

## 定常狀態에 있어서 木材의 濕氣傳達과 透濕速度

李 元 熙

慶北大學校 農科大學 林產工學科

Moisture Transfer and Velocity of Moisture Transmission by Wood in Steady State

Weon Hee LEE

Dept. of Wood Science and Technology, Coll. of Agriculture,  
Kyungpook National University.

### Abstracts

In general, the behavior of moisture transmission is estimated by vapor permeability or vapor transmission resistance, but its values obtained by experiments do not have great adaptability for practical situations because of changes in the experimental conditions. This fact is why only theoretical discussions have advanced. Thus, the fundamental study of the moisture transmission phenomenon has been treated lightly. Here, as the first step toward the basic research of moisture transmission, the amount of moisture transmission and the moisture distribution in specimens were investigated. The experiment was conducted in a steady state, and the moisture distribution was measured by slicing and weighing the specimens. From the examination of the vapor transmission resistance, the phenomenon of moisture transmission was dealt with divide the moisture transfer on the wood surface and moisture diffusion in wood. The following results were obtained. 1) The phenomenon of moisture transmission should be approached by its division into moisture transfer on the wood surface and moisture diffusion in the wood because the positive values of vapor transmission resistance exist in the extrapolation of thickness 0mm. 2) The distribution of moisture in wood can be illustrated by two straight lines intersecting at the point of nine percent moisture content : namely, diffusion coefficients have two constant values at moisture contents below and above nine percent. The shape of the distribution curve of moisture content is similar irrespective of the wood thickness. On the other hand, when the moisture contents on both sides was more than nine percent, the distribution of the moisture content could be illustrated by one straight lines. 3) The amount of moisture movement is determined by the moisture

gradient in wood. 4) Coefficients of the moisture transfer depend on the thickness of the specimens.

Keywords : moisture transmission, diffusion coefficient, moisture transfer.

### 緒 論

목재 및 그 제품의 함수율조절과 습기이동현상의 규명은 오래전부터 중요한 문제로 부각되어 왔다.<sup>1-3)</sup> 임산공학분야에 있어서 수분이동에 관한 연구는 특히 주택의 벽장재료<sup>2)</sup>에 응용이 되고 있으며, 실내기후인자이며 수분과 밀접한 관계에 있는 온도와 습도를 쾌적한 상태로 조절가능한 것 역시 다공질재료인 목재의 큰 특징이라고 할 수 있다. 최근 냉난방효율을 높이기 위한 주택의 기밀화로 인한 실내공기의 오염과 온습도조절의 곤란함으로 인하여 인체건강에도 영향을 미치는 경우가 있다고 알려져 있다.<sup>1)</sup> 실내난방으로 인한 과건조는 코나 목의 점막을 아프게 한다. 일반적으로 수분투과성능은 투습율, 투습계수, 투습저항으로 평가한다.<sup>3)</sup> 현재 투습성평가의 보고서는 재료양측의 증기압차를 이용하여 정상상태에서 수분의 이동량으로 평가되고 있다.<sup>4)</sup> 그러나 실제 이 방법의 의해 계산된 동일재료의 투습율도 실험방법이나 실험조건에 의해 크게 영향을 받고 있다.<sup>3)</sup> 그러므로 증기압차로 구한 투습율은 일반성의 결여로 인하여 실제 소용이 없다고 할 수 있다. 목재의 수분이동구동력에 대해서는 오래전부터 함수율구배와 수증기압구배의 두 학설이 있으며, 이외에도 화학포텐셜구배이론이 있고 아직도 수분이동의 구동력에 대한 논란이 많다.<sup>5)</sup> 본 보고서에서는 목재의 습기투과성을 통일된 법칙으로 설명할 수 있는가에 대하여 고찰검토하였다.

### 材料 및 方法

실험에 사용한 수종은 시트카스프루스(*Picea sitchensis* Carr.)로서 평균밀도는  $0.42(\text{g}/\text{cm}^3)$ , 평균연륜폭은  $2.2(\text{mm})$ 이다. 시험편은 직경이  $70(\text{mm})$ 인 원판상의 정목판재(곰은결판재)로서 두께는  $1, 6, 8, 20(\text{mm})$ 이다. 습기투과량측정은

일본공업규격 JIS Z-0208(cup method)에 의거하였다. Fig. 1에 컵시험체의 형상을 나타내었다.

