

백상지 공정 폐쇄화에 따른 백수 내 산화전분의 축적 현상에 관한 연구 (제3보)

—백수사용량과 파지첨가량 변화에 따른 공정의 비정상상태 변화—

안현건* · 이학래†

(2006년 3월 14일 접수: 2006년 5월 10일 채택)

A Study on the Accumulation Phenomena of Oxidized Starch in White Water of Closed Fine Papermaking Process (Part 3)

—Effect of white water and broke use ratios on the unsteady state
of papermaking process—

Hyun Kyun Ahn* and Hak Lae Lee†

(Received on March 14, 2006: Accepted on May 10, 2006)

ABSTRACT

In this study a process simulation method 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. Dynamic simulations of the influence of white water usage ratio and uncoated broke addition ratio on the variation of process variable was monitored as a function of time. Results from the dynamic simulations showed that the volume of reservoirs affected the dynamic behavior of the process. The dynamic behavior of flow rate and dissolved starch concentration in process units were different from each other. The speed of the change of dissolved starch concentration in process units was depend on the starting point of the change of dissolved starch concentration, the length of circulation loop, and the volume of reservoirs.

• 서울대학교 농업생명과학대학 산림과학부 (Department of Forest Sciences, 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

Keywords : accumulation phenomena, anionic starch, white water, closed mill, dynamic simulation

1. 서론

용수 및 에너지 다소비 업종인 제지산업은 머지않아 강화되는 정부 차원의 환경 규제와 용수 부족, 그리고 이에 따른 용수 가격 및 생산 원가 상승 등의 문제에 봉착할 것으로 예상되며, 이에 대한 해결 방안으로 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 여러 공정상의 문제들이 도사리고 있는데, 공정의 고평쇄화로 인하여 생기는 문제점으로는 첨가제의 기능저하, 이에 따른 보류 및 탈수성의 저하, 펄트 막힘, 공정부식, 제품의 품질저하, 슬라임 및 악취 발생, 진공효율 감소 등이 있다.¹⁻⁵⁾

이러한 공정상의 제반 문제들은 주로 공정 백수 내에 누적되는 무기이온과 유기물질에 의해 유발된다.¹⁻⁵⁾ 이를 해결하기 위해서는 이러한 물질의 백수 내 축적을 방지하거나 그 저해 효과를 최소화하는 기술이 필요하다. 특히 각종 문제의 원인인 백수 내 누적되는 무기이온 및 유기물질의 축적 양을 예측하는 것이 무엇보다도 중요하다.

본 연구에서는 백수 수질 모사 방법 가운데 시뮬레이션 방법을 활용하여 백상지 공정의 고평쇄화에 따른 산화전분의 축적 현상을 분석하였다.⁶⁻⁷⁾ 먼저 파일럿 머신의 상세 설계를 참조하여 공정 모델을 만들고 이를 상용 시뮬레이터에 적용하여 비정상상태 시뮬레이션 프로그램을 작성하고, 와이어 샤프의 백수 사용률과 백상파지 첨가량을 외란(disturbance)으로 설정하여 시간에 따른 공정의 변화를 분석하였다.

2. 연구방법

파일럿 머신 상세 설계도를 바탕으로 Fig. 1과

같은 백상지 공정 흐름도를 작성하였다. 이 파일럿 머신의 상세내역은 이미 자세히 보고된 바와 같다.⁸⁻⁹⁾ 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.

본 연구에서는 상용 시뮬레이터인 Aspen Tech사의 Aspen Custom ModelerTM 10.2를 이용하여 dynamic mode에서 비정상상태 시뮬레이션을 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 1×10^{-11} 으로 설정하였다.

비정상상태 시뮬레이션에서는 기본 값으로 설정한 변수 중 한 변수가 갑자기 변화하였을 때의 시간에 따른 공정의 변화를 살펴보고자 하였다. 비정상상태 시뮬레이션의 대상은 공정 폐쇄화를 위해 와이어 샤프의 백수 사용률을 갑자기 증가시킨 경우와 지절에 의한 백상파지 혼합비율이 갑자기 증가한 경우로 설정하였고, 이에 대해 각각 와이어 샤프의 백수 사용률과 백상파지 혼합비율을 외란(disturbance)으로 설정하여 비정상상태 시뮬레이션을 실시하였다.

