

구형과실의 열전도율 추정

허 중 화* 서 길 덕**

Prediction of Thermal Conductivity of Spherical-Shaped Fruits

Jong-Wha Hur* and Gil-Duk Suh**

ABSTRACTS

The thermal Conductivities along the position of spherical shaped fruits, such as, apple, mandarine orange, citrus haguyl were predicted by the analysis of the cooling curves obtained by the hydrocooling procedure using ice water.

The thermal conductivity was independent of temperature.

The thermal conductivities along the position of the fruits were nearly constant, but their small deviations were inherited by the improper spherical shape and the heterogenous structural composition of the fruits.

The thermal conductivities of apple, mandarine orange, and citrus haguyl were found to be 0.353, 0.430, and 0.397 Kcal / m h °C, respectively.

* : 정회원, 경상대학교 식품가공학과

** : 부산대학교 화학공학과

Nomenclature

- α : Thermal diffusivity (m^2/h)
- c : Specific heat ($Kcal/Kg\ ^\circ C$)
- k : Thermal conductivity ($Kcal/m\ h\ ^\circ C$)
- R : Radius of fruits (cm)
- r : Distance from center (cm)
- ρ : Density (g/cm^3)
- T : Temperature ($^\circ C$)
- T_0 : Initial temperature of sample ($^\circ C$)
- T_∞ : Temperature of cooling medium ($^\circ C$)

1. 서 론

식품의 열전달 특성은 식품의 가공, 저장 및 유통의 연구에 있어서 중요한 기초자료가 된다. 특히 냉각, 동결, 가열, 건조, 발효 등의 식품가공의 중요 공정에서 열전달 특성은 필수적으로 구명되어져 있어야 하는데, 우리나라의 식품공업에 관하여 이러한 기초자료가 보기도문 실정이다.

식품의 열전달에 관한 연구의 기초는, 냉각 때 고체벽과 기체사이의 강제 대류 열전달에 관하여 Schumann¹⁾ 과 Furnas^{2),3)} 등의 연구가 있으며, Bakker - Arkema⁴⁾ 와 Misener⁵⁾ 및 Wadsworth⁶⁾ 등은 각각 퇴적된 사탕무와 감자, 고구마의 냉각 또는 가열특성을 해석한 바 있다.

식품의 열전도율(열 확산 계수 포함)에 관한 연구로는, 곡류의 비열 및 열전도율에 관한 Kazarian⁷⁾ 등의 연구가 있으며, Hill⁸⁾ 등은 쇠고기등 축육의 생육(fresh meat) 및 동결육의 열전도율을 구하였다.

또, Kumbhar⁹⁾ 등은 어육의 생육 및 동결육을 $-20 \sim -40\ ^\circ C$ 구간에서 온도를 달리하면서 열전도율 등을 구하였으며, Levy^{10), 11)}는 동결상태에 있어서 몇가지 어육과 축육의 열전도율을 수정된 Maxell - Eucken 방정식으로

계산하는 방법을 제시하였다.

또한 밀감과 사과를 비롯한 청과물과 농산물¹²⁾⁻¹⁴⁾의 열전도율과 이들을 모형^{15) - 17)}에 따른 특성을 밝힌 것 및 구형^{19) - 20)} 등의 몇 가지 형상^{21) - 23)} 및 위치^{24) - 25)}에 따른 열전도율에 관하여 보고한 바가 있으며, 우리나라에서는 Hur²⁶⁾ 등이 온주밀감의 충전층에 대한 냉각 실험을 통하여 농산물 냉각 과정에 대한 Schumann 방정식¹⁾의 적용 가능성을 확인하고, 호흡열량의 향을 고려한 연립 편미분 방정식의 해를 구하여 제시한 바가 있다.

식품의 열전달 특성을 식품공업의 현장에서 정확하게 계산하거나 실험을 행하기가 어렵울 뿐만 아니라, 더우기 청과물은 저장, 유통 과정은 물론이고 일부의 가공 공정 중에도 호흡을 계속하므로 이 호흡열을 포함하면 복잡한 해석을 요하게 되어 열전달 특성을 이해하는데 어려움을 주고 있다.

본 연구에서는 우리나라의 중요 과실들의 가공, 저장 및 유통문제의 개선을 위한 기초 자료로서 열전달 특성을 알기 위하여, 이들 구형에 가까운 과실의 형태를 구체로 취급하여 열전도율을 해석적인 방법으로 구하고, 실제 청과물을 냉각하여 얻은 실험치와 비교하여 구형 청과물의 열전도율을 구함으로써 현재까지 알려지지 않은 과실에 대해 모형에 의한 방법보다 더욱 간편하고 정확한 열전도율을 추정하는 방법을 제시하고자 한다.

