

실린더/콘디벨트 건조된 라이너지의 재활용 특성 비교

이학래 · 함충현 · 박재훈 · 김종민
서울대학교 임산공학과

Effects of Cylinder/Condebelt Drying Methods on Recycling of Liner Boards

Hak-Lae Lee, Chung-Hyun Ham, Jae-Hoon Park, Jong-Min Kim
Dept. Forest Products, Seoul National University

1. 서론

국산 골판지 고지는 재활용율이 95%를 상회하는 고도의 환경친화적 원료 활용 체계를 가지고 있으나 이에 따라서 발생하는 강도 저하 현상에 의해 적절한 물성을 얻기가 어려운 근원적인 단점을 지니고 있다. 이러한 문제를 극복하기 위해서 펄프 섬유를 기계적으로 처리하는 방법과 화학적 첨가제를 사용하는 방안 등이 연구되고 있다.

그러나 기계적 처리 방법은 처리 직후 초지된 종이의 강도는 향상시키는 특징이 있지만 미세섬유를 다량 발생시킴으로 재활용 시 섬유 손실을 크게하며, 미세섬유의 각질화에 의한 강도의 저하 및 화학첨가제의 활용도를 저하시키는 문제를 일으키는 단점이 있다. 또 화학첨가제를 사용하여 강도의 증강을 피하는 연구 방향은 앞으로 환경문제에 대응하기 위하여 공정 폐쇄화가 진행될 경우 초지계 내의 각종 이온성 물질과 염류의 농도가 증가하여 첨가제의 효능이 저하되므로 이를 극복하기 위한 방안이 모색되어야만 할 것이다.

따라서 국산골판지를 다시 원료로 사용하여 더욱 우수한 품질과 강도적 성질을 지닌 골판지 원지를 생산하고, 수질오염 등의 환경문제를 최소화하기 위해서는 원료 조성과정에서 섬유의 과도한 단섬유화를 방지해야만 할 것이며, 첨가제 활용의 최적화 및 이를 위한 공정 적용 기술 확립이 필수적이라 하겠다. 하지만 이보다 더 좋은 대안으로서 고온압착 건조기술을 활용하는 방안이 연구되고 있다.

고온 압착건조기술의 요체는 압착과 건조의 두 공정을 하나로 조합함으로써 섬유간 결합을 더욱 크게 유도시킨다는 데 있다. 이러한 기술은 기술 개발 주체에 따라서 다양한 명칭으로 불리고 있지만 그 근본원리는 펄프 섬유의 유리전이점보다 높은 150 °C 이상의 가열조건 하에서 습지필을 압착건조하면 섬유의 유연성이 증가하므로 섬유간 결합력은 크게 증가하고 결과적으로 종이의 강도 증강이 지금까지의 기술로 얻을 수 없는 수준까지 가능하다는 데 있다. 이러한 가설은 그 동안 각종 파일럿 설비를 통한 연구에서 실증된 바 있으며 앞선 연구에 의해서 또 최근 가동된 대형 Condebelt 설비를 통해서도 확인된 바 있다.¹⁾ 고온 압착건조기술을 이용할 경우 특히 폭방향 압축강도와 파열강도는 50% 정도 향상되며, 층간결합강도는 20-30% 향상되고 밀도와 평활도는 각각 25-100% 증가되는 등 놀라운 물성 향상

효과가 있는 것으로 평가된 바 있다.^{2,3)}

결론적으로 고온 압착건조 기술은 국산 골판지 고지와 같이 강도 열화가 극히 심한 섬유로부터 제조된 종이의 강도 및 물성 향상 기술의 대안으로서 매우 높은 효과가 있다는 것이 실증되었다. Condebelt 공정에서는 섬유의 손상이 억제된 상태에서 건조되기 때문에 고지 재활용 시 섬유의 품질 유지 특성이 우수할 것으로 기대된다. 하지만 이와 달리 Condebelt process에서는 섬유간 결합이 리그닌의 연화에 의해 강화되기 때문에 해리가 불량할 것이라는 가정도 가능하다. 그러나 아직도 Condebelt process를 통하여 제조된 용지의 재활용 특성에 대해서는 연구된 바 없으므로 국내와 같이 재활용율이 높은 경우에 첨단 고온압착건조 기술이 성공적으로 적용되기 위해서는 생산제품의 재활용성을 평가하고 재활용공정을 최적화하기 위한 기술개발이 필수적으로 요청된다.

