

Plank's Equation의 변형에 의한 식품의 동결시간 예측

정진웅·공재열*

농수산물유통공사 종합식품연구원*, 부산수산대학 생물공학과

Studies on the Freezing Time Prediction of Foodstuffs by Plank's Equation of Modification

Jin-Woo Cheong and Jai-Yul Kong

Food Research Institute / AFMC, Suwon

**Department of Biological Science and Technology,
National Fisheries University of Pusan, Pusan*

Abstract

Freezing is becoming increasingly important in the food industry as a means of food preservation since the turn of the century. For quality, processing and economic reasons, it is important to predict the freezing time for foods. A number of models have been proposed to predict freezing time. However, most analytical freezing time prediction techniques apply only to specific freezing conditions. Therefore, it is necessary to develop an improved analytical method for freezing time prediction under various conditions. The objectives of this study, by reviewing previous experimental data obtained by uncertain freezing condition and thermo-physical data, were to develop simple and accurate analytical method for prediction freezing time, and to obtain the freezing time of various foodstuffs by still air freezing and immersion freezing method. The result of this study showed that the proposed method offered better results than the other complex method compared.

Key words: freezing time, still air freezing, simplified model, Plank's equation

서 론

냉동은 수세기 동안 사용되어온 식품보존의 수단이지만 식품산업에 응용되기 시작한 것은 금세기 초반으로, 동결에 관한 공학적인 연구가 진행되어진 것도 불과 20~30년에 지나지 않는다. 냉동은 식품의 온도를 저하시킴으로써, 또는 식품의 열적중심(thermal centre)에서 동결시킬 수 있는 자유수(freezable water)의 대부분이 얼음으로 변환하므로써 실제의 목적을 완수한다. 냉동식품의 질은 동결속도에 크게 의존하게 되는 것으로, 이미 여러 연구자들이 발표한 바와 같이 저온에서 완만동결(slow freezing)은 세포외부에 큰 빙결정이 생성되며, 급속동결(rapid freezing)은 세포의 내외에 미세한 빙결정을

생성시키기 때문이다. 이러한 빙결정의 생성은 세포구조의 손상과 해동시 texture의 저하 및 품질에 큰 영향을 초래한다.

따라서 동결과정 중의 동결시간 및 속도 예측과 냉동냉장 중의 내부 품온변동을 추정하는 것은 매우 필요할 실정이다. 그러나 동결시간 예측을 위한 정확한 해석적 모델은 식품동결 과정의 복잡성과 넓은 온도 범위에 걸쳐 연속적으로 변하는 열적물성치 때문에, 지금까지 표본물성치와 일정한 가정조건하에서 약 $\pm 10\%$ 의 공학적 정확도를 가진 단순한 관계식을 유도하고 있다⁽²⁾.

이러한 근사적인 방법은 크게 해석적방법(analytical method)과 수치적 방법(numerical method)으로 나뉘며, 해석적 방법은 Plank's equation을 변형시킨 근사적인 방법과 실험적 data 또는 computer 계산 결과의 regression에 의한 방법으로 Hung and Thompson(1983), Pham(1986), Cleland and Earle(1977,

Corresponding author: Jin-Woo Cheong, Korea Food Research Institute, 148-1, Dangsu, Banwol, Hwaseong-gun, Kyonggi-do 445-820.

1979), Nagaoka(1955) 등에 의해 연구되어 온 실정이다⁽²⁻⁴⁾. 그러나 그들이 동결시간 예측에 이용한 실험 data는 tylose, beef, potato 및 carp에 관한 것 뿐으로, 지금까지는 일정한 식품에 한정되어 있어 여러가지 냉동식품에 적합한 일반적인 동결시간예측 model의 창안에 필요한 실험 data가 매우 빈약한 실정이다⁽¹⁻⁶⁾.

따라서 본 연구에서는 종래의 불확실한 동결조건 및 열적물성치를 고찰하여 간편하고 정확한 동결시간예측 model과 data를 제공함과 아울러, 다양한 동결방식에 의한 시료별 동결시간을 측정하여 기존의 model과 비교 검토함을 그 목적으로 한다.

재료 및 방법

시료

본 실험에 사용한 시료는 양송이버섯, 피조개, ground lean beef, ground pork의 4종류로, 피조개는 내장 및 껍질을 제거하여 껍육부위만을 원형상태로, 양송이는 크기별로 선별후 무처리 상태로, pork와 beef는 살코기 부위만을 선별하여 얇게 저민후 grinding하여 두께별로 일정한 크기(15cm×4cm)로 성형한 후 일정한 온도로 유지시켰다.

