

스테인플 및 린터 면 섬유의 분리 고해 특성에 관한 연구: 고해 효율과 종이 물성

윤성훈[†], 이영석, 김태영, 김진영

(2003년 6월 2일 접수; 2003년 10월 15일 채택)

The Separated Refining System for Cotton Staple and Linter Fibers: Refining Efficiency and Paper Properties

Sung-Hoon Yoon[†], Young-Suk Lee, Tae-Young Kim and Jin-Young Kim

(Received on June 2, 2003; Accepted on October 15, 2003)

ABSTRACT

The objective of this study was to investigate the potential application of the separated refining system in the papermaking process using cotton pulps. The cotton staple and linter fibers were expected to show a great difference in their refining responses due to their morphological and physical differences. Experiments were conducted to examine the differences in flocculation tendency, CED viscosity, fiber length, handsheet properties and the SEM surface images between staple and linter fibers at a given refining degree. These fibers were also subjected to separated refining in a laboratory-scale beater and in a mill-scale refiner as well. The effect of the separated refining on the refining rates and papermaking properties were evaluated. Results obtained are summarized as follows: 1. Fiber flocculation tendency of cotton staple was estimated to be significantly greater than that of linter fibers; 2. The staple fibers showed higher cellulose DP, longer fiber length and higher sheet strength at a given refining degree compared to linter fibers, but remarkably slower refining rate was observed; 3. The separated refining system exhibited a significant increase in sheet strengths, especially in folding endurance, with an increase in the fibrillation on the surface of staple fibers, but slightly lower or comparable fiber length after refining to the mixed refining system; 4. Similar results were also obtained from the machine trial in which about 7-8% energy saving effects were achieved in the separated refining system. On the basis of the results observed in this study, it was concluded that a significant increase in paper strength and a substantial reduction in refining energy consumption could be achieved using the separated refining system for the cotton staple and linter fiber stock refining.

Keywords : Cotton staple, linter, CED viscosity, mixed refining, separate refining

• 한국조폐공사 기술연구소(Korea minting and Security Printing Corporation, Research Institute of Technology, 35 Kajeong-Dong, Yousung-Gu, Taejon, 305-713 Korea)

[†] 주저자(Corresponding author): email: sunghoonyoon@hanmail.net

1. 서론

제지 공정에서의 고해(beatng or refining)는 회전자(rotor)와 고정자(stator) 사이로 펄프 섬유들의 현탁액을 통과시킬 때 발생하는 기계적 작용을 이용하여 섬유 표면에 가압-전단 작용을 일으킴으로써 펄프 섬유의 형태적 변형을 유도시키고 제지특성을 개선하여 제조하고자 하는 종이 또는 판지 제품의 최종 용도에 필요한 물성이 발현될 수 있도록 하는 공정이다¹⁾. 고해의 1차적인 목적은 펄프 섬유에 섬유간 결합력(interfiber bonding)을 부여하기 위한 것으로 이를 통해 강도가 높아지고, 평활도와 인쇄적성이 향상된 종이가 얻어지며, 경우에 따라 섬유 절단에 의한 지합 향상이나 흡수성, 투기성 또는 광학적 특성 등 특별한 용도에 따라 조건을 달리한 고해를 행하기도 한다²⁾. 그러나, 어떠한 경우에서든 고해는 종이의 기본적인 물성을 결정하는 단위 공정으로서 기계적 에너지에 의한 섬유 변형의 비가역적 변화 과정을 수반하기 때문에 일단 주어진 고해과정에 의해 완성된 지료는 고해 이전의 상태로 되돌리거나 다른 고해 방식을 거쳐 다른 특성의 지료 상태로 바꾸어 준다는 것은 현실적으로 불가능하다. 고해가 진행되는 동안 펄프 섬유에 부여되는 기계적 에너지는 현탁액 내 존재하는 각각의 섬유에 균일하게 분산되어 전달되는 것은 아니고 섬유 뭉치나 다발의 형태로 형성된 섬유 응집체(floc)를 대상으로 전달되는 것이며, 형성되는 섬유 응집체의 크기에 따라 고해 에너지 분산의 균일성이 달라질 수 있게 된다. 이를 응집체 고해 이론(floc refining hypothesis)이라 하며³⁾ 섬유 응집체는 고해 과정 중 지료 내에 형성되었다가 전달력에 의해 다시 분산되는 응집-분산의 사이클을 끊임없이 되풀이하면서 전반적인 고해 효율에 영향을 미치게 된다. 섬유 응집체의 두께는 구성 섬유에 따라 다양하지만 대체로 1-5 mm의 크기이며 고해기의 회전자와 고정자 칼날 사이의 간극은 대개 50-150의 범위⁴⁾로서 고해기 간극의 약 20-100배의 크기를 갖는 섬유 응집체가 칼날 간극 사이로 유입될 확률은 극히 낮다고 볼 수 있다. 이에 대해 Smith⁵⁾ 등은 섬유 응집체는 대부분 고정자와 회전자 칼날의 선단 사이에 걸려진 상태(stapling)에서 강한 압축과 전단을 받게 되며 반복적인 기계적 작용에 의해 점차 섬유에 변형과 절단이 발생하고 마침내 고해 효과가 발생한다고 하였으며, Stephansen⁶⁾ 등은 고해 효과에 영향을 미치는 섬유 응집체 형성은 섬유 길이와 지료 농도에 의존한다고 하였다. Lumianinen^{7,8)} 등에 의해 발표된 연구결과에 의해 고해 효과는 회전자와

