

# 원심법에 의한 침엽수 심재부 유효수분이동경로의 반경분포\*<sup>1</sup>

- 조재와 만재의 비교 -

박종수\*<sup>2</sup> · 전수경\*<sup>2†</sup>

## The Size Distribution of Free Water Paths in Heartwood of Softwood by Centrifugal Method\*<sup>1</sup>

- The Difference between Earlywood and Latewood -

Jong Su Park\*<sup>2</sup> · Su Kyoung Chun\*<sup>2</sup>

### 요 약

원심법을 이용하여 침엽수 생재 심재부의 조재와 만재에 대한 수분이동경로의 크기를 평가하였다. 또한, 원심처리 후의 포수율 분포와 수분포텐셜의 관계로부터 액체투과성을 측정하였다. 삼나무의 경우, 조재는 0.70  $\mu\text{m}$ , 만재는 0.50  $\mu\text{m}$ 의 반경에서 뚜렷한 피크가 관찰되었다. 솔송나무는 조재와 만재 모두 0.50  $\mu\text{m}$ 의 반경에서 피크를 나타냈다. 일본전나무와 일본잎갈나무는 조재 0.70  $\mu\text{m}$ , 만재 0.30  $\mu\text{m}$ 의 반경범위에서 피크 값이 관찰되었다. 반면에, 미송과 시트카스푸르수는 뚜렷한 피크 값을 보이지 않았다. 액체투과성은 미송을 제외한 모든 수종에서 조재가 만재보다 좋게 평가되었다.

### ABSTRACT

The size distribution of the free water paths between earlywood and latewood for six species in the heartwood of softwoods was estimated from the amount of dehydrated free water under various centrifugal fields, such as 2,200, 3,300, 4,800 and 6,900 rpm. The centrifugal method is based on the concept that water movement occurs by the balance of centrifugal force and water potential by

\*<sup>1</sup> 접수 2002년 5월 13일, 채택 2002년 7월 30일

이 논문은 2001년 한국학술진흥재단의 박사후 연구과정 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2001-037-GA0012).

\*<sup>2</sup> 강원대학교 산림과학대학 College of Forest Sciences, Kangwon National University, Chunchon 200-701, Korea.

† 주저자(corresponding author) : 전수경(e-mail: chun@kangwon.ac.kr)

meniscus. Water stops where the pressure differential is zero. In the centrifugal field, only two factors affect water movement in wood, that is, centrifugal force and water potential. Also, the water permeability was evaluated from the relationship between the water saturation ratio after the centrifugal treatment and the measure of water potential in specimen. The results showed that *Cryptomeria japonica* had clear peaks at 0.70  $\mu\text{m}$  in earlywood and at 0.50  $\mu\text{m}$  in latewood. *Tsuga sieboldii* and *Larix kaemferi* had peaks at 0.50 and 0.30  $\mu\text{m}$  in both earlywood and latewood, respectively. *Abies firma* showed peaks at 0.70  $\mu\text{m}$  in earlywood and at 0.30  $\mu\text{m}$  in latewood. The water permeability of earlywood was higher than that of latewood for all softwoods except *Pseudotsuga menziesii*.

**Keywords:** centrifugal fields, free water paths, pit aspiration, water potential, water permeability

## 1. 서 론

목재를 유용하게 이용하기 위해서는 건조, 약제 투입, 화학가공 등의 기본적인 가공이 중요하다. 이들 가공의 공통과제는 목재 중의 물질이동이다. 목재 중의 물질이동은 세포내강, 벽공 및 벽공벽을 통하여 행해지고 있지만, 침엽수재에 있어서는 특히 내강과 내강을 연결하는 벽공의 역할이 매우 중요하다. 목재 중의 벽공은 변재에서는 대부분 개방되어 있지만, 심재에서는 상당부분의 벽공이 폐쇄되어 있다. 더욱이, 심재의 통로는 벽공폐쇄 이외에 심재화 물질로 폐쇄되어 있다. 토로스가 벽공연에 부착하여 벽공구를 밀폐한 상태인 벽공폐쇄나 심재화 물질에 의한 벽공폐쇄는 심재형성 과정에서 일어나는 물리적 및 화학적 변화의 결과이고, 이들 저해 인자들에 의해 심재는 변재에 비해 투과성이 상당히 저하된다고 알려져 있다 (Erickson, 1970; Matsumura 등, 1995 a, 1995 b; Fujii 등, 1997).

또한, 만재는 조재에 비해 투과성이 좋다고 알려져 있다. 이것은 만재의 벽공구조가 심재화 과정이나 건조시 발생하는 모관력에 저항하는 힘이 강하여 조재보다 벽공폐쇄율이 적기 때문이다 (Siau 1984). 이와 같이, 투과성은 목재의 조직구조와 밀접한 관계가 있으므로 물질이동에 중요한 역할을 담당하는 수분이동경로에 대한 많은 연구가 행해지고 있다.

지금까지, 수분이동경로의 측정은 주로 기체투과성 (Sebastian 등, 1965; Comstock, 1967; Stamm, 1970)과 현미경적관찰 (Sebastian 등, 1965; Immura & Harada, 1973)을 통하여 평가되었다. 그러나, 이

들 방법은 건조재에 대하여 측정된 것이다. 건조시에는 벽공부의 상태가 변화할 가능성이 있고 건조시의 수분이동경로를 평가하기 위해서는 미건조재에서의 수분이동경로를 평가할 필요가 있다.

