

# 冷凍食品의 理論과 管理

〈제 1 회〉

鄭 晋 雄

(韓國食品開發研究院 規格管理室)

## 목 차

1. 머릿말
2. 식품냉동의 기초이론
  - 2.1 동결중의 식품 물성 특성
  - 2.2 식품의 동결장치
3. 냉동식품의 품질과 T-T·T
  - 3.1 온도범위에 따른 식품분류
  - 3.2 냉동식품의 정의
  - 3.3 cold chain
  - 3.4 T-T·T 이론
  - 3.5 T-T·T 계산 방법
4. 냉동식품의 유통 관리 기술  
참고문헌

## 1. 머릿말

최근 식생활의 간편 지향적 추세에 따라 냉동식품의 보급이 크게 증가되면서 시장규모도 연간 1,000억원 정도로 확대되기에 이르러 향후 성장 가능성이 가장 높은 업종으로 국내 식품가공업체가 상당히 관심을 가지고 있다.

우리나라의 냉동시설의 현황을 보면 1986년 말 현재 총 427개소에 달하고 있으며 생산능력은 동결 5882T/D, 냉장 454,105M/T, 제빙 6,654T/D, 저빙 114,163M/T이다. 이는 지난 1975년도 시설현황에 비하면 공장수가 약 3.4배 증가되었고, 생산능력에 있어서도 동결 3.0배, 냉장 7.1배, 제빙 2.0배, 저빙 2.5배의 신장율을 보였다. 그러나 냉동설비 능력은 그림1에서 보는 바와 같이 동결 및 냉장은 계속 증가 경향을 보이고 있으나 제빙 및 저빙은 정체 현상을 보이고 있다. 이는 식생활의 경제적인 면과 국민의 소비성향과 직접 관련이 있는 것으로 이는 선진 외국의 냉동식품 소비 추세를 살펴보면 향후 국내 냉동식품 추세를 전망할 수 있을 것이다.

이에 본 고에서는 냉동식품 제조업체에게 다소나마 도움이 되기 위해 냉동식품에 관한 기초지식과 품질 및 유통관리에 있어, 지금까지 발표된 연구 보고를 요약 정리하여 소개 한다.

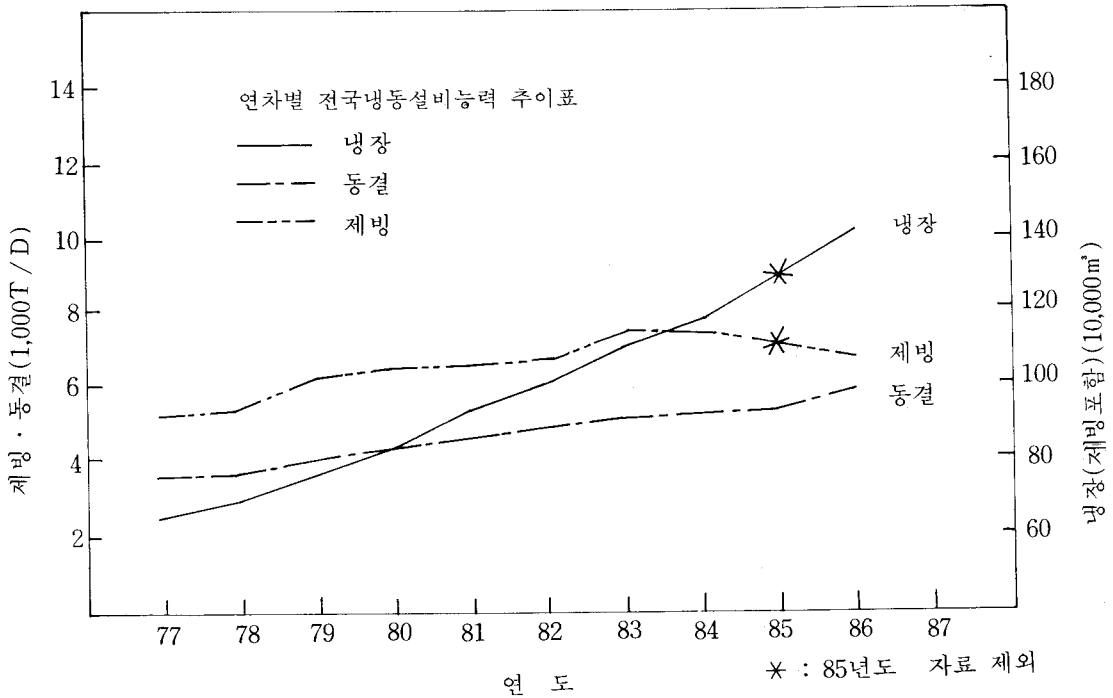


그림1 냉동설비능력 추이

표1 主要國別冷凍食品의 消費量과 前年對比率(最近5年間)

項目 年度 國別	冷凍食品消費量(톤)					消費量의 前年對比 伸長率(%)					最近5年間 年平均 伸長率(%)
	1982	1983	1984	1985	1986	1982	1983	1984	1985	1986	
일본	812,121	844,113	918,424	957,951	1,037,559	108.4	103.9	108.8	104.3	108.3	106.7
미국	10,248,000	10,414,000	10,806,000	11,115,000	...	103.1	101.6	103.8	102.9	...	103.1
스웨덴	199,445	204,383	209,137	211,828	219,338	96.6	102.5	102.0	101.3	103.5	101.2
노르웨이	50,623	54,334	59,509	66,101	70,911	112.3	107.3	109.5	111.1	107.3	109.5
핀란드	47,286	48,079	51,479	52,336	55,498	106.1	101.7	107.0	101.7	106.0	104.5
덴마크	117,688	127,433	134,570	147,227	160,724	106.4	108.2	105.6	109.4	109.2	107.8
서독	979,621	994,031	1,059,219	1,124,102	1,208,000	99.8	101.5	106.6	106.1	107.5	104.3
네덜란드	205,300	210,500	206,400	211,700	213,850	100.4	102.5	103.1	102.6	101.0	101.9
프랑스	552,694	629,729	687,808	823,791	882,650	106.5	113.9	109.2	119.8	107.1	111.3
스위스	100,720	106,322	111,403	121,923	130,973	98.2	105.6	104.8	109.4	107.4	105.1
이탈리아	203,900	220,175	241,010	259,940	299,710	109.9	108.0	109.5	107.9	115.3	110.1
영국	980,000	1,043,000	1,094,000	1,177,000	1,202,000	105.4	106.4	105.4	107.6	102.1	105.4

注 (1) 日本에 관한 통계는 日本冷凍食品協會調査. 生産量에는 冷凍野菜포함.

(2) 미국에 관한 統計는 「Quick-Frozen Foods International」誌에 따름.

(3) 기타의 歐州名國의 統計는 스위스 冷凍食品協會 資料임.

(4) 영국과 네덜란드의 消費量에는 冷凍家禽제의. 기타 名國의 消費量에는 冷凍家禽포함.

(5) 미국의 1986年 數字는 不明, 미국의 最近5年은 1981~1985年임.

(자료) 日本冷凍食品協會 1989

표2. 主要國別國民 1人당 年間冷凍食品消費量 (最近5年間)

(單位:kg)

國別	年次				
	1982	1983	1984	1985	1986
미 국	44.2	44.9	46.6	47.0	
덴마크	23.4	24.9	26.3	28.8	31.4
스웨덴	24.5	24.6	25.2	25.4	26.3
영 국	17.4	18.5	19.4	20.9	21.3
스위스	15.8	16.5	17.3	18.9	19.9
서 독	15.9	16.2	17.2	18.4	19.7
노르웨이	12.3	13.2	14.0	16.1	17.1
프랑스	10.2	11.5	12.5	15.0	15.9
네덜란드	14.4	14.6	14.3	14.7	14.7
핀란드	9.7	9.8	10.5	10.7	11.3
일 본	6.8	7.1	7.6	7.9	8.5
이탈리아	3.6	3.9	4.3	4.6	5.3

註.표1의 내용과 동일

(자료) 日本冷凍食品協會, 1989.

