

종이 휨강성 자동 측정방식의 개발과 그 이용 (2)

-실험실 측정-

서영범[†] · 정석면^{*1} · 정태영^{*1}

(2007년 8월 8일 접수:2007년 10월 26일 채택)

Development of On-line Bending Stiffness Tester (2)

-Lab experiment-

Yung Bum Seo[†], Suk Myun Jung^{*1}, and Tae Young Jung^{*1}

(Received August 8, 2007: Accepted October 26, 2007)

ABSTRACT

A simple method of on-line stiffness measurement using the wrinkling behavior of paper web between two rollers was presented. The theory and the equation were presented, and lab and mill tests were executed. We called the stiffness measured by Taber tester as 'Taber stiffness', and by tension wrinkling measurement as 'wrinkle stiffness', respectively. Lab experimental results showed Taber and wrinkle stiffness are almost equivalent. In the mill experiment, we could measure the stiffness in the wet state and in the dry state. The dry wrinkle stiffness was close to the taber stiffness, but the wet wrinkle stiffness was much lower than the corresponding taber stiffness

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

1. 서 론

최신 제지공정에서는 종이가 폭 8 - 10 m, 생산속도는 분당 약 1200 - 1500 m 이상의 속도로 생산되고 있다. 종이 평량을 100 g/m² 라고 가정할 때, 분당 1.5톤, 시간당 90톤의 종이가 생산될 수 있다. 즉 현대의 초지기에

서는 생산되는 종이의 품질규격이 맞지 않을 때, 단 시간 내에 많은 손해를 볼 수 있음을 뜻한다. 따라서 제지 공장에서 종이의 품질특성을 측정하는 측정방식은 순간적으로 이루어져야하며, 이러한 품질특성을 근거로 초지기의 생산조절 인자들을 빠르게 조정할 수 있어야 한다. 가장 빠른 품질특성 측정기구들은 보통 빛의 사

• 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

용을 근거로 하고 있다. 기계적인 방식들은 전기나 빛에 비해 움직임이 느릴 수밖에 없다. 우리는 빠르고 효과적인 공정조절을 위해서는 모든 종이의 품질특성측정이 초지기상에서 이루어져야만 한다고 믿는다. 만일 초지기상이 아니고 따로 최종 생산된 종이에서 샘플을 채취하여 일정한 장소로 옮겨져 종이의 품질특성을 측정한다면, 최소 30분 후에야 생산된 종이 소비자가 요구사항과 일치하지 여부를 판단할 수 있고, 그 후에야 초지를 조절할 수 있게 된다. 이러한 경우 앞에 예를 든 초지기에서는 약 45톤 이상의 생산된 종이 규격미달로 폐기될 수도 있는 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 방식으로 flexural rigidity 와 shear rigidity 를 측정하는 방법이다.¹⁻²⁾ 하지만 이러한 방법은 실제 종이 응력에 의해 휨변형이 일어난 것을 측정하는 것이 아니라 종이의 기본적인 탄성적 성질을 측정하고 그 측정치를 이용하여 휨강성을 계산해 내는 추정치인 단점을 가지고 있다. 현재는 가장 빠른 초지기상에서도 그 품질을 측정할 수 있는 장치들이 속속 개발되고 있다. 단 고가의

부속장치들이 많이 사용되고 있으므로 측정장치 자체가 고가의 품목이 될 것으로 판단된다. 본 연구는 기존의 초지기에서 측정되고 있는 롤 사이의 인장력과 새로운 인자로서 롤 사이의 종이의 주름현상(wrinkle behavior)을 화상(image analyzer)으로 측정하여 간단히 종이의 휨강성을 구하고자 하였다.³⁾ Tension buckling에 대한 연구들은 상당히 오래전부터 실시되어 왔으며 본 연구는 그러한 기존의 연구들을 적용 발전시켜 새롭게 휨강성의 연구에 적용하였다.⁴⁻⁸⁾ 또 휨강성은 휨강도가 아닌 탄성적인 성질을 의미하므로 본 연구를 위해서는 종이의 탄성적 성질의 특성과 그 측정방식에 대한 지식이 필수적이었다.⁹⁻¹³⁾

2. 재료 및 방법

2.1 실험재료

실험에 사용된 종이로는 현재 제지공장에서 생산 중인 신문용지(newsprint, 국내 P사), 감압증지(Pressure sensitive paper, 국내 H사), 무진원지(Moojin paper, 국내 H사), 티켓용 감열지(Heat sensitive paper, 국내 H사), BP(BP-1, 국내 S사), 박리원지(BP-2, 국내 H사)를 roll type으로 제공받아 사용하였다.