따라서 본 연구에서는 앞선 연구에 의해 그 우수성이 확인된 고온압착 건조기술을 통하여 제조된 종지와 기존 실린더 방식으로 제조된 종지의 재활용 특성을 비교하여, 고온압착 건조기술을 통하여 제조된 종지의 재활용성을 평가하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

본 연구에서는 원료로 침엽수 미표백크라프트펄프(UKP)와 동일제지(주)에서 분양받은 국산 test liner를 사용하였다. 고온압착 건조된 수초지의 해리 효율 평가와 재활용에 따른 강도 변화를 파악하는데 있어 건조 방식에 따른 차이만을 측정하고자 하였다. 이에 test liner를 이용할 경우 발생할 수 있는 지료 조성분의 불균일성을 배제하기 위하여 미표백크라프트 펄프를 실험실용 밸리 비터를 이용하여 450±10 mL CSF로 고해하여 사용하였다. 고온압착 건조는 앞선 실험 결과를 통해 제시된 운전조건에 따라 상부 플레이트 160℃, 하부 플레이트를 80℃로 고정하였고, 또한 압체시간은 5 bar로 조절하였으며, 이때 압착시간은 5초로 고정시켰다. 또한 지필의 압착건조시 압지를 교체하여 3.5 kgf에서 2회 압착시킴으로서 inlet 건조도를 50%로 유지하였다. 일반 실린더 건조의 경우 압착건조과정까지는 동일하게 진행시켰으며, 이후 실린더 표면 온도가 105℃로 유지된 상태에서 건조시켰다. 위와같은 방식으로 제조된 수초지를 실험실용 저농도 해리기를 이용하여 revolution에 따라 해리하였다. 이때 수초지는 가로 3 cm, 세로 3 cm가 되도록 찢어서 사용하였으며, 용수는 이온성 물질들의 영향을 제거시키기 위해 증류수를 이용하였다. 해리농도는 2%, 해리온도는 30℃가 되도록 하고 20분간 soaking time을 부여하였다. 이후 지료를 농도 0.5%로 희석하여 전건펄프 10 g이 되도록 지료를 채취한 후 slot 크기가 0.25 mm인 섬머빌 스크린을 이용해 10분간 정선시켰다. 스크린 상에 잔류된 지료 조성분을 채취하여 무게를 측정함으로써 미해리분 (unslushed contents)을 결정하였다.

고온압착 건조된 수초지와 실린더 건조된 수초지의 리사이클링에 따른 물성의 변화를 평가하기 위하여 미표백크라프트 펄프의 경우 실험실용 밸리비터로 고해하여 제조된 수초지를, 국산 라이너지의 경우에는 공장에서 생산된 test liner를 해리하여 제조한 수초지를 리사이클링 첫단계로 사용하였다. 리사이클링시 실험실용 저농도 해리기를 사용하여 해리만 실

시하였다. 해리시 미표백크라프트펄프의 경우 10,000 revolution, 국산 라이너지의 경우 30,000 revolution을 적용하였다. 2회 리사이클링을 하였으며, 각 리사이클링 단계마다 물성을 평가한 후 다시 해리하여 다음 단계의 수초지를 제작하였다(Fig. 1).

