

인치콘택 이론을 이용한 리파이닝 공정 평가

이학래[†] · 서만석 · 허용대 · 강태영

(2002년 12월 12일 접수; 2003년 4월 25일 채택)

Evaluation of Refining Process Based on the Inch Contact Theory

Hak Lae Lee, Man Seok Seo, Yong Dae Heo, and Tae Young Kang

(Received on December 12, 2002; Accepted on April 25, 2003)

ABSTRACT

Refining process is of critical importance unit process for papermaking that influences freeness as well as many mechanical and physical properties of paper. Refining is the process that requires extensive amount of electrical energy. Thus it is required to evaluate the refining process in terms of its influence on fiber and paper properties as well as its effect on energy consumption. In this study, to evaluate the efficiency of refining process the theory of inch contacts has been employed, and the influence of refining processes on fiber and paper properties has been determined and discussed.

Keywords : refining, IC/M, refining impact, specific edge load, specific refining energy

1. 서론

고해공정은 초지적성 개선과 종이물성 향상을 위한 필수공정이지만 초지공정 중 전기에너지를 가장 많이 사용하는 공정이기도하다.¹⁾ 따라서 고해 공정의 최적화는 품질 향상 뿐 아니라 동력 절감을 위해서도 매우 중요한 위치를 점하고 있다. 일반적으로 고해 공정의 평가를 위해서는 펄프의 여수도를 측정하고 있으며 이 밖에 보수성, 미세섬유 함량 변화, 섬유장의 변화 등을 검토할 수 있다. 하지만 고해 공정의 효율을 평가하기 위해서는 이러한 섬유의 변화 뿐 아니라 고해동력 분

석이 필수적으로 실시되어야만 한다.^{2,3)} 이는 고해 공정은 최소의 리파이닝 에너지를 이용하여 최대의 고해 효과를 얻는 것을 그 기본 목표로 하기 때문이다.

고해 효율을 평가하기 위해서는 리파이너 플레이트 상의 바의 길이와 수와 같은 설계 변수와 플레이트의 회전수를 조사하고 이를 바탕으로 인치콘택(inch contacts/minute; IC/M)을 산출하는 방법이 사용될 수 있다. 또 리파이너를 통하여 처리되는 펄프의 유량을 알 수 있다면 이로부터 단위 섬유 중량에 가해지는 리파이닝 임팩트^{4,5)}를 산출할 수 있다. 또 리파이닝이 실시될 경우와 고해 작용이 진행되지 않는 무부하 상

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

[†] 주저자(Corresponding author) : E-mail : lhakl@plaza.snu.ac.kr

태의 동력을 측정하면 실제 섬유 리파이닝에 투입되는 동력을 평가할 수 있다.⁶⁻⁸⁾ 이러한 자료는 리파이닝 공정에 투입되는 에너지가 효율적으로 섬유의 변형을 일으키는데 활용되고 있는지 평가하는데 기본적인 자료를 제공한다. 하지만 국내에서는 아직도 실제 공정을 대상으로 이러한 이론을 접목시켜 분석하고 그 활용성을 평가한 연구는 보고된 바 없다.

본 연구에서는 산업용지를 생산하고 있는 한 공장에서 사용되고 있는 두 가지 종류의 리파이너의 고해 효과를 인치콘택 이론을 바탕으로 분석하고, 고해 공정 변수인 소비 전력, 고해 농도 등을 근거로 하여 두 리파이너의 고해 효율을 평가하였다. 또 두 리파이너로 처리되기 전과 후의 섬유 성상과 지료특성을 분석함으로써 두 리파이닝 공정이 섬유처리에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 재료 및 방법

본 연구에서는 UKP와 AOCC를 이용하여 산업용지를 생산하는 한 제지공장에서 사용되고 있는 직경 34 인치와 26인치의 두 종류 리파이너를 연구 대상으로 설정하였다. 34 인치 리파이너 1대와 26 인치 리파이너 2대가 병렬로 설치되어 있었으며(Fig. 1), 동일한 원료가 34 인치 리파이너에 의해 1회 처리되거나, 직렬로 연결된 2대의 26 인치 리파이너에 의해 2회 처리된 후 초지기로 공급되고 있었다. 본 연구에서는 이들 리파이너에서 사용되고 있는 리파이너 플레이트의 설계 치수와 운전속도를 측정하여 인치콘택을 산출하였다. 또 리파이너의 운전 변수를 측정하고 이로부터 리파이닝 공정을 분석하였으며, 각 리파이너의 입구와 출구 지료를 채취하여 섬유 특성 및 종이의 물성을 평가하였다.

