

# 穀物の 常溫通風乾燥 시스템의 시뮬레이션

## Simulation of Drying Grain with Natural Air

琴 東 赫\* · 崔 在 甲\*\* · 高 學 均\*\*  
Keum, Dong Hyuk, Choi, Jae Kap, Koh, Hak Kyun

### Abstract

The major objective of this study was to develop a computer simulation model to analyze drying process in a deep bed with natural air.

The approach used to describe the continuous drying process in a deep bed was to divide the process into many small processes and simulate them by consecutively calculating the changes of grain and air conditions that occurred during short increment of time.

Success criterion of the drying system was based on grain deterioration estimated by drymatter decomposition during drying.

The results of the experimental test showed that the model was satisfactory.

解析할 수 있는 컴퓨터 모델을開發하고, 實驗的 方法에 依하여 그 妥當性を 檢定하는데 있다.

### 1. 緒 言

穀物の 常溫通風乾燥 시스템의 所要條件은 送風量, 送風空氣의 加熱溫度, 初期含水率 및 氣象條件의 영향을 받게 된다. 이들 因子들이 乾燥시스템의 性能에 미치는 影響을 究明함으로써 乾燥의 可能性 및 乾燥시스템의 適正한 所要條件을 결정하여야 한다. 특히 이들 因子중에서 氣象條件은 制御不可能하며, 시스템의 性能에 가장 크게 影響을 미치는 인자로서, 이의 影響을 究明하기 위해서는 多年間의 氣象條件에 근거하여야 할 것이다 따라서 實驗的 方法에 依하여 乾燥시스템의 所要條件을 결정하는 方法은 長期間의 實驗과 막대한 경비 및 노력이 불가피하게 되므로, 乾燥理論을 토대로한 시뮬레이션 方法의 모색이 선진각국에서 시도되고 있다.

本研究의 目的은 穀物の 常溫通風 厚層乾燥過程을

### 2. 文獻概要

#### 가. 穀物の 平衡 含水率 方程式

穀物 中の 水分을 空氣中으로 移動시키는 推進力은 穀物의 水蒸氣壓의 差異에 起因된다. 一定한 溫濕度의 大氣中에 穀物을 放置하여 두면 大氣의 水蒸氣壓과 穀物의 水蒸氣壓間에 差異가 있는 경우 穀物과 大氣間에는 水分移動現象이 일어나게 되어 穀物의 含水率이 變하게 된다.

그러나 결국 穀物의 水蒸氣壓과 大氣의 水蒸氣壓이 같은 狀態에서 水分移動이 停止된다. 이때의 穀物의 含水率을 大氣의 條件에 相應하는 平衡含水率이라 하며 또한 이때의 大氣의 相對濕度를 平衡相對

\*江原大學校 農科大學 農工學科

\*\*서울大學校 農科大學 農工學科

濕度라고 한다. (6)

平衡含水率은 一定한 乾燥條件下에서 穀物を 乾燥할 때 穀物이 乾燥可能한 最小限度的 含水率을 決定하여 주기 때문에 穀物乾燥에서 매우 重要的 意義를 갖는다. (29)

平衡 含水率을 算出하기 위한 많은 理論式, 準理論式 및 實驗式等이 開發되어 있으나 넓은 範圍의 溫度와 相對濕度에 對하여 正確한 豫測을 할 수 있는 方程式은 아직 없는 것으로 알려져 있다. (6)

平衡含水率 方程式 中에서 가장 널리 알려진 것은 Gibbs의 吸着理論에 根據하여 誘導한 Henderson의 方程式으로 다음과 같이 表示된다. (23)

$$1 - RH = \text{Exp}(-kTMe^n) \dots\dots\dots(2-1)$$

여기서, RH; 相對濕度(decimal)

$k, n$ ; 常數

$T$ ; 絕對溫度(°K)

$Me$ ; 平衡含水率(decimal, d.b.)

벼에 對하여 Yamazawa(54)는 常數  $n$ 은 2.00,  $k$ 는  $-2.32 \times 10^{-8}$ 으로 發表하였으며, Murata(34)는 다음 式으로 發表하였다.

$0 < RH < 0.9$ 일 때

$$Me = \text{Exp}\{0.409 \ln[-4.772 \ln(1 - RH)/T]\} \dots\dots\dots(2-2)$$

$0.9 < RH < 1.0$ 일 때

$$Me = \text{Exp}\{0.409 \ln(10.99/T)\} \dots\dots\dots(2-3)$$

Koh(29)는 11個品種의 벼에 對하여 常數  $n$ 와  $k$ 의 값을 決定하였으며,  $k$ 는  $(1.065 - 15.516) \times 10^{-8}$ ,  $n$ 은 2.0173 ~ 2.7343의 範圍로서 品種間에 커다란 差異가 있다고 報告하였다.

Thompson(50)은 Henderson의 方程式에 溫度의 影響을 考慮한 常數를 添加하여 다음과 같은 式을 提示하였다.

$$1 - RH = \text{Exp}[-R(T+C)Me^N] \dots\dots\dots(2-4)$$

여기서,  $k, C, N$ ; 常數

$T$ ; 溫度(°C)

Pfost等(37)은 벼에 對하여 常數  $k, N$  및  $C$ 를 各 1.9187  $\times 10^{-8}$ , 2.4451 및 51.161로 發表하였다.

Chung等(13)은 氣體의 狀態 方程式에 根據하여 다음과 같은 方程式을 提示하였다.

$$RH = \text{Exp}\left[\frac{-PA}{R \cdot (T+PC)} \cdot \text{Exp}(-PB \cdot Me)\right] \dots\dots\dots(2-5)$$

$$\text{혹은 } Me = PE - PF \ln[-R(T+PC) \ln(RH)] \dots\dots\dots(2-6)$$

여기서,  $T$ ; 溫度(°C)

$R$ ; 一般氣體常數(1.987cal/g, mole °C)

벼에 對하여,  $PA$ ; 1181.57

$PB$ ; 21.733

$PC$ ; 35.703

$PD$ ; 0.325535

$PE$ ; 0.046015

Day等(14)은 Henderson의 方程式을 修正하여 4個의 常數를 包含한 方程式을 다음과 같이 提示하였다.

$$RH = 1.0 - \text{Exp}\{P_1 T^{P_2} (Me)^{P_3} T^{P_4}\} \dots\dots\dots(2-7)$$

여기서  $P_1, P_2, P_3, P_4$ ; 常數

Chen等(10)은 Chung-pfost의 方程式을 修正하여 4個의 常數를 包含한 方程式을 다음과 같이 提示하였다.

$$RH = \text{Exp}\{G_1 T_k^{H_1} \text{Exp}(G_2 T_k^{H_2} Me)\} \dots\dots\dots(2-8)$$

여기서  $G_1, G_2, H_1, H_2$ ; 常數

$T_k$ ; 絕對溫度(°K)

Strohman等(46)은 穀物內部 水分의 熱力學的 性質을 根據로 다음과 같은 方程式을 提示하였다.

$$RH = \text{Exp}\{A' \text{Exp}(-B' Me) \cdot \ln(P_{vs}) + C' \text{Exp}(D' Me)\} \dots\dots\dots(2-9)$$

여기서  $A', B', C', D'$ ; 常數

$P_{vs}$ ; 飽和蒸氣壓

以上の 方程式은 準理論式이나 Haynes(63)는 純粹한 實驗式을 提示하였으며, Bakker-Arkema(2)는 S字型的 等溫平衡含水率曲線을 6가지의 相對濕度의 範圍로 나누어서 數學的인 方法으로 相對濕度의 3次式으로 表示하였다.

Pfost等(37)은 實驗値를 利用하여 몇가지 平衡含水率方程式의 精度를 檢討한 結果 많은 常數를 包含한 複雜한 方程式보다 3個의 常數를 包含한 (2-4)와 (2-5)式이 더 잘 實驗値와 一致한다고 報告하였다.

### 나. 벼의 物理的, 熱的 性質

Wratten等(53)은 벼의 부피密度를(Bulk density). 다음과 같이 含水率의 函數로 表示하였다.

$$D_m = 499.696 + 8.33M \dots\dots\dots(2-10)$$

$$D_i = 519.446 + 5.29M \dots\dots\dots(2-11)$$

여기서,  $D_m$ ; 中粒種 벼의 密度(kg/m<sup>3</sup>)

$D_i$ ; 長粒種 벼의 密度(kg/m<sup>3</sup>)

$M$ ; 含水率(% w.b.)