2.2 실험재료의 물리적 성질

제공받은 종이는 TAPPI standard T402 om-88에 따라 $23 \pm 1^\circ\text{C}$, 상대습도 $50 \pm 2\%$ 로 조절된 항온 항습실에서 24시간 이상 조습처리를 실시하였다. 먼저 종이의

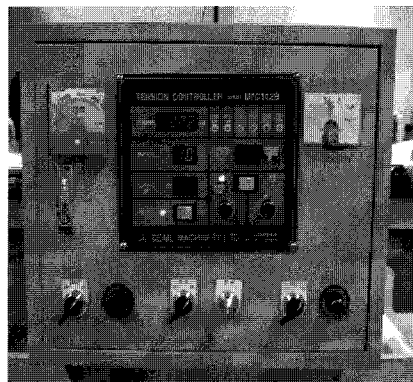
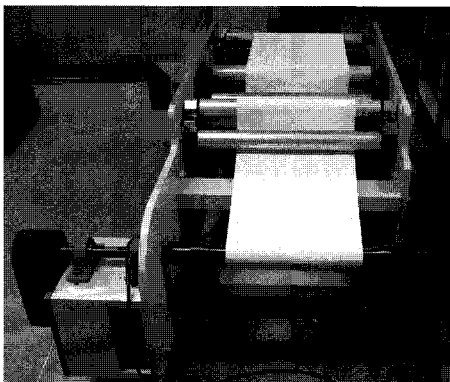


Fig. 1. Wrinkle stiffness measuring device.

휨강성 측정에 필요한 인자(factors)들을 산출하기 위해 동일조건 (상대습도 50±2%, 23±1℃)에서 처리된 각 종이들의 물리적 성질을 측정하였다. 그 측정항목으로는 평량, 두께, 휨강성 (Taber bending stiffness, TAPPI standard T 566 om-97, mNm)과 탄성계수 (Young's modulus)였다. 탄성계수는 정확한 측정을 위해 응력-변형곡선을 통해 직접 구하였다.

2.3. Wrinkle stiffness 의 측정

실험실에서 wrinkle stiffness의 측정은 인용문헌 3에 사용된 기구를 그대로 사용하였다 (Fig. 1).

Fig. 1의 기구는 일정속도로 두루마리 샘플을 전진시키며, 일정한 인장력을 유지할 수 있다. 이 때에 발생

하는 주름 (wrinkle)의 형태를 사진으로 찍어 분석하며, 인장력과 롤 사이의 거리 및 종이의 폭을 이용하여 wrinkle stiffness를 계산하였다.

국내 제지회사의 초지기상에서의 연구도 진행하였으며, 측정결과도 함께 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 실험재료의 물리적 특성

종이의 휨강성에 필요한 인자들을 알아보기 위해 물리적 성질을 측정해 본 결과를 Table 1에 정리하였다.

Taber stiffness 측정값의 신뢰성을 알아보기 위해 탄

Table 1. MD and CD physical properties of each paper

Sample	Grammage (g/m ²)	Thickness (10 ⁻² mm)	Density (g/cm ³)	Breaking length (km)	Tear index (mN/g·m ²)
BP-1, MD	84.04	10.94	0.77	8.50	5.86
BP-1, CD	84.04	10.94	0.77	2.82	7.43
Pressure sensitive paper, MD	52.58	6.50	0.81	7.16	5.76
Pressure sensitive paper, CD	52.58	6.50	0.81	3.27	5.52
Heat sensitive paper, MD	117.46	12.00	0.98	6.24	5.92
Heat sensitive paper, CD	117.46	12.00	0.98	4.87	5.27
Moojin paper, MD	67.42	9.00	0.75	5.83	9.27
Moojin paper, CD	67.42	9.00	0.75	4.97	8.10
BP-2, MD	96.52	11.13	0.87	7.42	9.84
BP-2, CD	96.52	11.13	0.87	4.27	9.30
Newsprint, MD	46.86	6.00	0.78	40.30	8.00
Newsprint, CD	46.86	6.00	0.78	10.63	4.69

