

히트펌프를 이용한 고효율 냉풍 대형 건조기 유동 최적설계

박상준*, 이영림⁺

(논문접수일 2011. 06. 01, 수정일 2011. 08. 05, 심사완료일 2011. 08. 06)

Optimal Flow Design of High-Efficiency, Cold-Flow, and Large-size Heat Pump Dryer

Sang Jun Park*, Young Lim Lee⁺

Abstract

Drying process, corresponding to a final process in the area of food engineering, requires a lot of heat energy. Thus, the energy efficiency is very important for dryers. Since the energy efficiency of heat pump dryers is much higher compared to that of electric dryers or other types of dryers, most of large-capacity dryers are adopting heat pump. In this study, shapes, positions and number of air-circulating fans, guide vanes, air inlet, outlet and top separator were varied for optimization of the flow of a large-capacity heat pump dryer. In addition, fans were modelled with performance curves and porous media were assumed for foods and heat exchangers. The simulation results were applied to the 12-ton dryer and the velocity distributions were experimentally examined. Finally, uniform drying in time was successfully accomplished through frozen pepper experiment.

Key Words : Heat pump(히트펌프), Dryer(건조기), Flow optimization(유동최적화), Fan(팬), CFD(전산유체역학)

1. 서론

건조기는 건조물보다 건조기 내부의 습도를 낮게 유지하여 건조물로부터 습도가 상대적으로 낮은 건조기 내부 공기로 증발을 유도하는 방식이다. 이러한 낮은 습도를 지속적으로 얻기 위해 건조실 내에서는 공기의 증발과 응축의 반복적인 과정을 통해 습증기에서 물과 공기를 분리하여 건조한 건포화 증기를 다시 건조물에 공급하는 과정이 반복적으로 이루어지는 방식이다. 부가적으로 습증기를 빠른 시간에 건증기로 만들기 위해 건조기 내부에 외부의 공기가 들어오고 나갈 수 있게 구멍을 뚫어 습증기를 밖으로

내보내고 나간 양만큼의 공기를 유입시키는 등 건조기의 구조 변경을 통한 노력도 이루어지고 있다.

건조기에서는 건조를 위해 많은 열에너지를 필요로 하는데 에너지 효율이 높은 히트 펌프(heat pump)건조기가 사용되고 있다. Fig. 1은 전형적인 히트펌프 건조기 사이클의 개략도를 보여 준다. 히트펌프 사이클의 성적계수를 더욱 증가시키거나 저온 대응성을 향상시키기 위하여 다단 압축 사이클이나 이중 냉매 이원냉동 사이클이 이용되기도 한다. 히트펌프 건조기의 경우 외국에서는 1970년대부터 주로 목재와 식품 건조분야를 중심으로 사용되어지고 있다⁽¹⁾. 히트펌프 건조기의 경우 전기식 혹은 다른 형식의 건조기에 비해 효율이 매우 높는데 이는 히트펌프 사이클의 구조상열을 회수 할 수 있기 때문이다. 즉 건조기의 내부 공기는 증발기에서 응결되어 수분이 제거된 후 다시 응축기를 통과하면서 가열되므로 열에너지를 매우 효율적으로 사용하게 된다.

* 공주대학교 대학원 기계공학과

+ 교신저자, 공주대학교 기계자동차공학부 (ylee@kongju.ac.kr)

