

Pressure Bomb법을 이용한 섬유방향 액체투과성 측정*1

허종윤*2 · 강호양*2

Measurement of Longitudinal Liquid Permeability Using Pressure Bomb Method*1

Jong-Yun Hur*2 · Ho-Yang Kang*2

ABSTRACT

Liquid permeabilities of red oak and several softwoods were measured by the pressure bomb method and a modified liquid permeability method in order to investigate their efficacy. The effect of pre-boiling and prefreezing on wood permeability were also examined for both green and resaturated specimens. Regardless of some disadvantages these two methods were revealed as a handy tool for quick evaluation of the permeability of an unknown species. The permeabilities of the resaturated specimens increased when preboiled, but decreased when pre-frozen. For green specimens, however, prefreezing increased permeability. The discrepancy of the prefreezing effect on two specimens partially attributes to their difference of initial permeabilities. For all species except radiata pine heartwood, the radii of the effective capillary pores, derived from the water potential equation, distribute from $0.42\mu\text{m}$ to $7.2\mu\text{m}$. Those of radiata pine heartwood are below $0.46\mu\text{m}$.

Keywords : Longitudinal liquid permeability, pressure bomb, water potential, radius of capillary pore

1. 서론

목재내 수분 유동은 모세관 이동과 확산 이동으로 나눌 수 있다. 열기건조시간의 대부분은 확산에 걸리는 시간으로 목재 투과성에 크게 영향받지 않는다. 그러나 고온건조, 고주파건조에서는 고온에 의해 발생한 수증기가 모세관 통로를 통해 빠르게 이동하기 때문에 투과성이 건조속도에 크게 영향을 미친다. 최근 고온건조와 고주파건조가 목재건조에서 차지하는 비중이 높아짐에 따라 목재 투과성의 측정 기술 및 투과성 개선기술에 대한 관심이 높아지고 있다.

목재 투과성은 액체 또는 기체의 유동속도로 판정하는데 기체보다 액체 투과성 측정이 더 어렵다(Siau, 1984). 액체 투과성을 바르게 측정하기 위해서는 액체 유동을 방해하는 모세관내 기포와 액체에 녹아있는 기체를 미리 제거하여야 할뿐만 아니라 벽공막소공을 막을 수 있는 미세 물질을 초정도 여과기로 걸러내야 한다. 따라서 지금까지 목재 투과성 측정에는 액체 측정법보다 기체 측정법이 많이 이용되어 왔다. 그러나 건조중 자유수는 대부분 액체상태로 유동하고 액체의 표면장력에 의해 수분통로의 변화가 생기므로 정확한 건조속도를 예측하기 위해서는 액체 측정법을 사용하는 것이 타당할 것으로 생각된다.

*1 접수 1997년 7월 20일 Received July 20, 1997

*2 충남대학교 농과대학 College of Agriculture, Chung-Nam National University, Dae-Jeon 305-764, Korea

지금까지 목재의 투과성에 대한 연구는 많이 발표되어 있다. Choong(1974)은 22종의 활엽수 투과성 실험에서 섬유방향 투과성이 접선방향과 방사방향 투과성보다 높게 나타난다고 보고하였고, Milota(1995)도 loblolly pine의 섬유방향 투과성은 9.5darcy이고, 횡단방향 투과성은 0.15darcy로 섬유방향 투과성이 약 65배 높음을 보였다. 이와 같은 결과를 Booker(1990)와 Petty(1993)도 보고하였다. 섬유방향 투과성이 횡단방향 투과성보다 높은 이유를 Siau(1971)는 섬유방향의 유체유동은 활엽수에서는 도관요소간의 천공관, 침엽수에서는 인접 가도관간의 유연벽공을 통해 단순히 이루어지나 횡단방향은 방사가도관, 방사유세포, 수평수지구 등으로 연결된 복잡한 조직을 통해 이루어지기 때문이라고 설명하였다.

일반적으로 변재가 심재보다, 수에서 수피로 갈수록 투과성은 높게 나타난다. Fogg(1969)는 미국 Southern pine의 변재부 투과성이 심재부보다 15배에서 190배까지 높다고 보고하였으며, Chen(1991)은 white oak, sugar maple, black walnut의 실험에서 심·변재부간의 투과성의 차이가 1,000배까지 나타났다고 발표하였다. Erickson(1970)은 침엽수에서 변·심재부간의 투과성에 차이를 보이는 가장 큰 원인은 유연벽공(borderd pit)의 폐쇄 정도와 벽공막에 침적된 추출물량의 차이라고 하였다. Comstock(1965)은 Eastern hemlock을 유기용매(알코올-벤젠)추출하여 투과성이 2배 증가함을 보고하였다. Milota(1995)는 미성숙재(juvenile wood)과 성숙재(mature wood)의 실험에서 비중과 투과성은 상관이 없다고 보고하였다.

