

건조이론

서동준

1. 개요

종이가 만들어지는 공정은 여러 단계를 거치고 서로 다른 기능과 특성을 가진 단위공정으로 이루어지나 한마디로 축약해 표현한다면 매우 커다란 탈수 혹은 건조 공정이라고 표현할 수 있다. 0.2~1.5 % 농도의 헤드박스 지료에서 시작하여 91~95 % 정도의 건조도(Dryness)를 가진 제품으로 완성되기까지 중력, 압력 맥동(Pressure pulse), 진공, 기계적 가압, 열에너지 전달 등의 방법으로 물을 탈수/건조시키기 때문이다. 그러나 초기기에서 대부분의 탈수는 와이어와 프레스 파트에서 이루어진다. 기계적으로 제거되지 못한 수분이 드라이어 파트에서 증발되어 제거된다. 와이어를 떠나는 지필의 건조도는 통상 16~23 % 수준이며, 프레스부 이후가 40~50 %, 드라이어부를 나오면서 91~95 %가 된다. 이를 종이 1kg 생산할 때 각 부분에서 제거되는 수분량으로 환산해보면 와이어 파트에서 100~170 kg, 프레스 파트에서 2~4 kg, 드라이어 파트에서는 기껏해야 1.0~1.5 kg의 물을 제거할 따름이다. 이와같이 헤드박스 지료에 함유되었던 전체양의 1% 정도인 아주 소량의 물을 제거할 뿐인 드라이어 파트가 초기기에 있어 가장 에너지 소비가 심한 부분이 된다.

스팀으로 가열되는 실린더에 지필을 접촉시켜 건조하는 방식이 종이나 판지를 제조하는데 있어 가장 일반적인 건조방식이다. 이 외에도 지종에 따라서는 티슈를 생산하는데 이용하는 양키 드라이어나 through-air drying, impingement drying, air floattation drying, infrared drying 등의 방법이 있다.

Dickinson이 최초로 실린더를 건조에 사용하도록 한 것이 1817년이며, 현재에도 기본적으로는 같은 원칙의 기술을 이용하고 있다. 초기 드라이어의 실린더에는 캔버스나 통기성을 가진 펠트를 사용하지 않았다. 1960년대에 들어서 통기성이 있고 보다 개공율이 높은 직조물이 기존의 펠트를 대체했으며 이로 인해

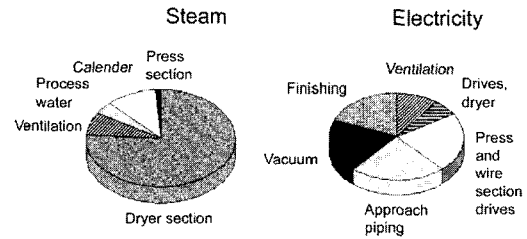


그림 1. 제지공정중 전기에너지와 스팀에너지의 소비처별 구성

표 1. 제지 산업에 있어서 건조방식별 분포

드라이어 방식	점유율 (%)	점유율(%) / 에너지 소비(MJ/kg H ₂ O) / 증발속도(kg H ₂ O/hM ²) / 종이 품질(+,=,-)			
		Tissue	Paper	Board	Coating
Cylinder	85~90	5/2.8~4.0/20/=	95/2.8~4.0/20/+	95/2.84.0/15~35/+	35/3.0~4.5/5~10/=
Yankee	4~5	84/4.0~5.0/200/+	0	3/2.8~3.5/30~50/+	0
Infrared	3~4	0	1/5.0~8.0/10~30/=	1/5.0~8.0/10~30/=	15/5.0~8.0/70~120/=
Impingement	2~3	0	4/2.8~3.5/50~120/=	0	50/3.0~5.0/40~140/=
Through	1~2	11/3.4~4.5/170~550/+	0	0	0
Condebelt				1/2.6~3.6/200/+,-	
Impulse			0/0.55~1.4/500~8000/+,-	0/0.55~1.4/500~8000/+,-	

• 한솔제지 기술연구소 수석연구원

포켓 환기가 개선되어 건조 조건이 급격하게 향상되었다.

드라이어 실린더 방식은 다음과 같은 장점을 가지기 때문에 아직도 많이 이용된다.

- 1) 에너지 효율면에서 비용이 덜 들어간다. 드라이어 후드를 고노점에서 운전할 경우 효율적인 에너지 회수 시스템을 가동할 수 있으며, 메인 라인도 저압의 스팀을 사용하는데 저압스팀은 제지공장 내에서 가장 값싼 열원이라고 할 수 있다. 만일 공장내에 크라프트 펄프 공장이나 TMP 펄프 공장이 있다면 제지공정에서 손쉽게 사용가능한 스팀의 생산이 가능하다.
- 2) 종이 표면이 필요없이 매끈해지거나 폭방향으로 지필이 수축되는 것을 억제할 수 있으며 특히 Single Tier 방식의 경우는 더욱 그렇다.
- 3) Single Tier 방식의 경우는 지필의 주행특성이 좋으며 지절시 지필이 걸리지 않아 쉽게 제거할 수 있으며 통지도 간편하다.

반면 다른 건조방식에 비해 단점도 있는데,

- 1) 다른 건조방식에 비해 단위 면적당 증발속도가 낮아 많은 공간을 필요로 하며
- 2) 조절에 대한 응답속도가 늦고
- 3) 지폭 방향의 건조 프로파일 조절이 불완전하다

1970년대에 고속 초지기에 현재의 Single Tier 방식의 지필 주행 방법이 도입되었으며, 이때에는 아래쪽 실린더 역시 표면이 매끈한 물이어서 고속에서 지필이 드라이어 패브릭에 잘 부착되지 않는 문제점이 발생하였다. 이에 대한 개선으로 이를 대체하여 groove, drilled, 혹은 두 가지를 모두 가진 석션 롤이 이용되었다. 최근에는 이러한 방식이 드라이어에 초기

에는 거의 표준으로 사용되며, 전체 드라이어를 이러한 방식으로 구성하는 경우도 늘고 있다. 그러나 석션 롤이 건조 능력을 크게 향상시키지는 않기 때문에 낮은 초속의 초지기를 특히 판지의 경우는 여전히 전통적인 2단 드라이어 실린더 방식이 선호된다.

2. 드라이어부의 고려사항 및 기본 구성요소

다양한 건조방식에 관계없이 건조공정은 다음과 같은 공통된 요구조건을 고려해야 한다.

1) 건조 능력(Drying Capacity)

건조를 위해 최소한의 설비로 효율적 운전을 해야 한다. 건조설비들은 초지기의 각 공정설비중에서 가장 크고 무겁고 또한 비싸다. 따라서 초기 설비 계획시에 단위 건조 설비당 최대 증발 능력을 발휘할 수 있도록 설계되어야만 한다.

2) 증발 프로파일

증발 효율을 높인다고 하더라도 품질은 유지되어야 한다. 특히 CD 전폭의 증발 프로파일이 균일해야만 하는데 왜냐하면 이것이 불균일 할 경우 제품 수분 프로파일이 불균일해지고 이는 종이 물성의 불균일성을 야기하며 조업성도 악화시키기 때문이다.

3) 조업특성(Runnability)

초지기 전체의 생산 효율에 미치는 드라이어부의 조업특성은 매우 크다. 드라이어부에서의 지절은 조치에 장시간을 요하는 경우가 많고, 가동율을 하락시키는 요인이 되는 경우가 많다. 초지기의 속도가 빨라지면 빨라질수록 이 점은 더욱 중요하게 된다.

