[논문] 태양에너지
Solar Energy
Vol. 11, No. 3, 1991

태양열 건조 시스템에 관한 실험적 연구(Ⅰ)
—무우절편의 태양열 건조 특성—

고 학 균 · 김 용 현* · 송 대 빈** · 김 만 수***

서울대학교 농공학과
서울대학교 농업개발연구소*
서울대학교 대학원 농공학과**
충남대학교 농업기계공학과***

Experimental Studies for Solar Drying System of Agricultural Products(Ⅰ)
—Solar drying characteristics for radish—

Koh, Hak-Kyun · Kim, Yong-Hyeon* · Song, Dae-Bin · Kim, Man-Soo*****

Dept. of Agricultural Engineering, Seoul National Univ.
Institute of Agricultural Science & Development, Seoul National Univ.*
Dept. of Agricultural Engineering, Seoul National Univ. Graduate**
Dept. of Agric. Machinery Engineering, Chungnam National Univ.***

요 약

무우절편의 태양열건조 및 천일건조 실험을 수행하여 건조 특성 및 품질 변화 특성을 비교하여 분석하였다. 무우절편의 태양열 건조 시스템은 공기가열식 태양열 집열기와 터널 건조실로 구성된다. 태양열 집열기의 구성 요소에 에너지 평형식을 적용하여 일사량과 송풍량의 변화에 따른 집열기의 집열성능을 분석할 수 있는 시뮬레이션 모형을 개발하였다.

ABSTRACT

Experiments for drying radish were carried out to analyze the drying characteristics and quality evaluation between solar heated-air drying and natural air drying system. Solar heated-air drying system consists of a small fan, a solar air heater and a tunnel dryer.

Simulation model for thermal environments of solar collector was developed to investigate the effect of solar radiation and airflow rate on thermal performance.

Nomenclature

A : collection area(m^2)
C : specific heat(KJ/kg ℃)
d : thickness(m)
D : root mean square of deviation(W/m^2)
F : view factor
G : mass flow rate(kg/hr)
h : convective heat transfer coefficient(W/m^2K)
H : drying time(hr)
I : solar radiation(W/m^2)
Io : solar constant(W/m^2)
k : thermal conductivity(W/m^2K)
L : length(m)
m : air mass
N : number of data
Nu : Nusselt number
P : atmospheric transmissivity
Pr : Prandtl number
Q : collected heat(W/m^2)
QC: convective heat transfer(W/m^2)
QH: conduction heat loss(W/m^2)
QL: longwave radiation(W/m^2)
QS: absorbed radiation(W/m^2)
R : density(kg/m^3)
Re : Reynolds number
t : time(hr)
T : temperature(K)
U : heat loss coefficient(W/m^2 K)
V : air velocity(m/s)
$\dot{V}$: airflow rate(m^3/s)
W : width of collector(m)
x : distance of collector(m)
Z : thickness(m)

Greek symbols

α : absorptivity
ϵ : emissivity
η : thermal efficiency(decimal)
ρ : reflectivity
τ : transmissivity
Δ : temperature difference(℃)

Superscript

m : air mass

Subscript

a : inner air
c : collection or cover
i : inner surface
m : measured
o : outer surface
p : plate or horizontal plane or predicted
s : sky
1 : black polyethylene film
2 : styrofoam
3 : plywood
∞ : atmosphere

1. 서 론

무우절편에 대한 기존의 건조 방법으로는 농가 단위에서 소규모의 멍석 또는 비닐 제품을 이용한 천일건조가 주를 이루어 왔다. 천일건조는 건조 과정동안 화석연료를 사용하지 않는 유리한 점을 지니고 있으나 건조기간이 길기 때문에 많은 노동력이 요구되며 피건조물의 품질 변화가 수반된다. 또한 천일건조의 경우 강우현상과 먼지에 의한 오염, 쥐, 새, 곤충 및 미생물에 의한 영향으로 피건조물의 품질이 심각하게 저하되는 것으로 나타났다.

이제까지 개발된 태양열 건조 시스템은 가열과 환기수단에 의해 분류하면 자연대류형 건조기에 해당된다. 이러한 건조기는 단지 태양열과 바람을 에너지원으로 사용하고 있다. 자연대류형 건조기에서는 건조 매체인 공기의 순환이 단지 밀도차에 의한 부력에 의해서 이루어지기 때문에 건조실로 유입되는 공기의 압력손실이 클 경우 피건조물이 부패되기도 한다. 그러므로 자연대류형 태양열 건조기에서 나타나는 상기의 문제점을 극복하려면 무우절편을 건조실 내부에 얇게 깔아 송풍저항을 줄이고 가열된 공기가 무우절편 위를 통과하며 건조시키는 건조기의 개발이 효과적일 것으로 사료된다. 더구나, 이러한 건조기는 집열기와 건조실

이 일체로된 건조 시스템으로서 건조실의 피건조물이 송풍기에 의해 강제로 공급되는 공기에 의한 대류건조와 피건조물 자체가 흡수하는 태양열 복사건조가 동시에 이루어져 건조 효율을 향상시킬 것으로 기대된다.

한편, 건조 기간을 단축시키고 소요 노동력을 줄이기 위하여 사용되고 있는 인공건조의 경우 고정투자비 및 건조 비용의 과다와 가동율의 저하에 따른 비경제성이 문제점으로 등장하고 있다. 더구나, 고온고속에 의한 인공건조는 무우절편의 단백질 변성, 지방의 산화, 아스코르빈산(Ascorbic acid), 카로틴 함량등의 질적 또는 양적 변화를 초래하고 있다.

농산물의 건조 과정에 태양열을 효율적으로 이용하고자 시도된 본 연구는 무우절편의 태양열 건조 시스템을 개발하여 건조 특성을 검토하고, 집열성능을 분석하고자 집열기 구성 요소에 대한 시뮬레이션 모형의 개발 및 타당성을 검증하며, 무우절편의 품질 변화를 평가하는 데 그 목적이 있다.

2. 태양열 집열기 집열성능의 시뮬레이션 모형

2.1 태양열 건조 시스템의 구성

태양열 건조 시스템의 구성 요소는 송풍기, 공기가열식 집열기 및 무우절편이 얇게 깔려있는 터널 건조실로 이루어진다. 무우절편의 건조는 공기가열식 집열기에 의해서 흡수된 에너지와 피건조물 자체가 흡수한 복사에너지에 의해서 이루어진다.

공기가열식 집열기와 건조실의 크기는 폭과 길이가 각각 0.91m, 7.28m이다. 집열기의 덮개로는 두께 0.1㎜의 투명 폴리에틸렌 필름을 사용하였고, 집열판은 두께 12㎜의 합판과 그 위에 설치된 두께 0.05㎜의 흑색 폴리에틸렌 필름으로 이루어졌다. 한편, 집열판의 하부에는 단열재로서 두께 30㎜의 styrofoam을 설치하였다. 건조실의 덮개 및 하부에 사용된 재료와 크기는 집열기에 사용된 경우와 동일하며 건조실 하부에 설치된 철망위에 무우절편이 위치한다. Fig.1과 2는 태양열 건조 시스템의 개략도 및 태양열 집열기의 단면도를 나타낸 것이다.

태양열 건조 시스템에 사용된 송풍기는 sirrocco fan으로 1735rpm에서 18m³/min의 풍량을 낼 수 있는 것으로 ½HP의 단상전동기가 연결되었다. 송풍기에 의해서 집열기 내로 공급되어 가열된 공기는 180° 회전하여 터널 건조실로 유입된다. 집열기와 건조실이 연결된 부위에 설

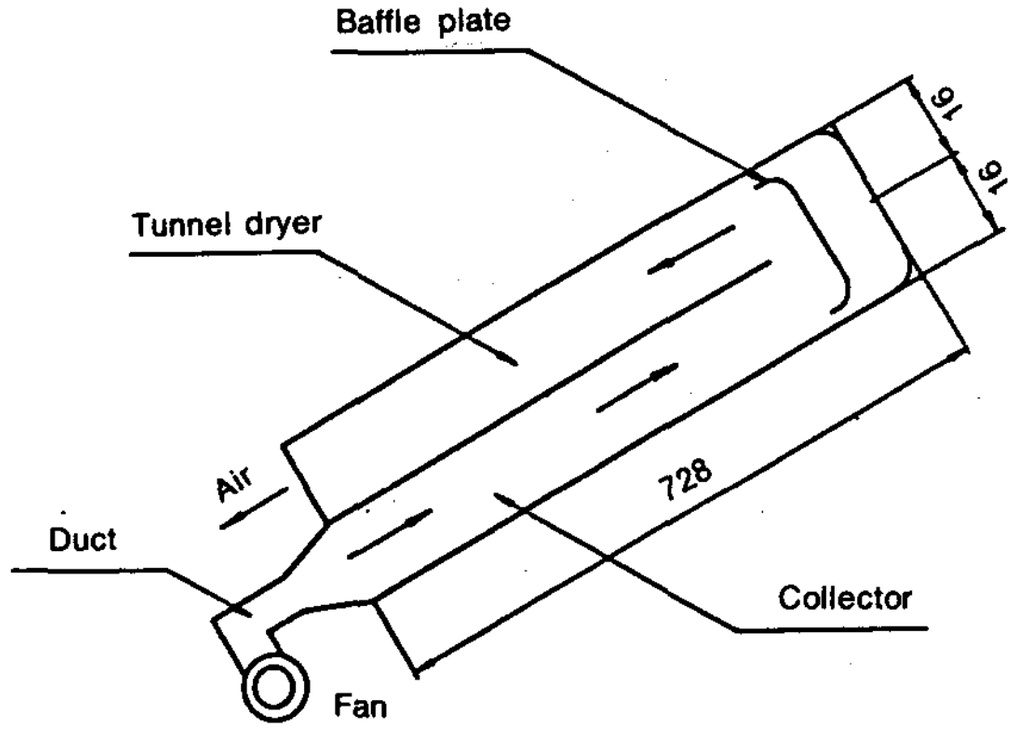

Fig. 1 Schematic diagram for solar heated-air drying system of radish (unit : cm).

