

## 식품의 조성과 미세구조에 의한 옴(Ohm)가열특성의 변화

최성진 · 윤성원 · 이철호

고려대학교 생명공학원 식품가공핵심기술연구센터

### Ohmic Heating Characteristics of Foods Having Different Chemical Composition and Microstructure

Sung-Jin Choi, Sung-Won Yoon and Cherl-Ho Lee

Center for Advanced Food Science and Technology, Korea University

#### Abstract

The ohmic heating properties of foods having different chemical compositions and microstructures were examined by using low frequency alternating current (50 Hz-50 kHz, sine wave). The selected samples were radish root as an intact plant cell tissue, acorn starch gel as an ordered gel structure, sausage as an protein/fat emulsion system, and hot pepper-soybean paste as a non-structured free moving system with high concentration of salt. The heating rate of samples increased as the electric field strength increased but with different rates. A significant rate of heating was noticed as low electric field strength as 15 V/cm with hot pepper-soybean paste and sausage, while acorn starch gel and radish root required 25 V/cm and 35 V/cm, respectively, for commercially meaningful heating rate. The heating rate of phosphate buffer solution by ohmic heating increased linearly with its ionic strength, indicating the direct involvement of electric conductivity to the heating. The frequency of alternating current influenced in different manner to different structures of food. The heating rate of radish root decreased sharply as the frequencies increased from 50 Hz to 500 Hz, while those of hot pepper-soybean paste and sausage increased linearly with the increasing frequency in the ranges of 50 Hz-50 kHz. Heating of acorn starch gel, which has relatively ordered network structure, was not influenced much with the changing frequency. In case of radish root, low frequency current was required for the heating, and more effective heating with the current direction perpendicular to the vascular system was observed. It was the indication of the electroporation effect due to the transmembrane potential developed on the cell membrane during ohmic heating.

Key words: ohmic heating, food composition, radish, sausage, acorn starch gel, hot bean paste

#### 서 론

옴가열(ohmic heating)은 저주파 통전가열로서 액상과 고체상의 혼합 식품의 가공 공정에서 제품의 품질을 높일 수 있는 혁신적인 가열방법으로 최근 활발히 연구가 진행되고 있다(김도현과 변유량, 1994; Sastry and Palaniappan, 1994). 영국의 APV Baker사가 제작한 5 kW pilot scale 옴가열 시스템으로 저산성식품과 고산성식품을 가열 살균할 경우 레토르트 가열등 전통적인 방법으로 가공했을 때보다 조직감, 색상, 향미,

영양가 등이 훨씬 더 잘 유지됨을 보고했다(Zoltai and Swearingen, 1996). 일본에서는 어묵등 고기풀의 근원 섬유 단백질 조직화에 옴가열을 이용하고 있으며, 이렇게 제조된 젤은 강도가 매우 강한 것으로 보고되고 있다(Makoto, 1989). 해동에도 옴가열이 이용되는데, 냉동육, 생선, 냉동 밥의 해동을 위한 옴가열에 관한 연구가 많이 이루어졌으나(Sanders, 1967; Segars and Kapisilis, 1976), 전극 재질의 안전성 문제로 상업화되지 못했다. 이러한 단점을 보완하여 Nareh *et al.*(3)은 냉각수 내에서 옴가열을 실시할 때 상온 해동보다 해동 속도가 3배나 빠르다고 보고한바 있다. 조원일 등(1994a)은 된장및 고추장의 옴가열 특성에 관한 연구에서 시료의 수분함량이 습량기준으로 30% 이하일 때에는 전류가 거의 흐르지 않아 옴가열이 적용되지 않

Corresponding author: Cherl-Ho Lee, Professor, Center for Advanced Food Science and Technology, Graduate School of Biotechnology, Korea University, 5 ga Anam-Dong, Songbuk-ku, Seoul, 136-701 Korea

음을 밝혔으며 비가열속도는 전압이 커짐에 따라 거의 비례적으로 증가하였고 1 kHz 이상에서부터 주파수의 증가에 따라 비가열속도는 급격히 증가하였다고 보고하였다. 조원일 등(1994b)은 옴가열에 관한 기초연구에서 60 V 이하의 전압과 5-10 KHz 저주파 교류 가열이 매우 효과적이라는 사실을 확인하였으며 식품의 구조, 성분 형태, 배열 등에 따라 옴가열특성이 변화됨을 시사하였다.

