

공정용수 재이용 최적화를 통한 용수 및 폐수 최소화 기술

유창규[†] · 이태영* · 이인범*

경희대학교 환경응용화학대학 환경학 및 환경공학 · *포항공대 환경공학부/화학공학과

(2005년 9월 8일 접수, 2006년 9월 6일 채택)

Water and Wastewater Minimization Technology Through Process Water-Reusing Optimization

ChangKyo Yoo[†] · Tae Yeong Lee* · In-Beum Lee*

Department of Environmental Science and Engineering, Kyung Hee University

*Department Chemical Engineering and School of Environmental Engineering, POSTECH

ABSTRACT : Designing water-reuse network which can reduce the fresh water within the process and increase the water-use efficiency by scientific and systematic analysis is recently interested in the industries. Water systems often allow efficient water uses via water reuse and recirculation in the paper, petrochemical, and steel industries which necessitate a lot of freshwater within the process. Defining network layout connecting water-using process is frequently accomplished by using water pinch technology which optimizes freshwater entering the process and also reduces the wastewater. In this review, recent researches and case studies of water pinch technology which can find the bottleneck of the water stream at the water reuse designing stage are introduced. Necessity of water pinch technology is illustrated by examples of real industries. Recent studies on simultaneous energy and water minimization and water-reuse network among industries in eco-industrial park(EIP) are also introduced.

Key Words : Water Pinch, Water and Wastewater Minimization, Water Reuse Network, Mathematical Optimization, Mass Exchange Network, Eco-Industrial Park(EIP)

요약 : 최근에 배출수를 고도 처리하여 재이용하는 기존의 방법에서 벗어나 공정 내에서 용수를 절약함과 동시에 생산 공정의 과학적이고 체계적인 분석을 통하여 용수의 이용률을 극대화한 후 최종 방류함으로써 물이용의 효율성을 높이고자 하는 용수재이용 기술이 많은 관심을 받고 있다. 이에 따라 제지, 석유화학 및 철강 산업 같이 용수를 많이 필요로 하는 용수 과소비 산업의 경우 공정수의 내부 재순환을 최적화 하여 유입되는 공업용수를 저감하는 동시에 재이용수의 사용으로 전체 용수 사용량을 줄이고 폐수의 방류량을 줄이고자 하는 워터핀치기술(water pinch technology)에 대한 관심이 높아지고 있다. 이 기법은 공정수의 재이용을 최적화 시켜주는 방법을 사용하기 때문에 폐수의 방류량을 줄이면서 전 생산 공정을 대상으로 최적의 공정용수 재이용 라인을 구축할 수 있는 것으로 알려져 있다. 본 총설에서는 공정 설계 단계에서 병목을 찾아 재이용 최적화를 통해 용수 및 폐수 최소화하는 워터핀치 기술과 국내외 산업체에서 용수 재이용 네트워크 설계의 사례연구를 소개하고자 한다. 또한 최근 각광을 받는 에너지와 용수 재이용 네트워크의 동시 설계와 생태산업단지에서 기업간 용수 재이용 네트워크 설계 같은 최신 연구 동향을 소개한다.

주제어 : 워터핀치, 용수 및 폐수 최소화, 용수 재이용 네트워크, 수학적 최적화, 물질 교환망 설계, 생태산업단지

1. 서론

최근 들어 환경규제 강화에 대한 국제적 압력은 폐수처리비용의 증가를 초래하여 지금도 폐수처리비용이 용수 비용을 훨씬 초과 하고 있으며 이 비용은 점점 더 증가할 것으로 예상되고 있다. 이러한 물 부족 현상은 외국의 문제가 아니라 우리나라에서도 여름 갈수기의 공장 가동을 위협하는 수준에 이르고 있으며 점차 심화될 것으로 예측되고 있다. 이러한 환경 변화에 따라 개별 기업과 산업단지 내에서 수자

원 관리는 에너지 수배급에 못지않은 중요한 문제로 대두되고 있다. Fig. 1의 용수수급 전망¹⁾에 따르면 2006년부터 4억 톤 이상의 용수 공급량 부족이 예상되며 신규수자원을 확보하기 위한 댐 건설을 필요로 하며 이로 인해 용수 생산 단가는 지속적으로 증가할 것이다. 이 밖에도 대부분의 산업체에서는 용수를 생산공정에 적합하게 사용하기 위해 가공, 운성하고 처리를 수행하는데 용수구입비용의 3-6배 정도를 지출하고 있으며²⁾ 이러한 비용도 지속적으로 상승될 것으로 예상되고 있고, 이 같은 용수 처리 비용 증가는 기업의 경쟁력 약화의 한 요소로 작용될 것으로 판단된다. 이러한 신규수자원 확보 요구와 용수 부족 현상에 따라 수처리 및 용수 공급 비용 절감 측면에서 효율적인 산업체 수자원 관리가 요구되고 있다.

[†] Corresponding author
E-mail: ckyoo@khu.ac.kr
Tel: 031-201-3824

Fax: 031-204-8114

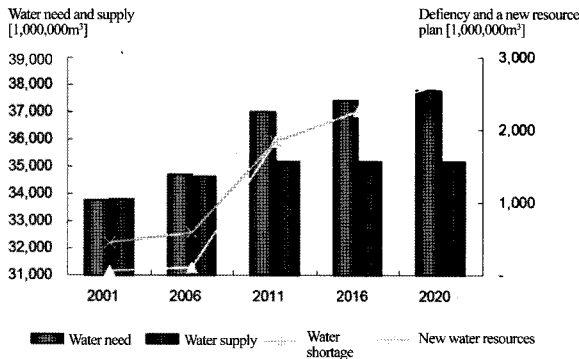


Fig. 1. Prediction of water supply and need.¹⁾

우리나라는 유엔이 정한 물 부족 국가에 포함되어 있고 향후 물 부족 현상이 심각해질 것으로 예상되나 새로운 수자원 개발을 위한 댐 건설 등은 지역 주민들의 반대와 주변 환경 파괴의 우려로 인하여 매우 어려운 실정이다. 또한 산업의 다양화와 고도화에 따른 양질의 수자원 확보가 점점 어려워지고 있는 가운데 2003년부터 시행되어 온 물이용 부담금 제도로 인하여 각 산업체에서는 양질의 용수 확보 문제뿐 아니라 경제적 부담도 가중되고 있다. 이에 각 산업체에서는 배출수를 재활용하기 위하여 많은 노력을 기울여 왔으며, 국내에서도 막여과 방법을 이용하여 폐수처리장의 처리수를 재처리 하여 공정수로 재이용하고자 하는 방법이 적용되었다. 그러나 막대한 시설비 및 유지 관리비와 더불어 농축수 발생 등의 운영상 문제점으로 인해 많은 어려움을 겪게 되었다.

1990년대 후반에서 2000년대로 접어들 무렵 최종 배출수를 고도 처리하여 재이용하는 기존의 방법에서 벗어나 공정 내에서 용수를 절약함과 동시에 생산 공정의 과학적이고 체계적인 분석을 통하여 용수의 이용률을 극대화한 후 배출함으로써 용수 이용의 효율성을 높이고자 하는 공정 용수 재이용 기술(워터핀치기술)이 많은 관심을 받고 있고 이미 국내 외에 도입되어 적용되기 시작하였다.^{3~7)} 그 동안 용수 재이용 기술은 석유화학,³⁾ 제지,⁵⁾ 회분식 공정,⁶⁾ 철강공정⁷⁾ 같은 산업 전반에 걸쳐 15~40%의 원수와 20~50%의 폐수를 절약함으로써 성공적으로 적용 되어져 왔다. 본 총설에서는 공정 설계 단계에서 병목을 찾아 용수 재이용을 최대화하는 워터핀치 및 수학적 최적화 기법을 소개하고 고분자 및 석유화학공정의 적용사례, 그리고 에너지 및 용수 재이용설계와 생산산업단지 같은 최신 연구동향을 기술하고자 한다.

2. 용수 재이용의 기본 개념

용수 재이용을 위한 출발점은 모든 공정들이 용수로 채워진 용수 재이용 네트워크에서 시작한다. Fig. 2(a)는 초기에 고려된 세 가지 공정으로 이루어진 초기 용수 흐름도를 나타낸다. 일반적으로 분리 공정에서 모든 유출 흐름들은 유출흐름처리장치에서 동시에 모아지고 처리된다. 만약 도시와 공장의 배출용수를 즉각적으로 처리하는 폐수처리시설에서 사용된다면 처리장은 현장에 사용되거나 하수시스템으로의

유출이 가능하다. 이러한 공정에서 발생하는 용수 및 폐수를 이용하는 방식은 재이용(reuse), 재생후 재이용(regeneration reuse), 재생후 순환 재이용(regeneration recycle), 그리고 분산 폐수처리(distributed effluent treatment)등으로 구분된다.⁷⁾

첫 번째 방법으로 용수 재이용은 Fig. 2(b)와 같이 한 공정의 유출수를 다른 공정의 유입수로서 재이용하는 개념이다. 이 재이용 방식은 단지 공정과 다른 공정을 연결하는 배관 작업을 필요로 한다. Fig. 2(b)는 Fig. 2(a)의 공정1에 대한 유입수로 공정 2의 유출용수를 재사용함으로써 최적화한 것이다. 두 번째 방법은 재생(regeneration)후 직접 재활용(direct reuse) 또는 순환 재활용(recycle)방법이다. 만일 공정 2의 유출용수에 대해서, 만약 단순히 온도만 증가하고, 오염물질이 공정에 첨가되지 않는다면, 간접냉각 운전으로부터 공정2의 유출용수를 재활용 할 수 있다. 이러한 재활용수는 다른 공정에 쉽게 사용될 수 있다. 이러한 재활용, 또는 재생후 재활용을 이용한 용수 재이용은 배관투자를 제외한 특별한 비용 투자 없이 공정에서 용수 소비를 줄이는데 아주 유용하다.

