



왜? 종이의 물성측정이 중요하며 알아야 하는가? ②

한국골판지포장공업협동조합
정보기술팀

고급 골판지상자를 만들기 위해서는 좋은 골판지원지를 사용하는 것이 무엇보다 중요하다. 특히 골판지상자의 물성 중에서 골판지의 흠 강도는 골판지상자 적재 시에 상자 굴곡강도를 예측할 수 있는 중요한 인자가 된다. 이와 관련된 종이의 물성은 종이의 스티프니스(뻣뻣이 강도)를 인장 스티프니스와 흠 스티프니스로 나누어 이러한 인자가 골판지나 골판지상자의 흠강도 및 굴곡강도와 연관되는 종이의 탄성적 성질의 중요성에 대하여 4회에 걸쳐 연재하므로 독자 및 업계 종사자의 기술력 향상에 많은 도움이 되기를 바랍니다(편집자 주).

종이물성 측정의 철학

제1장 스티프니스의 중요성

제2장 인장 스티프니스(tensile stiffness)

제3장 흠 스티프니스(bending stiffness)

제4장 측정결과의 비교



제2장 인장 스티프니스(tensile stiffness)

1. 인장 스티프니스는 무엇인가?

인장 스티프니스의 성질을 기술하기 위해 우리는 먼저 재료역학의 분야에서 몇 가지 개념을 살펴봐야 한다. 먼저 우리는 종이와 다른 물질(예, 강철)을 생각해 볼 수 있다.

2. 후크의 법칙(Hooke's law)

면적 A 와 길이 ℓ , 그리고 한쪽 끝은 고정되어 있고 다른 한쪽은 (그림 2.1)과 같이 막대의 중심선에 평행하게 힘 F 가 작용한다.



(그림 2.1 사각의 단면을 가진 균일한 빔에 하중이 가해지는 경우)

힘 F 가 단면적 A 에 대해 균일하게 분포되어 있다고 가정해보자.

단면에 생기는 응력(stress)를 정상응력(normal stress)이라고 하자. 이 하중의 경우는 인장응력(tensile stress)을 가진다. 인장응력은 σ 로 나타내고 단위 면적당 힘을 나타내는 단위 N/m^2 를 가진다. 빔의 무게를 무시할 경우 인장응력은 다음과 같다.

$$\sigma = F/A \quad (2.1)$$

여기서, σ = 인장응력(N/m^2), F = 인장력(N), A = 단면적(m^2)

마찬가지 방법으로 빔에 압축력이 가해지면 압축응력이 생겨난다. 빔에 인장하중이 가해지면 길이



ℓ 만큼 늘어나게 되며 일반적으로 변형률(strain)이라 불리고 ε 로 표시하는 단위 길이당 늘어난 길이는 다음과 같다.

$$\varepsilon = \Delta l / l \quad (2.2)$$

여기서, ε = 변형률(strain) (단위 없음), Δl = 늘어난 길이(m), l = 길이(m)

변형률은 단위 길이당 늘어난 길이이기 때문에 단위가 없는 양이다. 어느 정도 응력까지는 응력(stress)과 변형률(strain) 사이에 비례관계가 존재하게 되며 이 관계는 다음 방정식으로 표시될 수 있다.

$$\sigma = E \varepsilon \quad (2.3)$$

여기서, σ = 인장응력(N/m²), E = 재료의 탄성계수(N/m²), ε = 변형률(단위 없음)

E 는 재료의 성질에 따른 비례상수이며 영률, 탄성계수라 하며, 본문에서는 단순히 탄성률이라 부른다. 이 비례식은 후크의 법칙(Hooke's law)이라 불린다. 변형률 ε 는 단위가 없기 때문에 E 가 응력 σ , 즉 단위 면적당 힘(N/m²)의 단위를 갖는다는 것은 후크의 법칙으로부터 명백히 알 수 있다. 다른 재료들에 대한 탄성계수는 실험적으로 즉 수직 인장강도 측정기를 사용함으로써 알 수 있다. 후크의 법칙에 따르면 비례영역 안에서 값과 값 사이의 관계식은 다음과 같다.

$$E = F/A \times 1/\varepsilon \quad (2.4)$$

$$E = F/(t \times b) \times 1/\varepsilon \quad (2.5)$$

여기서, E = 탄성계수(N/m²), F = 힘(N), A = 단면적(m²), t = 두께(m), b = 폭(m)

응력과 변형에 대해 기술한 식들과 후크의 법칙은 재료역학에서 가장 중요한 기본 법칙들이다. 이것들은 종이와 카톤용 판지의 스티프니스 성질을 충분히 이해하기 위한 근간을 이룬다.