2. 이 론

식품의 냉각은 가열 살균 때와 같이 물체 내의 임의점에 있어서의 온도 및 열류 분포가 시간적으로 변하는 비정상 전열로 이루어진다.

반경이 R인 온도 T_0 의 구형 물체를 온도 T_∞ 로 유지되고 있는 환경속에 급히 넣었을 때 물체내의 온도 T의 시간적 변화는 다음 식

으로 표시된다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \dots\dots\dots(1)$$

이 식을 경계조건

$$t = 0, \quad 0 \leq r \leq R, \quad T = T_0.$$

$$t > 0, \quad r = R, \quad T = T_\infty$$

에서 풀면²⁷⁾,

$$\frac{T - T_0}{T_\infty - T_0} = \frac{1}{\left(\frac{r}{R}\right)} \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \operatorname{erfc} \frac{(2n+1)R-r}{2(\alpha t)^{1/2}} - \operatorname{erfc} \frac{(2n+1)R+r}{2(\alpha t)^{1/2}} \right\} \dots\dots\dots(2)$$

따라서,

$$\frac{T - T_0}{T_\infty - T_0} = f\left(\frac{r}{R}, \frac{\alpha t}{R^2}\right) \dots\dots\dots(3)$$

로 나타낼 수 있다.

또, 열전도율 k 는

$$k = \alpha \rho C \dots\dots\dots(4)$$

의 관계로부터 구해진다.

그러나, 식(3)으로부터 직접 α 를 구한다는 것은 실험적으로 측정되는 량이 r , t , T 이기 때문에 거의 불가능하다.

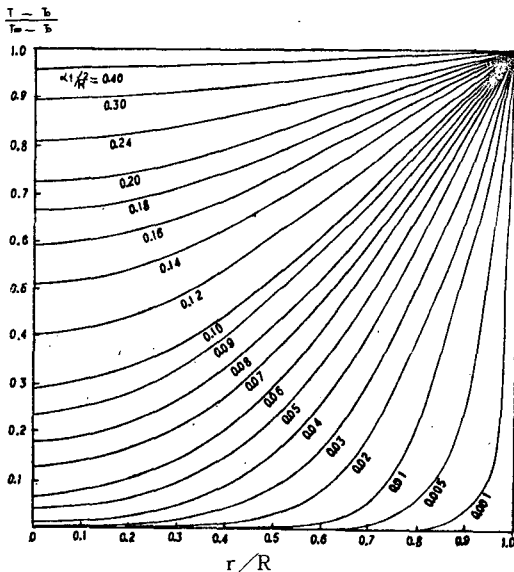


Fig. 1. Dimensionless Temperature as a Function of Position and time.

식(3)을 전자계산기를 사용하여 수치 해석한 결과 (표 1)로부터 $\frac{\alpha t}{R^2}$ 를 매개변수로 하고 $\frac{T - T_0}{T_\infty - T_0}$ 를 r/R 에 대하여 도시하면 Fig. 1 과 같이 된다.

이 그림을 사용하면 α 및 k 를 측정할 수 있다. 즉, 반경이 R 인 구형물체의 임의점 $\frac{r}{R}$ 에서의 시간 t 때의 온도 $\frac{T - T_0}{T_\infty - T_0}$ 를 측정하여 그림으로부터 $\frac{\alpha t}{R^2}$ 를 구하고, 이 값으로부터 α 를 계산하면 되며, 또, 식(4)를 이용하여 그 위치에서의 열전도율 k 를 구할 수 있다.

3. 실험방법

3.1. 시 료

시판되고 있는 사과 (국광, $R=3.9 \text{ cm}$), 온주밀감 ($R=3.0 \text{ cm}$), 하밀감 ($R=4.4 \text{ cm}$) 중 에서 적당한 크기의 것을 선별하여 그대로 사용하였다.

3.2. 실험장치

Fig. 2 와 같이 단열재 (폴리스티렌 2.54 cm 두께) 로 단열한 원통속에 얼음-물의 냉각재를 넣어 0°C 로 유지하고, 시료의 각 부위 ($\frac{r}{R} = 0, 0.33, 0.50, 0.67$) 에 Cu - constantan 열전대의 감지부가 오도록 고정시켜서 냉각재속에 급히 잠기게 하여, 시간에 따른 온도를 multi-pen recorder 와 digital thermometer 로 측정하였다.

3.3. 물성치의 측정

수분은 $105 \pm 2^\circ \text{C}$ 에서 5 시간 이상 건조시켜서 측정하였으며, 밀도는 무게와 부피를 직접 측정하여 구하였다.

또 비열은 문헌²⁸⁾ 값을 인용하였다.

