煉製品類의 熱擴散度 推定에 關한 硏究*
3. 加熱媒體의 熱擴散度에 대한 영향

韓 鳳 浩·崔 秀 逸**·金 鍾 鐵·裵 泰 進·趙 顯 德
釜山水産大學 食品工學科

Prediction of Thermal Diffusivities of Fish Meat Paste Products
3. Influence of Heating Medium on the Thermal Diffusivities

Bong-Ho HAN, Soo-Il CHOI,** Jong-Chul KIM, Tae-Jin BAE, and Hyun-Duk CHO
Department of Food Science and Technology, National Fisheries University of Pusan, Pusan 608 - 737, Korea

In this paper, the influence of heating medium on the thermal diffusivities of fish meat paste products was studied. Model products were heated in boiling water, saturated steam and soybean oil. The differences in temperature raise of the products were interpreted with Biot number of the products.

Because of the large overall heat transfer coefficient of heating medium, the temperature raise of the products in boiling water and saturated steam was fast and the Biot number of the products could be recognized as infinite. But the temperature raise of the products in soybean oil was slow and the Biot number of the products was less than 50.

緖 論

煉製品類의 熱處理工程을 數學的으로 推定可能케 하기위한 일련의 硏究로서 前報에서는 成分組成 및 텍스튜어와 熱擴散度와의 관계 (韓등, 1988), 加熱溫度 및 二段加熱과 熱擴散度와의 관계 (崔등, 1988)를 검토하였다. 그런데 Wardsworth and Spadaro (1969)는 食品의 熱擴散度가 加熱媒體의 總括熱傳達係數에 따라 달라진다고 하였으며, 朴 (1986)은 大豆油를 加熱媒體로한 魚肉소시지의 熱擴散度가 포화 수증기를 加熱媒體로한 Han and Loncin (1985)의 경우에 비하여 그 값이 12.3% 程度 낮아짐을 확인한 바 있다. 따라서 本 實驗에서는 加熱媒體의 種類가 魚肉煉製品의 熱擴散度에 미치는 영향을 검토하였다.

材料 및 方法

1. 試料

前報 (韓등, 1988 ; 崔등, 1988)에서와 같이 부원료와 혼합하여 축합 인산염과 식염의 濃度가 0.3% 및 3.0%, 水分, 蛋白質, 脂肪, 炭水化物, 및 灰分의 含量이 각각 43.00~82.49%, 9.17~36.08%, 0.50~14.88%, 1.00~29.29% 및 0.18~2.52% 범위가 되게한 명태, *Theragra chalcogramma*, 말쥐치, *Navodon modestus*, 고기풀을 使用하였다.

2. 實驗裝置

前報 (韓등, 1988 ; 崔등, 1988)에서와 同一한 裝置 및 模型容器를 使用하였으며, 加熱媒體로는 高壓殺

* 本 硏究는 1986年度 韓國科學財團 硏究費 지원에 의해 이루어졌음.

** 東明專門大學 食品加工科
(Department of Food Technology, Dong Myung Junior College, Pusan 608-080, Korea)

菌솥의 경우 포화 수증기를, 恒溫槽의 경우 끓는 물과 大豆油를 使用하였다.

3. 實驗方法

熱傳達實驗은 前報(韓등, 1988 ; 崔등, 1988)에서와 동일한 方法으로 행하였으며, 熱擴散度 역시 前報(韓등, 1988 ; 崔등, 1988)에서와 同一한 方法으로 $(\vartheta_R-\vartheta)\leqq 10℃$ 및 $F_0\geqq 0.2$의 범위(Ramaswamy et al. 1982)에서 Fourier 제2식의 解(Carslaw and Jaeger, 1959)와 Newman의 方法(Newman, 1930)으로 구하였다. 즉, 無限平版의 경우 Fourier 제2식의 解는

$$\left(\frac{\vartheta_R-\vartheta}{\vartheta_R-\vartheta_0}\right)_{pl}=\frac{4}{\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{(-1)^{n+1}}{(2n-1)}\cdot\cos\left[\frac{2n-1}{2}\cdot\pi\cdot\frac{x}{\Delta x}\right]\cdot\exp\left[-\left(\frac{2n-1}{2}\right)^2\cdot\pi^2\cdot Fo_{pl}\right]\cdots(1)$$

無限 원기둥의 경우에는

$$\left(\frac{\vartheta_R-\vartheta}{\vartheta_R-\vartheta_0}\right)_{cyl}=2\sum_{n=1}^{\infty}\frac{J_0(B_n\cdot R/R_{max})}{B_n\cdot J_1(B_n)}\cdot\exp\left(-B_n^2\cdot Fo_{cyl}\right).\cdots\cdots(2)$$