그리고 본 실험에 사용한 시료의 선택이유는 다음과 같다.

첫째, 이 시료들은 신선도와 질을 보존하기 위해 일정한 상업적 크기로 판매되는 동결형태의 제품으로 IQF 공정 및 급속동결법이 사용되는 고가품이다.

둘째, 이 시료들은 등방성(isotropic) 또는 등방성 조건에 접근시킬 수 있다.

셋째, 동결시간 측정에 있어 물성치의 영향을 비교하는데 적절한 크기 및 다양한 형태로서 변화시켜 이용할 수 있다.

동결실험

각 시료에 있어 동결시간의 정확도를 고려하여 실제 동결 상황에서 일어나는 것과 유사한 범위의 조건하에서 실험을 행하였다. 동결은 정지공기식(still air freezing)과 침지식(immersion freezing)에 의한 2가지 방법으로, 정지공기식은 부산수산대학의 Biological Storage Chest Freezer(Model 8107/8171, dimension: 1.22m×0.79m×1.05m)를 이용하여 고내중심부에 망형태의 염화비닐수지상자(dimension: 0.36

m×0.25m×0.06m)를 설치하고 그 위에 여러 포장형태의 시료를 얹어 놓고, 고내온도는 수시로 -30℃~-45℃ 범위로 조절하였다. 그리고 침지식은 60% ethylene glycol을 냉매로하여 순환식 thermomixer(dimension: 0.42m×0.37m×0.21m)를 이용하였다.

온도측정

모든 시료의 온도측정은 0.3mm copper constantan thermocouple을 이용하여 시료의 기하학적 중심부 및 표면에 부착하여 오차가 ±0.001%인 Data Logger(Model 2200B Fluke USA)를 이용하여 매분마다 연속적으로 기록하여 중심온도가 -18℃에 도달할 때까지 측정하였다.

표면열전달계수(h) 측정

동결매체와 여러 포장재 사이의 다양한 표면열전달계수 값을 구하기 위해 냉동고내에 시료와 유사한 형태 및 크기를 가진 순수구리로써 포장형태에 따른 시료의 표면온도(T)를 측정하여 semi-log paper에 냉각시간(t)과 무차원온도(T-Ta/Ti-Ta)를 plotting하여 다음과 같은 간단한 냉각방정식으로 산출하였다.

$$\text{즉, } h = \frac{MC \log_e Y_t}{A}$$

여기서 Y_t: 시간 t에 있어서의 대수온도비, M: 질량 A: 면적 Ta: 동결매체온도

물성치

일반성분의 정량; 수분(W)은 상압가열건조법, 조지방(F)은 Soxhlet 추출법에 의해 측정하였다⁽¹²⁾.

밀도(ρ); 부피(V)에 대한 질량(M)의 비로써 산정하였다. 열전도도(k); 빙결점이상의 범위(ku)는 수분함량에 따른 값으로 추정하였으며, 빙결점이하의 값(kf)은 Kong 등에 의해 제안된 실험식을 인용하였다^(8,13).

초기빙결점(Tf); 각 시료의 시간에 대한 온도추이 곡선에 있어 상변화 초기과정의 측정 data와 기 발표된 data를 비교 적용하였다.

동결기간동안 제거되는 전 열량(ΔH); 초기온도(Ti)와 최종동결온도(Tc) 사이의 전 열탈피차로서 다음과 같은 계산식에 적용하였다.

$$\Delta H = Cu(Ti - Tf) + Cf(Tf - Tc) + WL$$

비열(C); 빙결점이상의 범위(Cu)에 있어서는 Siebel의 실험식에 의해, 빙결점이하의 값(Cf)은 Yano에 의한 실험

Table 1. Thermo-physical data of freezing test materials

	Pine mushroom	Arkshell	Ground lean beef	Ground pork
ρ (Kg/m ³)	879.2	1062.6	1051.7	1054.3
k_u (W/m°C)	0.54	0.49	0.46	0.47
k_f (W/m°C)	1.56	1.40	1.26	1.31
C_u (J/m ³ °C)	3.81×10^6	3.52×10^6	3.27×10^6	3.35×10^6
C_f (J/m ³ °C)	1.97×10^6	2.00×10^6	1.76×10^6	1.80×10^6
L (J/m ³)	295×10^6	266×10^6	242×10^6	251×10^6
T_f (°C)	-0.9	-2.2	-1.2	-1.7
W (%)	78.3	79.8	72.5	75.1
F (%)	0.3	0.5	4.0	6.7

치로서 산정하였다⁽¹⁴⁾.