그 결과를 표 2 에 표시하였다.

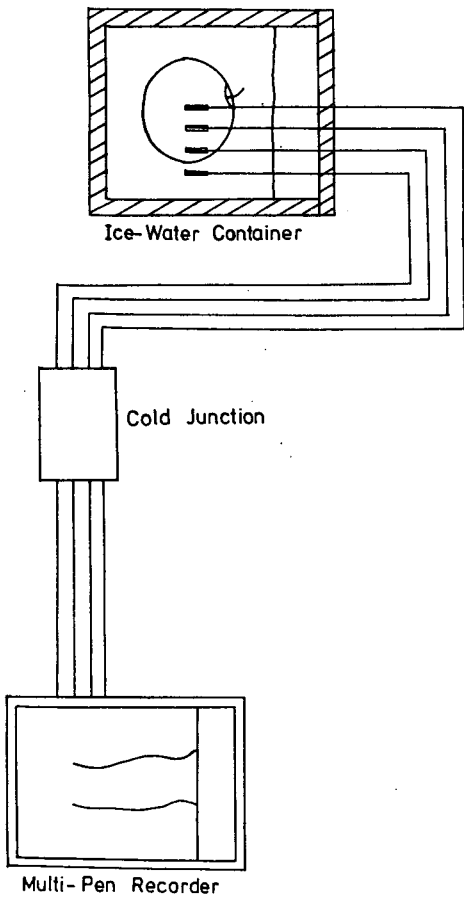


Fig. 2. Schematic Diagram of Experimental Apparatus.

4. 결과 및 고찰

4.1. 냉각곡선

사과, 밀감 및 하밀감의 임의점에 있어서의 시간에 따른 온도 변화를 multi-pen recorder로 측정한 결과를 각각 Fig. 3, 4, 5에 표시하였다.(실선).

4.2. 시료의 K값

위의 냉각실험에 사용된 사과, 밀감, 하밀감의 냉각 곡선과 표 1 또는 Fig. 1을 이용하여 각 위치에 따른 열특성치를 구하고 α 와 k값을 계산한 결과를 표 3, 4 5에 나타내

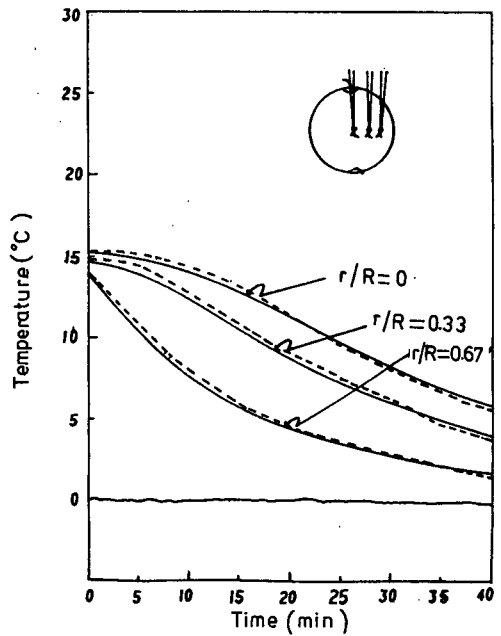


Fig. 3. Cooling Curves of Apple ($R = 3.9 \text{ cm}$) in Ice-Water (0°C)

— : Experimental
 - - - : Numerical

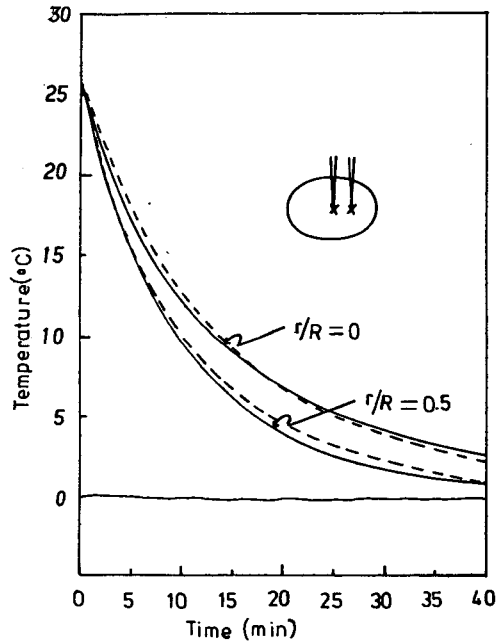


Fig. 4. Cooling Curves of Mandarin Orange ($R = 3.0 \text{ cm}$) in Ice-Water (0°C)

