

펄프의 종류 및 초기 캘린더링이 리사이클 섬유의 특성에 미치는 영향

손상돈* · 안병준 · 백기현†

The Effect of Pulp Type and Initial Calendering on the Characteristics of Recycled Fiber

Sang-Don Sohn*, Byoung-Jun Ahn, and Ki-Hyon Paik†

ABSTRACT

This study was intended to investigate the effect of pulp type and initial calendering on the properties of recycled fiber. As the number of recycling is increased, at least by the fourth recycling, the freeness of the SW-BKP and HW-BKP increased. And then that decreases after the fifth recycling. Especially the freeness of CTMP increased more rapidly than any other pulp in first recycling. And there was no difference of freeness in all kind of pulp by initial calendering. The speed of dewatering in making sheet consistently became slow by proceeding recycling on condition of all calendering. And the order of the speed of dewatering was as followed: CTMP>HW-BKP>SW-BKP. However in case of HW-BKP, which was low-yield pulp, the tendency of the speed of dewatering was similar to that of CTMP which was high-yield pulp and had high content lignin. There was no change of fiber length and no effect of calendering by recycling of HW-BKP and CTMP. However fiber length of SW-BKP generally decreased, especially in calendering of high temperature and high pressure conditions. The WRV of SW-BKP diminished by proceeding recycling but that of HW-BKP and CTMP diminished in the first recycling and then there was no change of the WRV of HW-BKP and CTMP. The contents of fines of HW-BKP consistently decreased by the fourth recycling and then increased in the fifth recycling. On the other hand there was no tendency in the content of fines of SW-BKP and CTMP by the number of recycling.

1. 서론

목재 섬유자원의 리사이클링은 계속 증가하고 있다. 이것은 일차적으로 매립 가능한 땅이 급속

히 감소하고 지속적인 개발로 인한 산림자원의 고갈, 환경문제, 폐지 재활용의 경제성 및 자원절약 측면에서 재이용 가능한 물질을 최대한 재활용하는 것이 절실히 요구되기 때문이다. 물론 일시적

• 고려대학교 산림자원학과(Department of Forest Resources, Korea University, Seoul 136-701, Korea).

* 보워트-한라제지 주식회사(Bowater-Halla Paper Co. Ltd.).

† 주저자(Corresponding author): e-mail: khpaik@kucncx.korea.ac.kr

으로 고지의 과잉 공급이 일어날 수도 있으며, 이로 인하여 원료의 질이 저하되어 종이 재생산업에 부정적인 측면을 초래할 수도 있다. 이와 같은 문제들을 해결하기 위해 리사이클링 기술의 조합, 새로운 프로세스 및 새로운 제품의 개발이 요구되고 있다.

지금까지 발표된 리사이클링에 관한 문헌은 크게 세 범주, 즉 일반적인 리사이클링의 영향, 리사이클링 잠재력에 미치는 영향인자 및 필프의 초지 특성 회복으로 분류할 수 있다. 일반적으로 리사이클 섬유는 물성 회복을 위한 고해나 기타 다른 처리가 없는 한 약간 증가한다.¹⁾ 또한 섬유장은 재해섬 또는 리파이닝 과정 중에 짧아질 수 있으나 일반적으로 큰 변화가 없다. 단지 강한 캘린더링을 하면 섬유가 약간 짧아질 수 있다.²⁾

리사이클 섬유에서 가장 문제되는 것은 섬유간 결합력이 약하다는 것이다. 섬유간의 결합력 감소는 반복 재생과정에 의하여 섬유가 뺏겨지고 딱딱해져서 섬유의 유연성과 가소성이 감소된다는 비가역적인 각질화(hornification)로 설명되고 있다. 각질화가 일어나면 팽윤성이 감소되기 때문에 섬유의 내부 팽윤능력을 나타내는 지표인 보수성(WRV: water retention value)을 측정하여 그 섬유의 각질화 정도를 평가할 수 있다.³⁾

UKP(bleached kraft pulp)의 경우, 리사이클링이 반복될수록 WRV는 감소하며 미세섬유가 없을 경우에는 감소폭이 더 크다. 그러나 장섬유는 고해를 통하여 WRV를 회복시킬 수 있지만 미세섬유의 경우는 이것이 불가능하다. 즉, 재생지에 함유된 미세섬유는 충전물과 같은 역할을 한다.⁴⁾ 물론 섬유간 결합력 상실이 팽윤성의 감소에 전적으로 의존하지는 않는다.⁵⁾ WRV는 습부

