

벼의 循環竝流乾燥機의 시뮬레이션 Simulation of Rice Circulating Concurrent-flow Dryer

琴 東 赫*, 李 旺 錫*
D. H. Keum, W. S. Lee

Summary

A computer simulation model for rice circulating concurrent-flow dryer was developed and verified by conduction a series of pilot-scale experiments.

The effects of design parameters and operating conditions on dryer performance were analyzed by using simulation.

The results indicated that the developed model was found suitable for analyzing operating characteristics. The other results from simulation also showed that;

- 1) an increase in the initial moisture content resulted in an increase in the drying rate and a reduction in the grain temperature and total energy requirements.
- 2) an increase in the drying air temperature resulted in an increase in the drying rate and grain temperature.
- 3) an increase in air flow rate resulted in an radical increase in drying rate, fan power requirements and total energy requirements but an radical decrease in final head rice yield.
- 4) an increase in the bed depth resulted in an increase in fan power requirements and a lowering of the final head rice yield.

• 記號의 뜻

A = 比表面積 (m^2/m^3)
 c_a = 乾空氣의 比熱 ($kJ/kg K$)
 c_p = 穀物의 比熱 ($kJ/kg K$)
 c_v = 수증기의 비열 ($kJ/kg K$)
 c_w = 물의 비열 ($kJ/kg K$)
 D = 穀物의 水分擴散係數 (m^2/hr)
 E_a = 穀物 水分 1kg 제거에 소요되는 연료에너지 ($kJ/kg H_2O$)
 E_a = 穀물 수분 1kg 제거에 소요되는 송풍기 에너지 ($kJ/kg H_2O$)
 G_a = 乾空氣 流量 (dry air, $kg/hr m^2$)
 G_p = 穀物流量 (dry grain, $kg/hr m^2$)

h = 對流熱傳達係數 ($kJ/m^2 hr$)
 H = 절대습도 ($kg H_2O/kg$ dry air)
 h_{fg} = 穀물수분증발잠열 ($kJ/kg H_2O$)
 M = 곡립내부의 함수율 (소수, d. b.)
 \bar{M} = 곡립의 평균함수율 (소수, d. b.)
 M_e = 평형함수율 (소수, d. b.)
 M_o = 초기 함수율 (소수, d. b.)
 M_f = 최종 함수율 (소수, d. b.)
 ΔP = 壓力 강하 (Pa)
 r = 반경방향 좌표 (m)
 R = 곡물의 반경 (m)
 RH = 상대습도 (소수)
 t = 시간 (hr)
 t_a = 건조시간 (hr)

本 연구는 서봉문화재단의 연구비 지원으로 수행되었음.
 *成均館大學校 農科大學 農業機械工學科

- T = 송풍공기 온도(℃)
- T_{amb} = 대기온도(℃)
- T_{in} = 건조실 입구의 송풍공기온도(℃)
- V_p = 곡물流下속도(m/hr)
- x = 건조기 곡물낙하 방향좌표(m)
- X_c = 건조실 높이(m)
- ρ = 곡물의 산물밀도(kg/m³)
- θ = 곡물온도(℃)

1. 緒言

穀物乾燥機 改良研究의 주요 目標은 穀物의 品質을 損傷시키지 않고 所要에너지 節減과 乾燥機의 性能을 增大시키는데 있다.

現在 國內에 普及되어 使用되고 있는 循環橫流型 乾燥機는 乾燥速度가 0.7~0.9%, w.b./hr 범위로서 收穫된 24%의 벼를 15%로 乾燥시키는데 約 12~14時間이 所要되며 5000~6000kJ/kg H₂O의 에너지가 所要된다.³⁾

이와같이 橫流型 乾燥機의 乾燥所要時間 및 所要 에너지 節減을 위한 多角度的 研究가 遂行되었으나 그 效果가 크게 기대할 수 없는 것으로 나타났다.²⁾

橫流型 乾燥機에 比하여 竝流型 乾燥機는 高溫乾燥가 可能하며 穀物의 品質을 損傷시키지 않고 乾燥時間과 所要ener지를 크게 節約할 수 있는 方法으로 評價되므로써 最近에 이에 대한 研究가 활발하게 進行되고 있다.⁴⁾

미국에서는 最近에 에너지節減 및 穀物의 品質向上을 目的으로 多段竝流型 乾燥機가 開發되어 商用化段階에 이르고 있다.⁵⁾

그러나 우리나라 農家規模에서 많이 利用될 수 있는 循環竝流型 穀物乾燥機에 대한 研究는 아직 이루어지지 못하고 있다.

本 研究는 우리나라 農家에서 利用可能 하리라고 기대되는 循環竝流型 穀物乾燥機 開發을 위한 基礎資料를 얻을 目的으로 遂行되었으며, 그 구체적 目的은 다음과 같다.

(1) 벼의 竝流乾燥過程을 解析하고 乾燥機의 性能을 評價할 수 있는 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램을 開發한다.

(2) 循環竝流型 乾燥機를 設計製作하고 乾燥實驗을 遂行하여 시뮬레이션 모델의 妥當성을 檢證한다.

(3) 設計 및 性能因子가 性能에 미치는 影響을 分析한다.

2. 시뮬레이션 모델링

가. 循環竝流乾燥過程

本 研究의 循環竝流型 乾燥機에서의 乾燥過程은 그림 2-1과 같다.

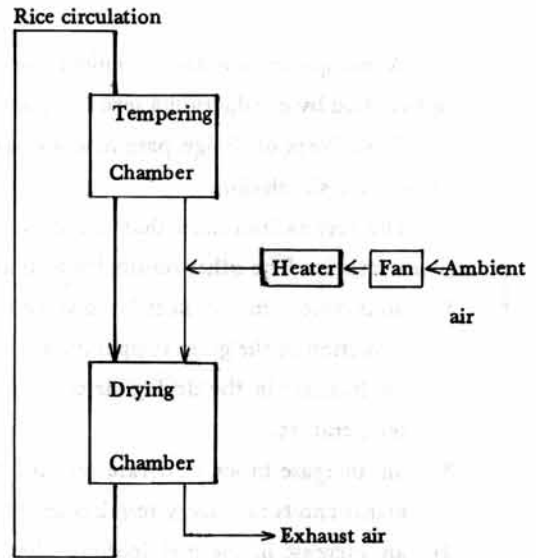


Fig. 2-1. Block diagram of a rice circulating concurrent-flow dryer.

