Journal of Korea TAPPI
Vol.38.No.4, 2006
Printed in Korea

고해가 종이의 응력-변형 특성 및 물성에 미치는 영향

원종명†

(2006년 7월 16일 접수: 2006년 10월 26일 채택)

Effect of Refining on the Stress-Strain Characteristics and Physical Properties of Paper

Jong Myoung Won†

(Received July 16, 2006: Accepted October 26, 2006)

ABSTRACT

The study was carried out to investigate how the refining of pulps affects the stress-strain characteristics and physical properties of paper. SwBKP and HwBKP were refined with Hollender laboratory beater to obtain three levels of freeness(500, 400 and 300 ml CSF) at the different consistencies(0.5% and 1.0%). The effects of fines were also evaluated. The stresses and strains of papers made from SwBKP and HwBKP were increased with refining. The absolute value of strain in paper made from SwBKP was higher than those of paper made from HwBKP. We also found that the presence of fines increased the stress and strain significantly in both pulp types. The refining at lower pulp consistency gave higher stress and strain properties. Most physical properties of paper were improved with refining, but the effect of refining consistency depended on the characteristics of each physical properties.

Keywords : *SwBKP, HwBKP, refining, consistency, freeness, fines, stress-strain characteristics, physical properties*

• 2004년 강원대학교 학술연구조성비로 연구하였음.
• 강원대학교 산림환경과학대학 제지공학과(Dept. of Paper Science & Engineering, College of Forest Environmental Sciences, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, South Korea)
† 주저자 (Corresponding author): E-mail: wjm@kangwon.ac.kr

1. 서 론

대부분의 제지공장에서는 공정 및 종이 품질 관리의 목적을 위하여 종이의 광학적 성질, 구조적 성질 이외에 일반적인 기계적 성질, 즉 인장강도, 인열강도, 파열강도, 휨강성, 내절도 등이 측정 관리되고 있다. 그러나 이들 성질들은 여러 가지 원료 자체의 특성과 지료조성 및 초지공정에서 적용되는 각종 처리 및 공정 조건에 의하여 영향을 받는 종이의 구조적 성질 및 섬유간 결합 특성 등이 조합되어 나타난 종합적인 종이의 물성 특성을 지닌다. 물론 이들 성질을 측정함으로써 종이의 성질을 대부분 이해할 수는 있으나 근본적인 성질을 알 수는 없기 때문에 공정 및 품질 관리를 효과적으로 하기 어렵다. 따라서 공정 및 품질 관리를 효율적으로 하기 위해서는 종이의 기초적 성질에 해당되는 응력-변형 특성에 대한 충분한 이해가 필요하다.

응력-변형 곡선은 종이의 인장시험을 통하여 얻을 수 있는 하중-신장 곡선이다. 그러나 평량, 섬유의 배향, 지필도와 같은 초지와 관련된 변이 및 기타 여러 인자들에 의하여 종이에서의 응력과 변형이 불균일하게 되는 결과가 초래될 수 있다. 이러한 경우 응력과 변형이 종이의 모든 부위에서 일정하지 않기 때문에 엄격히 말하자면 종이의 특성을 나타내는 응력-변형 곡선이라고 할 수 없지만 그럼에도 불구하고 종이의 기초적인 성질을 평가하기 위한 수단으로 사용될 수 있다. 이러한 응력-변형 곡선은 종이가 파괴되기 전까지 일어나는 기계적 성질과 관련된 거동을 보여주기 때문에 실용적인 측면에서 매우 유용하게 활용될 수 있다. 그러나 일반적인 기계적 성질과는 달리 숫자로 표시되지 않고, 곡선의 형태로 나타내기 때문에 종이 성질의 정량화 수단으로 거의 사용되지 않고 있다.

