

# 백상지 공정 폐쇄화에 따른 백수 내 산화전분의 축적 현상에 관한 연구 (제1보)

—공정 폐쇄화의 영향—

안현건\* · 이학래†

(2004년 3월 27일 접수: 2004년 7월 30일 채택)

## A Study on the Accumulation Phenomena of Oxidized Starch in White Water in Closed Fine Papermaking Process (Part 1)

—Effect of papermaking system closure—

Hyun Kyun Ahn\* and Hak Lae Lee†

(Received on March 27, 2004: Accepted on July 30, 2004)

### ABSTRACT

Diverse benefits such as reduction of fresh water consumption and effluent discharge, efficient use of raw materials and energy savings can be obtained by papermaking system closure. Closure of papermaking processes, however, causes many problems including reduction of the efficiency of additives, decrease of retention and dewatering, felt plugging, poor paper quality, generation of slime and odor, poor vacuum efficiency, etc, and it has been recognized that accumulation of inorganic and organic substances in the process white water is the prime cause of these problems. Therefore, technological developments for preventing accumulation of these detrimental substances are urgently required for implementing papermaking system closure. Understanding of the accumulation phenomena of the inorganic and organic substances in the papermaking process white water is prerequisite for papermaking system closure. In this study a process simulation method

---

◦ 서울대학교 농업생명과학대학 임산공학과 (Department of Forest Products, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 151-921, Republic of Korea)

\* 현주소: 신무림제지주식회사

† 주저자(Corresponding author) : E-mail: lhakl@snu.ac.kr

was used to analyze the accumulation phenomena of anionic starch in the process white water as the closure level of a fine paper making process is increased. A pilot paper machine was used as a model process. Starch adsorption and desorption models were developed based on the concept of starch adsorption ratio, which was not considered in previous studies. Steady state simulation studies were carried out based on this model using a commercial simulator. In steady state simulation, the variation of dissolved starch concentration in each process unit was monitored as a function of white water usage for wire shower. The result of the steady state simulation showed that dissolved starch concentration and its increase ratio in process units increased as white water usage ratio for wire shower increased.

**Keywords:** process simulation, closure, starch adsorption, anionic starch

## 1. 서 론

용수 및 에너지 다소비 업종인 제지산업은 강화되는 환경 규제와 용수 부족, 그리고 이에 따른 용수 및 생산 원가 상승 등의 문제에 봉착할 것으로 예상되며, 이에 대한 해결방안으로 공정의 고평쇄화를 추진해 나가고 있다. 공정의 고평쇄화는 청수 사용량과 폐수 방류량을 감소시킬 뿐만 아니라 주부원료의 절감, 에너지 절감 등의 경제적 이익을 가져다준다. 그러나 이러한 장점의 이면에는 첨가제의 기능저하, 이에 따른 보류 및 탈수성의 저하, 펄트 막힘, 공정부식, 제품의 품질저하, 슬라임 및 악취 발생, 진공효율 감소 등의 문제점도 있다. 이러한 공정상의 제반 문제들은 주로 공정 백수 내에 누적되는 무기이온과 유기물질에 의해 유발된다. 이를 해결하기 위해서는 이러한 물질의 백수 내 축적을 방지하거나 그 저해 효과를 최소화하는 기술이 필요하다. 이러한 기술은 공정의 구성 및 설계 기술, 공정 제어와 관리기술, 폐수처리 기술 등을 내용으로 하는 하드웨어적 접근과 습부 화학적 원리를 응용한 최적의 보류 및 탈수 시스템 개발과 저해물질 제어 기술을 포함하는 소프트웨어적 접근 방법으로 연구되고 있다.

이러한 연구들이 성공을 거두기 위해서는 문제의 원인인 백수 내 누적되는 무기이온 및 유기물질의 축적 양을 예측하는 것이 무엇보다도 중요하다. 기존의 여러 연구에서 채용한 백수 수질 모사 방법은 크게 나누면 실험실적 방법, 실제적 방법, 그리

고 공정 시뮬레이션의 3가지 방법으로 분류할 수 있다.<sup>1-3)</sup>

이 가운데 실험실적 방법으로 공정 백수를 분석하여 이에 해당하는 시약으로 백수를 제조한 경우와,<sup>4,5)</sup> 공장에서 사용하는 주부원료를 온수에 넣고 장시간 교반하여 주부원료의 구성 성분을 용출시키는 방법으로 인공적으로 백수를 제조하는 방법이<sup>6~8)</sup> 사용된 바 있다. 그러나 이는 고평쇄화로 발생하는 문제의 원인 물질 규명과 각 물질이 제지공정 및 종이 물성에 미치는 영향을 연구할 때에는 적합한 방법이지만 이 결과를 실제 공정에 적용한다는 것은 여러 가지로 한계를 가질 수밖에 없다는 단점도 지니고 있다. 실제적 방법이란 실제 공장이나 파이롯 머신에서 고평쇄화 조건을 적용하여 시운전을 하는 것이다.<sup>9,10)</sup> 이는 가장 실질적인 정보를 얻을 수 있는 방법이지만 경제적인 손실이 크고 결과를 얻을 때까지 많은 시간이 걸리기 때문에 다양한 조건을 부여하여 그 영향을 평가할 수 없다는 것이 단점이다. 공정 시뮬레이션 방법은<sup>11)</sup> 공장이나 실험실의 여러 정보와 물리·화학적 법칙을 종합하여 합리적 가정을 세워 수학적 모델을 만든 후 수치해석법으로 공정의 변화를 계산하는 방법이다. 이 방법은 시뮬레이션 대상에 대한 충분한 정보가 없으면 현실과 동떨어진 결과가 나올 가능성이 높지만, 여러 물리·화학적 정보를 바탕으로 이상적인 공정을 구현할 수 있고, 수질의 예측뿐만 아니라 공정의 설계, 관리에 이르기까지 다양한 방면에 폭넓게 적용할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

본 연구는 공정 시뮬레이션 방법을 이용하여 백상지 공정 고폐쇄화에 따른 유기물질의 축적 현상을 연구하였으며 분석 대상으로 표면사이징용 산화전분을 선정하였다. 표면사이징용 산화전분은 백상파지와 함께 백상지 공정에 유입되는데, 유입되는 양이 다른 유기물질에 비해 많고, 음이온성을 띠기 때문에 섬유와 충전물에 대한 흡착성이 낮아 다량으로 백수에 축적될 수 있으며, 백수에 축적된 산화전분은 음이온 트래쉬(anionic trash) 역할을 할 뿐만 아니라 슬라임 등의 원인이 되며, 폐수 처리 시 BOD 및 COD 부하를 증가시키는 등 백상지 공정의 폐쇄화를 저해하는 가장 중요한 물질이라 할 수 있다. 또한 미세섬유와 충전물에 흡착된 산화전분은 미세섬유와 충전물에 분산성을 부여하여 이들의 일과 보류도에도 영향을 준다. 따라서 백상지 공정에 고폐쇄화에 있어서 산화전분의 제어는 필수적으로 선행되어야만 할 것이라 믿어진다.

지금까지 산화전분의 흡착에 대한 연구로 Glittenberg와 Becker의 연구가 있다.<sup>12)</sup> 이들은 산화전분과 양성전분으로 표면사이징된 백상파지가 초지 공정의 백수 수질에 미치는 영향을 파일럿 머신으로 실험하여 산화전분의 보류도가 30%이며 백수의 COD 및 BOD 부하를 증가시킨다고 하였고, 양성전분을 표면사이징에 사용할 경우 전분 보류도는 95%에 이르고, BOD 및 COD를 줄일 수 있다고 하였다. 제지공정 시뮬레이션은 주로 효율적인 공정을 설계하기 위한 방법으로 연구되었기 때문에 용존 물질의 축적 양만을 시뮬레이션한 사례는 거의 없다. Miyanishi 등은 섬유와 충전제의 분포를 예측하는 시뮬레이션 프로그램을 개발하여 지중이 바뀔 때 섬유와 충전제의 분포 변화를 시뮬레이션하였고, 이 시뮬레이션 프로그램을 발전시켜 용존 물질의 분포도 시뮬레이션 할 수 있다고 하였다.<sup>9)</sup> Orcotoma 등은 신문용지 공장 내의 섬유상 물질과 용존 물질의 분포에 대한 연구에 공정 시뮬레이션을 사용하여 각 단위 공정의 용존 물질의 변화를 시뮬레이션한 바 있다.<sup>10,11)</sup>

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 공정 모델

백상지용 파일럿 머신 상세 설계도를 바탕으로 Fig. 1과 같은 백상지 공정 흐름도를 작성하였다. 이 파일럿 머신은 다음과 같은 운전 조건으로 운전되도록 설계되었다.

- 생산지종: 백상지, 특수지
- 초지기 형태: 장망식 초지기
- 지폭: 1,450 mm
- 기준 평량: 80 g/m<sup>2</sup>
- 일일생산량: 16 ~ 32 AD T/day (본 연구에서는 16 AD T/day)
- 초지기 속도: 121 ~ 242 m/min (본 연구에서는 121 m/min)

이 파일럿 머신이 실제 공장의 축소된 형태로 작동되도록 기존 설계도의 edge trim을 3.0%로 하여 일반 공장동일한 수준이 되도록 하였다. 또한 파지 체스트(broke chest)는 용량 10 m<sup>3</sup>의 습부파지 체스트(wet broke chest) 1개와 용량 30 m<sup>3</sup>의 건조파지 체스트(dry broke chest) 1개를 갖도록 설계하였다. 또 본 연구에 영향이 적을 것이라고 판단되는 팬 펌프와 헤드박스 사이에 있는 클리너(cleaner)와 스크린(screen)을 생략하였다.

이렇게 하여 단순화된 공정은 Fig. 1에서 보는 것과 같이, 펄프 슬러리 저장조(pulp slurry storage chest; St/C)로만 구성된 지료 조성부, 습부파지 체스트(WBr/C)와 건조파지 체스트(DBr/C)만이 포함된 파지처리 시스템, 혼합조(mixing chest; Mix/C)에서 헤드박스에 이르는 approach 시스템, 와이어 파트와 백수순환 시스템으로 구성되어 있다.

지료 조성부에서 펄프는 건조도 91%로 유입되어 해리 및 고해되어 농도 4%로 펄프 슬러리 저장조에 저장되었다가 혼합조로 유입된다. 또 파지처리 시스템에서 백상파지는 건조도 91%로 유입되어 4% 농도로 희석되어 건조파지 체스트에 저장되었다가 혼합조로 이송된다. 백상파지 혼합비율은 혼합조의 유출 질량유량에 대한 유입 백상파지의 질량유량으로 정의하였다. 또한 습부파지(농도 18%)와 PDF(polydisk filter)에서 재생된 섬유(농도 4%)는 습부파지 체스트에서 혼합되는데, 여기

서 4% 농도로 희석된 후 혼합조로 보내진다.

