

【 論 文 】

고추건조를 통한 태양열 건조기의 열성분석

Thermal Analysis of Solar Utilization Dryer for Redpepper Drying

이 태 규* 조 서 현* 조 덕 기* 최 영 희* 오 정 무*
Tai Kyu Lee Suh Hyun Cho Duk Ki Jo Young Hi Chea Paul J. Auh

ABSTRACT

The heat transfer analysis is performed on unloaded solar utilization dryer, and thermal performance for a prototype model while drying red-pepper is also investigated. Results of theoretically derived thermal equations are in good agreement with experimental data. This constructed feature of the prototype demonstrates the excellent technical drying performance. Finally, this paper recommends the further work to develop advanced and economic solar utilization multi-purpose dryer.

1. 서 론

농·수산물 처리공정에서 가장 많은 열의 소모를 요하는 단계의 하나가 건조 공정이다. 대상물에 따라서 달라지지만 건조 적정 온도를 유지하고, 건조시간을 단축하기 위해서 화석 연료의 많은 소모를 야기시켜 왔다. 그러나 점차 에너지원은 제한되고, 화석연료의 양적 한계성으로 인해 대체 에너지를 이용하는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이러한 연구들 중에서 태양열을 열원으로 사용하여 농·수산물을 건조시키는 노력은 오래전부터 수행되어 왔다. 최근의 대부분의 태양열 건조기 개발에 관한 연구는 기존의 건조기를 개선하고, 태양열을 효율적으로 집열, 이용하는 방향으로 진행되고 있으며 실제 다양한 농산물을 태양열로 건조시킨 연구의 보고는 다수에 이르고 있다. 1-4)

일반적으로 태양열 건조기는 작동 원리에 따라서 크게 다음의 두가지로 분류될 수 있는데, 첫째는 태양열과 직접 접촉시켜서 건조시키는 직접 건조방식과, 둘째 태양열을 집열하고 매개체(주로 공기)를 가열하여 이를 강제 운송시켜서 대상물을 건조시키는 간접 건조 방식이다.

본 연구에서는 두가지 방식을 혼용하여 집열판에서 가열된 공기를 강제 송풍하면서 동시에 건조실에서는 직접 태양열을 받게 하여 대상물을 건조시키는 혼합식 선반형 건조기를 제작하여 이론적 열성 분석과 실제 고추 건조 실험을 통하여 열적 성능을 조사하고 기술적 타당성을 밝혔다.

건조가 진행시 대상물을 중심으로 한 물질 전달 현상은 현 단계에서는 다루지 않고 에너지 방정식을 중심으로 이론의 전개를 수행하였다.

2. 이론적 고찰

이론의 전개와 실험을 수행하기 위해 제작된

*정회원 : 한국동력자원연구소

혼합식 건조기는 집열판과 2개의 선반이 있는 건조실로 구성되어 있다. 이 건조기의 형태는 Fig.1과 Fig.2에서 보는 바와 같고, 건조기의 제작에 사용된 건축 골재 및 크기와 개요도는 자세하게 보고된 바 있다^{5,6)}

Fig.2와 Fig.3에 보여진 대로 건조기를 집열판과 건조실의 두개의 소시스템으로 나누어 열성 분석을 수행하여 이론적 온도를 추정하였

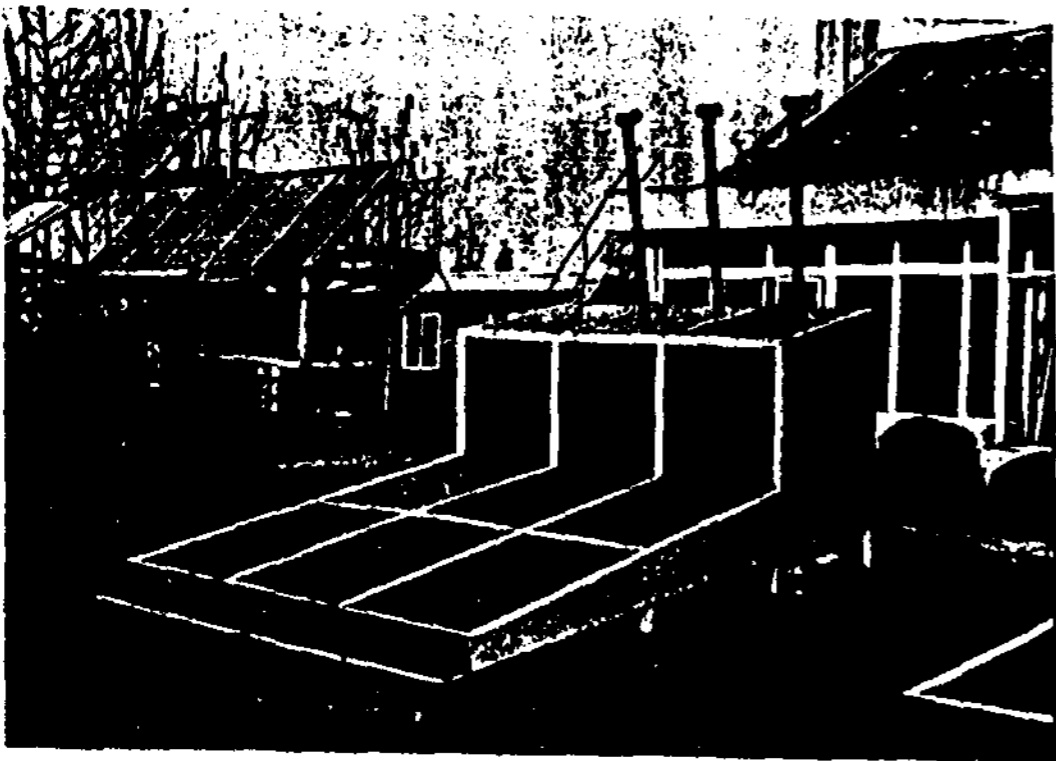


Fig. 1 Picture of solar dryer in KIER

고 실험을 통한 측정치와 비교 분석하였다. 이론식의 전개를 위하여 Fig.3에 집열판을 나타냈으며, 전개의 간편성을 위하여 다음과 같은 가정을 채택하였다.

- ① 정상 상태이고,
- ② 공기의 물성치는 온도의 함수가 아니고,
- ③ 온도구배는 Z 한 방향으로만 형성되고,
- ④ 집열판 내부에서는 열전도에 의한 열전달은 무시하며,
- ⑤ 집열판의 양면 및 바닥면은 완전히 단열된 것으로 간주하였다.