Newman의 方法(Newman, 1930)에 따르면 本 實驗에 使用한 有限 원기둥형 容器의 경우 고기풀의 時間에 따른 溫度分布는 식(1)과 (2)의 곱으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{\vartheta_R-\vartheta}{\vartheta_R-\vartheta_0}\right)=\left(\frac{\vartheta_R-\vartheta}{\vartheta_R-\vartheta_0}\right)_{pl}\cdot\left(\frac{\vartheta_R-\vartheta}{\vartheta_R-\vartheta_0}\right)_{cyl}\cdots(3)$$

그리고 실제로 溫度를 測定한 冷點에서는 식 (1)에서 $x=0$, 식 (2)에서 $R=0$이므로 식 (3)은 다음과 같이 나타내어 진다.

$$\left(\frac{\vartheta_R-\vartheta}{\vartheta_R-\vartheta_0}\right)=\left\{\frac{4}{\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{(-1)^{n+1}}{2n-1}\cdot\exp\left[-\left(\frac{2n-1}{2}\right)^2\cdot\pi^2\cdot Fo_{pl}\right]\right\}\cdot\left\{2\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{B_n\cdot J_1(B_n)}\cdot\exp\left(-B_n^2\cdot Fo_{cyl}\right)\right\}\cdots\cdots(4)$$

또한 無限 원기둥형 容器의 경우에도 冷點에서는 $R=0$이므로 식(2)는 다음과 같이 된다.

$$\left(\frac{\vartheta_R-\vartheta}{\vartheta_R-\vartheta_0}\right)_{cyl}=2\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{B_n\cdot J_1(B_n)}\cdot\exp\left(-B_n^2\cdot Fo_{cyl}\right)\cdots\cdots(5)$$

식 (1)부터 (5)까지에서

B_n : n-th root of the equation $J_0(B_n)=0$ (−)

Fo_{cyl} : Fourier number for infinite cylinder (−)

Fo_{pl} : 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)

x : distance from midpoint (m)

Δx : half thickness (m)

ϑ : temperature (℃)

ϑ_0 : initial temperature (℃)

ϑ_R : heating temperature (℃).

따라서 加熱時間에 따른 冷點에서의 溫度를 測定하고, 測定된 時間과 溫度를 식(4)와 (5)에 대입하여 試料 고기풀의 熱擴散度를 구하였다.

結果 및 考察

一般的으로 加熱媒體로부터 食品에로의 熱傳達過程에서 熱傳達에 대한 食品의 傳熱抵抗, 즉 表面熱傳達抵抗의 정도는 다음과 같이 정의되는 Biot number에 의하여 비교된다.

$$Bi=\frac{U\cdot\ell}{\lambda}\cdots\cdots(6)$$

여기서,

Bi : Biot number (−)

U : overall heat transfer coefficient ($W\cdot m^{-2}\cdot K^{-1}$)

ℓ : half thickness or radius (m)

λ : thermal conductivity ($W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$).

Heldman (1975)은 Biot number가 40을 초과하면 表面熱傳達抵抗은 加熱對象食品의 內部熱傳達抵抗(internal resistance to heat transfer)에 비하여 무시될 수 있고, 0.1이하이면 食品의 內部熱傳達抵抗은

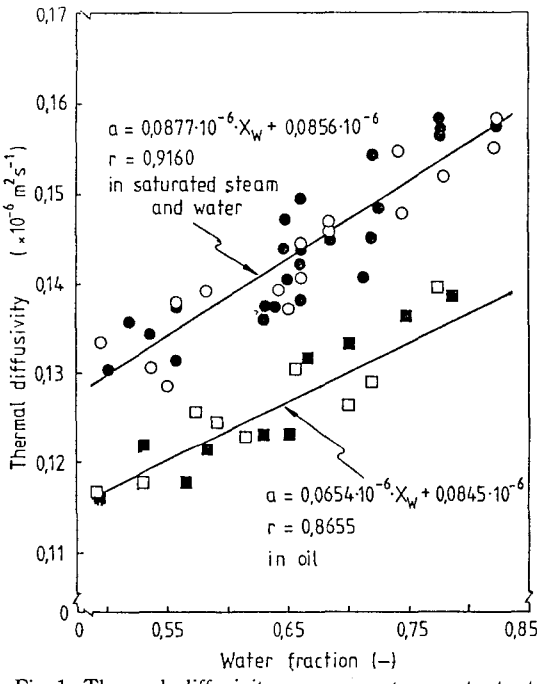

Fig. 1. Thermal diffusivity versus water content at 100.63± 0.80℃ in different heating media.●■: Filefish, ○,□: Alaska pollack.

