

Drainage Simulation in Fourdrinier Paper Machine

김용식*¹ · 원종명*²

*1 신호그룹중앙연구소 · *2 강원대학교 제지공학과

1. Introduction

지층형성시 영향받는 여과인자는 pulp 원료, 고해정도, filler 함량, 평량, 초지속도, 계의 전단력, 지층형성부의 설계, 다양한 초지 조절장치 등에 영향을 받으며, 교질상 결합인자는 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.

본 연구에서는 Taylor's 식을 이용한 hydrofoil 탈수[1], table roll 탈수(Wrist[2], Taylor[1,3], Bergstrom[4]), wire에서 자연탈수와 low vacuum box의 탈수는 Ingmanson[5]의 filtration 식을 이용하여 drainage simulation을 하였다. Model에서 사용된 specific filtration resistance의 수치는 개조된 MDDA(Modified Dynamic Drainage Analyser)를 이용하여 진공변화에 따라 실험실적 탈수를 수행하여 결정됐다. 과거에 사용된 drainage simulation은 순수 탈수장비를 기준으로 computer model화 하였으나[6] hydrofoil 탈수에 관한 simulation은 언급된바 없었다. 그러나 국내에 사용된 fourdrinier는 많은 hydrofoil, 소량의 table roll, vacuum box 등의 탈수소자로 이루어져 있어 hydrofoil, table roll, vacuum box 등 복합적 탈수소자에서의 drainage simulation은 대부분의 fourdrinier에서 쉽게 적용이 가능하다.

Drainage simulation은 head box에서 지료 분출 후 apron, wire, hydrofoil 순으로 배열되어 있는 fourdrinier 공정을 기준으로 simulation 하였으며, 초기 hydrofoil에서 탈수평가는 wire에 따라 얻어진 탈수를 기준으로 순차적인 mass balance를 수행한다. 본 연구에 사용된 개조된 MDDA는 wet end에서 지료의 탈수거동을 simulation 하도록 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 투입

시간이 제어되는 micro processor이며 보류제, fibers, 다른 전단조건 사이의 접촉시간을 제어할 수 있다. 개조된 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.

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[7]는 표준 탈수성 평가를 통해서 기계필프의 비여과저항을 계산하였고, Walstrom과 O'Blenes[8]는 Ingmanson 등[5, 9-10]과 같은 방법을 이용, 실제 초지기상에서 관찰되는 탈수속도와 농도 범위에서 실험하여 탈수성과 비여과저항을 평가할 수 있는 장치를 개발하였다. Springer 등[11]과 Piers등[12, 13]는 DDJ를 개조하여 용기 내의 지료 수위가 일정한 수준까지 저하될 때까지 걸리는 시간을 몇 개의 전극을 설치하여 비여과저항을 다양한 조건하에서 평가하였다. Springer 등[14]는 온라인 스트리밍 포텐셜 장치를 이용하여 활엽수 지료의 비여과저항을 평가하였다. 그러나 본 연구에서 사용된 MDDA는 지료의 흐름에 영향을 미치지 않도록 jar 측면에 매우 작게 도출된 전극을 설치하였고 정확한 탈수시간을 얻기 위해서 0.001 sec의 정확성을 갖도록 하였다.

2. Theoretical consideration

Filtration식은 wire와 low-vacuum box에서 중력과 가압력에 의해 탈수흐름을 계산하는데 사용되며 Darcy's Law과 Kozeny-Carman 식으로부터 유도되며 Ingmanson[5]는 이 식들이 cellulose fiber의 compressible mat에 대해 사용될 수 있다고 보였고 filtration에 대한 식은 1과 같다.

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

Hydrofoil의 탈수는 속도가 일정할 때, nip length와 blade angle에 관계하며, foil에서 탈수량은 G. Taylor의 식[1]으로 아래와 같이 표시된다.