— : Experimental
 - - - : Numerical

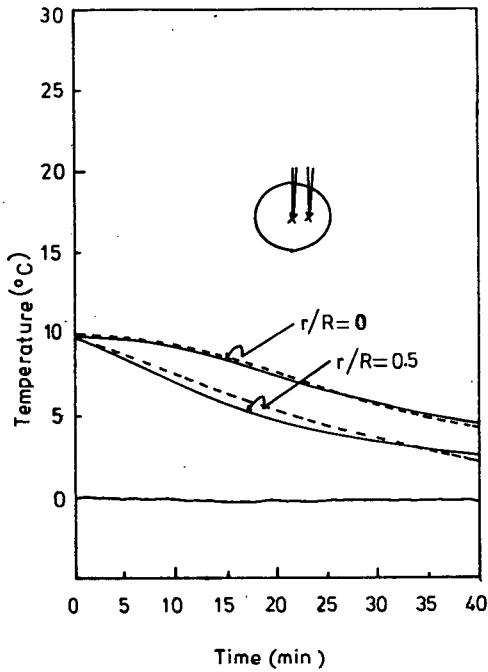


Fig. 5. Cooling Curves of Citrus Hagyul ($R = 4.4 \text{ cm}$) in Ice-Water ($0 \text{ }^\circ\text{C}$)

— : Experimental
 - - - : Numerical

었다. 각시료의 위치에 따른 k 값의 변화를 보면, 사과와 경우, $r/R = 0.67$, $r/R = 0.33$, $r/R = 0$ 에서 k 값이 각각 0.358 , 0.338 , $0.340 \text{ Kcal / mh } ^\circ\text{C}$ 의 비슷한 값을 나타내었다. 밀감의 경우에서도 $r/R = 0.50$, $r/R = 0$ 에서의 k 값은 각각 0.435 , $0.424 \text{ Kcal / mh } ^\circ\text{C}$ 로 비슷하였으며, 하밀감은 밀감과 같은 위치에서 각각 0.405 , $0.388 \text{ kcal / mh } ^\circ\text{C}$ 로 나타났는데, 위의 각 시료에서 위치에 따른 k 값의 차이는 비교적 적게 나타났다.

또한 각시료의 k 값에 대한 온도의 영향을 각각 Fig. 6, 7, 8로 나타내었는데, 사과 (Fig. 6)는 위치와 온도의 영향이 적었으며, 밀감 (Fig. 7)과 하밀감 (Fig. 8)은 표면쪽과 고온쪽이 값이 다소 높았으나 큰 차이는 없었다.

