

섬유와 습기(2)

7. 흡습속도와 컨디셔닝

섬유가 수분을 흡수하는 공부를 하는데 유의해야 할 점들은 섬유가 수분을 얼마만큼 흡수할 수 있는가 하는 흡수능력에 관한 것과 섬유가 수분을 흡수하면 그 물리적 또는 구조적 성질이 어떻게 달라지는가 하는 세가지 점이다. 여기서는 주로 섬유가 어느 일정량의 수분을 흡수하는데 걸리는 시간, 즉 흡수속도와 대기와의 수분평형에 도달하는데 걸리는 시간, 즉 컨디셔닝(conditioning)등에 대하여 생각한다.

섬유에 수분이 흡습 또는 탈습되는 현상은 수분의 확산 때문에 생기는 것이므로 이것의 가장 중요한 예 중의 하나가 건조이다. 섬유의 건조는 완만히 일어나는 현상으로서 건조속도는 주의공기의 온도, 공기의 습도, 공기의 순환속도, 건조되는 물질의 두께, 밀도, 섬유성질에 따라 다르다. 이렇게 건조속도 또는 흡수속도가 다른 것은 습도의 안정화(stabilization)에 상당히 좋다. 예를 들면 실내의 공기온도와 습도는 실내의 융단이나 장막 등의 흡수성 때문에 급속한 변동이 저지되므로 온습도가 더디 변하는 것은 인체건강 유지 및 생활에 아주 바람직한 현상이다.

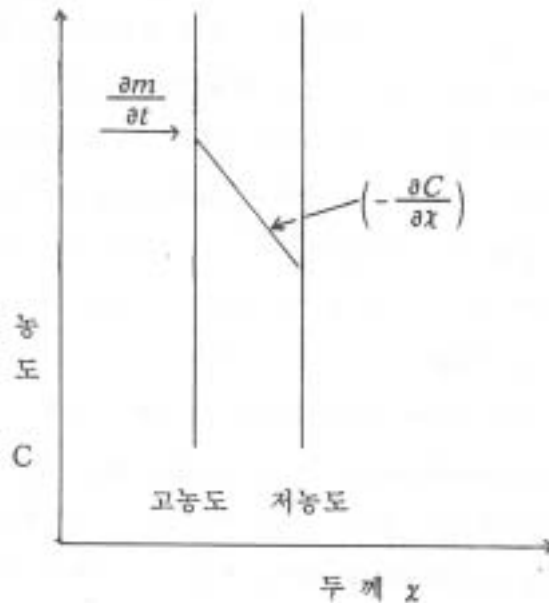
7.1 수분의 확산

섬유가 수분을 흡수하여 평형에 도달하는데 걸리는 시간이 늦은 것은 물분자가 공기 중에서 임의로 운동(random motion)을 하면서 섬유의 표면에 도달하고, 또 섬유표면에 도달된 물분자도 임의 운동을 하면서 섬유 내부로 침투하기 때문이라고 볼 수 있다. 이와 같이 물질이 농도가 큰 곳에서 낮은 곳으로 임의 운동하면서 같은 농도의 상태로 되는 현상을 확산(diffusion)이라고

하는데, 아래에는 확산의 기본법칙을 설명한다.

7.1.1 Fick의 확산방정식

어떤 매질 내에 물분자가 분포되어 있을 때 그 물분자의 농도가 매질의 위치에 따라 다르면 물분자는 고농도의 부분에서 저농도의 부분으로 물의 농도가 같아질 때까지 이동한다. 이때 매질이 등방성(等方性)이면 물은 임의 방향으로의 매질에서 운동을 한다.



