

## 圓板의 熱板乾燥에서 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 内部温度와 含水率 分布模型 \*1

呂煥明 · 鄭希錫 \*2

## Distribution Model Based on Computer Simulation for Internal Temperature and Moisture Content in Press Drying of Tree Disks \*1

Hwan-Myeong Yeo · Hee-Suk Jung \*2

### ABSTRACT

This study was executed to find the applicability of press drying of tree disk by investigating the shrinkage and drying defect and to form appropriate model by comparing the actual moisture content(MC) and internal temperature in respect of drying time with calculated values based computer simulation to which was applied finite difference method.

In press drying disk, heating period, constant drying rate period maintained plateau temperature at 100°C and falling drying rate period were significantly distinguished. Actual MC and internal temperature were analogous to those calculated at comparing points. Heat transfer model formed by Fourier's law using specific heat of moist wood and conduction coefficient considering fractional volume of each element of wood cell wall, bound water, free water and air showed applicability as basic data to developing heat expansion, shrinkage and drying stress during press drying. Also mass transfer model formed by Fick's diffusion law using water vapor diffusion coefficient showed applicability.

Longitudinal shrinkage was developed by pressure of hot press and tangential shrinkage was restrained by hygrothermal recovery. The heart check, surface check and ring failure were occurred differently in species, but V-shaped crack didn't develop.

*Keywords* : Press drying, computer simulation, finite difference method, heat transfer, mass transfer

\*1 接受 1994年 5月 19日 Received May 19, 1994

\*2 서울대학교 農業生命科學大學 College of Agriculture & Life Sciences, Seoul National University, Suwon 441-744, Korea

# 1. 緒 論

나무 원판은 素材와는 달리 수목의 성장역사를 그대로 지니고 있고, 성장률에 의한 곡선적 외관이 아름다운 특성을 지니고 있기 때문에 옛부터 목기와 테이블 상판등 목공예품으로 사용되어져 왔다.

그러나 원판은 건조 중에 쉽게 터지는 특성을 지니고 있어 원판건조는 원판가공 중 가장 어려운 공정이다. 지금까지 원판건조는 주로 재래식 훈연건조를 적용하고 있는데, 건조시간이 길 뿐만 아니라 할렬과 변색에 의한 손실도 상당량에 이르고 있다.

근래 원판가공 제품의 수요가 늘고 있지만, 적절한 원료 수종은 차츰 고갈되어가는 추세인 바, 제한된 자원의 합리적 이용의 한 측면에서 원판의 새로운 건조기술인 열판건조법을 개발할 필요성이 있다.

원판은 수목의 성장 중에 생성된 성장응력이 잔류한 상태에서 건조 중 수분경사에 의해 발생하는 표면응력과 횡단방향 수축이방성에 의해 발생하는 이방성 수축응력 등에 의해서 心裂, 윤할, V형 크랙 등이 쉽게 발생된다.<sup>1-5)</sup> 종래의 열판건조는 형질이 불량한 소경재의 製材品の 건조결함방지<sup>6,7)</sup>와 건조시간 단축에 있어서 적절한 건조법으로 인식되고 있는 바, 원판건조에 가압과 가열처리를 해주는 열판건조를 적용함으로써, 원판 또는 원목의 가열시 발생하는 접선방향 팽창은 방사방향에 비하여 상당히 큰데, 이 팽창은 냉각 후에도 완전 회복되지 않는다는 hygrothermal recovery<sup>8,9)</sup>와 열팽창을 이용하여 건조 중 발생하는 접선방향의 수축을 억제하고, 수축이방성 응력을 완화시켜서 여러 형태의 건조결함을 막아주고, 아울러 건조시간의 단축효과도 기대할 수 있다.

기존의 열판건조에 관한 연구에서 각재, 판재와 단판의 건조시간에 따른 재내 온도와 함수율을 직접 측정하여 제시<sup>10)</sup>하였으나, 온도와 함수율의 직접적인 측정은 목재의 비중, 크기 등의 건조대상목의 특성과 각기 다른 건조조건을 적용할 때마다 측정하여야 함으로 많은 목재자원과 인력을 요구하게 된다. 열기건조중 열과 수분이동 및 응력분포에 관한 수학적 모델개발<sup>11-13)</sup> 또는 시뮬레이션을 통한 온도와 함수율 분포에 관한 연구<sup>14)</sup>는 수행되고 있으나, 원판의 열판건조 중 열과 수분이동에 관한 연구는 극히 적은 실정이다.

따라서 본 연구는 원판 공예용재로서 널리 쓰이고 있는 은행나무와 피나무를 대상으로 하여 원판의 열판건조에서의 열팽창, 수축과 응력 발생에 기초가 되는 열과 수분의 이동현상을 구명하기 위하

여 원판내부 각 부위의 시간별 온도와 함수율을 수종별 원판의 평균 지름, 비중, 초기함수율과 열판 온도를 기초자료로 적용하여 에너지보존 방정식과 유한차분법 (finite difference method)에 의한 수학적 해석<sup>15,16)</sup>으로 구한 계산치와 측정치를 비교하여 그 적합성 정도를 밝혀내고, 효율적인 열판건조공정의 관리를 위한 기초자료를 마련코자 하였으며, 더 나아가 이러한 결과를 바탕으로 하여 적절한 열판건조조건을 알고져 수행하였다.

# 2. 材料 및 方法

## 2. 1 재료 및 시험기

공시수종은 木工藝用材로 널리 사용되는 전건비중이 각각 0.49와 0.45인 은행나무(*Ginkgo biloba* L.)와 피나무(*Tilia amurensis* Rupr.) 원목에서 두께 6 cm로 원판을 수종과 열판온도별로 띠뿔체재기로 횡절하여 단속열판건조에서 함수율과 수축률 측정용 원판으로 사용하고, 연속열판건조에서 최종함수율, 수축률, 건조결함과 내부온도 측정용 원판으로 사용하였다. 열판온도별 평균지름과 초기 함수율은 Table 1과 같다.