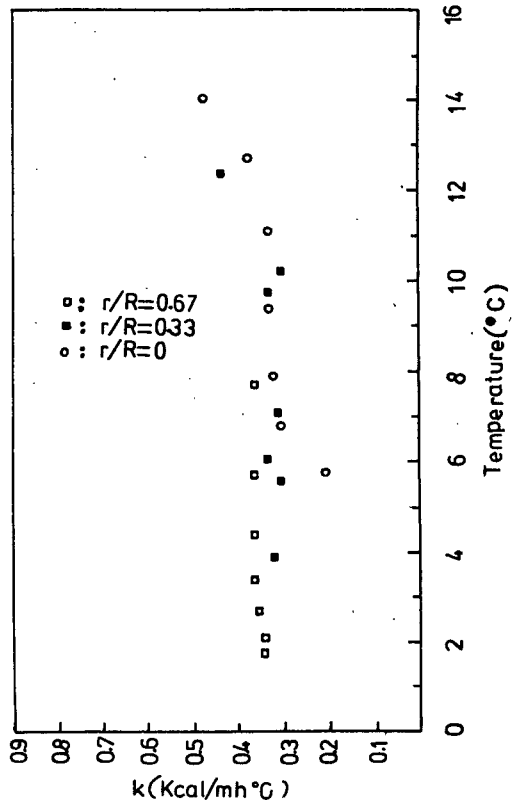


Fig. 6. K Value vs Temperature of Apple

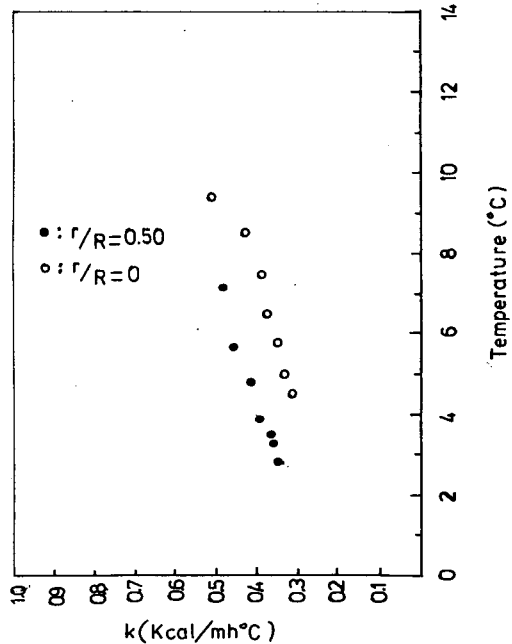


Fig. 7. K Value vs Temperature of Mandarin Orange

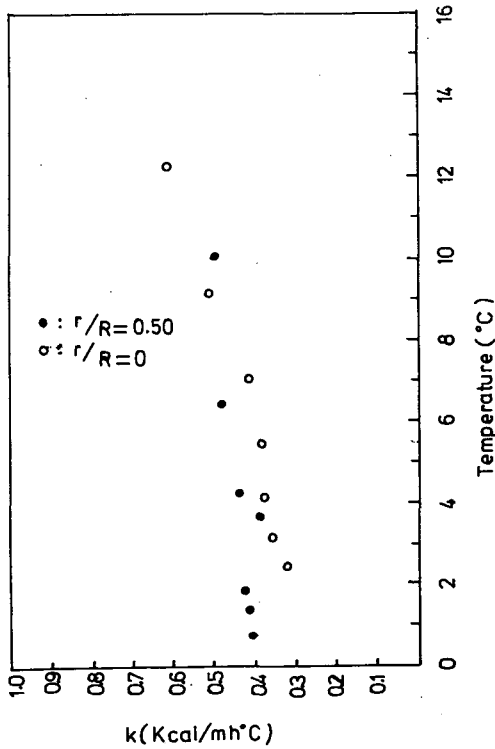


Fig. 8. K Value vs Temperature of Citrue Hagyu

본실험의 범위에서는 각시료의 위치와 온도에 따른 k 값의 변화가 크지 않으므로 각시료의 α , k 의 평균치 ($\bar{\alpha}$, \bar{k})를 표 6으로 나타내었다.

표 6에서 사과와 \bar{k} 는 $0.353 \text{ Kcal/m h } ^\circ\text{C}$ 로 나타났는데, 이는 Dickerson 등²⁹⁾의 실험치 $0.357 \text{ Kcal/m h } ^\circ\text{C}$ 및 Sweat¹²⁾가 제시한 식,

$$k = 0.148 + (0.00493 + W),$$

여기서 W=수분함량(%)

에 의한 계산치 $0.363 \text{ Kcal/m h } ^\circ\text{C}$ 과도 잘 일치하고 있다.

밀감의 경우 $\bar{k} = 4.30 \text{ Kcal/m h } ^\circ\text{C}$ 으로 역시 문헌치와 비슷하였다.

이상의 각 시료에서 계산치인 \bar{k} 값을 시료의 위치 및 온도에 관계없이 적용 시켰을 때 실험치인 냉각 곡선과 일치하는지를 확인하기 위하여, 각 시료의 \bar{k} 값을 적용하여 각 시료

의 위치별 냉각 곡선을 다시 그린 결과가 각각 Fig. 3, 4, 5의 점선 (...)과 같이 나타났다. 이 결과에서 보면, 사과는 실험치와 이론치가 비교적 잘 일치하였는데 이것은 사과가 구형에 가깝고, 각 부위의 성분과 조직이 비슷한 때문으로 보이며, 밀감과 하밀감은 사과만큼은 일치하지 않았는데, 밀감과 하밀감은 사과만큼 구형이 아닌데다 성분과 조직이 부위에 따라 다소 다른 때문으로 보인다.

형상계수도 고려해야 할 것으로 본다.^{20,21,22)} 그러나 사과는 물론, 밀감과 하밀감의 k 값이 실험치와 큰 차이는 없으므로, 표 1, 혹은 Fig. 1에 의해 구형 과실의 α , k 값을 쉽고 정확하게 구할 수 있다고 판단된다.

5. 결 론

구형 과실인 사과, 밀감 및 하밀감의 위치에 따른 열전도율을 얼음-물을 냉각 매체로 사용하여 얻은 냉각 곡선의 해석에 의하여 측정하였다. 중요 결과는 다음과 같다.

1. 열전도율은 온도에 관계없이 일정하였다.
2. 위치에 따른 열전도율은 거의 일정하였으나, 다소의 차이는 밀감과 하밀감의 비 구형성 및 성분과 조직의 비 균일성에 기인한다.
3. 사과, 밀감 및 하밀감의 열전도율은 각각 $0.353, 0.430, 0.397 \text{ Kcal/m h } ^\circ\text{C}$ 이었다.

감 사

본 연구는 1982년도 문교부 학술연구 조성비의 지원에 의해 수행된 것임을 밝히며, 문교부에 감사를 드린다.