잠열(L); Woolrich의 실험식에 의해 산출하였다⁽¹⁵⁾.

이와같이 하여 동결시간 예측을 위해 적용한 각 시료의 thermo-physical data는 Table 1과 같다.

결과 및 고찰

동결시간예측 model

본 연구는 기본적으로 균일물질과 일정한 조건에 한정되어진 것으로 가정하고, 동결시간과 관련있는 무차원변수 집단으로 나타내기 위해 무차원 해석을 적용하였다.

즉, Fourier No.는 시료의 두께(D), 상변화시간, 시료의 열적물성치(상변화과정 이후)가 관여하며,

$$Fo = \frac{k_s \cdot t}{C_f \cdot D^2} \dots\dots(1)$$

Biot No.는 열전달에 있어 외부저항에 대한 내부저항의 비로써,

$$Bi = \frac{h \cdot D}{k_f} \dots\dots(2)$$

Stefan No.는 주위 동결매체를 설명하고, 자체의 잠열방출에 따른 상변화과정 이후의 열전달과 관련 있다.

$$Ste = \frac{C_f(T_s - T_a)}{\Delta H} \dots\dots(3)$$

또한, plank No.는 과냉각 또는 초기과열의 설명과 잠열에 관계된다.

$$Pk = \frac{Cu(T_i - T_f)}{\Delta H} \dots\dots(4)$$

여기서 모든 열량은 상변화온도 범위에 있어 엔탈피 변화에 의해 방출되며, 시료의 초기 온도에서 최종 동결온도(-18°C)사이까지 적용된다. 동결시간 예측을 위해

plank's equation을 무차원 형태로 표시하면 다음과 같다.

$$Fo = \left[\frac{P}{Ste \cdot Bi} \right] + \left[\frac{R}{Ste} \right] \dots\dots(5)$$

그리고, 무차원 동결시간, Fo는 동결물질의 열적물성치와 외부조건에 의존되므로 (6)식과 같은 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$Fo = f(Bi, Pk, Ste) \dots\dots(6)$$

여기서 무차원 변수의 집단은 T_i, T_a, h, D 의 실험조건으로 구성되며, 이 model은 Plank's equation과 유사하게 변형된다.

$$t = \frac{\rho \cdot \Delta H}{(T_f - T_a)} \left(P \frac{D}{h} + R \frac{D^2}{k_f} \right) \dots\dots(7)$$

여기서 형태함수 P와 R의 값은 각각

$$P = 0.5(0.78 + 2.28Ste \cdot Pk) \dots\dots(8)$$

$$R = 0.125(0.43 + 2.15Ste - 1.48Ste^2) \dots\dots(9)$$

으로 계산되었다.

따라서 본 연구자는 위와 같이 제안된 단순한 해석적 model에 의해 각 시료별 예측동결 시간의 정확도를 살펴보고자 실제 동결실험한 data와 비교한 결과를 Table 2에 나타내었다.

Table 2에서 보는 바와 같이 pine mushroom의 경우 실제 측정된 동결시간의 범위는 33min에서 324min이며, 예측치와의 오차범위는 -15.47%에서 +14.34%로, 평균절대오차가 10.13%로 나타났다. arkshell은 동결시간의 측정치가 30min에서 309min까지로, 실험치와 예측치의 오차범위는 -12.11%에서 +16.93%, 평균절대오차는 8.7%이며, ground lean beef와 ground pork는 측정된 동결시간의 범위가 각각, 15min ~ 164min, 19min ~ 159min으로 오차범위는 -11,

Table 2. Difference between experimental freezing time and predicted results for testing food materials

