

## 축육 가공품의 열확산도 추정에 관한 연구

박철환\* · 박상민\*\* · 조현덕 · 한봉호†

부산수산대학교 식품공학과

\*고성물산 주식회사

\*\*사조산업 주식회사

## Prediction of Thermal Diffusivities of Pork Meat Products

Chul-Hwan Park\*, Sang-Min Park\*\*, Hyun-Duk Cho and Bong-Ho Han†

Dept. of Food Science and Technology, National Fisheries University of Pusan, Pusan 608-737, Korea

\*Gosung Mulsan Co., Gosung 638-800, Korea

\*\*Sajo Industrial Co., Seoul 138-160, Korea

### Abstract

To obtain a thermal diffusivity predicting equation for meat products, minced pork meat was mixed with some additives such as lard, isolated soybean protein, 1.5% of table salt and 2% of polyphosphate to control the composition and texture of the products and then stuffed in a model can. Heat penetration curves were measured in the temperature range of 80.76~121.03°C by using a thermocouple fixed at the cold point of the model can and the thermal diffusivities were calculated from the plotted heat penetration curves. At constant heating temperature, the thermal diffusivities of pork meat with water content of 49.01~77.55% increased linearly with increasing water content. The thermal diffusivities of the products with constant water content also increased linearly with increasing heating temperature and the values could be predicted by following equation :  $\alpha_p = (2.1394 + 0.5X_w) \cdot \alpha_w + 0.0035 \cdot 10^{-6} \cdot X_w - 0.2785 \cdot 10^{-6}$ , ( $m^2 \cdot s^{-1}$ ). The maximal difference of the values predicted with this equation on the basis of the practical measured values were less than 1.7%.

**Key words** : thermal diffusivity prediction, meat products

### 서 론

햄, 소시지 등의 축육 가공품은 열처리에 의하여 미생물로부터의 안전성이 확보되는데, 열처리 과정에서 이들 식품 내부의 온도분포는 열침투곡선으로 나타내어진다. 따라서 열침투곡선의 추정이 가능하면 축육 제품 내부온도의 추정이 가능하며, 그에 따라 미생물의 사멸정도와 열처리 조건의 예측이 가능하게 된다.

이러한 예측을 위하여서는 대상식품의 열확산도 예측이 가능하여야 하며, 이를 위하여 Riedel<sup>1)</sup>, Gaffney 등<sup>2)</sup>, Martens<sup>3)</sup>, Singh<sup>4)</sup>, Han 과 Loncin<sup>5)</sup> 등은 과일류, 지방함량이 낮은 육류 및 어류를 대상으로, 한 등<sup>6-8)</sup>과 최 등

<sup>9,10)</sup>은 어육 연제품류를 대상으로 열확산도 추정식을 제시한 바 있다. 그러나 축육제품의 열확산도 추정을 위하여서는 이들 몇몇 추정식의 적용가능성에 대한 검토가 선행되어야 하므로, 본 연구에서는 축육제품에 적용 가능한 열확산도 추정식을 제시하고자 하였다.

### 재료 및 방법

#### 시료육

햄 및 소시지의 원료로서 돼지고기를 한국냉장(주)에서 동결된 상태로 구입하여 -30°C의 동결고에 저장하여 두고 실험에 사용하였다. 부원료로서 식염 1.5%, 중합인산염 0.2%, 지방함량 조절용으로 lard를, 단백질함량 조절용으로 대두단백질을 사용하였으며,

† To whom all correspondence should be addressed

이들을 임의의 농도로 혼합하여 충분히 고기같이 하고 상온에 방치하여 온도를 균일하게 한 후 열전달실험에 사용하였다.

**실험장치**

시료용기, 가열장치 및 온도측정 장치는 한 등<sup>6-8)</sup>과 최 등<sup>9,10)</sup>이 제작하였던 것들을 이용하였다. 즉, 시료용기로는 두께  $0.07 \cdot 10^{-2}m$ 의 스테인레스강으로 제작한 유한원기동형의 모델 용기 ( $H=11.2 \cdot 10^{-2}m$ ,  $D=7.5 \cdot 10^{-2}m$ )를, 가열장치로는 고압증기솥과 항온수조를, 그리고 온도측정장치로는 Digital Microvoltmeter (Model 177 DMM, Keithley Instruments Co.)와 직경  $0.02 \cdot 10^{-2}m$ 의 열전대 (NiCr-Ni)를 사용하였다.