종이의 응력-변형 곡선에 대한 해석은 오랜 기간 동안 논란의 대상이 되어 왔다. 초기 연구에서 종이의 탄성계수는 방정식 $E_p = a \cdot \Psi \cdot E_f$ (a : 시트 내 섬유 배향의 분포, Ψ : 섬유간 응력 전달 효율지수, E_f : 섬유의 탄성계수)로 설명하였으나, Seth 등[1]은 각종 제지 공정에서의 처리가 종이의 응력-변형에 미치는 영향에 대한 집중적인 연구를 통하여 소성영역에 대하여 섬유의 점탄성, 섬유의 배향지수 및 효율지수를 통하여 설명될 수 있음을 보고하였다. 이 과정을 통하여 종이의 비선형 응력-변형 곡선이 종이의 구조보다는 주로 종이를 구성하는 섬유의 성질에서 비롯된다고 하였다. 이들의 연구에 의하면 Fig. 1과 Fig. 2에서 보는 바와 같이 섬유막이 충분히 얇고 고해를 하기 전에도 이미 충분히 높은 탄성계수를 얻을 수 있어 효율지수(efficiency factor)가 1에 달하는 경우에는 고해 정도를 달리한다고 할지라도 단지 파괴지점이 다를 뿐 곡선의 형

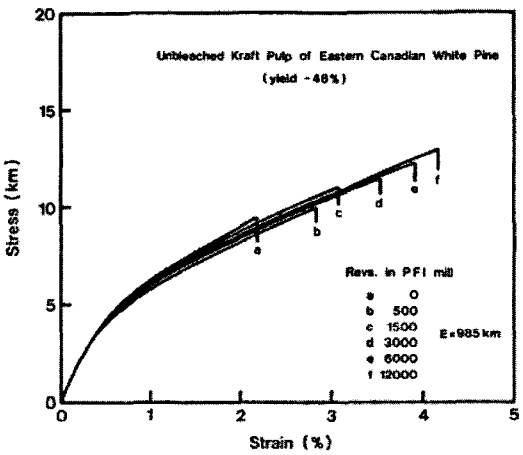

Fig. 1. Stress-strain curves obtained from same efficiency factor.[1]

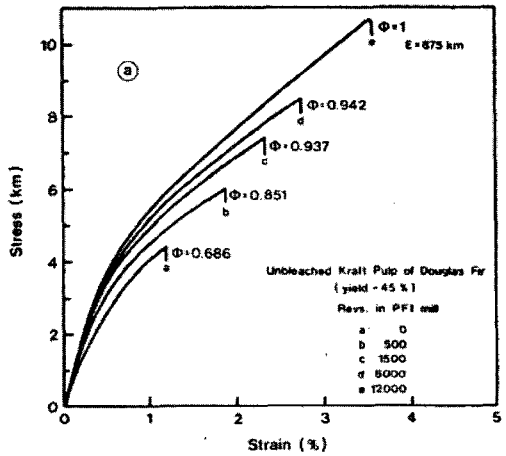

Fig. 2. Stress-strain curves obtained from different efficiency factor.[1]

태가 같게 나오는 반면, 섬유막이 두껍고 충분한 효율지수가 얻어지지 못하는 경우에는 Fig. 2와 같이 다른 형태의 응력-변형 곡선이 얻어지게 된다. 이와 같은 현상을 볼 때 얻어질 수 있는 종이의 응력-변형 특성은 펄프의 종류뿐만 아니라 고해, 압착, 건조 등의 처리 조건뿐만 아니라 각종 첨가제에 의해서도 매우 다양해질 수 있음을 알 수 있다. 한편 Retulainen 등[2]은 종이의 구조는 고해와 여러 가지 섬유간 결합에 영향을 미치는 첨가제에 의하여 변화될 수 있으며, 종이의 구조는 종이의 변형 특성에

