

장망초지기에서 탈수 시뮬레이션

김 용 식*¹ · 원 중 명*²

Drainage Simulation in Fourdrinier Paper Machine

Yong Sik Kim*¹ and Jong Myoung Won*²

ABSTRACT

The MDDA (Modified Dynamic Drainage Analyzer) was developed to evaluate the drainage at hydrofoil, table roll, and low vacuum devices on fourdrinier paper machine, MB-former. Comparison of the results was obtained using a computer simulation system based on Taylor's equation and filtration equation and by measuring the consistency profile in a paper machine presented an agreement within 10.7%. This device can evaluate the dewatering profile on wire for various stock properties, adjust dewatering devices on fourdrinier paper machine, and control the dosage of retention aids for improving paper structural properties and runnability of papermachine.

1. 서 론

초지공정에서의 탈수 부위는 지층형성 영역(~1.4%), 진공박스(~12%), 진공쿠우치(16~18%), 압착부, 건조부 등으로 분류되며, 이들 영역 중 지층형성에 가장 중요한 영향을 미치는 영역은 초기 지층형성 영역(~0.8%)과 실제 지층형성 영역(0.8~1.4%)으로 분류할 수 있다. 특히 지층형성에 가장 중요한 영역은 초기 지층형성 영역으로 지료의 균일한 유동성을 부여하는 시간을 제공하는 영역이다. 그러나 생산성 향상을 위해서 설계속도보다 생산성 향상을 위해서 초지기의 속도를 상승시켜 제조하는 경우가 많으며, 초지속도의 상승으로 요구되는 탈수개선을 헤드박스의 분출지료의 농도 상승으로 대처하고 있어 실제 초기 지층형성 영역은 미미하거나 없는 경우가 많다.

그러므로 지필도의 향상을 위하여 브레스트롤의 진동이나 지층형성 영역에서의 탈수소자의 배열이 매우 중요하게 되었다.

본 연구에서는 하이드로호일에서의 탈수¹⁾와 테이블롤에서의 탈수(Wrist,²⁾ Taylor,^{1,3)} Bergstrom⁴⁾)는 Taylor식을, 와이어에서의 자연탈수와 저진공박스의 탈수는 Ingmanson⁵⁾의 여과식을 컴퓨터모델로 하였다.

모델에서 사용된 비여과저항인 SFR(Specific Filtration Resistance)의 수치는 개조된 MDDA(Modified Dynamic Drainage Analyzer)를 이용하여 실험실적 탈수와 진공보류 실험기에서 실험적 수행으로 결정됐다.

과거에 사용된 컴퓨터모델은 테이블롤, 저진공박스 등 순수 탈수장비들의 단독 적용을 기준하여 모델화하였으나, 실제로는 이들 탈수소자들이 모

*1 신호제지(주) 중앙연구소(Shinho 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).

두 함께 사용되고 있기 때문에 본 연구에서는 복합적 탈수소자에서의 컴퓨터모델과 개조된 MDDA 실험기기에서의 적용성을 검토하고, 공정을 효율적으로 시뮬레이션하여 주·부원료 및 보류제의 공정에 미치는 영향을 쉽게 추론하도록 하였다.

컴퓨터모델은 헤드박스 슬라이스에서 분출된 지료가 에이프런, 와이어, 하이드로호일, 진공박스 순으로 배열되어 있는 장망초지기 공정을 기준으로 시뮬레이션하였으며, 초기 하이드로호일에서의 탈수평가는 와이어에 따라 얻어진 탈수 결과를 사용하여 순차적인 물질수지를 계산하였다.

본 연구에 사용된 개조된 MDDA는 습부에서 지료의 탈수거동을 시뮬레이션하도록 구성된 새로운 장치이며 탈수시 걸린 진공도와 탈수속도를 측정할 수 있도록 개조되었다. MDDA는 시간과 교반속도뿐만 아니라 약품의 투입시간을 제어할 수 있는 micro processor가 장착되었으며 다양한 지료조성, 보류시스템 및 전단조건에서 접촉시간을 제어할 수 있도록 설계되었다. 개조된 MDDA의 또 다른 특징은 대부분의 다른 실험방법과 달리 보류도, 탈수속도, 및 습윤지필 투기도를 동일 시료에 대해 동시에 측정이 가능하다. 그 결과들은 지료와 보류제 사이의 접촉시간을 제어하는 데 중요한 기초 자료로 활용할 수 있다.

