

침엽수 제재두께별 가열판 압체식 진공건조의 소요 에너지*1

정희석*2 · 이준호*2 · 강 욱*2 · 이남호*3

Energy Consumption in Vacuum-Press Drying of Some Softwood Lumber of Different Thicknesses*1

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

요 약

침엽수 4수종(소나무, 잣나무, 낙엽송, 웨스턴 헴록)의 가열판 압체식 진공건조에서 소요되는 비에너지 곡선은 함수율 감소에 따라 서서히 증가, 거의 일정, 급속 증가 등 3단계의 증가 패턴을 나타내었고, 제재두께별 계산된 비에너지는 3cm 제재 0.483, 5cm 제재 0.649, 7cm 제재 0.814, 9cm 제재 0.977 및 11cm 제재 1.138kWh/kg로서 두께가 증가함에 따라 거의 직선적으로 증가하였고, 강한 건조스케줄을 적용한 비에너지는 약한 건조스케줄의 것보다 적었으며, 가열판 진공건조의 평균 비에너지는 0.712kWh/kg으로서 다른 건조법의 것보다 적었다.

ABSTRACT

Specific energy curves for water removal in vacuum-press drying of different thick softwoods of red pine (*Pinus densiflora*), white pine (*Pinus koraiensis*), larch (*L. leptolepis*) and Western hemlock (*Tsuga heterophylla*) were split into three sections : increased slowly, fairly constant, and increased rapidly. Calculated specific energy for 3, 5, 7, 9 and 11cm thick lumber was a value of 0.483, 0.649, 0.814, 0.977 and 1.138kWh/kg of water, respectively. Specific energy almost linearly increased as lumber thickness increased, and specific energy for severe schedule was less than that for mild

*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

schedule. Average specific energy was 0.712kWh/kg and vacuum-press drying consumed less energy as compared with any other drying methods.

Keywords : specific energy curves, vacuum-press drying, softwoods, lumber thickness, severe schedule, mild schedule

1. 서론

목재의 인공건조는 함유수분 제거에 다량의 에너지가 소요되기 때문에 에너지 집약적 공정이고, 에너지 비용은 제재생산에서 최대의 생산비용을 차지한다. 에너지 소요량은 수종, 제재두께, 초기 및 최종함수율, 건조계절, 건조실 타입과 용량 등에 따라 달라진다. 에너지 쇼크 이후부터 어떻게 에너지를 절약할 수 있는가가 관심의 대상이 되어 왔다. 따라서 관행열기 건조보다 에너지를 절약할 수 있는 제습 건조 또는 진공 건조에 관심을 갖게 되었다. 특히 진공 건조는 저온에서도 고온 건조의 효과를 나타내기 때문에 건조시간의 단축과 아울러 에너지를 크게 절감할 수 있는 건조법으로 알려져 있다.

Mujumdar(1987)은 목재 건조의 소요 에너지는 원목에서 최종 목제품까지 가공에 필요한 에너지의 절반 이상 요구될 수 있기 때문에 건조 에너지 절약은 매우 중요함을 강조하였다. Aléon(1979)은 두께 27mm 참나무 판재의 대류식 비연속 진공 건조의 에너지 소비량은 열기 건조의 것보다 30~40% 적다고 보고하였다. Resch(1990)는 제재의 고주파 진공 건조의 증발수분당 평균 에너지 소비량은 6MJ/kg 정도라고 보고하였고, Avramidis와 Zwick(1992)은 캐나다 B.C.주 서해안산 다그라스퍼, 웨스턴 햄록과 레드시더 제재의 고주파 진공 건조 비에너지를 보고하였으며, Smith 등(1994)은 레드오크의 고주파 진공 건조에서 MBF당 소요되는 전기 에너지를 보고하였다. Viktorin(1995)는 너도밤나무 50mm 제재의 대류식 진공 건조에서 증발수분당 소요된 에너지는 11.086MJ/kg로 보고하였다. Perré 등(1995)은 진공 건조 시간은 열기 건조의 것보다 거의 3~5배 단축되고 에너지 소비량은 수종, 제재 두께와 건조 조작원리 등 여러 변수에 의존되고 가변적

이라고 보고하였고, Avramidis와 Zwick(1997)은 캐나다 서부산 두께 101mm 침엽수제 고주파 진공 건조에서 증발수분당 소요 에너지인 비에너지, 그리고 자유수와 함유수 15%일 때 결합수의 비에너지를 보고하였다. Cividini와 Pagnozzi(1995)는 가문비나무의 7수종 제재의 가열판 압체식 진공 건조의 비에너지를 보고하였다.

