

종이 휨강성 자동 측정방식의 개발과 그 이용 - (2) 실험실 측정
서영범¹⁾, 정석면²⁾, 정태영³⁾

Development of on-line bending stiffness tester - (2) Lab
experiment

Yung Bum Seo, Seok Myun Jung, Tae Young Jung

ABSTRACT

A simple method of on-line stiffness measurement using the wrinkling behavior of paper web between rollers was presented. The theory and calculating equation were presented, and lab experiment was executed. We called the stiffness measured by Taber tester as 'Taber stiffness', and by tension wrinkling measurement as 'wrinkle stiffness', respectively, for comparison. Lab experimental results showed Taber and wrinkle stiffness are almost equivalent. We expect this method will work properly for the on-line measurement of paper stiffness in near future.

1. 서 론

최신 제지공정에서는 종이가 폭 8m - 10m, 생산속도는 분당 약 1200 - 1500m 이상의 속도로 생산되고 있다. 종이 평량을 100g/m^2 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. 가장 빠른 품질특성 측정기구들은 보통 빛의 사용을 근거로 하고 있다. 기계적인 방식들은 전기나

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

2) (주)이엔페이퍼중앙연구소 (En paper Co. LTD, Daedeak-Gu, Daejeon, Republic of Korea)

3) (주)이엔페이퍼중앙연구소 (En paper Co. LTD, Daedeak-Gu, Daejeon, Republic of Korea)

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) 는 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 rigidity 와 shear rigidity 를 측정하는 방법이다 (1,2). 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. 재료 및 실험 방법

2.1 공시재료

실험에 사용된 종이는 현재 제지공장에서 생산중인 신문용지 (국내P사), 감압중지 (국내 H사), 무진원지 (국내 H사), 티켓용 감열지 (국내 H사), 박리원지 (국내 H사), BP (국내 S사)를 roll type 으로 제공받아 사용하였다.

2.2 공시재료의 물리적 성질

제공받은 종이는 TAPPI standard T402 om-88 에 따라 $23\pm 1^{\circ}\text{C}$, 상대습도 $50\pm 2\%$ 로 조절된 항온 항습실에서 24시간 이상 조습처리를 실시하였다. 먼저 종이의 휨강성 측정에 필요한 인자(factors)들을 산출하기 위해 동일조건(상대습도 $50\pm 2\%$, $23\pm 1^{\circ}\text{C}$)에서 처리된 각 종이들의 물리적 성질을 측정하였다. 그 측정항목으로는 평량(g/m^2), 두께(mm), Taber bending stiffness (TAPPI standard T 566 om-97, mNm)와 Young's modulus 였다. Young's modulus 는 정확한 측정을 위해 load & extension curve 를 통해 직접 구하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 물리적 특성

종이의 휨강성에 필요한 인자들을 알아보기 위해 물리적 성질을 측정해 본 결과 평량에 있어서는 신문용지, 무지원지, 감압중지가 46~67 g/m²로 저평량지로 구분하였고, 박리원지, 감열지, BP 는 84~117 g/m²로 고평량지로 구분하여 Taber stiffness 와 wrinkle stiffness 를 비교하였다. 또한 여기서 측정된 종이의 두께 측정값을 wrinkle stiffness 값을 계산하는 중요한 인자로 사용하였다 (Table 1).

Taber stiffness 측정값의 신뢰성을 알아보기 위해 young's modulus 를 측정하였는데 MD/CD에서 각 종이들이 서로 비례함을 알 수 있었고, 각 종이들의 기계수직방향(cross-machine direction)의 Taber stiffness값과 wrinkle stiffness값을 비교하였다 (Table 2).

