

# 벼의 熱傳導係數와 熱擴散係數에 關한 基礎 研究

## Fundamental Studies on the Thermal conductivity and Thermal diffusivity of Rough rice

金 滿 秀\* · 高 學 均\*\*  
Kim, Man Soo · Koh, Hak Kyun

### Summary

The knowledge of thermal properties of rough rice has become of great importance to the analysis of heat and mass transfer phenomenon in rice drying and storage process.

Some information is available on the thermal properties of rough rice in foreign countries but it is not available for these properties in Korea.

A fundamental study was made to determine the thermal conductivity and thermal diffusivity of rough rice with line source method and to select current and resistance suitable for these properties from investigating the effect of current and resistance of heating wire on the temperature rise.

The results of this study may be summarized as follows:

1. Even though the power per unit length of heating wires is about the same, the tendency of temperature rise showed a little difference among them, and the suitable range of it for thermal properties was found to be 3.56—5.37 w/m.
2. The most desirable resistance and current of heating wire was 18.40 ohm/m, 0.44 amperes among three kinds of heating wires and currents, respectively, because it took 13 minutes or so for the heating wire to reach equilibrium temperature.
3. The thermal conductivity of rough rice was 0.120—0.130 w/m°C. and thermal diffusivity of it was  $5.8210 \times 10^{-8}$ — $9.7529 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s.
4. The thermal conductivity showed a little difference in variation with resistance of heating wire but the variation of current of heating wire at the same resistance did not affect the thermal conductivity, and the thermal diffusivity was not affected by the variation of resistance and current.

### 1. 緒 論

우리나라는 多收穫 統一型 水稻 品種의 普及으로

그 生産量이 크게 增加하였을 뿐만 아니라 이로 因하여 많은 量의 穀物이 每年 乾燥, 貯藏되고 있는 實情이다. 이와 같이 穀物의 乾燥貯藏 過程은 農業 生産에 있어서 매우 重要的 分野中的의 하나이다.

\* 忠南大 農大 農業機械科

\*\* 서울大 農大 農工學科

穀物の乾燥, 貯藏過程中에惹起될 수 있는 많은 問題들은 主로 熱傳達의 基本方程式을 利用하여 分析될 수 있고 이를 爲해서는 우선 穀物の 熱特性을 알아야 한다.

穀物の 熱特性에는 比熱, 熱傳導係數, 熱擴散係數 등이 있는데 이들에 關한 研究는 1930年代 부터 部分的으로 研究되기 始作하여 오늘날에는 많은 進展을 보여 왔으나 이러한 研究들은 모두 外國에서 遂行되었을 뿐만 아니라 그 對象穀物도 主로 그 나라의 主 生産物인 밀, 옥수수, 귀리 등에 局限된 것들이다.

穀物の 熱傳導係數나 熱擴散係數에 關한 研究의 初期에는 定常狀態(steady state)에 있어서 熱傳導方程式을 利用한 것으로서 Bakke와 Stiles<sup>37)</sup>는 同心圓筒(concentric cylinder)사이에서 귀리를 넣은 後 안쪽 圓筒에 열을 넣고 이것 全體를 더운 물 탱크에 넣어 안쪽 圓筒속의 열이 녹는 量으로 熱傳導量을 測定한 裝置였다. 이 實驗에서 두 圓筒사이는 0.94cm, 1.48cm의 간격으로 하였으며 熱傳導係數는 水分含量이 增加함에 따라 直線的으로 增加하는 傾向을 보였다고 報告하였다. 대체로 水分含量 9.88%(w.b)의 경우 0.0640W/m°C이었고 27.7%의 경우 0.0929W/m°C로 發表하였다.

그 後 10余年 뒤에 Oxley<sup>38)</sup>는 밀, 옥수수, 귀리 등의 熱傳導係數에 關하여 報告한 바 있는데 그의 實驗裝置도 定常狀態의 熱傳導方程式에 根據를 둔 것으로서 直徑 10cm의 알루미늄球에 熱源을 附着시키고 그 바깥에 直徑 30cm의 귀리板으로 된 中空球로 熱源의 球와 同心이 되게 裝置한 後 그 사이에 試料를 넣어 熱傳導係數를 測定하였다. 그의 研究 結果는 밀이 水分含量 11.7%에서 0.151W/m°C, 옥수수 13.2%에서 0.177W/m°C, 귀리 12.7%에서 0.130W/m°C이라고 報告하였으나 산물비중(bulk density)과 水分含量의 變化가 熱傳導係數에 미치는 影響에 關하여는 言及한 바가 없었다.

오늘날의 Line source method와 비슷한 實驗裝置로서 밀의 熱特性에 關해 研究했던 Babbitt<sup>39)</sup>는 直徑 30.48cm, 길이 60.96cm로 된 합석 圓筒의 軸方向으로 熱線을 設置하고 그 左右에 圓筒의 中央에서 12個의 熱電帶를 埋設하여 半徑 方向의 溫度變化를 測定한 後 變形시킨 Carslaw의 熱傳導方程式을 利用하여 熱傳導係數와 熱擴散係數를 計算하였다. 그의 實驗 結果에 依하면 水分含量 9.2%에서 熱傳導係數는 0.151W/m°C였고 熱擴散係數는 1.15

$10 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ 라고 하였다. 이 方法은 非定常狀態(Unsteady State)의 熱傳導의 理論과 비슷한 것 같으나 Carslaw의 方程式을 變形시킬 때 圓筒內部の 溫度 分布는 時間에는 無關하고 그 位置 즉 半徑 方向으로만 溫度의 分配가 생긴다는 假定下에서 그 式을 變形시킨 것이고 水分含量도 아주 적은 9.2%에서 實驗이 遂行된 것이기 때문에 이 方法도 定常狀態下에서의 熱特性이라 할 수 있겠다. 이와 비슷한 方法으로 밀에 對하여 實驗했던 Moote<sup>31)</sup>에 依하면 Babbitt<sup>39)</sup> 비슷한 實驗裝置로서 穀物の 溫度 分配에 따른 水分의 移動이 熱傳導係數에 미치는 影響에 關하여 報告한 바 있는데 대체로 水分含量 1%의 增加는 熱傳導係數를  $1.212 \times 10^{-6} \text{W/m}^{\circ}\text{C}^{\circ}$ 增加시킨다고 하였으며 實驗 前後에 圓筒의 中心部와 벽 쪽에는 水分含量의 差가 있었으며 이러한 現象은 圓筒 中心部와 벽사이의 溫度 分配에 起因된다고 하였고 이러한 現象 때문에 試料의 位置에 따라서도 熱傳導係數가 變한다고 하였다. 그의 結果에 依하면 乾燥된 밀의 熱傳導係數는  $0.126 \text{W/m}^{\circ}\text{C}$ 이고 熱擴散係數는  $1.20 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ 로 報告하였으며 水分含量이 增加함에 따라 熱傳導係數는 直線的으로 增加하고 熱擴散係數는 약간 減少한다고 하였다.

