

Boltzmann법에 의한 목재 흡수시 확산계수 추정*¹

강 욱*^{2†} · 정 우 양*²

Estimation of Moisture Diffusivity during Absorption by Boltzmann Transformation Method*¹

Wook Kang*^{2†} · Woo Yang Chung*²

요 약

외장용 기둥재는 년중 사용환경에서 액상수와 직접 접촉할 수가 있으나, 이에 대한 연구는 그다지 많지 않다. 목재의 섬유방향에서 결합수와 자유수 확산계수를 포함한 수분확산계수를 측정하기 위해 상온에서 흡수실험을 실시하였다. 흡수성은 느릅나무, 까치막달나무, 험록, 가문비나무, 라디에타 소나무, 고로쇠나무 순으로 크게 나타났다. Boltzmann 변환법으로 구한 확산계수는 저함수율에서 섬유포화점 부근까지 감소하다가 최대함수율 부근에서 급격히 증가하는 경향을 나타내었다. 함수율 변화에 따른 확산계수는 $10^{-10} \sim 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 정도의 값을 나타내었다.

ABSTRACT

Although the exterior wood such as column may frequently contact with liquid water, little work has been found to measure liquid water absorption in wood. To investigate the moisture diffusivity of wood in the longitudinal direction including bound water and free water movement, liquid water absorption test was conducted at the room temperature. The order of magnitude for absorption coefficient and diffusivity was Japanese elm, horn beam, hemlock, spruce, radiata pine, and painted maple. The Boltzmann transformation method was used to determine the diffusivity from measured moisture content distributions in the absorption test. The shape of the curve representing the dependence of diffusivity with moisture content was similar in test samples. The diffusivity decreased with increasing moisture content until around the fiber saturation point and then increased at the nonhygroscopic region, which ranged from 10^{-10} to $10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

*¹ 접수 2008년 7월 16일, 채택 2008년 10월 8일

*² 전남대학교 농업생명과학대학 임산공학과, Department of Forest Products and Technology, College of Agriculture, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

† 주저자(corresponding author) : 강 욱(e-mail: kawook53@msn.com)

Keywords: absorption, wood column, moisture diffusivity, Boltzmann transformation

1. 서 론

외기에 면한 건축물에 유입되는 수분의 형태는 풍우(driving rain), 응축 지붕과 벽면으로부터 낙수, 지반으로부터 모세관수 등으로 구분할 수 있다. 따라서 전통 목조건축물 부재중 기둥은 외기에 직접 접촉되므로 자유수가 유입될 수 있다. 이와 같은 자유수가 다공성 건축재료에 유입되는 현상을 흡수(absorption)라 하는데 토질역학분야에서는 imbibition이라고도 불리운다. 기둥 둘레방향과 길이 방향 모두 수분이 유입되는데 목재는 횡방향 방사방향과 접선방향에 비해 섬유방향으로의 수분이동이 가장 크기 때문에 대부분의 수분은 기둥 밑부분으로부터 흡수가 일어나게 된다.

목재는 함수율이 높으면 박테리아와 균조류의 침해를 받기 쉽고 성장에 필요한 기질로 작용하여 물리화학적 손상을 받을 수 있다. 따라서 목재의 내구성은 함수율이 높으면 부후되기 쉽기 때문에 수분이력과 밀접한 관계가 있다. 따라서 외기조건에 따른 목재의 함수율 분포를 예측할 수 있다면 목재의 부후확률을 판단하는데 도움이 된다.

따라서 기둥 내 함수율 분포의 변화를 파악하기 위해서는 자유수에 노출되는 목재의 흡수현상을 정확히 이해하기 위해서는 목재 내 자유수와 결합수 이동을 모두 고려하여야만 한다. 고함수율부터 저함수율로의 수분이동은 주로 목재건조분야에서 이론적 및 실험적 연구가 활발히 이루어지고 있지만(Moyne 등, 1991; Turner, 1996; Perre 등, 1993; Couture 등, 1996), 이에 비해 저함수율에서 최대함수율로 수분이 증가하는 흡수현상에 대한 연구는 매우 제한적으로 이루어 졌다(Rosen, 1974; Kumaran, 1999; Mukhopadhyaya, 2002; Virta 등, 2006).

Koponen (1987)은 목재건조시 등온과정에서 전범위 함수율(섬유포화점 이하 및 섬유포화점 이상)에서 확산계수를 Boltzmann 변환법(BT법)으로 구하였는데, 섬유포화점 이하의 영역에서 함수율이 증가함에 따라 확산계수가 증가하다가 섬유포화점 이

상에서 감소하는 볼록 포물선 형태를 갖는다고 보고하였다. 그러나 섬유포화점 이상의 영역에서 함수율이 증가할수록 확산계수가 감소하는 것은 다른 연구 결과와는 일치하지 않는다. 또한 목재의 흡수에 대한 국내 연구로는 낙엽송의 고온처리에 효과에 따른 흡수성 비교(김정환 등, 2002) 및 소나무와 잣나무의 방부제 주입성에 대한 실험적 연구(이명재 등, 2005)가 이루어졌으나 수분이동계수에 대한 고찰은 찾아보기 어렵다.

