

Relationship between fracture behavior and debonding properties

이진호 · 박종문

충북대학교 산림과학부

1. 서론

종이의 찢어짐 저항 정도는 종이가 생산되는 조건이나, 인쇄나 재단과 같은 후 가공 공정에서 운전성을 결정하는 매우 중요한 인자이다. 다른 측면에서는 포장재에 재단선을 내는 경우와 같이 일정한 파괴를 원하는 경우에도 파괴 저항적인 측면이 요구되기도 한다.

파괴 역학은 결점을 가진 물질의 강도를 다루는 학분 분야이며, 파괴 강도에 영향을 미치는 세 가지 인자로는 하중 조건, 결점 구조의 형태, 그리고 국부적인 지역에서 받게 되는 응력 집중을 견디는 능력이 있다. 하중 조건의 측면에서 종이는 생산이나 인쇄 공정 중에서 종이가 받는 하중 조건은 대개 in-plane 방식의 인장 하중을 받기 때문에 종이의 물성 중 out of plane 방식의 인열 강도는 결점을 가진 측면은 같지만 하중의 형태가 실제와는 다르기 때문에 중요 물성으로 평가하기는 곤란하다. 결점 구조의 형태는 shive나 기타 오염물질이나 초지 조건에 의한 구멍 등 그 발생 원인에 따라 크기 및 형태가 다양하다. 마지막 인자로서 응력 집중에 대한 저항성은 파괴 인성으로 측정이 가능하데, 본 실험에는 초지 원료의 주를 이루는 섬유 고해에 따른 파괴 경향과 파괴 인성의 변화를 고찰하고, 초지 조건 변화가 파괴 인성에 미치는 영향에 대하여 살펴보고자 한다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1. 파괴 경향 시험

Softwood-BKP 와 Hardwood-BKP를 valley beater를 이용하여 일정간격으로 고해

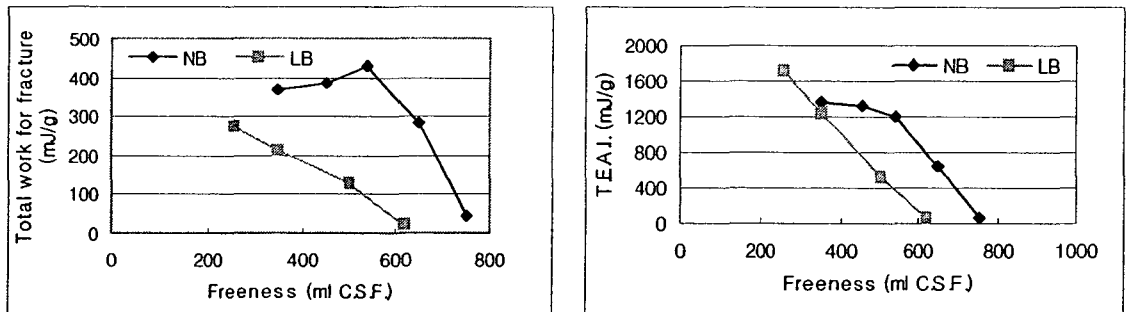
한 후 평량 60 g/m²으로 각각 수초 하였다. 수초된 종이는 DEN(double-edge-notched) 형태로 절단하여 파괴 경향을 시험 하였고, Tappi Standard에 의거하여 인장 시험을 시행 하여 물성을 비교 하였다.

2.2. 초지 조건 변화 시험

Softwood BKP를 고해하여 수초한 후 압착부의 조건을 달리하여 압착부의 건조도를 각각 25, 30, 35%로 조절 하여 압착부의 건조도 증가가 파괴 인성에 미치는 영향을 평가 하였다. 또한 동일 압착 조건에서 건조 온도를 120 및 140 ℃로 변화 하였을 때 건조 온도가 파괴 인성에 미치는 영향을 평가 하였다. 파괴 인성의 평가는 SCAN-P 67/P 77에 의거하여 L& W 인장 강도 시험기를 이용하여 평가 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 파괴 경향



(a) crack samples

(b) non-crack samples

Fig. 1. Absorption energy difference between different samples and different pulps.

