

穀物の熱傳導係數에 관한 研究

Thermal Conductivities of Grain

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

Summary

The thermal conductivities of grain are influenced by many physical factors such as initial temperature, moisture content, composition, bulk density or porosity of grain. However, not only few researchers considered all these factors in determining thermal conductivities of grain but also many researchers considered only moisture content as a major effective factor on the thermal conductivity.

This study was conducted to experimentally determine the thermal conductivities of rough rice (3 Japonica-type, 3 Indica-type) and barley(covered, naked) as a function of initial temperature, moisture content and porosity of grain, and to investigate the effect of those physical factors on the thermal conductivities of grain.

The results of this study are summarized as follows;

1. The average time correction value for this experimental apparatus was 7 sec, which was insignificant to the calculated thermal conductivity. The resulting conductivity for considering time correction value was only 4.9 percent higher than that calculated by the non-corrected equation.
2. The thermal conductivity was in the range of 0.1208~0.2058W/m²K for naked barley, 0.1138~0.1724W/m²K for covered barley, 0.0912~0.1864W/m²K for Japonica-type rice and 0.086~0.1774W/m²K for Indica-type rice.
3. The thermal conductivities of grain increased with initial temperature and moisture content of grain but decreased with porosity of grain.
4. The regression equations of the thermal conductivity of each grain were determined as a function of initial temperature, moisture content and porosity. The regression equations of the thermal conductivity of both Japonica-type and Indica-type rough rice were also determined.

*忠南大學校 農科大學 農業機械工學科

**서울大學校 農科大學 農工學科

1. 緒 言

穀物の乾燥 및 貯藏技術은 穀物の 含水率과 溫度를 合理的으로 調節하는 複合的인 技術이지만 根本的으로는 穀物の 熱特性을 基礎로 한 熱 및 物質 傳達(heat and mass transfer)의 現象과 깊은 關係를 맺고 있다. 또한 實際的인 問題로서 穀物 乾燥機나 貯藏庫의 設計 및 作動方法도 穀物の 熱特性에 바탕을 두고 있다.

이러한 重要性에도 不拘하고 지금까지 우리나라에서는 穀物の 熱特性에 關한 研究結果가 거의 없는 實情이다. 外國에서도 오래 前부터 各種 農産物의 熱特性에 關한 研究가 始作되었지만 穀物에 關한 資料는 어느 特定穀物에 偏重되었거나 또는 斷片的으로 取扱되어 있을 뿐이다. 特히 우리나라에 많이 普及되고 있는 統一型 品種은 在來의 品種에 比하여 物理的인 特性이 크게 다르다고 認定되고 있으나 이에 關한 研究는 거의 없는 實情이다.

따라서 本研究에서는 現在 우리나라에 많이 普及되어 있는 여섯개의 벼 品種(統一型 3, Japonica型 3)과 大麥 및 稈麥에 對한 熱傳導係數와 이에 影響을 미치는 因子들 間의 相互關係를 究明키 爲하여 遂行되었다.

2. 文獻概要

가. 熱傳導係數의 測定裝置

熱傳導係數를 測定하는 方法에는 熱傳導의 現象에 따라 定常狀態(steady-state)의 方法과 非定常狀態(unsteady-state)의 方法으로 區分될 수 있고 이들은 各各 그 基本方程式의 適用 形態에 따라 여러 가지 方法으로 分類된다^{4, 20}.

定常狀態의 方法은 다음 式으로 表示되는 Fourier-Biot의 熱傳導法則을 利用한 것이다.

$$q = -KA \frac{dT}{dx} \dots\dots\dots (2-1)$$

- 여기서, q : 試料에 投入되는 熱量(W)
- K : 試料의 熱傳導係數(W/m²K)
- A : 斷面積(m²)
- dT : 試料의 두께(m)
- dx : 試料의 두께 間의 溫度差(°K)

(2-1)式은 定常狀態에서 熱이 한 方向으로 傳導되는 現象을 說明하는 式으로 이 式을 平板, 圓筒,

球에 各各 適用시킴으로서 (1) 平行板(parallel plate or guarded hot plate)에 依한 方法 (2) 同心圓筒(concentric cylinder)에 依한 方法 (3) 同心球(concentric sphere)에 依한 方法으로 나누어진다.⁸⁾

非定常狀態의 方法은 다음 과 같이 內部에 熱原이 없는 熱傳導의 一般式을 利用하는 方法이다.

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

- 여기서, T : 溫度(°K)
- t : 時間(sec)
- α : 熱擴散係數(m²/sec)

이 方法에는 주로 (1) Heating or cooling curve에 依한 方法 (2) Line source 또는 Probe에 依한 方法 (3) Freeze drying에 依한 方法으로 細分된다고 Qashou⁹⁾는 報告하였다.

1) 定常狀態의 方法

穀物の 熱傳導係數를 平行板에 依한 方法으로 測定한 경우는 報告된 것이 거의 없으나 이 方法으로 Fig. 1과 같은 裝置를 使用하여 곡화種子 動物組織과 血液,^{21, 20)} 動物血液과 牛乳 等 主로 液體나 肉類와 같이 含水率이 높은 試料의 熱傳導係數를 測定한 事實이 있다.^{4, 19, 22, 25)}

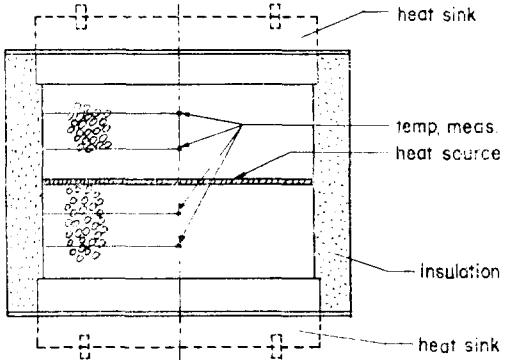


Fig. 1. Schematic diagram of parallel plate method for measuring the thermal conductivity.

Duncan 等²⁰⁾은 담배잎의 熱傳導係數測定을 爲하여 guarded hot plate에 依한 方法을 利用하였다. 그는 담배잎의 熱傳導係數에 影響을 미치는 因子로서 含水率, 散物密度, 溫度 等을 考慮하였으며 여기서 試料의 溫度는 平均溫度인 24°C에서만 實驗을 遂行하였으며 담배잎의 熱傳導係數를 含水率, 散物密度를 變數로 하는 多量非線形回歸分析(multiple curvilinear regression analysis)에 依하여 다음과 같은 式으로 提示하였다.

$$K = \frac{a}{b - eD - fM - gM^2} \dots\dots\dots (2-3)$$

여기서, K : 熱傳導係數($W/m^{\circ}K$)

a, b, e, f, g : 常數

D : 散物密度(kg/m^3)

M : 含水率(% , w.b)

平行板(parallel plate)에 의하여 熱傳導係數를 測定하는 方法은 주로 液體의 熱傳導係數를 測定키 위하여 開發된 裝置로서 穀物과 같은 含水率이 높은 試料의 熱傳導係數를 測定할 때 測定時間이 길기 때문에 試料 內部的 水分 移動이 問題가 되고 또한 熱의 흐름이 軸方向 뿐만 아니라 半徑方向으로도 흐를 수 있고 對流나 輻射에 의한 熱의 流動 등이 問題인 것이다.^{6, 23)}

그러나 Reidy 等⁵⁾은 試料 內部的 對流에 의한 誤差는 熱板(hot plate)과 冷却板(cold plate) 사이의 間隔을 0.32cm 以下로 維持하므로써 그 誤差를 無視할 수 있을 程度로 줄일 수 있다고 報告하였으며 이 方法은 液體의 熱傳導係數測定에만 局限하거나 含水率이 最高 10%의 試料에서만 이 方法을 適用하도록 추천하였다.

Bakke 等⁶⁾은 귀리(oats)의 熱傳導係數 測定에서 圓筒속의 물을 Bunsen burner로 加熱하여 그 熱源으로 하였으며 그 밑에 얼음을 넣은 圓筒을 冷却板으로 하여 그 사이에 試料를 넣어 冷却板 밑의 얼음을 녹이는 量으로 이 System에 傳達된 熱量을 計算하고 식(2-4)에 의하여 귀리의 熱傳導係數를 測定하였다.

$$K = \frac{Qd}{AT} \dots\dots\dots (2-4)$$

여기서, K : 熱傳導係數($W/m^{\circ}K$)

Q : 單位時間에 投入된 熱量(W)

d : 試料의 두께(m)

A : 圓筒의 斷面積(m^2)

AT : 試料 두께 間의 溫度差($^{\circ}K$)

이 實驗에서 그는 試料의 두께를 0.94cm, 1.48cm로 變化시켰으며 1.48cm의 경우가 熱傳導係數는 약간 높았지만 이들 間의 差異는 크지 않았으며 熱傳導係數는 含水率이 增加함에 따라 直線의으로 增加하는 것으로 나타났다.

