

Ohmic Heating을 이용한 동결육의 해동

윤철구 · 이도현 · 박지용

연세대학교 생명공학과 및 생물산업소재 연구센터

Ohmic Thawing of a Frozen Meat Chunk

Cheol-Goo Yun, Do Hyun Lee and Jiyong Park

Department of Biotechnology and Bioproducts Research Center, Yonsei University

Abstract

Ohmic thawing in combination with conventional water immersion thawing was investigated. Frozen meat chunks (10×10×10 cm) were immersed in a water reservoir (12×12×12 cm) which temperature was maintained at 10°C or 20°C, and were positioned between two stainless-steel electrodes (10×10 cm) having no direct contact with the samples. Alternating current (60 V~210 V) at various frequency (60 Hz~60 kHz) was used to generate internal heat by the electrical resistance. When the frequency was fixed to 60 Hz, thawing time was reduced as the voltage increased. Frequency changes gave no significant effect on thawing time. Ohmically-thawed samples treated with lower voltage showed lower drip loss and higher water holding capacity.

Key words: ohmic heating, water immersion thawing, frozen meat chunk

서 론

식생활의 변화에 따른 육류 소비의 증가와 수입 자
유화 조치에 의한 축산물의 수입 규제 완화로 쇠고기,
돼지고기 등의 수입량이 매년 증가 추세에 있다. 수입
육의 대다수는 동결육이며, 국내 생산육도 운반과 보
관의 편리성 때문에 동결육의 비율이 높아지고 있다.
식품의 동결에 대해서는 많은 연구가 수행되었고 실
제로 상당한 발전이 있었지만, 해동에 대한 연구는 그
중요성이 등한시 된 경향이 있었다. 그러나 적절한 해
동 여부는 식품의 품질에 커다란 영향을 미치며, drip
loss, 해동 시간 등 경제적인 면에도 직접적인 관계가
있으므로 해동도 동결과 마찬가지로 중요한 의미를
지닌다⁽¹⁾. 현재 주로 사용하고 있는 해동 방법에는 공
기 해동법과 물 해동법이 있다. 이들 방법은 동결육을
냉기나 냉수 중에 방치하여 외부로부터 내부로의 열
전도에 의해 서서히 해동시키는 것으로, 열전도율이
낮기 때문에 해동 시간이 길고, 해동중 변색을 야기시
키며, 잡균에 의한 오염 가능성이 커지고, 해동에 많은
공간이 필요하다는 단점이 있다⁽²⁾.

동결육을 보다 짧은 시간에 해동하면 시간과 노력

이 절감되고, 해동중 미생물의 성장, 변색, 산화 등에
의해 생기는 품질 저하가 방지되며, 시장 수요에 맞추
어 적시에 적절한 양을 공급할 수 있는 장점을 가지게
된다⁽³⁾. 이러한 급속 해동을 위해 전기에너지를 이용한
해동, 감압·가압하에서의 해동⁽⁴⁾ 등이 연구되고 있고,
이중 전기에너지를 이용한 해동법의 연구가 활발히
진행되고 있다. 전기에너지를 이용한 해동법은 라디
오파를 이용한 해동법, 마이크로파를 이용한 해동법,
그리고 ohmic heating을 이용한 해동법으로 나누어 볼
수 있다. 라디오파 가열과 마이크로파 가열에서 전류
는 주파수가 커질수록 도체 내에서나 비도체와 공간
에서도 흐르기 쉬워지는 성질이 있는데 이때 전기에
너지가 열에너지로 변하는 것을 이용한 가열이다. 일
반적으로 라디오파라고 부르는 것은 주파수 10 kHz에
서 300 MHz에 이르는 교류이고, 라디오파보다 주파수
가 커지면 마이크로파 또는 초고주파, 극초단파 등으
로 불린다⁽⁵⁾. 이러한 전자파에 의한 가열은 급속해동이
가능하고, 열효율이 좋으며, 진공중이나 비금속 포장
내에 있는 물체를 가열할 수 있고, 미생물에 의한 변패
가능성이 적으며, 컨베이어 시스템의 적용이 가능하
다는 장점⁽⁶⁾을 가지고 있으나, 전자파가 식품의 표면에
조사되어 표면에서부터 유전체손실에 의해 에너지가
흡수되면서 내부로 진행되는 것이기 때문에 내부로 갈

Corresponding author: Jiyong Park, Department of Biotechno-
logy, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

수록 전계가 약해진다는 단점을 가지고 있다⁹⁾.