그림 1은 파괴 및 정상 시편의 인장시 흡수된 에너지를 나타낸 것으로 파괴 시편이 정상 시편에 비해 흡수 에너지가 3-5배 적게 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 파괴 시편의 응력 집중 현상에 따른 것으로 결점이 존재하는 종이의 파괴가 그렇지 않은 것에 비해 쉽게 일어날 수 있음을 알 수 있다. LB는 파괴 시편과 정상 시편 모두 고해도

가 증가함에 따라 흡수 에너지가 증가하는 동일한 경향을 나타낸 반면, NB는 정상 시편과 파괴 시편이 다른 경향을 나타내었다. 표 1은 결점 시편의 파괴시 결점 끝부분의 섬유 거동을 나타낸 것으로 LB 의 경우 고해도 관계없이 거의 뽑히는 경향을 나타낸 반면, NB의 경우 뽑힘과 끊어짐이 복합적으로 일어나는 경향을 나타냄을 알 수 있다.

Table. 1. Broken and pulled out behavior of crack papers.

		NB					LB			
Freeness (ml C.S.F.)		750	650	550	450	350	620	500	350	250
Broken (%)		25	39	52	58	56	11	10	8	14
Pulled out (%)		75	61	48	42	44	89	90	92	86

그림 2는 LB 섬유로 초지시 미세분을 제거한 것과 포함한 종이의 인장 시험 결과를 나타낸 것으로, 미세분의 제거에 따라 결합면의 감소로 인한 물성 감소를 가져오기는 하지만 고해에 따라 열단장과 변형률이 모두 증가하는 같은 경향을 나타낸 반면, 그림 3의 NB 경우 미세분의 제거에 따라 약간의 물성 감소는 LB 와 같지만 열단장과 변형률이 미세분에 따라 약간 다른 경향을 나타내었다. 열단장의 경우 정상과 파괴 시편 모두 미세분에 관계없이 고해도가 증가함에 따라 증가하는 동일한 경향을 나타낸 반면 변형률의 경우 미세분이 없는 경우 정상과 파괴 시편 모두 일정 시점부터 거의 변화가 없지만, 미세분이 포함 되어 있는 경우 정상 시편과 파괴 시편 모두 일정 시점부터 감소하는 경향을 나타내었고, 파괴 시편의 경우 감소 폭이 더 크게 나타났다. 인장과 변형 곡선의 누적 값인 흡수 에너지가 파괴 NB 시편의 경우 감소하는 것은 응력 집중하에서의 발현되는 파괴 인장력 증가 폭이 파괴 변형률 감소 폭을 상쇄 시키지 못하기 때문으로 판단된다. LB의 경우 흡수 에너지의 지속적인 증가는 LB 섬유 자체가 미세분을 다량으로 포함 하고 있는 조건에서 파괴되는 경우 섬유의 파괴가 아닌 계면만의 파괴가 유도되기 때문에 고해에 따라 다량의 결합성이 약한 미세분의 결합성 향상과 섬유의 고해 효과에 의해 결합면의 지속적인 강도 증가로 인해 흡수 에너지가 고해도에 따라 계속적으로 증가하는 것으로 판단된다.

LB 와 NB의 고해에 따른 파괴 경향의 차이는 섬유가 가지는 강직성이 고해에 의해서 얼마나 개선되는가와 섬유이외의 미세분의 형태와 섬유간 결합 형태에 따라 달라지

는 것으로 판단된다.