## 2. 식품냉동의 기초이론

### 2.1 동결중의 식품물성 특성

#### 2.1.1 동결과정시의 물성치

식품이 0℃이하로 냉각되면 얼기 시작한다. 이 온도를 빙점(또는 빙결점, 동결점, freezing point라고도 함)이라 하며, 식품의 빙점은 식품

중의 수분함량과 그 수분에 녹아 있는 물질(용질)의 분자농도에 좌우된다. 즉 수분을 많이 함유하고 있는 과실의 빙점은 -2~-3℃이지만 수분함량이 적은 식육은 거의 -1℃ 부근이다. 식품이 빙점이하로 냉각되어 품온이 저하함에 따라 빙결이 발생하기 시작하여 식품중에 미동결로 남은 수용액에 대한 석출 빙결정의 비율이 식품중의 수용액에 있는 용질농도와 동결온도에 의해 변화된다.

한편, 식품에 있어 온도변화는 열적물성치에 영향을 미친다. 일반적으로 온도가 낮아지면 얼음의 비열은 물의 약 0.5배, 얼음의 열전도도는 물의 약 4배, 그리고 비중량(밀도)은 약 0.9배가 된다. 이 때문에 식품의 비중량, 비열 및 열전도도는 생체식품의 값과 동결상태의 값은 크게 다르며, 열전도도를 비열 및 밀도로 나눈 것을 역확산율이라 한다.

$$\alpha = \lambda / c \cdot \rho$$

여기서  $\alpha$  : 역확산율(m<sup>2</sup>/hr)

$\lambda$  : 열전도도(W/m℃)

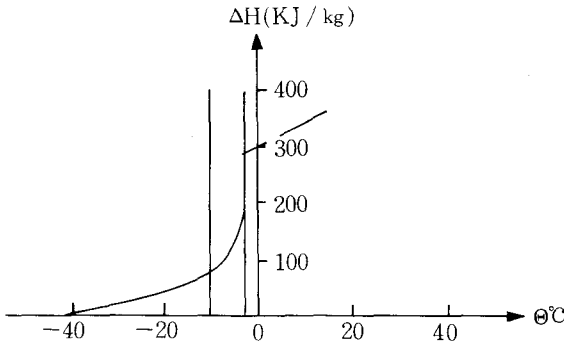
$c$  : 비열(J/m<sup>3</sup>℃)

$\rho$  : 밀도(kg/m<sup>3</sup>)

이는 동결과정의 냉각 및 동결속도에 관계하며 값이 큰 것은 열을 통과시키기 쉬우나 축적하기는 어렵다는 것을 의미한다. 또한 식품의 가공과 제조 및 가열 냉각 해동장치의 설계에

표3 식품중에서 빙결석출하는 수분의 100분율과 품온과의 관계

식 품 별	합수율 (%)	빙결할 수 있는 수분량에 빙결석출되는 비율					빙결하지 않는 수분kg (건조물) 1kg당)
		-5℃	-10℃	-15℃	-20℃	-30℃	
牛 肉 (少 脂)	74	83	93	97	99	100	0.35
대 구	83.5	87	94	97	98	100	0.39
명 태	80.5	85	64	97	98	100	0.39
液卵(黃白配合)	74	90	95	98	99	100	0.20
卵 黃	50	89	94	97	98	100	0.40
卵 白	86.5	93	96	98	99	100	0.40
과 즙	88	75	87	93	96	100	0.2
완 두	78	68	86	92	96	100	0.2~0.3
시 금 치	93	95	97	98	99	100	0.2

(a) 品温에 따른 엔탈피  $\Delta H$ 

(b) 品温에 따른 永結量의 비율 I

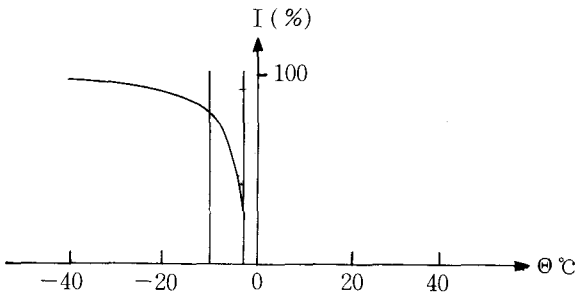
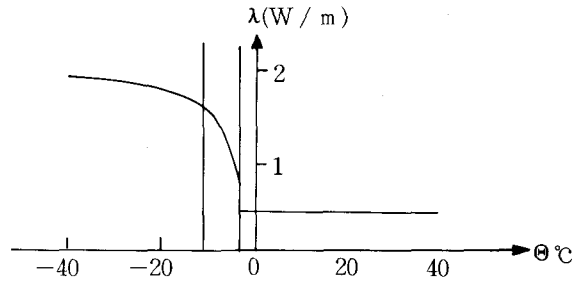
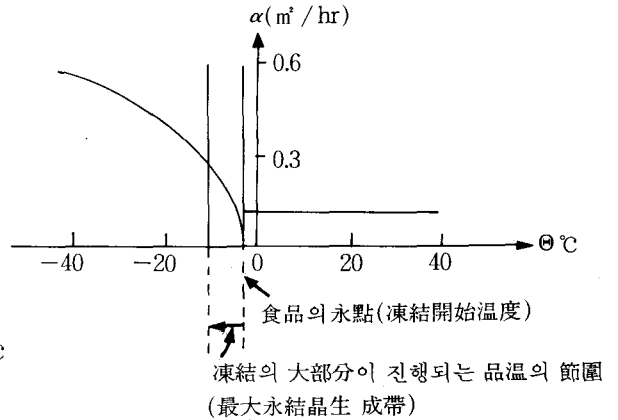
(c) 品温에 따른 熱傳導率  $\lambda$ (d) 品温에 따른 温度擴散率  $\alpha$ 

그림2. 凍結品温의 節圍內에 있어 食品의 熱物理的性質

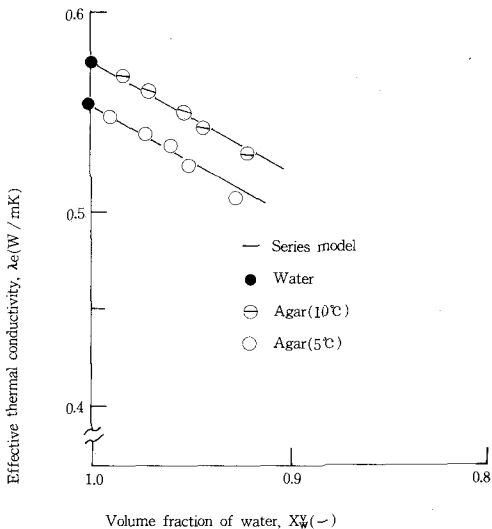
Table4. Experimental equation predicting the effective thermal conductivity of carbohydrate food

Investigators	Empirical equation	remark		Method
F.T.Wratten(1969)	$\lambda_e = 0.074428 + 0.00114W$	Rough rice	$9.9 \leq W \leq 19.3$	1
山田豊(1970)	$\lambda_e = 0.178 + 0.0035W$	Potato	$W \geq 60$	2
細川明(1970)	$\lambda_e = 0.080 + 0.00753T$	Rough rice	$10 \leq T \leq 20^\circ\text{C}$	2
D.K.Sharma(1973) T.L.Thompson	$\lambda_e = 0.0564 + 0.00858W$	Sorghum	$1 \leq W \leq 22.5$	1
大下誠(1978)	$\lambda_e = 0.0440 + 0.00276W + 4.07 \times 10^{-5}W^2$ $\lambda_e = 0.0441 + 0.00373W + 7.82 \times 10^{-5}W^2$ $\lambda_e = 0.0443 + 0.00476W + 1.12 \times 10^{-4}W^2$	Rough rice	$T = 16.3^\circ\text{C}$ $T = 30.8^\circ\text{C}$ $T = 45.9^\circ\text{C}$ $13 \leq W \leq 25$	1
S.S.H.Rizvi(1985)	$\lambda_e = (60.67 - 0.1542X_s - 0.0028X_s^2) \times 10^{-2}$ $\lambda_e = (60.36 - 2.3110X_s - 0.0410X_s^2) \times 10^{-2}$	Apple juice Orange juice	$23.8 \leq W \leq 82.6$ $W \geq 60$	3
G.D.Saravacos(1985)	$\lambda_e = 0.482 + 0.0015T$	Tomato paste	$30 \leq T \leq 50^\circ\text{C}$	4

