

# Measurement of paper properties using fracture toughness

이 진호\* · 박 종문

충북대학교 산림과학부 임산공학과

## 1. 서론

종이를 생산하는 제지공장에서의 가장 큰 목적은 이윤 추구이다. 즉, 좋은 품질의 종이를 균일하고 효율적으로 생산하는 것이 이윤 추구의 지름길일 것이다. 종이를 생산하는 초지기는 1799년 L. Robert 가 무한궤도의 가는 철망을 지료통위에 설치한 후 페들로 지료를 퍼 올리는 방법을 사용하여 초지한 이래로 1808년 fourdrinier 형제에 의해서 지료통과 성형부가 분리되고 성형보드와 테클이 설치된 초지기가 개발되어 장망식 초지기의 기초가 되었다. 이후 초지 속도의 증가를 위한 연구는 지층 형성부 뿐만 아니라 압착부와 건조부에서도 계속되었고, 현재 초지기는 지폭 3~5m, 속도 1,500m/min 정도로 비약적으로 발전하였고, 최신 설비의 경우 초지 속도는 2,000m/min 까지 빨라지고 있다. 초지 속도가 고속화될수록 중요시되는 문제는 생산효율로서, 생산효율 재고를 위해서는 공장의 지절율을 감소 시켜야한다. 제지공장의 지절은 여러 가지 원인이 복합적으로 얽혀 나타나지만 종이내에 존재하는 결점(flaw)또는 crack 즉, 홀이나 결속 섬유등에 의한 것이 주된 원인으로 지적되었다. 물질 내부에 결점이 존재하는 상태에서 외부 응력을 받으면 물질은 자신이 가지고 있는 강도보다도 훨씬 낮은 하중에서 파괴가 일어난다. 이는 종이내의 결점이 존재할 때 결점부분으로 응력이 집중하기 때문에 일어나는 현상이다. 때문에 본 연구에서는 종이의 원료섬유인 침엽수와 활엽수 섬유에 따라 종이 구조 변화와 파괴시험을 통해 파괴시편에서 나타나는 현상에 대하여 연구하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 공시재료

펄프는 국내 D사의 침엽수와 활엽수 표백화학 pulp를 사용하였고, 침엽수는 뉴질랜드산 Radiata pine, 활엽수는 칠레산 Eucalyptus를 사용하였다.

### 2.2 실험방법

#### 2.2.1 고해

침엽수와 활엽수를 각각 실험용 Valley beater를 이용하여 지료 농도를 1.4%로 하여 고

해도 450 ml C. S. F.로 고해 하였고 고해 정도를 평가하기 위해 Refining effect를 계산하였다.

$$\text{Refining effect(\%)} = \frac{\text{fiber quality after refining}}{\text{fiber quality before refining}} \times 100$$

\*fiber quality is FQA result containing length, curl, kink and coarseness.

## 2.2.2 섬유 특성분석(FQA)

고해 전후의 pulp를 일정량(30mg 이하) 취하여 FQA(Fiber quality analyzer)를 이용하여 섬유장, Curl, Kink, Coarseness를 분석하였다.

## 2.2.3 초지

실험실용 원형 수초지를 이용하여 TAPPI standard T 205 om-88에 의거하여 평량 30 g/m<sup>2</sup> 으로 침엽수와 활엽수를 100 : 0 부터 0 : 100까지 혼합(w/w) 초지하였다.