목재 내 수분유동을 예측하기 위해서는 유효확산계수, 고유투과성계수, 상대투과성계수 등과 같은 전달계수는 공극율, 공극크기, 공극배열형태, 공극분포 등의 함수이므로 이를 구하기 위해서는 많은 실험과 시간이 소요된다. 특히 목재의 자유수 유동은 결합수와 수증기 확산도 포함된 복합작용으로 나타난 결과를 관측할 수밖에 없기 때문에, 수증간 또는 시험재료간 차이를 명확히 밝히는 것은 어렵다. 따라서 실험적으로 구한 값의 적용범위와 재현성이 제한적인 경우가 많다.

또한 결합수와 수증기 이동을 알기 위해서는 상대습도와 평형함수율의 관계곡선인 수착등온선(sorption isotherm), 자유수 이동을 알기 위해서는 함수율에 따른 모세관 압력의 변화를 나타내는 수분보류곡선(water retention curve)이 측정되어야만 한다. 더구나 수착등온선과 수분보류곡선은 이력현상을 가진다. 즉 흡착과 탈착 곡선이 다르다. 또한 수착등온선과 수분보류곡선은 온도에 따라 영향을 받기 때문에 여러 온도와 함수율 범위에서 흡착과 탈착과정에 대한 측정을 위해서는 많은 시간과 노력이 요구된다. 따라서 이에 대한 특정 재료의 정보는 아직 매우 제한적이다.

따라서 본 논문에서는 목재가 섬유방향으로 장기간 물 흡수 시 평균함수율 변화와 함수율 분포에 대한 실험결과로부터 BT법을 적용하여 함수율 전범위에서 결합수와 자유수를 포함한 수분확산계수를 구하고자 한다.

Table 1. Density and maximum moisture content of wood species

	Species	Duration (month)	Dry density (kg/m ³)	Maximum MC (kg/kg)
Softwood	Hemlock	1	442	180
	(<i>Tsuga heterophylla</i>)	2	421	202
	Radiata pine	1	412	194
	(<i>Pinus radiata</i>)	2	480	174
	Spruce	1	509	161
	(<i>Picea mariana</i>)	2	481	169
Hardwood	Painted maple	1	620	121
	(<i>Acer mono</i>)	2	629	103
	Japanese elm	1	783	086
	(<i>Ulmus davidiana</i>)	2	637	103
	Horn beam	1	722	090
	(<i>Carpinus cordata</i>)	2	713	093

2. 재료 및 방법

2.1. 흡수실험

침엽수와 활엽수 각각 3수종씩 모두 6수종을 공시 수종으로 하였는데, 침엽수는 험록, 라디에타 소나무, 가문비나무이고 활엽수는 고로쇠나무(painted maple), 느릅나무(Japanese elm), 까치박달나무(horn beam)를 선정하였다. 이들로부터 시편치수가 폭 25 mm, 두께 25 mm, 길이 200 mm인 시편을 각 4개씩 채취하였다. 1차원 수분유동이 일어나도록 전건시편의 길이방향 양단을 제외한 둘레방향 4면을 유성페인트로 코팅하였다. 그 후 시편을 전건시키고 페인트 경화를 촉진시키기 위해 수 일간 오븐에 방치시켰다.

흡수실험은 전건시편의 한쪽 끝은 물에 침지시키고 다른 한쪽 끝은 외기에 노출시켰다. 수압의 영향을 감소시키기 위해 시편 밑면이 물 높이는 최소화 되도록 하였다. 시편 상단은 평형습수율이 약 5% 되도록 외기 온도 20°C, 상대습도 40%가 유지되는 항온습수기에 1개월 및 2개월 간 방치시킨 후 일정시간 간격으로 무게변화를 측정하였다.

실험종료 후 함수율 분포를 측정하기 위해 시편 길이방향으로 약 27개의 절편을 채취한 후 전건법으로 함수율을 구하였다. 시편은 파라핀 코팅 후 수침지법으로 구한 부피로 밀도를 계산하였다. Table 1

은 실험에 사용한 수종들의 밀도와 최대함수율이다.

2.2. 확산계수 추정방법

다공성재료인 목재는 세포벽과 내강으로 구성되며 세포벽간에는 벽공(pit)이 있으며 세포벽 내에도 미소공극(microvoid)이 존재한다. 목재 내 존재하는 수분은 결합수, 수증기, 자유수로 구분된다. 섬유포화점 이하에서의 결합수와 수증기 이동은 Fick의 법칙이 적용되고 섬유포화점 이상에서 세포내강과 벽공을 통한 자유수 이동은 Darcy 법칙이 적용된다. 섬유포화점 이하에서 목재의 방향별 열수분전달계수는(Kang 등, 2007)에 의해 상세히 고찰된바 있다. 섬유포화점 이상에서 자유수의 확산계수는 공극을 통한 수분의 모세관 압력차의 수분이동 구동력(Darcy 법칙)을 함수율 차의 구동력으로 변화시키면 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다(Kang 등, 2008).

