

시간스케줄을 적용한 數種의 針葉樹 製材品の 乾燥抵抗*1

정희석*2 · 이남호*3 · 이준호*2 · 권주용*2

Drying Resistance of Some Softwoods Lumber under Time Schedule*1

Hee-Suk Jung*2 · Nam-Ho Lee*3 · June-Ho Lee*2 · Ju-Yong Kwon*2

ABSTRACT

A relationship between drying resistance and moisture content was found for 24, 27 and 30mm thick boards, and 45, 51 and 57mm thick dimensions of Japanese larch, Dahurian larch and radiata pine in order to modify the kiln schedule by using time schedules. The amount of drying resistance for Dahurian larch lumber was the highest, and radiata pine lumber was the lowest, on the basis of the same moisture content range. Drying resistance increased curvilinearly as moisture content decreased, and was higher for thicker lumber than for thinner lumber, at a given moisture content. Combined drying resistance for the three board thicknesses and the three dimension thicknesses showed a comparatively strong for radiata pine and a Japanese larch, while a weak correlation for Dahurian larch as a function of two independent variables, thickness and moisture content of lumber, respectively.

Keywords : Drying resistance, moisture content, board, dimension, time schedule, thickness

1. 서론

목재의 열기건조에서 건조결함의 예방과 건조시간의 단축은 일반적으로 건조 초기에 저온과 고습 그리고 함수율이 감소함에 따라 차츰 고온과 저습을 적용하면서 이루어진다. 목재 건조에 적용할 온도, 습도 및 풍속 등에 의한 건조스케줄은 수종과 목재 두께 등에 따라 상이하다. 대부분의 건조스케줄은 실험실이나 산업체의 건조실에서 시행착오를 거치면서 발전되어왔지만 어떠한 현존 건조스

케줄도 완벽할 수가 없고 계속 개량되어져야만 한다. 건조자가 어떠한 건조스케줄을 적용할 것인가는 건조 목적에 따라 달라질 수 있다. 즉, 건조 시간의 단축, 또는 건조재의 품질 등 어느 것에 초점을 두느냐에 따라 적용할 건조스케줄이 달라질 수 있으므로 건조 문제를 융통성 있게 해결할 수 있는 건조스케줄을 개량할 필요가 있다. 따라서 어떤 목재의 초기함수율에서 최종함수율까지 건조하는데 요구되는 drying effort의 특정량을 계량하여야 한다.

*1 접수 1997년 4월 18일 Received April 18, 1997

본 연구는 1993년도 한국과학재단 연구비 지원에 의한 연구 결과의 일부임(과제번호 93-08-00-03).

*2 서울대학교 농업생명과학대학 College of Agriculture & Life Sciences, Seoul National University, Suwon 441-744, Korea

*3 전북대학교 농과대학 College of Agriculture, Chonbuk National University, Chunju 560-756, Korea

Bachrich(1980)은 건조이론에서 목재 건조와 관련된 3가지 기본 기구는 건조 1단계의 모세관 이동, 건조 2단계의 결합수 확산, 건조 3단계의 수증기 확산으로 구분하고 있는데, 건조 2단계부터 표층의 함수율이 섬유포 화점 이하가 되며, 결합수 확산 이동이 시작되어 차츰 내부의 함수율도 섬유포화점 이하가 되고, 표층과 내층의 함수율의 차이가 감소할수록 점차 건조저항(drying resistance)이 증가되면서 건조속도가 느려진다. Bramhall(1975)은 건조 구동력은 어떤 온도와 습도를 가진 열기가 잔적을 가로 이동할 경우 재면과 주위 열기간의 증기압 차이와 같고, 증기압이 클수록 구동력은 증가한다고 하였으며, 건조저항 측정법과 침엽수재의 건조스케줄 개량의 이론적 계산법을 제시하였다. 또한, Bramhall(1976)은 캐나다산 western white spruce 의 2수종의 두께 2인치 재제품의 건조저항을 측정하여 건조스케줄 개량법에 대한 내용과 함께 임의 함수율에서 확산속도는 건구온도와 습구온도의 증기압 차이에 비례하기 때문에 건조저항을 측정하여 건조스케줄 개량에 적용할 수 있다는 사실을 보고하였다. Jung 등(1984; 1985)은 다그러스 퍼(Douglas-fir) 3 두께별 재제품에 강·약 건조스케줄을 적용하여 이들 건조곡선과 함수율 별에 따른 건조저항을 측정하여 비교하였다. Lee와 Jung(1988)은 리기다소나무의 두께 2.5cm와 5.0cm 재제품의 함수율과 건조저항

