

고해부하가 지층 형성시 탈수특성에 미치는 영향

김 용 식[†] · 원 중 명^{*}

Effect of Refining Load on the Drainage Characteristics of Pulp

Yong Sik Kim[†] and Jong Myoung Won^{*}

ABSTRACT

The change of fiber length, freeness, initial forming drainage velocity, specific filtration resistance, final drainage time and wet web dryness were measured to investigate the effect of the refining load on the drainage characteristics of pulp. The arithmetic average fiber length after refining with higher refining load was shorter than that obtained with lower refining load. Higher refining load decreased initial forming drainage velocity, final drainage time and wet web dryness. The refining load also affected the relationship between freeness and specific filtration resistance, initial forming drainage velocity, final drainage time. It was found that the specific filtration resistance is better than freeness to predict the drainage characteristics of pulp and the wet web dryness.

1. 서론

지층 형성시 탈수에 영향을 미치는 인자는 펄프 원료, 고해정도, 충진제의 종류 및 함량, 평량, 초지속도, 계의 전단력, 지층 형성부의 설계, 다양한 초지 조절장치 등이 있다. 섬유의 고해는 섬유구조의 내·외부 변화, 단섬유 증가, 섬유길이 변화, 섬유단면의 변화, 섬유의 kinks와 crimps 발생, 세포벽의 미세압축 변화, 세포벽 물질의 용해, 세포벽의 젤라틴화, 섬유의 유연성 등을 변화시켜 탈수성에 영향을 미친다.

실험실적 고해방법으로는 Valley beater, PFI mill, Ball 또는 Pebble mill, Kollergang,

Lampen mill, Banning와 Seybold beater, Noble과 Wood cycle beater, Jokro mill, Aylesford beater, Bauer-Mead refiner, Escher-Wyss refiner 등¹⁾이 있는데, Abitz²⁾와 Seth 등³⁾은 중농도(8%~20%)에서 섬유에 강한 전단력을 부여하여 PFI mill의 결과와 물리적 특성 변화를 비교하여 보고한 바 있다.

Zanuttini⁴⁾는 표준 탈수성 평가를 통해서 기계 펄프의 비여과저항을 계산하였고, Springer 등⁵⁾은 온라인 스트리밍 포텐셜 장치를 이용하여 활엽수 지료의 비여과저항을 평가하였다. Nagarajan 등⁶⁾은 OCC에 pergalase A-40로 처리하여 탈수성의 변화를 조사하였고, 김⁷⁾은 UKP에 enzyme

· 신호제지(주) 중앙연구소(Shinho Paper R&D Center, #141-1, Rueup-Dong, Osan-City, Kyungki-do, 447-160, Korea).

* 강원대학교 제지공학과(Dept. of Paper Science & Engineering, College of Forest Sciences, Kangwon National University, Chuncheon, 200-701, Korea).

† 주저자(Corresponding author)

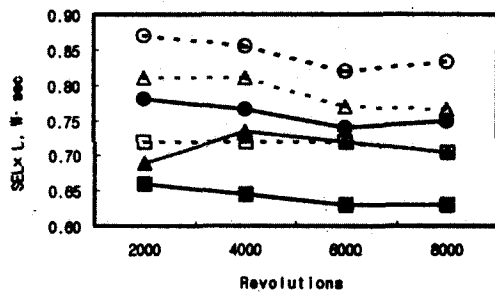


Fig. 1. SEL x L value as a function of revolutions of PFI Mill for various pulps. (■ HwBKP, ▲ SwBKP, ● SwUKP, - 3.33 N/mm, 6.00 N/mm)

을 처리하여 비여과저항을 평가하였다. Wei 등⁸⁾은 drainage column으로부터 초음파를 이용하여 펄프의 탈수성을 평가하였다.

본 연구에서는 PFI mill을 사용하여 펄프 종류별 고해부하의 값을 변화시켜 섬유 특성 및 탈수 특성의 변화를 조사하였다. 그 변화에 따른 전통적인 탈수특성은 여수도(Canadian standard freeness)와 초기 지층 형성 탈수속도 및 Ingmanson⁹⁾의 filtration 식을 이용한 비여과저항을 비교·분석하였다.

