

섬유 특성에 따른 종이의 물리적, 파괴 역학적 특성 변화

이진호 · 박종문[†]

(2003년 3월 7일 접수; 2003년 6월 20일 채택)

Change of Paper's Physical and Fracture Mechanical Properties Depending on Fibers Properties

Jin-Ho Lee and Jong-Moon Park[†]

(Received on March 7, 2003; Accepted on June 20, 2003)

ABSTRACT

Physical properties of paper can be explained in terms of the changes in fiber's morphological properties. As the paper machine speed increases, the basis weight decreases and the mixing ratio of inferior recycled fibers increases, paper break becomes important than ever before. One of the objectives of this study is to analyze paper's physical, mechanical and fracture mechanical properties depending on softwood(SW) and hardwood(HW) mixing ratios and recycling. Fibers were refined by Valley beater to 450 mL CSF. Handsheets of 30 g/m² were prepared at different mixing ratios.

Fracture toughness was measured as the amount of energy applied to cracked sample before total failure. Fracture toughness showed different trend to other strength properties. At the mixing ratio of SW 80: HW 20, papers showed the maximum fracture toughness. At this mixing ratio, flexible softwood fibers were mostly broken and stiff hardwood fibers were mostly pulled out.

Keywords : Softwood fibers, Hardwood fibers, Broken, Pulled-out, Fracture toughness

1. 서론

종이란 물과 혼합되어 있는 섬유에서 물을 제거하여 섬유 사이의 수소 결합을 유도하는 섬유의 집합체이다. 이 섬유간 결합은 종이의 구조적, 물리적, 광학적 성질에 모두 영향을 끼치는 가장 중요하고도 기본적인 영향인자로서 섬유간 결합이 어떤 형태로 유도되는가에 따라서 종이의 특성이 달라진다. 초지 속도가 고속화될수록 중요시되는 문제는 생산효율로서, 생산효율 증가를 위해서는 지절율을 감소시켜야 한다. 제지공장

의 지절은 여러 가지 원인이 복합적으로 작용하여 나타나지만 종이 내에 존재하는 결점(flaw) 또는 구멍이나 결속 섬유 등에 의한 크랙 등이 주된 원인으로 지적되고 있다. 물질 내부에 결점이 존재하는 상태에서 외부 응력을 받으면 물질은 자신이 가지고 있는 강도보다도 훨씬 낮은 하중에서 파괴가 일어난다.¹⁾ 이는 종이 내에 결점이 존재할 때 결점부분에 응력이 집중하기 때문에 일어나는 현상이다. 본 연구에서는 종이의 원료 섬유인 침엽수와 활엽수 섬유의 혼합비를 달리하여 초지하였을 때, 종이의 물리적 특성 및 파괴 역학적 특성을 변화를 분석하고자 한다.

*충북대학교 농과대학 산림과학부(School of Forest Resources, College of Agriculture, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea).

[†]주저자(Corresponding author): E-Mail: jmpark@chungbuk.ac.kr

2. 재료 및 방법

2.1 공시재료

펄프는 국내 D사에서 사용하고 있는 뉴질랜드산 Radiata pine 침엽수 표백화학 펄프와 칠레산 Eucalyptus 활엽수 표백화학 펄프를 사용하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 고해

침엽수와 활엽수를 각각 실험용 Valley beater를 이용하여 지료농도를 1.4%로 하여 고해도 450 mL.C. S. F.로 고해하였다.

2.2.2 섬유 특성분석(FQA)

고해 전후의 펄프를 일정량(30 mg 이하) 취하여 FQA(Fiber quality analyzer)를 이용하여 섬유장, curl, kink, coarseness를 분석하였다.

2.2.3 초지

실험실용 원형 수초지기를 이용하여 TAPPI standard T 205 om-88에 의거하여 평량 30 g/m² 으로 침엽수와 활엽수를 100 : 0 부터 0 : 100 까지 20%씩 증감하여 혼합(w/w) 초지 하였고, 섬유를 고해한 후 105℃에서 24시간 건조 및 물에 재 침지 시킨 후 재생하여 동일한 혼합비로 수초하였다.