열판의 길이와 폭은 135 cm×75 cm이고, 온도 ±1℃와 압력 ±1kg/cm<sup>2</sup> 정밀도로 조절 가능한 열판건조기를 사용하였고, 열판건조 중 원판내부 온도는 온도 ±0.1℃의 정밀도를 지닌 12채널의 자동온도기록계에 구리-콘스탄탄 열전대를 설치하여 측정하였으며, 초기함수율, 최종함수율과 비중 시험편의 무게 측정에는 정밀도 ±0.01g인 직시전자천칭을, 그리고 원판의 건조 중 무게 측정에는 정

Table 1. Platen temperature, average diameter and initial moisture content of disks

Species	Drying	Platen Temp.(℃)	Dia. (cm)	IMC (%)
Ginkgo	Int.* <sup>1</sup>		140	<del>109.4</del>
	Cont.* <sup>2</sup>	140	25.8	103.2
Basswood	Int.* <sup>1</sup>	140	26.0	79.8
	Cont.* <sup>2</sup>	140	24.4	91.7
	Int.* <sup>1</sup>	170	24.0	86.5
	Cont.* <sup>2</sup>	170	20.8	92.9

\*1 Intermittent drying determines the MC and shrinkage at interval of 30 minutes,

\*2 Continuous drying determines the internal temperature and drying defects.

밀도  $\pm 1g$ 인 직시전자천칭을 각각 사용하였다.

## 2. 2 시험 방법

### 2. 2. 1 잔적과 건조조건 및 건조방법

공시 원판을 열판사이에 넣고 원판의 양단면에 와이어스크린과 환기 카울을 끼우고, 압력은  $2.45 kgf/cm^2$ 로 가압하고, 열판온도는 은행나무는  $140^\circ C$ , 피나무는  $140^\circ C$ 와  $170^\circ C$ 를 적용하였다. 계산치와 측정치 함수율의 비교와 건조시간별 수축률의 변화를 알기 위해 30분 간격으로 원판의 무게를 측정하고, 접선, 방사방향의 길이와 두께를 측정하는 단속열판건조와 건조 중 내부온도, 최종함수율과 수축률, 그리고 건조결함을 측정기 위한 연속열판건조를 실시하였다.

### 2. 2. 2 원판 내부온도 측정

원판의 부위별 온도를 측정기 위해 Fig. 1과 같은 위치에 직경 2mm 구멍을 뚫어서 구리-콘스탄탄 열전대 (TC)를 삽입하였다. 열전대를 원판의 두께방향으로 삽입한 위치는 수피에서 수를 향한 방사방향으로 10cm 깊이 들어간 부위에서 횡단면으로부터 내부로 깊이 1cm인 수심표층(TC<sub>1</sub>), 2cm 부위가 수심중간층(TC<sub>2</sub>)과 3cm 부위가 수심내층(TC<sub>3</sub>)이고, 방사방향으로 삽입한 위치는 횡단면에서 깊이 3cm 부위에서 수피로부터 거리 6cm 부위가 내부내층(TC<sub>4</sub>), 3cm 부위가 중간내층(TC<sub>5</sub>), 1cm 부위가 외부내층(TC<sub>6</sub>)이다.

### 2. 2. 3 원판 부위별 함수율 측정

열판건조시간 30분 간격으로 원판 무게를 측정 한 후 Fig. 2와 같이 원판의髓에서 30 각도로 평균 반경 부위에서 쉘기형으로 원판의 부위별 함수율 시편을 절취하고, 두께방향으로 횡단면에서 깊이 0~1.5cm부위의 수피에서 수심을 향해 5등분하여 최외부표층(S<sub>1</sub>), 외부표층(S<sub>2</sub>), 중간표층(S<sub>3</sub>), 내부표층(S<sub>4</sub>), 최내부표층(S<sub>5</sub>)으로 하고, 깊이 1.5~3cm에서 수심을 향해 5등분하여 최외부내층(C<sub>1</sub>), 외부내층(C<sub>2</sub>), 중간내층(C<sub>3</sub>), 내부내층(C<sub>4</sub>), 최내부내층(C<sub>5</sub>)으로 구분하여 원판당 10부위에서 함수율을 구하였다.

### 2. 2. 4 원판 수축률과 건조결함 측정

건조시간 30분 간격으로 원판의 평균반경의 중간 부위에서 방사방향과 접선방향의 길이 및 두께를 측정하여 접선방향, 방사방향과 섬유방향 수축률을 구하였다. 원판의 연속열판건조 종료 후 양 횡단면에 나타난 할렬, 윤할과 V형 크랙이 발생한 원판 수, 발생한 할렬, 윤할과 V형크랙의 갯수, 길이를 조사하였다.

## 2. 3 목재내 열전달과 수분이동 모델

### 2. 3. 1 열전달

열판건조 중 열전달은 수피를 제외한 모든 부위에서는 전도에 의해 이루어진다고 가정하고, 수피를 제외한 원판 내부온도 계산은 Fourier 법칙을 적용하였으며, 수피에서 열전달은 Newton의 냉각 법칙을 적용하여 programming language PASCAL을 사용하여 건조 중 온도분포모형을 구성하였다.

### 2. 3. 2 수분이동에 필요한 활성화 에너지

열판건조 중 원판 내부수분은 대부분 수증기로

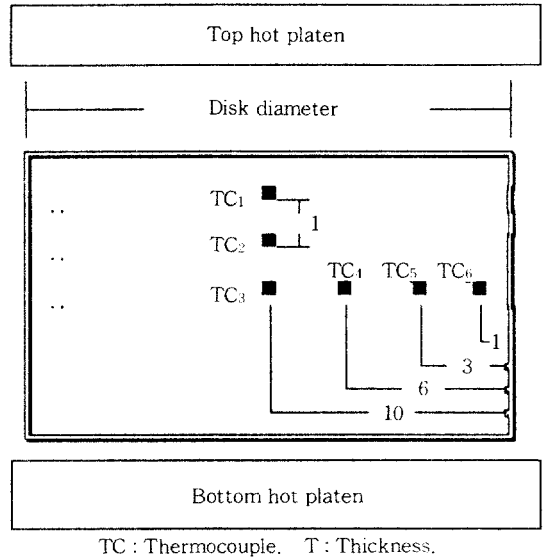


Fig. 1. Allocation of thermocouple (TC) for measurement of temperature in disk (unit: cm).

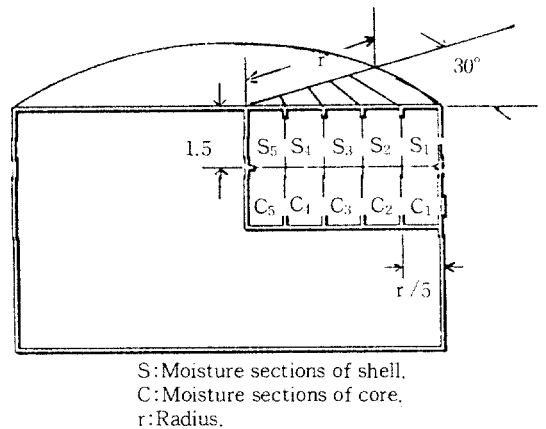


Fig. 2. Sections for determination of moisture content (unit: cm).

