

공정모사 기법을 이용한 제지공정 용폐수의 최적화

김형진¹⁾ · 안정송¹⁾ · 유성호²⁾

국민대학교 입산공학과¹⁾, (주) 미래엔지니어링²⁾

1. 서론

국제인구행동단체(PAI)는 세계 각국의 연간 1인당 가용한 재생성 가능 수자원량을 산정하고 이에 따라 전 세계 국가를 '물기근, 물부족, 물풍요' 국가로 분류 발표하고 있다. 이 보고서에 의하면 우리나라는 1990년에 연간 1인당 재생성 가능한 수량이 1,452 m³으로 '물 부족 국가'로 분류되었으며, 2025년에는 물 기근 국가로 전락할 것으로 전망되고 있다. 최근 물 부족 현상의 심화와 환경에 대한 관심이 증가함에 따라 수질환경보전법에서는 산업활동의 생산공정 및 폐수배출 특성을 조사하여 관리가 필요한 시설을 폐수배출시설로 지정하고 있으며, 제지산업에서 발생하는 폐수는 시행규칙 제 8조에 따라 수질오염물질 배출기준에 의해 규제되고 있다.

이러한 배출 폐수의 폐수 배출 기준 강화에 따라서 용수 사용량 및 배출 오염 부하량을 절감 할 수 있는 방안 마련이 절실히 요구되고 있다. 또한 국내 제지산업은 공업용수원의 부족, DCS 도입에 의한 환경규제의 강화, 용수 사용에 대한 원단위 및 발생 폐수의 환경부과금에 대한 상승 등 공정 내, 외적인 압박 요인이 증가되고 있으며, 따라서 용수 사용량을 절감하고, 재활용률을 극대화 하여 산업 환경 개선에 따른 용수 사용량 및 배출 오염 부하량을 절감 할 수 있는 경제적, 환경적 측면의 해결방안이 제시된다면 최근 국내, 외적으로 문제시 되고 있는 물 부족 현상의 심화와 폐수배출 기준 강화 등에 맞춰 제지산업의 청정화 및 환경개선을 이룩할 수 있을 것이다. 용수 사용량과 배출 오염 부하량의 절감을 위해서는 공정 내 용수의 재투입 또는 공정 내 순환수의 적절한 활용 등이 필수적이며 이에 따른 공정 내 투입원에 대한 정량적인 data base의 구축과 mass balance의 확립을 통한 용·폐수의 최적화 방안이 신중히 고려되어야 한다. 이에 따라 용수 사용량 및 배출오염 부하량을 절감할 수 있는 경제적·환경적 측면의 해결 방안에 대한 연구가 진행 되었으며²⁻⁶⁾, 공정 모사 기법을 응용하여 제지 공정에서의 용·폐수 순환망의 최적화에 대한 연구가 다방면에서 접근되고 있다.⁷⁻¹⁰⁾ 본 실험에서는 제지 공정 용·폐수의 최적화 및 현장 적용을 위해 공정 모사 기법을 응용하여 제지 공장의 용·폐수 공정을 분석 하였으며, simulation에 의한 용·폐수의

mass balance 조절 및 최적화 방안을 시도하였다. 또한 용·폐수의 최적화 기법(BAT : Best available treatment) 도입 전·후에 현장에서 생산된 제품의 물성과 백수의 수질을 평가하여 용·폐수 재순환에 의한 품질 변화 정도를 비교하였고, 이에 따라 공정 모사 기법의 결과를 검증하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 공정 P&ID분석

현재 운전 상황을 정량분석하기 위해 필수적으로 확인 되어야 하며, 공정 P&ID 분석 시, 공정 내부의 설비 및 배관도면이 모두 포함되어야 한다. 또한 공정 내에서 배관라인의 변경이 있는 곳은 확인하여 수정하였고, 일일 평균 5m' 이하의 사용처는 흐름도 작성 라인에서 배제하였다.

2.2 단위 공정 별 운전 현황 분석

현장에서의 입고 원료, 청수와 재활용수, 백수 순환 diagram이 타지종과 상대적으로 복잡한 생산 지종을 대표 지종으로 선정하였다. 시료 채취 지점은 pulper, paper machine, WWTP, chemical로 나누어 단위 공정에서의 inlet 지점과 outlet(accept, reject) 지점으로 선정하였고, 초출 후 48시간 이후에 백수 성상 및 지료 농도의 안정화가 이루어진 후 시료를 채취 하였다. 여기서 얻어진 data는 공정 모사 시 입력값으로 활용되었으며, 2회 이상 측정 후 평균값 또는 설계치와 근사한 값을 적용하였다.