Ohmic heating은 식품 자체가 전류가 흐르는 회로의 한 부분이 될 때, 식품이 갖는 고유의 저항값으로 인해 전기 저항(Joule)열이 발생하는 것을 이용한 것이다. 이는 가정용 전열기, 제철공업, 유리 용융 등에 이용되어 왔으며, 80년대 말부터 식품공업에서 상업적 시스템에 고안되어 활용되기 시작하였다¹⁰⁾. Ohmic heating에서 driving force는 전압으로, 온도차에 관계없이 균일하게 식품내부에 열을 발생시킨다¹¹⁾. Ohmic heating을 이용하면 전류에 의해서 식품 내에 열이 발생하기 때문에 외부 온도와 관계없이 급속한 가열이 가능하며, 전원장치의 전압, 주파수, 파형 등의 전기적 요소를 변화시켜 미리 예정된 가열조건을 형성할 수 있고, 마이크로파 가열에서 가장 문제시되는 불균일 가열의 원인인 투과율이 사실상 제한이 없는 등의 장점을 갖는다¹²⁾. 그러나 ohmic heating은 식품과 전극의 전기전도도 차이에 의해 전극과 식품이 접촉하는 부분이 과열되는 단점이 있다. 이를 방지하기 위해 동결육을 수용액 내에 두고 ohmic heating하여 전극과 식품과의 직접적인 접촉을 피하는 방법이 연구되고 있다^{13,14)}.

본 연구에서는 기존의 수해동이 해동에 오랜 시간이 필요하다는 점과 이로 인해 야기되는 drip loss, 해동품의 품질저하 등의 단점을 개선하기 위해 실험실 규모의 ohmic heating과 수해동을 병용한 장치를 고안하여 전압, 주파수, 용기 내 물의 온도가 동결육의 해동시간과 해동후의 품질에 미치는 영향을 고찰하였다.

재료 및 방법

실험 재료

실험에 사용된 재료는 돼지고기 뒷다리 정육(pork, fresh ham)으로 (주)미원농장에서 구입하였다. 도살 24시간 후에 뒷다리 정육을 분리하여 PVC 필름으로 포장하였고, 4°C에서 48시간 예냉한 후 -25°C에서 동결시키면서 심부온도가 -20°C에 도달하였을 때 동결을 완료하였다. Rolling saw (Universal Prometal, Krups, Germany)를 사용하여 정육면체(10×10×10 cm)로 성형한 후 -20°C 냉동고에서 보관하였다.

실험 장치

실험에 사용한 ohmic 수해동 장치는 자체 제작하였으며 그 개략도는 Fig. 1에 나타내었다. 윗면이 개방된 acryl box (12×12×12 cm)에 stainless-steel 전극(10×10 cm)을 양쪽 벽면에 설치하여 수해동 또는 ohmic 수해동(ohmic heating과 수해동을 병용한 해동)을 위한 용기

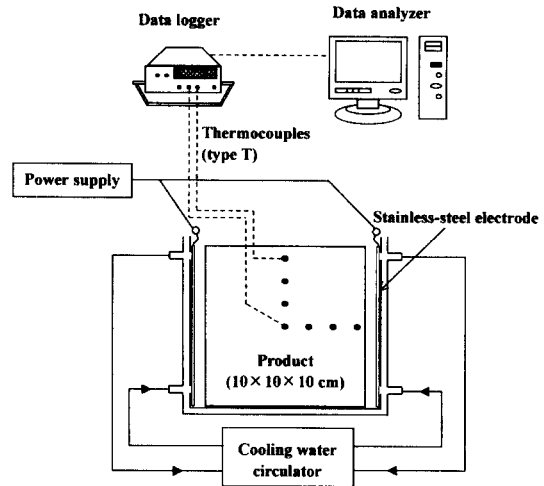


Fig. 1. Schematic diagram of experimental set-up.