穀物이 熱風과 함께 乾燥室(drying chamber)을 下降하는 동안 乾燥가 이루어지며, 乾燥室을 通過한 穀物은 버킷엘리베이터를 거쳐 溫퍼링室(tempering chamber)에 流入된다. 溫퍼링室을 지나는 동안 穀粒内部의 水分 및 溫度勾配가 緩和되는 溫퍼링過程을 거치게 된다. 溫퍼링過程을 거친 穀物은 乾燥室에 들어가 循環하게 되므로써 乾燥→순환→溫퍼링過程을 反復하면서 目標로하는 含水率에 到達하게 된다. 따라서 순환병류 건조과정의 해석을 위해서는 건조모델과 溫퍼링 모델이 필요하게 된다.

나. 乾燥 모델

Bakker-Arkema⁶⁾ 등은 穀物 및 穀物層을 通過하는 空氣에 대한 熱 및 物質平衡을 考慮하여 竝流乾燥過程을 지배하는 方程式을 다음과 같이 제시하

였다.

$$\frac{dT}{dx} = \frac{-hA}{G_a c_a + G_a c_v H} (T - \theta) \dots\dots\dots(2-1)$$

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{hA(T - \theta)}{G_p c_p + G_p c_w \bar{M}} + \frac{h_{fg} + c_v(T - \theta)}{c_p + c_w \bar{M}} \cdot \frac{d\bar{M}}{dx} \dots\dots\dots(2-2)$$

$$\frac{dH}{dx} = -\frac{G_p}{G_a} \cdot \frac{d\bar{M}}{dx} \dots\dots\dots(2-3)$$

$$\frac{\partial M}{\partial x} = \frac{D}{V_p} \left(\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right) \dots\dots\dots(2-4)$$

$$\frac{\partial \bar{M}}{\partial x} = \frac{3}{R^3} \int_0^R \frac{\partial M}{\partial x} r^2 dr \dots\dots\dots(2-5)$$

上記式中 (2-4)와 (2-5)식은 벼를 球로 간주하여 誘導한 水分擴散 모델이다. (2-1)~(2-3)식은 一階常微分方程式이며 (2-4)식은 二階偏微分方程式이다. 이들 方程式의 解를 數值解析法으로 求하기 위하여 (2-4)식을 聯立一階常微分方程式으로 變換하였다.

그림 2-2와 같이 벼 낱알의 半徑을 等間隔으로 N等分하고, $\frac{\partial M}{\partial r}$ 및 $\frac{\partial^2 M}{\partial r^2}$ 을 中心差分法으로 나타내

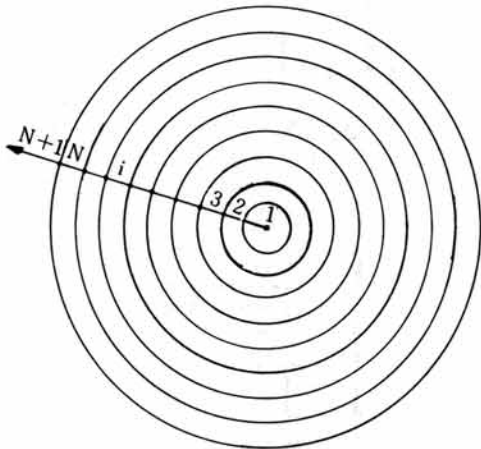


Fig. 2-2. Spherical representation of a short rough rice kernel.

면 다음과 같다.

$$\frac{\partial M_i}{\partial r} = \frac{M_{i+1} - M_{i-1}}{2\Delta r} \dots\dots\dots(2-6)$$

$$\frac{\partial^2 M_i}{\partial r^2} = \frac{M_{i+1} - 2M_i + M_{i-1}}{\Delta r^2} \dots\dots\dots(2-7)$$

(2-6), (2-7)식을 (2-4)식에 代入하면 (2-8)식이 유도된다.

$$\frac{\partial M_i}{\partial x} = \frac{D}{V_p \Delta r^2} \left[\left(1 + \frac{1}{i-1}\right) M_{i+1} - 2M_i + \left(1 - \frac{1}{i-1}\right) M_{i-1} \right] \dots\dots\dots(2-8)$$

$i = 2, 3, \dots, N$

中心노오드($i=1$)에 대하여는 다음식으로 表示된다.

$$\frac{\partial M_1}{\partial x} = \frac{6D}{V_p \Delta r^2} (M_2 - M_1) \dots\dots\dots(2-9)$$

穀物의 表面 즉 N+1 노오드에 대하여는 穀粒外部의 平衡含水率과 一致하는 假想的 點을 假定하여 다음식으로 나타내었다.

$$\frac{\partial M_{N+1}}{\partial x} = \frac{D}{V_p \Delta r^2} \left[\left(1 + \frac{1}{N+1}\right) M_e - 2M_{N+1} + \left(1 - \frac{1}{N}\right) M_N \right] \dots\dots\dots(2-10)$$

낱알의 平均含水率의 變化率을 나타내는 (2-5)식은 Simpson의 積分法則을 使用하여 다음식으로 表示하였다.

$$\frac{d\bar{M}}{dx} = \frac{\Delta r}{R^3} \left(F_1 + 4 \sum_{i=2,4,6}^N F_i + 2 \sum_{i=1,3,5}^{N-1} F_i + F_{N+1} \right) \dots\dots\dots(2-11)$$

여기서 $F_i = \frac{\partial M_i}{\partial x} (i-1)^2 (\Delta r)^2$ 이다.

結果적으로 竝流型 乾燥모델을 나타내는 方程式은 (2-1)~(2-3)식 및 (2-8)~(2-11)식이 된다. 이들 方程式의 初期 및 境界條件은 다음과 같다.

$$T(0) = T_{in}$$

$$\theta(0) = \theta_{in}$$

$$H(0) = H_{in}$$

$$M(0, r) = M_0$$

$$\left. \frac{\partial M}{\partial r} \right|_{x,0} = 0$$

$$M(x, R) = M_e$$

$$\bar{M}(0) = M_0$$

竝流型 乾燥모델을 나타내는 方程式은 一階聯立常微分方程式이 되며 이들 式의 解를 Runge-Kuttner 방법 및 Adams-Moulton 방법을 利用하여 求하

였다.