Petty(1970)는 춘·추재 간의 벽공이 폐쇄되는 정도 차이를 벽공막의 두께로 설명하였는데, 두꺼운 벽공벽을 갖는 추재는 벽공폐쇄에 대한 저항이 춘재 보다 높기 때문에 추재 비율이 높을수록 투과성이 낮다고 하였으나 Comstock(1970)은 건조 후에도 춘재의 폐쇄벽공 수가 추재보다 적을 때에는 춘재의 투과성이 추재보다 높다고 보고하였다.

세계적인 목재 자원의 감소로 국내에 도입되는 수종의 다양화는 피할 수 없는 현상이다. 이같이 다양한 수종의 건조속도를 빠르고 쉽게 예측할 수 있는 투과성 측정방법이 요구되고 있다. 본 연구에서는 보다 간편한 액체투과성 측정법을 찾기 위해 pressure bomb 법과간이 투과율 측정법의 가능성을 조사하였다. 전자는 pressure bomb을 이용하여 포수 시편의 water potential을 측정하여 유효공극크기를 계산하는 방법이며, 후자는 기존의 액체 투과성 측정법을 간편화시킨 것으로 시편의 한쪽 횡단면을 열린 액체 용기에 담그고 다른 횡단면에 진공압력을 걸

어 액체가 시편을 투과하는 속도를 측정하는 방법이다. 이 두 가지 방법을 이용하여 생재와 재포수재의 투과성을 측정하였으며, 천연건조 전후의 투과성 변화와 증기 전처리, 냉동 전처리에 의한 투과성 변화를 조사하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 계산식

2.1.1 Water potential

수분은 water potential이 낮아지는 방향으로 이동하는데 모세관내의 수분과 주위 증기압의 관계를 나타내는 water potential 식은 다음과 같이 표기될 수 있다 (Siau, 1984).

$$\Psi_s = \Psi^* + \frac{RT}{V_m} \ln h \quad (1)$$

Ψ_s : 증기압차에 의한 water potential(atm)

Ψ^* : 표준상태(1bar)의 water potential(atm)

R: 이상기체상수(8.2*10⁻⁵ atm m³/Kmol)

T: 절대온도(K)

V_m: 몰당 부피 (1.8*10⁻⁵ m³/mol)

h: 상대습도

표준상태 water potential(Ψ^*)은 0℃에서 0이며 온도에 따라 증가하나 등온조건에서는 무시할 수 있다(Siau, 1984). 따라서 식(1)은 식(2)와 같이 간단히 표시될 수 있다.

$$\Psi_s = 4.556 T \ln h \quad (2)$$

한편 표면장력에 의한 water potential은 다음과 같다.

$$\Psi_m = -\frac{2r \cos \theta}{r} \quad (3)$$

Ψ_m : 표면장력에 의한 water potential(atm)

r: 표면장력(7.2*10⁻⁷ atm m at 20℃)

r: 모세관 미세공극 반경(m)

θ : 접촉각

상대습도와 표면장력, 모세관 반경의 관계는 식(2)와 (3)의 두 water potential을 동일하게 놓으므로 구할 수 있다. 등온상태이며 접촉각은 0°, 온도 20℃일 때 상대습도는 다음의 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$\ln h = 1.078 * 10^{-9} \left(\frac{1}{r} \right) \quad (4)$$

2.1.2 Darcy의 법칙

목재와 같은 공극성물질을 통한 정상상태의 유체 유동은 Darcy식으로 기술될 수 있으나 목재는 비균질성 물질이기 때문에 Darcy 법칙의 모든 가정을 만족시키지 못한다. 그러나 본 연구의 목적 상 투과율을 간편하게 측정하기 위해 Darcy식(식 (5))을 사용하였다.

$$K = 1.013 * 10^8 k \eta \quad (5)$$

$$k = \frac{Q / A}{\Delta P / L}$$

K : 비투과율(darcy)

k : 투과율(cm⁴/dyne s)

η : 물의 점성계수(= 0.01 dyne sec/cm²)

Q : 유동속도(cm³/s)

A : 단면적(cm²)

ΔP : 시편 양단의 압력차

(dyne/cm²(1atm = 1.013*10⁶dyne/cm²))

L : 시편의 길이(cm)

2.2 측정장치

2.2.1 water potential 측정 장치

water potential 측정에는 주로 식물 엽기공의 개폐도를 측정하는데 쓰이는 pressure bomb을 사용하였는데 이 측정 장치는 Fig. 1의 모식도와 같이 pressure bomb, 압력계, needle valve, 고압질소통으로 구성되어 있다. pressure bomb(A)은 최대 50기압에 견디도록 설계되어 있으며, 시편(B)과 pressure bomb 뚜껑 사이에 고무 개스킷(C)이 있어 시편내 미세관 외에 다른 곳으로 질소가스가 새지 못하게 밀폐하는 역할을 한다. pressure bomb의 압력은 실험자의 안전을 고려하여 24기압 이상 올리지 않았다.

