

마이크로파를 이용한 고 효율 해동 시스템 개발

(The Development of High Efficiency Tempering System using Microwave)

조국희* · 박승호

(Kook-Hee Cho · Seung-Ho Park)

요 약

본 연구에서 개발된 해동 시스템은 에너지 절감 및 친환경 측면에서 위해 요소 중점 관리기준(HACCP)에 대응하기 위한 필수적인 기술이다. 개발된 해동 시스템으로 냉동 돈육과 연육을 실험하였다. 실험 결과 냉동 연육보다 냉동돈육이 해동되지 않는 부위가 많이 발생하였다. 이와 같은 현상은 냉동 연육의 경우 같아 있어서 부피와 밀도가 균일하게 형성 되었지만, 돈육은 밀도가 조밀하여 온도 차이 변화가 큰 것으로 사료되었다. 또한 해동 후 측정 위치 중심부에서 온도가 대체적으로 낮은 것으로 나타났다. 이것은 냉동 부위의 중심부분이 임피던스 변화가 적어 나타난 현상으로 사료되었다. 향후에는 임피던스 변화를 위해 해동 시스템의 구조를 변경할 필요가 있는 것으로 판단되었다.

Abstract

The tempering system which is developed by this research which sees energy curtailment and from the environmental side which is essential for in hazard analysis critical control point. The tempering system with development experimented frozen pork and fish. As test result, frozen pork region was not thawed occurred plentifully. Like this the actual condition, the case of frozen fish is grind and the bulk and density uniformly was formed, the pork the density was dense and was thought with the fact that the temperature difference change is big. Also after tempering from measurement location center the temperature appeared substitutionally with the low-end thing. This central part of the froze region is thought the impedance change appears few. To hereafter respects an impedance change is thought that has the necessity which will change the structure of tempering system.

Key Words : Microwave, Tempering System, Waveguide, Power Supply

1. 서 론

마이크로파 응용기술은 선진국에서 전기에너지의 효과적 이용을 위한 기술로 각 산업분야의 열 프로세스에 적용되고 있다[1-2].

마이크로파 해동은 기존 방법과 달리 식품 내부까

* 주저자 : 한국전기연구원 산업전기연구본부 책임연구원
Tel : 055-280-1577, Fax : 055-280-1490
E-mail : khcho@keri.re.kr
접수일자 : 2009년 7월 24일
1차심사 : 2009년 7월 27일, 2차심사 : 2009년 8월 25일
심사완료 : 2009년 9월 4일

마이크로파를 이용한 고 효율 해동 시스템 개발

지 에너지를 전달하므로 해동시간이 빠르고, 표면과 중심부의 온도차가 적은 특징이 있다. 따라서 해동시 육즙의 유출 및 세균에 의한 오염이 발생하지 않는 장점이 있다[3].

냉동식품은 0~-5[°C]정도로 해동하는 것이 유리하고, 대형 냉동식품은 해동할 때 2.45[GHz]보다 915[MHz]가 침투반감심도가 깊어서 냉동 처리를 위한 친환경 해동방식으로 많이 응용되고 있다[4-5].

재래식 해동방식인 자연해동, 수침 해동, 스팀 해동 등은 해동 과정에서 오폐수 대량발생, 작업면적 및 인력비용 과다, 미생물오염 발생, 장시간 처리법으로 계획 수립이 어렵고 에너지 비용 과다지출 등 많은 문제점이 있다. 그러나 마이크로파 해동은 단 시간에 해동이 가능하며, 프로세스 및 소요면적이 적어서 생산성 면에서 효율적이며, 식품 상태가 변질되지 않는 직접적인 에너지 절약 효과도 있다.

본 연구에서 개발된 마이크로파 템퍼링 방식은 저에너지비용 및 친환경의 선진화 기술로 세계화 및 HACCP(Hazard Analysis Critical Control Point: 위해요소 중점 관리기준)에 대응하기 위한 것이며, 냉동 식품을 해동하는 기술로서 시스템을 상용화 하기 위한 성장기 단계에 있는 기술이다.

2. 마이크로파 해동시스템 개발

단속식(Batch Oven Type) 해동 시스템은 915[MHz], 30[kW]급 고출력 마그네트론을 이용해 냉동 식품에 마이크로파로 가열시켜 해동을 하기 위해 제작하였다.

