

# 초지지절 및 인쇄지절

박종문

충북대학교 산림과학부

초지와 인쇄시의 지절은 생산성 또는 운전성의 저하를 야기하므로 최소화해야 한다. 지중에 따라 초지조건이 달라지므로 종이에 가해지는 인장력, 함수율, 초지속도 등을 고려해야 한다. 종이에 있어서 결점 부근에서 일어나는 항복(yield)과 파괴현상을 파괴역학적 관점에서 연구한 바 있다<sup>1)</sup>. 초지공정은 섬유 매트 또는 습지에서 점차적으로 수분이 제거되는 과정이며, 인쇄공정은 종이에 물이 가해지는 과정이 있으나, 파괴 인성 측면에서 동일한 이론을 적용할 수 있다. 박과 이<sup>42, 43)</sup>는 초지시 섬유의 특성, 미세분의 종류 및 함량에 따른 인장 특성 및 파괴 특성에 관한 연구에서 Sw-BKP의 경우 섬유의 파괴가 유도되고, Hw-BKP의 경우 결합면의 파괴가 유도되는 것으로 나타났으며, 미세분 특성에 따른 시험 결과 파괴 인성은 섬유간 실제적 결합이 유도되는 경우 파괴 인성의 향상을 가져올 수 있는 것으로 나타났다. 파괴 역학은 결점 부위의 응력집중 현상에 따른 독특한 파괴 거동으로 지합등과 같은 응력 확산 효과를 기대할 수 없기 때문에 섬유간 실제적인 결합에 직접적으로 의존한다고 할 수 있다.

## I. 서론

초지와 인쇄, 가공공정 중의 운전성(runnability)은 항상 펄프제지산업의 관심사항이었다. 몇 개의 리뷰 논문들이 발표되었다. Niskanen<sup>2)</sup>은 종이의 강도와 파괴(fracture)에 대하여 즉 섬유, 결합, 강도의 상관관계를 리뷰하였다. 지필의 인장하중과 파괴빈도에 대해서도 설명하였다. 그 외에도 Kortshot(2), Mäkelä<sup>3)</sup>, Roisum<sup>5, 6)</sup>도 종이의 운전성에 대하여 리뷰하였다.

지절의 원인은 상당히 하찮은 것임을 기억해야 한다. 물지는 운반과 취급에 의해서 손상을 입기도 한다. 물과 직접 접촉하거나 급격한 온도변화에 의해 응축수에 직접 접촉하여 손상을 입는다. 스프라이싱(splicing) 중에 테이프가 잘못 접착되면 지절된다. 그러한 많은 원인들은 제지공장을 깨끗하게 하고 작업장 바닥을 청소하고 정리하면 운전성을 향상시킬 수 있다. 종이가 이송되고 운송되는 경로를 따라 점검하고 규정을 세워 지키면 좋다. 운송하는 컨테이너 바닥에 자갈을 피하고, 트럭에서 종이를 묶는 조임압력(clamping pressure)을 적절히 조절해 주어야 한다. 그러나 아무리 조심해도 지

필에 손상된 부분이 있거나 약한 지점이 항상 있다. 따라서 지필에 가하는 인장하중 조건에서 지절발생이 예측되는지 분석할 수 있는 파괴역학(fracture mechanics)을 사용해 보는 것은 의미가 있다.

종이의 운전성을 향상시키기 위해서는 종이의 인장강도, 인열강도 또는 파괴인성을 증가시키면 될 것이라는 가정 하에서 많은 연구가 진행되어 왔다. 따라서 이 논문에서는 이러한 가정을 따져보고, 운전성을 향상시키기 위해서는 파괴가 일어나는 가공 또는 인쇄공정의 공학적 분석을 해보고자한다. 그러한 분석을 위해서는 지필응력(web stress), 결점크기의 분포와 종이의 기계적 성질이 중요한 영향인자이다.

## II. 인쇄소 지절과 종이의 특성

제지공장의 운전성 향상을 위한 대부분의 실제적인 노력들은 인열강도, 인장강도 또는 파괴인성 같은 하나 또는 몇 가지의 강도적 특성을 향상시키는 것이다. 종이의 강도적 특성과 인쇄소 지절횟수의 연관성을 분석한 바도 있었다. Page와 Seth<sup>7)</sup>는 캐나다의 인쇄지절을 심도 있게 분석하였다. 지절은 상당히 드문 현상(1-2회 지절/100롤)이기 때문에 무작위 통계학(random statistics)을 적용받으므로 통계학적으로 의미가 있는 데이터를 얻기 위해서는 상당히 많은 수의 롤을 가지고 측정해야만 한다. Page와 Seth에 의하면 단기간 동안에는 데이터에 큰 변이가 있어서 지절횟수 데이터를 해석하기 어렵고, 장기간에 있어서는 지절횟수에 많은 영향인자들이 서로 영향하므로 역시 해석이 어렵다고 하였다. 장기간에 걸친 영향인자에는 인쇄소 실내습도의 연간 변화가 있는데, 겨울동안 종이가 더욱 건조해지고 딱딱해져서(brittle) 지절이 상당히 증가한다고 하였다(Fig. 1).

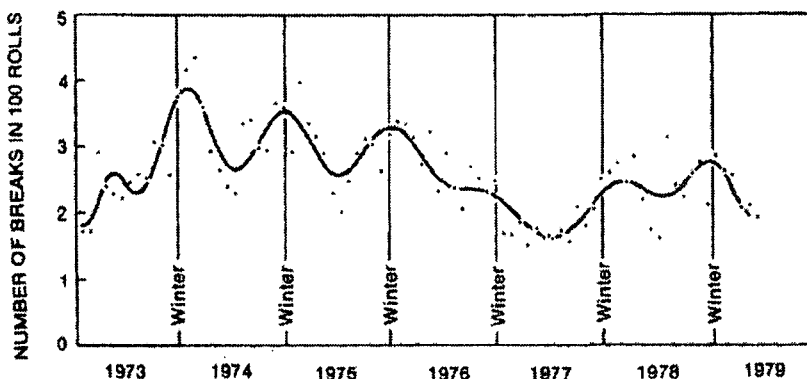


Fig. 1. 계절 변화와 지절횟수.

