

열화상분석 및 CLSM을 이용한 재생지의 고밀화 현상 연구

이 학 래[†] · 김 철 환* · 윤 혜 정 · 정 태 민

Studies on the Densification of Recycled Sheet Structure with Thermal Image Analysis and CLSM

Hak Lae Lee[†], Chul Hwan Kim*, Hye Jung Youn, and Tae Min Jung

ABSTRACT

The effects of Condebelt press drying on the densification of recycled sheets made from KOCC, AOCC, UKP and BKP were examined using CLSM (Confocal Laser Scanning Microscope) and thermal image analysis techniques. It was shown that significant improvement in sheet density, compression strength, tensile strength, surface smoothness was obtained by Condebelt drying. Densification effect by press drying was most prominent for recycled KOCC sheets. And this beneficial effect of Condebelt drying of increasing sheet density and strength was shown to provide opportunities of reducing the utilization ratio of AOCC for cost saving.

1. 서 론

국내 제지산업은 그 동안 국가 경제 발전에 따라서 성장을 거듭하여 지류생산 부문에서 세계 9위권에 해당하고 있지만 펄프 원료의 해외의존도가 높다는 큰 문제를 지니고 있다. 펄프 원료의 안정적인 공급을 위해서는 새로운 펄프 공장의 건설을 통한 생산 증가도 필요하지만 더욱 바람직한 것은 고지 재활용 증대를 위한 체제 구축 및 관련 기술 개발이라 할 것이다. 이는 고지 재활용이란 산림자원보호와 원가절감 및 환경보전효과도 크기 때문이다.

이러한 장점을 지닌 고지 재활용에 있어서 가장

큰 문제점으로 대두되는 것은 재활용에 따라 종이의 강도적 성질이 크게 저하된다는 사실이다. 따라서 이러한 재활용에 따른 강도 저하 문제를 극복할 수 있는 기술개발 및 기초연구는 매우 시급히 요청되고 있다.

최근들어 고지로부터 고품질의 종이를 생산할 수 있는 여러 가지 새로운 제지기술의 개발이 모색되고 있다. 이들은 크게 지료 조성공정에서의 섬유처리를 통한 물성 개선기술과 초지공정 개선을 통한 종이의 품질 향상 기술로 크게 나눌 수 있다. 종이의 물성을 향상시키기 위한 대표적인 초지기술의 하나로 콘디벨트(Condebelt) 건조공정이라고 불리는 고온압착건조기술을 들 수 있다.

* 이 논문은 1998년 한국학술진흥재단의 과학기술기초중점연구비에 의하여 지원되었음.

* 서울대학교 농업생명과학대학 임산공학과(Department of Forest Products, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Suwon, 441-744, Republic of Korea).

* 서울대학교 농업생명과학대학 농업과학공동기센터

† 주저자(Corresponding author): e-mail: lhakl@plaza.snu.ac.kr

고온압착건조기술은 기존 실린더 건조방식에 비해 에너지 이용효율, 종이의 물성향상 등 다양한 부문에 걸쳐 독특한 효과를 나타내는 새로운 제지 기술로 큰 주목을 받고 있다.¹⁾ 고온압착건조기술은 기존의 실린더 건조기술과 비교할 때 건조속도를 약 5-15배 향상시킬 수 있어 건조 에너지 절감에 큰 효과가 있을 뿐 아니라 인장강도, 압축강도, 내부결합강도, 밀도, 표면평활성, 투기저항성 등 종이의 중요한 물성을 대폭 향상시키는 혁신적인 제지기술로 인정받고 있다.²⁾ 본 기술을 라이너지, 크라프트지, 판지 등 산업용지의 생산에 적용할 경우 이와 같은 강도향상 효과에 의한 제품의 저평량화와 저급원료활용율의 증대를 통한 원가절감이 가능할 뿐 아니라 우수한 표면평활성과 인쇄적성에 의한 제품의 차별화도 가능할 것으로 기대되고 있다.³⁾ 특히 국내와 같이 고지 원료를 다량 사용하여 라이니지를 생산하는 경우 원료의 저급화에 따른 품질의 저하를 극복할 수 있는 방안으로 가장 적합한 기술이라 믿어지고 있다.