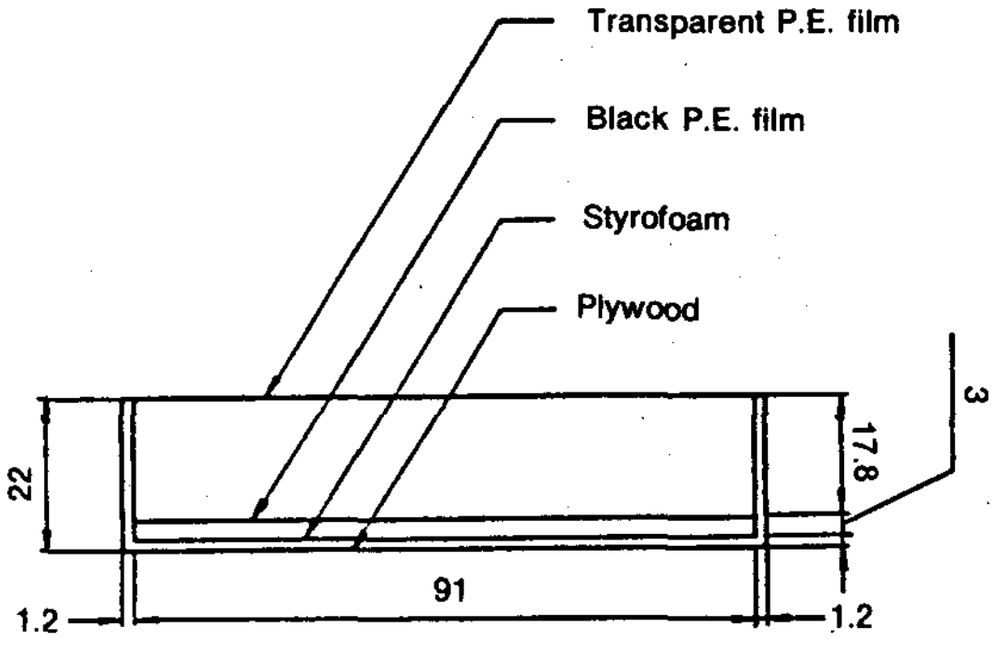

Fig. 2 Cross-section of the solar collector for drying of radish(unit : cm)

치되어 있는 baffle plates는 건조실 내부로 송풍량을 균일하게 공급시켜주는 역할을 수행한다.

2.2 집열기 열수지식의 구성

집열기의 집열성능을 분석하려면 집열기 구성 요소에 에너지 평형식을 적용하여 열전달을 산정하여야 한다. Fig.3은 집열기 구성 요소에 대한 열적 환경을 표시한 것이다. 집열기 구성 요소의 열전달은 크게 덮개를 투과한 태양광이

집열판에 흡수 및 저장되어 내부에너지로서 공기를 가열시키는 단파복사, 덮개와 집열판 사이를 무한 평판으로 가정할 경우 이들의 복사열교환에 의한 장파복사, 공기와 덮개, 공기와 집열판 사이의 대류열전달, 집열판 외부로의 열손실을 나타내는 전도열전달등으로 이루어진다. 집열기 구성 요소에 대한 에너지 평형식의 적용으로 유도되는 수식을 간단화하기 위하여 다음과 같은 가정을 설정한다.

① 덮개의 온도는 전표면에 걸쳐서 균일하기 때문에 열전도는 무시한다.
② 덮개와 집열판에 입사되는 태양광은 모두 나란하다.
③ 집열기 측면에서의 열손실은 무시한다.
④ 공기는 유동함에 따라 가열된다.
⑤ 장파복사에서 2차 반사 이하는 무시한다.

상기의 가정하에 집열기 구성 요소에 대하여 유도된 수식은 다음과 같다.

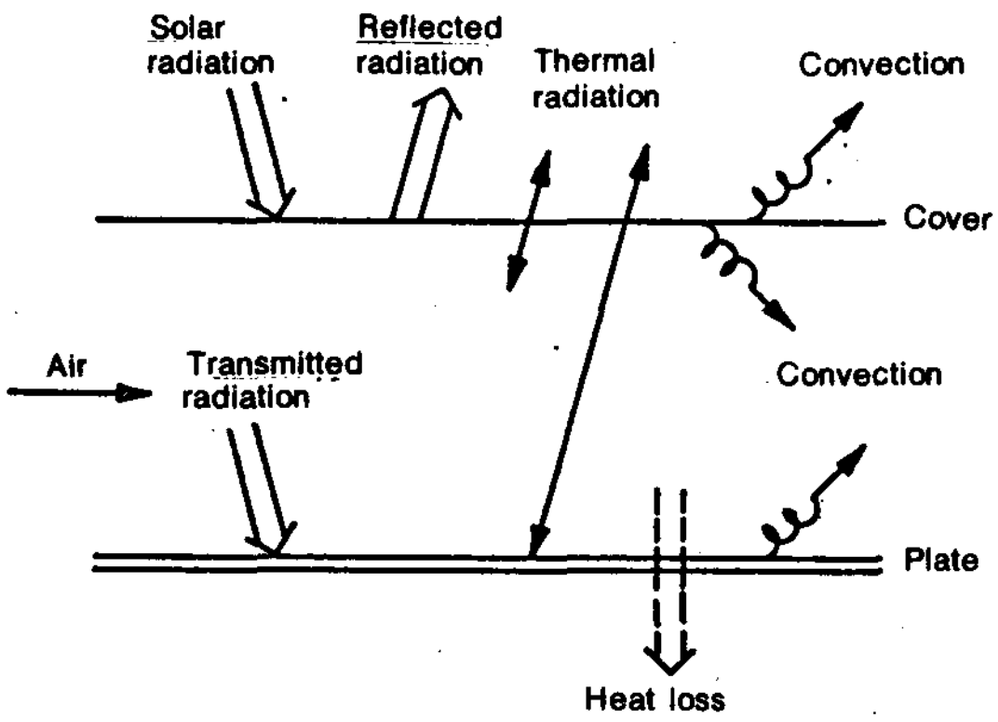

Fig. 3 Schematic diagram of thermal environment in solar collector

2.2.1 덮개의 열평형

Fig.4는 덮개에서의 열평형을 나타낸 것이며, 덮개에서의 열평형 방정식은 다음과 같다.

$$R_c C_c Z_c \frac{\partial T_c}{\partial t} = QS_{ca} + QL_{co} + QL_{ci} - QC_{co} - QC_{ci} \quad (1)$$

식(1)에서 좌측항은 덮개의 열량 변화를 나타내며, 우측항은 덮개의 흡수일사량, 덮개와 천공, 덮개와 집열판의 장파복사, 외부공기 및 내부공기의 대류열전달을 각각 표시한다.

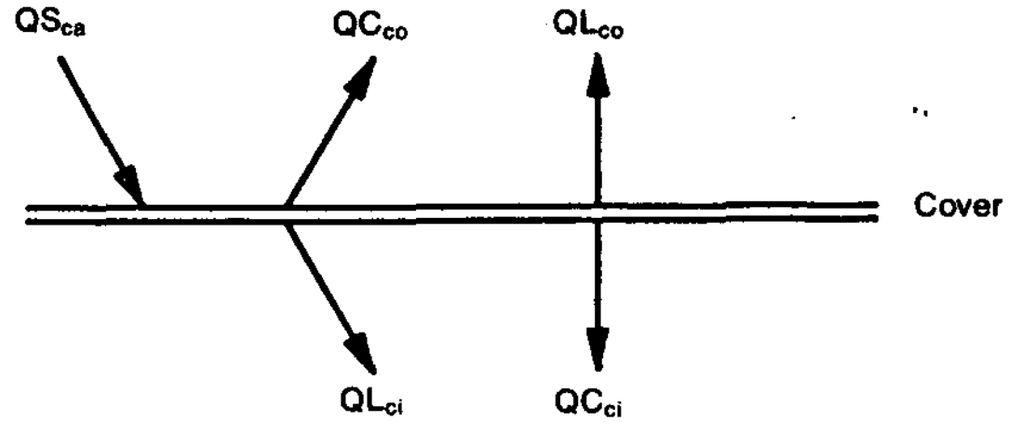

Fig. 4 Thermal balance for the cover

가. 덮개의 흡수일사량

$$QS_{ca} = (\alpha_c + \rho_p + \tau_c) I_p \quad (2)$$

나. 덮개와 천공의 장파복사

$$QL_{co} = \varepsilon_c \sigma F_{cs} (T_s^4 - T_c^4) \quad (3)$$

Swinbank[12]는 식(3)의 천공온도를 다음과 같은 식으로 표시하였다.

$$T_s = 0.0552\ T_\infty^{1.5} \quad (4)$$

다. 덮개와 집열판의 장파복사

$$QL_{ci} = \frac{\sigma F_{pc} (T_p^4 - T_c^4)}{1/\varepsilon_c + 1/\varepsilon_p - 1} \quad (5)$$

라. 덮개와 외기의 대류열전달

$$QC_{co} = h_{co} (T_c - T_\infty) \quad (6)$$

Duffie와 Beckman[7]은 덮개 표면의 대류열전달계수를 풍속에 관한 일차함수로 다음과 같이 정의하였다.

$$h_{co} = 5.67 + 3.8 V_\infty \quad (7)$$

마. 덮개와 내부공기의 대류열전달

$$QC_{ci} = h_{ci} (T_c - T_a) \quad (8)$$

덮개 내부 표면 위를 흘러가는 흡입 공기는 흡입 공기의 물성치로부터 $Re > 5 \times 10^5$되어 난류로 정의된다. 이 경우 유동공기의 Nusselt 수는 다음과 같이 표시된다.

$$Nu = \frac{hL}{k} = Pr^{1/3} (0.037\ Re^{0.5} - 850) \quad (9)$$

堀部和雄 등[4]은 식(9)의 물성치를 온도의 함수로 표시한 후 덮개 내부표면의 대류열전달계수를 내부공기의 풍속의 함수로서 다음과 같이 정의하였다.

$$h_{ci} = 4.14 V_a^{0.8} \quad (10)$$

2.2.2 집열판의 열평형

Fig.5는 집열판에서의 열평형을 나타낸 것으로서, 집열판에서의 열평형 방정식은 다음과 같다.

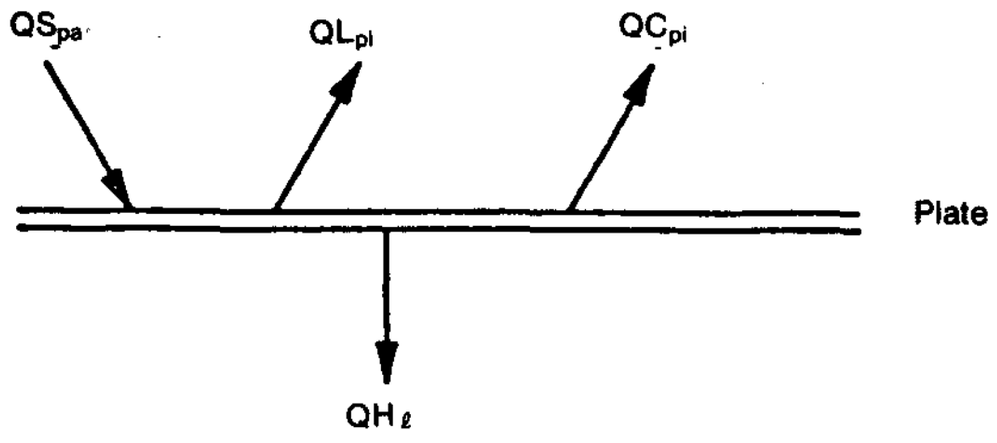

Fig. 5 Thermal balance for the plate

$$R_pC_pZ_p\frac{\partial T_p}{\partial t}=QS_{pa}+QL_{pi}-QC_{pi}-QH_\infty \quad (11)$$

식(11)에서 좌측항은 집열판의 열량 변화를 나타내며, 우측항은 집열판에 흡수된 일사량, 집열판과 덮개의 장파복사, 집열판과 내부공기의 대류열전달, 집열판 외부로의 열손실을 각각 의미한다.