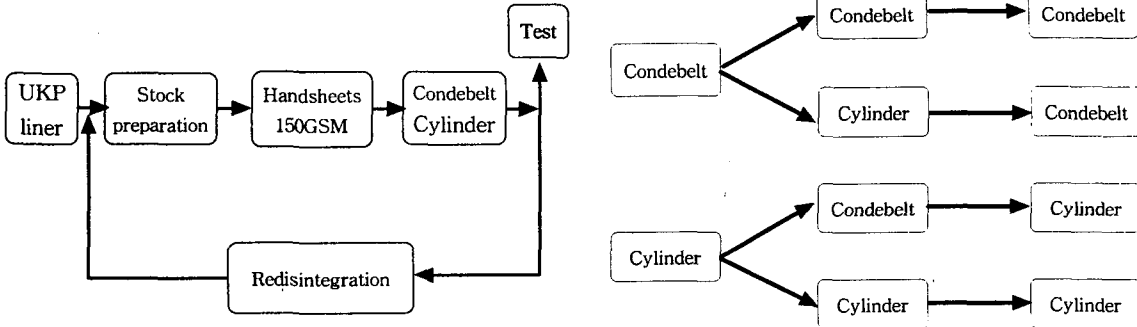


Fig. 1. Flow diagram for laboratory recycling. Fig. 2. Applied drying process in laboratory recycling.

미표백크라프트펄프로 제조된 수초지의 경우 고온압착 건조된 수초지를 해리하여 일반 실린더건조 방식으로 수초하였으며, 일반 실린더로 건조된 수초지는 고온압착 건조하였다. 이런 교차 리사이클링 역시 각각 단계에서 물성을 측정하였다(Fig. 2).

소요 고해 동력을 평가하기 위하여 미표백크라프트 펄프와 국산 라이너지를 각각 해리만을 실시하여 수초지를 제조한 후 물성을 측정하였다. 이렇게 제조된 수초지를 해리하여 실험실용 벨리비터로 고해 시간별로 고해한 후 수초하여 물성을 측정하였다. 이때 고해동력 측정장치를 사용하여 고해시 소요된 동력을 전력량으로 측정하였다.

3. 결과 및 토론

3.1. 건조방식에 따른 해리효율 변화

고온 압착건조 기술은 국산 골판지 고지와 같이 강도 열화가 극히 심한 섬유로부터 제조된 종이의 강도 및 물성 향상 기술의 대안으로서 매우 효과가 있다는 것이 실증되었다. Condebelt 공정에서는 섬유 수축이 근본적으로 억제된 상태에서 건조되기 때문에 고지 재활용 시 섬유의 품질 유지 특성이 우수한 것으로 나타났다. 하지만 이와 달리 Condebelt 공정에서는 섬유간 결합이 리그닌 연화⁴⁾에 의해 강화되기 때문에 해리가 불량할 것이라는 가정이 가능하다. 그러므로, Condebelt 공정에 의해 만들어진 라이너지를 일반 실린더 건조 방식 공장에서 재활용할 경우 동등한 해리 조건을 적용함으로써 유발되는 해리 불량으로 강도 저하를 가져올 것이라고 생각되어질 수 있다.

본 연구에서는 수초시 미표백크라프트 펄프를 사용함으로써 첫째, 일반 실린더 건조와

고온압착 건조를 통한 섬유간 결합을 극대화하고자 하였으며, 둘째, 국산 라이너지를 사용할 경우 지료내 포함된 스티키와 같은 이물질이 스크린을 이용한 실험실적 해리 효율 평가시 미치는 영향을 제외시키고자 하였다.

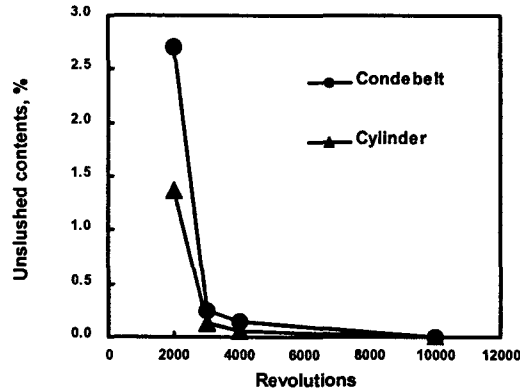


Fig. 3. Effects of revolutions on unslushed contents of UKP.