Run #	Int. temp. (°C)	Freezer temp. (°C)	Surface heat trans. coefficient (W/m ² °C)	Thickness (m)	Water content (%)	Exp. content time (min.)	Pred. freezing time (min.)	Time difference (%)
1A	21.2	-30.5	27.4	0.030	88.0	131.98	111.90	-15.21
2A	13.0	-43.1	27.3	0.023	88.5	64.83	54.80	-15.47
3A	25.1	-35.9	23.5	0.035	85.0	196.05	172.45	-12.03
4A	24.7	-33.3	20.5	0.035	87.5	221.98	208.33	- 6.14
5A	11.8	-43.9	18.5	0.025	87.0	87.50	98.72	+12.82
6A	11.6	-43.7	19.0	0.022	86.5	75.50	68.48	- 9.29
7A	23.6	-40.0	14.0	0.040	87.0	257.47	280.10	+ 8.78
8A	23.9	-39.0	14.5	0.029	85.0	178.34	191.67	+ 7.47
9A	23.4	-31.5	9.5	0.030	88.5	324.89	371.49	+14.3
10A	23.7	-34.5	10.5	0.027	87.5	269.33	281.40	+ 4.48
11A	24.7	-21.9	180	0.025	86.0	44.00	40.50	- 7.95
12A	21.5	-23.6	355	0.030	86.5	33.87	36.45	+ 7.61
1B	23.5	-41.9	28.0	0.020	79.0	82.83	72.80	-12.11
2B	6.0	-39.6	27.5	0.010	80.5	44.58	43.50	- 2.42
3B	13.2	-34.1	24.5	0.024	80.5	91.50	105.83	+15.66
4B	16.8	-35.5	26.0	0.027	77.5	97.11	113.56	-16.93
5B	21.7	-35.5	19.5	0.030	77.0	180.24	167.80	- 6.90
6B	18.6	-33.2	14.5	0.023	78.5	187.50	181.61	- 3.17
7B	15.2	-42.5	15.0	0.017	77.0	105.89	93.72	-11.49
8B	24.3	-33.1	9.5	0.015	80.0	179.78	182.40	- 1.46
9B	24.8	-35.5	8.5	0.027	76.0	309.65	331.26	+ 6.98
10B	20.8	-22.4	355	0.030	79.5	39.18	43.58	+11.23
11B	22.8	-25.0	216	0.025	78.0	37.38	34.50	- 7.70
12B	20.9	-22.5	119	0.018	79.0	30.46	33.32	+ 9.38
1C	11.8	-30.6	27.4	0.015	72.5	57.54	62.50	+ 8.62
2C	16.8	-28.9	27.0	0.030	72.0	130.08	150.00	+15.31
3C	21.6	-26.4	20.5	0.010	72.5	63.83	57.42	-10.9
4C	20.4	-32.1	15.5	0.015	71.0	87.45	93.54	+ 6.96
5C	25.5	-36.4	19.5	0.015	73.5	79.37	71.93	- 9.37
6C	19.3	-32.0	15.0	0.010	72.0	65.45	59.40	- 9.24
7C	20.3	-40.5	10.0	0.010	73.0	68.00	71.98	+ 5.85
8C	20.4	-40.0	14.0	0.018	73.5	90.88	97.40	+ 7.17
9C	17.2	-34.5	9.0	0.020	73.5	164.50	187.67	+14.08
10C	17.6	-22.5	219	0.015	71.5	15.45	13.90	-10.03
11C	11.8	-21.5	189	0.015	72.5	18.20	16.13	-11.37
12C	23.0	-22.7	125	0.010	72.5	16.50	15.38	- 6.78
1D	23.3	-34.2	28.0	0.010	75.0	40.08	35.92	-10.37
2D	15.6	-35.8	27.8	0.010	76.0	34.50	31.15	- 9.71
3D	22.5	-39.1	27.4	0.017	75.5	59.97	53.03	-11.57
4D	18.4	-34.0	24.5	0.015	75.5	67.54	61.62	- 8.76
5D	19.1	-38.6	25.0	0.012	74.5	33.50	28.89	-13.76
6D	22.7	-35.9	19.5	0.020	75.0	89.00	94.83	+ 6.55
7D	22.4	-39.5	14.5	0.018	74.5	101.85	109.14	+ 7.15
8D	17.5	-35.0	9.5	0.120	75.5	159.47	174.56	+ 9.46
9D	22.5	-35.5	8.5	0.014	75.5	135.74	144.83	+ 6.60
10D	15.5	-21.8	356	0.030	75.5	35.92	40.77	+13.50
11D	21.8	-23.5	191	0.020	76.5	28.50	26.08	- 8.49
12D	19.5	-20.9	120	0.010	74.0	19.45	15.60	-19.79

A. For mushroom
B. For arksell

C. For ground lean beef
D. For ground pork

37%~+15.31%, -19.79%~+13.50%로 평균절대 오차는 9.57%, 10.47%로 나타났다. 이는 동결시간 예측을 위한 해석적 변형 model을 제안한 Pham과 Cleland & Earle가 말한 공학적 최소오차인 ±10% 범

위에 접근함을 보여 주었다. 또한 -18°C이하의 동결저장시 1°C온도를 내리는데 소요되는 에너지는 고내온도, 동결방법 및 포장조건에 영향을 받으므로 cost도 절감시킬 수 있음을 알 수 있다.

