

새로운 탈수측정 설비를 이용한 탈수특성 평가

김 용 식*1 · 원 중 명*2

The Evaluation of Drainage Characteristics Using a New Drainage Tester

Yong Sik Kim*1 and Jong Myoung Won*2

ABSTRACT

The MDDA (Modified Dynamic Drainage Analyzer) was developed to evaluate the drainage characteristics on paper machine. The initial forming vacuum velocity was decreased with the increase of stock consistency and there were no significant effects of the applied vacuum. On the other hand, the initial forming drainage velocity was rapidly decreased with the increase of stock consistency above the 0.35 bar of applied vacuum. The final drainage time and wet web permeability showed similar trends under 0.075% consistency but increased rapidly at the higher consistencies. SFR (Specific Filtration Resistance) and drainage obtained for different vacuum level applied and deposited weights measured by using MDDA showed the linear relationship.

1. 서론

제지공정의 효율적 관리를 위한 수단으로 탈수와 보류를 측정하기 위한 많은 방법이 개발되었다. 탈수는 일반적으로 Shopper-Riegler,¹⁾ Canadian Standard Freeness,²⁾ TAPPI drainage³⁾ 또는 TAPPI freeness⁴⁾ 같은 표준 방법으로 측정될 수 있다. 그러나 이 방법들은 오직 탈수만을 측정하며 비난류성 조건하에서 측정되는 문제점을 지니고 있다. 보류는 일반적으로 Britt Jar⁵⁾로 측정되는데, 주로 콜로이드 성분에 대한 측정을 한다. 제지기술자들은 공정관리 측면에서 탈수와 보류에 대하여 관심이 많으며, 이들

두 가지 특성의 측정이 모두 가능한 장치의 개발에 많은 관심을 갖고 있다. Britt Jar는 탈수 연구에 적합하지 않아 그 동안 수많은 개량이 이루어졌다. Britt 등은 펄스 압력하에서 탈수할 수 있는 장치를 고안했으며⁶⁾ 여과와 농축 두 조건 하에서 탈수와 보류의 측정을 가능하게 해 주었다.

Weyerhaeuser drainage tester⁷⁾와 개량형⁸⁾은 탈수시험기의 다른 접근방법으로, 탈수시 걸리는 진공을 측정한다. Hercules dynamic retention tester^{9,10)}와 탈수, 진공, 그리고 retention tester¹¹⁾는 탈수 측정을 위해 더욱 개발된 것이다. Britt water release analyser¹²⁾는 습부화학의 또 다른 주요 관점인 진공 후 시이트의 습윤지필

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

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

건조도를 측정하도록 고안되었다. 본 연구에서 사용된 개조된 MDDA는 Weyerhaeuser drainage tester와 어느 정도 유사하다. 그러나 이 장치는 필프의 고해 거동 평가 및 생산공정의 조절 목적으로 탈수시간이나 여수도를 측정하기 위한 것으로 초지기에서의 탈수성을 예측하는 데는 그다지 좋은 방법이라고 할 수는 없다.¹³⁾ 왜냐하면, 탈수성 측정에 사용되는 측정조건과 실제 초지기상에서의 탈수 현상 및 조건이 크게 다르기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 기존의 탈수성 측정법의 단점을 보완하기 위해 개조된 MDDA를 사용하여 백상지 제조공정의 헤드박스 지료의 탈수 특성을 평가하려고 하였다.

