



왜? 종이의 물성측정이 중요하며 알아야 하는가? ④

한국골판지포장공업협동조합
정보기술팀

고급 골판지상자를 만들기 위해서는 좋은 골판지원지를 사용하는 것이 무엇보다 중요하다. 특히 골판지상자의 물성 중에서 골판지의 휨 강도는 골판지상자 적재시에 상자 굴곡강도를 예측할 수 있는 중요한 인자가 된다. 이와 관련된 종이의 물성은 종이의 스티프니스(뺏뺏이 강도)를 인장 스티프니스와 휨 스티프니스로 나누어 이러한 인자가 골판지나 골판지상자의 휨강도 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 휨 스티프니스(bending stiffness)

제4장 측정결과의 비교



3.7 공명 스티프니스 방식(공명을 이용한 방식)에 따른 휨 스티프니스의 이론

공명 스티프니스(resonance stiffness) 방법의 원리는 자유 진동(free vibration)이 일어나는 동안의 물질의 고유 진동수는 휨 스티프니스, 자유롭게 진동하는 길이(freely vibration length), 그리고 물질의 무게에 따라 다르다는 것이다. 평량을 알고 있는 시편이 일정한 주파수를 가지고 진동한다면, 휨 스티프니스는 그 주파수에서 공명을 일으키는, 즉 시편에 자유 주파수(free frequency)를 일으키는 시편의 자유길이(free length)를 측정함으로써 구할 수 있다.

$$(3.15) \quad f = \frac{1}{2\pi} \times \frac{k^2}{l^2} \times \left(\frac{S_b}{w}\right)^{0.5}$$

여기서, f = 진동수(주파수) (Hz), k = 단위없는 상수(= 1.875)
 l = 종이의 자유길이(m), w = 시편의 평량(kg/m²)
 S_b = 휨 스티프니스(Nm)

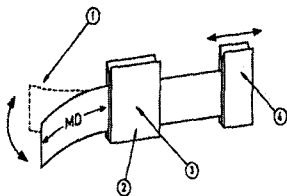
시편이 25 Hz에서 진동한다면 식은 다음과 같이 된다.

$$(3.16) \quad S_b = 2 \times 103 \times 14 \times w$$

여기서, S_b = 휨 스티프니스(Nm), l = 종이의 자유길이(m), w = 시편의 평량(kg/m²)

실제로 공명 스티프니스 방법에 따른 측정은 시편을 약하게 잡고 진동하는 클램프 사이에서 시편을 천천히 당기면서 자유길이(free length)를 줄이면서 행해진다.

특정 자유길이(free length)에서 고유 공명(natural resonance)이 일어난다. 여기에서 고유 공명은 자유롭게 진동하는 종이의 진폭이 최대일 때 얻어진다.



- ① 임의의 지역에서 진폭이 측정되고
- ② 진동 클램프
- ③ 클램핑 압력이 이 부분에 작용함
- ④ 시편을 당겨주는 클램프. 여기에서 시편은 MD방향으로 진동된다

([그림 3.11] 공명방법에 따라 휨 스티프니스를 측정하기 위해 사용되는 기기의 주요 부분)