이동하므로 건조초기 비등점에 도달할 때까지의 모세관이동은 무시하고, 기화열, 미분수착열<sup>17)</sup>만이 수분이동에 관여한다고 가정하여 Fick의 확산 법칙을 적용하여 수분이동모델을 구성하였다. 확산계수는 Siau<sup>18,19)</sup>가 제시한 세포내 수증기 확산계수를 사용하였다.

### 2. 3. 3 유한 차분법

#### 2. 3. 3. 1 격자망(mesh) 구성

열관건조시 원관내부의 온도, 함수율을 구하고자 격자망을 Fig. 3과 같이 원관의 횡단면에서 두께방향으로 두께의 1/2 되는 면까지 3등분하고, 방사방향으로 수피에서髓까지 15등분하여 격자점의 수가 64개(4×16개)가 되도록 구성하였다.

#### 2. 3. 3. 2 미소제어체적

격자망을 구성하기 위해 절단면으로부터 30° 회전시켜 섬유방향으로 절단하여 Fig. 4와 같이 미소 제어체적을 구성하였다. 미소제어체적 내의 열관에 가까운 단면을 A<sub>1</sub>, 먼 단면을 A<sub>1</sub>'라 하고, 수피쪽 접선단면을 A<sub>2</sub>, 수쪽 접선단면을 A<sub>3</sub>라고 구성하였다.

#### 2. 3. 3. 3 격자점 주위의 2차원계

격자점(m, n) 주위 2차원계에서 점(m, n)으로의 전도에 의한 에너지 전달률에 관한 방정식은 2-1a~2-1d와 같다.

$${}^{\circ}E_{(m-1, n) \rightarrow (m, n)} = kA_1(T_{m-1, n} - T_{m, n}) / \Delta x \quad (2-1a)$$

$${}^{\circ}E_{(m+1, n) \rightarrow (m, n)} = kA_1'(T_{m+1, n} - T_{m, n}) / \Delta x \quad (2-1b)$$

$${}^{\circ}E_{(m, n+1) \rightarrow (m, n)} = kA_2(T_{m, n+1} - T_{m, n}) / \Delta y \quad (2-1c)$$

$${}^{\circ}E_{(m, n-1) \rightarrow (m, n)} = kA_3(T_{m, n-1} - T_{m, n}) / \Delta y \quad (2-1c)$$

where  ${}^{\circ}E$ =Rate of heat flow(W)

K=Thermal conductivity(W/m°C)

A=Area(m<sup>2</sup>)

T=Temperature(°C)

### 2. 3. 4 건조기간별 적용방정식

#### 2. 3. 4. 1 가열기간

건조초기의 경계조건은 임의의 격자점 온도가 초기온도에서부터 100°C가 될때 까지로 하고, 열관에서 원관으로 가해주는 열량이 재온상승에 필요한 에너지로 모두 사용된다고 가정하였다. 열관과 접하는 원관의 횡단면의 4n+1(0≤n≤15, n은 정수)번 격자점의 초기함수율은 Tschernits<sup>20)</sup>가 단관 열관건조에서 가정한 바와 같이 0%, 온도는 열관온도와 같다고 가정하였고, 횡단면으로부터 1cm 깊이의 4n+2번 격자점과 3cm 깊이인 4n+4번 격자점은 각각 실험을 통해 구한 표층과 내층의 부위별 함수율을 초기함수율로 하였으며, 2cm 깊이인 4n+3번 격자점은 표층과 내층 함수율의 평균값을 초기함수율로 하였다. 격자점간 거리 dx 또는 dy, 제어체적내 열전달면적 A, 열전도계수 k, 열대류계수 h로서 전도와 대류에 의한 열저항 R을 각각 dx/(k·A)과 1/(h·A)으로 구하고, 점(m, n)과 (m+1, n)간의 열저항을 R<sub>m+</sub>, 점(m-1, n)과 (m, n)간의 열저항을 R<sub>m-</sub>, 점(m, n)과 (m,

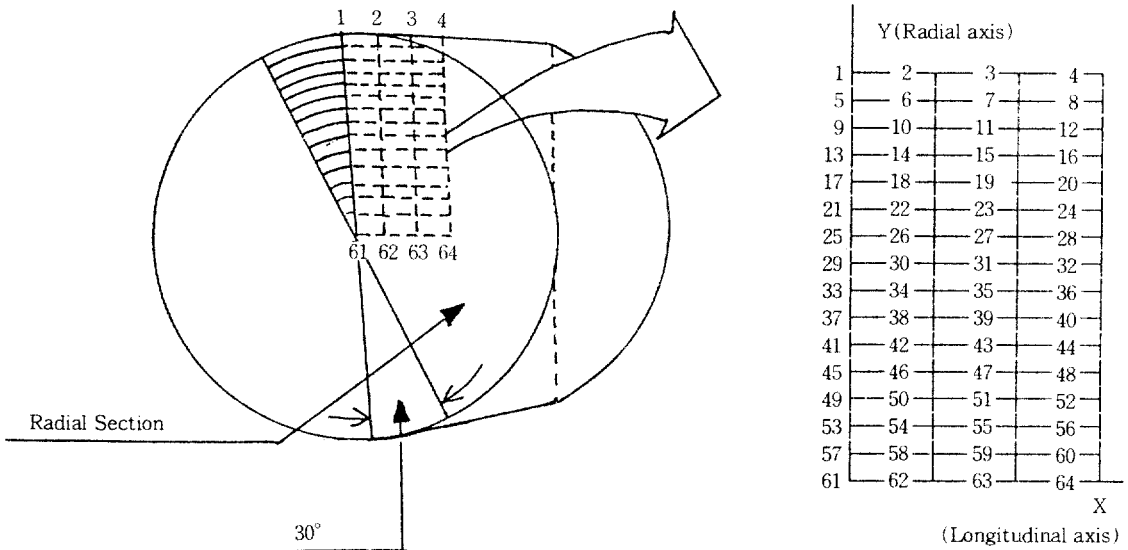


Fig. 3. Formation of mesh and allocation of node for heat conduction and water vapor diffusion analysis.

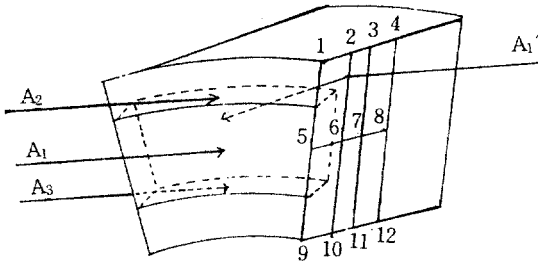


Fig. 4. Elemental volume for three-dimensional heat conduction and water vapor diffusion analysis in node no. 5.