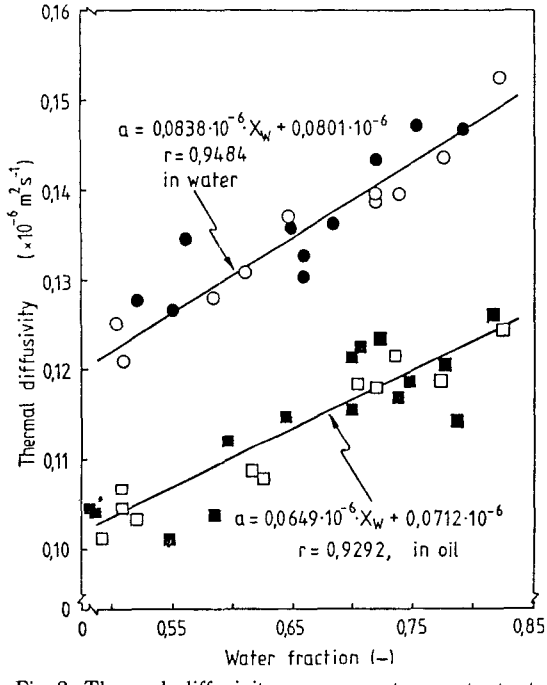

Fig. 2. Thermal diffusivity versus water content at 80.39± 0.50℃ in different heating media.●, ■: Filefish, ○,□: Alaska pollack.

表面熱傳達抵抗에 비하여 무시될 수 있다고 하였다. 그러나 Ramaswamy et al. (1982)은 非定常狀態의 傳導傳熱에 의한 加熱工程에서 加熱媒體로 사용되는 포화 수증기나 끓는 물의 總括熱傳達係數는 매우 커서 食品의 Biot number가 50을 초과한다고 하였다. 그리고 Heldman (1975)의 說明과 같이 表面熱傳達抵抗을 무시하게 되면 食品內部溫度의 豫測値는 實測値와 비교하여 무시할 수 없는 誤差를 나타내며, 그 誤差는 Fourier number가 커질수록 커지고 Biot number가 커질수록 작아진다고 하였다. Gustavo (1968)는 토마토 퓨레를 對象으로 한 傳導傳熱實驗에서 121℃의 수증기를 加熱媒體로 하고 表面熱傳達抵抗을 무시하였을 경우, 즉 Biot number가 무한대로 접근할 때 中心溫度의 豫測値는 實測値와 잘 일치한다고 하였다. 그러나 攪拌되지 않는 96.6℃의 물을 加熱媒體로 하였을 때의 中心溫度의 實測値는 Biot number를 20으로 가정하였을 때가 Biot number를 무한대로 가정하였을 때보다 오히려 豫測値와 잘 일치한다고 보고하였다.

Dickerson and Read (1968)에 의하면 대개의 加熱工程에 이용되는 高壓殺菌솥이나 격렬히 攪拌되는 恒溫水槽에서는 表面熱傳達抵抗을 무시할 수 있다고 하였다. 실제로 100℃의 수증기에서 닭고기를 熱處理하였을 때, Biot number를 무한대로 하였을 때의 熱擴散度를 이용하여 計算한 닭고기의 內部溫度는 實測 熱浸透曲線上의 溫度와 1℃ 내외의 차이를 나타내었다고 하였다.

本 實驗에서 魚肉煉製品의 경우 Fig.1과 Fig.2에 나타낸 바와 같이 加熱媒體가 물인 경우와 포화 수증기인 경우에 熱擴散度는 차이를 나타내지 않았으며, 수분 함량을 기준으로 다음과 같은 하나의 회귀직선식을 얻을 수 있었다.

$$a_{100\cdot 63℃}(W\&S) = 0.0877 \cdot 10^{-6} \cdot X_w + 0.0856 \cdot 10^{-6} \quad \cdots\cdots (7)$$

$$r = 0.9160$$

여기서,

a : thermal diffusivity ($m^2 \cdot s^{-1}$)

W&S : water and saturated steam (–)

X_W : mass fraction of water in product (–).

