

# 참나무類의 除濕太陽熱乾燥의 條件, 速度, 缺陷, 收率 및 熱效率과 慣行 天然, 半溫室型 太陽熱 및 热氣乾燥와 의 比較·分析<sup>\*1</sup>

李 亨 雨<sup>\*2</sup>, 鄭 希 錫<sup>\*2</sup>

The Comparative Analysis of Drying-Conditions, -Rates, -Defects and-Yield, and  
Heat-Efficiency in Solar-Dehumidification-Drying of Oaks With Those in Conven-  
tional Air-, Semi-Greenhouse Type solar-, and Kiln-Drying<sup>\*1</sup>

Hyoung Woo Lee<sup>\*2</sup>, Hee Suk Jung<sup>\*2</sup>

## SUMMARY

Seasonal semi-greenhouse type solar-drying of 2.5cm-and 5.0cm-thick lumber of *Quercus aliena* Blume and *Quercus variabilis* Blume was carried out to investigate the possibility of solar-drying of wood and to decide the active solar-drying period in Korea. In the active solar-drying period obtained solar-dehumidification-, semi-greenhouse type solar-, air-, and kiln-drying of 2.5cm-thick lumber of oaks were carried out to analyze drying-rates, -defects, and -yield in each drying-method and to calculate daily total absorbed solar-radiation by the solar dryers. The energy balance equations were set up, considering all the energy requirements, to analyze the heat efficiencies of semi-greenhouse type solar- and solar-dehumidification-dryer.

In a seasonal drying the drying rate of semi-greenhouse type solar-dryer was highest in summer, and greater in fall, spring, and winter in order. Solar-drying time was 45% in summer to 50% in winter of the air-drying time, and more serious drying-defects occurred in air-drying than in solar-drying. In the active solar-drying period, April, May, and June, the average drying rate in solar-dehumidification-drying was 1.0%/day and greater than 0.8%/day in semi-greenhouse type solar-drying. In solar-dehumidification-drying the time required to dry lumber to 10% moisture content was less than 60 days, and solar-dehumidi-  
fication-drying showed the highest drying-yield, 65.01%, than the other drying methods. The daily total absorbed solar radiations were 8.51MJ on the roof collector and 6.22 MJ on the south wall collector. In the energy blance 69.48% of total energy input was lost by heat

\*1. 接受 1989年 1月 20日, Received January 2, 1989

\*2. 林業研究院 Forestry Research Institute, Seoul 130-012, Korea

\*3. 成均大學校農科大學 College of Agriculture, Seoul National University, Suwon 440-744, Korea

conduction through walls, roof, and floor, 11.68% by heat leakage, 0.33% by heating the internal structures of the solar-dryer, and 5.38% by air venting. Therefore, the heat efficiency of semi-greenhouse type solar-dryer, 13.13%, was lower than that of solar-dehumidification-dryer, 14.04%.

Solar-drying of lumber in Korea showed the possibility to reduce the air-drying-time in every season and the efficiency of solar-dehumidification-drying was higher than that of semi-greenhouse type solar-drying.

## 1. 緒論

수종별 생재함수율은 30%에서 200%정도이기 때문에 생재상태의 製材品의 함수율도 광범위한 변이를 나타내게 된다. 목재를 최종용도별 사용장소에 알맞는 함수율까지 건조하지 않고 그대로 가공하여 사용할 경우에는 割裂과 变形이 발생하고 목재의 이학적 성질과 接着와 塗裝등 가공성이 좋지 못하기 때문에 이러한 문제를 해결하기 위하여 필요에 따라 天然乾燥, 促進天然乾燥, 热氣乾燥 및 特殊乾燥 등을 실시하고 있다. 더욱 기 산업의 발달과 더불어 乾燥木材의 수요도 급속히 증대됨에 따라 목재건조의 중요성에 대한 인식이 날로 높아져 최소의 건조비용과 건조결합, 그리고 단시간에 건조할 수 있는 건조방법에 대한 기술개발이 요구되고 있다.

이들 건조방법중에 天然乾燥는 예로부터 지금 까지도 널리 사용되는 건조방법으로 건조비용이 저렴하고 특수한 건조시설과 기술이 요구되지 않는 장점이 있는 반면, 건조시간이 길고 기후조건의 영향이 크며, 氣乾含水率이 하로 건조가 불가능한 단점도 있다. 이러한 단점을 개선하기 위하여 간이한 송풍 또는 가열장치를 적용하여 天然乾燥速度를 촉진시키는 여러 가지 促進天然乾燥方法이 개발되어 왔고, 太陽熱을 이용한 促進天然乾燥에 대한 관심이 높아지고 있다. 또한 热氣乾燥는 막대한 시설투자가 요구되고 소모되는 에너지의 양도 목재가공에 소요되는 총 에너지의 약 60~70%를 차지할 만큼 매우크며, 전 세계의 1년간 목재건조에 소요되는 에너지는 약  $2 \times 10^{17}$ J

로서 화석계연료로 3,500만 배럴(barrel)에 달할 정도로 막대하기 때문에 유가상승의 정도를 예측 할 수도 없는 현 상황하에서 에너지절약에 의한 건조비용의 감소는 목재공업의 가장 시급한 선결 과제중의 하나로 여겨진다.

그래서 일부 선진국가에서는 시설투자가 매우 저렴하면서도 热源의 공급량이 무한하고 건조비용이 전혀 들지 않으며 공해의 염려도 없는 태양 에너지를 이용하여 목재건조에 효과가 있는 온도 범위인 26°C ~ 82°C 까지 드라이어(dryer)의 내부 온도를 상승시킬 수 있는 太陽熱 목재 드라이어(solar lumber dryer)의 개발을 시도하고 있다.

太陽熱 목재 드라이어는 투명, 또는 반투명의 막으로 구성된 集熱部로 단파장(350~2,200 nm)의 태양광선이 저항없이 받아 들여져 吸熱板(heat absorber)이나 內壁에 열이 흡수되고, 내부로 부터 輻射되어 나가려는 장파장의 热線을 차단하는 温室效果(greenhouse effect)를 이용하여 드라이어 내부의 공기온도를 상승시키는 한편, 알맞는 送風裝置로 효과적인 통풍과 환기를 하면서 상대습도를 조절하여 목재를 건조하는 太陽熱木材乾燥方法은 선진 여러나라에서 이미 1950년대 초부터 그 가능성을 인식하기 시작하였고, 특히 1970년대의 유류파동이후 그 중요성이 크게 부각되어 현재까지 개발된 木材乾燥用 太陽熱 드라이어는 40여종에 달하며 개발된 温室型(greenhouse type), 半溫室型(semi-greenhouse type), 그리고 外部集熱板型(external collector type) 등이 있다.

温室型 太陽熱 드라이어는 비닐하우스의 형태

로 제작비가 가장 저렴하고 採光面積도 넓지만 熱效果는 기대할 수 없어 기온이 항상 높게 유지되는 열대지역(연평균기온 20°C 이상) 이외의 지역에서는 드라이어의 热效率이 약 5% 이하로 매우 낮고, 건조시간의 短縮效果가 작은 단점이 있다.

半溫室型 太陽熱 드라이어는 溫室型을 개량하여 지붕과 남쪽벽등의 集熱部를 제외한 나머지 벽들을 斷熱處理함으로서 热效率이 약 10% 전후로 안정되어 있어 天然乾燥時間은 50% 이상 단축시킬 수 있고, 목재의 할수율을 10% 이하로 건조할 수 있으며, 건조결함도 天然乾燥에 비하여 감소되는 장점이 있는 반면, 斷熱處理가 되어 있지 않은 集熱部를 통한 热損失이 발생하여 드라이어 내부온도를 충분히 높게 유지할 수 없고 야간이나 악천후에서는 건조가 자연되므로 계절별 기후 조건의 변화에 의한 영향이 큰 단점도 있다.

外部集熱板型 太陽熱 드라이어는 集熱과 吸熱을 하는 集熱板(collector)을 분리하여 드라이어에 완전한 斷熱處理를 하고 보조가열장치, 증기 분무장치 및 여러가지 부속 자동장치를 설치하여 热效率를 20% 이상으로 높여 热氣乾燥의 효과에 접근할 수 있는 가능성을 기대할 수 있으나 集熱板과 乾燥室이 분리되어 集熱板의 설치에 넓은 면적이 소요되고 많은 제작비와 고도의 기술이 요구되어 개량하다 보면 결국 太陽熱 乾燥의 최대 장점인 경제성을 상실할 위험이 있다.

그래서 제한된 장소에서 제작비가 비교적 저렴하고 热效率도 안정되어 있는 새로운 형태의 太陽熱 목재 드라이어의 개발이 요구되어 왔으며, 최근 실제 산업에 활용되거나 개선을 위한 연구가 계속 수행되고 있다. 그러나 대체에너지의 개발이 무엇보다도 시급한 우리나라에서는 太陽熱을 이용한 저렴하고 효율적인 太陽熱 목재 드라이어의 개발이 요청되고 있으나 아직도 목재의 太陽熱 乾燥에 관한 연구가 전무한 실정이다.

本研究는 우리나라 자생 활엽수종 대표적인 乾燥困難樹種인 참나무 屬의 갈참나무와 굴참나

무를 공시수종으로 하여 4계절별 半溫室型 太陽熱 乾燥를 실시하고 그 결과를 분석하여 계절별 기후조건이 매우 상이한 우리나라에서 4계절별 太陽熱乾燥速度와 活性太陽熱乾燥期間(active solar-drying period)을 알아보고, 또한 半溫室型 太陽熱 드라이어에 除濕裝置(dehumidifier)를 설치한 除濕太陽熱 드라이어를 개작하여 活性太陽熱乾燥期間에 天然乾燥, 半溫室型 太陽熱乾燥 및 除濕太陽熱乾燥를 실시하고, 병행하여 热氣乾燥를 실시하여 乾燥方法별 乾燥速度, 乾燥缺陷 및 乾燥收率을 분석하여 비교하는 한편, 半溫室型 太陽熱 드라이어와 除濕太陽熱 드라이어의 내부온도와 상대습도를 측정하여 外氣의 조건과 비교하여 太陽熱 드라이어의 건조조건의 개선정도, 그리고 이를 드라이어에 실제 투과되어 흡수되는 日射量을 계산하여 半溫室型 太陽熱 드라이어와 除濕太陽熱 드라이어의 열에너지 收支와 热效率을 비교 분석하여 우리나라에서 太陽熱乾燥의 적용 가능성을 구명하였다.

## 2. 研究史

太陽熱 드라이어의 가장 기본적인 형태인 溫室型 太陽熱 드라이어에 대한 연구는 오래 전부터 일부 국가에서 수행되어 왔다. Pack(1962)<sup>13</sup>은 미국 Wisconsin주( $43^{\circ}\text{N}$ )에서 수용재적  $1.0\text{m}^3$ 인 溫室型 太陽熱 드라이어로 두께 1인치 red oak를 건조한 결과 건조시간이 天然乾燥時間의 1/2에 불과하였다고 보고하였으며, Maldonado 등(1962)<sup>14</sup>은 푸에르토 리코( $17^{\circ}\text{S}$ )에서 두께 5/4인치 mahogany를 溫室型 太陽熱乾燥한 시간이 天然乾燥時間의 50%에 지나지 않았음을 확인하였고, Schneider 등(1979)<sup>15</sup>은 중부유럽지역에서 溫室型 太陽熱乾燥의 효과를 구명한 바 있다. 또한 Satish(1981)<sup>16</sup>는 인도에서의 太陽熱乾燥 이용실태를 소개하기도 하였다.

한편 Wengert(1971)<sup>17</sup>는 溫室型太陽熱 드라이어에 받아 들여진 태양에너지중 목재로 부터 수

분을 증발시키는 데 소요되는 에너지는 15%이하라고 분석하였으며, Duffie 등(1980)<sup>33</sup>은 년간 최대의 日射量을 얻으려면 集熱部의 경사각을 그 지방의 緯度와 일치시켜야 한다고 주장하였다. Sharma 등(1982)<sup>34</sup>은 太陽熱 드라이어를 豈과적 으로 단열처리하면 热損失을 최고 20% 이상 감소 시킬 수 있음을 자격하였고, Bois(1977)<sup>35</sup>는 半溫室型 太陽熱 드라이어도 단열처리를 하지 않고서는 여름철에도 두께 1인치 활엽수의 건조에 80日 이상이 소요됨을 확인하였다.

최근에는 Little(1977)<sup>36</sup>과 Sharma(1981)<sup>37</sup>가 温室型 太陽熱乾燥과 热氣乾燥의 1,000 board feet( $2.36\text{m}^3$ )당 所要乾燥費用을 각각 분석하여 비교한 결과 太陽熱乾燥에 의한 費用節減效果가 40%에 이른다고 분석하였으며, Plumtre(1983)<sup>38</sup>는 영국의 Oxford( $51^\circ\text{N}$ )에서 温室型 太陽熱乾燥의 경제성을 분석한 결과 1m<sup>3</sup>당 21\$이 소요됨을 보고하였으며, 이와같이 温室型 太陽熱 드라이어의 개선을 위한 연구가 계속되어 왔다.

半溫室型 太陽熱 드라이어에 대한 연구도 활발하게 진행되어 Troxell 등(1968)<sup>39</sup>은 미국 Colorado주( $41^\circ\text{N}$ )에서 半溫室型 太陽熱 드라이어의 集熱部에 이중의 유리판을 사용한 경우와 이중의 투명 FRP(fiber reinforced plastic)을 사용한 경우의 太陽光線 透過率를 비교한 결과 거의 차이가 없었음을 확인하였고, 두께 1인치 Engelmann spruce와 lodgepole pine을 건조한 결과 천연건조에 비하여 건조시간이 50% 이상 단축되었고 乾燥缺陷 發生率도 감소하였다고 보고하였다. Cuppett(1975)<sup>40</sup>은 미국 Virginia주( $35^\circ\text{N}$ )에서 수용재적 59m<sup>3</sup>의 대형 半溫室型 太陽熱 드라이어에 4대의 송풍기와 보조 증기 가열 장치를 설치하여 低温乾燥室로 이용함으로써 半溫室型 太陽熱 드라이어를 산업에 실제 이용하기도 하였다.

한편 寺尺(1967)<sup>41</sup>이 일본에서 목재의 太陽熱乾燥에 대한 가능성을 구명한 이후 野呂田 등(1980, 1981, 1983)<sup>42, 43, 44</sup>과 中嶋 등(1986)<sup>45, 46</sup>이 북해도( $43^\circ\text{N}$ )에서 여러가지 형태의 半溫室型 太

陽熱 드라이어를 제작하여 건조를 실시한 결과 천연건조의 경우보다 신속한 건조속도와 양호한 乾燥收率을 확인한 바 있다. 또한 Oliveira 등(1982)<sup>47</sup>은 미국 virginia주( $35^\circ\text{N}$ )에서 太陽熱乾燥의 效과가 가장 저조한 겨울철에 두께 5/4인치의 red oak와 white oak를 半溫室型 太陽熱 드라이어로 건조한 결과 天然乾燥時間의 약 1/2에 해당하는 건조시간에 함수율 10%이하로 건조할 수 있었으며 橫斷面割裂도 감소하였고 드라이어의 内部와 外氣의 平均溫度差는 약 18°C에 달하였음을 보고하였고, Taylor 등(1985)<sup>48</sup>은 半溫室 太陽熱 드라이어의 에너지와 물질수지를 분석하여 건조중 목재의 함수율과 드라이어의 내부온도 등을 예측할 수 있는 컴퓨터 모형의 개발을 시도하기도 하였다.

그러나 温室型과 半溫室型 太陽熱 드라이어는 热效率이 매우 낮아 건조시간이 热氣乾燥의 3배 이상 소요되는 단점을 개선하기 위한 연구가 계속되어 혼존하는 太陽熱 드라이어 중 가장 발달된 형태인 外部集熱板型 太陽熱 드라이어가 출현하게 되었고 유류파동이 극심하였던 70년대부터 많은 관심이 집중되기 시작하여 Read 등(1974)<sup>49</sup>은 일몰후나 악천후에도 드라이어 내부온도를 일정하게 유지하기 위하여 돌을 蓄熱媒體(heat storage medium)로 사용하는 外部集熱板型 太陽熱 드라이어로 두께 2.5cm의 Alpine ash를 건조한 결과 热氣乾燥에 비하여 약 2배정도의 건조시간이 소요되었고 찌그려진도 심하였으며, 상대습도의 조절은 吸·排氣口를 통한 환기로 가능하였으나 온도의 조절은 불가능하였음을 지적하였다.

Little(1979, 1984)<sup>23, 25</sup>은 기존의 外部集熱板型 太陽熱 드라이어의 热傳達媒體(heat transfer medium)로 사용되어 오던 공기대신에 比熱은 높지만 蓄熱의 기능도 지닌 물을 이용하고, 太陽光線反射板을 부착하여 热效率을 높인 수용재적 240m<sup>3</sup>의 대규모 外部集熱板型 太陽熱 木材乾燥室을 실제 산업에 적용한 결과 热氣乾燥에 비하여 건조 1회당 1,000\$의 비용절감효과가 있어 앞

으로 太陽熱 木材乾燥를 산업에 응용할 수 있는 가능성을 제시하였다. Lumley 등(1979)<sup>14</sup>은 平板型과 箱子型 集熱板을 각각 설치한 두 가지 外部集熱板型 太陽熱 드라이어의 日射量效果 등을 분석한 결과 箱子型集熱板이 平板型集熱板에 비하여 개질에 따른 태양광선의 입사각변이가 작고 흡열면적이 넓어 태양광선을 보다 효과적으로 투과·흡수할 수 있어서 평균온도가 비교적 높았다고 보고하였다.

