

個人用컴퓨터를 利用한 外部集熱板型 除濕太陽熱 木材乾燥의 自動化에 관한 研究^{*1}

李 亨 雨^{*2}

A Study on the automation of external collector type solar-dehumidification drying of wood using a personal computer^{*1}

Hyoung-Woo Lee^{*2}

ABSTRACT

An experimental external collector type, solar-dehumidification dryer was retrofitted with a simple computer-based control system. Solar, solar-dehumidification, and air-drying of 3cm-thick douglas-fir were carried out to investigate the drying-conditions and characteristics of this system, and to analyze the energy efficiencies of each drying methods in summer.

The drying rate of solar-dehumidification was 12%/day, which was about 2 times and 3 times faster than that of solar-and air-drying, respectively.

The amount of diurnal temperature fluctuation inside the solar-dryer was greatly reduced and the energy efficiency was enhanced from 25% to 60% by the dehumidifier.

Keywords : solar-dehumidification drying, air-drying, drying rate, energy efficiency

1. 緒 論

1970년대의 油類波動으로부터 최근의 폐로서 아만사태에 이르기까지 전세계는 언제나 현존하는 화석계 에너지자원의 한계를 체험하여 왔으며, 이를 극복하기 위한 노력도 전 산업분야에 걸쳐 꾸준히 계속되어 왔다. 목재산업분야도 예외없이 극심한 에너지難을 겪어 오면서 木材加工工程의 에너지효율을 높이기 위한 연구가 진행되고 있다.

따라서 태양에너지를 이용한 목재건조는 1950년대부터 꾸준히 연구되어왔으나 태양에너지만을 이용한 건조시스템의 한계로 거의 실용화되지 못하던중 1980년대초부터 제습건조기술을 접목한 除濕太陽熱木材乾燥技術에 관한 연구가 시작되면서 태양열건조의 실용화 가능성을 높여 왔으며, 동시에 에너지효율을 극대화할 수 있는 건조장치의 자동화에도 관심이 집중되기 시작하였다.

Tschernitz 등^{13, 14}이 태양열건조기내부에 제

* 1 接受 1992年 2月 13日 Received Februry 13, 1992

이 論文은 1990年度 文教部支援 韓國學術進興財團의 地方大育成 學術研究造成費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

습장치를 두어 성공적으로 red oak를 건조하여 태양열건조가 열기건조의 효과에 접근할 수 있음을 보여준 후 Chen등¹⁾은 除濕效果에 의해 기준의 태양열건조시간을 50%까지 절감할 수 있는 제습태양열건조기 모델로 미국특허를 획득하였으며, Helmer等^{4, 5)}은 이와 동일한 제습태양열건조과정을 컴퓨터로 형화하여 건조중 함수율과 건조기내부 공기조건 등을 예측할 수 있는 수학적 모델을 제시하기도 하였다.

제습태양열건조과정의 에너지효율을 높이기 위한 노력은 계속되어 Chen등²⁾은 돌을 이용한 蕃熱裝置와 제습장치의 廢熱을 회수할 수 있는 热交換器를 설치하고 높은 온도에서도 작동이 가능한 특수 冷媒(Freon R-114)를 사용하여 제습태양열건조기의 최고온도를 82°C까지 상승시켰다. 또한 Helmer等^{6, 7, 8)}은 제습장치의 압축기(compressor)운용에 소요되는 에너지까지도 태양에너지로 대체할 수 있는 太陽熱吸收木材除濕乾燥方法을 개발하였으나 현재로서는 그 제작비가 막대하여 경제성이 없는 것으로 나타났다. 최근에는 목재건조의 자동화에 관한 연구도 활발히 진행되어 Steinmann등^{11, 12)}은 태양열건조시스템이 기후변동에 따른 조건변화로 기존의 건조스케줄 적용이 사실상 불가능하다는 점에 착안하여 平衡含水率을 기준으로 한 새로운 換氣自動調節시스템을 구상하기에 이르렀다.

국내에서도 李等⁹⁾이 伴溫室型 太陽熱 木材乾燥器에 제습장치를 설치하여 국산 참나무類의 건조실험을 한 결과 국내에서도 태양열을 목재건조에 이용할 수 있는 가능성을 제시하기도 하였으나 아직까지는 보다 구체적인 연구가 이루어지지 않고 있는 실정이다.

