

## 전자선 전처리에 따른 침엽수 미표백 크라프트 펄프의 특성평가

김은혜 · 이지영<sup>†1</sup> · 전준표<sup>2</sup> · 김선영<sup>2</sup> · 김철환<sup>1</sup> · 박종혜

접수일(2015년 9월 9일), 수정일(2015년 10월 1일), 채택일(2015년 10월 3일)

### Effect of Electron Beam Irradiation on the Properties of Softwood Unbleached Kraft Pulp

Eun Hea Kim, Ji Young Lee<sup>†1</sup>, Joon Pyo Jeun<sup>2</sup>, Sun Young Kim<sup>2</sup>, Chul Hwan Kim<sup>1</sup>  
and Jong Hye Park

Received September 9, 2015; Received in revised form October 1, 2015; Accepted October 3, 2015

#### ABSTRACT

Electron beam irradiation is also an eco-friendly treatment compared to other physical and chemical treatments. In this study, we attempted to evaluate the possibilities of energy savings by applying electron beam irradiation to the refining process. After softwood unbleached kraft pulp (UKP) was irradiated with electron beams at 50 and 100 kGy, it was beaten in a laboratory beater, and then its freeness and fiber properties were analyzed. The physical properties of their fiber handsheet were also and measured. As the irradiation dose of the electron beam and the beating time increased, lower freeness and fiber lengths of the UKP were observed. Handsheets made from UKP that was irradiated by electron beam and beaten showed a reciprocal relationship with the irradiation dose of the electron beam, in particular, the strength of the handsheets decreased dramatically at 100 kGy of irradiation. Therefore, it was confirmed that electron beam irradiation is effective in reducing the beating time or beating energy. But the irradiation dose must be controlled under 50 kGy to minimize the loss of paper strength.

**Keywords:** *Electron beam irradiation, unbleached kraft pulp, beating, energy saving, freeness, strength*

---

• 경상대학교 임산공학과(Dept. of Forest Products, Gyeongsang National University, Jinju, Republic of Korea)

1 경상대학교 환경재료과학과/농업생명과학연구원(Dept. of Environmental Materials Science / IALS, Gyeongsang National University, Jinju, Republic of Korea)

2 한국원자력연구원 첨단방사선연구소(Advanced Radiation Technology Institute, Korea Atomic Energy Research Institute, Jeongseup, Republic of Korea)

† 교신저자(Corresponding Author): E-mail: paperyjy@gnu.ac.kr

## 1. 서론

현재 전자선은 강한 투과력과 분해력을 가지고 있어 물질을 빠르게 변화시켜 다양한 산업에서 사용된다. 상처 제거 등의 의료용, 폐질연유에 전자선을 쬐어 독성 물질을 제거시키는 공업용, 식품의 멸균처리, 유전공학 등 다양하게 사용된다. 전자선 가속기의 경우 투자 설비가 매우 고가라는 단점을 가지고 있지만 공정시간이 짧고 공정간 수분 침투가 적으며 모든 반응이 상온에서 가능한 매우 친환경적인 공정으로 오래전부터 연구되어 왔다.<sup>1,2)</sup> 전자선은 진공상태에서 고전압을 이용하여 빛의 속도에 가깝게 가속시킨 전자의 흐름이라 할 수 있는데 전자선은 이온을 생산할 수 있으며 높은 투과성을 가지고 있어 물체 내부의 분자간의 결합을 끊거나 중합을 시키며 수분이 적은 상태에서는 라디칼이 형성되어 반응이 일어난다.<sup>3)</sup> 이러한 전자선을 셀룰로오스에 조사할 경우 화학적으로 결합되어있는 셀룰로오스를 분해시킨다. 분해 후 유리기 반응이 더욱 일어나게 되어 체인이 분열되거나 산화되어 셀룰로오스를 분해시키고 있다.<sup>4,5)</sup> 따라서 전자선이 펄프·제지분야에서 활용이 되어 질 수 있을 것으로 판단하여 본 연구를 진행하였다.