Tschernitz 등(1979, 1984, 1985)<sup>49,50,51</sup>은 吸·排氣口외에도 드라이어 내부에 除濕裝置를 두어 상대습도조절이 가능한 外部集熱板型 太陽熱드라이어를 제작하여 여름철에 두께 1인치 red oak를 건조한 결과 함수율 80%에서 9%까지 소요된 건조시간이 54일 이었으며 드라이어내부의 최고 온도는 50°C였다고 보고한 이후 스리랑카, 필리핀 및 베마등에 보다 규모가 큰 동일한 구조의 드라이어를 설치하여 그 가능성을 분석하는 등 太陽熱 木材乾燥技術을 보급하려 노력하였다.

한편, Chen(1981)<sup>52</sup>은 外部集熱板型 太陽熱 드라이어의 热效率을 산출하는 방식을 개발하여 적용한 결과 여름철과 다른 가을철에 가장 높은 热效率을 나타내었다고 보고하였으며, 또한 Chen 등(1982, 1984)<sup>53,54</sup>은 동일한 드라이어에 除濕裝置를 설치하여 두께 1인치 yellow poplar를 건조한 결과 건조시간이 太陽熱乾燥의 경우의 50%까지 단축되었으며 乾燥材의 品等도 매우 우수하였음을 확인한 후 미국특허를 취득하기도 하였다. Helmer 등(1980, 1982)<sup>52,53</sup>은 동일한 除濕·太陽熱乾燥過程을 컴퓨터모형화하여 건조중 함수율과 드라이어 내부온도를 예측할 수 있는 수학적 모델의 개발에 성공한 이후 Helmer(1986)<sup>55</sup>는 지역에 따라 적절한 集熱板面積을 산출하는 방법을 제시하기도 하였다.

除濕太陽熱 드라이어의 개발은 계속되어 Chen 등(1987)<sup>56</sup>은 돌을 이용한 蓄熱裝置와 除濕裝置로부터의 廢熱을 재활용할 수 있는 热交換器(heat exchanger)를 설치하여 두께 1인치 yellow

poplar를 건조한 결과 계절에 관계없이 건조속도가 热氣乾燥의 경우에 거의 접근하였으며 건조결합에 의한 손실도 기존의 除濕太陽熱 드라이어의 경우보다 상당히 감소되었음을 보고하였다. 또한 Helmer 등(1983, 1985, 1987)<sup>54,56,57</sup>은 除濕乾燥器에서 壓縮機(compressor)를 운용하는데 소요되는 에너지를 태양에너지로 대체하는 방안을 모색한 결과 太陽熱吸收 木材乾燥方法(solar absorption lumber drying system)을 개발하였고, 除濕太陽熱乾燥過程에 대한 컴퓨터 모형화를 실시하여 비교적 정확한 예측결과를 얻기도 하였으나 아직도 除濕太陽熱 드라이어의 경제성 개선은 가장 시급한 선결과제로 남아 있는 실정이다.

### 3. 材料 및 方法

#### 3.1. 供試材料

##### 3.1.1. 公試原木

本試驗에서 사용한 供試原木은 경기도 용인군 모현면 초부리에서 생산된 갈참나무(*Quercus aliena* Bl.)와 굽참나무(*Quercus variabilis* Bl.)의 원목중에서 통직하고 형질이 우수한 원목을 供試材料로 사용하였다. 供試原木의 邊材率은 元口와 末口에서 변재가 차지하는 면적을 전체횡단면적에 대한 백분율의 평균으로 나타내었으며, 수종별 供試原木의 특성은 Table 1과 같다.

Table 1. Characteristics of sample logs

Species	Age (yrs)	Average end diameter (cm)	Average butt diameter (cm)	Sapwood proportion (%)	Location
<i>Quercus</i> <i>aliena</i> Bl.	27~30	23	30	58	Chobu-Ri Monyun-Myon Yongin-Gun Kyonggi-Do
<i>Quercus</i> <i>variabilis</i> Bl.	27~30	25	30	56	"

##### 3.1.2. 供試木材의 採取

供試原木으로부터 供試木材를 채취하기 위하여 두께 2.5cm와 5.0cm, 그리고 너비 10cm로 제재한 후 길이 110cm로 절단하여 은분페인트로 엔도코팅하였다.

### 3.2. 天然乾燥

#### 3.2.1. 實驗機器 및 裝置

##### 3.2.1.1 天然乾燥場

供試木材의 계절별과活性太陽熱乾燥期間의 천연건조를 위하여 기초높이 45cm, 길이 90cm, 너비 100cm이고 유리지붕을 설치한 옥외 天然乾燥場을 사용하였다.

#### 3.2.2. 實驗方法

##### 3.2.2.1. 木材의 横積

계절별 天然乾燥의 横積期間은 봄철의 경우 1987년 3월 2일~6월 1일, 여름철의 경우 6월 2일~8월 25일, 가을철의 경우 9월 3일~11월 26일, 그리고 겨울철의 경우 12월 1일~1988년 2월 29일이었다.

供試木材의 横積方法은 木材의 길이방향이 동서로 향하도록 하여 横積層別로 두께 2.5cm와 5cm의 木材를 교호로 배치하였다. 横積 한층의板材수는 5본으로 하여 供試木材인 갈참나무와 굴참나무의 4수종을 수종별로 각각 1본씩 横積하였으며, 두께 2cm, 너비 3cm의 横木(sticker)을 104cm간격으로 수직배치하여 20층까지 복스積(box-pile)하여 갈참나무와 굴참나무의 총 供試木材의 數는 두께당 10본이었고, 材間間隔이 1cm가 되도록 복스積하였다.

##### 3.2.2.2. 乾燥速度

供試木材의 乾燥速度를 조사하기 위하여 일주일 간격으로 모든 木材의 무게를 측정하여 初期含水率로 추정한 전건무게로 건조중 함수율을 계산하였다.

##### 3.2.2.3. 乾燥缺陷

건조中 木材의 表面割裂과 橫斷面割裂의 발생

과 그 정도를 측정하기 위하여 木材에 발생한 모든 割裂의 개수와 발생한 割裂中 가장 길이가 긴 割裂의 길이를 1mm까지 측정한 最大割裂長을 일주일 간격으로 乾燥速度와 동시에 조사하였다.

乾燥終了時 木材의 들어짐의 정도를 측정하기 위하여 각 木材의 너비 굽음(cup), 길이굽음(bow) 및 축면굽음(crook)은 굽음의 최고높이를 측정하였고, 비틀림(twist)은 비틀림 木材의 양단의 최고높이를 측정하였으며, 측정에는 버어니어 캘리퍼스를 이용하였다.

또한, 乾燥終了時 쪄그리짐(collapse)의 정도는 각 木材의 최대와 최소 두께를 측정하여 그 차로 나타내었으며, 内部割裂은 각 木材의 중앙부를 锯斷하여 锯斷面상에 나타난 개수로 그 정도를 나타내었다.

한편, 半溫室型과 除濕太陽熱乾燥의 速度와 缺陷도 위와 같은 방법으로 측정하였다.

### 3.3. 半溫室型 太陽熱乾燥

#### 3.3.1. 계절별 半溫室型 太陽熱乾燥

##### 3.3.1.1. 半溫室型 太陽熱 드라이어

목재의 계절별 半溫室型 太陽熱乾燥를 위한 半溫室型 太陽熱 드라이어의 구조와 크기 및 그 제작은 다음과 같다.

##### 3.3.1.1.1. 드라이어의 크기

평균위도가 37°N인 우리나라에서 연중 최대의 日射量을 얻음과 동시에 빗물이 고이거나 면지등이 뒤여 太陽光線의 透過率이 저하되는 것을 막기 위하여 드라이어의 북쪽벽은 높이 212cm, 남쪽벽은 높이 121cm로 하여 37°의 경사를 두었으며, 바닥은 121cm×121cm의 크기로 하여 최대 목재수용·재적이 약 1m<sup>3</sup>이 되도록 하였고, 드라이어의 축면에는 높이 121cm, 폭 121cm의 출입문을 두어 供試木材의 横積과 출입에 편리하도록 하였다. 또한 모든 벽과 바닥의 끌격은 충분한 내구력과 강도를 지닌 6cm×5cm의 철제 프레임

을 사용하였다.

### 3.3.1.2. 集熱 및 吸熱裝置

太陽熱의 효과적인 集熱을 위하여 드라이어의 지붕과 남쪽벽에 透過率 86.5%인 폴리에스터필름(polyester film) 2장 사이에 두께 5cm의 靜止空氣層(dead air space)을 두어 double glazing을 사용하였고, 吸熱을 위하여는 두께 1.8cm의 합판에 무광택의 흑색페인트(flat-black paint)를 塗布한 吸熱板(heat absorber)을 棧積의 상부와 송풍기의 좌우에 두어 삼각형의 箱子型 集熱器(box-type collector)의 형태가 되도록하여 集熱部로 순환하는 공기의 온도를 상승시켰다.

한편, 吸熱의 개선을 위하여 지붕과 남쪽벽의 투명막을 제외한 드라이어 내·외부의 모든 면을 무광택의 흑색페인트로 塗布하였다.

### 3.3.1.3. 斷熱處理

드라이어의 벽과 바닥을 통한 热損失을 줄이기 위하여 모든 벽은 두께 0.6cm의 합판으로, 이중 벽을 설치하고 그 사이에 두께 5cm의 스티로폼(styrofoam)을 두었으며, 바닥에는 상부의 두께 1.8cm 합판과 지면사이에 두께 5cm의 스티로폼과 목재를 두어 斷熱하였다.

### 3.3.1.4. 換氣裝置

드라이어 내부의 습윤한 공기의 배출과 외부의 건조한 공기의 유입을 유도하기 위하여 북쪽의 상단에서 25cm 떨어진 곳과 하단에서 37cm 떨어진 곳에 크기 10cm×10cm의 吸氣口와 排氣口를 각각 1개씩 두었다.

### 3.3.1.5. 空氣循環裝置

드라이어 내부의 원활한 공기순환을 위하여 날개지름이 50cm(0.2마력)이고 풍속이 1m/sec.인 송풍기 1대를 드라이어내부의 상단에 북쪽벽과 30cm의 간격을 두어 설치하였다.

### 3.3.1.6. 木材의 棧積

木材의 棧積기간과 방법은 계절별 天然乾燥의 경우와 동일하였으나 材間間隔은 두지 않았다.

### 3.3.1.7. 온도와 상대습도

드라이어 내부의 온도와 상대습도를 측정하기

위하여 乾·濕球溫度計 1쌍을 북쪽벽에 棧積의 중앙과 높이가 일치하게 두어 오전 9시와 최고온도가 예상되는 오후 2시에 측정하였다.

### 3.3.1.8. 送風機의 운영

일몰후나 악천후에 드라이어의 내부온도가 낮아 木材의 乾燥가 진행되지 못하는 경우에도 송풍기를 작동하여 전기에너지가 낭비되는 것을 막기 위하여 오전 9시부터 오후 6시 까지만 작동되도록 하였으며, 악천후에는 작동시키지 않았다.

한편, 송풍기에 의한 전력소모량은 韓國工業規格品인 普通電力量計(watt-hour meter)를 사용하였다.

### 3.3.1.9. 吸·排氣口의 운영

드라이어의 환기와 비교적 효과적인 습도조절을 위하여 흡·배기구를 오전 9시에 열고 오후 6시에 닫았으며, 악천후에는 기후가 호전될 때까지 폐쇄하였다.

또한 乾燥初期에는 드라이어내부의 낮은 상대습도에 의한 初期割裂의 발생을 방지하기 위하여 흡·배기구를 모두 닫아 상대습도를 높게 유지하도록 하였다.

## 3.3.2. 活性太陽熱乾燥期間의 半溫室型 太陽熱乾燥

### 3.3.2.1. 半溫室型 太陽熱 드라이어

#### 3.3.2.1.1. 斷熱處理

드라이어의 바닥에 두께 1.8cm 합판 2장을 두고 그 사이를 두께 5cm의 스티로폼으로 채워 단열하였으며, 바닥과 지면사이에 20cm의 간격을 두어 지면과의 접촉을 통한 热損失을 방지하였다. 그 외에는 계절별 半溫室型 太陽熱 乾燥에 사용한 드라이어의 斷熱處理와 같은 방법으로 단열하였다.

#### 3.3.2.1.2. 上段荷重

건조종 틀어짐의 발생을 억제하는 한편, 지붕吸熱板의 热傳達에 의하여 高温의 공기와 棧積上部가 접촉하는 것을 막기 위하여 폭 40cm, 길이 110cm, 두께 5cm이고 단위면적당 하중이 약

30kg/m<sup>2</sup>인 목재로 된 上段荷重(top load)을 두었다.

한편, 斷熱처리와 上段荷重을 제외하고 드라이어의 크기, 集熱 및 吸熱裝置, 換氣裝置, 空氣循環裝置는 계절별 半溫室型 太陽熱乾燥의 경우와 동일하였다.

### 3.3.2.2. 木材의 棧積

관정된 活性太陽熱乾燥期間인 1988년 4월 3일 ~ 6월 25일에 木材의 길이방향이 동·서로 향하도록 하여 棧積의 한층의 木材數를 4本으로 하여 두께 2cm, 폭 3cm의 棧木을 104cm 간격으로 수식 배치하였다.

한층에는 갈참나무와 굴참나무 2분씩을 교호로 배치하여 20층까지 복스팅하였고, 수종당 供試木材의 수는 40본으로 棧積容積이 0.44m<sup>3</sup>(實在積 0.22m<sup>3</sup>)이고 棧積容積對 乾燥室容積(1.8m<sup>3</sup>)의 比는 약 0.25로서 野呂田 등(1983)<sup>4)</sup>이 주장한 適正棧積比와 일치하도록 하였다.

### 3.3.2.3. 温度와 相對濕度

半溫室型 太陽熱 드라이어내부의 온도와 상대습도를 연속하여 측정하기 위하여 乾球와 濕球 1쌍을 棧積과 북쪽벽 사이에 棧積의 중앙과 높이가 일치하게 두어 自動溫度記錄計(thermograph)로 乾球와 濕球溫度를 연속으로 기록하였다.

### 3.3.2.4. 送風機의 運營

드라이어내부의 온도가 낮을 경우 전기에너지의 낭비를 방지하기 위하여 송풍기에 自動溫度調節器(thermostatt)를 부착하여 드라이어 내부 온도가 25°C 이상인 경우에만 작동되도록 하였으며, 송풍기에 의한 전력소모량은 電力量計로 측정하였다.

## 3.4 除濕太陽熱乾燥

### 3.4.1. 除濕太陽熱드라이어

#### 3.4.1.1. 空氣循環裝置

除濕太陽熱 드라이어 내부의 공기순환을 위한 장치로는 半溫室型 太陽熱 드라이어의 경우와 동

일한 송풍기 1대 이외에 지붕의 集熱部로부터 유입되는 热風을 棧積에 고루 유도함과 동시에 棧積이 太陽光線에 직접 노출되는 것을 방지하기 위하여 Fig.1과 같이 남쪽벽 투명막내측과 棧積과의 사이에 무광택 흑색페인트로 도포한 폭 2.5cm, 두께 1.8cm, 높이 110cm의 합판을 2cm 간격으로 설치한 가로 格子板(horizontal lattice plate)을 두었으며, 2cm의 格子間隔은 棧積各層의 두께 2cm 棧木과 그 높이가 일치되게 하였으며, 上段荷重 상부와 지붕의 吸熱板 사이로 유동하는 热風을 막기 위하여 흑색의 아스팔트 루핑(asphalt roofing)으로 만든 遮風板(baffle)을 두었다.

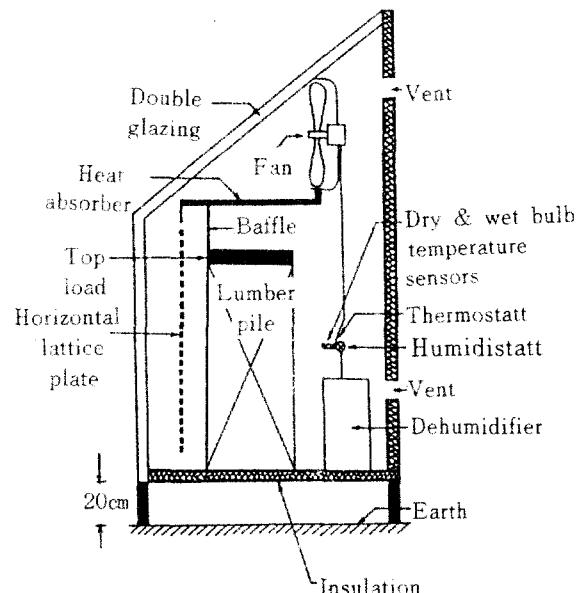


Fig. 1. Structure of semi-greenhouse type solar-dehumidification dryer.

### 3.4.1.2. 除濕裝置

吸·排氣口를 폐쇄하여 환기에 의한 热損失을 줄이고, 드라이어 내부 공기의 효과적인 除濕으로 乾燥速度를 증가시키는 한편, 濕度 스케줄에 따라 드라이어내부의 상대습도를 알맞게 조절하여 乾燥缺陷을 감소시키기 위하여 드라이어내부에서 가장 상대습도가 높아질 북쪽벽 하단에 除濕器(dehumidifier)를 설치하였다.

한편, 드라이어의 크기, 集熱型吸熱裝置, 斷熱處理, 換氣裝置는 半溫室型太陽熱드라이어의 경우와 동일하였다.

### 3.4.2. 實驗方法

#### 3.4.2.1. 溫度와 相對濕度

除濕太陽熱 드라이어 내부의 온도와 상대습도를 연속하여 측정하기 위하여 橫積과 북쪽벽사이에 橫積의 중앙과 높이가 일치하게 乾球와 濕球 1쌍을 두었고, 集熱部내부의 온도를 측정하기 위하여 吸熱板 중앙의 상부에 乾球 1개를 두어 自動溫度記錄計로 乾球와 濕球溫度를 연속으로 기록하였다.

#### 3.4.2.2. 除濕器의 운용

건조중 함수율단계에 따른 드라이어내부의 적당한 상대습도를 유지하기 위하여 除濕器에 自動濕度調節器(humidistatt)를 부착하여 영국스케줄 C<sup>18</sup>중에서 함수율단계에 따른 습도스케줄에 따라 운영하였다.