의 관계 그리고 kiln factor를 비교하여 보고하였다.

본 논문에서는 일본잎갈나무, 다후리안낙엽송(Dahurian larch)과 라디에타소나무의 각각 3두께의 판재류와 각재류에 대하여 시간스케줄을 적용하여 건조곡선, 그리고 건조과정에서 함수율과 건조저항의 관계, 함수율과 재제품의 두께를 변수로 한 건조저항과의 관계 및 수증과 재제품의 두께별 건조저항의 크기를 비교하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 재료

2.1.1 공시수종

공시수종은 국산 일본잎갈나무(*Larix leptolepis*), 시베리아산 다후리안낙엽송(*Larix gmelinei*)과 뉴질랜드산 라디에타소나무(*Pinus radiata*)를 사용하였다.

2.1.2 공시제제품

공시제제품은 중경목을 재재하여 두께별로 건조속도와 건조저항을 비교하기 위하여 판재류는 두께 24, 27과 30mm, 그리고 각재류는 두께 45, 51와 57mm로 하였다. 모든 재제품의 폭은 10cm, 길이는 1.2m이며, 재제품의 수량은 각 수종의 두께별로 각각 10본씩 사용하였다. 각 수종의 판재류와 각재류의 초기함수율은 표 1과 같다. 그리고 각 수종의 판재류와 각재류 각각의 함수율 12% 기

Table 1. Average initial moisture content of lumber used for kiln drying.

Species	Size classification	Lumber thickness (mm)	Initial MC
			(%)
Japanese larch	Board	24	64.4 ± 11.6 ^{*1}
		27	38.2 ± 7.0
		30	42.8 ± 14.0
	Dimension	45	33.9 ± 7.6
		51	39.6 ± 6.8
		57	37.8 ± 5.9
Dahurian larch	Board	24	52.4 ± 9.9
		27	43.9 ± 9.4
		30	36.7 ± 4.9
	Dimension	45	35.6 ± 3.5
		51	42.4 ± 8.3
		57	37.5 ± 5.6
Radiata pine	Board	24	32.5 ± 11.9
		27	29.2 ± 5.5
		30	37.9 ± 9.9
	Dimension	45	57.6 ± 21.1
		47	36.9 ± 10.3
		51	46.0 ± 20.6

*1: Indicated standard deviation

준일때 기건비중의 평균치 범위는 일본잎갈나무는 0.45~0.59와 0.44~0.59이고, 다후리안낙엽송은 0.43~0.63과 0.39~0.60이며, 라디에타소나무는 각각 0.36~0.50과 0.36~0.48인 것을 사용하였다.

2.2 방법

2.2.1 열기건조실과 잔적

건구온도와 습구온도의 정밀도는 $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ 가 유지되도록 자동제어 및 기록이 가능하며 재간 풍속은 1.2m/s 로 유지되는 소형 열기건조실을 사용하였다. 제재품은 잔적 전에 무게를 측정한 다음 두께 2.3cm인 잔목을 사용하여 재간 간격 없이 횡적하였다.

2.2.2 건조스케줄

공시 수종의 판재류와 각재류에 적용한 시간스케줄은 개발되어있지 않기 때문에 Boone 등(1988)이 보고한 함수율스케줄 중 본 연구에 적절하다고 여겨지는 것을 선택하였는데, 낙엽송류 판재의 경우 코드번호 T10C4S, 또한 각재류의 경우 T7-C3S 그리고 라디에타소나무 판재의 경우 T12B5S, 또한 각재의 경우 T-11C3S를 기준으

로 해서 시간스케줄로 변형하여 사용하였는데, 적용한 스케줄은 표 2와 같이 12시간 간격의 시간 스케줄을 적용하였다.