2.3 공정 모사 프로그램 활용

단위 공정 별 운전 현황 분석 결과에 따라 초지 공정 및 조성 공정에서 지료 농도의 현장 운전 조건을 확보하여 공정 모사 프로그램에 입력하였다. 공정 모사 프로그램의 신뢰도 상승과 검증 및 보정을 위해 실측, 초음파 유량계, 계산식을 사용하여 유량을 측정하였으며, 이를 통해 용·폐수량을 정량화 하였다. 정량화된 공정 모사 프로그램을 활용하여 공정 내에서 불필요한 용수 사용 및 폐수 발생의 원인이 되는 지점을 확인하였고 용수 라인을 변경함으로써 공정내의 용·폐수 최적화 방안을 제시 하였다.

2.4 물리적 특성 측정

시험용지의 전처리온도는 온도 $23\pm 1^{\circ}\text{C}$, 상대습도 $50\pm 2\%$ 대기 상태에서 24시간 이상 조습처리를 실시하였으며 Tappi standard에 의거하여 평량(TAPPI T410 om-02), 파열강도(TAPPI T403 om-02), 압축강도(TAPPI T818 cm-97), 내절도(TAPPI T511)에 의거하여 물리적 특성을 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

공정 모사 프로그램을 활용하여 현재 운전 현황을 simulation 하여 mass balance를 확립하였고, mass balance 결과를 바탕으로 공정상 폐수 발생의 원인 지점을 발견하였다.

3.1 Pulper 회석수

Simulation 분석 결과, 현장에서는 pulper에 하천수와 폐수 처리장의 3차 처리수가 혼합되는 용수라인을 사용하고 있으며, pulper 회석수로 사용되고 남은 물량은 다시 폐수 처리장 집수조로 이송되도록 구성되어 있었다. 하지만, 대표지종 생산 시 유입되는 원료의 양을 감안 한다면 별도로 폐수 처리장의 3차 처리수가 혼합 될 필요가 없을 것으로 사료되며, 따라서 Fig 1과 같이 폐수 처리장 3차 처리수가 혼합되는 용수라인을 삭제하고 하천수 만을 pulper 회석수로 사용하면서 약 1670m³에 해당하는 양질의 월류수를 보존 할 수 있었다. 또한 이러한 결과로 폐수 처리장으로의 유입량이 감소하기 때문에 경제적·환경적 측면에서 약품 절감 효과를 가져 올 수 있었다.

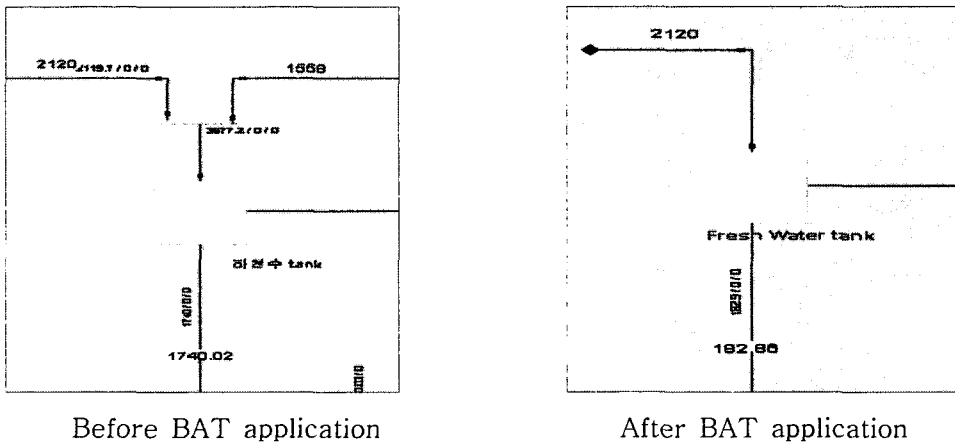
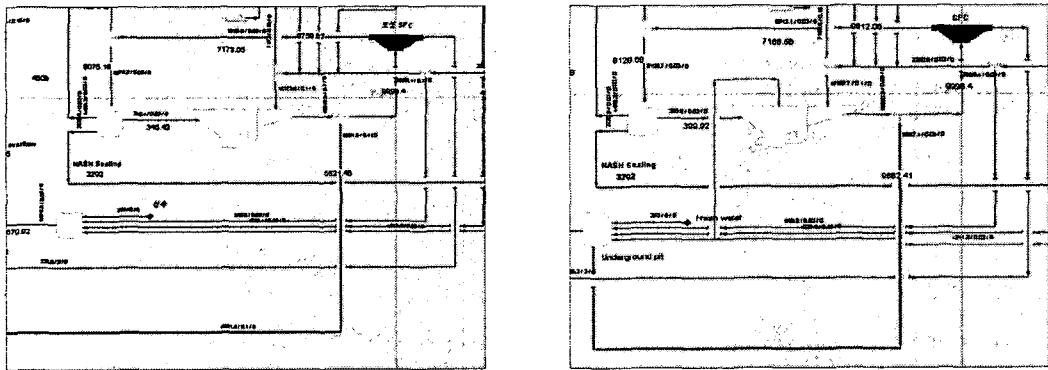