3. 인장 스티프니스 – 종이와 판지의 탄성을 정의하는 방법 –

식 (2.5)에서 양변에 두께 t 를 곱해주면 우변의 t 가 사라지고 인장 스티프니스를 정의하는 식을 얻게 된다. 단위 면적당 힘이 N/m로 표시된다면 변형률 σ 가 단위가 없는 숫자이기 때문에 인장 스티프니스도 또한 N/m의 단위를 갖게 된다.

$$E \times t = F/b \times 1/\varepsilon \quad (2.6)$$

$$S_t = E \times t = F/b \times 1/\varepsilon \quad (2.7)$$

여기서, S_t = 인장 스티프니스 (N/m), E = 탄성계수(N/m²), F = 힘(N), t = 두께(m),

b = 폭(m), ε = 변형률(단위없음)



식 (2.6)에서 양변을 평량 w 로 나누면 인장 스티프니스 지수(tensile stiffness index) E^* (평량으로 나누어진 값에 대해 지수(index)라는 용어가 사용됨)을 나타내는 식이 얻어진다.

$$E \times t/w = F/(b \times w) \times 1/\varepsilon \quad (2.8)$$

$$E^* = E \times t/w = F/(b \times w) \times 1/\varepsilon \quad (2.9)$$

여기서 $E^* = \text{인장 스티프니스 지수}(\text{인장 스티프니스를 평량으로 나눈 값}) (\text{Nm/kg})$,

$E = \text{탄성계수}(\text{N/m}^2)$, $t = \text{두께}(\text{m})$, $w = \text{평량}(\text{g/m}^2)$, $F = \text{힘}(\text{N})$,

$\varepsilon = \text{변형률(단위 없음)}$

4. 탄성계수 – 종이에 직접적으로 응용되지 않음 –

후크의 법칙에 따라 탄성 계수는 단위 면적당 힘으로 표현된다. 비행기에서와 같은 일부 적용분야와 종이를 사용하는 모든 분야에서 저평량이면서 높은 인장 스티프니스를 얻기 위한 필사적인 노력이 이루어지고 있다. 이와 관련해서 높은 비탄성계수(E/ρ)를 가진 종이가 선호된다. (ρ 는 재료의 밀도). 밀도는 w/t (평량/두께)이므로 다음 식이 얻어진다.

$$E/\rho = F \times t/(b \times t \times w \times \varepsilon) = F/(b \times w \times \varepsilon) = E^* \quad (2.10)$$

여기서, $E = \text{탄성계수}(\text{N/m}^2)$, $\rho = \text{밀도}(\text{kg/m}^3)$, $F = \text{힘}(\text{N})$, $b = 폭(\text{m})$,

$w = \text{평량}(\text{g/m}^2)$,

$E^* = \text{인장 스티프니스 지수}(\text{인장 스티프니스를 평량으로 나눈 값}) (\text{Nm/kg})$

$\varepsilon = \text{변형률(단위 없음)}$

비탄성계수(E/ρ)의 개념은 종이의 인장 스티프니스 지수 E^* (단위 평량당, 단위 폭당 힘의 단위를 갖는다)와 동일하다.

역학계산을 이용하여 종이의 탄성계수를 구하려 할 때 단면적을 정하는 문제가 생긴다. 이론적으로 면적은 시료 폭에 두께를 곱함으로 얻게 된다. 바로 여기에서 문제가 발생한다.