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

Hydrofoil nip 내측의 흡입력은 $a(1-a)$ 에서 a 가 1/2일 때 최대 흡입력을 나타낸다.

$$S = \frac{1}{4} \rho U^2 \quad (3)$$

where

$$S = \text{maximum vacuum, Pa}$$

Taylor는 table roll에서의 drainage는 nip 내측 흐름의 혼합 없이 탈수길이에 따라 균일한 저항에 대한 그의 해답은 식(4)에 주어진다.

$$\frac{Q}{L} = 0.295 \frac{\rho^2 R U^3}{\mu^2 R_f^2} \quad (4)$$

Total mixing이 nip 내측에서 일어난다면 factor는 0.295에서 0.405로 증가[15] 한다. Table nip 내측의 최대 흡입력은 아래와 같다.

$$S = \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (5)$$

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

$$\frac{dv}{dt} = \frac{Adp}{\mu[R_f + R_w]} \quad (6)$$

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

$$R_f = \frac{W}{A} \cdot SFR \quad (7)$$

주어진 순간 t에 대해, web에서 fiber의 질량

$$W = C \cdot V \quad (8)$$

그래서 증분 형태에서, 식 (6)(7)(8)를 합하고 간략화하고 거꾸로 하면

$$\frac{\Delta t}{\Delta V} = \frac{\mu C V SFR}{A^2 \Delta P} + \frac{\mu R_w}{A \Delta P} \quad (9)$$

식(9)가 fiber mat와 wire를 통해 flow에 대해 적합하다면, accumulated volume V의 함수로 $\Delta t/\Delta V$ 의 graph는 직선적이어야 할 것이다. 본 연구에서 수행된 실험결과 직선의 기울기와 절편은 SFR과 wire resistance를 계산하는데 사용되었으며, 전형적인 측정결과 예를 Fig. 1에 나타내었다.

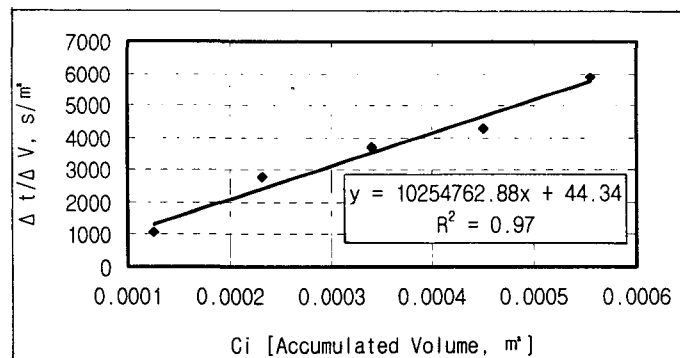


Fig. 1. Example of SFR calculation.

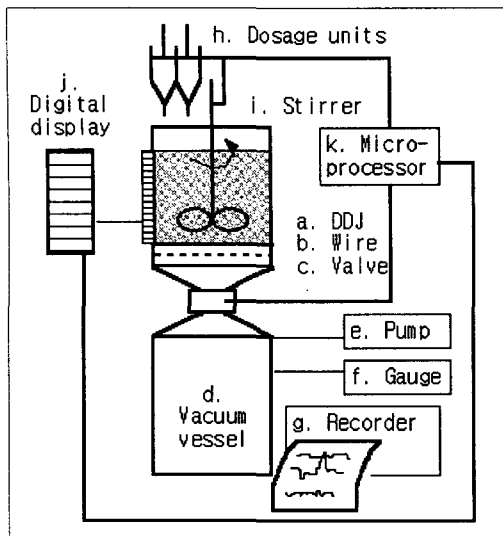


Fig. 2. Schematic illustration of the Modified Dynamic Drainage Analyser.

하게 측정할 수 있도록 하였다. (c) pneumatic valve로 opening time과 low flow resistance를 신속하게 잘 제어하기 위해 설치되어 있으며, (d) vacuum vessel의 크기는 1.5 dm^3 이며, (e) vacuum pump는 vacuum vessel에 있는 진공은 $0 \sim 60 \text{ kPa}$ 까지 조정될 수 있게 되어 있다. (f) vacuum gauge는 (g) chart recorder와 연결되어 있다. (h) Two dosage units는 약품 첨가용으로 첨가시간은 $0 \text{ sec} \sim$ 수분 (0.1 sec 정밀도)까지 조정된다. 각 측정 위치의 drainage time이 (j) digital display에서 출력되며 정밀도는 0.001 sec 이다. 측정위치마다 전도도를 이용한 electrodes를 설치하였으며, 총 7개를 설치하였다. Dosage unit, stirrer, bottom valve, digital display는 (k) micro processor와 연결되어 작동되도록 하였다.