## 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, 지합지수(gray level을 이용), 산란계수, 투기도를 측정하였고, 섬유의 특성에 따른 종이의 강직성 평가를 위해 FQA 결과를 이용하여 fiber capability와 network solidity를 계산 하였다. 강도적 특성(Hunsfiend 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 박의 시편을 따라 DEN(double-edged notched) sample을 취하였고, fracture toughness는 J-integral을 이용하였다. 측정에 이용된 지합지수식, 파괴시편 그리고 fracture toughness는 아래와 같다.

$$\text{Formation index} = \frac{\text{Gray level S.T.D.V.}}{\text{Gray level mean}} \quad \text{Fiber capability} = \frac{\text{fiber length}}{\text{coarseness*curl*kink I.D}} \text{Paper}$$

$$\text{network solidity (N.S.)} = [\text{SW F.C.} \times \text{SW fiber behavior}] \times [\text{HW F.C.} \times \text{HW fiber behavior}]$$

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

$$B = W - 2a$$

W = sample width, b = sample thickness, a=crack length

A = tensile energy adsorption

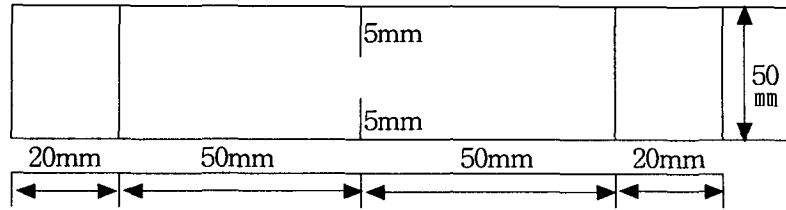


Fig. 1. DEN sample of fracture.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 섬유 특성

Table 1. FQA result of sample fibers

	Fiber length of length weighted mean(mm)	Curl of length weighted mean	Kink Index (1/mm)	Coarseness (mg/m)
Before refining SW	2.137	0.143	1.810	0.383
After refining SW	1.343	0.052	0.830	0.263
Before refining HW	0.701	0.086	1.473	0.264
After refining HW	0.657	0.067	1.367	0.218

Table 2. Refining effect of sample fibers

	Fiber length of length weighted mean(%)	Curl of length weighted Mean(%)	Kink Index (%)	Coarseness (%)
Softwood fiber	62.86	36.13	45.86	69.19
Hardwood fiber	93.70	77.61	94.80	82.70

Table 1, 2는 실험에 사용된 섬유의 특성과 고해 정도를 나타낸 것이다. 섬유의 휘어짐과 꼬임을 나타내는 값인 curl과 kink, 고해의 정도를 나타내는 refining effect가 활엽수에 비해 침엽수가 더 작은 값을 나타내고 섬유 세포벽의 양을 나타내는 coarseness가 고해 후 비슷해지는 것으로 보아 실험에 사용된 침엽수 섬유는 고해에 의한 영향을 많이 받아 섬유가 유연해지고 퍼진 섬유가 되고 활엽수 섬유는 침엽수 섬유 비해 고해의 영향을 덜 받아 섬유가 강직하고 섬유의 퍼짐이 크지 않음을 알 수 있다.

### 3.2 혼합 수초지의 구조적 특성

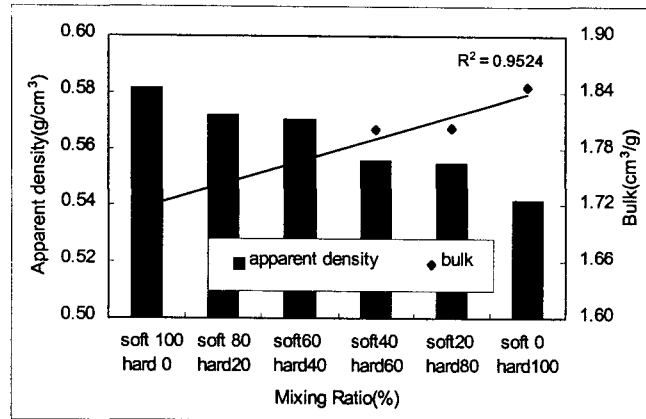


Fig. 2. Structural characteristic of mixed paper.