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[(D_w + D_v + D_B) \frac{\partial m}{\partial x} \right] \quad (1)$$

여기서 m : 함수율(kg/kg)

t : 시간(sec)

x : 시편길이방향 거리(m)

D_B : 결합수 확산계수(m^2/s)
 D_v : 수증기 확산계수(m^2/s)
 D_w : 자유수 확산계수(m^2/s)

건축물리분야에서 식 (2)와 같은 비선형 확산방정식을 편의상 사용하는 경우가 많다.

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D \frac{\partial m}{\partial x} \right] \quad (2)$$

여기서 D : 유효 수분확산계수(m^2/s).

평균함수율 증가곡선으로부터 구한 흡수계수를 이용해 수분이동 확산계수를 구할 수 있다(식 (3)과 식 (4) 참조). 이 방법은 이용하기 간단하므로 건축물리분야에서 많이 사용되고 있다(Kumaran, 1999; Mukhopadhyaya 등, 2002). 그러나 시편초기 함수율에 따라 결과가 다르고 확산계수는 함수율에 따라 변하지 않고 일정한 상수값이라는 단점이 있다.

BT법은 측정된 함수율 분포를 이용해 함수율 의존성 확산계수를 구할수 있는 유용한 방법이다. 그러나 시편의 함수율 분포측정은 여러 가지 방법이 있지만 비파괴적인 방법은 연구자가 측정장비를 사용하기 용이하지 않고 재료에 따라 함수율과 밀도의 보정을 해야 하는 어려움이 있다(Janz, 1997; Roels 등, 2000). 따라서 절편법(slice-dry-weigh method)이 주로 사용된다. 그러나 이 방법은 파괴시험법으로 한 시료에 대해 일정시점에서 하나의 함수율 분포데이터만을 얻을 수 있다.

2.2.1. 흡수계수를 이용한 확산계수 추정법

함수율 증가가 시간의 제곱근에 비례한다면 다음 식으로부터 흡수계수($A, kg/m^2 s^{1/2}$)를 구할 수 있다.

$$W = A \sqrt{t} \quad (3)$$

여기서 W : 시간에 따른 흡수량(kg/m^2)
 t : 시간 (sec)

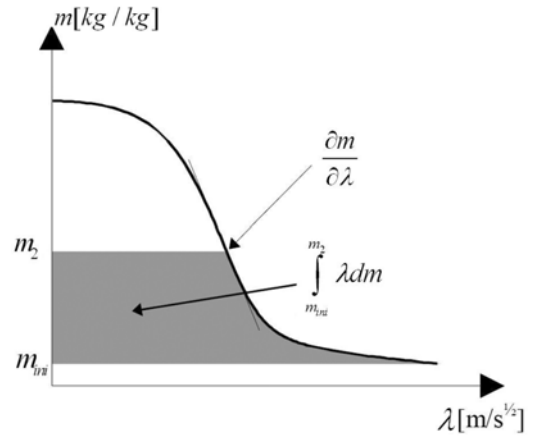


Fig. 1. Moisture distribution by Boltzmann transformation method.

상기 식으로 구한 흡수계수를 이용해 확산계수를 다음과 같이 계산할 수 있다(Kumaran, 1999; Mukhopadhyaya 등, 2002).

$$D = \frac{\pi}{4} \left(\frac{A}{w_c} \right)^2 \quad (4)$$

여기서 w_c : 최대 함수율(kg/m^3)

식 (4)에서 최대 함수율은 전건무게 기준 최대함수율에 전건밀도를 곱하면 구할 수 있다.

2.2.2. Boltzmann 변환법

Boltzmann 변환법(BT법)은 시편이 반무한 길이를 갖고 수분이동 플럭스(mass flux)가 \sqrt{t} 에 비례할 때 적용할 수 있다. 이 방법을 사용하기 위해서는 함수율 분포 측정 데이터가 있어야만 한다. BT 법은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 시간에 따른 시편위치별 함수율 변화로부터 확산계수를 구하는 방법으로 계산식은 다음과 같다.

$$D(m) = -\frac{1}{2} \frac{1}{(\partial m / \partial \lambda)_m} \int_{m_{ii}}^m \lambda(m) dm \quad (5)$$

