

지층 형성시 탈수 특성

김용석¹⁾ · 원종명²⁾

¹⁾ 신호제지(주) 중앙연구소 · ²⁾ 강원대학교 제지공학과

1. 서론

지층형성시 영향받는 여과인자는 pulp 원료, 고해정도, filler 함량, 평량, 초지속도, 계의 전단력, 지층형성부의 설계(design), 다양한 초지 조절장치 등에 영향을 받으며, 교질상 결합(colloidal attractive) 인자는 다양한 첨가제에 의해 영향을 받는다. 초지공정에서 탈수는 forming 영역(~1.4%), vacuum box(~12%), suction couch(16~18%), press section, dry section 등으로 분류되며, 지층형성에 중요한 forming 영역은 preforming length(~0.8%), actual forming length(0.8~1.4%)로 분류할 수 있다. 지층형성에서 formation에 가장 중요한 영역은 preforming length로 지료의 균일한 유동성을 부여하는 영역이다. 그러나 design speed보다 생산성 향상을 위해서 초지기의 speed를 상승시켜 제조하는 경우가 많으며, 초지속도의 향상을 headbox 분출지료의 농도상승으로 대처하고 있어 실제 preforming length의 영역은 미미하거나 없는 경우가 많다. 그러므로 지합의 향상을 위하여 breast roll shaking이나 forming 영역에서의 탈수소자의 배열이 매우 중요하게 된다.

비여과저항을 측정하는 목적은 습지필의 비여과저항을 신속하게 평가할 수 있는 탈수소자를 개발하고 탈수성을 시간의 함수로 동시에 측정할 수 있다면 형성 과정에 있는 지필의 비여과저항도 계산해 낼 수 있다. Zanuttini[1]는 표준 탈수성 평가를 통해서 기계필프의 비여과저항을 계산하였고, Walstrom과 O'Blenes[2]는 Ingmanson 등[3, 4, 5]과 같은 방법을 이용, 실제 초지기상에서 관찰되는 탈수속도와 농도 범위에서 실험하여 탈수성과 비여과저항을 평가할 수 있는 장치를 개발하였다. Springer 등[6]과 Piers 등[7, 8]는 DDJ를 개조하여 용기 내의 지료 수위가 일정한 수준까지 저하될 때까지 걸리는 시간을 몇 개의 전극을 설치하여 비여과저항을 다양한 조건 하에서 평가하였다. Springer 등[9]는 온라인 스트리밍 포텐셜 장치를 이용하여 활엽수 지료의 비여과저항을 평가하였다. 그러나 본 연구에서 사용된 개조된 MDDA(Modified Dynamic Drainage Analyser)는 지료의 흐름에 영향을 미치지 않도록 jar 측면에 매우 작게 도출된 전극을 설치하였고 정확한 탈수시간을 얻기 위해서 0.001 sec의 정확성을 갖도록 하였다. 그 결과 1차 연구[20]에서는 공정의 headbox 지료에 specific filtration resistance과 탈수속도를 측정하기 위하여 MDDA를 사용하였으며, 실험에 사용된 MDDA의 결과는 Fourdrinier paper machine에서의 탈수 simulation이 가능함을 보였다.

본 연구에서는 Ingmanson[3]의 filtration 식을 사용하여 specific filtration resistance을 구하였다. 사용된 기기는 MDDA(Modified Dynamic Drainage Analyser)를 이용하여 진공에

따라 실험실적 탈수를 수행하여 결정됐다. 본 연구에 사용된 MDDA는 wet end에서 자료의 탈수거동특성을 파악 하기위해 구성된 새로운 장치이며, 수정된 Britt Jar로 탈수 시 진공응답과 탈수속도를 측정할 수 있도록 개조되었다. 다른 수정된 Britt Jars와 구별되는 MDDA는 시간과 stirring 속도뿐만 아니라 약품의 투입시간이 제어되는 micro processor이며 보류제, fibers, 다른 전단조건 사이의 접촉시간을 제어할 수 있다. MDDA의 또 다른 이익은 대부분의 다른 실험방법과 비교되어, retention, drainage, drainage time/velocity, wet web porosity, wet web dryness는 같은 sample에 대해 동시에 측정되는 것이다. 본 연구는 pulp 종류별 SEL(Specific Edge Load, refiner bar에 걸리는 부하)를 변화하여 섬유 고해특성을 변화시켰으며, 이 변화에 따른 탈수특성을 Canadian standard freeness와 specific filtration resistance로 분석하였고, 탈수특성과 물리적 특성을 비교·분석하였다.

2. 이론적 배경

Filtration식은 wire와 low-vacuum box에서 중력과 가압력에 의해 탈수흐름을 계산하는데 사용되며 Darcy's Law과 Kozeny-Carman 식으로부터 유도되며 Ingmanson[3]는 이 식들이 cellulose fiber의 compressible mat에 대해 사용될 수 있다고 보였고 filtration에 대한 식은 1과 같다.

$$Q = \frac{\Delta P \cdot A}{\mu \cdot R_t} = \frac{dV}{dt} \quad (1)$$

Where :

Q = flow rate, m³/s

ΔP = pressure across the fiber mat, Pa

μ = fluid viscosity, N · s/m² = kg/(m · s)

A = cross section of the fiber mat, m²

R_t = total drainage resistance, m⁻¹

(R_t = R_m + R_w, R_m = mat의 여과저항, R_w = wire filter의 여과저항)

dV/dt = drainage flow rate, m³/s

Total drainage resistance은 flow pattern과 stock composition의 함수이며, wire와 fiber mat에 의해 부과된 flow에 대한 저항 영향의 합이므로 filtration 식은 아래와 같다.

