

# 소나무와 리기다소나무 平小角材의 高溫乾燥\*<sup>1</sup>

朴 文 在\*<sup>2</sup> · 鄭 希 錫\*<sup>2</sup>

## High-temperature drying of *Pinus densiflora* and *Pinus rigida* dimension lumber\*<sup>1</sup>

Moon Jae Park\*<sup>2</sup> · Hee Suk Jung\*<sup>2</sup>

### Summary

Korean red pine (*Pinus densiflora* S. et Z.) and pitch pine (*Pinus rigida* Mill) 5×10cm dimension lumber were dried in a kiln providing a cross-circulation velocity of 5 m/sec at dry-and wet-bulb temperatures of 116 and 71°C, followed by 3 hours at 91 and 85°C. Compared to dimension lumber dried at temperatures not in excess of 80°C, drying times and drying defects of the high-temperature dried lumber were as follows.

1. To dry to 10 percent moisture content, the high-temperature schedule of Korean red pine and pitch pine lumber took less than one seventh the time required by the conventional kiln drying schedule.
2. High-temperature drying rate and conventional drying rate to 10 percent moisture content of Korean red pine lumber were 2.75 and 0.35%/hr. and those of pitch pine lumber were 3.38 and 0.46%/hr. respectively.
3. Compared to lumber of both species on conventional schedule, moisture gradient of high-temperature lumber was greater.
4. Compared to lumber on conventional schedule, maximum surface checking of high-temperature lumber of both species was severer, and maximum end checking of high-temperature lumber of both species was similar to that of lumber on conventional schedule.
5. Compared to lumber on conventional schedule, Korean red pine lumber dried at high-temperature showed more honeycombing, but pitch pine lumber dried at high-temperature showed significantly slighter honeycombing.
6. Compared to lumber on conventional schedule, the high-temperature lumber showed less warping in lumber of both species.
7. Collapse and casehardening of Korean red pine and pitch pine lumber on both schedules were slight.

### 1. 緒 論

하고 乾燥木材의 材質을 改善하는 것이 중요한 과제이다.

木材乾燥方法을 적용함에 있어 乾燥時間을 短縮

木材의 高溫乾燥는 熱氣乾燥(慣行)보다 乾燥時

\*1. 接受 1987년 3월 26일 Received March 26, 1987.

\*2. 서울대학교 農科大學 College of Agriculture, Seoul National Univ., Suwon 170, Korea.

間을 대폭 短縮시키고, 乾燥室 용량의 축소를 가능케하며, 木材乾燥에 必要한 에너지를 절반정도 절약할 수 있는 잇점이 있고 乾燥材의 치수安定化에 효과가 있다. 따라서 고온건조는 木材加工의 生産性제고에 기여하는 바가 큰 乾燥方法으로 인정되어 왔다.

고온건조는 물의 비등점이상에서 목재를 건조하는 방식으로, 過熱蒸氣를 이용하여 空氣가 배제된 상태에서 습구온도 100°C를 유지하며 건조하는 방법과, 증기와 공기가 混合된 상태에서 습구온도 100°C 이하에서 건조하는 방법이 있으나 후자가 보편적인 방법으로 採擇되고 있다.

고온건조는 1960년대 후반에 이르러 침엽수재의 건조에서 바람직한 결과를 얻은 이후 산업화되기 시작하였다. 최근에 고온건조는 유용한 건조방법으로 입증되어 southern pine의 건조에 高溫乾燥가 적용되고 있으며, 美松, hemlock, 낙엽송, 사시나무등의 건조에도 널리 적용되고 있는 실정이다.

우리나라에 널리 분포되어 있는 대표적인 樹種인 소나무와 삼림녹화를 성공케한 리기다소나무의 건조방법으로서, 이들 樹種의 木材品等を 유지하고 건조에너지를 절약하면서 신속히 건조할 수 있는 高溫乾燥法의 효율성에 대한 관심을 갖게 되었다.

本 研究는 소나무와 리기다소나무 두께 5cm, 너비 10cm의 平小角材를 공기와 수증기가 混合된 상태에서 高溫乾燥하여, 소요된 乾燥時間과 각종 乾燥缺陷을 조사하여, 熱氣乾燥의 結果와 비교하여 高溫乾燥의 특성을 알고자 실시하였다.

## 2. 研究史

木材에 대한 高溫乾燥의 起原은 19세기 중엽에서 비롯되어 Allen 등(1867)<sup>1)</sup>은 “過熱蒸氣에 의한 목재건조장치”로 특허를 얻었고, 제2차 세계대전 중 목재수요가 증가함에 따라 Fischer 등(1941)<sup>3)</sup>은 오늘날의 乾燥室과 유사한, 공기와 수증기가 混合된 상태에서 강제순환 방식을 採擇한 소형전기가열식 고온건조실을 개발하게 되었다.

고온건조에서 발생하기 쉬운 틀어짐을 예방하고 품등을 향상시키기 위하여, Koch(1969)<sup>6)</sup>는 southern pine 목재를 frame으로 억제하여 건구온도 116°C, 습구온도 71°C에서 건조할 때 틀어짐이

열기건조에 비해 약 50% 감소됨을 밝혔고, McCollum(1986)<sup>11)</sup>은 southern pine 목재의 고온건조가 열기건조보다 좋은 품등의 목재를 제공한다고 발표하였다.

고온건조는 乾燥時間을 단축하고 또한 에너지를 절약할 수 있는 건조방법이다. Koch(1972)<sup>8)</sup>는 southern pine 목재의 고온건조가 열기건조에 비해 건조시간이 4배이상 단축되고 에너지의 소모량이 절반정도라고 주장하였으며, Price등(1981)<sup>14)</sup>은 southern pine 목재를 고온건조할 때 빠른 풍속과 두꺼운 잔목을 사용하여 건조시간을 단축시켰다고 보고하였다. Taylor(1982)<sup>20)</sup>는 southern pine 목재를 116°C에서 건조할 때 열기건조에 비해 약 15%의 에너지가 절감된다고 발표하였으며, Herzberg 등(1983, 1985)<sup>4, 5)</sup>은 pine목재의 고온건조시간은 풍속, 잔적목, 잔목두께에 영향을 받는다고 보고하였다.

고온건조목재의 强度的 性質을 구명한 연구로서, Yao등(1979)<sup>22)</sup>은 southern pine 2인치×6인치 角材를 고온건조하여 MOR, MOE, 韌性, 剛性度를 구한 결과 열기건조에 비해 나쁜 영향이 없음을 밝혔고, Price(1980)<sup>13)</sup>은 고온건조한 southern pine 목재가 열기건조한 목재보다 틀어짐은 적고, 强度的 性質은 차이가 없음을 보고하였다.

Williams등(1984)<sup>21)</sup>은 New Zealand產 radiata pine의 건조 스케줄로 건구온도 120°C, 습구온도 70°C로 건조한 후, 100°C 포화 증기조건에서 re-conditioning하는 것을 추천하였다.

고온건조의 이론적 배경에 관한 연구로는, Beard등(1983)<sup>2)</sup>이 건조중인 목재의 열전달계수를 구하여 내부온도 profile을 측정하고, 이로써 목재 함유율을 계산하는 방법을 발표하였으며, Rosen(1984)<sup>17)</sup>은 고온에서의 다공성물질에 적용되는 열 및 물질이동(transport of heat and mass)의 기본식을 응용하여, 목재에 대한 複雜한 미분방정식을 유도하여 고온건조의 이론적 기초를 다졌다.

