

리사이클링 횟수에 따른 일차미세섬유와 이차미세섬유의 폴리아크릴아미드 흡착특성 변화

주성범·이학래[†]

Effects of Recycling on Adsorption Characteristics of Cationic Polyacrylamide onto Primary and Secondary Fines

Sung Bum Joo and Hak Lae Lee[†]

ABSTRACT

Adsorption of cationic polyacrylamide dry strength resins onto the surface of papermaking fibers and fines is critical for their effective utilization. Since dry strength resins are frequently employed when recycled fibers containing a great deal of fines are used as a raw material, their adsorption characteristic onto the recycled fiber fines is of great importance. In this study, effects of recycling on adsorption characteristics of cationic polyacrylamide onto primary and secondary fines were examined.

Never dried bleached hardwood kraft pulp was beaten and dried for recycling. In each recycling step the adsorption characteristic of a cationic PAM onto primary and secondary fines was evaluated by Kjeldahl nitrogen analysis method. The influence of recycling on water retention value and carboxyl content along with the sheet density and tensile strength was examined.

Secondary fines of never dried pulp adsorbed twice as much of C-PAM as the primary fines, however, the adsorption capacity of the secondary fines decreased rapidly during the course of recycling and showed lower adsorption capacity than primary fines.

1. 서론

펄프섬유는 리사이클링하게 되면 건조-재습윤 과정을 거치게 됨에 따라 섬유가 각질화되어 섬유 팽윤성과 비표면적이 감소됨으로써 섬유간결합 형

성능력이 저하될 뿐 아니라, 추후 리사이클링을 위해 고해될 경우 쉽게 파괴되어 많은 미세섬유를 생성하는 성질을 나타낸다.^{1,2)} 미세섬유는 장섬유에 비해서 팽윤성이 높은 특징이 있으나 리사이클링을 통하여 각질화되면 섬유간 결합능력을 소실하여 충전물과 같은 형태로 변화된다.¹⁾ 뿐만 아니

• 서울대학교 임산공학과 (Department of Forest Products, Seoul National University, Suwon, 441-744, Korea).

† 주 저자 (corresponding author): e-mail: lhaki@plaza.snu.ac.kr

라 각질화된 미세섬유는 표면화학적 특성이 변화될 것으로 예상되며, 이러한 변화는 미세섬유의 고분자 흡착특성 변화를 유발할 것이라 믿어진다.

재생펄프의 리사이클링에 따른 고분자 흡착력 변화에 대한 연구는 재생펄프의 사용량 증가와, 최근들어 활발하게 진행되고 있는 백수시스템의 폐쇄화 경향을 고려해 볼 때 매우 중요한 문제로 대두되고 있다. 특히 리사이클링된 펄프를 고해할 경우 미세섬유의 생성이 과도하게 이루어진다는³⁾ 점을 생각하면 이들 미세섬유의 고분자 흡착특성을 구명하는 것은 고분자 첨가제의 효과적인 활용을 위해서 매우 중요하다 할 수 있다. 또한 펄프 섬유를 지속적으로 리사이클링하게 되면 발생하는 이차 미세섬유의 특성 또한 변화될 것이라 생각된다. 이는 리사이클링이 거듭됨에 따라 세포벽 내부의 피브릴이 미세섬유로 분리될 가능성이 높아지며 이들은 세포벽 외측에서 발생한 미세섬유와 다른 구조적 특징을 가지고 있기 때문이다.

본 연구에서는 펄프 섬유의 리사이클링 시 발생하는 일차 미세섬유와 이차 미세섬유의 양이온성 폴리아크릴아미드(cationic polyacrylamide : C-PAM) 흡착특성과 이들이 종이의 물성에 미치는 영향을 구명코자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 재료

동해펄프(주)에서 제조된 미건조 활엽수 표백 크라프트 펄프(Hw-BKP)를 공시 펄프로 사용하였다. 지력증강제로는 양이온성 PAM인 Suprex-505를, 지료의 pH 조절을 위해서는 NaOH를 사용하였다.