본 연구는 주요 침엽수 4수종의 5두께 제재를 접촉식 가열방법인 가열판 압체식 진공 건조에서 제재 두께별로 건조 경과 중 비에너지와 전체 평균 비에너지를 알고자 실시하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 공시제재

공시수종은 강원도산 소나무, 잣나무, 낙엽송과 북미산 웨스턴 햄록을 사용하였다. 이들 수종의 제 두께는 3, 5, 7, 9 및 11cm이고, 폭은 10~12cm이며 길이는 90~180cm이다. 제재 수량은 수종과 두께별로 각각 90cm 6본과 180cm 9본 등 모두 15본씩 사용하였다. 건조 스케줄 적용별 제재의 평균 초기 함수율과 표준편차는 Table 1과 같이 수종과 두께별로 차이가 심하였다.

2.2 가열판 압체식 진공 건조기

건조기의 용량은 0.57m³ 정도이고 전기보일러에서 가열된 온수는 알미늄 가열판으로 순환되면서 목재를 가열하고, 건조 중 가열판 압체력은 약 10ton/m²이고 진공도는 160mmHg 수준으로 유지하였다

Table 1. Initial moisture content of lumber used.

Species	Schedule	Lumber thickness (cm)				
		3	5	7	9	11
Red pine	Mi* ¹	49.5(24.4)	23.7(8.3)	28.1(13.0)	59.0(19.9)	62.3(23.8)
	Mo* ²	78.5(19.9)	59.4(24.4)	65.9(26.1)	93.4(29.9)	69.3(14.2)
	Se* ³	100.8(20.1)	57.1(28.1)	97.5(33.6)	60.1(23.9)	49.0(17.0)
White pine	Mi	42.1(10.5)	37.8(12.6)	43.9(7.8)	34.7(5.8)	34.1(6.2)
	Mo	51.6(23.8)	70.4(25.0)	44.0(16.1)	75.2(28.0)	65.9(21.9)
	Se	89.6(39.3)	52.4(12.2)	60.6(15.6)	53.1(9.6)	44.5(12.4)
Larch	Mi	32.7(2.9)	26.9(18.2)	35.6(19.2)	42.5(6.4)	35.3(6.3)
	Mo	30.6(3.1)	32.2(4.3)	39.2(5.9)	38.4(8.8)	38.2(7.2)
	Se	35.3(5.7)	45.0(7.0)	43.8(6.5)	39.3(14.5)	40.1(7.0)
Western hemlock	Mi	52.7(20.7)	21.0(2.2)	33.4(17.3)	58.1(15.5)	28.0(2.8)
	Mo	66.4(17.4)	74.1(18.4)	42.3(10.6)	56.5(20.4)	31.6(7.3)
	Se	79.7(33.2)	63.2(24.6)	76.9(15.5)	70.9(14.7)	56.1(16.7)

Mi*¹ : mild schedule, Mo*² : moderate schedule, Se*³ : severe schedule

() : Standard deviation

2.3 건조스케줄과 잔적

적용 온도의 고저에 따라 약한 스케줄, 중간 스케줄, 강한 스케줄 등 3가지로 구분하였고, 중간 건조스케줄

은 Table 2와 같다. 약한 스케줄과 강한 스케줄은 중간 스케줄보다 각 함수율 단계에서 각각 2℃ 낮고, 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 혼합잔적, 또는 4수종을 동시에 혼합잔적하였으며, 9cm 이상의 제재는 모두 초기함수율이 유사한 2수종씩 짝을 지어 혼합잔적하였다(Table 3 참조).

건조실험은 97년 3월 17일부터 6월 18일, 98년 3월 24일부터 5월 18일, 99년 3월 22일부터 4월 27일 기간중에 얇은 제재부터 먼저 순차적으로 실시하였다.

Table 2. 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

2.4 함수율과 전기에너지의 측정

건조 전에 제재의 무게를 측정한 후 목표 최종함수율 15%이하가 될 때까지 일정한 건조시간 1일 간격별로 제재의 무게와 동시에 적산전력계를 사용하여 소요된 전기에너지를 측정하여 건조시간별 함수율과 에너지의 관계곡선을 작성하였다. 또한 건조 전과 건조종료 후 무게 차이로서 전건조기간의 증발수분량(kg)과

전기에너지(kWh)를 측정하여 증발수분(kg)당 전기에너지인 비에너지(specific energy)를 산출하였다.