주소: 충남 천안시 서북구 부대동 275 공주대학교 공과대학 기계자동차공학부

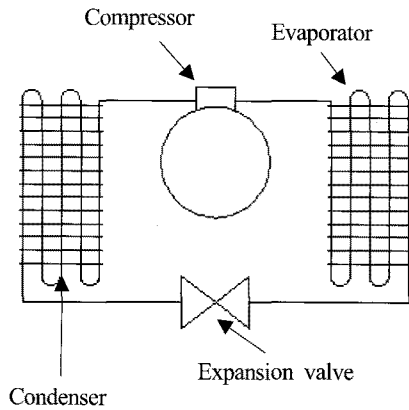


Fig. 1 Schematic of a standard heat pump cycle

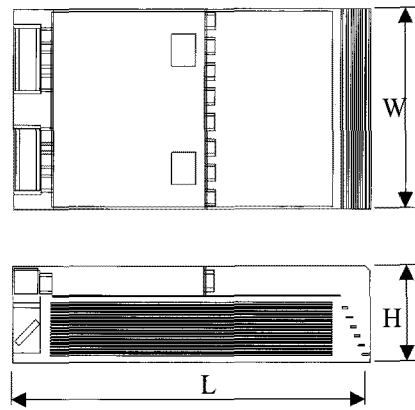
히트펌프 건조기에 관한 연구는 주로 사이클 개선이나 부품 개선 등에 관해 이루어져 왔다. Prasertsan 등⁽²⁾은 히트펌프 운전조건이 건조물에 미치는 영향을 고찰하였고, Bivens 등⁽³⁾은 내부 열교환기 적용 유무에 따른 냉동시스템w이 약 6~7% 정도 향상됨을 증명하였다. Cho 등⁽⁴⁾은 내부 열교환기를 적용한 히트펌프의 냉방성능에 관한 실험을 통해 내부 열교환기를 적용하지 않은 경우 대비 사이클 성능이 약 9% 정도 향상됨을 증명하였다. Sarkar 등⁽⁵⁾은 여러 냉매에 대하여 최적의 압축기 토출압력과 성능의 관계를 시뮬레이션을 통하여 고찰하였으며, Baek 등^(6,7)은 피스톤-실린더 형태의 팽창기를 적용한 사이클에 대하여 이론적 해석과 실험적 연구를 동시에 수행하였다. 특히 태양열 지원의 히트펌프를 사용할 경우 성적계수가 매우 높아짐을 보였고 흑한기에 보조열원으로 사용하면 효과적임을 확인하였다.

Russin 등⁽⁸⁾은 음식물 건조기에서 건조 부하량과 굴뚝의 높이가 건조 성능에 미치는 영향을 알아보았다. 대형 히트펌프 건조기에서 유동의 균일도가 건조시간에 미치는 영향이 큼에도 불구하고 아직 많은 연구가 필요하다. 따라서, 본 논문에서는 대형 히트펌프 건조기의 유동 최적화를 위해 공기순환용 팬, 가이드 베인, 공기 유입구, 토출구 및 상부 분리대 등의 형상, 위치, 개수 등을 최적화하였다. 또한, 이러한 결과를 12톤 건조기에 적용하여 실험으로 검증하였고 실제 냉동고추 건조 성능 실험을 수행하였다.

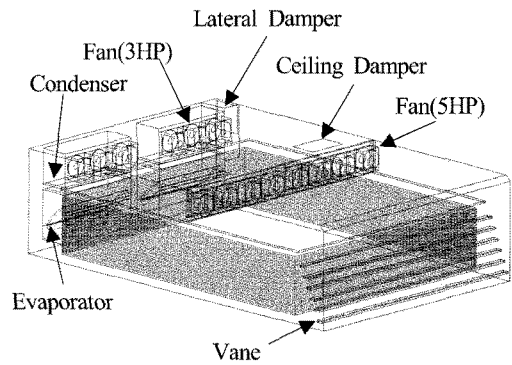
2. 수치해석 및 실험 방법

2.1 수치해석

Fig. 2에 수치해석에 사용된 건조기의 주요 제원 및 명칭을 나타냈다. 건조기의 주요 제원은 L 11.9m × W 7.5m × H 3m이다. Fig. 3은 수치해석에 사용된 내부 순환팬의 성능 곡선을 나타내었다. 내부 공기 순환을 위해 기계실 쪽에는 3마력의 팬



