

워터핀치(Water Pinch)기법을 적용한 백판지공장의 공정수 재이용 최적화

류정용[†] · 박대식 · 김용환 · 송봉근 · 서영범^{*1}
(2005년 7월 16일 접수: 2005년 11월 15일 채택)

Optimization of Water Reuse Network Using Water Pinch Method in Duplex Board Mill

Jeong-Yong Ryu[†], Dae-Sik Park, Yong-Hwan Kim,
Bong-Keun Song, and Yung-Bum Seo^{*1}
(Received on July 16, 2005: Accepted on November 15, 2005)

ABSTRACT

Paper mills use and discharge lots of water. And so now the papermaking industry could be classified into major water consuming industry. In order to analyze the process water network and to establish the mass, water balance of duplex board mill, computer aided simulation was made using water pinch method. Based on the pinch analysis results, reuse of process water, after regenerating by microfilter as much as 140 m³/hr, could be suggested without significant accumulation of contaminants in process water. According to this suggestion about 3000 m³/day of recycled process water could be substituted by regenerated water and consequently 30% of energy cost is expected to be reduced.

Keywords: water pinch, water network, recycling reuse, mass balance, optimization

• 한국화학연구원 펄프제지연구센터 (Pulp and Paper Research Center (PPRC), Korea Research Institute of Chemical Technology (KRICT)), P.O. Box 107, Yusung, Daejeon 305-606, Korea

*1 충남대학교 임산공학과 (Department of Forest Products, Chungnam University, Daejeon 305-764, Korea)

† 주저자(Corresponding Author):E-mail: jyryu@kriect.re.kr

1. 서론

제지산업은 원료의 정제와 제품의 생산에 다량의 공정수를 필요로 하는 용수 다소비 산업이다.¹⁻⁵⁾ 제지공정은 원료의 탈수 과정에서 발생하는 백수(white water)를 순환시켜서 공정 내에서 재사용하는 순환시스템을 가지고 있다.^{1,9,8)} 그러나 백수의 순환률이 높아짐에 따라서 배관이나 기계에 스케일을 형성하고 지층의 형성과정에서 섬유 간의 결합에 악영향을 미치는 문제점들이 제기되었다.^{3,7,8)} 배출 폐수의 오염물 농도에 관한 규제가 갈수록 강화되고 수자원의 감소로 인한 용수의 공급비용이 상승되고 있는 요즘 용수의 관리는 매우 중요하며 용수 사용량을 절감하는 노력이 요구되고 있다.⁹⁻¹³⁾ 제지공정의 용수 오염 정도는 최종 제품의 품질과 생산 효율에 미치는 영향이 크기에 제지공정의 용수 절감을 위해서는 오염물에 의한 영향을 최소화하기 위한 복잡한 용수 공급망에 대한 체계적인 접근과 분석이 이루어져야 한다.^{6,15,16)}

워터핀치기법(Water Pinch Technology)은 전산모사를 기본으로 하여 대상공정에 대한 파악과 분석을 선행하고 핀치 포인트를 찾아 용수의 재활용률을 높이기 위해 공정수의 유량 및 오염물의 농도변화 등을 면밀히 분석, 예측하는 방법이다. 이러한 분석을 통해 청수뿐만 아니라 폐수의 방류량까지 절감할 수 있다.²⁾

핀치 기법은 초기에 Heat Pinch라고 하는 열 교환기 망의 최적화 방법에 적용되었다. 이 기법은 공정에서 발생하는 열에너지의 손실을 방지하여 에너지 발생에 필요한 비용의 절감에 주 목표를 두었다. 그 이후에 EL-Halwagi와 Manousiouthakis^{17,18)}와 Wang과 Smith^{19,20)} 등은 원래 열 교환기 합성에서 사용되던 기술을 다르게 적용하여 워터핀치기술을 개발하고 오염을 방지하는데 성공적으로 기여했다. 워터핀치기법의 초점은 공정용수 재이용을 최대로 하고 오염물의 농도를 조절하는 것으로 용수 공급 네트워크를 분석하여 최대의 용수 재이용이 가능하도록 하는 공급망 디자인 방법이다.^{2,15)}