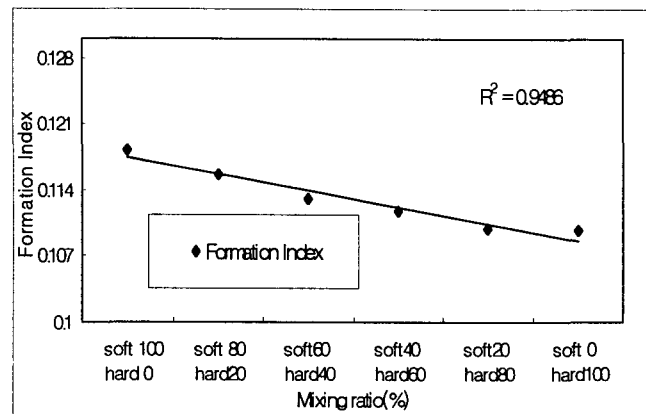


Fig. 3. Formation index of mixed papers.

Fig. 2는 혼합 초지한 종이의 구조적 변화를 나타낸 것으로 활엽수 섬유 첨가량이 증가할수록 종이가 bulk해 짐을 알 수 있다. 이는 고해 후에도 섬유의 curl 과 kink가 줄지 않고 강직한 활엽수 섬유의 특성에 기인한 것이다. Page 등은 curl 과 kink 가 증가할수록 종이의 bulk가 증가한다고 하였는데, 이는 섬유간 결합과 연관지어 설명할 수 있다. curl과 kink가 감소한다는 것은 섬유가 퍼짐을 의미하고, 섬유의 coarseness가 감소한다는 것 역시 섬유가 flexible 해지는 것을 의미하기 때문에 curl, kink, coarseness가 큰 섬유는 섬유가 강직하고 많이 휘어져 섬유간 결합이 잘 일어나지 못하게 된다.

실험에 쓰인 활엽수 섬유는 고해 후에도 섬유의 휘어짐의 완화가 크지 않고 고해의 영향을 덜 받았기 때문에 섬유의 강직성이 남아있어 섬유간 결합이 잘 일어나지 못함에 따라

bulk한 종이를 만들게 된다. Fig. 3은 섬유 분포의 불균일 정도를 나타내는 지합지수이다. 활엽수의 첨가량이 증가할수록 섬유의 분포가 균일해지는데 이는 활엽수 섬유가 침엽수에 비해 강직하고 섬유간 결합을 잘 일으키지 못하지만 섬유장이 상대적으로 짧기 때문에 지합이 개선된 것으로 판단된다.

실험 결과에서 유연한 침엽수 섬유가 결합이 잘됨에도 불구하고 지합이 나쁜 이유는 길이가 상대적으로 길기 때문으로 판단되고, 지합에 영향을 미치는 여러 인자 중 섬유장이 지합에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. Fig. 4는 혼합 초지한 종이의 산란계수와 내부 결합강도를 Fig. 5는 혼합 초지한 종이의 투기도를 나타낸 것이다. 산란계수는 종이내로 빛이 통과할 때 빛의 산란되는 정도로서 종이내의 산란은 섬유와 섬유사이의 공간이 클수록 산란계수는 커지게 된다.

혼합 초지한 종이에 있어서 활엽수 섬유의 첨가량이 증가할수록 산란계수가 커지고 결합강도는 작아지는데 이는 활엽수 섬유가 강직하고 섬유의 휘어짐이 크기에 따라 섬유간 결합을 잘 이루지 못하기 때문이다. Fig. 5는 혼합 초지한 종이의 투기도를 나타낸 것으로서 활엽수 섬유의 첨가량이 증가할수록 투기도가 작아지는 것을 알 수 있다. 활엽수 섬유는 섬유장이 짧기 때문에 종이 평면상으로는 균일하게 분포하지만 섬유간 결합이 약하기 때문에 종이의 z-direction으로는 치밀한 구조를 만들지 못하는 것으로 판단된다.

