

# 고해와 압착처리가 종이의 파괴인성에 미치는 영향

윤혜정\*† · 신동소

## Effect of Beating and Pressing on Fracture Toughness of Paper

Hye Jung Youn\*† and Dong So Shin

### ABSTRACT

As the speed of the paper machine and printing press increases, the dependency of the production efficiency upon the frequency of web break increases. It is believed that flaw or crack that presents in paper is one of the most important factor for web break. Runnability of papers on the paper machine could be evaluated by measuring fracture toughness. In this paper the effect of beating and pressing on the runnability was investigated using handsheets made from softwood bleached kraft pulp beaten to different freeness. Pressing pressure was also varied to obtain different levels of sheet consolidation. Density, tensile strength, and  $J$ -integral of the handsheets were evaluated. For measuring  $J$ -integral either a single specimen method or RPM method was employed.

Results showed that the density and tensile strength were improved as beating and pressing increased because of increased interfiber bonding.  $J$ -integral increased with beating until the CSF reached 400mL. No significant difference in  $J$ -integral, however, was observed afterward with the increase of beating. And it appeared to be due to acceleration of the stress concentration around the crack that exists on the fiber wall of the sheet when cracks exists.

### 1. 서론

제지공장의 궁극적 목표는 우수하고 균일한 품질의 종이를 최대의 효율로 생산하는 것이라 할 수 있다. 이 목표의 달성을 위해 이제껏 새로운 초지기의 개발, 공정 개발, 원질 기술 개발 및 각종 부원료의 개발 등 다각적인 방법으로 연구가 진행되어 왔을 뿐 아니라 앞으로도 지속적인 연구가 이루어지리라 생각된다. 생산효율은 가동률과 초조율

및 제품물에 의해 결정되는 것으로 우리 나라의 경우 대개 75% 내외이며 높을 경우 83% 정도라고 알려져 있다. 생산효율 제고를 위해서는 무엇보다도 공장의 지절률을 감소시켜야 한다. 제지 공장이나 인쇄소에서 지절 발생은 지절 후 공정이 정상화 되기까지 소비되는 시간으로 인해 커다란 손실을 야기하며, 고속화된 초지기의 경우 더욱 큰 피해를 초래한다.

제지공장에서 지절은 여러 가지 요인이 복합적으

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

\* 한솔기술원 제지연구소(Institute of paper Technology, Hansol Institute of Science & Technology, Nasmyang ju, 472-850, Korea).

† 주저자(Corresponding author): e-mail: Page94@hanmail.net.

로 얽혀 발생하기 때문에 단순하게 한 가지 원인으로 규명하기 어렵지만, 일반적으로 드로우 불량, 지필강도 저하 등의 원인을 들 수 있는데, 이 중에서 종이 내에 존재하는 결함, 즉 홀이나 결속섬유 등에 의한 것이 주된 것으로 지적되었다.<sup>1)</sup> 결함이 존재하는 상태에서 외부의 힘을 받으면 이 결함 주변에 응력이 집중하게 되어 결국 이 부분부터 파괴가 일어난다. 비록 종이 자체의 강도가 높다 하더라도 결점이 있을 경우는 그 강도보다 훨씬 낮은 하중에서도 파괴되어 지질이 발생하게 되는 것이다. 즉, 무결점 시편에 행해지는 인장강도만으로는 종이의 지질 가능성을 예측하기 어려우며, 따라서 결함이 존재하는 시편에 대한 적절한 평가가 이루어져야 한다. 이러한 평가는 지질의 원인과 빈도 등의 측정된 데이터를 바탕으로 한 통계적인 방법과 더불어 공정 내 지질 발생을 예측하고 미연에 방지할 수 있는 종이 구조 및 성질을 도출하는 근거를 제시하리라 생각된다. 과거에 지질 발생을 예측하기 위한 평가 방법으로 인장강도 혹은 Elmendorf 인열강도 측정이 주로 사용되었다. 그러나, 인장강도의 측정은 앞서 언급했듯이 무결점 시편에 행해지기 때문에 적합하지 않으며, Elmendorf 인열강도는 실제 공정 내에서 종이에 가해지는 하중 모드와는 상이하고 이러한 하중 모드의 차이는 초지 조건에 따라 반대의 결과를 보여 줄 수 있기 때문에 적절치 못하다고 할 수 있다.<sup>2,3)</sup> 그러므로, 종이에 있어서도 타 재료에서 평가되고 있는 파괴 저항성의 측정이 이루어져야 한다.

