

ベニヤ単板の蒸発乾燥に就いて

(第 1 報) 福山 万次郎・梶 田 茂

(木材物理第 1 研究室)

Manjiro FUKUYAMA and Sigeru KADITA :

On the evaporation-drying of rotary veneer. (I).

緒 言

木材の乾燥就中板材等の比較的厚い材料の乾燥に関しては木材中に於ける水分の拡散移動の形態、温度、含水率の水分拡散係数に及ぼす影響等、従来より多数研究が行われ、現在も尙論議されている様である。これに反し、ベニヤ単板等の比較的厚さの薄い材料の乾燥に関しては、現在木材工業界で大規模な装置を用いて乾燥が行われているにも拘らず、此の方面の研究は乾燥室内の経験的観察に留まる場合が多く、厚い材料の研究に比較して少い憾みがある。更に又、これ等単板の乾燥特性の検討は、現在尙異論のある木材内部に於ける水分移動の問題並びに拡散係数に及ぼす温度、含水率の影響等に関しても、解決の可能性を与えるものとも思われる。そこで本研究に於いては、内部水分の拡散抵抗が極めて小さい、厚さ 1.5 mm 以下のロータリ単板を用いて、その乾燥特性を含水率並びに蒸発速度の両面より検討した。本報告は、それ等の 2~3 の実験結果の概要である。

実 験 方 法

1) 供 試 材 料

マカバ (*Betula maxmowicziana* REGEL) 及びラワン (*Shorea negrosensis* F) のロータリ単板 (厚さ 1.5 mm 以下)、標準寸法 5×5 (cm) を用い、側面からの水分蒸発を防止する為、尿素樹脂を数回塗布した。試料数は、1 条件につき 5~7 枚である。

2) 乾燥条件並びに測定

島津製 HT-I 型恒温恒湿装置 (温度; 常温~70°C, 湿度; 0~98%, 恒温精度; $\pm 0.5^\circ\text{C}$, 恒湿精度; $\pm 1\sim 1.5\%$) を使用し、乾燥条件を、温度 40, 60°C, 湿度 40, 60% の 4 条件とした。本装置を所定条件に調節後、予め秤量した飽水の単板 (含水率; カバ 90~120% ラワン 150~180%) を試験室内の鱗一青銅合金の 2 ヶの Spring balance に吊し、標点をカセットメータ (精度 $1/20$ mm) にて測定し、重量の減少経過を求めた。測定は最初 5 分毎に、漸次乾燥の進行に伴つて間隔を長くし、平衡重量に達する迄継続した。乾燥終了後試験片を秤量し、後全乾重量を求めた。尙 Spring bal-

ance の精度並びに伸び一荷重の関係は、次の如くである。

Spring balance I. $Y(\text{gr})=0.387x(\text{cm})$ (最小 読度; 1.9 mg)

Spring balance II. $Y(\text{gr})=0.525x(\text{cm})$ (最小 読度; 2.6 mg)

実験結果並びに考察

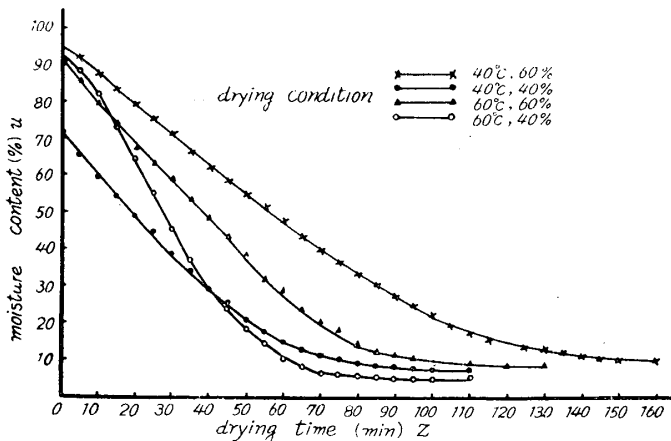
1, 乾燥経過

上述の条件下で測定した乾燥経過（平均含水率；乾燥時間）の例をカバ（厚さ，1.02 mm）及び

Fig. 1 Drying Processes under the various drying conditions (average moisture content~drying time)

species : birch wood

thickness of veneer : 1.02mm



ラワン（厚さ，1.18 mm）単板

に就いて示すと Fig. 1, Fig. 2

の如くである。各条件下に於ける

平衡含水率は両者共略等しく，

40°C 40% で 8.0% ($\pm 0.2\%$),

40°C 60% で 10.8% ($\pm 0.1\%$),

60°C 40% で 5.8% ($\pm 0.3\%$),

60°C 60% で 8.8% ($\pm 0.1\%$)で

あり，含水率は乾燥初期より45～

53%迄乾燥時間と共に直線的に，

それ以下では指數的に減少する事

が認められる。以上の経過を更に

log $u : z$ の関係で示すと (Fig. 3, Fig.