$n+1$ )간의 열저항을  $Rn^+$ , 점  $(m,n-1)$ 과  $(m,n)$ 간의 열저항을  $Rn^-$ 이라 하며, 건조시간  $t$ 는 정수  $p$ 를 도입하여  $t=p \cdot \Delta t$ 이라 하여, 이 기간의 에너지 보존식을 식 2-2와 같이 구성하였다.

$$\begin{aligned} & (1/Rm^+)^{p+1}(T_{m+1,n}^{p+1}-T_{m,n}^{p+1})+ \\ & (1/Rm^-)^{p+1}(T_{m-1,n}^{p+1}-T_{m,n}^{p+1})+ \\ & (1/Rn^+)^{p+1}(T_{m,n+1}^{p+1}-T_{m,n}^{p+1})+ \\ & (1/Rn^-)^{p+1}(T_{m,n-1}^{p+1}-T_{m,n}^{p+1}) \\ & = (S_m \cdot c \cdot dv/dt)(T_{m,n}^{p+1}-T_{m,n}^p) \dots\dots\dots(2-2) \end{aligned}$$

where

- R = Thermal resistance ( $^{\circ}C/W$ )
- $S_m$  = Specific gravity at moisture content, M
- c = Specific heat ( $J/kg^{\circ}C$ )
- dv = Elemental volume ( $m^3$ )
- dt = Unit time (sec)

- $T_{m+1,n}$  = Temperature at node  $(m+1,n)$  ( $^{\circ}C$ )
- $T_{m-1,n}$  = Temperature at node  $(m-1,n)$  ( $^{\circ}C$ )
- $T_{m,n+1}$  = Temperature at node  $(m,n+1)$  ( $^{\circ}C$ )
- $T_{m,n-1}$  = Temperature at node  $(m,n-1)$  ( $^{\circ}C$ )
- $T_{m,n}$  = Temperature at node  $(m,n)$  ( $^{\circ}C$ )

열전도계수는 세포벽, 결합수, 자유수, 공기 등 세포내 각 요소의 용적 비율을 고려하여 원판내부 각 제어체적내의 섬유방향 열전도계수(Kl)와 횡단방향 열전도계수(Kt)를 섬유포화점을 30%로 가정하여 식 2-3으로 유도하여 계산하였다. 세포내 각 요소의 열전도 계수와 함수목재의 비열식은 鄭<sup>21)</sup>이 제시한 값과 식을 이용하였으며, 열대류계수는 Incropera<sup>15)</sup>가 제시한 자유대류계수를 적용하였다.

$$Kl = k_1 \cdot S_m \cdot 1 / Sc + k_b \cdot S_m \cdot 0.3 / Sb + k_f \cdot S_m \cdot (mc - 0.3) / Sf + k_a \cdot [1 - S_m \cdot (1 / Sc + 0.3 / Sb + (mc - 0.3) / Sf)] \dots\dots\dots(2-3a)$$

$$Kt = k_t \cdot S_m \cdot 1 / Sc + k_b \cdot S_m \cdot 0.3 / Sb + k_f \cdot S_m \cdot (mc - 0.3) / Sf + k_a \cdot [1 - S_m \cdot (1 / Sc + 0.3 / Sb + (mc - 0.3) / Sf)] \dots\dots\dots(2-3b)$$

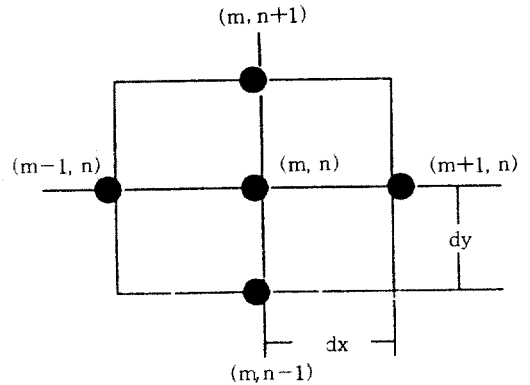


Fig. 5. Nomenclature for numerical solution of two-dimensional conduction problem.

where

- $k_1$  = Longitudinal thermal conductivity of cell wall ( $0.88W/m^{\circ}C$ )
- $k_t$  = Transverse thermal conductivity of cell wall ( $0.44W/m^{\circ}C$ )
- $k_b$  = Thermal conductivity of bound water ( $0.40W/m^{\circ}C$ )
- $k_f$  = Thermal conductivity of free water ( $0.59W/m^{\circ}C$ )
- $k_a$  = Thermal conductivity of air ( $0.024W/m^{\circ}C$ )
- $Sc$  = Specific gravity of cell wall (1.46)
- $Sb$  = Specific gravity of bound water (1.113)
- $Sf$  = Specific gravity of free water (1.00)
- $mc$  = Fractional moisture content

### 2. 3. 4. 2 항률건조기간

경계조건은 원판내부 임의의 점에서 온도가 100 $^{\circ}C$ 에 도달한 시기부터 함수율이 섬유포화점에 도달하였을 때까지로 하였다. 내부온도가 100 $^{\circ}C$ 미만인 부위는 가열기간의 방정식을 적용하고, 100 $^{\circ}C$ 에 도달한 부위는 열판으로부터 가해지는 열량이 자유수를 증발시키는 에너지로 사용된다고 가정하여 열방정식은 식 2-4a와 같이 구성하였으며, 이때 수분이동은 Siau<sup>18,19)</sup>가 제시한 확산계수를 Fick의 확산법칙 2-4b에 적용하였다.

$$\begin{aligned} & (1/Rm^+)^{p+1}(T_{m+1,n}^{p+1}-T_{m,n}^{p+1})+ \\ & (1/Rm^-)^{p+1}(T_{m-1,n}^{p+1}-T_{m,n}^{p+1})+ \\ & (1/Rn^+)^{p+1}(T_{m,n+1}^{p+1}-T_{m,n}^{p+1})+ \\ & (1/Rn^-)^{p+1}(T_{m,n-1}^{p+1}-T_{m,n}^{p+1}) \\ & = (mcm,n^{p+1} - mcm,n^p) \cdot S_m \cdot \lambda \cdot dv / dt \dots\dots\dots(2-4a) \end{aligned}$$

where  $\lambda$ =Evaporation heat ( $J/kg$ )

$$\{(mcm_{m+1,n} - mcm_{m,n}) - (mcm_{m,n} - mcm_{m-1,n})\} \cdot S_m \cdot dv / dt = D \cdot A \cdot dC / dx \dots\dots\dots(2-4b)$$

where D=Diffusion coefficient (cm<sup>2</sup> /sec)  
C=Concentration (g /cm<sup>3</sup>)

