2004년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2004.7.14-16

식품건조를 위한 유도가열 기술 응용 연구

류 명효, 백 주원, 김 종현, 유 동욱, 임 근희
한국전기연구원

The Application of the Induction Heating Technology for the food dryness

M.H. Ryu, J.W. Baek, J.H. Kim, D.W. Yoo, G.H. Rim
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - 본 논문에서는 400℃ 이상의 과열 증기 발생을 위하여 6kW급 유도가열장치를 개발하여 식품 건조 시스템에 적용한 예를 보인다. 유도가열장치는 과열 증기의 온도를 제어하기 위하여 인버터 입력 전압을 100~200V로 가변제어가 가능하게 하였고, 인버터 입력 전압은 벅컨버터를 사용하여 기준 전압을 과열증기의 온도에 대한 전압 값을 사용하여 제어하였으며, LC 공진에 의해 발생한 전류로 증기 가열 챔버를 유도 가열하여 과열 증기를 발생하게 하였다. 발생한 과열 증기는 식품 건조를 위하여 건조로에 투입되어 고온 건조에서 식품의 건조시간을 단축시킬 수 있었으며, 식품의 손상을 줄일 수 있었다. 이의 검증을 위하여 유도 가열 장치를 설계/제작하여 실험하였으며, 식품 건조 테스트를 행하였다.

1. 서 론

현재까지 식품 건조는 주로 저온의 열풍을 이용하여 식품 손상을 최소화하기 위해 장시간 건조하였다. 열풍건조는 시스템 구성이 간단하고 설비가 다른 건조장치들에 비해 경제적이므로 현재 가장 많이 이용되어 왔다. 그러나 이러한 열풍건조는 식품 손상을 방지하기 위하여 저온에서 건조하므로 효율적인 건조가 힘듦은 물론, 건조시간이 길어지는 단점이 있다.

이를 해결하기 위해 여러 가지 건조 기법들이 연구, 도입되어 왔으며 그중에서 대표적인 것이 동결 건조 방식이다. 이 방식은 우수한 건조 효과와 품질 상태를 보존할 수 있으나 모든 건조제품에 이용되지 못하고 있으며 건조온도가 낮고 낮은 압력에서 운전되므로 건조속도가 매우 느리고 동결과 진공 그리고 가열 등의 경비와 고가의 부대설비로 인해 전체 시스템의 비용이 생산량에 비해 매우 높은 단점이 있다.

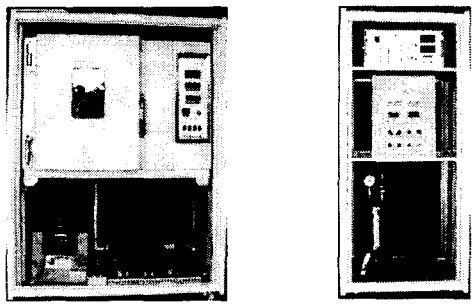
한편, 열풍 건조에서 고온 건조는 보다 빠른 건조특성을 얻을 수 있으나 식품에 손상을 피할 수 없다. 이에 따라 식품의 손상을 줄여주면서도 건조시간을 단축할 수 있는 방법의 하나로서 고려할 수 있는 것이 과열증기에 의한 건조가 있다. 과열증기는 100도에서 374도사이의 수증기를 지칭하며 살균작용과 급속한 건조효과가 있다. 이미 과열증기에 의한 건조효과는 기존 문헌에서 많이 소개되었으며 건조 오븐 내부의 열 순환에 의한 고효율 건조, 건조식품에서 건조품질 개선 효과, 빠른 열전도에 의한 건조시간의 단축 그리고 환경오염이 없으며 건조제품의 품질이 우수한 장점을 예시하였다.

본 논문에서는 과열증기 발생을 위한 시스템은 유도가열전원 장치와 간접가열기구물을 이용하여 구성하고 전기에너지로 증기의 온도를 제어한다. 유도가열전원 장치는 크게 입력측 벅 컨버터와 출력측 공진형 풀브리지 컨버터로 구성되며, 최대 출력은 6kW이다. 과열증기의 온도에 따라 벅 컨버터의 출력 전압을 가변하여 출력을 제어하였으며, 직렬 공진 풀브리지 컨버터의 출력측에 유도가열을 이용한 증기 발생 챔버를 설치하여 과열증기를 발생하였다. 발생된 과열증기는 건조로에 투입하여 식품이 고온에서 손상되는 것을 방지하였고 건조 시간을 단축시킬 수 있었다. 실험을 통하여 본 시스템의 타당성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 유도가열장치 구성

본 실험에서 구성한 전체 시스템을 아래 그림 1에 나타내었다.