2. 이론적 배경

2.1 호일에서의 Taylor 탈수식

하이드로호일의 탈수는 초지속도가 일정할 때, 닙의 길이와 블레이드각에 의하여 결정된다. 초지속도가 200 m/min로 낮은 공정에서는 닙의 길이가 클수록 탈수량이 많으며, 300 m/min 이상의 초지속도에서는 닙의 길이에 의한 영향을 적게 받는다. 최대 탈수량을 얻기 위해서는 닙의 길이에 따라 블레이드 각도를 유지하여 주어야 하며, 닙의 길이가 짧을수록 블레이드 각도를 높여 주어야 한다. 따라서 초지속도 610 m/min이고, 닙의 길이가 100 mm인 경우 블레이드는 0~2도의 범위, 닙의 길이가 50 mm의 호일은 0~3.5도까지 확대한다. 또한 탈수량은 초지속도가 높을수록 많으며, 닙의 길이가 짧을수록 구동동력이 저하된다. 호일의 사용법은 지중, 원료배합, 원료 여수

도, 초지속도, 지층형성 길이, 와이어 폭에 의하여 좌우된다. 호일에서 탈수량은 아래와 같이 G. Taylor의 식¹⁾으로 표시된다.

$$\frac{Q}{L} = a(1-a) \frac{\rho U^2 N_L}{\mu R_t} \quad (1)$$

여기에서

$$a = \frac{\alpha \mu R_t}{\rho U}$$

α = 호일 블레이드각, radian

μ = 백수 점도, Pa · s

ρ = 백수 비중, kg/m³

U = 초지속도, m/s

N_L = 닙의 길이, m

하이드로호일 닙 내측의 흡입력은 $a(1-a)$ 이며, a 가 1/2일 때 최대 흡입력을 나타낸다.

$$S = a(1-a)\rho U^2 \xrightarrow{a=\frac{1}{2}} \frac{1}{4} \rho U^2 \quad (2)$$

여기에서

S = 최대진공, Pa

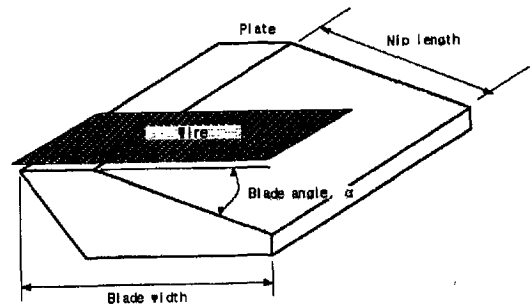


Fig. 1. Geometry of foil.

2.2 테이블롤에서의 Taylor 탈수식

Taylor는 테이블롤 탈수시 와이어 아래에서의 유동은 비점성이고, 닙에서의 유동은 Bernoulli's 법칙이 적용되며, 와이어는 물에 대해 접선을 이루고 변형되지 않는다고 가정하였다. 빠른 초지속도

로 중력은 관성력에 비해 작기 때문에 무시될 수 있고, 탈수수로 채워지는 와이어 아래의 수평 공간 길이는 물의 반지름과 비교하여 작고 가장 큰 수직 깊이와 크게 관계된다.³⁾

넙 내측 유동의 혼합 없이 탈수길이에 따라 균 일한 저항에 대한 그의 해답은 아래에 주어진다.

$$\frac{Q}{L} = 0.295 \frac{\rho^2 R U^3}{\mu^2 R_c^2} \quad (3)$$

여기에서

- L = 초지기 폭, m
- R = 테이블롤 반경, m
- μ = 백수 점도, Pa · s
- ρ = 백수 비중, kg/m³
- U = 초지속도, m/s

모든 혼합이 넙 내측에서 일어난다면 지수는 0.295에서 0.405로 증가⁶⁾한다.

