

外部集熱板型 太陽熱 木材乾燥機의 集熱效率과 適正 集熱面積 分析*¹

李 亨 雨*²

Analysis of Collector Efficiency and Proper Collector Size of External Collector Type Solar Lumber Dryer*¹

Hyoung Woo Lee*²

SUMMARY

Experimental external collector type solar lumber dryer with 1.6m² of collector area and 1.0m³ of maximum dryer capacity was designed and constructed to investigate the conditions inside and outside the dryer and collector. The efficiency of collector was calculated and numbers of drying-days and collector areas required to dry 0.2m³ and 1.0m³ of pine and oak at various air flow rate inside collector were estimated for eight cities in Korea.

Average temperatures of collector-inlet and -outlet air, and heat absorber were 52.5°C, 57.9°C, and 71.1°C, respectively, at 4m/sec of air flow rate inside collector on sunny day in summer. Overall heat transfer coefficient of collector was 4.875W/m²°C and collector efficiency was 52%.

Estimated numbers of drying-days required to dry 0.2m³ of pine and oak from 80% to 15% moisture content at various air flow rate inside collector were 38 and 66 days, respectively. Areas of collector required to dry 1.0m³ of lumber at desired safe drying rate were estimated as 13.7m² for pine and 16.0m² for oak.

1. 緒 論

國內 木材工業의 主류를 이루고 있는 木材家具産業은 최근 연간 2억달러 정도의 수출실적을 나타내어 가까운 장래에 세계시장을 석권할 수 있는 수출유망업종으로 선정되었으며, 내수시장도 꾸준히 성장하여 그 규모가 2조원에 이르

고 있다.

그러나 木製品의 품질을 좌우하는 핵심기술인 木材乾燥를 시행할 건조시설을 자체적으로 보유하고 있는 업체가 약 15개사뿐이며 나머지 수백개의 업체가 목재가공공장에서 乾燥木상태로 구입하므로써 적절한 含水率管理가 곤란한 상황이다. 또한 건조방법도 막대한 시설투자

*1. 接受 1990年 9月 19日, Received September 19, 1990.

*2. 全南大學校 農科大學 College of Agriculture, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea.

소요에너지 및 乾燥經費를 요구하는 蒸氣를 이용한 熱氣乾燥(kiln drying)가 대부분으로 그 운용도 경험에만 의존하고 있는 실정으로 낙후된 생산체제와 함께 최근 가구업체 수출부진의 주요원인으로 인식되고 있다.

목재가공에 소비되는 총에너지의 약 60-70%가 목재의 건조과정에서 소비되며, 전 세계의 연간 목재건조에 소비되는 에너지는 化石燃料로 환산하면 약 3,500백만 배럴에 달할 정도로 막대하나 90년대의 油價上昇은 거의 필연적이라 할 수 있으며, 그 상승폭도 產油國들의 급변하는 정세로 인하여 예측하기가 매우 곤란한 실정이다.

그러므로 이와 같은 세계적 에너지위기에 대처하는 한편, 국제시장에서 우리나라 가구 및 목제품들의 경쟁력을 제고하기 위하여는 목재의 가공에 필수불가결한 건조과정에서 에너지를 절약할 수 있는 방법이나 장치의 모색이 가장 시급한 과제중의 하나이다.

따라서 목재산업이 예로부터 발달하여온 몇몇 선진국에서는 이미 1950년대부터 熱源의 공급이 무한하고 건조비용이 전혀 들지 않으며 公害의 염려도 없는 太陽에너지를 목재건조에 응용하려는 시도가 이루어져왔으며 특히, 1970년대 유류파동 이후 시설투자가 저렴하고 취급이 용이하면서도 熱效率이 높은 太陽熱 木材乾燥器의 개발에 대한 연구가 계속 수행되어 왔다.

그러나 국내에서는 전국 日平均 日射量이 12,552MJ/m²에 이를 정도로 세계 어느나라에 못지않게 좋은 日射量條件을 가지고 있으면서도 낙후한 기술수준과 확고한 개발의지의 결핍으로 태양에너지의 목재산업에의 이용이 全無한 실정이다. 그러므로 우리나라의 기후조건에 알맞는 태양열 목재건조기의 설계와 그를 바탕으로한 熱效率向上方法의 개발을 통하여 보다 효율적인 모델을 木材產業界에 제시하는 것이 시급하다고 하겠다.

본 연구에서는 태양열 목재건조시스템중에서 가장 발달된 형태인 外部集熱板型 太陽熱 木材乾燥器(external collector type solar lumber

dryer)를 설계, 제작하고, 外氣溫度, 일사량조건 및 集熱器 内部 空氣流動速度 등의 변화에 따른 건조기와 집열기 각 部位의 온도변화를 측정, 분석하여 집열기의 효율을 파악하므로써 乾燥日數와 適正集熱面積 등의 推定과 아울러 그 개선책과 산업에의 이용 가능성을 구명하고자 하였다.

2. 研究史

목재의 태양열건조는 목재산업분야의 에너지 절약관점에서 그 중요성이 인식되기 시작하여 1970년대의 유류파동 이후 중요성이 크게 부각되었다. 일부 선진국가에서는 태양에너지를 이용하여 목재건조에 효과적인 온도범위인 26℃-82℃까지 건조기의 내부온도를 상승시킬 수 있는 태양열 목재건조기의 개발을 꾸준히 시도하여 왔으며, 간단한 형태의 溫室型(greenhouse type)과 半溫室型(semi-greenhouse type)의 연구를 거쳐 최근에는 가장 발달된 형태인 외부집열판형 태양열건조기에 관심이 집중되고 있다.