4), 含水率 45～53% 以上の恒率期間，

log $u : z$ が直線関係を示す減率第一段

の期間並びにそれ以下の減率第二段の期

間の3段階の存する事並びに，この直線

関係は，樹種及び，乾燥条件の相違には

無関係に，平衡含水率の約 3～5% 上部

迄成立し，減率第一段の期間の比較的長

い事が認められる。尙本実験では，樹

種，厚さ，乾燥速度と限界含水率の間には

明瞭な関係を認める事が出来なかつた。

減率第一段の期間に於いて，log $u : z$

が直線関係を示す事は，平均含水率と乾

燥時間に指數的關係即ち $u = u_{a.e} - Z \cdot K$

Fig. 2 Drying processes under the various drying condition (average moisture content~drying time)

species : lauan wood

thickness of veneer : 1.18mm

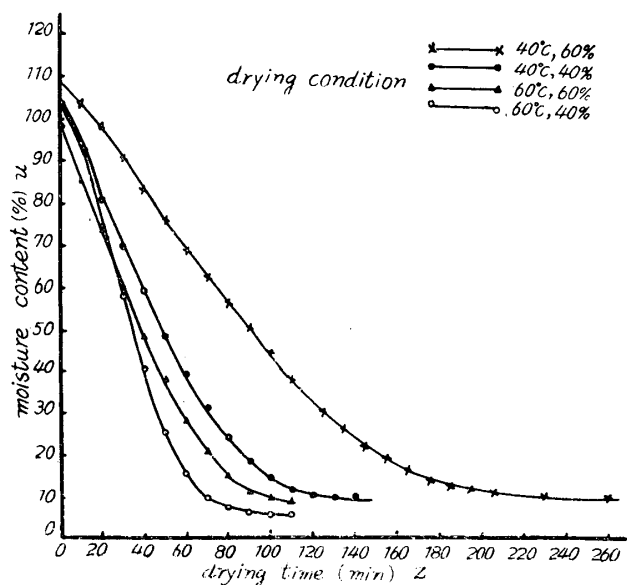


Fig. 3 Relationship between $\log u$ and z
species : birch wood
thickness of veneer : 1.02mm

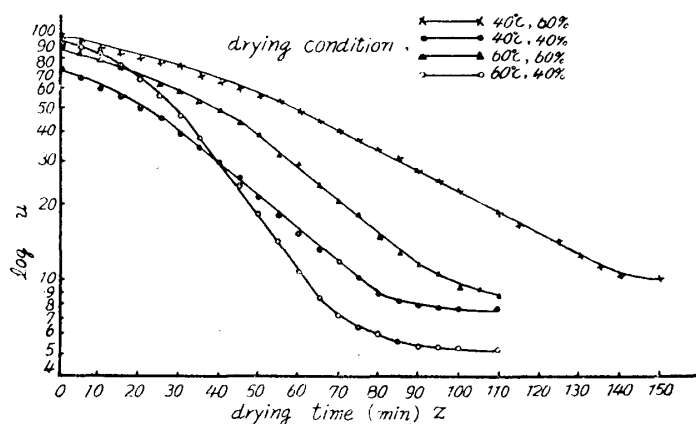
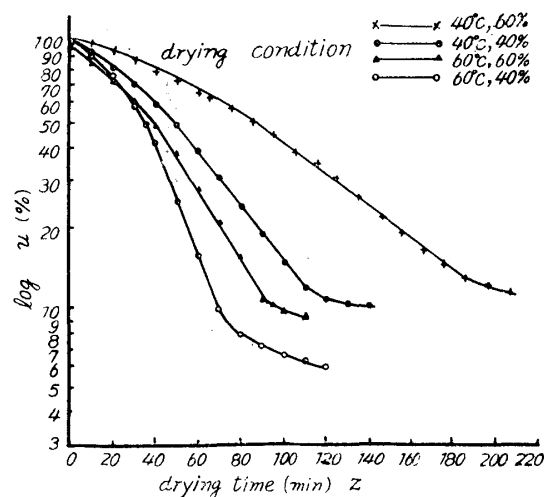
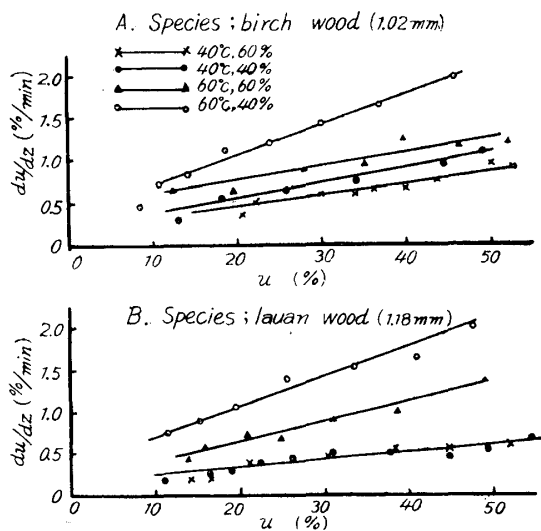