초기 워터핀치기법은 공정 그래픽을 이용하여 전체공정의 운전이 필요한 최소의 비용을 산출해내는 방법으로 적용되었으나 현재는 전산모사기법을

병행하여 전체 공정의 용수 공급에 소요되는 비용을 최소화하여 최적화된 용수 공급량과 공급비용을 산출해내는 방법으로 응용되고 있다. 이 방법을 통하여 대상공정의 현장 운전조건 변화에 따른 공정변화를 예측하여 실제의 공정현황을 고려한 최적의 용수 공급 네트워크를 구성할 수 있다.⁹⁻¹⁵⁾

본 연구에서는 위와 같은 전산모사를 병행한 워터핀치기법을 이용하여 제지공정의 복잡한 용수 공급 네트워크를 분석하고 최적의 용수 공급망을 구성하고자 하였다. 또한 재이용수의 사용에 따른 공정에 미치는 악 영향을 최소화하기 위하여 오염물의 농도변화에 대한 핀치분석을 수행하여 공정수 오염을 예측, 조사하였다. 아울러 본 연구에서는 실제 적용 실험과 전산모사 결과에 근거한 예측을 바탕으로 공정수의 오염을 경감시키는 마이크로 필터의 활용을 고려하였으며 배출 폐수의 오염물 농도 증가를 최소화하기 위한 최적의 용수 공급 네트워크를 도출하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 최적화된 용수 공급 네트워크의 설정

워터핀치기법을 통하여 대상 공정에 관한 최적화된 용수 사용 방안을 도출하기 위해서 다음과 같은 방법들이 사용되었다. 공정수 재이용(re-use)은 청수를 대체하기 위하여 재이용하고자 하는 공정수를 별도의 오염물 제거 시설을 사용하지 않고 유입농도가 허용되는 공정에 바로 재사용하는 방법이다. 재생처리 후 재사용(regeneration re-use)은 재이용수 내의 오염물의 농도를 사용하고자 하는 공정의 유입허용농도에 적합하도록 재생장비(regeneration unit)를 이용하여 조절한 후에 재사용하는 것이다. 그리고 공정수를 내부 순환시켜 연속하여 재사용하는 순환 재이용(regeneration recycle)방법이 있다.

재이용수의 사용을 최적화하기 위해서는 먼저 각 공정들에 오염물의 최대유입허용농도를 설정한다. 재이용수를 사용하고자 하는 공정에서 재이용수 내에 함유되어 있는 오염물로 인한 영향이 가능한 낮도록 전산모사기법을 수행할 때에 각 공정마

다 유입허용농도를 설정해 주면 이에 근거하여 기존에 공정에 유입되는 공정수의 오염물 농도에 따라서 또는 대상 공정에서 이루어지는 물질의 이동량에 의하여 최대 유입이 가능한 오염물의 양이 제한된다. 이것을 바탕으로 공정수정(process modification)이나 재이용수를 처리하기에 적합한 폐수 재생장비(wastewater regeneration)의 선정을 실시함에 따라 효율적인 용수 절감방안을 실현할 수 있다.

2.2 핀치 분석 및 전산모사 방법

핀치기법을 적용하기 위해서는 핀치분석을 통하여 공정의 현황을 파악하여야 한다. 공정의 파악은 Mass balance를 통하여 공정에서 이루어지는 물질의 흐름을 파악하는 것이라고 할 수 있다. 핀치분석은 이러한 물질 데이터를 기본으로 하여 공정의 흐름을 파악하며 오염물질의 이동에 관한 객관적인 분석을 하는 방법이다. 따라서 핀치분석을 수행하기 위해서는 공정에서 사용되는 공정수의 정확한 수질분석을 통하여 오염물질의 이동을 파악하는 것이 중요하다. 이러한 오염물질의 핀치분석결과를 다시 전산모사를 통하여 활용된다. 전산모사기법은 공정도의 분석을 통한 간략화된 공정도와 핀치분석 결과를 바탕으로 이루어진다.