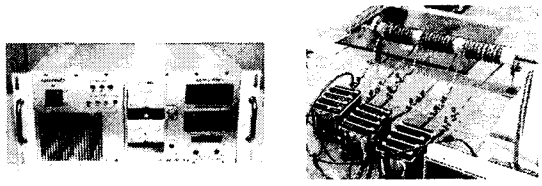
(a) 유도가열 및 건조장치 (b) 전원 및 제어장치

그림 1 전체 시스템 사진

전체 시스템은 크게 유도 가열부, 증기 발생 챔버, 건조로, 전원장치, 냉각부, 제어부로 나눌 수 있다. 본 논문에서는 전원 장치와 유도 가열부, 증기 발생 챔버, 그리고 식품 건조에 관해서 논하도록 한다.

2.1.1 유도 가열부, 증기 발생 챔버 및 전원 장치

본 실험에서 구성한 전원 장치 및 유도 가열부, 증기 발생 챔버를 아래 그림 2에 나타내었다.



(a) 전원 장치 (b) 유도가열부 및 증기 발생 챔버

그림 2 전원 장치 및 유도 가열부, 증기 발생 챔버

유도 가열부를 급속하게 가열하고 과열 증기의 온도를 400도 내외로 유지하기 위하여 최대 출력 6kW급 전원 장치를 설계하였다. 전원 입력부는 벅 컨버터를 구성하여 출력 전압을 100V~200V로 가변할 수 있도록 설계하였고, 출력부는 직렬 공진 풀브리지 컨버터를 구성하여 유도가열부로 출력 전달이 용이하도록 하였다.

출력을 가변시키기 위한 방법으로는 1)출력부 직렬

공진 풀브리지 컨버터의 스위칭 주파수를 고정시키고, 벅 컨버터의 출력 전압을 제어함으로써 가능하고, 2)벅 컨버터의 출력전압을 고정하고 출력부 컨버터의 스위칭 주파수를 가변하여 공진 이득을 가변함으로써 또한 가능하다. 본 논문에서는 간단한 제어를 위하여 벅 컨버터의 출력 전압을 제어하는 방법을 적용하여 구현하였다.

먼저, 벅 컨버터는 그림 3에 나타낸 것과 같이 단상 입력 220Vac를 정류한 310Vdc 전압을 100V~200V의 출력 전압을 얻을 수 있도록 제어하였다. 직렬 공진 풀브리지 컨버터는 그림 4에 나타낸 것과 같이 입력 전압 200V, 스위칭 주파수 20kHz 근방에서 최대 출력 6kW를 얻을 수 있도록 공진 파라메타 Lr, Cr을 선정하였다. 공진형 컨버터에서 영전압 스위칭을 얻기 위하여 스위칭 주파수는 공진 주파수보다 크게 설정하였다.

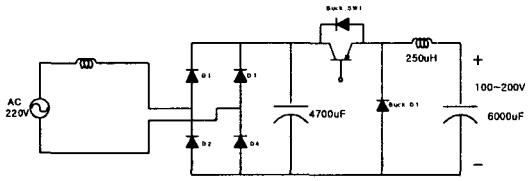


그림 3 벅 컨버터 회로도

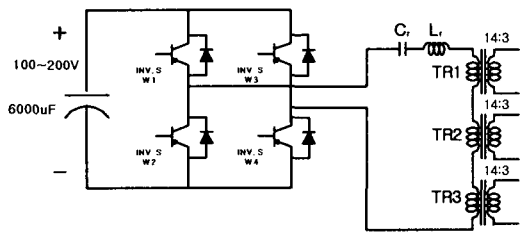
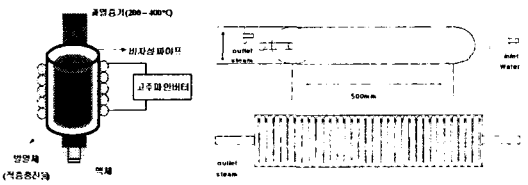


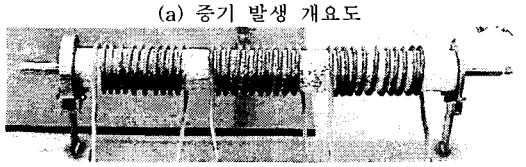
그림 4 직렬 공진 풀브리지 컨버터 회로도

직렬 공진 풀브리지 컨버터 출력단의 유도가열부는 3개의 변압기를 사용하여 1차측은 직렬, 2차측은 병렬로 구성하여 변압기 설계를 용이하게 하였다. 직렬 공진 파라메타 Lr, Cr은 영전압 스위칭과 최대 출력 6kW를 발생할 수 있도록 설계하였다.