2.2.3 건조곡선

모든 제재품은 건조가 종료될 때까지 12시간 간격별로 건조중 무게를 측정하였다. 건조 종료되었을 때 함수율 시험편을 절취하여 전건법에 의해 최종함수율을 구하고, 이를 제재품의 전건무게를 산출한 후 건조 중 함수율을 계산하여 건조시간과 함수율의 관계인 건조곡선을 작성하였다.

2.2.4 건조저항

건조저항은 전건조기간중에 Bramhall(1975)이 제시한 식(1)에 의해 각 수종의 제재품의 두께별로 구하였으며, 3두께의 판재류와 각재류를 종합한 건조저항은 해당 두께와 함수율을 가변인자로 하여 상관관계를 구하였다. 그리고 수종과 제재품의 두께간 건조저항의 비교는 두께간 초기함수율의 차이로 인한 변이를 제거하기 위하여 함수율 30%에서 10%까지 건조저항의 차이로 구하여 비교하였다.

Table 2. Time schedules of lumbers used.

Species	Size classification	Drying time (hr)	Dry-bulb temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Wet-bulb temp. ($^{\circ}\text{C}$)
Japanese larch, Dahurian larch	Board	0 ~ 12	60.0	54.5
		12 ~ 24	60.0	51.5
		24 ~ 36	65.5	54.5
		36 ~ 48	71.0	57.0
		48 ~ 60	80.0	58.0
	Dimension	0 ~ 12	54.5	51.5
		12 ~ 24	54.5	50.5
		24 ~ 36	54.5	48.5
		36 ~ 48	60.0	51.5
		48 ~ 60	65.5	54.5
		60 ~ 72	71.0	57.5
		72 ~ 84	71.0	43.5
		84 ~ 96 ^{*1}	71.0	43.5
		Radiata pine	Board	0 ~ 12
12 ~ 24	82.0			65.5
24 ~ 36	82.0			54.5
Dimension	0 ~ 12		65.5	62.5
	12 ~ 24		65.5	61.5
	24 ~ 36		71.0	65.0
	36 ~ 48		71.0	62.5
	48 ~ 60		76.5	65.5
	60 ~ 72		82.0	54.5
	72 ~ 84		82.0	54.5

*1 Not applied for Dahurian larch dimension lumber.

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

- R : 건조저항(mb-hr),
- P_d : 건구온도의 증기압(mb),
- P_w : 습구온도의 증기압(mb),
- Δt : 건조시간 간격(hr),
- ΔMC : 건조 시간별 감소 함수율(%).

3. 결과 및 고찰

3.1 건조곡선

3.1.1 판재류의 건조곡선

일본잎갈나무와 다후리안낙엽송 판재류의 건조시간 60시간과 라디에타소나무 판재류의 건조시간 36시간 동안 함수율 감소 곡선은 그림 1과 같고, 함수율은 건조 초기부터 말기까지 비교적 균일하게 감소하였다. 각 수종의 두께 24, 27과 30mm별 각각의 최종함수율의 평균과 표준편차는 일본잎갈나무의 경우 8.5±1.1%, 11.9±2.5%와 10.8±1.7%이고, 다후리안낙엽송의 경우 16.7±3.5%, 15.5±4.2와 13.9±2.2%였으며, 라디에타소나무의 경우 1.4±1.1%, 3.5±0.7%와 6.4±2.1%이었다. 그리고, 전 건조기간 중 각 수종의 두께 24, 27과 30mm별 각각의 평균건조속도(%/hr)는 일본잎갈나무의 경우 0.93, 0.44와 0.53이었고, 다후리안낙엽송의 경우 0.60, 0.47과 0.38이었고, 라디에타소나무의 경우 0.86, 0.71과 0.88이었다. 각 수종의 판재류의 두께간에 있어서 초기함수율과 최종함수율이 같지 않기 때문에 건조속도의 비교가 곤란하였지만 일반적으로 초기함수율이 큰 판재는 컸었으며, 최종함수율이 낮을수록 적어졌다. 또한 수종간에는 라디에타소나무가 가장 컸었고, 다음은 일본잎갈나무이며 다후리안낙엽송이 가장 적었다. 일본잎갈나무와 라디에타소나무의 건조속도는 두께간의 차이가 명확하지 않았으나, 다후리안낙엽송의 건조속도는 두꺼울수록 감소하였다.

