

벼 乾燥過程 分析에 必要한 資料 및 關聯式

Data and Equations for the Analysis of
Rough Rice Drying

琴 東 赫*

D. H. Keum

記號의 뜻

- C_b = 玄米의 比熱 (kJ/kg K)
- C_r = 벼의 比熱 (kJ/kg K)
- C_s = 白米의 比熱 (kJ/kg K)
- D = 水分擴散係數 (m²/hr)
- DELM = 1 回乾燥時 水分減少量 (±수, db.)
- DTIME = 1 回純乾燥時間 (hr)
- G_a = 空氣의 質量流量 (kg/hr m²)
- h_c = 對流熱傳達係數 (kJ/m² K hr)
- h_{fg} = 벼의 水分 蒸發潛熱 (kJ/kg H₂O)
- I_c = 템퍼링 指數 (±수)
- k = 散物熱傳導率 (W/mK)
- M = 含水率 (% , wb.)
- M_d = 含水率 (±수, db.)
- M_{d0} = 含水率 (% , db.)
- M_e = 平衡含水率 (% , db.)
- M_o = 初期含水率 (% , db.)
- P = 空隙率 (%)
- Δp = 壓力降下 (Pa/m)
- q = 空氣의 流速 (m³/s m²)
- R_b = 玄米의 等價球半徑 (m)
- R_r = 벼의 等價球半徑 (m)
- R_s = 白米의 等價球半徑 (m)
- RH = 相對濕度 (±수)
- RHP = 相對濕度 (%)
- T_c = 空氣의 乾球溫度 (°C)
- T_{at} = 空氣의 絕對溫度 (K)
- T'_a = 템퍼링 時間 (hr)

- t'_a = 템퍼링 時間 (min)
- α = 散物熱擴散係數 (m²/hr)
- ρ_r = 散物密度 (kg/m³)
- ρ_T = 眞密度 (kg/m³)

I. 緒 言

벼 乾燥機의 設計 및 作動條件의 最適化를 위해서는 乾燥過程의 理論的 分析이 先行되어야 한다. 이를 위해서는 많은 資料와 이들의 關聯式이 요구된다.

이 報告의 內容은 벼의 物理的 및 熱特性, 平衡含水率方程式, 水分擴散係數, 薄層乾燥方程式, 送風空氣의 壓力降下, 乾物重量損失率, 템퍼링 等 벼 乾燥過程分析에 必要한 資料를 要約한 것으로, Steffe와 Singh(19)의 資料를 보완한 것이다.

II. 벼의 分類

벼의 品種은 玄米의 크기와 모양에 따라서 短粒種, 中粒種 및 長粒種으로 分類되며 USDA(22)의 分類基準은 表1과 같다.

Table 1. The size and shape classification based on the brown rice kernels(22)

Grain type	Average length (mm)	Average length/width ratio
Short grain	5.50 or less	Up to 2.1
Medium grain	5.51 to 6.6	2.1 to 3.0
Long grain	6.61 to 7.5	Over 3.0

*성균관대학교 농과대학 농업기계공학과

우리나라에서 재배되는 重要 벼品種의 크기와 모양은 表 2 와 같다.

Table 2. Dimensions of brown rice kernel of principle rice varieties grown in Korea(6)

Variety		Length (mm)		Width (mm)	Thickness (mm)	$\frac{A}{B}$	Entry No.
		A	B	B			
Seolagbyeo	(설악벼)	5.20	2.93	2.93	2.05	1.77	2
Chiagbyeo	(치악벼)	4.92	2.94	2.94	2.11	1.67	3
Reimei	(여명벼)	5.05	2.98	2.98	2.07	1.69	4
Sobaegbyeo	(소백벼)	5.03	2.95	2.95	2.03	1.71	5
Odaebyeo	(오대벼)	5.33	3.09	3.09	2.20	1.72	6
Daeseongbyeo	(대성벼)	4.95	2.93	2.93	2.19	1.69	7
Fukuhikari	(북광벼)	5.27	2.90	2.90	2.04	1.82	9
Nongbaek	(농 백)	5.09	2.98	2.98	2.14	1.71	10
Dobongbyeo	(도봉벼)	5.07	2.86	2.86	2.16	1.77	20
Kwanakbyeo	(관악벼)	4.82	2.92	2.92	2.16	1.65	21
Jinbu 1	(진부 1호)	5.0	2.8	2.8	2.1	1.79	24
Jinbu 2	(진부 2호)	5.29	2.93	2.93	2.02	1.81	25
Sangpungbyeo	(상풍벼)	5.13	3.00	3.00	2.11	1.71	30
Gihobyeo	(기호벼)	5.12	2.94	2.94	2.08	1.74	31
Oosora	(대청벼)	5.09	3.02	3.02	2.05	1.69	33
Jinheung	(진 흥)	5.53	3.06	3.06	2.18	1.81	36
Paldal	(팔 달)	5.00	3.10	3.10	2.11	1.61	37
Pungok	(풍 옥)	5.16	2.91	2.91	2.06	1.77	38
Akibare	(추청벼)	4.95	2.91	2.91	2.02	1.70	41
Nakdongbyeo	(낙동벼)	5.05	2.94	2.94	2.00	1.72	42
Dongjinbyeo	(동진벼)	5.07	2.97	2.97	2.15	1.71	43
Seomjinbyeo	(섬진벼)	5.28	2.96	2.96	2.01	1.78	44
Milyang 42	(밀양42호)	5.59	2.74	2.74	1.99	2.04	176
Milyang 30	(밀양30호)	5.32	2.65	2.65	1.93	2.01	177
Weonpungbyeo	(원풍벼)	5.15	2.72	2.72	1.95	1.89	187
Jinjubyeo	(진주벼)	5.08	2.98	2.98	2.08	1.70	350
Tongil	(통 일)	6.4	2.9	2.9	2.0	2.21	157
Manseokbyeo	(만석벼)	6.26	2.82	2.82	1.78	2.22	158
Raegyeong	(밀양29호)	6.6	2.3	2.3	1.9	2.87	160
Saetbyeolbyeo	(새별벼)	5.6	2.2	2.2	1.7	2.55	163
Taebaegbyeo	(태백벼)	6.67	2.62	2.62	1.86	2.55	164
Chupungbyeo	(추풍벼)	5.88	2.23	2.23	1.84	2.64	165
Baekyangbyeo	(백양벼)	5.89	2.79	2.79	2.04	2.11	166
Gayabyeo eo	(가야벼)	6.04	2.60	2.60	1.99	2.32	167
Pungsanbyeo	(풍산벼)	6.37	2.59	2.59	1.89	2.55	172
Shinkwangbyeo	(신광벼)	6.15	2.71	2.71	2.03	2.27	173
Samkangbyeo	(삼강벼)	5.71	2.66	2.66	1.88	2.15	174