### 2. 3. 4. 3 감률건조기간

경계조건은 원판내부 임의의 점에서 함수율이 섬유포화점에서 모든 부위가 0%에 도달할 때까지로 하였다. 온도가 100℃ 미만이면 함수율이 섬유포화점이상인 부위에는 가열기간의 방정식을, 100℃ 이면 섬유포화점이상의 부위에는 항률건조기간의 방정식을 적용하고, 함수율이 섬유포화점이하인 부위에는 열판으로부터 가해지는 열량이 모두 결합수를 제거시키는데 필요한 에너지로 사용된다고 가정하여 열방정식을 식 2-5와 같이 구성하였다.

$$\begin{aligned} & (1/Rm^+)^{p+1}(T_{m+1, n}^{p+1} - T_{m, n}^{p+1}) + \\ & (1/Rm^-)^{p+1}(T_{m-1, n}^{p+1} - T_{m, n}^{p+1}) + \\ & (1/Rn^+)^{p+1}(T_{m, n+1}^{p+1} - T_{m, n}^{p+1}) + \\ & (1/Rn^-)^{p+1}(T_{m, n-1}^{p+1} - T_{m, n}^{p+1}) \\ & = (mcm_n^{p+1} - mcm_n^p) \cdot Sm \cdot E \cdot dv / dt \end{aligned} \quad (2-5)$$

where E=Evaporation heat and differential sorption heat (J /kg)

## 3. 結果 및 考察

### 3. 1 원판 내부온도

#### 3. 1. 1 은행나무 원판의 내부온도

열판온도 140℃에서 연속 열판건조시간에 따른 은행나무원판의 실측 내부온도 변화는 Fig. 6a와 같이 온도가 비점까지 상승하는 가열기간, 비점을 유지하는 항률건조기간과 건조속도가 감소하면서 내부온도가 상승하는 감률건조기간으로 뚜렷하게 구분되어 나타났다. 부위별 온도상승속도는 수심표층이 가장 빨랐고, 수심중간층, 수심내층, 내부내층과 중간내층은 서로 비슷하였다. 원판내부 모든 부위의 plateau temperature가 100℃를 유지하는 항률건조기간이 270분동안 유지되었는데, 이는 鄭<sup>10)</sup>의 이태리포플러 판재의 열판건조와 Simpson<sup>6)</sup>의 Loblolly pine 각재의 열판건조에서 plateau temperature는 100℃ 이상이었고, 항률건조기간이 짧은 것에 비해 상당한 차이를 나타내었다. 이같은 차이는 원판과 製材의 건조에서 수분이동의 방향과 투과성 차이에 기인된 것으로 생각된다.

은행나무원판의 계산한 내부온도변화는 Fig. 7a에서와 같이, 실측내부온도의 변화와 유사하게 가열기간, 항률건조기간과 감률건조기간으로 구별되었다. 수심표층, 수심중간층의 계산치는 실측치에 비

하여 약간 컸는데, 이는 열판과 원판의 접촉면의 온도를 열판온도로 가정하여 계산하였기 때문에 약간의 과대치로 계산되었다. 내층의 건조시간에 따른 각 부위의 내부온도를 비교한 결과 부위별 초기함수율의 순서에 따라 함수율이 낮은 수심내층부터 내부내층, 중간내층, 외부내층의 순서로 감률건조기간이 개시되었는데, 이는 원판 내부함수율이 섬유포화점에 도달하는 부위부터 내부온도가 상승한다는 Keylwerth<sup>22)</sup>의 보고와 일치하였다.

따라서 컴퓨터 시뮬레이션에 적용한 함수목재의 비열식과 세포벽, 결합수, 자유수, 공기 등 세포내 각 요소의 용적비율을 고려하여 구한 원판 각 부위별 열전도계수식에 의해 원판내 열전달률을 구할 수 있으며, 열판과 원판사이 접촉면의 실제 온도와 함수율을 알고 적용한다면 유한 차분법에 의한 내부온도 분포 모델은 더욱 정확해지리라 생각된다.

#### 3. 1. 2 피나무 원판의 내부온도

열판온도 140℃에서 연속열판 건조시간에 따른 피나무원판의 실측 내부온도 변화는 Fig. 6b와 같이 가열기간, 항률건조기간과 감률건조기간으로 뚜렷이 구분되었으며, 은행나무와 비교해 보면 가열기간의 내부온도의 변화는 거의 일치하였으나, 항률건조기간이 짧았다. 실측과 계산한(Fig. 7b) 내부온도를 비교한 결과, 외부내층 온도의 계산치가 실측치에 비하여 가열기간이 길었는데, 이는 수피에서 자연대류에 의한 열손실이 다소 존재한다는 가정을 컴퓨터시뮬레이션에 적용하였기 때문이다. 따라서 수피에서의 열대류 효과는 열판건조 중 원판내부 열전달에서 극히 적게 영향한다는 사실이 구명되었다.

열판온도 170℃에서 연속열판건조시 건조시간에 따른 피나무원판의 실측한 내부온도변화(Fig. 6c)를 140℃ 건조와 비교하여 보면 가열기간 중 온도상승 속도는 거의 유사하였으나, 항률건조기간이 짧았고, 감률건조기간 중 온도상승속도는 컸으며, 열대류에 의한 열손실을 과대적용하여 계산한 외부내층을 제외한 모든 부위에서 실측치와 계산치는 유사하였다.

### 3. 2 원판 함수율

#### 3. 2. 1 은행나무 원판의 함수율

은행나무 원판을 단속열판건조한 부위별 실측함수율 변화는 Fig. 8a와 같이 모든 표층과 내층의 함수율은 초기함수율이 높은 최외부표층, 외부표층, 중간부표층, 내부표층, 최내부표층 순을 유지하면서 감소하였다. 이는 열전도에 의한 열전달이

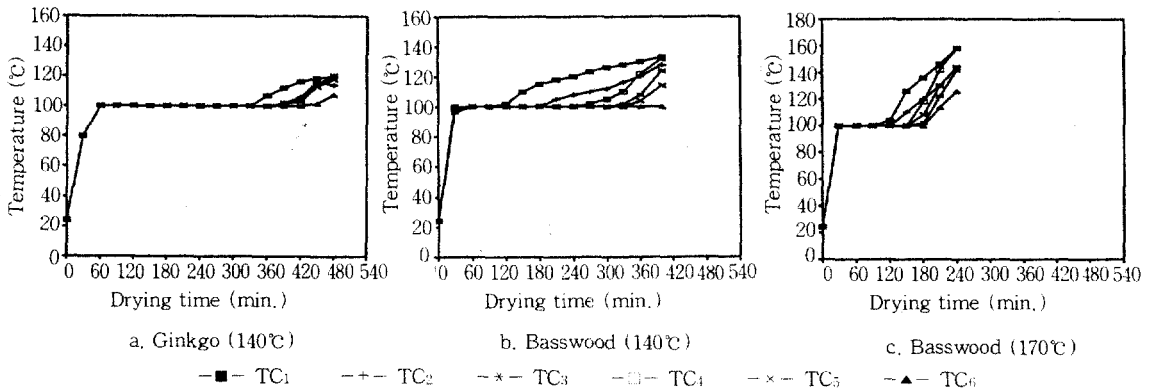


Fig. 6. Actual internal temperature during press drying.

