

# 短粒種벼의 薄層吸濕方程式

## Thin-layer Rewetting Equation for Short Grain Rough Rice

鄭 春 植\* 琴 東 赫\* 朴 勝 濟\*\*

C. S. Jung, D. H. Keum, S. J. Park

### Abstract

An experimental study was conducted to develop a thin-layer rewetting equation of short grain rough rice of Akihikari variety. Four thin-layer rewetting equations were experimentally determined from 25°C to 45°C and 70% RH to 85%RH conditions.

Diffusion, Henderson, Page, and Thompson equations widely used as thin-layer drying equations were selected. Experimental data were fitted to these equations using linear regression analysis except diffusion equation. The diffusivity in the diffusion equation was determined by optimization method. Four equations were highly significant.

In order to compare the goodness of fit of each equation, the error mean square of each equation was calculated.

The diffusion model was not a very good model because the error mean square was very large. The other three models showed the same level of error mean square and could predict satisfactorily the rewetting rate of short grain rough rice.

### 使用記號表

A, B : 實驗常數  
D : 水分擴散係數 (cm<sup>2</sup>/min)  
Me : 吸濕平衡含水率 (w.b., 소수)  
MR : 含水比  
R : 벼의 等價球半徑 (cm)  
RH : 相對濕度 (소수)  
T : 溫度 (°C)  
Ta : 絕對溫度 (K)  
θ : 時間 (min)

벼는 밀, 보리, 옥수수 등과 함께 世界 四大農產物中的 하나로 人間에게 가장 重要한 食糧이며, 아시아를 包含하여 地球人口의 25%가 벼를 主食으로 하고 있다 (Agrawal 등, 1977).

最近의 研究에 의하면 벼날알의 균열은 벼를 高溫 또는 高速으로 乾燥할때 뿐만 아니라 乾燥過程에서의 吸濕 또는 乾燥後 外氣에 노출될때의 吸濕에 크게 影響을 받아 發生하는 것으로 알려져 있다. 그리고 收穫時期에 벼가 예취후 탈곡되기 전에 圃場에서 自然乾燥되는 동안 降雨에 의해 再吸濕現象이 發生되는데 이로 인해 벼의 品質이 크게 低下되는 것으로 알려져 있다.

또 벼의 貯藏이나 취급과정중에서 再吸濕過程이

### 1. 諸 論 緒

\*성균관대학교 농과대학 농업기계공학과

\*\*서울대학교 농과대학 농공학과

일어나는 경우가 있어 이때 發生되는 質的損失도 無視할 수 없다.

이런 관점에서 벼의 均열현상의 해석뿐만 아니라 건조와 저장과정의 보다더 精確한 이론적 분석을 위하여 벼의 흡습특성의 구멍이 요구된다.

그러나 벼의 건조특성에 관한 연구는 많이 수행되어 왔으나 吸濕特性에 관한 연구는 거의 없는 실정이다.

벼의 흡습특성의 기초사항으로 吸濕平衡含水率과 吸濕方程式을 들 수 있다.

벼의 吸濕平衡含水率에 대하여는 이미 본 연구진에서 벼의 흡습특성 구멍 연구의 일부로 보고한바 있으며(琴 등, 1987), 本研究은 薄層乾燥方程式을 開發하기 위하여 수행되었다.

本研究의 구체적 目的은 우리 나라에서 주로 재배되는 短粒種벼에 대하여 送風空氣溫度 25~45°C, 相對濕度 70~85%의 범위에서 吸濕實驗을 수행하여 적절한 薄層吸濕方程式을 開發하는데 있다.

## 2. 文獻概要

穀物の 薄層乾燥 및 吸濕速度를 나타내기 위한 많은 모델이 개발되었다.

Hustrulid (1959) 등은 옥수수의 낱알을 球로 가정하고, 건조현상을 水分擴散理論에 근거하여 해석하였으며, 다음의 이론식으로 含水比를 表示하였다.

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \text{EXP} \left( -\frac{n^2 \pi^2 D}{R^2} \theta \right) \dots (2-1)$$

$$D = C_1 \text{EXP} \left( -\frac{C_2}{T_a} \right)$$

Henderson (1952) 은 水分擴散모델에서 첫항만을 나타내어 옥수수의 薄層乾燥모델로 사용하였으며, 다음식으로 表示하였다.

$$MR = A \text{EXP} (-B\theta) \dots (2-2)$$

여기서 A와 B는 送風溫度和 相對濕度の 함수로 나타내었다.

