목재공학 29(1): 1~8, 2001
Mokchae Konghak 29(1): 1~8, 2001

가열판 압체식 진공건조에서 침엽수 제재두께와 건조속도 및 건조시간계수의 관계*1

정희석*2 · 이준호*2 · 강 욱*2 · 이남호*3

Relationship between Softwood Lumber Thicknesses and Drying Rate and Drying Time Factor in Vacuum-Press Drying*1

Hee-Suk Jung*2 · Jun-Ho Lee*2 · Wook Kang*2 · Nam-Ho Lee*3

요 약

소나무, 잣나무, 낙엽송과 웨스턴 햄록의 5두께(3, 5, 7, 9 및 11cm) 제재를 3가지 종류의 건조스케줄을 적용한 가열판 압체식 진공건조에서 건조중 함수율, 제재두께와 건조속도의 관계, 제재두께와 건조시간계수의 관계 등을 구명한 결과에서 제재두께, 초기함수율 및 건조시간에 따른 건조중 함수율을 추정할 수 있었다. 그리고 함수율 30%에서 15% 범위에서 평균 건조속도는 웨스턴 햄록이 가장 컸고 다음은 소나무, 잣나무, 낙엽송 순위였으며, 제재두께가 증가함에 따라 곡선적으로 감소하였다. 또한 건조시간계수는 제재두께가 증가함에 따라 곡선적으로 증가하였다.

ABSTRACT

Red pine (*Pinus densiflora*), white pine (*Pinus koraiensis*), larch (*Larix leptolepis*) and Western hemlock (*Tsuga heterophylla*) lumber were vacuum-press dried under three drying schedules to investigate current moisture contents (MC), drying rates and drying time factors related to five lumber thicknesses of 3, 5, 7, 9 and 11cm. Current MC could be estimated by drying factors such as lumber

*1 접수 2000년 6월 20일, 채택 2000년 9월 27일
이 논문은 농림부 농림기술개발사업(관리번호 296081-3)의 연구개발 결과의 일부임.
*2 서울대학교 농업생명과학대학 College of Agriculture and Life Science, Seoul National University, Suwon 441-744, Korea
*3 전북대학교 농과대학 College of Agriculture, Chonbuk National University, Chonju 561-756, Korea

thickness, initial MC and drying time. Average drying rate from 30% to 15% MC was the highest for Western hemlock below fiber satuartion point, red pine, white pine and larch in the order of their magnitude. Drying rate curvilinearly decreased as lumber thickness increased. Drying time factor curvilinearly increased as lumber thickness increased.

Keywords: current moisture content, drying rate, drying time factor, vacuum-press drying, drying schedule, lumber thickness, initial MC

1. 서 론

어떠한 건조방법을 적용하든지 간에 건조속도와 건조시간은 온도, 습도와 풍속 등의 외주조건과 수종, 목재비중, 함수율, 목리 패턴, 제재두께 등의 목재조건 영향을 받는다. 목재 내부수분이 표면으로 이동하는 거리는 제재두께에 정비례하여 증가하고, 동일 함수율일지라도 제거할 수분량이 제재두께에 정비례하여 증가한다. 따라서 제재두께가 증가함에 따라 건조속도는 느려지면서 건조시간은 길어진다. 제재두께가 건조속도 및 건조시간에 미치는 영향은 천연건조, 열기건조, 고온건조 또는 진공건조 등 건조방법에 따라 상이하다. 즉 건조방법에 따라 건조시간과 수분이동의 메커니즘이 다르기 때문에 제재두께가 건조속도와 건조시간에 미치는 영향은 다를 수밖에 없다.