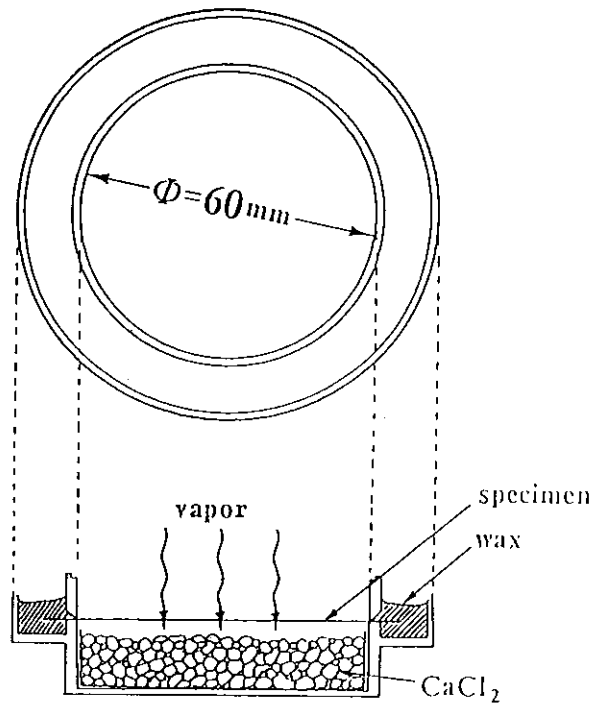


Fig. 1 Schematic represent of vapor permeation cup (JIS Z208).

실험전에 목재시편의 함수율을 0%로 조정하였다. 컵내부의 습도는 무수입상염화칼슘습으로 0%를 유지하였다. 목재시편을 컵 위에 얹고 기밀성유지를 위해 파라핀왁스로서 밀봉하였다. 실험은 먼저 온도  $26^{\circ}\text{C}$ , 습도 93%, 풍속  $2\text{m/s}$ 의 상태에서 행한 후, 같은 목재시편으로 다시 컵시험체를 만든 후 온도  $20^{\circ}\text{C}$ , 습도 93%, 풍속  $0\text{m/s}$ 의 상태에서 실험을 행하였다. 각 상태에서 일정시간간격으로 컵시험체의 증량증가율이

일정하게 될 때까지 컵의 중량을 측정하였다. 두 실험이 끝난 직후에 대패를 이용하여 두께방향의 함수율분포를 전건법에 의해 측정하였다.

### 結果 및 考察

#### 1. 透濕率과 透濕抵抗

목재의 투습성은 시편양측의 수증기압차에 의한 수분이동량으로 계산한 투습율  $p(g \cdot mm / (h \cdot m^2 \cdot mmHg))$ 과 투습계수  $P(g \cdot m^2 \cdot mmHg)$ 로서 평가한다.

$$Q = P(f_1 - f_2)At \dots\dots\dots(1)$$

$$Q = p(f_1 - f_2)At/L \dots\dots\dots(2)$$

여기서  $Q$ 는 수분이동량( $g$ )이며  $f_1 - f_2$ 는 수증기압차( $mmHg, f_1 > f_2$ ),  $A$ 는 수분투과면적( $m^2$ ),  $L$ 은 시편의 두께( $mm$ ),  $t$ 는 수분투과시간( $h$ )이다.

투습저항  $R_v(h \cdot m^2 \cdot mmHg/g)$ 는 투습계수의 역수로서 정의된다. 식으로부터 계산한 결과를 Table 1에 나타내었다. 투습율  $p$ 는 풍속이 있는 경우와  $0m/s$ 의 두 경우에 있어서 시편의 두께와 더불어 증가하였다. 투습저항은 그 정의로부터 시편의 두께와 정비례관계에 있으며, 실험범위에 있어서 투습저항( $R_v$ )을 시편두께( $L$ )에 대해 1차식으로 회귀하면 다음과 같다.

$$R_v = 0.404 L + 1.21, r = 0.995 (\text{풍속 } 0m/s),$$

$$R_v = 0.362 L + 0.57, r = 0.998 (\text{풍속 } 2m/s).$$

Table 1. Calculated results of vapor permeability( $p$ ), and vapor transmission resistance( $R_v$ ) for specimens of various thicknesses and densities.

