한국농화학회지 Vol. 26, No. 2, June 1983
J. Korean Agricultural Chemical Society

Rock-pile式 集熱器를 利用한 農産物乾燥에 關한 硏究

張 奎 燮 · 金 滿 秀

忠南大學校 農科大學

(1983년 2월 10일 수리)

Drying of Agricultural Products by the Flat-plate Solar Collector with Rock-piled Heat Storage Medium

Kyu-Seob Chang and Man-Soo Kim

College of Agriculture, Chung-nam National University, Dae-jun, Korea

Abstract

The performance of the flat-plate solar collector with rock-pile thermal storage medium and the drying characteristics of rough rice and red pepper by use of natural air and of supplementary heated air by the solar drier were studied.

The thermal efficiency of the flat-plate solar collector was average 25.4 percent and the overall heattransfer coefficient of the collector was approximately 38.13kJ/hr.m²°C. The flat-plate collector was able to supply the supplementary heated air which was about 7°C higher than the ambient air temperature during the daytime and about 3°C higher than during the night.

For rough rice drying of grain moisture content from 24.5 to 14.5%, it took 18 days in the natural air system, 12 days in the tubular solar collector and 10 days in the flat-plate solar collector. For red pepper drying from it's moisture from 81.0 to 15.0%, 68 hrs required under conventional sun drying system, but 38 hrs in tubular solar collector and 36 hrs in the flateplate solar collector.

The changes of capsanthin and capsaicine content were investigated at various drying system, and little difference was found among the drying system.

緖 論

農産物의 乾燥는 우리나라의 경우 日光乾燥가 普遍化되어 있으나 점차 農業의 機械化가 加速되고 多角營農과 農業經營의 合理化를 爲해서는 人工乾燥가 不可避해 지고 있는 實情이다.

人工乾燥의 熱源으로는 主로 化石에너지가 利用되고 있으나 化石에너지의 制限된 供給과 價格의 불안정으로 代替에너지의 開發에 많은 關心을 가지게 되었고 여러가지 代替에너지 中에서 低溫의 熱源으로도 큰 效果를 얻을 수 있는 穀物의 乾燥에는 太陽에너지가 脚光을 받게 되었다.

太陽熱을 利用한 穀物의 乾燥는 主로 大氣溫보다 約 5°C가 높은 加熱空氣로서 貯藏中에 乾燥하는 低溫乾燥方法[1,2,3,4]이나 60°C 以上의 高溫高速乾燥方法도 있다[5]. 大體로 低溫의 加熱空氣로도 常溫通風 乾燥에 送風量의 10~15% 減少시킬 수 있다고 報告하였으며[4] Loewer[5]는 穀物 收穫時 그 地方의 平均 氣溫이 約 10°C인 곳에서는 大氣溫보

다 6°C 높은 溫度로도 乾燥가 可能하나 그 以上의 平均 氣溫을 가지는 地方에서는 低溫乾燥에는 약간의 制約이 있다고 報告하였다.

Calderwood[1]는 集熱效率이 約 35%인 集熱器로 空氣를 常溫보다 約 5°C 높게 加熱하여 벼를 乾燥한 結果 乾燥所要時間이나 總所要에너지의 約 25% 줄일 수 있었으나 bin 下層部에서의 過乾現象이 問題였으며 이러한 過乾現象을 줄이기 爲해서는 蓄熱裝置를 利用하여 相對濕度가 높은 夜間의 乾燥에 加熱空氣를 利用하는 것이 바람직한 것으로 報告하였다.

Eckhoff等[7]은 蓄熱媒體로서 자갈, 土壤, 液體等을 比較 檢討했던바 媒體마다 長短點이 있으며 蓄熱 效果面에서는 液體가, 經濟的인 面에서는 土壤이 더 바람직한 蓄熱媒體라고 報告하였으나 實際 蓄熱裝置의 製作에는 取扱이 容易한 자갈이 主로 利用되고 있는 實情이며[2,8,9,10] 자갈을 축열매체로 사용한 연구로는 Walton,[8,9] Converse,[2] Koh[10]등의 보고가 있다.

本 硏究에서는 蓄熱媒體로 검은 돌을 利用한 平板集熱器을 製作하여 平板集熱器의 集熱效率, 總熱傳達係數 및 集熱器에 依한 上昇溫度等을 分析하고 集熱器에 依한 벼와 고추의 乾燥와 常溫通風乾燥를 比較 分析하는데 있었다.