천연건조의 경우 Rietz와 Page(1971)에 의하면 건조시간은 제재두께 제곱의 함수가 일반적이지만 실제에 있어서 제재두께의 정비례에서부터 시작하여 두께간 비의 제곱보다 더 길 수 있다고 하였다. 관행열기건조의 경우 Kollmann과 Côte(1968)에 의하면 건조시간은 제재두께의 제곱에 비례하나 얇은 목재일수록 두께간 비의 지수는 적어진다고 언급하였다. McMillen과 Wengert(1978)는 동일한 열기건조 조건에서 이론적 접근에 의하면 건조시간은 두께간 비의 제곱의 함수이지만 실제에서 두께의 영향은 더 적다고 언급하였다. Higgins는 제재두께 2인치의 건조시간계수(drying time factor)을 1.00으로 하고 두께 0.75인치부터 4.0인치까지 건조시간을 추정할 수 있는 건조시간계수를 보고하였다. Simpson(1991)에 의하면 건조속도는 두께간 비의 영향을 받으며 건조시간은 두께에 정비례 이상으로 증가하나 두께가 2배이면 건조시간은 3~4배 증가된다고 언급하였다. 고온건조의 경우 Koch(1972)는 함수율 10%까지 건조시간은 제재두께와 거의 정비례한다고 보고하였다.

진공건조의 경우 Avramidis와 Zwick(1996)에 의하면 고주파 진공건조시간은 주로 초기함수율과 power density에 의존된다고 보고되었다. Wengert와 Lamb(1982)는 레드오크의 3cm와 5cm 제재의 고주파 진공건조시간은 각각 2일과 4일이 소요되었음을 보고하였다. Avramidis 등(1996)은 캐나다 서부산 침엽수재의 end coating하지 않은 고주파 진공건조에서 재장이 건조속도에 영향하며 단재의 건조속도는 장재의 것보다 컸음을 보고하였다. Golfin 등(1996)은 참나무의 초기함수율 61.4%인 두께 3cm와 초기함수율 65.7%인 두께 5.5cm 판재의 과열증기진공건조에서 최종함수율이 각각 10.6%와 11.8%일 때 건조일수는 각각 7.5일과 17.5일로 보고하였다.

이상과 같이 오랜 역사를 가진 천연건조와 열기건조의 경우와는 달리 진공건조의 경우 제재두께에 대한 건조속도 및 건조시간의 관계는 대류식과 내부가열식(고주파 이용) 진공건조에서 몇 가지 두께에 국한하여 보고되었을 뿐 체계적인 보고는 이루어져 있지 않다. 특히 가열판 압체식 진공건조에서 제재두께와 건조속도 또는 건조시간계수의 관계는 전혀 보고되어 있지 않다.

따라서 본 연구는 주요 침엽수재의 5두께 제재를 공시하여 가열판 압체식 진공건조에서 제재두께와 건조속도 및 건조시간계수의 관계를 알고자 실시하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 공시제재

공시수종은 강원도산 소나무, 잣나무, 낙엽송과 북미산 웨스턴 햄록이고, 이들 수종의 제재두께는 3, 5, 7, 9 및 11cm, 폭은 10~12cm, 길이는 90cm와 180cm이다. 제재수량은 수종, 두께 및 건조스케줄별로 각각 90cm 6본과 180cm 9본 모두 15본씩 사용하였다. 제재의 초기함수율은 수종과 두께간에 차이가 있었고 Table 3과 같다.

2.2 가열판 압체식 진공건조기

진공건조기의 용량은 0.57m^3 정도이고 전기보일러에서 가열된 온수는 알미늄 가열판으로 순환되면서 목재를 가열하고, 건조중 가열판 압체력은 약 10ton/m^2 작용하며, 진공도는 160mmHg 수준으로 유지하였다.

Table 1. Moderate drying schedules.

Lumber thickness (cm)	Moisture content (%)	Drying temperature (℃)
3 and 5	〉40	75
	40~30	80
	30~20	85
	〈 20	90
7	〉40	73
	40~30	78
	30~20	83
	〈 20	88
9	〉40	71
	40~30	73
	30~20	83
	〈 20	88
11	〉40	71
	40~30	71
	30~20	81
	〈 20	86

2.3 건조스케줄과 잔적

적용 온도의 고저에 따라 약한 스케줄(mild schedule), 중간 스케줄(moderate schedule), 강한 스케줄(severe schedule) 등 3가지로 구분하였고, 중간 건조스케줄은 Table 1과 같다. 중간 스케줄을 기준으로 하여 각 함수율 단계별로 약한 스케줄은 2℃ 낮고, 강한 스케줄은 2℃ 높게 적용하였다. 두꺼운 제재는 얇은 제재보다 저온을 적용하였으며, 건조가 진행됨에 따라 온도를 차츰 상승시켰다.