Table 1. Numerical Value of Temperature Ratio, $\frac{T - T_0}{T_{\infty} - T_0}$

$\frac{r}{R}$ $\frac{at}{R^2}$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.028	1.000
0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.038	0.056	0.038	1.000
0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.007	0.048	0.196	0.532	1.000
0.015	0.000	0.000	0.000	0.001	0.007	0.035	0.119	0.310	0.620	1.000
0.020	0.000	0.000	0.006	0.007	0.025	0.076	0.191	0.396	0.686	1.000
0.025	0.000	0.002	0.006	0.182	0.051	0.123	0.257	0.464	0.727	1.000
0.030	0.002	0.005	0.014	0.036	0.082	0.171	0.315	0.518	0.759	1.000
0.040	0.014	0.023	0.044	0.085	0.154	0.262	0.413	0.599	0.804	1.000
0.050	0.039	0.056	0.089	0.144	0.228	0.343	0.490	0.659	0.835	1.000
0.060	0.079	0.102	0.144	0.208	0.298	0.414	0.552	0.705	0.859	1.000
0.070	0.129	0.156	0.203	0.272	0.363	0.475	0.604	0.741	0.877	1.000
0.080	0.185	0.214	0.263	0.333	0.422	0.529	0.647	0.771	0.892	1.000
0.090	0.244	0.273	0.323	0.391	0.476	0.576	0.685	0.797	0.904	1.000
0.100	0.303	0.332	0.380	0.445	0.526	0.618	0.717	0.818	0.915	1.000
0.120	0.414	0.441	0.484	0.541	0.610	0.689	0.771	0.854	0.931	1.000
0.140	0.513	0.536	0.573	0.622	0.680	0.745	0.813	0.881	0.994	1.000
0.160	0.598	0.617	0.648	0.689	0.738	0.791	0.848	0.903	0.995	1.000
0.180	0.669	0.685	0.710	0.744	0.785	0.829	0.875	0.921	0.963	1.000
0.200	0.727	0.741	0.762	0.790	0.823	0.860	0.898	0.935	0.970	1.000
0.220	0.776	0.787	0.804	0.827	0.855	0.885	0.916	0.946	0.975	1.000
0.240	0.816	0.825	0.839	0.858	0.881	0.906	0.931	0.956	0.980	1.000
0.260	0.849	0.856	0.868	0.884	0.902	0.922	0.943	0.964	0.983	1.000
0.280	0.876	0.882	0.892	0.905	0.920	0.936	0.954	0.970	0.986	1.000
0.300	0.898	0.903	0.911	0.921	0.934	0.948	0.962	0.976	0.989	1.000
0.400	0.962	0.964	0.967	0.971	0.975	0.981	0.986	0.991	0.996	1.000
0.500	0.986	0.987	0.988	0.989	0.991	0.993	0.995	0.997	0.998	1.000
0.600	0.995	0.995	0.995	0.996	0.997	0.997	0.998	0.999	0.999	1.000
0.700	0.998	0.998	0.998	0.999	0.999	0.999	0.999	1.000	1.000	1.000

Table 2. Physical Properties of Fruits

Sample	Moisture content (%)	Density (kg/m^3)	Specific heat ($Kcal/kg^{\circ}C$)
Apple	87.9	0.867	0.92
Mandarine orange	88.9	0.878	0.90
Citrus haryul	88.9	0.831	0.90

구형과실의 열전도를 추정

Table 3. Thermal Properties of Apple as a Function of Position and Time

Sample	r/R	t (min)	T (°C)	$\frac{T - T_0}{T_{\infty} - T_0}$	$\frac{\alpha t}{R^2}$	α (m^2/h) $\times 10^{-4}$	k (Kcal/ mh °C)
T = 3.90 cm To = 14.1 °C	0.67	10	7.8	0.45	0.050	4.56	0.364
		15	5.8	0.59	0.076	4.62	0.369
		20	4.5	0.68	0.100	4.56	0.364
		25	3.5	0.75	0.124	4.56	0.364
		30	2.8	0.80	0.145	4.44	0.354
		35	2.2	0.84	0.165	4.32	0.345
		40	1.9	0.87	0.190	4.32	0.345
		(average)					4.48
To = 14.9 °C	0.33	10	12.5	0.16	0.060	5.46	0.436
		15	10.3	0.31	0.084	5.10	0.307
		20	9.8	0.34	0.091	4.14	0.330
		25	7.2	0.52	0.109	3.96	0.316
		30	6.1	0.59	0.141	4.26	0.340
		35	5.7	0.62	0.149	3.90	0.311
		40	4.0	0.73	0.180	4.08	0.325
		(average)					4.41
To = 15.3 °C	0	10	14.1	0.08	0.066	6.02	0.480
		15	12.8	0.16	0.078	4.74	0.378
		20	11.2	0.27	0.096	4.26	0.340
		25	9.5	0.38	0.116	4.23	0.337
		30	8.0	0.48	0.135	4.11	0.328
		35	7.0	0.54	0.148	3.86	0.308
		40	5.9	0.61	0.166	2.64	0.211
		(average)					4.27

