

계절에 따른 골판지 원지의 강도변화에 대한 연구 (1) - OCC의 해리온도가 강도에 미치는 영향 -

이광섭 · 박열림 · 오 준 · 조상우 · 조정익 · 류정용[†]

접수일(2016년 6월 8일), 수정일(2016년 6월 20일), 채택일(2016년 6월 22일)

Studies on Seasonal Variation of Linerboard Strength (I) - Effect of Pulping Temperature of OCC on Strength-

Kwang Seob Lee, Yell Rim Pak, Jun O, Woo Sang Jo, Ik Jeong Jo and Jeong Yong Ryu[†]

Received June 8, 2016; Received in revised form June 20, 2016; Accepted June 22, 2016

ABSTRACT

Linerboards have been produced by recycling recovered paper such as old corrugated containers(OCC). Usually linerboards produced during summer season show weak strength compared with those of produced during winter. In order to cope with the weak strength of linerboards produced during summer, and to confirm uniform quality, it is important to understand the seasonal effect on strength properties. Effect of pulping temperature of the OCC for linerboard production was investigated by controlling pulping temperatures at 18°C and 51°C. Low pulping temperature (18°C) caused more generation of fines in stock. Consequently retention and drainage of linerboard defibrated at high pulping temperature (51°C) were better than those of 18°C. Strength properties of handsheet at low pulping temperature were higher than those of high pulping temperature and it could be confirmed that low pulping temperature during winter is one reason of seasonal variation of recycled linerboard strength. It is considered that surface modification of OCC fibers by harsh pulping action during winter caused increase of paper strength.

Keywords: *Linerboard, old corrugated container, pulping temperature, defibration, strength*

• 강원대학교 산림환경과학대학 제지공학과 (Dept. of Paper Science & Engineering, College of Forest and Environmental Science, Kangwon National University, Chuncheon, 24341, Republic of Korea)

† 교신저자(Corresponding Author): E-mail: jyryu@kangwon.ac.kr

1. 서론

국내 생산되는 골판지 원지는 2014년 기준 454만 톤으로 전체 종이·판지 생산량 중 약 39%에 해당되며 대부분 골판지 제조에 사용되고 있다.¹⁾ 골판지 원지 생산에 주원료로 사용되는 OCC(Old Corrugated Containers)는 압축베일 형태로 이송되어 펄퍼에서 슬러리로 분산된다.

폐지, 즉, 순환제지자원을 다시 재활용하는 경우 버진 펄퍼에 비하여 미세섬유가 많이 형성됨에 따라 초지 공정에서 지층을 형성할 때 보류·탈수가 불량하다는 문제점이 있다. 만일 펄퍼에서 충분히 해리되지 못할 경우 미해리물이 발생되어 순환제지자원의 재활용 효율저하와 최종 제품의 강도 저하를 유발하게 된다. 이러한 문제점들을 극복하기 위하여 정선설비의 효율성을 개선하고 고해 등의 기계적 처리 및 강도개선용 첨가제를 적용하여 재생지의 품질향상을 꾀할 수 있지만 무엇보다 일차적으로 원료가 해섬되는 해리공정의 운전 최적화가 선행되어야 할 것이다.

재활용 골판지 원지의 강도는 계절에 따라 달라지는데 일반적으로 공정수온이 낮은 겨울철에 생산된 종이의 강도가 공정수온이 상대적으로 높은 여름철에 생산된 경우보다 강도가 우수한 경향을 보인다. 재활용 골판지 원지의 생산조건 측면에서 살펴보면 겨울보다 여름에 공정수온이 높은 만큼 공정수의 점도가 낮고 습부의 탈수가 용이한 장점이 있다. 초지 시 탈수가 용이한 만큼 헤드박스 지료를 더 희석할 수 있고 이에 따라 지함이 개선되는 이유로 종이의 강도는 여름철에 더 우수해야 하는데 실제 폐지 재활용 현장의 경우 이와 반대인 셈이다. 고해 처리하는 버진펄퍼의 경우 펄퍼섬유의 팽윤이 발열반응인 이유로 공정수온이 낮은 겨울철에 생산된 종이의 강도가 우수할 수 있지만 조성공정 중 별도의 고해처리를 적용하지 않는 재생 골판지 원지가 여름이 아닌 겨울철에 강도가 높다는 사실은 초지 조건 측면에서 이해되지 않는다. 따라서 골판지 원지의 강도가 계절적으로 변화되는 주된 원인은 초지 이외의 공정에서 찾아야 하는데 강도에 영향하는 유력한 단계로 펄핑 즉, 해리공정을 들 수 있다.