혼합조에서 혼합된 지료는 머신 체스트(machine chest, Ma/C)로 보내지며, 머신 체스트 출구를 지난 지료는 백수로 3.2% 농도로 희석된 후 스텐트 박스(stuff box)로 보내진다. 팬 펌프에 도달한 지료는 충전물(20% 농도)과 사일로 백수와 혼합되어 농도 0.6%로 희석되어 헤드박스로 보내진다.

헤드박스에서 사출된 슬라이스는 와이어 파트를 지나는 동안 탈수과정을 거치게되는데, 와이어 전 반부와 후반부에서 탈수된 물은 각각 다른 저장조에 수집되므로 이를 고려하여 와이어 파트를 탈수부(drainage zone)와 진공부(vacuum zone)로 구분하였다. 탈수부와 진공부에서 탈수된 백수는 각각 사일로와 실핏(seal pit)에서 수집된다. 탈수부와 진공부를 통과한 습지필의 농도를 각각 10.4%와 18%로 설정하였다. 또한 진공부 이후에서 일어

나는 탈수는 모두 무시하였다. 진공부를 지나 쿠치(couch)에 도달한 습지필은 지폭의 3%가 trimming된 후 건조부로 이송되고, edge trim은 습부파지 체스트로 보내진다.

진공부에서 탈수된 백수는 사일로의 overflow와 와이어 샤워 수와 함께 실핏에 수집되며, 실핏에서 다시 PDF로 보내진다. PDF에서는 유입된 백수를 여과하여 섬유와 물을 분리시키는데, 여과 과정에서 회수된 섬유는 농도가 4%이고 습부파지 체스트로 보내지도록 설계되었다. 또한 PDF에서 여과된 백수는 농도 0.03%인 백수는 'cloudy filtrate'라 부르고, 0.006%인 백수는 'clear filtrate'라 부르는데, 이들은 여과 과정을 거치면서 섬유의 함량이 극히 낮아지기 때문에 장섬유가 없는 것으로 가정하였다.

이 두 가지 농도의 백수는 각각 백수저장탱크(white water storage tank; WWSt/T)와 clear

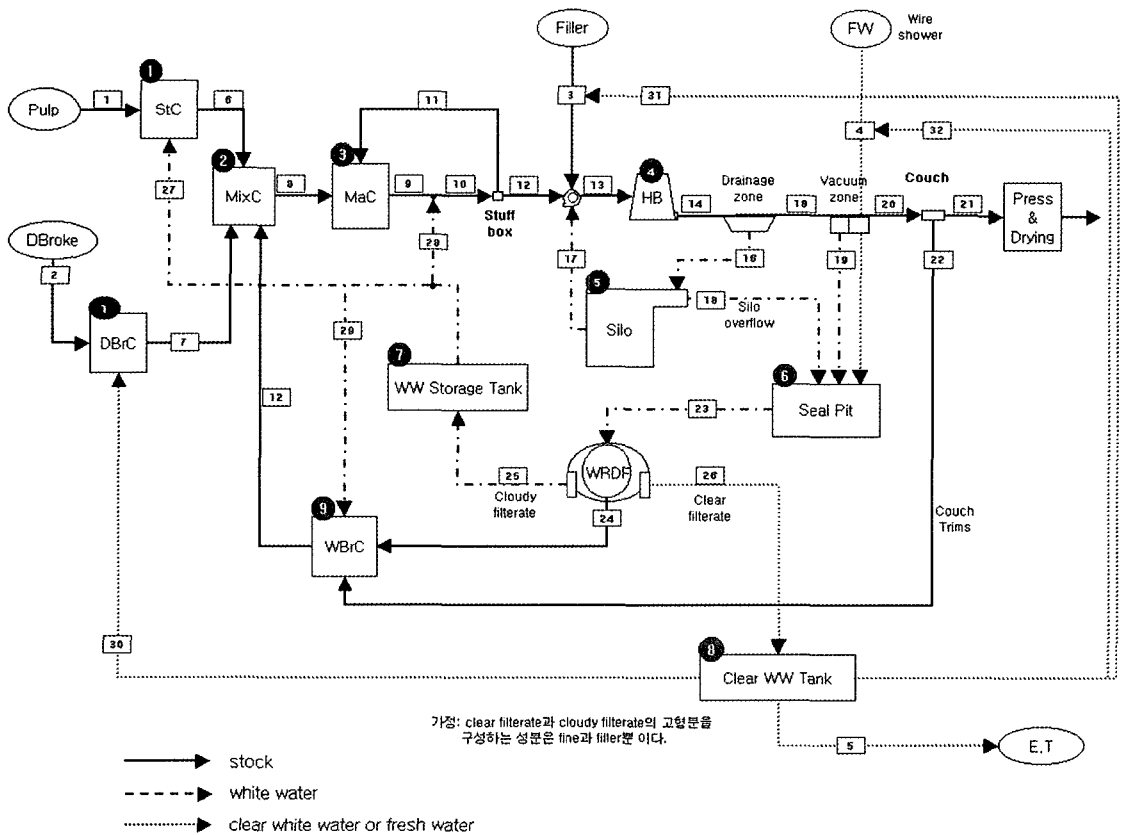


Fig. 1. Flowsheet diagram of process model.

**Table 1. The amount of water used for various kind of showers**

	Total water, m3/day	Fresh water, m3/day	White water, m3/day	FW ratio, %	WW ratio, %
Wire shower	511.5	55.7	455.8	10.9	89.1
Stock shower	122.4	0.0	122.4	0.0	100.0
Press shower	361.6	91.6	270.0	25.3	74.7
Sum	995.5	147.3	848.2		

Fresh water consumption 147.3/16 = 9.21 m3/T

filtrate 저장탱크(ClearWW/T)에 저장된 후 각 단 위공정의 회석수로 사용된다. Clear filtrate는 특히 고형분의 농도가 낮기 때문에 샤워수로 재활용 되고 있다. 본 연구의 분석 대상 공정의 상세 설계 에서는 세척수로 청수 일부와 대부분의 clear filtrate를 사용하는 것으로 되어있다. 와이어 샤워 에 사용되는 청수의 유량은 55.7 m<sup>3</sup>/day로 와이어 샤워와 stock shower & cleaning을 합한 세척수 유량의 8.7%에 해당되는 양이다. 또 프레스 샤워에 도 청수가 91.6 m<sup>3</sup>/day만큼 사용되는데 이는 프레스 샤워용 세척수 유량의 25.3%이다. 이와 같이 세 척수로 청수를 사용할 경우 공정 전체에 사용되는 청수의 양은 제품 생산량에 대해 9.21 m<sup>3</sup>/T(생산 량 16 AD T/day 기준)가 된다.

파일럿 머신 상세 설계 상의 각 샤워의 세척수 유량과 세척수의 청수 및 백수의 비율은 Table 1에

서 보는 바와 같다. 본 연구에서는 프레스 샤워의 청수는 설계와 동일한 유량으로 공정 변화에 상관 없이 일정하게 유지된다고 가정하고, 공정 폐쇄화 의 정도를 '와이어 샤워의 백수 사용률'로 정의하였 다. 와이어 샤워의 백수 사용률은 와이어 샤워로 유입되는 총 세척수 유량에 대하여 백수 유량의 비 율로 정의하였기 때문에 와이어 샤워의 백수 사용 률이 증가하면 폐쇄화 수준이 높아지는 것을 의미 한다.

와이어 샤워의 백수 사용률과 제품 생산량에 대 한 청수 사용량과의 관계는 Table 2와 같다.

**2.2 자료 구성 성분**

일반적인 백상지의 자료는 불과 섬유, 미세섬유, 충전물, 부유물질(suspended solid), 그리고 DCS 물질(dissolved and colloidal substance)로 구성

**Table 2. The relation between WW usage ratio for wire shower and FW usage ratio**

Total amount of wire shower water: 511.5 m3/day			
Fresh water, m3/day	White water, m3/day	WW usage ratio for shower, %	FW usage, m3/T
0.0	511.5	100.0%	5.7
50.0	461.5	90.2%	8.9
100.0	411.5	80.4%	12.0
150.0	361.5	70.7%	15.1
200.0	311.5	60.9%	18.2
250.0	261.5	51.1%	21.4
300.0	211.5	41.3%	24.5
350.0	161.5	31.6%	27.6
400.0	111.5	21.8%	30.7
450.0	61.5	12.0%	33.9
500.0	11.5	2.2%	37.0
511.5	0.0	0.0%	37.7

된다. 본 연구에서는 지료를 고품분과 용존 물질로 구분하고, 고품분 성분은 섬유와 미세섬유, 충전물로 구성되며, 용존 물질은 산화전분만으로 구성된다고 가정하였다.

지료의 고품분을 섬유와 미세섬유, 충전물로 구분한 것은 이들의 비표면적 차이에 따라 산화전분의 흡착량이 달라지기 때문이며, 산화전분 외의 다른 용존 물질을 고려하지 않은 것은 지료의 고품분 이외의 물질에 대한 산화전분의 흡착을 배제하고 다른 용존 물질에 의한 습부화학적 영향을 무시하기 위해서이다.

본 연구에서 사용한 지료 구성 성분과 관련된 가정 및 기본 설정 값은 다음과 같다.

- 펄프는 섬유와 미세섬유로 구성되어 있으며 미세섬유 함량은 15%이다.
- 생산되는 종이의 회분 함량은 항상 15%가 되도록 조절된다.
- 백상파지의 미세섬유 및 충전물의 함량은 종이와 동일하다.
- 충전물은 함수율 9%의 분말 상으로 공급되며 백수로 20%로 희석된 후 팬 펌프에 투입된다.
- 산화전분은 백상파지를 통해서만 유입되며 파지의 전분 함량은 표면사이징 양으로 주어지는데, 기본 값은  $3 \text{ g/m}^2$ 이다.
- 청수는 전술한 바와 같이 와이어 샤워수와 프레스 샤워수로만 유입되며 프레스 샤워수의 청수 유량은 일정하지만 와이어 샤워수의 청수 유입량은 폐쇄화 수준에 따라 달라진다. 청수는 물 외에 다른 물질을 포함하지 않는다.