Nampungbyeo (남풍벼)	6.30	2.80	1.85	2.23.25	181
Sujeongbyeo (수정벼)	6.43	2.83	1.97	2.28.28	186
Yeongpungbyeo (영풍벼)	6.24	2.51	1.86	2.49.49	319

Ⅲ. 벼의 物理的 特性

1. 크기

벼 낱알의 크기는 길이, 幅 및 두께로 나타내고 이들은 表3 과 같이 벼의 含水率의 函數로 表示된다.

表3에서 Morita 等(13)은 短粒程벼의 낱알의 길이와 幅을 顯微鏡을 使用하여 測定하였으며, Wratten (26)은 中粒과 長粒種 벼의 낱알 10個를 가지런히 연결하고 마이크로미터를 利用하여 이의 全長이와 幅을 測定하여 낱알의 平均長이와 幅을 決定하였다.

Table 3. Dimensions of short, medium and long grain rough rice

Grain type	Dimension (cm)	Regression equation	r ²	Range of M	Range of dimension (cm)
short* grain	Length	0.7318+0.00122 M	0.98	11.21~21.89	0.746~0.759
	Width	0.3358+0.00089 M	0.99	11.21~21.89	0.346~0.356
	Thickness	0.2187+0.00089 M	0.99	10.40~22.59	0.223~0.239
Medium** grain	Length	0.7747+0.00127 M	1.00	12.00~18.00	0.790~0.798
	Width	0.302+0.00076 M	0.60	12.00~18.00	0.312~0.318
	Thickness	0.184+0.00089 M	0.89	12.00~18.00	0.196~0.201
Long** grain	Length	0.894+0.00584 M	0.96	12.00~18.00	0.968~1.003
	Width	0.239+0.00165 M	0.96	12.00~18.00	0.259~0.269
	Thickness	0.177+0.00114 M	0.85	12.00~18.00	0.191~0.198

* Morita and Singh (13)

** Wratten et al. (26)

벼의 두께는 모두 낱알의 두께를 마이크로미터로 測定하였다.

Steffe (17)는 短粒種벼를 球로 간주하고, 含水率 11.2~22.9%, wb. 범위의 벼의 平均體積을 測定한 후, 球의 體積算出公式($\frac{4}{3}\pi R^3$)으로부터 白米, 玄米 및 벼에 대한 等價球半徑을 구한바 있으며, 그 값은 다음과 같다.

$$R_s = 1.58 \times 10^{-3} m$$

$$R_b = 1.66 \times 10^{-3} m$$

$$R_r = 1.77 \times 10^{-3} m$$

위의 값은 쌀겨 및 왕겨층의 平均 두께가 各各 0.08^{mm}와 0.11^{mm}를 나타낸다.

Bakker-Arkema 等(2)은 Steffe (17)의 方法을 利用하여 中粒程벼의 白米, 玄米 및 벼의 等價球半徑을 다음과 같이 提示하였다.

$$R_s = 0.142 \times 10^{-3} m$$

$$R_b = 0.150 \times 10^{-3} m$$

$$R_r = 0.161 \times 10^{-3} m$$

2. 體積

穀物の 體積은 大部分 Air-comparison pycnometer를 利用하여 測定하며, Steffe (17)와 Wratten 等(26)은 各各 短粒種과 中粒種벼의 體積을 表4와 같이 含水率의 函數로 提示하였다. Kim(11)은 우리나라에서 재배되는 Japonica 형인 Akibare와 Indica 형인 밀양23호의 體積을 表4에서와 같이 提示하였다.