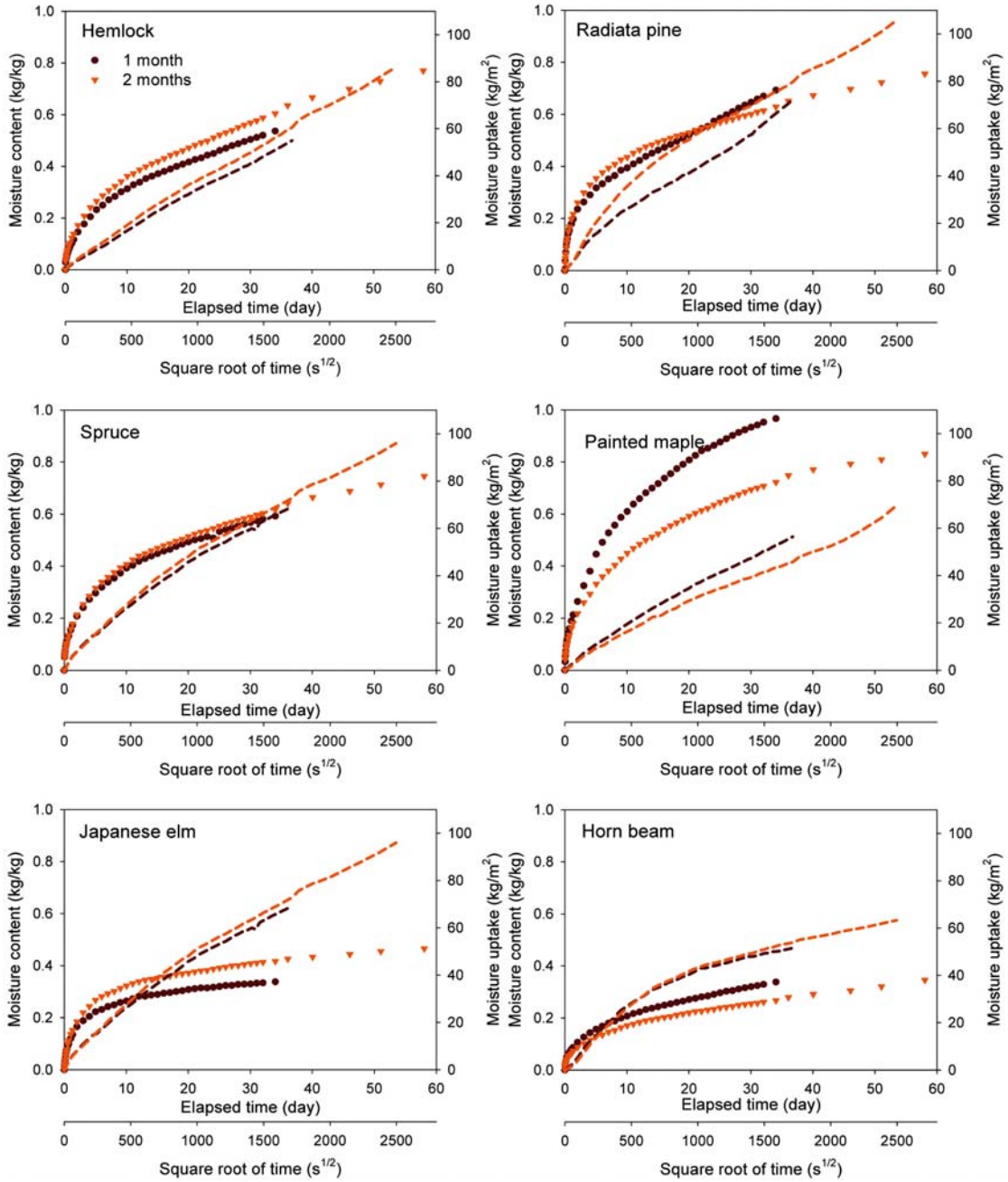


Fig. 2. Changes of average moisture content and uptake with time. Solid line : moisture content, dotted line : moisture uptake.

Table 2. Relation between moisture content and time, $m=a t^b$

Species		Duration (month)	a	b	R ²
Softwood	Hemlock	1	0.1092	0.4494	0.999
		2	0.1246	0.4486	0.999
	Radiata pine	1	0.1596	0.4037	0.994
		2	0.1953	0.3352	0.996
	Spruce	1	0.1627	0.3689	0.999
		2	0.1709	0.3660	0.998
Hardwood	Painted maple	1	0.2141	0.4385	0.996
		2	0.1850	0.3796	0.992
	Japanese elm	1	0.1248	0.2986	0.980
		2	0.1516	0.2912	0.973
	Horn beam	1	0.07997	0.4079	0.999
		2	0.06273	0.4193	0.997

Table 3. Absorption and diffusion coefficients by eqs. (3) and (4)

Species		Duration (month)	A (kg/m ² s ^{1/2})	D (m ² /s, × 10 ¹⁰)
Softwood	Hemlock	1	0.028	8.55
		2	0.032	10.7
	Radiata pine	1	0.037	14.7
		2	0.032	11.2
	Spruce	1	0.032	12.2
		2	0.032	11.5
Hardwood	Painted maple	1	0.072	66.0
		2	0.054	37.6
	Japanese elm	1	0.016	3.79
		2	0.018	3.98
	Horn beam	1	0.028	11.0
		2	0.023	7.09

여기서 Boltzmann 변수 $\lambda = x/\sqrt{t}$ 로 정의된다. $x(m)$ 는 시편길이방향 거리이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 흡수계수와 확산계수

시간에 따른 평균함수율 변화는 Fig. 2와 같다. 모든 수종에 있어 평균함수율은 초기에 급격하게 비선형적으로 증가하다가 약 2주 후부터는 거의 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 그 이유는 Rosen (1974)이 보고한 바와 같이 흡수현상은 결합수와 자

유수의 이동의 복합현상의 결과인데, 결합수의 시간에 따른 함수율 증가는 선형적이지만 자유수로 인한 함수율 증가는 초기에 비선형적인 것에 기인한다고 생각된다.