Page와 Seth에 의하면 동일한 제지회사에 의해 생산된 지절된 롤과 지절되지 않은 롤의 강도차이는 없었다고 한다. 그러나 서로 다른 회사에서 생산한 종이를 15개월간 인쇄소에서 분석하였더니 파괴저항이 높은 종이의 운전성이 우수하였다(Fig. 2). Moilainen과 Lindquist<sup>8)</sup>는 서로 다른 제지회사에서 생산한 종이를 분석하였더니 지절이 일어난 롤의 파괴인성이 낮은 경향이 있다고 하였다.

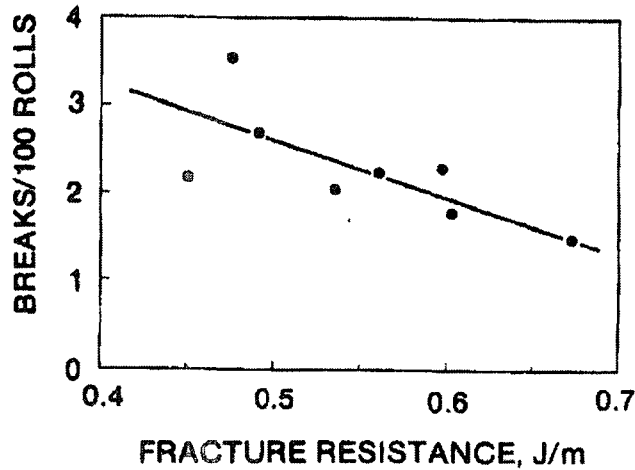


Fig. 2. 파괴저항과 지절횟수.

Uesaka *et al.*<sup>9)</sup>은 3년 동안 3개의 인쇄소에서 운전성을 통계학적으로 분석하였는데, 지절율과 종이의 특성의 상호관계를 조사하였다. 인장강도가 높고 MD 신장(stretch)이 증가하면 지절율이 감소하였고, CD 인열강도와 크라프트 펄프 함량은 큰 영향을 주지 않았다.

결론적으로 지절횟수와 종이특성의 직접적인 관련성을 밝힌 논문의 수가 적다고 볼 수 있다. 그 이유는 매우 많은 롤을 실험해야만 통계학적으로 유의성이 있기 때문이다. 마치 파괴인성, 인장강도, 신장율이 증가하면 지절율이 감소하는 마이너스의 연관성이 있는 것 같다. 그러나 그러한 특성을 향상시켜도 운전성 향상에는 효과가 적은데 그 이유는 운전성이 공정 디자인(process design)과 원료에 의해 많이 좌우되기 때문이다. 인열강도가 향상되면 운전성이 향상된다고 보고한 논문은 없다고 판단된다.

### III. 인장강도 변이와 지절

Weibull<sup>10)</sup>은 통계학적으로 구조가 큰 물체는 작은 물체보다 인장강도가 낮다고 보고하였다. 이러한 현상을 “the weak link effect”라고 자주 일컬어지는데 간단히 말하

면 모든 물체는 약한 부분에서 파괴되므로 큰물체일수록 더 약한 부분이 있을 수 있는 확률이 높다는 것이다.

문헌<sup>11)</sup>과 파괴역학 이론에 의하면 파괴는 테두리 끝(edges)에서 더 자주 시작된다고 한다. 물론 물체의 내부에서 파괴가 시작될 수도 있다.

Swinehart(24)는 linear elastic fracture mechanics(LEFM)과 Weibull shaped flaw size distribution을 결합하여 도공기에서의 지질을 분석하였다. 파괴인성을 측정하고 온라인으로 구멍 수(hole count)를 측정하여 운전성 예측 모델을 만들었다. 종이의 폭이 30 mm 이상 되어야 샤프트와 같은 작은 테두리 결점(edge defects)에 의한 심각한 기하학적 영향을 피할 수 있다고 하였다. Uesaka<sup>9)</sup>, Hristopolous<sup>13)</sup>는 Weibull distribution을 강도분포 커브 중 낮은 강도부분에 맞춰서 운전성을 예측하였다. 그 결과 지질횟수에 가장 큰 영향을 끼치는 인자는 Weibull modulus(m)인 것이 밝혀졌다.

Weak link statistics에 대한 비평으로는, 비교적 작은 크기의 시료를 측정하여 얻은 강도 결과를 사용하여 weak link statistics를 적용할 때, 종이의 지질을 야기하는 원인이 구멍이거나 찢어진 부분(cuts)일 때, 샤프트나 지합에 의한 강도의 변이에 근거하여 구멍이나 찢어진 부분의 수 또는 크기를 예측할 수 없다는 것이다.

#### IV. 인쇄지질의 공학적 분석

좀 더 완벽한 인쇄지질의 운전성을 분석하기 위해서는 물체의 파괴에 영향한다고 알려진 3가지 인자를 살펴보아야 하는데, 그것은 (1) 응력, (2) 결함크기, (3) 파괴인성이다. 지질에 관련하여 파괴역학을 적용하는 경우에는 (1) 종이의 파괴인성 측정, (2) 종이의 응력상태(stress state)의 측정, (3) 결점크기 분포(defect size distribution)의 측정문제로 한계가 있었다. 그러나 지난 20년 동안 많은 발전이 이뤄졌다. 이번 논문에서는 그러한 발전을 설명하고, 미래에 어떻게 파괴역학을 운전성 연구에 사용할 것인지에 대하여 설명하고자 한다.