$$\frac{dv}{dt} = \frac{Adp}{\mu [R_f + R_w]} \quad (2)$$

Fiber resistance (R_f)는 단위 면적당 web에서 침적된 fiber 질량과 SFR 계수로 쓰여진다.

$$R_f = \frac{W}{A} \cdot \text{SFR} \quad (3)$$

Where :

W = mass of the fiber web, kg

SFR = specific filtration resistance, m/kg

주어진 순간 t에 대해, web에서 fiber의 질량

$$W = C \cdot V \quad (4)$$

where :

C = concentration of fibers in the slurry, kg/m³

V = volume of slurry already drained, m³

그래서 증분 형태에서, 식 (2)(3)(4)를 합하고 간략화하고 거꾸로 하면

$$\frac{\Delta t}{\Delta V} = \frac{\mu C V \text{SFR}}{A^2 \Delta P} + \frac{\mu R_w}{A \Delta P} \quad (5)$$

Where :

Δt = time interval to filtrate the volume ΔV , s

ΔV = filtrate volume, m³

식(5)가 fiber mat와 wire를 통해 flow에 대해 적합하다면, accumulated volume V의 함수로 $\Delta t/\Delta V$ 비율의 graph는 직선적이어야 할 것이다. 실험 결과 직선의 기울기와 절편은 SFR과 wire resistance를 계산하는데 사용되었다. 전형적인 측정결과 예를 Fig. 1에 나타낸다.

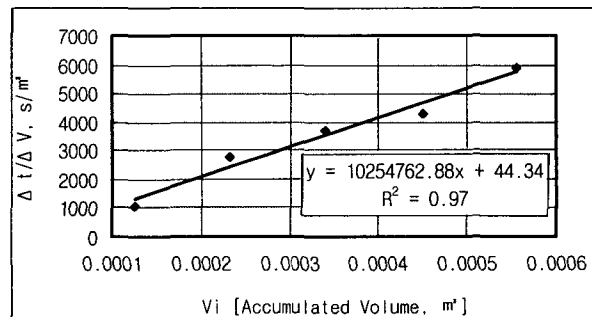


Fig. 1. Example of SFR calculation.

Total drainage resistance는 fiber mat basis weight의 증가에 따라 선형적으로 증가했으며, 이때 total drainage resistance는 식(6)과 같다.

$$R_t = SFR \cdot BW + R_w \quad (6)$$

Where :

BW = basis weight of the fiber mat, kg/m²

3. 실험장치

공정에서 수거된 지료의 여과저항과 지료의 특성을 파악하기 위해서 Fig. 2과 같이 개조된 MDDA 구성도는 아래와 같다.

(a) jar의 높이는 15cm, diameter는 10cm, 난류를 형성시키기 위해서 0.5cm 높이의 baffle(3개)가 설치되었고 교체 가능한 (b) wire로 형성된 sheet를 측정할 수 있도록 jar와 wire 사이에 얇은 고무 ring을 설치하여 분리시 물의 혼입을 방지하여 wet web의 무게를 정확하게 측정할 수 있도록 하였다. (c) pneumatic valve로 opening time과 low flow resistance를 신속하게 잘 제어하기 위해 설치되어 있으며, (d) vacuum vessel의 크기는 1.5 dm³이며, (e) vacuum pump는 vacuum vessel에 있는 진공은 0 ~ 60 kPa 까지 조정될 수 있게 되어 있다. (f) vacuum gauge는 (g) chart recorder와 연결되어 있다. (h) Two dosage units는 약품 첨가용으로 첨가시간은 0 sec ~ 수분 (0.1 sec 정밀도)까지 조정된다. 각 측정 위치의 drainage time이 (j) digital display에서 출력되며 정밀도는 0.001sec 이다. 측정위치마다 전도도를 이용한 electrodes를 설치하였으며, 총 7개를 설치하였다. Dosage unit, stirrer, bottom valve, digital display는 (k) micro processor와 연결되어 작동되도록 하였다.

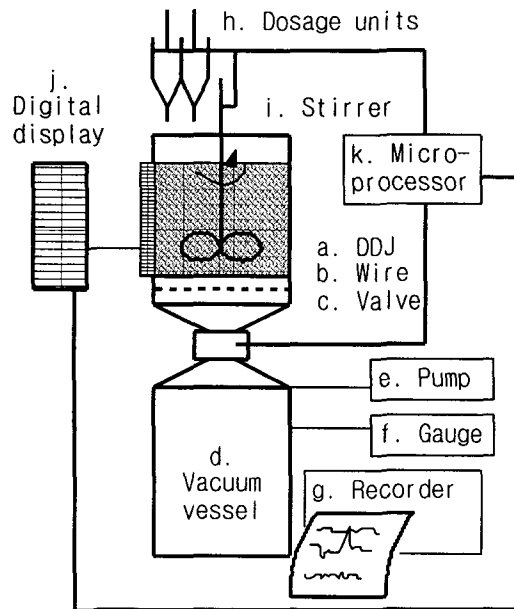


Fig. 2. Schematic illustration of the Modified Dynamic Drainage Analyzer.

MDDA에서는 지료의 충분한 혼합을 위하여 탈수 전 1000rpm, 5sec로 교반하였고 탈수 시간은 30 sec를 부여하였다. 본 연구에서 Fourdrinier paper machine에서 wire 위의 평균 진공도는 0.25 bar이므로 0.25 bar를 설정하였다.

