

## 木材内の 水分擴散 및 傳達現象에 관한 실험적 檢定\*<sup>1</sup>

이 원 희<sup>2</sup>

# Experimental Examinations on the Phenomenon of Transfer and Moisture Diffusion in Wood<sup>\*1</sup>

Weon-Hee Lee<sup>\*2</sup>

### ABSTRACT

The purpose of this study is to clarify the mechanism of moisture transfer depend on the thickness of the spruce(*Picea sitchensis* Carr.). Therefore, as the basic research of moisture transmission, the amount of moisture transmission and the moisture distribution in specimens and temperature of it's surfaces in vapor transmission process were investigated. The experiment was conducted in a steady state, and the moisture distribution was measured by knife cutting and weighing the specimens.

The following conclusions were obtained :

1. It can be found that distribution of moisture in the specimen can be approximated by two different straight lines intersecting at nine or ten percent moisture content. The amount of moisture movement depends on the gradient of moisture in the wood.
2. It is investigated that the wood surface moisture contents(MCs) are less for thinner specimens than for thick ones on the absorption side. On the other hand, the wood surface MCs are greater for thinner specimens than for thick ones on the desorption side. The main factor that affects the EMC of wood would be temperature when the relative humidity of atmosphere is constant. The specimen generate heat with the absorption and desorption process. In addition, the velocities of moisture transmission varied with the thicknesses of specimens. If the temperature of wood becomes greater, its MC decreases. Then the difference between surface MC and EMC of adsorption and desorption side becomes greater for thinner specimens.

Therefore it is considered that the coefficients of moisture transfer decreases with the increases of the specimens' thicknesses.

**Keywords** : Moisture transmission, coefficient of moisture transfer, MC, adsorption and desorption side, temperature.

\*1 접수 1995년 11월 16일 Received November 16, 1995

본 연구는 한국과학재단 핵심전문과제연구(과제번호 KOSEF 941-0600-027-2)의 연구비지원에 의해 수행되었음.

\*2 경북대학교 농과대학 College of Agriculture, Kyungpook National University, Taegu 702-701, Korea

# 1. 서 론

목재 및 그 제품의 함수율조절과 습기이동현상의 규명은 오래전부터 중요한 문제로 부각되어 왔다(渡邊, 1983, 山田, 1987, 上村, 1991). 특히 습기이동에 관한 현상은 임산공학분야에서 주택의 벽장재료(上村, 1991)에 응용이 되고 있으며, 실내기후인자이며 수분과 밀접한 상관관계에 있는 온도, 습도를 쾌적한 상태로 조절가능한 것 역시 다공질 재료인 목재의 큰 특징이라 할 수 있다. 최근 냉난방 효율을 높이기 위한 주택의 기밀화로 인해서 실내공기의 오염과 온습도 조절의 곤란함으로 인하여 인체건강에도 좋지 않은 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(山田, 1987). 실내난방으로 인한 과도한 실내공기의 건조는 코나 목의 점막을 아프게 한다. 전통문화의 계승에 이바지하고 있는 박물관이나 수장고의 환경관리에 있어서도 목재의 수분관리에 대한 역할은 대단히 크다고 할 것이다(Thomson, 1986).

목재재료의 한 쪽이 수증기압이 높은 공기에, 다른 쪽이 수증기압이 낮은 공기에 접해있을 때, 수증기압이 높은 쪽에서 흡습이 일어나고 수증기압이 낮은 쪽에서 탈습이 일어난다. 따라서 목재내부에서는 한쪽 방향으로의 습기이동이 일어나고, 재료를 사이에 두고 한쪽의 공기에서 다른 쪽의 공기로 수증기의 이동이 일어난다. 이것을 투습현상이라 하고, 목재와 같은 다공성의 재료를 투습성의 재료라고 한다. 이 투습현상은 재료의 표면과 이것에 접해있는 공기 사이의 수증기 이동과 재료내부의 수분이동에 의하여 생긴다. 일반적으로 습기의 투과성능은 재료양측의 수증기압차에 의한다는 전제하에 구해지는 투습율, 투습계수 또는 그 역수인 투습저항으로 평가하고

있다(渡邊, 1983). 그러나 실제 이 방법에 의해 구해진 이들 값들은 실험조건에 따라 동일재료에서도 많은 차이가 나기 때문에 일반성이 없는 것이 큰 문제점으로 부각되고 있다. 前報(李, 1990)에서는 목재에서의 수분이동에 있어서 수증기압차가 아닌 함수율차, 즉 수분이동의 구동력은 함수율구배임을 설명하였으나, 수분전달계수가 재료의 두께에 따라 변화하는 현상에 대해서는 해명할 수 없었다. 본 연구에서는 목재의 수분전달계수의 재료두께 의존성을 규명하고, 습기투과성을 통일된 법칙으로 설명할 수 있는가에 대하여 검토, 고찰하였다.