기존 data 와의 정확도 고찰

본 연구에서 제안된 실험 data 및 예측치의 정확도를 고찰하기 위해 기 발표된 동결시간 예측 model 과 비교 검토하였다. 이에 앞서, 동결시간 예측에 사용된 기존의 실험 data 중 Hung & Thompson⁽¹⁶⁾ Cleland & Earle⁽¹⁷⁾와 De Micelis & Calvelo⁽¹⁸⁾가 제안한 slab 형태의 시료 109개 data 를 이용하여 각 model 에 적용한 결과를 Table 3에 나타내었다.

여기서, Hung & Thompson의 59개 data 를 살펴 보면, Nagaoka 및 Pham의 model 에서 7.04%, 9.04%의 평균오차를 보이며, Cleland Earle의 45개 data 는 Pham의 model 에서 3.91%의 평균오차와 -7.01%~+13.49%의 오차범위로 나타났다. 이와같이 Hung & Thompson 및 Cleland & Earle의 data 가 Nagaoka 및 Pham의 model 에 잘 적용되는 것은 시료의 유사성 때문으로 사료된다. 이를 위해 Table 4에서 각 시료별과 model 사이의 정확도를 고찰한 바, lean beef는 Pham, Nagaoka, 및 Cleland & Earle의 model 에 ground beef는 Nagaoka의 model 에, 그리고 mashed potato, carp 및 tylose는 Nagaoka와 Pham의 model 에 잘 접근함을 볼 수 있다. 이를 토대로 본 실험에서 측정된 시료별 동결 시간과 Table 1의 열적 물성치를 각 model 에 적용시켜 computer로 data 처리한 결과를 비교하여 Table 5에 나타내었다.

Table 4. Accuracy of freezing time prediction by different materials

	No. of data		Average difference (%)	difference range (%)
Lean beef	20	(1)	35.22	-50.68 to - 19.31
		(2)	10.96	-12.46 to + 30.61
		(3)	10.03	-23.12 to + 5.71
		(4)	15.47	-31.51 to + 25.04
		(5)	5.58	-15.65 to + 15.58
Ground beef	9	(1)	36.54	-53.47 to - 13.60
		(2)	7.27	+ 1.99 to + 15.78
		(3)	13.57	-29.04 to + 7.61
		(5)	14.03	-26.20 to + 23.89
		(4)	9.83	-17.31 to + 19.44
Mashed potato	9	(1)	37.75	-48.18 to - 26.18
		(2)	7.33	-13.69 to + 13.71
		(3)	15.20	-22.73 to - 7.53
		(5)	5.63	-12.42 to + 9.22
		(4)	9.83	-17.31 to + 19.44
Carp	9	(1)	35.81	-49.23 to - 17.96
		(2)	6.98	- 1.60 to + 12.09
		(3)	13.02	-26.15 to - 0.87
		(5)	9.83	-17.31 to + 19.44
		(4)	12.97	-18.04 to + 32.34
Tylose	62	(1)	34.53	-52.39 to - 19.97
		(2)	10.99	-28.72 to + 33.61
		(3)	12.75	-25.49 to - 3.78
		(4)	12.97	-18.04 to + 32.34
		(5)	5.82	-15.17 to + 17.12

- (1) Plank form
- (2) Nagaoka form
- (3) Cleland & Earle form
- (4) Hung & Thompson form.
- (5) Pham form

Table 3. Comparison of individual datasets for predicting freezing time by various methods