3. 散物密度

벼의 散物密度를 나타내는 方程式은 表5와 같다. 散物密度는 一般的으로 體積을 알고 있는 容器에 벼를 채우고 무게를 計測하여 算出하는데, 表5에서 Morita와 Singh (13)이 提示한 短粒種벼에 대한 式은 容器에 벼를 채우고 20회 두드려서 最大로 다졌을 경우이며, Wratten 等(26)이 提示한 中粒種과 長

Table 4. Volume of rough rice(mm³)

Grain Type	Regression equation	r ²	Range of M	Range of Volume
Short grain*	19.29+0.1684 Mdp	0.93	11.20~22.99	21.688~24.024
Medium grain**	9.734+0.508 M	0.95	12.00~18.00	16.059~19.173
Long grain**	15.404+0.229 M	0.95	12.00~18.00	18.353~19.604
Akibare ⁺	22.689+0.262 M	0.95	7.35~26.92	24.615~29.751
Milyang 23 ⁺	22.591+0.320 M	0.97	7.42~26.95	24.965~31.215

* Steffe (17)

** Wratten et al. (26)

⁺ Kim (11)

Table 5. Bulk density of rough rice(kg/m³)

Grain type	Regression equation	r ²	Range of M	Range of bulk density
Short grain*	583.6+4.27M	0.95	11.24~20.95	632.0~664.0
Medium grain**	499.7+8.33M	0.99	12.00~18.00	598.4~648.7
Long grain**	519.4+5.28M	0.94	12.00~18.00	585.8~615.2
Akibare ⁺	537.59+1.222M	0.98	7.35~26.92	546.6~570.5
Milyang 23 ⁺	529.19-1.104M+0.010M ²	0.99	7.42~26.95	526.5~571.7

* Morita and Singh(13)

** Wratten et al. (26)

⁺ Kim(11)

粒種의 경우는 벼를 느슨하게 채웠을 때의 값을 표시한 것이다.

4. 比重

벼의 比重을 나타내는 方程式은 表 6 과 같다.
表 6 에서 短粒種 벼의 경우는 Toluene 溶液을 利用한 Pycnometer 로 測定한 값이며, 中粒種과 短粒種의 경우는 Air-comparison pycnometer 에 의하여 測定된 값이다.

5. 表面積과 比表面積

벼의 表面積의 測定에는 다음의 4 가지 方法이 利用되고 있다.

方法 1 : Wratten 等(26) 이 使用한 方法으로 벼 낱알을 왁스에 묻고 이를 Microtome 을 使用하여 15片의 얇은 斷面으로 切斷한다. 切斷한 斷面을 橢圓으로 간주하고 橢圓의 長軸과 短軸의 길이를 顯微鏡으로 測定하여 橢圓의 둘레를 算出한다. 算出한 橢圓

Table 6. Specific gravity of rough rice

Grain type	Regression equation	r ²	Range of M	Range of specific gravity
Short grain*	1.421-0.00564 M	0.94	10.83~21.50	1.359~1.299
Medium grain**	1.465-0.0076 M	0.94	12.00~18.00	1.374~1.325
Long grain**	1.436-0.0042 M	0.95	12.00~18.00	1.384~1.358
Akibare ⁺	-	-	14.00~22.00	1.037~1.021
Milyang 23 ⁺	-	-	14.00~22.00	1.032~1.024

* Morita and Singh(13)

** Wratten et al. (26)

⁺ Kim(11)

의 들레와 얇은 칩의 두께를 곱하여 개개의 칩의 表面積을 計算한다. 벼 낱알의 끝 부분은 圓錐로 간주하여 表面積을 計算한다. 벼 낱알의 全表面積은 벼 몸체부분의 개개의 칩表面積과 끝부분의 表面積을 합하여 구한다.

方法2 : Hosokawa 와 Motohashi (8) 가 使用한 方法으로 벼의 왕겨를 벗겨 이를 平平하게 한후 이를 확대한 그림의 面積을 Planimeter 로 測定한다.

方法3 : Morita 와 Singh (13) 이 報告한 方法으로 벼의 表面에 있는 돌기의 치수, 密度 및 모양을 電子顯微鏡을 利用하여 測定하고, 돌기의 形象을 表示하는 數式을 구하여 한개의 돌기의 表面積을 算出한다. 또한 돌기 한개가 차지하는 왕겨의 基本面積 및 單位基本面積當 돌기數를 구하여 벼의 表面積을 결정한다.

方法4 : Bakshi 와 Singh (3) 이 使用한 方法으로, 一定數의 벼와 表面積을 알고 있는 유리구의 表面에 니스를 바르고 니켈분말을 묻혀서 부착한 분말의 무게를 비교하여 벼의 表面積을 算出한다.

方法1 과 方法2 로 산출한 表面積은 表面의 돌기를 고려하지 않으므로 벼 낱알의 投影面積과 관련이 되며, 方法4 로 算出한 값은 不規則한 왕겨表面을 고려하지 않으므로 誤差가 포함될 것으로 報告되고 있다(19).

方法3 이 벼의 表面積을 가장 잘 算出할 수 있는 方法으로 생각된다(19).

Wratten 等(26)은 方法1 을 利用하여 含水率 12%, wb. 및 18%, wb. 의 中粒種벼의 表面積을 計測하여 각각 0.4019cm² 및 0.4245cm² 으로 報告하였다.

Morita 와 Singh (13) 은 方法3 을 利用하여 含水率 18%, wb. 인 短粒種벼의 表面積을 測定하여 0.8723 cm² 으로 報告하였다. 이 값은 方法1 및 方法2 를 使用한 값보다 80~100% 정도 큰 값이다.

벼의 比表面積은 單位散物體積當 表面積으로 中粒種벼의 경우 1038.5m²/m³(24), 長粒種벼의 경우 1060.0m²/m³(27)으로 報告된 바 있다.

