

## 김치 동결시의 물리적 특성 및 동결시간 예측 모델 개발

정진웅 · 김병삼 · 김종훈  
한국식품개발연구원

### Development of Freezing Time Prediction Model and Thermo-physical Properties of Frozen Kimchi

Jin-Woong Jeong, Byung-Sam Kim and Jong-Hoon Kim  
Korea Food Research Institute, Sunnam 463-420, Korea

#### Abstract

This study was carried out to investigate the thermo-physical properties and design Freezing time prediction model from data of freezing test of Kimchi. Density of Kimchi were measured as  $1001.9 \pm 0.03 \text{ kg/m}^3$  at unfrozen state,  $987.0 \pm 0.07 \text{ kg/m}^3$  at frozen state and volume of the Kimchi expanded 4.67% at  $-15^\circ\text{C}$ . Initial freezing point of Kimchi and seasoning were  $-4.0^\circ\text{C}$  and  $-2.5^\circ\text{C}$ , respectively. Freezing ratio of Kimchi were estimated more than 50% at  $-5.0^\circ\text{C}$ , more than 75% at  $-10^\circ\text{C}$  and approximately 90% at  $-25^\circ\text{C}$ . To obtain equation for freezing time prediction of Kimchi, 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. As results of the multiple regression analysis, equations were obtained as follows.  $Y_{\text{Kimchi}} = 3.856X_1 + 13982.8X_2 + 8305.166X_3 + 3559.181X_4 - 639.189$  ( $R^2 = 0.9632$ ). These equations shown better results than 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.

Key words : Kimchi, freezing time prediction, thermo-physical property

## 서 론

김치는 살아있는 식품으로서 미생물에 의해 계속 발효·숙성이 진행되어 탄산가스 등을 생성하기 때문에 김치를 포장하여 상품화시키는데 상당한 애로가 있을 뿐만아니라 제조 후에도 계속되는 발효로 인하여 연부 현상이나 산패 등의 품질변화를 일으키므로써 유통상에서도 상당한 어려움이 따른다(1-6). 이미 세계적 식품으로 알려져 있는 김치의 해외 수출을 위해서도 초기 품질의 유지를 위한 보존성 문제가 선결되어야하는 과제이기 때문에 지금까지 다양한 방법이 시도되어 왔으나 그다지 만족할 만한 방법이 아직 개발되어 있지 않다.

김치의 유통기간 연장에 관한 연구로서 감마선 조사(3), 보존료 첨가(4-6) 및 열처리법(5,6) 등 다양한 방법에 대하여 검토하였으나 합성 보존료는 맛의 변화를, 열처리법은 조직

연화를 초래하는 등의 문제를 초래하므로써 실용화에는 아직 미흡한 수준이다. 또한, 저온에서의 보존은 신선도를 유지하면서 품질이 보존된다는 점에서 타 방법에 비해 유리하다고 인식되어 많이 이용되고는 있으나 뚜렷한 보존방법은 개발되지 못하고 있는 실정이다.

한편, 동결은 식품의 품질보존을 위한 가장 일반적인 방법 중의 하나이지만 경제적 측면과 가공의 요구조건 및 품질을 평가하기 위해서는 식품의 정확한 동결시간 예측은 대단히 중요하다(7). 식품의 동결시간 예측에는 열물성치, 상변화를 동반하는 열전달 및 비등방성의 조건 등 여러 복잡한 매개인자가 관여하고 있기 때문에 지금까지 Plank가 제안한 제시한 기본적인 가정을 기초하여 연구가 계속되고 있는 실정이다(8).

따라서, 본 연구에서는 김치의 수출 활성화 방안의 일환으로 숙성 김치의 과숙을 최대한 억제시키며 장기저장 및 대량 유통에 이바지하기 위한 기초 연구로서 냉동처리한 김치의 물리적 특성을 조사함과 동시에 적정 동결시간을 예측하기 위한 모델 및 데이터를 제공하고자 한다.