고정자의 칼날 사이에 섬유가 걸려질 수 있는 확률과 고해 에너지에 의해 섬유 응집체가 파괴될 수 있는 정도에 크게 의존한다는 것이 보고된 바 있는데 장섬유의 경우는 고해기 칼날 사이에 걸려지게 될 확률은 높지만 강한 섬유 응집체가 형성되어 쉽게 파괴되지 않는 특성을 나타내게 되는 반면, 단섬유의 경우는 섬유가 고해기 칼날 사이에 걸려지는 것이 용이하지 않지만 섬유 응집체가 약하게 형성되어 고해 전달력에 의해 쉽게 파괴되고 분산되는 특성을 갖는 것으로 해석되고 있다⁹⁾. 따라서, 균일한 품질의 종이를 제조하기 위해 원료로 사용하는 펄프의 섬유 조건이 고해시 충분히 고려되어야 하며 특히 장섬유와 단섬유가 혼용되는 경우는 에너지 효율과 고해의 최적 효과를 위해 고해 조건의 설정에 있어서 신중을 기할 필요가 있다. 제지용 원료인 펄프 섬유는 그것이 얻어진 식물학적 기원이나 산지 또는 섬유화 방식과 처리 공정 등에 따라 큰 차이를 나타낼 수 있는데 특히 목재의 경우 수종, 산지 또는 펄프화 공정에 따라 다양한 특성의 펄프가 얻어진다. 목재펄프를 사용하는 제지공장의 경우 한 종류의 펄프를 단독으로 사용하는 경우는 드물고 경제성과 품질을 고려하여 침엽수펄프, 활엽수펄프, 화학펄프, 기계펄프, 재생펄프 등 대부분 두 종류 이상의 펄프를 일정한 비율로 배합하여 초지하고 있는데 과거에는 혼합된 원료를 직렬식 단일 공정에서 한꺼번에 고해하는 혼합고해 방식이 대부분이었지만, 점차 제지 생산규모가 현대화되고 대형화 되어감에 따라 병렬식 복합공정의 분리 고해체계로 전환되어졌다¹⁰⁾. 특히 목재 펄프의 고해 공정이 분리 고해체계로 전환되는 이유는 혼합 고해체계에 비해 에너지 소비가 낮고 종이의 물성이 높아지는 장점이 있기 때문인 것으로 알려져 있다¹¹⁾. 제지용 원료로서 목재 펄프와 비목재 펄프를 혼용하거나 또는 비목재 펄프와 다른 종류의 비목재 펄프를 혼용하는 것이 특수한 용도를 위해 사용될 수 있는데, 이러한 경우에는 목재 펄프만을 혼용하는 경우보다 원료별 섬유 특성에 있어서 더 큰 차이를 보일 수 있고 따라서 최적 고해 효율을 위한 고해 방식의 선정에 있어서 더욱 까다로운 조건이 요구될 수 있다. 그러나 비목재 펄프의 고해기술에 관한 과학적 자료나 발표된 연구보고는 현재 국내외적으로 매우 부족한 상태이며 특히 비목재 펄프를 원료로 사용하는 특수지 제조분야에서 이에 관련한 집중적 연구가 시급히 요청되고 있는 실정이다. 따라서, 본 연구는 비목재 펄프의 최적 고해체계 기술 개발을 목적으로 하여 수행되었으며 1차 연구로서 비목재 펄프 중 사용량이 가장 많은 면 펄프를 선정하였고, 면 펄프는 공급 방식과 섬유의

형태학적 특성이 크게 다른 스테이플 섬유와 린터 섬유로 구분하여 각 섬유의 자체 물성과 고해속도에서의 차이 및 분리 고해 조건에서의 제지 특성 등을 분석함으로써 제지용 원료로서의 면 펄프 최적 활용을 위한 고해 특성 구명에 연구의 중점을 두었다.