산업체에서 용수 및 폐수량을 최소화하기 위해 최적 용수 재이용은 기술적 가능성과 경제적 이익이라는 두 가지 중요한 기준을 만족해야 한다. 기술적 가능성 분석에서는 오염물질의 제거 및 분해를 원하는 정도까지 해 낼 후보 처리들의 성능과, 각 공정의 처리효율 같은 영역을 고려하게 된다. 경제성 분석에서는 투자비용, 운영유지비, 용수 절감비용, 관련 에너지와 원자재 절약을 포함한 세분화된 문제에 대해 최적 재이용 네트워크를 구축하게 된다. 기술적 가능성 분석은 다음 두 단계를 통해서 이루어진다. 첫째, 의미를 두어야 할

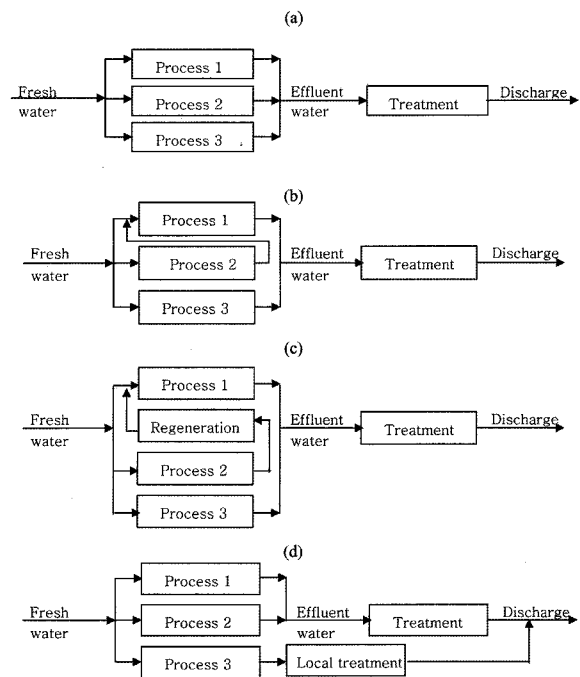


Fig. 2. (a) Initial water network using fresh water, (b) Water network through direct re-use, (c) Water network through regeneration, (d) Water network through a distributed effluent treatment.

재이용 기회는 적합한 용수를 얻기 위해 재생된 유출수가 다른 공정의 유입수로서 만족되어야 하는 것(Fig. 2(c)), 즉 결국 다른 공정 자체의 유입수로 사용될 수 있어야 하는 것이다. 이것은 재생 단계에서 재생된 용수의 질을 만족하기 위해 재생처리시설의 제거비율로 확인된다. 둘째, 동시에 모든 공정의 유출수를 재이용 대상으로 취급할 것인가에 대한 기술적 평가가 선행 되어야 한다. 실제로, 하나의 공정 유출수로 인해 종말 폐수처리장의 기능을 저해하는 오염물질이 존재 할 수도 있다. 예를 들어 고농도의 황산염은 생물학적 폐수처리장에서 미생물의 질화 작용을 방해한다. 이러한 특수한 오염물질은 Fig. 2(d)와 같이 분산폐수처리 개념을 통해 해당 공정에서 특수 설비를 통해 바로 처리하면 최종 폐수처리시설의 효율을 크게 증가시킬 수 있다. 이러한 분산 폐수처리는 현장에서 용수 재이용의 성공 확률을 크게 증가시키고 나중에 폐수처리장의 확장에 유용하게 사용될 수 있는 실용적인 연구의 기초로 사용될 수 있다.⁴⁾ 이러한 용수 재이용의 기술적/경제적 분석을 위해 기존 용수 네트워크를 분석하고 최적 재이용을 가능케 하는 체계적인 기술이 필요하다.

3. 워터핀치 이론

공정 내에서 용수를 재사용하기 위해서는 용수 네트워크를 분석하고 용수 소비를 감소시키기 위해 워터핀치(water pinch)이라 불리는 기술이 적용된다. 워터핀치 기법과 관련된 국내의 용수 재이용 현황에 대해 살펴보면, 기술적 측면에서 용수의 효율적 이용 방안으로 워터핀치기법이 적용되기 시작한 것은 불과 10여 년 전으로 특히 유럽지역을 중심으로 활발한 연구 및 적용이 이루어져 왔다.⁸⁻¹⁹⁾ 학계에서의 이론적 정립을 현장으로의 적용을 추진한 것은 영국의 Linhoff March 사이다. Linhoff March 자료에 의하면 용수 최적화 프로젝트를 수행한 기업의 수가 벌써 수십 개가 넘는다고 보고하고 있으며, 대부분 30% 가까운 용수를 절감할 수 있었다고 보고하고 있다.⁸⁾

핀치기술(heat pinch technology)은 초기에 영국 맨체스터 대학 공정통합학과에서 열교환기망 합성을 위해 개발되었다.⁹⁾ 그 이후 El-Halwagi,¹⁰⁻¹²⁾ Wang¹³⁻¹⁶⁾ 그리고 Dunn¹⁷⁻¹⁹⁾ 등이 원래 열교환망 구축에 사용되던 기술을 다르게 적용하여 용수재이용의 이론적 기틀을 마련하였고, 이러한 개발과정 이후 UMIST와 Linhoff March에 의해 본격적인 워터핀치 기술로 개발되었다. Linhoff March사의 접근 방식은 특허를 받아 현재 WaterPinchTM이라는 상품명으로 판매되고 있다.⁸⁾ 한편 수학적 최적화 기법을 통한 용수재이용 기법은 Aspen Technology에서 Aspen WaterTM이라는 상품명으로 상용화되고 있다.^{20,21)} 현재 워터핀치기법에 관한 대표적인 연구 기관으로는 영국의 UMIST, 미국의 Virginia 공대, 독일의 RWTH Aachen, 남아프리카공화국의 Durban-Westville 대학, 포르투갈의 Superior Tecnico 연구소 등이 있으며, 이들 연구 기관의 경우 UMIST를 제외하고는 대부분 용수 이용의 최적화 및 최소화를 위하여 수학적인 해석을 위주로 하고 있고, UMIST

Table 1. Wastewater savings by water-reusing projects²⁰⁾

Company	Process/Industry	Location	WW Flow Reduction,%
Confidential	Chemical & Fibres	Germany	25
Cerestar	Corn processing	UK	25
Gulf Oil	Oil refining	UK	30
Monsanto	Chemicals	UK	40
Parengo	Paper mill	Netherlands	20
Sasol	Coal chemicals	South Africa	50
Unilever	Polymers(batch)	UK	60
US Air Force	Military Base	USA	40
Confidential	Oil refining	Netherlands	40
Confidential	Chemicals	USA	40
Confidential	Chemicals & Fibres	USA	25

의 경우 Linhoff March사와 같이 공동으로 연구 및 현장 적용을 위한 연구 및 적용 실적을 다수 확보하고 있는 것으로 알려져 있다. Table 1은 공정용수 재이용의 대표적인 현장 적용 결과를 나타낸다.²²⁾

워터핀치기술의 기본 모토는 다음과 같다. 즉 오염물질을 최소화하는 가장 좋은 방법은 오염물질의 사후처리방식(end-of-pipe treatment)보다는 공정 내(in-process)에서 용수를 절약함과 동시에 용수의 이용률을 극대화한 후 최종 방류함으로써 용수 이용의 효율성을 높이고자 하는 것이다(The best way to minimize pollution is not to produce it, therefore, find in-process solutions, before focussing on the 'end of pipe').¹³⁾ 실제 산업에서는 하나의 공정에서 용수 최적화가 아니라 전체 산업공정에서 사용되는 용수 사용량을 최소화 시킬 필요가 있고 이 워터핀치 분석기법은 그래프에 기초한 방법으로 설명이 될 수 있다.

워터핀치는 기존의 용수 수지도(water balance)를 조사한 후 용수의 오염 물질의 흐름에 기초하여 각 공정의 단계적인 공정마다 오염물의 농도변화에서 시작한다. Table 2와 같은 용수 수지도를 통해 각 공정에서 사용되는 공정수의 유량과 함께 주요 오염물로 지정된 각 물질이 공정내에 얼마나 존재하여 유입 및 유출되는 것인가를 알 수 있다. 이러한 분석을 통하여 Fig. 3과 같이 전체 공정에서 오염물의 농도에 따른 흐름도인 water composite curve 그래프로 용수 수지도를 표시한다. 용수를 공급하는 흐름(water source)와 용수가 필요한 공정(water sink) 사이의 하나 또는 주요 대상이 되는 오염물을 선정하여 Fig. 3과 같은 각 공정마다 통합 청정도(total purity profiles)를 그림으로써 시작된다. 통합 청정도 그래프의 x축은 용수 유량(water flowrate, quantity)을 나타내고 y축은 수질(water purity, quality)을 나타내며 최소오염 농도에 대한 상대치를 표시한다. 여기서 y축은 높은 청정도(낮은 오염도)에서 낮은 청정도(높은 오염도)로 표시한다. Fig. 3에서 보면 용수(freshwater)는 청정도가 높은 수치를 나타내는 용수 흐름도로 오염물에 의한 오염이 거의 없는 상태를 말한다. Fig. 3의 그래프에서 깨끗한 용수를 기준으로 하

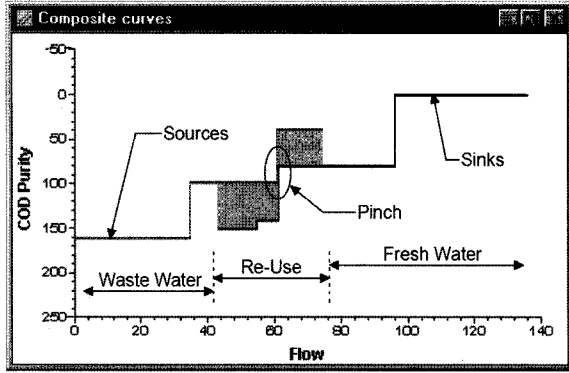


Fig. 3. Purity profiles of source and sink composite curves.²²⁾

여 오염물이 함유되는 농도변화에 맞추어 용수에서부터 폐수까지 공정을 통과할 때 마다 변화되는 공정수의 농도변화를 세밀히 분석할 수 있다. 즉, 공정이 운전되면서(그래프의 우측에서 좌측으로 갈수록) water source는 각각의 공정을 지날 때마다 오염물의 이동현상에 의해서 water sink로 오염물이 이동하는 것을 나타내며 water source의 청정도는 점점 낮은 수치를 나타내게 된다. 이것은 공정수의 흐름에 있어서 water source와 water sink의 관계를 정리하는 것으로 오염물의 이동에 의해서 용수의 오염도는 증가한다. 이 관계에서 각각의 공정의 오염농도는 공정의 제한 유입농도를 설정할 수 있는 자료로서 활용될 수 있다.