2. 재료 및 방법

공시재료는 미표백 크라프트펄프(SwUKP), 표백 크라프트 펄프(SwBKP, HwBKP)를 사용하였으며, 고해도를 조절하기 위하여 PFI Mill의 회전수를 2000, 4000, 6000, 8000회로 변화시켰다. 또한 고해부하를 조절하기 위하여 bar 압력을 3.33 N/mm와 6.00 N/mm로 변화시켰으며, SEL x L 값¹⁰⁾은 Fig. 1 및 Table 1과 같

Table 1. Average load and SELXL value applied

Pulp	Load (N/min)	Average SEL x L (W · sec)
HwBKP	3.33	0.641
	6.00	0.716
SwBKP	3.33	0.713
	6.00	0.789
SwUKP	3.33	0.759
	6.00	0.844

다. 고해 농도는 10%로 고정시켰다.

$$SEL, Bs = \frac{Ne}{L \times N} = \frac{Ne}{l \times Zr \times Zs \times n} \quad (1)$$

여기에서,

SEL, Bs : specific edge load, refiner bar 모서리에 걸리는 부하, Ws/m

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

L : cutting length(km/rev) = $l \times Zr \times Zs$

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 구조 특성상 구할 수 없어 변수로 사용하였다.

고해한 펄프의 섬유장 분석은 Kajaani FS-100으로 실시하였고, 고해 펄프의 탈수특성을 평가하기 위하여 WRV, 여수도, 비여과저항을 측정하였다. 비여과저항은 MDDA로 측정하였으며, 자료의 충분한 혼합을 위하여 탈수를 시키기 전에 1,000 rpm으로 5초간 교반하였고, 진공 탈수시간은 30초를 적용하였다.

탈수시 진공도는 0.25 bar를 적용하였고, 자료의 농도는 0.22%이었다. 초기 지층 형성 탈수 속도는 MDDA에서 사용된 전극의 위치별 유량(Table 2)과 초기 탈수영역의 시간을 감안하여

Table 2. Position of electrode sensors

	Drained Volume, %	Remarks
sensor-1	1.73	Setting Point of Drainage Initial Forming Drainage Velocity
sensor-2	15.48	
sensor-3	29.86	
sensor-4	43.82	
sensor-5	57.11	
sensor-6	71.74	
sensor-7	87.56	Final Drainage Time

sensor#2에서의 탈수속도를 취하였다. 또한 최종 탈수시간은 마지막 sensor(#7)에서의 탈수시간을 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 고해부하가 섬유장에 미치는 영향

고해가 섬유의 특성 변화에 미치는 영향에 대한 연구는 제지기술이 개발된 이래 꾸준히 진행되어 왔다. 그 결과 일반적으로 고해시 고해부하가 높을 수록 단섬유화가 많이 일어나며, 낮은 고해부하를 적용할 경우에는 소섬유화가 주로 일어나는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 이러한 현상이 다른 펄프 종류에 대하여도 동일하게 적용되는지를 조사한 결과 Fig. 2와 Fig. 3에서 보는 바와 같이 펄프의 종류에 관계없이 모두 낮은 고해부하가 적용되었을 때에 비하여 높은 고해부하가 적용되었을 때 짧은 수평균 섬유장을 나타내었다.

한편 고해가 진행됨에 따라 탈수와 광학적 특성에 영향을 미치는 수평균 섬유장과 종이의 물성에 영향을 미치는 중량평균 섬유장의 변이를 조사한 결과 수평균 섬유장은 활엽수 표백 크라프트펄프의 경우 초기 2,000 rpm까지 크게 증가하는 경향을 나타내었으며, 낮은 고해부하가 적용되었을 경우에는 계속 완만한 증가를 나타낸 반면, 높은 고해부하가 적용되었을 경우에는 다시 감소되는 경향을 나타내었다. 이러한 현상을 Mohlin 등¹¹⁾은

