

강화마루용 섬유판 열압공정에서의 열전달 원리에 대한 고찰¹

김수민²

Investigation on the mechanism of heat transfer in hot-pressing process of fiberboard manufacturing for laminate flooring¹

Sumin Kim²

ABSTRACT

The objective of this work was to investigate the mechanism of heat transfer in hot-pressing process for MDF manufacturing by reference study. Firstly, general heat transfer theory was studied. The numerical analysis of heat transfer in hot-pressing process was studied on temperature profile, moisture profile, physical properties between moisture and board. The mechanism of heat and moisture transfer inside of board was analyzed by conduction, convection, radiation and diffusion of bound water in wood cell walls. Especially, the change of core temperature as hot press time was important factor to setup hot-pressing schedule in MDF manufacturing.

Keywords : Heat transfer, Hot-pressing process, MDF, moisture.

1. 서 론

섬유판 열압공정의 열전달 메카니즘은 지난 수년간 연구되어 왔고, 현재에 이르러서는 다양한 수치해석 기법을 통한 시뮬레이션까지 가능하게 되었다. 본 메카니즘의 규명 작업은 제품 물성 향상, 열압시간 단축, 에너지 소비의 최소화 및 특수용도로 개발될 신복합체의 제조 설계에 기반이 되어 왔다. 열압공정은 MDF 제조공정에서 가장 중요한 공정으로써 최적화 작업에 앞서 공정 중의 물리적, 화학적 변화에 대한 전반적인 이해가 필요하다. 열압공정 메카니즘은 다음과 같이

1. 논문접수: 2009. 05. 10.; 심사: 2009. 05. 22.; 게재확정: 2009. 09. 15. 본 연구는 농림수산식품부 농림기술개발사업의 지원에 의해 이루어진 것임.

2. 숭실대학교 건축학부, School of Architecture, Soongsil University, 511 Dongjak-Gu, Sangdo-Dong, Seoul 156-743, Korea. E-mail: skim@ssu.ac.kr.

3가지 구조로 형성되어 있고 상호간에 미치는 교호작용의 해석을 통해 설명될 수 있다. (Humphrey 1999)

- THERMODYNAMICS : 열전도, 대류, 확산, 상변이
- ADHESION : 수지의 경화 / 결합력 ,
- RHEOLOGY : 밀도화 / 잔존응력

MDF는 프레스 열판의 열과 실린더 압력과 매트 수분에 의해 목질 복합체가 변형되고 층간 밀도를 형성한다. 보드의 밀도화 과정은 board 내부에 높은 응력을 유발시킨다. 이 응력은 목질 세포벽이 변형되면서 해소된다. 목재의 주요 성분인 헤미셀룰로오스와 리그닌은 무정형의 고분자이기 때문에 온도와 수분의 상태에 따라서 압축율이 바뀌게 된다. 일반적으로 온도와 수분의 증가는 목재의 압축율을 향상시킨다. 그리고 접착제(수지)와 피착제(화이버)간에 열에 의한 화학적 반응과 압력에 의한 습윤효과에 의해 접착력이 형성된다. 만일 열압과정속에서 응력이 충분히 해소되지 않으면 수지의 접착력이 발휘될지라도 열압 종료후 “spring back”현상이 발생한다. 더욱이 보드가 습한 상태하에 놓이게 되면 응력을 제한하지 못하게 된다. 목질복합체의 변형률과 아울러 수지의 경화 반응을 결정하는 온도와 수분의 분포는 목질 복합체의 접착력을 결정하는 중요한 변수가 된다. 열경화성 수지를 사용할 경우, 적층된 파티클 또는 화이버를 통한 열전달율은 열압시간에 중요한 인자로 작용한다. 따라서 열압시 board내부에서 시간별로 온도 변화를 측정하고 관련 열전달 메카니즘을 규명하는 것은 대단히 중요한 작업이라고 할 수 있다. MDF나 PB는 열압이 진행되는 동안 밀도가 시간별, 층별로 다양하게 변화하고 결과적으로 열전도율과 투과도가 변화하므로 합판 제조나 목재 건조에 비해 열전달 해석이 어려워진다.