파괴 저항성 또는 파괴인성(fracture toughness)은 균열이 있는 물질이 안정 혹은 불안정한 균열의 진행에 대해 견디는 정도인데, 탄성의 재료일 경우 선형탄성파괴역학(linear elastic fracture mechanics, LEFM)을 적용하여 임계 변형 에너지완화속도(critical strain energy release rate,  $G_c$ )와 응력확대계수(stress intensity factor,  $K$ )를 평가 지수로 사용한다.<sup>2,4)</sup> 그러나 종이와 같이 brittle한 성격보다는 연성을 갖는 재료의 경우 파괴 영역이 단지 균열부에 집중되지 않고 균열부가 확대될 때 물질에서 방출되는 에너지가 소성유동(plastic flow)을 통한 열로 소실되기 때문에 비탄성적 측정 지수로 평가되는 것이 바람직하다. 비탄성적인 지수로  $J$ -integral( $J_c$ )과 essential work of fracture 등이 평가되고 있는데,  $J$ -integral은 균열부의 확대 시 발생하는 잠재 에너지의 변화를 나타내는 것으로 다중시편법

(multiple-specimen method) 또는 단일시편법(single-specimen method) 등을 통해 얻은 하중-변이 곡선을 직접 해석하여 구할 수 있다.<sup>3,5-9)</sup> 종이는 두께가 매우 얇아 거의 평면성을 나타내고 구조적으로 이방성이며, 물질분포가 균일하지 않은 독특한 특성이 있기 때문에 파괴인성 측정법에 대한 정확한 기준이 아직 마련되지 않은 상태이다. 따라서 종이의 파괴인성을 평가하기 위한 적절한 시편 디자인과 시험법이 제시되어야 하며, 지질의 감소를 위해 높은 파괴인성을 가질 수 있는 종이 제조 방법에 관해서도 연구될 필요성이 있다.

본 연구에서는 종이의 초지 변수 중 밀도에 영향을 미치는 고해와 압착처리가 종이의 파괴인성에 어떻게 영향을 미치는지를 탄성변형과 소성변형을 모두 고려한  $J$ -integral을 통해 평가하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 공시재료

파괴인성 측정에 필요한 수초지를 제조하기 위하여 침엽수 표백크라프트펄프(Sw-BKP)를 공시재료로 사용하였으며, 미세분의 보류를 위해 양이온성 PAM(상품명:CD-5)을 보류향상제로 첨가하였다.

### 2.2 실험 방법

#### 2.2.1 수초지 제작

침엽수 표백크라프트펄프를 23-L Valley beater를 이용하여 685, 600, 400, 300 및 200 mL CSF가 되도록 고해하였다. 각 고해수준 별로 0.5% 이하로 희석된 지료에 보류향상제를 전건펄프 대비 0.02% 첨가한 후 사각 수초지기(20 cm×20 cm, Adirondack Machine社)를 사용하여 평량 80 g/m<sup>2</sup>이 되도록 수초하였다. 쿠치된 시트를 roll sheet press(Adirondack Machine 社)로 압착하여 실린더 건조하였으며, 이때 압착 압력은 2, 2.5, 3, 3.5, 4×100 kPa로 달리하였다. 제작된 수초지의 물성을 평가하기 위해 항온항습조건에서 조습처리하였다.

2.2.2 파괴시험

(가) 시험편 제작

조습처리된 수초지의 인장강도와 파괴인성 측정을 위해 Fig. 1에 제시된 바와 같이 dog-bone 형태로 시험편을 제작하였다. 이는 시험이 고정되는 grip의 영향을 최소화하기 위한 것으로 좌우의 길이를 길게 하였다. 시험의 인장강도와 탄성계수를 측정할 때는 균열이 없는 무결점 시험편을 이용하였으며, 본 연구에서 파괴인성의 지표로 이용된  $J$ -integral의 측정 시에는 시험 양측면 중앙부에 각각 5 mm의 균열이 있는 DEN(Double Edge Notched) 시험편을 이용하였다.

(나) 탄성계수 및 인장강도 측정

균열이 없는 시험편의 인장강도를 Instron 타입의 만능시험기(ELIE社)를 이용하여 측정하였으며, 이 때 얻어진 응력-신장을 곡선의 탄성영역 기울기로부터 탄성계수(elastic modulus)를 구했다.

