

# 종이 휨강성 자동 측정방식의 개발과 그 이용 (1)

- 이론적 배경 -

서영범<sup>†</sup> · 정태영<sup>\*1</sup>

(2005년 11월 24일 접수: 2006년 2월 20일 채택)

## Development of On-Line Bending Stiffness Tester (1)

- Theoretical Background -

Yung Bum Seo<sup>†</sup> and Tae Young Jung<sup>\*1</sup>

(Received on November 24, 2005: Accepted on February 20, 2006)

### ABSTRACT

A simple method of on-line stiffness measurement using the wrinkling behavior of paper web between rollers was developed. The theory and calculating equation were presented, and the theoretical maximum error associated with the equation was also presented. We called the stiffness measured by Taber tester as 'Taber stiffness', and by wrinkling behavior as 'wrinkle stiffness', respectively, for comparison. By using this method, on-line complete control of paper stiffness will be possible in near future. Special care about shear wrinkle and paper dimensional effects were addressed.

*Keywords* : on-line, measurement, bending stiffness, wrinkle stiffness, tension buckling

### 1. 서론

최신 제지공정에서는 종이가 폭 5 - 8 m, 생산속도는 분당 약 1200 - 1500 m 이상의 속도로 생산되고 있다. 종이 평량을 100 g/m<sup>2</sup> 라고 가정할 때, 분당 1.5톤, 시간당 90톤의 종이가 생산될 수 있다.

즉 현대의 초지기에서는 생산되는 종이의 품질규격이 맞지 않을 때, 단 시간 내에 많은 손해를 볼 수 있음을 뜻한다. 따라서 제지공장에서 종이의 품질특성을 측정하는 측정방식은 순간적으로 이루어져야하며, 이러한 품질특성을 근거로 초지기의 생산조절 인자들을 빠르게 조정할 수 있어야 한다.

• 충남대학교 농업생명과학대학 임산공학과 (Dept. of Forest Products, College of Life Science and Agriculture, Chungnam national University, Daejeon, Republic of Korea)

\*1 신호제지(주)중앙연구소 (Sinho Paper Mfg. Co. Ltd., Daedeak-Gu, Daejeon, Republic of Korea)

† 주저자(Corresponding author) : E-mail: ybseo@cnu.ac.kr

가장 빠른 품질특성 측정기구들은 보통 빛의 사용을 근거로 하고 있다. 기계적인 방식들은 전기나 빛에 비해 움직임이 느릴 수밖에 없다. 또 종이의 품질특성측정이 초지기상에서 이루어져야만 한다.

만일 초지기상이 아니고 따로 최종 생산된 종이에서 샘플을 채취하여 일정한 장소로 옮겨져 종이의 품질특성을 측정한다면, 최소 30분후에야 생산된 종이 소비자가 요구사항과 일치하지 않는다는 것을 깨닫고 초지기를 조정할 수 있게 된다. 이러한 경우 예를 든 초지기에서는 약 45톤 이상의 생산된 종이 규격미달로 폐기되어야만 하는 것이다. 제지 공정상에서 즉각적이고 정확한 품질특성을 측정하는 것은 생산되는 종이의 품질을 빠르게 제어함으로써 생산비 절감, 생산량의 증대, 생산비 절감에 크게 기여할 수 있는 근거가 된다.

종이의 품질측정 중 휨강성(bending stiffness)은 가장 중요한 위치를 차지하고 있음에도 불구하고, 최근까지 on-line 방식으로 측정이 불가능하였다. 2000년대에 들어서 on-line 측정방식이 개발되었으나 그 원리는 본 연구의 접근 방식과 현저한 차이를 보이고 있다. 즉 초음파영역 파장을 가진 펄스 레이저를 이용하여 종이에 충격을 주고 충격이 전달되는 속도를 측정하는 방식으로서 flexural rigidity와 shear rigidity를 측정하는 방법이다.<sup>1,2)</sup> 현재는 제지공장의 생산속도에서도 측정할 수 있는 장치로 개발되고 있다. 단 고가의 장치들이 많이 사용되고 있으므로 고가의 품목이 될 것으로 판단된다. 본 연구는 기존의 초지기에서 측정되고 있는 롤 사이의 인장력과 롤 사이의 종이의 wrinkle을 측정하여 간단히 종이의 휨강성을 구하고자 하였다.