또한 除濕器 내부에서 冷媒를 유동시키는 壓縮器를 효율적으로 운영하기 위하여 自動濕度調節器를 부착하여 Wetherby(1980)<sup>55)</sup>가 제시한 壓縮器 작동개시온도인 25°C 이상에서 작동되도록 하였으며, Cech 등(1978)<sup>21)</sup>도 除濕乾燥時 건조개시전에 드라이어 내부온도를 25°C 이상으로 유지하여 효과적으로 除濕器의 热交換이 이루어진다고 주장하였다.

#### 3.4.2.3. 吸·排氣口의 운용

乾燥初期에는 드라이어 내부의 상대습도가 매우 높아 除濕器의 작동만으로는 상대습도를 습도스케줄에 따라 신속히 저하시킬 수 없고, 전기에너지의 소비량도 증가하기 때문에 적정 상대습도가 70% 이하인 함수율 30%에 도달하기 전 까지는 주간에 흡·배기구를 드라이어내부의 상대습도가 습도스케줄보다 높은 경우에만 열었으며, 함수율 30% 이하에서는 건조가 끝날 때까지 폐쇄하였다.

한편, 木材의 橫積方法과 송풍기의 운용방법

등은 半溫室型太陽熱乾燥의 경우와 동일하였다.

### 3.4.3. 太陽熱 드라이어의 热에너지收支와 热效率分析

#### 3.4.3.1. 太陽熱 드라이어의 热에너지收支 分析

太陽熱 드라이어에 투입되는 전체 에너지중에서 목재로부터 수분을 제거하는 데 소요되는 열에너지와 드라이어로 부터 손실되는 열에너지의 각각의 비율 및 각 소요에너지중 요소별 열에너지의 소요량을 분석하여 에너지의 소비형태를 파악하기 위하여 太陽熱 드라이어로 흡수된 太陽에너지와 송풍기 및 除濕器로 부터 방출된 열에너지를 투입된 전체 에너지라 하였을 때 목재의 太陽熱乾燥과정에서 에너지를 소비하는 각 요소들과 투입에너지를 다음과 같이 계산하였다.

단, 계산을 위하여 목재의 온도는 드라이어내부의 乾球溫度와 일치하는 것으로 가정하였으며, 각 요소들의 열에너지의 량은 모두 절대값으로 사용하였다.

$$H_r + H_w + H_s + H_i + H_t + H_e = S_f + E_v \cdots (1)$$

$H_r$  : 목재내 수분을 기화하는 데 소요되는 열에너지(J)

$H_w$  : 목질과 목재내 수분을 가열하는 데 소요되는 열에너지(J)

$H_s$  : 목재의 積分濕潤熱(J)

$H_i$  : 드라이어의 热傳導에 의한 損失열에너지(J)

$H_t$  : 드라이어 내부의 構造物을 가열하는 데 소요되는 열에너지(J)

$H_e$  : 換氣에 의한 損失 열에너지(J)

$S_f$  : 드라이어로 부터의 공기 漏出에 의한 損失열에너지(J)

$E_v$  : 드라이어로 흡수된 太陽에너지(J)

$E_v$  : 送風機와 除濕器로 부터 방출되는 열에너지(J)

#### 3.4.3.2. 太陽熱 드라이어의 日射量分析

##### 3.4.3.2.1. 太陽熱 드라이어에 도달하는 日射量

太陽熱 드라이어에 도달하는 日射量은 일반적

으로 直達日射量(beam solar radiation)과 散亂日射量(diffuse solar radiation) 및 反射日射量(reflected solar radiation)으로 나눌 수 있으며, 이 중 直達과 散亂日射量은 太陽光線이 지구의 대기권을 통과하면서 대기에 의해 흡수되거나 산란되어 소실되고 남은 日射量이며, 反射日射量은 대기권을 통과한 日射量이 지면등에 반사되어 얻어진 日射量이라 할 수 있다. 또한 Fig.2에서 보는 바와 같이 日射量은 계절, 위치, 시각 및 集熱部의 傾斜角에 따라서 변화하므로 Duffie 등(1980)<sup>10</sup>이 제시한 방법을 응용하여 본 연구에 사용된 半溫室型과 除濕太陽熱 드라이어에 도달하는 日射量을 다음과 같은 방법으로 분석하였다.

日射量은 그 지방의 위치와 계절 및 시각에 따라 변화하므로 대기권 밖에서 시간당 수평면에 도달하는 日射量 ( $I_0$ )을 구하여 Orgill 등 (1977)<sup>2)</sup>이 제시한 식 (4)에 따라 지면에서의 시간당 水平面日射量 ( $I$ ) 대한 水平面散亂日射量 ( $I_d$ )의 비율 ( $I_d/I_0$ )을 대기권 밖에서의 水平面日射量

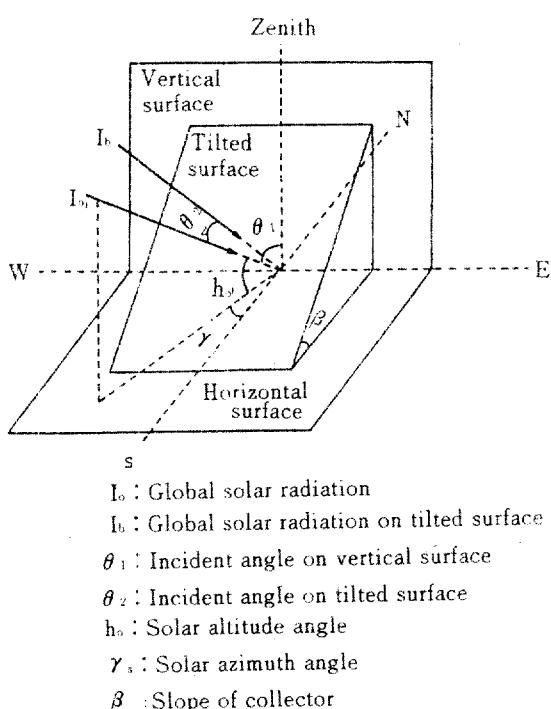


Fig. 2. Global solar radiation on tilted surface.

(I<sub>e</sub>)에 대한 지면에서의 水平面日射量(I)의 비율  $(I/I_e)$ 의 관계식으로 나타내어 시간당 水平面散亂日射量( $I_L$ )과 시간당 水平面直達日射量( $I_e$ )을 식 (2)를 이용하여 계산하였다.

I : 지면에서의 시간당 水平面日射量 ( $J/m^2 \cdot hr$ )

$I_b$ : 지면에서의 시간당 水平面直達日射量 ( $J/m^2 \cdot hr$ )

$I_s$ : 자연에서의 시간당 水平面散亂日射量 ( $J/m^2 \cdot hr$ )

L : 대기권 밖에서의 시간당 水平面日射量(J/ $m^2 \cdot hr$ )

따라서 太陽熱 드라이어에 도달하는 시간당 總 日射量( $I_0$ )은 지붕과 남쪽 벽 集熱部의 경사각 ( $\beta$ )과 면적(A), 直達成分의 比( $R_b$ ) 및 지표면의 反射率( $\rho_s$ ) 등에 따라 Liu등(1963)<sup>25)</sup>이 제시한 式 (3)~(5)에 의하여 산출하였다.

$$I_b = I_b R_{bc} + I_b ((1 + \cos \beta_r) / 2) + I_p ((1 - \cos \beta_r) / 2) \quad (3)$$

$$I_s = I_b R_{\text{sh}} + I_d((1 + \cos \beta_s)/2) + I \rho_g ((1 - \cos \beta_s)/2) \quad (4)$$

A : 集熱部의 면적 ( $m^2$ )

$I_r$ : 太陽熱 드라이어에 도달하는 시간당 總 日  
射量 ( $J/hr$ )

L : 集熱部의 단위면적에 도달하는 시간당 總  
日射量 ( $J/m^2 \cdot hr$ )

R<sub>b</sub>:直達成分의 比

$\beta$  : 集熱部의 경사각(degree)

$\rho_k$ : 지표면 反射率(눈이 없는 경우: 0.2, 눈이 덮힌 경우: 0.7)

### (Subscripts)

r: 지붕集熱部

s : 남쪽 벽集熱部

### 3.4.3.2.2. 太陽熱 드라이어의 吸水日射量 分析

太陽熱 드라이어에 도달하는 日射量中에서 集熱部를 통과하여 드라이어 내부로 흡수되는 日射量은 集熱部에 입사하는 太陽光線의 入射角에 따라 그 양이 변화하고, 또한 太陽光線의 入射角은 계절, 시각, 드라이어의 위치, 集熱部의 경사 각 및 투명막의 재질등에 의한 영향을 받는다. 따라서 Duffie 등(1980)<sup>2)이 제시한 방법을 응용하여 直達, 散亂 및 反射日射量에 대한 太陽光線의 入射角( $\theta_1$ )을 각각 구한 후 集熱部의 투명막에 의한 屈折角( $\theta_2$ )과 透過率( $\tau_1$ )을 식 (6)와 식 (7)에 의하여 각각 계산하였다.</sup>

$$\theta_2 = \sin^{-1}(\sin \theta_1 \times n_A / n_p) \quad (6)$$

$$\tau_1 = e^{-KL/\cos \theta_2} \quad (7)$$

$\theta_1$  : 入射角(degree)

$\theta_2$  : 屈折角(degree)

$n_A$  : 공기의 屈折率(decimal)

$n_p$  : 투명막의 屈折率(decimal)

K : 투명막의 傷却率(decimal)

L : 투명막의 두께(m)

$\tau_1$  : 투명막의 透過率(decimal)

계산된 入射角( $\theta_1$ )과 屈折角( $\theta_2$ )을 이용하여 투명막의 각 성분별 反射率( $r$ )을 구하여 식 (8.)에 따라서 集熱部의 透過率( $\tau$ )을 산출한 후 산출된 透過率에 吸熱板의 日射量 吸收率( $\alpha$ )을 곱하여 얻어진 식 (9)의 透過率·吸收率積( $(\tau \alpha)$ )을 이용하여 식 (10)과 (11)에서와 같이 드라이어에 흡수된 總 日射量( $S_T$ )을 계산하고, 식 (12)에 의하여 平均透過率·吸收率積( $(\tau \alpha)_{avg}$ )을 구하였다.

한편, 여기서 구하여진 平均透過率·吸收率積( $(\tau \alpha)_{avg}$ )은 드라이어에 도달하는 總 日射量에 대한 吸收日射量의 비율로 集熱部의 日射量吸收效率를 나타낸다.

$$\tau = \tau_1 \cdot \frac{1}{2} \left( \frac{1-r_{\perp}}{1+3r_{\perp}} + \frac{1-r_{\parallel}}{1+3r_{\parallel}} \right) \quad (8)$$

$$(\tau \alpha) = \tau \cdot \alpha \quad (9)$$

$$S = I_b R_b (\tau \alpha)_b + I_d (\tau \alpha)_d (1 + \cos \beta) / 2 + \rho_s$$

$$(I_b + I_d) (\tau \alpha)_d (1 - \cos \beta) / 2 \quad (10)$$

$$S_t = A \cdot S_b + A \cdot S_d \quad (11)$$

$$(\tau \alpha)_{avg} = S_t / I_b \quad (12)$$

r : 투명막의 反射率(decimal)

S : 吸收日射量(J/m<sup>2</sup>hr)

S<sub>t</sub> : 總 吸收日射量(J/hr)

$\alpha$  : 吸熱板의 日射量 吸收率(decimal)

$\tau$  : 集熱部의 透過率(decimal)

( $\tau \alpha$ ) : 透過率·吸收率積(decimal)

( $\tau \alpha$ )<sub>avg</sub> : 平均透過率·吸收率積(decimal)

(Subscripts)

b : 直達日射量

d : 散亂日射量

g : 反射日射量

托 : 수직성분

平行 : 평행성분

3.4.3.3. 送風機와 除濕器로 부터 방출되는 열에너지

드라이어에 투입된 열에너지중 送風機와 除濕器로 부터 방출되는 열에너지는 電力量計로 측정한 소모된 전기에너지에 Helmer 등(1982)<sup>3)</sup>이 제시한 식 (13)의 전동모타의 热效率을 곱하여 구하였다.

$$\eta_e = 0.65 - 0.0025(T_e - 0.06) \quad (13)$$

$\eta_e$  : 전동 모타의 热效率

3.4.3.4. 목재내 수분의 제거에 소요되는 열에너지

목재로 부터 수분을 제거하기 위하여는 목질과 목재내 수분을 드라이어 내부온도까지 가열한 후 목재내 수분을 액체상태에서 기체상태로 전환시키는 데 필요한 氣化熱에 상당하는 열에너지를 공급하여 氣화하고, 또한 섬유포화점이하에서 목질과 목재내 수분간의 화학적 결합에서 발생하는 積分濕潤熱을 극복할 수 있는 열에너지를 공급하여 그 결합을 파괴하여야 한다.

목질과 목재내 잔존수분을 드라이어내부온도까지 가열하는데 소요되는 열에너지는 수분을 함유한 水木材의 무게에 水木材의 비열과 드라이

어 내·외부의 온도차를 곱하여 식 (14)과 같이 구하였으며, 含水木材의 비열은 Siau(1984)<sup>11</sup>가 제시한 식 (15)을 이용하여 계산하였다.

$$H_e = W_e \times (1 + 0.01 M_e) \times C_w \times (T_k - T_A) \quad (14)$$

$$C_w = (0.268 + 0.0011 T_k + 0.01 M_e) / (1 + 0.01 M_e) \quad (15)$$

$C_w$  : 含水木材의 比熱(J/g°C)

$M_e$  : 含水木材의 初期含水率(%)

$T_k$  : 드라이어의 内부온도(°C)

$T_A$  : 外氣의 온도(°C)

$W_e$  : 목재의 전건무게(g)

목재내 수분을 氣化하는 데 소요되는 열에너지( $H_e$ )는 수분의 단위무게당 氣化熱( $\Delta H_v$ : heat of vaporization)에 증발된 수분의 무게를 곱하여 식 (16)로 구하였다.

$$H_e = \Delta H_v \times W_e (M_e - M_f) / 100 \quad (16)$$

$\Delta H_v$  : 물의 氣化熱(J/g)

$M_f$  : 목재의 最終含水率(%)

또한, 목재와 수분의 결합을 파괴하기 위하여 필요한 열에너지만 積分濕潤熱( $H_w$ )은 Skaar(1972)<sup>12</sup>가 제시한 식 (17)에 의하여 구하였으며 따라서, 목재로부터 1g의 수분을 제거하는 데 소요되는 열에너지( $H_w$ )는 식 (18)에 의하여 산출하였다.

$$H_w = W_e \times 4.1868 \times 10^{(1.235 - 0.0646 M_f)} \quad (17)$$

$$H_w = \frac{H_e + H_v + H_s}{W_e} \quad (18)$$

$H_s$  : 목재로부터 1g의 수분을 제거하는 데 소요되는 열에너지(J/g)

$W_e$  : 제거된 수분의 전체무게(g)

### 3.4.3.5. 드라이어로부터 損失되는 热에너지

드라이어로부터 손실되는 열에너지는 換氣에 의하여 손실된 열에너지, 热傳導에 의하여 손실된 열에너지, 공기의 漏出에 의하여 손실된 열에너지 및 드라이어 内部構造物가열에 소요된 열에너지등으로 나눌 수 있으며, 산출방법은 다음과 같다.

