

어프로치 시스템 체스트 용량 변동에 대한 동적 시뮬레이션 적용

윤혜정[†] · 함충현^{*1} · 진성민 · 유성호^{*2}
(2005년 1월 20일 접수: 2005년 5월 20일 채택)

Application of Dynamic Simulation on Effect of Chest Capacity in Papermaking Approach System

Hye Jung Youn[†], Choong-Hyun Ham^{*1}, Seong Min Chin, and Sung Ho Yoo^{*2}
(Received on January 20, 2005; Accepted on May 20, 2005)

ABSTRACT

Compact system as a new and highlighted trend in papermaking technology gives papermakers many advantages including simple and clean process, quick grade change, minimized liquid volume, and so on. It is possible to remove an existed chest for simplifying system and more utilization of space, but its effect on process and product stability must be evaluated qualitatively in advance. For this purpose, process simulation can be applied. We examined the effect of disturbances on process and product in a papermaking system with and without machine chest using dynamic simulation. As compared with the existed system, the papermaking system without machine chest showed twice or more variation in process and product and required longer time for stabilization.

Keywords : compact system, approach system, chest, dynamic simulation, variation

• 서울대학교 농업생명과학대학 산림과학부(Dept. of Forest Sciences, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul, 151-921, Republic of Korea)

*1 현주소 : 대상(주) 중앙연구소 (Starch and Sweetener Div., R&D Center, Daesang Co., Gyunggi-Do, 467-813, Republic of Korea)

*2 (주)미래엔지니어링(Meerae Engineering Co. Ltd., Sungnam-city, Gyunggi-Do, 465-805, Republic of Korea)

† 주저자 (Corresponding author): E-mail: page94@snu.ac.kr

1. 서론

불균일한 원료로부터 균일한 종이 제품을 생산하기 위해 수천 개의 단위공정이 존재하는 제지공정은 규모의 크기와 복잡화로 인해 제어에 어려움이 많으며 각 설비의 최적화가 이루어지지 않은 경우 생산성에 큰 손실을 초래할 수 있고, 또한 다양한 외란이 발생할 수 있다. 외란이란 시스템의 출력값에 나쁜 영향을 미치는 신호를 의미하며, 시스템 내부 또는 외부에서 발생한다.¹⁾ 외란이 발생했을 때 즉, 공정의 운전조건으로 설정한 초기 설정치 중 한 변수가 갑자기 변화되었을 때 공정은 급격하게 변동될 수 있으며, 이는 공정 및 제품을 불안정하게 한다. 특히 제지공정의 경우 연속적인 공정이라는 특성 때문에 하나의 단위 공정에서 발생된 문제는 선단 및 후단의 단위공정에도 영향을 미치게 되고 그 변폭은 때에 따라 더욱 증가될 수도 또는 감소될 수도 있다. 최근 불고 있는 제지공정의 변화방향을 고려하면 이러한 외란의 영향은 더욱 커지리라 생각된다.

제지공정의 발전 방향으로 꼽히고 있는 것 중에서 제지공정의 복잡화와 콤팩트화가 있다. 둘 이상의 단위 설비를 하나로 복잡화하거나 간단한 프로세스로 단순화하는 것이 일반적인 추세인데, 이 중 산공정기술로 익히 소개된 바 있는 POM technology는 어프로치 파트의 여러 설비를 간단하게 축소하고 불필요한 체스트를 제거하여 공정을 매우 단순화시킨 기술로서, 국내에도 도입되어 운전되고 있으며 세계 곳곳에서 채택되는 사례가 늘고 있다.²⁾ 이러한 POM 공정을 도입하면, 공정 반응 시간을 감소할 수 있으며 지절 및 세척 시간을 줄이는 등 다양한 이점이 있다고 알려져 있다. 이와 같이 새로운 공정인 POM을 도입하거나, 또는 제지플랜트의 면적을 줄이고 신속한 제어를 할 수 있도록 체스트의 용량을 최소화하거나 제거하려는 시도는 새로 신설되는 공정 또는 리모델링하는 공정에서 고려될 수 있다. 그러나 체스트의 경우 믹싱이라는 중요한 기능도 하지만 각종 공정의 유량 등 불안정한 요소를 제거하는 일종의 버퍼로서 역할을 하고 있다. 이러한 체스트의 용량이 줄어들거나 제거될 경우 버퍼 역할을 할 수 있는 설비가 없어지며, 불안정한

공정은 그대로 초지공정에까지 영향을 미칠 수 밖에 없을 것이다. 이러한 우려에 대한 검토 및 고려는 대상 공정에서 실제로 수행하여 결과를 얻을 수는 없다. 따라서 보통 타공정의 벤치마킹을 통해 검토하는 것이 다반사인데, 이는 단위공정 구성이나 mass flow의 값이 상이할 경우 다른 결과를 보여 줄 수도 있다. 따라서 보다 분명하고 비교적 정확한 예측을 할 수 있는 방법으로서 시뮬레이션을 통한 공정평가가 제안되고 있다.

