

太陽에너지를 利用한 穀物乾燥시스템의

시뮬레이션에 關한 研究*

Simulation of Drying Grain with Solar-Heated Air

琴 東 赫** · 全 龍 雲**

Keum, Dong Hyuk · Jeon, Yong Woon

Summary

Low-temperature drying systems have been extensively used for drying cereal grain such as shelled corn and wheat. Since the 1973 energy crisis, many researches have been conducted to apply solar energy as supplemental heat to natural air drying systems. However, little research on rough rice drying has been done in this area, especially very little in Korea.

In designing a solar drying system, quality loss, airflow requirements, temperature rise of drying air, fan power and energy requirements should be thoroughly studied.

The factors affecting solar drying systems are airflow rate, initial moisture content, the amount of heat added to drying air, fan operation method and the weather conditions.

The major objectives of this study were to analyze the effects of the performance factors and determine design parameters such as airflow requirements, optimum bed depth, optimum temperature rise of drying air, fan operation method and collector size.

Three hourly observations based on the 4-year weather data in Chuncheon area were used to simulate rough rice drying.

The results can be summarized as follows:

1. The results of the statistical analysis indicated that the experimental and predicted values of the temperature rise of the air passing through the collector agreed well.

2. Equilibrium moisture content was affected a little by airflow rate, but affected mainly by the amount of heat added to drying air. Equilibrium moisture content ranged from 12.2 to 13.2 percent wet basis for the continuous fan operation, from 10.4 to 11.7 percent wet basis for the intermittent fan operation respectively, in range of 1.6 to 5.9 degrees Centigrade average temperature rise of drying air.

**江原大學校 農科大學 農工學科

*본 연구는 문교부의 재정지원에 의한 것임.

3. Average moisture content when top layer was dried to 15 percent wet basis ranged from 13.1 to 13.9 percent wet basis for the continuous fan operation, from 11.9 to 13.4 percent wet basis for the intermittent fan operation respectively, in the range of 1.6 to 5.9 degrees Centigrade average temperature rise of drying air and 18 to 24 percent wet basis initial moisture content. The results indicated that grain was overdried with the intermittent fan operation in any range of temperature rise of drying air. Therefore, the continuous fan operation is usually more effective than the intermittent fan operation considering the overdrying.

4. For the continuous fan operation, the average temperature rise of drying air may be limited to 2.2 to 3.3 degrees Centigrade considering safe storage moisture level of 13.5 to 14 percent wet basis.

5. Required drying time decrease ranged from 40 to 50 percent each time the airflow rate was doubled and from 3.9 to 4.3 percent approximately for each one degrees Centigrade in average temperature rise of drying air regardless of the fan operation methods. Therefore, the average temperature rise of drying air had a little effect on required drying time.

6. Required drying time increase ranged from 18 to 30 percent approximately for each 2 percent increase in initial moisture content regardless of the fan operation methods, in the range of 18 to 24 percent moisture.

7. The intermittent fan operation showed about 36 to 42 percent decrease in required drying time as compared with the continuous fan operation.

8. Drymatter loss decrease ranged from 34 to 46 percent each time the airflow rate was doubled and from 2 to 3 percent approximately for each one degrees Centigrade in average temperature rise of drying air, regardless of the fan operation methods. Therefore, the average temperature rise of drying air had a little effect on drymatter loss.

9. Drymatter loss increase ranged from 50 to 78 percent approximately for each 2 percent increase in initial moisture content, in the range of 18 to 24 percent moisture.

10. The intermittent fan operation showed about 40 to 50 percent increase in drymatter loss as compared with the continuous fan operation and the increasing rate was higher at high level of initial moisture and average temperature rise.

11. Year-to-year weather conditions had a little effect on required drying time and drymatter loss.

12. The equations for estimating time required to dry top layer to 16 and 15% wet basis and drymatter loss were derived as functions of the performance factors by the least square method.

13. Minimum airflow rates based on 0.5 percent drymatter loss were estimated. Minimum airflow rates for the intermittent fan operation were approximately 1.5 to 1.8 times as much as compared with the continuous fan operation, but a few differences among year-to-year.

14. Required fan horsepower and energy for the intermittent fan operation were

3.7 and 1.5 times respectively as much as compared with the continuous fan operation.

15. The continuous fan operation may be more effective than the intermittent fan operation considering overdrying, fan horsepower requirements, and energy use.

16. A method for estimating the required collection area of flat-plate solar collector using average temperature rise and airflow rate was presented.

1. 緒 言

1973年の石油波動을契機로農作業中 가장 에너지集約的인穀物の乾燥過程에서의化石燃料의代替代지는節約的인方法의講究가高潮되고 있는바,太陽熱을集熱하여 이를常溫通風乾燥의補助熱源으로利用하려는研究가活潑히進行되고 있다.

太陽熱乾燥시스템은氣象條件 뿐 만 아니라送風方法,送風量,送風空氣의加熱溫度 및穀物の初期含水率에 따라 그所要條件이變하게 되므로,적정한乾燥條件을 결정하기爲해서는長期間의氣象條件을 근거로 많은實驗을 실시하지 않으면 안될 것이다.

그러나,實驗의方法에依한研究는長期間의實驗이 불가피하여 막대한經費와努力이所要된다. 따라서,先進國에서는近來에實驗的方法에依하지 않고,乾燥理論을土臺로한시뮬레이션方法으로太陽熱乾燥를 해석하려는研究가 시도되고 있다.

本研究에서는常溫通風乾燥시스템의시뮬레이션 모델을適用하여長期間의氣象條件을根據로太陽熱을利用한벼의乾燥可能性 및所要條件을究明코자 하였으며 그具體的인研究目的은 다음과 같다.

1. 氣象條件, 初期含水率, 送風量, 送風方法 및 送風空氣의 加熱溫度가 벼의 太陽熱乾燥시스템의 性能에 미치는 影響을 分析한다.

2. 벼의 太陽熱乾燥에 있어서의 所要乾燥時間 및 穀物損傷程度를 豫測하기爲한 方程式을 誘導한다.

3. 太陽熱乾燥시스템에 있어서의 所要에너지와 適正乾燥條件을 究明한다.

2. 文獻概要

가. 穀物乾燥에 利用되는 太陽熱集熱器

太陽에너지는 高温高速乾燥시스템보다는 低溫乾燥시스템에 더 利用妥當性이 있는 것으로 評價되고

있다. (9, 21)

前者는 稗, 콩과 같이 含有水分이 相對的으로 적은 穀物에 對해서는 그 妥當性이 認定되고 있으나 一般的으로 높은 溫度의 熱風(49°C~82°C)이 要求되므로 集熱器의 製作費用이 過大하여 아직까지는 經濟的妥當性이 없는 것으로 分析되고 있다. (9) 反面에 後者의 境遇는 低水準의 熱投入으로 乾燥가 可能하고 또한 乾燥期間이 길어서 간헐적으로 變動하는 太陽에너지를 利用하기에 便利한것으로 看做되고 있다. (15)

따라서 太陽에너지를 利用한 穀物乾燥에 關한 研究는 主로 常溫通風乾燥의 補助熱源으로 太陽熱을 利用하는데 集中되고 있다.

穀物乾燥에 利用되는 集熱器에는 空氣加熱平面式 集熱器와 이를 여러 型式으로 變形시킨 集熱器가 있다. 集熱器는 集熱板(Absorber)과 透明덮게판(Transparent cover) 및 斷熱材(Insulating material)로 構成되어 있다.

集熱板으로는 黑色페인팅을 한 鋼板, 알루미늄板, 銅板 및 합석板 등이 利用되며 黑色플라스틱 필름이나 木材 等도 利用된다. 이들 材料의 特性은 Table 1과 같다.

Table 1. Radiant energy absorptance and emittance for several surface materials (7, 11, 13)

Material	Solar absorptance	Infrared emittance
Flat black paint	.97~.99	.97~.99
Concrete and stone, dark	.65~.80	.85~.95
Colored paints, brick	.50~.70	.85~.75
Nickel black on galvanized iron	.89	.12
Copper treated with NaClO ₂ and NaOH	.87	.13
Copper aluminum or nickel plate with CuO coating	.80~.93	.90~.21

透明덮게판으로는 Plastic film이 주로 쓰이며,

現段階로서는 0.1~0.25mm 두께의 Polyethylen film이 가장 實用的인 것으로 알려지고 있다. (9) Plastic film의 太陽熱 透過率은 Table 2와 같다.

Table 2. Transmittance of solar energy through glass and plastic film at normal incidence angle(8)

Materials of cover	Transmittance
Teflon 100-X	0.97
Weatherable mylar	0.85
Clear polyethylene	0.92
Window glass	0.93

斷熱材로는 Styrofoam, Fiberglass, Urethane foam 및 木材等이 쓰이며 이들의 熱轉導率은 Table 3과 같다.

Table 3. Conductivity values of several insulating materials(7, 13)

Material	Conductivity (J/hr·cm ² ·°C·cm)
Styrofoam SM & TG	0.068
Fiber glass	0.104
Urethane foam	0.061
Gypsum plaster(Sand aggregate)	2.001
Plywood, flat siding	2.219
Fir, pine and similar soft wood	0.286
Maple, oak and similar hardwood	0.393

集熱器의 效率은 그 構造, 太陽輻射熱強度, 送風量 및 外氣溫度等 諸要因의 影響을 받게 된다. 穀物乾燥에 利用된 集熱器의 效率은 12~62%의 範圍로 多樣하다. (9) 몇가지 形式의 平面式 集熱器의 概略的인 效率은 Table 4와 같다.

Table 4. Collection efficiencies of flat-plate collector(11)

Type	Day long efficiency
Plastic tube type	25%
Bare plate	30%
Covered plate	35%
Suspended plate	40%
2-cover suspended plate	45%

低溫 穀物乾燥에 使用되는 集熱板의 크기는 穀物 1ton 當 0.35~2.65m²程度이며, 高溫高速乾燥에 太

陽熱을 利用하려면 穀物 1ton 當 14~18m²이 必要하다고 報告되고 있다. (9)

나. 太陽熱에 依한 送風空氣의 上昇溫度

常溫通風乾燥의 熱源으로 太陽熱을 利用할 경우 送風空氣의 上昇溫度를 制限해야 한다. 왜냐하면 太陽熱을 乾燥에 利用하는 낮 동안은 대개 大氣溫度가 높고 相對濕도가 낮기 때문에 大氣溫度를 약간만 上昇시키더라도 相對濕도는 相當히 낮은 穀物の 含水率과 平衡을 이루는 程度까지 下降하게 된다.

