

木材産業用 太陽熱 乾燥裝置의 開發과 經濟性分析에 관한 研究*1

李亨雨*2

Study on The Development and Economic Evaluation of Solar Drying System for Wood Industry*1

Hyung-Woo Lee*2

ABSTRACT

Experimental external collector type solar lumber dryer of 1m' of maximum capacity with 1.6m' of collector area was designed and constructed.

The seasonal performance of solar dryer, including air-conditions, energy efficiency, and drying characteristics of 3cm-thick red pine and douglas-fir lumber was investigated. Also, the economic analysis was carried out.

Annual average solar drying rate was about 2 times faster than air-drying rate with no significant difference in the amount of drying defects. But in initial drying stage air-drying rate in winter was much faster and those in spring and autumn were slightly slower than solar drying rate in each season.

Annual average energy efficiency of solar-dryer and-collector was 25% and 57%, respectively. Fuel savings were over 50% at 15% of energy inflation rate and the payback period was estimated as 6.10 years at 30% of energy inflation rate.

1. 緒 論

세계적인 에너지위기에 대처하기 위하여 꾸준히 연구되어온 태양에너지의 이용은 목재가공분야에서는 특히 에너지소비가 큰 건조공정에 집중되어왔다. 그러나 개발 초기의 溫室型은 간단한 형태와 시설에 반하여 열손실이 많고 에너지 효율이 극히 낮아 관심을 집중시키지 못하였으

며, 그 이후 출현한 半溫室型의 경우에도 에너지효율의 향상효과가 기대만큼 크지 못하여促進天然乾燥(forced-air-drying)의 범주를 벗어나지 못하였다.

그러므로 몇몇 선진국에서는 1970년대 중반부터 보다 충실한 단열처리와 간단한 보조장치를 갖추어 인공건조실에 접근할 수 있는 外部集熱販型 太陽熱 木材乾燥器의 개발에 관하여 많은

* 1. 接受 1991年 12月 12日 Received December 12, 1991

이 論文은 1990年 韓國科學財團 新進研究費 支援에 의하여 研究되었음.

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

연구가 계속 수행되어 Read등¹³⁾은 집열면적 56m²의 매우 넓은 집열기를 제작하여 6.5m²의 alfine ash를 건조한 결과 열기건조속도의 약 1/2수준에 접근하였으며, 기후조건이 매우 양호한 남아프리카에서는 Steinmann등^{16, 17)}이 수용재적 0.43m²의 실험용 외부집열판형 건조기를 설계, 제작한 이후 건조실내 평형함수율의 조절 방법이나 온도 및 풍속조절의 자동화에 의한 건조효과의 극대화를 위한 연구를 최근까지 계속하고 있다.

그러나 외부집열판형에 관한 많은 연구가 미국에서 집중 연구되어 Lumely등¹²⁾은 Louisiana 지방에서 집열기의 형태를 평판형과 상자형으로 각각 제작하여 이용한 결과 에너지효율면에서 상자형의 경우가 보다 효과적이라 주장하였으며 Robbins¹⁵⁾은 Arkansas 지방에서 건조실 밑바닥에 돌을 매체로 한 축열장치를 둔 형태를 고안하였고, 건조능력 완화를 위한 증기분무장치를 부착하기도 하였다.

지금까지의 연구들이 실험용의 소규모인데 반하여 Little^{10, 11)}은 수용재적 240m²인 건조실에 물을 열매체로 한 면적 230m²의 집열기와 220m²의 반사판을 설치하여 1회 건조당 1,000달러 이상의 절감효과와 5년미만의 자본회수기간을 보고함으로써 태양열건조의 산업적 이용가능성을 제시하였다.

Tschernitz등^{19, 20)}은 지금까지 개발된 집열기의 형태와는 달리 지면에 부착되어 설치한 형태의 집열기를 개발하여 적도지방에서의 이용가능성을 확인한 후 목재폐재를 연료로 하는 연소로와의 결합을 시도한 바 있으며, Chen등^{2, 3)}은 빈 알루미늄강통을 집열기 내부에 충전하여 열효율을 높인 집열기의 개발에 성공한 이후 돌을 이용한 축열장치와 제습장치로부터의 폐열을 이용할 수 있는 열교환기를 설치하여 두께 1인치 yellow-poplar를 건조한 결과 계절에 관계없이 건조속도가 열기건조의 경우에 거의 접근하였으며, 건조결합에 의한 손실도 기존의 제습태양열 건조기의 경우보다 상당히 감소되었음을 보고한 바 있다.