이러한 고온압착건조 기술을 통한 종이의 물성향상은 외국에서 많이 연구된 바 있다.⁴⁻⁶⁾ 하지만 이들은 주로 천연펄프를 원료로 연구한 것이므로 국내에서와 같이 재활용 자원에 대한 의존도가 높은 경우에 적용하기 위해서는 고온압착건조기술의 국내 고지원료에 대한 적용 가능성 및 효과를 정확히 구명하는 것이 요청되고 있다.

본 연구에서는 새로운 제지기술로 주목되고 있는 고온압착건조시 나타나는 종이의 고밀화 현상을 분석하고 이에 따른 물성개선 효과를 평가함으로써 국산 고지를 원료로하여 우수한 품질의 라이니지를 생산하기 위한 기틀을 마련하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 고온압착건조

고온압착건조는 실험용 고온압착건조 장치를 이용하여 실시하였다.⁷⁾ 실험용 고온압착건조 장치는 외형상으로는 일반 열압기와 같은 형태를 띠고 있으며, 고온부의 상부 플레이트와 저온부의 하부 플레이트로 이루어져 있다. 상부 플레이트는 내부에 존재하는 코일을 통해 300℃까지 가열할 수 있도록 하였으며, 하부 플레이트 내부에는 냉각수를

이용하여 40-80℃의 범위에서 온도를 조절할 수 있도록 냉각수 순환장치를 설치하였다. 하부 플레이트의 온도 조절을 위해서 냉각수 저장조, 가열장치, 냉각장치 및 순환 펌프로 구성된 냉각시스템을 구축하였다. 상부 플레이트의 개폐와 압체시간, 압체압력은 유압을 이용하여 자동조절할 수 있도록 하였다. 본 실험에서는 고온압착건조 공정변수 가운데 하부 플레이트의 온도는 80℃, 상부 플레이트의 온도는 160℃, 압체시간은 5초, 유입지의 함수율은 50%로 일정하게 유지하였다. 압착건조시 압체압력은 3-7 bar로 변화시켰다.

2.2 재료

고온압착건조 실험의 원료로는 국산 골판지 고지(KOCC), 미국산 골판고지(AOCC), 침엽수 미표백 크라프트 펄프, 활엽수 표백 크라프트 펄프를 사용하였다.

2.3 방법

원료에 따른 물성 변화를 확인하기 위해서 국산 골판고지는 실험실용 벨리 비터를 이용하여 30분간 해리한 후 7분간 고해하여 여수도가 350 ± 10 mL CSF가 되도록 조절하였다. AOCC는 고농도 펄퍼를 사용하여 펄핑한 후 비터를 사용하여 5분간 해리하고 7분간 고해하여 여수도가 430 ± 10 mL CSF가 되도록 조절하였다. 침엽수 미표백 크라프트 펄프의 경우 벨리 비터로 10분간 해리하고 37분간 고해하여 여수도가 450 ± 10 mL CSF가 되도록 조절하였으며, 활엽수 표백 크라프트 펄프는 5분간 해리하고 30분간 고해하여 여수도를 440 ± 10 mL CSF가 되도록 하였다.

AOCC와 KOCC를 혼합한 단층지를 제작하기 위해서 위와 같이 준비된 AOCC를 KOCC에 대해 0, 25, 50, 75, 100%가 되도록 혼합시켜 초지하였다. 또 AOCC 혹은 KOCC만으로 초지하여 합지하고 이를 압착 및 건조함으로써 이층지를 제조하였다. 합지시에는 AOCC로 초지한 종이 표면이 위치하도록 하였다. 이층지의 경우에는 두층의 평량 비율이 25, 50, 75%가 되도록 변화시켰다. 단층지와 이층지 모두 최종 평량은 150

g/m²이 되도록 하였다.

이와 같이 제조된 종이의 물성을 측정하여 기존의 실린더 방식으로 건조한 종이와 비교하였다. 평가한 물성은 밀도, 인장강도, 파열강도, 압축강도, 투기도, 광택도였다.

