

리기다소나무의 乾燥抵抗을 이용한 乾燥스케줄 改良*1

李 京 燮*2 · 鄭 希 錫*2

Kiln Drying Schedule Modification for Pitch Pine Using Drying Resistance*1

Kyung Sub, Lee*2 · Hee Suk Jung*2

Summary

For the modification of kiln drying schedule, relations between drying resistance R and moisture content or drying times were found 2.5cm-and 5.0cm-thick pitch pine (*Pinus rigida* Mill.) board and dimension lumber by the conventional kiln drying schedule until the average moisture content was 10%. The results of this study were as follows.

1. Drying resistance increased curvilinearly as moisture content decreased, and was higher for dimension lumber than for board at a given moisture content.

The relationships between drying resistance and moisture content for the conventional kiln drying schedule and thickness of lumber were

1) $R_{2.5} = 6.795 \times 10^3 M^{-1.27**}$ for 2.5cm-thick board by the conventional kiln drying schedule.

3) $R_{5.0} = 5.206 \times 10^4 M^{-1.55**}$ for 5.0cm-thick dimension lumber by the conventional kiln drying schedule.

2. As drying time increased, moisture content decreased and drying resistance increased at the same time. Gradient of slope for dimension lumber was gentler than board.

3. The predicted drying times to 10% moisture content with the conventional kiln drying schedule were a little shorter than actual drying times with relatively small error.

4. It is necessary for the conventional kiln drying schedule to be modified to provide the desired final moisture content at minimum drying time with no significant degrade under severe drying conditions.

5. The kiln factors for 2.5cm-thick board and 5.0cm-thick dimension lumber with the conventional kiln drying schedule were 1.112, 1.136, respectively.

1. 緒 論

本材의 含水率이 감소함에 따라 乾燥缺陷을 최

대한 예방하면서 乾燥時間을 단축할 수 있도록 溫度와 濕度를 적절하게 정해주는 乾燥스케줄은 樹種, 心·邊材, 목재두께 등에 따라 다르며 여러

*1. 接受 1988年 3月 4日 Received March 4, 1988.

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

종류가 있다.

그러나 時間스케줄이나 含水率스케줄 등을 비롯한 현재 사용되고 있는 대부분의 乾燥스케줄들은 실험실이나 공장에서의 많은 시행착오를 거쳐 개발된 것으로 완벽한 것이 아니며, 목재의 含水率이 目標含水率보다 높거나 낮은 상태에서 건조가 종료될 가능성이 있으며 이 경우 건조에 실제 필요한 시간과 차이가 생기고 乾燥缺陷이 발생할 가능성이 높아지므로 乾燥材의 品質向上과 에너지 절약의 차원에서 乾燥技術의 개발이 요구되고 있으며, 근래에 이르러 乾燥스케줄 改良에 관한 여러 연구가 진행되어 왔다.

乾燥스케줄을 改良하는데 있어 濕度固定法이나 平衡含水率固定法 또는 平衡含水率變化法 등의 관행적인 방법들과는 달리 乾燥抵抗(drying resistance)을 측정하여 乾燥스케줄 改良의 기초자료로 이용하고자 하였다.

乾燥스케줄의 각 조건은 단위 시간당 임의의 乾燥推進力(drying force)을 제공하며, 乾燥스케줄에 의해 제공된 全乾燥抵抗(total drying resistance)이 목재 건조에 실제 필요한 양과 같을 때 목재는 희망하는 任意 目標含水率에 이를 것이다.

乾燥推進력이 습윤한 목재표면과 棧積을 통과하는 熱氣 사이의 蒸氣壓差異와 같다면 임의의 初期含水率에서 임의의 最終含水率까지 乾燥에 요하는 乾燥抵抗을 계산할 수 있고, 이로써 乾燥抵抗과 乾・濕球溫度, 乾燥時間, 含水率 상호간의 영향 관계를 알 수 있어 乾燥스케줄 改良에 이용할 수 있으리라 본다.

리기다소나무는 우리나라 산림녹화를 성공케 한 수종의 하나이나, 이용도 증진을 위한 適正乾燥스케줄의 자체 개발은 부재한 실정이다.

본 研究에서는 Bramhall이 제시한 乾燥스케줄 改良法을 적용하여 두께 2.5cm 板材와 5.0cm 半小角材에 각각의 慣行乾燥스케줄을 적용하여 목재 두께별 乾燥스케줄에 따른 乾燥抵抗을 측정하고 乾燥時間에 따른 含水率과 乾燥抵抗의 관계, 含水率과 乾燥抵抗의 관계를 구명함으로써 목재 두께에 따라 적용한 慣行乾燥스케줄의 適正 여부를 檢定함과 아울러 乾燥스케줄 改良의 기초자료를 제공하고자 실시하였다.

2. 研究史

Bramhall(1976, 1979)¹⁾은 木材內 水分 및 水蒸

氣擴散은 蒸氣壓傾斜에 비례함을 보고하였으며, Barich(1980)²⁾은 乾燥 第2段階나 3段階에서의 乾燥速度도 蒸氣壓傾斜에 비례한다고 보고하였다.