Hydrofoil이 주로 배열된 fine paper 제조공정에서 head box 지료를 수거하여 사용하였다. MDDA에서는 지료의 충분한 혼합을 위하여 탈수전 1000 rpm , 5 sec 로 교반하였다. 공정의 탈수소자 위치별 specific filtration resistance을 구하기 위해서 침적평량을 변화시키고 진공도를 변화시켰다. 본 연구에서 공정의 진공도와 실험기기의 정확한 진공도 조절이 가능한 범위를 고려하여 $0.15 \sim 0.45 \text{ bar}$ 까지 변화시켰다.

공정의 탈수상태를 파악하기 위해서 아래와 같은 방법을 수행하였다.

1) Video-documentation(비디오 촬영조사)

Stroboscope(섬광촬영장치)를 이용하여 난류상태 혹은 지필 광투과 현상을 체크하고, videotape로 중요위치를 기록해 두기위해 실시한다.

2) Drainage-analysis(탈수상태 분석)

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

Total drainage resistance는 fiber mat basis weight의 증가에 따라 선형적으로 증가했으며, 이때 total drainage resistance는 식(10)과 같다.

$$R_t = \text{SFR} \cdot \text{BW} + R_w \quad (10)$$

3. Experimental apparatus

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

(a) jar의 높이는 15 cm , diameter는 10 cm , 난류를 형성시키기 위해서 0.5 cm 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 정확

4. Mass balance over the wire

Wire 위의 slurry 부분에 대해, mass balance는 Fig. 3와 같이 나타낼 수 있다. 탈수장치 i-1에서 탈수된 성분을 분석한 후 i위치에 유입된 침적평량과 총 탈수저항을 구한 후 i device에서 탈수량을 구한다.

(1) Consistency evaluation

Device i 유입 농도는 아래와 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}
 DL(i-1).s &= DL(i-1).l \times DL(i-1).c / 1000 && \text{' Pre-inlet solid} \\
 DL(i-1).w &= DL(i-1).l - DL(i).s && \text{' Pre-inlet water} \\
 DL(i-1).d &= DL(i-1).g + DL(i-1).i && \text{' Pre-inlet drained fluid} \\
 DL(i).s &= DL(i-1).s - DL(i-1).d \times DL(0).c \times (1 - sret) / 1000 && \text{' Inlet solid} \\
 DL(i).l &= DL(i-1).l - DL(i-1).d && \text{' Inlet fluid} \\
 DL(i).c &= DL(i).s / DL(i).l \times 1000 && \text{' Inlet consistency}
 \end{aligned}$$

where

subscript :

- s = solid flow rate, (Ton/s)/m
- w = water flow rate, (m³/s)/m
- d = drainage flow rate, (m³/s)/m
- g = gravity drainage flow rate, (m³/s)/m

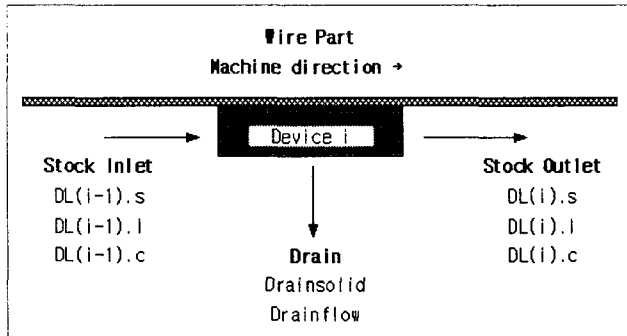


Fig. 3. Mass balance over the wire.