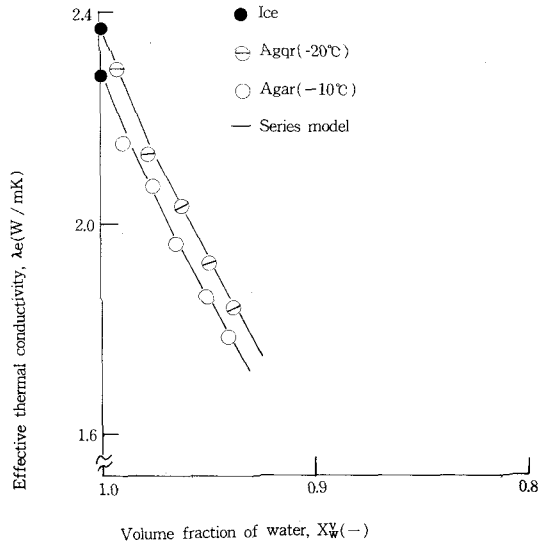
Method : 1 cylindrical 2 spherical 3 thermal diffusing 4 thermal comparator

필요한 열적물성치중 가장 중요한 인자로서 측정이 곤란한 것이 열전도도이다. 일반적으로 고체식품이나 고점도 식품의 열전도도는 이들 식품의 조성성분 온도 및 열류에 대한 섬유질 방향등의 영향을 받으나, 특히 조성성분의 영향이 큰 것으로 알려져 있다. 식품의 조성성분은 물, 단백질, 지방, 탄수화물 등을 들 수 있으나 건조식품을 제외하면 거의 다량의 수분을 함유하고 있으므로 지금까지의 열전도도에 관한 연구는 표4에서 보는 바와 같이 수분함량과 온도를 영향인자로 한 것이 대부분이며 다른 성분이 열전도도에 미치는 영향에 관한 연구는 거의 없는 실정이다. 근간에 식품조성성분의 열전도도에 미치는 영향에 관한 연구로서 Jacob 와 Erk(1929)의 얼음( $0^{\circ}\sim-20^{\circ}\text{C}$ ) Lenz의 물( $0^{\circ}\sim20^{\circ}\text{C}$ ) 및 Butterfat에 관한 연구가 있으며 그밖에 2성분계 및 3성분계에 대해 수식으로 구한 Wang 과 Knudsen(1958), Tsao (1961) 등의 연구가 있다.

Fig·3과 4는 동결 및 미동결시에 있어 수분함량이 열전도도에 미치는 영향을 나타내었으며 표5는 탄수화물 및 단백질의 고유열전도도를 나타낸 것이다.



Fig·3 Effect of water content on thermal conductivity measured and computed by series model



Fig·4 Relation of effective thermal conductivity measured and computed by series model

Table 5. Thermal conductivity of carbohydrates and Proteins computed with series model

Carbohydrates and Protein	Unfrozen state (W / mK)	Frozen state (W / mK)
Agar	0.256	0.389
Potato starch	0.252	0.376
Sucrose	0.308	0.391
Gelatin	0.648	0.521
Egg-albumin	0.238	0.403
Gluten	0.219	0.313
Milk casein	0.200	0.273

그리고 일반적으로 식품의 전열 물성이라고 하면 밀도, 비열, 열전도도 및 열확산율을 말하며, 이 중 비열은 열부하계산에 있어 필수적인 전열물성치이며, 이와 관련된 물성치로서 빙점이 있다. 식품의 빙점은 냉동부하와 같은 열계산에 중요한 영향을 미칠 뿐만 아니라 chilled 식품의 저장온도대, 과일·야채류의 저장조건설정, 식품의 동결시간 계산등과 동결 농축식품등에 있어 매우 중요한 인자이다. 지금까지 식품의 비열에 대해서는 식품의 성분은 물과 고형

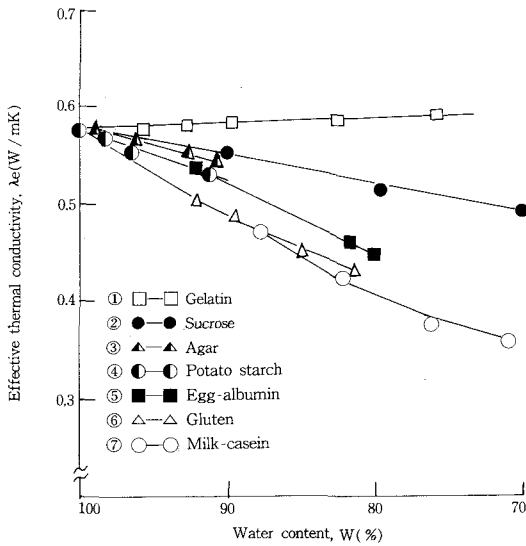


Fig · 5 Effect of hydrophobicity on effective thermal conductivity

분으로 구별하여 발표한 Siebel(1982) 이후, 용해 잠열, 엔탈피 등과 함께 연구되어 왔으므로 식품의 조성성분을 알고 있을 경우 비열의 가성성(additive properties)에 근거하여 식품의

Table 6. Empirical equations predicting the specific heat of food products.

	Empirical equations	Remarks
Kong (1982)	$C=4.20X_w^w+1.26X_p^w+2.10X_f^w$ $C=2.00X_w^w+1.26X_p^w+1.60X_f^w$	unfrozen state frozen state $C=(KJ / kg^{\circ}K)$ (soybean curd)
Yano (1978)	$C=1.0X_w^w+(0.2-0.35)X_s^w$ $C=0.5X_w^w+0.2X_s^w$ $=0.2+0.3X_w^w$	unfrozen state frozen state $C=(kcal / kg^{\circ}C)$
Charm & Moody (1966)	$C=1.0X_w^w+0.5X_f^w+0.3X_s^w$ $C=1.0X_w^w+0.3X_f^w+0.37X_p^w+0.34X_s^w+0.2X_a^w$	unfrozen state $C=(kcal / kg^{\circ}C)$
Riedel (1956)	$C=0.4+0.6X_w^w$	water content Above 25%(meats & Fishs)unfrozen state
Siebel (1982)	$C=1.0X_w^w+0.2X_s^w$ $=0.2+0.8X_w^w$	unfrozen state $C=(kcal / kg^{\circ}C)$

유효비열을 추정할 수 있게 되었다. 최근까지 발표된 실험식을 정리하여 Table6에 나타내었으며, Fig6 및 Table7은 비열에 있어 농도의 의존성을 나타낸 것이다.

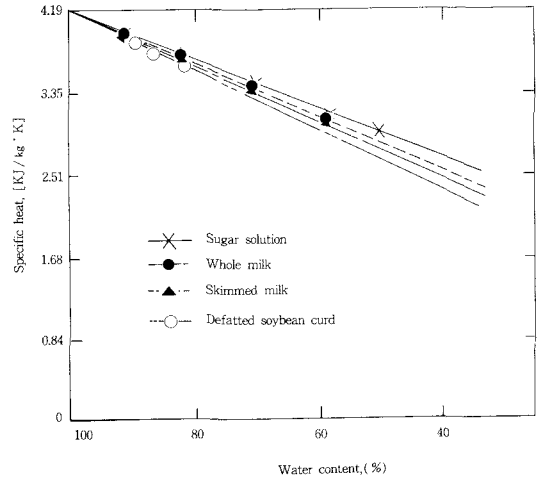


Fig · 6 Effect of water content on specific heat of milks(whole, skimmed), sugar and defatted soybean curd

빙점에 대하여는 Raoult's law으로 부터 이상 용액이나 묽은 용액인 경우는 용액의 몰농도에 따라 빙점이 강하한다는 것이 이론적으로 이미 밝혀져 있으며 식품의 경우도 여러 종류의 식품에 대해 이미 보고되어 있다. 또한 최근의 연구로는 빙점강하에 영향을 미치는 조성성분에 대해 Fig 7, 8, 9 및 10에 나타내었다.