우선 시스템에서의 기본 에너지 평형 방정식을 기술하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & (\text{Accumulation}) + (\text{Net out flow rate of heat by conduction}) + (\text{Net out flow rate of heat by Convection}) - (\text{insolation}) + (\text{Newton's cooling law}) \\
 & = (\text{generation}) \quad (1)
 \end{aligned}$$

기본식 (1)을 미분 방정식 형태로 다시 쓰면,

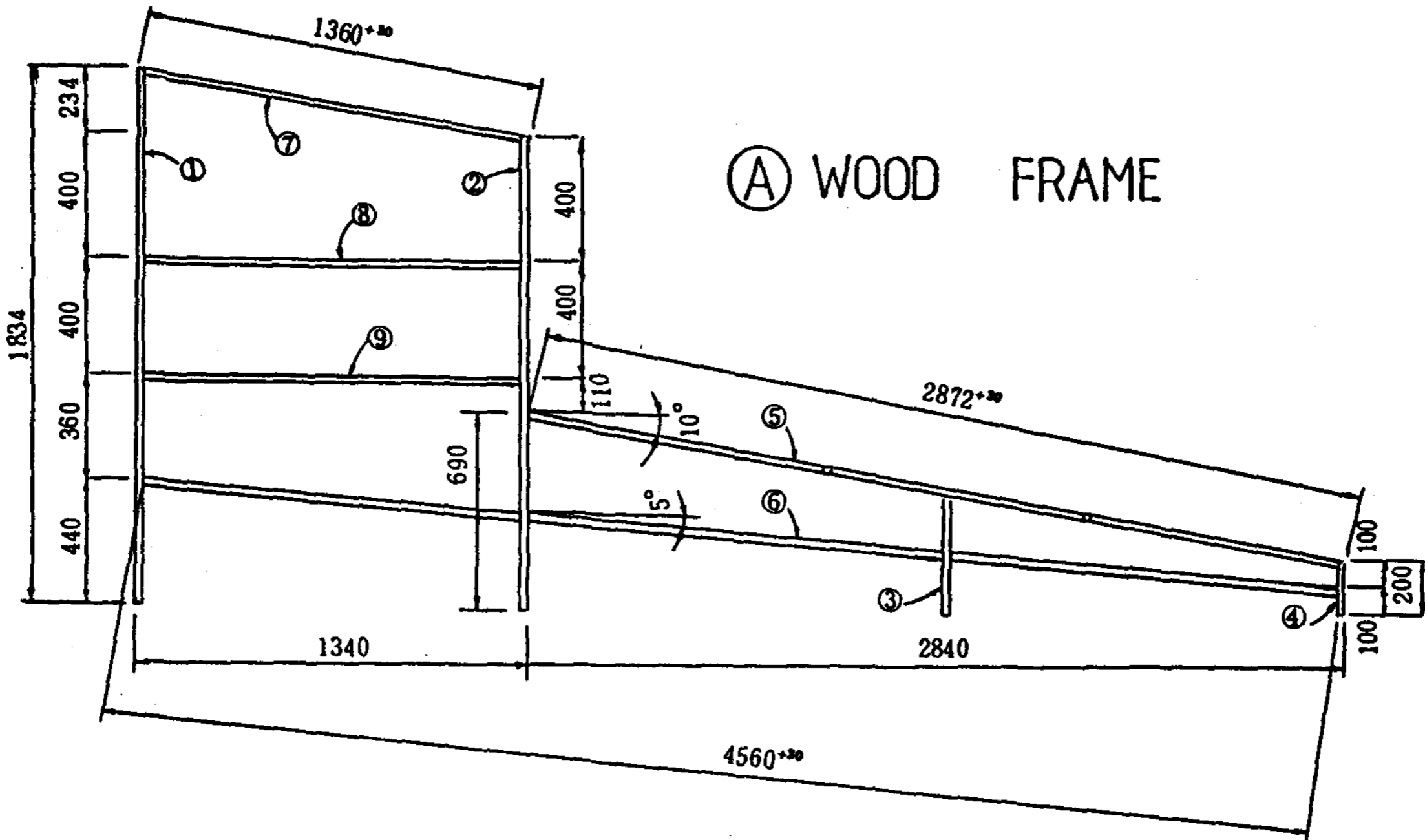


Fig. 2 Side View of Solar utilization dryer (unit; mm)

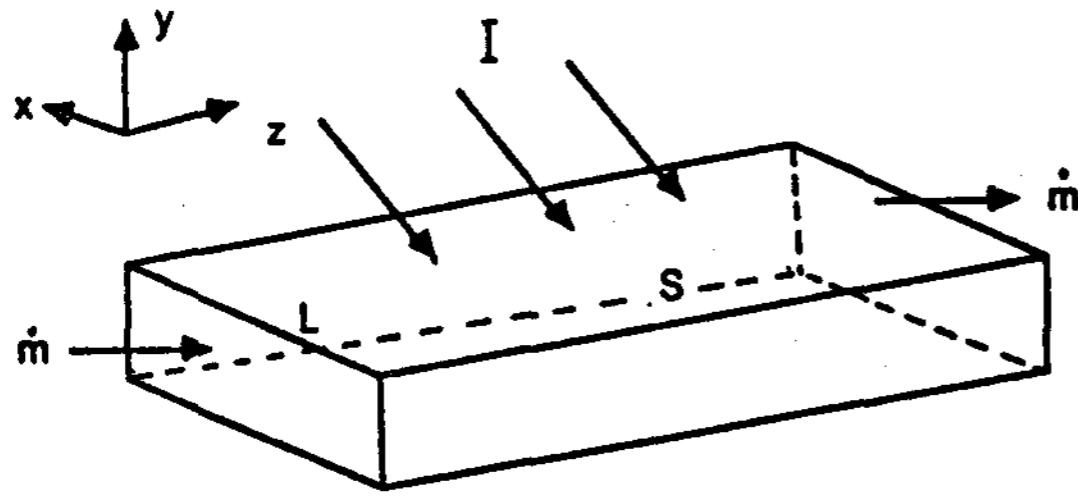


Fig. 3 Diagram of solar collector

$$\frac{d}{dt} \int_z^{z+\Delta z} [\rho h L \Delta y dz + \rho v h L \Delta y]_z^{z+\Delta z} + q L \Delta y]_z^{z+\Delta z} - I \Delta Z L + U_L L (T - T_a) \Delta Z = \int_z^{z+\Delta z} \phi L \Delta y dz \quad (2)$$