Date No.	Thickness (mm)	Density ( $g\ cm^3$ )	p ( $h \cdot mm / (h \cdot m^2 \cdot mmHg)$ )		$R_v$ ( $h \cdot m^2 \cdot mmHg/g$ )	
			Windy	Clam	Windy	Clam
1	1.11	0.422	1.27	0.62	0.87	1.60
2	1.32	0.433	1.36	0.74	0.97	1.79
3	1.11	0.420	1.33	0.65	0.83	1.70
4	6.00	0.438	2.03	1.66	2.96	3.62
5	6.00	0.418	2.19	1.70	2.74	3.53
6	6.00	0.423	2.11	1.61	2.84	3.74
7	8.15	0.431	2.19	1.80	3.72	4.52
8	8.15	0.417	2.36	1.73	3.46	4.71
9	8.15	0.420	2.36	1.89	3.46	4.31
10	20.05	0.430	3.11	2.22	8.04	9.05
11	20.05	0.428	3.08	1.99	7.88	10.05
12	20.05	0.433	3.27	2.26	7.45	8.87

두 식에서 기율기와 절편의 차이는 풍속의 영향을 나타낸다고 사료되며, 시편두께  $0mm$ 에서 외삽한 값이 正의 값이므로 목재의 수분이동현상은 내부수분의 확산과 시편 양측표면의 수분전달로 나누어 생각해야 함을 분명히 알 수 있다.

#### 2. 木材内部의 水分分布

시편두께 6, 8, 10,  $20mm$ 에 있어서 두께방향의

함수율분포를 Fig. 2에 나타내었다. 여기서 시편 양측공기의 평형함수율이 약 9%를 가운데에 두고 설정되면, 수분분포는 함수율 9%부근을 변곡점으로 그 상하에서 두께의 직선으로 나타낼 수 있다(Fig. 2a-c). 또한 시편두께를 같은 크기로 하여 시편두께간의 분포를 비교하면 시편 양측 표면의 함수율만 다르고 분포양