**실험방법**

시료육의 일반성분으로서 수분은 상압가열건조법, 조단백질을 Semi microkjedahl법, 조지방은 Soxhlet법, 회분은 전식회화법으로 측정하였으며, 그 이외의 성분을 탄수화물 함량으로 하였다.

열전달 실험은 한 등<sup>6-8)</sup>, 최 등<sup>9,10)</sup>의 방법에 따랐다. 즉, 시료육을 충전하고 냉점에 열전대를 고정시킨 모델용기를 일정 온도의 고압증기솥 또는 항온수조에 넣고 가열시간에 따른 냉점에서의 온도변화를 측정하였으며, 가열매체와 시료육 냉점의 온도와의 차이가  $1^{\circ}C$  미만이 될 때까지 2분간격으로 열침투곡선을 측정하였다. 가열매체로는 표면열전달저항을 무시할 수 있을 만큼 총괄열전달계수가 큰 물과 포화수증기를 사용하였으며<sup>7,11)</sup>, 열전대가 수증기 또는 끓는 물에 노출되는 부분은 실리콘으로 피복을 입혀 사용하였다

**열확산도의 계산**

표면열전달저항을 무시하는 전도전열에 의한 유한원기동형 시료의 열침투곡선은 Fourier 제2식의 해<sup>12)</sup>를 이용한 Newman<sup>13)</sup>의 방법에 따라 다음과 같이 나타내어진다.

$$\frac{T_h - T}{T_h - T_i} = \frac{4}{\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \cdot \cos \frac{2n-1}{2} \cdot \pi \cdot \frac{x}{\Delta x} \cdot \exp \left[ - \left[ \frac{2n-1}{2} \right]^2 \cdot \pi^2 \cdot Fo_{pl} \right] \cdot 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(B_n \cdot R / R_{max})}{B_n \cdot J_1(B_n)} \cdot \exp(-B_n^2 \cdot Fo_{cy}) \quad (1)$$

따라서 실측 시간과 온도를 식(1)에 대입하여 열확산

도를 구하되, 가열매체의 온도와 시료육의 냉점에서의 온도와의 차이가  $(T_h - T) \leq 10^{\circ}C$ 일 때 Ramaswamy 등<sup>14)</sup>의 방법에 따라  $Fo \geq 0.2$ 의 범위에서 2분간격으로 구한 값들을 산술평균하여 최종 열확산도로 하였다.

**결과 및 고찰**

**시료육의 일반성분**

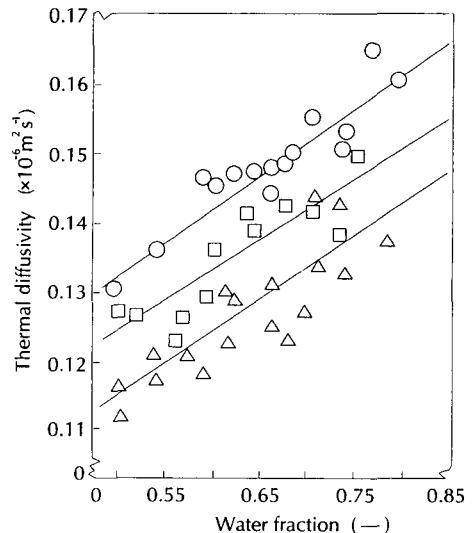
각종 부원료와 혼합, 성분조성을 달리하여 열전달실험에 사용한 돼지고기의 성분조성은 Table 1에 나타낸 바와 같이, 열확산도에 크게 영향을 미친다고 알려져 있는 수분은 49.01~77.55%, 지방은 1.38~37.05% 범위였다.