그밖에 가성성이 성립하지 않는 열확산율에 대해서는 Riedel(1969)이 5~65℃에서 각종 과실에 있어서, Dickerson(1975)은 43~63℃에서 축·어육(넙치, 쇠고기, 돼지고기)의 열확산율을 동심원통법을 이용하여 측정하였고, 최근에는 Kong(1979) 등이 동결 및 미동결상태에서 각종 단백질, 탈지 및 전지대두, 감자전분과 한천의 열확산율을 측정 한 바 있다. 그러나 지금까지 미동결상태에서의 어·축육에 대한

Table 7 Specific heats of sucrose solutions and soybean protein gels at different concentrations

Materials	Concentration (wt %)	W <sub>l</sub> (g)	W <sub>s</sub> (g)	T <sub>l</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>t</sub> (°C)	C <sub>p</sub> <sup>s</sup> (KJ/kg°K)	C <sub>ps</sub> (KJ/kg°K)	Remarks
sucrose solutions	10	400	100	19.0	24.5	20.0	3.96	1.84	Average C <sub>pf</sub> =1.59 KJ/kg°K
	10	400	100	17.2	8.9	15.7	3.92	1.51	
	20	400	100	20.1	24.8	20.9	3.65	1.51	
	20	400	100	17.7	8.9	16.2	3.65	1.51	
	30	400	100	19.3	24.9	20.2	3.48	1.60	
	30	400	100	17.7	8.9	16.3	3.37	1.42	
	40	400	100	20.8	24.7	20.1	3.19	1.42	
	40	400	100	19.4	9.4	17.9	3.14	1.55	
	50	400	100	22.0	24.1	22.3	2.97	1.60	
	50	400	100	19.4	9.4	18.0	2.90	1.72	
soybean protein gels	10	400	100	16.5	4.8	14.4	3.89	1.22	Average
	15	400	100	16.4	5.6	14.6	3.75	1.29	C <sub>pp</sub> =1.23
	20	400	100	16.2	5.1	14.0	3.58	1.19	KJ/kg°K

Table 8. The freezing point of selected foodstuffs & the empirical equation computing freezing point of dairy products.

Foodstuffs	Water content	Freezing point	Foodstuffs	Water content	Freezing point
Apples	84	-1.1	Apricots	85	-1.1
Asparagus	93	-0.6	Bananas	75	-0.8
Broccoli	90	-0.6	Cauliflower	92	-0.8
Celery	94	-0.5	Cheese	45	-7.4
Cucumbers	96	-0.5	eggs, white	88	-0.6
Eggs, yolks	51	-0.6	Grapes	82	-1.6
Grapefruit	89	-1.1	Leeks	85	-0.7
Lemons	89	-1.4	Lettuce	95	-0.2
Liver	70	-1.7	Melons	93	-1.1
Milk, fluid	87	-0.6	Olives	75	-1.4
Oranges	87	-0.8	Sausage	56	-1.7
Shrimp	83	-2.2	Spinach	93	-0.3
Strawberries	90	-0.8	Watercress	93	-0.3

$$T_i = X_i A + X_i (B + C X_i)$$

where, X<sub>i</sub> : mass fraction of the i component in a binary solution

empirical coefficient	sugar (0-48%)	serum (0-33%)
A	-6.52370	-5.38392
B	2.04349	-10.99640
C	-33.67600	-1.84488

T<sub>i</sub> : freezing point depression degree

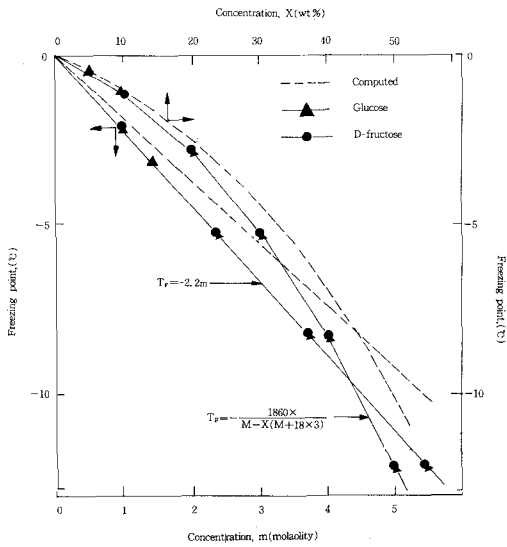


Fig · 7 Freezing point of glucose & D-fructose solutions at various concentrations

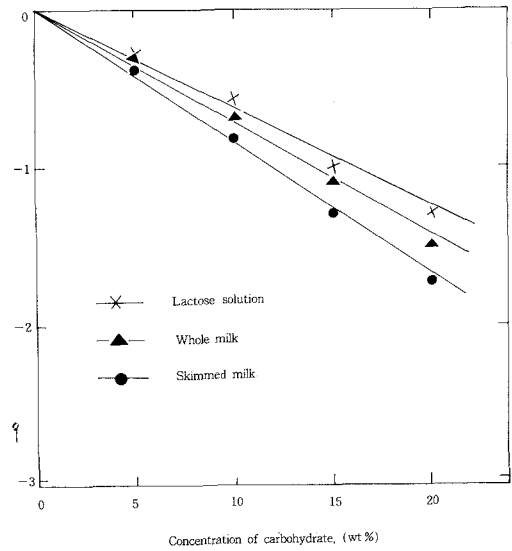


Fig · 9 Comparison of freezing point of lactose, whole and skimmed milks at various concentrations.

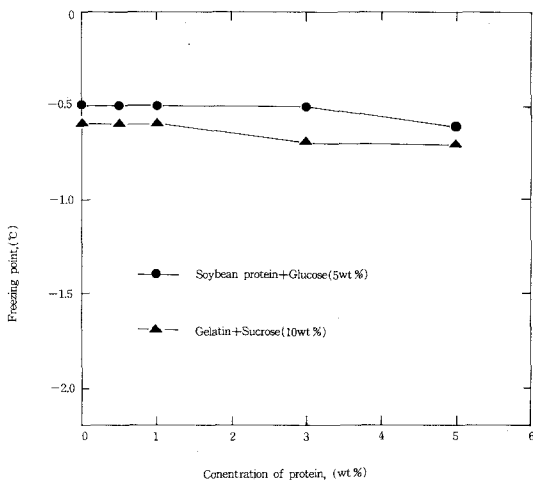


Fig · 8 Effect of proteins on freezing point depression.

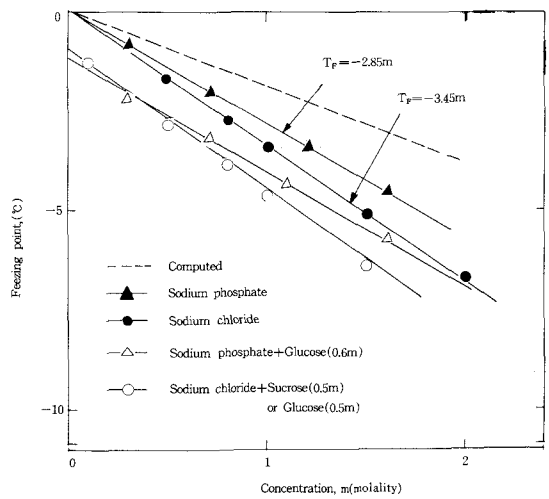


Fig · 10 Freezing point of salts at various concentrations



Table 9. Thermal diffusivity of foodstuffs from published reports

Foodstuffs	Water content (% wt.)	Fat content (% wt.)	Temperature (°C)	Thermal diffusivity (m <sup>2</sup> /h)x10 <sup>-4</sup>	Author
Fishes :					
Codfish	81	-	5	4.38	Riedel(1969)
"	"	-	65	5.10	"
Halibut	76	1.0	43~66	5.28	Dickerson & Read(1974)
"	78	0.6	"	4.92	"
Meats :					
Beef	75	-	0	4.35	Riedel(1969)
"	76	-	5	4.32	"
Beef, Chunk	66	16	43~66	4.44	Dickerson & Read(1975)
Beef, Round	71	4	"	4.80	"
Beef, Tongue	68	13	"	4.14	"
Ham, Smoked	64	-	5	4.26	"
"	"	-	65	4.61	"
"	"	11	43~66	4.92	"
"	"	14	"	4.98	"
Fruits :					
Cherry, Flesh	-	-	0~30	4.74	Parker & Stout(1967)
Peaches	-	-	2~32	5.04	Bennett(1963)
Apple, Whole (Red Delicious)	85	-	0~30	4.92	Bennett et al(1969)
Strawberry, Flesh	92	-	5	4.56	Riedel(1969)
Apple, Sauce	37	-	5	3.78	"
"	90	-	5	4.49	"
Bananas, Flesh	76	-	5	4.26	"
Plum, Jam	43	"	5	3.78	"
Marmalade	44	"	5	3.78	"
Vestables :					
Tomato, Marrow	67	-	5	4.26	Riedel(1969)
Potato, Mashed, (Monona)	78	-	5	4.43	"
Potato, Squash (Golden Delicious)	88.5	-	22.9	5.87	"
Peanuts :					
Ground, Kernels	8(d.b.)	-	4.5	5.11	Suter et al(1975)
Ground, Hulls	5 "	-	"	4.00	"
Peanut pods	7 "	-	"	2.61	"
The others :					
Sugar Beets	88	-	5	4.60	Riedel(1969)
The others :					
Sugar Beets	-	-	0~60	4.56	Slavioek et al(1962)
Egg	88	-	5	4.60	Riedel(1969)
Curd, Lean	55	-	5	3.90	"
"	86.2	1.1	10	4.75	Kent & et al(1984)

연구 결과는 발표된 바 있으나 동결상태에서의 열확산율에 관한 연구는 미비한 상태이다.