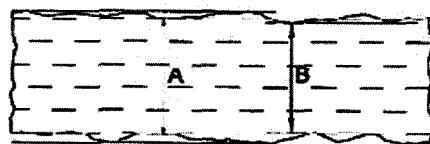
표준방법에 따라 측정된 두께가 $50\mu\text{m}$ 인 종이를 가정해 보자. 이 수치를 사용할 경우 종이의 불균일성으로 인해 하중을 잘 견딜 수 있는 부분이 매우 적으로 종이의 탄성계수는 매우 작은 값을 갖게 된다. 이러한 현상은 지합 및 평량의 불균일, 거칠음도에 큰 영향을 받는다(그림 2.2).

종이의 경우 표준에 의한 두께와 강도에 영향을 주는 두께(strength-effective thickness)간의 차이는 25%에 이른다.

따라서 정밀하게 표준 방식을 사용하지 않는다면 종이나 판지의 탄성계수를 얻는데 상당한 오차를



발생시킬 수 있다. 종이의 탄성계수를 성공적으로 계산하기 위해서 우리는 유효두께(effective thickness)를 측정할 수 있어야 한다. 그러한 방법들 중 하나는 STFI에 따른 두께 측정방법인 수은 침투 방법이다. 여기에서 종이의 두께는 서로 마주보는 두개의 등근 측정 센서로 측정되거나 부드러운 측정판을 가진 표준방식의 두께 게이지에 의해 측정된다.



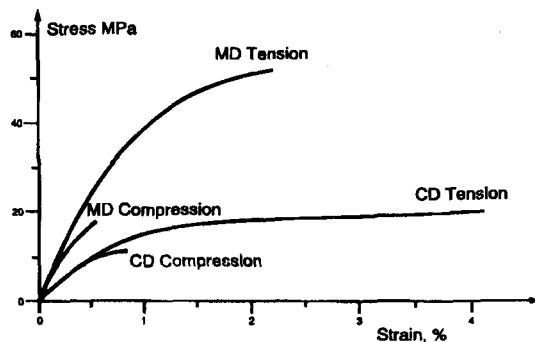
(그림 2.2 표준에 따른 두께와 강도에 영향을 주는 두께간의 종이의 경우 차이는 25%에 이른다.)

5. 인장 스티프니스의 측정

지금까지는 인장 스티프니스의 개념을 정의했다. 인장 스티프니스란 용어는 이 물성이 인장 측정기에서 인장력이 작용하는 상태에서 측정되기 때문에 사용하게 되었다.

탄성은 가역적이기 때문에 인장과 압축시 동일하다는 것을 기억하는 것이 중요하다. 이러한 관계는 직교 좌표에서의 응력-변형률(stress-strain)곡선을 통해 명백히 알 수 있다. 여기에서 인장응력 또는 압축응력(X축)은 변형률(strain) (Y축)에 비례한다(그림 2.3).

종이의 경우, 곡선이 초기에는 직선을 이룬다. 이 영역 안에서 응력은 변형률에 비례한다. 따라서 후크의 법칙은 이 영역 안에서 적용된다. 일반적으로 비례적, 직선적인 관계가 끝나는 지점을 '비례한계(proportional limit)라 한다.



(그림 2.3 종이에 대한 응력/변형률의 특성)



탄인장과 압축에서의 응력-변형률 곡선은 (그림 2.3)에서 보는 바와 같이 큰 차이가 있다.

압축응력의 경우는 종이가 파괴될 때까지의 변형률의 1/3에서 1/2정도까지는 직선 관계를 갖지만 인장의 경우는 1/5에서 1/3지점까지 직선이 된다.

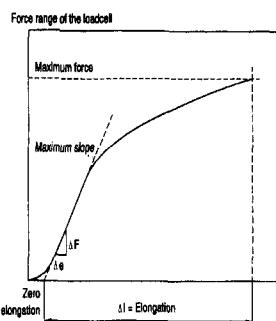
6. 인장 스티프니스의 표준화

불행히도 현재까지 인장 스티프니스를 결정하는 표준 방법은 없다. SCAN-TEST협회에서 현재 인장 스티프니스를 표준화하기 위한 작업이 진행되고 있다.

STFI와 SCAN-TEST 표준화 소위원회의 연구결과에 따르면 인장력과 변형률 사이의 관계를 결정하는 방법이 매우 중요하다는 것을 알 수 있다.