3.2 Taber stiffness 와 wrinkle stiffness의 상관관계

* 폭 30cm 와 Roll span-41cm 에서의 상관관계

Wrinkle수는 자체개발한 휨강성 측정 장치를 통해 평량과 물성에 따라 적용한 tension을 각각 달리 하여 적용하였을 때 나타나는 wrinkle 의 수를 측정하였다. 종이가 물을 통과할 때 tram이 발생하면 기계방향과 일정한 각도로 생기는 Shear wrinkle이 실시간에 따라 이동하는 반면, tension wrinkle은 한번 형성되면, 그 형태가 그대로 유지 되는 것을 관찰할 수 있었다. 물 간의 거리를 다르게 했을 경우 41cm span 에서는 Fig. 7 에서와 같이 실험한 모든 종이에서 wrinkle 수가 약 8-9에서 wrinkle stiffness 와 Taber stiffness 가 일치한 경향을 보였다. 또한 평량에 따라 구분했을 때 Fig. 8 과 Fig. 9 와 같이 저평량의 경우 wrinkle 수가 약 7.5-9.5에서 일치했으며, 고평량인 경우 wrinkle 수가 약 7-8.5에서 wrinkle stiffness 와 Taber stiffness 가 일치한 경향을 보였다. 각 종이의 상관관계를 살펴보면, Fig. 13~18과 같이 감압중지(8.5~10.5), 감열지(7.5~8), 신문용지(8.5~11), 박리원지(7~8.5), BP((7~8.5), 무진원지(8~10)의 wrinkle 수에 따른 wrinkle stiffness 와 taber stiffness 가 일치한 경향을 보였다. 이처럼 wrinkle 측정에 의한 stiffness 측정은 wrinkle 수가 적절할 때 taber stiffness 와 같은 값을 나타냈다. wrinkle 수가 너무 적으면 stiffness 계산식의 error가 급격히 증가하기 때문에 wrinkle stiffness 값이 매우 커졌다. wrinkle 수가 너무 많으면 in-elastic buckling 이 일어나 wrinkle stiffness 값이 작아 졌다.

Table 1. MD and CD physical properties of each paper

sample	basis weight (g/m ²)	thickness (10 ⁻² mm)	density (g/m ³)	breaking length (km)	tear index
BP-MD	84.04	10.94	0.77	8.50	5.86
BP-CD	84.04	10.94	0.77	2.82	7.43
감압중지-MD	52.58	6.50	0.81	7.16	5.76
감압중지-CD	52.58	6.50	0.81	3.27	5.52
감열지-MD	117.46	12.00	0.98	6.24	5.92
감열지-CD	117.46	12.00	0.98	4.87	5.27
무진원지-MD	67.42	9.00	0.75	5.83	9.27
무진원지-CD	67.42	9.00	0.75	4.97	8.10
박리원지-MD	96.52	11.13	0.87	7.42	9.84
박리원지-CD	96.52	11.13	0.87	4.27	9.30
신문용지-MD	46.86	6.00	0.78	40.30	8.00
신문용지-CD	46.86	6.00	0.78	10.63	4.69

* MD(machine direction), CD(cross machine direction)

Table 2. MD/CD ratio comparison of each paper

sample	Stiffness (mN)	MD/CD	Young's modulus (Mpa)	MD/CD
BP-MD	1.52	2.20	6017.85	2.24
BP-CD	0.69		2679.52	
감압중지-MD	0.27	1.69	5729.63	1.82
감압중지-CD	0.16		3149.65	
감열지-MD	1.52	1.36	4821.65	1.58
감열지-CD	1.12		3045.57	
무진원지-MD	0.60	2.22	4741.39	2.00
무진원지-CD	0.27		2379.69	
박리원지-MD	1.23	1.5	4687.87	1.73
박리원지-CD	0.82		2706.94	
신문용지-MD	0.23	2.09	2228.96	1.80
신문용지-CD	0.11		1235.06	

* MD(machine direction), CD(cross machine direction)

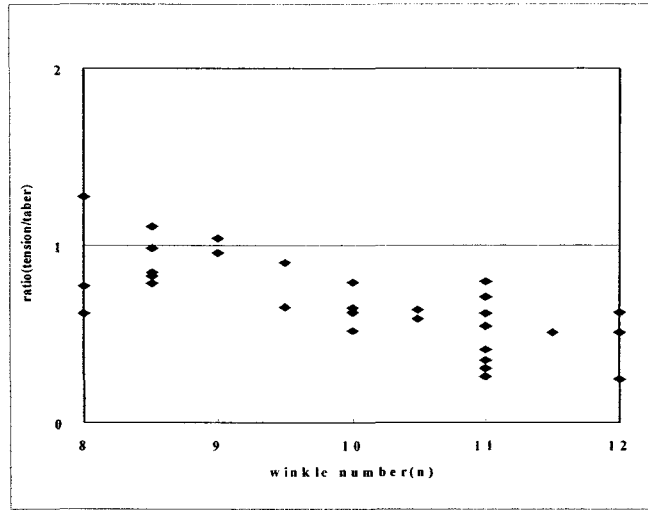


Figure 7. Interrelation of taber stiffness & wrinkle stiffness in 41cm span (total)