폐지의 해리에 영향하는 인자로는 펄퍼형태, 온도, 농도, 소요동력, 체류시간 및 화학 첨가제 등이 있는데, 설비를 구매할 때 결정되는 펄퍼의 형태와 소요동력을 제외하고 폐지의 해섬처리 시 조절할 수 있는 주요 인자는 해리시간, 농도 및 온도 등이다.²⁾ 일반적으로 해리를 촉진

시키기 위해서는 해리시간을 충분히 주면서 펄퍼 내 순환이 이루어지는 한 농도를 높게 유지하고 수온을 높여야 한다고 알려져 있지만,³⁾ 펄퍼의 다양한 형태와 지속적으로 변화하는 폐지의 종류에 따른 해섬 작용에 대한 이해는 아직 부족한 실정이다. 따라서 순환제지 자원으로서 국산 폐지의 사용 시 제기되는 문제점을 개선하고 해리조건을 최적화하여 자원의 이용가치를 향상시키기 위한 연구가 요구되고 있다.

이와 관련하여 Lee 등⁴⁾은 골판지 원지를 제조할 때 원료물질로 사용되는 AOCC와 KOCC의 원료별 해섬특성, 다양한 조성의 OCC 해리에 따른 해섬현상 파악 및 온도, pH와 같은 공정변수에 따른 해리효율성을 파악하고자 하였으며, Jung 등⁵⁾은 KOCC 섬유 강도 향상 방안으로 지료 내 잔존하는 미해리분의 해리성을 높이기 위해서 물리적, 화학적, 생물학적 개질처리 방법을 도입하여 강도 향상 효과를 탐색한 바 있다. Bang 등⁶⁾은 OCC의 해리정도가 지료의 응집 거동에 미치는 영향에 대해서 연구하였으며, Jung 등⁷⁾은 제지조업현장에서 계절적 요인에 따른 지료의 온도변화가 섬유의 해리 및 고해에 미치는 영향을 관찰하면서 공정 내 지료온도가 종이 강도에 미치는 영향을 파악하였고 지료온도가 변화하여도 제품 품질을 유지할 수 있는 방안을 모색하고자 하였다. 그리고 Lee 등⁸⁾은 해리 시 온도와 해리조건에 따른 점착성 고분자 이물질의 박리 및 미분화 거동을 평가하면서 해리공정에서의 기계적 전단력, 온도 및 pH가 중요한 영향인자이며 특히, 온도가 높고, pH가 높을수록 고분자 이물질의 미분화가 증가되는 경향을 확인하였다. 이와 같이 OCC와 같은 폐지를 해리할 때 pH, 농도와 함께 온도조건이 매우 중요한 영향인자임을 알 수 있고, 이에 따른 섬유의 해리성은 원료조성 뿐 만 아니라 시트의 물리·강도적 특성에 영향을 미치리라 짐작되나 폐지의 해리온도에 따른 해리도에 대한 연구결과는 보고된 바 있지만 아직까지 골판지 원지와 같은 재생종이 강도와의 상관성에 대해서는 그 연구가 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 재생 골판지 원지의 강도에 미치는 계절적 요인을 분석하기 위하여 첫 번째 단계로 폐지의 해리온도가 종이의 강도에 영향하는 바를 파악하고자 OCC의 해리 온도에 따른 해섬 정도를 분석하고 수초지 후 강도를 평가하였다. 상기한 과정을 통해 해리공정에 대한 이해를 향상시키고, 폐지 재활용 현장에서 발생하는 계절별 종이 강도변화의 원인을 파악하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 공시재료

본 실험의 시료로 실제 OCC를 대신하여 태림페이퍼(주)에서 분양 받은 골판지 원지(라이너지, 180 g/m²)를 사용하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 원료의 해리

본 실험에서는 OCC 재활용 현장의 해리 및 정선처리를 실험실적으로 최대한 재현하기 위하여 프랑스 국립 펄프제지연구소 CTP(Centre Technique Du Paper)에서 고안한 스크린 시스템인 LAM'RCF를 재활용한 파일럿 펄퍼-스크린 시스템 장비를 활용하였다. 골판지 원지의 해리 농도 및 교반속도를 8%, 300 rpm으로 동일하게 하고 각각 18℃, 51℃ 온도 조건에서 골판지 원지를 9분간 해리하였다.