채취된 지료의 여수도와 미세분 함량은 모두 TAPPI

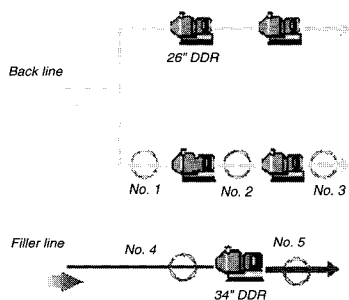


Fig. 1. Sampling positions for fiber analysis.

표준시험법에 의거하여 측정하였다. 지료의 보수도는 TAPPI Standard UM 257에 의하여 실시하였으며, 섬유장은 Fiber Quality Analyzer(FQA, Optest Equipment)를 이용하여 측정하였다.

종이의 물성을 평가하기 위해서 실험실용 Valley beater를 이용하여 지료를 5분 동안 해리 한 후 사각 수초기를 이용하여 평량 100 g/m²의 종이를 수초지하였으며 유압 프레스로 압착을 한 후 130℃의 실린더 드라이어에서 건조하였다. 수초한 종이는 TAPPI 표준시험법에 의거하여 조습처리한 다음 인장강도, 링크 러쉬 압축강도, 내부결합강도를 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 리파이닝 공정 평가

본 연구의 대상으로 선정된 리파이너는 플레이트 6 매가 1세트로 구성되어 하나의 리파이너 디스크에 장착되는 구조를 지니고 있었다. 따라서 플레이트 1매는 60°의 리파이너 디스크를 형성하며, 각각의 플레이트는 다시 20° 간격으로 3개의 세그먼트로 나뉘어져 바(bar)가 설계되어 있었다 (Table 1). 이들 플레이트의 바 폭, 길이, 각도 등을 측정하고 이로부터 리파이닝이 발생하는 리파이너 바의 인치콘택을 존 별로 나누어 계산하였다. 분당 인치콘택은 각 존에서의 바 모서리 길이와 리파이너 플레이트의 분당 회전수를 다음 식 [1]에 대입하여 산출하였다.

$$IC/M = 2[(BS_1 \times BR_1 \times L) + \dots + (BS_n \times BR_n \times L_n)] \times RPM \quad [1]$$

IC/M : Inch contact per minute, inch/min

BR₁ : Number of bars in rotor, zone 1

BS₁ : Number of bars in stator, zone 1

L₁ : Length of bar, zone 1

RPM : Revolutions per minute

Table 1. Geometric characteristics of double disk refiner plate

| Diameter of Refiner | Zone | Segment | Bar angle(°) |
|---------------------|------|----------|--------------|
| 34 inch | 9 | 20°/360° | 28 |
| 26 inch | 6 | 20°/360° | 24 |

인치콘택 계산 결과 34 인치의 DDR의 5.89×10^8 inch/min, 26 인치 DDR의 인치콘택은 2.16×10^8 inch/min로 34 인치 DDR의 인치콘택이 2.73배 높게 나타났다. 리파이너 플레이트 바의 분당 총교차 길이를 의미하는 IC/M은 고해의 중요한 변수로서 인치콘택이 커질수록 섬유가 받는 고해 작용이 증가될 가능성이 높다.

펄프 섬유 단위 증량에 가해지는 리파이닝의 인치콘택 즉 refining impact는 식 [2]에서와 같이 각 리파이너의 IC/M를 펄프의 농도 및 유량의 곱으로 나누어 산출할 수 있다.

$$RI = \frac{IC/M}{F \times C} \quad [2]$$

RI : Refining impact, IC/g

F : Volumetric flow, ℓ/min

C : Consistency of furnish

식 [2]에 의해 산출한 리파이닝 임팩트는 34 인치 DDR이 19,803 IC/g로서 9,499 IC/g인 26 인치 DDR 보다 2.08배 높았다. 26 인치 DDR의 경우 바 폭이 증가하여 총모서리의 길이가 감소하였기 때문에 리파이닝 임팩트 측면에서 낮은 수치를 나타내었다.