2.2 방법

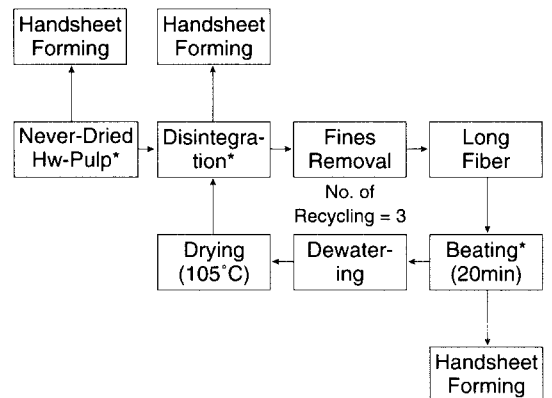
2.2.1 미세분 분리 및 고해과정이 포함된 리사이클링을 통한 시료준비

Fig. 1에 나타난 바와 같이 미건조 펄프에 존재하는 미세분을 제거한 장섬유분을 20분간 고해한 후, 섬유의 흡착력 및 종이의 강도를 측정하였다. 리사이클링 과정 중 미세분 제거는 본 실험을

위하여 제작된 미세분 제거기로 행하였다. 미세분 제거기는 하부에 200 mesh의 와이어가 설치된 시료통을 수조 내부에 설치한 형태로 시료통에 펄프 슬러리를 넣은 후 상수를 시료통에 공급하여 와이어와 외부의 수조를 통해 미세분이 물과 함께 배출되도록 설계하였다. 미세분 분리는 배출수가 완전히 투명해질 때까지 연속적으로 상수를 이용하여 세척함으로써 행하였다. 와이어 상부에는 브러쉬를 설치하고 계속 회전시켜 와이어 상에 섬유 매트가 형성되는 것을 방지하여 미세분 분리가 효과적으로 진행되도록 하였다. 미세분 제거가 완료된 장섬유 지료를 20분간 고해한 다음, 탈수와 건조과정을 거친 후 해리하여 다시 미세분을 제거하였다. 이러한 과정을 3회 반복하고(Fig. 1), 각 단계별로 장섬유와 미세섬유를 분리하여 양이온성 폴리아크릴 아미드의 흡착력 및 종이의 물성을 측정하였다.

2.2.2 해리, 고해, 탈수 및 건조

Fig. 1에 나타난 해리, 고해, 탈수 및 건조는 다음과 같이 실시하였다. 해리 시에는 농도 2%인 펄프 원료를 해리기에 투입하고 나서 미세분분이 완전히 없어질 때까지 해리하였다. 고해는 TAPPI 표준시험법 T 200 om-89에 의거하여 Valley beater를 사용하여 행하였다. 해리 혹은 고해된 펄프는 탈수기를 사용하여 탈수시킨 후



* Sample for C-PAM adsorption experiment

Fig. 1. Sample preparation process to evaluate the effects of recycling for pulps beaten at each recycling step.

105 °C의 건조기에서 건조시켰으며, TAPPI 표준 시험법 um-256과 237 om-88에 의하여 각 시료의 보수도와 카르복실기 함량을 측정하였다.

2.2.3 양이온성 PAM의 흡착량 측정

농도 0.7%의 지료 2500 mL를 700 rpm으로 교반시키면서, 지료의 pH를 10으로 조절한 후, 양이온성 PAM을 펄프 전건중량에 대하여 1.5% 첨가하고 60 분간 교반시켜 양이온성 PAM이 흡착되도록 하였다.

흡착이 완료된 지료를 4000 rpm에서 30분간 원심분리시켜 섬유를 분리시킨 후 건조시켰다. 고분자 흡착 후 미세섬유를 분리시키기 위해서는 흡착이 완료된 지료를 DDJ(Dynamic Drainage Jar)에 넣은 후, 배수하여 지료로부터 장섬유를 제거하였다. 장섬유를 제거한 지료를 원심분리기를 사용하여 4000 rpm에서 30분간 원심분리시켜 미세섬유분을 분리한 후 건조시키는 방법을 사용하였다.

전체섬유와 미세섬유에 흡착된 양이온성 PAM의 흡착량은 Kjeldahl법을 사용하여 측정하였다. 장섬유에 흡착된 양이온성 PAM의 양은 전체섬유에 흡착된 양이온성 PAM의 흡착량에서 미세섬유에 흡착된 양이온성 PAM의 흡착량을 빼서 구하였다.