1940年代까지는 定常狀態의 熱傳導理論에 依하여 各種 對象物의 熱特성을 測定 하였으나 Moote<sup>31)</sup>가 指摘했던 바와 같이 水分의 移動의 念慮되는 試料에서는 定常狀態下의 熱特性 究明은 많은 問題點을 가지고 있는 것이다. 非定常狀態下에서의 熱特性에 關한 實驗은 Van der Held에 依해 試圖되었던 것으로 그는 液體의 熱傳導係數 測定에 Line source method를 처음으로 사용한 사람이었으나 發表 當時에는 그의 方法에 對한 熱傳導理論이 제대로 開發되지 않았을 뿐만 아니라 그 應用도 그렇게 活潑치 못했었다. 그 後 Hooper<sup>32)</sup> 등은 Vander Held의 原理를 應用하여 非定常狀態下에서 水分含量이 많은 土壤의 熱傳導係數를 測定키 爲해 처음으로 thermal conductivity probe을 開發하였다. 그는 土壤뿐만 아니라 水分含量이 많은 다른 材料에서도 이 方法이 適用될 수 있음을 立證하였으며 D'Eustachio 등은 Hooper<sup>32)</sup>의 thermal conductivity probe의 原理와 構造는 비슷하나 直徑 0.76mm, 길이 10.16cm인 小型으로 만들고 熱線의 電源도 아주 적은 0.098~0.656W/m로 하였으며 Hooper<sup>32)</sup>가 提示하였던 probe에 있어서는 그것이 차지하는 空間 때문에 實際로 溫度上昇 始作時間이 늦기 때문에 時間補正係

數가 필요하다고 하였으나 그는 이것이 必要 無用이라고 하였다. 또한 Hooper와 Chang<sup>30)</sup>은 여러 規格의 thermal conductivity probe를 만들어 熱傳導係數를 圖解의 方法으로 求할 수 있다는 것을 例示하였으며 probe의 直徑에 對한 誤差를 줄이기 爲해 熱線 위에 直接 熱電帶를 設置하고 試料의 初溫 溫度를 等溫下에서 實驗을 實施했던바 滿足스러운 結果를 얻었다고 報告하였다.

그 後 Kazarian<sup>29)</sup>은 穀物의 熱傳導係數 測定을 爲해 熱線에 直接 熱電帶를 設置하여 實驗을 하였으며 最近에는 이 方法이 穀物의 熱傳導係數 測定의 가장 普偏化된 方法中의 하나가 되고 있다. 그의 實驗裝置는 直徑 13.97cm, 길이 27.94cm의 Brass 圓筒의 中央에 軸向으로 熱線을 設置하고 그 周圍에 穀物을 채워 實驗하였다. 그가 使用한 電源은 D.C 6V.였고 抵抗은 17.88ohm/m, 電流는 0.49~0.56 amp.였는데 電流의 增加에 따른 熱傳導係數의 變化는 5%의 有意水準에서 그 差가 없었다고 報告한 바 있으며 그가 熱傳導係數 計算에 利用한 式은 Hooper<sup>30)</sup>의 式을 利用했는데 이 式에서 생길 수 있는 誤差中 無限級數(rn)의 二次項 以上을 無視한 것은 測溫의 位置가 熱線의 中心에 매우 가까울 때는 큰 影響을 미치지 않는다고 하였고 熱線의 直徑에 對한 誤差는 時間補正係數를 適用함으로써 除去할 수 있다고 하였다

熱擴散係數의 測定은 Wratten<sup>18)</sup>, Morita<sup>13)</sup> 등과 같이 比熱, 산물비중, 熱傳導係數 등으로  $\alpha = \frac{K}{\rho C}$ 로 計算한 경우도 있으며 Kazarian<sup>29)</sup>은 Slab의 熱傳導에 依한 方法이었으며 Moysey<sup>2)</sup>, Rae<sup>6)</sup> 등은 Hooper<sup>30)</sup>의 方程式을 利用하여 Line source method에 依해 熱傳導係數와 同時에 測定하는 方法이었다.

이 두가지의 熱特性을 測定키 爲한 裝置를 보면 圓筒의 材料는 Bilanski<sup>4)</sup>, Wratten<sup>18)</sup> Moysey<sup>2)</sup>, Morita<sup>13)</sup> 등은 알루미늄이었으며 Kazarian<sup>29)</sup>은 Brass, Babbitt<sup>32)</sup>는 합석을 使用했다. 또 圓筒의 直徑과 길이의 比는 대체로 2~3배가 大部分이었고 熱線의 抵抗은 2.85~17.88ohm/m, 電流는 一般의 熱傳導係數가 작은 材料에서는 적은 量의 電流를 使用한다고<sup>33)</sup> 하였는데 대략 0.25~0.80amp의 範圍였다. 實驗 對象穀物은 옥수수, 밀, 수수, Rapeseed 등이 大部分이고 Wratten<sup>18)</sup>과 Marita<sup>13)</sup>는 벼에 對하여 이들 特性을 報告한 바 있는데 水分含量이 12~20%에서 熱傳導係數는 0.102~0.127W/m°C이었고 熱擴散係數는  $1.05 \times 10^{-7} \sim 9.00 \times 10^{-8} \text{m}^2/\text{s}$ 의

範圍였다. 또한 이러한 熱特性 測定方法에서 다른 것들로는 有限要素法(Finite element method)<sup>14)</sup>이나 가루와 같이 粒子의 크기나 分布가 比較的 均一한 경우에는 空隙 사이의 空氣에 對한 熱傳導係數까지 감안한 方法도<sup>31)</sup> 있었으며 Qashow 등은 과일 채소 등 여러가지 食品에 關한 熱特性 蒐集하여 報告한 바 있으나 벼에 關한 이 分野의 研究는 매우 限定되어 있는 實情이며 이들의 結果를 直接 우리나라에서 利用한다는 것은 困難할 것으로 생각된다.