# 2. 재료 및 방법

실험에 이용한 재료는 함수율분포 측정용으로는 스프루스(*Picea sitchensis*), 여과지(Toyo, 5C)를, 표면은도측정에는 여과지를 2mm와 8mm두께의 재료를 이용하였다. 투습 실험방법은 직경70mm의 아크릴제 컵을 이용하여, 이른바 컵법(Cup method, JIS Z0208)으로 실시하였다. 사용컵은 원통형으로서 높이는 80mm정도이다. 먼저 실험을 시작하기 전에 목재시편의 함수율을 0%로 조정하였고, 컵 내부의 습도는 무수입상 염화칼슘으로 0%를 유지하였다. 목재시편을 컵 위에 얹고 기밀성 유지를 위해 파라핀왁스로 밀봉하였다. 실험은 일정 온도 20℃ 조건으로 실시하였으며, 풍속은 0 m/s였다. 컵외부의 습도는 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>포화염 수용액을 이용하여 93%로 조정하였다. 실험은 일정시간간격으로 투습컵의 중량을 측정하여 중량증가율이 일정할 때까지 실험을 행하였다. 또 수분 투과방향의 함수율분포 측정실험은 중량측정실험이 끝난 직후에 목재는 대패를 이용하여 함수율분포를, 여과지는 문구용 칼로서 중앙부를 잘라 두께방향

Table 1. Vapor permeability p, vapor transmission resistance Rv.

Material	Densities (g/cm <sup>3</sup> )	Thickness (mm)	p (g · mm / (h · m <sup>2</sup> · mmHg))		Rv (h · m <sup>2</sup> · mmHg/g)	
			Windy	Calm	Windy	Calm
Spruce	0.426	1.2	0.32	0.67	0.89	1.69
		6.0	2.11	1.66	2.85	3.63
		8.2	2.30	1.81	3.55	4.51
		20.1	3.15	2.16	7.79	9.32
Filter paper	0.613	2.0		1.30		1.54
		3.0		1.85		1.62
		4.0		2.30		1.74
		5.0		2.63		1.90
		6.0		2.98		2.02
		8.0		3.72		2.15

의 함수열분포를 전건법에 의해 실시하였다. 표 1에는 실험조건을 나타내었다. 또 흡습표면과 탈습표면 및 양측면에 접해있는 공기중의 온도측정에는 여과지를 재료로서 열전대(thermo-couple)를 이용하여 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 목재와 여과지의 투습성

표2에 스프루스와 여과지의 투습율과 투습저항을 나타내었다. 투습율 $p$ 는 재료의 두께가 증가할수록 증가하는 경향을 보였으며, 투습저항도 두께 의존성을 나타냈다. 따라서 이들 값들은 실험조건에 좌우되는 관계로 물성치로서의 의미가 없는 것으로 판단되었다.

#### 3.2 목재내부의 함수열분포

수분이동성을 통일된 법칙으로 설명할 수 있는 물성치를 발견하기 위해서 습기 투과방향으로의 함수열분포를 조사하였다. 표3에는 목재와 여과지의 흡착면과 탈착면의 양측면에 있어서의 표면함수열 및 투습도를 나타냈다. 재료 두께방향의 함수열분포는 목재에서는 함수열 약 9~10%를 경계로 하여 수분경사를 달리하는 2개의 직선으로 나타났다. 문헌에 의한 값에 있어서도 이 현상은 침엽수, 활엽수에 관계없이 일정함수열에서 분포양식이 같음을 알수 있었다. 또 습기이동속도가 목재재료보다 매우 빠르다고 생각되는 여과지재료내의 함수열분포는 1개의 직선으로 나타났다. 표 3에는 재료내부의 수분투과방향으로의 함수열분포를 1차직선 회귀하여 구한 재료의 흡습습 표면에서의 함수열을 나타냈다. 이 표로부터 흡습면의 표면함수열은 두께가 커질수록 함수열이 증가하는 반면에 탈습면의 표면함수열은 감소하는 경향을 나타내었다.