가. 집열판의 흡수일사량

$$QS_{pa}=\alpha_p\tau_cI_p \quad (12)$$

나. 집열판과 덮개의 장파복사

$$QL_{pi}=\frac{\sigma F_{cp}(T_c^4-T_p^4)}{1/\varepsilon_p+1/\varepsilon_c-1} \quad (13)$$

다. 집열판과 내부공기의 대류열전달

$$QC_{pi}=h_{pi}(T_p-T_a) \quad (14)$$

라. 집열판 외부로의 전도열손실

$$QH_\infty=U_\infty(T_p-T_\infty) \quad (15)$$

식(15)에서 열손실계수는 집열판과 외기와의 열관류율을 나타내는 것으로 다음과 같이 표시된다.

$$U_\infty=\frac{1}{Z_1/k_1+Z_2/k_2+Z_3/k_3} \quad (16)$$

2.2.3 내부공기의 열평형

내부공기가 유동하면서 가열될 경우 내부공기의 열평형 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{G_aC_a}{W}\frac{\partial T_a}{\partial x}=QC_{ci}+QC_{pi} \quad (17)$$

식(17)에서 좌측항은 내부공기의 열량 변화를 나타낸 것이며, 우측항은 덮개 및 집열판과 내부공기와의 대류열전달을 각각 표시한 것이다.

2.2.4 일사량 모형

三原義秋[3]는 태양열 집열기의 덮개에 도달하는 수평면 전천일사량은 직달일사량과 산란 일사량의 합으로 이루어지며 식(18)로 표시하였다.

$$I_p=Io\ P^m\sin\phi + \frac{1.2I_oP^m\sin\phi(1-P)(1-P^m)}{(1-1.4\ \ln P)} \quad (18)$$

식(18)에서 우변의 첫째항은 수평면 전천일사량의 직달 성분을 의미하고, 둘째항은 산란 성분을 나타낸다. 대기투과율은 태양이 천정에 있을 때 대기권 일사량에 대한 지표면 일사량의 비로서, 대기의 청명도를 나타내는 기준이 된다. 대기투과율은 지역, 계절 및 시각등에 따라 변하나, 청명일의 경우 0.7~0.8의 값을 갖는다. 대기질양은 태양이 천정에 있을 때 광학거리(optical thickness)에 대한 직달일사가 투과한 대기의 광학거리의 비로서 태양고도의 여현값에 상당한다.

2.3 시뮬레이션 모형의 수치해석

집열기의 열전달 현상에 관한 열평형 방정식으로 유도된 시뮬레이션 모형을 분석하기 위하여 수치해석법을 이용하였다. 집열기 덮개와 집열판에서의 열전달 현상은 폴리에틸렌 필름의 두께가 매우 작고 열전도계수가 낮기 때문에 정상상태로 가정하였다. 그러므로 시뮬레이션 모형에 관련된 방정식은 2개의 대수방정식과 1개의 일차미분방정식으로 구성되어 Newton-Raphson 방법과 Runge-Kutta 방법을 이용하여 이들을 해석하였다. 시뮬레이션 모형의 수치해석에 사용된 언어는 Fortran 77이며, 컴퓨터 프로그램의 전체 유통도는 Fig.6과 같다. 컴퓨터 프로그램의 주요 입력 및 출력 자료는 다음과 같다.

〈입력자료〉

(1) 실험 지역의 위치 및 일시
(2) 대기투과율, 일출 및 일몰 시각
(3) 덮개 및 집열판의 흡수율
(4) 덮개의 투과율 및 집열판의 반사율
(5) 덮개 및 집열판의 방사율
(6) 덮개와 천공 및 집열판과의 형태계수
(7) 흑색 폴리에틸렌 필름, styrofoam 및 합판의 두께
(8) 흑색 폴리에틸렌 필름, styrofoam 및 합판의 열전도계수

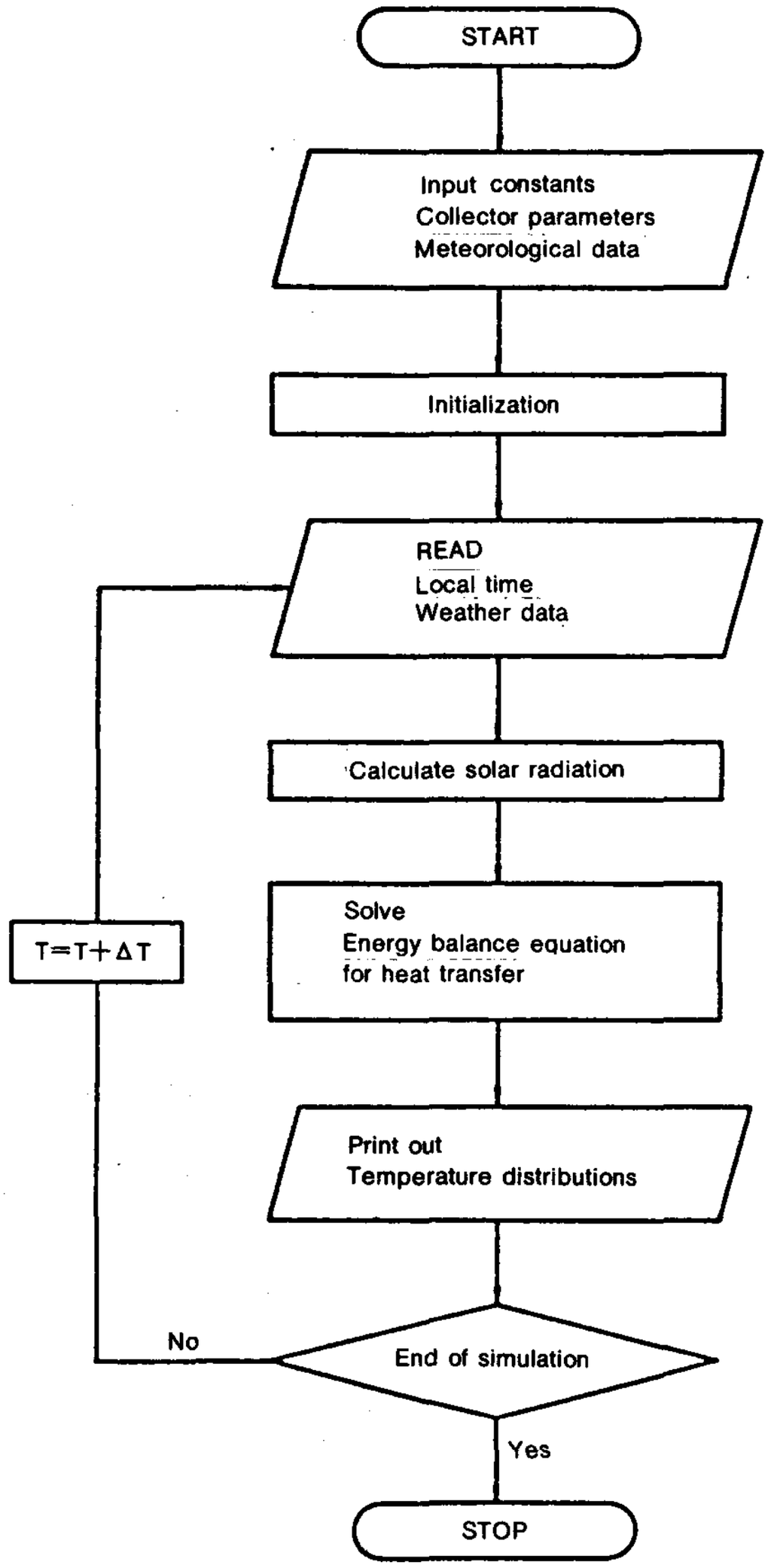

Fig. 6 Flow chart of the computer program for simulation of thermal environment in solar collector

(9) 집열기의 길이 및 폭
(10) 내부공기의 풍속, 질량유량 및 비열
(11) 시간별 외기온 및 풍속
〈출력자료〉
(1) 시간각, 태양고도, 대기질량, 직달일사량, 산란일사량 및 전천일사량
(2) 시간별 내부공기 온도, 덮개 온도 및 집열판 온도

3. 측정항목 및 방법

천일건조와 태양열 건조 시스템의 건조능력을 비교 분석하고자 시료상자에 담겨진 무우절편의 무게 변화를 매일 오전 9시 30분과 오후 4시30분에 측정하여 함수율을 결정하였다. 건조실의 입구에서부터 0.9, 2.7, 4.5, 6.3m되는 지점에 위치한 시료상자에 담겨진 시료의 무게는 평균 250 g 이다. 한편, 천일건조의 경우 태양열 건조에서와 마찬가지로 시료상자에 담겨진 시료의 무게 변화를 측정하여 함수율을 결정하였다.

집열기의 집열성능 분석과 태양열 건조의 시뮬레이션 모형에 대한 검증을 위해서 외기의 건구 및 습구온도, 집열기 내의 공기 온도, 건조실내의 공기 온도, 무우절편의 온도, 배출공기의 건구 및 습구 온도의 변화를 직경 0.3mm의 Copper-constantan 열전대와 multiplex data logger를 이용하여 10분 간격으로 측정하였다.

일사량은 지표면으로부터 60cm 높이에 Epply 일사계를 설치하여 수평면 전천일사량을 측정하였다. 외기 및 배출 공기의 상대습도는 측정된 건구 및 습구 온도를 이용하여 습공기의 성질 계산을 위한 컴퓨터 프로그램으로 결정하였다. 송풍기에서 공급되는 송풍량은 유입공기의 duct에서 열선식 풍속계를 사용하여 풍속을 측정한 후 결정하였고, 송풍기의 전력소모량은 watt-hour meter를 사용하여 측정하였다. 한편, 집열기의 외부풍속은 실험 장소에 인접한 수원 기상측후소의 기상 자료를 이용하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 일사량 분석

수평면 전천일사량의 실측치와 식(18)에 의한 일사량의 예측치를 비교한 결과가 Fig.7과 Fig.8에 실려 있다. 1990년 10월 30일과 11월 28일의 실측치는 모두 청명일의 일사량이다. 일사량의 예측치는 수원(동경 127° 05, 북위 37° 13′) 지방의 대기투과율 0.75에 해당한 값이다. 그림에서 일사량의 예측치와 실측치는

