

## 유한요소분석법과 반응표면분석법을 이용한 장조림 식품의 가열온도 예측

†신해헌·조원일\*

백석대학 외식산업학부, \*CJ(주) 식품연구소

### Prediction of Heating Temperature of Jangjorim Food by Using Finite Element Method and Response Surface Methodology

†Hae-Hun Shin and Won-Il Cho\*

Division of Foodservice Industry, Baekseok College, \*CJ R&D

#### Abstract

This Study was conducted to predict temperature profile of Jangjorim (boiled beef in soy sauce) food during retorting using the commercial NISA (Numerical Integrated Elements for System Analysis) program. NISA program is a good tool to simulate the temperature profile of a specific material based upon the finite element method. The cold point of Jangjorim food located not at the geometrical center but at 26.9 mm backward in y plane because specific heat of soy sauce was 20% higher than that of boiled beef. The effects of heat transfer coefficients on heat transfer during retorting process of Jangjorim were analyzed by response surface methodology (RSM). Independent variables were thermal conductivity of soy sauce, thermal conductivity of boiled beef, and convection heat transfer coefficient and dependent variables were temperature error and lethality error. Thermal conductivity of soy sauce was the most significant contributor among those ( $P<0.01$ ).

Key words: finite element method, RSM, heating temperature.

#### 서론

가공식품 제조에 있어서 열전달(heat transfer)은 냉장(refrigeration), 동결(freezing), 살균(thermal sterilization), 건조(drying), 증발(evaporation), 농축(concentration) 등의 다양한 가공공정에서 미생물적 안정성, 효소 불활성화, 관능품질 향상 등의 여러 목적으로 사용되는 중요한 단위조작(unit operation)이다<sup>1)</sup>. 특히 이 중에서 열전달을 이용한 살균공정은 가공 조리식을 대량 생산, 유통하는 가공식품으로 전환시키는데 있

어 매우 중요한 역할을 담당하게 된다<sup>2)</sup>.

열처리 살균방법은 가열온도에 따라 레토르트 살균, 고온단시간 살균(HTST), 후살균(2차 살균), 저온살균, 블렌칭 등으로 구분된다. 이 중에서 115~121℃, 2.0 Kg/cm<sup>2</sup>의 고온, 고압하에서 수 분에서 수 십 분간 가열하여 F<sub>0</sub>값이 4이상 되는 조건을 가하여 미생물, 포자류를 사멸시켜 저장성을 확보하는 레토르트 가열이 대표적인 열처리를 이용한 가공공정이다<sup>3-6)</sup>.

이러한 레토르트 살균은 미생물을 상업적 멸균조건까지 사멸시켜 상온에서도 장기간 유통 가능한 제품을

† Corresponding author : Hae-Hun Shin, Division of Foodservice Industry, Baekseok College, Cheonan-si, Chungcheongnam-do, 330-705, Korea.

Tel : 041-550-0490, Fax : 041-550-0452, E-mail : hun@bsc.ac.kr

제조할 수 있다는 장점을 가지고 있지만 종종 제품 특성에 맞는 정확한 열처리 조건이 확립되지 않아 표면은 과도하게 살균되는 *overheating*이 발생하여 관능품질이 손상되는 문제점을 가지고 있으며, 과잉 에너지 소비는 제품의 생산단가를 상승시키는 요인이 된다. 따라서 살균조건은 에너지 소비와 제품의 품질 저하를 최소화 할 수 있도록 최적화되어야 한다<sup>7,8)</sup>.

이상과 같은 다양한 열처리 살균공정에서 중요한 역할을 하는 온도변화는 대부분 *thermocouple*과 같은 전자식 계측기나 온도센서가 부착된 *Fo calculator*를 통해 직접 측정하는데 가열 시 온도변화를 *computer program* 등을 통해 사전에 예측할 수 있다면 시간, 인력, 비용 등의 여러 측면에서 경제적인 장점이 있으며, 측정오류도 사전에 방지할 수 있는 큰 장점이 있다. 여기서 측정오류라는 것은 대상 시료의 실제 냉점(*cold point*)이 건더기가 서로 겹치는 등의 문제로 정확한 중심이 아닐 경우가 발생할 때 기하학적 중심의 실제 온도 측정이 살균효과 예측에 있어 오류를 발생시킬 수 있다는 것이다. 즉, 이러한 다양한 오류 발생의 여부를 *computer simulation* 함으로써 사전에 예측할 수 있으며, 이를 통해 미연에 방지할 수 있는 것이다. 또한, 다양한 가열조건에서 대상시료의 원료별, 위치별, 시간별 온도변화를 정확히 예측해낼 수 있다면 미생물별 *D*값, *z*값 등의 상수와 살균치 계산식을 이용하여 미생물의 가열조건별 사멸효과 즉 미생물 균수 변화를 실험을 직접 수행하지 않아도 정확히 예측할 수 있다.

이러한 온도예측을 위해서는 수치적 방법(*numerical method*)과 해석적 방법(*analytical method*)이 널리 사용되고 있으며<sup>9)</sup>, 특히 수치적 방법 중의 유한요소법은 일정하지 않은 기하학적 모양, 열의존 열확산계수, 초기의 일정하지 않은 온도, 열흐름과 열전달계수의 변화 등과 같이 복잡한 문제를 해결할 수 있는 방법이다<sup>10,11)</sup>.