지료의 탈수거동을 평가한 주요 연구 현황을 살펴보면 Zanuttini¹⁴⁾는 표준 탈수성 평가를 통해서 기계필프의 비여과저항을 계산하였고, Walstrom과 O'Blenes¹⁵⁾는 Ingmanson 등^{16,17)}과 같은 방법을 이용, 실제 초지기상에서 관찰되는 탈수속도와 농도 범위에서 실험하여 탈수성과 비여과저항을 평가할 수 있는 장치를 개발하고 이를 Shopper Riegler 측정 결과와 비교하였다. Andrews와 White¹⁸⁾는 화학필프 지료가 고속탈수되는 경우에는 Ingmanson 등^{16,17)}의 연구 결과가 적용될 수 없음을 지적하고 일정한 탈수속도를 유지하면서 탈수가 가능한 장치를 고안, 탈수시 형성되는 지층에 의한 압력 강하를 분석하였다. Britt와 Unbehend^{19,20)}는 DDJ를 고안하여 지료가 난류에 노출된 상태에서 탈수성을 평가할 수 있는 방법을 제시하여 교반속도 500-1,200 rpm 범위에서 탈수성과 보류도를 평가하였다. Penniman과 Olsen²¹⁾은 DDJ를 이용한 탈수성 평가가 화학첨가제의 첨가 및 제타전위와 밀접한 관계를 가지고 있음을 보고하였다. Britt와 Unbehend²²⁾는 DDJ를 개조하여 실제 초지조건과 유사한 상태에서 탈수성을 측정할 수 있는 방법을 고안하였으나 이들 측정 장치로는 비여과저항을 평가할 수는 없었다. Britt 등²³⁾과 Davison²⁴⁾는 실험 초지기상에서 와이어가 탈수소자를 통과하는 순간 진공탈수가 발생하므로 진공 펄스를 가할 수 있는 장치 개발하여 펄스, 진공시간 등이 탈수성과 미세분 보류도에 어떻게 영향을 미치는지 연구를 수행하였다. Werdouschegg²⁵⁾와 Abson 등²⁶⁾는 난류 조건 하에서 탈수성과 보류도를 동시에 측정할 수 있는 기기를 고안하였고 Gess²⁷⁾는 이들^{25,26)} 연구를 더욱 발전시켜 지층 형성과정에서의 진공도

를 측정할 수 있는 G/W 탈수성 측정기를 개발하였다. Springer 등²⁸⁾과 Piers 등^{29,30)}는 지료의 탈수성과 보류도를 평가할 수 있도록 DDJ를 개조, 용기 내의 지료 수위가 일정한 수준까지 저하될 때까지 걸리는 시간을 몇 개의 전극을 설치하여 측정, 몇 가지 필프의 비여과저항을 다양한 조건하에서 평가하였다. Springer 등³¹⁾은 온라인 스트리밍 포텐셜 장치를 이용, 활엽수 지료의 비여과저항을 평가하였다.

비여과저항을 평가하는 여과식은 와이어와 저진공박스에서 중력과 가압력에 의해 탈수 거동을 계산하는 데 사용되며, Darcy's Law와 Kozeny-Carman 식으로부터 유도되었다. Ingmanson³²⁾은 이 식들이 셀룰로우스의 압축성 매트에 대해 사용될 수 있다고 하였으며, 여과에 대한 식을 (1)과 같이 유도하였다.

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

여기에서

Q = 유량, m³/s

ΔP = 섬유매트 횡단면에서의 압력차, Pa

μ = 유체점도, N · s/m² = kg/(m · s)

A = 섬유매트 횡단면적, m²

R_t = 총 탈수저항, m⁻¹

(R_t = R_f + R_w, R_f = 섬유매트의 여과저항,

R_w = 와이어 필터의 여과저항)

dv/dt = 탈수 유량, m³/s

총 탈수저항은 유동패턴과 지료조성의 함수이며, 와이어와 섬유매트에 의해 부과된 유동에 대한 저항 영향의 합이므로 여과식은 아래와 같다.

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

섬유저항(R_f)은 단위 면적당 지필에서 퇴적된 섬유 질량과 SFR(specific filtration resistance) 계수로 쓰여진다.

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

여기에서

W = 섬유 지필의 질량, kg
 SFR = 비여과저항, m/kg

주어진 순간 t에 대해, 지필에서 섬유의 질량

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

여기에서

C = 슬러지 내 섬유농도, kg/m³

V = 탈수된 슬러리의 부피, m³

식 (2)에 식 (3)과 (4)를 대입하여 정리하면

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

여기에서

Δt = 여과시간 간격, s

ΔV = 여과부피, m³

식 (5)가 섬유매트와 와이어를 통한 물의 유동에 대해 잘 부합된다면, 누적부피 V의 함수인 $\Delta t/\Delta V$ 의 그래프는 직선적이어야 할 것이다

실험결과 직선의 기울기와 절편은 SFR과 와이어 저항을 계산하는 데 사용되었다.

전형적인 측정결과 예를 Fig. 1에 나타낸다.

