

◀ 論 文 ▶

柑橘의 熱傳達 特性에 관한 研究

— (I) 温州蜜柑充填層의 冷却過程에 對하여 —

許 宗 和* · 金 錫 賢**

Studies on the Heat Transfer Characteristics of Citrus Fruits

(I) On the Cooling Process of Packed Bed of Citrus Unshu

Jong-Wha Hur and Suk-Hyun Kim.

Abstract

The distribution of temperature obtained by the solution of Schumann equation and that of experimentally obtained on the cooling process of packed bed of citrus unshu show a good agreement, and the maximum deviation is only 1-2°C. The agreement means that it is possible to apply the Schumann model to the cooling process of packed bed of citrus unshu.

In considering respiration heat, the numerical result by the solution of the equation is that in case of the velocity of gas (3°C) is above 1m/sec, becomes below 0.01 and effect of respiration heat is negligible and in case of below 1m/sec, the velocity of gas (3°C) is above 0.01 and the effect of respiration heat must be considered.

We present the practically easily applicable figure of cooling characteristic line on the both cases of short term cooling process and long time storage of citrus unshu.

記 號

記號表示

定義 및 單位

A	열전달면적, m^2	η	무차원 길이, $(x \cdot a / u)$
a	$hA / (\rho c v)_g$, 1/sec	θ	무차원 교체 온도, $(T_i - T_0) / (T_i - T_0)$
b	$hA / (\rho c v)_s$, 1/sec	ν	무차원 유체 온도, $\{(T_g - T_0) / (T_i - T_0)\}$
c	비열, J/kgK	ρ	밀도, kg/m^3
h	열전달계수, $J/m^2 \text{ secK}$	τ	무차원 시간 $[(t - \frac{x}{u}) \cdot b]$
Q	호흡열량, J/kgsec	上添字	
T	온도, °K	—	Laplace 변환변수
t	시간, sec	下添字	
u	유속, m/sec	g	동작유체
v	부피, m^3	i	입구
ρ	밀도, kg/m^3	0	초기
x	입구로부터의 거리, m	s	충전매질
λ	무차원 호흡열량, $(Q / b \cdot c_s \cdot (T_i - T_0))$		

* 正會員, 濟州大學 食品工學科

** 蔚山工科大学 機械工學科

1. 緒 論

우리나라의 蜜柑生産量은 매년 급격히 증가하고 있으며, 貯藏, 加工의 必要性이 강조되고 있으나 이에 대한 基本的인 資料가 부족한 실정이다.¹⁾ 蜜柑의 加工은 물론, 貯藏初期에 있어서 熱傳達特性을 아는 것은 매우 중요한 일이며, 우리나라와 같이 대부분의 蜜柑生産이 濟州道에 集中되어 流通過程에서 低溫貯藏, 低溫輸送이 必須인 경우는 더욱 중요시된다.

農産物의 冷却은 堆積 또는 充填된 狀態에 冷氣를 통과시킴으로써 行해지고 있는데, 이때 固體壁面과 氣體사이에서 일어나는 強制對流 熱傳達에 關해서는 Nusselt, McAdams²⁾ (1954), Schumann³⁾ (1929) 등의 研究가 있으며, Furnas⁴⁾ (1930)는 이것을 개량하여 폭넓게 解析가능한 解線圖를 만들었고, 이를 이용하여 Bakker-Arkema⁵⁾ 등 (1966)은 堆積된 사탕무의 冷却特性을 解析하였다.

또한 中馬등⁶⁾ (1968a)은 夏橘을 카튼박스에 넣어 矛盾의 冷却速度를 測定하였으며, 역시 中馬^{7,8)} 등 (1968b, 1969)은 Paraffin model에 의해 任意形狀의 農産物의 有效溫度傳達率을 測定하고, 납(鉛)模型에 의해 農産物의 非定常法에 의한 平均熱傳達率을 求하였다. 그리고 崔와 盧⁹⁾ (1978)는 유리구슬 充填層內에서의 蓄熱設計를 爲한 流體의 溫度를 求하였다.