Fig. 3에서 알 수 있듯이 2000 rev.에서 미해리분의 발생 정도가 고온 압착건조 기술에 의해 건조된 수초지의 경우 일반 실린더 건조에 비하여 2배정도 많은 미해리분이 측정되었다. 그러나 3000 rev. 수준 이상에서는 미해리분량의 차이가 급격히 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 또한 10,000 rev. 수준에서는 실린더 건조된 수초지와 고온압착 건조된 수초지의 해리시 발생하는 미해리분은 두 경우 모두 발생하지 않았다.

위의 결과를 통해 고온압착 건조시 리그닌의 연화에 의한 섬유간 결합의 증대로 인한 해리 효율의 저하는 초기 해리시에는 발생할 수 있으나, 3000 rev. 이상의 해리 조건에서는 그러한 강화된 섬유간 결합 역시 쉽게 깨어져 미해리분의 발생에 큰 영향을 미치지 않는다고 판단하였다. 따라서 일반 실린더 건조 방식으로 제조된 종이를 완전 해리하기 위하여 적용되는 해리 수준을 고온 압착건조된 종이의 해리시에 적용하여도 큰 무리는 없을 것으로 생각되었다.

3.2. 펄프섬유의 재활용에 따른 물성 변화

고온 압착건조 기술로 제조된 수초지와 국산 라이너지로 제조된 수초지를 Fig. 1과 Fig. 2와 같은 방법으로 리사이클링과 건조 방식을 적용하였으며 단계별로 제조된 수초지의 물성을 측정하였다. 천연펄프를 리사이클링 했을 경우 첫 번째 단계에서 가장 큰 강도 저하가 발생하고, 4단계 이상에서는 강도의 저하가 크게 일어나지 않는다는 보고⁵⁾와 같이 수회의 리사이클링을 통해 섬유의 각질화가 더 이상 진행되지 않을 것으로 생각되는 국산 test liner의 경우 예상대로 리사이클링에 따른 밀도의 변화가 크게 나타나지 않았다(Fig. 4). 또한 리사이클링에 따른 고온압착 건조된 수초지의 밀도 변화 경향과 실린더 건조방식으로 제조

된 수초지의 밀도 변화 경향이 유사하다는 것을 알 수 있다. Kunnas등의 연구⁶⁾에 의하여 알려진 바로 고온압착을 통해 고밀화되고 리그닌 연화로 인해 섬유간 결합이 증대되는 부분은 두께방향으로 약 30 μm 정도라고 한다. 이를 통해 미루어볼 때 고온압착 건조를 통해 고밀화되지 않는 부분은 실린더 건조시와 마찬가지로 섬유의 각질화⁷⁾의 영향으로 밀도가 감소하게 되며 이것이 측정시 나타난 것으로 추측된다.

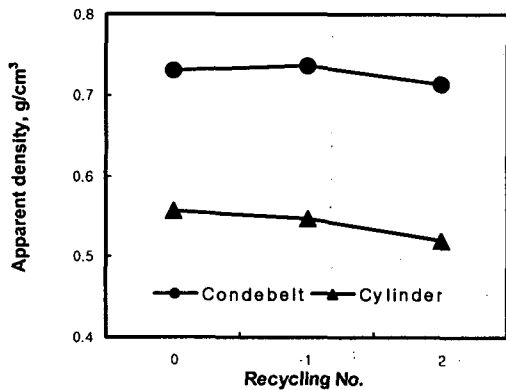


Fig. 5. Effects of Recycling on apparent density of test liner.

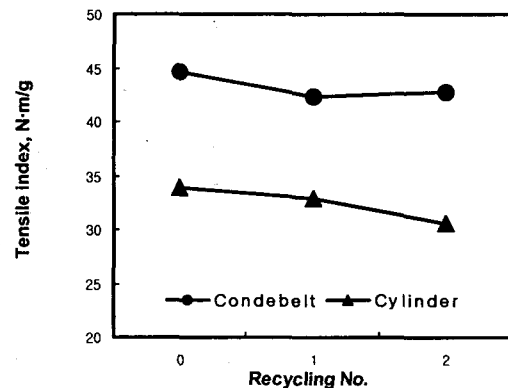


Fig. 6. Effects of recycling on tensile index of test liner.