Fig. 4 Relationship between $\log u$ and z
species : lauan wood
thickness of veneer : 1.18mm



(但し, u_a = 限界含水率, k = 樹種, 厚さ, 乾燥条件に依つて異なる常数) の関係が明らかに成立する事を示す。R. KEYLWERTH¹⁾ は, 単板及び板材の対流乾燥に於いて, 3 乾燥期間即ち (i) 冷却木材面上に水蒸気が凝縮する加熱期間, (ii) 蒸発速度が大きく且略等しい速度を示す毛管水分蒸発の期間, 並びに (iii) 水分拡散の期が存在し且水分拡散の期間は次の3式, 即ち (i) $du/dz = -k \cdot u \dots (i)$, (ii) $du/dz = -k(u - u_{ge}) \dots (2)$, (iii) $du/dz = -k \cdot u^m \dots (3)$ の何れかが適用される事を述べ, 厚さ1~3 mm の balsa wood の 単板乾燥 (乾球 温度; 110°C, 湿球温度; 87°C, 風速; 1.5~2.0 m/sec) に於いて第3式の適用された事を示している。本実験に於いては, $\log u : z$ に直線関係が成立するので明らかに R. KEYLWERTH の第 1 式の適用される事が理解出来る (Fig. 5)。本実験と R. KEYLWERTH の実験結果に於ける斯る差違は, 恐らく R. KEYLWERTH の実験が高温低湿で而も

Fig. 5 Relationship between du/dz and u .

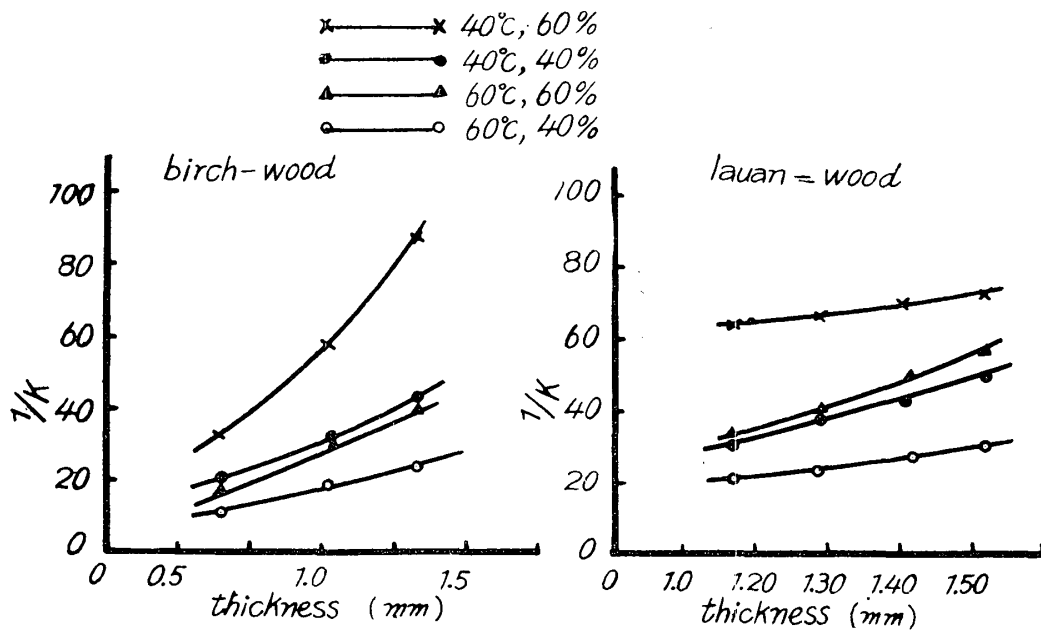


風速 1.5~2.0 m/sec の急速乾燥の場合の結果である事に起因すると考えられる。上述の本実験結果から, 減率第一段の期間内での乾燥時間 z は, $z = -1/k \ln \frac{u_e}{u_a} \dots (4)$ で示す事が出来る。実験値から計算した係数 k の逆数値 $1/k$ (Trocknungsbeiwert) を樹種, 厚さ, 乾燥条件に就いて示すと, Table 1, Fig. 6 の如くで, 乾燥条件の急激な程又厚さの薄い単板程 $1/k$ の値は小さく且厚さの増加に従つてその値は指数的に上昇し, その程度は材の密度が高いカバ単板に於いて急激である事が認められる。減率第二段の乾燥特性に関しては, 実験精度上論ずる事が出来ない所以他の機会に譲る。