Little(1979, 1984)^{13,14}은 기존의 외부집열판형 태양열건조기의 熱傳達媒體로 사용되어 오던 공기 대신에 比熱은 높지만 蓄熱의 기능도 지닌 물을 이용하고, 太陽光線 反射板(reflector)을 부착하여 열효율을 높인 수용재적 240m³의 대규모 외부집열판형 태양열 목재건조기를 실제 산업에 응용한 결과 열기건조에 비하여 건조 1회당 1,000\$의 비용을 절감하는 효과가 있었음을 보고하였고, Tschernitz등(1979, 1984, 1985)^{15,16,17}은 태양열건조기 내부에 除濕裝置를 두어 두께 1인치 red oak를 건조한 결과 함유율 80%에서 9%까지 소요된 건조일수가 54일이었으며 건조기의 내부온도도 50℃ 이상이었음을 보고하여 태양열건조가 열기건조의 효과에 접근할 수 있음을 보여주었다.

Chen(1982)²¹은 건조기 내부에 두께 1인치 yellow-poplar를 잔적하고 제습장치를 두어 태

양열건조한 결과 기존의 태양열건조일수를 50%까지 절감할 수 있음을 확인한 후 미국특허를 취득하기도 하였으며, Helmer등(1980, 1982)^{4),5)}은 除濕太陽熱乾燥과정을 컴퓨터模形化하여 건조중 함수율과 건조기의 내부온도를 예측할 수 있는 수학적 모델을 제시한 후 Helmer(1986)⁶⁾는 지역에 따라 적절한 집열판 면적을 산출하는 방법을 제시하였다.

외부집열판형 태양열건조기의 개선에 관한 연구는 계속되어 Chen등(1987)³⁾은 돌을 이용한 축열장치와 제습장치로부터의 廢熱을 이용할 수 있는 熱交換器를 설치하여 두께 1인치 yellow-poplar를 건조한 결과 계절에 관계없이 건조속도가 열기건조의 경우에 거의 접근하였으며, 乾燥缺陷에 의한 손실도 기존의 제습 태양열건조기의 경우보다 상당히 감소되었음을 보고하였다. 또한 Helmer등(1983, 1985, 1987)^{6),7),9)}은 제습장치에서 壓縮機(compressor)를 운용하는데 소요되는 에너지를 태양에너지로 대체하는 太陽熱吸收 除濕乾燥方法을 개발하기에 이르렀다.

국내에서는 최근 鄭등(1987, 1988)^{10),11)}이 국내의 5수종의 반온실형 태양열건조를 실시한 결과 天然乾燥日數를 50%이상 감소시킬 수 있음을 보고하였으며, 李등(1989)¹²⁾은 동일한 형태의 태양열목재건조기에 제습장치를 설치하여 대표적인 乾燥困難樹種중 하나인 참나무류의 건조실험을 실시한 결과 건조일수와 함께 건조결함의 발생율도 감소시킬 수 있는 가능성을 밝혔다.

따라서 현재까지 개발된 목재건조용 태양열건조기는 전 세계를 통틀어 약 50여종에 이르며 실제 산업에 활용되거나 개선을 위한 연구가 계속 수행되고 있으나 국내에서 개발된 목재건조용 태양열건조기는 그 시설과 효과가 미미한 상태의 반온실형 1종뿐으로 태양열 목재건조시스템중 가장 진보된 형태인 외부집열판형에 관한 연구가 이루어지지 않고 있다. 그러므로 에너지의 절약과 건조시간의 단축으로 生産性을 향상시킬 뿐만 아니라 국내 목재산업을 주도하고 있

는 中小企業의 규모를 고려하여 시설의 투자와 운용비용이 막대한 人工乾燥施設을 갖출 수 없는 중소 목재가공기업에서 활용할 수 있고, 나아가서 대규모 공장에서도 활용할 수 있는 목재건조용 외부집열판형 태양열건조기의 모델을 제시하고, 有用木材의 太陽熱乾燥特性과 그 효과를 구명하여 보다 열효율이 향상된 태양열건조기를 개발하는 것이 절실히 요구된다고 하겠다.

3. 材料 및 方法

3.1. 外部集熱板型 太陽熱乾燥器의 製作

본 연구를 위하여 설계, 제작된 목재건조용 외부집열판형 태양열건조기의 구조는 그림 1과 같으며, 건조기의 각 부분별 구조와 규격 및 그 제작방법은 다음과 같다.

3.1.1. 集熱器(Solar collector)

집열기의 크기는 건조기의 규모에 알맞도록 集熱部의 면적을 $1.6\text{m}^2(1.5\text{m} \times 1.1\text{m})$ 으로 하고 집열부를 제외한 모든 면을 두께 10cm의 스티로폼(styrofoam : 熱傳導率 $0.026744\text{W}/\text{m}^2\text{C}$)층으로 斷熱하였다.

집열부의 上層에는 유리에 비하여 잘 깨지지 않고 透過率도 비교적 양호한 두께 2mm의 투명한 強化플라스틱(transparent fiber reinforced plastic : 투과율 83%)을 그리고 下層에는 두께 5mm의 유리(투과율 87%)를 두었으며, 두 층사이에는 두께 5cm의 停止空氣層(dead air space)을 두어 집열기 내부로부터의 長波長損失을 방지하는 동시에 단열의 효과도 얻을 수 있도록 double glazing을 이용하였다.