送風空氣의 溫度上昇幅의 制限은 穀物の 安全貯藏含水率과 平衡을 이룰수 있는 程度까지 相對濕도를 下降시키는데 基準을 두고 定해진다. (2) Buelow(6)는 낮동안에 溫度를 8.3°C 上昇시키면 相對濕도는 約 20% 程度 下降하며 平均 3.3~4.4°C의 溫度上昇이 穀物乾燥에 적합하다고 報告하였다. Hall(11)은 5.6°C程度로 溫度가 上昇되도록 集熱器를 設計할 것을 추천하였다.

集熱器를 通過한 空氣의 上昇溫度는 送風量, 集熱器의 크기, 傾斜角, 斷熱材料, 日射量 및 外氣溫等의 諸要因의 影響을 받게 때문에 正確한 豫測을 할 수는 없으나 이를 豫測하기 위한 많은 方法이 試圖되어 왔다. (5, 12, 26) Buelow等(5)은 集熱板에서 吸收된 에너지는 集熱板을 通過한 空氣가 얻은 에너지와 集熱器 內외의 空氣의 溫度差異로 因하여 損失된 에너지의 合計와 같다는 熱收支理論에 根據하여 다음과 같은 豫測 方程式을 提示하였다.

$$t - t_0 = \frac{IE}{U} (1 - e^{-N}) \dots\dots\dots (2-)$$

여기서 t; 集熱器에서 排出된 空氣의 溫度(°C)

t₀; 外氣溫度(°C)

I; 太陽輻射熱 強度(ly/hr)

U; 集熱器內의 空氣와 大氣사이의 熱傳達 係數(kcal/m².hr.°C)

$$N = \frac{UA}{mc}$$

A; 集熱板의 面積(m²)

m; 送風空氣의 무게(kg/hr)

v; 送風量(cmm/m²)

c; 空氣의 比熱(kcal/kg °C)

그는 또한 上記 方程式을 利用하여 黑色 페인팅을 한 鐵板을 集熱板으로 使用했을 때 덮개板의 種類에 따라 다음과 같은 上昇溫度 豫測方程式을 發表했다.

덮개板이 없는 集熱器; t-t₀

$$= 0.221^t(1 - e^{-2.463/t}) \dots\dots\dots(2-2)$$

單板 유리 덮게 板 ; $t-t_0$

$$= 0.742^t(1 - e^{-0.868/t}) \dots\dots\dots(2-3)$$

플라스틱 덮게 板 ; $t-t_0$

$$= 0.683^t(1 - e^{-0.810/t}) \dots\dots\dots(2-4)$$

다. 太陽熱을 利用한 穀物乾燥

太陽熱을 穀物乾燥에 利用하려는 研究가 Davis와 Lipper(16)에 依하여 처음 시도된 以後 많은 學者들(1, 4, 5, 6, 9, 15, 17, 20, 22, 24)에 依하여 研究되어 왔다. 그러나 研究가 本格化된 것은 1973年의 石油危機以後 부터 이었으며(9) 이러한 研究들은 大部分 常溫通風乾燥의 補助熱源으로 太陽熱을 利用하는데 集中되고 있다. 現在까지 遂行된 太陽熱을 利用한 穀物乾燥에 關한 主要研究結果는 다음과 같다.

一般的으로 太陽熱을 利用한 乾燥가 乾燥速度에 있어서 常溫通風乾燥보다는 빠르며 電熱을 利用한 低溫乾燥보다는 느린것으로 報告되고 있다.

Robertson과 Morey(9)는 黑色플라스틱필름의 集熱板과 透明플라스틱필름의 덮게板으로 構成된 集熱器를 利用하여 수수를 乾燥한 結果 常溫通風に 比하여 乾燥期間이 短縮되었다고 報告하였다.

Foster等(9)은 1974~1975년에 걸쳐 美國의 中北部에서 實施한 太陽熱을 利用한 콩, 수수 및 옥수수 的 乾燥 實驗에서 모든 乾燥穀物이 質的損傷 없이 安全貯藏含水率까지 乾燥되었으며, 乾燥速度는 常溫通風乾燥에 比해서는 빨랐으나 電熱을 利用하여, 送風空氣의 溫度를 大氣速度보다 4~5.5°C程度 높게 加熱하여 連續送風乾燥한 경우 보다는 느리게 나타났다고 報告하였다. (10)

一般的으로 最終 含水率은 太陽熱을 利用한 乾燥가 常溫通風乾燥의 경우보다는 낮게 나타났으나 電熱을 補助熱源으로 連續送風乾燥한것 보다는 높은 것으로 報告되고 있다. Peterson(23)은 Inflated tubular type의 集熱器를 利用하여 옥수수를 2.7~3.0m³/min -tonne의 送風量으로 20日間 乾燥한 結果 最終含水率이 太陽熱乾燥에서는 13.2% (w.b.), 常溫通風乾燥에서는 14.4% (w.b.)로 나타났다. Foster等(9)은 크기 2.8m²/tonne의 集熱器와 2.2m³/min-tonne의 送風量으로 初期含水率 24% (w.b.)의 옥수수를 24日間 乾燥하였을 때 最終含水率이 16%에 到達하였으며 電熱을 利用하여 送風空氣의 溫度를 5.6°C 上昇시켜 같은 送風量으로 16日間 乾燥하였을때 14.6%에 到達하였다고 報告하였다.

一般的으로 熱利用率에 있어서는 太陽熱을 利用한 乾燥가 常溫通風乾燥보다 약간 높거나 거의 같은 것으로 報告되고 있다. Foster等(9)은 陽太熱乾燥에서의 熱利用率은 14~46%로 變化가 甚하여 乾燥에 利用된 全熱量의 約 20~34%가 太陽熱集熱器에서, 약 60~80%가 空氣와 送風器에서 充當된다고 報告하였다.

에너지 節約面에서는 수수의 乾燥의 경우 常溫通風乾燥에 比하여 23~52%의 에너지가 節約되며, 옥수수 乾燥에서는 26~55%의 에너지가 節約되는 것으로 報告되고 있다. (9)

太陽熱의 利用에 依한 費用節約效果는 아직까지 뚜렷하게 나타나지 않는 것으로 報告되고 있다. Morey等(22)의 太陽熱乾燥의 시뮬레이션 結果에 依하면 太陽熱集熱器를 利用한 옥수수의 乾燥費用이 \$9.04/tonne, 프로판가스를 利用한 乾燥費用이 \$5.74/tonne (太陽熱乾燥의 63.6%), 電熱을 利用한 乾燥費用이 \$9.46/tonne (太陽熱乾燥의 104.6%)이 所要되므로서 太陽熱乾燥의 費用 節約效果가 뚜렷하지 못하였다. 따라서 Foster等(9)은 集熱施設의 利用率을 提高시켜 穀物乾燥費用을 줄이기 爲해서는 集熱施設을 穀物乾燥뿐만 아니라 暖房, 溫水 및 기타 農產物 乾燥等 多目的으로 利用하여야 한다고 報告하였다.

一般的으로 太陽熱集熱器로 부터의 補助熱은 送風量 減少에는 거의 影響을 주지 못하는 것으로 보고되고 있다.

Peterson等(23)은 太陽熱에 依한 補助熱이 送風量에 미치는 效果를 判斷하기 위하여 最終含水率 15%, 乾物重量損失率 0.5%를 基準으로 하여 送風機로 부터 1.1°C, 太陽熱로 부터 1.7°C의 平均的인 空氣 溫度 上昇 效果가 있는 것으로 보고 分析한 結果 이와 같은 事實을 報告하였다.

그러나 그는 相對濕度가 높은 地域에서는 太陽熱에 依한 送風量 減少效果가 크다고 報告하였다.

라. 太陽熱을 利用한 穀物乾燥시스템의 시뮬레이션

太陽熱을 利用한 穀物乾燥시스템의 시뮬레이션 方法으로는 太陽熱에 依한 送風空氣의 上昇溫度를 豫測하고 이로 因한 流入空氣의 狀態變化를 推定하여 일반적인 穀物乾燥 시뮬레이션 모델에 적용하는 方法이 利用된다.

Bakker-Arkema等(7)은 厚層乾燥모델을 利用하여

1, 6, 12 및 24時間 單位의 平均 氣象資料를 入力資料로 使用하여 含水率 및 乾物重量損失率에 미치는 影響을 검토한 結果 大部分의 穀物乾燥에 1日 平均 氣象資料의 利用이 可能하다고 報告하였다.

Troeger等(25)은 日最大氣溫과 最低氣溫만을 利用하여 每時間의 氣溫 및 日射量을 豫測하고 이를 땅콩乾燥의 시물레이션에 적용한 結果 所要 乾燥時間과 所要에너지量의 合理的인 豫測이 可能하다고 報告하였다.

3. 太陽熱乾燥

太陽熱을 利用한 穀物乾燥시스템의 解析을 爲하여 平面式 空氣加熱 太陽熱 集熱器에 依한 送風空氣의 上昇溫度를 豫測하고 溫度上昇으로 因한 送風空氣의 狀態變化를 推定하여 常溫通風乾燥시스템의 시물레이션 모델(14)에 適用하는 方法을 利用하였다.

가. 太陽熱 集熱器에 依한 送風空氣의 上昇溫度 豫測

1) 太陽熱 集熱器의 性能實驗

平面式 空氣加熱 太陽熱 集熱器에서의 送風空氣

의 上昇溫度를 豫測하기 爲하여 集熱器에서의 理論的 熱收支 解析을 통해 豫測方程式을 誘導하고 이를 實驗에 依해 檢定하였다.

이를 爲하여 實驗에 使用된 集熱器의 構造 및 實驗方法은 다음과 같다.

1) 集熱器의 構造

本 實驗에 使用된 集熱器는 Fig 1 및 2와 같은 構造의 平面式 空氣加熱 集熱器였다. 集熱板은 24番 합석板(曲板)에 검은 페인트를 칠하여 使用하였으며, 덮개板은 두께 0.1mm의 Polyethylene film을 使用하였다. 斷熱材로는 5cm 두께의 Styrofoam을 使用하였으며 3cm 두께의 라왕木材로 兩壁面을 만들었다.

덮개板과 集熱板 사이에 5cm間隔의 密閉空間을 設置하였으며 集熱板과 斷熱層 사이에 5cm間隔의 送風空氣通路를 設置하였다. 集熱器의 入口와 出口 및 그 사이에 2m간격으로 溫度計를 設置하여 流通立氣의 溫度를 測定할 수 있게 하였다. 集熱板의 크기는 幅 0.79m(2.59ft), 길이 9m(29.53ft)로 集熱面積은 7.11m²(76.48ft²)이었다. 集熱板의 傾斜角은 45°, 集熱器의 設置方向은 集熱板의 斜面이 正南으로 向하게 하였다.

