

식품의 동결시간 예측 및 동결시간에 영향을 미치는 요인에 관한 연구

공재열 · 정진웅* · 김민용**

부산수산대학 생물공학과, 한국식품개발연구원*, 부산수산대학 냉동공학과**

Studies on the Freezing Time Prediction and Factors Influencing Freezing Time Prediction

Jai-Yul Kong, Jin-Woong Jeong* and Min-Young Kim**

Department of Biological Science and Technology,

*** Department of Refrigeration Engineering, National Fisheries University of Pusan, Pusan*

** Korea Food Research Institute, Banwol, Kyonggi-do*

Abstract

The objectives of this investigation were to develop an improved analytical method and to review with respect to experimental parameters and thermo-physical properties influencing the freezing time prediction. The results indicate that the relationship between freezing time and product size is dependent on the surface heat transfer coefficient. As the magnitude of surface heat transfer coefficient decreases, the influence of product size on freezing time becomes more profound. But the freezing time does decrease slightly as the coefficients are increased to values greater than $150 \text{ w/m}^2\text{C}$. In addition, influence of thermo-physical properties on the freezing time prediction shown generally density, water content, specific heat and thermal conductivity, in order of % difference. Multiple linear regression equation for freezing time prediction were obtained with respect to 4 different food materials with varying thickness.

Keywords: freezing time prediction, thermo-physical properties, experimental parameters

서 론

최근 동결식품의 급격한 소비 추세로 식품산업에 있어 동결의 중요성이 크게 대두되고 있다.

일반적으로 동결은 식품의 보존과 고품질 유지를 위한 수단이며, 이는 동결시간 및 속도에 관여하는 제 인자들에 의해 영향을 받는다. 따라서 식품의 품질저하를 최소화하고 원가를 절감시키기 위해 동결시간에 관한 연구와 동결 및 저장시 품질에 영향을 미치는 인자들에 관하여 폭넓은 연구가 필요한 실정이다. 지금까지 보고되어 있는 동결시간 예측에 관한 연구는 주로, plank's equation을 기초로 하여 Nagaoka, Cleland & Earle, Hung & Thompson 및 pham 등에 의해 해석적 방법으로 소개되고 있으며⁽¹⁻³⁾, 동결시간에 영향을 미치는 요인에 대해서는 Hsieh *et al*이 asparagus 등 4종류의

과채류에 있어 동결매체 온도와 표면열전달 계수의 영향에 대하여 연구하였으며⁽⁴⁾, Heldman은 strawberries에 있어 시료의 크기 및 초기온도에 따른 영향 등에 관하여 보고했을 뿐이다⁽⁵⁾. 따라서 본 연구에서 피조개 등 4종의 시료를 사용하여 동결시간에 영향을 미치는 제인자에 관해 비교 검토하고, 이를 검증하기 위하여 정지공기식 동결방법에 의한 시료별 동결시간을 추정하였기에 이들 결과를 보고코져 한다.

재료 및 방법

시료

동결시간 측정을 위해 사용한 실험재료는 pine mushroom, arkshell, ground lean beef, ground pork 등 4종류를 사용하였다. 본 실험에 사용한 시료의 전처리로서 arkshell은 내장 및 껍질을 제거하여排骨 부위만을 원형상태로, pine mushroom은 선별 후 무처리 상태로, beef와 pork는 살코기 부위만을 선별하여 얇게 저

Corresponding author : Jin-Woong Jeong, Korea Food Research Institute 148-1, Dangsuri, Banwol-myun, Hwaseong-gun, Kyonggi-do 445-820

민 후 grinding 하여 두께별로 일정한 크기(10cm×4cm)로 성형한 후, 수분감량을 막기 위해 wrap 포장을 하여 필요한 온도로 제어한 것을 사용하였다.