또한, 와이어 와이어 샤워의 백수 사용률의 기본 값은 50%로 설정하였다. 와이어 샤워의 백수 사용률이 50%이면 생산량에 대한 청수사용량은 약  $20 \text{ m}^3/\text{T}$ 가 되는데, 이 정도의 청수사용량은 폐쇄화 정도가 낮은 공장의 청수 사용 수준이므로 고품쇄화의 출발점으로 적절하다고 판단되었다.

### 2.3 파이프라인

파이프를 지나는 지료의 밀도와 온도는 모든 공정에서 일정하다고 가정하였다. 또한 파이프라인의 길이에 따른 지료의 이송시간의 차이는 고려하지 않았으며, 지료가 이송되는 통로로서의 의미만을 가지는 stream이라 정의하였다.

Stream으로 연결된 단위공정의 농도와 각 성분의 농도 및 함량 변화를 계산하기 위해서는 stream을 통해 전달되는 변수 - 본 연구에서 사용한 상용 시뮬레이터의 경우 'port'-에 정의한 변수의 이름과 속성 및 단위는 Table 3과 같다. 여기에서 보는 바와 같이 port로 전달해야 하는 stream의 속성은 지료의 농도와 유량, 질량유량, 미세섬유와 충전물 함량, 충전분 질량유량, 용존 전분의 농도, 섬유와 미세섬유, 충전물 각각에 대한 전분 흡착율이다.

어떤 단위공정(저장조 혹은 펌프)에서 Feed 혹은 Out라는 port가 정의되었다면 port에 정의된 변수는 다음과 같이 표현한다.

```
port_name.Var_Name
port_name : port name
Var_name : variable name
```

**Table 3. Names and units of variables of the streams defined in the port**

Variable name	Property	Unit
C	Consistency of stock	kg/kg
F	Volumetric flow rate(or flow rate)	L/hr
$M_{\text{solids}}$	Mass flow rate of solid materials in the stock	kg/hr
$Y_{\text{fine}}$	Mass fraction of fiber fines	kg/kg
$Y_{\text{fil}}$	Mass fraction of filler	kg/kg
$C_s$	Dissolved starch concentration in the stock	kg/kg
$AS_{\text{fib}}$	Adsorption ratio of starch on fibers	kg/kg
$AS_{\text{fine}}$	Adsorption ratio of starch on fiber fines	kg/kg
$AS_{\text{fil}}$	Adsorption ratio of starch on filler	kg/kg
$MT_s$	Mass flow of total starch	kg/hr

### 2.3.1 Stream의 변수 정의

지료 고형분의 정의에 의거해 지료 고형분의 질량유량(Msolids)을 다음과 같이 나타내었다.

$$M_{\text{solids}} = M_{\text{fib}} + M_{\text{fine}} + M_{\text{fil}} \quad (1)$$

- $M_{\text{fib}}$  : mass flow rate of fibers, kg/hr
- $M_{\text{fine}}$  : mass flow rate of fiber fines, kg/hr
- $M_{\text{fil}}$  : mass flow rate of filler, kg/hr
- $M_{\text{solids}}$ : mass flow rate of solid materials in stock , kg/hr

지료 구성에 대한 기본 가정으로부터 지료의 질량유량은 고형분의 질량 유량과 산화전분, 물의 질량유량의 합으로 정의할 수 있지만, 산화전분의 질량 유량의 변동은 공정 제어에 미치는 영향이 거의 없기 때문에 지료의 질량유량(M)에 반영하지 않았다. 그러므로 지료의 질량유량은 다음과 같다.

$$M = M_{\text{solids}} + M_w \quad (2)$$

- $M$  : mass flow rate of stock, kg/hr
- $M_w$  : mass flow rate of water, kg/hr

지료의 질량유량(M)은 지료의 밀도를  $\rho$  (kg/L)라 하면,

$$M = \rho F \quad (3)$$

와 같이 밀도와 유량의 식이 된다.

또 다음과 같이 지료 고형분의 각 성분의 질량유량을 각각의 밀도로 나누면 각 성분의 유량을 계산할 수 있다.

$$F_{\text{fib}} = \frac{M_{\text{fib}}}{\rho_{\text{fib}}} \quad (4)$$

$$F_{\text{fine}} = \frac{M_{\text{fine}}}{\rho_{\text{fine}}} \quad (5)$$

$$F_{\text{fil}} = \frac{M_{\text{fil}}}{\rho_{\text{fil}}} \quad (6)$$

$$F_w = \frac{M_w}{\rho_w} \quad (7)$$

- $F_w$  : volumetric flow rate of water, L/hr
- $F_{\text{fib}}$  : volumetric flow rate of fibers, L/hr
- $F_{\text{fine}}$  : volumetric flow rate of fiber fines, L/hr
- $F_{\text{fil}}$  : volumetric flow rate of filler, L/hr
- $\rho_w$  : density of water, kg/L
- $\rho_{\text{fib}}$  : density of fibers, kg/L
- $\rho_{\text{fine}}$  : density of fiber fines, kg/L
- $\rho_{\text{fil}}$  : density of filler, kg/L

각 지료 고형분 성분의 유량의 합은 지료의 유량과 같으므로,

**Table 4. Density of solid materials in the stock**

Material	Density	Unit
Water	1.000	kg/L
Fiber	1.550	kg/L
Talc	2.700	kg/L
CaCO <sub>3</sub>	2.700	kg/L

$$F = F_{\text{fib}} + F_{\text{fine}} + F_{\text{fil}} + F_w \quad (8)$$

위의 식 (3)에 의해 지료의 밀도는 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$\rho = \frac{M}{F} \quad (9)$$

지료의 고형분 농도는 지료 무게에 대한 지료에 포함된 고형분 무게의 비율, 즉 질량 비율로 정의하였는데, 이때 앞에서 가정한 바와 같이 전분의 질량은 고형분의 질량에 포함하지 않았다. 이 때문에 stream의 질량유량 및 유량 계산에 오차가 발생한다. 그 정도는 백상파지의 표면사이징 양, 전분 흡착율, 그리고 백상파지 혼합비율에 비례한다. 예를 들어, 전분 흡착율이 95%인 양성전분으로 평량의 4%만큼 표면사이징된 백상파지가 공정에 유입되고 있는데 백상파지 혼합비율이 30%라면, 혼합조에서의 흡착 전분의 질량유량은 고형분 질량유량의 1.2%를 차지하므로 지료 농도는 1.2%의 오차가

발생한다. 본 연구에서는 지료 농도의 오차가 최대 2.4%까지 발생하는 범위에서 시물레이션을 실시하였으며, 산화전분의 백수 내 축적 현상을 구명하는데 있어서 이 정도의 오차는 큰 영향을 주지 않는다고 판단된다.

지료의 농도 계산에 흡착 전분이 포함되지 않기 때문에 지료의 농도, C는 다음과 같은 식으로 정의할 수 있다.

$$C = \frac{M_{\text{solids}}}{M} \quad (10)$$

또 이는 식(3)을 대입하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C = \frac{M_{\text{solids}}}{\rho F} \quad (11)$$

미세섬유 함량과 충전물함량은 지료 고형분에 대한 질량 분율로 정의하였다. 그러므로 각각의 함량은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$Y_{\text{fine}} = \frac{M_{\text{fine}}}{M_{\text{solids}}} \quad (12)$$

$$Y_{\text{fil}} = \frac{M_{\text{fil}}}{M_{\text{solids}}} \quad (13)$$

또한, 섬유 함량을  $Y_{\text{fib}}$ 라 하면,

$$Y_{\text{fib}} + Y_{\text{fine}} + Y_{\text{fil}} = 1 \quad (14)$$

와 같다.

용존 전분의 농도,  $C_s$ 는 지료의 질량유량에 대한 용존 전분의 질량유량의 비로 정의했으며, 이를 식으로 나타내면,

$$C_s = \frac{(M_{\text{Ts}} - M_{\text{AS}})}{M} \quad (15)$$

$$= \frac{(M_{\text{Ts}} - M_{\text{AS}})}{\rho F} \quad (16)$$

MTs: mass flow rate of total starch in the stock, kg/hr

MAS: mass flow rate of starch adsorbed on the solid materials in the stock, kg/hr

와 같다.

섬유와 미세섬유, 충전물에 흡착된 전분의 흡착율은 각 성분의 질량에 대한 흡착 전분 질량의 비율로 정의하였고, 이는

$$A_{s_{\text{fib}}} = \frac{M_{\text{ASfib}}}{M_{\text{fib}}} \quad (17)$$

$$A_{s_{\text{fine}}} = \frac{M_{\text{ASfine}}}{M_{\text{fine}}} \quad (18)$$

$$A_{s_{\text{fil}}} = \frac{M_{\text{ASfil}}}{M_{\text{fil}}} \quad (19)$$

$M_{\text{ASfib}}$ : mass flow rate of adsorbed starch on fibers, kg/hr

$M_{\text{ASfine}}$ : mass flow rate of adsorbed starch on fiber fines, kg/hr

$M_{\text{ASfil}}$ : mass flow rate of adsorbed starch on filler, kg/hr

와 같은 식으로 나타내었다.

식 (2) - (14)에 의해서 총 전분의 질량유량은 다음과 같다.

$$T_s = MC_s + M_{\text{ASfib}} + M_{\text{ASfine}} + M_{\text{ASfil}} \quad (20)$$

$$= \rho C_s F + A_{s_{\text{fib}}} M_{\text{fib}} + A_{s_{\text{fine}}} M_{\text{fine}} + A_{s_{\text{fil}}} M_{\text{fil}} \quad (21)$$

$$= \rho C_s F + M_{\text{solids}} [A_{s_{\text{fib}}} + (A_{s_{\text{fine}}} - A_{s_{\text{fib}}}) Y_{\text{fine}} + (A_{s_{\text{fil}}} - A_{s_{\text{fib}}}) Y_{\text{fil}}] \quad (22)$$

$$= \rho C_s F + A_{s_{\text{fib}}} (1 - Y_{\text{fine}} - Y_{\text{fil}}) M_{\text{solids}} + A_{s_{\text{fine}}} Y_{\text{fine}} M_{\text{solids}} + A_{s_{\text{fil}}} Y_{\text{fil}} M_{\text{solids}} \quad (23)$$

$$= \rho C_s F + CM [A_{s_{\text{fib}}} + (A_{s_{\text{fine}}} - A_{s_{\text{fib}}}) Y_{\text{fine}} + (A_{s_{\text{fil}}} - A_{s_{\text{fib}}}) Y_{\text{fil}}] \quad (24)$$

$$= \rho C_s F + \rho CF [A_{s_{\text{fib}}} + (A_{s_{\text{fine}}} - A_{s_{\text{fib}}}) Y_{\text{fine}} + (A_{s_{\text{fil}}} - A_{s_{\text{fib}}}) Y_{\text{fil}}] \quad (25)$$



$$= \rho F [ C_s + C [ A_{s_{fib}} + (A_{s_{fine}} - A_{s_{fib}}) Y_{fine} + (A_{s_{fil}} - A_{s_{fib}}) Y_{fil} ] ] \quad (26)$$

### 2.4 저장조

모델 공정에 사용되는 저장조인 각종 체스트와 탱크는 완전혼합형 연속식 저장조로서 저장조의 지료 농도는 저장조 내의 위치에 상관없이 일정하다고 가정하였다. 또한 저장 수위는 시간에 따라 변하지 않으며, 지료의 온도와 밀도는 항상 일정하다고 가정하였다.