공정 폐쇄화를 위해 갑자기 와이어 샤프의 백수 사용률을 증가시키는 경우는 와이어 샤프의 백수 사용률을 50%에서 70%로 변화를 주었으며, 백상파지 혼합비율이 갑자기 변하는 경우에는 백상파지 혼합비율을 15%에서 25%로 변화시켰다. 와이어 샤프의 백수 사용률을 증가시키는 경우와 백상파지

한다. 첫 번째는, 와이어 샤워의 백수 사용률의 변화와 동시에 변하는 경우로 와이어 샤워로 유입되는 백수의 유량과 폐수처리장 유입 백수의 유량이 이에 해당된다. 두 번째는, 공정의 물질수지 변화에 의해 유량이 변하는 경우로 대부분의 단위공정의 유량 변화가 이에 해당된다.

Table 1은 와이어 샤워의 백수 사용률이 50%일 때와 70%일 때의 각 단위공정의 출구의 정상상태에서의 유량을 비교한 것이다.

Table 1에서 나타낸 바와 같이 와이어 샤워의 백수 사용률이 50%에서 70%로 변할 때 폐수처리장 유입 백수를 제외한 나머지 저장조 출구의 유량 변화는 10 L/hr 이하이다. 이렇게 대부분의 저장조의 출구 유량이 미소한 변화를 보이는 것은 와이어 샤워의 백수 사용률 변화에 의해 유발되는 공정의 물질수지 변동이 적기 때문인데, 공정의 물질수지 변동이 적은 이유는 백수의 농도가 0.006%로 낮기 때문이다.

이러한 두 가지 유형의 유량 변화 경향은 Fig. 2에서 보는 바와 같은 형태로 나타난다. Fig. 2는 10 hr에서 와이어 샤워의 백수 사용률이 갑자기 변함에 따라 폐수처리장 유입백수(Effluent)의 유량 변화를 도시한 것이다. 도시한 바와 같이 폐수처리장 유입 백수의 경우 유량이 갑자기 낮아지는 반면, 습부파지 체스트의 경우 유량이 서서히 증가하고 있다.

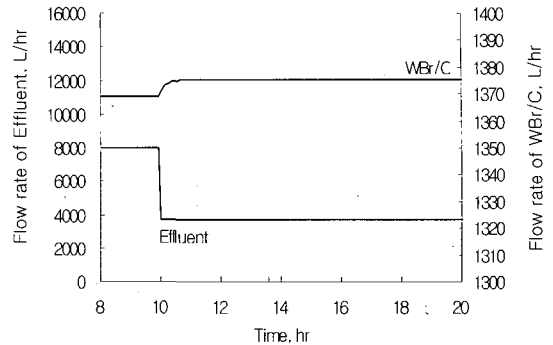


Fig. 2. The variation of flow rate as a function of time. WW usage ratio for wire shower was changed from 50% to 70% at 10 hr.

Fig. 3은 와이어 샤워의 백수 사용률이 70%일 때의 정상상태에서의 각 단위공정 유량에 대해 일정한 비율에 도달하는데 걸리는 시간을 나타낸 것이다. 도시된 바와 같이 폐수처리장 유입 백수의 경우 변화가 없으며, 펄프 슬러리 저장조(St/C)의 경우와 습부파지 체스트의 경우 1시간이내에 정상상태의 95%까지 유량이 안정화되며, 나머지 체스트의 경우 정상상태의 95%까지 도달하는데 걸리는 시간은 약 12시간이 걸렸다. 유량의 변화는 지료 고형분 성분의 변화와도 관련되어 있기 때문에 유량의 안정화 시간은 지료 고형분의 안정화 시간과 일치한다.

Fig. 4는 백수 순환시스템에 있는 실핏과 clear

Table 2. Flow rate of the outlet streams of chests and tanks at 50% or 70% of WW usage ratio for wire shower in a steady state

Chest Name	WW usage ratio for shower		Increase, L/hr
	50%, L/hr	70%, L/hr	
DBr/C	2,160	2,160	0.6
St/C	10,868	10,865	-2.9
WBr/C	1,369	1,375	6.5
Mix/C	14,397	14,401	4.3
Ma/C	16,797	16,801	4.3
Silo	115,081	115,077	-4.5
Seal pit	36,322	36,326	4.5
WW to Ma/C	3,633	3,634	1.1
Effluent	7,995	3,732	-4,262.8