비모서리부하(specific edge load; SEL)는 리파이닝 공정에서 펄프에 가해지는 동력을 인치콘택으로 나눈 값으로 다음 식 [3]과 같이 계산하였다.^{2,8)}

$$SEL = \frac{Pt - Pn}{\sum(BR \times BS \times l \times n)} \quad [3]$$

SEL : Specific edge load, J/m

Pt : Total absorbed refining power, kW

Pn : No load power, kW

BR, BS : Number of rotor and stator bars

ℓ : Number of contact length of opposite bars, km

n : Rotation speed, 1/s

여기에 필요한 고해동력(Pt)과 무부하동력(Pn)은 각각 리파이닝이 실제로 행해질 때와 리파이너 플레이트 간격을 충분히 벌려 리파이닝이 진행되지 않을 때 전력량을 측정하여 구하였다(Table 2). 그 결과 34 인치 DDR과 26 인치 DDR의 SEL은 각각 1.04 J/m과 1.37 J/m로 34 인치 DDR이 낮은 SEL을 나타내었다.

Table 2. Operating conditions of double disk refiner

| Refiner | Pt (kW) | Pn (kW) | Rotation speed (rpm) | Volumetric flow (L/min) |
|---------|------------|------------|-------------------------|----------------------------|
| 34 inch | 500 | 243 | 592 | 850 |
| 26 inch | 326 | 201 | 708 | 650 |

비고해 에너지(specific refining energy; SRE)는 리파이너에 의해서 소모되는 총동력, 무부하동력 및 섬유의 질량유량을 이용하여 식 [4]에 의하여 평가하였다.

$$SEL = \frac{Pt - Pn}{F \times C} \quad [4]$$

SRE : Specific refining energy, J/g

비고해 에너지가 높을 경우 펄프 섬유가 리파이닝 에너지를 많이 흡수한다는 것을 의미하므로 고해에 의한 섬유의 변화가 크게 발생할 가능성이 높다⁷⁾. 34 인치 DDR과 26 인치 DDR의 비고해 에너지는 각각 518 J/g과 330 J/g으로 34 인치 DDR이 높게 나타났다. 26 인치 DDR의 경우 330 J/g의 비고해 에너지가 2회 동안 균일하게 섬유에 전달되도록 2대의 리파이너가 직렬로 연결되어 있지만 34 인치 DDR은 518 J/g의 강한 비고해 에너지가 리파이너를 1회 통과할 때 모두 섬유로 전달되기 때문에 고해의 균일성이 낮을 것으로 예상되었다. 일반적으로 디스크 리파이너에 의한 섬유의 처리는 일부 섬유만을 집중적으로 변형시키는 결과를 초래한다고 알려져 있다.

3.2 섬유 특성 및 물성 평가

Fig. 2는 고해도에 따른 지료의 여수도를 평가한 결과이다. 두 종류 리파이너의 입구 지료는 동일한 지료로 670 mL CSF를 나타내었다. 이 지료를 26 인치 DDR로 1차와 2차 처리한 지료는 각각 540 mL와 380 mL CSF의 여수도를 나타내어 고해에 따른 여수도 감소 경향이 뚜렷하였다. 34 인치 DDR로 처리한 지료의 여수도는 320 mL CSF를 나타내어, 1회 처리하였으나 리파이닝 효과가 크게 발생함을 확인할 수 있었다. 34 인치 DDR 플레이트는 인치콘택과 리파이닝 임팩트가 컸기 때문에 이러한 결과가 나타난 것으로 해석할 수 있다. 전술한 바와 같이 34 인치 DDR은 1회 처리로 이와 같은 낮은 여수도를 나타내고 있기

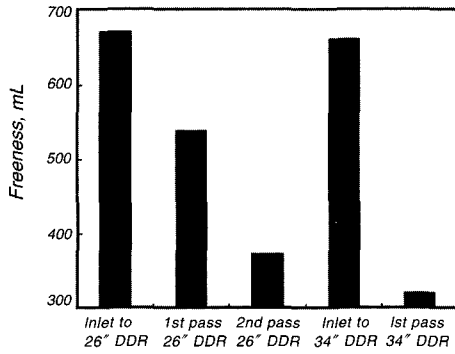


Fig. 2. Freeness of stock samples taken from the inlet or outlet of two refiners.