3.1.2 각재류의 건조곡선

일본잎갈나무 각재류의 건조시간 96시간과 다후리안낙엽송과 라디에타소나무 각재류의 84시간 동안 건조곡선은 그림 1과 같았다. 각 수종의 두께 45, 51과 57mm별 최종함수율의 평균과 표준편차는 각각 일본잎갈나무의 경우 9.7±0.9%, 11.6±0.8%와 14.4±1.9%이었고, 다후리안낙엽송의 경우 14.9±1.9%, 19.7±6.7%와 20.6±4.4%이었고, 라디에타소나무의 경우 5.3±1.4, 5.6±1.5%와 6.7±1.5%로서 두꺼운 각재류일수록 최종함

수율이 낮았다. 전건조기간중 각 수종의 두께 45, 51과 57mm별 각각의 평균 건조속도(%/hr)는 일본잎갈나무의 경우 0.25, 0.29와 0.24이었고, 다후리안낙엽송의 경우 0.25, 0.27과 0.20였으며, 라디에타소나무의 경우 0.62, 0.37과 0.48로서, 라디에타소나무가 가장 컸었고, 일본잎갈나무는 다후리안낙엽송보다 약간 컸었다. 또한 모든 수종과 두께에 있어서 초기함수율이 높을수록 건조속도는 증가하였다.

3.2 두께별 판재류와 각재류의 건조저항

3수종의 판재류와 각재류의 두께별 함수율과 건조저항의 상관관계는 그림 2~3과 같았으며, 수종별 상관계수는 일본잎갈나무가 가장 컸고 다음은 라디에타소나무이며 다후리안낙엽송이 가장 적었다. 일본잎갈나무와 다후리안낙엽송 판재의 건조저항은 함수율 30% 이상에서 완만한 증가 곡선을 나타내다가 함수율 30% 이하부터 급속한 감소곡선을 나타내었으나, 라디에타소나무의 경우는 다른 수종보다 저함수율 수준에서부터 증가하기 시작하였다. 모든 수종의 각재류의 두께에 있어서 건조저항은 함수율이 감소할수록 곡선적으로 증가하였는데, 일본잎갈나무와 다후리안낙엽송의 경우 섬유포화점 이상에서는 완만한 증가를 나타내다가 섬유포화점 이하부터 급속히 증가하였으며, 동일 함수율 수준에서 두께가 두꺼울수록 증가하였다. 동일 두께와 함수율에 있어서 수종간 건조저항의 차이는 다후리안낙엽송이 가장 컸었고 다음은 일본잎갈나무와 라디에타소나무 순이었다.

전 건조저항(Total drying resistance)은 수종과 제재품 두께에 따라 상이할 뿐만 아니라 초기함수율 크기에 따라 서로 달라짐으로 본 연구의 판재류와 각재류의 건조저항을 다른 논문의 유사한 두께의 경우와 동일 함수율 범위 즉 30%에서 10%까지를 기준으로 비교해보면 먼저 두께 27mm 판재의 경우 건조저항은 일본잎갈나무 6.404mb-hr이고, 다후리안낙엽송 7.727mb-hr이며 라디에타소나무는 2.233mb-hr로서 Jung등(1985)이 보고한 두께 25.4mm Douglas-fir 판재의 건조저항 6.249mb-hr와 Lee 등(1988)이 보고한 리기다소나무의 두께 25mm 판재의 건조저항 3.467mb-hr와 비교해 보면 낙엽송류 경우는 컸었으나 라디에타소나무의 경우는 적었다. 다음에 두께 51mm 각재의 경우 건조저항은 일본잎갈나무 13.149mb-hr이고, 다후리안낙엽송 16.278mb-hr이며, 라디에타소나무 5.782mb-hr로서 Bramhall(1975)이 보고한 두께 50.8mm인 western spruce의 15.462mb-hr, lodgepole pine의 28.935mb-hr와 apline fir의 26.691mb-hr 그리고 Jung 등(1985)이 보고한 Dou-