테이블 넙 내측의 최대 흡입력은 아래와 같다.

$$S = \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (4)$$

여기에서

- S = 최대진공, Pa

3. 재료 및 방법

하이드로호일이 설치된 백상지 제조공정에서 헤드박스 지료를 수거하여 사용하였다. MDDA에서 지료를 탈수시키기 전에 충분한 혼합이 이루어지도록 하기 위하여 1000 rpm에서 5초간 교반하였다. 공정의 탈수소자 위치별 비여과저항을 구하기

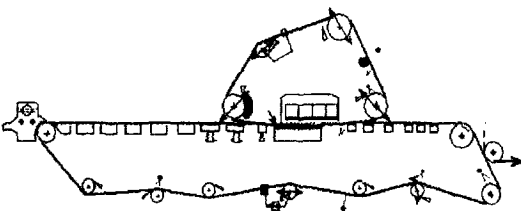


Fig. 2. Schematic of dewatering device for MB-former.

위해서 퇴적 평량과 진공도를 변화시켰다. 진공도 변화는 공정의 진공도를 고려하여 0.15~0.45 bar로 변화시켰다.

헤드박스 지료는 초지속도 370 m/min로 C2S 160 g/m² 를 생산하는 공정에서 채취하였다. 지료는 90% 활엽수, 10% 파지, 13% 충전제로 구성되어 있으며, (+)PAM과 (-)silica를 보류 시스템이 사용되었다. 본 연구 대상으로 정한 초지기는 장망초지기형 MB former이다. 탈수소자는 forming board, multifoil, vacuum box, forming shoe, suction box, couch로 이루어져 있다.

본 연구에서는 공정의 탈수상태와 와이어 상부 지료의 난류상태를 조사하였다. 탈수분석 장비를 이용하여 얻은 결과와 실험실적 MDDA에서 얻은 자료를 이용한 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 비교·분석하였다.

1) 비디오 촬영조사

섬광촬영장치를 이용하여 난류상태 혹은 지필 광투과 현상을 체크하고, 비디오테이프를 중요 위치를 기록해 두기 위해 실시하였다.

2) 탈수상태 분석

특별히 개발된 초음파 장치에 의해 무게를 측정하고, 모든 필요위치에서 백수 시료를 취해 분석하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 와이어상의 물질수지

와이어 위의 슬러리 부분에 대한 물질수지는 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다.

탈수장치 i-1에서 탈수된 성분을 분석한 후 i

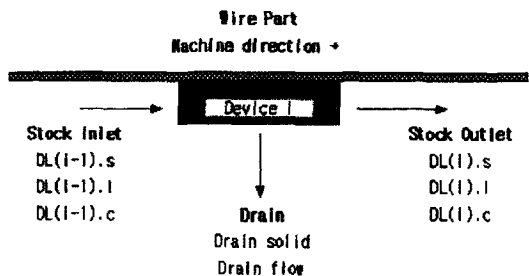


Fig. 3. Mass balance over the wire.

위치 유입 퇴적평량과 총 탈수저항을 구한 후 i 탈수소자에서의 탈수량을 구한다.

4. 1. 1 농도식

탈수소자 i 유입 농도는 아래와 같이 계산된다.

$$DL(i-1).s = DL(i-1).l \times DL(i-1).c / 1000$$

'전단 유입 고형분

$$DL(i-1).w = DL(i-1).l - DL(i-1).s$$

'전단 유입 물

$$DL(i-1).d = DL(i-1).g + DL(i-1).i$$

'전단 유입 탈수 유량

$$DL(i).s = DL(i-1).s - DL(i-1).d \times DL(0).c \times (1 - sret) / 1000$$

'유입 고형분

$$DL(i).l = DL(i-1).l - DL(i-1).d$$

'유입 유량

$$DL(i).c = DL(i).s / DL(i).l \times 1000$$

'유입 농도

여기에서

subscript :

- s = 고형분 유량, (Ton/s)/m
- w = 물의 유량, (m³/s)/m
- d = 탈수 유량, (m³/s)/m
- g = 중력탈수 유량, (m³/s)/m
- i = 유도탈수 유량, (m³/s)/m
- c = 농도, kg/m³
- l = 부피 유량, m³/s
- sret = 지료 보류도, kg/kg

탈수소자 i에서의 수지는 질량유량의 항으로 처리되었으며, 앞 공정에서 계산된 흐름을 기준으로 공정의 질량유량과 부피유량을 계산하여 농도를 계산할 수 있다.