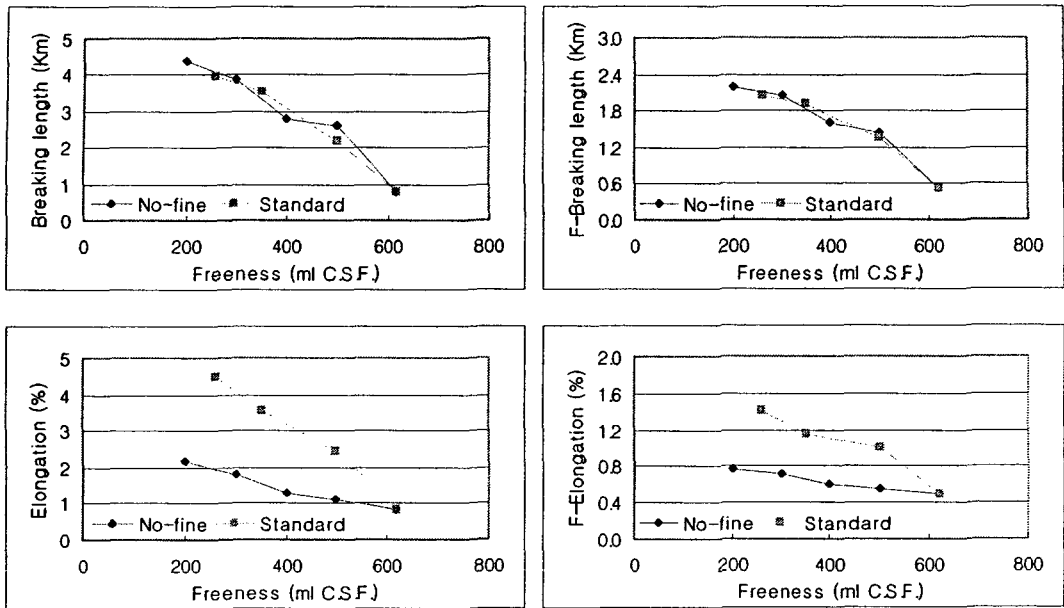


Fig. 2. Tensile properties of LB papers containing and without fines.

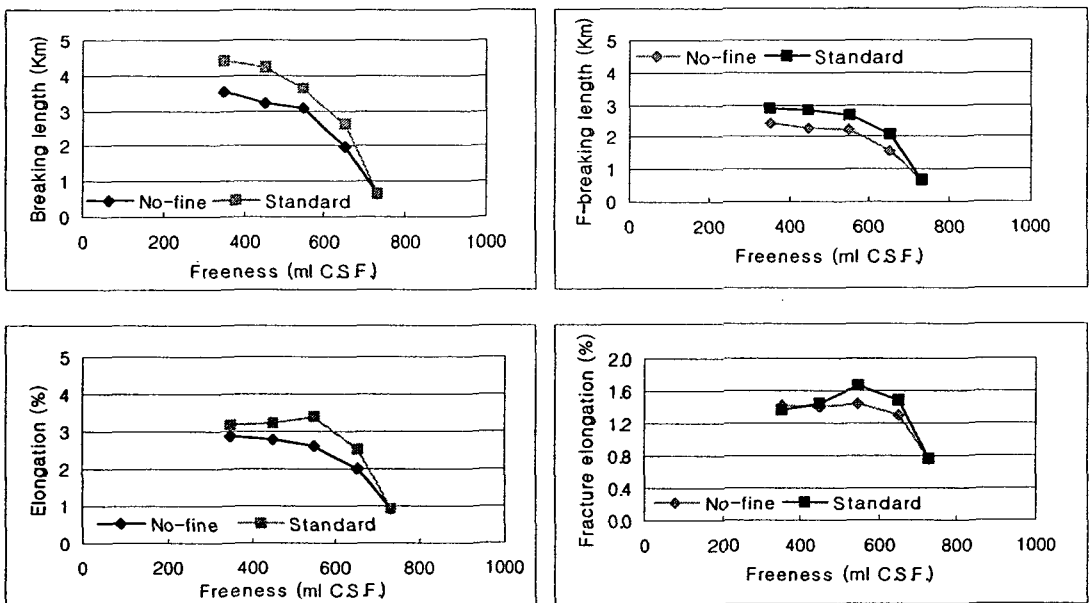


Fig. 3. Tensile properties of NB papers containing and without fines.

3.2. 초지 조건 변화 실험

3.2.1 압착부의 건조도 변화에 따른 파괴 인성 변화

그림 4는 압착부의 건조도를 25,30,35%로 5%씩 증가 하였을 때 파괴 인장 물성과 파괴 인성의 변화를 나타낸 것으로, 압착부의 건조도가 증가함에 따라 모든 여수도 구간에서