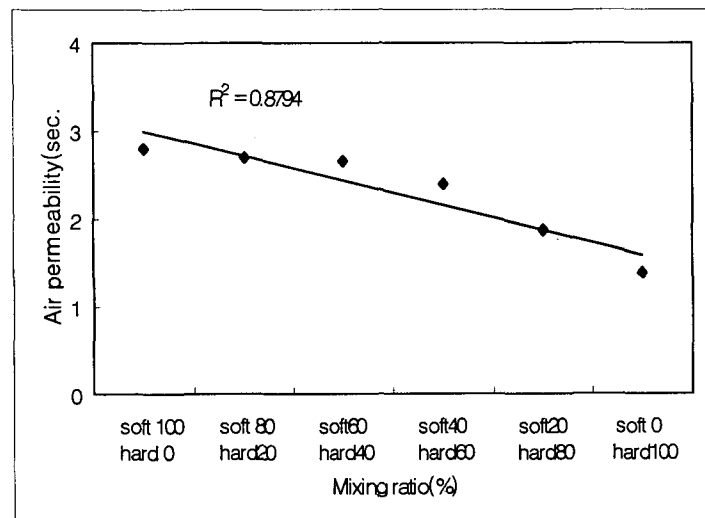


Fig. 5. Air-permeability of mixed papers.

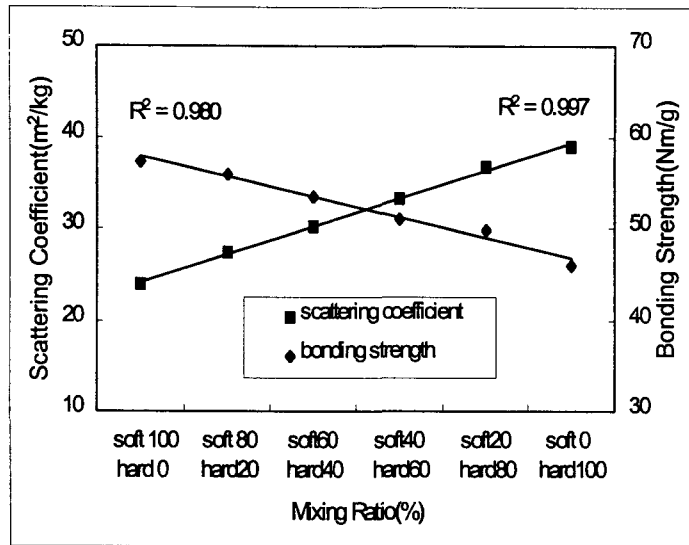


Fig. 4. Scattering coefficient and bonding strength of mixed papers.

Table 3. Fiber broken and pulling out behavior of mixed papers

Mixing ratio(%)	softwood fiber	100	80	60	40	20	0
	hardwood fiber	0	20	40	60	80	100
broken(%)		70.8	58.3	48.5	38.0	31.3	12.7
pulling out(%)		29.2	41.7	51.5	62.0	8.7	87.3

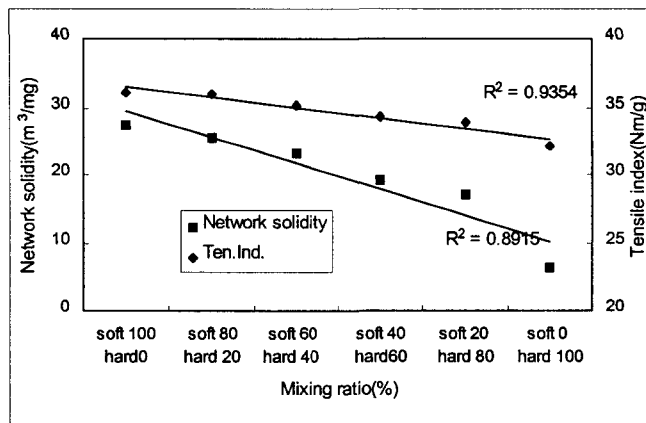


Fig. 6. Relationship between network solidity and tensile index of mixed papers.