질소가스통을 열어 pressure bomb의 압력을 서서히 높이면서 시편 횡단면에 물방울이 비치기 시작하는 지점의 압력을 측정하였다. 이 때 측정된 압력이 식(2)의 water potential(Ψ_s) 값으로 인장력을 나타내므로 음의 값이 된다.

2.2.2 간이 투과율 측정

간이 투과율 측정 장치는 Fig. 2와 같이 시편 홀더, 저울, reservoir, water trap, mercury manometer,

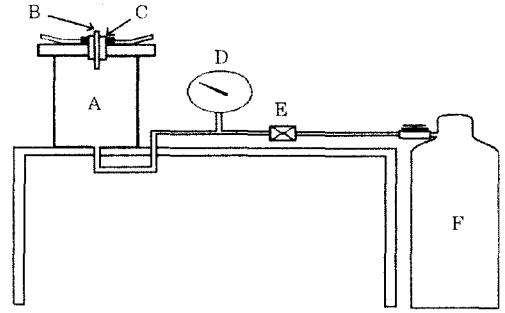


Fig. 1. Apparatus set-up for water potential measurement with a pressure bomb.

Notes: A: pressure bomb, B: specimen, C: rubber gasket, D: pressure gauge, E: needle valve, F: nitrogen bomb.

진공 펌프로 구성되어 있다. 시편 홀더는 시편 직경보다 약간 작은 고무호스를 사용하여 시편을 넣으면 시편과 밀착되어 목재 시편과 고무호스 사이로 물이 유입되지 않도록 하였을 뿐만 아니라 목재 시편 표면에 vaseline을 도포하고 시편과 고무호스의 양단을 조임쇠로 조였다. reservoir의 용량은 약 10 l로 투과실험중 초기 압력 경사를 충분히 유지할 수 있었다. water trap에는 silica gel을 채워 수증기가 진공펌프에 들어가는 것을 막았다. 진공펌프는 로터리 식으로 배기량은 분당 180 l였다.

진공펌프를 작동시켜 reservoir의 압력을 목표진공압력에 도달시킨 후 진공펌프를 정지시키고 동시에 밸브 V2를 잠근다. 밸브 V1을 열면 대기압과 reservoir의 압력차에 의해 비이커 물이 시편을 통과하여 reservoir로 이동하는데 이 때 비이커 무게를 일정 시간마다 기록한다.

실험중 물의 유입으로 인한 reservoir의 압력 변화는 거의 나타나지 않았다. 이는 Fig. 2에는 표기되지 않았으나 reservoir 상부에 설치된 Bourdon 압력계로 확인할 수 있었다. 본 실험에서는 증류수를 사용하여 물 속에 포함된 미세물질에 의한 투과 통로 폐쇄를 예방하였다.

2.2.2 공시재료

본 연구에는 건조재와 생재의 두 종류 공시재료가 사용되었다. 건조목은 구입시 함수율이 10~15%로 대부분 열기건조재였으며, 생재는 원목으로 구입 제재하였다.

본 연구에 사용된 건조재 수종은 radiata pine(*Pinus radiata*) 변재, Western hemlock(*Tsuga heterophylla*) 심재, Douglas-fir(*Pseudotsuga menziesii*) 심재, red oak(*Quercus rubra* L.) 심재와 변재이며 생재 수종은 radiata pine과 낙엽송(*Larix gmelini*)이었다.

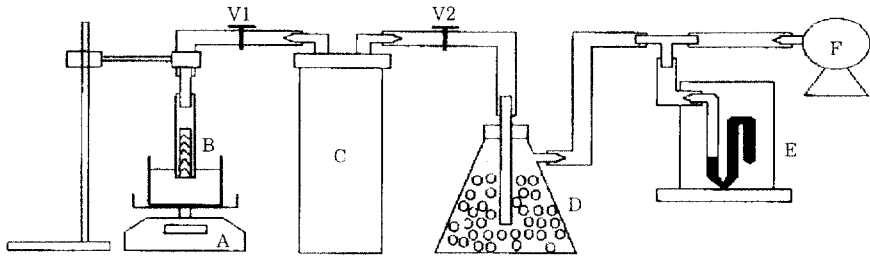


Fig. 2. Apparatus set-up for liquid permeability measurement.

Notes: A : digital balance, B : specimen holder, C : air reservoir, D : silica gel, E : mercury manometer, F : vacuum pump. V1 & V2 : valve.

2.2.3 시편 제작 및 실험 방법

Pressure bomb용 시편의 크기는 대략 가로와 세로 각각 3mm, 길이 30mm로 microtome과 고무망치를 사용하여 목리 방향을 따라 쪼개었다. 생체 시편은 심재와 변재, 조재와 만재로 구분하여 제작하였다. 생체시편은 제작 후 상온에서 물 속에 보관하였으며 건조재 시편은 진공 데시케이터에서 물 속에 넣고 가라앉을 때까지 감압과 해압을 반복하여 포수시켰다.