때문에 섬유의 단섬유화에 의한 미세분 발생이 높을 것으로 예상되었다.

34 인치 DDR은 인치콘택이 높고 비모서리 부하가 낮게 유지되었지만 여수도 결과로 볼 때 탈수성에 악영향을 미치는 단섬유화가 더 크게 진행되었을 것으로 추정되었다. 이를 확인하기 위하여 지료의 미세분 함량을 측정하여 Fig. 3에 나타내었다. 여기에서 보는 것과 같이 26 인치 DDR에 의해 1회와 2회 처리된 지료의 미세분 함량은 각각 23%와 26%로 고해에 의한 섬유의 절단이 심하게 발생하지 않았다. 하지만 34 인치 DDR 처리된 지료의 미세분 함량은 34.5%로 상당히 높은 경향을 나타내었다.

현장에서 사용되는 디스크 리파이너의 경우 리파이너 플레이트의 바에 의해서 고해 작용을 받는 섬유의 숫자는 매우 제한적이므로 불균일한 처리가 발생할 가능성이 높아진다. 즉 실제 리파이너에 의해 처리된 섬유는 고해 작용이 크게 가해진 섬유와 전혀 처리되지

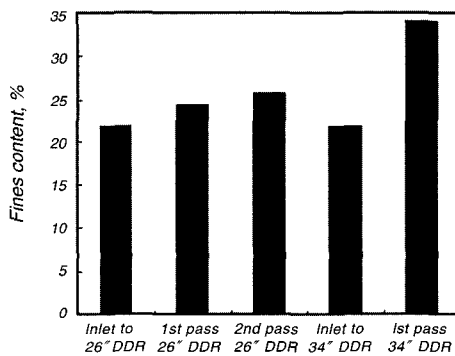


Fig. 3. Fines contents of stock samples taken from the inlet or outlet of two refiners.

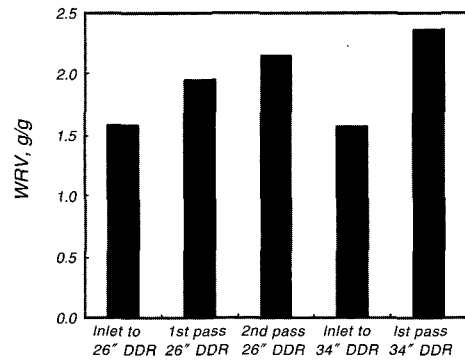


Fig. 4. Water retention value of stock samples taken from the inlet or outlet of two refiners.

않고 리파이너를 단순히 통과한 섬유로 나누어지며, 실험실용 고해기로 처리한 경우와 같이 모든 섬유가 균일한 처리를 받는 확률은 매우 낮다. 이를 다시 말하면 지료를 1회 리파이너로 처리하는 경우에는 단섬유의 발생도 높지만, 전혀 처리되지 않은 섬유의 비율도 증가될 수밖에 없음을 뜻한다. 따라서 이러한 문제를 방지하기 위해서는 더 많은 섬유가 리파이너 바에 의한 기계적 처리를 받을 수 있도록 플레이트 디자인을 변경시켜야 할 것으로 판단되었다. 이는 리파이너 플레이트에 댐(dam)을 설치하는 등의 방법을 통하여 개선할 수 있을 것으로 생각된다.

Fig. 4는 고해된 지료의 보수도 변화를 나타낸 것으로 미세분 발생과 유사한 경향을 보였다. 미세분 함량이 높은 지료가 보수도가 높았다.

고해에 따른 평균섬유장의 변화를 평가한 결과는 Fig. 5에 나타내었다. 평균 섬유장은 고해가 진행됨에

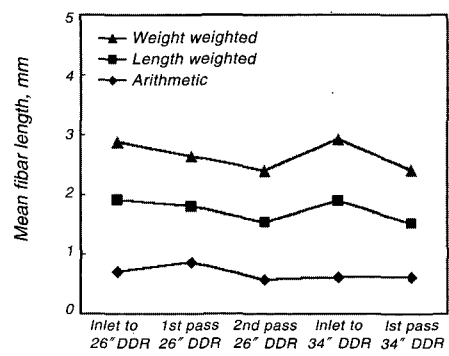


Fig. 5. Fiber length changes of stock samples taken from the inlet or outlet of two refiners.

