

벼의 物理的 및 熱的 特性에 관한 研究*

— 熱的 特性에 關하여 —

Study on the Physical and Thermal Properties of Rice Kernels — Thermal Properties —

高學均** · 盧祥夏** · 鄭琮薰**

Koh, Hak Kyun · Noh, Sang Ha · Chung, Jong Hoon

Summary

This study was intended to search the thermal properties of rice which are necessary in preventing qualitative and quantitative losses in the drying and milling processes. First, the coefficient of cubical thermal expansion of brown rice was measured, which is required for analyzing the internal stress of rice, and then theoretical thermal and moisture stresses were calculated.

The results are summarized as follows:

1. The coefficient of cubical thermal expansion of brown rice was about $2.81 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ in the temperature range of 10°C - 60°C .
2. When the shape of brown rice was assumed to be a sphere or a cylinder, maximum thermal stress due to temperature change of 20°C - 60°C was in the range of 25 - 100 kg/cm^2 . And maximum moisture stress was in the range of 450 - 650 kg/cm^2 when the drying temperature was 35°C , initial and final moisture contents of brown rice were 20% and 14% (w.b.), and the moisture diffusion coefficient was assumed to be $6.79 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{hr}$.
3. Consequently, it was concluded that crack formation in a rice kernel is mainly caused by moisture stress.

1. 緒 論

현재 우리나라에서는 收穫以後 米穀 損失量이 全体 生産量의 11% 이며 그 중에서도 搗精損失이 $5 \sim 6\%$ 에 달하고 있다(3). 또한 統一系品種은 穀物 그 자체의 特性으로 因하여 一般系品種보다도 胴割이 쉽게 發生되어 더욱 많은 損失을 招來하고 있다.

특히 穀物의 胴割은 機械的 要因 以外에 乾燥時의 熱風溫度와 乾燥速度 그리고 포장에서의 Sun-crack과 再吸濕에 의한 穀物内部의 水分分布差異 등으로 야기되어 搗精時에 白米 全体 生産量의 20% 에 달하는 碎米를 發生시키는 것으로 보고되고 있다(2). 外國의 경우, 自然乾燥를 한 原料의 碎米發生率은 $8.8 \sim 15\%$ 정도이며, 機械乾燥時에는 2% 정도로서 自然乾燥時에 碎米發生率이 훨씬 높은 것으로 보고되고 있다(1). 따라서 脫粒性이 강한 統一系品種

의 경우에는 脫穀損失과 乾燥時에 發生되는 質的 損失을 줄이기 위하여 生脫穀+人工乾燥法을 이용하는 作業體系가 더욱 勸奨되고 있다. 그러나 人工乾燥時에도 乾燥條件 및 乾燥方法에 따라 胴割이 많이 發生되고 過乾燥 現狀을 일으키는데, 이때 胴割의 主要因으로 熱風溫度와 乾燥速度를 들 수 있다. 낱알의 순간적인 溫度變化와 빠른 乾燥速度 即 乾燥時 갑작스런 溫度上昇으로 인하여 米粒 内部에 生기는 熱應力과 含水率의 變化로 생기는 水分應力들로 인하여 米粒에 胴割이 생기게 된다.

本 研究의 目的은 乾燥時에 發生되는 米粒의 質的 損失을 防止하기 위하여 理論的 分析和 實驗을 통하여 米粒의 熱的 및 流動學的 特性을 糾明하는데 있다. 本 研究의 具體的 目的은 다음과 같다.

첫째로, 米粒의 内部應力를 理論적으로 分析하고자 玄米의 熱膨脹係數를 測定한다.

* 本 研究은 1983年度 産學協同財團 學術研究費에 의하여 이루어졌음.

** 서울大學校 農科大學 農工學科

둘째로, 温度와 含水率 變化에 따른 内部応力들을 數値解析의 으로 分析한다.

세째로, 理論的 分析을 뒷받침하고자 温度 變化和 含水率 變化가 胴割에 미치는 影響을 實驗的으로 究明한다.

네째로, 完全米와 乾燥過程에서 發生한 胴割米의 壓縮強度를 測定하여 搗精의 基礎的 資料를 提示하고자 한다.

위 中에서 세째와 네째 항목에 해당하는 것은 다음 學會誌에 투고할 예정이다.

2 研究史

가. 熱膨脹係數

Arora(2) 등은 Glass Dilatometer 를 使用해서 "Standard ASTM Test D864-52 for Plastics (ASTM, 1968)" 에 의하여 白米의 熱膨脹係數를 測定하였으며 그 結果로 含水率 11.8% (w.b.) 인 白米의 體積熱膨脹係數는 52.37℃ 以下에서는 $2.403 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ 이고 52.37℃ 以上에서는 $3.364 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ 였다고 報告했다. 또한 實驗에 使用된 水銀의 體積熱膨脹係數의 平均値는 温度 10~60℃ 사이에서 $1.81 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ 이었으나(5) ASTM D864-52에서는 温度에 關係없이 $1.82 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ 로 추천하고 있다.