2.2.2 해설탁성 평가

골판지 원지의 해리 시 해설탁성을 분석하기 위하여 파일럿 펄퍼-스크린 시스템으로 정선된 지료를 조성한 후 썸머빌 스크린(Somerville-type screen)을 이용하여 미해리물, 섬유분, 미세분으로 분급하였다. 우선 파일럿 펄퍼-스크린 시스템 펄퍼에서 해리된 지료를 3 mm 홀 스크린과 0.3 mm 슬롯 스크린을 통과시켜 미해리물이 제거된 지료를 구성하는 과정에 대해서 Fig. 1에 나타내었다. 이처럼 파일럿 스크린을 활용한 정선처리를 실시하여

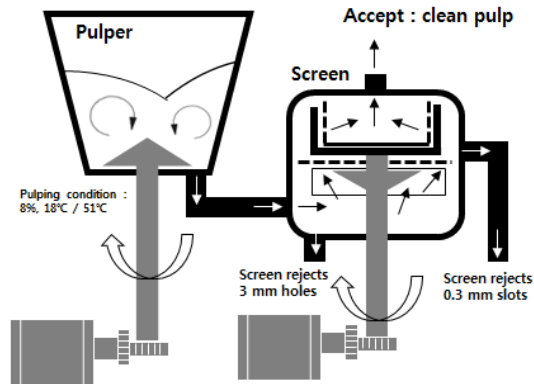


Fig. 1. Schematic drawing of pilot pulping and screening system.

지료를 조성한 이유는 실제 생산현장의 경우 해리처리 정도가 다를 때에도 기본적인 정선과정을 거쳐 조성된 지료로 초지하는 만큼, 실험실 평가이지만 현장의 조건을 최대한 재현하기 위해서다.

조성된 지료의 섬유 특성 분석을 위해 섬유장 측정기(L & W fiber tester PLUS, Lorentzen & Wettre사, Sweden)를 이용하여 섬유장, 미세분 함량 등을 측정하였고, 마지막으로 TAPPI test method T275 - UM 242에 따라 썸머빌 스크린(Korea special machinery & const사, Korea)을 이용하여 0.15 mm 슬롯 스크린을 통과하지 못한 미해리물과 스크린 통과 후 200 mesh에 잔류하는 섬유를 채취하여 정량함으로써 해리된 지료 조성분의 해설탁성을 평가하였다. 미세분 함량은 Eq. 1에 의거하여 값을 구하였다.

$$\begin{aligned} \text{Fines contents(\%)} \\ = \{(\text{투입된 전건 섬유양} - \text{flake 전건량} - \text{fiber 전건량}) \\ / (\text{투입된 전건 섬유양})\} \times 100 \quad [1] \end{aligned}$$

Fig. 2는 썸머빌 스크린을 이용하여 해리된 지료조성분의 함량비율을 구하기 위한 실험 모식도이다.

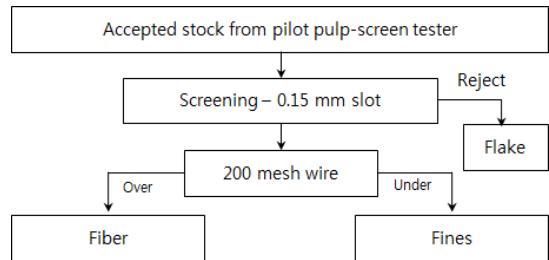


Fig. 2. Block diagram of stock fractionated by Somerville screen and 200 mesh.

2.2.3 수초지 제조 및 초지 특성 분석

파일럿 스크린을 통과한 스크린 역설탁 지료의 수초지 물성을 분석하기 위하여 미세분 제거 전 지료 1차와 미세분 영향을 최소화하기 위해 썸머빌 스크린에서 200 mesh 스크린을 이용하여 미세분을 제거한 지료 2차를 대상으로 RDA(Retention and drainage analyzer, GIST사, Korea)를 이용하여 0.3%의 농도로 평량 150±3 g/m²의 수초지를 실시한 후 종이 강도를 분석하였다. 초지과

정에서 탈수된 백수의 탁도(2100AB IS Turbidimeter, Hach사, USA)를 측정하고 RDA를 활용하여 탈수곡선을 측정하였다.