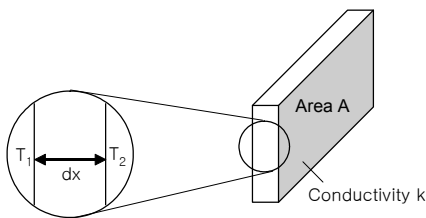
MDF 제조시 열전달의 방식은 재질(목질)을 통한 전도(conduction)와 증기에 의한 대류(convection) 2가지가 있다. 열압 초기에 목질 보드의 열전달 대부분은 대류에 의해서 이루어진다. 프레스 열판으로부터 전달되는 열은 수증기를 발생시키고 이것은 층간에 수증기압차를 가져온다. 열을 함유한 수증기는 온도가 낮고 수증기압이 낮은 층층으로 이동하면서 응축과 동시에 함유한 열을 방출하게 된다. 열압 초기에 목질 복합체의 매트는 매우 투과성이 좋고 Flake(fiber) 주위로 수증기의 흐름이 방해될 덜 받는다. 열압 초기에는 공극의 비율이 90% 이상이고 스팀과 공기가 매트의 층층과 Edge를 통해서 활발히 흐르므로 매트내부의 압력증가는 거의 없다. 매트가 압축되기 전에 매트는 공기로 채워져 있고 층층의 공기는 스팀의 흐름을 방해한다. 즉 층층으로 대류에 의한 열전달이 낫다. 목질 복합체의 밀도가 $500\text{kg}/\text{m}^3$ 이상이 되면 공극률이 감소하고 가스흐름이 상당히 감소한다. 차츰 표층의 증기압이 증가하고 표층과 층층의 압력차에 의해서 열을 함유한 수증기가 층층으로 이동한다. 매트가 최종두께에 이를 즈음 대류에 의한 열전달 효과는 감소하고 대신 전도에 의한 열전달 효과가 증가한다. 즉 대류에 의한 열전달은 대기중으로 수증기가 소모되면서 낮은 매트습수율이 될 때 차츰 감소하고 전도에 의한 열전달로 방식을 전환한다. 전도와 상변이, 대류의 상호작용은 열전도율과 매트의 투과도 그리고 Edge로 방출되는 수분과 온도 감소율에 따라서 변하게 되는데, 본 고에서는 MDF의 열압공정에서의 board내 열전달 원리에 대하여 고찰하고자 한다.

2. 열전달의 일반적인 이론

열전달이란 한 시스템에서 다른 시스템으로 열에너지가 전달되게 하는 혹은 ‘흐르게 하는’ 과정에 대한 연구이며 열전달 방식에 의해 전도, 대류, 복사로 분류된다.

- 전도란 고체 물질내의 높은 온도 영역에서 낮은 온도 영역으로 또는 높은 온도의 고체에서 그것과 물리적으로 접하고 있는 낮은 온도의 고체로의 열전달이다.
- 대류란 유체운동의 결과에 의한 높은 온도의 고체표면으로부터 낮은 온도의 유체로의 유체의 높은 온도 영역으로부터 낮은 온도 영역으로의 열전달이다.
- 복사란 진공 또는 낮은 밀도의 매질(예:공기)내의 서로 떨어진 두개의 물체사이의 온도차 때문에 일어나는 전자기파에 의한 열의 전달이다.

전도에 의한 열 흐름의 기본관계는 등온 표면을 통과하는 열 흐름속도와 그 표면에서의 온도 구배간의 비례이다. 한물체내 어느 위치에서 그리고 어느 시간에 적용될 수 있도록 일반화된 것을 Fourier법칙이라 한다. 이것은 다음과 같은 식으로 표시된다.



$$\frac{dq}{dA} = -k \frac{\partial T}{\partial x}$$

Eq. 1. Fourier's Law

Fig 1. Fourier's Law.

여기서, A =등온표면적, x =거리, T =온도, k = 비례상수, q =표면에 직각방향으로 그 표면을 통과하는 열흐름 속도 이다.

그리고 음(-)의 부호는 열 흐름이 뜨거운 곳으로부터 찬 곳으로 일어나고 또 구배의 부호는 열 흐름에 반대라는 물리적 사실을 반영하는 것이다. 비례상수 k 는 열전도도라고 하며 물질의 고유한 물성이다. 열전도도는 금속에서는 가장 높고 속에 기공이 있는 미세한 분말고체에서는 가장 낮다.(Table 1) dx 사이의 어느 주어진 지점이 시간에 따라 온도가 변화하지 않고 일정 하면 정상상태 전도, 변화하면 비정상상태 전도라고 한다. 비정상상태 전도의 경우 어느 주어진 지점에서 유출열량과 유입열량의 차이가 발생하고 열축적에 따른 온도 상승(하강)이 동반된다. 이것을 수식으로 표현하면,

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

Eq. 2. 비정상상태의 열전도

여기서, c_p 는 비열, ρ 는 밀도이며, α 는 열확산계수라고 한다.