## 2. Tension buckling을 이용한 휨강성 측정원리

### 2.1 이론적 배경

판상형태의 물질들이 한쪽방향으로 인장력을 받는 경우, 힘의 수직방향으로 수축이 일어나는 성질, 즉 포아손비에 의한 수축이 롤 등에 의해 제한을 받을 때 판상형태의 물질에 힘이 가해지는 방향에

평행하도록 tension buckling이 일어나게 된다.<sup>3)</sup> 본 연구에서는 이러한 현상을 이용하여 종이의 stiffness를 초지기상에서 on-line으로 빠르게 측정하는 방식을 개발하고자 하였다. 이렇게 측정된 stiffness는 제지공정 조절인자로 변환되어서 목표 stiffness를 획득하면서 다른 품질특성도 유지하도록 공정인자를 조절하는데 사용할 수 있다. 초지기상에서 우리가 흔히 접하는 인장력에 의해 나타나는 종이의 wrinkle 현상은 바로 이러한 tension buckling에 기인하는데, 화학분석을 통해 그 형태를 측정하고, 일부 다른 공정인자와 협력하여 종이의 stiffness를 측정할 수 있도록 하고자 하였다.

롤 상에서 종이 web의 움직임에 대해서는 미국 오클라호마 대학에서 많은 연구가 이루어져 있다.<sup>3-8)</sup> 이들의 연구는 롤 상에서 web의 tension을 조절하며, web의 tension control이 감겨진 종이 롤의 특성에 어떠한 영향을 미치는지에 관해 주로 연구하였다. 어떻게 감겨진 롤이 실제 종이 가공업자들의 롤 handling에 더 유용한지에 관해 많은 연구가 있었다. 또 중요한 연구목록 중의 하나는 롤의 misalignment가 어떻게 종이 web의 움직임에 영향을 주는지 자세히 연구하였으며, Tram error, lateral motion, 롤 직경변화, 기존 wrinkle들의 재발생의 원인에 의해 발생된다고 보고하였다. 따라서 web의 shear buckling에 많은 연구가 이루어졌다. 하지만 이들은 tension buckling에 관해 다루지 않고 있다. 즉 그들의 많은 출판물들은 tension buckling에 관해 크게 다루지 않으며, 더 나아가 이러한 현상을 이용하여 종이의 stiffness를 측정하리라고는 예상하지 못하고 있었다.

Seo 등은 1992년에 종이의 tension buckling에 관하여 논문발표를 하였으며,<sup>3)</sup> 이 논문을 중심으로 종이의 탄성적 특성과 tension buckling의 상호관계를 이용하여 stiffness의 측정이 가능한 것으로 판단되었다. 제지공정상에서 롤과 롤 사이를 지나가는 종이는 롤이 제공하는 기계방향(MD)의 인장력을 받게 되며, 또한 인장에 따른 종이의 포아손비에 의해 기계 수직방향(CD)으로 수축이 생기게 된다. 종이가 포아손비에 의해 기계수직방향으로 수축되는 현상은 롤과 종이사이의 마찰력에 의해 제한되는 것이 일반적이다. 하지만 롤과 롤 사이의 free

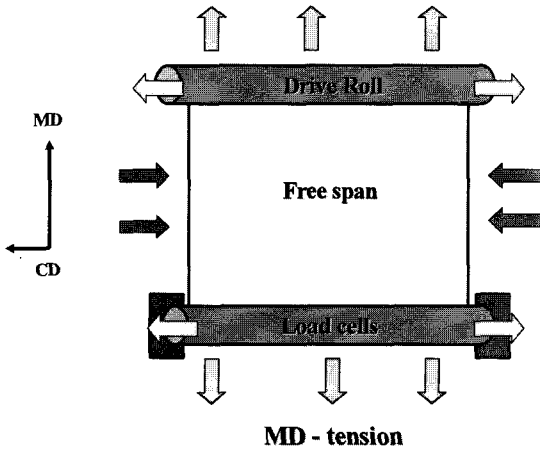


Fig. 1. Web tension buckling.

span에 존재하는 종이는 마찰력을 받지 않으므로 포아손 비에 의해 수축이 된다. 즉 롤 상에 있는 종이는 포아손 비에 의한 CD 방향의 수축이 마찰력에 의해 제한되지만, 롤과 롤 사이 free span에 존재하는 종이는 수축이 자유로우므로 material continuity에 문제점이 발생하며, 이때 롤 가까이 CD 방향의 압축응력이 발생하게 된다고 연구하였다(tension buckling behavior of paper<sup>3)</sup>). 이러한 현상을 Fig. 1에서 보이고 있다.

