

고해와 압착에 의한 파괴 인성과 파괴 신장률의 변화

—섬유 활성화와 미세분 활성화—

이진호 · 박종문[†]

(2004년 6월 29일 접수: 2004년 10월 29일 채택)

Relationship Between Refining, Wet Pressing and Fracture

Toughness, Fracture Elongation

—Fibers activation and fines activation—

Jin Ho Lee and Jong-Moon Park[†]

(Received on June 29, 2004: Accepted on October 29, 2004)

ABSTRACT

To increase paper strength, refining and wet pressing are performed. Many researches were carried out to identify the origin of paper strength. Since fracture toughness was governed by stress concentration, fracture toughness reflects microscopic paper strength. The aim of this paper is to analyze how paper strength was affected by changes of refining and wet-pressing. Fiber properties and structural, tensile and fracture properties of hand-sheets were evaluated. Especially, fracture toughness was evaluated by J-integral. As the refining proceeds, stock properties maybe divided into two stages such as fibers activation and fines activation according to freeness. In fibers activation stages, about 750-450 mL CSF, the fracture toughness increased with refining and wet pressing but in fines activation stages, about 450-250 mL CSF, the fracture toughness increased only with wet pressing. It is clear that fracture toughness was affected not only by fibers properties but also by fines properties in fines activation stages.

Keywords: fibers activation, fines activation, fracture toughness, refining, wet pressing

• 본 연구의 일부는 충북대학교 학술연구비의 지원에 의하여 수행되었음.
• 충북대학교 농과대학 임산공학과 (Department of Forest Products, College of Agriculture, Chungbuk National University, Cheongju, 361 763).

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

1. 서론

종이를 제조하는 초지 공정 중에서 가장 기본적인 물리적 처리 공정은 고해와 압착 공정이다. 고해를 통해 섬유는 피브릴화 발생, 유연성 증가, 미세분 발생 등에 의한 섬유의 개질이 발생한다.¹⁾ 압착 공정은 물리적인 힘을 이용하여 습지필의 과도한 수분을 제거하여 지필의 건조도를 증가, 건조부의 부하를 줄이게 된다. 또한 기계적인 압착을 통해 섬유간 결합을 증대시키기도 한다.¹⁾ 종이의 강도는 구성하는 섬유와 섬유간 결합의 정도에 의해 강도가 결정된다. 종이의 강도에 관한 많은 연구들에서의 주된 관점은 종이의 강도가 섬유 자체에서 유발되는 것인가, 결합면의 강도에 의해서 유발되는 것인가 하는 것이었다.²⁻⁴⁾ 기존의 연구는 정상 시편의 물성 시험에 따른 물성 평가를 통해서 분석하였지만, 본 실험에서는 파괴 시험을 통해 물성을 분석하고자 하였다.

파괴 시험은 종이에 결점이 있는 상태에서 종이의 강도를 평가하는 방법으로 일반적인 강도 결과와는 약간 다른 결과를 나타내게 된다. 정상 시편의 경우 시편의 횡방향에 대해 외부 응력이 고르게 분포하기 때문에 지합과 같은 인자에 의해 종이가 외부 응력에 대해 간섭을 받게 되는 반면, 파괴 시험은 결점 선단부에 과도한 응력이 집중되기 때문에 섬유간 결합 강도 이외의 지합과 같은 외부 인자의 간섭이 최소화되기 때문에 종이가 가진 순수한 강도가 발현된다고 할 수 있다.

본 실험에서는 표준화된 SCAN 시험법을 이용하여 파괴 인성을 측정하였는데, 상기 시험법은 J-적분법을 사용하였다. 종이는 탄성과 소성을 함께 가지고 있기 때문에 소성 영역에 대한 평가를 하기 위해서 비선형 탄성 파괴 역학인(non-linear elastic fracture mechanics, NLEFM) J-적분법이 적당하다고 할 수 있다.^{5,6)}

본 실험에서는 종이의 강도를 향상시키는 가장 기본적인 처리인 고해와 압착변화에 따른 종이의 파괴 인성 변화를 측정하고, 종이 강도 변화 원인이 섬유자체인지 결합 강도인지에 대해 파괴 역학적 측면에서 알아보려고 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 공시 재료

시트상의 침엽수 표백 크라프트 펄프(Sw-BKP, radiata pine)를 분양받아 사용하였다.