2. 재료 및 방법

하이드로호일이 설치된 백상지 제조공정에서 헤드박스 지료를 취하여 사용하였으며, MDDA에서

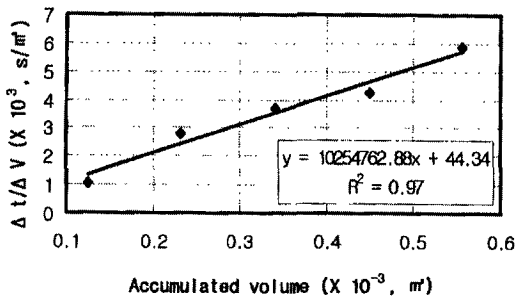


Fig. 1. Calculation of specific filtration resistance.

는 지료의 충분한 혼합을 위하여 탈수시키기 전에 1,000 rpm으로 5초 동안 교반하였다. 공정의 탈수소자 위치별 비여과저항을 구하기 위해서 진공도와 지료 농도의 변화로 퇴적평량을 변화시켰다. 지료는 90% 활엽수, 10% 파지, 13% 충전제로 구성되어 있으며, (+)PAM과 (-)silica를 보류시스템을 적용하였다.

지료의 여과저항과 지료의 특성을 파악하기 위해서 사용된 개조된 MDDA 구성도는 Fig. 2와 같다.

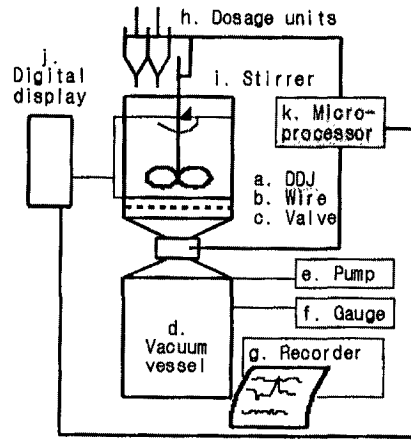


Fig. 2. Schematic illustration of the Modified Dynamic Drainage Analyser.

Jar(a)의 높이는 15 cm, 직경은 10 cm이며, 난류를 형성시키기 위해서 0.5 cm 높이의 baffle 3개가 설치되었고 교체 가능한 와이어(b)로 형성된 시이트를 측정할 수 있도록 jar와 와이어 사이에 얇은 고무링을 설치하여 분리시 물의 혼입을 방지하여 습윤지필의 무게를 정확하게 측정할 수 있도록 하였다. 공기밸브(c)는 개봉시간과 저유속저항을 신속하게 잘 제어하기 위해 설치되어 있으며, 진공용기(d)의 크기는 1.5 dm³이며, 진공펌프(e)는 진공용기 내 진공을 0~60 kPa까지 조정될 수 있게 되어 있다. 진공계이지(f)는 차트기록계(g)와 연결되어 있다. 2개의 약품투입기(h)는 약품 첨가용으로 첨가시간은 0초~수분(0.1초 정밀도)까지 조정된다. 각 측정 위치의 탈수시간이 디지털출력기(j)에서 출력되며 정밀도는 0.001초이다. 측정위치마다 전극을 설치하였으며, 총 7개를 설치하였다. 약품투입기, 교반기(i), 하

부밸브, 디지털출력기는 컴퓨터(k)와 연결되어 작동되도록 하였다.

출력 결과는 Fig. 3과 같이 시간에 따른 진공도의 변화가 도시되었으며, 탈수속도와 최종 진공도의 정보를 얻을 수 있고, 각 break point curve에서 유용한 정보를 얻을 수 있다.

실험 시작시(Fig. 3의 point a), 진공은 거의 선형적으로 빠르게 떨어진다. 초기 탈수속도는 이 부분에서의 기울기를 사용한다. 초기 탈수는 사용된 와이어에 의하여 크게 영향을 받기 때문에 이 때 얻어진 기울기 값은 다른 와이어의 성능을 평가 비교하는 데 사용될 수 있다. 또한 초기 탈수에서 이 기울기 값을 사용함으로써 첨가제의 효과를 평가하는 것이 가능할 것으로 생각된다.

실험이 진행함에 따라, 물 유동의 저항이 증가하기 때문에 진공도가 다시 증가한다. 점(c)에서, 평평한 부분(plateau)이 나타나는데 이것은 시이트가 압축될 때 탈수하기 위해 증가된 저항에 의해 야기된 것으로 보이며, 이것을 wet line이라고도 한다.