Fig. 1 BAT application in pulper

3.2 Wire pit 월류수 및 지하 pit 용수라인

Simulation 분석 결과, 현장에서는 wire pit의 월류수가 폐수 처리장으로 이송되도록 배관이 구성되어있어서 SPC의 처리 용량을 초과하여 약 4000m³/day 이상의 용수가 폐수 처리장으로 이송되고 있었으며, 이러한 문제는 폐수 처리장 환경 부하 증가의 원인이 된다고 판단되었다. 용수 라인의 효율적 사용을 위해 폐수 처리장으로 유입된

wire pit 월류수의 SS성분 제거 후 filler · back pulper 회석수로 사용되고 있는 용수라인을 수정하여 지하 pit로 포집된 내부 용수와 배관이 결합되어 전량을 filler · back pulper 회석수로 사용되도록 개선하였다.(Fig. 2) 이로써 전체 폐수 발생량의 50% 이상을 차지하는 물량이 공정내로 재순환됨으로서 폐수 처리장의 환경 부하가 감소되고 폐수 처리공정에 투입되던 약품량을 절감 할 수 있었다.



Before BAT application

After BAT application

Fig. 2 BAT application in the wire pit and underground pit

3.3 BAT 적용 후 백수 특성 변화

BAT 적용 후에 백수의 재활용률 상승에 의한 오염 정도를 파악하기 위해 BAT 적용 지점인 wire pit와 지하 pit의 백수를 채취하여 TCOD, SCOD, 전기전도도를 측정하였다. Wire pit에서 BAT 적용 후, TCODcr은 19.4%증가하였고 전기전도도는 0.07%로 소폭 감소한 반면에 SCODcr은 약 두배가량 증가하는 결과를 나타냈다. 또한 Underground pit에서 BAT 적용 후 TCODcr은 28.68%, SCODcr은 14.22% 증가하였고, 전기전도도는 0.9% 감소하는 결과를 나타냈다. 이러한 결과는 폐수처리장으로 유입되는 wire pit의 월류수를 filler나 back-ply line의 pulper 회석수로 사용함으로써 공정내 백수의 재활용률을 높임에 따라 나타난 결과라 판단된다. 하지만 재활용 된 백수가 비교적 오염 부하가 높은 filler나 back ply line의 pulper의 사용되기 때문에 제품 생산에 있어 품질 저하에 끼치는 영향은 적다고 사료된다.

3.4 BAT 적용 후 품질 변화

용수의 재활용에 따른 제품의 품질 저하 정도를 파악하기위해 BAT 적용 전과 후에 생산된 제품의 물성 값을 분석하고자 하였다. 분석 항목은 제품의 품질에 가장 영향

을 많이 끼치는 파열강도와 압축강도, 사이즈도, 내절도로 결정하였다. 파열강도는 파열 강도를 평량으로 나눈 비파열강도 값을 사용하였으며 Fig. 4에서 나타낸 바와 같이 BAT 적용 후 BAT 적용 전보다 8.9% 정도 감소하였지만 KS 기준에 명시된 값 보다 높은 결과 값을 나타냈다. 압축강도는 BAT 적용 전보다 4.55% 증가하였고 비파열강도와 마찬가지로 KS 기준에 명시된 값 보다 높은 결과 값을 나타냈다. 또한 사이즈도는 BAT 적용 전보다 57.14% 높은 결과 값을 나타냈지만 내절도는 BAT 적용 전보다 13.8% 감소하는 결과 값을 나타냈다. 결과적으로 BAT 적용 전과 후의 제품의 품질을 평가한 결과 사이즈도를 제외하고 전체적으로 소폭 증가하거나 감소하는 결과 값을 나타냈다. 사이즈도의 결과 값이 증가한 것은 제품에 보류되지 않고 백수에 용존되어 있던 사이즈제 물질이 폐수처리장으로 유입되지 않고 filler나 back-ply line의 pulper의 희석수로 사용되어 다시 제품에 영향을 끼쳤기 때문으로 사료되며 용수의 재활용에 따른 제품의 품질 변화가 미미한 것은 wire pit나 지하 pit에서 재활용된 백수가 라이너지에서 가장 강도 형성에 예민한 top층이 아닌 filler나 back층의 pulper 희석수로 사용되었기 때문으로 사료된다. 하지만 시간의 경과에 따라 백수의 재활용률은 높아지기 때문에 향후 제품의 품질 변화가 일어날 가능성이 있다고 판단되며 이에 따른 지속적인 관찰과 분석이 필요하다고 사료된다.

