

# 針葉樹材의 水分擴散모델을 利用한 소나무板材와 平小角材의 熱氣乾燥 時間과 含水率 推定에 關한 研究<sup>\*1</sup>

李 相 奉<sup>\*2</sup> · 鄭 希 錫<sup>\*2</sup>

## Studies on Predicting the Kiln Drying Time and Moisture Content of Board and Dimension Lumber of *Pinus densiflora* using an Internal Moisture Diffusion Model of Softwood<sup>\*1</sup>

Sang Bong Lee<sup>\*2</sup> Hee Suk Jung<sup>\*2</sup>

### SUMMARY

This experiment was carried out to know the method of changing the step of moisture content schedule with time in conventional kiln drying.

For the purpose of this object, we made drying model by applying the moisture diffusion model by J.F.Siau(1984) to average moisture content equation by J.Crank(1956) derived it from Fick's second law. And to verify this method of drying model, 2.5cm-thick boards and 5.0cm-thick dimension lumbers of *Pinus densiflora* were kiln-dried with the schedule of T11-C3 and T10-C4, respectively.

And then the drying rates were investigated and compared with those calculated from drying model.

The results obtained were as follows

1. Average drying rate and total drying time of board to dry to 6.5% moisture content were 0.64% / hr. and 109hr., and those of dimension lumber to dry to 8.3% moisture content were 0.4% / hr. and 162hr., respectively.
2. The moisture content of shell and core decreased by equalizing treatment and increased by conditioning treatment both on board and dimension lumber. But the moisture gradient was lower after conditioning than after equalizing.
3. As the drying was proceeded, the transverse bound water diffusion coefficient all but linearly decreased, the water vapor diffusion coefficient abruptly curvilinearly increased, while the transverse diffusion coefficient curvilinearly decreased both on board and dimension lumber. But each of diffusion coefficients on board was larger than that on dimension lumber.

---

\*1. 教授 1989年 5月 19日 Received May 19, 1989

\*2. 서울대학교 農科大學 College of Agriculture, Seoul National University, Suwon 440-744, Korea

4. Compared to experimental drying rate of board, theoretical drying rate was larger at 30.0%-21.8% moisture content range and was similar at 21.8%-5.4% moisture content. And in case of dimension lumber, the drying rate was similar at 30.0%-16.1% moisture content range but theoretical drying rate was much lower at 16.1%-8.3% moisture content range.
5. The possibility of adapting this drying model to changing the moisture content schedule step with time was in the range of 21.8%-5.4% moisture content on board. And in the case of dimension lumber, that was in the range of 30.0%-16.1% moisture content.

## 1. 緒 論

木材를 利用하는데 있어서 木材의 乾燥는 木材加工工程의 중요한 基本工程이다. 木材乾燥에서 含水率이 減少함에 따라 乾燥缺陷이 적게 발생하고 가급적 빨리 乾燥할 수 있도록 溫度와 濕도를 적절히 정해주는 乾燥스케줄을 사용하는데, 時間스케줄과 含水率스케줄 등이 利用되고 있으나 주로 含水率스케줄이 利用되고 있다. 그러나 慣行熱氣乾燥에서 含水率스케줄을 適用할 경우에는 乾燥스케줄 變更時 木材의 乾燥中 含水率을 알아야 한다. 乾燥中 含水率을 직접 測定하기 위한 방법에는 試驗材의 일정시간별 平량방법, 함수울계를 利用한 方法 및 자동평량장치를 利用하는 方法 등이 提安되고 있으나 함수울계를 利用한 方法은 그 測定範圍가 제한되어 있으며 많은 誤차가 있고, 또한 자동평량장치를 利用한 方法은 設置費用이 많이 들어 非經濟적이다. 이와 같이 慣行熱氣乾燥에서 乾燥中 含水率을 직접 測定하기는 쉽지 아니하다. 이러한 問題를 해결하기 위하여 乾燥中 木材의 수분이동 메카니즘에 대한 糾明과 이를 利用한 乾燥方法의 改善이나 開發이 필요하다.

일반적으로 木材의 수분이동은 纖維飽和點 이상에서 수분의 압력경사에 의해서 自由수가 연속된 세포내강을 통해서 移動하고, 纖維飽和點 이하에서는 結合水와 水蒸氣의 擴散移動 등 3가지 수분이동형태로 이동하는데, Siau (1984)는 이를 근거로 하여 纖維飽和點 이하

에서 木材內 水分의 橫斷方向 擴散모형을 제시한 바 있다.

따라서 本 研究는 熱氣乾燥에서 含水率스케줄 적용시 時間에 따른 含水率을 추정하여 乾燥스케줄段階를 變更할 수 있는 方法을 알고 저 Siau의 水分擴散모형을 利用하여 乾燥모형을 만들고, 이 乾燥모형의 適合性 與否를 알고 저 韓國產 소나무(*Pinus densiflora*) 두께 2.5cm 판재와 두께 5.0cm 평소각재를 각각 熱氣乾燥하여 얻은 實驗値를 乾燥모형에 의한 計算値와 비교하였다.

## 2. 研究 史

木材內 含水率이 擴散에 미치는 영향에 관한 研究로서 Martley(1926)는 木材의 擴散係數가 水分의 농도에 의존한다는 것을 처음 보고하였고, Skaar(1958)는 數値解析的 方法에 의해 擴散係數의 대수값이 含水率에 따라서 직선적으로 增加한다고 보고하였다. 木材의 纖維飽和點 이하에서 結合水와 水蒸氣 擴散의 移動에 관한 研究로서 Stamm(1959, 1960a)은 sitka spruce의 木材 공극에 金屬(metal alloy)을 注入하여 水蒸氣 擴散의 효과를 제거한 纖維方向 結合水擴散係數는 침엽수재에서보다 활엽수재에서 약간 낮았고 心材와 邊材間에는 차이가 없었으며, 橫斷方向 結合水擴散係數는 纖維方向 結合水擴散보다 1/3~1/2배임을 보고하였다. Tarkow와 Stamm(1959)은 木材內 연속된 세포내강을 통하여 移動하는 水蒸氣

擴散에 關한 研究에서 木材內 二酸化炭素의 擴散係數를 測定한 후 Graham의 법칙에 적용하여 橫斷方向과 纖維方向 擴散係數를 구하였으며, Stamm(1960b)은 sitka spruce 단판에서 結合水와 水蒸氣 擴散의 組合에 의한 水分移動 理論值는 平均含水率 20%에서의 實驗值와 잘 일치함을 보고하였다. Comstock(1963)은 정상상태하에서 흡착·탈착실험으로부터 擴散係數는 含水率에 따라서 增加한다고 보고하였고, Stamm과 Nelson(1963)은 木材의 밀도가 水分擴散係數에 미치는 영향에 關한 研究에서 木材의 밀도가 클수록 擴散係數는 減少한다고 보고하였다. Choong(1965)은 정상상태 實驗에 의한 方法과 數值解析 方法을 利用하여 구한 擴散係數는 含水率에 따라 增加함을 보고하였으며, 또한 木材內 橫斷方向 擴散係數의 대수값은 절대온도의 역수값과 직선적인 상관관계가 있음을 보고하였다. Petty(1973)는 *Picea sitchensis*와 *Abies grandis* 수종의 접선방향에 비평윤기체를 통과시켜 擴散의 저항 정도가 膜孔口에서 90%, 膜孔膜에서 10%, 세포내강에서 0.3%임을 보고하였다. Skaar와 Siau(1981)은 정상상태하의 橫斷方向 結合水 擴散係數를 온도와 含水率 경사에 따른 方程式으로 誘導하였다.