여기서 기본 방정식 (2)에 앞에서 소개한 가정들을 도입하고 시스템 내에서의 반응들에 의한 열의 발생이나 소멸이 없으므로 generation 항은 없어지게 된다. 따라서 mean value theorem of integral calculus와 differential calculus를 적용하고 다음의 식 (3)으로 표시되는 경계 조건을 이용하여 최종 해를 구한다.

$$Z = 0 ; T = T_i \quad (3)$$

결국 최종적으로 집열판 내의 온도 해는,

$$T - T_a - \frac{I}{U_L} = [T_i - T_a - \frac{I}{U_L}] \exp[-\frac{U_L L}{\dot{m} C_p} Z] \quad (4)$$

가 된다. 여기서 식 (2)부터 (4)까지에서 이용된 문자들은,

- t : 시간, sec
- ρ : 공기의 비중, kg/m^3
- v : 공기의 유속, m/s
- h : 공기의 엔탈피, cal/kg
- q : 열전도에 의한 열전달량, W/m^2
- I : 일사량, W/m^2
- T_a : 대기온도, K
- T_i : 집열판 입구 온도, K

ϕ : 단위 부피당 generation된 열량, W/m^3

U_L : 열전달 계수, $W/m^2 \cdot K$

C_p : 공기의 비열, $W/kg \cdot C$

식 (4)로부터 집열판 내부를 통과하는 공기의 온도는 일사량 및 공기 유속과 밀접한 상관 관계가 있음을 알 수 있다. 여기서 U_L 은 측정에 의해 구할 수 있지만, 본 연구에서는 Tsao와 Wheelock⁷⁾이 제시한 다음 식을 사용하였다.

$$U_L = 0.071 G^{0.8} \quad (5)$$

여기서 U_L 은 열전달 계수로 단위는 $cal/m^2 \cdot hr \cdot C$, 그리고 G 는 공기의 유량을 표시하며 단위는 $kg/m^2 \cdot hr$ 이다. 그러므로 식 (4)로부터 집열판을 통과한 후 건조실로 유입되는 공기의 온도를 예측할 수 있다.

따라서 공기온도와 함께 두번째 소시스템인 건조실 내부에서의 온도 변화는 다음의 Fig. 4를 바탕으로 이론을 전개할 수 있다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 건조실 내부에는 건조물을 충전할 수 있도록 두개의 철망 선반이 부착되어 있다. 그러므로 이론식의 전개도 각 선반

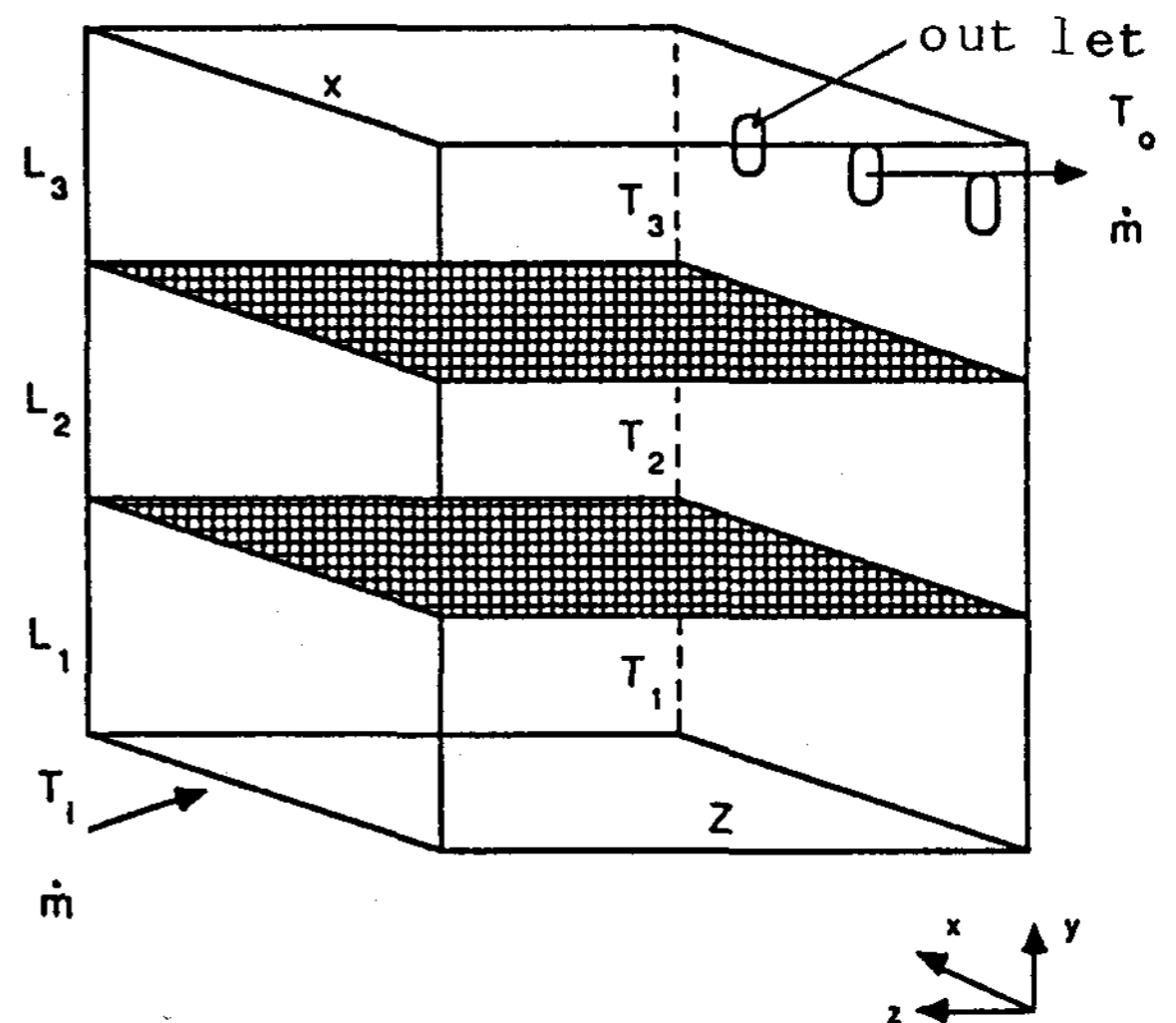


Fig. 4 Diagram of solar drying chamber

을 기준으로 구역을 설정하여 각 구역별로 열성 분석을 행하였다. Fig. 4에서 건조실의 윗면과 앞면(남향)은 태양광이 통과할 수 있도록 투명 유리인 반면에 나머지 면들은 단열 처리되었다. 건조실 내부는 구조상 세 방향에 온도 구배가 존재하지만 현 단계에서는 이론 해석의 간편성을 위해 다음의 가정들을 도입하였다.