<그림 10> 농도물매가 있는 매질에서의 수분의 확산

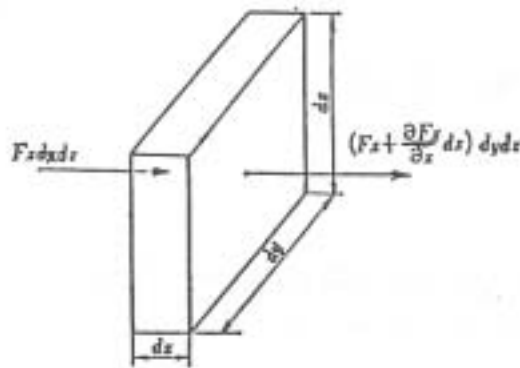
<그림 10>은 등방성물질 안에서 수분이 확산되는 경우 두 인접한 가상면을 보인 것이다. 왼쪽은 온도가 높고, 오른쪽은 농도가 낮은 부분이라고 하고, C 를 확산되는 물의 농도, x 를 위치를 나타내는 변수라고 하고, 또 확산이 진행되는 x 방향에 수직인 단위넓이를 통한 물질의 전달속도를 $\frac{\partial m}{\partial t}$ 라고 하면

$\frac{\partial m}{\partial t}$ 는 농도물매에 비례하는데, 이것을 Fick의 제 1법칙이라고 하며

$$\frac{\partial m}{\partial t} = -D \frac{\partial C}{\partial x} \dots \dots \dots (1)$$

로 나타내는데, 여기서의 D는 확산계수이다. 이 식으로부터 등방성물질 안에서의 수분의 농도, 위치 및 시간에 관한 비분방정식을 유도할 수 있다.

<그림 11>은 확산이 일어나고 있는 매질의 직육면체 부피요소를 나타낸 것이다.



<그림 11> 확산이 일어나는 부피요소

F_x 를 왼쪽 가상단면의 단위면적을 통해서 물이 x 축 방향으로 전달되는 속도라고 하면 왼쪽 단면을 통한 물의 전달속도는

$$F_x dydz$$

가 되고, 또 오른쪽 면을 통한 물의 전달속도는

$$(F_x + \frac{\partial F_x}{\partial x} dx) dydz$$

가 되므로 이 요소 안에서 물의 증가속도는

$$-\frac{\partial F_x}{\partial x} dx dydz$$

가 된다. 한편 이 요소에서 물의 증가속도를 농도로 표시하면

$$\frac{\partial C}{\partial t} d\chi dy dz$$

가 된다. 이두가지가 같아야 하므로

$$\frac{\partial C}{\partial \chi} = -\frac{\partial F_{\chi}}{\partial \chi} \dots \dots \dots (2)$$

이 성립한다. 그런데 F_{χ} 는 식 (1)에서의 χ 축 방향의 $\frac{\partial m}{\partial t}$ 이므로 D를 농도와

위치에 관계 없는 상수라고 하면

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial \chi^2} \dots \dots \dots (3)$$

이 성립한다. 이 식을 Fick의 제 2법칙이라고 한다.

만일 D가 상수가 아닌 경우에는 식 (3)은

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \chi} (D \frac{\partial C}{\partial \chi}) \dots \dots \dots (4)$$

이 된다. 또 χ 축 방향의 확산 이외에 y, z축 방향의 확산도 동시에 일어날 때에, F_y , F_z 를 y, z축 방향의 단위 넓이에 대한 전달속도라고 할 때 3차원 확산은 식 (2)을 확장하여 다음과 같이 된다. 즉

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial F_{\chi}}{\partial \chi} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} \dots \dots \dots (5)$$

D를 상수라고 하면, 식 (5)는

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial \chi^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \dots \dots \dots (6)$$

이 된다. 즉 이것이 등방성물질에 있어서의 3차원적인 확산방정식이다.

그러나 섬유나 고분자, 필름 등과 같은 이방성매질(異方性媒質)에 있어서는 확산성질이 방향에 따라서 다르다. 그러므로 이러한 물질에 있어서의 Fick의 제 1법칙은

$$\begin{aligned} -F_{\chi} &= D_{11} \frac{\partial C}{\partial \chi} + D_{12} \frac{\partial C}{\partial y} + D_{13} \frac{\partial C}{\partial z} \\ -F_y &= D_{21} \frac{\partial C}{\partial \chi} + D_{22} \frac{\partial C}{\partial y} + D_{23} \frac{\partial C}{\partial z} \end{aligned}$$

$$-F_{\chi} = D_{31} \frac{\partial C}{\partial \chi} + D_{32} \frac{\partial C}{\partial y} + D_{33} \frac{\partial C}{\partial z} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (7)$$

이 된다. 여기에서 χ 축 방향의 전달속도 F_{χ} 는 $\frac{\partial C}{\partial \chi}$ 에 의하여 영향을 받을 뿐만 아니라 $\frac{\partial C}{\partial y}$ 와 $\frac{\partial C}{\partial z}$ 의 영향도 받는다. 즉 $D_{12} \frac{\partial C}{\partial y}$ 는 y 축 방향의 농도물매 성분의 x 축 방향의 물질 전달속도에의 기여이다.