2.2.4 수초지 물성 측정

제조된 수초지는 TAPPI standard T402 om-83에 따라 온도 23±1℃, 상대습도 50±2%로 조습 처리한 후 종이의 구조적 특성을 보기 위해 겉보기밀도, 지합지수²⁾를 측정하였다. 강도적 특성(Hounsfield tensile tester)을 알아보기 위해서 인장지수(T494 om-88), Zero-span tensile(T231 cm-96), 내부 결합강도(UM-256)를 측정하였고, fracture toughness를 계산하기 위하여 파괴시험을 수행하였다. 파괴시험은 DEN(double-edged notched) 시료를 취하였고, fracture toughness는 J-integral을 이용하였다.^{3, 4)}

측정에 이용된 지합지수식, 파괴시편 그리고 fracture toughness는 아래와 같다.

$$\text{Formation index} = \frac{\text{Standard deviation of gray level}}{\text{Mean of gray level}}$$

$$\text{Fracture toughness (J/m)} = \frac{2 \times A}{B \times b}$$

B = W - 2a, W = Sample width

b = Sample thickness, a = Crack length

A = Tensile energy absorption

3. 결과 및 고찰

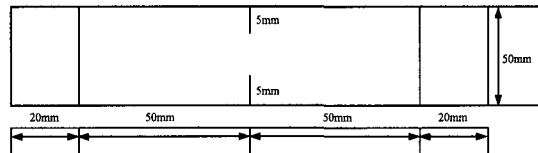


Fig. 1. DEN sample for fracture test.

3.1 섬유의 특성 및 수초지의 구조적 특성

Table 1과 Fig. 2는 실험에 사용된 섬유의 특성을 나타낸 것으로 침엽수 섬유가 활엽수 섬유에 비해 고해의 영향을 많이 받은 것을 알 수 있다. 재생 전후의

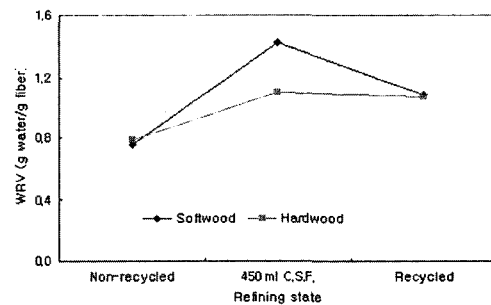


Fig. 2. WRV depending on fiber condition.

활엽수 섬유의 WRV 변화가 크지 않은 것으로 보아

활엽수 섬유는 침엽수 섬유에 비해 섬유의 피브릴화가 적게 발생된 것으로 판단된다.

Fig. 3은 혼합 초지한 종이의 구조적 변화를 나타낸 것으로 재생하지 않은 경우 활엽수 섬유의 첨가량이 증가할수록 종이가 bulk해 지나 재생을 하는 경우는

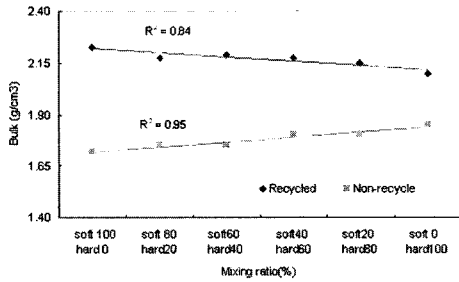


Fig. 3. Bulk of handsheet depending on mixing ratios and recycling.

반대의 경향을 나타내었다. 재생하지 않은 활엽수 섬유는 고해 후에도 섬유의 유연성이 향상되지 않고 고해의 영향을 덜 받았기 때문에 섬유의 강직성이 남아 있어 섬유간 결합이 잘 일어나지 못함에 따라 bulk한 종이를 만들게 되며,^{5~7)} 재생한 경우 섬유의 각질화에 의해 조도가 높은 침엽수 섬유의 양이 증가할수록 종이의 bulk가 증가하게 된 것으로 판단된다.