Misra (1980) 등은 옥수수의 薄層乾燥와 吸濕方程式으로 (2-2)식을 변형시켜 다음의 Page형 方程式으로 表示하였다.

$$MR = \text{EXP} (-A\theta^n) \dots (2-3)$$

Thompson (1968) 은 옥수수의 薄層乾燥實驗에서 다음과 같은 함수비의 二次式으로 제시하였다.

$$\theta = A \ln(MR) + B \{ \ln(MR) \}^2 \dots (2-4)$$

琴(1987) 등은 葉용액을 이용한 정적인 방법을 사용하여 온도 20~50°C, 相對濕度 46.3~97.2% 범위에서 短粒種벼에 대한 吸濕實驗을 수행하였으며, 다음의 吸濕平衡含水率方程式을 제시하였다.

二次式 모델 :

$$Me = 0.18448 - 0.00106T - 0.26582RH + 0.0000115T^2 + 0.28936RH^2 \dots (2-5)$$

Henderson 모델 :

$$Me = \left[ \frac{-\ln(1-RH)}{0.785355T_a} \right]^{1/n} \dots (2-6)$$

## 3. 材料 및 方法

### 가. 供試材料

本研究에 使用된 試料은 一般벼(品種: 아끼히카리)短粒種으로 경기도 화성군 반월면 입북리에서 1985년 11월에 收穫한 것으로 圃場에서 自然乾燥한 후 저장고에 貯藏중인 것을 구입하였으며 異物質을 除去하고 空氣乾燥온 內的 溫度 30°C에서 11.8% (w.b.)까지 건조한 후 비닐봉지에 밀봉하여 3°C 냉장고에 보관하였다.

벼의 等價球半徑은 試料中 임의의 100개의 낱알을 추출하여 토루엔이 담긴 메쉬실린더에 넣어 토루엔의 체적변화를 측정하여 벼 낱알의 평균체적을 구한후 球의 體積算出公式( $\frac{4}{3}\pi R^3$ )으로부터 구하였으며, 그 값은 0.174cm였다.

### 나. 實驗裝置 및 方法

#### 1) 實驗裝置

本研究에 使用된 恒溫恒濕裝置의 구조는 그림 1과 같으며 그 作動原理 및 特徵은 李 등(1985)의 論文에 기술된 바와 같다.

그림 2와 같이 試料箱子(17cm×17cm)는 乾燥室中央에 設置하고 試料箱子와 乾燥室 벽사이의 空間은 함석으로 차단하였으며, 水分吸濕에 의한 試料의 무게變化를 測定하기 爲하여 스트레인 게이지를 부착한 probing ring을 製作하여 試料箱子에 連結하였다.

#### 2) 實驗方法

本研究의 實驗設計는 分割區配置法으로 하였으며, 主區인 相對濕度の 水準은 70, 80, 85%, 細區인 溫度는 25, 35, 45°C로 하여 各各 3反復의 實驗을

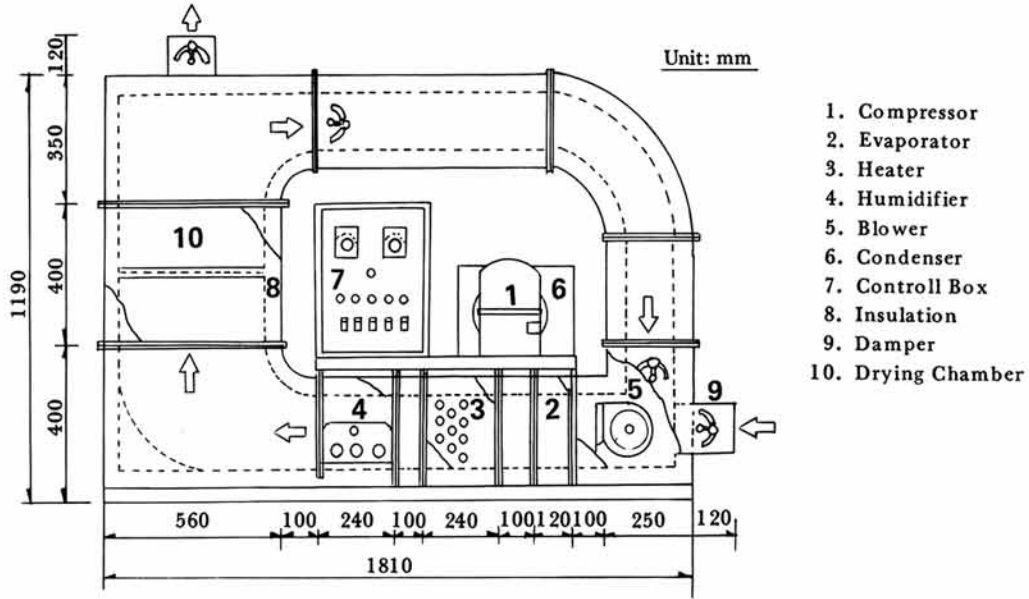


Fig. 1. Schematic Drawing of Experimental Dryer.