##### 1. 결점(defects)

종이의 약한 지점의 원인들이 밝혀진바 있다. Adams<sup>14)</sup>는 신문용지의 지질의 원인을 Fig. 3과 같이 보고하였다. 그동안 샤프트<sup>14-21)</sup>에 대해 가장 많은 관심을 가지고 있었다. 오래전에는 샤프트 수와 지질의 상관관계가 분명히 있었다. 그러나 현대에는 정선기술이 발전되어 샤프트와 지질의 관계가 얼마나 있을지는 의문이다. 마신 칼렌다는 일반적으로 고평량 부분의 종이강도를 저하시킨다. 샤프트는 지역적으로 평량을 높이는 효과가 있어서 그 지역의 강도를 떨어뜨린다. 따라서 샤프트가 있는 자리는 작은 금(slits)처럼 된다. Eriksson *et al.*<sup>22)</sup>에 의하면 일반적인 인쇄공정 중에 테두리 결점

(edge cuts)에 의해 지절이 되려면 최소한 그 길이가 23 mm가 되어야 한다고 한다. 따라서 샤프나 기타 작은 결함은 일반적인 지필 장력 조건 하에서 별로 중요하지 않다.

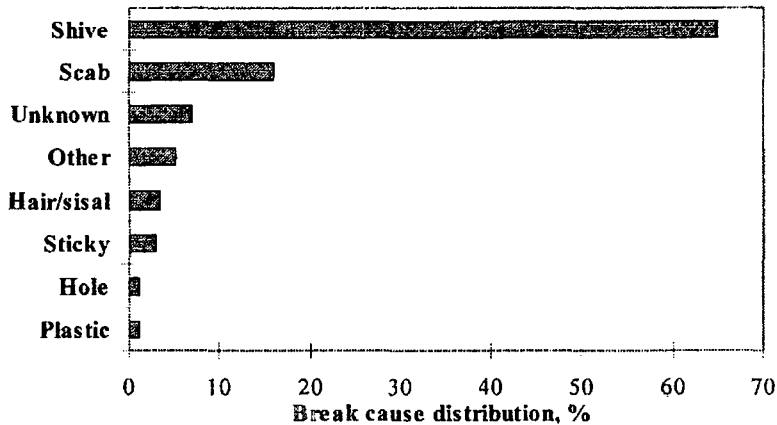


Fig. 3. 지절의 원인.

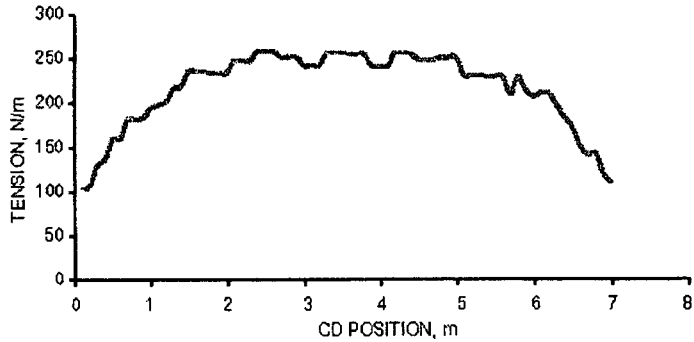
구멍(holes)은 응력집중의 원인이 되어 지필의 강도를 떨어뜨리므로 점점 더 많은 제지공장들<sup>23)</sup>이 온라인 구멍검출시스템(hole detection system)을 설치하고 있다. 비디오 카메라를 설치하여 지절시 어떤 결점이 원인이 되는지 살펴보는 것은 좋은 방법이다.

## 2. 지필 인장력(web tension)

초지기 전폭을 봤을 때 끝부분(edges)에서 지필 인장력이 낮은 것을 자주 볼 수 있다(Fig. 4). 그럴 경우 롤지로 감으면 한쪽은 팽 조이고 다른 쪽은 느슨한 롤이 된다. 두께, 평량 또는 함수율이 주변과 달라 줄(streaks)이 생기면 인쇄소에서 롤을 풀 때 CD에서의 지필장력이 불균일하게 된다. Flying splices 때문에 그리고 찌부러진 롤(un-round roll) 때문에 지필 인장력이 최대값에 도달한다.

Fig. 4. 지폭에 걸친 인장력 분포.

MD방향으로의 지필 인장력뿐만 아니라 인쇄 nip)에서 나올 때 종이의 두께방향(ZD)으로 접착력(tack forces)이 생기고, 고정된 장치를 지날 때에는 지필에 마찰력이 부여된다. 그러한 마찰력 때문에 테두리가 찢어진(edge cut) 경우에는 지필의 일부가 동일 평면에서 밖으로 튀어나오게 되는 원인이 되기 때문에 중요하다(Fig. 5). 느슨한 테두리 때문에 테두리가 떨락이는(edge flutter) 현상이 발생하여 팽팽한 지필부분에서 급격한 인장변화가 생길 수 있다. 또한 지필과 동행하는 ~10 m/s 정도의 공기층이



넘에 들어가서 복잡한 응력상태가 되게 한다.

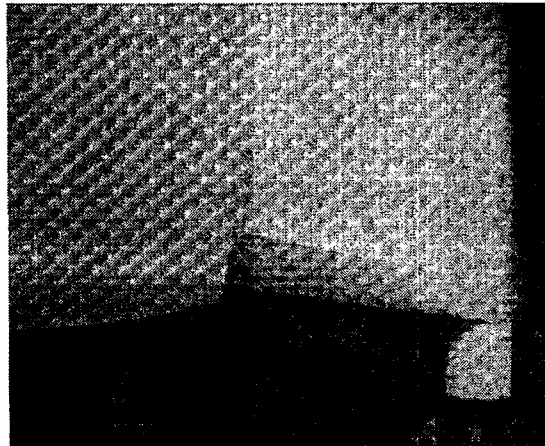


Fig. 5. 고정된 장치와 가이드 롤을 찢어진 부분이 지날 때 마찰력에 의해 테두리가 밖으로 돌출되는 현상.