Table 1. Heat Transfer of Materials

	온도(℃)	$k(W/m^{\circ}C)$	$\rho(kg/m^3)$	$c(kJ/kg^{\circ}C)$
스테인레스강	0	16.3	7670	0.46
알루미늄	0	202	2707	0.9
Yellow Pine	23	0.15	640	2.8
Fir	23	0.11	420	2.7
수증기	107	0.025	0.59	2.1
물	0	0.056	1000	4.2
공기	0	0.025	1.3	1
단열보드	20	0.5	240	

3. 보드 열/수분 전달의 수치해석

수분을 함유한 공극 구조체는 열과 물질이 함께 전달될 때 다양한 독립 변수들에 의해 영향을 받는다. 예를 들면 온도, 습도와 같은 대기 조건과 밀도, 투과도 흡습도와 같은 공극 구조체의 성질이다. 대류와 전도에 의한 열전달은 공극을 통과하는 가스와 액체 상태의 흐름(Flow)과 확산(diffusion)에 의한 물질 전달과 고형구조(Solid Matrix)속을 통한 결정수의 확산에 의해서 이루어진다. 공극 구조체 내부의 수분은 자유수, 결정수, 수증기 세가지 상으로 존재한다. 목재내의 수분과 열전달의 모델링은 수년동안 연구자들의 관심을 이끌어 왔다. 지금까지 수분확산의 구동력은 함수열 경사, Water potential의 경사, 부분 압력경사에 의해서 형성되고 전체 수분 흐름량에서 열을 함유한 수분전달은 상당한 기여를 하며 결과적으로 열과 수분의 전달은 상호 작용을 통해 해석되고 있다(Philips and De Vries 1957; DeGroot 1963; Prigogine 1961; Fortes and Okos 1978).

3-1 Temperature Profile

매트의 온도 profile은 두께방향의 매트 내부 각지점에 대해 시간별 온도 변화이며 비정상상태의 열전달 이론으로 설명될 수 있다(Siau 1984).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad \text{Eq. 3.}$$

여기서, t =열압시간(s), x =보드표면으로부터 거리(cm), T = x 위치에서 온도(℃), D_h =열확산계수(cm^2/s)

열압시간이 짧고 온도변화가 상대적으로 적을 경우 D_h 는 상수로 간주될 수 있다.(목재의 경우 $D_h=0.0011$)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D_h \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad \text{Eq. 4.}$$

여기서, $U = T - T_1$ 이라 하고 미분방정식에 대한 초기조건과 경계조건은 $t = 0$ 일 때, $T = T_0$, $x = 0$ 이고 $t > 0$ 일 때 $U = 0$, $x = b$ 이고 $t > 0$ 일 때 $U = 0$ 이다.

MacLean(1942)에 의해 제안된 위 미분 방정식의 해는 다음과 같다.

$$T = T_1 + (T_0 - T_1) \frac{4}{\pi} \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} \sin \frac{(2n-1)\pi x}{b} \exp\left(-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 D_h t}{b^2}\right) \right) \quad \text{Eq. 5.}$$

여기서, b =보드두께(cm), T_0 =매트초기온도, T_1 =열판온도

보드내부의 열전달과 관련한 수치해석(Simulation) 방법으로는 유한차분법, 유한 요소법, 유한체 적법이 있는데 주로 유한차분법에 의해 해석되고 있다. 열전달의 편미분항을 유한차분법으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T^*(i) - T(i)}{\Delta t}, \quad \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T(i+1) - 2T(i) + T(i-1)}{\Delta x^2} \quad \text{Eq. 6}$$

여기서 Δt =시간증분(sec), Δx =요소두께(m), T =현재온도, $T = \Delta t$ 후 온도, i =요소구분자

Lewis(1967)은 PB의 열전도도와 밀도, 온도간의 관계를 아래와 같이 설명하였다.

$$K = 0.018152 + 0.0001484D + 0.0001441(T - 297)$$

여기서, K =열전도도($w/(m \times Kelvin)$), T =온도(kelvin), D =밀도(kg/m^3)

한편 McMillin(1969)이 실험한 loblolly pine에 대한 비열과 온도와의 관계는 아래와 같다.

$$C = 0.0115321 + 0.0009497T$$

여기서, C 는 비열($cal/(g \times Kelvin)$)

3-2 Moisture profile

초기에 균일하게 분포되어 있는 매트내 수분은 열판의 열이 공급될 때 매트 내부로 이동하고 끓는점에 도달시 증기로 변해 압력이 낮은 매트의 중층으로 향한다. 온도 profile과 마찬가지로 함수율 profile도 열압공정을 통하여 모델화 될 수 있다(Siau 1984).