건조할 제재는 상하 알미늄 가열판 사이에 잔적하였다. 두께 3cm와 5cm 제재는 각각 4수종을 혼합잔적하였고, 7cm 제재는 초기함수율이 유사한 2수종씩 혼합잔적하고 강한 스케줄의 경우에만 4수종을 동시에 혼합잔적하였으며, 9cm 이상의 제재는 모두 초기함수율이 유사한 2수종씩 짝을 지어 혼합잔적하였다.

2.4 건조속도와 건조시간

건조재의 최종함수율 15% 이하가 될 때까지 1일 간격으로 무게를 측정하였다. 최종함수율은 건조목재의 횡단면으로부터 45~50cm 부위에서 시험편을 절취하여 전건법에 의해 구하였으며, 건조목재의 전건무게는 건조종료시 제재무게와 최종함수율을 이용하여 구하였다.

건조중 함수율은 제재의 전건무게와 건조중 무게를 이용하여 건조시간별로 계산하였고 3가지 건조스케줄을 적용한 결과를 종합한 건조중 함수율과 건조의 주요 영향인자(두께, 초기함수율과 건조시간)간에 회귀식을 구하였다.

건조속도는 수종과 제재두께별로 초기함수율과 최종함수율의 차이가 크기 때문에 동일 함수율 범위에서 비교코자 30%에서 15% 범위에서 계산하였다. 제재두께와 건조속도의 관계 및 제재두께와 건조시간의 관계, 그리고 건조시간과 제재두께의 회귀식을 이용하여 두께 5cm 제재를 기준으로 한 제재두께별 건조시간계수(drying time factor)를 구하였고, 또한 건조시간계수와 두께간의 관계식을 구하였다.

Table 2. Relationship between moisture content (M) and drying factors.

Species	Regression equation	R^2
Red pine	M=-0.162x+0.396y+0.307z+8.90∗10^{-3}xy-1.93∗10^{-2}xz-7.63∗10^{-3}yz+5.10∗10^{-4}xyz-9.85	0.562
White pine	M=6.19x+1.37y+0.904z-8.77∗10^{-2}xy-9.74∗10^{-2}xz -2.13∗10^{-2}yz+2.04∗10^{-3}xyz-55.7	0.659
Larch	M=-0.372x-0.492y-0.246z+3.62∗10^{-2}xy+4.94∗10^{-3}yz+8.20∗10^{-5}xyz+27.7	0.676
Western hemlock	M=-0.640x+0.152y+0.536z+7.04∗10^{-2}xy-3.61∗10^{-3}yz-6.20∗10^{-4}xyz-28.4	0.860

x : lumber thickness (cm), y : initial MC (%), z : drying time (hr).

3. 결과 및 고찰

3.1 건조중 함수율과 건조인자의 관계

3가지 건조스케줄을 적용하여 종합한 건조중 함수율과 건조속도에 영향하는 제재두께, 초기함수율 및 건조시간 등 주요 건조인자간의 회귀식은 Table 2와 같다. 건조중 함수율은 제재두께와 초기함수율이 증가할수록, 그리고 건조시간이 경과할수록 감소하는 결과를 나타내고 있었으며, 이는 목재건조의 일반적인 원리를 나타내었다. 본 연구에서 모든 수종의 제재두께는 5가지로서 동일하지만 각 수종의 초기함수율이 제재두께간 상당한 차이가 있었지만, 이들 회귀식은 공시한 두께와 초기함수율 범위에서 이들 건조인자를 적

Table 3. Initial and final moisture content and drying rates from 30% to 15% MC by lumber thickness and drying schedule.