- i = induced drainage flow rate, (m³/s)/m
- c = consistency, kg/m³
- l = volumetric flow rate, m³/s
- sret : stock retention, kg/kg

Device i에서의 balance는 mass flow rate의 향으로 처리되었으며, 앞 공정에서 계산된 흐름을 기준으로 공정의 mass flow rate와 volumetric flow rate를 계산하여 농도를 계산할 수 있다. 이 계산의 초기 값은

headbox에서의 slurry 농도와 headbox slice에서의 mass flow rate와 volumetric flow rate를 기초로 wire에서 적용되는 filtration식을 사용하여 계산된다.

(2) Basis weight evaluation

Device i 유입부 침적된 평량(deposited basis weight)은 아래와 같이 계산된다.

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

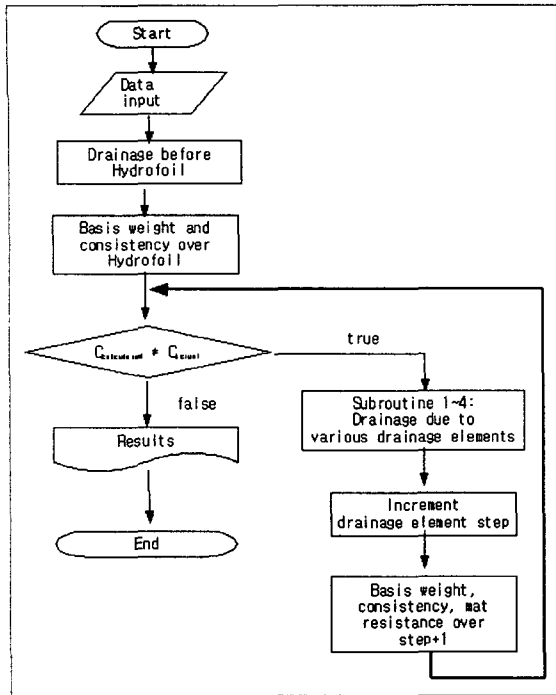


Fig. 4. Main program of drainage simulation.

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

where

subscript :

b = basis weight increment, kg/m²

d = drainage flow rate, (m³/s)/m

c = consistency, kg/m³

sret : stock retention, kg/kg

L = machine width, m

U : machine speed, m/s

Device i-1에서 탈수된 유량을 계산하고 이 탈수량에 대한 침적된 평량을 head box 유입농도와 평균보류율을 기준으로 계산한 후, 앞 공정에서 침적된 모든 평량을 합한 후 device i 입구의 침적된 평량으로 사용한다.

5. The drainage simulation

(1) General development of the model

본 연구에서 사용된 drainage simulation은 wire에 따라 각 탈수소자에서의 지료농도, 탈수량, 침적평량을 계산한다. 계산 종료조건은 공정에서 측정된 최종 탈수위치의 농도가 일치할 때까지 Taylor's 식의 상수 a(1-a) 수치를 변경시키면서 계산된 최종 농도와 측정된 최종농도가 일치할 때까지 반복 계산하도록 하였다. Taylor's 식의 상수 a는 foil blade angle에 영향을 받으며, 이를 계산하기 위해서는 총 탈수저항을 알아야 계산되며, 총 탈수저항을 계산하기 위해서는 압력을 또한 알아야 하므로 본 연구에서는 전 wire part에서 foil에 작용하는 흡입력은 동일하다는 조건에서 평균 흡입력을 조정하여 최종 농도조건과 일치하도록 하였다.

첫 hydrofoil에서 탈수계산 전에 slice와 첫 hydrofoil사이에서 일어나는 탈수를 계산하고 이 영역에서는 오직 wire 유량에 대해 저항을 나타내므로 중력가속도에 의해 야기된다. 그러므로 filtration식이 적용되었다. 이 탈수량이 결정된 후, mass balance는 이미 wire에 침적된 fiber의 basis weight와 slurry의 평균농도를 계산하는데 사용되었다. Device i에서의 loop 구조는 각 device 종류를 인식하여 지정 device에서 탈수량을 계산한다. 탈수단계를 한 단계(i+1) 상승시킨 후 i 공정에서 계산된 탈수량을 기준으로 i+1 step 입구의 평균 지료 농도와 침적된 평량을 계산한다. 이 계산된 침적된 평량은 총 침적된 평량으로 다시 update되며, 계산된 평균 지료 농도를 바탕으로 총 mat resistance를 계산한다.