제지공정 시뮬레이션은 백수의 성상변화를 정상 상태에서 평가하거나 공정폐쇄화 시 또는 지절 발생 시 백수의 성상변화에 대한 동적 변화를 예측하는 데에 많이 이용되어 왔다.³⁻⁶⁾ 또한 공정에 새로운 설비를 추가하고자 할 경우 발생할 수 있는 문제를 시뮬레이션을 통해 미리 예측하거나, 공정 제어 인자에 대한 영향을 검토한 연구도 보고된 바 있다.⁷⁻¹⁰⁾ 공정 콤팩트화와 관련하여, POM 시스템의 효능에 대한 공정시뮬레이션 연구는 기존 공정에 비해 POM 시스템 적용 시 지료부피가 60% 감소하며 에너지 비용 역시 30% 정도 감소된다는 결과를 얻었다.¹¹⁾ 이 외 기존 단위 공정 제거 또는 콤팩트화에 따른 공정 평가가 보고된 바는 없다.

따라서 본 연구에서는 지료 조성 공정의 대표적인 체스트인 머신체스트를 제거할 경우 상류에서의 유량의 변동과 초지공정에서의 지절이라는 외란이 공정 및 생산안정성에 미치는 영향을 시뮬레이션을 적용하여 구명하고자 하였다. 본 연구에서 상용 시뮬레이터인 Pacific Simulation사의 WinGEMs Ver 5.0을 이용하여 백상지 제지 공정을 모델링하였다.

2. 제지공정 모델 구축 및 시뮬레이션

2.1 제지공정 모델 구축

본 연구에서는 지료조성 및 초지공정의 변동에 따른 영향과 제어함수의 영향을 살펴보기 위한 공정 모델로서 백상지 공정을 대상으로 구축하였다.

일반적인 백상지 생산 공정을 대상으로 하였으며 간략한 공정 흐름도를 Fig. 1에 도시하였다. 생산량은 750 tons/day이었고, 지료 조성부, 파지처