전체공정이 묘사된 간략한 공정도는 전산모사에서 물이 이동하는 통로를 나타낸다. 즉 각각의 배관들은 오염된 물, 즉 오염물질이 이동하는 경로를 나타내며 자료가 된다. 핀치분석을 위해서는 이러한 오염물의 상태를 입력해주기 위한 매우 정확한 수질분석결과가 요구된다.

전산모사를 위해 위와 같이 대상 공정의 공정도와 수질분석결과를 이용하여 공정수의 흐름을 나타내는 flowsheet를 작성하게 되며 flowsheet에는 각 공정의 운전 상황과 함께 각 공정수의 유량과 오염물질의 농도 등이 입력된다. 그리고 이러한 자료들을 바탕으로 Mass balance와 Water balance를 설정하게 된다. 설정된 balance 데이터를 근거로 현재 공정에서 이루어지고 있는 물질의 흐름을 파악할 수 있으며, 공정에 변화가 일어났을 때 예상되는 공정수의 양과 질 변화를 추정할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 대상공정의 공정현황분석

본 연구에서는 백판지를 생산하는 S제지를 대상으로 워터핀치기법을 적용하였다. S제지는 2대의 초지기를 가동하는 제지회사로 용수 사용량이 하루

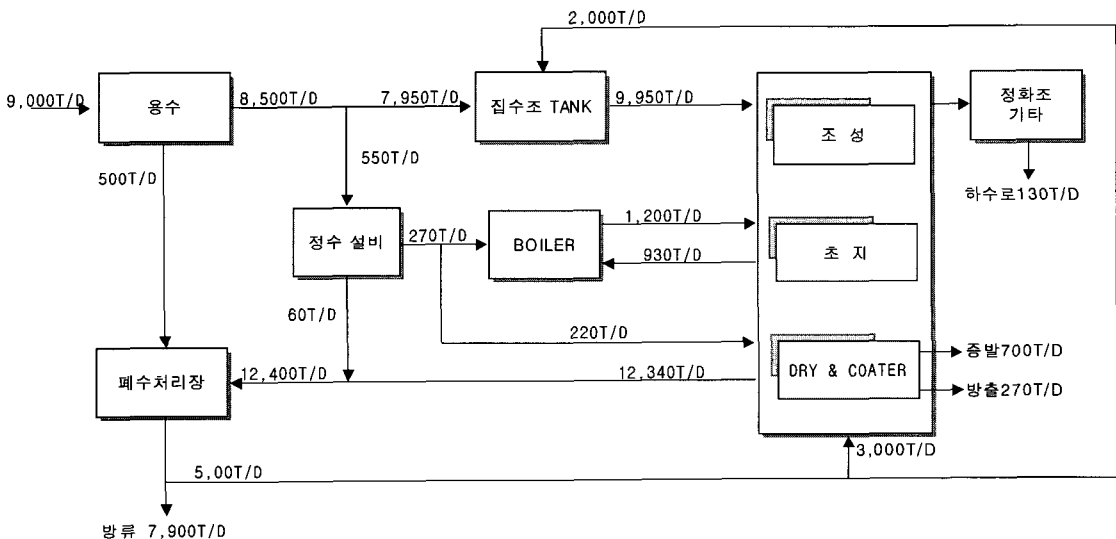


Fig. 1. Water diagram for S-paper.

에 10,000톤에 달하는 규모를 가지고 있다. S제지의 용수 사용 현황은 Fig.1과 같다.