(다) 파괴인성 측정

파괴인성을 측정을 위해 시험 양측면 중앙부에 5 mm의 균열이 있는 DEN 시험편을 이용하였다. 인장강도 측정 시와 같이 시험이 파괴될 때까지의 하중을 가한 후 초기 탄성부분의 기울기와 최대 하중이 걸릴 때까지의 일을 구하였다. 테스트에 사용한 strain 속도는 5 mm/min이었으며 각 시험편에 대해 다섯 반복씩 수행하였다. 파괴가 진행되는 단계별로 시험의 균열부 주위의 표면을 CCD 카메라로 관찰하였다.

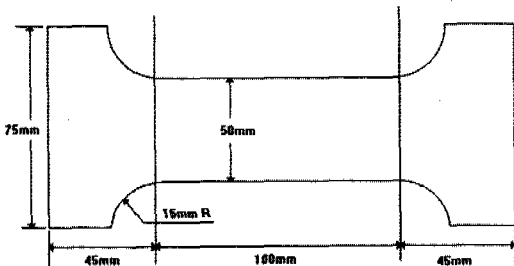


Fig. 1. Specimen geometry for the measurement of tensile strength and fracture toughness.

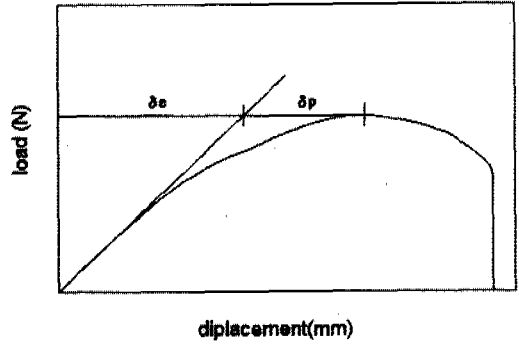


Fig. 2. Load against displacement for a notched specimen. Elastic and plastic elongations at failure are  $\delta_e$  and  $\delta_p$ .

(라)  $J$ -integral 계산

Rice 등에 의해 제시된 RPM method을 이용하여 계산하였다.<sup>6)</sup> RPM 방법은 Fig. 2에서처럼 탄성변형량과 소성변형량을 나누어 고려한 것으로 소성변형량은 균열되지 않은 시험의 길이(b)에 대한 하중(P)의 함수로 정의하였으며, 계산식은 식 (1)~(3)에 제시되어 있다.

$$J = J_e + J_p \tag{1}$$

$$J_e = \frac{K^2}{E} \tag{2}$$

$$J_p = \frac{1}{bt} (2 \int_0^{\delta_p} P d\delta_p - P\delta_p) \tag{3}$$

여기서,  $J$  : 물질의  $J$ -integral( $J/m^2$ )

$J_e$  : 탄성영역의  $J$ -integral( $J/m^2$ )

$J_p$  : 소성 영역의  $J$ -integral( $J/m^2$ )

$K$  : 응력확대계수( $N/m^{1.5}$ )

$E$  : 탄성계수( $N/m^2$ )

$P$  : 최대하중(N)

$\delta_p$  : 소성변형(m)

$b$  : 시험 내 균열되지 않은 길이(m)

$t$  : 시험의 두께(m)이다.

탄성변형 에너지인  $J_e$ 를 계산하기 위한 응력확대계수( $K$ )는 식 [4]처럼 시험의 길이와 균열 길

이의 함수로 주어지며,  $F(\frac{a}{w})$  함수는 Tada에 의해 제시된 식 [5]에 의해 계산되었다.<sup>10)</sup>

$$K = \frac{P}{wt} \sqrt{\pi a} F\left(\frac{a}{w}\right) \quad (4)$$

$$F\left(\frac{a}{w}\right) = \frac{1.122 - 0.561\left(\frac{2a}{w}\right)^2 + 0.471\left(\frac{2a}{w}\right)^3 - 0.190\left(\frac{2a}{w}\right)^4}{\sqrt{1 - \frac{2a}{w}}} \quad (5)$$

여기서, w : 시편의 폭(m)  
2a : 총균열 길이(m) 이다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 밀도에 미치는 영향

고해와 압착처리에 따른 종이 밀도의 변화가 Fig. 3에 나타나 있다. 같은 여수도 수준에서 압착 압력이 높아질수록 시트의 밀도는 선형적으로 증가하였다. 상관정도는 400 mL CSF의 여수도로 고해된 자료로 만들어진 시트를 제외하고는 대개 높았으며, 특히 고해처리가 되지 않은 685 mL CSF의 자료로 만든 종이에서 압착의 효과가 가장 크게 나타났다. 이는 본래의 형태를 거의 유지하고 있는 섬유가 압착에 의해 찌그러짐이 크게