동결실험

각 시료에 있어 동결시간은 정지공기식(still air freezing)과 침지식(immersion freezing) 동결법에 의해 측정하였으며, 실험장치는 biological storage chest freezer(Model 8107/8171, Forma Scientific, dimension ; 1.22m×0.79m×1.05m)와 circulating thermostat thermomix(Model Frigomix 1495 dimension ; 0.42m×0.37m×0.21m)를 이용하여 고내 중심부에 망 형태의 염화비닐수지 상자(dimension ; 0.36m×0.25m×0.06m)를 설치하고 그 위에 여러 포장 형태의 시료를 얹어 실험하였다. 고내온도는 ±0.5°C 온도편차로 유지하면서 -20~-45°C 범위로 하였다.

온도의 측정

모든 시료의 온도는 증류수의 빙점을 측정하여 ±0.1°C 이내로 보정한 0.3mm C-C 열전대를 이용하여 시료의 기하학적 중심부와 표면을 측정하였으며, 온도 기록은 오차가 ±0.01%인 Data Logger(Model 2200B Fluke, USA)를 이용하여 중심온도가 -18°C에 도달할 때까지 1분 간격으로 연속 측정하였다.

표면열전달계수

본 실험에서는 다양한 표면열전달계수를 선정하기 위해 고내에 시료와 유사한 형태 및 크기를 가진 copper plate 로써 포장재질 및 wrapping 횟수에 따른 표면온도를 측정 한 후, 半代數用紙에 냉각시간과 무차원온도

(T-Ta/Ti-Ta)를 plotting 하여 (1)식과 같은 냉각속도를 구하여 표면열전달계수를 산출하였다⁽⁶⁾.

$$h = \frac{MC \log_e(T - T_a / T_i - T_a)}{A} \dots\dots\dots (1)$$

전열물성치

밀도 : 부피에 대한 질량의 비로써 산정하였다.

열전도도 : 빙결점 이상과 이하의 범위에 있어서의 열전도도를 추정하기 위해, Kong 과 Sarvacose 등에 의한 방법으로 열확산율을 측정하여 다음 식으로 계산하였다^(8,9).

$$k = \alpha \cdot \rho \cdot C \dots\dots\dots (2)$$

초기 빙결점 : 수 차례에 걸쳐 실험한 각 시료의 온도변화를 1분 간격으로 plot 함으로써, 온도변화가 일정한 상변화 과정의 초기온도를 기 발표된 data 와 비교 적용하였다.

비열 : 빙결점 이상의 온도범위에 있어서는 Siebel의 실험식에 의해, 빙결점 이하의 값은 Yano 에 의한 실험식으로 산정하였다⁽¹¹⁾.

잠열 : Woolrich의 실험식에 의해 산출하였다⁽¹²⁾.

일반성분의 정량 : 수분은 상압가열건조법으로, 조지방은 Soxhlet 추출법에 의해 산출하였다⁽⁷⁾.

이와 같이 하여 동결시간 계산을 위해 적용한 각 시료의 전열물성치는 Table 1에 나타내었다.

동결시간의 계산

본 연구에 있어 동결시간 예측치는 plank's eq 에서 ΔH, P, R의 값을 각각 식(4), (5) 및 (6)으로 변형시켜 식(2)에 의해 계산하였다.

$$t = \frac{\rho \cdot \Delta H}{T_i - T_a} \left(P \frac{D}{h} + R \frac{D^2}{K_s} \right) \quad (3)$$

Table 1. Thermo-physical data of freezing test materials

	Pine mushroom	Arkshell	Ground lean beef	Ground pork
ρ (kg/m ³)	952.2	1062.6	1051.5	1054.3
ku (W/m°C)	0.48	0.46	0.44	0.45
ks (W/m°C)	1.56	1.44	1.30	1.33
Cu (J/m ³ °C)	3.81 × 10 ⁶	3.52 × 10 ⁶	3.40 × 10 ⁶	3.36 × 10 ⁶
Cs (J/m ³ °C)	1.83 × 10 ⁶	1.85 × 10 ⁶	1.80 × 10 ⁶	1.79 × 10 ⁶
L (J/m ³)	29.5 × 10 ⁶	266 × 10 ⁶	255 × 10 ⁶	251 × 10 ⁶
Tf (°C)	-0.9	-2.2	-1.2	-1.7
W (%)	88.3	79.8	76.1	75.1
F (%)	0.3	0.5	2.0	6.7