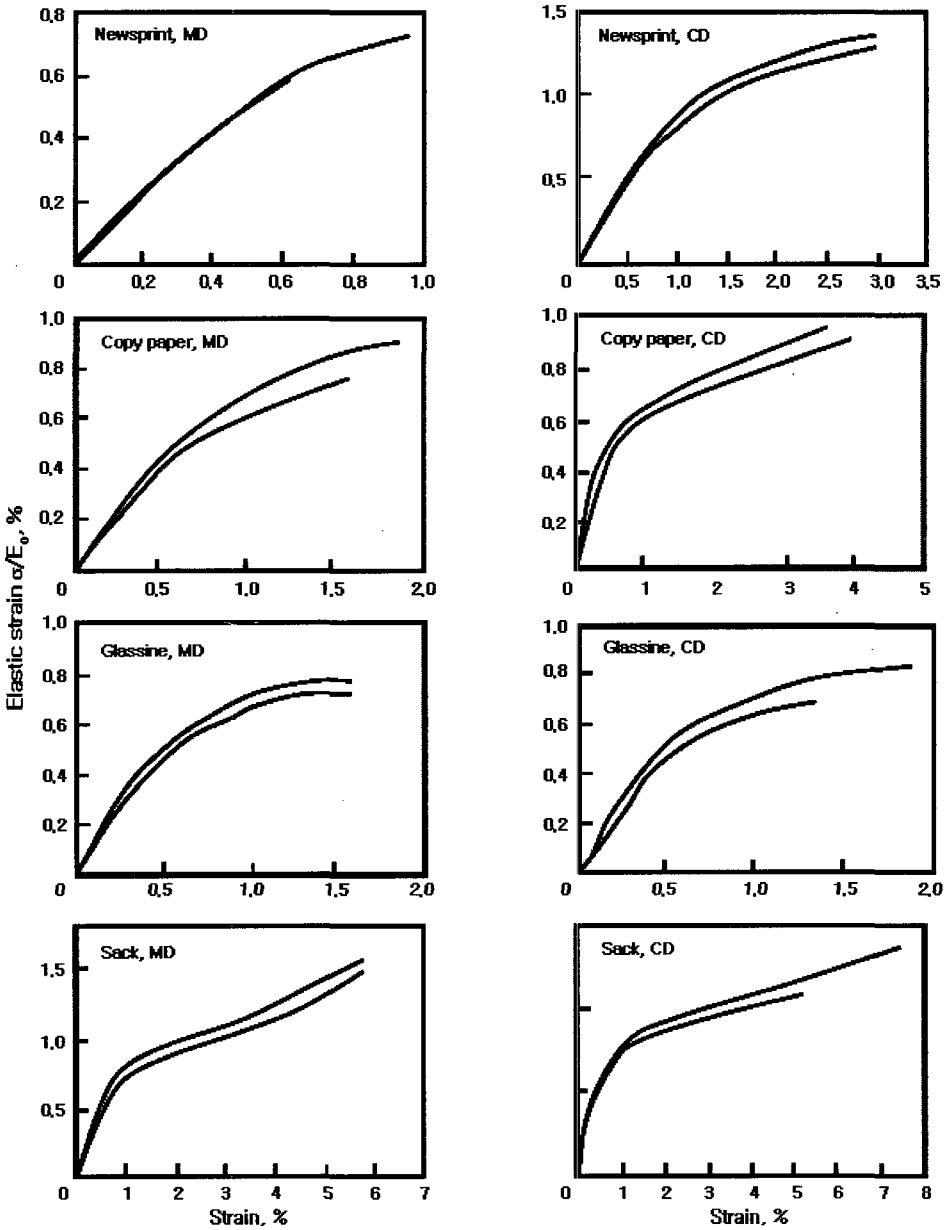

Fig. 3. Characteristic load-elongation curves of machine-made paper grades in MD and CD. Load is expressed as elastic strain($\varepsilon_{el} = \sigma/E$).[4]

큰 영향을 미친다고 하였으며, Ebeling[3]은 불가역적인 변형은 섬유간 결합에 의해서만 일어나는 것이 아니며, 섬유 내 수소결합의 파괴와도 밀접한 관계가 있다고 하였다. 이와 같이 아직까지도 종이구조와 섬유간 결합 및 종이의 응력-변형 특성 사이의 관계에 대한 논란이 지속되고 있다.