이 청정도 그래프에서 water source profile과 water sink profile이 수평으로 overlap되는 면적은 용수 재이용이 가능한 범위를 나타내며 두 그래프가 만나는 점을 핀치점(pinch point)라 정의하고 용수 재이용은 이 핀치점에 의해 제한된다. 핀치점 우측에서 water source profile이 water sink profile과 중복되지 않은 면적이 필요한 최소용수필요량(minimum freshwater consumption)이고 핀치점 좌측에서 water sink profile이 water source profile과 중복되지 않은 면적이 최소폐수배출량(minimum wastewater discharge)으로 정의한다. 이 핀치점을 기준으로 공정에서 필요한 용수공급량과 폐수 배출량이 계산될 수 있다. 따라서 Fig. 3의 빗금 친 water source profile과 water sink profile이 겹치는 부분내에서 용수재이용을 최대화 하는 것은 곧 최소용수 및 최소 폐수 배출이 가능하게 된다. 원칙적으로 이러한 청정도 그래프는 각각의 주요 오염물질(contaminant)에 대하여 분석될 수 있고 Fig. 3의 water source와 water sink사이의 전체적인 분석을 통해서 핀치점을 찾아내고 여기서 성립되는 제한 조건에 의해 용수의 재이용 양과 그 대상공정을 효과적으로 찾아낼 수 있는 방법이다. 최종적으로 모든 오염물질에 공통적으로 유용한 용수 재이용 네트워크를 구성하게 된다.²²⁾

워터핀치분석 후 다음 단계는 전체 공정을 워터핀치분석에 적용할 수 있도록 농도에 따른 공정들 사이의 용수 재이용을 가능케 하는 공정간 재이용 네트워크를 합성하는 것이다. 공정 합성은 공정간의 오염물의 농도나 종류에 따라서 합성을 하여 간략한 블록모식도로 표시할 수 있도록 하는 합성과정이다. 먼저 워터핀치분석을 통해 공정수의 오염물과 종류

를 파악한 후에 그려지는 composite curve를 통해서 오염물의 흐름을 알 수 있다. 오염물의 이동현황에 대해서 파악하면 공정 간에 이동되는 오염물에 따라서 공정 통합(process integration)을 수행하는 것이다. 이러한 방식이 간단하지만, 워터핀치는 많은 흐름과 다양한 오염물질에 의해 매우 복잡해질 수 있다. 일반적으로 이 과정은 한 번에 하나의 오염물에 대한 각각의 합성이 필요하고 다성분 오염물질을 고려할 때는 각각의 분석 결과는 전체 최적 해를 구하기 위하여 종합되어야 한다.

3.1. 워터핀치기법의 실제 적용 순서

워터핀치 기법의 실제 적용은 다음과 같은 단계로 나누어 볼 수 있다.

- 1) 유틸리티 시설을 포함한 물이 사용되는 모든 공정과 폐수나 기타 공정수가 발생하는 지점들이 표시되어 있는 전체 용수 사용 시스템에 대한 용수 흐름도를 작성한다. 용수의 물질수지를 설정하며 source와 sink가 정의되어야 한다.
- 2) 핵심오염물질을 선정한다. 오염물질에는 보통 부유물질, 전도도, 온도, pH 등이 포함된다. 주요 대상 공정에서 제한요인이 되는 오염물을 선정하고 제한 농도치를 설정하여야 한다. sink에 대해서는 최대 허용량을 정하고 source에 대해서는 최소량을 지정한다.
- 3) 상용화된 소프트웨어나 수학적 최적화 방법을 사용해서 source와 sink사이의 최적의 용수 공급상태를 분석하며 이를 위해서 다량의 오염물질을 고려한 핀치 분석을 수행한다. 초기 설계된 용수망에서 현장의 공정변화나 최적 지점의 변화에 따라서 오염물의 추가가 고려되어야 하며 공정개선이나 재이용의 조건이나 핀치점을 포함하여야 한다.
- 4) 마지막 단계에서는 실제 공정에 적용 가능하도록 재이용망의 설계를 수정한다.

3.2. 워터핀치 분석과 용수 재이용 설계의 간단한 예제

워터핀치방법을 설명할 목적으로 다음 Fig. 4와 같이 간단한 네 개의 공정단위로 구성된 생산 공정에서 핀치분석의 경우를 고려해보자. 문제를 단순화하기 위해 한가지의 오염물질만 고려하였고 Table 2는 초기입구농도와 출구농도 그리고 실제 유량을 나타낸 용수수지를 나타낸다. 전체 공정은 295 ppm의 농도로 지하수의 순 소비량 200 t/h와 200 t/h의 유출량을 가진다. 59 kg/h의 전체 오염부하는 하수시스템으로 유출된다.

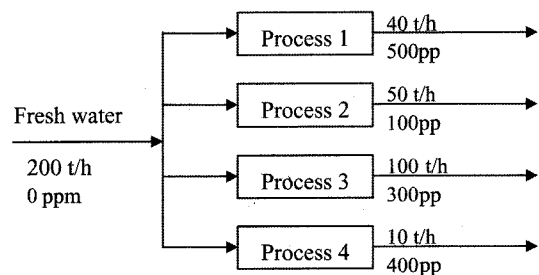


Fig. 4. Example of four water utilizing processes.

Table 2. Process contaminants of four water utilizing processes⁷⁾

	Contaminant load [kg/h]	C in [ppm]	C out [ppm]	Actual flowrate [t/h]
process 1	2	0	50	40
process 2	5	0	100	50
process 3	30	0	300	100
process 4	4	0	400	10
Overall	41			200

최소용수공급량(minimum fresh flowrate)을 계산하기 위한 워터핀치는 Fig. 5의 한계합성곡선(limiting composite curve)에서 시작한다. 이러한 목적으로 모든 독립된 한계용수프로파일들은 x축의 농도 대 y축의 전달된 오염물질의 농도의 도표로 표현된다. Fig. 4로부터 각 공정의 유출 농도인 네 개의 농도 구간이 분리되는 것이 관측된다(0~50; 50~100; 100~400; 400~800). 각각의 농도 구간에서 선은 가장 낮은 질량 흐름(mass flow)과 가장 낮은 농도를 가지는 점과 가장 높은 질량 흐름과 가장 높은 농도를 가지는 점으로 그려진다. 정해진 농도 구간에서의 각 점을 연결함으로써 Fig. 5의 한계합성곡선(limiting composite curve)이 얻어진다. 이 한계합성곡선에서 전체 공정에 필요한 최소용수유량은 한계합성곡선과 총괄용수공급선을 일치시켜 만나는 점을 찾는다. 즉, 총괄용수공급선의 입구농도는 0이라고 가정하고 전체 공급선과 한계합성곡선이 만나는 중간 점, 즉 핀치점(pinch point)에서 총괄용수공급선과 한계 합성 곡선과 만난다. 이 핀치점에서 총괄용수공급선의 역수가 이 공정에서 필요한 최소용수공급량이 된다. 이 예제의 경우 최소 용수 공급량이 90 t/h와 같아진다. 또한 Fig. 5에서 보듯이 이 핀치점에서 최소 용수공급량을 공급했을 경우 네 공정의 혼합 유출농도는 456 ppm이 됨을 알 수 있다.

Fig. 6는 핀치점에 의해 설정된 90 t/h인 유량을 얻기 위한 가능한 재이용 용수망을 나타낸다. Fig. 6에서 보는 바와 같이, 공정2의 배출수중 일부는 재사용되어 공정2로 다시 공급된다. 이러한 내부 재순환은 공정의 재 이용의 경우 원하지 않는 요소들이 모이는 것을 방지하기 위해 아주 작은 비율로 최소화시키나 없애야 한다. 여기서 핀치점은 용수사용을 보다 최소화하는 한계점을 나타낸다. 용수 사용을 더

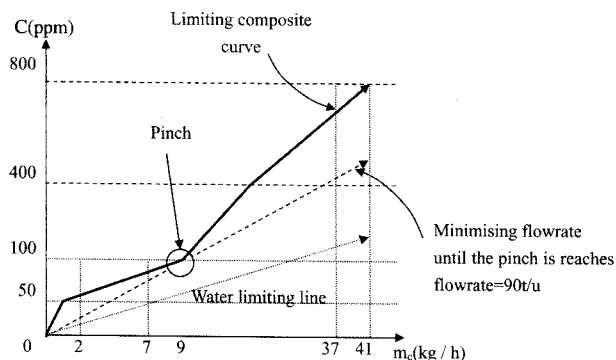


Fig. 5. The limiting composite curve and water limiting line for the four processes.

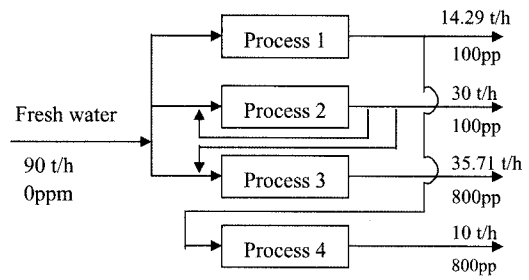


Fig. 6. Optimized water-reusing network.

줄이기 위해, 즉 전체 공급선의 기울기를 증가시키기 위해 핀치점 아래쪽의 공정을 바로 밑에 위치시킬 필요가 있다. 단, 핀치점 아래의 공정만을 고려한다는 점을 주의해야 한다. 이러한 공정에서의 최대농도제약조건이 너무 지나치게 설정되는 지도 평가해야 한다. 이러한 재이용 네트워크는 많은 가능한 용수 재이용 네트워크 중 하나일 뿐이다. 실제로 각각의 가능한 용수망은 경제성 및 기술적 적용 가능성으로 최종적으로 결정된다. 이온교환수지, 폐수처리장비 같은 재생 기술 적용은 보다 더 용수사용을 더 줄이기 위한 용수 및 폐수최소화의 가능한 기술이 된다.

4. 수학적 최적화를 이용한 용수 재이용 네트워크 설계

앞에서 기술한 워터핀치 방법은 근본적으로 경험에 의한 것이고 워터핀치 기술은 여러 가지 오염물질을 다루기가 어렵다. 본 장에서는 용수 재이용 네트워크를 분석, 합성, 개선, 설계를 위한 수학적 최적화 기반 접근법을 소개하고자 한다(Yoo와의 참고문헌 참조).²⁵⁾ 기본적으로 한가지 세척공정이나 세정공정에 대한 용수 재이용 방법을 모델링 해보고 여러 가지의 공정용수 재이용 시스템이 결합된 온구조(superstructure) 모델을 적용한다. 본 논문에서는 대부분 Yang 등²³⁾과 Bagajewicz²⁴⁾의 접근방식을 따른다. 구축된 모델은 재생 공정, 유량제한, 다성분 오염물질을 포함하는 비선형 모델로 구성이 가능하고 비선형 프로그래밍 방법에 의해 용수최소화의 목적함수 해를 구함으로써 재이용 망이 설계될 수 있다. 수학적 최적화 방법은 참고문헌²⁵⁾에 잘 기술되어 있다.