본 연구에서는 미건조재에 대한 유효수분이동경로의 반경을 정량적으로 평가하기 위해 원심법을 이용하여 수분이동경로의 크기분포를 조사해 보고자 했다. 원심법은 Hassler & Brunner(1945)가 소형 고형체내의 모관압을 평가하기 위해 최초로 도입하였다. Choong & Tesoro(1989)는 길이가 1.50 cm인 비교적 짧은 시험편을 대상으로 다양한 범위의 원심력을 가한 후, 수분의 탈수량으로부터 침엽수재의 유효 벽공 크기를 평가하였다. 또한, Park 등(1999 a)과 Park & Hayashi(2000)는 길이가 5 cm인 비교적 긴 미건조 시험재를 대상으로 원심처리 후의 포수율 분포와 자유수의 탈수거동으로부터 수분이동경로의 분포 및 액체투과성을 평가하였다. 따라서, 본 연구에서는 원심법을 이용하여 침엽수 심재, 특히 조재와 만재의 수분이동경로 분포 및 액체투과성을 평가하여 목재조직과의 관계를 구명한 후, 기존의 방법과 비교 검토 해 보고자 실시하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 공시수종

생재상태인 삼나무(*Cryptomeria japonica* D. Don.), 솔송나무(*Tsuga sieboldii* Carr.), 일본전나무

무(*Abies firma* Sieb. et Zucc.), 미송(*Pseudotsuga menziesii* Franco), 시트카스푸르스(*Picea sitchensis* Carr.), 일본잎갈나무(*Larix kaemferi* Carr.)를 공시수종으로 하여 심재부에서 단면 2 × 2 cm, 길이 10 cm의 시험재를 할렬법으로 수 개씩 채취하였다. 그 후, 생재상태인 시험재를 증류수 속에 담귀 감압과 상압을 반복하면서 포수화처리를 실시하였다(Park 등, 1999 a). 포수상태의 확인은 시험재가 완전히 침지된 후에도 충분한 시간을 두어 무게의 변화가 나타나지 않을 때를 포수상태로 판단하였다. 포수처리 후, 시험재를 5 cm의 길이로 절단한 후, 탈수처리시의 시험재로 사용하였다.

## 2.2. 실험방법

원심력에 의한 탈수조건은 회전축에서 탈수면까지의 거리 9.7 cm, 온도 10℃, 회전수는 2,200, 3,300, 4,800, 6,900 rpm을 사용하였다. 시험재는 1회 탈수 시 4개의 시험재가 사용되었고, 각 회전수에 대하여 반복실험을 4회 실시한 후 이들의 평균값을 탈수량으로 하였다. 탈수시간은 시험재의 무게변화가 없게 되는 시점까지 탈수를 실시하였다. 무게변화의 여부는 일정시간마다 시험재의 무게를 측정하였다. 본 실험에서는 5시간 탈수처리를 실시하였다. 탈수처리 후, 시험편을 6등분하였다(Fig. 1).

그 후, 각 시험편들의 무게를 달고, 조재와 만재를 각각 절단하였다. 절단 후, 즉시 조재와 만재 절편들의 무게를 측정하였다. 그 후, 각 절편들을 다시 포수화하여 중량을 측정하였다. 각 절편들의 중량을 측정함 다음, 전건상태까지 건조하여 탈수후의 함수율(M)과 포수함수율(M<sub>max</sub>)을 구하였다. 그 후, 섬유포화점을 28%로 하여 다음 식 (1)을 사용하여 포수율(SR)을 계산하였다.

$$SR = \frac{M - FSP}{M_{max} - FSP} \times 100 (\%) \quad (1)$$

where, M : the moisture content after dehydration  
 M<sub>max</sub> : the moisture content at saturation  
 FSP : the fiber saturation point (28%)

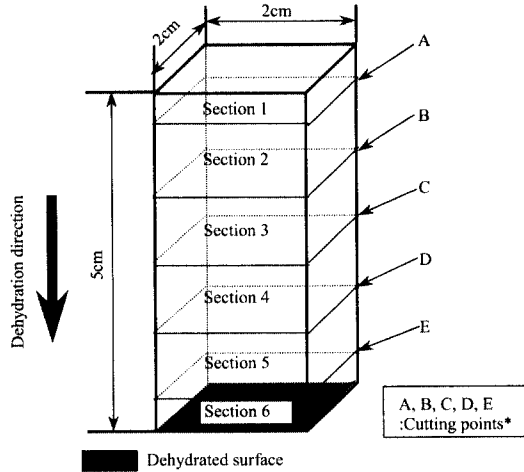


Fig. 1. Cutting positions to make small sections and the number of each section. The water saturation ratio of each section was measured after centrifugal treatment. The specimen size was about 2 × 2 × 5 cm<sup>3</sup>.

\* Cutting points indicate the distance inward from the dehydrated surface, that is, A, B, C, D and E mean 4.5, 3.5, 2.5, 1.5 and 0.5 cm, respectively.