(2) Computation of drainage due to hydrofoil action

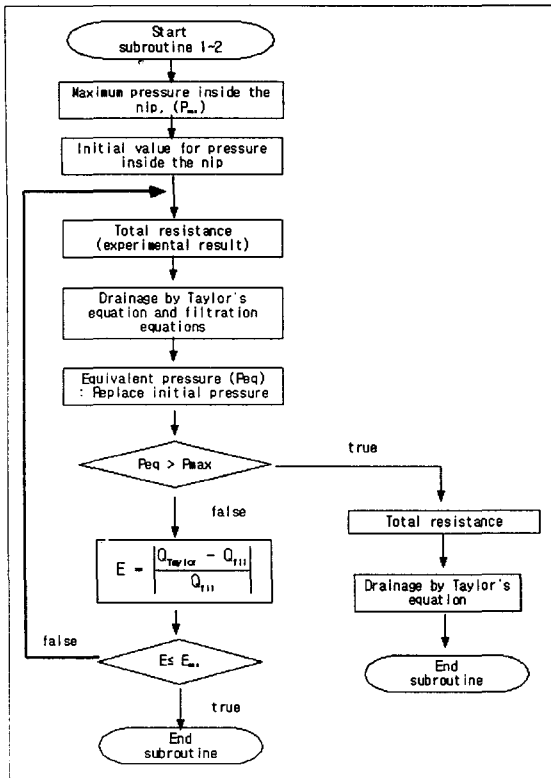


Fig. 5. Subroutine program of drainage simulation for calculation of the induced drainage on hydrofoil/table roll section.

다. 이 nip 내측 압력을 계산하는데 또한 두 방법이 사용되었다. 최대압력(흡입력)이 $\frac{1}{2} \rho U^2$ 과 같은 영향에 대한 이론적[2] 그리고 경험적 증거[10]를 기초한 것과 filtration 식으로부터 유도된 상당 진공압력과 비교하여 계산된다. 상당압력방법은 Taylor's 식의 사용으로 계산된 flow rate는 filtration 식의 사용으로 계산된 flow rate와 동등해야 한다는 가정을 기초하였으며 이 방법은 만약 최대 진공($\frac{1}{2} \rho U^2$)의 조건이 만족되어야 사용될 수 있다. 그렇지 않으면 첫 방법이 사용된다. Fig. 6은 hydrofoil과 table rolls 작용에 의해 야기된 탈수 유속의 계산을 도식화 하였다.

(4) The drainage simulation for drainage of vacuum box/wire

이 model은 filtration식을 사용하여 각각 계산되며, 모든 압력은 미리 결정되어야 하고 먼저 specific filtration resistance

Hydrofoil 작용으로 생긴 탈수는 fiber mat에서 작용하는 압력함수이며, foil과 mat 저항사이의 상호작용은 wire 아래에서 낮은 압력영역을 발생해서 탈수를 야기시킨다. 이 영역을 foil nip이라 부른다. 이 nip 내측 압력을 계산하는데 두 방법이 사용될 수 있다. 흡입력 $a(1 - a)\rho U^2$ 과 filtration 식으로부터 유도된 상당 진공압력과 비교하여 계산된다. Taylor's 식의 사용으로 계산된 flow rate는 filtration 식의 사용으로 계산된 flow rate와 동등해야 한다는 가정을 기초하였으며 이 방법은 만약 $a(1 - a)\rho U^2$ 의 조건이 만족 되어야 만 사용될 수 있다. 그렇지 않으면 첫 방법이 사용된다.