압착 과정에서도 영향을 받는다. 또한 건조에 의해서는 WRV가 크게 변화한다. Formette Dynamique sheet former에서 제조한 종이의 건조온도를 더 높이면 팽윤이 덜 일어나고, 인장 건조는 팽윤을 훨씬 더 감소시킨다.^{6,7)}

한편 CTMP(chemi thermo mechanical pulp)나 TMP(thermo mechanical pulp)는 CP(chemical pulp)와 달리 건조 후 물에 젖을 경우 물 흡수능력이 회복되는데 이것은 고수율 필프의 경우 건조나 물을 재흡착 후에도 CP보다 더 유연성을 지니고 있기 때문이다.⁸⁾ KP(kraft pulp)를 4회 반복 리사이클링할 경우 FSP(Fiber Saturation Point)가 30-40% 감소하나 TMP와 UHYS(Unbleached high yield sulfite)는 동일하다고 보고되고 있다.⁹⁾ 이러한 이유는 리그닌이 세포벽 내에서 cross-linking agent로 작용하거나 셀룰로오스와 헤미셀룰로오스가 coupling을 형성하기 때문이라고 설명하였다. CP의 경우는 리그노-셀룰로오스 겔이 감소하여 WRV가 감소한다는 보고도 있다.¹⁰⁾ 비록 문헌상으로 리사이클 필프의 형태학적인 변화는 보고되어 있지만^{11, 12)}, 형태학적인 중요성은 명확하지 않다. 결국 리사이클링을 함에 따라 섬유의 형태적 변화는 제지 포텐셜을 상당히 감소시키는데, 이에 대한 이유는 아직 명확히 밝혀져 있지 않다.

본 연구는 재생필프의 종류와 초기 캘린더링이 리사이클 특성과 재생지의 인쇄적성에 미치는 영향을 구명하기 위해 시도하였다. 일차적으로 SW-BKP, HW-BKP 및 CTMP 필프로 초지한 종이를 캘린더링한 후 재해섬을 5회까지 반복하면서 생성된 각 섬유의 여수도, 섬유장, WRV 및 미세섬유량을 조사하여 재생섬유의 특성을 밝히고자 한다.

Table 1. Characteristics of pulp samples

Species	Initial freeness (mL, CSF)	Weighted average fiber length (mm)	Brightness (% ISO)	Dirt (ppm, TAPPI)	Ash content (%)
Western red cedar, SW-BKP	640	2.33	88.0	1	<0.5
White spruce, Lodgepole pine					
HW-BKP	630	1.03	87.0	2-3	0.3
Oaks, Gum, Poplar, Others					
BCTMP	405	0.80	84.2	3-5	0.4
Aspen					

2. 재료 및 방법

2.1 공시재료

본 연구에서 사용된 펄프는 Canfor(캐나다)社의 침엽수 크라프트 펄프(SW-BKP), Stone Container Corporation(미국)社의 활엽수 크라프트 펄프(HW-BKP), Louisiana Pacific(캐나다)社의 표백 화학열기계 펄프(BCTMP)를 사용하였으며, 각 펄프에 대한 일반적인 성질은 Table 1과 같다.

2.2 실험방법

2.2.1 지료 조성

각각의 공시펄프를 20 L 용량의 실험실용 Valley beater에 넣고 펄프농도 1.25%가 되도록 물을 가하고 추를 달지 않은 상태에서 펄프를 먼저 해리시킨 다음 목표 여수도를 맞추기 위해 각 펄프에 대하여 Table 2와 같은 조건으로 상온(20-25℃)에서 고해처리를 하였다.