표 2. 지종별 추정 에너지 소비량

Paper grade	Steam, kWh/ton	Electricity, kWh/ton	Steam, % of total
Newsprint	1 500	630	70
Wood-containing, noncoated	1 528	680	69
Wood-containing, coated	1 417	820	63
Wood-free, noncoated	2 000	670	75
Wood-free, coated	2 139	900	70
Tissue (gas not included, typical gas consumption is 800-1 400 kWh/t)	1 056	1 050	50

표 3. 초지기 드라이어의 기본 기능

1. 목표 수분 함량까지 지필을 건조
2. 일정 건조조건을 유지하여 품질의 균일성을 확보
3. 생산지필 전폭에 걸쳐 균일한 수분 Profile 달성
4. 지필 주행성을 확보하여 최대 생산성을 실현
5. 최소한의 열에너지를 사용하여 지필 수분 증발량을 극대화

4) 에너지 절감(Energy Economy)

드라이어부와 관련된 설비들 즉 스팀, 응축수 처리, 환기설비 등은 에너지 소비를 최소화하고 또 에너지 회수를 적극적으로 할 수 있도록 설계되어야만 한다.

초지속도, 평량이 증가하게 되면 드라이어 수는 증가되어야 한다. 반대로 건조가 원활하게 이루어지지 않을 때 초지속도 상승의 제한요인이 되는 경우가 많다. 따라서 점점 고속초지화 되어 가는 현 추세를 고려하면 건조공정의 이론 및 최적운전 조건을 이해하고 실제 작업을 최적화 해서 품질, 생산성, 에너지 효율을 개선해야 할 필요성이 커지고 있다.

따라서 드라이어 각 부분의 기본적인 기능을 충분히 이해하고 조절요소를 파악하여 적절한 범위에서 조작이 이루어지고 있는가를 확인해야 할 필요가 있다. 또한 실제 운전상태를 점검하여 설계시의 값과 비교를 해 볼 필요가 있으며, 일반적으로 알려진 권장값과의 비교를 통해 운전효율을 알아보고 이를 기준으로 개선이 가능한 부분을 선정, 개선을 해야 할 것으로 생각된다.

3. 건조 공정 관련 이론적 이해

프레스 파트에서 드라이어로 넘어가는 습지필은 대부분 온도가 30~40℃, 수분은 50~60%를 포함하고 있다. 때문에 원활하게 건조가 이루어지기 위해서는 수분의 증발이 활발하게 이루어지는 온도까지 점진적으로 가열해야 할 필요가 있고 또 안정적인 건조가 지속되도록 각 실린더의 온도를 일정하게 유지할 필요가 있다. 아래 그림은 초지기에서의 건조공정을 단순화시켜 세 가지 단계로 나타낸 것이다. 이들 단계는 각각 가열(heating phase), 정율 건조(constant drying rate phase), 증발 감소(falling drying rate phase) 단계이다. 이러한 이론적인 과정은 만일 전체 건조 공정에서 건조 환경이 유사하다면 일어날 수 있는 단계들이다. 그러나 실제 운전상에서는 정율 건조 단계는 아래의 그림처럼 일정하지 않고 불규칙하거나 존재하

표 4. 초지기 드라이어의 설비적 기본 구성

	- Hood Frame(Front Side Opening + Insulation)
	- Supply Air Line
	Pocket Ventilation
	Blower Unit
후드 및 Air Ventilation System	Basement Supply
	Steam Coil
	- Exhaust Air Line
	False Ceiling
	Exhaust Duct
	- Heat Exchange Unit
	Economizer(Air to Air)
	Air to Liquid type
	- Dryer Cylinder
	Syphon
	Spoiler(Turbulence) Bar
	Journal & Rotary Joint
Steam & Condensate System	- Steam Section & Control V/V
	- Separate Tank Unit
	Condenser
	Vacuum Pump
	- Dryer Fabric
	- Carrier Rope Run
기타	- Drive & Gear box
	- Sensors & Control System

지 않는 경우도 많다.

가열 단계에서 지필의 온도와 건조율은 점차로 증가하고 정율 건조 조건에 가까워진다. 정율 건조 단계에서는 건조에 공급되는 에너지와 물이 증발되는데 사용되는 에너지가 균형을 이루고 있다. 따라서 이 단계에서는 지필의 온도와 건조율이 일정한 수치를 유지하는 일정한 상태를 제공한다. 증발은 지필의 표면과 지필 구조 내부에서 모두 일어날 수 있으며 이 때 내부로부터 바깥쪽의 수증기의 확산에 대한 저항은 무시할 수 있다. 증발감소 단계에서는 지필 내부로부터 바깥쪽 표면으로의 수증기의 확산에 대한 저항이 커지기 때문에 건조율이 감소하기 시작한다. 이는 펄프 섬유 흡습특성과 지필의 열전달도(thermal conductivity)가 저하해 열전달에 대한 저항이 커져 수증기 분압이 낮아지기 때문이다. 결과적으로 증발에 사용되는 에너지는 줄어들며, 열적으로 균형을 맞추기 위해 지필의 온도가 올라가기 시작한다. 정율 건조에서 증발감소로 바뀌는 지점을 임계 수분 함량(critical

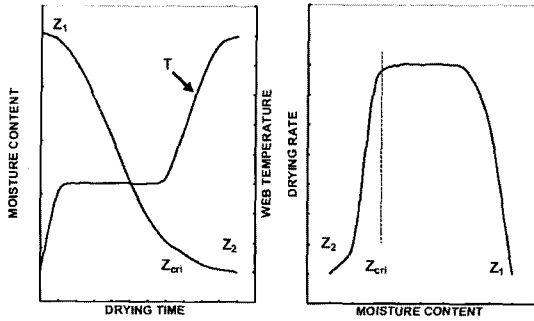


그림 2. 건조공정

moisture content, CMC)라고 한다. 지필내 자유수 (free water)가 완전히 없어지고 나면 2차 증발감소 단계가 시작되는데 이때에는 증발을 곡선이 약간 아래로 구부러지게 된다.

위의 설명은 드라이어부 전체를 하나의 시스템으로 보았을 때 개략적인 상태의 설명이며, 많이 이용되는 2단 실린더 배열이나 단일 실린더 배열의 경우 각 실린더 주변을 지필이 주행하면서 단계별로 건조조건은 달라지게 된다. 2단 배열 실린더의 경우 크게 4 단계의 건조과정을 생각해 볼 수 있는데