2. 재료 및 방법

본 실험에 사용된 면 펄프 공시재료로서 스테이플 섬유는 국내 T사에서 제공된 것을 사용하였고, 린터 섬유는 미국의 B사에서 제공된 것으로서 린터 함유율이 70% 이상인 것을 사용하였다. 공시재료의 CED 점도는 Tappi standard T230 om-94에 근거하여 측정하였는데 전건 0.25 g(± 0.0005 g)의 시료를 채취하여 25 mL의 증류수 및 직경 6 mm의 유리 구슬 5개와 함께 118 mL 용량의 유리병에 넣어 진탕 교반하여 분산시켰다. 용기에 25 mL의 cupriethylenediamine(CED)용액을 첨가하고 여분의 공간을 질소 가스로 1분간 충전시킨 뒤 입구를 밀봉하였으며 적정 시간 진탕 교반하여 셀룰로오스 분자사슬이 용해되도록 하였다. 반응을 끝낸 CED 용액은 glass filter로 여과하였고 여과액은 Ubbelode형 점도계를 사용하여 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 의 항온수조에서 점도를 측정하였다. 자료 고해 실험에서의 섬유장 분포 분석은 프랑스 Techpap사의 morfiahepf 섬유장 측정기를 사용하였고 산술평균 섬유장, 가중평균 섬유장 및 미세분 함량을 측정하였다. 고해속도 실험에서는 스테이플 섬유와 린터 섬유를 각각 분리하여 고해하는 방식과 혼합하여 고해하는 방식으로 진행하였으며 스테이플과 린터의 혼합비율은 1 : 1로 일정하게 하였고 Tappi standard T200 om-89에 근거하여 실험실 Valley beater에서 약 80°SR 부근의 고해도에 도달할 때까지 고해하면서 5-20분 간격으로 시료를 채취하여 고해도 변화율을 측정하였다. 또한 Tappi standard T205 om-88에 근거하여 원형 수초지를 제작하였으며 수초지 평량은 약 $60-65 \text{ g/m}^2$ 및 $80-85 \text{ g/m}^2$ 의 두 종류로 하였다. 수초지의 물성 측정은 Tappi standard T 411, T494, T403 및 T423을 근거로 하여 두께, 인장강도, 파열강도, 내절도 등을 측정하였다. 또한 수초지의 섬유상태 분석을 위해 시료를 stub에 카본테입으로 고정시키고 Ion sputter(E1010)를 이용하여 Au-Pd를 코팅 처리한 후 주사전자 현미경(Hitachi S-3200)으로 종이의 표면상태를 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 면 섬유의 형태학적 응집 특성

면 섬유는 아욱과의 목화(Gossypium) 씨앗에 밀생하는 가느다란 섬유로서 생물학적 기원과 산지에 따라 해도면, 이집트면, 육지면 및 인도면 등 다양한 종류로 구분된다. 면은 지역에 따라 1년생에서 다년생으로 성장하는 초본식물이며 열매가 익으면 고풍리(cotton ball)를 형성하고 이어서 성숙한 섬유의 압력에 의해 고풍리가 깨지면 솜이 터져 나오는데 이를 면화 또는 실면(seed cotton)이라 한다. 면화는 조면 공정(ginning process)을 통해 씨앗과 섬유로 분리되는데 씨앗은 면실류 제조에 사용되고 분리된 섬유는 다시 Comber에서 스테이플(staple)이라고 부르는 긴 섬유와 린터(linter)라고 하는 짧은 섬유로 선별되어 채취되며 각각 다른 용도의 직조나 제지용 원료로서 사용된다. 스테이플 섬유는 폭이 약 12-16이고 길이는 40-50인 반면 린터 섬유는 폭이 약 16-22이고 길이는 약 3 mm이다¹¹⁾. 섬유 길이만을 비교해 보면 스테이플 섬유는 린터 섬유 보다 약 10~15배 높은 값을 나타내 주고 있는데 두 종류의 섬유가 모두 면화로부터 유래되었기는 하지만 이러한 형태학적 차이는 고해과정에서의 응집체 형성 특성에 현저한 차이를 보여줄 것으로 예상된다. 섬유의 절단에 소요되는 고해 압력(P_r)은 다음 식(1)과 같이 섬유장과 반비례 관계에 있는 것으로 알려져 있는데⁹⁾,

$$P_r = k \frac{B_s}{1/2 l_f} \quad [1]$$

여기에서는 비례상수이고, B_s와 l_f는 각각 비연단부하(specific effective energy load, 섬유 절단 길이당 유효 에너지) 및 평균 섬유장을 나타낸다. 식(1)은 린터 섬유는 스테이플 섬유에 비해 10~15배 낮은 비연단부하에서 고해가 가능하다는 것과 고해가 진행함에 따라 섬유의 하중 흡수능력이 감소된다는 것을 부분적으로 설명하고 있다. 또한, 섬유의 형태학적 특성을 섬유 직경(d_f)에 대한 섬유장(l_f)의 비율인 슬렌더니스(slenderness, l_f/d_f)로 나타낼 수 있고, 주어진 섬유의 응집체 형성 능력은 섬유의 완전 자유 회전이가 가능한 한계 부피농도(volume concentration, C_{r, vol})로서 섬유의 슬렌더니스와의 관계를 다음 식(2)와 같이 표현할 수 있다¹²⁾.

$$C_{f, vol} = \frac{\rho_f}{(l_f/d)^2} \quad [2]$$

여기에서 P_f 는 섬유의 밀도를 나타낸다. 식(2)가 나타내고 있는 것은 섬유의 응집능력은 슬렌더니스(slenderness)의 제곱에 영향을 받게 되며 섬유 슬렌더니스가 높은 펄프일수록 크고 견고한 응집체가 형성된다고 할 수 있다. 슬렌더니스를 계산해 보면 스테이플 섬유의 경우 약 3,000인 반면 린터 섬유는 160으로서 린터 섬유는 스테이플보다 약 18배 높은 값을 갖고 있는 것을 알 수 있으며 부피농도($C_{f, vol}$)를 계산해 보면 스테이플 섬유는 0.00017 g/L이고 린터 섬유는 0.06 g/L으로 린터 섬유가 스테이플 섬유에 비해 약 350배 높은 농도에서 동일한 응집 조건이 형성된다는 것을 알 수 있다. 그러므로, 두 종류의 섬유는 모두 면 섬유로부터 유래된 것이긴 하지만 현저한 형태학적 차이를 갖고 있으며 특히 응집체 형성 특성의 차이는 각 섬유의 고해 속도에 큰 영향을 미칠 것으로 사료된다.