木材의 乾燥모델에 關한 研究로서는 Bramhall(1979)이 木材에서 水分이 移動하는 과정을 6가지로 분류하고 이들 과정에 關聯된 方程式과 變數를 文獻, 다른 研究者의 實驗데이터 및 간접적인 實驗에 의하여 구하였고 이를 근거로 木材乾燥의 數學的 모델을 만들어 含水率分布, 溫度分布, 平均含水率을 추정할 수 있는 컴퓨터 프로그램을 開發하였다. Bui등(1980)은 木材에서 비정상상태하의 水分擴散에 關한 편미분 방정식을 시뮬레이션하기 위하여 有限要素法에 의한 方程式을 개발하여 木材의 등온 乾燥過程에서는 Fick의 方程式에 含水率과 相對濕度는 擴散을 유발하는 힘으로 유효하고 含水率 結果로

부터 계산한 擴散係數가 相對濕度 結果로부터 계산한 擴散係數보다 큼을 보고하였다. Nadler등(1985)은 木材의 乾燥過程을 Fick의 제2법칙으로 구한 水分의 擴散으로 모델화하여 木材의 두께와 밀도 그리고 溫度, 相對濕度, 空氣速度가 木材의 乾燥에 중요한 相互作用을 한다고 보고하였다.

### 3. 材料 및 方法

#### 3.1. 供試材料 및 器械

##### 3.1.1. 供試原木

本 研究에서는 京畿道 龍仁郡에서 자란 樹齡이 25~30년, 末口直徑 25~30cm, 材長 180cm의 통직한 15本을 供試原木으로 선정하였다.

##### 3.1.2. 初期含水率, 比重 및 乾燥試驗片

供試原木을 그림 1과 같은 方法으로 폭은 10cm이며 두께는 2.5cm인 판재와 두께가 5.0cm인 평소각재로 제재하여 乾燥試驗木으로 하였다가 판재와 평소각재의 乾燥試驗片은 乾燥試驗木의 중앙에서 길이가 120cm 되게 채취하여 양단면을 은분으로 2회 엔드코팅하였다. 판재와 평소각재의 初期含水率은 乾燥試驗木上的 乾燥試驗片 밖의 兩橫斷面에서 길이 2.5cm인 含水率 試驗片을 채취하여 全乾法으로

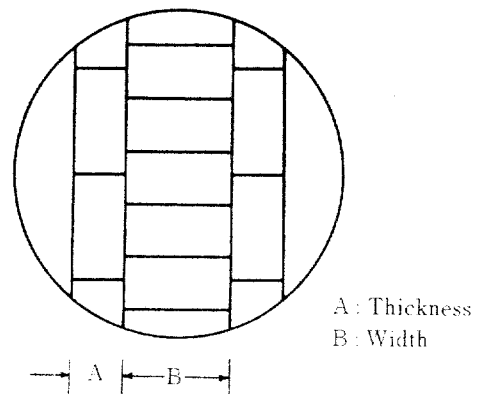


Figure 1. Sawing patterns of sample logs.

구하였고, 心材率은 初期含水率 試驗片을 利用하여 横斷面上的의 心材部位의 面積으로 구하였고 平均연륜폭도 初期含水率 試驗片을 利用하여 調査하였다. 생재비중은 乾燥試驗木의 한 横斷面에서 길이 2.5cm인 試驗片을 채취하여 浸漬法으로 測定하였으며, 全乾比重은 生材比重試驗片을 全乾後 파라핀 코팅하여 浸漬法으로 測定하였다.

乾燥試驗片의 수량, 심재율, 平均연륜폭, 초기함수율 및 비중은 표 1과 같다.

Table 1. Number, heartwood percentage, average ring width, initial moisture content, and specific gravity of drying specimens of *Pinus densiflora*.

Thickness (cm)	Number	Heartwood percentage	Average ring width(cm)	Initial M. C. (%)	Specific gravity	
					Based on green vol.	Based on O. D. vol.
2.5	48	18.13	4.27	75.78	0.41	0.45
		±22.18	±1.44	±19.79	±0.05	±0.06
5.0	40	22.50	4.23	72.63	0.42	0.45
		±17.80	±1.48	±12.38	+0.22	±0.45

### 3.1.3. 實驗器機

#### 3.1.3.1. 乾燥室

實驗에 사용한 熱氣乾燥室의 내부 크기는 폭 129cm, 길이 120cm, 높이 64cm 크기인 캐비네트형 乾燥室로서 건구·습구온도의 설정온도를  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 로 유지할 수 있는 乾燥室을 利用하였고 風速은 초당 1m를 適用하였다.

#### 3.1.3.2. 其他器機

初期含水率 및 比重 試驗片을 乾燥하기 위하여  $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 를 유지할 수 있는 오븐을 사용하였다. 乾燥試驗片의 평량은 정도 1g인 직시천칭을 사용하였고, 비중과 含水率 試驗片의 평량은 정도 0.01g 직시천칭을 사용하였다.

## 3.2. 實驗方法

### 3.2.1. 棧積

폭 3cm와 두께 2cm인 棧木을 사용하면서 供試板材의 棧積은 한 층당 4개씩 판재의 側面이 밀착되도록 하여 12층까지 棧積하였고 公시평소각재의 棧積은 한 층당 5개씩 평소각재의 側面이 밀착되도록 하여 10층까지 棧積하였다.

### 3.2.2. 乾燥스케줄

日本 林業試驗場(1982)이 추천한 두께 2.5cm 판재인 경우는 乾燥스케줄 코드번호 T<sub>11</sub>-C<sub>1</sub>, 두께 5.0cm 평소각재인 경우는 乾燥스케

줄 코드번호 T<sub>11</sub>-C<sub>3</sub>의 乾燥스케줄을 사용하였으며 판재와 각재의 組合한 慣行乾燥스케줄은 각각 표 2, 표 3과 같다.

### 3.2.3. 乾燥中 含水率

乾燥스케줄 適用을 위한 乾燥中 含水率의 계산은 公시 판재와 평소각재의 初期含水率에 의해 산출한 全乾무게와 乾燥中 測定한 무게로 하였다.

### 3.2.4. 最終含水率과 乾燥速度

供試板材와 平小角材의 最終含水率은 乾燥終了後 이들 試驗片의 중앙에서 길이 2.5cm인 最終含水率 試驗片을 채취하여 즉시 무게를 測定한 후 全乾法으로 구하였다.

乾燥速度는 供試板材와 平小角材의 最終含水率로 구한 全乾무게와 乾燥中에 測定한 무게를 利用하여 계산하였다.

Table 2. Conventional kiln drying schedule,  $T_{11}-C_4$ , used for 2.5cm-thick board of *Pinus densiflora*.

M. C. (%)	D. B. T. (°C)	W. B. T. (°C)	R. H. (%)	E. M. C. (%)
above 40	65	61	83	14.2
40-35	65	59.5	76	11.9
35-30	65	56.5	66	9.4
30-25	70	59	59	8.0
25-20	70	56	50	6.8
20-15	75	58	44	5.8
below 15	80	52	25	3.5
Equalizing	80	56	31	4.0
Conditioning	80	71	67	9.0

Table 3. Conventional kiln drying schedule,  $T_{10}-C_3$ , used for 5.0cm-thick dimension lumber of *Pinus densiflora*.