간이 투과율 측정 시편은 건조목을 목공소에서 직경 15mm, 길이 1,000mm의 원주형으로 깎은 다음 결합 부위를 피해 길이 방향으로 잘랐다. Red oak 변재를 제외한 모든 시편의 길이는 40mm, 양단의 압력차(ΔP)는 500mmHg였다. 그러나 red oak 변재는 투과율이 매우 우수하여 유동속도가 빠르므로 시편길이를 90mm로 늘리고 양단 압력차 50mmHg로 낮추었다. 예비실험 결과 유동속도는 초기에 비정상상태를 보이다가 약 1분이 경과해서 부터 정상상태를 나타내는 것이 관찰되었다. 따라서 투과율과 비투과율은 정상상태의 유동속도를 측정하여 산출하였다.

2.2.4 시편의 전처리

자비처리, 냉동처리의 전처리가 목재의 투과성에 미치는 효과를 조사하기 위해 시편을 아래와 같이 처리하였다.

생체 시편의 자비처리는 100℃ 끓는 물에서 1시간 실시하였으며 건조재 시편은 포수시킨 후 처리시간별 차이를 보기 위해 1, 3, 5, 7시간 각각 실시하였다.

생체 시편의 냉동처리는 영하 70℃ 급속냉장고에서 5일간 처리한 다음 실온에서 24시간 해동하였고, 건조재 시편은 포수시킨 후 생체 시편과 같은 방법으로 냉동처리를 5회 반복하여 실시하면서 투과율의 변화를 조사하였다.

시편의 천연건조는 상온에서 실내에 방치하여 항량에 도달할 때까지 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 재포수재의 water potential

재포수재의 water potential 분포를 Fig. 3에 200개 시편 측정치에 대한 95% 신뢰한계로 나타내었다. 수종별 평균 water potential을 비교하면, red oak 심재가 -19.53기압으로 가장 낮았으며 red oak 변재가 -1.36기압으로 가장 높았으나, 침엽수인 radiata pine 변재, Western hemlock 심재, Douglas-fir 심재는 각각 -4.56기압, -4.87기압, -4.60기압으로 수종간 별차이가 없었다. 그러나 세 침엽수 수종간 water potential 분포(Table 1)를 비교하면 약간의 차이를 발견할 수 있다. radiata pine 변재의 72%가 -3기압 이하에 몰려 있는데 반해 Western hemlock 심재와 Douglas-fir 심재는 각각 49%와 29%만 이 범위에 있고 나머지는 -3 내지 -9기압 범위에 골고루 분포되어 있다. 따라서 건조재에 있어서 radiata pine 변재의 투과성이 다른 침엽수 재 심재보다 높다고 할 수 있다. 그러나 이러한 radiata pine 재포수재의 투과성도 다음에 언급하게 될 radiata pine 생체에 비하면 낮았다.

수종별 water potential 분포표(Table 1)에 의하면 red oak 변재의 95%는 -3기압 이상의 높은 water potential을 보인 반면 red oak 심재의 72%는 -24기압 이하를 나타냈다. 이 결과를 통해 red oak 변재의 도관은 충분히 크고 개방되어 있으나 red oak 심재의 도관은 대부분 추출물과 타이로시스 등으로 폐쇄되어 있음을 알 수 있다. 그러나 red oak 심재의 11%가 -3기압 이상의 높은 water potential을 나타낸다는 것은 모든 red oak 심재의 도관이 폐쇄되어 있지 않음을 증명해 준다.

재포수재의 투과성에 대한 자비처리 효과 실험에서 red oak 변재를 제외한 모든 수종의 water potential은 일

Table 1. Distribution of water potentials of resaturated specimens. Each species has 200 samples. (Unit: %)

Class (atm*-1)	Red oak sapwood(%)	Red oak heartwood(%)	Radiata pine sapwood(%)	W. hemlock heartwood(%)	Douglas-fir heartwood(%)
-3 이상	95	11	72	49	29
-3 ~ -6	*	*	*	27	46
-6 ~ -9	*	*	*	12	20
-9 ~ -12	*	*	*	*	*
-12 ~ -15	*	*	*	*	*
-15 ~ -18	*	*	*	*	*
-18 ~ -21	*	*	*	*	*
-21 ~ -24	*	*	*	*	*
-24 이하	*	72	*	*	*

Notes: * : less than 5% out of 200 specimens.

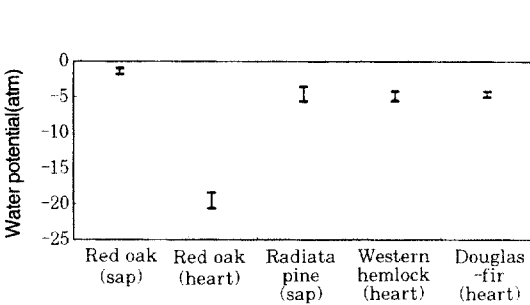


Fig 3. Plot of 95% confidential intervals of water potentials for 200 specimens of each group.