4. 재료 및 방법

공시 재료는 미표백 크라프트 펄프(UKP), 표백 크라프트 펄프(NBKP, LBKP)를 사용하였으며, 고해도 변화는 PFI Mill의 회전수를 2000, 4000, 6000, 8000회로 변화하였고 bar 압력을 3.33, 6.00 N/mm로 변화하여 SEL 값[11]를 변화시켰다.

$$SEL, Bs = \frac{Ne}{L \times N} = \frac{Ne}{\ell \times Zr \times Zs \times N} \quad (7)$$

Where :

SEL, Bs : specific edge load, refiner bar 모서리에 부딪치는 부하(Ws/m)

Ne : refiner를 돌리기 위한 net power, effective refining power(kW)

L : cutting length (Km/rev) = $\ell \times Zr \times Zs$

ℓ : 1개의 rotor와 stator bar의 접촉길이, 교차점폭 (km)

Zr : rotor bar 이빨수

Zs : stator bar 이빨수

N : running speed(s^{-1}) = rpm / 60

같은 고해기를 사용하였을 때는 L 값은 동일하며, 또한 PFI Mill에서 idle power는 측정이 곤란하여 전력계에 출력된 수치를 Ne로 하였고 L 값은 PFI Mill의 구조특성상 구할 수 없어 변수로 사용하였다.

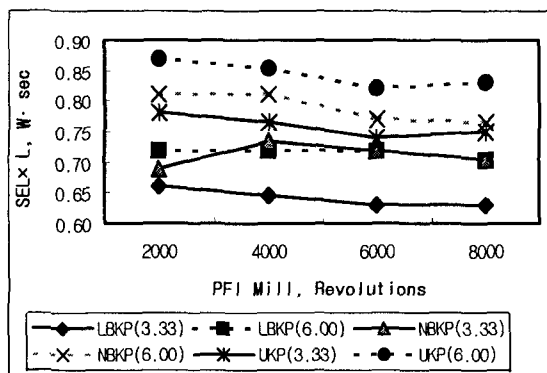


Fig. 3. SEL value as a function of revolutions of PFI Mill for various pulps.

Table 1. Average SEL value of pulps

	Load	평균 SELx L
	N/mm	W·sec
LBKP	3.33	0.641
	6.00	0.716
NBKP	3.33	0.713
	6.00	0.789
UKP	3.33	0.759
	6.00	0.844

Disintegrator(Tappi method T205 om-88)에서 해리된 지료의 고해는 PFI Mill(Tappi method T248 cm-85, 처리농도 = 10%)에서 수행하였으며, pulp 및 탈수특성은 섬유장측정기(Kajjani FS-100), WRV(Tappi Useful method UM 256), Canadian standard freeness(Tappi method T227 om-92)의 CSF, MDDA의 SFR(specific Filtration Resistance)

로 평가하였고, 평량 약 80 g/m²으로 제조(Formax II, Adirondack machine corp.) 하였다. 물리적 특성은 지필도(Paprican Micro-scanner), 투기도(L&W Densometer), 인열강도(L&W Tearing tester), 내부결합력(Scott Internal Bond Tester, Precision Scientific Petroleum Instruments Company), 인장강도(Testo Metric AX, M350-5kw), Zero Span(TS-100 PulMac) 등을 각각 측정하였다.

5. 결과 및 고찰

5.1 고해방법에 따른 탈수특성

LBKP, NBKP, UKP를 PFI Mill의 load를 변화시켜 SEL 값을 변화시켰으며, 고해도 변화는 2000, 4000, 6000, 8000회를 수행하여 펄프의 탈수특성을 분석하였다. PFI Mill의 회전수에 따라 CSF는 선형관계를 보이나 SFR는 지수형태의 상관관계를 보였다. SEL의 증가에 따라 여수도(CSF)와 비여과저항(SFR)은 큰 차이를 보였다.

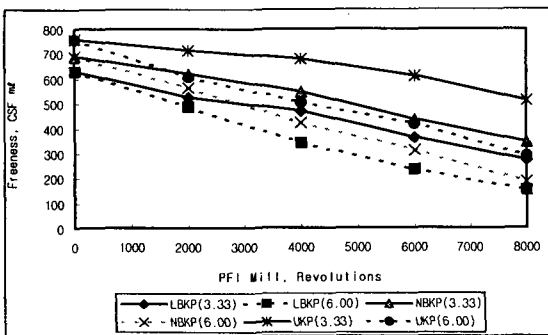


Fig. 4. Freeness as a function of revolutions of PFI Mill.

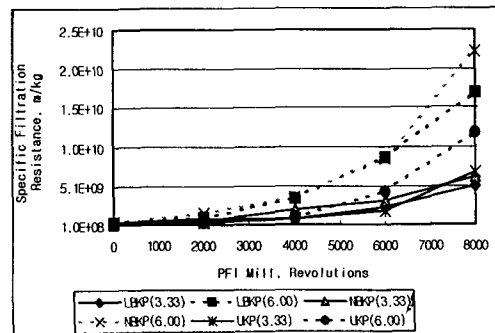


Fig. 5. SFR as a function of revolutions of PFI Mill.

지료의 탈수 속도는 지필 형성시 pre-forming length에서의 탈수를 초기탈수시간으로 vacuum box전 지필의 탈수속도를 최종탈수 시간으로 하였으며, Fourdrinier machine wire위 평균 진공도인 0.25 bar를 사용하여 평가하였고 그 결과 CSF와 탈수시간은 CSF의 누승으로 변화나 상관관계가 낮았다. SFR과 초기탈수시간은 펄프종류에 따라 선형적으로 관계를 갖고, 최종탈수시간은 pulp 종류에 관계없이 선형적인 관계를 가지며, 상관관계도 매우 높아 펄프의 탈수특성은 SFR의 결과가 직접적인 관련성이 있었다.