실린더 건조방식과 고온압착건조 방식에 의한 고밀화를 평가하기 위해 CLSM (Confocal Laser Scanning Microscope)을 이용하여 종이의 횡단면을 관찰하였으며, 건조방식의 차이에 의한 지필의 온도 분포 균일성을 FLIR System사의 IQ812 열화상분석기를 사용하여 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 열화상 분석

고온압착건조시 종이의 온도 및 온도 분포는 세포벽 구성성분의 유동성과 섬유 유연성을 변화시켜 종이의 건조속도뿐 아니라 고밀화 및 최종 종이의 품질에도 영향을 끼치게 된다. 본 실험에서는 건조 조건별 종이의 온도와 온도 분포를 열화상분석기를 통해 측정하였다. 그 결과 실린더 건조기 출구에서의 종이의 온도는 60-70℃ 정도 이었으며, 고온압착건조 장치 출구에서의 종이의 온도는 상부 플레이트의 온도에 따라서 60-110℃의 범위를 나타내었다. 또 압착 압력이 지필 온도에 미치는 영향은 없는 것으로 평가되었다.

본 연구에 사용된 고온압착설비는 단속적으로 운전되는 고온압착설비였으므로 건조 후 시편을 제거하는 동안 시편 온도의 감소가 발생하여 정확한 건조 시의 온도를 측정할 수는 없었다. 하지만

열화상 분석기를 이용하여 전체 시편의 표면 온도 프로파일이 균일함을 확인하였다.

3.2 CLSM에 의한 종이의 횡단면 평가

네 가지 원료를 가지고 초지된 습지를 일반 실린더 건조 및 고온압착건조한 후 횡단면을 CLSM으로 관찰하였다. Fig. 1에는 KOCC를 이용하여 초지된 종이의 건조 방법에 따른 두께방향 CLSM 사진을 나타내었으며, Fig. 2에는 AOCC, UKP 및 BKP로 초지된 종이의 횡단면 사진을 나타내었다. 여기에서 보는 것과 같이 고온압착건조된 종이의 밀도향상 효과는 CLSM을 이용한 종이의 두께 관찰을 통해서 뚜렷이 확인할 수 있었다. 펄프 종류에 따른 영향을 살펴보면 콘디벨트 건조에 의한 밀도향상 효과가 모든 펄프 종류에서 나타났으나, BKP의 경우에는 Fig. 2에서 보는 것과 같이 밀도 증가 현상이 비교적 적었다. 이는 BKP의 경우 표백 펄프이므로 리그닌의 양이 다른 펄프에 비해 작고 충분히 고해가 진행되어 리그닌 유동과 섬유 유연성 증대 등에 따른 고온압착건조의 효과가 작았기 때문으로 생각된다.

또 CLSM을 통해서 고온압착건조시에는 실린더 건조시에 비해서 섬유의 형태가 더욱 리본상으로 변화되어 섬유간 결합을 향상시킬 수 있는 형태를 띠게 됨을 확인할 수 있었다. 이에 반해 실린더 건조된 종이는 여러 곳에서 섬유의 내강이 그대로 유지되고 있었으며 섬유간에도 다수의 공극이 존재하고 있었다.

또 종이의 평활성도 실린더 건조된 종이가 고온압착건조 방식으로 건조된 종이의 표면에 비해 낮

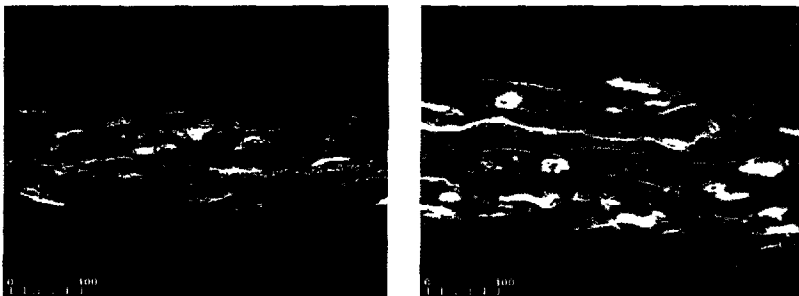


Fig. 1. Cross sections of handsheets made from KOCC after Condebelt drying (left) and cylinder drying (right).