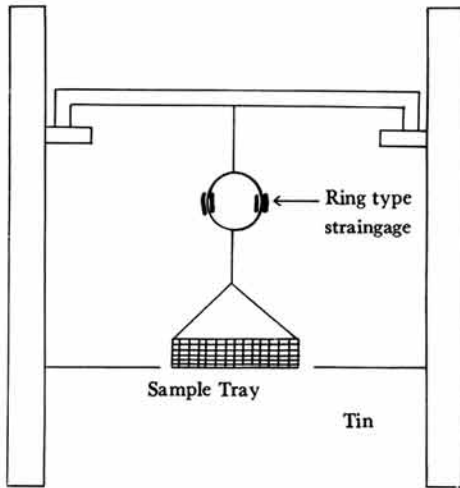


Fig. 2. Drying chamber.

수행하였다. 試料箱子를 통과하는 空氣의 流速의 平均値는 1.56m/s 이었으며 實驗中 溫度와 相對濕度는 白金測溫低抗體(Pt 100Ω)와 自記溫濕度計로 測定하였다.

實驗時作 30分前에 試料를 냉장고에서 꺼내 試料溫度가 室內溫度와 平衡을 이루게한 後 200g을 取하여 試料箱子에 담고 미리 作動하여 正常狀態가 되

어 있는 恒溫濕裝置의 乾燥室에 試料箱子를 設置하여 吸濕에 의한 무게變化를 測定하였다.

試料의 무게變化는 스트레인게이지를 통하여 Linearcoder에 連續的으로 記錄되게 하였으며 含水率은 무게變化로써 계산하였고 實驗은 12時間 실시하였다.

#### 4. 結果 및 考察

그림 3, 4 및 5는 各處理別 吸濕曲線을 나타낸 것이다. 여기서 含水比(moisture ratio)를 구하기 위하여 사용된 吸濕平衡含水率은 (2-5)式에 의해 計算된 값이다.

그림 3부터 그림 5까지에서 보면 벼의 吸濕特性도 乾燥特性과 비슷함을 알 수 있다. 따라서 乾燥方程式의 模型을 吸濕方程式의 模型로서 使用해도 무리가 없는 것으로 판단되어 現在 많이 使用되고 있는 薄層乾燥方程式 模型 4가지(liquid diffusion, Henderson, Page 및 Thompson model)를 선택하여 薄層吸濕方程式 模型로서의 適合性을 檢定하였다.

各 模型은 (2-1)~(2-4)式과 같다.

4개의 模型中 水分擴散模型에서 水分擴散係數 D

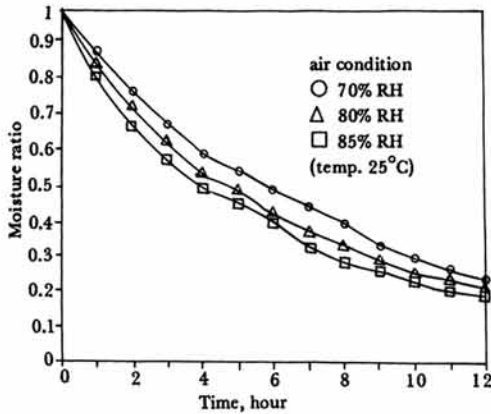


Fig. 3. Adsorption rate of short grain rough rice.

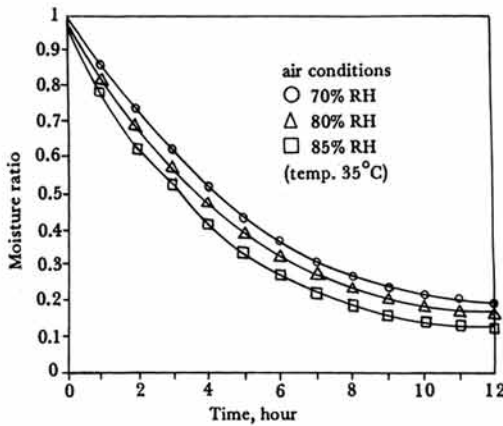


Fig. 4. Adsorption rate of short grain rough rice.