4.1. 용수 재이용 네트워크의 수학적 모델링 및 최적화

보통의 공정에는 많은 생산 라인이 있고 각 라인에는 세척과 세정 단계가 많이 있다. 전형적인 세척/세정 공정에서의 용수 재이용 시스템이 Fig. 7에 나타나 있다. 여기서 물은 M 가지 타입의 오염물질을 제거하는데 사용되고 있다. 시스템의 유입에는 유량 W^f 인 용수가 두 가지 타입의 재순환 즉, 내부 재순환과 외부 재순환 흐름과 섞인다. 내부 재순환은 같은 공정의 출구에서부터 유량(W^{ir}), 농도(C_i^{out})으로 나오고 외부재순환은 다른 공정의 출구에서 유량(W^{er}), 농도(C_i^{in})으로 온다($i=1,2,\dots,M$). 이렇게 혼합된 흐름은 유량(W^{in}), 농도(C_i^{in})으로 공정에 유입된다. 세척/세정 공정을 거쳐서 q_i 만큼의 오염물질을 제거한 흐름의 농도는 C_i^{out} 으로 증가된다.^{23,24)}

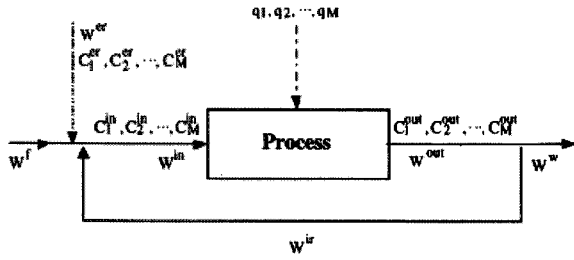


Fig. 7. Water-reusing systems for a single cleaning or rinsing process.²³⁾

용수 재이용 네트워크 시스템은 기본적으로 용수와 폐수를 여러 가지 방법으로 분배하는 네트워크이다. 폐수를 최소화 하기 위해서는 용수 재이용 네트워크를 최적으로 디자인 하는 것이 중요하다. Fig. 8은 가능한 N 개의 기본 용수 재이용 시스템을 나타내며 각각의 시스템에서 배출되는 물의 흐름은 부분적으로 또는 전체가 다른 시스템에 재이용 될 수 있다. 이것은 가능한 모든 재이용 네트워크를 포함하는 운구조이다. 수학적 모델에서 화학반응은 일어나지 않고 모든 용수의 흐름은 혼합이 가능하다고 가정한다. 물론 입구와 출구에서 오염물질 농도는 허용범위를 벗어나지 않아야 하며, 물질전달의 최소 구동력은 유지되어야 한다.

N개의 하위공정(Sub-process)로 이루어진 세척 또는 세정 공정에 대해서 M가지의 오염물질(\$q_{ij}, i \in N; j \in M\$)이 물을 통해서 제거되어야 한다. 하위공정 \$P_i\$에서 물의 흐름에서 최대 허용되는 오염 농도가(\$C_{i,j}^{in}\$)max, (\$C_{i,j}^{out}\$)max로 주어져 있다. 여기서 공정 설계의 목적은 공정용수 사용을 최소화 하는 것이고, 용수 사용을 최소화 하는 것은 폐수 재생을 최소화 하

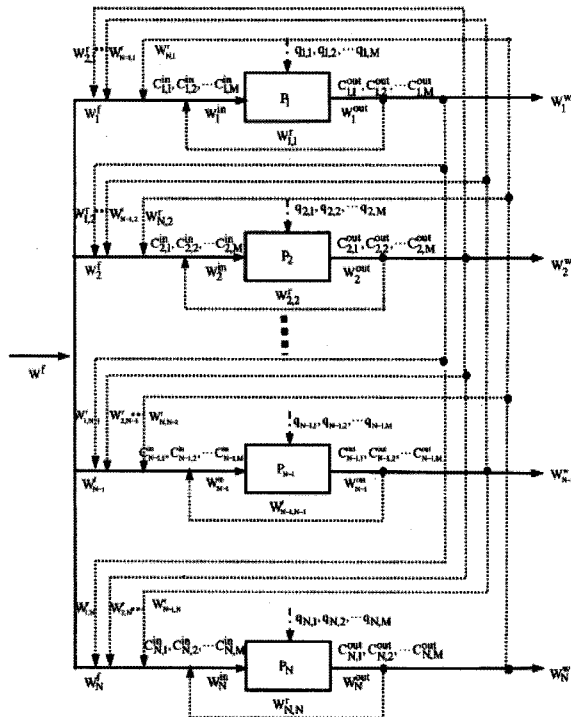


Fig. 8. Superstructure of a wastewater reuse network.²³⁾

는 것과 동등하다. 즉 공정의 원래 목적을 만족하면서 최소의 용수(\$W^f\$)를 사용할 수 있는 최적의 용수 재이용 네트워크를 결정해야 한다. 이러한 최적화 문제는 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$\text{Min } \sum_{i=1}^N W_i^f \tag{1}$$

제약조건:

(i) 흐름 혼합에서의 물질수지

$$W_i^m = W_i^f + \sum_{j=1}^N W_{j,i}^r, \quad i = 1, 2, \dots, N \tag{2}$$

(ii) 흐름 분기에서의 물질수지

$$W_i^{out} = W_i^w + \sum_{j=1}^N W_{i,j}^r, \quad i = 1, 2, \dots, N \tag{3}$$

(iii) 용수 재이용에서 각 성분의 물질수지

$$C_{i,k}^{in} W_i^m = \sum_{j=1}^N C_{j,k}^{out} W_{j,i}^r, \quad i = 1, 2, \dots, N; k = 1, 2, \dots, M \tag{4}$$

$$q_{i,k} = W_i^{out} C_{i,k}^{out} - W_i^{in} C_{i,k}^{in}, \quad i = 1, 2, \dots, N; k = 1, 2, \dots, M \tag{5}$$

(iv) 공정과 환경에서의 제약조건

$$(C_{i,k}^{out})_{max} \geq C_{i,k}^{out} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, N; k = 1, 2, \dots, M \tag{6}$$

$$(C_{i,k}^{in})_{max} \geq C_{i,k}^{in} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, N; k = 1, 2, \dots, M \tag{7}$$

$$W_i^m, W_i^f \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, N \tag{8}$$

$$W_{i,j}^r \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, N \tag{9}$$

여기서 \$C_{i,max}^{in}\$와 \$C_{i,max}^{out}\$는 공정의 입구와 출구에서 허용되는 오염물질의 최대 농도이다. 최대 농도는 보통 공정의 흐름과 물의 흐름에서 물질 전달의 최소 구동력을 바탕으로 결정된다. 물의 양에 비해 오염물질의 양이 무시할 만하므로 물의 흐름은 입구와 출구에서 같은 값으로 유지된다는 가정이 타당하다(즉, \$W_i^{in} = W_i^{out}\$). 위의 모델에서 하첨자가 \$i=j\$일 경우 \$W_{i,j}^r\$은 내부 재순환 흐름이고, 그렇지 않을 경우는 외부 재순환 흐름이다.^{23,25)}

용수 재이용 네트워크에서의 비용은 펌프와 파이프에 한하지만 이 비용은 거의 모든 경우에 공장 운용 비용에 비하면 무시할 만하다. 시스템 개발에서 불필요한 용수 재이용은 확실히 제거되어야 한다. 그리고 수학적 방법으로 접근한 최적화 문제는 다른 흐름에 비하여 매우 적은 유량의 흐름을 최적해로 포함시킬 수 있다는 점에 유의해야 한다. 따라서 이러한 부분은 실제로 제거되어야 하므로 다음과 같은 제약조건을 추가한다.

$$W_{i,j}^r = 0, \text{ if } W_{i,j}^r \leq aW_i^{out} \text{ or } W_{i,j}^r \leq bW_i^{in} \quad (10)$$

여기서 a와 b는 설계자가 결정하는 분율이다. 여기서 제시된 최적화 문제는 공정의 형태에 따라 비선형 최적화(non-linear programming)나 혼합 정수 비선형 최적화(mixed integer nonlinear programming)같은 여러 가지 비선형방법을 이용해서 풀 수 있다. 비선형 문제에서는 전역 최적 해를 보장할 수 없으므로 초기치를 잘 선택하여 좋은 결과를 얻어야 한다.^{23,25)}

4.2. 수학적 최적화 방법의 응용

식 (1)~(9)로 표현된 시스템의 모델은 다양한 용수 재이용 네트워크 디자인에 성공적으로 사용될 수 있다. 이러한 수학적 최적화 방법의 효율성을 예측하기 위하여 다음과 같은 제지공장의 간단한 예제를 여기서 다루어 본다. 펄프공장과 제지공장은 용수와 폐수 재생기의 주된 소비 고객이다. 제지공정은 엄청난 양의 물을 사용하여 종이로부터 오염물질을 제거한다. 여기서는 제지공정에서 주된 네 가지 공정을 고려하고 총부유고형물(total suspended solid, TSS)를 종이 질에 주된 영향을 미치는 오염원으로 정의한다. 본 예제는 Yang등²³⁾ 의해 제시된 예제로 실제 제지 공장의 간략화된 사례로서 Table 3에 입·출구에서 농도의 허용치, 샤워 공정에서 제거되어야 할 TSS양을 표시했다. 이 네트워크의 온 구조는 Fig. 8에서 4개의 하위공정(N=4)이 있으며 오염물질은 TSS 한 가지이다(M=1). 식 (1)~(10)로 표현된 최적화 모델은 가장 바람직한 용수 재이용 방법을 결정하는 것이다. 비선형 최적화 방법을 이용한 이 용수재이용 네트워크의 최적해는 Fig. 9에 나타나있다. P₁(Head box)와 P₄(Trim squirt)에서 사용되었던 용수는 완전히 재사용되고 P₂(Breast roll process)에서 사용된 용수의 84%도 재사용된다. 이 세 가지 흐름은 용수와 섞여서 P₃(Knock off process)에 진입한다. 이 네트워크는 용수 146.2 t/hr를 사용한다. Table 4에 최적해와 기본 네트워크에서의 값들을 비교하였다. 공정의 원래 목적인 세정의 목적을 달성하면서도 전체 용수 사용은 21.4%가 절감되었다는 것을 알 수 있다.²³⁾

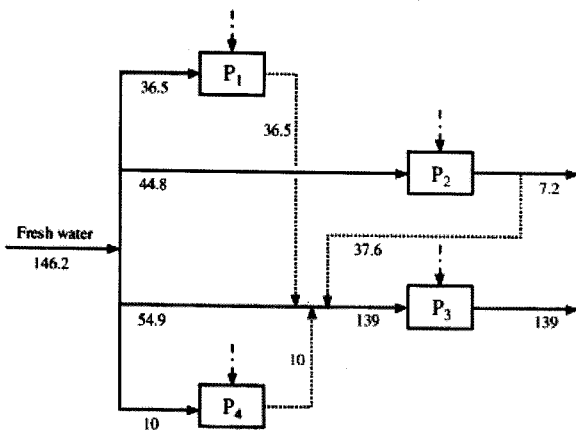


Fig. 9. Optimal reuse design in a paper making process.²³⁾

Table 3. Maximum permissible concentrations and quantity of total suspended solids for a papermaking process²³⁾

Process	C ⁱⁿ _{max} (ppm)	C ^{out} _{max} (ppm)	flowrate q (kg/h)
Head box(P ₁)	0	200	7,000
Breast roll(P ₂)	100	500	22,400
Knockoff(P ₃)	200	650	62,550
Trim squirt(P ₄)	0	200	2,000