915[MHz], 30[kW] 마이크로파 해동 시스템은 그림 1과 같으며, 냉동식품을 해동시키기 위해 챔버, 마이크로파를 전송하기 위한 웨이브 시스템 및 마이크로파를 발생시키기 위한 마이크로파 발생기와 제어 시스템으로 분류할 수 있다.

2.1 챔버 및 누설전력

단속식 해동 시스템은 식품을 해동할 때 위생을 고려해야 하므로 스테인레스(SUS 304)를 사용하여 제작 하였다. 시스템 전면에는 냉동품 투입구 및 내

부의 관찰이 용이하도록 투시창을 가진 구조이고, 내부에 턴 테이블을 설치하여 균일한 해동을 할 수 있도록 하였으며, 상부에는 배기팬을 설치하였다. 챔버의 크기 및 형태는 해동효율에 상당한 영향이 발생하므로 3차원 전자기장 시뮬레이션을 이용한 해동 시스템 모델링 및 해석으로 임피던스 매칭을 고려하여 최적의 형태로 제작하였다.

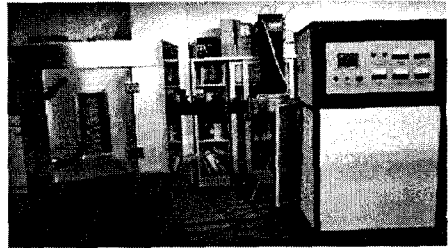


그림 1. 단속식 해동 시스템
Fig. 1. Batch oven type tempering system

2.1.1 챔버 사양

- 재질 : 스테인레스(SUS 304)
- 크기 : W1,116×D1,008×H1,610[mm]
- 마이크로파 출력부 : W250×H330[mm]
- 턴 테이블
직경 : 800[mm], 재질 : 스테인레스(SUS 304),
속도 : 5[rpm], 모터 정격 : 220[V], 180[W],
1,600[rpm]
- 할로겐 램프 : 220[V], 50[W]
- 적외선 온도 센서 : 모델(Raytek MID 10), 온도
측정 범위 : 0~85[°C]

2.1.2 마이크로파 누설전력

마이크로파에서 발생하는 누설전력은 인체, 전자기 및 통신에 영향을 주므로 최근 ANSI 및 UL규격에 5[mW/cm²] 이하로 규정하고 있다. 본 연구에서도 누설전력 측정을 위해 챔버 내부에 약 20[l] 정도의 물을 넣고 누설 측정기의 주파수를 915[MHz]로 설정하고, 측정해야 할 장소에 누설 측정기를 약 10[cm] 이격시켜 측정을 한 결과를 표 1에 나타내었다.

표 1과 같이 마이크로파 누설 측정결과 모두 규정치 이하의 값으로 측정되었지만, 투입구 및 투시창과 인접한 거리에서 작업자가 작업을 하기 때문에 향후

에는 1/4[λg] 초크 구조 및 절연 가스켓을 이용하여 누설이 거의 없도록 보완해야 할 것으로 사료된다.

표 1. 해동 시스템 누설전력 측정치
Table 1. Measurement value of leakage power for tempering system

측정 위치	규정값	측정값	비고
투입구	5[mW/cm ²] 이하	최대 3[mW/cm ²] 이하	양호
투시창	5[mW/cm ²] 이하	최대 3[mW/cm ²] 이하	양호
배기팬	5[mW/cm ²] 이하	최대 1[mW/cm ²] 이하	양호
모서리	5[mW/cm ²] 이하	최대 1[mW/cm ²] 이하	양호
턴 테이블 하단	5[mW/cm ²] 이하	최대 2[mW/cm ²] 이하	양호
웨이브 가이드	5[mW/cm ²] 이하	최대 1[mW/cm ²] 이하	양호