本實驗에 使用된 集熱器의 主要諸元 및 材料는

Table 5. Specification of the solar collector and its materials

Type	Covered, suspended-plate	
Size(width×length)	0.79m×9m	
Net area of absorbing plate	7.11m ²	
Air space between absorbing plate and insulating material	5cm	
Air space between cover and absorbing plate	5cm	
Tilted angle	45°	
Materials	cover	Polyethylene film with thickness of 0.1mm
	Absorbing Plate	Black-painted corrugated galvanized iron plate (#24)
	Insulation	Styrofoam with thickness of 5cm
	Side walls of collector	Wood(lauan) with thickness of 3cm

Table 5와 같다.

2) 測定方法 및 器具

- ① 實驗期間; 春川市 江原大學校에서 1978年10月 15日 午前 8時에 始作하여 午後 5時에 終了하였다.
- ② 送風空氣의 溫度 測定; 集熱器의 入口와 出口

및 送風空氣의 流通路에 2m 간격으로 水銀溫度計 (精度 0.2°C)를 押入하여 空氣의 溫度를 10分 간격으로 測定하였다.

- ③ 風量測定; 精度 1m/sec의 Biram anemometer를 利用하여 出口에서의 風量을 測定하였다. 本 實驗에서의 送風量은 4.9m³/min로 하였다.

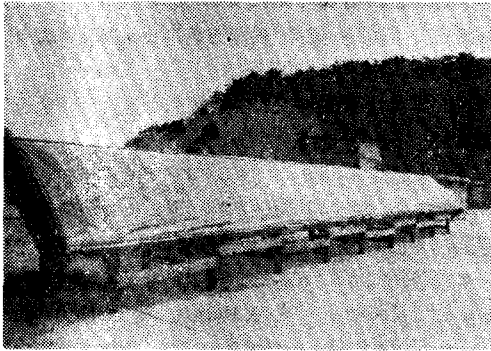


Fig. 1. View of the solar air collector.

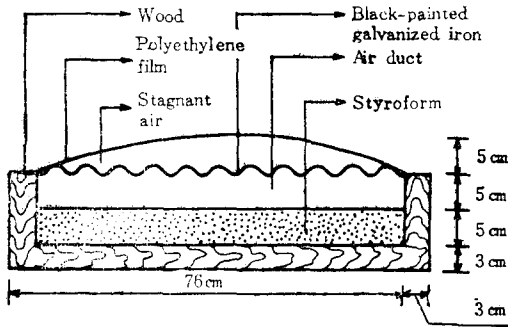


Fig. 2. Cross section of the collector

④ 大氣의 溫度 및 日射量; 大氣의 溫度는 水銀溫度計로 10分 間격으로 測定하였으며, 日射量은 春川測候所의 記錄值를 利用하였다.

2) 太陽熱 集熱器의 熱傳達 解析

集熱板에서 吸收된 에너지는 集熱器를 通過한 空氣가 얻은 에너지와 集熱器에서 損失된 에너지의 合計와 같게 된다. 즉, 集熱板에 吸收된 太陽熱은 送風空氣에 傳達된 熱과 集熱器의 덮개板 및 後板을 통한 損失熱의 合計와 같다.

集熱板에 吸收된 太陽熱은 (3-1)式으로 表示된다.

$$E_{in} = 10ISBdx \dots \dots \dots (3-1)$$

여기서, E_{in} ; 集熱板에서 吸收한 에너지 (kcal/hr)

- I ; 集熱板에 照射된 時間當 日射強度 (ly/hr)
- S ; 集熱板의 吸收率, 덮개板의 透過率 및 其他 損失率의 相乘積
- B ; 集熱板의 幅 (m)
- dx ; 集熱板의 微小길이 (m)

한편, 送風空氣에 傳達된 熱은 (3-2)式으로 表示된다.

$$E_{ga} = mcdt \dots \dots \dots (3-2)$$

- 여기서, E_{ga} ; 送風空氣가 얻은 熱量 (kcal/hr)
- m ; 送風量 (kg/hr)
- c_a ; 送風空氣의 比熱 (kcal/kg°C)
- dt ; 送風空氣의 上昇溫度 (°C)

또한, 集熱器에서의 熱損失은 集熱器內의 空氣溫度와 外氣溫度와의 差異에 起因하므로 다음 (3-3)式으로 表示된다.

$$E_l = U(t - t_o) Bdx \dots \dots \dots (3-3)$$

- 여기서, E_l ; 集熱器에서 損失된 熱量 (kcal/hr)
- U ; 集熱器內의 空氣와 大氣間의 熱傳達 係數 (kcal/m². hr°C)
- t ; 入口에서 부터 dx 地點의 空氣溫度 (°C)
- t_o ; 大氣溫度 (°C)

따라서 (3-1), (3-2) 및 (3-3) 式을 綜合하면 다음과 같은 熱平衡方程式이 成立한다.

$$10ISBdx = mcdt + U(t - t_o) Bdx \dots \dots \dots (3-4)$$

윗式을 變形하면,

$$Bdx = \frac{mcdt}{10IS - U(t - t_o)} \dots \dots \dots (3-5)$$

되고,

$x=0$ 일때 $t=t_o$ 이므로 윗式을 積分하면,

$$A = \frac{-mc}{U} \ln \frac{10IS - U(t - t_o)}{10IS} \dots \dots \dots (3-6)$$

로 된다.

여기서 A ; 集熱板의 面積 (m²)

다시 $\frac{UA}{mc}$ 를 N 으로 表示하고 $t - t_o$ 에 對하여 整理하면,

$$t - t_o = \frac{10IS}{U} (1 - e^{-N}) \dots \dots \dots (3-7)$$

로 된다.

여기서, 黑色페인팅을 한 集熱板의 吸收率 α , 먼지에 依한 熱損失 d , 덮개板 支持物의 그늘에 依한 損失率 S_a 및 透明덮개板 (Polyethylene film)의 透過率 t 를 各各 0.92%, 3% 및 0.9로 假定하면 (7, 13)

$$S = \alpha \cdot t \cdot (1 - d) (1 - S_a) = 0.77$$

로 된다.

또한, 空氣의 比熱 c_a 를 0.245 (kcal/kg°C), 空氣의 密度를 1.232kg/m³로 假定하면

$$N = 0.0552 \times \frac{U}{v}$$

로 된다.

여기서, v ; 集熱板單位面積當 送風量 (cmm/m²)

이들을 代入하면 (3-7)식은 결국 다음과 같이 整理된다.

$$t-t_0 = \frac{7.7}{U} I [1 - \text{EXP}(-0.0552U/v)] \dots (3-8)$$

I 의 값은 集熱板의 傾斜角에 따라 다르며 傾斜面에 照射된 日射量은 水平面 日射量에 對한 比 즉, 方向係數에 依하여 算出되므로 (3-8)식은 결국 다음과 같이 表示된다.

$$t-t_0 = \frac{7.7}{U} I_h \cdot R_f [1 - \text{EXP}(-0.0552U/v)] \dots (3-9)$$

여기서, I_h : 時間當 總水平面 日射量 (ly/hr)

R_f : 時間當 總日射量에 對한 方向係數 (dimensionless)

適定傾斜角은 集熱器가 單位時間에 가장 많은 太陽에너지를 받을 수 있는 角으로 이것은 季節과 時刻에 따라 變하므로 集熱器의 利用期間동안 日射強度가 가장 큰 時刻에서의 方向係數(Orientation factor)를 가장 크게 하는 값으로 決定할 수 있을 것이다.

方向係數는 直達日射量의 境遇와 散亂日射量 및 地表에서의 反射에 依한 경우의 값으로 나누어지며 다음식으로 表示된다.

$$R_f = \left(1 - \frac{I_d}{I_h} R_b + \frac{1}{2} (1 + \cos\beta) \left(\frac{I_d}{I_h}\right) + \frac{1}{2} (1 - \cos\beta) \rho \dots (3-10)\right)$$

여기서, R_f : 時間當 總日射量에 對한 方向係數 (dimensionless)

I_d : 時間當 水平面散亂日射量 (ly/hr)

I_h : 時間當 水平面總日射量 (ly/hr)

β : 集熱板의 傾斜角 (degrees)

ρ : 地表에서의 反射率(눈이 덮여 있지 않을때 0.2)

R_b : 時間當 直達日射量에 對한 方向係數

(3-10)식의 둘째와 셋째 項은 各各 散亂 및 地表에서의 反射에 依한 日射量의 方向係數로써 어떠한 傾斜角에서도 恒常 1보다 적게된다. 즉, 傾斜面에서의 散亂 및 反射에 依한 日射量은 恒常 水平面에서의 값보다 적게 된다. 따라서 傾斜面에서의 日射量은 주로 直達日射量의 方向係數에 影響을 받게 된다.

適定傾斜角은 日射強度가 가장 큰 時刻에서의 直達日射量에 對한 方向係數가 가장 크게 되도록 해야 한다. 즉, 南中時의 R_b 의 값이 最大가 되도록 傾斜角을 定하면 될 것이다.

R_b 는 다음 (3-11)식으로 表示된다. (18)

$$R_b = \frac{\cos\theta_i}{\cos\theta_h} = \frac{\cos(L-\beta)\cos\delta\cos\omega + \sin(L-\beta)\sin\delta}{\cos L\cos\delta\cos\omega + \sin L\sin\delta} \dots (3-11)$$

여기서, θ_i : 傾斜面에 對한 入射角 (degrees)

θ_h : 水平面에 對한 入射角 (degrees)

δ : Solar declination (degrees)

L : 緯度 (degrees)

β : 集熱板의 傾斜角 (degrees)

ω : Hour angle (degrees)

南中時의 ω 는 0이므로 이를 (3-11)식에 代入하면,

$$R_b = \cos\beta + \tan(L-\delta)\sin\beta \dots (3-12)$$

로 된다.

여기에서 R_b 의 最大값은 β 가 $L-\delta$ 와 같을 때가 된다.

穀物乾燥期間인 10月の 適定傾斜角은 10月15日을 基準으로 算出하면 春川地方의 L 이 $37^\circ 52'$, 10月15日에 δ 의 값이 $-8^\circ 26'$ (19)이므로 適定傾斜角은 46° 가 되나, 本 實驗에서는 集熱器의 傾斜角을 45° 로 取하였다.