$$T/S = \text{Wrinkle stiffness} / \text{Taber stiffness}$$

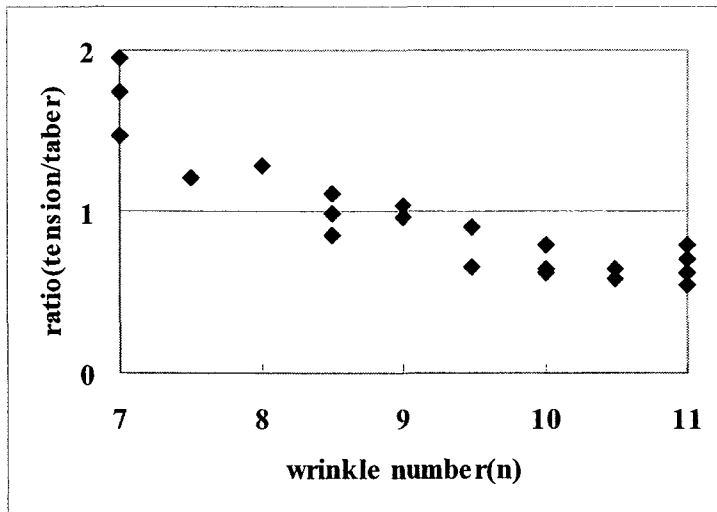


Figure 8. Interrelation of taber stiffness & wrinkle stiffness in 41cm span
(light weight paper, 46~67 g/m²)

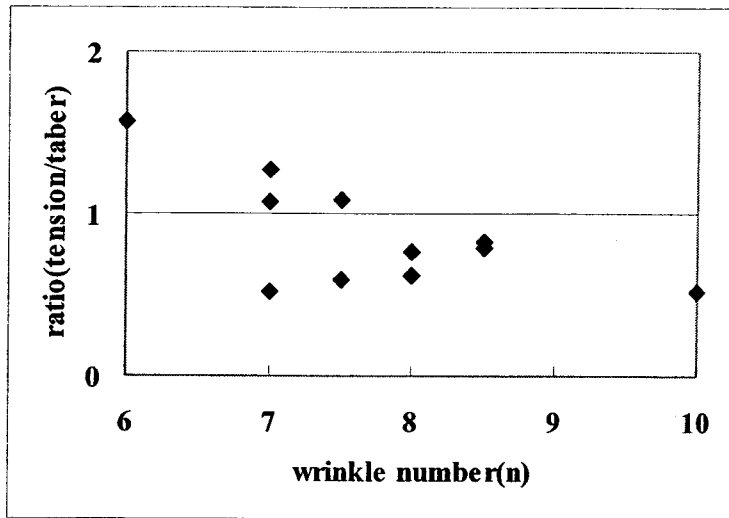


Figure 9. Interrelation of taber stiffness & wrinkle stiffness in 41cm span
(heavy weight paper, 84~117 g/m²)

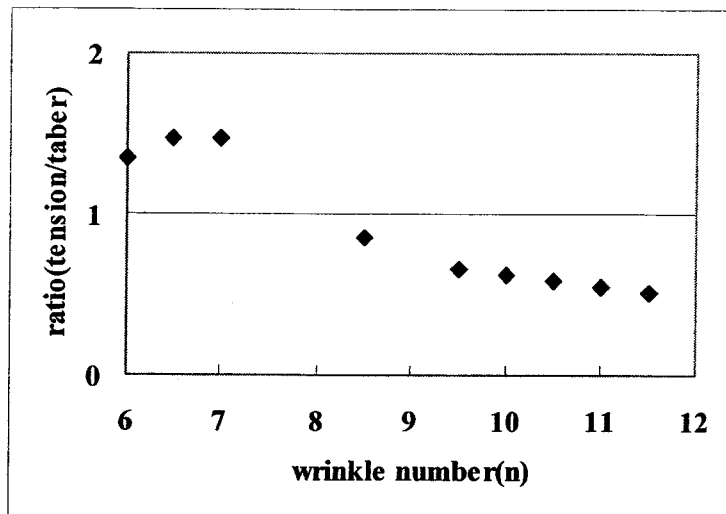


Figure 10. Interrelation of taber stiffness & wrinkle stiffness in 41cm span
(pressure-sensitive paper)