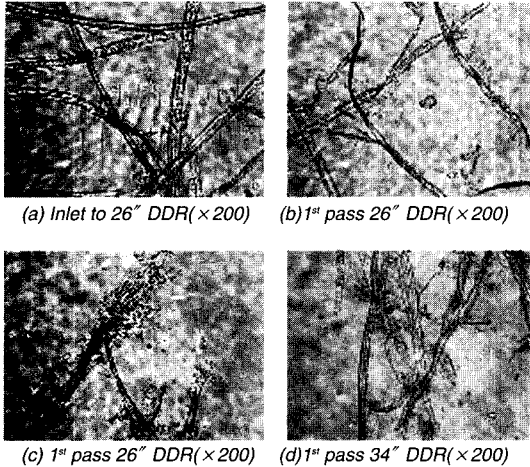


Fig. 6. Fiber development of stock samples with refining degree.

따라 지속적으로 감소되었다. 26 인치 DDR의 1차, 2차 처리를 통하여 섬유장의 감소가 뚜렷하게 나타났으며, 34 인치 DDR 처리된 섬유장도 유사한 양상을 보였다.⁴⁻⁶⁾

Fig. 6은 고해에 따른 섬유의 변화를 나타낸 현미경 사진이다. (a)는 DDR에 투입되는 재료로서 펄퍼에서의 해리와 스크린 공정을 통하여 결속 섬유가 제거되어 있는 상태이다. 섬유의 기계적 처리가 이루어지지 않은 상태이므로 장섬유의 형태를 유지하고 있었으며 섬유 자체의 손상과 단섬유화가 진행되지 않았다. 장 섬유 비율이 높기 때문에 탈수성은 유리하지만 섬유의 피브릴화가 이루어지지 않았으므로 우수한 물성을 기대하기는 어렵다. (b)는 26인치 DDR에 의해 1차 처리된 섬유의 형태로 피브릴화가 진행되었지만 여수도는 500mL CSF의 높은 상태를 나타내고 있었다. (c)는 26 인치 DDR로 2차 처리된 섬유로 피브릴화와 더불어 고해에너지 투입이 증가함에 따라 섬유 절단과 미세섬유가 발생하였음을 알 수 있다.

Fig. 7에 나타난 바와 같이 고해가 진행됨에 따라 인장강도가 증가하였다. 동일한 재료를 34 인치 DDR로 1회 처리한 재료의 인장강도가 26 인치 DDR로 2회 처리한 종이의 인장강도보다 낮았다. 이는 섬유의 미세분화가 크게 발생하는 리파이닝 조건보다는 비교적 전체 섬유가 고르게 처리되는 조건이 더욱 좋은 강도를 발휘시킬 수 있음을 보여준다.

Fig. 8-9에 도시한 압축강도와 내부결합 강도의 측정 결과도 인장강도와 유사한 경향을 나타내었다. 따

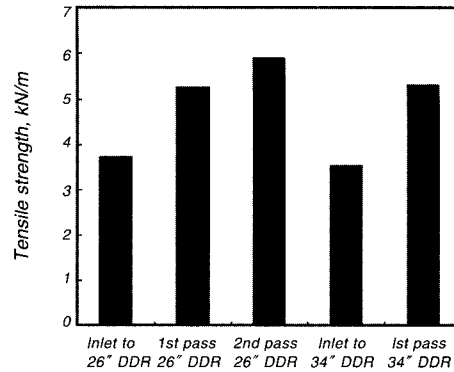


Fig. 7. Tensile strength of handsheets for stock samples taken from the inlet or outlet of two refiners.

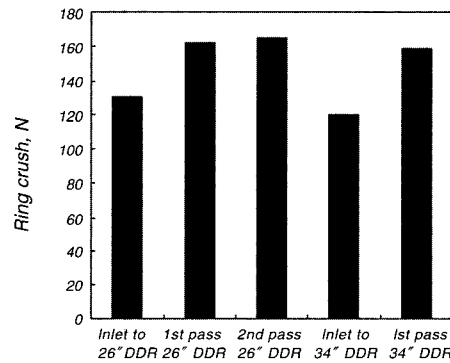


Fig. 8. Ring crush of handsheets for stock samples taken from the inlet or outlet of two refiners.