고온건조의 작업능률을 향상시키기 위한 방안으로 건조실의 자동화는 필수적이다. Koch등(1977)<sup>10)</sup>은 southern pine 목재를 건조할 때 上段荷重을 자동 적재 및 제거하는 방식의 연속식 터널형고온 건조실을 개발하였고, Panow등(1985)<sup>12)</sup>은 slash pine의 고온건조에서 열전대를 이용하여 시험재의 內層溫度를 탐지하면서, 건조종료시기를 판단하여 자동으로 건조실작동을 정지시킬 수 있다고 보

고하였다.

### 3. 材料 및 方法

#### 3.1 供試材料 및 器機

##### 3.1.1 供試原木

本 研究에서는 서울大學校 農科大學 구내에서 자란 소나무(*Pinus densiflora* S. et Z.)와 農科大學 樹木園에서 자란 리기다소나무(*Pinus rigida* Mill) 중에서 樹幹이 通直한 立木 1本씩을 供試立木으로 선정하였다.

소나무와 리기다소나무 供試立木의 樹高는 각각 14m와 18m이었는데, 根株부분 30cm정도를 제거하고 상부로 향하면서 각각 4本씩을 造材하였다. 造材된 原木의 크기는 表1과 같다.

##### 3.1.2 供試平小角材

供試原木은 그림1과 같이 두께 5cm, 폭 10cm인 平小角材로 製材한 다음, 웅이와 둥근모를 적게 포함하는 재료를 수종별로 각각 20本씩 선정하여, 온도 0°C를 유지하는 저장소에 貯木하였다.

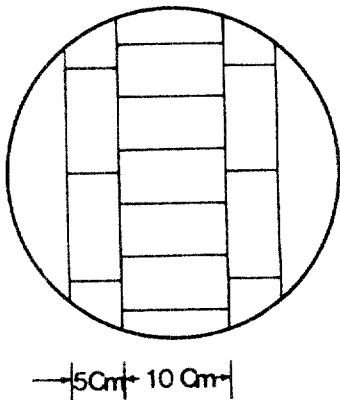


Fig. 1. Sawing patterns of sample logs.

##### 3.1.3 乾燥, 比重 및 初期含水率試驗片

제1회와 제2회 고온건조시험편은 수종별로 평소 각재 5本씩을 선정한 후 고온건조실험전에 1本당

길이 60cm인 乾燥試驗片 2개를 木取하였다. 제3회 고온건조와 열기건조시험편은 수종별로 평소 각재를 10本씩 선정한 후 1本당 길이 60cm인 乾燥試驗片 2개를 목취하여 1개는 고온건조시험편으로, 다른 1개는 열기건조시험편으로 사용하였다.

乾燥試驗片의 初期含水率은 양단에서 채취한 길이 2.5cm의 含水率試驗片을 전건하여 구하였고, 心材率은 건조시험편의 양쪽 횡단면상의 심재부위의 면적 대 횡단면적의 값을 평균하였으며, 比重試驗片은 각 平小角材에서 두께 5cm, 폭10cm, 길이 2.5cm 크기로 2개씩 목취하여 生材比重을 구하였다.

건조회수별 건조시험편의 수량, 초기함수율, 심재율 및 비중은 表2와 같다.

##### 3.1.4 實驗器機

###### 3.1.4.1 乾燥室

高溫乾燥와 熱氣乾燥에 사용된 乾燥室은 內部容積 117×65×47cm이고, 最高溫度 250°C, 乾濕球溫度의 精度 ±0.5°C인 內部送風機型 小型人工乾燥室이었다.

###### 3.1.4.2 風速計

乾燥室內의 風速을 測定하기 위해 최대측정가능 풍속 40m/sec, 精度 ±0.1m/sec인 AM-A11型 Anemomaster를 사용하였다.

###### 3.1.4.3 其他器機

含水率과 比重試驗片을 乾燥하기 위해 103±2°C를 유지할 수 있는 오븐을 사용하였다.

乾燥試驗片의 평량은 精度 1g인 直示天稱을, 比重과 含水率 試驗片의 평량은 精度 0.01g인 直示天稱을 각각 사용하였다.

比重試驗片의 두께, 폭과 길이, 그리고 乾燥試驗片의 두께 收縮率과 폭수축율, 너비굽음, 비틀림, 길이굽음, 측면굽음, 찌그러짐, 表面硬化率측정에는 精度 0.05mm의 버어니어 캘리퍼스를 사용하였다.

### 3.2 實驗方法

Table 1. Size of sample logs

Variables	<i>Pinus densiflora</i>				<i>Pinus rigida</i>			
	log1	log2	log3	log4	log5	log6	log7	log8
Butt end diameter(Cm)	37	32	29	28	36	30	28	26
Top end diameter(Cm)	32	29	28	27	30	28	26	26
Log length(m)	1.6	1.6	1.6	1.6	1.8	1.8	1.8	1.8

Table 2. Initial moisture content, heartwood content, and specific gravity of drying specimens for *Pinus densiflora* and *Pinus rigida*

Variables	High-temperature drying			Conventional kiln drying
	1st run	2nd run	3rd run	
<i>Pinus densiflora</i>				
	Avg. St. dv.	Avg. St. dv.	Avg. St. dv.	Avg. St. dv.
Number of specimens	10	10	10	10
Initial MC	53.7 12.8	36.9 6.12	41.2 7.02	41.5 4.67
Heartwood content	87.0 13.2	89.0 13.9	83.0 16.4	89.0 18.4
Specific gravity	0.42 0.040	0.41 0.034	0.42 0.029	0.39 0.025
<i>Pinus rigida</i>				
	Avg. St. dv.	Avg. St. dv.	Avg. St. dv.	Avg. St. dv.
Number of specimens	10	10	10	10
Initial MC	80.3 15.6	80.6 18.8	74.9 14.8	73.3 16.5
Heartwood content	17.0 25.5	9.0 23.7	16.5 24.9	18.5 29.8
Specific gravity	0.52 0.014	0.51 0.028	0.51 0.027	0.51 0.025

3.2.1 棧積

두께 2cm, 폭2.5cm의 棧木을 사용하여 소나무와 리기다소나무 건조시험편을 그림2와 같이 교호로 棧積하였다.

高溫乾燥에서는 들어짐을 줄이기 위하여 철제로 된 252kg/m<sup>2</sup>의 上段荷重(top load)을 棧積上段부에 가하였다. 熱氣乾燥의 경우 고온건조와 잔적높이가 같도록 상단부에 假試驗片을 배치하였다.