2.2 실험 방법

2.2.1 수초지 제작

Sw-BKP를 실험실용 Valley beater를 이용하여 650, 550, 450, 350 mL CSF 로 각각 고해하였다. 원형 수초지기를 이용하여 평량 60 g/m² 으로 초지한 후, 롤프레스를 이용하여 습지필의 건조도를 25, 30, 35%로 각각 조절하였다. 건조는 드럼 드라이어를 이용하여 120℃에서 최종 지필의 건조도를 95%로 조절하여 과건조에 의한 강도 변화를 최소화하였다.

2.2.2 섬유 특성 시험

섬유의 특성은 Bauer-McNett 섬유 분급기를 이용하여 섬유장별 섬유 분포를 측정하였고, Morfi Labo(LB-01)을 이용하여 섬유의 크기, 폭, 조도, 컬, 키크 등을 측정하였다.

2.2.3 물성 시험

섬유 자체 강도는 Zero-span tensile tester를 이용하여 측정한 후, 단위 환산을 통해 열단장 값으로 환산하였고, 결합 강도는 간단한 Page 식을 이용하여 계산하였다.

$$1/\text{Tensile strength} =$$

$$1/\text{Zero span strength} + 1/\text{Bonding strength}$$

종이의 인장 및 파괴 시험은 L&W사의 파괴 인장 시험기를 이용하여 SCAN-P 67과 P77:95 에 의거하여 물성을 평가하였다. Fig. 1 은 파괴 인성에 대한 기본적인 이론을 나타낸 것으로 결점이 진행한 것에 대한 에너지 편차를 결점 진행 거리로 나누는 것으로 결국 파괴 인성은 결점이 진행하는데 소비되는 에너지를 말한다.⁷⁾ 파괴 시험에 사용된 시편은 가로 5 cm, 세로 10 cm, 결점은 시편의 중앙에 2 cm를 주어 사용하였다.

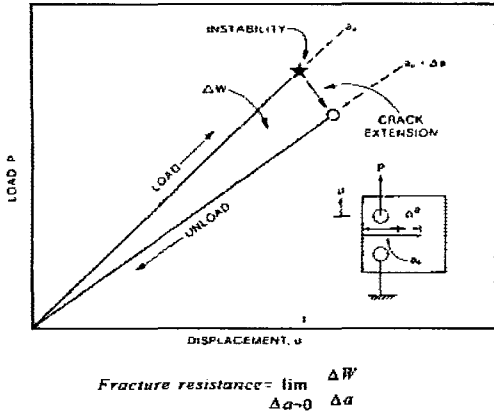


Fig. 1. Basic principle of fracture toughness.

3. 결과 및 고찰

3.1 고해에 따른 지료의 변화

Fig. 2와 Table 1은 고해에 따른 지료 자체의 물성 변화를 나타낸 것으로 550-450 mL CSF를 기점으로 이 지점 이후 미세분을 제거한 지료의 섬유변화는 거의 없는 것으로 보아 이 지점 이전 고해 구간은 섬유 자체의 변화에 따라 섬유의 물성이 영향을 받으며 이후 고해 구간은 섬유 자체의 변화라기보다는 미세분 증가에 의해서 섬유의 물성이 영향을 받음을 알 수 있다. 고해에 따른 섬유의 변화를 볼 때 550-450 mL CSF 여수도 구간을 경계로 이전은 섬유 활성 구간으로 이후는 미세분 활성 구간으로 나눌 수 있고, 종이의 물성에 미치는 영향도

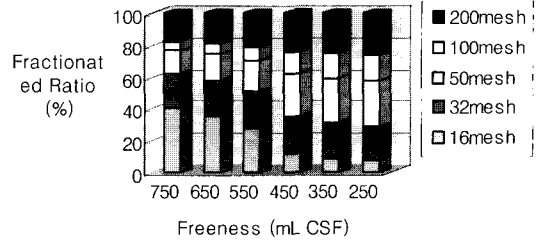


Fig. 2. Fraction ratio with refining.

이에 따라 다를 것으로 판단된다.