平行板(parallel plate)에 의한 方法으로 熱傳導係數를 測定할 경우 또 다른 誤差의 原因으로는 試料 주위의 熱損失인데 이 點만을 감안한다면 熱傳導係數의 測定裝置는 同心圓筒(concentric cylinder)의 方法이나 同心球(concentric sphere)의 方法이 좋은

方法이라고 報告하였다.²³⁾

Ojha 等¹⁹⁾은 粉末牛乳와 밀가루의 熱傳導係數를 測定하기 위하여 Fig. 2.와 비슷한 裝置인 同心圓筒에 의한 方法을 利用하였으며 다음 式에 의하여 熱傳導係數를 計算하였다.

$$K = \frac{Q \ln(r_2/r_1)}{2\pi L(T_1 - T_2)} \dots\dots\dots (2-5)$$

여기서, K : 熱傳導係數($W/m^{\circ}K$)

Q : 單位時間當 投入熱量(W)

r_1, r_2 : 圓筒의 半徑(m)

L : 圓筒의 길이(m)

T_1, T_2 : r_1 과 r_2 에서 圓筒面의 溫度($^{\circ}K$)

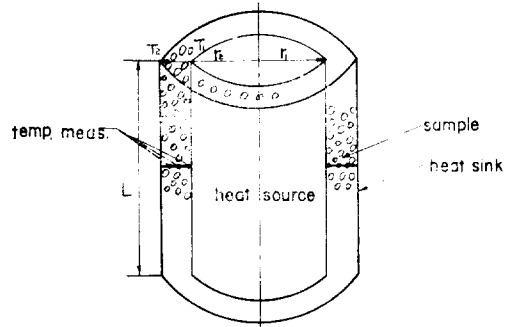


Fig. 2. Schematic diagram of concentric cylinder method for measuring the thermal conductivity.

이들은 外部 圓筒에 設置된 電熱線으로 試料를 加熱하여 願하는 溫度에서 平衡狀態에 到達시킨 後 內部 圓筒에 一定量의 冷却水를 흐르게 하므로써 그 溫度差에 의하여 粉末牛乳의 熱傳導係數를 計算하였다. Farrall 等¹²⁾도 이 裝置를 利用하여 粉末牛乳의 熱傳導係數에 對하여 報告한 바 있다.

Ojha 等¹⁹⁾은 粉末牛乳의 初期溫度와 含水率이 增加함에 따라 그 熱傳導係數도 增加한다고 하였으며 Farrall 等¹²⁾은 試料의 溫度, 含水率 뿐만 아니라 散物密度에 따라서도 熱傳導係數는 增加한다고 報告하였다.

同心圓筒에 의한 方法에서 나타나는 主된 誤差의 原因은 圓筒上下面의 熱損失과 試料 內部的 對流와 輻射에 의한 熱傳導 現象인데 이것은 두 圓筒의 間격을 가능한 限 줄이고 試料 兩面의 溫度差를 적게 하고 圓筒을 수직으로 세워 測定하는 것이 좋으며 對流와 輻射에 의한 誤差의 범위는 1—2%程度라고 報告하였다.^{5, 16, 23)}

Oxley²⁰⁾는 밀, 옥수수, 귀리 등의 熱傳導係數를

測定하기 위하여 Fig. 3.과 같은 裝置의 同心球에 依한 方法을 利用하였으며 다음 式에 依하여 計算하였다. 이 裝置는 直徑 10cm의 알루미늄 球에 熱源을 附着시키고 그 바깥에 直徑 30cm의 구리板으로 된 中空球에 穀物을 채우고 熱傳導係數를 測定하였다.

$$K = \frac{Q(r_2 - r_1)}{4\pi(T_1 - T_2)r_1r_2} \dots\dots\dots (2-6)$$

여기서, K : 熱傳導係數(W/m°K)
 Q : 單位時間當 投入熱量(W)
 r_1, r_2 : 球의 半徑(m)
 T_1, T_2 : r_1, r_2 에서 球面의 溫度(°K)

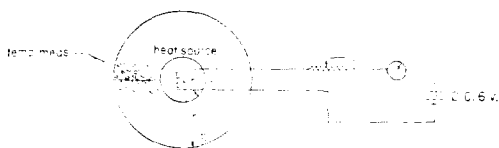


Fig. 3. Schematic diagram of concentric sphere method for measuring the thermal conductivity.

Yamada¹²⁾는 同心球에 依한 方法으로 감자의 熱傳導係數를 測定하였는 바 試料의 溫도와 含水率이 增加함에 따라 熱傳導係數도 增加한다고 報告하였다. 同心球에 依한 方法은 熱損失을 줄인다는 면에서는 定常狀態의 方法中 가장 理想的인 것이나 두球를 正確히 同心이 되게 設置하는 것이 가장 어려운 問題點으로 지적되고 있다.^{5,23)}

2) 非定常狀態의 方法

非定常狀態의 方法에 依한 熱傳導係數 測定裝置의 여러가지 問題點에 反하여 非定常狀態의 方法은 測定時間이 짧고(約 10分) 實驗條件이 試料의 熱處理(heat processins) 條件과 비슷하다는 點에서^{5,15)} 最近에는 各種 試料의 熱傳導係數 測定에 이 方法이 널리 利用되고 있다.

非定常狀態의 方法에 依한 各種 試料의 熱傳導係數를 測定하는 方法中 가장 많이 利用되고 있는 것이 Line source(hot wire) 方法인데 이에 對한 理論은 Stålhan과 Pyk에 依해 처음으로 記述되었고 이 方法을 實際로 液體의 熱傳導係數 測定에 適用한 學者는 Van der Held와 Van Drunen이라고 報告된 바 있으나²³⁾ 이 理論의 發表當時에는 數式이 複雜하고 利用方法이 제대로 開發되지 않아 그 適用도 活潑치 못했다. 그후 Hooper 등은 Van der Held 原理를 應用하여 含水率이 높은 土壤의 熱傳

導係數를 測定키 위하여 처음으로 Thermal conductivity probe를 開發하였으며 그후부터 熱傳導係數 測定에 이 方法이 主로 利用되어 많은 研究結果가 報告되었다. Thermal conductivity probe는 圓筒에 Fourier의 熱傳導方程式을 適用한 것으로 다음 式에 依하여 熱傳導係數가 測定된다.

$$K = \frac{\ln(t_2/t_1)}{4\pi(T_2 - T_1)} \dots\dots\dots (2-7)$$

여기서, K : 熱傳導係數(W/m°K)
 T_1, T_2 : t_1, t_2 時間에 對應하는 溫度(°K)
 t_1, t_2 : 時間(sec)
 Q : 熱線單位 길이當 投入熱量(W/m)

Line source 方法에 依한 熱傳導係數의 測定에서 發生할 수 있는 誤差의 原因으로는 (1) 熱이 半徑方向뿐만 아니라 다른 方向으로도 흐를 수 있다는 것 (2) Probe나 熱線의 直徑과 길이가 有限하다는 것 (3) 式(2-7)를 誘導할 때 無限級數(Bessel function)로 繼續되는 項들 中 첫번째로부터 두 項만을 取하고 그 以下의 項들은 無視하는 데서 오는 誤差 등이다.^{10, 11, 25, 23, 32)} Chandra 등¹¹⁾은 Bessel function에서 2次項 以上은 그 값이 매우 작기 때문에 無視할 수 있다고 報告하였으나 熱線이나 Probe의 直徑과 길이가 有限한데서 오는 誤差는 補正을 해야 한다고 報告하였다. 왜냐하면 Probe를 그 크기만큼의 穀物로 代置하였을 때 이들 사이에 생기는 吸熱의 差는 溫度 測定 前에 發生된 熱量으로 看做될 수 있기 때문에 이 時間에 해당하는 時間補正值(time correction value)를 測定時間에서 빼어 주어야 한다고 주장하였다.³²⁾ 이 時間補正值의 決定은 大部分 溫度-時間 曲線의 기울기가 0이 되는 時間으로 하였으며^{7, 9, 11, 28, 32)} Moysey 등⁷⁾은 다음식에 依하여 時間補正值를 計算하였다.

$$t_0 = t_1 \exp\left\{ \frac{T^* - A}{B} \right\} \dots\dots\dots (2-8)$$

여기서, t_0 : 時間補正值(sec)
 t_1 : 溫度-時間 曲線이 直線이 된 후의 일의 時間(sec)
 A, B : 常數
 T^* : 初期溫도와 時間 t_1 일때의 溫度差(°K)

이와 같은 方法에 依하여 計算된 時間補正值의 값은 大體로 0~8.5秒의 範圍에 있었다.^{2, 3, 7, 11, 24, 27, 30)} 이와 같이 時間補正值는 大體로 10초 未滿으로서 時間補正值를 考慮했음에와 하지 않았을 경우를 比較하던 熱傳導係數의 誤差는 5% 以下로 다른 誤差

穀物の熱傳導係數에 관한 研究

에 비해 크지 않기 때문에 無視할 수 있다고 報告한 學者도 있다.