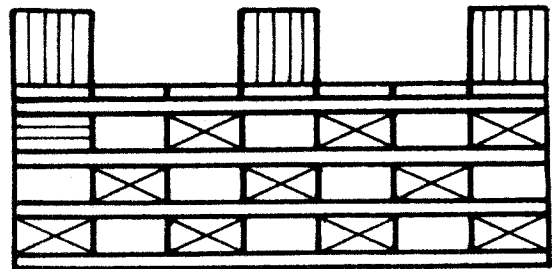
3.2.2 乾燥스케줄

3.2.2.1 高溫乾燥스케줄과 後處理

高溫乾燥스케줄은 乾球溫度 116°C, 濕球溫度 71°C, 平衡含水率 1.7%의 조건에서 材間風速 5m/sec로 乾燥初期로부터 終了까지 일정하게 유지시켰다. 乾燥試驗片간의 含水율변이를 감소시키고 乾燥應力을 완화시키기 위하여 고온건조말기에 3시간동안 건구온도 91°C, 습구온도 85°C에서 蒸氣處理하였다. 증기처리가 끝난 후 건조시험편을 온도 21-27°C, 상대습도 40-60%의 대기중에서 48시간동안 冷却시켰다.

3.2.2.2 熱氣乾燥스케줄과 後處理

日本 林業試驗場(1982)<sup>24</sup>) 이 추천한 T10-C3의








-  *Pinus densiflora*
-  *Pinus rigida*
-  Dummy
-  Top load
-  Sticker

Fig. 2. Stacking method of dimension lumber in high-temperature drying.

Table 3. Conventional kiln drying schedule for 50mm *Pinus densiflora* and *Pinus rigida* dimension lumber

Moisture content	D.B.F.(°C)	W.B.T.(°C)	EMC(%)
above 40	60	57	15.3
40-35	60	56	13.8
35-40	60	54	11.4
30-25	65	56.5	9.4
25-20	70	59	8.0
20-15	75	61	6.6
below 15	80	52	3.3
Equalizing	80	64	5.9

건조 스케줄을 적용하였으며, 材間風速은 3m/sec 이었다. 건조종료후 이퀄라이징처리를 24시간 실시한 후 48시간 동안 고온건조와 같은 조건의 冷却處理를 하였다. 열기건조스케줄은 표3과 같다.

### 3.2.3 乾燥中含水率

乾燥中含水率は 初期含水率에 의해 산출한 乾燥試驗片의 全乾 무게와 乾燥中 측정된 乾燥試驗片의 무게에 의해 구하였다. 乾燥試驗片의 무게측정은 高溫乾燥에서는 3시간 간격으로, 熱氣乾燥에서는 24시간 간격으로 측정하였다.

### 3.2.4 最終含水率과 含水率分布

乾燥試驗片의 含水率分布는 48시간 冷却후에 건조시험편 양끝으로부터 20cm되는 지점에서 2개의 시험편을 목취한 후 含水率分布試驗片을 채취하여 表面層, 中間層, 內層의 含水率을 구하였다.

건조시험편의 含水율은 표층, 중간층, 내층의 시험편 무게를 합산하여 구하였고, 이 含水율로부터 冷却前 건조시험편의 最終含水率을 환산하였다.

### 3.2.5 割裂

乾燥中 발생하는 表面皸裂과 횡단면皸裂의 갯수와 총길이를 高溫乾燥에서 3시간간격으로, 熱氣乾燥에서는 24시간 간격으로 각각 측정하였다.

乾燥終了後 절단한 횡단면상에 발생한 內部割裂의 갯수를 측정하고 皸裂깊이는 스테인레스 강으로 제작한 내부할렬 측정용 자(尺)로 측정하였다.

### 3.2.6 틀어짐

틀어짐은 버어니어 캘리퍼스를 사용하여 측정하였는 바, 側面굽음(crook)은 길이방향으로 휘 側面의 최대처짐을, 길이굽음(bow)은 材面이 길이방향으로 휘 최대처짐을, 너비굽음(cup)은 材面이

너비방향으로 휘 최대처짐을, 비틀림(twist)은 평면상에서 최대높이를 가진 모서리의 변형된 높이를 측정하여 구하였다.

### 3.2.7 收縮率, 찌그러짐과 表面硬化

乾燥試驗片의 중앙에 두께와 폭을 측정하기 위한 기준선을 그어, 乾燥後 乾燥中의 측정치로써 수축율을 구하였다.

찌그러짐은 48시간 冷却後 건조시험편의 중앙에서 길이 2.5cm 되도록 목취한 시험편의 최대두께와 최소두께의 差를 구하였다. 표면경화율은 찌그러짐을 측정후 應力試驗片을 제작하여 측정하였다.

## 4. 結果 및 考察

### 4.1 乾燥曲線과 乾燥速度

소나무재와 리기다소나무재의 高溫乾燥曲線은 그림3과 같이 건조 초기에는 含水율이 직선적으로 감소되었지만, 건조가 진행됨에 따라 건조속도가 차츰 감소되는 경향을 나타내었다. 고온건조시 소나무재의 含水率 단계별 乾燥速度는 含水率 40%에서 30%까지 3.88%/hr, 30%에서 10%까지 2.41%/hr이고, 含水율 40%에서 10%까지 平均乾燥速度는 2.75%/hr이었다. 리기다소나무재의 高溫乾燥速度는 含水율 70%에서 30%까지 4.57%/hr, 含水율 30%에서 10%까지 2.22%/hr이고, 含水율 70%에서 10%까지 平均乾燥速度는 3.38%/hr이었다.

소나무재와 리기다소나무재의 열기건조곡선은

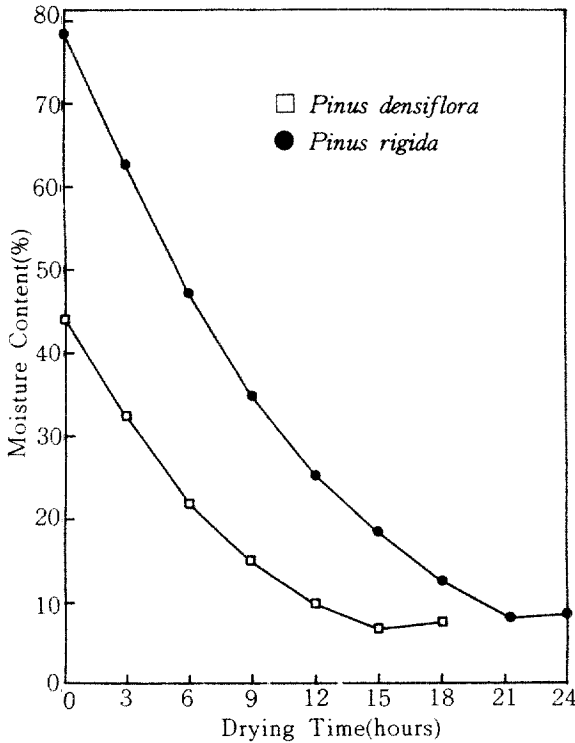


Fig. 3. High-temperature drying curves for *Pinus densiflora* and *Pinus rigida* dimension lumber.