Haswell(20)은 Bunson Ice Calorimeter를 利用하여 벼의 比熱을 測定하였으며, 다음과 같은 含水率

의 函數로 表示하였다.

$$C_g = 0.0448M + 1.1095 \dots \dots \dots (2-12)$$

여기서  $C_g$ ; 比熱(KJ/Kg °K)

$M$ ; 含水率(% w.b.)

다. 벼의 貯藏期間 동안의 品質損傷

貯藏中인 穀物은 穀物自體 및 微生物의 呼吸作用에 依하여 炭酸가스가 發生하며 重量이 減少하고 新鮮度를 잃어 品質이 低下된다. 穀物의 呼吸過程은 炭水化合物이 燃燒하여 炭酸가스, 물 및 熱을 發生하는 過程으로 認識되고 있다. (45) 따라서 穀物의 呼吸에 依해 發生한 炭酸가스의 量이 品質低下의 指標로 使用될 수 있으며 이 炭酸가스 發生量은 穀物의 乾物 損失量으로 換算될 수 있다. 이와 關聯된 主要 研究結果는 다음과 같다.

Saul等 (39)은 穀物貯藏中 炭酸가스의 發生量이 最大일 때 微生物의 生長이 最大라고 報告하였다. Steele (45)은 炭酸가스의 發生量을 乾物重量損失率로 換算하고 乾物重量損失率이 0.5%일 때 穀物의 品質이 低下된다고 報告하였다. 또한 그는 呼吸에 依한 炭酸가스의 發生量은 穀物의 貯藏期間, 穀溫, 含水率 및 穀物의 機械的인 損傷程度와 密接한 關係가 있다고 報告하고 옥수수 의 경우 이들의 關係를 表示하는 方程式을 發表하였다.

벼의 경우 Chikubu (11)는 溫度 10~30°C의 範圍에서 含水率과 炭酸가스의 發生量과의 關係를 다음 式으로 表示하였다.

$$\left. \begin{aligned} \ln Y &= 1.043M - 17.75 \text{ at } 10^\circ\text{C} \\ \ln Y &= 0.848 M - 12.675 \text{ at } 20^\circ\text{C} \\ \ln Y &= 1.0489M - 15.12 \text{ at } 25^\circ\text{C} \\ \ln Y &= 1.435 M - 19.00 \text{ at } 30^\circ\text{C} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (2-13)$$

여기서  $Y$ ; 炭酸가스 發生量(cc/200gr/24hr)

$M$ ; 含水率(% w.b.)

Duggal (15)은 Bloome (4)의 示물레이션 모델과 Chikubu의 炭酸가스의 發生量에 관한 式을 利用하여 乾物重量損失率 0.5%와 1.0%水準을 基準으로 한 벼의 安全貯藏期間을 Table(2-1)과 같이 發表하였다.

Murata等 (35)은 벼의 경우에 含水率, 溫度 및 炭酸가스의 發生量과의 關係를 實驗에 依해 究明하고 呼吸熱, 含水率 및 溫度의 關係를 다음 式으로 表示하였다.

$$Y = 4.184 \text{Exp}(a_{11}T^2 + a_{12}TM + a_{22}M^2 + a_1T + a_2M + a_3) \dots \dots \dots (2-14)$$

여기서,  $Y$ ; 呼吸熱(KJ/hr.Kg of drymatter)

$T$ ; 溫度(°C)

$M$ ; 含水率(% w.b.)

$a_{11}$ ;  $-0.11339 \times 10^{-2}$

$a_{12}$ ;  $0.111532 \times 10^{-2}$

$a_{22}$ ;  $-0.5820 \times 10^{-2}$

$a_1$ ; 0.08708

$a_2$ ; 0.4147

$a_3$ ;  $-10.85623$

라. 穀物의 常溫通風乾燥시스템의 시물레이션

緒言에서 言及한 바와같이 實驗的 乾燥研究의 어려움 때문에 近來에 와서 穀物의 厚層乾燥를 解釋하기 위한 많은 數理的인 모델이 研究開發되어 利用되고 있으며, 主要 研究結果는 다음과 같다.

Bakker-Arkema(2), Hamdy (19)等은 穀物의 厚層에서의 熱 및 物質傳達現象에 基礎를 두고 片微分方程式을 誘導하여 乾燥現象을 解釋하였다.

Hukill(25)은 送風空氣의 溫度가 穀物層을 通過함에 따라 指數的으로 降下한다는 假定下에 穀物의 깊이와 乾燥時間 및 水分變化率(Moisture ratio)의 關係를 規定한 方程式은 開發하였다.

Jachariah(56), Young(55) 및 Sutherland(47)等은 Hukill의 모델을 利用하여 乾燥시스템의 效率, 乾燥費用 및 乾燥特性 等を 分析하였다.

Thompson (50)은 穀物의 厚層이 여러개의 薄層으로 이루어진 것으로 看做하고 薄層에 對한 乾燥現象을 解釋하여 이를 連續 過程으로 組合하므로써 厚層乾燥를 分析하였다. 또한 그는 薄層乾燥現象을 解釋하기 위하여 Henderson과 Morey (32)가 提示한 Moisture ratio equation을 實驗에 依하여 2次의 指數函數로 變形하였으며 이를 利用하여 몇가지 乾燥시스템에 對한 乾燥特性 및 乾燥費用을 分析하였다.

Morey等 (32)은 옥수수의 最適常溫通風乾燥시스템을 決定하기 爲하여 前述한 Thompson 모델(Moisture ratio Model이라 함)을 利用한바 있으며 Flood (16)는 Thompson 모델을 變形하여 穀物의 乾燥와 吸濕過程을 分離하고 Sabbah(38)의 薄層乾燥方程式과 Del Giudice(44)의 薄層吸濕方程式을 適用하여 옥수수의 常溫通風乾燥를 分析하였다.

Bloome(3)은 짧은 乾燥時間동안 穀溫과 送風空氣의 溫度가 平衡을 이루며 穀物에서의 水分移動率은

穀物과 空氣의 溫度差에 支配를 받으며, 乾燥過程에서의 送風空氣 및 穀物에서 交換된 熱과 蒸發潛熱의 合은 零이 된다는 假定下에 薄層乾燥方程式을 利用하지 않고, 熱平衡方程式 및 平衡含水率 方程式을 利用한 모델(Near equilibrium model이라 함)을 開發하였다.

Alam(1)은 Bloome모형을 籠의 常溫通風乾燥에 適用한 結果 豫測值가 實驗值보다 낮아서 過乾燥現象을 나타낸다고 하였다. 그는 이러한 過乾燥現象은 上部層으로 갈수록 送風空氣와 穀物 사이에 平衡이 이루어지지 않기 때문이라고 解釋하고 各 穀物層에서 排出되는 空氣의 絕對濕도를 다음 式으로 修正하였다.

$$WI(J+1) = WOJ(0.98 + 0.002 J/J_{max}) \dots (2-15)$$

여기서 WI(J+1) : J+1層에 流入되는 空氣의 絕對溫度

WOJ : J層에서 排出되는 空氣의 絕對溫度

Jindal(30)은 Bloome모형을 籠의 常溫通風乾燥에 適用하여 Alam과 비슷한 結果를 얻으므로 排出 空氣의 絕對溫度를 다음 式으로 修正하였다.

$$Hest = HO + (Hf + HO) \text{ Alpha} \dots (2-16)$$

여기서, Hest ; 修正한 排出空氣의 絕對溫度

HO ; J-1層에서 排出된 空氣의 絕對溫度

Hf ; J層에서 排出된 空氣의 平衡絕對溫度

Alpha ;  $0.3 + 0.006(N - J)$

N ; 總穀物層數

Bloome모형은 蒸發에 依한 冷却現象을 考慮하지 않았으나 Thompson (49)은 이를 考慮하고 또한 穀物の 呼吸에 依한 穀溫上昇, 含水率 增加 및 穀物 Bin의 壁體를 통한 熱傳達을 考慮한 모델(Equilibrium model이라 함)을 開發하여 高水分의 옥수수를 低水準의 風量으로 送風하면서 長期貯藏할 때의 乾燥와 貯藏特性을 分析하였다.