3. 결론 및 고찰

3.1 함수율과 비에너지의 관계

4수종의 5단계 제재의 건조시간별로 함수율과 비에너지의 관계곡선은 Fig. 1과 같다. 모든 수종과 제재 두께별 비에너지는 일반적으로 함수율 감소에 따라 증가하였다. 그러나 건조기간중 건조스케줄의 온도를 상승시켰을 때 건조속도가 촉진되면서 비에너지는 감소하였다. 함수율 감소에 따른 비에너지 곡선의 증가 패턴은 건조초기에 비교적 급속하게 증가하다가, 그 후 거의 일정하게 유지되고 다시 급속하게 증가하는 3단계 변화 패턴을 나타내었다. 이는 가열기간중에 목질과 함유수분을 초기 설정온도까지 상승시킴과 더불어 내부기기의 가열 등에 열에너지가 다량 소요되었기 때문이다. 가열기간 이후 공급되는 열은 주로 자유수 증발에 소요되고, 자유수 증발에는 기화잠열만 소요되기 때문에 자유수 존재 기간에 비에너지는 거의 일정하게 유지되어졌다. 그러나 자유수가 제거된 다음에 결합수 증발에는 기화잠열뿐만 아니라 부가적으로 흡착열이 요구되고 흡착열은 결합수의 함수율이 감소함에 따라 곡선적으로 증가되기 때문에 건조후기, 특히 저함수율 영역에서 비에너지가 더 증가하게 되었다.

Simpson(1991)에 의하면 흡착열은 함수율 20% 수준부터는 감소할수록 지수곡선적으로 증가한다고 보고하였고, 또한 Avramidis와 Zwick(1997)은 침엽수 재 고주파 진공건조에서 자유수의 비에너지는 약 0.7 kWh/kg이지만, 함수율 15%에서 결합수의 비에너지는 약 1.24kWh/kg로서 비에너지는 함수율이 감소할수록 급격히 증가한다고 보고한 바 있다. 본 연구의 비에너지에서도 건조중 함수율 20% 수준에 도달 이후부터 함수율이 감소할수록 지수적 증가를 나타내고 있었는 바, 상기 본문의 내용과 부합되었다.

3.2 제재두께별 평균 비에너지

침엽수 4수종의 5단계 제재에 대하여 전건조기간 중 증발수분량과 전기에너지 소비량 및 실측 비에너지는 Table 3과 같고, 제재두께와 비에너지의 관계곡선은 Fig. 2와 같다.

전건조기간 동안 4수종의 실측 비에너지의 평균치는 두께 3cm 제재의 혼합잔적의 경우 0.482kWh/kg 이었고, 두께 5cm 제재의 혼합잔적은 0.538kWh/kg로서 서로 비슷하였다. 두께 7cm 제재의 소나무와 잣나무의 혼합잔적은 0.799kWh/kg, 낙엽송과 웨스턴 햄록의 혼합잔적의 경우 0.918kWh/kg로서 4수종의 전체 평균치는 0.759kWh/kg이었다. 두께 9cm 제재의 소나무와 잣나무의 혼합잔적은 0.695kWh/kg, 낙엽송과 웨스턴 햄록의 혼합잔적은 0.879kWh/kg로서 4수종의 평균치는 0.787kWh/kg이었다. 그리고 두께 11cm 제재의 소나무와 웨스턴 햄록의 혼합잔적은 0.685kWh/kg, 잣나무와 낙엽송의 혼합잔적은 1.058kWh/kg로서 4수종의 평균치는 0.871kWh/kg이었다. 비에너지는 건조속도가 큰 소나무, 또는 웨스턴 햄록이 포함된 잔적 그룹에서 적었고, 건조속도가 느린 잣나무, 또는 낙엽송이 포함된 잔적 그룹에서 컸었다. 또한 강한 건조스케줄을 적용할수록 비에너지는 적어지는 경향을 나타내었다. 동일 수종일지라도 건조속도는 초기함수율의 고저와 변재율 등 목재조건의 영향을 받는 바, 본 연구의 건조스케줄별로 사용한 제재간의 이들 인자는 상당한 차이가 있었다. 모든 수종, 두께와 건조스케줄에 대한 전체 평균 환산비에너지는 0.712kWh/kg으로서 Resch(1990)의 제재의 고주파 진공건조의 비에너지 6MJ/kg보다 적었다.