국내에서는 최근 鄭등^{6, 7)}이 국내외 5수종의 반온실형 태양열건조를 실시한 결과 천연건조일수율 50%이상 감소시킬 수 있음을 보고하였으며, 李등⁸⁾은 동일한 형태의 태양열건조기에 제습장치를 설치하여 참나무의 건조속도를 향상시

킬 가능성을 밝힌 후 李⁹⁾는 실험용 외부집열판형 태양열건조기를 실험 제작하여 그 성능을 보고한 바 있으나 아직까지도 연구의 실적이나 내용이 미흡하여 국내에서는 태양에너지의 목재산업에의 이용이 전무한 실정으로 우리나라의 기후조건에 알맞은 태양열 목재건조기의 설계와 그를 바탕으로 한 열효율향상방법의 개발을 통하여 보다 효율적인 모델을 목재산업계에 제시하는 것이 시급하다고 하겠다.

본 연구에서는 실험제작된 외부집열판형 태양열 목재건조기를 이용하여 연중 계절별 태양열 및 천연건조를 함께 실시함으로써 4계절의 기후변화에 따른 건조조건변화 및 건조효과를 분석하는 한편, 경제성분석을 통하여 태양열 목재건조시스템의 산업적 이용가능성을 구명하고자 하였다.

2. 材料 및 方法

2.1 外部集熱板型 太陽熱乾燥器의 製作

본 연구를 위하여 설계, 제작된 목재건조용 외부집열판형 태양열건조기의 부분별 구조와 규격 및 그 제작방법은 李⁹⁾가 발표한 바와 같다.

2.2 季節別 乾燥試驗

2.2.1 供試材料

계절별 태양열 건조특성 및 건조효과를 조사하기 위하여 두께 3cm, 폭 12cm, 길이 120cm의 供試板材를 제재소로부터 생재상태로 구입하여 사용하였으며, 겨울철(1990년 12월 4일-1991년 2월 13일)과 봄철(4월 11일-5월 2일)에는 국산 소나무(*Pinus densiflora S. et Z.*)를 선정, 사용하였으나 그후 구입이 불가능하여 여름철(8월 16일-8월 28일)과 가을철(10월 9일-10월 27일)의 供試樹種으로 美松(*Pseudotsuga mansurii*)을 이용하였다.

2.2.2 棧積과 含水率測定

각 계절별로 1층에 4본씩 12층까지 두께 3cm의 棧木을 사용하여 총 48본(실재적 0.21m³)을 잔적하였으며, 각 흡수층의 중앙에 乾燥中 含水率測定用 試驗片 1본씩 총 6개의 시험편을 두어 건조기간중 1일 1회 무게측정하였다.

2.3 에너지效率 計算

본 연구에서 설계, 제작된 외부집열판형 태양

열건조기의 에너지효율을 계산하기 위하여 Duffie등¹⁾이 제시한 방법을 기준으로 우선 집열기로 부터 얻은 에너지의 양을 식(1)과 같이 구한 후 집열기로 투입된 전체 태양에너지의 양으로 나누어 식(2)에서 처럼 집열기의 효율을 계산하였다.

$$Q_c = m C_p (T_o - T_i) \dots\dots\dots(1)$$

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

m : flow rate of air (kg / hr)

C_p : specific heat of air (MJ / kg K)

T_o : outlet temperature of air (K)

T_i : inlet temperature of air (K)

$$\eta_c = 100 Q_c / (A_c I) \dots\dots\dots(2)$$

η_c : collector efficiency (%)

A_c : collector area (m²)

I : global solar radiation on the horizontal surface (MJ / m² hr)

전체적인 건조기의 에너지효율을 계산하기 위하여 1일 총 투입에너지를 송풍기와 열풍팬의 작동에 소요된 전기에너지를 일사량과 합산하여 구하고, Resch¹⁴⁾가 목재로 부터 1kg의 수분을 제거하는 데 소요되는 에너지로 제시한 2.4MJ / kg에 1일간 제거된 함수율(分率)과 판재의 총 건조무게를 곱하여 1일간 목재로 부터 수분을 제거하는 데 소요된 에너지를 구하므로써 식(3)에 따라 에너지효율을 계산하였다.

$$\eta_k = 2400 W_r / (A_c I_t + E_f) \dots\dots\dots(3)$$

η_k : solar dryer efficiency (%)

W_r : weight of water removed from lumber pile (kg / day)

I_t : total solar radiation for one day (MJ / m² day)

E_f : electrical energy used to operate fans (MJ / day)

2.4 經濟性 分析方法

太陽熱 利用裝置의 初期 施設投資費는 언제나 계속 가격이 상승하는 에너지의 절감에 의하여 회수되기 마련이나 일반적으로 자본의 회수에 장기간이 소요되어 시스템의 시설비나 壽命과 함께 金利, 物價上昇率, 稅率등의 경제적인 요인들을 고려하여 시스템의 규모를 결정하여야 할 것이다.