이러한 乾燥機構로서의 擴散에 기초하여, Bramhall(1975, 1976)³⁾은 임의 含水率에서 목재의 乾燥速度는 乾球溫度와 濕球溫度에서의 蒸氣壓 差異(P)에 비례하며, 擴散 조절인자인 乾燥抵抗(R)은 Pdt/dM 으로 계산하여 이에 기초한 乾燥스케줄 改良에 관한 이론적인 방법에 대해 연구하였으며, 캐나다產 western white spruce 의 2 수종의 두께 2인치 목재에 대해 乾燥抵抗과 含水率과의 관계를 조사하였다.

Barich(1980)²⁾은 乾燥스케줄에 대해 기술하면서 乾燥抵抗을 이용한 乾燥스케줄 改良을 비롯한 몇가지 乾燥스케줄 改良法에 대해 보고하였다.

乾燥抵抗을 이용한 乾燥스케줄의 적용 가능한 乾燥스케줄 범위에 대해 Bramhall(1975)³⁾과 Bramhall 등(1976)⁴⁾은 이 乾燥스케줄 改良法은 관행열기건조나 elevated-temp. drying에 적용 가능하며, mass flow가 주요 水分移動工程이 되는 高溫乾燥에서는 유효성이 감소함을 보고하였다.

Gorvad(1979)⁵⁾와 Gorvad 등(1979)⁶⁾은 incense cedar pencil stat를 공시하여 乾燥抵抗을 측정하고 乾燥損傷의 조절을 위한 乾燥스케줄 severity indices가 乾燥損傷에 미치는 영향에 대해 보고하였다.

목재두께와 乾燥스케줄의 強・弱이 乾燥抵抗에 미치는 영향에 대해 Jung 등(1984, 1985)⁷⁾은 美松 板材의 세가지 두께와 乾燥스케줄의 두가지 強・弱별로 적용하여 목재두께에 따른 含水率別 乾燥抵抗은 목재두께가 두꺼울수록 컸으며, 동일 두께에서 약한 乾燥스케줄과 강한 乾燥스케줄간의 乾燥抵抗의 差異는 미미하였음을 보고하였다.

3. 材料 및 方法

3.1. 供試材料

3.1.1. 供試原木

本 研究에서는 서울大學校 農科大學 樹木園에서 自生하는 리기다소나무(*Pinus rigida* Mill.) 중 에서 樹幹이 通直하고 枝下高가 높은 立木 10本을 선정하여 根株부분 20cm 정도를 제거하고 상부로 향하면서 材長 2.3m 인 통나무를 각각 3本씩 造材

하여이 중 말구직경이 20cm 이상되는 20本을 供試原木으로 선정하였다.

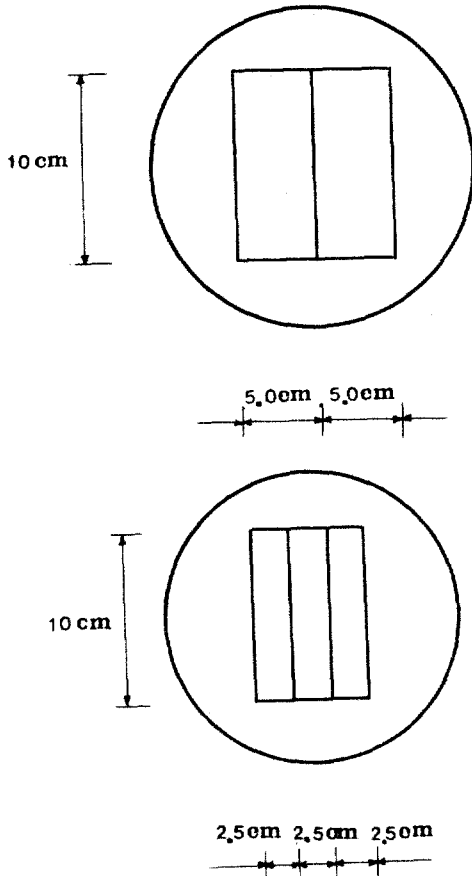


Fig. 1. Sawing patterns of sample logs.

Table 1. Initial MC and Green volume Sp. Gr. of drying specimens.

Thickness (cm)	Sp. Gr.		Initial MC	
	Avg.	Std.dev.	Avg.	Std.dev.
2.5	0.49	0.02	65.5	7.8
5.0	0.51	0.03	51.8	9.9

供試原木의 횡단면 건조와 횡단면 할렬을 방지하기 위해 조재 즉시 은분페인트로 엔드코팅을 2회 실시하였다.

3.1.2. 供試板材와 平小角材

供試原木을 그림 1의 방법에 따라 폭 10cm, 두께 2.5cm의 板材와 5.0cm의 平小角材로 製材한 후, 웅이와 둥근모를 적게 포함하는 재료를 두께별로 각각 17本, 34本씩 선정하였다.

3.1.3. 試驗片 採取

3.1.3.1. 比重과 初期含水率試驗片

比重과 初期含水率試驗片은 그림 2의 방법에 따라 乾燥試驗片의 양단에서 길이 2.5cm로 採取하였다.

목재 두께별로 구한 初期含水率과 生材比重은 표 1과 같다.

3.1.3.2. 乾燥試驗片

供試板材로부터 그림 2의 방법에 따라 폭 10cm, 길이 60cm, 두께 2.5cm인 板材 50개, 두께 5cm인 平小角材 84개를 採取하였다.

乾燥試驗片의 횡단면 건조와 횡단면 할렬을 방지하기 위해 採取 즉시 은분페인트로 엔드코팅을 2회 실시하였다.