Table 2. Water vapor transmission rate( $q$ ) and wood surface MCs( $u$ ) with various thickness of specimens.

Materials	Thickness(mm)	$q[g/(h \cdot m^2)]$	$u_d$	$u_a$
Spruce	1.2	9.44	5.21	10.92
	6.0	4.41	3.22	14.67
	8.2	3.55	3.65	14.96
	20.0	1.72	2.48	16.56
Filter paper	2.0	10.62	6.11	7.55
	3.0	10.05	5.07	7.32
	4.0	9.36	5.74	8.97
	5.0	8.56	5.56	8.62
	6.0	8.09	4.69	8.53
	8.0	7.58	4.26	8.62

Notes :  $u_d$  : desorption side,  $u_a$  : adsorption side

#### 3.3 수분확산현상

습기투과방향으로의 재료내의 함수열분포가 함수열 약 9%를 경계로 한 2개의 직선분포로, 또는 재료내부에 함수열 9%가 존재하지 않는 경우에는 1개의 직선분포로 나타났기 때문에 함수열경사와 확산계수와와의 관계를 검토하였다. 재료내부의 함수열 분포와 습기 투과량으로부터 함수열 경사를 구동력으로 한 다음식에 의해 수분확산계수  $D_u$ 를 계산할 수 있다. 이식으로부터 확산계수는 동일재료이면 두께에 관계없이 일정한 값을 나타냄을 알 수 있다.

$$Q = Du \cdot \frac{du}{dx} \cdot A \cdot t \quad \dots \dots \dots (1)$$

단,  $Q$ 는 수분이동량(g),  $A$ 는 투과단면적( $cm^2$ ),  $t$ 는 투과시간(hr)이다.

표 5에 위 식으로 구한 확산계수의 재료두께변이를 나타냈다. 확산계수는 일정함수열을 경계로 하여 2개의 그룹으로 나누어졌으며 각 재료에 있어서 실험조건이 같은 경우, 재료의 두께에 의존성이 없는 일정한 값을 나타내었다. 따라서 투습율이나 투습저항과 같은 수증기압경사에 의해서 산출한 값은 실용성면에서 무의미한 것으로 생각되며, 반면에 본 수식에 의해 함수열경사로 구한 확산계수는 물성치로서 이용가능성이 클 것으로 생각된다. 따라서 기존의 Fick의 법칙에 의한 수분이동의 구동력에 관한 확설은 함수열경사  $du/dx$ 를 이용하여 구한 수분확산계수가 수식의 논리에도 타당성이 있는 것으로 판단되었다.

따라서 본 연구결과, 목재내의 수분이동의 구동력은 함수열경사임이 인정되었다. 또한 그림 1과 2에는 목재와 여과지의 수분이동방향으로의 수분분포 모식도와 수분이동현상을 하나로 설명할 수 있는 통일된 식을 병기하였다. 그림 내의 화살표는 수분이동방향이고  $u_0$ ,  $u_4$ 는 탈습측과 흡습측에 있어서의 평형함수열,  $u_d$ ,  $u_a$ 는 탈습면과 흡습면의 표면함수열(%),  $u_2$ 는 재내 함수열 9%부분이다. 문자  $\alpha$ 와  $D$ 는 각 영역에 있어서의 수분전달계수 [ $g/(h \cdot m^2 \cdot \%)$ ]와 수분확산계수( $cm^2/s$ )이다. 또 식 (6), (7)로부터 단위시간당 단위면적을 이동하는 습기의량을 추정할 수 있다.

#### 3.4 수분전달현상

##### 3.4.1 재료표면에서의 이동기구

수분전달계수는 재료표면의 함수열과 공기중의 평형함수열의 차이에 의해 수분이 이동한다는 가정하에 정의되는 계수로서, 다음식으로 정의할 수 있다.