3.2 면 펄프의 점도

면 펄프인 스테이플과 린터 섬유에 있어서 셀룰로오스 중합도에 대한 차이를 비교하기 위해 각 시료에 대한 비 점도(specific viscosity, η_{sp})를 측정하였고 다시 비 점도를 용질의 농도로 나누어 환산 점도(reduced viscosity)를 결정하였으며 또한 용질의 농도가 0.003 g/mL 이하로서 0에 가까운 값을 고려하여 환산 점도를 극한 점도의 근사치(approximated intrinsic viscosity, $[\eta]^*$)로 하였다. 다극한 점도와 고분자 분자량과의 관계를 표현하는 mark-Houwink 관계식¹⁵⁾을 근사-극한 점도에 대한 관계식(3)으로 변형하여 스테이플과 린터 섬유의 셀룰로오스 평균 중합도(DP_{avg}) 근사치 계산에 활용하였다.

$$[\eta]^* \approx K (162 \cdot DP_{avg})^a \quad [3]$$

여기에서 계수와 지수는 모두 실험적으로 결정될 수 있는 값으로서 문헌에 근거는 0.0815, 는 0.7로 가정하였다. 스테이플과 린터 섬유의 CED 점도, 셀룰로오스의 점도 평균 분자량 근사치($M_{g, avg}^*$) 및 평균 중합도 근사치(DP_{avg}) 측정결과를 Table 1에 나타내었다.

스테이플과 린터 섬유는 모두 농종의 면화 섬유에서 얻어낸 것이지만 Table 1에 나타낸 바와 같이 세포를 구성하는 셀룰로오스의 중합도에 있어서 현저한 차이

Table 1. Approximated intrinsic viscosity, approximated average molecular weight() and approximated degree of polymerization() of staple and linter cellulose

Fiber source	Approx. intrinsic viscosity ($[\eta]^*$)	Viscosity average molecular weight($M_{g, avg}^*$)	Degree of polymerization (DP_{avg})
Staple	474	239,117	1,476
Linter	91	22,640	140

를 보여주고 있으며 특히 스테이플은 린터에 비해 약 10배 이상의 높은 분자량과 중합도를 나타내 주고 있다. 이와 같이 셀룰로오스의 평균 중합도에 있어서의 차이로 부터 동일 조건의 고해 과정에서 스테이플과 린터 섬유에 가해지는 고해 작용 효과가 다르게 나타날 수 있다는 것을 말해 주고 있으며 두 종류의 펄프를 혼합한 상태에서 고해한 경우와 분리한 상태에서 고해한 경우 완성 지료의 특성은 물론 초지한 종이의 물성에 있어서도 큰 차이를 보여줄 것으로 예측된다. 일반적으로 셀룰로오스의 중합도가 높은 섬유는 셀룰로오스 중합도가 낮은 섬유에 비해 고해시 섬유 피브릴화(fibrillation)의 정도가 현저히 높게 나타나 길이가 길고 미세한 피브릴이 섬유 표면에 형성되어 높은 강도의 종이 얻어지는 것으로 알려져 있다¹⁴⁾. 또한 셀룰로오스의 중합도가 높은 섬유로 제조된 종이는 종이의 내구성 면에서도 유리한 것으로 알려져 있는데, Klemm¹⁵⁾ 등은 고 내구성의 종이 제조를 위한 펄프는 CED점도와 알파-셀룰로오스의 함량이 높고, copper 값이 낮으며, 리그닌, 펜토산, 감마-셀룰로오스의 함량이 낮아야 한다고 했다. 또한 Faulhaber¹⁶⁾ 등은 종이의 내구성에 가장 영향을 미치는 인자는 셀룰로오스의 중합도이며 그 값은 최소한 1000-1200 이상이 되어야 한다고 한 바 있다. 이러한 사실에 근거하여 높은 내구성의 종이를 제조하기 위해서는 린터 섬유보다 스테이플 섬유를 원료로 사용하는 것이 유리하다고 할 수 있다.

3.3 고해 섬유장 및 표면 미세구조

고해 펄프의 섬유장은 섬유를 평가하는 기본적인 특성으로서 지료 조성 공정에서의 고해 효율 뿐 아니라 종이의 전반적인 물성을 결정하는 중요한 인자에 해당한다¹⁾. 펄프 섬유장은 섬유 길이의 통계적 분포 상태를 평가할 수도 있고 또는 평균 섬유장을 계산하여 비교

할 수 있는데 다음 식(1)과 식(2)에 나타낸 바와 같은 산술 평균 섬유장(L_n) 또는 가중 평균 섬유장(L_w)이 주로 사용되고 있다.

$$L_n = \frac{\sum_i n_i l_i}{\sum_i n_i} \quad [4]$$

$$L_w = \frac{\sum_i n_i l_i^2}{\sum_i n_i l_i} \quad [5]$$

여기에서는 길이가 l_i 인 섬유의 개수를 나타낸다. 본 연구에서는 면 섬유 스테이플과 린터 섬유를 50oSR 까지 고해한 후 섬유장 분포를 측정하여 Fig. 1에 나타내었고 평균 섬유장, 다분산성(polydispersity) 및 미세분 함량을 계산하여 Table 2에 나타내었다.