Table 1. The relationship between $1/k$ -value and drying condition, Species and thickness of Veneer, birch wood (0.64—1.34mm), Lauan wood (1.16—1.52mm)

species	thickness of veneer (mm)	40°C		60°C	
		40 %	60 %	40 %	60 %
birch wood	0.64~0.66	20.23	33.26	11.71	19.58
	0.98~1.06	32.20	58.26	19.66	34.44
	1.30~1.34	42.86	88.39	22.22	38.84
lauan wood	1.16~1.19	31.99	64.45	21.66	34.78
	1.26~1.28	36.58	68.00	23.64	38.10
	1.40~1.43	41.02	70.92	24.01	58.10
	1.49~1.52	49.51	70.98	29.48	59.02

Fig. 6 Relationship between $1/k$ and thickness of veneer.



2. 蒸 発 速 度

以上はロータリ単板の乾燥経過を含水率より考察したのであるが、更に各単板の重量減少曲線の微分値より単位時間単位面積当りの蒸発水分量即ち蒸発速度 ($\text{gr}/\text{cm}^2 \cdot \text{hr}$) を求め、考察してみよう。蒸発速度と乾燥時間の関係は、上述の $u : z$ の関係と同様に乾燥初期より含水率 45~53%迄の恒率期間、それ以下平衡含水率の約 3~5% 上部迄の減率第一段及び減率第二段の存在する事が明らかに認められる。各条件下に於ける蒸発速度と自由含水率 ($u - u_{gl}$) の関係は Fig. 7 の如くである。3段階の含水率区間は、上述の $\log u : t$ の区間と略一致している。

恒率乾燥に於ける蒸発速度は一般に次式に依り示される。

$$dw/A \cdot dt = -k(p_w - p_0) \dots (5)$$

但し,

$dw/A \cdot dt$ = 蒸発速度 (gr/cm²・hr)

k = 表面蒸発係数 (gr/cm²・hr・

mmHg), p_w = 木材表面上の蒸気圧

(mmHg), p_0 = 外周空気の蒸気圧

(mmHg), A = 蒸発表面積 (cm²),

(5)式を用いて計算した, カバ及びラ

ワン単板の値は Table 2, Fig. 8 の

如くで $dw/A \cdot dt$ と $(p_w - p_0)$ の関

Fig. 8 Relationship between $dw/A \cdot dt$ and $(p_w - p_0)$.

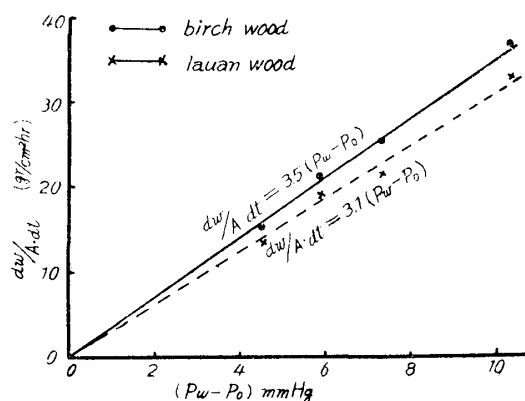


Fig. 7 Drying rates under the various drying condition.