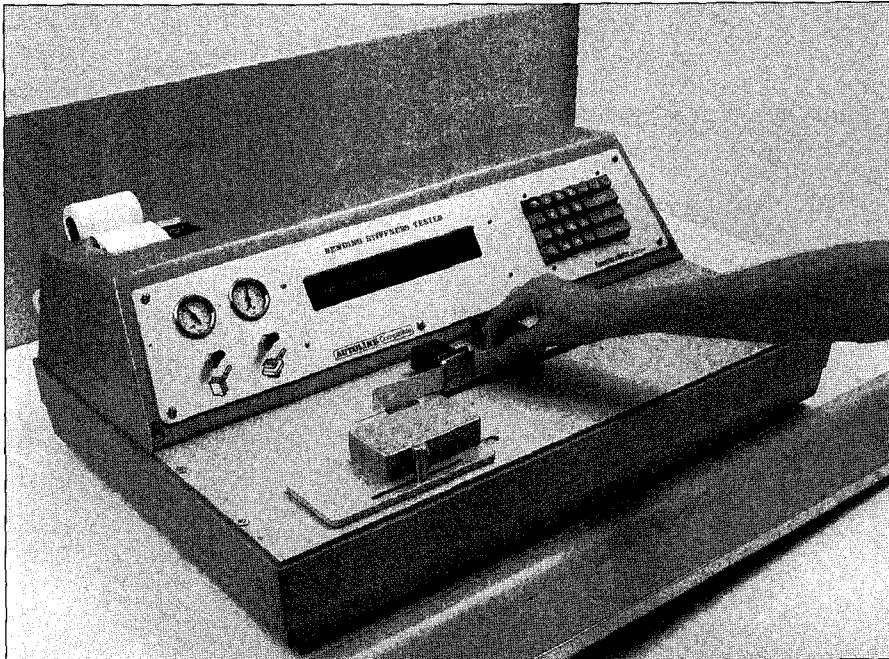


공명이 일어날때 시편의 자유길이(free length)가 휨 스티프니스를 결정하게 된다.

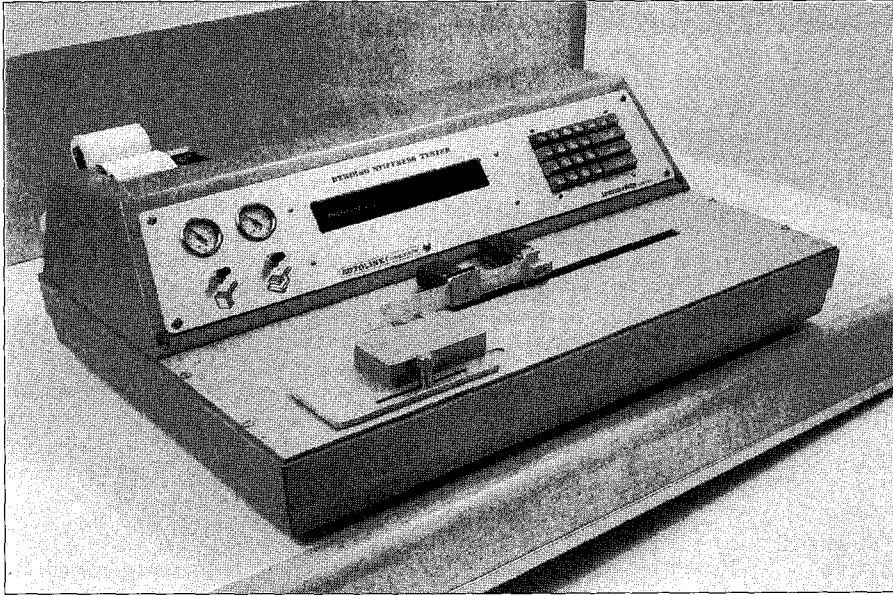
공명 스티프니스 방법에 따라 휨 스티프니스를 측정하는 동안 휨(deflection)이 물리적으로 정확한 방법으로 발생하기 때문에 측정 방법에 따른 오류가 발생하지 않는다.

이 방법은 물질의 실제 휨 스티프니스를 측정하게 되며 종기와 판지의 휨 스티프니스를 측정하는 가장 좋은 방법이다.

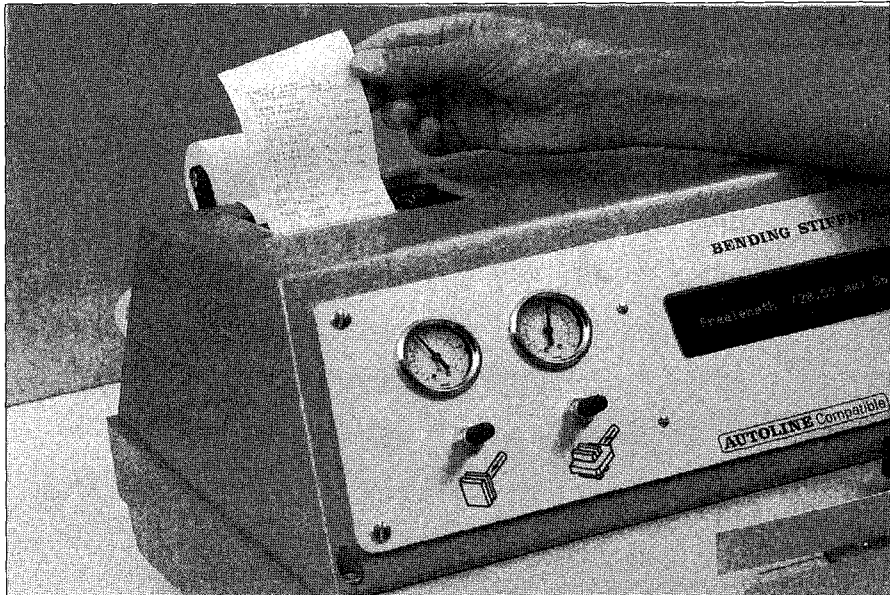
L사의 공명 스티프니스 시험기는 공명 스티프니스의 이론과 고도의 기술이 결합하여 만들어진 합리적이고 정확한 측정기기이다. 이 측정기는 빠르고 사용하기 쉬우면서 품질관리뿐 아니라 연구개발에서도 매우 중요하다. 측정기의 측정범위(1 - 10,000)가 넓기 때문에 하나의 측정기로 신문용지부터 다층지에 이르기까지 대부분의 지종에 사용할 수 있다.