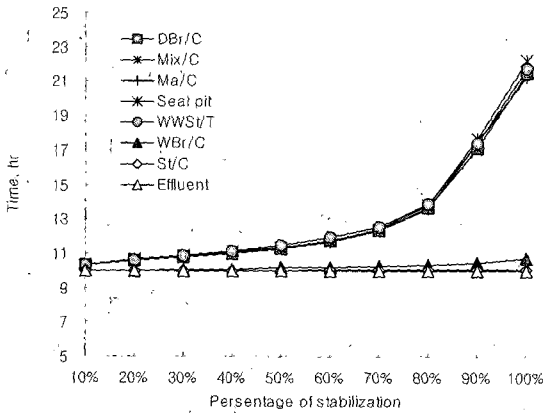


Fig. 3. The variation of stabilized time of flow rate in the process units as a function of percentage of stabilization. WW usage ratio for wire shower was changed from 50% to 70% at 10 hr.

filtrate 저장 탱크, 그리고 백수 저장 탱크의 용존 산화전분 농도를 시간에 따라 표시한 것이다. 도시한 바와 같이 실핏과 clear filtrate 저장 탱크, 그리고 백수 저장 탱크의 용존 산화전분 농도는 열거한 순서의 역순으로 빠르게 증가하였다. 이는 와이어 샤워수의 용존 산화전분 농도가 변함에 따라 와이어 샤워수가 유입되는 실핏에 가장 먼저 영향을 주고, 그 후에 실핏에서 나온 백수가 유입되는 두 백수 저장조에 영향을 주기 때문이다. 두 백수 저장조의

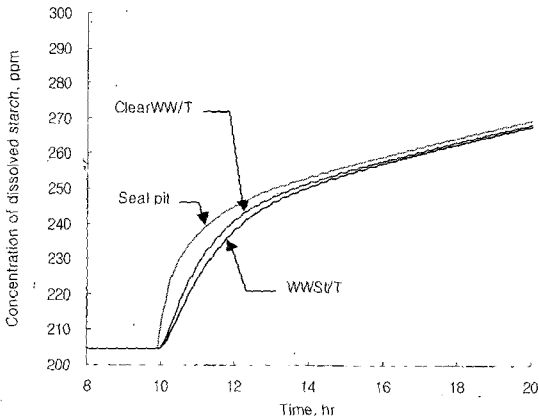


Fig. 4. The variation of dissolved starch concentration of WW system as a function of time. WW usage ratio for wire shower was changed from 50% to 70% at 10 hr.

용존 산화전분의 증가 속도가 차이가 나는 이유는 두 백수 저장조의 용량은 10 m³로 같으나 유량이 각각 다르기 때문인데, 백수 저장 탱크의 유입 유량은 14,389 L/hr이고, clear filtrate 저장 탱크의 유입 유량은 21,028 L/hr로 clear filtrate 저장 탱크의 유량이 많기 때문에 백수 저장 탱크보다 농도 증가 속도가 빨랐다.

와이어 샤워의 백수 사용률의 갑작스런 변화에 의한 단위공정의 용존 산화전분 농도 변화를 Fig. 5에 도시하였다. 도시한 바와 같이 백수순환 시스템에 포함된 저장조인 실핏과 clear filtrate 저장 탱크, 그리고 백수 저장 탱크의 용존 산화전분 농도는 다른 부분의 저장조에 비해 와이어 샤워의 백수 사용률이 50%에서 70%로 변한 직후에, 급격하게 변화하였다.

이렇게 백수 순환 시스템에 포함된 저장조와 다른 부분의 저장조 간에 용존 산화전분 농도 변화 경향이 차이가 나는 것은 와이어 샤워 → 실핏 → 백수 저장조 → 와이어 샤워로 이어지는 short circulation 루프 때문이다.

즉, 실핏의 용존 산화전분 농도 변화는 공정 전체에 걸친 long circulation과 위에서 언급한 short circulation에 의해 좌우되는데, 와이어 샤워의 백수 사용률 변화에 의한 공정의 용존 산화전분의 농도 변화는 와이어 샤워에서 시작되기 때문에 와이

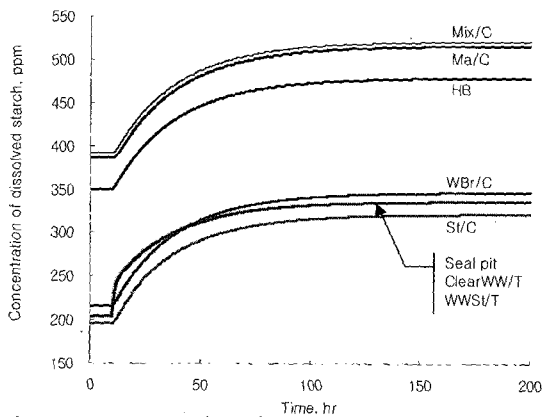


Fig. 5. The variation of dissolved starch concentration in the process units as a function of time. WW usage ratio for wire shower was changed from 50% to 70% at 10 hr.