蜜柑의 冷却方法은 水冷却이 빠르지만 物理的 外傷을 받기 쉬우므로 空氣冷却에 의해 貯藏初期에 冷却되고 있는데, 이 蜜柑의 冷却速度는 系의 熱的性質과 動作流體(冷氣)의 溫度, 流速등에 의해 支配된다.

이러한 系에 대한 理論的 接近은 Schumann model을 적용시킴으로써 可能하고, 이미 몇가지 數學的 手段에 의해 그 解가 求해져 있다. 그러나 風量이 적은 경우, 혹은 長時間 低溫貯藏할 경우에는 農産物(蜜柑)의 呼吸熱 發生이 系를 支配하는 또 하나의 因子가 된다. 특히 이 呼吸熱量은 溫度上昇에 따라 加速度的으로 증가하

는 것으로 알려져 있고,¹⁰⁾ 따라서 系의 溫度가 높은 상태일수록 呼吸熱을 고려해 주지 않으면 안된다.

本 研究에서는 濟州道産 溫州蜜柑의 充填層에 대한 冷却實驗을 통하여 農産物 冷却過程에 대한 Schumann equation의 적용 가능성을 확인하고, 또한 呼吸熱量의 項을 고려한 聯立偏微分方程式의 解를 求하여 제시하였다.

2. 理論的 考察

充填層內에 冷却流體 또는 加熱流體가 流動할 때, 系內의 非定常熱傳達 問題는 Schumann 方程式과 類似한 熱平衡方程式을 적용함으로써 理論的 解析을 할 수 있다. 이 方程式을 誘導하기 爲하여 다음과 같은 몇가지 假定을 隨伴하였다.

즉

가. 充填媒質粒子間의 熱傳導는 無視한다.

나. 流體流動은 一次元的이며 流體層의 熱傳導는 無視한다.

다. 系內의 熱的性質들은 溫度에 관계없이 一定하다.

라. 系外部로 熱損失은 없다.

이러한 假定下에 熱平衡方程式은 系의 길이 方向 微小에 대하여

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} + a(T_g - T_s) + u \frac{\partial T_g}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} + b(T_s - T_g) - \frac{Q}{cs} = 0 \quad (2)$$

$$a = \frac{hA}{(\rho c V)_g} \quad [1/\text{sec}]$$

$$b = \frac{hA}{(\rho c V)_s} \quad [1/\text{sec}]$$

Q: 充填媒質 單位質量當熱發生率 [J/kg·sec]

式 (1) 및 (2)에 적용될 初期 및 境界條件들은 冷却過程에 대해

$$T_g(0, t) = T_i \quad (3)$$

$$T_s(x, 0) = -T_0 \quad (4)$$

적절한 無次元變數의 도입으로 식 (1)~(4)는

$$\frac{\partial \nu}{\partial \eta} + (\nu - \theta) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + (\theta - \nu) - \lambda = 0 \quad (6)$$

$$\text{및 } \theta(\eta, 0) = 0 \quad (7)$$

$$\nu(0, \tau) = -1 \quad (8)$$

로 變換된다.

Laplace Transformation 에 의해 變化된 方程 式은

$$\frac{d\bar{\nu}}{d\eta} + \bar{\nu} - \bar{\theta} = 0 \quad (9)$$

$$S\bar{\theta} - \bar{\theta}(0) + \bar{\theta} - \bar{\nu} - \frac{\lambda}{S} = 0 \quad (10)$$