나. 内部應力에 의한 玄米의 胴割

穀粒의 胴割은 穀粒內의 温度와 含水率 分布差異로 인하여 發生되는 内部應力에 起因되며, 이에 關한 研究 結果는 다음과 같다.

Ekstrom(7) 등은 옥수수에 胴割이 생기려면 적어도 79℃ 以上の 温度 變化가 있어야 한다고 했고, Arora(2) 등은 米穀이 乾燥될 때 理論的으로 43℃ 以上の 温度 變化가 있어야 胴割이 생긴다고 報告하였다. 그러나 周圍 空氣와 米粒의 温度 差異는 米粒의 含水率 정도에 따라 다르므로 温度 變化는 含水率의 變化 정도에 따라 決定된다고 하였다. Kunze와 Hall(8)은 米粒이 일정 含水率을 유지하고 있는 한 17℃의 温度 變化로 胴割이 생기지 않는다고 하였으며 주로 胴割은 相對温度와 含水率의 變化로 생긴다고 하였다. Timoshenko(11)는 球와 圓筒體의 内部温度와 周圍 空氣의 温度差에 의해서 생기는 内部應力 即 最大引張應力을 數式으로 유도하였고 그때 소요되는 時間을 算出했다. Chizhikov(4)는 乾燥條件 中 乾燥温度가 組織의 強度와 胴割에 決定的인

影響을 미친다고 하였다. Milner와 Shellenberger(9)는 粒의 胴割은 乾燥時에 불균일한 水分分布의 差異때문에 생기는 内部應力때문이라고 하였다. Earle과 Ceaglske(6)는 마카로니(macaroni)의 熱應力은 水分應力과 組織自體의 強度에 비해서 훨씬 작다고 하였다. Shinkichi Yamaguchi(10) 등은 一般系 品種의 벼를 球로 假定하고 玄米의 内部應力을 理論的으로 分析하였고, 薄層乾燥에서 温度와 含水率의 獨立인 變化가 粒의 胴割에 미치는 影響을 分析한 바 있다.

3. 熱應力과 水分應力에 關한 理論的 分析

理論的 分析을 위해 米粒과 關連되는 基本假定으로 米粒은 等方性(isotropic)의 性質을 가지며 温度와 含水率이 均일하게 변화하는 線形彈性體라 하고, 幾何學的 形象은 回轉橢圓體에 가까우나 本研究에서는 品種에 따라 球形(sphere) 혹은 圓筒形(cylindrical shape)으로 看做하였으며 初期 基準温度와 含水率에서 内部應力을 0으로 假定하였다. 또한 温度나 含水率 變化는 단지 半徑方向으로만 일어나며 長軸에 대해 대칭이라고 생각하고 米粒內에 생기는 熱應力과 水分應力을 時間과 半徑의 函數로 表示하였다. 理論的 分析에 使用된 玄米의 物性値는 表 1과 같다.

가. 熱應力

熱應力이란 米粒에 순간적인 温度變化가 일어날 때 米粒內의 温度 기울기에 의해 생기는 壓縮 및 引張應力을 말한다.

1) 玄米를 球形으로 假定한 경우

温度를 半徑方向 r과 時間 t만의 函數로 생각한다. 對稱性에 의거해 球內에는 半徑方向의 應力 σ_r 과 두개의 接線方向의 應力 σ_t 가 米粒內 温度分布에 의해 發生한다. 그리고 이들은 半徑方向의 微小 部피에서 發生되는 힘의 平衡에 의하여 다음과 같이 熱應力 式이 유도된다(7)

$$\sigma_r = \frac{2\alpha \cdot E}{1-\nu} \left(\frac{1}{a^2} \int_0^a T \cdot r^2 \cdot dr - \frac{1}{r^3} \int_0^r T \cdot r^2 \cdot dr \right) \dots\dots (1)$$

$$\sigma_t = \frac{\alpha \cdot E}{1-\nu} \left(\frac{2}{a^2} \int_0^a T \cdot r^2 \cdot dr + \frac{1}{r^3} \int_0^r T \cdot r^2 \cdot dr - T \right) \dots\dots (2)$$

여기서 半徑方向보다 長軸方向의 應力이 훨씬 더

Table 1. Thermo-physical properties of brown rice used in stress calculation.