Maurer(30)은 Newton의 冷却法則(Newton's law of cooling)에 根據하여 穀物內에서의 水分除去力은 穀物內部에서의 水蒸氣壓과 空氣의 水蒸氣壓의 差異에 起因한다는 前提下에 다음과 같은 物質擴散모델(Mass diffusion model이라 함)을 提示하였다.

$$\frac{M_0 - M_f}{\Delta\theta} = -K_d (P_{v,g} - P_{v,a}) \dots (2-17)$$

여기서,  $M_0$  ; 初期含水率(decimal, d.b)

$M_f$  ; 最終含水率(decimal, d.b)

$\Delta\theta$  ; 乾燥時間(hrs)

$K_d$  ; 物質擴散係數(decimal, d.b/hr. Pa)

$P_{v,g}$  ; 穀物の 水蒸氣壓(Pa)

$P_{v,a}$  ; 空氣의 水蒸氣壓(Pa)

$K_d$ 의 값은 乾燥方法 및 穀物에 따라서 相異한 값을 가지며 籠을 常溫通風乾燥할 경우  $K_d$ 는  $2.901 \times 10^{-6}$ 의 값이 適當한 것으로 報告하였다. 그는 또한 Moisture ratio model, Equilibrium model 및 Mass diffusion model을 實驗值를 利用하여 檢定한 結果 Mass diffusion model이 가장 正確하고 効率的이라고 報告하였다.

### 3. 穀物の 厚層乾燥 시스템의 시뮬레이션 모델링

#### 가. 厚層乾燥過程의 解析

穀物乾燥는 穀物の 含水率, 穀物과 送風空氣의 溫度, 送風空氣의 溫度가 同時에 變化하는 連續過程으로 看做되며 厚層乾燥의 境遇 이들의 變化는 厚層에서의 穀物の 位置에 따라 다르게 된다. 이러한 連續的인 乾燥過程에 있어서 이들의 變化樣相을 豫測하기 爲한 一般的인 接近方法은 乾燥過程을 많은 작은 過程(薄層乾燥)으로 分離하여 짧은 分間 동안에 이 薄層에서 일어나는 變化를 連續的으로 計算하여 이들을 組合하는 것이다. (51)

本 研究에서도 厚層乾燥過程을 解釋하기 爲하여 짧은 時間 동안에 穀物の 薄層에서 일어나는 變化를 計算하여 厚層을 形成할 수 있도록 많은 薄層을 組合하는 方法을 擇하였다.

薄層乾燥의 境遇 穀物과 送風空氣의 狀態變化는 Fig(3-1)과 같이 表示된다. 즉, 乾燥溫度 T, 絕對溫度 H인 空氣를  $\Delta\theta$ 時間 동안 含水率 M, 穀溫 G인 籠의 薄層에 送風하면  $\Delta\theta$ 時間後에 穀物에서  $\Delta M\%$ 의 水分이 蒸發하여 送風空氣에 添加되며 穀物の 水分은  $M - \Delta M$ 으로 減少되고 送風空氣의 水分은  $H + \Delta H$ 만큼 上昇하게 된다. 한편 穀溫은  $\Delta G$ 만큼 上昇하게 되고 送風空氣의 溫度는 穀溫上昇 및 水分蒸發에 依한 冷却效果에 比例하여  $\Delta T$ 만큼 下降하게 된다.

따라서 厚層乾燥過程은 送風空氣가 하나의 薄層을 通過하여 다음 薄層으로 移動할 때의 送風空氣 및 穀物の 狀態變化를 連續的으로 算定하므로써 解釋할 수 있다. 이 경우 하나의 薄層에서의 乾燥는 짧은 時間 동안에 이루어지며 하나의 薄層을 通過하여 排出된 空氣는 다음 薄層의 流入空氣가 되어 다음 穀物層을 乾燥하게 된다. 이러한 過程이 最上層 穀

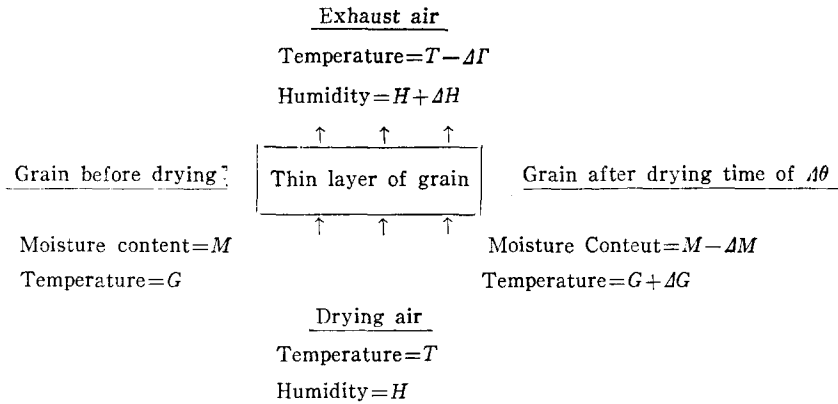


Fig. 1. Schematic diagram of thin layer drying process

물의 含水率이 要求되는 水準으로 減少될 때까지 反復되는 것으로 볼 수 있다.

本 研究에서는 시뮬레이션 모델의 開發을 爲하여 穀物 Bin內에서 任意로 1m<sup>2</sup>의 穀物기둥을 選擇하여 이 穀物기둥에서의 모든 變化가 Bin內의 全體 變化를 代表할 수 있는 것으로 看做하고, 다음과 같은 假定을 設定하였다.

① 乾燥過程은 物質擴散(Mass diffusion)에 依해 支配된다.

② 穀粒內部에서의 溫度 및 水分分配은 없다.

③ 最終穀溫과 最終送風空氣의 溫度는 同一하다.

④ 空氣와 穀物사이의 熱傳達은 斷熱的이다.

⑤ 穀物 Bin의 壁面을 통한 熱損失은 無視한다.

⑥ 微小 時間동안에 시스템의 全質量은 不變하며 穀物間의 混合은 없다.

①, ② 및 ③의 假定은 各各 Maurer (30), Thompson等 (52) 및 Henderson等 (24)의 研究結果에 依

한 것이다. 또한, ④~⑥의 假定은 거의 모든 穀物 乾燥過程을 分析하는데 있어서 有效한 것으로 報告되고 있다. (3, 22, 32, 50)

#### 나. 시뮬레이션 모델과 關聯된 方程式

厚層乾燥에서의 穀物과 送風空氣의 連續的인 狀態 變化過程은 Fig 2와 같이 表示될 수 있다.  $j$ 時點에서  $i$ 層의 穀物로부터 排出된 空氣는  $i+1$ 層의 流入 空氣가 되며  $j$ 時點에서  $i$ 層 穀物의 最終狀態는  $j+1$ 時點의 初期狀態가 된다.

여기에서 다음과 같은 5個의 初期狀態가 既知項으로 주어진다.

$T_o$ ; 流入空氣의 溫度

$H_o$ ; 流入空氣의 絕對溫度

$RH_o$ ; 流入空氣의 相對溫度

$T_g$ ; 初期穀溫

$M_o$ ; 穀物의 初期含水率

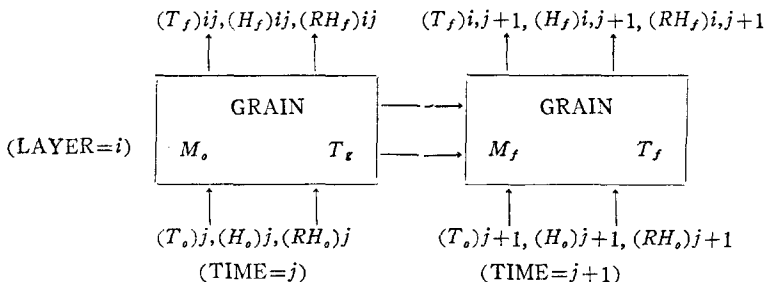


Fig. 2. Schematic diagram of simulation approach

그런데 穀物層에서 排出된 空氣의 狀態와 그때의 穀物의 狀態變化를 計算해야 하므로 다음과 같은 4個의 未知項이 생기게 된다.

$T_f$ ; 排出空氣의 溫度

$H_f$ ; 排出空氣의 絕對溫度

$RH_f$ ; 排出空氣의 相對溫度

$M_f$ ; 穀物의 最終含水率

따라서, 4個의 未知項을 求하기 爲한 4個의 基本

方程式이 必要하게 된다. 이들 4개의 基本方程式과 이와 關聯된 方程式은 다음과 같다.