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_m \frac{\partial M}{\partial x} \right) \quad \text{Eq. 7.}$$

여기서, D_m =수분의 확산계수(cm^2/s), M =함수율(%), t =열압시간(sec), x =보드표면으로부터 거리(cm)

확산계수 D_m 은 다음과 같은 공식으로 얻어질 수 있다.

$$D_m = \frac{0.07}{(1-a^2)(1-a)} \exp\left(-\frac{9200-70M}{RT}\right) \quad \text{Eq. 8.}$$

여기서, R =일반가스상수($1.987cal/mol K$), T =켈빈온도(K), $a^2 = V$ =목재의 공극 $= 1 - G(0.667 + 0.01M)$

만일 평균 D_m 이 결정되면 다음과 같이 변환된다.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_m \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \quad \text{Eq. 9.}$$

이 미분방정식은 다음과 같은 경계조건을 갖는다. $t=0$ 일 때 $M=M_0$, $x=0$ 이고 $t>0$ 일 때 $M=0$, $x=b$ 이고 $t>0$ 일 때 $M=0$ 이다. 여기서 M_0 =매트의 초기함수율 그리고 이 미분방정식의 해는 다음과 같은 무한급수와 유사하다.

$$M = M_o \frac{4}{\pi} \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} \sin \frac{(2n-1)\pi x}{b} \exp\left(-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 D_h t}{b^2}\right) \right) \quad \text{Eq. 10.}$$

3-3 수분-매트(보드)간의 물리적 성질

목질 내부의 수증기의 점도(Viscosity)는 정상압력 상태에서 압력에 독립적이고 절대온도의 제곱근에 비례하여 변한다. Walton(1976)의 실험 결과를 보면 압력이 $105N/m^2$ 이상일 때는 점도-온도간의 관계가 식으로서 설명할 수 없다. 그러나 보드의 열압과정에서는 그런 과도한 압력은 발생하지 않는다. 수증기의 점도에 대해 Sutherland(1893)에 의해 제안된 방정식은

$$\eta = \frac{BT_a^{1.5}}{(T+C)} \quad \text{Eq. 11.}$$

여기서, T_a =Kelvin온도, B 와 C =상수, η =수증기 점도 그리고 Keenan and Keyes (1966)이 실험을 통하여 구하였던 실험식은

$$\eta = \frac{1.2 \times 10^{-5} \times (T + 273.15)^{1.5}}{(T + 3211.0)} \quad \text{Eq. 12.}$$

수증기의 질량과 열량을 평가하기 위해서는 증기의 밀도를 구해야 한다. Keenan and Keyes는 포화수증기압 - 상대습도 - 비포화증기 밀도간의 관계를 설정하였다.

$$D = P_{\text{sat}} \times 6.0 \times 10^{-8} \times RH \quad \text{Eq. 13.}$$

여기서, RH =상대습도, D =비포화증기의 밀도, P_{sat} =포화수증기압(N/m^2) 그리고, P_{sat} 는 온도의 함수값으로 설명될 수 있다.

매트의 Soption 특성이란 열압시 Fiber의 표면에서 발생하는 수증기(Vapor)와 수분(Water) 간의 상변이에서 발생하는 흡착(Adsorption)과 탈착(Desorption) 현상을 말한다. 매트의 수분에 관한 증발, 활성화에너지는 온도와 함수율이 높을 수록 또는 고유의 흡착 / 탈착에너지가 낮을수록 작아지고 결과적으로 수분의 이동이 활발해 진다.(Fig 2) 매트의 함수율은 항상 섬유포화점 이하 이므로 수분이 증발시 잠열(H_L)과 탈착차분열량(H_W)을 필요로 한다. Flowers와 Mendoza(1970)가 적용한 잠열은,

$$H_L = 2.511 \times 10^6 - (2.48 \times 10^3 \times T) \quad \text{Eq. 14.}$$

Bramhall(1979)이 spruce 수중에 대해 62.5°C에서 측정한 탈착차분열량은,

$$H_W = 1.176 \times 10^6 \times \exp(-0.15M) \quad \text{Eq. 15.}$$

H_L 과 H_W 의 단위는 J/kg 이다. 목질보드의 H_W 는 목재와 다르며 왁스와 수지의 종류 및 투입량 그리고 압축비에 따라서 변한다.