symbol	property	value
* a	radius	0.148 cm
(10) D	thermal diffusivity	4.5cm ² /hr
(12) Dw	moisture diffusion coefficient	6.79×10 ⁻⁴ cm ² /hr (35°C)
(2) E	Young's modulus in axial direction	2.448×10 ⁴ kg/cm ²
* α	coefficient of linear thermal expansion	9.37×10 ⁻⁶ (°C) ⁻¹
(10) α _w	coefficient of linear hygroscopic expansion	0.39[kg/kg-dry] ⁻¹
* ν	Poisson's ratio	0.3

Note 1. * : author's
2. () : reference

크므로 接線方向의 応力, α가 米粒의 胴割에 큰 영향을 미친다고 볼 수 있다. 그런데 식(2)에서 溫度 T는 時間 t와 半徑 r의 函數이다. 即 米粒이 어떤 溫度에 순간적으로 接할 때 米粒内部의 상태는 非定常狀態(non-steady state)이다. 따라서 熱의 擴散이 半徑方向으로 일어난다고 보면 熱擴散係數를 D라 할 때 球狀인 米粒의 溫度 T에 대한 微分方程式은 식(3)의 形態를 갖는다.

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

半徑方向의 變位 U를 U=T·r로 놓으면

$$\frac{\partial U}{\partial t} = D \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} \dots\dots\dots(4)$$

$$U = 0, \quad r = 0, \quad t > 0 \dots\dots\dots(5)$$

$$U = aT_1, \quad r = a, \quad t > 0 \dots\dots\dots(6)$$

$$U = rf(r), \quad 0 < r < a, \quad t = 0 \dots\dots\dots(7)$$

f(r) : 初期分布函數

여기서 T₁은 米粒 表面의 溫度이다. 米粒의 溫度가 T₀에서 T₁으로 變化할 경우 米粒内の 溫度分布 即 式(3)의 解는 다음과 같다.

$$\frac{T - T_0}{T_1 - T_0} = 1 + \frac{2a}{\pi r} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n} \sin \frac{n\pi r}{a} e^{-D n^2 \pi^2 t / a^2} \dots\dots\dots(8)$$

米粒內 溫度는 時間과 半徑의 函數로써 나타나며 式(8)을 式(2)에 代入하면 接線方向의 熱應力은 時間 t와 半徑 r의 函數로 表示된다(式10).

$$\alpha = \frac{\alpha \cdot E}{1 - \nu} \left[\frac{2}{a^2} \int_0^a \left\{ T_1 + \frac{2a}{\pi r} (T_1 - T_0) \right. \right.$$

$$\left. \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n} e^{-D \cdot n^2 \cdot \pi^2 \cdot t / a^2} \cdot \sin \left(\frac{n\pi r}{a} \right) \right\} r^2 dr + \frac{1}{r^3} \int_0^r \left\{ T_1 + \frac{2a}{\pi r} (T_1 - T_0) \right. \\ \left. \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n} e^{-D \cdot n^2 \cdot \pi^2 \cdot t / a^2} \cdot \sin \left(\frac{n\pi r}{a} \right) \right\} r^2 dr \\ - \left\{ T_1 + \frac{2a}{\pi r} (T_1 - T_0) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n} e^{-D \cdot n^2 \cdot \pi^2 \cdot t / a^2} \sin \left(\frac{n\pi r}{a} \right) \right\} \dots\dots\dots(10)$$

2) 玄米를 圓筒形으로 假定한 경우

統一系의 形想는 一般系와는 달리 가늘고 길므로 米粒을 圓筒形으로 假定하고 米粒内の 溫度變化는 半徑方向만 존재하며 軸方向으로의 溫度傾斜를 무시할 경우 球와 마찬가지로 半徑方向과 軸方向의 微小부피 平衡條件에 의해 軸方向으로 均一한 軸應力(uniform axial stress)과 半徑方向의 應力이 發生한다. 이와 같은 경우 米粒内の 應力은 軸方向의 應力이 훨씬 크게 나타나며, 米粒内の 胴割은 軸應力에 커다란 영향을 받는다. 軸方向의 힘의 0이라고 할 때 다음과 같이 軸方向의 熱應力式을 얻을 수 있다. (7)

$$\sigma_z = \frac{\alpha \cdot E}{1 - \nu} \left(\frac{2}{a^2} \int_0^a T \cdot r \, dr - T \right) \dots\dots\dots(11)$$

또한 米粒을 加熱하면 아주 짧은 時間 t에 대해 表面에서는 壓縮應力이 中心에서는 引張應力이 發生하여 米粒內에 最大應力이 式(12)와 같이 發生한다고 Timoshenko는 報告하였다.

$$\sigma_{max} = \frac{\alpha \cdot E (T_1 - T_0)}{2(1 - \nu)} \dots\dots\dots(12)$$

나. 水分應力

水分應力이란 乾燥過程에서 米粒內의 水分傾斜 (moisture gradient)에 의해 생기는 内部應力으로서 熱應력과 같은 方法으로 分析될 수 있다.