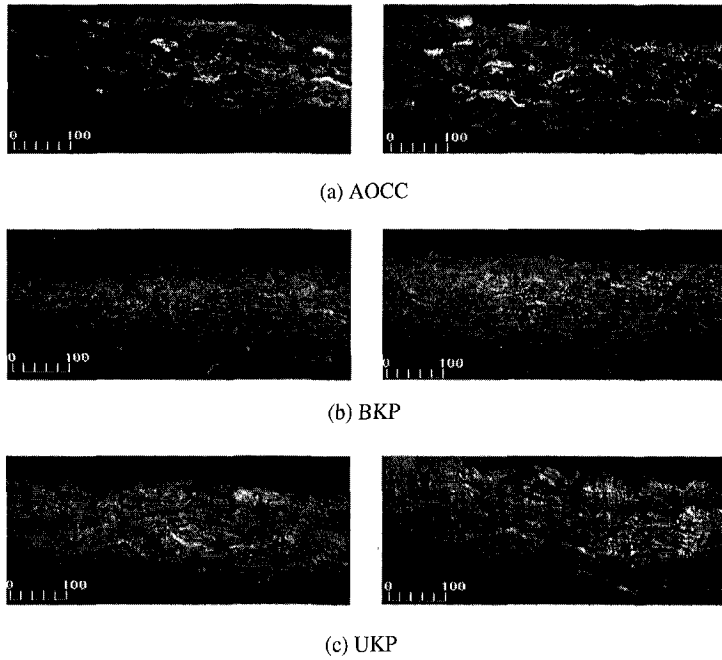


Fig. 2. Cross sections of handsheets (left:Condebelt-dried sheet, right:cylinder-dried sheet) made from various pulps.

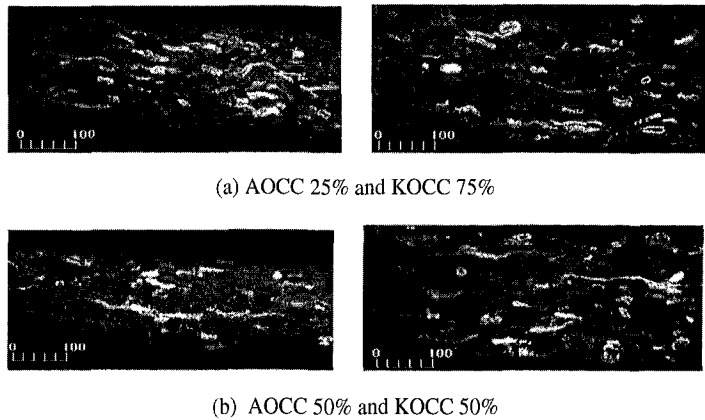


Fig. 3. Cross sections of handsheets made from AOCC and KOCC. (left : Condebelt-dried sheet, right : cylinder-dried sheet)

게 나타났다. 하지만 고온압착방식으로 건조시켰을 경우 상부 플레이트와 접촉되어 건조된 면은 매우 평활하였으나, 와이어와 접촉된 면은 와이어 마크가 발생하여 평활성이 크게 떨어졌다.

KOCC와 AOCC를 적당한 비율로 혼합초지한 경우, 위에서 제시된 바와 동일한 결과를 보여 주었다(Fig. 3). 즉 실린더 건조된 종이보다 고온압착건조된 종이도 역시 우수한 고밀화 현상을 보였다.