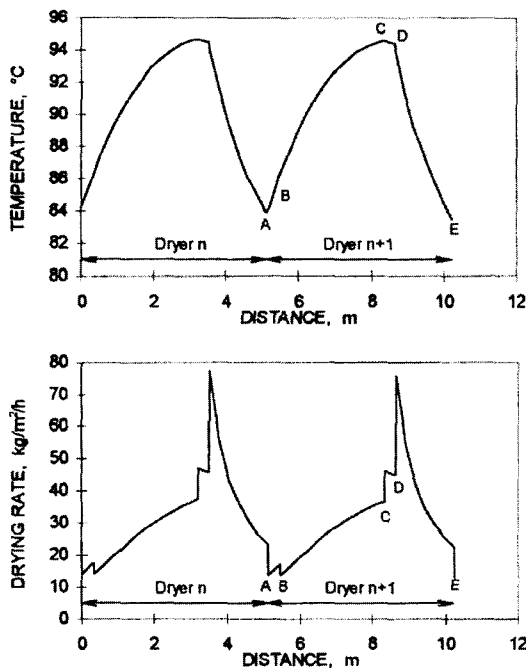


그림 4. 2단 배열 실린더에서의 지필 온도와 건조 속도

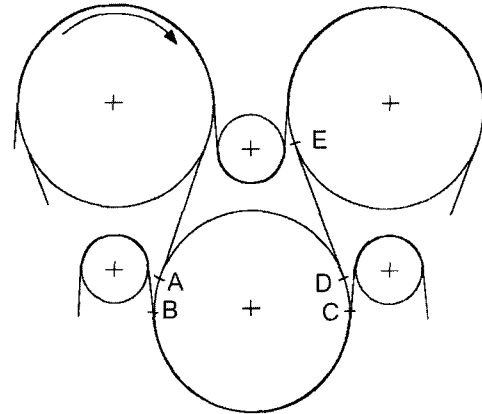


그림 3. 통상적인 2단 배열 실린더의 건조 4 단계

- 1) 지필의 한쪽면은 실린더 표면에 접촉하고 다른쪽면은 공기중에 노출된 상태 (A-B 구간)
- 2) 지필 한쪽면은 계속 실린더 표면과 접촉하고 다른쪽면은 드라이어 패브릭으로 덮힌 상태 (B-C 구간)
- 3) 한쪽면은 계속 실린더 표면과 접촉해 있고 다른쪽면은 다시 공기중에 노출된 상태 (C-D 구간, 1)과 유사)
- 4) 지필이 더 이상 실린더와 접촉하지 않고 수분이 양쪽면으로부터 자유로이 증발하는 상태(D-E 구간)

최근 많이 도입되고 있는 단일 실린더 배열의 경우 다음과 같이 건조가 4 단계로 구분될 수 있다.

- 1) 지필의 한쪽면이 실린더와 접촉하고 있고 다른 한쪽면은 드라이어 패브릭에 덮여있는 상태 (A-B 구간)

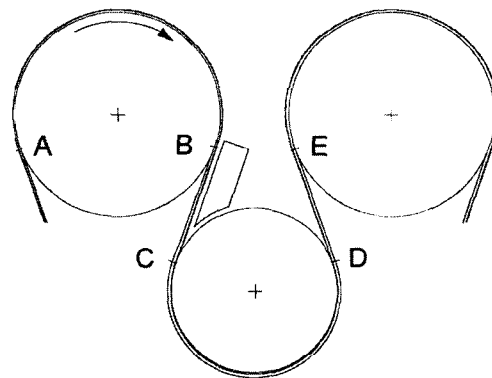


그림 5. 단일 실린더 배열에서 건조의 4 단계

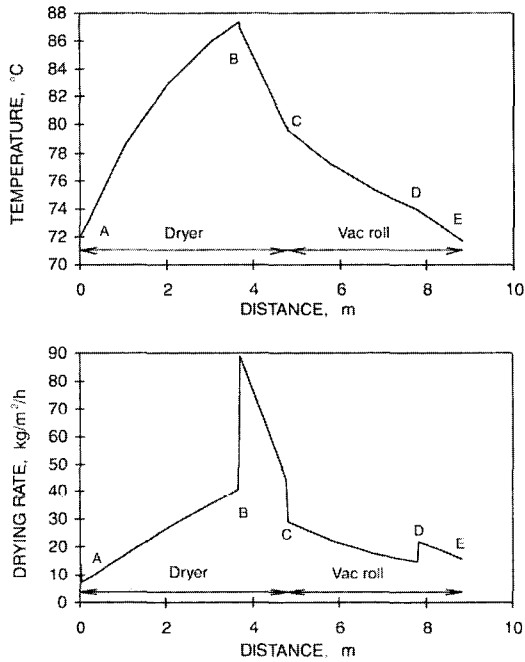


그림 6. 단일 실린더 방식에서의 지필 온도와 건조속도 변화

- 2) 지필이 실린더와 더 이상 접촉하지 않고 지필의 한쪽면은 자유로이 건조가 이루어질 수 있는 상태 다른 한쪽면은 드라이어 패브릭과 접촉 (B-C 구간)
- 3) 상태 2)에서 건조가 이루어지던 면은 지속적으로 자유로운 건조가 이루어지며 다른쪽 면은 드라이어 패브릭에 얹혀있는 상태로 가열된 드라이어 실린더나 석션롤과 접촉된 상태 (C-D 구간)
- 4) 상태 2)와 마찬가지로 상태

3.1 열전달 고려사항

건조 실린더 내의 스팀으로부터 종이로의 열전달 저항은 다음과 같은 고전적인 식으로 설명된다 :

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{a} + \frac{d}{L} + \frac{1}{b}$$

여기에서 :

k = 스팀으로부터 종이로의 총괄 열전달 계수 $W/(m^2 \text{ } ^\circ\text{C})$

a = 스팀으로부터 실린더 벽면으로의 열전달 계수 $W/(m^2 \text{ } ^\circ\text{C})$

d = 실린더 벽면의 두께 m

L = 벽면의 열전도도 $W/(m \text{ } ^\circ\text{C})$

b = 벽면으로부터 종이로의 열전달 계수 $W/(m^2 \text{ } ^\circ\text{C})$

일반적으로 총괄 열전달 계수의 역수는 일련의 열전달 계수의 역수의 합과 같다. 이 역수는 열전달 저항으로 생각할 수 있다. 그러므로, 열 흐름의 총괄 저항은 저항들의 합과 같다. 실제 열전달은 총괄적인 온도 차이와 열이 흐르는 면적에 비례하고, 전체 열전달 저항에 반비례한다. 보다 정확하게는 총괄 열전달 계수는 비례상수이다.

$$q = kA(T_1 - T_2)$$

여기에서 :

q = 열 흐름 W

A = 열전달 면적 m^2

T_1 = 스팀의 온도 $^\circ\text{C}$

T_2 = 종이의 온도 $^\circ\text{C}$

스팀으로부터 벽면으로의 열전달은 내벽 표면으로부터 응축수를 효과적으로 제거하는가에 의해 촉진되며 남아있는 응축수층 내의 높은 난류에 의해 더욱 개선된다. 공기나 다른 비응축성 가스들은 스팀으로부터 벽면으로의 열전달에 강한 부정적 효과를 가지며 아마도 스팀의 응축이 일어나야할 내벽면상에 가스들이 축적되기 때문일 것이다. 통상적인 운전조건 하에서는 가스들은 실린더를 나오는 블로우 쓰루 스팀과 함께 계속적으로 제거된다.

현재의 제철방법상으로는 벽면의 두께는 구조적 요

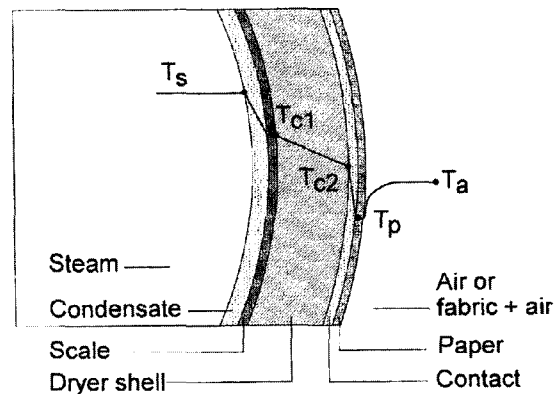


그림 7. 스팀에서 지필로의 열전달 과정

구사항들, 이용되는 스팀 압력, 특정한 안전 항목(통상은 10에서 20)에 의해서 결정된다. 순수한 주철은 가장 높은 열전도성을 가지며 강도를 향상시키기 위해 합금을 한 철은 열전도도가 떨어진다. 벽면의 열전도도는 주조방법과 냉각시의 조건들에 의해 영향을 받으며 이것은 실린더마다 다르고 심지어는 같은 벽면의 각 부분별로 다르기도 하다. 통상은 벽면의 전도도는 열전달의 주요 저항은 아니다.