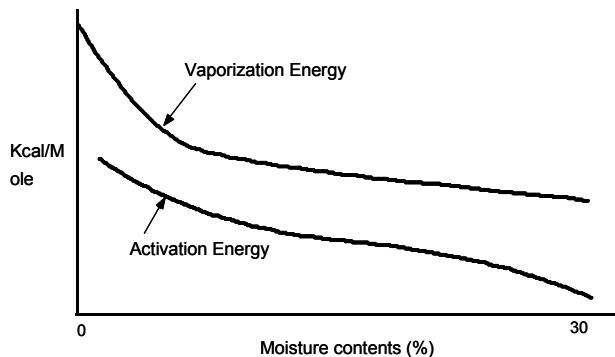


Fig. 2. Moisture, Vaporization Energy Activation energy of water.

매트의 평형함수율은 주위의 상대습도에 의해 결정된다 (Fig. 2). 평형함수율(EMC) 과 상대 습도, 온도 사이의 관계는 Sorption Isotherm로써 설명될 수 있다.

OSB, PB, MDF, Hardboard, HPL, 목재는 각각 다른 Sorption Isotherm을 가진다.

Table 2. Sorption energy of boards

Materials	Adsorption		Desorption		Hystersis ratio (M_V)
	$A(cal/g)$	$M_V(\%)$	$A(cal/g)$	$M_V(\%)$	
Aspen OSB	4.45	22.20	4.79	27.49	0.808
PB	5.18	20.02	5.11	25.93	0.770
MDF	4.68	19.13	4.94	24.94	0.767
Hardboard	4.54	15.95	4.97	20.73	0.769
HPL	5.15	10.05	5.19	12.68	0.793
Solid wood	4.92	24.80	5.11	29.60	0.831

M_V = 탈착 섬유포화점,

A = 상대습도 0%에서 Sorption된 물의 그램당 Gibbs 자유에너지의 자연 로그값

목질 보드 종류에 따라 섬유포화점이 다르며 평형함수율은 상대습도에 비례하여 증가한다. $Q = KAP/\eta L$ 에서 Gas의 저항인 η 값은 매트의 sorption 특성에 따라 다양하며 클수록 수분 흐름을 방해하여 건조 시 응력이 많이 발생한다. 보드내 수분과 온도, 상대습도의 평형 관계는 목재로 실험하였던 Kauman(1956)의 데이터를 이용할 수 있다(Table 3).

Table 3. Equilibrium moisture content (EMC)

EMC	Temperature (°C)									
	30	50	70	90	110	130	150	170	190	210
1	3	4	6	8	11	13	14	17	21	25
3	12	15	18	24	29	35	41	53	62	74
5	20	26	30	39	47	56	70	84	93	100
7	31	37	44	53	61	71	84	98	100	100
9	44	48	56	64	74	80	92	100	100	100
11	55	59	66	73	80	87	98	100	100	100
13	65	68	74	80	86	93	100	100	100	100
15	71	74	80	85	90	97	100	100	100	100
17	77	79	85	90	94	100	100	100	100	100
19	82	84	89	94	98	100	100	100	100	100

매트는 일정한 하중이 작용하면 변형이 되고 밀도가 형성된다. 매트(보드)는 점탄성물질이기 때문에 압력과 온도와 수분에 의해서 변형이 된다. 그러나 불행히도 열압과정의 온도와 함수율

범위내에서 실험한 Rheological property에 관련한 보고된 자료는 거의 없었다. Kavvouras(1977)는 매트 변형률 실험을 통해 매트내부의 응력해소는 열압과정 전반에 걸쳐 진행되고 이 과정에서 두께 방향으로 밀도는 계속해서 변한다고 하였다(Fig. 3). Fig. 3 를 보면 열압시간과 두께방향의 밀도를 결정하는 계수가 있다. 가로축의 열압시간 별(①→②→③)로 나타나는 평균 보드 밀도에 세로축의 밀도 계수를 곱해서 두께 방향 층간의 밀도를 구할 수 있다. 증기의 질량을 계산하기 위해서는 공극률 계산이 필요하다. 공극률 F_V 는 다음과 같이 주어진다.

$$F_V = 1 - (\rho / \rho_w)$$

여기서, ρ = 보드밀도, ρ_w = 목질밀도(1500kg/m³)

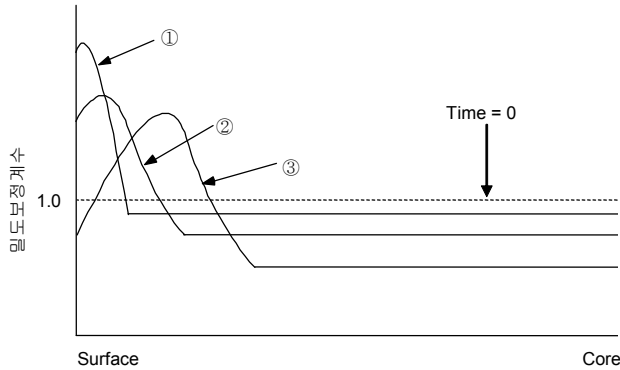


Fig. 3. Interformational density change as hot-press time.