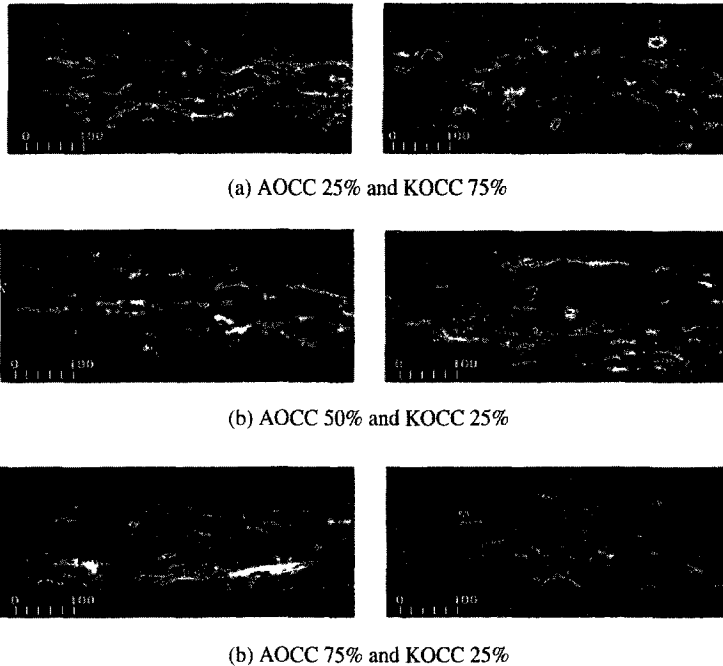


Fig. 4. Cross sections of two-ply handsheets made from AOCC and KOCC. (left : Condebelt-dried sheet, right : cylinder-dried sheet)

며, AOCC를 25% 혼합하여 초지한 것보다 50% 혼합초지하였을 때 더욱 치밀한 구조를 보여 주었다.

KOCC와 AOCC의 평량비를 달리하여 탈수한 후 합지하여 제조한 이층지를 CLSM을 통해 관찰한 결과를 Fig. 4에 제시하였다. CLSM 관찰 결과 이층지의 경우 단층지보다 고밀화가 덜 진행됨을 확인할 수 있었으며, 이층지는 두 가지 펄프로 구성된 구조를 확연히 구분할 수 있었다. 즉 이층지의 경우에는 단층지와는 달리 평량비에 해당되는 두께 부분에서 층간 결합이 적게 일어났음을 확인할 수 있었다. 이러한 층간결합의 결여는 밀도 차이와 더불어 이층지의 강도가 단층지에 비해 낮아지는 원인이 될 것으로 판단되었다.

층간결합의 결여현상은 이층지의 제조시 동시에 탈수시키는 방식으로 제조하지 않고, 각각 탈수시킨 후 합지하였기 때문에 우수한 층간 결합을 유발시킬 수 있는 미세섬유가 부족하였으며 지필의 수분함량이 낮았기 때문이라 생각된다.

3.3 원료에 따른 물성 변화

Figs. 5-6에서 보는 바와 같이 고온압착건조시 압착압력이 증가함에 따라 밀도가 증가하였으며 이에 따라 인장강도도 향상되었다. 이러한 현상은 모든 원료에서 동일하게 나타났다. 펄프 종류별로는 재활용되지 않은 천연펄프가 재생원료에 비해 초기 밀도가 높게 나타나 섬유의 각질화 현상에 의해 밀도 감소가 크게 발생한다는 것이 확인되었다. 하지만 압착건조에 의한 종이의 밀도 증가는 재생펄프를 사용한 경우에 더욱 크게 나타났다.

각종 펄프 원료로 제조한 종이의 밀도 증가에 따른 인장지수 변화는 Fig. 6에서 보는 것과 같이 직선적인 관계를 나타내었으며, 각 직선의 기울기는 거의 동일하였다. Fig. 6에서 화살표는 실린더 건조를 한 경우를 의미한다. KOCC의 경우에는 고해 시간별로 3종류의 지료를 이용하여 초지한 종이의 밀도를 도시하였다. KOCC를 원료로 할 경우에는 압착건조를 통하여 밀도를 증가시

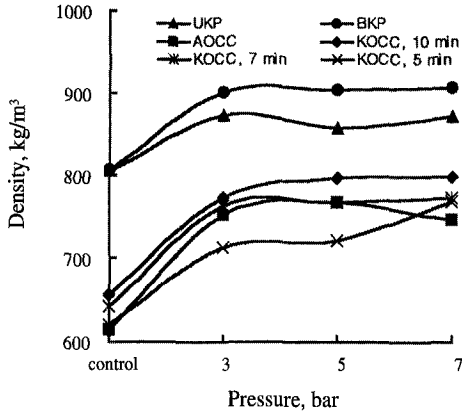


Fig. 5. Effects of pressure on density.