유한요소법은 대상물을 이론에서 제공하는 요소로 분할하고 공통된 점, 경계선 및 경계면으로 연결되는 작은 물체의 집합체로써 도형화한 다음, 도형화된 구조물에 대해 요소의 공통되는 점, 선 및 면 등에서 여러 가지 경계조건을 사용하여 수식을 만들고 이를 이용해 구조물 전체에 대한 연립 대수방정식을 만들어 해를 구한다. 공통되는 점이나 선, 면이 많아질수록 연립 대수방정식이 많아지게 되어 해를 구하는 데 많은 시간이 필요하므로, 컴퓨터의 발전과 더불어 그 사용이 확대되고 있다<sup>12,13)</sup>.

본 연구에서는 가열살균시 위치별, 시간별 온도변화를 정확하게 예측하는 컴퓨터 프로그램을 위하여

미국의 상업적 NISA(*Numerical Integrated elements for System Analysis, EMRC, USA*) program<sup>14)</sup>을 구입하여 다양한 조건에서 검증실험을 통해 최적화하고자 하였다. NISA 프로그램은 원래 플라스틱, 금속 등으로 구성되어 있는 소재의 열전달 현상을 유한요소분석법(*finite element method*)을 이용하여 *simulation*하여 항공공학, 화학공학, 기계공학 등에 응용하는 것이 주된 목적인데 본 연구에서는 다양한 관련 실험을 진행하여 식품의 정확한 온도변화를 예측하는 목적으로 사용하였다. 또한 NISA 프로그램에 의한 온도예측의 정확성을 위해서는 대상시료의 정확한 열전도, 열대류 등에 관련된 열전달계수를 산출해야 하는 데 이는 문헌상의 이론치와 실험치를 이용하였다. 그러나, 사용되는 열전달계수들이 정확한 값으로 보기는 어렵다고 판단되어 열전달계수의 변화에 의하여 온도, 치사율이 어떤 영향을 받는지를 알아보고, 가능하다면 최적화된 계수를 얻고자 반응표면 분석법(*RSM*)을 실시하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 모델식품

온도예측을 위한 모델로는 가장 단순한 형태인 장조림제품을 선택하였다. 장조림은 호주산 홍두깨살 고기를 스팀으로 가열한 다음  $8 \times 8 \times 30$  mm의 블록형태로 절단하여 사용하였으며 용기 내 중앙에 위치한다고 가정하였다. 즉, 장조림은 단 1개만 용기 중앙에 위치하여 소스 속에 담겨져 있는 상태로 가정하였다. 소스는 간장을 주원료로 한 장조림용 소스를 사용하였으며, 주요 원료는 진간장, 물엿, 백설탕, 미림, 생야채(마늘, 생강, 대파), 후추 등이다. 장조림용 소스를 포함한 장조림 샘플 제품은 CJ(주) 식품연구소에서 개발한 배합비와 공정을 토대로 자체적으로 제조한 것을 사용하였다.

장조림제품은 간장으로 채워진 용기 안에 장조림이 떠있는 형태로, 이를 단순화시켜 Fig. 1에 나타내었다. 용기의 모양은 실린더 형태로 가정하였고, 장조림은 막대기 모양으로 가정하였다. 용기의 지름은 13.8 cm, 높이는 16.7 cm인 원형이다.

### 2. 살균처리 및 온도측정

제조한 시료를 파우치 또는 트레이, 캔 포장재에 충전 밀봉한 다음 열수식 레토르트(*Pilot-Rotor 900, Stock, 독일*)를 이용하여 살균하였다. 가열 살균시 내부의 온도변화는 온도를 측정할 수 있는 *needle* 모양의 4개의 *thermocouple* 온도센서(*CTF 9004, Ellab, Den-*

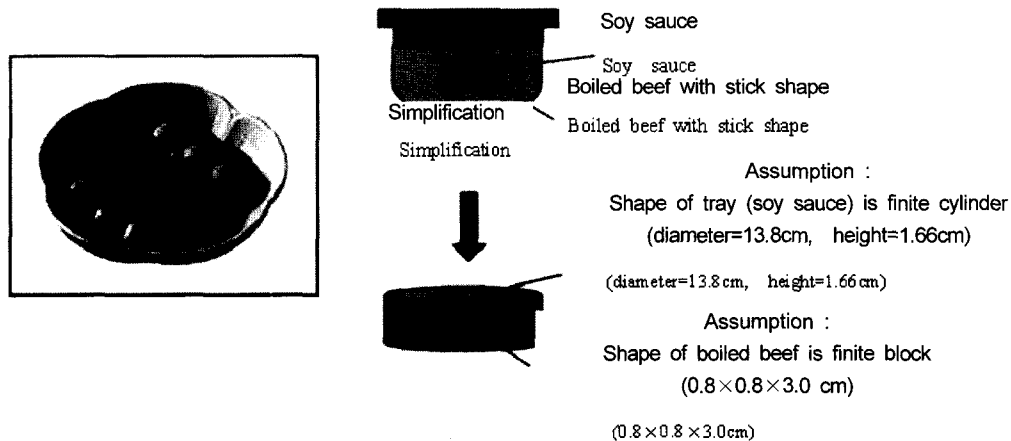


Fig. 1. Diagram of model food(Jangjorim).

mark)를 이용하여 측정하였다. 모델에 관련된 각종 열 전달계수는 문헌치와 실험치를 바탕으로 Table 1에 나타내었다. 용기에 의한 열저항은 무시하였으며, 장조림의 열전도계수는 문헌치 등<sup>15,16)</sup>에 의해 온도에 따라 변화되는 것으로 표현하였으며, 초기 온도 47°C인 식품을 110°C 수증기를 이용하여 20분간 살균처리하였으며, 온도 측정은 냉점이라고 생각되어지는 장조림의 기하학적 모양의 가운데를 선택하였다.