종이의 경우, 금속들만큼 쉽게 비례영역을 정하기는 어렵다. STFI는 힘-변형 곡선의 계속적인 측정(scanning)을 통하여 힘의 변화량/변형량의($\Delta F/\Delta e$) 최대 기울기를 결정할 수 있는 방법을 개발했다(그림 2.4). 스캐닝을 하는 동안에 변형량 Δe 로써 시험편의 초기길이의 0.05 ~ 0.1% 정도가 적용된다.

힘-변형의 과정의 초기부분(곡선부분)은 인장 스티프니스의 계산에 영향을 주지 않는다. 이 방법은 탄성영역 내에서 인장 스티프니스 값이 얻어지는 것을 보장해준다. 이것은 모든 종류의 강성을 측정하기 위한 기본적인 조건이다. 이 방법은 현재의 측정기기 때문에 쉽고 빠르게 적용될 수 있다. 즉, 시편의 길이가 100mm일때 50 μm 정도가 된다. 영 신장을(Zero elongation)의 정의에 주의해야 한다.



(그림 2.4 신장을의 함수로써의 힘. Δe 는 시험편의 원래 길이의 0.05%정도이다.)

7. 가장 중요한 종이의 성질

인장 스티프니스는 물리적으로 안정된 종이의 제조에서 매우 중요한 성질이다. 종이와 판지 또는 콜



판지가 휘게되면 인장력 또는 압축력이 한쪽면에 생기게 된다. 실제적으로 하중이 작용하는 경우에 다른 응력들도 물론 발생한다 그러나 여기서는 이러한 것들을 무시하겠다. 주어진 두께에 대한 인장응력과 압축응력의 크기는 휨반경(bending radius), 재료의 인장 및 압축강도 및 다른 인장 스티프니스를 가진 여러 재료층의 분포(판지의 경우)등에 따라 달라진다. 최적의 스티프니스를 가진 종이를 생산하는 일반적인 법칙은 만들어질 수 없다. 그러나 지필의 구조, 펠프, 펠프처리 및 초지기술 등의 적절한 선택을 통해 좋은 휨 스티프니스를 얻을 수 있다. 인장 스티프니스는 압축강도와 인장강도 등과 같은 여러 강도 사이에 밀접한 관련이 있다. 이러한 연관성은 인장 스티프니스는 일반적인 물성이므로 대부분의 종이에서 가장 중요한 강도적 성질이라는 것을 나타낸다.

8. 초음파(ultrasonic)방식에 의한 인장 스티프니스의 측정

초음파 방식에 의한 인장 스티프니스의 측정은 기존의 인장측정기에 비해 측정시간이 짧은 대체 방법이다. 초음파는 사람들이 일반적으로 들을 수 있는 20kHz와 100kHz의 범위를 넘어서는 주파수를 가진 소리이다. 측정원리는 소리는 물질의 탄성에 따라 다른 속도로 전파된다는 것이다. 높은 스티프니스를 가진 물질은 낮은 물질에 비해 소리가 빠르게 전파된다. 인장 스티프니스 지수 E^* 는 물질에서 소리의 속도의 제곱에 비례한다.

다음과 같은 공식으로 그 관계를 간단히 나타낼 수 있다.

$$E^* = k \times V^2 \quad (2.11)$$

$$S_t = k \times V^2 \times w \quad (2.12)$$

여기서, E^* = 인장 스티프니스 지수(인장 스티프니스를 평량으로 나눈 값) (Nm/kg)

S_t = 인장 스티프니스(N/m), k = 상수(단위 없음), V = 측정된 음속(m/s)

w = 평량(g/m^2)

상수는 이론적으로 거의 하나의 값을 갖는다. 초음파 기술에 의해 측정된 인장 스티프니스는 측정시간의 차이로 인해 인장 측정기에 의해 측정된 값보다 일반적으로 높은 값을 갖는다.

초음파 방식은 여러 가지 장점을 가지고 있다. 그 중 가장 흥미로운 것은 시편을 파괴하지 않고 측정하며 지필 위에서 바로 측정한다는 것이다. 시험편을 절단하는 시간을 줄일 수 있다. 이 측정방법은 매우 빠르며 일반적으로 세로방향(MD) 및 가로방향(CD)으로 측정하는 것과는 달리 여러 방향으로 인장 스티프니스를 측정할 수 있도록 해준다.