Table 2. Beating conditions

Pulps	SW-BKP	HW-BKP	CTMP
Disintegrating time (min)	15	10	9
Beating consistency (%)	1.20	1.25	1.70
Beating time (min)	40	29	5
Target freeness (mL, CSF)	360	360	360

2.2.2 시트 제조

고해된 지료의 농도를 0.5-0.6%의 범위가 되도록 희석한 후 수초지하였다. 실험실 수초기로는 4각형의 KRK 수초지기(25×25 cm)를 이용하였으며 목표 평량 80 g/m²이 되도록 종이를 제조하였다. 이때의 습부 압착 조건은 5회의 리사이클링을 시킬 때까지 동일한 조건에서 실시하였으며,

건조는 회전식 건조기에서 TAPPI 표준 시험법으로 수행하였다. 습부 압착 조건은 3.5 kg_r/cm²에서 7분, 건조조건은 120℃에서 114초 동안 행하였다.

2.2.3 캘린더링

최초로 제조된 종이(recycle 0)를 캘린더링하지 않은 것과 2가지 종류의 캘린더링 처리한 것을 5회까지 리사이클시키면서 각각의 처리에 따른 종이의 특성을 조사하였다. 캘린더링의 조건은 Table 3과 같으며, 이때에 사용한 캘린더는 Beloit Wheeler社의 실험실용 캘린더로 2개의 steel roll 사이를 1회(1 nip) 통과시켰다.

Table 3. Calendering conditions

	Temperature (°C)	Calendering pressure (psi)	Speed (m/min)
UC*1	-	-	-
CO*2	50	350	20
XT*3	210/150	1000	20

*1:Uncalendered samples,

*2:Conventional calendered,

*3:Extreme temperature and pressure calendered(top/bottom roll).

2.2.4 리사이클링

2.2.2에 의해 제조된 종이를 초기 캘린더링의 조건을 달리하여 Fig. 1과 같은 방법으로 리사이클링시켰다. 이때의 해리 방법은 농도 2±0.05%로 표준해리기에서 해리시켰다. 이후의 반복되는 리사이클에서는 고해를 행하지 않았으며, 습부 압착, 회전식 건조기에서 고온 건조, 약한 리슬러쉬를 반복하여 종이를 제조하였다. 또한 각 리사이클마다 미세섬유의 함량을 측정하여 미세섬유의 함량 분포를 조사하였다.

2.2.5 미세섬유 함량조사

각 처리에 대한 리사이클링의 미세섬유 함량을 PCLI社의 dynamic drainage & retention

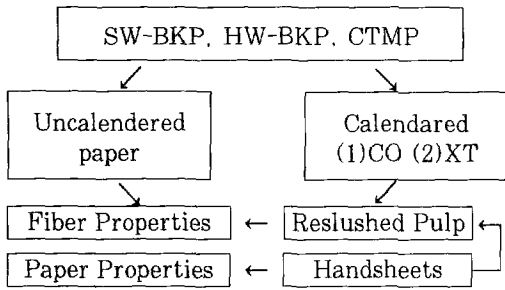


Fig. 1. Schematic sequence of recycling experiments.

jar(Britt Jar)를 이용하여 TAPPI 표준 시험법 T 261 cm-94에 의거 측정하였다.

2.2.6 섬유특성 분석

(가) 여수도

TAPPI 표준 시험법 T 227 om-85에 의거 측정하였다.

(나) 섬유장 분석

펄프의 섬유장 변이분포를 측정하기 위해 Kajaani Fiber Length Analyser(FS-100, 핀란드)를 이용하여 섬유의 길이를 측정하였다.

(다) 섬유의 보수성

리사이클링시 섬유의 보수성(water retention value, WRV)과 각 리사이클에 따른 제반강도와와의 관계를 알아보기 위해 처리간의 지료를 원심분리기에서 g-force 3000, 온도 20℃로 15분간 탈수시켜 원심분리 후의 섬유무게와 전건 후의 섬유무게를 이용하여 섬유의 보수성 값을 계산하였다.¹⁵⁾

3. 결과 및 고찰

고지섬유의 리사이클이 진행됨에 따른 리사이클 섬유의 수초지 특성의 변화를 조사하기 위해서 각각의 리사이클에서 지료의 여수도, 탈수 특성, 섬유장 변화, WRV 및 미세섬유의 함량 변이 등을 측정하였다. 목표 여수도 360 mL를 맞추기 위해

최초의 초지에서만 고해하여 종이를 만들었고, 이 종이의 리사이클에서는 고해를 행하지 않고 다시 초지하였다.