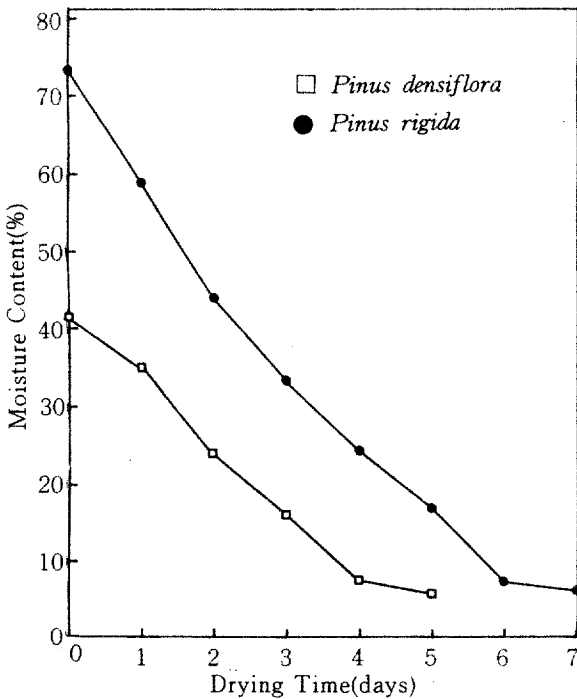


Fig. 4. Conventional kiln drying curves for *Pinus densiflora* and *Pinus rigida* dimension lumber.

그림4와 같았다. 열기건조시 소나무재의 습수율단 계별 건조속도는 함수율 40%에서 30%까지 0.34%/hr, 30%에서 10%까지 0.37%/hr, 함수율 40%에서 10%까지 평균건조속도는 0.36%/hr이었다. 리기다소나무재의 열기건조속도는 함수율 70%에서 30%까지 0.52%/hr, 30%에서 10%까지 0.37%/hr이고, 함수율 70%에서 10%까지 평균건조속도는 0.46%/hr이었다.

고온건조 및 열기건조에서 함수율 30% 이상에서의 건조속도는 소나무재가 리기다소나무재보다 적었지만, 함수율 30% 이하에서는 양수종의 건조속도가 유사하였다. 함수율 30% 이상에서 소나무재의 건조속도가 적은 것은 초기함수율이 적은데 기인한 것으로 생각한다.

소나무재가 함수율 40%에서 10%까지 건조될 때 평균건조속도는 고온건조가 열기건조의 7.6배 이었고, 리기다소나무재가 함수율 70%에서 10%까지 건조될 때는 7.3배이었다.

이와같이 고온건조속도가 빠른 것은 Koch (1972)<sup>8)</sup>가 제시한 대로 고온건조는 물의 비등점이 상에서 건조되기 때문에 木材內 水分移動이 擴散 現象이 아닌 壓力流動(pressure flow, hydrodynamic flow) 現象에 기인한 것이다.

#### 4.2 乾燥時間

소나무재의 함수율단계별 고온건조시간은 함수율 40%에서 30%까지 2.6시간, 30%에서 10%까지 8.3시간으로, 함수율 40%에서 10%까지는 10.9시간이었다.

리기다소나무재의 고온건조시간은 함수율 70%에서 30%까지 8.8시간, 함수율 30%에서 10%까지 9.0시간이었고, 함수율 70%에서 10%까지는 17.8시간이었다.

소나무재의 열기건조시간은 함수율 40%에서 30%까지 29.5시간, 30%에서 10%까지 54.2시간으로, 함수율 40%에서 10%까지는 83.7시간이었다.

리기다소나무재의 열기건조시간은 함수율 70%에서 30%까지 76.5시간, 30%에서 10%까지 54.2시간이었고, 70%에서 10%까지는 130.7시간이었다.

고온건조 및 열기건조에서, 소나무재의 초기함수율이 리기다소나무재보다 낮은 이유로 소나무재

의 건조시간이 짧았지만, 함수율 30%이하에서 양수종의 건조시간은 유사하였다.

고온건조시간은 열기건조보다 소나무재의 경우 약 7.7배 단축되었으며, 리기다소나무재의 경우 약 7.3배의 단축효과가 있었다.

이와같이 건조시간의 단축은 Koch(1971)<sup>7)</sup>가 southern pine의 고온건조시간이 열기건조보다 4배이상 단축된다고 보고한 내용보다 컸는데, 이는 공시수종이 다르고 본 연구에 적용된 열기건조스

코, 리기다소나무재의 경우 8.5%이었다. 고온건조에서 소나무재의 함수율分布는 표층, 중간층 및 내층의 평균함수율이 각각 9.2, 9.7, 10.6%이고, 리기다소나무재의 평균함수율은 각각 9.4, 11.3, 13.4%로 목재표면에서 내부로 갈수록 함수율이 높았다. 따라서, 함수율경사는 소나무재가 리기다소나무재보다 적었다.

열기건조시 소나무재의 최종함수율은 5.8%, 리기다소나무재의 경우 6.1%이었다. 열기건조에서

Table 4. Final moisture content and distributions of moisture in shell, intermediate shell, and core for *Pinus densiflora* and *Pinus rigida* dimension lumber

Variables	High-temperature drying			Conventional kiln drying
	1st run	2nd run	3rd run	
<i>Pinus densiflora</i>				
	Avg. St. dv.	Avg. St. dv.	Avg. St. dv.	Avg. St. dv.
Final MC(%)	5.7 1.66	6.7 1.33	8.2 0.96	5.8 0.45
MC after cooling for 48 hours(%)	10.7 1.26	9.5 0.87	10.2 0.98	7.3 0.33
Moisture Shell distribution (%)	9.1 0.90	8.2 0.31	10.3 0.40	7.3 0.33
Intermediate core	10.9 2.31	8.5 1.03	9.7 1.07	7.2 0.36
core	11.9 1.65	9.2 1.70	10.6 1.97	7.4 0.74
<i>Pinus rigida</i>				
	Avg. St. dv.	Avg. St. dv.	Avg. St. dv.	Avg. St. dv.
Final MC(%)	8.5 1.58	9.5 1.51	7.5 1.54	6.1 0.67
MC after colling for 48 hours(%)	11.3 1.18	11.7 0.95	9.5 1.32	7.2 0.58
Moisture Shell distribution (%)	9.6 1.43	9.8 0.40	8.8 0.67	7.2 0.28
Intermediate Core	11.6 3.24	12.8 1.54	9.4 1.76	6.9 0.72
core	13.5 1.76	15.5 1.94	11.2 2.47	7.3 1.14

케줄(T10-C3)이 Koch가 적용한 열기건조스케줄(T12-C5)보다 약한데 기인한 것으로 생각한다.

### 4.3 最終含水率 및 含水率分布

고온건조와 열기건조시험편의 最終含水率, 48시간 冷却後의 함수율 및 含水率分布를 표4에 나타내었다.

고온건조시 소나무재의 최종함수율은 6.9%이

소나무재의 함수율分布는 표층, 중간층 및 내층의 평균함수율이 각각 7.3, 7.2, 7.4%, 리기다소나무재의 경우 7.2, 6.9, 7.3%로 양수종에서 함수율경사는 거의 없었다.

양수종의 함수율경사는 고온건조가 열기건조보다 약간 급하였다.

### 4.4 表面割裂

소나무재와 리기다소나무재의 고온건조 및 열기

건조시험편에 발생한 표면할렬의 평균갯수와 평균 길이는 그림5, 그림6과 같다.