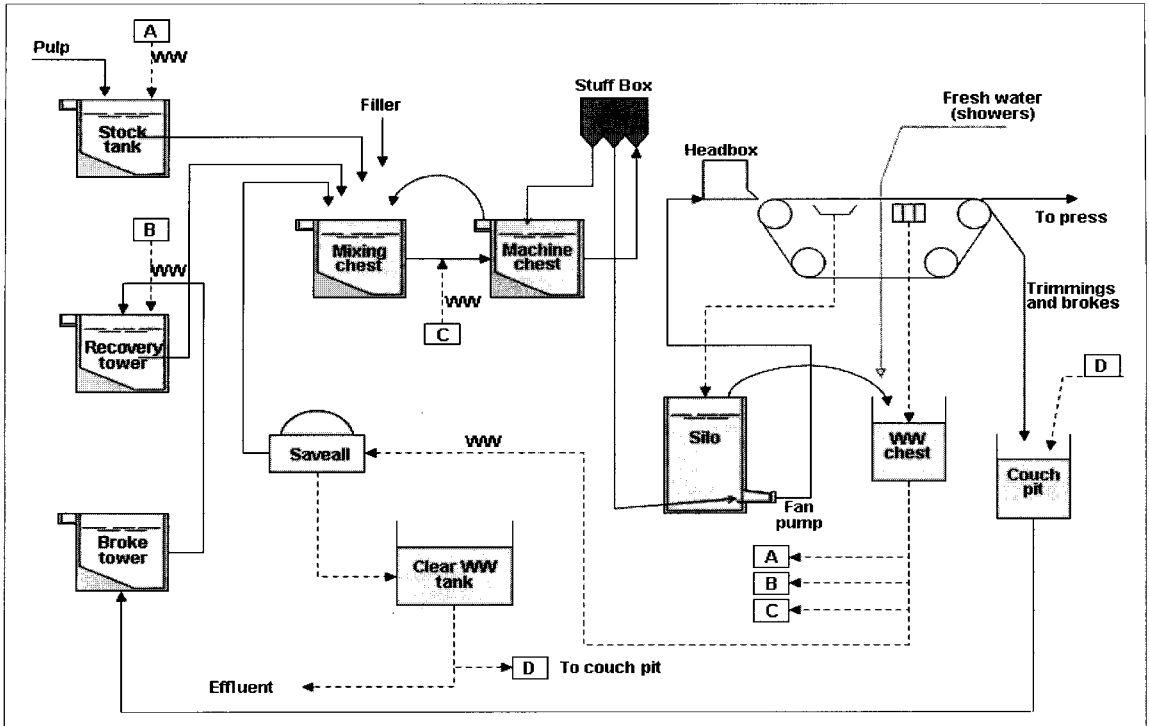


Fig. 1. Simulated wet-end flow diagram for fine paper mill.

리시스템, 믹싱체스트에서 헤드박스에 이르는 어프로치 시스템, 와이어 파트와 백수순환 시스템으로 구성되었다. 믹싱체스트와 머신체스트의 용량은 200 m³으로 설정하였다. 헤드박스에서 사출된 자료는 와이어 파트에서 탈수되는데, 와이어 전반부와 후반부에서 탈수된 물은 각각 다른 저장조에 수집되므로 이를 고려하여 와이어 파트를 자연탈수부와 진공탈수부로 구분하였다. 자연탈수부와 진공탈수부에서 탈수된 백수는 각각 사일로와 백수체스트에 수집된다고 가정하였다. 또한 보류도는 55%로 동일하다고 가정하였다.

모델 공정에 사용되는 저장조인 각종 체스트와 탱크는 완전 혼합형 연속식 저장조로서 저장조의 자료농도는 저장조 내의 위치에 관계없이 일정하다고 가정하였다. 그리고 각 단위공정에서 수위 조절과 유량 조절이 요구되어지는 곳은 비례-적분 제어 (PI-control) 방식을 통해 제어가 되도록 구성하였다. 믹싱체스트와 머신체스트 등은 수위조절을 하였으며, broke 체스트와 recovery tower 등은 유량

조절하였다.

본 시뮬레이션의 경우 청수의 사용은 샤워수의 용도로 제품톤당 6 m³이 사용되고 있으며, 설비 내에서 및 설비와 주변간의 열교환도 없고, 파이프나 밸브 등 기기에 의한 지체현상은 없는 것으로 가정하였다.

2.2 시뮬레이션 대상 및 외란

제지공정 어프로치 파트에서 큰 용적을 차지하고 있는 체스트를 제거할 경우 발생할 수 있는 영향의 크기와 변화 속도를 평가하기 위해 Fig. 1에서 구축된 모델을 이용하여 시뮬레이션을 적용하였다. 특히, 본 연구에서는 자료 조성 공정의 대표적인 체스트인 머신체스트를 제거할 경우 상류에서의 유량의 변동이 미치는 영향과 후단의 초지공정에서 발생한 지질이 미치는 영향을 구명하고자 하였다. Fig. 2는 기존의 머신체스트 존재 시와 머신체스트 제거 시의 시뮬레이션 공정을 보여주고 있다. 동적 시뮬레이션을 적용하였으며, 이 때 비례이득은 40