3.1.3.3. 最終含水率試驗片

最終含水率試驗片은 乾燥終了 후 乾燥試驗片의 양 횡단면에서 材長의 1/3과 2/3가 되는 部位에서 길이 2.5cm로 採取하였다.

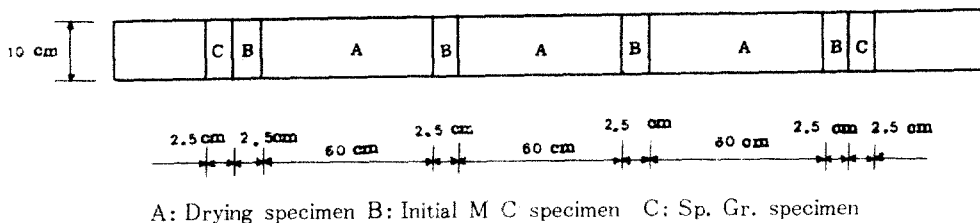
3.1.4. 實驗器機

3.1.4.1. 乾燥室

熱氣乾燥에 사용된 乾燥室은 內部容積 117×65×47cm이고, 풍속 2m/sec, 最高濕度 250℃, 乾濕球溫度 調節可能範圍 ±0.5℃인 內部送風機型 小型人工乾燥室을 사용하였다.

3.1.4.2. 其他器機

1) 乾燥器: 比重과 含水率試驗片의 건조는 溫度 103±2℃를 유지하는 오븐(oven)을 사용하



A: Drying specimen B: Initial M C specimen C: Sp. Gr. specimen

Fig. 2. Preparation of Green volume Sp. Gr., initial MC and drying specimens.

였다.

2) 直示天秤: 乾燥試驗片의 무게측정은 精密度 1g 인 直示天秤을, 比重과 含水率試驗片의 무게측정은 精密度 0.01g 인 直示天秤을 사용하였다.

3.2. 實驗方法

3.2.1. 棧積

두께 1.5cm, 폭 3cm의 棧木을 사용하여 棧積하였으며, 균일한 건조를 위해 두께 2.5cm 乾燥試驗片 棧積은 건조실 양측벽과 33cm의 간격을 두었고, 5.0cm 乾燥試驗片 棧積은 23cm의 간격을 두었다.

3.2.2. 乾燥스케줄

두께 2.5cm 乾燥試驗片의 건조에는 Rasmussen¹¹⁾이 제시한 표 2의 乾燥스케줄(BS11-BK5)을, 두께 5.0cm 乾燥試驗片의 건조에는 표 2의 乾燥스케줄(AK11-BK6)을 적용하였다.

3.2.3. 乾燥中含水率

最終含水率에 의해 산출된 乾燥試驗片의 全乾 무게와 乾燥前과 乾燥中 12시간 간격으로 측정된 乾燥試驗片의 무게로 乾燥中含水率을 구하였다.

3.2.4. 乾燥抵抗

最終含水率이 10% 정도에 도달할 때까지 건조를 실시하여 Bramhall¹²⁾이 제시한 식 (1)에 의해 목재두께별로 乾燥抵抗을 계산하였으며, 含水率과 乾燥抵抗의 關係, 乾燥時間에 따른 含水率과 乾燥抵抗의 關係를 구하였다.

Table 2. Conventional kiln schedule for 2.5cm- and 5.0cm-thick *Pinus rigida* board and dimension lumber.

Thickness (cm)	Drying time (hr.)	D.B.T. (°C)	W.B.D. (°C)	W.B.T. (°C)
2.5	0--25	74	6	68
	25--49	77	9	68
	49--69	79	13	66
5.0	0--13	74	8	66
	13--25	77	8	69
	25--37	79	11	68
	37--49	82	11	71
	49--61	88	14	74
	61--73	88	14	74
	73--85	93	17	76

*Included 1-hr. heating period.

$$R = \frac{(P_d - P_w) \Delta t}{\Delta MC} \dots \dots \dots (1)$$

R: 乾燥抵抗(mb-hr. / % MC)

P_d: 乾燥溫度의 蒸氣壓(mb)

P_w: 濕球溫度의 蒸氣壓(mb)

Δt: 乾燥時間간격(hr.)

ΔMC: 乾燥段階別 감소 含水率(%)

3.2.5. 乾·濕球溫度의 蒸氣壓

乾·濕球溫度의 蒸氣壓은 표 3을 이용하였다.

Table 3. Vapor pressure of water at temperature from 30 to 119°C(mb).*

Temp. (°C)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
30	42	45	48	50	53	56	59	63	66	70
40	74	78	82	91	96	101	106	112	114	117
50	123	130	136	143	150	157	165	173	181	190
60	199	209	218	229	239	250	261	273	286	298
70	312	325	339	354	370	385	402	419	436	455
80	473	493	513	534	556	578	601	625	649	675
90	701	728	756	785	815	845	877	909	943	978
100	1013	1050	1088	1127	1167	1208	1251	1294	1339	1385
110	1432	1482	1532	1583	1630	1691	1747	1804	1963	1924

* Adapted from "Vapor pressure of water at temperature from--15 to 374°C", Handbook of Chemistry and Physics, 31st edi., pp. D143~144.

3.2.6. 慣行乾燥스케줄 檢定

목재두께별로 적용한 慣行乾燥스케줄에 따른 實際乾燥時間(actual drying time)과 推定乾燥時間(predicted drying time)과의 誤差 정도를 비교하여 적용한 乾燥스케줄의 適正 여부를 檢定하였다.