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

Table 2. MD/CD ratios of Taber stiffness and Young's modulus

Sample	Stiffness(mN)	MD/CD ratio	Young's modulus (MPa)	MD/CD ratio
BP-1, MD	1.52	2.20	6017.85	2.24
BP-1, CD	0.69		2679.52	
Pressure sensitive paper, MD	0.27	1.69	5729.63	1.82
Pressure sensitive paper, CD	0.16		3149.65	
Heat sensitive paper, MD	1.52	1.36	4821.65	1.58
Heat sensitive paper, CD	1.12		3045.57	
Moojin paper, MD	0.60	2.22	4741.39	2.00
Moojin paper, CD	0.27		2379.69	
BP-2, MD	1.23	1.5	4687.87	1.73
BP-2, CD	0.82		2706.94	
Newsprint, MD	0.23	2.09	2228.96	1.80
Newsprint, CD	0.11		1235.06	

성계수를 측정하였는데 MD/CD에서 각 종이들이 서로 비례함을 알 수 있었다 (Table 2).

3.2 Taber stiffness 와 wrinkle stiffness의 상관관계 - 실험실적 연구

3.2.1 폭 30 cm 와 Roll span-41 cm에서의 상관관계

주름의 수는 자체개발한 실험실의 휨강성 측정장치를 통해 평량과 물성에 따라 적용한 인장력을 각각 달리 하여 적용하였을 때 나타나는 주름의 수를 측정하였다. 종이가 롤을 통과할 때 롤의 배열이 잘못되어 tram이 발생하면 주름이 기계방향과 일정한 각도로 생기는 shear wrinkle이 실시간에 따라 이동하는 반면, 롤들의 배열이 정확한 경우 tension wrinkle이 종이의 기계방향과 평행하게 형성되고 한번 형성되면, 그 형태가 그대로 유지 되는 것을 관찰할 수 있었다. 여기서 tram이란 두 개의 롤이 평행으로 정렬되지 못할 때 생기는 현상을 말한다..

롤 간의 거리인 41 cm span에서는 Fig. 2와 같이 전체적으로 node 수가 7.5-9.0 사이에서 wrinkle stiffness와 Taber stiffness가 일치하는 경향을 보였다. 이 때 롤간의 거리와 종이의 폭의 비율은 1.33 으로 계산되는데 이 비율이 클수록 오차가 커지기 때문에 생기기 쉬우며, 또한 주름의 수가 적을 때 실험오차가 커지게 된다. 주름의 수가 20개 이상 형성되어서 node 의 수가 40개 (주름 1개의 node 는 2개) 이상인 경우 실험적 오차를 5% 이내로 줄일수 있음을 기존의 논문에 발표한 바 있다.³⁾ Node 수가 40개 이상인 경우는 일반 초지기에서 쉽게

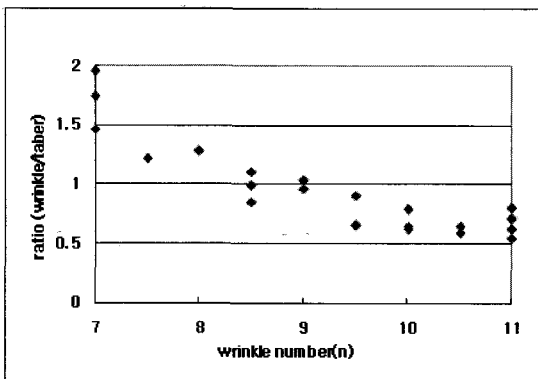


Fig. 2. Interrelation of Taber stiffness and wrinkle stiffness in 41cm span.

발견할 수 있다.

각각 종이의 상관관계를 살펴보면, Fig. 3~6과 같이 감압종지, 신문용지, BP, 무진원지 등의 주름수에 따른 wrinkle stiffness와 Taber stiffness가 일치한 경향을 보였다. 이처럼 실험실적 주름측정에 있어서는 주름측정에 의한 휨강성의 측정은 주름의 수가 적절할 때 Taber stiffness 와 같은 값을 나타냈다. 주름 수가 너무 적으면 휨강성 계산식의 실험오차가 급격히 증가하기 때문에 wrinkle stiffness 값이 매우 커졌다. 인장력을 너무 강하게 적용하면 주름수가 많이 생기기는 하지만 휨강성 자체가 탄성적인 성질을 기억할 때, 비탄성 범위하에서의 tension buckling 이 일어나 wrinkle stiffness 값이 작아질 수 있다고 판단되었다.