제지산업은 장치산업이자 용수산업이다. 종이제조 원가의 상당 부분을 에너지 비용이 차지하고 있는데 제지공정에 있어서 에너지 소비율 중 가장 높은 부분이 건조공정이며 두 번째로 높은 부분이 고해공정이다.<sup>6)</sup> 고해공정은 펄프의 긴 섬유를 단섬유화시킬 뿐만 아니라 내부와 외부 피브릴화를 유도하여 섬유간의 결합력을 높이게 하여 강도를 향상 시킬 뿐 아니라 적절한 물리적 성질을 가진다.<sup>7)</sup> 이러한 이유들 때문에 고해는 제지공정에 있어서 빠질 수 없는 공정인자라 할 수 있다. 본 연구에서는 침엽수 미표백 크라프트 펄프에 전자선 조사를 각각 0, 50, 100 kGy로 다르게 실시하여 시간에 따른 여수도의 변화를 비교하여 전자선 조사를 하지 않은 펄프보다 고해시간이 얼마나 단축되는지 분석하였으며 전자선 조사된 펄프의 고해시간별 섬유장의 차이를 확인하였고 고해에 의한 침엽수 미표백 크라프트펄프의 피브릴화 정도를 광학현미경을 이용하여 관찰하였다. 또한 전자선 조사된 침엽수 미표백 크라프트펄프를 실험실적으로 수초지를 제작 후 조습처리를 거쳐 기계적 강도를 비교 평가하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 공시재료

본 연구에서 사용된 공시 펄프는 국내 S 제지회사에서 분양받은 침엽수 미표백 크라프트펄프를 원료로 사용하였다.

### 2.2 실험방법

#### 2.2.1 전자선 처리

침엽수 미표백 크라프트 펄프의 전자선 처리는 전자빔 가속기(ELV-8-type 2.5 MeV Electron Beam Accelerator, EB Tech, Co., Korea)를 이용하여 0, 50, 100 kGy로 조사를 실시하였으며 펄프의 안정화를 위해 7일 정도 저온에서 보관한 후 실험을 실시하였다.

#### 2.2.2 고해 및 기본 특성 분석

전자선 조사에 따른 고해특성을 평가하기 위해 침엽수 미표백 크라프트 펄프를 실험실용 해리기(Disintegrator, Korea)로 8,000 revolution 속도로 해리를 실시한 후 실험실용 벨리비터(Valley beater)를 이용하여 고해를 실시하였다. 이 때 10분 간격으로 고해진 펄프 샘플을 채취한 후 캐나다 여수도 측정기(Canadian Freeness Tester)를 이용하여 여수도를 측정하였다.

고해진 펄프섬유의 섬유길이를 관찰하기 위해 섬유장 측정기(Kajaani Fiber Lab, Metso, Finland)를 이용하여 평균 섬유장(length weighted average fiber length)을 측정하였다. 또한 전자선 조사된 펄프의 고해 시간별 이미지를 거시적으로 분석하기 위해 광학현미경(BX51, Olympus, Japan)을 이용하여 고해시간별 변화를 평가하였다.

#### 2.2.3 수초지 제조 및 물리적 특성 분석

전자선 조사된 미표백 크라프트 펄프로 제조된 종이의 물리적 특성을 알아보기 위하여 각각 0, 50, 100 kGy로 전자선 처리된 펄프를 여수도 450±5 mL CSF로 고해처리한 후 평량 100 g/m<sup>2</sup>의 수초지를 제작하고 항온항습실에서 23℃, 50% RH에서 24시간 조습처리 하였다. 이후 TAPPI Standard Test Methods에 의거하여 벌크(TAPPI T 411), 인장강도(TAPPI T 494), 압축강

도(TAPPI T 818), 파열강도(TAPPI T 403), 인열강도(TAPPI T 414)를 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 전자선 처리에 의한 침엽수 미표백 크라프트 펄프의 특성변화