본 연구는 옴가열의 가열방식을 이해하기 위한 기초연구로서 화학조성과 미세구조가 다른 대표적인 식품들에 대한 가열속도를 비교하였다.

## 재료 및 방법

### 실험재료

식물체의 세포조직을 그대로 유지하는 시료로 무절편을 선택하였으며, 전분 쪼렐의 구조를 가진 도토리묵, 유태식품의 대표적인 예로 소시지를 사용하였다. 페이스트상 식품으로 고추장을 선택하였는데, 이것은 고농도의 전해질을 함유하는 시료이기도 하다. 시료의 이온강도에 따른 가열속도의 변화를 보기 위하여 인산완충용액(pH 7.0)의 농도를 달리하여 비교 실험하였다. Table 1은 시료로 사용한 식품의 일반적인 성분조성이다.

### Ohmic heating system의 구성

본 실험에 사용된 통전 가열 시스템은 50 Hz-1 MHz 주파수의 정현파 및 구형파 교류를 발생시키는 signal generator (Kenwood, model AG-204)와 이렇게 발생된 교류 전류를 식품에 적용할 수 있을 정도의 ~100 volt의 전압으로 증폭시켜주는 power amplifier (NF Electronics, Model 4025), 측정 및 시스템의 조절을 위한 data acquisition system과 computer, 그리고 식품 시료 양끝에 전극을 접촉시키고 thermocouple을 장착할 수 있는 heating unit로 구성되어 있다. 실험에 사용한 ohmic heating system의 개략적인 구조도는 Fig. 1과 같다. 온도의 측정은 절연된 T type의 온도계를 이용하였으며, 온도의 측정치는 datalogger (Fluke Data Ac-

quisition Unit, Model 2620)를 이용하여 IBM PC로 전송하여 data를 분석하였다. 또한 heating unit에 적용되는 교류의 파형 측정 및 관찰은 digital oscilloscope (Fluke combiscope, Monei PM 3380A)를 이용하였다.

### 전극 형태 및 가열방법

본 실험에서는 비교적 안정성이 인정된 티타늄 전극을 사용하였으며, 인산 완충 용액이나 고추장과 같은 액상 및 페이스트상 식품을 가열하기 위한 전극구조는 상부가 개방된 직사각형의 아크릴 상자(100×20×50 mm)에 전극간격이 20 mm가 되도록 전극을 장착하여 실험을 행하였다. 전극간격이 20 mm인 직사각형의 가열상자에 샘플을 50 g씩을 취하여 옴가열을 행하였으며, 주파수를 고정시키고 전기장의 세기를 바꾸어 주면서, 또한 전기장의 세기를 고정시킨 후 주파수를 바꾸어 주면서 교류전류를 통했을 때의 샘플 온도의 변화를 측정하여 가열특성을 알아보았다.

소시지나 무와 도토리묵과 같은 고체 식품을 가열하기 위한 전극구조는 의자형으로 제작한 전극을 사용하여 전극사이에 샘플을 놓은 후 완전한 접촉을 위하여 집게로 단단히 고정시킨 후 실험을 행하였다. 시판하는 국산 소시지는 지름이 15 mm, 높이가 20 mm가 되도록 원통형으로, 도토리묵은 35×35×20 mm의 직사각형으로, 무는 유관 속의 방향과 직각 또는 평행으로 30×30×20 mm가 되도록 직사각형으로 샘플을 준비한 후 비닐 백으로 포장하여 4°C에서 저장하면서 실험에 이용하였다.

## 결과 및 고찰

### 전압 및 전기전도도의 영향

Figs. 2-5는 50 Hz, sine wave의 교류전류를 사용하여 전기장의 세기에 따른 무, 도토리묵, 소시지 및 고추장의 옴가열 속도를 측정한 결과이다. 식물 세포 조직을 그대로 유지하고 있는 무의 옴가열은 다른 시료

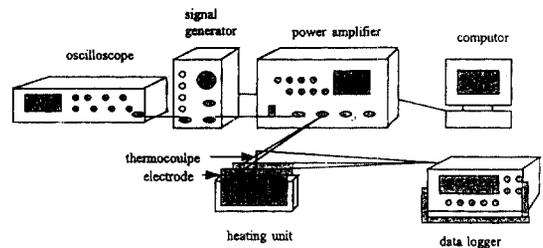


Fig. 1. Schematic diagram of ohmic heating system.