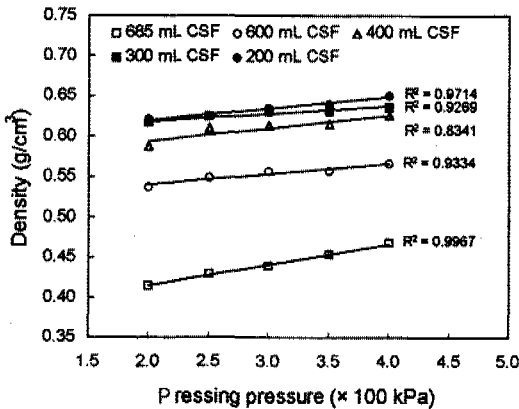


Fig. 3. Effect of pressing pressure on sheet density at various beating levels.

발생하기 때문이며, 또한 Szikla에 의해 보고된 바와 같이 압착처리가 수분을 지펠로부터 제거하여 표면장력을 발생시킴으로써 섬유가 더욱 밀접하게 접촉되기 때문이다.<sup>11)</sup> 또한 고해도가 높아짐에 따라 섬유의 절단과 피브릴화의 증가로 인해 시트의 밀도가 증가하였다. 고해수준이 낮은 상태에서 높은 상태로 갈수록 밀도의 증가폭은 줄어들었으며 고해가 과다하게 된 200 mL CSF와 300 mL CSF 수준에서의 밀도는 압착력이 높은 경우를 제외하고는 거의 비슷했다. 본 연구에 이용된 필프의 경우 고해처리에 의한 섬유간 결합 증가가 압착에 의한 효과보다 높은 것으로 나타났다.

#### 3.2 인장강도에 미치는 영향

Fig. 4는 고해도별로 압착처리가 종이의 인장강도에 미치는 영향을 보여 주고 있다. 미고해된 자료로 제조된 종이를 제외하고는 인장강도는 R<sup>2</sup>가 0.95 이상으로 압착력과 높은 상관관계를 나타내었으며, 고해도가 높아짐에 따라 인장강도가 상승하였다. 미고해 자료로 제조된 종이의 경우 압착력에 따른 밀도 상승에 비해 인장강도의 향상이 저조한 것으로 볼 때 섬유간 결합 증가보다는 압축의 효과가 더욱 크다고 판단되며, 피브릴이나 섬유의 가소성이 거의 발휘되지 않은 상태에서 압착에 의해 형성된 섬유간 접촉은 실제 강도 상승에 기여하는 바가 적은 것으로 추측되었다. 미고해 자료에

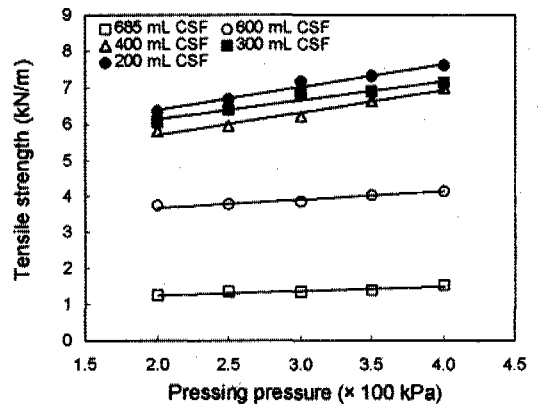
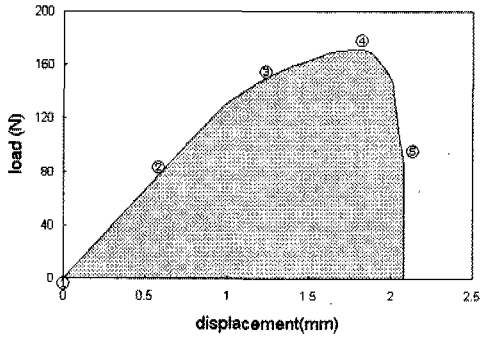
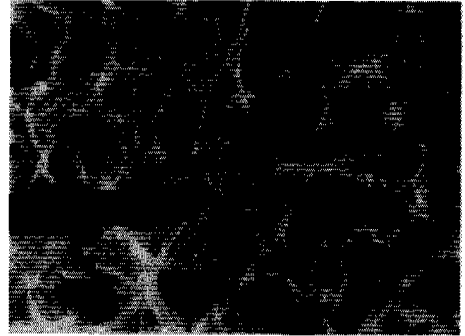