전자선 처리된 침엽수 미표백 크라프트 펄프의 여수도 변화를 측정한 결과는 Fig. 1에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 고해시간이 증가함에 따라 펄프의 여수도는 감소하였으며, 전자선 조사 처리된 펄프가 동일한 고해시간에서 더 낮은 여수도를 나타냈다. 특히 전자선 조사강도가 증가함에 따라 더 낮은 여수도를 나타냈다. 고해가 진행됨에 따른 평균 섬유장 결과는 Fig. 2에서 볼 수 있다. 전자선 조사에 의해 섬유장이 감소되었으며 전자선 조사량이 증가될수록 섬유장 감소가 두드러졌다. 일례로 0 kGy의 고해 20분과 100 kGy의 고해 20분의 섬유장 측정결과를 비교분석해 보면 거의 2배 정도 섬유장이 감소하는 것을 확인하였다. 이처럼 전자선 조사처리에 의해 여수도 및 섬유장 감소가 증가하는 것으로 볼 때, 전자선 처리에 의해 침엽수 미표백 크라프트 펄프의 고해효과가 증대되는 것으로 판단된다. 즉 상기 기술한 바와 같이 셀룰로오스는 전자선 조사처리에 의한 라디칼 분해 반응에 기인하여 분해되는데, 이러한 셀룰로오스 분해가 셀룰로오스 섬유 부분적 손상 혹은 유연성을 가져와 고해 효과를 증대시키는 것으로 보인다.

전자선 처리에 따른 고해 시간별 침엽수 미표백 크라프트 펄프를 거시적으로 관찰하기 위하여 광학현미경으로 분석한 결과는 Figs. 3과 4에 나타났다. 전자선 처리된 침엽수 미표백 크라프트 펄프의 고해시간별 광학현미경 이미지 촬영 결과 해리 시에는 0, 50 kGy의 경우 차이를 확인할 수 없었으며 100 kGy의 경우 타 펄프에 비해 피브릴화가 조금이나마 일어났으며 겉이 보였다(Fig. 3). 전자선 처리된 각 시료들의 고해 후 섬유 이미지 분석결과, Fig 4에서 보는 바와 같이 고해에 의해 섬유의 피브릴화가 모두 발생되었으며, a 펄프섬유(미처리 시료, 40분 고해)보다는 전자선 조사된 b 펄프섬유(50 kGy 조사 시료, 30분 고해)와 c 펄프섬유(100 kGy 조사 시료, 20분 고해)가 피브릴화가 확실히 많이 일어난 것을 확인 할 수 있었다. 특히 전자선 조사량이 보다 큰 c

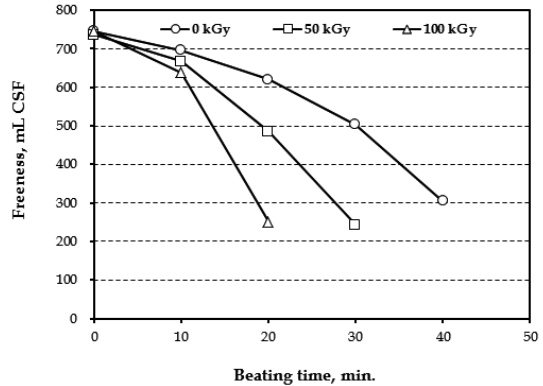


Fig. 1. Freeness of UKP as a function of beating time and the irradiation dose of electron beam.

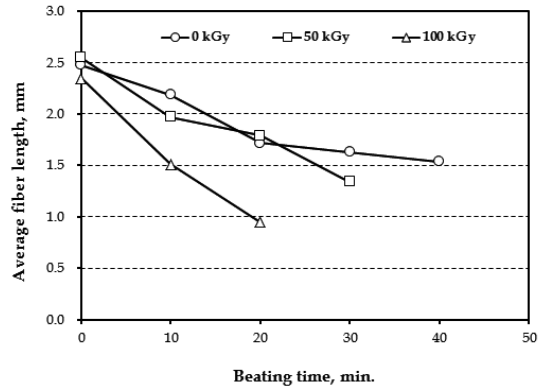


Fig. 2. Average fiber length of UKP as a function of beating time and the irradiation dose of electron beam.