본 연구에서는 태양열 목재건조시스템 중 가장 진보적인 형태인 외부집열관형 목재건조기에 제습장치를 설치하고 각 장치의 운영을 간단한 개인용컴퓨터를 이용하여 자동화하므로써 에너지 효율 및 능률의 향상을 기대할 수 있는 除濕太陽熱 木材乾燥自動化시스템을 개발하고, 그 효과를 실제 실험을 통하여 구명하고자 하였다.

2. 材料 및 方法

2.1 外部集熱板型 太陽熱 木材乾燥器의 製作

본 연구에 사용된 외부집열관형 태양열 목재건조실은 李¹⁰⁾가 계절별 태양열건조특성 구명을 위하여 사용한 건조기와 동일한 것으로 건조실

내부공기의 상태습도를 목재의 함수율단계에 적합한 수준으로 유지하기 위하여 건조실내부 출구측 하단에 시간당 약 260g의 물을 제거할 수 있는 제습기(1/6HP)를 두었으며, 凝縮水는 용축 즉시 배출구를 통하여 건조실 외부로 배출되도록 하였다.

2.2 自動化시스템의 構成

건조실 내외부의 온습도와 건조중 함수율을 측정하기 위하여 乾球와 濕球온도센서(k-type thermocouple)들과 重量센서(load cell)들을 장치하였으며, 4개의 중량센서는 잔적의 하부 네 모서리에 각각 1개씩 두어 건조중 잔적의 전체 무게를 측정토록 하였다.

각 센서들로부터 발생되는 전기적 신호는 amplifier & multiplexer board로 증폭(gain=1.000)한 후 A/D converter를 통하여 컴퓨터에 입력하며, 건조대상수종에 적합한 건조스케줄을 컴퓨터에 기억시켜 입력된 자료와 비교함으로서 적절한 건조실 내부공기의 조건을 유지할 수 있도록 relay를 이용하여 열풍팬 및 제습기의 on/off를 조절하였다.

2.2.1 重量센서

건조중 판재의 무게변화를 측정하여 함수율을 추정하므로써 자동적으로 건조스케줄을 적용하

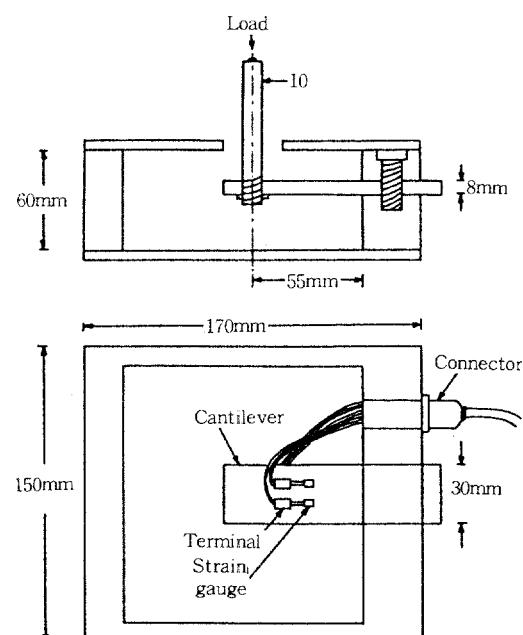


Fig. 1. Structure of load cell

기 위하여 Fig. 1과 같은 구조와 규모의 로드셀(load cell : cantilever-beam type) 4개를 제작하였다.

사용된 strain gauge(Model No.: Kyowa KFC-2-350-C1-11)는 350Ω 으로 1kg~40kg의 추를 제작하여 strain gauge meter로 보정한 후 개인용 컴퓨터의 D/A converter에 연결 각 로드셀에 직류 2V를 가하여 얻어진 주의 무게와 로드셀 출력 간의 直線回歸式 平均相關係數는 0.9998이었다.

한편, strain gauge의 온도변화에 따른 오차를 제거하기 위하여 각 로드셀의 외팔보에는 상하 양면에 각각 2개의 strain gauge를 부착, wheatstone-bridge를 형성하였다.

2.2.2 시스템構成

건조중 온습도와 함수율의 측정 및 열풍팬, 송풍기와 제습기의 on/off조정을 자동으로 하기 위하여 Fig. 2와 같은 시스템을 구성하였다.