3. NISA 프로그램에 의한 온도예측

유한요소법(finite element method, FE)을 이용한 비정상 상태의 온도를 예측하기 위해서 NISA 프로그램을 사용하였다<sup>14)</sup>. NISA는 선형/비선형 정적 해석을 수행할 수 있는 module로서 전처리단계(pre-process), 해석(solver) 실행, 그리고 결과확인(post process)의 3가지 단계로 이루어진다. 이중 가장 중요한 것은 전처리단계로서 다음 몇 가지 단계를 거쳐야 한다.

1) 실구조물(식품)을 단순화된 구조물로의 변경

경험과 지식을 이용하여 구조물을 대칭조건 등을 이용하여 이상적인 구조물(ideal structure)로 단순화시켜야 한다.

2) 이상적인 구조물은 유한요소법의 이론에 따라 연속체로 분할(기하학적 모델)

즉, 구조물을 유한요소법에서 제공하는 기하학적인 형상(선, 면, 입방체)으로 분할한다. 분할된 형상을 요소(element)라 하고 공통되는 점을 절점(node)이라고 명칭한다. 또한 요소와 절점에 번호를 기입하고, 요소의 기하학적 성질(geometric properties)과 물성치(여기서는 열전달계수, material properties)를 정리한다.

3) 경계조건(boundary condition) 정의

완성된 유한요소 모델에 문제 조건에 맞게 초기 온도 및 대류조건을 정의한다.

4) 결과파일 작성 및 해석분야 선정

해석 후 생성되는 결과 및 해석분야를 선정한다.

5) 재료의 물성치 정의

Transient heat transfer analysis에서 정의되어야 하는 물성치는 비열(specific heat), 밀도(density), 그리고 열전달계수(thermal conductivity)가 반드시 입력되어야 한다. 또한, 해석 대상이 두 가지 이상의 물질로 구성되었을 경우에는 각 물질에 맞는 물성치를 입력하여

Table 1. Material properties of Jangjorim food for heat transfer analysis

| Materials     | Density( $\rho$ )<br>(kg/mm <sup>3</sup> ) | Specific heat(C)<br>(kcal/kg °C) | Thermal conductivity(k)<br>(kcal/mm · min · °C) | Heat transfer coefficient(h)<br>(kcal/mm <sup>2</sup> · min · °C) |
|---------------|--|----------------------------------|---|---|
| Boiled beef   | $1.11 \times 10^{-6}$                      | 0.82                             | <sup>a)</sup> Temperature dependent             | $7.17 \times 10^{-5}$   |
| Soybean sauce | $1.14 \times 10^{-6}$                      | 1.0038                           | $9.536 \times 10^{-6}$                          |   |

<sup>a)</sup>  $k = 8.08687 \times 10^{-6} + 2.5791 \times 10^{-8} T - 8.31983 \times 10^{-12} T^2$   
T is temperature.

야 한다. 이때 열전도계수는 온도의 함수로 정의한다.

6) Transient heat transfer analysis를 위한 환경설정

주위온도와 열전달계수  $h$ 가 시간에 따른 함수로 정의되며, iteration 수, 해석시간의 초기 시간과 최대시간, 미분방정식 풀이방법, 시간간격, 측정하고자 하는 위치 등의 환경을 설정한다.

이상의 전처리 과정을 거친 후 NISA solver를 실행하여, 결과물을 얻었다.

4. 치사율

식품모델에서 위치와 시간에 따른 온도를 구한 경우에는 목적으로 하는 미생물의 살균 여부를 구해야 하는 일반적으로 치사율( $L$ , lethality)로 표현하게 된다. 치사율은 임의의 온도  $T$ 에서 1분간 가열했을 때와 동일한 살균효과를 가지는 121.1°C에서의 살균시간을 의미한다.

치사율  $L$ 은 다음과 같이 표현된다<sup>17)</sup>.

$$L = 10^{\frac{T - T_0}{z}} \quad (1)$$

여기서,  $T$ 는 임의의 온도,  $T_0$ 는 기준온도(일반적으로 121.1°C)이다.  $z$ 는 target 미생물의  $z$ 값(°C)이다.

5. 표준오차

실험에서 얻어진 온도와 NISA 프로그램을 실행하여 얻은 예측 온도와의 차이는 표준오차로 표현하였다. 표준오차는 Shin 등이 사용한 RMSE(Root Mean Square Error)로 다음과 같이 정의하였다<sup>18)</sup>.

$$\text{표준오차} = \left[ \frac{\sum (Y_{pre} - Y_{exp})^2}{N} \right]^{0.5} \quad (2)$$

여기서,  $Y_{pre}$ 는 예측값,  $Y_{exp}$ 는 실험값,  $N$ 은 데이터수이다.

또한, 온도 이외에도 치사율을  $z = 10^\circ\text{C}$ 로 가정하여, 식 (2)에서부터 계산하여 역시 같은 방법으로 표준오차를 구하여 비교하였다.

6. 반응표면분석법(Response Surface Methodology)

반응표면분석(RSM)은 3-level factorial design으로 하여 간장소스의 열전도계수( $k_1$ ), 열전달계수( $h$ ), 장조림의 열전도계수( $k_2$ )를 독립변수로 하여 처음에 대입한 값에 대해서 1/2, 1, 2배씩 변화시켜 실시하였다 (Table 2).