M. C. (%)	D. B. T. (°C)	W. B. T. (°C)	R. H. (%)	E. M. C. (%)
above 40	60	57	86	15.3
40-35	60	56	82	13.8
35-30	60	54	73	11.4
30-25	65	56.5	66	9.4
25-20	70	59	59	8.0
20-15	75	61	52	6.6
below 15	80	52	25	3.5
Equalizing	80	64	48	5.9
Conditioning	80	74	78	11.0

3.2.5. 含水率 分布

含水率 등급이 균등하게 配分될 수 있도록 乾燥試驗片 10개를 선정하여 이쿼라이징처리 후 및 콘디숀닝후에 乾燥試驗片의 한 단면에서 10cm 되는 부위에서 길이 2.5cm의 含水率 分布 試驗片을 채취해 가면서 含水率 分布 試驗片을 외층과 내층으로 분리하여 全乾法으로 외층과 내층의 含水率을 구하여 調査하였다.

3.2.6. 擴散모델

擴散모델은 傳導率모델(conductivity model)

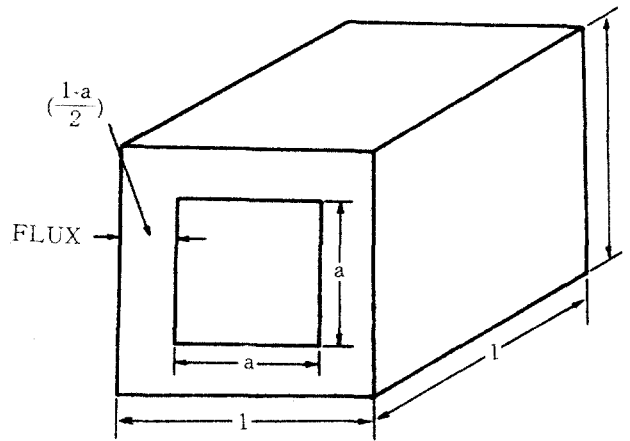


Figure 2. Geometrical model for single wood cell.

로부터 誘導하였는데 傳導率모델은 그림 2와 같이 단위 정육면체이고 針葉樹 주요 구성세포인 假導管, 木纖維, 軸方向柔細胞 등의 縱軸細胞에 국한하고 또한 細胞의 接線膜과 放射膜의 두께는 同一하고, 세포막의 두께에 대한 세포의 지름비율이 試驗片의 모든 세포에서 同一하다고 가정하며 각 세포의 양단에 존재하는 膜部分, 膜孔 및 放射組織을 무시한 모델로서 熱傳導度, 電氣傳導度 및 蒸氣擴散 등에 利用된다. 이 모델에서 水分의 擴散은 일반적으로 그림 3과 같이 3가지 형태로 된다.

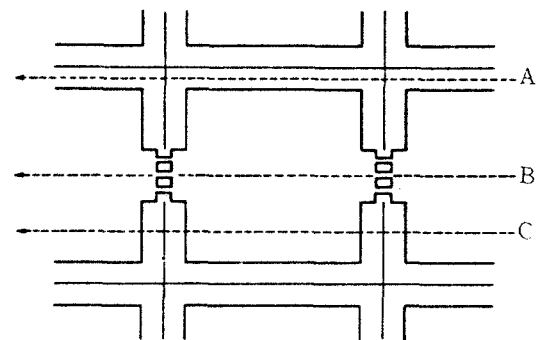
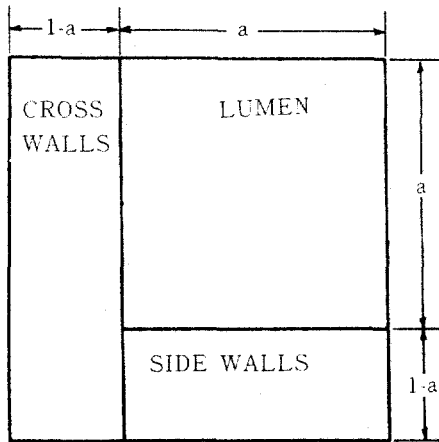


Figure 3. Schematic moisture diffusion paths in softwood: A) bound water diffusion in continuous cell walls; B) vapor diffusion through cell cavities and permanent pit membrane pores; C) alternately bound water diffusion in double cell walls and vapor diffusion across cell cavities(E.T. Choong, 1965.)

이 水分擴散 메카니즘을 利用하여 橫斷方向의 플럭스 모델의 수학적 分析은 그림 4를 참조하면 橫斷模(cross wall)은 유동방향에서 (1-a)의 전체길이와 모델의 단위폭과 동일한 폭에 의해 생겼으며, 측막(side wall)은 플럭스(flux) 방향에 있으며 길이는 세포내강의 크기와 동일하고 폭은 (1-a)이다. 세포내강은 변장의 치수가 a인 사각형으로 동일한 플럭스가 橫斷模를 통해 세포내강과 측막으로 병렬유동이 되는 모델로서 직렬·병렬 電氣回路(series-paralled electrical circuit)와 유사하다.



$D_v$  : 세포내강의 수증기 확산계수 (cm<sup>2</sup>/s)  
 $a^2$  : 함수목재의 공극율

여기서 식 (1)과 식 (2)의 變數인 細胞膜質의 橫斷方向 結合水擴散係數( $D_{B1}$ )는 다음 식 (3)을 이용하여 구하였으며 細胞內腔의 水蒸氣擴散係數( $D_v$ )는 다음 식 (4)를 利用하였다. 또한 含水木材의 空隙率은 含水木材의 比重과 自由水 및 結合水 容積率을 이용한 식으로 구하였다.

$$D_{B1} = 0.07 \exp[-(9.200 - 70M) / RT] \dots\dots (3)$$

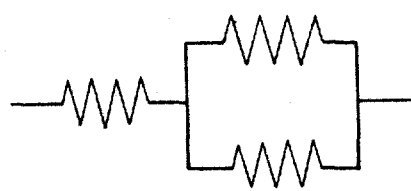


Figure 4. Equivalent configuration of transverse conductivity model showing conductances of sections and the analogous electrical circuit.

이상과 같은 모델을 근거로 하여 저항(resistance)과 콘덕턴스(conductance)의 관계를 이용하여 Siau(1984)가 제시한 木材의 橫斷方向 擴散係數는 含水率이 纖維飽和點 미만인 경우는 식 (1)과 같고 含水率이 15% 미만인 경우는 식 (2)와 같다.

$$D_1 = \frac{1}{(1-a^2)} \times \frac{D_{B1} D_v}{D_{B1} + D_v(1-a)} \dots\dots (1)$$

$$D_1 = \frac{D_{B1}}{(1-a^2)(1-a)} \dots\dots (2)$$

$D_1$  : 목재의 횡단방향 확산계수 (cm<sup>2</sup>/s)

$D_{B1}$  : 세포막질의 횡단방향 결합수확산계수 (cm<sup>2</sup>/s)

$D_{B1}$  : 세포막질의 횡단방향 결합수확산계수 (cm<sup>2</sup>/s)

M : 함수율 (%)

R : 기체상수 (cal / Kmol)

T : 절대온도 (K)

$$D_v = \frac{18 D_s P_s}{G'M \rho_w R T} \frac{dH}{dM} \dots\dots (4)$$

$D_v$  : 세포내강의 수증기 확산계수 (cm<sup>2</sup>/s)

$D_s$  : 공기중의 수증기 확산계수 (cm<sup>2</sup>/s)

$P_s$  : 포화수증기압 (cm Hg)

$\rho_w$  : 물의 밀도 (g / cm<sup>3</sup>)