다. 템퍼링 모델

템퍼링은 乾燥過程에서 일어난 穀粒内部의 水分 勾配를 완화시키는 過程으로, 템퍼링 동안 穀粒의 平均含水率은 變하지 않는다. 즉 穀粒의 表面은 水分에 대하여 不透過性인 것으로 간주된다. 따라서 템퍼링은 表面에서 水分蒸發이 없는 穀粒内部에서 水分擴散過程이므로 (2-4) 式의 水分擴散方程式 으로 表示할 수 있으며, 初期 및 境界條件은 다음 式으로 表示된다.

$$M(0, r) = M(X_c, r) \dots\dots\dots(2-12)$$

$$\frac{\partial M}{\partial r} \Big|_{x,r} = 0 \dots\dots\dots(2-13)$$

여기서 X_c 은 乾燥室의 높이이다.
穀粒表面노오드에 대한 式은 (2-4) 式과 境界條件(2-13) 式으로부터 다음과 같이 表示된다.

$$\frac{\partial M_{N+1}}{\partial x} = \frac{2D}{V_p \Delta r^2} (M_N - M_{N+1}) \dots\dots\dots(2-14)$$

따라서 템퍼링모델은 (2-8), (2-9) 및 (2-14) 式으로 表示되며 이들 方程式의 解는 乾燥모델에서 와 같은 方法으로 求하였다.

4. 完全米收率 豫測 모델

Singh 等⁽¹⁶⁾은 Stripe 等⁽¹⁵⁾의 벼의 乾燥와 品質實驗에 관한 資料를 利用하여 完全米收率比를 送風空氣의 溫度와 純乾燥時間(resident time)의 함수로 나타내었으며 다음 (2-15) 式으로 表示하였다.

$$H_r = EXP(-60 C_t) \dots\dots\dots(2-15)$$

여기서 H_r = 完全米收率化

$$\left(= \frac{t \text{時間乾燥後의 完全米收率}}{\text{初期의 完全米收率}} \right)$$

$$C = 1.9103 \times 10^{21} EXP(-1.7748 \times 10^4 / (\theta + 273.15))$$

t = 純乾燥時間

(2-15) 式을 t 에 關하여 微分하고, 有限差分法을

適用하여 整理하면,

$$H_r(\text{new}) = H_r(\text{old}) (1 - 60 C \Delta t) \dots\dots\dots(2-16)$$

이 된다.

여기서 $H_r(\text{new}) = \Delta t$ 時間乾燥後의 完全米收率比

$H_r(\text{old}) =$ 初期의 完全米收率比

(2-16) 式으로 Δt 時間乾燥後의 完全米收率比를 구하고 이를 全乾燥時間동안 연속적으로 計算하여 完全米收率比를 算出하였다.

3. 모델의 檢證

가. 乾燥實驗

시뮬레이션 모델의 妥當性을 檢證하기 위하여 含水率, 穀溫 및 完全米收率에 대한 시뮬레이션 모델에 의한 豫測值와 乾燥實驗에 의한 實驗值를 比較하였다. 實驗用 乾燥機는 그림 3-1과 같이 乾燥室,

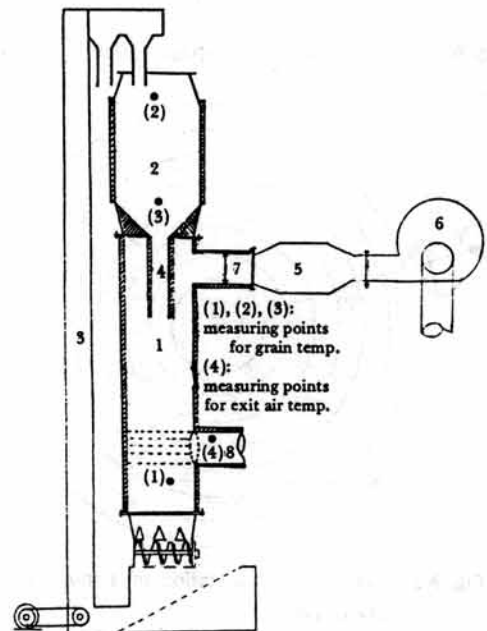


Fig. 3-1. Schematic diagram of rice circulation concurrent-flow dryer

- 1. Drying section
- 2. Tempering section
- 3. Bucket elevator
- 4. Insulated grain tube
- 5. Heater
- 6. Turbo blower
- 7. Air inlet
- 8. Air exhaust

템퍼링室, 送風裝置 및 버킷엘리베이터로 構成되어 있다. 乾燥室은 直徑 45cm, 높이 70cm (체적 0.111m³)의 圓筒形으로 철재로 制作하였다. 乾燥室 上·下部에 각각 直徑 20cm의 空氣 流入口와 排出口를 設置하고 空氣排出口에는 多空圓筒을 設置하여 穀物層을 通過하는 空氣의 流速을 均等하게 하였다.

템퍼링室은 템퍼링時間을 벼의 乾燥室通過時間의 2 배로 하기 위하여 템퍼링室의 體적을 乾燥室 體적의 2 배 (0.20m³)로 하였다.

乾燥室 아래에 설치한 스크루콘베이어에 의하여 穀物循環을 調節하였다. 乾燥室을 通過한 穀物은 버킷엘리베이터에 의하여 템퍼링室로 들어가며 템퍼링室을 통과한 벼는 直徑 10cm의 斷熱된 튜브관을 거쳐 다시 乾燥室에 流入된다.

空氣의 加熱은 전기히터와 터보팬을 利用하였으며 送風空氣의 溫度는 온도조절장치를 부착하여 조절하였다.

送風空氣와 穀物의 溫度變化는 熱電對를 多點自動溫度記錄計에 연결하여 測定하였으며 空氣의 相對濕度는 濕度計를 使用하여 계측하였다.

穀物의 含水率은 15g의 試料를 105°C 오븐乾燥法으로 3反復 測定하였다.

送風量은 Anemometer로 측정하였다.

米質에 對한 實驗方法은 Lee (1984)에 의한 方法을 利用하였다.

乾燥實驗에 使用된 벼 品種은 추정벼 (Akibare) 이었으며, 1회 試料의 量을 約 220kg으로 하여 2 회 실험을 수행하였다. 實驗에 使用된 乾燥條件은 表3-1과 같다.