6. 空隙率

空隙率은 다음 式으로 計算된다.

$$P = (1 - \frac{\rho_r}{\rho_s}) \times 100 \dots\dots\dots (1)$$

Wratten 等(26) 및 Kim(11)은 벼의 空隙率을 表7 과 같이 報告하였다.

IV. 熱特性

1. 比熱

Morita 와 Singh (13), Wratten 等(26)은 熱量計를 利用하여 물과 試料의 混合物의 溫度變化를 測定하여 벼의 比熱을 計算하는 混合法을 使用하였으며, Kim(11)은 두께가 一定한 平板을 溫度를 一定하게 유지시킨 冷却水槽內에 設置하고, 平板 中央部의 穀物冷却溫度를 測定하여 벼의 比熱을 計算하였다.

벼의 比熱은 表8 과 같다.

ASAE 標準規格에서는 白米, 玄米 및 벼의 比熱을 各各 다음과 같이 提示하였다.

$$\begin{aligned} C_s &= 1.1805 + 0.0377 M \\ C_o &= 1.2014 + 0.0381 M \dots\dots\dots (2) \\ C_r &= 1.1093 + 0.0448 M \end{aligned}$$

2. 散物熱傳導率

벼의 散物熱傳導率의 測定에는 Line source 方法이 一般적으로 使用되는데, 이 方法은 알루미늄으로 된 圓筒의 中心軸과 一致하도록 熱線을 設置하고 試料를 圓筒에 넣은 후 一定量의 電流를 熱線에 흐르게 하여 그 熱이 圓筒의 半徑方向으로 傳導될 때 熱線溫度의 變化를 測定하여 試料의 熱傳導率을 計算하는 方法이다.

벼의 散物熱傳導率은 表9 와 같다.

Table 7. Porosity of rough rice (%)

Grain type	Regression equation	r ²	Range of M	Range of Porosity
Medium grain*	69.05-0.885M	0.99	12.00~18.00	58.5~53.1
Long grain*	65.55-0.475M	0.95	12.00~18.00	59.6~56.9
Akibare ⁺	49.67-0.227M	0.99	7.35~26.92	45.0~43.6
Milyang 23 ⁺	49.38+0.0646M-0.0099M ²	0.96	7.42~26.95	49.3~43.9

* Wratten et al. (25)

⁺ Kim (11)

Table 8. Specific heat of rough rice(kJ/kg K)

Grain type	Regression equation	r ²	Range of M	Range of specific heat
Short grain*	1.2692+0.0349M	0.93	11.23~23.68	1.666~2.026
Medium grain**	0.9213+0.0545	0.81	12.00~18.00	1.599~1.993
Japonica ⁺	—	—	7.35~28.09	1.517~2.378
Indica ⁺	—	—	6.39~27.88	1.526~2.398

* Morita and Singh (13)
 ** Wratten et al (26)
 + Kim (11)

Table 9. Bulk thermal conductivity(W/m K)

Grain type	Regression equation	r ²	Range of M	Range of conductivity
Short-grain*	0.09999+0.01107M	0.66	11.23~23.68	0.113~0.127
Medium grain**	0.08657+0.00133M	0.87	12.00~18.00	0.102~0.113
Akibare ⁺	0.5662+0.0013T- 0.0004M-0.0107P	0.76	11.52~28.75	0.0912~0.1864
Milyang 23 ⁺	0.3527+0.0019T+ 0.003M-0.0058P	0.84	10.77~32.20	0.0861~0.1774

* Morita and Singh (13)
 ** Wratten et al. (26)
 + Kim (11)

3. 散物熱擴散係數

散物熱擴散係數는 다음 式(3)으로 表示된다.

$$\alpha = \frac{k}{\rho_r C_r} \dots \dots \dots (3)$$

벼의 散物熱擴散係數는 表10과 같다.

4. 對流熱傳達係數

Wang等(25)은 直徑 15cm, 길이 30cm의 圓筒에 中粒種벼를 25cm 깊이까지 넣은 후 熱風을 送風하였을 때 排出되는 空氣의 溫度를 測定하여 理論적으로

解析한 結果와 比較함으로써 對流熱傳達係數를 計算하였으며, 다음 (3)式으로 提示하였다.

$$h_c = 0.00718G_a^{1.3} \dots \dots \dots (3)$$

Walker (23)는 長粒種벼에 대하여 다음 (4)式을 提示하였다.

$$h_c = 0.672G_a^{0.688} \dots \dots \dots (4)$$

5. 벼의 水分蒸發潛熱

Zahed(27)는 Zuritz(28, 29)가 提示한 (10)式의 中粒種벼에 대한 平衡含水率方程式에 근거하여 Othmer (14)의 方法을 使用하여 中粒種벼에 대한 水分蒸發潛

Table 10. Bulk thermal diffusivity of rough rice(m²/hr)

Grain type	Regression equation	r ²	Range of M	Range of α
Short grain*	4.51x 10 ⁻⁴ -5.85x 10 ⁻⁶ M	0.99	10.00~22.00	3.95x 10 ⁻⁴ ~3.24x 10 ⁻⁴
Medium grain**	4.86x 10 ⁻⁴ -8.96x 10 ⁻⁶ M	0.99	12.00~20.00	3.79x 10 ⁻⁴ ~3.08x 10 ⁻⁴
Japonica ⁺	—	—	7.21~31.80	2.54x 10 ⁻⁴ ~4.66x 10 ⁻⁴
Indica ⁺	—	—	5.64~32.20	2.61x 10 ⁻⁴ ~4.41x 10 ⁻⁴

* Morita and Singh (13)
 ** Wratten et al. (26)
 + Kim (11)

熱을 (5)式 및 (6)式으로 提示하였다.