그러나 주택이나 건물의 태양열 난방시스템에 대한 경제성 분석에 대하여는 이미 많은 연구가 진행되어 온 반면, 목재산업용 태양열 이용시스템에 대한 연구는 Lumley등¹²⁾이나 Tschernitz²¹⁾와 Helmer⁵⁾등이 매우 간단한 回收期間法 (payback period method)이나 純現在價値法 (net present value method)에 의하여 분석한 것 이외에는 거의 찾아 볼수가 없다. 따라서 본 연구에서 제작한 시스템에 대한 경제성 분석은 Fisk등⁴⁾이 태양에너지를 보조열원으로 이용하는 기존의 난방시스템에 적용한 방법을 응용하여 다음과 같이 분석하였다.

우선 분석대상기간을 N년으로 가정하였을 때 油價上昇率(e)과 投資全額을 다른 부문에 투자하였을 때 기대할 수 있는 利潤率(d: 割引率)을 반영하는 경제요소(F1)와 투자자금의 貸出金利(J), 財産稅(P)와 所得稅(R)등의 각종 세율, 투자액중 自己負擔金比率(K) 및 保險과 維持費의 비율(U)등을 반영하는 經濟要素(F2)를 식(4)와 식(5)에 의하여 각각 구하였다.

$$F1 : (1-R)F(N, e, d) \dots\dots\dots(4)$$

$F1$: economic factor, accounting for the inflation of energy costs

$F(N, e, d)$: inflating-discounting factor = $[1 - ((1+e)/(1+d))^N] / (d-e)$

d : discounting rate

N : analysis term (yr)

e : energy inflation rate

R : income-tax rate

$$F2 = K + [(1-R)F(M, 0, d) / F(M, 0, J) + RF(M, J, d) / F(M, J, 0)](1-K) + [(1-R)P + U]F(N, i, d) - RF(Z, 0, d) / Z \dots\dots\dots(5)$$

$F2$: economic factor, accounting for the mortgage, taxes, and upkeep of system

P : property-tax rate

U : insurance and maintenance fraction

J : mortgage rate

K : downpayment fraction

Z : depreciation lifetime (yr)

i : general inflation rate

태양열 이용시스템의 초기 시설투자비를 포함

한 사용 가능한 전기간 동안의 운용비용은 식 (6)으로 나타낼 수 있으며, 이 費用曲線의 집열 면적에 대한 微分이 0일 경우의 해는 그 비용을 최소로 하면서 최대의 비용절감효과를 기대할 수 있는 경제적 집열면적이라 할 수 있으며 식 (7)에 의하여 구하였다.

$$C_t = A_c C_a (F_2 - T) + (1 - \tau) Q_{yr} E F_1 \dots \dots \dots (6)$$

C_t : total lifetime costs associated with the solar-heating system(₩)

T : fraction of first cost refunded as a federal tax credit = $L + m / A_c C_a$

C_a : collector-area-dependent cost(₩ / m^2)

L : constant(0.15 for energy credit)

m : constant determined by the system type and cost(0 for commercial)

Q_{yr} : total energy demand for one year(MJ / yr)

E : delivered energy cost by conventional heating system, considering furnace efficiency(0.5-0.6 for gas and oil : 1.0 for electric resistance : 1.4 for electric heat pumps)

$$\tau = a + b \ln(A S_{yr}^k / Q_{yr})$$

a, b : collector-dependent constants ($a=0.918$ and $b=0.432$ for air flat-plate collector)

S_{yr} : total solar radiation on a horizontal surface for one year(MJ / m^2 yr)

k : area-performance correction factor (=1)

$$A_{opt} = b Q_{yr} E F_1 / C_a (F_2 - L) \dots \dots \dots (7)$$

A_{opt} : optimum collector area(m^2)

한편, 연간 요구되는 에너지의 양은 건조대상 수종별 적정 건조소요일수를 고려한 연간 건조 가능회수를 추정하여 식(8)에 의하여 계산하였다.

$$Q_{yr} = 1000 V N_c S (M_i - M_f) E_1 / (1 + M_i) \dots \dots (8)$$

N_c : number of charges per year

E_1 : energy require to evaporate 1kg of water from wood(2.4MJ / kg)

