

진공고주파를 이용한 일체형 건조기개발에 관한 연구

A Study on an Integrated Drying Machine with Microwave at Vacuum Conditions

김태형(Taehyung Kim)¹, 고광수(Gwang-Soo Ko)¹, 박윤철(Youn Cheol Park)^{2*}

¹제주대학교대학원 기계공학과, ²제주대학교 기계공학과

¹Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea

²Department of Mechanical Engineering, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea

(Received April 22, 2014; revision received July 21, 2014; Accepted: August 4, 2014)

Abstract In Jeju province, the Citrus is widely spread crop which is the most popular fruit on the island. When the quality of a Citrus is not in a good condition or when its size exceeds or is lower than the set criteria, it is discarded as a waste. In this study, a drying machine for waste Citrus has been developed with 2.6 GHz microwave energy supply to the Citrus at vacuum environment. The vacuum environment of the drying chamber was maintained to reduce the energy supply to the Citrus by lowering the evaporating temperature of the water. The experiment was conducted with variation of the vacuum pressure, interior temperature of the drying chamber, and operating time of the microwave. As a result, the effect of the temperature was shown to be higher than the other two control methods, and it showed with 0.305 g/W evaporation efficiency.

Key words Microwave(고주파), Evaporation efficiency(증발효율), Vacuum dry(진공건조), By-product(부산물)

† Corresponding author, E-mail: ycpark@jejunu.ac.kr

1. 서 론

1960년 이후 우리나라는 급격한 도시화와 산업화 과정에서 대량으로 발생하는 생활폐기물을 처리하기 위하여 매립 및 소각위주의 폐기물 정책을 추진하여 왔다. 그러나 매립 및 소각정책, 침출수로 인한 지표수오염, 협소한 국토여건으로 인한 매립지 부족, 가연성폐기물의 고발열량, 폐기물감량의 한계 및 소각시 오염물질 발생 등의 문제로 인하여 한계점에 이르렀다.

초기의 농산물 건조기는 버너를 발열장치로 하여 유류식 건조기가 보급되었으나, 유가상승으로 인한 농가 부담이 가중됨에 따라 상대적으로 저렴한 전기를 열원으로 하는 전기식 농산물 건조기가 최근 몇 년 사이에 급격하게 보급되기 시작하였다.⁽¹⁾ 향후, 인구 증가와 함께 전반적인 생활수준의 향상으로 건조기술에 대한 필요성은 증대될 것이 분명하며 높은 에너지 효율, 환경에 대한 작은 충격, 건조를 위한 재생 가능(renewable)한 에너지의 활용 및 저비용으로 고품질 제품 생산 등에 대한 요구가 증대될 것이다.

오늘날 혁신적인 건조기술을 이끌어내는 추진력은 높은 생산성과 향상된 제품 품질을 동시에 얻고자하는 요구라 할 수 있다.⁽²⁾

국·내외적으로 건조기에 대한 다양한 연구가 진행

되고 있다. Eom et al.⁽³⁾의 연구는 기존에 보급된 버너를 발열장치로 하는 유류식 농산물 건조기에 대하여 내부의 유동메커니즘을 규명하고, 이를 바탕으로 건조실 내의 피 건조물들이 동시에 균일하게 건조될 수 있는 건조실을 고안함으로써 피 건조물에 대한 최적 건조형태의 실현과 연료소비율 및 노동력 투입을 절감할 수 있는 건조기를 개발하기 위한 기초를 제시하였다.

한편 국내에서는 고추의 건조에 관한 연구가 많이 수행되었는데, Lee and Park⁽⁴⁾은 품질 최적화에 관한 연구를 수행하였으며, Lee 등⁽⁵⁾은 저온진공 건조기를 이용한 고추의 열적 특성에 관한 연구를 발표한 바 있다. 이들 연구에서는 주로 건조기의 운전조건이나 건조조건에 따른 피 건조물의 상태 등 범용 건조기 개발을 위한 열적 조건 등을 제시하였다.