3.2 고해와 압착에 따른 종이의 구조 변화

Fig. 3은 고해 및 압착에 따른 종이의 구조 변화를 나타낸 것으로 고해가 진행될수록 종이의 밀도는 증가하지만 압착에 의한 영향은 고해 정도 즉, 여수도 따라 다른 양상을 나타내고 있다. 섬유의 활성이 증대되는 초기 고해구간(750-550 mL)에서는 압착에 따라 종이의 산란계수나 투기도가 비교적 적게 변하고, 미세분의 활성이 증대되는 후기 고해구간(450-250 mL)에서는 압착에 따른 산란계수와 투기도가 크게 변화하게 된다. 압착에 따른 종이 내부 구조 변화가 다른 것은 구성 지료의 특성에 따른 것으로 초기 섬유 활성 구간은 섬유의 팽윤이 주로 발생하기 때문에 압착 시 섬유의 압착만이 행해져 낮은 압착 조건에서도 섬유의 두께방향 압착이 가능해지지만, 후기 미세분 활성 구간에서는 섬유층간에 존재하는 작은 크기의 미세분에 의해 두께 방

Table 1. Physical properties of fibers depending on freeness

Freeness (mL CSF)		730	650	550	450	350
length weighted in length (mm)	Whole pulp	1.10	0.99	0.91	0.89	0.79
	No fines	1.10	0.93	0.96	0.89	0.87
Width (μm)	Whole pulp	23.65	26.92	27.73	27.71	27.66
	No fines	23.65	29.28	30.67	30.16	30.15
Coarseness (mg/m)	Whole pulp	0.94	0.71	0.62	0.59	0.55
	No fines	0.94	0.95	0.68	0.69	0.62
Kink angle (°)	Whole pulp	130.38	131.75	131.09	131.00	130.80
	No fines	130.38	132.18	130.81	130.94	130.94
Curl (%)	Whole pulp	5.76	5.26	5.19	5.10	5.07
	No fines	5.76	6.57	6.60	6.17	6.02

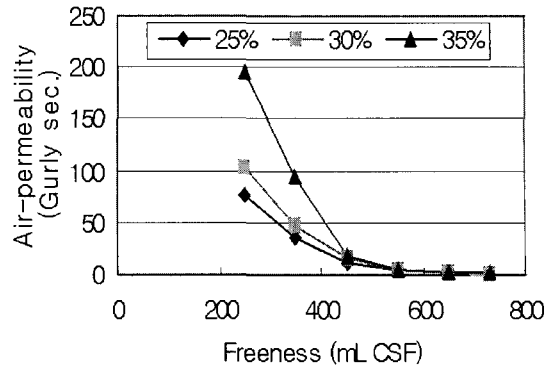
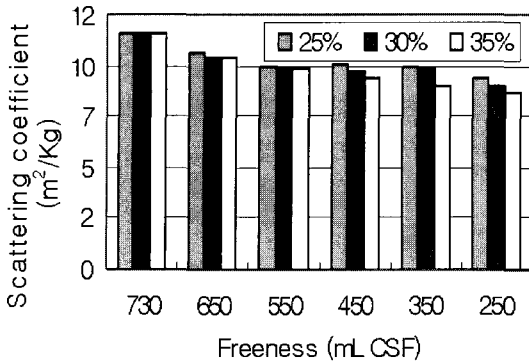


Fig. 3. Structural properties of handsheets depending on refining and wet-pressing.

향으로의 압착성이 크게 증가하기 때문에 압착부에서의 조이의 건조도 증가에 따라 내부 구조가 계속적으로 변화하게 된다. 결합면적 증가의 목적으로서 압착부를 고려할 때 장섬유로 구성된 지료는 상대적으로 낮은 압착부의 건조도에서도 최대 결합면적을 크게 증가시킬 수 있다고 판단된다.

3.3 고해와 압착에 따른 비파괴 시험의 강도 변화

Fig. 4는 고해와 압착에 따른 zero-span 인장 강도를 측정된 섬유 자체 강도와 Page 식으로 계산한 결합 강도를 나타낸 것이다. 고해에 의해 섬유의 자체 강도는 증가하다 일정해지는 경향을 나타내며, 여수도 구간별 압착에 따른 섬유 자체 강도의 변화는 크게 나타나지 않는다. 섬유 자체의 변화가 일어나는 550 mL 구간까지는 섬유 자체 강도의 증

가를 나타내지만, 이후 고해에 의해서 섬유의 강도 변화는 나타나지 않기 때문에 550 mL 이후에 고해에 따른 섬유의 물성적인 변화는 크지 않은 것으로 판단된다. 섬유간 결합 강도의 경우 고해 및 압착 증가에 따라 모두 증가하는 경향을 나타내었다. 고해의 경우 피브릴화, 미세분 발생 등에 의해 섬유간 결합 수 및 결합 면적을 증가시켰기 때문이고, 압착의 경우 지필 내 수분 제거를 통해 섬유간 표면장력을 발생시켜 섬유간 수소 결합이 증대되었기 때문이라고 판단된다.