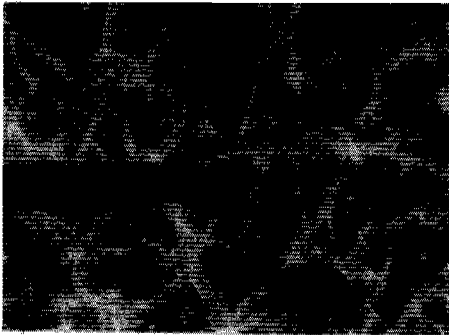
Fig. 4. Effect of pressing pressure on tensile strength at various beating levels.



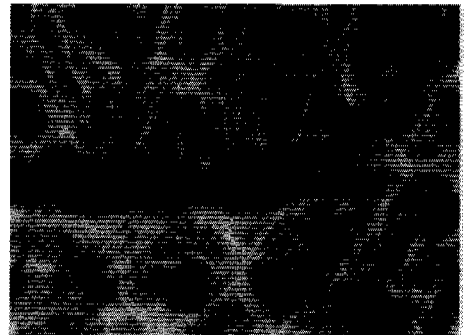
(a) Load-displacement curve



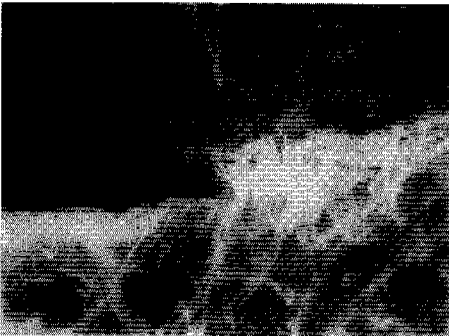
(b) step ① (×100)



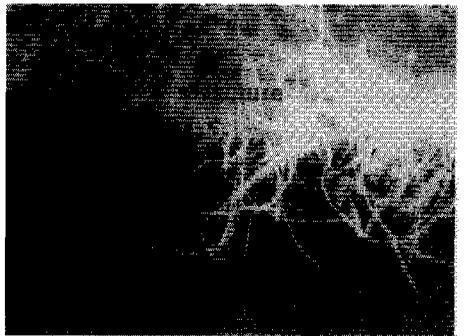
(c) step ② (×100)



(d) step ③ (×100)



(e) step ④ (×100)



(f) step ⑤ (×60)

**Fig. 5. Load-displacement curve((a)) and photographs of sheet surface around the crack at the fracture processing steps((b) - (f)).((b);at step ① (×100), (c);at step ② (×100), (d);at step ③ (×100), (e);at step ④ (×100), (f);at step ⑤ (×60).  $2a/w=0.2$ , 400 mL CSF,  $2 \times 100$  kPa.)**

비해 600 mL CSF의 여수도까지 고해된 치료로 제조된 종이의 인장강도가 월등히 상승한 것은 고해 초기에 주로 발생하는 일차 세포벽의 제거가 인장강도의 초기 향상에 영향하기<sup>12)</sup> 때문이라 판단되었다.

### 3.3 DEN 시편의 파괴 거동

여수도 400 mL CSF로 고해된 치료를 이용하여  $2 \times 100$  kPa의 압착력으로 만든 DEN 시편이 파괴될 때의 하중-변형 곡선과 각 단계에서의 종이 표면 사진이 Fig. 5에 제시되어 있다. 하중-변형

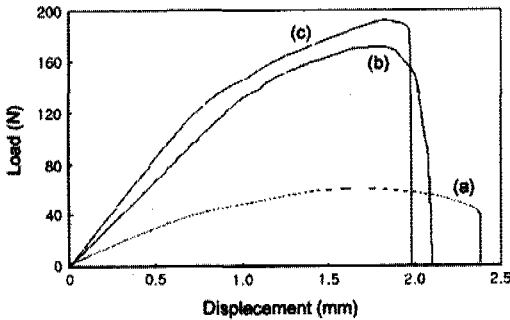


Fig. 6. Load-displacement curves for sheets made from the stocks beaten to various levels. ((a);685 mL CSF, (b);400 mL CSF, (c);200 mL CSF, crack length(2a); 10mm,  $2a/w=0.2$ .)