주어진 傾斜角에 對한 方向係數를 算出하기 爲해서는 直達日射量과 散亂日射量을 알아야 한다. 그러나 測候所의 觀測資料는 總日射量이므로 이들을 推定해야 한다. 이를 爲하여 本研究에서는 다음 (3-13)식의 Liu와 Jordan(25)의 散亂日射量 推定方程式 利用하였다.

$$S_d = S(1.0045 + 0.0435K - 3.5227K^2 + 2.6313K^3) \dots (3-13)$$

여기서, S_d : 散亂日射量 (ly/day)

S : 總日射量 (ly/day)

K : 大氣圈밖의 日射量과 總日射量과의 比(dimensionless)

大氣圈밖의 日射量은 다음 (3-14)식으로 計算된다.

$$H_o = \frac{24}{\pi} r I_{sc} (\cos L \cos \delta \sin \omega_s + \omega_s \sin L \sin \delta) \dots (3-14)$$

여기서, H_o : 大氣圈밖의 水平面 日射量 (ly/day)

r : 大氣圈밖의 日射量과 太陽 常數와의 比(10月15일에 r 의 값은 1.0087(19))

I_{sc} : 太陽常數 (1.940 ly/min)

日間直達日射量 S_b 는 總日射量에서 散亂日射量을 除한 값이므로 다음 (3-15)식과 같이 된다.

$$S_b = S - S_d \dots (3-15)$$

日間直達日射量에 對한 時間當直達日射量의 $44X_r$ 은 다음 (3-16)식으로 주어진다. (25)

$$X_r = \frac{\pi (\cos\omega - \cos\omega_r)}{24(\sin\omega_r - \omega_r \cos\omega_r)} \dots (3-16)$$

여기서, ω_s : Daily hour angle (radians)

$$\cos \omega_s = -\tan L \tan \delta$$

따라서, 時間當 散亂日射量 I_d 는 다음과 같이 計算된다.

$$I_d = I_h - (S - S_d)X, \dots\dots\dots(3-17)$$

3) 實驗値와 豫測値의 比較

測候所의 實測値인 水平面 總日射量 I_h 와 (3-17)式에 依하여 算出한 散亂日射量 I_d 의 값으로 $\frac{I_d}{I_h}$ 의 값을 求하고 이를 (3-10)式에 代入하여 $\beta=45^\circ$ 일 때 時間當 總日射量에 對한 方向係數 R_I 를 求하였다.

送風空氣의 上昇溫度 豫測方程式 (3-9)式에서의 U 의 값을 推定하기 爲하여 우선 이를 各各 4.8824, 7.3236, 8.7883, 9.7648, 11.0342 및 14.6472 kcal/hr·m²·°C로 假定하여 上昇溫度를 求하고 이를 實測値와 比較하였다.

Fig 3은 各各의 U 의 값에 對한 豫測値와 實驗値의 差의 算術平均과 標準誤差의 變化를 表示한 것으로서 U 의 값이 9.7648 일때 豫測値가 實驗値와 가장 잘 一致함을 알 수 있다.

따라서, (3-9)式에 이 U 의 값을 代入하면 送風空氣의 上昇溫度 豫測 方程式은 다음과 같이 表示

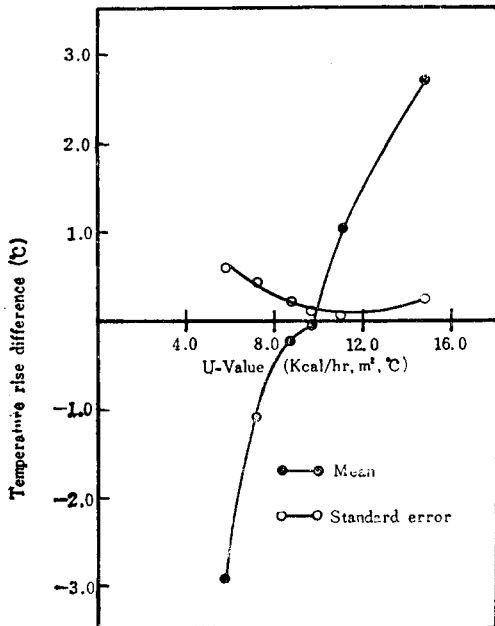


Fig. 3. Effect of U-Value on temperature rise prediction.

된다.

$$t - t_o = 0.7885 I_h \cdot R_I (1 - EXP(-0.539/v)) \dots\dots\dots(3-18)$$

이 된다.

Fig 4는 實驗期間 동안의 日射量과 集熱器出口에서의 時間別 實測溫度와 (3-18)式에 依하여 算出한 豫測溫度를 나타낸 것으로서 實驗値와 豫測値가 서로 잘 一致함을 알 수 있다.

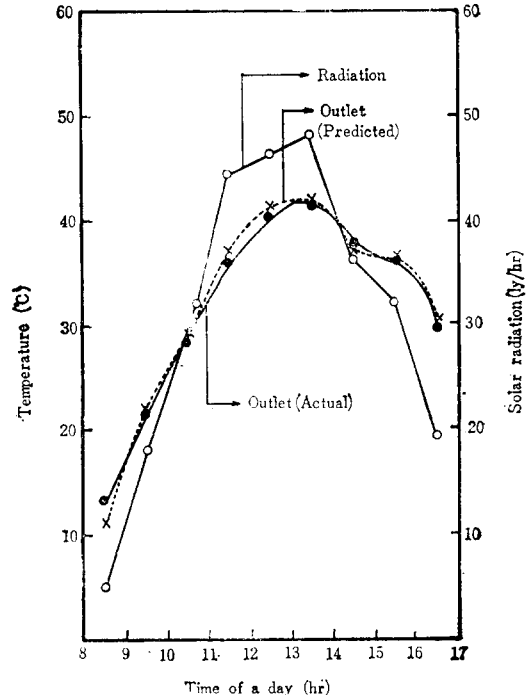


Fig. 4. Comparison of the actual and predicted outlet temperatures of the solar collector.

나. 시뮬레이션 모델에 依한 分析方法

送風空氣의 上昇溫度 豫測方程式에 依하여 送風空氣의 上昇溫度를 求하고 이로 因한 相對溫度의 變化를 常溫送風乾燥의 시뮬레이션모델에서 一定溫度로 送風空氣를 加熱한 경우와 같은 方法으로 計算하여 穀物層에 流入되는 送風空氣의 初期條件으로 하였다.

送風空氣의 上昇溫度 豫測方程式 (3-18)에서 方向係數의 값은 春川地方의 10月平均値(14)인 1.3533으로 하였다.

穀物乾燥시스템의 性能에 影響을 미치는 5가지의 獨立變數 즉 穀物의 初期含水率, 送風量, 送風空氣의 平均加熱溫度, 氣象條件 및 送風方法이 所要乾燥時

間 및 乾物重量損失率에 미치는 영향을 究明하고 適定한 集熱施設 設計基準을 주기 爲하여 다음과 같이 分析하였다.

1) 氣象資料

太陽熱乾燥의 시뮬레이션에서는 日射量의 觀測值가 記錄된 春川地方의 4年間(1972~1975)의 秋穀乾燥期間인 10月中 3時間單位의 氣象資料를 利用하였다.

2) 獨立變數의 組合

初期含水率은 18~24% 範圍에서 4段階(2% 간격)로 變化시키고 送風方法은 連續送風과 間斷送風(9a.m~9p.m)으로 나누었다. 集熱板의 面積은 1.836m²(20ft²)으로 하여 送風量을 變化시키므로써, 送風空氣의 溫度上昇 效果가 나타날 수 있게 하였다.

送風量은 4.205(148.5), 8.407(296.9), 12.609(445.3), 16.812cmm(593.7cfm)의 4段階로 變化시켰다. 穀物 Bin의 直徑을 2.37m(7.9ft), 穀物推積 두께를 2.25m(7.5ft)로 하였으므로 總穀物量은 10.509m³이 된다. 따라서 總送風量 4.205, 8.407, 12.609, 16.812cmm은 各各 0.402, 0.804, 1.205, 1.607cmm/m³에 該當된다.

3) 入力資料

太陽熱을 利用한 穀物乾燥시스템의 시뮬레이션 프로그램의 入力資料에는 常溫通風乾燥시스템의 入力資料外에 集熱器의 面積, 3時間 單位의 日射量 및 方向係數가 追加되었다.

4. 結果 및 考察

가. 集熱器를 通過한 送風空氣의 上昇溫度

Fig 5는 4年間(1972~1975)의 春川地方의 10月中의 午前 9時부터 午後 6時까지의 日平均 時間當 日射量, 日平均氣溫 및 送風量別 集熱器에서의 排出空氣의 日平均 溫度變化를 表示한 것이다.

그림에서와 같이 日射量은 10月全體를 通하여 거의 平準한 變化를 나타내었으며, 10月平均 時間當 日射量은 26.2ly/hr이었다. 日照時間帶인 午前 9時부터 午後 6時까지의 平均氣溫은 10月上旬에서 中·下旬으로 갈수록 점차 下降하여 各各 16.8, 14.8 및 11.9°C를 나타내었다. 따라서 集熱器를 통한 送風空氣의 上昇溫度幅은 10月全體를 通하여 큰 차이가

없으나 集熱器에서의 排出空氣의 溫度는 大氣溫度의 變化에 따라 下旬으로 갈수록 下降하였다.

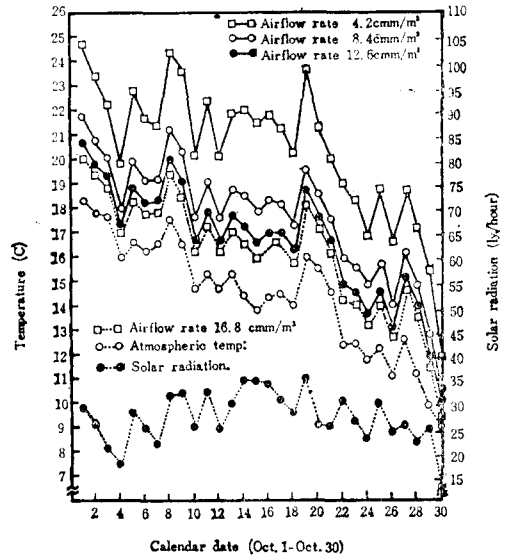


Fig. 5. Variation of daily average temperatures of atmospheric and solar-heated air and daily average hourly solar radiation on horizontal plane during October based on 4-year weather data, 1972-1975 in Chuncheon (The collector area 1.836m², tilting angle 45°)

送風量이 各各 4.205, 8.407, 12.609 및 16.812 cmm 일때 集熱器를 通過한 送風空氣의 낮동안(09-18時)의 月平均 上昇溫度는 各各 5.9, 3.2, 2.2 및 1.6°C이었다.

나. 平衡含水率과 平均含水率에 對한 影響

太陽熱을 利用하여 벼를 乾燥할때 送風方法, 送風量, 初期含水率 및 送風空氣의 加熱溫度가 平衡含水率과 平均含水率에 미치는 영향을 分析하기 爲하여 初期含水率 24%인 벼를 乾燥할때의 平衡含水率과 平均含水率을 算出하였다.

Fig 6과 7은 各各 連續送風과 間斷送風으로 乾燥할때 最下穀物層에서의 含水率 變化를 加熱溫度와 送風量別로 表示한 것으로써 最下層에서의 含水率 變化는 送風量에는 거의 영향을 받지 않으며 送風空氣의 加熱溫度에 주로 영향을 받음을 알 수 있다. 이 最下層에서의 含水率이 거의 一定한 값을 나타낼때의 含水率이 平衡含水率이므로 平衡含水率

역시 送風空氣의 加熱溫度만의 函數임을 알 수 있다.