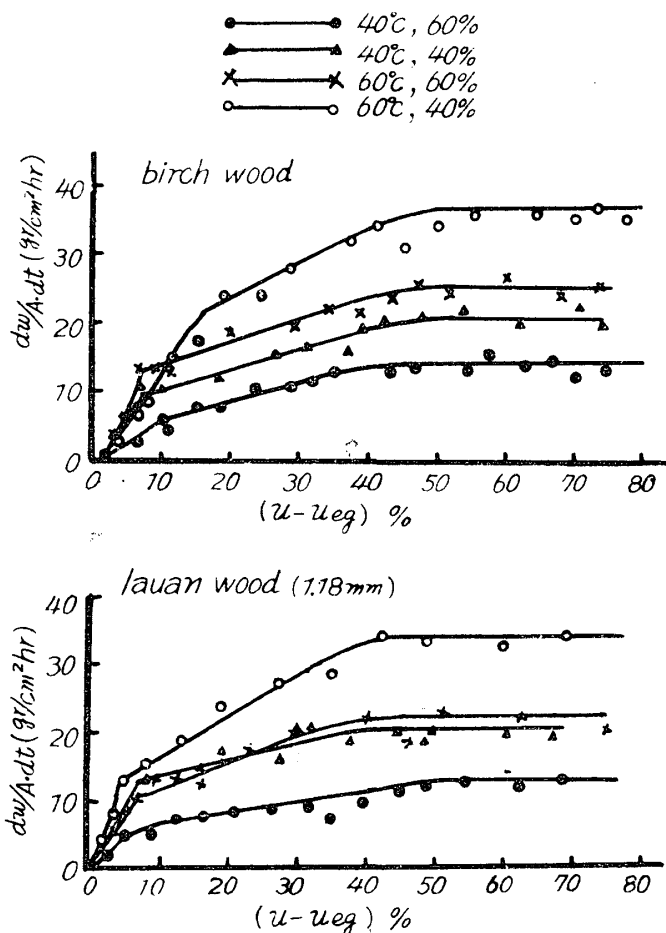


Table 2 The value of surface evaporating coefficient under the various drying conditions

species	temper- ature (°C)	humidity (%)	$dw/A \cdot dt$ ($\times 10^{-3}$)	p_w	p_0	$(p_w - p_0)$	k ($\times 10^{-3}$)
birch wood (0.64~ 1.34mm)	40	40	21.2	29.63	23.74	5.88	3.4
		60	14.5	37.70	33.18	4.52	3.4
	60	40	37.3	70.10	59.80	10.30	3.7
		60	25.1	97.00	89.70	7.30	3.5
lauan wood (1.16~ 1.53mm)	40	40	19.7	29.63	23.74	5.88	3.3
		60	12.6	37.70	33.18	4.52	2.8
	60	40	32.6	70.10	59.80	10.30	3.3
		60	21.3	97.00	89.70	7.30	2.9

係は, 原点を通る直線で示され, 表面蒸発係数としてカバ単板では $k=0.0035$, 又ラワン単板では $k=0.0031$ の値が得られた。

恒率乾燥期間は蒸発表面が充分水分で蔽われている間は、材料の種類に無関係に自由水面からの蒸発と大差ない事が従来から認められている。本実験結果を従来の値と比較すると、カバ材の $k=3.5 \times 10^{-3}$ 小倉氏²⁾のナラ材の値 $k=3.58 \times 10^{-3}$, SHEPHERD³⁾の砂についての値 $k=3.6 \sim 3.7 \times 10^{-3}$, 龜井氏⁴⁾のバルブに対する値 $k=3.4 \sim 3.9 \times 10^{-3}$ と略一致し、妥当なる値の様である。一方ラワン単板の表面蒸発係数を上述の値と比較すると実験精度及び実験値の分布から考えて稍小さい様に思われる。ラワン単板の値が小さいのは、ロータリ単板を用いた本実験に於いては、ラワン単板の蒸発表面がカバのそれに比較して大小無数の凹凸を有する為、蒸発に対し何らかの抵抗例えば凸面部の乾燥に依る有効蒸発表面積の減少或いは凹面部に於ける蒸気圧の低下 (W. THOMSON に依る凹面上の蒸気圧の低下) 等の影響に起因するのではないかと考えられる。従つて表面蒸発係数は材料の蒸発表面が略同じ程度の平滑性を有する場合には材料の種類に無関係に略等しい値を示すと考えるのが至当である様に思われる。尙此の問題に関しては、現在種々なる樹種のロータリ単板並びに切削面を用いて検討中である故追つて報告する積りである。

単板の減率乾燥第一段に於ける蒸発速度は、Fig. 7 の如く、ラワン、カバの両単板共含水率の低下に従つて略直線的に低下し、且この期間は非常に広い含水率区間に亘つて存在する事が認められる。

木材の減率乾燥第一段に於ける蒸発速度低下に関しては、現在迄多数の人々に依つて説明が加えられており、その説明の何れが妥当であるかは、簡単に述べる事は出来ないが、本段階の蒸発速度は次の2式で与える事が出来る様である。即ち、

$$i) \quad dw/A \cdot dt = -kA'/A(p_w - p_0) \dots\dots\dots (6)$$

$$ii) \quad dw/A \cdot dt = -k(p_w - p_r - p_0) \dots\dots\dots (7)$$

但し A' = 有効蒸発表面積 (cm²)

A = 全蒸発表面積 (cm²)

p_r = 蒸発抵抗圧 (mmHg)