Fig. 3에 예시된 다양한 지종에 대하여 얻어진 응력-변형 곡선을 통하여 지종 및 종이의 용도에 따라 각기 다른 형태의 응력-변형 곡선을 나타냄을 알 수 있다. 이러한 특성들은 사용된 지료의 특성과 그 지료에 어떠한 처리가 이루어졌고, 제지 공정에 어떤 조건이 적용되었는가에 따라 결정된다고 할 수 있다. 즉, 신문용지의 MD 방향에서는 종이가 파괴될 때까지 응력-변형 곡선이 거의 직선을 나타내지만, CD 방향에서는 완만한 곡선의 형태를 이루며 세 배 이상의 변형률을 나타낸다. 복사지의 경우에는 이와 달리 MD와 CD 방향에서 모두 2개의 직선부로 구성되며 단지 CD방향에서 2배 이상의 높은 변형률을 나타낸다. 한편 글라신지의 경우에는 비록 다소 다른 형태의 응력-변형 곡선 형태를 나타내기는 하지만 MD와 CD 방향에서의 변형률의 차이가 다른 일반 지종에 비하여 크지 않다. 마지막으로 미세 주름을 도입시킨 지대용지의 경우에는 MD 방향에서 매우 높은 변형률을 나타내며, 위로 굽은 형태의 곡선을 이룬다. 이와 같이 각 지종별 응력-변형 곡선은 사용된 원료 및 종이 제조 시 적용된 각종 처리 방법 및 조건에 의하여 매우 다양한 성질을 지니는 종이가 얻어짐을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서는 종이의 응력-변형 특성에 영향을 미치는 여러 가지 인자 중 특히 가장 큰 비중을 차지할 수 있는 고해의 영향을 조사하기 위하여 수행되었으며, 더불어 종이의 물성에 미치는 영향도 조사되었다.

2. 재료 및 방법

펄프의 종류 및 고해 조건이 종이의 응력-변형 특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 고해 농도(1%, 0.5%) 및 고해 수준(500, 400 및 300 ml CSF)을 달리하여 침엽수 및 활엽수 표백 크라프트 펄프의 고해를 실시한 후 평량 60 g/m^{2}의 수초지를 제조하고, 항온항습실에서 TAPPI Standdard T402 sp-03에 의거 조습처리를 실시한 후 만능시험기를 이용하여 수초지의 응력-변형 특성을 측정하였다. 또한 섬유간 결합에 크게 기여하는 것으로 알려져 있는 미세분의 영향을 조사하기 위하여 200 mesh 망을 이용하여 미세분을 제거한 것과 제거하지 않은 펄프로 제조된 수초지의 응력-변형 특성에 대하여도 검토되었으며, 이와 관련하여 종이의 주요 물성에서 일어나는 변화를 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

종이 제조 시 적절한 구조적 물리적 특성을 얻기 위하여 고해 공정을 거치게 되는데 이 과정에서 주목적으로 하는 소섬유화 이외에도 필연적으로 발생되는 현상의 하나가 단섬유화라 할 수 있다. 가장 바람직한 것은 가능한 한 섬유의 단섬유화를 최소화하는 것이라 할 수 있다. 이미 예측할 수 있는 바와 같이 고해가 진행됨에 따라 침, 활엽수 펄프 모두 평균 섬유장이 짧아졌는데 특히 고해 농도가 낮아짐에 따라 그 정도가 더 크게 나타났다 (Fig. 4). 이와 같이 고해 공정을 거쳐서 변형된 펄프 섬유는 섬유간 결합뿐만 아니라 종이의 구조적, 물리적 성질에 직접적인 영향을 미치게 된다. 그 대표적인