유도 가열부에 의해 증기를 발생하는 증기 발생 챔버를 아래 그림 5와 같이 구성하였다. 그림과 같이 유도 가열부는 3개의 변압기를 통해 발생한 유도 전류를 이용하였고 유도 가열부와 증기 발생관 사이에는 비자성 파이프를 끼워 안전성을 확보하였다. 증기 발생관은 산화 소손없이 고온에서 사용가능한 inconel 관을 채택하였고 효율적인 과열 증기 발생을 위하여 관 내부에 발열체를 삽입하였다.



(a) 증기 발생 개요도



(b) 증기 발생기

그림 5 증기 발생 챔버

2.1.2 식품 건조 시스템

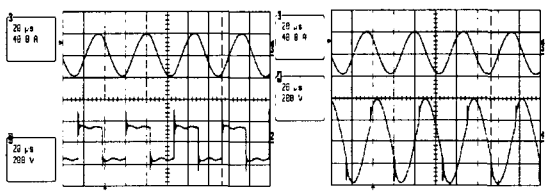
식품 건조로는 180℃ 이상의 고온에서 동작하도록 설계하였고, 고온에서의 식품 손상을 방지하기 위하여 내부에 식품과 접촉하는 부분은 열전달 특성을 줄일 수 있도록 처리하였다. 온도가 한곳에 집중되는 것을 방지하기 위하여 팬을 이용하여 공기의 흐름을 순환하도록 하였으며 아래 그림 6은 건조로 내부 사진을 나타내고 있다.

그림 6 건조로 내부 사진

유도 가열부에서 발생한 과열 증기는 관을 따라서 건조로 내부의 구멍을 통하여 투입되도록 하였다. 과열 증기는 고온건조에서 식품이 타거나 손상되는 것을 상당부분 해결할 수 있었다.

2.2 실험 결과

유도 가열부의 급속 가열을 위하여 가열 초기에는 최대 6kW의 출력을 내도록 설계하고 정상 상태에서는 약 3~4kW의 출력을 발생하도록 하여 과열 증기의 온도를 400℃ 내외로 유지하도록 하였다. 아래 그림 7은 약 4kW에서 동작하고 있는 유도 가열 전원 장치의 공진형 풀브리지 컨버터 출력 전압 파형과 1차측 공진 전류 파형, 1차측 변압기 중 하나의 전압 파형을 나타내고 있다. 따라서 1차측 변압기의 전체 전압은 나타낸 전압 파형의 약 3배가 된다. 이때의 벅 컨버터의 출력 전압은 약 150V정도이고, 스위칭 주파수는 약 21kHz이다. 아래 그림(a)의 전압과 전류 파형에서 전류가 전압 파형보다 뒤지는 유도성 부하로 동작하는 것을 알 수 있다. 따라서 스위치가 턴온되기 전에 스위치와 병렬로 구성된 다이오드를 통하여 미리 전류가 도통하고 있으므로 영전압 스위칭을 이룰 수 있다.



(a) (b)

그림 7 풀브리지 컨버터 출력 전압(파형 2), 1차측 직렬 공진 전류(파형 3), 1차측 변압기(TR1) 전압(파형 4) 20us/div.

아래 그림 8은 가열된 유도가열부에 물을 투입하였을 때 관을 통하여 증기가 발생하는 장면을 촬영한 것으로, 플라스틱 상자에 하얀 수증기가 발생하는 것을 알 수 있다. 실제로 유도 가열부가 충분히 가열되어 400℃ 정도의 과열 증기를 발생할 때는 관에 수분이 맺히지 않으며 무색의 수증기가 발생하고 바깥의 차가운 것과 부딪히면서 하얀 수증기로 변하게 된다.