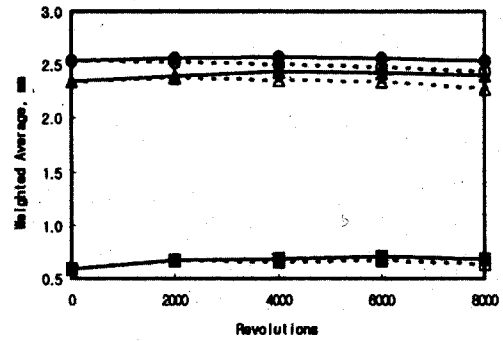


Fig. 3. Weighted average fiber length as a function of PFI Mill revolutions. (■ HwBKP, ▲ SwBKP, ● SwUKP, — 3.33 N/mm, ···· 6.00 N/mm)

straightening effect라고 하였고, 이러한 현상이 낮은 SEL에서 보다 많이 일어난다고 보고한 바 있다. 그러나 본 연구에서는 침엽수 펄프의 경우 낮은 고해부하에서 원래의 섬유장을 유지하거나 완만한 감소를 나타낸 반면 높은 고해부하에서는 수평균 섬유장의 감소가 크게 나타났다. 중량평균 섬유장은 낮은 고해부하가 적용되었을 경우 침엽수 펄프의 경우에도 다소의 straightening effect가 관찰되었다.

3.2 수평균 섬유장이 여수도와 비여과저항에 미치는 영향

고해처리에 의하여 얻어진 수평균 섬유장이 여수

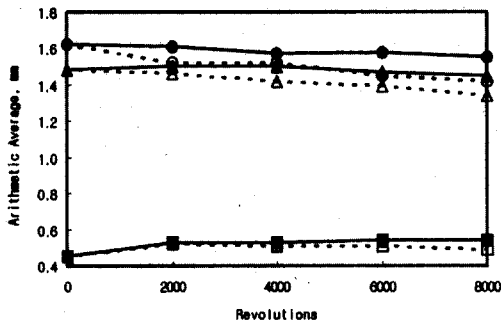


Fig. 2. Arithmetic average fiber length as a function of PFI Mill revolutions. (■ HwBKP, ▲ SwBKP, ● SwUKP, — 3.33 N/mm, ···· 6.00 N/mm)

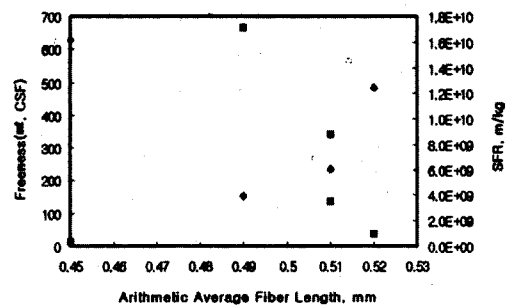


Fig. 4. Effect of arithmetic average fiber length on the freeness and specific filtration resistance(HwBKP, beating load 6.0 N/mm, ◆ Freeness, ■ SFR).

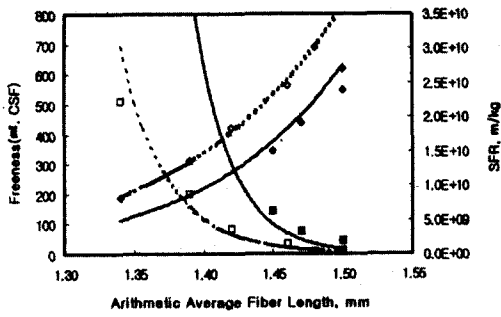


Fig. 5. Effect of arithmetic average fiber length on the freeness and specific filtration resistance(SwBKP, -3.33N/mm, ... 6.00 N/mm, ◆ Freeness, ■ SFR).
 x =arithmetic average fiber length(mm),
 y_1 =freeness(ml, CSF), y_2 =SFR(m/kg)
 For Beating load 3.33 N/mm
 $y_1=1.2726 \times 15.305 (R^2=0.6224)$, $y_2=2E+18 \times 53.541 (R^2=0.3699)$
 For Beating load 6.00N/mm
 $y_1=4.3227 \times 12.95 (R^2=0.9968)$, $y_2=4E+15 \times 40.574 (R^2=0.9276)$