S : specific gravity

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

경제적 집열면적을 이용하여 연간 절감가능한 에너지비용의 비율은 Tschernitz²¹⁾가 제시한 식 (9)를 사용하였으며, 이때 송풍기의 가동에 소요되는 전기에너지는 1 m^3 의 목재당 0.2hp가 필요한 것으로 가정하여 연간 5114MJ / m^3 yr가 소요되는 것으로 추정하였다. 한편 그에 따른 투자자본 회수기간은 우선 분석기간중 태양열 이용에 의한 연료비의 절감액을 식(10)에 의하여 구한 후 회수기간법을 이용하여 식(11)로 계산하였다.

$$F_s = 100 Q_{sn} / (Q_{yr} - Q_p) \dots \dots \dots (9)$$

F_s : fuel savings(%)

Q_{sn} : net solar energy gain(MJ / yr) = $S_{yr} A_{opt} \tau_c$

Q_p : electric power(Mj / yr)

$$C_f = \sum [Q_{sn} E (1 + e)^{n-1} \dots \dots \dots (10)$$

C_f : cost of fuel saved over amortization(₩)

$$n = \log[(A_{opt} C_a e) / (Q_{sn} E) + 1] / \log(1 + e) \dots \dots \dots (11)$$

n : payback period(yr)

그리고 집열기의 단위면적당 투자할 수 있는 최고투자금액은 투자금에 대한 세금공제율을 10%로 가정하여 Lumley등¹²⁾이 제시한 식(12)를 통하여 산출하였다.

$$MP = ANPV / [1 - \{1 - (1 / (1 + d))^n\} (1 - R) / (Zd)] \dots \dots \dots (12)$$

MP : the maximum price to be paid per m^2 of collector(₩ / m^2)

$ANPV$: net present value, adjusted for investment tax credit (₩ / m^2)

3. 結果 및 考察

3.1 乾燥器의 温度條件

실험대상 계절별 건조시험에서 측정된 흡열판, 건조기내부공기 및 外氣 온도변화중 清明日의 자료를 측정당시의 함수율과 함께 표1에 나

타내었다.

흡열판의 最高溫度는 겨울철과 봄철 건조초기 단계를 제외하고는 모든시기에서 60°C이상이었으나 최저온도는 외기온도의 것과 큰 차이가 없어 일몰후에서 일출전까지 집열부를 통한 熱傳導에 의한 에너지의 손실이 극심함을 알 수 있었다. 乾燥器內部溫度 역시 여름철이 가장 높아 최고 48.5°C를 기록하였으나 겨울철과 봄철 건조초기에는 효율적인 건조가 이루어질 수 없는 30°C미만을 나타내었다.

계절별 平均溫度의 경우 심한 온도변화로 最低溫度가 매우 낮아 여름철 乾燥末期를 제외하고는 모든 시기에서 30°C미만을 보이고 있어 태양열만을 이용한 시스템의 단점을 나타내고 있

다. 따라서 집열부 및 건조기벽체를 통한 열손실을 막기 위한 단열처리와 일몰후부터 일출전까지 건조기내부 공기온도를 적정수준으로 유지할 수 있는 보조 열원장치가 필요한 것으로 사료된다.

한편, 건조기내부와 외부의 온도차는 日較差가 심한 가을철에 가장 큰 것으로 나타났으며, 건조말기의 내부온도가 상대적으로 낮은 외기온도에도 불구하고 건조초기의 경우보다 높은 것은 건조초기에는 투입된 에너지의 대부분이 목재와 목재에 포함되어 있는 수분을 가열하고 증발시키는 데 사용되는 반면, 乾燥末期에는 殘存水分의 양이 줄어들어 가열과 증발에 소모되는 에너지가 감소되기 때문으로 생각된다.

Table 1. Daily temperature conditions in solar dryer.

(unit : °C)

Season	T _p *1			T _k *2			T _a *3			DT**4			MC*5 (%)
	Max	Min	Avg	Max	Min	Avg	Max	Min	Avg	Max	Min	Avg	
Winter													
'90.12.19	39.0	-3.5	12.5	20.0	1.0	9.7	9.0	-5.0	0.9	14.5	4.0	8.9	89
Spring													
'91. 4. 19	51.5	3.7	22.4	26.8	7.5	16.8	19.3	4.2	11.5	8.2	1.1	5.3	62
'91. 4. 29	62.8	13.8	28.6	37.5	21.0	27.6	20.0	9.7	15.5	17.5	5.3	12.1	10
Summer													
'91. 8. 17	60.6	22.9	32.4	40.2	23.4	28.4	29.9	23.1	26.2	10.3	0.1	2.2	74
'91. 8. 27	68.7	20.9	39.2	48.5	27.7	37.2	34.1	20.1	25.6	16.3	5.6	11.6	12
Autumn													
'91. 10. 10	63.1	11.6	29.7	33.6	15.1	23.7	30.8	13.6	20.3	4.9	0.0	3.4	77
'91. 10. 27	64.2	12.4	29.3	43.2	20.7	29.8	21.0	12.4	16.3	23.1	7.0	13.5	9