送風方法別, 送風空氣의 平均 加熱溫度別 平衡含水率은 Table 6과 같다.

여기에서 間斷送風의 경우에는 모든 加熱溫度 범

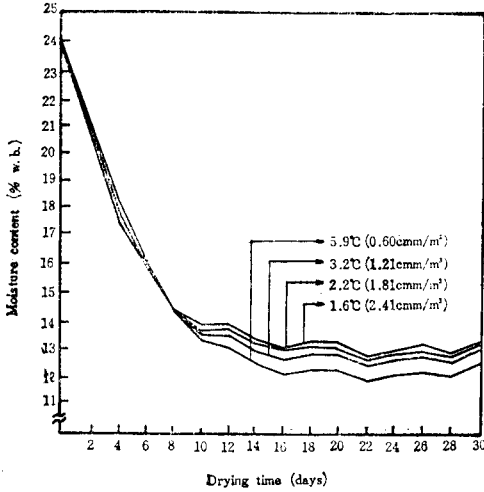


Fig. 6. Effect of average temperature rise on moisture content at bed layer (Initial moisture content 24% w.b., bed-depth 1.5 meter, continuous fan operation,)

위에서 過乾燥現象을 나타내고 있는 反面 連續送風의 경우에는 높은 加熱溫度에서만 過乾燥現象이 나타나고 있음을 알 수 있다.

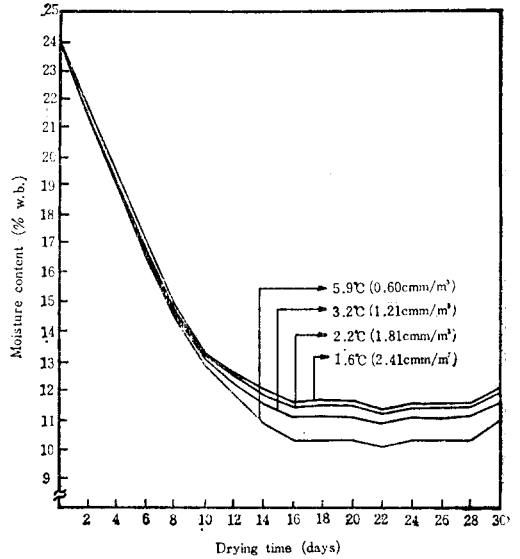


Fig. 7. Effect of average temperature rise on moisture content at bed layer (Initial moisture content 24% w.b., bed-depth 1.5 meter, intermittent fan operation,)

Table 6. Equilibrium moisture content of rough rice under the weather conditions of October

Fan operation	Equilibrium moisture content of rough rice							
	Continuous				Intermittent			
	1.6	2.2	3.2	5.9	1.6	2.2	3.2	5.9
Average temperature rise(°C)								
Initial moisture content(% w.b.)								
1 8	13.18	13.06	12.84	12.32	11.70	11.53	11.21	10.44
2 0	13.18	13.06	12.84	12.32	11.70	11.53	11.21	10.44
2 2	13.18	13.06	12.84	12.32	11.70	11.53	11.21	10.44
2 4	13.18	13.06	12.84	12.32	11.70	11.53	11.21	10.44

Table 7과 8은 連續送風과 間斷送風으로 乾燥할 때 最上層이 各各 16%와 15%(w.b.)까지 乾燥되었을 때의 平均含水率을 初期含水率과 送風空氣의 平均 加熱溫度別로 表示한 것이다.

여기에서 平均含水率은 送風方法에 間係없이 初期含水率이 增加할수록 加熱溫度가 높을수록 減少하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한, 乾燥가 終了되는 것으로 看做되는 最上層이 15%

(w.b.)까지 乾燥되었을 때의 平均含水率은 連續送風에 比하여 間斷送風의 경우가 훨씬 낮게 나타났으며 間斷送風은 어떠한 加熱溫度 범위에서도 平均含水率이 13.4%(w.b.)以下로 乾燥됨을 알 수 있다.

以上과 같이 過乾燥現象을 考慮할때 間斷送風方法 보다는 連續送風方法을 擇함이 바람직하지만 連續送風方法에서도 送風空氣의 平均 加熱溫度가 높을수록 過乾燥現象이 나타나므로 벼의 安全貯藏倉

水率이 13.5~14.0%(w.b.)임을 考慮하여 送風空氣의 平均加熱溫度를 3°C以下로 制限함이 妥當할 것으로 判斷된다.

다. 所要乾燥時間과 乾物重量損失率에 對한 影響

1) 送風方法, 送風量, 送風空氣의 平均加熱溫度

및 初期含水率의 影響

送風方法, 送風量, 送風空氣의 平均上升溫度 및 初期含水率이 所要乾燥時間 및 乾物重量損失率에 미치는 影響을 分析하기 爲하여 送風方法, 送風空氣의 平均上升溫度 및 初期含水率別로 最上 15cm 穀物層이 各各 16%와 15%(w.b.)까지 乾燥되는데 所

Table 7. Average moisture content when top layer was dried to 16% wet basis

Fan operation		Continuous				Intermittent			
Initial moisture content(% w.b.)	Average temperature rise(°C)	1.6	2.2	3.2	5.9	1.6	2.2	3.2	5.9
		1.8	15.00	14.79	14.49	13.75	14.27	13.88	13.34
2.0	14.71	14.46	14.08	13.67	13.65	13.31	13.02	12.40	
2.2	14.41	14.23	14.00	13.40	13.34	13.27	12.84	12.34	
2.4	14.30	14.10	13.89	13.60	13.35	13.13	12.85	12.25	

Table 8. Average moisture content when top layer was dried to 15% wet basis

Fan operation		Continuous				Intermittent			
Initial moisture content(%, w.b.)	Average temperature rise(°C)	1.6	2.2	3.2	5.9	1.6	2.2	3.2	5.9
		1.8	14.31	14.11	13.84	13.35	13.42	13.03	12.75
2.0	14.13	13.94	13.73	13.12	13.06	12.84	12.55	11.92	
2.2	14.00	13.75	13.69	13.24	12.98	12.70	12.44	11.98	
2.4	13.85	13.74	13.52	13.08	12.85	12.67	12.47	11.90	

要된 時間과 이 期間동안에 發生한 乾物重量 損失率을 算出하였다.

Fig 8과 9는 初期含水率 24%(w.b.)인 벼를 各各 連續送風과 間斷送風으로 乾燥할 때의 最上層이 15%(w.b.)까지 乾燥되는데 所要된 時間을 送風量과 平均加熱溫度別로 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 所要乾燥 時間은 送風量이 倍加하면 約 39~45% 短縮되는 傾向을 보이고 있다.

送風空氣의 加熱溫度에 依한 所要乾燥時間의 短縮 效果는 間斷 送風方法이 連續送風 方法보다 약간 크게 나타나고 있으나 큰차이는 없으며 加熱溫度가 1°C 上昇하면 所要乾燥時間은 間斷送風의 경우 約 4.3%, 連速送風의 경우 3.9% 短縮되는 傾向을 나타내고 있다.

送風方法間的 所要乾燥時間을 比較해보면 間斷送

風이 連續送風에 比하여 約 36~42%程度 乾燥時間이 短縮됨을 알 수 있다.

Fig 10은 初期含水率이 所要乾燥時間에 미치는 影響을 나타낸 것이다.

初期含水率 18%~24%(w.b.)의 範圍에서 初期含水率이 2% 增加하면 所要乾燥時間은 加熱溫度나 送風方法에 크게 관계없이 18~30%程度 增加하는 傾向을 나타내었다.

Fig 11과 12는 各各 連續送風과 間斷送風할 때의 乾物重量損失率을 나타낸 것으로 乾物重量損失率은 送風量이 增加할 수록 送風空氣의 加熱溫度가 높을 수록 減少하는 傾向을 나타내고 있으며 送風方法間에는 큰 差異없이 送風量이 倍加하면 乾物重量損失率은 約 34~46%程度 減少하였다. 또한 加熱溫度가 1°C 增加하면 乾物重量損失率은 約

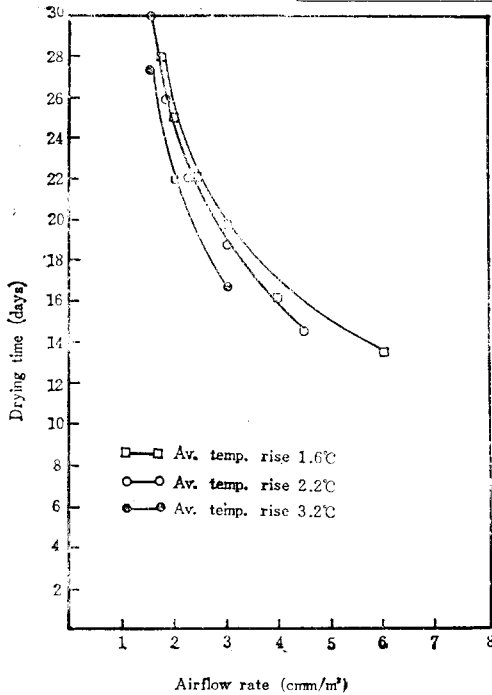


Fig. 8. Time required to dry top layer to 15% wet basis with solar-heated air versus airflow rate—Fan was operated continuously (Initial moisture content 24% w.b.)

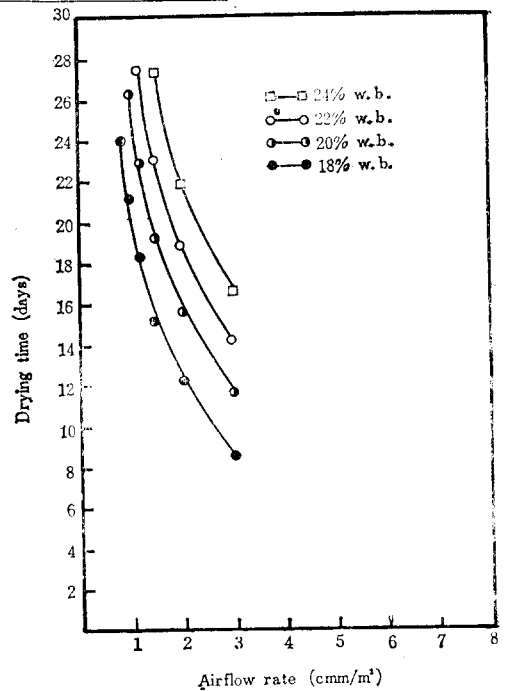


Fig. 10. Effect of initial moisture content on time required to dry top layer to 15% wet basis with average temperature rise 3.2°C (Continuous fan operation).