1) 物質擴散 方程式

穀物の 乾燥過속은 恒率乾燥期間과 減率乾燥期間으로 나뉘어지며 大部分의 乾燥는 減率乾燥期間에 이루어진다. 減率乾燥期間에서 穀物內部的 水分移動現象을 나타내는 方程式은 Newton의 冷却法則에 基礎를 두고 있다.

一定温度的 媒體에 둘러 쌓인 物體의 溫度變化率은 周圍의 媒體와 物體사이의 溫度差異가 적을때 그 溫度差異에 比例하며 다음 (3-1)式으로 表示된다.

$$\frac{dt}{d\theta} = -K(t-t_e) \dots\dots\dots(3-1)$$

여기서,  $t$ ; 時間  $\theta$ 에서의 物體의 溫度  
 $t_e$ : 物體周圍의 媒體의 溫度  
 $K$ ; 熱傳達係數

이와같이 冷却率은 溫度差에 起因한 冷却能力에 比例하듯이 穀物乾燥에 있어서 乾燥率은 空氣의 乾燥能力에 比例하며 이 乾燥能力은 穀物の 水蒸氣壓과 空氣의 水蒸氣壓의 差異와 같다(18). 이와같은 關係는 다음 (3-2)式으로 表示된다.

$$\frac{dM}{d\theta} = -K_d(P_{v,g} - P_{v,a}) \dots\dots\dots(3-2)$$

여기서,  $M$ ; 穀物の 含水率(decimal, d.b.)  
 $\theta$ ; 時間(hr)  
 $K_d$ ; 物質擴散係數(decimal, d.b./hr. Pa)  
 $P_{v,g}$ ; 穀物の 水蒸氣壓(Pa)  
 $P_{v,a}$ ; . . . . . (Pa)

最終含水率을 求하기 爲하여 다시 (3-2)式은 (3-3)式으로 變形된다.

$$\frac{M_o - M_f}{\Delta\theta} = -K_d(ERH \cdot P_{v,T_g} - RH \cdot P_{v,T_a}) \dots\dots\dots(3-3)$$

여기서,  $M_o$ ; 初期含水率(decimal, d.b.)  
 $M_f$ ; 最終含水率(decimal, d.b.)  
 $\Delta\theta$ ; 時間(hr)  
 $K_d$ ; 物質擴散係數(decimal, d.b./hr.Pa)  
 $ERH$ ; 平衡相對濕度(decimal)  
 $P_{v,T_g}$ ; 穀溫  $T_g$ 에서의 飽和水蒸氣壓(Pa)  
 $RH$ ; 相對濕度(decimal)  
 $P_{v,T_a}$ ; 空氣의 溫度  $T_a$ 에서의 飽和水蒸氣壓(Pa)

上記式에서 平衡相對濕度를 算出하기 爲하여 Chung-Pfost의 平衡含水率方程式 (37)을 利用하였으며 다음 (3-4)式으로 表示한다.

$$ERH = \text{EXP}\left[\frac{-PA}{R(T_g + PC)} \cdot \text{EXP}(-PB \cdot M_o)\right] \dots\dots\dots(3-4)$$

여기서  $ERH$ ; 穀溫  $T_g$ , 含水率  $M_o$ 에서의 穀物の 平衡相對濕度(decimal)

$T_g$ ; 初期穀溫(°C)  
 $M_o$ ; 初期穀物 含水率(decimal, d.b.)  
 $PA$ ; 常數(1181.57)  
 $PB$ ; 常數(21.733)  
 $PC$ ; 常數(35.7031)  
 $R$ ; 一般氣體常數(1.987Kcal/kg-mole,OK)

또한, (3-3)式의 飽和水蒸氣壓을 算出하기 爲하여 Brooker方程式 (7)을 利用하였으며 다음 (3-5)와 (3-6)式으로 表示된다.

$$273.16 \leq T \leq 393.16 \text{ 일 때}$$

$$P_{v,s} = \text{EXP}\left[-\frac{A}{T} + B + CT + DT^2 + ET^3 + FT^4 + G \ln(T)\right] \dots\dots\dots(3-5)$$

$$233.16 \leq T \leq 273.16 \text{ 일 때}$$

$$P_{v,s} = \text{EXP}\left[24.2779 - \frac{6238.64}{T} - 0.344438 \ln(T)\right] \dots\dots\dots(3-6)$$

여기서  $P_{v,s}$ ; 溫度  $T$ 에서의 飽和水蒸氣壓(KPa)  
 $T$ ; 絕對溫度(°K)  
 $A$ ; -7511.52  
 $B$ ; 89.63121  
 $C$ ; 0.023998970  
 $D$ ;  $-1.1654551 \times 10^{-5}$   
 $E$ ;  $-1.2810336 \times 10^{-8}$   
 $F$ ;  $2.0998405 \times 10^{-11}$   
 $G$ ; -12.150799

2) 穀物과 空氣間의 物質平衡 方程式

穀物이 잃거나 얻은 水分의 量은 空數가 얻거나 잃은 量과 같기 때문에 排出空氣의 絕對濕度는 다음 (3-7)式과 같은 物質平衡方程式 (49)으로 計算된다.

$$H_f = H_o + (M_o - M_f) \frac{W_{gd}}{W_a} \dots\dots\dots(3-7)$$

여기서,  $H_f$ ; 排出空氣의 絕對濕度 (Kg, H<sub>2</sub>O/Kg, dry air)  
 $H_o$ ; 流入空氣의 絕對濕度 (Kg, H<sub>2</sub>O/Kg, dry air)  
 $W_{gd}$ ; Bin의 單位面積當 穀物層當 穀物の 乾物重量 (Kg, dry matter/m<sup>2</sup>, layer)  
 $W_a$ ; Bin의 單位面積當 時間當 乾空氣의 重量 (Kg, dry air/Kg hr)

3) 穀物과 空氣間의 熱平均 方程式

穀物과 空氣의 初期狀態의 熱容量의 合은 末期에서의 熱容量의 合과 같으므로 排出空氣의 溫度는 다음 (3-8)式과 같은 熱平衡方程式 (49)으로 計算된다.

$$1.006W_aT_0 + W_aH_0(2501.0 + 1.775T_0) + C_{g0}W_{gd}(1 + M_0)T_g = 1.006W_aT_f + W_aH_f(2501.0 + 1.775T_f) + C_{gf}W_{gd}(1 + M_f)T_f$$

여기서,  $T_0$ ; 流入空氣의 溫度(°C) .....(3-8)

$T_f$ ; 排出空氣의 溫度(°C)

$C_{g0}$ ; 初期穀物 比熱(KJ/Kg °K)

$C_{gf}$ ; 末期穀物 比熱(KJ/Kg °K)

上記式에서 左右兩邊의 첫째 項은 0°C를 基準으로 한 乾空氣의 熱容量이며, 둘째 項은 0°C를 基準으로 한 空氣中에 포함된 水蒸氣의 熱容量을 나타낸 것이다. 兩邊의 셋째 項은 穀物의 熱容量을 나타낸 것이다.