## 2.3. 수분이동경로의 유효반경 평가

원심법은 원심력하에서 목재 중의 물에 작용하는 원심력과 조직구조적으로 결정되는 목재 중의 모관력과의 밸런스로부터 수분이동경로를 구하는 것이다. 자유수가 연속상태일 경우, 시험편을 원심력하에 두면 탈수면의 반대편에 생기는 메니스커스가 자유수의 이동을 지배하게 된다. 원심력(식 3)이 메니스커스에 의해 발생하는 수분포텐셜의 절대값(식 2)보다 크면 메니스커스는 탈수면 쪽으로 이동하여 물은 탈수된다. 만약, 원심력과 메니스커스에 의한 절대값이 같으면 자유수의 이동은 정지하므로 식 (4)가 유도된다(Park 등, 1999 a).

회전축에서 탈수면까지의 거리( $r_0$ )가 일정할 때, 수분이동경로의 반경( $r$ ), 탈수면에서 메니스커스까지의 거리( $l_m$ ) 및 각속도( $\omega^2$ )로부터, 목재내 작용하는 원심력은 회전축에 가까울수록 증가함을 알 수 있다.

이 관계와 각각의 회전수에 대한 목재내 포수율 분포를 이용하여, 수분이동경로의 반경분포를 구하였다.

$$\psi_c = -\frac{2\gamma\cos\theta}{r} \quad (2)$$

$$\psi_f = \frac{\rho_w}{2} l_m(2r_0 - l_m)\omega^2 \quad (3)$$

$$r = \frac{4\gamma\cos\theta}{\rho_w l_m(2r_0 - l_m)\omega^2} \quad (4)$$

where,  $\psi_f$  : the centrifugal force per unit area (Pa),

$\psi_c$  : the capillary pressure(Pa),

$r$  : the radius of the free water path(m),

$\gamma$  : the surface tension of water(N/m),

$\rho_w$  : the water density(kg/m<sup>3</sup>),

$\theta$  : the contact angle,

$l_m$  : the distance inward from the dehydrated surface(m),

$r_0$  : the distance from the rotational center to the dehydrated surface (m),

$\omega^2$  : the angular velocity (s<sup>-1</sup>)

Fig. 1의 절편 2, 3, 4, 5가 수분이동경로의 유효반경 계산에 사용되었다. 유효반경은 각 절편의 평균값을 의미하며 자유수가 연속상태라는 가정하에 평가되었다. 따라서, 절편 1과 6은 시험편 제작시 파괴된 가도관을 많이 포함하고 있으므로 평가대상에서 제외하였다. 수분이동경로의 유효반경 분포를 평가하기 위

해, 각 절편에 대한 수분이동경로의 유효반경을 식 (4)에 의해 계산하였다. 이때, 물의 표면장력은 0.073 N/m, 물과 세포벽의 접촉각은 0°이다. 계산된 각 절편의 반경은 Table 1과 같다. RV(Representative Value: 대표값)는 각 시험편의 양 단면에서 계산된 원심력의 평균값에 해당하는 유효반경을 나타낸다. 원심력을 작용시킨 후의 수분분포는 메니스커스의 크기 분포를 나타낸다고 볼 수 있다. 즉, 포수율 분포는 다양한 크기의 메니스커스에 의해 유지되고 있는 자유수의 분포로 생각할 수 있다. 그리고, 시험재를 원심력방향으로 분할하여 각 절편의 포수율을 구한 후, 인접한 절편과의 포수율 차를 구하면 분할한 위치에 상당하는 원심력에 의해 이동한 수분량을 알 수 있다. 즉, 원심력에 상당하는 메니스커스의 크기에 의해 유지되어 있던 수분의 양을 알 수 있는 것이다. 따라서, 인접한 포수율의 차에 의해 계산된 값은 RV의 모세관의 크기에 의해 유지된 자유수 양을 의미한다.

각 절편에 대한 유효반경의 범위를 4개의 회전수(rpm)에 대하여 식 (4)를 이용하여 평가한 값은 평가범위가 좁다. 따라서, 넓은 범위의 유효반경 분포를 평가하기 위하여 각 회전수에 대하여 계산된 값을 결합하였다. 본 연구에서 평가된 유효반경의 분포는 0.11~3.01 μm의 범위이다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 포수율 분포

Table 2~7은 탈수 후, 공시수중에 대한 조재와 만

Table 1. Range of radius and representative value for each section (μm)

Number of section*	2,200 rpm		3,300 rpm		4,800 rpm		6,900 rpm	
	Range	RV	Range	RV	Range	RV	Range	RV
2	Below 0.99	-	Below 0.44	-	Below 0.21	-	Below 0.10	-
3	0.99~1.31	1.12	0.44~0.58	0.50	0.21~0.28	0.24	0.10~0.14	0.11
4	1.31~2.05	1.59	0.58~0.91	0.70	0.28~0.43	0.33	0.14~0.21	0.16
5	2.05~5.83	3.01	0.91~2.59	1.34	0.43~1.23	0.63	0.21~0.59	0.31

\* RV means representative value which is the radius corresponding to the average value of the centrifugal forces calculated at both ends of each section.

