

고해부하가 종이의 물성에 미치는 영향

김 용 식 · 원 종 명*

(2000년 11월 10일 접수, 2001년 2월 5일 채택)

The Effect of Refining Load on the Paper Properties

Yong Sik Kim and Jong Myoung Won*

(Received November 10, 2000; Accepted February 5, 2001)

ABSTRACT

The effects of refining load on the paper properties were investigated. HwBKP, SwBKP and SwUKP were refined with PFI mill at the load of 3.33 N/mm and 6.00 N/mm. Higher Scott bond was obtained at the higher refining load for three pulp used in this study. However any changes in the light scattering coefficient with the change of refining load were not observed. Although the effect of refining load on the formation index for SwUKP was not observed, higher refining load gave the better formation for HwBKP and SwBKP. The fiber mass and fiber crowding factor were not affected by the refining load. Higher apparent density and tensile index were obtained with the higher refining load. However, the higher refining load did not improve the tensile index at the same apparent density. The tear index was decreased with the increase of refining load.

Keywords: Refining load, Internal bond strength, Light scattering coefficient, Formation index, Fiber mass, Crowding factor, Paper properties

1. 서론

고해는 종이의 성질을 거의 좌우한다고 할 정도로 제지공정에 있어서의 비중이 매우 크다. 이는 종이의 두께, 밀도, 평활도, 다공성, 투기도 및 지필도와 같은 구조적인 성질뿐만 아니라 내부 결합강도, 인장강도, 인열강도, 파열강도, 뺏빳이 및 내절도 등의 강도적 성질, 불투명도와 같은 광학적 성질, 치수안정성, 그 외에 흡수성, 인쇄지분, 표면 마찰계수 등과 같은 가공적성 등에도 크게 영향을 미친다. 고해에 의하여 변

화됨으로써 종이의 물성에 영향을 미치는 주요 인자는 섬유 표면의 개질, 섬유의 유연성과 압축성의 증가, 섬유장의 감소 등이며, 섬유포화나 팽윤은 특히 화학 펄프에서 고해를 통해 변화되는 중요한 인자이다.¹⁾ 고해에 영향을 미치는 인자²⁾는 원료, 장치 특성, 그리고 공정의 변수로 나누어진다. 원료에서는 수종, 춘재와 추재의 비율, 섬유의 조도(coarseness), 섬유의 화학적 조성, 펄프화 방법, 펄프화 정도, 표백의 방법 및 정도, 건조나 기계적 전처리, 섬유장 분포 등이

• 신호제지(주) 중앙연구소(Shinho Paper R&D Center, #141-1, Rueup-Dong, Osan-City, Kyungki-Do 447-160, Korea).

* 강원대학교 산림과학대학 제지공학과(Dept. of Paper Science & Engineering, College of Forest Sciences, Kangwon National University, Chunchon 200-701, Korea).

있으며, 장치의 특성에서는 바아의 크기와 형태, 바아와 골의 면적, 골의 깊이, 댐의 유무, 재질, 마모 형태, 바아 각도, 그리고 회전 속도 등이 고려될 수 있고, 공정 변수에서는 온도, pH, 농도, 첨가제, 전처리, 생산 속도, 적용 동력 등이 고려될 수 있다. 그러나 이와 같이 많은 변수들 중 제지공장에서 제지공정 및 종이의 품질을 조절하기 위하여 가장 많이 사용하고 있는 것은 고해세기(refining intensity)이다. 이러한 목적을 위하여 SEL(specific edge load)이 가장 널리 사용되고 있으며, 그 외에 Lewis와 Danforth³⁾에 의하여 처음 제안된 섬유에 대한 충격의 수와 세기, Kerekes⁴⁾에 의하여 유도된 C-factor(리화이너를 통과하는 섬유의 양 F와 순동력 공급량 P로부터 충격의 수 N과 충격의 세기 I를 계산할 수 있게 해 줌) 등이 있다.