材料 및 方法

1. 實驗材料

試料로 使用된 벼는 忠南大學校 實驗農場에서 栽培된 密陽 15號로서 初期含水率 24.5%(W.b.)이었다. 고추는 大田 近郊에서 生産된 금강 品種으로 熟成된 赤果中 比較的 크기가 비슷한 것을 골라 꼭지는 約 5mm만 남기고 除去하였고 통고추, 고추 끝에서 길이 方向으로 자른 水平切斷形과 가로로 자른 垂直切斷形으로 區分하여 實驗하였으며 初期含水率은 81.0%(W.b.)이었다.

2. 實驗裝置

平板集熱器는 1.2mm두께의 鐵板과 約 2cm 두께의 斷熱材(glasswool)를 使用하여 製作하였으며 蓄熱媒體로는 平均 直徑 約 10cm의 돌을 利用하였다. 돌에는 무광택 黑色 페인트 칠을 하였으며 約 0.69m³(1.1ton)의 돌을 平板集熱器 바닥에 設置되어 있는 送風 duct 위에 쌓았다. 튜브型集熱器는 0.08mm두께의 폴리에틸렌 필름을 直徑 29 cm의 圓筒形이 되게 接合하였고 그 안에 黑色 폴리에필렌 필름을 直徑 19cm되게 만들어 넣었으며 外部 필름을 圓筒으로 維持시키기 爲하여 內部 필름의 길이 方向으로 30cm 간격으로 直徑 5mm의 구멍을 뚫었다. 實驗裝置의 配置圖와 그 諸元은 Fig. 1 및 Table 1과 같다.

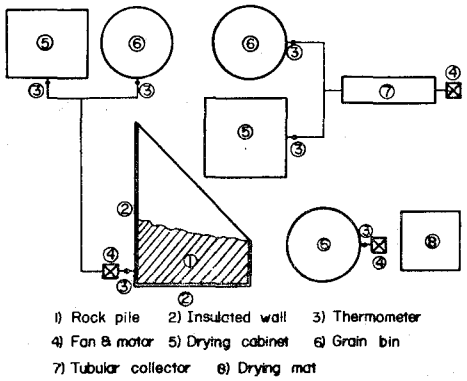

Fig. 1. Schematic diagram of experimental equipments.

Table 1. Specification of the solar collectors.

Items \ Collectors		Flat-plate solar collector with rock-pile heat storage	Tubular solar collector
Size(m)		$L1.16 \times W1.20 \times H1.60$	$\phi 0.19 \times L10.00$
Absorbing area(m²)		2.00	1.90
Tilted angle and direction		46°	east to west
Material	absorbing surface	black-painted wall and rock-pile	black color tubular polyethylene film
	insulation	wall insulated with 0.02m glass wool	

3. 方 法

(1) 太陽熱集熱器의 效率 : 集熱器의 集熱效率은 다음 (1)式에 依하여 計算하였다.

$$\eta=\frac{VC\rho\Delta T}{HAK}\times 100 \qquad (1)$$

여기서, η=efficiency of collector(%), V=volumetric flow rate(m^3/hr.), C=specific heat of air(kJ/kg°C), ρ=density of air(kg/m^3), ΔT=temperature difference(°C), H=radiation on horizontal surface(kJ/hr.m^2), A=net absorbing area of collector(m^2), R=orientation factor (dimensionless),

(2) 集熱器에 依한 上昇溫度의 豫測 및 總熱傳達係數 : 다음 (2)式과 같이 어떤 物體의 時間에 따른 溫度의 變化가 外部 熱抵抗에 依해서만 左右되는 경우에서 內部에 熱源이 있는 경우의 (2)式으로 集熱器의 上昇溫度를 豫測하였다[11].

$$T_t-T_a=\frac{Q}{UA_S}\left\{1-\exp\left(-\frac{UA_S}{\rho_R C_R V_R}t\right)\right\} \qquad (2)$$

여기서, T_t=每時間 集熱器의 出口溫度(°C), T_a=每 時間 大氣溫度(°C), $Q=AH_{av}$=集熱器에 吸收되는 平均에너지(kJ/hr.), U=集熱器의 總熱傳達係數(kJ/hr.m^2°C), A_S=rock-pile의 表面積(m^2) ρ_R=rock-pile의 散物密度(kg/m^3), V_R=rock-pile의 體積(m^3), A=集熱器의 集熱面積(m^2), H_{av}=日平均 時間當 水平面 日射量(kJ/hr.m^2), t=時間(hr.),