上記式을  $T_f$ 에 關해서 整理하면 다음 (3-9)式과 같다.

$$T_f = \frac{1.006W_aT_0 + W_aH_0(2501.0 + 1.775T_0) + C_{g0}W_{gd}(1 + M_0)T_g - 2501.1W_aH_f}{1.006W_a + 1.775W_aH_f + C_{gf}W_{gd}(1 + M_f)}$$

4) 排出空氣의 相對濕度

排出空氣의 相對濕度는 다음 (3-10)式으로 算出된다.

$$RH_f = \frac{101.325H_f}{P_{vs}T_f(H_f + 0.6219)}$$

여기서,  $RH_f$ ; 排出空氣의 相對濕度(decimal)

$P_{vs}T_f$ ; 溫度  $T_f$ 에서의 飽和 水蒸氣壓(Pa)

5) 其他 方程式

1) 空氣의 物理的 性質

上記의 基本方程式에 包含된 空氣의 水蒸氣壓, 絕對濕度 및 比體積은 다음 (3-11)~(3-13)式으로 算出된다.

$$P_v = RH \cdot P_{vs} \dots\dots\dots(3-11)$$

$$H_0 = \frac{0.6219P_v}{101.325 - P_v} \dots\dots\dots(3-12)$$

$$V_a = 2.833 \times 10^{-3} T_a (1 + 1.6078 H_0) \dots\dots\dots(3-13)$$

여기서,  $P_v$ ; 空氣의 水蒸氣壓(KPa)

RH; 空氣의 相對濕度(decimal)

$P_{vs}$ ; 空氣의 飽和 水蒸氣壓(KPa)

$H_0$ ; 絕對濕度(kg, H<sub>2</sub>O/kg, dry air)

$V_a$ ; 空氣의 比體積(m<sup>3</sup>/kg, dry air)

$T_a$ ; 水氣絕對溫度(°K)

2) 벼의 比熱 및 密度

벼의 比熱은 Haswell(20)의 式, 密度는 Wratten (53)의 式을 使用했다.

$$D_m = 499.696 + 8.33M \dots\dots\dots(3-14)$$

$$C_g = 1.1095 + 0.0448M \dots\dots\dots(3-15)$$

여기서,  $D_m$ ; 벼의 密度(kg/m<sup>3</sup>)

$C_g$ ; 벼의 比熱(KJ/kg °K)

$M$ ; 벼의 含水率(decimal, w.b.)

다. 送風空氣의 加熱에 依한 相對濕度의 變化

送風空氣를 加熱하지 않을 때는 氣象資料 즉, 乾球溫度와 相對濕度가 穀物層에 最初로 流入되는 空氣의 初期條件이 되지만, 送風空氣를 加熱할 때는 空氣의 溫度가 上昇함에 따라 相對濕도가 낮아지게 된다. 따라서 送風空氣의 加熱에 依해 變化된 相對濕도와 溫度가 穀物層에 最初로 流入되는 空氣의 初期條件이 된다.

送風空氣를 加熱하면 空氣의 乾球溫度와 相對濕도는 變하지만 絕對濕도나 水蒸氣壓은 變하지 않는다. 따라서 送風空氣의 加熱로 因하여 變化한 相對濕도는 加熱前의 水蒸氣壓과 加熱된 溫度에서의 飽和 水蒸氣壓을 利用하여 다음 (3-16)式으로 算出된다.

$$RH_0 = \frac{P_v}{P_{vs}T_a} \dots\dots\dots(3-16)$$

여기서  $RH_0$ ; 乾球溫度를  $\Delta T_a$ 만큼 上昇시켰을 때의 相對濕度(decimal)

$P_{vs}T_a$ ; (乾球溫度 +  $\Delta T_a$ )에서의 飽和 水蒸氣壓(KPa)

$\Delta T_a$ ; 送風空氣의 上昇溫度(°C)

$P_v$ ; 加熱前의 空氣의 水蒸氣壓(KPa)

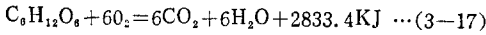
라. 穀物의 乾物重量 損失率

어떤 乾燥시스템이든지 穀物을 所要의 含水率까지 乾燥하는 동안 品質의 損傷이 일어나지 않아야 한다. 따라서 乾燥시스템의 成敗 與否는 所要의 含水率(安全貯藏含水率)까지 穀物을 乾燥하는 동안의 品質損傷 與否에 左右된다. 品質低下의 程度는 貯藏中에 呼吸에 依해 發生한 穀物의 乾物重量損失率로 判斷될 수 있다.

穀物의 呼吸過程은 炭水化合物이 分解하여 炭酸가

穀物の 常温通風乾燥 시스템의 시뮬레이션

스와 물 및 熱을 發生하는 過程이며 다음 (3-17)式으로 表示된다(49).



윗 式에서 1g의 炭水化合物이 分解하면 1.47g의 炭酸가스와 0.6g의 물 및 15.74J의 熱이 發生하게 된다.

벼의 貯藏中에 發生한 呼吸熱은 Murata式 (35)을 利用하여 算出하였으며 다음 (3-18)式으로 된다.

$$DM_k = 4.184 \text{EXP} [-0.111339 \times 10^{-2} T^2 + 0.111532 \times 10^{-2} TM - 0.5820 \times 10^{-2} M^2 + 0.08708 T + 0.4147 M - 10.85623] \dots (3-18)$$

여기서,  $DM_k$ ; 呼吸熱(KJ/kg, drymatter·hr)

$T$ ; 溫度(°C)

$M$ ; 벼의 含水率(% w.b.)

그런데 1KJ의 呼吸熱이 發生하면 0.09317g의 炭酸가스가 發生하게 되며, 穀物の 乾物 1kg中 1% 즉 10g이 分解하면 14.7g의 炭酸가스가 發生하게 되므로 上記式에 0.09317(g-CO<sub>2</sub>/KJ)를 곱하고, 14.7로 나누면, 乾物重量損失率(%)이 된다. 즉

$$DM = 0.02652 DM_k \dots (3-19)$$

여기서,  $DM$ ; 乾物重量損失率(%/hr)

一定時間 乾燥後  $i$ 穀物層에서의 總乾物重量損失率은 다음 式으로 表示된다.

$$TDM_{ij} = \sum_{j=1}^N DM_{ij} \cdot \Delta\theta \dots (3-20)$$

여기서,  $TDM_{ij}$ ;  $i$ 層 穀物の 一定時間 乾燥後의 總乾物量 損失率(%)

$DM_{ij}$ ;  $i$ 層 穀物の  $j$ 時點에서의 時間當 乾物重量 損失率(%/hr)

本 研究에서는 最上 15cm層의 穀物이 15%(w.b)로 乾燥되는 동안의 許容乾物重量損失率을 0.5%로 認定하고 이를 벼 乾燥시스템의 成敗判斷基準으로 하였다.

마. 呼吸에 依한 穀溫과 含水率의 變化

穀物の 呼吸過程에서 生成된 물과 熱에 依하여 穀物の 含水率이 增加하고 穀溫이 上昇한다. 따라서 本 研究에서는 이들 變化를 穀溫과 含水率의 算出에 包含시켰다.

1kg의 乾物重量이 損失되면 15.74KJ의 熱이 發生하며 1%의 乾物重量이 損失되면 0.6%(d.b.)의 含水率이 增加하므로 呼吸에 依한 穀溫 및 含水率 增加는 다음 式으로 表示된다.

$$\Delta T_g = \frac{0.01 DM \cdot W_{gd} \cdot 15.74}{W_{gw} \cdot C_g} \dots (3-21)$$

$$M_{fd} = \frac{M_f + 0.006 DM}{1 - 0.01 DM} \dots (3-22)$$

여기서,  $\Delta T_g$ ; 乾物重量損失로 因한 穀溫上昇分 (°C)

$M_{fd}$ ; 乾物重量損失後의 穀物含水率(% , d.b.)

$W_{gw}$ ; 穀物重量(kg)

$C_g$ ; 穀物比熱(KJ/kg °K)

$M_f$ ; 乾物重量損失前의 穀物含水率(% , d.b.)

바. 시뮬레이션 프로그램

앞에서 誘導한 方程式을 使用하여 FORTRAN LANGUAGE로 COMPUTER PROGRAM을 만들었으며, 이의 流通圖(Flow chart)는 Fig.(3-3)에 圖示되어 있다.

시뮬레이션 프로그램은 MAIN PROGRAM,  $RH_f$ 의 값을 修正하기 爲한 SUBROUTINE ADJUST, 乾物重量損失率을 算出하기 爲한 SUBROUTINE DLOSS, 飽和水蒸氣壓을 計算하기 爲한 FUNCTION PS로 構成되어 있다.

프로그램의 入力資料는 다음과 같다.

初期穀物含水率

初期穀溫

總穀物重量

穀物 Bin의 直徑

穀物層의 數

送風量

乾燥時間 増分

氣象資料(乾球溫度, 相對濕度)

送風空氣의 加熱濕度

시뮬레이션 프로그램으로부터 各 穀物層에서 一定時間別로 얻을 수 있는 出力資料는 다음과 같다.