고해부하에 대한 연구가 이루어지기 전에는 Shopper Riegler, Canadian Standard Freeness, TAPPI drainage와 같은 측정 수단이 사용되었으나, 고해된 섬유의 상태를 정확히 파악하는 데는 한계가 있다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위하여 고해부하에 대한 연구가 이루어지게 되었다. 고해부하에 대한 정의는 Wulsch 등⁵⁾에 의하여 처음 정의되었으며, 그후 Brecht,⁶⁾ Danforth,⁷⁾ Arjas 등,⁸⁾ 그리고 Leider 등⁹⁾에 의하여 고해부하에 대한 연구가 이루어졌다. 1990년대에 들어서면서 보다 구체적이고, 깊이 있는 연구들¹⁰⁻¹⁶⁾이 많이 수행되었는데, Baker¹⁷⁾는 여러 가지 고해기 관련 이론의 비교를 통하여 C-factor 방정식을 사용할 경우 정확한 결과를 얻을 수 있기는 하지만 SEL이 리화이닝 작용을 정량화할 수 있는 가장 빠른 방법이라고 하였다.

본 연구에서는 고해부하가 탈수 특성에 미치는 영향에 대하여 보고한 전보¹⁸⁾와 관련하여 제지공정의 조절에 사용할 수 있는 기초 자료를 얻기 위하여 고해부하가 종이 물성에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 재료 및 방법

공시 펄프로는 침엽수 미표백 크라프트 펄프(SwUKP)와 침엽수 및 활엽수 표백 크라프트 펄프(SwBKP, HwBKP)를 사용하였다. 고해기로는 PFI Mill을 사용하였으며, 펄프 농도는 10%로 조절하고, 회전수를 2000, 4000, 6000 및 8000회로 변화시켰다. 고해부하의 변화는 바아의 압력을 3.33 N/mm와 6.00 N/mm로 조절하여 변화시켰으며, 이때 걸린 부하는 Table 1과 같다.

Table 1. Refining load and average SEL×L value applied for different pulps

Pulp	Load (N/mm)	Average SEL×L (W·sec.)
HwBKP	3.33	0.641
	6.00	0.716
SwBKP	3.33	0.713
	6.00	0.789
SwUKP	3.33	0.759
	6.00	0.844

고해한 각 펄프에 대하여 종이의 물성을 측정하기 위하여 실험실용 수초지기(Formax II, Adirondack Machine Co.)로 평량 80 g/m²의 수초지를 제조한 후 formation index(Paprican Micro-scanner, Optest Equipment), fiber mass, fiber crowding factor, 광산란계수(Erlepho 3000), 상대결합면적, 투기도(L & W densometer), 인장강도(M350, Testometric Co.), 제로-스팬 열단장(TS-1000, Pulmac) 및 인열강도(L & W tearing tester)를 측정하였다. 상대결합면적은 Ingmanson 등¹⁹⁾이 이용한 바와 같이 인장강도에 대하여 광산란계수를 도시하여 각 펄프에 대하여 S₀ 값을 구한 후 다음 (1) 식에 의하여 산출하였다.

$$RBA = 1 - \left(\frac{S}{S_0} \right) \quad (1)$$

여기에서,

RBA : 상대결합면적

S : 광산란계수(m²/kg)

S₀ : 섬유간 결합이 zero일 때의 광산란계수(m²/kg)

3. 결과 및 고찰

3.1 섬유간 결합 특성

섬유간 결합은 고해 방법 및 정도에 따라 일어나는 섬유 특성의 변화에 의하여 좌우되며, 결국 종이 성질의 대부분에 중대한 영향을 미친다. 각 고해조건별로 처리된 공시펄프로 제조된 종이의 내부 결합강도를 측정된 결과 Fig. 1과 같이 침엽수 표백 크라프트 펄프가 가장 높은 값을 나타내었으며, 전반적으로 고해부하와 고해 수준이 높을수록 높은 값을 나타내었다. 섬유간 결합을 간접적으로 평가할 수 있는 광산란계수는

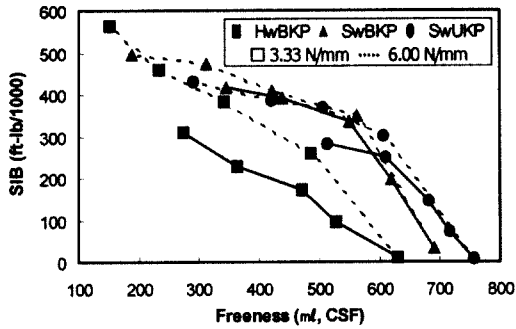


Fig. 1. Effect of refining load on the Scott internal bond strength.