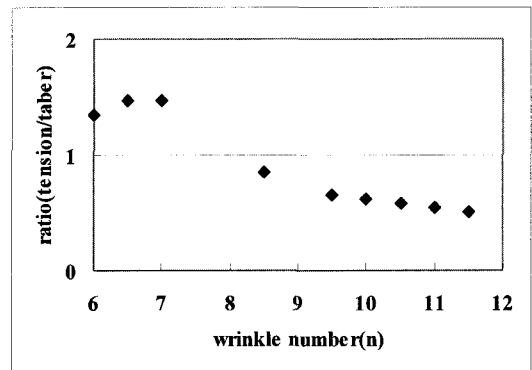


Fig. 3. Interrelation of Taber stiffness and wrinkle stiffness in 41cm span. (Pressure sensitive paper)

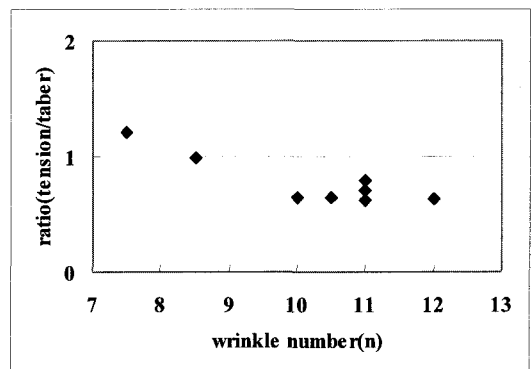


Fig. 4. Interrelation of Taber stiffness and wrinkle stiffness in 41cm span. (Newsprint)

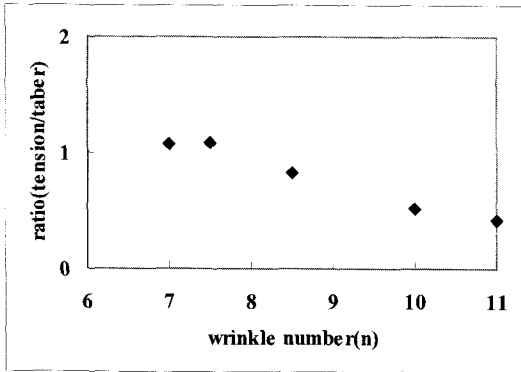


Fig. 5. Interrelation of Taber stiffness and wrinkle stiffness in 41cm span. (BP-2)

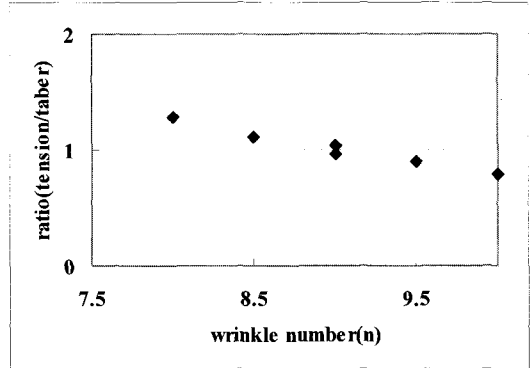


Fig. 6. Interrelation of Taber stiffness and wrinkle stiffness in 41cm span. (Moojin base paper)

3.2.2 폭 30 cm 와 Roll span-31 cm에서의 상관관계분석

41 cm span에서와 같이 31 cm span에서도 주름 측정에 의한 휨강성 측정은 주름 수가 적절할 때 Taber stiffness 와 같은 값을 나타냈다. Span 이 31 cm 이므로 롤간의 거리와 종이의 폭의 비율이 1.0 에 가까우므로 실험오차가 커졌으며 주름의 수 20 개 이하이므로 역시 실험오차가 상당할 것으로 판단되었다.³⁾ 실험실적으로 실시하는 실험의 경우 이러한 비율을 낮추기가 매우

어려웠다.

먼저 31 cm span에서는 Fig. 7과같이 실험한 모든 종이에서 주름 수가 약 9-11에서 wrinkle stiffness와 Taber stiffness가 일치한 경향을 보였다. 각각 종이의 상관관계를 살펴보면, Fig. 8-12 와 같이 감압중지, 감열지, 신문용지, 박리원지, 무진원지의 주름 수에 따른 wrinkle stiffness와 Taber stiffness가 일치한 경향을 보였다. 이번에도 역시 주름 수가 너무 작으면 wrinkle stiffness 값이 Taber stiffness 값보다 매우 커졌고, 주름 수가 너무 많으면 wrinkle stiffness 값이 너무 작았다.