특히 D_{ij} 가 상수인 경우에 식 (7)을 식 (5)에 대입하면

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} = & D_{11} \frac{\partial^2 C}{\partial \chi^2} + D_{22} \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_{33} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + (D_{23} + D_{32}) \frac{\partial^2 C}{\partial y \partial z} + (D_{31} + D_{13}) \frac{\partial^2 C}{\partial \chi \partial z} + \\ & (D_{12} + D_{21}) \frac{\partial^2 C}{\partial \chi \partial y} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (8) \end{aligned}$$

이 된다. 또 D_{ij} 가 상수가 아닌 때에도 식 (4)를 만들 때와 같은 방법으로 식 (5)에 의하여 만들 수 있다.

7.2 컨디셔닝

컨디셔닝은 섬유가 흡수 또는 탈습하여 그 주위공기의 수분상태와 평형을 이루게 하는 현상을 말하며 이때 섬유는 수분을 흡수하면 열을 발생하고, 또 탈습하면 열을 흡수하므로 섬유 주위의 공기의 온도가 일정하더라도 섬유와 주위공기와의 수분의 교환은 섬유에 부분적으로 온도의 변화를 가져오게 한다. 그러므로 섬유의 컨디셔닝 중에는 수분과 열의 전달이 동시에 일어나고, 또 이 두 현상은 서로 영향을 미친다.

컨디셔닝의 속도는 섬유공업에 있어서는 중요한 인자중의 하나인데 그것은 섬유공업의 여러 공정에서 섬유집합체를 필요한 수분율로 컨디셔닝 시켜야 할 때가 많기 때문이다. 이렇게 하는 방법으로 “Cellar Method”가 있는데, 이것은 요구 수분율을 부여하는 섬유시료를 대기중에 놓아 두는 방법이다. 이 방법에 의하면 수분평형이 되도록 수분을 흡수하는데 걸리는 시간이 너

무 길어서 어떤 경우에는 수 10일이 넘는 수도 있다. 시간을 절약하기 위하여 섬유주위의 공기의 수분율을 높게 하여 섬유의 수분율 평형에 도달시간을 짧게 한다.

그런데 이것이 성공적으로 이루어지려면 시간에 따라 수분율이 어떻게 변하는가를 알아야 한다. 또 컨디셔닝 된 시료를 두 섬유공정中间的 저 RH 상태에 수분율 변화 없이 얼마나 오랫동안 놓아둘 수 있는가 하는 것도 문제이다. 같은 문제는 원면 짚(bale)의 운반의 경우나 모직물 봉제공장 등에서도 일어난다.

섬유의 물리적 시험에 있어서 얼마나 오랫동안 섬유시료를 표준상태 (온도 20°C, 상대습도 65%의 상태)에 놓아두어야 하는지, 또 시험을 표준상태에서 행하는지 또는 보통의 시험실에서 행하는지를 결정해야 할 때도 있는데, 수분율이 너무 빨리 변하는 시료의 경우에는 보통상태에서 실험하면 많은 오차가 생기므로 가능한 이것을 피해야 한다.

지금까지의 여러 예로 보아 흡수속도는 실제적으로 중요한 인자로서 시료를 RH가 일정한 상태에 놓아두는 경우, 어떠한 현상이 생기는지 또 수분율은 어떻게 변하고 이에 관계되는 인자들은 무엇인지 생각한다.

7.2.1 컨디셔닝 시간에 관계되는 인자

가) 시료의 크기

컨디셔닝 할 시료의 크기가 클수록 수분이 시료의 중심부까지 도달하는데 걸리는 시간이 길어지고, 또 흡수에 의하여 발생한 열이 발산하는데 걸리는 시간도 오래 걸려서 컨디셔닝 하는데 긴 시간이 요구된다. 즉 시료의 크기가 클수록 컨디셔닝 시간이 오래 걸리는데 이것은 일반적으로 시료의 치수의 제곱에 비례한다.