곡선은 다섯 단계로 나누어 고려할 수 있는데, 단계 ①은 하중이 가해지지 않은 초기 상태이며, 단계 ②는 탄성변형에 해당되는 부분이고, 단계 ③은 항복점(yield point)을 넘어 소성변형을 하고 있는 상태로서, 이 영역에선 변형에너지의 일부만이 균열 확대에 소모된다. 단계 ④는 균열의 확대가 시작되는 최대 하중점이며, 단계 ⑤는 완전한 파괴가 일어난 후의 시편 모습이다. 단계 ①부터 단계 ④까지는 100배의 확대율로 관찰하였지만, 단계 ⑤에서는 60배로 관찰하였다. 단계 ①과 단계 ② 사이에는 뚜렷한 구별이 없으나 단계 ③으로 진행되면서 균열 선단부로부터 미세한 균열이 진행됨을 알 수 있었다. 이러한 소성변형에 의한 단계 ③은 subcritical failure라고도 불리며, Uesaka 등은 이것이 안정된 균열 진행을 나타내는 것이라고 설명하였다.<sup>13)</sup>  $J$ -integral은 이러한 미세 파괴를 고려하지 않고 불안정한 균열 진행의 시작점인 최대 하중점을 균열의 확대 개시점으로 잡기 때문에 파괴인성 지수로 평가하는 데 있어서 문제점으로 지적되기도 하였다.<sup>14)</sup> 단계 ④에서 다른 영역보다 섬유가 하얗게 보이는 부분이 균열이 확대되는 진행 경로이다. 균열 선단부의 소성변형 후 응력이 섬유로 전달되면서 섬유나 섬유간 결합의 가장 약한 부분을 따라 파괴가 진행된다. 단계 ⑤는 파괴가 완전히 일어난 후 절단된 부분의 모습으로 끊어진 형태의 섬유를 발견할 수 있다. 비교적 본래의 형태를 제대로 갖춘 섬유도 보이는데 이는 섬유 자체의 파괴보다는 섬유간 결합의 파괴로 인해 빠져나온 것으로 추측할 수 있다. 섬유간 결합이 제대

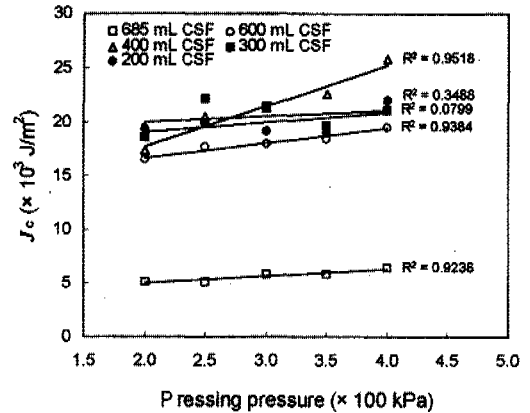


Fig. 7. Effect of pressing pressure on  $J$ -integral at various beating levels( $2a/w=0.2$ ).

로 발현되지 않은 경우 외부에서 힘이 가해지면 섬유 자체가 파괴되기보다는 섬유-섬유간 결합이 파괴된다.

Fig. 6은 고해 조건은 다르지만 모두  $2 \times 100$  kPa의 동일한 압착 압력하에서 만들어진 세 DEN 시편이 파괴되는 양상을 하중-변형 곡선을 통하여 나타낸 것이다. Fig. 6의 (a) 곡선은 미고해 펄프로서 여수도가 685 mL CSF인 지료로 제조된 종이의 하중-변형 곡선이며, (b)와 (c)는 각각 고해도 400 mL CSF와 200 mL CSF의 지료로 만들어진 종이의 하중-변형 곡선이다. 미고해 지료로 제조된 종이는 가장 낮은 강도치를 나타냈으며, 변형에 대한 하중의 초기 기울기로부터 유추할 수 있는 탄성률도 가장 낮았지만, 고해처리가 행해질수록 최대 하중과 탄성률이 증가하였다. 또한 시편의 파괴가 시작되는 최대 하중점부터 파괴가 완전하게 일어나는 지점까지의 변형은 미고해 지료의 경우 0.674 mm로서 (b)와 (c)의 0.281 mm와 0.170 mm에 비해 매우 큰 소성변형의 양상을 나타내었다. 이것은 고해수준이 증가함에 따라 섬유간 결합이 증가하고 시트가 고밀화되면서 brittle한 경향을 나타내며 외부 응력의 전달이 용이해지기 때문인 것으로 생각된다.