따라서 本研究은 穀物의 熱特性 究明을 爲한 基礎的 研究로서 熱線의 抵抗과 適用 電流의 크기를 決定하고 이들의 變化가 벼의 熱傳導係數와 熱擴散係數에 어떠한 影響을 미치는가를 보기 爲하여 遂行되었다.

## 2. Line source에 依한 熱傳導係數와 熱擴散係數의 測定方法과 理

論<sup>1), 2), 5), 24), 26), 29), 33)</sup>

穀物과 같이 그 粒子가 작고 不均一하며 水分含量의 變化가 熱特性에 影響을 미치는 農產物의 熱傳導係數나 熱擴散係數의 測定에 널리 利用되는 方法으로서 一般의 方法으로 알루미늄으로 된 圓筒의 中心 軸과 一致하도록 熱線을 設置하고 試料를 圓筒에 넣은 後 一定量의 電流를 熱線에 흐르게 하여 그 熱이 圓筒의 半徑方向으로 傳導될때 熱線 溫度의 時間에 따른 變化를 測定하므로써 穀物의 熱特性을 測定할 수 있는 裝置이다. 이 方法에 依해 熱傳導係數와 熱擴散係數를 計算할 수 있는 式들은 다음과 같다.

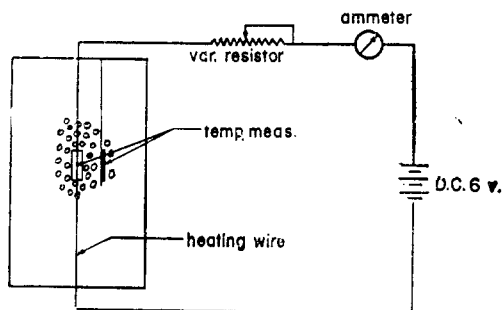


Fig. 1. Schematic diagram of line source method for thermal conductivity and thermal diffusivity.

가. 熱傳導係數

非定常狀態에서의 熱源이 없는 경우 熱傳導의 基本方程式은 다음과 같이 表示된다.

$$\frac{\partial T}{\partial \theta} = \alpha \left\{ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right\} \dots\dots\dots(1)$$

(1)式을 圓筒座標로 傳換하면

$$\frac{\partial T}{\partial \theta} = \alpha \left\{ \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right\} \dots\dots\dots(2)$$

이 된다.

여기서  $r$ =원통의 반경, m

$\phi$ =원주각, rad

$T$ =온도, °C

$\theta$ =시간, sec

$\alpha$ =열확산계수, m<sup>2</sup>/s

(2)式에서 圓筒의 軸線上에 熱線이 設置되어 있으므로 圓筒의 軸方向이나 圓周角( $\phi$ )의 方向으로는 熱이 傳導되지 않고 半徑方向으로만 傳導된다고 하면 (2)式에서  $\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0$ ,  $\frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} = 0$ 이 된다.

따라서 (2)式은

$$\frac{\partial T}{\partial \theta} = \alpha \left\{ \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right\} \dots\dots\dots(3)$$

으로 表示된다.

Hooper와 Lepper<sup>33)</sup>는 (3)式의 溫度( $T$ )에 對한解를 다음과 같은 無限級數로 表示하였다.

$$T = \frac{Q}{2\pi K} I(rn) \dots\dots\dots(4)$$

여기서  $Q$ =熱線單位길이 當의 投入熱量, W/m

$K$ =熱傳導係數, W/m°C

$I$ =無限級數

$r$ =熱線으로 부터 測溫點까지의 距離, m

$$n = \frac{1}{2\sqrt{\alpha\theta}}, m^{-1}$$

$$\text{無限級數 } I(rn) = C - \ln(rn) + \frac{(rn)^2}{2} - \frac{(rn)^4}{8} + \dots\dots\dots(5)$$

이 展開되는데 만약 ( $rn$ )의 값이 充分히 작다고 하면 (5)式에서 ( $rn$ )의 二次項 以下는 無視할 수 있으므로 (5)式은 다시 다음과 같이 表示할 수 있다.

$$I(rn) = C - \ln(rn) \dots\dots\dots(6)$$

따라서 (4)式은

$$T = \frac{Q}{2\pi K} \{C - \ln(rn)\} \dots\dots\dots(7)$$

로 表示되고 또 時間  $\theta_1$ 에서  $\theta_2$ 로 變하는 동안 溫度

의 變化가  $\Delta T$ 였다면

(7)式은 다음과 같이 表示할 수 있을 것이다.

$$\Delta T = \frac{Q}{2\pi K} \{ \ln(rn_2) - \ln(rn_1) \} = -\frac{Q}{2\pi K} \ln \frac{n_2}{n_1} \dots\dots\dots(8)$$

(8)式에  $n = \frac{1}{2\sqrt{\alpha\theta}}$ 을 代入하고 整理하면

$$T_2 - T_1 = \frac{Q}{4\pi K} \ln \frac{\theta_2}{\theta_1} \dots\dots\dots(9)$$

이 된다.

따라서 熱傳導係數는 다음 式으로 表示된다.

$$K = \frac{Q \ln(\theta_2/\theta_1)}{4\pi(T_2 - T_1)} = \frac{i^2 R \ln(\theta_2/\theta_1)}{4\pi(T_2 - T_1)} \dots\dots\dots(10)$$

여기서  $T_1, T_2$ =時間  $\theta_1, \theta_2$ 에 對應하는 溫度, °C

$i$ =電流, amp.