(6)式は乾燥の進行に伴い、有効蒸発表面積が含水率の低下に比例して減少し、表面蒸発係数 k 及び材料表面の蒸気圧 p_w が変化しないと仮定した式である。又(7)式は小倉氏²⁾に依つて示された式で、含水率の低下に従つて木材一水分の凝着力が増加する為に、一定乾燥条件下では表面からの蒸発量が減少し、その結果境界層の蒸気圧が p_w から或る値 p_r まで減少する為に表面蒸発係数 k 及び蒸発表面積 A が一定であつても蒸発速度が低下すると仮定した式である。

薄い単板を用いた本実験に於いては、厚さ方向の水分傾斜の測定が不可能であり、又表面温度の測定も技術上極めて困難で、これ等の測定を行わなかつた為、何れがより妥当であるかは、云々出来ないが、乾燥条件 40°C, 40%, 厚さ 0.66 mm のカバ単板の乾燥結果を両式により計算すると

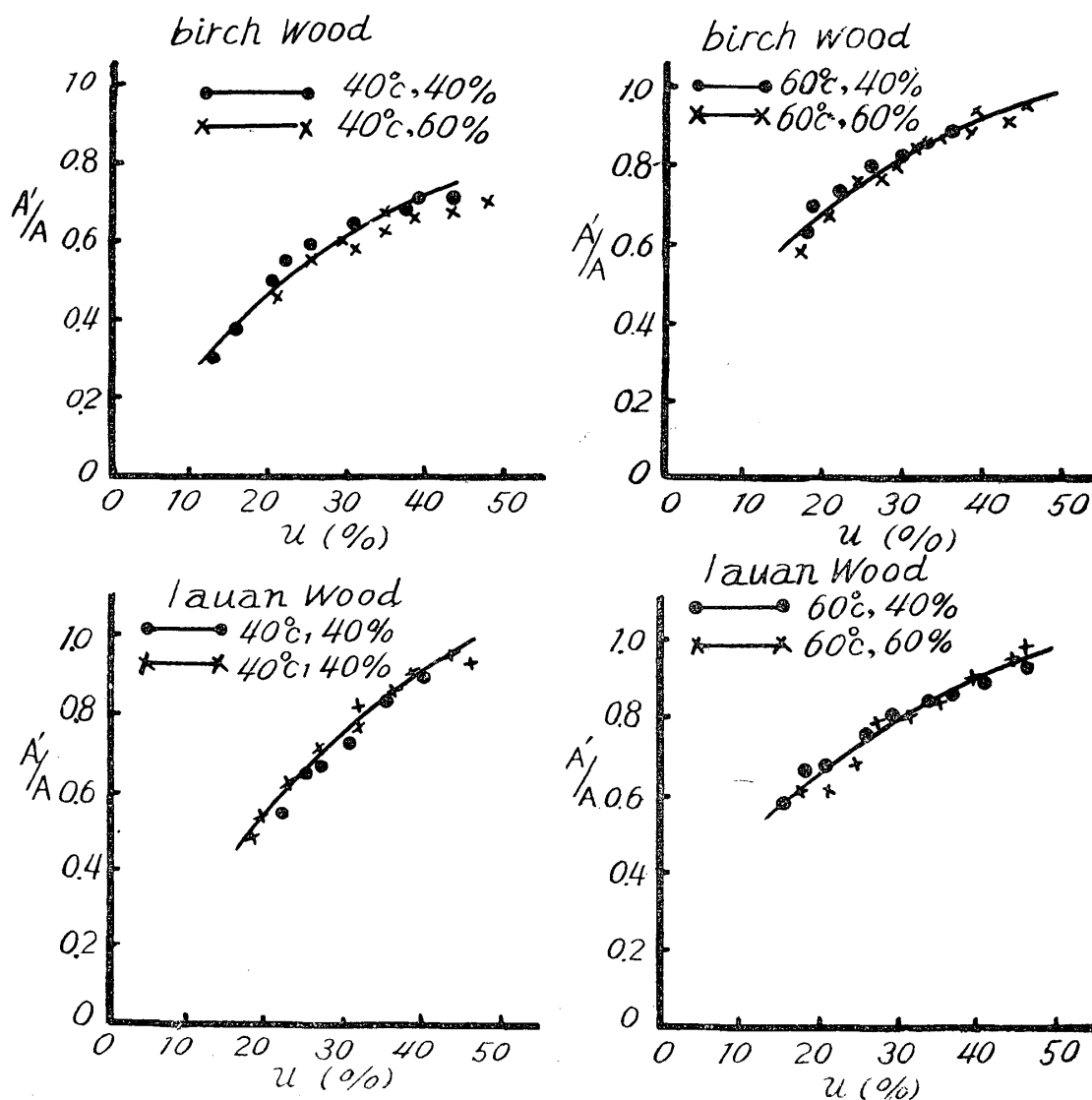
Table 3の如くである。表面温度 t_s は、小倉氏の例にならつて、限界含水率で蒸発表面が湿球温度を示し、含水率の低下に従つて漸次温度が上昇し、平衡含水率で乾球温度に到達すると仮定し

Table 3. The result of computation of the effective evaporating area A'/A and of the surface evaporating resistance pressure p_r in first stage of decreasing rate of drying.