吸熱板(heat absorber)으로는 無光澤 黑色 페인트(flat black paint : 吸收率 95%)를 塗布한 골이진 두께 0.5mm의 亞鉛鐵板(corrugated galvanized iron)을 사용하였으며, 유리와 5cm의 간격을 두어 흡열을 도모하였다.

한편, 설치면적을 최소화하기 위하여 집열기

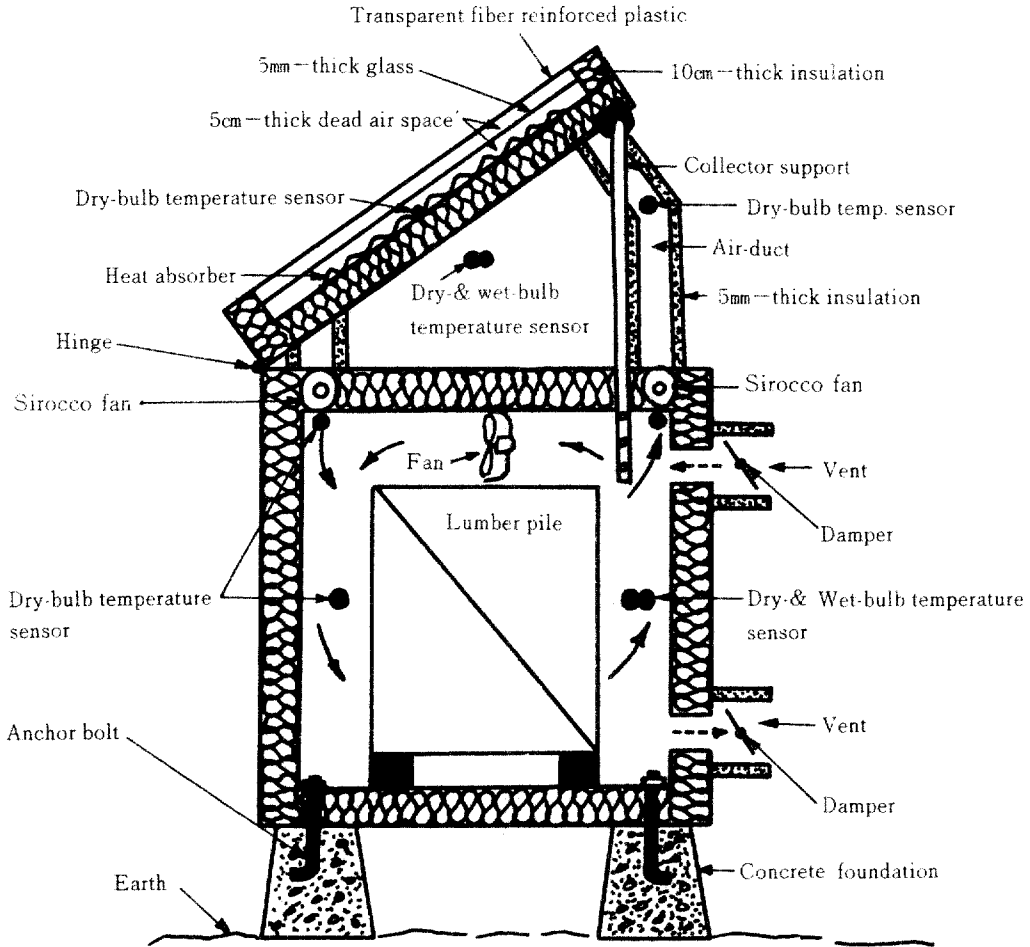


Fig.1. External collector type solar lumber dryer schematic.

를 건조실위에 위치하도록 하였으며 집열기와 건조실의 연결에 경첩과 위치변경이 가능한 집열기지지대를 사용하여 연중 최대의 일사량을 얻을 수 있도록 집열기의 설치각도(봄, 가을: 緯度와 일치, 여름: 緯度 -10° , 겨울: 緯度 $+10^{\circ}$)를 조절 가능하게 하였다.

3.1.2. 乾燥室

5cm \times 10cm 규격의 목재를 골격으로 한 바닥면적 1.2m \times 1.2m, 높이 1.2m 크기의 건조실 벽과 천정 및 바닥 모두는 두께 1.2cm 합판 두장 사이에 두께 10cm의 스티로폼을 두어 단열하였으며, 벽, 천정 및 바닥의 내외부는 우선 알루미늄페인트를 충분히 도포하여 수분 및 증기의 흡

수를 방지하는 vapor-barrier로 이용하였으며, 그 위에 다시 무광택 흑색페인트를 도포하여 공간에 흡열을 도모하므로써 熱傳導에 의한 열손실을 최소화하도록 하였다.

3.1.3. 空氣循環裝置

집열기로부터 더운 공기를 효과적으로 유입시키고, 棧積을 통하여 온도가 낮아진 공기를 다시 집열기로 보내기 위하여 건조실의 吹入口와 吹出口에 날개길이 30cm, 폭 6cm의 熱風팬(sirocco fan: 2,800rpm, 50W)을 각각 2대씩 설치하였으며, 집열기와 건조실을 연결하는 管(duct)은 두께 5mm의 發泡 폴리에틸렌층으로 단열하여 공기의 이동중 열손실을 방지할 수 있도

록 하였다.