여러 연구에 따르면 흡수시 평균함수율의 변화는 \sqrt{t} 에 비례한다고 보고된 바 있으나, Table 2에서 보는 바와 같이 모든 수종의 경우 b 값이 0.5보다 작게 나타났다. 그러한 가장 큰 이유는 시편의 초기함수율이 전건상태이므로 자유수의 급격한 흡수에 따른 영향으로 생각된다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 흡수량 곡선의 비선형성은 수종에 따라 다르다.

2주 후 평균함수율 변화곡선에서 선형회귀식으로

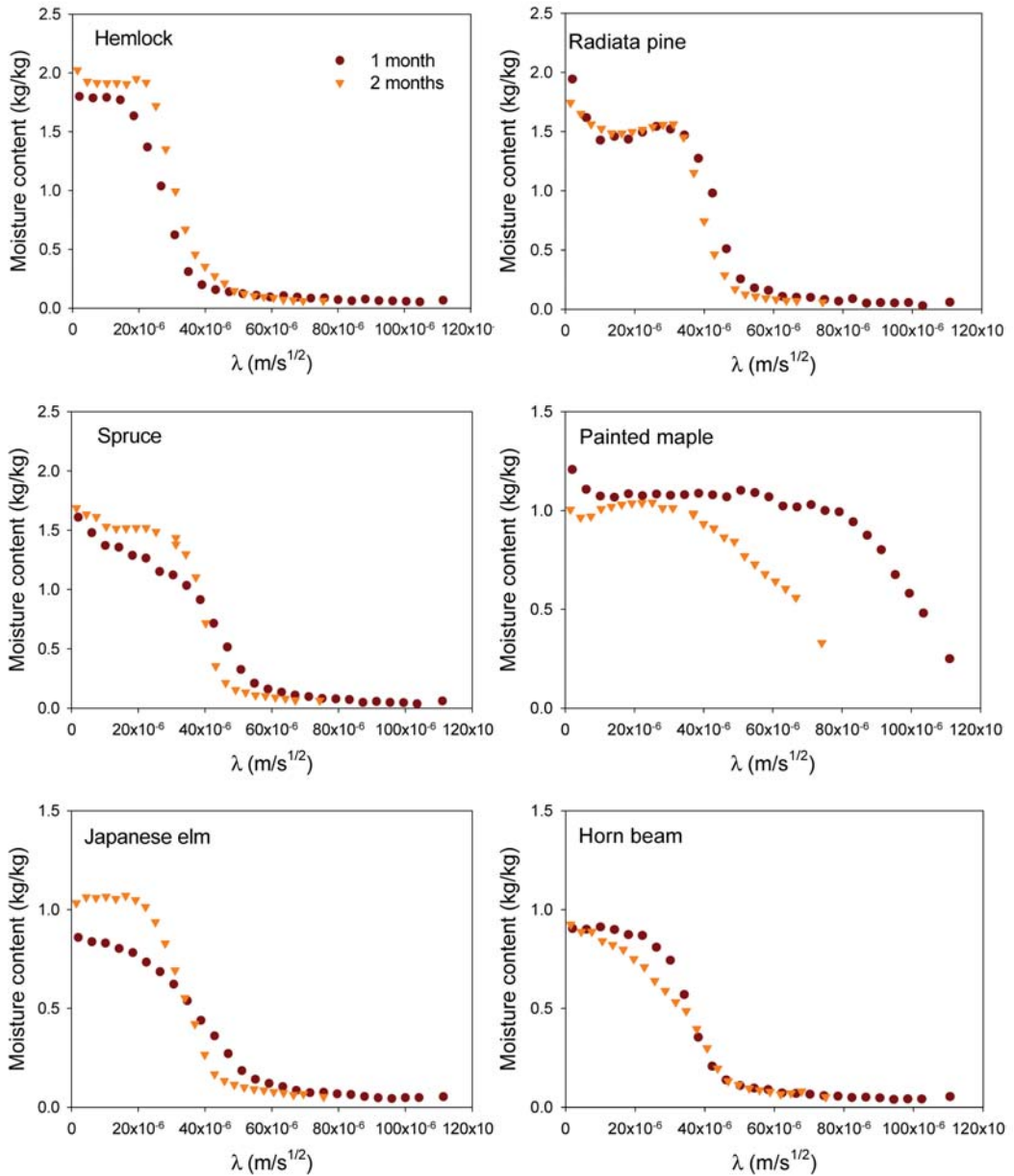


Fig. 3. Boltzmann transformation of the measured moisture profiles.

구한 수종별 흡수계수(A)는 Table 3과 같다. 수분흡수 곡선의 초기 비선형으로 인해 1시간 후부터의 데이터를 이용해 흡수계수를 구하였다. 흡수계수는 Mukhopadhyaya 등(2002)이 보고한 것보다 약간 더

큰 값을 나타내었다. 흡수계수는 초기함수율에 영향을 받는데 초기함수율이 낮을수록 흡수계수는 증가한다. 따라서 본 연구의 흡수계수가 더 큰 것은 초기함수율이 더 낮기 때문이라 생각된다.