晝間에는 위의 (2)式에 依하여 上昇溫度를 豫測하였으며 夜間(18時 以後)에는 日射量이 없으므로 晝間 마지막 時間의 出口溫度를 rock-pile의 初期溫度로 看做하여 다음 (3)式에 依하여 夜間의 集熱器 出口溫度를 豫測하였다.

$$\frac{T_t-T_a}{T_i-T_a}=\exp\left(-\frac{UA_S}{\rho_R C_R V_R}t\right) \qquad (3)$$

여기서, T_i는 rock-pile의 初期溫度(°C)이다.

集熱器의 總熱傳達係數는 晝間의 上昇溫度 豫測式(2式)을 適用하고 Newton-Raphson iteration method를 利用하여 digital computer로 計算하였다.

結果 및 考察

1. 太陽熱 集熱器의 效率

集熱器의 效率은 10月 20日에서 11月 9日까지 7日동안의 10~11時와 14~15時의 效率를 分析하였으며 그 結果를 같은 期間의 水平面日射量과 같이 Fig. 2에 圖示하였다.

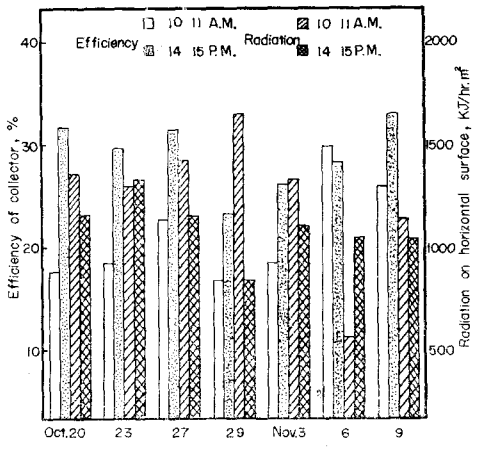

Fig. 2. Efficiency of the collector and radiation on horizontal surface at 10~11 A.P. and 14~15 P.M. of each day.

이 期間의 水平面日射量은 10~11時의 경우 平均 1255.4kJ/hr.m^2이었고 14~15時의 경우는 平均 1101.7kJ/hr.m^2로서 午前보다 약간 작은 값이었으나 效率은 10~11時의 경우 平均 21.5%이었고 14~15時의 경우 平均 29.2%로서 午後의 效率이 約 8% 높은 것으로 나타났다. 이러한 現象은 이 期間의 水平面日射量이 大體로 午後보다 午前이 높았으나 上昇溫度는 그 反對였기 때문이다. 따라서 本 實驗에 使用된 集熱器의 效率은 10~11時와 14~15時 效率의 平均인 25.4%라 할 수 있겠으며 이 값은 다른 硏究者들[2,10]이 報告한 값보다 약간 작은 값을 나타내고 있는데 이것은 集熱器의 材料와 構造等의 差異 때문에 集熱器의 總熱傳達係數가 서로 다르기 때문인 것으로 思料된다.

2. 集熱器의 總熱傳達係數

集熱器의 總熱傳達係數의 推定은 熱源으로서 10月 20日 9時에서 17時까지의 水平面日射量의 平均値를 使用했는데 이것은 實驗에 使用된 集熱器가 一般的인 平板集熱器와는 달리 돌을 媒體로 하여 蓄熱을 兼하고 있기 때문이었다.

Table 2에는 10月 20日 9時부터 17時까지의 大氣溫, 集熱器에 依한 上昇溫度, 集熱器의 總熱傳達係數를 나타낸 것으로 大氣溫의 全體 平均이 20.1°C이었고 上昇溫度는 27.2°C로서 上昇溫度의 平均은 約 7°C이었다. 表에서 보는 바와 같이 總

Table 2. Results of determination of the overall heat-transfer coefficients of the flat plate solar collector.