Fig. 3은 파일럿 스크린에서 채취한 엑셉트 지료의 수초지 제조를 위한 실험 모식도이다.

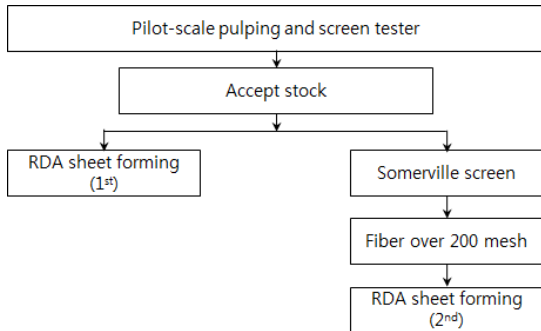


Fig. 3. Block diagram of RDA sheet forming.

2.2.4 수초지의 강도적 특성 분석

2.2.4에 따라 초지된 종이를 온도 $23 \pm 1^\circ\text{C}$, 상대습도 $50 \pm 2\%$ 의 항온항습조건에서 24시간 이상 조습처리한 후 KS 표준 시험법에 따라 인장강도(KS M ISO 1924-2, L&W tensile tester, Lorentzen & Wettre사, Sweden), 압축강도(KS M ISO 12192, L & W bursting strength tester, Lorentzen & Wettre사, Sweden)를 평가하였다.

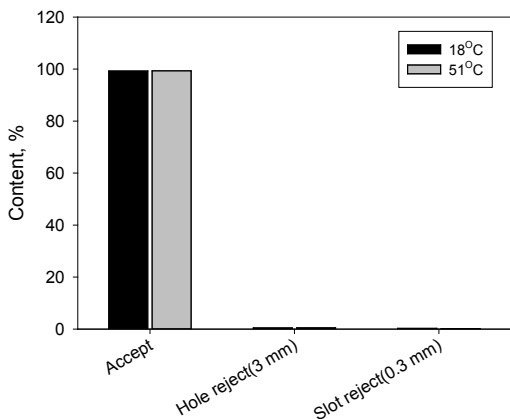


Fig. 4. Mass balances fractionated by pilot pulper-screen system.

3. 결과 및 고찰

3.1 펄퍼 온도조건에 따른 골판지 원지의 해리 성분 분석

골판지 원지의 온도별 해리성을 분석하기 위하여 3가지 측정방법을 이용하였다. 첫 번째로 펄퍼에서 18°C 와 51°C 온도조건으로 각각 해리된 지료를 3 mm 홀 스크린을 통과하지 못한 미해리물과 0.3 mm 슬롯 스크린을 통과하지 못한 미해리물 그리고 두 종류의 스크린을 통과한 엑셉트 지료로 구분하여 정량하였다. 두 번째로 스크린에서 미해리물을 제거한 엑셉트 지료의 섬유 조성을 섬유장분석기를 이용하여 측정, 분석하였다. 그리고 세 번째로 썸머빌 스크린으로 엑셉트 지료의 섬유와 미세분 함량을 정량하여 OCC의 온도에 따른 해리성을 평가하였다.

Fig. 4는 파일럿 스크린을 통과한 원료의 물질수지를 나타낸 것이다. 0.3 mm 크기의 슬롯 스크린을 통과한 엑셉트 지료가 99% 이상으로 미해리물이 1% 미만인 결과를 얻었고, 온도에 따른 미해리물 함량 차이는 거의 없었다. Fig. 5는 섬유장 분석기의 화상분석을 이용한 엑셉트 지료의 미세분 함량 및 표면 피브릴 발생정도를 측정 결과이다. 미세분 및 표면 피브릴 함량은 동일한 결과로서 해리성 차이를 볼 수 없었다. 이와 같이 스크린을 통한 물질수지 분석법과 화상분석을 이용한 섬유장 분석법으로는 본 연구의 해리온도에 따른 해리 정도의 차이를 명확히 확인하기 어려웠다.