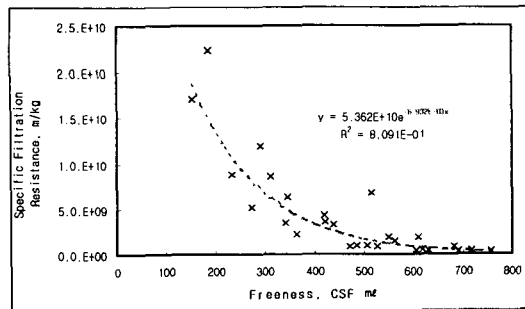


Fig. 6. Correlation between SFR and freeness.

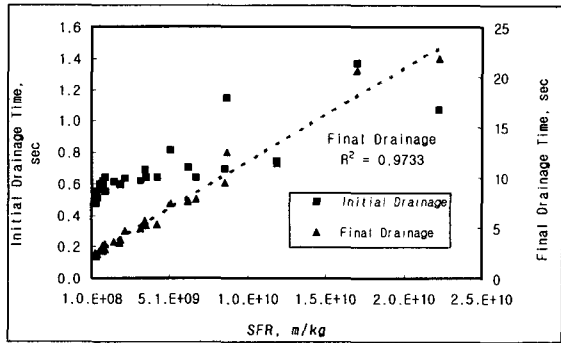
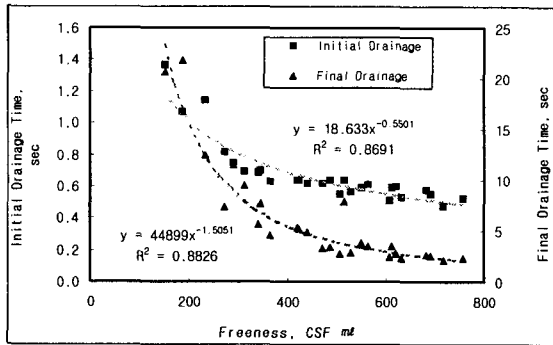


Fig. 7. Drainage time as a function of freeness. Fig. 8. Drainage time as a function of SFR.

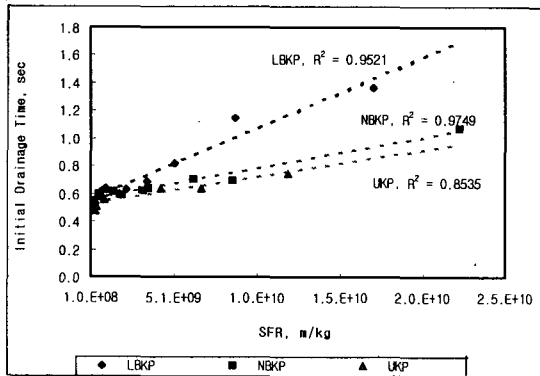


Fig. 9. Initial drainage time as a function of SFR.

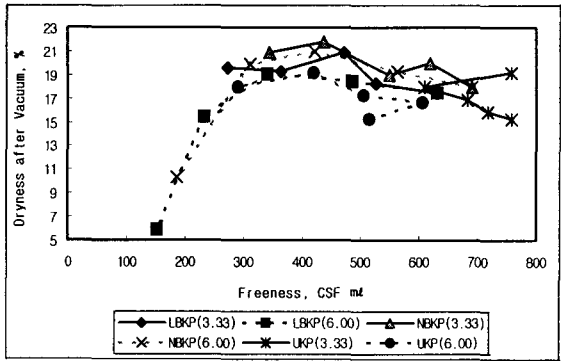


Fig. 10. Dryness after vacuum as a function of freeness.

MDDA에서 0.25bar로 진공탈수를 수행할 때, CSF에서는 선형관계를 보이나 SFR에서는 로그형태의 증가를 보인다. SEL 값이 증가할수록 건조도가 하락함을 볼 수 있으며, 과도한 고해수행으로 SFR(비여과저항)이 크게 증가하게 되면 건조도는 크게 하락하였다. 이는 SFR의 증가에 따라 최종 탈수시간이 길어지므로 높은 진공응답을 갖고 있더라도 vacuum box에서 체류시간이 짧아지므로 press part에 유입되는 지필의 건조도는 낮게 되기 때문이다.

5.2 고해방법에 따른 물리적 특성

WRV(water retention value)는 fiber saturation point(FSP, 섬유포화점)이하의 결합수(imbibed water)를 나타내며, 종이의 주요 물리적 특성을 나타낸다. 섬유포화점이 보통 25 ~

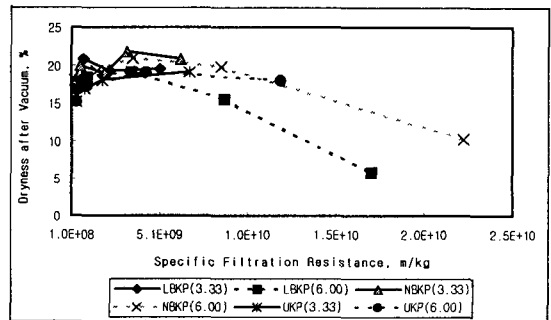


Fig. 11. Dryness after vacuum as a function of specific filtering resistance.

35% (평균 28%) 이며 원심분리기의 900g와 600g에서 수행하였다. 고해작업에 따라 WRV는 증가하였으며, CSF에서는 SEL 값의 증가에 따라 LBKP만이 WRV가 증가하였고, SFR에서는 LBKP와 UKP에서 SEL값 증가에 따라 약간 증가된 WRV를 보였다. 특히 NBKP는 가장 낮은 WRV 수치를 보였다.