로 사용하였다. Ohmic heating을 위한 전원 공급 장치로 주파수 발생기(PM 5191, Philips, France)와 증폭기(4510, NF Electronics, Japan)를 사용하였다. 온도 측정에는 전류의 영향을 받지 않도록 Teflon으로 코팅된 T-type의 온도계(Type IT-18, Physitemp Instruments Inc., U.S.A.)를 사용하였고, 전류는 ammeter (80i-110S, Fluke, U.S.A.)를 이용하여 측정하였다. 전압 측정과 측정된 자료의 저장은 PC가 연결된 data logger (2620A, Fluke, U.S.A.)를 이용하였다. Ohmic 수해동 용기 내 물의 온도를 일정하게 하기 위해 cooling water circulator (MC-11, Jeio Tech, Korea)로 일정 온도의 물을 순환시켰으며, roller pump (Eyela RP-1000, Rikakikai, Japan)로 용기에 공급되는 물의 유속을 조정하였다.

해동 방법

수해동은 전압을 걸지 않은 채 용기 내 물의 온도를 20 °C 또는 10°C로 고정한 후 육괴의 심부 온도가 -1°C에 도달하였을 때 해동을 완료하였다. Ohmic 수해동은 60~60 kHz까지의 주파수에서 극간 전압을 60~210 V까지 변화시켜서 적용하여 육괴의 심부온도가 -1°C에 도달했을 때 해동을 완료하였다. 이 경우도 용기 내 물의 온도를 20°C 또는 10°C로 달리하여 실험하였다.

Drip loss 측정

해동중 발생하는 육즙의 손실정도를 알아보기 위해 동결육의 해동 전·후의 무게를 비교하여 나타내었다¹⁵⁾.

보수력 측정

해동이 끝난 육을 마쇄하여 잘 혼합한 다음 25 g의

시료를 취하여 원심분리관 상부의 fritted glass disk 위에 채우고, 고무마개를 한 다음 70°C의 열탕조에서 30분간 가열하고, 25°C에서 10분간 식힌 후, 상온에서 170×g로 10분간 원심분리하여 원심분리관의 하부에 분리된 육즙의 양을 읽었다. 이때 상부에 뜨는 지방층은 무시하였으며, 총 수분량을 측정하기 위하여 동일한 재료를 5~6 g 취하여 105°C 오븐에서 16시간 건조하였다⁽¹⁶⁾.

결과 및 고찰

전압이 해동시간에 미치는 효과

-20°C로 동결된 정육면체(10×10×10 cm) 형태의 돈육을 20°C의 물이 흐르는 용기에 위치하고 상용 주파수인 60 Hz에서 전압을 달리하여 ohmic heating 하였다. 중심부의 온도가 -1°C에 이르렀을 때 해동을 완료하였다. 전류를 흘려주지 않고 20°C로 물의 온도를 유지한 일반적인 수해동은 205.1 min이 걸린 반면, 전압이 60, 110, 160, 210 V 증가함에 따라, 해동에 걸리는 시간이 각각 154.2, 101.4, 79.3, 54.7 min으로 단축되었다(Fig. 2). 이와 같이 전압의 증가와 해동시간 사이에 반비례 관계가 성립하는데 이는 ohmic heating에서는 전압이 driving force로 작용하므로 전기장의 세기가 증가할수록 가열속도가 빨라진다는 Kwak⁽¹⁷⁾의 연구와 일치하였다. 160 V 이상의 전압을 걸어주었을 때 해동 완료시 표면 온도가 40°C 이상으로 과열되어 가열감량, 단백질 조성의 변화 등 품질 저하가 예상되