$$\text{및 } \bar{\theta}(\eta) = 0 \quad (11)$$

$$\bar{\nu}(0) = -1/S \quad (12)$$

식 (9)~(12)의 解를 求하여 逆變換하면 최종 式으로

$$\begin{aligned} \nu &= \lambda\tau - e^{-\nu} e^{-\tau} I_0(2\sqrt{\eta\tau}) - e^{-\nu} \int_0^{\tau} e^{-\zeta} I_0(2\sqrt{\eta\zeta}) d\zeta \\ &\quad - \lambda e^{-\nu} \int_0^{\tau} e^{-\zeta} I_0(2\sqrt{\eta\zeta}) d\zeta \\ &\quad - \lambda e^{-\nu} \int_0^{\tau} (\tau - \zeta) e^{-\zeta} I_0(2\sqrt{\eta\zeta}) d\zeta \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \theta &= \lambda\tau - e^{-\nu} \int_0^{\tau} e^{-\zeta} I_0(2\sqrt{\eta\zeta}) d\zeta \\ &\quad - \lambda e^{-\nu} \int_0^{\tau} (\tau - \zeta) e^{-\zeta} I_0(2\sqrt{\eta\zeta}) d\zeta \end{aligned} \quad (14)$$

와 같이 流體 및 充填媒質의 溫度分布를 얻는다.

한편 식 (6)에서 左邊第三項(Heat Source의 項)을 무시할 경우, 소위 Schumann Equation 으로서 이의 聯立解는

$$\nu = e^{-\nu} [e^{-\tau} I_0(2\sqrt{\eta\tau}) + \int_0^{\tau} e^{-\zeta} (2\sqrt{\eta\zeta}) d\zeta] \quad (15)$$

$$\theta = e^{-\nu} \int_0^{\tau} e^{-\zeta} (2\sqrt{\eta\zeta}) d\zeta \quad (16)$$

으로 주어 진다.

3. 實 驗

本 實驗에 사용된 試料는 보통크기의 濟州產 溫州蜜柑을 썼으며, 實驗裝置의 概略圖가 Fig. 1 에 주어 졌다. 몸체는 내경 26.5cm, 높이 100cm 두께 5cm의 Styroform 원통으로 제작되고 外部 에 다시 2cm 두께의 Glass Wool 보온 및 함석원 통으로 보강하였다.

入口측에는 送風機, 溫度調節用 2kW 電氣加 熱器, 그리고 鋼鐵 Wire Mesh로 된 Rectifier 를 설치하였다.

加熱器에는 Variac을 연결하여 入力을 調整, 소요온도의 空氣를 얻고 風量은 휴대용 熱線風 速計로 測定, 入口 Damper로서 調整하였다.

몸체내에 試料를 넣고 入口, 中間, 出口 등의 위치의 流體 및 固體에 Cu-Const. 熱電對를 설 치하고 Multi-Pen Recorder 및 Digital 溫度計로 서 起電力變化를 測定하였다.

