

종이의 특성에 영향을 미치는 펄프 섬유특성의 정량적 해석(I)

李康鎭^{*1} · 朴鍾文^{*1}

Quantitative Analysis of Pulp Fiber Characteristics that Affect Paper Properties(I)

Kang-Jin Lee^{*1} and Jong-Moon Park^{*1}

ABSTRACT

Refining is one of the most important processes of fiber treatment that provides optical and physical properties of final paper products. The evaluation method of refining progress is usually freeness (CSF) or wetness (SR) test because of its rapidity and convenience. However, there are some deficiencies in using freeness or wetness test to evaluate pulp fibers accurately because its results are more influenced by fines contents than extent of fibers treatment. The objective of this study is to show the deficiency of wetness in evaluating the refining process. For this, beating is done by varying the beating load. Handsheets are made after beating until 25 and 32° SR, and then paper properties are measured. Refined fibers are analyzed by fiber length, fines contents, curl, kink, WRV, and zero-span tensile strength.

The results show that longer beating time is required to reach the same wetness at lower beating load. There are differences in the average fiber length, distribution curve of fiber length, fines contents, curl, kink, WRV of long fiber fraction, drainage time, and zero-span tensile strength of rewetted sample at different beating load. At the low beating load in the same wetness, apparent density, breaking length, burst strength, and tear strength are higher, while opacity and air permeability are lower than those of the high beating load.

Using Page's equation, which shows the relationship among tensile strength, intrinsic fiber strength, and interfiber bonding strength, interfiber bonding strength is calculated and analyzed to explain final paper properties. At 25° SR, interfiber bonding strength is only slightly higher at 2.5kgf beating load, while the intrinsic fiber strength is substantially higher. At 32° SR, intrinsic fiber strength is a little bit higher at 2.5kgf beating load, and interfiber bonding strength is remarkably higher than those of 5.6kgf beating load. These results can be used to explain the different properties of the final paper at selected beating loads.

*1 충북대학교 임산공학과 (Department of Forest Products, Chungbuk National University, Cheongju, 361-763, Korea).

1. 서론

고해 결과 분석을 위한 기존의 평가방법으로 캐나다 표준 여수도 시험기(Canadian standard freeness tester)와 쇼퍼리글러 여수도 시험기(Schopper Riegler wetness tester)가 널리 쓰이고 있다. °SR과 CSF의 측정값은 지료내의 미세섬유의 양에 의해 크게 영향받는 것으로 알려져 있다. 따라서 이들 여수도 측정값은 일차벽과 이차벽의 바깥층의 제거에 의한 미세섬유의 발생 정도와 섬유의 절단이라는 고해 효과를 측정할 뿐 고해의 주기작인 피브릴화를 평가하는데는 충분하지 못하다고 본다.

고해의 효과를 평가한다는 의미는 펄프섬유가 얼마나 변형되었느냐의 평가이다. 따라서 본 연구에서는 여수도만으로 펄프섬유를 평가하는 것의 무리함을 밝히고, TAPPI 방법에 의한 펄프섬유 평가방법을 이용하여 고해정도를 정확히 평가하고자 하였다. 이를 위해 고해하중(beatting load)을 변화시켜 25와 32°SR까지 고해를 수행하였으며, 이를 수초지한 후 종이특성을 측정하였다. 고해처리 후의 펄프섬유의 섬유장, 미세섬유함량, 컬(curl), 키크(kink), WRV(Water Retention Value), 제로-스팬 인장강도를 측정하였고, 이 결과를 이용하여 종이특성을 해석하였다. 또한 Page식을 이용하여 섬유간 결합력을 정량화하였고, 이 자료를 이용하여 최종 종이의 특성을 해석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 공시펄프

공시펄프로는 Howe Sound사에서 제조한 상품명 "Howe Sound 400"이라는 혼합 침엽수 표백 크라프트 펄프를 사용하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 고해

TAPPI T248에 의거 실험실용 Valley beat-

er를 이용하여 2.5kgf, 4.0kgf, 5.6kgf의 세가지 고해하중으로 변화시키면서 25와 32°SR이 되도록 고해하였다.