본 시뮬레이션에서 사용한 저장조의 이름과 용량, 초기 농도는 Table 5와 같다.

**Table 5. Capacity of chests and their initial consistency**

Chest name	Capacity, m <sup>3</sup>	Initial consistency, %
Storage chest	75	4.0
Dry broke chest	30	4.0
Wet broke chest	10	4.0
Mixing chest	1	4.0
Machine chest	15	3.89
Headbox	-	0.60
Silo	7.5	0.126
Seal pit	8	0.086
WW storage tank	10	0.030
Clear WW tank	10	0.006

#### 2.4.1 저장조의 물질수지

정상상태에서는 시간에 따른 물질 양의 변동이 없는 상태이므로 유입되는 물질 양과 유출되는 물질 양의 차이는 항상 0이 된다. 반면 비정상상태에서는 시간에 따라 물질 양이 변하기 때문에 저장조의 지료 농도나 미세섬유 및 충전물의 함량 등은 시간에 따라 변하며, 각 변수들이 안정화되는데 걸리는 시간은 저장조의 용량과 유량에 따라 좌우된다.

저장조 내의 물질량은 지료의 총량, 지료 농도, 미세섬유와 충전물의 농도, 용존 전분의 농도, 그리고 섬유와 미세섬유, 충전물에 흡착된 전분의 흡착을 등으로 나타내었다.

Fig. 2와 같이 2개의 유입 stream과 2개의 유출



**Fig. 2. Simple diagram of a chest with four streams.**

stream을 가진 체스트가 있다고 가정했을 때, 지료의 총괄 물질수지는 다음과 같다.

$$\frac{d(\rho V)}{dt} = \rho_{f1} \text{ feed1} \cdot F + \rho_{f2} \text{ feed2} \cdot F - \rho_{o1} \text{ out1} \cdot F - \rho_{o2} \text{ out2} \cdot F \quad (27)$$

V : volume of stock in the chest, L

$\rho_{f1}$  : density of stock in the stream feed1, kg/L

$\rho_{f2}$  : density of stock in the stream feed2, kg/L

$\rho_{o1}$  : density of stock in the stream out1, kg/L

$\rho_{o2}$  : density of stock in the stream out2, kg/L

이 때 공정 내의 모든 지료의 밀도를 일정하다고 가정하였고, 저장조 수위의 변동을 고려하지 않는다고 하였기 때문에 식 (27)은 다음과 같은 식으로 정리된다.

$$\frac{dV}{dt} = \text{feed1} \cdot F + \text{feed2} \cdot F - \text{out1} \cdot F - \text{out2} \cdot F = 0 \quad (28)$$

지료의 총괄 물질수지식은 지료의 밀도가 일정할 경우, 유량수지를 나타내는 식이 된다.

저장조 내의 지료 농도 변화는 지료 고형분의 물질수지로 나타낼 수 있다.

$$V \frac{dC}{dt} = \text{feed1} \cdot M_{solids} + \text{feed2} \cdot M_{solids} - \text{out1} \cdot M_{solids} - \text{out2} \cdot M_{solids} \quad (29)$$

$$= \text{feed1} \cdot C \text{ feed1} \cdot M + \text{feed2} \cdot C \text{ feed2} \cdot M - \text{out1} \cdot C \text{ out1} \cdot M - \text{out2} \cdot C \text{ out2} \cdot M$$

저장조의 지료 고형분 구성 성분의 농도(섬유 농도  $C_{fib}$ , 미세섬유 농도  $C_{fine}$ , 충전물 농도  $C_{fil}$ ) 변화는 다음과 같이 각 지료 고형분 구성 성분의 물질수지로 나타내었다.

$$\begin{aligned}
 V \frac{dC_{fib}}{dt} &= feed1.M_{fib} + feed2.M_{fib} - out1.M_{fib} - out2.M_{fib} \\
 &= feed1.Y_{fib} feed1.M_{solids} + feed1.Y_{fib} feed2.M_{solids} \\
 &\quad - out1.Y_{fib} out1.M_{solids} - out2.Y_{fib} out2.M_{solids} \\
 &= feed1.Y_{fib} (feed1.C_{fib} feed1.M) + feed1.Y_{fib} (feed2.C_{fib} feed2.M) \\
 &\quad - out1.Y_{fib} (out1.C_{fib} out1.M) - out2.Y_{fib} (out2.C_{fib} out2.M)
 \end{aligned} \tag{30}$$

$$\begin{aligned}
 V \frac{dC_{fine}}{dt} &= feed1.M_{fine} + feed2.M_{fine} - out1.M_{fine} - out2.M_{fine} \\
 &= feed1.Y_{fine} feed1.M_{solids} + feed1.Y_{fine} feed2.M_{solids} \\
 &\quad - out1.Y_{fine} out1.M_{solids} - out2.Y_{fine} out2.M_{solids} \\
 &= feed1.Y_{fine} (feed1.C_{fine} feed1.M) + feed1.Y_{fine} (feed2.C_{fine} feed2.M) \\
 &\quad - out1.Y_{fine} (out1.C_{fine} out1.M) - out2.Y_{fine} (out2.C_{fine} out2.M)
 \end{aligned} \tag{31}$$

$$\begin{aligned}
 V \frac{dC_{fil}}{dt} &= feed1.M_{fil} + feed2.M_{fil} - out1.M_{fil} - out2.M_{fil} \\
 &= feed1.Y_{fil} feed1.M_{solids} + feed1.Y_{fil} feed2.M_{solids} \\
 &\quad - out1.Y_{fil} out1.M_{solids} - out2.Y_{fil} out2.M_{solids} \\
 &= feed1.Y_{fil} (feed1.C_{fil} feed1.M) + feed1.Y_{fil} (feed2.C_{fil} feed2.M) \\
 &\quad - out1.Y_{fil} (out1.C_{fil} out1.M) - out2.Y_{fil} (out2.C_{fil} out2.M)
 \end{aligned} \tag{32}$$

저장조 내의 용존 산화전분의 농도( $C_s$ ) 변화는 다음과 같은 용존 산화전분의 물질수지 식으로 나타내었다.

$$\begin{aligned}
 V \frac{dC_s}{dt} &= feed1.C_s feed1.M + feed2.C_s feed2.M \\
 &\quad - out1.C_s out1.M - out2.C_s out2.M
 \end{aligned} \tag{33}$$

### 2.5 일과 보류도 모델

일과보류도 모델은 Orccotoma 등<sup>11)</sup>이 사용한 모델을 수정하여 만들었다.

Orccotoma 등은 와이어 상의 탈수 영역을 탈수부와 진공부로 구분하여 각각의 일과보류도를 각 지료 고형분의 함량과 각 지료 고형분의 일과보류도의 곱으로 정의되었다. 이들의 일과보류도 식은 섬유질의 일과보류도와 미세섬유의 일과보류도가 일정할 때 미세섬유의 함량 변화에 따라 각 영역의 일과보류도가 변하도록 되어있다.

그들이 사용한 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 R &= \frac{T_w}{T_h} \times 100 \\
 T_w &= \left[ \sum_{i=1}^n M_i \right]_w \\
 R_i &= 100 \frac{(M_i)_w}{(M_i)_h} \\
 Y_i &= \frac{(M_i)_h}{T_h} \\
 R &= \sum_{i=1}^n Y_i R_i \\
 R &= R_{fib} Y_{fib} + R_{fine} Y_{fine} \\
 &= R_{fib} + (R_{fine} - R_{fib}) Y_{fine}
 \end{aligned} \tag{34}$$

V : volume of stock in the chest, L

R : first pass retention of pulp

R<sub>i</sub> : first pass retention of i-th fiber fraction in the pulp

R<sub>fib</sub> : first pass retention of fibers in the pulp

R<sub>fine</sub> : first pass retention of finer fines in the pulp

T<sub>w</sub> : total fibrous materials in the web

T<sub>h</sub> : total fibrous materials in delivered stream through HB slice

M<sub>i</sub> : the mass associated to the i-th fiber fraction in the pulp

Y<sub>i</sub> : the mass fraction of the i-th fiber fraction in the pulp

Y<sub>fib</sub> : the mass fraction of fibers in the pulp

Y<sub>fine</sub> : the mass fraction of fiber fines in the pulp

본 연구에서는 이들이 사용한 식을 활용하였는데, 그들은 지료 고형분 성분을 두 가지로 나누었으나 본 연구에서는 세 가지로 구분한 것이 그 차이이다.

본 연구에 적용한 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 R &= \sum_{i=1}^3 Y_i R_i \\
 &= R_{fib} Y_{fib} + R_{fine} Y_{fine} + R_{fil} Y_{fil} \\
 &= R_{fib} + (R_{fine} - R_{fib}) Y_{fine} + (R_{fil} - R_{fib}) Y_{fil}
 \end{aligned} \tag{35}$$

R<sub>fil</sub> : first pass retention of filler in the pulp

Y<sub>fil</sub> : the mass fraction of fiber filler in the pulp

또한 Orccotoma 등과 같이 섬유의 일과보류도는 공정 조건에 상관없이 일정하게 유지되는 것으로 가정하였다. 또한 섬유의 일과보류도 값으로 Orccotoma 등이 사용한 값을 그대로 사용하였는데, 이들이 사용한 값은 Graff<sup>15)</sup>가 실험한 결과를 통계적 검증을 거쳐 정리한 것으로 섬유의 일과보류도는 탈수부에서 97.7%, 진공부에서 99.7%였다. 이들이 사용한 TMP는 주로 활엽수를 이용하여 제조하므로 활엽수 펄프만을 사용한다고 가정한 본 연구의 모델공정과 유사한 섬유장을 가질 것으로 판단되며, 또한 신문용지의 평량은 백상지보다 훨씬 낮기 때문에 이들이 사용한 보류도 수치는 백상지 공정의 일과보류도의 최소값에 해당된다고 생각되었다.