벽면으로부터 종이로의 열전달은 표면간의 접촉 정도에 달려있다. 양기 드라이어의 경우 건조도가 약 50% 정도에서 지필이 벽면으로 압착되었을 때 극대의 열전달이 얻어진다. 멀티 실린더 건조에서는 지필은 드라이어 패브릭에 의해 실린더 표면으로 압착된다. 그러므로 열전달은 패브릭 텐션과 건조도에 따라 달라진다. 만일 벽면과 종이 사이에 상당한 공기 필름이 남아있게 되면 열전달은 매우 저하될 것이다.

첫번째 식에서 계수 "b" 는 지필내에서의 열전도의 저항을 포함한다 ; 우리가 측정 가능한 유일한 온도는 바깥쪽 표면상의 온도이다.

그러나, 종이 건조에서 열전달 과정은 항상 그렇게 한 방향으로만 이루어지는 것은 아니다. 열은 공기로부터 종이로 전달될 수도 있다. 이 열전달은 공기와 종이 그리고 실린더 건조중에 종이 표면에 형성되는 습공기 층의 온도의 차이에 의해서 달라질 수 있다. 이 단열층의 두께와 안정성은 특별한 건조 후드나 건조 상자내에서 높은 속도로 종이표면에 대해 수직방향으로 뜨거운 건조공기를 불어줌으로써 줄일 수 있다.

지필의 두께가 두꺼운 경우에는 지필의 표면이 내부보다 건조가 더 빨리 되게 되는데 왜냐하면 모세관 현상에 의해 지필 표면이 항상 수분으로 포화상태로 유지되는 상태가 빨리 끝나기 때문이다. 경우에는 수증기의 확산에 대한 저항과 열전달 저항이 더욱 뚜렷해

진다. 그러므로 평량이 크면 클수록 CMC는 증가한다. 다음의 그림은 평량에 따른 CMC 값의 변화를 여러 실험자가 실험을 통해 알아낸 것으로 평량증가에 따라 CMC의 증가 경향은 모든 실험에서 나타난다. 이 외에도 CMC에 영향을 미치는 요소들로는 원료, 밀도, 온도, 건조율 등이다.

3.2 지필로부터의 증발

Stefan 식은 지필 표면으로부터 주위 공기로의 증발을 표현해준다.

$$\frac{m_{ev}}{A} = \frac{\beta}{R_v T} (p_{vps} - p_{va})$$

여기에서 β 는 질량전달계수, R_v 는 수증기의 기체상수(461.5 J/kg 수분/K), p_{vps} 는 지필 표면에서의 수증기 분압, p_{va} 는 주변 공기의 수증기 분압이다. 이 식은 건조공정에서 주변공기의 흐름이 난류조건이라는 가정하에서 성립한다. 초지기상의 종이 건조라면 수증기 분압을 사용하는 것보다는 공기의 수분함량(절대습도, kg 수증기/kg 건조공기)를 이용하는 것이 더 일반적일 것이다. 따라서 다음의 Lewis 식을 이용하는 것이 보다 일반적일 수 있다.

$$\frac{m_{ev}}{A} = \frac{\alpha}{c_{da} + x_{ps} \cdot c_s} (x_{ps} - x_a)$$

여기에서 α 는 공기에서 지필로의 대류 열전달 계수, c_{da} 와 c_s 는 건조공기와 수증기의 비열, x_{ps} 와 x_a 는 지필 표면과 주변공기의 절대습도이다.

3.3 수증기 분압

Antoine 식은 자유수의 수증기 분압을 표현한다

$$\left[\frac{p_{sat}}{bar} \right] = 10^{(5.127 - \frac{1660}{273.15 + T})}$$

아래 그림은 온도에 따른 자유수의 수증기 분압을 표현한 곡선이다. 건조초기에는 지필 표면의 수증기 분압은 같은 온도에서 자유수 표면의 수증기 분압과 같은 값을 가지며 이러한 조건은 지필 표면에서 증발되는 수분만큼 모세관 현상을 통해 새로이 지필 내부로부터 지필 표면으로 물이 공급되는 동안은 마찬가지이다.

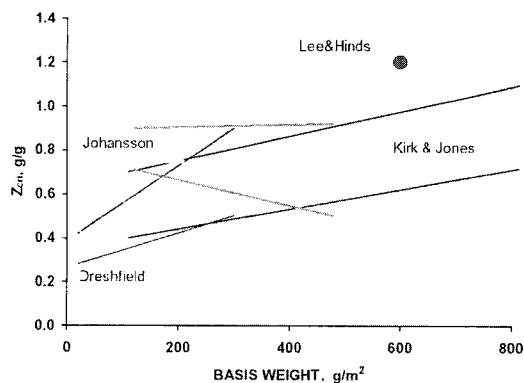


그림 8. 평량에 따른 CMC 값 (실험치)

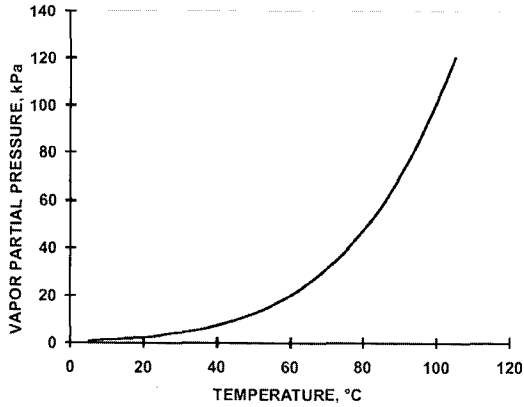


그림 9. 온도에 따른 증기압 분압곡선

3.4 열전달의 경계 조건

다음 그림은 종이의 건조에 이용되는 서로 다른 3 가지 열전달 방식을 나타낸다. 접촉(전도), 대류, 복사.

이들 각각의 열전달 방식에 대해 다음과 같이 경계 조건을 표현하는 것이 가능하다. 접촉(전도) 건조의 경우, 필요한 에너지를 지필로 전달하려면 지필을 가열된 표면에 눌러 접촉시켜야 하며 이것을 간단히 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$q = \alpha_{c-p}(T_c - T_{po})$$

이때 α_{c-p} 는 접촉열전달계수, T_c 는 가열된 표면온도, T_{po} 는 가열표면에 접촉하는 지필표면온도임.

대류를 이용하는 건조기나 초지기내에서 어디라도 지필이 공기와 접촉하여 공기로부터 지필로 열이 전

달될 경우는 다음과 같은 식으로 열전달을 표현할 수 있다.

$$q = \alpha_{a-p}(T_a - T_{po})$$

이때 α_{a-p} 는 대류열전달계수, T_a 는 공기온도, T_{po} 는 지필표면온도임.

공기의 온도라고 하는 것은 지필 주변의 공기의 온도를 말하며 예를 들자면 실린더 사이의 free draw 구간이나 실린더 주변 혹은 impingement dryer의 경우는 impingement 개공부 등을 말함.

