

# 종이의 품질 및 공정관리를 위한 제로스팬 인장강도

## 원 종 명

강원대학교 산림환경과학대학 제지공학과

### 1. 서 론

종이의 성질은 비록 각종 첨가제가 부수적으로 사용되기는 하지만 근본적으로 섬유 특성과 섬유간결합에 의하여 결정이 된다고 할 수 있다. 또한 섬유간결합이 부분적으로는 섬유 자체의 성질에 의하여 영향을 받으며, 펄프 섬유의 특성이 제지 공정에서의 작업성뿐만 아니라 종이의 품질에 지대한 영향을 미치고, 종이 구성 원료 중 가장 큰 비중을 차지하고 있기 때문에 단일 요소로서는 아마도 가장 중요한 요소의 하나라 할 수 있을 것이다. 그러나 아무리 품질과 작업성이 좋다고 해도 비용이 너무 많이 들면 기업의 특성상 원료의 선택에서 배제될 수밖에 없다. 이러한 관점에서 볼 때 제지공정 및 종이 품질관리를 위한 일환으로 섬유의 특성을 평가하는 것은 아무리 강조를 하여도 지나치지 않다. 섬유를 평가하는 방법은 여러 가지가 있으나 간단히 분류해 보면 1) 섬유의 치수 및 구조적 특성을 평가하기 위한 섬유분석(평균 섬유장, 섬유장 분포, 미세분 함량, 섬유폭, 섬유막 두께, coarseness, 결, 킹크 등) 방법과 2) 섬유 자체의 강도, 3) 섬유의 유연성 관련 성질(flexibility, conformability) 등으로 나누어 질 수 있다. 이들 중 섬유의 유연성은 섬유 분석 결과를 통하여 예측할 수 있으며, 측정 방법이 매우 불편하고 시간이 많이 걸리기 때문에 널리 채용되지는 않고 있다.

본 주제와 관련된 섬유의 강도를 직접적으로 측정하기 위하여 만능시험기를 개조하여 단일 섬유의 강도와 기타 물리적 특성을 측정하였다.<sup>1-9)</sup> 그러나 측정 방법이 매우 까다롭고 많은 시간과 노력이 필요할 뿐만 아니라 통계적으로 유의성을 지니는 만족스러운 수준의 값을 얻기 위해서는 측정 횟수가 충분히 많아야 하는 문제점을 지니고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 일환으로 zero-span 및 short-span 인장시험에 시도가 이루어졌다. 섬유 강도를 측정하기 위한 수단으로서의 zero-span의 개념은 이미 1925년 초에 Jacobsen에 의하여 소개되었다.<sup>10)</sup> 이 아이디어는 인장시험 시 매우 짧은 스패를 적용함으로써 섬유가 2개의 클램프에 직접 걸려 종이의 강도보다는 섬유 강도의 측정이 가능할 것이라는 가정 하에서 얻어졌다. 과거 40여 년 동안 이와 관련된 많

은 연구가 진행되었으며, 주로 장치의 디자인, 측정 방법 및 파괴 현상에 대하여 연구가 이루어졌다.<sup>11-16)</sup>

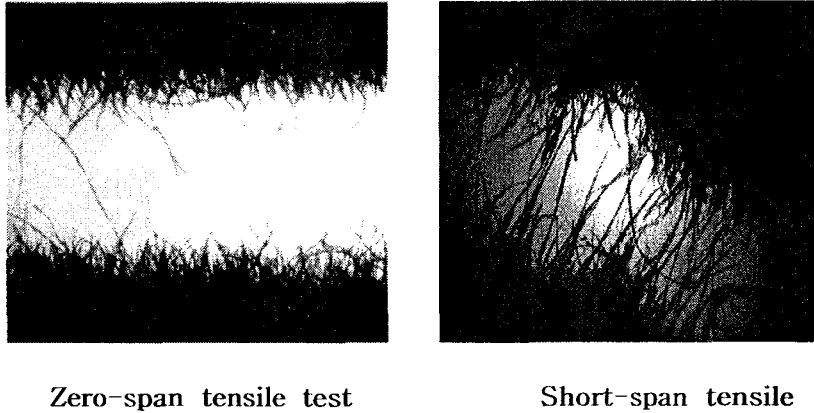


Fig. 1. Fiber failures in the zero-span and short-span tensile test.<sup>17)</sup>