Table 2. Stock percentage consistency at 900g and 600g

	900g	600g
Average	48.61	37.90
Max	59.91	51.45
Min	40.45	29.64

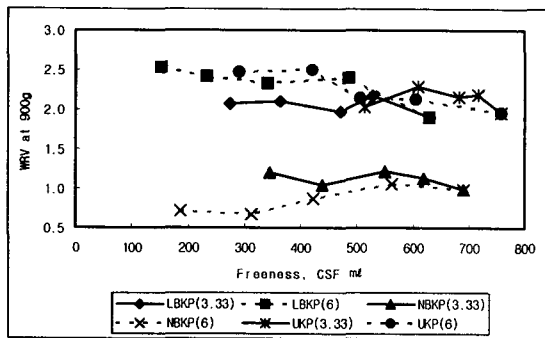


Fig. 12. WRV at 900g as a function of freeness.

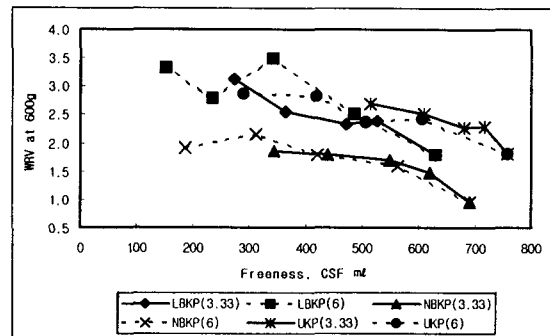


Fig. 13. WRV at 600g as a function of freeness.

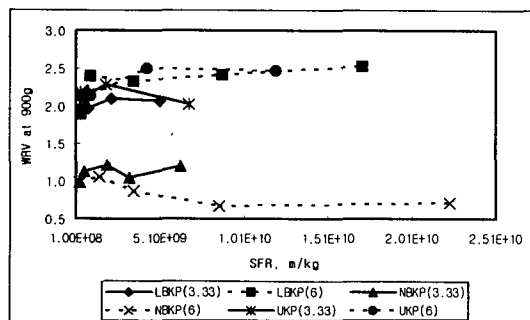


Fig. 14. WRV at 900g as a function of SFR.

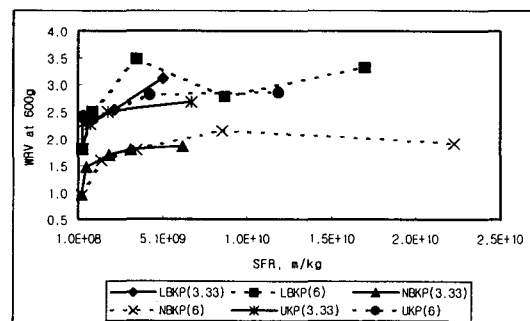


Fig. 15. WRV at 600g as a function of SFR.

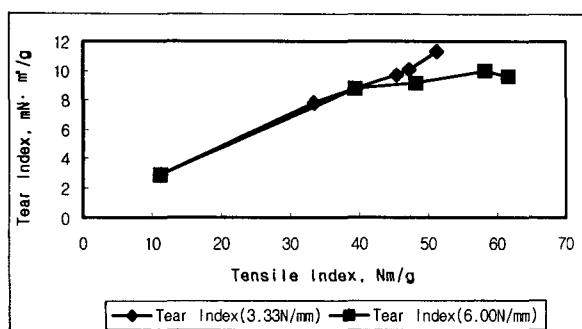


Fig. 16. The relationship between tensile index and tear index for LBKP.

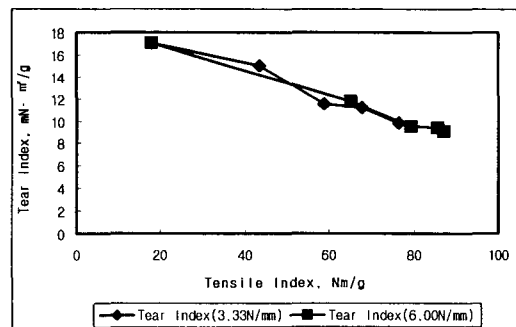


Fig. 17. The relationship between tensile index and tear index for NBKP.

인장강도와 인열강도 관계는 pulp 종류에 따라 다른 상관관계를 보였다. SEL 값에 따라 UKP에서만 차이를 보였으며, SEL 값 증가에 따라 낮은 물리적 특성을 보였다.

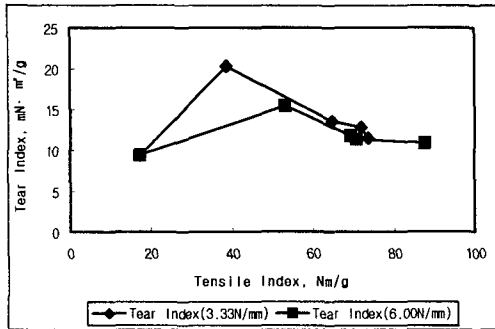


Fig. 18. The relationship between tensile index and tear index for UKP.

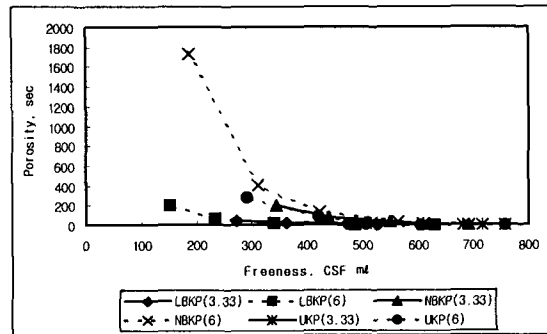


Fig. 19. Porosity as a function of freeness.