3.2 강도적 특성

Fig. 4는 재생섬유와 비 재생 섬유의 결합 강도를 나타낸 것으로, 재생하지 않은 경우 강직한 활엽수 섬

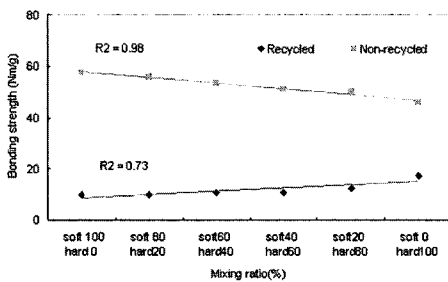


Fig. 4. Bonding strength depending on mixing ratios and recycling.

유의 첨가량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내

었으며, 재생한 경우 오히려 증가하는 경향을 나타내었다. 재생하지 않은 경우 동일 여수도 구간에서 침엽수 섬유에 비해 상대적으로 피브릴화가 적게 일어나는 활엽수 섬유의 자체 고해 특성에 기인하며, 재생시 결합력의 증가는 섬유의 피브릴화에 의한 결합력 증가보다는 상대적으로 짧은 섬유의 균일한 분포에 기인한 것으로 판단된다.

Figs. 5와 6은 결점이 없는 일반 시험편의 인장 지수와 변형률을 나타낸 것으로, 재생하지 않은 경우 인장 강도가 활엽수 섬유의 첨가량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내며, 재생한 경우에는 반대로 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 결합 강도에서 나타난 것과 마찬가지로 섬유간 결합력 차이에 의한 것으로 판단된다. 변형률은 재생하지 않은 경우 활엽수 첨가량이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타낸 반면 재생한 경우 감소하다 증가하는 경향을 나타내었다.

3.3 파괴 역학적 특성

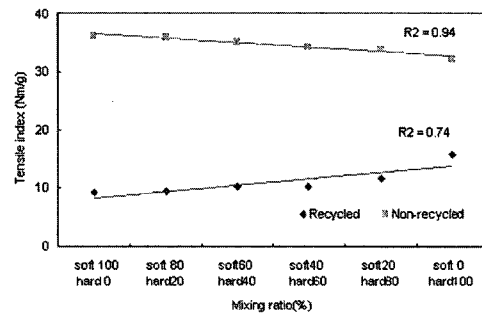


Fig. 5. Tensile strength depending on mixing ratios and recycling.

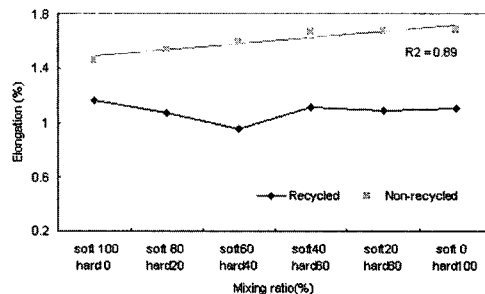


Fig. 6. Elongation depending on mixing ratios and recycling.

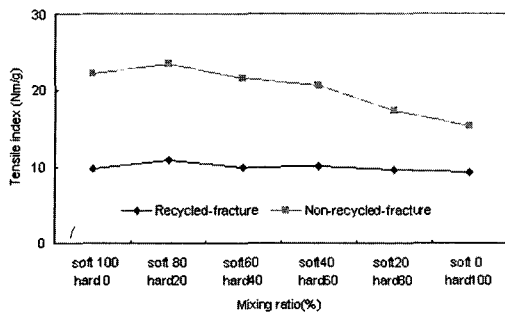


Fig. 7. Tensile strength depending on mixing ratios and recycling at fracture.

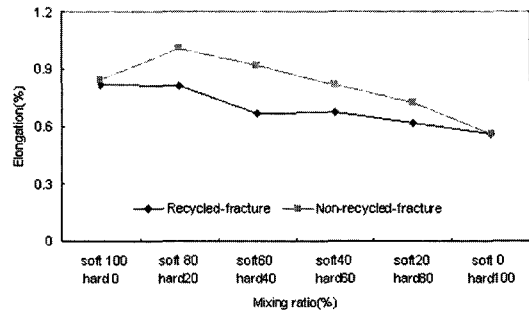


Fig. 8. Elongation depending on mixing ratios and recycling at fracture.