3-4 보드 내부 열/수분 전달의 메카니즘

3-4-1 Conduction

Bowen(1970)은 열판과 매트사이에서 일어나는 열전달의 주 메카니즘은 전도, conduction이라고 했다. 열전도를 설명하는 그 모델은 Fourier의 일차법칙에 기반을 둔다. 매트의 열전도율 K_t 은 다음과 같은 식에 의해서 구해진다.

$$K_t = \frac{Q_t L}{(\Delta T A t)} \quad \text{Eq. 16.}$$

여기서 Q_t = 단위시간당 전달된 열량, L = 길이, t = 시간, A = 횡단면적, ΔT = 온도차이, K_t 는 초기의 매트 특성(보드구조, flake 형상, 수종)과 열압공정의 조건(밀도, 함수율, 열판온도)에 따라 변한다. 보드면과 직각방향의 열전도율을 구하는 실험은 지금까지 여러 사람에게 의해서 연구되었다(Kiosseff1973, Denisov & Juskov 1974, Kollmann & Malmquist 1956, Kuhlmann 1962, Lewis 1967, Wangaard 1969, Ward & Skaar 1963). Humphrey & Bolton(1989)가 실험하였던 보드(PB)

김수민- 강화마루용 섬유판 열압공정에서의 열전달 원리에 대한 고찰

밀도와 열전도율 사이의 관계는

$$K_{tm} = 0.01172 + 0.0001319\rho$$

여기서, K_{tm} = 보드면과 직각방향의 열전도율(W/mK), ρ = 전건 보드밀도(kg/m^3)

Kollmann & Malmquist(1956)은 목재에 대한 열전도율과 함수율사이의 상관관계는 섬유포 화점까지 (+)선형관계를 나타내고 밀도별로 유사한 경사를 보인다고 발표하였다.(Fig.3) 동일한 보드밀도라면 목재는 PB에 비해 높은 열전도율을 갖는다. 예를 들어 평균밀도 $586kg/m^3$ 의 전건 보드(PB)는 $0.09 W/mK$ 인 반면 동일 밀도에서 목재는 $0.11 W/mK$ 이다. 목재에서 구한 함수율과 열전도도의 관계가 그대로 PB에서도 적용된다고 가정하면 다음과 같은 보정계수를 얻을 수 있다.

$$F_m = 0.00103M + 1.00000$$

여기서, M = 보드함수율(%)

열전도도에 대한 온도의 효과는 함수율보다 측정하기가 쉽다. Kuhlmann(1962)이 구한 온도와 열전도도 사이의 관계식으로 부터 보정계수를 산출하면

$$F_t = 0.001077T + 0.978$$

여기서, T = 섭씨온도($^{\circ}C$)

종합적으로 보드면과 직각방향인 열전도도에 대한 밀도, 함수율, 온도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_t = (0.01172 + 0.0001319\rho)F_mF_t$$

열은 보드의 Edge면을 통해서 방출되므로 보드면과 평행한 열전도도값도 필요하다. 그러나 그 부분에 대한 자료는 아직까지 발표되지 않았다. 그대신 Ward와 Skaar(1963)가 extrude PB (적층된 파티클 방향이 보드두께와 평행)로 실험하였던 결과로 보드면과 평행한 열전도도값을 유추할 수 있다. 그 실험의 조건은 보드밀도 $650kg/m^3$, 혼합수종, 매트함수율 11%였고 사용수지는 요소수지 였다. 실험결과 열전도도값은 일반 PB 보다 50~60% 높게 나타났다. 그러므로 K_{\parallel} (보드면과 평행한 열전도도)은 K_t 에 1.5배를 곱해주면 구할 수 있다고 가정할 수 있다.