G'M : 함수세포막 비중

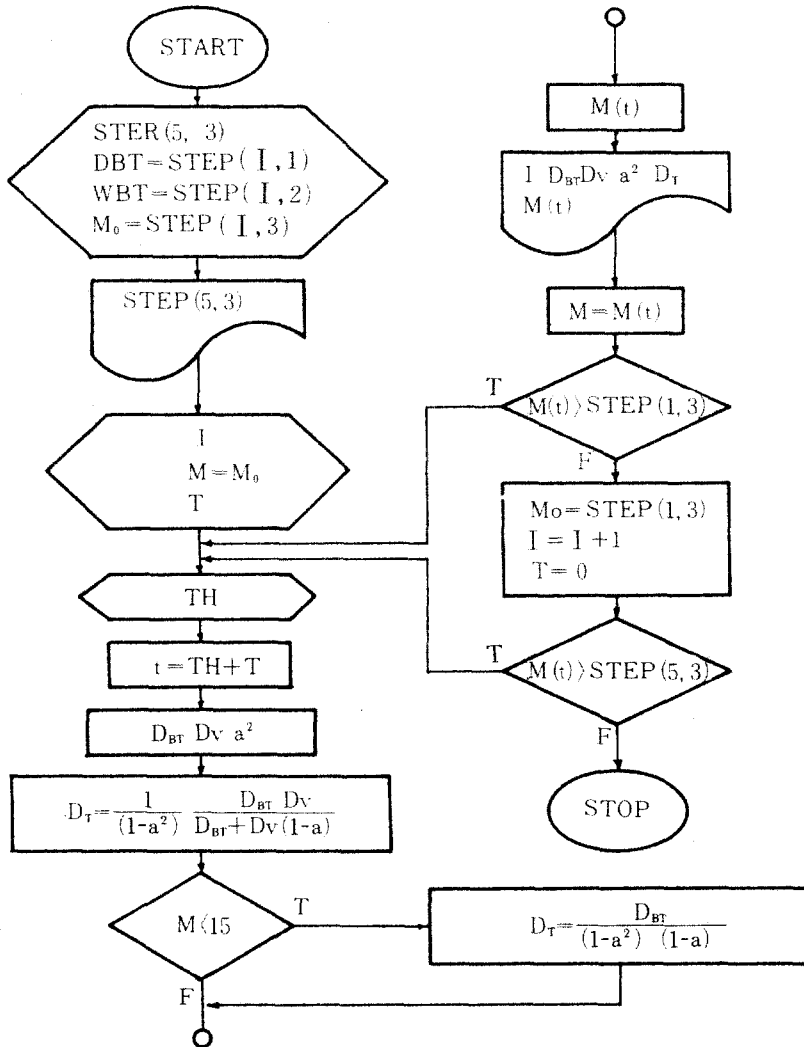
R : 기체상수 (cm<sup>3</sup> Hg / mol K)

$dH/dM$  : 수차등온선 기울기 역수

3.2.7. 乾燥모델

本 研究에서 사용한 乾燥모델은 전술한 擴散모델을 Crank(1956)의 平均함수율 방정식에 代입하여 컴퓨터 프로그래밍 하였다.

Crank의 平均함수율 방정식은 Fick의 擴散 제 2 법칙에서 유도되었는데 슬랩(slab) 형태의 물체에서 2가지 前提條件, 즉 初期含水率은 均일하게 분포되어 있으며 또한 주어진 환경에서 물체의 표면은 즉시 平衡함수율에 도달한다는 前提로부터 유도되었다. 平均함수율 방



Step : 건조스케줄단계  
 DBT : 건구온도(°C)  
 WBT : 습구온도(°C)  
 Mo : 각 스케줄단계에서 초기함수율(%)  
 I : 각 스케줄단계  
 M : 현재의 함수율(%)

$M(t)$  : 각 건조스케줄단계에서 t시간후의 함수율(%)  
 $D_{br}$  : 세포막질의 횡단방향 질합수 확산계수 ( $cm^2/s$ )  
 $D_v$  : 세포내강 공기중 수증기확산계수 ( $cm^2/s$ )  
 $a^2$  : 공극율  
 $D_r$  : 목재의 횡단방향 확산계수 ( $cm^2/s$ )  
 TH : 시간 스텝(sec)  
 t : 각 건조스케줄 단계에서 시간(sec)

Figure 5. The flow chart of drying model.

정식은 식 (5)와 같다.

$$\bar{M}(t) = M_e + (M_o - M_e) \frac{8}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2}{L^2} D_T \cdot t\right] \dots\dots\dots (5)$$

- $\bar{M}(t)$  : 시간 t에서 평균함수율 (%)
- $M_e$  : 평형함수율 (%)
- $M_o$  : 초기함수율 (%)
- L : 두께 (cm)
- $D_T$  : 확산계수 (cm<sup>2</sup>/s.)
- t : 시간(sec.)

乾燥모델의 프로그래밍 방법은 乾燥스케줄 단계의 初期含水率과 건구온도를 利用하여 木材의 橫斷方向 擴散係數를 계산하고 임의시간 (t)에서 含水率을 계산한 다음에 이 含水率을 利用하여 다음 乾燥스케줄단계를 適用할 수 있는 含水率까지 乾燥되는데 소요되는 시간을 알 수 있게 하였다. 프로그래밍의 순서도는 그림 5와 같다.

### 4. 結果 및 考察

#### 4.1. 實驗에 의한 乾燥速度, 乾燥時間 및 含水率分布

##### 4.1.1. 乾燥速度와 乾燥時間

두께 2.5cm 소나무 板材의 乾燥曲線은 그림 6과 같으며, 乾燥時間別 乾燥速度는 표 4와 같다. 또한 두께 5.0cm 소나무 平小角材의 乾燥曲線은 그림 7과 같으며 乾燥速度는 표 4와 같다.

板材의 乾燥初期, 中期 및 末期의 含水率 범위별 乾燥速度는 初期含水率 75.8%에서 31.9% 범위에서 0.91%/hr.이고 含水率 31.9%에서 14.3% 범위 내에서 0.84%/hr.이며 含水率 14.3%에서 6.5% 범위 내에는 0.19%/hr.이다. 그리고 全乾燥期間의 平均乾燥速度는 0.64%였다.

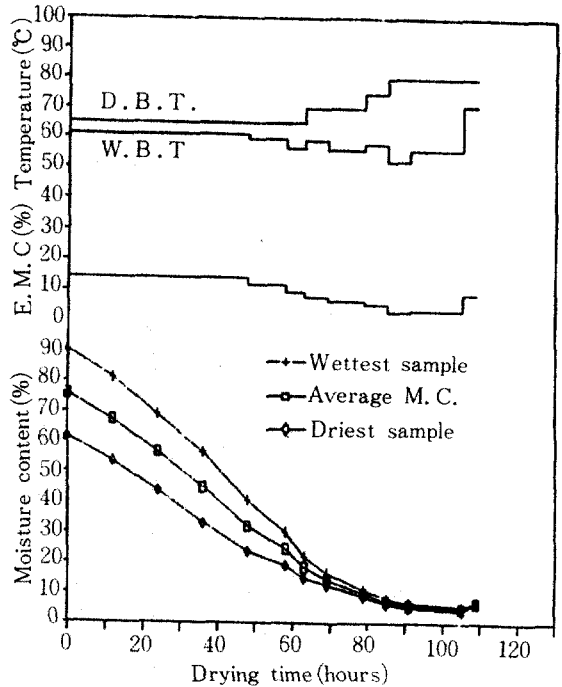


Figure 6. Kiln-drying schedule and moisture content during drying of 2.5cm-thick board of *Pinus densiflora*.