어 샤워수가 유입되는 실핏이 가장 먼저 영향을 받는다. 실핏에서 백수 저장조를 거쳐 다시 각 공정으로 이어지는 long circulation에 비해 이 short circulation에 포함된 저장조는 실핏과 clear filtrate 저장 탱크, 그리고 백수 저장 탱크뿐이기 때문에 백수의 순환 속도가 빠르다. 따라서 용존 산화전분 농도의 변화도 빠르게 진행된다. 반면 long circulation은 와이어 샤워 → 실핏 → 백수 저장조 → 각 저장조 → 헤드박스과 사일로 → 실핏의 순환 루프로 구성되어 있기 때문에 백수의 순환 속도가 그만큼 느리다. 따라서 용존 산화전분 농도의 변화도 그만큼 느리다.

실핏과 이에 직접적으로 영향을 받는 clear filtrate 저장 탱크와 백수 저장 탱크의 농도가 초기에 빠르게 변하는 것은 와이어 샤워의 백수 사용률이 50%에서 70%로 변함에 따라 와이어 샤워에서부터 용존 산화전분의 농도가 변하기 시작하여 초기에는 백수의 순환이 빠른 short circulation에 의해 용존 산화전분 농도 변화가 주도되기 때문이다. 또한 시간이 지나면서 용존 산화전분의 농도 변화가 느리게 진행되는 것은 용존 산화전분의 long circulation의 영향을 받기 때문이다.

나머지 저장조의 산화전분의 농도 변화는 long

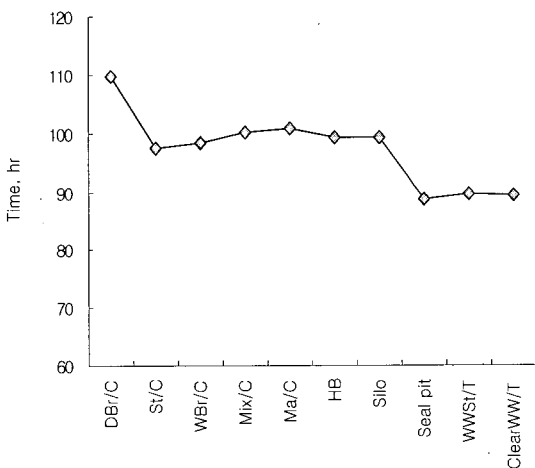


Fig. 6. The variation of stabilized time when dissolved starch concentration in the process units is equal to 95% of steady state. WW usage ratio for wire shower was changed from 50% to 70% at 10 hr.

circulation에 의해 영향을 받는데 각 저장조마다 circulation의 루프 구성과 순서가 다르기 때문에 정상상태에 도달하는 시간이 차이가 난다.

Fig. 6은 각 단위공정의 용존 산화전분 농도가 와이어 샤워의 백수 사용률이 70%일 때의 정상상태에서의 용존산화전분 농도의 95%에 도달하는 시간을 나타낸 것이다. 도시한 바와 같이 백수 순환 시스템에 있는 실핏과 백수 저장 탱크, clear filtrate 저장 탱크의 용존 산화전분 농도가 정상상태의 95%에 도달하는 시간이 빠르며, 건조파지 체스트의 경우가 가장 늦다. 건조파지 체스트의 용존 산화전분 농도가 정상상태의 95%에 이르는 시간이 가장 늦은 이유는 체스트의 용량이 30 m³로 큰 반면 유입 및 유출되는 유량이 작기 때문이다.

펄프 슬러리 저장조의 경우, 건조파지 체스트와 long circulation 루프의 길이나 실핏에서의 거리가 같지만 정상상태의 95%에 이르는 시간은 더 짧다. 이는 펄프 슬러리 저장조의 용량은 75 m³로 건조파지 체스트의 2.5배이지만 유량이 5.7배이기 때문이다.