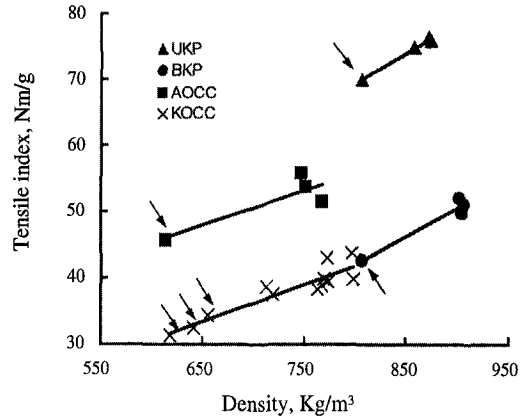


Fig. 6. Effects of density on tensile index.

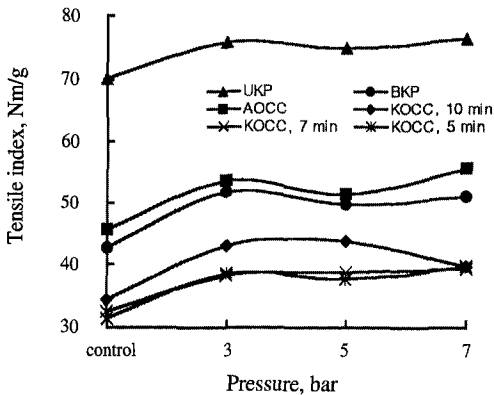


Fig. 7. Effects of pressure on tensile index.

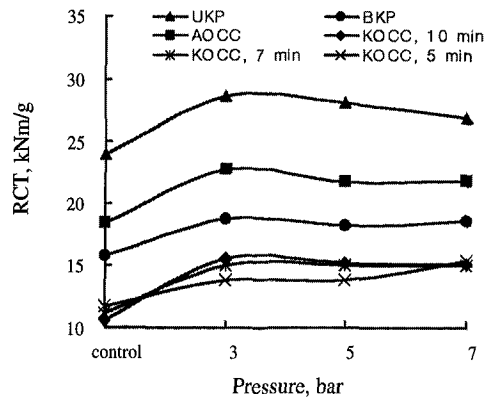


Fig. 8. Effects of pressure on RCT.

키더라도 AOCC를 원료로 이용하여 실린더 건조한 경우보다 인장강도가 낮았다. 이는 압착건조 기술을 통하여 KOCC 자체의 강도적 결합을 완전히 극복할 수는 없으나 AOCC를 적절히 혼합하여 압착건조를 실시할 경우에는 AOCC만을 이용하여 실린더 건조한 제품의 강도 수준에 도달할 수 있을 것임을 시사한다.

특히 KOCC를 10분 고해하여 고온압착건조한 경우에는 AOCC를 고해하여 초지한 경우에 비해 밀도가 높았으나, 인장강도와 압축강도는 각각 Fig. 7과 Fig. 8에서 보는 것과 같이 AOCC로 초지한 경우에 비해 낮았다. 이는 AOCC에 비해 KOCC는 재활용 횟수가 높으므로 섬유가 극도로 각질화되어 고해가 거듭될 경우 과도하게 단섬유

화될 뿐 아니라 상대적으로 섬유간 결합력이 낮기 때문이라 생각된다. 그러나 Figs. 7-8에서 보는 바와 같이 강도향상률은 KOCC를 이용한 경우가 천연펄프 또는 AOCC를 이용한 경우에 비해 높게 나타나 압착건조가 저급원료의 강도향상에 가장 큰 효과가 있다는 것이 실증되었다.

광택도의 경우에는 펄프의 종류에 따라 큰 차이를 나타내지는 않았으나 KOCC를 5분 고해하여 초지한 경우가 약간 높은 값을 나타내었다(Fig. 9). 투기저항성의 경우, 종이 구조의 치밀화가 투기저항성을 증가시킨다는 것을 Fig. 10을 통해서 알 수 있다. 역시 가장 높은 밀도를 나타낸 UKP가 가장 높은 투기저항성을 나타내었다.