공정현황을 파악하기 위하여 제지공정에서 존재할 수 있는 여러 가지 오염물질 중 COD, SS, calcium hardness, alkalinity와 같은 주요 인자를 정하여 수질분석을 실시하였다. 수질분석은 S제지에서 입수한 공정도와 주요 공정들을 대상으로 선정된 샘플 포인트를 기초로 하여 이루어졌다. 이 수질분석자료와 입수된 자료를 바탕으로 공정에서 이루어지는 물질의 흐름을 파악하기 위한 물질수지자료를 작성하였다.

3.2 전산모사를 통한 워터핀치기법의 적용

전산모사기법을 통해서 공정수와 오염물질의 유입, 유출에 관한 체계적인 접근과 분석을 수행할 수 있었다. 전산모사는 AspenTech사의 Aspen Water와 AspenPlus를 이용하여 수행하였다. Table 1에서 보는 바와 같이 각 공정수의 오염정도를 분석하여 공정수를 재이용할 수 있는 가능성을

탐색하였다.

Table 1은 전체공정수의 분석결과이며 전산모사의 수행을 위한 입력 자료로서 활용되었다. 각 공정에는 최대로 유입 가능한 오염물질의 허용농도를 설정하였으며 공정수의 배출이나 다음 공정으로의 유입에 따른 오염물 농도 변화를 분석하였다. 각각의 공정들은 오염물의 농도에 따라서 공정합성(process integration) 방법을 적용하여 통합한 후 분석되었다.

Table 2는 전산모사를 통한 핀치분석을 수행한 결과 재이용이 가능하다고 선발된 공정수들의 오염물 농도이다. Fig. 2에 나타낸 바와 같은 처리과정을 거친 filler line 처리수의 경우에는 일련의 수처리 과정을 거쳤음에도 양호하지 못한 수질을 가지고 있음을 확인할 수 있었다. Filler line의 처리수는 백수를 처리하여 재활용하는 필터를 가지고 있는 공정이지만 오염물의 농도가 다른 공정수들에 비하여 상당히 높은 편임을 알 수 있다. 따라서 공정수의 재활용 가능성이 오염물의 농도변화만큼 저하 되는

Table 1. Material balance for S-paper

	PM1-no1.former	PM1-no34 56.former	PM2-no34 56.former	PM2-no8. former	W/L w.w chest-2	SUB w.w chestclear	Filler w.w	Filler line treatment	press felt shower	pump sealing
COD(mg/l)	388	862	910	748	1214	1300	812	1074	118	79
SS(mg/l)	5190	2615	795	550	7105	535	3280	280	7.5	7

Table 2. Contaminant concentration of varied process water

process	Sealing, balance water	Wire shower water	1'st treatment water	3'rd treatment water	Filler line treatment water
COD(mg/L)	168	1034	316	161	1134
SS(mg/L)	11.25	4089	320	18	515

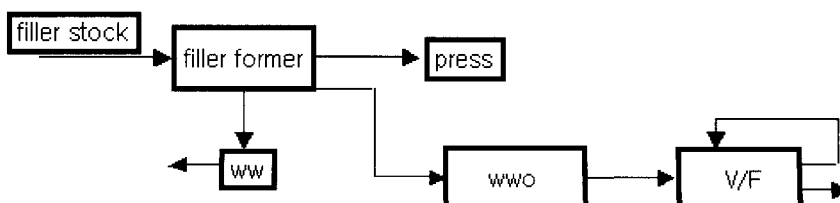


Fig. 2. Water diagram of filler line.

