

다중회귀분석에 의한 식품의 동결시간 예측

정진웅 · 김종훈 · 박노현 · 이승현 · 김영동
한국식품개발연구원

Freezing Time Prediction of Foods by Multiple Regression Analysis

Jin-Woong Jeong, Jong-Hoon Kim, Noh-Hyun Park, Seung-Hyun Lee and Young-Dong Kim

Korea Food Research Institute

Abstract

To develop simple and accurate analytical method for freezing time prediction of beef and tylose under various freezing conditions, freezing time (Y) was regressed against the reciprocal (X_3) of difference of initial freezing point and freezing medium temperature, reciprocal (X_4) of surface heat transfer coefficient, the initial temperature (X_1) and thickness (X_2) of samples which should cover most situations arising in frozen food industry. As results of the multiple regression analysis, equations were obtained as follows. $Y_{\text{tylose}}=3.45X_1+7642.84X_2+4642.67X_3+2946.89X_4-431.33$ ($R^2=0.9568$) and $Y_{\text{beef}}=0.68X_1+7568.98X_2+2430.78X_3+3293.26X_4-299.00$ ($R^2=0.9897$). These equations offered better results than Plank, Nagaoka and Pham's models, shown in satisfactory agreement with models of Cleland & Earle and Hung & Thompson when were compared to previous models, and the accuracy of its was very high as average absolute difference of about 10% in the difference between the fitted and experimental results. Also, thermal diffusivities of beef and tylose were measured as $4.43 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{hr}$ and $4.39 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{hr}$ at $6\sim 7^\circ\text{C}$, $2.42 \times 10^{-3} \text{m}^2/\text{hr}$ and $3.32 \times 10^{-3} \text{m}^2/\text{hr}$ at $-10\sim -12^\circ\text{C}$. Initial freezing points of beef and tylose were -1.2°C and -0.6°C , respectively. Surface heat transfer coefficients were estimated $20.57 \text{W/m}^2\text{C}$ with no-packing, $16.11 \text{W/m}^2\text{C}$ with wrap packing and $13.07 \text{W/m}^2\text{C}$ with Al-foil packing, and the cooling rate of immersion freezing method was about 10 times faster than that of air blast freezing method.

Key words: freezing time prediction, beef, tylose, multiple regression analysis

서 론

식품동결의 경제적 측면과 가공의 요구조건 및 품질을 평가하기 위해서는 식품의 정확한 동결시간 예측은 대단히 중요하다. 지금까지 동결시간 예측을 위해 문헌상에서 많은 모델이 제안되어 왔으나 동결과정은 moving boundary problem 즉, 상변화를 포함한다는 것과 대부분이 단상(single phase)이 아니라는 문제로 비정상 상태(unsteady state)의 해(solution)로서는 쉽게 해결되지 않고 있다. 또한, 동결이 진행되는 동안 식품은 모든 온도 범위에 걸쳐 잠열을 방출할 뿐만 아니라 동결동안 일정한 열물성치를 가지지 않기 때문에 식품의 동결을 예측하는 정확한 수학적 모델은 아직까지 없는 실정이다⁽¹⁾.

이러한 동결시간 예측에 관한 연구는 현재 Plank 방정식을 기초로 한 단순한 해석적 모델 개발과 유한요소와 같은 수치해석적 방법으로 크게 구분되는 데, 후자는 광범위한 수학적 지식과 컴퓨터 프로그램 작업이 요구되는 것으로 실제 현장에서는 그다지 적용되지 못하고 있다. 따라서 최근에는 정확한 해석적 방정식을 유도하기 보다 근사적이며 단순한 경험적 관계식을 찾으려고 노력하고 있다^(1,2). 국내에서는 지금까지 동결시간예측에 필요한 연구실적이 그다지 없는 실정으로, Plank방정식을 변형시킨 근사적인 해석적 방법으로 정과 공⁽³⁾에 의해 일부 연구가 진행된 바 있으며, 주로 지금까지는 외국에서 Cleland와 Earle^(4,9), Hung과 Thompson⁽¹⁰⁾, Pham⁽¹¹⁻¹³⁾, Mascheroni와 Calvelo^(14,15) 등에 의해 연구되어 왔으나, 이러한 냉동에 관한 공학적 연구가 진행되어진 것은 불과 30-40년 정도에 지나지 않는 실정이어서 예측에 필요한 주요 물성치 데이터는 대부분 타 연구자의 데이터를 인용하거나 tylose 등 한정

Corresponding author: Jin-Woong Jeong, Korea Food Research Institute, San 46-1 Baekhyun-dong, Bundang-gu, Songnam-si, Kyonggi-do 463-420, Korea

된 시료를 대상으로 예측 모델을 개발하였으므로 실험데이터가 매우 빈약하다^(10,11).