2.3 乾燥試驗

제습태양열건조시스템의 효과를 구명하기 위하여 두께 3cm, 폭12cm, 길이 120cm의 미송(*Pseudotsuga menziesii*)을 재재소로부터 생재상태로 구입하여供試板材로 사용하였으며, 건조기간은 연중 일사량 및 온도조건이 가장 양호한 8월중순부터 태양열건조(1991년8월16일~8월28

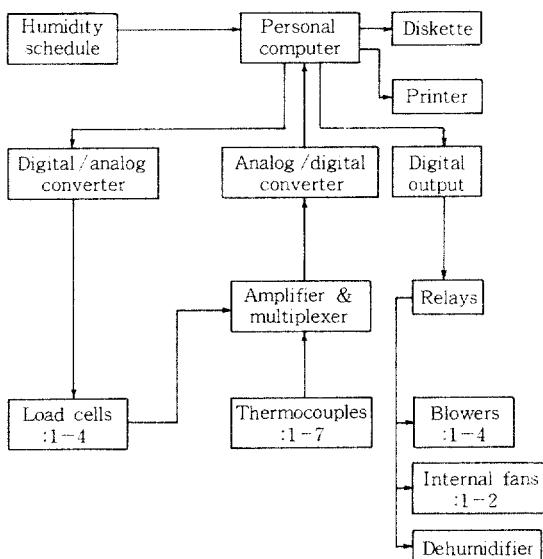


Fig. 2. Schematic diagram of the control for solar-dehumidification lumber

일)의 천연건조를 동시에 시작하였으며, 건조종료후 9월중순에 제습태양열건조(9월9일~9월14일)를 실시하였다.

2.4 自動化시스템의 運營

GW-BASIC언어로 작성한 자동화시스템 프로그램은 건조과정에 소요되는 전기에너지의 이용효율을 극대화하기 위한 내용은 다음과 같다.

집열기로 공기를 유입시키고 더위진 공기를 다시 건조실내부로 유입시키는 열풍팬은 흡열판의 온도가 건조실내부 공기온도보다 높은 경우 예만 작동되도록 하였으며, 일몰후부터 일출전까지는 독재의 건조가 효과적으로 이루어지지 않으므로 송풍기의 작동도 역시 중지하도록 하였다.

그러나 제습태양열건조의 경우 야간이나 악천후에도 건조가 이루어질 수 있으므로 송풍기만은 작동을 계속하도록 하였으며, 제습기의 운영은 두께 2.5cm 미송에 대하여 美國林產物研究所에서 주천하는 스케줄 T7-A4중 습도스케줄³⁾만을 적용하였다.

2.5 資料의 探索과 貯藏

건조개시전 전진법에 의하여 측정한 전체 공시화재의 초기함수율로부터 전체 전진무게를 추정하고 이것을 기준으로 4개의 중량센서로 부터 얻은 건조중 機積의 무게를 이용하여 건조중 함수율을 추정, 온습도와 동시에 자동측정되도록 하였다.

자료의 저장을 위하여 OPEN FILE 및 APPEND명령을 이용, 매 10분간격으로 주프로그램이 있는 드라이브가 아닌 다른 드라이브의 디스크에 자료를 기록하도록 하였으며, 기록된 자료들은 기존의 통계 및 spread sheet software(Q…, L…, etc.)상에서 연결하여 처리하였다.

3. 結果 및 考察

3.1 乾燥器의 空氣條件

태양열 및 제습태양열건조기의 건조중 공기조건은 건조방법별 해당 건조기간을 초기와 말기로 나누어 각 기간중의 清明日을 선정하여 Table 1에 흡열판, 건조실내부 및 외기온도등을 그 당시의 함수율과 함께 나타내었다.

각 건조방법이 실시된 두 기간 모두 일사량이나 외기온도조건이 양호하여 흡열판의 최고온도

Table 1. Maximum, minimum, and average temperatures of heat absorber, air inside and outside solar dryer.