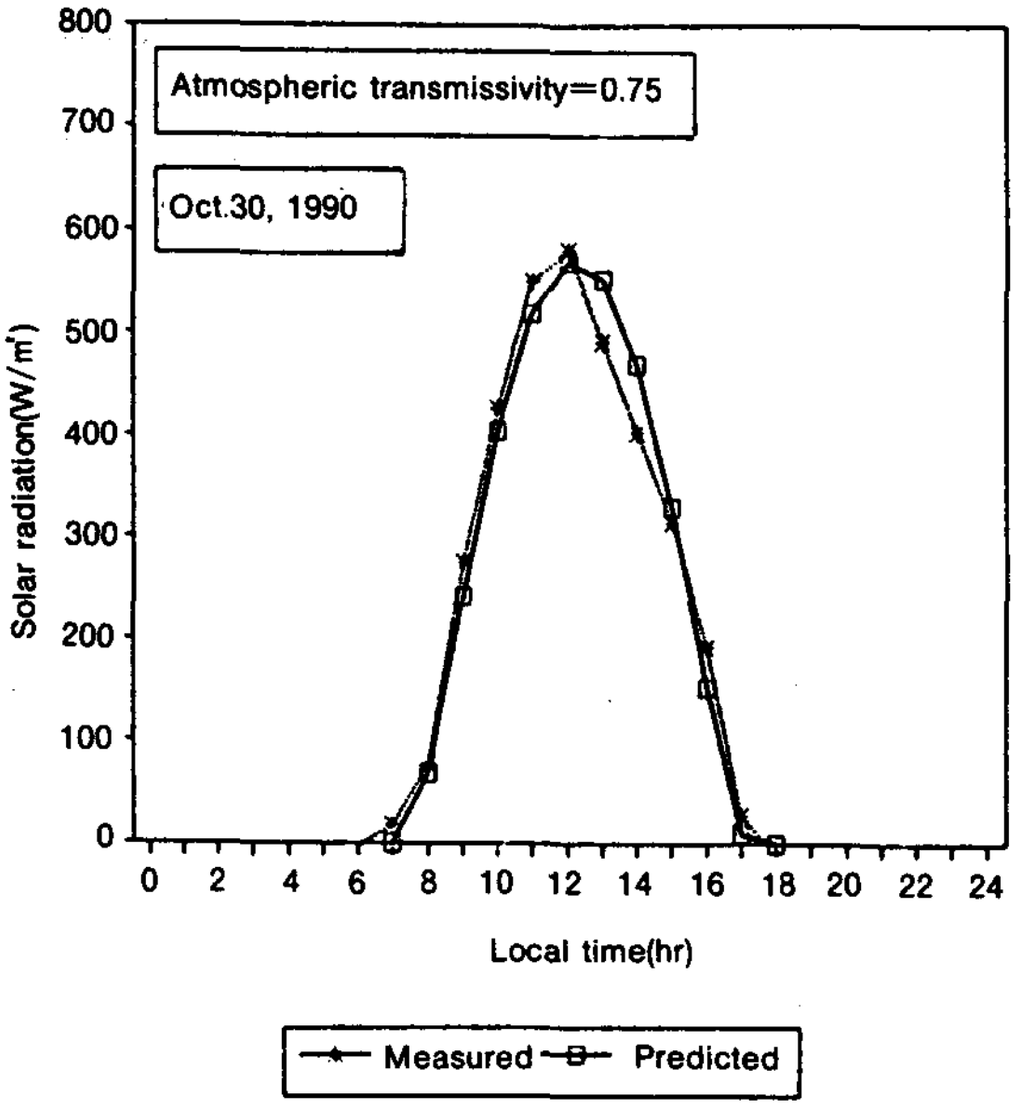

Fig. 7 Comparison of the experimental and predicted total radiation in horizontal plane(Oct. 30, 1990)

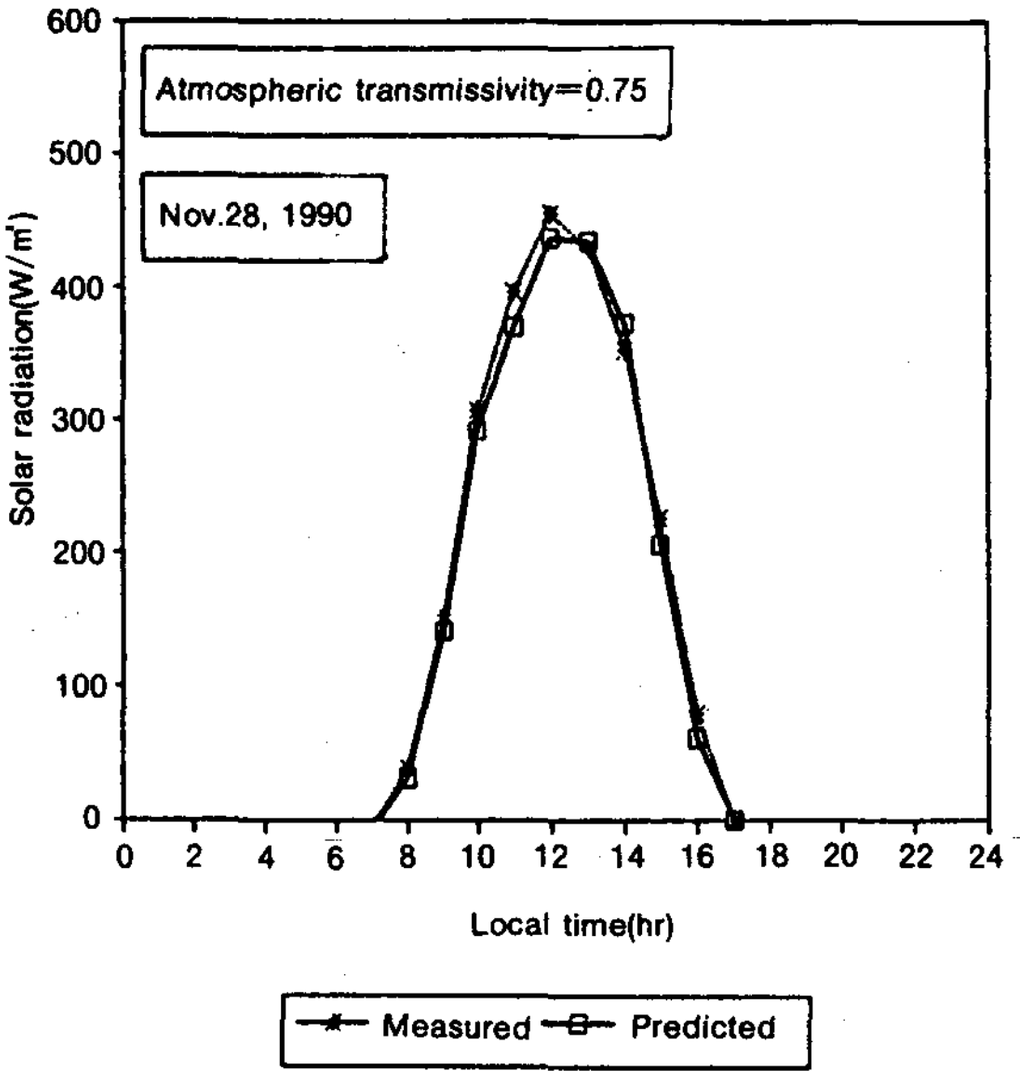

Fig. 8 Comparison of the experimental and predicted total radiation in horizontal plane(Nov.28, 1990)

잘 일치하는 것으로 나타났다.

한편, 일사량의 예측치와 실측치와의 적합도는 대기투과율에 따라 커다란 차이를 나타내는데, 이 적합도는 다음 식으로 정의되는 일사량의 표준편차(root mean square of deviation)에 의해서 표시된다.

$$D=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(I_{p,p}-I_{p,m})^2}{N-1}} \tag{19}$$

Fig.9는 1990년 10월 30일과 11월 28일의 일사량 표준편차를 대기투과율에 따라 표시한 것이다. 그림에서 일사량의 표준편차를 최소로 하는 대기투과율은 0.75인 것으로 나타났다. 그러므로, 본 연구의 일사량 분석 및 집열기의 집열성능 분석에 필요한 대기투과율은 0.75로 고려하였다.

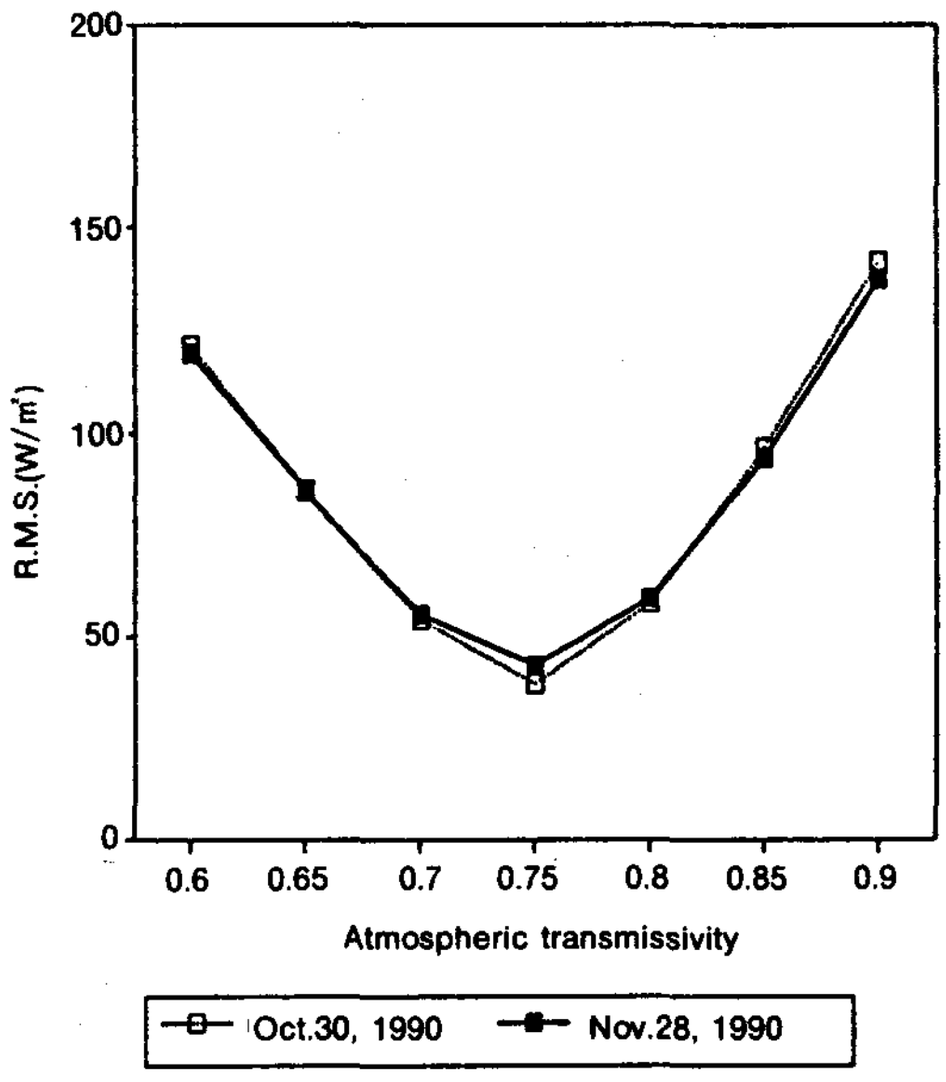

Fig. 9 Variation of root mean square of deviation of solar radiation with atmospheric transmissivity

4.2 집열기 집열성능의 시뮬레이션 결과

4.2.1 시뮬레이션 모형의 검증

본 연구에서 개발된 집열기 구성 요소에 관한 시뮬레이션 모형의 타당성을 검증하기 위하여 집열기 출구온도의 실측치를 시뮬레이션 모형에 의한 예측치와 비교하였다. Table 1은 시뮬레이션 모형에 사용된 덮개와 집열판의 주요 인자들을 나타낸 것이다.