이 계산의 초기 값은 헤드박스에서의 슬러리 농도와 헤드박스 슬라이스에서의 질량유량과 부피유량을 사용하였다.

4. 1. 2 평량계산

탈수소자 i 유입부 퇴적평량은 아래와 같이 계산된다.

$$DL(i).b = (DL(0).c \times DL(i-1).d \times sret) / (L \times U)$$

$$DL(i).b = DL(i).b + DL(i-1).b$$

여기에서

subscript :

- b = 평량 증가, kg/m²
- d = 탈수 유량, (m³/s)/m
- c = 농도, kg/m³
- sret = 지료 보류도, kg/kg
- L = 초지기 폭, m
- U = 초지속도, m/s

탈수소자 i-1에서 탈수된 유량을 계산하고 이 탈수량에 대한 퇴적된 평량을 헤드박스 유입농도와 평균 보류도를 기준으로 계산한 후, 앞 공정에서 퇴적된 모든 평량을 합하여 탈수소자 i 입구의 퇴적된 평량으로 사용하였다.

4. 2 탈수에 대한 컴퓨터모델

4. 2. 1 모델의 주 흐름도

본 연구에서 사용된 컴퓨터모델은 와이어에 따

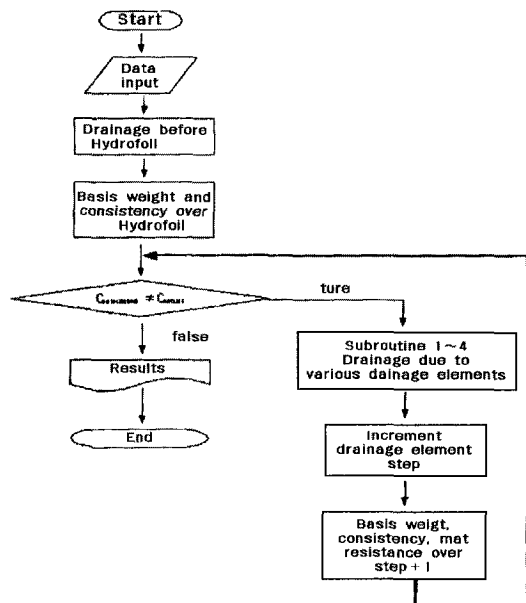


Fig. 4. Main program of computational model.

라 각 탈수소자에서의 지표농도, 탈수량, 퇴적평량을 계산한다. 계산 종료조건은 공정에서 측정된 최종 탈수위치의 농도가 일치할 때까지 Taylor공식의 상수 $a(1-a)$ 수치를 변경시키면서 계산된 최종농도와 측정된 최종농도가 일치할 때까지 반복 계산하도록 하였다. Taylor식의 상수 a 는 호일 블레이드각에 영향을 받으며, 이를 계산하기 위해서는 총 탈수저항을 알아야 계산되며, 총 탈수저항을 계산하기 위해서는 압력을 알아야 한다. 그러므로 본 연구에서는 전 와이어부에서 호일에 작용하는 흡입력이 동일하게 되도록 조정하여 최종 농도조건과 일치하도록 하였다.

첫 하이드로호일에서 탈수계산 전 슬라이스와 첫 하이드로호일 사이에서 일어나는 탈수를 계산 하였다. 이 탈수량이 결정된 후, 물질수지는 이미 와이어에 퇴적된 섬유의 평량과 슬러리의 평균농도를 계산하는 데 사용하였다.