약 80 g/m²으로 제조된 종이의 투기도는 CSF보다 SFR에서 선형적으로 일치하였으며, 높은 상관관계를 얻을 수 있었다. SEL 값의 증가에 따라 투기도 편차는 pulp 종류에 따라 다른 결과를 보였으며, UKP, NBKP, LBKP 순으로 SEL 값 증가에 따라 높은 기울기 편차를 보였다.

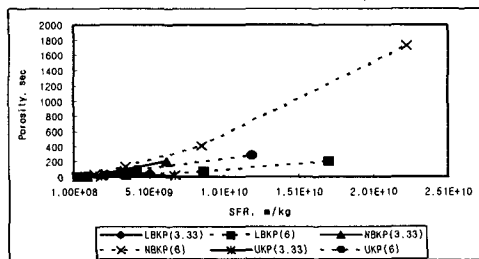


Fig. 20. Porosity as a function of SFR.

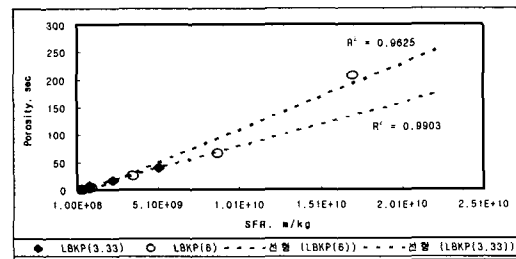


Fig. 21. Porosity as a function of SFR for LBKP.

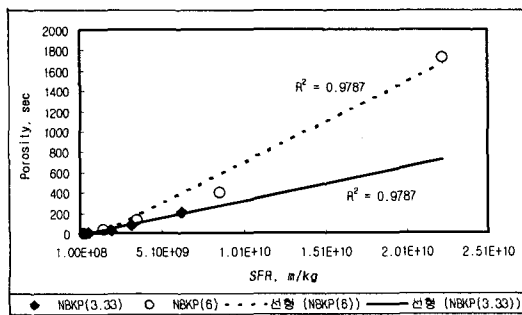


Fig. 22. Porosity as a function of SFR for NBKP.

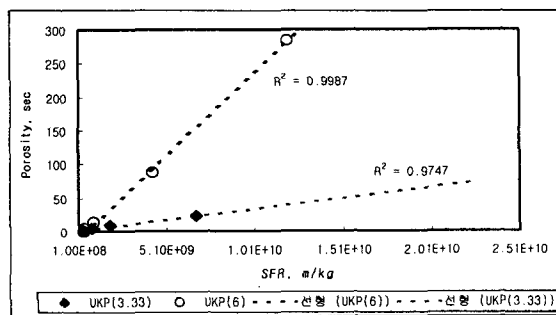


Fig. 23. Porosity as a function of SFR for UKP.

지합지수는 평량의 제곱근에 비례하므로 80 g/m^2 을 기준으로 환산한 결과 지합지수는 CSF에는 선형적으로 SFR에 대해서는 로그형태의 상관관계를 얻을 수 있었다.

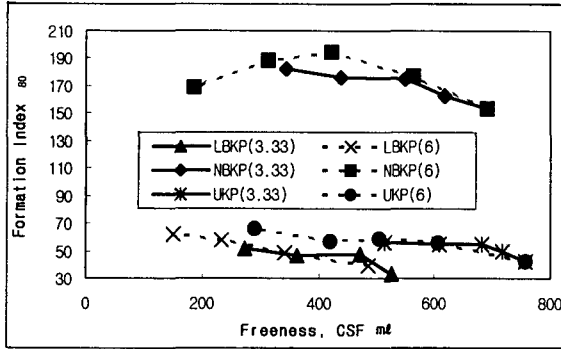


Fig. 24. Formation index as a function of freeness.

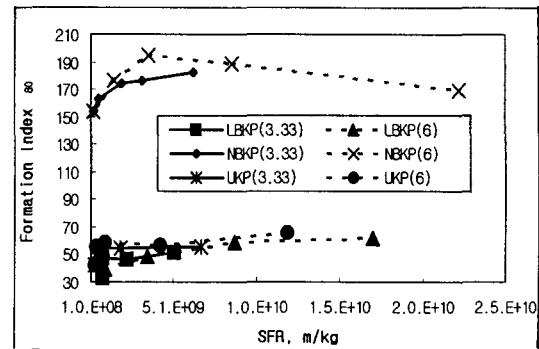


Fig. 25. Formation index as a function of SFR.

내부결합력은 CSF에서는 LBKP는 선형적으로 NBKP와 UKP는 반로그형태의 상관관계가 있었으며, SFR에서는 로그형태로 증가하였으며, 낮은 여과저항에서 내부결합력이 급격하게 증가하였다.

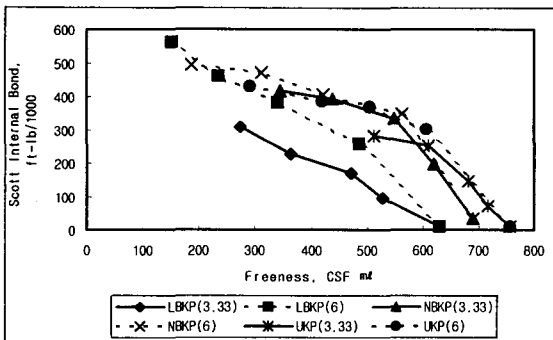


Fig. 26. Scott internal bond strength as a function of freeness.