이러한 tension buckling 현상은 다음과 같은 boundary condition으로 설명할 수 있다 (Fig. 2). Fig. 2는 두 롤 사이에 있는 전체 종이의 반만을 그린 것이다. 그 이유는 다른 반대쪽은 본 그림과 정확히 대칭을 이루기 때문이다. Fig. 2에서 위아래에 그려져 있는 오른쪽으로 점점 커지는 응력은 shear stress로서 종이의 가운데는 제로이고 바깥쪽으로 갈수록 점점 커지는 응력이다. 이 shear 응력은 종이가 MD 방향 인장력에 의해 CD방향 포아손 비로 수축하는 현상을 롤의 마찰력이 저항하는 현상을 나타내고 있다. 만일 롤과 종이사이의 마찰력이 제로이면 wrinkle은 생기지 않는다. 하지만 현실적으로는 절대 그러한 현상이 생기지 않으며, 상당한 shear stress 가 나타나게 되며, 이러한 현상에 의해 종이의 tension buckling이 나타나게 된다.

종이는 특별히 orthotropic material symmetry를 나타내는 물질이다. 이에 대한 equilibrium

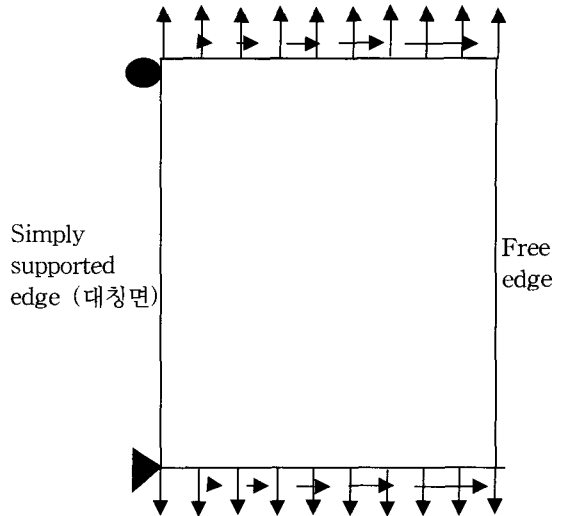


Fig. 2. Dynamic boundary condition of paper between rolls.

equation들과 constitutive equation들이 마련되어야하며, 그들은 다음과 같다.

Governing equation :

$$D_{11}dw_{,xxxx} + 2(D_{12} + 2D_{66})dw_{,xxyy} + D_{22}dw_{,yyyy} + N_x dw_{,xx} = 0$$

여기서

w : out of plane deformation

x : MD 방향

y : CD 방향

$D_{11}, D_{12}, D_{66}, D_{22}$  : orthotropic symmetry의 bending stiffness

$N_x$  : load in MD direction

특히  $D_{22}$ 의 존재는 매우 중요한데 여기서 아래 첨자 22는 CD 방향을 의미하며 이 기호자체는 CD 방향의 flexural rigidity에 해당한다. 즉 우리가 구하고자 하는 CD 방향의 flexural rigidity를 나타내며 수식적으로는,

$$D_{22} = E_{CD}h^3/12(1 - \nu_{MDCD}\nu_{CDMD})$$

로 나타낼 수 있다. 여기서  $\nu_{MDCD}, \nu_{CDMD}$ 는

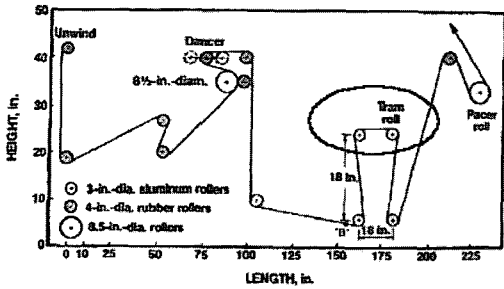


Fig. 3. Web wrinkle measuring instrument.

in-plane 포아손 비가 된다<sup>9-12)</sup>.  $h$ 는 종이의 두께이다.  $E_{CD}$ 는 종이의 CD 방향의 탄성계수를 의미한다. 즉 탄성계수가 높을수록, 또 두께가 두꺼울수록 CD 방향의 stiffness가 높아짐을 의미한다.