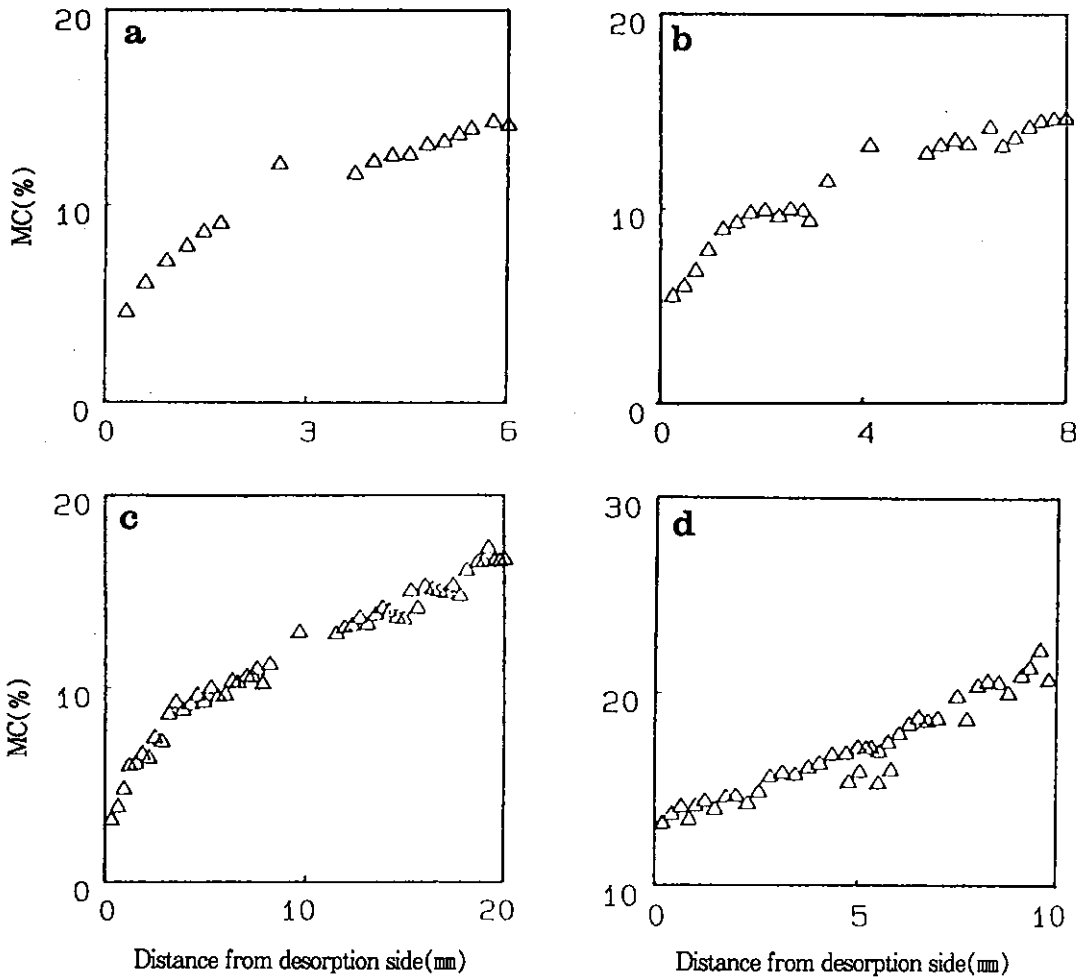


Fig. 2. Distribution of moisture content(MC) in the tangential direction.

Notes : RH 0-93% (a, b, c), RH 0-100% (d), 20°C, wind velocity of 0.0m/s.

식은 거의 같았다. 반면에 시편양측공기의 평형습수율이 9%를 가운데에 두지 않고 설정되면 (Fig. 2-d, NaCl포화염수용액과 증류수에 의해 시편양측의 평형습수율을 13.3%(RH 76%)와 17.5%(RH 100%)로 설정), 수분분포는 한개의 직선으로 나타낼 수 있다. 이런 현상은 시편의 수중에 무관하며 시편양측의 공기조건에만 의존하였다.<sup>6)</sup> 왜 9%인가라는 사실에는 미지점이 많으나, 목재의 흡착이 단분자층과 다분자층을 이루는 경계점이 습수율 9% 정도가 아

닌가 추정할 뿐이다. 수분의 이동속도는 당연히 두 분자층을 경계로 완전히 틀리기 때문이다. B. E. T.식<sup>7)</sup>에 의한 단분자층흡착시의 습수율은 재료에 따라 다양한 값을 나타내고 있고, 스프루스와 젤라틴에서 각각 5.16%와 13.5%였다.<sup>8)</sup> B. E. T.이론으로 이 문제는 차후에 분명히 알 수 있다고 판단되어진다. 수분분포로부터 수분이동양과 습수율 구배의 관계를 조사한 결과, 수분이동양은 습수율 9%이상과 이하에 있어서 정확하게 원점을 지나는 다음과 같은 두

직선이 됨을 확인하였다. 이 사실로부터 목재에 있어서 수분이동의 구동력은 함수율구배임을 알 수 있었다.