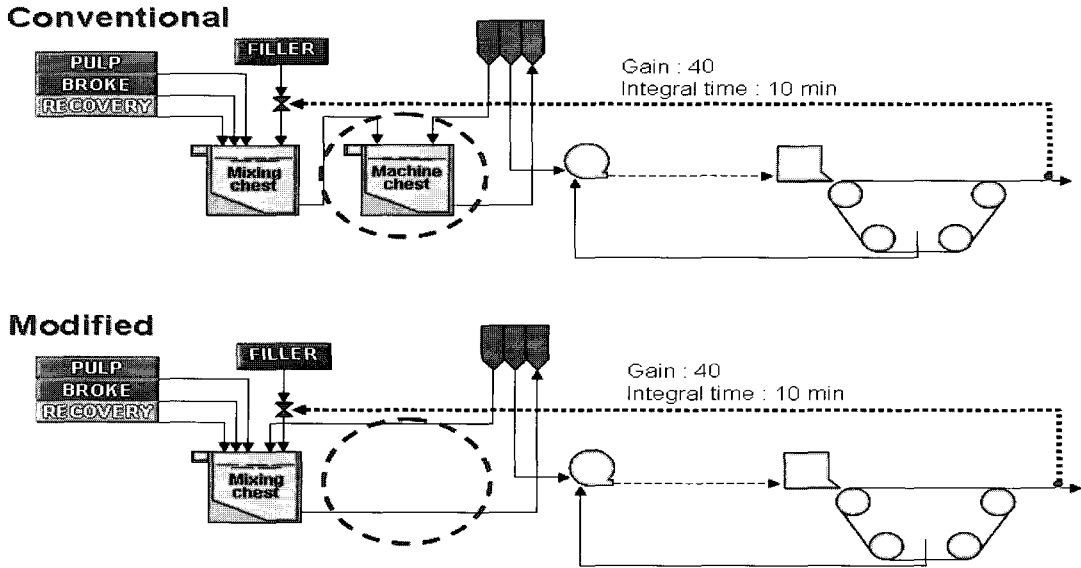


Fig. 2. Flow diagrams of papermaking process with and without machine chest.

으로, 적분시간은 10분으로 고정하였다.

이 공정에서 두 가지 외란을 고려하였다. 첫째, 지료 공급 30분 되는 시점에서 펄프의 유입이 10분 동안 일시적으로 감소하는(545 L/min → 500 L/min) 것과 둘째, 운전 30분 시점에서 지질이 발생하여 그 후 30분 동안 모든 지료가 쿠치핏을 통해 브로크 타워로 모여지는 상황이다. 외란이 없던 정상상태에서 쿠치 핏으로 모아지는 쿠치 트림은 2%에 불과하였지만, 지질 발생 시 100% 전량 쿠치 핏으로 보내졌다. 이때 믹싱체스트의 레벨과 유량 변동 및 제품의 생산량 변동에 미치는 영향을 평가하였다.

Fig. 3은 선단 측, 펄프 유입량의 일시적 감소 시 머신체스트 존재 여부에 따른 믹싱체스트의 수위와 믹싱체스트 출구 유량 변화를 보여주고 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 펄프 유입량의 변화

머신체스트는 보통 제지공정에서 믹싱체스트 뒤에 위치하며 지료를 헤드박스로 보내고 일부는 스테르박스 오버플로우를 받아들이는 역할을 한다. 이러한 머신체스트가 제거될 경우 공정 변화의 신속성을 기대할 수 있지만, 그 외 다양한 변화가 발생할 것으로 생각된다.

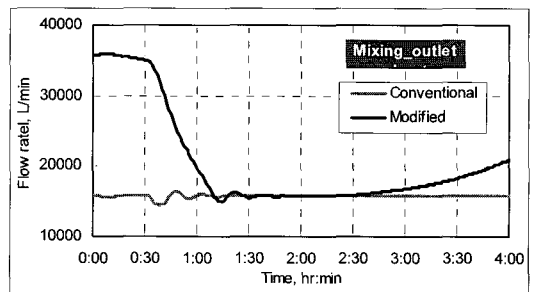
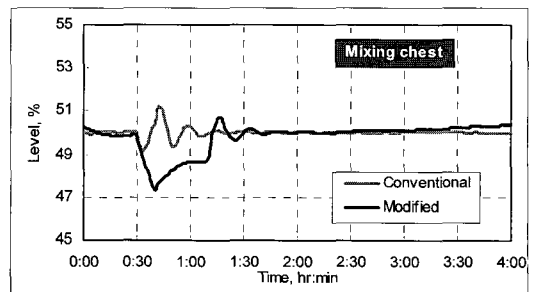


Fig. 3. Effect of temporary change of pulp flow rate on level of mixing chest (top) and flow rate of mixing chest outlet (bottom).

머신체스트가 존재하는 경우 선단부 펄프 유입량의 변화는 믹싱체스트에 큰 변화를 야기하지 못했다. 즉, 이후 믹싱체스트 후에 존재하는 머신체스트에 의해 그 외란의 영향이 감소되었기 때문에 믹싱체스트의 수위와 유출량에 있어서 큰 변화는 보이지 않았다. 다만, 펄프 유입량 감소 초기에 순간적인 수위의 변동과 유입량의 변동이 있었으며, 이를 보전하기 위해 이후 머신체스트에서 수위와 유출량 변동이 있었기 때문에 믹싱체스트는 외란 직후 30분 지난 시점부터는 안정화되었다. 반면 머신체스트가 제거된 시스템의 경우 펄프유입량 중단은 곧 믹싱체스트의 수위를 떨어뜨렸으며 이는 펄프 유입이 재개되는 시점까지 지속되었다. 이 때 믹싱체스트 유출량 또한 수위를 맞추기 위해 급격히 감소함을 알 수 있다. 믹싱체스트 유출량 감소는 펄프 공급이 재개된 이후에도 지속되었으며, 수위가 안정화된 이후에는 다시 유출량이 증가하는 것을 볼 수 있었다. Fig. 4는 머신체스트가 존재하는 경우 믹싱체스트와 머신체스트의 레벨 변화를 보여주고 있다. 믹싱체스트의 레벨은 펄프 공급 중단과 동시에 감소되기 시작하지만 유량의 감소로 인해 곧 증가하여 30분정도 지난 후에는 정상화되었다. 이후 존재하는 머신체스트의 경우 펄프 공급 중단에 따른 효과가 즉시 나타나지는 않았으며, 오히려 믹싱체스트의 레벨이 안정화된 30분이 지난 시점에서 레벨의 감소가 나타났다. 이는 체스트의 용량 및 비례적분 제어 상수에 의한 영향때문으로 생각된다.