고해와 압착 처리는 섬유의 유연성 증대와 결합성을 증가시키는 가장 기본적인면서도 중요한 공정으로 Fig. 5는 고해와 압착 처리에 의해 종이의 인장 특성이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 강도적 특성인 열단장과 탄성계수는 여수도 구간에 관계없이 고해와 압착에 따라 증가하는 경향을 나타내지

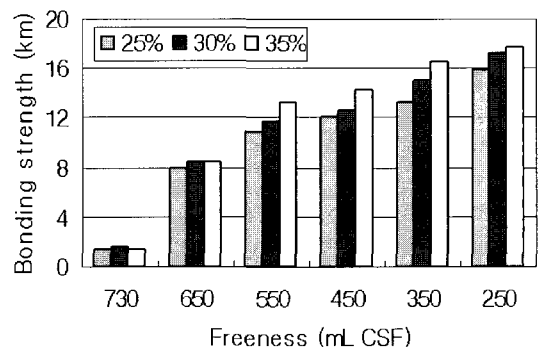
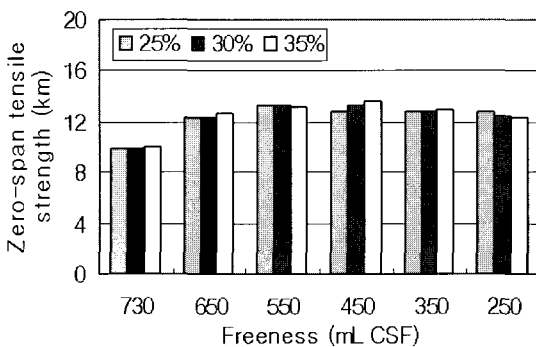


Fig. 4. Fiber and bonding strength of handsheets depending on refining and wet-pressing.

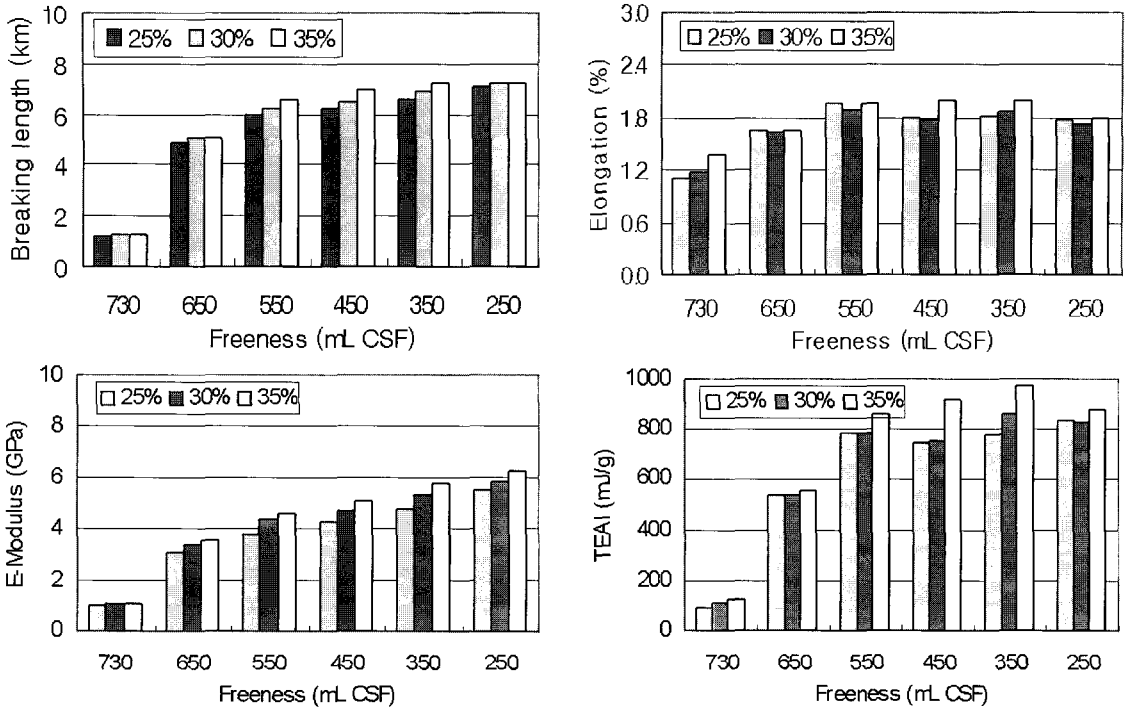


Fig. 5. Tensile properties of handsheets on refining and wet-pressing.