$$Q=2.67 \text{ du/dx (} u \geq 9\%),$$

$$Q=0.66 \text{ du/dx (} u \leq 9\%).$$

3. 定常狀態에 있어서 水分傳達 및 水分擴散 모델

수분이동에 있어서는 위에서 논의한 바와 같이 목재표면과 공기층의 경계층에 있어서의 수분전달현상을 고려할 필요가 있다. Fig. 3에 단

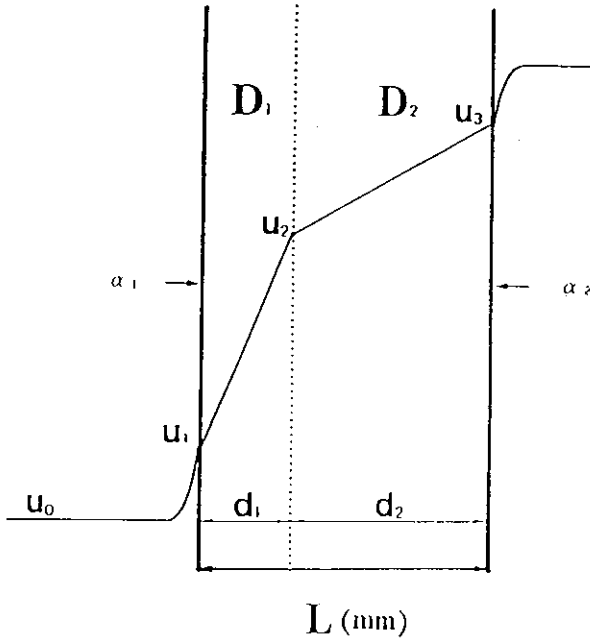


Fig. 3. Moisture transfer-diffusion model for woods on steady state. The abbreviations represent :  $u_1 \sim u_4$ , moisture content(%),  $u_2=9\%$ ;  $\alpha_1, \alpha_2$ , coefficient of moisture transfer ( $\text{g/hr/\%}\cdot\text{m}^2$ );  $D_1, D_2$ , moisture diffusion coefficient ( $\text{g}\cdot\text{mm}\cdot\text{m}^2/\text{hr/\%}\cdot\text{m}^2$ );  $L$ , thickness of specimen along flow direction( $d_1+d_2$ , mm).

순화한 수분이동모델을 나타내었다. 이 모델에서 수분은 한쪽면의 공기로부터 흡수되어 목재중을 확산이동하여 다른면의 공기중으로 탈습이동한다. 여기서 공기와 목재의 경계층에 있어서의 수분이동양은 공기중의 평형함수( $u_0, u_4$ )과 목재표면함수( $u_1, u_3$ )과의 차이로서 결정된다고 가정하였다.  $u_0, u_4$ 의 값은  $20^\circ\text{C}$ , 무풍 상태에서 각각 0%와 22.7%이다. 수분이동양  $Q(g)$ 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$Q=D_1 \cdot \frac{u_2-u_1}{d_1} At = D_2 \cdot \frac{u_3-u_2}{d_2} At$$

$$= \alpha_1(u_1-u_0) At = \alpha_2(u_4-u_3) At \dots\dots\dots(4)$$

여기서  $D_1, D_2$ 는 함수율 9%이하와 이상에 있어서의 수분확산계수( $\text{g}\cdot\text{mm}/(\text{h}\cdot\%\cdot\text{m}^2)$ )이며,  $\alpha_1, \alpha_2$ 는 탈습면과 흡수면에 있어서의 수분전달계수( $\text{g}/(\text{h}\cdot\%\cdot\text{m}^2)$ )이다.  $d_1, d_2$ 는 목재의 탈습과 흡수표면으로부터 목재내 함수율 9%위치까지의 거리이며,  $A$ 는 수분투과단면적( $\text{m}^2$ )이고  $t$ 는 수분투과시간( $\text{h}$ )이다.

그런데 수분확산계수  $D_1$ 의 단위는 확산계수의 일반적인 단위  $\text{cm}^2/\text{s}$ 로 환산해 줄 때는 다음과 같이 한다.

$$D=100D_1/r_a \dots\dots\dots(5)$$

여기서  $r_a$ 는 목재의 밀도이다. 이상의 식으로 수분확산계수를 구하기 위하여 목재내부의 함수율 9%를 경계로 함수율구배를 계산한 결과를 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Constants a, b of a simple equation,  $u = aL + b$ .

Thickness (mm)	$u < 9\%$		$u \geq 9\%$	
	a	b	a	b
6	5.03	3.50	1.21	8.60
	4.44	3.17	1.00	7.67
	4.47	3.00	1.24	7.03
8	3.71	4.30	0.85	8.03
	3.70	2.83	1.02	7.37
	3.56	3.83	0.80	8.13
20	1.84	2.67	0.49	7.17
	1.85	2.33	0.45	7.43
	1.53	2.43	0.47	6.87

Note:  $U$ : moisture content(%),  
 $L$ : thickness of specimen(mm).