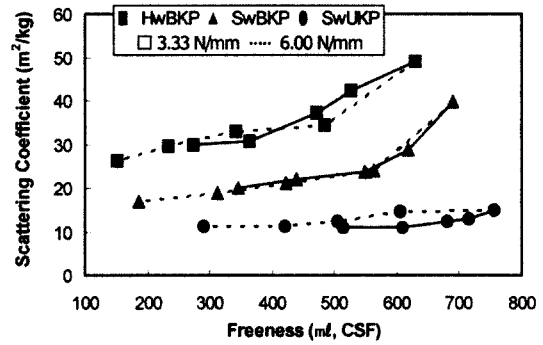


Fig. 2. Effect of refining load on the light scattering coefficient.

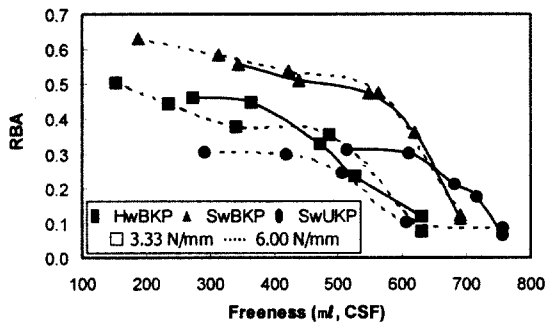


Fig. 3. Effect of refining load on the relative bonded area.

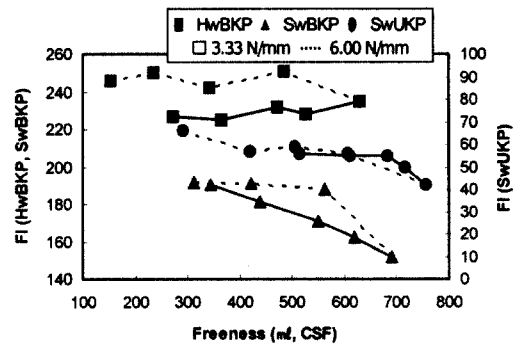


Fig. 4. Effect of refining load on the formation index.

Fig. 2와 같이 여수도에 대하여 도시할 경우 고해부하에 따른 변화가 관찰되지 않았으며, 단섬유인 활엽수 표백 크라프트 펄프로 만든 종이의 광산란계수가 가장 높게 나왔고, 침엽수 표백 크라프트 펄프, 침엽수 미표백 크라프트 펄프의 순으로 감소되었다. 이와 같은 결과가 나온 것은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 활엽수 표백 크라프트 펄프가 침엽수 표백 크라프트 펄프보다 상대결합면적이 적을 뿐만 아니라, 동일한 표백 펄프라 하더라도 활엽수 펄프가 침엽수 펄프에 비하여 비표면적이 크기 때문에 빛을 보다 많이 산란시킬 수 있기 때문인 것으로 사료된다. 한편 침엽수 미표백 크라프트 펄프가 상대결합면적이 가장 적음에도 불구하고 낮은 광산란계수를 나타낸 것은 미표백 화학 펄프가 지니는 특유의 색에 의한 빛의 흡수로 말미암아 상대적으로 빛의 산란이 크게 감소되었기 때문이다. 이는 고해진행에 따라 Kim 등^{20, 21)} 결과와 같이 WRV가 증가되어 섬유간 결합력이 증가하기 때문으로 사료된다.

3.2 지필도

펄프 종류별, 고해부하별 및 고해 수준에 따른 formation index는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 펄프 종류별로는 활엽수 표백 크라프트 펄프가 가장 우수하였고, 침엽수 미표백 크라프트 펄프가 가장 낮은 값을 나타내었다. 침엽수 및 활엽수 표백 크라프트 펄프의 경우 고해부하가 높을수록 지필도가 개선되었는데, 이는 Kim 등¹⁸⁾에 의한 연구 보고와 같이 고해를 통하여 섬유장의 감소가 일어났기 때문인 것으로 생각된다. 고해 수준의 증가에 따른 변화는 비록 침엽수 표백 크라프트 펄프의 경우 다소 벗어나는 결과를 나타내었으나 대부분이 고해부하 및 펄프 종류에 관계없이 고해가 진행될수록 지필도가 다소 개선되었다.