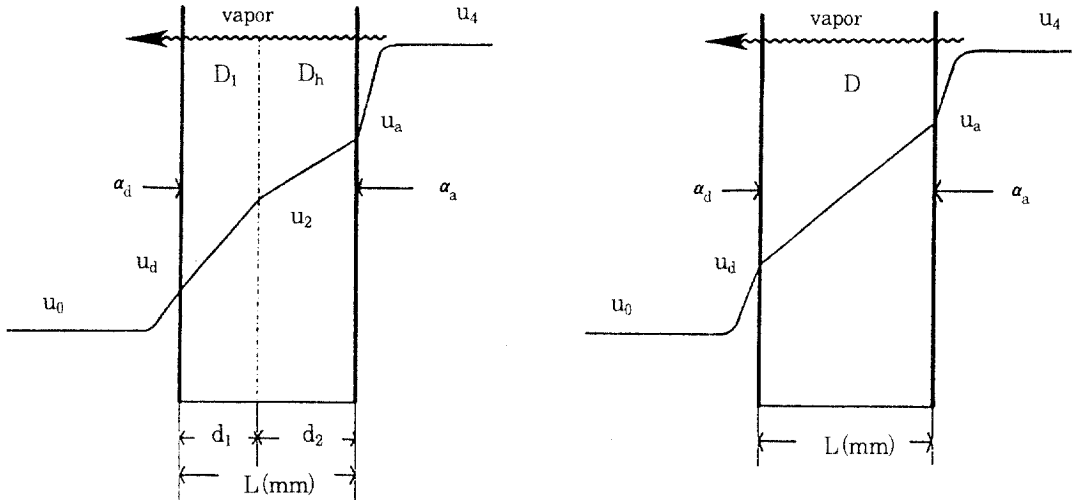


Fig. 1. Moisture transfer-diffusion model for wood(left) and filter paper(right) in a steady state.  
 Notes : u : moisture content,  $\alpha$  : coefficient of moisture transfer, D : moisture diffusion coefficient, L : thickness of specimen in flow direction.  $u_2 = 9\%$  moisture content.

$$Q = \alpha |u_e - u_f| \quad (2)$$

Definition :

$$q = \frac{Q}{A \cdot t} \quad [g/(h \cdot m^2)]$$

$$= D_1 \frac{u_2 - u_d}{d_1} = D_h \frac{u_a - u_2}{d_2} \quad (3)$$

(for wood)

$$= D \frac{u_a - u_d}{L} \quad (4)$$

(for filter paper)

$$= \alpha_d (u_d - u_0) = \alpha_a (u_4 - u_a) \quad (5)$$

(for wood & filter paper)

$$q = \frac{(D_1 u_2 + D_h u_4 - D_h u_2)}{L + \frac{D_1}{\alpha_d} + \frac{D_h}{\alpha_a}} \quad (6)$$

(for wood)

$$q = \frac{u_4 - u_0}{\frac{L}{D} + \frac{1}{\alpha_d + \alpha_a}} \quad (7)$$

(for filter paper)

단 Q는 수분이동량(g),  $u_e$ 는 공기중의 평형함수율(%),  $u_f$ 는 목재표면의 함수율(%),  $\alpha$ 는 수분전달계수 [ $g/(h \cdot m^2 \cdot \%)$ ], A는 습기투과방향과 수직방향의 단면적( $m^2$ ), t는 투과시간(h)이다.

흡습면과 탈습면에 있어서 값은 모두 수분이동방향의 목재 두께가 두꺼워질수록 단조감소하였으며, 흡습면보다 탈습면에 있어서의  $\alpha$ 가 큰값을 나타내었다. 원래 전달현상은 유체와 고체표면간만의 물질수지관계로서 재료가 일정하면 전달계수는 두께에 상관없이 일정한 값을 나타내어야만 한다. 표 4에 위의 정의식(그림 1 참조)에 의거하여 탈습면과 흡습면에서의 수분전달계수( $\alpha$ ), 재료내부의 함수율 9%이하 부분에서의 확산계수( $D_1$ ), 9%이상인 부분에서의 확산계수( $D_h$ )의 값을 목재 및 여과지에 대하여 두께별로 각각 나타내었다.