나) 시료의 형태

시료의 형태도 물론 컨디셔닝 시간에 영향을 미치는데 일반적으로 시료의 표면적이 클수록 컨디셔닝 시간은 짧게 걸린다. 예를 들어서, 면사를 roving bobbin, ring tube, mule cop, bottle bobbin, warper's bobbin, cone, cheese, warper's beam, weaver's beam, 원면짜 등으로 하여 이것들을 33% RH에 컨디셔닝시킨 후 65% RH(20°C)의 상태로 옮기면 수분율이 처음과 최종 평형의 중아값에 도달하는데 걸리는 시간은 mule cop의 3시간에서 원면짜의 40일로 차가 벌어진다. 90% 컨디셔닝 시키는데 걸리는 시간은 각각 12시간과 3개월이 된다. 그러나 의류나 roving 및 굵은 실의 컨디셔닝에 걸리는 시간은 수초(數秒)이다.

다) 부피밀도

섬유시료의 부피밀도(bulk density)는 이 경우에는 시료의 압축된 상태를 나타내는 것으로서 많이 압축되어 있을수록 수분이 투과되는 시간이 오래 걸리므로 컨디셔닝 되는 시간이 길게 된다. 일반적으로 컨디셔닝 시간도 밀도에 비례한다.

라) 섬유 재료

섬유의 종류에 따라서 컨디셔닝 되는 시간이 달라지는데 <표 1>에 보인 것은 시료의 부피밀도가 0.5g/cm³일 때 표준상태에서 여러 섬유가 반평형시간에 도달하는데 걸리는 시간을 보인 것이다.

<표 1> 여러 섬유의 반평형시간

시료	면	머서화 면	비스코스	아세테이트	견	나일론
반평형시간(시간)	12	15	24	24	18	8

마) 온도

온도가 높아지면 컨디셔닝은 더 빨라지는데 그것은 열 전달속도는 온도가 높아질수록 커지기 때문이다. 저온에서의 실험 예를 보면, 모사의 경우 5°C에서는 10시간, -180°C에서는 95시간, -30°C에서는 260시간이 걸린다.

RH를 일정하게 유지하고 온도를 10°C 올리면 컨디셔닝 시간은 약 반으로 되고, 온도를 20°C 올리면 컨디셔닝 시간은 약 1/4로 줄어든다. 이것은 컨디셔닝을 빠르게 하는 한 방법이 되지만 섬유의 수분율은 주로 RH에 의하여 결정되므로 온도를 올리고 RH를 일정하게 유지하기 위해서는 이 공간에 수분을 더 공급해 주어야 된다는 것을 염두에 두어야 한다.

바) 공기순환

섬유시료 주위의 공기를 순환시키면 열손실 속도가 빨라지므로 컨디셔닝 시간이 짧아진다.

사) 수분율

섬유시료에 존재하고 있는 수분의 양, 즉 수분율에 따라서 컨디셔닝 시간이 달라지는데 <표 2>는 면섬유 시료의 수분율과 반평형시간과의 관계를 보인 것이다. 이 표에서 보면 수분율이 아주 작을 때와 클 때 컨디셔닝 시간이 길고 중간부분에서는 짧다. 그러나 가장 실제적인 수분율 범위에서는 컨디셔닝 시간은 수분율과 독립이라고 보는 것이 타당하다.

<표 2> 면섬유 시료의 수분율과 반평형시간과의 관계

평균수분율(%)	0	1	2	3	6	7	8	10	12	14
반평형시간(시간)	72	24	12	8	9	12	15	24	36	60

7.2.2 컨디셔닝 단계

컨디셔닝은 공기중에 있는 수분이 섬유시료의 내부까지 전달되어 수분평형을 이루는 것을 말하며, 이것은 다음의 3단계로 일어난다고 볼 수 있다. 즉,

① 주위의 공기로부터 섬유시료 package의 표면까지의 수분의 전달이 이루어지는 첫번째 과정으로서 이것은 정지된 공기중에 있는 소형의 섬유시료인 경우는 중요하나 공기를 순화시키는 경우 이 단계의 수분이동은 순강적으로 일어난다.