반적으로 1시간 또는 3시간 처리까지 감소하다 그 후에 증가하여 7시간 처리를 마쳤을 때는 자비처리 전보다 증가하였다(Fig. 4). 즉 단시간의 자비처리는 오히려 투과성을 낮추나 장시간 처리하면 투과성이 높아짐을 알 수 있다. Red oak 변재의 water potential은 자비처리 전에도 매우 높았으므로 자비처리에 의해 더 이상 효과를 얻기 힘들었다.

자비시간에 따라 자비처리 효과가 감소하거나 증가하는 현상은 다음과 같이 설명할 수 있다. 자비처리시 추출물이 세포벽을 빠져 나와 세포내강을 따라 이동하는데 단시간만 처리하면 세포내강을 이동하던 추출물이 목재 밖으로 빠져 나오지 못하고 목재내 잔류하여 벽공 등의 수분 통로를 막게 되므로 목재의 투과성이 감소된다. 그러나 오랜 시간 자비처리를 실시하면 차츰 벽공을 막고 있던 추출물도 목재 밖으로 빠져 나오게 되므로 투과성이

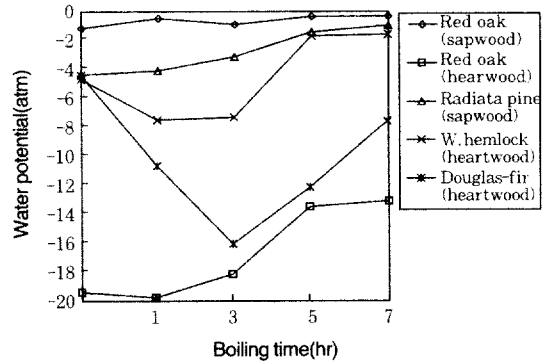


Fig 4. Plot of water potential vs. boiling time for five groups.

향상된다. 또 장시간 자비처리로 수지구내 수지가 용출되어 수지구가 열림으로 투과성이 향상된다. Booker(1994)는 고온건조 목재의 투과성이 일반열기건조 목재보다 우수한 이유를 이 같은 수지 용출에 의한 수지구 개방으로 설명하였다.

냉동처리를 반복하면서 채포수재의 water potential을 측정된 결과 red oak 심재와 radiata pine 변재는 점차 증가하였으나, Western hemlock 심재와 Douglas-fir 심재는 처리전보다 오히려 감소하였다(Fig. 5). Red oak 변재는 원래 높은 water potential 때문에 냉동처리에 의한 변화가 거의 없었다. Western hemlock 심재와 Douglas-fir 심재의 water potential은 1, 2차 냉동처리 후 매우 감소하였다가 그 후엔 점차 증가하였지만 그래도 최종 water potential은 처리전 보다 낮았다. 냉동처리에 의해 water potential이 처음보다 감

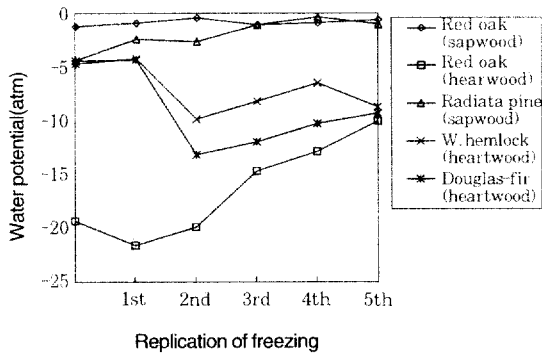


Fig 5. Plot of water potential vs. replication of freezing for five.

소한 이유는 밝혀지지 않았으나 침엽수 심재만 이러한 경향을 나타냈으며 활엽수인 red oak 심재는 반대로 분명히 증가하였다. 이러한 red oak 심재의 결과는 Chen과 Copper(1974)의 black walnut 실험 결과를 뒷받침하는 것으로 그들은 냉동전처리된 목재 조직내 미세조직을 파괴하여 건조 초기 건조속도와 투과성을 증가시킨다고 설명하였다.

3. 2 생재의 water potential

상대습도(h)와 모세관 미세공극 반경(r)은 각각 식(2)

와 식(4)를 이용하여 구하였다. 여기서 구한 상대습도는 모세관에 응축이 일어나기 시작할 때 주위 상대습도를 말하며 모세관 직경이 작을수록 낮은 상대습도에서도 응축이 일어난다. Table 2에 표기한 바와 같이 pressure bomb의 특성상 매우 낮은 water potential (-24기압 이하)과 매우 높은 water potential (-0.2기압 이상)을 측정할 수 없었기 때문에 계산된 모세관 미세공극 반경도 7.2 μ m이하 0.06 μ m이상 범위만 얻을 수 있었다.