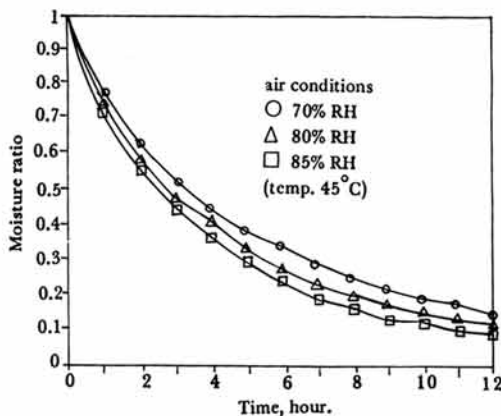


Fig. 5. Adsorption rate of short grain rough rice.

를 구하는데는 殘差自乘平均(Error Mean Square)이 最少가 되도록 하는 最適化方法을 使用하였고,

다른 세 모델에서는 最少自乘法을 使用하여 常數값을 구하였다.

4個의 모델에 대한 分析結果는 表1과 같다.

모델의 適合性을 比較하기 위하여 殘差自乘平均값을 구하였으며, 그 結果는 表2와 같다.

表2에서와 같이 水分擴散모델의 잔차자승평균값은 다른 모델에 比하여 큰값을 나타내었으며, 다른 세 모델은 거의 같은 수준의 값을 나타내었다.

4個의 모델은 모두 1% 水準에서 有意性이 인정되었으나 殘差自乘平均값이 적은 Henderson, Page 및 Thompson 모델이 水分擴散모델보다 短粒種벼의 薄層吸濕方程式으로 보다더 適合하다고 判斷할 수 있다.

그림 6은 溫度 45°C 相對濕度 70% 條件에서 實驗値와 各 모델들에 의한 豫測値를 比較한 것이다. 水分擴散모델을 제외한 나머지 세 모델에 의한 예측치는 實驗치와 잘 일치함을 알 수 있다.

Table 1. Results of regression analysis.

Diffusion model

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{-\frac{n^2 \pi^2 D}{R^2} \theta}$$

$$D = 0.00308 e^{-\frac{2575.9}{T_a} + 2.4303 RH}$$

Henderson model

$$MR = Ae^{-B\theta}$$

$$A = 1.0398 + 0.010907 T - 0.1436 RH - 0.00024005 T^2 - 0.17797 RH^2$$

$$B = 0.01014 + 0.0001949 T - 0.033605 RH - 0.0000023024 T^2 + 0.02406 RH^2$$

Page model

$$MR = e^{-A\theta^B}$$

$$A = 0.055781 - 0.0017514 T - 0.082308 RH + 0.000028328 T^2 + 0.062666 RH^2$$

$$B = 0.74888 + 0.067294 T - 1.9040 RH - 0.001015 T^2 + 0.99601 RH^2$$

Thompson model

$$\theta = A \ln(MR) + B \{\ln(MR)\}^2$$

$$A = -1199.2 + 9.9033 T + 705.33 RH$$

$$B = 300.9668 e^{(0.0059305 T - 2.4607 RH)}$$

Table 2. Comparison of Single-layer rewetting equations for short grain rough rice.

| Equations          | Error mean square of moisture ratio ( $s^2$ ) |
|--------------------|---|
| Diffusion equation | 0.212504                                      |
| Henderson equation | 0.001117094                                   |
| Page equation      | 0.001228585                                   |
| Thompson equation  | 0.000988284                                   |

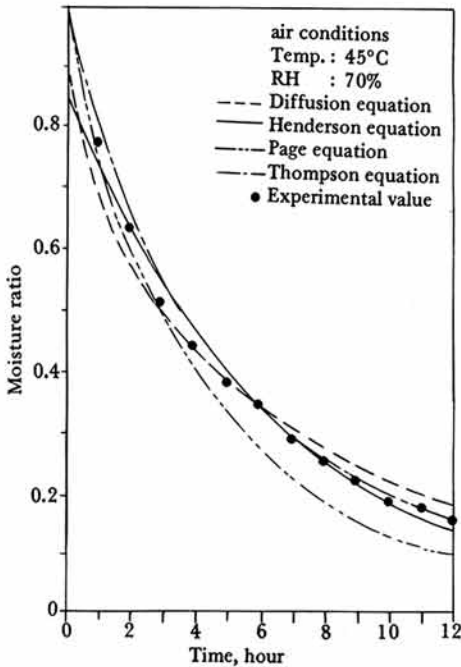


Fig. 6. Comparison of experimental and predicted values by different equations.