Table 2. Level of heat transfer coefficients in experimental design for the Jangjorim food

| $X_i^{1)}$ | Conditions(fold)                               | Levels |   |   |
|------------|--|--------|---|---|
|            |  | - 1    | 0 | 1 |
| $X_1$      | Thermal conductivity( $k_1$ ) of soybean sauce | 0.5    | 1 | 2 |
| $X_2$      | Heat transfer coefficient( $h$ )               | 0.5    | 1 | 2 |
| $X_3$      | Thermal conductivity( $k_2$ ) of boiled beef   | 0.5    | 1 | 2 |

<sup>1)</sup>  $X_i$  : Independent variables.

또한, 열전달계수들이 미치는 효과를 보기 위한 종속변수로는 온도오차(error 1)와 치사율오차(error 2)를 사용하였다. 실험결과는 SAS (Statistical Analysis System) 프로그램<sup>(19)</sup>을 이용하여 반응표면분석을 행하였으며, 모델식은 다음과 같이 2차 회귀모형을 사용하였다.

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \sum \sum \beta_{ij} X_i X_j$$

여기서,  $Y$ 는 종속변수,  $\beta_0, \beta_i$ 는 상수이며,  $X_i, X_j$ 는 독립변수를 나타낸다.

결과 및 고찰

1. 유한요소분석법에 의한 온도예측

장조림 제품에서의 열전달을 예측하기 위하여 NISA 프로그램을 실행시키기 위해서, 우선 장조림 제품을 기하학적으로 단순한 형태로 변형시켜 Fig. 2에 나타내었다. 장조림은 대칭제품이므로, Fig. 1을 4등분하여 한 부분의 온도변화를 예측하면 나머지 부분도 같은 값을 나타내게 되어, 본 연구에서는 그림과 같이 1/4 부분만을 선택하였다.

Table 1의 각종 열전달계수를 대입하여 NISA 프로그램을 실행하여 얻어진 온도변화를 시간에 따라 Fig. 3

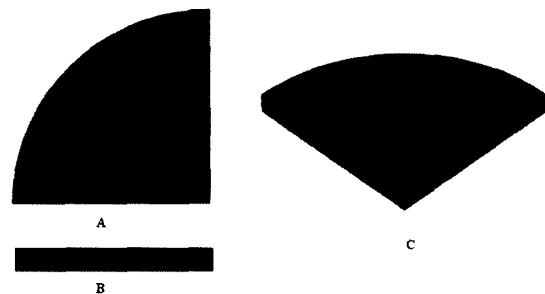


Fig. 2. Geometric model of Jangjorim food.

A : Top view, B : Front view, C : Isometric view

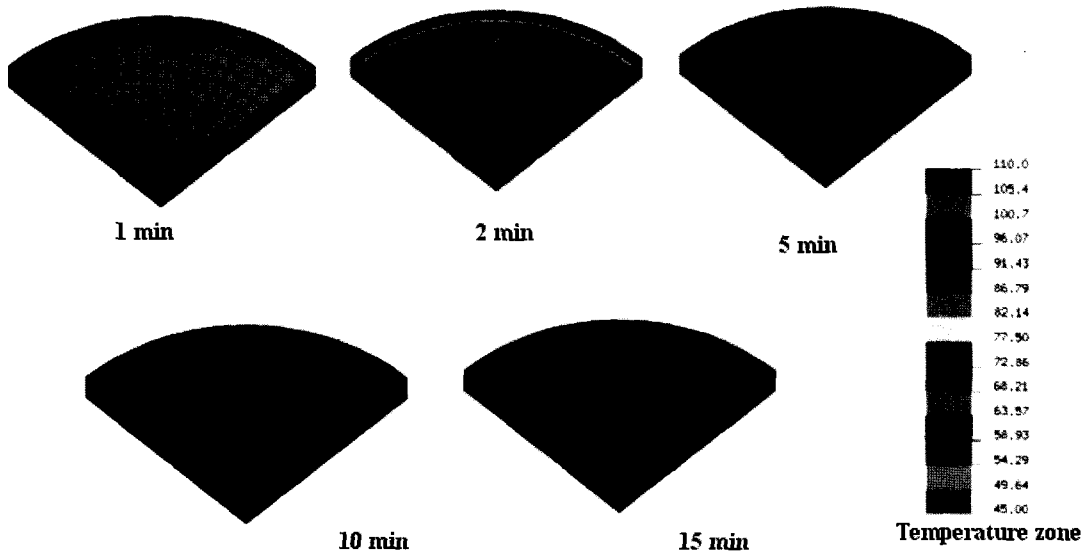


Fig. 3. Comparisons of nodal temperature of Jangjorim food over time.

에 나타내었다. 간장소스에 노출된 제품의 끝면에서부터 온도가 증가하여 5분 이상이 되면, 치사율이 얻어지는 100℃ 이상의 온도분포를 나타내었다. 이때, 장조림 제품보다는 간장소스의 온도분포가 도리어 늦게 올라가는 것으로 예측되었으며, 전체모양에서의 냉점 즉 가장 늦게 온도가 올라가는 부분은 장조림이 아닌 간장소스 부분으로서 위치는  $x, y, z$  좌표로 (0, 26.9412, 0)인 부분이다. 이곳은 가운데이긴 하지만 장조림 뒤쪽에 위치한다. 이러한 결과는 간장소스의 비열이 1.0038 kcal/kg · °C로 0.82 kcal/kg · °C인 장조림보다 20% 이상 큰 값을 나타내므로, 아래의 열전달방정식인 식에서 열확산계수인  $\frac{k}{(\rho C_p)}$  항을 보면 비열( $C_p$ )이 크면 열전달속도가 느리게 되어 온도상승이 느리게 된다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right]$$

여기서,  $T$ 는 온도,  $t$ 는 시간,  $\alpha$ 는 thermal diffusivity ( $\frac{k}{\rho C_p}$ )이다.