일반적으로 충전물의 입자 크기는 미세섬유보다 작기 때문에 여과에 의한 보류가 덜 일어날 것으로 판단되어 충전물의 일과보류도를 미세섬유보다 5% 낮도록 설정해 주었다. 또한 탈수부와 진공부의 일과보류도는 각각 80%와 96%로 일정하게 유지되는 것으로 가정하였다.

이상에서 고려한 섬유의 일과보류도와, 미세섬유와 충전물의 일과보류도 차이 및 각 영역의 일과보류도를 고려할 때, 탈수부와 진공부의 미세섬유

와 충전물의 일과보류도는 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다.

$$R1 = R1_{fib} Y_{fib} + R1_{fine} Y_{fine} + R1_{fil} Y_{fil} \quad (36)$$

$$R1_{fine} = R1_{fil} + 5.0\%, \quad R1_{fib} = 97.7\%$$

$$R2 = R2_{fib} Y_{fib} + R2_{fine} Y_{fine} + R2_{fil} Y_{fil} \quad (37)$$

$$R2_{fine} = R2_{fil} + 5.0\%, \quad R2_{fib} = 99.7\%$$

## 2.6 산화전분 흡착 모델

산화전분의 축적 현상은 유입된 산화전분이 초지계 외로 배출되지 않기 때문에 생기는 현상이다. 산화전분이 초지계 외로 배출될 수 있는 통로는 섬유에 흡착되어 제품과 함께 계 외로 배출되는 경우와 폐수와 함께 방류되는 경우가 있다. 후자의 경우 고폐쇄화가 진행될수록 초지계 내에서 순환되는 백수의 양이 증가하는 반면 방류되는 폐수의 양이 감소하여 폐수와 함께 방류되는 산화전분 양이 감소하기 때문에 초지계 내에 전분이 축적되는 것이고, 전자의 경우 섬유와 충전물에 대한 산화전분의 흡착 양이 감소할수록 백수 내의 산화전분의 농도는 증가하지만 종이와 함께 계 외로 빠져나가는 산화전분의 양은 줄어들기 때문에 전분의 축적량이 증가하는 것이다. 산화전분의 축적 현상을 시뮬레이션하기 위해서는 이 두 부분을 모두 고려한 모델을 만들어야 한다.

폐쇄화에 의한 산화전분의 축적은 공정 관리 측면에서 다루어야 할 문제로 전술한 공정 모델에서 폐쇄화 정도를 나타내는 '와이어 사위의 백수 사용률'을 사용함으로써 모델링하였다.

섬유와 충전물에 대한 산화전분의 흡착은 습부화학적 측면의 문제이므로 섬유와 충전물에 대한 산화전분의 흡착율과 흡착량을 고려하여 모델링하였다.

### 2.6.1 산화전분 흡착율

산화전분의 흡착율에 영향을 주는 인자로는 산화전분의 종류, 치환도, 분자량, pH, 공정에 투입되

는 여러 첨가제의 종류와 정전기적 성질, 무기이온 농도, 온도, 반응시간 등이 있다.

산화전분을 가장 많이 사용하는 표면사이징 공정은 10 ~ 15% 농도로 호화한 산화전분 호화액을 평량 대비 4% 정도의 양이 되도록 건조 지필의 표면을 도피한 후 함수율 7%가 되도록 건조하는 과정이다. 표면사이징에 사용하는 산화전분 호화액은 50℃ 정도의 온도로 유지된 상태에서 지필에 적용되며, 이때의 산화전분 호화액의 점도는 15 cPs 이하로 아주 낮다. 전분 호화액의 점도가 낮기 때문에 지필에 도피된 전분 호화액은 지필의 작은 공극 구조로 인해 생기는 모세관력에 의해 지필의 두께 방향으로 급속하게 침투하게 되고, 일부는 표면에 잔류하게 된다. 건조과정을 거치면서 표면에 잔류한 전분 호화액은 전분 분자간의 수소결합을 형성하면서 필름을 형성하게 되고, 표면과 지필의 공극에 존재하는 산화전분은 섬유와 수소결합을 형성하게 된다.

표면사이징된 종이 백상파지로 재활용될 때, 4% 농도로 백수를 혼합한 후 해리 과정을 거치는데, 이때 건조과정에서 형성된 수소결합은 물에 의해 약화되며 해리 과정에서 가해지는 전단력에 의해 더욱 약화되어 전분의 분자들이 물 속으로 용출되게 된다. 물 속으로 용출되지 않은 산화전분은 물과 강한 전단력이 주어지는 상황에서도 산화전분간 혹은 산화전분과 섬유 간에 수소결합을 유지하고 있는 것들이다.

본 연구에서는 해리 과정에서 백수에 용출되지 않은 산화전분은 표면사이징 과정에서 형성된 지료 고형분에 대한 흡착력을 유지하고 있는 것으로 '흡착 전분(adsorbed starch)'이라고 정의하였고 이와 달리 물 속에 용존 상태로 존재하는 전분을 '용존 전분(dissolved starch)'이라 하였다(Fig. 3).

본 연구에서는 산화전분의 흡착에 대하여 다음과 같은 가정을 도출하였다.

- 섬유와 미세섬유, 충전물에 대한 전분의 흡착 현상은 표면사이징 공정에서 건조과정을 통해 형성된 수소결합에 의해 발생한다.

- 산화전분의 용출은 파지를 해리하는 과정에서 발생하여 건조파지 체스트에서 완결되며 공정을 순환하는 동안에는 일어나지 않는다.

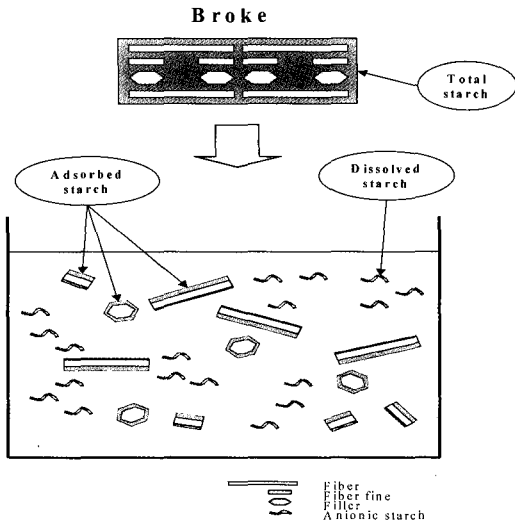


Fig. 3. Adsorption and dissolution of starch during disintegration of fine paper broke.

Table 6. Specific area of solid materials in the stock

Material	Specific surface area, m <sup>2</sup> /g
Fiber	1.2
Fiber fine	8.0
Talc	6.0
CaCO <sub>3</sub> (GCC)	3.0
No. 2 clay	12.0

• 이때 유입되는 전분 총량에 대한 용출되지 않고 섬유와 미세섬유, 충전물에 흡착된 전분의 질량 분율을 '전분 흡착율'이라 정의한다.

• 용존 산화전분은 섬유와 미세섬유, 충전물에 재흡착되지 않는다.

• 양이온성 고분자나, 알람과 같은 다가의 양이온에 의한 전분의 흡착 현상은 무시한다.

### 2.6.2 산화전분의 흡착량

산화전분의 흡착량은 섬유와 미세섬유, 충전물의 비표면적에 따라 달라지도록 고려하였다. 이를 위해 비표면적이 가장 작은 섬유에 대한 흡착비율을 1이라고 했을 때 미세섬유와 충전물에 대한 흡착비율을 '상대흡착강도'로 정의하였는데, 이는 Marton<sup>16)</sup>이 양성전분의 흡착에 대한 연구에서 사

용한 개념이하였다. Marton은 양성전분의 상대 흡착 강도를 비표면적을 이용하여 계산하였고, 그 결과 비표면적이 8.0 m<sup>2</sup>/g인 미세섬유는 5, 비표면적이 12.0 m<sup>2</sup>/g인 2급 백토(clay)는 4라고 하였다.

본 연구에서는 Marton이 계산한 양성전분의 상대흡착강도를 그대로 사용하여 미세섬유는 5, 탈크는 2로 설정하였다. 탈크에 대한 상대 흡착 강도는 Marton의 연구에서 언급되지 않았지만 상대 흡착 강도가 비표면적에 비례하므로 비표면적이 2급 백토의 1/2배인 탈크의 상대 흡착 강도는 2급 백토의 1/2이라고 가정하였다.

### 2.7 시뮬레이션

공정의 폐쇄화는 순간적인 공정의 변화가 아니라 일단 목표한 폐쇄화 수준에 도달하면 장시간 유지되는 공정 상태를 의미한다. 반면에 지질에 의해 파지가 발생되면 순간적으로 파지의 혼합비율에 변화를 가져오게 되는데, 이때 생기는 공정의 변화는 일시적인 것으로 지질이 종료되면 다시 정상적인 운전 조건으로 돌아오게 된다.

이런 관점에서 봤을 때 공정의 변화는 첫째, 장기적이고 안정된 상태를 고려해야 되는 경우와, 둘째, 일시적이고 비정상적인 변화를 고려해야 경우로 나누어 생각할 수 있다. 위에서 언급한 공정의 폐쇄화는 장기적이고 안정된 운전조건으로 고려해야 하지만, 지질의 발생은 순간적이고 비정상적인 운전 상태로 고려해야 한다.

공정의 고폐쇄화에 따른 산화전분의 백수 내 축적현상은 장기적인 변화의 측면에서 고찰되어야 하며, 이를 위해서는 정상상태 시뮬레이션이 적당한 방법이라 생각된다. 그러나 제지공정은 여러 공정변수들이 복잡하게 작용하여 항상 안정된 상태로만 운전되지 않기 때문에 정상상태 시뮬레이션으로는 이러한 단기적이고 비정상적인 변화를 고려할 수 없다. 따라서 비정상상태 시뮬레이션 역시 필요하다.

본 연구에서는 장기적인 공정관리 측면에서 고려할 수 있는 공정의 변화로 폐쇄화를 변화에 의한 공정의 변화를 정상상태 시뮬레이션을 통해 고찰하였다.

### 2.7.1 시뮬레이터

본 연구에서는 상용 시뮬레이터인 Aspen Tech사의 Aspen Custom Modeler™ 10.2를 이용하였다. 이 시뮬레이터는 initialization, steady state, dynamic, estimation, optimization의 5가지 run mode가 있다. 이 가운데 정상상태 시뮬레이션은 steady state mode에서, 비정상상태 시뮬레이션은 dynamic mode에서 실행하였다.