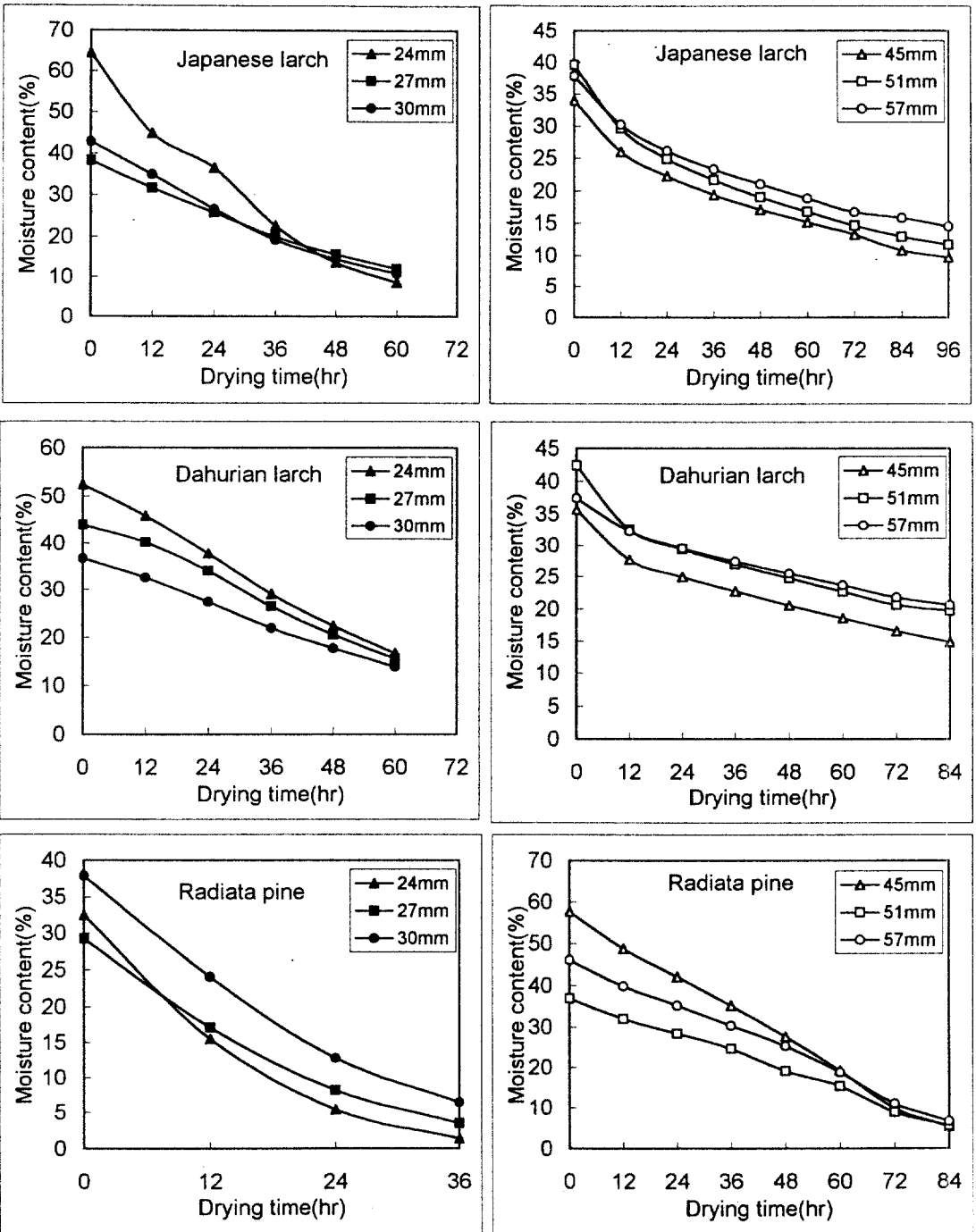


Fig. 1. Kiln drying curves by lumber thicknesses for softwood species.