3.1 여수도

Figs. 2와 3에서 보는 바와 같이 여수도 특성은 SW-BKP와 HW-BKP의 경우 모두 초기 캘린더링에 의한 차이는 거의 없었다. 침엽수 펄프의 경우 리사이클 횟수에 따라서 1회 리사이클에서는 감소하지만, 그 이후부터는 오히려 여수도가 증가하다가 5회 리사이클에서는 다시 감소하는 경향을 나타내었다. 활엽수 펄프의 경우 4회 리사이클까지 증가하다가 5회 리사이클에서는 감소하는 경향을 보였다.

한편 CTMP의 경우는 Fig. 4에서와 같이 다른 펄프에 비해 여수도가 1회 리사이클에서부터 5회 리사이클까지 지속적으로 증가하는 특성을 보였는데, 이러한 결과는 현재 고지펄프의 사용에서 문제가 되는 탈수성에 오히려 좋은 효과가 있을 것으로 판단된다. 이와 같이 CTMP에서 탈수성이 좋은 이유는 리그닌이 많은 펄프로서 계속되는 건조과정에서 각질화가 더욱 촉진되어 팽윤성이 떨어지므로써 보수성이 감소하는 것으로 사료된다. 그러나 3가지 모든 펄프에서 초기 캘린더링에 따른 여수도 특성의 차이는 거의 없었다.

Howard¹³⁾에 따르면 백수를 순환시키면서 리사이클링시킬 경우 모든 펄프(SGW, TMP, CTMP, SW-BKP)에서 여수도는 떨어진다고 하였다. 또한 Yamagishi와 Oye¹¹⁾도 1회 리사이클에서는 여수도가 증가하지만 그 후부터는 점진적으로 감소한다고 보고하였다. 그러나, 본 연구에서는 화학펄프의 경우 여수도 저하의 대부분은 1회 리사이클에서 일어났고, 백수를 리사이클시키지 않은 두 경우(초기 고해를 한 것과 초기 고해를 하지 않은 것) 모두 여수도가 증가한 결과를 나타냈다. 한편 여수도는 주로 섬유물질의 외부표면의 기능이므로 미세섬유의 영향에 좌우된다.¹⁴⁾ 그러므로 비록 리사이클 지료가 매우 강한 해리를 받으면 상황이 바뀔지 모르지만, 실험실 규모에서는 리사이클 동안에 여수도가 증가할 수 있다. 초지시의 탈수속도는 여수도 특성과는 또 다른 결과를 보여 주는데 SW-BKP는 모든 캘린더링 조건

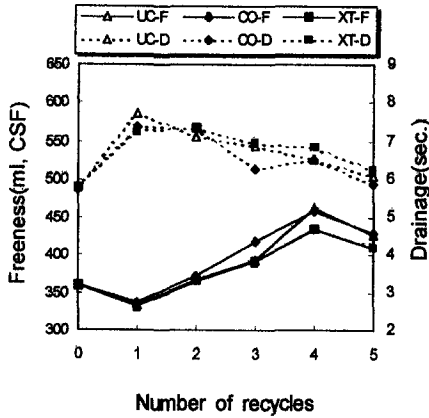


Fig. 2. Freeness and drainage time of recycled SW-BKP.

UC : uncalendered,
 CO : conventionally calendered,
 XT : extreme temperature and pressure calendered,
 F : freeness, D : drainage time

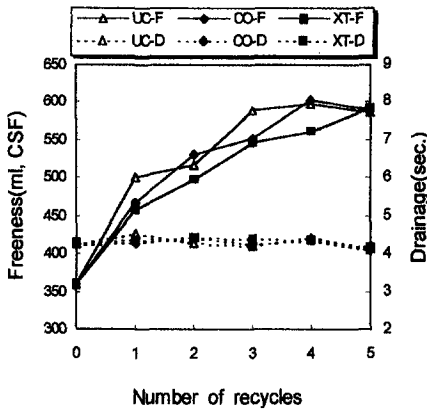


Fig. 4. Freeness and drainage time of recycled CTMP.