**성분조성 및 가열온도와 열확산도**

수분함량 49.01~77.55% 범위의 돼지고기 제품의 각 온도에서의 열확산도를 수분함량을 기준으로 Fig. 1에 그 변화를 나타내었다. 열확산도는 수분함량의 증가에

**Table 1. Chemical composition of pork meat mixed with filefish meat** (unit : %)

| Component     | Content     |
|---------------|-------------|
| Water         | 49.01~77.55 |
| Crude protein | 8.36~25.39  |
| Crude lipid   | 1.38~37.05  |
| Carbohydrate  | 0.18~ 1.79  |
| Ash           | 0.39~ 4.83  |



**Fig. 1. Thermal diffusivities versus water content.**  
 —△— : 80.76°C, —□— : 98.57°C, —○— : 121.03°C

따라 직선적으로 그 값이 커짐을 확인할 수 있었으며 각 온도에서의 열확산도는 다음과 같이 나타낼 수 있었다.

$$\alpha_p, (80.76 \pm 0.3^\circ\text{C}) = 0.0869 \cdot 10^{-6} \cdot X_w + 0.0720 \cdot 10^{-6},$$

$$(m^2 \cdot s^{-1}, r=0.9230) \quad (2)$$

$$\alpha_p, (98.57 \pm 0.3^\circ\text{C}) = 0.0849 \cdot 10^{-6} \cdot X_w + 0.0818 \cdot 10^{-6},$$

$$(m^2 \cdot s^{-1}, r=0.9264) \quad (3)$$

$$\alpha_p, (121.03 \pm 0.5^\circ\text{C}) = 0.0909 \cdot 10^{-6} \cdot X_w + 0.0893 \cdot 10^{-6},$$

$$(m^2 \cdot s^{-1}, r=0.9507) \quad (4)$$

Riedel<sup>11)</sup>, Gaffney 등<sup>2)</sup>, Martens<sup>3)</sup>, Singh<sup>4)</sup>, Han 과 Loncin<sup>9)</sup>, 한 등<sup>6)</sup>은 식품의 열확산도가 성분조성에 따라 달라지지만, 대부분의 식품이 수분함량이 증가함에 따라 직선적으로 커짐을 밝힌 바 있으며, 본 연구의 결과도 이들의 보고와 잘 일치하였다.

온도와 열확산도의 관계에서 Singh<sup>4)</sup>은 식품의 열확산도가 가열온도의 영향을 크게 받기 때문에 가열온도의 범위가 넓은 식품의 열처리 공정에서는 이점이 충분히 고려되어야 한다고 하였다. 그런데 Rizvi 등<sup>15)</sup>은 수종의 단백질로 조제한 축육과 유사한 모형식품의 열확산도가 71.1~83.3°C의 범위에서는 증가하나 93.3~116°C의 범위에서는 온도상승에 따라 오히려 감소한다고 하였다. 또한 Griffith<sup>16)</sup>은 Mexican Tortillas Dough의 경우 온도와 열확산도와는 큰 상관관계가 없다고도 하였다.

그러나 Riedel<sup>11)</sup>은 각종 식품의 열확산도가 0~80°C의 범위에서, Nesvadba 와 Eunson<sup>17)</sup>은 대구육의 열확산도가 0~38°C의 범위에서, 그리고 Han 과 Loncin<sup>9)</sup>은 모형 어육제품의 열확산도가 100~120°C의 범위에서 온도상승에 따라 증가한다고 하였다. 또한 한 등<sup>6-8)</sup>과 최 등<sup>9,10)</sup>은 어육 연제품류의 경우에도 이와 같은 현상을 확인한 바 있으며, 본 연구에서의 돼지고기 제품도 식(2)~(4)에서와 같이 이와 동일한 현상을 나타내었다.