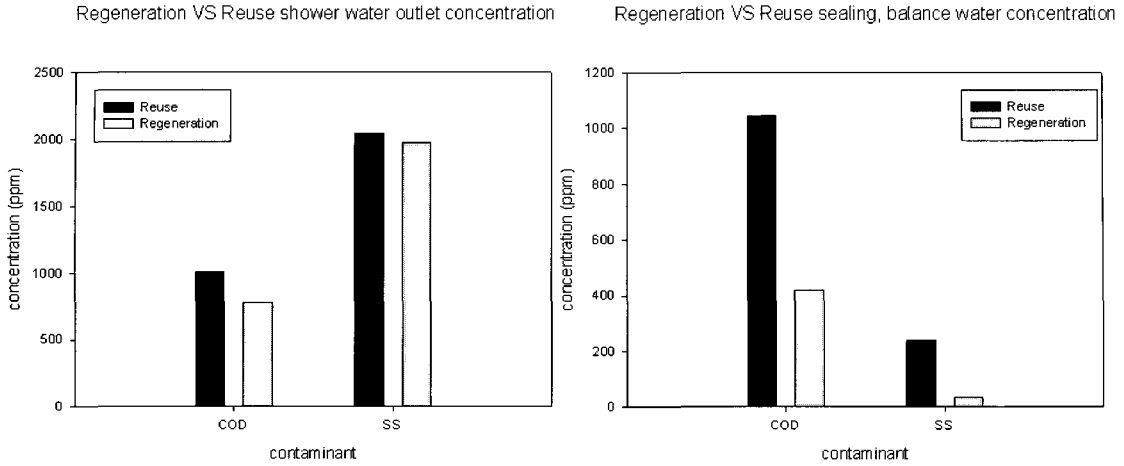


Fig. 3. Contaminant concentration of shower water and balance water according to the application of microfilter as a regeneration method.

것을 확인할 수 있다. 실링(sealing)수의 경우에는 실링에 청수가 사용되기에 공정을 거친 후에도 3차 처리수와 비슷한 양호한 수질을 가지고 있음을 알 수 있었다. 와이어 샤워수(wire shower water)의 경우 청수와 재활용수가 같이 사용되는데 다른 공정수에 비해 SS의 농도가 높은 것을 알 수 있다. 와이어 샤워수는 filler line 처리수와 COD가 비슷한 수준이며 청수가 다량 사용되는 실링수와 COD 차이가 큰 것으로 분석되었다.

Fig. 3은 공정수의 재이용방법에 따라서 공정 내에 오염물의 양이 얼마만큼 변화할 것인가에 대한 분석결과이다. 일련의 재생장비(regeneration unit)를 사용하지 않고 직접 재이용할 경우에는 오염물의 농도증가로 인하여 공정 내에 오염물이 축적될 가능성이 높은 것을 알 수 있다. 그러나 수처리 시설(micro filter)을 거친 즉 재생 후 재사용(regeneration re-use)방법을 사용하면 공정에서의 오염물의 농도증가를 저하시킬 수 있다는 것을 알 수 있다. 공정수 내의 SS를 효과적으로 제거할 수 있는 마이크로 필터(micro filter)를 재생장비로 선택하여 재이용한 결과가 Fig. 3과 Fig. 4에 나와 있다.

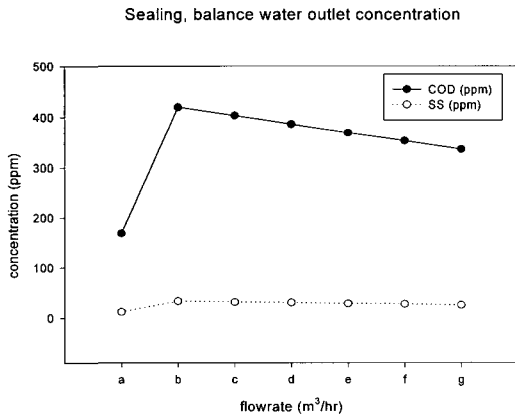


Fig. 4. Contaminant concentration of sealing and balance water outlet according to the introduced amounts of regenerated water.