Table 3과 Fig. 13에서는 31 cm 롤간 거리의 경우 측정된 wrinkle stiffness 값들을 Taber stiffness와 비교하고 있다. Wrinkle stiffness는 주름의 수가 9-11인 경우

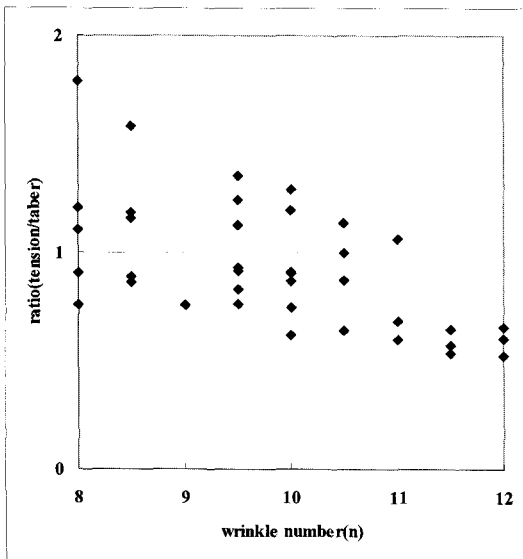


Fig. 7. Interrelation of Taber stiffness and wrinkle stiffness in 31cm span (total).
T/S = Wrinkle stiffness / Taber stiffness

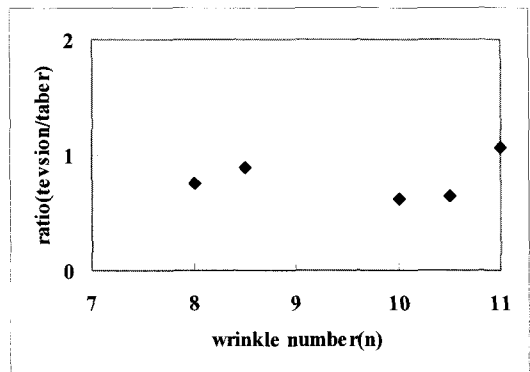


Fig. 8. Interrelation of Taber stiffness and wrinkle stiffness in 31cm span. (Pressure sensitive paper)

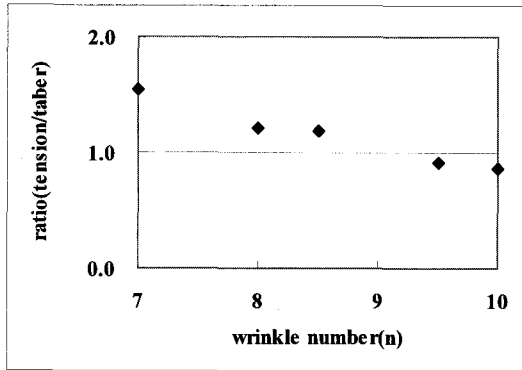


Fig. 9. Interrelation of Taber stiffness and wrinkle stiffness in 31cm span. (Heat sensitive paper)

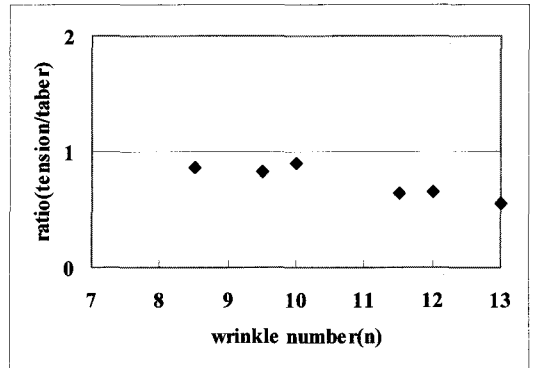


Fig. 10. Interrelation of Taber stiffness and wrinkle stiffness in 31cm span. (Newsprint)