- ① y 방향 한 방향으로만 온도 구배가 있고,
- ② 각 구역내에서는 온도가 균일하고,
- ③ 단열면의 완전 단열을 가정하였다.

또한 건조실의 상부 유리면을 통과한 일사량은 선반별로 철망의 두께를 고려한 유효면적과 함께 다루었으며, 남향으로 설치된 수직 유리면을 통한 일사량은 실제로 측정된 값을 수평면 일사량에 대한 분율을 구하여 이론해석에 사용하였다. 그 일사 분율을 R 이라 하고, 상부 유리면적에 대한 망의 유효공간 면적의 비율을 ϵ 으로 표시하여 각 구역별 에너지 방식을 유도하면 다음의 식들로 표시된다. Fig. 4의 건조실 하단으로부터 구역 1, 2, 3으로 간주하여 우선 건조 시료가 없는 상태를 기준으로 하면,

구역 1 ;

$$RA_{c1}I + IA_s(\epsilon)^2 = \dot{m}C_p(T_1 - T_i) + A_{c1}U_L(T_1 - T_a) \quad (6)$$

구역 2 ;

$$RA_{c2}I + \epsilon A_s I = \dot{m}C_p(T_2 - T_1) + A_{c2}U_L(T_2 - T_a) \quad (7)$$

구역 3 ;

$$RA_{c3}I + A_s I = \dot{m}C_p(T_3 - T_2) + A_{c2}U_L(T_3 - T_a) + A_s U_L(T_3 - T_a) \quad (8)$$

앞의 식 (6), (7) 그리고 (8)로부터 각 구역의 온도 T_1, T_2, T_3 를 구할 수 있다. 그리고 식들을 m 개의 구역으로 구성된 건조실에 대하여 일반식으로 나타내면, 식 (9)와 같이 된다.

$$RA_{cn}I + IA_s(\epsilon)^{m-n} = \dot{m}C_p(T_n - T_{n-1}) + A_{cn}U_L(T_n - T_a) \quad (9)$$

여기서 n 은 1부터 $m-1$ 까지 변화하고 m 번째 구역에 대해서는 식 (10)으로 표시된다.

$$RA_{cm}I + A_s I = \dot{m}C_p(T_m - T_{m-1}) + A_{cm}U_L(T_m - T_a) + A_s U_L(T_m - T_a) \quad (10)$$

앞의 식 (6)부터 (10)까지에서 A_{ci} ($i=1, 2, \dots$)는 각 구역의 남향쪽 유리면적을 나타내며, A_s 는 건조기 상부의 집광 유리면적을 표시한다. 전개된 식들로부터 건조실 내부의 온도와 상관 관계를 갖는 인자를 유추할 수 있으며 적정 건조온도를 얻기 위한 조정 변수를 결정할 수 있다.

지금까지의 이론식 전개를 바탕으로 건조실내에 건조물을 충전시킨 후의 열성분석은 시료로부터 공기중으로 증발될 때 수분의 증발 잠열을 포함시켜 유도하였다. 즉, $m-1$ 번째 그리고 m 번째의 구역에 대한 열 방정식을 다시 쓰면,

$$RA_{cn}I + IA_s(\epsilon)^{m-n} = \dot{m}C_p(T_n - T_{n-1}) + A_{cn}U_L(T_n - T_a) + h_{fg}(M_n(t_1) - M_n(t_2)) \quad (11)$$

$$RA_{cm}I + IA_s = \dot{m}C_p(T_m - T_{m-1}) + A_{cm}U_L(T_m - T_a) + A_s U_L(T_m - T_a) + h_{fg}(M_m(t_1) - M_m(t_2)) \quad (12)$$

이 된다. h_{fg} 는 물의 증발 잠열 (J/kg)을 표시하고, $M_i(t_j)$ 는 i 번째 구역에서 시간 t_j 때 시료의 수분 함량을 나타낸다.

3. 실험 및 결과분석

3.1 실험 및 결과분석

고추를 건조하기 전에 집열판과 건조실의 열적 상태를 측정하여 이론식의 타당성을 평가하였으며, 이에 유입된 공기의 속도는 $0.85 m/s$ 이었다.

고추의 건조실험을 수행하기 위하여 우선 고

추를 전체 시료중에서 임의 추출하여 초기 함수율을 측정하였다. 이의 측정은 Ohaus Scale 회사의 OHAUS Moisture Determination Balance(Model 6100)을 사용하였다.

이 실험을 통하여 측정된 시료의 평균 함수율은 약 80% (w.b.)였다. 건조실에 투입된 고추의 전체 초기 중량은 47.3 kg이었고, 건조실 내의 두번째 선반위에 고르게 펼쳐 놓은 후, 이 시료의 층을 통과하기 전의 공기온도, 통과후의 공기 온도를 측정하였으며, 건조실 내부의 건구 및 습구 온도를 측정하였다. 매 2시간 마다의 무게변화를 측정하기 위하여 좌측, 중간, 우측의 세 위치에서 고정된 시료를 채취하고 무게를 측정하고 기록하였다. 집열판을 통과하는 공기의 온도 역시 위치별로 측정하였다. Fig.5와 같이 각 지점에 열전대를 설치하여, 매 2시간마다 Fluke Data Logger를 사용하여 온도를 측정하였다. Fig.5에서 보는 바와 같이 1번부터 6번까지는 집열판 내부, 7번부터는 건조실 내부에 위치한 열전대를 설치하였다. 16번은 건조실을 빠져나가는 공기의 온도를 측정하기 위하여 배출구에 설치하였다. 일사량은 매 2시간마다 측정하였고, 건조실내의 습도를 측정하기 위하여 건습구 온도계와 습도계를 설치하였다.