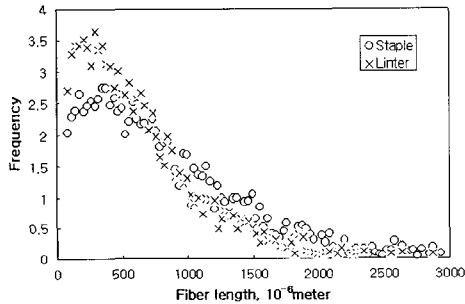


Fig. 1. Fiber length distributions of cotton staple and linter fibers at 50 ° SR.

Table 2. Average fiber length, polydispersity and fines content for cotton staple and linter fibers

	Numerical average fiber length (L_n , μm)	Weighted average fiber length (L_w , μm)	Polydispersity	Fines(%)
Staple	414.7	769.6	1.86	32.8
Linters	350.9	611.0	1.74	39.3

Fig. 1에서 볼 수 있는 바와 같이 섬유의 분포는 스테이플과 린터 섬유에 있어서 현저한 차이를 나타내 주고 있는데 고해 후에도 스테이플은 장섬유 쪽으로 린터는 단섬유 쪽으로 분포가 기울어져 있는 것을 알 수가 있다. 섬유장이 약 200 μm 부근에서 단섬유 발생량이 린터가 스테이플 섬유에 비해 약 40% 높은 값을

보여주고 있으나 700 μm 길이에서는 동등한 수준의 분포를 나타내었고 1000-1500 μm 길이 부근에서는 린터가 스테이플에 비해 약 40% 낮은 분포를 나타내 주고 있다. 또한, Table 2에서 보는 바와 같이 고해 후 평균 섬유장은 산술 평균 섬유장 및 가중 평균 섬유장 모두 스테이플이 높은 값을 나타내고 있으며 다분산성(polydispersity)도 약간 높은 값을 보여주고 있으나 미세분 함량은 약 16% 낮은 것으로 나타났다.

면 섬유의 스테이플과 린터 섬유를 각각 1:1로 혼합한 상태에서 50oSR까지 고해한 후 수초지를 제작하였고 수초지 표면에서의 스테이플과 린터의 섬유 상태를 관찰하기 위해 주사전자현미경 ($\times 450$) 사진을 촬영하여 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다.



Fig. 2. Scanning electron micrograph ($\times 450$) of the surface of a handsheet prepared with the mixed stock of staple and linter at a rate of 50 to 50 percent after refining up to 50oSR.

Fig. 2에서 볼 수 있는 바와 같이 수초지 표면에서의 스테이플 섬유 성분은 길고 납작한 리본 형태를 보여주고 있으며 린터 섬유는 스테이플 보다 가늘지만 둥근 원통 구조를 유지하고 있는 것을 알 수가 있다. 이는 스테이플 섬유는 세포 내강(lumen)이 크고 세포벽이 얇은 반면 린터 섬유는 세포 내강이 좁고 세포벽이 두꺼운 형태학적 차이에서 비롯된 것으로 해석할 수 있다. 이러한 특성은 섬유의 유연성과 섬유간 결합력 형성에 있어서도 차이를 나타내게 되는데 대체로 린터 섬유로 초지한 종이는 스테이플로 초지한 종이에 비해 비용적이 높고 강도가 낮게 나타나는 결과를 낳는 원인이기도 하다. 또한, Fig. 2는 혼합 고해되어 제작된 수초지의 표면 미세구조를 나타낸 것으로서 스테이플 섬유 표면에 피브릴 형성(fibrillation)이 충분히 관찰되지는 않고 있는 것으로 사료된다.

3.4 면 섬유의 고해속도

제지공정에서 펄프에 고해처리를 하는 목적은 지료 내 존재하는 섬유 각각에 대해 기계적 에너지를 균일하게 전달하여 후 공정에서의 초지와 물성발현에 적합한 섬유상태를 얻어내기 위한 것이다. 본 연구에서는 면 펄프에 있어서 섬유의 형태학적 특성에서의 차이를 갖고 있는 스테이플과 린터를 혼합 고해하거나 분리 고해했을 때 고해 속도에 있어서의 차이를 비교하였다. 면 펄프에 대한 고해 속도의 측정은 스테이플과 린터의 혼합비율을 1 : 1로 조성하여 혼합 및 분리 고해 실험을 진행하였으며 일정 시간 간격으로 시료를 실험실 고해기로부터 채취한 후 고해도를 측정하였다. 혼합 고해와 분리 고해 실험에서 고해도의 시간 변화율은 Fig. 3에 나타낸 바와 같다.

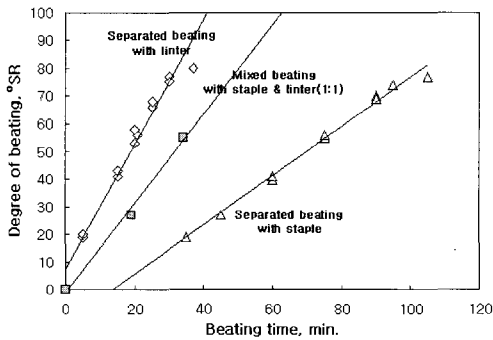


Fig. 3. Refining rates of staple fibers, linter fibers and their mixture.