적외선 건조기의 경우 에너지는 전자기적인 복사에 의해 지필로 전달된다. 대부분의 전기식 적외선 건조기는 짧은 파장의 복사파(스펙트럼의 최고 파장이 0.76~2 μm)를 내보내며, 가스식 IR 건조기는 중간 파장의 복사파(스펙트럼의 최고 파장 2~4 μm)를 내보낸다. 적외선 복사파는 지필을 통과해서 진행할 수 있으며 점차로 지필에 흡수된다. 짧은 파장의 적외선은 지필을 잘 통과하며 중간 파장의 적외선도 어느정도는 통과한다. 지필에 적외선이 흡수되는 것은 여러 가지 방법으로 표현이 가능한데 가장 단순하면서 일반적인 방법은 경험적인 흡수 계수를 이용하는 것이다. 어떤 복사 건조기는 가스식이던 전기식이던 공급된 에너지에 대해서 복사파를 발생시키는데 어떤 에너지 효율값 η_{gen} 을 가지게 된다. 이것이 지필에 흡수될 때 또한 효율값 η_{abs} 를 가지게 되며 나머지 에너지는 어떤 형태로 인치 손실된다. 지필로 흡수되는 에너지는 다음과 같이 표현이 가능하다.

$$q_{abs} = q_{input} \eta_{gen} \eta_{abs} = q_{input} \eta_{total}$$

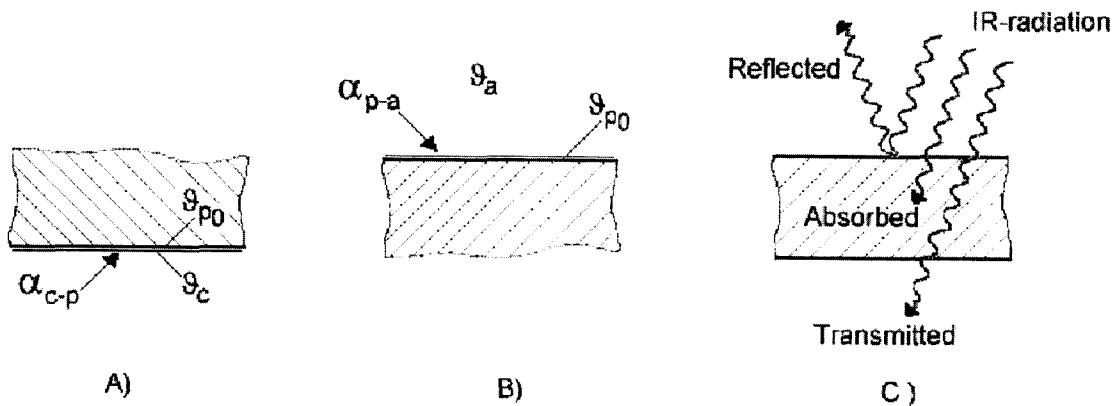


그림 10. 열전달 경계조건 a) 접촉 b) 대류 c) 적외선 복사

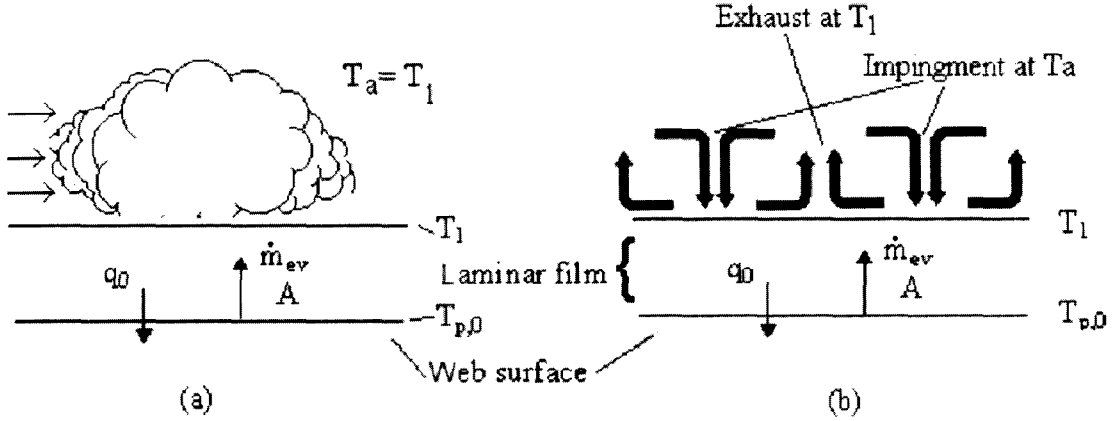


그림 11. 열과 물질 전달이 동시에 이루어지는 기구 설명

3.5 대류 열전달에서 증발의 영향

증발은 대류 열전달에 영향을 미친다. 이유는 수증기 흐름이 층류로 형성된 경계층 필름을 통과해 흐르기 때문이다. 수증기 흐름은 경계층 필름에 온도 차이가 존재하므로 가열된다(만일 공기 온도가 지필 온도보다 낮다면 냉각된다). 수증기의 가열에 사용되는 에너지에는 대류 열전달에 이용되는 에너지가 포함된다. 주변공기와 증발하는 표면간에 온도차가 작은 경우는 물질전달이 열전달에 미치는 영향이 무시할 정도이나 양키드라이어나 코터에 사용되는 AID 등의 경우는 증발시 공기의 온도가 수백도에 달하기 때문에 영향이 매우 크다.

3.6 건조과정중의 지필 구조의 변화

펄프 섬유, 액체 상태의 물, 기체로 차 있는 세공 등으로 구성된 결합 구조는 건조 과정 중 지필 내부에서의 열이나 물질의 전달에 상당한 영향을 미친다. 서로 다른 성분들의 구성 부피 비율, 흐름 통로의 연속성과 모양 변형 정도, 공극의 크기 분포 등으로 구조를 설명할 수 있다. 프레스 부 이후 수분의 함량과 지필의 밀도가 중요한 변수인 상태가 시작점이 된다. 건조가 진행됨에 따라 물로 차 있던 공간이 서서히 기체로 대체되고 또 수축이 일어나면서 지필의 구조가 발현되게 된다. 그림 13이 이 과정을 표현하고 있다. 지필은 건조가 진행하면서 평면상으로나 두께 방향으로 수축하게 된다. 초지기 상에서 지필은 초지 방향으로는 움직

임에 제한을 받게 된다. 폭 방향으로 일부 수축이 일어난다. 수직적으로 나타내면 두께 방향으로 30~40%의 수축이, 평면상으로는 1~10%의 수축이 나타난다. 두께방향으로의 수축은 건조공정에도 상당한 영향을 미치는데 왜냐하면 공극의 크기와 통기도에 서 변화가 발생하기 때문이다. 증발된 수증기가 빠져나가는 통로는 이리저리 굽어져 있다. 변형도는 건조가 진행되어 최종 수분 함량과 두께에 이르기까지 계속 변한다. 공극의 입구는 표면에 대해 수직방향이 아니며 수증기는 최소한의 저항을 받는 이동 통로로 이동하게 된다. 그림 14는 물질의 공극구조를 설명하고 있고 그림 15는 실제 지필의 단면 전자현미경 사진을 보여준다. 종이 구조 내에 존재하는 수분은 크게 자유수(free water)와 결합수(bind water)로 구분할 수 있으며