Species	Lumber thickness (cm)	Mild schedule			Moderate schedule			Severe schedule		
		Initial MC (%)	Final MC (%)	Drying rate (%/hr)	Initial MC (%)	Final MC (%)	Drying rate (%/hr)	Initial MC (%)	Final MC (%)	Drying rate (%/hr)
Red pine	3	49.5	6.5	0.65	78.5	10.8	0.58	100.8	5.6	0.84
	5	23.7	8.5	0.31	59.4	8.1	0.58	57.1	6.1	0.70
	7	28.1	8.6	0.18	65.9	9.0	0.62	97.5	5.0	0.60
	9	59.0	11.9	0.18	93.4	7.7	0.33	60.1	8.8	0.44
	11	62.3	10.0	0.25	69.3	24.6	0.20	49.0	12.9	0.30
White pine	3	42.1	8.8	0.49	51.6	5.9	0.65	89.6	8.4	0.73
	5	37.8	13.0	0.30	70.4	17.1	0.57	52.4	8.0	0.42
	7	43.9	12.8	0.19	44.0	8.4	0.31	60.6	22.1	0.30
	9	34.7	6.7	0.20	75.2	7.7	0.26	53.1	11.0	0.29
	11	34.1	15.1	0.19	65.9	13.9	0.12	44.5	9.8	0.17
Larch	3	32.7	9.4	0.37	30.6	6.9	0.46	35.3	7.1	0.50
	5	26.9	11.6	0.26	32.2	10.7	0.33	45.0	9.5	0.48
	7	35.6	16.9	0.23	39.2	10.4	0.32	43.8	19.6	0.25
	9	42.5	18.0	0.10	38.4	12.9	0.22	39.3	15.1	0.21
	11	35.3	10.0	0.10	38.2	13.7	0.11	40.1	17.9	0.18
Western hemlock	3	52.7	7.7	0.57	66.4	6.5	0.82	79.7	5.2	0.74
	5	21.0	7.3	0.33	74.1	9.7	0.62	63.2	6.6	0.70
	7	33.4	8.2	0.44	42.3	8.5	0.49	76.9	10.0	0.46
	9	58.1	11.7	0.18	56.5	11.0	0.36	70.9	10.5	0.38
	11	28.0	12.3	0.19	31.6	15.9	0.16	56.1	8.3	0.25

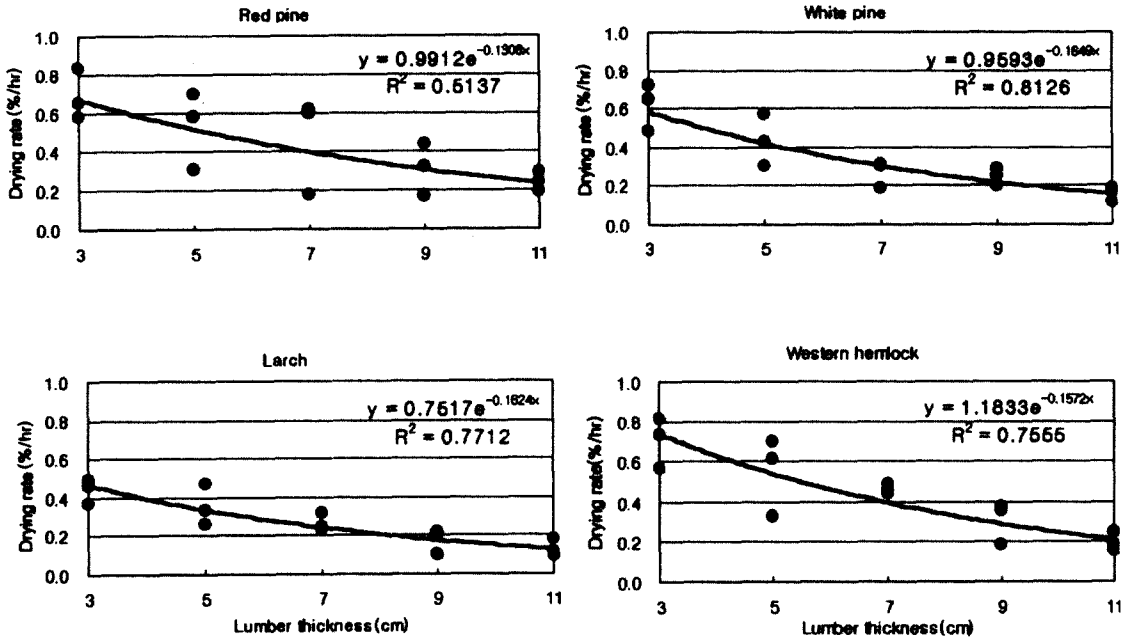

Fig. 1. Relationship between drying rate and lumber thickness.