## 2. 제로-스팬 인장강도

제로-스팬은 말 그대로 종이의 인장강도 측정 방법과 동일하게 하되 단지 스펠이 0이 되도록 하여 측정함을 의미한다. 일반적으로 종이의 인장강도 측정 시 클램프 사이의 거리를 나타내는 스펠이 10cm(수초지)-18cm(기계초지)의 범위가 적용되기 때문에 종이 내에 존재하는 결함은 종이의 강도에 직접적인 영향을 미친다. 또한 이러한 시험 방법에서는 섬유가 직접 두개의 클램프 사이에 걸리지 않기 때문에 섬유가 파괴되는 확률은 상대적으로 낮아지게 된다. 반면에 제로-스팬 인장시험을 실시할 경우 Fig. 1에서 보는 바와 같이 섬유의 파괴 현상이 많이 일어나는 반면, short-span 인장시험 시에는 섬유의 파괴보다는 섬유간결합의 파괴가 더 현저히 일어남을 관찰할 수 있다. 물론 zero-span 인장시험의 과정에서 섬유간결합의 일부가 파괴되기도 하며, 스펠이 정확히 0이 되도록 하는 것이 불가능하여 섬유 자체의 순수 강도를 측정하는 데는 어려움이 있지만 아래 방정식<sup>18)</sup>과 같이 섬유강도와 관계를 지니고 있기 때문에 펄프 및 종이 품질 관리에 유용하게 사용될 수 있다.

$$T_{po} = 0.375t_f$$

$T_{po}$  : 종이의 제로-스팬 인장강도

$t_f$  : 섬유의 인장강도

Table 1은 총 24종의 펄프에 대하여 전통적인 평가 방법인 PFI mill로 처리하여 열단장과 인장지수를 분석한 결과와 제로-스팬 인장시험 시스템을 이용하여 섬유강도와 길이를 평가한 결과의 절대치와 변이상수를 분석한 결과이다. 표에서 보는 바와 같이 제로-스팬 인장강도를 측정할 경우가 PFI mill로 처리하여 종이의 물성을 측정할 경우보다 현저히 낮은 변이상수 값을 나타냄으로써 보다 정밀한 펄프 품질의 평가 수단으로 활용될 수 있음을 보여주었다.

Table 1. Variability of pulp quality<sup>19)</sup>

Sample	PFI mill data				PQ system data			
	Tensile <sup>1</sup> at 400 ml CSF		Tear <sup>2</sup> at 7 tensile		FS(N/cm)		L	
	Av.	C.V. <sup>3</sup>	Av.	C.V. <sup>3</sup>	Av.	C.V. <sup>3</sup>	Av.	C.V. <sup>3</sup>
Test precision	-	2-4	-	5-7	-	0.6	-	1.2
All pulps(24)	9.1	13.1	14.7	11.5	78.9	13.8	0.68	4.8
Northern pulps(17)	9.8	7.7	14.9	12.2	84.3	9.3	0.69	4.5
Southern pulps(7)	7.6	5.3	14.0	8.6	65.8	3.3	0.66	4.4
Mill A(4)	9.8	1.7	15.4	5.1	85.0	2.5	0.69	1.5
Mill B(1)	7.5	-	9.0	-	59.0	-	0.58	-
Mill C(6)	9.5	3.5	14.4	5.4	83.1	3.9	0.69	0.8
Mill D(6)	10.3	4.2	16.1	4.8	89.4	5.4	0.70	3.7
Mill E(5)	7.5	5.7	14.5	4.7	66.3	3.6	0.67	0.8
Mill F(2)	7.9	2.7	13.0	14.7	64.5	0.3	0.63	9.2

1. Breaking length, km, 2. Tear index, mN m<sup>2</sup>/g

제로-스팬 인장강도 측정법이 처음 개발된 동기는 전술한 바와 같이 보다 편하게 섬유강도를 측정하기 위한 것이었으나, 제로-스팬 인장강도의 특성을 이용하여 다양한

목적으로 사용될 수 있음이 확인되었다. 그럼에도 불구하고 제로-스팬 인장강도에 대한 이해 부족으로 제지공정 관리에 널리 활용되고 있지 않은 바 그 적용 가능 예를 소개하고자 한다.

참고로 제로-스팬 인장강도 시험 시스템에 의하여 측정되는 성질에 대하여 간단히 정리하면 다음과 같다.