나. 實驗値와 豫測値의 比較

그림 3-2~3-5는 各各 Test No. 1과 Test No. 2 에서의 含水率과 템퍼링室 入口의 穀溫의 實驗値와 시뮬레이션에 의한 豫測値를 比較한 것이다.

Table 3-1. Drying conditions used for validation tests of simulation model.

Test No.	1	2
Grain flow rate (m/hr)	2.116	1.965
Air flow rate (cmm/m ²)	19.18	21.0
Resident time (min/pass)	1.26	1.42
Tempering time (min/pass)	3.74	3.58
Bed depth (m)	0.74	0.74
Ambient air temperature(°C)	6.8	8.3
Ambient relative humidity(%)	59.4	52.8
Grain weight (kg)	212.3	228
Initial mc (% w.b)	24.5	24.4
Initial grain temperature(°C)	8.5	9.0
Initial head rice yield (%)	64.54	63.99
Drying air temperature (°C)		
(1st pass-2nd-3rd-4th)	115-105-105-95	120-110-110-100

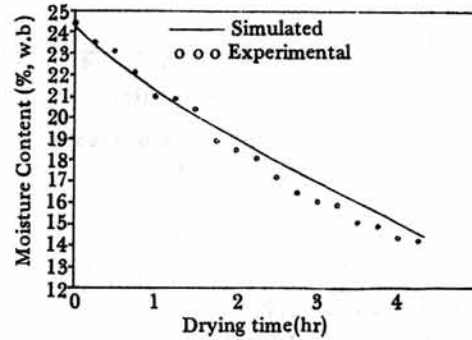


Fig. 3-2. Comparison of the experimental and simulated moisture content for Test No. 1.

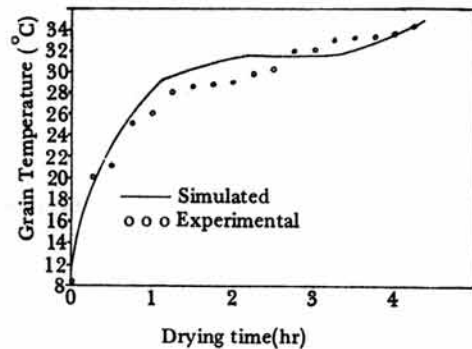


Fig. 3-3. Comparison of the experimental and simulated grain temp. for Test No. 1.

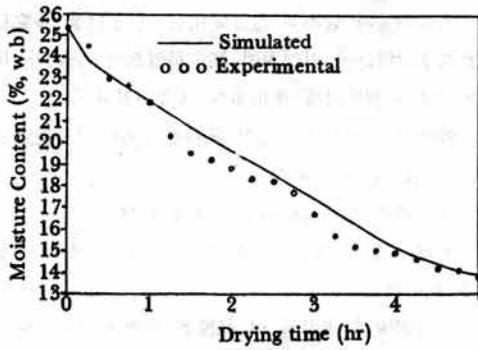


Fig. 3-4. Comparison of the experimental and simulated moisture content for Test No. 2.

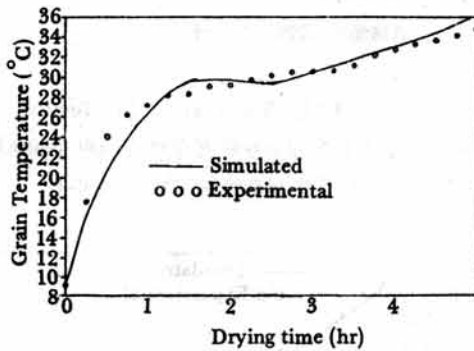


Fig. 3-5. Comparison of the experimental and simulated grain temp. for Test No. 2.

그림에서와 같이 實驗値와 豫測値는 거의 일치하는 것으로 나타났다. 表 3-2는 穀物의 最終狀態의 實驗値와 豫測値를 比較한 것이다.

實驗値와 豫測値의 差異는 穀溫의 경우 0.6~1.5 °C, 含水率의 경우 0.1~0.7%, w.b., 完全米收率은 0.7~0.8%로 나타났다.

이러한 差異는 벼의 熱 및 物理的 特性의 不正確, 外氣溫度 및 濕度의 變化를 考慮하지 않은 것에 기

인한 것으로 생각된다. 따라서, 보다 더 正確한 시뮬레이션모델의 開發이 要請되지만, 乾燥機의 性能因子の 影響 및 性能의 分析에는 有效하게 利用할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 시뮬레이션에 의한 性能分析

乾燥機의 性能에 影響을 주는 設計要因으로는 乾燥室과 덤퍼링실의 크기를 들 수 있으며, 作動條件은 送風溫度, 送風量, 穀物循環速度 등이다. 이들 性能因子和 곡물의 상태가 乾燥機의 性能 즉 乾燥速度, 所要에너지, 所要動力 및 品質에 미치는 影響을 分析하기 위하여 일련의 乾燥시뮬레이션을 수행하였다.

가. 性能因子の 組合

다음의 곡물상태와 성능인자의 조합에 대하여 일련의 乾燥시뮬레이션을 수행하였다.

初期含水率(% w. b.)	: 18, 20, 22, 24
初期穀溫 (°C)	: 15, 20, 25, 30
送風量(m ³ /m ² ; min)	: 15, 20, 25, 30
穀物循環速度(m/hr)	: 1.5, 2.0, 2.5, 3.0
乾燥室의 높이(m)	: 0.5, 0.7, 0.9, 1.1
送風溫度(°C)	A : 90-90-90-90 B : 100-100-100-100 C : 110-100-90-80 D : 120-110-100-90

上記의 조합에 대한 모든 乾燥시뮬레이션에 대하여 表 4-1의 作動條件을 가정하였다.

나. 所要에너지와 所要動力

Table 3-2. Comparison of experimental & simulated results.

Items	Test No. 1		Test No. 2	
	Experimental results	Simulated results	Experimental results	Simulated results
Final moisture content (% w.b.)	14.2	14.9	13.1	13.2
Final grain temperature (°C)	32.2	32.8	34.0	35.5
Final head rice yield (%)	64.3	63.5	62.7	62.0
Drying rate (% w.b./hr)	2.3	1.9	2.3	2.1

Table 4-1. Hypothetical operating conditions for drying simulations.