$R$ =熱線單位길이 當의 抵抗, W/m

나. 熱擴散係數

(4)式은 다음과 같이 表示될 수도 있다.

$$T = \frac{Q}{2\pi K} \int_{\beta}^{\infty} \frac{e^{-\beta}}{\beta} d\beta = \frac{Q}{2\pi K} I(rn) \dots\dots\dots(11)$$

여기서  $\beta = \frac{r}{2\sqrt{\alpha\theta}}$ , 無次元函數

(11)式을 熱擴散係數의 計算을 爲한 式으로 展開하면

$$\begin{aligned} T &= \frac{Q}{2\pi K} \left[ -\frac{Ce}{2} - \ln\beta - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n (\beta^2)^n}{(2n)(n!)} \right] \\ &= \frac{Q}{2\pi K} \left[ -\frac{Ce}{2} - \ln\beta + \frac{\beta^2}{2 \cdot 1!} - \frac{\beta^4}{4 \cdot 1!} \right. \\ &\quad \left. + \frac{\beta^6}{6 \cdot 1!} - \dots \right] \dots\dots\dots(12) \end{aligned}$$

이 된다.

여기서  $Ce$ =Euler's constant (0.5772157)

$n$ =양의정수

Line source method에 依해 熱擴散係數를 求하기 爲해서는 熱傳導係數의 計算에 必要한 溫도와 同時에 熱線으로 부터 約 1cm의 距離에서 測溫한다. 이와같이 熱線에서 가까운 곳에서 測定한 時間-溫度曲線으로부터 熱傳導係數를 計算하고 熱線으로부터 먼곳에서 測定한 時間-溫度曲線에서 熱擴散係數를 計算하는데 이때의 熱傳導係數의 값은 그때의 平均値를 (12)式에 代入하고 먼저 iteration method에 依해  $\beta$ 을 求한다음  $\alpha = \frac{r^2}{4\theta\beta^2}$ 로서 熱擴散係數를 計算한다.

### 3. 材料 및 方法

#### 가. 材料

本 實驗에서 供試 材料로 사용한 벼의 品種은 아끼바레였으며 實驗 條件은 水分含量 15.6% (w.b), 初期 穀粒의 溫度 28~30°C, 산물비중 545kg/m<sup>3</sup>으로서 恒條件에서만 遂行되었다.

#### 나. 實驗裝置

벼의 熱傳導係數와 熱擴散係數를 測定키 爲해 두께 2mm의 알루미늄 圓筒에 熱線을 設置한 Line source方法을 利用하였으며 溫度의 測定은 Strain gage system에 依하여 實施하였다. 實驗裝置의 配置圖 및 圓筒의 詳細圖은 그림 2, 3, 4에서 보는 바와 같고 그들의 諸元은 Table. 1에 表示하였다.

Table. 1. Specification of experimental apparatus and instrument for measuring the thermal conductivity and diffusivity of roughrice by the line source method.

Aluminum Cylinder(m)		φ0.13 H0.35
Heating Wire	Length(m)	0.30
	Resistance (ohm/m)	7.99, 18.40
	Current(amp.)	0.44, 0.54, 0.72
Power source(v.)		D.C 6
Current	Control	0-50 ohm variable resistor
	Measurement	0-1.0 D.C ammeter
Temperature gage type		KTB-6-12-A1
Adapter		TA-12UA
Recorder		Kyowa RMV-33N

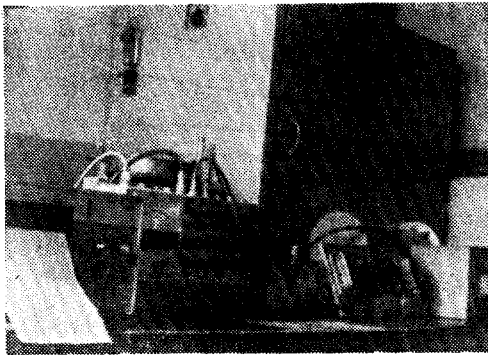


Fig. 2. Experimental apparatus and measuring instrument.

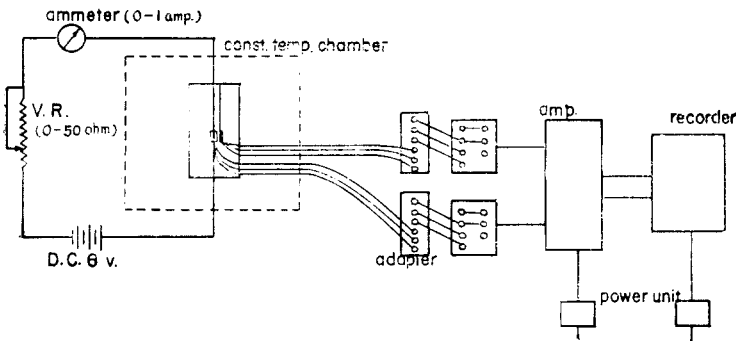


Fig. 3. Schematic diagram of experimental apparatus arrangements.

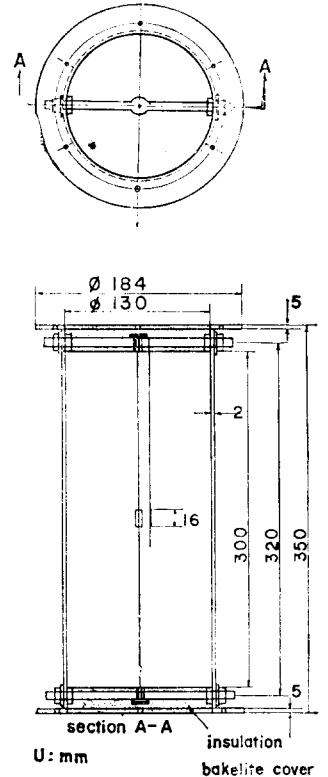


Fig. 4. Details of Aluminium cylinder for thermal conductivity and thermal diffusivity.