Table 4. Thermal Properties of Mandarin Orange as a Function of Position and Time

Sample	r/R	t (min)	T (°C)	$\frac{T - T_0}{T_{\infty} - T_0}$	$\frac{\alpha t}{R^2}$	α (m^2/h) $\times 10^{-4}$	k (Kcal/ mh °C)
R = 3.0 cm To = 25.5 °C	0.50	10	10.1	0.60	0.116	6.24	0.493
		15	6.5	0.75	0.168	6.06	0.479
		20	4.3	0.83	0.205	5.52	0.436
		25	3.7	0.85	0.227	4.92	0.389
		30	1.9	0.93	0.300	5.40	0.427
		35	1.4	0.95	0.340	5.22	0.412
		40	0.8	0.97	0.382	5.16	0.408
		(average)					5.50
(average)	0	10	12.3	0.52	0.143	7.74	0.612
		15	9.2	0.64	0.176	6.36	0.503
		20	7.1	0.72	0.195	5.28	0.417
		25	5.5	0.78	0.226	4.86	0.384
		30	4.2	0.84	0.263	4.74	0.375
		35	3.2	0.87	0.286	4.44	0.351
		40	2.5	0.90	0.308	4.14	0.327
		(average)					5.36

Table 5. Thermal Properties of Citrus Hagyul as a Function of Position and Time

Sample	r / R	t (min)	T (°C)	$\frac{T - T_0}{T_{\infty} - T_0}$	$\frac{\alpha t}{R^2}$	α (m^2/h) × 10	k (Kcal / mh °C)
R = 4.35 cm T = 10.0 °C	0.50	10	7.2	0.28	0.057	6.47	0.484
		15	5.7	0.43	0.082	6.21	0.464
		20	4.8	0.52	0.097	5.51	0.412
		25	3.9	0.61	0.117	5.31	0.398
		30	3.5	0.65	0.129	4.88	0.365
		35	3.3	0.71	0.148	4.80	0.359
		40	2.9	0.75	0.165	4.68	0.350
(average)						5.41	0.405
(average)	0	10	9.4	0.06	0.061	6.90	0.516
		15	8.5	0.15	0.076	5.76	0.431
		20	7.5	0.25	0.092	5.22	0.390
		25	6.5	0.35	0.109	4.98	0.372
		30	5.8	0.42	0.123	4.68	0.350
		35	5.0	0.50	0.138	4.50	0.337
		40	4.5	0.55	0.151	4.26	0.319
(average)						5.19	0.388

Table 6. Mean Values of Thermal Diffusivity and Thermal Conductivity of Fruits

Sample	$\bar{\alpha}$ (m^2/h) × 10 ⁻⁴	\bar{k} (Kcal /mh °C)	k (Kcal /mh °C) from literatures
Apple	4.39	0.353	0.357 ²⁹⁾ , 0.363 ¹²⁾
Mandarine orange	5.44	0.430	0.421 ³⁰⁾ ,
Citrus hagyul	5.30	0.397	—