Radiata pine 심재를 제외한 낙엽송 심재와 변재, radiata pine 변재의 water potential은 -3.4기압 이상으로 매우 높은 투과성을 보였으며 조재와 만재간에 투과성 차이를 나타내지 않았다(Table 2). radiata pine 심재를 제외한 수종의 모세관 미세공극 반경은 0.42 μ m에서 7.2 μ m 범위를 나타내고 있는데 이 값은 현미경으로 측정된 침엽수 벽공막 소공 직경의 평균 0.02 μ m~4 μ m (Siau, 1984)와 비슷하거나 약간 높은 수치를 나타내고 있다. 이같이 높은 값은 Sebastian 등(1965)이 기체투과성 측정법을 사용하였을 때도 얻었다. 이들이 발표한 Western white spruce의 미세공극 직경은 1.4 μ m에서 5.0 μ m로 현미경 측정치보다 컸다. 그러나 池 등(1996)은 기체 투과성 측정법을 이용하여 낙엽송 심재의 미세공극 반경을 위치에 따라 0.079 μ m에서 0.128 μ m라고 보고하였는데 이 범위는 본 연구에서 얻은 낙엽송 심재의 최소 0.42 μ m, 최대 3.6 μ m와 매우 큰 차이를 나타

Table 2. Maximum and minimum radii of capillary pores in green earlywood and latewood of larch and radiata pine, calculated from the water potentials measured by the pressure bomb method.

Species	Specific gravity (gr. vol.-od. wt.)	Earlywood/Latewood	Max-Min	Water potential (atm)	Relative humidity (%)	Radius of capillary pore (μ m)
Larch sapwood	0.46	Earlywood	Min	-1.4	99.9	1.03
			Max	-0.2 above	100.0	7.20 이상
		Latewood	Min	-2.0	99.9	0.72
			Max	-0.4	100.0	7.20
Larch heartwood	0.49	Earlywood	Min	-2.1	99.8	0.69
			Max	-0.8	99.9	1.80
		Latewood	Min	-3.4	99.7	0.42
			Max	-0.4	100.0	3.60
Radiata pine sapwood	0.52	Earlywood	Min	-0.2 above	100.0	7.20 이상
			Max	-0.2 above	100.0	7.20 이상
		Latewood	Min	-0.2 above	100.0	7.20 이상
			Max	-0.2 above	100.0	7.20 이상
Radiata pine heartwood	0.59	Earlywood	Min	-24.0 below	98.2 이하	0.06 이하
			Max	-3.1	99.8	0.46
		Latewood	Min	-24.0 below	98.2 이하	0.06 이하
			Max	-10.7	99.2	0.13

Table 3. Effect of air-drying on the water potentials of control and pretreated radiata pine heart-woods.

Pretreatment		Water potential (atm)		
		Before air-drying	After air-drying	Difference
Control	Earlywood	-18.5	-19.3	-0.8
	Latewood	-20.9	-21.2	-0.3
Prefreezing	Earlywood	-14.6	-16.3	-1.7
	Latewood	-15.8	-17.8	-2.0
Preboiling	Earlywood	-18.5	-20.4	-1.9
	Latewood	-17.6	-18.7	-1.0

내고 있다. 오히려 池 등(1996)의 결과는 본 연구에 사용된 수종 중 가장 투과성이 낮은 radiata pine 심재의 미세공극 반경 $0.06\mu\text{m} \sim 0.13\mu\text{m}$ 와 매우 잘 일치하고 있다. 따라서 본 연구에서 얻은 미세공극 반경은 일반적으로 기체 투과범으로 측정된 값보다 컸는데 그 이유는 밝혀지지 않았으나 액체와 기체의 차이가 일부 기여하였다고 생각된다. 보다 정확한 원인을 밝히기 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다. 최근에 Tremblay 등(1996)은 Cloutier와 Fortin이 개발한 유효 미적분공극 곡선을 이용하여 red pine 변재의 미세공극 반경을 현미경 측정치와 비슷한 $0.2\mu\text{m}$ 로 계산해 냈다고 보고하였다.

Radiata pine 심재는 앞에 설명한 낙엽송 심변재, radiata pine 변재와 비교해서 매우 낮은 water potential을 나타냈다(Table 2). 이는 radiata pine 심재의 투과성이 나쁘다는 것을 의미하는 것으로 조재의 최대 water potential, -3.1기압, 과 만재의 최대 water potential, -10.7기압, 을 비교하면 만재의 투과성이 더 나쁨을 알 수 있다. 최소 water potential은 pressure bomb의 측정 하한치 -24기압을 벗어나 정확한 값을 알 수 없었으며 최소 미세공극 반경도 $0.06\mu\text{m}$ 이하로 조재와 만재간의 차이를 발견할 수 없었다.