다. 方法

1) 熱傳導係數

熱線의 中央에 두께 0.2mm의 銅板을 9mm×20mm의 크기로 만들어 固定시키고 그 위에 溫度 Sensor를 附着하여 熱線 中心線으로 부터 約 0.345mm의 位置에서 溫度를 測定하였다. 試料의 加熱 時間은 10~15分으로 하였으며 時間-溫度曲線의 資料를 Semi-log graph paper에 表示했을 때 直線이 되는 期間 中에서 10分의 間隔을 둔 두 點의 時間과 溫度로서 (10)式에 依하여 穀物의 熱傳導係數를 計算하였다.

2) 熱擴散係數

熱線 中央에서 半徑 方向으로 約 1cm의 位置에 溫度 Sensor를 設置하여 測溫하였으며 熱線 中央으로 부터의 距離는 實驗 前後에 各各 測定하여 그 平均值로 하였다. 熱擴散係數의 計算은 (12)式을 利用하였으며 여기서 熱傳導係數의 값은 이와 同時에 測定한 값들의 平均值로 計算하였다.

4. 結果 및 考察

가. 抵抗과 電流 變化에 따른 熱線의 溫度 上昇

熱線의 抵抗(ohm/m)과 電流의 變化가 熱線 中央點에서의 溫度 上昇에 어떠한 影響을 미치고, 어느 熱線과 電流가 앞으로 遂行될 穀物의 熱特性에 關한 實驗에 適合한가를 보기 爲해 다른 研究者들이 熱特性 測定 時에 使用된 것과 비슷한 3種類(3.28, 7.99, 18.40ohm/m)의 熱線에 이들이 變化시켰던

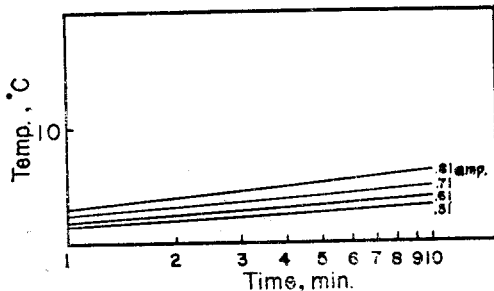


Fig. 5. Effect of current on the temperature rise of heating wire at the resistance of 3.28 ohm/m.

電流의 範圍인 0.22~0.84amp.로 電流를 變化시키면서 溫度를 測定하였던 바 各 熱線과 電流에서의 溫度 上昇程度는 그림 5, 6, 7과 같다.

그림 5에서 보는 바와 같이 熱線의 抵抗이 3.28 ohm/m의 경우 電流를 0.51amp.에서 0.81amp.까지 變化시키면서 熱線에서의 上昇溫度를 測定하였으나 溫度의 上昇 範圍가 1.4~1.6°C로서 매우 낮았다. 이와같이 溫度의 上昇 程度가 낮을 경우에는 記錄紙에서 測定誤差가 크기 때문에 이러한 抵抗과 電流의 범위는 適合치 못한 것으로 判斷되었다.

따라서 熱線의 抵抗은 앞의 것의 2倍 以上이나 熱線單位길이當의 動力 (W/m)은 거의 비슷한 範圍內에서 電流를 0.33amp에서 0.76amp까지 變化시키면서 熱線의 上昇溫度를 測定한 것을 그림 6에

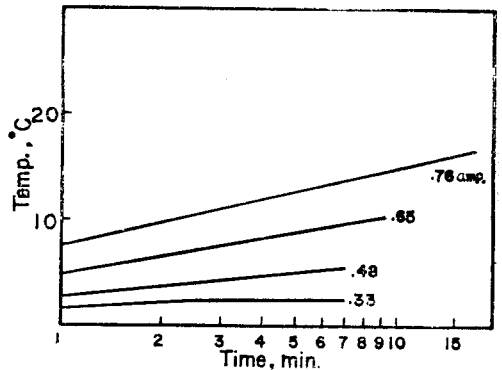


Fig. 6. Effect of current on the temperature rise of heating wire at 7.99 ohm/m.

表示하였는데 溫度의 上昇 傾向이 比較的 均一치 못했고 0.33amp와 0.48amp의 경우는 加熱時間이 10分이 되어도 約 5°C로서 너무 낮았으며 0.65amp의 것은 加熱時間 約 9分 後부터 一定한 溫度를 유지하였다. 0.76amp의 것은 加熱時間 10分 後부터는 一定한 溫度를 유지하다가 다시 11分 後부터는 溫度가 上昇하는 傾向을 보였다. 따라서 單位길이 當 熱線의 動力 (W/m)은 3.38W/m( $R=7.99, i=0.65$ )에서 4.24W/m( $R=7.99, i=0.72$ )의 것이 適合할 것으로 생각된다. 또 그림 7에서 보는 바와 같이 熱線의 抵抗 18.40ohm/m에서 電流를 0.22amp로부터 0.84amp까지 增加시키면서 熱線의 上昇溫度를 測定하였던 바 0.22amp.에서는 溫度가 너무 낮았고 0.66amp.에서는 約 15分 後부터 一定한 溫度에 도달하였으며 0.84amp.에서는 15分 後에도 溫度는 繼續 上昇하는 傾向을 나타내었다. 그러나 0.44amp.에서는 約 10分 後부터 一定한 溫度를 유지한 것으로

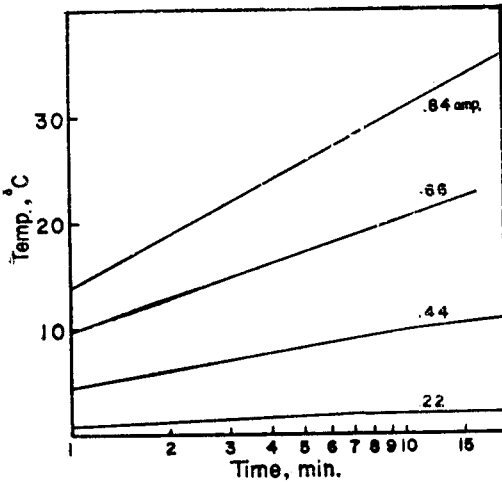


Fig 7. Effect of current on the temperature rise of heating wire at 18.40 ohm/m.