Corresponding author : Jin-woong Jeong, Korea Food Research Institute, San 46-1, Baekhyun-dong, Bundang-ku, Sungnam-si, Kyungki-do 463-420, Republic of Korea  
E-mail : jwjeong@kfri.re.kr

## 재료 및 방법

### 김치 제조 및 전처리

원료 배추를 잘 다듬어 16.7%(w/v)의 천일염 용액에서 3~5시간 절임한 다음 3회 세척하여 1시간 동안 자연 탈수한 후, 부재료와 혼합하기 전에 3~4 cm 크기로 세절하였다. 부재료 처리에 있어 파는 선별, 세척 후 0.5 cm 두께로 잘게 썰었으며, 마늘과 생강은 선별, 세척 후 Ultra cutter(주)광진가전, KJ-201)로 마쇄하였다. 배추김치의 배합비율은 절임배추 100 g에 대하여 파 3.1 g, 고춧가루 1.8 g, 마늘 1.5 g, 생강 0.4 g, 물 2.9 mL로 버무린 후 밀폐 용기에 1 kg씩 넣어 0°C 냉장고에 보관하면서 실험에 사용하였다. 물성치 측정에 사용된 김치 시료는 염 농도 2.7%(w/w), pH 4.41~5.82, 산도 0.26~0.38 인 것을 마쇄하여 두께별로 일정 크기(10 cm×10 cm, 오차: ±0.5 cm)로 성형한 후 5°C에서 24시간 동안 품온을 일정하게 유지시킨 것을 사용하였다.

### 동결실험

동결처리 방식은 정지공기식, 송풍식 및 침지식에 의해 각각 동결 처리하였으며, 동결고내의 중심부에 설치한 트레이 위에 시료를 얹어 놓고, -20~-50°C 범위에서 온도조절기 및 송풍량으로 온도를 조절하였다. 동결온도 및 시간 측정은 0.3 mm 동-콘스탄탄 열전대를 시료의 기하학적 중심부에 부착하여 중심온도가 -18°C에 도달할 때까지 자동온도기록계(Hydra Data Acquisition Unit, Model: 2620A, USA)를 이용하여 1분 간격으로 연속 측정하였다.

### 물성치 측정

시료에 있어 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 Beckmann 법(9)에 의해, 표면열전달계수는 Creed와 James(10)의 총괄열전달계수의 산출을 위한 transient temperature method를 적용하였고, 비열은 빙결점 이상의 온도에서는 Siebel 및 Kong의 실험식(8)에 의해, 빙결점 이하의 온도에서는 Yano 및 Kong의 실험식(8)으로 산정하였으며, 잠열은 Woolrich(11)의 실험식으로, 동결동안 제거되는 전열량은 시료의 초기온도와 최종동결온도사이의 total enthalpy차를 이용하여 산출하였다. 그리고, 열전도도를 추정하기 위해 열확산율을 측정하여  $k = \alpha \cdot \rho \cdot C_p$  식(여기서  $\alpha$ =열확산율(m<sup>2</sup>/hr),  $\rho$ =밀도(kg/m<sup>3</sup>),  $C_p$ =비열(J/m<sup>3</sup>°C))으로 산출하였다. 이를 위해 열확산율은 항온조에서 시간에 따른 온도변화를 연속 측정하여 curve fitting법을 이용하였다. 그리고 수분은 상압가열 건조법으로 측정하였다.

### 동결시간 계산 및 비교

다양한 동결처리 조건에 따른 김치의 총 30개 데이터와 기존의 동결시간예측 모델(Plank (8), Nagaoka(12), Cleland & Earle(13), Hung & Thompson(14) 및 Pham(15))과 비교 검토하기 위하여 각 모델을 Basic 및 Microsoft Excel 97(Version 7.0) 프로그램으로 계산 처리하였다.