([그림 3.12] ① 시편을 삽입한다)



([그림 3.12] ② 측정)



([그림 3.12] ③ 측정결과 인쇄)



3.8 휨 스티프니스 측정에서의 오류 원인

3.8.1 오류 A의 원인 : 탄성지역(elastic region)을 넘어선 경우

대부분의 휨 모멘트 방법에 있어서 심각한 오류의 원인은 힘과 변형 사이에 비례관계가 성립하는 후크의 법칙을 적용할 수 있는 범위를 넘어선 경우, 즉 어느 정도 잘 정의된 휨에 대한 저항력(bending resistance)은 측정되지만 휨 스티프니스는 측정되지 않는다.

이것은 높은 휨 스티프니스를 갖는 두꺼운 물질에 대해 낮은 측정값을 나타내기 쉬우므로 매우 심각한 원인이 된다. 이러한 오류는 잘 설계된 측정장비로 예방할 수 있다.

어떤 측정장비에서는 휨 스티프니스는 인장 스티프니스의 측정에서 사용하는 것과 비슷한 방법, 즉 힘과 휨 정도(deflection)의 관계곡선에서 최대의 기울기를 찾는 방법을 통해 측정한다. 이 문제를 어떻게 피할 수 있는가 하는 다른 예는 골판지와 판지용으로 제작된 4-포인트 휨 스티프니스 시험기를 이용하는 것이다. 이 측정기에서 컴퓨터 프로그램은 휨(deflection)이 탄성지역(elastic region)안에서 일어나는지를 체크한다. 사용자는 단지 시편의 대략적인 치수에 대한 도구(치수에 따라 다른 부속품 사용)에 대해 알기만 하면 된다.

인장 스티프니스를 측정하는 동안 탄성 영역은 일반적으로 0.2% 변형(strain)안에 존재한다. 이것은 전통적인 빔-휨 방법에 대해 휨 정도(deflection)와 휨 각도가 아래 공식에서 주어지는 값을 초과해서는 안된다는 것을 의미한다.

(3.17) the 2-point method: $\delta = \frac{1,3 \times l^2}{t}$

(3.18) $\Theta = \frac{76 \times l}{t}$

(3.19) the 3-point method: $\delta = \frac{0,33 \times l^2}{t}$

(3.20) the 4-point method: $\delta = \frac{0,5 \times l^2}{t}$

여기서, δ = 인정할 수 있는 최대의 휨 정도(deflection) (mm)
 θ = 인정할 수 있는 최대의 휨 각도(bending angle) (도)
 t = 시편의 두께(m), l = 시편의 길이(mm)

4-포인트 휨 스티프니스 측정의 경우 휨 정도(deflection)는 바깥층에서 0.05 %의 변형(strain)



이내로 제한된다는 것을 알아야 된다. 이러한 사실은 측정방법을 표준화하는 과정에서 측정방법의 정확성에 대한 세밀한 연구에 근거한다.

분석가를 위한 측정을 용이하게 하기 위해 측정기 스스로 휨 정도(deflection)가 허용된 범위(allowable limit)안에 있는지를 체크한다. 위에서 제시한 휨 정도와 휨 각도에 대한 허용범위는 조심스럽게 사용되어야 한다.