Hours	Ambient air temp. (0°C)	Solar heated air temp. (°C)	Overall heat-transfer coefficient (kJ/hr.m²°C)
9~10	17.2	20.5	65.98
10~11	17.6	23.5	21.88
11~12	18.8	26.0	24.63
12~13	23.5	32.0	24.07
13~14	21.8	29.5	39.35
14~15	21.4	30.0	36.49
15~16	20.5	28.5	44.17
16~17	19.8	27.5	48.44
average	20.1	27.2	38.13

熱傳達係數의 값도 時間에 따라 差異를 보이는데 이것은 主로 每 時間의 上昇溫度의 差 때문이라고 判斷되며 本 實驗에서 使用된 集熱器의 總熱傳達係數는 全體 平均인 38.13kJ/hr.m²°C로서 Walton 等[8]의 34.52kJ/hr.m²°C보다 약간 높게 나타났으나 이들의 實驗裝置는 地下에 rock-pile을 設置한 때문인 것으로 思料된다. 平板集熱器의 總熱傳達係數를 理論的으로 究明했던 Parker[12]에 依하면 一般的으로 集熱器의 總熱傳達係數는 約 33.66에서 66.96kJ/hr.m²°C로서 集熱器의 種類, 構造, 使用材料等에 따라서 差異가 甚하나 大體로 이 범위 안의 값들이 大部分일 것으로 思料된다.

3. 集熱器에 依한 上昇溫度의 豫測

集熱器에 依한 上昇溫度는 實驗을 通하여 推定한 總熱傳達係數 38.13kJ/hr.m²°C를 畫, 夜間의 豫測式(2式)에 代入하여 每 時間의 上昇溫度를 計算하였다. Fig. 3은 每 時間의 大氣溫과 上昇溫度의 實測値 및 豫測値를 比較한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 9時에서 13時까지는 實測値가 豫測値보다 약간 높게 나타났으나 그 以後에는 反對의 現象으로 나타났으며 그 差異는 約 2°C 以下로 두 값間에는 큰 差異가 없었다. 大體로 9時에서 19時까지는 上昇溫度가 大氣溫보다 約 7°C 높게 나타났고 19時에서 다음날 8時까지에는 約 3°C 높게 나타났으며 最高, 最低溫度는 그 날 大氣溫의 最高, 最低溫度가 나타난 13時와 다음날 7時에 나타났다. 이와 같은 現象은 高等[10]의 硏究結果와는 매우 類似하였으나 Converse等[2]의 報告에 依하면 最高溫度는 18時에, 最低溫度는 9時에 나타났다고

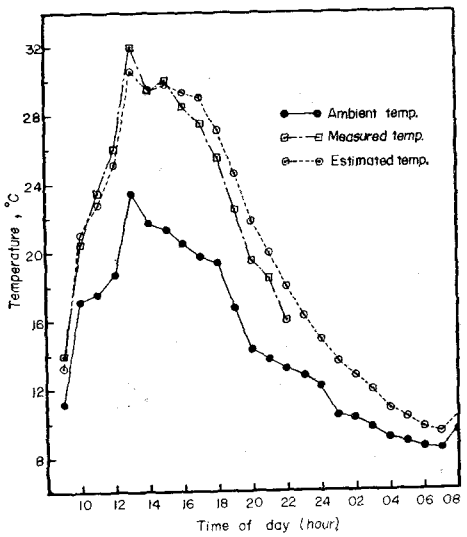

Fig. 3. Temperature variations of the ambient air, the solar-heated air and the estimated solar-heated air on a typical day.

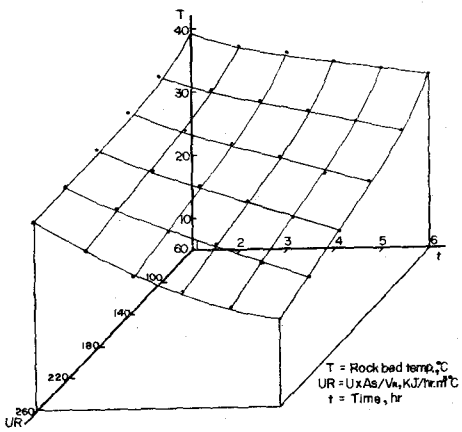

Fig. 4. Response surface for rock-pile temperature as functions of UR and time.

하였던 바 本 實驗의 結果와는 아주 다른 現象으로 나타났는데 이것은 rock-pile의 量이 約 22m³로서 매우 크기 때문에 太陽熱이 充分히 貯藏된 後에야 제대로 溫度가 올라갈 수 있기 때문인 것으로 思料된다.