FS (N/cm) : 평량 60 g/m<sup>2</sup>인 시트의 습윤 제로-스팬 인장강도

L (%) : 스펠 0.4mm의 습윤 인장강도 값을 습윤 제로-스팬 인장강도로 나눈 값

B (%) : 건조 제로-스팬 인장강도를 스펠 0.4mm의 습윤 인장강도로 나눈 값

FS는 펄프화 공정뿐만 아니라 고해, 제진, 스크린 및 지료의 배합에서 비롯되는 평균 섬유강도의 변화에 대한 정보를 제공해주며, L은 펄프화, 사분 및 고해과정에서 비롯되는 평균 섬유강도의 변화를 나타내며, B는 고해로부터 비롯되는 섬유간결합의 잠재적인 개선 효과를 나타낸다.

### 3. 제로-스팬 인장강도의 응용 예

#### 3.1 절연지의 유전강도 특성 평가<sup>20)</sup>

펄프의 주성분인 셀룰로오스의 절연성이 매우 우수할 뿐만 아니라, 강도, 내열성 등의 성질이 다른 소재에 비하여 우수하기 때문에 펄프 섬유는 절연지 제조를 위한 가장 우수한 특성을 지니고 있는 것으로 알려져 있다. 종이의 유전강도는 종이에 걸어주는 전압을 점차적으로 높였을 때 전기저항이 저하되지 않고 견딜 수 있는 최대 전압을 의미한다. 즉 절연재료로서 우수한 소재일수록 유전강도가 높아야 한다. 남부소나무 표백 크라프트 펄프와 노르웨이산 미표백 가문비나무 열기계펄프로 만든 시트에 Fig. 2에서 보는 바와 같이 전압을 걸어준 결과 전압이 높아짐에 따라 남부소나무 표백크라프트 표백펄프의 점도가 감소되고 있음을 보여주었다. 이와 같이 점도가 감소된다는 것은 셀룰로오스 분자가 파괴됨을 나타내며, 이는 곧 전기저항이 감소됨을 의미한다. 남부소나무 표백 크라프트 펄프와 노르웨이산 가문비나무 열기계 펄프로 만든 시트에 걸어준 전압이 증가됨에 따라 이로부터 측정된 제로-스팬 인장강도는 감소되는 경향을 나타내어 점도의 변화와 유사한 경향을 보여줌으로써 단지 제로-스팬 인장강도의 측정만으로

도 원료 펄프의 유전강도 특성을 평가할 수 있음을 알 수 있다.

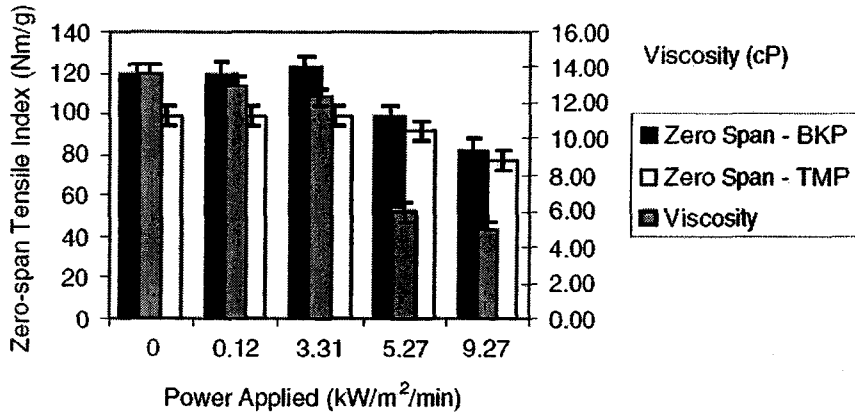


Fig. 2. Effects of power applied on the viscosity of BKP and zero-span tensile index of sheets made from BKP and TMP.

### 3.2 섬유 변형 또는 결함이 미치는 영향 평가<sup>21)</sup>

섬유의 변형은 일반적으로 섬유의 성질과 종이의 성질 사이의 관계를 논할 때 영향 인자로 고려되지 않고 있다. 그 대표적인 이유로써 첫 번째는 섬유 변형 정도가 측정하기 어렵고 시간이 매우 많이 걸리며(이제는 섬유 분석 장치를 이용하여 쉽게 측정 가능), 두 번째 이유는 섬유 변형이 실험실적인 연구에서 생기기보다는 산업적인 생산 현장에서 생기기 때문에 고의로 섬유 변형을 도입한다고 하더라도 현장에서 생긴 것과 같은 형태 또는 같은 정도로 부여하기가 어렵기 때문이다. Fig. 3은 섬유 변형 정도와 제로-스팬 인장지수와의 관계를 나타낸 것으로 섬유 변형이 많이 일어날수록 제로-스팬 인장지수가 직선적으로 낮아지고 있음을 보여준다. 이와 같은 관계를 통하여 섬유 변형이 섬유강도를 감소시키고, 이것이 종이의 강도를 떨어뜨리는데 기여함을 알 수 있다.