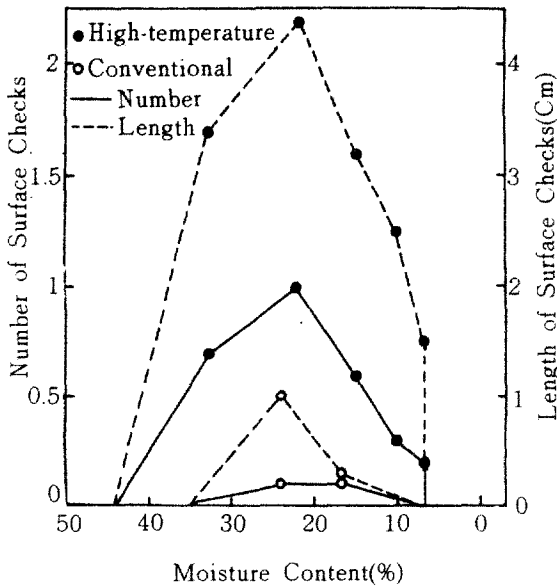


Fig. 5. Surface checks for *Pinus densiflora* dimension lumber.

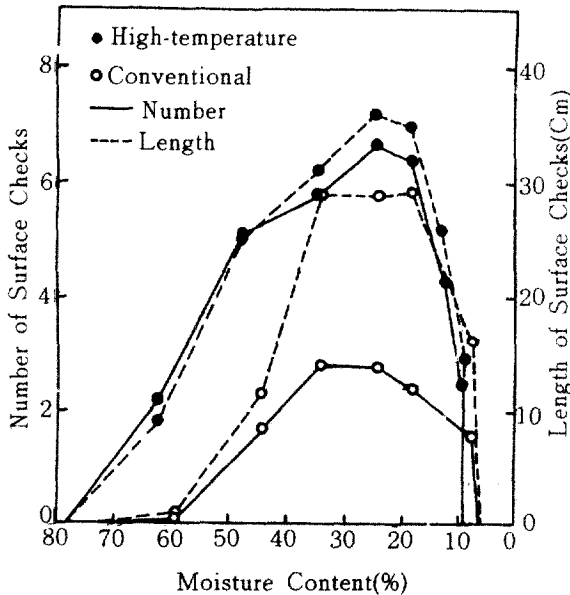


Fig. 6. Surface checks for *Pinus rigida* dimension lumber.

고온건조에서 소나무재의 표면할렬은 함수율 21.8%에서 최대 발생하여, 평균 1.0개, 4.4cm, 할렬당 평균길이 4.4cm에 이른 후 감소하기 시작

하였다. 리기다소나무재의 표면할렬은 함수율 24.8%에서 최대 발생하여, 평균 6.7개, 37.1cm, 할렬당 평균길이 5.5cm에 이른 후 감소하기 시작 하였다.

熱氣乾燥에서 소나무재의 표면할렬은 함수율 24.2%에서 최대 발생하여, 평균 1.0개, 1cm, 할렬당평균길이 10cm에 이른 후 감소하기 시작 하였다. 리기다소나무재의 경우 함수율 24.4%에서 최대 발생하여 평균 2.8개, 28.9cm, 할렬당평균 길이 10.3cm에 이룬후 감소하기 시작하였다.

건조방법에 관계없이 양 수종의 건조종료시에는 어느 시험편에서도 표면할렬은 발견되지 않았다. 또한 고온건조와 열기건조에서 소나무재의 최대표면할렬발생은 리기다소나무재에 비해 적었다.

양 수종의 최대표면할렬의 발생은 고온건조재가 열기건조재 보다 심하였다.

고온건조재의 최대표면할렬발생이 열기건조재 보다 심한 것은 고온 건조시의 강한 건조조건에 의해 큰 건조응력이 작용하기 때문으로 생각하며, 건조종료후 표면할렬이 발견되지 않은 것은 Koch (1974)<sup>9)</sup>가 건조종료 후 표면할렬이 거의 발견되지 않았다고 보고한 내용과 유사하였다.

#### 4.5 橫斷面割裂

乾燥中 횡단면에 나타난 소나무재와 리기다소나무재의 횡단면할렬의 평균갯수와 평균길이는 그림 7, 그림 8과 같았다.

고온건조에서 소나무재의 橫斷面割裂은 함수율 21.9%에서 평균 1.9개, 3.1cm로 최대에 이른 후 감소하기 시작하였으며, 리기다소나무재의 경우 함수율 34.6%에서 최대 발생하여 평균 1.9개 2.8cm에 이른 후 감소하기 시작하였다.

熱氣乾燥에서 소나무재의 횡단면할렬은 함수율 24.2%에서 평균 2.2개, 3.7cm로 최대에 이른 후 감소하였으며, 리기다소나무재의 경우 함수율 33.6%에서 평균 2.2개, 3.6cm로 최대에 이른 후 감소하기 시작하였다.

고온건조와 열기건조에서, 양수종의 횡단면할렬은 건조종료시 어느 시험편에서도 발견되지 않았고, 최대횡단면할렬의 발생은 양수종에서 경미 하였으며, 건조방법간에 차이가 없었다.

건조종료후 고온건조에서 횡단면할렬이 발견되지 않은 것은 Koch(1974)<sup>9)</sup>가 보고한 내용과 일치



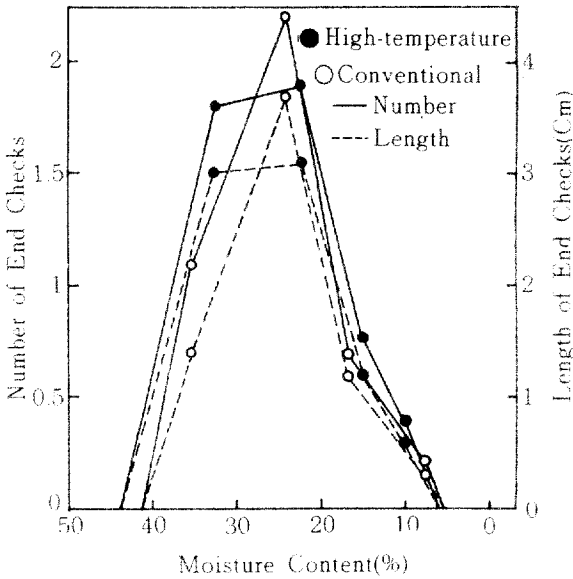


Fig. 7. End checks for *Pinus densiflora* dimension lumber.

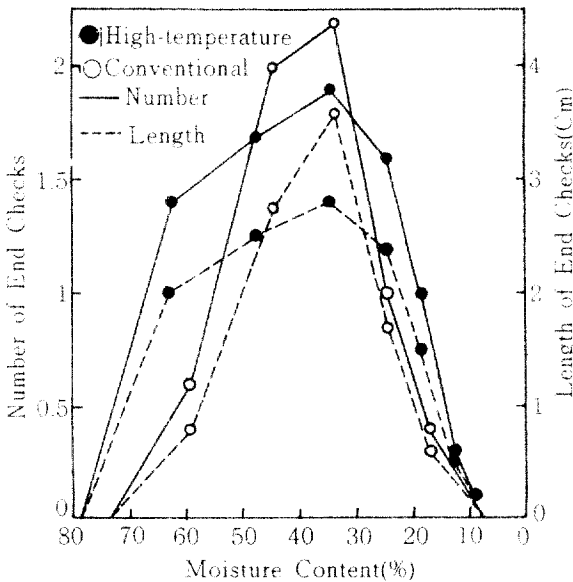


Fig. 8. End checks for *Pinus rigida* dimension lumber.

하였다.