펄프 공급의 일시적 중단이 그 밖의 충전물 유량, 믹싱체스트 수위, 스테르프박스 유량 및 제품 생산량에 미치는 영향이 Fig. 5에 나타나 있다. 펄프의 유량이 줄어들고 동시에 충전물의 유량 역시 감소하였으며, 펄프 유입이 재개된 직후부터 충전물의 유량 역시 증가하였다. 이는 섬유 대비 충전물의 함량을 맞추기 위하여 펄프 유입량에 연동하여 움직였기 때문이다. 머신체스트가 제거된 시스템의 경우 펄프 유입량의 변화는 충전물 유량에도 변화를 주며 외란이 제거됐음에도 불구하고 오랜 시간에 걸쳐 불안정한 유량을 보여주고 있다. 이러한 불안정성은 스테르프박스 유출량의 변화에서도 볼 수 있는데, 머신체스트의 제거로 인해 믹싱체스트 수위 및 유량의 변화가 곧 스테르프박스에 영향을 미쳤다. 즉

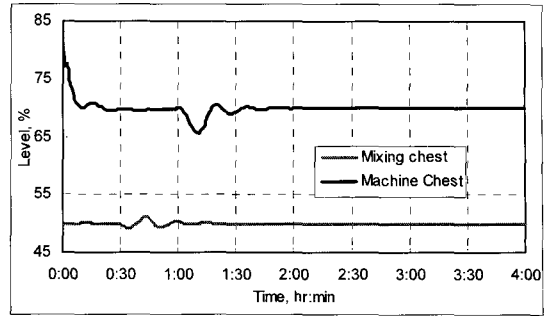


Fig. 4. Levels of mixing chest and machine chest in conventional system.

믹싱체스트의 수위 감소에 따라 유출량이 감소되었으며, 이는 스테르프박스 내로 유입 유량의 감소를 의미하여 결국 유출량이 줄어드는 현상으로 나타났다. 스테르프박스 플로우 변동은 제품의 생산량에 직결되어 평량 변동으로 이어졌다. 10분간 유입유량의 변동이 있었지만, 제품은 약 90분간의 변동이 있는 후 안정이 되었다. 또한 변폭은 후단으로 갈수록 더욱 커져 제품의 경우 평량 범위가 약 8%정도 변동이 있었다. 즉, 버퍼 역할을 수행하는 체스트의 부재로 인해 선단의 변동이 제품까지 영향을 미치는 것을 알 수 있으며, 이러한 변동이 지속되는 시간과 변폭은 PI 변수의 조작으로 다소 감소될 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 지질의 영향

지질은 제지공정에서 종종 경험하는 가장 큰 외란 중의 하나이다. 지질이 발생될 경우 형성된 지필은 쿠치 락을 거쳐 브로크 타워에 일반적으로 모여진다. 브로크 타워의 수위에 따라 과량의 지료는 recovery tower로 이송되어 사용을 기다리게 된다. 30분 시점에서 30분간 지질이 발생될 경우 정상 조건에서 지필의 2%만이 쿠치 트림으로 보내진 것과 달리 생산 지필 100%가 모두 쿠치 락으로 보내진다. 따라서 브로크 타워와 recovery tower의 수위는 영향을 받게 되는데, Fig. 6에서 보는 바와 같이 브로크 타워의 수위가 30분 동안 지속적으로 증가하고, 이후 recovery tower는 약 30분이 더 지난 시점에서 서서히 수위가 증가하여 설정 한계에 도달된 뒤 믹싱체스트로 방출되어 수위가 감소하게 되었다. 이 경우 쿠치를 지난 시점에서 외란이 발생