Table 3은 파괴 시험시 나타나는 섬유들의 거동으로 침엽수 섬유는 대부분이 broken되고 활엽수 섬유 대부분은 pulling out 되는 것을 알 수 있다. 이는 고해 후 섬유의 특성에 따른 것으로 침엽수 섬유는 고해 후 결합력을 증대시키는 fibrillation 이나 flexibility등이 증대되어 섬유간 결합이 잘 일어나 종이의 인장시 섬유의 파괴가 유도되고 활엽수 섬유의 경우 결합력의 저해로 인해 섬유의 뽑힘이 유도된다. Fig. 6은 network solidity를 계산한 것으로 활엽수 섬유가 증가할 수록 N.S.가 감소하는 것을 알 수 있다. N. S.가 증가한다는 것은 곧 섬유간 결합이 잘 일어남을 의미하고, 증가된 결합력은 섬유의 파괴를 유도하여 종이의 강도가 높아지고, N.S.가 낮은 것은 섬유간 결합이 잘 일어나지 못해 섬유가 뽑히게 되어 낮은 종이의 강도를 나타내게 된다. 인장강도와 N.S. 간의 correlation coeff.도 0.992로 매우 높게 나타났다. N.S.를 통하여 짧고 강직한 섬유는 섬유 network 형성능력이 떨어짐을 알 수 있다.

### 3.3 정상시편과 파괴시편의 강도시험

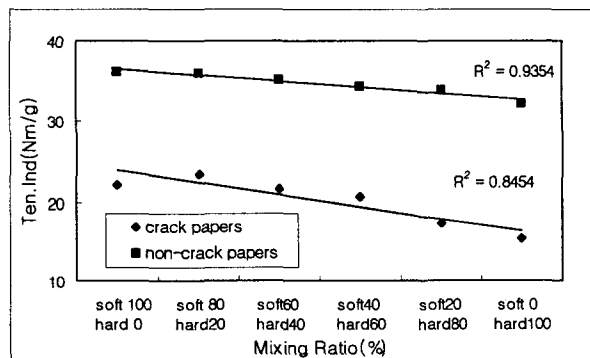


Fig. 7. Ten. ind. of crack and non-crack papers.

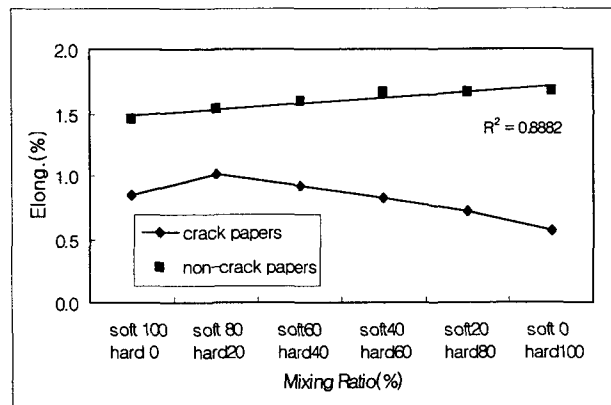


Fig. 8. Elongation of crack and non-crack papers.