#### 3.4.3.5.1. 換氣에 의한 열에너지의 損失

건조중 換氣過程에서 유입되는 외부공기에 포함되어 있는 건조공기와 수증기를 드라이어의 내부온도까지 가열하는 데 소요되는 열에너지를 구하기 위하여 Siau(1984)<sup>11</sup> 와 Eckelman 등(1976)<sup>13</sup>이 각각 제시한 식 (19)와 (20)을 용용하여 드라이어 내·외부공기의 절대습도(absolute humidity)를 계산하였다.

$$P_d = 8.75 \times 10^5 \times \exp(-10400 / (273 + T)) \cdot R \quad (19)$$

$$AH = \frac{0.621 \times RH \times P_d}{100 \times P - RH \times P_d} \quad (20)$$

$AH$  : 절대습도(g/g)

$P$  : 대기압(76cmHg)

$P_d$  : 포화증기압(cmHg)

$R$  : 기체상수(2cal/mol·K)

$RH$  : 상대습도(%)

$T$  : 온도(°C)

계산된 드라이어 내·외부공기의 절대습도를 Little(1981)<sup>14</sup>이 제시한 식 (21)와 (22)에 적용하여 외부공기에 포함된 건조공기와 수증기를 가열하는 데 소요되는 열에너지를 각각 구하였으며, 식 (23)에서와 같이 이들 둘의 합을 換氣에 의한 열에너지의 손실량으로 하였다.

$$h_e = C_w \times \frac{W_e \times (M_e - M_f)}{100 \times (AH_k - AH_A)} \times (T_k - T_A) \times 1.1 \quad (21)$$

$$h_v = C_w \times \frac{W_e \times (W_e - M_f) \times AH_A}{100 \times (AH_k - AH_A)} \times (T_k - T_A) \times 1.1 \quad (22)$$

$$H_e = h_e + h_v \quad (23)$$

$AH_A$  : 외부공기의 절대습도(g/g)

$AH_k$  : 드라이어 内부공기의 절대습도(g/g)

$C_w$  : 건조공기의 비열(1004.832J/g°C)

$C_w$  : 수증기의 비열(1884.060J/g°C)

$h_e$  : 건조공기의 가열에 소요되는 열에너지(J)

$h_v$  : 수증기의 가열에 소요되는 열에너지(J)

1.1 : 가열시 발생하는 압력과 용적의 변화에 대한 보정계수

$T_k$  : 드라이어 내부온도(°C)

$T_a$  : 외부공기의 온도(°C)

### 3.4.3.5.2. 热傳導에 의한 열에너지의 손실

드라이어의 벽, 지붕 및 바닥을 통하여 热傳導 되어 손실되는 열에너지를 구하기 위하여 각 벽체와 바닥 및 남쪽벽과 지붕의 두께 5cm 靜止空氣層의 热抵抗係數(heat resistance)로는 미국임산물연구소(1974)<sup>15</sup>에서 제시한 자료를 이용하여 벽체의 경우 7.46과 바닥의 경우 8.36을, 그리고 靜止空氣層의 경우 지붕의 0.87과 남쪽벽의 0.85를 각각 적용하였으며, 그 역수를 热傳導率(heat conductance)로 사용하여식 (24)에서와 같이 热傳導에 의한 열에너지의 손실량을 구하였다.

$$H_r = (T_k - T_a) \times \sum (U_i \times A_i) \quad \dots \dots \dots (24)$$

$U_i$  : 드라이어 각 부분의 热傳導率( $J/m^2\text{hr}^{\circ}\text{C}$ )

$A_i$  : 드라이어 각 부분의 면적( $\text{m}^2/\text{hr}^{\circ}\text{C}$ )

### 3.4.3.5.3. 드라이어 내부의 구조물 가열과 공기 누출에 의한 열에너지의 손실

드라이어 내부의 구조물 즉, 棧木, 上段荷重, 吸熱板, 內則壁 등을 드라이어 내부온도까지 가열하는 데 소요되는 열에너지는 식 (25)에서와 같이 각 구조물들의 무게에 각각의 比熱과 온도 차를 곱하여 모두 합한 것으로 나타내었으며, 드라이어 내부공기의 누출에 의해 손실되는 열에너지는 계산과 측정이 불가능하여 앞에서 설정한 식 (1)을 이용하여 식 (26)에서와 같이 투입된 전체 에너지중에서 앞에서 구한 각 열에너지 요소들을 모두 제하고 남은 나머지로 하였다.

$$H_s = (T_k - T_a) \times \sum (C_i \times W_i) \quad \dots \dots \dots (25)$$

$$H_r = S_r + E_r - H_s W_k - H_r - H_i - H_e \quad \dots \dots \dots (26)$$

$C_i$  : 드라이어 내부 각 구조물의 比熱( $J/g^{\circ}\text{C}$ )

$W_i$  : 드라이어 내부 각 구조물의 무게(g)

### 3.4.3.6. 太陽熱 드라이어의 热效率

太陽熱 드라이어의 热效率은 목재로부터 1g의 수분을 제거하는 데 소요되는 열에너지에 제거된 수분의 전체 무게를 곱하여 얻어진 열에너지의 투입된 전체 에너지에 대한 백분율로서 식 (27)과 같이 계산하였다.

$$\eta = \frac{H_r W_k}{S_r + E_r} \times 100 \quad \dots \dots \dots (27)$$

$\eta$  : 太陽熱 드라이어의 热效率(%)

## 3.5 热氣乾燥

### 3.5.1. 热氣乾燥室

供試木材의 热氣乾燥를 위하여 풍속 1.0m/sec., 乾濕球溫度 調節可能範圍 ±0.2°C, 内部容積 130×120×65cm인 内部送風機型 小型 人工乾燥室을 사용하였다.

### 3.5.2. 實驗方法

#### 3.5.2.1. 木材의 棧積

供試木材의 热氣乾燥를 위하여 热氣乾燥室의 중앙에 수종당 2본씩을 교호로 한층에 4본을 두께 2.5cm 棧木을 이용하여 12층까지 棧積하였으며, 棧積의 높이는 60cm였고, 총 본수는 48본이었다.

#### 3.5.2.2. 热氣乾燥 스케줄

供試木材의 热氣乾燥에 적용한 스케줄은 Table.2의 영국스케줄 C<sup>16</sup>였으며 건조중 함수율 단계는 初期含水率로 계산한 전전무게로 함수율을 구하여 적용하였다.

## 3.6 乾燥收率

半溫室型 太陽熱乾燥, 除濕太陽熱乾燥, 热氣乾燥 및 天然乾燥 중 발생하는 수축과 틀어짐에 의하여 손실되는 목질의 양을 조사하기 위하여 다음과 같이 乾燥收率을 분석하였다.

### 3.6.1. 乾燥木材의 비틀림에 의한 손실량

乾燥木材의 비틀림에 의한 손실량과 平削後 두께와 폭은 비틀린 木材兩端의 斷面(Fig.3의 점선)을 직사각형으로 가정하고 다음과 같이 구하였다.

木材 斷面의 밑변을 x축으로, 그리고 단면의

Table 2. Kiln-drying schedule for 2.5cm-thick lumber of oaks

M. C. (%)	Dry bulb temperature (°C)	Wet bulb temperature (°C)	Wet bulb depression (°C)	Relative humidity (%)
Green - 60	40.5	38.0	2.5	85
60 - 40	40.5	37.0	3.5	79
40 - 35	43.5	39.0	4.5	75
35 - 30	43.5	38.0	5.5	70
30 - 25	46.0	39.5	6.5	66
25 - 20	51.5	43.0	8.5	60
20 - 15	60.0	47.5	12.5	50
15 - End	65.5	49.0	16.5	40
Equalizing	65.5	46.0	19.5	34
Conditioning	65.5	59.0	6.5	73

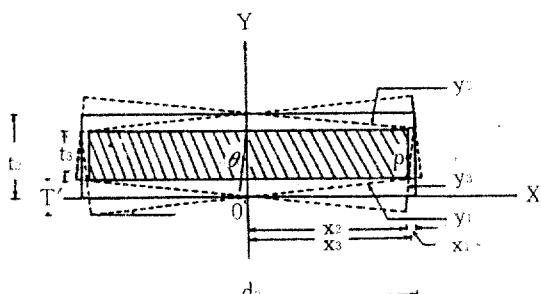


Fig. 3. Twist of dried lumber.

중앙을 지나 밑변과 교차하는 직선을  $y_1$ 축으로 하여 비틀림 각( $\theta$ )을 비틀림량( $T'$ )과 乾燥後木材의 폭( $d_2$ )을 이용하여 식(28)과 같이 표시하였다.

$$\theta = \arctan\left(\frac{T'}{\sqrt{d^2 - T^2}}\right) \quad (28)$$

$d_2$ : 乾燥後木材의 폭(cm)

$T'$ : 비틀림량(cm)

$\theta$ : 비틀림각(degree)

계산된 비틀림각( $\theta$ )을 이용하여 좌표상의 거리  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ 를 식(29), (30), (31)에 따라 각각 구하였다.

$$x_1 = t_2 \cdot \tan \theta \quad (29)$$

$$x_2 = \frac{d_2}{2} - x_1 \quad (30)$$

$$x_3 = x_2 / \cos \theta \quad (31)$$

한편, 비틀린 양단의 단면중 한 단면의 밑변

( $y_1$ )과 다른 한 단면의 윗면( $y_2$ )의 직선식은 식(32)과 식(33)으로 나타내었고, 직선  $y_2$ 와 직교하는  $y_3$ 의 직선식은 직선  $y_2$ 의 기울기와 거리  $x_2$ 를 이용하여 식(34)과 같이 구하였다.

$$y_1 = \tan \theta \cdot x \quad (32)$$

$$y_2 = -\tan \theta \cdot x + t_2 \quad (33)$$

$$y_3 = \frac{1}{\tan \theta} \left( x + \frac{1}{\cos \theta} \cdot \left( \frac{d_2}{2} - t_2 \cdot \tan \theta \right) \right) \quad (34)$$

$t_2$ : 乾燥後木材의 두께(cm)

그러므로 平削後 남게 되는 단면(Fig. 8의 벗금친 부분)의 끝점인 점p의 좌표는 직선  $y_1$ 과 직선  $y_3$ 의 교점으로 표시할 수 있으며, 점p의  $x$ 축과  $y$ 축 좌표는 식(35)과 (36)로 각각 표시하였다.

$$X_p = \frac{d_2 \cos \theta - 2t_2 \sin \theta}{2(\sin^2 \theta - \cos^2 \theta)} \quad (35)$$

$$Y_p = X_p \cdot \tan \theta \quad (36)$$

$X_p$ : 점p의  $x$ 축 좌표

$Y_p$ : 점p의  $y$ 축 좌표

따라서 乾燥後 수축과 비틀림에 의한 두께와 폭의 손실량은 각각 식(37)과 식(38)을 이용하여 구하였다.

$$tr = 2Y_p \quad (37)$$

$$d_1 = d_2 - 2X_p \quad (38)$$

$t_1$  : 乾燥後 비틀림에 의한 두께 손실량(cm)

$d_1$  : 乾燥後 비틀림에 의한 폭 손실량(cm)

### 3.6.2. 乾燥木材의 너비굽음에 의한 損失量

乾燥木材의 너비굽음에 의한 損失量과 平削後 두께와 폭은 Fig. 4와 같이 너비굽음이 발생하지 않은 상태의 木材단면(굵은 실선)의 윗변을 x축으로, 그리고 木材의 중앙을 지나 윗변과 수직한 선을 y축으로 하여 다음과 같이 구하였다.

두께 손실량은 너비굽음의 최대높이인  $c$ 를 측정하여 표시하였다. 폭손실량을 구하기 위하여는 x축 아래의 굽은 단면(점선)을 반지름이  $r$ 인 원의 원주에 일부로 가정하고 각  $\theta$ 의 삼각함수를 반지름  $r$ 과 측정된  $c, d$  및  $t_1$ 를 이용하여 식(39)과 식(40)과 같이 표시한 후 반지름  $r$ 의 3차식인 식(41)를 유도하였다.

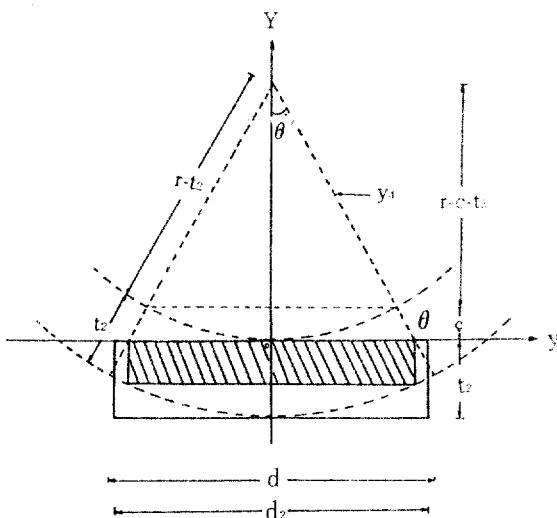


Fig. 4. Cup of dried lumber.

$$\cos\theta' = \frac{r - c - t_1}{r - t_1} \quad \dots \dots \dots (39)$$

$$\sin\theta' = \frac{d}{2r} \quad \dots \dots \dots (40)$$

$$r^3 - \frac{8ct_1 + 4c^2 + d^2}{8c} \cdot r^2 + \frac{t_1d^2}{4c} \cdot r - \frac{d^2t_1^2}{8c} = 0 \quad \dots \dots \dots (41)$$

식(41)로부터 반지름  $r$ 을 구하기 위하여 Newton-Raphson 방법<sup>21</sup>을 이용하였으며, 오차한계는  $10^{-4}$ 으로 하였다.

한편, 굽은 단면의 우측면을 연장한 직선  $y_1$ 는 기울기가  $-\tan(90 - \theta')$ 이고  $y$ 축 절편이  $r - t_1$ 이므로 그 직선식을 식(42)와 같이 표시하였으며 平削後 남게되는 단면(빗금진 부분)의 끝점 Q는 직선  $y_1$ 과  $x$ 축과의 교점이므로 점Q의  $x$ 축 좌표는 식(43)과 같이 구하였다.

$$y_1 = -\tan(90 - \theta') \cdot x + (r - t_1) \quad \dots \dots \dots (42)$$

$$x = \frac{r - t_1}{\tan(90 - \theta')} \quad \dots \dots \dots (43)$$

그러므로 너비굽음에 의한 두께와 폭손실량은 식(44)과 식(45)로 각각 나타내었다.

$$t_1 = C \quad \dots \dots \dots (44)$$

$$d_1 = d_2 - 2x \quad \dots \dots \dots (45)$$

### 3.6.3. 乾燥木材의 길이굽음과 측면굽음에 의한 損失量

乾燥木材의 길이굽음에 의한 두께손실량과 측면굽음에 의한 폭손실량은 각각 Fig. 5과 Fig. 6에서와 같이 측정한 값  $t_B$ 와  $d_B$ 로 표시하였다.



Fig. 5. Bow of dried lumber.

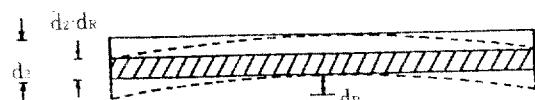


Fig. 6. Crook of dried lumber.

### 3.6.4. 乾燥收率의 계산

건조중 발생하는 수축과 틀어짐에 의한 損失量을 제외한 平削後 木材의 최종두께와 폭을 식(46)~(51)의 조건과 관계식들에 의하여 구한 후 수축과 틀어짐에 의한 乾燥收率을 식(52)에 의하여 계산하였다.

$$\text{i) } t_r > t_B, t_r ; t_r = t_B - t_1 \quad \dots \dots \dots (46)$$

$$\text{ii) } t_B > t_r, t_r ; t_r = t_B - t_1 \quad \dots \dots \dots (47)$$

$$\text{iii) } t_r > t_B, t_r ; t_r = t_r - t_1 \quad \dots \dots \dots (48)$$

$$V_1) \quad d_C > d_R, \quad d_T, \quad d_F = d_T - d_C \quad \dots \dots \dots \quad (51)$$

$t_f$  : 平削後 木材의 최종두께 (cm)

$d_f$  : 平削後 木材의 최종 폭(cm)

$t_0$ : 乾燥前 木材의 두께(cm)

d : 乾燥前 木材의 폭(cm)

$V_{\infty}$  : 수축과 틀어짐에 의한 乾燥收率(%)

#### 4 結果 品 者密

#### 4. 1. 계절별 半溫室型 大陽熱乾燥

#### 4.1.1. 生溫室型 太陽熱드라이어의 구조조경

#### 4.1.1.1. 평균온도

오전 9시와 오후 2시에 측정한 太陽熱 드라이어의 온도와 상대습도의 일주일간의 평균치를 外氣의 평균치와 1년간 계절별로 비교하여 도해한 결과는 Fig. 7, 8과 같다.

1987년 3월부터 시작된 太陽熱 乾燥의 드라이어내부 평균온도는 오전 9시와 오후 2시 모두 外氣온도가 상승하고 日射量이 증가함에 따라 상승하여 8월에  $36.4^{\circ}\text{C}$ 의 최고온도를 나타낸 후 차츰 감소하여 1월에  $-1.5^{\circ}\text{C}$ 의 최저온도를 기록하였다.

한편 오전 9시의 경우 외기온도에 따른 드라이어 내부온도의 변화에 큰 변동이 없었으나 오후 2시의 경우는 비교적 심한 변동을 나타내고 있으며 이처럼 큰 변동은 악천후시 오후 2시까지도 충분한 日射量을 공급받지 못하여 드라이어 내부 온도가 淸明日의 수준까지 상승하지 못하였기 때문이다.

#### 4. 1. 1. 2. 상대습도

드라이어 내부의 계절별 상대습도는 오전 9시와 오후 2시의 경우 모두 乾燥初期에는 목재로부터 증발되는 수분의 양이 드라이어 내부의 용적과 空氣循換能力에 비하여 상대적으로 많아

80% 이상의 높은 상태를 유지하다가 진조가 진행됨에 따라 수분증발량이 감소하여 상대습도도 절차 저하되는 경향을 보인다.

그러나 건조가 진행되어 복재의 함수율이 저하됨에 따라 드라이어 내부의 상대습도를 그 함수율 단계에 알맞게 낮추어 드라이어 내부의 공기가 증발된 수분을 충분히 받아들일 수 있는 조건을 조성하여야 하나 外氣의 상대습도 조건에 의한 영향으로 外氣의 상대습도가 드라이어 내부의 상대습도보다 높은 경우 日射量은 감소되어 공기에 포함되어 있는 수분을 적정수준까지 증발시킬 수 있을 정도의 열을 공급할 수가 없어 저함수율 단계에서도 높은 상대습도가 유지되어 乾燥速度가 매우 낮아지는 원인 중의 하나가 되었으며, 특히, 여름철의 경우 6월 말부터 시작된 雨期로 인하여 저함수율 단계에서도 80% 이상의 상대습도가 유지되고 있음을 볼 수 있다.

#### 4.1.2. 乾燥曲線

계절별 太陽熱乾燥의 특성을 구명하기 위하여  
봄철은 3월~5월, 여름철은 6월~8월, 가을철은  
9월~11월, 그리고 겨울철은 12월~2월로 하여  
계절당 3개월간씩 半溫室型 太陽熱 乾燥를 실시  
하여 얻어진 乾燥曲線은 Fig. 9 와 같다.

두께 2.5cm의 경우 乾燥開始후 함수율 30% 까지는 4계절 모두 天然乾燥와 太陽熱乾燥의 乾燥速度가 비슷하였으나 그 이후 太陽熱乾燥가 天然乾燥에 의해 신속히 진행되어 함수율 30%에서 20%까지의 함수율단계에서 太陽熱乾燥速度의 天然乾燥speed에 대한 비는 가을철의 경우 3배로 가장 그 차이가 컸으며, 봄철과 여름철에는 2배 이상이었고 겨울철에는 1.3배에 지나지 않았다.