#### 열확산도 추정식

식(2)~(4)는 온도 80~121°C의 범위의 특정 온도에서의 돼지고기 제품에 대한 열확산도 추정식일 뿐이어서, 이들 결과로부터 불특정 온도에서의 열확산도 추정을 가능케 하고자 한 등<sup>6-8)</sup>과 최 등<sup>9,10)</sup>의 방법에 따라 (2)~(4)의 결과를 정리하여 다음과 같이 하나의 식으로 나타내었다.

$$\alpha_p = (2.1394 + 0.5 \cdot X_w) \cdot \alpha_w + 0.0035 \cdot 10^{-6} \cdot X_w - 0.2785 \cdot 10^{-6}, (m^2 \cdot s^{-1}) \quad (5)$$

Table 2. Differences in thermal diffusivities predicted with equation (5)

(unit : %)

| Heating temperature | Water fraction |      |      |      |
|---------------------|----------------|------|------|------|
|                     | 0.50           | 0.60 | 0.70 | 0.80 |
| 80.76±0.3°C         | 1.21           | 0.81 | 0.38 | 0.00 |
| 98.57±0.3°C         | 1.69           | 1.58 | 1.42 | 1.27 |
| 121.03±0.5°C        | 1.03           | 0.63 | 0.33 | 0.00 |

식(5)의 정확도를 조사하기 위하여 수분함량 49.01~77.55%, 지방함량 1.38~37.05% 범위의 돼지고기의 열확산도를 추정식(5)로부터 구하고, 그 값을 식(2)~(4)로 구한 값과 비교하여 그 차이를 Table 2에 나타내었다.

실제 돼지고기 제품의 열처리 온도범위인 80~121°C에서 식(5)를 이용하여 구한 열확산도는 식(2)~(4)로 구한 열확산도를 기준으로 그 차이가 Table 2에서와 같이 ±1.7% 미만이었다. 따라서 식(5)를 이용하여 돼지고기 제품의 열확산도를 큰 오차없이, 그리고 손쉽게 추정할 수 있음을 확인하였다.

#### 요 약

축육제품의 실제 열처리 온도범위에서 적용가능한 열확산도 추정식을 제시하고자, 식염 1.5%, 중합인산염 0.2%, lard 및 대두단백질을 임의의 농도로 혼합한 돼지고기를 사용하여 열전달실험을 행하고 열확산도 추정식을 구하였다. 수분함량 49.01~77.55%, 가열온도 80.76~121.03°C의 범위에서 열확산도는 동일온도에서는 수분함량의 증가에 따라, 동일 수분함량에서는 가열온도가 높아짐에 따라 커졌으며, 각 온도에서의 실측 열확산도는 다음의 식들로 나타낼 수 있었다.  $\alpha_p, (80.76 \pm 0.3^\circ\text{C}) = 0.0869 \cdot 10^{-6} \cdot X_w + 0.0720 \cdot 10^{-6}, (m^2 \cdot s^{-1}, r=0.9230)$   $\alpha_p, (98.59 \pm 0.3^\circ\text{C}) = 0.0849 \cdot 10^{-6} \cdot X_w + 0.0818 \cdot 10^{-6}, (m^2 \cdot s^{-1}, r=0.9264)$   $\alpha_p, (121.03 \pm 0.5^\circ\text{C}) = 0.0909 \cdot 10^{-6} \cdot X_w + 0.0893 \cdot 10^{-6}, (m^2 \cdot s^{-1}, r=0.9507)$  이 식들을 종합한, 임의의 온도에서의 열확산도 추정식은 다음과 같았으며 이로부터 구한 열확산도와 실측치의 차이는 실측치를 기준으로 ±1.7% 이내였다.  $\alpha_p = (2.1394 + 0.5 \cdot X_w) \cdot \alpha_w + 0.0035 \cdot 10^{-6} \cdot X_w - 0.2785 \cdot 10^{-6}, (m^2 \cdot s^{-1})$ .