(a) Specifications



(b) Parts

Fig. 2 Dryer specifications and parts

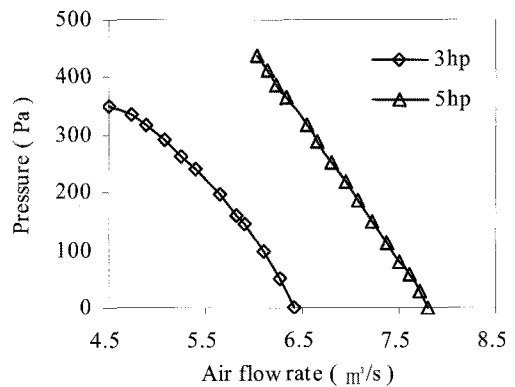


Fig. 3 Fan performance curves

Table 1 Loss coefficient of parts

Parts	Loss Coefficient
Dried products	25
Condenser	8.11
Evaporator	14.65

을 좌우 각각 3개씩 위치시켰고, 건조기 상단 가운데 부분에는 5마력의 팬을 각각 4개씩 장착하였다. 내부 공기는 베인을 거쳐 건조실로 들어가고 증발기 및 응축기를 차례로 거치며 순환된다. Table 1은 건조기 내부의 응축기와 증발기를 단순화하기 위하여 다공성매질로 설정하여 각 부품별 손실계수를 입력하였다. 손실계수는 실제 압력강하를 측정하여 계산하였다.

불균일도를 계산하기 위해 식 (1)을 사용 하였는데 불균일도 i 는 균일한 통과풍속 분포에 비해 얼마나 불균일하게 풍속이 분포되었는지를 나타내주는 척도로 건조물 면적을 n 개의 면적요소로 분할했을 때 다음과 같이 정의되어진다⁽⁹⁾.

$$i = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^n \frac{\left| \frac{m_k \cdot A_R}{A_k} - m_{tot} \right|}{m_{tot}} \quad (1)$$

m_k = 한 개의 셀(cell)을 통과하는 질량유량

m_{tot} =전체 질량유량

A_k =한 개의 셀 크기

A_R = 건조실 y-단면의 면적

불균일도 i 가 0이 되면 균일 풍속이며 i 값이 증가할수록 불균일하게 된다. 팬을 통과한 공기 유동은 180도 반대 방향으로 회전해야 하는데 풍속분포 불균일도에 영향을 미치는 주요 인자는 베인 및 상부 분리대 등이다.

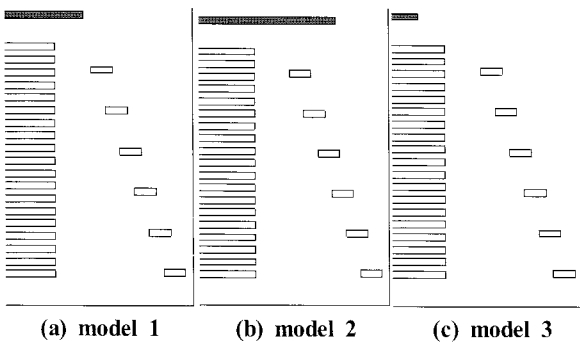


Fig. 4 Variations of model with upper separator

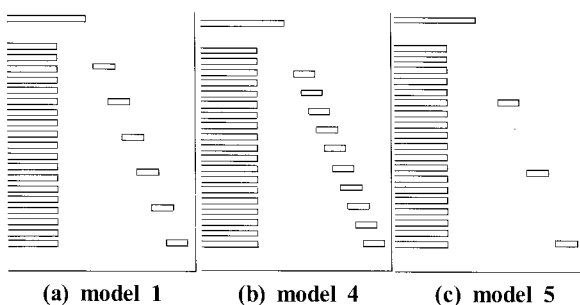


Fig. 5 Variations of model with number of vanes

Fig. 4는 상부 분리대의 길이에 따른 모델을 보여준다. 모델 1은 상부 분리대와 1.0m, 모델 2는 0.5m, 모델 3은 1.5m로 상부 분리대의 길이에 따른 전면 풍속분포를 예측하였다. Fig. 5에 상부 분리대의 길이를 고정시켜 가이드 베인의 개수를 조절 한 모델들을 나타냈다. 가이드 베인의 개수에 따른 전면 풍속분포를 예측하기 위해 모델 1, 4, 5는 각각 6, 10, 3개로 조절하여 예측하였다.