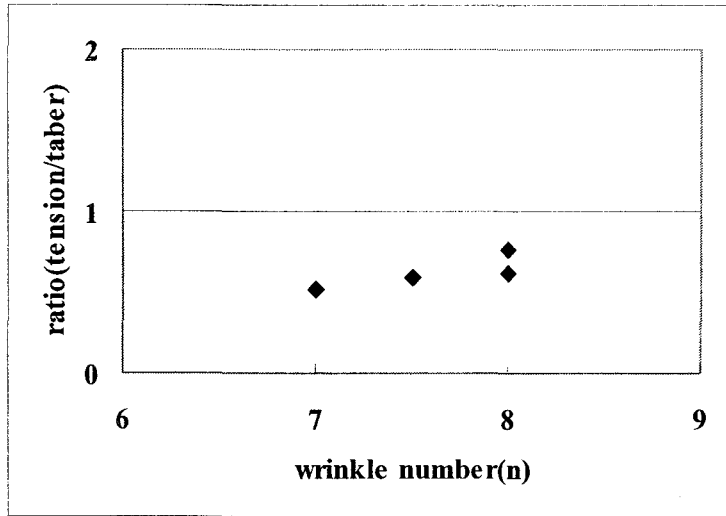


Figure 11. Interrelation of taber stiffness & wrinkle stiffness in 41cm span (thermo-sensitive paper)

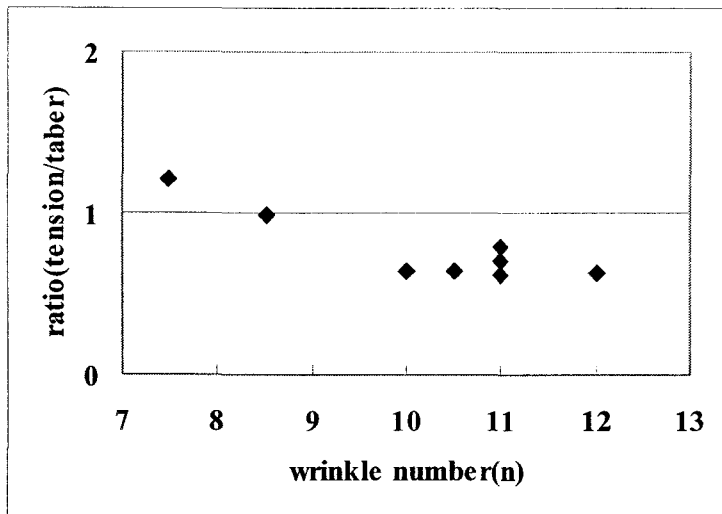


Figure 12. Interrelation of taber stiffness & wrinkle stiffness in 41cm span (newsprint)

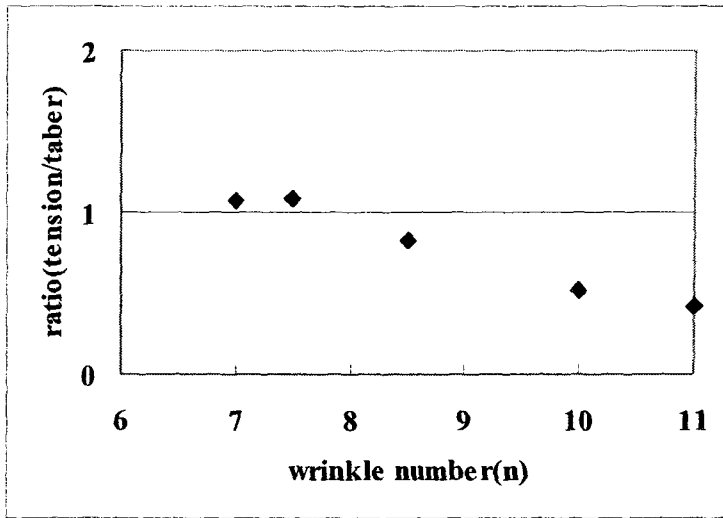


Figure 13. Interrelation of taber stiffness & wrinkle stiffness in 41cm span
(separate base paper)

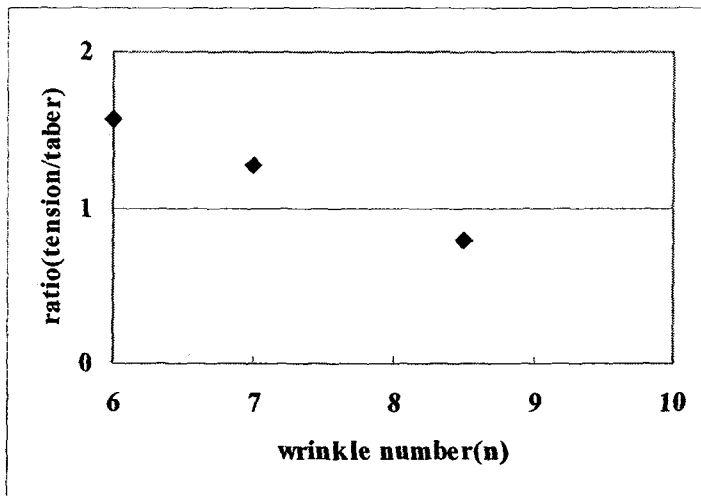


Figure 14. Interrelation of taber stiffness & wrinkle stiffness in 41cm span
(BP)