*1T_p: temperature of heat absorber, *2T_k: temperature inside solar dryer,

*3T_a: ambient temperature, **4DT: temperature difference between ambient and inside solar dryer, *5MC: moisture content

3.2 乾燥曲線 및 乾燥速度

季節別 乾燥曲線은 그림1과 같았으며, 함수율 단계별 太陽熱과 天然 乾燥速度는 표2에 나타내었다.

겨울철 乾燥初期에는 천연건조의 건조속도가 오히려 신속하여 태양열건조속도의 2배이상을 보였으며, 봄철과 가을철에도 건조초기의 태양열과 천연건조속도간의 차이가 크지 않았다. 이

와 같은 현상은 이 시기의 기후가 건조초기에 목재내 많은 양의 수분을 가열하여 증발하고자 필요한 에너지를 충분히 공급하지 못할 뿐만 아니라 증발된 많은 양의 수분이 밀폐된 건조기내부로 부터 효과적으로 배출되지 못한 때문으로 생각된다.

따라서 겨울철에는 纖維飽和點以下까지 천연 건조로 前乾燥를 실시한 후 태양열건조기에 투

입하는 것이 경제적이며, 봄철과 가을철에도 건조초기에는 천연건조로 약간의 전건조를 실시하여 열풍팬이나 송풍기등을 작동하는 데 소모되는 전기에너지를 절약하는 것이 바람직할 것이다.

그러나 여름철에는 풍부한 일사량과 함께 온도가 높은 상태로 유지되므로 전체含水率段階에 걸쳐 태양열건조속도가 천연건조속도의 2배 이상 신속함을 알 수 있었다. 한편, 섬유포화점미만의 함수율단계에서는 年中 태양열건조속도가 계속해서 천연건조속도에 비하여 신속한 것으로 나타났으며, 最終含水率에 있어서도 天然乾燥材는 계절에 관계없이 함수율 10%이하로 건조될 수 없음을 알 수 있었고, 연평균 천연건조에 대한 태양열건조의 乾燥速度 向上效果는 약97%에 달하였다.

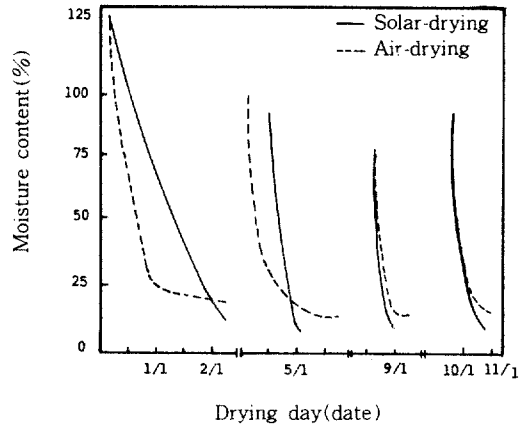


Fig 1. Drying curves of 3cm-thick red pine (winter and spring run) and Douglas-fir(summer and autumn run) lumber.

Table 2. Seasonal solar-and air-drying rates of 3cm-thick red pine and Douglas-fir lumber.

Item	Winter		Spring		Summer		Autumn	
	Solar drying	Air drying	Solar drying	Air drying	Solar drying	Air drying	Solar drying	Air drying
Initial mc*	122.4	121.4	86.0	92.5	74.1	74.6	87.7	78.3
Final mc*	12.5	18.4	9.5	13.1	10.0	15.1	10.0	14.9
Drying rate (%/day)								
IMC*-30%	1.98	4.57	6.75	5.39	14.57	7.38	11.01	9.52
30%-20%	1.11	0.37	5.43	1.08	3.55	2.71	4.32	2.24
20%-FMC*	0.53	0.12	2.85	0.21	2.65	0.75	1.08	0.45
Average	1.54	1.45	5.46	1.62	8.08	4.00	4.57	3.17

* mc : moisture content(%), *IMC : initial moisture content(%),

* FMC : final moisture content(%).