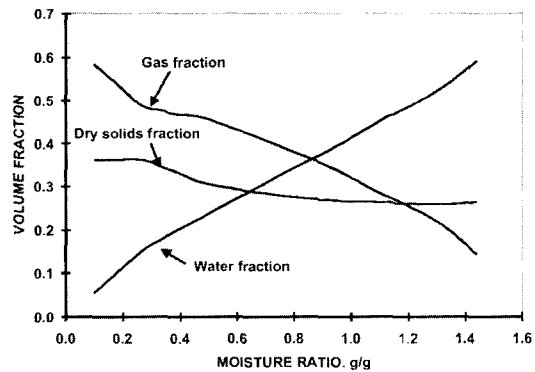


그림 12. 건조 과정중 지필 구조내 부피 분율 변화

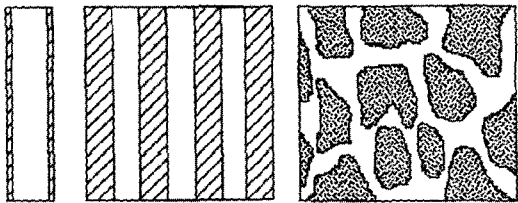


그림 13. 다공질의 단면
 a) 이상적 공극
 b) 여러개의 이상적 공극
 c) 자연적인 공극구조

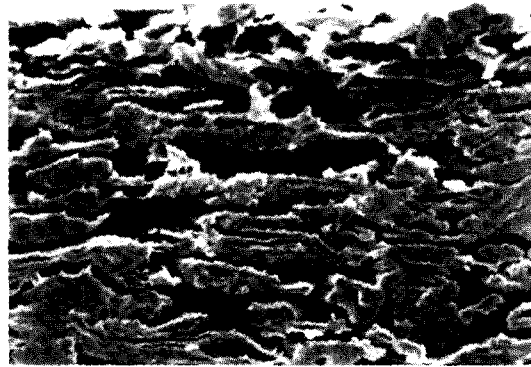


그림 14. 실제 지필의 공극을 보여주는 단면 현미경 사진

이들은 증기 분압, 엔탈피, 용액특성 등 서로 다른 열역학적, 물리적 특성을 가지고 있다. 자유수는 섬유사이 또는 큰 공극(macropore)에 존재하는 물이며 유리컵에 담겨있는 일반적인 물과 같이 거동한다고 생각해도 무방하다. 반면, 결합수는 세포벽내의 무정형질 부분이나 접근 가능한 친수성기가 있는 세공(micropore)내에 존재한다. 다음 그림은 수분 함량에 따른 이들 물의 구성비 변화를 나타내고 있다.

건조는 세포벽내의 기공을 비가역적으로 막아서 섬유 팽윤 정도를 감소시킨다. 이러한 정도를 나타내는 값을 섬유 포화점(FSP, Fiber Saturation Point)라고 한다. 이는 달리 말하면 섬유 세포벽내의 물의 양

을 나타내는 것이다. FSP는 섬유의 종류에 따라 다르나 통상은 0.7~1.8 사이의 값을 갖는다.

3.7 자유수의 모세관 흐름

지필 내에서의 액체상태의 물의 흐름을 흔히 모세관 흐름이라고 부른다. 이러한 흐름을 일으키는 힘은 수분 함량의 차이에서 기인하는 모세관 압력이나 모세관 흡입력의 차이이다. 만일 전체 압력의 차이가 지필내

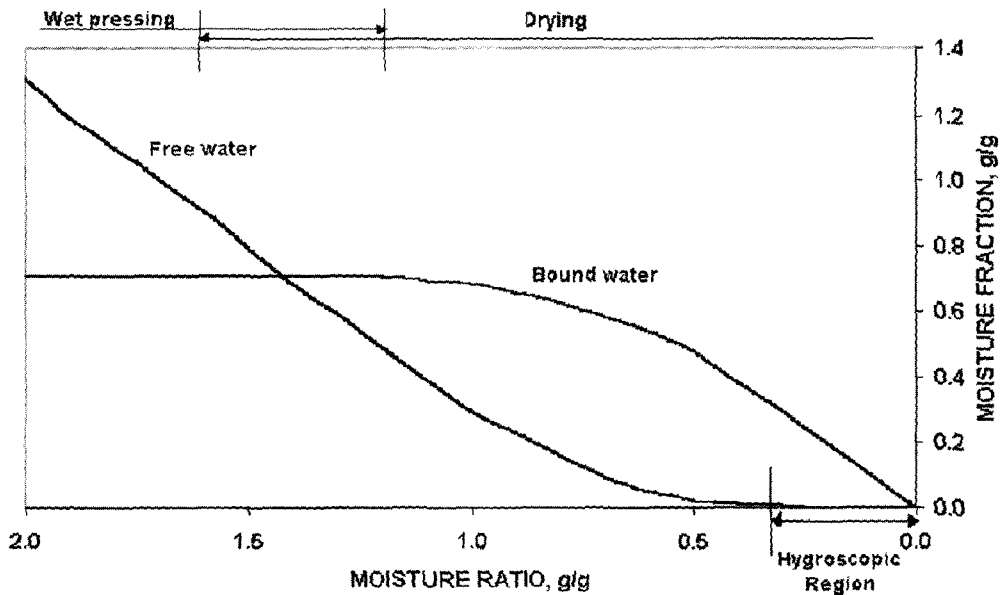


그림 15. 물의 분율과 지필로부터의 제거 방법

부에 존재한다면 그것도 하나의 원인이 될 수 있다. 수분의 차이는 지필의 개공 표면에서의 증발이나 뜨거운 면과 접촉할 때 물이 증발하여 발생한다. 후자의 경우 발생한 수증기는 지필 내부 쪽으로 향하여 확산한다.

지필 내부의 액상의 물은 연속체의 형태로 존재하는 한은 흘러 다닐 수 있다. 수분 함량이 감소함에 따라 물은 연속적인 형태를 잃어버리고 흐름이 불가능한 서로 끊어진 형태로 존재하게 된다. 이론적으로는 자유수의 모세관적 흐름은 수분함량이 FSP 이하로 떨어져 모든 물이 결합수의 형태로 존재하는 시점에서 끝난다.

Darcy의 식은 자유수의 모세관 흐름을 설명한다.

$$\frac{m_w}{A} = \rho_w \frac{K}{\mu} \frac{dp_r}{dy}$$

여기에서 ρ_w 는 물의 밀도, K 는 투기도, μ 는 물의 점도, dp_r/dy 는 모세관 압력기울기 이다.

3.8 결합수의 움직임

흡습성이 있는 어떠한 다공성 물질에서도 결합수는 존재한다. 흡수된 물분자는 물질의 내부 또는 외부 표면에 단일층 또는 다층으로 흡착되어 있다. 다층으로 흡착되어 있는 경우 맨 아래층은 표면의 흡착점에 매우 강하게 결합되어 있기 때문에 매우 제한적인 유동성을 가진다. 그 위의 층들은 보다 자유롭게 움직일 수 있다. 이들 층의 움직임은 표면 확산의 형태를 가지며 이러한 움직임을 일으키는 힘은 단순히 수분 량의 차이 또는 흡습 영역에서의 결합수의 농도차이다.

자유수가 지배적인 영역(inter-fiber water)에서는 모세관 흐름과 수증기 흐름이 수분전달의 주요 요인이 되며, 결합수가 지배적인 영역(inter-fiber water)에서는 수증기 흐름이 주된 요인이다. 물질 흐름 속도를 비교하면 자유수 영역에서의 모세관 흐름이 결합수의 수증기 확산보다는 훨씬 효과적인 수분의 이동 방법이다.