전처리에 의한 radiata pine 심재 투과성의 변화는 표 3에 나타낸 것과 같다. 천연건조전 시편의 평균 water potential은 냉동처리 시편이 무처리와 자비처리 시편보다 높았으며, 무처리와 자비처리는 만재에서는 자비처리가 약간 높았으나 춘재에서는 차이를 나타내지 않았다. 따라서 자비처리와 냉동처리는 생재의 투과성을 높인다고 할 수 있다. 그러나 냉동처리 결과는 앞의 재포수재 결과와 상반되는 것으로 재포수재인 Western hemlock과 Douglas-fir 심재는 반복적인 냉동처리에 의해 투과성이 낮아졌다(Fig. 5). 이 상반된 냉동처리 효과는 건

조재와 미건조재의 차이와 두 그룹의 초기 투과성 차이로 설명할 수 있다. Western hemlock과 Douglas-fir 심재는 건조재이지만 초기 투과성이 높았으나(Fig. 5) radiata pine 심재는 생재로 초기 투과성이 매우 낮았다. 따라서 투과성이 낮은 경우에는 냉동처리가 투과성을 높여주지만 투과성이 높은 경우에는 오히려 반대효과가 나타날 수도 있다고 결론지을 수 있다.

한편 전처리 시편을 실온에서 건조한 후 재 포수시켜 water potential을 측정된 결과 모든 시편의 평균 water potential이 감소하였다(Table 3). 감소한 정도는 전처리 시편이 무처리 시편보다 컸는데 이는 전처리가 목재 강도를 떨어뜨렸기 때문으로 설명할 수 있다. 건조시 목재 강도가 물의 표면장력에 의한 횡인장응력보다 낮으면 물이 이동하면서 세포벽의 미세조직을 움직여 미세공극을 막으므로 내부표면이 감소하고 투과성이 낮아질 것으로 생각된다.

3. 3 건조재의 간이 투과성 측정

간이 투과성 측정 시편은 건조재를 포수시키지 않고 그대로 사용하였기 때문에 평균함수율이 10% 내지 12%이었다. 수종별 평균, 최대, 최소 비투과율을 Table 4에 비교하였다. Red oak 심변재의 비투과율은 각각 14.0darcy와 0.1darcy로 140배 차이를 나타냈다. 이는 수분의 주요 통로인 도관의 폐쇄 정도에 따른 것으로 심재는 타이로시스로 막혀 있으나 변재는 막혀있지 않기 때문으로 이해할 수 있다. 한편 red oak 심재의 최대-최소 비투과율비는 245.5이고 대부분의 값이 최대와 최소에 몰려있어 시편에 따른 변이가 매우 심함을 알 수 있다. 이러한 결과는 -3기압 이상과 -24기압 이하에만 몰려 있는 red oak 심재의 water potential 결과(Table 1)와 일치한다.

침엽수 시편 중 radiata pine 변재의 비투과율이 가

Table 4. Average, maximum and minimum specific permeabilities of kiln-dried hardwoods and softwoods.

Species	Specific permeability(darcy)			
	Average	Maximum	Minimum	Max / Min
Red oak sapwood	14.0	18.1	9.7	1.9
Red oak heartwood	0.100	0.509	0.002	254.5
Radiata pine sapwood	1.84	4.42	0.42	10.5
Western hemlock heartwood	0.006	0.011	0.003	3.7
Douglas-fir heartwood	0.047	0.128	0.010	12.8

장 높고, Douglas-fir 심재 그리고 Western hemlock 순인데 이 순서는 건조재의 water potential 결과(Table 1)와 일치해 보인다. 세 수종 중 radiata pine 변재가 -3기압 이상의 water potential 비율이 가장 높았다.

Western hemlock의 평균 비투과율은 0.003 darcy 내지 0.011 darcy 로 매우 낮았는데 이 값은 Comstock(1965)이 측정 한 동일한 수종 심재의 투과율 0.03darcy 내지 0.13darcy의 1/10에 지나지 않는다. 이러한 차이는 공시 재료의 차이에 일부 기인한다고 볼 수 있다. 본 연구에서는 건조재를 사용했고 Comstock은 생재를 사용하였다. Erickson과 Crawford(1959)는 Douglas-fir와 Western hemlock 변재를 건조하였더니 투과율이 1/10 내지 3/10으로 줄었다고 보고하였다.

Western hemlock의 비투과율이 적으면서도 최대-최소 비투과율비가 radiata pine 변재, Douglas-fir 심재보다 낮은 것은 의외이다. 이 결과만 의지한다면 Western hemlock의 세포가 비교적 고르게 배열되어 있다고 할 수 있다.

4. 결 론

Red oak, radiata pine, 낙엽송, Western hemlock, Douglas-fir의 생재와 재포수재, 전처리재의 투과성을 pressure bomb 법과 간이 투과율 측정법을 사용하여 측정하므로 이 두 가지 투과성 측정 방법의 가능성을 조사하였다.