파괴 인성이란 결점이 존재하는 물질에서 결점이 확산해 나가는 것에 대한 저항성⁸⁾으로 Figs. 7과 8은 파괴 시편의 파괴 시험시 나타나는 인장 강도와 변형률을 나타내는 것으로 정상 시편과는 다른 경향을 나타내었다. 정상 시편은 시편의 횡방향 전체로 응력이 분포되는 반면 파괴 시험은 결점 끝부분 섬유에 응력이 집중되기 때문에, 섬유가 받는 힘을 비교해 볼 때 정상 시편보다는 파괴 시편의 섬유가 더욱 크게 받게 되며, 이에 따라 종이 가 외부 인장력에 대한 반응인 변형이 정상시편에 비해 파괴 시편에서 다르게 나타내게 된다. 기존 강도 시험의 경우 SW 100 : HW 0의 혼합비에서 최대 강도를 나타내는 반면, 파괴 시험의 경우 SW 80 : HW 20에서 최대 강도를 나타내었고, 동일한 혼합비에서 변형률 또한 최대값을 나타내었다. 이러한 결과는 물질에 결점이 있는 상태에서 하중이 부여될 때 결점 부분으로 하중이 몰리는 응력 집중 현상 때문으로 SW 80 : HW 20의 혼합비에서 SW 100 : HW 0 혼합비보다 집중되는 응력에 대한 분산이 효과적으로 일어났기 때문으로 판단된다.

결점이 존재하는 시편에 대해 하중이 주어지는 경우

하중은 결점의 최선단부에서 종이의 내부로 결점을 확산시키면서 진행해 나가게 되기 때문에, 그곳에 관찰을 집중적으로 할 수 있어서 섬유의 특성에 따른 종이 내 거동을 좀더 명확히 알 수 있다. 정상 시편의 경우 외부 하중이 시편의 폭 방향 전체에 대해 동시에 작용하며 지합이라는 또 하나의 변수가 존재하기 때문에 정상 시편을 통한 섬유의 특성에 따른 종이 내 섬유의 거동을 명확히 분석하기는 매우 어렵다.

Figs. 9와 10은 파괴 시험을 수행 하였을 경우 나타나는 섬유의 거동으로 재생하지 않은 경우와 재생한 경우 섬유간 끊어짐과 뽑힘의 경향이 다른 것을 알 수 있다. 결점이 존재하는 상태에서 물질의 변형이 일어나는 경우 파괴의 양상은 섬유의 파괴 또는 결합면의 파괴로 나타난다. 재생하지 않은 경우 침엽수 섬유는 뽑힘이 대부분 발생하며, 활엽수 섬유의 침가량이 증가함에 따라 뽑힘이 증가하는 경향을 나타내었으며, 재생한 경우 뽑힘이 대부분 일어나는 것을 알 수 있다. 위와 같은 결과는 섬유간 결합력의 차이에 기인한 것으로 외부 하중이 작용하여 결점이 확산 될 때 섬유간 결합이 섬유 자체 강도 보다 강한 경우 섬유의 파괴를

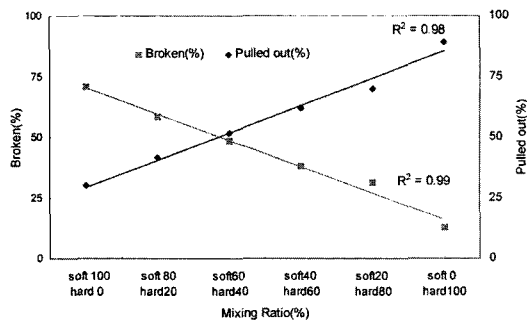


Fig. 9. Non-recycled fiber's broken and pulled out behavior of mixed paper.