3.3 에너지效率

건조기간중 에너지收支에 따른 건조기의 에너지효율을 섬유포화점을 기준으로 두가지 함수율 단계로 나누어 분석한 결과 표3에서 보는 바와 같이 年中 전체 투입에너지중 태양에너지가 연평균 약 64%를 차지하고 있으며, 그 나머지 36%는 송풍기 및 열풍팬의 작동에 사용된 전기 에너지였다.

계절별로 살펴 보면 함수율 30%이상에서는 가을철이, 그리고 그 이하의 함수율단계에서는

봄철이 비교적 높은 효율을 나타내었으며, 건조속도가 가장 신속하였던 여름철에는 태양에너지의 투입량도 그 만큼 많아 효율면에 있어서는 오히려 봄철보다 약간 낮았다.

그러나 겨울철에는 일사량이 적었어도 건조속도 자체가 매우 느려 효율이 낮았으며, 가을철에는 초기의 높은 효율에도 불구하고 건조말기로 갈수록 낮아지는 외기온도와 불량한 일사량 조건으로 건조속도마저 느려져 전체적인 효율이 가장 낮았다.

Table 3. Energy efficiencies of solar-dryer and-clector.

Season	A _{clt} *(MJ)	E _{ft} *(MJ)	E _{wrt} *(MJ)	η _k (%)	η _c (%)
Winter					
MC>30%	378.86	123.77	159.40	31.7	
MC>30%	220.34	54.86	31.71	11.5	
Total	599.20	178.63	191.11	24.6	52.0
Spring					
MC>30%	168.32	58.50	69.11	36.2	
MC>30%	245.24	31.50	56.32	20.4	
Total	413.56	90.00	125.43	26.8	60.5
Summer					
MC>30%	186.08	30.53	73.69	34.0	
MC>30%	149.30	30.60	28.11	15.6	
Total	335.38	61.13	101.80	25.7	57.7
Autumn					
MC>30%	158.51	32.44	89.46	46.9	
MC>30%	253.34	110.51	36.92	10.2	
Total	411.85	142.95	126.38	22.8	59.4

* A_{clt} : total solar radiation during drying period,*E_{ft} : total electrical energy used during drying period,*E_{wrt} : total energy consumed to remove water from lumber pile during drying period.

Table 4. Amount of warp occurred during solar-and air-drying of 3cm-think red pine and Douglas-fir lumber.

Warp(mm)	Winter		Spring		Summer		Autumn	
	Solar dried	Air dried	Solar dried	Air dried	Solar dried	Air dried	Solar dried	Air dried
Cup	2.00	2.14	0.20	1.43	0.00	0.15	0.50	0.10
Bow	3.83	4.29	2.83	4.33	1.63	0.50	2.28	3.55
Crook	5.37	2.71	4.25	3.61	1.95	1.85	2.43	4.00
Twist	5.10	4.14	8.63	6.66	5.33	6.25	4.15	6.45

연평균 건조기와 집열기의 에너지효율은 각각 25%와 57.4%로 전술한 바와 같이 일몰후부터 일출전까지의 기간동안 집열부와 건조기벽체를 통한 열손실을 줄이고 건조초기에 천연건조로 전건조를 실시하여 전기에너지를 절약하면 에너지 효율면에서 높은 효과를 볼 수 있을 것이며, 같은 기간동안 건조기내부온도를 적정수준으로 유지하기 위한 간단한 보조열원을 장치한다면 건조속도의 촉진을 아울러 기대할 수 있을 것이다.

3.4 乾燥缺陷

乾燥終了後 측정된 틀어짐(warp)의 양은 표4와 같았으며, 소나무와 미송 모두 乾燥方法別 큰 차이는 없었으나 틀어짐중 특히, 비틀림(twist)의 발생이 심한 것을 알 수 있었다.

이와 같이 틀어짐이 비교적 심하게 발생하고 있는 것은 잔적된 목재의 양이 많지 않아 自體荷重에 의한 틀어짐억제효과가 거의 없었으며, 열기건조에 비하여 알맞은 온습도조건을 유지할 수가 없고 그 변화가 극심한 조건속에서 장기간 방치되었기 때문으로 사료되며, 따라서 틀어짐抑制를 위한 보조장치가 추천할만 하다고 하겠다.

Table 5. Cost and inflation factors.