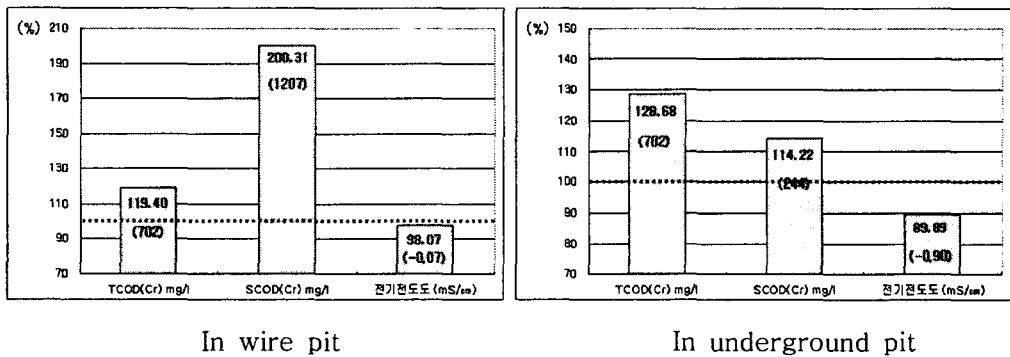


Fig. 3 The changes of white water property after BAT application

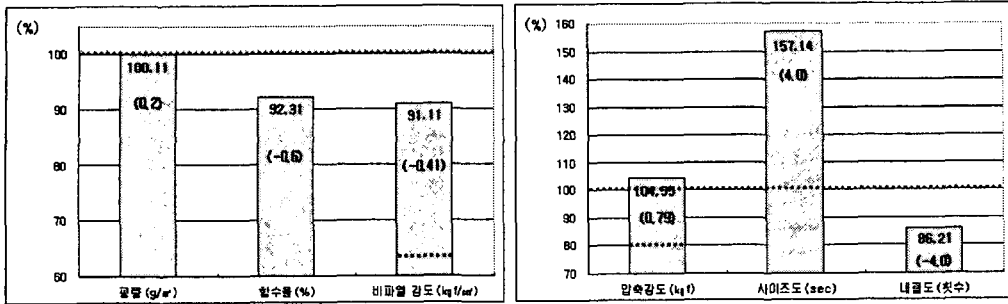


Fig. 4 The changes of mechanical property after BAT application

4. 결론

제지 공정의 mass balance를 공정 모사 프로그램을 사용하여 정량화할 수 있었고, 정량화된 mass balance를 기준으로 현장의 용·폐수 라인에서 폐수 발생의 원인이 되는 지점을 확인 할 수 있었다. 용·폐수의 최적화를 위해 공정 모사 프로그램을 활용하여 용·폐수 라인을 변경하였고 simulation을 실시하였다. Simulation 실시 결과 라인 변경에 의해 폐수 발생량을 50%이상 줄일 수 있었고, 이를 현장에 적용하여 용·폐수 발생량을 최적화 할 수 있었다. 백수의 재활용률에 따라 BAT 적용 지점의 백수 수질은 SCOD만이 두 배 가량 증가하여 제품 품질의 저하가 예상 되었지만 재활용된 백수를 filler나 back pulper 희석수로 전량 사용하였기 때문에 급격한 강도 저하가 발생하지 않았다고 사료된다.

인용문헌

1. 환경백서 2004, 환경부 (2004).
2. 임택진, 이성호, 조준형, 응집 침전법에 의한 재생지 폐수처리, 한국펄프종이공학회 학술발표논문집 제1권 (2001).
3. Carsillo, S., Apgar, J. "Effects of Water Closure in a Recycle Board Mill - A22 Year Story", 1998 Pulping Conference Proceedings.
4. Robertson, L.R. "Impact of Water Reuse on Papermachine Microorganisms", 1997 Biological Sciences Symposium Proceedings.
5. Barnack, M., Stein, R., Gellner, L. "Optimization of a Recycle Linerboard Mill WWTP", 2000 Environmental Conference Proceedings.
6. Smith, J., Clark, M., Guidotti, P., Hartung, R. "Novel Approach to the

Management of Recycled Whitewater and Solid Waste Disposal at a Recycle Newsprint Mill”, 1992 Environmental Conference Proceedings.

7. Adan Melton, Jim Haynes “PROCESS SIMULATION AS A TOOL FOR CLOSING WATER LOOPS”, Pacific Simulation

8. Joelle M. Scheldorf, Bill C.Strand “Simulation of Ink Removal at a Newsprint Deinking Facility”

9. Devin Cole, Dan Farmin, Loren Euhus “USING SIMULATION TO IDENTIFY AND EVALUATE OPERATING COST”

10. Loren Euhus “OPTIMIZATION USING PROCESS SIMULATION ”

11. 함충현, 윤혜정 “제지 공정의 효율적인 투입에 대한 동적 시뮬레이션 적용”