2.2.2 펄프섬유의 특성 분석

섬유장분석에는 Kajaani FS-200 Fiber Analyzer를 사용하여 측정하였다.

미세섬유의 영향을 배제한 진정한 피브릴화를 측정하기 위하여 미세섬유를 제거한 장섬유분만의 WRV를 측정하였다. WRV는 TAPPI UM256에 의거하여 900G로 30분간 원심분리시킨 후 측정하였다. 미세섬유제거는 지료를 0.1%로 희석하여 200mesh 스크린을 이용 미세섬유를 걸러내었다. 이러한 과정은 여과되어 나온 물이 맑아졌다고 판단될 때까지 반복하였다. 미세섬유의 양, 컬, 키크는 FQA(Fiber Quality Analyzer)를 이용하여 측정하였다. 중력탈수시간(gravity drainage time)은 TAPPI T221에 의거 DDJ(Dynamic Drainage Jar)를 이용하여 총 500mL 중에서 450mL의 물이 자연탈수될 때까지의 시간을 측정하여 나타내었다.

2.2.3 종이의 물성 측정

TAPPI 방법에 의거 조습처리 후 겉보기밀도, 인장강도, 인열강도, 파열강도를 측정한 후 열단장, 인열지수, 파열지수를 계산하였다. 섬유자체강도는 Pulmac사의 zero-span tensile strength tester를 이용하여 측정하였다.

광학적 특성중 백색도는 Hunter 백색도계를 이용하여 측정하고 %로 나타내었다.

투기도는 L&W사의 Gurley densometer로 측정하여 초로 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 고해하중에 따른 펄프섬유의 특성

3.1.1 고해하중에 따른 고해시간의 변화

고해하중에 따라 목표한 여수도까지 도달하는데 걸린 시간을 Table 1에 나타내었다. 고해하중이 클수록 목표여수도에 도달하는데 짧은 시간이 걸

Table 1. Beating response depending on different beating load (unit : min.)

Load(kgf)	Until 25° SR	Until 32° SR
5.6	37	52
4.0	47	56
2.5	63	91

렸다. 이는 고해하중이 커지면 펄프섬유의 절단이 많아져 미세섬유가 많이 발생되어 이들이 탈수성을 방해하므로, 목표 여수도까지 빨리 도달한 것으로 판단된다.

3. 1. 2 고해하중에 따른 섬유장과 미세섬유량의 변화

고해를 하는 동안 어떤 현상이 일어나는지 충분히 이해하기 위해서는 섬유장 분포의 변화를 파악하는 것은 중요하다.

Fig. 1은 32° SR의 동일고해수준에서 고해하중변화에 따른 섬유장의 분포곡선을 나타내고 있다. 5.6kgf의 높은 고해하중에서 1.0mm 이하의 단섬유가 많이 분포하였다. 반면에 2.5kgf의 낮은 고해하중에서는 1.5mm 이상의 장섬유가 많이 분포하였다. Table 2는 고해하중 변화에 따른 미세섬유 함량을 보여주고 있다. 동일 여수도

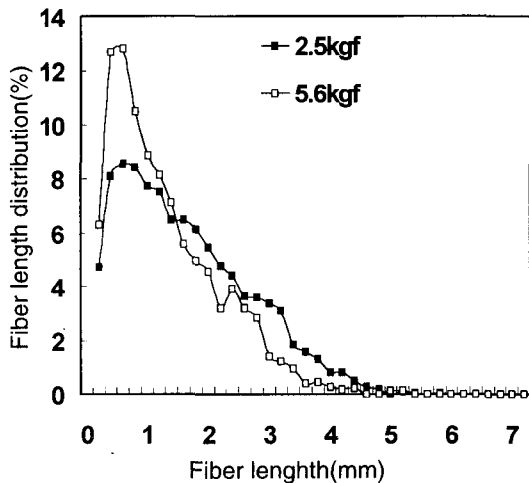


Fig. 1. Fiber length distribution depending on beating load at 32° SR.