$T_c < 43^\circ\text{C}$:

$$h_{fg} = (1626.25 - 1.546T_c) M_d^{-0.3162} \dots\dots\dots (5)$$

$T_c \geq 43^\circ\text{C}$:

$$h_{fg} = (1862.45 - 1.757T_c) M_d^{-0.213} \dots\dots\dots (6)$$

(5)式과 (6)式에 의하면 含水率 15~20%, wb, 溫度 10~60°C 범위의 벼의 水分蒸發潛熱은 純粹물의 蒸發潛熱의 1.049~1.186倍로 2473~2939kJ/kgH₂O가 된다.

Brook와 Foster (4)는 Chung-Pfost의 平衡含水率方程式인 式(8)을 使用하여 다음의 (7)式을 提示하였다.

$$h_{fg} = (2495.76 - 2.38T_c) (1 + 2.4962 \exp(-21.73M_d))$$

V. 平衡含水率方程式

Pfost等(15)은 여러 벼 品種에 대한 여러 연구자들이 提示한 平衡含水率資料를 利用하여 다음의 (8)式과 (9)式의 方程式을 發表하였다.

Chung-Pfost 式 :

$$M_e = [0.325535 - 0.046015 \ln\{-1.987(T_c + 35.703) \cdot \ln(RH)\}] \times 100 \dots\dots (8)$$

Henderson-Thompson 式 :

$$M_e = \left\{ \frac{\ln(1-RH)}{1.918 \times 10^{-5}(T_c + 51.161)} \right\}^{\frac{1}{2.4451}} \dots\dots (9)$$

Zuritz等(28, 29)은 塩基性溶液(salt solution)를 使用하여 中粒種벼에 대한 平衡含水率을 測定하여 다음 (10)式으로 提示하였다.

$$M_e = \left[\frac{\{-\ln(1-RH)\} \cdot T_{ak}}{A \cdot \left(1 - \frac{T_{ak}}{647.1}\right)^B} \right] \frac{1}{C \cdot T_{ak}^D} \dots\dots (10)$$

여기서, $T_c < 43^\circ\text{C}$ 일때

$$A = 2.667 \times 10^{-7}$$

$$B = -23.438$$

$$C = 4.0 \times 10^8$$

$$D = -2.1166$$

$T_c \geq 43^\circ\text{C}$ 일때

$$A = 1.798 \times 10^{-3}$$

$$B = -10.178$$

$$C = 451.658$$

$$D = -0.938$$

Kachru와 Matthes(10)는 溫度 18.8~37.8°C, 濕度 5~90% 범위에서 長粒種벼에 대한 平衡含水率을 다음 (11)式으로 提示하였다.

$$M_e = 4.51 + 0.069RHP + 8.837(RHP)^{0.8} - 0.015(RHP)^{0.8} T_{ak} \dots\dots\dots (11)$$

VI. 水分擴散係數

Steffe와 Singh(20)은 短粒種벼 全體를 球 또는 白米, 쌀겨 및 왕겨層으로 이루어진 同心의 球로 가정하고 薄層乾燥實驗의 結果와 Fick의 物質擴散法則에 근거한 水分散乾燥方程式의 理論值를 비교하는 方法을 使用하여 表11에서와 같이 短粒種벼 全體, 쌀겨 및 왕겨部에 대한 水分擴散係數를 絕對溫度의 函數로 나타나는 Arrhenius型으로 提示하였다.

Wang(24)은 위와 같은 方法을 使用하여 中粒種벼에 대한 水分擴散係數를 表11에서와 같이 提示하였다.

Husain等(9)은 벼內部에서의 熱 및 水分擴散현상을 함께 고려하여 長粒種벼에 대한 水分擴散係數를 溫度와 含水率의 函數로 (12)式과 같이 提示하였다.

$$D = A \exp(BM_{dp}) \dots\dots\dots (12)$$

여기서, $A = 9.8787 \times 10^{-3} \exp(-7730.65(1.8T_{ak}))$

$$B = 8.833 \times 10^{-4}(1.8T_{ak}) - 0.3788$$

VII. 薄層乾燥方程式

Agrawal과 Singh(1)은 乾燥溫度 32~51°C, 相對濕度 18.8~85% 범위에서 短粒種벼에 對한 薄層乾燥實驗을 수행하여 다음의 Page型 方程式을 提示하였다.

$$\frac{M_{dp} - M_e}{M_o - M_e} = \exp(-X t_n^Y) \dots\dots\dots (13)$$

여기서, $X = 0.02958 - 0.44565RH + 0.01215T_c$

$$Y = 0.13365 + 1.93653RH - 1.77431RH^2 + 0.009468T_c$$

(13)式에서 平衡含水率 M_e 는 (9)式의 Henderson-Thompson式을 使用하여 구한 값이다.