2.2.4 수초지 및 물성 평가

TAPPI 표준시험법 205 om-81에 의거하여 양이온성 PAM을 첨가하지 않은 종이와 양이온성 PAM을 첨가한 종이를 각각 평량 87 g/m²으로 수초지하여 3 kg/cm²로 압착한 후 실린더 건조기로 건조시켰다. 준비된 수초지는 항온항습실에서 조습시킨 후 겉보기 밀도와 인장강도를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 미세분 제거 및 고해과정을 포함한 리사이클링 단계의 섬유특성 변화

Fig. 1에서 본 바와 같은 리사이클링 방법을 채용하여 이전 단계에서 존재하던 미세섬유를 모

두 제거한 뒤 다시 고해하면 고해에 의해 새롭게 발생된 미세섬유의 성질을 평가할 수 있다. 이를 위해 각 리사이클링 단계 별로 Fig. 1에 도시한 것과 같이 시료를 채취하여 펄프의 보수도, 카르복실기 함량 및 고분자 흡착특성을 평가하였다.

Fig. 2에는 리사이클링에 따른 장섬유와 전체 지료의 보수도 변화를 나타내었다. 여기에서 각 단계의 지료에 존재하는 미세섬유를 모두 제거한 뒤 고해한 펄프의 보수도는 삼각형으로 표시하였으며, 고해된 펄프를 건조시킨 후 해리한 펄프의 보수도는 원형으로 표시하였다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 전 단계의 펄프에 존재하는 미세섬유를 제거한 뒤 고해한 펄프의 보수도는 리사이클링이 진행됨에 따라 약간 감소한 후 다시 증가하는 경향을 보였다. 그리고 고해 후 건조-해리시킨 장섬유의 보수도는 큰 변화를 보이지 않은 반면, 미세섬유를 포함하고 있는 전체 펄프의 보수도는 감소 후 증가하는 경향을 나타내었다.

이러한 경향을 좀 더 분명히 나타내기 위하여 Fig. 3에는 미세섬유의 함량을 고려하여 전체섬유의 보수도와 장섬유의 보수도의 차이로부터 계산한 각 단계 미세섬유의 보수도를 나타내었다.

Fig. 3에서 보는 것과 같이 미세분의 보수도 변화 양상은 Fig. 2의 전체 섬유의 보수도 변화 경향과 완전히 일치하였다. 따라서 각 단계에서 발생한 미세섬유의 보수도가 전체 펄프의 보수도

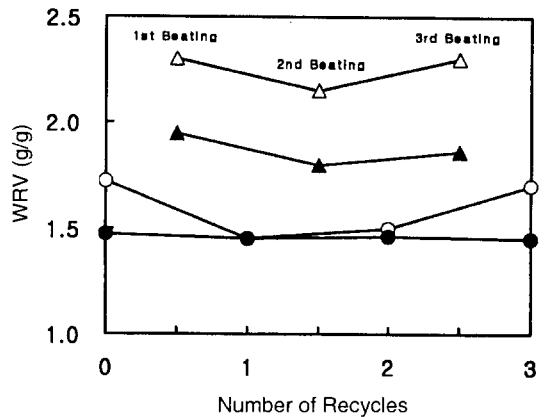


Fig. 2. Water retention values versus number of recycles (Recycled pulps were beaten after each recycling step).

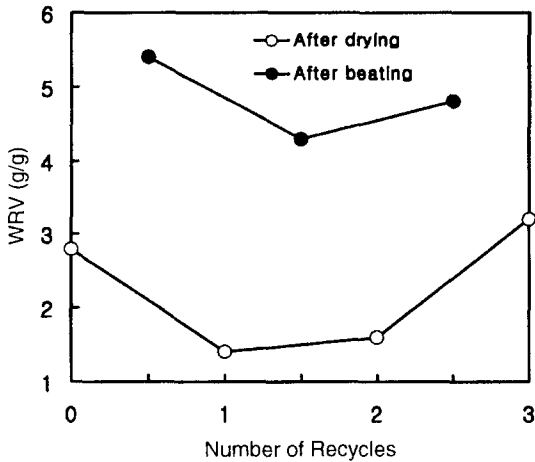


Fig. 3. Water retention values of fines generated after each recycling step.

에 결정적인 영향을 끼침을 알 수 있었다.

Fig. 3에 나타난 미세섬유의 보수도 변화 경향은 리사이클링에 의해 발생하는 각질화 효과와 각 단계에서 행하여지는 고해의 2가지 효과가 복합적으로 작용한 결과로 다음과 같이 설명할 수 있다.