여기서, $\Delta H = Cu(T_i - T_f) + C_s(T_f - T_c) + L$ (4)

$P = 0.5(0.78 + 2.28 Ste \cdot Pk)$ (5)

$R = 0.125(0.43 + 2.15 Ste - 1.48 Ste^2)$ (6)

결과 및 고찰

Plank's eq 과 같은 해석적 방법에서, 이미 밝혀진 바와 같이 동결시간에 직접적으로 영향을 미치는 인자들을 정리하면 Table 2와 같다⁽¹³⁾.

Table 2. Influencing factors for freezing time prediction

- a. Thermal properties of the material.
- b. Size of the object.
- c. Initial temperature of the material.
- d. The freezing medium temperature.
- e. The surface resistance to heat transfer as defined by the surface heat transfer coefficient.
- f. The geometric configuration of the object.
- g. The final temperature of the geometric center at the completion of the phase change process.

그리고 본 연구에서는 일반적으로 동결시간에 영향을 미치는 인자를 실험적 매개변수와 전열물성치로 대별하여 고찰하였다.

시료 두께의 영향

Fig 1에서 보는 바와 같이, 동결시간은 거의 시료 두께에 비례하므로, 두께가 클수록 열량을 감소시키기 위한 시간이 길어진다는 것을 알 수 있다. 그리고 동결시간은 초기 빙결점이 낮고, 밀도가 높고, 초기 수분함량이 많을수록 더 길어짐을 알 수 있다.

이와 같은 결과는 Hseih *et al*이 실험 결과와 유사한 경향을 보여 주었다. 또한, 동결시간에 영향을 주는 인자로서, 시료 두께와 표면열전달계수를 들 수 있으며, 동일한 두께의 시료라 할지라도 표면열전달계수에 의해서 동결시간이 크게 달라진다는 사실을 알 수 있다. 따라서, 두께가 큰 시료의 동결일수록 표면열전달계수의 영향이 크다는 점에 주의를 요한다.

초기온도의 영향

초기온도 5°C에서 25°C 사이에 걸쳐 동결시간에 미치는 초기온도의 영향을 Fig 2에 나타내었다. Fig 2에서

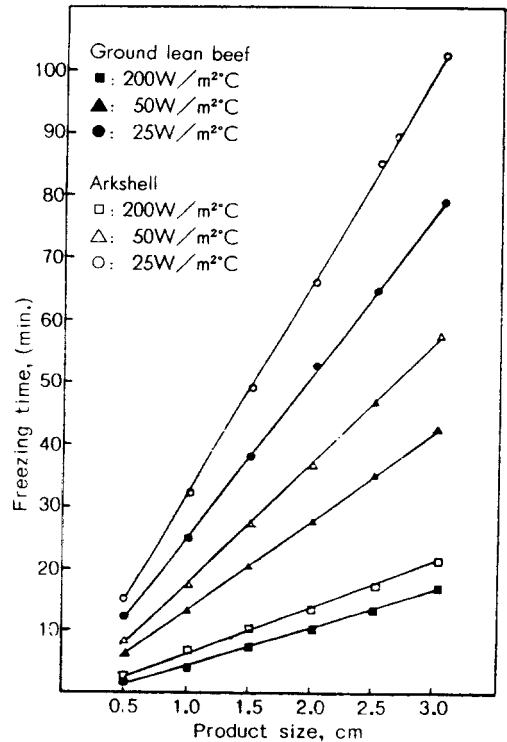


Fig. 1. Influence of product size on freezing time prediction. (Ti = 10°C, Ta = -40°C)

보는 바와 같이 동결시간에 미치는 초기온도의 영향은 비교적 적지만, 시료가 초기 빙결점에 도달한 후에는 제거되는 열량과 동결시간이 비례하고 있음을 알 수 있으며, 시료 두께가 얇을수록 초기온도의 영향이 적고, 상대적으로 두께가 두꺼울수록 초기온도의 영향이 커짐을 알 수 있다. 이는 각 시료에 있어, 동결시간에 영향을 미치는 비열 및 밀도등의 전열물성치에 따른 열량차에 의한 것으로 사료된다.