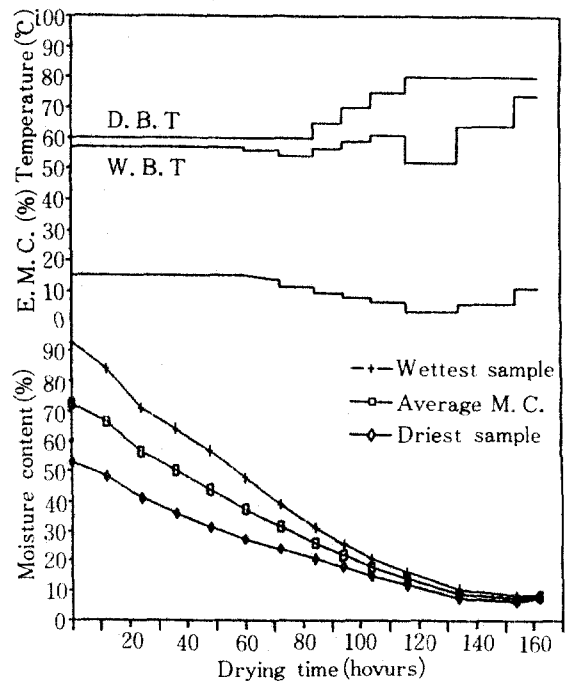


Figure 7. Kiln-drying schedule and moisture content during drying of 5.0cm-thick dimension lumber of *Pinus densiflora*.



Table 4. The drying rate of board and dimension lumber of *Pinus densiflora* during drying

Thibkness (cm)	Average M. C. (%)	Range of moisture content			
		75.8-31.9	31.9-14.3	14.3-6.5	Average
2.5	Wettest specimens	0.06	1.12	0.23	0.77
	Dryiest specimens	0.78	0.53	0.15	0.28
	Average	0.91	0.84	0.19	0.40

Thickness (cm)	Average M. C. (%)	Range of moisture content			
		72.6-31.6	31.6-14.0	14.0-8.3	Average
5.0	Wettest specimens	0.73	0.53	0.16	0.52
	Driest specimens	0.40	0.27	0.09	0.38 28
	Average	0.55	0.40	0.12	0.40

平小角材의 乾燥初期, 中期 및 末期의 含水率 범위별 乾燥速度는 初期含水率 72.6%에서 31.6% 범위내에서 0.56%/hr.이고 含水率 31.6%에서 14.0% 범위내에는 0.40%/hr.이며 含水率 14.0%에서 8.3%까지 범위내는 0.12%/hr.였다. 그리고 全乾燥期間의 平均乾燥速度는 0.40%였다.

乾燥時期別 板材의 乾燥速度對 平小角材의 乾燥速度比率는 乾燥初期에 1.63배이고 乾燥中期에 2.1배이며 乾燥末期에는 1.6배였다.

板材의 乾燥時期別 乾燥速度에서 乾燥速度는 乾燥初期에는 빨랐으나 乾燥中期부터는 減少하여 乾燥末期에는 매우 減少하였다. 平小角材에 있어서도 乾燥速度는 板材와 같은 변화를 나타내었지만 板材의 乾燥速度보다 느렸다. 乾燥初期 짧은 기간동안 乾燥室內 木材表面의 水蒸氣 凝縮으로 木材表面의 水分이 증발되지 않는 加熱期間이 있지만 加熱期間後에 木材表面에 自由水가 존재하는 한 自由水 유동에 의해 內部水分이 外部로 이동이 용이하여 乾燥速度가 크고 일정한 恒率乾燥期間을 나타내며 恒率

乾燥期間의 증발속도는 乾濕球溫度差에 비례하나 乾燥速度는 두께에 反比例하므로 乾燥初期에서 두께가 얇은 板材는 두꺼운 平小角材보다 乾濕球溫度差가 큰 乾燥스케줄이 적용되었기 때문에 板材의 乾燥速度는 平小角材보다 컸다. 乾燥中期 이후부터는 板材와 平小角材의 含水率이 纖維飽和點 이하로 내려가면서 모든 수분이 擴散에 의해 이동하기 때문에 乾燥速度가 減少하는 減率乾燥期間으로서 乾燥速度가 曲線의로 감소하였으며 乾燥初期의 平均乾燥速度와 비교하여 보면 板材의 경우 0.9배이고 平小角材의 경우는 0.7배였다. 乾燥末期에는 結合水의 擴散이 乾燥의 주체가 되어 乾燥速度는 급격히 減少하였다.

板材의 乾燥時間은 初期含水率 75.8%에서 最終含水率 6.5%까지 109시간 소요되었으며 平小角材의 乾燥時間은 初期含水率 72.6%에서 最終含水率 8.3%까지 162시간 소요되었다.

4.1.2. 含水率 分布

板材와 平小角材의 試驗材에 대한 이쿼라이징 處理前 및 處理後와 콘디숀닝후의 含水率

Table 5. Moisture distribution of board and dimension lumber of *Pinus densiflora*

Thickness (cm)		Moisture distribution	
		Shell (%)	Core (%)
2.5	Before	6.0	8.1
	Equalizing	±0.89	±1.57
	After	5.2	5.8
	Equalizing	±0.41	±0.66
	After	7.0	7.4
	Conditioning	±0.31	±0.83
5.0	Before	8.7	14.7
	Equalizing	±1.66	±4.30
	After	6.9	8.9
	Equalizing	±0.59	±1.5
	After	9.1	10.5
	Conditioning	±0.58	±1.62

分布는 표 5와 같다.

乾燥終了後 板材 試驗材의 外層含水率は 7.4%였으며, 內層含水率は 7.0%였다. 또한 平小角材 試驗材와 外層含水率は 10.5%였으며, 內層含水率は 9.1%였다. 이쿼라이징 處理後의 內層과 外層의 含水率は 이쿼라이징 處理前보다 減少하였는데 그 減少率は 板材의 경우 外層에서는 13%였으나 內層에서는 28%로서 減少率は 內層이 컸고 平小角材의 경우는 外層에서 21%였으나 內層에서는 40%로 減少率は 內層이 外層보다 컸다. 콘디손닝후의 외층과 內층의 含水率は 이쿼라이징 處理後보다 증가하였는데 그 增加率は 板材의 경우 外層에서 35%였으나 內層에서는 29%로서 증가율은 外층이 內층보다 높았고 平小角材의 경우에는 外層에서 32%였으나 內層에서는 18%로서 外층이 內층보다 增加률이 높았다. 그리고 外層 含水率과 內層含水率間의 差는 이쿼라이징 處理 및 콘디손닝 處理에 의하여 더 적어짐을 알 수 있으며 平小角材의 外層含水率과 內層含水率間의 差는 板材에서의 差보다 컸다.

4.2. 乾燥모델에 의한 擴散係數, 乾燥時間 및 乾燥速度

4.2.1. 擴散係數

乾燥모델에 의한 두께 2.5cm 板材와 두께 5.0cm 平小角材의 乾燥中 重要 단계별 含水率 범위의 하한치로부터 60%에 相應하는 含水率에서 擴散係數는 각각 그림 8, 그림 9와 같다.