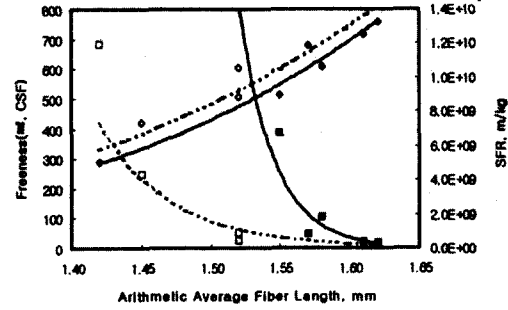


Fig. 6. Effect of arithmetic average fiber length on the freeness and specific filtration resistance(SwUKP, -3.33 N/mm, ... 6.00N/mm, ◆ Freeness, ■ SFR).
 x =arithmetic average fiber length(mm),
 y_1 =freeness(ml, CSF), y_2 =SFR(m/kg)
 For Beating load 3.33 N/mm
 $y_1=20.841 \times 7.4601 (R^2=0.7804)$,
 $y_2=3E+21 \times 61.834 (R^2=0.8192)$
 For Beating load 6.00 N/mm
 $y_1=30.53 \times 6.797 (R^2=0.9012)$, $y_2=1E+14 \times 27.474 (R^2=0.8367)$

도와 비여과저항에 미치는 영향을 조사한 결과 Fig. 4에서 보는 바와 같이 straightening effect가 현저하게 나타난 활엽수 표백 크라프트 펄프의 경우에는 수평균 섬유장과 여수도 및 비여과저항과의 사이에 상관관계가 거의 없는 것으로 나타났다. 그러나 Fig. 5와 Fig. 6에서 보는 바와 같이 straightening effect가 관찰되지 않은 침엽수 표백 크라프트펄프와 침엽수 미표백 크라프트

트펄프의 경우에는 높은 상관관계가 확인되었다.

3.3 여수도와 비여과저항의 관계

본 연구에서 사용된 모든 펄프와 고해부하에 대하여 얻어진 비여과저항을 여수도에 대하여 도시할

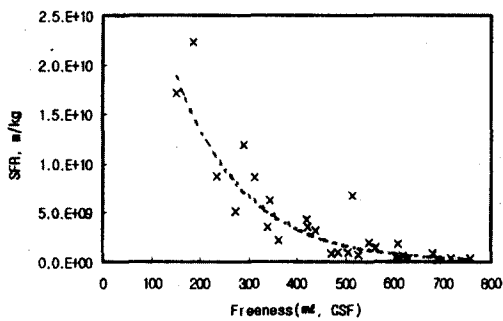


Fig. 7. Correlation between specific filtration resistance and freeness.
 $(Y=5.362E+10e^{-6.932E-03x}, R^2=0.8091)$

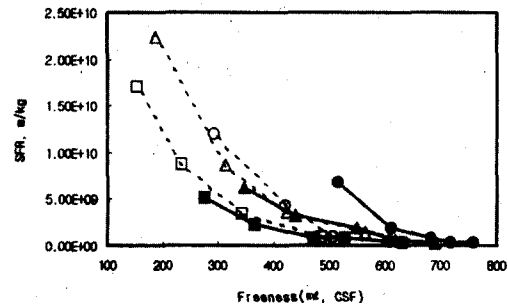


Fig. 8. Correlation between specific filtration resistance and freeness at different refining load and pulps.
 $(Y=ax^b, x$ =Freeness(ml, CSF), Y =SFR(m/kg))

Pulps	Coefficient	Refining load, N/mm	
		3.33	6.00
HwBKP	a	2E + 17	2.00E+16
	b	-3.0899	-2.7095
	R ²	0.9856	0.9697
SwBKP	a	8.00E+20	4.00E+17
	b	-4.3366	-3.1166
	R ²	0.9133	0.9208
SwUKP	a	4.00E+31	1.00E+20
	b	-8.0278	-4.0722
	R ²	0.9847	0.9423

경우 Fig. 7과 같이 결정계수가 약 0.81로서 비교적 높은 상관관계를 나타내었지만 다소 분산된 상태를 보여 주었다. 그러나 Fig. 8과 같이 각 펄프 종류별, 고해부하별로 분리하여 회귀식을 구할 경우 여수도와 비여과저항의 사이에서 훨씬 더 높은 상관관계를 얻을 수 있었다.