3.8.2 오류 B의 원인 : 2-포인트와 3-포인트 방법에 대한 공식에 있어서의 에러

그림 3.7과 3.10에 따른 2-포인트와 3-포인트 방법의 휨 모멘트에 대한 연구는 모멘트가 하중을 받는 측정길이 전반에 걸쳐 균일하게 분포되지 않아 시편이 원형으로 휘어질 수 없다는 것을 보여준다. 휨 스티프니스의 유도과정에서 식의 단순화(simplification)는 변형곡선의 방정식에서 행해지고 있다. 휨 스티프니스를 계산하는 과정에서 발생하는 오류는 휨 정도(deflection)가 증가할수록 커진다.

2-포인트 방법에서 50mm의 길이를 갖는 시편이 7.5도의 휨 각도를 갖게 될 때 에러는 이미 6% 정도가 된다. 4-포인트 방법에서 이러한 에러의 원인은 시편이 휘는 동안 원형의 일부로 볼 수 있기 때문에 존재하지 않는다.

시편이 휨이 발생하는 동안 공식에 의해 알려진 대로 행동하지 않는다는 사실에 의한 오차를 5% 이내에서 유지하기 위해 휨 정도나 휨 각도는 아래에 주어진 식에 따라 제한되어야 한다.

$$(3.21) \text{ 2-포인트 방법 : } \delta = 0.132 \times l$$

$$(3.22) \quad \theta < 7.5$$

$$(3.23) \text{ 3-포인트 방법 : } \delta < 0.067 \times l$$

여기서 δ = 인정할 수 있는 최대의 휨 정도(deflection) (mm)

θ = 인정할 수 있는 최대의 휨 각도(bending angle) (도)

l = 시편의 길이(mm)

3.8.3 오류 C의 원인 : 전단력(shear force)이 2-포인트, 3-포인트 방법에서의 측정을 방해

2-포인트와 3-포인트 방법에 의한 휨시 측정결과를 방해하는 전단력이 발생하기 때문에 이 에러의 원인을 고려해야 한다. 전단력을 1% 이내에서 유지하기 위해 시편의 길이는 두께의 40배 이상이 되어야 한다.

3.8.4 오류 D의 원인 : 위험지역에서 클램핑에 의해 두께변화



휨 스티프니스를 수학적으로 나타낼 때 시편의 두께는 결정적인 요소이다. 더 큰 문제는 최고의 모우먼트는 정확하게 시편의 클램핑 지점에서 발행한다는 것이다. 2-포인트 방법에 의한 휨 스티프니스의 측정은 물질의 압축성(compresibility)에 의해 큰 영향을 받는다. 클램핑 압력이 항상 일정하기는 어렵다. 또한 시편이 항상 같은 압축성을 갖도록 해야한다.

에러의 크기를 정확히 말하기는 어렵지만 에러가 잘못된 해석을 일으킬 수 있다는 것은 확실하다. 상이한 지종의 종이를 휨 스티프니스에 따라 배열할 때 순서가 잘 못 정해질 수 있다.

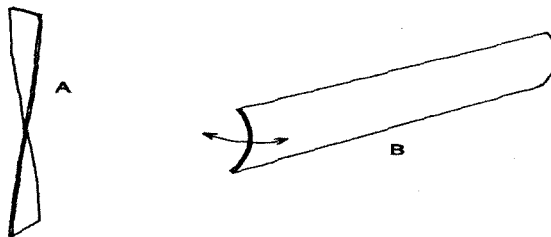
3.8.5 휨 스티프니스 측정이 어려운 비틀림(twist)이나 컬(curl) 상태인 종이 및 판지

모든 휨 스티프니스의 측정에 있어서 일반적인 문제는 시편이 순수한 휨 스티프니스를 측정할 수 있도록 편평해야 한다는 것이다. 종이와 판지의 제조과정에서 편평하게 생산되어야 한다. 종이와 판지는 다른 기수에 노출되더라도 편평한 상태를 유지해야 한다. 비틀림과 컬은 그 자체가 문제이고 시편이 편평하지 않다면 휨 스티프니스를 측정하는 것은 더욱 어렵게 된다. 종이는 자연 천연 제품이다. 그러나 공정 중에서 다듬어진다.