(a: Blank, b:180m³/hr of regenerated water, c:170m³/hr, d:160 m³/hr, e:150m³/hr, f:140m³/hr, g:130m³/hr)

Fig. 4에는 기존에 청수를 사용하던 실링수를 오염물이 함유되어 있는 재이용수로 대체함에 따라서 유출수의 오염물의 농도가 높아지는 경향을 나타내었다. 청수를 대체하는 재이용수의 유량이 증가함에 따라서 유출수의 오염물 농도가 증가함을 알 수 있다. 그러나 한번 사용된 공정수는 폐수처리시설로 이동되기 때문에 일정 유량이하에서는 오염물의 농도변화가 적었다. 또한 전산모사를 통해 각 공정별로 설정된 최대 유입허용농도 별로 재이용수 활용 유량에 따라 유출수 내 오염물의 양과 공정 내의 축적에 영향이 있는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5에서는 기존에 재활용수와 청수를 사용하던 샤워공정

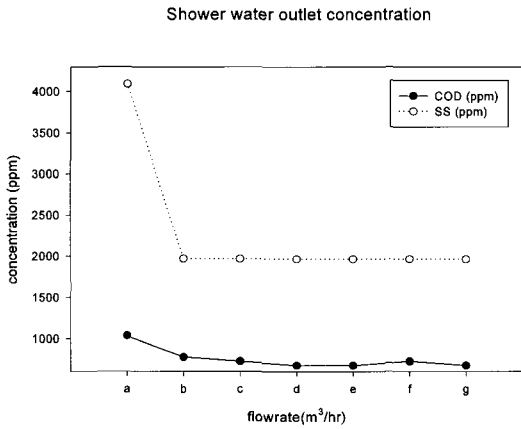


Fig. 5. Contaminant concentration of shower water outlet according to the introduced amounts of regenerated water.

(a: Blank, b:180m³/hr of regenerated water, c:170m³/hr, d:160 m³/hr, e:150m³/hr, f:140m³/hr, g:130m³/hr)

의 오염물 농도변화가 나타나 있다. 기존의 재활용수는 filler line의 처리효율이 양호하지 못하므로 사용하는 공정의 오염물 농도가 높은 수치를 나타내었다. 그러나 Fig. 6과 같이 마이크로 필터로 처

리된 재이용수는 Table 3과 같이 70%이상의 부유오염물 제거효율을 보이므로 안정된 수질의 공정수를 공급할 수 있게 된다.

기존에 공정으로 유입되는 filler line 처리수의 오염물을 재생장비(micro filter)로 제거함으로써 폐수의 오염물 농도가 저하되는 효과를 가져왔다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 기존 공정에서의 폐수 오염물 농도가 재이용수의 사용량에 따라서 저하되고 있다. 이것은 재이용수의 사용에 따른 폐수의 오염물 증가에 관한 영향을 전산모사를 통해 조사해본 것으로 공정 내 부유오염물의 축적 가능성이 줄어드는 것을 알 수 있다. 전산모사결과에서 재이용수를 전량 재이용하였을 경우에는 청수만을 사용하는 경우보다 부유오염물의 증가율이 높은 것으로 나타나고 있다. 하지만 재이용수의 공급량을 조절하면 140m³/hr 시점부터는 기존의 폐수처리를 거친 1차 처리수보다 약간 높은 부유오염물 농도를 나타내며 COD의 경우에는 오히려 낮은 수치를 보이고 있다. 기존 공정에서 순환되던 백수의 오염물 농도가 저감되고 최종적으로 폐수처리장으로 유입되는 공정수까지 부하가 줄어드는 것을 알 수 있다.