系가 일정한 溫度로 유지된 것을 확인한 후 송 풍기 및 가열기를 연결하여 入口온도가 일정하 게(本 실험에서는 3°C) 유지시켜 空氣를 공급해

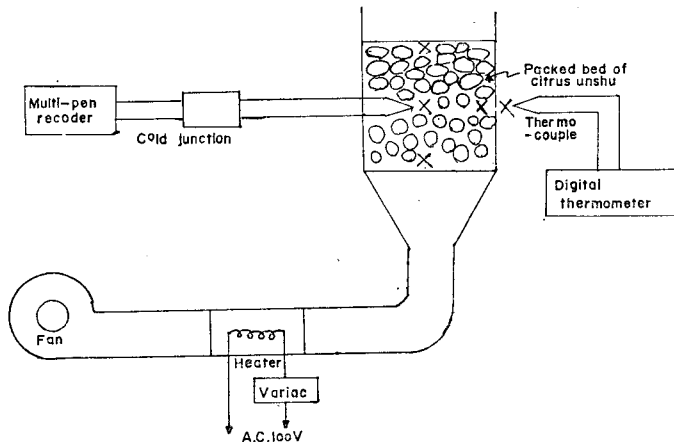


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus

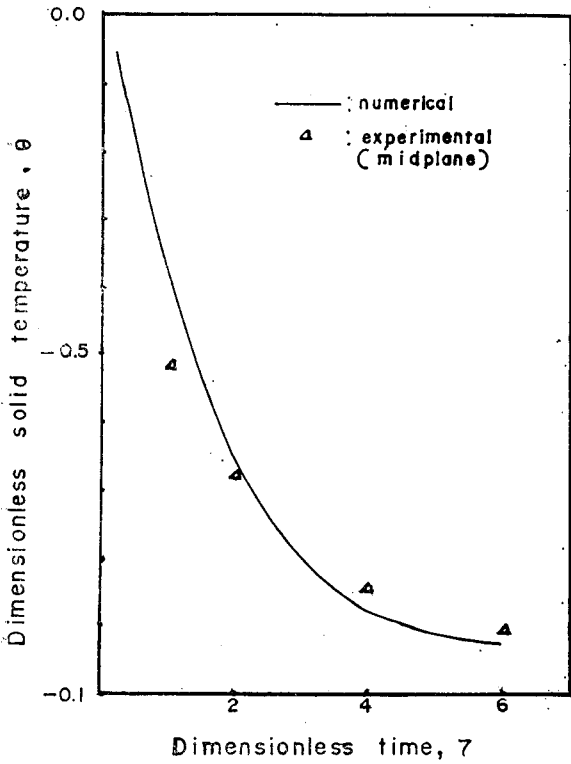


Fig. 2. Dimensionless solid temperature distribution

주고, 냉각과정동안 몇개의 測定點에서의 溫度 및 流速을 測定하였다. 流速은 20개點에서 測定하여 算術平均을 내었다.

4. 結果 및 考察

가. Schumann Equation의 解로 주어진 온도 분포와 제주도 溫州蜜柑의 充填層으로 실험한 결과의 冷却曲線과의 比較가 Fig. 2~3에 주어졌다. 數值計算에 사용된 物性值들은 15°C 때의 값 (Table 1)^{11,12}을 引用하였으며 實驗值들은 無次元溫度로 換算比較되었다. 두가지 결과는 좋은 一致를 보여 주고 있으며 最大偏差는 1~2°C 정도이다. 이는 溫州蜜柑의 充填層冷却의 경우 Schumann Model의 적용이 可能함을 立證하고 있다.

나. 呼吸熱量의 效果를 고려한 경우의 解式 (13) 및 (14)에 대하여 高速 Digital Computer를 사용한 數值計算結果가 Fig. 4~5에 圖示되었다. (부록 참조) 이것은 冷却流速이 작거나 長期貯藏의 경우에 呼吸熱量이 主要因子로 되어 적용될 수 있을 것이다.

그러나 流速이 1m/sec 이상의 冷却空氣에 대

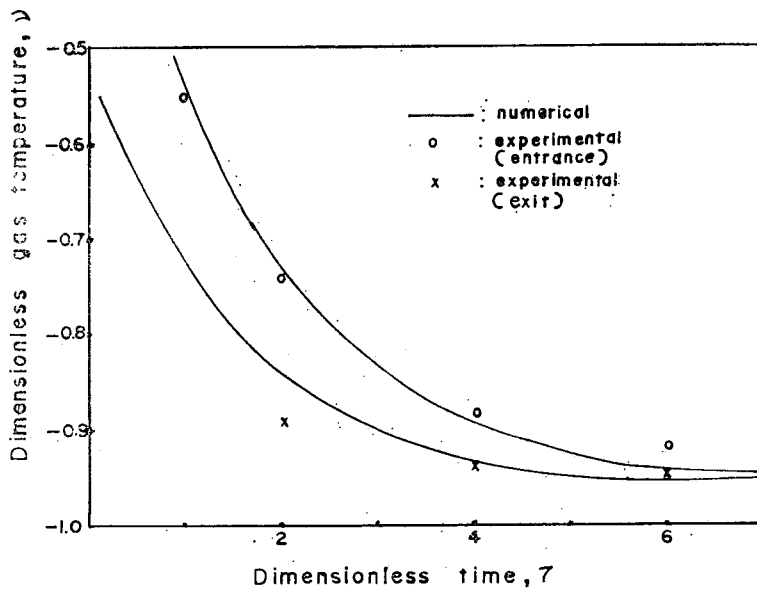


Fig. 3. Dimensionless gas temperature distribution.