펄프섬유의 경우 고해 시간이 가장 짧았음에도 불구하고 피브릴화가 가장 많이 발생되었을 뿐만 아니라 섬유 파괴가 발생되었음을 확인 할 수 있었다.

따라서 전자선 조사가 진행되면 고해공정에서 섬유장 감소와 피브릴화가 촉진되어 고해에너지를 저감시킬 수 있을 것으로 판단된다.

#### 3.2 전자선 처리에 의한 침엽수 미표백 크라프트 펄프 수초지의 특성 변화

침엽수 미표백 크라프트 펄프 고해 시 전자선 조사 전 처리가 그 수초지의 특성 변화에 미치는 영향을 평가하기 위해 실험실적으로 수초지를 제작하여 벌크, 인장강도, 파열강도, 압축 강도 등의 물리적 특성을 분석한 결과들은 Figs. 5와 6에 도시하였다. 먼저 벌크 측정 결과

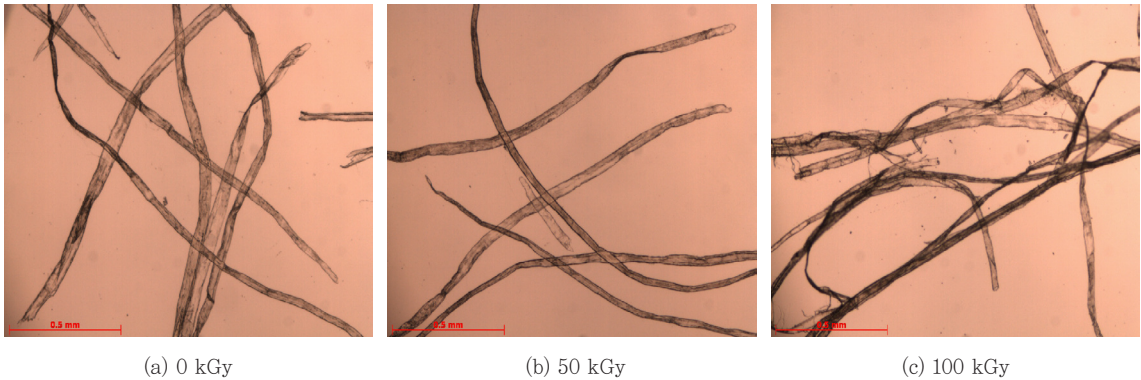


Fig. 3. Microscopic images of UKP fibers disintegrated by a laboratory disintegrator as a function of the irradiation dose of electron beam ( $\times 40$ ).