섬유의 세포벽은 해부학적 구조 및 화학적 조성이 서로 다른 일차세포벽과 이차세포벽으로 구성되어 있다. 이차세포벽의 대부분을 점하는 S2층을 구성하는 피브릴은 세포축과 거의 나란히 배열되어 있는 반면에, 일차세포벽의 피브릴은 망상구조를 이루고 있다. 이러한 구조적 차이 때문에 이차세포벽은 고해 시 피브릴화가 비교적 용이하게 발생하지만 일차세포벽은 피브릴화가 쉽게 이루어지지 않는다. 이러한 차이점은 일차세포벽이 파괴되어 발생한 이차 미세섬유와 이차세포벽이 파괴되어 발생한 이차 미세섬유의 형태 및 보수도에도 영향을 미칠 것으로 생각된다. Fig. 3의 첫 번째 고해 시에는 주로 각질화가 되지 않은 일차세포벽이 파괴되어 미세섬유가 생기므로 비교적 큰 값의 보수도를 나타낸 것으로 생각된다. 두 번째 고해 시에도 역시 첫 번째 고해에서 완전히 제거되지 않은 일차세포벽이 파괴되어 미세섬유가 발생하는 것으로 생각되지만, 이 경우에는 리사이클링에 의한 각질화가 발생하였기 때문에 보수도가 크게 낮아진 것으로 판단된다. 특히 이 단계의 미세섬유의 보수도는 장섬유 펄프와 거의 같은 정도로 낮

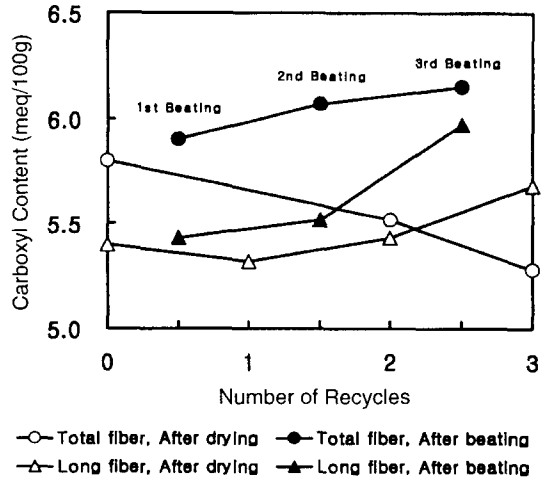


Fig. 4. Carboxyl contents of the pulps versus number of recycles before and after beating the recycled pulps.

게 나타났다. 이는 일차세포벽으로부터 분리된 미세섬유는 각질화될 경우 미세섬유의 특성을 거의 모두 상실한다는 것을 의미한다. 마지막 세 번째 고해 시에는 앞 단계에서 이미 일차벽의 제거가 어느 정도 이루어졌으므로, 주로 이차세포벽이 파괴되어 미세섬유화된 것으로 생각되며, 이에 따라 이전 단계보다 더 높은 값의 보수도가 얻어진 것으로 믿어진다. 이차세포벽으로부터 분리된 미세섬유는 일차세포벽으로부터 발생한 미세섬유보다 팽윤성이 높다 할지라도 이미 리사이클링에 의한 각질화가 상당히 이루어져 있기 때문에 첫 번째 발생한 미세섬유보다 더 큰 보수도를 나타내지는 못한 것으로 보인다.¹⁾ 각 단계에서 발생된 미세섬유가 1회씩 리사이클링된 미세섬유도 역시 마찬가지로의 경향을 보이고 있다.

화학펄프의 경우 고해 초기에는 일차세포벽과 S1층이 주로 파괴되어 이차 미세섬유가 되며, 고해를 계속함에 따라 S2층이 피브릴화되어 미세섬유가 발생한다는 사실은 Page⁴⁾에 의해서도 보고된 바 있다.

Fig. 2의 장섬유 보수도도 위와 마찬가지로 설명할 수 있다. 즉 세 번째 고해 시에는 일차세포벽이 대부분 제거되고 이차세포벽이 노출되었기 때문에 보수도가 더 이상 감소하지 않은 것으로 해석할 수 있다.

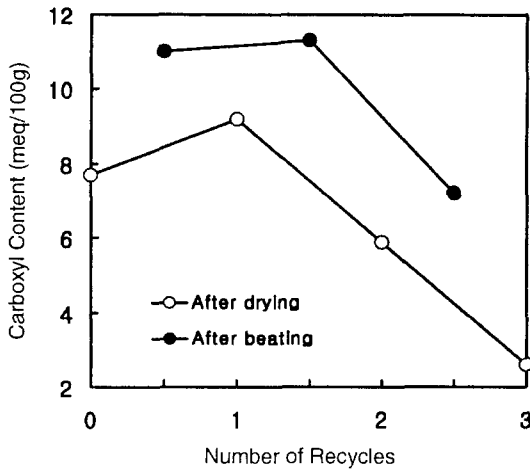


Fig. 5. Carboxyl contents of fines obtained before and after beating at each recycling steps.