(3) Computation of drainage due to table roll action

Hydrofoil 계산과 유사한 방법으로 계산된다. Table roll 작용으로 생긴 탈수는 fiber mat에서 작용하는 압력함수이며, roll 운동과 mat 저항사이의 상호작용은 wire 아래에서 낮은 압력영역을 발생해서 탈수를 야기 시킨다. 이 영역을 roll nip이라 부른다.

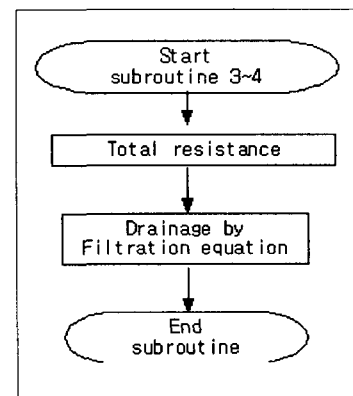


Fig. 6. Subroutine program of drainage simulation for calculation of the induced drainage on vacuum box/wire section.

의 계산을 한 후 이 저항을 바탕으로 filtration식에 적용하여 탈수량을 계산하였다. 이때 적용된 box의 blades의 각도는 "0" 이었다.

6. Results and discussion

Simulation 대상공정의 정보는 Table 1과 같으며 forming board, multi hydrofoil, forming shoe, flat suction box, couch roll 등으로 이루어져 있다.

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
Fiber retention	%	83

Specific filtration resistance(SFR)는 각 진공도에 있어서 침적된 평량에 따라 선형관계로 아래와 같았으며, 공정 head box 지료를 이용한 SFR은 진공도에 따라 아래와 같았다.

$$\text{SFR} = \text{Slop} * \text{BW} + \text{Intercept} \text{ [m/kg]} \quad (11)$$

where : BW = Basis Weight, kg/m²

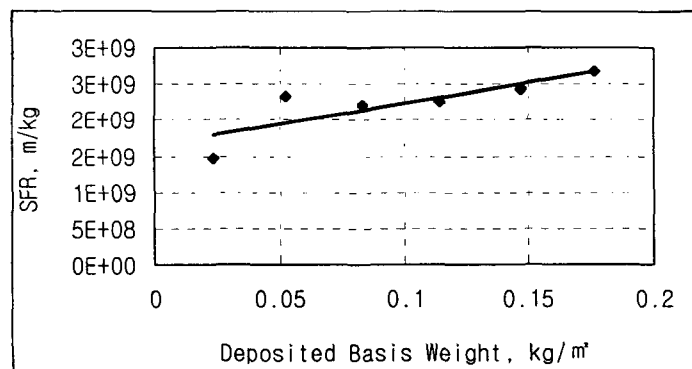


Fig. 7. Correlation between specific filtration resistance and deposited basis weight for 0.15 bar vacuum.

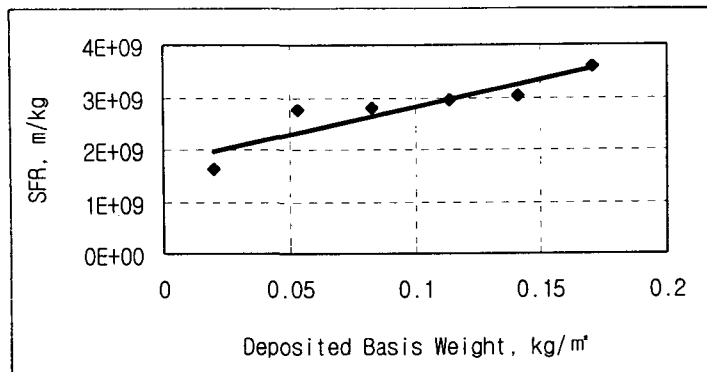


Fig. 8. Correlation between specific filtration resistance and deposited basis weight for 0.25 bar vacuum.