Table 1. Proximate chemical composition of the samples used for ohmic heating experiment (%)

	Moisture	Protein	Fat	Carbohydrate	Ash
Radish root	94.6	0.83	0.1	3.8	0.7
Acorn starch gel	90.1	0.16	0.1	9.6	0.1
Sausage	54	16.1	8.9	18.8	2.2
Hot beanpaste	43.5	5.9	2.0	39.3	9.3

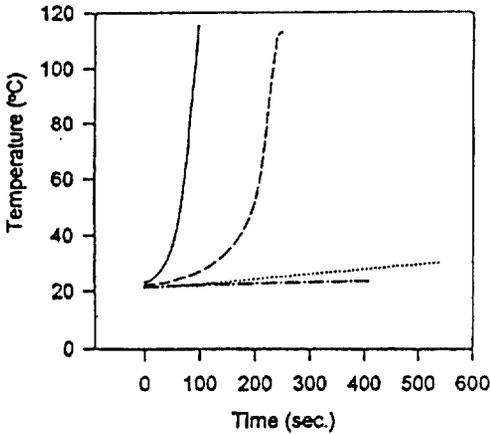


Fig. 2. Change of temperature of white radish during ohmic heating at various electric field strengths (50 Hz, sine wave). ·····: 10 V/cm, ·····: 20 V/cm, -·-·-: 25 V/cm, —: 35 V/cm.

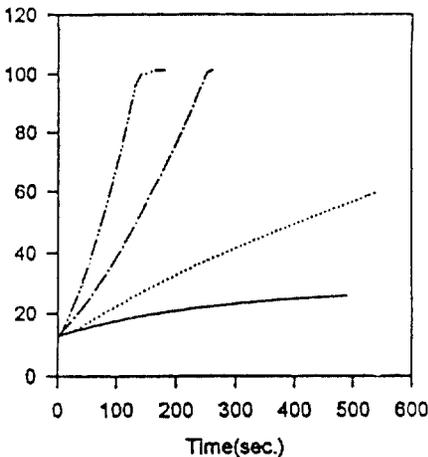


Fig. 3. Change of temperature of Acom starch gel during ohmic heating at various electric field strengths (50 Hz, sine wave). ·····: 5 V/cm, ·····: 10 V/cm, -·-·-: 15 V/cm, —: 20 V/cm.

들보다 훨씬 높은 전압 즉 전기장의 세기가 25 V/cm 이상일 때 가열이 시작되는 반면, 전분 젤은 15 V/cm 이상에서, 소시지의 유헤젤과 페이스트상의 고추장은 7.5 V/cm 이상에서 빠르게 가열되었다. 모든 시료는 일정한 주파수에서 전기장의 세기(E)가 증가함에 따라 가열속도가 증가하는 것을 알 수 있으며, 이는 음가열의 열발생량(Q)에 관한 기본식( $Q=E^2k$ )에서 제시되고 있는 바와 같다(Sastry and Palaniappan,1992; 조원일 등, 1994a). 이 식에서 k는 전기전도도(mS/cm)인데 조원일 등(1994a)은 이 식을 이용하여 가열된 식품의 전기전도도를 추정하였다. Ohmic heating을 상업적으로

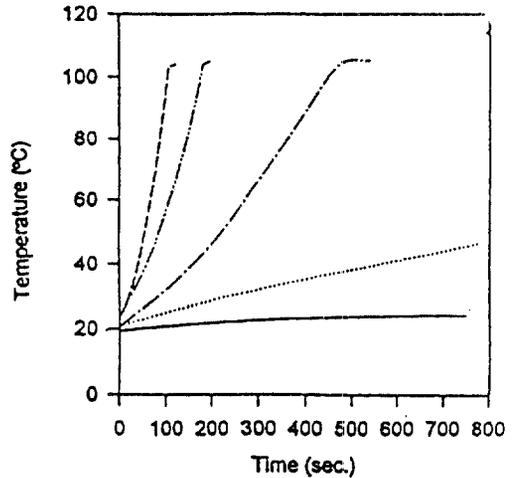


Fig. 4. Change of temperature of sausage during ohmic heating at various electric field strengths (50 Hz, sine wave). —: 2.5 V/cm, ·····: 5 V/cm, -·-·-: 7.5 V/cm, -·-·-: 10 V/cm, -·-·-: 15 V/cm.