동결매체 온도의 영향

동결중 시료 주위의 냉각매체 온도의 하강은 열전달 機動力(driving force)을 증가시켜 동결시간을 단축시킨다. Fig 3에서 보는 바와 같이 동결매체 온도의 영향은 크게 나타나지만, 냉각매체 온도가 -60°C 이하에서는 비교적 적은 영향을 나타내며, -50°C와 -20°C 사이에서 동결시간에 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 또한, 각 시료에 대해 살펴보면, 일정한 동결조건에서는 수분함

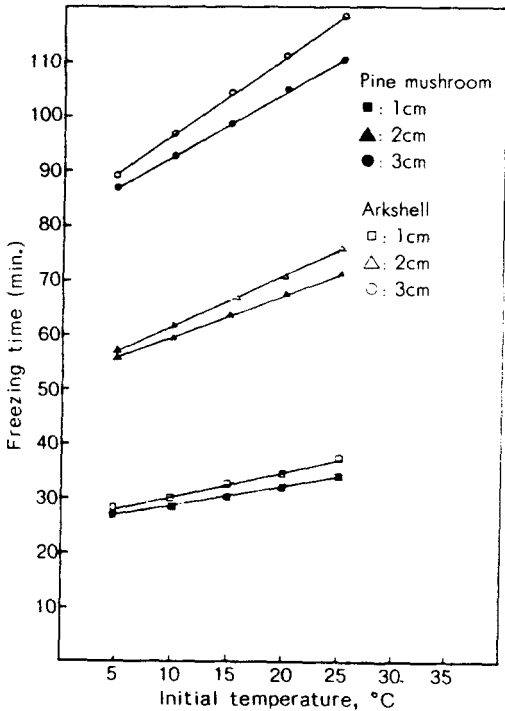


Fig. 2. Influence of initial product temperature on freezing time prediction. ($T_a = -40^\circ$, $h = 27.4 \text{ W/m}^2\text{C}$)

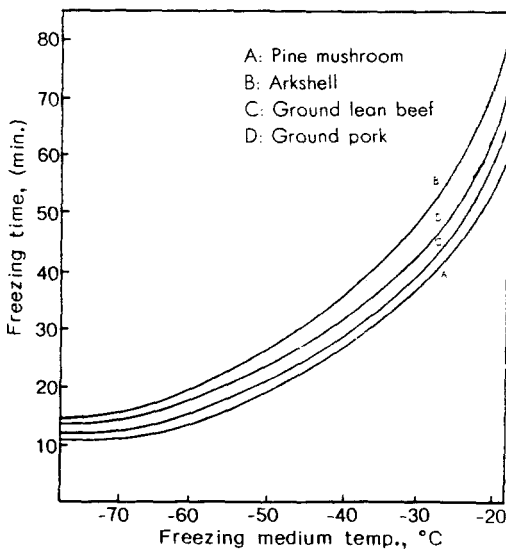


Fig. 3. Influence of freezing medium temperature on freezing time prediction. ($T_i = 20^\circ\text{C}$, $D = 0.01\text{m}$, $h = 27.4 \text{ W/m}^2\text{C}$)

량이 많고, 전열물성치가 큰 시료일수록 동결에 소요되는 시간이 길어짐을 볼 수 있으며, ground lean beef 및 pork의 경우는 일반적으로 수분함량 및 지질함량과 관련하여, 특히 지질함량이 많은 ground pork는 ground lean beef에 비해 동결 소요시간이 길어짐을 알 수 있다.