첫째로 玄米를 球形으로 假定할 경우에 接線方向의 水分應力은 式(2)에서 α 대신에 線形水分膨脹係數 α_w , T 대신에 含水率 W (乾量基準, 小數)을 代한 式(14)로부터 求할 수 있다.

$$\sigma_i = \frac{\alpha_w \cdot E}{1 - \nu} \left(\frac{2}{a^3} \int_0^a W \cdot r^2 dr + \frac{1}{r^3} \int_0^r W \cdot r^2 dr - W \right) \dots\dots\dots(14)$$

둘째로 玄米를 圓筒形으로 假定할 때도 應應力을 分析했을 때와 마찬가지로 다음과 같이 軸方向의 最大水分應力을 얻을 수 있다.

$$\sigma_{max} = \frac{\alpha_w E (W_o - W_i)}{2 (1 - \nu)} \dots\dots\dots(15)$$

4. 材料 및 方法

米粒의 内部應力을 理論적으로 分析하는데 利用하고자 玄米의 熱膨脹係數를 다음과 같이 測定하였다.

가. 供試材料

實驗에 使用된 玄米는 統一系品種인 서광으로서 常溫通風 乾燥法에 의해 乾燥되었으며 濕量基準 含水率은 12.5%이었다. 또한 100% 純度の 水銀이 實驗에 使用되었다. 實驗에 使用된 玄米의 品位는 表 2와 같다.

Table 2. Specification of brown rice

Items	Observations	Remark	
Variety	Seokwang	average value of 10 brown rice	
Grain Size (mm)	Length		6.2
	Width		2.5
	Thickness		1.9
	L/T		3.26
Moisture Content % , w. b.	12.5		

나. 測定裝置

ASTM D 864-52의 "Standard Method Of Test

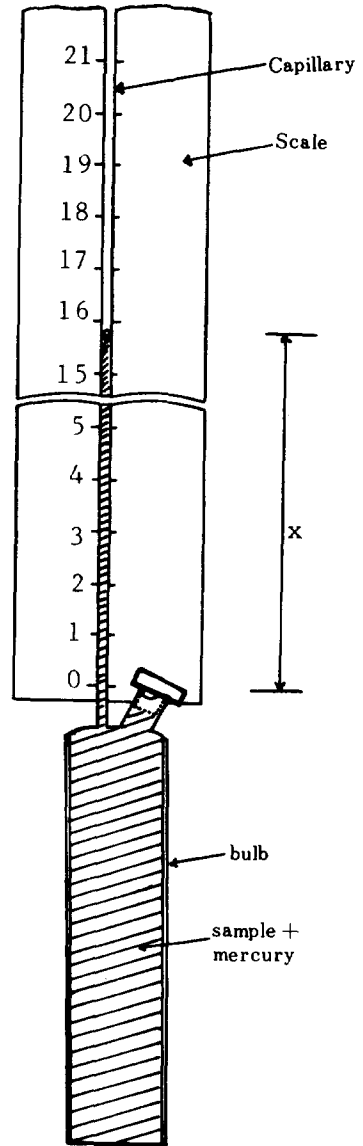


Fig. 1 Glass dilatometer

for Coefficient of Cubical Thermal Expansion of Plastics"에 의해서 硬質유리를 使用하여 그림 1과 같은 glass dilatometer를 製作하였다. 밑부분 (bulb)은 管徑 1mm, 길이 11cm, 부피는 11cm³이고 上부분의 毛細管 (Capillary tube)은 長이가 35cm, 斷面積이 4.55 × 10⁻³ cm²이었다. 또한 0℃ ~ 100℃ 까지

溫度調節 가능한 恒溫水槽가 이용되었으며 水銀의 정확한 부피를 測定하기 위해 20 μ cc의 피펫과 0.01 cc까지 읽을 수 있는 주사기를 使用하였다.

다. 測定方法

먼저 供試器機로 使用된 硬質 유리의 體積熱膨脹係數를 測定하기 위해 bulb 속에 100% 純度の 水銀을 채워 恒溫水槽에 넣은 다음에 10 ~ 60 $^{\circ}$ C 까지 물의 溫度를 서서히 올려서 다음과 같은 式(16)을 利用하여 유리의 體積熱膨脹係數를 算出했다. 이때 使用된 水銀의 體積熱膨脹係數는 1.82 $\times 10^{-4}$ / $^{\circ}$ C (ASTM D 864-52)로 하였다.