한편, 공기 토출구로 습증기가 나가는 유량을 예측하기 위하여 Fig. 6에 공기 유입구와 토출구 변경에 따른 모델들을 나타냈다. 실험결과와의 비교를 위하여 Fig. 7은 건조실 y방향 단면을 z방향으로 5개 구간으로 나누어 평균풍속을 구하였는데 한 구간의 크기는 가로 7.5m, 세로 0.4m이다.

건조기 해석에 사용된 격자수는 110만개를 사용하였고 3차원, 비압축성, 정상 유동에 대하여 난류모델은 $k-\epsilon$ 을 사용하

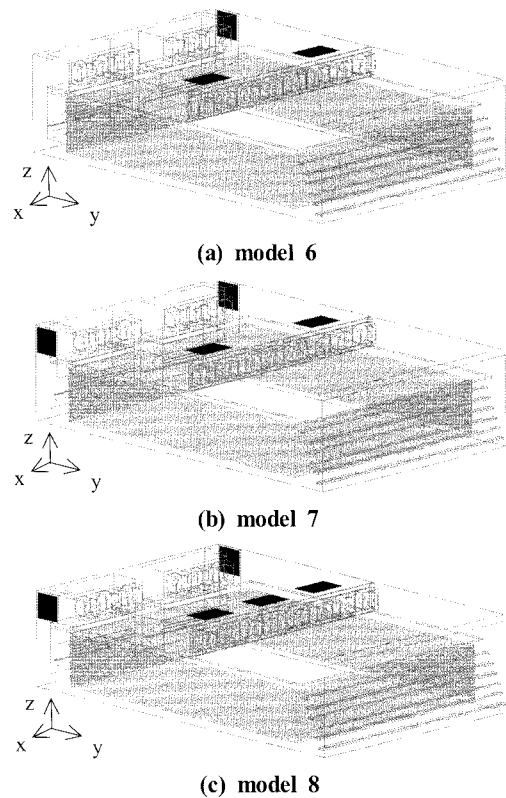


Fig. 6 Variations of model with location of inlets and outlets

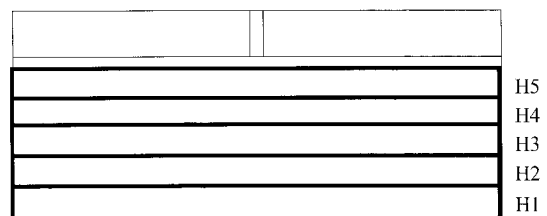


Fig. 7 Cross-section of inlet perpendicular to y axis

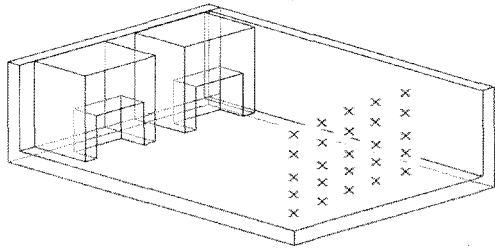


Fig. 8 Locations for velocity measurement

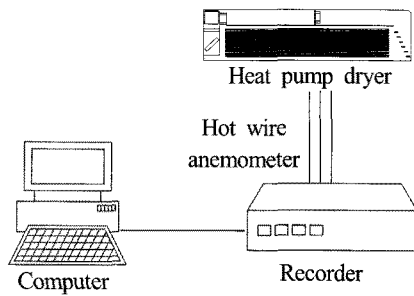


Fig. 9 Schematic of experimental equipment

였고 3차원 형상 설계에는 Catia⁽¹⁰⁾, 격자생성과 CFD 해석에는 상용프로그램인 Ansys 12⁽¹¹⁾를 사용하였다.