종이의 운전성 이해에 있어서 지필 인장력 상태의 측정 또는 계산은 현대에도 가장 어려운 부분이다. 대부분의 제지기술자들이 롤의 지필 인장력을 모르고 있다는 것이 큰 장애물이다. Fig. 4와 같은 지필 인장력분포 때문에 테두리 부분의 롤지에서 운전성의문제가 발생하는 것으로 보인다.<sup>24)</sup>

#### 가. 실험실적 리와인더의 운전성 실험

지절횟수와 지필 인장력은 로그관계가 있다.<sup>11, 14, 25)</sup>(Fig. 6). Gregersen<sup>26)</sup>은 지필의 지절이 Weibull이론을 따르기 때문에 로그관계가 있다고 한다.

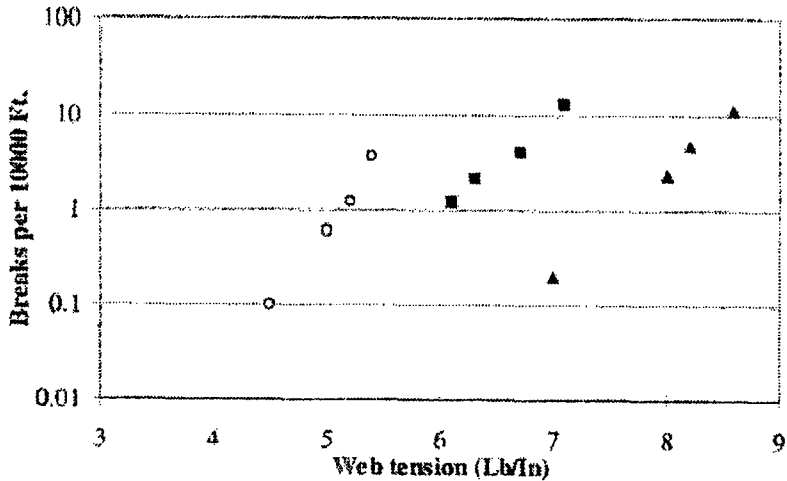


Fig. 6. 지필 인장력(Lb/In)과 지절횟수(breaks per 10000 Ft).

### 3. 파괴인성

결점의 크기, 응력상태와 함께 파괴인성(fracture toughness)을 알아야 지절을 예측할 수 있다. 파괴역학은 Griffith<sup>27)</sup>의 선구자적 연구 이래로 일반적인 고체역학(solid mechanics)에 성공적으로 이용되어 왔다.

#### 가. LEFM

탄성체에 대한 파괴역학을 LEFM이라고 한다. 하중을 받을 때 크랙주변의 응력과 변형율을 완전히 묘사하는 응력집중지수(stress intensity factor) 특히 mode I의 경우인  $K_I$ 를 유도할 수 있다.

$$K_I = \sigma_{gen} \times (\pi \cdot a)^{1/2} \times f(\text{geometric parameters}) \quad (1)$$

여기서  $\sigma_{gen}$ 은 전체 시료에 가한 응력이고,  $a$ 는 동일한 크랙이 양끝에 있을 때의 길이 또는 중앙 크랙의 경우 절반의 길이이고,  $f$ 는 시료의 크기, 크랙의 형태와 위치에 의해 결정되는 함수이다. 크랙 주변의 응력과 변형율을 완전히 묘사할 수 있는 응력집중지수  $K_I$ 를 구할 수 있다면 크랙이 커지는 순간의  $K_{cr}$ 과 비교하여 파괴의 판단기준으로 생각할 수 있다.

$$K_I \geq K_c \quad (2)$$

이 때 물체에 따라 다른 특정한 값인  $K_{cr}$ 을 물체의 고유특성인 파괴인성이라고 한다. 완벽한 탄성물체는 없으며, LEFM은 소성지역이 물체크기에 비해 상당히 작아야만 적용할 수 있다.

#### 나. J-integral

파괴시 소성지역이 상당히 커지면 LEFM의 한계에 도달하게 된다. J를 측정하는 방법은 몇 가지가 있다. 유도된 J 정의식과 FEM모델을 이용하여, 복잡한 응력-변형률 관계를 나타내는 결점이 있는 물체의 J-integral을 직접 계산하는 것이 가장 좋은 방법인 것으로 판단된다.

#### 다. Essential work of fracture

파괴시 소성지역이 매우 큰 물체에 있어서, 비가역적 일(irreversible work)  $W_f$ 를 필수요소(essential part)  $W_e$ 와 비필수요소(nonessential part)  $W_p$ 로 나눌 수 있다 (Cottrell<sup>28)</sup>)는 이론에 근거하여 측정하는 방법이다.

$$W_f = W_e + W_p \quad (3)$$

#### 라. 종이와 파괴역학

Mäkelä<sup>4)</sup>와 Swinehart<sup>41)</sup>에 의하면 파괴를 이해하기 위해  $J_c$ 만으로는 물체의 파괴 여부를 판단하기 어렵고 응력-변형률 곡선을 알아야 한다고 한다. Wellmar<sup>29)</sup>는 소형 시료를 이용하여 J-integral에 기초한 FM으로 큰 종이의 한계하중(critical load)과 한계신장(elongation)을 예측할 수 있다고 한다. Fellers<sup>30)</sup>는 파괴인성을 직접 이용하는 것보다 한계하중과 한계신장으로 판단할 것을 추천하였다.