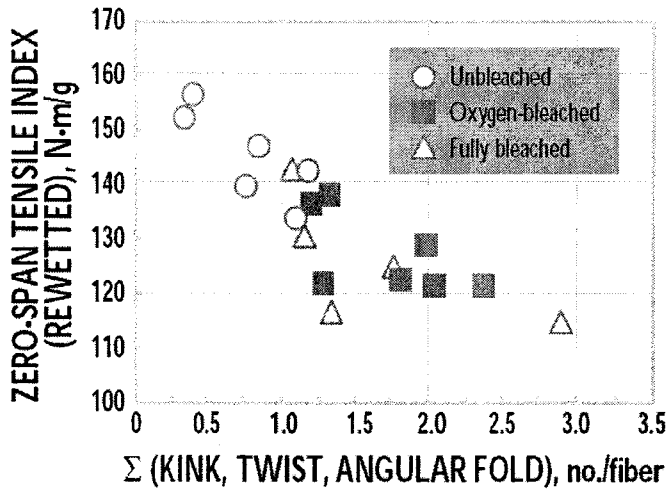


Fig. 3. Effect of fiber deformations on zero-span tensile index.

### 3.3 고해와 리사이클이 섬유강도에 미치는 영향<sup>22)</sup>

일반적으로 펄프를 고해하면 섬유간결합이 증가되어 인장강도가 증가되나, 리사이클을 시킬 경우 펄프 강도 및 섬유간결합이 감소되어 인장강도가 감소되는 것으로 알려져 있다. 하지만 제로-스팬 인장강도 측정을 한 결과 Fig. 4와 5에서 보는 바와 같이 전혀 예상치 못했던 현상을 관찰할 수 있다. 이미 예상하고 있는 바와 같이 인장지수는 고해를 하지 않은 펄프를 리사이클할 경우 인장지수가 그리 감소되지 않았다. 한편 고해를 함으로써 인장지수가 크게 증가되었고, 다시 리사이클할 경우 특히 첫 번째 리사이클에서 크게 인장지수가 감소되었으며, 다시 고해를 더 진행할 경우 인장지수가 크게 증가되었다가 리사이클에 의하여 다시 유사한 감소 경향을 나타내었다(Fig. 4). 하지만 제로-스팬 인장지수의 경우에는 비록 고해를 하지 않은 경우에는 오히려 다소 증가되는 경향을 보여주었으나, 고해한 펄프의 경우에는 리사이클에 의한 감소 현상이 뚜렷하지 않았다. 이러한 결과를 통하여 리사이클에 의한 강도의 감소는 섬유강도의 감소보다는 오히려 주로 섬유간결합 능력의 감소에서 비롯됨을 알 수 있다.

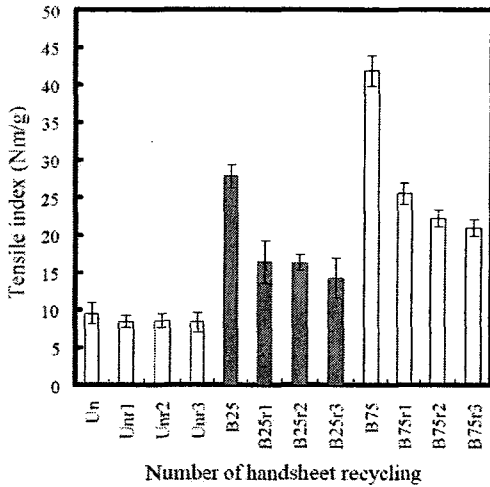


Fig. 4. Effect of recycle and refining on the tensile index of paper.

(Un : unbeaten, r1 : recycle once, r2 : recycle twice, B25 : beaten for 2500 rev., B75 : beaten for 7500 rev.)