표면열전달계수의 영향

Fig. 4는 ground lean beef의 실험 결과로, 표면열전달계수가 동결시간에 미치는 영향이 매우 민감함을 볼 수 있다. 표면열전달계수의 값이 $150 \text{ W/m}^2\text{C}$ 이상에서는 비교적 낮은 기울기를 나타내지만, 표면열전달계수의 값이 $50 \text{ W/m}^2\text{C}$ 이상의 적은 값에 있어서는 시료의 두께에 따라 민감한 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 따라서 동결시간 예측시 표면열전달계수의 값이 적은 still air freezing method나 열저항치가 높은 포장재를 이용한 동결에서는 상대적으로 동결시간이 길어질 것이다.

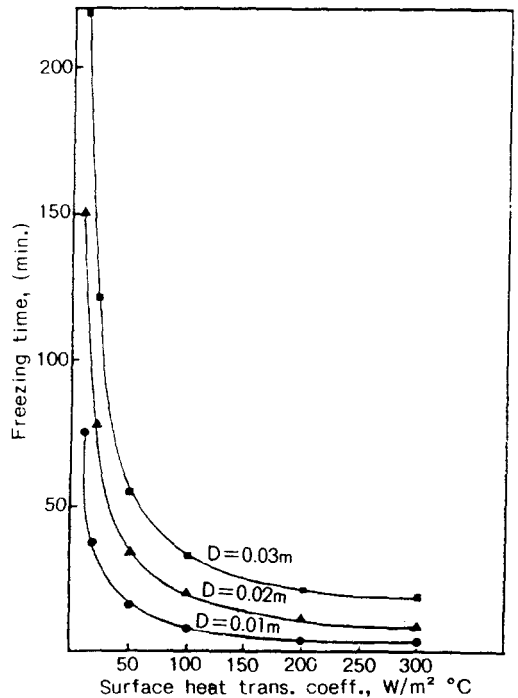


Fig. 4. Influence of surface heat transfer coefficient on freezing time prediction. ($T_i = 15^\circ\text{C}$, $T_a = -40^\circ\text{C}$)

전열물성치의 영향

동결시간 예측에 있어 전열물성치가 동결시간에 미치는 영향을 살펴보기 위해 각 물성치의 10% 감소시킨 값에 대한 반응도를 살펴보았다. Fig. 5에서 보는 바와 같이, 예측곡선에 가장 큰 영향을 미치는 것은 수분함량과 밀도의 변화로써, 표준치와 비교하여 각각 -7.90% 및 -10.01%의 오차를 보이고 있다. 이는 상대적으로 고품분 함량의 증가로 인한 전열량의 감소를 이유로 들 수 있다. 그리고, 비열은 시료의 조성파 온도에 의해 영향을 받으므로 비열이 높을수록 전체 enthalpy 차가 증가하므로 동결시간이 길어짐을 알 수 있으나(오차: -5.92%), 열전도도에 의한 영향은 +1.33%의 오차로 동결시간 계산에 그다지 큰 영향은 미치지 않는 것으로 나타났다. 또한 초기 빙결점은 빙결점이 높을수록 빙결정 형성속도가 빠르므로 동결시간이 단축될 수 있으나, 전체 동결 소요 시간에는 크게 영향을 미치지 못했음을 알 수 있다(오차: -1.13%).

중직선 회귀분석법(Multiple Linear Regression)에 의한 동결시간 예측

한편, 동결매체의 온도는 시료 초기온도 보다 동결시간

에 더 큰 영향을 준다. 이는 동결매체 온도와 동결시간 간의 관계를 나타내는 다음의 식(6)에서 알 수 있다.