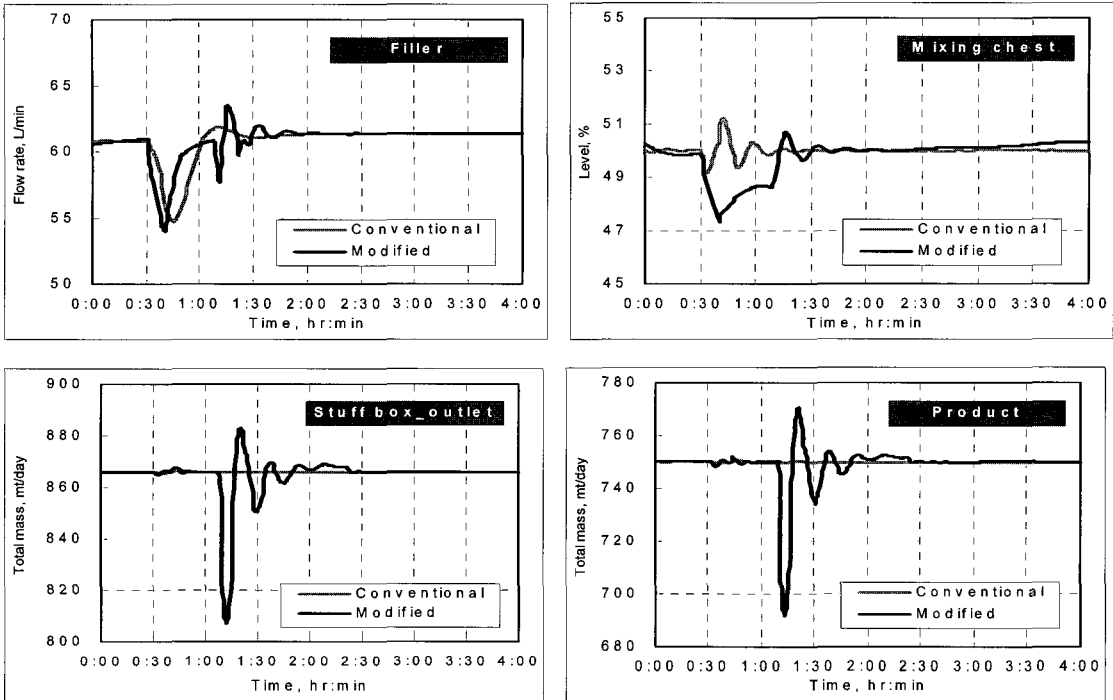


Fig. 5. Effect of temporary change of pulp flow rate.

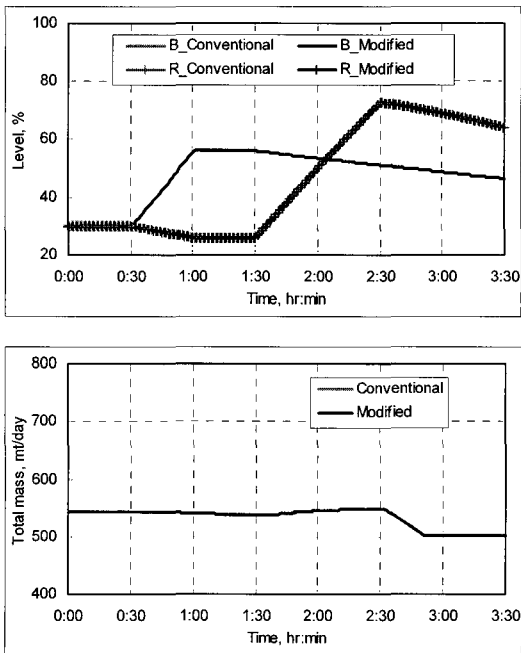


Fig. 6. Effect of web break on the levels of broke tower and recovery tower (top) and pulp flow rate (bottom).

된 것이기 때문에 머신체스트 존재의 영향은 나타나지 않았다. 펄프 용량이 약 2:30 시점부터 감소되었는데, 이는 recovery tower로부터 브로크가 믹싱체스트로 방출되어 브로크 양이 늘어남에 따라 펄프에 대한 요구량이 감소되어 나타나는 현상이다.