그러나, 일반적으로 간장소스보다는 장조림에서의 온도가 중요한 항이므로, 그림에서 장조림 부분만을 확대하여 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 윗부분은 실제 장조림 제품에서 중앙부분이므로 온도가 가장 늦게 올라가며, 10분 정도 경과시에 온도가 100℃이상으로 나타나 살균효과가 생기는 것으로 판단되었다.

실험에서 얻어진 기하학적 중심의 온도와 NISA 프

로그램에서 예측된 온도를 Fig. 5(A)에 나타내었다. 10분 전후부터는 온도예측이 상당히 맞는 반면에 5분까지의 초기온도에서는 실험값이 예측된 값보다 높은 온도를 나타내고 있다. 즉, 실제 가열살균시에 초기 온도 상승이 예상보다 빠른 속도를 나타내고 있다. 이는 주위의 수증기나 간장소스 등의 가열매체에 의해서 thermocouple에 의해 온도를 측정할 때 약간의 오차가 발생한 것으로 판단되었으며, 이러한 차이는 여러 가지 요인에 의해서 생기는 것으로 보고되고 있다. 예로 T type thermocouple을 사용할 때 온도오차는 신뢰도 95%에서 한번 읽었을 때  $\pm 0.14$ ℃를 보인다고 보고하였다<sup>(11)</sup>.

그러나, 우리의 목적이 미생물을 사멸하는 치사율이므로, 초기시간에서의 낮은 온도 부분에서의 차이는 큰 의미를 갖지 못한다. 따라서, 각 시간에서의 온도를 이용하여  $z$ 값을 10℃로 가정하여 식 (1)에 대입하여 치사율을 계산하여 Fig. 5B에 나타내었다. 이 경우에서는 초기값에는 차이를 보이지 않으나, 10분 이상이 경과한 경우에는 온도와는 달리 실험값이 오히려 낮은 치사율을 나타내고 있다. 이는 높은 온도에서는 치사율 계산식 (1)에 의하면 121.1℃에 가까운 온도에서는 작은 값의 차이도 치사율에서 큰 변화를 나타내므로, 온도변화보다는 치사율의 변화폭이 시간증가에 따라 증가되는 것이다.

이는 이론적으로는 계속적으로 열전달이 진행되어 온도상승이 이루어져야 하지만, 실제로는 식품이 온도 상승에 의해서 여러 물질들의 분해, 용출, 합성 등과 같은 반응이 진행됨에 따라서 열전달을 저해하게 되

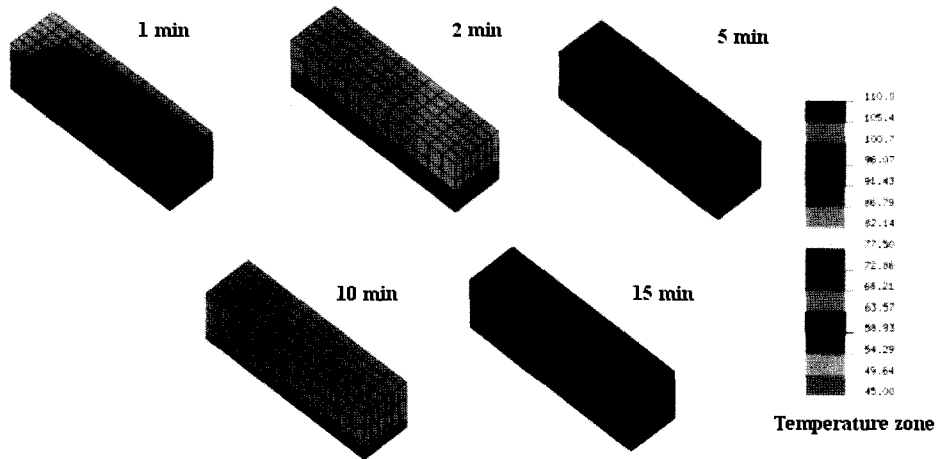


Fig. 4. Comparisons of boiled beef temperature in boiled beef over time.

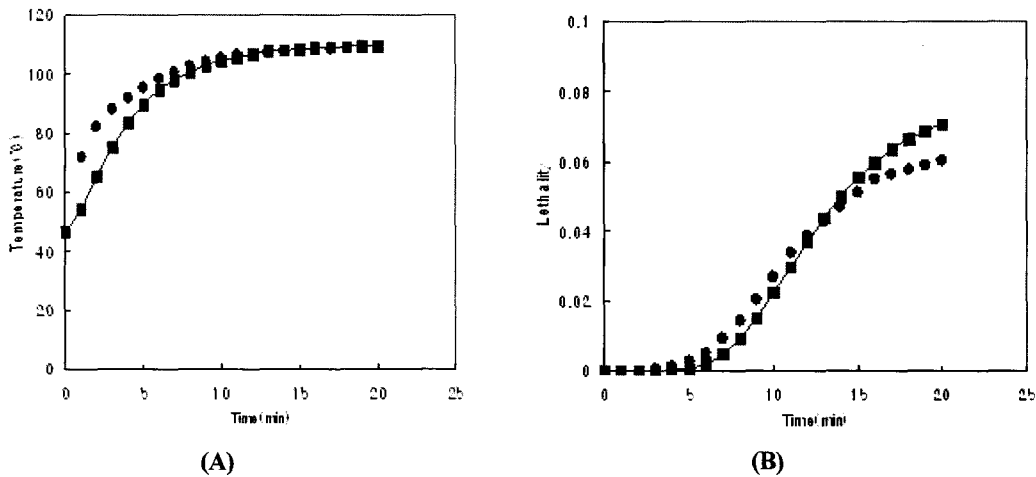


Fig. 5. Comparison of nodal temperature(A) and lethality(B) in the center point of beef boiled in soy sauce. Line(■) is predicted by NISA.