용하여 건조중 함수율을 추정하는 데 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

3.2 제재두께와 건조속도의 관계

4수종 5두께의 적용한 3가지 건조스케줄별 함수율 30%부터 15% 범위에서 건조속도는 Table 3과 같이 건조속도는 적용온도가 높을수록 크게 나타났다. 3 건조조건에서 측정한 건조속도를 평균하여 각 수종의 두께별로 건조속도를 비교하면 두께 3, 5, 7, 9 및 11cm 제재별 평균 건조속도는 소나무의 경우 각각 0.69, 0.53, 0.47, 0.32 및 0.25%/hr이고, 잣나무의 경우 각각 0.62, 0.43, 0.27, 0.25 및 0.16%/hr이며, 낙엽송의 경우 0.44, 0.36, 0.27, 0.18 및 0.13%/hr이고, 웨스턴 햄록의 경우 0.71, 0.55, 0.46, 0.31 및 0.20%/hr로서 수종별로는 웨스턴 햄록이 가장 컸고, 다음은 소나무, 잣나무와 낙엽송 순위였다.

또한 건조속도와 제재두께간 회귀식은 Fig. 1과 같이 건조속도는 제재두께가 증가함에 따라 완만한 곡선적 감소를 나타내었는데, 이는 목재두께가 증가함에 따라 내부수분의 이동거리가 비례적으로 증가하는 데 기인된 것으로 사료된다.

Cividini 등(1995)은 소나무 두께 2.7cm 제재의 가열판 압체식 진공건조속도는 초기 및 최종함수율이 각각 94%와 14%이고 건조온도가 95℃일 때 4.26%/hr이었고, 초기 및 최종함수율이 각각 68%와 20%이고 건조온도가 90℃일 때 0.97%/hr로 보고하였는 바, 본 연구에서 국산 소나무 3cm 제재의 건조속도와 비교하여 보면 국산 소나무의 건조속도가 더 작았는데, 이와 같은 차이는 건조온도가 낮고, 제재두께는 약간 두꺼우며, 초기함수율이 낮았는 데 기인된 것으로 여겨진다.

Kollmann 등(1968)이 확산계수는 수증기압 경사에 비례하고 증기압 경사는 제재두께에 반비례한다는 논술과 비교하여 보면, 본 연구에서 얻어진 진공건조속도는 열기건조속도보다 두께의 영향을 덜 받는 것으로 나타났다.