Table 3. Properties of micro filter treated waters

filter	Suspended Solid				COD Total			
	Inlet	Clear	Cloudy	Reject	Inlet	Clear	Cloudy	Reject
30	410	100	290	1370	1995	1233	1213	6345
30	380	140	310	2050	965	1100	1045	1890
30	240	76	220	1750	996	995	1075	2200
20	225	42	155	2665	970	830	1065	2410

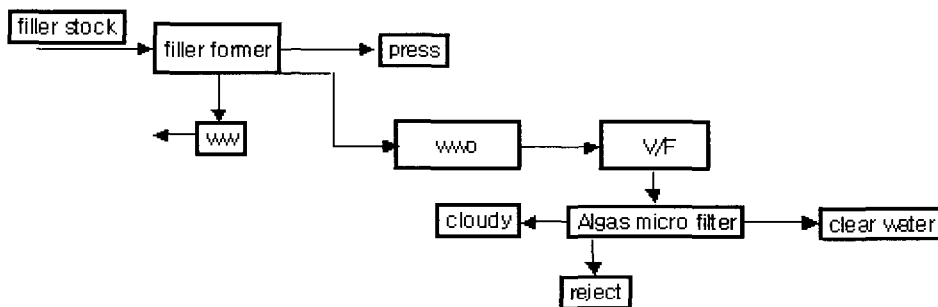


Fig. 6. Microfilter installed diagram of filler line.

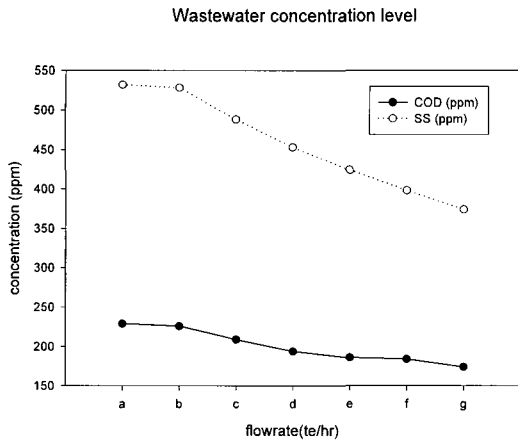


Fig. 7. Contaminant concentration of waste water outlet according to the induced amounts of regenerated water.

(a: Blank, b:180m³/hr of regenerate water, c:170m³/hr, d:160 m³/hr, e:150m³/hr, f:140m³/hr, g:130m³/hr)

Table 4를 보면 폐수처리장으로 유입되는 공정수의 오염물이 마이크로 필터를 통과함으로써 COD는 40%이상, SS는 10%이상 농도가 저하되어 있는 것을 알 수 있다. 폐수의 농도부하가 낮아짐으로써 기존에 청수가 사용되던 실링수나 보충수, 기타 공정수와 재활용수와 청수가 사용되던 사위공정에 재생장비로 처리된 재이용수로 대체할 수 있는 것으로 분석된다. 오염물의 농도변화를 최소화하는 범위에서 청수를 대체할 수 있는 재이용수의 양은 Fig. 4와 Fig. 5에서 보는 바와 같이 유출수의 농도 변화가 적은 130m³/hr에서 140m³/hr이라고 할 수

있다.

Table 5에서 전산모사를 통해 워터핀치기법을 적용하여 최적화된 용수 공급 비용이 나와 있다. 적용해본 결과 약 3000m³/day의 재이용수를 청수대신 사용할 경우 30%이상의 비용절감효과가 있는 것으로 분석되었다.

4. 결론

백판지 생산 업체의 용수공급 네트워크를 청수 사용량의 절감 뿐 만 아니라 폐수의 오염감소까지 고려하여 워터핀치 기법을 적용해 전산모사를 실시하였다. 이를 통해 재이용수의 사용에 따른 공정오염을 예측할 수 있었으며 오염물의 유입허용농도에 따라 결정되는 재이용수의 사용가능 유량 변화를 파악하였다.

이러한 핀치기법을 이용하여 재이용수의 활용에 따른 오염물질의 공정 내 축적현상을 분석해 본 결과 약 140m³/hr의 재이용수를 활용하였을 경우에는 오염물의 현저한 축적없이 공정에 미치는 악영향을 최소화 할 수 있을 것으로 분석되었다. 이에 따라 약 3000m³/day 가량의 공정수를 재이용수로 대체할 수 있으며 30% 이상의 에너지 비용 절감효과를 얻을 수 있을 것으로 기대되었다.