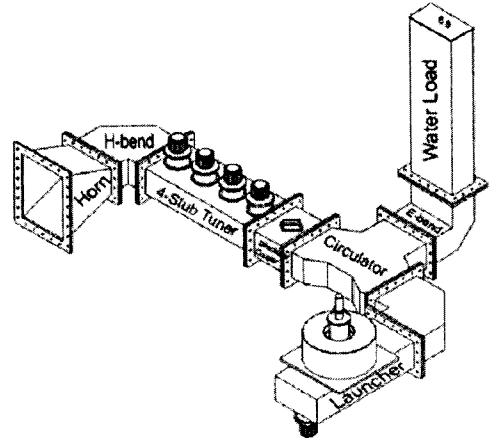


그림 2. 해동을 위한 웨이브 가이드 시스템
Fig. 2. Waveguide system for tempering

2.2 웨이브 가이드 시스템

그림 2는 마이크로파를 적용대상에 전달하기 위한 웨이브 가이드 시스템이며, 직사각형 도파관으로 구성하였다. 웨이브 가이드는 주위가 도체로 둘러싸인 중공 파이프로, 도파관의 지름보다 파장이 큰 전자파는 파이프를 통과할 수가 없다. 이러한 파장을 차단 파장이라 하고 그림 3과 같은 직사각형 도파관에서는 다음 식으로 표시된다.

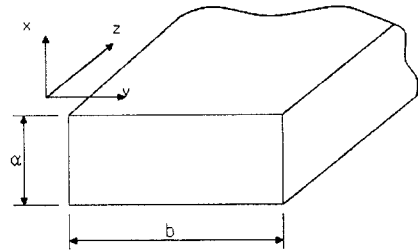
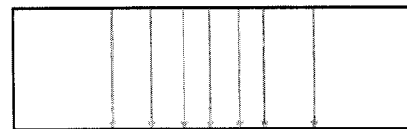


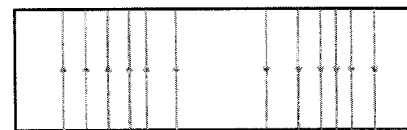
그림 3. 직사각형 도파관
Fig. 3. Rectangular waveguide

$$\lambda_c = 1 / \sqrt{\left(\frac{m}{2a}\right)^2 + \left(\frac{n}{2b}\right)^2} \quad (1)$$

여기서 m, n은 각각 x방향과 y방향에서의 차동의 수를 나타내며, 모드수라고 한다. 일반적으로 그림 3과 같은 직사각형 도파관이 많이 사용되며, 진행 방향에 자계의 성분이 존재하고(Hz≠0), 전계 성분이 없는(Ez=0) 경우를 TE 모드라고 한다. 그림 4는 TE 모드의 대표적인 형태로 도파관의 여진 결합 방식과 주파수에 의해서 결정되며, 화살표 방향은 전계의 이동도를 나타낸 것이다. 일반적으로 TE 10 모드가 실용적인 면에서 많이 이용되고 있다.



(TE 10 모드)



(TE 20 모드)

그림 4. TE 형식
Fig. 4. TE mode

2.3 마이크로파 발생기 및 제어 시스템

2.3.1 마이크로파 전력변환장치

전력변환장치를 설계하기 위해서는 마그네트론

특성 및 사양이 검토되어야 하며, 본 연구에서 개발된 마이크로파 해동 시스템은 915[MHz], 30[kW]급 마그네트론을 적용하였으며, 표 2는 시스템에 적용된 마그네트론의 정격 및 사양이다.

표 2. Magnetron 사양
Table 2. Magnetron specification

주파수	출력	양극전압	양극전류
915±25[MHz]	30[kW]	12.5[kV]	2.8[A]
필라멘트 전압	필라멘트 전류	예열시간	냉각 유량
12.6±1.2[V]	115[A]	90sec	8[l/min]