D'Eustachio 等¹¹⁾은 Probe의 直徑과 길이가 有限한데서 생기는 誤差는 Probe의 直徑을 줄이고 熱線單位 길이에 投入하는 熱量을 줄이므로써 이 誤差는 無視할 수 있다고 報告하였으며 正確한 溫度의 測定을 爲하여 高感度(high sensitivity)의 記錄裝置를 利用한 바 있다.

Sweat 等¹²⁾은 닭고기의 熱傳導係數 測定을 爲한 작은 Probe(直徑 0.813mm, 길이 38.1mm)를 製作하여 時間補正值를 無視하고 實驗을 遂行하였는 바 그 理由는 Probe가 매우 작고 試料와 잘 接觸되기 때문이라고 報告하였으며 軸方向의 熱傳導에 對하여도 Probe의 길이 對 直徑의 비가 매우 크기 때문에 이로 因한 誤差는 無視할 수 있었으며 Black-

welle¹³⁾은 그 誤差는 0.1% 以下라고 報告한 바 있다.

Hooper와 Chang¹⁴⁾은 Probe의 直徑에 대한 誤差를 줄이기 위하여 熱線위에 直接 熱電帶를 設置하여 實驗했던 바 滿足스러운 結果를 얻었다고 發表하였다.

그후 Kazarian²⁴⁾은 穀物の 熱傳導係數 測定을 爲하여 熱線에 直接 熱電帶를 設置하여 實驗하였으며 最近에는 이 方法과 Probe에 依한 方法이 穀物の 熱傳導係數 測定에 가장 一般의인 方法으로 알려져 있다. 그러나 이러한 方法에서 問題가 되는 것은 圓筒의 直徑, 길이, 熱線의 抵抗, 適用電流, 熱線에 投入되는 熱量 등인데 이와 같은 裝置에 對한 研究 結果를 要約하면 Table 1.과 같다.

Table 1. Specifications of apparatus for measuring thermal conductivity of grain by line source method

Cylinder (material & size) (m)	Resistance (ohm/m)	Current (Amp)	Input power (W/m)	Sample materials	Heating time(min)	References	Remarks
Alφ=0.1778	0.49	0.5—0.55	0.123—0.148	Soybean	10	Jasantky	Probe method
Alφ=0.2032 L=0.4667	3.28	—	—	Peanuts	10	Suter	"
Alφ=0.1524 L=0.7620	3.79	0.25—0.50	0.237—0.948	Rapeseed	10	Bilanski	"
Alφ=0.1524 L=0.3048	—	—	—	Rough rice	5	Wratten	Cylinder & Heating wire
Alφ=0.1780 L=0.4000	6.63	0.36±0.002	0.859	Rapeseed	—	Moysey	"
Brass φ=0.1397 L=0.2794	17.88	0.49—0.56	4.24—8.76	Corn, Wheat	10	Kazarian	"
φ=0.2032 L=0.4572	6.76	0.80	4.33	Sorghum	10—15	Sharma	"
Alφ=0.1270 L=0.3048	2.85	—	—	Rough rice	5	Morita	"

나. 穀物の 熱傳導係數

熱傳導係數의 여러가지 測定方法과 各種材料에 對한 研究結果는 많이 報告되었지만 穀物은 物理的인 特性이 매우 不均一하고 溫度, 含水率, 空隙率 等과 試料에 따라 그 熱傳導係數의 差가 심하고 熱傳導現象이 複雜하기 때문에¹¹⁾ 이에 關한 研究結果는 드물다.

Kazarian²⁴⁾은 밀과 옥수수 含水率을 0.68% ~ 20.30%의 範圍에서 熱傳導係數를 測定했던 바 含水率에 따라 熱傳導係數는 增加하였으며 다음과 같이 含水率의 1次式으로 表示하였다.

$$K_w = 0.1170 + 0.001132M \quad (21^\circ\text{C} - 44^\circ\text{C}) \dots (2-9)$$

$$K_c = 0.1409 + 0.001118M \quad (22^\circ\text{C} - 53^\circ\text{C}) \dots (2-10)$$

여기서, K_w, K_c : 밀, 옥수수의 熱傳導係數 (W/m²K)

M : 含水率(% , w.b)

Wratten 等¹⁴⁾은 벼의 含水率 9.9%에서 19.3%까지 變化시키면서 熱傳導係數를 測定한 바 있는데 그 關係를 다음과 같은 含水率의 式으로 表示하였다.

$$K_m = 0.0866 + 0.001327M \dots\dots\dots (2-11)$$

여기서, K_m : 벼(中粒種)의 熱傳導係數(W/m²K)

M : 含水率(% , w.b)

Chandra 等¹⁵⁾은 含水率을 4.4%~22.5%로 變化시키고 試料의 溫度를 -27°C에서 20°C까지 變化시키면서 熱傳導係數를 測定하였으며 이 實驗結果로 부터 다음과 같은 關係式을 얻었다.

$$K_w = 0.1394 + 0.001197M \dots\dots\dots (2-12)$$

여기서, K_w : 밀의 熱傳導係數(W/m²K)

M : 含水率(% , w.b)

Sharma와 Thompson⁹⁾의 實驗에 依하면 수수의 熱傳導係數는 平均溫度 24°C, 含水率 1%의 경우 0.0967W/m²K였고, 含水率 22.5%에서 0.1331W/m²K로서 이들의 關係式을 다음과 같은 式으로 表示하였다.

$$K_s = 0.0976 + 0.001450M \dots\dots\dots (2-13)$$

여기서, K_s : 수수의 熱傳導係數(W/m²K)

M : 含水率(% , w.b)

Suter 等⁶⁾은 穀物과 같이 粒子形이고 含水率이 높은 試料의 熱傳導係數 測定에는 Line source에 依한 方法이 가장 效果的이나 Probe에 依한 方法은 粒子가 큰 땅콩과 같은 경우에는 不適當하다고 하였다. 땅콩의 熱傳導係數는 溫度와 含水率이 增加함에 따라 直線의으로 增加하며 다음과 같은 式을 提示하였다.

$$K_G = 0.0183 + 0.3653 \times 10^{-4} T (7.4\%, w.b) \dots (2-14)$$

$$K_P = 0.0418 + 1.6346 \times 10^{-4} T (6.5\%, w.b) \dots (2-15)$$

$$K_P = 0.1038 + 8.6537 \times 10^{-4} M (25^\circ C) \dots\dots\dots (2-16)$$

여기서, K_G : 땅콩 ground kernel의 熱傳導係數 (W/m²K)

K_P : 땅콩 pod의 熱傳導係數(W/m²K)

T : 땅콩의 溫度(°C)

M : 땅콩의 含水率(% , w.b)

Bilanski와 Fisher³⁾는 Line source 方法은 試料의 對流에 依한 熱傳達을 最少로 할 수 있고 輻射에 依한 熱傳達은 거의 無視할 수 있다고 報告하였으며 油菜의 경우 試料의 溫度와 含水率이 增加하면 그 熱傳導係數도 增加한다고 報告하였다.

Moysey 等²⁾은 油菜의 熱傳導係數는 옥수수나 밀

의 熱傳導係數보다 작은 값으로 19.4°C에서 0.0969 (0.75%)~0.1197W/m²K(15.5%)였으며 1.7°C에서 0.0929(0.75%)~0.1129(19.64%)W/m²K로 報告하였다.

Morita¹⁾는 벼(短粒種)의 含水率을 11.23%에서 23.68%까지 變化시키면서 熱傳導係數를 測定하여 다음과 같은 式으로 表示하였다.

$$K = 0.09999 + 0.01107M \dots\dots\dots (2-17)$$

여기서, K : 벼의 熱傳導係數(W/m²K)

M : 含水率(% , w.b)

3. Line source 方法에 依한 熱傳導係數의 測定理論

이 方法은 穀物과 같이 그 粒子의 形狀이 不均一하고 含水率의 變化가 熱特性에 影響을 미칠 憂慮가 있는 試料의 熱傳導係數나 熱擴散係數의 測定에 많이 利用되는 方法으로서 그 裝置는 알미늄으로 된 圓筒의 中心軸과 一致하도록 熱線을 設置하고 試料을 圓筒에 넣은 후 一定量의 電流을 熱線에 흐르게 하여 그 熱이 圓筒의 半徑方向으로 傳導될 때 熱線 溫度의 時間에 따른 變化를 測定하므로써 試料의 熱傳導係數를 計算할 수 있는 裝置이다. 이 方法에 依하여 熱傳導係數를 計算할 수 있는 式의 誘導過程은 다음과 같다.