$$t \propto 1/(T_f - T_a) \dots\dots\dots (6)$$

따라서, 동결시간을 추정할 수 있는 간편한 model을 모색하기 위하여 시료의 초기온도(X_2)와 시료의 초기 빙결점에서 동결매체 온도간의 차의 역수(X_1)를 독립변수로 하고 동결시간(Y)을 종속변수로 하여, 정지공기식 동결법에 의한 무포장 형태의 각 시료별 2가지 두께에 대해 실험한 data를 회귀분석한 결과, Table 3과 같은 중직선 회귀식을 얻었다. 각 시료별 회귀방정식은 계산치와 실험치 간의 오차가 $\pm 5\%$ 이며, 다중 상관계수는 0.85에서 0.96으로 나타났다. 따라서 일정한 두께의 시료를 동결코저 할 때, 냉각매체온도, 시료의 초기온도 및 초기 빙결점만 알면 동결시간을 예측하는데 유용하리라 사료된다.

요 약

본 연구는 식품의 동결시간에 영향을 미치는 요인에 대해 비교 검토하고, 시료 두께에 따른 동결시간 예측 모델을 유도하기 위해 정지공기식 동결법을 이용하여 피조개

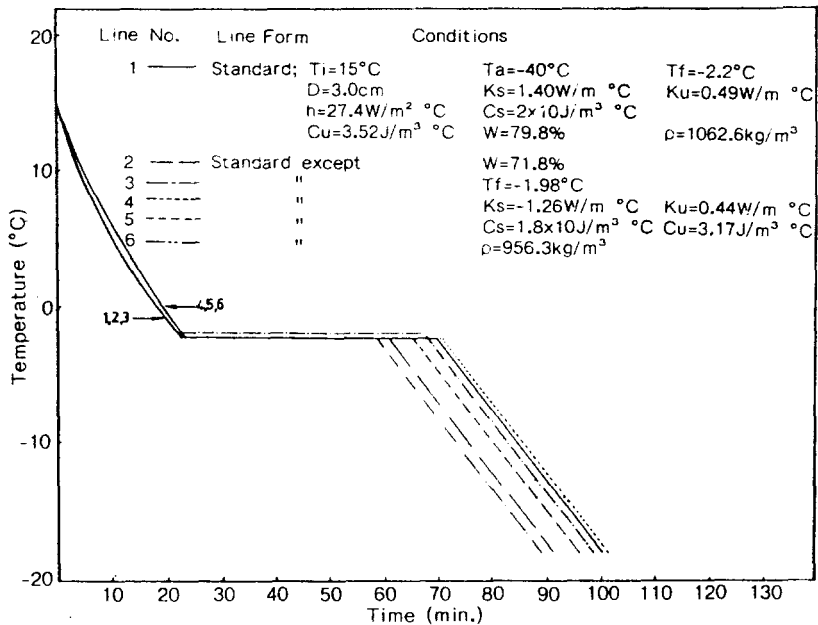


Fig. 5. Influence of thermophysical property changes on the predicted freezing curve of Arkshell.

Table 3. Freezing time equations by mutiple regression analysis

Test material	Thickness (cm)	Equation	R ²
Pine mushroom	3.5	Y=22.743 + 4593.075X ₁ + 1.582X ₂	0.959
	2.5	Y=31.507 + 3570.529X ₁ + 1.329X ₂	0.904
Arkshell	3.5	Y=72.569 + 5820.763X ₁ + 2.504X ₂	0.848
	2.5	Y=19.336 + 3182.623X ₁ + 1.082X ₂	0.890
Ground lean beef	3.0	Y=42.829 + 3651.647X ₁ + 2.136X ₂	0.943
	1.5	Y=44.141 + 2768.315X ₁ + 0.700X ₂	0.958
Ground pork	3.0	Y=64.560 + 4702.008X ₁ + 2.295X ₂	0.933
	1.5	Y=28.140 + 1844.487X ₁ + 1.438X ₂	0.857

Y=freezing time(min.) to -18°C
 X₁=reciprocal of (Tf-Ta in °C)
 X₂=initial temperature(°C)
 R²=multiple correlation coefficient