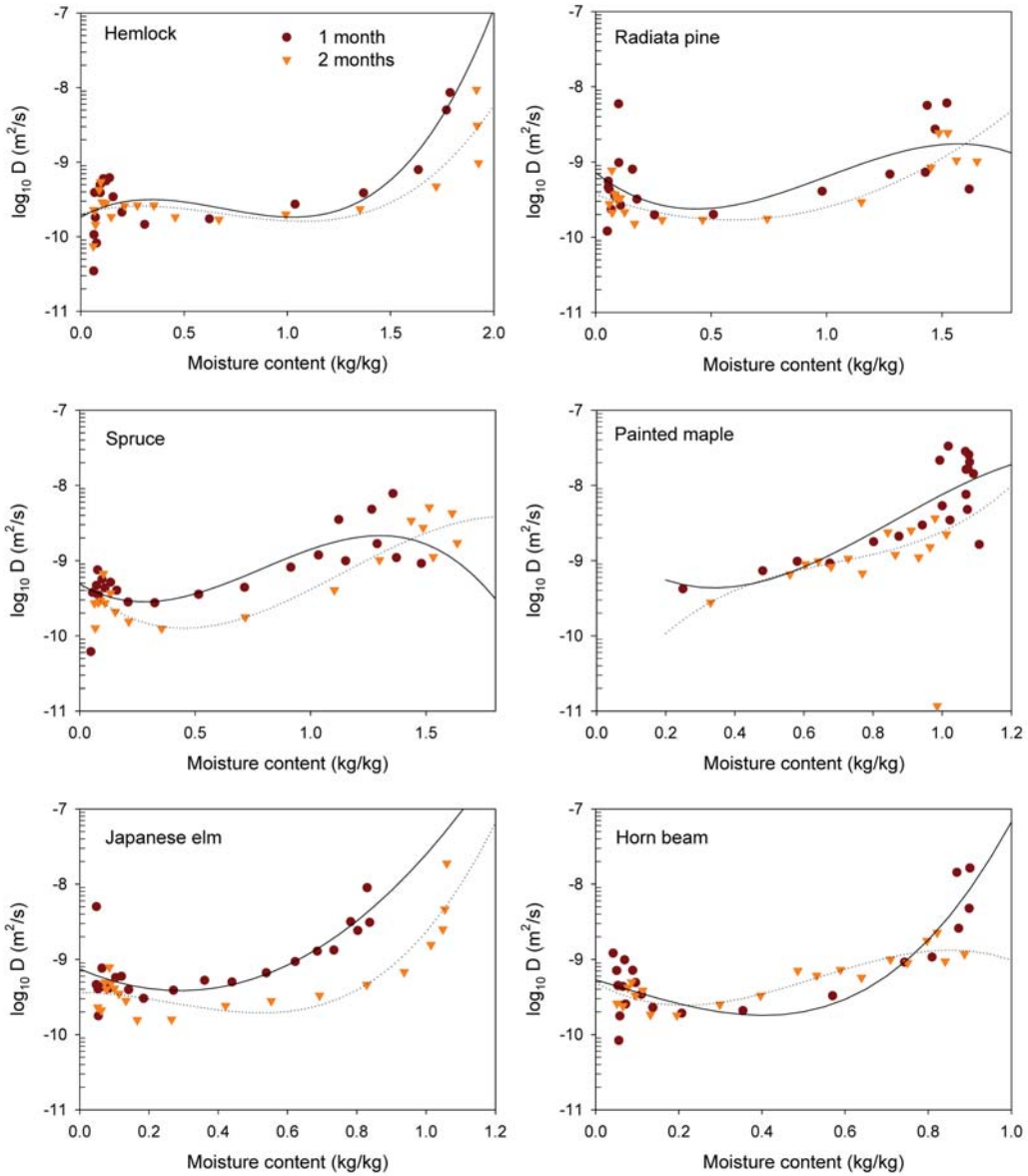


Fig. 4. Diffusion coefficients estimated by Boltzmann transformation method. Solid line : 1 month, dotted line: 2 month.

흡수계수를 식 (4)에 대입하면 확산계수를 구할 수 있다. 그러나 평균함수율 증가에 따른 흡수계수는 일정하지 않고 초기에 가장 큰 값을 나타내다가

점차 감소하였다. 따라서 식 (4)로 구한 확산계수는 대략적인 수종간 흡수성의 차이를 파악하는데 도움을 줄 수 있지만, 이를 이용해 정확한 예측을 하기에

Table 4. Diffusion coefficients over the whole moisture region by Boltzmann method, $D=\exp(a_0 + a_1m + a_2 m^2 + a_3 m^3)$

Species		Duration (month)	a_0	a_1	a_2	a_3	R^2
	Hemlock	1	-22.42	3.575	-6.967	3.394	0.66
		2	-22.33	1.873	-4.065	1.983	0.81
Softwood	Radiata pine	1	-21.05	-5.607	8.212	-2.728	0.31
		2	-21.72	-2.653	2.263	-	0.75
	Spruce	1	-21.44	-4.180	9.061	-3.822	0.62
		2	-21.46	-6.449	8.893	-2.594	0.85
	Painted maple	1	-19.96	-10.26	18.82	-7.299	0.66
		2	-25.39	15.75	-19.71	9.508	0.75
Hardwood	Japanese elm	1	-21.02	-4.526	7.627	0.410	0.64
		2	-21.74	0.057	-6.971	8.768	0.82
	Horn Beam	1	-21.35	-3.783	-1.304	9.921	0.76
		2	-21.45	-6.995	20.54	-12.84	0.82

는 문제점이 있다고 생각된다.

