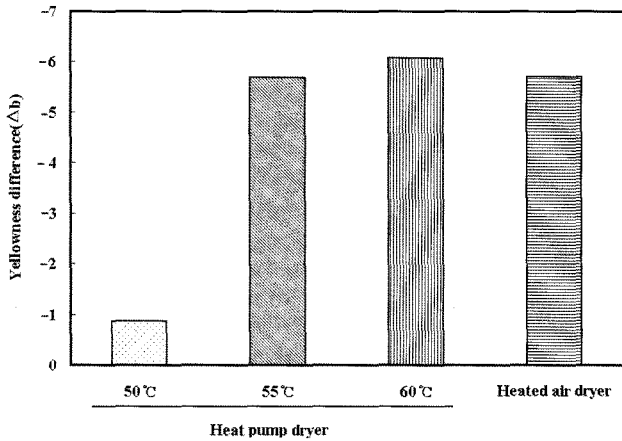


Fig. 12 Yellowness difference of red pepper for different drying conditions.

는 경향을 나타내었으며, 건조 조건이 a와 b값 감소에 미치는 영향은 모두 유의성이 인정되었다.

한편 그림 13에 나타난 바와 같이 전체 색차 변화는 50°C 히트펌프 건조의 경우 5.16, 55°C 히트펌프 건조의 경우 15.05, 60°C 히트펌프 건조의 경우 15.36, 열풍 건조의 경우 16.33으로 나타나 히트펌프 건조가 열풍 건조에 비해 색차 변화가 다소 적은 것으로 나타났으며, 건조 조건이 전체 색차 변화에 미치는 영향은 분산 분석 결과, 유의성이 인정되었다.

채도는 색의 순수함의 정도를 의미하고 포화도라고도 한다. 선명한 색일수록 채도가 높고 탁한 색일수록 채도는 낮다. 채도의 값은 0에서부터 80까지로 값이 클수록 순수한 색임을 나타낸다. 그림 14는 식 (8)을 이용하여 계산한 건조 전, 후의 채도값의 변화를 나타낸 것이다. 건조온도 50°C, 55°C, 60°C 히트펌프 건조의 초기 채도값은 각각 32.8, 33.65, 35.46, 열풍 건조는 35.36이었으며, 건조후의 채도값은 각각 27.89, 18.74, 20.31, 19.37이었다. 건조 전, 후 채도값의 차이는 50°C,

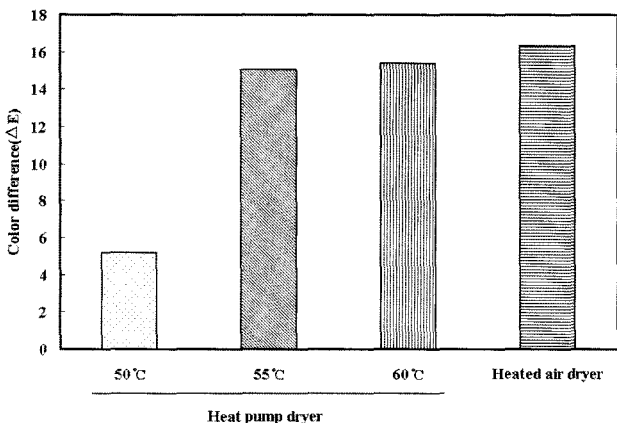


Fig. 13. Color difference of red pepper for different drying conditions.

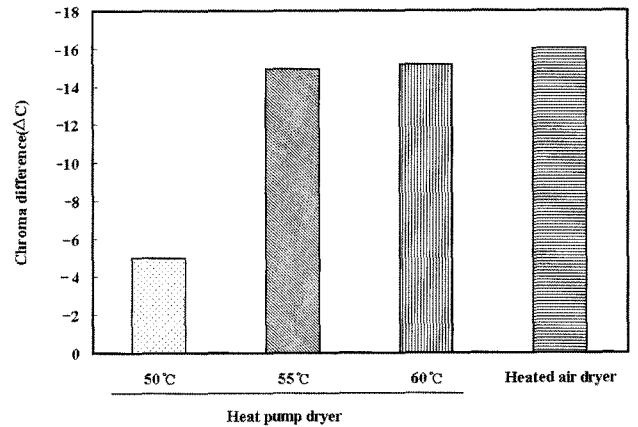


Fig. 14 Chroma difference of red pepper for different drying conditions.

55°C, 60°C에서 히트펌프 건조의 경우, 각각 5.01, 14.91, 15.15, 열풍건조는 15.99 감소하여 건조온도 50°C 히트펌프 건조의 채도값 변화가 다른 건조 조건에 비해 낮게 나타났다.

4. 결론 및 요약

고온 열풍 건조로 인한 건조물의 품질 손상 위험과 과도한 에너지 소모를 해결하고, 건조전용 혹은 저온저장전용 시스템이 연중 짧은 기간만 활용되어 높은 설치비용에 대해 낮은 활용 비율을 갖는 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 건조와 저온저장을 겸할 수 있는 히트펌프를 제작, 실험하였다. 그리고 이를 이용하여 고추의 건조를 행함으로써, 이 시스템의 기계적 특성과 건조 특성을 구명하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 히트펌프를 이용한 건조시스템에 의한 고추 건조의 경우 평균 건조 물량은 약 1.12 kg/kWh로 분석되었다. 또한, 표고버섯의 평균 건조물량은 약 1.36 kg/kWh로 분석되었다.
2. 외기온도 13°C ~ 23°C 범위에서 성능계수는 1.8~2.2 수준이었다. 건조실내 공기온도를 55°C로 설정한 경우, 개방형에서는 외기온도 9~14°C 범위에서 성능계수가 1.9~2.0, 밀폐형에서는 외기온도 8~11°C 범위에서 성능계수가 1.2~1.9 수준이었다.
3. A-A단면은 응축기에서 고온 공기가 배출되는 중앙 하단의 공기온도가 다른 곳에 비해 높았으며, 우측 상단면의 온도가 비교적 낮은 것으로 나타났으나, 비교적 온도분포가 일정한 것으로 나타났다.
4. 풍속은 건조실의 뒤쪽 단면(C-C)이 앞쪽 단면(A-A, B-B)