② 섬유시료의 표면에서부터 섬유시료 내부까지 사이의 수분 전달이다. 섬유시료는 상당히 많은 단섬유들의 집합체로 되어 있기 때문에 섬유의 집합 상태에 따라서 섬유 사이에는 공기가 존재하고 있다. 이 경우에는 섬유와 섬유사이에 있는 공기에서는 수분이 이동한다.

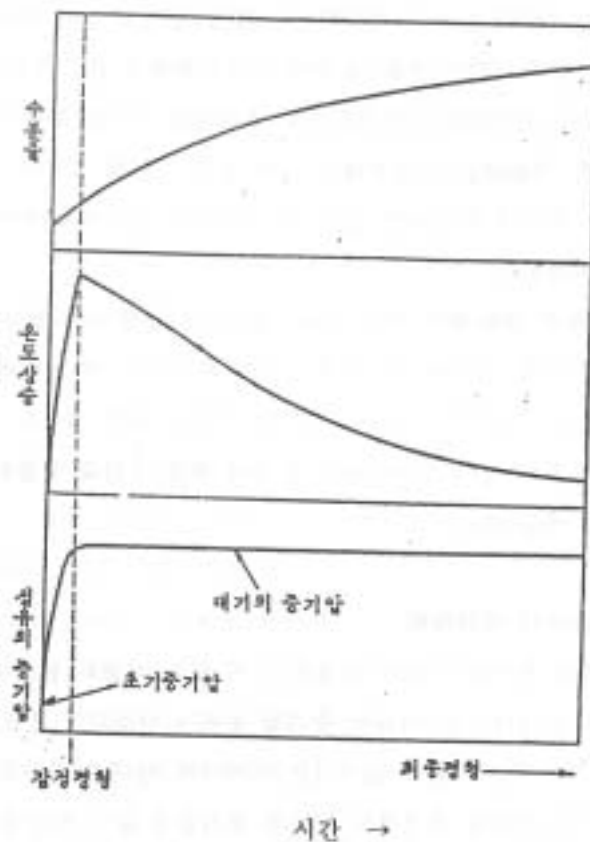
③ 각 단섬유의 주위에서부터 섬유 내부로의 수분의 이동이 마지막 단계이다. 이 경우에는 수분은 순간적으로 섬유내부로 확산된다. 이 세번째 단계에서는 흡습열이 발생하므로 주위공기의 RH에 영향을 미치고, 또한 섬유의 흡습능력에도 영향을 미치는데 그것은 열이 섬유시료를 통하여 주위 공기로 방출되어서 섬유의 흡수능력이 커지기 때문이다.

7.2.3 열과 수분의 상호작용

섬유가 수분을 흡수하면 열이 발생하고, 이 열은 섬유의 온도를 상승시키면서 섬유의 증기압을 증가시킨다. 따라서 증기압 물매가 감소되어 흡습속도가 감소한다.

이와 같이 컨디셔닝 동안에 일어나는 여러 가지 상태의 변화를 나타낸 것이 <그림 12>이다. 컨디셔닝의 초기에는 공기의 증기압이 높기 때문에 수분

은 시료 속으로 쉽게 들어가고, 그 결과 섬유시료의 수분율을 증가시키고, 열을 발생하고, 온도가 올라가게 한다. 이어서 섬유의 증기압이 증가하는데 이것은 수분율이 증가했기 때문일 뿐만 아니라 온도가 올라갔기 때문이다. 이 과정은 섬유의 증기압이 외부의 증기압과 같아질 때까지 계속된다. 이것이 과도평형(transient equilibrium)의 상태인데, 이 명칭은 열이 시료에 의하여 빼앗길 때까지는 더 이상의 흡습이 불가능하기 때문에 생긴 명칭이다. 열이 주위의 대기로 차차 확산되면 온도는 내려가고 수분율의 증가가 생겨서 섬유의 증기압은 공기의 그것에 가까워진다. 이것은 섬유와 공기사이에 온도와 증기압이 최종 평형에 도달할 때까지 계속된다. 냉각과정 중에서도 흡습은 열을 발생하고, 그 열은 주위로 확산된다.