따라서 본 연구에서는 서로 다른 동결조건 및 방법에 따른 우육 및 gel상 모델 시료인 tylose의 단순하며 간편한 동결시간을 예측하기 위한 모델을 제시하고 지금까지 발표된 대표적 모델을 대상으로 비교 검토한 결과를 소개하고자 한다.

재료 및 방법

공시재료

본 실험에 사용한 시료는 23% methylcellulose와 77% 수분으로 된 gel상 모델 시료인 tylose와 우육을 사용하였으며, 우육은 살코기 부위만을 선별하여 두께별(Table 5)로 일정 크기(10 cm×10 cm, 오차: ±0.5 cm)로 성형한 후 일정 온도로 유지시켰다.

동결실험

각 시료에 있어 동결시간의 정확도를 고려하여 실제 동결상황에서 일어나는 것과 유사한 범위의 조건 하에서 실험을 실시하였다. 동결은 2원냉동시스템의 초저온 동결고(모델; SW- UF 400, 삼원냉열ENG.)를 이용하여 고내(유효면적; L1,850×W850×H980 mm) 중심부에 설치한 트레이 위에 시료를 얹어 놓고, -20~-50°C범위에서 온도조절기와 송풍량으로 온도를 조절하였다. 동결온도 및 시간 측정은 0.3 mm 동-콘스탄탄 열전대를 시료의 기하학적 중심부에 부착하여 중심온도가 -18°C에 도달할 때까지 자동온도기록계(Data Logger, Model: DIGISTRIP III, USA)를 이용하여 1분 간격으로 연속 측정하였다.

물성치 측정

측정시료의 동결 전후의 밀도는 부피에 대한 중량의 비로써 산정하였으며, 동결상태의 경우는 일정량의 시료를 비중병에 주입하여 처리온도 별로 약 24시간 동결시킨 후의 체적과 동결전의 중량으로 구하였다. 초기빙결점은 Beckmann법^(16,18)에 의해 열평형 온도대를 외삽하여 결정하였으며, 표면열전달계수는 Creed와 James⁽¹⁷⁾의 총괄열전달계수의 산출을 위한 transient temperature method를 적용하였고, 비열은 빙결점 이상의 온도에서는 Siebel⁽¹⁸⁾의 실험식에 의해, 빙결점 이하의 온도에서는 Yano⁽¹⁸⁾의 실험식으로 산정하였으며, 잠열은 Woolrich⁽¹⁹⁾의 실험식으로, 동결동안 제거되는 전열량은 시료의 초기온도와 최종동결온도사이의 total enthalpy 차와 DSC (모델: UNIX DSC 7, PERKIN ELM-

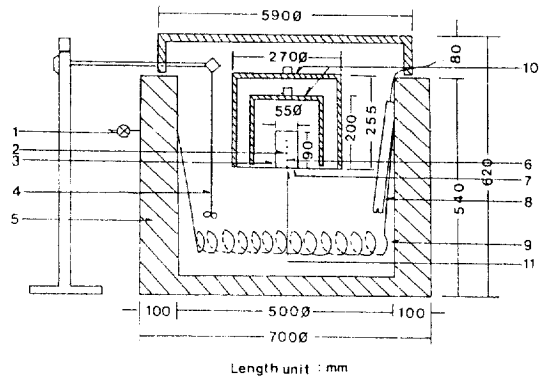


Fig. 1. Schematic diagram of experimental installation for measuring Thermal diffusivity. 1. Expansion valve, 2. Sample, 3. Sample container, 4. Insulating vessel, 6. Thermocouple, 7. Copper cooling plate, 8. Heater, 9. Refrigerant pipe, 10. Lid, 11. Thermocouple for temperature control

ER Co. U.S.A.)를 이용하여 비교 산출하였다. 그리고, 열전도도를 추정하기 위해 열확산율을 측정하여 $k = \alpha \cdot \rho \cdot C_p$ 식(여기서 α =열확산율(m^2/hr), ρ =밀도(kg/m^3), C_p =비열(J/m^3C))으로 산출하였다. 이를 위해 열확산율은 Fig. 1과 같은 측정장치를 제작하여 항온조에서 시간에 따른 온도변화를 연속 측정하여 curve fitting법⁽²⁰⁾을 이용하였다. 항온조내의 온도조절을 위하여 가열기 및 교반기를 설치하였으며, 시료용기는 PVC원통의 중심에 동판을 부착하여 그 위에 아크릴원통을 고정하였으며, 아크릴원통에는 밀면에서 1 cm간격으로 동-콘스탄탄 열전대를 5개 부착하였고, 시료의 표면온도를 측정하기 위하여 동판표면에 깊이 1 mm, 길이 3 cm의 홈을 파서 열전대를 부착하였다. 시료는 시료용기에 일정하게 채운 뒤 냉장고내에 24시간 저장하여 온도편차가 없도록 조절하였다. 그리고 수분은 상압 가열 건조법으로 측정하였다.