Table 4. Comparison of fresh water consumption with and without water reuse²³⁾

Process	Fresh water(t/h)		
	Symbol	w/o reuse	Optimal
Head box(P ₁)	W ₁ ^f	35.0	36.5
Breast roll(P ₂)	W ₂ ^f	44.8	44.8
Knockoff(P ₃)	W ₃ ^f	96.2	54.9
Trim squirt(P ₄)	W ₄ ^f	10.0	10.0
Total fresh water	Σ _{i=1} ⁴ W _i ^f	186.0	146.2
Water reduction	-	-	21.4%

4.3. 워터핀치 방법과 수학적 최적화 방식의 비교

여기서는 수학적 최적화와 워터핀치 기술을 장단점을 비교하며 각 방법은 용수이용 공정 유형에 따라 각 방법에 대해 장점을 가지고 있고 많은 경우에 두 가지 방법은 같은 결과를 제시한다. 워터핀치는 최소용수유량을 확인하고 이 유량을 맞추기 위해 재이용 망을 합성하는 단계적 방식이다. 요약하면 다음과 같다. 첫째, 핀치기술을 이용하여 최소 용수 유량을 확인한다. 둘째, 예비 용수재이용 네트워크를 구축한다. 셋째, 재이용 수를 줄이면서 경험적인 방법을 통해 예비용수재이용 망을 단순화한다. 마지막으로 재이용이 제한된 지역을 확인하고 최소용수유량을 더 줄이기 위해 공정변화를 제안한다. 이 방법은 운전의 병목을 발견하고 기존의 용수이용 망을 개선할 때 효과적인 방법이다. 따라서 핀치기술에 기반한 방법은 용수 시스템의 물리적인 통찰과 설계특징을 제공하고 진정한 최소 용수량에 대한 해를 보장한다. 반면에 이러한 방법은 커다란 문제, 다양한 오염물질, 다양한 운전제약 조건의 경우에 적합하지 않는 단점이 있다.^{2,25)}

수학적 최적화 방법은 엔지니어가 미리 설정한 제약조건들에 따라 최소용수유량을 구한다. 워터핀치 방법과 비교해서 수학적 최적화 방법은 용수이용 망이 어떻게 구성되어 있다는 이해가 없는 “Black Box” 방식이다. 그러나 커다란 다양한 오염물질문제의 경우 수학적 최적화 방법이 워터핀치 방법에 비해 장점을 지닌다. 수학적 최적화 방법은 용수는 모든 다른 공정으로 사용할 수 있다는 용수이용 망을 가지고 시작한다. 최적용수이용 망 배치에 도달하기 위해 바람직하지 못하거나 실행 불가능한 용수이용은 제거된다. 수학적 최적화는 용수 재이용공정에 많은 수의 모델선택이 가능하다. 예를 들어 재이용, 유량 변화, 고정 유량등에 대한 모델을 개발할 수 있다. 또한 열 교환기비용, 배관 비용 등의 투자비용과 운전비용 등의 비용을 목적함수에 포함하는 장점을 가진

다. 수학적 최적화의 경우 다양한 민감도 분석이 가능하다는 장점을 가진다. 그러나 수학적 최적화 방법의 경우 공정 변화나 핀치 위치 등에 대한 어떠한 통찰도 제공하지 않는 단점이 있다. 또한 비선형 최적화 문제에 전역해에 대한 보장을 해주지 않고 국소해와 비선형 최적화 알고리즘에서 수렴하지 않는 단점을 가지고 있다. 이러한 비선형 문제의 경우 몇 가지 중요 변수에 초기값이 중요한 역할을 한다. 이러한 단점의 보완으로 재이용 망에 핀치기술과 수학적 최적화 방법의 장점을 보완한 방법을 생각할 수 있다. 먼저 작은 하위 네트워크를 확인하기 위해 다성분 오염물질 각각에 대해 핀치기술을 적용하고 이러한 작은 하위 네트워크를 결합하여 모든 오염물질에 환경 규제치를 충족하는 통합 망을 만든다. 그 후에 핀치기술에 의해 제안된 설계를 초기값으로 하고 전역 최소유량을 제약조건으로 추가하여 수학적 최적화 방법을 적용하는 것이다.^{4,25)}

이러한 워터핀치와 수학적 최적화 방법은 서로의 단점을 보완하고 장점을 강화할 수 있다. 엔지니어나 사용자는 수학적 최적화와 워터핀치 방법을 용수망을 설계하는 동안 계속해서 서로 전환할 수 있다. 다성분이 많은 수의 공정을 가진 커다란 문제의 경우 수학적 모델로 먼저 시작하여 모델을 만들고 그 후에 단순화된 해에 대해 워터핀치 방법을 사용하여 시각화가 가능하다. 즉 두 가지 방법은 공학적 이해와 시각화를 개선하는 워터핀치 방법과 복잡한 문제를 다루는 것이 가능한 수학적 방법이 서로 상호 보완이 가능하다.²⁵⁾

5. 실제 적용사례

5.1. 워터핀치 과제 수행단계

Fig. 10은 실제 산업공정에서 워터핀치 과제 수행 시 필요한 과제 수행단계로 Aspen Water의 공정 모델링 및 합성기능을 사용하여 용수재이용 과제의 총괄적인 작업흐름을 예시하고 있다. 주요 단계는 공정 데이터 습득단계, 존재하는 공정모델의 개발단계, 합성제약조건규정단계, 재사용 기회를 확인용 개선선택사항 단계, 개선된 재모델링 설계 단계로 구성된다. 비용 분석 및 민감도 분석 등은 추가적으로 사용이 가능하다.^{20,21)}

어떤 프로젝트에서든 첫 번째 단계는 공정에 사용되는 모든 용수와 공급되는 유틸리티의 위치를 정하는 것이다. 그리고 공정에 사용되는 모든 용수의 유량은 알려져 있다. 가장 큰 유량의 10% 내의 정확도를 가지는 용수에 대한 수치를 세우는 것이 필요하다. 회분식 공정에 대해서는 실험을 통해서 대체적인 값을 정한다. 구조적인 접근에 있어서 다음 단계는 공정에 사용되는 모든 용수에 대해 정성적인 결정하는 것이다. 즉, 핵심 오염물질을 선택하는 것이다. 오염물질은 재사용하는 용수의 흐름에 방해가 되는 어떤 성질로써 정의되고, 오염물질에는 부유물질, 전도도, 온도, 산성도, pH 등이 포함된다. 목표 농도, 즉 각 하수시설들에 대해 허용되는 최대의 농도와 공급원(Source)들에 대한 실제적인 최소의 농도에 해당하는 설계 농도들이 선택되어야 한다. 모든 오염물

질이 알려지게 될 때, 모든 공급원들의 수질이 평가된다. 용수와 오염물의 수치를 확인한 후에, 워터핀치 분석을 시작하되 전 단계로부터 얻은 모든 정보가 포함된다. 마지막 단계로 비용분석과 민감도분석이 이루어진다. 공정들 사이의 거리, 저장조의 사용 가능한 공간, 재활 장치 등을 고려하여 기술적으로 가능한 시나리오들 중에서 선택하면, 필요한 투자, 운영 비용 등이 계산된다. 결론적으로, 워터핀치 방법의 사용으로 재활용을 포함한 용수의 사용을 최소화하는 공정을 어디에 설치해야 하는지를 얻을 수 있다.

5.2. 고분자 공장의 실제 사례²⁰⁾

여기서는 고분자 제조공정에 대한 실례 연구가 Aspen WaterTM에 의해 실행된 예를 보인다.²⁰⁾ Fig. 11은 공정의 개략도를 나타내며 공정에 사용되는 용수는 탈염수(de-mineralized water)와 강물수(river water circuit)로 구성된다. 탈염수는 반응기 같은 중요한 공정에 공급되고 강물수는 냉각탑, 세척 공정, 스크러버에 공급된다. 일반적으로 고분자 제조에 사용되는 공정들이 부유물을 포함하지 않는 고순도의 용수를 사용하는 용수망으로 이루어져 있다.

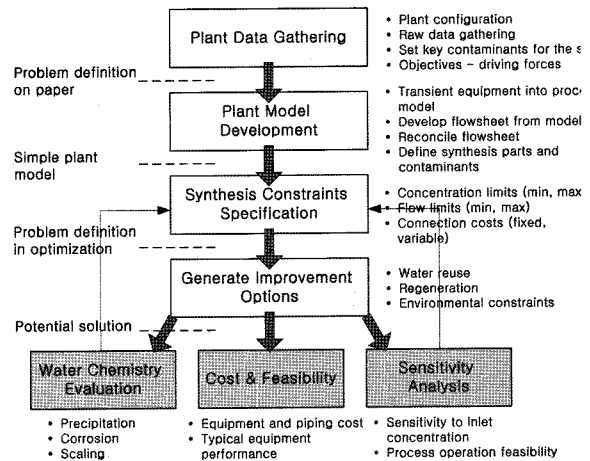


Fig. 10. The overall workflow for water pinch application in process industries.²⁰⁾

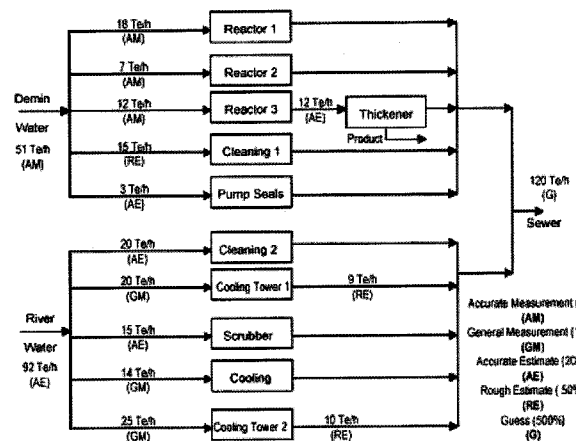


Fig. 11. The initial water design of de-mineralized(demin) water and river water circuits in a polymer process.²¹⁾

Table 5. Process in/out concentration in a polymer process²⁰⁾

	flowrate	solid	TOC	temp
	Ton/h	ppm	ppm	C
De-mineralized water	51	1	2	25
River	92	50	30	25
Effluent conc.		5000	5000	60
Reactor 1		5	5	50
Reactor 2		5	5	40
Reactor 3		5	5	40

현재 공정의 중요한 목적은 용수, 방출용수, 방출오염폐수의 운전비용과 관련된 용수를 줄이는 것이다. 이 과제에서 가능한 최대 투자비용은 25 cost unit(Cu)이다. 데이터와 관련된 비용과 장비는 다음과 같다.²²⁾

- demin water cost = 2Cost unit(Cu) per ton/h; River water = 0.1Cost unit(Cu) per ton/h
- 새로운 배관, 고정비 = 2 Cu, 변동비=0.02 Cu/ton/h
- 하수비용(sewer cost) = 1 Cu/Kg of solids(polymer), 0.2 Cu/ton/h of wastewater

여기서 cost unit(Cu)은 각 용수 가격 및 운전 배관비용을 통틀어 상대 비용개념으로 사용된다. 공정의 오염물질은 고형물(주로 고분자), TOC(공정과 용수중의 유기물질), 온도(주요 공정에서 온도 한계점)의 3가지 성분이다. 공정의 주요 오염물질은 한 공정에서 다른 공정으로 용수의 재사용을 제한하는 오염물질이다. 일반적으로 현장 과제의 단순화를 위해서 복잡하고 주요 오염물질의 수를 제한하는 것이 중요하다. Table 5는 고분자 공정에 대한 초기 용수 및 주요공정의 제약조건 및 수지식을 표현한다. 이 공정들에서 TOC/고형물의 경우 최대유입허용농도는 각각 5 ppm으로 맞추어져다. 전체의 용수 사용은 143 t/h이다. 최소화된 용수의 사용을 위해서는 우선 유입부에서 최대허용농도를 결정해야 한다. 유입부에서의 민감도로부터 반응기로 들어가는 유입농도의 증가에 따라 용수 사용에서의 가장 높은 절수량을 파악할 수 있다. 용수 재이용 시에는 각 그림이나 물질수지에는 각 반응기 및 장치는 단지 용수만을 사용하여야 한다.