3.4 여수도와 초기 지층 형성 탈수속도

본 연구에 사용된 3종의 펄프에 대하여 각기 다른 고해부하에서 얻어진 여수도와 초기 지층 형성 탈수속도를 도시한 바 Fig. 9와 같이 여수도와 상관관계가 매우 낮았다. 그러나 Fig. 10에 도시된 바와 같이 각 펄프 종류별, 고해부하 별로 구한 회귀식에 대한 결정계수 값이 모두 0.95 이상의 값을 나타내어 여수도와 초기 지층 형성 탈수속도 사이에 매우 높은 상관관계가 있음을 확인할 수 있었다.

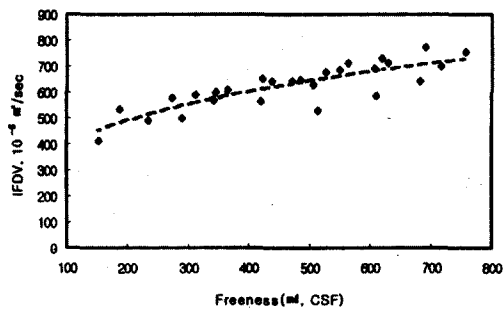


Fig. 9. Initial forming drainage velocity as a function of freeness.
($Y=102.25 \times 0.2963$, $R^2=0.7286$)

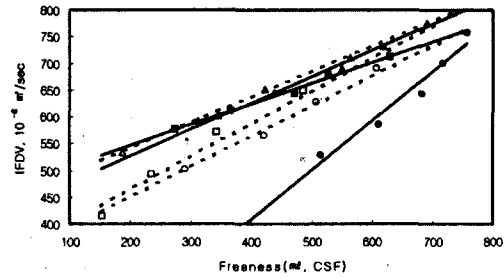


Fig. 10. Initial forming drainage velocity as a function of freeness for various pulps.
(■ HwBKP, ▲ SwBKP, ● SwUKP, - - -3.33 N/mm, ····6.00 N/mm)
 $Y=ax+b$, $x=Freeness(ml, CSF)$,
 $Y=IFDV(10^{-6} m^2/sec)$

Pulps	Coefficient	Refining load, N/mm	
		3.33	6.00
HwBKP	a	0.3874	0.6133
	b	469.18	341.94
	R ²	0.9930	0.9796
SwBKP	a	0.4932	0.4773
	b	428.11	445.43
	R ²	0.9910	0.9989
SwUKP	a	0.9179	0.5657
	b	42.101	337.36
	R ²	0.9540	0.9924

3.5 여수도와 최종 탈수시간

본 연구에서 사용된 3종의 펄프에 대하여 다른 고해부하에서 얻어진 최종 탈수시간을 여수도에 대하여 도시할 경우 Fig. 11과 같이 결정계수가 약 0.88로서 지수함수적인 상관관계를 나타내어 초기 와이어부에서 진공박스 앞에서의 지필의 건조도와 밀접한 관계가 있는 최종 탈수시간을 예측하는데 개략적으로 활용할 수 있는 가능성을 보여 주었다. Fig. 12는 펄프 종류별로 나누어 최종 탈수시간을 여수도에 대하여 도시한 것으로 침엽수 표백 크라프트펄프와 활엽수 표백 크라프트펄프의 경우에는 결정계수가 0.98~0.99로서 매우 높은 상관관계를 나타내었으나, 침엽수 미표백 크라프트펄프의 경우에는 결정계수가 약 0.76으로 매우 낮은 값을 나타내었다. 따라서 침엽수 미표백 크라프트펄프에 대하여 다시 고해부하 별로 나누어 여수도