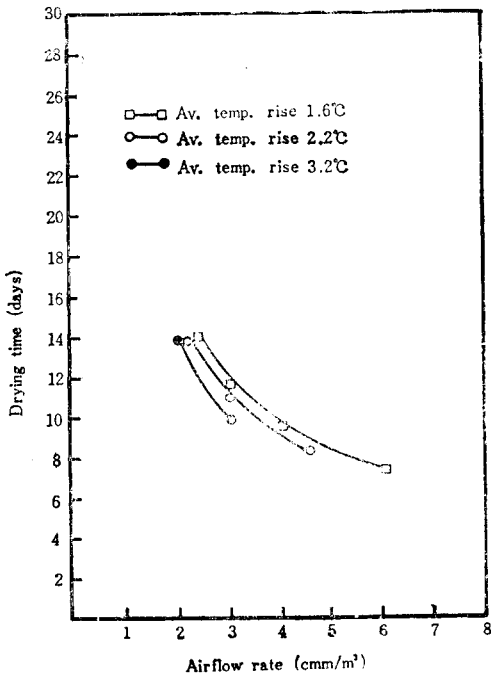


Fig. 9. Time required to dry top layer to 15% wet basis with solar-heated air versus airflow rate—Fan was operated from 9 a.m. to 9 p.m. intermittently (Initial moisture content 24% w.b.)

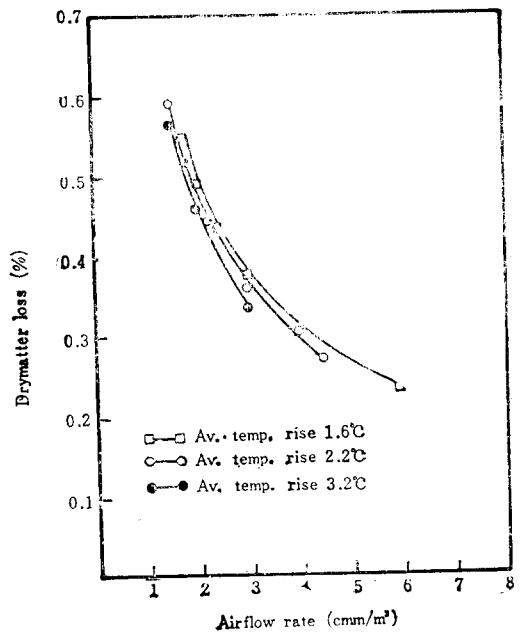


Fig. 11. Percentage drymatter loss at top layer versus airflow rate—Top layer was dried to 15% wet basis with solar-heated air and fan was operated continuously (Initial moisture content 24% w.b.)

2~3% 程度 減少하므로써 送風空氣의 加熱溫度가 乾物重量損失率에 미치는 影響이 크지 않음을 알 수 있다.

送風方法間的 乾物重量損失率을 比較해 보면 間斷送風の 경우가 連續送風に 比하여 乾物重量損失率이 約 40~50% 크게 나타나고 있다.

Fig(3-13)는 初期含水率이 乾物重量損失率에 미치는 影響을 나타낸 것이다. 全般的으로 初期含水率이 높을수록 乾物重量損失率이 크게 增加하는 傾向을 나타내고 있으며, 그 增加率은 送風空氣의 加熱溫度가 높을수록 初期含水率이 낮은 水準일수록 약간 크게 나타나고 있다. 初期含水率이 2% 增加하면 乾物重量損失率은 約 50~70% 增加하는 경향을 보이고 있다.

2) 氣象條件의 影響

年度別 氣象條件이 乾燥速度와 乾物重量損失率에 미치는 影響을 分析하기 爲하여 初期含水率 24% (w.b.)인 벼를 1.5m의 두께로 推積하고 送風量 1.21cm/m³, 送風空氣의 平均加熱溫度 3.2°C로 連續送風한 경우를 擇하였다.

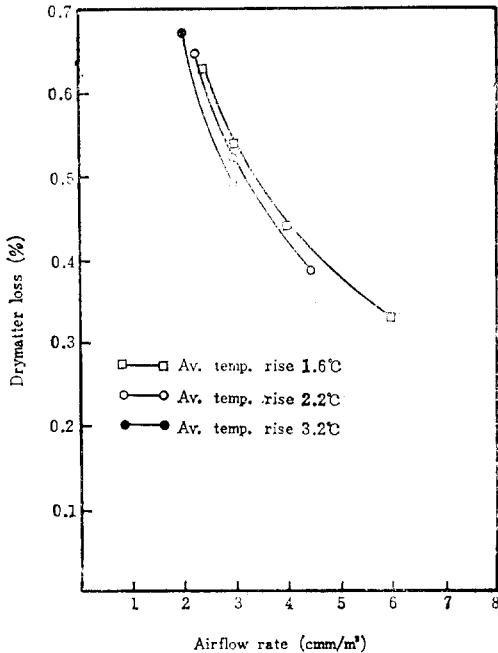


Fig. 12. Percentage drymatter loss at top layer versus airflow rate—Top layer was dried to 15% wet basis with solar-heated air and fan was operated from 9 a.m. to 9 p.m. intermittently (Initial moisture content 24% w.b.)

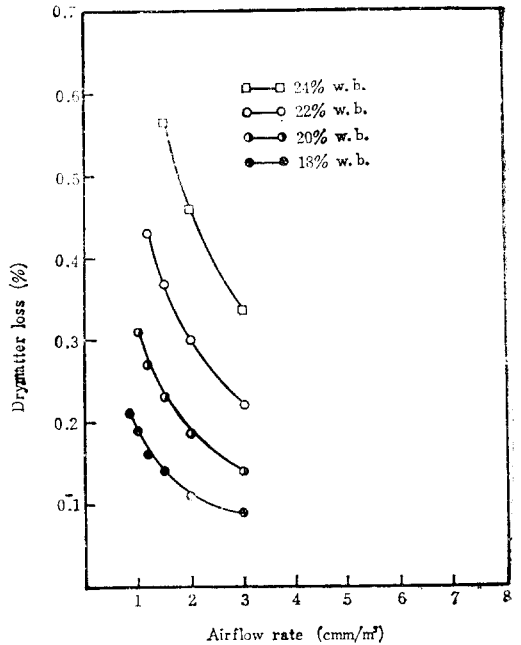


Fig. 13. Effect of initial moisture content on drymatter loss at top layer (Average temperature rise, 3.2°C, continuous fan operation).

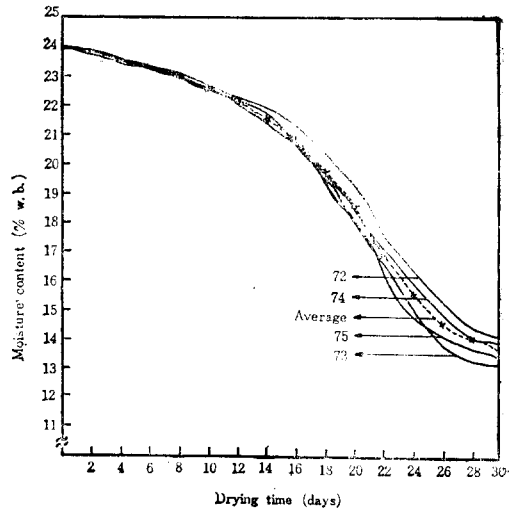


Fig. 14. Effect of changes in yearly weather conditions on moisture content at top layer (Initial moisture content 24% w.b., bed depth 1.5 meter, airflow rate 1.21cm/m³, average temperature rise 3.2°C, continuous fan operation).

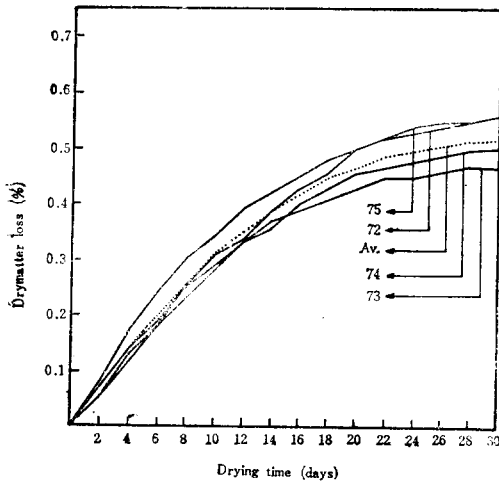


Fig. 15. Effect of changes in yearly weather conditions on drymatter loss at top layer (Initial moisture content 24% w.b., bed depth 1.5 meter, airflow rate 1.21cmm/m³, average temperature rise 3.2°C, continuous fan operation).

Fig 14는 最上層 벼의 年度別과 4個年 平均의 含水率 變化를 나타낸 것으로 乾燥速度는 年度間에 큰 差異가 없음을 알 수 있다.

Fig 15는 最上에서의 乾物重量損失率을 表示한 것이다. 그림에서와 같이 73年度와 74年度는 含水率이 15%에 이를때 까지 乾物重量損失率이 0.5%를 上廻하지 못하였으나 72年度와 75年度에서는 含水率이 各各 19.4%와 18.2%에 도달했을때 이미 乾物重量損失率이 0.5%에 到達하였다. 따라서 72年度가 氣象條件이 가장 나쁜 年度로 判斷된다.

라. 所要乾燥時間과 乾物重量 損失率의 豫測

最上層의 벼를 各各 16%와 15%(w.b.)까지 乾燥하는데 所要되는 時間과 이동안에 發生한 乾燥重量 損失率을 4個年間的 시물레이션 結果의 4個年 平均 値를 利用하여 送風量, 初期含水率 및 平均加熱溫度의 函數로 誘導하였다.

1) 連續送風

分析方法에서 言及한 獨立 變數의 組合에서 最上層이 16%(w.b.)까지 乾燥된 경우는 77組合, 15%(w.b.)까지 乾燥가 이루어진 경우는 75組合이었다. 따라서 16%와 15%(w.b.)까지 乾燥하는데 所要된 時間과 乾物重量損失率을 豫測하기 爲하여 各各 77

個와 75個의 資料를 利用하였다.

所要乾燥時間의 豫測方程式은 常溫通風乾燥와 마찬가지로 다음과 같은 指數函數가 가장 適合하였으며 最小自乘法으로 算出한 常數의 값은 Table 5)와 같다.

$$DT_{sc} = \text{EXP}(S_1 + S_2A + S_3M + S_4M^2 + S_5H + S_6H^2 + S_7HM) \text{--- (3-19)}$$

여기서, DT_{sc} ; 所要乾燥時間(day)

A ; 送風量(cmm/m³)

M ; 初期含水率(% w.b.)

H ; 送風空氣의 平均加熱溫度(°C)

$S_1, S_2, S_3, \dots, S_7$; 常數

Table 9 Values of constants in Equation (3-19) for predicting drying time (Continuous fan operation).