시편이 그림 3.13a에서 처럼 시편이 뒤틀어졌을 때는 스티프니스가 작게 측정되기 때문에 특히 어렵다. 그림 3.13b에서 처럼 컬의 축이 휨 축과 수직이 될 때도 마찬가지로 측정이 어려워진다. 심한 컬 상태인 시편의 휨 스티프니스를 측정할 때 컬이 진 형태가 관성 모멘트를 높게 되므로 휨 스티프니스가 실제보다 높게 나타나게 된다.

시편이 넓을수록 더욱 심해진다. 2-포인트 방식에서 시편의 폭은 일반적으로 38 - 50 mm이다.

따라서 결과는 컬에 의해 크게 영향을 받는다. 뒤틀어진(twisted) 시편도 또한 일정치 않은 측정결과를 가져온다.



([그림 3.13] 비틀림과 컬은 휨 스티프니스를 일정치 않게 만든다. 그림 3.13a에서처럼 비틀림은 휨 스티프니스가 낮게 측정되도록 한다. 그림 3.13b에서처럼 컬은 휨 스티프니스 값을 정상보다 높게 측정한다.)



몇몇의 표준 방법에서 컬이 진 시편은 먼저 시편의 가장자리 부분을 손으로 찢거나 당김으로써 평평하게 만들어야 한다고 규정되어 있다. 그러한 과정 후에 시편은 확실히 평평해진다. 하지만 물질의 탄성을 어떻게 측정해야 하는가 하는 이론에 역행하는 이러한 부정확한 처리 후 측정되어야 할 실제 스티프니스가 남아 있는나 하는 것이 의문점이다.

모양을 변경시키기 위해서 시편은 응력과 변형 사이에 비례관계가 존재하는 탄성지역의 밖에서 휘어야 한다는 것이다. 탄성영역 밖에서의 휨은 물질의 성질을 변경시킨다. 즉, 물질이 파괴된다.

3.8.6 물질의 실제 스티프니스가 중요

휨 스티프니스에 대한 연구가 계속되고 있는 연구개발부서나 품질관리를 위한 조건은 우리는 측정에서 오류를 일으킬 없이 진짜 물질의 스티프니스를 측정하는 것이다. 종지와 판지의 스티프니스에 영향을 주고자 펄프와 고해, 그리고 초지기에서의 작업조건을 변화시키면 컬도 또한 영향을 받는다.

충분한 주의를 기울이지 않으면 측정오류로 인해 여러 가지 지중을 스티프니스의 크기에 따라 등급을 정할 때 순서를 잘 못 정하기가 쉽다.

컬과 비틀림 화의 경향은 항상 존재한다. 평평한 종이는 단지 생각 속에서만 존재한다. 지필은 릴에 감겨있을 때 평평하게 보인다. 그러나 다른 기후조건, 예를 들면 23°C, 50 % RH의 조건에서 습윤 팽창성의 차이가 시편을 휘게 할 수 있다. 섬유 배향성의 주축이 MD 방향과 어긋나 있다면 시편을 뒤틀리게 할 수 있다.

컬 및 비틀림 경향이 매우 강한 종이 및 판지는 기술적으로 휨 스티프니스의 성질을 정의하기가 어렵다. 컬과 비틀림이 형태에 있어서의 심한 불균일성은 심각한 품질결점을 야기할 수 있으므로 세심한 주의를 요한다. 컬, 비틀림 측정기와 같은 현재의 측정기술은 초음파 방식에 의한 인장 스티프니스 오리엔테이션(TSO) 측정기와 함께 불균일 측정의 문제를 꿰뚫어 보기에 매우 좋은 장비이다.

3.8.7 공명 스티프니스 방법 - 컬에 대해 덜 민감

공명 스티프니스방법은 휨 응력(bending force)을 측정하는 것이 아니기 때문에 컬에 덜 민감하다. 따라서 curl의 영향을 최소화할 수 있도록 시편의 폭을 줄일 수 있다. 일반적인 새편의 폭은 25mm이지만 L사의 측정기는 15mm나 1/2 인치의 폭을 갖는 시편을 사용할 수 있도록 설계되었다. 특별한 경우에는 더 좁은 폭의 시편도 측정될 수 있다.

시편의 컬이 측정결과에 영향을 미친다고 느껴지면 여러 가지 폭의 시편으로 측정된 data와 비교하여 측정결과와 옳고 그름을 판단할 수 있다. 컬이 측정결과에 영향을 준다면 좁은 폭의 시편을 사용할 때 낮은 휨 스티프니스를 얻게 된다.