3.2 백상파지 혼합비율을 변화시켰을 때 공정의 동적 거동

사이즈 프레스 이후 공정에서 지절이 발생한 상황을 시뮬레이션하기 위해 백상파지 혼합비율을 외란으로 설정하여 비정상상태 시뮬레이션을 실시하였다. 이때, 백상파지 혼합비율을 15%로 설정한 상태에서 운전을 시작하여 10 hr가 되었을 때 25%로 백상파지 혼합비율을 갑자기 증가시켰다.

Fig. 7은 백상파지 혼합비율을 15%에서 25%로 증가시켰을 때 시간에 따른 각 저장조의 유량의 변화를 도시한 것이다. 도시한 바와 같이 두 가지 유형의 유량 변화 경향이 나타났다. 백상파지 혼합비율 증가에 따라 건조파지 체스트의 유량은 급격히 증가하는 반면 펄프 슬러리 저장조의 유량은 급격히 감소하였다. 또한 혼합조와 머신 체스트의 경우는 물질수지 변화에 따라 서서히 증가하는 경향을 나타내고 있다. 펄프 슬러리 저장조는 10 hr에서 급격히 유량이 감소한 이후에 공정 전체의 물질수지 변화에 따라 조금씩 유량이 증가하는 경향을 보이고

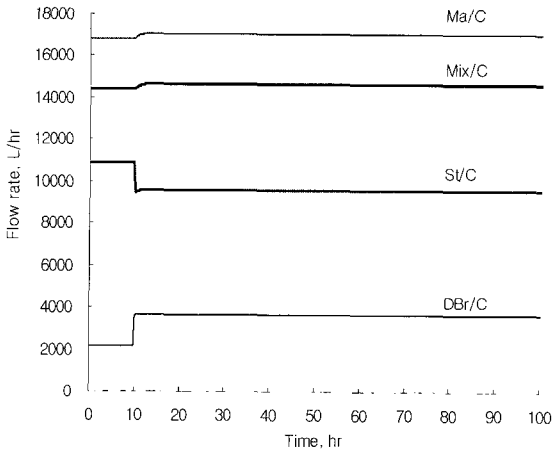


Fig. 7. The variation of flow rate as a function of time. Dry broke addition ratio was changed from 15% to 25% at 10 hr.

있다.

Fig. 8은 백상파지 혼합비율을 15%에서 25%로 증가시켰을 때 시간에 따른 각 저장조의 용존 산화전분 농도의 변화를 도시한 것이다. 도시한 바와 같이 백상파지 혼합비율이 15%에서 20%로 변한 직후에는 혼합조, 머신 체스트, 헤드박스, 실핏의 순으로 급격한 용존 산화전분의 증가를 나타냈으며, 습부파지 체스트와 펄프 슬러리 저장조는 완만한 증가를 보였다. 그러나 15 hr 이후에는 모든 공정이 비슷한 경향으로 완만한 증가 경향을 보였다. 10 hr에서부터 15 hr 사이에 용존 산화전분 농도 증가 경향이 저장조마다 다르게 나타나는 것은 용존 산화전분 농도 변화의 출발점이 혼합조이기 때문이다. 즉 백상파지 혼합비율이 증가함에 따라 용존 산화전분의 농도가 공정 전체에서 가장 높은 건조파지 체스트의 지료의 유량이 증가하면서 동시에 펄프 슬러리로부터 유입되는 유량은 감소하기 때문에 혼합조의 용존 산화전분의 농도는 가장 먼저 변하게 되며, 혼합조의 용존 산화전분 농도의 변화는 머신 체스트 → 헤드박스 및 사일로 → 백수 순환시스템 → 각 저장조의 순으로 영향을 준다. 이에 따라, 이러한 순환 루프의 뒤쪽으로 갈수록 용존 산화전분 농도의 증가속도는 줄어드는데, 이는 순환 루프의 각 저장조들이 용존 산화전분 농도 증가를 지연시키는 버퍼의 역할을 하기 때문이다. 버퍼 역할의

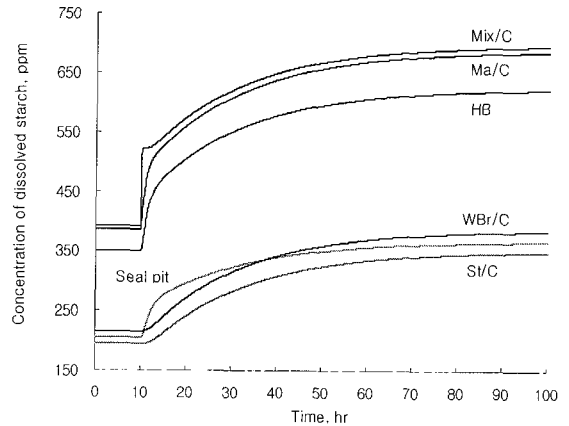


Fig. 8. The variation of dissolved starch concentration in process units as a function of time. Dry broke addition ratio was changed from 15% to 25% at 10 hr.