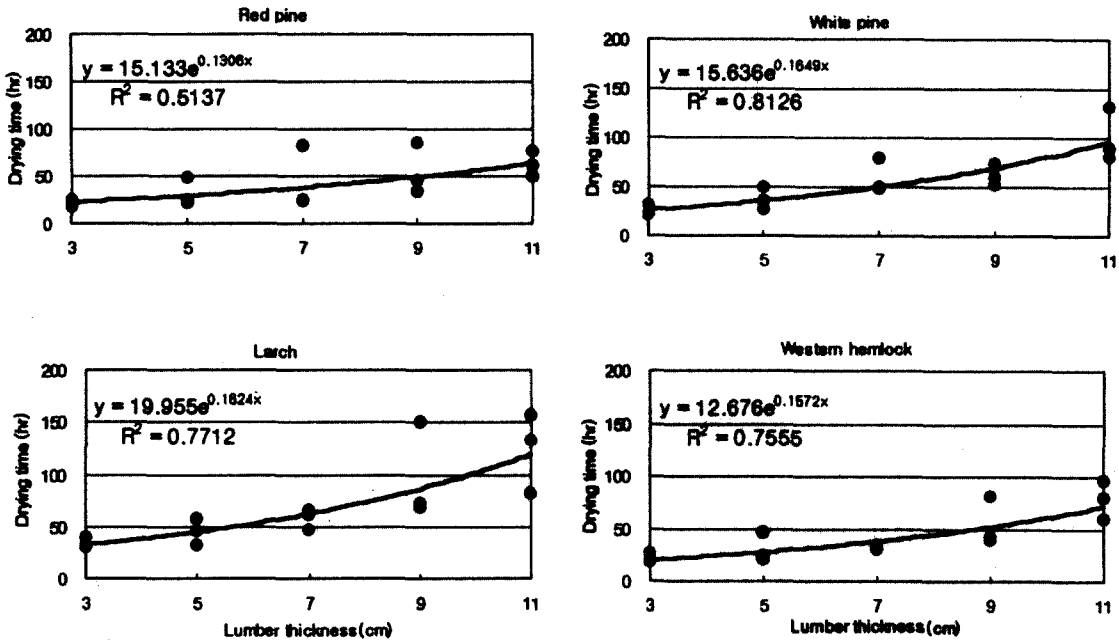

Fig. 2. Relationship between drying time and lumber thickness.

3.3 제재두께와 건조시간계수의 관계

4수종의 제재두께별로 함수율 30%에서 15%까지 소요되는 건조시간의 관계는 Fig. 2와 같이 두께 3cm 제재는 웨스턴 햄록이 20.3시간으로 가장 짧았고, 다음은 소나무 22.4시간, 잣나무 25.6시간, 낙엽송 32.4시간 순위였다. 두께 11cm 제재는 소나무 63.7시간, 웨스턴 햄록 71.4시간, 잣나무 95.9시간, 낙엽송 117.8시간의 순위였다. 이와 같이 건조시간은 제재두께가 증가함에 따라 곡선적으로 증가하였으며 곡선의 기울기는 소나무가 가장 적었고, 다음은 웨스턴 햄록이고, 잣나무와 낙엽송의 순위로 컸으나 서로 비슷하였다. 건조스케줄 강약에 따른 건조시간은 제재두께가 증가함에 따라 분산이 커지는 경향을 보였으며, 특히 낙엽송 제재의 경우 두께가 증가할수록 건조스케줄의 영향이 매우 크게 나타났었다.

두께 5cm를 기준으로 제재두께별 건조시간계수, 건조시간계수와 제재두께간의 회귀식은 Table 4와 같다. 4수종의 두께별 건조시간계수의 범위는, 3cm 제재는 0.72~0.77, 7cm 제재는 1.30~1.39, 9cm 제

Table 4. Drying time factor(y) from 30% to 15% for various lumber thickness(x) in vacuum press drying.

Species	Thickness (cm)					Regression equation
	3	5	7	9	11	
Red pine	0.77	1.00	1.30	1.69	2.19	$y=0.5203e^{0.1308x}$
White pine	0.72	1.00	1.39	1.93	2.70	$y=0.4382e^{0.1651x}$
Larch	0.72	1.00	1.38	1.90	2.63	$y=0.4444e^{0.1616x}$
Western hemlock	0.73	1.00	1.37	1.88	2.57	$y=0.4552e^{0.1574x}$

재는 1.69~1.93, 11cm 제재는 2.19~2.70으로서 두께가 증가할수록 수종간의 차이가 커졌다.

본 연구에서 4수종의 두께 9cm 제재의 건조시간은 Avramidis 등(1996)이 보고한 변장 9.1cm 정각재의 고주파 진공건조의 23시간보다 길었고 관행열기건조시간 20일보다는 훨씬 짧았다. 본 연구의 건조시간계수는 Higgins에 의한 제재두께에 따른 열기건조시간계수는 두께 2인치인 경우 1.00을 기준으로 하면 1인치는 0.40, 1.5인치는 0.70, 2.5인치는 1.35, 3인치는 1.75, 3.5인치는 2.25, 4인치는 2.85로 제시한 값보다 얇은 제재의 경우는 컸었고 두꺼운 제재의 경우는 적었다. 그리고 Kollmman과 Côte(1968)이 열기건조시간은 제재두께 비율의 제곱에 비례한다는 것보다 훨씬 적었으나, 두께간의 비는 얇은 목재일수록 적어진다는 보고 내용과는 부합하였다. Perré 등(1995)이 진공건조시간은 관행열기건조시간보다 3~5배 정도 빠르다고 보고한 범위에 속하였는데, 건조시간계수는 두꺼운 제재일수록 더 컸었다. 진공건조시간은 목재의 투과성, 건조온도와 진공도 등에 좌우되지만, 가열판 압체식 진공건조시간은 고주파 진공건조시간보다 긴 편에 속하였고, 제재두께 증가에 따른 건조시간은 열기건조에 비하여 짧았다.