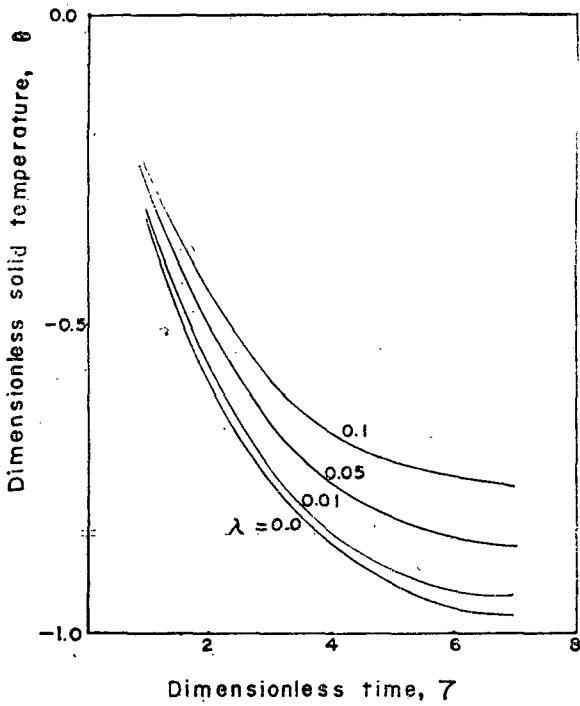


Fig. 4. Effects of respiration heat (λ) on dimensionless solid temperature distribution (for $\eta=1.0$)

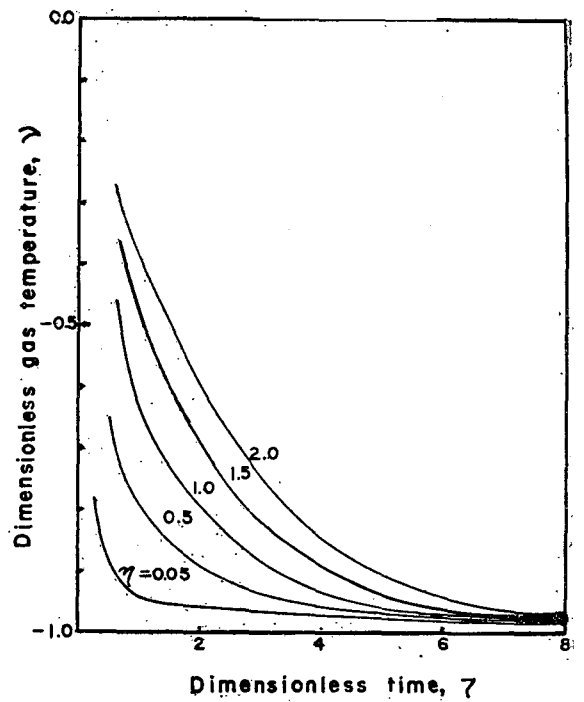


Fig. 6. Dimensionless gas temperature distribution (for $\lambda=0$)

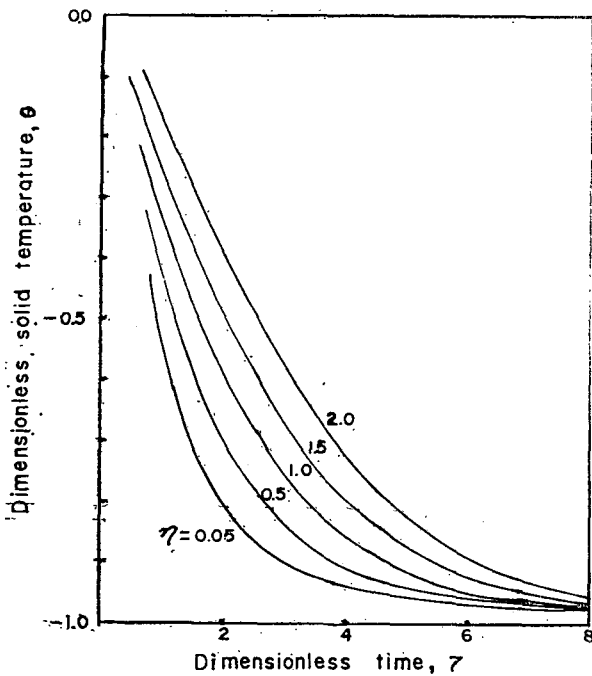


Fig. 5. Effects of respiration heat (λ) on dimensionless gas temperature distribution