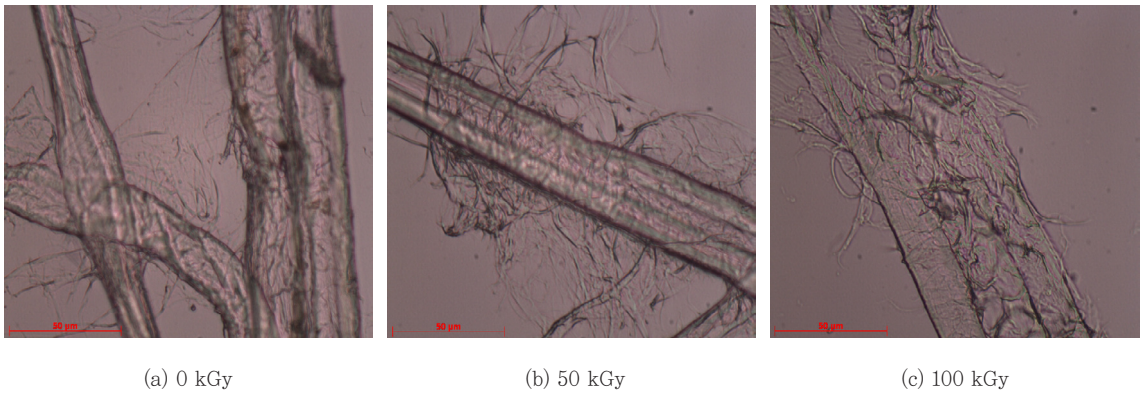


Fig. 4. Microscopic images of UKP fibers beaten by a valley beater as a function of the irradiation dose of electron beam (a: beating time at 40 min, b: beating time at 30 min, c: beating time at 20 min ( $\times 400$ )).

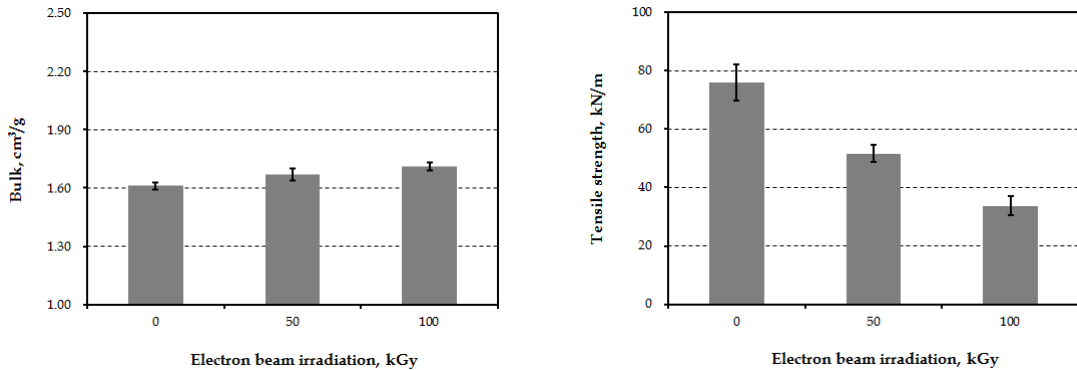


Fig. 5. Bulk (left) and tensile strength (right) of handsheets made from UKP as a function of the irradiation dose of electron beam.

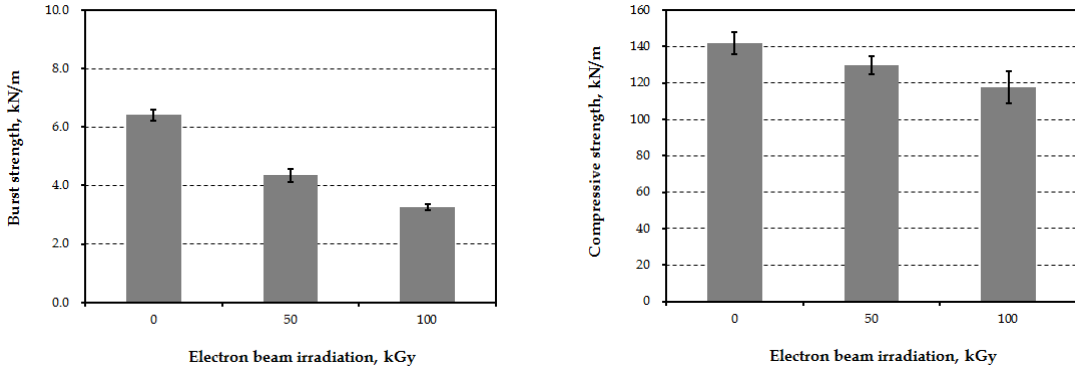


Fig. 6. Burst strength (left) and compressive strength (right) of handsheets made from UKP as a function of the irradiation dose of electron beam.

전자선 처리한 침엽수 미표백 크라프트 펄프 수초지의 별크가 향상되는 것을 확인 할 수 있었으며 전자선 조사량이 많을수록 별크가 향상되는 것을 확인하였다. 또한 인장강도, 파열강도, 압축강도 등의 강도적 특성 측정 결과, 모두 전자선 처리가 되지 않은 침엽수 미표백 크라프트 펄프 수초지의 강도가 가장 높게 나왔으며 전자선 조사량이 많을수록 강도가 현저히 저하되는 것을 확인할 수 있었다.