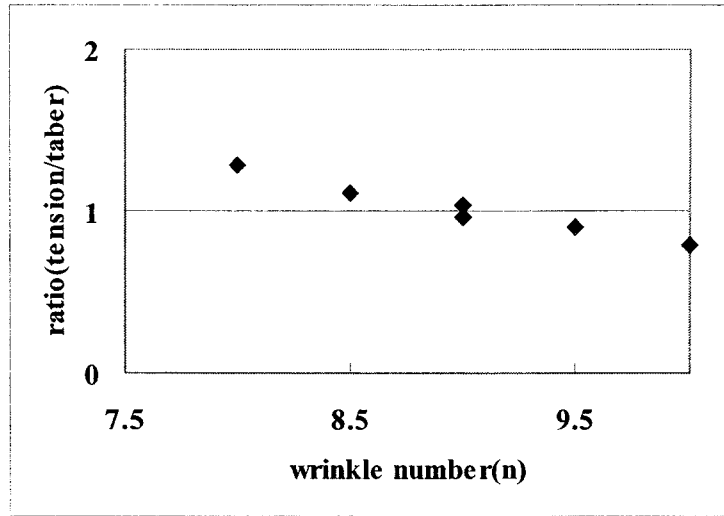


Figure 15. Interrelation of taber stiffness & wrinkle stiffness in 41cm span
(moojin base paper)

* 폭 30cm 와 Roll span-31cm에서의 상관관계분석

41cm span 에서와 같이 31cm span 에서도 wrinkle 측정에 의한 stiffness 측정은 wrinkle 수가 적절할 때 taber stiffness 와 같은 값을 나타냈다. 또한, 한번 형성된 tension wrinkle 은 그 형태가 변하지 않았다. 이것으로 고정된 wrinkle 의 수를 측정하여 휨강성을 계산할 수가 있었다.

먼저, 31cm span 에서는 Fig. 19와 같이 실험한 모든 종이에서 wrinkle 수가 약 8-11에서 wrinkle stiffness 와 taber stiffness 가 일치한 경향을 보였다. 또한 평량에 따라 구분했을 때 Fig. 20~21과 같이 저평량의 경우 wrinkle 수가 약 8.5-10에서 일치했으며, 고평량인 경우 wrinkle 수가 약 8-10.5에서 wrinkle stiffness 와 taber stiffness 가 일치한 경향을 보였다. 각 종이의 상관관계를 살펴보면, Fig. 22~27과 같이 감압중지(8~11), 감열지(8~10), 신문용지(8.5~10), 박리원지(8~10.5), BP((8~10), 무진원지(9.5~10.5)의 wrinkle수에 따른 wrinkle stiffness 와 taber stiffness 가 일치한 경향을 보였다. 하지만, wrinkle수가 너무 작으면 wrinkle stiffness값이 taber stiffness 값보다 매우 커졌고, wrinkle수가 너무 많으면 wrinkle stiffness값이 너무 작았다.

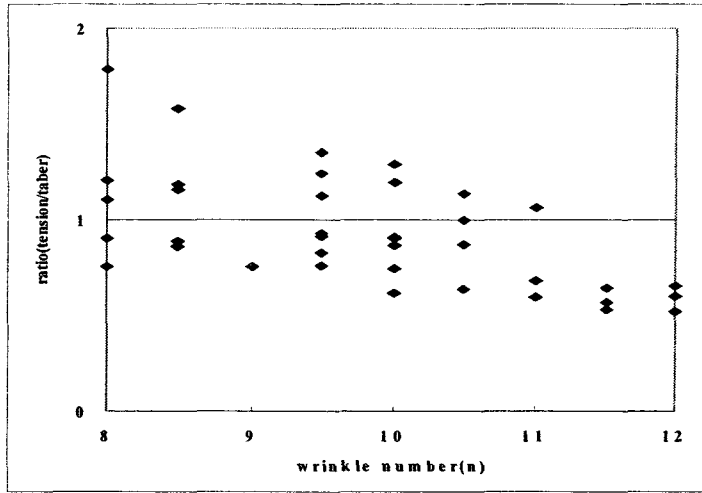


Figure 19. Interrelation of taber stiffness & wrinkle stiffness in 31cm span (total)
 $T/S = \text{Wrinkle stiffness} / \text{Taber stiffness}$