板材의 경우 含水率이 26.7%일 때 細胞膜質의 橫斷方向 結合水擴散係數는  $20.9 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}$ , 細胞內腔 水蒸氣擴散係數는  $60.9 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}$ , 그리고 木材의 橫斷方向 擴散係數는  $255.1 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}$ 였으며 含水率이 14.0% 일 때 細胞膜質의 橫斷方向 結合水擴散係數는  $8.9 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}$ , 細胞內腔 水蒸氣擴散係數는  $65.9 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}$ , 그리고 木材의 橫斷方向 擴散係數는  $113.9 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}$ 였으며 含水率이 6.1%일 때는 細胞膜質의 橫斷方向 結合水擴散係數  $2.5 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}$ , 細胞內腔 水蒸氣擴散係數는  $572.9 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}$ , 그리고 木材의 橫斷方向 擴散係數는  $44.8 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}$ 였다.

平小角材의 경우 含水率이 28.9%일 때 細胞膜質의 橫斷方向 結合水擴散係數는  $16.7 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}$ , 細胞內腔 水蒸氣擴散係數는  $47.0 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}$

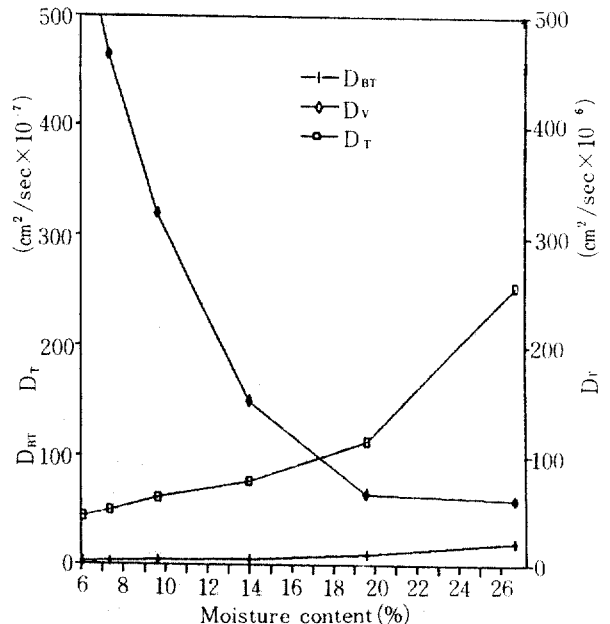


Figure 8. Diffusion coefficients of 2.5cm-thick board of *Pinus densiflora* during drying

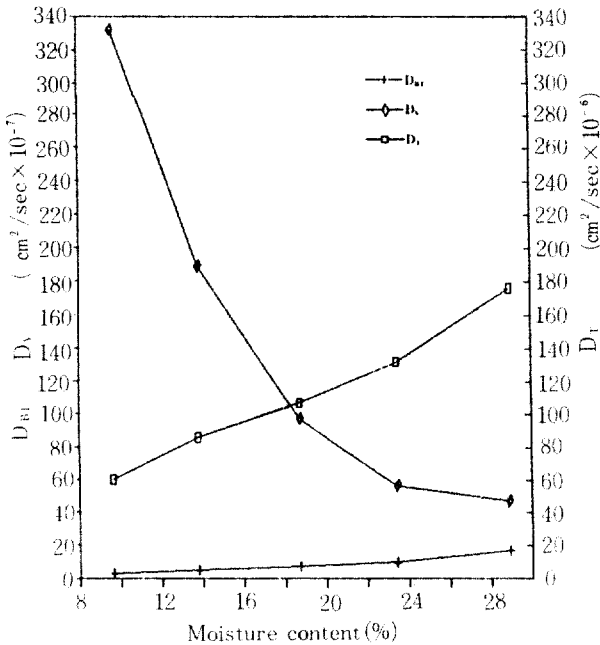


Figure 9. Diffusion coefficients of 5.0cm-thick dimension lumber of *Pinus densiflora* during drying.

cm<sup>2</sup>/s, 그리고 木材의 橫斷方向 擴散係數는  $176.0 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}$ 였으며 含水率이 18.7%일 때 細胞膜質의 橫斷方向 結合水擴散係數는  $7.0 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}$ , 細胞內腔 水蒸氣擴散係數는  $97.0 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}$ , 그리고 木材의 橫斷方向 擴散係數는  $107.0 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}$ 였으며 含水率이 9.6%일 때는 細胞膜質의 橫斷方向 結合水擴散係數는  $3.0 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}$ , 細胞內腔 水蒸氣擴散係數는  $332.2 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}$ , 그리고 木材의 橫斷方向은 擴散係數는  $60.0 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}$ 였다.

이와 같이 소나무 板材의 경우 含水率이 감소함에 따라서 細胞膜質의 횡斷방향 확산계수는 매우 적고 거의 직선적으로 감소하였으나 細胞內腔의 水蒸氣擴散係數는 含水率이 감소함에 따라 曲線的으로 증가하였고 이들 兩者가 結合된 木材의 횡斷방향 확산계수는 含水率이 감소함에 따라 曲線的으로 감소하였다. 또한 平小角材의 경우 含水率이 감소함에 따라 細胞膜質의 횡斷방향 확산계수, 細胞內腔 水蒸氣擴散係數 및 木材의 횡斷방향 확산계수는 板材의

경우와 유사한 패턴을 나타내었고 板材의 擴散係數보다 적었다.

乾燥가 진행되면서, 細胞膜質의 횡斷방향 結合水擴散係數는 結合水와 수착점간의 결합력이 강해져 활성화에너지가 증가하기 때문에 감소한다고 생각되며 細胞內腔의 水蒸氣擴散係數는 온도가 상승함에 따라서 水蒸氣擴散係數( $D_a$ )가 커지면서 증가한다고 생각한다. 그러나 細胞膜質의 횡斷방향 結合水擴散係數( $D_{BT}$ )와 細胞內腔의 水蒸氣擴散係數( $D_a$ )의 결합으로 된 木材의 횡斷방향 結合水擴散係數는 수증기확산이 이루어지는 細胞內腔의 큰덕턴스 (conductance)가 結合水 이동하는 細胞膜質보다 상대적으로 커져 細胞膜質의 횡斷방향 結合水擴散係數에 의해 영향을 많이 받게 된다. 따라서 乾燥모델에 의한 木材의 횡斷방향 확산계수는 乾燥가 진행됨에 따라서 감소하게 된다.

Choong(1965)은 western-fir를 利用하여 擴散모델과 實驗에 의한 횡斷방향 확산계수를 含水率과 溫度를 變數로 하여 비교 研究한 바 擴散係數는 含水率과 溫度에 비례하였고 이론치와 실측치간의 擴散係數는 거의 일치함을 보고 하였는데 溫度 60℃와 含水率 15%에서 실측치 擴散係數는  $93.0 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{sec}$ 였고 理論值 擴散係數는  $85.2 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{sec}$ 였다. 本研究의 乾燥 모델에 의한 소나무 板材와 平小角材의 乾燥中 擴散係數를 이와 유사한 조건에서는 板材의 경우 溫度 80℃와 含水率 14.0%에서 擴散係數는  $76.9 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{sec}$ 이고 平小角材의 경우 溫度 80℃와 含水率 13.8%에서  $86.0 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{sec}$ 로서 western-fir의 실측치 擴散係數보다는 적었으나 含水率 및 溫度條件이 달라서 약간의 차이를 내고 있었다.