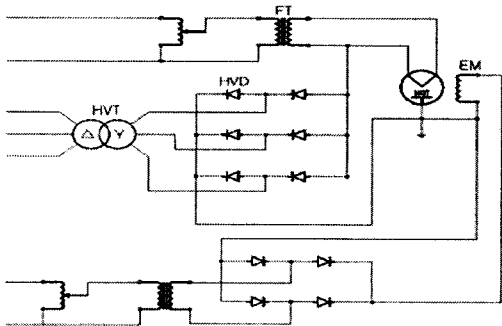


그림 5. 전력 변환장치 회로도
Fig. 5. Circuit diagram of power variable device

본 연구를 위해 제작한 30[kW]급 해동장치의 전자석에는 DC전압을 공급하여 초기 전자석에 흐르는 전류가 약 4[A] 정도 발생하도록 설계되었다. 전압 파형은 AC 전압을 전파 정류해서 전자석에 공급하였고, 전자석의 전압은 가변이 가능하도록 슬라이더스에 모터를 부착하여 에너지를 변환하는 방식으로 설계되었다. 초기 고전압 인가 전에는 필라멘트 전류가 약 115[A], 전력이 30[kW]일 때 약 100[A]로 필라멘트 전류를 조정하여야 마그네트론이 안정적으로 동작하고 또한 수명의 신뢰성을 확보할 수 있다. 본 연구에서도 30[kW] 해동 시스템의 초기 필라멘트 전압은 AC 12[V]를 인가하여 필라멘트 전류가 115[A]로 유지되도록 하였고, 예열시간 90초 후 마그네트론이 동작하게 하였다. 마그네트론이 가열에 사용하기 위해서는 평균 전력만 필요하므로 3상 전파방식을 채택하였고, 그림 5는 30[kW]급 해동 시스템의 전력변환장치의 회로도이다.

2.3.2 제어 시스템

마이크로 웨이브 해동 시스템은 마그네트론, 전자석 코일, 서쿠레이터 및 부하의 냉각을 위해 냉각수를 사용하였다. 마그네트론에는 DC 10[kV] 이상의

고전압이 발생되기 때문에, 투입구 개방 시 마이크로 웨이브에 의한 인체에의 영향과 주변 장비의 오동작을 피하기 위하여 고전압을 차단하도록 설계되었다. 또한 마그네트론의 안정적인 동작을 위해 항상 고전압 인가 전에 필라멘트 전원과 전자석 전원을 공급하도록 하였고, 부품의 파손이나 오동작으로 인해 고전압 인가 후 필라멘트 전원이거나 전자석 전원이 끊어지면, 고전압을 차단하도록 설계를 하였다. 또한 장비 정지 시 필라멘트 전압과 전자석 전압을 원점으로 복귀시켜 항상 원점 위치에서 장비가 시작할 수 있도록 하였다. 전력변환장치의 제어는 PLC (Programable Logic Controller)를 이용한 순차제어 방식으로 제작하였으며 그림 6이 PLC 프로그램 순서도이다.

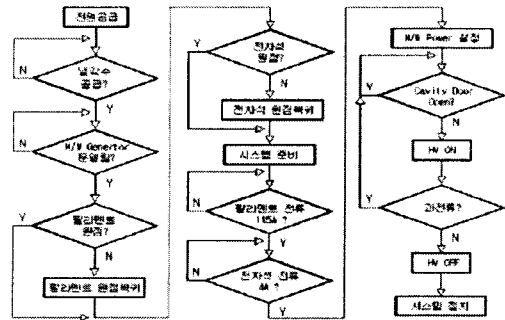


그림 6. 제어용 프로그램
Fig. 6. Program for control

3. 915[MHz], 30[kW] 마이크로파 해동 장치를 이용한 실험 결과

냉동육을 20[kg]정도 포장된 상태로 최대 -25[°C] 정도의 냉동능력을 가진 냉동고에 4~5일간 저장하여 온도가 -22[°C]이상 되도록 하였다. 이 냉동육을 포장 상태로 마이크로 웨이브를 조사하여 냉동육의 온도가 약 0~-5[°C]로 해동 되는지 실험을 하였다.

해동 실험은 각 위치의 깊이에 따라 상·중·하로 9개 요소를 선정하여 직경 3.2[mm] 구멍을 내어 초기 냉동온도를 측정하고, 해동 후 9개 요소의 온도를 측정하여 균일한 해동이 되었는지 확인하였다. 시험 조건은 마이크로 웨이브 출력이 30[kW]이며, 해동 시간은 60초 및 90초로 턴테이블을 회전시켜 포장 상태로 마이크로 웨이브를 조사하였다. 해동실험을

하기 위한 냉동육은 냉동후지, 냉동전지 및 냉동 삼겹살이며, 냉동연육은 잡어, 대구 및 갈치를 해동시험 대상으로 하였다.