### V. 파괴역학의 응용

그동안 파괴역학을 많이 연구하여 새로운 파괴인성 측정방법을 개발하고 종이에 적용하게 되었다. 실험재료의 크기에 따라 파괴인성 측정값이 달라지지 않아야하고, 모든 지중에 다 적용할 수 있어야 한다. LEFM은 매우 큰 시료가 필요하며, MD의 신문용지처럼 부서지기 쉬운(brittle) 지중에만 적용이 가능하다. EPFM(J-integral)은 모든 지중에 잘 적용된다. EWF(essential work of fracture) 방법은 매우 인성이 강한 종이에 적용할 수 있도록 개발되었는데, 이 방법은 LEFM나 EPFM만큼 이론적 기초가 탄탄하지 못하며, 해당 측정방법에서 사용한 시료의 형태가 아닌 다른 형태의 시료에



대한 한계하중과 한계변형을 미리 예측하는 것에는 적합하지 않다.

실험방법을 채택하고, 측정된 다음 단계는 파괴역학적 측정결과를 적용하여, 다양한 크기와 모양의 종이에 대하여 파괴 당시의 파괴하중과 파괴신장율을 예측할 수 있는가 하는 것이다. 이러한 작업을 Wellmar et al.<sup>29)</sup>이 J-integral 방법에 대하여 발표하였다.

초지공정의 변수 즉 고해, 상대습도 등 주변 환경, 섬유장과 섬유자체가 절단되는 비율, 강도향상용 섬유의 혼합율, 펄프의 형태적 차이 등에 대하여 많은 연구가 있었다. 그러나 초지공정 변수에 따라 파괴인성과 응력-변형을 곡선 2가지가 모두 동시에 변하기 때문에 결론을 내리우므로 이러한 연구는 바람직하지 않다. 그 대신에 파괴시의 하중과 파괴시의 신장율을 연구하여야 하며, 파괴시 실제 사용되는 크기의 종이 구조(structure)가 어떻게 되는지를 연구하여야 한다. 이러한 방향의 연구로 기계펄프 함유 인쇄용지의 강도특성에 영향을 주는 강도향상용 펄프배합비와 섬유의 특성에 대하여 Fellers et al.<sup>30)</sup>이 실시한바 있다.

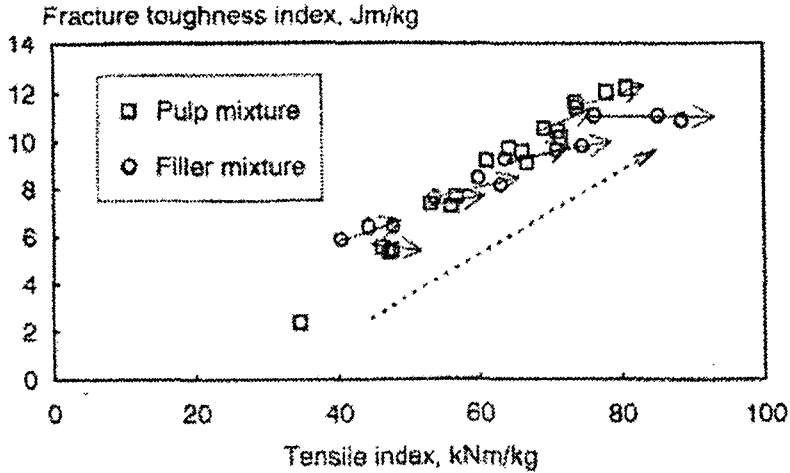
### 1. 파괴역학을 응용한 종이품질의 최적화

종이의 파괴인성을 최적화함으로써 종이의 운전성을 최적화시키려고 하는 연구가 몇 개 있었다. 고해처리를 달리하거나 펄프혼합비를 달리하면서 파괴인성을 직접 측정하는 방법도 있지만, 한계하중과 한계변형을 최적화함으로써 운전성을 최적화시키는 것이 바람직하다.

#### 가. 고해

강도향상을 위한 화학펄프의 고해에 대하여 가장 많은 연구가 이루어졌다. Seth<sup>31)</sup>는 CP를 고해할수록 파괴인성이 증가하므로 탈수특성이 허용하는 한 높은 인장강도가 발휘되도록 고해할 것을 추천하였다. Fellers et al.<sup>30)</sup>에 의하면 TMP와 KP를 혼합하여 초지하였을 때 KP를 고해할수록 파괴인성이 증가하였지만, KP섬유가 직선인지 켄이 되었는지가 훨씬 더 중요하였다. Koskinen et al.<sup>32)</sup>은 파이로트 코타로 실험실 규모로 운전성을 연구하였는데, CP의 고해정도와 첨가율의 효과를 분석하였다. TMP와 GW(쇄목펄프) 원지를 도공 하였을 때 원지의 holes와 cuts의 영향을 분석하였다. 고해를 더 많이 한 KP가 적게 한 KP보다 결점이 있는 종이(damaged sample)의 한계하중을 증가시켰다. Seth와 Page<sup>33)</sup>에 의하면 침엽수 UBKP, 침엽수 BKP, 침엽수 BSP(표백 아황산펄프) 모두 고도로 고해할 때까지는 파괴인성이 증가하여 최대값에 도달한다고 하였다. 그러나 활엽수 BKP는 고해하면 할수록 단순하게 계속 파괴인성이 증가하였다. Åström et al.<sup>34)</sup>은KP와 SGW를 혼합초지하였을 때, KP를 고해할수록 파괴인성이 약간

씩 증가한다고 하였다 (Fig. 7). 그러나 Hiltunen<sup>35)</sup>은 TMP와 KP를 혼합초지하였을 때 고해의 진행에 의해 한계하중과 한계변형이 증가하지 않았다고 한다. 이러한 결과를 보면 TMP와 KP를 혼합초지하였을 때는 KP의 고해가 파괴인성에 미미한 영향을 끼친



것이라고 생각한다.