#### 기호 설명

B<sub>n</sub> : n-th root of the equation  $J_0=0, (-)$

$F_{oc}$  : Fourier number for infinite cylinder, (-)  
 $F_{opt}$  : Fourier number for infinite plate, (-)  
 $J_0$  : Bessel function of 1st kind of order zero, (-)  
 $J_1$  : Bessel function of 1st kind of order one, (-)  
 $R$  : radial distance from midpoint, (m)  
 $R_{max}$  : maximal radius, (m)  
 $T$  : temperature of product at time  $t=t$ , ( $^{\circ}C$ )  
 $T_h$  : temperature of heating medium, ( $^{\circ}C$ )  
 $T_i$  : initial temperature of product, ( $^{\circ}C$ )  
 $x$  : distance from midpoint of plate, (m)  
 $\Delta x$  : Half thickness of plate, (m)  
 $X_w$  : mass fraction of water in food, (-)  
 $\alpha_p$  : thermal diffusivity of product, ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )  
 $\alpha_w$  : thermal diffusivity of water at heating temperature, ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )

감사의 글

본 연구는 부산수산대학교 해양산업개발연구소(ER-C)의 해양식량개발연구부와 고성물산주식회사와의 협력에 의하여 수행되었음을 밝힙니다.

문헌

1. Riedel, L. : Temperaturleitfähigkeitsmessungen an wasserreichen Lebensmitteln. *Kältetechnik-Klimatisierung*, **21**, 315 (1969)
2. Gaffney, J. J., Baird, C. D. and Eshleman, W. D. : Review and analysis of the transient method for determining thermal diffusivity of fruits and vegetables. *ASHRAE Trans.*, **2**, 261 (1980)
3. Martens, T. : Mathematical model of heat processing in flat containers. *Ph. D. Thesis*. Katholieke Univ., Leuven, Belgium (1980)
4. Singh, R. P. : Thermal diffusivity in food processing. *Food Technol.*, **36**(2), 87 (1982)

5. Han, B. H. and Loncin, M. : Thermal diffusivities of fish products. *Lebensm. Wiss. u. Technol.*, 159 (1984)
6. 한봉호, 최수일, 김종철, 배태진, 조현덕 : 연제품류의 열확산도 추정에 관한 연구. 1. 성분조성 및 텍스처의 열확산도에 대한 영향. *한국수산학회지*, **21**(5), 277 (1988)
7. 한봉호, 최수일, 김종철, 배태진, 조현덕 : 연제품류의 열확산도 추정에 관한 연구. 3. 가열매체의 열확산도에 대한 영향. *한국수산학회지*, **21**(5), 292 (1988)
8. 한봉호, 최수일, 김종철, 배태진, 조현덕 : 연제품류의 열확산도 추정에 관한 연구. 5. 적색육 어육 연제품의 열확산도. *한국수산학회지*, **21**(6), 366 (1988)
9. 최수일, 한봉호, 김종철, 배태진, 조현덕 : 연제품류의 열확산도 추정에 관한 연구. 2. 가열온도 및 이단가열의 열확산도에 대한 영향. *한국수산학회지*, **21**(5), 288 (1988)
10. 최수일, 한봉호, 김종철, 배태진, 조현덕 : 연제품류의 열확산도 추정에 관한 연구. 4. 백색육 어육 연제품의 열확산도. *한국수산학회지*, **21**(6), 361 (1988)
11. Dickerson, R. W. Jr. and Read, R. B. Jr. : Calculation and measurement of heat transfer in foods. *Food Technol.*, **21**, 1533 (1968)
12. Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C. : *Conduction of heat in solids*. Oxford Univ. Press, Oxford, England, p. 150 (1959)
13. Newman, A. B. : Temperature distribution in initially heated cylinder. *Trans. Amer. Inst. Chem. Eng.*, **24**, 315 (1930)
14. Ramaswamy, H. S., Lo, K. V. and Tung, M. A. : Simplified equations for transient temperatures in conductive food with convective heat transfer at the surface. *J. Food Sci.*, **47**, 2042 (1982)
15. Rizvi, S. S. H., Bleisdell, J. L. and Haper, W. J. : Thermal diffusivities of model meat analog system. *J. Food Sci.*, **45**, 1727 (1980)
16. Griffith, C. L. : Specific heat, thermal conductivity, density and thermal diffusivity of Mexican Tortillas Dough. *J. Food Sci.*, **50**, 1333 (1985)
17. Nesvadba, V. E. and Eunson, C. : Moisture and temperature dependence of thermal diffusivity of cod mince. *J. Food Technol.*, **59**, 585 (1984)

(1992년 11월 5일 접수)