Table 2. Effect of beating load on fines content at 32° SR

Load(kgf)	Fines content(%)	
	Arithmetic	Length weight
5.6	37.6	8.8
4.0	35.2	7.1
2.5	34.3	6.8

이지만 5.6kgf의 높은 고해하중보다는 2.5kgf의 낮은 고해하중에서 미세섬유 함량이 적었다. Fig. 1과 Table 2와 같은 결과는 고해하중의 영향 때문인데, 즉 높은 고해하중에서의 고해 시 펄프섬유에 가해지는 기계적인 충격이 커져 섬유를 보호하지 못하기 때문이다.

3. 1. 3 고해하중에 따른 펄프섬유의 컬과 키크의 변화

고해과정은 펄프섬유의 완만하고 지속적인 굴곡인 컬(curl)과 굴곡의 돌발적인 변형인 키크(kink)를 발생시킨다. 고해하중에 따른 컬과 키크의 변화를 각각 컬지수(curl index: CI)와 키크지수(kink index: KI)로 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서의 컬지수와 키크지수의 증가는 컬과 키크가 많아짐을 의미한다.

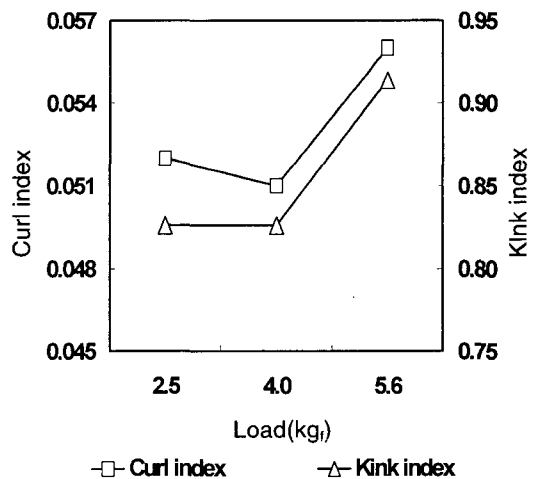


Fig. 2. Effect of beating load on length weighted curl index and kink index at 32° SR.

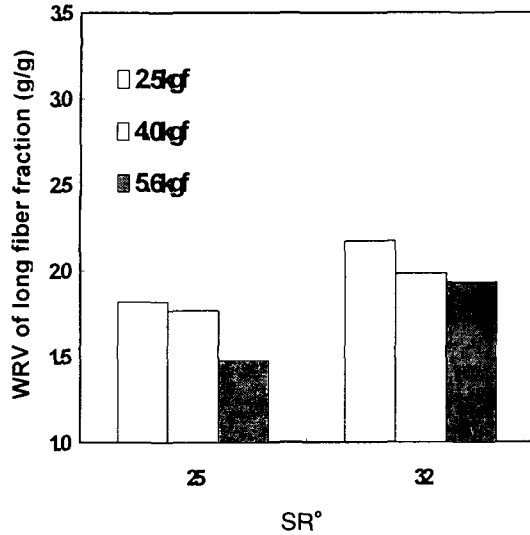


Fig. 3. Effect of beating load on long fiber WRV at the same wetness.

Fig. 2의 결과는 5.6kg_r의 높은 고해하중에서 쉐일 지수가 높게 나타났다. 또한 키크의 경우는 고해하중이 5.6kg_r로 높을 때가 키크지수가 컸다. 이는 고해하중이 커짐에 따라 바 사이를 통과하는 펄프섬유에 가해지는 기계적 충격이 커져 쉐일과 키크를 많이 발생시켰다고 사료된다.