Fig. 7. KP와 SGW를 혼합초지하였을 때, KP 고해정도와 파괴인성.

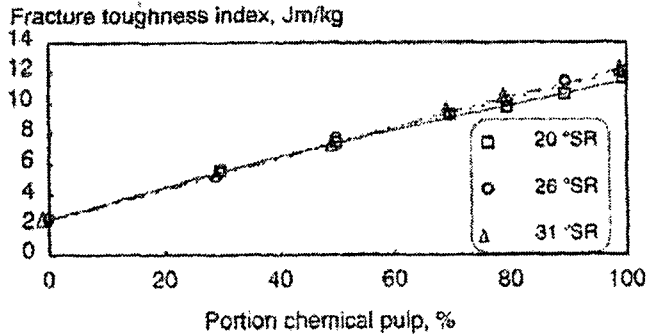
나. KP 배합비 조절

Fellers *et al.*<sup>30)</sup>은 KP와 TMP 섬유를 혼합하여 제조한 종이의 파괴인성은 KP 배합비를 증가시킬 때 파괴인성, 한계하중(critical load)과 한계변형(critical strain)이 매우 크게 증가한다고 발표하였다. 증가율이 처음 10%를 첨가했을 때가 가장 큰 효과를 나타내었다. Shallhorn<sup>36)</sup>은 침엽수 KP와 쇄목펄프(GP)를 혼합하여 초지하였을 때 처음 20%를 첨가했을 때 가장 큰 효과가 있었다고 하였다. Krenlampi *et al.*<sup>38)</sup>과 Åström *et al.*<sup>34)</sup>은 J-integral이나 EWF(essential work of fracture)방법으로 측정된 파괴에너지가 모두 강도강화(reinforcement) 펄프 첨가에 따라 직선적으로 증가한다고 발표하였다(Fig. 8). 강도강화 펄프를 소량 첨가했을 때 인장강도 향상 효과는 거의 0인데 파괴인성은 직선적이거나 또는 오히려 약간 더 좋은 효과가 나타나는 것은 매우 흥미로운 사실이다.

Fig. 8. 강도강화(reinforcement) 펄프 첨가량에 따른 파괴인성의 변화.

다. 충전제 함량 조절

Åström *et al.*<sup>34)</sup>은 탄산칼슘 첨가량 1% 증가에 따라 파괴인성이 약 1.5% 감소된다고 발표하였다.



### 라. KP 특성 조절

Eriksson *et al.*<sup>22)</sup>은 TMP에 10종류의 시중 판매 KP를 강도향상용으로 사용하여, 동일한 밀도로 압착하여 초지하였을 때 한계하중이나 한계변형의 변화가 없었다고 한다. 그러나 Seth<sup>37)</sup>는 x축에 인장강도를, y축에 파괴인성을 나타내었을 때, 강도향상용 펄프로 세포벽이 얇은(fine) 섬유를 사용했을 때 세포벽이 두꺼운(coarse) 섬유를 사용했을 때보다 파괴인성이 더 높았다고 한다(Fig. 9). 세포벽이 두꺼운 섬유의 조도는  $241 \mu\text{g}/\text{m}$ 이고 세포벽이 얇은 섬유의 조도는  $125 \mu\text{g}/\text{m}$ 이었다. Fellers *et al.*<sup>30)</sup>은 직선으로 고해된 섬유는 한계하중이 가장 높았고, 길이 형성된 섬유는 한계변형이 가장 높았다고 한다. 혼합초지 하였을 때 Kärenlampi *et al.*<sup>38)</sup>은 세포벽이 두꺼운 장섬유가 어린 침엽수에서 얻은 세포벽이 얇은 단섬유보다 파괴인성을 약간 증가시킨다고 보고하였다.

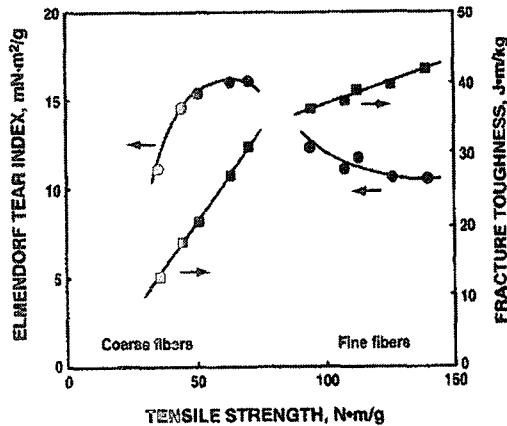


Fig. 9. 세포벽이 두꺼운 섬유보다 얇은 섬유의 파괴인성이 높다.

마. 압착부 조절

Shallhorn<sup>36)</sup>은 칩엽수 크라프트 펄프로 제조한 종이의 활엽수 크라프트 펄프로 제조한 종이 모두가 압착 하중이 증가할 때 파괴인성이 증가한다고 한다.

바. 광택처리 조절

Shallhorn<sup>36)</sup>은 칩엽수 크라프트 펄프로 제조한 종이의 밀도가 광택처리에 의해 0.7 g/cm<sup>3</sup>보다 증가하면 파괴인성이 급격히 하락한다고 하였다(Fig. 10).

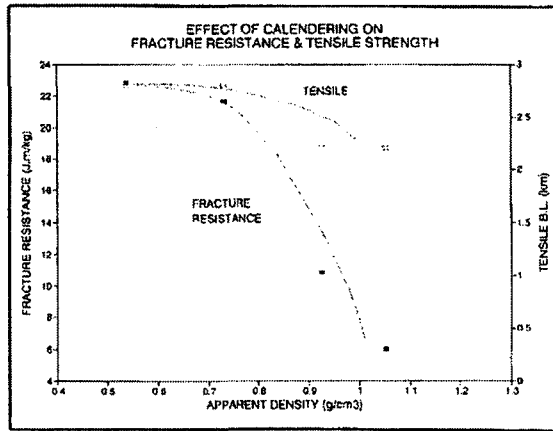


Fig. 10. 광택처리에 의한 종이의 밀도 변화에 따른 파괴인성.