#### 4.6 内部割裂

소나무재와 리기다소나무재의 내부할렬발생을 표5에 나타내었다. 고온건조에서 소나무재의 내부할렬은 건조시험편 30本中 6本에서 발견되어 20%의 발생율을 보였으며, 평균깊이는 3.7cm인데 반

해, 리기다소나무재의 경우 건조시험편 30本中 11本에서 발견되어 37%의 발생율을 보였고 평균 깊이는 4.9cm이었다.

열기건조에서 소나무재의 내부할렬은 발견되지 않았으며, 리기다소나무재의 경우 건조시험편 10本中 5本에서 발견되어 50%의 발생율을 보였고 평균깊이는 14.9cm이었다.

고온건조 및 열기건조에서 소나무재의 내부할렬 발생율은 리기다소나무재보다 낮았다. 소나무재의 내부할렬발생은 고온건조에서 다소 심하였으나, 유의한 차이를 보이지 않았다. 리기다소나무재의 경우 고온건조가 열기건조에서보다 유의하게 (5%수준) 적었다.

고온건조에서 내부할렬발생이 열기건조보다 심하지 않은 것은 Williams(1981)<sup>21)</sup>가 주장하였듯이 고온건조후의 증기처리에 기인된다고 생각한다.

#### 4.7 틀어짐

건조종료후와 48시간 冷却후에 측정된 틀어짐은 표6의 내용과 같다.

##### 4.7.1 측면굽음

고溫乾燥에서 소나무재의 측면굽음은 건조종료 후 및 冷却후에 0.5mm로 같았으며, 리기다소나무재의 경우 0.5mm로 같아, 수종간에 차이가 없었다.

熱氣乾燥에서 소나무재의 측면굽음은 건조종료 후 및 冷却後에 각각 0.5mm, 0.3mm이었으며, 리기다소나무재의 경우 0.8mm, 1.2mm로 측정되어, 소나무재의 측면굽음이 적게 발생하였다.

소나무재의 측면굽음은 건조방법간에 차이가 없었으며, 리기다소나무재의 경우 건조종료후 유의성은 없었지만, 冷却後에 고온건조가 열기건조보다 유의하게(5% 수준) 적었다.

##### 4.7.2 길이굽음

고溫乾燥에서 소나무재의 길이굽음은 건조종료 후와 冷却後에 0.6mm로 같았으며, 리기다소나무재의 경우 0.3mm로 같아, 소나무재에서 다소 크게 나타났다.

熱氣乾燥에서 소나무재의 길이굽음은 건조종료 후와 冷却後에 각각 0.7mm, 0.9mm이었으며, 리기다소나무재의 경우 각각 0.4mm, 0.6mm로, 소나무재에서 다소 크게 나타났다.

Table 5. Honeycombing for *Pinus densiflora* and *Pinus rigida* dimension lumber

Variables	High-temperature drying			Conventional kiln drying
	1st run	2nd run	3rd run	
<i>Pinus densiflora</i>				
	Avg. St. dv.	Avg. St. dv.	Avg. St. dv.	Avg. St. dv.
Number of lumber with honey comb occurred	3	2	1	0
Average number of honey comb occurred	0.7 1.25	0.4 0.84	0.2 0.6	0
Average depth of honey comb occurred(Cm)	6.2 11.5	3.0 6.51	2.0 4.23	0
Maximum depth of honey comb occurred(Cm)	14.9	9.9	11.1	0
<i>Pinus rigida</i>				
	Avg. St. dv.	Avg. St. dv.	Avg. St. dv.	Avg. St. dv.
Number of lumber with honey comb occurred	2	4	5	5
Average number of honeycomb occurred	0.3 0.67	0.8 1.32	0.7 0.82	0.6 0.70
Average depth of honeycomb occurred(Cm)	1.5 3.97	5.0 7.98	8.0 10.5	14.9 21.2
Maximum depth of honeycomb occurred(Cm)	11.1	11.8	31.9	45.0

양수종의 길이굽음은 유의성은 없지만 고온건조재가 열기건조재보다 적었다.

#### 4.7.3 너비굽음

高溫乾燥에서 소나무재의 너비굽음은 冷却前後에 발견되지 않았고, 리기다소나무재의 경우 각각 0.1mm, 0.2mm로 측정되어, 양수종에서 경미하였다.

熱氣乾燥에서 소나무재의 너비굽음은 건조종료후와 冷却後에 각각 0.5mm, 0.4mm이고, 리기다소나무재의 경우 0.5mm, 0.2mm로 측정되어, 양수종에서 유사하게 나타났다.

소나무재의 너비굽음은 건조종료후와 冷却後에 유의하게(1%수준) 고온건조가 열기건조보다 적었으며, 리기다소나무재의 경우 유의성은 없지만 고온건조에서 적었다.

#### 4.7.4 비틀림

고온건조에서 소나무재의 비틀림은 건조종료후에 평균 1.8mm, 冷却後에 평균 1.6mm이며, 리기다소나무재의 경우 각각 2.9mm, 2.7mm이었다.

열기건조에서 소나무재의 비틀림은 건조종료 후

및 冷却後에 각각 3.3mm, 4.2mm이고, 리기다소나무재의 경우 각각 4.9mm 4.0mm이었다.

건조방법에 관계없이 소나무재의 비틀림은 리기다소나무재보다 적은 경향이였다. 소나무재의 비틀림은 건조종료후에 고온건조가 열기건조보다 적었지만 유의성은 없었고, 冷却후에는 고온건조가 유의하게(1%수준) 적었다. 리기다소나무재의 비틀림은 건조종료후에 고온건조가 열기건조보다 유의하게(5%수준) 적었으며, 冷却후에는 유의성은 없었지만 고온건조가 적었다.

소나무재와 리기다소나무재의 틀어짐발생이 고온건조가 열기건조보다 적은 것은 上段荷重의 억제효과에 기인한다고 생각하며 이는 Price 등(1981)<sup>13)</sup>이 보고한 내용과 일치하는 것이였다.

#### 4.8 收縮率

소나무재와 리기다소나무재의 두께수축을 그림 9와 10에, 폭수축율은 그림 11과 그림 12에 나타내었다.

Table 6. Warping for *Pinus densiflora* and *Pinus rigida* dimension lumber

Kind of warp	High-temperature drying			Conventional kiln drying
	1st run	2nd run	3rd run	
<i>Pinus densiflora</i>				
	Avg. St. dv.	Avg. St. dv.	Avg. St. dv.	Avg. St. dv.
Crook (mm) Before colling	0.5 1.48	0.5 0.79	0.6 0.72	0.5 0.84
After colling	0.5 1.45	0.5 0.79	0.4 0.56	0.3 0.60
Bow (mm) Before colling	0.7 1.17	0.4 0.84	0.6 0.77	0.7 1.23
After colling	0.6 1.10	0.4 0.84	0.7 0.86	0.9 0.69
Cup (mm) Before colling	0.0 0.00	0.0 0.00	0.0 0.00	0.5 0.74
After colling	0.0 0.00	0.0 0.00	0.0 0.00	0.4 0.73
Twist (mm) Before colling	1.4 2.51	1.6 1.83	2.5 2.69	3.3 2.85
After colling	1.3 2.46	1.2 1.51	2.3 2.47	4.2 3.33
<i>Pinus rigida</i>				
Crook (mm) Before colling	0.2 0.51	0.7 1.14	0.7 0.91	0.8 0.94
After colling	0.2 0.49	0.6 1.09	0.6 0.82	1.2 1.13
Bow (mm) Before colling	0.4 0.93	0.4 1.19	0.2 0.28	0.4 0.62
After colling	0.5 0.73	0.3 0.81	0.2 0.27	0.6 0.91
Cup (mm) Before colling	0.2 0.38	0.0 0.00	0.2 0.63	0.5 0.87
After colling	0.2 0.57	0.0 0.00	0.2 0.63	0.2 0.60
Twist (mm) Before colling	2.2 1.01	4.0 2.78	2.6 1.71	4.9 2.30
After colling	1.4 0.99	3.8 2.55	3.0 1.93	4.0 2.15