로 이들 중에서 가장 適合한 것이라고 判斷된다.

나. 熱傳導係數 測定을 爲한 熱線의 選擇

熱傳導係數 測定을 爲한 熱線의 抵抗과 電流는 測定誤差를 줄이고 實驗 分間을 節約하는 意味에서 上昇溫度가 높고 짧은 加熱時間 內에 一定한 溫度에 到達하는 것이 理想的이었으나 熱線 電流의 自乘과 抵抗의 相乘積인 單位길이 當의 動力이 적으면 溫度가 一定한 溫度에 到達하는 時間이 빠른 反面 上昇溫度가 너무 낮고 그 反對로 動力이 클 경우에는 溫度는 높고 올라 가지만 一定한 溫度에 到達하는 時間이 너무 길기 때문에 不利할 것이다.

앞의 結果와 文獻을 基礎로 할때 動力의 範圍는 大體로 3.56~5.37W/m였던바 이 範圍 內에서 앞의

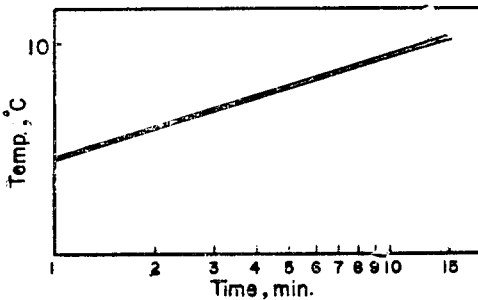


Fig. 8. Time-temperature relationship at the resistance of 18.40 ohm/m and the current of 0.44 amp.

實驗中 比較的 溫度上昇이 均一하고 加熱時間이 約 10分 後부터 一定한 溫度가 되는 것을 各 熱線 別로 한 電流 祇만 3種類 ( $R=18.40\text{ohm/m } i=0.44\text{amp}$ ,  $R=7.99\text{ohm/m } i=0.72\text{amp}$ ,  $R=18.40\text{ohm/m } i=0.54\text{amp}$ .)에 對하여 그들의 再現性을 보기 爲하여 各各 3反復으로 實驗한 結果를 그림 8, 9, 10에 表示하였다.

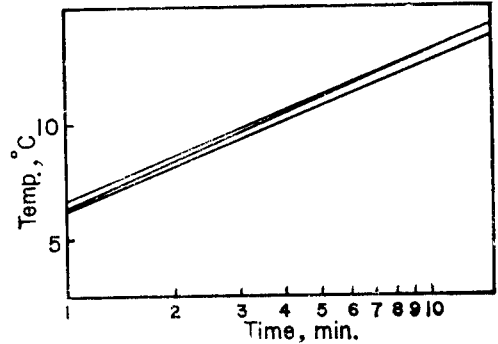


Fig. 9. The-temperature relationship at the resistance of 7.99ohm/m and the current of 0.72 amp.

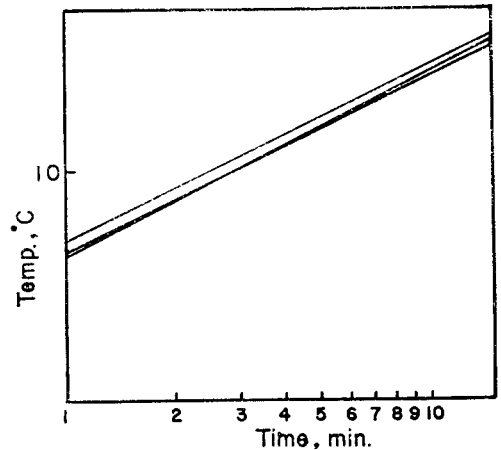


Fig. 10. Time-temperature relationship at the resistance of 18.40 ohm/m and the current of 0.54 amp.

그림 9, 10에서 보는 바와 같이  $R=7.99\text{ohm/m}$ ,  $i=0.72\text{amp}$ 의 경우와  $R=18.40\text{ohm/m}$ ,  $i=0.54\text{amp}$ 의 경우는 溫度의 上昇 傾向이 均一치 못했을 뿐만 아니라 一定한 溫度에 到達하는 時間도 15分 以上이었고 反復間에 再現性도 좋지 못함을 알 수 있다. 그러나 그림 8의  $R=18.40\text{ohm/m}$ ,  $i=0.44\text{amp}$ 의 경우는 溫度의 上昇 傾向도 比較的 均一했을 뿐만 아니라 一定 溫度에 到達하는 時間도 13分 內

외로서 溫度의 測定 時間을 15分으로 하더라도 本 實驗에는 支障이 없을 것으로 判斷되었다. 따라서 以上の 實驗結果에 依하면 熱線의 抵抗은 18.40ohm/m, 電流는 0.44amp.로 하는 것이 再現性이나 熱線을 圓筒에 設置하는 面에서도 다른것들 보다 良好하였다.

다. 熱線電流와 抵抗의 變化가 穀物의 熱傳導係數와 熱擴散係數에 미치는 영향

熱線의 抵抗과 電流를 變化시키면서 穀의 熱傳導係數와 熱擴散係數를 測定한 結果를 Table. 2,3에 表示하였다.

Table. 2. Thermal conductivities of rough rice according to the different power unit length of heating wire.

Resistance (ohm/m)	Current(amp.)	Power(W/m)	Replication	No. of data*	Thermal conductivity (W/m°C)
18.40	0.44	3.56	1	4	0.129
			2	4	0.132
			3	4	0.129
			Average		0.130
7.99	0.72	4.14	1	4	0.118
			2	4	0.122
			3	4	0.122
			Average		0.121
18.40	0.54	5.37	1	4	0.128
			2	4	0.129
			3	4	0.126
			Average		0.128

\* Indicates the number of time-temperature rise data utilized to compute the magnitude of thermal conductivity.

Table. 3 Thermal diffusivities of rough rice in case of temperature being measured at approximately 1cm from Center line of cylinder.