이러한 롤 간의 wrinkle 문제는 Gehlbach 등이 분석한 전단 wrinkle 분석방식의 실험방식을 이용하여 연구하는 것이 바람직하다고 판단된다.<sup>4)</sup> Fig. 3는 운전 중인 종이 web의 인장력을 조절할 수 있는 장치이다. Fig. 3에서 tram이라는 것은 롤과 롤이 빠져버린 정도를 나타내고 있다. 따라서 우리가 연구하는 목적과 일치하지는 않지만 이들의 연구방식은 우리들에게 큰 도움이 되고 있다. 본 실험에 사용되는 조절인자로서는 롤과 롤 사이 종이의 길이와 폭, 또 그들의 비, 종이의 두께, 종이의 물리적 특성, winding 속도, 인장력의 크기, wrinkle의 수와 크기, wrinkle 발생 시의 인장력 등을 들 수 있다. 이들 조절인자들의 변화에 따른 wrinkle의

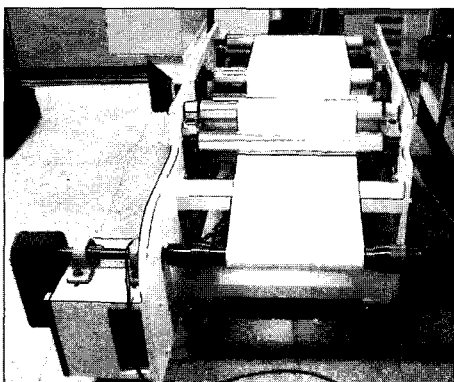


Fig. 4. Web tension measuring device.

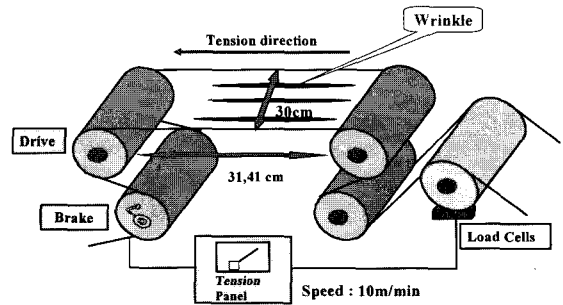


Figure 5. Wrinkle stiffness measurement.

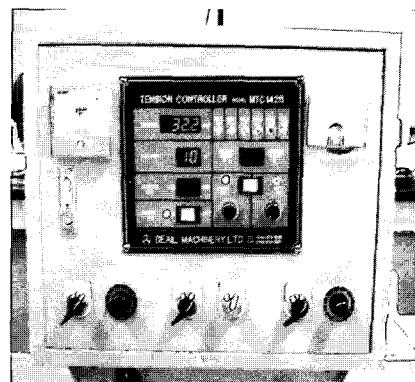
변화를 측정하고, 이 결과를 다시 종이의 stiffness로 전환시키는 이론적, 실험적인 관계식을 만들게 된다.

휨강성은 bending stiffness라고 불리우며 flexural rigidity와는 다음의 관계가 있다.

$$D_{22} = E_{CD}h^3/12(1-\nu_{MDCD}\nu_{CDMD}) = BS(\text{Bending Stiffness})/(1-\nu_{MDCD}\nu_{CDMD})$$

Tension buckling 현상을 통해 생기는 wrinkle의 형태를 측정하여 계산된 값을 wrinkle stiffness라고 부르고, Taber tester에 의해 측정된 값을 Taber stiffness라고 부르도록 하자. 결과적으로 wrinkle stiffness와 Taber stiffness는 같은 값을 가져야 될 것이다.