에서 리사이클이 진행됨에 따라 탈수속도가 지속적으로 늦어졌다(Fig. 2). HW-BKP와 CTMP도 같은 경향을 보여 주지만 그 감소 폭은 SW-BKP에 비해 훨씬 적게 나타났다(Figs. 3, 4). 특히 펄프 종류간의 탈수속도는 CTMP>HW-BKP>SW-BKP순으로 크게 나타났지만, 저수율 펄프인 HW-BKP의 경우 오히려

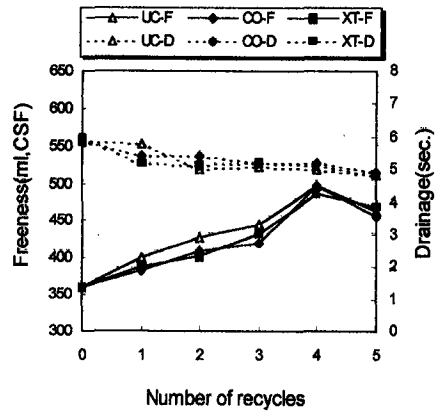


Fig. 3. Freeness and drainage time of recycled HW-BKP.

리그닌이 많이 함유된 고수율 펄프인 CTMP와 리사이클 횟수에 따라 비슷한 경향을 보여 주는 것이 다르다. 이는 물론 섬유-물간의 상호작용에 관하여 특히 섬유 표면의 성질에 의한 역할과 섬유구조에 따른 보수능력에도 밀접한 관계가 있는 것으로 판단되며, 물의 동적인 평형상태(dynamic equilibrium)에 대한 셀룰로오스 표면이 매우 민감하다는 것을 의미한다. 또한 초기 과정에서 첨가제의 부가에 의해 섬유 표면의 반응성이 물과 첨가제의 상호작용에 의해서도 크게 영향을 받게 됨을 예측할 수 있다.

3.2 섬유장

Fig. 5에서와 같이 섬유장 변화에서는 SW-BKP의 경우 일반적으로 감소하는 경향이 보이며, 특히 2회 리사이클에서 섬유장의 감소가 큰데, 이는 1회 리사이클에서부터 섬유의 각질화가 크게 진행되었다는 것을 의미한다. 또 XT 캘린더링 조건에서 섬유장 감소가 크게 나타났는데, 이것은 SW-BKP가 캘린더링 충격에 보다 더 민감하기 때문인 것으로 사료된다.

그러나 HW-BKP와 CTMP의 경우 섬유의 길이 감소는 거의 없으며, 변화 경향도 이 두 펄프간에 비슷하게 나타났다. 이는 HW-BKP와 CTMP가 리사이클이 진행됨에 따라 SW-BKP보

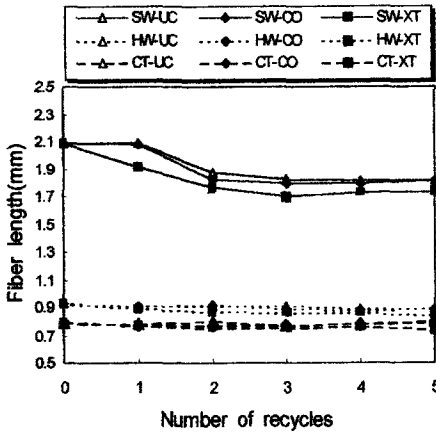


Fig. 5. Effect of recycling on fiber length(SW:SW-BKP, HW: HW-BKP, CT : CTMP).

다 각질화에 대한 영향을 덜 받아서 재펄핑 과정에서 단섬유의 발생도 적은 것으로 판단되는데, 이는 이들 섬유의 성질이 SW-BKP와 다른 특성이 있음을 의미한다. 그러나 리사이클에 따른 와이어에서의 미세섬유 손실로 인하여 섬유장의 변화는 크게 나타나지 않았다.

3.3 보수성

Fig. 6에서와 같이 섬유의 보수성(WRV)은 SW-BKP에서는 지속적으로 떨어지지만 HW-BKP와 CTMP의 경우는 1회 리사이클 후 조금 낮아지고, 그 후에는 거의 변화가 없다. 이러한 결과는 고수율 기계펄프가 저수율 화학펄프에 비해 건조에 의한 보수성의 저하 효과가 적다¹⁵⁻¹⁷⁾는 보고와 부분적으로 상반되는 결과를 나타내고 있다. 즉 HW-BKP의 경우 화학펄프이지만 고수율 기계펄프에 가까운 특성을 나타내는데, 이것은 다시 말해서 펄프의 수종에 관계없이 일률적으로 그 특성을 저수율 펄프(화학펄프)와 고수율 펄프(기계펄프)로 구분하는 것은 부적절하다고 사료된다. 따라서 각질화에 대한 주장이 오랫동안 논쟁의 주제가 되어 왔으며, 아직도 이에 대한 해결이 만족스럽지 않다는 것을 보여 주는 결과로 사료된다.