Fig. 4에는 리사이클링 단계 별 펄프의 카르복실기 함량을, Fig. 5에는 Fig. 4의 자료로부터 계산된 미세섬유의 카르복실기 함량을 나타내었다.

Fig. 4에서 보는 바와 같이 장섬유의 카르복실기 함량은 리사이클링 횟수가 증가함에 따라 셀룰로오스의 열화에 의하여 계속적으로 증가하였다.⁵⁾ 반면에 건조 후 전체 섬유의 카르복실기 함량은 리사이클링에 따라 감소하였으나, 고해 후 전체 섬유의 카르복실기 함량은 리사이클링에 따라 계속적으로 증가하였다. 이러한 원인은 Fig. 5로 설명할 수 있다. 여기에서 보는 바와 같이 미세섬유의 카르복실기 함량은 초반에는 높게 나타났지만 리사이클링이 진행되어 고해 횟수가 늘어감에 따라 큰 폭으로 감소하였다. 이러한 현상은 일차세포벽의 카르복실기 함량은 이차세포벽의 경우에 비해 크게 높기 때문이다.

크라프트 펄프의 경우 카파값에 따라 차이가 있지만 펄프 100g당 약 5-15 meq의 카르복실기를 함유하고 있으며, 이러한 카르복실기는 헤미셀룰로오스와 크라프트 펄핑 중 카르복실화가 발생한 리그닌에 의하여 주로 기인하는 것으로 알려져 있다.⁶⁾ 또 리그닌 함량이 높은 일차세포벽이 이차세포벽에 비해 카르복실기 함량이 높다.⁶⁾ 그러므로 매 리사이클링 단계에서 고해를 행하면 전술한 바와 같이 첫 번째와 두 번째 고해과정에서는 카르

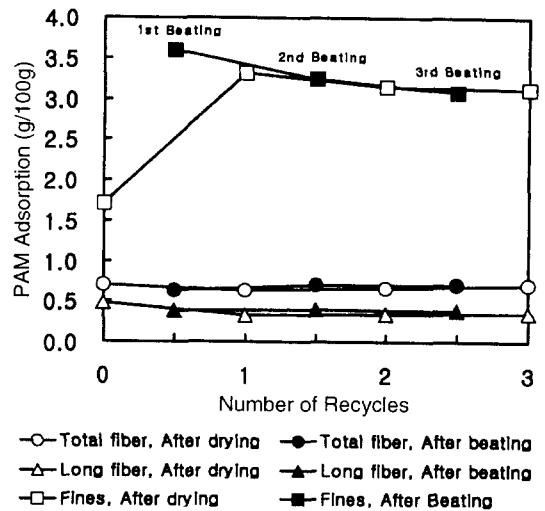


Fig. 6. The amount of PAM adsorbed onto total fiber, ling fiber and fines obtained before and after beating versus number of recycles.

복실기 함량이 높은 일차세포벽이 주로 파괴되어 미세섬유가 되므로 미세섬유의 카르복실기 함량이 높게 나타나지만, 세 번째 고해에서는 카르복실기 함량이 비교적 낮은 이차세포벽이 주로 미세섬유가 되기 때문에 카르복실기 함량이 낮게 나타난 것이라고 생각된다.

Fig. 6은 각 단계의 지료에 1.5%의 양이온성 PAM을 첨가한 후 그 흡착량을 측정된 결과이다. 전체 섬유 및 장섬유의 양이온성 PAM 흡착량은 첫 번째 리사이클링 단계에서는 약간 감소하였으나, 두 번째와 세 번째 리사이클링에서는 미세하게 증가하는 경향을 나타내었으며, 전 단계 펄프의 미세섬유를 제거한 후 고해한 펄프는 고해 전의 펄프에 비해 약간 높은 양이온성 PAM 흡착량을 보였다. 본 실험에서는 첫 번째 고해 시에도 전단계에 존재하는 미세섬유를 모두 제거하였기 때문에 고해 후의 전체 펄프 및 장섬유의 PAM 흡착량이 고해 전과 거의 같은 수준을 나타내었다. 미세섬유의 경우에는 일차 미세섬유로만 이루어져 있는 리사이클링 0회의 PAM 흡착량이 약 1.7g/100g이었지만, 일차 미세섬유를 제거하고 고해하여 얻어진 이차 미세섬유의 PAM 흡착량은 3.5g/100g 이상으로 약 2배 증가하였다. 즉 일

차 미세섬유에 비하여 이차 미세섬유가 훨씬 높은 흡착력을 나타내었다.