시뮬레이션 프로그램은 Aspen Custom Modeler Language Reference의 문법에 의거하여 작성하였으며, 물질수지 방정식의 풀이는 시뮬레이터에 내장된 solver에 의해 수행되었으며, 이때 solver option은 대부분 기본 값으로 설정하였으나 General의 Mode Tolerance의 모든 Tolerance 값을  $1 \times 10^{-11}$ 으로 설정하였다.

### 2.7.2 정상상태 시뮬레이션

장기적 공정운영 계획이나 공정의 변화 상황에 따라 산화전분의 축적에 영향을 줄 것으로 생각되는 변수를 다음과 같이 4가지로 설정하였다.

- 와이어 샤프의 백수 사용률: 50 ~ 87.5%
- 백상파지 혼합비율 : 0.1 ~ 30%
- 전분 흡착율 : 0.1 ~ 95%
- 표면사이징 양 : 0.1 ~ 8.0 g/m<sup>2</sup>

와이어 샤프의 백수 사용률은 공정의 폐쇄화 정도를 나타내는 변수로서 현재 공정의 폐쇄화수준을 50%라고 가정하고 그 이상으로 폐쇄화가 진행될 때 산화전분의 축적 정도를 알아보기 위하여 와이어 샤프의 백수 사용률을 87.5%까지 증가시키면서 정상상태 시뮬레이션을 실시하였다. 이 경우 와이어 샤프의 백수 사용률의 최대 값은 87.5%인데, 이는 전술한 바와 같이 와이어 샤프의 백수 사용률이 87.5%가 되면 공정은 거의 완전한 폐쇄화 수준이 되며, 이 때의 폐수처리장 유입 백수의 유량이 2.5 L/hr가 된다.

백상파지 혼합비율은 현재의 혼합비율이 15%라고 가정하고 그보다 낮아질 때와 높아질 때의 공정 백수 내 산화전분의 축적 정도를 파악하기 위해 0.1%에서 30%까지 증가시키면서 정상상태 시뮬레이션을 실시하였고, 산화전분의 유입량이 표면사이징 양에 따라서 달라지므로 현재의 표면사이

징 양이 3.0 g/m<sup>2</sup>이라 가정하고 0.1 g/m<sup>2</sup>에서 9.0 g/m<sup>2</sup>까지 변화시키면서 정상상태 시뮬레이션을 실시하였다. 또한 전분 흡착율 변화에 따른 공정의 변화를 살펴보기 위해 현재의 산화전분 흡착율을 20%로 가정하고 0.1%에서 95%까지 증가시키면서 정상상태 시뮬레이션을 실시하였다.

Table 7은 위의 4가지 변수의 기본 값을 정리한 것이다.

**Table 7. Default values in steady state simulation**

Variable	Value
WW usage for shower	50.0%
Dry broke addition ratio	15.0%
Adsorption ratio of anionic starch	20.0%
Amount of surface sizing	3.0 g/m <sup>2</sup>

이들 기본 값은 어느 한 변수의 변화에 따른 공정의 영향을 평가하기 위한 기준이 되는 공정의 상태에서 고폐쇄화나 장기적인 공정 관리 전략을 세우는데 있어서 출발점이 되는 현재의 공정 상태를 의미한다. 정상상태 시뮬레이션에서는 공정 모델의 가정으로부터 Table 8과 같은 고정값을 사용하였다.

또한 저장조와 관련된 저장조 내의 농도, 미세섬유 및 충전물의 함량, 용존 산화전분의 농도와 지료 고형분 각각에 대한 흡착 산화전분의 양 등은 초기 값(initial value)으로 설정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

와이어 샤프의 백수 사용률, 백상파지 혼합비율, 표면사이징 양과 전분 흡착율의 4가지 변수를 각각 변화시키면서 정상상태 시뮬레이션을 실시하여 공정 백수 내 산화전분 축적이 발생하는 원인과 그 정도를 분석하였다.

공정 백수 내 산화전분의 축적은 공정으로 유입된 산화전분이 공정 밖으로 빠져나가지 못하여 공정 백수와 함께 공정 내에서 순환하면서 생기는 현상이다. 그러므로 공정 백수 내 산화전분의 축적 정도를 살펴보기 위해서는 공정에 유입되는 산화전분의 양과 유출되는 산화전분의 양을 파악하여야 한다.

**Table 8. Constant values of consistency, flow rate, first pass retention and web dryness used in steady state simulation**

Stream	Consistency or dryness	Stream	Fixed flow rate
Pulp	91.0%	Production	16 AD T/day
St/C outlet	4.0%	Stuff box inlet	21,312.5 kg/hr
DBr	91.0%	Stuff box return to Ma/C	2,400 kg/hr
DBr/C outlet	4.0%	Variable	FPR*
WBr/C outlet	4.0%	Drainage zone	80.0%
Stuff box inlet	3.2%	Vacuum zone	96.0%
HB inlet	0.6%	Fiber in drainage zone	97.7%
Filler powder	91.0%	Fiber in vacuum zone	99.7%
Diluted filler	20.0%	Percentage of the couch trims generated	3.0%
Drainage zone outlet	10.5%	Fines content of pulp	15%
Vacuum zone outlet	18.0%		
Clear filtrate	0.006%		
cloudy filtrate	0.03%		
Recovered fibers from PDF	4.00%		

\*FPR: first pass retention

본 연구에서 사용한 공정모델은 펄프, 백상파지, 충전물과 청수가 유입되고, 프레스 입구의 습지필과 폐수처리장 유입 백수를 통해 물질의 유출이 이루어진다. 이들 중 산화전분이 유입되는 곳은 백상파지 유입 stream이며, 유출되는 곳은 프레스 입구 stream과 폐수처리장 유입 백수 stream이다. 따라서 이 세 가지 stream의 변수의 변화를 파악하면 산화전분의 축적 발생 원인과 그 정도를 파악할 수 있다. 또한, 위의 세 가지 stream은 나머지 4가지 stream의 유량과 물질 양의 변화에 영향을 받기 때문에 각 stream의 물질 양의 변동도 함께 고려하였다. 마지막으로 공정에 유입 및 유출 stream이 공정에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

공정으로 유입되는 산화전분의 양은 백상파지의 혼합비율과 산화전분의 흡착율, 표면사이징 양에 의해 결정되므로 공정의 폐쇄화에 의한 영향만을 평가하기 위해서 산화전분의 유입 양이 일정하게 유지되도록 와이어 샤크의 백수 사용률만을 변화시켰다. 즉, 백상파지 혼합비율은 15%, 표면사이징 양은 3/m<sup>2</sup>, 그리고 전분 흡착율은 20%로 고정시킨 상태에서 와이어 샤크의 백수 사용률만 50% ~ 87.5% 범위에서 변화시키면서 정상상태 시뮬레이

션을 실시하였다.

Fig. 4와 5는 와이어 샤크의 백수 사용률의 변화에 따른 공정의 유입 유출 stream의 유량 변화를 도시한 것이다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 청수 유입 유량과 폐수처리장 유입 백수 유량은 와이어 샤크의 백수 사용률에 대해 직선적으로 감소하여 와이어 샤크의 백수 사용률이 87.5%가 되면 폐수처리장 유입 백수의 유량은 2.5 L/hr까지 감소하였다. 또한 프레스 입구 유량은 항상 일정한데, 이는 생산량이 일정하다고 가정하였기 때문이다. 공정 밖으로 물질이 빠져나가는 stream인 폐수처리장 유입 백수와 프레스 입구의 유량은 Fig. 5와 같이 변하기 때문에 폐수처리장 유입 백수의 유량 감소에 의해 초지 계 외로 유출되는 물질의 양은 감소하게 되며, 이에 따라 공정 백수 내에 물질의 축적이 일어난다.

백수 내에 함유된 물질 중 충전물과 미세섬유의 변동은 그렇게 크지 않았다. 폐수처리장 유입 백수의 농도는 항상 0.006%가 되도록 설정하였고, 백수에는 섬유가 없다고 가정하였기 때문에 백수의 지료 고형분 성분은 미세섬유와 충전물만이 존재한다. 따라서 폐수처리장 유입 백수의 유량 감소에

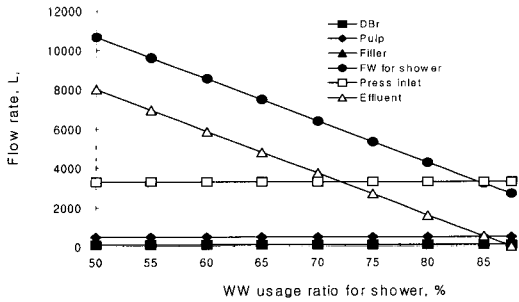


Fig. 4. The variation of flow rate of the process inlet and outlet streams as a function of WW usage ratio for wire shower.

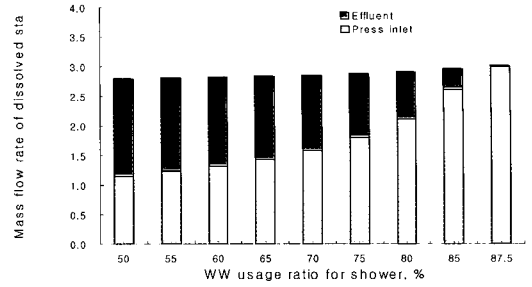


Fig. 6. The variation of mass flow rate of dissolved starch in stream Press inlet and stream Effluent as a function of WW usage for wire shower.

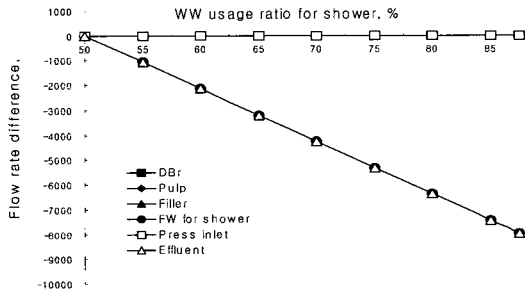


Fig. 5. The variation of Flow rate difference of the process inlet and outlet streams as a function of WW usage ratio for wire shower.

따라 계 외로 방출되는 미세섬유와 충전물의 질량 유량도 감소한다. 그렇지만 백수의 농도가 0.006% 정도로 낮기 때문에 와이어 샤워의 백수 사용률 증가에 따라 충전물과 미세섬유의 축적 양은 적었고, 충전물과 미세섬유의 질량유량 변동에 의해 유발되는 공정 전반의 유량 변동도 미소한 수준이었다. 이것은 와이어 샤워의 백수 사용률이 50%일 때와 와이어 샤워의 백수 사용률이 87.5%일 때, 공정의 각 stream의 미세섬유 함량과 충전물 함량의 변화는 0.05% 이하였고, 펄프와 충전물, 백상파지의 유량 변화는 0.5 L/hr 미만이라는 사실로부터 확인할 수 있다. 그러나 백수 내 포함된 용존 산화전분 농도는 충전물과 미세섬유의 경우와 달리 와이어 샤워의 백수 사용률의 증가에 따라 그 증가율이 점점 증가하는 경향을 보이고 있다.