에 비해 고른 분포를 보였으며, A-A단면의 최고풍속은 3.7 m/s이었으며, B-B단면은 2.4 m/s, C-C단면은 약 1.4 m/s 수준이었다.

5. 고추를 히트펌프 건조하는 경우, 함수율비 0.02에 도달하는 시간은 건조 온도 60°C는 21시간이었으며, 55°C는 26시간, 50°C가 31시간으로 나타나 건조온도가 높을수록 건조소요시간이 단축되었다.
6. 고추의 히트펌프 건조에서 건조 소요 에너지 당 제거된 수분 양은 건조온도 50°C는 1.095 kg_{water}/kWh, 55°C가 1.017 kg_{water}/kWh이었으며, 60°C에서는 1.094 kg_{water}/kWh로 나타났다.
5. 고추의 명도값 변화는 50°C, 55°C, 60°C로 히트펌프 건조의 경우, 각각 0.16, 1.93, 2.55 감소하여 건조온도 50°C가 가장 낮은 명도값 감소를 보였다. 반면, 일반 열풍 건조는 약 3.01 감소하여 히트펌프 건조가 열풍 건조보다 건조 시료의 밝기가 양호하였다.
6. 히트펌프 건조에서 건조온도별 고추의 a, b 변화값을 측정한 결과, 50°C에서는 각각 5.08, 0.89, 55°C는 각각 13.78, 5.68, 60°C는 각각 13.88, 6.07 감소한 반면, 일반 열풍 건조는 각각 15.01, 5.69 감소하여 히트펌프 건조가 일반 열풍 건조에 비해 a, b값의 변화가 낮은 것으로 나타났다.
7. 고추의 채도값 변화는 50°C, 55°C, 60°C로 히트펌프 건조의 경우, 각각 5.01, 14.91, 15.15, 일반열풍건조는 15.99 감소하여 건조온도 50°C 히트펌프 건조의 채도값 변화가 다른 건조조건에 비해 낮은 것으로 나타났다.

참고문헌

1. Best, R., J. M. Cruz, J. Gutierrez and W. Soto. 1996. Experimental results of a solar assisted heat pump rice drying system. *Renewable Energy* 9(4):690-694.
2. Chua, K. J., A. S. Mujumdar, M. N. A. Hawlader, S. K. Chou and J. C. Ho. 2001. Batch drying of banana pieces - Effect of stepwise change in drying air temperature on drying kinetics and product colour. *Food Research International* 34:721-731.
3. Hodgett, D. L. 1976. Efficient drying using heat pump. *The Chemical Engineer* 311:510-512.
4. Incropera, F. P. and D. P. Dewitt. 1998. *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons Inc.
5. Perera, C. O. and M. S. Rahman. 1997. Heat pump dehumidifier drying of food. *Trends in Food Science and Technology* 8(3):75-79.
6. Prasertan, S. and P. Saen-saby. 1997. Heat pump drying of agricultural materials. *Drying Technology* 15(2):125-139.
7. Rahman, M. S., C. O. Perera and C. Thebaud. 1997. Desorption isotherm and heat pump drying kinetics of peas. *Food Research International* 30(7):485-491.
8. Strommen, I. 1983. New equipment in fish drying. *Scandinavia Refrigeration* 4:295-302.
9. Teeboonma, U., J. Tiansuwan and S. Soponronnarit. 2003. Optimization of heat pump fruit dryers. *Journal of Food Engineering* 59(4):369-377.
10. 韓 東海, 安部武美, 正田慶夫, 鶴崎 孝. 1994. 히트펌프による椎柑の除濕乾燥(第1報) - 密閉型 히트펌프乾燥装置の性能 -. *日本 農業機械學會誌* 56(6):25-32.
11. 韓 東海, 安部武美, 正田慶夫, 鶴崎 孝. 1995. 히트펌프による椎柑の除濕乾燥(第2報) - 乾燥過程における特性 -. *日本 農業機械學會誌* 57(3):29-36.
12. 김영중, 임장순. 1997. HFC134a를 사용한 히트펌프 건조기의 성능향상에 관한 실험적 연구. *태양에너지* 7(2):3-11.
13. 김유호, 조영길, 조광환, 이선호, 김영민, 한충수, 이호필. 2002. 벼의 원적외선 건조특성에 관한 연구(I). *한국농업기계학회 동계 학술대회 논문집* pp.355-361.
14. 송현갑 외 12인. 2002. *열에너지공학*. 문운당
15. 조광환, 김유호, 김선호, 김연민, 오성식, 이종욱. 2000. 농산물의 고품위 건조기계화 기술연구. *농업기계화연구소 농업기계화 시험연구보고서* pp.360-368.
16. 통계청 통계자료, <http://www.nso.go.kr/>