동결시간 계산 및 비교

본 연구에서는 실험조건에 따른 tylose 및 우육의 총 46개 데이터와 기존의 동결시간예측모델(Plank, Nagaoka⁽²¹⁾, Cleland & Earle⁽⁶⁾, Hung & Thompson⁽¹⁰⁾, Pham⁽²²⁾)과 비교 검토하기 위하여 각 모델을 Basic 및 Microsoft Excel (Version 5.0) 프로그램으로 계산 처리하였다.

결과 및 고찰

열물성치 측정

일반적으로 고체식품 및 고점도식품의 전열은 대부

Table 1. Comparison between published and measured values of thermal diffusivity for ice

Material	Temperature (°C)	Published ¹⁾ (m ² /hr)	Measured (m ² /hr)	Difference (%)
Ice	-5~-6	4.36 × 10 ⁻³	4.09 × 10 ⁻³	-6.2
			3.95 × 10 ⁻³	-10.4
			4.20 × 10 ⁻³	-3.7
	-17~-18	4.75 × 10 ⁻³	4.50 × 10 ⁻³	-5.3
			4.45 × 10 ⁻³	-6.3
		4.40 × 10 ⁻³	-7.4	

¹⁾Values from International Critical Tables.

분 전도에 의한 전열로서, 여기에 관여하는 비열 및 밀도는 비교적 추정 및 측정이 쉬우나 열전도도는 측정이 용이하지 않으므로 본 연구에서는 Fig. 1의 측정 장치를 이용하여 curve fitting법을 이용하여 열확산율을 구하므로써 열전도도를 추정하였다. 먼저, 열확산율 측정장치의 보정을 위해 -5°C~-6°C와 -17°C~-18°C에서 얼음의 시간에 따른 온도변화를 측정하여 구한 측정치와 비교 검토하였다. Table 1에서 보는 바와같이 3회의 측정치를 문헌치와 비교한 결과, 약 6%의 근소한 오차로 거의 일치하므로 측정장치의 정확도와 재현성을 입증하였다. 이와같이 하여 tylose 및 우육의 미동결상태와 동결상태에서의 열확산율을 구하여 밀도 및 비열 값(Table 4)을 대입하므로써 산출한 열전도도의 계산 결과를 Table 2에 나타내었다. Fig. 2는 시료통 plate의 온도가 0.75°C, 초기온도 7.2°C에 있어서 우육의 열확산율을 계산하기 위한 냉각곡선을 나타낸 것으로 6~7°C범위에서의 열확산율은 4.43 × 10⁻⁴ m²/hr, 이 때의 열전도율은 0.447 W/m²C로 계산되었다.

표면열전달계수는 냉각매체온도에 따라 변하는 시료의 표면온도를 직접 측정하여 반대수그래프에 냉각 시간과 무차원온도를 plotting하므로써 얻은 기울기를 이용하여 Creed와 James⁽¹⁷⁾의 transient temperature method로 포장조건별에 따른 다양한 표면열전달계수를 측정 한 결과, Table 3과 같이 나타내었다. Table 3에서 보는 바와같이 송풍식에서는 무포장시 20.57 W/m²C,

Table 2. Thermal diffusivity and thermal conductivity of beef and tylose in unfrozen and frozen state

Material	Temperature (°C)	Thermal diffusivity (m ² /hr)	Thermal conductivity (W/m°C)
Beef	6~7	4.43 × 10 ⁻⁴	0.447
	-10~-12	2.42 × 10 ⁻³	1.273
	-20~-21	2.66 × 10 ⁻³	1.399
	-41~-42	3.48 × 10 ⁻³	1.830
Tylose	6~7	4.39 × 10 ⁻⁴	0.424
	-10~-12	3.32 × 10 ⁻³	1.663

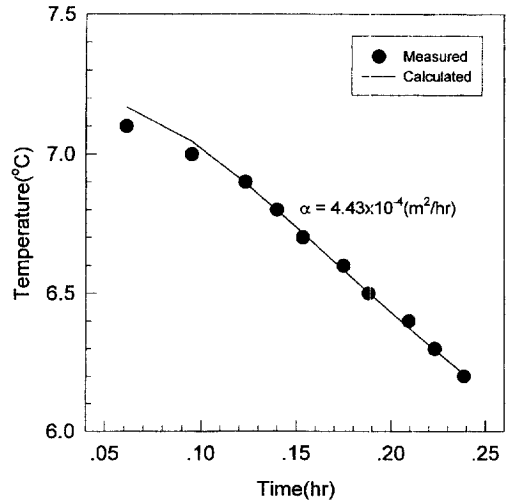


Fig. 2. Cooling curve of beef for calculating thermal diffusivity (T_p=0.75°C, T_f=7.2°C).