또한, Fig.9에서 보는 바와 같이 乾燥初期의 太陽熱乾燥速度와 天然乾燥速度가 거의 비슷하게 나타난 것은 太陽熱乾燥의 경우 건조개시 후 한정된 드라이어 내부 용적에 목재로부터 많은 양의 수분이 증발되고 효과적인 吸·排氣가 이루어지지 못하여 상대습도가 상승함으로서 드

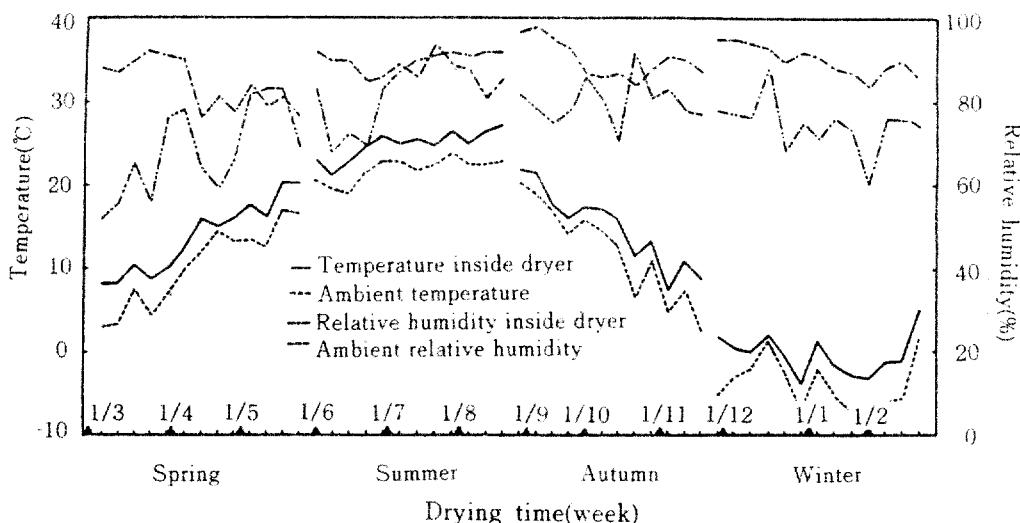


Fig. 7. Average ambient temperature and relative humidity, and temperature and relative humidity inside solar dryer at 9:00 AM from March, 1987 to February, 1988.

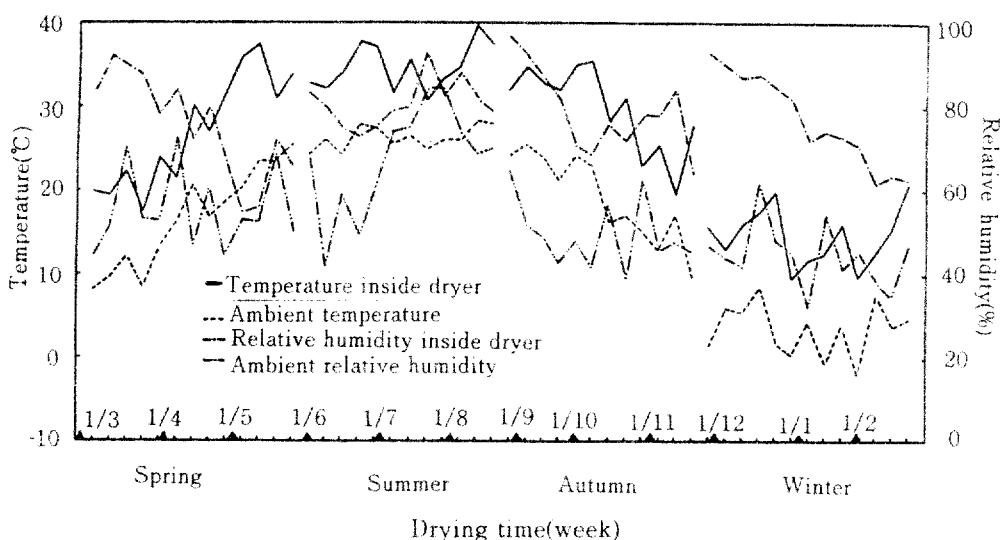


Fig. 8. Average ambient temperature and relative humidity, and temperature and relative humidity inside solar dryer at 2:00 PM from March, 1987 to February, 1988.

라이어 내부온도가 外氣온도보다 높음에도 불구하고 건조가 지연되는 반면, 天然乾燥는 공기의 자유로운 유통이 가능하여 증발수분에 의한 건조의 지연이 없기 때문이다.

한편, 두께 5.0cm의 경우에는 4개월 모두 太陽熱乾燥速度가 天然乾燥速度에 비하여 전 함수율 단계에 걸쳐 큰 것으로 나타났다.

계절별로 乾燥曲線을 검토하여 보면 3월에 시

작된 봄철 太陽熱乾燥는 乾燥初期에는 낮은 外氣 온도와 日射量으로 드라이어 내부온도가 낮아 비교적 완만하게 진행되었으나 乾燥末期인 5월에 들어서는 양호한 기후조건으로 두께 2.5cm는 最終含水率 10%미만까지, 그리고 두께 5.0cm는 最終含水率 15%까지 건조가 가능하였으며, 여름철 太陽熱乾燥는 外氣온도와 日射量이 모두 높은 6월에 시작되어 드라이어 내부온도가 높아 乾

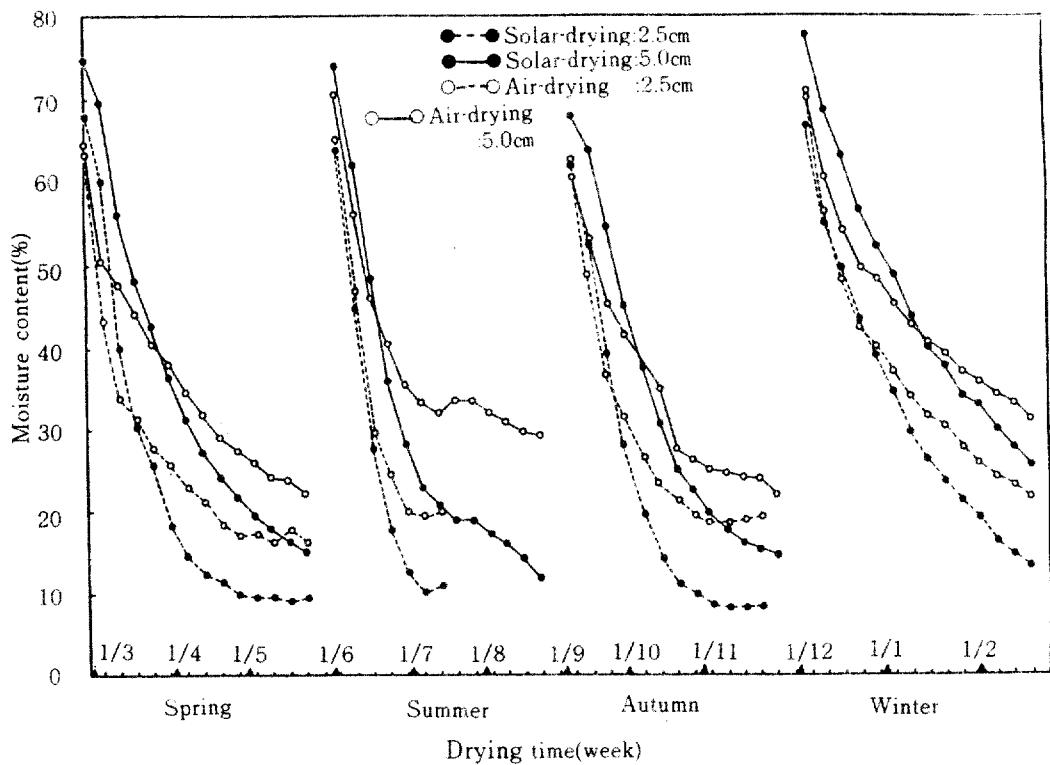


Fig. 9. Seasonal solar-and air-drying curves of 2.5cm and 5.0cm-thick lumber of oaks.

燥初期의 건조가 급속히 진행되었으나 6월 말부터 시작된 雨期에 의한 기후조건의 변동이 심하여 두께 5.0cm는 最終含水率 14%까지 건조되었고 두께 2.5cm는 雨期가 끝난 8월에 다시 효과적인 건조가 진행되어 最終含水率 14%까지의 건조가 가능하였다.

9월에 시작된 가을철 태양열건조는 乾燥初期의 비교적 양호한 기후조건으로 건조가 신속히 진행되었으나 外氣온도와 日射量이 낮은 11월 말에 乾燥末期로 접어들어 두께 2.5cm는 最終含水率 12%까지, 그리고 두께 5.0cm는 最終含水率 18%까지 건조되었으며, 겨울철 太陽熱乾燥는 계속해서 낮은 기온과 日射量으로 4계절 중 가장 완만하게 건조가 진행되었다.

#### 4.1.3. 活性太陽熱乾燥期間의 판정

1년간 계절별로 半溫室型 太陽熱乾燥를 실시

하여 그 결과를 분석한 바 乾燥速度에 있어서는 여름철과 가을철이 양호하였으나 여름철의 경우 乾燥初期인 6월초에는 비교적 外氣 온도도 높고 日射量도 양호하여 드라이어 내부의 온도가 높은 반면, 6월 말부터 시작된 雨期에 의한 乾燥速度의 변동이 있었으며, 가을철에는 9월초에 건조가 시작되어 乾燥初期 드라이어 내부온도가 상당히 높아 乾燥缺陷이 심하게 발생하였고 건조가 진행될 수록 오히려 外氣의 온도와 日射量은 저하되어 乾燥末期에는 충분히 낮은 합수율까지 건조 시키지 못하였다.

따라서 소요되는 乾燥日數를 3개월로 가정하였을 때 乾燥缺陷을 최소로 하면서 비교적 양호한 乾燥速度를 얻기 위하여서는 乾燥初期로부터 乾燥末期까지 온도가 아무런 기복없이 계속 상승할 수 있도록 雨期인 7월을 피하여 太陽熱乾燥를 4월초에 시작하여 6월 말에 종료하는 것이 가장

바람직한 것으로 판정되었다.

#### 4.2. 半溫室型과 除濕太陽熱乾燥

4.2.1. 外氣와 太陽熱 드라이어 내부의 공기조건

##### 4.2.1.1. 평균온도와 상대습도

外氣의 조건과 그에 따른 半溫室型과 除濕太陽熱 드라이어의 내부공기조건의 乾燥期間 중 변화는 Fig.10과 같다.

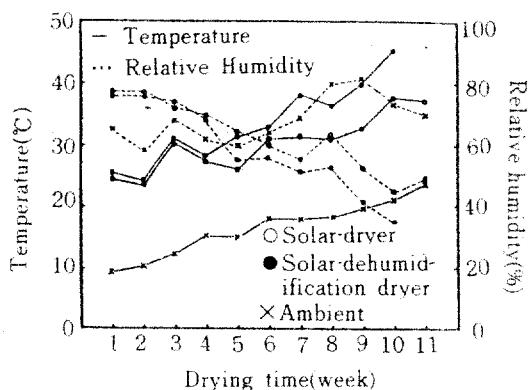


Fig. 10. Ambient temperature and relative humidity, and temperatures and relative humidities of solar-and solar-dehumidification dryer from April 9 to June 25, 1988.

평균온도의 경우 外氣의 온도가 乾燥初期인 4월초 10°C 정도의 낮은 온도로부터 점차 상승하여 乾燥末期인 6월말에는 25°C 정도에 이르렀으며 이에 따라서 드라이어의 내부온도도 乾燥初期의 25°C 정도에서 상승하기 시작하여 乾燥末期에는 除濕太陽熱 드라이어의 경우 45°C, 그리고 半溫室型 太陽熱 드라이어의 경우 40°C 정도에 이르러 Lumley 등(1979)<sup>7</sup>이 箱子型 集熱板을 갖춘 太陽熱 드라이어의 봄철 평균온도로 보고한 39°C와 같은 수준을 보였으며, 外氣와의 평균온도차는 除濕太陽熱 드라이어의 경우 16°C, 그리고 半溫室型 太陽熱 드라이어의 경우에는 13°C를 나타내었고, 특히 除濕器 내부의 凝縮器(condenser)에서 冷媒가 기체상태에서 액체상태로 전환되면서 방출하는 열로 인하여 除濕太陽熱 드라이어의 내부온도가 半溫室型 太陽熱 드라이어의 경우

보다 5~6°C 정도 높았으며, Chen 등(1982)도 除濕器에서 壓縮機를 떠나 凝縮器로 유입되는 冷媒의 온도가 93°C였음을 보고한 바 있다.

상대습도의 경우 外氣의 상대습도는 乾燥期間 중 60~80% 사이에서 심한 변동을 보였고 건조가 진행될수록 오히려 상대습도가 상승하였으나 半溫室型 太陽熱 드라이어의 경우 乾燥初期에는 80% 정도의 높은 상대습도를 유지하다가 건조가 진행됨에 따라 온도가 상승하여 상대적으로 상대습도는 점차 저하하여 乾燥中期에는 60%를, 그리고 乾燥末期에는 50% 수준을 유지하였다. 그러나 除濕太陽熱 드라이어의 경우에는 乾燥初期에는 半溫室型 太陽熱 드라이어와 마찬가지로 80% 정도의 높은 상대습도를 유지하였으나 그후 습도스케줄에 따라 除濕器에 의한 除濕과 온도상승으로 半溫室型 太陽熱 드라이어의 경우보다 빠르게 상대습도의 저하가 진행되어 乾燥中期에는 50%, 그리고 乾燥末期에는 40% 이하의 수준을 유지하였다.

따라서 건조가 진행될수록 온도는 상승하고 상대습도는 저하되어 이 시기가 太陽熱乾燥에 적합함을 알 수 있었으며, 특히 除濕太陽熱乾燥의 경우 除濕器의 작동으로 상대습도의 조절이 가능하여 더욱 양호한 건조조건을 조성할 수 있었다.

한편, 월평균온도와 상대습도, 일일 최고온도와 최저온도 및 外氣와의 온도차와 상대습도차는 Table.3과 같았다.

특히, 최저온도는 乾燥期間 중 除濕太陽熱 드라이어가 가장 높았으며, 半溫室型 太陽熱 드라이어의 경우가 集熱部보다 약간 높았다. 이는 일몰 후에 集熱部는 온도가 신속히 저하되나 드라이어 내부의 構積은 열을 드라이어 내부의 공기에 빼앗겨 온도가 서서히 저하되었기 때문이며, 특히 6월의 경우 除濕太陽熱 드라이어는 최저온도 31.4°C로 계속해서 30°C 이상인 것은 일몰후에도 드라이어 내부온도가 25°C 이상을 유지하여 除濕器가 가동되면서 열을 방출하기 때문에 사료된다.

Table 3. Monthly average temperature and relative humidity of, and temperature and relative humidity differences between indoor and outdoor during active solar-drying period

Month	Item	Temperature (°C)			Temperature difference (°C)		Relative humidity (%)	Relative humidity difference (%)
		Max.	Min.	Avg.	Max.	Avg.		
April	S. D. D.	50.8	12.9	26.9	34.2	15.9	75	9
	S. D.	47.9	12.8	26.4	31.3	15.4	75	9
	C	62.6	12.6	29.9	46.0	17.9	-	-
	A	16.6	5.5	11.0	-	-	66	-
May	S. D. D.	51.9	17.9	32.7	29.9	15.7	58	-6
	S. D.	50.1	15.6	29.1	28.1	12.1	62	-2
	C	68.4	15.5	35.4	46.4	18.4	-	-
	A	22.0	11.7	17.0	-	-	64	-
June	S. D. D.	57.0	31.4	40.0	31.6	18.8	43	-33
	S. D.	50.8	25.0	34.7	25.4	13.5	52	-24
	C	59.8	23.6	37.4	34.4	16.2	-	-
	A	25.4	20.6	21.2	-	-	76	-

(S. D. D.:solar-dehumidification dryer S. D. :semi-greenhouse type solar dryer

C:collector A:ambient)

상대습도는 乾燥初期인 4월의 경우 외기는 66%로 除濕太陽熱 드라이어와 半溫室型 太陽熱 드라이어의 75%보다 9% 낮았으나, 5월의 경우 외기가 64%이고 半溫室型 太陽熱 드라이어가 62%인 반면, 除濕太陽熱 드라이어는 除濕器의 가동으로 인하여 58%로 약간 낮았으며, 乾燥末期인 6월에는 除濕太陽熱 드라이어의 경우 除濕器의 본격적인 가동으로 습도스케줄의 마지막 할 수율단계의 적정상대습도인 40%와 거의 비슷한 수준인 43%의 상대습도를 나타내어 외기의 76%보다 33% 낮았으며, 半溫室型 太陽熱 드라이어는 52%로 외기보다 24% 낮았다.

#### 4.2.2. 乾燥曲線

두께 2.5cm 갈참나무와 굴참나무의 半溫室型, 除濕太陽熱 및 天然乾燥曲線은 수종에 따라 Fig. 11과 12에 나타내었다.

半溫室型과 除濕太陽熱 乾燥의 경우 乾燥初期에는 드라이어 내부를 外氣와 차단하여 높은 상대습도를 유지하였기 때문에 건조의 진행이 늦어

져 두 수종 모두 天然乾燥가 보다 빠르게 진행되었으며, 이는 Tschermitz 등(1979)<sup>10</sup>이 두께 3.0cm red oak의 天然과 太陽熱 乾燥에 대하여 보고한 내용과 일치하였다. 또한, 乾燥初期에는 除濕太陽熱 乾燥의 경우 습도 스케줄에 따라 상대습도를 유지하기 위하여 吸排氣口의 개폐와 除濕器의 작동을 동시에 실시하여 除濕器의 작동이 활발하지 못하였으므로 除濕太陽熱 乾燥曲線과 半溫室型 太陽熱 乾燥曲線은 비슷한 경향을 나타내었다. 한편 割裂 발생의 위험이 없는 함수율 30% 이하에서는 본격적으로 건조가 진행되어 변재율 50% 이하의 경우 갈참나무는 함수율 17% 수준, 굴참나무는 함수율 20% 수준에서, 그리고 변재율 50% 이상의 경우 두 수종 모두 함수율 12% 수준에서 半溫室型 및 除濕太陽熱 乾燥曲線과 天然乾燥曲線이 역전되었으며, 함수율이 30% 이하에서는 除濕器의 작동이 활발하여 건조가 진행될수록 除濕太陽熱 乾燥가 半溫室型 太陽熱 乾燥보다 신속하게 진행되었다. 그러나 天然乾燥의 경우에는 함수율 20% 이하에서

外氣의 변화에 따른 변동이 심하였고 乾燥開始 후 126일이 경과한 후에도 합수율 10% 이하로의 건조가 불가능하였으나 半溫室型과 除濕太陽熱 乾燥의 경우에는 악천후에 外氣와의 차단으로 乾燥曲線의 변동이 없었고 乾燥末期 드라이어 내부의 공기조건이 고온저습하여 합수율 10% 이하로의 건조가 가능하였다.