排出空氣의 相對濕度

排出空氣의 溫度

最終含水率

乾物重量損失率

Fig. 3에서 보는바와 같이 豫測한 排出空氣의 相對濕도가 100%以下일 때는 排出空氣狀態의 豫測이 合理的이지만 100%以下일 때는 排出空氣의 溫度가 露點以下로 下降하여 空氣中の 水蒸氣가 穀物에 凝縮된 狀態이므로 排出空氣의 狀態點을 다시 豫測하여야 한다. 이를 爲하여 먼저  $H_f$ 를 假定하고  $M_f$ ,  $T_f$  및  $RH_f$ 를 차례로 算出하여  $RH_f$ 의 값이 0.995~1.000의 範圍에 이를 때까지 反復計算하는



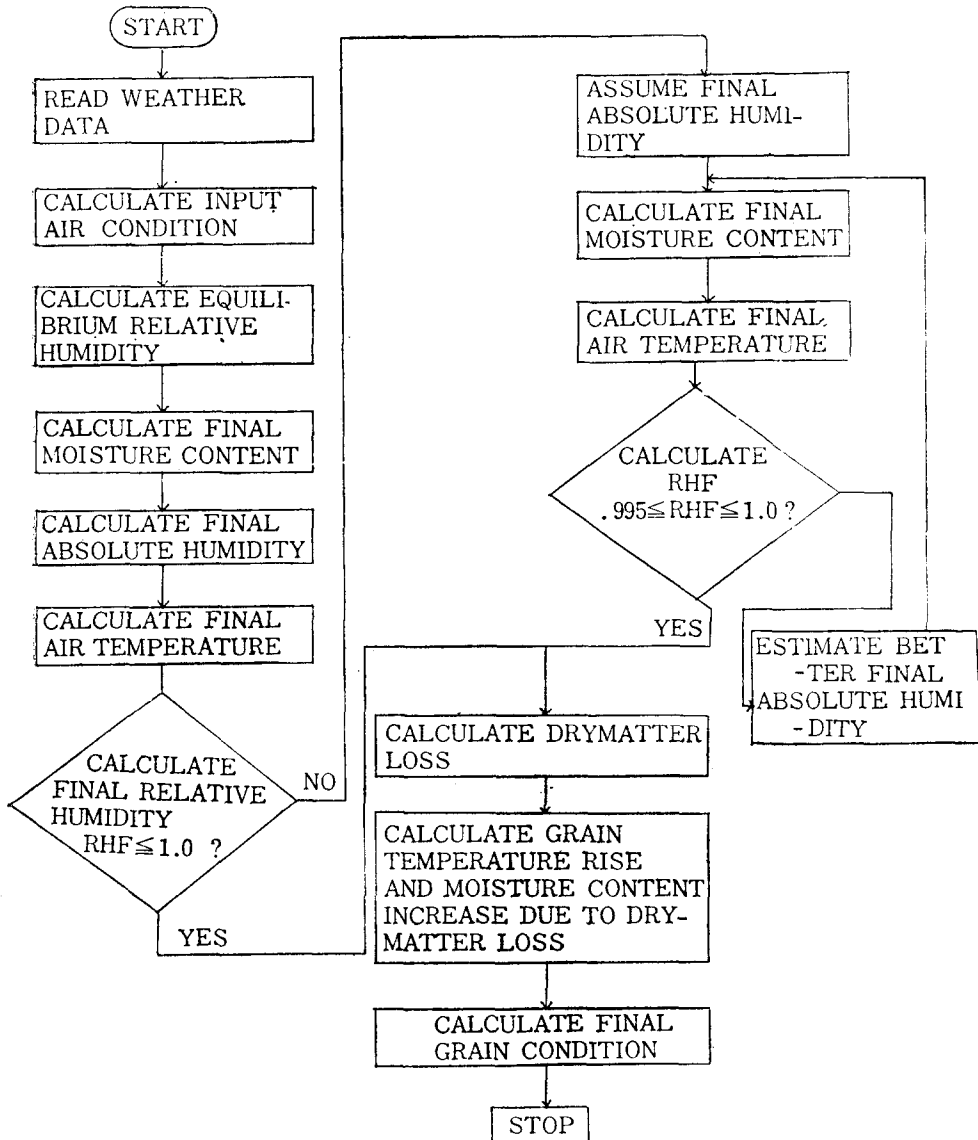


Fig. 3. Flow chart of simulation program

Thompson의 方法 (50)을 擇하였다.

#### 4. 시뮬레이션 모델의 檢定

常溫通風乾燥 시스템의 시뮬레이션 모델의 妥當性을 檢定하기 위하여 實驗値와 시뮬레이션 모델에 依한 豫測値를 比較하는 方法을 擇하였으며, 이를 爲하여 實施한 乾燥實驗 및 시뮬레이션 內容은 다음과 같다.

##### 가. 遂行方法

###### 1) 乾燥實驗

###### (1) 供試材料

常溫通風乾燥實驗은 1978年 10月 14日에 始作하여 10月 31日, 終了하였다. 本 實驗에 使用된 벼는 自脫型 콤바인으로 收穫한 것으로 品種 및 栽培關係資料는 Table 1과 같다.

Table 1. The agronomic and other data of the rough rice variety used for the drying test with natural air

Variety	Jinheung
Sowing date	Apr. 25
Transplanting date	Jun. 17
Harvesting date	Oct. 13
Drying period	Oct. 14-Oct. 23(continuous fan operation) Oct. 24-Oct.31(intermittent fan operation from 9:00 to 21:00)
Initial moisture content	24.8(% w.b.)
Quantity of rough rice	2.5(m <sup>3</sup> )
Grain depth	1.1(m)

###### 2) 乾燥裝置

本 乾燥實驗에 使用된 穀物 Bin을 熱損失을 줄이기 爲해 12mm두께의 合板을 使用하여 밑면적 2.25 m<sup>2</sup>(1.5m×1.5m), 높이 1.8m의 正方形 構造로 製作하였다. 밑바닥에서 20cm 높이에 鐵網(눈의 크기 2.5mm×2.5mm)을 깔았으며, 鐵網에서 부터 15cm, 30cm, 60cm, 105cm의 높이에 各各 試料採取孔(直徑 3.2cm)을 設置하였다.

本 實驗에 使用된 送風機는 直徑 30cm의 遠心型으로 1734rpm에서 42.6m<sup>3</sup>/min의 風量을 낼 수 있는 것으로 0.75KW의 單相電動機를 連結하여 使用

하였다. 乾燥實驗에 使用된 벼의堆積 두께는 1.1m이며, 風量은 2.35m<sup>3</sup>/min.m<sup>2</sup>이었다.

乾燥實驗中 日射의 影響을 排除하기 爲하여 乾燥裝置를 屋內에 設置하였다.

###### 3) 測定方法 및 器具

① 벼의 含水率; 穀物 Bin의 鐵網에서 부터 15cm, 30cm, 60cm, 105cm높이에 있는 各層의 中央點과 그 中央點에서 左右 50cm點의 穀物을 15g씩 3번 反復으로 1日 1回 採取하였다

벼의 含水率은 精度 0.01g의 天秤을 使用하여 乾燥 oven에 依한 110°C 定溫乾燥法으로 測定하였다.

② 送風量의 測定; 精度 1m/sec. Biram anemometer를 使用하여 風量을 測定하였다.

③ 送風空氣의 溫度 및 相對濕度; 測候所의 測定値를 使用하였으며, 乾燥期間中의 氣象資料는 附錄의 Table(c)에 收錄되어 있다

###### 2). 시뮬레이션 모델에 依한 豫測

벼의 冷水率의 變化를 豫測하기 爲하여 實施한 常溫通風乾燥의 시뮬레이션에 使用된 入力資料는 다음과 같다.

- ① 初期含水率; 0.330(decimal, d.b.)
- ② 初期穀溫; 15.6(°C)
- ③ 總穀物重量; 1,500(kg)
- ④ 穀物 Bin의 直徑; 1.53(m)
- ⑤ 穀物層의 數; 15
- ⑥ 送風量; 4.99(m<sup>3</sup>/min)
- ⑦ 乾燥時間増分; 3(hrs)
- ⑧ 氣象資料; 3時別의 乾球溫度 및 相對濕度(附表 (Table(c)))
- ⑨ 送風空氣의 加熱 溫度; 0(°C)

乾燥實驗과 마찬가지로 送風은 처음 10日間은 連續送風을 하였으며 그後 8日間은 間斷送風(09~21時)을 實施하였다.