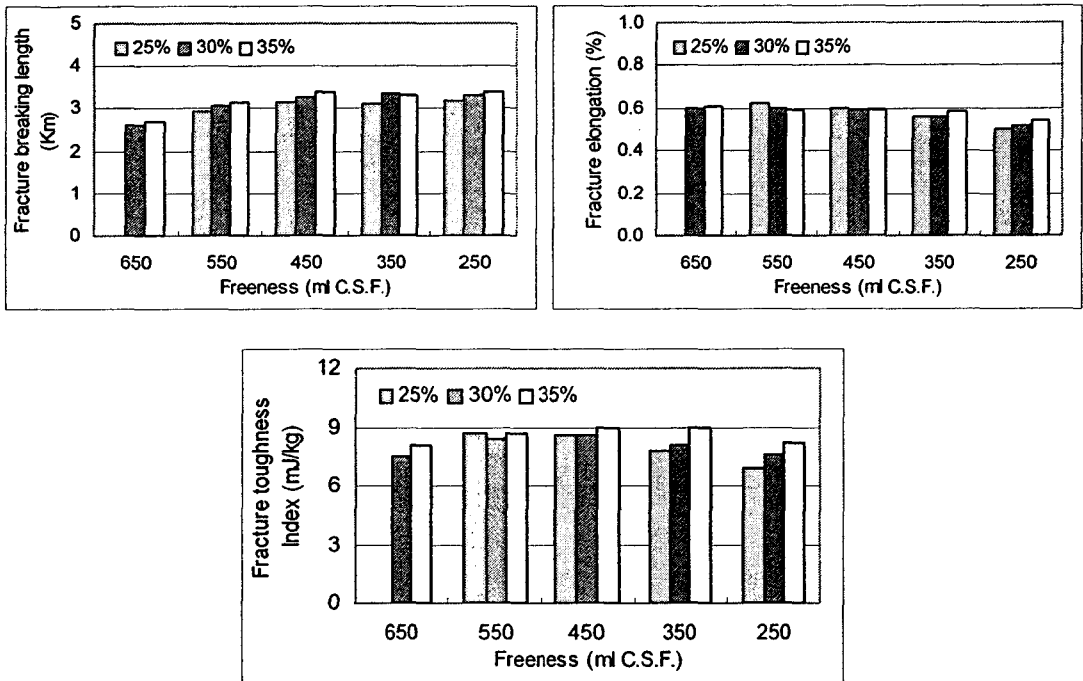


Fig. 4. Fracture properties depending on change of pressing dryness.

강도가 증가 하였으며, 파괴 변형의 경우 낮은 압착부 건조도에서는 고해도가 증가함에 따라 증가하다 감소는 경향을 나타내었으나, 압착부의 건조도가 증가함에 따라 감소 폭이 줄어드는 것을 알 수 있다. 파괴시 결점의 진행에 대한 저항성인 파괴 인성은 낮은 압착부 건조도 조건에서는 최대점 이후 고해도가 감소에 따라 파괴 인성이 감소하였지만, 압착부의 건조도가 증가 할수록 고해 증가에 따른 감소 폭이 줄어드는 경향을 나타내었다. 이는 과도한 고해가 진행되는 경우 증가된 미세분의 압착에 따른 결합 강도의 증가의 영향으로 판단된다.

그림 5는 건조기의 온도에 따른 파괴 경향 변화를 나타낸 것으로 건조 온도 상승에

따라 파괴 인장 및 변형률이 모두 감소하였고, 파괴 인성 역시 건조 온도 상승에 따라 감소하였다. 건조 온도 상승에 따라 결합 강도 상승에 따라 강도 값이 증가할 것이라는 예상과는 다른 결과를 나타내었다. 이는 건조 온도에 따라 결합 강도는 상승 하였지만, 열화에 의해 섬유 자체 강도가 감소하였기 때문에 섬유의 파괴와 결합면의 파괴가 모두 발생하는 NB 섬유의 특성에 따라 섬유 자체 강도 감소에 의한 섬유 파괴시의 강도가 감소하여 파괴 물성이 감소 한 것으로 판단된다.