또 Table 3에 각 두께별 수분전달계수와 수분 확산계수를 나타내었다. 여기서 시편 두께 1mm에 대해서 두께 6, 8, 20mm의 수분확산계수의 평균치를 이용하여 추정계산하였다. 수분확산계수는 시험편의 두께에 관계없이 거의 일정한 값을 나타내었다. 이것은 지금까지의 연구자들이 수분확산계수가 시험편의 두께에 의존한다는 학설과는 완전히 다른 것으로서, 같은 수종일 때는 두께에 따라 수분확산계수에 차이가 없음을 확실하게 알 수 있다. 이와는 다르게 수분전달계수는 두께의존성을 나타내었다. 수분전달계수( $\alpha$ )와 시편두께(L)의 대수를 1차식으로 회귀하면 다음과 같다.

$$\alpha_1 = -0.930 \log L + 1.937, r = -0.929$$

(탈습면),

$$\alpha_2 = -0.413 \log L + 0.844, r = -0.974$$

(흡습면).

그래서 시편두께의 증가에 따른 수분전달계수의 감소에 대한 원인을 검토하였다. Fig. 2로부터 탈습면에서는 표면함수율이 두꺼운 시편쪽이 더 높음을 알 수 있다. 대기중의 상대습도가 일정할 때 평형함수율에 영향을 미치는 주요인자는 온도라고 할 수 있다. 시험편은 흡습과정에서 있어서 발열과 흡열반응을 동반한다. 부수적으로 수분투과속도는 시편의 두께에 따

라 다르다. 만일 시편의 온도가 높아지면 시편의 함수율은 감소할 것이다. 그러므로 함수율  $u_3$ 와  $u_4$ 의 차이는 얇은 시험편에서 더 크게 될 것이다. 여기서 수분전달계수와 시편의 표면함수율과의 상관관계를 검토하였다. 시편두께 1mm에 대해서는 함수율분포측정이 어려웠기 때문에 투습량과 두께로부터 표면함수율을 추정하였다. 식 (4)로부터 단위면적을 단위시간에 통과한 투습량, 즉 투습도  $q(g/(h \cdot m^2))$ 는 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$q = \frac{Q}{At} = \frac{D_1(u_2 - u_0) + D_2(u_4 - u_2)}{D_1/\alpha_1 + D_2/\alpha_2 + L} \dots\dots(6)$$

L은 시편의 두께이며, 목재내부에 함수율 9%의 위치가 존재하는 경우의 식이다. 한편, 시편내부에 함수율 9% 되는 곳이 존재하지 않을 경우의 투습도 q는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q = \frac{u_4 - u_0}{\frac{L}{D_2} + \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\alpha_1 \times \alpha_2}} \dots\dots\dots(7)$$

Table 3에 목재의 각 두께에 있어서의 표면함수율과 투습도 q의 실험치와 계산치를 나타내었다. Fig. 4에 시편의 표면함수율과 수분전달계수의 관계를 나타내었다. 이 그림으로부터 흡습 및 탈습면의 수분전달계수는 목재의 표면함수율과 다음과 같은 상관관계를 가지고 있다.

Table 3. Coefficients of moisture transfer and diffusion coefficients for various thickness of specimens.

Date No.	Thickness (mm)	$\alpha_1$ (g/(h · % · m <sup>2</sup> ))	$\alpha_2$	D <sub>1</sub> (10 <sup>-6</sup> cm <sup>2</sup> /s)	D <sub>2</sub>
1	1.11	1.87	0.85	0.64	2.53
2	1.32	1.59	0.78	0.64	2.53
3	1.11	2.02	0.78	0.64	2.53
4	6.00	1.27	0.64	0.58	2.40
5	6.00	1.38	0.50	0.65	2.90
6	6.00	1.49	0.53	0.65	2.31
7	8.15	0.81	0.46	0.64	2.64
8	8.15	1.27	0.50	0.61	2.22
9	8.15	0.92	0.42	0.63	2.83
10	20.05	0.64	0.32	0.64	2.37
11	20.05	0.74	0.28	0.64	2.60
12	20.05	0.71	0.28	0.76	2.47
Mean		1.03	0.44	0.64	2.53
Standard Deviation		0.33	0.12	0.05	0.23

Note :  $\alpha_1$  : desorption side,  $\alpha_2$  : absorption side, D<sub>1</sub> : u < 9%, D<sub>2</sub> : u ≥ 9%.