2.2 실험 방법으로 변경

실험에 사용된 건조기의 제원은 L 11.9m × W 7.5m × H 3m이며 좌우 각각 3 마력 팬 3개, 5 마력 팬 4개를 장착하였다. 3 마력 팬의 경우 기계실에 위치하여 건조실 후면 부분의 공기 유동을 끌어올리며 5 마력의 팬을 이용하여 다시 건조실 전면으로 공기유동을 이송시켰다.

Fig. 7의 각 구간 평균풍속에 해당하는 속도를 측정하기 위하여 Fig. 8에서와 같이 속도센서를 장착하였는데 종방향으로 0.4m 간격으로 총 5개, 횡방향으로 1.5m 간격으로 총 5 회의 측정을 수행하여 각 구간에서 평균값을 구하였다. Fig. 9의 속도센서는 Kanomax 열선 풍속계를 사용하였다. 또한 건조기 성능 실험을 위해 12톤의 냉동고추를 투입하여 건조기 가동 42 시간 후 입구와 출구의 습도를 측정 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 상부 분리대의 길이에 따른 전면 풍속분포 수치해석

Fig. 10은 상부 분리대의 길이에 따른 모델의 불균일도를 보여준다. 수치해석 결과 모델 1, 2, 3의 건조실 입구에서 불균일도는 각각 0.48, 0.55, 0.45로 예측 되었으며 모델 1과 3의 균일도가 우수하였다. 따라서 이러한 두 모델을 비교하기 위하여 Fig. 11에 두 가지 모델에 대해 건조실 입구로 들어오는 공기의

유선을 비교하여 보았다. 모델 1은 공기가 가이드 베인을 따라 건조실 입구로 비교적 균일하게 통과하는 반면 모델 3의 경우 전체적으로 유선이 매우 불규칙적인 경향을 보였다. 이것은 상부 분리대가 짧은 경우 유동이 코너를 진입할 때 회전을 너무 빨리 시작하여 유동의 90도 회전이 원활하지 않기 때문이다.

공기유동이 상부 분리대에서 하부 건조실로 들어올 때 상부 분리대의 길이가 평균풍속 분포에 미치는 영향을 알아보았다. Fig. 12는 건조기 전면부, 즉 y 단면을 5구간으로 나누었을 때 각 구간에 대한 평균 통과풍속을 보여준다. 모델 1, 2 및 3의