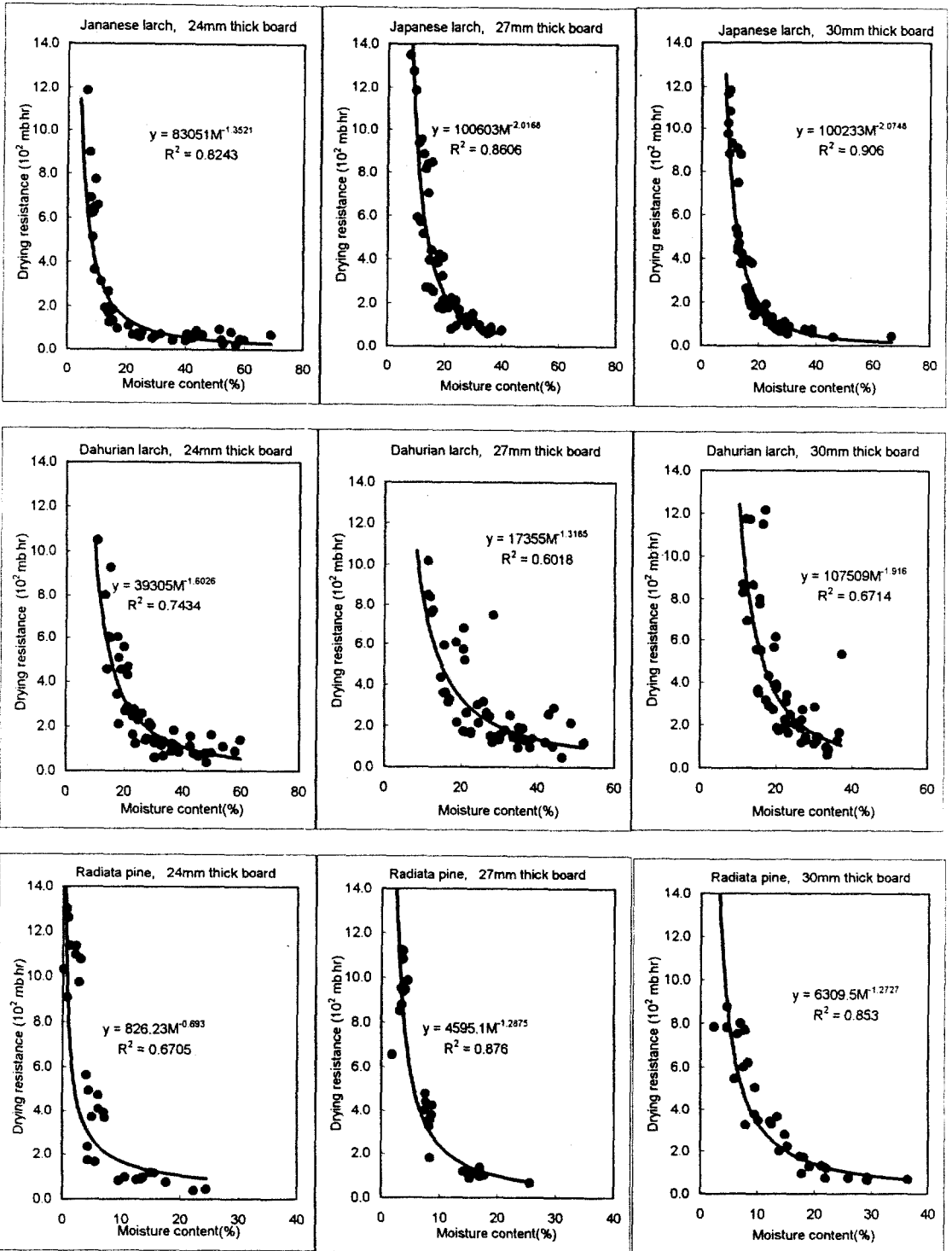


Fig. 2. Relationships between moisture contents and drying resistances by board thicknesses.