확산계수는 고로쇠나무가 가장 큰 $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 을 나타내었으며 그 외 수종은 대략 $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 크기를 갖는 것으로 나타났다. 흡수성 크기는 느릅나무, 까치박달나무, 헐록, 가문비나무, 라디에타 소나무, 고로쇠나무 순으로 나타났다.

Janz (1997)에 따르면 흡수계수는 흡습범위 내 함수율 영역에서 크게 변화된다고 한다고 보고하였다. 본 연구에서도 흡수계수는 실험 초기단계에서 급격히 감소하다가 시간이 지날수록 일정한 값에 접근하는 현상을 나타내었다. 침엽수의 흡수 중 수분플럭스는 초기에 $10^{-3} \text{ (kg/m}^2 \text{ s)}$ 에서 $10^{-5} \text{ (kg/m}^2 \text{ s)}$ 정도로 감소하였다. 그러나 활엽수의 초기플럭스 크기는 침엽수와 유사한 $10^{-3} \text{ (kg/m}^2 \text{ s)}$ 이었으나 말기에는 침엽수보다 더 작은 $10^{-6} \text{ (kg/m}^2 \text{ s)}$ 정도로 감소하였다.

3.2. Boltzmann법에 의한 함수율 분포와 확산계수

1개월 및 2개월 실험시작 후 종료시 함수율 절편과 Boltzmann 변수를 이용한 함수율분포 곡선은 Fig. 3과 같다. 함수율분포곡선은 대체로 라디에타 소나무를 제외한 모든 수종의 경우 점진적으로 감소하는 형태를 나타내었으나, 라디에타 소나무의 경우

모든 시편에서 침지부분인 $x=0$ 으로부터 함수율이 감소하다가 다시 약간 증가하는 경향을 보였다. 향후 이에 대한 조사가 필요하다고 생각된다. 고로쇠나무의 경우 함수율 20% 이하에서의 확산계수를 구할 수 없었다. 따라서 흡수성이 큰 수종의 경우 함수율 분포 측정시간 간격을 단축시킬 필요가 있다고 생각한다.

확산계수를 지수함수식으로 가정하여 전함수율 범위에서 확산계수식의 파라미터 값은 Table 4와 같으며 그 결과는 Fig. 4에 나타내었다. 또한 섬유포화점 이상의 함수율 영역에서 자유수만의 확산계수 파라미터 값은 Table 5에 나타내었다. 명확하게 섬유포화점을 구분할 수는 없었지만 전함수율 범위에서 크기는 $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s} \sim 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 정도로 나타났다. Kumaran (1999)은 동일한 방법으로 구한 eastern white pine과 가문비나무의 확산계수는 $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 정도의 크기를 갖는다고 보고한 바 있는데, 본 연구에 따른 확산계수는 이보다 더 큰 값을 나타내었다. 그러나 Rosen (1974)에 따르면 침엽수와 활엽수의 섬유방향 평균확산계수는 섬유포화점이하에서 $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, 섬유포화점 이상에서 $10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ 정도의 크기라는 보고와 본 연구의 결과는 유사한 크기를 갖는 것을 알 수 있다.

BT법에 따른 함수율 의존성 곡선은 모든 수종에

Table 5. Diffusion coefficients at the nonhygroscopic region by Boltzmann method, $D_w = \exp(a_0 + a_1 m + a_2 m^2 + a_3 m^3)$

Species		Duration (month)	a_0	a_1	a_2	a_3	R^2
	Hemlock	1	-24.76	9.786	-11.95	4.651	0.96
		2	-22.77	2.394	-4.833	2.156	0.81
Softwood	Radiata pine	1	-19.74	-13.78	18.68	-6.454	0.58
		2	-22.39	-0.991	1.459	-	0.82
	Spruce	1	-23.72	4.782	-1.493	-	0.55
		2	-20.23	-11.72	14.78	-4.525	0.86
Hardwood	Painted maple	1	-19.96	-10.26	18.82	-7.299	0.66
		2	-25.39	15.75	-19.71	9.508	0.75
	Japanese elm	1	-23.87	14.81	-31.01	24.00	0.90
		2	-27.80	32.28	-57.38	32.86	0.90
	Horn Beam	1	-29.85	43.99	-82.85	53.37	0.86
		2	-23.06	2.495	3.496	-3.284	0.79

서 유사한 경향을 나타내었는데 저함수율에서 섬유포화점 부근까지 감소하다가 최대함수율 부근에서 급격히 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 다른 연구 결과와도 대체로 일치한다(Rosen, 1974; Siau, 1974; Kumaran, 1999; Kang 등, 2007).

4. 결 론

목재의 섬유방향에서 결합수와 자유수 확산계수를 측정하기 위해 침엽수와 활엽수 각 3수종에 대해 상온에서 흡수실험을 실시하였으며 시간에 따른 평균 함수율 변화와 최종 함수율 분포를 전건법으로 구하였다.