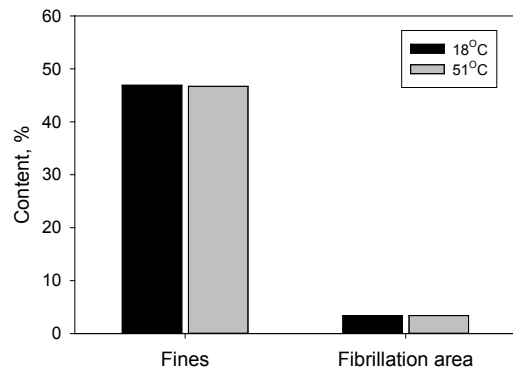


Fig. 5. Fines contents and fibrillation degrees measured by fiber analyzer.

섬머빌 스크린을 이용하여 엑셉트 지료를 분급한 분석 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 0.15 mm 슬롯 스크린을 통과하지 못한 미해리물과, 200 mesh(75 μ m) 이상인 섬유, 200 mesh 이하 미세분으로 지료를 구분하여 정량하였다. 파일럿 스크린으로 걸리내 미해리물이 제거된 깨끗한 엑셉트 지료이기 때문에 0.15 mm 이상 미해리물은 미량 측정되었다. 200 mesh로 나눈 섬유분과 미세분의 비율을 측정한 결과 해리온도가 18 $^{\circ}$ C일 때와 51 $^{\circ}$ C일 때의 미세분 함량이 각각 18%와 14%로써 해리온도가 낮을 때 미세분 함량이 약 4% 증가됨을 알 수 있었다. 미세분 함량이 증가된 만큼 200 mesh로 걸리진 섬유 비율은 감소하였다.

폐지의 해리 시 다양한 인자가 해섬효율에 영향하게 되는데, 온도에 따른 물의 점도변화는 종이 해리에 주요 영향인자이다. Likhachev⁹⁾에 의하면 물의 온도가 낮을수

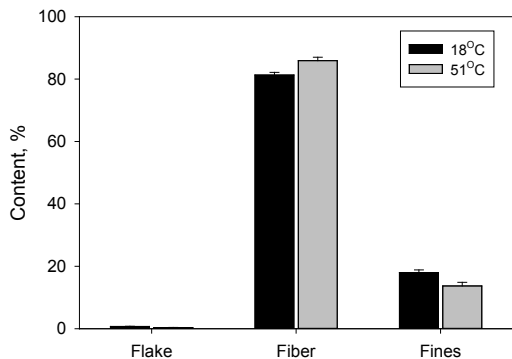


Fig. 6. The mass balance of flake, fiber and fines fractionated by somerville screen(150 μ m slot).

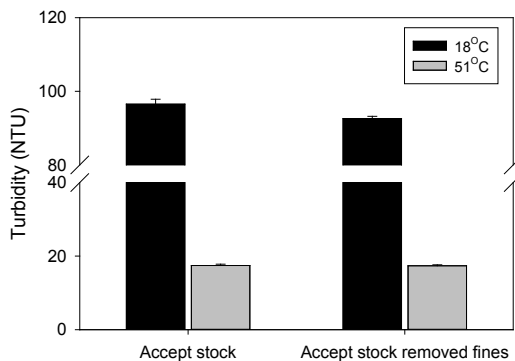


Fig. 7. Turbidity of RDA filtrate vs. pulping temperature.

록 점도가 증가하고 점도가 증가하면 전단력이 증가되어¹⁰⁾ 해리 시 종이에 가해지는 물리적 힘이 증가하게 된다. 그리고 액체의 점도와 침투속도를 정의한 Washburn¹⁰⁾ 공식에 의하여 해리 온도가 증가하면 종이의 물 침투가 용이해지고 종이 해리는 촉진된다. 이와 같이 온도가 물의 점도에 영향을 미치게 되고 변화된 점도에 따라 종이의 물 침투속도 및 종이에 가해지는 물리적 전단력에 차이가 발생하면서 최종적으로 종이의 해리에 영향을 주어 Fig. 6에서 보는 바와 같이 섬유와 미세분 구성비율의 차이가 발생 되었다고 여겨진다. 즉 해리 온도가 낮을 때 미세분이 증가되었는데 낮은 온도에 따른 점도증가는 섬유에 가해지는 외부 힘을 증가시켜 상대적으로 단섬유화를 조장한 것으로 판단된다. 해리 온도에 의한 미세분 증가는 RDA를 이용한 초지과정에서 발생하는 백수의 탁도 증가 경향과 일치된 결과이다.