3.2.7. Kiln factor

乾燥스케줄의 乾·濕球溫度나 乾燥時間 외에 乾燥速度에 영향하는 인자들, 材間風速, 乾燥室간의 高유의 차이, 그리고 棧木두께 등으로 인해 實際乾燥抵抗(actual drying effort)과 계산된 乾燥抵抗(calculating drying effort)간에 차이를 나타내는데, 이 차이를 나타내는 kiln factor는 식 (2)에 의해 목재두께별로 적용한 慣行乾燥스케줄에 따

라 kiln factor를 구한다.

$$\text{kiln factor} = \frac{\text{實際乾燥抵抗}}{\text{계산된 乾燥抵抗}} \dots\dots\dots (2)$$

4. 結果 및 考察

4.1. 含水率과 乾燥抵抗의 關係

목재두께 2.5cm 板材와 5.0cm 平小角材에 慣行乾燥스케줄을 적용하여 乾燥할 때의 일정 乾燥段階別 乾燥抵抗은 乾燥段階別 감소 含水率을 이용하여 구한 결과 표 4, 5와 같고, 含水率과 乾燥抵抗의 關係식은 표 6과 같은 回歸式으로 나타낼 수 있다.

Table 4. Sample calculation of drying resistance of 2.5cm-thick *Pinus rigida* board.

Time (hr.)	D.B.T. (°C)	W.B.T. (°C)	Pd (mb)	Pw (mb)	Pdt (mb-hr.)	ΔMC (%)	R (mb-hr./%MC)
12	74	68	370	286	1008	17.3	58.3
24	74	68	370	286	1008	12.9	78.1
36	77	68	419	286	1596	15.6	102.3
48	77	68	419	286	1596	8.7	183.4
60	79	66	455	261	2328	3.5	665.1

Table 5. Sample calculation of drying resistance of 5.0cm-thick *Pinus rigida* dimension lumber.

Time (hr.)	D.B.T. (°C)	W.B.T. (°C)	Pd (mb)	Pw (mb)	Pdt (mb-hr.)	ΔMC (%)	R (mb-hr./%MC)
12	74	66	370	261	1308	12.4	105.5
24	77	66	419	298	1452	6.6	220.0
36	79	68	455	286	2028	5.3	332.6
48	82	71	513	325	2256	5.1	442.7
60	88	74	649	370	3348	6.2	540.0
72	88	74	649	370	3348	3.5	956.6
84	93	76	785	402	4596	2.8	1641.4

Table 6. Final MC and regression equations of moisture content and drying resistance for 2.5cm-and 5.0cm thick *Pinus rigida* board and dimension lumber.

Thickness(cm)	Final MC	Equation ^{a,b}	r ²
2.5	10.0	$R = 6.795 \times 10^3 \bar{M}^{-1.27^{b^*}}$	0.94
5.0	9.9	$R = 5.206 \times 10^4 \bar{M}^{-1.55^{b^*}}$	0.91

^aM=average MC (%).

^b** = significant at 1% level.

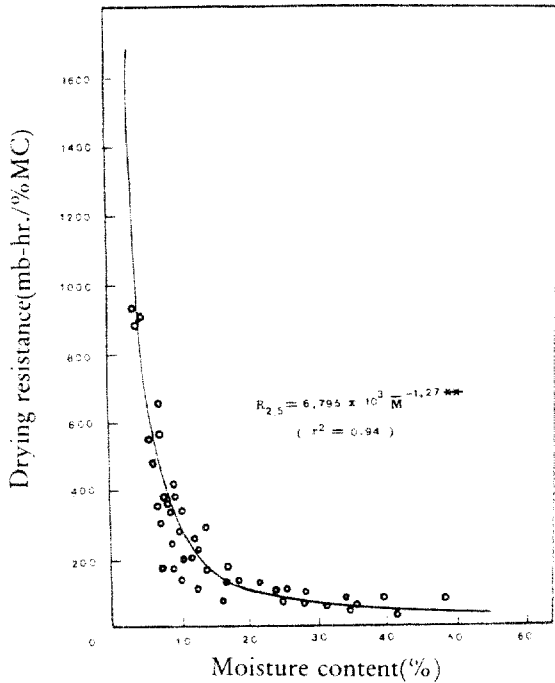


Fig. 3. Relationship between MC and drying resistance of 2.5cm-thick *Pinus rigida* board.

乾燥抵抗은 그림 3, 4에서 보는 바와 같이含水率在 감소할수록 曲線의 形式으로 증가하였으며, 동일含水率 수준에서 板材의 乾燥抵抗은 平小角材의 乾燥抵抗보다 적었고, 板材와 平小角材의 乾燥抵抗은 각각 含水率15%와 24% 수준까지는 완만히 증가하였다가 그 이후부터 급격히 증가하였다.

목재두께별 적용한 慣行乾燥스케줄에 따른 任意含水率에서의 全乾燥抵抗(total drying resistance)는 두께 2.5cm 板材와 5.0cm 平小角材別로 구한 含水率과 乾燥抵抗의 回歸式을 이용하여 계산하였으며, 그 값은 표 7, 8과 같다.