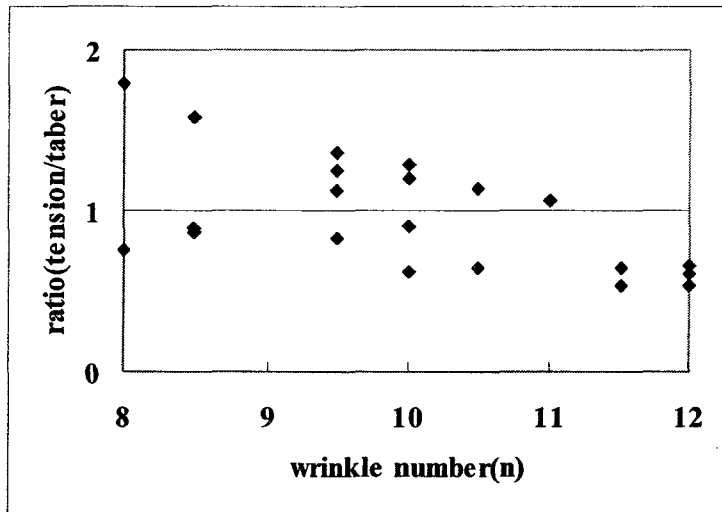


Figure 20. Interrelation of taber stiffness & wrinkle stiffness in 31cm span
 (light weight paper, 46~67 g/m²)

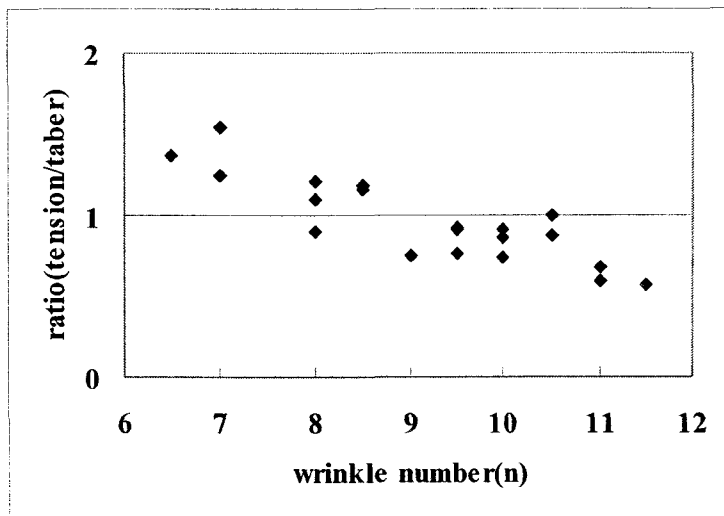


Figure 21. Interrelation of taber stiffness & wrinkle stiffness in 31cm span
(heavy weight paper, 84~117 g/m²)

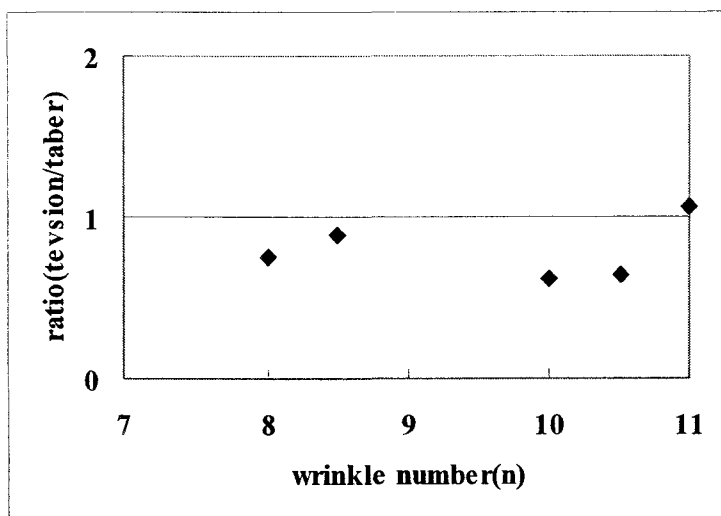


Figure 22. Interrelation of taber stiffness & wrinkle stiffness in 31cm span
(pressure-sensitive paper)