2-포인트 방법에서도 유사한 측정이 수행될 수 있다. 그러나 불행히도 방법에 있어서의 결함 때문에 기술적인 문제들이 발생한다. 측정된 힘이 시편의 줄어드는 폭의 크기에 따라 줄어든다는 사실은 좁은 폭의 시편을 충분한 정확성을 가지고 측정하는 것이 어려울 수 있다는 것을 의미한다.

제 4 장 측정 결과의 비교

4.1 측정결과와의 비교

우리는 여러 가지 측정방법을 통해 얻어진 동일한 성질에 대한 데이터의 비교시에 종종 문제점들에 부딪히게 된다. 이 문제점은 전형적인 것이며 여기에서 이 문제에 대한 나의 관점을 피력하고자 한다.

4.2 이론적인 계산 또는 상관관계

서로 다른 방법에 따라 측정된 일정한 특성에 대한 데이터의 비교를 위해 두가지 방법이 사용된다. 첫번째 방법은 이론적이고 물리적인 방법과 통계적 상관관계에 의한 방법이다.

이론적인 방법으로는 측정방법에 숨겨진 물리적인 상관관계에 대한 지식에 근거해서 서로 다른 방법에 의해 측정된 데이터가 어떻게 서로 연관되어 있는지를 계산할 수 있다.

이러한 상관관계를 설명하기 위해서 종이의 투기도의 경우를 생각해보자. 투기도는 여러가지 다른 방법들, 예를 들면 Gurley, Bendtsen, Sheffield, PPS 그리고 또 다른 것들 등으로 측정될 수 있다.

측정방법은 같은 원리에 근거한다. 종이의 한쪽 면을 통해 고압의 공기를 불어넣고 종이를 투과해 흐르는 공기를 시간당 유량 또는 단위 체적당 시간으로 측정한다. 종이를 투과하는 공기의 양은 종이에 가해지는 공기의 압력과 측정헤드에 닿는 표면의 크기에 따라 변한다.

이론적이고 물리적인 상관관계는 다음과 같이 나타내어질 수 있다.

$$(4.1) \quad S = \frac{\mu}{A \times \Delta P}$$

여기서 S = 투기도(m/(cm/Pa×s))

μ = 공기의 유량(cm/s)

A = 측정표면의 면적(cm²)

P = 압력(Pa)

투기도의 단위는 m/(Pa × S)가 된다. 점점 더 많은 표준협회들이 이 투기도의 정의를 채택하여 성공적으로 사용하고 있다. 어떤 방법에 의해 측정된 데이터든지 공기 투기도에 관한 것은 모두 m/(Pa



× s)로 표시되도록 변환시킬 수 있다. 측정값은 서로 비교 될 수 있다.

이러한 방법으로 재 계산된 측정결과는 서로 일치한다. 그러나 이것이 옳은 것은 아니다.

왜 옳은 것이 아닐까? 그 이유는 다른 방법들에 영향을 주는 많은 측정요소를 간과해 왔다는 사실이다. 스티프니스 측정에서처럼 공기 투기도의 측정을 위한 여러가지 방법들은 상이한 결점들에 시달리고 있다.

종이를 투과한 것으로 생각해왔던 공기량이 종이표면의 거칠음도(roughness)에 따라 어느 정도는 새어나가기 때문에 투기도의 비교는 틀리게 된다.

또한 상이한 측정방법에는 상이한 측정 공기압이 사용되기 때문에 측정결과는 종이를 투과하는 공기 흐름의 상태에 의해 영향을 받는다.

휨 스티프니스도 유사한 방법으로 고려되어야 한다. 예를 들면 2-포인트 방법에 따른 휨 저항(휨시 건디는 힘)를 이용하여 공명 스티프니스 방법에 의해 측정된 휨 스티프니스와 비교할 만한 정확도를 갖는 휨 스티프니스를 계산해 내는 것은 어렵다. 2-포인트 방법에 의해 얻어진 결과에 영향을 주는 여러가지 오류의 원인을 측정하려고 시도하는 것도 물론 가능하다. 그러나 나의 개인적인 경험은 그 결과가 매우 의심스럽다는 것이다.