수초 후, 시이트 내의 물이 제거됨에 따라 공기의 통과 현상이 일어남으로써 진공도가 다시 떨어지게 되는데 이것을 dry line이라고도 한다(d). 이것은 쉽게 감지되고 최종 탈수시간으로 사용했다.

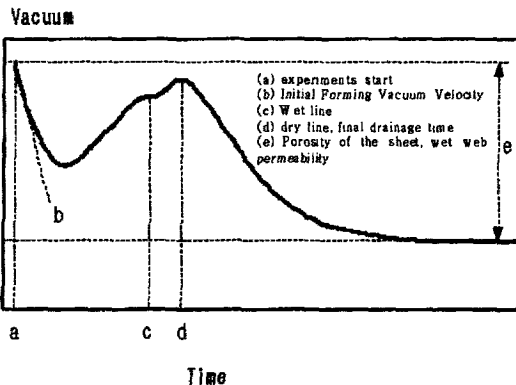


Fig. 3. The vacuum curve from the chart recorder.

Dry line 이후, 진공은 떨어지고 일정한 수치에 도달한다(e). 본 연구에서 사용된 MDDA의 지료 투입량은 900 ml로 일정하게 하여 진공탈수를 수행하였으며, 진공탈수 20초 후 진공을 측정했고, 이것을 시이트의 투기도 수치로 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 지료의 농도, 진공도 변화에 따른 탈수특성을 분석하였으며, 진공탈수시 지층 형성에 영향을 미치는 초기 탈수속도를 초기 지층형성시간(performing length)으로, 지층이 실제로 형성되는 실제 지층형성시간(actual forming length)을 wet line이 형성되는 시간으로, dry line을 최종 탈수시간(final drainage time)으로 각각 분석하였다. 또한 종이의 투기도와 지료의 microfloc 상태를 알 수 있는 습윤 지필 투기도를 측정하였다.

시간에 따른 진공도 변화 곡선에서 wet line을 나타내는 평평한 부분(plateau)은 진공도가 높은 경우 평가하기 곤란하였다. 초기 탈수속도의 경우 초기 지층형성 진공도 변화속도와 초기 지층형성 탈수속도로 각각 비교·분석하였다.

3.1 지료의 탈수특성

초기 탈수속도는 Figs. 4~6에서 보는 바와 같이 초기 탈수시간에서 시간에 따른 진공도 변화속도가 선형적이었으며, 지료의 농도가 높을수록 초기 진공도가 빠르게 감소하였다. 초기 진공도가 하락한 후 지층이 형성되면서 진공도가 다시 증가하고 wet line에서 지층형성이 완료되었다. 이 구간을 지층형성시간이라고 할 수 있으며, 지료의 농도가 높을수록 퇴적평량이 증가하고 그 결과 비여과저항이 증가하여 이 지층형성시간은 길어졌다. 지료의 농도가 높을수록 평량이 증가하고 비여과저항이 증가하여 이 지층형성시간은 길어졌다.

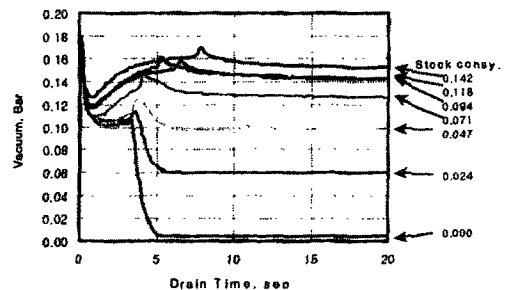


Fig. 4. Vacuum as a function of drainage time for the different stock consistencies at 0.15 bar of applied vacuum.

다. 또한 최종 탈수시간도 지료의 농도에 의하여 크게 영향을 받았다. 한편 탈수시 걸린 진공도의 영향을 조사한 결과 진공도가 높을수록 초기 탈수 속도는 높았으나, 지층형성시간과 최종 탈수시간은 짧아졌다.