高溫乾燥에서 소나무재의 두께수축율은 함수율 30%에서 0.3%이고, 함수율 10%에서 2.4%이었으며, 리기다소나무재의 경우 각각 1.2%, 2.9%로 소나무재가 리기다소나무재보다 두께수축율이

적었다. 고온건조에서 소나무재의 폭수축율은 함수율 30%와 10%에서 각각 0.2%, 1.9%이며, 리기다소나무재의 경우 각각 1.2%, 2.8%로, 소나무재가 리기다소나무재보다 폭수축율이 적었다.

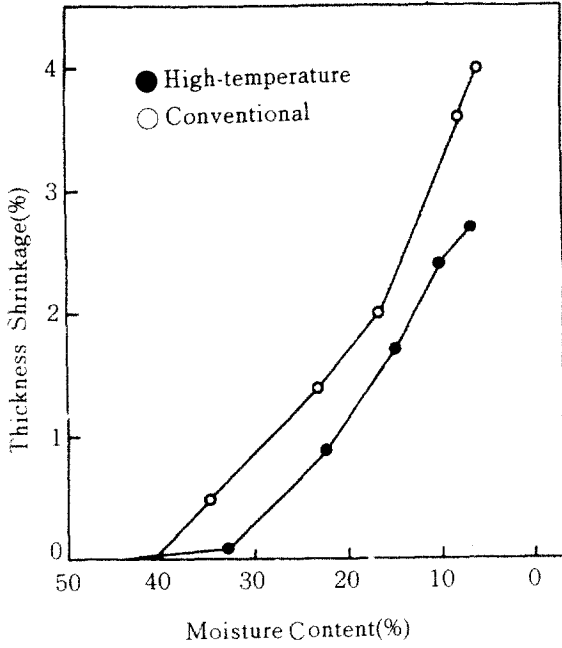


Fig. 9. Thickness shrinkage for *Pinus densiflora* dimension lumber.

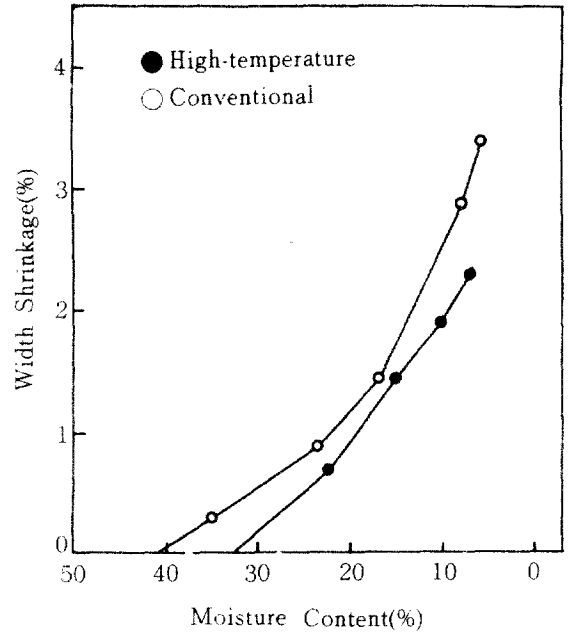


Fig. 11. Width shrinkage for *Pinus densiflora* dimension lumber.

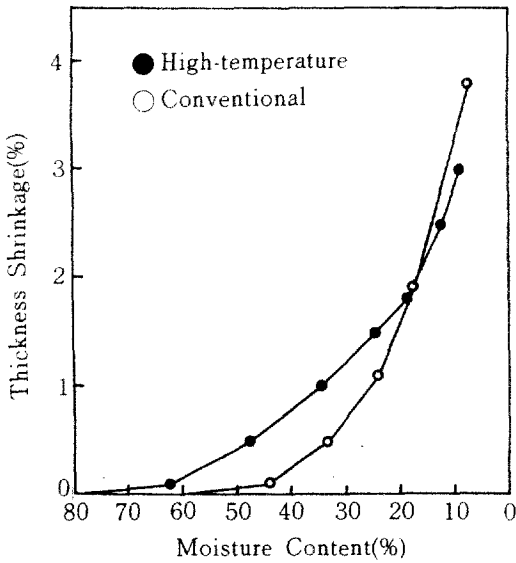


Fig. 10. Thickness shrinkage for *Pinus rigida* dimension lumber.

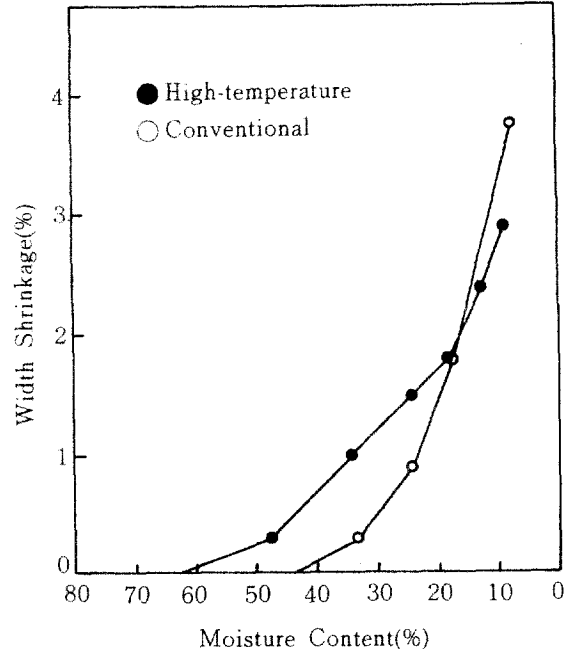


Fig. 12. Width shrinkage for *Pinus rigida* dimension lumber.

熱氣乾燥에서 소나무재의 두께수축율은 함수율 30%와 10%에서 각각 0.8%, 3.1%이었으며, 리기다소나무재의 경우 각각 0.7%, 3.3%로, 소나무재와 리기다소나무재에서 유사하였다.

열기건조에서 소나무재의 폭수축율은 함수율 30%와 10%에서 각각 0.5%, 2.5%이었으며, 리기다소나무재의 경우 각각 0.5%, 3.3%로 소나무재가 리기다소나무재보다 적었다.

소나무재와 리기다소나무재의 함수율 10%에서 두께수축 및 폭수축율은 고온건조재보다 다소 적었지만 차이는 크지 않았다.

#### 4.9 찌그러짐과 表面硬化

찌그러짐과 表面硬化의 발생은 표7과 같다.