그림 7은 냉동 잡어가 포장된 것으로 측정 위치를 나타낸 사진이며, 대구 및 갈치도 그림 7과 같은 위치(point)에서 온도측정을 하였다. 그림 8은 냉동 연육인 잡어, 대구 및 갈치의 온도 측정 결과 그래프이며, 마이크로파 조사시간을 60초와 90초로 구분하였고, 상부는 표면에서 10[mm], 하부는 30[mm]이다.

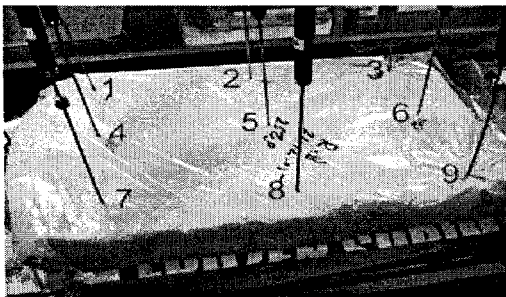


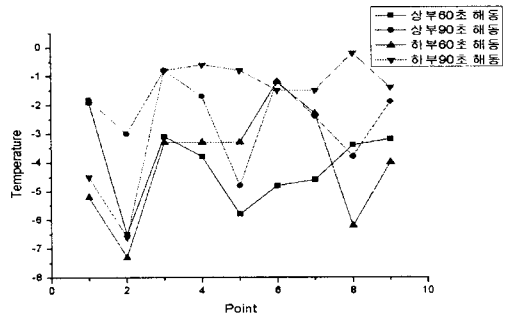
그림 7. 냉동 잡어 온도 측정 위치
Fig. 7. Temperature measurement position of deep-frozen small fish

그림 9는 냉동 돈육인 후지를 포장된 것으로 측정 위치를 나타낸 사진이며, 전지 및 삼겹살도 그림 7과 같은 9개의 위치에서 온도측정을 하였다. 그림 10은 마이크로파 조사시간을 60초로 하고 돈육의 깊이를 3가지로 선정하여 온도를 측정한 결과 그래프이다.

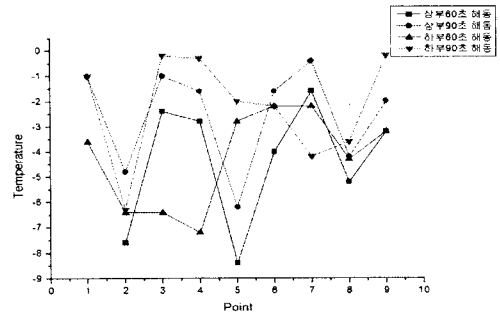
4. 결 론

915[MHz], 30[kW] 마이크로 웨이브 해동 시스템으로 기본적인 해동 실험을 하였다. 여러 가지 종류의 냉동육 실험에서 공통된 현상은 냉동 상태일 때는 온도가 천천히 상승하다가 2분 이상 가열을 하면 0[°C]를 기준으로 급격한 온도 상승이 발생하였다.

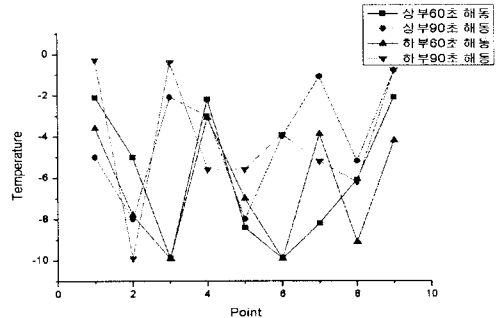
이와 같은 이유는 물이 얼음보다 마크로 웨이브의 흡수가 쉽고 빠르기 때문에 나타나는 현상으로 사료된다. 실제 물과 얼음을 넣고 마이크로 웨이브를 조사했을 때 얼음을 넣었을 때가 초기 반사파가 많이 발생하고 가열되면서 반사파가 감소하는 것을



(a) 냉동잡어



(b) 냉동대구



(c) 냉동갈치

그림 8. 냉동 연육(대구, 갈치, 잡어)의 온도 특성
Fig. 8. Temperature characteristics of deep-frozen fish



그림 9. 냉동 돈육(후지) 온도 측정 위치
Fig. 9. Temperature measurement position of deep-frozen pork