사. 함수율

Steadman and Fellers<sup>39, 40)</sup>과 Shallhorn<sup>36)</sup>에 의하면 주변 공기의 상대습도가 변함에 따라 종이의 함수율이 변할 때, 종이의 함수율이 증가하면 파괴인성도 증가한다고 한다(Fig. 11).

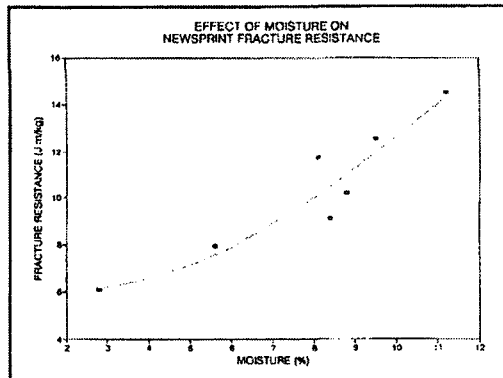


Fig. 11. 신문용지의 함수율에 따른 파괴인성.

## 2. 최종용도 사용시 종이의 거동 예측

J-integral 측정방법에 의한 파괴인성 값을 구하면 모든 형태의 결점에 대하여 한계하중과 한계변형을 계산할 수 있다. Wellmar *et al.*<sup>29)</sup>은 이와 같은 방법으로 중앙 및 테두리에 크랙이 있는 50 cm × 100 cm의 신문용지와 크라프트 포장용지(sack paper)에 대하여 버클링(buckling)이 일어나지 않도록 가이드를 설치하고 연구하였는데, 한계하중과 한계변형에 대한 이론값과 실험값이 모두 잘 일치하였다.

## VI. 운전성 연구에 있어서 미래의 파괴역학의 응용

종이의 운전성에 대해 아직 많이 적용되지 않은 분야로, 파괴역학을 흥미롭게 적용할 수 있는 분야는 sensitivity analysis이다. 즉 결점의 크기, 지필의 장력, 파괴인성이 서로 어떤 상관관계를 가지고 영향을 끼치는지 계산해 보는 것이다. 제지공장의 현장에서 종이의 한계변형 또는 한계하중을 증가시키거나, 결점의 수와 크기를 줄이거나, 지필의 장력 프로파일을 균일화하거나 3가지 방법 중 어떤 것이 가장 투자비에 대한 효과가 클 것인지 분석할 수 있게 해준다.

인쇄시에 지필이 처한 상황이 한계에 도달할 때, 그 한계가 지필 장력(web tension)인지 지필 신장율(web elongation)인지 따져 보는 것이다. 흔히 2가지가 혼재하는데, unwinding 단계에서는 지필 장력 상태이지만, 일단 첫번째 인쇄를 통과하면 지필 신장율의 상황으로 바뀐다. 이것을 알아야 한계하중을 향상시킬지 한계변형을 향상시킬지 전략을 세울 수 있게 해준다.

## 사사

본 논문은 본인의 연구 결과를 토대로 다음의 리뷰 논문을 요약, 번역하였음을 알려드립니다. Gregersen, Ø. W., Runnability, fracture and pressroom breaks, *Advances in Paper Science and Technology*, 13th Fundamental Research Symposium, (ed. S. J. I'Anson), pp. 797-825, Cambridge, UK, Sept. 2005.

## 참고문헌

1. Park. J.-M., Yield and Fracture Study of Paper, PhD Thesis, State Univ. of New York, Syracuse, USA, 1993.
2. Niskanen, K., Strength and fracture of paper, Products of papermaking, Trans. 10th Fund. Res. Symp., (ed. C. F. Baker), pp. 641-725, PIRA Int'l., Surrey, UK, 1993.
3. Korshot, M. T., Fracture of paper, Handbook of Physical Testing of Paper, Vol. 1, 2nd ed., pp.

429-481, 2002.

4. Mäkalä, P., On the fracture mechanics of paper, *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 17(3):254-274(2002).

5. Roisum, D. R., *Runnability of paper*, 1989 Finishing and Converting Conference, pp. 41-57, Kansas City, MO, USA, Tappi press, Atlanta, 1989.

6. Roisum, D. R., *Runnability of paper Part 2: troubleshooting web breaks*, Tappi J., 73(2):101-106(1990).

7. Page, D. H., and Seth, R. S., The problem of pressroom runnability, Tappi J., 65(8):91-95(1982).

8. Moilainen, P., and Lindquist, U., Web inspection in the printing press - Research under the Finnish technology program, Tappi J., 79(9):88-94(1996).

9. Uesaka, T., Ferahi, M., Hristopoulos, D., Deng, N., Moss, C., Factors controlling pressroom runnability of paper, *The science of papermaking*, Trans. 12th Fund. Res. Symp., (ed. C.F. Baker), pp. 1423-1439, FRC, Lancashire, UK, 2001.

10. Weibull, W., *A statistical theory of the strength of materials*, Ingeniörvetenskapsakademiens handlingar, Vol. 151, pp. 1-45, 1939.

11. Sears, G. R., Tyler, R.F., Denzer, C. W., Shivers in newsprint: The role of shives in paper web breaks, *P. & P. Can.*, 66(7):T351-360, 23(1965).

12. Swinehart, D. E., and Broek, D., Tenacity, fracture mechanics, and unknown coater web breaks, Tappi J., 79(2):233-237(1995).

13. Hristopoulos, D. T., and Uesaka, T., Factors that control the tensile strength distribution in paper, 2003 Int'l. Paper Physics Conf., Victoria, BC, Canada, pp. 5-17, 2003.