Fiber mass의 펄프 종류별, 고해부하별 및 고해 수준별 변화를 조사한 결과 Fig. 5에서 보는 바와 같이 활엽수 표백 크라프트 펄프가 가장 낮은 값을 나타내었고, 침엽수 미표백 크라프트 펄프가 가장 높은 값을

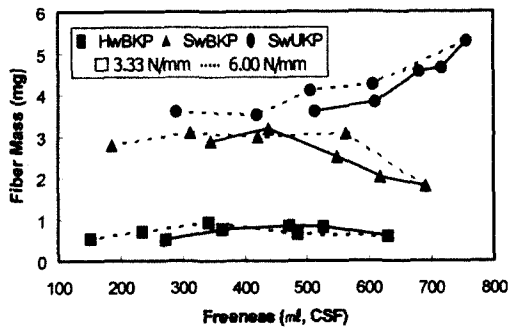


Fig. 5. Effect of refining load on the fiber mass.

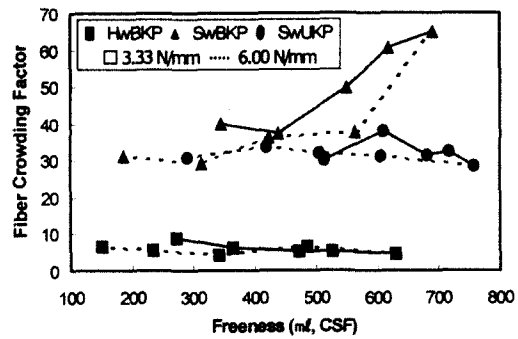


Fig. 6. Effect of refining load on the fiber crowding factor.

나타내어 지필도 측정 결과와 잘 일치하는 경향을 나타내었으나 고해부하에 따른 변화는 명백하지 않았고, 대체로 고해 수준이 높아질수록 fiber mass가 감소되어 지필도의 개선에 기여한 것으로 사료된다.

종이의 지필도와 밀접한 관계가 있는 것으로 알려진 fiber crowding factor는 다음 식 (2)에서 보는 바와 같이 평균 섬유 농도, 섬유장 및 섬유의 조도에 의하여 좌우된다. 따라서 고해에 의하여 다소 영향을 받을 것으로 생각되어 fiber crowding factor를 구한 결과 Fig. 6과 같이 고해부하 및 고해 수준의 영향은 명백치 않았다. 펄프 종류별 변화는 활엽수 표백 크라프트 펄프의 경우 가장 낮은 값의 fiber crowding factor를 나타내어 지필도 측정치와 유사한 경향을 나타내었으나, 침엽수 표백 크라프트 펄프와 침엽수 미표백 크라프트 펄프의 경우는 다소 다른 경향을 나타내었다.

$$\text{Fiber Crowding Factor} = \frac{5C_M L^2}{\omega} \quad (2)$$

여기에서,

C_M : 평균농도, %

L : 섬유장, m

ω : fiber coarseness, kg/m

3.3 종이의 물성

종이의 대표적인 물성이라고 할 수 있는 밀도는 제지공정 조건뿐만 아니라 섬유장, 조도 및 유연성과 같은 섬유의 특성에 의하여 영향을 받는다. 펄프 종류별, 고해부하별 및 고해 수준별로 밀도를 측정된 결과 Fig. 7과 같이 침엽수 표백 크라프트 펄프가 가장 높

았고, 활엽수 표백 크라프트 펄프가 가장 낮은 값을 나타내었다. 이와 같은 결과가 나타난 것은 섬유 자체의 섬유간 결합 특성도 중요하지만 섬유의 조도가 중요한 영향인자로 작용하였기 때문이다. 즉 활엽수의 경우 침엽수 섬유에 비하여 섬유장이 짧기 때문에 상대적으로 조도가 낮아서 침엽수 펄프보다 벌키한 종이 구조를 제공해 주기 때문이다. 비록 침엽수 미표백 크라프트 펄프의 경우 낮은 고해 수준에서만 비교되었기 때문에 고해부하의 영향을 논하기 어려우나, 침엽수 및 활엽수 표백 크라프트 펄프의 경우 고해부하가 높을수록 높은 밀도를 나타내었다. 한편 밀도와 밀접한 관계를 나타내는 투기도는 Fig. 8과 같이 활엽수 표백 크라프트 펄프의 경우 가장 우수한 투기도를 나타내었으며, 낮은 고해부하 적용시 다소 우수한 투기도가 얻어졌다.