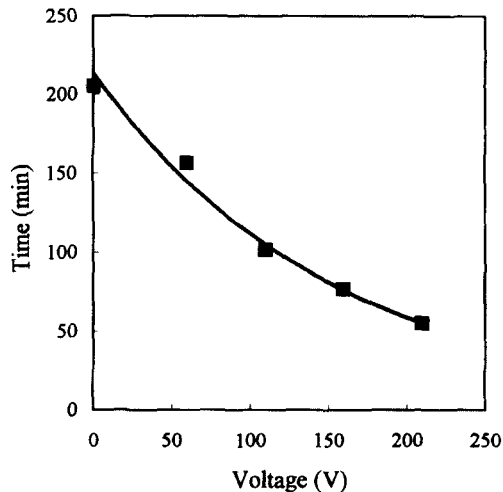


Fig. 2. Changes in thawing time with voltage of alternating current. Frequency of alternating current was fixed to 60 Hz and immersion water temperature at 20°C.

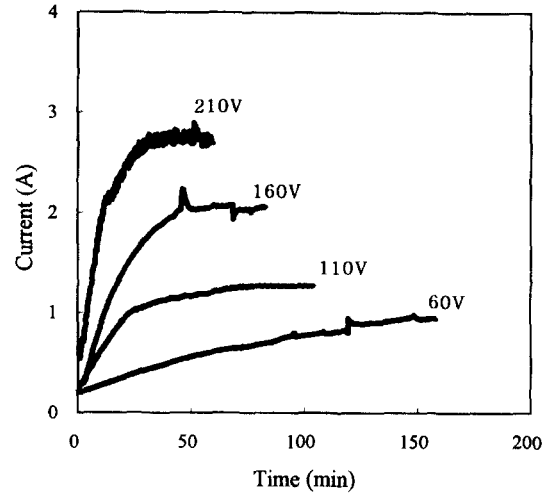


Fig. 3. Comparison of time-current curves with different voltage when frequency of alternating current was fixed to 60 Hz.

었다.

Ohmic heating시 시간에 따른 전류량의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 시간이 지남에 따라 전류의 양이 급격히 증가하다가 점차 일정한 양을 유지하는 것을 볼 수 있는데, 이는 얼음이 큰 저항체로서 작용하기 때문에 동결육중 이미 녹아서 저항이 낮아진 부분으로 전류가 선택적으로 흘러서 열을 발생시키기 때문이다. 이때 발생된 열은 얼음 경계면에 열을 공급하게 되어 연속적으로 새로운 열 공급원이 생기게 되고 얼음 경계면은 점차 중심부로 후퇴하게 된다. 이에 따라 전체적으로 저항값은 작아져서 전류량이 많아지게 된다. 이는 ohmic heating에 의한 해동시간의 단축효과를 설명할 수 있으며, 높은 전압에서 보다 높은 전류량을 나타내어 전압이 높을수록 해동시간이 단축되었다.

주파수가 해동시간에 미치는 효과

주파수를 변화시키면서 동결육을 ohmic heating했을 때 해동시간의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 식품의 가열속도의 주파수 의존성은 식품 고유의 특성이라는 Cho 등⁽¹⁸⁾의 보고와는 달리 주파수가 증가할수록 해동시간이 단축되는 경향이 있었는데, 이는 동결육이 얼음과 유사한 절연체로서의 특성을 나타내고 있기 때문으로 생각되었다. 한편 실험장치상의 제약으로 30 kHz (210 V의 경우는 6 kHz) 이상의 주파수는 검토하지 못하였으며 이 범위에서의 해동시간 단축 효과는 주목할 만 하지 않았다.