제재두께와 비에너지 관계식에 의해 계산한 비에너지는 제재두께 3, 5, 7, 9 및 11cm 제재의 경우 각각 0.483, 0.649, 0.814, 0.977 및 1.138kWh/kg로서 제재두께가 두꺼워질수록 증가하였다.

Cividini와 Pagnozzi(1995)에 의한 몇 가지 수종별 가열판 압체식 진공건조의 비에너지는 두께 60mm인 가문비나무 제재는 1.70kWh/kg, 구주적송 제재는 1.19kWh/kg, 두께 18mm인 포플러 제재 0.99 kWh/kg, 두께 55mm인 단풍나무 제재는 2.23kWh/kg으로서 수종과 제재두께에 따라 차이가

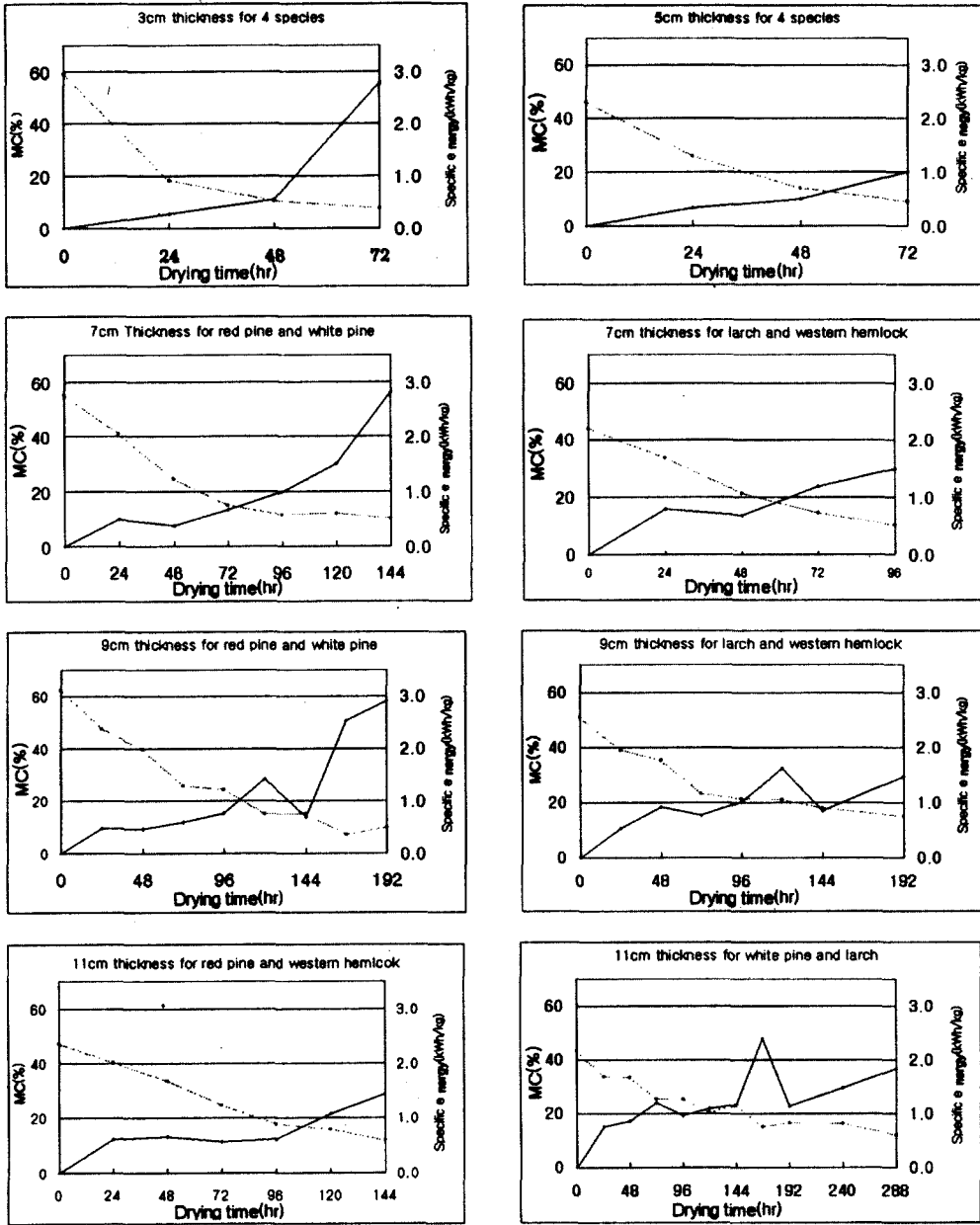


Fig. 1. Relationship between average moisture content, specific energy and drying time (dotted line: moisture content, solid line: specific energy).