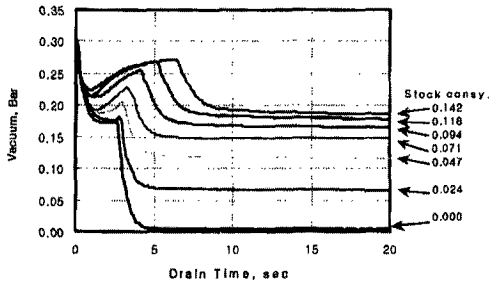


Fig. 5. Vacuum as a function of drainage time for the different stock consistencies at 0.25 bar of applied vacuum.

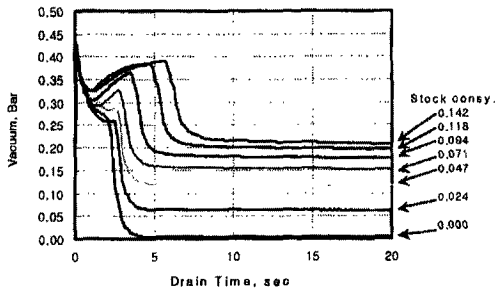


Fig. 6. Vacuum as a function of drainage time for the different stock consistencies at 0.35 bar of applied vacuum.

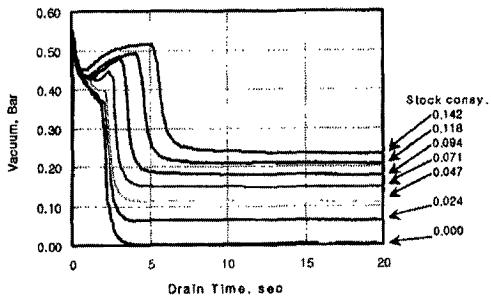


Fig. 7. Vacuum as a function of drainage time for the different stock consistencies at 0.45 bar of applied vacuum.

초기 탈수속도가 지료의 농도에 따라 큰 차이를 보이지 않은 것은 초기 탈수에서는 지층형성에 따른 여과저항이 거의 와이어의 여과저항에 의하여 영향을 받으며, 도입된 진공도 등에 더 크게 영향을 받기 때문인 것으로 사료된다. 한편 최종 탈수 시간은 지료의 농도와 진공도에 의하여 크게 영향을 받음을 알 수 있었다.

3.2 초기 지층형성 속도

3.2.1 정의

와이어상에서 지필이 형성될 때 지층형성에 중요한 초기 지층형성시간은 초기 지층형성시 탈수 속도나 탈수진공도 변화속도에 영향을 받게 된다. 본 연구에서 사용된 MDDA에서의 초기 지층형성시 탈수진공도의 변화는 Fig. 8과 같이 0.5초 이하에서 발생하였고 선형곡선을 보여 초기 최대 기울기를 갖는 진공도의 변화를 초기 지층형성 진공도 변화속도(initial forming vacuum velocity)로 하였고, MDDA에서 사용된 전극의 위치

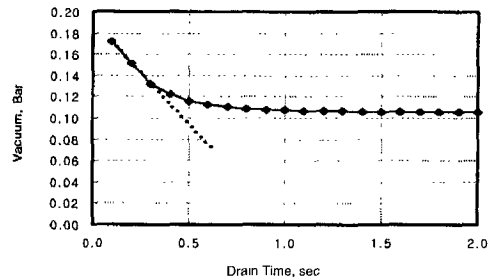


Fig. 8. Example of initial forming vacuum velocity.

Table 1. Position of electrode sensors

	Sensor level, ml
sensor-1	786
sensor-2	676
sensor-3	561
sensor-4	449
sensor-5	343
sensor-6	226
sensor-7	100

별 유량과 초기 탈수영역의 시간을 감안하여 초기 지층형성 탈수 변화속도(initial forming drainage velocity)는 sensor#2(Table 1)에서의 탈수속도로 결정하였다. 지료농도, 헤드박스 지료분출 조건이 동일할 때, 초기 지층형성 진공도 변화속도와 초기 지층형성 탈수속도가 높을수록 초기 지층형성시간이 짧아지기 때문에 지필도가 불량하게 될 것으로 예상된다.