	No. of data		Average difference (%)	difference range (%)
Hung & Thompson (1983)	59	(1)	37.80	-53.47 to - 13.60
		(2)	7.04	-16.09 to + 15.78
		(3)	14.24	-29.04 to + 7.61
		(5)	9.04	-26.20 to + 23.89
		(4)	9.83	-17.31 to + 19.44
Cleland & Earle (1977,1979)	45	(1)	29.59	-40.18 to - 19.31
		(2)	16.69	-28.72 to + 33.61
		(4)	12.40	-18.04 to + 32.34
		(5)	3.91	- 7.01 to + 13.49
		(3)	14.24	-29.04 to + 7.61
De Michelis & Calvelo (1983)	5	(1)	36.66	-41.54 to - 32.92
		(2)	7.87	- 5.54 to + 21.52
		(3)	3.43	+ 1.28 to + 5.71
		(4)	19.10	-31.51 to + 2.02
		(5)	4.88	- 6.79 to + 8.43

- (1) Plank form
- (2) Nagaoka form
- (3) Cleland & Earle form
- (4) Hung & Thompson form
- (5) Pham form

Table 5. Comparison of various methods on prediction of freezing time

Run #	Int. temp. (°C)	Medium temp. (°C)	Surface heat trans. (W/m ² °C)	Thickness (m)	Water content (%)	Exp.	Pred.	Plank	Naga.	C.&E.	H.&T.	Pham
1A	21.2	-30.5	27.4	0.030	88.0	131.98	111.90	92.43	151.31	141.99	140.02	163.42
2A	23.7	-34.5	10.5	0.027	87.5	269.33	281.40	172.63	294.56	271.70	271.45	314.53
3A	24.7	-21.9	180	0.025	86.0	44.0	40.50	24.60	42.57	40.68	38.59	45.45
1B	6.0	-39.6	27.6	0.010	80.5	44.58	43.50	36.93	47.52	38.75	43.22	42.05
2B	24.3	-33.1	9.5	0.015	80.0	179.78	182.40	123.42	216.62	162.83	198.92	180.88
3B	22.8	-25.0	216	0.025	78.0	37.78	34.50	23.49	40.26	33.25	34.91	33.97
1C	11.8	-30.6	27.8	0.015	72.5	57.54	62.50	42.77	60.75	53.21	48.20	61.78
2C	20.3	-40.5	10.0	0.010	73.0	68.00	71.98	55.04	90.38	71.99	76.48	82.83
3C	23.0	-22.7	125	0.010	72.5	16.50	15.38	9.83	16.90	13.28	13.79	15.09
1D	15.6	-35.8	27.8	0.010	76.0	34.50	31.15	24.29	36.81	31.04	31.15	35.28
2D	22.5	-35.5	8.5	0.014	75.5	135.74	144.83	108.96	185.13	161.33	161.33	163.69
3D	21.8	-23.5	191	0.020	76.5	28.50	26.08	18.16	30.50	25.38	26.09	27.15
Freezing time difference range(%)						-15.2	-44.09	-3.25	-19.52	-16.23	-9.12	
						to	to	to	to	to	to	
						+8.62	-17.16	+36.39	+7.58	+18.85	+23.82	
Average difference						6.20	30.54	12.76	9.15	10.14	10.39	
A. For mushroom						C. For ground lean beef						
B. For arksshell						D. For ground pork						

Table 5에서 보는 바와 같이, 본 실험에 사용한 시료는 Cleland & Earle, Hung & Thompson과 Pham의 model에서 평균절대오차가 10%수준으로 정확성을 보여 주었으나, plank model은 현열을 포함하지 않은 상태이므로 실험치보다 17.16%에서 44.09%까지 낮게 예측되었으며, Nagaoka model은 현열은 계산되었으나 모든 water가 동결한 것으로 가정된 이유로 실험치보다 -3.25%에서 +36.39%로 비교적 높게 예측되어졌다.

본 model의 간편성

동결시간 예측의 실제 응용면에 있어 계산에 이용되는 실험적 매개변수와 열적물성치는 가능한 소수의 input data로서 정확한 값을 구하는 것을 최선의 방법으로 볼 때, 복잡한 수치적용이나 graph 및 Table의 이용은 되도록 피하는 것이 편리하다. 이런 관점에서 볼 때 Table 6에 나타낸 바와 같이, 타 model에 비해 소수의 매개변수를 가진 단순한 방법으로 수계산(hand calculation)이 가능하며 빠른 시간 내에 동결시간을 예측할 수 있다는 장점을 지닌 해석적 model로써 단지 3가지의 실험적 매개변수(P, R, h)에 7가지의 물성치(ρ, ku, kf, Cu, Cf, L, W)만으로 예측할 수 있다.