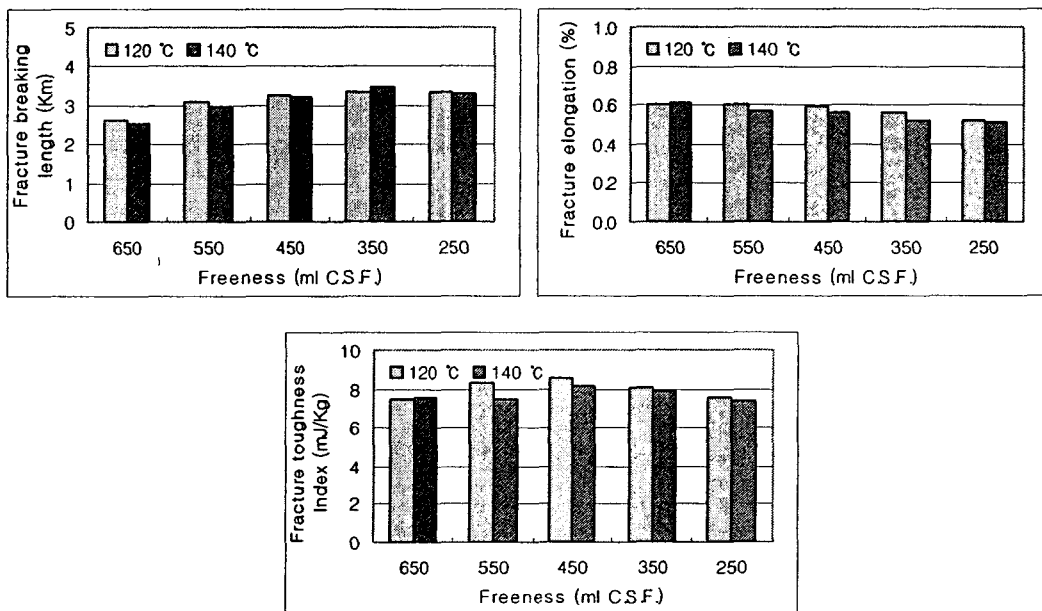


Fig. 5. Fracture properties depending on change of dryer temperature.

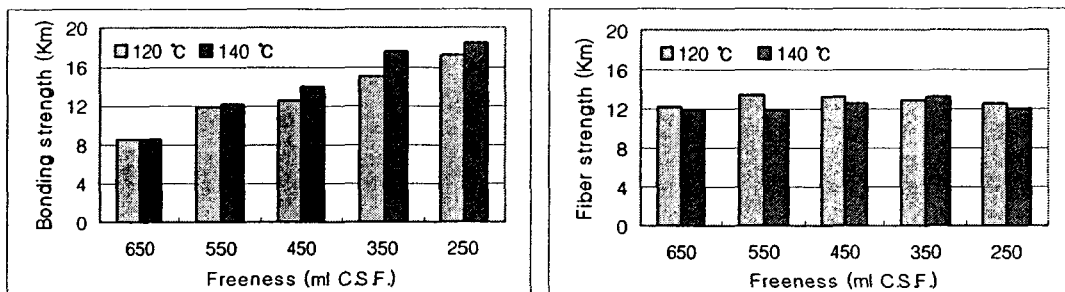


Fig. 6. Fiber strength and bonding strength depending on dryer temperature.

4. 결 론

결점이 존재하는 상태에서의 종이물성은 응력집중의 영향에 따라 파괴시 섬유유 고 유한 결합 특성이 무결점 시편 보다 중요하게 작용한다. 초지에 사용되는 섬유유는 수종 및 펄핑 방법 및 재생 정도에 따라 여러 가지로 분류 할 수 있지만, 크게 물리적 처리에 의해 결합성이 쉽게 발현되느냐 그렇지 못하느냐로 크게 나눌 수 있다. 쉽게 결합성이 발현되는 섬유유의 경우 파괴시, 섬유유의 자체 파괴와 결합면의 파괴가 함께 발생되고, 결합성이 쉽게 발현 되지 못하는 경우 결합면의 파괴가 지배적으로 발생되며, 이에 따라 파괴 경향도 달라지게 된다.

초지 공정 단계는 크게 지료 조성부, 초지부, 압착부, 건조부로 나눌 수 있는데, 후반 공정이라 할 수 있는 압착부와 건조부의 공정 조절을 통해 충분히 파괴인성의 향상을 가져 올수 있음을 실험 결과 확인 하였다.

5. 참고 문헌

1. Petri Mäkelä, On the fracture mechanics of paper, NPPR Journal., 17:3, pp. 254-274.
2. Atsushi Tanaka, Eero Hitunen, Heikki Kettunen and Kaarlo Niskanen, Inter-fiber bonding effects of beating, starch or filler, NPPR Journal., 16:4, pp. 306-312.
3. Derek H. Page, The meaning of Nordman bonding strength, NPPR Journal., 17:1, pp. 39-43.
4. Tomas W. Bither and John F. Waterhouse, Strength development through refining and wet pressing, November 1992 Tappi Journal., pp. 201-208.
5. Rajinder S. Seth, A. Gordon Robertson, Yiu-Wing Mai, and John D. Hoffman, Plane stress fracture toughness of paper, Tappi Journal, 76:2, p. 109-116.
6. P. A. Moss and E. Retulainen, The effect of fines on fibre bonding: Cross-sectional dimensions of TMP fibres at potential bonding sites, JPPS, 23:8, pp. 382-388.