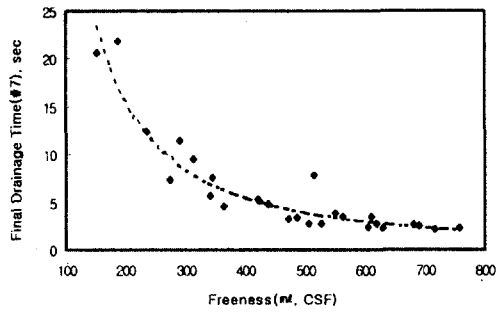


Fig. 11. Final drainage time as a function of freeness.

$(Y=44899 \times x^{-1.5051}, R^2=0.8826)$

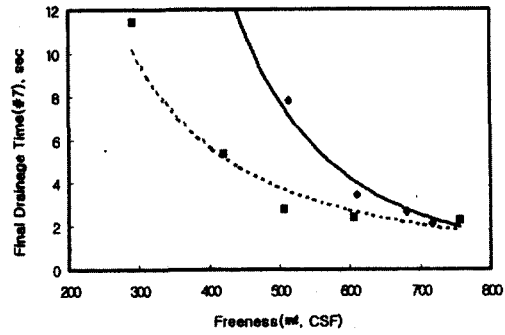


Fig. 13. Final drainage time as a function of freeness for SwUKP.

(-3.33 N/mm, ···· 6.00 N/mm)
 x=Freeness(ml, CSF), Y=FDT(sec)
 For Refining load 3.33 N/mm
 $Y=8E+09 \times x^{-3.3347}, R^2=0.9404$
 For Refining load 6.00 N/mm
 $Y=263389 \times x^{-1.7935}, R^2=0.9094$

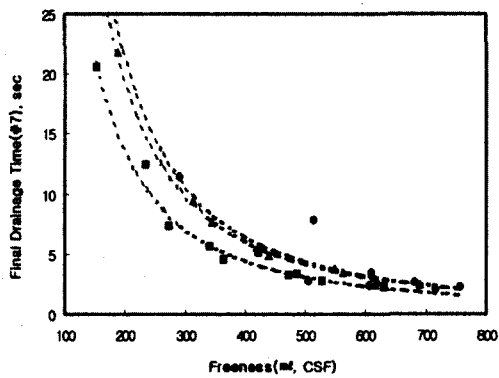


Fig. 12. Final drainage time as a function of freeness for various pulps.

(■ HwBKP, ▲ SwBKP, ● SwUKP)
 $Y=ax^b, x=Freeness(ml, CSF), Y=FDT(sec)$

HwBKP	a	65542
	b	-1.6022
	R ²	0.9856
SwBKP	a	131766
	b	-1.6673
	R ²	0.9942
SwUKP	a	202183
	b	-1.7282
	R ²	0.7585

에 대하여 도시한 결과 Fig. 13과 같이 0.9 이상의 결정계수 값을 나타내어 여수도와 최종 탈수시간 사이에 매우 높은 상관관계를 나타내었다. 이상의 결과들을 검토해 볼 때 진공박스 앞에서의 지필의 건조도를 펄프의 여수도로 추정하고자 할 경우

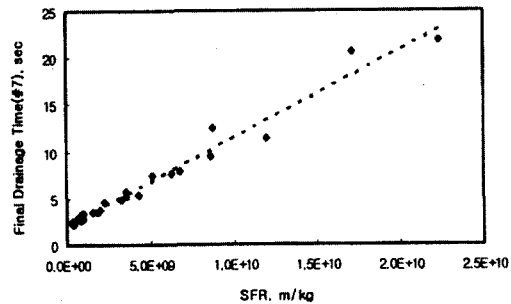


Fig. 14. Final drainage time as a function of specific filtration resistance.

$(Y=9E-10 \times x + 2.0671, R^2=0.9733)$

펄프 종류별, 고해부하별로 분석하는 것이 바람직한 것으로 생각된다.