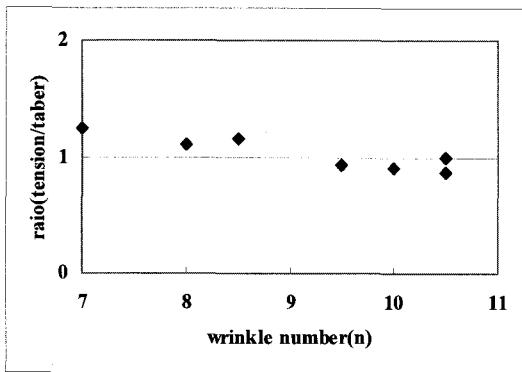


Fig. 11. Interrelation of Taber stiffness and wrinkle stiffness in 31cm span. (BP-2)

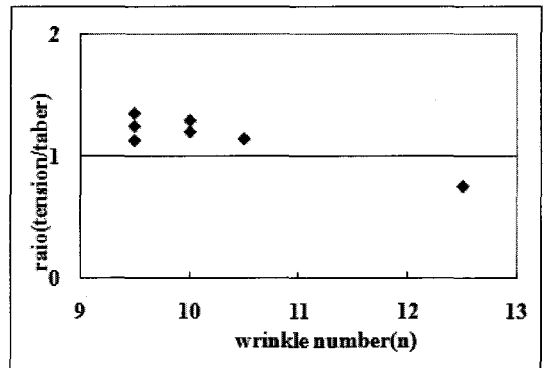


Fig. 12. Interrelation of Taber stiffness and wrinkle stiffness in 31cm span. (Moojin base paper)

를 선택하여 그 때의 인장값과 주름 값을 이용하여 wrinkle stiffness를 측정하였다. 실험결과 두 가지의 휨 강성 측정방식의 결과는 일치하는 경향을 보였다.

3.3 제지회사의 초지기상에서 휨강성의 측정

본 연구에서는 다음과 같이 아트지 공장의 두 군테를 선발하여 그 휨강성 특성을 측정하고자 하였다.

Table 3. Winkle stiffness vs. Taber stiffness (CD) at 31cm span length

Paper	Taber stiffness, mNm		Wrinkle stiffness, mNm	
	Average	SE**	Average*	SE**
BP-1	0.69	7.5	0.756	12.8
Pressure sensitive paper	0.16	12.3	0.13	18.5
Heat sensitive paper	0.12	7.7	1.051	6.8
Moojin base paper	0.27	3.6	0.366	11.5
BP-2	0.82	11.2	0.856	15.5
Newsprint	0.11	5.4	0.093	12.8

*:Average when wrinkle number is in the range of 9-11.

** : Standard Error in % (Standard deviation/Average x 100)

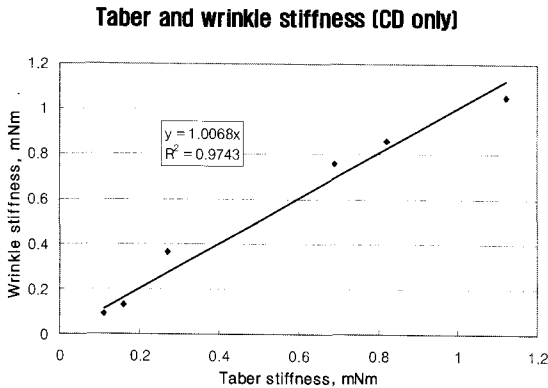


Fig. 13. Wrinkle stiffness measured at 31 cm span length vs. Taber stiffness.

* 코터에서 pope reel 로 감기는 부위 - 적외선 건조가 진행중이었음

- 지종 : 양면 코팅지 90 g/m²
- 도공속도 : 900 m/min.
- 인장력 : 184 N/m
- b = 5190 mm
- a = 3400 mm
- wrinkle width = 187.3 mm

a/b = 0.655. wrinkle number 는 27.6 이며, node 수는 55개로서 40개 이상이므로 이론적인 실험오차는 5% 이하가 된다.³⁾

* 캘린더 부분

- 지종 : 양면 코팅지 90 g/m²
- 칼렌다 속도 : 1050 m/min.
- 인장력 : 401 N/m
- b = 5190 mm
- a = 1400 mm
- wrinkle width = 132.2 mm

a/b = 0.269. wrinkle number 가 39.2 이고 node 수는 78.5 개로서 40개 이상이므로 이론적인 실험오차는 5% 이하가 된다.³⁾