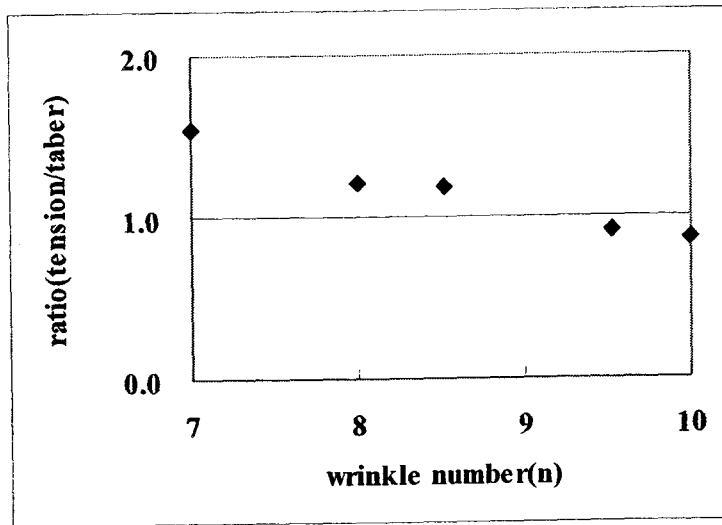


Figure 23. Interrelation of taber stiffness & wrinkle stiffness in 31cm span (thermo-sensitive paper)

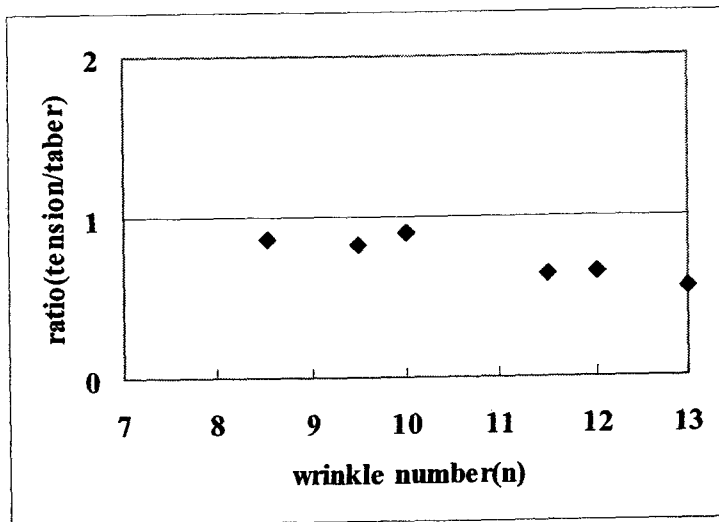


Figure 24. Interrelation of taber stiffness & wrinkle stiffness in 31cm span (news print)

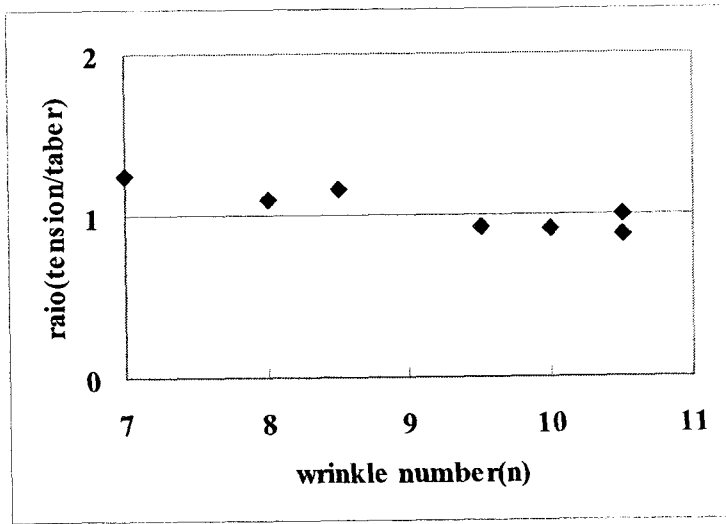


Figure 25. Interrelation of taber stiffness & wrinkle stiffness in 31cm span
(separate base paper)

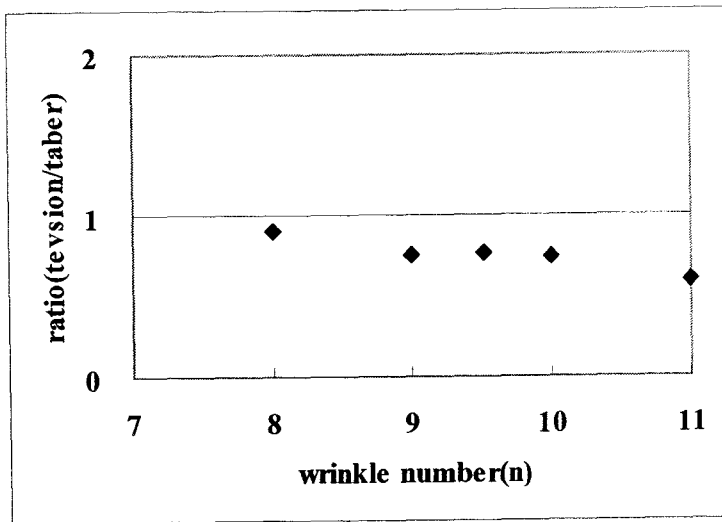


Figure 26. Interrelation of taber stiffness & wrinkle stiffness in 31cm span
(BP)