Table 9는 지금까지 보고된 열확산율 데이터를 정리한 것이다.

※ 기호 설명

C : 비열

C<sub>p</sub><sup>s</sup> : 시료의 비열 [KJ/kg°K]

C<sub>pf</sub> : 지방의 비열 [KJ/kg°K]

C<sub>pp</sub> : 단백질의 비열 [KJ/kg°K]

- $C_{ps}$  : 수용액 중 용질의 비열 [KJ/kg°K]
- $m$  : molality
- $M$  : 분자량
- $T$  : 온도 [°C]
- $T_f$  : 빙점강하도
- $T_i$  : 초기온도 [°C]
- $T_s$  : 시료표면온도[°C]
- $T_t$  : 혼합온도[°C]
- $W$  : 수분함량 [%]
- $W_i$  : 초기 물의량[g]
- $W_s$  : 시료의 무게[g]
- $X^w_f$  : 지방의 중량분율
- $X^w_p$  : 단백질의 중량분율
- $X^w_s$  : 수용액중 용질의 중량분율
- $X^w_w$  : 물의 중량분율
- $X^v_w$  : 고형분의 체적분율
- $\lambda_e$  : 유효열전도도[W/mk]

2.1.2 동결곡선

식품의 조성성분은 수분이외에 염류, 당류, 및 기타의 성분이 녹아 있는 수용액으로 존재한다. 식품의 동결이란, 이 수용액을 얼리는 것으로 동결에 의해 액상에서 고상으로 상태 변화를 일으키는

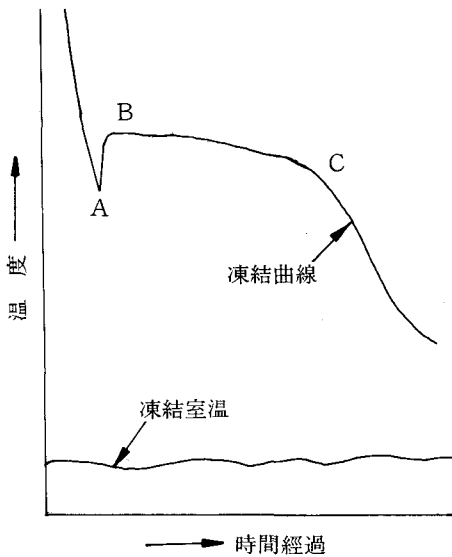


그림11. 凍結曲線의一例

것은 수분뿐이다. 그러나 조성성분이 다양하므로 실제 얼기 시작하는 온도는 0°C보다도 낮으며 용액 농도가 높을수록 동결점은 낮아지는 동결점 강하현상을 나타낸다. 이 동결점 강하는 수용액의 분자농도(mole농도)에 비례하므로 동결점은 동일 식품에 있어서도 함수율이나 함유성분의 조성에 따라 다른 값을 지닌다.

그림11은 식품을 냉각시켜 동결이 종료할 때까지의 온도변화를 나타낸 동결곡선을 모식적으로 나타낸 것이다. 과냉각, 점A는 동결점을 초월해서도 빙결정이 생기지 않는 과냉각 상태로 진행되다가 돌발적으로 B점까지 상승한 후 서서히 온도가 저하하여 점C에 도달한후, 비교적 빠른 온도저하를 나타내어 최종온도에 접근하게 된다. 과냉각이 파괴된 후의 B온도는 거의 동결점과 비슷한 것으로 생각되나 이 점 이하에서 빙결정이 생성되어 표면에서 중심으로 동결이 진행되며C점의 온도 부근에서 대부분의 수분이 빙결정으로 변한다. 이 점B와 C사이의 온도범위를 최대빙결정 생성대라고 일컫는다. 이 최대빙결정 생성대는 지금까지 식품의 동결점에서 -5°C사이의 품온범위를 일반적으로 이야기하지만 최근에는 동결점과 -15°C사이의 범위로서 보고되고 있다. 이 구간은 물에서 얼음으로 변하는데 필요한 잠열때문에 열부하가 크게되어 품온이 상승하지 않는 열적평형부를 나타낸다. 또한 식품은 빙결정생성에 따라 세포조직의 기계적 손상을 받기 때문에 이 온도대는 동결처리시 중요한 온도대이다.

한편, 동결이 진행되는 과정에서 수용액이 빙결정화되므로 용질로 있는 여러 성분은 그대로 용액중에 잔존하므로써 용액의 농도가 높아지게 된다. 따라서 용액의 동결점은 점차 내려가게 되어 냉각에 의해 수용액의 일부가 동결된다. 이와같이 동결과 수용액의 온도저하및 농축이 진행되면서 동결이 종료된다. 동결 종료 온도를 공정점이라 부르며 동결점과 공정점사이의 온도에 있어 수분의 동결된 비율을 동결율이라 한다. 이 수용액의 농도와 동결점 강하사이의 관계는 Raoult법칙에 의해

$r = 1 - \theta_f / \theta$ 으로 나타낸다.

여기서  $r$  : 동결율(kg / kg)

$\theta_f$ : 수용액의 동결점(°C)

$\theta$  : 수용액의 냉각온도(°C)

단, 공정잡에서는 동결율  $r=1$ 로 한다.

표10 生鮮食品의 凍結點 및 共晶點

種 類	凍結點 $\theta_f$ °C	共晶點 $\theta_z$ °C
淡水魚, カエル, 乳, 卵 肉, 鰵肉, 鳥, 野采	-0.5 -1	- 60
回遊性海水魚, 介, 果汁	-1.5	
底棲性海水魚, 介, 海藻	-2	
果汁	-2.5	

### 2.1.3 동결속도 및 시간

식품의 수송, 저장, 제조 및 가공공정에 있어서 동결과정중 식품내의 온도분포, 동결시간, 동결계면의 이동속도(moving velocity of fusion front)를 정확히 예측한다는 것은 식품 동결장치의 설계 및 최적조건 결정과 공학적인 재문제를 합리적으로 해결하기 위해서 대단히 중요하다.

지금까지 식품의 동결과 관련하여 동결기간에 관한 연구보고로서 Plank(1941)가 식품의 형상(평판, 실린더, 구)에 따른 동결시간의 예측방법을 최초로 발표한 이후, Nagaoka(1955)등이 어육의 동결에 대하여, Cleland와 Earle(1977~79)이 여러가지 형상의 모델 식품에 관하여, Talmon과 Davis(1981)는 동결 및 해동계면의 이동속도에 대하여, Mascheroni와 Calvelo(1982)가 beef의 동결시간 추정에 관한 새로운 모델을 제시한 바 있다. 그러나 동결속도에 관한 연구로서는 Long(1955)이 동결속도가 어육의 품질에 미치는 영향에 관해, Yigit(1983)가 과일 및 야채식품의 동결속도 추정에 관한 연구등이 있으나 비교적 부족한 실정이다.

이와같이 동결시간 및 속도에 관해 최근에 많이 연구되고 있으므로 식품의 동결시간 및

속도를 예측하기 위해 우선 알아두어야 할 사항에 대해 고찰해 보면 다음과 같은 것이 있다.

먼저 동결시간의 용어에 관해 살펴보면 Long은 열적저지시간, 즉 -1~-5°C의 최대빙결정생성대를 통과하는데 걸리는 시간으로 정의하였으며, Fennema와 Powrie(1973)는 동결속도와 관련된 시간은 온도방법으로 주어진 온도범위를 통과하는데 경과되는 시간으로 설명하였다. 최근에 가장 적합한 내용으로 I.I.R.(1972)에서 발표한 유효동결시간 즉, 시료의 초기온도로부터 시료의 열적중심에서 주어진 온도까지 동결시키는데 소요되는 시간으로, 이 시간은 냉동고내에서 식품의 전체 가공시간과 관련되는 것으로 정의하였다.