Fig. 7은 펄퍼의 해리온도를 달리한 각각의 지료를 파일럿 스크린을 통과시켜 정선한 다음 RDA 초지하고 섬머빌 스크린을 이용하여 200 mesh 이하의 미세분을 제거하고 RDA 초지하였을 때 발생하는 백수의 탁도를 측정 한 결과이다. 미세분의 제거 전과 후 해리온도에 따른 백수 탁도를 비교한 결과 미세분 제거 후 온도에 따른 백수의 탁도는 차이가 없었고 미세분 제거 전 백수 탁도는 해리온도가 낮을 때 증가함을 확인하였다. 해리온도에 의한 백수의 탁도 변화는 섬유의 해리정도에 온도가 영향을 미치고 있음을 의미한다. 해리온도가 낮을 때 백수의 탁도 증가는 해리 시 단섬유화가 더 많이 진행되면서 미세분이 증가했음을 의미한다. 그리고 미세분의 증가는 초지 시 탈수를 지연시키는데 Fig. 8에서 보는 바와 같이 미세

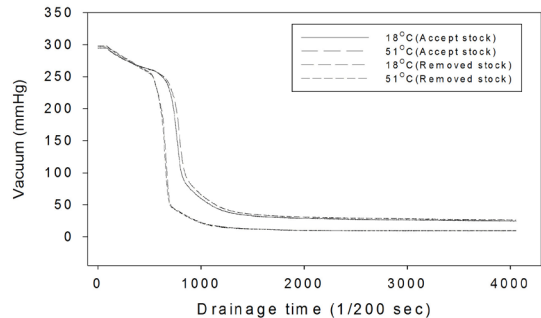


Fig. 8. Drainage of RDA sheet vs. pulping temperature.

분이 제거되지 않은 지료가 미세분이 제거된 지료와 비교하여 탈수성이 떨어지는 것을 확인할 수 있었고, 미세분이 많은 18°C에서 해리된 지료의 탈수곡선이 51°C의 경우와 비교하여 진공도가 높게 나타난 것으로 볼 때 탈수성이 다소 둔화되었음을 확인할 수 있었다.

3.2 펄퍼 온도조건에 따른 골판지 원지의 강도 분석

펄퍼에서 종이의 해리에 영향을 미치는 주요 공정 인자로는 체류시간과 농도, 온도 등을 들 수 있는데, 이러한 펄핑 조건에 따른 섬유해리정도는 원료조성 뿐 만 아니라 시트의 물리·강도적 특성에 영향을 미친다.

골판지 원지에 요구되는 주요 강도특성인 파열강도, 인장강도, TEA, 신장률 등을 측정하여 미세분 제거 전과 후

스크린 어셉트 지료의 수초지 강도결과를 Figs. 9–12에 그리고 수초지 벌크를 분석하여 Fig. 13에 나타내었다.

RDA 수초지의 인장강도를 측정한 결과 Fig. 9에 나타난 바와 같이 미세분을 제거하기 전의 지료는 펄핑 온도와 상관없이 유사한 인장강도 측정치를 보였으나, 미세분을 세척한 decrilled stock의 경우에는 펄핑 온도가 낮은 지료로 초지한 RDA 수초지의 강도가 우수하였다. 신장률을 나타낸 Fig. 10의 경우는 Fig. 9의 인장강도와 유사한 경향을 나타내어 미세분이 존재할 때는 펄핑 온도에 따른 신장률 차이가 미미하였으나 미세분을 세척함에 따라 저온에서 펄핑한 지료의 신장률이 현저히 우수한 결과를 확인할 수 있었다. 인장흡수 에너지와 파열강도를 나타낸 Fig. 11과 12도 같은 경향이었으나 RDA 수초지의 벌크를 측정한 Fig. 13을 보면 펄핑 온도에 따른 현저

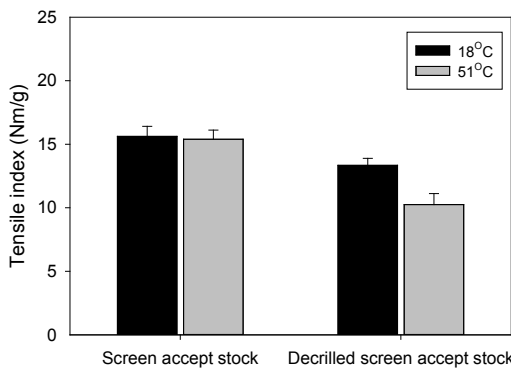


Fig. 9. Tensile strength of RDA sheets at varied pulping temperature.