Contants	Final moisture content at top layer	
	16% (w.b.)	15% (w.b.)
S_1	-0.300419 E 01	-0.123791 E 01
S_2	-0.273724	-0.224229
S_3	0.517016	0.347761
S_4	-0.963365 E-02	-0.551614 E-02
S_5	-0.165341	0.125421
S_6	0.378578 E-02	0.127446 E-01
S_7	0.344417 E-02	-0.173091 E-01

乾物重量損失率의 豫測方程式도 다음(3-20)式과 같은 指數函數가 가장 適合하였으며, 常數의 값은 Table 6과 같다.

$$DM_{sc} = \text{EXP}(R_1 + R_2A + R_3M + R_4M^2 + R_5H + R_6H^2 + R_7HM) \text{--- (3-20)}$$

Table 10. Values of constants in Equation (3-20) for predicting percentage drymatter loss at top layer(Continuous fan operation).

Constants	Final moisture content at top layer	
	16% (w.b.)	15% (w.b.)
R_1	-0.119657 E 02	-0.793917 E 01
R_2	-0.269688	-0.237464
R_3	0.782290	0.451969
R_4	-0.117516 E-01	-0.514360 E-02
R_5	0.25326	0.326938 E-01
R_6	0.104289 E-01	0.122740 E-01
R_7	-0.157214 E-01	-0.611289 E-02

여기서, $DM_{,i}$; 乾物重量損失率(%)

$R_1, R_2, R_3, \dots, R_7$; 常數

2) 間斷送風

間斷送風의 경우 最上層이 16%와 15%(w.b.)까지 乾燥가 이루어진 獨立變數의 組合은 各各 63個와 60個이었다. 따라서, 16%와 15%(w.b.)까지 乾燥하는데 所要된 時間과 乾物重量損失率을 豫測하기爲하여 各各 63個와 60個의 資料를 利用하였다.

所要乾燥時間과 乾物重量損失率의 豫測方式은 連續送風의 경우와 같은 方法으로 各各 다음(3-21)式과 (3-22)式으로 誘導되었으며 最小 自乘法으로 算出한 常數의 값은 各各 Table(3-7)과 (3-8)에서 보는 바와 같다.

$$DT_{,i} = \text{EXP}(I_1 + I_2A + I_3M + I_4M^2 + I_5H + I_6H^2 + I_7HM) \dots (3-21)$$

여기서, $DT_{,i}$; 所要乾燥時間(days)

$I_1, I_2, I_3, \dots, I_7$; 常數

$$DM_{,i} = \text{EXP}(P_1 + P_2A + P_3M + P_4M^2 + P_5H + P_6H^2 + P_7HM) \dots (3-22)$$

여기서, $DM_{,i}$; 乾物重量損失率(%)

$P_1, P_2, P_3, \dots, P_7$; 常數

마. 最少送風量

常溫通風乾燥의 경우와 마찬가지로 最上層에서의 最終含水率을 15%(w.b.), 乾物重量損失率의 限界值를 0.5%로 看做하여 最少送風量을 決定하였다. 4個年 平均의인 最少送風量은 (3-20)式과 (3-22)式을 利用하여 算出하였으며 最惡의 氣象年度인 1972年에 對해서는 시뮬레이션 結果를 利用하여 決定하

였다.

Table 11. Values of constants in Equation (3-21) for predicting drying time(Intermittent fan operation).

Constants	Final moisture content at top layer	
	16% (w.b.)	15% (w.b.)
I_1	-0.458686 E 01	-0.180590 E 01
I_2	-0.289297	-0.309379
I_3	0.584752	0.346039
I_4	-0.103344 E-01	-0.512628 E-02
I_5	0.146237	0.142435
I_6	0.222087 E-02	0.137480 E-01
I_7	-0.103991 E-01	-0.135199 E-01

Table 12. Values of constants in Equation (3-22) for predicting percentage drymatter loss at top layer(Intermittent fan operation)

Constants	Final moisture content at top layer	
	16% (w.b.)	15% (w.b.)
P_1	-0.107206 E 02	-0.825737 E 01
P_2	-0.271289	-0.240332
P_3	0.698618	0.492699
P_4	-0.956626 E-02	-0.561054 E-02
P_5	0.212845	0.773368 E-01
P_6	0.888748 E-02	0.132718 E-01
P_7	-0.136526 E-01	-0.853141 E-02

Table 13. Minimum airflow rate for solar heated-air drying of rough rice based on 4-year weather data (cmm/m³)

Initial moisture content(% w.b.)	Continuous fan operation				Intermittent fan operation			
	1.6°C	2.2°C	3.2°C	5.9°C	1.6°C	2.2°C	3.2°C	5.9°C
1.8	—	—	—	—	—	—	—	—
2.0	—	—	—	—	—	—	—	—
2.2	—	—	—	—	1,817	1,677	1,672	1,634
2.4	2,135	1,976	1,772	1,746	3,654	3,491	3,241	3,165

初期含水率이 18%와 20%인 경우는 乾燥期間中(10月) 어느 水準의 送風量에서도 乾物重量損失率이 0.5%를 초과하지 않았으므로 15%까지 乾燥가 可能한 送風量을 最少送風量으로 擇하였다. 그 結果는 Table 13 및 14와 같다.

여기에서 送風方法間의 最少送風量을 比較해 보면 4個年 平均值의 경우 間斷送風方法이 連續送風方法에 비해 1.5~1.7배나 더 큰값을 나타내고 있으며, 氣象條件이 가장 나쁜 1972年度의 경우는 初期含水率이 24%일때 1.7~1.8배나 더 큰값을 나타

Table 14. Minimum airflow rate for solar heated air drying of rough rice for the worst year, 1972. (cmm/m³)

Fan operation Average temperature rise (°C) Initial moisture content (% w.b.)	Continuous			Intermittent		
	1.6	2.2	3.2	1.6	2.2	3.2
1.8	1.607	1.205	0.804	1.607	1.291	1.205
2.0	1.607	1.205	0.927	1.722	1.507	1.507
2.2	1.607	1.291	1.205	2.009	1.808	1.808
2.4	2.191	2.009	2.009	4.018	3.616	3.444

내고 있다. 또한 最少送風量은 平均加熱溫度가 높을 수록 약간 낮게 나타나지만 큰 差異가 없음을 알수있다.

바. 所要動力과 에너지

連續送風方法과 間斷送風方法간의 乾燥에 所要되는 에너지를 比較하기 爲하여 氣象條件이 가장 나쁜 1972年度의 最少送風量을 基準으로 初期含水率 이 24%(w.b.)인 벼의 最上層을 15%(w.b.)까지 乾燥하는데 必要한 4個年間 平均 所要에너지를 穀物의 堆積두께別로 다음과 같이 算出하였다.

$$E_{s,c} = 24DT_{s,c} \frac{(AD)^{2.182}}{148.82} \dots\dots\dots (3-23)$$

$$E_{s,i} = 24DT_{s,i} \frac{(AD)^{2.181}}{148.82} \dots\dots\dots (3-24)$$

- 여기서, $E_{s,c}$; 連續送風方法에서의 所要電力(KWH/m³)
- $E_{s,i}$; 間斷送風方法에서의 所要電力(KWH/m³)
- $DT_{s,c}$; 連續送風方法에서의 所要乾燥時間(days)
- $DT_{s,i}$; 間斷送風方法에서의 所要乾燥時間(days)
- A; 送風量(cmm/m³)
- D; 穀物의 堆積두께(m)

Fig 16은 送風空氣의 平均加熱溫度가 2.2°C일 때 初期含水率이 24%인 벼의 最上層을 15%(w.b.)까지 乾燥하는데 所要되는 에너지를 堆積두께와 送風方法別로 나타낸 것으로 連續送風方法이 間斷送風方法에 比較하여 送風量과 堆積두께가 增加함에 따라 所要 에너지는 훨씬 더 急增함을 알 수 있다.

그러나 最少送風量으로 乾燥할 때에는 Table 11에서와 같이 所要乾燥時間은 連續送風方法이 間斷

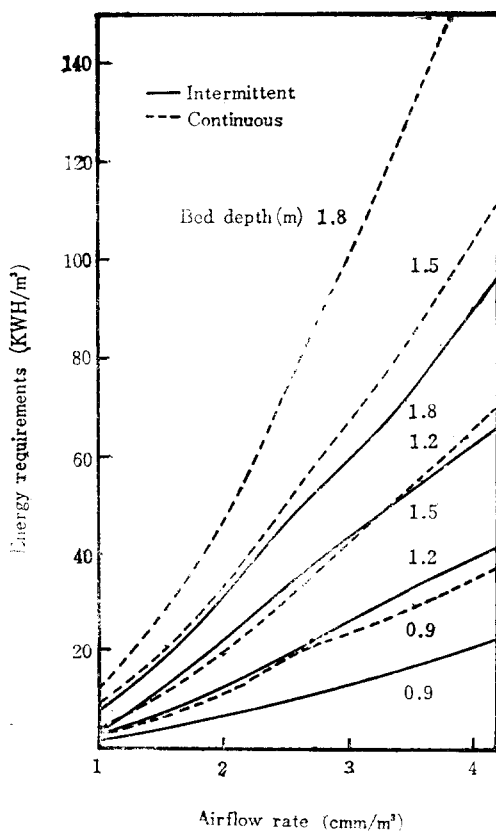


Fig. 16. Total energy required to dry top layer to 15% wet basis with different fan operation methods (Initial moisture content 24% w.b., average temperature rise 2.2°C).

送風方法에 比較하여 約 2.6倍程度 더 큰값을 나타내지만, 所要動力과 所要에너지는 間斷送風方法이 오히려 各各 約 3.7倍와 1.5倍나 더 크게 나타내고 있다.

Table 15. Fan power and total energy required to dry top layer to 15% wet basis with solar heated-air at minimum airflow rate

Fan operation method	Initial moisture content (% w. b.)	Minimum airflow rate (cmm/m ³)	Required drying time (days)	Average Temperature rise(°C)	Bed depth (m)					
					0.9		1.2		1.5	
					KW/m ³	KWH/m ³	KW/m ³	KWH/m ³	KW/m ³	KWH/m ³
Continuous	24	2.191	23.47	2.2	0.027	15.32	0.051	28.53	0.082	46.21
Intermittent	24	4.018	9.12	2.2	0.101	22.36	0.188	41.11	0.304	66.59

대라서, 間斷送風方法이 連續送風方法에 比하여 所要動力과 所要에너지를 考慮할 때 훨씬 不利하므로 連續送風方法을 擇하는 것이 妥當한 것으로 判斷된다.

사. 所要集熱面積

所要集熱面積은 集熱器의 構造, 要求되는 送風空氣의 上昇溫度, 送風量 및 日射量에 좌우된다.

따라서 集熱器의 效率, 上昇溫度 및 送風量과의 關係를 究明하므로써 所要集熱面積을 算出할 수 있다.