Species : birch (rotary veneer), thickness : 0.66 mm, drying condition : 40°C, 40 %, surface evaporating coefficient : 3.5×10^{-3} , evaporating surface area : 49.449cm² moisture content of limitation : 52.4%, $(p_w - p_0) = 29.63 - 23.74 = 5.88\text{mmHg}$.

$u\%$	$dw/A \cdot dt$	A'/A	A'	$(p_w - p_r - p_0)$	p_r	$p_w - p_r$	t_s	H	u_s
50	29.1	0.975	48.213	5.74	0.15	29.48	29.0	95.1	23.4
45	19.2	0.927	45.839	5.49	0.40	29.23	30.1	91.9	22.6
40	18.3	0.884	43.713	5.22	0.67	28.96	31.7	81.0	17.2
35	17.8	0.859	42.477	5.08	0.81	28.82	33.0	76.4	15.3
30	16.7	0.802	39.658	4.77	1.12	28.51	34.2	71.5	13.7
25	15.8	0.763	37.729	4.51	1.38	28.25	35.7	63.3	10.7
20	11.8	0.570	28.186	3.37	2.52	27.11	37.0	57.6	9.8
15	7.3	0.352	17.406	2.08	3.81	25.82	38.1	51.9	8.3

Fig. 9 Relationship between A'/A and u



て推定した値であり、又関係湿度 H は t_s と $(p_w - p_r)$ から湿度表により、表面含水率 u_s は、 t_s と H から平衡含水率曲線に依つて求めた値である。

Table 3 から明らかな如く、減率第一段から減率第二段へ移る限界点 ($u = 13 \sim 15\%$) はで、表面含水率は殆んど平衡含水率に達している事が認められる。只考慮すべき事柄は、(7)式に従えば厚さ 0.66 mm の単板に於いても減率の初期に於いて既に表面含水率の間には30%以上の水分傾斜が存在し、且本実験の場合には、乾燥条件、樹種、厚さの相違如何に拘らず平均含水率50%に於いて、表面含水率が常に21~23%の値を示した事である。これに関しては、小倉氏も指摘がしている如く表面温度の推定或るは他の原因に基く結果であると考えられるので更に検討する余地がある様に思われる。表面含水率 u_s と蒸発抵抗圧 p_r の関係は小倉氏の結果と同様に、 u_s の増加に従つて p_r が指数的に減少する傾向を示すが、此所では特に(6)式に従つて求めた A'/A と u の関係を検討した。(Fig. 9) 実験結果より、 A'/A は u の減少に従つて拋物線的に減少する事が認められ、此の結果は全く $u_s : p_r$ の関係同様な理由によるものと思われる。即ち乾燥の進行に伴つて、木材—水分の凝着力が増加する一方毛管内の水分が蒸発する為に、毛管が縮少し、蒸発抵抗が増加する結果水分を分離蒸発せしめる力が減少した事に起因すると考えられる。

本実験に於いては、乾燥条件が少かつた為に、外周条件の単枚乾燥時間に及ぼす影響を検討する事は出来なかつたが、単板厚さの影響に関しては、上述 Table 1, Fig. 6 の如くであり更に此の関係を $z_1/z_2 = (s_2/s_1)^n$ で示すと、カバ単板は $n = 0.9 \sim 1.3$ で略 $n \doteq 1$ 、又ラワン単板で $n = 1.6 \sim 1.9$ 略 $n \doteq 2$ の値を示し、従来の値に近い結果が得られた。

要 約

カバ、ラワン両単板の蒸発乾燥の結果を簡単に要約すると次の如くである。

(1) 単板乾燥に於いては、恒率、減率第一段、減率第二段の3乾燥期間が明らかに認められ、その含水率範囲は、恒率期間は乾燥初期より45~53%迄、減率第一段は、それ以下平衡含水率の約3~5%上部迄である (Fig. 1, 2, 3, 4, 7)。

(2) 減率乾燥第一段の期間では平均含水率—乾燥時間に指数的関係 ($u = u_{a.e} \cdot e^{-k \cdot z}$) が成立し、R. KEYLWERTH によつて示された $du/dz = -k \cdot u$ の式が適用される。(Fig. 5)