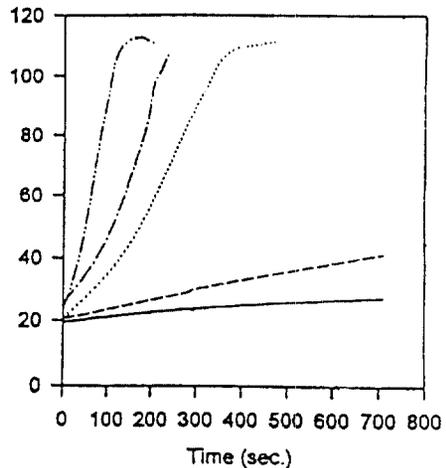


Fig. 5. Change of temperature of hot pepper-soybean paste during ohmic heating at various electric field strengths (50 Hz, sine wave). —: 2.5 V/cm, ·····: 5 V/cm, -·-·-: 7.5 V/cm, -·-·-: 10 V/cm, -·-·-: 15 V/cm.

이용하기 위해서는 1~5°C/s 정도의 빠른 가열속도가 요구되는데 이와 같은 발열속도를 얻기 위해서는 일정 세기 이상의 전계강도가 가해져야 한다. 위의 그림들에서 알 수 있듯이 가열시간에 따라 시료의 가열속도가 변하기 때문에 각각의 가열곡선의 초기 100초간의 평균 가열 속도(°C/s)를 구하여 전기장의 세기(V/cm)의 함수로 나타낸 그래프가 Fig. 6이다. 이 그림에서처럼 각각의 샘플의 가열속도는 전기장의 세기의 제곱에 비례하는 것을 알 수 있다. 즉, 전기장의 세기가 커질수록 가열속도는 지수적으로 증가하는 것을

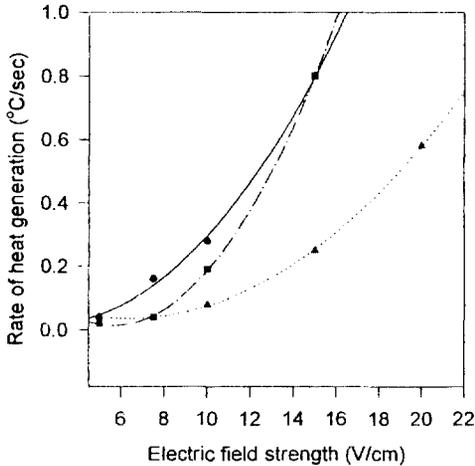


Fig. 6. Heating rate of foods at various electric field strengths (50 Hz, sine wave). ●—●: Hot pepper-soy-bean paste, ▲—▲: Acorn starch gel, ■—■: sausage.

알 수 있다. 또한 상업적 이용을 위한 가열속도를 내기 위하여는 주파수 50 Hz를 사용할 경우 도토리묵은 25 V/cm 이상, 소시지와 고추장은 최소한 15 V/cm 이상의 전기장 세기가 요구됨을 알 수 있다.

한편 같은 전기장의 세기에서 세포조직을 갖지 않는 시료들의 가열속도를 비교해 보았을 때 고추장, 소시지, 도토리묵순으로 가열속도가 빠른 것을 알 수 있다. 이것은 시료성분의 회분함량, 즉 전해질 농도와 비례하는 것으로 통전 가열 속도는 전기장의 세기뿐만 아니라 전기전도도에 의해서도 영향을 받음을 나타내고 있다.

Fig. 7은 인산완충용액의 농도에 따른 통전 가열 속도의 변화를 보여주고 있다. 가열속도는 용액의 이온강도와 직선적인 비례관계를 나타내며 전극간의 거리가 멀수록 가열속도는 감소하여 전극간 거리와 통전 가열속도는 지수적 역상관계를 나타내었다.