있음을 보고하였다. Smith 등(1994)은 레드오크의 변장 2인치 각재의 고주파 진공건조에서 초기함수율

87.0%에서 최종함수율 6.4%까지 건조하는 데 소요된 비에너지는 1.53kWh/kg로 보고한 바 있다. Perré 등

Table 3. Amount of water evaporation and electrical energy consumption.

Thick-ness (cm)	Schedule	Amount of water evaporation (kg)					Energy consumption (kWh)	Specific energy (kWh/kg)
		Red pine	White pine	Larch	Western hemlock	Total		
3	Mi ¹	19,666	20,552	7,238	11,734	59,190	27.19	0.459
	Mo ²	23,056	10,574	8,252	12,736	54,618	33.38	0.611
	Se ³	12,031	8,332	6,748	18,242	45,353	17.07	0.376
5	Mi	9,100	11,886	7,298	6,420	34,704	26.90	0.775
	Mo	20,611	21,082	9,964	23,258	74,915	33.47	0.447
	Se	20,636	17,224	16,486	26,122	80,468	31.57	0.392
7	Mi	-	-	12,869	14,276	27,145	26.52	0.977
	Mi	38,883	24,776	-	-	63,659	49.36	0.775
	Mo	-	-	17,084	32,692	49,776	42.72	0.858
	Mo	46,391	17,930	-	-	64,321	52.90	0.822
	Se	36,356	21,816	15,764	17,594	91,530	33.25	0.363
9	Mi	41,396	60,432	-	-	101,828	68.09	0.669
	Mi	-	-	23,076	36,491	59,567	62.17	1.044
	Mo	57,837	18,205	-	-	76,042	59.18	0.778
	Mo	-	-	18,683	33,108	51,791	41.86	0.808
	Se	48,721	30,420	-	-	79,141	50.42	0.637
	Se	-	-	13,294	32,050	45,344	35.55	0.784
11	Mi	-	53,478	26,952	-	80,430	91.19	1.134
	Mi	38,512	-	-	14,980	53,492	32.01	0.598
	Mo	-	17,642	21,814	-	39,456	34.72	0.880
	Mo	45,543	-	-	29,217	74,760	59.72	0.799
	Se	-	29,028	24,749	-	53,777	62.33	1.159
	Se	35,473	-	-	16,361	51,834	34.13	0.658
Total		494,212	363,377	230,271	325,281	1413,141	1005.70	0.712 ⁴

Mi¹: mild schedule, Mo²: moderate schedule, Se³: severe schedule, ⁴: Average specific energy

(1995)은 초기함수율이 거의 동일한 두께 27mm인 참나무와 너도밤나무 판재의 가열판 압채식 진공건조에서 비에너지는 각각 2.61과 1.43kWh/kg이고, hot climatized air kiln에서 두께 27mm와 54mm인 참나무 제재의 열기건조의 비에너지는 각각 3.14과 4.00kWh/kg으로서, 참나무와 같이 건조속도가 느린 수종과 두꺼운 제재일수록 에너지 요구량이 컸다는 사실을 밝힌 바 있다. Resch(1990)에 의하면 증발수분 kg당 에너지 요구량은 소재, 단판과 파티클의 대류식 건조의 경우 1.11~3.33kWh이고, 소재의 고주파 진공건조의 경우는 1.67kWh 정도임을 보고하였다. Avramidis 등(1992)은 3수종(태평양 연안산 햄록, 다그라스퍼, 웨스턴 레드시더)의 여러 치수를 혼합잔적

한 고주파 진공건조 비에너지는 각각 2.406, 2.639과 2.603kJ/kg이 소요되었다고 보고하였고, Avramidis와 Zwick(1997)은 3수종의 두께 101mm 제재의 비에너지는 1.29kWh/kg임을 보고하였다. Viktorin(1995)는 두께 50mm인 너도밤나무 판재의 고주파 진공건조의 비에너지는 11.08MJ/kg로 보고하였다. Mackay와 Nielson(1987)은 두께 50mm인 hem-fir 제재의 열기건조와 제습건조의 비에너지는 각각 2.07과 1.08kWh/kg임을 보고하였다. 보고자에 따라 각 건조방법별로 사용 수종과 목재두께가 상이하기 때문에 정밀한 비교는 할 수 없지만 건조방법별 비에너지는 열기건조, 제습건조와 진공건조 순위로 적었다.