## 결과 및 고찰

### 김치의 열물성치 측정

일반적으로 고체식품 및 점도가 높은 식품의 전열은 대부분 전도에 의한 전열로서, 여기에 관여하는 비열 및 밀도는 비교적 추정 및 측정이 쉬우나 열전도도는 측정이 용이하지 않으므로 Fig. 1과 같은 측정장치를 제작하여 curve fitting법(8)으로 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 바와 같이 3회의 측정치를 문헌치와 비교한 결과, 약 6%의 근소한 오차로 거의 일치하므로 측정장치의 정확도와 재현성을 입증하였다. 이와 같이 하여 김치의 미동결 상태와 동결상태에서의 열확산율을 구하여 밀도 및 비열 값을 대입하므로써 산출한 열전도도의 계산 결과를 Table 2에 나타내었다. 표면열전달계수는 냉각매체온도에 따라 변하는 시료의 표면온도를 직접 측정하여 반대수그래프에 냉각시간과 무차원온도를 plotting하므로써 얻은 기울기를 이용하여 Creed와 James의 transient temperature method로 표면열전달계수를 산출한 결과, 무포장 시에는 20.57W/m<sup>2</sup>°C, wrap포장 시는 16.11W/m<sup>2</sup>°C, wrap과 Al-foil로 포장한 경우에는 8.79W/m<sup>2</sup>°C로 계산되었다. 시료의 빙결점은 동결 기작 중의 중요한 인자의 하나로서 최적 동결조건 설정에 대단히 중요시되고 있으며 빙결점을 전후하여 식품의 물성이 크게 변하므로 중요한 의미를 갖는다. 따라서, 본 연구에서는 Beckmann에 의한 빙결점 측정법을 적용하여 직접 측정하였다. 즉, 수용액을 냉각하면 온도가 내려가고 빙결점 이하로 되어도 빙결하지 않는 과냉각 현상이 나타난다. 그러나 과냉각은 불안정한 상태이므로 외부에서 충격을 주거나 일정한 시간이 경과하면 이 상태는 균형을 잃고 갑자기 품온이 빙점까지 상승한 후 일정온도를 유지하면서 빙결점이 생성되며, 이 때 열평형온도대를 외삽하여 빙결점을 결정하였다. Fig. 2는 김치의 냉각곡선으로 초기 빙결점은 양념액은 -4.0°C로, 고형물인 김치는 -2.5°C로 측정되었다. 또한, 김치의 수분함량이 91.75%일 때의 빙결을 산출한 결과 Fig. 3에서 보는 바와 같이 -5.0°C일 때 약 50% 이상, -10°C일 때 약 75%이상, -25°C일 때 약 90% 수준

을 나타내었다. 그리고, 동결에 의한 체적변화를 살펴본 결과, 순수한 물이 동결하여 0°C의 얼음으로 상 변화될 때, 미 동결시의 체적을 기준으로 8.75% 정도 팽창하므로 물이 주성분인 신선식품을 동결시키면 체적은 당연히 팽창하게 될 것이다. 따라서 본 실험에서는 김치를 대상으로 동결중의 체적변화를 살펴보기 위하여 에틸 알콜을 저온매체로 사용하여 측정한 결과, Fig. 5에서 보는 바와 같이 김치의 밀도는 20°C 전후에  $1001.9 \pm 0.03 \text{ kg/m}^3$  이 온도가 낮아짐에 따라 체적이 증가하여 -20 ± 1.0°C에서  $987.0 \pm 0.07 \text{ kg/m}^3$ 으로 나타났으며, 이 때의 체적변화는 4.67% 증가하였다. 한편, 동결시간 예측을 위해 적용할 열물성치는 Table 3에 나타낸 바와 같다.

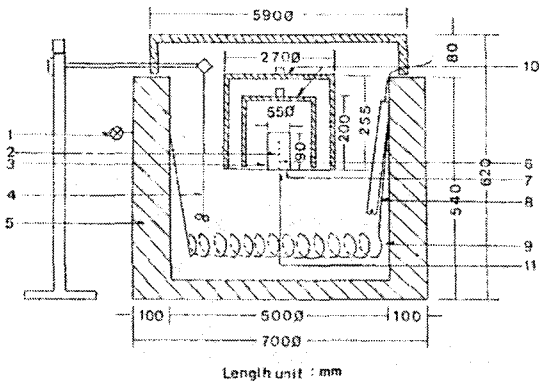


Fig. 1. Schematic diagram of experimental installation for measuring thermal diffusivity.

1. Expansion valve
2. Sample
3. Sample container
4. Stirrer
5. Insulation vessel
6. Thermocouple
7. Copper cooling plate
8. Heater
9. Refrigerant pipe
10. Lid
11. Thermocouple for temperature control

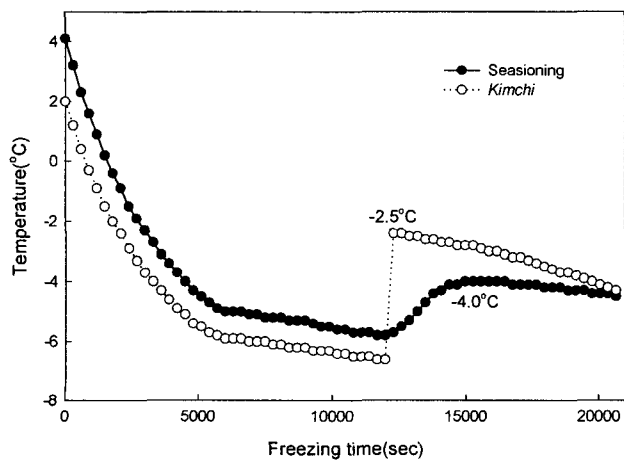


Fig. 2. Initial freezing point of Kimchi.