이 표로부터 투습율은 재료의 두께가 변하면 같은 조건이라도 값이 변하지만, 모델식으로 함수율경사를 구동력으로 하여 구한 확산계수는 두께에 관계없이 거의 일정한 값을 나타냄을 보여주고 있다. 따라서 새로운 모델식의 타당성이 인정됨을 알 수 있다. 또, 이 값들은 여과지가 목재에 비해 매우 큰 값을 보임으로써 수분투과속도가 목재보다 빠름을 알 수 있다. 반면에 목재의 수분전달계수는 두께가 커질수록 흡탈습면에서 모두 작아지지만, 여과지의 수분전달계수는 목재와 같은 큰 재료두께 의존성은 나타내지 않았다. 이상의 수분확산계수와 수분전달계수에 관한 검토로부터 다음의 사실들이 추정될 수 있다. 목재에서는 내강이 독립기포이기 때문에 투습은 수증기가 세포내강과 세포벽을 통한 氣相  $\rightarrow$  固相  $\rightarrow$  氣相  $\rightarrow$  固相  $\rightarrow$ 의 상태로 변화하면서 일어난다. 그러나 여과지는 내강은 별로 관여하지 않고 수증기가 섬유간을 확산에

Table 3. Water vapor permeability(p), coefficients of moisture transfer( $\alpha$ ), and diffusion coefficients(D)for various thickness of materials.

Material	Density (g/cm <sup>3</sup> )	T (mm)	$\alpha_{d1}$ (g/h · m <sup>2</sup> %)	$\alpha_a$	D <sub>l</sub> (10 <sup>-6</sup> cm <sup>2</sup> /s)	D <sub>h</sub>
Spruce	0.426	1.2	1.83	0.80	0.64	2.53
		6.0	1.38	0.56	0.63	2.37
		8.2	1.00	0.46	0.62	2.58
		20.0	0.70	0.29	0.67	2.48
Filter paper	0.613	2.0	2.66	1.31	6.65	
		3.0	3.41	1.20	6.06	
		4.0	2.59	1.39	5.24	
		5.0	2.49	1.21	6.34	
		6.0	3.15	1.13	5.73	
		8.0	3.54	1.07	6.31	

Notes :  $\alpha_d, \alpha_a$  is the coefficients of moisture transfer for desorption and adsorption side. D<sub>l</sub>, D<sub>h</sub> is the coefficients of moisture diffusion at the lower and upper side of 9 percent moisture content.

의해서 이동한다고 생각된다. 즉 여과지에서의 투습은 氣相 → 氣相 → 氣相만의 이동이 일어난다고 추정된다.

### 3.4.2 수분전달계수의 두께의존성

수분전달계수의 두께의존성을 검토하기 위해 흡습면과 탈습면 및 양측면에 접해있는 고기층의 온도를 측정하여, 습기투과방향으로의 재료두께 2mm와 8mm에서 측정된 결과를 그림 2에 도시하였다. 이 그림으로부터, 습기투과방향의 재료 두께가 작은 시편과 큰 시편의 흡습면에서는 수분흡착에 동반한 흡착열이 흡착표면에 접한 공기의 온도보다 각각 0.8~1.0℃와 0.4~0.5℃가 각각 높았고, 탈착면의 온도는 탈착에 요구되는 흡열반응으로 인하여 흡착표면의 온도보다 약 0.1℃와 0.6℃ 각각 높게 나타났다. 반면에 탈습면과 탈습면에 접한 공기의 온도차는 2mm두께의 시편에서 0.4~0.5℃, 8mm두께의 재에서는 0.5~0.6℃였다. 또한 흡착면의 공기층과 탈착면의 공기층(재료표면에서 1cm 떨어진 곳의 유체)의 온도차는 1.5℃ 정도로 흡탈습 양측면의 온도차는 큰 값을 보였다. 이 결과로부터, 얇은 재료에서는 두꺼운 재료에 비해, 빠른 투습속도때문에 재료표면에서는 온도차이가 발생한다. 이 온도차이가 재료의 표면 함수율변화에 직접적인 원인이 되며, 이로 인하여 결과적으로 수분전달계수에 차이가 생기고 있음이 확인되었다.