$$\Delta V_b = \Delta V_m - \Delta V_c \dots \dots \dots (16)$$

여기서 V_b : glass bulb의 부피, cm^3
 V_c : 毛細管內의 水銀부피, cm^3
 V_m : bulb 속의 水銀부피, cm^3

$$V_b \cdot C_b \cdot \Delta T = V_m \cdot C_m \cdot \Delta T - A \cdot \Delta X$$

$$C_b = \frac{C_m V_m}{V_b} - \frac{A \cdot \Delta X}{V_b \Delta T} \dots \dots \dots (17)$$

그 結果 C_b 는 即 유리의 體積熱膨脹係數는 0.30 $\times 10^{-4}$ / $^{\circ}$ C 이었다. 다음에는 bulb 속에 玄米 50粒을 넣고 100% 純度の 水銀을 채운 후 玄米와 水銀의 부피를 算出했다. 그리고 恒溫水槽에 bulb를 담근 후 水槽의 溫度를 5 $^{\circ}$ C 간격으로 60 $^{\circ}$ C 까지 서서히 增加시키면서 玄米의 熱膨脹係數를 다음 式(18)을 使用하여 計算하였다.

$$\Delta V_k = \Delta V_b + \Delta V_c - \Delta V_m \dots \dots \dots (18)$$

$$C_k V_k \Delta T = V_b C_b \Delta T + A \cdot \Delta X - V_m C_m \Delta T$$

$$C_k = \frac{V_b}{V_k} \cdot C_b + \frac{A \cdot \Delta X}{V_k \cdot \Delta T} - \frac{V_m C_m}{V_k}$$

여기서 V_k : 玄米의 부피, cm^3
 C_k : 玄米의 體積熱膨脹係數/ $^{\circ}$ C
 C_m : 水銀의 體積熱膨脹係數/ $^{\circ}$ C
 C_b : bulb의 體積熱膨脹係數/ $^{\circ}$ C
 $V_b = 11cm^3$, $V_k = 0.825cm^3$ (50粒)
 $C_b = 0.305 \times 10^{-4}$ / $^{\circ}$ C, $C_m = 1.82 \times 10^{-4}$ / $^{\circ}$ C (ASTM D 864-52)

5. 結果 및 考察

가. 玄米의 熱膨脹係數

玄米의 體積熱膨脹係數는 10 ~ 60 $^{\circ}$ C 사이에서 거의

直線의으로 增加하였으며 4회 反復 實驗한 結果 平均値는 2.81 $\times 10^{-4}$ / $^{\circ}$ C 였다 (그림 2). 이때 收縮時에도 直線의으로 減小하였으며 膨脹때보다 같은 溫度에서 水銀柱의 높이가 全般的으로 약간 낮게 나타나고 있음을 알 수 있었다. 이는 米粒과 水銀의 膨脹과 收縮사이에서 本質의으로 나타나는 異歷現狀 (hysteresis effect)이라 할 수 있다. 그리고 이 結果는 Arora(2)가 實驗한 結果와 거의 비슷했다.

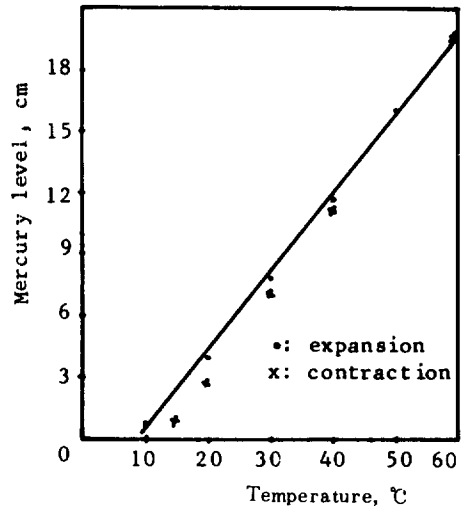


Fig. 2 Mercury level versus temperature for brown rice at 12.5percent moisture (w. b.)

나. 熱應力과 水分應力

1) 熱應力

아주 짧은 時間동안에 水分의 移動은 무시할 정도로 작다고 보고 단지 溫度를 時間과 半徑만의 函數로 보았을 경우 그 溫度分布는 그림 3과 같다. 이때 5~6초 時間이경과하면 米粒溫度가 약 90% 이상 平衡에 도달하는 것을 알 수 있다. 그러나 水分移動을 고려하고 周위 空氣速度가 0.5 ~ 2m/s 일 때, 1~2분 지나면 米粒溫度가 平衡에 도달한다고 山口信吉(10)이 보고한 바 있다. 따라서 米粒內의 溫度傾斜와 平衡時間은 條件에 따라 약간 差異가 생기므로, 熱應力 역시 溫度傾斜가 클 경우 더 크게 나타나게 된다. 따라서 時間과 半徑만의 函數로 본 溫度의 傾斜로 야기되는 熱應力은 다음과 같다.