만, 신장률의 경우는 섬유의 활성 구간과 미세분의 활성 구간에서 고해와 압착에 따른 강도적 특성 변화와는 다른 경향을 나타낸다. 즉 신장률의 경우 고해에 따른 신장률 증가 효과는 섬유의 활성 구간에서만 나타나며, 압착에 따른 신장률 증가는 미세분 활성 구간에서만 나타나는 경향을 나타내었다. 이는 구성 지료의 구성 성분 특성에 기인한 것으로 미세분이 다량으로 포함되어 있는 미세분 자체의 작은 크기에 의해 더 높은 압착성을 가지기 때문으로 판단된다. 이에 따라 인장에너지 흡수 지수 (TEAI)에서 볼 수 있는 것처럼 장섬유로 지료가 구성되어 있는 경우 낮은 압착부 건조도에서도 충분한 에너지 흡수를 나타내는 반면 미세분이 포함되어 있는 경우 상대적으로 압착부 건조도 증가에 따라 지속적인 에너지 흡수의 증가를 나타내게 되는 것으로 판단된다.

3.4 파괴 시편의 강도 변화

Fig. 6은 파괴 시험 시 나타나는 종이의 파괴 인

장 특성을 나타낸 것으로 신장 측면에서 정상 시편의 인장 특성과는 약간 다른 현상을 나타내었다. 파괴 시험은 종이에 결점이 주어진 상태에서의 강도 측정법으로, 응력 집중이라는 독특한 현상에 의해 종이의 강도가 다르게 나타난다. 파괴 인장 시험은 결점 선단부에 과도한 응력이 집중되기 때문에 정상 시편에서 나타나는 섬유간 네트워크에 의한 응력 분산의 효과를 나타낼 수 없기 때문에 결점 선단부의 섬유간 결합에 보다 직접적으로 의존하며, 이는 파괴 시험이 섬유 네트워크의 결합 자체에 대한 보다 순수한 평가를 할 수 있음을 의미한다. 파괴 인장 역시 정상 시편과 마찬가지로 고해와 압착에 의해 파괴 열단장이 증가하기는 하지만, 낮은 압착 건조도 조건에서 미세분 활성 구간에서 파괴 강도 증가는 거의 없는 것으로 나타났다. 파괴 신장률의 경우 낮은 압착부 건조도 조건에서는 고해가 진행될수록 파괴 신장률이 감소하고, 압착부 건조도가 증가함에 따라 미세분 활성 구간에서의 파괴 신장률이 상승하는 것을 알 수 있다. 이는 정상 시편에서

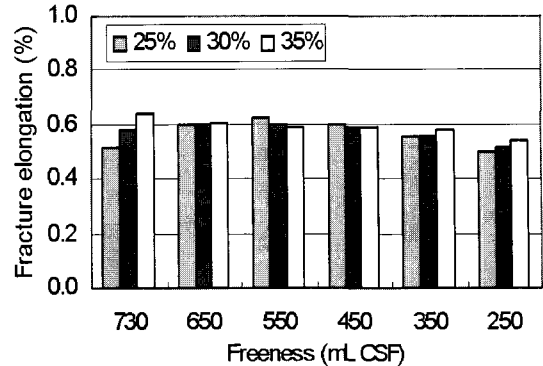
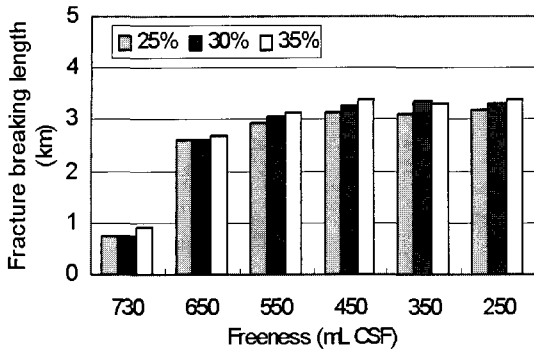


Fig. 6. Effect of refining and wet pressing on fracture tensile properties.