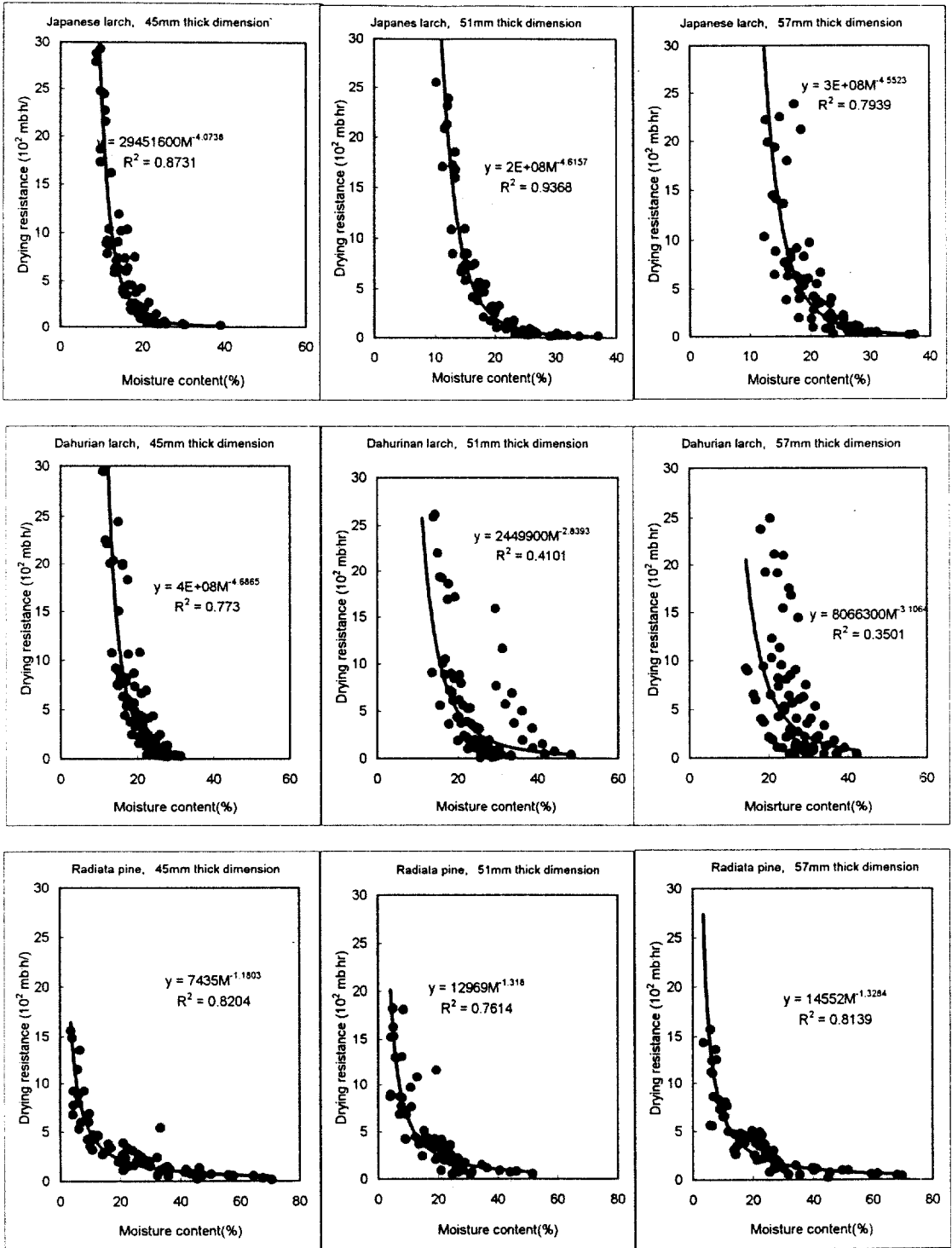


Fig. 3. Relationships between moisture contents and drying resistances by dimension thicknesses.