(Unit : °C)

Drying method	Date	T _p *			T _k *			T _a *			dT*		
		Max.	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.
S*	8.17 (74.1)	60.6	22.9	32.4	35.8	23.4	28.4	29.9	23.1	26.2	4.6	0.1	2.2
	8.27 (11.8)	68.7	20.9	39.2	48.5	27.7	37.2	34.1	20.1	25.6	16.3	5.6	11.6
SD*	9.10 (66.6)	66.4	32.1	42.0	40.6	36.0	37.9	33.3	22.8	27.4	13.6	5.3	10.5
	9.13 (14.4)	66.8	24.9	36.3	41.3	32.2	35.8	30.8	19.6	24.1	14.6	8.0	11.7

* T_p: temperature of heat absorber, T_k: temperature inside dryer, T_a: ambient temperature
 $dT = T_k - T_a$, S : solar drying, SD : solar-dehumidification drying, () : moisture content(%)

가 60°C를 넘어섰으며, 건조실내부 최고온도도 태양열건조 초기를 제외하고는 역시 40°C 이상을 웃돌고 있었다. 그러나 건조실내부의 최저온도는 제습태양열건조의 경우 모두 30°C 이상을 유지한 반면에 태양열건조에서는 그 이하로 나타났다.

이와 같은 현상은 1일중 건조기내부 온도변화를 보여주는 Fig. 3에서 보다 확연히 확인할 수 있듯이 태양열건조의 경우 일출이후 환기구를 열어 덥고 습한공기를 배출하고 일몰후에는 에너지손실을 위하여 환기구를 폐쇄하므로 주간에 환기를 통한 에너지손실을 막을 수 없는 반면, 제습태양열건조에서는 건조중 계속 환기구를 폐쇄하고 제습기의 응축기(condenser)로부터 나

오는 폐열을 다시 이용하게 되므로 야간에도 비교적 높은 온도를 유지하여 1일중 온도변화가 매우 적음을 알 수 있었으며, 그에 따라 외기와의 온도차도 크게 유지되고 있었다.

3.2 乾燥曲線과 乾燥速度

두께 3cm 미송의 천연, 태양열 및 제습태양열곡선은 Fig. 4와 같았으며, 각 건조방법별 함수율단계에 따른 건조속도의 변화는 Table 2에 나타내었다.

건조초기 함수율 60%까지는 천연건조와 태양열건조간의 건조속도차가 크지 않았으나 제습태양열건조는 건조초기부터 매우 신속하게 건조되었음을 알 수 있었다. 이러한 현상은 태양열건조시 건조초기에 목재로 부터 많은 수분이 증발되나 환기를 통한 배출이 원활치 못하고 배기의 위하여 차츰 온도도 떨어지게 되지만 제습기를 사용한 경우에는 효과적으로 공기중 수분을 제거하는 동시에 높은 온도를 계속 유지할 수 있었기 때문으로 생각된다.

또한 제습태양열건조에서는 1일중 온도변화도 심하지 않아 지속적인 건조를 수행함으로써纖維飽和點이하의 함수율단계에서도 매우 만족스러운 결과를 보여주고 있다. 전 건조기간에 걸쳐서도 제습의 효과가 뚜렷하여 천연건조속도의 약 3배, 그리고 태양열건조속도에 비하여도 약 50%정도의 건조속도 향상효과를 나타내었다. 한편, 연중 가장 기후조건이 양호한 기간에 생재상태로부터 함수율 10%까지 미송의 제습태양

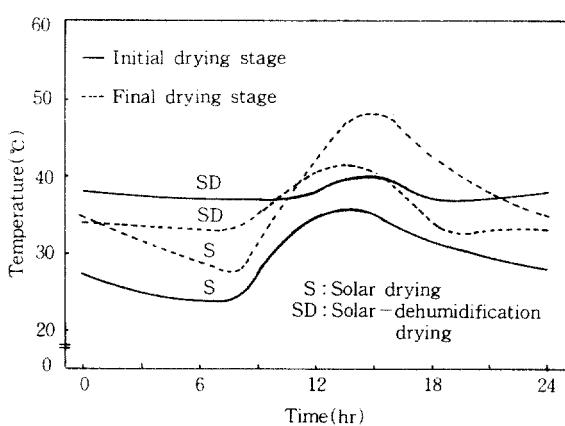


Fig. 3. Diurnal cycle of temperature inside solar-dryer in initial and final stage.

열건조일수는 약 6일로 합수율 6%까지 미송의 일반열건조일수 4~5일³⁾에 접근하였다.

3.3 에너지效率

건조방법별 합수율단계에 따른 총 투입 태양열 및 전기에너지와 전체 건조기간중 목재로부터 수분을 제거하기 위하여 사용된 총에너지, 그리고 그에 따른 에너지효율은 Table 3과 같았다.