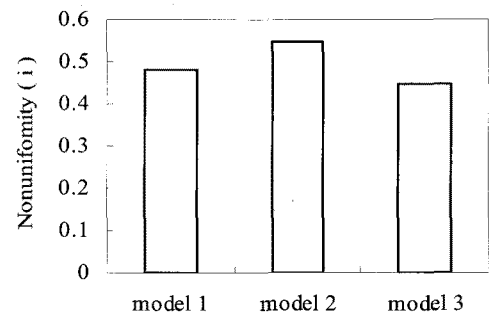


Fig. 10 Variations of nonuniformity with model

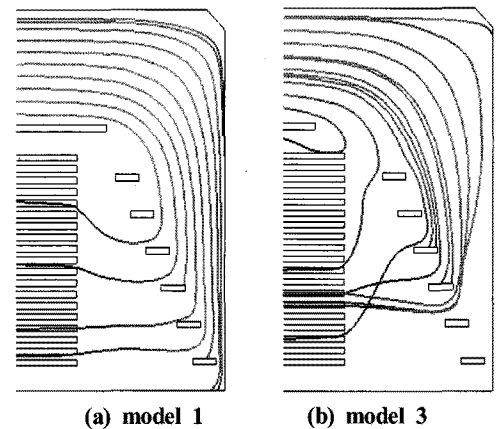


Fig. 11 Variations of streamline with model

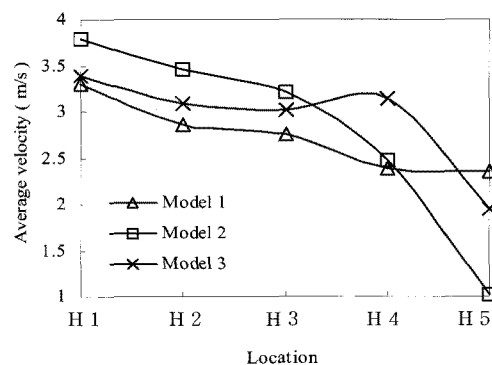


Fig. 12 Variations of average velocity with model

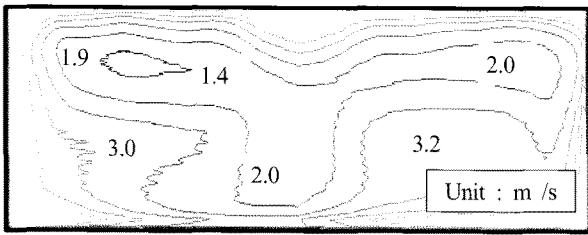


Fig. 13 Contour of velocity magnitude

최대풍속과 최소풍속의 차는 각각 29%, 73%, 43%이므로 모델 1이 가장 편차가 적고 모델 2의 경우가 가장 편차가 큰 것으로 예측되었다. 따라서, 상부분리대의 경우 전반적으로 모델 1이 가장 우수함을 알 수 있다.

Fig. 13은 모델 1인 경우 건조실 전면부에서 풍속분포를 보여준다. 공기 유속은 벽쪽이 상대적으로 높고 중간 부분이 채반으로 인한 압력 강하로 다소 낮음을 알 수 있다.

3.2 베인의 개수에 따른 전면 풍속분포 수치해석

상부 분리대의 길이 조절에 따른 수치해석 결과 균일도와 건조실 입구로 유입되는 유선의 분포가 가장 우수한 모델 1을 기준으로 베인의 개수를 조절하여 베인 개수를 최적화하였다. Fig. 14에 세 가지 베인 모델에 대하여 불균일도를 나타냈다. 베인의 개수가 10개일 때는 불균일도가 0.58, 베인의 개수가 3개일 경우 0.87로 베인 개수 6개일 때 0.48에 비해 유입공기

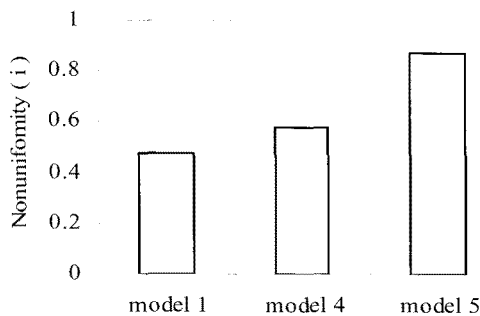


Fig. 14 Variations of nonuniformity with model

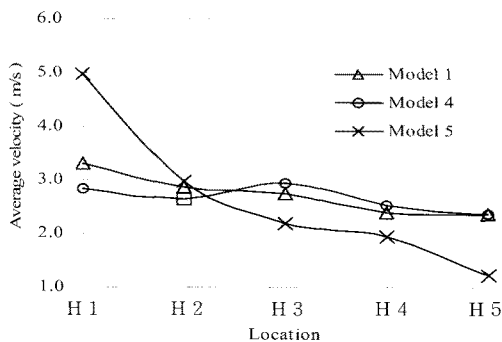


Fig. 15 Variations of average velocity with location

의 불균일도가 크게 상승하였다.

Fig. 15는 각 모델에 대하여 건조실 입구로 유입되는 공기의 위치에 따른 평균 풍속분포를 보여준다. 모델 1, 4 및 5의 최대 풍속과 최소풍속의 차는 각각 약 29, 20, 75%로 나타나 모델 4의 편차가 가장 작고 모델 5의 편차가 가장 심한 것으로 나타났다. 이는 베인의 개수가 많을수록 수직방향으로의 풍속 분포가 균일하다는 것을 의미한다. 따라서, 베인 개수는 최대 및 최소 풍속 차가 모델 4번에 비해 다소 높지만 균일도 성능이 가장 우수한 모델 1로 결정하였다.