첫 번째 고해에서 미세섬유의 양이온성 PAM 흡착력이 크게 증가한 이후로는 리사이클링이 됨에 따라 흡착력이 조금씩 감소하는 경향을 보였다. 이는 리사이클링이 됨에 따라 고해에 의하여 새롭게 발생하는 이차 미세섬유의 흡착력이 계속적으로 감소함을 의미한다. 이는 전보의 결과와도 일치하는 것이다.⁷⁾ 앞의 Fig. 3과 Fig. 5에서는 세 번째 고해 시 이차세포벽이 파괴되어 이차 미세섬유로 발생하는 현상이 관찰되었지만 Fig. 6의 미세섬유의 흡착량 곡선에서는 뚜렷한 경향이 보이지 않았다. 이는 이차 미세섬유의 경우 보수도 증가에 의한 흡착량 증가가 카르복실기 함량 감소보다도 PAM의 흡착력에 더 큰 영향을 미치기 때문으로 생각된다.

3.2 미세분 제거 및 고해과정을 포함한 리사이클링 단계별 물성 변화

Figs. 7-8은 각 리사이클링 단계의 펄프를 수초지한 후 겉보기밀도와 인장강도를 측정한 결과를 나타낸 것이다. 여기에서 볼 수 있듯이 매 단

계 고해된 펄프를 리사이클링시킨 펄프의 겉보기 밀도와 인장강도는 리사이클링이 진행됨에 따라 증가하였다. 이는 Fig. 2의 보수도 곡선을 기본으로 해석할 수 있다. 즉 장섬유의 보수도는 거의 변화가 없지만, 각 단계 고해에서 발생한 이차미세섬유에 의하여 전체 보수도가 점차 증가하며, 이차 미세섬유가 일차 미세섬유에 비하여 종이의 강도를 증진시키는 효과가 더 크기 때문에 겉보기 밀도와 인장강도가 리사이클링됨에 따라 오히려 증가한 때문으로 판단된다.

앞 단계의 펄프에 존재하던 미세섬유를 모두 제거한 뒤 고해한 펄프의 겉보기밀도와 인장강도는 위와는 반대로 리사이클링에 따라 감소되었다. 이는 Fig. 2에서 본 바와 같이 장섬유의 보수도 즉 섬유결합능력이 리사이클링됨에 따라 감소하였기 때문으로 판단된다.

Figs. 7-8에서는 전반적으로 리사이클링 2회와 3회에서 흡착된 양이온성 PAM이 섬유간 결합에 쉽게 참여하여 강도를 상승시키고 있음을 알 수 있다. 이는 고해에 의하여 발생한 미세섬유의 보수도가 높아⁸⁾ 섬유간 결합을 형성하는 능력이 크기 때문에 양이온성 PAM이 섬유결합에 기여한 때문이라고 판단된다.

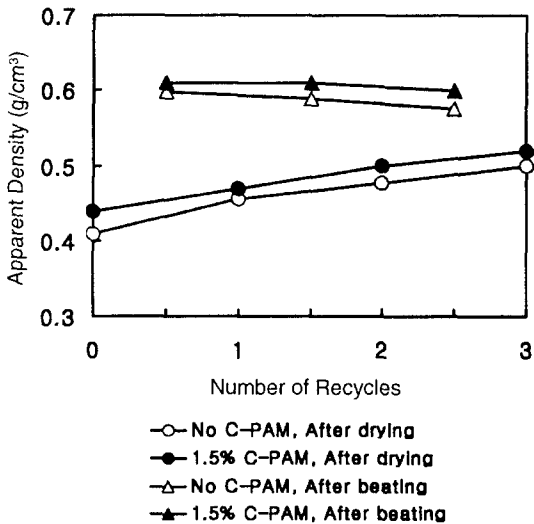


Fig. 7. Effect of recycling on apparent density of handsheets with and without C-PAM treatment as a function of number of recycles.