Factor	Amount
Ca (collector-area dependent cost)	150,000₩ / m ²
d (discount rate ; interest rate of best alternative investment)	0.15
e (energy inflation rate)	0.10 - 0.20
N (analysis term)	10yrs
i (general inflation rate)	0.09
J (mortgage rate)	0.10
K (downpayment fraction if purchased with cash)	0.10
M (mortgage term)	10yrs
P (property-tax rate)	0
R (income-tax rate)	0.30
U (insurance and maintenance fraction)	0.005
Z (depreciation lifetime)	10yrs

Table 6. Optimum collector-area, fuel savings, and payback-period for the solar-drying of 1 m² of pine and oak according to the energy-inflation rates.

Energy Inflation rate (%)	Species	Optimum collector area (m ²)	Net solar energy gain (MJ / yr)	Fuel savings (%)	Payback period (yr)
5	Pine	3.29	7,487	36.90	10.37
	Oak	2.58	5,866	38.63	10.37
10	Pine	4.02	9,149	45.09	8.82
	Oak	3.15	7,168	47.21	8.82
15	Pine	4.95	11,266	55.53	7.80
	Oak	3.88	8,827	59.71	7.80
20	Pine	6.13	13,960	68.80	7.08
	Oak	4.80	10,937	73.99	7.08
25	Pine	7.63	17,381	85.66	6.53
	Oak	5.98	13,617	92.18	6.53
30	Pine	9.53	21,712	107.01	6.10
	Oak	7.47	17,011	115.07	6.10

3.5 經濟性分析

경제적 집열면적 분석을 위한 경제요소들을 구하기 위하여 韓國銀行 調查統計月報²⁴⁾를 이용하였고, 割引率은 Tillman¹⁸⁾이 投資에 대한 危險度를 고려하여 목재산업에 적용한 범위가 10-19%이므로 그 평균인 15%로 하였으며, 金²²⁾도 우리나라의 一般利率을 12-15%로 제시한 바 있다. 한편, 집열기 제작비는 집열기 제작당시인 1990년 6월 현재의 物價情報²³⁾를 기준

으로 계산할 결과 150,000원 / m²이었으며, 집열기의 수명은 金²²⁾이 제재설비나 목제품 제조설비에 대하여 제시한 耐用年數인 10년으로 가정하였다. 그리고 소득세율은 1990년 6월 현재 所得稅 課稅標準 稅率의 범위가 6-55%이므로 그 평균인 30%로 가정하였다. 표5에 위의 자료들을 나타내었다.

연간 요구되는 에너지의 양은 수종과 건조소 요일수에 따라 다르므로 본 연구에서는 소나무 (생재비중 0.5)와 참나무 (생재비중 0.7)를 대상

으로 수종별 연간 건조가능회수를 각각 24회 및 12회로 가정하여 분석하였으며, 연료비는 1990년 6월 현재 연료용 中質油(벙커 C유)를 기준으로 燃燒爐의 효율을 60%로 가정하였을 때 5원/MJ로 계산하였다.

그러므로 1㎡의 목재를 함수율 80%로 부터 함수율 10%까지 건조할 때 유가상승율에 따른 경제적 집열면적은 표6에 나타난 바와 같다. 이때 경제적 집열면적에 의하여 얻어진 태양에너지는 연중 가장 기후조건이 열악한 겨울철의 집열효율 52%와 우리나라 연평균 일사량 12MJ/m²day를 기준으로 계산하였으며, 그에 따른 연료비절감효과와 회수기간도 표6의 내용과 같았다.

유가상승율이 5%인 경우에는 자본회수기간이 시스템의 수명인 10년을 초과하는 것으로 나타나 태양열을 이용한 목재건조시스템의 경제성이 매우 열악할 것으로 판단되었다. 그러나 유가상승율 10%이상에서는 10년 미만의 자본회수기간을 나타내었으며, 유가상승율 15%부터 연료비절감효과가 50%를 초과하여 태양열 이용시스템의 도입 가능성을 제시하였다.

또한, 유가상승율 30%이상인 경우에는 燃料費節減效果가 100%를 상회할 것으로 추정되며, 따라서 태양에너지만을 공급하여 건조하여도 경제성이 충분히 양호할 것으로 기대된다. 따라서 최근 불안정한 아랍 산유국들의 정세에 따른 유가상승의 조짐이 이미 직, 간접적으로 국내산업 전반에 걸쳐 심각한 영향을 미치고 있는 현실에서 보다 높은 효율의 태양열이용시스템의 연구, 개발은 매우 시급한 당면 과제라 하겠다.