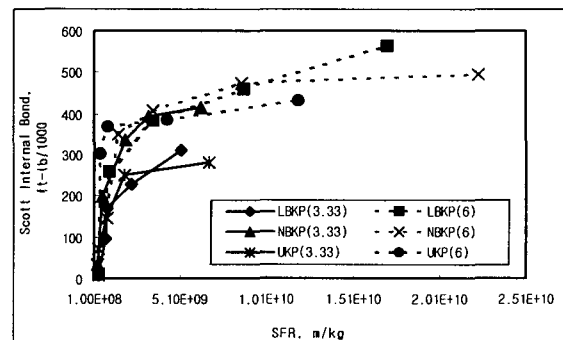


Fig. 27. Scott internal bond strength as a function of SFR.

종이의 밀도는 CSF에서는 LBKP는 선형적으로 NBKP와 UKP는 반로그형태로 상관관계가 있었으며, SFR에서는 로그형태로 증가하였으며, 낮은 비여과저항 부근에서 밀도가 급격히 증가하였다.

TEA(Tensile Energy Absorption)는 CSF에서 거의 선형관계를 보이며, UKP를 제외하고 SEL 값에 관계없이 동일한 경향을 보였다. 그러나 UKP에서는 높은 SEL 값에서 낮은 경향을 보였다. SFR에서는 로그형태로 증가하며, UKP를 제외하고 SEL 값에 관계없이 동일한 경향을 보였다. 그러나 UKP에서는 CSF와 반대로 높은 SEL 값에서 높은 경향을 보였다.

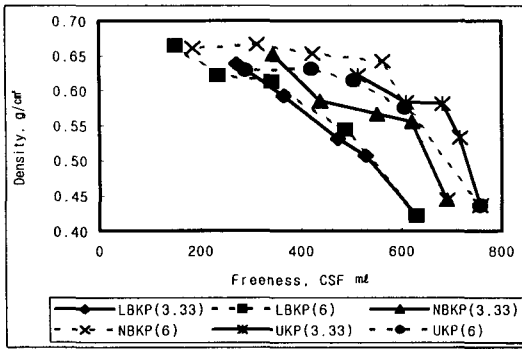


Fig. 28. Density as a function of freeness.

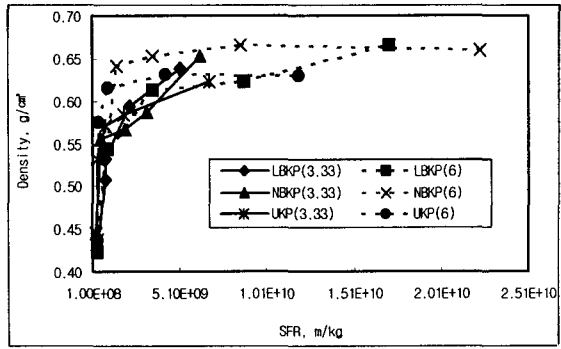


Fig. 29. Density as a function of SFR.

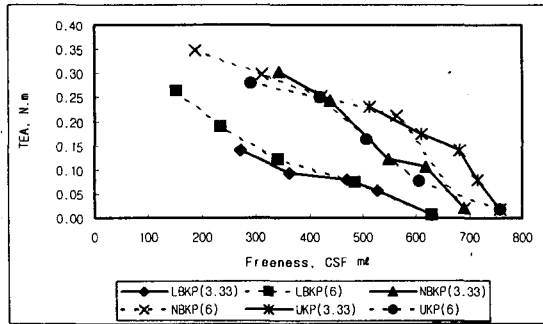


Fig. 30. TEA as a function of freeness.

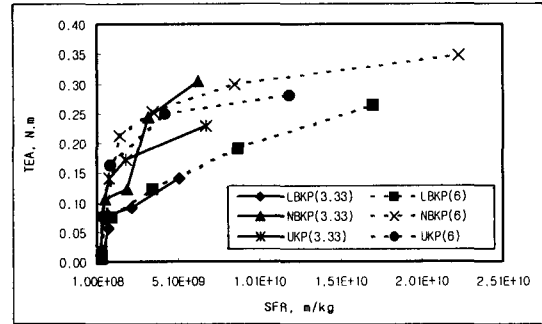


Fig. 31. TEA as a function of SFR.

섬유의 결합력과 섬유길이는 ZSTS(Zero-span tensile strength)에 영향을 적게 미치며, 섬유의 해리나 고해로부터 fiber kinks와 crimps의 펴는 정도에 영향을 크게 받는다. 기계적 전단력과 낮은 농도에서의 해리와 고해시 팽윤과정, 그리고 건조시 수축력에 의해 섬유를 직선화하게 하여 ZSTS를 향상시킨다[12]. 고해가 증가함에 따라 ZSTS는 증가하다 일정한 수치를 유지하며, LBKP와 NBKP에서는 SEL값이 증가함에 따라 ZSTS가 감소하는 경향을 보였다. SFR의 경우 UKP에서 SEL값이 증가할수록 ZSTS가 증가하였다.

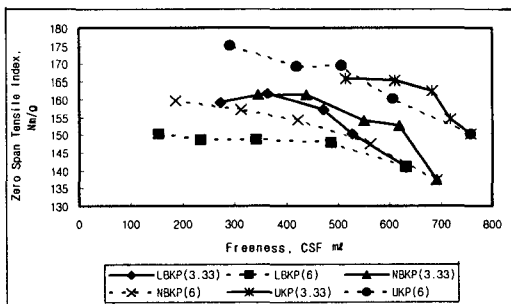


Fig. 32. Dry-sheet zero span tensile index as a function of freeness.