Fig. 6은 와이어 샤워의 백수 사용률 증가에 따른 용존 산화전분의 질량유량의 변화를 도시한 것

으로서 용존 산화전분은 백상파지를 통해서만 유입되므로 프레스 입구(press inlet)와 폐수처리장 유입 백수(effluent)의 산화전분 질량유량의 합은 백상파지를 통해 유입되어 백수 속에 용출된 산화전분의 질량유량과 같다.

폐수처리장 유입 백수의 유량 감소는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 용존 산화전분의 유출량을 감소시켰다.

와이어 샤워의 백수 사용률이 증가함에 따라 폐수처리장 유입 백수를 통해 계 외로 빠져나가는 산화전분의 양은 점점 감소하였고, 와이어 샤워의 백수 사용률이 증가할수록 그 감소 양도 증가하였는데, 와이어 샤워의 백수 사용률이 87.5%에 이르면 0.002 kg/hr의 용존 산화전분만이 폐수처리장 유입 백수를 통해 계 외로 빠져나간다. 반면 프레스 입구를 통해 계 외로 방출되는 용존 산화전분의 질량유량은 와이어 샤워의 백수 사용률이 증가할수록 그 증가량이 커졌는데, 와이어 샤워의 백수 사용률이 87.5%일 경우에는 유입되는 용존 산화전분이 거의 모두 프레스 입구를 통하여 계 외로 방출됨을 알 수 있었다.

Fig. 6에서 와이어 샤워의 백수 사용률이 증가함에 따라 유입되는 용존 산화전분의 질량유량이 증가한 이유는 공정 모델의 가정에서 백상파지의 물질 구성이 생산되고 있는 종이와 동일하다고 하였기 때문이다. 즉, 와이어 샤워의 백수 사용률이 증가하면 프레스 입구를 통과하는 습지필의 용존 산화전분과 흡착 산화전분의 질량유량이 증가하는데, 습지필이 건조되면서 이들 산화전분은 종이에



잔류하게 된다. 이 종이가 백상파지로 계 내로 다시 유입되면 산화전분의 잔류량 만큼 산화전분의 계 내 유입량이 증가하게 된 것이다.

또한 Fig. 7은 와이어 샤워의 백수 사용률의 증가에 따른 프레스 입구 습지필과 폐수처리장 유입 백수의 용존 산화전분 농도 변화를 도시한 것이다. 도시된 바와 같이 두 stream의 용존 산화전분의 농도는 와이어 샤워의 백수 사용률이 증가할수록 증가하는데, 와이어 샤워의 백수 사용률이 높을수록 용존 산화전분 농도의 증가량이 커지고 있으며, 폐수처리장 유입 백수의 용존 산화전분 농도와 프레스 입구 습지필의 용존 산화전분 농도와의 차는 점점 줄어든다는 것을 알 수 있다.

이러한 용존 산화전분 농도의 변화 경향은 와이어 샤워의 백수 사용률의 증가에 따른 실핏의 용존 산화전분 농도의 변화를 통해 설명할 수 있다.

실핏에는 사일로 overflow와 와이어의 진공부에서 탈수된 백수, 와이어 샤워수가 혼합된다. 이 중 사일로 overflow와 진공부의 용존 산화전분 농도는 헤드박스와 동일하지만, 와이어 샤워수는 그렇지 않다. 와이어 샤워수는 실핏 출구와 용존 산화전분 농도가 동일한 백수와 청수가 혼합되므로 청수 혼합량 만큼 실핏보다 용존 산화전분 농도가 낮다. 따라서 실핏에는 헤드박스와 용존 산화전분 농도가 같은 두 stream과, 실핏 출구보다 용존 산화전분 농도가 낮은 1개의 stream이 혼합되므로, 실핏 출구의 용존 산화전분 농도는 항상 헤드박스보다 낮으며, 그 정도는 와이어 샤워수의 용존 산화전

분 농도에 따라 달라진다. 이에 따라 와이어 샤워수의 용존 산화전분 농도는 청수 유입량에 따라 변하므로 결국 실핏의 용존 산화전분 농도는 청수 유입량, 즉 와이어 샤워의 백수 사용률에 따라 변한다고 할 수 있다. 그러므로 와이어 샤워의 백수 사용률이 높아질수록 실핏에 유입되는 와이어 샤워수의 용존 산화전분 농도가 높아지므로 실핏 출구의 용존 산화전분 농도도 높아진 것이다.

실핏의 용존 산화전분 농도 변화는 헤드박스의 용존 산화전분의 농도와 실핏 이후의 백수의 용존 산화전분 농도, 와이어 샤워의 백수 사용률과의 관계를 통해서 좀더 자세히 파악할 수 있다.

실핏의 유입 및 유출 stream의 용존 산화전분의 물질 수지는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$C_{S_{sp}}F_{sp} = C_{S_{silo}}F_{silo} + C_{S_{VZ}}F_{VZ} + C_{S_{shr}}F_{shr} \quad (38)$$

$C_{S_{sp}}$  : dissolved starch concentration in seal pit outlet

$C_{S_{silo}}$  : dissolved starch concentration in silo overflow

$C_{S_{VZ}}$  : dissolved starch concentration in WW from vacuum zone

$C_{S_{shr}}$  : dissolved starch concentration in wire shower

$F_{sp}$  : flow rate of seal pit outlet

$F_{silo}$  : flow rate of silo overflow

$F_{VZ}$  : flow rate of WW from vacuum zone

$F_{shr}$  : flow rate of wire shower

실핏 출구의 용존 산화전분 농도는 와이어 샤워에 사용된 백수와 같고, 사일로 overflow와 진공부로부터 유입되는 백수는 헤드박스의 용존 산화전분 농도와 같다.

$$C_{S_{WW}}F_{sp} = C_{S_{HB}}F_{silo} + C_{S_{HB}}F_{VZ} + C_{S_{WW}}F_{WW} \quad (39)$$

$$= C_{S_{HB}}(F_{silo} + F_{VZ}) + C_{S_{WW}}F_{WW}$$

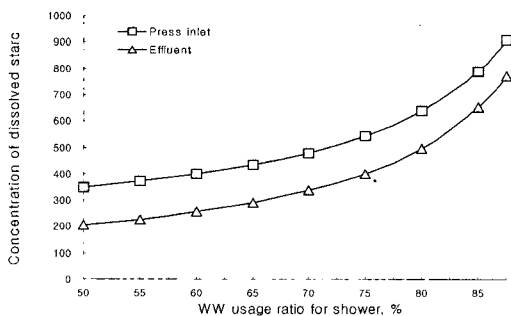


Fig. 7. The variation of dissolved starch concentration in stream Press inlet and stream Effluent as a function of WW usage ratio for wire shower.

$C_{SWW}$  : dissolved starch concentration in WW to wire shower

$C_{SHB}$  : dissolved starch concentration in HB

$F_{WW}$  : flow rate of WW to wire shower

와이어 샤워의 백수 사용률을  $R_{WW}$ 라 정의하면, 와이어 샤워에 사용된 백수의 유량은 다음과 같이 나타낼 수 있고,

$$F_{WW} = R_{WW} F_{shr} \quad (40)$$

식 (40)을 식 (39)에 대입하면 다음과 같이 정리된다.

$$C_{SWW} F_{sp} = C_{SHB} (F_{silo} + F_{VZ}) + C_{SWW} R_{WW} F_{shr} \quad (41)$$

$$C_{SWW} (F_{sp} - R_{WW} F_{shr}) = C_{SHB} (F_{silo} + F_{VZ}) \quad (42)$$

$$C_{SWW} = \frac{C_{SHB} (F_{silo} + F_{VZ})}{F_{sp} - R_{WW} F_{shr}} = \frac{F_{sp} - F_{shr}}{F_{sp} - R_{WW} F_{shr}} C_{SHB} \quad (43)$$

식 (43)은 실핏 이후의 백수의 용존 산화전분 농도( $C_{SWW}$ )를 와이어 샤워의 백수 사용률( $R_{WW}$ )과 헤드박스의 용존 산화전분( $C_{SHB}$ ) 농도에 관한 식으로 나타낸 식이다.

이 식은 와이어 샤워의 백수 사용률이 증가하면 백수의 용존 산화전분 농도가 헤드박스의 용존 산화전분 농도에 근접해 감을 나타낸다. 또한 와이어 샤워의 백수 사용률이 1.0에 가까워질수록 백수와 헤드박스의 용존 산화전분 농도 차이는 더 많이 줄어든다. 한편 와이어 샤워의 백수 사용률이 증가할수록 헤드박스의 용존 산화전분 농도는 상승할 것이다. 따라서 실핏 이후의 백수의 용존 산화전분 농도 증가량은 와이어 샤워의 백수 사용률이 증가할수록 더욱 더 커진다. 이러한 결과는 Fig. 7의

경향과 완전히 일치된다.

실핏 이후의 백수, 즉 clear filtrate와 cloudy filtrate는 각각의 저장조에 저장되었다가 공정의 희석수로 사용되므로 백수의 용존 산화전분 농도의 변화는 희석수가 공급되는 각 단위공정의 용존 산화전분 농도에도 영향을 미친다.

Fig. 8은 각 단위 공정별 용존 산화전분의 농도 분포를 나타낸 것이고, Fig. 9는 단위 공정 별로 와이어 샤워의 백수 사용률 증가에 따른 용존 산화전분 농도의 변화를 도시한 것이다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 모든 단위 공정에서 앞서 본 Fig. 7과 같은 경향을 나타냄을 볼 수 있다.

Fig. 8과 Fig. 9에서 도시한 바와 같이, 산화전분의 농도는 백상파지가 유입되는 건조파지 체스트(DBr/C)에서 가장 높았고, 청수가 유입되는 와이어 샤워수가 가장 낮았다. 공정 폐쇄화 수준이 높아지면 와이어 샤워수의 용존 산화전분 농도는 실

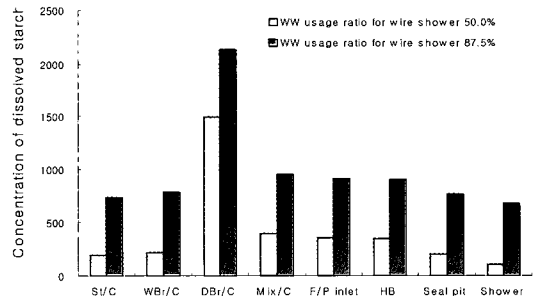


Fig. 8. The distribution of dissolved starch concentration.