실험결과 코터에서 측정된 종이의 휨강성은 wrinkle stiffness의 경우 휨강성은 0.124 mNm, 캘린더에서 측정된 종이의 wrinkle stiffness의 경우 휨강성은 0.394 mNm로 각각 측정되었다. 실제 건조되어 조습 처리된

종이의 Taber stiffness는 코터에서 사용된 종이의 경우 0.58 mNm이었고, 캘린더에서 측정된 종이 web의 경우 0.478 mNm이었다. 코터에서는 종이가 충분히 건조되지 못하여, 적외선처리가 진행 중인 샘플이었으며, 캘린더에서의 종이는 충분히 건조된 상태였으므로 Taber stiffness와 값이 가까운 근사치를 이루었다. 샘플간의 차이와 조습처리여부가 최종 측정된 종이의 휨강성에 차이를 나타낸 것으로 판단되었다.

4. 결론 및 향후 연구방향

본 연구는 아직까지 tension buckling을 이용한 종이의 on-line 휨강성 측정방식의 가능성을 확인한 것에 불과하다. 정밀한 화상분석을 이용한 초지기상에서의 주름측정방식이 개발되어야 하며, 롤간의 인장력의 변화를 실시간으로 주름수와 함께 기록하는 장치의 개발이 필요하다. 본 연구에 사용된 실험실적 장치는 이론적으로도 많은 오차를 발생시킬 수밖에 없는 장치였다. 본 연구의 활용은 정밀한 측정장치의 개발이 병행되어야만 완성될 수 있으며 앞으로 그러한 장치의 개발을 기대해본다. Wrinkle stiffness 측정에 대한 precision 과 repeatability 는 그러한 측정기기의 개발이 이루어진 후에 정확히 제시할 수 있게 될 것이다.

본 연구에서는 tension buckling 현상을 이용한 종이의 휨강성을 on-line 방식으로 측정하는 방법을 개발하였고 실제 실험실 측정기구를 이용한 방식과 실제 초지기상에서 on-line으로 적용하였으며 off-line으로 측정 한 Taber stiffness 값과의 상관관계를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Moving web 에 형성된 주름패턴은 shear wrinkle 이 배제된 상태에서는 시간의 변화에 따라서도 그 형태가 변하지 않았다.

2. 실험실에서 주름을 이용한 휨강성의 측정은 장치의 크기를 크게 만들 수 없는 문제로 인해 주름의 발생 숫자가 너무 적어서 많은 실험오차를 발생시키는 것을 알 수 있었다. 따라서 지폭에 따라 일정 범위의 주름수를 형성시키며 그때의 인장력을 측정하여 휨강성을 측정하는 것이 효과적이었다. 이러한 경우 wrinkle stiffness와 Taber stiffness는 일치하는 경향을 나타내었다.

3. 제지공장에서 on-line으로 측정 한 wrinkle stiffness

는 off-line으로 조습처리하여 측정한 Taber stiffness와 실험오차를 염두에 둘 때, 일치하는 값을 보였다.

4. 제지공장에서 on-line으로 건조가 충분히 진행되지 않은 종이의 wrinkle stiffness를 측정한 결과 off-line으로 조습처리하여 측정한 Taber stiffness보다 현저히 떨어지는 값을 보였다.

사 사

“이 논문은 2004년도 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임”(KRF-2004-202-F00014)

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 29(9):289-293 (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, pp. 747-750 (2001).
3. Seo, Y.B., Jung, T.Y., Development of on-line bending stiffness tester (1) theoretical background, J. of Korea TAPPI 38(1):21-26 (2006).
4. Seo, Y.B., Oliveira, C., and Mark, R.E., Tension Buckling Behavior of Paper, JPPS 18(2):J55-59 (1992).
5. Gehlbach, L.S., Kedl, D.M., Good, J.K., Predicting shear wrinkles in web spans, TAPPI, August (1989).
6. Shin, K.H., Tension Control, TAPPI Press, Atlanta, GA (2000).
7. Rosium, D.R., Mechanics of Rollers, TAPPI Press, Atlanta, GA (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 15(5):J178-182 (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 15(6):J201-205 (1989).
12. Seo, Y.B., Determination of In-plane Shear Properties by an Off-axis Tension Method and Laser Speckle Photography, JPPS 25(9) (1999).
13. Seo, Y.B., Castagnede, B., Mark, R.E., An Optimization approach for the determination of in-plane elastic constants of paper, Tappi 75(11): 209-214 (1992).