전자선 조사 처리된 펄프 수초지의 강도가 저하되는 것으로 보아 전자선 조사 처리에 의해 셀룰로오스 섬유의 분해가 발생하는 것을 알 수 있다. Ma 등<sup>5)</sup>은 전자선 조사처리가 대나무 셀룰로오스와 헤미셀룰로오스의 분해에 미치는 영향을 평가한 결과 15 kGy 이상으로 전자선 조사를 실시할 경우 셀룰로오스의 중합도와 결정화도가 급격히 저하된다고 보고하였다. 따라서 고효율을 낮추기 위해서는 전자선 조사량을 높이는 것이 중요하지만 종이의 강도를 고려한다면 50 kGy 이하로 전자선을 조사하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 침엽수 미표백 크라프트 펄프에 전자선 조사를 실시하여 고효율을 비교하였고 전자선 처리된 펄프로 제조된 종이의 물리적 특성을 평가하였다. 연구 결과 전자선 조사된 침엽수 미표백 크라프트 펄프가 처리되지 않은 침엽수 미표백 크라프트 펄프보다 고훈시 시간을 단축시키는 것을 확인하였다. 또한 물리적 특성 평가결

과 침엽수 미표백 크라프트 펄프에 50 kGy 이상 전자선을 조사할 경우 강도가 크게 저하하는 것을 확인하였다.

본 연구를 통해 전자선 조사 전처리가 침엽수 미표백 펄프가 고훈시 시간을 단축시킬 수 있는 것으로 확인되었으며 강도적 측면에서는 저하가 일어나는 것을 확인하였다. 따라서 이를 이용하여 제지 공정에서 고훈시 시간을 단축시켜 에너지 사용량을 줄일 수 있을 것으로 판단되며 강도 저하는 측면은 전자선 조사를 50 kGy 이하에서 실시할 경우 그 감소폭이 그리 크지 않을 것으로 사료된다.

#### 사사

본 연구는 한국원자력연구원 기관고유사업 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### Literature Cited

1. Shin, B. S., Jeun, J. P., Kim, H. B., and Kang, P. H., Thermal behavior and abrasion properties of glass fiber reinforced nylon 12 cross-linked by electron beam irradiation, *Journal of Korea Polymer* 35(1):30-34 (2011).
2. Crivello, J. V., Walton, T. C., and Malik, R., Fabrication of epoxy matrix composites by electron beam induced cationic polymerization,

- Chemistry of Materials 9(5):1273–1284 (1997).
3. Shon, H. J., Chung, S. Y., Lee, J. S., and Seo, Y. B., Utilization of electron beam-radiated cotton waste for agaric mushroom cultivation bed, *Journal of Korea TAPPI* 41(3):71–75 (2009).
  4. Fernandes, A., Antonio, A. L., Oliveira, M. B. P. P., Martins, A., and Ferreira, I. C. F. R., Effect of gamma and electron beam irradiation on the physico-chemical and nutritional properties of mushrooms, *Food Chemistry* 135(2):641–650 (2012).
  5. Ma, X., Zheng, H., Zhang, M., Huang, L., and Cao, S., Electron beam irradiation of bamboo chips: Degradation of cellulose and hemicelluloses, *Cellulose* 21(6):3865–3870 (2014).
  6. Won, J. M., Effects of refining condition on the specific energy consumption and physical properties of liner, *Journal of Korea TAPPI* 36(2):17–23 (2004).
  7. Gharekhani, S., Sadeghinezhada, E., Kazi, S. N., Yarmand, H., Badarudin, A., Safaei, M. R., and Zubir, M. N. M., Basic effects of pulp refining on fiber properties – A review, *Carbohydrate Polymers* 115:785–803 (2015).