최적 용수망 설계 목적은 공장의 용수망에 대해 용수관련 비용을 줄이기 위해 용수재이용 최대화와 용수재생의 조건을 체계적으로 확인하는 것이다. 기본적인 경우는 모든 탈염수를 사용하는 공정들이 부유물질 등을 포함하지 않는 고순도의 용수를 사용하는 용수망으로 이루어져 있다. 최적 용수망의 목적함수에는 용수 비용뿐만 아니라 배관비용, 재생비용 폐수배출비용을 고려할 수 있다. 본 연구에서 최적화된 용수망은 재생장비를 고려하지 않은 경우로 Table 6은 재이용 전후의 탈염수의 절수 그리고 전체비용 감소를 나타낸다. 최적화 결과 결과적인 배출농도는 최대허용농도 아래에 맞추어지며 5개의 배관 1개의 재순환으로서 용수 중 탈염수 소비는 51.1 t/hr에서 40.5 t/hr로 감소하고 재이용을 통해 전체비용(용수비용+폐수배출비용)은 164 Cu에서 116 Cu으로 30%가 감소되었음을 알 수 있다. 또한 높은 배관비용을 목적함수에 고려 시 용수 절감 비용은 감소하는 대신 배관 개수가 5개에서 2개로 준다.²⁰⁾

Table 6. Water and cost savings in a polymer process by optimal water reuse²⁰⁾

Fresh water	Water usage		Water reduction	Water usage		Cost reduction
	(before)	(after)		(before)	(after)	
De-mineralized water	51	40.5	51	164Cu	116Cu	30%
river	92	81.5	(m ³ /hr)			
	(m ³ /hr)	(m ³ /hr)				

한편 민감도 분석은 공정들의 낮아진 오염물질의 농도에 대한 전체 용수 비용 절감의 민감도를 나타내는 것으로 나타낸다. 예를 들어 반응기 2와 반응기 3의 고형물(Solid)의 도입 최대농도가 두 배로 완화했을 경우 엄격해진 도입 농도에 대한 비용감소 효과를 민감도 분석을 통하여 파악 할 수 있다. 이렇게 증가된 유입농도를 고려함으로써 최소화된 용수사용량과 최소화된 유출유량으로 인해 전체비용이 감소함을 그림을 통해 알 수 있다. 이런 민감도 분석으로 반응기의 도입에서 오염물질에 대한 한계도입농도를 완화시킴으로써 현재 공정에서 추가적으로 가능한 용수절감 가능성을 확인할 수 있다. 그러나 공정상 이유로 반응기 도입최대농도가 높아질 수 없는 경우도 있으며 또한 높아진 반응기 도입최대농도로 인해 전체의 배출농도가 높아 질 수 있다. 만약 이 농도가 하수시스템이나 지하수로의 유출로 너무 높아지게 된다면 유출량 처리가 필요하게 된다. 이러한 경우 전체의 배출흐름이나 분산 폐수처리 흐름에 의해 행하여 질 수 있고 그 가능성을 미리 예측할 수 있다. 하지만 전체 용수의 소비량을 보다 더 최소화하기 위하여 경제적으로 적합한 재생기술(regeneration unit)을 적용한다면 이러한 점은 우선적으로 평가되어야 한다.²⁵⁾

만일 재생 처리장비를 사용했을 경우의 용수 교환망의 경우 공정에서 배출된 높은 농도의 유출용수는 하수 시스템으로 버릴 수 없기 때문에 특별한 마지막 처리가 필요하다. 여기서 재생 기술을 용수 교환망에 포함시키는 경우 만약 처리비용이 더 높다면 재활용 되는 폐수의 양이 제한되거나 너무 비싼 기술일 경우에는 폐수처리를 하지 못할 것이며 이는 경제성 및 환경 평가(Life cycle assessment, LCA)를 기초로 하여 최적의 용수 교환망이 결정된다.

5.3. 국내 석유화학공정 사례연구³⁾

석유화학공정은 원유를 주원료로 일련의 화학반응을 거쳐 제품을 생산하는 산업으로 다량의 용수를 소비하는 용수 다 소비 산업중의 하나이다. 화학반응을 통해 제품의 원료를 생산하기 때문에 용수를 처리하는 과정도 복잡하며 열원 및 용수 사용량이 많은 편이다. 석유화학공정에 적용된 워터핀치 기법은 재이용을 하고자 하는 공정수를 대상 공정에서 요구하는 제한 농도값에 맞게 처리하여 재이용가능성을 분석하는 것을 주목표로 연구되었다. 따라서 재생장치의 선정과 효율성을 선정하는 과정이 매우 중요한 연구로 진행되었으며 실제 공정에 적용 가능한 처리시설의 효율성을 설정하기 위해서 전산모사 되었다. 석유화학공정은 오염물의 농도가 다양하기 때문에 하나의 오염물을 대상으로 처리효율을 산정할 수 없다.

따라서 물질수지를 작성하여 각각의 대상 오염물을 고려하여 적절한 재생장비(regeneration unit)를 지정해야 한다.³⁾

재이용수를 사용하게 되는 대상공정의 선정은 수질분석결과, 현장조사, 현장 운전자들과의 협의, 물질수지 분석결과, 용수 및 물질수지 등의 조사결과를 바탕으로 하여 재이용수가 생산되는 지점을 제한요건으로 하여 선정한다. 본 사례의 대상공정인 S-석유화학은 37000 t/d 이상의 용수를 사용하며 방류수 역시 10000 t/d에 가까운 다량의 공정수를 사용하는 석유화학공정이다. Fig. 12의 S-석유화학은 공정에 사용되는 용수의 종류는 여과수(YW), RO수(UW), 순수(PW), 2B2T처리수(TW)등으로 구분되며 재이용수의 오염물 상태를 총유기물질(total organic carbon, TOC), 전기전도도(conductivity)로 나타내어 전산모사 하였다. S-석유화학공정은 공장 자체의 규모가 워낙 크기 때문에 배관의 위치 선정이 대상공정의 선정과 더불어 재이용수 사용 라인 설계에 따르는 제한조건이 되고 있다. 각각의 공정에 따라서 배관의 길이와 그에 따르는 투자비용의 재설계가 요구된다. 따라서 전산모사에서는 이 같은 현장의 조건이 모두 반영되어야 적용 가능한 결과를 얻을 수 있다. 석유화학공정은 원수를 처리하는 과정이 복잡할 뿐만 아니라 처리되는 용수의 수질에 따라서도 각각의 공급량이 달라지게 된다. 또한 열원의 사용에 따라서 에너지의 소모가 많기 때문에 재이용수를 활용할 때 에너지의 사용에 따라서 비용절감의 효과가 커다란 영향을 미친다.³⁾ Table 7은 S-석유화학공장에 대해서 조사한 수질분석결과와 현장 분석결과를 바탕으로 하여 조사된 오염물에 대한 세부분석 결과이다. source와 sink로 구분된 각 공정들과 농도 변화에 따른 흐름을 구분하여 분석할 수 있으며 핀치분석에 필요한 다성분 오염물질에 따른 농도변화가 나타나 있다.³⁾

워터핀치기법이 적용된 공정 최적화를 통해서 각각의 공정에 어느 정도의 재이용수가 사용 가능한지 Fig. 13에 나와 있다. 물론 재이용수가 사용 가능한 공정은 핀치분석을 통해서 예측 가능하다. Fig. 13을 통해 재이용수의 사용량과 사용 대상공정을 알 수 있다. 핀치 분석을 수행함으로써 오염물의 유입 가능한 한계점의 농도를 파악할 수 있기 때문에 최적의 유량을 조절할 수 있는 밸런스가 가능하다. 재이용수의 사용처는 재이용수의 발생이 이루어지는 공정의 유출 오염물 농도에 따라서 한계 유입 농도에 비교하여 결정된다. 또한 재이용수의 처리시설 또한 농도의 저하율에 의해서 정해진다.³⁾

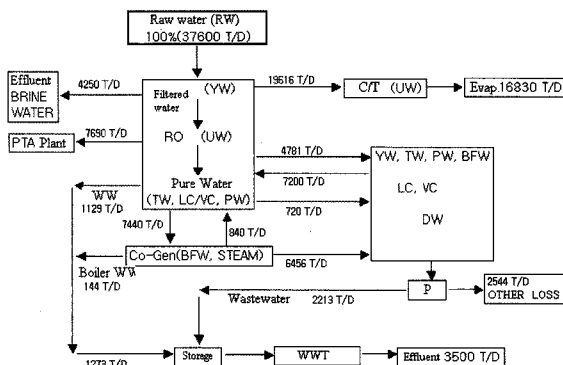


Fig. 12. Water balance in S-petrochemical industry.³⁾

Table 7. Water balance of S-petrochemical³⁾

Operation	f in (te/hr)	f out (te/hr)	COD in (ppm)	COD out (ppm)	Conductivity in (μs)	Conductivity out (μs)
CT A	376	35	1.58	9.9	38	558
CT B	49	15	1.58	11.7	38	488
CT C	131	25	1.58	9.14	38	486
CT D	115	16	1.58	8.41	38	304
N process	228	16.9	0.75	256	0.5	767
E process	11	4	0.77	418	1.1	771
L process	9	4.1	0.75	3.7	0.5	94
LL process	2	3.4	0.77	4.7	1.1	276
P process	7	5.1	0.77	3.9	1.1	108
H process	7	7.8	0.77	4.3	1.1	1201
S 1 process	59	72	0.75	8.45	0.5	26.5
S 2 process	174	150	0.75	6.33	0.5	17.1
A process	2.15	18.5	0.75	14.6	0.5	3864