3.1.4 고해하중에 따른 WRV의 변화

기존의 여수도를 통한 펄프섬유의 고해정도의 평가는 탈수정도에 따른 평가이므로 미세섬유의 영향이 크다고 알려져 WRV가 제안되었다. 그러나 Casey¹⁾는 WRV도 미세섬유의 SSA(Specific Surface Area)에 크게 영향받는다고 하였다. 따라서 본 연구에서는 진정한 피브릴화 측정에 근접하기 위해 미세섬유를 제거한 후 장섬유분(long fiber fraction)만의 WRV를 측정하였고, 이를 Fig. 3에 나타내었다.

2.5kg_r의 작은 고해하중에서 장섬유분의 WRV가 크게 나타났는데, 이는 작은 고해하중에서 피브릴화가 더 많이 진행되었음을 의미한다.

3.1.5 고해하중에 따른 탈수시간의 변화

DDJ를 이용하여 고해하중에 따른 탈수시간의

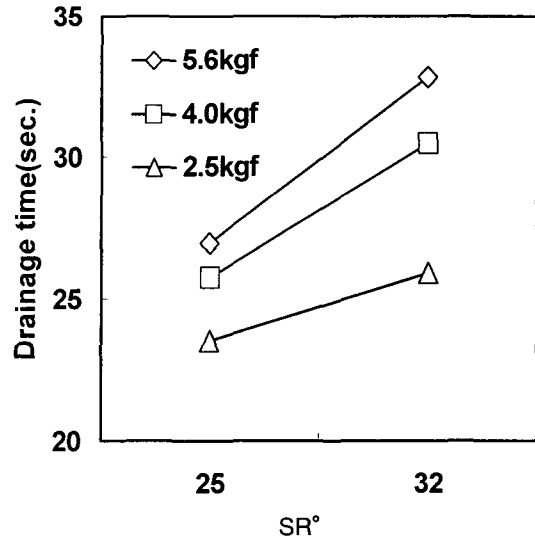


Fig. 4. Effect of beating load on gravimetric drainage time at the same wetness.

변화를 측정하였고 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 고해가 진행되면서 탈수시간은 지연되었으며, 고해하중별 탈수시간에서는 고해하중이 클 때가 탈수시간이 길었다. 즉 높은 고해하중인 5.6kg_r로 고해시 같은 양의 물이 탈수하는데 보다 오랜 시간이 걸린 것을 의미한다. Levlin 등²⁾이 여수도가 주로 미세섬유의 함량에 큰 영향을 받는다고 한 것처럼 미세섬유의 영향에 의해 탈수시간의 차이를 보인 것으로 사료된다. 즉 고해하중에 의해 펄프섬유의 특성이 달라지게 되었음을 의미한다.

3.2 겉보기밀도와 종이특성과의 관계

종이의 겉보기밀도는 종이의 물리적 강도, 광학적 성질, 투기성 등을 좌우하는 특성으로 알려져 있다.

Fig. 5는 고해하중에 따른 겉보기밀도의 변화를 나타내고 있다. 고해하중이 작아지고, 고해가 진행될수록 겉보기밀도가 상승되는 직선적인 관계를 보였다. 이러한 동일 여수도에서의 겉보기밀도의 차이는 고해하중에 따라 펄프섬유가 달리 영향받았음을 의미한다.