위와 같은 결과를 통해, 펄프 섬유의 재활용에 따른 강도 저하는 어떠한 건조 방식을 택 하더라도 발생할 수 밖에 없는 필수불가결한 것임을 알 수 있었다. 하지만, 각질화는 온도와 시간의 함수로 고온압착 건조의 경우 온도는 높지만 접촉시간은 상당히 짧게 된다. Condebelt process에서는 건조시 발생하는 heat pipe 현상⁸⁾으로 인하여 건조가 이루어지게 되며, 이로 인하여 실린더 건조보다 각질화의 정도가 감소하게 된다. 따라서, 고온압착 건조를 통해 그 감소 정도를 줄일 수 있는 가능성이 있으며, 최소한 펄프 섬유의 재활용시에도 실린더 건조방식에 비하여 항상 높은 수준의 강도를 나타내고 있어 강도적인 측면에서 유리한 건조 방식이라고 판단되었다.

3.3. 펄프섬유의 재활용시 건조방식의 교차 적용

현실적으로 펄프섬유의 재활용을 위하여 원료를 수집하는 과정에서 고온압착 건조된 종이와 실린더 건조된 종이를 분리하여 선택적으로 재활용할 수는 없다. 따라서 재활용시 실린더 건조와 고온압착 건조를 교차로 적용함으로써 보다 현실적인 측면에서의 펄프섬유의 재활용에 대한 건조 방식의 영향을 파악하고자 하였다.

Fig. 6과 Fig. 7에는 펄프 섬유의 재활용에 따른 밀도의 변화를 보여주고 있다. Fig. 6은 첫 단계의 건조방식이 고온압착 건조인 경우로 리사이클링 1회에 실린더 건조를 행한 경우 급격한 밀도의 저하를 나타내나 리사이클링 2회시 고온압착 건조를 실시함으로써 고온압착

건조를 지속적으로 유지한 경우와 거의 동일한 밀도 결과를 나타내었다. 이는 Fig. 7의 첫 단계에서 실린더 건조를 행한 경우에서도 볼 수 있는데 리사이클링 1회에 고온압착 건조를 행함으로써 밀도의 증가가 발생하나 리사이클링 2회시 실린더 건조를 적용할 경우 실린더 건조를 지속적으로 유지한 경우와 거의 동일한 결과를 나타내었다. 이로부터 펄프섬유의 재활용시 어떠한 건조 방식을 거쳤느냐보다는 차라리 최종적으로 적용한 건조방식이 물성에 미치는 영향이 클 것으로 생각되었다.

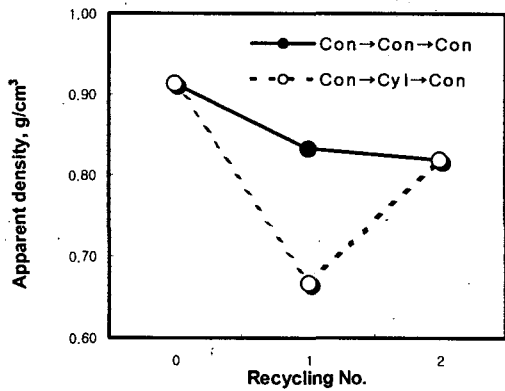


Fig. 7. Effects of condebelt drying and recycling on apparent density of UKP.

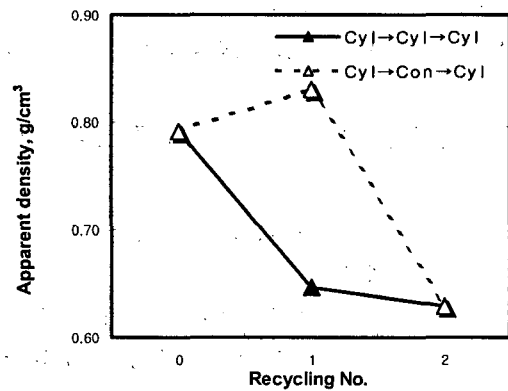


Fig. 8. Effects of cylinder drying and recycling on apparent density of UKP.