첫째로, 玄米를 球形으로 假定할 경우 表1에 나

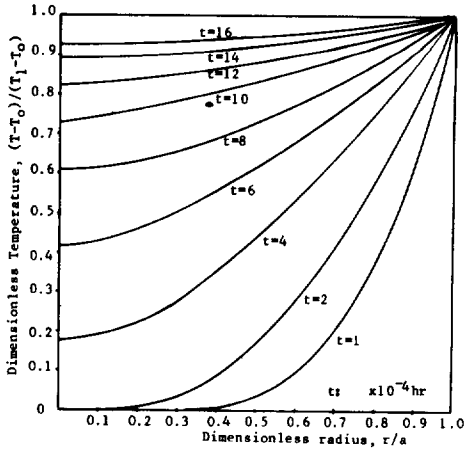


Fig. 3 Temperature distribution with time, t and dimensionless radius, r/a , in sphere.

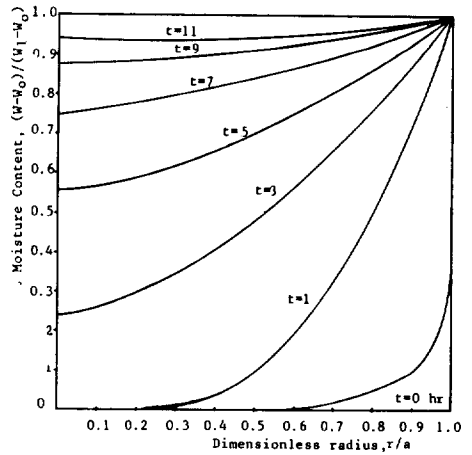


Fig. 4. Moisture distribution with time, t and dimensionless radius, r/a , in sphere.

타난 玄米의 物理的 特性值들을 式(10)에 代入하고 時間과 半徑 그리고 溫度差에 따라 接線方向 應力の 近似值를 컴퓨터를 使用하여 分析하였으며, 그 結果는 그림 5와 같다.

米粒을 加熱시켰을 때 米粒 内部에는 引張應力이 表面에는 壓縮應力이 發生하는데 米粒과 같은 彈性體는 壓縮에 비해 引張에 약하므로 理論上 米粒 内部에서 먼저 龜裂이 생기게 된다. 그림 5와 같이 米粒의 初期溫度를 $T_0 = 15^\circ\text{C}$, 周圍溫度 $T_1 = 35^\circ\text{C}$ 로 했을 경우, 米粒 中心에서 생기는 最大引張應力과 表面에서 생기는 最大壓縮應力이 約 $25\text{kg}/\text{cm}^2$ 로 나타났으며 이때 소요되는 時間은 約 $4 \times 10^{-4}\text{hr}$ 이었다. 처음 約 $2 \times 10^{-4}\text{hr}$ 동안은 非正常狀態로서 溫度差異로 인하여 熱應力이 發生하나 그 以後에는 米粒溫度가 平衡狀態에 도달되어 熱應力이 점점 사라지게 된다. 또한 $r = a/2$ 인 지점에서의 熱應力은 米粒 中心에서 생기는 熱應力의 절반에 해당하는 引張應力이 생기게 됨을 알 수 있다. 그리고 $T_0 = 15^\circ\text{C}$, $T_1 = 50^\circ\text{C}$ 境遇에도 米粒 中心和 表面에서 約 $50\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 内部應力이 發生함을 알 수 있었다. 이들 熱應力들은 米粒의 最大引張強度 $117\text{kg}/\text{cm}^2$ 에는 훨씬 못미치는 것으로 보아서 胴割에는 決定的인 影響을 미치지 못하고 단지 水分變化로 생기는 應력과 함께 복합적으로 龜裂에 影響을 주리라 생각된다.

둘째로, 玄米를 圓筒形으로 假定할 경우 式(12)에서 米粒内の 最大應力을 算出할 수 있다. 특히 溫度變化가 20°C 일 때는 約 $33\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 最大熱應力이 發生하며, 最大應力 σ_{max} 가 米粒의 最大引張強度,

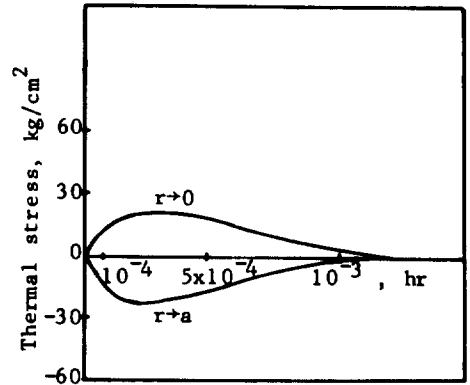


Fig. 5. Transient thermal stress due to temperature change, $T_1 = 35^\circ\text{C}$, $T_0 = 15^\circ\text{C}$ in sphere.