Ambient air conditions:	
Temperature	20°C
Relative humidity	60 %
Grain conditions:	
Initial moisture content	24 % w.b.
Initial grain temperature	20°C
Grain flow rate	2.0 m/hr
Initial head rice yield	65 %
Air conditions:	
Inlet air temperature	120-110-100-90°C
Air flow rate	20 m ³ /m ² ·min
Bed depth	0.6 m

乾燥에 所要되는 에너지는 送風空氣의 加熱에 要求되는 燃料에너지와 팬의 구동에 所要되는 팬에너지로 區分할 수 있다. 燃料에너지는 버어너의 熱效率을 70%로 가정하여 다음식으로 算出하였다.

$$E_a = \frac{G_a(c_a + c_a H)(T_{in} - T_{amb}) t_d}{0.7 (M_a - M_r) \rho X_c}$$

팬에너지는 전동기의 電氣-機械效率을 70%, 팬效率을 50%로 가정하여 다음 식으로 算出하였다.

$$E_r = \frac{0.71 Q_a \Delta P t_d}{(M_a - M_r) \rho X_c}$$

여기서 ΔP 는 다음 식으로 算出하였다.¹⁴⁾

$$\Delta P = 10357.8 (Q_a/60)^{1.3877} X_c$$

따라서 팬에너지는 다음 식으로 表示된다.

$$E_r = \frac{6.05 Q_a^{1.3877} t_d}{(M_a - M_r) \rho}$$

所要電力은 팬의 구동動力만을 고려하였으며 다음식으로 算出하였다.

$$KW = 1.68 \times 10^{-3} (X_c) (Q_a)^{1.3877}$$

5. 시뮬레이션 結果 및 考察

가. 初期含水率의 影響

그림 5-1은 初期含水率에 따른 含水率變化를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 벼를 14% w.b.까지 乾燥할 경우 初期含水率 18% w.b.의 벼는 2.2시간 初期含水率 20, 22, 24% w.b.의 벼는 각각 3.2시간, 4.3시간 및 5.4시간이 所要된 것으로 나타났다.

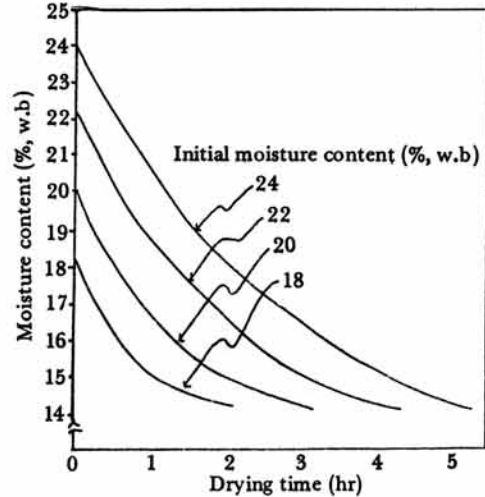


Fig. 5-1. Effect of initial moisture contents on moisture content variations.

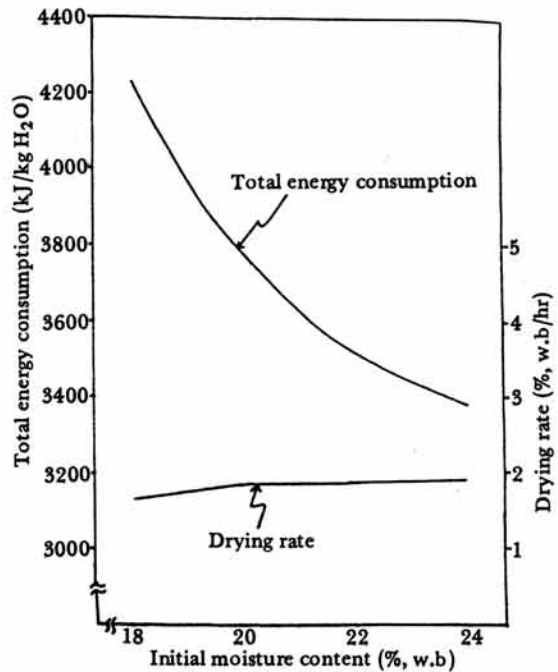


Fig. 5-2. Effect of initial moisture content on total energy consumption and drying rate.

그림 5-2는 벼를 約 14% w.b.까지 乾燥한 경우 初期含水率의 變化가 總所要에너지와 乾燥速度에

미치는 영향을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 初期含水率이 18%, w.b.에서 24%, w.b.로 증가함에 따라 總所要에너지(연료소비에너지 + 송풍기 구동에너지)는 4200 kJ/kg, H₂O에서 3350 kJ/kg, H₂O로減少하였다. 또한 乾燥速度는 初期含水率이 증가함에 따라 1.76%, w.b./hr에서 1.85%, w.b./hr로 완만하게 증가하는 경향을 나타내었다. 이와 같은 현상은 投入에너지는 동일한 반면 初期含水率이 높을수록 제거되는 水分量이 증가하는데 기인된 것으로 判斷된다. 完全米收率은 初期含水率에 크게 영향을 받지 아니하였다.

나. 初期穀溫의 影響

그림 5-3은 初期穀溫이 含水率의 變化에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 初期穀溫이 15°C에서 25°C로 높아질수록 乾燥速度는 增加하였으며, 15%, w.b.로 乾燥하는데 初期穀溫이 15°C, 20°C 및 25°C의 경우 각각 4.4시간, 4.1시간 및 3.9시간이 所要되었다.

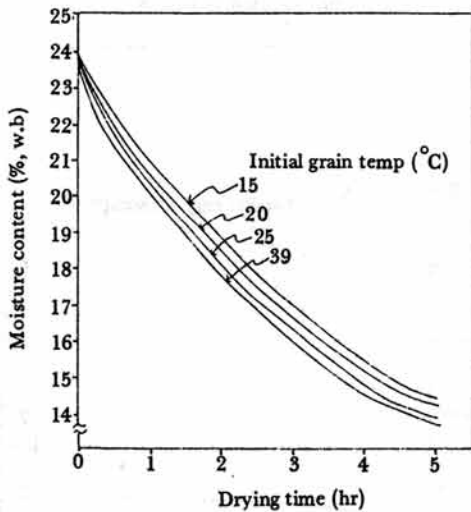


Fig. 5-3. Effect of initial grain temp. on moisture content variations.