#### 4.2.2. 乾燥時間 및 乾燥速度

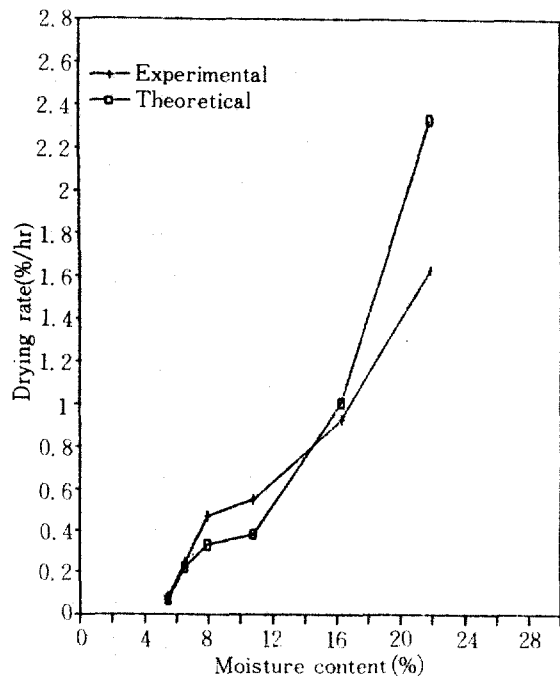
두께 2.5cm 소나무 板材와 두께 5.0cm 소나무 平小角材의 乾燥모델에 의한 含水率 단계별 理論值 乾燥時間은 표 6과 같다. 板材의 경우 乾燥時間은 含水率 30.0%에서 16.3%까지 범

Table 6. Experimental and theoretical elapsed drying time of 2.5cm-thick board and 5.0cm-thick dimension lumber of *Pinus densiflora*.

Thickness (cm)	Moisture content range (%)	Experimental elapsed drying time (hr)	Theoretical elapsed drying time (hr)
2.5	30.0-21.8	5.0	3.5
	21.8-16.3	6.0	5.5
	16.3-10.8	8.5	14.5
	10.8- 7.9	6.0	8.5
	7.9- 6.5	6.0	6.5
	6.5- 5.4	14.0	15.0
5.0	30.3-25.4	10.0	7.5
	25.4-20.4	10.0	11.0
	20.4-16.1	12.0	15.0
	16.1-10.5	18.0	40.5
	10.5- 8.4	20.0	55.5

위에서 11시간,含水率 16.3%에서 7.9%까지는 16시간, 그리고含水率 7.9%에서 5.4%까지 범위에서 26시간 소요되었다. 또한 平小角材의 경우 理論值 乾燥時間은含水率 30.3에서 20.4%까지 범위에서 20시간,含水率 20.4%에서 10.5%까지 범위에서 30시간, 그리고含水率 10.5%에서 8.4%까지 범위에서 20시간 소요되었다.

板材와 平小角材의 乾燥모델에 의한 理論值 乾燥速度와 實驗에 의한 실측치 乾燥速度를 비교한 것은 각각 그림 10과 그림 11과 같다. 板材의 경우含水率 30.1%에서 16.3%까지 범위에서 理論值의 乾燥速度는 1.52%/hr.이고, 實測值 乾燥速度는 1.25%/hr.였으며含水率 16.3%에서 7.9%까지 범위에서 理論值 乾燥速度는 0.36%/hr.이고 實測值 乾燥速度는 0.52%/hr.였으며含水率 7.9%에서 5.4%까지 범위에서는 理論值 乾燥速度는 0.12%/hr.이고 實測值 乾燥速度는 0.13%/hr.로서 乾燥初期에 乾燥모델에 의한 理論值 乾燥速度는 實測值 乾燥速度보다 컸으며 乾燥中期에서는 비슷한 양

Figure 10. Experimental and theoretical drying rate of 2.5cm-thick board of *Pinus densiflora*.

상을 나타내었고 乾燥末期에는 거의 일치하였다. 또한 平小角材의 경우含水率 31.3%에서

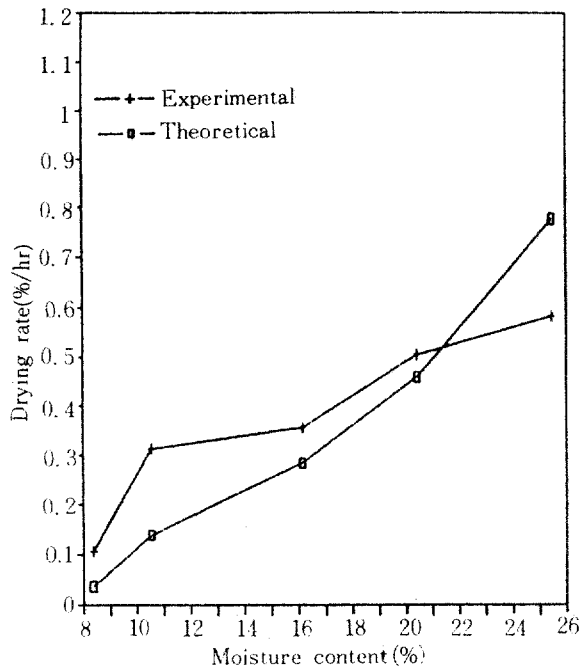


Figure 11. Experimental and theoretical drying rate of 5.0cm-thick dimension lumber of *Pinus densiflora*.

20.4% 범위에서 理論值 乾燥速度는 0.59%/hr.이고 實測值 乾燥速度 0.54%/hr.였으며 含水率 20.4%에서 10.5%까지 범위에서 理論值 乾燥速度는 0.22%/hr.이고 實測值 乾燥速度는 0.33%/hr.였으며 含水率 10.5%에서 8.4%에서 理論值 乾燥速度는 0.04%/hr.이고 實測值 乾燥速度는 0.11%/hr.로서 乾燥初期와 中期에서는 乾燥모델에 의한 理論值 乾燥速度는 實測值 乾燥速度와 비슷한 양상을 나타내었고 末期에는 乾燥모델에 의한 理論值 乾燥速度가 實測值보다 급격히 감소하였다.

이와 같은 결과를 분석하여 보면 板材의 경우에 있어서 乾燥初期에 乾燥모델에 의한 理論值 乾燥速度가 實驗에 의한 實測值 乾燥速度보다 크다. 이러한 원인은 乾燥모델에서 平均含水率方程式을 유도하는 前提條件인 木材의 初期含水率은 均일하여야 한다는 조건이 실제의 木材乾燥에서는 不합되지 않음에 있고 乾燥木材는 乾燥初期에 外층과 내층의 含水率이 均일

하지 않고 水分傾斜가 나타나 있었다고 할 수 있다. 이렇게 木材內에 水分傾斜가 발생되면 木材의 表층과 乾燥室 공기간의 分析傾斜는 前提條件에서의 경우보다 적어지게 된다. 따라서 木材의 表층과 乾燥室 공기간의 水分傾斜가 큰 乾燥모델에서는 확산이 빨라져서 乾燥速度가 實測值 乾燥速度보다 빠르다. 그리고 板材의 實測值 乾燥速度和 理論值 乾燥速度間的 차이는 平小角材의 경우보다 크게 나타났는데 이것은 板材의 表층과 내층간의 水分傾斜가 平小角材의 경우보다 컸음을 알 수 있다.