送風速度의 조절을 위하여는 電壓調節機(0-130V, 380W)를 이용하였으며, 日沒後부터 日出前까지 열풍팬의 작동을 중지하여 건조실 내부의 온도를 유지하는 동시에 전기에너지의 낭비도 막기 위하여 타이머(timer)를 부착하여 적절한 시간에 電源을 자동으로 차단 또는 연결토록 하였다. 또한 열풍팬의 작동에 소요되는 전기에너지의 양을 측정하기 위하여 標準 積算電力量計(watt-hour meter)도 연결하였다.

한편, 기온이 매우 높고 일사량도 풍부한 기간에는 건조초기의 경우 건조실 내부온도가 지나치게 높히 상승하여 건조결합이 발생할 가능성이 크므로 自動溫度調節機(thermostatt)를 각 열풍팬에 부착하여 적정온도 이상인 경우 자동으로 열풍팬의 작동을 중지시켜 집열기로부터 뜨거운 공기의 유입을 막도록 하였다. 건조실내부의 공기순환을 위하여는 건조실 상부에 날개 지름 25cm의 프로펠러型 送風機(風速 1-4m/sec, 風量 2-9m³/sec, 36W) 2대를 설치하였으며, 열풍팬과 마찬가지로 각 송풍기에 전압조절기, 자동온도조절기 및 타이머를 부착하고 표준 적산전력계에 연결하였다.

습도가 높아진 내부공기를 건조실 외부로 배출하고 신선한 공기를 유입하기 위하여는 건조실의 상부에 지름 20cm의 吸氣口를, 그리고 하부에도 같은 크기의 排氣口를 두었으며, 건조실 외부로 돌출시켜 내부에 두께 5mm의 발포 폴리에틸렌층으로 단열한 바람문(damper)을 장착하여 惡天候시 빗물이나 강풍이 건조실 내부로 유입되는 것을 방지하는 한편, 일몰후에도 換氣口를 막아 건조실 내부온도나 건조초기 습도를 유지할 수 있도록 하였다.

3.2. 溫度와 風速 測定

집열기 및 건조실 내외부의 온도를 연속으로 측정하기 위하여 온도센서(pt100Ω)를 그림1에 표시된 위치에 설치하여 自動溫度記錄計(thermograph)에 연결하였다.

집열기로 유입되고 다시 건조실로 유입되는 공기의 이동속도와 건조실 내부의 풍속을 측정하기 위하여는 Biram 風速計(Biram's anemometer : 측정가능 최고풍속 15m/sec)를 이용하였다.

한편, 전국 주요도시의 일사량 및 실험기간동안의 광주지방 일사량등 기상조건은 中央氣象臺의 氣象年報와 광주지방 기상대의 測候資料를 이용하였다.

3.3. 集熱器의 效率 計算

본 연구에서 설계, 제작된 외부집열판형 태양열건조기의 집열기효율을 계산하기 위하여 우선 집열기의 에너지收支方程式(flat-plate collector energy balance equation)을 식(1)과 같이 수립하였다.

$$Q_U = A_c F_R [S - U_L (T_i - T_a)] \dots\dots\dots (1)$$

Q_U : useful energy output of a collector(MJ/hr)

A_c : area of collector(m²)

S : solar radiation hourly absorbed by the absorber plate(MJ/m²hr)

U_L : heat transfer coefficient, representing the thermal energy loss from the collector to the surroundings by conduction, convection, and infrared radiation(MJ/m²°C)

T_i : mean inlet temperature of the air(°C)

T_a : ambient temperature(°C)

F_R : collector heat removal factor(decimal)

식(1)의 변수중 먼저 집열기로부터의 열손실을 나타내는 熱傳達係數인 U_L 을 투명집열부(top loss), 집열기의 바닥(bottom loss) 및 측면부분(edge loss)을 통하여 손실된 에너지로 나누어 Duffie등(1980)¹¹⁾이 제시한 다음의 식들을 이용하여 계산하였다.

Klein's empirical equation for top loss coefficient

$$U_t = [NT_{p,m} / (C((T_{p,m} - T_a) / (N+f))^e) + 1/h_w]^{-1} + \sigma(T_{p,m} + T_a)(T_{p,m}^2 + T_a^2) / [\epsilon_p + 0.00591N h_w]^{-1} + (2N + f - 1 + 0.133 \epsilon_p) / \epsilon_a - N] \dots (2)$$

U_t : top loss coefficient
 N : number of covers
 $T_{p,m}$: mean absorber plate temperature(K)
 $C = 520(1 - 0.000051 \beta^2)$ for $0^\circ < \beta < 70^\circ$

β : slope of collector(degree)
 T_a : ambient temperature(K)
 $f = (1 + 0.089h_w - 0.1166h_w \epsilon_p)(1 + 0.07866N)$

h_w : wind heat transfer coefficient(W/m^2C)
 $h_w = 5.7 + 3.8V$ according to McAdams(1954)¹⁾

V : wind speed(m/sec)
 $e = 0.43(1 - 100/T_{p,m})$
 ϵ_p : emittance of cover(decimal)
 ϵ_a : emittance of absorber plate(decimal)
 σ : Stefan-Boltzmann constant($5.6697 \times 10^{-8} W/m^2K^4$)

$$U_b = K/L \dots (3)$$

U_b : bottom loss coefficient
 K : thermal conductivity of the insulation(W/mC)
 L : thickness of insulation(m)

$$U_e = (UA)_{edge} / A_e \dots (4)$$

U_e : edge loss coefficient
 U_{edge} : thermal conductivity of edge(W/m^2C)
 A_{edge} : area of edge(m^2)