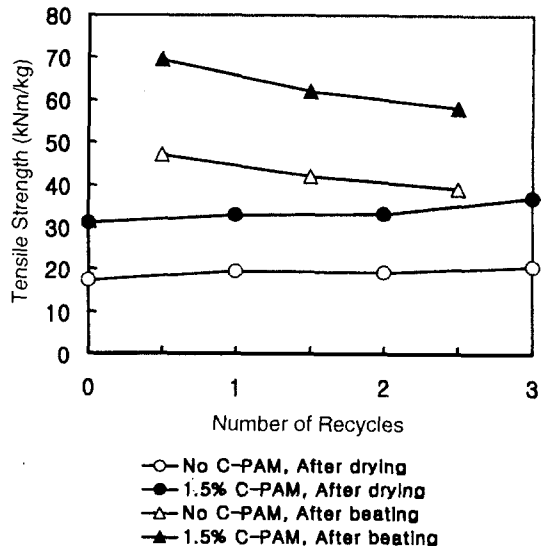


Fig. 8. Effect of recycling on tensile strength of handsheets with and without C-PAM treatment as a function of number of recycles.

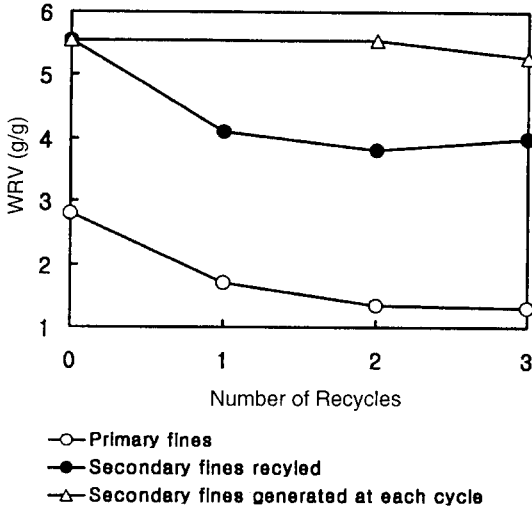


Fig. 9. Comparison of water retention values of primary and secondary fines.

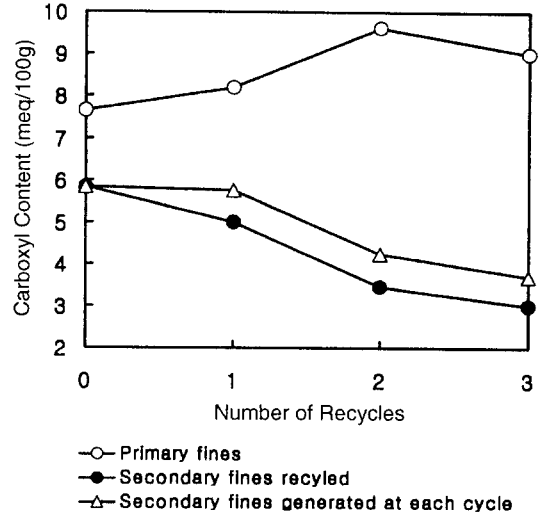


Fig. 10. Comparison of carboxyl contents of primary and secondary fines.

3.3 리사이클링에 따른 미세섬유의 성질 및 흡착력 변화

여기에서는 전보⁷⁾의 자료를 기본으로 계산한 결과를 토대로 리사이클링에 따른 미세섬유의 성질 및 흡착력 변화를 분석하였다.

Fig. 9에는 일차 미세섬유, 이차 미세섬유 및 고해에 의하여 매 단계 발생한 미세섬유의 3가지 미세섬유의 보수도 변화를 나타내었다. 여기에서 보는 바와 같이 일차 미세섬유에 비하여 이차 미세섬유의 보수도가 훨씬 크게 나타났다. 이는 일차 미세섬유는 플레이크의 형태를 가지는 반면, 이차 미세섬유는 피브릴의 형태를 가지기 때문인 것으로 판단된다.⁹⁾ 따라서 이차 미세섬유가 일차 미세섬유에 비하여 섬유간 결합을 형성하는 능력이 크며, 그 결과 종이강도를 상승시키는 효과가 큰 것으로 판단된다.