<그림 12> 컨디셔닝 중 수분율, 온도 및 증기압의 변화

7.2.4 열과 수분의 확산방정식

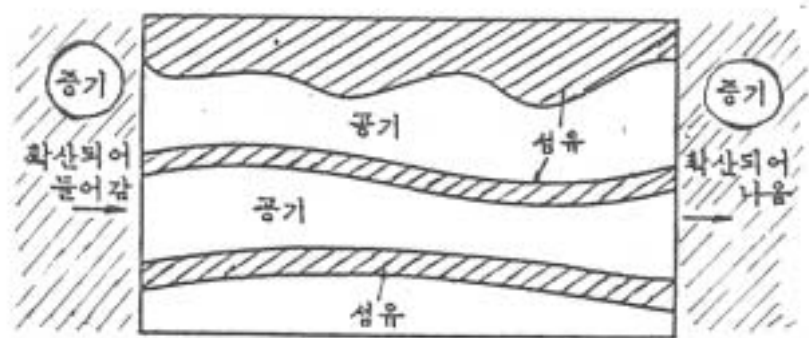
섬유가 컨디셔닝 되는 동안에 일어나는 열과 수분의 동시확산현상(同時擴散現象)을 앞에서는 정성적으로 설명하였는데, 여기에서는 컨디셔닝 과정중의 습도(수분의 농도), 온도와 수분율과 시간과의 광계를 계산하는 방법에 대하여 생각한다.

가) 평형방정식

<그림 13>은 섬유와 공기로 구성된 섬유시료의 요소를 보인 것이다. 여기에서 C를 공기(air space)에 있는 수증기의 농도(g/cm^3), T를 절대온도, a, b를 상수라 하면, 단위질량의 섬유가 흡수하는 수분의 질량 M은 C와 T에 관하여 다음과 같은 선형관계, 즉

$$M = \text{상수} + aC - bT \cdots \cdots (9)$$

를 갖는다고 가정한다. 이 가정은 좁은 범위의 습도와 온도의 변동 범위 내에서는 합리적이라고 알려져 있다.



<그림 13> 섬유시료 요소의 모형도

나) 수증기확산방정식

<그림 13>에 보인 섬유시료 요소를 가지고 농도변화를 나타내는 방정식을 유도할 수 있다. 농도변화의 속도는 다음의 주 인자에 의하여 지배된다. 즉

① 요소에 있는 공기와 섬유를 통한 수증기의 확산은 농도물매에 비례하므로 공기를 통한 확산은 대부분의 경우 섬유를 통한 것보다 크다. 그런데 만일 그렇지 않더라도 섬유 내의 수증기가 항상 그 부근에 있는 공기 내의 수증기오 평형을 유지하고 있고, 또 흡습등온선이 식 (9)와 같이 선형이라면 두 과정은 한 항으로 나타낼 수 있다.

② 확산에 의하여 섬유시료 요소 내로 들어가는 수증기의 질량

$$= \text{공기 내의 수증기의 증가} + \text{섬유내의 수증기 증가} \cdots \cdots (10)$$

섬유시료 요소 내에서 섬유의 전 부피에 대한 공기의 부피분율을 v 라고 하면, 밀도가 ρ_s 인 섬유의 부피분율은 $1-v$ 가 된다.

수증기의 이동을 지배하는 방정식은

$$vgD_A \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + (1-v)\rho_s \frac{\partial M}{\partial t} \cdots \cdots (11)$$

가 된다. 여기에서 D_A 는 수증기의 공기중에서의 확산계수이고, g 는 확산이 직선통로에서 일어나는 것이 아니라 굴곡된 통로에서 일어나는 것을 감안한 계수이다.

다) 열의 확산방정식

<그림 13>에 보인 섬유시료 요소에서 온도 변화율을 나타내는 방정식을 유도한다. 이때 온도 변화율은 섬유와 공기를 통한 열의 전도와 섬유에 의하여 수분이 흡수될 때 발생하는 열에 따라 결정된다고 가정한다. 즉 섬유의 열용량(heat content)의 증가는 전도에 의하여 들어온 열의 정미량(正味量)과 섬유가 수분을 흡수할 때 발생하는 열량의 합계이므로 이것을 방정식으로 표시하면

$$C\rho \frac{\partial T}{\partial t} = K \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + q\rho \frac{\partial M}{\partial t} \cdots \cdots (12)$$

로 된다. 여기에서 C 는 섬유의 비열, K 는 섬유시료의 열전도도, ρ 는 섬유시료의 밀도이고, q 는 섬유가 1g의 물을 흡수할 때 발생하는 열량이다. 그런데 이 식을 선정할 때에 공기의 열용량은 섬유의 그것에 비하여 무시할 정도라는 가정을 사용하였다.