지절은 운전 시작 후 30분되는 시점에서 발생되었지만, 브로크가 최종적으로 배출되는 recovery tower의 변동이 발생된 시점인 1:30과 2:30부터 공정상의 다양한 변화가 발견되었다. 머신체스트가 존재하는 경우 recovery tower의 수위가 설정한 계인 70%에 도달된 2:30 시점부터 믹싱체스트로의 용량은 늘어났기 때문에 Fig. 7에서 보는 바와 같이 믹싱체스트 및 스티프박스 출구 용량의 변동이 발생하였고, 이는 스티프박스에서의 용량 및 생산 평량에도 변동을 야기하였으나 그 변폭은 그리 크지 않았으며 30분 내에 안정화되었다. 제품 평량 그래프에서 30분 시점에서 데이터가 없는 것은 지절이 발생되어 제품이 생산되지 않았기 때문이다. 머신체스트가 존재하지 않는 경우 믹싱체스트 수위 변

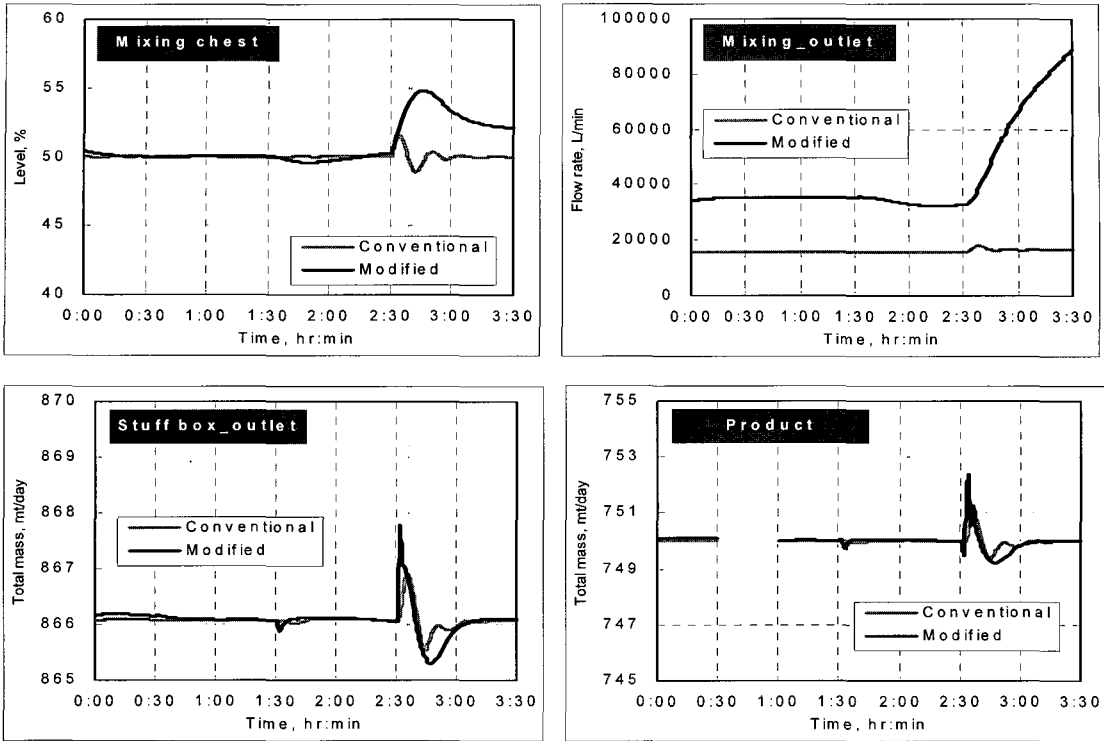


Fig. 7. Effect of web break in a system with or without machine chest.

동과 그에 따른 유출량의 변동은 기존 시스템에 비해 크게 나타났으며 이는 결국 제품 평량 변동에서도 크게 영향을 미쳤다. 브로크 타워의 수위가 감소하고 recovery tower의 수위가 증가하기 시작하는 1:30시점부터 믹싱체스트 수위 및 유량에 변동이 발생되었으며, 그 변화는 recovery tower 수위 조절이 본격화된 2:30시점부터 더욱 커졌다. 믹싱체스트 수위는 곧 증가하였으며, 이 수위를 조절하기 위해 믹싱체스트 유출량은 급격히 증가하였다. 머신체스트가 없기 때문에 스티프박스에서 헤드박스로 나가는 유량 역시 큰 폭으로 영향받았으며, 스티프박스 유출량 및 생산제품 평량의 변동은 머신체스트가 존재하는 경우와 유사한 시간 내에 안정화되는 양상을 보여주었지만, 그 변폭은 약 2배정도로 컸다. 이는 버퍼 역할을 하는 머신체스트가 존재함으로써 인해 유량의 변동이 완충되기 때문으로 생각된다. 선단에서 발생되었던 펄프유입량의 변동에 비해 지절의 영향은 오히려 작은 변폭 및 짧은 안정화시간을 보여주었는데, 이는 믹싱체스트 전 존재