乾燥가 진행됨에 따라서 板材의 경우 實測值 乾燥速度和 理論值 乾燥速度가 일치하는 것으로 보아 板材의 表층과 내층간의 水分傾斜는 감소하여 乾燥스케줄 각 단계의 初期에 含水率은 前提條件에 不합하다고 생각한다. 그러나 平小角材의 경우는 乾燥가 진행됨에 따라서 理論值 乾燥速度는 實測值 乾燥速度보다 현저히 느려졌다. 이는 平小角材와 같이 두께가 큰 木材의 경우는 透과성이 낮아 乾燥末期에는 表층과 내층간의 水分傾斜가 板材의 表층과 내층간의 경우보다 크며 平小角材 내층의 含水率은 아직 높은 含水率을 保有하고 있다. 따라서 水分傾斜가 크기 때문에 木材內部の 확산은 크고 내층의 높은 含水率의 水分이 乾燥末期에도 계속 乾燥되어 실측치 乾燥速度는 높게 나타나지만 이론치 乾燥速度는 平小角材의 乾燥室의 平均含水率에 거의 도달한 상태이기 때문에 木材의 표면과 乾燥室 공기간의 水分傾斜가 거의 없게 되어 擴散이 느려져 乾燥速度가 감소한다고 생각한다.

이상에서 理論值 乾燥速度를 實測值 乾燥速度和 비교하여 본 結果 소나무材의 熱氣乾燥에서 이 乾燥모델을 時間에 따른 含水率스케줄 단계를 변경하는데 適用할 수 있는 가능성 여부는 板材의 경우 含水率 21.8%에서 5.4%까지 범위내에서 含水率 0.6% 오차범위내에서 할 수 있고 平小角材의 경우 含水率 30.3%에서 16.1%까지 범위내에서 含水率 0.7% 오차

범위내에서 적용할 수 있었다.

## 5. 結 論

소나무 板材와 平小角材를 各各 熱氣乾燥하여 얻은 實測值 乾燥速度, 건조時間 및 含水率 分布와 乾燥모델에 의한 擴散係數 및 理論值 乾燥速度를 利用하여 분석한 결론은 다음과 같다.

1. 板材는 初期含水率 75.8%에서 最終含水率 6.5%까지 平均乾燥速度는 0.64%/hr.였고 總乾燥時間은 109시간이었다. 또한 平小角材는 初期含水率 72.6%에서 最終含水率 8.3%까지 平均乾燥速度는 0.4%/hr.였고 總乾燥時間은 162hr.였다.

2. 이쿼라이징 處理에 의한 板材와 平小角材 試驗材의 外層 및 內層含水率은 모두 감소하였고 콘디숀닝 處理에 의한 板材와 平小角材 試驗材의 外層 및 內層含水率은 모두 증가하였으며 外層과 內層間의 含水率 차이는 이쿼라이징 處理후보다 콘디숀닝 處理후가 더 적었다.

3. 乾燥모델에 의한 板材의 細胞膜質 橫斷方向 結合水擴散係數는 乾燥가 진행됨에 따라서 직선적으로 감소하였고 細胞內腔의 水蒸氣擴散係數는 曲線的으로 급격히 증가하였으며 木材의 橫斷方向 擴散係數는 曲線的으로 감소하였다. 또한 平小角材의 細胞膜質 橫斷方向 結合水擴散係數, 細胞內腔의 水蒸氣擴散係數 및 木材의 橫斷方向 擴散係數는 板材의 경우와 유사한 경향을 보였으나 그 값은 板材보다 적었다.

4. 理論值 乾燥速度와 實測值 乾燥速度를 비교한 결과, 板材의 경우 含水率 30.0%에서 21.8%까지 범위에서는 理論值 乾燥速度가 크며 含水率 21.8%에서 5.4% 범위에서는 서로 비슷하였다. 또한 平小角材의 경우 含水率 30.3%에서 16.1% 범위에서는 서로 비슷하였으나 含水率 16.1%에서 8.3% 범위에서는 理論值

乾燥速度가 적었다.

5. 소나무材 熱氣乾燥에서 含水率스케줄 적용이 이 乾燥모델을 利用하여 시간에 따른 乾燥스케줄단계 변경을 할 수 있는 가능성은 板材의 경우 含水率 21.8%에서 5.4%까지 범위에서, 平小角材에서는 含水率 30.3%에서 16.1% 범위에서 있었다.

## Literature cited

1. Bramhall, G. 1979. Mathematical model for lumber drying I, II. Wood Sci. 12(1) : 14-31.
2. Bui X., E.T. Choong, and W.G. Rudd. 1980. Numerical method for solving the equation for diffusion through wood during drying. Wood Sci. 13(2) : 117-121.
3. Choong, E.T. 1963. Movement of moisture through softwood in the hygroscopic range. Forest Prod. J. 13(11) : 489-498.
4. Choong, E.T. 1965. Diffusion coefficients of softwoods by steady-state and theoretical methods. Forest Prod. J. 15(1) : 21-27.
5. Choong, E.T. and C. Skaar. 1972. Diffusivity and surface emissivity in wood drying. Wood Fiber, 4(2) : 80-86.
6. Comstock, G.L. 1963. Moisture diffusion coefficients in wood as calculated from adsorption, desorption, and steady-state data. Forest Prod. J. 13(3) : 97-103.
7. Crank, J. 1956. The mathematics of diffusion. Clarendon Press. Oxford England : 47-48.
8. Dushman, S. and J.M. Lafferty. 1962. Scientific foundation of vacuum technique. Wiley, N.Y., 806pp.
9. Martley, J.F. 1926. Moisture movement

- through wool : The steady state. Dep. Sci. and Ind. Res., For. Prod. Res. Tech. Pap. No.2.
9. Nadler, K.C., E.T. Choong, and D.M. Wetzel. 1985. Mathematical modeling of the diffusion of water in wood during drying. Wood and Fiber Sci.,19(3) : 404-423.
  10. Petty, J.A.1973.Diffusion of non-swelling gases through dry conifer wood. Wood Sci. Tech. 7 : 297-307.
  11. Siau, J.F. 1971. Flow in wood. Syracuse Univ. Press, Syracuse, N.Y.,1-10.
  12. Siau, J.F., and Babiak M. 1983. Experiments on nonisothermal moisture movement in wood. Wood and Fiber Sci. 15 : 40-46.
  13. Siau, J.F. 1984. Transport process in wood. Syracuse Univ. Press, Syracuse, N.Y. : 151-174.
  14. Simpson, W.T. 1973. Predicting equilibrium moisture content of wood by mathematical models. Wood and Fiber 5(1) : 41-49.
  15. Skaar, C. 1958. Moisture movement in beech below the fiber-saturation point. Forest Prod. J.8(12) : 352-357.
  16. Skaar, C. and J.F.Siau. 1981. Thermal diffusion through air-filled capillaries of softwoods-Part I : Carbon dioxide. Forest Prod. J. : 247-250.
  17. Tarkow, H., and A.J. Stamm. 1959. Diffusion through air-filled capillaries of Softwoods-Part I : Carbon Dioxide. Forest Prod. J. : 247-250.
  18. Stamm, A.J. and R.M.Nelson. 1961. Comparison between measured and theoretical drying diffusion coefficients for southern pine. Forest Prod. J.536-543.
  19. Stamm, A.J. 1959. Bound water diffusion into wood the fiber direction. Forest Prod. J. : 27-37.
  20. \_\_\_\_\_. 1960a. Bound water diffusion into wood in cross-the fiber directions. Forest prod. J. : 524-528.
  21. \_\_\_\_\_. 1960b. Combined bound water and water vapor diffusion into sitka spruce. Forest prod. J. : 664-648.
  22. \_\_\_\_\_. 1964. Wood and cellulose science. Ronald Press, New York, N.Y. 林業試驗場. 1982. 木材工業 핸드ブック. 丸喜株式會社. : 309-311.