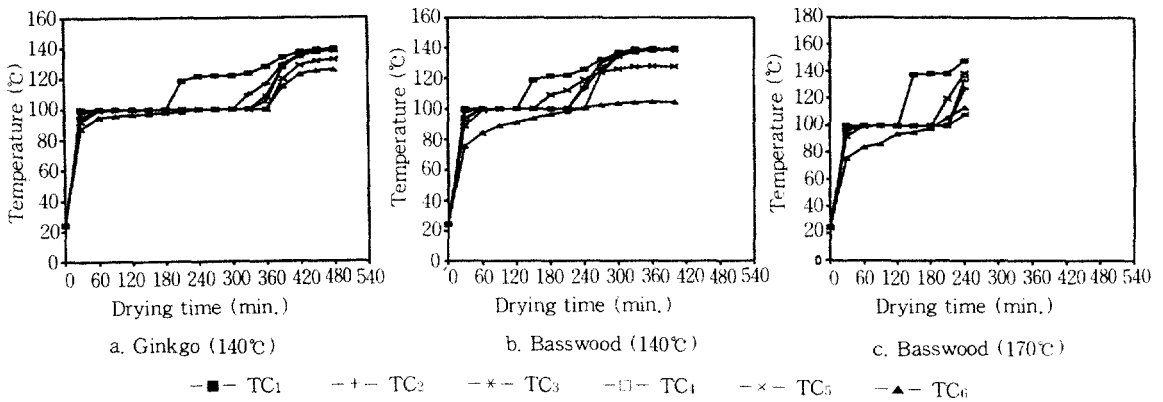


Fig. 7. Calculated internal temperature during press drying.

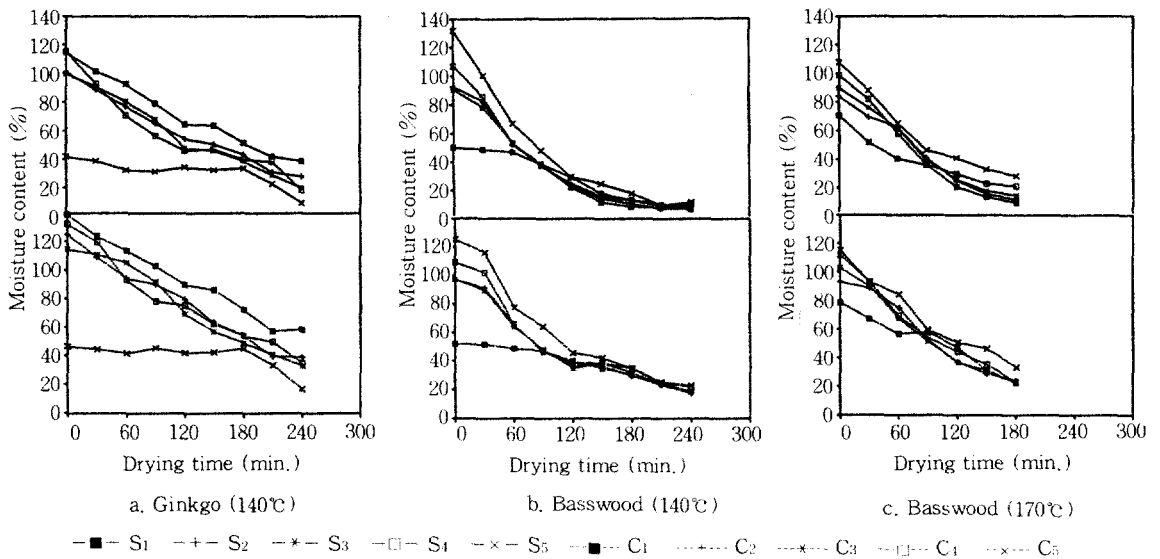


Fig. 8. Actual moisture content during press drying (140°C).

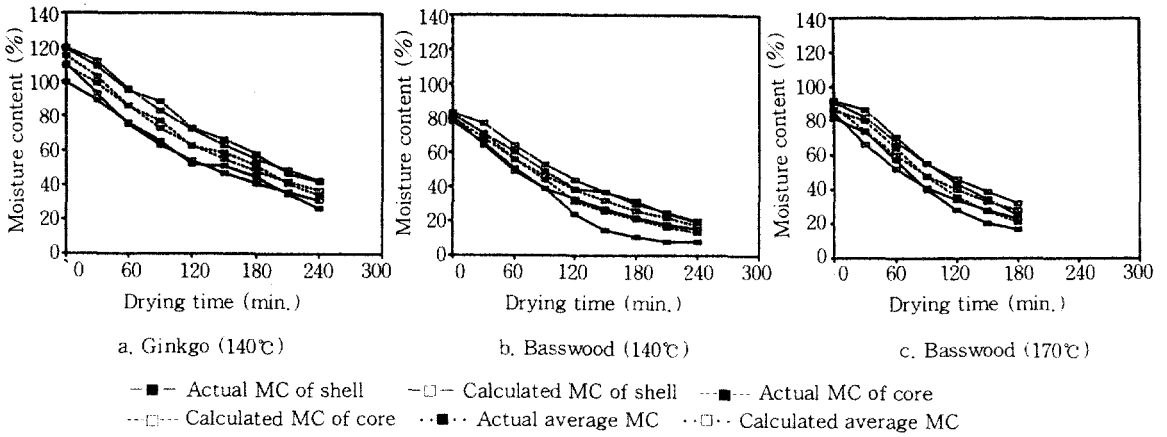


Fig. 9. Average moisture content of shell and core during press drying.