Resistance (ohm/m)	Current (amp.)	Power (W/m)	Replication	No. of data*	Thermal diffusivity (m <sup>2</sup> /s)	Remarks
18.40	0.44	3.56	1	4	$6.7398 \times 10^{-8}$	exact distance from the center line of cylinder(m) $r=0.0095$
			2	4	$5.9379 \times 10^{-8}$	
			3	4	$4.7851 \times 10^{-8}$	
			Average		$5.8209 \times 10^{-8}$	
7.99	0.72	4.14	1	4	$7.3644 \times 10^{-8}$	$r=0.0105$
			2	4	$12.2590 \times 10^{-8}$	
			3	4	$9.6359 \times 10^{-8}$	
			Average		$9.7531 \times 10^{-8}$	



18.40	0.54	5.37	1	4	$8.1355 \times 10^{-8}$	$r=0.0095$
			2	4	$9.6405 \times 10^{-8}$	
			3	4	$8.4613 \times 10^{-8}$	
			Average		$8.7458 \times 10^{-8}$	

\* Indicates the number of time-temperature rise data utilized to compute the magnitude of thermal diffusivity.

熱線의 抵抗 18.40ohm/m, 電流 0.44 및 0.54amp.에서 熱傳導係數는 各各  $0.130W/m^{\circ}C$ ,  $0.128W/m^{\circ}C$ 였으며 熱擴散係數는  $5.8209 \times 10^{-8}m^2/s$ ,  $8.7458 \times 10^{-8}$ 이었다. 또 抵抗 7.99ohm/m, 電流 0.72amp.의 경우는 各各  $0.121W/m^{\circ}C$ 이었고 熱擴散係數는  $9.7531 \times 10^{-8}m^2/s$ 으로서 값은 Wratten<sup>13)</sup>의  $0.102 \sim 0.12W/m^{\circ}C$ 와  $1.05 \times 10^{-7} \sim 8.56 \times 10^{-8}m^2/s$ 나 Morita의  $0.113 \sim 0.127W/m^{\circ}C$ ,  $1.10 \times 10^{-7} \sim 9.00 \times 10^{-8}m^2/s$ 의 값과 類似한 값이었으나 本實驗值 間에는 서로 差異가 있는 바 抵抗과 電流의 變化가 이들 熱特性에 어떠한 영향을 미치는 가를 보기 爲하여 亂塊法에 依해 分散時析을 實施했던 結果를 Table. 4, 5에 表示하였다.

Table. 4. Analysis of variances for thermal conductivity of rough rice.

SOV	d.f.	SS	MS	F
Total	8	$1.630 \times 10^{-4}$		
Blocks	2	$1.167 \times 10^{-6}$	$5.835 \times 10^{-6}$	2.42 N.S
Treatments	2	$1.417 \times 10^{-4}$	$7.685 \times 10^{-5}$	29.42**
Error	4	$9.63 \times 10^{-6}$	$2.408 \times 10^{-6}$	

Table. 5. Analysis of variances for thermal diffusivity of rough rice

SOV	d.f.	SS	MS	F
Total	8	$4.0218 \times 10^{-16}$		
Blocks	2	$6.2582 \times 10^{-16}$	$3.1291 \times 10^{-16}$	1.40 N.S
Treatments	2	$2.5034 \times 10^{-16}$	$1.2517 \times 10^{-16}$	5.61 N.S
Error	4	$8.9258 \times 10^{-16}$	$2.2315 \times 10^{-16}$	

Table 2에서도 豫測할 수 있는 바와 같이 熱傳導係數의 경우 反復 間에는 有意差가 없었으나 處理 間에는 高度의 有意性이 認定되었던 바 그들의 平均 值에 對하여 L.S.D檢定을 한 結果 서로 抵抗이 다른 것들끼리는 5% 水準에서 有意性이 認定되었으나 熱線의 抵抗은 같고 電流를 約 1.2倍 增加시켰을

경우에도 有意差가 없었다.

熱擴散係數에 對한 分散分析에서는 反復이나 處理 間에 모두 有意差가 없었다. 따라서 熱線의 抵抗이 같을 경우 電流는 多小間 變하더라도 이들의 熱特性에는 영향을 미치지 않는 것으로 생각되며 이러한 現象은 Kazarian<sup>26)</sup>의 경우와도 잘 一致하는 結果였다.

### 5. 結 論

穀物の 熱特性을 究明하기 爲한 基礎實驗으로서 벼의 熱傳導係數와 熱擴散係數에 對하여 Line source method와 strain gage system을 利用하여 溫度를 測定하고 이들 두 熱特性을 구하였으며 熱線의 어떤 抵抗과 電流가 穀物の 熱特性 測定에 適合한가를 究明키 爲해 熱線의 抵抗과 電流를 變化시키면서 實驗했던 結果를 要約하면 다음과 같다.

가. 熱線의 種類에 따라 그 單位길이 當의 動力이 비슷하더라도 熱線의 溫度上昇 傾向은 약간의 차이를 보였으며 熱線의 加熱時間을 15分 以內로 하기 爲해서는 대체로 熱線의 動力은  $3.59 \sim 5.37W/m$ 의 범위가 適當하였다.

나. 3種類의 熱線과 電流가운데 熱線의 直徑이 가장 작은 것인 抵抗 18.40ohm/m, 電流 0.44amp.의 경우가 一定한 溫度에 到達되는 時間이 13分 以內였으며 反復時 再現性도 가장 良好하였다.

다. 벼(아끼바레)의 熱傳導係數는  $0.120 \sim 0.130W/m^{\circ}C$ 였으면 熱擴散係數는  $5.8210 \times 10^{-8} \sim 9.7529 \times 10^{-8}m^2/s$ 의 範圍였다.

라. 熱線의 抵抗이 變할 경우 熱傳導係數의 값은 差異를 보였으나 같은 抵抗의 경우에는 電流를 變化시키더라도 그 값은 變하지 않았고 熱擴散係數의 값은 抵抗이나 電流의 變化에 別 영향을 받지 않는 것으로 判斷되었다.