매 단계 고해에 의하여 발생한 이차 미세섬유는 다른 미세섬유와는 달리 리사이클링에 따른 보수도의 감소가 거의 나타나지 않았다. 이는 미세섬유에 비하여 각질화가 심하게 발생하지 않는 장섬유로부터 고해과정을 거쳐 분리되어 나왔기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 10은 3가지 종류의 미세섬유의 카르복실

기 함량을 나타낸 것이다. 전술한 바와 같이 일차 미세섬유는 리그닌, 추출물 등의 함량이 상대적으로 높기 때문에 높은 카르복실기 함량을 나타내고 있으며, 이차 미세섬유는 리사이클링에 따라 발생하는 각질화에 의한 비표면적 감소효과로 카르복실기가 감소하는 것을 볼 수 있다. 또 리사이클링 단계마다 새로이 고해를 통하여 발생된 이차 미세섬유의 카르복실기 함량은 리사이클링된 이차 미세섬유의 카르복실기 함량보다 높았다.

Fig. 11은 3가지 미세섬유의 양이온성 PAM 흡착력을 나타낸 것이다. 일차미세섬유는 비표면적 감소에 의한 흡착량 감소효과와 카르복실기 증가에 의한 흡착량 증가효과가 서로 상쇄되어 리사이클링 횟수에 관계없이 일정한 흡착성을 나타내었으며, 이차 미세섬유는 리사이클링 할 경우 비표면적 및 카르복실기 함량이 급격히 감소하기 때문에 흡착량이 급격히 감소하였다. 또 리사이클링된 장섬유로부터 고해를 통하여 다시 생성된 이차 미세섬유의 경우에는 미세섬유의 발생위치가 일차 세포벽으로부터 이차세포벽으로 이행됨에 따라 카르복실기의 함량이 감소하였다. 하지만 각 리사이클링 단계에서 산화가 발생하기 때문에 그 감소 정도는 낮게 나타난 것으로 해석된다.

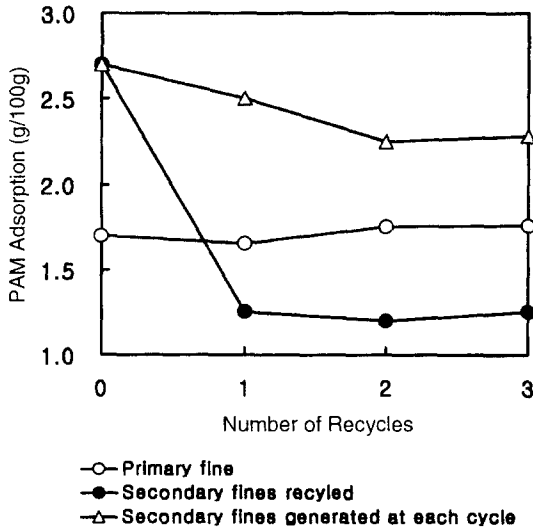


Fig. 11. Comparison of the amount of PAM adsorbed onto the primary and secondary fines.

4. 결론

펄프 섬유의 리사이클링 시 발생하는 일차 미세 섬유와 이차 미세 섬유의 양이온성 폴리아크릴아미드(cationic polyacrylamide : C-PAM)의 흡착특성과 이들이 종이 물성에 미치는 영향을 조사한 결과 리사이클링 매단계에서 일정한 고해를 할 경우, 리사이클링 후반에 발생하는 이차세포벽으로부터 분리된 이차미세섬유는 보수도가 매우 큰

특성을 가지고 있었으나 카르복실기 함량은 매우 낮았다.

또 일차미세섬유에 비하여 이차미세섬유의 흡착력이 2배 정도로 높게 나타났으나, 리사이클링이 진행됨에 따라 이차미세섬유의 흡착력이 급격히 감소하여 일차미세섬유의 흡착력보다 더 낮아졌다.

인용문헌

1. Laivins G. V. and Scallan A. M., The mechanism of hornification of wood pulp, in "Products of Papermaking," Vol. II, Pira International, pp. 1235-1260 (1993).
2. Howard R. C., JPPS 16(5) : 143 (1990).
3. Nazhad M. M. and Paszner L., Tappi J., 77(9) : 171 (1994).
4. Page D. H., in "Fundamentals of Papermaking," Vol. 1, pp. 1-38, Mechanical Eng. Pub. (1989).
5. McGinnis G. D. and Shafizadeh F., in "Pulp and Paper", Vol 1., pp. 377-491, Wiley-Interscience (1960).
6. 이학래, 목재섬유와 펄프의 특성, 제지과학, pp. 11-29, 광일문화사, (1996).
7. Joo, S.B, and Lee, H.L., J. Korea TAPPI 31(1): 31 (1999).
8. Marton J., Tappi 63(2) : 121 (1980).
9. Klungness J. H. and Exner M. P., Tappi 63(6) : 73 (1980).