#### 4. 2. 3. 推定乾燥日數

半溫室型, 除濕太陽熱 및 热氣乾燥曲線을 회귀분석하여 각 합수율 단계별로 추정한 乾燥日數는 Table. 4.에서 보는 바와 같이 除濕太陽熱 乾燥에서는 변재율 50% 이하의 경우 두 수종 모두 합수율 30%까지는 25일이 소요되어 半溫室型 太陽熱 乾燥의 경우보다 약 2일~3일 정도 밖에는 乾燥日數가 단축되지 못하였으나 합수율

10% 까지의 所要乾燥日數는 굴참나무가 59일, 그리고 갈참나무가 58일로 半溫室型 太陽熱 乾燥의 경우보다 각각 9일 및 11일이 단축되었으며, 변재율 50% 이상의 경우에는 합수율 30% 까지의 乾燥日數가 굴참나무는 20일, 갈참나무는 19일로 오히려 半溫室型 太陽熱 乾燥의 경우보다 1일~2일 정도 더 소요되었으나 그 후 합수율 10% 까지의 乾燥日數는 각각 52일과 51일로 변재율 50% 이하의 경우와 마찬가지로 각각 11일과 10일이 단축되었다.

따라서, 합수율 30%에서 10% 까지의 합수율 단계에서 除濕太陽熱 乾燥에 의한 乾燥日數 短縮效果가 두 수종 모두 변재율 50% 이상인 경우에는 27%, 그리고 변재율 50% 이하인 경우에는 17%로 변재율이 클수록 그 효과가 증가하였음을 알 수 있었다.

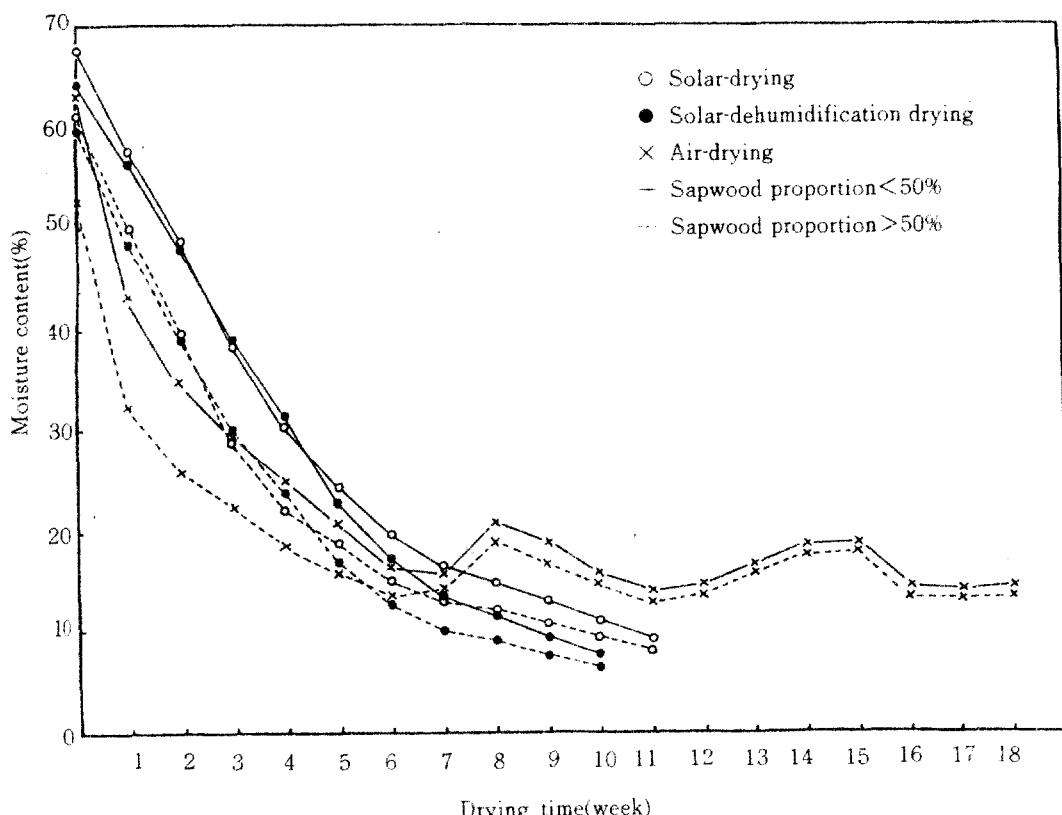


Fig. 11 Drying curves of 2.5cm-thick lumber of *Quercus aliena* Bl.

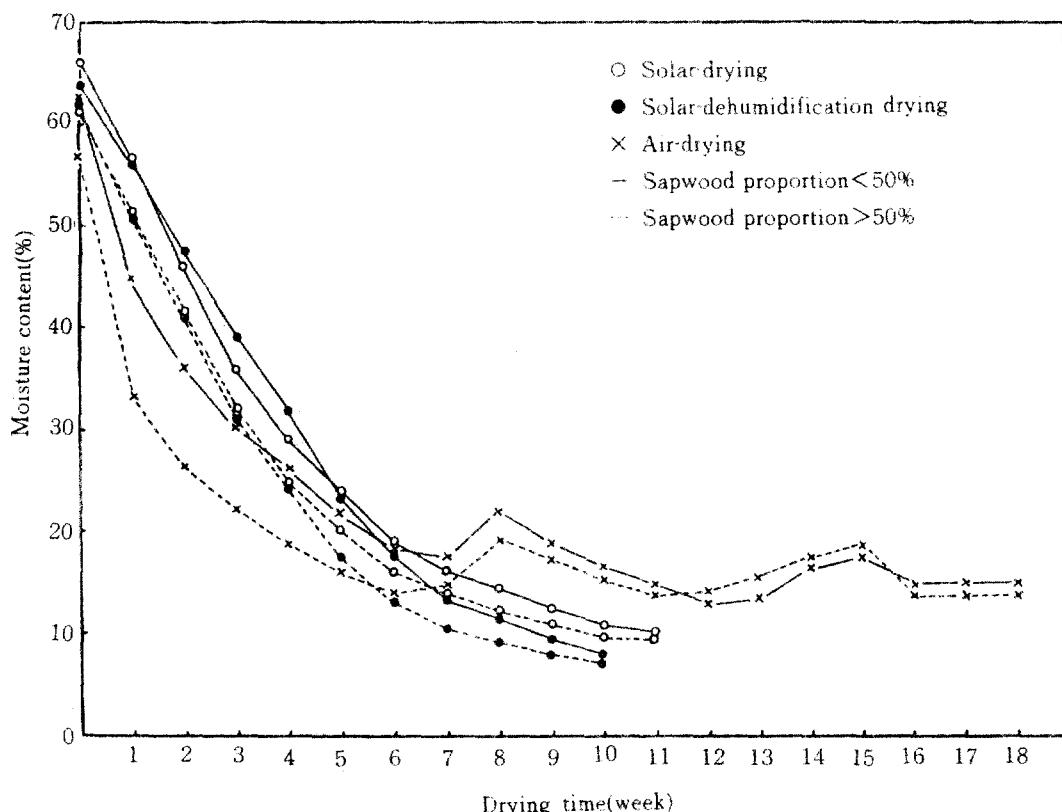


Fig. 12. Drying curves of 2.5cm-thick lumber of *Quercus aliena* Bl.

한편, 热氣乾燥의 推定乾燥日數와 비교하여 보면 除濕太陽熱乾燥의 推定乾燥日數가 半溫室型太陽熱乾燥에 비하여는 적어 소요되나 热氣乾燥에 비하여는 3배 정도가 소요되는 것은 除濕太陽熱乾燥의 경우 주간에는 드라이어 내부온도가 충분히 높은 상태를 유지할 수 있으나 일몰후나 악천후에는 적절한 蓄熱裝置가 없고 충분한 斷熱處理가 되어있지 않아 除濕器의 가동만으로는 내부온도를 높게 유지하지 못하여 건조의 진행이 지연되기 때문이다.

#### 4.2.4. 乾燥速度

함수율단계별 乾燥速度는 생재로 부터 함수율 30%까지의 단계에서는 天然乾燥速度가 1.6~2.2%/日로 1.2~1.6%/日의 乾燥速度를 보인 半溫室型과 除濕·太陽熱乾燥의 경우보다 약간 빠르거나 半溫室型과 除濕太陽熱乾燥速度간에는

차이가 거의 없었다. 그러나 함수율 30%로부터 함수율 15%까지의 단계에서는 除濕太陽熱乾燥의 경우가 0.9%/日의 乾燥速度를 나타내어 0.6%/日인 半溫室型太陽熱乾燥와 0.5%/日인 天然乾燥의 경우보다 신속히 건조됨을 알 수 있었으며, 함수율 15%로부터 함수율 10%까지의 함수율단계에서는 번째율 50%이상인 칼나무의 除濕太陽熱乾燥速度가 0.5%/日이었음을 세워하고는 半溫室型과 除濕太陽熱乾燥의 경우 모두 0.3%/日의 동일한 乾燥速度를 나타내어 15%이하의 낮은 함수율에서 드라이어 내부온도가 50°C이하로 热氣乾燥스케줄의 온도 65.5°C에 크게 마치지 못하여 목재로 부터 수분을 증발시킬 수 있는 충분한 열에너지를 공급하지 못함으로 해서 除濕太陽熱드라이어의 乾燥速度向上效果도 매우 적었음을 알 수 있었으며, Chen 등(1981)<sup>17</sup>도 低温除濕乾燥의 경우 54°C이하의 낮

Table 4. Regression equations and estimated drying times to 30%, 15%, and 10% moisture content for solar-, solar-dehumidification-, and kiln-drying curves of 2.5cm-thick lumber of oaks

Drying method	Species	Sapwood proportion (%)	Regression equation	Estimated drying time (day)			$R^2$
				To 30%	To 15%	To 10%	
Solar-drying	<i>Quercus aliena</i> Bl.	<50	$MC = 63.2464 \times 0.9735^t$	28	54	69	0.99224
		>50	$MC = 50.8238 \times 0.9738^t$	17	46	61	0.96737
	<i>Quercus variabilis</i> Bl.	<50	$MC = 60.8013 \times 0.9739^t$	27	53	68	0.99050
		>50	$MC = 54.0519 \times 0.9735^t$	19	48	63	0.97423
Solar-dehumidification drying	<i>Quercus aliena</i> Bl.	<50	$MC = 67.8605 \times 0.9678^t$	25	46	58	0.99459
		>50	$MC = 56.2179 \times 0.9669^t$	19	39	51	0.98806
	<i>Quercus variabilis</i> Bl.	<50	$MC = 67.7503 \times 0.9682^t$	25	47	59	0.99479
		>50	$MC = 58.3932 \times 0.9668^t$	20	40	52	0.98649
Kiln-drying	<i>Quercus aliena</i> Bl.	<50	$MC = 69.8569 \times 0.9001^t$	8	15	19	0.98480
		>50	$MC = 57.6932 \times 0.8908^t$	6	12	15	0.99319
	<i>Quercus variabilis</i> Bl.	<50	$MC = 65.4848 \times 0.9036^t$	8	15	19	0.98973
		>50	$MC = 56.9861 \times 0.8934^t$	6	12	16	0.99313

\* : time in day

은 온도로 함수율 15% 이하에서는 除濕乾燥의 효과가 적은 반면 에너지의 소비량은 증가한다고 주장한 바 있다.

따라서 初期含水率에서 함수율 10% 까지의 乾燥速度는 除濕太陽熱乾燥의 경우가 1.1~0.9%/日로 0.8%/日인 半溫室型 太陽熱乾燥의 경우 보다 약 25%의 乾燥速度 向上效果를 나타내었고 热氣乾燥速度는 除濕太陽熱乾燥 speed의 3배이상, 그리고 半溫室型 太陽熱 乾燥 speed의 4배이상 이었다.

한편 함수율 단계에 따른 棱積層별 乾燥速度는 Table 5.에 나타낸바와 같이 변재율 50% 이상인 경우 初期含水率로 부터 함수율 30% 까지는 半溫室型과 除濕太陽熱乾燥 모두 비슷한 경향을 보여 棱積중 높은 곳에 위치할수록 그 乾燥速度가 커서 최상층의 乾燥速度가 최하층의 乾燥速度의

약 2~3배 가량 되었으나, 함수율이 낮아짐에 따라 그 차가 감소하여 함수율 30%로 부터 함수율 10% 까지의 단계에서는 각 층중 최대와 최소 乾燥速度의 차가 0.1~0.3%/日의 범위를 보였으며 半溫室型 太陽熱乾燥의 경우에는 초기의 함수율 단계와 마찬가지로 棱積중 상부에 위치할수록 乾燥速度가 커 있으나 除濕太陽熱乾燥의 경우에는 드라이어 내부에 위치한 除濕器내의 送風機와 남쪽벽쪽의 가로格子板에 의하여 集熱部로 부터 유입되는 더운 공기를 棱積의 중앙부에 효과적으로 유도하여 중간층의 乾燥速度가 오히려 상층과 하층의 경우보다 약간 커졌다.

또한 변재율 50% 이하인 경우에도 변재율 50% 이상인 경우와 마찬가지로 初期含水率로 부터 함수율 30% 까지의 단계에서는 상부로 위치할수록 乾燥速度가 커 있으나 최상층과 최하층의 乾燥速度

Table 5. Comparison of drying rates according to the height in the lumber pile of 2.5cm-thick lumber of oaks during active solar-drying period

(Unit: %/day)

Species	Drying method	Course	Sapwood proportion (%)					
			>50			<50		
			IMC-30%	30%-10%	IMC-10%	IMC-30%	30%-10%	IMC-10%
<i>Quercus aliena</i> Bl.	Solar-drying	17-20	2.4	0.6	1.1	2.0	0.5	1.1
		13-16	2.1	0.4	0.8	1.9	0.4	0.9
		9-12	1.4	0.5	0.8	1.2	0.4	0.7
		5-8	0.9	0.4	0.6	1.1	0.5	0.7
		1-4	0.9	0.5	0.7	1.1	0.5	0.8
	Solar-dehumidification drying	17-20	2.6	0.6	1.4	1.7	0.6	1.0
		13-16	1.5	0.9	1.1	1.6	0.7	1.1
		9-12	1.3	0.8	1.1	1.1	0.7	0.9
		5-8	0.9	0.9	0.9	1.1	0.6	0.8
		1-4	0.9	0.7	0.8	1.1	0.6	0.9
<i>Quercus variabilis</i> Bl.	Solar-drying	17-20	2.2	0.8	1.4	2.2	0.6	1.0
		13-16	1.3	0.4	0.6	1.3	0.4	0.8
		9-12	1.4	0.5	0.7	1.3	0.5	0.8
		5-8	1.2	0.4	0.7	1.1	0.5	0.7
		1-4	1.1	0.5	0.7	1.0	0.5	0.7
	Solar-dehumidification drying	17-20	2.5	0.7	1.1	1.7	0.6	1.1
		13-16	1.6	0.6	1.0	1.5	0.6	1.0
		9-12	1.2	0.7	1.0	1.2	0.7	1.0
		5-8	1.1	0.7	0.9	1.1	0.6	0.9
		1-4	1.2	0.6	0.9	1.1	0.6	0.9

의 차는 변재율 50%이상인 경우보다는 작았다.

## 4.2.5. 太陽熱 드라이어의 热에너지 收支와 热效率

월별 集熱部의 위치에 따른 日射量의 분석결과는 Table 6 과 같다.

경사각 37°인 지붕集熱部의 경우 하루동안 集熱部에 도달하는 전체 日射量中 散亂日射量의 乾燥期間중 평균치는 8.70MJ로 直達日射量의 7.27MJ보다 많았으며, 지표면에 의한 反射日射量은 0.33MJ로 가장 적었다.

경사각 90°인 남쪽벽集熱部의 경우에는 지표면에 의한 反對日射量이 5.37MJ로 散亂日射量의

4.84MJ과 直達日射量의 2.09MJ보다 많았다. 이

는 남쪽벽集熱部가 90°의 경사도를 가지므로 지면에 의한 反射日射量이 지붕集熱部보다 쉽게 도달할 수 있기 때문이다. 그러나 散亂日射量과 直達日射量은 모두 지붕集熱部의 경우보다 적어 集熱部에 도달하는 전체일사량도 지붕集熱部의 경우 16.30MJ로 남쪽벽 집열부의 경우 12.30MJ보다 많았으며, 이는 Duffie 등(1980)<sup>9)</sup>이 연중 최대의 일사량을 얻기 위하여 集熱部의 경사를 그 지방의 위도와 일치시켜야 한다는 주장에 일치하였다.

한편, 지붕과 남쪽벽集熱部를 통하여 드라이어 내부로 흡수되는 日射量의 평균은 각각 8.51MJ과 6.22MJ이었다.