그림 5-4는 初期穀溫이 總所要에너지와 乾燥速度에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 穀溫이 15°C에서 20°C로 증가할수록 總所要에너지는 3400 kJ/kg, H₂O에서 3280 kJ/kg, H₂O로 아주 완만하게減少하였으며, 乾燥速度는 1.8%, w.b./hr에서 1.9%, w.b./hr로 약간 증가하였다.

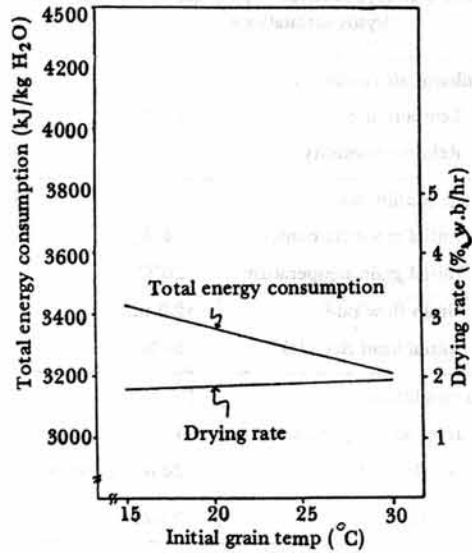


Fig. 5-4. Effect of initial grain temp on the total energy consumption and drying rate.

完全米收率은 初期穀溫이 15°C, 20°C 및 25°C일 때, 각각 62.5%, 62.3 및 61.9%로 나타나므로써 初期穀溫이 높을수록 完全米收率이 저하하는 것으로 나타났다.

따라서 初期穀溫의 增加는 所要에너지 및 乾燥速度에는 크게 영향을 미치지 않으나 完全米收率을 저하시키는 경향을 나타내므로 初期穀溫이 20°C이상 높은 수준을 유지하지 않도록 해야 할 것이다.

다. 送風空氣 溫度의 影響

그림 5-5는 送風空氣의 溫度의 變化가 含水率變化에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 乾燥溫度를 一定하게 90°C로 유지한 A의 경우가 乾燥速度가 가장 느리게 나타났으며, 120°C에서 90°C까지 단계적으로 변화시킨 D의 경우가 가장 빠르게 乾燥가 이루어진 것으로 나타났다.

表 5-1의 乾燥溫度別로 중요한 몇가지의 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 表에서와 같이 乾燥速度는 A의 경우가 가장 느린 1.63%, w.b./hr로 나타났으며, D의 경우가 가장 빠른 1.83%, w.b./hr로 나타났으며, 소요에너지는 4경우 모두 큰 변화를 나타내지 아니하였다. 完全米收率은 設定溫度가 낮은 A의 경우와 110°C에서 80°C로 단계적으로 변

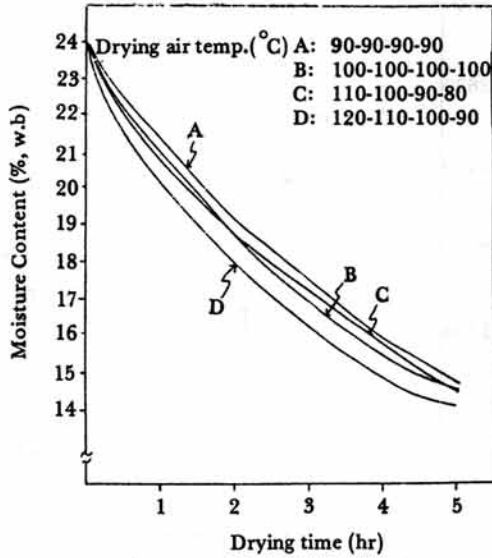


Fig. 5-5. Effect of drying air temp. on moisture content variations.

화시킨 C의 경우가 각각 62.7%와 62.8%로 가장 높게 나타났다.

이상을 종합해 볼 때 乾燥溫度는 乾燥初期에는 높게 設定하고 乾燥가 진행될수록 낮추어가는 것이 乾燥速度를 增加시키는 同時에 完全米收率의 저하를 줄일 수 있는 방법으로 판단되며, 여타의 건조 조건을 表 4-1에서와 같이 고정할 때 上記의 4경우 중 C의 方法이 가장 合理的인 것으로 判斷된다.

라. 送風量의 影響

그림 5-6과 그림 5-7은 送風量의 變化에 따른 含水率 變化와 總所要에너지 및 乾燥速度의 變化를 나타낸 것이다.

그림에서와 같이 送風量이 15, 20, 25 및 30m³/min. m²로 增加함에 따라 乾燥速度는 각각 1.41, 1.85, 2.29 및 2.66%, w.b./hr로 크게 증가하는

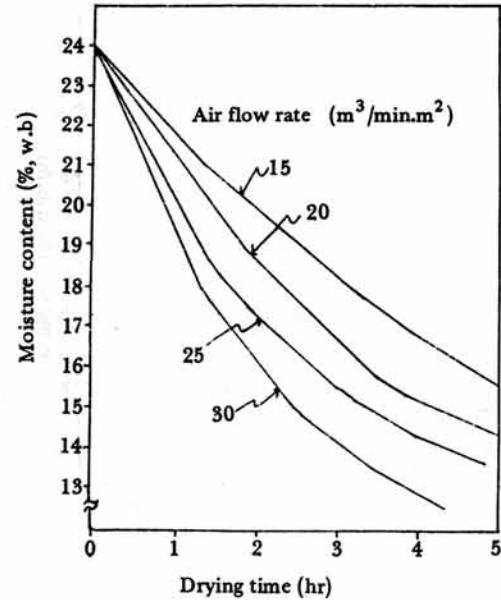


Fig. 5-6. Effect of air flow rate on moisture content variations.

경향을 나타내었다. 또한 送風量이 15m³/min. m²에서 30m³/min. m²로 2배 증가하였을 때 總所要 에너지는 3140 kJ/kg H₂O에 3800 kJ/kg H₂O로 증가하여 약 21% 증가한 것으로 나타났다.

한편 送風量이 각각 15, 20, 25 및 30m³/min. m²일 때, 完全米收率은 각각 63.5, 62.3, 60.3 및 56.2%로 初期의 完全米收率 64%에 비하여 각각 0.5, 1.7, 3.7 및 7.8로 감소하여 送風量의 증가가 完全米收率에 크게 영향을 미치는 것임을 알 수 있다.