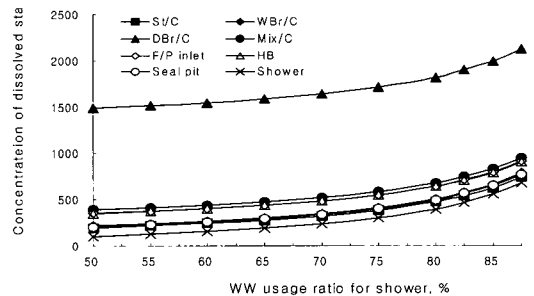


Fig. 9. The variation of dissolved starch concentration in the process units as a function of WW usage ratio for wire shower.

핏 출구의 용존 산화전분 농도, 즉 백수의 용존 산화전분 농도에 가까워지고, 실핏의 용존 산화전분 농도는 와이어 샤프수의 용존 산화전분 농도가 증가하기 때문에 헤드박스의 용존 산화전분 농도에 가까워진다

펠프 슬러리 저장조(St/C)의 용존 산화전분 농도는 실핏과 거의 동일하다. 이는 함수율 9.0%인 펄프를 4.0% 농도로 희석할 때 백수가 사용되는데, 백수의 용존 산화전분 농도는 실핏과 동일하기 때문이다. 따라서 공정 폐쇄화에 따른 펄프 슬러리 저장조의 용존 산화전분 농도 변화는 실핏의 용존 산화전분 농도 변화와 거의 동일하다.

습부파지 체스트(WBr/C)에서는 쿠치의 edge trim과 PDF에서 재생된 섬유, 그리고 백수가 혼합된다. 쿠치의 edge trim은 헤드박스와 용존 산화전분 농도가 동일하고, PDF에서 재생된 섬유와 백수는 실핏 출구와 용존 산화전분 농도가 같기 때문에 습부파지 체스트의 용존 산화전분 농도는 헤드박스와 실핏의 중간 정도의 용존 산화전분 농도를 나타낸다. 공정 폐쇄화 수준이 높아지면 실핏의 용존 산화전분 농도가 헤드박스에 근접해 가므로 습부파지 체스트의 용존 산화전분 농도도 헤드박스에 가까워진다.

건조파지 체스트의 용존 산화전분 농도는 백상파지가 함유한 산화전분의 양과 희석수로 사용되는 백수의 용존 산화전분 농도에 따라 달라진다. 백상파지의 산화전분 함량은 공정 폐쇄화 수준이 높아질수록 프레스 입구를 통해 유출되는 습지필의 용존 및 흡착 산화전분의 양이 증가하기 때문에 이에 비례해서 증가한다. 백상파지의 산화전분 총량은 와이어 샤프의 백수 사용률이 50%일 때 3.49 kg/hr이고, 87.5%일 때 3.76 kg/hr이다. 이 중 유출되는 산화전분의 양은 각각 2.79 kg/hr, 3.01 kg/hr이다. 건조파지 체스트의 유량이 2,160 L/hr이므로 백상파지의 산화전분 총량 증가에 의한 용존 산화전분 농도 증가량은 101.9 ppm 정도인데, 이는 건조파지 체스트의 용존 산화전분 농도 증가량 639.2 ppm의 16%에 불과한 양이다. 따라서 건조파지 체스트의 용존 산화전분 농도의 증가는 주로 희석에 사용된 백수의 용존 산화전분 농도의 증가 때문이라고 볼 수 있다.

혼합조(Mix/C)로 이송된 건조파지 체스트의 지료는 펄프 슬러리 저장조와 습부파지 체스트에서 이송된 지료와 혼합된다. 펄프 슬러리 저장조와 습부파지 체스트에서 이송된 지료는 용존 산화전분 농도가 건조파지 체스트에 비해 아주 낮기 때문에 혼합조의 용존 산화전분의 농도는 건조파지 체스트보다 훨씬 낮아진다. 또한 혼합조를 통과한 지료는 머신 체스트와 스티프 박스를 거치는 동안 백수로 희석되는데, 이때 혼합되는 백수의 양만큼 용존 산화전분 농도는 더 감소하게 된다.

스티프 박스를 통과한 지료가 팬 펌프에 도달하면, 지료의 농도는 3.2%에서 0.6%로 급격히 떨어지는데, 이 과정에서 용존 산화전분 농도의 변화는 그렇게 크지 않다. 이는 팬 펌프에서 혼합되는 stream 중 팬 펌프 출구 유량의 87.1%를 차지하는 사일로 백수의 용존 산화전분 농도가 헤드박스와 동일하기 때문이다.

혼합조에서 헤드박스 사이에 있는 저장조들의 용존 산화전분 농도는 각각에 유입되는 stream의 용존 산화전분 농도에 영향을 받는데, 이들은 연속된 공정이므로 백상파지를 통해 유입되는 산화전분의 양과 희석 백수의 용존 산화전분 농도에 의해 용존 산화전분 농도가 결정된다. 그런데 건조파지 체스트의 용존 산화전분 농도 변화는 백상파지를 통해 유입되는 산화전분 양의 변화보다는 백수의 용존 산화전분 농도 변화에 더 큰 영향을 받는다. 다시 말하자면, 백상파지 체스트의 용존 산화전분 농도 변화는 백수의 용존 산화전분 농도 변화에 의해 주도된다고 할 수 있다. 따라서, 혼합조에서 헤드박스 사이에 있는 저장조들의 용존 산화전분 농도는 결국 백수의 용존 산화전분 농도 변화에 의해 주도된다고 할 수 있다.

이 때문에 Fig. 8과 9에서 도시한 바와 같이, 용존 산화전분 농도의 증가량을 단위 공정 별로 비교하였을 때 각 단위공정 간에 큰 차이가 나타나지 않은 것으로 판단된다.

이상의 결과들을 종합해 보면, 공정 폐쇄화로 인해 유입되는 산화전분의 양은 크게 변하지 않지만 희석에 사용되는 백수의 용존 산화전분의 농도가 증가하기 때문에 공정 내 산화전분의 축적 현상이 나타난다고 할 수 있다.

각 단위공정의 용존 산화전분의 축적 정도를 살펴보면, 와이어 샤프의 백수 사용률이 87.5%일 때, 건조파지 체스트의 용존 산화전분의 농도는 와이어 샤프의 백수 사용률이 50%일 때에 비해 1.4배, 헤드박스의 경우 2.6배, 실핏의 경우 3.8배 증가하였다.

이렇게 각각의 단위 공정마다 용존 산화전분 농도의 증가 비율이 차이가 나는 것은 Fig. 8에서 도시한 바와 같이 용존 산화전분 농도의 증가량은 비슷하지만 와이어 샤프의 백수 사용률이 50%일 때의 용존 산화전분 농도가 각기 다르기 때문이다.

#### 4. 결론

백상지 공정의 고폐쇄화에 따른 산화전분의 축적 현상을 분석하기 위해 공정 시뮬레이션 기법을 사용하였다. 파이롯 머신의 상세 설계를 참조하여 공정 모델을 만들었고, 산화전분 흡착과 탈착에 대한 모델을 만들었다. 이를 활용하여 와이어 샤프의 백수 사용률을 변수로 정상상태 시뮬레이션을 실시하였다.

정상상태 시뮬레이션의 결과, 용존 산화전분의 농도는 샤프용 백수 사용량의 증가함에 따라 증가하였는데, 와이어 샤프의 백수 사용률이 높을수록 그 증가율도 높아졌다.

#### 사 사

이 연구는 산업자원부 청정기술개발 사업의 지원으로 수행되었으며, 일부분은 BK-21 사업의 지원에 의해 진행되었음.

#### 인용문헌

- Lyman, C.A. and Raymond, L.J.: White water reuse on a fine paper machine. *Tappi J.* 56(3): 92-96 (1973).
- Alexander, S.D. and Dobbins, R.D.: The buildup of dissolved electrolytes in a closed paper mill system. *Tappi J.* 60(12): 117-120 (1977).
- Alexander, S.D. and Dobbins, R.D.: The physical and optical properties of paper made at high salt concentrations. *Tappi J.* 60(12): 121-124 (1977).
- Lindstrom, T., Soremarm, C., Heinegard, C. and Martin-Lof, S.: The importance of electrokinetic properties of wood fiber for papermaking. *Tappi J.* 57(12): 94-96 (1974).
- Linhart, F., Auhorn, W.J., Degen, H.J. and Lorz, R.: "Anionic trash": controlling detrimental substances. *Tappi J.* 70(10): pp79-85 (1987).
- Allen, L., Polverrari, M., Levesque, B. and Francis, W.: Effects of system closure on retention- and drainage-aid performance in TMP newsprint manufacture. *Tappi J.* 82(4): 188-195 (1999).
- Zhang, X., Beatson, R.P., Cai, Y.J. and Saddler, J.N.: Accumulation of specific dissolved and colloidal substances during white water recycling affects paper properties. *J. Pulp & Paper sci.* 25(6): 206-210 (1999).
- Wågberg, L. and Åsell, I.: The action of cationic polymers in the fixation of dissolved and colloidal substances Part2. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.* 104: 169-184 (1995).
- Miyanishi, T., Iida, K. and Iwatsu, T.: Dynamic simulation for efficient paper machine grade change. *Tappi J.* 71(1): 49-56 (1988).
- Orccotoma, J.A., Paris, J. and Perrier, M.: Dynamics of fines distribution in a white-water network. *Pulp and Paper Canada.* 98(9): 77-80 (1997).
- Orccotoma, J.A., Paris, J. and Perrier, M.: Dynamic analysis of fibrous material and dissolved solids distribution in the wet-end of a newsprint mill. *Appita J.* 52(2): 105-113 (1999).
- Glittenberg, D. and Becker, A. : Cationic starches for surface sizing: The better solution. *Paperi Ja Puu-Paper and Timber.* 79(4): 240-243 (1997).
- Luukkonen, K., Malmström, O. and Zetter, C.: New and innovative sizing strategies for the sizing of PCC containing fine paper. 1995 Papermakers Conference Proceedings, TAPPI Press, pp. 435-443.
- Webb, L. J. : Water and wet-end chemistry. *Paper technology,* 33(6): 30-35 (1991).
- Graff, S.: Analysis de la distribution de matière dans la partie humide d'une machine à papier, M.Sc.A. thesis, École Polytechnique, Montreal(1998).
- Marton, J.: The role of surface chemistry in fines-cationic starch interactions. *Tappi J.* 63(4): 87-91.