또한 동결과정에 있어 상변화의 최종점(end point)의 정의에 대한 연구도 불확실한 실정으로서, 이는 식품에 있어서 유동경계조건 가설이 만들어지지 않는 한 불가한 것인 바, 통상 질량 평균온도에 도달할 때 또는 열역학적 중심이 어떤 온도에서 상변화가 완료되는 것으로 고려하여 최종점을 정하는 것이 최선의 방법이라고 보고되고 있다. 이러한 이유로 동결시간 예측에 사용되는 최종중심온도는 -5°C, -10°C 및 -18°C 등으로 설정하고 있다. 이와같이 이론적 동결시간 예측법에서 최종 열역학적 중심 온도의 선정은 동결과정시에 방출되는 열량에 대한 정확한 계산뿐만 아니라, 동결후의 저장조건에도 관련되므로 최종중심온도의 선정은 매우 중요한 문제로 대두되고 있다. 이러한 식품의 동결시간 예측에는 열물성치, 상변화를 동반하는 열전달 및 비등방성의 조건 등 여러 복잡한 인자가 관여하고 있기 때문에 지금까지 Plank(1941)가 제안한 단순 모델에 의해 연구가 계속되고 있다.

지금까지 Plank식의 변형에 의한 식품의 동결시간 예측을 위해 연구한 모델을 요약하여 Table 11에 나타내었다.

그밖에 동결매체온도 및 시료의 초기온도에 의한 시료두께별 동결시간을 예측할 수 있는 간편한 방법으로 다음과 같은 관계를 응용하여

추적할 수 도 있다.

Table 11. Summary of previous research for freezing time prediction

Years	Researcher	Form	Comment
1941	Plank	$t = \frac{\rho_s L}{T_f - T_a} \left( \frac{P \cdot D}{h} + \frac{R \cdot D^2}{k_s} \right)$	<ul style="list-style-type: none"> <li>· The Earliest model</li> <li>· P and R are constant (slab : P=1/2, R=1/8, cylinder : P=1/4, R=1/16, sphere : P=1/6, R=1/24)</li> </ul>
1955	Nagaoka	$t = (1 + 0.008 T_1) \frac{\rho_s \cdot \Delta H}{T_f - T_a} \left( \frac{P \cdot D}{h} + \frac{R \cdot D^2}{k_s} \right)$	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Modified Plank's equation to calculate freezing time of fresh fish in air blast freezer</li> <li>· <math>\Delta H = c_{u1}(T_1 - T_f) + L + c_{u2}(T_f - T_c)</math></li> </ul>
1958	Levy	$t = \{1 + 0.008(T_1 - T_f)\} \frac{\rho_s \cdot \Delta H}{T_f - T_a} \left( \frac{P \cdot D}{h} + \frac{R \cdot D^2}{k_s} \right)$	<ul style="list-style-type: none"> <li>· A slightly different form of Nagaoka model</li> </ul>
1964	Mott	$t = \frac{\rho_s \cdot \Delta H}{T_f - T_a} \frac{V}{A} \left( \frac{1}{h} + \frac{D}{2k_s} \right)$	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Development of tables to organize the thermo-physical data needed for use in Plank's equation</li> </ul>
1967	Cowell	$\frac{F_o}{k_o} = p(R + 1/B_1)$	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Plank's equation described in a dimensionless form</li> </ul>
1972	I.I.R.	$t = \frac{\rho_s \cdot \Delta H}{T_f - T_a} \left( \frac{P \cdot D}{h} + \frac{P \cdot D^2}{k_s} \right)$	<ul style="list-style-type: none"> <li>· I.I.R. modification is similar to Plank's model but with an enthalpy factor between <math>T_f</math> and <math>T_c</math></li> </ul>
1976	Mellor	$t = [0.5c_u(T_1 - T_f) + L + 0.5c_s(T_f - T_c)] \cdot \frac{\rho_s}{T_f - T_a} \left( \frac{P \cdot D}{h} + \frac{P \cdot D^2}{k_s} \right)$	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Inclusion of only one-half of sensible heat in the calculation of enthalpy</li> </ul>
1976 ~79	Cleland & Earle	$t = \frac{\Delta H}{T_f - T_a(\text{EHTD})} \left( \frac{P \cdot D}{h} + \frac{R \cdot D^2}{k_s} \right)$ $P = 0.7306 - 1.083P_k + S_{te}[15.40U - 15.43 + 0.01329(S_{te}/B_1)]$ $R = 0.125[1.202 + S_{te}(3.410P_k + 0.7336)]$	<ul style="list-style-type: none"> <li>· <math>\Delta H = L + c_{u1}(T_f - T_c)</math></li> <li>· EHTD : slab=1, cylinder=2, sphere=3</li> </ul>
1982	Mascheroni & Calvelo	$t = \frac{\rho_s W L I D^2}{(T_f - T_a) k_s^*} \left( \frac{1}{B_1} + \frac{1}{2} \right)$	<ul style="list-style-type: none"> <li>· <math>k_s^*</math> : thermal conductivity at <math>\frac{T_f + T_a}{2}</math></li> </ul>
1983	Hung & Thompson	$t = \frac{\rho_s \Delta H}{\Delta T} \left( P \frac{D}{h} + R \frac{D^2}{k_s} \right)$ $P = 0.7306 - 1.083P_k + S_{te}[15.40U - 15.43 + 0.01329(S_{te}/B_1)]$ $R = 0.2079 - 0.2656U \cdot S_{te}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>· <math>\Delta H = c_{u1}(T_1 - T_f) + (T_f - T_c)(M_a - M_n)L</math></li> <li>· <math>\Delta T = \frac{(T_1 - T_f)^2(c_{u1}/2) - (T_f - T_c)^2(c_{u1}/2)}{\Delta H} + (T_f - T_a)</math></li> </ul>
1986	Pham	$t = \frac{D}{h} \left( \frac{\Delta H_1}{\Delta T_1} + \frac{\Delta H_2}{\Delta T_2} \right) \left( 1 + \frac{hD}{4k_s} \right)$	<ul style="list-style-type: none"> <li>· <math>\Delta H_1 = c_{u1}(T_1 - T_m)</math></li> <li>· <math>\Delta H_2 = L + c_{u2}(T_m - T_c)</math></li> <li>· <math>\Delta T_1 = (T_1 + T_m) / 2 - T_a</math></li> <li>· <math>\Delta T_2 = T_m - T_a</math></li> <li>· <math>T_m = 1.8 + 0.263T_c + 0.105T_a</math></li> </ul>

※ 기호 설명

A : Surface area[m<sup>2</sup>]

C : Specific heat[J / m<sup>3</sup>.°C]

D : Length (slab thickness, cylinder diameter, sphere diameter)[m]

EHTD : Equivalent heat transfer dimension

[-]

h : Heat transfer coefficient[W / m<sup>2</sup>.°C]

ΔH : Enthalpy change[J / m<sup>3</sup>]

I : Ice content[%]

K : Thermal conductivity of material[W / m.℃]

$K_o$ : Kossovitch number,  $L\{cs(T_f - T_a)\}$  [-]

L : Latent heat of freezing[J / m<sup>3</sup>]

M : Mass[kg]

$B_i$ : Biot number,  $hd / K_s$  [-]

$F_o$ : Fourier number,  $\alpha t / D^2$  [-]

$S_{te}$ : Stefan number,  $C_s(T_f - T_a) / \Delta H$  [-]

$P_k$ : Plank number,  $C_u(T_i - T_f) / \Delta H$  [-]

P,R : Shape factor[-]

t : Time[sec]

T : Temperature[℃]

$\Delta T$  : Weighted average temperature difference[℃]

U : Dimensionless temperature,  $\Delta T / (T_f - T_a)$  [-]

W : Water content[%]

$\alpha$  : Thermal diffusivity[m<sup>2</sup> / hr]

$\rho$ : Density[kg / m<sup>3</sup>]

<Subscripts>

1 : Precooling

2 : Freezing, or freezing and subcooling

a : Freezing medium

b : Surface

c : Final center(-18℃)

f : Initial freezing point

i : Initial

m : Mean freezing

s : Frozen phase

t : Final surface

u : Unfrozen phase

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

여기서 t : 동결시간(min)

$T_f$  : 초기 빙결점[℃]

$T_a$  : 동결매체온도[℃]

이와같이 하여 시료의 초기온도와 시료의 초기빙결점에서 동결매체온도와와의 차의 역수를 독립변수로 하고, 동결시간을 종속변수로 하여 양송이 버섯등 4종류의 시료에 대해 회귀분석한 결과를 Table12에 나타내었다. 이로써 일정한 두께의 시료에 있어 냉각매체온도, 시료의 초기온도, 초기빙결점만을 알면 동결시간을 예측하는데 응용할 수 있을 것으로 사료된다.