Fig.10과 11은 1990년 10월 30일과 11월 28일의 집열기 출구온도 실측치와 예측치를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 일사량이 많은 12시와 14시 사이에 예측

Table 1. Parameters used in the simulation model

Description	Value	Unit	Reference number
Transmissivity of cover	0.77	decimal	8
Absorptivity of cover	0.13	decimal	8
Absorptivity of plate	0.77	decimal	6
Reflectivity of plate	0.05	decimal	6
Emissivity of cover	0.13	decimal	8
Emissivity of plate	0.77	decimal	6
View factor from cover to sky	0.78	decimal	8
Air flow rate	1.25	m/s	Measured
Thickness of plate	0.00005	m	Measured
Thickness of styrofoam	0.03	m	Measured
Thickness of plywood	0.012	m	Measured
Thermal conductivity of plate	0.337	W/m K	Estimated*
Thermal conductivity of styrofoam	0.037	W/m K	Estimated
Thermal conductivity of plywood	0.163	W/m K	Estimated
Massflow rate of air	1200.95	kg/hr	Measured
Specific heat of air	1.0057	KJ/kg K	10
Width of solar collector	0.91	m	Measured
Length of solar collector	14.4	m	Measured
Atmospheric transmissivity	0.75	decimal	Estimated

*Estimated means approximate value for parameters used in simulation model

치가 실측치보다 2~3℃ 낮았으나, 전체적으로 예측치와 실측치는 일치하는 것으로 나타났다. 특히 외기온의 변화가 적은 야간의 경우(19시 이후) 예측치와 실측치는 잘 일치하였다.

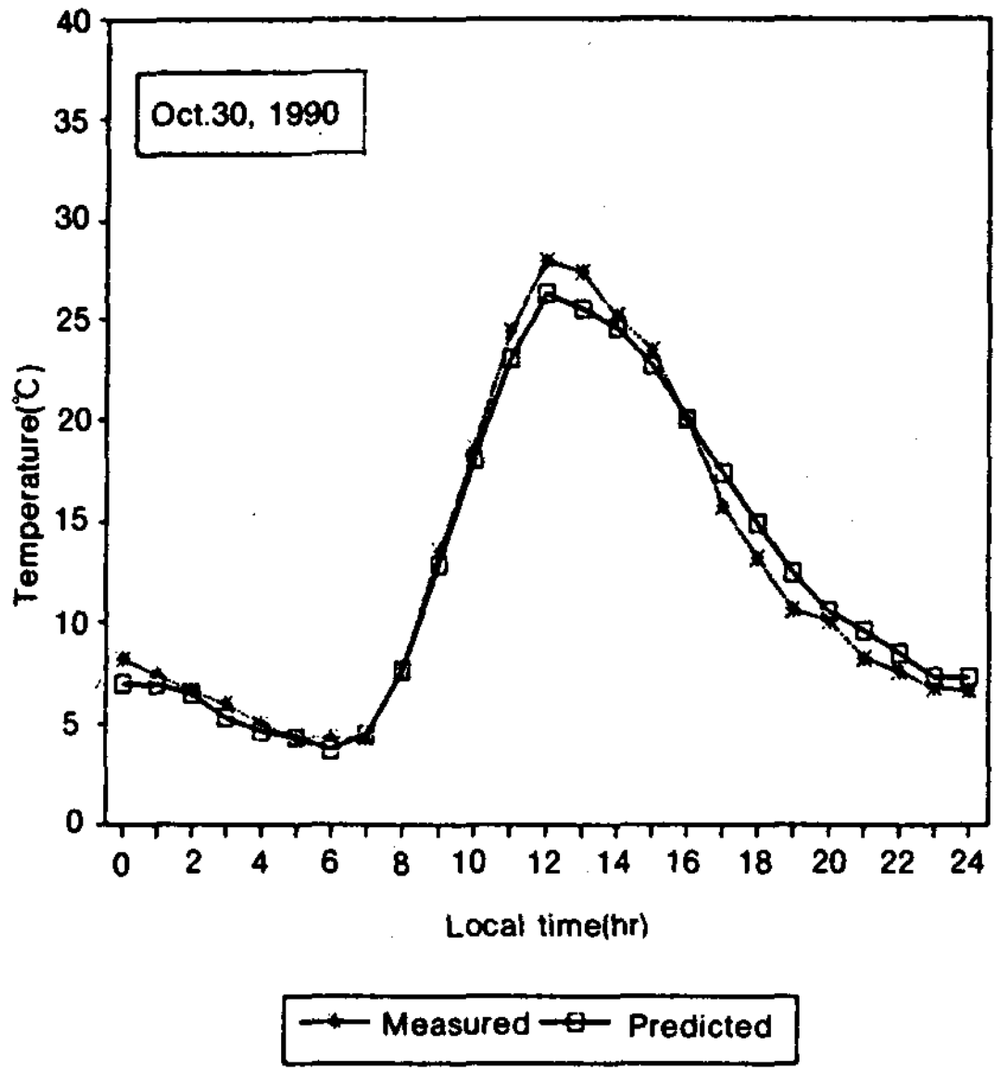

Fig. 10 Comparison of the experimental and predicted air temperatures at collector exit(Oct. 30, 1990)

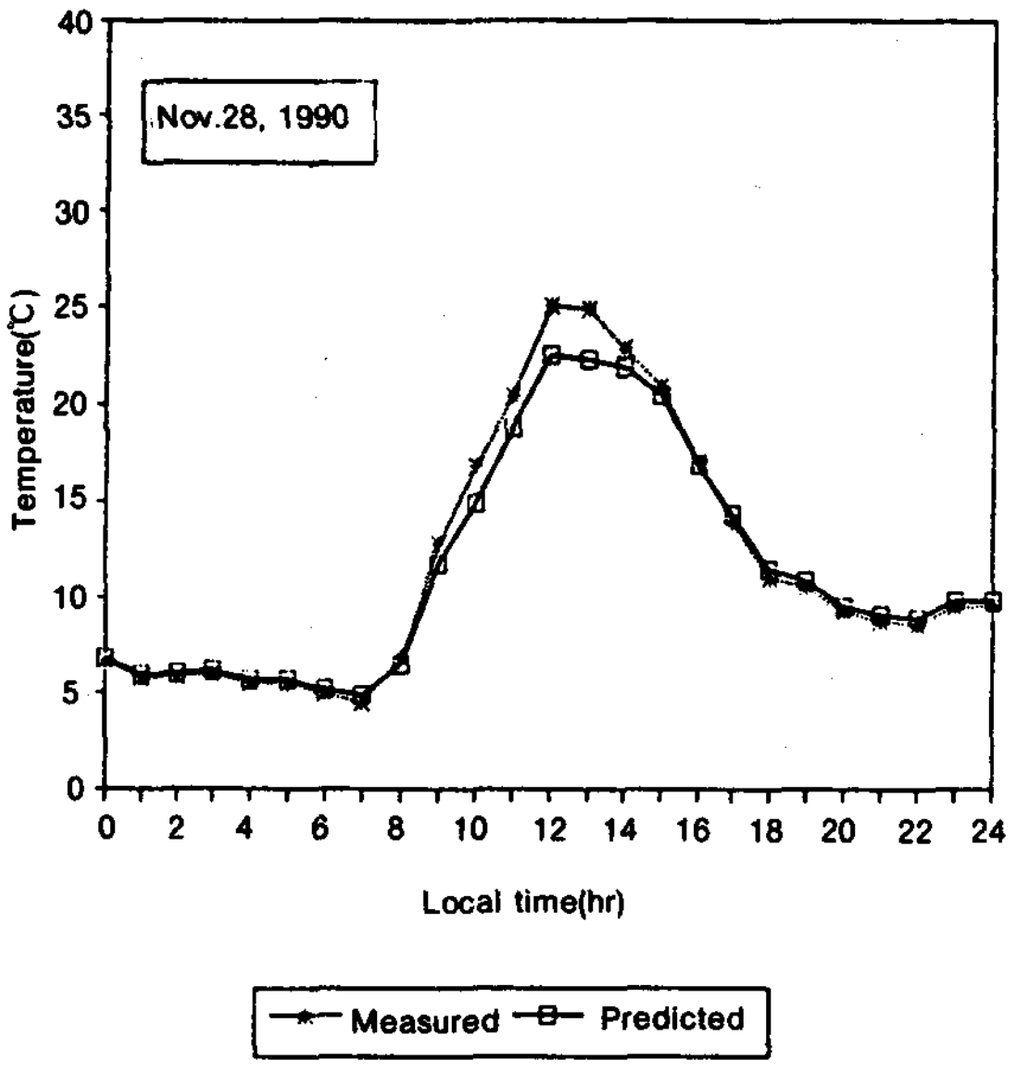

Fig. 11 Comparison of the experimental and predicted air temperatures at collector exit(Nov.28, 1990)

4.2.2 집열량에 미치는 일사량 및 송풍량의 영향

실험용 태양열 집열기에 의해서 집열되는 열량이 건조 공기가 흡수한 열량과 같다고 가정할 때 집열량은 다음 식으로 계산된다.

$$Q_c=\sum_{i=1}^{H}\dot{V}R_aC_a\Delta T \quad (20)$$

Fig.12와 13은 단위집열면적당 집열량에 미치는 일사량과 송풍량의 영향을 나타낸 것이다. 단위집열면적당 집열량에 미치는 일사량과 송풍량의 영향을 중회귀식으로 표시하면 다음과 같다.