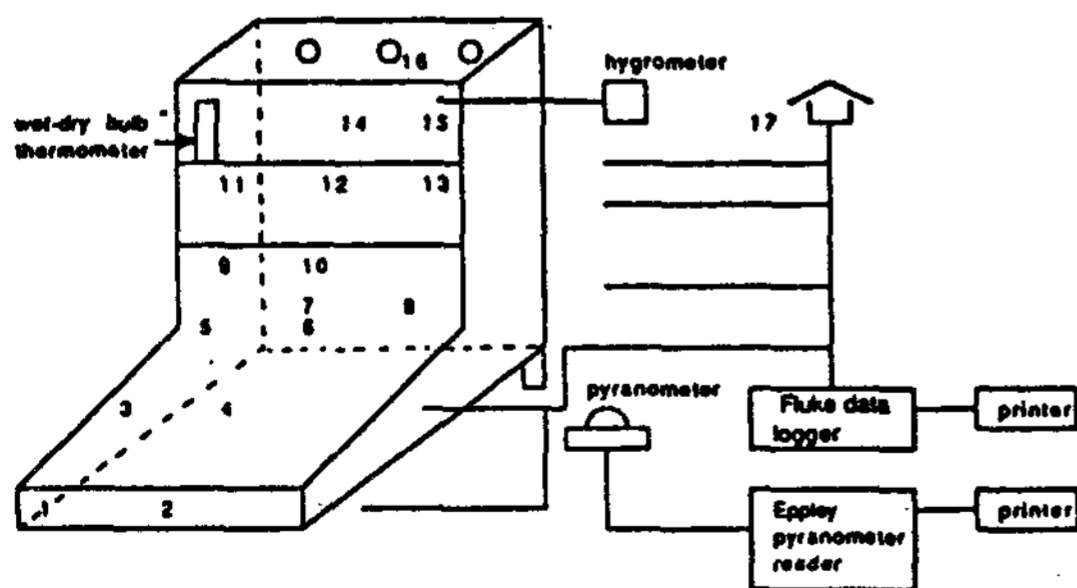


Fig. 5 Schematic diagram of solar dryer and data collection system

각 열전대의 간격 및 집열판, 건조실의 크기는 Table 1에 나타냈으며, 이 Table에 사용

된 기호는 Fig.3과 4에 표시된 문자들이다. 건조실에서 건조효과를 대기중의 자연건조와 비교하기 위하여 고추시료를 같은 기간동안 대기중에서 건조시켜 동일한 시간간격으로 고정 시료의 무게변화를 측정하였다.

Table 1 Dimension of Solar Dryer

Classification		Distance	Remarks	
L		2.48 m	Upper glass surface area; X·Z=3.03m ²	
L ₁	Compartment 1	0.11		
L ₂	Compartment 2	0.4		
L ₃	Compartment 3	0.4	Vertical glass surface area: (L ₁ +L ₂ +L ₃)·X = 2.26m ²	
X		2.48		
Z		1.22		
S	S ₁	T/C (1) & (2)	Entrance	
	S ₂	T/C (3) & (4)		1.42 m
	S ₃	T/C (5) & (6)		1.42 m

3.2 실험결과 및 분석

3.2.1 온도

먼저 고추를 넣지 않은 상태에서 공기유속을 0.85 m/s로 하여 앞의 이론식들로부터 계산한 온도와 실제 측정한 온도를 비교하였다. 실험을 수행한 날 중에서 9월 15일 13시와 동일 15시에 측정한 온도와 이론치를 Table 2에 수록하였으며, 각 시간에서의 기상조건과 공기의 물성치를 Table 3에 수록하였다. 이론식에서 사용된 R값과 ε값은 각각 0.7과 0.65였다. Table 3에서 집열판이나 건조실에서 측정 온도가 계산치 보다 다소 높은 것은 내부의 흑체로부터의 복사열의 영향이 있는 것으로 판단되고, 실제로는 U_L이 공기온도의 영향을 받는 것으로 사료된다. 이러한 효과들은 일사량이 높은

Table 2 Comparison between measured and predicted temperatures at different location.

		Sept. 15, 1 pm		Sept. 15, 3 pm	
		Measured, °C	Predicted, °C	Measured, °C	Predicted, °C
Collector	Entrance	25.1	25.1	25.8	25.8
	1.42 m	33.5	30.9	35.2	34.4
	2.84 m	36.3	34.7	38.5	36.5
Drying Chamber	Comp. 1	38.8	37.3	41.1	39.2
	Comp. 2	40.1	40.8	43.8	43.1
	Comp. 3		40.7		43

Table 3 Meteorological data and physical properties of air

	Sept. 15, 1pm	Sept. 15, 3pm
I, W/m ²	261	286
T _a , K	297.7	298.6
ρ, kg/m ³	1,295	1,295
C _p , J/kg K	995.13	995.13
U _L , W/m ² K	15.46	15.46

15시의 경우에 더욱 나타나고 있다. 그러나 지금까지의 열성분석으로부터 유도한 이론식을 이용하여 구한 온도들은 측정된 온도들과 비교적 일치하고 있으므로 건조물의 물성, 지역에 따른 기상조건에 대하여 적정 건조온도를 얻을 수 있는 집열판과 건조실을 설계할 수 있고, 공기의 유속을 결정할 수 있다. 참고적으로 Fig. 6에 9월 15일에 측정된 시간별 온도변화를 표시하였고, 오후 2시에 건조실의 온도가 70°C에 다름을 보아 집열효과가 좋은 것으로 판단된다.

3.2.2 고추 건조 실험

이미 앞에서 설명한 바와 같이 평균 초기 함수율이 80%인 고추 47.3 kg을 건조실에 투입시켜 건조실험을 행하였으며, 공기의 유입속도는 0.75 m/s로 조정하였다. 건조기의 건조효과를 자연 건조와 비교하기 위하여 고추 30.7 kg을 대기중에서 건조시켰다. 본 실험에서는 시