本 研究에서 구한 리기다소나무재의 含水率과 乾燥抵抗의 관계는 Bramhall(1975)¹⁾이 western white spruce, alpine fir, 그리고 lodgepole pine의 두께 2인치 목재의 含水率과 乾燥抵抗에 관한 연구에서 보고한 含水率과 乾燥抵抗의 관계, Jung 등(1985)²⁾이 美松의 乾燥스케줄 改良에 관한 연구에서 발표한 목재두께 1.0, 1.5 및 2.0인치別로 구한 含水率과 乾燥抵抗의 관계와 유사한 경향을 보였다.

本 研究의 목재두께별 乾燥中 同一含水率을 기준으로 한 乾燥抵抗을 다른 연구결과와 비교해 보면 乾燥中 含水率 30%의 경우 두께 2.5cm 리기다

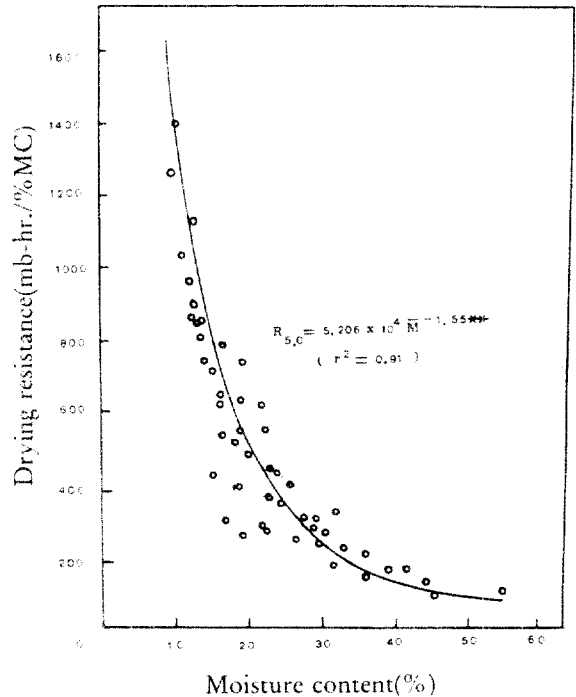


Fig. 4. Relationship between MC and drying resistance of 5.0cm-thick *Pinus rigida* dimension lumber.

소나무 板材는 10046mb-hr.로서 Jung 등이 보고한 美松의 2151mb-hr.보다 컸고, 두께 5.0cm 리기다소나무 平小角材는 14579mb-hr.이고, Bramhall이 보고한 수종 중에 alpine fir는 13322mb-hr., lodgepole pine은 6125mb-hr., western white spruce는 3137mb-hr., Jung 등이 보고한 美松은 4535mb-hr.로 나타나는 등 수종과 목재두께 등에 따라 변하며, 本 研究에서 공시한 리기다소나무재의 乾燥抵抗은 Bramhall이나 Jung 등이 공시한 모든 수종의 것보다 컸음을 알 수 있다. 이는 리기다소나무의 乾燥速度가 이들 수종의 乾燥速度보다 느린데 기인된 것으로 생각된다.

목재두께별로 각각의 慣行乾燥스케줄을 적용하여 任意 初期含水率에서 任意 最終含水率까지 乾燥하는데 필요한 乾燥抵抗은 표 7, 8에 해당하는 最終含水率의 乾燥抵抗 값과 初期含水率의 乾燥抵抗 값의 차로 계산할 수 있다.

4.2. 乾燥時間에 따른 含水率과 乾燥抵抗의 關係

두께 2.5cm 板材와 5.0cm 平小角材의 乾燥中 含水率 30%에서 각각 乾燥時間은 24.6시간과 38.1

Table 7. Total drying resistance(mb-hr.) for 2.5cm-thick *Pinus rigida* board at various MCs.

MC*	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
10	13513	13479	13443	13408	13373	13338	13304	13271	13237	13204
11	13172	13140	13108	13077	13046	13015	12984	12954	12925	12895
12	12866	12837	12809	12781	12753	12725	12698	12671	12644	12617
13	12591	12565	12539	12514	12488	12463	12439	12414	12390	12366
14	12342	12318	12294	12271	12248	12225	12203	12180	12158	12136
15	12114	12092	12071	12049	12028	12007	11986	11966	11945	11924
16	11905	11885	11865	11845	11825	11806	11787	11768	11749	11730
17	11711	11692	11674	11656	11638	11619	11602	11584	11567	11549
18	11532	11515	11498	11481	11464	11449	11430	11414	11397	11381
19	11365	11349	11334	11317	11301	11285	11270	11254	11239	11224
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
20	11209	11062	10924	10793	10670	10553	10442	10336	10235	10139
30	10046	9958	9873	9791	9712	9637	9564	9493	9425	9359
40	9295	9234	9174	9116	9059	9004	8951	8899	8849	8800
50	8751	8705	8660	8615	8572	8530	8488	8448	8408	8369
60	8331	8294	8258	8223	8188	8153	8120	8087	8055	8023
70	7992	7961	7931	7902	7873	7844	7816	7789	7762	7735
80	7709	7683	7658	7633	7608	7584	7560	7536	7513	7490
90	7468	7445	7423	7402	7380	7359	7339	7318	7298	7278

*Decimal fraction at the top of the table are intended to be added to the whole numbers in the extreme left-hand column as needed. Thus, in the first row, the drying resistance for an MC of 10.1% is 13479.