이 계산에 의해 30 % 또는 그 이상의 오차가 생기는 것도 드문 일은 아니다. 따라서 실제로는 휨 저항을 측정하는 휨 스티프니스와 관련된 측정 방법은 휨 스티프니스를 측정하는것에는 적합하지 않다는 점을 분명히 해야 한다. 측정은 대개 진실을 찾는 것이다.

만약 우리가 종이와 판지의 스티프니스를 알기를 원한다면 우리는 다른 아무것도 아닌 스티프니스를 측정해야 한다.

4.3 통계적인 상호관계에 의한 방법

상관관계 방법(correlation method)은 상이한 방법에 따라 측정된 결과들이 수학적으로 서로 관계가 있을 때 사용될 수 있다. 예를 들면 두개의 측정된 변수 사이에 어떤 수학적인 관계가 있다면 그것 들은 서로 관련되어 있다가 할 수 있다.

두개의 변수 사이에 상관성을 통계적으로 분석하는 많은 방법들이 있다. 가장 일반적인 방법은 회귀 분석(regression analysis)이며 최소 제곱법(least square method)라고도 불린다. 이 방법에서 두개의 변수 사이의 관계성 결정계수 r^2 은 0과 1 사이의 값을 갖게 된다. 결정계수 $r^2 = 0$ 이라는 것은 통계적인 상관성이 없다는 것을 의미하고 $r^2 = +1$ 이라는 것은 완벽한 통계적인 상관관계가 존재한다는 것을 그리고 결정계수 $r^2 = -1$ 이라는 것은 완벽한 음의 통계적 상관성을 갖는다는 것을 의미한다.

이 방법은 매우 유용하지만 물론 매우 분별있게 사용되어야 한다. 이 관계성은 통계적인 것이며 개개의 값은 상당히 벗어날 수도 있다. 통계적인 관계는 상호관계가 주어진 조건하에서 실험적으로 얻어



진 특정물질에 대해서만 유효하다는 것을 기억해야 한다.

예를 들면 휨 길이(bending length)와 휨 각도(bending angle)의 경우이다. 나의 개인적인 관점은 측정하고자 의도한 물성을 명확한 물리적 방법으로 측정할 수 있도록 보장하는 방법이 사용되어야 한다는 것이다. 휨 스티프니스에 관심이 있는 사람이 있다면 다른 어느것도 아닌 휨 스티프니스가 측정되어야 한다.

4.4 잘못된 상호관계에 대한 경고

불행히도 여러가지 측정결과들을 비교할 때 맞지 않는 상호관계들이 상당히 많이 발생하고 있고 여기에 주의를 기울였으면 한다. 휨 저항과 공명 스티프니스들과 같은 두가지 측정방법에 의해 얻어진 데이터가 다른 평량을 가진 여러가지 지종들에 대해서 비교된다면(평량에 의해 나누어진 지수 값을 사용하지 않음) 우리는 원래의 두가지 변수와 명백한 상관관계를 가질 수 있는 평량이라는 세번째 변수를 도입할 수 있다.

그러한 비교의 결과로써 I사에 따른 2-포인트 휨 저항과 공명 스티프니스가 완벽한 상호관계 즉, $r^2 = 1$ 을 갖는 것으로 잘 못 진술될 수 있다.

무엇이 원인이고 무엇이 영향인지를 잊어버린다면 이러한 일이 발생할 수 있다. 종이와 판지의 강도는 평량에 크게 영향을 받는다는 것을 우리 모두는 알고 있다. 평량과 다른 여러가지의 강도적 성질과의 관계는 동일하다.

이러한 치명적인 실수를 범했을 때 실제로 발생하는 것은 평량이 우세한 변수이고 연구되고 있는 결정계수(covariation)를 알아내기 어렵게 한다는 것이다.

다른 말로하면 평량을 측정하고 그것을 통해 휨 스티프니스를 예측하는 것과 마찬가지다.

휨 저항처럼 휨 스티프니스와 관련된 방법과 실제 휨 스티프니스 사이에는 강한 통계적 상관관계가 있을 것으로 예상된다. 그러나 결정계수 r^2 이 1이 된다면 우리는 의심을 하게 된다. 비교가 지수 값(평량에 의해 나뉜 값)을 통해 이루어지거나 같은 평량을 가진 종이에 대해서만 이루어진다면 완전히 다른 상관관계가 발행할 것이다. 통계적인 방법에서 잘못된 것은 없다. 그러나 올바르게 적용되어야 한다.