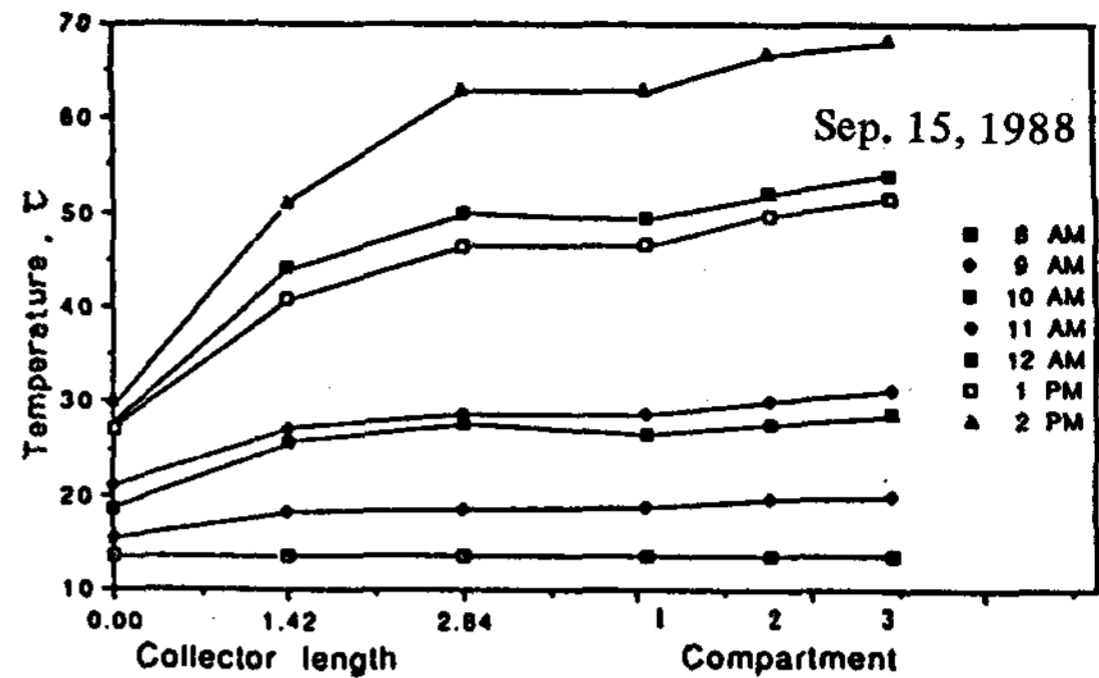


Fig. 6 Measured temperatures in dryer

간 t_1 과 t_2 에서 측정된 무게의 차를 이 시간 동안 증발된 수분량으로 보고 건조실 내에서의 온도변화를 추정하였으며 함수율을 계산하였다.

9월 23일부터 실시한 총 건조시간동안의 함수율을 Fig. 7에 나타냈으며, 고추 전체의 건조에 소요된 시간별 열량을 계산할 때는 이 함수율을 사용한다. Fig. 7에서 자연건조에 의한 함수율과 비교하여 보면 실험이 수행된 같은 기간동안 건조기를 사용하는 것이 자연 건조보다 건조 속도가 빠르고, 거의 완전 건조가 이루어지며 더 좋은 품질의 생산품을 얻을 수 있음을 알 수 있다. Table 4에는 실험을 수행하는 동안 제반 측정치들을 날짜와 시간별로 수록하였다.

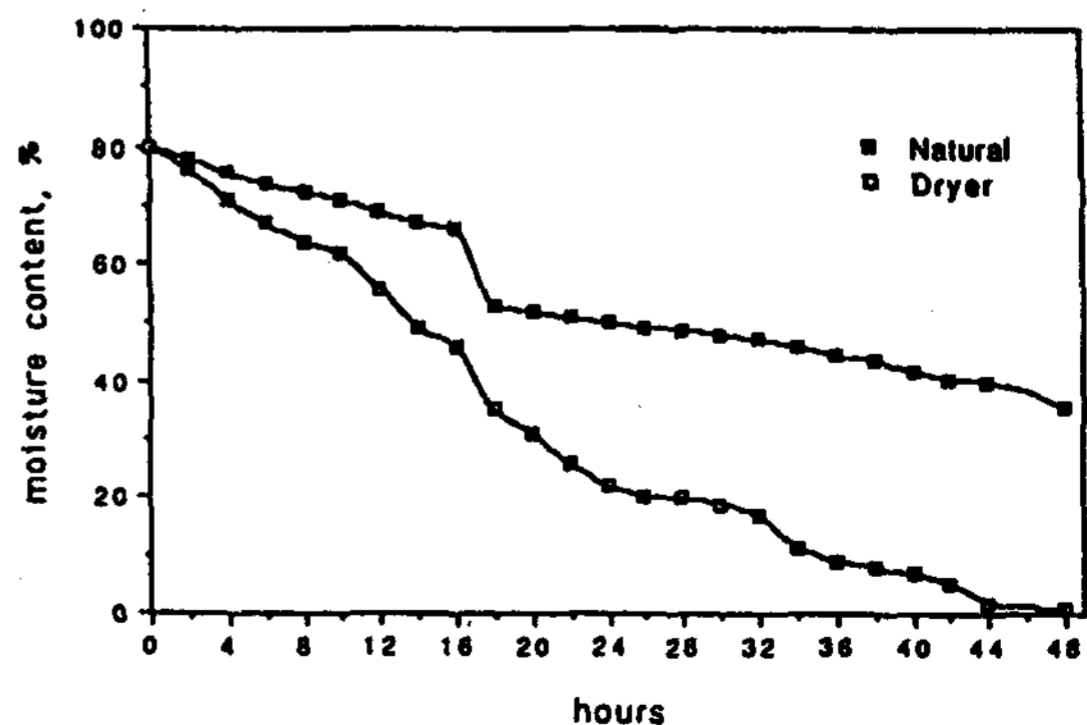


Fig. 7 Comparison of moisture content between solar utilization drying and natural drying

Table 4 Experimental data of red pepper drying in dryer and air

Date	Initial Weight	Drying % (w.b)				Dry bulb temp. (°C)	Wet bulb temp. (°C)
		Left	Center	Right	In air		
		402.9g	239.8g	542.3g	213.7g		
9/23	11:30	-	-	-	-		
	13:30	3.4	4.1	3.1	2.2		
	15:30	8.1	9.4	7.8	4.5	53.6	38
	17:00	11.7	13.2	11.3	6.3	42	30
9/24	9:00	14.2	15.7	13.7	7.5	32	26.5
	11:00	15.9	17.50	15.2	8.8	50	35
	13:00	20.7	23.6	19.9	11.2	61.3	41.5
	15:00	27.4	31.1	26.1	12.8	54.8	37
	17:00	30.7	34.3	28.9	14.2	43.8	29.5
9/27	10:00	42.8	44.9	38.6	27.0	37	25
	12:00	46.1	48.8	41.6	28.2	54.8	36
	14:00	50.9	54.3	46.3	28.8	55.5	37
	16:00	54.6	58.2	49.8	30.0	48.5	31.5
	17:00	55.7	58.9	50.9	30.4	35	24
9/28	9:30	56.6	59.8	51.9	30.8	39	27
	11:00	58.3	61.2	53.5	32.1	52.7	34.5
	12:00	60.6	63.4	55.5	32.6	56.5	39.5
	14:00	65.7	68.4	59.1	33.9	61.2	38.5
	15:00	69.0	70.9	63.6	35.5	54.3	33.5
	17:30	71.3	72.1	65.5	36.4	40	28
9/29	10:00	71.7	72.70	66.9	38.1	44	30
	12:00	74.2	75.0	69.8	39.5	59.1	40
	14:00	77.3	77.6	73.9	40.0	65.1	38
	16:00	79.7	79.1	77.5	44.7	50	31

Fig.8은 고추건조 실험시 측정된 온도들과 식으로부터 구한 이론치를 비교하였는데 큰 오차없이 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러므로 앞에서 전개된 이론식들은 본 실험에서 사용한 집열판과 건조실의 열적 현상을 타당성있게 해석하고 있다고 사료된다.