Fig.7 과 fig.8은 정상시편과 파괴시편에 대한 인장시험 결과이다. 인장강도의 경우 활엽수 섬유는 첨가량이 증가할수록 두 시편 모두 감소하고 변형률의 경우 정상시편의 경우는 활엽수의 첨가량이 증가할수록 증가하고 파괴시편의 경우는 혼합비 SW80 : HW20에서 증가하다가 감소하는 상반된 결과를 나타냈다. 파괴 시편의 인장강도가 정상시편의 인장강도보다 낮은 값을 나타내는 것은 응력 집중현상에 의한 것으로 종이내에 결점이 있을 경우 결점부분으로 응력이 집중하기 때문이다. 활엽수 섬유는 자체 강도가 크면서도 인장강도가 떨어지는데 이는 결합강도가 떨어지기 때문이다. 변형률의 경우 정상시편과 파괴 시편이 차이가 나는 것은 시편에 대한 응력의 분산이 다르기 때문으로, 정상시험의 경우 종이 전달되는 인장력이 접촉하는 종이면 전체에 균일하게 공급되기 때문에 응력 집중이 발생하지 않고, 이에 따라 섬유의 분포가 균일할수록 인장력의 전달이 용이하여 변형률이 커지게 된다. 반면 파괴시험의 경우 시편자체가 결점을 가지고 있기 때문에 공급된 인장력이 결점부분으로 집중하게 되고 이에 따라 파괴 시험의 경우 섬유의 분포가 균일해 질수록 변형률은 작아지게 된다.

### 3.4 파괴인성과 응력 집중 현상

파괴 인성은 결점이 있는 종이의 인장시험시 나타나는 응력-변형률에 의해서 나타나는 값으로 fig. 9에서 보여지는 바와 같이 파괴 시편에서는 활엽수의 첨가량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타냈다. 이중 혼합비 SW80 : HW20에서 가장 큰 값을 나타냈다. 섬유의 파괴 시험시 혼합비 SW80 : HW20에서 침엽수 섬유는 강한 결합력에 의한 종이의 골격 역할을 담당하고, 강직한 활엽수 섬유는 약한 섬유간 결합에 의해 뽑혀나갈 때 마찰이 발생하여 종이의 변형률을 증가시키는 역할을 담당하는 것으로 판단된다. 때문에 SW100 보다 SW80 : HW 20이 더 강한 파괴 인성값을 나타내는 것으로 판단된다. 혼합비 SW80 : HW20 이하에서는 종이의 골격역할을 담당하는 침엽수 섬유의 양이 너무 줄기 때문에 강도와 변형률이 모두 감소하게 된다. 종이 면에서 응력의 분포는 공급되는 인장력과 섬유의 분포의 관계로 연관지어 응력의 분포 정도를 정량화 할 수 있다. 응력 집중지수는 아래의 식으로 정량화 하였다.

$$\text{Stress dispersion I.D. (S.D.I.)} = \frac{\text{Tensile I.D.}}{\text{Formation I.D.}} \text{ -----(1)}$$

$$\text{Stress concernration I.D.(S.C.I.)} = \frac{1}{\text{S.D.I.}} \text{ -----(2)}$$

(1)식에서 지합지수는 큰 값일수록 나쁜 지합을 나타내기 때문에 인장지수를 지합지수로 나눈 값을 응력 분산지수(S.D.I.)으로 계산하였고, S.D.I.의 역수를 응력 집중지수(S.C.I.)로



계산하였다.

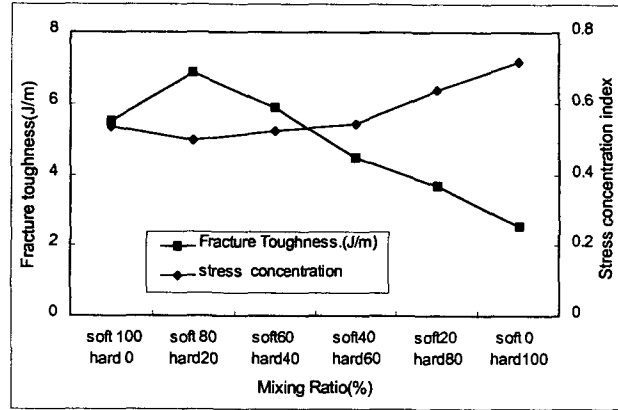


Fig. 9. Relationship between fracture toughness and stress concentration of crack papers.