먼저 Fig. 4는 자체개발한 휨강성 측정 장치를



보여주고 있다. 이 장치를 통해 각 tension 하중에 따라 생기는 wrinkle의 형태를 이미지 분석을 통해 측정하게 된다. Fig. 5는 Fig. 4의 장치가 움직이는 모습을 도식적으로 나타낸 그림이다.

이 때 생기는 wrinkle의 수와 다른 인자들을 식 1에 적용하여 wrinkle stiffness를 계산하였다. 식 1은 Ref. 4에 제공된 식을 이용하여 지폭에 생기는 wrinkle의 half wave 개수를 n이라고 할때, wrinkle n-1과 n의 교차지점의 stress와 wrinkle n과 n+1의 교차지점의 stress를 평균하여 wrinkle n의 stress 값으로 구한 공식이다.

$$D = Fa^2 / b\pi^2\{n^2(n^2+1)(a/b)^4-1\} \text{ ---- (1)}$$

D : stiffness calculation (mN·m)

- a : web span length (cm)
- b : web span width (cm)
- n : number of wrinkle (frequency)
- F : tension force (kgf)

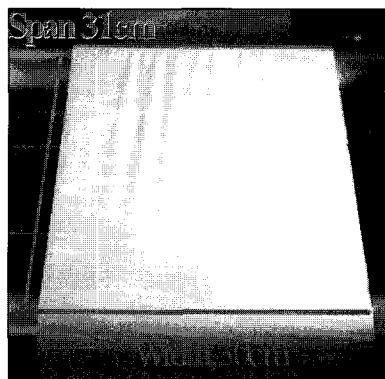
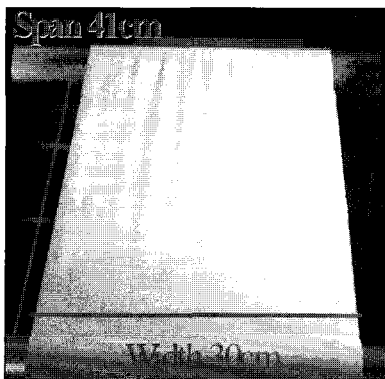
### 2.2 휨강성 측정의 이론적 오차 보정

식 1은 두 stress의 평균값이므로 평균값 좌우로 최대 오차를 가질 수밖에 없다. 이 최대 오차는 half wave 값인 n과 a/b 즉 (web span length)/(web span width)가 각각 변화할 때 그 오차 값을 계산할 수 있다. 최대 오차 값이 5% 이하에 도달하면 이때 측정된 값을 사용하여 wrinkle stiffness를 구할 수 있다. 계산된 최대 오차 값들을 Table 1에서 보이고 있다.

**Table 1. Maximum theoretical error involved with the use of equation 1 to measure wrinkle stiffness (equation 1 :  $D = Fa^2 / b\pi^2\{n^2(n^2+1)(a/b)^4-1\}$ )**

a/b	n values									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0.02	0.000	-0.003	-0.010	-0.035	100.000	0.064	0.039	0.029	0.025	0.021
0.04	-0.005	-0.069	0.128	0.059	0.043	0.034	0.029	0.025	0.022	0.020
0.06	-0.030	0.192	0.074	0.052	0.040	0.034	0.029	0.025	0.022	0.020
0.06	-0.140	0.118	0.069	0.050	0.040	0.033	0.029	0.025	0.022	0.020
0.10	20.000	0.106	0.067	0.050	0.040	0.033	0.029	0.025	0.022	0.020
0.20	0.211	0.100	0.067	0.050	0.040	0.033	0.029	0.025	0.022	0.020
0.30	0.200	0.100	0.067	0.050	0.040	0.033	0.029	0.025	0.022	0.020
0.40	0.199	0.100	0.067	0.050	0.040	0.033	0.029	0.025	0.022	0.020
0.50	0.198	0.100	0.067	0.050	0.040	0.033	0.029	0.025	0.022	0.020