Figs. 6과 7은 겉보기밀도에 따른 종이특성의

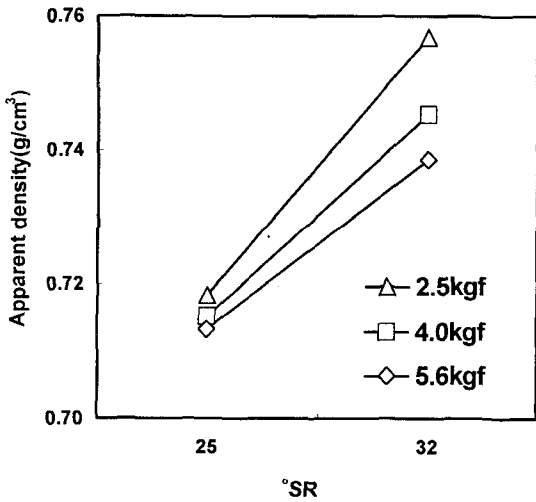


Fig. 5. Effect of beating load on apparent density at the same wetness.

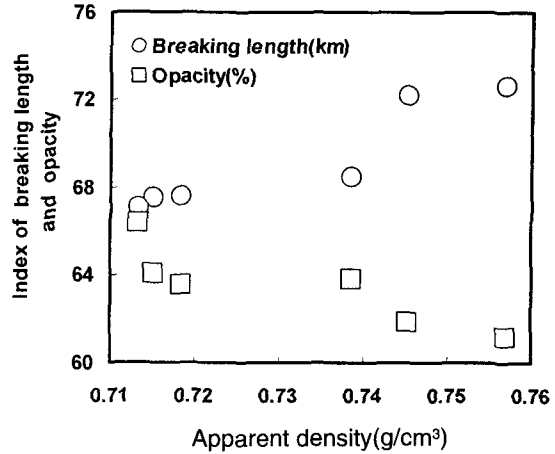


Fig. 6. Relationship among apparent density, tensile and opacity.

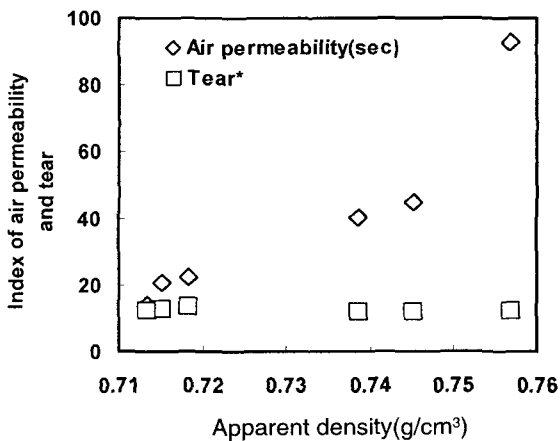


Fig. 7. Relationship among apparent density, air permeability and tear (*: mN · m²/g).

변화를 나타낸 것이다. 겉보기밀도가 증가함에 따라 즉, 고해하중을 작게할수록 인장, 인열강도가 증가하였고 불투명도와 투기도는 감소하였다. 이는 고해하중을 작게해 줌으로써 섬유장이 보호되고, 피브릴화에 의한 비표면적과 유연성의 증가로 수소결합이 증가하여 겉보기밀도가 상승되었기 때문에 사료된다. 이러한 겉보기 밀도의 상승이 인장강도의 상승을 가져왔고 상대적으로 작은 고해하중을 이용하므로 인열강도도 상승하였다. 또한 겉보기밀도의 상승은 광학적접촉 및 섬유간 결

합력의 향상을 의미한다. 따라서 빛의 산란력이 감소되어 불투명도가 떨어지고 섬유간 결합이 치밀해져 공기의 투과성이 나빠지므로 투기도도 떨어졌다.

3.3 섬유자체강도와 섬유간 결합력을 이용한 종이의 강도적 특성 해석

종이의 강도발현에는 섬유자체강도와 섬유간 결합력이 가장 중요한 요소로 작용하게 된다. 특히 섬유간 결합의 강도 및 면적이 크게 영향하게 된다.