마이크로파를 이용한 고 효율 해동 시스템 개발

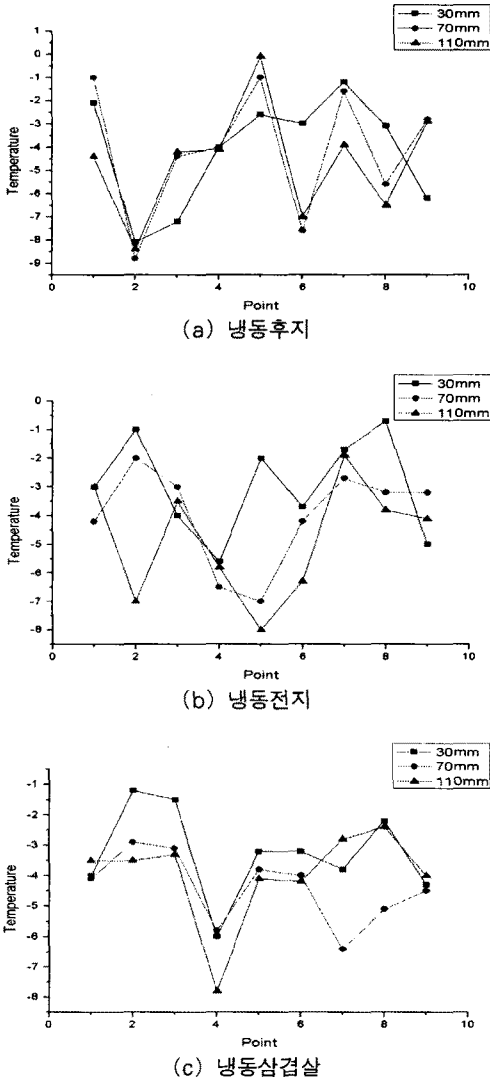


그림 10. 냉동 돈육(후지, 전지, 삼겹살)의 온도 특성
 Fig. 10. Temperature characteristics of deep-frozen pork

알 수가 있었다. 이러한 현상이 표면부터 발생하면 표면에는 온도 상승이 더욱 급격히 발생되게 되고, 표면의 물이 보호막 역할을 하여 내부에는 해동이 잘되지 않게 되어 불균일한 해동 결과를 보였다. 따

라서 각 해동 대상물 종류마다 충분한 시험을 통해 적절한 해동시간의 임계점이 필요한 것으로 사료되었다. 실험 결과 냉동돈육이 냉동 연육보다 온도가 낮았다. 이와 같은 현상은 냉동 연육의 경우 같아서 냉동시켰기 때문에 어느 정도의 부피 및 밀도가 균일하게 형성되었지만, 돈육은 부위별 상태로 밀도가 조밀하여 온도 차이가 변화가 큰 것으로 사료되었다. 또한 해동 후 온도 곡선에서 보면 측정 위치 2번, 5번, 8번 위치(point)에서 온도가 대체적으로 낮은 것으로 나타났다. 측정 위치 2번, 5번, 8번은 냉동육의 중심부분이기 때문에 임피던스 변화가 냉동육 모서리 부분 보다 적어 나타난 현상으로 사료되었다. 향후에는 해동장치 개발에 있어서 임피던스를 변화시킬 구조가 필요할 것으로 판단되었다.

References

- (1) 조국희, "915(MHz) 30(kW) 마그네트론 시험을 위한 측정 장비", 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2006. 07., pp. 1570-1571.
- (2) 조국희, "산업용 마그네트론 및 응용기술 개발", 에너지관리 vol.361 2006. 06., pp 114-121.
- (3) 이종경, "915(MHz) Microwave를 이용한 동결 돈육의 급속해동", Korea J. Food SCI, Vol. 31, No.1, pp.54-61.
- (4) 김영민, "공업용 마이크로파 응용기술", 기전연구사, 2001.
- (5) OM p. Gandhi, "Microwave Engineering and Applications", 2005.

◇ 저자소개 ◇

조국희 (趙國熙)

1960년 1월 13일생. 1987년 숭실대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한국전기연구원 산업전기연구본부 전력기기연구센터 책임연구원.

박승호 (朴承浩)

1957년 3월 4일생. 1981년 청주대 전기공학과 졸업. 1987년 삼성전자 주임연구원. 1993년 LG전자 선임연구원. 현재 한국고주파 응용기기 대표이사.