Table 3. Values of surface heat transfer coefficient and slope of freezing curve

Materials	Packaging combination ¹⁾	Air-blast freezing Immersion freezing			
		m ²⁾	h ³⁾	m	h
Beef	I	0.347	20.57	0.028	254.92
	II	0.443	16.11	0.045	158.62
	III	0.546	13.07	0.050	142.76
	IV	0.674	10.59	0.057	125.22
	V	0.812	8.79	0.079	90.35

¹⁾I: No packing, II: Wrap, III: Wrap/Al-foil, IV: Wrap/Al-foil/Polyethylene film, V: Wrap/Al-foil/Polyethylene film/Urethane board.

²⁾The slope of freezing curve.

³⁾The surface heat transfer coefficient.

wrap포장시는 16.11 W/m²C, wrap과 Al-foil로 포장한 경우에는 13.07 W/m²C로 계산되었고, 또한 침지식은 송풍식보다 기울기 즉, 냉각속도가 약 10배 이상 빠르게 나타났는 바, 이는 일반적으로 물의 열전도도 (0.593 W/m²C)가 공기(0.023 W/m²C)보다 매우 크기 때문이다.

한편, 시료의 빙결점은 동결 기작중의 중요한 인자의 하나로서 최적 동결조건 설정에 대단히 중요시되고 있으며 빙결점을 전후하여 식품의 물성이 크게 변하므로 중요한 의미를 갖는다. 따라서, 본 연구에서는 Beckmann^(16,18)에 의한 빙결점 측정법을 적용하여 직접 측정하였다. 즉, 수용액을 냉각하면 온도가 내려가고 빙결점이하로 되어도 빙결하지 않는 과냉각 현상이 나타난다. 그러나 과냉각은 불안정한 상태이므로 외

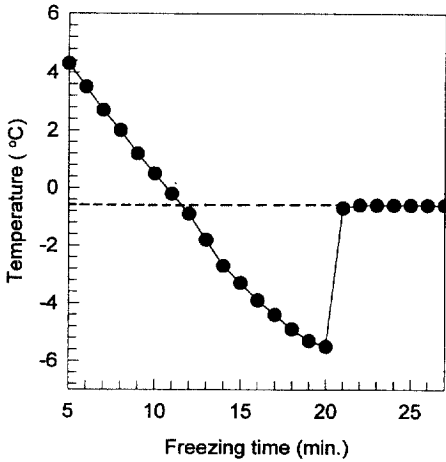


Fig. 3. Freezing point of tylose by Beckmann method.

부에서 충격을 주거나 일정한 시간이 경과하면 이 상태는 균형을 잃고 갑자기 품온이 빙점까지 상승한 후 일정온도를 유지하면서 빙결점이 생성되며, 이 때 열 평형온도대를 외삽하여 빙결점을 결정하였다. Fig. 3은 tylose의 냉각곡선으로 빙결점은 -0.6°C로 나타났으며, 우육은 -1.2°C로 측정되었다.

그 밖의 동결시간 예측을 위해 적용할 전열물성치의 산정 결과는 Table 4와 같다.

동결시간 예측모델

일반적인 Plank방정식의 형태는 식 (1)과 같다.

$$t = \frac{\Delta H}{(T_f - T_a)} \left(P \frac{D}{h} + R \frac{D^2}{k} \right) \quad (1)$$

여기서 ΔH 는 초기빙결점과 동결이 종료된 시점에서의 온도 사이의 엔탈피, T_f 는 빙결점, T_a 는 동결매체 온도, D 는 판상시료의 두께, h 는 표면열전달계수, k 는

동결상의 열전도도, P 와 R 은 형태인자이며, T_i 는 동결할 시료의 초기온도이다. 식 (1)에서 보면 실험인자로는 $D, h, T_f - T_a$ 로 구성되어 있으며 초기의 과열온도인 $(T_i - T_f)$ 는 없다. T_i 는 동결할 시료의 초기온도로서, Plank방정식을 이용한 동결시간 예측모델에서는 초기 온도에 대한 인자는 $T_i = T_f$ 의 가정 때문에 무시되어 왔기 때문이다. 이러한 결과로 인하여 실험인자로 해석할 때, Plank 방정식에 의해 예측한 시간은 상당한 차이가 있음을 보여 주었다³⁾.