3.2.2 농도와 진공도 영향

지료의 농도에 따라 초기 지층형성 탈수 변화속도와 초기 지층형성 진공도 변화속도는 Figs. 9~12에서 보는 바와 같이 다른 경향을 보였다. 즉 초기 지층형성 진공도 변화속도는 탈수시 적용된 진공도가 증가함에 따라 모두 감소되었으며, 지료

의 농도가 높아져도 유사한 경향을 보여 주었다. 그러나 초기 지층형성 탈수 변화속도는 탈수시 적용된 진공도가 높아짐에 따라(0.35 bar 이상에서) 지료의 농도가 높아질수록 크게 감소되었다. 이상과 같이 탈수시 적용된 진공도의 증가와 더불어 초기 지층형성 탈수 변화속도와 진공도 변화속도가 느려졌고, 지료 농도가 증가됨에 따라 이들이 감소된 것은 Fig. 14에서 보는 바와 같이 습윤 지필 투기도를 나타내는 진공도가 지료의 농도와 탈수시 적용된 진공도의 증가에 따라 증가비율이 감소되는 경향으로 설명될 수 있다. 상기 효과를 명백히 하기 위하여 도시한 선형곡선을 이용한 종합 곡선(Fig. 13)에서 그 차이를 명백하게 알 수 있었으며 지층형성 탈수 변화속도와 지층형성 진공도 변화속도는 헤드박스에서 분출되는 지료 농도가 동일할 경우 탈수에 영향을 미치는 약품

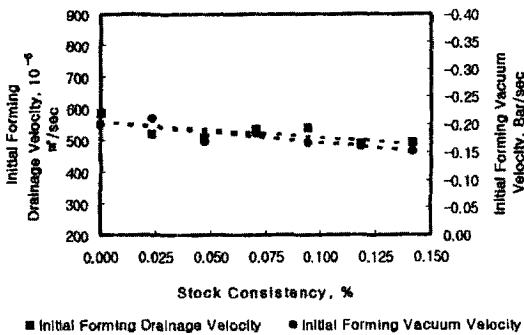


Fig. 9. Effects of stock consistency on initial forming drainage and vacuum velocity at 0.15 bar suction.

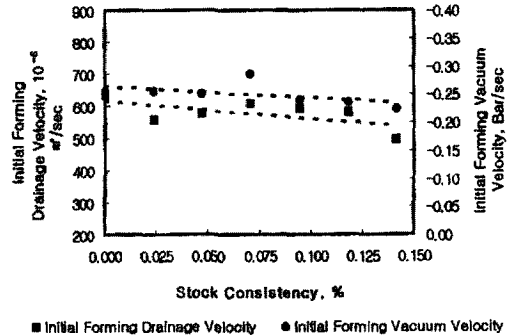


Fig. 10. Effects of stock consistency on initial forming drainage and vacuum velocity at 0.25 bar suction.

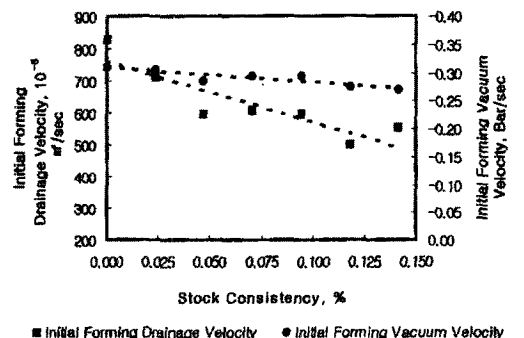


Fig. 11. Effects of stock consistency on initial forming drainage and vacuum velocity at 0.35 bar suction.

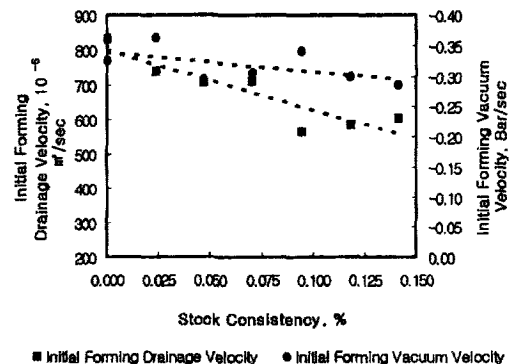


Fig. 12. Effects of stock consistency on initial forming drainage and vacuum velocity at 0.45 bar suction.