또한 Cho 등⁽⁶⁾은 마이크로웨이브를 이용한 농산물 건조기에 관한 연구를 통하여 열풍 건조기에 비하여 건조시간을 30~40% 단축시킬 수 있다는 결과를 얻었다.

제주도의 주요 농산품중의 하나인 감귤은 생산 후 선과과정을 거치면서 감귤의 크기를 기준으로 등급을 매겨 상품성이 떨어지는 경우(1번과 및 10번과)에는 폐기처분하거나 혹은 감귤처리공장에서 주스의 형태로 재활용하고 있다. 이때 폐기되는 감귤 및 주스 제조 후에 발생하는 폐기물은 기간에 따라 젤형태로 성상이

변화되며 이와 더불어 당분이 발효하는 독특한 특성이 있어, 기존의 열풍 건조방식으로는 건조에 많은 어려움이 있다. 최근에는 새로운 건조방식에 대한 기술개발이 제 주도지방개발공사를 비롯하여 활발히 진행되고 있다.⁽⁷⁾

본 연구에서는 진공건조기를 진공상태로 유지하여 건조에 필요한 열량을 감소시키는 동시에 젤상태의 감귤폐기물의 내부에 열을 전달하기 위하여 고주파발진을 이용함으로써 감귤부산물을 효율적으로 건조하기 위한 기초연구를 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구의 진공 및 고주파를 이용한 건조장치는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 챔버 내부에 배플(baffle)로 분리하여 시료를 건조시킬 수 있는 건조챔버(dry chamber)와 수증기를 응축시킬 수 있는 응축챔버(condensing chamber)로 구성되었다. 본 연구에서 건조챔버와 응축챔버의 가열 및 냉각을 목적으로 설치한 열펌프 시스템은 내부의 가열을 위하여 시료바닥에 설치되었으며, 시료에서 발생된 수증기의 응축을 위하여 내부 및 옆면에 2개의 증발기를 설치하였다. 열펌프 시스템은 용량 불균형으로 인한 문제를 해결하기 위하여 챔버 외부에 응축기와 증발기를 별도로 설치하였다.

일체형 건조기는 챔버 내의 진공을 유지하면서 1.2 kW 용량의 마이크로웨이브(microwave)를 설치하여 건조물의 수분과의 공진주파수인 2.6 GHz의 고주파를 건조물에 공급하게 하였다. 또한 일체형 건조기 운전시의 온도측정을 위하여 건조챔버 및 응축챔버 내에 T-type 열전대를 설치하였으며, 일체형 건조기의 설치된 열펌프 시스템의 성능특성을 파악하기 위하여 고압 및 저압측에 압력계를 설치하였다. 마이크로웨이브 및 열펌프 시스템의 소비동력의 측정은 전력 변환기를 사용하였으며, 측정된 데이터는 데이터로거(DR230)를 사용하

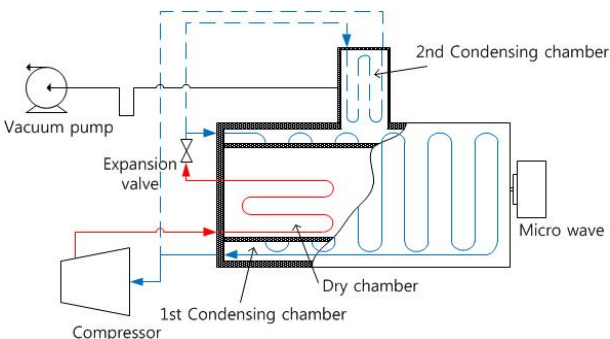


Fig. 1 Schematic diagram of the developed integrated drying machine.

여 컴퓨터로 기록하였다.

일체형 건조기의 운전 순서는 시료를 챔버에 투입한 후 진공펌프를 이용하여 설정된 진공압력까지 진공펌프를 운전한 후, 마이크로웨이브를 가동하였다. 시료가 가열되면서 발생된 수증기는 첫 번째 응축챔버에서 1차적으로 응축되고 나머지 수증기는 두 번째 응축챔버에서 한 번 더 응축된 후 밖으로 배출되게 된다.