전기전도도는 온도의 함수이며 식품의 구조에도 영향을 많이 받는데 소시지의 경우는 고기의 근육단백질을 갈아서 만든 단백질과 지방질의 유화 젤이라고 할 수 있고, 도토리묵은 전분으로만 된 젤이라고 할 수 있는데 단백질의 경우 전분보다 전기전도도가 높다. 또한 전분 젤은 비교적 질서있게 구성된 격자구조로서 육류 유화젤 보다는 식물 세포 조직의 구조에 더 가까운 미세구조를 가지고 있다(김영아와 이혜수, 1989). 고추장의 경우는 이들보다 전기전도도가 월등히 높는데 이는 고추장에 NaCl 등 전해질 금속이온이 많이 함유되어있고, 단백질, 아미노산, 탄수화물 등의 극성분자가 수용액상태로 존재하기 때문으로 생각된

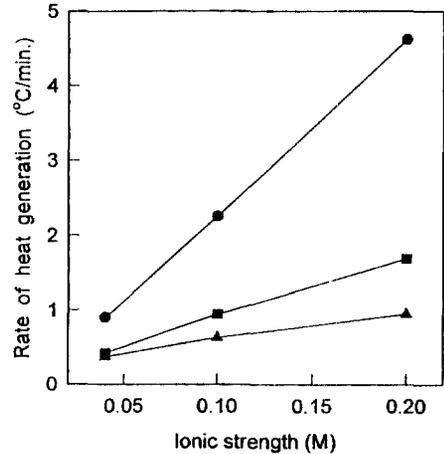


Fig. 7. Changes of ohmic heating rate of phosphate buffer solution (pH 7.0) by the concentration of electrolytes (15 V/cm, 60 Hz). ●—●: 4 cm, ■—■: 6 cm, ▲—▲: 8 cm.

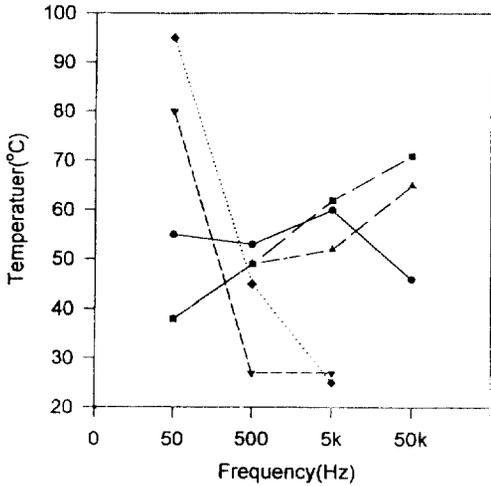
다. 상온에서 감자의 전기전도도는 0.025 S/cm, 쌀 전분은 0.046 S/cm, 달걀 흰자의 경우 0.418 S/m, 그리고 고추장의 경우는 1.865 S/cm이라고 보고되고 있다(조원일 등, 1994a).

#### 주파수의 영향

Fig. 8은 주파수의 변화에 따라서 시료들의 가열온도가 변화하는 현상을 보여주고 있다. 시료의 종류 특히 구조적 특징에 따라 커다란 차이를 보이고 있다. 격막으로 분리된 식물 세포 조직의 구조를 가진 무의 경우에는 주파수가 증가하면 가열속도는 급격히 감소한다. 반면 액상유동이 순조로운 페이스트나 근섬유와 지방성분이 불균일한 유화제로 연속상을 이룬 소시지에서는 주파수가 커지면 가열속도는 거의 직선적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 비교적 질서있는 격자구조를 이룬 전분 젤은 주파수에 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 조원일 등(1994b)은 감자와 같이 조직을 가지고 있는 경우에는 10 kHz 근방에서, 조직이 없는 비지, 감자박, 소시지 등은 대체적으로 5 kHz 근방에서 가장 많은 발열량을 발생시킨다고 보고하고 있는데, 본 실험의 결과에 의하면 생체조직은 비교적 낮은 주파수에서 효과적으로 가열되는 것으로 나타났다.

#### 세포막의 영향

무와 같은 식물조직의 경우에는 세포조직을 그대로 가지고 있으므로 도토리묵이나 소시지와 같은 조립식품과는 다른 통전가열 특성을 나타낸다. Fig. 2에서 보

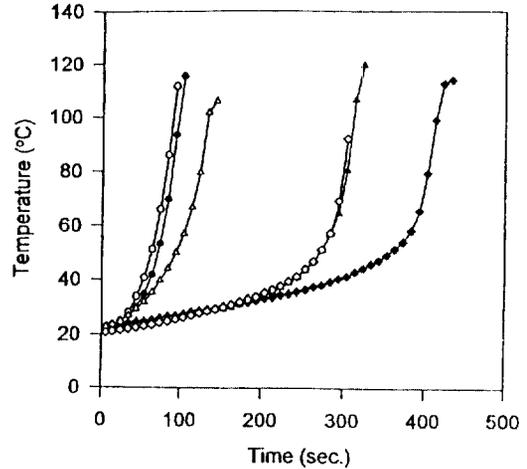


**Fig. 8.** Changes of temperature of ohmic heated samples by various electric frequencies. ●—●: Acorn starch gel (15 V/cm, 150 sec), ■—■: Sausage (7.5 V/cm, 150 sec), ▲—▲: Hot pepper-soybean, ◆—◆: Radish root (parallel, 35 V/cm, 80 sec), ▼—▼: Radish root (perpendicular, 35 V/cm, 80 sec).