또한 집열기로 부터 열을 공기에 전달하는 과정의 효율을 나타내는 collector heat removal factor(F_R)는 식(5)에 의하여 구하였으며, 그에 따른 시간별 및 일별 집열기의 효율은 식(6)과 식(7)에 의하여 계산하였다.

$$F_R = m C_p (T_o - T_i) / [A_c (S - U_L (T_i - T_a))] \dots (5)$$

m : flow rate of air(kg/sec)

C_p : specific heat of air(J/kg K)
 T_o : mean outlet temperature of the air(C)

$$\eta_{time} = Q_u / (A_c I) \dots (6)$$

$$\eta_{day} = \Sigma Q_u / \Sigma (A_c I) \dots (7)$$

η_{time} : hourly collector efficiency(decimal)
 η_{day} : day-long collector efficiency(decimal)

I : global solar radiation on the horizontal surface(MJ/m^2hr)

3.4. 所要乾燥日數 推定

제작된 외부집열판형 태양열건조기를 이용하여 목재를 건조할 때 소요되는 건조일수를 추정하기 위하여 우선 건조기로 부터 요구되는 총에너지를 식(8)을 통하여 구한 후, 계산된 집열기 효율을 이용하여 식(9)와 같이 집열기로 부터 요구되는 에너지를 계산하였다.

$$E_d = E_i V_w S (M_i - M_f) \times 10^3 / (\eta_d / 100) \dots (8)$$

$$E_c = E_d / (\eta_c / 100) \dots (9)$$

E_i : energy required to evaporate 1kg of water from wood(2.3MJ/kg)

E_c : energy required from collector(MJ)

E_d : energy required from dryer(MJ)

M_i : green moisture content of wood(decimal)

M_f : final moisture content of wood(decimal)

V_w : volume of wood to be dried(m^3)

S : specific gravity

η_d : dryer efficiency(%)

30-40% for well insulated($R_{wall} > 30$)

20-30% for moderately insulated ($5 < R_{wall} < 30$)

10-20% for poorly insulated ($1 < R_{wall} < 5$)

η_c : solar collector efficiency(%)

한편, 집열기로 투입되는 연평균 총 일사량은 식(10)으로 구하였으며, 따라서 소요건조일수

를 식(11)과 같이 추정하였다.

$$E_s = I_r A_c \dots\dots\dots (10)$$

$$N_d = E_s / E_d \dots\dots\dots (11)$$

E_s : heat supplied to solar collector(MJ/day)

I_r : annual average daily solar radiation rate(MJ/m² day)

N_d : estimated number of drying days required per a charge(day)

그러므로 연중 가능한 건조회수는 365일을 소요 건조일수로 나누어 추정할 수 있다. 그리고 본 연구에서 설계된 집열기를 이용하는 경우 일정량의 목재를 원하는 건조일수내에 건조하기 위하여 요구되는 집열기의 면적은 식(12)를 통하여 쉽게 구할 수 있다.

$$A_c = E_d / I_r N_d'$$

N_d' : desired number of drying days per a charge(day)

4. 結果 및 考察

4.1. 外部集熱板型 太陽熱乾燥器의 空氣條件

실험기간중 淸明日을 선택하여 측정한 외기, 흡열판 및 건조기 내부공기의 온도변화와 광주기상대의 자료로부터 얻은 水平面日射量의 변화는 그림2와 같다.

흡열판의 온도는 일출후 일사량이 증가하면서 급격히 상승하기 시작하여 14시경에 최고온도 84℃를 나타내었다. 그리고 일몰전까지는 60℃를 유지하다가 일몰후 다시 급격히 하강하기 시작하여 4시경에는 외기의 온도와 거의 차이가 없었다.

건조기 내부공기의 온도는 집열기로 통하는 열풍팬을 9시경에 작동시키면서 온도가 상승하기 시작하여 흡열판의 경우보다 조금 낮은 15시경에 최고온도 67.5℃를 나타내었다. 일몰후는 열풍팬의 작동을 중지시키므로써 집열기를 통한 열손실을 억제하여 그후 일출전까지도 흡열판보다 높은 온도를 계속 유지할 수 있었으며,

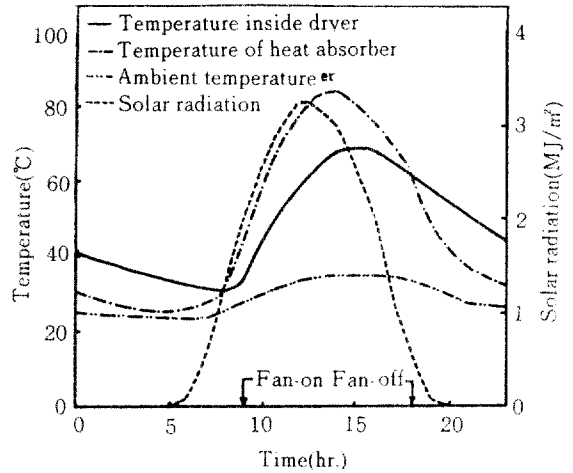


Fig.2. Diurnal cycle of dryer condition on sunny day(August 1, 1990).