2.2 실험조건 및 실험방법

본 연구에서는 건조대상물은 분쇄한 감귤을 시료로 실험에 사용하였으며, 제어압력차에 따른 성능 특성 실험, 제어온도차에 따른 성능특성 실험 및 마이크로웨이브 제어시간에 따른 성능특성 실험을 수행하였다.

제어압력차에 따른 일체형 건조기의 성능특성을 파악하기 위하여 건조챔버 내부온도를 30℃로 고정시킨 후, 설정압력을 50, 100 및 150 mbar로 설정하여 설정압력과 제어압력차를 10, 30 및 50 mbar로 변경하여 제어압력차에 따른 건조 성능특성을 측정하였다. 따라서 설정압력이 50 mbar이고 제어압력차가 10 mbar일 경우에 챔버 내부의 압력변화는 최대 50~60 mbar의 범위에서 압력변화가 발생하게 된다.

제어온도차에 따른 일체형 건조기의 성능실험에서는 건조챔버 내부온도를 30℃로 고정시킨 후, 설정온도와 제어온도차를 5, 7 및 10℃로 변경하여 제어온도차에 따른 성능특성을 측정하였다. 따라서 설정온도가 30℃이고, 제어온도차가 5℃이면, 건조챔버 내부의 온도변화는 최대 30~35℃의 범위에 온도변화가 발생하게 된다.

마이크로웨이브 제어시간에 따른 일체형 건조기의 성능 실험은 챔버 내부에 설치된 증발기와 응축기 그리고 마이크로웨이브의 운전시간을 제어하여 실시하였으며, 이때 건조챔버 내부 온도는 30℃, 설정압력은 50 mbar이고 제어압력차는 10 mbar로 고정하여 실험을 수행하였다. 실험장치의 운전 순서는 응축기-마이크로웨이브-증발기 순이며 실험의 운전시간은 응축기와 증발기는 운전시간을 100 sec로 고정하고 마이크로웨이브의 운전시간만 100, 200 및 400 sec로 변경하여 시료의 증발량을 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 제어압력차에 따른 실험결과

Fig. 2는 설정압력이 50 mbar에서 제어압력차에 따른 건조챔버 및 응축챔버의 온도변화로써 제어압력차가 커짐에 따라 건조챔버 내부의 온도가 상승하는 것을 알 수 있다.

이것은 압력 차이가 커짐에 따라 마이크로웨이브에 공급된 에너지가 감귤시료 내부에 충분히 전달된 것으로 판단되며, 두 번째 응축챔버의 온도는 첫 번째 응축챔버 보다 낮게 나타나기 때문에 응축효율은 더 증가할 것으로 판단된다.

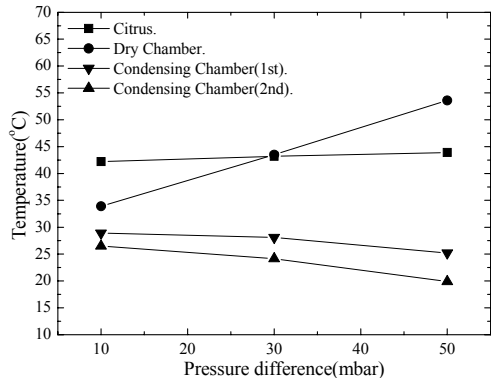


Fig. 2 Temperature variation in the drying machine by pressure difference(50 mbar).

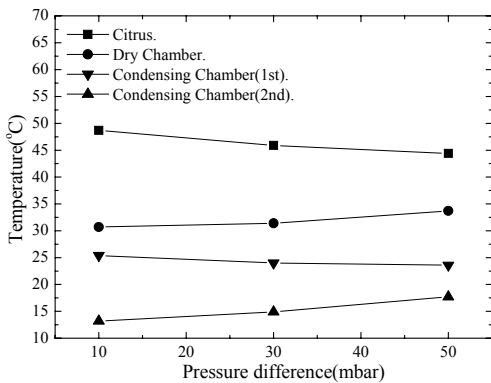


Fig. 3 Temperature variation in the drying machine by pressure difference(100 mbar).