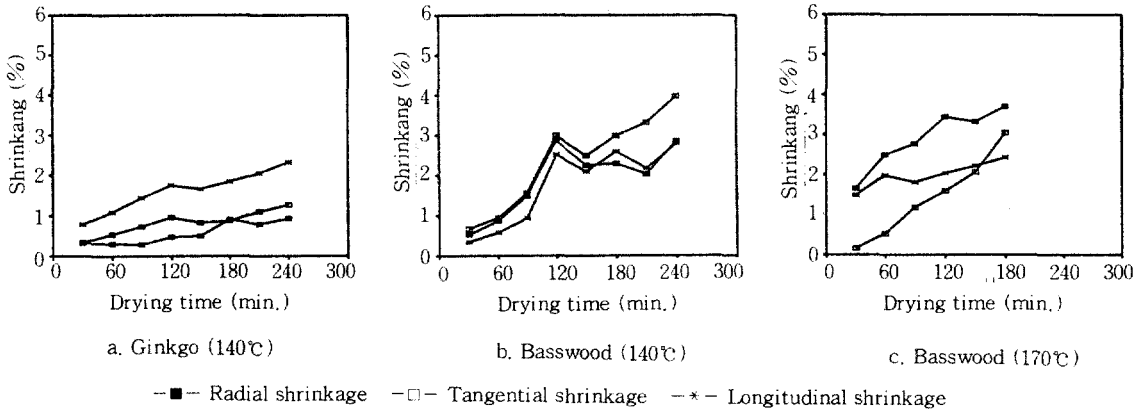


Fig. 10. Shrinkage during press drying.

열판과 원판사이 접촉면에서 균일하게 이루어짐에 의해 원판 내부가 고르게 가열됨으로써, 부위에 따른 수분제거율의 차이가 매우 적었기 때문으로 생각된다. 최내부표층을 제외한 모든 표층 함수율은 건조초기에 직선적으로 빠르게 감소하고 건조시간 210분 이후부터 느리게 감소하여 항률건조와 감률건조로 구분되었다. 이는 섬유포화점 이후 미분수착열 만큼의 열량이 원판 내로 유입되어야 결합수 제거가 가능함을 보여주었다. 반면 최내부내층을 제외한 모든 내층의 함수율은 건조종료까지 직선적으로 일정하게 감소함으로써 함수율이 섬유포화점까지 도달하지 못하고 건조가 종료된 내층에서는 열판으로부터 원판으로 유입되는 열량이 증발열로 소모되었음을 알 수 있었다.

단속열판건조에서 표층과 내층, 그리고 원판의

평균함수율의 실측치와 계산치는 Fig. 9a에서 나타난 것과 같이 유사하게 변화하였다. 따라서 Siau<sup>16,19)</sup>가 제시한 원판내부의 온도와 압력을 이용한 수증기 확산계수를 Fick 법칙에 적용하여 유한 차분법을 통하여 구한 원판내부 수분이동모델로서 내부함수율의 변화를 예측할 수 있었다.

### 3. 2. 2. 피나무 원판의 함수율

피나무 원판을 열판온도 140°C에서 단속열판건조한 부위별 실측함수율 변화는 Fig. 8b와 같다.

최내부표층을 제외한 모든 표층함수율은 건조초기에 직선적으로 빠르게 감소하고 건조시간 120분부터 느리게 감소하여 항률건조와 감률건조로 구분되었으며, 이 때의 수심 표층온도는 Plateau temperature를 넘어 상승하는 시기로 섬유포화점에 도달하였음을 감지할 수 있었다.



피나무 원판의 170℃ 열판건조에서 건조시간에 따른 부위별 함수율 분포는 다양하지만, 초기함수율의 순위가 건조말기까지 대부분 유지되었는데, 이는 개체간의 초기함수율의 불균일이 건조 후 개체간 함수율 변이를 나타낸다는 Taylor<sup>23)</sup>의 보고와 유사하였다. 건조시간에 따른 부위별 함수율 측정결과, 은행나무와 피나무 모두 항률건조기간에 내층은 표층에 비해 약 20% 높게 일정하게 유지하다가 감률건조기간에 표층과 내층간의 함수율차이가 줄어들었다. 단속열판건조에서 구한 표층과 내층의 함수율 그리고 원판의 평균함수율의 실측치와 계산치를 비교한 결과, Fig. 9c와 같이 유사한 곡선으로 변화하였다.

### 3. 3 수축률

#### 3. 3. 1 은행나무 원판의 수축률

단속열판건조에서 건조시간에 따른 은행나무의 방향별 수축률 변화는 Fig. 10a와 같다. 접선방향 수축률은 방사방향 수축률에 비해 약간 크거나 같은 상태에서 건조시간에 비례하여 건조종료까지 증가하였다. 이는 Yokota<sup>9)</sup>와 Kubler<sup>1,8)</sup>가 제시한 hygrothermal recovery의 영향으로 접선방향의 수축이 억제되었기 때문으로 생각된다. 열판의 가압력에 의해 유도된 섬유방향 수축률은 건조시간에 따라 증가하였으며, 접선방향에 비하여 컸다.

#### 3. 3. 2 피나무 원판의 수축률

140℃ 단속열판건조에서 건조시간에 따른 피나무 원판의 방향별 수축률 변화는 Fig. 10b와 같다. 건조초기 접선방향 수축률은 방사방향 수축률과 거의 유사한 크기로 증가하다가, 건조시간 120분(평균함수율 약 35%) 이후 급격히 감소했는데, 이는 할렬발생과 유관하다고 생각된다. 생재에서 함수율 14%까지 건조한 피나무의 방사방향 수축률은 2.86%, 접선방향 수축률은 3.98%로 T/R은 1.39였다.

170℃ 단속열판건조시 건조시간에 따른 피나무 원판의 수축률 변화는 Fig. 10c와 같다. 생재에서 함수율 19%까지 건조한 건조종료시 방사방향 수축률은 3.70%이고, 접선방향수축률은 3.04% (T/R= 0.82)로서 방사방향의 수축이 접선방향 수축보다 컸다. 섬유방향 수축률은 140℃에서 피나무와 은행나무를 건조했을 때와 유사하였는데, 이는 섬유방향에서 동일한 열판의 가압력이 작용한 결과로 생각된다.

### 3. 4 원판 건조결함

#### 3. 4. 1 은행나무 원판의 건조결함

연속열판건조에서 측정된 건조결함은 Table 2와 같다. 心裂은 모든 원판에서 발생하지 않았는데, 이는 심재부위 세포에서 성장응력이 미미하게 존재한 결과로 생각된다. 표면할렬은 수부위에 집중적으로 발생하였는데, 이는 심재의 초기함수율이 변재에 비해 낮아서 심재표층이 다른 부위와 함수율 차이가 큰 상태에서 섬유포화점에 빨리 도달한 때문으로 사료되며, 윤활은 미약하게 발생하였고, V형 크랙은 발생하지 않았는데, 이는 hygrothermal recovery가 접선방향의 수축을 줄인 결과로 생각된다.