4. 결 론

소나무, 잣나무, 낙엽송과 웨스턴 햄록의 5두께 제재를 약한 스케줄, 중간 스케줄과 강한 스케줄을 적용하여 건조중 함수율, 제재두께와 건조속도의 관계, 제재두께와 건조시간계수의 관계 등을 구명한 결과는 제재두께, 초기함수율 및 건조시간에 따라 개략적인 건조중 함수율을 측정할 수 있었다. 그리고 함수율 30%에서 15% 범위에서 평균 건조속도는 웨스턴 햄록이 가장 컸고 다음은 소나무, 잣나무, 낙엽송 순위였으며 제재두께가 증가함에 따라 곡선적으로 감소하였다. 또한 건조시간계수는 제재두께가 증가함에 따라 곡선적으로 증가하였다.

참 고 문 헌

1. Avramidis, S., L. Zhang, and S. U. Hatzikiriakos. 1996. Moisture transfer characteristics in wood during radio frequency/vacuum drying. Proceedings of the 5th International IUFRO Wood Drying Conference. August 13-17, 1996. Quebec city, Canada: 125-133.
2. Avramidis, S., and R. L. Zwick. 1996. Commercial-scale RF/V drying of softwood lumber. Part 2. Drying characteristics and lumber quality. Forest Prod. J. 46(6): 27-36.
3. Cividini, R. 1995. Timber straightening and shrinkage tests in vacuum-press plus dryer. Proceedings of Int'l Conference on Wood Drying. Oct. 8-12, 1995. High Tatras, Slovak Republic: 231-236.
4. Golfin, J. L. and H. A. Noves. 1996. Kiln and continuous vacuum drying of Eucalyptus Globulus, oak and chestnut 27 and 50mm thick boards. Proceedings of the 5th International IUFRO Wood Drying Conference. August 13-17, 1996. Quebec city, Canada: 185-190.
5. Higgins, N. C. A rule-of-thumb method for estimating drying time. Release 8,023. Coop. Exten. Serv., Dept. For. Prod., Mich. State Univ., East Lansing, Mich. (Published in Drying Eastern Hardwood Lumber. Agric. Handbook No. 528. USDA Sept. 1978)
6. Koch, P. 1972. Utilization of the Southern Pines. Vol. II. Processing, Agric. Handbook No. 420. U.S.D.A.: 1-104.
7. Kollmann, F. F. P. and W. A. Côte. 1968. Principles of Wood Science and Technology I. Solid Wood. Springer-Verlag: 1-502.
8. McMillen, J. M., and E. M. Wengert. 1978. Drying Eastern Hardwood Lumber. Agric. Handbook No. 528. For. Prod. Lab. Forest Service, U.S.D.A.: 1-104.
9. Perré, P., P. Joyet, and D. Aléon. 1995. Vacuum drying: physical requirements and practical solutions. Proceedings of Int'l Conference on Wood Drying. Oct. 8-12, 1995. High Tatras, Slovak Republic: 7-34.

10. Rietz, R. C. and R. H. Page. 1971. Air Drying of Lumber: A Guide to Industry Practices. Agric. Handbook No. 402. Forest Service, U.S.D.A.: 1-110.
11. Simpson, W. T. 1991. Dry Kiln Operator's Manual. Agric. Handbook No.188. Forest Prod. Lab. Madison, Wisconsin: 1-256.
12. Wengert, E. M., and F. M. Lamb. 1982. A comparison of conventional and new drying methods. Joint production division meeting. National Assoc. of Furniture Manufacturers. Lousville, Ky.