Table 2. Distribution of the water saturation ratio (%) of *Cryptomeria japonica* after dehydration

Number of section*	2,200 rpm		3,300 rpm		4,800 rpm		6,900 rpm	
	Earlywood	Latewood	Earlywood	Latewood	Earlywood	Latewood	Earlywood	Latewood
2	508	74.4	27.3	48.1	9.0	31.1	3.1	9.2
3	65.4	75.2	34.8	69.6	14.9	39.9	3.9	12.2
4	76.8	80.6	60.9	76.8	19.9	44.4	5.3	19.1
5	88.7	86.2	84.7	84.4	49.9	67.9	11.0	35.7

Table 3. Distribution of the water saturation ratio (%) of *Tsuga sieboldii* after dehydration

Number of section*	2,200 rpm		3,300 rpm		4,800 rpm		6,900 rpm	
	Earlywood	Latewood	Earlywood	Latewood	Earlywood	Latewood	Earlywood	Latewood
2	58.5	77.7	35.9	51.5	16.4	24.7	9.8	12.8
3	71.4	82.5	56.2	69.5	20.1	28.6	17.2	21.0
4	85.6	90.1	78.0	84.5	34.1	44.0	27.6	30.5
5	86.7	90.4	86.2	89.1	65.8	76.2	45.7	49.8

Table 4. Distribution of the water saturation ratio (%) of *Abies firma* after dehydration

Number of section*	2,200 rpm		3,300 rpm		4,800 rpm		6,900 rpm	
	Earlywood	Latewood	Earlywood	Latewood	Earlywood	Latewood	Earlywood	Latewood
2	41.0	64.6	21.6	39.8	10.4	21.8	6.0	11.7
3	62.1	78.7	31.3	48.3	16.0	30.7	11.7	18.7
4	82.6	88.3	58.4	72.3	27.0	43.7	19.2	25.6
5	92.3	90.4	84.6	88.2	57.9	70.5	33.1	41.2

Table 5. Distribution of the water saturation ratio (%) of *Pseudotsuga menziesii* after dehydration

Number of section*	2,200 rpm		3,300 rpm		4,800 rpm		6,900 rpm	
	Earlywood	Latewood	Earlywood	Latewood	Earlywood	Latewood	Earlywood	Latewood
2	60.0	75.7	44.2	44.1	34.3	32.6	23.6	20.2
3	70.3	84.9	55.0	52.3	43.3	36.5	33.8	28.6
4	79.1	86.7	83.4	69.8	47.7	40.9	38.7	31.7
5	88.6	87.3	85.7	83.5	70.4	70.5	44.6	37.4

Table 6. Distribution of the water saturation ratio (%) of *Picea sitchensis* after dehydration

Number of section*	2,200 rpm		3,300 rpm		4,800 rpm		6,900 rpm	
	Earlywood	Latewood	Earlywood	Latewood	Earlywood	Latewood	Earlywood	Latewood
2	75.8	74.4	55.9	66.3	36.0	55.1	22.2	42.9
3	81.8	86.0	67.8	70.8	43.9	62.6	31.6	49.7
4	90.4	86.9	86.6	77.0	64.0	70.1	44.4	56.0
5	93.6	87.8	89.0	82.5	87.3	80.9	64.9	66.5

Table 7. Distribution of the water saturation ratio (%) of *Larix kaemferi* after dehydration

Number of section*	2,200 rpm		3,300 rpm		4,800 rpm		6,900 rpm	
	Earlywood	Latewood	Earlywood	Latewood	Earlywood	Latewood	Earlywood	Latewood
2	38.7	61.1	24.3	49.6	15.4	22.6	14.2	15.2
3	58.2	70.0	38.6	57.8	22.7	31.1	19.2	16.4
4	77.1	76.8	65.6	71.5	39.1	47.2	26.1	23.9
5	90.1	79.5	89.5	81.6	72.2	69.7	56.2	45.0

In all tables, \*the small numbers represent the section near the center of rotation. The distance from the center of rotation to the surface of dehydration is  $97 \times 10^3$  m. Water saturation ratio was calculated by Eq. (1)

재의 포수율 분포를 나타낸다. 모든 수종에서, 회전축에 가까운 절편일수록 포수율이 낮았으며, 이들 포수율 분포로부터 수분이동경로의 크기분포를 평가하였다. Table 2의 포수율 분포로 예를 들면 다음과 같다. 2,200 rpm의 원심력을 적용했을 때, 조재의 절편 No. 2와 3의 포수율은 각각 50.8과 65.4%이었다. 따라서, 0.99~1.31  $\mu\text{m}$  사이의 빈도는 인접한 포수율 차에 의해 14.6%로 계산되었다. 같은 방법으로 1.31~2.05  $\mu\text{m}$ , 2.05~5.83  $\mu\text{m}$  사이의 빈도를 계산하면 각각 11.4%와 11.9%로 평가되었다. 또한, 4,800 rpm의 원심력을 적용했을 때, 0.21~0.28  $\mu\text{m}$ , 0.28~0.43  $\mu\text{m}$  및 0.43~1.23  $\mu\text{m}$  사이의 빈도는 인접한 조재 절편사이의 포수율 차로부터 계산한 결과, 각각 5.9%, 5.0% 및 30.0%로 평가되었다. 각 절편의 No. 2에 대한 포수율은 No. 2의 최대반경이하의 반경빈도를 나타낸다. 즉, No. 1과 6의 절편들은 많은 파괴된 가도관을 포함하고 있으므로 빈도계산에 사용되지 않았다. 본 연구에서 평가된 빈도의 범위는 0.10~5.83  $\mu\text{m}$ 이었다(Table 1). 탈수 후의 포수율은 주어진 원심상태에 해당하는 수분포텐셜을 발생하는 메니스커스에 의해 유지된 자유수의 양을 나타낸다. 따라서, 인접한 포수율의 차에 의해 계산된 값은 RV의 모세관 크기에 의해 유지된 자유수 양의 빈도이다.