參考文獻

1. Morita, T. and R.P. Singh. 1979. Physical and thermal properties of short-grain rough rice. *Trans. of the ASAE* 22(3) : 630—636.
2. Moysey, E.B., J.T. Shaw and W.P. Lampman. 1977. The effect of temperature and moisture and moisture on the thermal properteis of rape seed. *Trans. of the ASAE* 20(4) : 768—771.
3. Crumpton, W.R. and E.D. Threadgill. 1977. Thermal diffusivity of sweet potatoes. *Trans of the ASAE* 20(3) : 589—592.
4. Bilanski, W.K. and D.R. Fisher. 1976. Thermal conductivity of rape seed. *Trans. of the ASAE* 19(4) : 788—791.
5. Rao, M.A., J. Barnard and J.F. Kenny. 1975 Thermal conductivity and thermal diffusivity of process variety squash and white potatoes. *Trans. of the ASAE* 18(6) : 1188—1192.
6. Heldman, D.R. and D.P. Gorby. 1975. Prediction of thermal conductivity in frozen foods. *Trans. of the ASAE* 18(4) : 740—744.
7. Sharma, D.K. and T.L. Thomson. 1973. Specific heat and thermal conductivity of sorghum. *Trans. of the ASAE* 16(1) : 114—117.
8. Chen, A.C. and D.R. Heldman. 1972. An alaysis of the thermal properties of dry food powder in a packed bed. *Trans. of the ASAE* 15(5) : 951—955.
9. Reidy, G.A. and A.L. Rippon. 1971. Methods for determining thermal conductivity in foods. *Trans. of the ASAE* 14(2) : 248—253.
10. Farrall, A.W., A.C. Chen, P.Y. Wang and A.M. Dhanak. 1970. Thermal conductivity of dry milk in a packed bed. *Trans. of the ASAE* 13(2) : 391—394.
11. Keppeler, R.A. and J.R. Boose. 1970. Thermal properties of frozen sucrose solutions. *Trans. of the ASAE* 13(2) : 335—339.
12. Bashford, L.L. and J.A. Ferguson. 1970. Instrumentation and temperature control of guarded hot-plate system for measuring thermal properties of seed cotton. *Trans. of the ASAE* 13(1) : 155—157.
13. Wratten, P.T., W.D. Poole, J.L. Chesness, S. Bal and V. Ramarao. 1969. Physical and thermal properties of rough rice. *Trans. of the ASAE* 12(6) : 801—803.
14. Ford, R.M. and W.K. Bilanski. 1969. Thermal diffusivity of alfalfa stems. *Trans. of the ASAE* 12(2) : 249—251.
15. Wadsworth, J.I. and J.I. Spadaro. 1969. Transient temperature distribution in whole sweet potato roots during immersion heating. *Food Technology* 23 : 219—223.
16. Matthews, F.V. and C.W. Hall. 1968. Method of finite differences used to relate change in thermal and physical properties. *Trans. of the ASAE* 11(3) : 558—562, 565.
17. Ojha, T.P., A.W. Farrall, A.M. Dhanak, and C.M. Stine. 1967. A method of determining heat transfer through powdered food products. *Trans. of the ASAE* 10(3) : 543—545.
18. Parker, R.E. and B.A. Stout. 1967. Thermal properties of tart cherries. *Trans. of the ASAE* 10(3) : 489—491, 496.
19. Smith, R.E., G.L. Nelson and R.L. Henrickson. 1967. Analyses on transient heat transfer from anomalous shapes. *Trans. of the ASAE* 10(2) : 236—245.
20. Zoerb, G.C. 1967. Instrumentation and measurement techniques for determining physical properties of farm products. *Trans. of the ASAE* 10(1) : 100—109, 113.
21. Poppendiek, H.F., R. Randall, J.A. Breeden, J.E. Chambers and J.R. Murphy. 1966. Thermal conductivity measurements and prediction for biological fluids and tissues. *Cryobiology* 3(4) : 318—327.
22. Mohsein, N.N. 1965. Physical properties of agricultural products. *Trans. of the ASAE* 8(1) : 25—29.
23. Dickerson, R.W. 1965. An apparatus for the measurement of thermal diffusivity of foods. *Food Technology* (May). 880—886.
24. Tait, R.W.F. and B.A. Hills. 1964. Methods

- for determining liquid thermal conductivities  
Ind. and Engg. Chemistry 56(7) : 29—35.
25. Pelanne, C.M. and C.B. Bradley. 1962. A rapid heat-flow meter thermal-conductivity apparatus. Materials Research and Standards (Jul.). 549—552.
  26. Kazarian, E.A. 1962. Thermal properties of grain. Ph.D. thesis. Michigan State University.
  27. Spells, K.E. 1960. The thermal conductivity of some biological fluids. Physics in Med. and Biology 5 : 139—153.
  28. Turrell, F.M. 1957. Specific heat and conductivity of citrus fruit. Proce Am. Soc. Hort. Sci. 70 : 261—265.
  29. Vos, B.H. 1955. Measurements of thermal conductivity by a non steady method. Appl. Sci. Res. (Hague) A5 : 425—438.
  30. Hooper, F.C. and S.C. Chang. 1953. Development of the thermal conductivity probe. Trans of the ASHVE 59 : 463—472.
  31. Moote, I. 1953. The effect of moisture on the thermal properties of wheat. Can. J. Tech. 31 : 57—62.
  32. D'Eustachio, D. and R.E. Schreiner. 1952. A study of a transient heat method for measuring thermal conductivity. Trans. of the ASHVE 58 : 331—339.
  33. Hooper, F.C. and F.R. Lepper. 1950. Transient heat flow apparatus for the determination of thermal conductivities. Trans. of the ASHVE 56 : 309—322.
  34. Kethley, T.W., W.B. Cown and F. Bellinger. 1950. An estimate of thermal conductivities of fruits and vegetables. Refrigerating Engineering 48(p49) : 49—50.
  35. Babbitt, E.A. 1945. The thermal properties of grain in bulk. Can. J. of Research. F23 : 388—401.
  36. Oxley, T.A. 1944. The properties of grain in bulk. Trans. of Chem. Indus. J. 63 : 53—57.
  37. Bakke, A.L. and H. Stiles. 1935. Thermal conductivity of stored oats with different moisture content. Plant physiology 10 : 521—524.