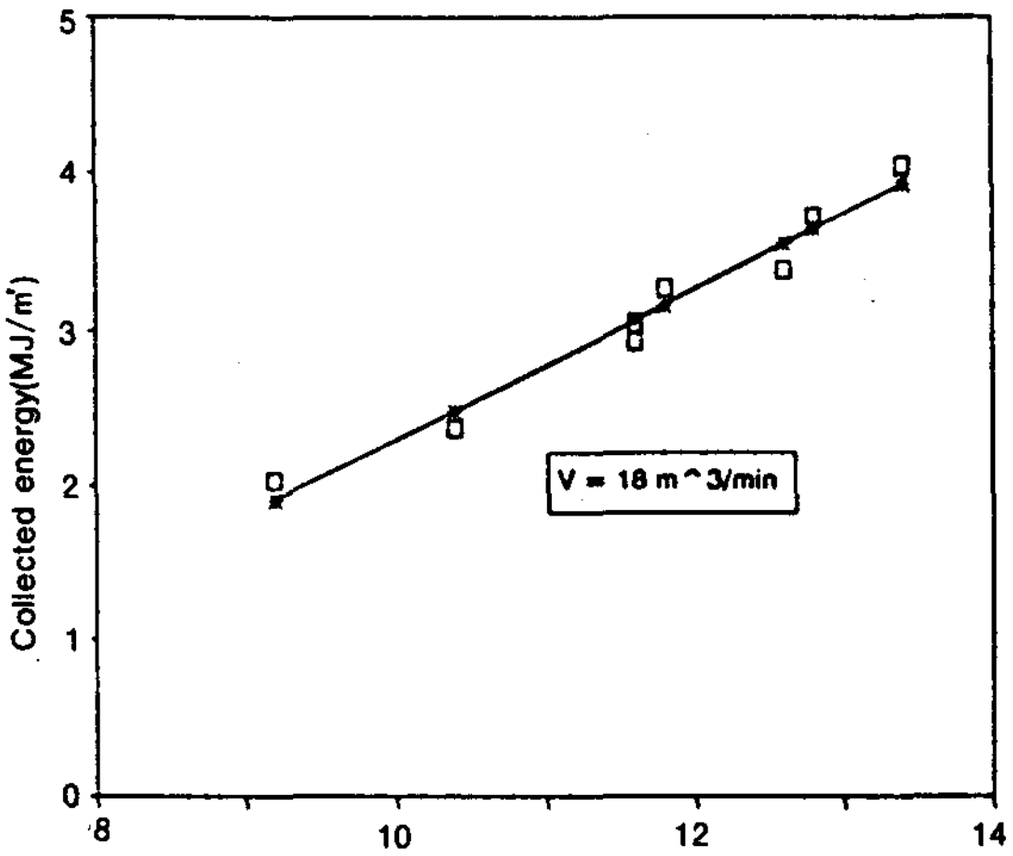

Fig. 12 Influence of solar radiation on collected energy per unit collection area

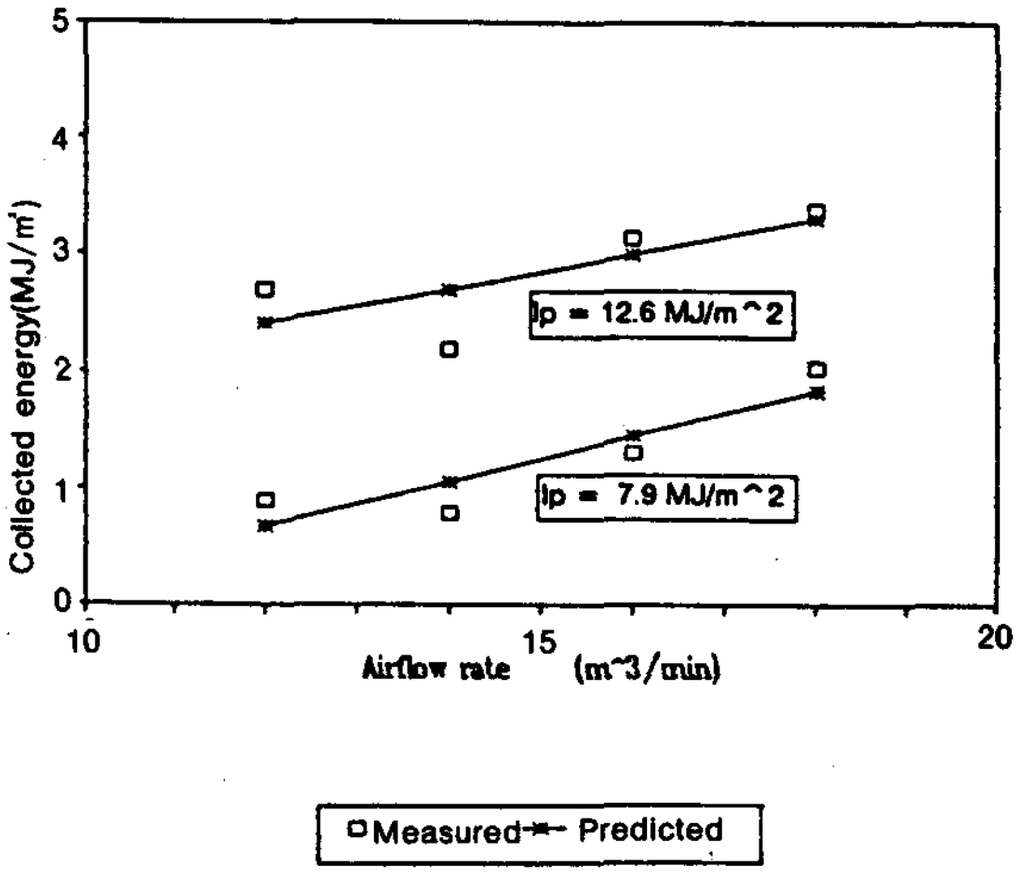

Fig. 13 Influence of airflow rate on collected energy per unit collection area

$$Q_c=0.366887\ I_p+9.585646\ \dot{V}-4.109612 \quad (21)$$
$$(R^2=0.965)$$

중회귀분석 결과 일사량과 송풍량이 커질수록 집열량은 증가하나, 일사량의 영향이 더 큰 것으로 타나났다.

4.2.3 집열효율에 미치는 일사량 및 송풍량의 영향

집열기의 집열효율은 집열면에서의 일사량에 대한 건조 공기가 흡수한 열량의 비로서 정의되며 다음 식으로 표시된다.

$$\eta_c=\frac{Q_c}{I_p}=\frac{\sum_{i=1}^{H}\dot{V}R_aC_a\Delta T}{\sum_{i=1}^{H}A_cI_p} \quad (22)$$

Fig.14와 15는 집열효율과 일사량 및 송풍량의 관계를 나타낸 것이다. 중회귀분석 결과 일사량과 송풍량이 커지면 집열효율도 증가하는 것으로 나타났다.

$$\eta_c=0.018696\ I_p+0.063224\ \dot{V}-0.00626 \quad (23)$$
$$(R^2=0.9168)$$

4.2.4 최대온도 상승에 미치는 일사량 및 송풍량의 영향

건조 공기의 최대온도 상승과 일사량 및 송풍량의 관계가 Fig.16과 17에 실려 있다.

$$\Delta T=0.833141\ I_p-18.9373\ V-2.265118 \quad (24)$$
$$(R^2=0.9287)$$

중회귀 분석결과 일사량이 증가하고, 송풍량이 감소할수록 최대온도 상승이 높게 나타났다. 이것은 일사량이 증가하면 집열판의 온도가 상승되나, 송풍량이 커지면 건조 공기가 집열판과의 접촉 시간이 짧게 되기 때문인 것으로 판단된다.

4.3 태양열 건조 시스템의 건조 특성 및 품질 분석

4.3.1 건조 특성

Fig.18은 천일건조와 태양열 건조시 무우절편의 함수율 변화를 나타낸 것이다. 태양열 건조의 경우 무우절편의 무게 변화를 측정한 각 지점의 평균함수율이 10.3%까지 도달하는데 소요된 건조 시간은 216시간, 천일건조의 경우 13.9%까지 도달하는데 소요된 건조 시간은