이 두 가지 방법에서 얻은 투과성을 다른 액체 투과성 측정법과 직접 비교하지 못해 이들 방법의 정확성과 신뢰성에 대한 확실한 결론을 내릴 수는 없으나 본 연구에서 얻은 수종별 투과성의 크기, 순서 등이 일반적으로 발표된 결과와 일치하고 있어 목재의 투과성을 복잡한 장치 없이 간단히 판정하는데 이 두 가지 방법이 유용하게 사

용될 수 있을 것으로 보인다. 특히 pressure bomb 법은 시편 제작이 쉽고 매우 작은 시편을 사용할 수 있는 장점이 있으나 시편을 포수시켜야 하고 투과성이 매우 높거나 낮으면 측정이 곤란하다는 단점이 있음이 밝혀졌다. 간이 투과율 측정법도 red oak 변재와 같이 투과성이 매우 높은 경우 측정의 어려움을 겪었다.

Pressure bomb 법으로 측정 한 자비처리 재 건조재의 투과성은 red oak 변재를 제외한 모든 수종이 초기 1시간 내지 3시간까지 감소하다 그 후에 증가하여 7시간 처리를 마쳤을 때는 일반적으로 무처리보다 증가하였다.

냉동처리 재 건조재의 투과성은 냉동이 반복될수록 red oak 심재와 radiata pine 변재는 점차 증가하였으나, Western hemlock 심재와 Douglas-fir 심재는 처리 전보다 오히려 감소하였으나 그 원인은 밝혀지지 않았다.

Radiata pine 심재를 제외한 모든 수종의 모세관 미세공극 반경은 0.42 μ m에서 7.2 μ m 범위로 이 값은 현미경으로 측정 한 침엽수 벽공막 소공 직경의 평균, 0.02~4 μ m(Siau, 1984)와 비슷하거나 약간 높은 수치를 나타내었다. Radiata pine 심재는 최대 0.46 μ m 최소 0.06 μ m 이하로 매우 적은 값을 보였다.

생재를 전처리한 결과 자비처리와 냉동처리 모두 생재의 투과성을 높였다. 이러한 냉동처리 결과는 앞의 건조재 결과와 상반되는 것으로 건조 유무, 초기 투과율에 따라 냉동처리 효과가 달라짐을 알 수 있다.

간이 투과율 측정법으로 측정 한 red oak 심변재의 비투과율은 각각 14.0darcy와 0.1darcy로 140배 차이를 나타냈으며 침엽수 시편 중 radiata pine 변재의 비투과율이 가장 높고, Douglas-fir 심재 그리고 Western hemlock 순으로 나타났는데 이 순서는 건조재의 water potential 결과와 비슷하였다.

참 고 문 헌

1. Booker, R. E. 1990. Changes in transverse wood permeability during the drying of *dacrydium cupressinum* and *Pinus radiata*. *N. Z. J. Forestry Sci.* 20(2) : 231~244
2. Chen, Y. S., and Y. Tang. 1991. Variation in longitudinal permeability of three U.S. hardwoods. *Forest Prod. J.* 41(11/12) : 79~83
3. Choong, E. T., F. O. Tesoro, and F. G. Manwiller. 1974. Permeability of twenty-two small diameter hardwoods growing on southern pine sites. *Wood & Fiber* 6(1) : 91~101
4. Comstock, G. L. 1965. Longitudinal permeability of green Eastern hemlock. *Forest Prod. J.* 15(4) : 441~449
5. Comstock, G. L. 1965. Longitudinal permeability of green Eastern hemlock. *Forest Prod. J.* 15 : 441~449
6. Erickson, H. D. 1970. Permeability of Southern pine wood. *Wood Sci.* 2(3) : 149~158
7. Erickson, H. D., and R. J. Crawford. 1959. The effects of several seasoning methods on the permeability of wood to liquids. Amer. Wood Preservers' Assoc. Proc. (seen in Comstock(1965))
8. Fogg, P. J., and E. T. Choong. 1989. Effect of specimen length on longitudinal gas permeability in hardwoods. *Wood & Fiber Sci.* 21(1) : 101~104
9. Milota, M. R., J. L. Tschernitz, S. P. Verrill, and T. Mianowski. Gas permeability of plantation loblolly pine. *Wood & Fiber Sci.* 27(1) : 34~40
10. Petty, J. A. 1970. Permeability and structure of the wood of Sitka spruce. *Proc. Roy. Lond. B* 175 : 149~166
11. Sebastian, L. P., W. A. C t., and C. Skaar. 1965. Relationship of gas phase permeability to ultrastructure of white spruce wood. *Forest Prod. J.* 15 : 394~404
12. Siau, J. F. 1971. Flow in Wood. Syracuse Univ. Press, Syracuse, New York
13. Siau, J. F. 1984. Transport Processes in Wood. Springer-Verlag, New York : 245
14. Tremblay, C., A. Cloutier, and Y. Fortin. 1996. Moisture content-water potential relationship of red pine sapwood above the fiber saturation point and determination of the effective pore size distribution. *Wood Sci. & Tech.* 30 : 361~371
15. 지우근·김규혁. 1997. 북양 침엽수재의 공기 투과성. 목재공학 24(4) : 22~31