Table 6. Complexity of freezing time prediction methods

	No. of empirical parameters used	No. of material parameter required
Cleland & Earle (1982)	7	6
Mascheroni & Calvelo(1982)	0	19
Hung & Thompson (1983)	14	6
Succer & Hayakawa (1984)	18	12
Pham(1986)	4	6
Present methods	3	7

요 약

이상과 같이, 기존 data의 정확도에 대한 고찰과 본 연구에서 소개한 단순한 해석적 방법에 의한 식품의 동결시간예측 model로서, 실제 측정된 시료별 실험치와 기존 model을 비교 검토하였다. 기 발표된 lean beef 등 109개의 data중, Hung & Thompson의 data는 Nagaoka 및 Pham의 model에, Cleland & Earle의 data는 Hung & Thompson의 model에 매우 접근함

을 볼 수 있으며, 시료별로 살펴볼 때, tylose 등 5품목의 시료는 Nagaoka 및 Pham의 model에 잘 적용됨을 알 수 있다. 그러나 본 실험에서 사용한 pine mushroom 등 4품목은 Cleland & Earle, Hung & Thompson 및 Pham의 model에 잘 부합되며, 제안된 model의 간편성과 정확도에 있어서도 단지 3가지의 실험적 매개변수와 7가지의 물성치 만으로 실험치와 비교한 결과, 공학적 최소오차 범위인 $\pm 10\%$ 이내로 나타났다.

문 헌

- Hsieh, R.C., Lerew, L.E. and Heldman, D.R.: Prediction of Freezing Times for Foods as Influenced by Product Properties. *J. Food process Eng.*, **1**, 183(1977)
- Pham, Q.T.: Simplified Equation for Predicting the Freezing Time of Foodstuffs. *J. Food Technol.*, **21**, 209(1986)
- Mascheroni, R.H. and Calvelo, A.: A Simplified Model for Freezing Time Calculation in Foods. *J. Food Sci.*, **47**, 1201(1982)
- Cleland, A.C. and Earle, R.L.: Assessment of Freezing Time Prediction Methods. *J. Food Sci.*, **49**, 1034(1984)
- Pham, Q.T.: Freezing of Foodstuffs with Variations in Environmental Conditions. *Int. J. Refrig.*, **9**, 290(1985)
- Creed, P.G. and James, S.J.: Heat Transfer during the Freezing of Liver in a Plate Freezer. *J. Food Sci.*, **50**, 285(1985)
- Ansari, F.A. Charan, V. and Varma, H.K.: Measurement of Thermo Physical Properties and Analysis of Heat Transfer during Freezing of Slab-Shaped Food Commodities. *Int. J. Refrig.*, **8**, 85(1985)
- Singh, R.P.: Thermal Diffusivity in Food Processing. *Food Technol.*, **2**, 87(1982)
- Woolrich, W.R.: Specific and Latent Heat of Foods in the Freezing Zone. *ASHRAE J.*, **4**, 43(1966)
- Heldman, D.R.: Food Properties during Freezing. *Food Technol.*, **36**, 92(1982)
- Heldman, D.R. and Gorby, D.P.: Prediction of Thermal Conductivity in Frozen Foods. *Trans of ASAE*, p.740(1975)
- A.O.A.C.: *Official Methods of Analysis*, 14th ed., Association of Official Analytical Chemists, Washington, D.C., p. 431(1980)
- Kong, J.Y., Libuchi, S. and Miyawaki, O.: Analysis and Prediction of the Effective Thermal Conductivities of Meats. *Agric. Chem.*, **46**, 1235(1982)
- 정기철: 유동식품의 빙점과 비열의 측정. 부산수산대학 석사 학위논문(1984)
- Fennema, O.R. and Powrie, W.D.: Advances in Food Research. In *Fundamentals of Low-Temperature Food Preservation*, Academic Press, New York, vol. 13, p.219(1964)
- Hung, Y.C. and Thompson, D.R.: Freezing Time Prediction for Slab Shape Foodstuffs by an Improved Analytical Method. *J. Food Sci.*, **48**, 555(1983)
- 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(1977)
- Michelis, A.D. and Calvelo, A.: Freezing Time Prediction for Brick and Cylindrical Shaped Foods. *J. Food Sci.*, **48**, 909(1983)

(1988년 2월 9일 접수)