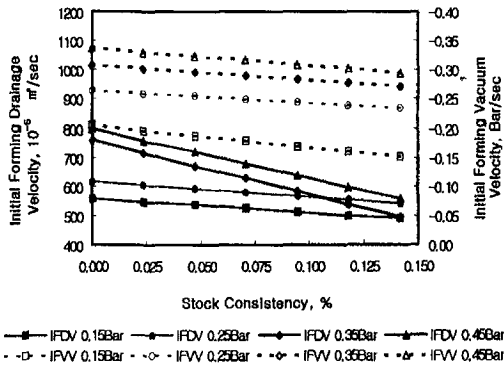


Fig. 13. Effects of stock consistency on the initial forming drainage and vacuum velocity at different vacuum applied.

사용에 따른 지필도의 영향을 파악할 수 있는 주요한 도구로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

3.3 최종 탈수시간

최종 탈수시간은 Fig. 15와 같이 지료 농도가 0.075%로 증가될 때까지는 완만하게 증가하다가 그 이후 급격히 증가되었으며, 탈수시 걸어 준 진공도가 높을수록 짧아졌다.

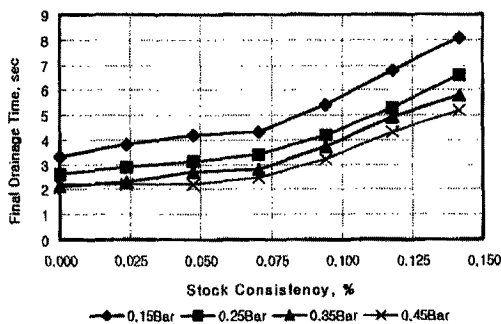


Fig. 15. Effects of stock consistency on the initial forming drainage and vacuum velocity at different vacuum intensity.

3.4 비여과저항

비여과저항은 Fig. 16과 같이 와이어에 퇴적된

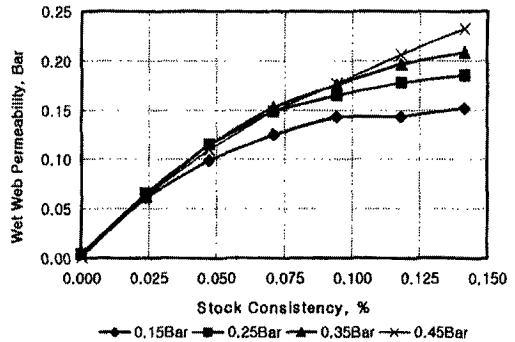


Fig. 14. Wet web permeability as a function of stock consistency at different vacuum applied.

평량과 적용된 진공도에 직접적인 영향을 받았다. 즉, 퇴적 평량이 증가됨에 따라 비여과저항은 선형적으로 증가하였으며, 진공도가 높을수록 높은 비여과저항을 나타내었다.

$$SFR = Slop \times BW + Intercept \quad (6)$$

여기에서

SFR : 비여과저항, m/kg

Slop : 기울기, (m/kg)/(kg/m²)

BW : 와이어에 퇴적된 섬유매트의 평량, kg/m²

Intercept : 절편, m/kg

Table 2. The slope and intercept of the linear regression equation and determination coefficient for specific filtration resistance

Vacuum pressure applied (Pa)	Slope	Intercept	R ₂
15000	5.91E+09	1.64E+09	0.69
25000	1.04E+10	1.78E+09	0.82
35000	1.12E+10	2.09E+09	0.84
45000	1.53E+10	2.18E+09	0.86

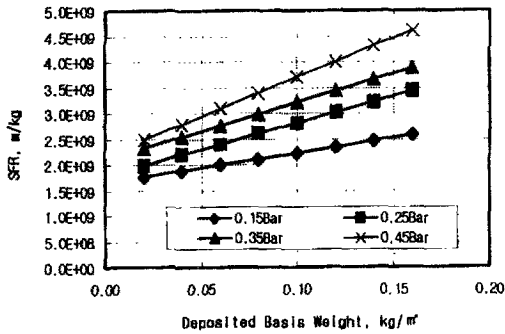


Fig. 16. Specific filtration resistance as a function of deposited basis weight for different vacuum applied.

4. 결론

하이드로호일로 구성된 백상지 제조공정의 헤드박스 지료의 탈수 특성을 MDDA(modified dynamic drainage analyzer)를 사용하여 측정한 결과 다음과 같은 결론이 얻어졌다.