므로, 온도상승이 둔화되는 것으로 판단되었다<sup>13)</sup>.

2. 반응표면분석

NISA 프로그램에 의한 온도예측에서 처음에 대입한 열전달계수값들이 정확한 값이라고는 보기 어렵기 때문에, 이러한 열전달에 영향을 주는 값 중에서 간장소스의 열전도계수( $k_1$ ), 열전달계수( $h$ ), 장조림의 열전도계수( $k_2$ )가 문제가 있을 것으로 판단하여, 이들 변수들을 독립변수로 하여, 온도오차(error 1)와 치사율오차(error 2)를 최소화 할 수 있는 값을 구하고자 하여, 반응표면분석법을 실시하였다.

우선, Table 2에 주어진 계획법에 의하여 각 독립변수의 값들을 대입하여, NISA 프로그램을 실행하여 얻어진 예측온도를 이용하여 온도오차와 치사율오차를 계산하여 Table 3에 나타내었다.

Table 3의 값들을 이용하여 반응표면분석법을 행한 결과는 Table 4와 같다. 온도오차와 치사율오차는 상관관계수가 각각 0.9985, 0.9994로 높은 상관관계를 보여 우리가 설정한 모델식이 결과예측에 잘 맞음을 알 수 있었다.

온도오차에 대해서 간장소스의 열전도도의 유의성이  $P<0.1$ 인 반면에 열전달계수와 장조림의 열전도도는 영향을 미치지 못하였다. 이는 NISA 프로그램에 의한 온도예측시 간장소스의 열전도도값이 큰 영향을 미치기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 장조림의 크기가 상대적으로 작고, 비열값이 간장소스에 비해 낮으므로 전체적으로 온도 증가에 미치는 영향이 적은 것으로 판단되었다. 모델의 유의성은  $P<0.1$ 로 높은 편이며, 특히 직선항과 제곱항이  $P<0.01$ 로 높은 유의성을 보이지만 교차항은 유의성이 낮아서 계수상호간의

영향은 작은 것으로 판단된다.

최적화 인자로 설정한 온도오차의 독립변수 변화에 의한 회귀식은 다음과 같다.

$$y = 31.579477 - 3921953 k_1 + 56239 h - 816643 k_2 + 135950809130 k_1^2 - 2630469006 h k_1 - 255033518 h^2 + 18274085390 k_2 k_1 + 2041151139 k_2 h + 16139309761 k_2^2$$

치사율 오차에 대해서는 간장의 열전도도만이  $P < 0.01$ 로 매우 높은 유의성을 보이고 있어서, 온도오차에 비해 상대적으로 더 큰 영향을 미치고 있으며, 온도오차와 마찬가지로 다른 독립변수는 영향을 미치지

**Table 3. Experimental data of temperature and lethality error of Jangjorim food**

| Run number | Temperature error | Lethality error |
|------------|-------------------|-----------------|
| 1          | 14.21289458       | 0.025272313     |
| 2          | 12.62785438       | 0.024116611     |
| 3          | 4.80794995        | 0.004959362     |
| 4          | 15.76404431       | 0.026668125     |
| 5          | 4.32259669        | 0.006319889     |
| 6          | 4.00092375        | 0.024011005     |
| 7          | 12.93836667       | 0.024724048     |
| 8          | 4.33639993        | 0.025723702     |
| 9          | 4.48169146        | 0.005807616     |
| 10         | 4.32258646        | 0.006319970     |
| 11         | 4.33639939        | 0.025723706     |
| 12         | 4.32258621        | 0.006319930     |

**Table 4. Analysis of variance showing effects of heat transfer variables as linear or quadratic terms and interaction effects on response variables of Jangjorim food**

| Source                       | DF | Error 1 <sup>1)</sup> |        | Error 2 <sup>2)</sup> |        |
|------------------------------|----|-----------------------|--------|-----------------------|--------|
|                              |    | SS <sup>3)</sup>      | Prov>F | SS <sup>3)</sup>      | Prov>F |
| Model                        | 9  | 239.608787            | 0.0908 | 0.001085              | 0.0029 |
| Linear                       | 3  | 147.412079            | 0.0634 | 0.000115              | 0.0089 |
| Quadratic                    | 3  | 89.944930             | 0.0810 | 0.000969              | 0.0011 |
| Cross                        | 3  | 2.251778              | 0.4648 | 0.000001387           | 0.4540 |
| R <sup>2</sup>               |    |                       | 0.9985 |                       | 0.9994 |
| k <sub>1</sub> <sup>4)</sup> | 4  | 190.712558            | 0.0656 | 0.000919              | 0.0015 |
| h <sup>5)</sup>              | 4  | 2.264435              | 0.5337 | 0.000001782           | 0.4801 |
| k <sub>2</sub> <sup>6)</sup> | 4  | 2.358096              | 0.5253 | 0.000001830           | 0.4723 |

<sup>1)</sup> Error 1 : Temperature error, <sup>2)</sup> Error 2 : Lethality error, <sup>3)</sup> SS : Sum of squares of residue,

<sup>4)</sup> k<sub>1</sub> : thermal conductivity of soy sauce, <sup>5)</sup> h : heat transfer coefficient, <sup>6)</sup> k<sub>2</sub> : thermal conductivity of boiled beef.