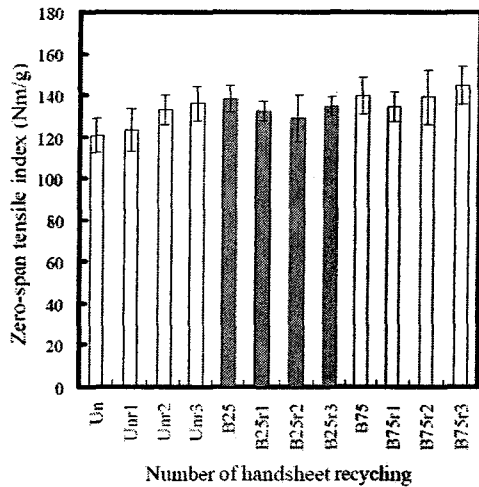


Fig. 5. Effect of recycle and refining on the zero-span tensile index of paper.

### 3.4 공정관리<sup>23)</sup>

종이를 제조하기 위해서 펄프는 고해 공정을 거치고, 지료를 구성하는 모든 성분과 혼합되어 제진기 및 스크린을 거쳐 초지기로 공급된다. 과연 이와 같이 공급된 펄프가 적절한지, 그리고 공정상 아무 문제가 없는지를 couch 및 reel에서 샘플을 취하여 제로-스팬 인장지수를 측정함으로써 초지기에서 발생하는 문제를 해결할 수 있다. Table 2는 초지기에서 인장강도에 문제가 발생하는 원인을 평가하기 위하여 couch trim과 reel에 감긴 종이에 대하여 제로-스팬 인장시험 시스템을 이용하여 섬유강도(FS), 길이(L) 및 결합 특성(B)을 측정하여 그 비를 구하여 요약한 것이다. 불량한 제지 작업성은 지료의 품질 또는 초지기에서의 주행성에서 찾을 수 있다. Table 2에 요약된 couch trim의 측정치와 reel에 감긴 종이에 대한 측정치 및 그 비를 통하여 문제점을 파악할 수 있다. 우선 인장강도를 비교하면 아래쪽의 것이 위쪽의 것보다 낮은 값을 나타내었다. 한편 couch trim에 대한 섬유 특성 값은 위쪽 및 아래쪽 값이 거의 같은 수치를 나타

내고 있다. 그러나 couch와 reel에서의 FS 측정값의 비는 뚜렷한 차이를 나타내었다. 이러한 차이가 바로 인장강도를 떨어뜨리는 원인으로 작용했으며, 이것이 초지기에서 문제를 발생시킨 원인이 되었고, 이러한 문제의 대표적인 발생 원인의 하나는 지필도가 급격히 감소이다.

**Table 2. Evaluating the causes of paper tensile problem**

Properties			Reel			Couch			Reel/Couch ratio		
Tensile	Ash (%)	A*	FS	L	B	FS	L	B	FS	L	B
3.8	21.8	2.00	46.1	0.61	1.87	49.4	0.58	1.75	0.93	1.05	1.12
4.1	24.3	1.85	50.3	0.60	1.89	48.0	0.57	1.78	1.05	1.05	1.02
4.4	24.5	1.76	50.2	0.55	1.86	50.8	0.57	1.78	0.99	0.96	1.04
3.8	22.3	1.93	48.8	0.58	1.76	50.1	0.56	1.88	0.97	1.04	1.01
<b>4.0</b>	<b>23.2</b>	<b>1.89</b>	<b>48.9</b>	<b>0.59</b>	<b>1.85</b>	<b>49.6</b>	<b>0.57</b>	<b>1.80</b>	<b>0.98</b>	<b>1.03</b>	<b>1.05</b>
3.3	22.1	1.89	42.2	0.57	2.09	46.9	0.58	1.87	0.90	0.98	1.07
3.3	20.5	1.92	43.4	0.58	1.92	50.6	0.58	1.83	0.86	1.00	0.97
3.5	20.4	1.92	44.0	0.58	2.02	48.1	0.58	1.71	0.91	1.00	1.06
3.4	20.6	1.89	43.6	0.62	1.83	51.4	0.61	1.71	0.85	1.02	1.11
3.3	20.4	1.89	43.0	0.58	2.01	48.7	0.57	1.78	0.88	1.02	1.10
<b>3.4</b>	<b>20.4</b>	<b>1.90</b>	<b>43.2</b>	<b>0.59</b>	<b>1.97</b>	<b>49.1</b>	<b>0.58</b>	<b>1.78</b>	<b>0.88</b>	<b>1.00</b>	<b>1.08</b>

#### 4. 맺는말

이상에서 간단히 제로-스팬 인장강도의 원리와 응용 예를 살펴보았다. 이미 제로-스팬의 측정 기술이 개발 보급된 지는 오래 되었으나 초기의 측정이 불편하다는 인식이 각인된 탓에 측정하기 편리한 장치들이 개발되었음에도 불구하고 다른 측정기기에 비해 다소 소외된 감이 있다. 여기에 소개된 외에도 다양한 응용이 가능하므로 측정 원리 및 응용 기술을 익혀 조업 현장 및 연구실에서 품질 관리 및 공정관리에 널리 사용될 수 있기를 바란다.