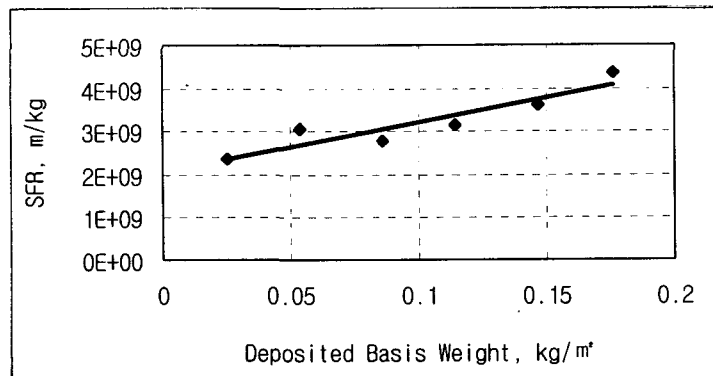


Fig. 9. Correlation between specific filtration resistance and deposited basis weight for 0.35 bar vacuum.

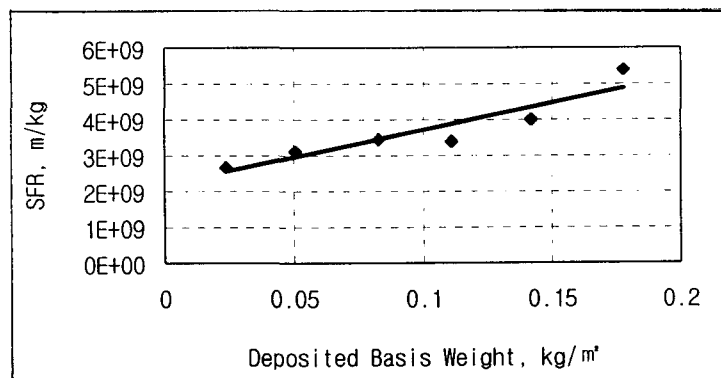


Fig. 10. Correlation between specific filtration resistance and deposited basis weight for 0.45 bar vacuum.

Table 2. The equation and coefficient for specific filtration resistance

Vacuum Pressure Pa(=N/m ²)	Linear Equation	
	Slop	Intercept
15000	5.91E+09	1.64E+09
25000	1.04E+10	1.78E+09
35000	1.12E+10	2.09E+09
45000	1.53E+10	2.18E+09

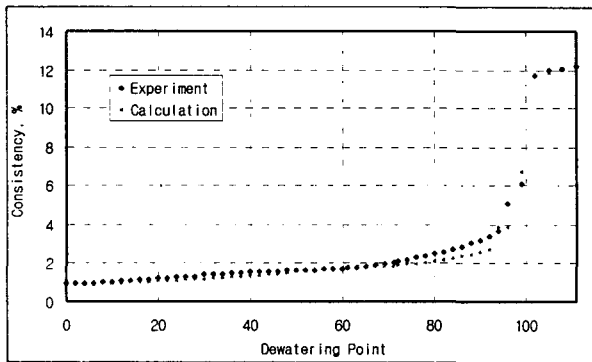


Fig. 11. Comparison between the calculated and measured consistency profiles on the wire.

탈수 위치에서의 상부 지료 농도와 계산된 결과는 매우 유사한 결과를 얻었다. Actual forming length(농도 = 1.4%)의 위치는 탈수위치로는 #44(Multi hydrofoil #4)이며, 상부 wire의 총 길이(slice - couch) 17.126m 중 4.19m 위치에서 이루어지고 있으며 wire 지층 명장의 24.5%내에서 지합이 형성되고 있었다. 또한 지필에 영향을 미칠 수 있는 진공압력이 걸리는 forming shoe(탈수위치 = #70, 거리 = 8.079m)보다 짧았다.

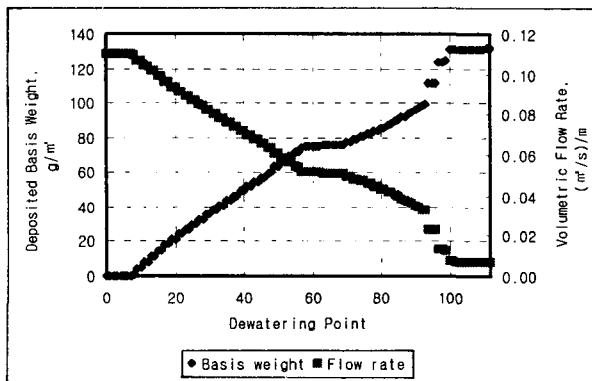


Fig. 12. Results on the Wire for simulation.