#### 3. 4. 2 피나무 원판의 건조결함

140℃와 170℃에서 건조한 모든 원판에서 건조 중 성장응력에 의해 발생한 미세한 心裂<sup>24)</sup>이 건조 중 확대되었다. 표면할렬은 모든 원판에서 발생하지 않았는데, 이는 방사와 섬유방향세포의 섬유배향이 근본적으로 같은 피나무의 해부학적 특성과 부위별 초기함수율의 차이가 적은 상태에서 건조되어 건조응력발생이 미미하였기 때문인 것으로 보이며, 윤활의 발생 역시 미약하였는데, 이는 hygrothermal recovery가 접선방향의 수축을 억제하고, 방사방향수축을 늘림과 동시에 부가적으로 열판의 가압력이 섬유방향세포의 수축률 차이

Table 2. Drying checks of disks in press drying.

Species	Platen Temp. (°C)	Heart Frequency (%)	check Avg. length (cm)	Surface Frequency (%)	Drying check				
					check Avg. length (cm)	Ring Frequency (%)	failure Avg. length (cm)	V-shape Frequency (%)	crack Avg. length (cm)
Ginkgo	140	None	None	33	2.2	17	9.5	None	None
Basswood	140	100	4.7	None	None	17	11.0	None	None
	170	100	5.8	None	None	33	11.5	None	None

에 의한 섬유방향 전단력을 줄였기 때문으로 생각된다. V형 크랙은 모든 원판에서 발생하지 않았는데, 이는 변재부의 접선방향 수축에 의한 인장력의 발생이 hygrothermal recovery로 억제되었기 때문으로 생각된다.

#### 4. 結 論

두께 6 cm인 은행나무 원판은 온도 140℃, 피나무 원판은 온도 140℃와 170℃, 압력 2.45 kgf/cm<sup>2</sup>로 열판건조하여 구한 건조시간에 따른 함수율과 내부온도의 실측치와 컴퓨터 시뮬레이션에 의하여 구한 계산치를 비교하고, 수축률과 건조결함을 조사한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 원판의 열판건조는 가열기간, 항률건조기간, 감률건조기간으로 뚜렷이 구분되었고, plateau temperature는 100℃였다.
2. 컴퓨터 시뮬레이션에 적용한 함수목재의 비열식과 세포벽, 결합수, 자유수, 공기 등 세포내 각 요소의 용적비율을 고려하여 구한 원판 각 부위별 열전도계수식에 의해 건조시간에 따른 온도와 함수율을 구할 수 있었다.
3. 원판내부의 온도와 압력을 이용한 수증기 확산계수를 Fick 법칙에 적용하여 유한차분법을 통하여 구한 원판내부 수분이동모델로서 내부함수율의 변화를 예측할 수 있었다.
4. 열판의 가압력은 섬유방향세포의 수축률 차이에 의한 섬유방향 전단력을 줄여 윤활예방에 기여하였고, 변재부의 접선방향 수축에 의한 인장력의 발생은 hygrothermal recovery로 억제되어 V형 크랙의 발생을 막았다.

#### 參 考 文 獻

1. Kubler, H. 1977. Formation of checks in tree stems during heating. *Forest Prod. J.* 27(1):41~46
2. Kubler, H. 1975. Study on drying of tree cross sections. *Wood Sci. Tech.* 7(3):173~181
3. Lutz, J. F., H. Habermann and H. R. Panzer. 1974. Press-drying green, flatsliced walnut veneer to reduce buckling and end waveness. *Forest Prod. J.* 24(5):29~34
4. 정희석, 이남호, 심재현, 여환명. 1993. 한지

엔드레이핑처리에 의한 진공건조에서 원판의 목공예적 가치증진. *목재공학* 21(2):39~48

5. 이남호, 정희석. 한지 엔드레이핑처리 원판의 감압건조 응력분포모형 및 엔드레이핑스의 건조결함 예방효과. *목재공학* 19(1):31~63
6. Simpson, W. T., J. D. Daniellson and R. S. Boone. 1988. Press drying plantation-grown loblolly pine 2 by 4's to reduce warp. *Forest Prod. J.* 38(11/12):11~38
7. Simpson, W. T. 1992. Press-drying plantation loblolly pine lumber to reduce warp loss: economic sensitivity analysis. *Forest Prod. J.* 42(5):23~26
8. Kubler, H. 1973. Role of moisture in hygrothermal recovery of wood. *Wood Sci. Tech.* 5(3):198~204
9. Yokota, T. and H. Tarkow. 1960. Hygrothermal properties of wood. USDA Forest Service, Forest Prod. Lab.
10. 정희석. 1979. 판재와 단판의 열판건조에 관한 연구. *서울대학교 농학연구* 4(1):67~96
11. Felixx, S., J. C. Razafindrakoto and P. Castera. 1989. Modeling of hygrothermoelastic effects during timber drying. IUFRO. Drying Wood Symposium:238~246
12. Kisseloff, P. 1992. Interrelation between heat and mass transfer during drying wood. 3rd IUFRO drying conference. 156~159
13. Nelson, R. M. 1991. Heat of transfer and activation energy for bound water diffusion in wood. *Wood Sci. Tech.* 25:193~202
14. Todorov B. A. and N. S. Delliisky. 1992. Differential and integral heat energy expenditure of wood drying process. IUFRO. 3rd drying conference: 175~181
15. Incropera, F. P. and D. P. Dewitt. 1985. Introduction to Heat Transfer. John Wiley and Sons
16. Holman, J. P. 1989. Heat transfer, si metric edition, McGraw-Hill
17. Skaar, C. 1972. Water in Wood. Syracuse Univ. Press. Syracuse
18. Siau, J. F. 1971. Flow in Wood. Syracuse

Univ. Press. Syracuse

19. Siau, J. F. 1984. Transport Processes in Wood. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg
20. Tschernitz, J. L. 1985. Empirical equation for estimating drying times of thick rotary-cut veneer in press and jet dryers. *Res. pap. FPL* 453:1~16
21. 정희석. 1988. 목재이학. 서울대학출판부. 서울
22. Keylwerth, R. 1952. High temperature drying installations. *Holz als Roh-und Werkstoff* 10(40):134~138
23. Taylor, F. 1991. Moisture gradients in poles dried at high temperatures. *Forest Prod. J.* 41(5):37~38
24. Wilhelmy, V. and H. Kubler. 1973. Probe for measurement of strains inside solid bodies. *Experimental Mechanics* 13(3):142~144