탈수소자 i 에서의 loop 구조는 각 탈수소자 종류를 인식하여 지정 탈수소자에서 탈수량을 계산 하였다. 탈수단계를 한 단계($i+1$) 상승시킨 후 i 공정에서 계산된 탈수량을 기준으로 $i+1$ 단계 입구의 평균지표농도와 퇴적된 평량을 계산하였다. 계산된 퇴적된 평량은 총 퇴적된 평량으로 다시 수정되며, 계산된 평균 지표농도를 바탕으로 총 매트저항을 계산하였다.

4.2.2 호일에서의 탈수계산

하이드로호일에서의 탈수는 섬유매트에서 작용하는 압력함수이며, 호일과 매트 저항 사이의 상호작용은 와이어 아래에서 낮은 압력영역을 형성하여 탈수를 야기시킨다. 이 영역을 호일 닢이라 부른다. 닢 내측 압력의 계산에 두 가지 방법이 사용될 수 있다. 즉 흡입력 $a(1-a)\rho U^2$ 과 여과식으로 부터 유도된 상당 진공압력으로부터 계산될 수 있다. 이때 Taylor식 사용으로 계산된 유량은 여과식 사용으로 계산된 유량과 동등해야 한다는 가정을 기초하였으며 이 방법은 $a(1-a)\rho U^2$ 의 조건이 만족되어야만 사용될 수 있다.

4.2.3 테이블롤에서의 탈수계산

하이드로호일 계산과 유사한 방법으로 계산되었다. 테이블롤 작용으로 생긴 탈수는 섬유매트에서 작용하는 압력함수이며, 물 운동과 매트 저항 사

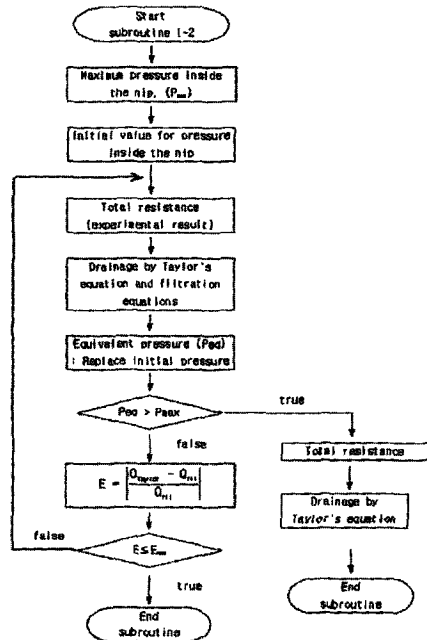


Fig. 5. Subroutine program of computational model for calculation of the induced drainage on hydrofoil/table roll section.

이의 상호작용은 와이어 아래에서 낮은 압력영역을 형성하여 탈수를 야기시킨다. 이 영역을 닢이라 부른다. 이 닢 내측 압력의 계산을 위하여 두 가지 방법이 사용될 수 있다. 즉 최대압력(흡입력)이 $\rho U^2/2$ 과 같은 영향에 대한 이론적²⁾ 그리고 경험적 증거⁷⁾를 기초한 것과 여과식으로부터 유도된 상당 진공압력으로부터 계산될 수 있다. 상당압력방법은 Taylor식 사용으로 계산된 유량은 여과식 사용으로 계산된 유량과 동등해야 한다는 가정을 기초하였으며 이 방법은 최대 진공($\rho U^2/2$)의 조건이 만족되어야 사용될 수 있다.

하이드로호일과 테이블롤 작용에 의해 야기된 탈수유속의 계산 과정을 도식화하였다(Fig. 5).

4.2.4 진공박스과 와이어의 탈수계산

이 모델은 여과식을 사용하여 각각 계산되며, 모든 압력은 미리 결정되어야 하고 먼저 비여과저항의 계산을 한 후 이 저항을 바탕으로 여과식에 적용하여 탈수량을 계산하였다.

박스의 블레이드 각도는 본 연구에서는 "0"를

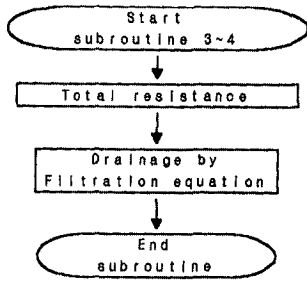


Fig. 6. Subroutine program of computational model for calculation of the induced drainage on vacuum boxes/wire section.