수증기방정식 (11)과 온도방정식 (12)에는 모두 섬유의 수분율 M 이 포함되어 있다. 이것은 두 과정, 즉 수분전달과 열 전달은 이와 같이 서로 관련되어 있으므로 한 과정을 다른 과정과 분리하여 생각할 수 없음을 말한다. 이 경우의 이론적 고찰에서 쓰인 가정들은 다음과 같다.

- ① M 은 C 와 T 에 선형관계를 갖고 있다. (식 9)
- ② D_A, K, C 및 ρ 는 일정하고, 수분농도와 온도에 관계없다.
- ③ 흡수열 q 는 수분율에 독립이다.
- ④ 흡습의 이력(履歷)은 무시한다. 즉, 평형방정식 (9)는 섬유가 수분을 흡수하거나 탈수하거나에 관계없이 성립한다.
- ⑤ 섬유와 공기의 부피분율은 확산이 진행되는 중에도 변화하지 않는다.
- ⑥ 모세관현상에 의한 흡습은 무시한다.
- ⑦ 섬유는 그 최인접주위(最隣接周圍)와 순간적으로 수분평형을 이룬다.

라) 수학적 해(解)

위에서 보인 확산방정식의 수학적 해는 농도, 온도 및 수분율이 시간에 따라서 어떻게 변하는가를 알 수 있게 한다. 즉, 이 해는 섬유시료 주위의 대기조건이 변하면 시료가 평형에 도달할 때까지 열과 수분의 확산과 온도변화는 각각 독립적으로 시료를 통하여 확산한다고 생각할 수 있다.

확산방정식 (9), (11), (12)의 가장 간단한 해는 건조섬유 시료와 습윤섬유 시료를 같은 온도의 습한 공기중에 두었을 때의 조건에서 구하는 것이다. 이

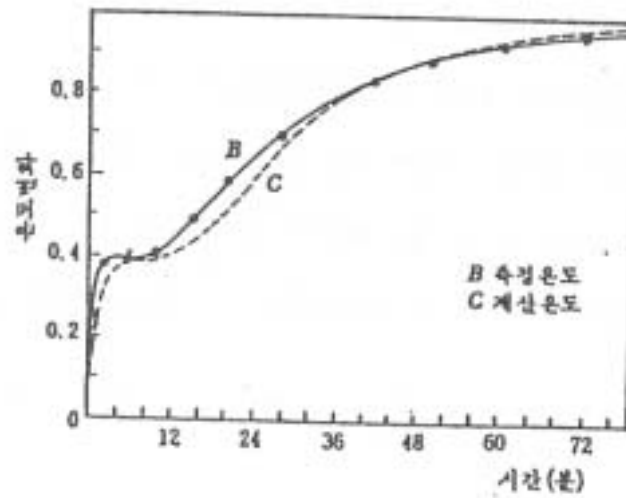
[illegible]

온도에 관한 해는

$$T-T_0 = C_0 S(f_1 - f_2) \cdot \dots \quad (14)$$

[illegible]

<그림 14> 원통형 섬유의 중앙에서의 온도의 변화



<그림 15> 공기유동시 원통형 섬유의 중앙에서의 온도변화

<그림 14>와 <그림 15>는 식 (13)~(15)를 계산한 값과 실험값을 비교한 것이다. <그림 14>는 우너통형 섬유시료의 중앙에서의 온도변화이며, 자연확산 실험결과와 비교한 것이고, <그림 15>는 공기를 유동시켰을 때의 결과이다. 후자의 경우, 이론과 실험결과가 더 접근되어 있는 것을 볼 수 있다. 전자의 경우, 차이가 큰 이유는 확산계수의 측정이 곤란하기 때문인 것으로 생각된다.