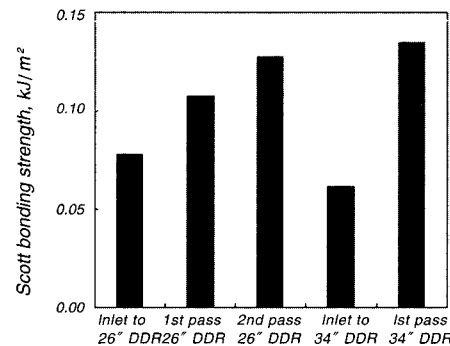


Fig. 9. Scott internal bonding strength of handsheets for stock samples taken from the inlet or outlet of two refiners.

라서 단순히 여수도 수준으로 물성을 예측하는 것은 리파이너의 종류가 다른 경우에는 적용될 수 없음을 알 수 있었다.

4. 결론

산업용지를 생산하고 있는 한 공장에서 사용하고 있는 두 가지 종류의 리파이너의 고해 효율을 리파이너 플레이트의 설계 변수를 활용하여 인치콘택 이론에 근거하여 분석을 실시하고, 고해 공정 변수로부터 고해 공정을 해석하였다. 또 이러한 분석 결과를 고해 후 펄프의 형상 및 여수도 변화 현상과 연관지어 해석하였다.

인치콘택 계산 결과 34 인치의 DDR은 5.89×10^8 inch/min, 26 인치 DDR의 인치콘택은 2.16×10^8 inch/min로 34 인치 DDR의 인치콘택이 2.73배 높게 나타났다. 리파이닝 임팩트는 34 인치 DDR이 19,803 IC/g로서 9,499 IC/g인 26 인치 DDR 보다 2.08배 높았다. 34 인치 DDR과 26 인치 DDR의 비교해 에너지는 각각 518 J/g과 330 J/g으로 34 인치 DDR이 높게 나타났다.

26 인치 DDR에 의해 1회와 2회 처리된 자료의 미세분 함량은 각각 23%와 26%로 고해에 의한 섬유 절단이 심하게 발생하지 않았다. 하지만 34 인치 DDR 처리된 자료의 미세분 함량은 34.5%로 상당히 높은 경향을 나타내었다. 동일한 자료를 34 인치 DDR로 1회 처리한 자료의 인장강도가 26 인치 DDR로 2차 처리한 종이의 인장강도보다 낮았다. 이는 섬유의 미세분화가 크게 발생하는 리파이닝 조건보다는 비교적 전체 섬유가 고르게 처리되는 조건이 더욱 좋은 강도를 발현시킬 수 있음을 보여주는 것으로 해석되었다.

인용문헌

1. Wei, S. and Jeffery, H., The effect of TMP refining using an adjustable-speed drive on energy consumption and pulp quality, *Tappi J.*, 77(9): 111~117 (1994).
2. Mohlin, U. B., Fibre development during mechanical pulp refining, *JPPS*, 23(1): 28~33 (1997).
3. Karins, A., The mechanism of fiber development in mechanical pulping, *JPPS*, 20(10): 280~288 (1994).
4. Xingsheng, Q., A mechanistic model for predicting pulp properties from refining operating conditions, *Tappi J.*, 78(4): 215~222 (1995).
5. Kure, K. A and Dahlqvist, G., Development of structural fibre properties in high intensity refining, *Pulp & paper canada J.*, 99(7): 59~63 (1998).
6. Richard, A., Ivan, B. and Gary, H., Impact of refining intensity on energy reduction in commercial refiners : effect of primary-stage consistency, 80(1): 185~193 (1997).
7. Sabiurin, M. and Xu, E., Optimizing residence time, temperature and speed to improve TMP pulp properties and reduce energy, *Pulp & paper canada J.*, 98(4): 38~45 (1997).
8. Seth, R. S., Beating and refining response of some reinforcement pulps, *Tappi J.*, 82(3): 147~155 (1999)
9. Stevens, W. V., *Pulp and paper manufacture*, Vol 6, p 193, TAPPI Press, Atlanta (1992).
10. Thomas, W. J., Enzymatic modifications of secondary fiber, *Tappi J.*, 76(3): 147~159 (1993).