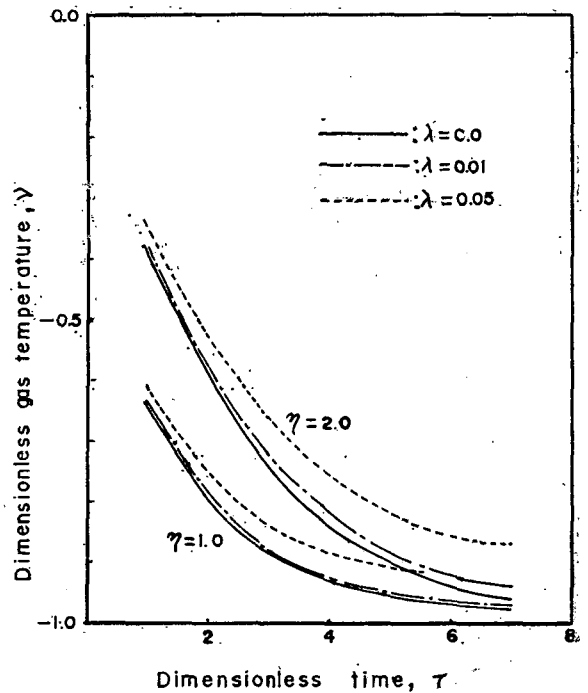


Fig. 7. Dimensionless solid temperature distribution (for $\lambda=0$).

Table. 1. Physical Properties of Citrus Unsha

	ρ kg/m ³	c J/kgK	k w/mk	Q J/kgsec
Air	1.175	1005	0.026	—
Citrus Unshu	1047	3760	—	0.05

하여 λ 는 대개 0.01 이하이고(初期冷却), 이때의 呼吸熱량의 영향은 무시할만하며 이 경우의 濃度分布를 Fig. 6~7로 주어 졌다. 이것은 溫州蜜柑의 貯藏初期에 가장 중요한 豫備冷却에 있어서의 冷却過程을 잘 나타내 주고 있다.

5. 結 論

Schuman Equation의 解로 주어진 溫度分布와 溫州蜜柑의 充填層에 冷風(3°C)을 통과시킨 실험으로 얻어진 冷却曲線을 無次元溫度로 換算比較한 결과는 좋은 일치를 보여주고 있으며, 이는 溫州蜜柑의 充填層冷却에 대하여 Schumann model을 적용할 수 있음을 입증하였으며, 호흡 열량을 고려한 경우의 解에 대하여 數值計算結果 流速이 1m/sec 이상인 初期冷却의 경우는 λ 가 0.01 이하가 되어 呼吸熱량의 영향을 무시할 수 있으나, 流速이 1m/sec 이하인 長期貯藏 또는 本貯藏의 경우는 呼吸熱량의 영향을 고려해야 할 것으로 판단된다. 著者들은 溫州蜜柑의 初期豫備冷却 및 長期本貯藏에 관하여 이 두 경우에 實際적으로 쉽게 적용하여 蜜柑 및 農産物의 貯藏, 加工에 응용할 수 있는 몇가지 圖表를 제시하였다.

謝 辭

本研究는 1977年度 文敎部 學術研究 造成費의 補助로 수행되었음을 밝히며, 實驗에 便宜와 助言을 아끼지 않으신 서울大學校 工科大學 機械工學科의 金孝經 教授님, 李澤植 教授님, 盧承卓 教授님 그리고 裝置제작에 협조해 주신 李在憲先生님께 深甚한 謝意를 表한다.