한편, Plank방정식은 식 (2)와 같은 무차원수의 형태로 나타낼 수 있다.

$$F_0 = \left[\frac{P}{S_{te} \cdot B_i} \right] + \left[\frac{R}{S_{te}} \right] \quad (2)$$

여기서 Fourier Number, $F_0 = \frac{\alpha t}{D^2}$ (3)

Stefan Number, $S_{te} = C_s \frac{(T_f - T_a)}{\Delta H}$ (4)

Biot Number, $B_i = \frac{hD}{k}$ (5)

그리고 초기 과열은 식 (6)과 같은 무차원수에 의해 Plank Number로 정의하였다.

$$P_k = C_u \frac{(T_i - T_f)}{\Delta H} \quad (6)$$

따라서 무차원수는 일반적으로 다음 식으로 접근될 수 있다.

$$F_0 = f(B_i, P_k, S_{te}) \quad (7)$$

여기서 무차원수의 집단은 T_i, T_a, h, D 의 실험조건으로 구성되며, 이와같은 실험인자에 의하여 동결시간을 예측할 수 있는 간편한 모델을 모색하기 위하여

Table 4. Thermo-physical data of tylose and beef for freezing time prediction

	Tylose		Beef	
	Above ¹⁾	Below ²⁾	Above	Below
Density (kg/m ³)	1012.5	1001.5	1071.4	1051.5
Thermal conductivity (W/m°C)	0.42	1.66	0.45	1.40
Thermal diffusivity (m ² /hr)	4.39 × 10 ⁻⁴	3.32 × 10 ⁻³	4.43 × 10 ⁻⁴	2.72 × 10 ⁻³
Specific heat(J/m ³ °C) ³⁾	3.43 × 10 ⁶	1.81 × 10 ⁶	3.40 × 10 ⁶	1.80 × 10 ⁶
Latent heat (J/m ³) ⁴⁾	258.00 × 10 ⁶		255.69 × 10 ⁶	
Freezing point (°C)	-0.60		-1.20	
Water content (%)	77.0		76.1	

^{1),2)} means above freezing and below freezing.

³⁾ by Siebel and Yano⁽¹⁸⁾.

⁴⁾ by Woolrich⁽¹⁹⁾.

동결시간의 증가요소인 시료의 초기온도(X_1), 시료의 두께(X_2)와 동결시간의 감소요소인 시료의 초기빙결 점에서 동결매체 온도사이의 차의 역수(X_3) 및 표면열 전달계수의 역수(X_4)를 독립변수로 하고 동결시간(Y)

을 종속변수로 설정하여 Table 5의 실험적 데이터를 이용하여 통계 소프트웨어인 SAS (statistical analysis system, version 6.11)을 사용하여 다중회귀 분석을 실시하였다. 다중회귀 분석에서 독립변수는 변수선택법

Table 5. Experimental test conditions and results of tylose (T) and beef (B)