#### 나. 實驗値와 豫測値의 比較

乾燥實驗과 시뮬레이션에서 얻은 實驗値와 豫測値를 比較한 結果는 Table 2와 같다. Fig. 4은 各穀物層에서의 乾燥時間別 含水率을 比較한 것이며 Fig. 4는 全穀物層의 乾燥時間別 平均含水率을 比較한 것이다.

以上の 結果에서 보는 바와 같이 各層에서 含水率의 實驗値와 豫測値의 差異는 ±0.01~1.29%이며 全穀物層의 平均含水率의 差異는 ±0.03~0.47(平均

**Table 2. Comparison of the experimental and predicted moisture content**  
(Initial moisture content 24% w.b., airflow rate 2.35 mm/m<sup>3</sup>, bed depth 1.1m, no heat added.)

Depth (cm)	15			30			60			105			Average			
	M (w.b.)	*E	**P	***D	E	P	D	E	P	D	E	P	D	E	P	D
DT																
21	22.68	23.97	-1.29	24.33	24.21	0.12	24.57	24.38	0.19	24.66	24.51	0.15	24.06	24.27	-0.21	
45	22.29	23.00	-0.71	22.79	23.57	-0.78	23.96	24.07	-0.11	24.04	24.32	-0.28	23.27	23.74	-0.47	
117	21.73	21.18	0.55	22.65	22.46	0.19	23.76	23.58	0.18	24.19	24.13	0.06	23.08	22.84	0.24	
165	19.42	19.32	0.10	21.63	21.10	0.53	22.47	22.82	-0.35	23.56	23.70	-0.14	21.77	21.74	0.03	
225	17.86	18.22	-0.36	20.76	20.10	0.66	21.76	22.30	-0.54	23.36	23.48	-0.12	20.94	21.03	-0.09	
279	15.23	15.28	-0.05	17.02	17.52	-0.50	20.82	20.96	-0.14	22.94	23.02	-0.08	19.00	19.20	0.20	
303	15.20	15.51	-0.31	16.92	17.20	-0.28	20.52	20.48	0.04	22.71	22.70	0.01	18.83	18.97	-0.14	
327	15.17	15.18	-0.01	16.02	16.66	-0.64	20.26	20.04	0.22	22.62	22.59	0.03	18.52	18.62	-0.10	

\*E ; Experimental values \*\*P ; Predicted values \*\*\*D=E-P DT ; Drying time(hrs)

±0.19)로서 서로 잘 일치하는 것으로 判斷할 수 있다.

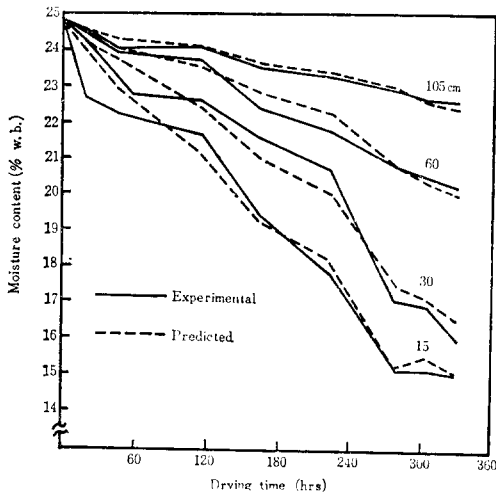
또한 시뮬레이션 모델의 檢定을 爲하여 Calderwood(9)가 美國 Texas주 Beaumont에서 實施한 벼의 乾燥實驗結果를 使用하였다. 이와 關聯된 乾燥條件은 다음과 같다.

初期含水率 : 19.6% (w.b.)

送風量 : 1.91cm/m<sup>3</sup>

Bin의 直徑 : 2.7m

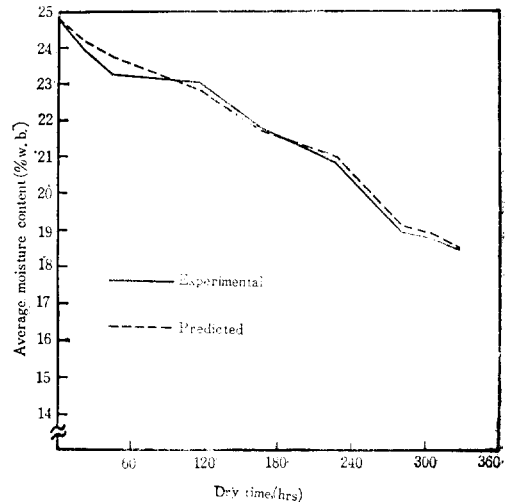
堆積 두께 : 2.5m



**Fig. 4. Comparison of the experimental and predicted moisture content at each layer**(Initial moisture content 24.8% w.b., airflow rate 2.35cm/m<sup>3</sup>)

Calderwood의 實驗値와 本 시뮬레이션모델의 豫測値는 Fig. 6과 Fig. 7에서 보는 바와 같이 역시 잘 일치함을 알 수 있다.

따라서, 本 시뮬레이션 모델은 벼의 常溫通風乾燥에서 含水率變化를 豫測하는데 妥當性이 있는 것으로 思料된다.



**Fig. 5. Comparison of the experimental and predicted average moisture content**(Initial moisture content 24.8% w.b., airflow rate 2.35cm/m<sup>3</sup>, bed-depth 1.1 meter)

## 5. 結 論

穀物の 常溫通風に 의한 厚層乾燥過程을 解釋하기

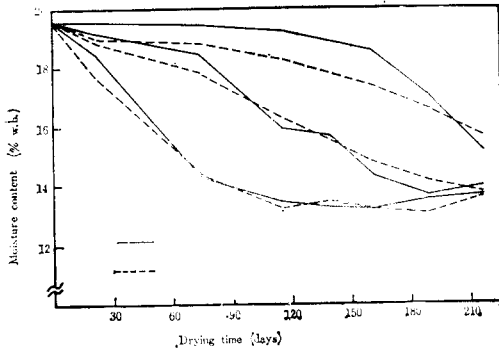


Fig. 6. Comparison of the experimental and predicted moisture content at each layer (Initial moisture content 19.6% w.b., airflow rate 1.99cm/m<sup>3</sup>, bed-depth 2.45m, bin diameter 2.70m, location, Beaumont, Texas)

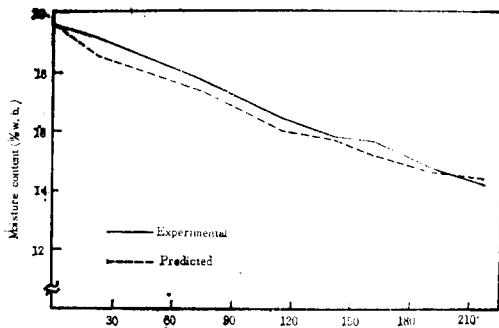


Fig. 7. Comparison of the experimental and predicted average moisture content (Initial moisture content 19.6% w.b., airflow rate 1.99 cm/m<sup>3</sup>, bed-depth 2.45m, bin diameter 2.70m, location, Beaumont, Texas)

爲하여 厚層을 많은 薄層으로 나누고, 이들 薄層에서 일어나는 穀物 및 送風空氣의 狀態變化를 連속的으로 計算하여 厚層을 形成할 수 있도록 이들을 組合하였다.

常温通風乾燥에서 穀物の 含水率變化를 豫測할 수 있는 시뮬레이션 모델을 開發하여 豫測程度를 實驗的方法에 依하여 檢定하였다. 그 결과 本研究에서 開發된 시뮬레이션 모델은 穀物の 常温通風乾燥過程을 解釋하고 含水率 變化를 豫測하는데 적절한 것으로 나타났다.