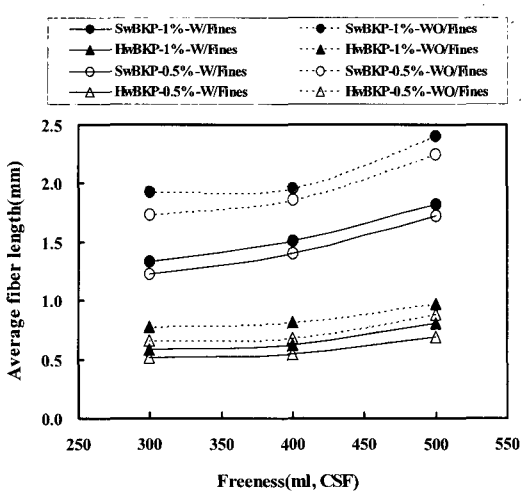

Fig. 4. Average fiber length of SwBKP and HwBKP refined at different consistency.

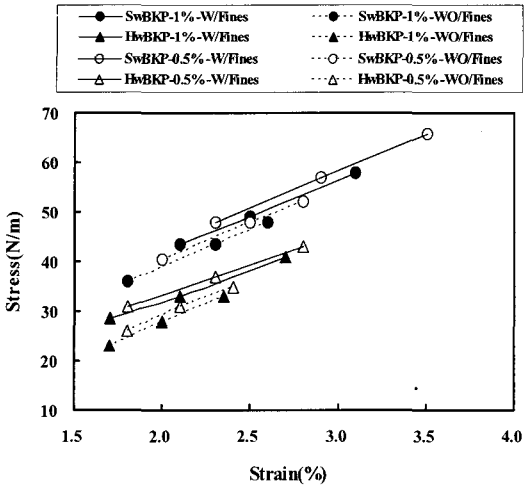

Fig. 5. Stress-strain characteristics of handsheet made from SwBKP and HwBKP refined at different consistency.

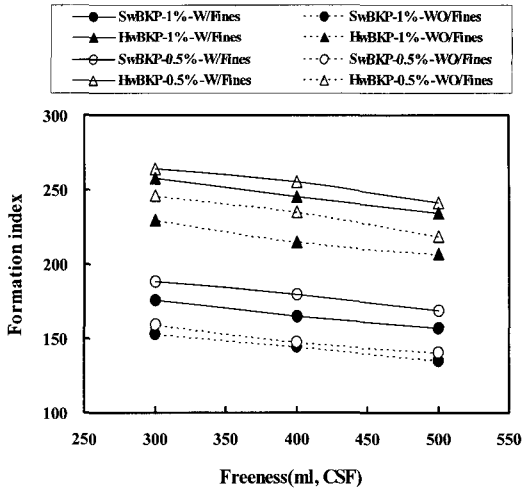

Fig. 6. Effect of refining conditions on the formation of paper.

성질로서 종이의 제반 물성에 영향을 미치는 종이의 응력-변형 특성은 Fig. 5에서 보는 바와 같이 고해에 의하여 모두 증가되었으며, 0.5%에서 고해되었을 경우 1.0%에서 고해된 경우보다 높은 응력-변형 특성을 나타내었다.