간접적인 섬유장 및 섬유간 결합 정도를 비교하는데 사용될 수 있는 제로-스팬 인장지수는 Fig. 9와 같

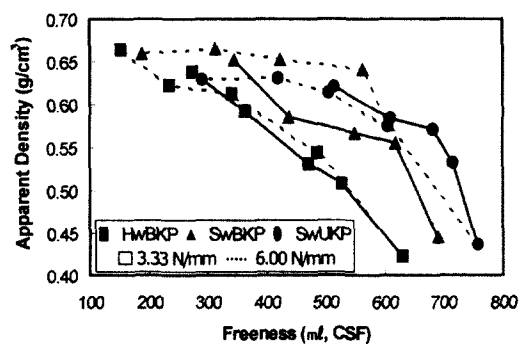


Fig. 7. Effect of refining load on the apparent density.

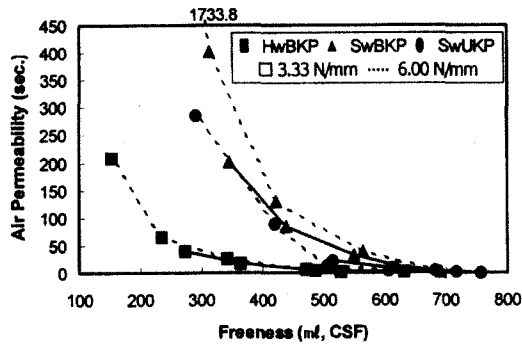


Fig. 8. Effect of refining load on the air permeability.

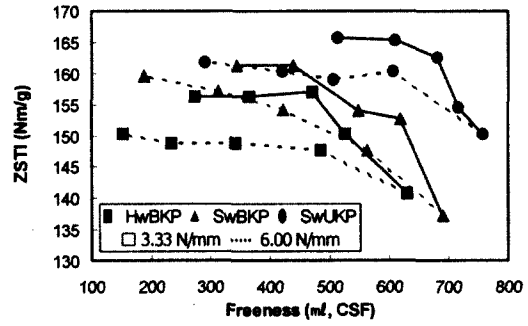


Fig. 9. Effect of refining load on the zero-span tensile index.

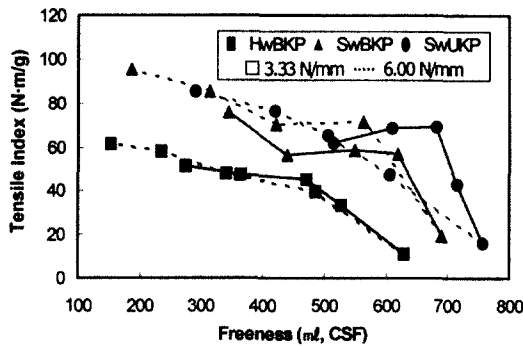


Fig. 10. Effect of refining load on the tensile index.

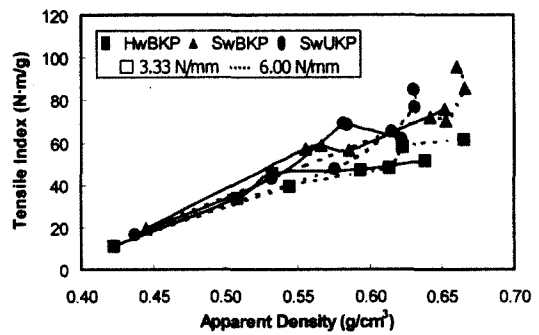


Fig. 11. Relationship between tensile index and apparent density.