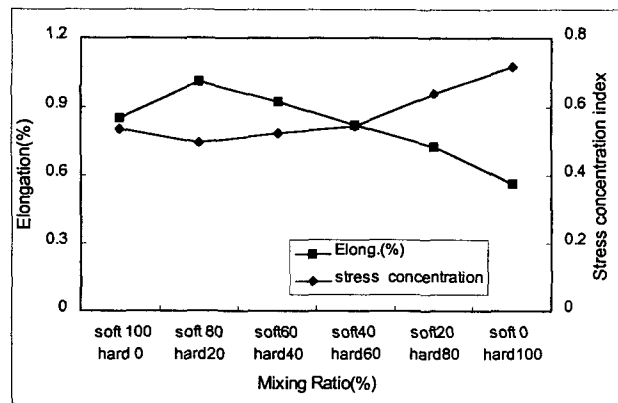


Fig. 10. Relationship between elongation and stress concentration of crack papers.

Fig. 9과 10은 응력 집중지수와 fracture toughness, elongation 과의 관계를 나타낸 것이다. 혼합비 SW80 : HW 20에서 응력 집중값이 가장 작게 나타났고 활엽수 섬유 첨가량이 증가할수록 응력 집중값이 증가하였다. 이는 혼합비 80 : 20에서 첨가된 활엽수 섬유가 침엽수 섬유의 사이에 첨가되어 섬유간 결합을 저해함으로써 응력의 집중을 분산시킨 것으로 판단된다. 파괴인성과 변형률 이 두 값과 응력 집중지수의 상관계수는 각각 -0.97 과 -0.95로서 매우 높은 연관성을 나타내었다. 이는 종이의 인장강도와 지합지수를 가지고 응력 집중지수를 계산하였을 때 종이의 응력 분포 예측이 가능하다는 것을 설명한다.

#### 4. 결 론

1. 실험용 valley beater로 고해도 450ml C.S.F. 으로 침엽수와 활엽수를 고해할 경우 활엽수는 고해의 영향을 덜 받아 구조적·광학적 특성에 많은 영향을 미쳤다.
2. 혼합 초지 하였을 때 활엽수 섬유는 첨가량이 증가할수록 종이 평면상에서 분포의 균일성에는 기여하지만 두께와 구조적 강직성에는 별다른 영향을 미치지 못하였다.
3. 정상시험과 파괴시험의 비교에서 인장강도는 비슷한 경향을 나타냈지만, 변형률의 경우는 반대의 경향을 나타냈는데 이는 응력 집중현상 때문이다.
4. 침엽수와 활엽수를 혼합 초지할 경우 침엽수 섬유는 종이의 강도에, 활엽수 섬유는 종이의 변형에 영향 하였다. 혼합비 SW 80 : HW20에서 최대 fracture toughness를 나타내었고, 응력 집중지수(S.C.I.)를 이용하여 종이내의 응력의 거동 해석이 가능하였다.

#### 5. 참고문헌

1. 이학래, 이복진, 신동소, 임기표, 서영범, 원종명, 손창만, 제지과학, 광일문화사, p. 409-415(2000)
2. J.-M. Park, Study of yield and fracture of paper, 뉴욕주립대학교, 박사학위논문 (1993)
3. G. A. Smook, Handbook for pulp & paper technologist, Joint textbook committee of the paper industry (1997).
4. Jokinen, O., Ebeling, K., Paperi Puu 67(5) p. 317(1985)
5. Kerekes, R.J., Schell, C.J., JPPS 18(1) p.32(1992)
6. Dodson, C.T.J., JPPS 16(4) p. J136(1990)
7. Caulfield, D.F., Passaretti, J.D., Sobczynski, S.F., Fiber Quality Factors in papermaking - The Importance of Fiber Length and Strength, Materials Research Society Symposium Proceedings San Francisco, CA, April 18-20, Vol. 197 p. 125-141(1990)
8. Kerekes, R.J., Schell, C.J., Effects of fiber length and coarseness on pulp flocculation, Tappi 78(2) p.133(1995)