Fig. 14는 펄프의 종류 및 고해부하를 구분하지 않고 비여과저항과 최종 탈수시간의 관계를 나타낸 것으로 결정계수가 약 0.97로서 매우 높은 직선적인 상관관계가 있는 것으로 확인되었다. Fig. 11에 도시된 여수도와 최종 탈수시간과의 관계에 비하여 최종 탈수시간과 비여과저항 사이에 더욱 밀접한 상관관계가 있음을 알 수 있었다.

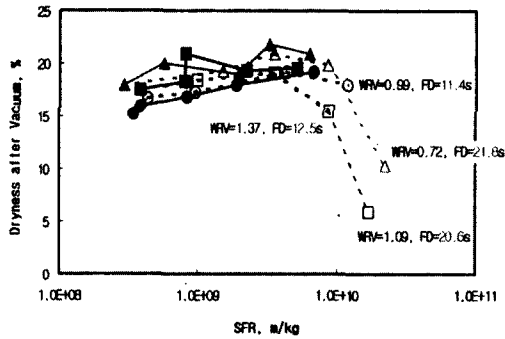


Fig. 15. Dryness after vacuum as a function of freeness. WRV=water retention value, FD=final drainage time(#7).
 (■ HwBKP, ▲ SwBKP, ● SwUKP, -3.33 N/mm, ···· 6.00 N/mm)
 $Y=ax+b$, $x=Freeness(ml, CSF)$,
 $Y=Dryness(\%)$

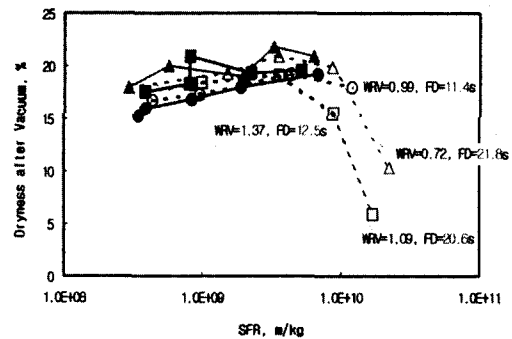


Fig. 16. Dryness after vacuum as a function of specific filtration resistance. WRV=water retention value, FD=final drainage time(#7).
 (■ HwBKP, ▲ SwBKP, ● SwUKP, -3.33 N/mm, ···· 6.00 N/mm)
 $Y=aLn(x) + b$, $x=Freeness(ml, CSF)$,
 $Y=Dryness(\%)$

Pulps	Coefficient	Refining load, N/mm	
		3.33	6.00
HwBKP	a	-0.0053	-0.0055
	b	21.473	21.006
	R ²	0.325	0.9848
SwBKP	a	-0.0087	-0.0059
	b	24.509	22.483
	R ²	0.6366	0.6331
SwUKP	a	-0.0163	-0.007
	b	27.738	20.890
	R ²	0.9835	0.7156

Pulps	Coefficient	Refining load, N/mm	
		3.33	6.00
HwBKP	a	-0.5319	-0.6993
	b	78.31	3.775
	R ²	0.1824	0.9550
SwBKP	a	0.8777	1.1197
	b	1.4097	-3.9502
	R ²	0.5437	0.9344
SwUKP	a	1.2555	1.3713
	b	-9.0753	-11.143
	R ²	0.9721	0.9150

3.6 습윤지필의 건조도

MDDA를 이용하여 0.25 bar의 진공도에서 탈수시킨 후 얻어진 습윤지필의 건조도를 여수도에 대하여 도시한 결과 Fig. 15와 같이 여수도 약 250~800 ml CSF 사이에서는 선형적인 비례관계를 나타내었다. 한편 비여과저항에 대한 습윤지필의 건조도의 관계는 Fig. 16에 도시된 바와 같이 비여과저항이 약 1.0E+10에 달할 때까지 세미로그 그래프에서 직선적인 비례관계를 나타내었다. 전술한 여수도 및 비여과저항에 대한 습윤지필의 건조도의 관계에서 모두 고해부하가 높을 때 다소 낮은 습윤지필의 건조도를 나타내었다. 그러나 지나친 고해에 의한 비여과저항의 증가 및 여수도의 감소는 오히려 습윤지필의 건조도를 크게 감소