시간이고, 乾燥抵抗은 90.4mb-hr./% MC와 267.3mb-hr./% MC이었으며, 乾燥中 含水率 15%에서 각각 乾燥時間은 44.7시간과 73.8시간, 乾燥抵抗은 218.0mb-hr./% MC와 782.6mb-hr./% MC로 나타나는 등 乾燥時間이 증가할수록 含水率は 감소함과 동시에 乾燥抵抗은 증가하였다.

또한 두께 5.0cm 平小角材의 乾燥時間 증가에 따른 含水率 감소曲線과 乾燥抵抗 증가曲線의 변화는 두께 2.5cm 板材의 경우보다 완만하였다.

이상과 같은 결과는 Jung 등(1984)¹¹⁾이 美松의 乾燥스케줄 改良에 관한 연구에서 보고한 美松의 목재두께 1.0, 1.5 및 2.0 인치별로 구한 乾燥時間에 따른 含水率과 乾燥抵抗의 관계와 유사한 경향을 보였으며, 이로써 목재두께가 두꺼울수록 乾燥抵抗이 커서 乾燥速度가 느리며, 목재두께가 얇을수록 乾燥抵抗이 작아서 乾燥速度가 빠르다는 乾燥特性을 乾燥抵抗의 측면에서 관찰할 수 있었다.

4.3. 慣行乾燥스케줄 檢定

목재두께별로 적용한 慣行乾燥스케줄에 따른 實際乾燥時間(actual drying time)과 推定乾燥時間(predicted drying time)은 표 9와 같이 初期含水率 65.5%인 두께 2.5cm 板材의 最終含水率 10.0%까지의 推定乾燥時間은 48.6시간, 初期含水率 51.8%인 두께 5.0cm 平小角材의 最終含水率 9.9%까지의 推定乾燥時間은 78.1시간으로 實際乾燥時間과 각각 -6.5%, -7.0%의 비교적 작은 誤差를 나타내며 實際乾燥時間보다 모두 작았다.

Jung 등(1985)¹²⁾은 美松의 목재두께별 적용한 乾燥스케줄 强·弱에 따른 推定乾燥時間은 實際乾燥時間과 각각 두께 1인치 재목은 5.9%와 -1.7%, 두께 1.5인치 재목은 -0.3%와 0.1%, 두께 2인치 재목은 2.2%와 -5.9%의 오차를 나타냈음을 보고하였고, Bramhall(1975, 1976)¹³⁾은 두께 2인치의 alpine fir 경우 -3.0~2.6%, lodge-

Table 8. Total drying resistance(mb-hr.) for 5.0cm-thick *Pinus rigida* dimension lumber at various MCs.

MC	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
10	26677	26532	26388	26247	26108	25971	25836	25703	25572	25442
11	25315	25189	25065	24943	24822	24704	24586	24470	24356	24243
12	24132	24022	23914	23806	23701	23596	23493	23391	23290	23191
13	23093	22996	22900	22805	22711	22618	22527	22436	22346	22258
14	22170	22084	21998	21913	21829	21747	21664	21583	21503	21423
15	21345	21267	21190	21114	21038	20963	20883	20816	20743	20672
16	20600	20530	20460	20391	20323	20255	20188	20120	20055	19990
17	19925	19861	19797	19734	19672	19610	19548	19488	19427	19367
18	19308	19249	19191	19134	19076	19019	18963	18907	18852	18797
19	18743	18688	18635	18582	18529	18477	18425	18373	18322	18271
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
20	18221	17739	17291	16873	16483	16117	15773	15449	15143	14853
30	14579	14318	14071	13834	13609	13394	13188	12991	12802	12620
40	12445	12278	12116	11960	11810	11665	11525	11389	11258	11131
50	11008	10889	10773	10661	10552	10446	10343	10243	10145	10050
60	9958	9868	9780	9694	9610	9529	9449	9371	9295	9221
70	9148	9077	9008	8940	8873	8808	8744	8681	8620	8560
80	8501	8443	8386	8330	8275	8222	8169	8117	8066	8016
90	7967	7919	7872	7825	7779	7734	7689	7646	7603	7560

*Decimal fraction at the top of the table are intended to be added to the whole numbers in the extreme left-hand column as needed. Thus, in the first row, the drying resistance for an MC of 10.1% is 26532.

pole pine 경우 -9.2~6.5%, western white spruce 경우 -5.0~10.0%의 오차를 나타냈다고 보고하면서 實際乾燥時間과 推定乾燥時間간의 이 같은 오차는 목재자체의 乾燥特性 차이, 또는 적용한 乾燥스케줄에 따라 발생할 수 있는 mass-flow 요소 등의 영향으로 인해 존재하게 된다고 설명한 바 있다.

한편, 乾燥中の 乾燥缺陷은 거의 발생하지 않았는데 이는 적용한 乾燥스케줄이 慣行乾燥스케줄 중에서 약한 乾燥條件을 적용하였기 때문이다.

이상과 같은 결과에 의하면 목재두께별로 적용한 慣行乾燥스케줄들은 비교적 適正한 것으로 생각되나, 乾燥缺陷이 거의 발생하지 않았다는 점에서 좀더 강한 乾燥條件을 적용하여 심한 乾燥缺陷을 야기하지 않으면서 乾燥時間을 단축할 수 있는 乾燥스케줄로 改良할 필요가 있었다.