못하는 것으로 나타났다. 모델의 유의성은  $P < 0.01$ 로 매우 높으며, 직선항과 제곱항도  $P < 0.01$ 로 매우 높은 영향을 주고 있지만, 교차항은 유의성이 없다. 최적화 인자로 설정한 치사율오차의 독립변수 변화에 의한 회귀식은 다음과 같다.

$$y = 0.067453 - 10274 k_1 + 15.408001 h - 745.765467 k_2 + 423910396 k_1^2 + 316997 h k_1 - 113392 h^2 + 15108718 k_2 k_1 + 1053443 k_2 h + 20164005 k_2^2$$

온도 오차에 대한 간장 소스의 열전도도와 열전달계수의 효과를 보기 위해서 Fig. 6(A)에 장조림의 열전도도가 1배일 때의 반응표면 곡선을 나타내었다. k<sub>1</sub>값의 증가에 따라서 온도오차는 직선적으로 감소하는 반면에 h값이 증가하면 온도오차는 약간의 증가를 가져오지만 변화를 나타내지 않고 있다.

치사율오차에 대한 열전도도와 열전달계수의 효과를 보기 위해서 장조림의 열전도도가 1배일 때의 반응표면 곡선을 Fig. 6(B)에 나타내었다. k<sub>1</sub>값의 변화에 있어서 치사율오차는 최소값을 가지는 모습을 보이고 있으며, 특히 낮은 값일 때 변화폭이 크게 나타났다. 반면에 h값에 의한 차이는 온도오차와 마찬가지로 큰 영향을 미치지 못하였다. 즉, 치사율에 대한 영향은 주로 간장소스의 열전도도에 의한 것으로 판단되었다.

반응표면분석법의 회귀분석에 의한 최적화인자는 모두 임계점으로 나타나 최소값을 결정하기 위해서, 이를 다시 회귀식을 이용하여 최적화 한 결과를 Table 5에 나타내었다. 치사율 오차는 간장소스의 k<sub>1</sub>값이 원래값의 1.25배, h값은 1.87배, k<sub>2</sub>는 1.3배에서 최소값 0.003522를 나타내었다. 이 값은 반응표면분석법의 최

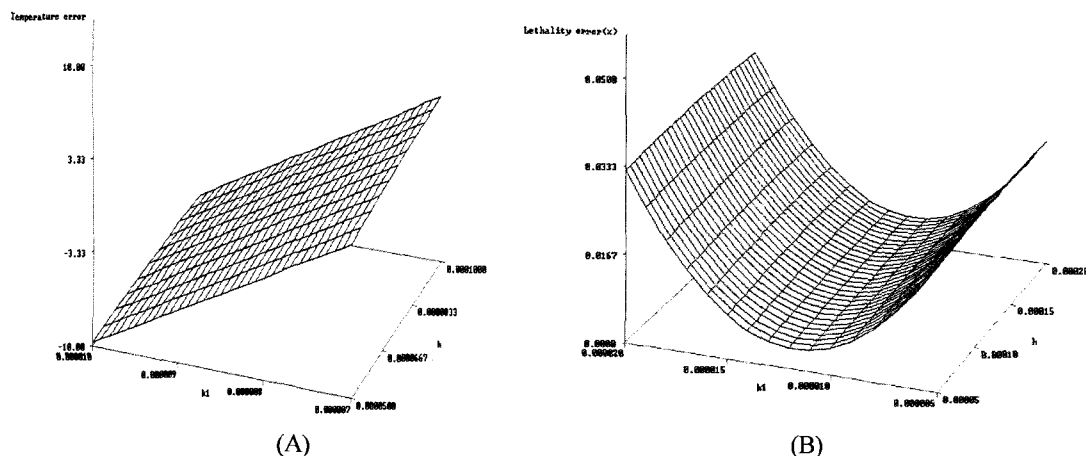


Fig. 6. Response surface plot of thermal conductivity of soy sauce( $k_1$ ) and heat transfer coefficient ( $h$ ) on the temperature error (A) and lethality error (B) of boiled beef in soy sauce.

Table 5. Critical values from the optimization techniques for the heat transfer of Jangjorim food by using response surface methodology data

| Variable            | Error 1 <sup>1)</sup>     | Error 2 <sup>2)</sup>   |
|---------------------|---------------------------|-------------------------|
| $k_1$ <sup>3)</sup> | $0.726558 \times 10^{-5}$ | $0.1188 \times 10^{-4}$ |
| $h$ <sup>4)</sup>   | $0.83294 \times 10^{-4}$  | $0.134 \times 10^{-3}$  |
| $k_2$ <sup>5)</sup> | $1.14085 \times 10^{-5}$  | $1.0553 \times 10^{-5}$ |
| Minimum             | $-3.25795 \times 10^{-7}$ | 0.003522                |

<sup>1)</sup> Error 1 : Temperature error.

<sup>2)</sup> Error 2 : Lethality error.

<sup>3)</sup>  $k_1$  : Thermal conductivity of soy sauce.

<sup>4)</sup>  $h$  : Heat transfer coefficient.

<sup>5)</sup>  $k_2$  : Thermal conductivity of boiled beef.