한편, 이와같은 식품의 동결속도 및 시간에 영향을 미치는 요인은 크게 식품성상및 물성치

Table 12. Freezing time equations by mutiple regression analysis.

Test material	Thickness(m)	Equation	R <sup>2</sup>
Pine mushroom	0.035	$Y = -22.743 + 4593.075X_1 + 1.582X_2$	0.959
	0.025	$Y = -31.507 + 3570.529X_1 + 1.329X_2$	0.904
Arkshell	0.035	$Y = -72.569 + 5820.763X_1 + 2.054X_2$	0.846
	0.025	$Y = -19.336 + 3182.623X_1 + 1.082X_2$	0.890
Ground lean beef	0.030	$Y = -42.829 + 3651.647X_1 + 2.136X_2$	0.943
Ground pork	0.015	$Y = -44.141 + 2768.315X_1 + 0.700X_2$	0.958
	0.030	$Y = -64.560 + 4702.008X_1 + 2.295X_2$	0.933
	0.015	$Y = -28.140 + 1844.467X_1 + 1.436X_2$	0.857

Y = freezing time (min.)  
to -18℃  
 $X_1$  = reciprocal of  $(T_f - T_a$  in ℃)  
 $X_2$  = initial temperature (℃)  
 $R^2$  = mutiple correlation coefficient

와 동결장치에 의한 것으로 주요 인자는 다음과 같다.

- ① 식품의 크기와 형상, 특히 두께
- ② 식품의 초기온도(동결전)와 최종온도(동결후)

- ③ 동결매체의 온도
- ④ 식품의 표면열전달계수
- ⑤ 엔탈피의 변화
- ⑥ 식품의 열전도율

이 중, 동결시간에 직접적으로 영향을 미치는 매개인자로는 표면열전달계수, 동결매체온도, 시료의 두께 및 초기온도로서 냉각매체온도가 낮을수록, 표면열전달계수가 클수록, 시료의 두께가 얇을수록, 초기온도가 낮을수록 동결시간이 짧아지며, 동결시간에측에 영향을 미치는 열적물성치로는 일반적으로 수분함량, 밀도, 비열 및 열전도로서, 밀도와 수분함량, 비열이 낮을수록 짧은 동결시간을 얻을 수 있으나 낮은 값의 열전도도는 긴 동결시간을 초래하며, 초기빙결점은 동결시간에 그다지 영향을 미치지 않는 것으로 예측된다.

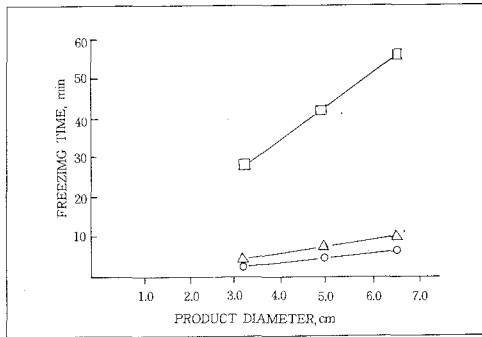


Fig.12. INFLUENCE OF PRODUCT SIZE on predicted freezing time (For □,  $h = 22.7 \text{ W/m}^2\text{K}$  for △,  $h = 170.35 \text{ W/m}^2\text{K}$ ; for ○,  $h = 340.7 \text{ W/m}^2\text{K}$ )

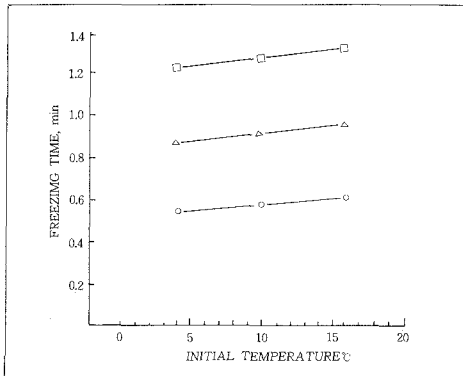


Fig.13. INFLUENCE OF INITIAL PRODUCT TEMPERATURE on predicted freezing time (For □ diameter = 2.54 cm ; for △, diameter = 1.91 cm; for ○, diameter = 1.27 cm;  $T_a = -196^\circ\text{C}$ ;  $h = 170.35 \text{ W/m}^2\text{K}$ )

또한, 동결속도의 차이에 따라 급속동결과 완만동결로 구분되어 완만동결은 세포외부에 큰빙결정을 생성하고 급속동결은 미세한 빙결

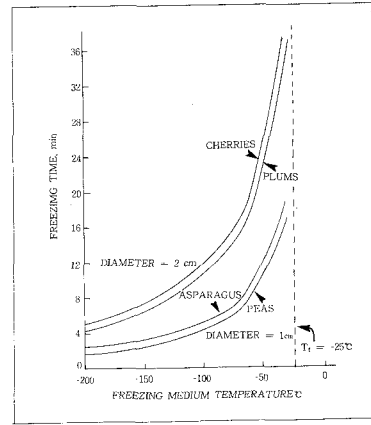


Fig.14. INFLUENCE OF FREEZING MEDIUM TEMPERATURE on predicted freezing times of fruits and vegetables ( $T_i = 10^\circ\text{C}$ ;  $h = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$ ;  $T_f = -25^\circ\text{C}$ ) (Hsieh et al., 1977)

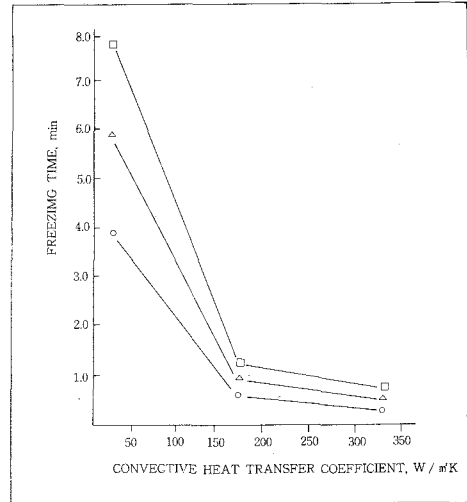


Fig.15. INFLUENCE OF CONVECTIVE HEAT TRANSFER COEFFICIENTS on predicted freezing times (For □, diameter = 2.54 cm; for △, diameter = 1.91 cm; for ○, diameter = 1.27 cm;  $T_i = 10^\circ\text{C}$ ;  $T_a = 196^\circ\text{C}$ )