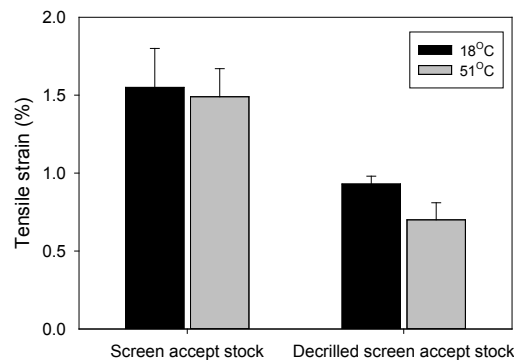


Fig. 10. Tensile strain of RDA sheets at varied pulping temperature.

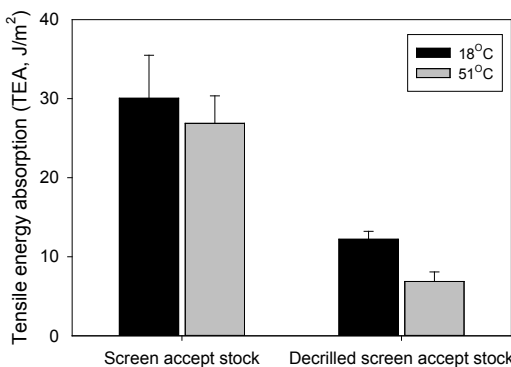


Fig. 11. Tensile energy absorption of RDA sheets at varied pulping temperature.

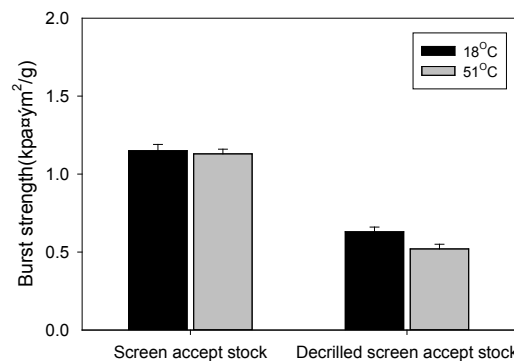


Fig. 12. Burst strength of RDA sheets at varied pulping temperature.

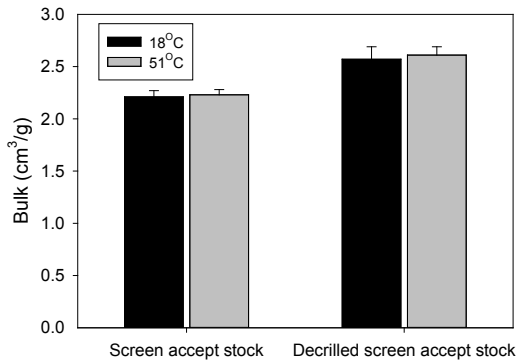


Fig. 13. Bulk of RDA sheets at varied pulping temperature.