### 3.4 $J$ -integral에 미치는 영향

시편의  $J$ -integral 측정치인  $J_c$ 와 탄성변형에 해당되는  $J_e$  및 소성변형에 해당되는  $J_p$ 의 값을

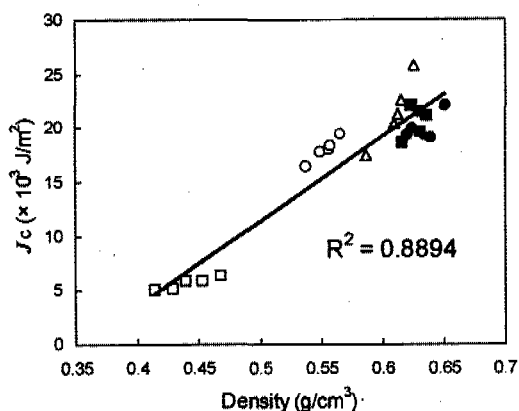


Fig. 8. Plot of  $J_c$ -integral versus sheet density ( $2a/w=0.2$ ).

Table 1에 제시하였다. Fig. 7은 고해처리와 압

착처리가  $J_c$ 에 미치는 영향을 보여주고 있다. 압착력에 대해  $J_c$ 는 비교적 선형적인 비례관계를 만족시켰지만, 고해수준이 높은 경우에는 압착력에 대한 상관관계가 매우 낮아 밀도나 인장강도와는 다른 결과를 나타내었다. 고해수준이 증가할수록  $J_c$ 는 대체로 증가하는 경향을 나타내었는데, 여수도 400 mL CSF의 치료로 만든 종이가 가장 높은 파괴인성을 가졌으며 그 이상 고해를 할 경우에는 파괴인성의 증가가 둔화되었다. 어느 정도의 고해 처리는 섬유간 결합을 증진시켜 응력의 전달을 용이하게 하지만,<sup>15)</sup> 과도하게 행해진 경우 섬유 자체에 할렬을 발생시켜 오히려 파괴인성 지수의 증가를 억제하는 것으로 생각된다. Stone 등의 연구에서 밝혀진 바와 같이 고해처리가 심해질수록 섬유벽에 원래 존재하였던 공극 외에 더 큰 크기의 균열이 발생하며,<sup>16)</sup> 이와 같은 섬유벽 균열은 인장강도 측정 시와는 달리 파괴인성의 측정을 위해 결

Table 1.  $J$ -integrals of specimens

Beating degree (mL CSF)	Pressing pressure (x100 kPa)	$J_e$ (x10 <sup>3</sup> J/m <sup>2</sup> )	$J_p$ (x10 <sup>3</sup> J/m <sup>2</sup> )	$J_c$ (x10 <sup>3</sup> J/m <sup>2</sup> )
685	2	1.0450	3.9550	5.0000
	2.5	1.0600	4.0640	5.1240
	3	1.0850	4.7350	5.8200
	3.5	1.1230	4.7680	5.8910
	4	1.0822	5.3107	6.3929
600	2	2.8810	13.6190	16.5000
	2.5	3.1640	14.5741	17.7381
	3	3.0455	14.9069	17.9524
	3.5	3.1730	15.2270	18.4000
	4	3.246	16.254	19.5000
400	2	3.8128	13.6240	17.4368
	2.5	3.8244	16.6343	20.4587
	3	3.7328	17.5498	21.2826
	3.5	4.0727	18.4898	22.5625
	4	4.3647	21.4246	25.7893
300	2	3.7191	14.8269	18.5460
	2.5	3.7231	18.3846	22.1077
	3	4.1769	17.2724	21.4493
	3.5	3.6668	15.9332	19.6000
	4	3.8348	17.2643	21.0991
200	2	4.2773	15.0739	19.3512
	2.5	4.5303	15.3697	19.9000
	3	4.3837	14.8244	19.2081
	3.5	4.3930	14.7070	19.1000
	4	4.5448	17.4847	22.0295

점을 외부에서 부여할 경우 더 낮은 하중에서 응력 집중을 가속화할 수 있으리라 생각된다. 따라서 높은 고해도에서  $J_c$ 의 증가가 둔화된 것으로 판단된다. 이러한 결과는 Uesaka 등의 PFI mill을 이용한 연구에서 유사하게 나타나는데, 그들은 고해도 증가에 따라 증가폭은 줄어들지만 계속 증가하는 열단장(breaking length)과는 달리  $J_c/\rho$ 는 증가하다가 감소하며 이는 파괴인성이 국소적인 균열 선단부 근처 응력장의 성질에 의존하기 때문이라고 설명하였다.<sup>13)</sup>

Fig. 8은 밀도와  $J_c$ 의 관계를 나타낸 것으로, 이 두 물리적 성질간에  $R^2$ 가 0.89 정도로 선형적인 관계를 보여 주지만, 앞서 언급한 이유로 인해 인장강도와 밀도간의 상관성( $R^2=0.97$ )보다 떨어지는 결과를 보여 주었다.