4.4. kiln factor

목재두께별 적용한 慣行乾燥스케줄에 따른 kiln factor는 두께 2.5cm 板材의 경우 1.112, 두께 5.0cm 平小角材의 경우 1.136이었다.

Bramhall(1976)¹⁾은 alpine fir, lodgepole pine 그리고 western white spruce의 두께 2인치 목재의 含水率과 乾燥抵抗에 관한 연구에서 kiln factor는 alpine fir는 1.0844이고, lodgepole pine은 1.1463이며, western white spruce는 1.0205로 유사한 경향을 나타내었다.

本 研究에서 리기다소나무 두께 2.5cm 板材 및 5.0cm 平小角材의 乾燥中 含水率과 乾燥抵抗의 관계가 구명됨으로서 乾燥스케줄의 설정과 동시에 kiln factor를 이용하여 乾燥時間의 推定과 아울러 乾燥스케줄 改良의 기초자료로 이용할 수 있다.

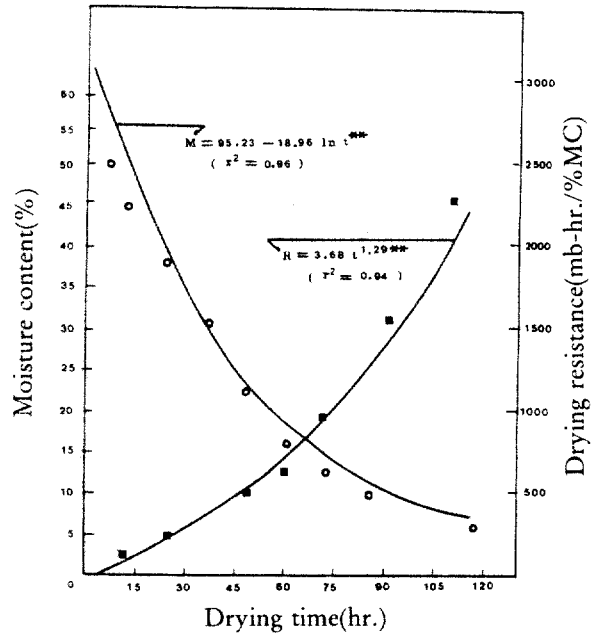
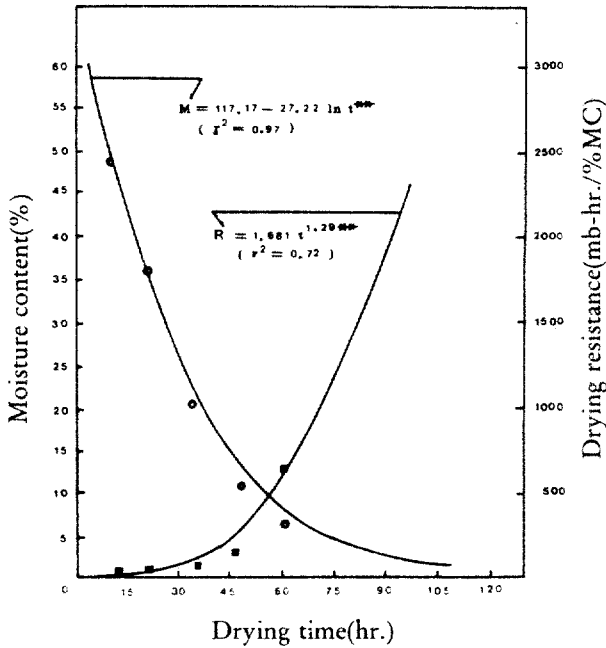


Fig. 5. Drying resistance and MC as function of drying time for the schedule of 2.5cm-thick *Pinus rigida* board.

Fig. 6. Drying resistance and MC as function of drying time for the schedule of 5.0cm-thick *Pinus rigida* dimension lumber.

Table 9. Comparison of predicted and actual drying times of 2.5cm-and 5.0cm-thick *Pinus rigida* board and dimension lumber.

Variable	Thickness(cm)	
	2.5	5.0
fRdM of initial MC(mb-hr.)	8134	10243
fRdM of final MC(mb-hr.)	13513	26825
Net fRdM(mb-hr.)	5379	16582
Actual fPdt(mb-hr.)	5984	18836
Actual drying time(hr.)	52	84
Predicted drying time(hr.)	48.6	78.1
Error(hr.)	-3.4	-5.9
Error(%)	-6.5	-7.0

5. 結 論

리기다소나무의 乾燥스케줄 改良을 위해 목재 두께별 慣行乾燥스케줄을 적용하여 건조한 후 含水率과 乾燥抵抗의 관계, 乾燥時間에 따른 含水率과 乾燥抵抗의 관계를 측정 한 결과는 다음과 같다.

1. 含水率과 乾燥抵抗의 관계는 含水率이 감소할수록 乾燥抵抗은 曲線的으로 증가하였으며, 乾燥中 含水率이 동일한 경우 乾燥抵抗은 平小角材가 板材보다 컸다.

목재두께별 적용한 慣行乾燥스케줄에 따른 含水率과 乾燥抵抗의 관계는 다음과 같다.

1) 두께 2.5cm 板材의 慣行乾燥스케줄에 따른 乾燥抵抗

$$R_{2.5} = 6.795 \times 10^3 M^{-1.27**}$$

2) 두께 5.0cm 平小角材의 慣行乾燥스케줄에 따른 乾燥抵抗

$$R_{5.0} = 5.206 \times 10^4 M^{-1.33**}$$

2. 乾燥時間에 따른 含水率과 乾燥抵抗의 관계는 乾燥時間이 증가할수록 含水率은 감소함과 동시에 乾燥抵抗은 증가하였으며, 平小角材가 板材보다 曲線變化가 완만하였다.