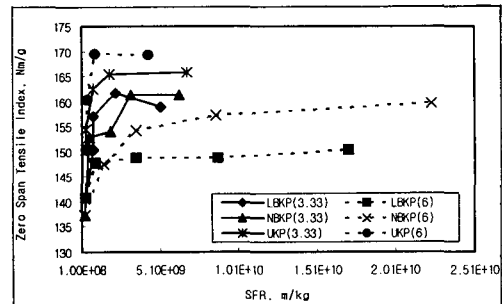


Fig. 33. Dry-sheet zero span tensile index as a function of SFR.

6. 결론

Pulp 종류별 SEL(Specific Edge Load, refiner bar에 걸리는 부하)를 변화하여 섬유의 고해특성을 변화시켰으며, 이 변화에 따른 탈수특성을 Canadian standard freeness와 specific filtration resistance로 분석하였고, 탈수특성과 물리적 특성을 비교·분석한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 고해방법에 따른 탈수특성

- SEL의 증가에 따라 여수도(CSF)와 비여과저항(SFR)은 큰 차이를 보였다.
- 자료의 탈수속도는 CSF로 평가하기 어려웠으나 SFR과 초기탈수시간은 펄프종류에 따라 선형적으로 관계를 갖고, 최종탈수시간은 pulp 종류에 관계없이 선형적인 관계를 가지며, 상관관계도 매우 높아 펄프의 탈수특성은 SFR의 결과가 직접적인 관련성이 있었다.
- Press part에 유입되는 지필의 건조도는 MDDA의 최종탈수시간과 진공탈수시간에 영향을 받음을 알 수 있었다. 이는 자연탈수로 측정되는 CSF 측정기로는 지필의 건조도를 제지공정의 조건에서 파악하기 어려움을 알 수 있다.

(2) 고해방법에 따른 물리적 특성

- 고해작업에 따라 WRV는 증가하였으며, NBKP는 가장 낮은 WRV 수치를 보였다.
- 인장강도와 인열강도 관계는 pulp 종류에 따라 다른 상관관계를 보였다. SEL 값에 따라 UKP에서만 차이를 보였으며, SEL 값 증가에 따라 낮은 물리적 특성을 보였다.
- 기타 물리적특성 상관 관계

항 목	CSF	SFR	비 고
투기도	지수관계	선형관계	SFR는 높은 상관관계
지합지수	선형관계	로그 관계	
내부결합력	선형관계:LBKP 반로그관계:NBKP/UKP	로그관계	낮은 SFR에서 내부결합력 급격히 증가
밀도	선형관계:LBKP 반로그관계:NBKP/UKP	로그관계	낮은 SFR에서 밀도 급격히 증가
TEA(Tensile Energy Absorption)	선형관계	로그관계	
ZSTS(Zero-span tensile strength)	고해가 증가함에 따라 ZSTS는 증가하다 일정한 수치를 유지		

(3) 결론

CSF는 물성에 따라 상관관계가 다르나 SFR는 탈수시간과 투기도는 거의 일치하는 선형 관계를 가지며, 그 외 물성들은 로그관계를 가졌다. SFR은 제지공정의 생산성과 관계되는 지필의 건조도를 파악할 수 있었다. 그러므로 비여과저항(SFR)의 측정으로 초지조건 및 물리적특성도 추론할 수 있어 CSF보다 더욱 효율적인 정보를 얻을 수 있었다.

7. 참고문헌

1. ZANUTTINI, M.A., "Using the Drainage Time to Evaluate Mechanical Pulps". Tappi 71(2):115-116(1988).
2. WALSTRDM, B. and O'BLENES. G.. "The Drainage of Pulps at Paper-Making Rates and Consistencies Using a New Drainage Tester", Pulp Paper Mag. Can. 63(8):T405 (1962).
3. INGMANSON, W.L., "An Investigation of the Mechanism of Water Removal from Pulp Slurries", Tappi 35(10):439-448(1952).
4. INGMANSON, W.L. and WHITNEY R.P, "The Filtration Resistance of Pulp Slurries", Tappi 37(11):523-533(1954).
5. INGMANSON, W.L., ANDREWS, B.D. and JOHNSON, R.C., "Internal Pressure Distributions in Compressible Mats Under Fluid Stress", Tappi 42(10):840-849(1959).
6. SPRINGER. A.M., CHANDARASEKARAN, S. and WAGNER, T.H., "Single Procedure for Measuring Drainage, Retention, and Response to Vacuum of Pulp Slurries", Tappi 67(2):124-126(1984).
7. PIERS, E.C., SPRINGER, A.M. and KUMAR, V., "drainage simulation for Water Drainage in Fourdrinier Paper Machines", Tappi 71(4):133-139(1988).
8. PIERS, E.C., SPRINGER, A.M. and KUMAR, V., "A New Technique for Specific Filtration Resistance Measurement", Tappi, 72(7):149-154(1989).
9. SPRINGER, A., PENNIMAN, J.G., Jr. and PIRES, E.C., "Innovative Procedure for Automatic Measurement of Specific Filtration Resistance and Electrostatic Charge", Tappi 77(8):121-127(1994).
10. WON, J.M., KIM, Y.S., "Drainage Simulation in Fourdrinier Paper Machine", 1999 Proceedings of the Korea Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 49-60(1999).
11. Brecht, W. and Siewert, W. "The Theoretical and Technical Evaluation of the Beating Process as Performed on Modern Beating Equipment", Das Papier 20(1):4-14(1966).
12. Seth. R.S., "Zero-span Tensile Strength of Papermaking Fibres: The Role of Beating and Refinig", 5th International Paper & Board Industry Conference Scientific & Technical Advances in Refining:Paper 5(1999)