Fig. 4는 體積에 對한 表面積의 比와 集熱器의 總熱傳達係數의 相乘積인 UR과 時間에 따른 rock-pile의 平均溫度에 對한 反應表面(response surface)을 rock-pile의 初期溫度 40°C와 주위의 大氣溫 10°C의 경우를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바

와 같이 UR값이 작은 경우에는 時間에 따른 rock-pile의 溫度는 매우 緩慢한 變化를 하고 있으나 UR의 값이 큰 경우에는 매우 急激한 變化를 하고 있음을 알 수 있다. rock-pile을 利用한 蓄熱裝置의 設計에는 UR의 값을 줄일 수 있는 方案이 充分히 考慮되어야 할 것으로 思料된다.

4. 乾燥方法別 벼와 고추의 乾燥特性

벼의 乾燥는 初期含水率 24.5%(W.b.)의 벼를 各各 平板集熱器, 튜브型集熱器에 連結한 bin과 常溫通風乾燥 bin에 50cm 두께로 堆積하여 送風量 1.32cmm/m³로 每日 9時에서 19時까지 10時間씩 間斷送風하였다. 乾燥期間(10月 20日~11月 11日)의 送風空氣의 溫度는 rock-pile集熱器에서 大氣溫 보다 5~8°C, 튜브型集熱器에서는 3~4°C 程度 높은 溫度이었으며 벼의 平均含水率이 14.5%(W.b.)以下로 될때 까지 實驗을 繼續하였다.

Fig. 5는 벼의 乾燥特性을 나타낸 것으로 rock-pile集熱器에 依한 乾燥의 경우 乾燥 始作後 9日째에 15%以下로 떨어져 10日以後에는 14.5%에 到達할 수 있었고 튜브型 集熱器에서는 12日, 常溫通風乾燥에서는 18日이 所要되었다. 이와같이 常溫보다 약간의 높은 溫度로 加熱된 空氣로도 充分한 乾燥의 效果를 거둘 수 있다는 것을 알 수 있으며 이러한 現象은 다른 硏究者들[1,10]의 結果와 類似하였으나 乾燥所要時間에 對하여는 各 硏究結果들 間에 많은 差異를 나타내고 있었다. 이것은 乾燥에 큰 影響을 미친다고 잘 알려져 있는 送風量, 初期含水率, 堆積두께, 乾燥空氣의 溫度等 實驗 條件의 差에서 오는 것이라고 思料된다.

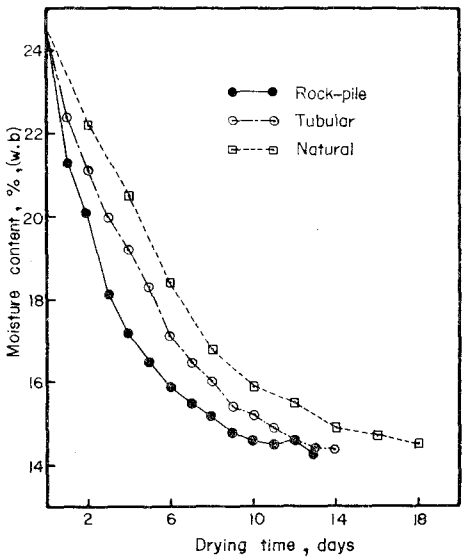

Fig. 5. Comparison of rough rice drying curves between the solar heated and the natural air drying systems.

고추의 初期含水率 81.0%(W.b.)인 試料를 통고추, 水平切斷, 垂直切斷한 고추로 各各 區分하여 벼의 乾燥에서와 같은 集熱器에 連結한 乾燥箱에서의 乾燥와 日光乾燥를 比較 分析하였다. 乾燥期間(9月 20日~10月 4日)의 乾燥空氣의 溫度는 rock-pile集熱器의 경우 大氣溫보다 8~10°C, 튜브型集熱器의 경우는 4~6°C 높은 溫度이었으며 그 外의 實驗條件은 벼의 乾燥實驗에서와 類似하였다

Table 3은 各 경우의 實驗結果를 고추의 含水率에 對한 時間의 累乘回歸로 表示한 것이다. 이들

Table 3. Regression equations of drying curves of the red pepper at various drying systems and cutting methods.