Wang(24)은 溫度 30~55°C, 相對濕度 15~95% 범위에서 中粒種벼에 대한 薄層乾燥實驗을 수행하여 4개의 乾燥方程式 모델을 가정하고 그 적합도를 검증한 결과 水分擴散모델은 오차가 크므로 利用이 곤란하며, 다음 (14)~(16)式의 3개의 모델에서는 거의 같은 수준의 오차가 발생하지만, 1회 乾燥時間이 40분 以下가 되는 건조시뮬레이션에서는 (14)式의 2次

Table 11. Liquid diffusion coefficients for rough rice and rough rice component,
 $D = A \cdot \exp(B/T_{ak})$ (m²/hr)

Grain type	Materials	Constants	
		A	B
Short grain*	Starchy endosperm	2.57 X 10 ⁻³	-2880
	Bran	7.97 X 10 ⁻³	-5110
	Hull	4.84 X 10 ²	-7380
	Whole brown rice	0.141	-4350
	Whole rough rice	33.6	-6420
	Rewetted starchy endosperm	1.29 X 10 ⁻²	-3430
	Rewetted bran	1.82	-5400
Medium grain**	Whole rough rice	9.83 X 10 ⁻³	-4151

* Steffe and singh(20)

** Wang(24)

函數型 모델의 使用이 컴퓨터 처리 시간의 節約을 위해 바람직하다고 報告하였다. Wang(24)이 提示한 3 가지型의 薄層乾燥모델은 다음과 같다.

Quadratic equation:

$$MR = 1 + C_1 t_m + C_2 t_m^2 \dots\dots\dots (14)$$

$$C_1 = -0.001208 T_c^{0.4887} \cdot RH^{-0.3187}$$

$$C_2 = 0.00006625 T_c^{0.03408} \cdot RH^{-0.4842}$$

Page's equation:

$$MR = \exp(-P t_m^Q) \dots\dots\dots (15)$$

$$P = 0.01579 + 0.0001746 T_c - 0.01413 RH$$

$$Q = 0.6545 + 0.002425 T_c + 0.07867 RH$$

Single term approximate:

$$MR = \exp(-B t_m) \dots\dots\dots (16)$$

$$A = 0.96 - 8.826 \times 10^{-5} T_c + 0.02324 RH$$

$$B = 0.002814 + 1.267 \times 10^{-4} T_c - 0.00262 RH$$

上記 式에서 $MR = \frac{M_{dp} - M_e}{M_o - M_e}$ 이며, M_e 는 Zuritz

(29)의 다음 式을 使用하였다.

$$1 - RH = \exp \left[- \left(1 - \frac{T_{ak}}{647.1} \right)^n \frac{k}{T_{ak}} M_e^a T_{ak}^b \right] \dots\dots\dots (17)$$

$$n = -26.1911$$

$$k = 4.49488 \times 10^{-8}$$

$$a = 2.2244 \times 10^6$$

$$b = -2.4160$$

VIII. 벼의 送風抵抗

送風空氣가 벼層을 通過할 때 일어나는 壓力降下는 그림 1 과 같다. 그림 1 은 벼에 포함된 異物質과 含水率이 다양한 여러 品種에 대한 資料를 Steffe (21)가 정리한 것이며, 벼를 느슨하게 채움(loose fill)의 경우를 나타낸 것이다.

그림 1 의 I線은 異物質이 함유되지 않은 含水率 16.5%, wb.의 中粒種벼에 대한 Calderwood (5)의 實驗結果를 나타낸 것으로 이를 最少自乘法으로 數式化한 결과는 다음과 같다.

$$\Delta p = 5402.598 q^{1.1821}, r^2 = 0.997 \dots\dots\dots (18)$$

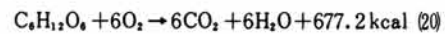
Zahed (27)는 다음 式을 提示하였다.

$$\Delta p = 10357.8 q^{1.3877} \dots\dots\dots (19)$$

IX. 乾物重量損失率

벼를 貯藏하거나 常溫通風乾燥할 때 일어나는 벼의 品質低下의 정도는 貯藏中에 벼의 呼吸에 依해 발생한 乾物重量損失率으로 判斷할 수 있다.

穀物の 呼吸過程은 炭水化合物이 分解하여 이산화탄소와 물 및 熱을 發生하는 過程으로 다음과 같이 表示된다.



윗式에서 알 수 있는 바와 같이 炭水化合物(乾物) 1g이 分解하면 1.47g의 이산화탄소와 3.76 kcal의 熱이 發生하게 되므로 벼의 貯藏중에 發生하는 이산화