送風空氣의 上昇溫度는 I_k 의 값을 26.2ly/hr (春川地方의 10月의 平均値), R_f 의 값을 1.3533 (集熱器의 傾斜角 45°에 對한 春川地方의 10月의 平均値)으로 取하여 U 와 v 의 값에 따라 (3-9)式을 利用하여 算出하였다.

集熱效率은 集熱板에 照射된 太陽熱량과 空氣가 集熱器 속을 通過하는 동안 吸收한 熱량의 比로 定義되므로 다음 (3-25)式으로 表示된다.

$$\eta = \frac{60v\rho_a C_a \Delta t}{10I_k R_f A_c} \times 100(\%) \dots\dots\dots (3-25)$$

- 여기서, η ; 集熱器의 效率(%)
- v ; 集熱器의 單位面積當 送風量(cmm/m²)
- ρ_a ; 空氣의 密度(kg/m³)
- C_a ; 空氣의 比熱(kcal/kg°C)
- I_k ; 日射量(ly/hr)
- A_c ; 集熱板의 面積(m²)
- Δt ; 送風空氣의 上昇溫度(°C)

ρ_a 를 1.232kg/m³, C_a 를 0.245kcal/kg °C로 假定하면, (3-25)式은 다음과 같이 된다.

$$\eta = \frac{1.811\Delta t}{I_k R_f A_c} \times 100(\%) \dots\dots\dots (3-26)$$

Fig. 17은 (3-9)式과 (3-26) 依하여 算出한 送風空氣의 上昇溫度와 效率을 送風量과 U 의 값에 따라 表示한 것이다.

그림으로부터 乾燥에 要求되는 送風空氣의 上昇溫度, 集熱器의 構造에 따른 U 의 값 및 穀物乾燥에

必要한 送風量이 주어지면 所要集熱面積을 求할 수 있다.

例컨데, 本研究에 使用된 集熱器의 U 값은 約 10.0 이었고 送風空氣의 平均 上昇溫度는 3.3°C以下로 합적이었으며 또한 24%(w.b.)의 벼를 乾燥하는데 必要한 最少送風量은 3.902cmm/tonne이 있으므로, 이들의 값을 利用하여 所要集熱面積을 求

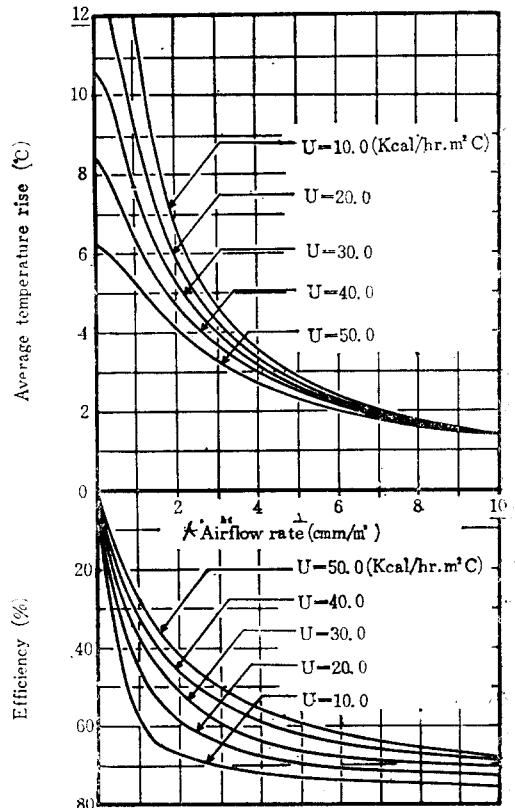


Fig. 17. Relationship of temperature rise, airflow rate and efficiency with five different over-all coefficient of heat transfer.

하면, 送風空氣의 上昇溫度 3.3°C 와 $U=10$ 의 曲線과의 交點의 送風量을 읽으면 約 $4.25\text{cm}^3/\text{m}^2$ 이 된다. 따라서 每 1tonne 當 所要集熱面積은 0.92m^2 ($3.902/4.25$)이 된다.

參考로 덮개 板이 없는 集熱器($U=50$)의 所要集熱面積은 $1.3\text{m}^2/\text{tonne}$ 이 된다. 이러한 結果는 Foster(9)等이 報告한 所要集熱面積 $0.35\sim 2.65\text{m}^2/\text{tonne}$ 과 近似하다.

Fig 17은 春川地域의 日射條件을 기초로 作成된 것이지만 日射條件이 다른 地域에서도 平均日射量(ly/hr)과 方向係數를 알면 所要集熱面積을 算出하는데 使用될 수 있다. 즉 주어진 地域에서의 所要集熱面積은 Fig 17에서 算出한 集熱面積에 春川地域과 그 地域에서의 日射量과 方向係數의 相乘積의 比를 곱하여 주면 된다.

5. 結論 및 要約

平面式 空氣加熱 太陽熱 集熱器를 통한 送風空氣의 上昇溫度를 豫測할 수 있는 方程式을 理論 및 實驗的 方法에 依하여 誘導하고 이를 常溫通風乾燥 시스템의 시뮬레이션 모델에 適用하여 春川 地域의 4年間의 10月の 氣像資料를 根據로 太陽熱에 依한 每 乾燥 可能性을 分析하였으며, 그 結果를 要約하면 다음과 같다.

1) 過乾燥現象을 考慮할 때 間斷送風方法보다는 連續送風方法이 바람직하지만, 連續送風을 하더라도 送風空氣의 加熱溫度가 높을 수록 過乾燥現象이 나타나므로 每의 安全貯藏含水率을 考慮하여 送風空氣의 平均加熱溫度를 3.3°C 以下로 制限함이 適當할 것으로 判斷된다.

2) 所要乾燥時間은 送風方法에 關係없이 送風量이 倍加하면 40~45% 短縮되었으며, 送風空氣의 平均上昇溫度가 1°C 增加하면 約 4% 內外로 短縮되므로 送風空氣의 上昇溫度는 所要乾燥時間에 크게 影響을 미치지 못하였다. 또한 初期含水率이 2% 增加하면 所要乾燥時間은 送風方法에 關係없이 約 18~30% 增加하였으며, 間斷送風方法은 連續送風方法에 比하여 約 36~42% 短縮되었다.

3) 乾物重量損失率은 送風方法에 關係없이 送風量이 倍加하면 約 34~46% 減少하였으며, 送風空氣의 上昇溫度는 乾物重量損失率에 거의 影響을 미치지 못하였다. 또한 初期含水率이 2% 增加하면 乾物重量損失率은 約 50~78% 增加하였으며, 間斷

送風方法은 連續送風方法에 比하여 約 40~45% 더 크게 나타났다.

4) 最上層의 벼를 各各 16%와 15%(w.b.)까지 乾燥하는데 所要되는 時間과 이동안 發生한 乾物重量 損失率을 豫測하기 爲한 方程式을 初期含水率, 送風量 및 送風空氣의 加熱溫度의 函數로 誘導하였다.

5) 過乾燥現象, 所要動力 및 所要에너지를 考慮할 때 間斷送風方法보다 連續送風方法이 보다 더 有利한 것으로 判斷되었다.

6) 送風空氣의 平均上昇溫도와 送風量이 주어질 때 平面式 太陽熱 集熱器의 所要集熱面積을 算出하는 方法을 그림으로 提示하였다.

參 考 文 獻

1. Bailey, P. H. and Williamson, W. F. Some experiments on drying grain by solar radiation. Agr. Eng. Res. 10(3), pp. 191-196, 1965
2. Baker, J.L. and Shove, G. C. Solar grain drying in Illinois. ASAE Paper No. 77-3009, 1977
3. Bakker-Arkema, F.W. and Haight, J. Required weather data for simulation of solar grain drying. ASAE Paper No. 76-3020, 1976
4. Bates, D. W. Dry your grain with solar heat. Hoard's Dairyman, 109, 1962
5. Buelow, F.H. and Boyd, J.S. Heating air by solar energy. Agricultural Engineering, 38(1), pp. 28-30, 1957
6. Buelow, F. Dry grain with solar heated-air. Mich. Agr. Expt. Sta. Quart. Bull. 4(2), pp. 421-429, 1958
7. Duffie, J. A. and Beckman, W. A. Solar energy thermal processes. Wiley-Interscience Co., 1974
8. Edlin, F.E. Plastic glazings for solar energy absorption collectors. Solar Energy, 2(2), pp. 3-6, 1958
9. Foster, G.H. and Peart, R. M. Solar grain drying progress and potential. USDA. Agricultural Research, Agriculture Information Bull. No. 401, 1976
10. Foster, G.H. Minimum air flow requirements for drying grain with unheated air. Agricultural Engineering, 34, pp. 681-684, 1953

11. Hall, M. Farmstead design for energy efficiency. Grain Drying and Energy Management Workshop, 1978
12. Hosokawa, A. and Motohashi, K. Drying characteristics [of a single grain of rough rice, JSAM 33(1), pp. 53—59, 1971
13. Kreider, J. F. and Kreith, F. Solar heating and cooling. McGraw-Hill, 1975
14. Keum, D.H. Simulated drying of rough rice with Natural and solar-heated air. Ph. D. Thesis, Seoul National Univ. 1979
15. Lipper, R.I. and Davis, C.P. Drying crops with solar energy. Agricultural Research, 8 (11) : 14, 1960
16. Lipper, R.I. and Davis, C.P. Solar energy for conditioning. ASAE Paper No. 59—902, 1959
17. Lipper, R. I. and Davis, C.P. Various uses possible for new solar heat collectors. Agricultural Research, 10(5), 14, 1961
18. Liu, B.Y.H. and Jordan, R.C. A rational procedure for predicting the long-term average performance of flat-plate solar energy collectors. Solar Energy, 7(2), pp. 53—74, 1962
19. Liu, B.Y.H. and Jordan, R.C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse, and total solar radiation. Solar Energy, IV(3), pp. 1—19, 1960
20. Lof, George, O.G. Solar energy for drying of solid. Solar Energy, 6(4) pp. 122—128, 1962
21. Meyer, G.E., Keener, H.M. and Roller, W.L. Solar heated air drying of soybean seed and shelled corn. ASAE Paper No. 75—3002, 1975
22. Morey, R.V., Cloud, H.A. and Nelson, W.W. Field evaluation of a solar energy grain drying system. ASAE Paper No. 75—3515, 1975
23. Peterson, W. H. Solar electric crop dryer progress report, EMC 657, South Dakota Univ. 1973
24. Sobal, A. T. and Suelow, F. H. Galvanized steel roof construction for solar heating. Agricultural Engineering, 44(6), pp. 312—313, 316—317, 1963
25. Troeger, J.M. and Butler, J.L. Simulation of solar peanut drying. ASAE Paper No. 77—3537, 1977
26. Whillier, A. Performance of black-painted solar air heaters of conventional design. Solar Energy, 7, pp. 31—37, 1963