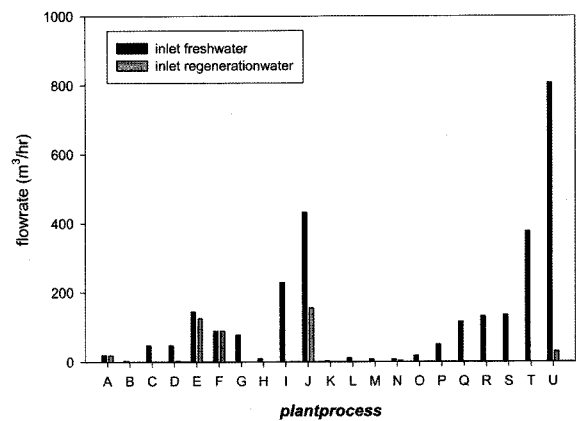


Fig. 13. Freshwater vs regeneration water flowrate in S-petrochemical.³⁾

각 공정에 대하여 문제의 범위를 좁히기 위해 민감도 분석 및 초기 핀치기법을 적용하여 모든 공정을 대상으로 최적화 기법을 적용하지만 자세한 전산모사는 분석을 통해서 재이용수의 가능하다고 진단되는 공정을 대상으로 워터핀치 기법을 적용하게 된다. S석유화학의 경우 분석결과 약 5군데 정도의 공정이 재이용수의 활용이 가능한 것으로 평가되고 있다. 재생장치로는 온도와 TOC의 농도를 낮추기 위한 처리시설이 적용되었으며 에너지 절감효과를 위한 온도에 따른 처리 효율이 고려되었다. 대상공정의 온도를 고려한 용수 재이용 네트워크는 용수 절감과 함께 에너지 비용에 따른 경제성을 확보효과를 가져 올 수 있다. 따라서 핀치기법의 적용에 있어서 공정수의 온도는 같은 유량을 확보하더라도 더 높은 경제성을 갖는 공정 최적화를 수행할 수 있다. TOC에 따른 공정 최적화는 대상공정의 유입 한계농도에 따른 것으로 재이용수의 사용시 유입 TOC 농도에 따라서 대상공정의 운전엔 큰 영향이 없는 범위 내에서 최적화가 이루어졌다. 대부분의 재이용 대상 공정수는 해당 공정의 유출구 부분으로 대상공정의 한계 유입 오염물 농도에 이르는 지점까지 오염물과 온

도 조절 후 재이용을 통한 용수 최적화가 가능하였다. 이러한 한계 유입 농도를 적용하는 전산모사는 전 공정수에 걸쳐서 최적화의 범위를 넓힐 수 있다는 장점을 가지고 있다. 해당 공정에 고려되는 공정수뿐만 아니라 한계 농도에 적합한 수질을 가진 공정수는 배관의 위치와 경제성을 고려하여 대상 공정수 이외에도 적용할 수 있다.³⁾

재이용수의 선정과 대상공정은 앞에서 말한 바와 같이 공정의 한계유입농도와 배관연결에 따르는 비용, 수처리시설 도입에 따른 경제성 평가 등과 같은 요소들을 고려하여 선정되었다. 각 재생장치 도입은 재이용 공정수의 오염물의 종류와 농도, 그리고 대상공정에서 가장 높은 한계점을 갖는 오염물의 농도로써 결정된다. Fig. 14와 15는 재이용 전후의 용수 수지도를 나타낸다. 재이용수 최적화를 목적함수로 한 용수 재이용 최적화는 Fig. 15를 보면 약 5군데 정도의 공정이 재이용수의 활용이 가능한 것으로 평가되고 있다. 재생 장비로는 온도와 TOC의 농도를 낮추기 위한 처리시설이 적용되었으며 에너지 절감효과를 위한 온도에 따른 처리효율이 고려되었다. 온도에 따른 대상공정의 적용은 용수 절감과 함께 에너지 비용에 따른 경제성을 확보할 수 있는 효과를 가져올 수 있다. 따라서 핀치기법의 적용에 있어서 공정수의 온도는 같은 유량을 확보하더라도 더 높은 경제성을 갖는 공정 최적화를 수행할 수 있다. TOC에 따른 공정 최적화는 대상공정의 유입 한계농도에 따른 것으로 재이용수의 사용시 유입 TOC 농도에 따라서 대상공정의 운전이 큰 영향이 없는 범위 내에서 최적화가 이루어졌다. 대부분의 재이용 대상 공정수는 해당 공정의 유출구부분 으로 대상공정의 한계 유입 오염물 농도에 이르는 지점까지 오염물과 온도의 조절이후에 재이용을 통한 용수 최적화가 가능하였다. 이러한 한계 유입 농도를 적용하는 전산모사는 전 공정수에 걸쳐서 최적화의 범위를 넓

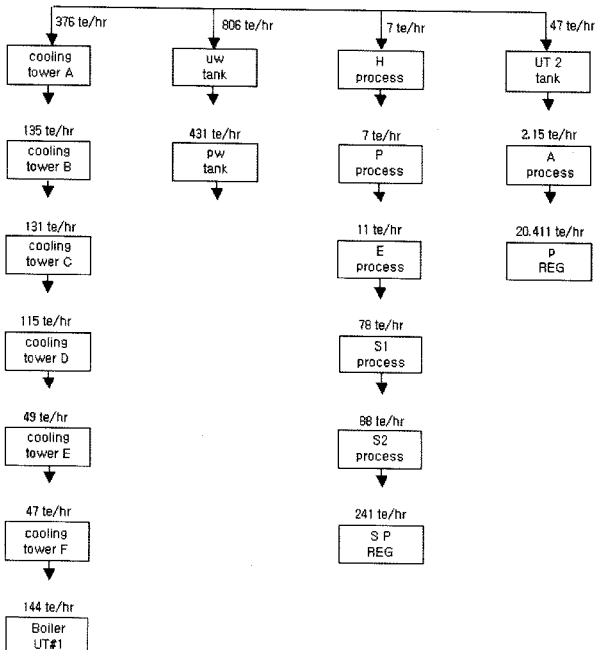


Fig. 14. The initial water design in S-petrochemical industry.³⁾

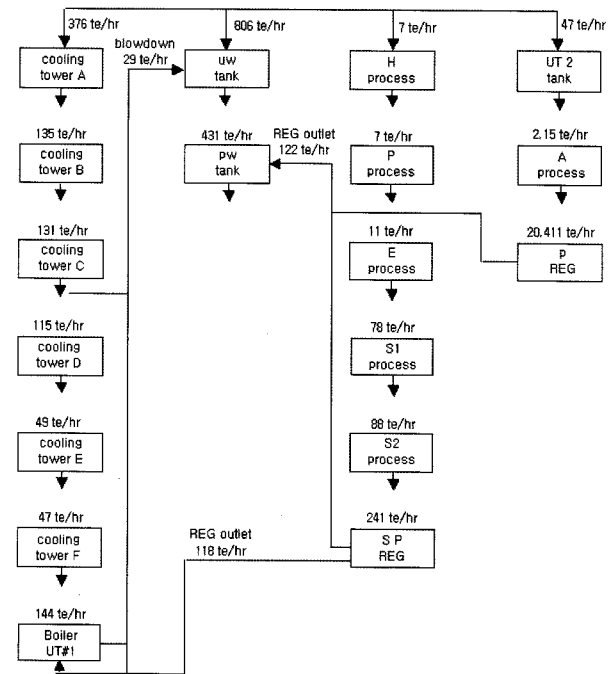


Fig. 15. Optimal water-reusing network in S-petrochemical industry.³⁾

힐 수 있다는 장점을 가지고 있다. 해당 공정에 고려되는 공정수뿐만 아니라 한계 농도에 적합한 수질을 가진 공정수는 배관의 위치와 경제성을 고려하여 대상 공정수 이외에도 적용할 수 있다.³⁾

Table 8에서 보는 바와 같이 석유화학공정에 워터핀치기법을 적용하였을 경우 약 30% 이상의 공정수 절감효과가 있는 것으로 전산모사 하였다. 이에 비례하여 경제적인 효과 역시 용수사용에 해당하는 비용이 20% 이상 절감되는 것으로 나타났다. 또 다른 국내의 J-석유화학공장에 워터핀치기법을 적용하였을 경우 약 36% 정도의 이상의 용수절감을 할 수 있는 것으로 보고되었다.³⁾ 이를 통해 수처리 시설의 조건과 위치, 처리하여야 할 오염물의 종류 및 농도를 예측함으로써 효과적인 최적화 방안을 적용할 수 있는 기준이 되는 자료가 될 수 있음을 알 수 있었다. 물론 이 결과를 현장 적용 시에는 수처리 시설의 도입이나 새로운 배관연결에 따른 공정시설의 변경에 따른 투자비가 고려되어야 한다. 그러나 지속적으로 사용되는 용수비용의 절감은 연속적인 경제적인 효과를 나타낼 수 있는 부분이며 공정수 유입량의 절감에 따라 비례적으로 폐수 발생량 또한 절감할 수 있는 것으로 나타났다.³⁾

Table 8. Optimal water reuse flowrate and cost in a petrochemical plant³⁾

Plants	Water usage		Water reduction	Cost reduction
	(before)	(after)		
S-petrochemical	1429(m ³ /hr)	996(m ³ /hr)	30.3%	28.5%
J-petrochemical	825(m ³ /hr)	495(m ³ /hr)	61%	36.6%

5.4. 제지공정에서 공정수 재이용과 도시하수 재이용의 비교⁷⁾

제지산업은 원료의 운반과 제품의 생산에 있어서 다량의 공정수를 필요로 하는 용수 과소비 산업으로 알려져 있다. 최종 생산품인 종이는 제조특성상 90% 이상의 수분을 함유한 원료를 사용하기 때문에 농도 유지를 위하여 많은 양의 공정수가 사용되며 그로 인한 폐수의 발생량도 많은 편이다. 또한 제지공정은 원료의 농도유지와 압착, 탈수 과정에서 발생하는 백수를 순환시켜서 공정 내에서 재사용하는 순환시스템을 가지고 있다. 이것은 용수의 재사용과 일치하는 공정시스템으로 많은 양의 공정수를 대체하여 운전되고 있다. 그러나 백수의 사용이 많아짐에 따라서 배관이나 기계에 스케일을 형성하고 지료의 형성과정에서 섬유간의 결합에 영향을 미치는 등 용수를 재이용함으로써 공정에 미치는 영향도 많은 것으로 알려져 있다.⁷⁾ 제지공정의 경우 이런 오염물질에 의해 야기될 스케일링 같은 다양한 문제가 있어서 용수 관리의 변화를 평가할 때 다양한 잠재적 악영향을 고려하여야 한다. 보다 철저한 분석을 위하여 부식과 막 형성의 원인이 되는 특정 불용성 이온에 대한 고려가 요구된다. 추가로 현탁 고형물의 입자 크기 분포는 재생 정도가 크고 부유 고체의 부하 정도가 큰 시스템에서 장애적인 문제를 만들어 낼 수 있다. 이러한 경우 성공적인 용수 재생의 핵심은 공정 운영과 생산 품질에 영향을 미칠 잠재적 문제를 예상하고 예방하는 것이다. 즉 제지공정의 용수 재이용은 아주 복잡하고 여러 현장 특성에 따른다. 본 사례연구는 Deul의 사례연구를 기초로 하였다.⁷⁾