3.9 수증기 흐름

건조 공정중에 수증기는 지필내부의 빈 공간을 통해 흐른다. 세 가지 흐름 메카니즘이 가능하다 : Stephan 확산, Knudsen 확산, 그리고 층류 흐름. Stephan 확산이 제지공정의 건조에 있어 지배적인 수증기 전달 메카니즘이다. Stephan 확산의 추진력은 수증기 분

압의 차이이다. 대부분의 경우 지필의 두께방향에 있어 전체 압력은 동일하며 주위의 공기의 압력과 같다고 가정한다. Knudsen 확산은 매우 미세한 공극에서의 수증기 확산을 설명하고 있으나 전체 수증기 흐름에 대해서 차지하는 부분이 작고 실험적으로 Stephan 확산과 구분이 어려워 두께 방향으로 압력차가 없을 경우는 무시하기도 한다. 층류 흐름의 경우는 지필 구조 내에 압력차가 존재할 경우의 수증기 흐름을 설명하기 위한 방법이다.

3.10 지필의 열전달율

젖어있는 다공질의 지필 내에서의 열전달에는 여러 가지 현상들이 영향을 미친다 : 여러 가지 서로 다른 상(고체, 액체, 기체)의 열전도도, 기체와 액체간의 기화와 응축 메카니즘, 액상이나 기체상태의 흐름에 의한 열전달이나 적외선 복사에 의한 기체로 차 있는 공극 내에서의 에너지 전달은 통상 무시된다. 낮은 온도에서는 기체로 차 있는 공극은 열전달율이 매우 나쁘다. 높은 온도가 되면 기화와 응축이 중요한 메카니즘이 된다. 수분을 포함한 기체로 채워진 공극 내에 온도편차가 존재하면 물은 온도가 높은 곳에서 증발하고 이 때 증발잠열을 필요로 한다. 기화된 기체는 온도가 낮은 곳으로 이동하여 그곳에서 응축하게 되고 이때 응축 잠열을 내어놓게 된다. 이러한 과정이 반복되면서 공극 내에서는 열에너지의 이동이 신속하게 이루어진다. 물론 이러한 일이 일어나려면 공극 내에 자유수가 충분히 존재해야 한다는 전체 조건이 있기는 하다. 따라서 건조가 진행됨에 따라 지필의 열전달율은 점차

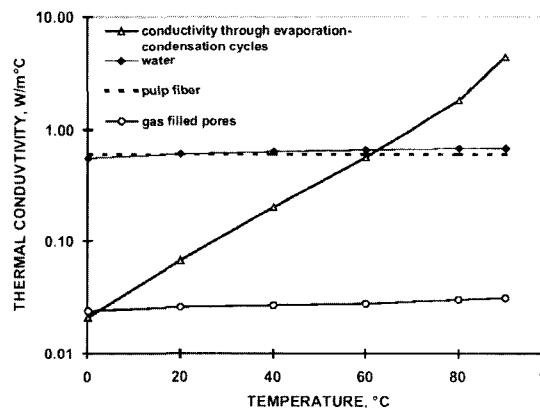


그림 16. 여러 가지 물질의 열 전달율 (펄프섬유의 열전달율 0.6 W/m·°C)

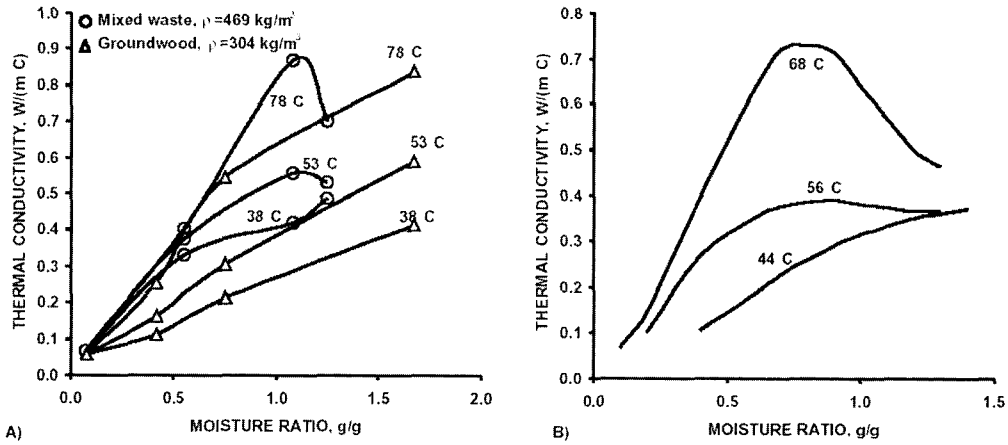


그림 17. 유효 열전달율에 대한 온도와 수분함량의 영향

로 감소하게 된다. 기체로 차 있는 공극의 열전도율은 기체 상태 물질들의 열전도도 자체와 앞서 설명한 기화와 응축으로 인한 열전도율 기여분이 합해진 값이 된다.

다음의 그림은 여러 가지 상들의 서로다른 열 전도율을 나타낸다. 목재 섬유는 열전달율은 원주방향으로 약 0.4~0.5 W/(m·C)이다. 액체 상태의 물과 펄프 섬유의 열전도율은 매우 유사한 값을 가진다. 기체로 채워진 공극은 이보다 훨씬 낮은 값을 가진다. 기화와 응축에 의한 열전도율은 온도가 낮은 경우는 그다지 중요성을 가지지 못하는 수준이지만 50°C 이상이 되면 펄프 섬유 자체와 비슷한 정도가 되고 70°C 이상에서는 지배적인 요소가 된다.

종이의 열전달율은 수분함량이 증가할수록 증가한다. 이는 공극내에 많은 물이 존재하여 이것이 섬유와

섬유사이의 열전달 매체 역할을 하기 때문이다. 또한 일부는 증발과 응축에 의한 열전달 효과가 증가하기 때문이기도 하다. 그러나, 일정 수준 이상으로 수분 함량이 많아지면 기체로 채워진 공극의 부피가 줄어들게 되고 증발과 응축에 의한 열전달 증가 효과도 감소하게 된다. 다음 그림에서 보는 것과 같이 수분 함량 증가에 따른 열전달율은 일정한 최대값을 가지고 그 이상에서는 다시 감소하는 경향을 보여준다.

지필의 밀도는 프레스나 캘린더링과 같은 기계적 처리의 결과로 나타나며 또한 건조 과정중의 섬유 네트워크의 수축에 의해 달라지기도 한다. 따라서 지필의 밀도의 사용하는 원료종류, 수분 함량, 또한 지필이 겪게 되는 기계적 처리에 따라 다른 값을 가진다. 동일한 수분함량일 경우 섬유 네트워크에 있어 높은 밀도란 기체로 채워진 공극의 부피가 작다는 이야기가 된다. 기체로 차 있는 공극은 열전달율이 나쁘기 때문에 밀도가 낮으면 열전달율은 작은 값을 가진다. 특히 증발과 응축에 의해 열전달이 향상되지 않는 부분에서는 특히 이러한 경향이 강한데, 말하자면 낮은 온도 영역이나 낮은 수분 함량의 경우가 그렇다. 다음 그림에 밀도와 열전도율의 상관관계를 나타내었다.