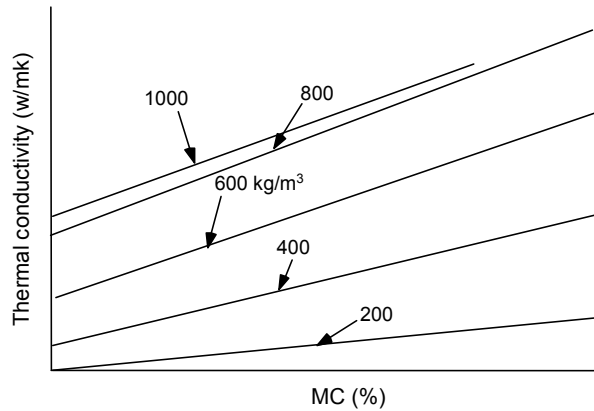


Fig. 4. Moisture contents and thermal conductivity.

열은 보드의 Edge면을 통해서 방출되므로 보드면과 평행한 열전도도값도 필요하다. 그러나 그 부분에 대한 자료는 아직까지 발표되지 않았다. 그대신 Ward와 Skaar(1963)가 extrude PB (적층된 파티클 방향이 보드두께와 평행)로 실험하였던 결과로 보드면과 평행한 열전도도값을 유추할 수 있다. 그 실험의 조건은 보드밀도 650kg/m^3 , 혼합수종, 매트함수율 11%였고 사용수지는 요소수지였다. 실험결과 열전도도값은 일반 PB 보다 50~60% 높게 나타났다. 그러므로 K_1 (보드면과 평행한 열전도도)은 K_2 에 1.5배를 곱해주면 구할 수 있다고 가정할 수 있다.

3-4-2 Convection

증기의 흐름은 주어진 압력에서 수분의 끓는점에 도달했을 때 만이 발생한다고 가정하였다. 그러나 이것은 단순한 가정이다. 보드내부의 어느 지점에서 온도 변화는 평형 함수율과 증기의 부분압력에도 영향을 미친다. 이때 부분 압력 경사가 생기면 증기는 압력이 낮은 쪽으로 이동할 것이다. 공극 구조체를 통한 증기이동은 다양한 메카니즘을 포함한다.

Sokunbi(1978) & Nketiah(1982)는 PB를 통한 가스흐름을 Darcy's Law로 설명하였다. 그들이 설정한 투과도(permeability)는 다음과 같이 주어진다.

$$K = \frac{QpL\eta}{A\Delta P P}$$

여기서, Q =증기의 Volumetric flow rate, η = viscosity, P = 평균압력
Nketiah가 구한 투과도 (보드면과 직각방향)와 보드밀도간의 관계는 Table 4에 있다.

Table 4. Board density and transmittance

Desity (kg/m^3)	425	475	525	575	625	675	725	775	825	875
Mean permeabilty ($\text{m}^2 \times 10^{-15}$)	64	40	24	16	11	7	5	3	2	2

3-4-3 Radiation

PB 매트에서 열은 대류와 전도로 대부분이 전달되고 방사(Radiation)는 전체 열전달에 기여하는 정도가 매우 적다. 그러나 열압 초기, 매트가 프레스 안에 진입하는 순간부터 매트의 밀도가 $200\sim 300\text{kg/m}^3$ 될 때까지는 방사에 의한 열전달이 약간은 이루어진다.

3-4-4 Diffusion of bound water in wood cell walls

함수율(수분) 경사에 의해 파티클을 통한 결정수의 확산은 일어난다. 그러나 이것은 대류에 의한 수분의 이동에 비해서 작은 양이다. 그래서 결정수 확산은 보드 수분 이동 해석에서 종종 무시된다.

3-5 보드의 중층 온도 변화 해석

보드의 중층에서 온도상승률은 열압스케줄의 최적화를 위해서 분석하는 중요한 항목이다. 시간경과에 따른 중층 온도 변화는 5단계로 분류할 수 있다.

1단계(A) : 중층온도 변화가 거의 없다.

2단계(B) : 급격한 온도 상승이 일어난다.

1단계에서 형성된 급격한 증기압력경사로 인해 중층의 온도와 증기압력이 급속히 증가함. 중층의 평균 증기압이 상승하면서 증기압력 경사가 감소되고 더불어 수분의 흐름이 감소.

3단계(C) : 온도상승률이 차츰 감소된다. 온도상승률 감소의 원인은 다음과 같다.

- 1) 보드표면의 온도경사가 감소함에 따라 공급되는 에너지가 감소.
- 2) 중층 함수율이 상승함에 따라 흡착시 방출되는 열량이 감소함.
- 3) 표층 함수율이 감소함에 따라 중층으로 향하는 증기량이 감소.

4단계(D) : 중층온도가 일정하게 유지된다.

보드 내부에서 발생하는 증기압보다 Edge로 빠져 나가는 증기압이 더 많다.