#### 4. 결론

침엽수 표백크라프트펄프에 다양한 고해처리와 압착처리를 가하여 초지한 종이의 밀도와 인장강도를 측정하고, 단일시편법에 의거하여 시편 양측면에 균열을 부여하여 파괴인성 지수인  $J$ -integral을 평가하였다. 그 결과 고해와 압착처리는 종이의 밀도를 증가시키고, 응력 전달을 용이하게 하여 인장강도 및 탄성률을 증가시켰다. 또한 DEN 시편의 하중-변형 곡선으로부터 저밀도지의 경우 최대 하중이 작았으며 최대 하중점부터 완전 파괴점까지의 변형이 증가함을 알 수 있었다. 종이의  $J_c$ 는 고해와 압착처리에 따라 대체로 증가하였지만 인장강도와는 달리 어느 수준 이상으로 고해될 경우 큰 증가가 억제되었으며, 이는 과도한 고해로 인한 섬유벽 균열이 응력 집중을 더욱 가속화시킨 것에 기인한 것으로 생각되었다.

#### 인용문헌

1. Roisum, D. R., Runnability of paper, Tappi J. 73(2):101-106 (1990).
2. Yuhara, T. and Kortschot, M. T., The J-integral as a parameter for characterizing the fracture toughness of paper, in "Products of Papermaking", Vol. 2., Ed. by Baker, C. F., Pira International, pp. 783-806 (1993).
3. Seth, R. S., Robertson, G., Mai, Y.-W., and Hoffmann, J. D., Plane stress fracture toughness of paper, Tappi J. 76(2):109-116 (1993).
4. Broek, D., "Elementary Engineering Fracture Mechanics", Kluwer Academic, pp. 3-31 (1986).
5. Uesaka, T., Specimen design for mechanical testing of paper and paperboard, in "Handbook of Physical and Mechanical Testing of Paper and Paperboard", Vol. 1., Ed. by Mark, R. E., Marcel Dekker, pp. 99-111 (1983).
6. Niskanen, K., Strength and fracture of paper, in "Products of Papermaking", Vol. 2., Ed. by Baker, C. F., Pira International, pp. 691-711 (1993).
7. Begley, J. A. and Landes, J. D., The J Integral as a fracture criterion, in "Fracture Toughness. Part II", ASTM STP 514, pp. 1-23 (1972).
8. Seth, R. S. and Page, D. H., Fracture resistance: A failure criterion for paper, Tappi 58(9):112-117 (1975).
9. Westerlind, B. S., Carlsson, L. A., and Andersson, Y. M., Fracture toughness of liner board evaluated by the J-integral, J. of Materials Science 26:2630-2636 (1991).
10. Tada, H., Paris, P. C., and Irwin, G. R., "The Stress Analysis of Cracks Handbook", Del Research, 2.6-2.7 (1973).
11. Szikla, Z., and Paulapuro H., Compression behavior of fiber mats in Wet Pressing, in "Fundamentals of Papermaking", Vol. 2., Ed. by Baker, C. F., Mechanical Engineering Publications, pp. 587-624 (1989).
12. Clark, J. d' A., "Pulp Technology and Treatment for Paper", Miller Freeman Publications, pp. 277-295 (1985).
13. Uesaka, T., Okiniwa, H., Murakami, K., and Imamura, R., Tearing resistance of paper and its characterization, J. Japan Tappi 33(6):39-45 (1990).
14. Mai, Y.-W. and Powell, P., Essential work of fracture and J-integral measurements for



- ductile polymers, *J. Polymer Science:Part B:Polymer Physics*, 29:785-793 (1991).
15. Shallhorn, P. M., Fracture resistance-Theory and experiment, *JPPS*, 20(4):J119-J124 (1994).
16. Page, D. H., The beating of chemical pulps-The action and the effects, in "Fundamentals of Papermaking", Vol. 1., Ed. by Baker, C. F. and Punton, V. W., Mechanical Engineering Publications, pp.1-38 (1989).