적용하였다.

4.3 시뮬레이션 결과

4.3.1 기초 자료

시뮬레이션 대상공정의 정보는 Table 1과 같으

Table 1. General information for a fourdrinier paper machine

Wire speed	m/s	5.98
Dry basis weight	g/m ²	152
Flow rate at slice	(m ³ /s)/m	0.1105
Headbox consistency	%	0.916
Stock temperature	°C	30
Wire resistance	1/m	111876805.680
Water viscosity	N · s/m ² =kg/(m · s)	0.000795
Water density	kg/m ³	995.57

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

며 forming board, multifoil, forming shoe, flat suction box, couch roll 등으로 이루어져 있다.

비여과저항은 각 진공도에 있어서 퇴적된 평량에 따라 선형관계로 아래와 같았으며, 공정 헤드박스 지료를 이용한 비여과저항인 SFR은 Table 2와 같다.

$$SFR = Slope * BW + Intercept \text{ [m/kg]} \quad (5)$$

여기에서 BW = 평량, kg/m²

각 탈수장치에서의 보류도도 각 진공도에 있어서 퇴적된 평량에 따라 선형관계로 아래와 같았으며, 공정 헤드박스 지료를 이용한 보류도는

Table 3. The equation and coefficient for retention

Vacuum pressure applied (Pa)	Slope	Intercept	R ²
15000	116.05	80.27	0.890
25000	96.90	84.31	0.997
35000	84.84	86.33	0.852
45000	75.50	87.85	0.972

Table 3과 같다.

SFR과 보류도 수식을 각 탈수장치에서 퇴적된 평량과 진공도에 따라 내·외삽법을 사용하여 적정수치를 구해 적용하였다.

$$\text{보류도} = \text{기율기} * BW + \text{절편} \text{ [%]} \quad (6)$$

여기에서 BW = 평량, kg/m²

4.3.2 시뮬레이션 결과

탈수위치에서의 상부 지료농도와 계산된 결과는 10.7% 오차로 매우 유사한 결과를 얻었다.

실제 지층형성 영역(농도 = 1.4%)의 탈수위치로는 #44, multifoil #4이며, 상부 와이어의 총 길이(슬라이스 - 카우치) 17.126 mm 중 4.19 mm 위치에서 이루어지고 있으며 와이어 지층면장의 24.5%내에서 지층이 형성되고 있었다. 또한

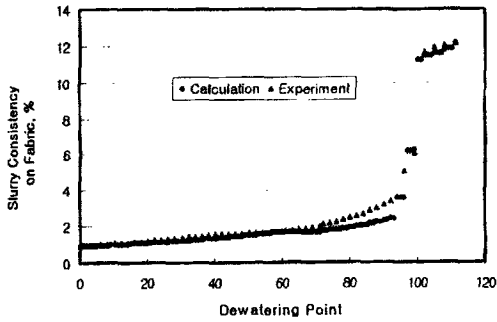


Fig. 7. Comparison between the calculated and measured consistency profiles on the dewatering point of wire.

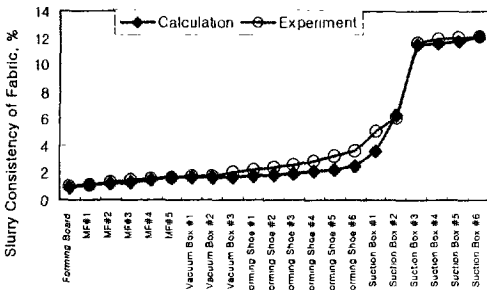


Fig. 8. Comparison between the calculated and measured consistency profiles on the dewatering device of wire.

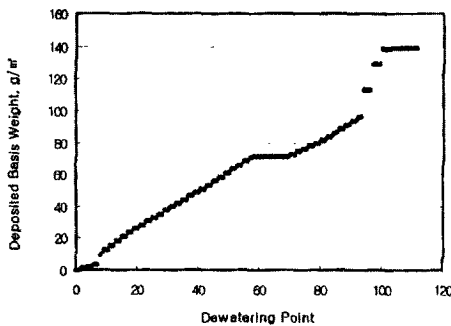


Fig. 10. The deposited basis weight on the dewatering point of wire for simulation.