Run (#)	Int. temp. (°C)	Medium temp. (°C)	Surface heat transfer coefficient (W/m ² C)	Thick. (m)		Dimensionless values				Experimental freezing time (min)
				Weight (g)	F ₀	B _i	P _k	S _{ic}		
T-1	15.1	-29.9	20.57	0.013	17.475	0.160	0.157	0.154	60.2	
T-2	18.3	-25.0	20.57	0.028	10.356	0.345	0.183	0.125	171.8	
T-3	12.9	-30.1	20.57	0.013	16.878	0.160	0.138	0.159	57.6	
T-4	13.7	-30.1	20.57	0.048	-5.044	0.591	0.145	0.158	239.4	
T-5	29.6	-30.4	20.57	0.012	21.898	0.148	0.264	0.137	71.3	
T-6	30.2	-29.3	16.11	0.047	7.871	0.453	0.267	0.131	396.4	
T-7	13.5	-32.4	16.11	0.029	9.321	0.280	0.143	0.170	158.1	
T-8	26.3	-29.3	16.11	0.011	30.247	0.106	0.242	0.136	80.6	
T-9	29.6	-30.1	16.11	0.045	7.947	0.434	0.264	0.136	365.0	
T10	16.8	-30.9	16.11	0.012	23.717	0.116	0.171	0.157	70.1	
T11	14.2	-29.4	13.07	0.048	7.822	0.376	0.149	0.153	369.5	
T12	14.4	-25.7	13.07	0.011	36.645	0.086	0.151	0.133	90.8	
T13	30.2	-30.3	13.07	0.010	41.164	0.078	0.267	0.136	93.6	
T14	4.5	-30.0	13.07	0.048	6.710	0.376	0.057	0.173	321.2	
T15	4.4	-30.1	13.07	0.011	27.304	0.086	0.056	0.174	68.6	
T16	3.8	-30.6	10.59	0.011	32.711	0.070	0.050	0.178	82.9	
T17	18.0	-25.6	10.59	0.044	12.318	0.279	0.181	0.128	501.1	
T18	20.9	-34.9	10.59	0.027	15.232	0.171	0.203	0.171	232.5	
T19	17.4	-20.1	20.57	0.030	11.833	0.370	0.176	0.100	226.5	
T20	17.3	-25.0	20.57	0.027	10.592	0.333	0.175	0.126	161.8	
T21	17.3	-24.7	20.57	0.027	10.713	0.332	0.175	0.124	163.4	
T22	17.4	-25.2	20.57	0.027	10.525	0.333	0.176	0.127	160.6	
T23	17.9	-25.1	20.57	0.028	10.271	0.345	0.180	0.126	170.6	
B-1	9.0	-29.6	20.57	0.020/26.7	8.680	0.316	0.108	0.160	94.2	
B-2	4.8	-31.8	20.57	0.019/39.3	7.987	0.301	0.067	0.180	78.7	
B-3	7.2	-33.1	20.57	0.022/45.7	6.951	0.348	0.091	0.183	90.3	
B-4	3.7	-32.4	20.57	0.018/31.4	6.728	0.348	0.055	0.186	89.6	
B-5	3.8	-30.8	20.57	0.022/42.6	7.082	0.348	0.056	0.176	94.8	
B-6	1.8	-30.6	20.57	0.022/34.6	6.905	0.348	0.035	0.179	94.7	
B-7	2.1	-32.5	20.57	0.018/21.5	7.875	0.285	0.038	0.190	71.5	
B-8	15.3	-26.2	20.57	0.030/ -	6.730	0.432	0.200	0.160	182.1	
B-9	15.5	-30.2	20.57	0.034/61.6	5.696	0.538	0.166	0.153	183.1	
B10	10.8	-28.9	20.57	0.032/ -	5.912	0.506	0.125	0.153	166.3	
B11	15.7	-28.5	20.57	0.028/39.7	7.189	0.443	0.168	0.143	157.2	
B12	20.0	-30.0	20.57	0.029/75.0	6.974	0.459	0.202	0.140	167.3	
B13	21.6	-26.4	20.57	0.028/49.3	8.267	0.443	0.214	0.125	188.3	
B14	21.8	-28.5	20.57	0.029/59.4	7.464	0.459	0.215	0.135	182.0	
B15	20.7	-33.7	16.11	0.029/59.3	7.900	0.359	0.207	0.163	188.1	
B16	24.7	-35.4	16.11	0.057/74.2	4.294	0.706	0.236	0.165	407.5	
B17	25.5	-36.4	16.11	0.084/95.0	2.897	0.946	0.288	0.201	619.2	
B18	20.7	-37.3	16.11	0.055/96.3	4.048	0.682	0.207	0.181	343.7	
B19	24.6	-38.0	16.11	0.045/130.2	4.959	0.558	0.235	0.178	290.5	
B20	20.4	-32.1	16.11	0.029/59.2	8.236	0.359	0.205	0.155	196.5	
B21	19.3	-32.0	13.07	0.028/54.9	10.251	0.282	0.196	0.156	225.7	
B22	19.5	-33.8	13.07	0.029/65.5	9.446	0.292	0.198	0.165	222.5	
B23	17.2	-34.5	13.07	0.030/96.9	8.733	0.302	0.180	0.172	216.0	

Table 6. Comparison of various freezing time prediction methods

Run (#)	Int. temp. (°C)	Medium temp. (°C)	Surface heat transfer coefficient (W/m ² °C)	Thick. (m)	Exp. freezing time (min.)	Predicted freezing time (min.)					
						Plank	Nagaoka	Cleland & Earle	Hung & Thompson	Pham	Eq.(9)
B-1	4.8	-31.8	20.57	0.019/39.3	71.4	72.5	90.3	85.8	78.7	99.5	73.9
B-2	3.7	-32.4	20.57	0.018/31.4	70.5	66.7	81.3	78.2	71.7	90.7	63.5
B-3	2.1	-32.5	20.57	0.018/21.5	69.5	66.5	78.6	77.1	70.9	89.3	62.1
B-4	21.6	-26.4	20.57	0.028/49.3	172.0	134.1	223.7	176.3	188.3	202.8	176.4
B-5	20.7	-33.7	16.11	0.029/59.3	162.5	134.9	221.8	177.7	188.1	202.6	186.7
B-6	24.7	-35.4	16.11	0.057/74.2	346.4	271.9	476.8	374.7	407.5	415.6	396.3
B-7	20.7	-37.3	16.11	0.055/96.3	302.8	247.3	406.6	333.4	343.7	371.3	373.4
B-8	24.6	-38.0	16.11	0.045/80.2	231.5	193.2	338.3	265.3	290.5	295.3	298.7
B-9	20.4	-32.1	16.11	0.029/59.2	189.0	141.9	232.1	186.1	196.5	212.9	191.8
B-10	19.3	-32.0	13.07	0.028/54.9	208.0	166.4	267.3	215.8	225.7	248.4	218.9
B-11	19.5	-33.8	13.07	0.029/65.5	213.5	163.2	263.0	212.5	222.5	243.7	220.7
Freezing time difference range (%)						+1.54	+46.13	+19.75	+25.49	+39.36	+10.72
						to	to	to	to	to	to
						-24.92	+13.09	-1.53	+1.70	+12.64	-29.02
Average difference (%)						15.92	28.54	8.37	10.23	23.22	10.77