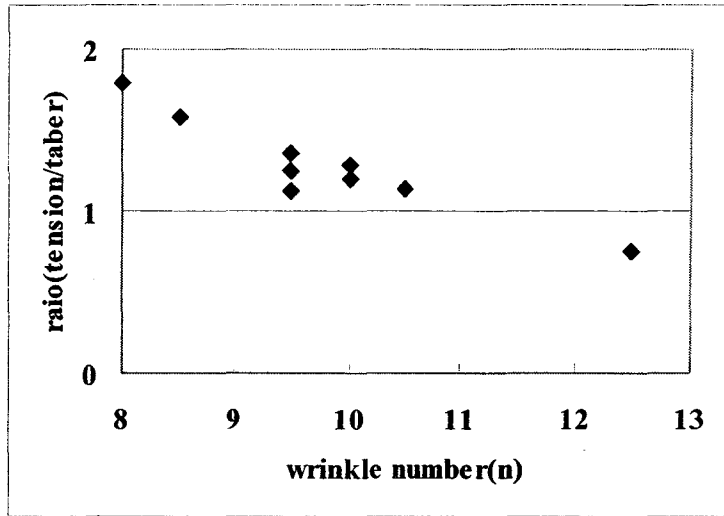


Figure 27. Interrelation of taber stiffness & wrinkle stiffness in 31cm span
(moojin base paper)

3.4 요약

Tension buckling 현상을 이용한 종이의 stiffness를 on-line 방식으로 측정하는 것은 종이마다 각 하중에 따라 생기는 wrinkle 수가 일정한 범위 내에 있을 때 off-line 으로 측정한 taber stiffness 값과의 상관관계를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Moving web 에서 tension wrinkle 을 이용한 stiffness 의 측정은 실제 taber stiffness 와 일치하는 경향을 보였다.
2. Wrinkle 을 이용한 stiffness 의 측정은 지폭에 따라 일정 범위의 wrinkle 수를 형성시키는 것이 효과적이었다. Wrinkle 수가 너무 적을 경우, wrinkle 측정에 의한 stiffness 의 계산에서는 wrinkle n-1 과 n 의 교차지점의 stress 와 wrinkle n 과 n+1 의 교차지점의 stress 를 평균하여 wrinkle n 의 stiffness 측정에 사용 한다. 이때 web 의 wrinkle 수가 너무 적은 경우, 두 stress 의 값 차이가 커서 error 가 급격히 커지고 평균 stiffness 값이 매우 커진다. 따라서 적절한 크기 이상의 wrinkle 수, 혹은 wrinkle span 이 필요한 것으로 판단된다.

Wrinkle 수가 너무 많을 경우, wrinkle 은 약 2mm 높이 이상일 때 육안으로 식별이

가능하다, 이때 wrinkle의 가장 정점은 stress 가 가장 높은 부분으로 N 이 커질수록 in-elastic 부위에 속하게 된다. 이러한 경우 wrinkle 에 의한 stiffness 값은 작아진다.

3. Moving web 에 형성된 wrinkle 패턴은 시간의 변화에 따라서도 그 형태가 변하지 않았다.

4. 이러한 결과를 토대로 앞으로 좀 더 정확한 자동 on-line stiffness 의 측정의 개발이 가능할 것으로 판단된다.

3.5 참고문헌

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), 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 특히. Ultrasonics Syp., Vol. 1, 747-750, 2001
3. Seo, Y.B., Oliveira, C., and Mark, R.E., Tension Buckling Behavior of Paper, JPPS, Vol. 18 (2), 1992
4. Gehlbach, L.S., Ke이, 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. Friedrich, C.R., Good, J.K., Stability sensitivity of web wrinkles on rollers, TAPPI, Feb., 1989
8. Jones, R.M., Mechanics of Composite Materials, Scripta Book Co., Washington D.C., 1975
9. 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), 1989
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 II: Experimental Results, JPPS, Vol. 15 (6), 1989
11. Seo, Y.B., Determination of In-plane Shear Properties by an Off-axis Tension

Method and Laser Speckle Photography, JPPS, Vol. 25 (9), 1999

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), 1992

13. Tappi Test Method., vol., Tappi Press., (1991)