a/b = length/width



**Fig. 6. Wrinkle number analysis.**

Table 1에서 보면 a/b가 0.1 이상이고, half wave 수가 적어도 40개 이상일 때 최대오차가 5% 이하임을 보이고 있다. 실제 제지공장에서 백상지의 지폭이 4-5 m 이상인 것은 쉽게 볼 수 있다. 백상지의 지폭이 최소 4 m라고 하고, 롤간 거리를 40 cm 라고하면, wrinkle stiffness 측정시 최대 오차가 5% 이하이기 위해서는 half wave 수가 40 개 이상이어야 하고, wrinkle node의 수는 20개 이상이어야 하며, wrinkle node간의 거리는 20cm 이하가 된다. wrinkle node 간의 거리는 one full wave 로서 half wave 수의 반이 된다. 우리의 경험은 wrinkle node 간의 거리가 백상지의 경우 20cm 이상인 것보다 10 cm 이하인 경우를 더 자주 볼 수 있다. 환언하면 실제 공장에서는 wrinkle stiffness 를 측정시 최대오차가 5% 이하인 경우를 쉽게 볼 수 있게 될 것이다.

Fig. 6은 실제 측정기에서 발생한 wrinkle의 모습을 보이고 있다.

### 3. 결론 및 요약

본 연구는 종이의 stiffness를 초지기상에서 on-line으로 측정하기 위해 개발되었으며, 롤간의 인장력이 주어질 때 형성되는 tension buckling을 이용하여 종이의 stiffness를 측정하게 된다. 이러한 측정을 위하여 이론적인 배경 및 계산식을 제공하였으며, simulation을 통해 발생할 수 있는 최대 오차범위를 설정하였다. 따라서 본 연구 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

- Tension buckling을 이용한 wrinkle stiffness 를 측정할 수 있음을 이론적으로 보였다.
- 이러한 wrinkle stiffness 측정은 보통 wrinkle 이 20개 이상 생기고 web span length/ web span width가 0.1 이상일 때 최대오차 5% 이하로 생길 수 있었다.
- 본 연구 결과는 wrinkle이 롤에 수직 방향으로 형성되는 경우에만 적용될 수 있다. 따라서 본 연구 결과의 이용을 위해서는 shear wrinkle이 형성되

지 않는 위치에서 사용하거나 형성 되지 않도록 롤을 조정하며 사용해야 할 것이다.

### 인용문헌

1. Ridgway, P.L., Russo, R.E., Lafond, E.F., Habeger, C.C., and Jackson, T., Laser Ultrasonic System for On-line Measurement of Elastic Properties of Paper, JPPS, Vol. 29(9), 289-293, Sept., (2003).
2. Cornwell, M. and Berthelot, Y.H., Noncontact Determination of the Bending Stiffness of Paper Using Laser Ultrasonics and Wavelet Analysis: Effect of Moisture and Temperature, Proc. Inst. Electrical Electronics Engi. Ultrasonics Symp., Vol. 1, 747-750 (2001).
3. Seo, Y.B., Oliveira, C., and Mark, R.E., Tension Buckling Behavior of Paper, JPPS, Vol. 18 (2), 55-59, (1992).
4. Gehlbach, L.S., Kedl, D.M., Good, J.K., Predicting shear wrinkles in web spans, TAPPI, August, (1989).
5. Shin, K.H., Tension Control, Tappi press, Atlanta, GA, (2000).
6. Rosium, D.R., Mechanics of Rollers, Tappi press, Atlanta, GA, (1996).
7. Rosium, D.R., Mechanics of wrinkling, Tappi J., Vol. 79(10), (1996).
8. Friedrich, C.R., Good, J.K., Stability sensitivity of web wrinkles on rollers, TAPPI, Feb., (1989).
9. Jones, R.M., Mechanics of Composite Materials, Scripta Book Co., Washington D.C., (1975).
10. Castagnede, B., Mark, R.E., Seo, Y.B., New Concepts and Experimental Implications in the Description of the 3-D Elasticity of Paper, Part I: General Consideration, JPPS, Vol. 15 (5), 178-182, (1989).
11. Castagnede, B., Mark, R.E., Seo, Y.B., New Concepts and Experimental Implications in the Description of the 3-D Elasticity of Paper, Part II: Experimental Results, JPPS, Vol. 15 (6), 201-205, (1989).
12. Seo, Y.B., Castagnede, B., Mark, R.E., An Optimization approach for the determination of in-plane elastic constants of paper, Tappi, Vol. 75 (11), 209-214, (1992).