흡수계수로부터 구한 확산계수는 고로쇠나무가 가장 큰 $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 을 나타내었으며 그 외 수종은 대략 $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 크기를 갖는 것으로 나타났다. 흡수성 크기는 느릅나무, 까치박달나무, 험록, 가문비나무, 라디에타 소나무, 고로쇠나무 순으로 나타났다.

Boltzmann 변환법을 이용하기 위해서는 초기 함수율 및 외기 평형함수율이 동일해야만 하고 시편은 반무한길이가 가정하며 함수율 변화가 \sqrt{t} 에 선형비례관계가 성립해야만 한다. 그러나 본 실험조건은 이를 완전히 만족하지 못한다는 제한점이 있다. 그러나 Boltzmann 변환법으로 구한 확산계수는 함수

율 증가에 따라 저함수율에서 섬유포화점 부근까지 감소하다가 최대함수율 부근에서 급격히 증가하는 경향을 나타내었다. 자유수의 확산계수는 $10^{-10} \sim 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 넓은 범위를 나타내었으며 함수율이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 따라서 조사 대상의 수종의 목재기동이 외기에 노출되는 경우 기등바닥으로부터 우수 유입이 발생하는 경우나 수용성 방부제 처리시 섬유방향으로의 함수율 증가율과 함수율 분포를 예측하는데 도움이 되리라 생각된다.

사 사

본 연구는 국립문화재보존연구소와 BK21의 지원으로 수행되었다.

참 고 문 헌

1. Couture, F., W. Jomma, and J. R. Puiggali. 1996. Relative permeability relations : a key factor for a drying model. *Transport in Porous Media* 23: 303~335.
2. Janz, M. 1997. Methods of measuring the moisture diffusivity at high moisture levels. *TVBM-3076*. Univ. of Lund, Sweden.
3. Kang, W., Y. H. Lee, W. Y. Chung, and H. L. Xu.

2008. Parameter estimation of moisture transfer in wood. SET 2008 7th International Conference on Sustainable Energy Technologies. Seoul, Korea. 24~27 August. pp. 2119~2126.
4. Kang, W., W. Y. Chung, C. D. Eom, and H. M. Yeo. 2008. Some considerations in heterogeneous non-isothermal transport models for wood: Numerical study. *J. Wood Sci.* 54: 267~277.
 5. Kang, W., C. W. Kang, W. Y. Chung, C. D. Eom, and H. M. Yeo. 2007. The effect of openings on combined bound water and water vapor diffusion in wood : Revisited. *J. Wood Sci.* (accepted).
 6. Kang, W. and Y. H. Lee. 2006. Control volume finite element method for wood drying. *Proceedings of the National Institute for Mathematical Sciences. National Institute for Mathematical Sciences.* 1(8): 29~40.
 7. Koponen, H. 1987. *Moisture diffusion coefficients of wood.* Drying 87, Hemisphere Publishing Company.
 8. Kumaran, M. K. 1999. Moisture diffusivity of building materials from water absorption measurements. *J. Thermal Env. & Bldg. Sci.* 22: 349~355.
 9. Lee, Y. H., W. Kang, and W. Y. Chung. 2007. Numerical solution for wood drying on one-dimensional grid. *Journal of the Korean Society for Industrial and Applied Mathematics.* 11(1): 95~105.
 10. Moyne, C. and P. Perre. 1991. Process related to drying: Part I, theoretical model. *Drying Technology* 9(5): 1135~1152.
 11. Mukhopadhyaya, P., K. Kumaran, and N. Nordmandin. 2002. Effect of surface temperature on water absorption coefficient of building materials. *J. Thermal Env. & Bldg. Sci.* 26: 179~195.
 12. Perre, P., M. Moser, and M. Martin. 1993. Advances in transport phenomena during convective drying with superheated steam and moist air. *Int. J. Heat Mass. Transfer* 36(11): 2725-2746.
 13. Perre, P. and I. W. Turner. 1999. A 3-D version of TransPore: a comprehensive heat and mass transfer computational model for simulating the drying of porous media. *Int. J. Heat Mass. Transfer* 42: 4501~4521.
 14. Perre, P. and I. W. Turner. 2001. Determination of the material property variations across the growth ring of softwood for use in a heterogeneous drying model. Part 2. Use of homogenization to predict bound liquid diffusivity and thermal conductivity. *Holzforschung* 55: 417~425.
 15. Roels, S. 2000. *Modeling unsaturated moisture transport in heterogeneous limestone.* PhD Thesis, Catholic Univ. of Leuven, Belgium.
 16. Rosen, H. N. 1974. Penetration of water into hardwoods. *Wood and Fiber.* 5(4): 275~287.
 17. Turner, I. W. and P. Perre. 1996. *Mathematical model and numerical techniques in drying technology : A synopsis of the strategies and efficient resolution techniques for modeling and numerically simulating the drying process.* pp. 1~82. Marcel Dekker Inc.
 18. 김정환, 이원희. 2002. 고온수증기 처리에 의한 낙엽송재의 물성변화. *목재공학* 30(4): 1~7.
 19. 이명재, 이동흡, 이현미, 손동원. 2005. 초음파 침지처리제에 의한 목재방부제의 주입성. *목재공학* 33(3): 64~71.