그러나 동일 溫度에서 대두유를 加熱媒體로 하여 구한 熱擴散度는 식 (7)과는 차이를 보여서, 다음과 같이 나타낼 수 있었다.

$$a_{100\cdot 63℃}(O) = 0.0654 \cdot 10^{-6} \cdot X_w + 0.0845 \cdot 10^{-6} \quad \cdots (8)$$

$$r = 0.8655$$

80.39℃에서도 동일한 結果를 확인할 수 있었으며, 加熱媒體에 따른 熱擴散度는 식 (9)와 식 (10)으로

나타낼 수 있었다.

$\alpha_{80.39℃}(W) = 0.0838 \cdot 10^{-6} \cdot X_w + 0.0801 \cdot 10^{-6}$ … (9)

$r = 0.9484$

$\alpha_{80.39℃}(O) = 0.0649 \cdot 10^{-6} \cdot X_w + 0.0712 \cdot 10^{-6}$ … (10)

$r = 0.9292$

여기서,

W : water (−)

O : soybean oil (−).

成分組成이 일정한 魚肉燻製品의 경우 熱擴散度는 동일 溫度에서는 고유의 값이어야 함에도 불구하고 이와 같이 熱擴散度가 加熱媒體에 따라 뚜렷한 차이를 나타내는 것은, 물이나 포화 수증기의 경우에는 Dickerson and Read (1968)의 지적과 같이 魚肉燻製品의 表面熱傳達抵抗을 무시할 수 있을만큼 總括熱傳達係數가 크지만, 대두유의 경우에는 總括熱傳達係數가 작아서 表面熱傳達抵抗을 무시할 수 없었기 때문으로 생각된다.

Ramaswamy et al. (1982)은 非定常狀態의 傳導傳熱에서 정확한 熱浸透曲線의 推定을 위하여 식 (1)과 (2)를 다음과 같이 표현하였다.

$$\left(\frac{\vartheta_R - \vartheta}{\vartheta_R - \vartheta_0}\right)_{pl} = R_{pl} \cdot \exp(-S_{pl} \cdot Fo_{pl}) \cdots\cdots (11)$$

$$\left(\frac{\vartheta_R - \vartheta}{\vartheta_R - \vartheta_0}\right)_{cyl} = R_{cyl} \cdot \exp(-S_{cyl} \cdot Fo_{cyl}) \cdots (12)$$

여기서 R_{pl}, S_{pl}, R_{cyl} 및 S_{cyl}은 다음과 같이 Biot number의 함수로 정의 되었다.

$$R_{pl} = 0.1138 \cdot \tan^{-1}(Bi) + 0.1111 \cdot \tan^{-1}(Bi/3) - 0.05142 \cdot \tan^{-1}(Bi/7) + 1.0016 \cdots\cdots (13)$$

$$S_{pl} = 2.0738 \cdot Bi/(Bi+2) + 0.2795 \cdot \tan^{-1}(Bi/3) - 0.02915 \cdot \tan^{-1}(5Bi) + 0.001171 \cdots\cdots (14)$$

$$R_{cyl} = 0.4411 \cdot \tan^{-1}(Bi/2) + 0.007242 \cdot \tan^{-1}(11Bi) - 0.1021 \cdot Bi/(Bi+11) + 0.9984 \quad (15)$$

$$S_{cyl} = 4.1093 \cdot Bi/(Bi+2) + 1.2365 \cdot \tan^{-1}(Bi/3) - 0.1641 \cdot \tan^{-1}(2Bi) - 0.007762 \quad (16)$$

그리고 식 (13)~(16)을 이용하여 구한 熱處理對象食品의 Biot number 범위를 Table 1에서와 같이 제시하였다.

本 實驗에 사용된 有限 원기둥형 魚肉燻製品의 冷點에서의 溫度比는 Newman의 方法 (Newman, 1930)에 따라 식 (11)과 식 (12)의 곱으로 다음과 같이 나타낼 수 있었다.

$$\left(\frac{\vartheta_R - \vartheta}{\vartheta_R - \vartheta_0}\right) = R_{pl} \cdot R_{cyl} \cdot \exp\left[-(S_{pl} \cdot Fo_{pl} + S_{cyl} \cdot Fo_{cyl})\right] \cdots\cdots (17)$$

Table 1. Some properties of R and S functions calculated at low and high Biot number*

Biot number	Infinite plate		Infinite cylinder	
	R_{pl}	S_{pl}	R_{cyl}	S_{cyl}
0	1.000	0.000	1.000	0.000
0.02	1.003	0.020	1.005	0.040
50.0	1.273	2.372	1.600	5.557
100.0	1.273	2.419	1.601	5.669
Infinite	1.273	2.467	1.602	5.783

*Cited from Ramaswamy et al. (1982)

本 實驗에서 加熱媒體가 물과 포화 수증기인 100.63±0.80℃에서의 熱浸透曲線을 對象으로 식(17)과 Table 1의 값을 이용하여 Biot number를 구하였을 때, Dickerson and Read (1975), Gustavo (1968)의 보고와 같이 Biot number가 무한대였다. 그러나 加熱媒體가 대두유인 경우에는, 물과 포화 수증기를 加熱媒體로 하여 구한 熱擴散度를 식(17)에 적용하면 Biot number는 50 이하였다.