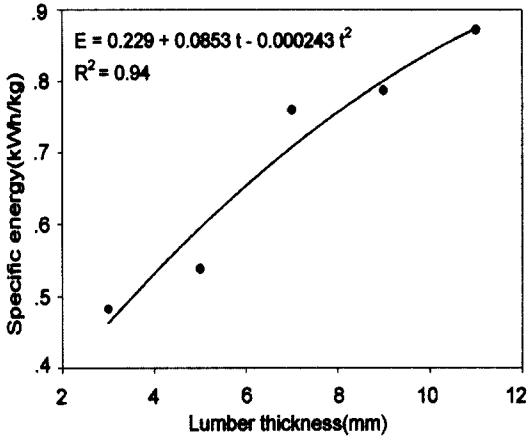


Fig. 2. Relationship between specific energy and lumber thickness.

본 연구의 가열판 압체식 진공건조의 비에너지는 고주파 진공건조를 포함한 다른 인공건조법보다 매우 적었고, 제재 두께가 두꺼울수록 증가하였다. 이와 같은 결과는 목재가 두꺼울수록 내부수분 이동거리가 증가되면서 건조속도가 느려지기 때문으로 사료된다.

4. 결론

가열판 압체식 진공건조의 비에너지는 함수율 감소에 따라 처음에 급속하게 증가한 후, 거의 일정 또는 완만하게 유지되다가, 다시 급속히 상승하는 3단계 변화 패턴을 나타내었다. 비에너지는 제재두께가 증가함에 따라 거의 직선적으로 증가하였고 강한 건조스케줄을 적용할수록 적었다. 평균 비에너지는 0.712kWh/kg으로서 다른 인공건조법의 경우보다 적었다.

참고 문헌

1. Aléon, D. 1979. "Procédédé sé chage du bois par de vide" Etude n° 281 CTVA.
2. Avramidis, S., and E. L. Zwick, 1992. Exploratory

- radio-frequency/vacuum drying of three B.C. coastal softwoods, *Forest Prod. J.* 42(7/8): 17-24.
3. Avramidis, S., and R. L. Zwick, 1997. Commercial-scale RF/V drying of softwood lumber, Part 3. Energy consumption and economics, *Forest Prod. J.* 47(1): 48-56.
4. Cividini, R., and V. Pagnozzi, 1995. Vacuum-press plus dryer—Recent practical experiments of a new leap ahead in high temperature wood drying. *Proceedings of the Int'l. Conference on Wood Drying.* Oct. 8-12, 1995. High Tatras, Slovak Republic: 223-230.
5. Mackay, J. F. G. and R. W. Nielson, 1987. Comparison of dehumification and heat and vent drying of hem-fir softwood, Rept. m 418-u-461. Canadian Electrical Assoc., Ottawa, Ont.: 44.
6. Mujumdar, A. S. 1987. *Advances in Drying.* Vol. 4. Hemisphere Publishing Corporation: 124.
7. Perré, P., P. Joyet and D. Aléon, 1995. Vacuum drying: Physical requirements and practical solutions. *Proceedings of the Int'l. Conference on Wood Drying.* Oct. 8-12, 1995. High Tatras, Slovak Republic: 7-34.
8. Resch, H. 1990. Energy consumption in drying solid wood products. *Proceedings of the 3rd. Int'l. Symposium on Forest Products Industry in the 21st. Century.* July 2-5, 1990. Suwon, Korea: 13-32.
9. Simpson, W. T. 1991. *Dry Kiln Operator's Manual.* Agric. Handbook No.188. Forest Prod. Lab. Madison, Wisconsin: 1-256.
10. Smith, W.B., A. Smith and E. F. Neauhauser. 1994. Radio-frequency/vacuum drying of red oak : Energy, Quality, Value. *Proceedings of the 4th IUFRO Conference on Wood Drying.* Rotorua, New Zealand : 263-270.
11. Viktorin, Z. 1995. Energetic demands of vacuum drying of wood. *Proceedings of the Int'l. Conference on Wood Drying.* Oct. 8-12, 1995. High Tatras, Slovak Republic: 183-190.