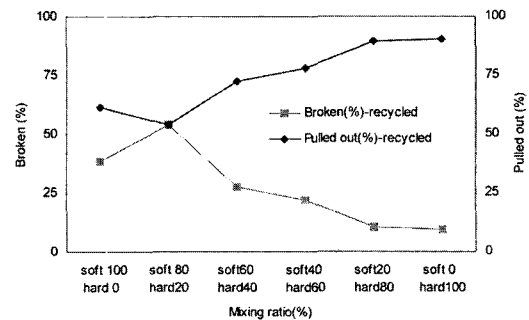


Fig. 10. Recycled fiber's broken and pulled out behavior of mixed paper.

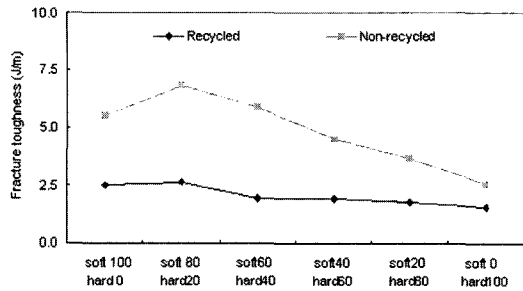


Fig. 11. Fracture toughness depending on mixing ratios and recycling.

유도하고 결합이 섬유 자체 강도 보다 약한 경우 결합면의 파괴가 발생하여 섬유의 뽑힘을 유도하기 때문이라고 판단된다.

Fig. 11은 혼합비에 따른 파괴인성을 나타낸 것으로 재생하지 않은 경우와 재생한 경우 모두 SW 80 : HW 20 혼합비에서 최대 파괴인성을 나타내었다. 이는 SW 80 : HW 20의 혼합비에서 첨가된 강직한 활엽수 섬유가 뽑혀 나가면서 변형률을 증가 시켰기 때문으로 판단된다. 활엽수 섬유의 혼합비가 증가 할수록 파괴인성이 감소하는 것은 섬유간 결합력이 외부 하중에 대해 저항할 만한 강도 값을 나타내지 못하여 낮은 파괴인성과 변형을 나타내기 때문인 것으로 판단된다.

Figs. 12와 13은 파괴 시험시 최소 인장-변형률 값을 나타내는 SW 0 : HW 100 혼합비를 기준으로 하여 침엽수 첨가량이 증가함에 따라 증가된 인장지수와 변형률의 정도를 Δ tensile effect와 Δ elongation effect로 표현한 것으로, 이를 통하여 혼합비에 따른 파괴인성의 변화가 인장-변형 중 어느 인자에 의해 영향을 받았는지에 대하여 평가하였다. 재생하지 않은 경우 및 재생한 경우 침엽수 섬유의 첨가량이 증가함에 따라 강도의 증가 보다 변형률의 증가가 더 크게 나

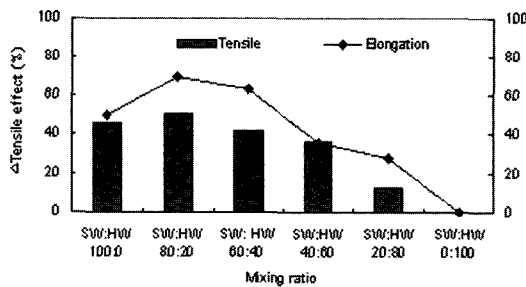


Fig. 12. Tensile and elongation effect of non-recycled paper.

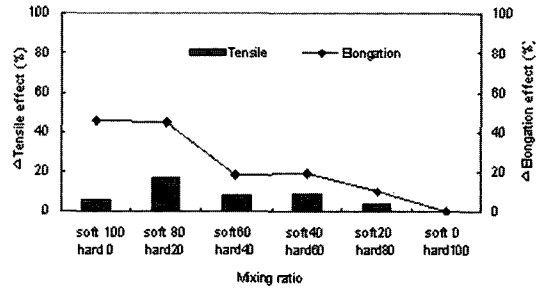


Fig. 13. Tensile and elongation effect of recycled paper.