정도는 저장조의 용량과 유량에 따라 달라진다.

각 저장조의 용존 산화전분 농도의 안정화 속도를 비교하기 위하여 Fig. 9에는 백상파지 혼합비율이 25%일 때의 정상상태에서의 용존 산화전분 농도의 95%에 도달하는데 걸리는 시간을 도시하였다. 도시한 바와 같이 정상상태의 95%에 도달하는데 걸리는 시간은 혼합조, 머신 체스트, 헤드박스, 사일로, 백수순환 시스템 저장조, 건조파지 체스트, 습부파지 체스트, 펄프 슬러리 저장조 순으로 증가하였다.

순환 루프의 길이가 같은 펄프 슬러리 저장조와 건조파지 체스트를 비교했을 때, 펄프 슬러리 저장조가 정상상태의 95%에 도달하는 시간이 길었다. 이는 와이어 샤프의 백수 사용률을 변화시킨 비정상상태 시뮬레이션과 반대 경향인데, 백상파지 혼합비율이 증가하여 건조파지 체스트의 유량은 증가하였으나 펄프 슬러리 저장조의 유량은 감소하였기 때문에 이러한 결과가 나왔다. 즉 와이어 샤프의 백수 사용률을 변화시킨 비정상상태 시뮬레이션과 비교했을 때, 펄프 슬러리 저장조는 건조파지 체스트에 비해 용량은 1.5배로 변하지 않았지만 두 저장조의 유량비가 15 : 85에서 25 : 75로 변하였기 때문이다.

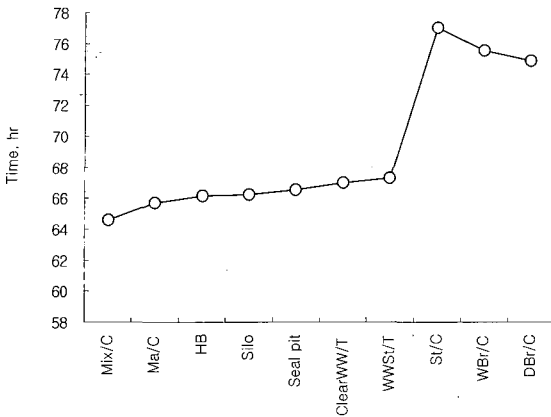


Fig. 9. The time required for reaching 95% of the dissolved starch concentration in the process units in the steady state. Dry broke addition ratio was changed from 15% to 25% at 10 hr.

4. 결론

백상지 공정의 고품쇄화에 따른 산화전분의 축적 현상을 분석하기 위해 공정 시뮬레이션 기법을 사용하였다. 파이롯 머신의 상세 설계를 참조하여 공정 모델을 만들고, 산화전분 흡착과 탈착에 대한 모델을 만들었다. 이를 활용하여 와이어 샐리의 백수 사용률을 변화시켜 비정상상태 시뮬레이션을 실시하였다.

비정상상태 시뮬레이션 결과, 공정의 동적 거동은 저장조의 용량에 영향을 받으며 유량과 용존 산화전분 농도의 동적 거동은 각기 다르게 나타났다. 용존 산화전분 농도의 변화 속도는 변화가 시작되는 단위공정의 위치와 순환 루프의 길이, 그리고 저장조의 용량에 의해 변화였다.

사 사

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

인용문헌

- 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).
- 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).
- Miyamishi, 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.: Dynamic analysis of fibrous material and dissolved solids distribution in the wet-end of a newsprint mill. *Appita J.* 52(2): 105-113 (1999).
- 안현건, 이학래: 백상지 공정 폐쇄화에 따른 백수 내 산화전분의 축적 현상에 관한 연구 (제1보)-공정폐쇄화의 영향, *펄프종이기술* 36(3): 15-34 (2004).
- 안현건, 이학래: 백상지 공정 폐쇄화에 따른 백수 내 산화전분의 축적 현상에 관한 연구 (제1보)-파지 혼합비율 및 표면 사이징 픽업량 변화의 영향, *펄프종이기술* 36(3): 35-43 (2004).