## 인용문헌

1. Duncker, B. and Nordman, L., Determination of the strength of single fibres, *Paperi ja Puu* 47(10):539(1965).
2. Page, D.H., El-Hosseiny, F. and Winkler, K., Behavior of single wood fibres under axial tensile strain, *Nature* 229(1):252(1971).
3. Page, D.H., El-Hosseiny, F., Winkler, K. and Bain, R., The mechanical properties of single wood pulp fibres. Part 1. A new approach, *Pulp and Paper Magazine of Canada* 73(8):T198(1972).
4. El-Hosseiny, F. and Pge, D.H., The mechanical properties of single wood pulp fibres : theories of strength, *Fiber Science and Technology* 8:21(1975).
5. Kim, C.Y., Page, D.H., El-Hosseiny, F. and Lancaster, A.P.S., Mechanical properties of single wood pulp fibers. III. Effect of drying stress on strength, *Journal of Applied Polymer Science* 19(6):1549(1975).
6. Page, D.H., and El-Hosseiny, F., The mechanical properties of single wood fibers. Part 4. the influence of defects, *Svensk Papperstidning* (14):471(1976).
7. Page, D.H., El-Hosseiny, F., Winkler, K. and Lancaster, A.P.S., Elastic modulus of single wood pulp fibers, *Tappi* 60(4):114(1977).
8. Page, D.H., and El-Hosseiny, F., The mechanical properties of single wood pulp fibres. Part VI. Fibril angle and the shape of the stress-strain curve, *JPPS* 9(4):TR99 (1983).
9. Ehrnrooth, E.M.L. and Kolseth, P., The tensile testing of single wood pulp fibers in air and in water, *Wood and Fiber Science* 16(4):549(1984).
10. Jacobsen, H., *Paper Trade Journal* 81(22):52(1925).
11. Boucai, E., Zero-span tensile test and fiber strength, *Pulp and Paper Magazine Canada* 72(10):73(1971).
12. Cowan, W.F. and Cowdrey, E.J., Evaluation of paper strength components by short-span tensile analysis, *Tappi Journal* 57(2):90(1974).
13. El-Hosseiny, F. and Bennet, K., Analysis of the zero-span tensile strength of paper, *JPPS* 11(4):J121(1985).

14. Gurnagul, N. and Page, D.H., The difference between dry and rewetted zero-span tensile strength of paper, *Tappi Journal* 72(12):164(1989).
15. Cowan, W., Rapid testing of fiber quality of machine-made paper, *Pulp and Paper Canada* 91(2):T57(1990).
16. Cowan, W.F., Testing pulp quality - An alternative to conventional laboratory evaluation, *Tappi Journal* 77(10):77(1994).
17. Balint, L., At what cost quality? Case studies of measurements that facilitate the optimization of cost and quality, *Proceedings of TAPPI Pulping/Process and Product Quality Conference*, pp. 308-311(2000)..
18. Van den Akker, J.A., Lathrop, A.L., Voelker, M.H. and Dearth, L.R., Importance of fiber strength to sheet strength, *Tappi* 41(8):416(1958).
19. Lorraine, C., Wielen, V., Elder, T. and Ragauskas, A.J., Analysis of the topochemical effects of dielectric-barrier discharge on cellulosic fibers, *Cellulose* 12:185(2005).
20. Cowan, W.F., Comparing pulp mill Pulmac fiber quality testing with conventional laboratory evaluation.
21. Mohlin, U.B., Dahlbom, J. and Hornatowska, J., Fiber deformation and paper strength, *TAPPI Journal* 79(6):105(1996).
22. Khantayanuwong, S., Effects of beating and recycling on strength of pulp fibers and paper, *Kasetsart J.(Nat. Sci.)* 36:193(2002).
23. Cowan, W.F., Fiber process control.