### 3.2. 조재와 만재의 수분이동경로 크기 분포

Fig. 2는 공시수종에 대한 조재와 만재의 수분이동경로 크기분포를 나타낸다. 분포곡선의 비교에서, 삼나무는 조재와 만재 사이에 뚜렷한 분포차이를 나타냈다. 반면에, 다른 수종은 조재와 만재 사이에 특징적인 분포차이를 보이지 않았다. 삼나무의 경우, 조재는 0.70  $\mu\text{m}$ , 만재는 0.50  $\mu\text{m}$ 의 반경에서 뚜렷한 피크가 관찰되었다. 즉, 반경 0.70과 0.50  $\mu\text{m}$ 의 모세관에 의해 유지된 자유수 양의 빈도는 각각 22.6%와 26.6%였다. 솔송나무는 조재와 만재 모두 0.50  $\mu\text{m}$ 의 반경에서 피크를 나타냈다. 일본전나무는 조재 0.70  $\mu\text{m}$ , 만재 0.30  $\mu\text{m}$ , 일본잎갈나무는 조재와 만재 모두 0.30  $\mu\text{m}$ 의 반경에서 피크 값을 보였다. 그러나, 미송

과 시트카스푸르스는 명확한 피크를 보이지 않았다. 한편, 미송은 다른 수종들에 비해 0.10  $\mu\text{m}$  이하의 반경 범위에서 훨씬 높은 빈도를 나타냈다.

Sebastian 등(1995)은 기체투과성 실험을 통해 white spruce 심재부에 대한 벽공벽 소공의 유효반경을 계산한 결과, 0.8~4.8  $\mu\text{m}$ , 평균 2.33  $\mu\text{m}$ 값을 얻었다. 그러나, 같은 수종에 대한 전자현미경 관찰에 의해서는 0.66  $\mu\text{m}$ 의 반경값을 얻었다. 池·金(1996)은 북양 침엽수재인 가문비나무, 낙엽송, 적송의 심재부 미세공극의 평균 반경을 기체투과성에 의해 평가하였다. 측정결과, 세 수종의 반경 크기는 가문비나무(0.703  $\mu\text{m}$ ), 적송(0.152  $\mu\text{m}$ ), 그리고 낙엽송(0.101  $\mu\text{m}$ ) 순으로 나타났다고 보고하였다. 한편, Taniguchi 등(1995)은 수은압입법을 이용하여 삼나무 벽공벽 소공의 분포를 측정하였다. 그들은 벽공벽 소공은 반경 0.65  $\mu\text{m}$ 에서 최대값을 보였다고 보고하였다. Siau (1984)는 침엽수재에 있어서 수분이동경로의 유효반경은 수종별, 벽공의 상태, 그리고 측정방법에 따라 반경에 차이를 나타내지만 대략 0.01~2.00  $\mu\text{m}$ 의 범위라고 언급하였다. Park 등 (1999 a)은 원심법을 이용하여 미건조 침엽수 심재부의 수분이동경로 크기분포를 평가하였다. 실험결과, 삼나무, 솔송나무 및 일본전나무는 각각 0.56, 0.16 및 0.11  $\mu\text{m}$ 에서 최대값을 보였다고 보고하였다. 심재부에서는 상당부분의 벽공이 폐쇄되어 있고 더욱이 심재화 물질에 의한 벽공폐색이 더해지므로 이들 피크값에 대해 그들은 우상층의 존재에 주목하였다. Liese(1965)의 연구결과에 의하면, 우상층의 높이는 0.5~1.0  $\mu\text{m}$ 의 범위로 측정되었다. 따라서, 그들은 만약, 우상층이 세포내강 맞은 편의 유연벽공에 존재한다면 불완전한 벽공폐쇄의 가능성이 크며 3수종 모두 우상층이 존재하므로 이들 최대값은 우상층의 존재로 인한 불완전한 벽공폐쇄가 그 원인일 가능성이 크다고 제안하였다. 또한, 그들은 심재화 과정시 발생하는 강한 모관력에 의한 벽공파괴가 최대값의 원인일 가능성이 있다고 보고하였다. Park 등(1999 b)은 삼나무 심재부의 유연벽공을 조사해 본 결과, 일정비율만큼 토러스의 가장자리가 파괴된 형태를 관찰하였다. 이 현상에 대해 그들은 심재화 과정시 강한 모관압에 의해 벽공벽이 파괴될 가능성이 있다는 가정을 설정하여 이를 증명하