3.3 공기 유입구 및 토출구의 개수에 따른 토출유량 수치해석

Fig. 16에 공기 유입구와 토출구의 개수를 변화시킨 세가지 모델에 대해서 토출 통과유량을 나타냈다. 공기 토출구를 반대편에 추가한 모델 7의 경우 모델 6의 경우에 비해 약 48% 더 많은 습증기를 배출할 수 있다. 하지만 모델 7 대비 공기 유입구를 1개 더 만든 모델 8의 경우 토출유량이 거의 변하지 않아 이미 유입구의 면적은 충분함을 알 수 있다. 따라서, 추가적인 습증기 배출을 통한 건조시간 단축은 토출구 면적 증가를 통해서만 가능함을 알 수 있다. 따라서, 최종적으로 유입구 2개 및 토출구 2개인 모델 7을 최적안으로 도출하였다.

3.4 히트펌프 건조기 평균풍속 측정 실험

Fig. 17은 시제품 건조기의 각 위치별 속도분포를 보여준다. 실험 편의상 채반이 없는 상태에서 풍속 측정을 수행하였다. 측정된 최저풍속과 최고풍속은 각각 1.73m/s, 4.0m/s이고 이는 건조기 바닥면을 기준으로 약 0.6m 및 1.8m지점에 해당한다. 풍속은 바닥면에서 위로 갈수록 증가하다 H2를 지나 다시 감소하는 경향을 보여준다. 실험과 수치해석 풍속분포 비교시 실험값대비 수치해석의 평균오차가 약 8.7%의 오차율을 보여 수치해석의 정확도가 비교적 확보되었다. 하지만 이러한 오차는 1차원 팬 모델, 다공성 매질, 형상 단순화, 난류 모델 등에 기인하므로 향후 좀 더 정교한 모델이 필요하다.

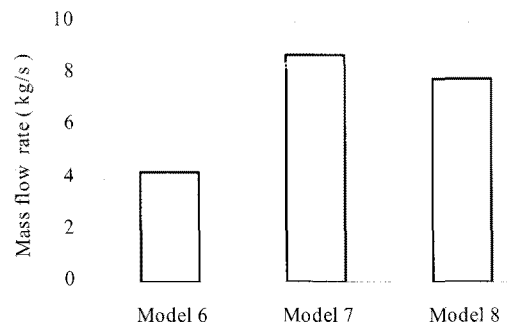


Fig. 16 Variations of mass flow rate with model

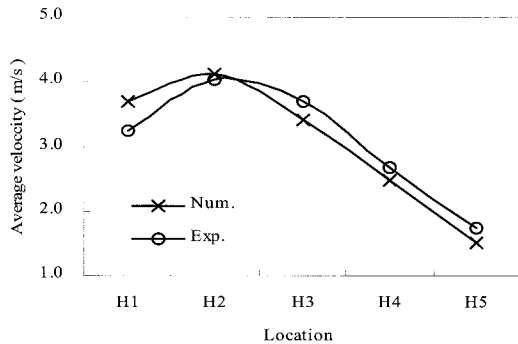


Fig. 17 Variations of average velocity with location

한편, 건조기 성능을 알아보기 위하여 냉동 고추를 건조시켰는데 건조기 가동 후 약 42시간 경과시 상대습도가 채반 전면부 14.8%, 채반을 지나 후면부에서 25.3%로 나타났으며 건조 후 냉동 고추의 무게는 약 2.4톤으로 80% 건조가 완료되었다.