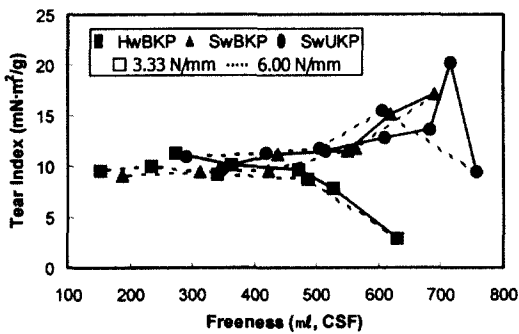


Fig. 12. Effect of refining load on the tear index.

이 침엽수 미표백 크라프트 펄프가 가장 높았고, 활엽수 표백 크라프트 펄프가 가장 낮은 값을 나타내었다. 전반적으로 고해 수준이 증가됨에 따라 제로-스팬 인장지수가 다소 증가된 것은 어느 정도까지는 섬유간

결합의 영향을 받기 때문이다. 또한 펄프 종류에 관계 없이 고해부하가 높을수록 낮은 값을 나타내었는데 이러한 결과는 높은 고해부하에 의해 섬유의 손상이 그만큼 크게 일어났음을 의미한다.

인장지수에 대한 고해부하의 영향은 Fig. 10과 같이 고해 초기에는 분명치 않았으나, 고해가 진행됨에 따라 고해부하가 높을수록 다소 높은 인장지수를 나타내었다. 특히 높은 고해부하 적용시 낮은 여수도가 얻어졌는데, 이는 Kim 등¹⁸⁾의 보고와 같이 높은 고해부하를 적용할 경우 단섬유화 및 미세분 발생이 보다 많이 일어났기 때문인 것으로 사료된다. 이미 Fig. 1에서 높은 고해부하 적용시 높은 Scott bond가 얻어질 수 있음이 밝혀진 바 있으며, 이와 같은 결과를 통하여 낮은 고해부하에서 주로 일어나는 소섬유화에 의한 섬유간 결합 및 강도개선 효과도 중요하지만, 미세분 함량이 많지 않은 환경에서는 높은 고해부하에 의하여 발생되는 미세분에 의한 개선 효과가 크게 나타날 수

있음을 알 수 있었다. 인장지수를 겉보기 밀도에 대하여 도시한 결과 Fig. 11과 같이 고해부하를 증가시키다 할지라도 인장지수의 개선 효과가 얻어지지 않음이 확인되었다. 인열지수는 Fig. 12와 같이 낮은 고해부하 적용시 다소 높은 값이 얻어졌다.

4. 결론

제지공정 조절을 위하여 사용되는 고해부하가 종이의 성질에 미치는 영향을 조사하기 위하여 PFI Mill로 SwBKP, HwBKP 및 SwUKP에 대한 고해 실험을 실시하였다. 고해 농도는 10%로 고정시키고, 고해부하는 바아의 압력을 3.33 N/mm와 6.00 N/mm로 조절하여 변화시켰고, 고해 수준은 PFI Mill의 회전수를 2,000, 4,000, 6,000, 8,000회로 하여 조절하였다.

내부 결합강도를 나타내는 Scott bond는 전반적으로 고해부하와 고해 수준이 높을수록 높은 값을 나타내었으며, 침엽수 표백 크라프트 펄프가 가장 높은 값을 나타내었다. 광산란계수는 고해부하에 따른 변화가 관찰되지 않았으며, 단섬유인 활엽수 표백 크라프트 펄프로 만든 종이의 광산란계수가 가장 높게 나왔다. 상대결합면적에 대한 고해부하의 영향은 비록 SwBKP의 경우에 뚜렷하지 않았지만, HwBKP 및 SwUKP는 고해부하가 낮을수록 높은 상대결합면적을 나타내었다.

SwUKP는 고해부하에 따른 formation index의 변화를 나타내지 않았으나, HwBKP와 SwBKP는 고해부하가 높을수록 지필도가 개선되었는데, 이것은 고해를 통하여 섬유장의 감소가 일어났기 때문인 것으로 생각된다. 종이의 지필도에 영향을 미치는 것으로 알려진 fiber mass는 고해부하에 따른 변화는 명백하지 않았고, 대체로 고해 수준이 높아질수록 fiber mass가 감소되어 지필도의 개선에 기여한 것으로 사료된다. Fiber crowding factor는 고해부하 및 고해 수준의 영향이 명백치 않았다.