非定常狀態下에서 內部에 熱源이 없는 一般의 熱傳導方程式은 다음과 같은 Fourier의 方程式으로 表示된다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left\{ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right\} \dots\dots\dots (3-1)$$

式(IV-1)을 圓筒座標(cylindrical coordinate)로 轉換하면

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

이 된다.

여기서, r : 圓筒中心에서 半徑方向으로 測溫點까지의 거리(m)

θ : 圓周角(rad)

T : 溫度(°K)

t : 時間(sec)

α : 熱擴散係數(m²/s)

式(3-2)에서 熱은 圓筒의 軸方向이나 圓周角(θ)의 方向으로는 傳導되지 않고 半徑方向으로만 傳導된다고 하면, $\frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} = 0, \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0$ 이 된다. 따라서 式

(3-2)는

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

으로 된다.

式(3-3)의 溫度(T)에 對한 一般解는 다음과 같은 無限級數로 表示된다.⁴⁷⁾

$$T = \frac{Q}{2\pi K} \int_0^\infty \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta = \frac{Q}{2\pi K} I(rn) \dots\dots\dots (3-4)$$

여기서, Q: 熱線單位 길이 및 時間當 投入熱量 (W-m)

K: 熱傳導係數(W/m°K)

I: 無限級數

$$n = \frac{1}{2\sqrt{\alpha t}} \text{ (m}^{-1}\text{)}$$

$$\beta = \frac{r}{2\sqrt{\alpha t}} \text{ (無次元量)}$$

式(3-4)에서 無限級數 I(rn)은 다음과 같이 展開 된다.

$$I(rn) = C - \ln(rn) + \frac{(rn)^2}{2} - \frac{(rn)^4}{8} + \dots\dots (3-5)$$

式(3-5)에서 (rn)의 값이 充階히 작다고 하면 (rn)의 二次項 以上은 無視할 수 있으므로 式(3-5)는 다음과 같이 表示된다.

$$I(rn) = C - \ln(rn) \dots\dots\dots (3-6)$$

따라서 式(3-4)는 다음과 같은 式으로 表示된다.

$$T = \frac{Q}{2\pi K} \{ C - \ln(rn) \} \dots\dots\dots (3-7)$$

式(3-7)에서 時間 t₁에서 t₂로 變하는 동안 溫度의 變化가 T₂-T₁이었다면 式(3-7)은 다음과 같이 表示될 수 있다.

$$T_2 - T_1 = \frac{Q}{2\pi K} \{ \ln(rn_2) - \ln(rn_1) \} = \frac{Q}{2\pi K} \ln \frac{n_2}{n_1} \dots\dots\dots (3-8)$$

式(3-8)에서 $n = \frac{1}{2\sqrt{\alpha t}}$ 을 代入하고 整理하면

$$T_2 - T_1 = \frac{Q}{4\pi K} \ln \frac{t_2}{t_1} \dots\dots\dots (3-9)$$

이 된다. 따라서 熱傳導係數는 다음 式으로 表示된다.

$$K = \frac{Q \ln(t_2/t_1)}{4\pi(T_2 - T_1)} = \frac{i^2 R \ln(t_2/t_1)}{4\pi(T_2 - T_1)} \dots\dots\dots (3-10)$$

여기서, T₁, T₂: 時間 t₁, t₂에 對應하는 溫度(°K)
i: 電流(amp.)

R: 熱線單位길이當抵抗(ohm/m)

4. 材料 및 方法

가. 實驗材料

供試된 穀物の 熱傳導係數를 究明키 위하여 變化시켰던 各 變數들의 變化 範圍는 Table 2.와 같다.

Table 2. Ranges of initial temperature, moisture content and porosity varied for measuring the thermal conductivity and diffusivity of grain.

Grain	Initial temperature(°C)	Moisture content (% , wb)	Porosity (%)
Rough rice			
Akibare	2.80-35.40	11.52-28.75	37.80-47.85
Minchikari	3.00-38.00	8.45-31.80	38.17-47.78
Milyang 15	3.00-36.00	7.21-25.64	41.86-48.48
Milyang 23	3.00-36.00	10.77-32.20	38.39-46.73
Milyang 21	3.00-35.00	5.84-28.20	40.10-47.90
Suweon 264	4.00-33.00	5.64-29.92	41.03-48.72
Barley			
Covered	3.00-32.20	8.26-32.53	41.04-47.58
Naked	5.00-36.40	7.87-27.96	26.86-39.42

나. 實驗裝置

穀物の 熱傳導係數를 測定키 위해 두께 2mm의 알루미늄板으로 內徑 0.13m, 길이 0.35m의 圓筒을 製作하고 圓筒의 上下에는 熱損失을 防止하기 爲해

2.54cm의 Stylofoam으로 斷熱시켰으며 그 外面에 는 두께 約 9mm의 Bakelite cover를 6개의 bolt로 圓筒의 Flange에 固定시켰다. Bakelite cover에는 外徑 3mm의 고무 ring을 半程度 埋設하여 圓筒의 Flange에 附着했을때 氣密이 維持되도록 하였다.

實驗裝置의 配置圖 및 圓筒의 詳細圖는 Figs. 4, 5.에서 보는 바와 같고 그들의 諸元은 Table 3과 같다.

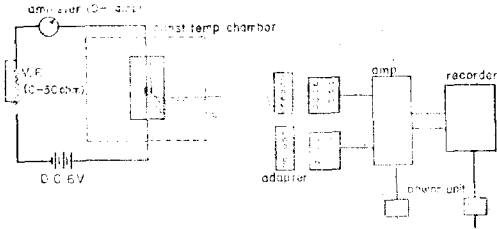


Fig. 4. Schematic diagram of the experimental apparatus arrangement.

Table 3. Specifications of experimental apparatus and instruments for measuring the thermal conductivity and diffusivity of grain by the line source method.

Aluminum cylinder(m)		φ0.13 H0.35
Heating wire	Length(m)	0.30
	Diameter(m)	0.00029
	Resistance(ohm/m)	18.40
	Current(amp.)	0.40-0.45
Power source(v)		D.C. 6
Current	Control	0-50 ohm variable resistor
	Measurement	0-1.0 D.C.ammeter
Temperature gage		KTB-6-12-A1
Adapter Recorder		TA-12UA Kyowa RMV-33N

다. 實驗方法

1) 溫度의 測定

穀物의 初期溫度는 精度 0.2°C의 水銀溫度計로 測定하였으며 實驗始作後 任意의 時間에서의 穀物溫度는 Strain gage system을 利用하여 測定하였다. Strain gage system을 利用한 溫度의 測定은 熱線中央部에 두께 0.2mm의 銅板을 9×20mm의 크기로 단들어 固定시키고 그 위에 溫度 sensor을 附着시켰다. 모든 實驗은 穀物의 初期溫도와 비슷한 溫度의 恒溫室 內에서 3反覆으로 遂行되었으며 Strain變化와 溫度와의 關係는 製作會社에서 제공한 다음 式에 依하여 求하였다.

$$T_1 = T_0 + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_0}{10} \dots \dots \dots (4-1)$$

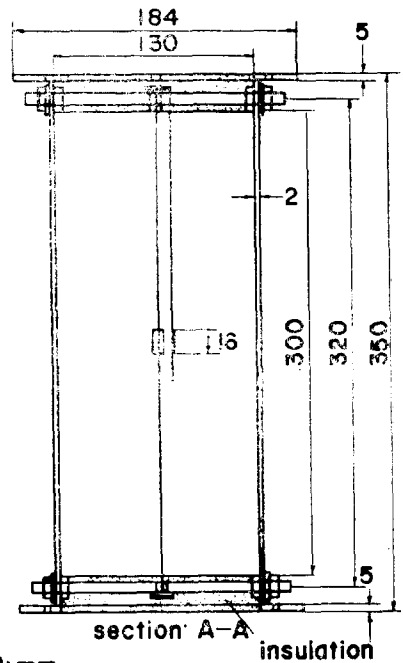
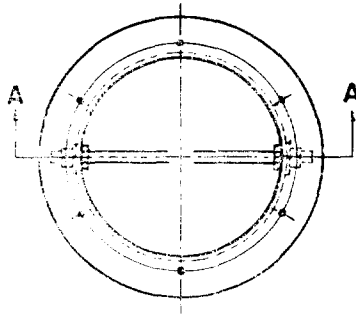


Fig. 5. Details of the aluminum cylinder for measuring the thermal conductivity and thermal diffusivity.