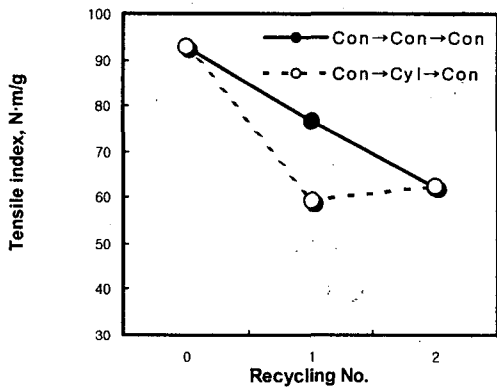


Fig. 9. Effects of condebelt drying and recycling on tensile index of UKP.

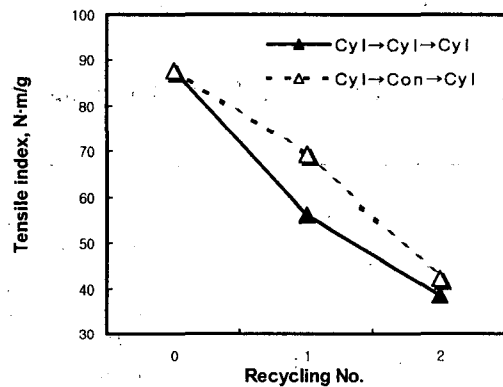


Fig. 10. Effects of cylinder drying and recycling on tensile index of UKP.

Fig. 8, 9에는 재활용에 따른 인장강도의 변화를 도시하였다. Fig. 8에서 알 수 있듯이 리사이클링 1회시 실린더 건조를 거치더라도 최종적으로 고온압착 건조를 적용함으로써 고온압착 건조를 지속적으로 적용한 경우와 동등한 인장강도를 나타내었다. Fig. 9에서도 역시

리사이클링 1회에서 고온압착 건조를 행함으로써 상대적으로 완화된 강도 저하를 보여주지만 최종적으로 실린더 건조를 적용함으로써 실린더 건조를 지속적으로 행한 경우와 유사한 인장강도를 보여주었다. 하지만 리사이클링 2회의 결과를 보면 중간에 고온압착 건조를 거친 경우가 실린더 건조만을 행한 경우보다 높은 수치를 나타내고 있는데 이는 고온압착 건조시 유발된 섬유 유연화에 의한 것으로 추측된다.

위의 결과를 통해 지속적인 펄프섬유의 재활용을 통한 종이의 강도적 성질은 최종적으로 적용된 건조 방식에 크게 의존하고 있음을 확인하였으며, 고온압착 건조시 섬유의 영구적인 변형(permanent flattening)⁹⁾을 통해 유발된 섬유의 유연화가 섬유간 결합에 도움을 주어 재활용시 강도의 감소를 조금이나마 회복시켜주고 있음을 알 수 있었다.

3.4. 펄프섬유의 재활용시 고해를 통한 강도 회복

앞의 결과에서 보았듯이 재활용에 따른 펄프 섬유 물성의 저하는 어떠한 건조방식을 택 하든지에 관계없이 발생하게 된다. 따라서 재활용시 섬유의 물성을 향상시켜 재활용하기 전의 물성을 갖도록 하기 위해서 고해와 같은 기계적 처리를 가하여 보았다.

Table 1에 펄프섬유의 재활용시 고해의 정도에 따른 여수도 및 미세분 함량의 변화를 나타내었다. 재활용 초기에 미세분 함량은 30%에서 해리후 수초시 백수 재활용을 하지 않았기 때문에 22~24%로 낮아졌지만 5분 고해만으로도 다시 30%에 가까운 미세분 함량을 나타내었다. 이는 백수를 재활용하게 된다면 계내에 더욱더 많은 미세분이 발생하게 됨을 의미하고, 단섬유화가 발생하여 재활용 포텐셜이 낮아지게 된다. 이로부터 고해가 적게 이루어진 고온 압착건조 공정을 통하여 섬유의 재활용 포텐셜을 높일 수 있을 것으로 생각된다.