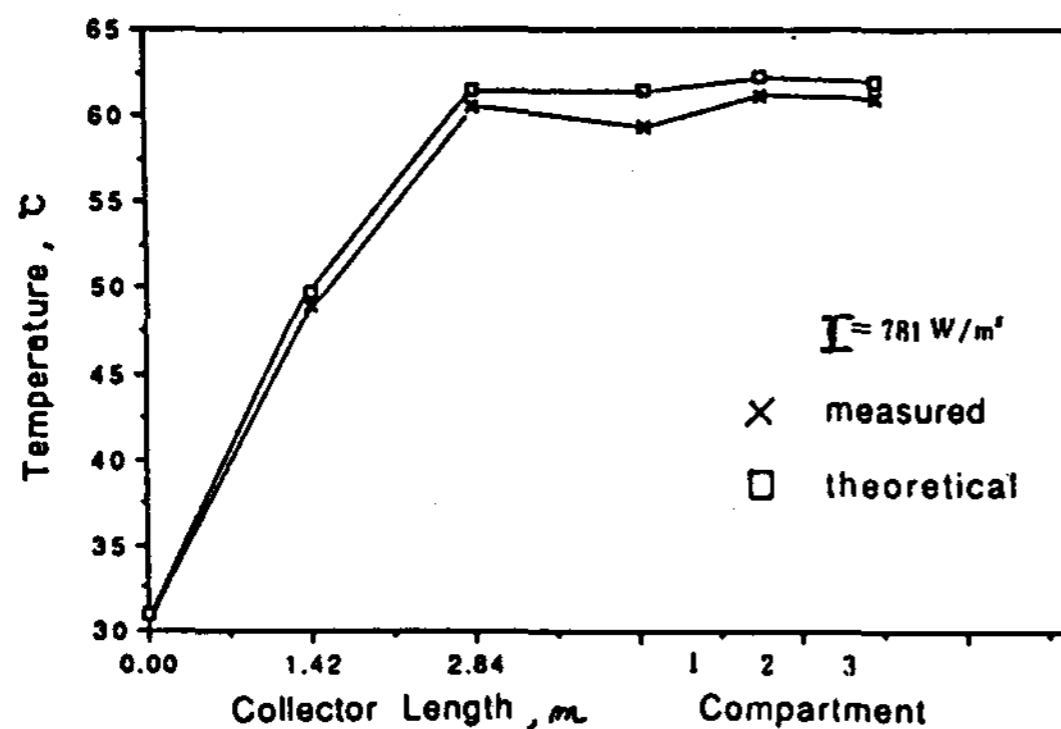


Fig. 8 Comparison of temperature in dryer between measured and theoretical

Fig.9는 건조실험이 수행된 날 중에서 실제로 측정된 값들을 표시한 것이고, Fig.10은 건조 시료층을 통과하기 전, 그리고 통과 직후

의 공기온도를 나타내고 있다.

본 건조기 실험을 통하여 일사량이 유효한 낮 시간동안 건조를 실시할 경우 건조시간이 다소 길어지는 단점은 있지만 양질의 최종 생산품을 얻을 수 있었고, 거의 완전 건조를 달성할 수 있었다. 건조시간을 단축하거나 지속되는 악천 후에 대비하기 위하여는 보조 열원을 부착하여 사용할 수 있다. 보조 열원의 용량 및 작동시간의 결정은 앞의 이론식들과 대상물의 초기 함수율 등 물성치를 조사하여 이룰 수 있다.