등 4종의 시료에 대하여 실험하였다. 그 결과, 시료의 두께가 두꺼울수록, 표면열전달계수 및 초기온도에 의한 영향은 상당히 급증하였으며, 표면열전달계수의 값이 낮을수록 시료 두께에 미치는 영향은 크며, 150W/m²°C 이상에서는 동결시간에 미치는 영향이 거의 유사하게 나타났다. 또한 각 시료에 있어 초기 빙결점이 낮을수록, 초기 수분함량이 많을수록, 밀도가 높을수록 동결시간이 길게 나타났고, 열적 물성치의 영향은 밀도, 수분함량, 비열 및 열전도도의 순으로 나타났다. 그리고 시료 초기온도, 초기 빙결점, 동결매체 온도에 따른 시료 두께별 동결 시간을 예측할 수 있는 증직선 회귀방정식을 유도한 결과 실험치와 비교하여 ±5%의 오차를 보여 주었다.

Ti : 시료 초기온도, °C
 t : 동결시간, min.
 ρ : 밀도, kg/m³
 α : 열확산율, m²/sec
 (첨자)
 S : 동결상
 u : 비동결상

문 헌

1. Ramaswamy, H.S. and Tung, M.A. : A Review on predicting freezing times of foods. *J. of Food Proc. Eng.*, 7, 169(1984)
2. 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)
3. Cleland, A.C. and Earle, R.L. : Assessment of freezing time prediction methods. *J. Food Sci.*, 49, 1034(1984)
4. Hsieh, R.C., Lerew, L.E. and Heldmen, D.R. : Prediction of freezing times for foods as influenced by product properties. *J. of Food Proc. Eng.*, 1, 183(1977)
5. Heldman, D.R. : Factors influencing food freezing rates. *Food Technol.*, 4, 103(1983)
6. Creed, P.G. and James, S.J. : Heat transfer during the freezing of liver in a plate freezer. *J. Food Sci.*, 50, 285(1985)
7. A.O.A.C. : *Official Methods of Analysis*, 14th ed., Association of Official Analytical Chemists, Wa-

기 호 설 명

A : 표면적, m²
 C : 비열, J/m³°C
 D : 시료두께, m
 F : 지방함량, %
 ΔH : 엔탈피 변화량, J/m³
 h : 표면열전달계수, W/m²°C
 L : 잠열, J/m³
 M : 질량, kg
 k : 열전도도, W/m°C
 Pk : Plank No., Cu(Ti-Tf)/ΔH
 Ste : Stefan No, Cs(Tf-Ta)/ΔH
 W : 수분함량, %
 Ta : 동결매체온도, °C
 Tc : 최종 중심온도, °C
 Tf : 초기 빙결점, °C

- shington, D.C., p.431(1980)
8. Kong, J.Y., Iibuchi, S. and Miyawaki, O. : Analysis and prediction of the effective thermal conductivities of Meats. *Agric. Chem.*, **46**, 1235(1982)
 9. Saravacose, G.D. and A.E. Drusas : Thermal conductivity of tomato paste. *J. Food Eng.*, **4**, 157(1985)
 10. Heldman, D.R. and Gorby, D.P. : Prediction of thermal conductivity in frozen foods. *Trans. of the ASAE*, **74**(1975)
 11. 정기철 : 유동식품의 빙점과 비열의 측정. 부산수산대학 석사 학위논문(1984)
 12. W.R. Woolrich(1966) : Specific and latent heat of foods in the freezing zone. *ASHRAE J.*, 43(1966)
 13. I.I.R. : *Recommendation for the Processing and Handling of Frozen Food*. 2nd ed., International Institute of Refrigeration, Paris, p.18(1972)
 14. Pham, Q.T. : Extension to plank's equation for predicting freezing times of foodstuffs of simple shapes. *Int. J. Refrig.*, **7**, 377(1984)
 14. Fleming, A.K. : Immersion freezing of small meat products. Proc. 12th. Int. Cong. of Refrig. Madrid 2, 683(1967)
 15. 天野俊正 : 食品の傳熱物性. *New Food Industry*, **20**, 55(1980)
- (1988년 8월 3일 접수)