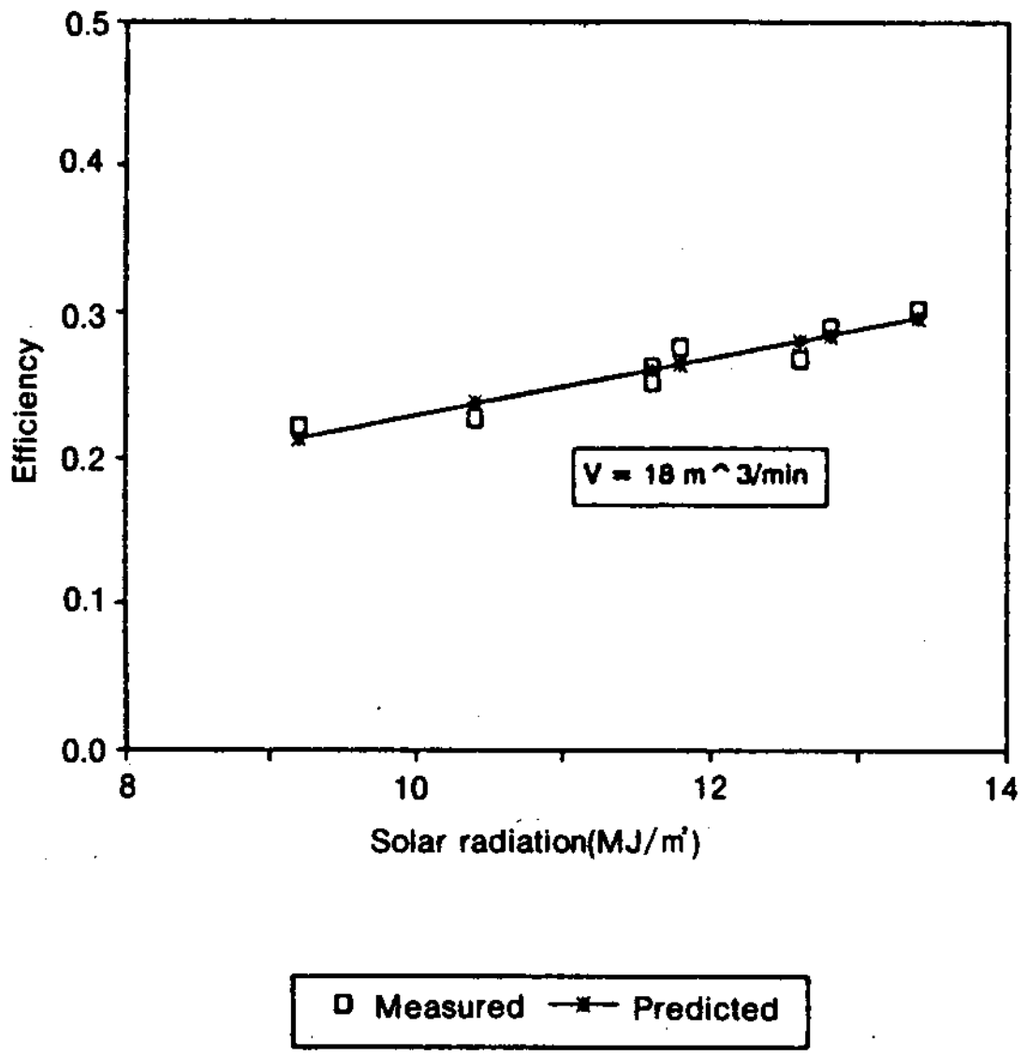

Fig. 14 Influence of solar radiation on collection efficiency

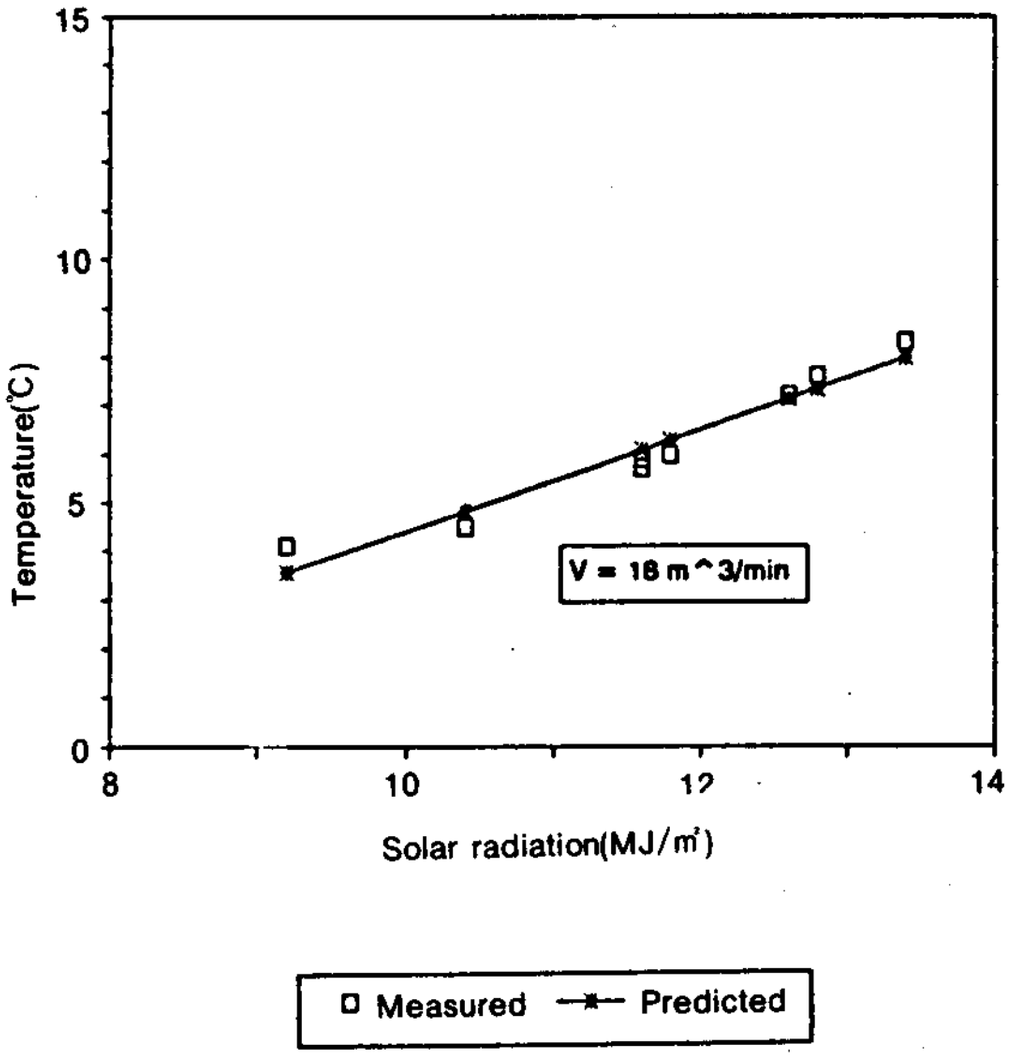

Fig. 16 Influence of solar radiation on maximum temperature rise of heated air

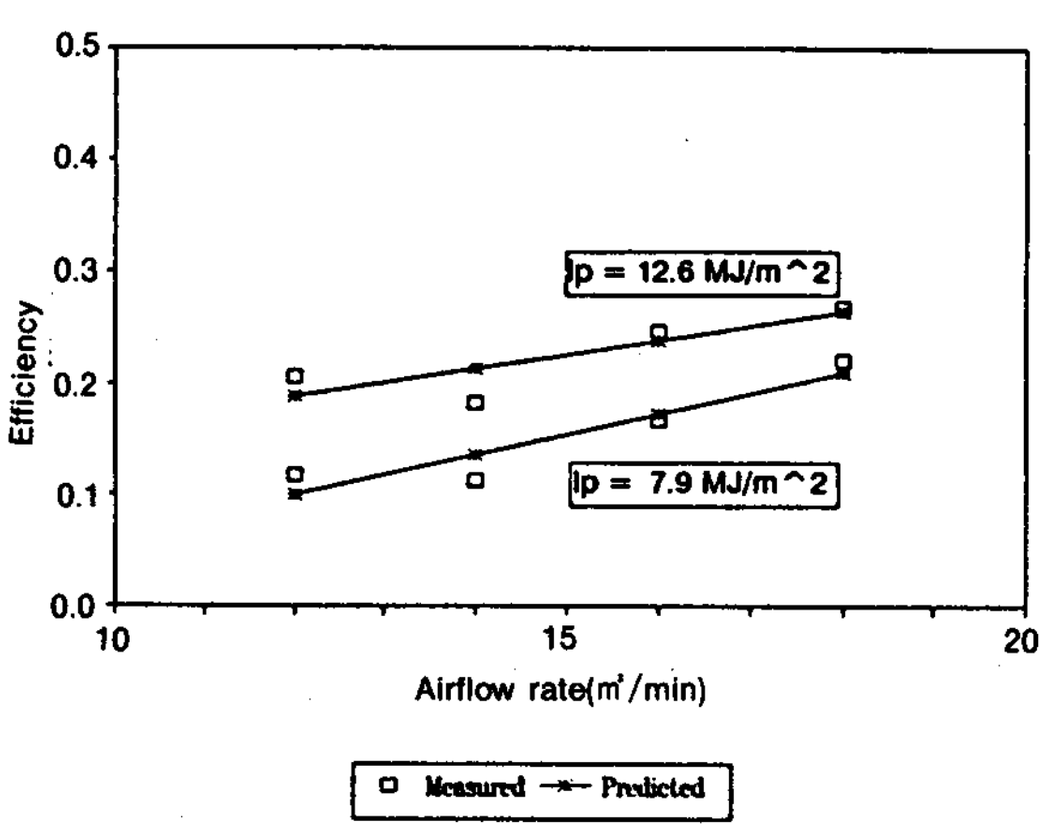

Fig. 15 Influence of airflow rate on collection efficiency

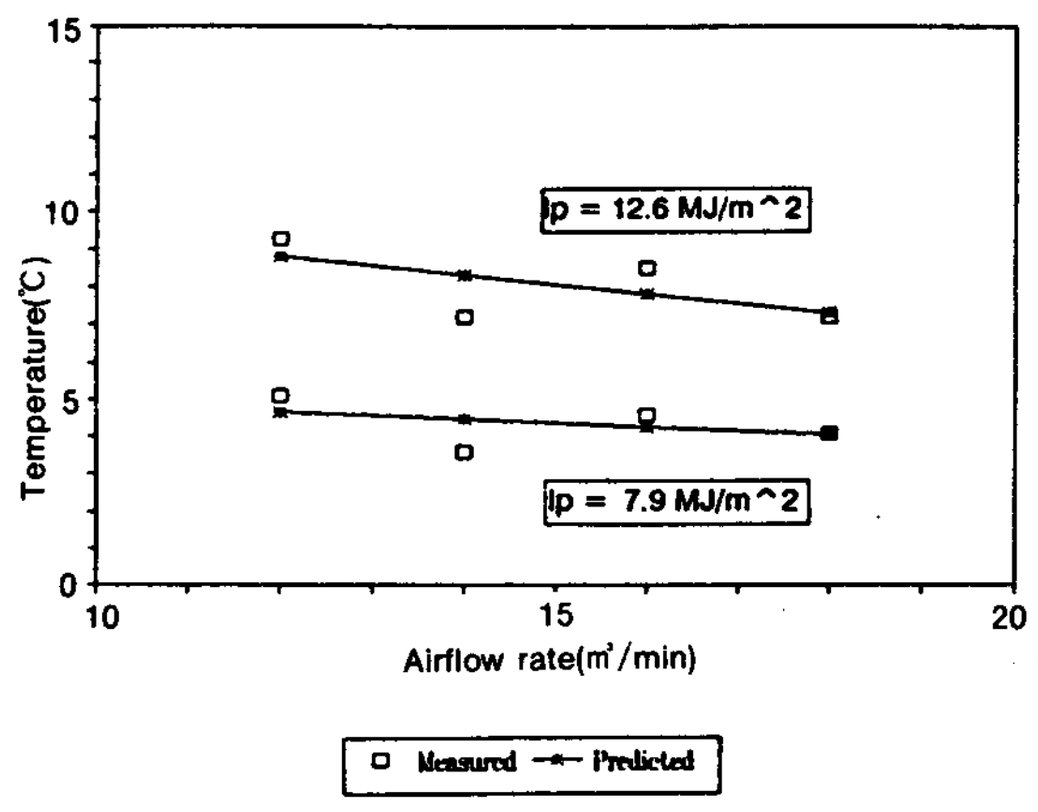

Fig. 17 Influence of airflow rate on maximum temperature rise of heated air

408시간으로 나타났다. 한편, 무우절편의 초기 함수율은 93.8%w.b로서 태양열 건조의 평균함수율은 0.372%/hr, 천일건조의 경우 0.196%/hr로 나타났다.

4.3.2 품질 분석

가. 아스코르빈산 정량

HPLC를 사용한 Sood등[11]의 방법에 의거하여 분석하였다. 분말시료 1 g을 100㎖의 6% metaphosphoric acid에 녹인 후 暗所에서 1.5시간 흔들어 추출한다. 이를 Whatman No.2 여과지로 여과한 후 0.45 μ membrane filter를 이용하여 재여과하여 HPLC에 주입한다. 아스코르빈산 함량은 peak의 면적으로 계산하며 이때의 HPLC의 조작 조건은 Table 2와 같다.