또 送風量이 증가할수록 所要動力은 各各 0.65, 1.29, 2.2, 3.39KW로 크게 증가하였다.

마. 穀物循環速度의 影響

그림 5-8과 그림 5-9는 각각 穀物循環速度가 含水率과 總所要에너지 및 乾燥速度에 미치는 영향을

Table 5-1. Summary of the results from five simulations with different drying air temperature

Drying air temperature (°C)	A: 90-90-90-90	B: 100-100-100-100	C: 110-100-90-80	D: 120-110-100-90
Final moisture content (% w.b.)	13.4	14.2	13.6	14.1
Drying rate (% w.b./hr)	1.63	1.81	1.81	1.85
Total energy consumption (kJ/kg, H ₂ O)	3,400	3,350	3,400	3,340
Final head rice yield (%)	62.7	62.2	62.8	62.3

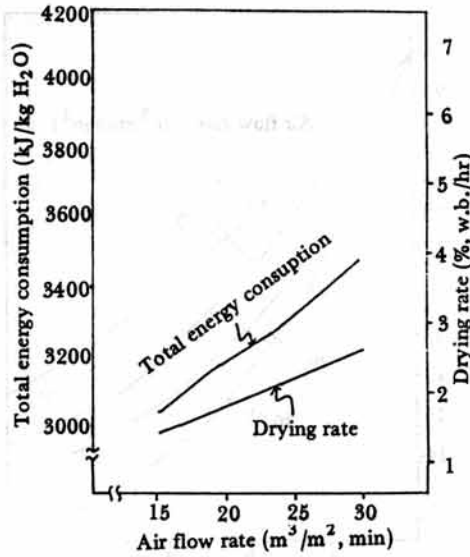


Fig. 5-7. Effect of air flow rate on the total energy consumption and drying rate.

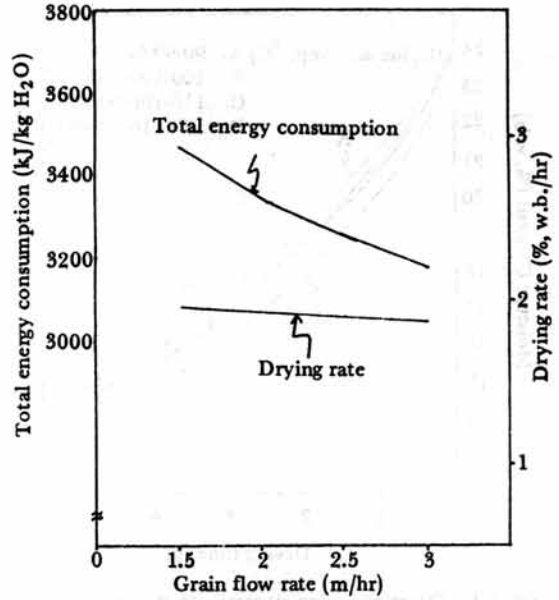


Fig. 5-9. Effect of grain flow rate on the total energy consumption and drying rate.

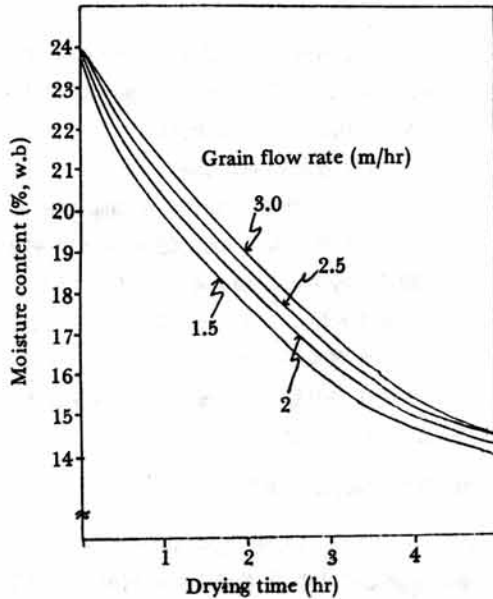


Fig. 5-8. Effect of grain flow rate on moisture content variations.

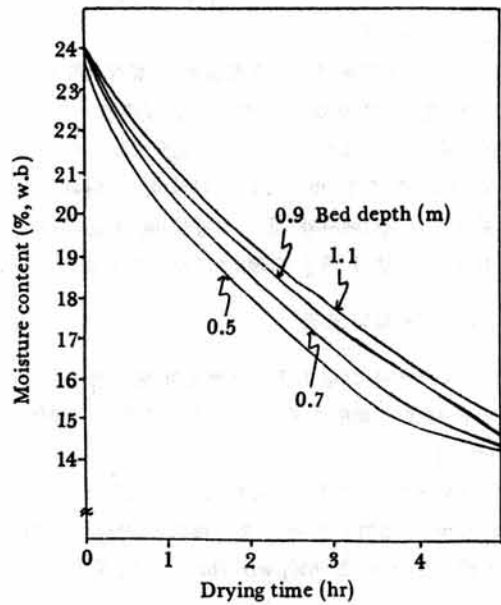


Fig. 5-10. Effect of bed depth on moisture content variations.

나타낸 것이다.

그림에서와 같이 穀物循環速度가 증가하면 乾燥速度와 總所要에너지는 감소하는 경향을 나타내었다.

한편 穀物循環速度가 1.5, 2.0, 2.5 및 3.0m/hr일때 完全米收率은 各各 59.2, 62.3, 63.8 및 63.9로 나타나므로서 穀物循環速度가 느릴수록 完全米收率이 크

게 減少하였다. 이와 같이 完全米收率의 차이가 큰 것은 穀物循環速度가 느릴수록 穀温上昇이 크게 나타나기 때문인 것으로 判斷된다.