지필도는 종이를 구성하는 지료가 얼마나 균일하게 분포하는 가를 나타내는 지표를 정의가 내려지고 있는데,[5] 실제로 원료뿐만 아니라 습부 화학 및 초지 공정에 관련된 많은 인자들에 의하여 영향을 받는다. 양호한 지필도를 얻기 위해서는 지료의 균일한 분포뿐만 아니라 가능한 한 보다 작은 크기의 응집체를 형성하는 것이다. 이러한 이유로 인쇄필기용지의 경우 지필도 향상을 위하여 다량의 단섬유인 활엽수 펄프를 사용하고 있다. 본 연구와 관련하여 설명을 하자면 고해 과정을 통한 소섬유화, 단섬유화 및 미세분 발생을 고려할 수 있다. 소섬유화는 섬유의 리본상으로의 찌그러짐 현상을 용이하게 해주며, 섬유 부스러기 및 미세분은 섬유 사이의 간극을 채우는 역할뿐만 아니라 Campbell 효과를 크게 증가시켜 섬유간 결합을 개선시켜주고,[6] 종이 구조를 치밀하게 만들어 주는 효과를 나타낸다. 본 연구에서도 Fig. 6에서 보는 바와 같이 단섬유인 활엽수 펄프로 제조된 종이의 지필도가 침엽수 펄프로 제조된 종이보다 우수하였으며, 고해가 진행됨에 따라 지필도가 더욱 개선되는 결과를 얻을 수 있었다. 또한 미세분의 존재는 펄프의 종류와 관계없이 지필도를 개선시켜주었다. 종이의 겉보기 밀도는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 상대적으로 유연성이 우수한 침엽수 펄프의 경우 더 높은 값을 나타내었으며, 0.5%에서 고해한 경우보다 1.0%에서 고해하였을 때 보다 높은 겉보기 밀도가 얻어졌다. 이와

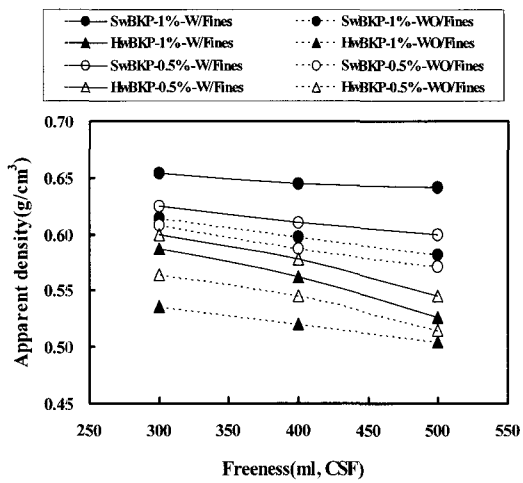

Fig. 7. Effect of refining conditions on the apparent density of paper.

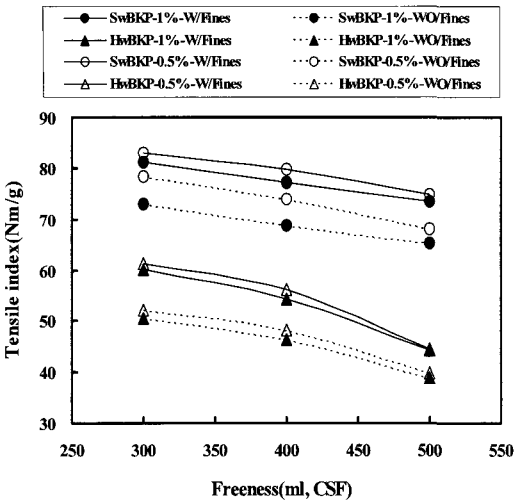

Fig. 8. Effect of refining conditions on the tensile index of paper.

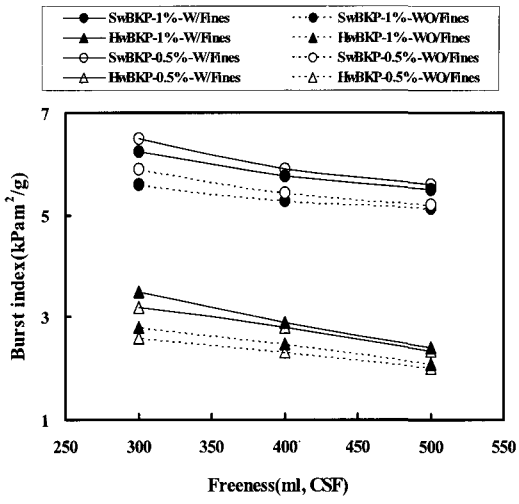

Fig. 9. Effect of refining conditions on the burst index of paper.