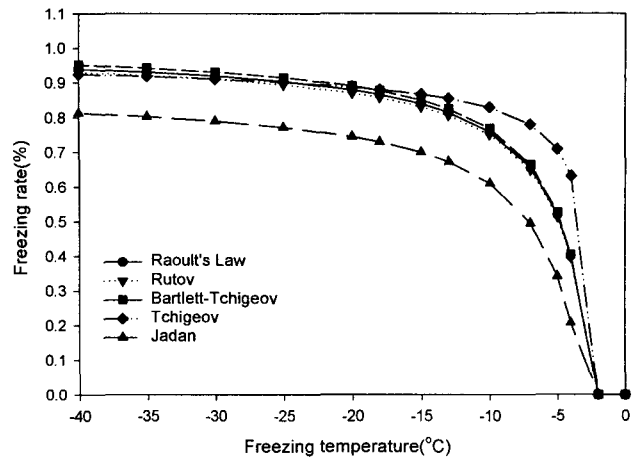


Fig. 3. Ice content during freezing of Kimchi calculated by different methods.

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

Material	Temperature (°C)	Published <sup>1)</sup> (m <sup>2</sup> /hr)	Measured (m <sup>2</sup> /hr)	Difference (%)
Ice			$4.09 \times 10^{-3}$	-6.2
	-5 ~ -6	$4.36 \times 10^{-3}$	$3.95 \times 10^{-3}$	-10.4
			$4.20 \times 10^{-3}$	-3.7
			$4.50 \times 10^{-3}$	-5.3
	-17 ~ -18	$4.75 \times 10^{-3}$	$4.45 \times 10^{-3}$	-6.3
			$4.40 \times 10^{-3}$	-7.4

<sup>1)</sup> Values from International Critical Tables.

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

Temperature (°C)	Thermal diffusivity (m <sup>2</sup> /hr)	Thermal conductivity (W/m°C)
15 ~ 20	$4.89 \times 10^{-4}$	0.513
5 ~ 10	$4.71 \times 10^{-4}$	0.508
-5 ~ -6	$1.44 \times 10^{-3}$	0.734
-10 ~ -11	$1.57 \times 10^{-3}$	0.799

Table 3. Thermo-physical data of Kimchi for freezing time prediction.

	Above freezing	Below freezing
Density (kg/m <sup>3</sup> )	1001.9	987.0
Thermal conductivity (W/m°C)	0.51	0.80
Specific heat (J/m <sup>3</sup> °C)	$3.86 \times 10^6$	$1.86 \times 10^6$
Latent heat (J/m <sup>3</sup> )		$306.14 \times 10^6$
Freezing point (°C)		-2.4
Water content (%)		91.75

### 김치의 동결시간 예측 모델 개발

본 연구에서는 동결시간 예측모델을 동결시간과 관련있는

무차원 변수의 집단으로 나타내기 위해 무차원 해석을 적용하였다. 먼저 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  $\Delta H$ 는 초기 빙결점과 동결이 종료된 시점에서의 온도 사이의 엔탈피,  $T_f$ 는 빙결점,  $T_a$ 는 동결매체온도,  $D$ 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 초기온도로써 Plank방정식을 이용한 동결시간 예측모델에서는 초기온도에 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 주었다. 한편, Plank방정식은 식(2)와 같은 무차원수의 형태로 나타낼 수 있다.

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

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

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

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

또한, 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.