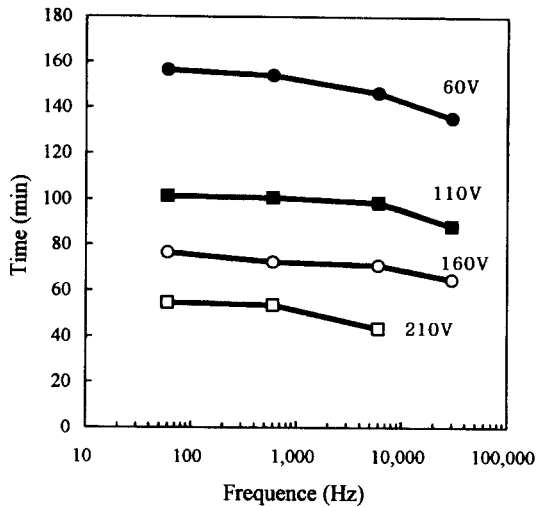


Fig. 4. Changes in ohmic thawing time with different frequency of alternating current.

용기 내 물의 온도가 해동에 미치는 효과

용기 내 물의 온도를 각각 20°C와 10°C로 고정한 후 동결육을 ohmic heating 하였을 때의 해동시간과 표면 온도의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 외부온도가 해동 속도에 미치는 영향이 거의 없다는 Naveh 등⁽¹⁵⁾의 보고와는 달리 물의 온도가 낮을 때 해동시간은 길어졌으며 표면온도는 낮아졌는데, 물의 온도가 낮은 경우 물로부터의 열전도 효과가 작아서 해동속도가 늦어지

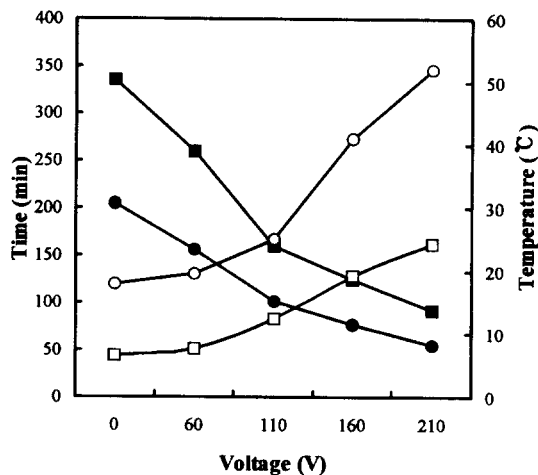


Fig. 5. Changes in ohmic thawing time and surface temperature of the samples when immersion water temperature was controlled at 10°C and 20°C. The frequency of alternating current was fixed to 60 Hz. ●—●: ohmic thawing time at 20°C, ■—■: ohmic thawing time at 10°C, ○—○: surface temperature of the sample at 20°C, □—□: surface temperature of the sample at 10°C.

지만 해동이 진행되면서 ohmic heating에 의해 과열되는 부분을 냉각시켜 주는 작용을 하기 때문에 표면 온도는 낮아지는 것이라 생각되었다.

해동시 drip loss와 보수력의 비교

해동시 발생하는 drip loss와 보수력을 Fig. 6에 나타내었다. Ohmic heating을 적용한 경우 낮은 전압에서는 drip loss가 적었고 보수력도 높았으며, 전압이 높아질