Houen³⁾은 파괴기작(rupture mechanism)에서 섬유간 결합력과 섬유자체강도가 일정한 비를 갖고 강도에 영향하며, 섬유자체강도보다는 섬유간 결합력이 보다 큰 영향을 미친다고 하였다. 즉 섬유간 결합력과 섬유자체강도가 종이의 특성을 변화시킴을 알 수 있다. 이를 Page⁴⁾는 종이의 인장강도는 섬유의 수소결합 정도와 섬유의 자체강도에 의존한다고 보고하였다. 따라서 이미 종이의 인장강도와 섬유자체강도를 측정한다면 섬유간 결합력을 정량화할 수 있는 것이다.

3.3.1 고해에 따른 섬유자체강도의 변화

제로-스팬(zero-span) 인장강도 시험 방법은 섬유자체강도를 측정하기 위하여 개발되었다. 원⁵⁾

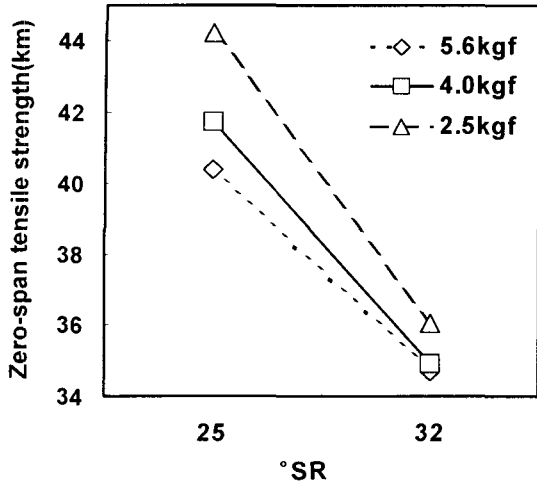


Fig. 8. Effect of beating load on the zero-span strength of rewetted sheet at the same wetness.

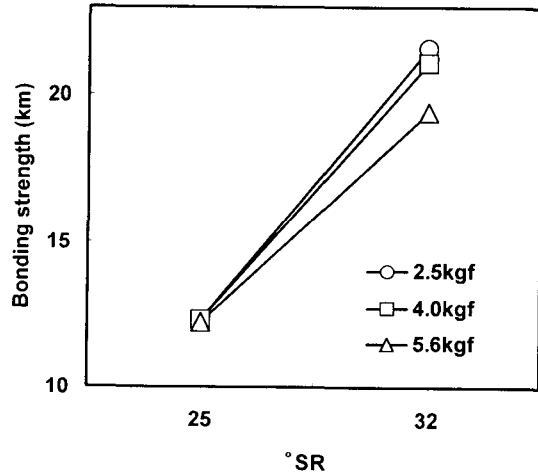


Fig. 9. Effect of beating load on bonding strength at the same wetness.

은 건조한 종이 시편에 대하여 제로-스팬 인장강도를 측정할 것을 제안하고 있다.

그러나 실험결과 건조종이 시편의 제로-스팬 인장강도에서는 스펠 길이에 따른 외삽함수의 상관관계수가 낮게 나타남으로써 섬유간 결합력이 내재되어 있음이 밝혀졌다. 따라서 본 연구에서는 섬유의 변형을 측정하는데 재습윤시킨 종이시편의 제로-스팬의 측정을 실시하였다.

Fig. 8은 재습윤 후의 섬유자체강도를 측정된 결과이다. 고해정도를 여수도로 x축에, 섬유자체강도의 변화를 y축에 나타내었다. 고해가 진행됨에 따라 섬유자체강도는 떨어졌다. 그리고 높은 고해하중인 5.6kgf보다는 낮은 고해하중인 2.5kgf일 때가 섬유자체강도가 보호되었다.