한편, 소나무건조의 경우 적정집열면적이 참나무의 경우보다 넓게 나타난 것은 소나무의 소요건조일수가 적어 연간 건조가능회수도 증가하기 때문이며, 반면에 연료비절감효과에 있어서는 참나무건조의 경우가 약간 더 양호하게 나타난 것은 연간 건조가능회수가 적어 연간 소요에너지도 그에 따라 감소한 때문으로 사료된다. 그러므로 두 수종간 결과의 차이는 중요한 의미를 갖는다고는 생각되지 않으나 특히, 乾燥困難樹種의 경우 필요이상의 집열면적으로 경제성을 불량하게 하여서는 안될 것이다.

4. 結 論

본 연구는 1.6㎡의 집열면적과 최대수용가능

재적 1.0㎡의 실험용 외부집열판형 태양열 목재 건조기를 설계, 제작하고, 두께 3cm의 소나무 및 미송을 대상으로 계절별 태양열 및 천연건조를 실시하여 건조기 및 집열기 내외부의 공기조건, 건조특성 및 건조기와 집열기의 에너지효율을 측정, 조사하였으며, 경제성분석을 통하여 연료비절감효과와 자본회수기간을 추정하였다.

본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 태양열건조의 천연건조에 대한 연평균 건조속도향상효과는 약 97%에 달하였다.
2. 건조기내부의 일일 최고온도는 겨울철과 봄철의 건조초기를 제외하고는 30°C를 크게 상회하였으나 일일 평균온도는 여름철을 제외하고는 모두 30°C미만을 나타내었다.
3. 연평균 건조기와 집열기의 에너지효율은 각각 25%와 57.4%로 산출되었으며, 각 계절에서 건조초기에는 건조기의 에너지효율이 30%이상이었으나 건조말기에는 20%이하로 하락하였다.
4. 태양열건조에 의한 연료비절감효과는 유가상승율 15%에서부터 50%를 초과하였으며, 유가상승율 30%에서의 자본회수기간은 6.10년으로 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. 1981. Design and tests of a 500BF solar kiln. *For. Prod. J.* 31 (3).
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. Fisk, M. J. and H. C. W. Anderson. 1982. Introduction to solar technology. Addison-Wesely Pub. Co.
5. Helme, 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.
6. Jung, H. S. and H. W. Lee. 1987. Seasoning of wood using solar energy. Collection of theses published by Dr. Chong Supp Shim.
 7. 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.
 8. 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.
 9. Lee, H. W. 1990. Analysis of collector efficiency and proper collector size of external collector type solar lumber dryer. *Korean Wood Sci. & Tech.* : 41-52.
 10. Little, R. L. 1979. Industrial use of solar heat in lumber drying : a long term performance report. *For. Prod. J.* 34(9)
 11. Little, R. L. 1984. Solar-heated water dries lumber. *For. Prod. J.* 29(2)
 12. Lumley, T. G. and E. T. Choong. 1979. Technical and economic characteristics of two solar kiln designs. *For. Prod. J.* 29(7)
 13. Read, W. R., A. Choda, and P. I. Copper. 1974. A solar timber kiln. *solar Energy* 15 : 309-316.
 14. Resch, Helmut. 1990. Energy consumption in drying solid wood products. Proc. of the 3rd International Symposium of Forest Products Industry in the 21st Century, July 2-5, 1990, Suwon, Korea.
 15. Robbins, A. M. ca. 1983. Solar lumber kilns : design ideas. New Mexico Energy Research and Development Institute.
 16. Steinmann, D. E. M., H. F. Vermaas, and J. b. Forrer. 1980. Solar timber dry kilns. *J. Inst. Wood Sci.* 48 : 254-257.
 17. Steinmann, D. E. M. 1990. Temperature control in a solar kiln. *Holz als Roh-und Werkstoff* 48 : 287-291.
 18. Tillman, D. A. 1985. Forest Products : advanced technologies and economic analyses. Academic Press., Inc.
 19. Tschernitz, J. L. and W. T. Simpson. 1979. Solar-heated lumber dryer for tropical latitudes. *Solar Energy* 227 : 563-566.
 20. Tschernitz, J. L. and W. T. Simpson. 1985. FPL design for lumber dry kiln using solar/wood energy in tropical latitudes. FPL-44
 21. Tschernitz, J. L. 1986. Solar energy for wood drying using direct and indirect collection with supplemental heating : A computer analysis. FPL RDs. Pap. 477.
 22. 金成勳. 1978. 投資事業의 妥當性分析. 中央大學校 國際經營大學院.
 23. 流通經濟研究所. 1990. 月刊物價情報. 20(6)
 24. 韓國銀行. 1990. 調查統計月報. 44(1)-44(8)