적화 인자와 동일한 값이므로 임계점으로 나타난 값이 최소값임을 나타내었다.

온도오차의 경우에는 온도오차가 0이 되는 부분을 최적화한 결과  $k_1$ 값이 원래값의 0.76배,  $h$ 값은 1.16배,  $k_2$ 는 1.41배에서 최소값인  $-3.25795 \times 10^{-7}$ 을 나타내었다.

이상과 같이 유한요소분석법과 최적화 기법을 이용하여, 실제실험을 통하지 않고도 온도예측이 가능할 것으로 여겨지며 차후에 여러 가지 방향으로 연구가 진행되어야 할 것으로 생각되어진다.

## 요 약

간장으로 채워진 실린더 형태의 장조림 제품의 가열살균시 온도변화를 유한요소분석법(finite element

method)을 이용하여 예측하기 위하여 상업적 NISA (Numerical Integrated Elements for System Analysis, EMRC, USA) 프로그램을 이용하여 실시하였다. 장조림 식품에서의 열전달은 냉점이 기하학적 중심에 위치하지 않고 y축으로 26.9 mm 뒤쪽에 위치하였다. 이는 간장소스의 비열이 장조림보다 20% 이상 큰 값이기 때문으로, 사용된 재료의 열전달계수에 의해서 냉점의 위치가 다르게 나타났다. 장조림 식품의 가열살균시 열전달계수의 영향을 검토하기 위하여 온도와 치사율 오차를 종속변수로 하여 간장소스의 열전도계수, 장조림의 열전도계수, 열전달계수를 독립변수로 한 반응표면분석법을 행한 결과 장조림의 열전도계수가  $p < 0.01$ 로 매우 높은 상관관계를 보이며, 치사율 오차를 최소화 하는 최적화값을 얻을 수 있었다.

## 참고문헌

1. Leniger, H.A. and Beverloo, W.A. : Food Process Engineering. D. Reidel Pub. Co., Dordrecht-Holland, Boston, USA, pp.304(1975)
2. Park, W.S. : Present conditions of food sterilization technique, *Food Sci. Ind.*, **33(2)**, 2~11(2000)
3. Shin, D.W. : Microbiology sterilization theory of retort food, *Food Sci. Ind.*, **16(1)**, 37~41(1983)
4. Koh, H.Y. and Park, M.H. : Effects of sterilization temperature and internal air volumes of a pouch on the quality of retort rice, *Kor. J. Food Sci. Technol.*, **22(2)**, 150~154(1990)
5. Pyun, Y.R., Shin, S.K., Kim, J.B. and Cho, E.K. : Studies on the heat penetration and pasteurization



- conditions of retort pouch Kimchi, *Kor. J. Food Sci. Technol.*, **15(4)**. 414~420(1983)
6. Lee, S.Y., Chun, B.I. and Lee, S.K. : Computer simulation for optimal conditions of high temperature sterilization of cooked rice packed in retort pouch, *Kor. J. Food Sci. Technol.*, **17(3)**. 136~140(1985)
  7. Cho, Y.B., Lim, J.Y. and Han, B.H. : Optimal sterilizing condition for canned ham, *J. Kor. Sci. Food Nutr.*, **25(2)**. 301~309(1996)
  8. Saguy, I. and Karel, M. : Optimal retort temperature profile in optimizing thiamine retention in conduction type heating of canned foods, *J. Food Sci.*, **44**. 1485 (1979)
  9. Hendrickx, M.E., Silva, C.L., Oliveria, F.A. and Tobback, P. : Optimization of heat transfer in thermal processing of conduction heated foods. pp. 221~235. In: *Advances in Food Engineering*, Singh, R.P. and Wirakartakusumah, M.A. (ed.), Boca Raton, CRC press(1992)
  10. Kumar, A., Bhattacharya, M. and Blaylock, J. : Numerical simulation of natural convection heating of canned thick viscous liquid food products, *J. Food Sci.*, **55(5)**. 1404~1411(1990)
  11. Peralta Rodriguez, R.D., Martinez, A., Rodrigo, M. and Safon, J. : Numerical method for prediction of final microbial load in inoculated cylindrical cans of tomato concentrate heated in a pilot plant. *Int. J. Food Sci. Technol.*, **31**. 489~496(1996)
  12. Naveh, D., Kopelman, J.J. and Pflug, I.J. : The finite element method in thermal processing of foods, *J. Food Sci.*, **48**. 1086~1093(1983)
  13. Sastry, S.K., Beelman, R.B. and Speroni, J.J. : A three dimensional finite element model for thermally induced changes in foods; Application to degradation of agaritines in canned mushrooms, *J. Food Sci.*, **50**. 1293~1299(1985)
  14. NISA<sup>TM</sup>/DISPLAY. Troy, Michigan, Engineering Mechanics Research Cooperation, USA
  15. 한국식품과학회 : 식품공학, 형설출판사, p.427~453(2000)
  16. Toledo, R.T. : *Fundamentals of Food Process Engineering*, 2nd ed., Van Nostrand Reinhold, New York, p.582~594(1991)
  17. Welty, J.R. : *Engineering heat transfer*, John Wiley and Sons, Inc., New York, USA(1974)
  18. Shin, H.H. and Hwang, J.K. : Modeling of rheological properties of pectins by side branches, *Kor. J. Food Sci. Technol.*, **34(4)**. 583~589(2002)
  19. SAS Institute Inc. SAS User's Guide. Statistical Analysis System Institute. Cary, NC, USA(1990)

---

(2004년 1월 20일 접수)