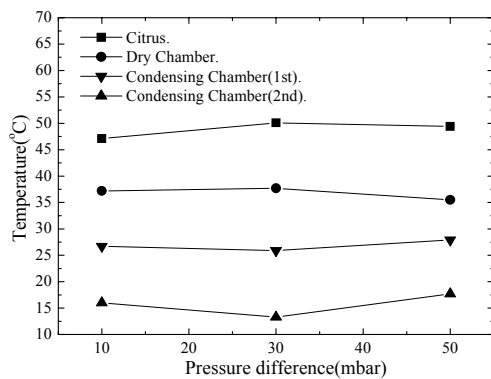


Fig. 4 Temperature variation in the drying machine by pressure difference(150 mbar).

Fig. 3은 설정압력이 100 mbar에서 제어압력차에 따른 건조챔버 및 응축챔버의 온도변화를 나타내고 있다. 제어압력차가 커짐에 따라 감귤 시료내부 온도는 감소하는 경향을 보이나 건조챔버 온도 및 두 번째 응축챔버 온도는 상승하는 것을 알 수 있다. 이것은 50 mbar에 비하여 내부의 공기가 더 존재하여 공기에 의한 열전달이 발생하는 것으로 보이며, Fig. 4도 동일한 경향을 나타내고 있다.

일체형 건조기 운전 중 진공펌프의 운전율은 Fig. 5와 같으며, 설정압력이 낮고, 제어압력차가 클수록 진공펌프 운전율이 높게 나타나고 있다.

또한 각각의 설정 압력별 진공펌프의 운전율을 보면 설정압력이 50 mbar이고, 제어압력차가 10 mbar인 경우 전체 운전시간(2,400 Sec) 중 8.9%(214 sec)만 설정압력을 유지하기 위하여 진공펌프가 운전되었으며, 제어압력차가 50 mbar에서는 9.8%(234 sec)로 나타났다.

설정압력이 50, 100 및 150 mbar에서 제어압력차를 10, 30 및 50 mbar로 건조기를 운전시 소비동력은 Fig. 6과 같으며, 제어압력차에 따른 평균 소비동력은 973 W이며 제어압력차에 따른 소비동력은 거의 일정한 경향을 나타내고 있다.

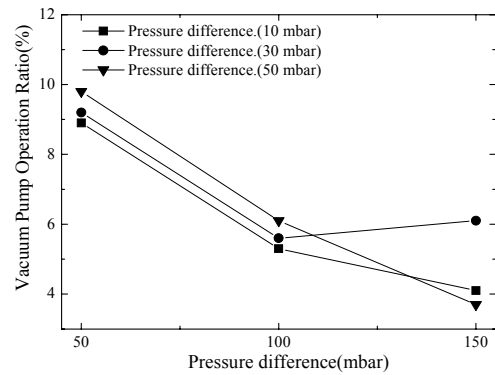


Fig. 5 Vacuum pump operation ratio with variation of the pressure difference.

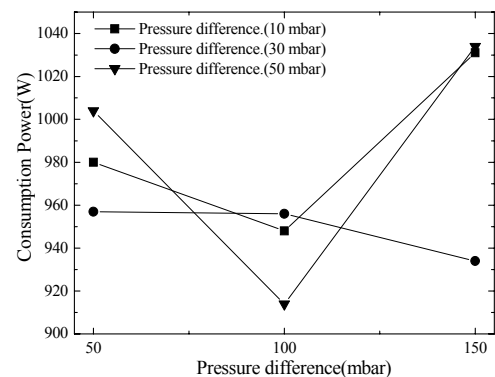


Fig. 6 Power consumption with drying machine.