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

여기서 무차원수의 집단은  $T_i$ ,  $T_a$ ,  $h$ ,  $D$ 의 실험조건으로 구성되며, 이와 같은 실험인자에 의하여 동결시간을 예측할 수 있는 간편한 모델을 모색하기 위하여 동결시간의 증가요소인 시료의 초기온도( $X_1$ ), 시료의 두께( $X_2$ )와 동결시간의 감소요소인 시료의 초기 빙결점에서 동결매체 온도사이의 차의 역수( $X_3$ ) 및 표면 열전달계수의 역수( $X_4$ )를 독립변수로 하고 동결시간( $Y$ )을 종속변수로 설정하여 Table 4의 실험적 데이터를 이용하여 통계 소프트웨어인 SAS (statistical analysis system, version 6.11)을 사용하여 다중회귀 분석을 실시하였다. 다중회귀 분석에서 독립변수는 변수선택법 중  $R^2$  선택법을 이용하여 적정 독립변수를 선정하였다. 그 결과 식(8)과 같은 방정식을 얻었다.

$$Y_{kimchi} = 3.856X_1 + 13982.8X_2 + 8305.166X_3 + 3559.181X_4 - 639.189 \quad (8)$$

$(R^2 = 0.9632)$

Table 4. Experimental test conditions and results of Kimchi.

Run (#)	Int. temp. (°C)	Medium temp. (°C)	Surface heat transfer coefficient (W/m²°C)	Thickness (cm)	Weight (g)	Dimensionless values				Experimental freezing time* (min)
						F <sub>o</sub>	B <sub>i</sub>	P <sub>k</sub>	S <sub>te</sub>	
K-1	9.6	-25±2	8.79	1.8/118.60	18.258	0.198	0.131	0.117	379.08	
K-2	9.2			1.9/120.83	17.243	0.209	0.128	0.118	418.75	
K-3	9.4			1.8/113.18	18.210	0.198	0.129	0.118	377.37	
K-4	14.9			2.6/164.15	13.743	0.286	0.179	0.111	566.07	
K-5	13.6			2.5/160.15	14.040	0.275	0.168	0.113	572.80	
K-6	8.1			3.1/198.92	10.683	0.341	0.117	0.119	611.18	
K-7	7.1	-20±2	8.79	1.5/114.21	26.775	0.165	0.107	0.094	426.18	
K-8	6.3			1.4/95.33	28.323	0.154	0.099	0.095	402.77	
K-9	6.1			1.9/129.39	21.029	0.209	0.097	0.095	542.76	
K-10	6.8			2.2/142.60	18.445	0.242	0.104	0.094	647.37	
K-11	6.6			2.3/141.32	17.632	0.253	0.102	0.094	527.00	
K-12	6.5			1.7/104.52	23.532	0.187	0.101	0.095	489.85	
K-13	6.6			2.1/129.28	19.233	0.231	0.102	0.094	596.65	
K-14	6.7			2.2/146.46	18.421	0.242	0.103	0.094	672.68	
K-15	8.1	-40±2	16.11	2.5/162.54	5.928	0.362	0.079	0.207	129.73	
K-16	8.0			2.3/150.74	5.017	0.463	0.116	0.199	143.70	
K-17	6.2			2.0/135.15	5.540	0.403	0.098	0.203	119.75	
K-18	4.4			1.8/116.25	5.928	0.362	0.079	0.207	98.78	
K-19	5.2	-45±2	16.11	2.5/152.00	3.982	0.503	0.088	0.233	133.21	
K-20	6.1			2.4/147.77	0.419	0.483	0.097	0.231	134.18	
K-21	9.2			2.2/136.19	4.750	0.443	0.128	0.223	132.67	
K-22	8.7			1.9/119.39	5.385	0.383	0.123	0.224	112.93	
K-23	10.1			1.8/109.53	5.778	0.362	0.136	0.206	103.50	
K-24	13.3	-35±2	20.57	1.7/106.50	8.571	0.342	0.154	0.153	105.33	
K-25	12.2			2.0/128.60	5.508	0.514	0.155	0.165	136.00	
K-26	12.2			2.1/136.69	5.272	0.540	0.155	0.165	130.02	
K-27	11.1			3.0/193.20	3.806	0.771	0.145	0.167	214.70	
K-28	11.6			2.3/150.30	4.825	0.591	0.150	0.166	130.75	
K-29	11.4			2.8/174.60	4.054	0.720	0.148	0.166	177.63	
K-30	9.2			2.1/136.00	5.064	0.540	0.128	0.170	146.87	

\* Final freezing time at -18°C

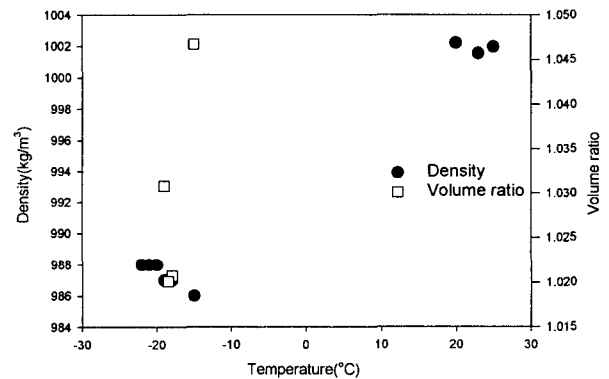


Fig. 4. Density and volume ratio of frozen and unfrozen Kimchi.