$117\text{kg}/\text{cm}^2$ 일 때, 胴割이 생기는 溫度變化 ΔT 는 71.4°C 로 나타났다.

따라서 米粒의 形象이 球形보다 圓筒形에 가까울수록 보다 큰 内部應力이 發生되며, 또한 米粒 自體의 強度도 球形보다 圓筒形이 작으므로 熱應力에 의한 米粒의 龜裂은 圓筒形에서 보다 쉽게 發生됨을 알 수 있다. 그러나 全般적으로 熱應力은 米粒의 強度에 비해 작게 나타나고 있다.

이러한 理論的 分析 結果를 볼 때, 乾燥時에 乾燥空氣 溫度의 變化 폭이 작을 경우 (60°C 이내) 熱應力은 米粒의 胴割에 決定的인 影響을 미치지 않음을 알 수 있다.

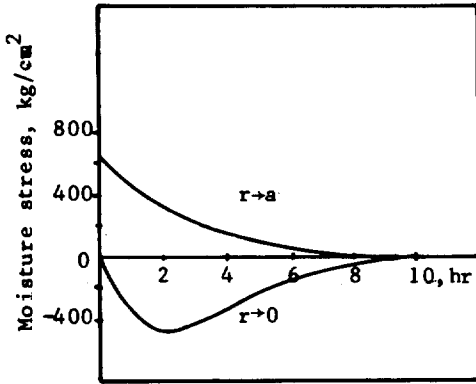


Fig. 6. Moisture stress due to moisture change during drying process, $W_0 = 0.25 \text{ kg/kg-dry solid}$, $W_1 = 0.163 \text{ kg/kg-dry solid}$, $T = 35^\circ \text{C}$ in sphere

2) 水分応力

球形에 있어서 半徑과 時間에 따른 水分分布는 그림 4와 같다. 또한 表 1에 나타난 米粒의 物理的 特性値와 $W_0 = 0.25 \text{ kg/kg-dry solid}$ (20%, w. b), $W_1 = 0.163 \text{ kg/kg-dry solid}$ (14%, w. b.) 그리고 $Dw = 7.09 \times 10^{-4} e^{-2.85 \times 10^4/T}$ (T : 絶對溫度, $^\circ \text{K}$) 등을 式 (14)에 代入하여 컴퓨터로 數值解析한 結果, 時間과 半徑에 따른 水分應力 變化는 그림 6과 같다. 따라서 米粒을 球形이라 假定했을 경우 米粒表面 ($r \rightarrow a$)에서 처음엔 600 kg/cm^2 이상의 引張應力이 發生한다음 서서히 사라진다. 米粒中心部 ($r \rightarrow 0$)에서는 2~3時間이 지난 후 약 450 kg/cm^2 의 壓縮應力이 最大로 發生하며 約 10時間이 지나면 사라지게 된다. 또한 米粒을 圓筒形으로 假定할 경우에는 式 (15)에 $W_0 = 0.25 \text{ kg/kg-dry solid}$, $W_1 = 0.163 \text{ kg/kg-dry solid}$ 를 代入했을 때 約 600 kg/cm^2 의 最大水分應力이 發生했다. 그리고 그림 7은 球形의 경우 一定 時間에서 半徑에 따른 水分應力의 變化를 나타내며 中心보다는 表面部에서 水分應力의 變化가 더 크게 나타났다. 또한 乾燥時에 發生되는 수백 kg/cm^2 의 水分應力으로 인하여 理論上 米粒 전부에 胴割이 生길 것으로 생각되어지나, 실제로는 玄米가 아닌 벼 狀態로 乾燥되므로 水分應力이 더 적게 發生되어 부분적으로만 胴割이 發生할 것으로 생각된다.

이와같이 水分變化에 의해 생기는 水分應力은 理論上 熱應力에 비해 상당히 커서 米粒의 胴割에 큰 影響을 미치고 있다. 따라서 乾燥時에는 水分變化率

즉 乾燥速度를 서서히 하여 水分에 의한 收縮이나 水分廣散을 완만하게 함으로써 水分分布에 따른 米粒內의 水分應力을 줄일 수 있을 것이다.