Fig. 3에서 보는 바와 같이 린터와 스테이플은 고해 속도에 있어서 현저한 차이를 나타내고 있는데 린터는 스테이플에 비해 약 3배의 높은 고해속도를 보여주고 있으며, 린터와 스테이플을 1 : 1로 혼합하여 고해한 경우의 고해속도는 각각 분리 고해한 경우에 대한 평균 수준의 고해 속도를 보여주고 있다. 이와 같이 린터와 스테이플 섬유는 기원이 동일한 면화 섬유임에도 불구하고 고해 속도에 있어서 확연한 차이를 보이고 있는데 이는 전술했던 바와 같이 각 펄프의 구성 섬유의 형태학적 특성에서의 차이와 고해 과정에서의 섬유의 응집성향 및 응집체 형성 속도 및 크기 등의 차이로부터 기인된다고 해석된다. Fig. 3에 나타낸 혼합고해 지료의 고해속도 선분에서 고해도 40° SR을 기준으로 하여 분석해 본다면 이 때 소요된 고해시간은 약 25분이며 이에 해당하는 고해시간에서의 린터 섬유는 약 65° SR, 스테이플은 약 15° SR 임을 알 수가 있고

평균값을 계산하면 대략 40° SR을 나타낸다. 따라서, 형태학적 특성이 다른 린터와 스테이플의 두 종류 펄프를 혼합하여 고해 한다면 과잉 고해된 린터와 미고해된 스테이플이 부분적으로 혼합되어 있는 불균일 지료 상태가 되고 이 때 측정된 고해도는 단지 두 극단적인 값의 평균에 불과하다는 것을 말해주고 있다. 이와 같은 결과는 Fig. 3에서의 혼합고해에 대한 수초지 표면관찰의 결과와도 일치된다고 할 수 있으며 이 때 측정된 고해도는 단지 최소와 최대의 두 극단적인 값의 평균에 불과하다는 것을 말해주고 있다. 또한, 최종 고해도가 높은 값으로 설정 될 수록 과잉고해와 미고해의 폭은 더욱 커질 수 있기 때문에 혼합고해의 불균일도는 증가될 수 밖에 없게 된다고 할 수 있다. 전술한 바와 같이 고해는 에너지를 섬유에 전달하는 과정으로서 만일 섬유에 대한 에너지 분산이 불균일한 경우 종이의 물성발현 효과가 낮아질 뿐 아니라 그만큼 제지공장의 고해 소요 에너지의 효율에 있어서도 불리한 결과가 발생한다고 할 수 있다.

3.5 분리 고해 섬유장

면섬유의 스테이플과 린터 섬유의 혼합 및 분리 고해 후 동일 고해도(50° SR)에서의 평균 섬유장 차이를 비교하기 위해 섬유장 분포를 측정하여 Fig. 4에 도시하였고 산술평균 섬유장, 기중평균 섬유장, 다분산성 및 미세분 함량 등을 측정하여 Table 3에 나타내었다.

Fig. 4에서 보는 바와 같이 스테이플과 린터 섬유의 혼합고해(mixed refining system, MRS) 결과는 분

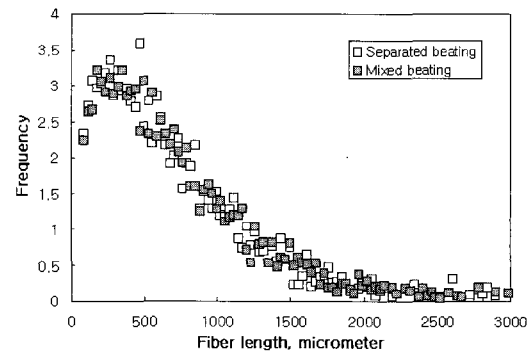


Fig. 4. Fiber length distributions of 50 to 50 percent mixture of staple and linter fibers after separated refining and mixed refining up to 50° SR.

Table 3. Average fiber length, polydispersity and fines contents for the 50 to 50 percent mixture of staple and linter fibers after separated refining(SRS) and mixed refining (MRS) up to 50 ° SR

Refining system	Numerical	Weighted	Polydispersity	Fines(%)
	average fiber length(L_n , μ m)	average fiber length(L_w , μ m)		
MRS	384.4	690.3	1.80	33.6
SRS	374.8	677.9	1.81	34.4

리고해(separate refining system, SRS)에 비해 섬유장 분포가 현저한 차이를 나타내고 있지는 않자만 약간 장섬유 쪽으로 치우쳐져 있는 것을 알 수가 있고 Table 3에 나타낸 바와 같이 혼합고해는 분리고해에 비해 산술평균 섬유장은 약 2.6%, 가중평균 섬유장은 1.8% 높은 값을 나타내고 있고, 미세분 함량은 2.3%가 낮은 값을 보여주고 있다. 산술평균 섬유장에 대한 가중평균 섬유장의 비율인 다분산성은 분리고해와 혼합고해가 거의 유사한 수준으로 나타났다. 섬유장에 있어서 혼합고해의 장섬유화 경향은 린터 섬유의 과잉고해에 비해 스테이플의 미고해 비율이 다소 높게 발생한다는 것을 암시한다고 할 수 있다.