半溫室型 太陽熱과 除濕太陽熱 드라이어를 이

Table 6. Analysis of daily solar radiation in Suwon

Month	Position of collector	Daily beam solar radiation	Daily diffuse solar radiation	Daily ground- reflected solar radiation	Daily total solar radiation	Daily total absorbed solar radiation	Transmittance · absorbtance product	Daily solar radiation on a horizontal surface (MJ)
		(MJ)	(MJ)	(MJ)	(MJ)	(MJ)		
April	Roof	8.34	8.95	0.37	17.66	9.86	0.56	17.84
	South -wall	3.59	4.63	5.18	13.40	7.34	0.55	
May	Roof	7.30	8.68	0.32	16.30	8.23	0.50	17.70
	South -wall	1.65	4.83	5.82	12.30	5.97	0.49	
June	Roof	5.56	9.08	0.30	14.94	7.44	0.50	15.60
	South -wall	1.03	5.06	5.11	11.20	5.34	0.48	
Average	Roof	7.27	8.70	0.33	16.30	8.51	0.52	17.05
Average	South -wall	2.09	4.84	5.37	12.30	6.22	0.51	

용하여 목재를 건조하는 데 소요되는 각각의 열에너지 요소들의 木材의 합수율 단계별 열에너지 소비량은 Table. 7에 나타내었다. 각 에너지 요소에 대한 소요에너지량을 분석한 결과 半溫室型 太陽熱과 除濕太陽熱乾燥 각각의 경우에서 드라이어에 투입된 太陽에너지와 전기에너지에 대한 백분율이 热傳導에 의한 热損失은 69.48%와 70.61%로 다른 에너지요소들 보다 월등히 커으며, 이는 드라이어 벽면 자체가 충분히 단열처리되어 있지 않았고 특히, 集熱部의 경우 斷熱效果가 거의 없어 集熱部를 통한 热損失이 매우 커기 때문에이며, 드라이어 내부와 外氣간의 차단이 완벽하지 못하여 드라이어 벽면의 틈새를 통한 열의 누출에 의한 热損失은 11.68%와 12.59%로 热傳導에 의한 热損失 다음으로 큰 백분율을 나타내었고, 換氣에 의한 热損失은 드라이어 내부 온도가 热氣乾燥의 경우보다 낮은 상태가 유지되었고 除濕太陽熱乾燥의 경우에는 합수율 30%이하의 단계에서 드라이어의 吸·排氣口를 폐쇄하

였기 때문에 5.38%와 2.41%의 비교적 낮은 비율을 나타내었다. 그리고 槓積을 제외한 드라이어 내부의 모든 물체의 온도를 드라이어 내부 공기의 온도까지 상승시키기 위하여 필요한 에너지 0.33%와 0.34%를 종합하면 전체 热損失은 전체 투입에너지중 半溫室型 除濕太陽熱乾燥의 경우 86.97%, 그리고 除濕太陽熱乾燥의 경우 85.96%를 나타내어 85%이상의 열에너지가 목재의 건조에 직접 소요되지 못하고 손실되었음을 알 수 있었다. 그러므로 斷熱處理를 더욱 보완하고 드라이어의 각 이음새 부분의 밀폐에 완전을 기하므로써 热損失의 많은 부분을 방지할 수 있을 것으로 사료된다.

한편, 목재의 건조에 직접 소요된 열에너지중 목재로 부터 수분을 증발시키는데 소요된 에너지는 전체 투입에너지중 半溫室型 太陽熱과 除濕太陽熱乾燥의 경우 각각 7.19%와 8.16%를 차지하였으며, 목재를 가열하는 데는 3.28%와 3.43%의 에너지가 소요되어 除濕太陽熱乾燥의 경우가

Table 7 Energy balance for a charge dried in solar-and solar-dehumidification-dryer

Energy requirements	Unit	Solar-drying			Solar-dehumidification drying		
		Moisture content range			Moisture content range		
		IMC - 30%	30% - 10%	IMC - 10%	IMC - 30%	30% - 10%	IMC - 10%
Energy required to evaporate water from wood	MJ	114.94	68.71	183.65	139.27	69.60	208.87
	%	70.14	40.08	54.77	73.98	41.15	58.08
	%	10.15	4.83	7.19	11.77	5.13	8.16
Energy required to raise the temperature of wet lumber to the temperature inside solar dryer	MJ	48.93	37.60	86.53	48.98	41.11	90.09
	%	29.86	21.93	25.81	26.02	24.31	25.58
	%	4.33	2.64	3.39	4.14	3.03	3.58
Energy required to overcome the hygroscopic force	MJ	0.00	65.12	65.12	0.00	58.41	58.41
	%	0.00	37.99	19.42	0.00	34.54	16.34
	%	0.00	4.58	2.55	0.00	4.31	2.30
Total energy required to remove water from lumber	MJ	163.87	171.43	335.30	188.25	169.12	357.37
	%	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	%	14.47	12.06	13.13	15.91	12.48	14.04
Vent losses	MJ	72.71	64.59	137.30	62.71	0.00	62.71
	%	7.51	5.17	6.19	6.30	0.00	2.41
	%	6.42	4.54	5.38	5.30	0.00	2.41
Conduction losses	MJ	774.25	1000.25	1774.50	827.91	964.30	1792.21
	%	79.92	80.00	79.98	83.22	81.29	82.15
	%	68.38	70.36	69.48	69.97	71.14	70.61
Leakage losses	MJ	117.63	180.78	298.41	100.69	216.89	317.58
	%	12.19	14.46	13.45	10.12	18.28	14.65
	%	10.40	12.72	11.68	8.51	16.00	12.59
Energy required to raise the temperature of dryer components to the temperature inside solar dryer	MJ	3.74	4.66	8.40	3.55	5.11	8.66
	%	0.39	0.37	0.38	0.36	0.43	0.39
	%	0.33	0.32	0.33	0.30	0.38	0.34
Total energy losses	MJ	968.33	1250.28	2218.61	994.98	1186.30	2181.28
	%	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	%	85.53	87.94	86.97	84.09	87.52	85.96
Total energy input	MJ	1132.20	1421.71	2553.91	1183.23	1355.42	2538.65
	%	-	-	-	-	-	-
	%	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

半溫室型 太陽熱乾燥의 경우보다 이 두가지 요소에서 그 비율이 높은 것은 除濕太陽熱乾燥의 경우 빠른 乾燥速度에 의하여 수분의 증발에 더 많은 에너지가 소요되었고, 함수율 30% 이하의 단

계에서 吸·排氣口를 폐쇄하고 또한 除濕器로 부터 방출되는 열로 내부온도가 상승하여 목재를 가열하는데 더 많은 열 에너지가 투입되었기 때문이다. 그러나 積分濕潤熱의 극복을 위한 열에

너지는 半溫室型 太陽熱乾燥材의 경우 2.66%로 오히려 除濕太陽熱乾燥의 경우의 2.45%보다 약간 높은 경향을 보인 것은 半溫室型太陽熱乾燥의 경우 함수율이 낮은 상태에서 乾燥速度가 낮아 저함수율 상태가 除濕太陽熱乾燥의 경우 보다 더 많은 시간동안 지속되었기 때문으로 사료된다.

그러므로 전체 투입 에너지중 목재의 건조에 직접 소요된 에너지의 백분율인 평균熱效率은 Fig. 13에서 보는 바와 같이 除濕·太陽熱乾燥의 경우 14.04%로 半溫室型太陽熱乾燥의 경우의 13.13%보다 높았으며, 두 乾燥方法 모두에서 初期含水率로 부터 함수율 30%까지의 함수율 단계에서의 백분율이 함수율 30%로 부터 함수율 10%까지의 함수율 단계보다 높은 것은 함수율이 저하됨에 따라 수분의 증발과 목재의 가열에 필요한 에너지가 급격히 감소한 반면 積分濕潤熱의 극복에 소요되는 에너지의 증가분은 그리 크지 못한 때문이다.

한편 Eckelmann 등(1976)<sup>16)</sup>이 热氣乾燥의 에너지收支에 대하여 분석한 결과와 비교하여 보면 半溫室型 太陽熱乾燥의 경우 내부온도가 충분히 높은 상태로 계속해서 유지되지 못하여 저함수율에서의 건조가 매우 느리게 진행되어 저함수율 상태가 오랜 동안 지속되므로 積分濕潤熱을 극복하기 위한 에너지가 热氣乾燥의 경우의 3배에 달하였고, 集熱部를 통한 热損失이 상당한 양에 달하여 热傳導에 의한 열에너지의 損失量도 热氣乾燥의 경우의 4배에 달하였으나, 換氣에 의한 열에너지의 손실에 있어서는 半溫室型 太陽熱 드라이어의 경우 드라이어 내부온도가 비교적 낮고 주간에만 換氣를 하며, 특히 除濕太陽熱 드라이어 경우에는 함수율 30% 이하에서는 계속해서 吸·排氣口를 폐쇄하므로 热氣乾燥의 경우의 1/10미만의 에너지만이 換氣에 의하여 손실되었음을 알 수 있었다.

#### 4. 2. 6. 乾燥缺陷

##### 4. 2. 6. 1. 表面割裂

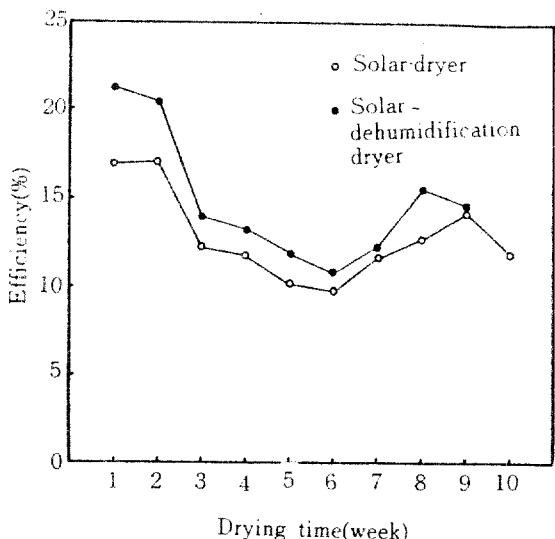


Fig. 13. Efficiency of solar-and solar dehumidification dryer.

건조가 시작되면서부터 두 수종의 半溫室型과 除濕太陽熱 乾燥材 및 天然乾燥材 모두 表面割裂이 발생하기 시작하였고 건조가 진행될수록 그 發生갯수가 증가하여 최대表面割裂이 굴참나무는 변재율 50% 이하의 경우 天然乾燥材는 함수율 36.2%에서 16개에 11.0cm, 半溫室型 太陽熱乾燥材는 함수율 35.7%에서 12개에 8.2cm였으나 除濕太陽熱 乾燥材는 함수율 31.9%에서 8개에 6.4cm로 가장 적은 최대 表面割裂이 발생하였으며, 변재율 50% 이상에서는 天然乾燥材가 함수율 26.5%에서 9개에 5.3cm였으나 半溫室型과 除濕太陽熱 乾燥材는 함수율 41.6%와 41.1%에서 각각 4개에 2.8cm와 4개에 2.9cm의 거의 동일한 최대表面割裂을 나타내었다. 한편, 갈참나무는 변재율 50% 이하의 경우 天然乾燥材는 함수율 29.8%에서 19개에 9.5cm의 최대表面割裂이 발생한 반면, 半溫室型과 除濕太陽熱乾燥材는 함수율 24.6%와 23.0%에서 각각 8개에 5.7cm와 7개에 5.8cm의 비슷한 수준의 최대表面割裂이 발생하였고 변재율 50% 이상에서의 최대表面割裂은 天然乾燥材가 함수율 32.4%에서 9개에 7.5cm, 半溫室型 太陽熱乾燥材가 함수율

28.3%에서 6개에 4.9cm인 반면 除濕太陽熱乾燥材는 38.8%의 함수율에서 4개에 9.0cm로 두 수종 모두 天然乾燥材의 최대表面割裂의 발생정도가 낮아 除濕·太陽熱乾燥材는 半溫室型太陽熱乾燥材보다 최대表面割裂의 발생정도가 낮아 除濕太陽熱乾燥에 의한 表面割裂의 억제효과를 알 수 있었으며 이는 除濕器에 의하여 비교적 균일한 상대습도를 유지할 수 있었기 때문으로 생각된다.

최대表面割裂이 발생한 이후로는 점차 割裂이 감소하여 乾燥終了후의 割裂갯수와 割裂長은 Table 8에 나타난 바와 같이 太陽熱乾燥材의 경우 거의 폐쇄되었으나 天然乾燥材의 경우에는 두 수종 모두 최대表面割裂이 발생한 이후 감소하다가 外氣의 변화에 따라 심하게 변동하여 비교적 심한 表面割裂이 계속 남아있었다.

또한, 热氣乾燥材의 경우와 비교하여 보면 乾燥終了后 割裂갯수와 割裂長은 除濕太陽熱乾燥材의 경우와 비슷한 수준을 보였으나 그 발생율에 있어서는 热氣乾燥材의 경우가 半溫室型太陽熱乾燥材의 경우보다 낮았으나 除濕太陽熱乾燥材의 경우가 가장 낮은 발생율을 나타냈으며, 天然熱乾燥材의 경우가 가장 높은 발생율을 나타내어 변재율 50%이하에서는 두 수종 모두 모든材에서 表面割裂이 발견되었다.

한편, 갈참나무가 두 변재율 모두에서 굴참나무보다 심한 表面割裂을 보였으며, 이는 林業研究院(1988)<sup>11)</sup>에서 국산참나무류의 해부학적 성질을 조사한 바와 같이 表面割裂이 주로 발생하는 單列放射組織이 길이 1mm간 분포수에 있어서 갈참나무가 12개로 10개의 굴참나무보다 많았으며 그 폭과 높이도 0.1 $\mu$ m와 42.7 $\mu$ m씩 커기 때문에 사려된다. 또한 두 수종 모두 변재율 50%이하인 경우가 변재율 50%이상인 경우보다 매우 심한 表面割裂이 발생하였고 그 발생율도 높았음을 알 수 있었다.

#### 4. 2. 6. 2. 橫斷面割裂

表面割裂과 마찬가지로 진조가 시작되면서 부

터 橫斷面割裂이 발생하기 시작하여 진조가 진행될수록 그 발생량이 증가하여 최대橫斷面割裂이 굴참나무는 변재율 50%이하의 경우 天然乾燥材는 함수율 36.2%에서 9개에 2.5cm, 半溫室型太陽熱乾燥材는 함수율 36.6%에서 3개에 2.0cm, 그리고 除濕太陽熱乾燥材는 함수율 47.5%에서 2개에 1.7cm였고, 변재율 50% 이상의 경우 天然乾燥材는 함수율 33.6%에서 7개에 2.5cm였으나 半溫室型과 除濕太陽熱乾燥材는 함수율 41.6%와 함수율 41.1%에서 각각 2개에 1.4cm와 2개에 1.3cm의 비슷한 수준을 보였다.

한편, 갈참나무는 변재율 50% 이하의 경우 天然乾燥材는 함수율 43.2%에서 7개와 2.2cm의 橫斷面割裂이 발생한 이후 점차 감소하다가 外氣의 변화에 따라 심하게 변동하여 함수율 18.8%에서 9개에 2.5cm의 최대橫斷面割裂이 발생하였으나 半溫室型太陽熱乾燥材는 함수율 48.0%에서 2개에 1.7cm, 除濕太陽熱乾燥材는 함수율 48.0%에서 1개에 1.4cm의 최대橫斷面割裂을 나타내었고 변재율 50% 이상에서는 天然乾燥材가 함수율 32.4%에서 6개에 2.4cm의 최대橫斷面割裂을 나타내었으나 그후 변재율 50%이하의 경우와 마찬가지로 外氣에 따른 변동이 심하였고 半溫室型太陽熱乾燥材가 함수율 38.4%에서 3개에 2.0cm, 그리고 除濕太陽熱乾燥材가 함수율 56.5%에서 1개에 0.8cm의 최대橫斷面割裂이 발생하였다.

따라서, 橫斷面割裂의 경우에도 表面割裂의 경우와 마찬가지로 天然乾燥材가 가장 심한 최대橫斷面割裂이 발생하였으며, 半溫室型太陽熱乾燥材는 除濕太陽熱乾燥材보다는 약간 심한 최대橫斷面割裂 발생수준을 보여 除濕太陽熱乾燥材가 橫斷面割裂의 억제에도 효과가 있었음을 알 수 있었다.

최대橫斷面割裂이 발생한 이후로 半溫室型과 除濕太陽熱乾燥材의 경우 곧 감소하기 시작하여 乾燥終了후에는 거의 폐쇄되었고 热氣乾燥材의 경우에도 乾燥終了후에는 거의 폐쇄되었으나

天然乾燥材의 경우에는 外氣에 따른 변동이 심하였고 건조도 충분히 진행되지 못하여 乾燥終了 후에도 5~8개의 橫斷面割裂이 남아있었으며 그 발생율도 天然乾燥材의 경우에는 100%로 모든 板材에서 橫斷面割裂을 발견할 수 있었으며, 이는 Oliveira 등(1982)<sup>9</sup>과 野呂田 등(1981)<sup>10</sup>이 두께 3.0cm 참나무材를 太陽熱乾燥와 天然乾燥를 실시한 결과 太陽熱乾燥材에는 약간의 橫斷面割裂이 발생하였으나 天然乾燥材의 경우에는 매우 심한 橫斷面割裂이 발생하였다고 보고한 바와 일치하였다.

한편, 두 수종간의 橫斷面割裂의 발생수준의 차는 거의 없었으나 변재율 50%이하인 경우가 변재율 50% 이상인 경우보다 심한 橫斷面割裂이 발생하여 表面割裂의 경우와 같은 경향을 나타내었다.

#### 4.2.7. 乾燥收率

수축과 틀어짐에 의한 폭과 두께의 손실량과 그에 따른 乾燥收率은 Table 9에 나타내 있다.

收缩率은 乾燥速度가 클수록, 그리고 最終含水率이 낮을수록 수축되는 폭질의 양이 증가함에 따라 키져수축에 의한 乾燥收率은 天然乾燥의 경우 90% 이상으로 가장 커으며, 半溫室型 太陽熱乾燥의 경우와 除濕太陽熱乾燥의 경우에는 각각 86.3%와 84.8%였고, 热氣乾燥의 경우에는 평균 82.5%로 가장 낮았다.