같은 결과가 얻어진 것은 이미 전술한 바와 같이 종이의 구조는 섬유간 결합이 많이 일어날수록 치밀해지는데, 보다 높은 농도에서 고해할수록 단섬유화보다는 소섬유화가 더 많이 일어나며, 섬유가 리본상으로 찌그러짐으로써 보다 많은 섬유간 결합을 얻을 수 있기 때문이다. 반면에 활엽수 펄프의 경우에는 0.5% 농도에서 고해하였을 때 더 높은 겉보기 밀도가 얻어졌다. 미세분의 역할은 아무리 강조해도 지나치지 않을 정도로 섬유간 결합과 종이구조의 치밀화 현상에 미치는 영향은 큰 것으로 알려져 있는데, 본 연구를 통하여 그 효과가 매우 큼을 확인할 수 있었다.

종이의 인장지수와 파열지수는 모두 침엽수 펄프 사용 시 높은 값이 얻어졌으며, 고해가 진행됨에 따라 개선되는 것이 확인되었다. 이들 강도적 성질은 미세분의 존재 시 모두 강도적 성질이 개선되어 섬유간 결합에 의하여 큰 영향을 받고 있음을 재확인할 수 있었다. 본 연구에서 검토된 대부분의 물성들이 0.5%에서 고해하였을 때 높은 값을 나타내었으나, 활엽수 펄프로 제조된 종이의 파열지수는 겉보기 밀도와는 달리 1% 농도에서 고해하였을 때 보다 높은 강도치가 얻어졌다.

4. 결 론

펄프의 고해는 침엽수뿐만 아니라 활엽수의 경우에도 모두 고해가 진행됨에 따라 변형률과 파괴 시 인장 하중이 증가하는 경향을 나타내었으며, 미세분의 존재도 종이의 인장 응력과 변형률에 큰 영향을 미침이 확인되었다. 침엽수 펄프의 고해를 통하여 얻어진 파괴 시 하중과 변형률의 절대치는 모두 활엽수 펄프의 고해로부터 얻어진 값보다 높게 나왔으며, 또한 두 경우 모두 미세분의 존재 시 훨씬 높은 값을 나타내었다. 0.5% 농도에서 고해하여 얻어진 파괴 시 인장 하중과 변형률이 모두 1% 고해 농도에서 얻어진 것보다 높게 나왔으며, 이러한 경향은 고해가 진행될수록 더욱 뚜렷하게 나타났다. 이러한 결과로부터 인장-응력 특성이 섬유간 결합과도 매우 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 대부분의 종이 물성들이 고해에 의하여 개선되었으나, 물성의 특성에 따라 고해농도가 미치는 영향이 다소 다르게 나타났다.

인용문헌

1. Seth, R.S. and Page, D.H., The stress strain curve of paper, The Role of Fundamental Research in Paper

Making, Transactions of the 7th Fundamental Research Symposium, pp. 421-452 (1981).
2. Retulainen, E. and Ebeling, K., Effect of paper on the load-elongation behaviour of fiber-to-fiber bonds, Papermaking Raw Materials, Transactions of the 8th Fundamental Research Symposium, pp. 229-263 (1985).
3. Ebeling, K., Fundamental Properties of Paper Related to Its Uses, Technical Division, BPBIF, pp.304-335 (1976).
4. Niskanen, K., Papermaking Science and Technology, Book 16, Paper Physics, p. 160, The Finnish Paper Engineers' Association and TAPPI (1998).
5. Kouris, M., Dictionary of Paper, p. 137, TAPPI PRESS, Atlanta (1996).
6. Lyne, L.M. and Gallay, W., The fundamentals of wet-web strength, Tappi 37(12):698 (1954).