나타난 것처럼 지료 내 미세분이 증가함에 따라 지료의 압착 포텐셜이 증가하기 때문이라고 판단된다.

Fig. 7은 고해와 압착에 따른 파괴 인성 변화를 나타낸 것으로 섬유 활성 구간과 미세분 활성 구간에서 고해와 압착에 따른 파괴 인성이 다른 경향을 나타내었다. 즉 섬유 활성 구간에서는 고해에 따라 파괴 인성이 증가하지만 압착에 따른 증가 경향이 뚜렷하지 않은 반면, 미세분 활성 구간에서는 낮은 압착부 조건에서는 고해의 증가에 따라 파괴 인성이 감소하지만 압착부 건조도 증가에 따라 다시 증가하는 경향을 나타내고 있다. 윤 등⁸⁾은 고해에 의한 파괴 인성 변화에서 과도한 고해에 의해 파괴인성 증가의 둔화는 섬유 할렬 등과 같은 섬유 자체의 손상에 의한 섬유 내의 응력 집중으로 설명하였는데, 본 실험에서 정상 시편의 섬유 자체 강도는 고해에 의해서 감소가 크게 나타나지 않음을 보아 섬유 자체의 할렬에 의한 섬유 강도 하락에 의한 파괴인성 증가 둔화보다는, 위에서 언급한 바와 같이 고해에 의해 증가되는 미세분이 가지는 압착 포텐셜 만큼의 충분한 압착이 가해지지 않았기 때문에 파괴 인성이 둔화되는 것으로 판단된다.

4. 결론

종이의 강도를 발현시키기 위한 가장 기본적인 공정인 고해와 압착 공정으로 종이의 강도는 구성하는 섬유간 결합 면적과 결합 강도에 따라 달라지

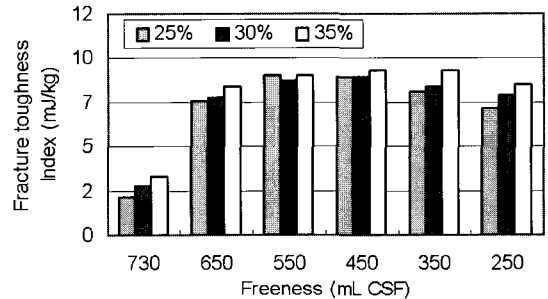


Fig. 7. FTI of handsheets depending on refining and wet pressing.

며, 고해와 압착은 이 두 인자를 모두 증가시키는 역할을 하지만, 구성된 지료의 성상(장섬유와 미세분의 비율)에 따라 압착에 따른 종이의 강도적 거동은 달라진다. 본 실험을 통해 유추할 수 있는 것은 섬유의 파괴 강도 또는 결합면의 파괴 강도에 의해서 결정되는 종이의 파괴 강도에 있어서 고해에 의해 섬유의 팽윤이 주로 일어나는 섬유 활성 단계의 경우는 섬유가 종이 강도 변화의 원인이지만, 지료 내 미세분이 증가하는 미세분 활성 단계의 경우 종이 강도 변화의 원인은 섬유라기보다는 섬유 사이에 존재하는 미세분의 거동에 의해 지배되는 것으로 판단된다.

인용문헌

1. Smook, G. A., Handbook for Pulp & Paper Technologists, pp. 193-249 (2002).

2. Cox, H. L., BRIT. J. Appl. phys., 3(3): 72-79 (1952).
3. Van Den Akker, J. A., Structural aspects of bonding, Tappi J. 42(12):940-947 (1959).
4. Page, D. H., The meaning of Nordman bond strength, NPPR J. 17(1):39-43 (2002).
5. Anderson, T. I., 이억섭, 김정규 옮김, 파괴역학 응용과 기초, 한국경제신문, pp.23-50 (2000).
6. 강동기, 파괴역학 실험법, 원창출판사(1990).
7. Seth, R. S., Measurement of in-plane fracture toughness, Tappi J.78(10):117 (1995).
8. 윤혜정, 신동소, 고해와 압착 처리가 종이의 파괴 인성에 미치는 영향, J. of Korea Tappi 32(4):1-9 (2000).