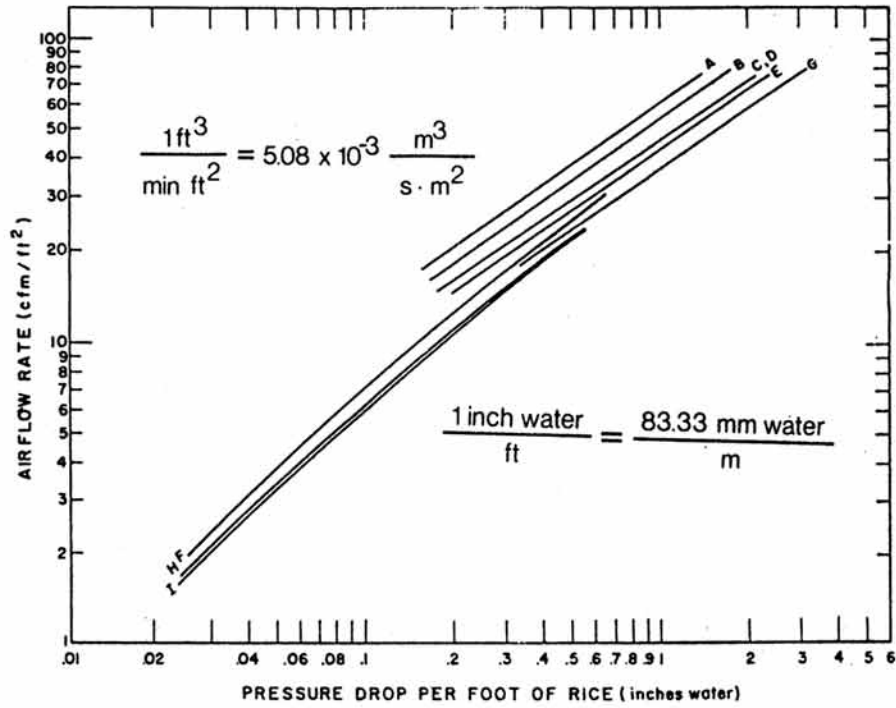


Fig. 1. Resistance of Rough Rice to Airflow

- (A) Calrose, medium grain, rough hulled (with trichomes), 24.4% MC wb 0.66% foreign matter.
- (B) Same as A but 12.7% MC wb; (C) CSM3, medium grain, smooth hulled (glabrous), 27.6% MC wb, 0.88% foreign matter. (D) Caloro, short grain, dry (exact MC unknown) clean. (E) Same as C but 12.7% MC wb; (F) Bluebonnet, long grain, 13.4% MC wb, clean. (G) CSM3, dry (exact MC unknown), clean. (H) Belle Panta, long grain, 15.2% MC wb, clean. (I) Nato, medium grain, 16.5% MC wb, clean.

탄소의 량이나 熱量을 測定하여 乾物重量損失率을 計算할 수 있다.

Seib 등 (16) 은 貯藏溫度 18~35°C, 含水率 15~23%, wb. 貯藏기간 41~85日 범위에서 中粒種벼와 長粒種벼를 貯藏하는 동안에 발생하는 이산화탄소의 量을 測定하여 乾物重量損失率을 含水率, 貯藏온도 및 貯藏시간의 函數로 다음과 같이 提示하였다.

$$DML = 1 - \exp[-(A \cdot t^c) \cdot \exp\{D \cdot (T - 60)\} \cdot \exp\{E \cdot (M - 0.14)\}] \dots\dots\dots (21)$$

- 여기서, DML = 乾物重量損失率 (소수)
- t = 貯藏시간 (hr/1000)
- T = 貯藏온도 (°F)
- M = 含水率 (소수, wb.)
- A, C, D, E = 상수

中粒種벼 :

- A = 0.000914
- C = 0.6540
- D = 0.03756
- E = 33.61

長粒種벼 :

- A = 0.001889
- C = 0.7101
- D = 0.0274
- E = 31.63

Seib 등 (16) 은 위의 實驗에서 벼의 품질검사를 실시한 결과 乾物重量損失率이 含水率 18%, wb. 의 벼는 0.5%, 22%, wb. 의 벼는 0.25%를 초과할 때 벼의 품질이 저하되어 시장가치가 하락된다고 보고하

었다. 따라서 벼의 품질손실과 관련된 건물중량손실율의 制限値는 含水率과 반비례관계가 성립한다고 가정할 때 건물중량손실율의 제한치는 含水率 14%, wb.의 벼는 1%, 26%, wb.의 벼는 0.1%가 될 것으로 예측하였다.

X. 벼의 템퍼링

Steffe (17)는 多回通過式(multipass)으로 短粒種벼를 乾燥할 때 95% 템퍼링을 이루는데 요구되는 1회 템퍼링 時間을 推定하는 式을 乾燥溫度(T_c), 건조공기의 상대습도(RH), 初期含水率(M_d) 및 1회純乾燥時間(DTIME) (혹은 水分減少量(DELM),의 函數로 다음과 같이 提示하였다.

一定水分減少量에 대한 式:

$$t'_n = 11.194 - 2.365 \ln(T_c) + 0.259 \ln(DELM) - 0.223(RH) - 1.146(M_d), r^2 = 0.98 \quad (22)$$

一定乾燥時間에 대한 式:

$$t'_n = 8.509 - 1.905 \ln(T_c) + 0.135 \ln(DTIME) - 0.012(RH) - 0.083(M_d), r^2 = 0.98 \quad (23)$$

상기 式은 템퍼링初期에 穀粒内部의 含水率이 均一하다는 가정하에 實驗 및 理論의인 템퍼링 過程의 分析에 근거한 것이다.

Keum 등(12)은 우리나라의 순환식 건조기로 中粒種벼를 乾燥할 경우 1회템퍼링시간을 건조온도(T_c)와 템퍼링지수(I_c)의 함수로 다음과 같이 提示하였다.

$$t'_n = (2.59 - 0.0305T_c) \exp(3.875I_c + 0.0108T_c \cdot I_c) \dots \dots \dots (24)$$

상기 式은 초기함수율 24%, wb.의 벼를 상대습도 65%의 공기를 가열하여 건조할 경우에 대한 시뮬레이션 결과이며, 1회 건조시간을 15분, 건조온도를 42℃로 할 때 米質 손상을 일으키지 않고 건조속도를 1.0~1.5%, wb./hr로 유지하기 위해서는 평균 1회 당 18~37분의 템퍼링시간이 요구된다고 보고하였다.