아스코르빈산의 정량분석 결과, 태양열 건조에서 15.2mg/100 g, 천일건조의 경우 12.0mg/100 g으로 나타났으며, 최소유의차 검정 결과

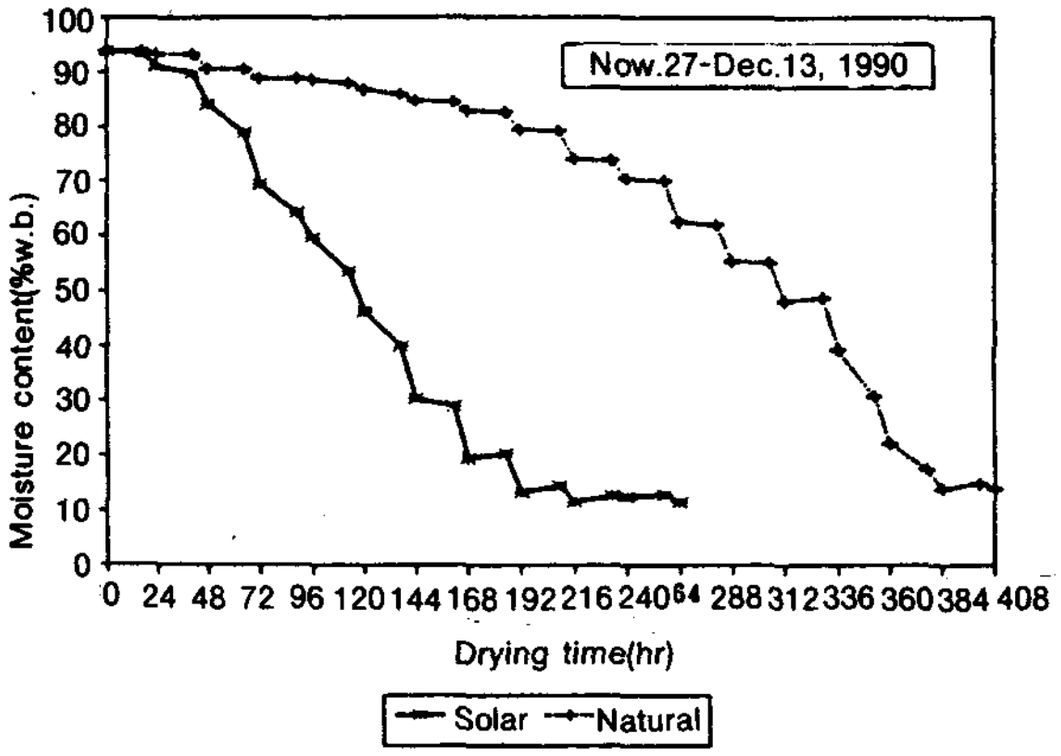

Fig. 18 Comparison of moisture contents with sun drying and solar heated-air drying of radish

Table 2. Operating condition of HPLC

Item	Conditions
Instrument	Waters association model 440
Column	μ-Bondapark C_{18}
Mobile phase	water : methanol : tetrabutyl ammonium phosphate=96.5 : 2.5 : 1.0
Detector	UV 254nm
Flow rate	2.0㎖/min

1% 수준에서 L.S.D.=1.69로 고도의 유의성이 인정되었다. Table 3은 아스코르산의 정량 분석 및 최소유의차 검정 결과를 표시한 것이다.

나. 갈변도

Hendel등[9]의 방법을 약간 변형하여 측정하였다. 즉, 건조분말 시료 1.3 g을 취하여 40㎖의 증류수를 가한 다음 10% trichloroacetic acid 용액 10㎖를 가하여 30℃에서 2시간 방치한다. 방치하는 중에 처음과 중간 및 끝에 약간씩 흔들어 준다. Toyo No.2 여과지로 여과한 후 420nm에서 흡광도를 측정하였다. 흡광도는 수분함량을 보정하여 건물 1.3 g에 기준하여 나타내었다.

건조 방법에 따른 갈변도가 Table 4에 실려있다. 태양열 건조의 경우 갈변도는 0.213, 천일건조에서는 0.451로 나타났으며, 최소유의차 검정결과 1% 수준에서 L.S.D.=0.145로 고도의 유의성이 인정되었다.

Table 3. Significance of ascorbic acid content for radish drying

Method	Ascorbic acid(㎎/100 g)
Solar drying	15.2
Sun drying	12.0
Difference	3.2**

** significant at 1% level

Table 4. Significance of brownig for radish drying

Method	Browning(O.D. at 420nm)
Solar drying	0.213
Sun drying	0.451
Difference	0.145**

** significant at 1% level

5. 결 론

무우절편의 건조 과정중에 소요되는 에너지를 절감시키고자 태양열 집열기와 터널건조실이 일체로된 태양열 건조 시스템을 개발하여 집열기 구성 요소에 대한 시뮬레이션 모형을 개발하고 집열기의 집열성능을 분석하였으며 무우절편의 건조실험을 수행한 후 건조 특성과 품질 분석을 검토하였다. 이상의 분석 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 대기투과율을 고려한 수평면 전천일사량의 실측치를 검토한 결과 수원지방의 대기투과율은 0.75로 나타났다.
2. 집열기 구성 요소에 관한 시뮬레이션 모형을 개발하였으며, 개발된 모형에 따라 집열기 출구 온도의 예측치와 실측치가 전체적으로 일치하였다. 또한 시뮬레이션 모형으로 집열량, 집열효율 및 최대온도 상승에 미치는 일사량과 송풍량의 영향을 검토하였다.
3. 무우절편의 천일건조 및 태양열 건조에 소요된 건조 시간은 각각 408시간, 216시간으로 나타났다. 건조 후 최종함수율의 평균치

는 천일건조 및 태양열 건조의 경우 각각 10.3%, 13.9%로 나타났으며, 건감율은 천일건조에서 0.196%/hr, 태양열 건조에서 0.372%/hr로 나타났다.

4. 건조후 무우절편의 품질분석 결과, 아스코르빈산의 정량은 태양열 건조에서 15.2mg/100g, 천일건조의 경우 12.0mg/100g로 나타났다. 갈변도는 태양열 건조에서 0.213, 천일건조에서 0.451로 나타났다.

후 기

본 연구는 1990년도 동력자원부의 "대체에너지 기술개발사업"의 연구비지원에 의하여 수행된 것의 일부로서 관계제위께 감사드리는 바이다.

참 고 문 헌

1. 고학균, 농산물의 태양열 건조 시스템 개발에 관한 연구. 동력자원부 대체에너지 기술개발보고서(1990)
2. 고학균, 김용현, 태양열 건조 시스템에 관한 실험적 연구. 제4회 신재생에너지 기술개발 및 동향에 관한 세미나(1991)
3. 三原義秋. 温室設計の基礎と實際. 養賢堂. 東京.(1980)
4. 堀部和雄, 中川健治, 大河誠一, 前田正俊. 太陽熱利用もみ乾燥の實用化に關する研究(第一報). 日本農業機械學會誌 45(1) : 485-492(1984)
5. Amir, E.J., K. Grandegger, A. Esper, M. Sumarsono, C. Djays, and W. Muhlbauer. Development of a multi-purpose solar tunnel dryer for using in humid tropics. Proceedings of CNRE technical meeting. 81-95(1988)
6. Bailey, B.J. The reduction of thermal radiation in glasshouses by thermal screens. J. Agric. Engng. Res. 26: 215-224(1981)
7. Duffie, J.A. and W.A. Beckman. Solar engineering of thermal processes. John Wiley Sons, Inc(1980)
8. Garzoli. K.V. and J.Blackwell. An analysis of the nocturnal heat loss from a single skin plastic greenhouse. J. Agric. Engng. Res. 26: 203-214(1981)
9. Hendel, C.E., V.G. Silveira, and W.O. Harrington. Rates of nonenzymatic browning of white potato during dehydration. Food Technol. 9: 433(1955)
10. Holman, J.P. Heat transfer. 5th ed. McGraw-Hill, Inc.(1981)
11. Sood, S.P., L.E. Sartori, D.P. Whittmer, and W.G. Haney. High pressure liquid chromatographic determination of ascorbic acid in selected foods and multivitamin products. Anal. Chem. 48(6): 796(1976)
12. Swinbank, W.C. Long-wave radiation from clear skies. Quart. J. Royal Met. Soc. 89(1963)

ABSTRACTS

SOLAR ENERGY VOL. 11, NO. 3, 1991

The Un–Manned Automated Weather(Insolation) Station at the Island "Dok–do"

Lee, Tai K · Cho, Suh H · Jo, Dok K · Auh, P.Chungmoo

Korea Institute of Energy & Fesoures
Daedeok Science Town, Korea

There are fifteen solar radiation measurement stations over the entire country in Korea. However, they are not capable of supplying reliable solar radiation data for remote areas including islands. The un–manned automated insolation measurement station is suitable for these areas due to the electric power shortage and the maintenance problems at these isolated areas. Our main aim in this work is to develop a solar radiation measurement system which collects and stores data by itself utilizing a PV module and a battery as power source for entire system irregardless of the environmental condition.

A developed KIER's prototype system along with an independent HWS reference system has been installed at the designated remote island, Dok–do. Global solar radiation has been measured every hour for a 6–month period of time by both systems at this site. A comparison between the measured solar radiation data by each system indicates that there is an excellent agreement showing average 3.0% of an absolute error. It has been observed that the 8–month average global solar radiation was 2,330 W/m² day at this island. We came to the conservative conclusion that the developed KIER system is applicable for measuring solar radiation and for supplying reliable fundamental design data for solar energy utilization system at the remote areas.

Experimental Studies for Solar Drying System of Agricultural Products(Ⅰ)

—Solar drying characteristics for radish—

Koh, Hak–Kyun · Kim, Yong–Hyeon* · Song, Dae–Bin · Kim, Man–Soo*****

Dept. of Agricultural Engineering, Seoul National Univ.
Institute of Agricultural Science & Development, Seoul National Univ.*
Dept. of Agricultural Engineering, Seoul National Univ. Graduate**
Dept. of Agric. Machinery Engineering, Chungnam National Univ.***

Experiments for drying radish were carried out to analyze the drying characteristics and quality evaluation between solar heated–air drying and natural air drying system. Solar heated–air drying system consists of a small fan, a solar air heater and a tunnel dryer.

Simulation model for thermal environments of solar collector was developed to investigate the effect of solar radiation and airflow rate on thermal performance.

Experimental Studies for Solar Drying System of Agricultural Products(Ⅱ)

— Solar drying characteristics for rough rice —

Koh, Hak-Kyun · Kim, Yong-Hyeon* · Song, Dae-Bin · Park, Jae-Bok*****

Dept. of Agricultural Engineering, Seoul National Univ.
Institute of Agricultural Science & Development, Seoul National Univ.*
Dept. of Agricultural Engineering, Seoul National Univ. Graduate**
Korea Food Research Institute***

In-bin grain drying experiments were performed to investigate the drying characteristics between natural air and solar heated-air drying system of rough rice. A computer simulation model for solar drying system of rough rice resulted in a good agreement between the experimental and predicted moisture content.

In order to save the electric energy consumption of fan, airflow rates control system using inverter was developed and resulted in the effect of energy saving.

Misgurnus Anguillicaudatus Growing in Winter Season by Solar Thermal Heating

Jung, Hyun Chai · Sun, Kyung Ho · Jo, Jae Sun* · Nam, Sang Yul**

Kyung Hee Univ. Institute of Solar Energy. Dept. of Chemistry, Kyung Hee Univ.
Dept. of Food Processing, Kyung Hee Univ.*
Dept. of Biology, Kyung Hee Univ.**

We have maintained the optimum water temperature for misgurnus in winter season by solar thermal heating energy.

The Optimum temperatures for the misgurnus anguillicaudatus were experimentally estimated, i.e. for the total length 4~5㎝ and body weight 1~2g, the optimum temperature was 18~20℃. For the total length 5~7㎝, body weight 2~3g was 20~22℃ and for the total length 7~9㎝ and body weight 4~6gr was 22~24℃.

The smaller misgurnus(1~3g) grow relatively slow but the bigger ones(4~8g) grow relatively fast and total average body weight increment was about 30~50g per month.

A Performance Study on Direct Gain Passive Solar School Buildings

Lim, Sang Hoon · Lee, Nam Ho · Lim, Bok Kyu*