Table 1. Effects of beating on CSF and Fine contents of test liner

CSF (Fine contents)	0 recycle	1 recycle		
		0 min beating	5 min beating	8 min beating
Condebelt	480 (30.08%)	540 (26.69%)	400 (29.76%)	330 (33.89%)
Cylinder	480 (30.08%)	540 (26.45%)	410 (28.86%)	340 (33.31%)

Fig. 10에 펄프 섬유의 재활용시 고해의 정도에 따른 밀도의 변화를 도시하였다. 국산 라이너지를 이용한 경우로서 고온압착건조의 경우 약 1분, 실린더 건조의 경우 약 3분 정도의 고해시간으로 밀도가 회복되는 것을 알 수 있었다. 이러한 차이는 각질화가 더 이상 크게 진행되지 않는 국산 라이너지의 경우 고해에 의한 섬유의 피브릴화 및 미세분의 발생이 주

로 밀도에 영향을 주기 때문이라고 생각된다.

재활용시 고해정도가 인장강도에 미치는 영향을 Fig. 11에 나타내었다. 국산 라이너지를 원료로 사용한 경우의 인장강도 결과로서 고해에 따른 재활용전의 강도치로의 회복에 있어 실린더 건조보다 고온압착 건조가 더 낮은 고해수준에서 달성되었으며, 이를 통해 실린더 건조방식으로 제조된 수초지의 강도회복을 위해 고해를 실시할 경우 고온압착 건조의 경우보다 많은 에너지를 소비해야 함을 알 수 있었다. 또한, 실린더 건조방식으로 재활용시 5분 정도의 고해를 통해 재활용시 해리만을 행한 후 고온압착 건조된 수초지의 강도와 유사해짐을 알 수 있었다.

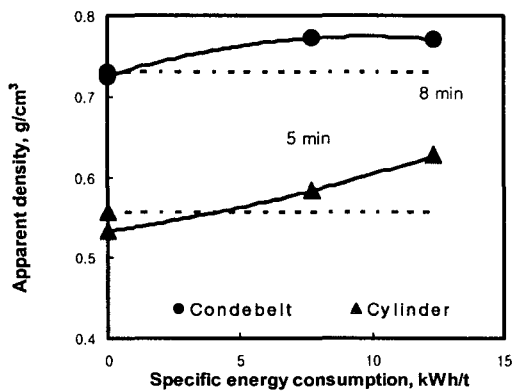


Fig. 11. Effects of specific energy consumption on apparent density of test liner.

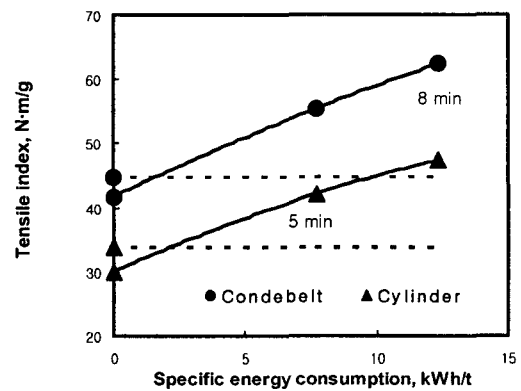


Fig. 12. Effects of specific energy consumption on tensile index of test liner.

이러한 고해가 섬유 물성을 향상시키는 일반적인 방법임에도 불구하고 고해를 하게 되면 다량의 미세섬유가 발생하게 된다. 또한, 건조과정을 거친 섬유는 각질화가 일어나 있기 때문에 고해를 통하여 섬유가 피브릴화 되기보다는 단섬유화 같은 섬유 절단이 쉽게 일어나게 됨으로 인해 섬유자체가 갖는 재활용 포텐셜을 더욱 크게 감소시키게 된다. 뿐만아니라, 이미 많은 단섬유와 미세분을 포함하고 있는 국산 골판지 고지의 경우 섬유 물성 향상을 위해 고해를 하게 되면 초지공정시 야기되는 탈수성 저하 등의 문제로 인하여 고해를 통한 강도 향상은 한계를 가진다. 따라서 고온압착 건조를 실시할 경우 실린더 건조와 비교하여 낮은 고해동력에너지를 소비를 통해 높은 수준의 강도적 성질을 획득할 수 있으며 이는 과도한 고해로 인한 공정내 단섬유와 미세분의 발생을 억제할 수 있는 가능성을 제공함으로써 초지시 탈수성 개선에도 도움을 줄 수 있을 것으로 생각된다.