(3) 従つてその期間に於ける乾燥時間は $z = 1/k \cdot \ln \frac{u_e}{u_a}$ で与えられ、係数 $1/k$ は、厚さが薄い程、又乾燥条件が急激な程その値は小さく、且厚さの増加に従つて指数的に増加する事が認められる。又厚さに依る増加の程度は、板の密度が大きいカバ単板に於いて急激である。(Table 1, Fig. 6)

(4) 恒率乾燥期に於ける表面蒸発係数はカバ単板で $k = 3.5 \times 10^{-3}$ 、ラワン単板で $k = 3.1 \times 10^{-3}$ で、ラワン単板の値は稍小さい (Table 8)。此の差算は蒸発表面の精粗に起因する様に思われる。尙此の点に関しては検討中である。

(5) 減率乾燥第一段の期間に於いて、有効蒸発表面積 A' と全表面積 A の比 A'/A は、含水率の減少に従つて拋物線的に減少する事が認められる (Table 3, Fig. 9)。此れは、水分減少に伴う木

材一水分の凝着力の増加並びに毛管縮少に伴う蒸発抵抗の増加に起因すると考えられる。

(6) 単板の厚さ (s) と乾燥時間 (z) の関係を $z_1/z_2 = (s_2/s_1)^n$ で示すと, カバ単板では $n=1$, 又ラワン単板では $n=2$ が与えられる。

Résumé

Under the constant drying condition (temperature ; 40, 60°C, humidity ; 40, 60 %), we experimented on the evaporation-drying of rotary veneer of birch-wood (*Betula maximowicziana* REGEL) and lauan wood (*Shorea* sp.), of the thickness of test pieces less than 1.5 mm. The test pieces of about 5×5 cm (i. e. total evaporating surface area ; 50 cm²) were coated with urea-formaldehyde resin to prevent the evaporation of water from four side-faces and then soaked in water until completely saturated (moisture content ; birch wood 90~120 %, lauan wood 150~180 %). The results were as follows ;

i) The three stages of drying constant rate (A), first (B) and second (C) stages of decreasing rate of drying were obviously recognized in this experiment and the range of the moisture content of (A) was from the initial moisture content to 45~53% and that of (B) was from 45~53 % to the moisture content which is 5~6 % higher than equilibrium one. (Fig. 1, 2, 3, 4, 7)

ii) Between the average moisture content and the drying time on the first stage of decreasing rate of drying was recognized the exponential relationship (Fig. 3, 4) and consequently the first formula indicated by R. KEYLWERTH ($du/dt = -k \cdot u$) can be applied to the results of our experiment (Fig. 5).

iii) As the results of the fact above mentioned, the drying time (z_1) was given by the following formula ;

$$z = -1/k \ln \frac{u_c}{u_n}$$

In this equation, coefficient $1/k$ (Trocknungsbeiwert by R. KEYLWERTH) was exponentially increasing with the thickness of veneer and its value was decreasing with sharp drying condition (Table 1, Fig. 6).

iv) In the constant rate of drying, surface evaporating coefficient of birch wood was $k=3.5 \times 10^{-3}$ and that of lauan wood was $k=3.1 \times 10^{-3}$ (Fig. 8). The cause of this difference seems to be due probably to roughness of evaporating surface. At present we are studying for tracing to its origin.

v) The ratio of effective evaporating area (A') to total surface area (A) A'/A was parabolically decreasing in proportion to decreasing of moisture content at the first stage of decreasing rate of drying (Table 3, Fig. 9). It seems to be due to increasing of wood-water adhesion and of evaporating resistance according to the reduction of wood capillary.

vi) The relationship between thickness of veneer and the drying time was given by the equation $z_1/z_2 = (s_2/s_1)^n$. In our experiment the value of n at birch wood equal to approximately 1 and at lauan wood approximately 2.

文 献

- (1) R. KEYLWERTH ; Holz als Roh-und Werkstoff. Heft **1**, (1953)
- (2) 小倉武夫；林業試験場研究報告 51 (昭 25)
- (3) C. B. SHEPHERD ; Ind. & Eng. Chem. **30**, No. 12 ,(1938)
- (4) 亀井三郎；同上 (2)
- (5) 松本文三；木材乾燥法
- (6) 押田勇雄；蒸発，乾燥 (昭 25)
- (7) 亀井三郎；化学機械の理論と計算 (昭 24)
- (8) R. KEYLWERTH ; Holz als Roh-und Werkstoff. Heft **3**, (1952)
- (9) F. Kollmann ; Technologie des Holzes und Werkstoffe (1951).
- (10) 亀井三郎；化学工学
- (11) T. K. SHERWOOD ; Ind. & Eng. Chem. **21** No. 10 (1929) **26**, No. 10, (1934).