그 결과 증기압이 감소한다. 증기압 감소에 따라 평형함수율도 함께 감소하며 수분의 증발이 활발해 급격한 증기압 감소를 막는다.

5단계(E) : 점진적으로 중층온도가 증가한다. 이 단계에서 중층온도의 재상승은 전도 효과 때문이며 수증기의 대류에 한 열전달은 줄어든다.

초기 매트 함수율이 높을수록 2단계의 온도 상승률은 증가한다. 대신 3단계와 4단계가 연장되며 (높은 중층 함수율 때문) 열압시간이 길어진다. 그리고 열판 온도가 높고 보드 두께가 얇을수록 3단계, 4단계가 단축된다.

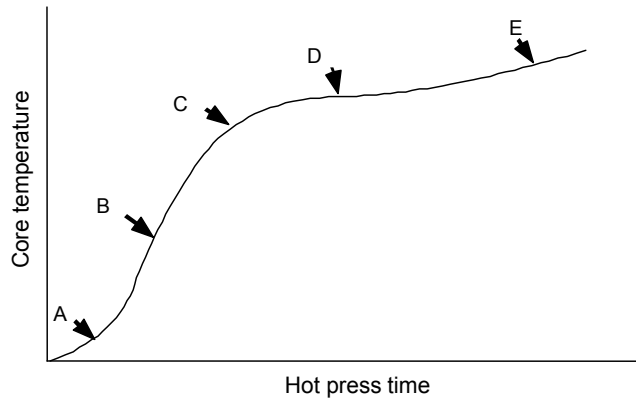


Fig. 5. Core temperature as hot press time

4. 결 론

본 고에서는 열전달의 기본 개념과 관련 연구문헌의 조사를 통해 MDF의 열압 공정에서의 열전달을 해석하였다. 열압공정에서 가해지는 에너지는 열과 압력을 통해 전달된다. 그리고 보드의 접착력과 거스름 현상은 투입된 열량과 가해진 압력의 함수값이다. 일반적으로 중층온도 측정으로 판단하는 열압공정의 적합성 여부 외에 실린더 압력을 산출하여 최적의 열량/압력비를 규격별로 설정해 나가야 한다. 열압공정에 작용하는 외부인자의 영향력은 지대하다. 예를 들어 계절별 대기온도, 습도와 Fiber의 sorption 특성(원재료 종류와 해섬조건)은 접착력과 매트내부 수분의 이동에 영향을 미친다. 열판온도, 열압시간, 매트 함수율과 같은 제어 인자 외에 외부인자의 영향력도 공정조건 최적화 작업에 함께 고려되어야 한다. MDF 열압공정에서 발생하는 주요 문제점은 거스름, 층간박리, L/C/R의 물성 편차였다. 이 문제점들은 근본적으로 해결되지 않고 계속적으로 발생하고 있다. 열압 공정 개선의 궁극적인 목표가 품질 수준과 생산성을 향상시키는 것에 있다면 앞선 문제점들을 해결하지 않은 상태에서 생산성과 품질 향상 시도는 오히려 공정조건의 불안정과 물성 하락을 가져 올 수 있을 것이다. 이러한 변수들을 감안하여 보드에서의 열전달 이론을 실제 MDF 열압공정에서 적용할 수 있는 방법에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

5. 참고문헌

P.E. Humphrey and A.J. Bolton, The hot pressing of dry-formed wood-based composites. Holzforschung 1989;43:199-206.

- P.E. Humphrey and P.K. Kavvounas, The hot pressing of dry-formed wood-based composites. Holzforschung 1989;43:265-274.
- T.E.G. Harless, F.G. Wagner, P.H. Short, R.D. Seale, P.H. Mitchell, D.S. Ladd, A model to predict the density profile of particleboard. Wood Fiber Sci. 1987;19(1):81-92.
- F.A. Kamke, L.J. Casey. Fundamentals of flakeboard manufacture: internal-mat conditions. Forest Prod. J. 1988;38(6):38-44
- A.J. Bolton, P.E. Humphrey, The permeability of wood-Based composite materials. Holzforschung 1994;48:95-100.
- S. Avramidis, S.G. Hatzikiriakos. Convective heat and mass transfer in nonisothermal moisture desorption. Holzforschung 1995;49:163-167.
- J.F. Siau. Transport processes in wood. 1984.

논문 제출 안내

한국가구학회지 (vol.21/no.1)의 논문을 국문 규정 및 요령에 의거하여
2009년 11월 30일(월)까지 제출 바랍니다.

한국가구학회 편집위원장