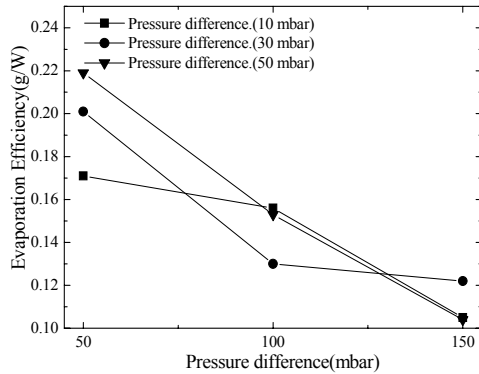


Fig. 7 Evaporation efficiency of the sample by pressure difference.

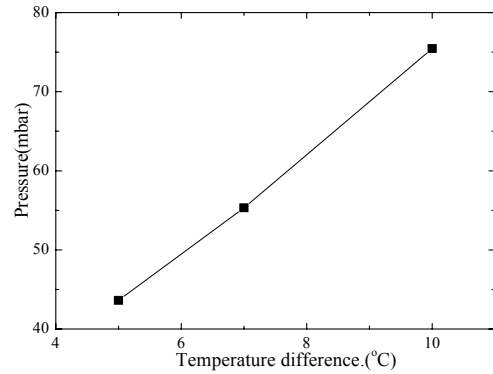


Fig. 9 Pressure variation in the drying machine by temperature difference.

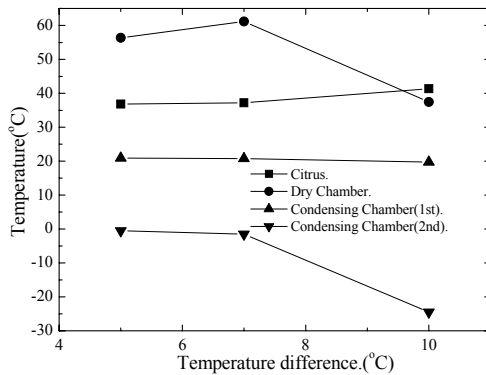


Fig. 8 Temperature variation in the drying machine by temperature difference.

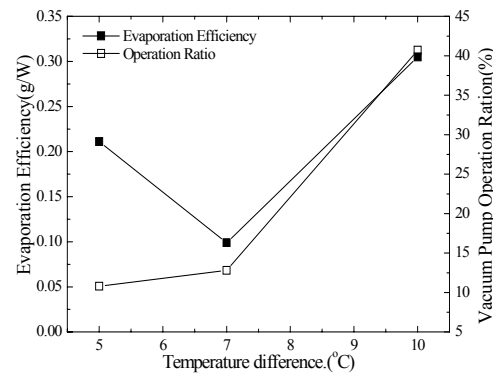


Fig. 10 Evaporation efficiency and vacuum pump operation ratio by temperature difference.

설정압력이 150 mbar일 경우가 가장 높은 소비동력을 내지만 설정압력 및 제어압력차에 따른 증발효율은 Fig. 7에 나타난 바와 같이 설정압력이 50 mbar이고, 제어압력차가 50 mbar일 때 가장 높은 증발효율을 나타내고 있다. 이것은 마이크로웨이브를 통해 시료에 에너지를 공급하여 시료에 포함된 수분을 수증기로 변화시키기 위해서는 일정시간이 필요하기 때문이다.

3.2 제어온도차에 따른 실험결과

제어온도차에 따른 성능특성을 파악하기 위하여 초기 챔버 온도를 30°C로 고정시키고, 제어온도차를 5, 7 및 10°C로 하여 실험을 수행하였다.

Fig. 8은 제어온도차에 따른 건조기 내부 온도변화로써 제어온도차가 5 및 7°C에서는 챔버 내의 온도변화 폭이 작으나 제어온도차가 10°C의 경우는 일 때는 챔버 내부의 온도변화폭이 크게 나타났다. 이것은 진공펌프의 영향으로 판단되어지며 제어온도차가 5 및 7°C일 때는 진공펌프 운전율이 10.8% 및 12.8%로 일

정하지만 제어온도차가 10°C일 때는 40.7%로 증가하였기 때문이다.