지필에 영향을 미칠 수 있는 진공압력이 걸리는 forming shoe(탈수위치 = #70, 거리 = 8.079 m)보다 짧았다.

탈수 시뮬레이션을 수행한 수치와 공정수치에서는 forming shoe에서 차이를 보였다. 이는 진공도의 수치와 직접 관련이 있는 수치로 측정자료에 문제가 있을 것으로 사료된다.

와이어 상부에 존재하는 슬러리 질량과 컴퓨터 시뮬레이션 결과는 공정자료와 약간의 차이가 있으나 유사한 결과를 보였다.

지필의 농도가 1.7% 이상인 탈수위치 #57부터는 하이드로호일 등의 자연 및 브레이드 탈수의 기능이 미약하였으며, #70 탈수위치인 forming shoe에서부터 진공탈수에 의해 탈수가 진행하였다. 이상과 같은 결과로부터 탈수소자의 효율적

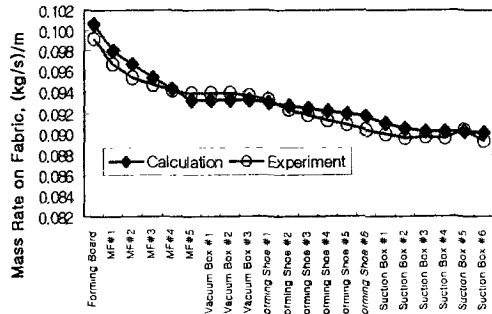


Fig. 9. Comparison between the calculated and measured mass rate profiles on the dewatering device of wire.

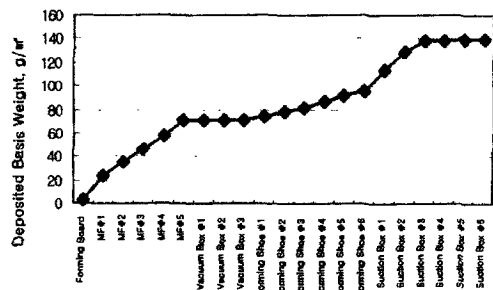


Fig. 11. The deposited basis weight on the dewatering device of wire for simulation.

이용에 관한 정보를 얻을 수 있었다.

5. 결론

개조된 MDDA를 사용한 장망초지형 MB former의 탈수 시뮬레이션은 공정 작업조건, 헤드박스과 측정 가능한 최종 탈수위치의 농도만으로 가능하였으며, 다음과 같이 실제 공정에서 측정된 수치와 매우 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

1. 헤드박스과 측정 가능한 최종 탈수위치의 농도만으로 공정의 탈수 시뮬레이션이 가능하였다.
2. 각 탈수 위치별 시뮬레이션 결과와 측정치와의 결과는 농도 프로파일에서 10.7% 내로 매우 잘 일치하였다.
3. 지필형성 영역(농도 = 1.4%) 위치를 파악하여 대처할 수 있는 가능성을 부여하였다.
4. Multifoil의 경우 지필농도가 1.7% 이상에서는 탈수능력이 미약하였다.
5. 시뮬레이션 결과를 이용하여 지충형성에 영향

을 미치는 탈수소자의 위치선정과 부원료 약품의 사용량 조절 및 적용으로 양질의 제품을 생산할 수 있는 자료를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

인용 문헌

1. Taylor, G. I., Pulp Paper Mag. Can. 59(C):172 (1956).
2. Wrist, P. E., Pulp Paper Mag. Can. 55(6):115 (1954).
3. Taylor, G. I., Pulp Paper Mag. Can. 57(3):229 (1956).
4. Bergstrom, J., Svensk Papperstid. 60(1):1 (1957).
5. Ingmanson, W. L., Tappi. J. 35(10):439 (1952).
6. Meyer, H. and Brown, G. R., Tappi. J. 56(6):144 (1973).
7. Britt, K. W., Tappi J. 56(10):46-50 (1973).