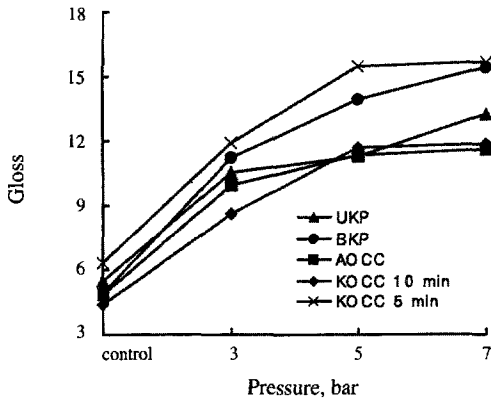


Fig. 9. Effects of pressure on gloss.

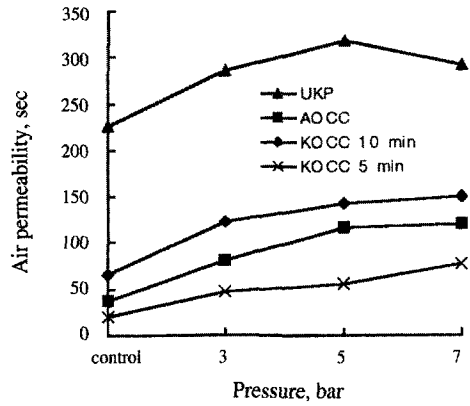


Fig. 10. Effects of pressure on air permeability.

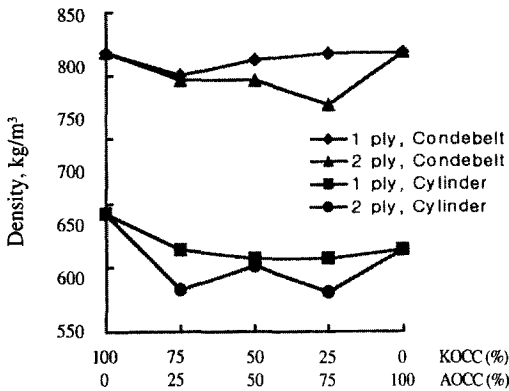


Fig. 11. Influence of the blending ratio of KOCC and AOCC on the density of sheets dried on the Condebelt or cylinder deyer.

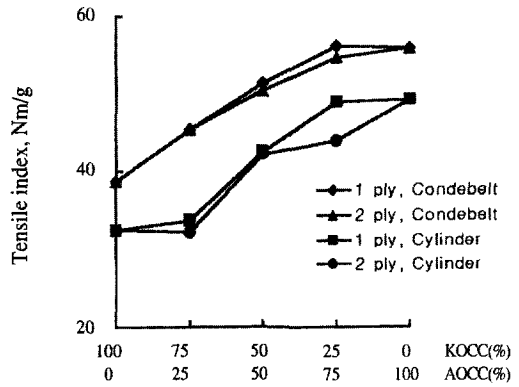


Fig. 12. Influence of the blending ratio of KOCC and AOCC on the tensile index of sheets dried on the Condebelt or cylinder dryer.

3.4 AOCC와 KOCC를 이용한 단층지와 이층지의 물성 비교

실제 라이너지를 생산함에 있어서 KOCC만을 사용하였을 경우에는 압착건조방식을 이용하더라도 미국산 골판지 고지를 이용하여 실린더 건조된 종이의 강도를 얻을 수 없었으나 KOCC와 AOCC를 적절한 비율로 혼합하고 압착건조 방식을 적용한다면 미국산 골판지 고지를 100% 활용하여 실린더 건조한 경우의 강도를 얻을 수 있을 것으

로 기대되었다. 본 실험에서는 이러한 가정을 증명하기 위해서 KOCC와 AOCC의 혼합비율을 변화시켜 제조한 수초지를 실린더 건조한 경우와 온압착건조한 경우의 강도를 평가하였다.