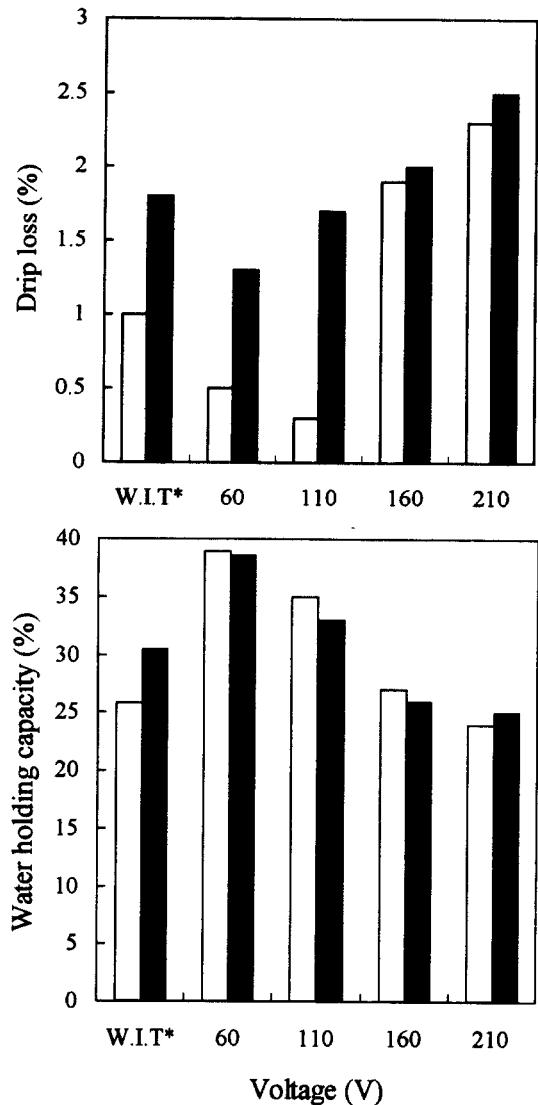


Fig. 6. Comparison of drip loss and water holding capacity with different voltage when frequency of alternating current was fixed to 60 Hz. □: when immersion water temperature was fixed at 10°C, ▨: when immersion water temperature was fixed at 20°C. *W.I.T: water immersion thawing.

수록 drip loss가 커졌고 보수력은 낮아졌다. 또한, 전반적으로 용기 내 물의 온도가 낮을 때 drip loss가 적었고 보수력도 높았다. 낮은 전압에서는 ohmic heating에 의해 해동시간이 단축되어 육즙이 외부로 유출되는 시간이 줄어들었으나, 전압이 높아질수록 표면 온도 상승에 의한 가열감량이 심해지면서 drip loss가 커졌다고 생각되었다.

얼음 경계면의 변화

해동중 재료 각 부분의 온도를 측정하여 -1°C 부분(얼음 경계면)이 변하는 과정을 Fig. 7에 나타내었다. Naveh 등⁽¹³⁾이 보고한 것과 같이 전극과 수직인 부분이 평행한 부분보다 빨리 해동되는 것을 볼 수 있는데 이는 전류가 보다 흐르기 쉬운 곳을 찾아서 흐르는 성질에 기인한다. 전류가 전기전도도가 낮은 동결육 자체에 직접 흐르지 못하고 일부 녹아서 전기전도도가 높아진 부분으로 집중되기 때문이다. 전극의 개수와 위치를 조절하여 전류를 흘려주는 방향에 변화를 준다면 더 좋은 해동효과를 기대할 수 있으리라 생각되었다.

대기중 ohmic thawing 효과

대기중(20°C)에서 ohmic heating 효과를 알아보기 위해 양쪽 전극판에 동결육이 직접 접촉되도록 하고, 60 Hz, 60 V의 전압을 걸어주었을 때의 해동 곡선을 Fig. 8에 나타내었다. 전류를 흘려주지 않고 대기 중에 방치한 경우(공기 해동) 보다 빨리 해동되었으며, 해동 초기에는 수해동을 한 것보다도 중심과 표면과의 온도차이가 작았으나, 중심 온도가 약 -3°C에 이르렀을 때부터 표면 온도가 급격히 상승하였다. 수해동에 ohmic heating을 적용한 경우 물을 통해 전류가 흐르기 쉬우므로 물과 접한 부분부터 가열되기 때문에 표면 온도가 쉽게 상승하지만, 대기 중에서 ohmic

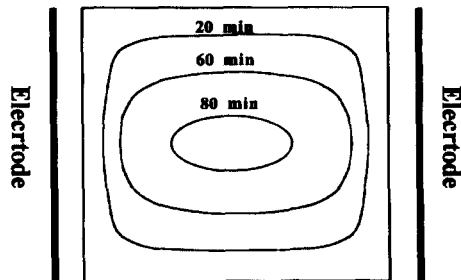


Fig. 7. Schematic drawing of ice front retreating pattern during ohmic thawing of frozen pork ham muscle (10×10 cm).