參考文獻

1. Alam, A. and Shove, G.C. Simulated drying of soybeans. ASAE Paper No. 71-816, 1971
2. Bakker-Arkema, F.W. and Farmer, D.M. Use of digital computer for efficient drying of high moisture cerealgrain dough. ASAE Trans. 13(1), pp. 61-63, 66, 1970
3. Bloome, P.D. and Shove, G.C. Near equilibrium smulation of shelled corn drying. ASAE Trans. 14(4), pp. 481-487, 1971
4. Bloome, P.D. Drying shelled corn with ambient air-a computational model. Unpub. M. S. Thesis, Univ. of Ill. May 1969
5. Bloome, P.D. and Shove, G.C. Simulation of low temperature drying of shelled corn leading to optimization. ASAE Trans. 15(1), pp. 310-316, 1972
6. Brooker, D.B., Bakker-Arkema, F.W. and Hall, C.W. Drying cereal grains. VI Publishing Co., 1974
7. Brooker, D.B. Mathematical model of the psychrometric chart. ASAE Trans. 10(4), pp. 558-560, 563, 1967
8. Brooker, D.B., and McQuigg, J.D. Analysis of weather data pertaining to grain drying. ASAE Trans. 3(2), pp. 116-119, 1960
9. Calderwood, D.L. Resistance to airflow of rough, brown and milled rice. ASAE Trans 16(3), pp. 525-527, 1973
10. Chen, C.S. and Clayton, J.T. The effect of temperature on sorption isotherms of biological materials. ASAE Trans. 14, pp. 927-929, 1971
11. Chikubu, S. Storage condition and storage method in training in storage and preservation of food grains. APO, Tokyo, Japan, pp. 109-136, 1970
12. Christensen, C.M. Deterioration of stored grains by fungi. The Botanical Review. 23 (2), pp. 108-134, 1957
13. Chung, D.S. and Pfost, H.B. Adsorption and desorption of water vapor by cereal grain

- and their products. ASAE Trans. 10(4), pp. 549—557, 1967
14. Day, D.L. and Nelson, G.L. Desorption isotherms for wheat. ASAE Trans. 8(2), pp. 293—297, 1965
  15. Duggal, A.K. Near equilibrium simulation of paddy drying with ambient air to predict safe storage periods, M.S. thesis, AIT. Bangkok, Thailand, 1978
  16. Flood, C.A., Sabbah, Jr.M., Meeker, D. and Peart, R.M. Simulation of a natural air corn drying system. ASAE Trans. 15(1), pp. 156—159, 162, 1972
  17. Foster, M.H. Minimum air flow requirements for drying grain with unheated air. Agricultural Engineering, 34, pp. 681—684, 1953
  18. Hall, C.W. Drying farm crops. AVI Publishing Co., 1971
  19. Hamdy, M.Y. and Barre, H.J. Analysis and hybrid simulation of deep-bed drying of grain. ASAE Trans. 13(6), pp. 752—757. 1970
  20. Haswell, G.H. A note on the specific heat of rice, oats and their products. Cereal Chemistry 31, pp. 341—343, 1954
  21. Haynes, B.C. Vapor pressure determination of seed hygroscopicity. Tech. Bull. 1229, ARS. USDA. 1961
  22. Henderson, J.M. and Henderson, S.M. A computational procedure for deep-bed drying analysis. Agr. Eng. Res. B(2), pp. 87—95, 1968
  23. Henderson, S.M. A basic concept of equilibrium moisture, Agricultural Engineering 33, pp. 29—31, 1952
  24. Henderson, S.M. Deep-bed ricedrier performance. Agricultural Engineering 36, pp. 817—820, 1955
  25. Hukill, H.V. Basic principles in drying corn and grain sorghum. Agricultural Engineering, 28(8), pp. 335—338, 240, 1974
  26. Ishibashi, S., Kojima, T. and Ito, A. Studies on cooling and cold air drying for grain storages(Ⅱ), JSAM. 32(2), pp. 140—144, 1970
  27. Ishibashi S. Principles of quality, drying and storage of rough rice. JSAM. 33(3), pp. 312—322, 1971
  28. Kim, S.R. Study on the small grain bin for the improvement of grain drying and storage. The Journal of the Korean Society of the Agricultural Machinery, 16(1), pp. 39—67, 1974
  29. Koh, H.K. Determination of equilibrium moisture content of rough rice. The Journal of the Korean Society of the Agricultural Machinery, 3(2), pp. 62—68, 1978
  30. Maurer, S.G. Natural-air rain drying model and validation. Unpublished MS thesis. Kansas State Univ. 1977
  31. McNeal, X. Rice aeration, drying and storage. Arkansas Experiment station, Bulletin 593, pp. 1—41, 1957
  32. Morey, R.V. and Peart, R.M. Optimization of a natural air corn drying system. ASAE Trans. 14(5), pp. 930—934, 1971
  33. Morrison, S. Drying rice with unheated air. Agricultural Engineering, 35, pp. 735—736, 1954
  34. Murata, S. An application of thin-layer-drying theory to predicting grain moisture and temperature changes in a mixing bed of rough rice. Sci. Bull. Fac. Agr., Kyushu Univ. 27(34), pp. 2590280, 1973
  35. Murata, S., Chuma, Y. and Otsuka, K. The formulae of aeration and ventilation for storage room of farm products. JSAM, 38(2), pp. 233—238, 1976
  36. Pfost, H.B., Maurer, S.G., Chung, D.S. and Foster, G. Fan management systems for natural air dryers. ASAE Paper No. 77—3526, 1977
  37. Pfost, H.B., Maurer, S.G., Chung, D.S. and Milliken, G.A. Summarizing and reporting equilibrium moisture data for grains. ASAE Paper No. 76—3520, 1976
  38. Sabbah, M.A. Prediction of batch drying performance with natural air. Unpublished M.S. thesis. Agricultural Engineering Department, Purdue Univ. 1968
  39. Saul, R.A. and Lind, E.F. Maximum time for safe drying of grain with unheated air.

- ASAE Trans. 9(1), pp. 29—33, 1958
40. Schaper, L.A., Isaacs, G.W. and Dale, A.C. Evaluating heat available for drying in natural air, ASAE Trans. 4(1), pp. 140—141, 1961
  41. Schmidt, J.L. and Waite, P.J. Summaries of wet-bulb temperature and wet-bulb depression for grain drier design. ASAE Trans. 5(2), pp. 186—189, 1962
  42. Semeniuk, G., Anderson, J.S. and Alcock, A. W. Microflora in storage of cereal grains and their products. American Association of Cereal Chemists. Monograph Series 2, pp. 77—151, 1954
  43. Shove, G.C. and Andrew, F.W. Cooling, chilling and dehydration of stored shelled corn. Agricultural Engineering, 50(6), pp. 360—362, 1969
  44. Sorenson, J.W., Jr. and Crane, L.E. 1960. Drying rough rice in storage, Texas Agr. Exp. Sta. Bull. B-592, 1960
  45. Steele, J.L., Saul, R.A., and Hukill, W.V. Deterioration of shelled corn as measured by carbon dioxide production. ASAE Trans. 12 (5), pp. 685—689, 1969
  46. Shrohman, R.D. and Yoeger, R.R. A new equilibrium moisture content equation. ASAE Trans. 10(5), pp. 675—677, 1967
  47. Sutherland, J.W. Batch grain drier design and performance prediction. Agr. Eng. Res. 20, pp. 423—432, 1975
  48. Teter, N.C. and Hoane, C.W. Molds impose limitations in grain drying. Agricultural Engineering, 39, pp. 24—27, 1958
  49. Thompson, T.L. Temporary storage of high-moisture shelled corn using continuous aeration. ASAE Trans. 15(2), pp. 333—337, 1972
  50. Thompson, T. L. Peart, R.M. and Foster, G.H. Mathematical simulation of corn drying—a new model, ASAE Trans. 11(4), pp. 582—586, 1968
  51. Thompson, T. L. Simulation for optimal grain-drier design. ASAE Trans. 13(6), pp. 844—848, 1970
  52. Thompson, T.L., Villa, L.G. and Cross, O.E. Simulated and experimental performance of temperature-control systems for chilled high moisture grain storage, ASAE Trans. pp. 554—559, 1971
  53. Wratten, F.T., Poole, W.D., Chesness, J.L., Bal, S. and Ramarao, V. Physical and thermal properties of rough rice. ASAE Trans. 2(6), pp. 801—803, 1969.
  54. Yamashita, R. Study of rough rice drying ( I ). JASM 28(3), pp. 162—166, 1966.
  55. Young, J.H. and Dickens, J.W. Evaluation of costs for drying grain in batch or crass-flow systems. ASAE Trans. 18(4), pp. 734—739, 1975
  56. Zachariah, G.L. and Isaacs, G.W. Simulating a moisturecontrol system for a continuous-flow drier. ASAE Trans. 9(3), pp. 297—302, 1966
  57. Zachariah, G.L. and Lipper, R.I. Weather data as pertaining to crop drying. ASAE Trans. 9(2) pp. 261—264, 1966