예측 모델의 정확도 검토

본 실험에서 측정된 김치의 동결시간과 전열 물성치를 각

모델에 적용시켜 산출 비교한 결과를 Table 5에 나타내었다. Table 5에서 보는바와 같이 본 실험에 사용한 시료는 Pham과 Hung & Thompson의 모델에서 평균절대온도차가 10% 수준으로 나타났으나, Cleland & Earle의 모델은 여러 가지 경험적 방법 및 현열을 포함하지 않은 상태에서 계산되기 때문에 13%이상의 오차가 발생한 것으로 나타났다. 한편, 본 연구에서 제안한 식(8)은 Fig. 5에서 보는 바와 같이 기존의 모델에 비하여 측정치와 예측치가 비교적 유사한 것으로 나타났으며, 아울러 Table 5에서 보는 바와 같이 평균절대오차도 10% 수준으로 이러한 수준의 오차는 기존의 동결시간 예측 모델에서 제안한 바와 같이 공학적 최소오차인 ±10% 범위로서 설정 모델은 비교적 정확함과 아울러 기존의 모델에 비하여 매우 간편함을 보여 주었다(16).

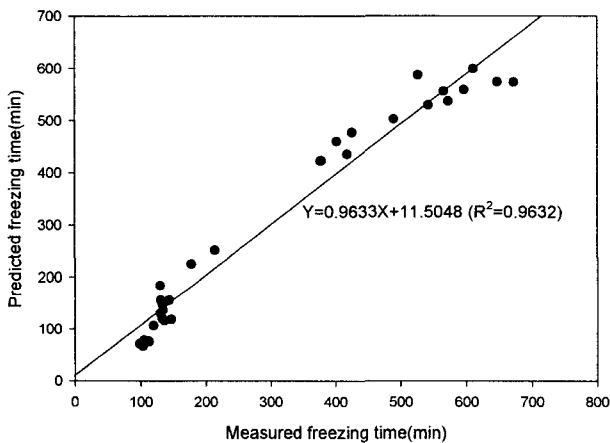


Fig. 5. A plot of predicted versus measured freezing time of Kimchi.

Table 5. Comparison of various freezing time prediction methods.

Run #	Int. temp. (°C)	Medium temp. (°C)	Surface heat temp. (W/m <sup>2</sup> °C)	Thickness (m)	Freezing time(min.)				
					Exp.	C & E <sup>1)</sup>	H & T <sup>2)</sup>	Pham <sup>3)</sup>	Eq. (8)
1	7.1	-20	8.79	0.015	426.18	314.83	359.44	359.66	477.43
2	6.6	-20	8.79	0.023	527.00	493.25	564.34	561.58	587.36
3	9.6	-25	8.79	0.018	379.08	302.52	340.93	342.08	423.55
4	14.9	-25	8.79	0.026	566.07	462.26	522.16	517.60	555.85
5	13.3	-35	20.57	0.017	105.33	116.18	129.52	129.20	88.38
6	11.1	-35	20.57	0.030	214.70	177.65	194.25	193.75	251.67
7	8.1	-40	16.11	0.025	129.73	101.92	111.97	112.52	114.02
8	4.4	-40	16.11	0.018	98.78	101.92	111.98	112.52	91.87
9	5.2	-45	16.11	0.025	133.21	131.37	141.09	143.36	146.78
10	10.1	-45	16.11	0.018	103.50	93.79	101.86	103.55	107.80
					Difference range(%)				
					to to to to				
					-26.13 -15.66 -15.61 -17.22				
Average difference (%)					13.40±9.07 10.76±5.92 10.78±6.43 10.39±4.97				

<sup>1)</sup> Cleland, A.C. & Earle, R.L.(1982)

<sup>2)</sup> Hung, Y.C. & Thompson, D.R.(1983)

<sup>3)</sup> Pham, Q.T.(1986)