3.3.2 Page 관계를 이용한 섬유간 결합력의 정량화

Fig. 9는 Page식에 의해 고해하중별 섬유간 결합력을 정량화한 결과이다. 고해가 진행될수록 모든 고해하중에서 섬유간 결합력이 향상되었다. 25°SR에서의 고해하중에 따른 섬유간 결합력의 차이는 크지 않았다. 그러나 고해가 32°SR로 진행되면서 고해하중별 섬유결합력의 차이는 커졌다. 이는 Giertz⁶⁾의 보고처럼 고해가 되면서 펄프섬유의 유연성(flexibility)이 좋아져, 상호간

밀착성이 개선되고, Campbell 효과인 섬유간의 강한 인력으로 섬유표면에 있는 수산기들 사이에 수소결합이 많아져 섬유간 결합이 효율적으로 이루어졌기 때문이다.

3.3.3 섬유자체강도와 섬유간 결합력을 통한 종이 특성의 해석

Figs. 10, 11은 Page가 제시한 종이의 인장강도, 섬유자체강도와 섬유간 결합강도간의 관계식을 이용해 종이 특성 발현을 해석한 것이다. 여수도별 고해하중을 달리한 것을 x축에, 그리고 y축의 왼쪽으로 섬유간 결합력과 섬유자체강도를 표시하였으며, 오른쪽으로 종이 특성 변화를 나타내었다.

먼저 섬유의 자체 강도면에서 보면 섬유자체강도가 클수록, 종이의 인열강도와 파열강도가 상승하였다. 즉 동일 여수도라 하더라도 고해하중을 작게 하면 섬유자체강도의 감소가 줄고, 섬유장이 보호되어 파열, 인열강도가 상승한다는 것이다.

섬유간 결합력 측면을 보면 25°SR에서는 고해하중별 섬유간 결합력이 큰 차를 보이지는 않지만, 고해가 32°SR로 진행되면서 그 차가 뚜렷해져, 2.5kgf의 고해하중에서 섬유간 결합력이 컸다. 이는 고해하중에 따른 퍼브릴화와 섬유장의 차이 때문인데, 고해하중을 작게 하여 보다 완화(mild)된 고해하중을 가하면 장섬유분만의 WRV

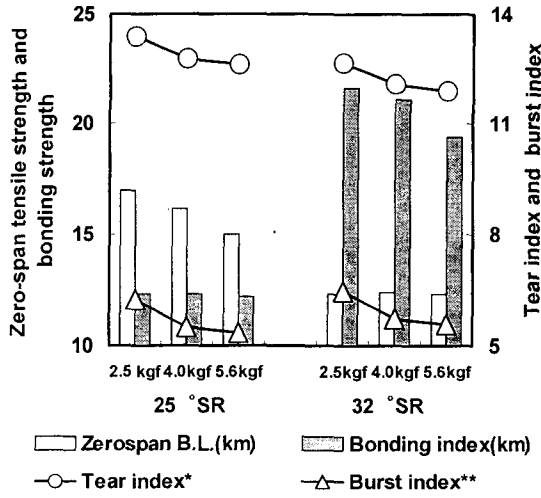


Fig. 10. Relationship of paper's tear and burst strength using Page's equation at the same wetness (* : $mN \cdot m^2/g$, ** : $kPa \cdot m^2/g$).

에서 알 수 있듯이 보다 많은 피브릴화를 유도하게 되므로 섬유간 결합력이 향상되어 종이의 강도가 상승한 것으로 사료된다. 또한 섬유장의 분포에서 알 수 있듯이 고해하중이 큰 경우는 섬유의 절단(cutting)이 상대적으로 많이 발생되기 때문에 종이의 파열, 인열강도가 떨어졌다고 사료된다.

Casey¹⁾는 섬유간 결합력과 불투명도 간의 높은 상관성을 보고하였으며, 섬유간 결합면적을 측정하는 편리한 방법으로 이용할 수 있다고 하였다. 고해가 진행이 되고 고해하중이 작아짐에 따라 불투명도는 감소되었는데, 이는 동일 여수도라도 고해하중이 커지게 되면 섬유의 절단이 많이 이루어져 빛과 섬유의 계면이 증가하여 빛의 산란이 많아져 불투명도가 높아진 것으로 사료된다.