인용문헌

1. Ronald, T. K. Successful implementation of a zero dis-

Table 4. Varied COD and ss of wastewater according to the use of microfilter

	base wastewater+treatment water with microfilter	base wastewater+treatment water
COD (mg/L)	157	308
SS (mg/L)	297	340

Table 5. Cost reduction according to the application of new suggestion

water cost	optimization water cost	base water cost
freshwater cost	1467	2401
connection cost	197	90

- charge program, *Tappi J.* 79 : 97-102 (1996).
2. Koufos, D. and Retsina, T. Practical energy and water management through pinch analysis for the pulp and paper industry, *Water Science and Technology* 43: 327-332 (2001).
 3. Serge, B. and Mikhail, S. Water minimization in the washing section of a paperboard mill, *Tappi J.* 83(9) (2000).
 4. Scott, B. Water management with mechanical seal", *Tappi J.* 82:97-102 (1999).
 5. Subhash, C. Effluent minimization-A little water goes a long way, *Tappi J.* 80:37-42 (1997).
 6. James, G. M. Cultural change and water-asset realignment to support water-reuse projects, *Resource Conservation and Recycling* 37:175-180 (2003).
 7. Jean, C. B., Michel, P., and Jean, P. Model predictive control for integrated management of whitewater tanks, *Tappi J.* 1: 15-21 (2002).
 8. Theodore, M. G., Tianyan, X., and Kenneth, H. B. Variation of whitewater composition in a TMP and DIP newsprint paper machine, *Tappi J.* 80: 163-173 (1997).
 9. Kutepov, A. M., Meshalkin, V. P., and Nevskill, A. V. Modified Water Pinch method for designing resource-efficient chemical engineering systems, *Doklady Chemistry* 383:123-127 (2002).
 10. Alva-Argaez, A., Kokossis, A. C., and Smith, R. Wastewater minimization of industrial systems using an integrated approach, *Computers Chem. Engng* 22: S741-S744 (1998).
 11. Wang, Y. P. and Smith, R. Wastewater minimization, *Chemical Engineering Science* 49(7): 981-1006 (1994).
 12. Russell, F. D., Henrik, W., and Michael, R. O. Process integration design methods for water conservation and wastewater reduction in industry, *Waste manag* 14: 103-113 (2001).
 13. Duncan, M. F. and Nick, H. Determination of effluent reduction and capital cost targets through pinch technology, *Environmental Science and Technology* 34: 4146-4151 (2000).
 14. Sivabhalini, T., Jiri, K., Dora, P., Gustavo, A., and Geronimo, J. C. Water and wastewater minimization study of a citrus plant, *Resources Conservation and Recycling* 1-24 (2002).
 15. Hallale, N. A new graphical targeting method for water minimization, *Advances in Environmental Research* 6: 377-390 (2001).
 16. Huang, C. H., Chang, C. T., and Ling, H. C. A mathematical programming model for water usage and treatment network design, *Ind. Eng. Chem. Res.* 38: 2666-2679 (1999).
 17. El-Halwagi, M. M. and Manousiouthakis, V. Synthesis of mass exchange networks, *AIChE J.* 35(8): 1233-1244 (1989).
 18. El-Halwagi, M. M., Manousiouthakis, V. Simultaneous synthesis of mass-exchange and regeneration networks, *AIChE J.* 36(8): 1209-1219 (1990).
 19. Wang Y. P., Smith R. Wastewater minimization with flowrate constraints, *Trans IChemE*, 73(A): 889-904 (1995).
 20. Wang Y. P. and Smith R. Design of distributed effluent treatment system *Chem. Eng. Sci.* 49(18): 3127-3145 (1994).
 21. Yang, Y. H., Lou, H. H., and Huang, Y. L. Synthesis of an optimal wastewater reuse network, *Waste Management*, 38(5): 311-319 (2000).