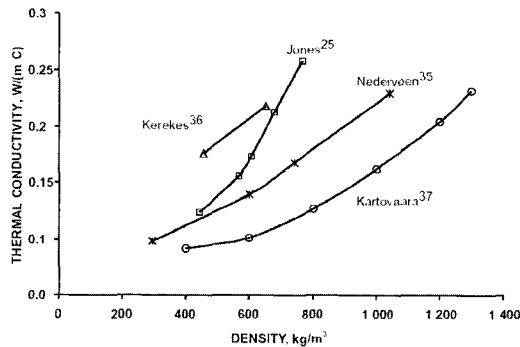


그림 18. 열전도도에 대한 밀도의 영향

4. 습공기의 성질

종이 건조는 건조를 진행시키는 매체로서 또는 건조 환경을 제공하거나 종이로부터 수증기를 받아들이는 매체로서 늘상 공기와 연관이 있다. 따라서 건조공정을 잘 이해하기 위해서는 습기를 포함한 공기의 성질

을 잘 이해할 필요가 있다.

온도 T 와 압력 p 값을 가지는 공기와 수분의 혼합물을 가정해보자. 이 혼합물은 각각 질량 m_a 의 건조공기와 질량 m_w 의 수분으로 이루어져 있다. 이 때 수분은 수증기 형태의 질량 m_v 나 액체 물형태의 질량 m_{lw} , 또는 얼음 형태의 질량 m_{ice} 로 존재할 수 있다. 따라서 혼합물 중 수분의 비율은 다음과 같이 표현하는 것이 가능하다.

$$x = m_w/m_a = (m_v + m_{lw} + m_{ice})/m_a = x_v + x_{lw} + x_{ice}$$

이것이 곧 공기중의 수분함량이며, $\text{kg water/kg dry air}$ 의 단위를 가진다. 종이를 건조시키는 환경을 고려하면, 얼음형태로 존재하는 수분은 없다고 보아도 무방하다($m_{ice} = 0$). 습공기에 대해서 이상기체 방정식을 적용하는 것이 타당하다고 가정하면 다음과 같은 식을 쓸 수 있다.

$$(p_w/p_a)(m_w/m_a) = [(p_w/p_a)](x_w) = R_w R_a$$

그리고

$$x_w = (R_w/R_a) [p_w/(p-p_w)]$$

위의 식은 공기중 수분 x_w 를 전체 압력이 p 일 때 증기압의 함수로 표현한 것이다. 기체상수 R_w/R_a 는 다음과 같은 값을 가진다

$$\begin{aligned} R_w/R_a &= 1 \text{ kmol 수증기} / 1 \text{ kmol 건조 공기} = \\ &= 18016 \text{ kg 수증기} / 28966 \text{ kg 건조 공기} \\ &= 0.62197 \text{ kg 수증기} / \text{kg 건조 공기} \end{aligned}$$

끓는점 이하의 어떤 온도에서 압력이 p 일 때 포화 증기압력 p_w' 를 가지게 된다. 이것은 이 온도에서 공기와 수분의 혼합물이 이 분압 이상의 증기압을 가질 수 없다는 말이다. 따라서 이 때 공기내 수분의 비율은 이 온도에서의 최대값 x_w 를 가지게 되며 이 최대 수분함량은 이 때 공기의 포화 수분 함량이다. 이를 식으로 표현하면 위의 식과 유사하게 된다.

$$x_w' = (R_w/R_a) [p_w'/(p-p_w')]$$

4.1 공기의 상대습도

공기의 상대습도는 다음과 같이 표현된다.

$$\psi = x/x_w'$$

이 양은 종이의 건조에 대한 습공기의 상태를 고려할 때에는 그다지 중요한 것은 아니며 건조될 물질의 흡습특성을 설명할 때 유용한 개념이다.

4.2 비열용량(Specific Enthalpy)과 습공기의 비열(Specific Heat)

습공기의 비열용량은 다음의 식으로부터 구할 수 있다

$$m_a i = m_a c_a \theta + m_w (r_w + c_w \theta) + m_{ice} (r_{ice} + c_{ice} \theta) + m_{ice} \theta$$

c_a 일정 압력에서 공기의 비열, $1.01 \text{ kJ}/(\text{kg dry air } ^\circ\text{C})$

c_w 일정 압력하에서 수증기의 비열, $1.88 \text{ kJ}/(\text{kg vapor } ^\circ\text{C})$

c_{ice} 물의 비열, $4.19 \text{ kJ}/(\text{kg water } ^\circ\text{C})$

r_w 얼음의 비열, $2.0 \text{ kJ}/(\text{kg ice } ^\circ\text{C})$

r_{ice} 0°C 에서 물이 증발하는 기화열, $2501 \text{ kJ}/\text{kg}$

r_{ice} 얼음이 녹는 용융열, $-333 \text{ kJ}/\text{kg}$

θ 혼합물의 온도, $^\circ\text{C}$

위 식의 양변을 m_a 로 나누어주면 비열용량 i 를 구할 수 있다.

$$i = c_a \theta + x_w (r_w + c_w \theta) + x_{ice} (r_{ice} + c_{ice} \theta) + x_{ice} \theta$$

습공기의 대부분의 경우 $x_{ice} = 0$, $x_{ice} = 0$ 이므로 다음식과 같이 간략히 할 수 있다.

$$i = c_a \theta + x_w (r_w + c_w \theta)$$

이 식을 다시 배열하면 일정 압력 하에서의 습공기의 비열 c_s 를 구할 수 있다.

$$c_s = (i - x_w r_w) / \theta = c_a + x_w c_w$$

5. 드라이어 운전관련 기본 정의

기본적으로 드라이어부의 운전을 이해하려면 기본적인 정의를 이해할 필요가 있다. 지필내의 수분함량을 표현하는 방법은 여러 가지가 있다. 건조 고형분 함량 또는 농도는 건조 물질의 질량을 전체 질량으로 나타내는 것이다.

$$d.s.c = \frac{m_d}{m_d + m_w} \cdot 100\% \quad (m_d : \text{건조 물질의 질량}, m_w : \text{물의 질량})$$

수분함량도 유사하다. 즉, 물의 양을 전체 질량으로 나누는 것이다.

$$z_{mc} = \frac{m_w}{m_d + m_w} \cdot 100\%$$

수분함량은 가끔 건조 물질의 질량에 대한 수분의 질량(moisture ratio)로 표현하기도 한다.

$$z_{mr} = \frac{m_w}{m_d} \quad \text{or} \quad z_{wb} = \frac{m_w}{m_d} \cdot 100\%$$

건조과정 중 건조되는 수분의 양은 다음과 같이 건조 물질의 질량, 건조공정 전후의 건조도나 수분비를 이용하여 구할 수 있다.

$$m_{cs} = m_d \left(\frac{1}{d.s.c./100\%} - \frac{1}{d.s.c./100\%} \right)$$

$$\text{or} \quad m_{cs} = m_d (z_{mr1} - z_{mr2})$$

건조물질의 질량 흐름은 지필의 속도 u , 지폭 l , 건조 평량 w_d 로 구할 수 있다.

$$m_d = u \cdot l \cdot w_d$$

실린더 드라이어에서의 건조의 경우 비증발 속도는 TAPPI 건조속도를 이용하는데

$$\text{비증발속도} = \frac{m_{cs}}{\Sigma A_{cyl}} = \frac{m_{cs}}{N \cdot \pi \cdot d_{cyl} \cdot l}$$

이 때 N 은 가열 드라이어 실린더 수, d_{cyl} 은 실린더 드라이어 직경, l 은 드라이어 실린더와 접촉하는 지필의 폭이다.