Oye 등⁸⁾에 따르면 건조공정 동안에 자유수는

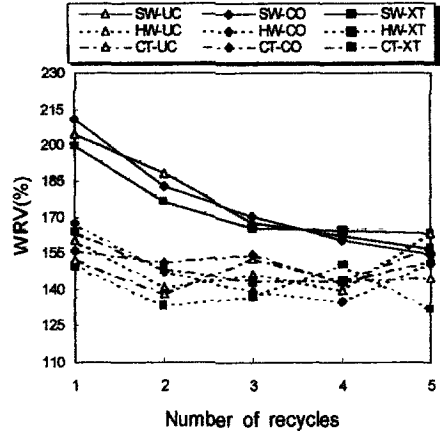


Fig. 6. Effect of recycling on water retention value.

세포벽에서 대부분 빠져 나가고 결합수는 세포벽 내의 세포벽 구성물질의 수산기(OH⁻)와 2차 결합인 수소결합에 의해 고착되어 있다. 이러한 섬유를 다시 물에 적어도 완전히 원래의 상태로 돌아가지는 않는다고 하였다. 이와 같은 현상은 화학펄프 섬유에서 두드러진다. 따라서 화학펄프의 강도 감소는 섬유 자체의 길이나 강도 감소에 의해서가 아니라 섬유의 결합 감소 때문이라고 보고하였다.^{10, 13)} 한편, Scallan 등¹⁰⁾은 고수율 펄프(TMP, CTMP 등)는 건조처리 후에도 물을 흡수하는 능력을 회복할 수 있지만 저수율 펄프는 다시 물을 흡수하는 능력이 떨어진다고 하였으며, 그 이유는 리그닌이 세포벽의 cross-linking agent로 작용하며, 헤미셀룰로오스가 공극을 코팅하여 리그닌과 셀룰로오스 사이의 커플링 agent로 작용하기 때문이라고 보고한 바 있다. 따라서 섬유가 다시 물에 젖을 때 물은 공극을 통해서 흡수되고 ligno-hemicellulose가 겔(gel) 상태로 돌아간다. 이 겔이 세포벽 내의 공유결합과 수소결합에 공유할 수 있다고 하였다. 또한 화학펄프가 물을 흡수하는 능력이 감소하는 원인은 재펄핑 과정에서 ligno-hemicellulose 양이 감소하기 때문이라고 추정하였다. 그러나 이들 이론도 펄프 처리방법, 즉 고해, 건조, 첨가약품, 펄프의 혼합비율 등에 따라 서로 다른 결과들이 도출되므로 이 분야는 앞으로 더 연구가 필요하다고 본다.

3.4 미세섬유

미세섬유 함량은 펄프간, 캘린더링 방법 그리고 리사이클간에 그 결과가 상당히 분산되어 일부 그림을 생략하였다. 이는 초지시 백수의 리사이클링이 되지 않았던 점과 와이어상에서 빠져 나가는 미세섬유의 변수가 리사이클링 횟수 및 캘린더링 수준보다 더 크게 영향을 미친 것으로 판단된다. 그러나 HW-BKP의 경우 Fig. 7에서와 같이 아주 일정한 경향을 보여 주고 있는데, 리사이클이 진행됨에 따라 미세섬유의 함량이 약간 감소하다가 5회 리사이클에서 증가하는 것을 알 수 있다. 즉 5회 리사이클 이상에서는 단섬유화가 많이 진행되는 것으로 유추할 수 있다.

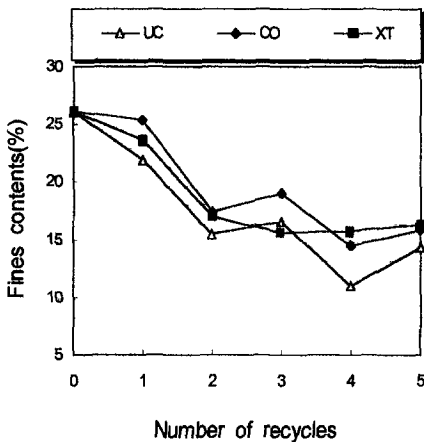


Fig. 7. Effect of recycling on fines contents for HW-BKP.