REFERENCES

1. Agrawal, Y.C. and R.P. Singh. 1977. Thin-layer drying studies on short-grain rough rice. American Society of Agricultural Engineers Paper No. 77-3531. ASAE, St. Joseph, MI.
2. Bakker-Arkema, F.W., C.Fontana, R.C.Brook,

- and C.M.Westelaken. 1983. Concurrent flow rice drying. *Drying Technology* 1(2): 171-191.
3. Bakshi, A.S. and R.P.Singh. 1979. Surface area measurements of rough rice. American Society of Agricultural Engineers Paper No. 79-3549. ASAE, St. Joseph, MI.
4. Brook, R.C. and G.H. Foster. 1979. Cereals and Feed Grains, Including Soybeans. Chapter 2. In: E.E. Finney (ed). *Transportation and Marketing, Section E, CRC Handbook Series In Agriculture*. CRC Press, Inc., West Palm Beach, FL. In Press.
5. Calderwood, D.L. 1973. Resistance to airflow of rough, brown and milled rice. *Tran. of the ASAE*: 525-527, 532.
6. Crop Experiment Station. R.D.A. Korea. 1984. Characteristics of rice breeding materials(1).
7. Heldman, D.R. 1975. *Food Process Engineering*. AVI Publishing Co., Westport, CT.
8. Hosokawa, A. and K Motohashi. 1975. Constant drying rate of a single paddy grain. *Nogyo kai Gjakkaishi* 37(3): 326-330.
9. Husain, A.C., C.S. Chen and J.T. Clayton. 1970. Coupled heat and moisture diffusion in porous food products. American Society of Agricultural Engineers Paper No. 70-833. ASAE, St. Joseph, MI.
10. Kachru and Matthes. 1976. The behavior of rough rice in sorption. *J. Agr. Eng. Res.* 21: 405-416.
11. Kim, M.S. 1981. Physical and thermal properties of grain. Ph. D. Thesis. S.N.U.
12. Keum, D.H. 1986. Continuous flow rice drying using simulation. *J. of the KSAM.* 11(2).
13. Morita, T. and R.P. Singh. 1979 Physical and thermal properties of short-grain rough rice. *Trans. of the ASAE* 22(3): 630-636.
14. Othmer, D.F. 1940. Correlating vapor pressure and latent heat data. *Ind. Eng. Chem.*

- 32(6): 841-856.
15. Pfof, H.B., S.G. Maurer, D.S. Chung, and G. A. Milliken. 1976. Summarizing and reporting equilibrium moisture data for grains. American Society of Agricultural Engineers Paper No. 76-3520. ASAE, St. Joseph, MI.
 16. Seib, P.A., H.B. Pfof, A. Sukabdi, and R. Burroughs. 1980. Spoilage of rough rice measured by evolution of carbon dioxide. Paper presented at the regional grains post harvest workshop, Malaysia.
 17. Steffe, J.F. 1979. Moisture diffusion and tempering in the drying of rough rice. Unpublished ph.D. Thesis. Agricultural Engineering Department, University of California, Davis, CA.
 18. Steffe, J.F. and R.P. Singh. 1979. Volumetric reduction of short grain rice during drying. Cereal Chemistry. Accepted for Publication.
 19. Steffe, J.F. and R.P. Singh. 1980. Parameters required in the analysis of rough rice drying. A.S. Mujumdar(ed). Drying'80, Vol.2. McGraw-Hill International Book Company: 256-262.
 20. Steffe, J.F. and R.P. Singh, 1982. Diffusion coefficients for predicting rice drying behavior. J. Agric. Engng Res. 27: 489-493.
 21. Steffe, J.F., R.P. Singh and G.E. Miller. 1979. Harvesting, drying and storage of rough rice. Chapter 8. In: B.S. Luh (ed). Rice: production and Utilization. AVI Publishing Company, Westport, CT.
 22. USDA. 1973. Rice in the United States: Varieties and production. Agriculture Handbook No. 289. Agricultural Research Service, United States Department of Agriculture, Washington, D.C.
 23. Walker, L.P. 1978. Process analysis of a multistage concurrent flow rice dryer. Ph. D. Thesis. M.S.U.
 24. Wang. C.Y. 1978. Simulation of thin-layer and deep-bed drying of rough rice. Ph. D. Thesis. U.C. D.
 25. Wang. C.y., T.R. Rumsey, and R.P. Singh. 1979. Convective heat transfer coefficient in a packed bed of rice. American Society of Agricultural Engineers Paper No. 79-3040. ASAE. St. Joseph, MI.
 26. Wratten, F.T., W.D. Poole, J.L. Chesness, S. Bal, and V. Ramarao. 1969. Physical and thermal properties of rough rice. American Society of Agricultural Engineers Paper No. 68-909. ASAE, St. Joseph, MI.
 27. Zahed, A.H. 1979. Simulation of drying and air Channeling in a concurrent-flow rice dryer. Ph. D. Thesis. U.C.D.
 28. Zuritz, C.A. 1980. Simulation of rough rice in drying in Spouted bed. Ph.D. Thesis. U.C. D.
 29. Zuritz, C., R.P. Singh, S.M. Moini, and S.M. Henderson. 1979. Desorption isotherms of rough rice from 10°C to 40°C. Trans. of the ASAE 22(2): 433-436.