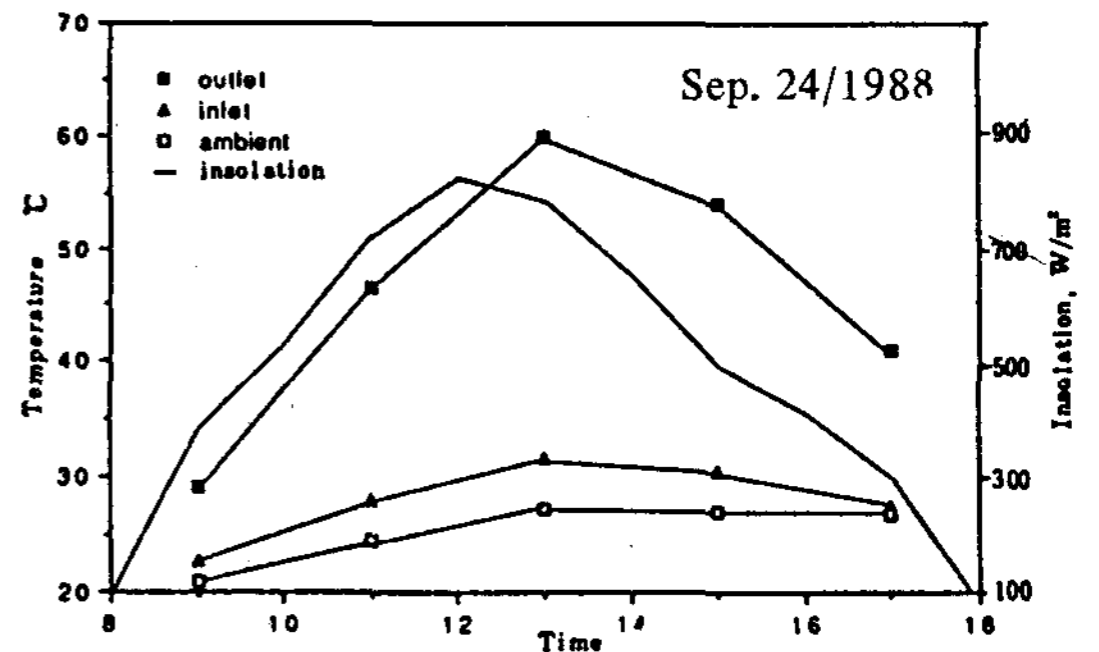


Fig. 9 Measured temperatures and insolation during drying experiments

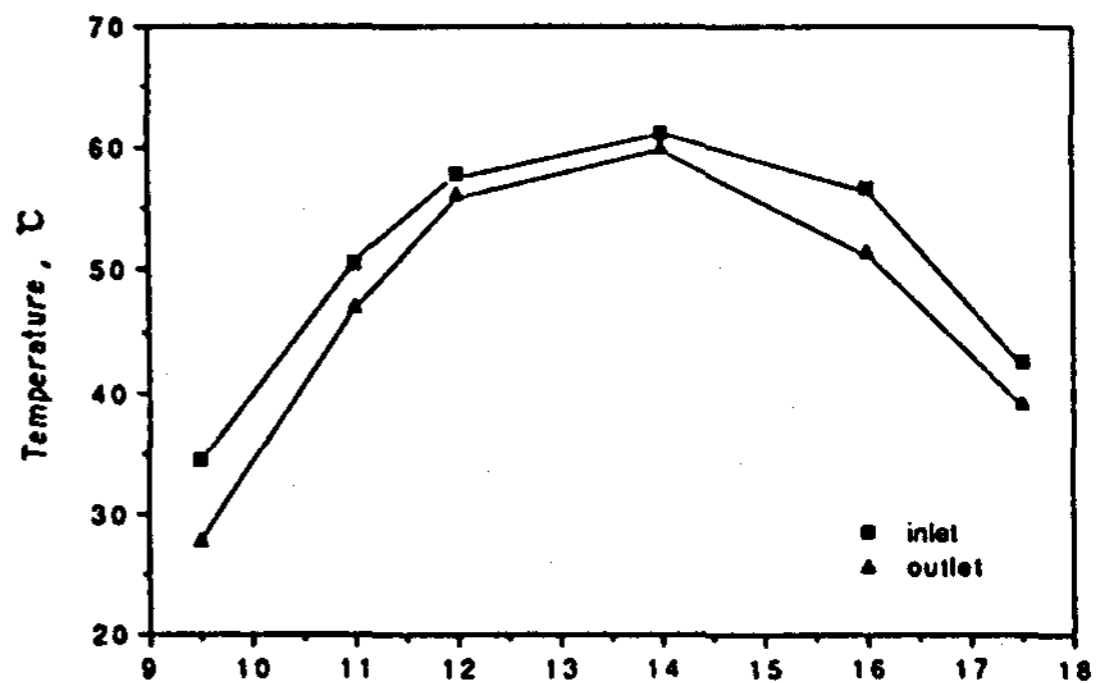


Fig. 10 Measured air temperatures before and after redpepper bed

4. 결론 및 고찰

본 연구에 사용된 형태의 태양열 건조기의 열적 성능을 해석하기 위하여 유도된 이론식들의 타당성은 Table 2와 Fig.8에 잘 나타나고 있

다. 초기 함수율이 약 80%인 고추 건조 실험에 있어서 건조기 내로 유입되는 공기의 유속을 약 0.75 m/s 로 하고, 9월 23일부터 약 48시간 동안 태양열로 건조시켜 우수한 질의 건조 고추를 얻을 수 있었다. 또한 같은 기간 동안의 대기 중에서 자연건조 실험과 비교하여 약 30~40%가량 더 건조시킬 수 있었다. 그러나 본 연구를 바탕으로 건조기의 성능 및 열적 상태를 보다 정확하게 분석하기 위해서는 본 연구에서 유도된 이론식들과 함께 실험을 통한 공기 유속과 상대 습도의 영향을 조사할 필요가 있다. 그리고 건조 대상물에 따라 초기 함수율과 건조 적정 조건이 다르므로 건조기의 설계가 달라지고, 운전 조건이 달라지므로 보다 풍부하고 정확한 연구가 필요하다. 건조실 내부의 온도 및 습도의 변화는 공기 유속과 일사량과 밀접한 관계를 가지기 때문에 건조기의 효율을 높이기 위해서는 최적의 일사량을 최대로 집열하여야 하고 적정 공기 유속이 결정되어야 한다. 그러나 집열 면적을 무조건 크게 제작하면 오히려 건조기 효율은 떨어지고 경제성이 감소하며 유지관리가 어려워지는 단점이 있다. 따라서 건조대상물에 따른 최적 건조조건을 만족하도록 집열 면적을 결정하여야 한다.

건조기의 해석 및 설계를 위해 유도된 이론식들은 본 연구를 통해 그 타당성이 밝혀졌고, 실제 제작된 본 건조기를 이용한 고추건조의 기술적 타당성이 밝혀졌으므로 앞으로 보다 개선된 건조기의 설계를 위해 다음과 같은 사항을 보완하고, 건조실을 빠져나가는 고온의 공기를 재순환시켜 이용하는 방법도 고려하여야 한다.

- (1) 단열의 철저화
- (2) 유리를 대체할 수 있는 저가의 내구성이 좋고 투과율이 높은 재료 선택

(3) 건조대상물의 건조속도 조사

앞으로 경제성 분석과 최적화 연구를 통하여 저가이고 고효율의 다대상물 태양열 건조기를 개발하여 농·수산가에 보급하는 연구가 있어야 할 것이다.

REFERENCE

1. Converse, H.H., G.H. Foster and D.B. Sauer, Low temperature grain drying with solar heat, ASAE paper No. 76-3018 (1977).
2. Donald, J., C.B. Ogburn, J. Thompson and D. Laird, Field demonstration and economic feasibility of the use of solar drying techniques for drying soybeans in Alabama, ASAE Southeast-Southwest Region paper (1978).
3. McLendon, B.D. and J.M. Allison, Solar energy utilization in alternate grain drying systems in the Southeast, ASAE paper No. 78-3013 (1978).
4. Morrison, D.W., Bare plate solar collector grain drying bin, ASAE paper No. 75-3513 (1975).
5. 이남호 외, 한국동력자원연구소 보고서, KE-87-28(1987).
6. 최영희 외, 한국동력자원연구소 보고서, KE-88-9(1988).
7. Perry, R.H., C.H. Chilton, Chemical Engineers' Handbook, 5th ed., McGraw-Hill, Inc., NY (1973).
8. Bird, R.B., W.E. Stewart and E.N. Lightfoot, Transport Phenomena, John Wiley & Sons, Inc., NY (1960).