### 5. 結論 및 要約

本 研究는 溫度 25~45°C, 相對濕度 70~85% 범  
위에서 短粒種벼인 아끼히가리에 대한 薄層吸濕實  
驗을 통하여 薄層吸濕方程式을 開發하기 위해 수행  
된 것으로 그 결과를 要約하면 다음과 같다.

벼의 薄層吸濕方程式모델로는 穀物의 薄層乾燥方  
程式모델로 많이 使用되는 水分擴散모델, Hender-  
son, Page 및 Thompson 모델을 선정하여 모델의  
適合性を 判定한 결과, 4個의 모델이 모두 1%  
水準에서 有意성이 認定되었으나, 殘差自乘 平均값

이 적은 Henderson, Page 및 Thompson 모델이 水  
分擴散모델보다 短粒種벼의 薄層吸濕方程式 모델로  
보다 더 適合한 것으로 判斷되었다.

### 參考文獻

1. 琴東赫, 鄭春植, 朴勝濟. 1987. 短粒種벼의 吸  
濕平衡含水率. 성대논문집(과학기술편) 제38집 No.1
2. 이용국, 김삼도, 박승제. 1983. 보리의 건조특  
성과 건조온도 및 함수율이 정맥수율에 미치는  
영향. 한국농업기계학회지 8(2): 62-68.
3. Agrawal, Y.C. and R.P. Singh. 1977.  
Thin-layer drying studies on short grain  
rough rice. ASAE paper No. 77-3531.
4. Duggal, A.K., W.E. Muir. and D.B. Broo-  
ker, 1982. Sorption equilibrium moisture  
content of wheat kernels and chaff.  
Trans. ASAE 25(4): 1086-1090.
5. Dunstan, E.R., D.S. Chung and T.D.  
Hodges, 1973. Adsorption and desorption  
characteristics of grain sorghum. Trans.  
ASAE 16(4): 667-670.
6. Hustrulid, A. and A.M. Flikke. 1959.  
Theoretical drying curve for shelled corn.  
Trans. ASAE 2(1): 112-114.
7. Henderson, S.M. and S. Pabist. 1961.  
Grain drying theory. 1. Temperature  
effect on drying coefficient. J. Agri.  
Engr. Res. 6(3): 169-174.
8. Henderson, S.M. 1952. A basic concept  
of equilibrium moisture. Agricultural  
Engineering. 33(1): 29-31.
9. Misra, M.K. and D.B. Brooker. 1980.  
Thin layer drying and rewetting equation  
for shelled yellow corn. ASAE paper No.  
80-1254.
10. Jindal, V.K. and M.V. Islam. 1981.  
Some results on the heated air drying  
of paddy under laboratory conditions.

- Regional Grain Post Harvest Workshop. January 20-22. Philippines.
11. Juliano, B. 1964. Hygroscopic equilibrium equilibria of rough rice. Cereal Chem. Vol(41): 191-197.
  12. Thompson, T.L., R.M. Peart and G.H. Foster, 1968. Mathematical simulation of corn drying—A new model. Trans. ASAE. 11(4): 582-586.
  13. Wang, C.Y. and R.P. Singh. 1978. A single layer drying equation for rough rice. ASAE paper No. 78-3001.
  14. Lee, Y.K. 1985. Effect of drying on rice milling. Ph.D. Thesis. KANSAS Univ. U.S.A.  
(原稿接受 1987年 5月 6日, 質問期限 1987年 7月 31日)

(15페이지에서 계속됨)

14. Mitchell, B.W., G.L. Zachariah and J. B. Liljedahl. 1972. Prediction and control of tractor stability to prevent rearward overturning. Transactions of the ASAE 15(5): 838-844.
15. Reichmann, E. 1972. Hangstabilität landwirtschaftlicher Fahrzeuge. Forschungsberichte der Bundesversuchs und Prüfungsanstalt für landwirtschaftliche Maschinen und Geräte. Wieselburg, Austria.
16. Smith, D.W. and J. B. Liljedahl. 1972. Simulation of rearward overturning of farm tractors. Transactions of the ASAE 15(5): 818-821.  
(原稿接受 1987年 5月 4日, 質問期限 1987年 7月 31日)