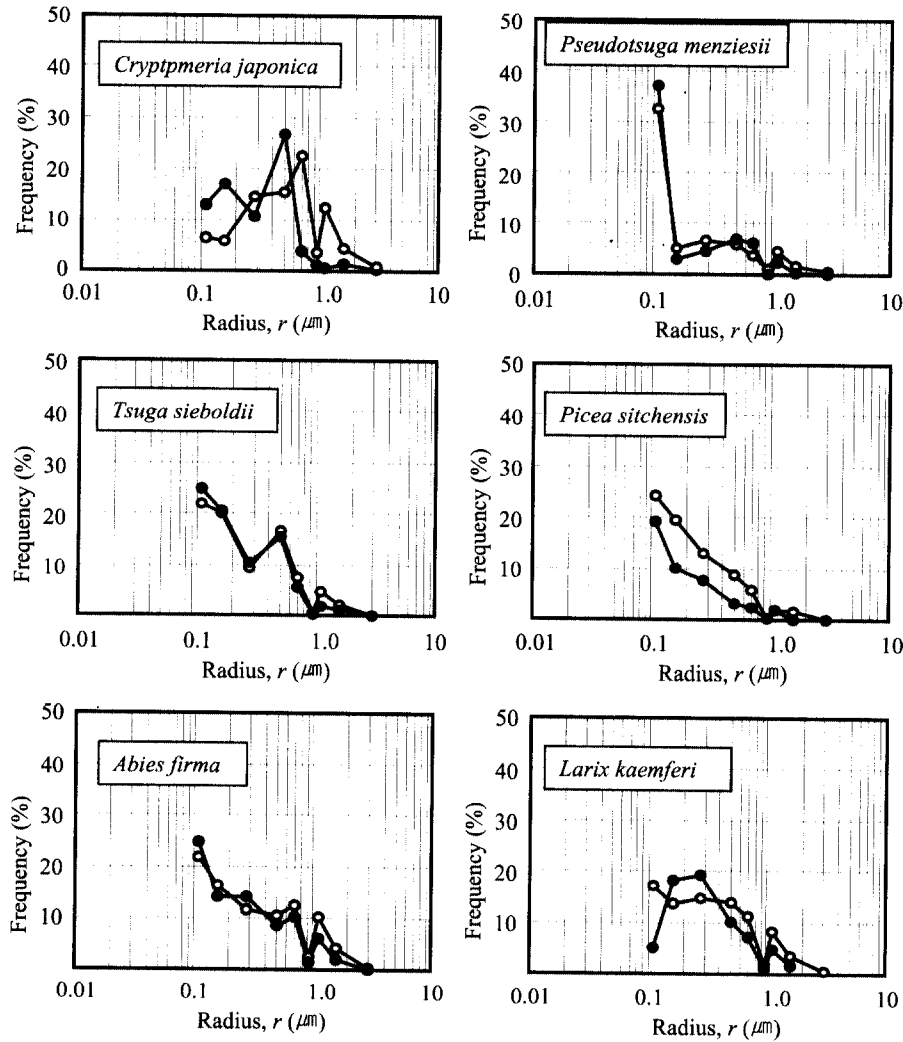


Fig. 2. Distribution curves of radii of free water paths of earlywood and latewood for six species. Open circles: earlywood, Filled circles: latewood.

기 위해 원심법을 이용하여 침엽수 변재부의 벽공벽 거동을 조사하였다. 포수율 분포와 현미경적 관찰을 통해 조사한 결과, 삼나무 변재부의 벽공벽은 0.248 MPa의 압력차를 가하면 벽공벽이 파괴되며 그 파괴 형태가 심재부의 파괴형태와 유사함을 발견하였다. 따라서, 그들은 심재화 과정시 발생하는 강한 모관압에 의해 유연벽공이 파괴될 가능성이 크다고 제안하였다. 이 압력차는 반경  $0.59 \mu\text{m}$ 에 해당한다.

이들의 연구결과를 토대로 판단해 보면, 본 연구에서 관찰된 피크 값들은 수분이동경로의 유효반경 값으로 판단되며, 이상층의 존재 및 벽공벽 파괴가 그 원인일 것으로 생각된다.