일일 평균온도는 48.5℃로 외기의 평균온도 29.5℃보다 19℃정도가 높게 나타났다. 鄭동(1988)¹¹⁾이 같은 기간중 반온실형의 공기조건에 대하여 보고한 바에 따르면 최고온도 50℃에 외기와 건조기내부의 평균온도차는 9-13℃로 이와 같은 온도의 차이는 반온실형의 경우 투명집열부를 통한 열손실이 심각한 반면 외부집열판형은 건조기가 집열기와 분리되고 비교적 충실히 단열되어 일몰후에도 온도의 하강속도가 느렸기 때문이며 온도가 급격히 떨어지고 있는 일출전 수시간 동안만 약간의 補助熱源을 가동한다면 일일중 비교적 높고 균일한 온도를 유지할 수 있으리라 사료된다.

4.2. 集熱器의 效率

일일중 시간별로 집열기를 통하여 획득한 에너지와 그에 따른 집열기효율의 변화를 계산한 결과는 표1과 같았다.

집열기 내부를 이동하는 공기의 속도를 4m/sec로 하였을 때 집열기로 투입되는 공기와 집열기로 부터 건조기에 투입되는 공기 및 흡열판의 평균온도는 각각 52.5℃, 57.9℃, 71.1℃로서 李동(1989)¹²⁾이 제시한 방법을 이용하여 계산한 집열기에 투입된 총 일사량 20.26MJ/m²중 약 52%에 해당하는 10.47MJ/m²의 에너지가 건조기에 투입되었음을 알 수 있었다. 집열기의

Table 1. Calculation of daily useful energy gain and efficiency of solar collector

Flow rate (m/sec)	Item	Time							
		9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17
4	Ambient Temperature(°C)	29	32	33	35	36	36	36	36
	Inlet air temperature(°C)	36	44	48	55	60.5	59	59	56
	Outlet air temperature(°C)	43	51	54	62	64	65	64	60
	Wind speed(m/sec)	0.5	1.7	1.3	3.3	3.8	2.5	2.0	2.8
	Solar radiation (MJ/m ²)	2.35	2.60	3.19	3.21	2.93	2.65	2.09	1.24
	Energy gain(MJ/m ²)	1.61	1.61	1.38	1.61	0.81	1.38	1.15	0.92
	Collector efficiency(%)	68.5	61.9	43.3	50.2	27.7	52.1	55.0	74.2
	Inlet air temperature(°C)	31	41	50	57	62	64.5	64.5	62
	Outlet air temperature(°C)	36	47	57	64	69	71	69.5	66
	Energy gain(MJ/m ²)	0.85	1.02	1.19	1.19	1.19	1.11	0.85	0.68
Collector efficiency(%)	47.2	42.0	41.9	38.5	38.6	39.1	35.3	37.4	
2	Inlet air temperature(°C)	33	42	49	55	60	62	63	60
	Outlet air temperature(°C)	36	46	56	63	68	71	70	67
	Energy gain(MJ/m ²)	0.33	0.44	0.77	0.88	0.88	0.99	0.77	0.77
	Collector efficiency(%)	16.4	16.7	25.5	27.3	27.3	33.1	29.8	39.3

상부, 바닥 및 측면을 통한 열손실계수는 각각 3.703W/m²°C, 0.267W/m²°C, 0.905W/m²°C로 투명 집열부를 통한 열손실이 가장 큰 부분을 차지하고 있었으며, 집열기를 통한 전체 열손실은 2.5MJ/m²으로 집열기에 투입된 총 일사량의 약 12%에 달하였다.

한편, 공기의流速이 3m/sec와 2m/sec인 경우에는 집열기로 투입되는 공기와 집열기로부터 건조기로 투입되는 공기의 평균온도차가 각각 5.9°C와 6.6°C로 유속 4m/sec의 경우보다

약간 높았으나 단위시간당 집열기를 통과하는 공기의 양이 크게 줄어들어 집열기로부터 효과적으로 열을 흡수하지 못하여 그 열효율은 각각 39.8%와 26.9%로 낮았다. 그리고 유속이 1m/sec이하인 경우에는 공기의 유동이 거의 이루어지지 않아 온도차가 나타나지 않았다.

집열효율 52%는 Little(1979)¹³⁾이 설계한 집열기의 최대효율 48%보다는 양호하였으나 Chen등(1982)²¹⁾이 개발한 집열기의 최고효율 67%보다는 낮은 수준으로 보다 투과율이 높으면서

도 충격에 잘 견디는 집열부의 선택과 흡열판의選擇的 塗裝(selective coatings) 및 空氣流動通路의 개선등을 통하여 集熱效率을 향상시킬 수 있을 것이다. 또한 반사판(reflector)을 부착하여 집열기로 보내지는 일사량을 증대시켜 집열 효율을 6-10% 정도 향상시키는 것도 좋은 방법 중 하나라고 생각한다.

한편, 집열기의 효율이 한낮보다 오전에 높은 이유는 오전에는 집열판의 온도상승이 급격히 이루어져 집열기에 투입되는 공기와 건조실로 방출되는 공기의 온도차가 크나 한낮에는 이미 건조실내부의 공기온도가 높은 상태로 유지되어 집열기에 투입되는 공기의 온도도 상승하여 그 온도차가 감소하기 때문으로 사료된다.

4.3. 所要乾燥日數

본 연구에서 설계, 제작된 외부집열판형 태양열 건조기를 이용하여 實材積 0.2m³의 소나무(生材比重 0.4)와 참나무(生材比重 0.7)를 각각 함유율 80%로 부터 15%까지 건조한다고 가정하였을

때 소요될 것으로 추정되는 건조일수 및 그에 따른 年中乾燥可能回收, 그리고 실제적 1m³의 목재를 수종별로 건조결함을 최소화할 수 있는 건조속도로 건조하고자할 때 요구되는 집열기의 면적을 표2에 나타낸 지난 5년간 전국 8개 주요 도시의 일사량을 토대로 하여 표3에 나타내었다.