Fig. 9와 같이 챔버 내부의 압력은 제어온도차가 커질수록 증가하는데 이것은 마이크로웨이브에서 전달된 열이 시료의 내부에 수분을 증발시켜 수증기로 변화시키면서 발생된 수증기가 계속적으로 챔버내에 존재함으로 인하여 압력이 증가한 것으로 판단된다.

제어온도차에 따른 증발효율 및 진공펌프의 운전율은 Fig. 10과 같으며, 증발효율 및 진공펌프 운전율이 가장 높은 온도차는 10°C이며, 이때 증발효율은 0.35 g/W, 진공펌프 운전율은 40.7%(977sec)로 나타났다.

3.3 마이크로웨이브 제어시간에 따른 실험결과

마이크로웨이브를 이용한 건조기의 제어시간에 따른 건조기의 성능특성을 파악하기 위하여 응축기를 이용하여 시료의 예열을 실시한 후, 마이크로웨이브를 이용하여 시료를 직접 건조시켰다. 건조 후 시료에서 발생된 수증기는 증발기를 이용하여 응축시키는 방법

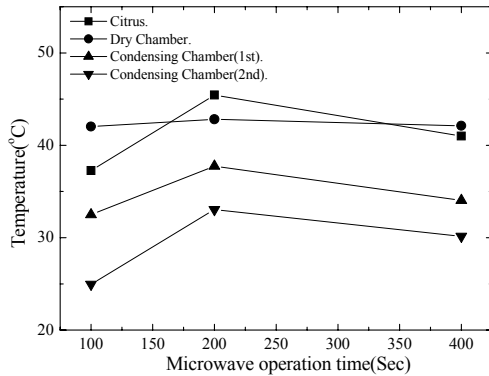


Fig. 11 Temperature variation in the drying machine by microwave operation time.

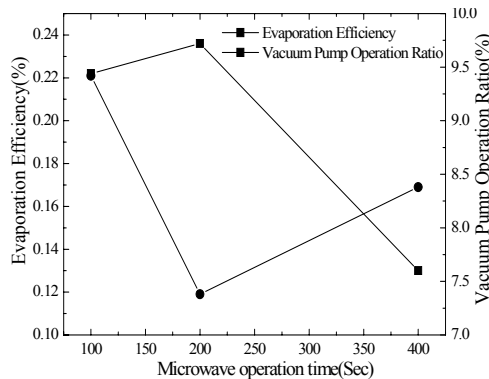


Fig. 12 Evaporation efficiency and vacuum pump operation ratio by microwave operation time.

으로 실험을 실시하여, 운전 시간은 응축기 및 증발기는 100 sec로 고정시키고 마이크로웨이브 제어시간을 100, 200 및 400 sec로 변화시켜 실험을 수행하였다.

마이크로웨이브의 제어시간 따른 건조챔버 및 응축챔버 내의 온도 변화는 Fig. 11과 같은 결과를 얻을 수 있었으며, 건조 챔버 및 응축챔버의 온도는 마이크로웨이브 운전시간이 200 sec일 때 가장 높게 나타났다. 실험결과를 통하여 마이크로웨이브의 제어시간에 따른 증발효율 및 진공펌프의 운전율은 Fig. 12와 같으며, 건조챔버 및 응축챔버 내의 온도가 가장 높은 200 sec 일 때 0.236 g/W로 가장 높게 나타났으며, 진공펌프 운전율은 7.38%로 가장 낮다.

4. 결 론

본 연구에서는 진공상태에서 운전되는 건조기에 있어서 고주파를 공급하여 건조성능을 향상시키기 위한 건조 장치를 제작하고, 건조성능 특성을 파악하기 위

하여 시스템의 온도 및 압력을 변화시키면서 감귤시료의 건조량을 측정하였다.