4. 결론

본 연구는 대형 히트펌프 고효율 건조기 개발을 위해 베인, 상부 분리대, 공기 유입구 및 토출구 등의 변화에 따른 건조실 풍속분포를 수치해석을 통해 최적화하였다. 또한 건조기 시제품의 성능 실험을 통해 이를 검증하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 상부 분리대의 길이를 조절하여 건조실 전면부의 풍속분포를 최적화하는 경우 본 연구에서 고려된 건조기의 경우 상부 분리대가 첫 번째 베인의 위치까지 설치되었을 때 건조실로 유입되는 풍속분포 및 유입되는 공기의 유선이 가장 균일하였다.
- (2) 베인의 개수를 조절하여 풍속분포를 최적화하는 경우 베인의 개수가 많을수록 수직 방향으로 더욱 균일해지나 전체 단면의 균일도는 모델 1이 최적인 것으로 나타났다.
- (3) 공기 유입구와 토출구의 개수를 조절하여 풍속분포를 최적화하는 경우 토출구가 두개일 때가 한 개일 때 보다 두 배 토출량이 증가하였고 유입구 개수는 두 개 이상인 경우 더 이상 토출량이 증가되지 않았다.
- (4) 건조기 시제품에 약 12톤의 냉동고추를 입고하여 약 42시간 동안 약 9.6톤의 수분을 균일하게 제거하여 건조기의 성능을 성공적으로 검증하였다.

후 기

본 연구는 2010년도 한국에너지기술평가원 에너지자원기술개발사업(2010T100100926) 지원에 의하여 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) Bannister, P., Carrington, G., and Chen, G., 2002, "Heat Pump Dehumidifier Drying Technology-Status, Potential and Prospects," *Proc. of 7th IEA Heat Pump Conference*, Vol. 1, pp. 219~230.
- (2) Prasertsan, S., Saen-Saby, P., Prateepchaikul, G., and Ngamsritrakul, P., 1996, "Effects of Product Drying Rate and Ambient Condition on the Operating Modes of Heat Pump Dryer," *Proc. of 10th Int. Drying Symp.*, Vol. A, pp. 529~534.
- (3) Bivens, D. B., Allgood, C. C., Shiflett, M. B., Patron, D. B., Shely, G. S., Yokozeki, A., Wells, W. D., and Geiger, K. A., 1994, "HCFC-22 Alternative for Air Conditioners and Heat Pumps," *ASHRAE Transactions*, Vol. 100, No. 2, pp. 566~572.
- (4) Cho, H. H., Ryu, C. G., and Kim, Y. C., 2005, "Experimental Study on the Cooling Performance of a Variable Speed CO₂ Cycle with Internal Heat Exchanger and Electronic Expansion Valve," *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 209~216.
- (5) Sarkar, J., Bhattacharyya, S., and Gopal, M., 2004, "Natural Refrigerant-based Subcritical and Transcritical Cycles for High Temperature Heating," *Int. Journal of Refrigeration*, Vol. 30, No. 1, pp. 3~10.
- (6) Baek, J., Groll, E., and Lawless, P., 2005, "Piston-Cylinder Work Producing Expansion Device in a Carbon Dioxide Cycle. Part I: Experimental Investigation," *Int. Journal of Refrigeration*, Vol. 28, No. 2, pp. 141~151.
- (7) Baek, N. C., Lee, J. K., Kim, H. J., Yang, Y. S., and Song, B. H., 2000, "Experimental Study on the Solar Assisted Heat Pump System," *Proceeding of Korean Solar Energy Society*, pp. 76~82.
- (8) Russon, J. K., Dunn, M. L., and Steele, F. M., 2009, "Optimization of a Convective Air Flow Solar Food Dryer," *International Journal of Food Engineering*, Vol. 5, Iss. 1, Article 8, pp. 1~11.
- (9) Lee, Y. L., 2001, "An Analysis of Engine Cooling using a Three-dimensional Radiator Model," *Journal of KSAE*, Vol. 9, No. 4, pp. 10~17.
- (10) Catia, 2006, *V5R17*, Dassault Systems.
- (11) Ansys Fluent version 12.1, 2009, *User's Manual Version 12.0*, Ansys Inc.