SwUKP의 경우 낮은 고해 수준에서만 비교되었기 때문에 고해부하의 영향을 논하기 어려우나, SwBKP 및 HwBKP의 경우 고해부하가 높을수록 높은 밀도를 나타내었다. 투기도는 낮은 고해부하 적용시 보다 우수한 투기도가 얻어졌다. 인장지수는 높은 고해부하 적용시 높은 값을 나타내었으나 이러한 결과는 미세분 발생에 의한 섬유간 결합 및 밀도의 증가에서 비롯된 것으로 사료된다. 인열지수는 낮은 고해부하에서 다소 높은 값이 얻어졌다.

인용문헌

1. Stone, J. E., Scallan, A. M., and Abrahamson, B., Influence of beating on cell wall swelling and internal fibrillation, *Svensk Papperstidning*, 71(19):687 (1968).
2. Stevens, W. V., *Refining, Pulp and Paper Manufacture*, vol. 6, TAPPI Press, p. 208 (1992).
3. Lewis, J. and Danforth, D. W., Stock preparation analysis, *Tappi*, 45(3):185 (1962).
4. Kerekes, R. J., Characterization of pulp refiners by a C-factor, *Nordic Pulp Paper Research J.*, 1(5):3 (1990).
5. Wultsch, F., and Flucher, W., Small Escher-Wyss refiner as a standard testing instrument for modern stock preparation plants, *Das Papier*, 12(13/14):334 (1958).
6. Brecht, W., A method for the comparative evaluation of bar equipped beating devices, *Tappi*, 50(8):40A (1967).
7. Danforth, D. W., Stock preparation : Theory/practice, *Southern Pulp and Paper Manufacturer*, 32(7):52 (1969).
8. Arjas, A., Huuskonen, J., and Ryti, N., Evaluation of the performance of a beating machine and of the beating result, Part 1, *Paperi ja Puu*, 52(4):269 (1970).
9. Leider, P. J., and Nissan, A. H., Understanding the disk refiner :the mechanical treatment of fibers, *Tappi*, 60(10):85 (1977).
10. Lumaiainen, J. J., New theory can improve practice, *PPI*, 32(8):46 (1990).
11. Lumaiainen, J. J., Specific surface load theory and the Conflo refiner concept, *PIRA Conference on Current and Future Technologies of Refining Conference*, Paper 16 (1991).
12. Welch, L. V. and Kerekes, R. J., Characterization of the PFI mill by the C-factor, *Appita*, 47(5):387 (1994).
13. Meltzer, F. P. and Speke, P. W., New ways to forecast the technological results of refining, *Third International Refining Conference*, Atlanta, GA, U. S. A., Paper 2 (1995).
14. Kerekes, R. J., Oullet, D., and Martinez, M., New perspectives on refining intensity, *Third*

- International Refining Conference, Atlanta, GA, U. S. A., Paper 3 (1995).
15. Lumiainen, J. J., Specific surface load theory, Third International Refining Conference, Atlanta, GA, U. S. A., Paper 5 (1995).
 16. Bennett, P. D., Jansson, S., Turt, V., Genco, J. M., and Lonnberg, B. K., 1996 Engineering Conference, Book 2, pp. 505-516 (1996).
 17. Baker, C. F., Critical review of refiner theory, Third International Refining Conference, Atlanta, GA, U. S. A., Paper 7 (1995).
 18. Kim, Y. S., and Won, J. M., Effect of refining load on the drainage characteristics of pulp, J. Korea Tappi, 32(4):10 (2000).
 19. Ingmanson, W. L. and Thode, E. F., Factors contributing to the strength of a sheet of paper, II. Relative bonded area, Tappi, 42(12):83 (1959).
 20. Kim, S. H., Park, J. M., and Kim, C. H., Effects of fiber wall thickness on paper properties using CLSM. J. Korea Tappi, 31(1):39 (1999).
 21. Kim, S. H., Park, J. M., and Kim, C. H., Analysis of effects of fiber's collapse index on physical properties of paper using CLSM. J. Korea Tappi, 31(1):46 (1999).