실험에 있어서 설정압력은 50, 100 및 150 mbar이고 초기온도는 30°C로 설정하고 제어압력차를 10, 30 및 50 mbar로 변화시켰으며, 온도는 기준온도를 30°C로 하고 제어온도차를 5, 7 및 10°C로 변경하여 실험을 수행하였다. 또한 마이크로웨이브의 제어시간에 따른 성능특성은 설정압력을 50 mbar를 기준으로 하고 제어압력차를 10 mbar로 하여 실험하였다. 마이크로웨이브 제어시간에 따른 각 요소기기의 운전 순서는 응축기-마이크로웨이브-증발기의 순이며, 응축기와 증발기는 운전시간을 100 sec로 고정시키고, 마이크로웨이브 운전시간을 100, 200 및 400 sec로 변화 시켰다.

이러한 실험을 통하여 개발된 일체형 건조기의 수분증발량 및 시스템의 효율을 측정하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

- (1) 일체형 진공고주파 건조기의 경우 온도제어 실험의 결과 시료온도가 41.6°C로 가장 높고 건조챔버 내 온도가 37.5°C로 가장 낮을 때 증발효율이 0.305 g/W로 높게 나타났다. 따라서 시료의 온도가 건조 챔버내의 온도보다 높을 경우 증발효율이 높게 나타난 것을 알 수 있다.
- (2) 압력 차이에 따른 건조성능은 챔버 내의 시스템의 설정압력이 50 mbar이고 이 압력을 유지하기 위하여 진공펌프를 운전시키기 위한 압력차이가 10 mbar 일 때 증발효율은 0.17 g/W이며, 압력 차이가 50 mbar인 경우에는 0.219 g/W로 압력차이가 클수록 증발효율이 더 높게 나타났다.
- (3) 마이크로웨이브 시간제어를 통한 실험결과 시료온도가 가장 높은 운전시간이 200 sec일 때 증발효율은 0.236 g/W이다.
- (4) 선행 연구에서는 설정압력을 50, 100, 150, 300 및 700 mbar에서 수분증발량을 측정한 결과 설정압력 50 mbar에서 0.24 g/W의 최대 증발효율을 나타내었으며, 본 연구에서는 선행 연구보다 증발효율이 27% 증가하였다.
- (5) 일체형 진공고주파 건조기의 성능특성을 파악하기 위하여 압력, 온도 및 마이크로웨이브의 작동시간 등을 제어하였을 때 온도를 제어하는 경우가 증발효율이 0.305 g/W로 가장 높게 나타났다.

후 기

이 논문은 2011년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(과제번호 : 2011-0012326)의 지원을 받아 수행된 것임.

References

1. Lim, J. K., 2009, Improving quality of agricultural electric dryer, National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration, 11-1390802-000035-01, pp. 22-77.
2. Kudra, T. and Mujumdar, A. S., (Translator : Lee, H. W.) 2007, Advanced drying technologies, Chonnam National University Press, pp. 40-41.
3. Eom, Y. K., Ahn, D. W., Cheon, S. K., and Seo, T. W., 2006, Flow analysis to develop uniform thermal flow distributions of the box type dryer for agriculture products, Korea Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, Vol. 18, No. 1, pp. 7-16.
4. Lee, D. S. and Park, M. H., 1989, Quality optimization in red pepper drying, Korean Journal of Food Science and Technology, Vol. 21, No. 5, pp. 655-661.
5. Lee, D. S., Keum, D. H., Park, N. H., and Park, M. H., 1989, Optimum drying conditions of on-farm red pepper dryer, Korean Journal of Food Science and Technology, Vol. 21, No. 5, pp. 676-685.
6. Cho, K. H., Yun, H. S., Chung, H., Oh, B. G., and Kim, Y. H., 1999, Development of microwave dryer for agricultural products, Proceedings of the KSAM 1999 Winter Conference, Vol. 1, No. 1, pp. 421-427.
7. Ko, G. S., Park, Y. C., and Yoon, H. K., 2014, A study on a drying machine with microwave at vacuum condition for discarded citrus scrapes, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 26, No. 1, pp. 21-25.