### 3.3. 조재와 만재의 액체 투과성

Fig. 3은 공시수종에 대한 조재와 만재의 액체투과

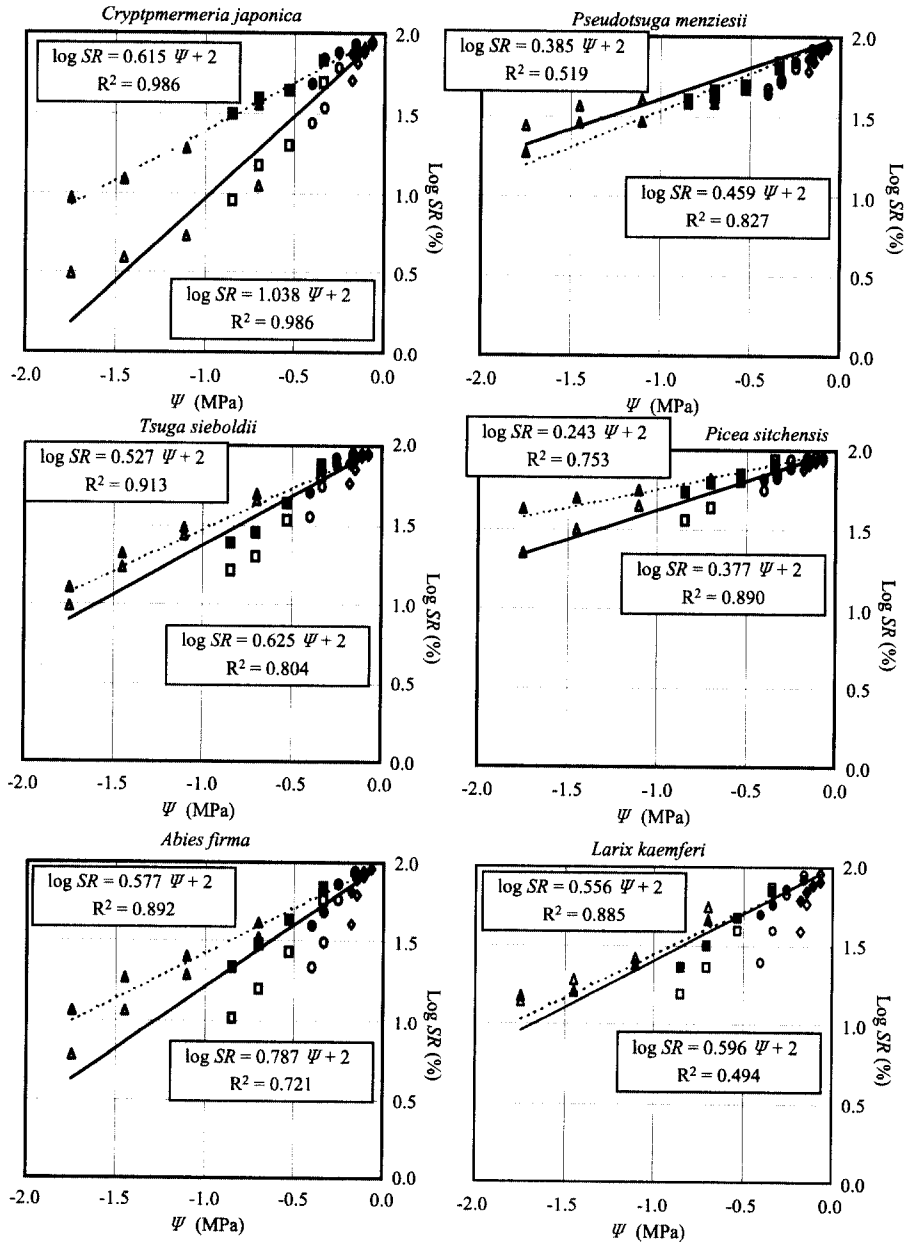


Fig. 3. Relationship between water potential ( $\Psi$ ) and the logarithm of the water saturation ratio (log SR) for earlywood (solid lines) and latewood (dotted lines). Diamonds: 2,200 rpm, Circles: 3,300 rpm, Squares: 4,800 rpm, Triangles: 6,900 rpm.

성을 나타낸다. 포수율은 수분이동의 良否를 나타내므로, 액체투과성은 원심처리 후의 포수율(SR)과 수

분포텐셜( $\Psi$ )의 관계를 이용하여 평가하였다. 원심처리 후의 포수율(SR)과 수분포텐셜( $\Psi$ )의 관계는 다



음 식 (5)와 같다.

$$\text{Log}_{10} SR = \alpha \Psi + 2 \quad (5)$$

여기서,  $\Psi$ (MPa)의 범위는 0에서 -2이다. 수분포텐셜  $\Psi$ 은 각 절편의 중심에 대하여 계산했다.  $\Psi$ 이 0과 같으면,  $\text{Log}_{10} SR$ 은 2이다. 즉,  $SR$ 은 100과 같다. 계수  $\alpha$ 는 액체투과성의 정도를 나타낸다.

실험결과,  $\alpha$ 의 값은 조재의 경우, 삼나무가 가장 높게 평가되었고, 일본전나무, 솔송나무, 일본잎갈나무, 미송, 시트카스프루스의 순으로 평가되었다. 만재는 삼나무, 일본전나무, 일본잎갈나무, 솔송나무, 미송, 시트카스프루스의 순으로 평가되었다. 일반적으로 일본잎갈나무는 투과성이 나쁜 수종으로 알려져 있다(일본목재보존협회, 1982). 그러나, 본 실험결과 일본잎갈나무의 액체투과성은 상당히 좋게 평가되었다. 이 불일치에 대해서는 추후에 구명해야할 사항이다. 조재와 만재의 액체투과성을 비교해 보면, 미송을 제외한 모든 수종에서 조재의 액체투과성이 만재보다 좋게 평가되었다. 특히, 삼나무의 경우 조재와 만재의 투과성에 큰 차이를 보였다.

일반적으로 건조상태에서 만재는 그들의 벽공구조가 건조시 발생하는 모관력에 저항하는 힘이 강하여 조재보다 투과성이 뛰어나다고 알려져 있다(Siau, 1984). Phillips(1933)의 연구결과에 의하면 벽공폐쇄는 섬유포화점까지 함수율이 감소됨에 따라 증가하였고, 섬유포화점에서 조재가도관은 거의 대부분의 벽공이 폐쇄되었지만, 만재가도관은 일정부분 개방되어 있었다고 하였다. 또한, Jinxing(1989)는 radiata pine 심재의 벽공폐쇄율을 조사한 결과, 조재가도관은 약 90%, 만재가도관은 약 20%가 폐쇄되었다고 보고하였다. 이들 결과에 의해 일반적으로 만재가 조재보다 투과성이 뛰어나다고 알려져 있다. 그러나, 본 실험결과는 기존의 기체투과성과는 상반된 결과를 보였다. Thomas(1969)는 southern pine 만재가도관의 유연벽공에 많은 양의 추출물이 존재하는 것을 관찰하였다. 따라서, 그는 만재의 투과성은 조재보다 상당히 감소할 것이라 보고하였다. Comstock(1965)은 생재상태인 eastern hemlock을 대상으로 축방향의 액체투과성을 측정된 결과, 심재부에서 투과성은 만재

율이 증가함에 따라 감소하였다고 보고하였다. 이들 결과들을 토대로 판단해 보면, 생재상태의 액체투과성은 건조재에 대하여 측정된 기체투과성과 차이점이 있다는 것을 알 수 있었다.