이와 같이 加熱媒體가 대두유인 경우 Biot number가 물과 포화 수증기일 때의 그것에 비하여 작은 것은, 동일 製品이라 하더라도 식 (6)에서 熱傳導度와 密度는 동일하나, 대두유의 總括熱傳達係數가 물과 포화 수증기의 總括熱傳達係數에 비하여 훨씬 작기 때문으로서, 이는 加熱媒體의 粘度差에 기인하는 것으로 생각되었다.

따라서 加熱媒體가 대두유인 경우 魚肉燻製品의 表面熱傳達抵抗이 크게 작용하였기 때문에 加熱媒體가 물과 포화 수증기인 경우에 비하여 熱擴散度가 작게 나타났던 것으로 생각되었다.

結論 및 要約

燻製品類의 熱處理工程을 數學的으로 推定可能케 하기위하여 1報 (韓 등, 1988), 2報 (崔 등, 1988)에 이은 硏究의 일환으로서 加熱媒體가 燻製品의 熱擴散度에 미치는 영향을 검토하였다.

成分組成을 무작위하게한 명태 및 말쥐치 고기풀을 試料로 하고, 100.63℃ 및 80.39℃의 끓는 물, 포화 수증기 및 大豆油를 加熱媒體로 하여 熱傳達實驗을 행하였고 Fourier 제 2식의 解와 Newman의 方法으로 熱擴散度를 구하였으며, 그 結果는 다음과 같이 要約할 수 있었다.

加熱媒體는 그 種類에 따라 魚肉燻製品의 熱擴散度에 크게 영향을 끼쳤으며, 끓는 물과 포화수증기의 경우 魚肉燻製品의 Biot number는 무한대로 評價되었으나 大豆油가 加熱媒體인 경우에는 Biot

number가 50이하였다.

文　　獻

Carslaw, H. S. and J. C. Jaeger. 1959. Conduction of heat in solids. Oxford Univ. Press, Oxford, England, 150p.

Dickerson, R. W. and R. B. Jr. Read. 1968. Calculation and measurement of heat transfer in foods. Food Technol., 22, 1533～1535, 1545～1548.

Gustavo, F. L. 1975. Estimation of central temperature of thermally conductive food in cylindrical and rectangular cans during heat processing. J. Food Sci., 41, 685～690.

Han, B. H. and M. Loncin. 1985. Thermal diffusivities of fish products. Lebensm. －Wiss. u. －Technol. 18,|159～163.

Heldman, D. R. 1975. Food process engineering. The AVI Publ. Co. Inc., Westport C.T.

Newman, A. B. 1930. Temperature distribution in internally heated cylinder. Trans. Amer. Inst. Chem. Eng. 24, 44～54.

Ramaswamy, H. S., K. V. Lo and M. A. Tung. 1982. Simplified equations for transient temperatures in conductive food with conductive heat transfer at the surface. J. Food Sci. 47, 2042～2047.

Wardsworth, J. I. and J. J. Spadaro. 1969. Transient temperature distribution in whole seed potato roots during immersion heating. J. Food Sci. 23 (2), 85～89.

朴相珉. 1986. 畜肉 및 魚肉 소시지의 熱擴散度에 關한 硏究. 釜山水産大學 工學碩士學位 論文.

崔秀逸・韓鳳浩・金鍾鐵・裵泰進・趙顯德. 1988. 煉製品類의 熱擴散度 推定에 關한 硏究 2. 加熱溫度 및 二段加熱의 熱擴散度에 대한 영향. 韓水誌 21(5), 288～291.

韓鳳浩・崔秀逸・金鍾鐵・裵泰進・趙顯德. 1988. 煉製品類의 熱擴散度 推定에 關한 硏究 1. 成分組成 및 텍스튜어의 熱擴散度에 대한 영향. 韓水誌 21(5), 277～287.

1988년　8월 31일 접수
1988년 10월 11일 수리