여기서, T_1 : Strain ϵ_1 일때의 溫度(°C)

T_0 : 初期溫度(°C)

ϵ_1 : 任意의 時間에서의 Strain($\times 10^{-6}$)

ϵ_0 : 初期溫度에서의 Strain($\times 10^{-6}$)

2) 熱傳導係數의 計算

試料의 加熱時間은 10-11分으로 하였으며 熱傳導係數는 1-10分, 1.5-10分, 2-10分, 2.5-10分 區間에 對應하는 溫度로서 式(3-10)을 利用하여 各 各 計算하고 그 平均值를 주어진 實驗條件에서의 熱傳導係數로 看做하였다.

5. 結果 및 考察

가. 水銀溫度計와 Strain gage system에 의한 測定溫度的 比較

本 研究에서 主된 溫度 測定裝置로 使用된 것이 Strain gage system이었으므로 이 測定裝置의 精度를 檢定하기 爲하여 蒸溜水를 0°C에서 44°C까지 加熱하면서 두 方法으로 同時에 溫度를 測定하였다.

Fig. 6.에서 보는 바와 같이 Strain gage system에 의한 測定溫度가 水銀溫度計에 의하여 測定된 것보다 약간 높았으나 그 差異는 0~0.8°C로서 두 測定裝置間에 別差異가 없었다.

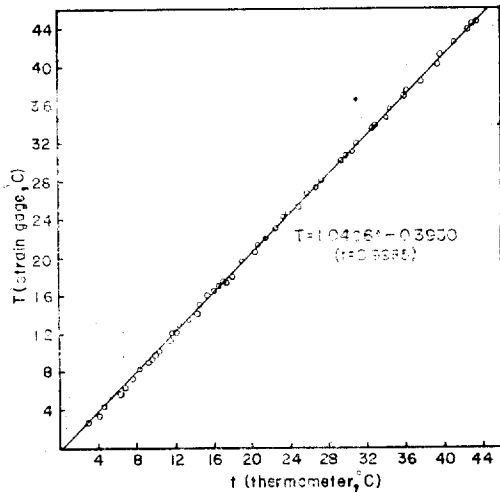


Fig. 6. Comparison of temperature between the strain gage system and the mercury thermometer.

나. 時間補正值가 熱傳導係數에 미치는 影響

時間補正值는 熱傳導係數를 計算하기 爲하여 誘導된 式에서 圓筒이나 熱線의 長이가 無限하고 圓筒의 中心軸線上에 設置된 熱線으로부터 熱은 半徑方向으로만 傳導된다는 假定과 式(3-5)에서 2次項以上은 無視한데서 오는 誤差 等を 補正키 爲하여 必要하다. (2, 9, 11, 27, 30)

Fig. 7.은 時間補正值를 求하기 爲하여 實驗條件이 다른 3경우에 對하여 Log(time)-temperature의 曲線을 圖示한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 이 曲線들은 測溫 始作後 約 30~40秒後부터는 直線으로 되었으며 時間補正值는 8秒未滿으로 다른 研究

者들이 報告한 0.1~8.5秒와 類似하게 나타났다.

時間補正值는 平均 7秒로서 이를 考慮하여 熱傳導係數를 計算한 結果 이를 無視한 경우보다 約 4.9% 더 큰 값을 나타내었다. 그러나 Jasansky 등²⁾이 報告한 바와 같이 時間補正值를 考慮한다고 하더라도 理想的인 假定下에서 出發한 測定裝置의 缺點을 完全히 補完할 수 없으므로, 本 研究에서도 時間補正值를 無視하고 熱傳導係數를 求하였다.

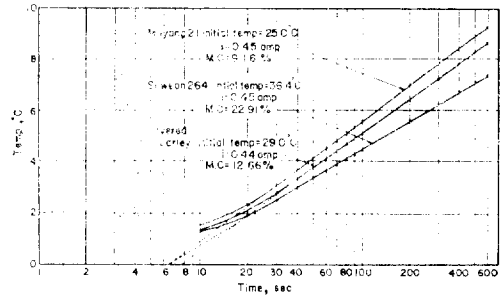


Fig. 7. Logarithm of time versus temperature rise above ambient for a typical test of thermal conductivity.

다. 熱傳導係數의 模型

本 研究에서는 穀物の 熱傳導係數에 큰 影響을 미치는 穀物の 含水率, 初期溫度, 空隙率 等を 變數로 하는 熱傳導係數의 模型을 얻기 爲하여 Table 4와 같은 4種類의 模型을 가지고 實驗結果를 分析하였다. 分析方法是 Digital computer를 利用한 Stepwise method를 適用하였다.

Table 4. Models considered to predict the thermal properties of grain.

Model	Equation
Linear	$K = A + aT + bM + cP$
Exponential	$K = BT^a M^b P^c$
Quadratic	$K = m + aT + bM + cP + dTM + eMP + fTP + gT^2 + hM^2 + nP^2$
Quadratic without porosity (Q.W.P.)	$K = m + aT + bM + cTM + dT^2 + eM^2$

Note: K = thermal conductivity (W/m² K)

A, B, a, b, c, d, e, f, g, h, m, n = constants

T = initial temperature (°C)

M = moisture content (% w.b)

P = porosity (%)

Tables 5, 6, 7, 8은 各 模型에 關한 回歸方程式을 表示한 것이다. 이들 表에서 보는 바와 같이 方程式에 對한 分散分析 結果 4模型 모두 1%의 水準에서도 有意性이 認定되었으나 決定係數(Coefficient

of determination) Exponential, Linear, Quadratic without porosity, Quadratic 模型의 順으로 점점 커짐을 알 수 있었다.

Table 5. Non-linear multiple regression equations of the thermal conductivity as a function of initial temperature, moisture content and porosity of grain.

Model Coefficient Grain	$K = m + aT + bM + cP + dTM + eMP + fTP + gT^2 + hM^2 + nP^2$				
	m	a	b	c	d
Akibare	855.2014×10^{-4}	224.7817×10^{-4}	—	—	-1.0448×10^{-4}
Minehikari	5338.2614×10^{-4}	—	—	-96.2056×10^{-4}	—
Milyang 15	$-47514.9667 \times 10^{-4}$	-12.6283×10^{-4}	739.5393×10^{-4}	1922.2434×10^{-4}	0.4426×10^{-4}
Milyang 23	$37082.6314 \times 10^{-4}$	258.9239×10^{-4}	-584.2124×10^{-4}	$-1423.3665 \times 10^{-4}$	-1.3231×10^{-4}
Milyang 21	$-105810.1115 \times 10^{-4}$	286.9712×10^{-4}	1417.4848×10^{-4}	4251.3508×10^{-4}	-2.3320×10^{-4}
Suweon 264	$-125858.5982 \times 10^{-4}$	249.6585×10^{-4}	840.7835×10^{-4}	5085.2423×10^{-4}	-1.0300×10^{-4}
Covered barley	$18636.7313 \times 10^{-4}$	82.6791×10^{-4}	-70.9731×10^{-4}	-757.8360×10^{-4}	0.8579×10^{-4}
Naked barley	1021.7583×10^{-4}	28.4927×10^{-4}	-658.6732×10^{-4}	251.8594×10^{-4}	-1.3668×10^{-4}

Model Coefficient Grain						R ²
	e	f	g	h	n	
Akibare	—	-4.5662×10^{-4}	—	0.5021×10^{-4}	—	0.7816**
Minehikari	—	0.5847×10^{-4}	0.2561×10^{-4}	0.2922×10^{-4}	—	0.7096**
Milyang 15	-16.1703×10^{-4}	0.4048×10^{-4}	0.1379×10^{-4}	10.8261×10^{-4}	-20.3583×10^{-4}	0.9055**
Milyang 23	11.9943×10^{-4}	-5.0349×10^{-4}	0.1389×10^{-4}	2.0615×10^{-4}	13.9030×10^{-4}	0.8957**
Milyang 21	-28.2945×10^{-4}	-5.6585×10^{-4}	0.3126×10^{-4}	-3.9103×10^{-4}	-42.3167×10^{-4}	0.9401**
Suweon 264	-18.7718×10^{-4}	-5.5120×10^{-4}	0.7292×10^{-4}	2.0888×10^{-4}	-50.6139×10^{-4}	0.9256**
Covered barley	1.4661×10^{-4}	-2.6802×10^{-4}	1.0507×10^{-4}	0.0600×10^{-4}	8.2584×10^{-4}	0.9471**
Naked barley	22.0312×10^{-4}	-0.7009×10^{-4}	0.9162×10^{-4}	-3.9613×10^{-4}	-7.6002×10^{-4}	0.8872**

Table 6. Non-linear regression equations of the thermal conductivity as a function of initial temperature and moisture content of grain.