Table 3. Total drying resistance as function of lumber thicknesses and moisture contents.

Species	Size classification	Regression equation	R ²
Japanese larch	Board	$R=376 \times 1.0289^t + 0.9401^M$	0.6658
	Dimension	$R=700 \times 1.0699^t + 0.8013^M$	0.8605
Dahurian larch	Board	$R=881 \times 1.0062^t + 0.9469^M$	0.5891
	Dimension	$R=253 \times 1.0704^t + 0.8737^M$	0.4493
Radiata pine	Board	$R=41 \times 1.1308^t + 0.8809^M$	0.8240
	Dimension	$R=578 \times 1.0125^t + 0.9419^M$	0.7792

Notes: R : Drying resistance(mb.hr), t : Lumber thickness(mm), M : Moisture content(%).

glas-fir의 18,979mb-hr보다 적었고, Lee 등(1988)이 보고한 두께 50mm인 리기다소나무 각재의 11,098mb-hr보다 컸었다. 이와 같이 전건조저항은 건조할 목재의 건조속도 등과 같은 건조특성에 따라 달라지므로 수종과 두께별로 측정하여야 한다.

3.2.2 판재류와 각재류의 종합 건조저항

판재류와 각재류의 각각 3두께를 종합한 건조저항은 표 3과 같고, 모든 수종의 판재류와 각재류의 상관계수의 값은 수종과 재종에 따라 상이하였는데, 수종간에는 라디에타소나무가 가장 컸었고, 다음은 일본잎갈나무이며, 다후리안낙엽송의 경우는 매우 적었다. 따라서 라디에타소나무와 일본잎갈나무의 판재류와 각재류의 두께와 함수율을 변수로 구한 다중회귀식에 의해 개략적인 종합건조저항을 구하여 활용할 수 있을 것이다.

4. 결 론

건조스케줄 개량에 활용될 수 있는 일본잎갈나무, 다후리안낙엽송과 라디에타소나무의 두께 24, 27, 30mm 판재류와 두께 45, 51과 57mm 각재류의 건조저항과 함수율의 상관관계를 구하였다(그림 2, 3). 동일 함수율 수준에서 수종별 건조저항은 다후리안낙엽송이 가장 컸고, 라디에타소나무가 가장 적었다. 건조저항은 재제품의 두께가 두꺼울수록 그리고 함수율이 감소할수록 증가하였다. 판재류와 각재류의 각각 3두께를 종합해서 함수율과 두께를 변수로 구한 종합 건조저항은 라디에타소나무와 일본잎갈나무의 경우는 비교적 뚜렷한 상관관계를 나타내었으나, 다후리안낙엽송의 경우는 미약한 상관관계를 나타내었다.

참 고 문 헌

1. Bachrich, J. L., 1980. Dry Kiln Handbook. H. A. Simon(International) Ltd. : 371
2. Boone, R. S., C. J. Kozlik, P. J. Bois, and Wengert, 1988. Dry Kiln Schedules for Commercial Woods. USDA FPL-GTR-57 : 87~102
3. Bramhall, G. 1975. Calculating Kiln Schedules Changes. *Canadian Forest Industries* 95(9) : 31~33
4. Bramhall, G. 1976. Semi-empirical Method to Calculate Kiln-Schedule Modification for Some Lumber Species. *WoodSci.* 8(3) : 213~222
5. Jung, H. S., C. J. Kozlik, and H. Resch, 1984. Study on Kiln-Schedule Modification for Douglas-fir. *Mokchae Konghak* 12(1) : 31~37
6. Jung, H. S., C. J. Kozlik, and H. Resch, 1985. Drying Resistance of Three Thicknesses of Douglas-fir Lumber under Mild and Severe Kiln Schedules. *Forest Prod. J.* 36(6) : 73~77
7. Lee, K. S., and H. S. Jung, 1988. Kiln Drying Schedule Modification for Pitch Pine Using Drying Resistance. *Mogchae Konghak* 16(2) : 69~78