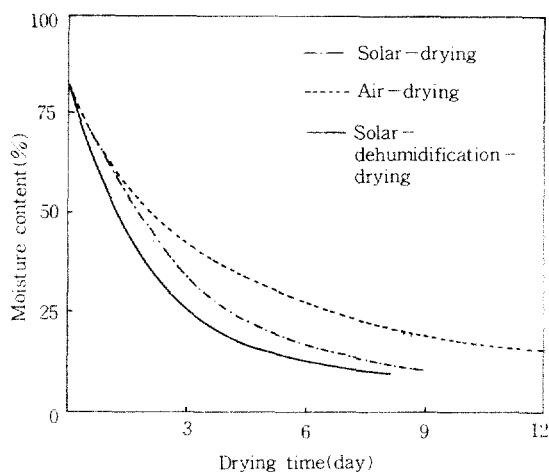


Fig. 4. Solar-, air-, and solar-dehumidific drying curve of 3cm-thick Douglas-fir.

Table 2. Solar-, solar-dehumidification-, and air-drying rates of 3cm-thick Douglas-fir.

(Unit : %/day)

Method	MC 30%	20% MC 30%	MC 20%	Total
S*	14.57	3.55	2.65	8.08
SD*	19.69	10.13	4.50	12.00
A*	7.38	2.71	0.75	4.00

* S : solar-drying, SD : solar-dehumidification-drying
A : air-drying

제습태양열건조에서는 건조기간이 상대적으로 짧아 총 투입사량도 적었으나 일몰후에도 송풍기를 작동시켰으므로 짧은 건조기간에도 불구하고 송풍기와 열풍팬의 작동에 소요된 전기에너지가 적지 않았으며 제습기의 작동에는 그보다 더 많은 전기에너지가 소모되었다. 그러나 건조초기 제습기가 습도스케줄에 따라 활발히 작동하여 건조속도가 촉진됨에 따라 에너지효율이 매우 높게 나타났다.

Table 3. Energy-consumption and -efficiencies of solar-and solar-dehumidification-drying of 3cm-thick Douglas-fir.

Method	MC	A _d *	E _f *	E _d *	E _w *	η_k^*
		(MJ)	(MJ)	(MJ)	(MJ)	(%)
	MC>30%	186.08	30.53	—	73.69	34.00
S*	MC<30%	149.30	30.60	—	28.11	15.60
	Total	335.38	61.13	—	161.80	25.70
	MC>30%	73.00	11.59	22.46	61.28	68.19
SD*	MC<30%	66.03	33.41	32.62	22.61	17.12
	Total	139.03	45.00	55.08	83.89	60.34

* A_d : total solar radiation, E_f : total electrical energy used to operate fans and blowers, E_d : total electrical energy used to operate dehumidifier, E_w : total energy used to remove water from lumber pile, η_k : energy efficiency of dryer.

건조가 진행되어 합수율이 낮아 질수록 제습에 의한 건조속도향상효과는 둔화되어 선풍포화점 이하의 단계에서는 건조방법별 효율의 차이가 크지 않았으며, Chen 등¹⁾도 합수율 20% 이하에서는 제습건조의 효과가 급격히 떨어짐을 보고한 바 있다. 한편, 제습태양열건조의 전체적인 에너지효율은 60.3%에 달하여 일반 태양열건조에 비하여 2배이상 에너지효율이 향상되었음을 알 수 있었으며, 송등⁸⁾은 반온실형 태양열건조의 경우 제습의 효과가 그리 크지 못하였음을 보고한 바 있어 제습은 역시 단열의 효과가 반온실형보다는 월등히 우수한 외부집열관형에서 그 효능을 발휘함을 알 수 있었다.

따라서 제습의 효과는 건조초기에 두드러진 것으로 판단되며, 건조후기에는 제습보다는 보조열원등을 이용하여 보다 충분한 에너지를 공급한다면 건조속도 촉진과 함께 보다 높은 효율을 기대할 수 있을 것이다. 그러나 Table 4의 목재로부터 수분 1kg을 제거하기 위하여 소모된 전기에너지량을 비교하여 보면 제습기의 가동에 따라 전기에너지의 소모량이 약 2배로 증가하였으므로 제습에 의한 乾燥速度促進效果와 乾燥費用上昇 등을 비교, 經濟的 妥當性을 검토할 필요가 있을 것이며, Chen 등²⁾은 보조열원과 새로운 형태의 熱回收裝置를 이용하여 제습태양열건조기의 전기에너지 소모량을 0.36kwh/kg of water removed까지 감소시킨 바 있으므로 그와 같은

보조 장치의 적용도 고려할만하다고 생각된다.