틀어짐에 의해서는 4가지 乾燥方法에서 모두 두께손실량에서는 길이굽음에 의한, 그리고 폭 손실량에서는 측면굽음에 의한 손실량이 가장 커으며 비틀림에 의한 두께손실량은 틀어짐에 의한 두께와 폭손실량중 가장 커다. 수종별로 분석하여 보면 굴참나무의 경우 변재율 50%이상에서의

Table 8. Average number and maximum length of surface- and end-check, and percentage of lumber checked at the end of drying during active solar-drying period

Drying method	Species	Sapwood proportion (%)	Surface-check			End-check		
			Number of checks	Maximum length (cm)	Percentage of lumber checked (%)	Number of checks	Maximum length (cm)	Percentage of lumber checked (%)
Air-drying	<i>Quercus aliena</i> Bl.	>50	1.1	2.7	27	4.8	2.3	100
		<50	5.2	7.5	100	5.4	2.3	100
	<i>Quercus variabilis</i> Bl.	>50	1.2	1.9	50	5.1	2.4	100
		<50	11.3	10.0	100	7.5	2.5	100
Solar-drying	<i>Quercus aliena</i> Bl.	>50	1.9	1.9	38	0.2	0.1	7
		<50	3.6	4.9	70	0.5	1.0	33
	<i>Quercus variabilis</i> Bl.	>50	1.2	0.8	22	0.1	0.2	11
		<50	5.1	5.3	67	0.4	1.3	30
Solar-dehumidification drying	<i>Quercus aliena</i> Bl.	>50	1.3	2.3	19	0.3	0.5	14
		<50	4.4	4.6	58	0.7	0.8	16
	<i>Quercus variabilis</i> Bl.	>50	0.6	0.8	17	0.2	0.3	11
		<50	2.5	2.6	48	0.4	0.5	24
Kiln-drying	<i>Quercus aliena</i> Bl.	>50	0.5	0.9	29	0.1	0.1	14
		<50	4.3	9.3	67	0.3	0.5	18
	<i>Quercus variabilis</i> Bl.	>50	0.4	1.2	20	0.1	0.2	7
		<50	1.4	4.9	56	0.2	0.6	22

Table 9 Drying yield of 2.5cm-thick lumber of oaks during active solar-drying period

Drying method	Species	Sapwood proportion (%)	Thickness loss (cm)			Width loss (cm)			Yield (%)	
			Twist	Bow	Cup	Twist	Crook	Cup	Shrinkage	Warp
Air-drying	<i>Quercus aliena</i> Bl.	>50	0.01	0.70	0.16	0	0.16	0.27	91.00	59.67
	<i>Quercus variabilis</i> Bl.	<50	0.01	0.79	0.14	0.01	0.23	0.23	90.01	56.48
	<i>Quercus aliena</i> Bl.	>50	0.02	0.25	0.35	0.01	0	0.56	92.25	73.21
	<i>Quercus variabilis</i> Bl.	<50	0.01	0.48	0.13	0	0.34	0.22	90.51	65.79
Solar-drying	<i>Quercus aliena</i> Bl.	>50	0.01	0.67	0.17	0	0.27	0.27	86.51	57.05
	<i>Quercus variabilis</i> Bl.	<50	0.01	0.74	0.19	0	0.63	0.35	84.88	50.18
	<i>Quercus aliena</i> Bl.	>50	0.01	0.52	0.19	0.17	0.28	0.29	87.41	61.07
	<i>Quercus variabilis</i> Bl.	<50	0	0.63	0.21	0	0.38	0.36	86.22	55.29
Solar-dehumidification drying	<i>Quercus aliena</i> Bl.	>50	0.01	0.46	0.11	0	0.30	0.18	85.68	62.77
	<i>Quercus variabilis</i> Bl.	<50	0.01	0.44	0.18	0	0.23	0.27	84.35	60.91
	<i>Quercus aliena</i> Bl.	>50	0.01	0.27	0.09	0	0.11	0.15	85.32	70.28
	<i>Quercus variabilis</i> Bl.	<50	0	0.39	0.01	0	0.94	0.12	83.69	66.06
Kiln-drying	<i>Quercus aliena</i> Bl.	>50	0.01	0.49	0.22	0	0.13	0.34	80.83	53.88
	<i>Quercus variabilis</i> Bl.	<50	0.01	0.82	0.12	0	0.33	0.18	82.36	49.47
	<i>Quercus aliena</i> Bl.	>50	0	0.11	0.12	0	0.13	0.20	83.46	72.94
	<i>Quercus variabilis</i> Bl.	<50	0	0.34	0.13	0	0.41	0.23	83.19	62.34

乾燥收率이 天然乾燥의 경우 73.21%, 热氣乾燥의 경우 72.94%를 나타내어 除濕太陽熱乾燥의 경우 70.28%보다 약간 높은 乾燥收率을 보였으나 굴참나무의 변재율 50%이하와 같참나무의

변재율 50%이상 및 이하에서 除濕太陽熱乾燥의 경우 모두 60%이상의 乾燥收率을 보여 그 평균 乾燥收率이 65.01%로 天然乾燥의 경우 63.79%보다도 높아 4가지 乾燥方法 중 乾燥收率이 가장 양호하였음을 알 수 있었고 半溫室型 太陽熱乾燥와 热氣乾燥의 경우 굴참나무에서는 热氣乾燥의 경우가 그리고 길참나무에서는 半溫室型 除濕太陽熱乾燥의 경우가 각각 높은 乾燥收率을 나타내었으나 평균 乾燥收率에 있어서는 热氣乾燥의 경우 59.66%로 半溫室型 太陽熱乾燥의 경우 55.90%보다는 양호하였다.

한편 굴참나무는 갈참나무보다 양호한 乾燥收率을 보였으며, 두 수종 모두 변재율 50%이상인 경우가 변재율 50%이하인 경우보다 높은 乾燥收率을 나타내었고, 天然乾燥의 경우 乾燥收率이 높은 것은 건조가 충분히 진행되지 못하여 수축과 틀어짐이 심하게 발생하지 않았기 때문으로

사료되며, 外氣의 변화 즉, 장기간 雨天이 지속되어 青變菌이 모든 木材에서 발생하였고 특히, 변재율 50%이상의 木材에서는 매우 심하게 발생하였다.

## 5. 結論

본 연구는 우리나라 활엽수중 대표적인 乾燥困難樹種인 참나무속의 갈참나무와 굴참나무를 공시재료로 하여 계절별 半溫室型 太陽熱乾燥를 실시하여 活性太陽熱乾燥期間을 판정하고, 판정된 活性太陽熱乾燥期間에 除濕太陽熱乾燥, 半溫室型 太陽熱乾燥 및 天然乾燥를 실시하였으며, 热氣乾燥를 병행하였다. 이를 乾燥方法별 乾燥條件, 乾燥速度, 乾燥缺陷 및 乾燥收率을 비교·분석하는 한편, 太陽熱 드라이어 내부로 흡수되는 日射量과 열에너지 收支를 산출하여 半溫室型과 除濕太陽熱 드라이어의 热效率을 분석하므로서 우리나라에서 半溫室型 太陽熱乾燥와 除濕太陽熱乾燥의 적용 가능성을 구명하였다.

본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 半溫室型 太陽熱乾燥에서 계절별 드라이어의 내부온도는 8월 중순에 36°C의 최고온도를 나타내었고, 1월초에 -2°C의 최저온도를 기록하였으며, 外氣와의 최대온도차는 10월에 12°C를 보였고, 연평균 온도차는 10°C였다. 또한 상대습도는 드라이어의 온도가 상승할수록 저하되었으며, 外氣의 상대습도에 비해 변동이 적었다.

2. 온도가 높고 상대습도는 낮은 活性太陽熱乾燥期間은 4월, 5월, 그리고 6월이었다.

3. 活性太陽熱乾燥期間에서 集熱部의 온도는 68°C까지 상승하였으나 半溫室型 太陽熱 드라이어는 51°C까지 상승하였고, 除濕太陽熱 드라이어에서는 57°C까지 상승하였다. 除濕太陽熱 드라이어의 상대습도는 半溫室型 太陽熱드라이어의 상대습도보다 낮게 유지되었다.

4. 活性太陽熱乾燥期間에서 전 건조기간 중 평균 乾燥速度는 除濕太陽熱乾燥에서 1.0%/日로서 半溫室型 太陽熱乾燥의 0.8%/日보다 20% 커졌으며, 热氣乾燥의 3.4%/日보다는 적었다.

5. 活性太陽熱乾燥期間에서 변재율 50% 이상과 이하인 木材의 최종함수를 10%까지의 推定乾燥日數는 除濕太陽熱乾燥에서 52일과 59일, 半溫室型 太陽熱乾燥에서 62일과 69일 소요되었으며, 热氣乾燥에서는 15일과 19일이 소요되었으나 天然乾燥에서는 126일간 건조하여도 함수율 14.3%까지 건조되었다.

6. 活性太陽熱乾燥期間에서 변재율 50% 이상과 이하인 木材의 함수율 30%에서 10% 범위까지 除濕太陽熱乾燥日數는 半溫室型 太陽熱乾燥日數에 비해 27%와 17%의 短縮效果를 나타내었다.

7. 活性太陽熱乾燥期間에 太陽熱드라이어에 도달한 일일 평균 日射量은 지붕集熱部에서 散亂日射量이 8.70MJ로서 直達日射量 7.27MJ과 反射日射量 0.33MJ보다 많았으나 남쪽벽 集熱部의 反射日射量은 5.37MJ로서 많았으며, 흡수된 평균 日射量은 지붕集熱部에서 8.51MJ로

남쪽벽 集熱部의 6.22MJ보다 많은 日射量이 흡수되었고, 평균 透過率·吸收率積은 0.52였다.

8. 活性太陽熱乾燥期間에 太陽熱드라이어에 투입된 전체 에너지중 손실된 열에너지의 열진달에 의하여 69.48%, 공기누출에 의하여 11.68%, 구조물 가열에 의하여 0.33%였고, 환기에 의하여는 半溫室型 太陽熱드라이어는 5.38%였으며 除濕太陽熱 드라이어는 2.41%였다. 따라서 半溫室型 太陽熱드라이어의 热效率은 13.13%로서 除濕太陽熱 드라이어의 热效率 14.04%보다 낮았다.

9. 活性太陽熱乾燥期間에서 전체 木材中 表面割裂이 발생한 木材의 비율은 除濕太陽熱乾燥材의 36%, 热氣乾燥材의 43%, 半溫室型 太陽熱乾燥材의 49%, 그리고 天然乾燥材의 69% 순위였다.

10. 活性太陽熱乾燥期間에서 橫斷面割裂의 평균 발생개수는 半溫室型 太陽熱乾燥, 除濕太陽熱乾燥 및 热氣乾燥에서 모두 1개 미만이었으나 天然乾燥에서는 5.7개로 나타났다.

11. 活性太陽熱乾燥期間의 乾燥收率은 최종함수율 7.5%인 除濕太陽熱乾燥에서는 65.0%로서 최종함수율 14.3%인 天然乾燥의 63.8%, 최종함수율 8.3%인 热氣乾燥의 58.7%, 그리고 최종함수율 8.9%인 半溫室型 太陽熱乾燥의 55.9%보다 커졌다.

## Literature Cited

- Bois, P. J. 1977. Constructing and operating a small solar-heated lumber dryer. For. Prod. Util. Tech. Rep. No. 7.
- Cech, M. Y. and F. Pfaff. 1978. Dehumidification drying of spruce studs. For. Prod. J. Vol. 28, No. 3.
- Chen, P. Y. S. 1981. Design and tests of a

- 500BF solar kiln. For. Prod. J. Vol. 31. NO. 3.
4. ...., W. A. Helmer, H. N. Rosen, and D. J. Barton. 1982. Experimental solar dehumidifier kiln for drying lumber. For. Prod. J. Vol. 32. No. 9.
5. .... and W. A. Helmer. 1982. Principles of dehumidification drying. For. Prod. J. Vol. 32. No. 5.
6. ...., ...., and H. N. Rosen. 1984. Energy efficient lumber dry kiln using solar collectors and refrigeration system. United States Patent 4, 432, 147, Feb. , 21, 1984.
7. .... and W. A. Helmer. 1987. Design and tests of a solar-dehumidifier kiln with heat storage and heat recovery systems. For. Prod. J. Vol. 37. No. 5.
8. Cuppett, D. G. and E. P. Craft. 1975. Low-temperature forced-air-drying of Appalachian hardwoods. USDA NE-328.
9. Duffie, J. A. and W. A. Beckman. 1980. Solar engineering of thermal processes. John Wiley & Sons, Inc.
10. Eckelmann, C. A. and J. L. Baker. 1976. Heat and air requirements in the kiln drying of wood. Purdue Univ. Res. Bull. No. 933.
11. 林業研究院. 1988. 참나무 資源의 綜合利用  
開發에 關한 研究. 林業研究院.
12. 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, Vol. 2 :21-28.
13. ...., ...., and M. B. vaidya. 1982. A computer model to simulate solar and solar-dehumidification lumber drying. Trans. ASME Vol. 104:182-186.
14. ...., ...., and S. Nazer-Adl. 1983. A mathematical model for a solar absorption lumber drying system. Proc. Gateway Energy Conference:44-53.
15. .... 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.
16. ...., 1986. A general collector sizing method for solar kilns. For. Prod. J. vol. 36. No. 6.
17. ...., 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.
18. 鄭希錫. 1982. 木材乾燥學. 先進文化社
19. 中央氣象臺. 1964~1987. 氣象月報. 中央氣象臺.
20. 韓國工業標準協會. 1980. 木材의 試驗通則. 韓國工業規格:F2201~F2202.
21. Kreyzig, Erwin. 1972. Advanced engineering mathematics. John Wiley & Sons Inc.
22. Little, R. L. 1977. Design and performance of foreign solar lumber dryer. Practcal application of solar energy to wood processing. FPRS:35-48.
23. ...., 1979. Solar-heated water dries lumber. For. Prod. J. Vol. 29. No. 2.
24. ...., 1981. Effect of weather on dry kiln venting losses. For. Prod. J. Vol. 31. No. 6.
25. ...., 1984. Industrial use of solar heat in lumber drying:a long term performance report. For. Prod. J. Vol. 34. No. 9.
26. Liu, B. Y. H. and R. C. Jordan. 1963. The long-term average performance of flat-plate solar energy collectors. Solar Energy Vol. 7:53.
27. Lumley, T. G. and E. T. Choong. 1979. Technical and economical characteristics of two solar kiln designs. For. Prod. J. Vol. 29.

- No. 7.
28. Maldonado, E. D. and E. C. Peck. 1962. Drying by solar radiation in Puerto Rico. For. Prod. J. Oct. , 1962.
29. 中篤厚外 2人. 1986. 太陽熱利用木材乾燥 (I). 林產試月報. 10月.
30. ...., ....-(II), .....12月.
31. Oliveira, L. C.G. . C.Skaar, and E. M. Wengert. 1982. Solar and air lumber drying during winter in Virginia. For. Prod. J. Vol. 32. No. 1.
32. Orgill, J. F. and K. G. T. Hollands. 1977. Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface. Solar Energy Vol. 19:357.
33. Peck, E. C. 1962. Drying 4/4 red oak by solar heat. For. Prod. J. Mar. , 1962.
34. Plumtre, R. A. 1983. Some thoughts on design and control of solar timber kilns. For. Prod. J. Vol. 33.
35. Rasmussen, E. F. 1965. Seasoning small quantities of lumber. FPL-089.
36. Read, W. R. , A. Choda, and P. I. Copper. 1974. A solar timber kiln. Solar Energy Vol. 15:309-316.
37. Satish Kumar. 1981. Utilization of solar energy in India. For. Prod. J. Sep.
38. Schneider, A. , F. Engelhardt, and L.Wagner. 1979. Comparative investigations on air-drying and solar-drying of lumber under Central European weather conditions, Part 1:Experimental station and results of the first drying test. Holz als Roh- und Werkstoff 37.
39. Sharma, S. N. 1981. Solar drying of building timber. N. B. O. Journal. Oct. 1981.
40. ...., Prem Nath, and S. P. Badoni. 1982. A direct method for determination of energy savings by thermal insulation in a glasshouse type solar kiln. J. Timb. Dev. Assoc. (India). Jul. , 1982.
41. Siau, J. F. 1984. Transport processes in wood. Springer-Verlag.
42. Skaar, C. 1972. Water in wood. Syracuse Univ. Press.
43. 野呂田 隆史 外 3人. 1980. 木材乾燥における太陽熱の利用(第1報). 林產試月報. 10月
44. ...., 1981. ....-(第2報). ...., 8月.
45. ...., 1983. 太陽熱利用木材乾燥に関する研究. 林產試研報 第72號.
46. Taylor, K. J. and A. D. Weir. 1985. Simulation of a solar timber dryer. Solar Energy Vol. 34. No. 3.
47. 寺尺真1967. 天然乾燥の促進法と矛備乾燥装置. 木材工業.
48. Troxell, H. E. and L. A. Muller. 1968. Solar lumber drying in the Central Rocky Mountain Region. For. Prod. J. Vol. 18. No. 1.
49. Tschermitz, J. L. and W. T. Simpson. 1979. Solar-heated lumber dryer for tropical latitudes. Solar Energy Vol. 22:563-566.
50. .... and ...., 1984. Solar dry kiln for tropical latitudes. For. Prod. J. Vol. 34. No. 5.
51. .... and ...., 1985. FPL design for lumber dry kiln using solar/wood energy in tropical latitudes. FPL-44.
52. ...., 1986. Solar energy for wood drying using direct or indirect collection with supplemental heating:A computer analysis. FPL Res. Pap. 477.
53. USDA FPL . 1974. Wood handbook. US Government Printing Office p20-6.
54. Wengert, E. M. 1971. Improvements in solar dry kiln design. FPL-0212.
55. Wetherby, E. C. 1980. Improvements in dehumidification drying. Midwest Seasoning Assoc