參 考 文 獻

- 1) 許宋和: 靑果物의 低溫貯藏에 關하여 (2) —감귤류의 저온 저장—空調·冷凍誌 5 (2) 1976, 115—121.
- 2) McAdams W. H.: Heat Transmission, McGraw-Hill Book co. Inc., New York. 1954.
- 3) Schumann, T. E. W.: Heat Transfer—A liquid flowing through a porous prism. J. Franklin Inst., 208 1929, 405—416.
- 4) Furnas, C. C.: Heat Transfer from gas Stream to a bed of broken Solid. Ind. Eng. chem., 22(7) 1930, 721—731.
- 5) Bakker-Arkema, F. W.: A deep bed computational cooling procedure for biological products. Trans. ASME 9(6) 1966, 834—836, 845.
- 6) 中馬·村田·岩元: 生鮮農産物의 空氣豫冷에 關する 研究 (1) —夏柑의 冷却速度について— 日農機誌 30 (1) 1968, 35—41.
- 7) 中馬·村田·內田: 파라핀模型による任意形狀農産物의 有效溫度傳導率의 測定について 日農機誌 30 (2) 1968, 100—105.
- 8) 中馬·村田·內田: 農産物의 熱傳達率의 測定—鉛模型による非定常法—日農機誌 31 (4) 1969, 293—302.
- 9) 崔耕震·盧承卓: 充填層內에서 蓄熱에 따른 熱傳達, 空調·冷凍誌 7 (1) 1978, 13—19.
- 10) Ting, S. V. and J. A. Attaway: "The Biochemistry of Fruits and Their Products. Vol. 2. Citrus Fruits. Ed. by A. C. Hulme, Academic Press, London & N. Y., 1971, Chap. 3. 107—169.
- 11) Eckert, E. R. G. and R. M. Drake: Analysis of Heat and Mass Transfer, McGraw-Hill, New York, 1972, Chap. 9. 413—416.
- 12) 村田 敏: 集合農産物의 冷却計算法 —堆積層と流動層—, 冷凍, 50 (568) 1975, 26—36.

부 록: 계산 결과

TAU	AT ETA 0.05 T	GT
1.0	-0.57669	-0.94434
2.0	-0.81390	-0.95583

3.0	-0.90543	-0.96016	1.0	-0.33102	-0.63953
4.0	-0.94071	-0.96179	2.0	-0.59098	-0.80269
5.0	-0.95429	-0.96241	3.0	-0.76029	-0.89142
6.0	-0.95952	-0.96264	4.0	-0.86156	-0.93719
7.0	-0.96153	-0.96273	6.0	-0.95043	-0.97305
8.0	-0.96230	-0.96276	7.0	-0.96712	-0.97896
	AT ETA 0.50		8.0	-0.97576	-0.98182
TAU	T	GT		AT ETA 1.50	
1.0	-0.44586	-0.79530	TAU	T	GT
2.0	-0.70699	-0.89411	1.0	-0.24318	-0.50303
3.0	-0.84371	-0.93930	2.0	-0.48453	-0.70071
4.0	-0.91248	-0.95971	3.0	-0.66930	-0.82344
5.0	-0.94607	-0.96884	4.0	-0.79601	-0.89742
6.0	-0.96212	-0.97288	5.0	-0.87690	-0.93965
7.0	-0.96965	-0.97466	6.0	-0.92588	-0.96302
8.0	-0.97310	-0.97539	7.0	-0.95440	-0.97562
	AT ETA 1.00		8.0	-0.97049	-0.98229
TAU	T	GT		AT ETA 2.00	
1.0	-0.33102	-0.63953	TAU	T	GT
2.0	-0.59098	-0.80269	1.0	-0.17705	-0.38876
3.0	-0.76029	-0.89142	2.0	-0.39053	-0.59613
4.0	-0.91248	-0.95971	3.0	-0.57844	-0.74563
5.0	-0.94607	-0.96884	4.0	-0.72276	-0.84451
6.0	-0.96212	-0.97288	5.0	-0.82408	-0.90649
7.0	-0.96965	-0.97466	6.0	-0.89089	-0.94377
8.0	-0.97310	-0.97539	7.0	-0.93293	-0.96549
	AT ETA 1.00		8.0	-0.95841	-0.97781
TAU	T	GT			