3. 初期含水率 65.5%인 두께 2.5cm 板材 最終含水率 10.0%까지의 推定乾燥時間은 48.6시간, 初期含水率 51.8%인 두께 5.0cm 平小角材의 最終含水率 9.9%까지의 推定乾燥時間은 78.1시간으로 實際乾燥時間과 각각 -6.5%, -7.0%의 비교적 작은 誤差를 나타내며 實際乾燥時間보다 모두 작았다.

4. 목재두께별로 적용한 慣行乾燥스케줄들은 좀더 강한 乾燥條件을 적용하여 심한 乾燥缺陷을 야기하지 않으면서 최소의 시간에 원하는 最終含水率에 도달하도록 改良할 필요가 있다.

5. kiln factor는 두께 2.5cm 板材의 경우 1.112, 두께 5.0cm 平小角材의 경우 1.136이었다.

6. 摘要

리기다소나무(*Pinus rigida* Mill)의 乾燥스케줄 改良을 위해 두께 2.5cm 板材와 5.0cm 平小角材를 공시하여 각각 慣行乾燥스케줄을 적용하여 最終含水率 10% 정도까지 乾燥하고 含水率과 乾燥抵抗의 관계, 乾燥時間에 따른 含水率과 乾燥抵抗의 관계를 측정된 결과는 다음과 같다.

1. 含水率과 乾燥抵抗의 관계는 含水率が 감소할수록 乾燥抵抗은 曲線的으로 증가하였으며, 乾燥中 含水率が 동일한 경우 乾燥抵抗은 平小角材가 板材보다 컸다.

목재두께별 적용한 慣行乾燥스케줄에 따른 含水率과 乾燥抵抗의 관계는 다음과 같다.

1) 두께 2.5cm 板材의 慣行乾燥스케줄에 따른 乾燥抵抗

$$R_d = 6.795 \times 10^4 M^{-1.233}$$

2) 두께 5.0cm 平小角材의 慣行乾燥스케줄에 따른 乾燥抵抗

$$R_d = 5.206 \times 10^4 M^{-1.233}$$

2. 乾燥時間에 따른 含水率과 乾燥抵抗의 관계는 乾燥時間이 증가할수록 含水率は 감소함과 동시에 乾燥抵抗은 증가하였으며, 平小角材가 板材보다 曲線變化가 완만하였다.

3. 含水率 10%까지의 慣行乾燥스케줄에 따른 推定乾燥時間은 비교적 작은 誤差를 나타내며 實際乾燥時間보다 작았다.

4. 목재두께별로 적용한 慣行乾燥스케줄들은 좀더 강한 乾燥條件을 적용하여 심한 乾燥缺陷을 유발하지 않으면서 최소의 시간에 원하는 最終含水率에 도달하도록 改良할 필요가 있다.

5. 慣行乾燥스케줄에 따른 kiln factor는 두께 2.5cm 板材의 경우 1.112이었으며, 두께 5.0cm 平小角材의 경우 1.136이었다.

Literature Cited

1. Bachrich, J.L. 1980. Dry Kiln Handbook.

- H.A. Simons (International) Ltd. 289-300.
2. Bramhall, G. 1975. Calculating Kiln Schedule Changes. Canadian Forest Industries 95(9).
3. _____ . 1976. Evaporation rate during "first stage" of lumber drying. Wood Science 8(1); 78-92.
4. _____ . 1976. Semi-Emperical Method to Calculate Kiln-Schedule Modification for Some Lumber Species. Wood Science 8(4): 213-222.
5. _____ . 1976. Fick's Law and Bound-Water Diffusion. Wood Science 8(3): 153-161.
6. _____ . 1979. Mathematical Model for Lumber Drying. I. Principle Involved. Wood Science 12(1); 14-21.
7. _____ , and R.W. Wellwood. 1976. Kiln Drying of Western Canadian Forest Service, Western Forest Products Lab. Information Report VP-X-159.
8. Cech, M.Y., and F. Pfaff. 1980. Kiln Operator's Manual for Eastern Canada Forintek Canda Corp., Eastern Forest Products Lab. Special Publification SP 504 ER.
9. Gorvad, M.R., and D.G. Arganbright. 1979. Development of Kiln Drying Schedule Severity Indices for Degrade Control Part 1; Theoretical Development. Wood Science and Technology. 13.
10. _____ . 1979. Development of Kiln Drying Schedule Severity indices for Degrade Control. Part 2; Experimental Results. Wood Science and Technology. 13.
11. Jung, H.S., C.J. Kozlik, and H. Resch. 1984. Study on Kiln-Schedule Modification for Douglas Fir. Mogjae-gonghak 12(1); 31-37.
12. _____ . 1985. Drying resistance of three thickness of Douglas-fir lumber under mild and severe kiln schedules. Forest Prod. J. 36(6): 73-77.
13. Koch, P. 1972. Utilization of Southern Pine. Vol. II. Agriculture Handbook No. 420.
14. Rassmussen, E.F. 1961. Dry Kiln Operator's Manual. USDA. Agriculture Handbook No. 188.