한 차이를 미세분의 세척여부에 상관없이 볼 수 없었다. 상기한 결과는 미세분이 존재하여 섬유간 결합을 도와 줄 때에는 펄핑 온도에 따른 섬유의 결합능력차이가 종이 강도차이로 드러나지 못했으나, 미세분을 세척함에 따라 저온에서 펄핑한 지료의 섬유간 결합력과 고온에서 펄핑한 경우의 차가 강도의 차이로 현저히 드러난 사례라고 판단된다. 여기서 섬유간 결합력의 차이란 종이의 bulk의 차이가 없었던 점으로 미루어 볼 때 섬유의 plausibility가 개선되어 종이밀도가 상승함에 따른 결과가 아니라 섬유표면의 수화정도 차로부터 비롯되었다고 여겨진다.¹²⁾ 여기서 섬유의 plausibility란 유연성(flexibility)와 복원력(restoring force)의 조합으로 이해할 수 있다. 재생섬유가 각질화될 때에는 유연성이 줄어들고, 뽀뽀해지기에 섬유간 결합이 어렵다. 반면 화학펄프는 고해처리에 따라 유연해지고 변형된 상태에서 원래 모양으로 돌아가려는 복원력이 약하기에 섬유간 결합이 용이하다. 재생섬유의 표면에는 다양한 이물질이 존재할 수 있는데 셀룰로오스 보다 친수성이 낮은 소수성 사이즈제나 코팅제 기타 오염 물질들은 섬유의 수화를 저해하고 섬유간 결합을 약화시킬 수 있다. 따라서 골판지 원지의 강도가 동절기보다 하절기에 저하되는 문제점을 극복하기 위해서는 펄퍼의 농도를 다소 높인다든지 다공판의 천공 직경을 줄여 섬유의 수화를 촉진시키는 펄퍼 체류시간을 늘리는 등의 방안이 강구되어야 한다고 판단된다.

4. 결론

재생 골판지 원지의 강도에 미치는 계절적 요인을 분석

하기 위하여 첫 번째 단계로 폐지의 해리온도가 종이의 강도에 영향을 미치는 바를 파악하고자 OCC의 해리 온도에 따른 해섬 정도를 분석하고 수초지 후 강도를 평가한 결과, 해리 온도의 차이가 OCC 재활용 현장에서 발생하는 계절별 종이 강도변화의 원인 중 하나임을 확인하였다.

OCC의 해리 온도를 18°C와 51°C로 달리함에 따라 저온에서 미세분의 발생이 다소 조장되었으나 스크린 리젝트량이나 탈수성의 변화가 미미하였다. 미세분을 세척한 지료의 강도를 비교한 결과 저온에서 펄핑한 경우의 종이 강도가 밀도의 변화없이 우수함을 확인하였다. 이것은 저온 펄핑 시 이미 보고한 바와 같이 재생섬유 표면의 수화가 촉진되었기에 비롯된 결과로 판단된다.

Literature Cited

1. http://www.paper.or.kr/n_indu/indu_05.asp, Korea Paper Association, Seoul(2014).
2. Gary A. Smook., Secondary fiber, In Handbook For Pulp&Paper Technologists (translation version), Park, J. M., Jo, B. M., Won, J. M., and Kim, C. H., (Trans.), Seo il, Seoul, p.251(2004).
3. ibid. p.253(2004).
4. Lee, H. L., Yong H. J., Lee, S. G., Kang, T. Y., and Heo, Y. D., Analysis of Disintegration Characteristics of OCC, Journal of Korea TAPPI 36(4): 1-8(2004).
5. Jung, C. H., Lee, J. H., and Park, J. M., Mechanical, Chemical, Biological Modifying Treatment of KOCC for Disintegrating of Shives, Proceeding of Fall Conference of the Korea TAPPI, pp.413-420(2011).
6. Bang, H. S., Ryu, J. Y., Seong, Y. J., Song, B. G., and Choi, T. H., Effect of OCC Pulping on Aggregation behavior of stock, Proceeding of Fall Conference of the Korea TAPPI, p.169(2004).
7. Jung, W., Hwang, J. W., Lee, K. H., and Weng, Y. P., Effect of Elevated Stock Temperature in the Hot Weather on The Paper

- Properties, Proceeding of Fall Conference of the Korea TAPPI, p.33(2014).
8. Lee, H. L., and Kim, J. W., Detachment and micronizing behavior of model macro stick-ies in disintegration process, Proceeding of Fall Conference of the Korea TAPPI, pp.357-362(2003).
 9. Likhachev, E. R., Dependence of water viscosity on temperature and pressure, Technical Physics, Technical Physics 48(4): 514-515(2003).
 10. Noel de Nevers, Fluid Mechanics for Chemical Engineers (translation version), Jo, Y. I., and Lee, T. H., (Trans.), Hee Joong Dang, Seoul, p.9(1994).
 11. Washburn, E. W., The dynamic of capillary flow, physical Review, 17, pp.273-283(1921).
 12. Ryu, J., Y., Lee, K., S., and Lee, D., J., Analysis of Pulping Efficiency of Recovered Paper Using Pilot Screen, Proceeding of Spring Conference of the Korea TAPPI, p.6(2016).