Drying systems	Cutting method	Equations	Corr. coeff.(r)
Rock-Pile solar collector	Horizontal	$M=115.5205t-0.6277$	−0.9750
	Vertical	$M=201.7215t-0.7631$	−0.9809
	Whole	$M=277.1904t-0.8150$	−0.9714
Tubular solar collector	Horizontal	$M=127.8746t-0.6101$	−0.9833
	Vertical	$M=226.6522t-0.7578$	−0.9928
	Whole	$M=317.9219t-0.8390$	−0.9736
Mat drying	Horizontal	$M=415.8521t-0.9045$	−0.9544
	Vertical	$M=472.3864t-0.8758$	−0.9068
	Whole	$M=386.7473t-0.7687$	−0.8908

Note M : Moisture content%(W.b), t : Drying time(hrs.)

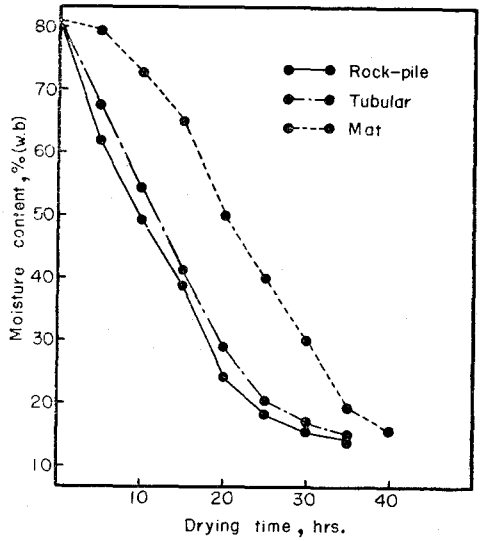

Fig. 6. Comparison of drying curves for the whole red pepper at various drying systems.

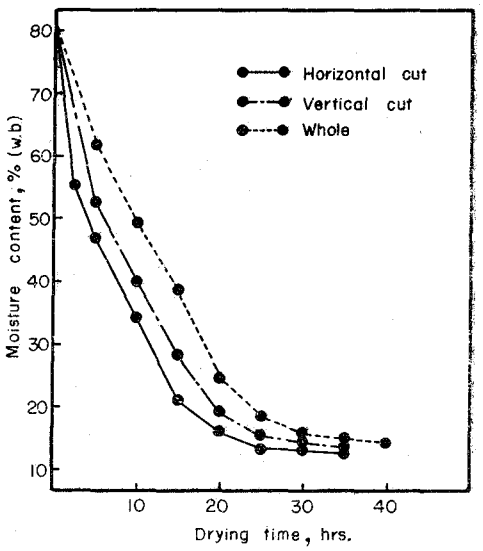

Fig. 7. Drying curves of the red pepper by the rock-pile collector according to the different cutting types.

中 乾燥方法別 통고추의 乾燥曲線을 Fig. 6에 圖示하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 통고추의 含水率이 15%(W.b)까지 到達하는 時間은 rock-pile集熱器에서 36時間, 튜브型集熱器에서 38時間, 日光乾燥에서는 60時間 以上이 所要되었다. 乾燥方法에 있어서는 集熱器에 依한 乾燥間에는 別 差異가 없었으나 이들과 日光乾燥와는 매우 큰 差異를 나타내었다. 이와 같이 고추의 乾燥 所要時間이 다른 硏究者들[13]의 結果보다 오래 걸린 것은 主로 乾燥箱 內의 溫度의 差가 크기 때문인 것으로 思料된다.

5. 고추의 切斷方法別 乾燥特性과 品質 變化

고추의 切斷方法別 乾燥實驗의 結果 中 rock-pile 集熱器에서 遂行된 것을 Fig. 7에 圖示하였다. 含水率 15%(W.b)까지 到達하는데 所要時間을 보면 水平切斷의 경우 26時間, 垂直切斷의 경우 30時間, 통고추의 경우 36時間으로 나타났다. 이와 같이 切斷方法에 따라 乾燥 所要時間이 큰 差異를 나타내지 않는 것은 乾燥箱內의 溫度가 높지 않았기 때문으로 思料된다. 水平, 垂直切斷方法 間에는 큰 差異는 없었으나 水平切斷의 경우가 약간 빠른 乾燥速度를 나타내었다. 大體로 모든 乾燥方法에서 水平切斷의 경우는 통고추에 比해 1.4～1.8배의 乾燥速度를 나타내었다.