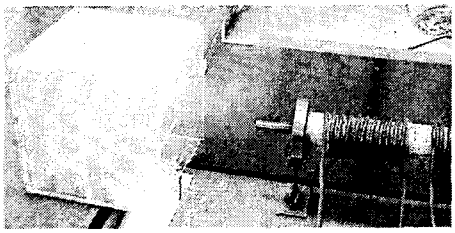
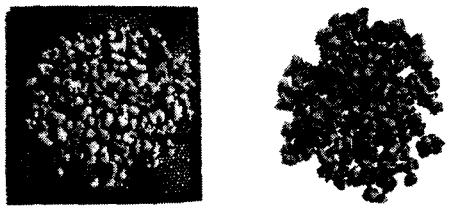
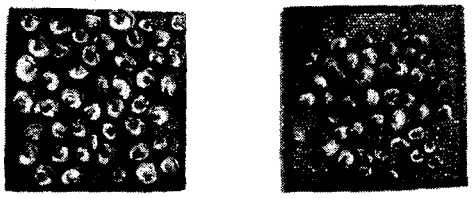


그림 8 과열 증기 발생 사진

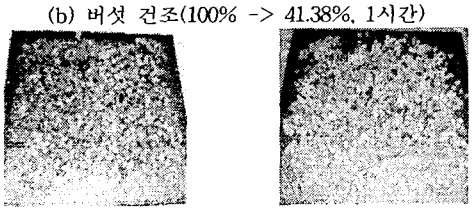
발생한 과열 증기를 건조로에 투입하여 식품 건조 테스트를 행하였다. 건조로 내부온도는 180℃로 고정하고 건조로 내부 습도를 약 20~30%정도를 유지하도록 과열 증기를 투입하였다. 그러나 식품 건조시에 건조 초기에는 습도를 유지하면 식품이 손상되는 것을 방지할 수 있으나 건조가 어느 정도 진행되면 습도를 유지하더라도 타는 현상이 발생하였다. 따라서 각각의 식품에 따라 건조 되는 비율을 달리 하여 식품이 손상되기 전에 실험을 중단하였다. 그러더라도 고온 건조에서 건조하는 것은 저온에서 건조하는 것보다 건조 속도가 훨씬 뛰어남을 알 수 있었다. 아래 그림 9는 몇 가지 식품에 대한 고온 건조 테스트 실험 결과를 나타내고 있다.



(a) 생강 건조(100% -> 28.9%, 1시간 20분)



(b) 버섯 건조(100% -> 41.38%, 1시간)



(c) 당근 건조(100% -> 68.8%, 15분)

그림 9 건조 테스트 결과

과열 증기를 이용한 고온 건조 테스트는 식품 살균 및 건조 시간이 단축되는 장점이 있지만, 식품이 손상되는 것을 완전히 없앨 수는 없었다. 따라서 건조 초기에는 고온에서 건조를 하고 어느 정도 건조된 후에는 저온 건조에서 마무리를 하는 것이 바람직할 것 같다.

3. 결 론

본 논문에서는 6kW급의 유도가열 전원장치를 제작하여 유도 가열에 의해 발생한 과열증기를 식품 건조에 적용하였다. 유도 가열 장치는 출력 제어를 위한 벅 컨버터, 유도 전류 발생을 위한 직렬 공진형 풀브리지 컨버터, 발생한 유도 전류를 열로 변환하는 유도 가열부, 유도 가열에 의해 증기를 발생하는 증기 발생 챔버로 구성하였다. 유도 가열부에 의해 발생한 과열 증기를 고온(180℃) 건조로에 투입하여 식품의 손상을 줄이면서 식품을 건조할 수 있었다. 그러나 과열 증기에 의한 고온 건조 방법은 어느 정도 이상의 건조에서는 고온 건조와 동일하게 식품에 손상을 입히므로, 각 식품에 따라 건조 방법을 달리 하여야 하는 단점이 있어 이의 보완이 꼭 필요하다.

[참 고 문 헌]

[1] D.W.TEEB and L. Hhbson, "Design of Matching Circuitry for 100kHz MOSFET Induction Heating Power Supply",IEEE,Industrial Electronics, Vol.I E-34, No.2, May 1987

[2] Bimbenet, J.J., J,D. Daudin and E. Wolff. 1985. Air drying kinetics of biological particles. In drying '85, Selection of Papers from 4th International Drying Symposium,178-185.Washington, DC: Society of Chemical Engineers

[3] 한경희, 백주원, 조기연, 백수현, "유도가열장치에 의한 고추의 가열건조 실험 및 특성", 대한전기학회 EMECS학회, 2002

[4] 유상봉, 이동윤, 현동석, "유도가열 인버터의 특성 및 시스템 동향", 전기학회지, 제50권 2호, 21-28, 2001

[5] 전우진, 장석명, "유도가열 히팅롤 기술의 개발 동향 및 응용", 전기학회지, 제50권 2호, 30-33, 2001