3.6 수초지 물성

Table 4는 스테이플과 린터 섬유를 50 ° SR로 고해 처리 후 각각의 지료를 별도의 수초지로 제작하고 물성을 분석한 결과이다.

린터 섬유 수초지의 경우 스테이플 수초지에 비해 투기도가 약 2배 높게 나타난 반면 강도적 성질에 있어서는 스테이플 수초지가 인장강도에 있어서 23%, 파열강도는 50%, 내절도는 16배 등으로 현저히 높은 값을 나타내었다.

Table 5는 스테이플과 린터 섬유의 혼합비를 1 : 1로 하여 혼합고해(MRS) 또는 분리고해(SRS)를 행하

고 동일한 목적 고해도(50 ° SR)에서 수초지를 제작한 후 물성을 분석한 결과이다.

투기도와 stiffness에 있어서는 혼합고해 수초지가 분리고해 수초지에 비해 다소 높은 값을 보여주고 있는 반면 인장강도(열단장)와 파열강도 등의 강도적 특성 면에서는 분리고해 수초지에서 현저히 높은 값이 나타내었고 특히 내절도에 있어서 약 2-4배 높은 물성치를 나타내 주고 있다. 이와 같은 결과로부터 스테이플과 린터 섬유를 제지용 원료로 혼합 사용 시 분리고해는 혼합 고해에 비해 스테이플의 균일상 고해를 도모해 주고 섬유간 결합력을 증가시킴으로써 종이의 전반적인 물성이 향상될 뿐만 아니라 고해 동력소비 효율이 높아 질 수 있는 것으로 사료된다.

Fig. 5는 스테이플과 린터 섬유를 별도로 고해하고(50 ° SR) 각 섬유 지료를 1 : 1로 혼합한 후 제작한 수초지의 표면 주사전자현미경 사진이다.

Fig. 5에서 관찰될 수 있는 바와 같이 분리 고해의 경우 Fig. 2의 혼합 고해에 비해 섬유 피브릴화(fibrillation)의 정도가 훨씬 높게 진행된 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 혼합 고해의 경우 주어진 고해도에서 린터 섬유는 과잉 고해로 될 확률이 높고 반면 스테이플 섬유는 미 고해 상태로 남아 전반적으로 고해 상태가 불균일한 지료를 형성할 수 있다는 것을 말해



Fig. 5. Scanning electron micrograph ($\times 400$) of the surface of a handsheet prepared with the separated refining of staple and linter fiber stocks.

Table 4. Physical properties of two types of laboratory handsheets prepared with stable and linter fibers after refining up to 50 ° SR.

Fiber source	Basis wt. (g/m ²)	Density (g/cm ³)	Light scatt. coeff.(m ² /kg)	Porosity (mL/min)	Breaking length (km)	Burst index (kPa · m ² /g)	Double fold
Staple	86.43	0.586	45.55	90	4.2	2.72	923
Lintner	86.63	0.550	45.04	194	3.4	1.83	55

Table 5. Physical properties of handsheets of a staple-linter mixed stock(50 : 50) prepared with the mixed refining(MRS) and the separated refining system(SRS) at 50 ° SR

Run	Refining type	Basis wt. (g/m ²)	Density (g/cm ³)	Light scatt. coeff.(m ² /kg)	Porosity (ml/min)	Breaking length (km)	Burst index (kPa · m ² /g)	Double fold
1	MRS	65.7	0.517	38.04	154	4.3	-	447
	SRS	64.4	0.519	36.20	100	4.6	-	1888
2	MRS	60.81	0.542	42.61	355	4.2	-	104
	SRS	60.09	0.530	42.87	342	4.7	-	196
3	MRS	60.80	0.543	42.09	333	4.2	-	113
	SRS	60.60	0.527	40.45	310	4.7	-	204
4	MRS	87.80	0.572	42.10	157	3.6	2.1	89
	SRS	87.30	0.572	43.36	145	3.9	2.3	312

주고 있지만, 분리 고해방식에서는 스테이플 섬유에 충분한 고해 작용이 가해져 스테이플과 린터의 혼합 지료 내 균형있는 섬유 퍼브릴화가 진행되며 섬유의 유연성이 높아지고 초지 시 섬유간 결합 면적이 증대 되어 종이의 전반적인 강도가 증가된다는 것을 시사하고 있다.

혼합 고해에 비해 강도 면에서 우수한 결과를 보여주고 있으며 이는 전술한 실험실적 결과와 일치한다고 할 수 있다. 특히 분리 고해 종이는 혼합 고해 종이에 비해 내절도 면에서 현저히 높은 값을 나타내고 있고 또한 고해 소비 동력이 약 7-8% 절감되었다는 것은 주목할 만한 사실이라 할 수 있다.

3.7 현장 실험

Table 6은 국내 제지공장 초지기에서의 면 펄프 혼합 고해와 분리 고해에 대한 현장 실험 결과를 요약한 표로서 고해 소요 에너지는 다음 식에 근거하여 리파이닝 총괄 비에너지(gross specific refining ener-

$$W_{sp} = \frac{P_{tot}}{Q} \quad [6]$$

gy.)의 최대 값을 계산하였다.