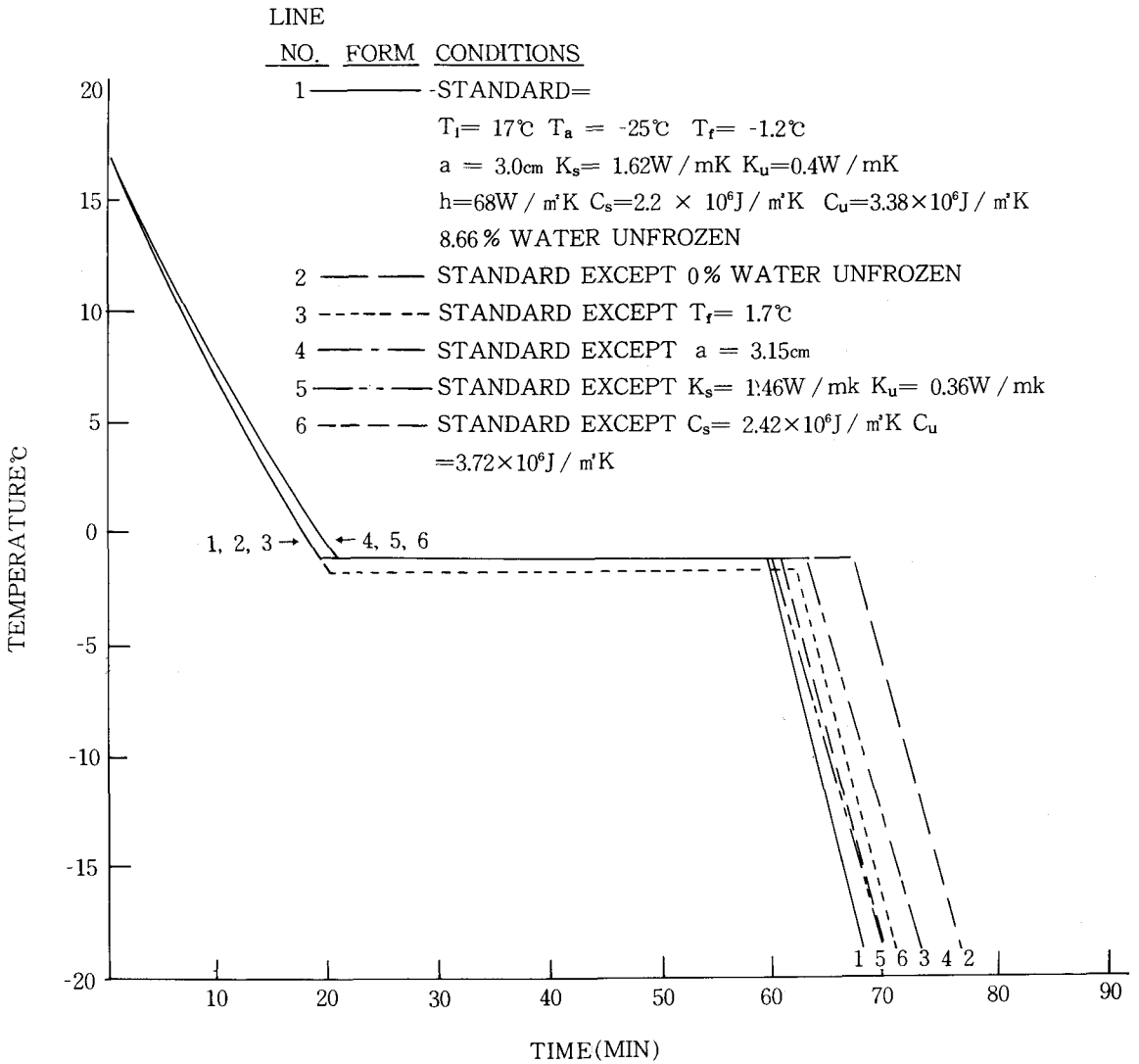


Fig.16. Influence of property changes on the predicted freezing curve.

정을 생성하므로써 동결식품의 품질이 좋다고 평가하고 있으나, 지나친 급속동결은 탈수및 내압발생에 의해 식품내부의 균열(gape)과 융기(heave)를 초래한다. 최근에 Ogawa(1988)등에 의한 연구에 따르면 낮은 동결매체 즉, LN<sub>2</sub> 및 CaCl<sub>2</sub> 브라인, 에탄올 침지 및 살포에 의한 동결시에는 내압발생에 의해 균열 및 융기가 발생하며, 이와 같은 내압은 브라인 온도, 수분함량 및 동결전의 비중량에 비례하고, 시료

두께에 반비례하여 상승하지만, 원주응력은 내압, 직경 및 동결후의 비중량에 비례하여 증가되므로써 균열이 생기기 쉽다고 한다. 즉 직경이 큰 햄은 직경이 적은 햄보다 낮은 균열이 생기기 쉬우며 수분함량 및 동결전의 비중량이 적은 소세지는 반경이 큰 햄보다 내압이 낮으며 균열도 일어나기 어려운 것을 알 수 있다. 이와같이 내압상승에 의한 식품의 손상을 방지하기 위해 균온처리를 실시하면 식품의 균열방

지가 가능할 것이다.

## 2.2 식품의 동결장치

### 2.2.1 동결장치의 정의

냉동의 목적은 식품의 품질유지 즉, 목적 물질로 하는 식물성 또는 동물성 식품을 인위적으로 상온이하로 온도를 저하시켜 조직내의 자유수를 빙결정화하여 미생물 성장과 효소활성의 억제로 물리적 화학적 성분의 변화및 생리적 변질 속도를 현저히 느리게 하는 것을 말한다. 일반적으로 냉동에는 저온을 생성하는 것과 이러한 저온을 이용하는 2가지 의미가 있는데 저온을 생성하는 기계를 냉동기 또는 냉동장치라 하며 저온을 이용하는 장치를 저온처리장치 또는 냉동냉장장치라고 일컫는다. 또한 저온생성을 원리적으로 분류하면 증발이나 용해·승화등의 물리적 자연현상에 의한 흡열작용을 이용하는 것과 기계적 일이나 열에너지 소비시켜 저온역의 열을 흡수하여 고온역에서 열을 발산시키는 방법이 있는데 전자를 자연냉동법, 후자를 기계냉동법이라고 한다. 그 중 동결장치는 식품을 초기온도에서 최종온도가  $-18^{\circ}\text{C}$  이하까지 내려 대부분의 수분을 동결시켜 냉동제품을 만드는 장치를 말한다. 동결된 제품에는 가공원료로 공급되는 것과 크기가 소형으로 소비자에게 직접 공급되는 제품의 2가지 형태가 있는데 전자를 동결품 또는 냉동품이라 부르며 후자를 동결식품 또는 냉동식품이라고 한다. 이와같은 냉동품과 냉동식품은 동결장치의 종류, 생산 형태와 식품위생상의 취급 및 처리 기준도 완전히 다르며, 이러한 장치는 일반적으로 다음과 같은 구비 요건을 갖추어야 한다.

① IQF, 연속자동화, 인력및 에너지 절약등이 가능할 것

② 재료, 구조등이 위생적이고 세정이 가능

③ 동결시간이 짧고, 품질이 양호할 것

④ 복합형(compact type)으로 동결비용이 저렴할 것

### 2.2.2 동결장치의 능력

동결장치의 능력은 생산능력을 나타내는 것으로 냉동품에서는 1일 생산량(TON/일),

냉동식품에서는 1시간의 생산량(kg/h)을 나타낸다. 일반적으로 냉동식품 1kg/h의 소요냉동능력( $\text{kCal/h}$ )은 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$Q_F = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6$$

여기서  $Q_1$ ; 외부 침입 열량

$$Q_1 = K \cdot F \cdot (t_a - t_b)$$

$K$  ; 열통과율( $\text{kCal/m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$ )

$F$  ; 동결실 면적( $\text{m}^2$ )

$t_a$ ; 외부온도( $^{\circ}\text{C}$ )

$t_b$ ; 동결실 온도( $^{\circ}\text{C}$ )

$Q_2$ ; 환기에 의한 열손실량

$$Q_2 = E \cdot V \cdot n \cdot \frac{1}{24}$$

$E$  ; 내외 공기의 엔탈피 차( $\text{kCal/m}^3$ )

$V$  ; 동결실 용적( $\text{m}^3$ )

$n$  ; 1일 환기 횟수

$Q_3$ ; 작업원의 발열량

$$Q_3 = 300 \cdot N \cdot \frac{n}{24}$$

$n$  ; 1일의 실내 작업시간(hr)

$N$  ; 작업원 수

$Q_4$ ; 조명의 발열량

$$Q_4 = 0.86 \cdot W \cdot \frac{n}{24}$$

$W$  ; 조명시설의 출력(W)

$n$  ; 1일의 점등시간(hr)

$Q_5$ ; 송풍기 또는 펌프의 발열량

$$Q_5 = 860 \cdot KW \cdot \frac{n}{24}$$

$KW$  ; 전동기의 출력(KW)

$n$  ; 1일 운전시간(hr)

$Q_6$ ; 동결품의 부하열량

$$Q_6 = \frac{T}{Z} \{C_1 C t_a - t_f\} + L_f + C_2 (t_f - t_b)$$

$T$  ; 1회의 동결량(Kgf)

$Z$  ; 동결시간(hr)

$C_1$ ; 동결점이상의 비열( $\text{kCal/kgf}^{\circ}\text{C}$ )

$C_2$  ; 동결점이하의 비열( $\text{kCal/kgf}^{\circ}\text{C}$ )

$L_f$  ; 동결잠열( $\text{kCal/kg}$ )

$t_a$ ; 동결품의 초기온도( $^{\circ}\text{C}$ )

$t_f$ ; 동결품의 빙결점( $^{\circ}\text{C}$ )

$t_b$ ; 동결품의 최종온도( $^{\circ}\text{C}$ )

(다음호에 계속)