## 요약

본 연구에서는 냉동처리한 김치의 동결에 따른 물리적 특성을 조사하고 적정 동결시간을 예측하기 위한 모델을 개발하였다. 김치의 동결 전후의 밀도를 부피에 대한 증량의 비로 산정한 결과 김치의 밀도는 1001.9±0.03 kg/m<sup>3</sup>(동결전), 987.0±0.07 kg/m<sup>3</sup>(동결후)이었고 김치의 체적팽창은 4.67%(-15°C)이었다. 김치의 빙결점은 양념액에서 -2.5°C, 고형분은 -4.0°C로 측정되었다. 김치의 빙결율은 -5.0°C일 때 약 50% 이상, -10°C일 때 약 75% 이상, -25°C일 때 약 90% 수준이었다. 시료의 초기온도(X<sub>1</sub>), 시료의 두께(X<sub>2</sub>)와 시료의 초기 빙결점에서 동결매체 온도사이의 차의 역수(X<sub>3</sub>) 및 표면열 전달계수의 역수(X<sub>4</sub>)를 독립변수로 하고 동결시간(Y)을 종속변수로 설정하여 다중회귀 분석을 실시한 결과, Y<sub>Kimchi</sub> = 3.856X<sub>1</sub> + 13982.8X<sub>2</sub> + 8305.166X<sub>3</sub> + 3559.181X<sub>4</sub> - 639.189 (R<sup>2</sup>=0.9632)의 방정식을 구하였다. 이 식은 기존의 모델에 비해 측정치와 예측치가 비교적 유사한 것으로 나타났으며, 평균 절대 오차도 10% 수준이었다.

## 참고문헌

1. 구영조, 정진웅, 김인호, 홍석인 (1999) 김치의 보존성 향상을 위한 동결 및 해동 기술개발. 한국식품개발연구원, E1496-9907, 15-35
2. 조재선 (1991) 김치의 이화학적특성. 한국식품연감, 농수축산신문, 25-26
3. 차보숙, 김우정, 변명우, 권중호, 조한옥 (1989) 김치 저장성 연장을 위한 Gama선 조사. 한국식품과학회지, 21(1), 109-115
4. 황인주, 윤의정 (1989) 보존료, 젓갈, CaCl<sub>2</sub> 첨가가 김치 발효중 배추잎의 조직감 변화에 미치는 영향. 한국식품화학회지, 4(2), 20-26
5. 강근옥, 구경형, 이형재, 김우정 (1991) 효소 및 염의 첨가와 순간열처리가 김치발효에 미치는 영향. 한국식품과학회지, 23(2), 183-187
6. 유명식, 김주봉, 변유량 (1991) 염절입 및 가열에 의한 배추조직의 구조와 팩틴의 변화. 한국식품과학회지, 23(4), 420-426
7. 정진웅, 김종훈, 박노현, 이승현, 김영동 (1998) 다중회귀 분석에 의한 식품의 동결시간 예측. 한국식품과학회지, 30(2), 341-347
8. Jeong, J.W. (1989) Freezing time prediction of slab shape foodstuffs by modification of plank's equation. Ph. D. Thesis, National Fisheries Univ. of Pusan, Korea

9. Henningson, R.W. (1967) Thermister cryoscopy in the food industry. *Food Technol.*, 21, 28-31
10. Creed, P.G. and James, S.J. (1985) Heat transfer during the freezing of liver in a plate freezer. *J. Food Sci.*, 50, 285-288
11. Woolrich, W.R. (1966) Specific and latent heat of foods in the freezing zone. *ASHRAE J.*, 43-47
12. Nagaoka, J., Takagi, S. and Hotani, S. (1955) Experiments on the freezing of fish in an air-blast freezer. *Proc. 9th Int. Congr. Refrig.*, Paris, 4: 105-110
13. Cleland, A.C. and Earle, R.L. Freezing time prediction for foods a simplified procedure. *Int. J. Refrig.*, 5, 134~140(1982)
14. Hung, Y.C. and Thompson, D.R. (1983) Freezing time prediction for slab shape foodstuffs by an improved analytical method. *J. Food Sci.*, 48, 555-560
15. Pham, Q.T. (1986) Simplified equation for prediction the freezing time of foodstuffs. *J. Food Tech.*, 21, 209-219
16. Mascheroni, R.H. and Calvelo, A.A. (1982) Simplified model for freezing time calculation in foods. *J. Food Sci.*, 47, 1201-1207

---

(접수 2003년 3월 20일, 채택 2003년 4월 18일)