Table 4. Electrical energy consumption to remove 1Kg of water from lumber pile for drying 3cm-thick Douglas-fir.

(Unit : kwh /kg of water removed)

Drying method	MC	Energy consumption to operate		
		Blowers and fans	Dehumidifier	Total
S	>30%	0.28	—	0.28
	<30%	0.73	—	0.73
	Total	0.70	—	0.70
SD	>30%	0.12	0.25	0.37
	<30%	0.94	0.90	1.84
	Total	0.37	1.84	0.80

4. 結 論

外部集熱板型 除濕太陽熱 木材乾燥室을 간단한 개인용 컴퓨터로 自動化한후 두께 3cm 美松을 대상으로 여름철 태양열, 제습태양열 및 천연건조를 실시하여 제습의 효과를 구명하기 위하여 乾燥條件, 乾燥特性 및 에너지效率을 분석한 결과는 다음과 같다.

1. 1991년 8월16일부터 실시한 태양열건조는 함수율 74%에서 10%까지 12일간의 乾燥日數가 소요되었으며, 9월9일부터 개시한 제습태양열건조는 동일한 함수율범위에서 6일이 소요되었다.
2. 제습태양열건조속도는 12%/일로 천연건조속도의 약 3배, 그리고 태양열건조속도의 약 2배를 나타내었다.
3. 건조기내부공기의 日平均溫度는 제습태양열건조의 경우가 태양열건조의 경우에 비하여 비교적 높게 유지되었으며, 1日中 溫度變化의 幅도 매우 감소하였다.
4. 태양열건조의 에너지效率 약 25%는 제습기에 의하여 60%까지 향상되었으며 특히, 乾燥初期에 제습에 의한 에너지效率向上效果가 컸다.

参考文獻

1. Chen, P.Y.S., W.A.Helmer, H.N.Rosen, and D.J.Barton.1982. Experimental solar

dehumidifier kiln for drying lumber.
Forest Prod. J. 32(9).

2. _____ and W.A.Helmer. 1987. Design and tests of a solar-dehumidifier kiln with heat storage and heat recovery systems. *Forest Prod. J.* 37(5).
3. Forest Products Laboratory. 1988. Dry kiln operator's manual. Hardwood Research Council.
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. Procd. 2nd Int. Symp. Drying'80, 2 : 21-28.
5. _____, _____, and M.B.Vaidya.1982. A computer model to simulate solar-and solar-dehumidification lumber drying. Trans. ASME104 : 182-186.
6. _____, _____, and S.Nazer-Adl.1983. A mathematical model for a solar absorption lumber drying system. Procd.Gateway Energy Conf.
7. _____ and P.Y.S.Chen.1985. Computer simulation of a new method to dry lumber using solar energy and absorption refrigeration. *Wood & fib. Sci.* 17(4) : 464-476.
8. _____. 1987. Model development and economic evaluation of a sensible unit utilized in a solar-dehumidification lumber drying system. *Wood & fib. Sci.* 19(3) : 246-261.
9. Lee, Hyoungwoo and Heesuk Jung.1989. The comparative analysis of drying-conditions, -rates, -defects and -yields, and heat-efficiency in solar-dehumidification-drying of oaks with those in conventional air-, semi-i-greenhouse type solar-, and kiln-drying. *Wood Sci. & Tech.* 17(1) : 22-54.
10. Lee, Hyoungwoo. 1991. External collector type solar drying of lumber in winter. *Korean Furniture. J.* 2(1) : 34-41.
11. Steinmann,D.E. and H.F.Vermaas.1990. Control of equilibrium moisture content in a solar kiln. *Holz als Roh-und Werkstoff.*

- 48 : 147-152.
12. _____ and _____. 1990. Drying rate and air circulation in a fully automated solar kiln. *Holz als Roh-und Werkstoff* 48: 195-200.
13. Tschernitz, J.L. and W.T. Simpson. 1979. Solar-heated lumber dryer for tropical latitudes. *Solar Energy* 22 : 563-566.
14. _____. 1984. Solar dry kiln for tropical latitudes. *Forest Prod. J.* 34(5).