따라서 일반 금속재료의 열전달계수는 온도가 정해지면 금속의 종류와 고체표면의 성상 및 풍속에 의해 바로 결정되는 것과는 다르게, 목재에서는 재료표면의 성상과 풍속 및 두께 의존성이 있음이 인정되었다. 이와 같이 목재에서의 수분이동에 있어서는 재료표면의 함수율과 외기 평형함수율의 차이 및 투습속도가 빠른 작은 두께의 재료

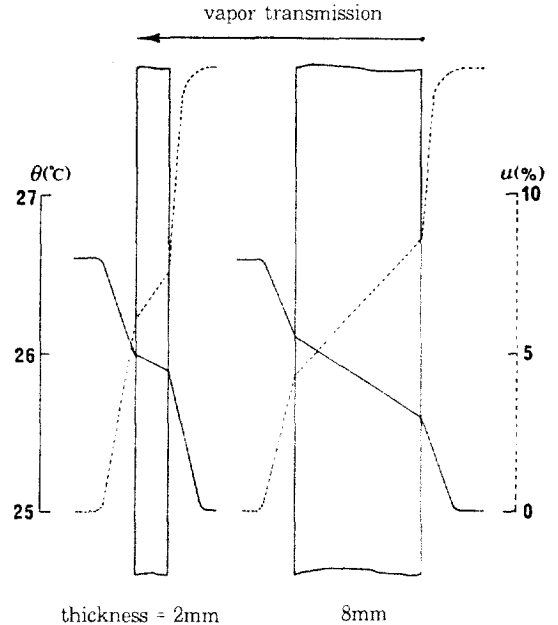


Fig. 2. Distribution of moisture content(u) and temperature( $\theta$ ) relation to thickness of specimen.

표면에서는 두꺼운 재료표면에 비해 흡착열의 발생량이 크고, 이에 동반하여 표면함수율이 저하한다. 따라서 동일 외기조건하에서 표면경계층의 두께는 같지만 투습속도와 관련한 표면함수율의 변동에 의해 수분전달계수가 변화한다. 덧붙여 여과지에서는 습기가 氣相의 상태로 섬유간극사이를 통과함으로써 투습속도는 목재에 비해 대

단히 빨라서 두께에 따른 투습저항은 큰 차이를 보이지 않고 있으며, 따라서 수분전달계수의 두께의존성도 본 실험 범위에서는 뚜렷하게 나타나지 않는 것으로 생각되었다.

#### 4. 결 론

이상의 수분확산 및 전달현상에 관한 실험을 통하여 다음과 같은 사실이 분명하게 밝혀졌다.

1. 수분이동방향에 있어서 목재내부의 함수율분포는 함수율 약 9~10%를 기점으로 기울기가 다른 2개의 직선분포를 나타냈다. 또한, 목재두께와 수분량과 목재내부의 함수율경사는 원점을 지나는 1차직선 상관을 나타내었다. 따라서 함수율경사를 구동력으로 하여 구한 수분확산계수는 수증기압경사로서 구한 수분확산계수에 비하여 두께에 따른 변동폭이 없고 거의 일정한 값을 나타내었기 때문에, 수분이동의 구동력은 함수율경사임이 검정, 확인되었다.
2. 목재표면에서의 수분수지관계인 수분전달계수는 열전달계수와는 다르게 두께의존성이 크게 나타났다. 이 원인은 재료두께에 따른 수분이동의 속도차이에 의한 흡열 및 발열반응에 동반한 표면함수율의 변동으로 생긴 외관상의 차이임이 열전대를 이용한 표면과 공기층의 온도를 계측함으로써 확인되었다.

이상의 결과를 종합해 볼 때, 투습현상은 재료양측의 수증기압차로서 정의할 것이 못되며, 재료표면에서의 수분전달과 재료내부에서의 수분확산으로 나누어서 정의해야만이 이동속도를 표현할 수 있는 일정한 재료 물성치가 얻어질 것으로 판단되었다. 따라서 본론부분에 표기한 수분이동식으로 통일시켜 수분이동에 관련한 물성치를 구한다면, 재료에 따른 습기투과성능을 표현할 수 있는 값이 될 수 있음이 분명하게 밝혀졌다.

#### 참 고 문 헌

1. 上村 武, 小原 二郎, 所 莊吉. 1991. 壁装と調湿. 彰國社. 東京
2. 山田 正(編). 1987. 木質環境の科學. 海青社. 大津市
3. Thomson. G. 1986. The Museum Environment. Butterworth & Co., Ltd., London
4. Lee, W.H., T. Okano, M. Ohta. 1991. Moisture transmission in wood, *Mokuzai Gakkaishi* 37(2) : 101~108
5. 渡 要. 1983. 建築計劃原論 Ⅲ. 丸善. 東京