14. Adams, R. J., and Westlund, K. B., Off-line testing for newsprint runnability, 1982 Printing and Graphic Art Conf., pp. 13-18, 1982.

15. Gregersen, Ø. W., Hansen, Å., Tufa, L. D., Helle, T., The influence of fiber shives on calender cuts in newsprint, *JPPS*, 26(5):176-179(2000).

16. Hopkins, R. M., MacPerson, R., Morin, L. J., Analysis of the effects of centrifugal pulp cleaners and pressure screens on newsprint runnability, *P. & P. Can.*, 63(12):T563-570(1962).

17. MacMillan, F. A., Farrel, W. R., Booth, K. G., Shives in newsprint: Their detection, measurement and effects on paper quality, *P. & P. Can.*, 66(7):T361-369(1965).

18. Stephens, J. R., Pearson, A. J., The cleaning of eucalypt groundwood by the use of the 623 Bauer hydrocyclone, *Appita* 21(3):79-93(1967).

19. Laurila, P., Smook, G., Cutshall, K., Mardon, J., Shives - how they affect paper machine runnability, *P. & P. Can.*, 79(9):348-353(1978).

20. Höglund, H., Johnsson, E., Tistad, G., Shives in mechanical pulp, *Svensk Papperstidning* 79(11):348-353(1978).

21. Moffat, J. M., Beath, L. R., Mihelich, W. G., Major factors governing newsprint strength, The fundamental properties of paper related to its uses, Trans. 5th Fund. Res. Symp., (ed. F. Bolam), pp. 101-127, BPBMA, London, 1973.

22. Eriksson, I., Edbom, M., Grannå, A., Pettersson, L., Sundström, P., Boman, R., Westerlind, B., Fracture mechanics as a tool to predict runnability in press rooms, 6th Int'l conf. on new available

technologies, Stockholm, Sweden, 1-4 June 1999, pp. 351-361.

23. Hildén, K., Valkonen, M., Paper makes its break on the big screen, *Pulp Pap. Eur.* 2(3):14-16(1997).

24. Frye, K. G., Pressroom to mill feedback for problem solving and product development, *Proc. Tappi Papermakers Conf.*, pp. 589-601, 1994.

25. King, D. L., Web breaks tests at the IFRA institute, *Newspaper techniques*, Mars, 1972.

26. Gregersen, Ø. W., On the assessment of effective paper web strength, PhD Thesis NTNU, Trondheim, Norway, 1998.

27. Griffith, A. A., The theory of rupture, *Proc. 1st Int'l Conf. Applied Mechanics*, Delft, pp. 55-63, 1924.

28. Cotterel, B., and Reddel, J. K., The essential work of plane stress ductile fracture, *Int'l J. Fract.*, 13(3):276(1977).

29. Wellmar, P., Gregersen, Ø. W., Fellers, C., Prediction of crack growth initiation in paper structures using J-integral criterion, *Nordic Pulp and Paper Research J.*, 15(1):4-11(2000).

30. Fellers, C., Melander, J., Mohlin, U.-B., Predicting the effect of reinforcement pulp characteristics in TMP papers for web breaks using fracture mechanics, *Nordic Pulp and Paper Research J.*, 16(4):257-260(2001).

31. Uesaka, T., Okaniwa, H., Murakami, K., Imamura, R., Tearing resistance of paper and its characterisation, *J. Tappi*, 33(6):403-409(1979). (in Japanese).

32. Koskinen, T., Kosonen, M., Ebeling, K., The impact of paper defects on paper strength requirements, *The Science of Papermaking, Trans. 12th Fund. Res. Symp.*, (ed. C. F. Baker), pp. 1441-1465, The Pulp and Paper Fundamental Research Society, Lancashire, UK, 2001.

33. Seth, R. S., and Page, D., Fracture resistance: a failure criterion for paper, *Tappi J.*, 58(9):112-117(1975).

34. Åström, A., Nordsröm, A., Rost, T., Fellers, C., Fracture toughness as a pulp characterization method for runnability assessment of paper, *Products of papermaking, Trans. 10th Fund. Res. Symp.*, (ed. C. F. Baker), pp. 807-823, Pira International, Surrey, UK, 1993.

35. Hiltunen, E., On the beating of reinforcement pulp, Ph. D. Thesis, Helsinki University of Technology, 2003.

36. Shallhorn, P. M., Fracture Resistance - Theory and Experiment, *JPPS*, 20(4):J119-124(1994).

37. Seth, R. S., Optimizing reinforcement pulps by fracture toughness, *Tappi J.*, 79(1):170-178(1996).

38. Kärenlampi, P., Cichoraki, T., Alava, M., Pylkkö, J., Paulapuro, H., A comparison of two test methods for estimating the fracture energy of paper, *Tappi J.*, 81(3):154-160(1998).

39. Steadman, R., Fellers, C., *Solid Mechanics Advances in Paper Related Industries: Proceedings of 1986 NSF Workshop*, (eds. Perkins, R. W., Mark, R. E., and Thorpe, J. L.), Dept. of Mech. & Aerospace Eng., Syracuse University, Syracuse, NY, p.332, 1986.

40. Steadman, R., Fellers, C., Fracture toughness characterization of paper at different climates, 1987 Paper Physics Conf., pp. 173-176, 1987.

41. Swinehart, D., and Broek, D., Tenacity and fracture toughness of paper and board, *JPPS*, 21(11):J389-397(1995).

42. 박종문, 이진호, 섬유 특성에 따른 종이의 물리적, 파괴 역학적 특성 변화, *KTAPPI*, 35(3): 37-42(2003).

43. 이진호, 박종문, 미세분의 종이내 거동 및 적용, 2004 추계학술발표논문집, 238- 246(2004).