참 고 문 헌

1. Jacob, M. : "Schumann's Analytical Solution". Heat Transfer. vol. 2., John Wiley & Sons Inc., 277-289.1957.
2. Furnas, C.C. : Heat Transfer from a Gas Stream to a Bed of Broken Solids. Ind & Eng. Chem., 22(1), 26-31. 1930.
3. Furnas, C.C. : Heat Transfer from a Gas Stream to a Bed of Broken Solids. Part-2, Ind. & Eng. Chem., 22(7), 721-731. 1930.
4. Bakker-Arkema, F.W. and W.G. Bickert : A Deep Bed Computational Cooling Procedure for Biological Products. Trans. A.S.M.E., 9(6), 834-836, 845. 1966.
5. Misener, G.C. and G.C. Shove : Simulated Cooling of Potatoes. Trans. A.S.A.E., 19, 954-957, 961. 1976.
6. Wadsworth, J.I. and J. J. Spadaro : Transient Temperature Distribution in whole Sweet Potato Roots During Immersion Heating. J. Food Tech., 24, 913-928. 1970.
7. Kazarian, E. A. and C.W. Hall : Thermal Properties of Grain. Trans. A.S.A.E., 8, 33-37, 48. 1965.
8. Hill, J. E., J.E. Leitnon, and J. E. Sunderland : Thermal Conductivity of Various Meats, J. Food Tech., 21, 1143-1148. 1967.
9. Kumbhar, B.K., R. S., Agarwal and K. Das : Thermal Properties of Fresh and Frozen Fish. Int'l. J. Refrigeration, 4(3), 143-146. 1981.
10. Levy, F.L. : A Modified Maxwell-Eucken Equation for Calculating the Thermal Conductivity of Two-Component Solutions or Mixtures. Int'l. J. Refrigeration, 4(4), 223-225. 1981.
11. Levy F. L. : Calculating the Thermal Conductivity of Meat and Fish in the Freezing Range. Int'l. J. Refrigeration, 5(3), 149-154, 1982
12. Sweat, V.E. : Experimental Values of Thermal Conductivity of Selected Fruits and Vegetables. J. Food Sci., 39, 1080-1083. 1974.
13. Ishibashi, S. and T. Kojima. : On the Cooling Rates of Agricultural Products(1). J. Soc. Agr. Mach. Japan, 29(1) 19-25. 1967.
14. Ishibashi, S. and T. Kojima. : On the Cooling Rates of Agricultural Products(2). J. Soc. Agr. Mach. Japan, 29(2), 92-97. 1967.
15. Chuma, Y, S. Murata and S. Uchida : Estimating Effective Thermal Diffusivity of Anomalously Shaped Farm Products by Paraffin-Model Method, J. Soc. Agr. Mach. Japan, 30(2), 100-105. 1968.
16. Chuma, Y. and S. Murata : Measurement of the Effective Thermal Diffusivity of the Cylindrical Vegetables. J. Soc. Agr. Mach. Japan 30(4), 237-240. 1968.
17. Chuma, Y. S. Murata and S. Uchida : Determination of Heat Transfer Coefficients of Farm Products by Transient Method Using Lead Model, J. Soc. Agr. Mach. Japan, 31(4), 298-302. 1969.
18. Chuma, Y. and S. Murata : Theroretical Half-Cooling Time of

- Mass-Average Temperature of Fruits and Vegetables- In the case of Spherical Products under the Forced Air Cooling-. J. Soc. Agr. Mach. Japan, **29**(4), 221-224. 1967.
19. Murthy, S. S., M. V. K. Murthy and A. Ramachandran. : Heat Transfer During Aircooling and Storing of Moist Food Products-2. Spherical and Cylindrical Shapes. Trans. the A. S. A. E., **19**, 577-583. 1976.
20. Albin, F. V. S. S. Murthy and M. V. k. Murthy : Prediction of the Freezing Characteristics of Spherical -Shaped Food Products. Int'l. J. Refrigeration, **2**(3), 129-135. 1979.
21. Majeed, P. M. A., S. S. Murthy and M. V. K. Murthy : Prediction of Air Cooling Characteristics of Moist Food Products. Trans. A. S. A. E., **23**, 788-792. 1980.
22. Purwadaria, H. K. and D. R. Heldman : A Finite Element Model for Prediction of Freezing Rates in Food Products with Anomalous Shapes, Trans. A. S. A. E., **25**, 827-832. 1982.
23. Umeda, S., V. D. Chau and K. Mohri : Shape Analysis of Agricultural Products, J. Soc. Agr. Mach. Japan, **43**(4), 599-604. 1982.
24. Kopelman, I. J. and I. J. Pflug : The Relationship of the Surface, Mass Average and Geometric Center Temperatures in Transient Conduction Heat Flow, J. Food Tech. **22**, 799-804. 1968.
25. Majeed, P. M. A. : Prediction of Cooling Characteristics During Air Cooling of Cylindrical Food Products with a Flowing Film of Cold water at the Surface (Air -Film Cooling), Trans. A. S. A. E., **25**, 508-514. 1982.
26. Hur, J. W. and S. H. Kim : Studies on the Heat Transfer Characteristics of Citrus Fruits, -On the Cooling Process of Packed Bed of Citrus Unshu(1)- J. Soc. A. R. E. K., **7**(2), 80-86. 1978.
27. Caslaw, H. S. and J. C. Jaeger : Conduction of Heat in Solids (2nd ed), 232-254. 1959.
28. Rha, C. : Theory, Determination and Control of Physical Properties of Food Materials. D. Reidel Pub. Co., 318-331. 1975.
29. Dickerson, R. W. and R. B. Read : Cooling Rates of Foods, J. Milk Food Tech., **36**, 167-171. 1973.
30. Poppendiek, H. F. : Thermal Conductivity Measurements and Predictions for Biological Fluids and Tissues, Cryobiology, **3**, 318-327. 1966.