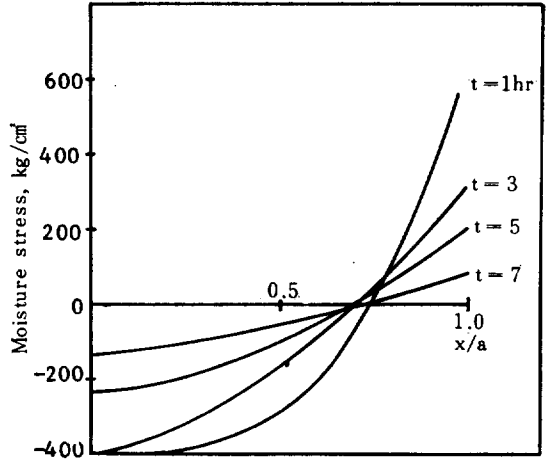


Fig. 7. Moisture stress with dimensionless radius, r/a , at various time in sphere.

마지막으로, 이들 熱應力과 水分應力은 米粒의 彈性係數 E 에 큰 影響을 받고 있음을 알 수 있다. 벼의 物理的 特性 (韓國農業機械學會誌 第9卷1號)의 半徑方向 壓縮試驗에서 玄米의 彈性係數는 約 $4 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ 이었는데, 軸方向의 彈性係數는 V. K. Arora의 引張試驗에서 約 $2.448 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 으로 約 6배 정도 크게 나타나고 있다. 따라서 半徑方向보다 軸方向으로 内部應力이 많이 發生하고 軸方向의 應力이 胴割에 큰 影響을 미치므로, 본 理論的 分析에서는 軸應力 計算時에 軸方向의 彈性係數를 利用해서 分析하였다. 또한 彈性係數를 $4 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ 로 하였을 때 $2.448 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 의 경우에 비해 熱應力과 水分應力은 1/6 정도임을 알 수 있다.

6. 結 論

現在 우리나라에서 벼收獲以後 乾燥와 搗精過程中에서 상당량의 損失이 發生되는 것으로 報告되고 있는 바, 이와같은 損失을 質的 및 量的으로 줄이기 위해 벼차체의 熱的 特性을 규명하고자 하였다.

따라서 米粒의 内部應力을 理論的으로 分析하고자 玄米의 熱膨脹係數를 測定하였고 熱應力과 水分應力을 數值解析的으로 分析하였다. 이들 結果들을 要約하면 다음과 같다.

1. 玄米의 体積熱膨脹係數는 溫度 10°C ~ 60°C 에서 約 $2.81 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ 이었다.

2. 米粒의 形狀을 球形과 圓筒形으로 假定할 경우, 相對的인 溫度變化 20°C ~ 60°C 사이에서 理論的인 最大 熱應力은 米粒의 最大 引張強度 ($117\text{kg}/\text{cm}^2$) 에 못미치는 約 $25 \sim 100\text{kg}/\text{cm}^2$ 으로 나타났으며, 乾燥溫度를 35°C, 玄米의 初期 및 最終 水分함량을 각각 20%와 14% (w.b.), 水分擴散係數를 $6.79 \times 10^{-4}\text{cm}^2/\text{hr}$ 로 가정할 때, 最大 水分應力은 $450 \sim 650\text{kg}/\text{cm}^2$ 이었다.

3. 따라서 理論的 分析結果, 熱應力보다는 水分應力이 米粒의 胴割에 決定的인 影響을 미침을 알 수 있었다.

參 考 文 獻

1. 韓國科學技術研究所. 1972. Rice Center Plant의 基本設計.
2. Arora, V.K. et al. 1973. Rice drying cracking versus thermal and mechanical properties. Transaction of the ASAE:320-323.
3. Chung, C.J. 1980. Post-harvest rice systems, Final report of phase II, Seoul National Univ. P.1.
4. Chizhikov, A. 1960. The effect of drying conditions on the strengths of maize kernels. Mukrom. Elevat. Prom 26(9):15-16.
5. CRC press co., The handbook of chemistry and physics, 60th ed.
6. Earle, P.L. and N.H. Ceagle. 1949. Factors causing checking of macaroni. Cereal chemistry 26(4):267-286.
7. Ekstrom, G.A., J.B. Liljedahl and R.M. Peart. 1966. Thermal expansion and tensile properties of corn kernels and their relationship to cracking during drying. Transaction of the ASAE. 9(4).
8. Kunze, O.R., C.W. Hall. 1967. Moisture adsorption characteristics of brown rice. Transaction of the ASAE. 10:448.
9. Milner, M. and J.A. Shellenberger. 1953. Physical properties of weathered wheat in relation to internal fissuring detected radiographically. Cereal chemistry 30:202-212.
10. Shinkichi et al. 1980. Experimental study on the internal stress cracking of rice kernel (part 2). Transaction of the JSAE. 42(2):251-257.
11. Timoshenko, S. Theory of Elasticity, McGraw-Hill book co., p.433-460.
12. Yutaka CHUMA et al. 1969. Measuring the moisture diffusion coefficient of some grains of an anomalous shape. Transaction of the JSAE 31(3):255.