동일여수도이지만 고해하중이 감소하고 고해가 진행될수록 투기도는 감소하였다. 이 또한 피브릴화에 의한 섬유간 결합력의 개선에 따른 종이내 공극의 크기가 작아지고, 그 분포가 치밀해졌기 때문으로 사료된다.

4. 결론

고해하중을 달리하여 동일 여수도에서의 펄프섬

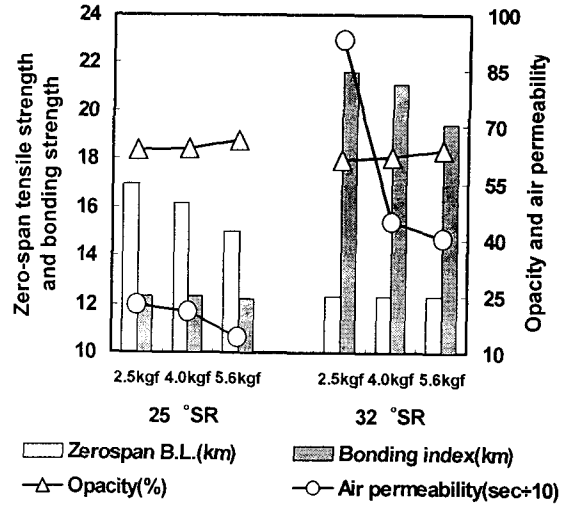


Fig. 11. Relationship of paper's opacity and air permeability using Page's equation at the same wetness.

유를 비교하였다. 2.5kgf의 고해하중으로 고해할 경우가 5.6kgf의 경우에 비해 섬유의 절단, 미세 섬유량, 키크지수가 감소하였다. 또한 탈수시간은 2.5kgf에서가 빨랐고 장섬유분만의 WRV와 제로-스팬 인장강도도 높게 나타났다.

종이특성의 측정결과 2.5kgf의 작은 하중으로 고해할 경우가 동일 여수도이지만 결보기밀도, 열단장, 파열강도, 인열강도가 상승하였고, 불투명도와 투기도는 떨어졌다. 이러한 동일 여수도에서의 종이 특성의 차이는 고해하중에 따라 펄프섬유가 다르게 영향받았음을 의미하며, 기존의 신속성과 편리성을 위주한 여수도만의 사용은 펄프섬유의 고해정도를 정확히 평가할 수 없음을 의미한다.

섬유자체강도와 Page식을 이용한 섬유간 결합력의 정량화 결과, 25°SR에서는 고해하중에 따른 섬유간 결합력의 차는 크지 않았으나, 섬유자체강도는 고해하중이 작은 쪽이 크게 나타났다. 그리고 32°SR에서는 고해하중별 섬유자체강도의 차이는 크지 않았으나, 섬유간 결합력에선 고해하중이 작은 경우가 크게 나타났다. 즉 고해하중이 작아짐에 따른 인열강도, 파열강도의 상승과 불투명도와 투기도의 하락 등은 섬유간 결합력이 커지고 섬유자체강도 및 섬유장의 보호에 기인됨을 알 수 있었다.

인용문헌

1. James P. Casey, *Pulp and Paper*, third edition, A Wiley-Interscience Publication, 1980, pp. 839-840, 918.
2. Levlin, J. -E., *Pira International Conference : Advances in Refining Technology*, Birmingham, England, Dec. pp. 9-11, 1986.
3. P.J. Houen, Thesis, Norges Tekniske Høgskole, Norway (1966).
4. Page, D.H., *Tappi J.* 50(9):449-455(1967).
5. 원종명, 고해가 섬유에 미치는 영향. *제지기술* 4호:74-82(1995).
6. Giertz, H., and Rodland, G., 1979, *Elongation of Segments-bonds in the Secondary Regime of the Load/Elongation Curve*. Proc., International Paper Physics Conference, Harrison Hot Springs.