여기에서 은 총 리파이닝 동력(kW)이고 는 리파이너 처리속도(Ton/H)를 나타낸다.

Table 6에 나타난 바와 같이 초지기 현장 실험 결과에서도 스테이플과 린터 섬유를 사용한 분리 고해는

4. 결론

본 연구의 목적은 면 섬유인 스테이플 섬유와 린터 섬유를 사용하는 제지공정에 분리 고해 체계를 응용하기 위해 섬유 자체 물성과 고해 속도에서의 차이와 제지 특성 등을 분석하여 면 펄프의 최적 활용을 위한 고해 조건을 구명하기 위한 것이다. 연구는 섬유의 응집 성향, CED점도, 고해 섬유장, 수초지 물성 및 주사전자현미경 관찰 등의 기초 연구 단계와, 섬유별 고해 속도 분석, 분리 고해 수초지 물성 분석 및 초지기 현장 적용 실험 등의 응용 연구 단계로 구분하여 수행되었다.

연구 결과를 요약하면 다음과 같다:

1. 지료 내 섬유 응집 성향은 스테이플 섬유가 린터 섬유에 비해 높은 값으로 추정되었다;

Table 6. Machine trial results obtained from the mixed refining and the separated refining experiments using the cotton staple and linter fibers at a domestic paper mill

Refining Type	Basis wt. (g/m ²)	Density (g/cm ³)	Porosity (mL/min)	Breaking length (km)	Burst index (kPa · m ² /g)	Double fold	Specific refining energy (kWh/T)
MRS	86.50	0.531	215	4.6	2.0	645	126.6
SRS	87.40	0.527	235	4.7	2.2	942	116.8

2. 스테이플 섬유는 린터 섬유에 비해 주어진 고해도에서 셀룰로오스 중합도, 섬유장 및 수초지 강도에 있어서 현저히 높은 값을 보여 주었고 낮은 고해속도를 나타내었다;

3. 스테이플과 린터 섬유의 분리 고해는 혼합고해에 비해 섬유장은 약간 짧거나 유사한 수준이었으나 종이의 강도 면에서는 전반적으로 향상된 결과를 나타내었고 특히 내절도에 있어서 현저히 높은 강도 값을 나타내었다;

4. 분리 고해의 초지기 현장 실험 결과에 있어서도 실험실적 결과와 유사하게 나타났으며 고해 소요 에너지에 있어서 약 7-8% 절감되는 효과가 얻어졌다.

이상의 결과로부터 면 섬유인 스테이플 섬유와 린터 섬유를 사용하는 제지 공정에 있어서 혼합 고해보다는 분리 고해 체계를 적용하는 것이 현저히 높은 종이 강도와 실질적인 고해 에너지 절감 면에서 유리할 것으로 사료된다.

인 용 문 헌

1. Clark, J. d'A., Pulp Technology and Treatment for Paper, 2nd Ed., Miller Freeman Publications, Inc., San Francisco, 277-305, 452-502 (1985).
2. Scott, W. E., Properties of Paper: An Introduction, Tappi Press, Atlanta, 20-22 (1989).
3. Hietanen, S., Paper and Timber, 72(2): 172 (1990).
4. Ebeling, K., A critical review of current theories for the refining of chemical pulps, 1980 International Symposium on fundamental Concepts of Refining, The Institute of Paper Chemistry, Appleton, USA.
5. Smith, S., The action of beater, London, Techn. Sect., Brit. Papermaker's Association, Great Britain and Ireland, 212 (1923).
6. Stephansen, E., Norsk Skogind., 21(8), 266-275 (1967).
7. Lumianinen, J. J., A new approach to the critical factors effecting on refining on refining intensity and refining result in low consistency refining, TAPPI 1990 Papermakers Conference Proceedings, TAPPI PRESS, Atlanta.
8. Lumiainen, J. J., Comparison of the mode of operation between conical and disc refiners, 1997 PIRA 4th International Refining Conference Proceedings, PIRA, Leatherhead, UK (1997).
9. Gullichsen, J. and Paulapuro, H., Papermaking Part 1, Stock Preparation and Wet End, Book 8, 86-122 (2000).
10. Lumiainen, J. J., Refining performances with separated and mixed pulps for fine paper production, 1996 ATIP-96/IP-96 conference Notes, A.T.I.P., Paris.
11. Hamby, D. S., The American Cotton Handbook, Vol. 1., Interscience Publishers, New York, 45-54 (1965).
12. Meyer, R. and Wahren, D., Svensk Papperstid., 67(10): 432 (1964).
13. Browning, B. L., Method of Wood Chemistry, Vol. 2, Interscience Publications, New York, 524-530 (1967).
14. Casey, J. P., Pulp and Paper Chemistry and Chemical Technology, 3rd Ed., Vol. II, A Wiley-Interscience Publication, New York, 849-850 (1980).
15. Klemm, P., Paper Trade J., 89(6): 53-58 (1929).
16. Faulhaber, M. and Pietrzyk, K., Wochbl. Papierfabrik, 84(3): 75-82, (4): 111-117, (5): 147-153, (6): 183-187, (1956).