Model Coefficient Grain	$K = aT + bM + cTM + dT^2 + eM^2$		
	m	a	b
Akibare	1826.0202×10^{-4}	—	-99.0462×10^{-4}
Minehikari	910.5935×10^{-4}	2.0059×10^{-4}	13.0035×10^{-4}
Milyang 15	1071.2132×10^{-4}	6.5854×10^{-4}	-30.9133×10^{-4}
Milyang 23	999.9857×10^{-4}	2.8213×10^{-4}	-6.4276×10^{-4}
Milyang 21	1096.5588×10^{-4}	-2.8533×10^{-4}	-18.7351×10^{-4}
Suweon 264	1929.7733×10^{-4}	-34.7991×10^{-4}	-93.4163×10^{-4}
Covered barley	1412.5474×10^{-4}	-31.5055×10^{-4}	-16.1917×10^{-4}
Naked barley	2105.8966×10^{-4}	-8.7433×10^{-4}	-84.0484×10^{-4}

Model Coefficient Grain	K = BT ^a M ^b P ^c			R ²
	c	d	e	
Akibare	—	0.3668 × 10 ⁻⁴	2.9885 × 10 ⁻⁴	0.7448**
Minehikari	0.0059 × 10 ⁻⁴	0.1858 × 10 ⁻⁴	0.0115 × 10 ⁻⁴	0.6780**
Milyang 15	0.4491 × 10 ⁻⁴	0.0814 × 10 ⁻⁴	1.2858 × 10 ⁻⁴	0.8301**
Milyang 23	0.5930 × 10 ⁻⁴	0.0364 × 10 ⁻⁴	0.3236 × 10 ⁻⁴	0.8327**
Milyang 21	0.1705 × 10 ⁻⁴	0.4487 × 10 ⁻⁴	1.1248 × 10 ⁻⁴	0.9115**
Suweon 264	0.8706 × 10 ⁻⁴	0.7630 × 10 ⁻⁴	2.7557 × 10 ⁻⁴	0.9063**
Covered barley	0.6548 × 10 ⁻⁴	0.9401 × 10 ⁻⁴	0.3381 × 10 ⁻⁴	0.9178**
Naked barley	-0.2006 × 10 ⁻⁴	0.7598 × 10 ⁻⁴	2.3351 × 10 ⁻⁴	0.6398**

Table 7. Exponential regression equations of the thermal conductivity as a function of initial temperature, moisture content and porosity of grain.

Model Constant Grain	K = BT ^a M ^b P ^c				R ²
	B	a	b	c	
Akibare	10396.3981	0.1182	-0.0576	-3.0632	0.7159**
Minehikari	29.5552	0.0935	0.0316	-1.5490	0.6173**
Milyang 15	141504.7706	0.1958	-0.1236	-3.7121	0.8181**
Milyang 23	41.5495	0.1809	0.0103	-1.6649	0.8207**
Milyang 21	4685.8700	0.0929	-0.1197	-2.7608	0.8327**
Suweon 264	489604.1468	0.1051	-0.1322	-3.9668	0.6580**
Covered barley	126.0185	0.1325	0.1952	-2.0389	0.6681**
Naked barley	0.6169	0.1465	0.0842	-0.5630	0.5175**

Table 8. Linear multiple regression equations of the thermal conductivity as a function of initial temperature, moisture content and porosity.

Grain	Regression equation	Simple correlation coefficient	Partial correlation coefficient	R ²
Akibare	K = 0.5662 + 0.0013T - 0.0004M - 0.0107P	R _{KT} = 0.5080 R _{KM} = 0.5680 R _{KP} = 0.6870	R _{KT·MP} = 0.7215 R _{KM·TP} = -0.0883 R _{KP·TM} = 0.5241	0.7625**
Minehikari	K = 0.4125 + 0.0009T - 0.0006M - 0.0069P	R _{KT} = 0.6067 R _{KM} = 0.5892 R _{KP} = -0.6133	R _{KT·MP} = 0.7144 R _{KM·TP} = -0.0844 R _{KP·MM} = 0.2941	0.6954**
Milyang 15	K = 0.3951 + 0.0017T + 0.0002M - 0.0068P	R _{KT} = 0.7516 R _{KM} = 0.3976 R _{KP} = -0.4111	R _{KT·MP} = 0.9404 R _{KM·TP} = 0.4550 R _{KP·TM} = 0.7493	0.8321**
Milyang 23	K = 0.3527 + 0.0019T + 0.003M - 0.0058P	R _{KT} = 0.6996 R _{KM} = 0.4893 R _{KP} = -0.3560	R _{KT·MP} = -0.9627 R _{KM·TP} = -0.2066 R _{KP·TM} = -0.4686	0.8398**
Milyang 21	K = 0.5601 + 0.0011T - 0.0081M - 0.0096P	R _{KT} = 0.6770 R _{KM} = 0.7480 R _{KP} = -0.7764	R _{KT·MP} = 0.8332 R _{KM·TP} = -0.1840 R _{KP·TM} = -0.4542	0.8889**

Suweon 264	$K=0.4774+0.0011T+0.0001M-0.0058P$	$R_{KT}=0.3533$ $R_{KM}=0.6575$ $R_{KP}=-0.6973$	$R_{KT\cdot MP}=0.5837$ $R_{KM\cdot TP}=0.0164$ $R_{KP\cdot TM}=-0.1173$	0.6613**
Covered barley	$K=0.2190+0.0015T+0.0010M-0.0029P$	$R_{KT}=0.8046$ $R_{KM}=0.2165$ $R_{KP}=0.1423$	$R_{KT\cdot MP}=0.8607$ $R_{KM\cdot TP}=0.6615$ $R_{KP\cdot TM}=-0.2859$	0.7531**
Naked barley	$K=0.2158+0.0017T+0.0012M-0.0031P$	$R_{KT}=0.6780$ $R_{KM}=-0.0920$ $R_{KP}=-0.1533$	$R_{KT\cdot MP}=0.7520$ $R_{KM\cdot TP}=0.2338$ $R_{KP\cdot TM}=0.5079$	0.6112**

Figs. 8에서 15까지는 各供試穀物別로 4種類의 模型을 比較한 것이다. 여기서 熱傳導係數의 反應表面(response surface)은 空隙率을 一定한 값으로 固定하고 穀物의 初期溫度와 含水率을 變數로 하여 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 어떤 模型의 경우는 穀物의 含水率이나 初期溫度가 增加함에 따라 熱傳導係數는 減少하는 경우도 있는바 이러한 模型으로는 穀物의 熱傳導係數를 合理的으로 說明할 수 없을 것이다. 왜냐하면 一般적으로 非金屬性의 固體나 液體는 그 溫度가 增加함에 따라 熱傳導係數는 恒常 增加하고 常溫에서는 熱傳導係數가 작은 物質도 溫度의 增加에 따라 그 熱傳導係數는 增加하기 때문이다.¹⁷⁾ 따라서 穀物의 熱傳導係數도 그의 初期溫度가 增加함에 따라 당연히 增加해야 할 것이다. 이 事實은 Bilanski 等²¹⁾ Hosokawa 等²⁰⁾ Suter 等²²⁾의 研究結果로서 뒷받침 될 수 있다.

또한 穀物의 含水率과 熱傳導係數와의 關係를 보면 물의 熱傳導係數는 常溫에서 $0.5521W/m^{\circ}K$ ²³⁾로서 穀物의 熱傳導係數 $0.0967-0.2058W/m^{\circ}K$ 보다 約 3倍가 크기때문에 穀物의 含水率이 增加하면 그 熱傳導係數도 당연히 增加해야 할 것이다.

따라서 穀物의 熱傳導係數의 模型으로서 適合한

Table 9. The types of model selected for predicting the thermal conductivity of the grain

Grain	Model
Akibare	Quadratic
Minchikari	Quadratic
Milyang 15	Linear
Milyang 23	Quadratic without porosity
Milyang 21	"
Suweon 264	Quadratic
Covered barley	"
Naked barley	Linear

것은 穀物의 初期溫度와 含水率에 따라 熱傳導係數가 항상 增加하는 模型이어야 한다.

各供試 穀物別로 4種類의 模型中 위의 條件을 滿足시킴과 同時에 決定係數가 가장 큰 模型을 求하였으므로 그 結果를 要約하면 Table 9와 같다.

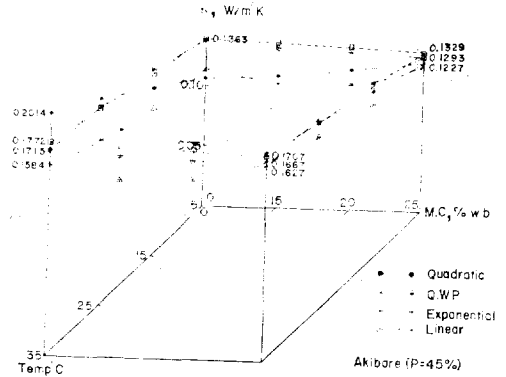


Fig. 8. Response surface for the thermal conductivity of Akibare as a function of initial temperature and moisture content at a porosity of 45%.