고溫乾燥에서 소나무재의 찌그러짐의 평균은 0.8mm이었고, 리기다소나무재의 찌그러짐은 평균 0.7mm로 소나무재가 리기다소나무재 보다 다소 컸다. 고온건조에서 소나무재의 표면경화율은 5.4%이었으며, 리기다소나무재의 표면경화율은 15.1%로, 소나무재가 리기다소나무재보다 적었다.

Table 7. Collapse and casehardening for *Pinus densiflora* and *Pinus rigida* dimension lumber

Variables	High-temperature drying			Conventional kiln drying
	1st run	2nd run	3rd run	
<i>Pinus densiflora</i>				
	Avg. St. dv.	Avg. St. dv.	Avg. St. dv.	Avg. St. dv.
Collapse(mm)	0.79 0.63	0.79 0.44	0.73 0.46	0.80 0.58
Casehardening(%)	15.6 6.99	1.9 2.12	1.3 7.06	14.6 4.60
<i>Pinus rigida</i>				
Collapse(mm)	0.61 0.49	0.68 0.52	0.66 0.45	1.18 0.70
Casehardening(%)	25.9 7.13	10.3 5.80	9.1 7.69	14.3 7.80

熱氣乾燥에서 소나무재의 찌그러짐은 0.8mm이었으며, 리기다소나무재의 경우 1.2mm로 소나무재가 리기다소나무재보다 적었다.

열기건조에서 소나무재의 표면경화율은 14.6%이었으며, 리기다소나무재의 경우 14.3%로 양수종간에 차이가 없었다.

소나무재의 찌그러짐은 고온건조 및 열기건조에서 같았으며, 리기다소나무재의 경우 고온건조가 유의하게(1%수준) 적었다.

소나무재의 표면경화율은 고온건조가 유의하게(1%수준) 적었으며, 리기다소나무재의 경우 건조방법에 따른 차이가 없었는데, 양수종에서 표면경화는 경미하였다. 이는 Koch(1971)<sup>7)</sup>가 고온건조 및 열기건조에서 표면경화를 야기시키지 않는다고

보고한 내용과 일치하는 것이었다.

#### 5. 結 論

소나무와 리기다소나무 平小角材를 高溫乾燥한 후 乾燥時間과 乾燥缺陷을 조사하여, 熱氣乾燥의 結果와 比較分析하여 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 함수율 10%까지의 소나무재의 高溫乾燥時間은 19.9시간이었고 熱氣乾燥時間은 83.7시간이었으며, 리기다소나무재의 고온건조시간은 17.8시간이었고, 열기건조시간은 130.7시간이었다. 高溫乾燥時間은 熱氣乾燥시간보다 소나무재가 7.7배 리기다소나무재가 7.3배 만큼 短縮되었다.
2. 함수율 10%까지의 소나무재의 高溫乾燥速度는 2.75%/hr이었고 熱氣乾燥速度는 0.36%/hr이었으며, 리기다소나무재의 高溫乾燥速度는 3.38%/hr 이었고 熱氣乾燥速度는 0.46%/hr이었다.

3. 소나무와 리기다소나무의 高溫乾燥材의 含水率傾斜는 熱氣乾燥材보다 약간 急하였다.

4. 소나무와 리기다소나무의 고온건조재의 最大表面割裂은 熱氣乾燥材보다 심하였으나, 이들 수종의 最大橫斷面割裂은 건조방법에 따른 차이를 나타내지 않았다.

5. 소나무의 고온건조재의 内部割裂은 열기건조재보다 심하였으나, 리기다소나무의 고온건조재의 内部割裂은 열기건조재보다 적었다.

6. 소나무와 리기다소나무의 고온건조재의 捲어짐은 열기건조재보다 적었다.

7. 소나무재와 리기다소나무재의 찌그러짐과 表面硬化率은 경미하였다.

## Literature cited

1. Allen, C.F., and L.W. Campbell. 1867. U.S. patent No. 64,398.
2. Beard, J.N., H.N. Rosen, and B.A. Adesany. 1983. *Drying Technology An International Journal*: 117-140.
3. Fischer, W., and E. Czepek. 1941. Die Heisstrocknung von Weichholz in Electrobeheizten Trockenraumen. *Mittulungen Fachausschussberscht. Holzfragen*, Haft 30: 46 Berlin.
4. Herzberg, B.L., F.W. Taylor, and H.N. Rosen. 1983. Kiln characteristics can influence drying time and moisture uniformity in high-temperature dried lumber. *Proceedings of Western Dry Kiln Clubs Joint Meeting. Western Dry Kiln Clubs*.
5. \_\_\_\_\_, 1985. *Forest Prod. J.* 35(7): 34-35.
6. Koch, P. 1969. At 240°F Southern pine studs can be dried and steam-straightened in 24 hours. *Southern Lumberman*, vol. 219, No. 2723. 26-29.
7. \_\_\_\_\_, 1971. *Forest Prod. J.* 12(5): 17-24.
8. \_\_\_\_\_, 1972. *USDA Forest Serv. Agri. Hbk.* No. 420.
9. \_\_\_\_\_, 1974. *Forest Prod. J.* 24(3): 35-39.
10. \_\_\_\_\_, and W.L. Wellford, Jr. 1977. *Forest Prod. J.* 27(5): 39-47.
11. McCollum, M.P. 1986. *Forest Prod. J.* 36(3): 51-53.
12. Panow, S., and M.R. Nester. 1985. *Forest Prod. J.* 35(10): 51-55.
13. Price, E.W., and P. Koch. 1980. *Forest Prod. J.* 30(8): 41-47.
14. \_\_\_\_\_, 1981. *Wood and Fiber*. 13(2): 115-119.
15. Rosen H.N. 1979. Psychrometric relationship and equilibrium moisture content of wood above 212°F. *Proceedings of Wood Moisture Content-Temperature Relationships Symposium at Virginia Polytechnic Insitute and State University*.
16. \_\_\_\_\_, 1979. Energy requirements in high-temperature and conventional kilns. *Proceedings of a Symposium Held at New Albany, Indiana on High-temperature Drying of Hardwoods*.
17. \_\_\_\_\_, 1984. Theoretical developments in high-temperature drying of wood. *Proceedings of the North American Wood Drying Symposium. Mississippi Forest Products Sti. Lab. Mississippi State*.
18. \_\_\_\_\_, 1985. Lumber drying: Merging the old with the new. *Symposium on Forest Products Research International Achievements and the Future*. 22-26. April 1985 CSIR Conference Center Pretoria. Republic of South Africa.
19. Simpson, W.T., H.N. Rosen. 1981. *Wood and Fiber*. 13(3): 150-152.
20. Taylor, F.W. 1982. *Wood and Fiber*. 14(4): 246-253.
21. Williams, D.H. 1981. Internal checking in New Zealand grown radiata pine after high-temperature drying. *New Zealand Forest Service. Reprint 1441*.
22. \_\_\_\_\_, and J.A. Kininmonth. 1984. High-temperature kiln drying of radiata pine sawn timber. *FRI Bulletin No. 73. Forest Research Intitute, New Zealand Forest Service*.
23. Yao, J., and F. Taylor. 1979. *Forest Prod. J.* 29(8): 49-51.
24. 林業試験場, 1982. 木材工業ハンドブック. 丸善株式會社.