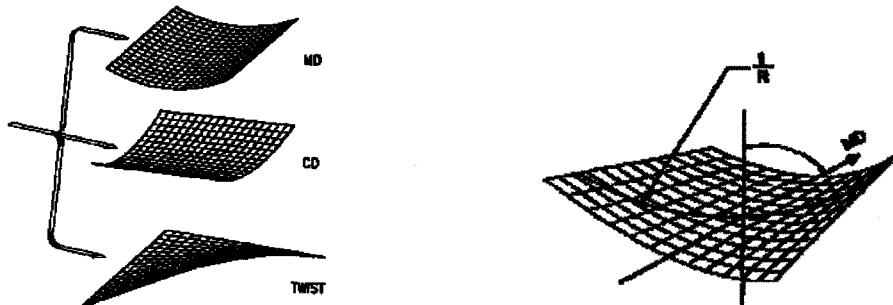
9. 초음파방식에 의한 인장 스티프니스의 측정은 공정의 최적화를 가능하게 한다

스웨덴의 L&W사의 AUTOLINE 시스템이나 ISOTUNER의 도움으로 각 초기기에서 생산되는 지필의 인장 스티프니스를 전폭으로 측정할 수 있으며 지속적인 측정을 통해 공정 컨트롤을 위해 매우 중요한 데이터를 얻을 수 있다. 이 방식이 매우 빠르고 완전 자동으로 측정되기 때문에 인장 스티프니스는 여러 각도로 측정될 수 있고 지필의 지폭방향의 여러 위치에서 측정할 수 있다. 예를 들면 헤드박스의 lip screw의 간격에 맞춰 측정할 수도 있다. 인장 스티프니스의 MD/CD 비율, 인장 스티프니스가 최대일 때의 방향과 MD방향이 이루는 각도 등을 구할 수도 있다. 인장 스티프니스는 평균적인 섬유 배향성과 밀접한 관계가 있기 때문에 이 방법은 종이의 섬유 배향성을 조절하는데에도 적당하다.

10. 초음파방식에 따른 인장 스티프니스의 측정

– 최소 뒤틀림(twist) 조절을 위한 단계 –

종이나 판지 또는 골판지가 충분히 평평하지 못한 것은 잘 알려진 문제점이며 자주 매우 심각한 품질 문제가 된다. 컬(curl)과 뒤틀림(twist)은 대부분이 아는 개념이다. 컬은 지필의 주요방향으로 지필이 휘어진 상태를 나타낸다. 따라서 MD-컬과 CD-컬이 존재한다. 컬의 크기는 반경의 역수이며 미터 단위로 나타낸다. 뒤틀림은 MD 방향에 대한 지필의 뒤틀림을 나타낸다(그림 2.5과 2.6)



(그림 2.5 MD-컬, CD-컬 및 뒤틀림의 정의) (그림 2.6) 여러 가지가 결합된 컬에서 한 방향이 두드러진다. 결과는 그림에서 보는바와 같다
(약간의 뒤틀림을 가진 컬). 뒤틀림이 없는 방향은 1/R의 컬로 나타난다(R은 곡률반경).

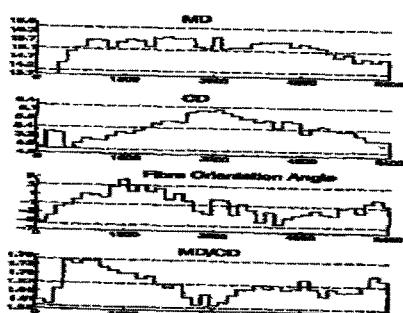


컬과 뒤틀림은 주로 종이의 층 간에서의 습윤팽창(hygroexpansion : 수분의 많고 적음에 따라 치수가 변하는 성질)의 차이에 의해 주로 발생된다. 목재에서도 비슷한 현상이 관찰된다. 수분이 많을 때에 팽창하고 수분이 적을 때에는 수축한다. 팽창은 섬유의 길이 방향보다 폭방향으로 크게 일어난다. 섬유의 배향성이 확실한 순수한 목재에서 이러한 현상은 확실하다. 종이에서의 팽창을 예측하기는 쉽지 않다. 그러나 종종 어떤 지종의 습윤 팽창성(hygroexpansivity)은 인장 스티프니스가 증가할 때 감소하는 것을 볼 수 있다.