마. 乾燥室 높이의 影響

그림 5-10과 그림 5-11은 乾燥室 높이가 含水率

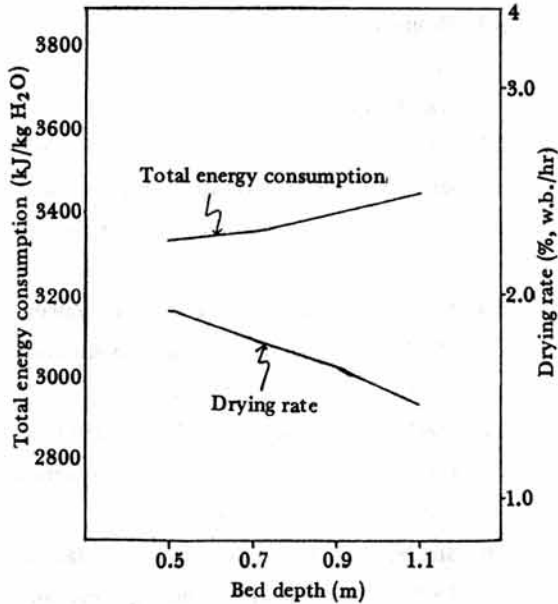


Fig. 5-11. Effect of bed depth on the total energy consumption and drying rate.

변화, 總에너지 및 乾燥速度에 미치는 影을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 乾燥室의 높이가 增加할수록 乾燥速度는 減少하였으며 總所要에너지는 약간 增加하였다.

完全米收率は 乾燥室 높이가 各各 0.5, 0.7, 0.9 및 1.1m일때 62.4, 62.2, 61.9 및 61.7%로 나타났는데 乾燥室높이가 增加할수록 減少하는 경향을 나타내었다.

乾燥室높이가 增加할수록 所要動力은 各各 1.07, 1.50, 1.93, 2.36Kw로 크게 增加하는 경향을 나타내었다.

6. 結論 및 要約

循環竝流型 穀物乾燥機의 開發을 目的으로 竝流 乾燥課程 및 乾燥機의 性能을 分析하기 위한 시뮬레이션 모델을 開發하고 벼의 乾燥實驗을 通하여 이를 檢證하였다.

또한 設計因子 및 作動條件이 乾燥機의 性能에 미치는 影을 分析하였다.

중요한 結果를 要約하면 다음과 같다.

1. 시뮬레이션 모델은 乾燥機의 性能分析에 有效하게 利用될 수 있는 것으로 判斷되었다.
2. 初期含水率이 높을수록 乾燥速度는 增加하고

乾燥所要에너지는 減少하였으며 完全米收率は 크게 影을 받지 아니하였다.

3. 初期穀溫의 增加는 乾燥速度 및 所要에너지에는 크게 影을 미치지 아니하였으나 完全米收률을 저하시키는 경향을 나타내었다.

4. 送風空氣의 溫度가 높을수록 穀溫과 乾燥速度는 增加하고 所要에너지는 큰 차이를 나타내지 아니하였다. 송풍공기의 온도는 건조초기에는 높게 設定하고 乾燥가 진행될수록 낮추어가는 것이 乾燥速度를 增加시키는 同時에 完全米收率의 저하를 줄일 수 있는 것으로 나타났다.

5. 送風量이 增加할수록 乾燥速度와 總所要에너지는 급격히 增加하고 穀溫도 增加하였으며 完全米收率は 급격히 減少하였다. 또한 所要動力은 급격히 增加하였다.

6. 穀物循環速度가 增加함에 따라 穀溫과 乾燥速度 및 總所要에너지는 減少하였으며 完全米收率は 增加하였다.

7. 乾燥室 높이의 增加와 더불어 所要動力은 급격히 增加하였으며 所要에너지는 약간 增加하고 完全米收率は 減少하는 경향을 나타내었다.

參考文獻

1. 琴東赫, 1978. 太陽熱을 利用한 穀物乾燥에 관한 연구. 韓國農業機械學會誌 3(1).
2. 琴東赫, 1984. 穀物乾燥機의 排氣熱 再利用 및 熱效率改善에 관한 研究. 韓國農業機械學會誌. 9(12).
3. 琴東赫, 1986. 시뮬레이션에 의한 循環式 穀物乾燥機의 性能分析. 成均館大學校論文集37(1).
4. ASAE Year book, 1983.
5. Bakker-Arkema, F.W. Brook, R.C. Walker, L.P. Kalchik, S.J., and Adna dnia, A. 1977. Concurrent flow grain drying grain quality aspects. Corn Quality Res. Conf. Proc., Univ. of ILL., Urbana, IL.
6. Bakker-Arkema, F.W., Brooker, D.B., and Hall, C.W. 1972. Comparative evaluation of cross-flow and concurrent flow grain dryers. ASAE paper 72-849.

7. Brook, R.C., Bakker-Arkema, F.W. 1978. Simulation for design of commercial concurrent flow grain dryers. Trans. ASAE 21: 978-981.
8. Brook, R.C. 1977. Design of multi-stage grain dryers. ph.D. Thesis, Mich. State Univ., E. Lansing, MI.
9. Baughman, G.R., Barre, H.J., and Hamdy, M.V. 1973. Experimental study and simulation of concurrent flow dryers. Trans. ASAE 16: 890-894.
10. Farmer, D.M. 1972. Optimization techniques for grain dryer design and analysis, ph.D. thesis, Mich. State Univ., E. Lansing, MI.
11. Ingram, G.W. 1976. Deep bed dryer simulation with intraparticle moisture diffusion. J. Agric. Engr. Res. 21: 262-272.
12. Keum, D.M. and R.P. Singh. 1986, Continuous flow rice drying using simulation KSAM 11(2).
13. Ohlman, G.V. 1955. Method and arrangement for drying grain and the like in drying silo provided with direct heat supply. US patent No: 2,706,343.
14. Rumsey, T.R. and R.P. Singh. 1978. Pressure drop through a bed of food grains. ASAE Paper No. 78-6546.
15. Stripe, D.R., E.T. Wratten, and M.F. Miller. 1973. Rice drying and processing. Annual report of Louisiana Rice Experiment Station.
16. Singh, R.P., C.Y. Wang, and C. Zuritz. 1980. A numerical approach to simulate rice drying. Drying 80: 227-232.
17. Steffe, J.F. and R.P. Singh. 1980 a. Liquid diffusivity rough rice components. trans. ASAE 23(3): 767-774, 782.
18. Steffe, J.F., R.P. Singh, and A.S. Bakshi. 1979. Influence of tempering time and cooling on rice milling yields and moisture removal. Trans. ASAE 22(5): 1214-1218, 1224.
19. Steffe, J.F. and R.P. Singh. 1980 b: Theoretical and practical aspects of rough rice tempering. Trans. ASAE 23(3): 775-782.