타나는 것으로 보아, 파괴 인성의 증가에는 인장력 보다는 변형률이 더 크게 영향을 미친 것으로 판단된다. 또한 재생 섬유 역시 변형률이 인장력에 비해 더 높은 값을 나타내는 것으로 보아 이미 언급한 바와 같이 약한 섬유간 결합이 유도되어 섬유가 뽑히는 경우 변형력에 긍정적인 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

4. 결론

파괴 시험을 통한 종이 내 강도 발현과 섬유의 거동은 혼합 초지한 종이에 있어서 침엽수 섬유는 강한 섬유간 결합에 의한 섬유의 파괴가 유도되었고, 활엽수 섬유로 초지한 종이는 약한 섬유간 결합에 의한 결합면의 파괴가 유도되었다. 혼합 초지한 종이의 강도 발현은 침엽수 섬유로 초지한 경우 섬유의 파괴에 의한 강도가 발현되기 때문에 강한 강도적 특성을 나타내고 활엽수 섬유로 초지한 경우 결합면의 파괴에 의한 약한 강도적 특성을 나타내었다. 재생지의 경우 약한 섬유간 결합에 의하여 결합면의 파괴가 지배적으로 일어나지만 침엽수 재생섬유의 경우 강직함과 장섬유의 영향으로 섬유의 뽑힘시 미세 재생 섬유 보다는 낮지만 섬유의 파괴가 유도되었다.

기존의 종이의 강도적 평가 이외에 제지공정의 운전성 평가나 지질 연구에 이용되는 파괴역학적 평가는 일반 적인 강도적 특성이 혼합 초지 하였을 때 침엽수 단독 초지가 가장 강한 특성을 나타낸 반면, 파괴인성은 섬유의 파괴가 지배적으로 일어나고 첨가되는 활엽수 섬유의 뽑힘시 저항에 의한 변형이 증가하는 혼합비 SW 80 : HW20 에서 가장 강한 파괴 인성을 나타내었다. 재생지의 경우 재생하지 않은 섬유와는 다른 원인에서 섬유의 파괴가 일어나지만 재생하지 않은 섬유와 동일하게 혼합비 SW 80 : HW 20 에서 가장 강

한 파괴 인성을 나타내었다. 이처럼 일반적인 종이의 강도적 평가와 파괴역학적 평가가 다른 것은 파괴인성은 종이의 인장력과 변형력이 모두 포함되는 에너지의 개념이기 때문이고 또한 파괴 시편에서 일어나는 독특한 응력집중 현상 때문이다.

인용문헌

1. Christer F., Melander, J., Mohlin, U.-B., Fracture mechanics- A tool for evaluating the effect of reinforcement pulps in mechanical pulps, Tappi International Paper Physics Conference, Stockholm, Sweden, pp.145~153(1999).
2. 조용민, 투과광 走査機의 화상분석법에 의한 종이의 물성 평가, 서울대학교, 박사학위논문 (2000).
3. Park, J.-M., Study of Yield and Fracture of Paper, State University of New York, Ph. D. Thesis(1993).
4. Anderson T. I., 이억섭, 김정규 옮김, 파괴역학 응용과 기초, 한국경제신문, pp.23~50 (2000).
5. Paavilainen, L., Influence of morphological properties of softwood fibers on sulfate pulp fiber and paper properties, In 1991 International Paper Physical Conference, Kona, Hawaii, September, pp.22~26(1991).
6. Seth, R. S. Importance of fiber coarseness for pulp properties, CPPA Annual Meeting Preprints, 77B:B251(1991).
7. Page, D. H., and Tydeman, P. A., A new theory of the shrinkage, structure, and properties of paper, Formation and Structure of Paper, Transactions of the 4th Fundamental Research Symposium-Oxford, Mechanical Engineering Publications Ltd., London, pp.397~413(1989).
8. Seth, R. S., Measurement of in-plane fracture toughness, Tappi J.,78(10):117 (1995).