밀도의 경우에는 Fig. 11에서 보는 것과 같이 두 가지 고지의 혼합 비율이 변화할지라도 큰 차이를 보이지 않았으나, 전반적으로 이층지로 제작한 경우가 단층지에 비하여 다소 낮은 밀도를 나타내었다. 이는 층간의 결합상태가 단층지의 경우에 비해 좋지 않아 두께가 상승한 때문으로 생각

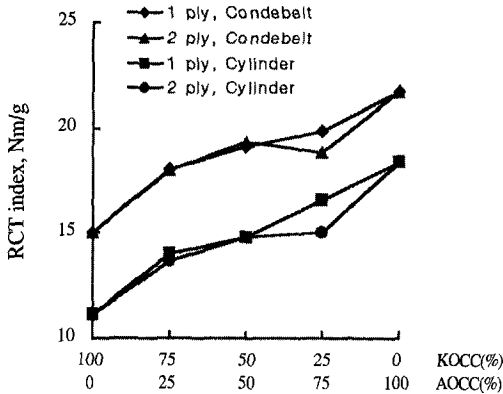


Fig. 13. The effects of KOCC and AOCC mized ratio on RCT in different drying method.

된다. 이러한 사실은 전술한 CLSM 관찰한 결과와도 일치한다.

인장강도와 압축강도는 Figs. 12-13에서 보는 바와 같이 미국산 골판고지의 비율이 증가함에 따라 직선적으로 증가하는 경향을 보였다. 또 고온 압착건조를 이용할 경우에는 KOCC의 함량이 50%인 경우에도 AOCC만으로 초지하여 실린더 건조한 경우와 동일한 강도를 나타내었다. 이는 압착건조 방식을 활용할 경우에는 약 50%에 해당하는 미국산 골판고지를 KOCC로 대체하여도 100% 미국산 골판고지를 이용하여 실린더 건조한 경우와 같은 수준의 강도를 얻을 수 있다는 것을 보여주는 것이다.

또한 실린더 건조한 경우에 비해 고온압착건조를 실시하였을 경우 단층지와 이층지간의 강도 차이가 더 적게 나타났다. 이는 고온압착건조에 의해 층간결합이 증가하였기 때문이라고 판단된다.

4. 결론

고온압착건조에 의한 재생지의 고밀화 현상을 CLSM, 열화상분석 및 각종 물성측정 방법으로 평가한 결과는 다음과 같다.

CLSM을 이용하여 고온압착건조된 종이와 실린더 건조된 종이의 횡단면을 관찰함으로써 고온압착건조에 의한 밀도의 증가를 확인하였으며, 또 열화상분석기를 이용하여 습지필의 온도를 측정된 결과 고온압착건조한 지필의 온도가 실린더 건조한 지필의 온도에 비해 더 높다는 것을 알 수 있었다.

반복된 재활용으로 인하여 섬유간 결합능력이 감소된 KOCC도 미표백 크라프트 펄프, 표백 크라프트 펄프, AOCC 등과 같이 고온압착건조에 의해 높은 밀도향상이 가능하며, 이에 따른 제반 물성이 크게 증가함을 확인하였다. 콘디벨트 건조의 이러한 물성개선 효과는 KOCC의 반복된 재활용으로 인한 강도 저하를 극복할 수 있는 대안이 될 것으로 판단되었으며 저급 원료의 사용비율 증대를 통한 원가 절감이 가능함을 보였다.

인용 문헌

1. Sprague, C.H., Tappi J. 70(4):79 (1987).
2. Retulainen, E., Merisalo, N., Lehtinen, J. and Paulapuro, H., Pulp Paper Canada 99(1):53 (1998).
3. Retulainen, E., Condebelt press drying and sustainable paper cycle, in 2nd EcoPaper Tech Conf. Proceedings, p. 315 (1998).
4. Horn, R.A., Tappi J. 62(7):77 (1979).
5. Byrd, V.L., Tappi J. 62(7):81 (1979).
6. Lehtinen, J., Drying Technology, 2049 (1945).
7. Lee, H.L., Youn, H.J., Jung, T.M., and Kim, J.D., J. Korea TAPPI 32(3):19 (1999).