집열면적 1.6m²을 이용하여 실제적 0.2m³의 소나무와 참나무를 건조할 경우 주요 8개 도시 중 일사량조건이 가장 양호한 목포지역에서는 소요건조일수가 각각 36일과 61일, 그리고 가장 열악한 일사량조건을 보인 춘천지역에서는 각각 41일과 69일로 추정되었으며, 전국 평균은 각각 38일과 66일이었다.

계절별로 소요건조일수를 추정하여보면 봄철(3월-5월)에는 29일과 52일, 여름철(6월-8월) 31일과 54일, 가을철(9월-11월) 44일과 77일, 그리고 겨울철(12월-2월)에는 56일과 99일로 Chen등(1982)²⁾이 미국 Madison에서 외부 집열판형 태양열 건조기를 제작하여 여름철에

Table 2. Average annual global radiation on a horizontal surface for various cities in Korea* (unit: MJ/m²)

Month	Chunchon	Inchon	Kwangju	Mokpo	Pusan	Seoul	Taegu	Taejon	Average (/day)
January	214.21	215.20	259.13	260.91	273.34	246.76	285.67	244.20	8.06
February	273.86	280.77	288.34	284.62	293.60	309.06	312.29	292.48	10.43
March	395.13	385.55	410.99	435.46	388.90	421.81	410.21	413.28	13.59
April	480.89	477.93	516.48	551.41	488.34	517.71	525.85	515.67	16.98
May	559.10	558.36	558.81	605.17	524.49	586.27	554.78	565.06	18.20
June	546.32	524.51	473.21	526.13	467.45	528.26	497.21	498.25	16.92
July	428.20	413.85	440.40	489.64	438.52	388.12	424.52	436.26	13.95
August	461.72	452.67	494.49	555.36	480.14	430.38	451.66	497.20	15.42
September	380.11	398.44	400.72	441.57	349.59	402.61	377.19	396.42	13.11
October	309.21	330.74	372.37	398.60	356.04	351.11	350.05	350.02	11.36
November	210.48	226.95	248.53	264.38	273.31	232.62	268.58	237.51	8.18
December	184.85	198.17	223.14	224.68	250.64	196.00	246.77	208.38	6.99
Average (/day)	12.18	12.24	12.84	13.80	12.56	12.63	12.89	12.76	12.74

* Data from 'Annual climatological report; 1985-1989' published by Korean Meteorological Service.

Table 3. Number of days required to dry 0.2m³ of wood, number of charges per a year, and solar-collector area required to dry 1.0m³ of wood at desired drying rate from 80% to 15% moisture content

Species	Volume of wood to be dried (m ³)	Item	Chunchon	Inchon	Kwangju	Mokpo	Pusan	Seoul	Taegu	Taejon	Average	
Pine	0.2	No. of drying days required (day)	40.8	40.6	38.7	36.0	39.6	39.4	38.6	39.0	37.6	
		No. of charges per year	8.9	9.0	9.4	10.1	9.2	9.3	9.5	9.3	9.7	
		Solar-collector area required (m ²)	14.3	14.2	13.6	12.6	13.9	13.8	13.5	13.7	13.7	
	Oak	0.2	No. of drying days required (day)	68.8	68.5	65.3	60.8	66.8	66.4	65.1	65.7	65.8
		0.2	No. of charges per year	5.3	5.3	5.6	6.0	5.5	5.5	5.6	5.6	5.6
		1.0	Solar-collector area required (m ²)	16.7	16.6	15.8	14.7	16.2	16.1	15.8	15.9	16.0

* Desired safe drying rate : 3%/day for pine and 2%/day for oak.

두께 2.9cm의 hard maple과 red oak를 건조한 결과 보고한 소요건조일수 26일과 54일에 접근하고 있으며,李등(1989)¹²⁾이 수원지방에서 두께 2.5cm의 참나무류를 대상으로 活性太陽熱乾燥期間(4월-6월)에 조사, 보고한 반온실형 태양열 건조일수 69일보다는 약 25%의 소요건조일수 감소효과가 기대된다. 그러나 증기를 이용한 일반적인 열기건조의 소요일수 19일과는 큰 차이를 나타내고 있다.

실재적 1m³의 소나무와 참나무를 각각 3%/일과 2%/일의 乾燥缺陷豫防 適正乾燥速度⁸⁾로 건조할 경우 함수를 80%로부터 15%까지의 건조일수는 각각 22일과 33일이 소요되고 이때 요구되는 평균 집열면적은 13.7m²과 16.0m²으로 나타나 건조대상목재의 실재적이 약 5배정도 증가한 반면 所要集熱面積은 약 10배로 늘어나고 있

으며, 지금까지 개발된 약 10여종의 외부집열판형 태양열 목재건조기들도 그 집열면적을 조사하여 보면 건조대상 목재의 실재적 1m³당 10-20m²의 범위임을 알 수 있다.