는 바와 같이 전기장의 세기가 커질수록 중심온도가 약 50°C 부근에 도달할 때까지 걸리는 시간이 줄어들며 중심온도가 50°C에 도달한 이후에는 가열속도가 급격하게 증가되는 것을 알 수 있다. 이것은 50°C 전후에서 무의 식물 세포 조직이 파괴되어 세포내의 물질들이 자유로이 이동할 수 있게되어 전기전도도가 급격히 상승하기 때문으로 보인다. 조원일등(1994b)은 감자의 음가열에서도 이러한 현상을 관찰하였는데, 40°C 근방에서 급격한 전기전도도의 증가가 일어났다고 보고하였다.

Fig. 6은 전기장의 방향과 무의 유관속 방향이 평행을 이루도록 놓았을 때와 직각이 되도록 놓았을 때의 무의 온도 변화를 보여주고 있다. 여기서 알 수 있는 것은 두 경우 모두 주파수가 가장 낮은 50 Hz에서 음가열하였을 때 중심 온도가 50°C에 가장 빨리 도달하였으며 그 이후의 가열속도는 주파수에 관계없이 일정한 것을 알 수 있다. 이는 낮은 주파수의 교류를 가해 주었을 때 무의 세포조직의 파괴에 더욱 효과적이라는 것을 나타낸다.

식물 세포 조직은 각각의 세포로 구성되어 있고 이 각각의 세포는 세포벽과 세포막으로 구성되어 있다. 세포막의 주요 구성성분은 인지질로서 이들이 이중막을 이루는 구조를 가지고 있다. 이러한 인지질 이중막 구조는 전기장이 가해졌을 때 전하를 축적하는 축전지의 역할을 하게 된다. 따라서 세포막에 전기장이



**Fig. 9.** Changes of temperature of radish during ohmic heating at various frequencies (35 V/cm, sine wave). ●—●: 50 Hz, ▲—▲: 500 Hz, ◆—◆: 5 k Hz, perpendicular, ○—○: 50 Hz, △—△: 500 Hz, ◇—◇: 5 k Hz, parallel.

가해지면 세포막을 가로질러 전하가 축적되어 transmembrane potential (TMP)이 형성되며 이러한 TMP가 일정한 전하이상으로 축적되면 서로 다른 전하의 끌어당기는 힘에 의해 인지질 이중막이 파괴되는 electroporation 현상이 일어나게 된다. 이때 transmembrane potential  $U(t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다(Sower, 1992).

$$U(t) = \frac{3}{2} r E \cos \theta \quad (1)$$

여기서  $r$ 은 구형 세포의 반지름,  $E$ 는 가해주는 전기장의 세기,  $\theta$ 는 전기장의 방향과 세포막의 위치 사이의 각이 된다. 이때 교류전류의 주파수는 전기의 극성이 바뀌는 주기(cycle)가 되고 주파수가 낮을 때에는 이러한 주기가 충분히 길어 세포막의 파괴가 일어나기에 충분한 TMP가 생길 수 있는 시간적인 여유가 있는 반면 주파수가 증가할수록 전기의 극성이 빠르게 바뀌기 때문에 세포막 사이에 충분한 TMP가 발생하기 힘들어지고, 결과적으로 세포막의 파괴가 주파수가 낮을 때보다 적게 일어나게 된다고 생각된다.

또한 같은 전기장의 세기와 같은 주파수에서도 전기장의 방향과 유관속의 방향이 평행을 이룰 때보다 직각을 이룰 때 중심온도가 더 빨리 50°C에 도달함을 알 수 있는데 이것은 식 (1)에서 보듯이 세포의 방향과 전기장의 방향이 직각일 때 TMP의 형성에 더욱 효과적이며 따라서 세포막의 파괴도 더 효과적이기

때문임을 알 수 있다.