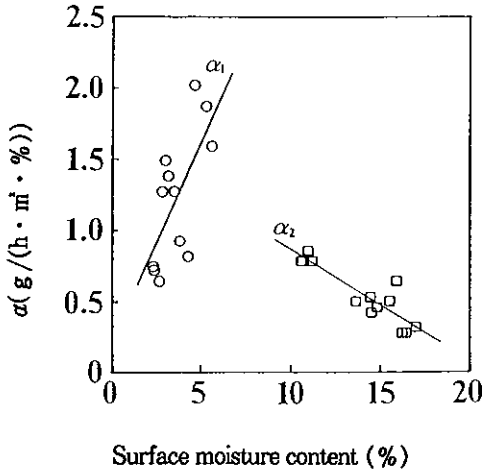


Fig. 4. Relationship between coefficients of moisture transfer and wood facial moisture content. ○: desorption side ( $\alpha_1$ ), □: absorption side ( $\alpha_2$ ).

$$\alpha_1 = 0.279u - 2.209, \quad r = 0.67,$$

$$\alpha_2 = -0.078u + 1.641, \quad r = 0.88.$$

즉 수분전달계수는 목재의 표면함수율의 함수로서 표시할 수 있으며, 이상의 결과로부터 목재의 수분전달현상은 열전달현상과는 근본적으로 다른 것임이 확인되었다. 열전달현상<sup>9)</sup>은 목재표면의 형상과 풍속에 영향을 받으며, 수분전달현상은 여기에 수분이동에 동반한 열반응이 하나 더 추가되어 영향을 받는다. 결로현상 등의 수분전달의 기구해명은 앞으로의 과제라고 할 수 있다.

### 摘 要

목재투습성에 관하여 다음과 같은 결과가 밝혀졌다.

1) 시편두께 0mm에 외삽한 투습저항값이 正

이므로 목재표면에서의 수분전달현상을 고려함이 인정되었다.

2) 목재내부의 함수율분포는 함수율 9%를 경계로 두 개의 직선으로 나타났다. 또 시편양측의 공기중 평형함수율이 9%이상일 때는 한 개의 직선으로 나타났다. 수분확산계수는 함수율 9%를 경계로 두 개의 일정한 값을 가지며, 이 값들은 오직 함수율에만 관계한다.

4) 수분이동량은 목재내의 함수율구배에 의존한다.

4) 목재의 수분전달계수는 시편두께에 의존하였다. 이 현상의 기구에 대해서는 아직 알 수 없다.

### 參 考 文 獻

1. 山田 正(編). 1987. 木質環境の科學. pp. 251-351. 海青社. 京都.
2. 上村 武, 小原二郎, 所 莊吉. 1991. 壁裝と調濕. pp. 54-147. 壁裝材料協會發行. 章國社. 東京.
3. 渡邊 要(編). 1983. 建築計劃原論 Ⅲ. pp. 136-141. 丸善(株). 東京.
4. 高分子學會. 1972. 高分子と水分. pp. 256-261. 幸書房. 東京.
5. 佐道 健. 1986. 木材中の物質移動. 日本木材學會誌. 32(7): 485-491.
6. 李元熙. 1990. 木材の透濕ならびに吸放濕に関する研究. pp. 33-77. Ph. D. Thesis. 東京大學.
7. 慶伊富長. 1986. 吸着. pp. 8-57. 共立全書. 東京.
8. Stamm, A. J. 1964. Wood and Cellulose Science. p. 162. Ronald Press.
9. 北山直方. 1986. 傳熱工學の學び方. pp. 71-78. オーム社. 東京.