중 R² 선택법을 이용하여 적정 독립변수를 선정하였다. 그 결과 식 (8) 및 (9)와같은 방정식을 얻었다.

$$Y_{tylose} = 3.45X_1 + 7642.84X_2 + 4642.67X_3 + 2946.89X_4 - 431.33 \quad (R^2 = 0.9568) \quad (8)$$

$$Y_{beef} = 0.68X_1 + 7568.98X_2 + 2430.78X_3 + 3293.26X_4 - 299.00 \quad (R^2 = 0.9897) \quad (9)$$

예측모델의 정확도 검토

본 실험에서 측정한 우육의 동결시간과 전열물성치를 각 모델에 적용시켜 산출 비교한 결과를 Table 6에 나타내었다. Table 6에서 보는바와 같이 본 실험에 사용한 자료는 Cleland & Earle와 Hung & Thompson의 모델에서 평균절대온도차가 8~10%정도로 나타났으나, Plank 모델에 있어서는 실험치보다 낮게 예측되었는 바, 이는 Plank 모델은 동결시간 예측에서 현열을 포함하지 않은 상태에서 계산되기 때문이며, Nagaoka 모델은 빙결점 상하에서 현열을 나타내는 인자를 포함하고 있으나 잠열이 일정한 온도에서 모두 제거된다고 가정하고 있기 때문에 실험치보다 비교적 높게 예측되었다⁽³⁾. 그리고 Pham의 모델은 여러 가지 경험적 방법에 의한 수치 적용에 따라 20%이상의 오차가 발생한 것으로 나타났다. 한편, 본 연구에서 제안한 식 (9)는 Fig. 4에서 보는 바와같이 기존의 모델에 비하여 측정치와 예측치가 비교적 유사한 것으로 나타났으며, 아울러 Table 6에서 보는 바와같이 평균절대 오차도 10% 수준으로 이러한 수준의 오차는 기존의

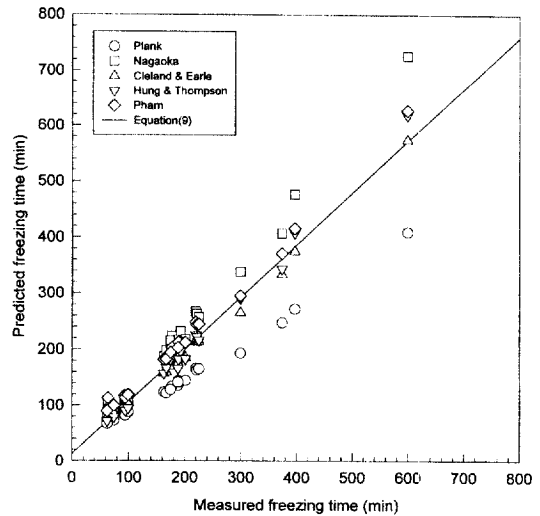


Fig. 4. A plot of predicted versus measured freezing times of beef.

냉각시간 예측 모델에서 제안한 바와같이^(9,13) 공학적 최소오차인 ±10% 범위로서 설정 모델은 비교적 정확함과 아울러 기존의 모델에 비하여 매우 간편함을 보여 주었다.