하는 두 타워에 의해 다소 그 변폭이 감소되기 때문으로 생각된다. 이상으로부터 지료조성 공정에서 체스트의 제거는 선단 또는 후단의 영향을 직접적으로 또한 큰 폭으로 증폭시키는 역할을 하기 때문에 외란이 발생되지 않도록 공정 관리에 유념해야 하며 일반적인 PID 제어보다는 짧은 반응에 빠르게 또한 인공지능적으로 대응할 수 있는 제어가 필요하다고 판단된다. 특히 헤드박스에 가깝게 위치한 체스트일수록 그 영향은 더욱 클 것으로 생각된다.

4. 결론

최근 체스트를 제거함으로써 공정을 간편화하고 공간을 여유롭게 활용하고자 하는 움직임이 확산되고 있는 시점에서 기존 공정으로부터 체스트 제거 시 상류부 또는 후단에서 발생하는 외란이 공정에 미치는 영향에 대해 시뮬레이션을 이용하여 구명하였다. 선단에서 일시적으로 펄프 유입이 감소된 경

우 머신체스트가 존재하는 경우 믹싱체스트 수위 및 유량에는 영향을 미치나 그 이후 공정에는 거의 변동이 없었다. 반면 머신체스트가 제거된 경우 믹싱체스트의 변동은 훨씬 컸으며, 이는 일정 시간 지체 후 스테르팩스와 제품 평량에 직접적인 영향을 미쳤다. 즉 약 10%의 유량의 일시적 감소가 제품에 최대 8%의 변동을 야기하였으며 안정화되기까지 약 1시간 30분가량이 소요되었다. 후단에서 지질이 발생하는 경우 브로크타워 및 recovery tower의 수위는 머신체스트 존재 여부에 상관없이 동일한 경향을 보였으나, 이로부터 발생하는 브로크의 변동으로 인해 믹싱체스트 수위 및 유량을 비롯하여 스테르팩스와 제품에 변동이 야기되었다. 머신체스트 제거의 경우 존재 시보다 약 2배의 변폭을 보였으나, 선단에서 직접적인 변동이 있었던 경우에 비해서 후단의 영향은 비교적 낮은 변폭과 짧은 안정화시간을 나타내었다.

사 사

이 연구는 서울대학교 신입교수 연구정착금 지원사업과 Brain Korea 21 핵심사업으로 지원되는 연구비에 의하여 수행되었습니다.

인용문헌

1. 강철구, 권육현, 박영필, 이교일(공역), 현대제어공학 p.3, 사이텍미디어 (1999).
2. Meinander, P. O., Cutts, J., Kontkanen, M., and Nykanen, R., Experience confirms the validity of compact papermaking systems, 2001 Papermakers Conference Proceedings, TAPPI Press.
3. Orcotoma, J. A., Stiée, D., Paris, J., and Perrier, M., Dynamics of fines distribution in a white-water network, Pulp & Paper Canada 98(9):77 (1997).
4. Houle, J. F., Brousseau, Y., Dorica, J., and Paris, J., Reduction of fresh water consumption for process and non-process uses in an integrated newsprint mill, Pulp & Paper Canada 100(3):50 (1999).
5. Orcotoma, J. A., Paris, J., Perrier, M., and Roche, A. A., Dynamics of white water networks during web breaks, Tappi J. 80(12):101 (1997).
6. Vassas, J.-B. and Rueff, M., Dynamic simulation of a paper mill in view of analysing the effects of circuit closure, 2000 Engineering Conference Proceedings, TAPPI Press.
7. Kirkman, A. G., Introduction to simulation in the paper industry, 2000 TAPPI Engineering Conference Proceedings, TAPPI Press.
8. Panchapakesan, B., Introduction to process simulation in pulp & paper industry capital effectiveness and design, 2000 TAPPI Engineering Conference Proceedings, TAPPI Press.
9. Laperriere, L., and Wasik, L., Implementing optimization with process simulation, Tappi J. 1(4):7 (2002).
10. 함충현, 윤혜정, 제지 공정의 효율적인 충전제 투입에 대한 동적 시뮬레이션 적용, J. of Korea TAPPI 35(3):1-12 (2003).
11. Matula, J. and Parviainen, J., Short flow-a new paper machine approach flow system and mill concept, 2001 Papermakers Conference Proceedings, TAPPI Press.