供試된 고추의 一般 및 特殊成分은 水分 81.0%, 蛋白質 7.40%, 脂肪 0.9%, 灰分 1.75%, 無機窒素物 8.95%였고 붉은 色素인 capsanthine은 20.4 mg/g, 매운맛 成分인 capsaicine은 31.5mg/g이었다.

Table 4. Capsanthine and capsaicine content in dried red pepper on different drying systems and cutting methods(mg/g dried sample)

Drying systems	Horizontal cut		Vertical cut		Whole		Remarks
	Capsanthine	Capsaicine	Capsanthine	Capsaicine	Capsanthine	Capsaicine	
Rock-pile solar collector	16.4	24.3	15.7	25.3	15.4	30.1	Initial content; capsanthine:20.4mg/g capsaicine:31.5mg/g
Tubular solar collector	16.8	25.4	15.6	24.8	15.6	29.8	
Mat	18.8	24.1	18.9	24.7	18.4	27.5	

Table 4는 乾燥方法과 고추의 切斷 形態에 따른 乾燥고추의 capsanthine과 capsaicine의 含量을 나타낸 것으로 capsanthine은 日光乾燥의 경우에 그 含量의 變化가 적었으며 capsaicine은 乾燥方法에 따라서는 서로 類似하였으나 切斷方法에 따라서는 약간의 差異를 나타내었다. 이러한 現象은 切斷하므로서 capsaicine이 飛散되기 때문인 것으로 思料되며 이 程度의 變化는 乾燥고추의 質에 큰 影響을 미치지 않는다고 思料된다.

抄 錄

太陽熱 蓄熱裝置의 開發을 爲한 基礎資料를 얻기 爲하여 太陽熱의 蓄熱媒體로 돌을 利用한 平板集熱器을 製作하여 集熱器의 效率, 總熱傳達係數, 集熱器에 依한 上昇溫度等을 分析하고 이를 熱源으로 벼와 고추에 對한 乾燥實驗을 하였다.

初期含水率 24.5%인 벼를 14.5%까지 乾燥시키는데 常溫通風乾燥에서는 約 18日, 튜브型集熱器에서 約 12日, 平板集熱器에서 約 10日이 所要되었으며 통고추 乾燥의 경우 日光乾燥에서 約 68時間, 튜브型集熱器에서 約 38時間, 平板集熱器에서 約 36時間이 所要되었다. 고추를 切斷하여 乾燥할 경우 水平으로 切斷하는 것이 效果的이었으며 乾燥 過程中 capsanthine과 capsaicine成分의 變化는 乾燥方法이나 切斷方法에 따라 고추의 品質에 影響을 미치는 程度는 아니라고 思料되었다.

參 考 文 獻

1. Calderwood, D.L.; Trans. of the ASAE, 22 : 1435(1979).
2. Converse, H.H., Foster G.H. and Sauler D.B.; ASAE paper No. 76~3018. ASAE, St. Joseph. Michigan 49085(1976).
3. Kranzler, G.A., Bern, C.J. Kline G.L. and Anerson M.E.: Trans. of the ASAE, 23 : 214(1980).
4. Morey, R.V., Cloud, H.A. Gustafson R.J. and Peterson D.W.: Trans. of the ASAE, 22 : 409(1979).
5. Loewer, O.J., White G.M. and Parker B.F.: Trans. of the ASAE, 24 : 221(1981).
6. McLenden, B.B., and Allison J.M.: Trans. of the ASAE, 23 : 1289(1980).
7. Eckhoff, S.R. and Okos M.R.: Trans. of the ASAE, 23 : 722(1980).
8. Walton. L.R., Henson W.H., McNeill S.G. and Bunn J.M.: Trans. of the ASAE, 22 : 1202(1079).
9. Walton, L.R., Henson, W.H., McNeill S.G. and Bunn J.M.: Trans. of the ASAE, 23 : 192(1980).
10. Koh, H.K. and Chung C.J.: J. KSAM, 5 : 15 (1980).
11. Kreith, F. and Black W.Z.: Basic heat transfer. Harper & Row, Publishers, New York 192(1980).
12. Parker, B.F.: Trans. of the ASAE, 23 : 1494 (1980).
13. Chun, J.K. and Kim K.H.: J. KSAC, 17 : 42 (1974).