따라서 종종 인장 스티프니스를 측정함으로써 습윤 팽창성의 변화에 대한 정보를 얻는 것이 가능하다. 최대의 인장 스티프니스가 종이의 MD방향과 일치하는 종이를 가정하면 수분의 변화는 종이를 단지 MD와 CD방향으로 휘게 한다. 지필은 두께 측면에서 완전히 대칭적이지 못하기 때문에 휘게 한다. 장망초지기에서는 한쪽 방향으로만 탈수가 일어나기 때문에 문제가 있을 수밖에 없다. 일반적으로 어느 정도의 MD, CD 방향으로의 컬은 뒤틀림에 비해 문제가 되지 않는다. 종이의 스택 린(stack lean : 종이를 일정크기로 잘라 쌓아놓을 때 기울어지는 현상) 같은 문제뿐 아니라 롤에서 발생하는 문제들도 섬유 배향의 주요한 방향이 지필의 MD 방향과 일치하지 않는다는 사실과 밀접하게 관련되어 있다.

섬유 배향성은 초기기의 습지부(wet-end)부분에서의 작업조건에 의해 크게 좌우되므로 뒤틀림 문제의 원인도 이 부분에서 찾을 수 있다. 일반적으로 원료가 여러 가지 에지(edge) 효과에 의해 영향을 받는 금망(wire)의 가장자리에서 경사지게 흐르지는 않는다.

몇몇의 문제들은 작업요소를 변경하는 것과 같은 간단한 조치(예를 들면 제트비(jet ratio)를 조절하는 것과 같은)에 의해 해결될 수 있는 반면 다른 문제들은 습지부의 개조를 필요로 할 수도 있다. 컬과 뒤틀림에 영향을 줄 것으로 생각되는 다른 요소들은 건조 조건이다. 지필이 건조공정에서 얼마나 자유롭게 움직일 수 있는지에 따라 지필에 작용하는 응력이 달라진다. 특히 지필의 폭방향, 즉 CD 방향에서는 통제되지 않는(uncontrolled) 상태에서 건조된다.



(그림 2.7 인장 스티프니스 지수와 인장 스티프니스 배향의 전폭에 걸친 프로파일. 초음파 방식에 의하여 측정)

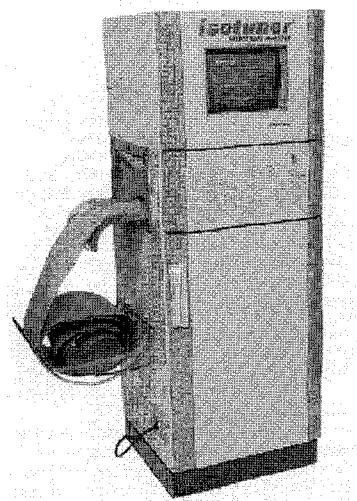


11. 균일한 종이를 생산하기 위한 측정기

올바른 측정결과는 지식과 적합한 측정기가 결합되었을 때 얻어질 수 있다. 종이 제조업자들은 공정과 완성된 종이제품 모두를 이해할 수 있다. 초기기의 개조는 매우 중요한 결정이다. 따라서 무슨 일이 있어도 정확하지 않은 측정기에 의한 잘못된 결정은 피해야 한다. Lorentzen & Wettre는 측정 기술과 적합한 측정기를 제공한다.

종이가 평평하지 않은 문제를 성공적으로 해결할 수 있는 측정을 위한 필수적인 측정기는 다음과 같은 것들이 있다.

- 인장 스티프니스 배향성 측정기
- 컬과 뒤틀림의 측정기
- 습윤 팽창 측정기
- STFI에 의해 개발된 LAMINATE 이론에 따른 컬 & 뒤틀림의 계산을 위한 컴퓨터 프로그램
- 지식



(그림 2.8 ISOTUNER)

(다음호 계속)