지필의 농도가 1.7% 이상인 탈수위치 #57부터는 hydrofoil 등의 자연 및 blade 탈수의 기능이 미약하였으며, #70 탈수위치인 진공탈수에 의해 탈수가 진행하였다. 이는 탈수소자의 효율적 이용에 관한 정보를 얻을 수 있었다.

7. Conclusions

개조된 MDDA를 사용하여 fourdrinier paper machine의 탈수 simulation은 공정 작업조건, head box와 측정 가능한 최종탈수 위치의 농도만으로 가능하였으며, 실제 공정에서 측정된 수치와 매우 유사한 결과를 얻었다. 그 결과 아래와 같았다.

- (1) MDDA를 이용한 Specific filtration resistance(SFR)는 각 진공도에 있어서 침적된 평량에 따라 선형관계를 보였다.
- (2) Head box와 측정 가능한 최종탈수 위치의 농도만으로 공정의 탈수 simulation이 가능하였다.
- (3) Forming length(농도 = 1.4%) 위치를 파악하여 대처할 수 있는 가능성을 부여하였다.
- (4) Multi hydrofoil은 지필의 농도가 1.7% 이상에서는 탈수능력이 미약하였다.
- (5) Simulation data를 이용하여 지함에 영향을 미치는 탈수소자의 위치선정과 부원료 약품의 사용량 조절 및 적용으로 양질의 제품을 생산할 수 있는 자료를 얻을 수 있었다.
- (6) 언급되지는 않았으나 MDDA에서 추가로 얻을 수 있는 자료인 최종 진공도와 탈수 시간은 부원료 및 보류제 사용시 공정의 변화를 정확하게 simulation이 가능하였다.

References

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): 267(1956).
4. Bergstrom, J., Svensk Papperstid. 60(1): 1(1957).
5. Ingmanson, W. L., Tappi 35(10): 439(1952).
6. PIERS, E.C., SPRINGER, A.M. and KUMAR, V., "drainage simulation for Water Drainage in Fourdrinier Paper Machines", Tappi 71(4):133-139(1988).
7. ZANUTTINI, M.A., "Using the Drainage Time to Evaluate Mechanical Pulps". Tappi 71(2):115-116(1988).
8. 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 (Aug. 1962).
9. INGMANSON, W.L. and WHITNEY R.P, "The Filtration Resistance of Pulp Slurries", Tappi 37(11):523-533 (1954).
10. 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).
11. 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).
12. PIERS, E.C., SPRINGER, A.M. and KUMAR, V., "drainage simulation for Water Drainage in Fourdrinier Paper Machines", Tappi 71(4):133-139(1988).
13. PIERS, E.C., SPRINGER, A.M. and KUMAR, V., "A New Technique for Specific Filtration Resistance Measurement", Tappi, 72(7): 149-154(1989).
14. 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).
15. Meyer, H. and Brown, G. R., Tappi 56(6): 144(1973).

Nomenclature

Q = flow rate, m^3/s

ΔP = pressure across the fiber mat, Pa

μ = fluid viscosity, $N \cdot s/m^2 = kg/(m \cdot s)$

A = cross section of the fiber mat, m^2

R_t = total drainage resistance, m^{-1}

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

$a = (\alpha \mu r_f / \rho U)$

α = foil blade angle, $^\circ$

ρ = white water specific mass, kg/m^3

U = machine speed, m/s

N_L = nip length, m

L = machine width, m

R = table roll radius, m

S = maximum vacuum, Pa

(dv/dt) = drainage flow rate, m^3/s

W = mass of the fiber web, kg

SFR = specific filtration resistance, m/kg

Δt = time interval to filtrate the volume ΔV , s

ΔV = filtrate volume, m^3

C = fiber concentration in the slurry, kg/m^3

V = accumulated volume, m^3

BW = basis weight of the fiber mat, kg/m^2