그러나 본 외부집열판형 태양열건조기의 壁體熱抵抗係數(R : heat resistance coefficient)가 22로 계산되어 건조기의 열효율을 30%로 적용하였으므로 만일 건조기 벽체의 단열을 보다 충실히(열저항계수 30이상)하여 건조기의 열효율을 10%정도 향상시키고, 집열기에도 보다 높은 투과율을 지닌 집열부를 사용함과 동시에 더욱 충실한 단열을 기하여 집열기의 효율도 10%정도 향상시킨다면 소요집열면적을 약 38%까지 감소시킬 수 있으리라 사료된다. 또한 태양광 반사판을 부착하여 일사량을 증대시키면 Little(1979)¹³⁾이 보고한 약 23%정도의 집열면

적 감소효과를 기대할 수 있으며, 돌이나 물 등의 매체를 이용한 축열장치와 건조기 내부 상대 습도를 조절할 수 있는 제습장치, 그리고 보조 열원등을 추가로 장치하고 그 조절을 간단한 개인용 컴퓨터등을 이용하여 공기 및 목재조건의 측정과 동시에 실시한다면 열기건조의 효과에 접근할 수 있을 것이다. 그러나 태양열건조의 가장 중요한 관점은 경제성으로 모든 처리와 장치의 도입에는 신중한 經濟性 分析이 선행되어야 하며, 이와 같은 경제성 분석방법의 개발도 역시 요청되고 있다.

5. 結 論

본 연구는 1.6m²의 집열면적과 最大受容可能材積 1.0m³의 실험용 외부집열판형 태양열 목재 건조기를 설계, 제작하고, 건조기 및 집열기 내 외부의 공기조건을 측정하여 집열기의 효율을 조사하는 한편, 전국 주요 8개 도시의 일사량을 조사하여 각 지역별로 수종, 공기유속 및 수용 재적에 따른 소요건조일수와 소요집열면적을 추정하였다.

본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 여름철 청명일에 집열기 내부를 이동하는 공기의 속도를 4m/sec로 하였을 때 집열기로 투입되는 공기와 집열기로부터 건조기로 투입되는 공기 및 흡열판의 평균온도는 각각 52.5°C, 57.9°C, 71.1°C였다.
2. 집열기의 총 열손실계수는 4.875W/m²C였으며, 집열기의 효율은 52%였다.
3. 실재적 0.2m³의 소나무와 참나무를 함유율 80%로부터 15%까지 건조한다고 가정하였을 때 추정건조일수는 각각 38일과 66일이었으며, 연간 건조가능 회수는 각각 9-10회와 5-6회로 추정되었다.
4. 실재적 1.0m³의 소나무와 참나무를 함유율 80%로부터 15%까지 적정건조속도로 건조한다고 가정하였을 때 요구되는 평균 집열면적은 13.7m²과 16.0m²으로 추정되었다.

參 考 文 獻

1. Duffie, J. A. and W. A. Beckman. 1980. Solar engineering of thermal processes. John Wiley & Sons, Inc.
2. Chen, P. Y. S., W. A. Helmer, H. N. Rosen, and D. J. Barton. 1982. Experimental solar dehumidifier kiln for drying lumber. For. Prod. J. 32, (9).
3. Chen, P. Y. S. and W. A. Helmer. 1987. Design and tests of a solar-dehumidifier kiln with heat storage and heat recovery systems. For. Prod. J. 37 (5).
4. Helmer, W. A., P. Y. S. Chen, H. N. Rosen, and S. W. Wang. 1980. A theoretical model for solar-dehumidification drying of wood. Proc. 2nd International Symposium, Drying '80, 2 : 21-28.
5. Helmer, W. A., P. Y. S. Chen, and M. B. Vaidya. 1982. A computer model to simulate solar and solar-dehumidification lumber drying. Trans. ASME 104 : 182-186.
6. Helmer, W. A., P. Y. S. Chen, and S. Nazer-Adl. 1983. A theoretical model for a solar absorption lumber drying system. Proc. Gateway Energy Conference.
7. Helmer, W. A. and P. Y. S. Chen. 1985. Computer simulation of a new method to dry lumber using solar energy and absorption refrigeration. Wood Fiber Sci. 17 (4) : 464-476.
8. Helmer, W. A. 1986. A general collector sizing method for solar kilns. For. Prod. J. 36 (6).
9. Helmer, W. A. 1987. Model development and economic evaluation of a sensible unit utilized in a solar-dehumidification lumber drying system. Wood Fiber Sci. 19 (3) : 246-261.
10. Jung, H. S. and H. W. Lee. 1987. Sea-

- soning of wood using solar energy. Collection of theses published by Dr. Chong Supp Shim.
11. Jung, H. S., H. W. Lee, N. H. Lee, and S. B. Lee. 1988. Seasoning of commercial wood using solar energy. *Korean Wood Sci. & Tech.* 16(4) : 10-39.
 12. Lee, H. W. and H. S. Jung. 1989. The comparative analysis of drying-conditions, -rates, -defects and -yield, and heat-efficiency in solar dehumidification-drying oaks with those in conventional air-, semi- greenhouse type solar-, and kiln-drying. *Korean Wood Sci. & Tech.* 17(1) : 22-54.
 13. Little, R. L. 1979. Industrial use of solar heat in lumber drying : a long term performance report. *For. Prod. J.* 29(9).
 14. Little, R. L. 1984. Solar-heated water dries lumber. *For. Prod. J.* 34(2).
 15. Tschernitz, J. L. and W. T. Simpson. 1979. Solar-heated lumber dryer for tropical latitudes. *Solar Energy* 22 : 563--566.
 16. Tschernitz, J. L. 1984. Solar dry kiln for tropical latitudes. *For. Prod. J.* 34(5).
 17. Tschernitz, J. L. and W. T. Simpson. 1985. FPL design for lumber dry kiln using solar/wood energy in tropical latitudes. FPL-44.