1. 지료의 초기 탈수속도는 지료의 농도가 높을수록 낮은 기울기를 나타내었으며, 초기에는 진공도가 하락하였다가 지층이 형성됨에 따라 진공도가 다시 증가되었다.
2. 초기 탈수속도는 지료의 농도에 거의 영향을 받지 않았다.
3. 실제 지층형성시간은 농도가 높을수록 길었다.
4. 초기 지층형성 진공도 변화속도는 탈수시 걸어 준 진공도 및 지료의 농도에 비례하여 감소되었다.
5. 초기 지층형성 탈수 변화속도는 지료 농도의 증가와 더불어 감소되는 경향을 나타내었으며, 적용된 진공도가 0.35 bar 이상으로 높아짐에 따라 더욱 급속히 감소되었다.
6. 최종 탈수시간은 지료의 농도가 높아질수록 길어졌으며, 적용된 진공도가 높아짐에 따라 감소되었다.
7. 지층 형성시 비여과저항은 평량과 적용된 진공도가 높아질수록 증가되었다.

인용문헌

1. Scandinavian Pulp, Paper and Board Testing Committee Method SCAN-C 19:65.
2. Canadian Pulp and Paper Association Standard Test Method C. 1.
3. TAPPI Test Method T 221.
4. TAPPI Test Method T 227.
5. Britt, K. W., Tappi J. 56(10):46 (1973).
6. Britt, K. W., Unbehend, J. E., Shridharan, R. Proceedings Tappi Papermakers Conf. 129, TAPPI PRESS (1986).
7. Abson, D. et al., Tappi. J. 63(6):55 (1980).
8. Gess, J. M., Proceedings Tappi Papermakers Conf. 183, TAPPI PRESS (1983).
9. Davison, R. W., Proceedings Tappi Papermakers Conf. 153, TAPPI PRESS (1982).
10. Davison, R. W. Proceedings Tappi Papermakers Conf. 75, TAPPI PRESS (1989).
11. Pires, E. C., Springer, A. M., Kumar V. Tappi. J.-72(7):149 (1989).
12. Britt, K. W., Unbehend, J. E., Tappi. J. 63(4):67 (1980).
13. Clark, J. d' A., Pulp Technology and Treatment for Paper, 516, Miller-Freeman, San Francisco (1978).
14. Zanuttini, M. A., Tappi. J. 71(2):115 (1988).
15. Walstrdm, B. and O' Blenes, G., Pulp Paper Mag. Can. 63(8):T405 (1962).
16. Ingmanson, W. L. and Whitney R. P., Tappi. J. 37(11):523 (1954).
17. Ingmanson, W. L., Andrews, B. D. and Johnson, R. C., Tappi. J. 42(10):840 (1959).
18. Andrews, B. D. and White, L. R., Tappi. J. 59(6):1171 (1969).
19. Britt, K. W. and Unbehend, J. E., Tappi. J. 59(2):67 (1976).
20. Britt, K. W. and Unbehend, J. E., Tappi. J. 63(4):67 (1980).
21. Penniman, J. G. and Olsen, C. R., Paper Trade J. :34 (Apr.15, 1979).
22. Britt, K. W., Unbehend, J. E. and Holman, J.

- C., Tappi. J. 65(11):64 (1982).
23. Britt, K. W., Unbehend, J. E. and Shridharan, R., Tappi. J. 69(7):76 (1986).
24. Davidson, R. W., Tappi. J. 72(8):121 (1989).
25. Werdouschegg, F., Tappi. J. 60(7):105 (1977).
26. Abson, D., Bailey R. M., Lenderman, C. D., Nelson, J. A. and Simons, PB., Tappi. J. 63(6):55 (1980).
27. Gess, J. M., Tappi. J. 67(3):70 (1984).
28. Springer. A. M., Chandarasekaran, S. and Wagner, T. H., Tappi. J. 67(2):124 (1984).
29. Piers, E. ., Springer, A. M. and Kumar, V., Tappi. J. 71(4):133 (1988).
30. Piers, E. C., Springer, A. M. and Kumar, V., Tappi. J. 72(7):149 (1989).
31. Springer, A., Penniman, J. G., Jr. and Pires, E. C., Tappi. J. 77(8):121 (1994).
32. Ingmanson, W. L., Tappi. J. 35(10):439 (1952).