4. 결론

국내와 같이 고지 재활용율이 높은 상황에서 고온 압착 건조를 통한 일시적인 강도 개선보다는 라이너지의 재활용에 있어 고온압착 건조 방식이 갖는 의미를 파악하는 것이 보다

절실히 요구되어 지고 있다.

따라서 본 연구에서는 고온 압착 건조로 제조된 수초지의 해리 효율을 평가하여 실린더 건조와 비교하였고, 그에 따른 재활용성을 평가하였다. 고온 압착 건조의 경우 리그닌 유동에 의한 섬유간 결합 강화로 인하여 해리 초기에는 실린더 건조 방식으로 제조된 수초지의 해리 효율에 비하여 떨어졌으나 해리 시간이 증가하면서 실린더 건조 방식과 거의 같은 해리 효율을 보였다. 이는 리그닌 유동에 의한 섬유간 결합 강화는 고온 압착 건조 방식의 해리 효율을 감소시키는 원인이기는 하나, 실린더 건조를 통해 제조된 종이를 완전 해리 할 수 있는 시간이 주어진다면 고온 압착 건조된 종이 역시 같은 해리 정도를 얻을 수 있을 것으로 판단되었다.

펄프섬유의 재활용시 국산 test liner를 원료로 하였을 경우에는 재활용에 따른 강도 저하는 크게 발생하지 않았으며 재활용시에도 고온압착 건조 방식을 이용하여 제조한 종이의 강도가 실린더 건조보다 높은 강도를 유지하였다.

교차 재활용실험을 통하여 펄프섬유의 재활용시 전 단계에 실린더 건조 방식과 고온 압착 건조 방식 중 어느 것을 행했나 보다는 최종적으로 적용한 건조 방식이 무엇이냐에 따라 재활용의 마지막 단계에서 제조된 수초지의 강도적 특성이 결정되었다. 또한 고온 압착 건조 방식으로 제조된 수초지를 실린더 건조 방식으로 재활용할 경우 고온 압착 건조시 발생한 섬유의 영구변형(permanent flattening)에 의하여 섬유 자체의 유연성이 증가로 인해 실린더 건조만을 행한 경우보다 높은 강도를 나타내었다.

펄프섬유의 재활용시 강도 회복을 위하여 고해를 적용할 경우 고온압착 건조는 실린더 건조와 비교하여 고해동력에너지의 낮은 소비를 통해서도 높은 수준의 강도적 성질을 획득할 수 있으며 이는 강도 개선을 목적으로 과도한 고해를 행할 경우 발생할 수 있는 공정내 단섬유와 미세분을 억제할 수 있는 가능성을 제공함으로써 초지시 탈수성 개선에도 도움을 줄 수 있을 것으로 생각된다.

5. 참고문헌

1. Retulainen E. and Hämäläinen, A. : Engineering, Process & Product Quality Conference, TAPPI PRESS, Atlanta, pp. 95(1999).
2. 이학래, 윤혜정, 정태민, 김진두: 제지과학심포지움, pp. 149-160(1998).
3. Lee, H. L, Youn, H. J., and Jung, T. M.: J. of KOR TAPPI 31(3):19(1999).
4. Markku K., Metso O. : "Papermaking Part 2, Drying", TAPPI PRESS, Atlanta, pp. 193-206 (2000).
5. Ferguson, L. D. : Paper Tech., Oct:14(1992)
6. Kunnas, L. and Lehtinen, J.:Tappi J. 76(4):95(1993).
7. Laivins, G. V. and Scallan A. M. : JPPS, 22(5):178(1996).
8. Lehtinen, J. : Paperi ja Puu, 74(7):560(1992).
9. E. Retulainen : Proceedings of the 2nd Ecopapertech Conference, Helsinki, 315(1998).