4. 결론

펄프 종류와 초기 캘린더링이 리사이클링 섬유의 초지 특성에 미치는 영향은 다음과 같다.

1. 여수도의 경우 SW-BKP 및 HW-BKP는 리사이클링이 증가함에 따라 적어도 4회 리사이클까지는 여수도가 증가하며 그 이후 5회 리사이클부터는 감소하기 시작하였다. 특히 CTMP는 다른 펄프에 비해 1회 리사이클부터 급속히 증가하는 특성을 나타냈다. 또한 3가지 모든 펄프에서 초기 캘린더링에 따른 여수도 차이는 인정되지 않았다.

2. 초지시의 탈수속도는 여수도 특성과는 달리 모든 캘린더링 조건에서 리사이클이 진행됨에 따라 지속적으로 느려지는 것으로 나타났으며, 펄프 종류간의 탈수속도는 CTMP>HW-BKP>SW-BKP순으로 빨랐다. 그러나 저수율 펄프인 HW-BKP의 경우 리그닌이 많이 함유된 고수율 펄프인 CTMP와 비슷한 경향을 나타냈다.
3. HW-BKP 및 CTMP는 리사이클에 따른 섬유 길이 변화가 없었으며 캘린더링의 충격에는 거의 민감하지 않았지만, 일반적으로 SW-BKP의 경우 섬유의 길이가 감소하는 변화를 보였다. 특히 고온, 고압의 캘린더링 조건에서 길이 감소가 크게 나타난 것은 SW-BKP가 유연성이 강한 캘린더링에 의해 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다.
4. 보수성은 리사이클링이 계속됨에 따라 SW-BKP는 계속 감소하지만, HW-BKP와 CTMP는 1회 리사이클링에서 감소하고 그 후에는 큰 변화가 없었다.
5. 미세 섬유량은 HW-BKP의 경우, 4회 리사이클까지 계속 감소하다가 5회 리사이클에서 다시 증가하였다. 그러나 SW-BKP와 CTMP에서는 리사이클 횟수에 따른 일정한 경향이 나타나지 않았다.

인용문헌

1. Howard, R. C. and Bichard, W., CPPA Recycling Forum, p. 81 (1991).
2. Göttsching, L. and Sturmer, L., Trans. BPBIF Symp. Vol. II, London, UK, p. 873 (1978).
3. Lyne, L. M. and Gallay, W., Tappi J. 33(9):429 (1950).
4. Szwarcstajn, E. and Przybysz, K., Cellulose Chemistry & Technology 10(6):737 (1976).
5. Eastwood, F. G. and Clarke, B., Trans. BPBIF Symp. Vol. I, London, UK, p. 835 (1978).
6. Lundberg, R. and de Ruvo, A., Svensk Papperstidning 81(11):383 (1978).
7. Lundberg, R. and de Ruvo, A., Svensk Papperstidning 81(11):355 (1978).
8. Oye, R., Okayama, T., Yamazaki, Y., and

- Yoshinaga, N., CPPA Recycling Forum 1991, p. 191.
9. Chatterjee, A., Lee, J., Roy, D. N., and Whiting, P., *Proceedings of the 1991 Paper Physics Conference, Book 1*, TAPPI Press, Atlanta, p. 129.
 10. Scallan, A. M. and Tigerstrom, A. C., *J. Pulp Paper Sci.* 18(5):J188 (1992).
 11. Yamagishi, Y. and Oye, R., *Japan Tappi* 35(9):33 (1981).
 12. Stone, J. E. and Scallan, A. M., *Cellulose Chemistry & Technology* 2(3):343 (1968).
 13. Howard, R. C., *J. Pulp Paper Sci.* 16(5):J143 (1990).
 14. Cardwell, R. D. and Alexander, S. D., *Appita* 30(4):327 (1977).
 15. McKee, R. C., *Paper Trade J.* 155(5):34 (1971).
 16. Bobalek, J. F. and Chaturvedi, M., *Tappi J.* 72(6):123 (1989).
 17. Horn, R. A., *Paper Trade J.* 159(2):78 (1975).