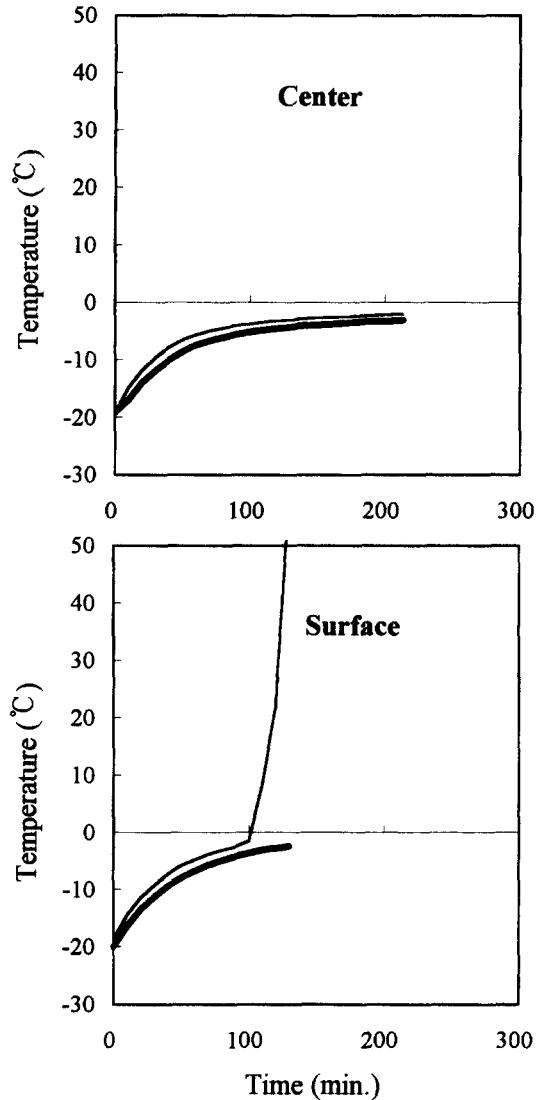


Fig. 8. Time-temperature curves during ohmic thawing (60 V, 60 Hz) without immersion water and conventional air thawing at 20°C. —: ohmic thawing, - - : conventional air thawing.

heating을 하는 경우에는 동결육 전체에 골고루 전류가 흐르다가 일단 표면의 일부가 녹아서 저항값이 작아지면 전류가 편중되어 표면 과열 현상을 보이기 때문이라고 생각되었다. 수해동과는 달리 물과 접촉하지 않기 때문에 물과의 접촉에 의한 품질 저하가 우려되는 재료의 반해동(-5~-3°C에서 해동을 완료)을 목적으로 하는 경우에는 적절한 방법이라 생각되나 완전 해동을 위해서는 표면을 강제로 냉각시키는 등의 개선책이 있어야 한다고 판단되었다.

요 약

Ohmic heating은 식품에 교류 전류를 흘려줄 때 식품 내부에 전기 저항열이 발생되는 것을 이용한 것으로, 이를 기존의 수해동법에 적용하여 해동시간의 단축과 그에 따른 품질 향상 효과를 연구하였다. 자체 제작한 ohmic 수해동 장치에 동결육(10×10×10 cm)을 넣고 해동 실험하였다. 윗면이 개방된 acryl box (12×12×12 cm)를 용기로 사용하였으며, stainless-steel 전극(10×10 cm)을 양쪽 벽면에 설치하였다. 용기 내 물의 온도를 20°C 또는 10°C로 고정하였다. 해동시간은 동일한 주파수(60 Hz)에서 전압을 높여줄수록(60~210 V) 단축되었으며, 수해동만을 한 경우에 비해 최고 1/4 이상 단축되었다. 동일한 전압에서 주파수가 높아질수록 (60~60 kHz) 해동시간이 단축되었으나 그 효과는 크지 않았다. 수해동만을 한 경우나 높은 전압을 적용한 경우보다 낮은 전압을 적용한 경우 drip loss가 적었고 보수력이 우수하였다.