요 약

본 연구에서는 서로 다른 동결조건 및 방법에 따른 우육 및 tylose의 단순하며 간편한 동결시간을 예측할

수 있는 모델을 모색하기 위하여 23개의 실험데이터를 이용하여 시료의 초기온도(X_1), 시료의 두께(X_2)와 시료의 초기빙결점에서 동결매체 온도사이의 차의 역수(X_3) 및 표면열전달계수의 역수(X_4)를 독립변수로 하고 동결시간(Y)을 종속변수로 설정하여 다중회귀 분석을 실시한 결과, $Y_{tylose}=3.45X_1+7642.84X_2+4642.67X_3+2946.89X_4-431.33$ ($R^2=0.9568$) 및 $Y_{beef}=0.68X_1+7568.98X_2+2430.78X_3+3293.26X_4-299.00$ ($R^2=0.9897$)의 방정식을 구하였다. 본 모델은 Cleland & Earle와 Hung & Thompson의 모델과 마찬가지로 평균절대오차는 10% 수준으로, Plank, Nagaoka 및 Pham의 모델 보다 정확함과 아울러 매우 간편함을 보여 주었다. 또한, 우육 및 tylose의 6~7°C범위에서의 열확산율은 4.43×10^{-4} m²/hr 및 4.39×10^{-4} m²/hr, -10~-12°C에서의 열확산율은 2.42×10^{-3} m²/hr 및 3.32×10^{-3} m²/hr로 측정되었고, tylose 및 우육의 빙결점은 각각 -0.6°C 및 -1.2°C로 나타났다. 그리고 표면열전달계수는 송풍식에서 무포장시 20.57 W/m²C, wrap포장시는 16.11 W/m²C, wrap과 Al-foil로 포장한 경우에는 13.07 W/m²로 계산되었으며, 침지식은 송풍식보다 냉각속도가 약 10배 이상 빠르게 나타났다.

문 헌

1. Mittal, G.S., Hanenian, R. and Mallikarjunan, P.: Evaluation of freezing time prediction models for meat patties. *Canadian Agricultural Engineering*, **35**, 75-81 (1993)
2. Cleland, A.C. and Earle, R.L.: Assessment of freezing time prediction methods. *J. Food Sci.*, **49**, 1034-1042 (1984)
3. Jeong, J.W. and Kong, J.Y.: Studies on the freezing time prediction of foodstuffs by plank's equation of modification (in Korean). *Korean J. Food Sci. Technol.*, **20**, 280-286 (1988)
4. Cleland, A.C. and Earle, R.L.: Freezing time prediction for foods a simplified procedure. *Int. J. Refrig.*, **5**, 134-140 (1982)
5. Cleland, A.C. and Earle, R.L.: A comparison of analytical and numerical methods of prediction the freezing times of foods. *J. Food Sci.*, **42**, 1390-1395 (1977)

6. Cleland, A.C. and Earle, R.L.: A comparison of methods for predicting the freezing times of cylindrical and spherical foodstuffs. *J. Food Sci.*, **44**, 958-963 (1979)
7. Cleland, A.C. and Earle, R.L.: Prediction of freezing times for foods in rectangular packages. *J. Food Sci.*, **44**, 964-970 (1979)
8. Cleland, A.C. and Earle, R.L.: A simple methods for prediction of heating and cooling rates in solids of various shapes. *Int. J. Refrig.*, **5**, 98-106 (1982)
9. Cleland, A.C. and Earle, R.L.: Freezing time prediction for different final product temperatures. *J. Food Sci.*, **49**, 1230-1232 (1984)
10. Hung, Y.C. and Thompson, D.R.: Freezing time prediction for slab shape foodstuffs by an improved analytical method. *J. Food Sci.*, **48**, 555-560 (1983)
11. Pham, Q.T.: Analytical methods for predicting freezing times of rectangular blocks of foodstuffs. *Int. J. Refrig.*, **8**, 43-47 (1985)
12. Pham, Q.T.: Extension to Plank's equation for predicting freezing times of foodstuffs of simple shapes. *Int. J. Refrig.*, **7**, 377-383 (1984)
13. Pham, Q. T.: Simplified equation for prediction the freezing time of foodstuffs. *J. Food Tech.*, **21**, 209-219 (1986)
14. Mascheroni, R.H. and Calvelo, A.: A simplified model for freezing time calculation in foods. *J. Food Sci.*, **47**, 1201-1207 (1982)
15. Mascheroni, R.H., A De Michelis and Calvelo, A.: A simplified mathematical model for freezing time calculation in plate freezers. *I.I.R. Annex-1*, 431-441 (1982)
16. Henningson, R.W.: Thermister cryoscopy in the food industry. *Food Technol.*, **21**, 28-31 (1967)
17. Creed, P.G. and James, S.J.: Heat transfer during the freezing of liver in a plate freezer. *J. Food Sci.*, **50**, 285-288 (1985)
18. Jeong, K.C.: Measurements of the initial freezing point and specific heat on fluid food products. *M.S. Thesis*, National Fisheries Univ. of Pusan, Seoul, Korea (1975)
19. Woolrich, W.R.: Specific and latent heat of foods in the freezing zone. *Ashrae J.*, 43-47 (1966)
20. Jeong, J.W.: Freezing time prediction of slab shape foodstuffs by modification of plank's equation. *Ph. D. Thesis*, National Fisheries Univ. of Pusan, Seoul, Korea (1989)
21. Nagaoka, J., Takagi, S. and Hotani, S.: Experiments on the freezing of fish in an air-blast freezer. *Proc. 9th Int. Congr. Refrig., Paris*, **4**, 105-110 (1955)