## 요 약

세포 격막 구조를 가진 무, 비교적 질서있는 전분의 젤의 구조를 가진 도토리묵, 단백질과 지방의 유화젤인 소시지, 그리고 다량의 식염을 함유한 고점성 페이스트 식품인 고추장을 이용하여 저주파 교류전기에 의한 음가열의 기작과 이에 영향을 미치는 요소들을 조사하였다. 실험에 사용한 각각의 식품에 있어서 가해주는 전기장의 세기가 커질 수록 가열 속도는 증가하였으며 이 때의 가열속도의 변화를 비교 관찰하였을 때 같은 전기장의 세기에서도 각각의 식품의 특성, 특히 식품의 미세구조와 전해질농도에 따라 가열속도가 크게 좌우되며, 음가열을 실시하는 동안에도 세포 구조의 변화 등에 의해 가열 속도가 변하는 것을 볼 수 있었다. 인산완충용액의 경우 이온강도와 음가열 속도는 직선적 비례관계를 나타내었으며 이는 전기전도도가 가열속도에 직접적으로 관여함을 의미한다. 상업적 이용을 위한 가열속도를 내기 위하여는 주파수 50 Hz를 사용할 경우 무는 35 V/cm 이상, 도토리묵은 25 V/cm 이상, 소시지와 고추장은 최소한 15 V/cm 이상의 각각 다른 전기장 세기가 요구되어 식품의 구조와 조성에 따른 음가열속도의 차이를 극명하게 나타내었다.

주파수에 따른 가열속도는 식품의 미세구조에 따라서로 상이하게 영향을 받았다. 식물 세포 조직을 가지고 있는 무는 주파수가 50 Hz에서 500 Hz로 증가할 때 가열속도가 급격히 감소한 반면, 고추장이나 소시지는 주파수가 50 Hz에서 50 KHz로 증가함에 따라 가열속도도 직선적으로 증가하였다. 구조적으로 세포 조직과 페이스트의 중간위치에 있는 도토리묵은 주파수에 크게 영향을 받지 않았다. 낮은 저주파 교류에서 무의 가열 속도가 높고 유관속과 평행한 전류방향보

다는 수직의 전류방향에서 가열속도가 높은 것으로 나타나 세포벽 내외에 형성되는 transmembrane potential에 의한 electroporation 효과가 작용함을 알 수 있었다

## 감사의 글

본 연구는 보건 복지부 보건 의료기술 연구 개발 사업의 연구비 지원으로 수행된 것입니다. (CAFST Reaserch Paper NO. 97009)

## 문 헌

- 김도현, 변유량. 1994. Ohmic heating에 의한 식품 가공. 식품 과학과 산업. **27(4)**: 21-33
- 김영아, 이혜수. 1989. 응력완화시험에 의한 도토리전분 젤의 물성론적 모형분석. 한국조리과학회지. **5(1)**: 49-52
- 조원일, 김도연, 김숙, 변유량. 1994a. 된장및 고추장의 Ohmic heating 특성. 한국식품과학회지. **26(6)**: 791-798
- 조원일, 김도연, 변유량. 1994b. 저주파 교류가열 특성에 관한 연구. 한국식품과학회 제25차 학술발표회. 부산수산대
- Makoto, S. 1989. 식품 가공에 있어 주울 열의 이용 (수산연제품). *Jap. Food Science* **29**
- Nareh, D., I.J. Kopelman, and S. Mizrahi, 1983. Electroconductive thawing by lipid contact. *J. Food Technol.* **18**: 171-176
- Sanders, H.R. 1967. Electrical resistance thawing of fish. Torry Research Station. Aberdeen. UK
- Sastry, S.K. and S. Palaniappan, 1992. Ohmic heating of liquid-particle mixtures. *Food Technol.* **46(12)**: 64-67
- Segars, R.A and J.G. Kapisilis, 1976. The use of joule heating for rapid thawing and heating of frozen foods. 1st Int. Cong. on Eng. and Food. 68
- Sowers, A.E. 1992. Mechanisms of electroporation and electrofusion. In : Guide to Electroporation & Electrofusion, ed. by Chang, D.C., Chassy, B.M., Saunders, J.A., and Sowers, A.E. Academic Press: 119-138
- Zoltai, P. and P. Swearingen, 1996. Product development considerations for ohmic heating processing. *Food Technol.* **50(5)**: 263-268