감사의 글

본 연구는 1995년 농림수산부에서 시행한 농림수산 기술개발사업에 의해 수행된 결과중의 일부이며 연구비 지원에 감사드립니다.

문 헌

1. 공재열 : 식품 냉동공학의 기초. 형설출판사, p.312-324 (1983)
2. Heinz, G.: Auftauen von gefrorenem Fleisch. *Kälte und Klima-Rundschau*, **10**(1), 9-16 (1972)
3. Kim, Y.H., Yang, S.Y. and Lee, M.H.: Quality changes of thawed porcine meat on thawing methods (in Korean). *Korean J. Food Sci. Technol.*, **22**(2), 123-128 (1990)
4. Inoue, K. and Shima, Y.: Preparation of frozen and defrosted foods. *U.S. Patent* 4,054,672 (1977)
5. Minett, P.J.: Radio frequency and microwaves. *Food Processing Ind.*, **45**, 36-41 (1976)
6. Younathan, M.T., Farr, A.T. and Laird, D.L.: Microwave energy as a rapid-thaw method for frozen poultry. *Poultry Sci.*, **63**, 265-268 (1984)
7. Anon.: Sun Valley finds radio frequency improves quality and saves money and time. *Food Trade Rev.*, 90-92 (1992)
8. Olson, V.M., Swaminathan, B., Prett, D.E. and Stadelman, W.J.: Effect of five cycle rapid freeze-thaw treatment in conjugation with various chemicals for the reduction of *Salmonella typhimurium*. *Poultry Sci.*, **60**, 1822-1826 (1981)
9. Bialod, D., Jolion, M. and LeGoff, R.: Microwave thawing of food products using associated surface cooling. *J. Microwave Power*, **13**(3), 269-274 (1987)
10. Alwis, A.A. and Fryer, P.J.: The use of direct resistance heating in the food industry. *J. Food Eng.*, **11**, 3-27 (1990)
11. Jason, A.C.: Rapid thawing of foodstuffs. *IFST-Processing*, **7**(3), 146-158 (1973)
12. Bengtsson, N.E.: Dielectric heating in food processing measurements of dielectric properties of foods and experiments with thawing and pasteurization. *Dissertation Abstracts International*, **35**(3), 1287-1294 (1971)
13. Naveh, D., Kopelman, I.J. and Mizrahi, S.: Electroconductive thawing by liquid contact. *J. Food Technol.*, **18**, 171-176 (1983)
14. Balaban, M.O., Henderson, T., Teixeira, A. and Otwell, W.S.: Ohmic thawing of shrimp blocks. *Developments in Food Engineering*, 307-310 (1994)
15. Lambert, A.D., Smith, J.P. and Dodds, K.L.: Physical chemical and sensory changes in irradiated fresh pork packaged in modified atmosphere. *J. Food Sci.*, **57**(6), 1294-1299 (1992)
16. 이유방, 성삼경 : 식육과 육제품의 분석실험. 선진문화사, p.129-130 (1983)
17. Kwak, N.S.: A Study on the ohmic heating effect on the coagulation of soy protein. *M.S. Thesis*, Yonsei University, Seoul, Korea (1995)
18. Cho, W.I.: A Study on pasteurization of paste foods by ohmic heating. *M.S. Thesis*, Yonsei University, Seoul, Korea (1993)

(1998년 3월 17일 접수)