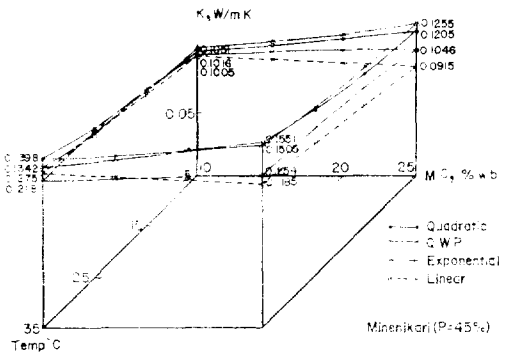


Fig. 9. Response surface for the thermal conductivity of Minehikari as a function of initial temperature and moisture content at a porosity of 45%.

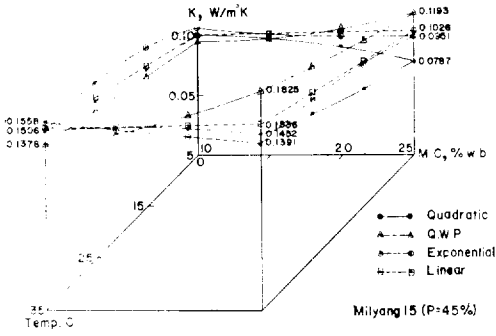


Fig. 10. Response surface for the thermal conductivity of Milyang 15 as a function of initial temperature and moisture content at a porosity of 45%.

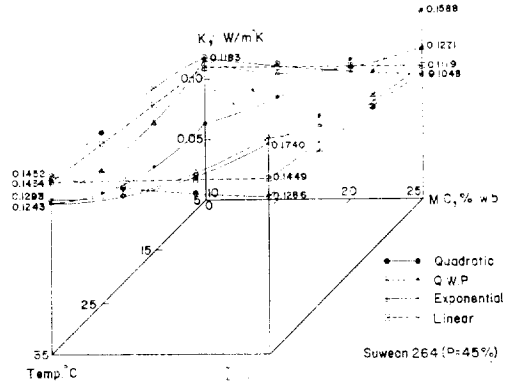


Fig. 13. Response surface for the thermal conductivity of Suweon 264 as a function of initial temperature and moisture content at a porosity of 45%.

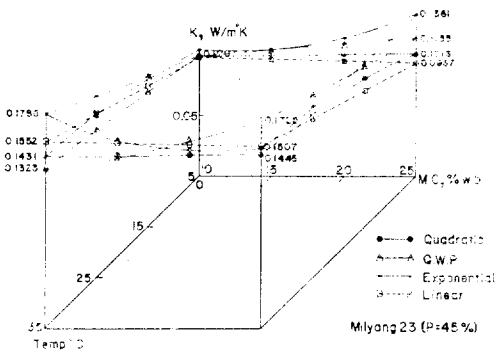


Fig. 11. Response surface for the thermal conductivity of Milyang 23 as a function of initial temperature and moisture content at a porosity of 45%.

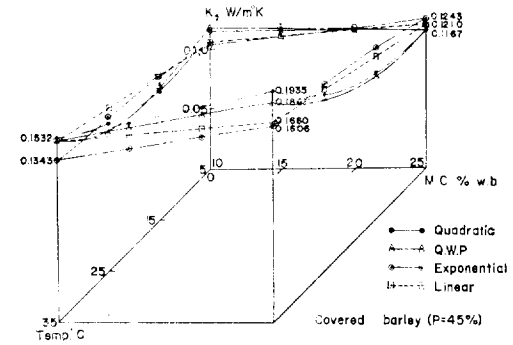


Fig. 14. Response surface for the thermal conductivity of Covered barley as a function of initial temperature and moisture content at a porosity of 45%.

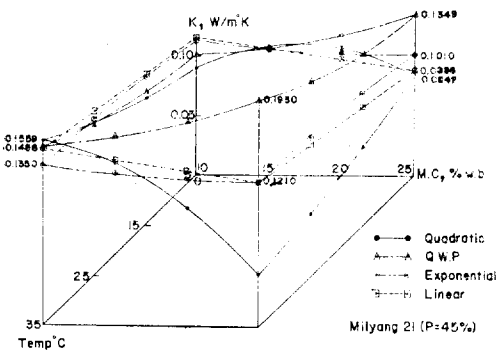


Fig. 12. Response surface for the thermal conductivity of Milyang 21 as a function of initial temperature and moisture content at a porosity of 45%.

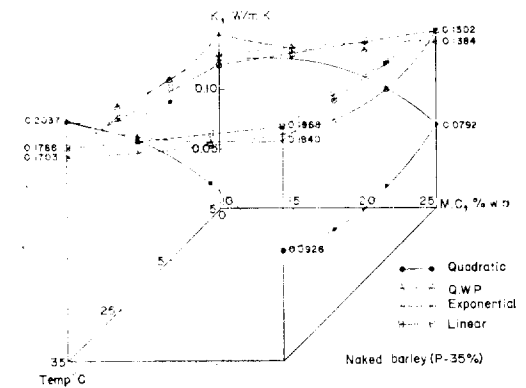


Fig. 15. Response surface for the thermal conductivity of Naked barley as a function of initial temperature and moisture content at a porosity of 35%.

벼의 熱傳導係數에 關한 模型을 一般化하기 爲하여 物理的 特性이 서로 비슷한 品種인 Japonica型벼와 統一型벼에 對한 熱傳導係數의 模型을 各各 求하였다. 여기에서도 Table 4의 模型을 各各 適用했던 바 Japonica型벼나 統一型벼의 決定係數는 各各의 供試穀物에 對한 模型에서보다 약간 작은 값을 보였으며 특히 Linear, Exponential模型에서는 아주 작은 값을 나타내었다. 따라서 벼에 對한 熱傳導係數의 模型은 Japonica型벼의 경우 空際率을 제외한 Quadratic模型, 統一型벼의 경우 Quadratic模型이 適合하였다. 이들 模型은 Table 10에 表示된 바와 같으며 이를 圖示하면 Fig. 16과 같다.

供試穀物의 熱傳導係數는 實驗條件에 따라 다르나 大體로 稈麥이 가장 큰 0.1208~0.2058W/m²K 이었고, 大麥 0.1138~0.1724W/m²K, Japonica型벼

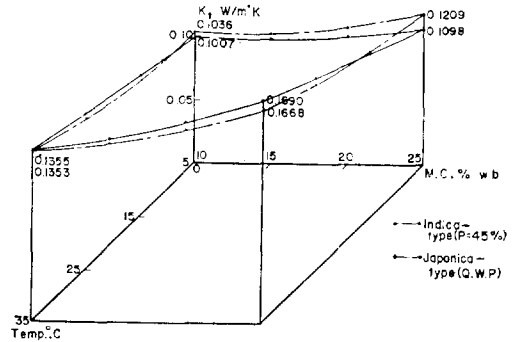


Fig. 16. Response surface for the thermal conductivity of rough rice as a function of initial temperature and moisture content

Table 10. The models selected for predicting the thermal conductivity of rough rice.

Rough rice	Equation	R ²
Indica-type	$K = 8377.5878 \times 10^{-4} - 86.0623 \times 10^{-4}T - 92.2749 \times 10^{-4}M - 251.9536 \times 10^{-4}P + 0.6830 \times 10^{-4}TM + 1.4209 \times 10^{-4}MP + 1.9783 \times 10^{-4}TP + 0.0458 \times 10^{-4}T^2 + 0.8854 \times 10^{-4}M^2 + 2.0305 \times 10^{-4}P^2$	0.7145**
Japonica-type	$K = 1239.2730 \times 10^{-4} - 5.4768 \times 10^{-4}T - 32.1245 \times 10^{-4}M + 0.3645 \times 10^{-4}TM + 0.3096 \times 10^{-4}T^2 + 1.1950 \times 10^{-4}M^2$	0.7916**

0.0912~0.1864W/m²K, 統一型벼 0.0861~0.1774 W/m²K로서 가장 작은 값을 나타내었다. 供試穀物의 熱傳導係數는 稈麥이 가장 큰 값으로 나타났고, 벼에 있어서도 Japonica型벼가 統一型벼보다 약간 큰 값으로 나타났으나 그 差異는 크지 않았다. 이들은 化學的 成分이 비슷함에도 이러한 差異를 보이는 것은 그 物理的인 形狀이 다르기 때문에 생기는 現象으로 보아야 할 것이다. 穀物의 形狀을 端的으로 나타내는 球形率(sphericity)을 보면 稈麥은 62%, Japonica型벼 51%, 統一型벼 45%로서 球形率이 큰 穀物의 경우가 堆積된 狀態에서 接觸面積이 크기 때문에 그 熱傳導係數도 큰것으로 思料된다.