시켰다. 이러한 결과는 비여과저항이 증가함에 따라 최종 탈수시간의 평균 범위인 5~7초보다 길어서 높은 진공 응답을 갖고 있더라도 진공박스에서의 체류시간이 짧아지므로 압착부에 유입되는 지필의 건조도가 낮아지게 되기 때문이다. 한편 최종 탈수시간이 짧더라도 WRV가 높은 경우에는 습윤지필의 건조도가 낮은 값을 나타내어 WRV의 영향이 확인되었다.

4. 결론

침엽수 표백 크라프트펄프, 활엽수 표백 크라프트펄프 및 침엽수 미표백 크라프트펄프에 2수준

(3.33 N/mm, 6.00 N/mm)의 고해부하를 적용하여 고해를 실시하여 이들이 펄프의 탈수특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 섬유장의 변화, 여수도, 초기 지층 형성 탈수속도, 비여과저항, 최종 탈수시간 및 습윤지필 건조도를 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 펄프의 종류에 관계없이 모두 낮은 고해부하가 적용되었을 때에 비하여 높은 고해부하가 적용되었을 때 짧은 수평균 섬유장을 나타내었다.
2. Straightening effect가 관찰되지 않은 침엽수 표백 크라프트펄프와 침엽수 미표백 크라프트펄프의 경우 수평균 섬유장과 비여과저항 사이에 높은 상관관계가 확인되었다.
3. 펄프 종류별, 고해부하별로 고해처리된 펄프의 여수도와 비여과저항의 사이에서 매우 높은 상관관계가 있음이 확인되었다.
4. 펄프 종류별, 고해부하별로 고해처리된 펄프의 여수도와 초기 지층형성 탈수속도의 사이에서 결정계수 0.95 이상의 매우 높은 상관관계가 있음이 확인되었다.
5. 펄프 종류별, 고해부하별로 고해처리된 펄프의 여수도와 최종 탈수시간 사이에서 결정계수 0.9 이상의 매우 높은 상관관계가 있음이 확인되었다.
6. 비여과저항과 최종 탈수시간의 관계는 펄프의 종류 및 고해부하를 구분하지 않고도 결정계수가 약 0.97로서 매우 높은 직선적인 상관관계를 나타내어 여수도와 최종 탈수시간과의 관계에 비하여 더욱 밀접한 상관관계가 있음을 알 수 있었다.
7. 고해부하가 높을수록 습윤지필의 건조도가 낮았다.

인 용 문 헌

1. Smook, G. A., Handbook for Pulp & Paper Technologists, second edition, 336, Angus Wilde Publications (1992).
2. Abitz, P. R., 1991 International Paper Physics Conference, 1, TAPPI PRESS, Atlanta (1991).
3. Seth, R. S., Francis, D. W., and Bennington, C.P.J., 1991 International Paper Physics Conference, 525, TAPPI PRESS, Atlanta (1991).
4. Zanuttini, M. A., Tappi. J. 71(2):115 (1988).
5. Springer, A. M., Chandarasekaran, S., and Wagner, T. H., Tappi. J. 67(2):124 (1984).
6. Nagarajan, R., and Sarkar, J.M., 1996 Papermakers Conference, 475, TAPPI PRESS, Atlanta (1996).
7. Kim, T. J., Biocatalytic Reaction and Papermaking Properties of UKP using *Trichoderma longibrachiatum* Crude-Enzyme, PHD, Dep. of Forest Products, Chungnam National University (1999).
8. Wei, H., and Ramarao, B.V., 1996 Engineering Conference, 859, TAPPI PRESS, Atlanta (1996).
9. Ingmanson, W. L., Tappi J. 35(10):439 (1952).
10. Brecht, W., and Siewert, W., Das Papier 20(1):4 (1966).
11. Mohlin, U.B., and J. Miller, The European Pulp and Paper Week, Bologna, vol. 2, pp. 274-283 (1992).