## 4. 결 론

원심법을 이용하여 조재와 만재의 수분이동경로 및 액체투과성을 측정된 결과, 모관계에 존재하는 수분이동경로의 분포를 정량화 할 수 있었다. 또한, 원심처리 후의 포수율과 수분포텐셜의 관계로부터 함수율의 변화를 동반하는 비정상상태하에서의 액체투과성을 평가할 수 있었다. 본 실험을 통하여 얻어진 결과는 다음과 같다.

- 1) 삼나무, 솔송나무, 일본전나무, 일본잎갈나무의 조재는 각각 0.70, 0.50, 0.70 및 0.30  $\mu\text{m}$ 의 유효반경에서 뚜렷한 피크가 관찰되었다.
- 2) 삼나무, 솔송나무, 일본전나무, 일본잎갈나무의 만재는 각각 0.50, 0.50, 0.30 및 0.30  $\mu\text{m}$ 의 유효반경에서 뚜렷한 피크를 나타냈다.
- 3) 미송과 시트카스프루스는 명확한 피크 값을 보이지 않았다.
- 4) 생재상태의 액체투과성은 미송을 제외한 모든 수종에서 조재의 투과성이 만재보다 양호하게 평가되었다.

## 참 고 문 헌

1. 지우근 · 김규혁. 1996. 북양 침엽수재의 공기 투과성. 목재공학 24(4): 22~31.
2. Choong, E. T. and F. O. Tesoro. 1989. Relationship of capillary pressure and water saturation in wood. *Wood Sci. Technol.* 23: 139~150.
3. Comstock, G. L. 1965. Longitudinal permeability of green eastern hemlock. *Forest Prod. J.* 17(10): 37~48.
4. Comstock, G. L. 1967. Longitudinal permeability of wood to gases and nonswelling liquids. *Forest Prod. J.* 17(10): 41~46.
5. Erickson, H. D. 1970. Permeability of southern

- pine wood - A review-. *Wood Sci* 2(3): 149~158.
6. Fujii, T., Y. Suzuki, and N. Kuroda. 1997. Bordered pit aspiration in the wood of *Cryptomeria Japonica* in relation to air permeability. *IAWA Journal* 18(1): 69~76.
  7. Hassler, G. L. and Brunner. 1945. Measurement of capillary pressure in small core samples. *Trans. AIME*. 160: 114~123.
  8. Imamura, Y. and H. Harada. 1973. Electron microscopic study on the development of the bordered pit in coniferous tracheids. *Wood Sci Technol*. 7: 189~205.
  9. Japan Wood Preserving Association. 1982. Wood Preservation. Japan Wood Preserving Association, Bunkyo-shuppan, p. 193.
  10. Jinxing, L. 1989. Distribution, size and effective aperture area of the inter-tracheid pits in the radial wall of *Pinus radiata* tracheids. *IAWA Journal* 10(1): 53~58.
  11. Liese, JF. 1965. The warty layer. In: Cote WA Jr(ed) Cellular Ultrastructure of Woody Plants. Syracuse University Press, Syracuse, NY, pp. 41~56.
  12. Matusmura, J., J. Tsutsumi, and K. Oda. 1995. Relationships of bordered pit aspiration occurring during to longitudinal gas permeability in Karamatsu (*Larix leptolepis*) woods natural- and freeze-dried. *Mokuzai Gakkaishi* 41(4): 433~439.
  13. Matusmura, J., J. Tsutsumi, and K. Oda. 1995. Effect of ethanol exchange-drying and ethanol treatments after natural-drying on longitudinal gas permeability of softwood. *Mokuzai Gakkaishi* 41(9): 863~869.
  14. Phillips, E. W. J. 1933. Movement of the pit membrane in coniferous woods with special reference to preservative treatment. *Forestry* 7: 109~120.
  15. Park, J. S., K. Hayashi, and N. Nakamura. 1999 a. Trial approach to the estimation of the size distribution of free water paths in the undried heartwood of softwoods by a centrifugal field. *J. Wood Sci*. 45(1): 1~9.
  16. Park, J. S., K. Hayashi, and N. Wakabayashi. 1999 b. The behavior of pit membranes in softwood under the centrifugal field. *The Society of Materials Science Japan* 48(3): 213~217.
  17. Park, J. S. and K. Hayashi. 2000. Dehydration to longitudinal direction of wood under centrifugal fields. *The Bulletin of the Ehime University Forest* 1~10.
  18. Siau, J. F. 1984. Transport Processes in Wood. Springer-verlag, pp. 49~53.
  19. Sebastian, L. P., W. A. Jr. Cote, and C. Skaar. 1995. Relationship of gas phase permeability to ultrastructure of white spruce wood. *Forest Prod. J.* 15(9): 394~404.
  20. Stamm, A. J. 1970. Maximum effective pit pore radii of the heartwood and sapwood of six softwoods as affected by drying and resoaking. *Wood and Fiber* 1(4): 263~269.
  21. Thomas, R. J. 1969. The ultrastructure of southern pine bordered pit membranes as revealed by specialized drying techniques. *Wood Fiber* 1: 110~123.