라. 穀物의 初期溫度, 含水率, 空際率과 熱傳導係數와의 關係

Table 8에서 보는 바와 같이 偏相關係數는 모든 供試穀物에서 溫度와 熱傳導係數間의 相關係數가 다른 因子들 間의 相關係數보다 컸고 單純相關係數도 大部分의 供試穀物에서 溫度와 熱傳導係數와의 相關係數가 컸으므로 보아 穀物의 熱傳導係數에는 含水率보다 溫度가 더 큰 影響을 미치고 있음을 알 수

있었다. 따라서 穀物의 熱傳導係數의 模型에는 含水率뿐만 아니라 溫度도 반드시 包含되어야 할 것으로 判斷된다.

空際率과 熱傳導係數와 關係는 Table 8에서 보는 바와 같이 空際率이 增加하면 熱傳導係數는 減少하는 것으로 나타났는데 이러한 現狀은 空際率이 增加함에 따라 空氣가 차지하는 空間이 많아지고 따라서 熱傳導係數가 0.0256W/m²K²⁵인 空氣가 斷熱材의 役割을 하기 때문인 것으로 判斷된다. 이와 같은 事實을 뒷받침하는 研究 結果로는 Duncan 등²⁰⁾, Farrall 등¹²⁾의 散物密度를 考慮하여 熱傳導係數를 究明한 것으로서 散物密度가 增加함에 따라 熱傳導係數도 增加하였다. 이것은 本 研究의 結果와도 一致하는 것으로 散物密度가 增加하면 空際率이 減少하여 空氣가 차지하는 空間이 줄어들기 때문인 것으로 判斷된다.

6. 結 論

Line source method를 利用하여 稈麥, 大麥, Japonica型벼 3品種, 統一型벼 3品種에 對한 初期溫

度, 含水率, 空隙率 등을 變化시키면서 熱傳導係數를 測定하고 이들 因子들이 熱傳導係數에 미치는 影響을 分析하였으며 이들을 變數로 하는 熱傳導係數의 模型을 求하였다. 그 結果를 要約하면 다음과 같다.

가. 本 實驗裝置의 時間補正值는 平均 約 7秒로 이를 無視하는데서 發生되는 誤差는 約 4.9%였으므로 이를 無視하더라도 熱傳導係數에는 큰 影響을 미치지 않는 것으로 判斷되었다.

나. 供試穀物の 熱傳導係數는 實驗條件에 따라 다르나 大體로 稈麥이 가장 큰 0.1208~0.2058W/m²K 이었고, 大麥 0.1138~0.1724W/m²K, Japonica型벼 0.0912~0.1864W/m²K, 統一型벼 0.0861~0.1774W/m²K이었다.

다. 供試穀物の 初期溫度와 含水率이 增加함에 따라 그 熱傳導係數도 增加하였으며 空隙率의 增加함에 따라서는 減少하는 傾向으로 나타났다.

라. 各供試穀物에 對하여, 穀物の 初期溫度, 含水率 및 空隙率을 變數로 하는 4가지 形態의 熱傳導係數 模型을 分析하여 이들 中에서 가장 適合한 模型을 求하였다. 또한 物理的 特性이 서로 類似한 Japonica型벼와 統一型벼에 對한 各各의 熱傳導係數 模型도 求하였다.

References

- Morita, Tobru and R.P. Singh. 1979. Physical and thermal properties of short-grain rough rice. Trans. of the ASAE 22(3) : 630—636.
- Moysey, E.B., J.T. Shaw, and W.P. Lampman. 1977. The effect of temperature and moisture on the thermal properties of rapeseed. Trans. of the ASAE 20(4) : 768—771.
- Bilanski, W.K. and D.R. Fisher. 1976. Thermal conductivity of rapeseed. Trans. of the ASAE 19(4) : 788—791.
- Misener, G.C. and G.C. Shove. 1976. Simulated cooling of potatoes. Trans. of the ASAE 19(5) : 945—961.
- Reidy, G.A. and A.L. Rippen. 1971. Methods for determining thermal conductivities in foods. Trans. of the ASAE 14(2) : 248—254.
- Suter, D.A., K.K. Agrawal, and B.L. Clary. 1975. Thermal properties of peanut pods, hulls and kernels. Trans. of the ASAE 18(2) : 370—375.
- Jasansky, A. and W.K. Bilanski. 1973. Thermal conductivity of whole and ground soybeans. Trans. of the ASAE 16(1) : 100—103.
- Qashou, M. S., R.I. Vachon, and Y.S. Tou-Lou kian. 1973. Thermal conductivity of foods. Research Report. No. 2224 RP-62.
- Sharma, D.K. and T.L. Thompson, 1973. Specific heat and thermal conductivity of sorghum. Trans. of the ASAE 16(1) : 114—117.
- Sweat, V.E., C.G. Haugh, and W.J. Stadelman. 1973. Thermal conductivity of chicken meat at temperatures between -75 and 20°C. J. of Food Science 38 : 158—160.
- Chandra, S. and W.E. Huir. 1971. Thermal conductivity of spring wheat at low temperature. Trans. of the ASAE 14(4) : 644—646.
- Farrall, A.W., A.C. Chen, P.Y. Wang, and A.M. Dhanak. 1970. Thermal conductivity of dry milk in packed bed. Trans. of the ASAE 13(2) : 391—394.
- Yamada, Toyokazu. 1970. The thermal properties of potato. JSAC 44(12) : 587—590.
- Wratten, F.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.
- Matthews, F.V., Jr. and C.W. Hall. 1968. Method of finite differences used to relate changes thermal and physical properties of potatoes. Trans. of the ASAE 11(3) : 558—562, 565.
- Woodams, E.E. and J.E. Nowrey. 1968. Literature values of thermal conductivities of foods. Food Technology 22 : 494—502.
- Zemansky, Mark. W. 1968. Heat and thermodynamics. McGraw-Hill Kogakusha, LTD., 1-103.
- Hill, J.E., J.D. Leitman, and J.E. Sunderland. 1967. Thermal conductivity of various meats. Food Technology 21(Aug) : 91—96.

19. 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* 19(3) : 543—545.
20. Duncan, G.A., J.M. Bunn, and W.H. Hensen, Jr. 1966. Thermal conductivity of burley tobacco during the cure. *Trans. of the ASAE* 9(1) : 36—38.
21. Poppendick, H.F., R. Randall, J.A. Breeden, J.E. Charmbers, and J.R. Murphy. 1966. Thermal conductivity measurement and predictions for biological fluids and tissues. *Cryobiology* 3(4) : 318—327.
22. Lusk, G., M. Karel, and S.A. Goldblith. 1964. Thermal conductivity of some freeze-dried fish. *Food Technology* (Oct) : 121—124.
23. Tait, R.W.F. and B.A. Hills. 1964. Methods for determining liquid thermal conductivities. *Industrial and Engineering. Chemistry* 56(7) : 29—35.
24. Kazarian, E.A. 1962. Thermal properties of grain. Ph. D. Thesis, Michigan State University, East Lansing, Mich.
25. Lentz, C.P. 1961. Thermal conductivity of meats, fats, gelatin gels, and ice. *Food Technology* (May) : 243—247.
26. Blackwell, J.H. 1956. The axial-flow error in the thermal conductivity probe. *Canadian Journal of physics* 34 : 412—417.
27. Vos, B.H. 1955. Measurement of thermal conductivity by a nonsteady-state method. *Applied Science Research, Hague section A*, 5 : 425—438.
28. Haswell, G.A. 1954. A note on the specific heat of rice, oats and their products. *Cereal Chemistry* 31 : 341—343.
29. Hatfield, H.S. 1953. An apparatus for measuring thermal conductivity of animal tissue. *Journal of Physiology*.
30. Hooper, F.C. and S.C. Chang. 1953. Development of the thermal conductivity probe. *Trans. of the ASHVE* 59 : 463—472.
31. 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.
32. Hooper, F.C. and F.R. Lepper, 1950. Transient heat flow apparatus for the determination of thermal conductivities. *Trans. of the ASHVE* 56 : 309—324.
33. Oxley, T.A. 1944. The properties of grain in bulk. III. -The thermal conductivity of wheat maize, and oats. *Soc. Chem. Indus. J. Trans.* 63 : 53—57.
34. Bakke, A.L. and H. Stiles. 1935. Thermal conductivity of stored oats with different moisture content. *Plant Physiology* 19 : 521—524.