대상 제지공장은 제지 1톤 당 약 5.3 m³/ton의 마실 수 있는 용수를 사용한다. 이것은 비슷한 제지 공장의 평균 용수 사용량 9.5 m³/ton 보다 매우 적은 양이며, 이는 제지공장이 이미 높은 정도의 용수 절약 상태에서 운영되고 있음을 나타낸다. 선행 조사를 통해 폐 골판용기(OCC)로부터 라이너 원지 재료를 평균 900 tons/day를 생산하는 100% 재생 공장에서는 용수와 에너지 비용을 줄이기 위해 담수 소비를 줄이는데 관심을 가지게 되었다. 제지 기계 head box shower에 들어가는 백수의 재생과 3차 처리된 도시하수의 재이용이 용수 사용량에 중요한 영향을 주는 실용적인 재생 방법이라고 여겨졌다.⁷⁾ 제지공장에서 재이용 가능한 요소들에 의한 질수와 비용 절감은 Table 9에 표기하였다.

5.4.1. 백수의 재이용(white water reuse)

도시하수와 headbox shower에서의 백수의 재이용 자료와 기초단계 시뮬레이션 자료가 Table 10에 나타나 있다. 시뮬레이션 결과에 의하면 개선 방안 중 하나가 실행되더라도 어떤 부정적 영향(관석, 부식, 생산 품질 등)도 예상되지 않았다. 소량의 유기물 증가는 예상되나 그 정도가 미미하여 용수의 화학적 성질은 크게 변하지 않는다. 부식 문제는 설비 재료가 연강 또는 알루미늄, 주철로 되어 있다면 심각해 질 수 있다. 하지만 백수 설비 시스템의 장치는 주로 스테인리스와 철골 구조로 구성되므로 부식성 물질의 현재 및 계획된

Table 9. Economic evaluation on water reuse options(headbox shower and municipal water reuse)⁷⁾

Description	Water reduction(gpm)		Annual saving (\$)	Investment (\$)
	city	Waste		
Headbox shower	120	120	381,000	59,000
Municipal water reuse	379		111,000	

수치를 기반으로 판단할 때, 물의 사용량을 크게 줄임으로써 야기되는 부식이 발생할 것으로 예상되지 않는다.⁷⁾ 따라서 제지공정에서 headbox shower의 백수 재이용이 가능한 것으로 판단된다.

5.4.2. 도시하수 재이용

지역 하수처리장에서 3차 처리된 도시하수는 잠정적 대체 용수 공급원으로서 평가된다. 이 폐수처리장의 경우 공장에서 받게 되는 폐수로부터 미처리 하수가 차단되고 질산화 탈질산화를 위한 생물학적 폭기조으로 흘러 들어간다. 폭기조의 폐수 흐름은 생체 고형물을 제거하기 위해서 정화조로 흘러간다. 오수는 그 후 3차 처리시스템으로 보내고 거기서 모래 필터를 거쳐 자외선 살균을 통해 살균된다. 도시하수를 보일러와 냉각 탑 메이크업수의 대체 공급수로의 이용에 대해 평가하였다. 증기 시스템은 두 개의 보일러(275 PSIG)로 구성되어 있다. 현재 보일러 유입 용수 전처리 시스템은 활성화 탄소 필터와 나트륨 불석 연화장치, 역삼투압 시스템으로 이루어져 있고 관석 방지제가 RO 장치 전에 주입된다. 관류 물냉각 시스템에서 나온 도시 용수는 냉각탑 보충수로 사용된다.⁷⁾

Table 10. Simulation of water reuse option and predicted water chemistry in the paper machine heabox⁷⁾

Component	Units	Basecase	Headbox	Municipal
		simulation	shower reuse	effluent reuse
Sodium(Na)	ppm	545.0	560.0	550.0
Calcium(Ca)	ppm	450.0	470.0	453.0
Magnesium(Mg)	ppm	26.0	26.0	27.0
Potassium(K)	ppm	42.0	42.0	44.0
Aluminum(Al)	ppm	4.0	4.0	4.0
Silica(SiO ₂)	ppm	31.0	32.0	33.0
Barium(Ba)	ppm	0.3	0.3	0.3
Manganese(Mn)	ppm	2.0	3.0	2.0
Chloride(Cl)	ppm	115.0	125	119.0
Sulfate(SO ₄)	ppm	1400.0	1450	1420.0
TSS(%)	ppm	0.75	0.75	0.75
Extract	ppm	10.0	10.0	10.0
TOC	ppm	3580.0	3601.0	3589.0
pH	ppm	5.4	5.3	5.4
Temperature	°F	135	138	135
CaCO ₃ (S)	ppm	0.0	0.0	0.0
CaSO ₄ (S)	ppm	0.0	0.0	0.0

설비에 제시된 대체 용수 공급원은 높은 수질의 오수로 공급 용수를 대체하고 제지 제조 공장에 적용하기에 적당하다. 공업 용수에서 도시하수로 전환으로서 나타날 수 있는 문제는 관석 형성성, 부식성, 미생물 오염 가능성, 수질의 일관성 등으로 다음과 같은 평가를 통해서 고려된다.⁷⁾

- 관석 형성성 평가

용수의 무기 퇴적물 형성과 관석 형성에 영향을 미치는 이온은 H⁺, 칼슘, 마그네슘(hardness), 탄산염과 중탄산염(alkalinity), 규산과 오르토인산염 등이다. 공업 용수에서 도시하수로의 전환은 위의 모든 염의 농도에 큰 변화를 나타내지 않는다. 향후 공급 용수의 pH는 8.2에서 7.1로 감소할 것으로 예상된다. 이 정도의 변화는 pH에서 큰 변화지만 관석 생성에 어떤 부정적인 영향도 미치지 않는다. 실제로 pH 7의 용수가 pH 8보다 더 적은 관석을 만든다. 현재 공업 용수의 경도는 CaCO₃가 120에서 180 ppm 정도인데, 도시 용수에서 도시하수로의 전환에 의한 어떤 변화도 예측되지 않는다. 결국 도시하수로의 전환은 같은 관석 경향을 유지하고 무기 토적 경향에서도 큰 변화를 주지 않을 것이다.^{7,25)}

용수의 탄산염과 중탄산염은 CaCO₃ 관석을 형성하려는 경향에 중요한 역할을 한다. 일반적으로 용수의 알칼리성이 증가하면 관석이 생성되는 정도는 증가한다. 다행스럽게도 새로운 용수 공급은 공업 용수에 의한 공급보다 더 낮은 알칼리성을 나타내므로 용수의 전환이 관석 형성을 초래하지는 않을 것이다.

- 부식성 평가

용수의 부식성은 염화물, 모든 용해성 이온(TDS), H⁺(pH), 칼슘과 마그네슘(hardness), 암모니아와 부식 억제제에 의해 영향을 받는다.

비록 염화물 농도의 증가가 26에서 99 ppm으로 크지만 문제를 일으킬 정도는 아니다. 시스템의 금속성(낮은 품질의 스테인리스 스틸)과 운영 조건(순환 스트레스와 높은 온도)으로 염화물 200 ppm의 농도에서 부식이 염려된다. 적절히 부식 억제 처리된 탄소강은 800 ppm 이상의 염화물 농도를 이겨낼 수 있으나 염화물 증가와 더불어, 전도도 증가가 용수의 부식성을 높일 수 있다. 비록 용수 공급의 변화가 전도도의 증가를 야기하지만, 시스템의 전도도는 여전히 수용 한계 안에 있다. 어떤 부정적 영향도 적당한 부식 억제제를 첨가하여 제어할 수 있을 것으로 보인다. 도시하수는 일반적으로 높은 암모니아 수치를 가지고 있는 것으로 알려졌다. 다행스럽게도, 이 하수는 일반적이 경향을 따르지 않으며 거의 암모니아를 포함하고 있지 않다(<0.1 ppm). 이 농도에서는 구리를 함유한 금속에 대한 부식을 걱정할 필요가 없으나, 암모니아 오염의 잠정적 악영향에 대한 대비로 독소 부식 억제제를 시스템에 첨가할 것을 추천한다.^{7,25)}

- 미생물에 의한 오염 가능성 평가

용수의 미세균에 의한 오염 가능성은 영양소가 있느냐 없느냐에 따라서 영향을 받는다. 인산염, 암모니아 그리고 총유

기탄소(TOC)는 미세균의 영양소가 될 수 있다. 도시하수의 암모니아와 인산염 농도는 낮아서 미세균에 의한 위험은 야기되지 않는다. 들어오는 TOC 농도가 2에서 20 ppm으로의 예상되는 증가는 큰 편이다. 냉각탑은 두 농도 순환 아래에서 작동한다. 이론적으로 예상된 TOC 농도는 재순환하는 용수에서 40 ppm을 넘어서는 안된다. TOC 농도는 현재 사용되는 살균제를 적당히 사용하여 처리될 수 있으며 첨가 농도는 이 냉각탑에서의 높은 유기 부하를 반영하여 결정해야 할 것이다.^{7,25)}

- 수질 일관성 평가

현재 공장에 공급되는 공업 용수는 약간의 후 처리를 거쳐 안정적인 대수층에서 오는 것이다. 수질 변동은 예상되지 않으며 유입수에 대한 수질 제어는 일반적으로 매우 느슨하게 이루어진다. 새로 제안된 용수는 다양한 상태의 폐수 처리장에서 오는 것이다. 이 용수가 비록 특별한 수질 요소는 만족되고 있더라도 자연 수원보다 높은 공정 불균의 가능성을 가지고 있다. 그러므로 개선된 도시하수에 대해 자주 실내 수질 점검이 필요하며 암모니아, 오르토 인산염, 칼슘 정도, 전도도를 매일 분석하는 것이 바람직하다.^{7,25)}

6. 워터핀치기술의 최신 연구동향

최근에 용수 재이용 분야에서 각광을 받는 두 가지 분야는 에너지와 용수 재이용망의 동시 설계와 생태 산업단지 내 기업간 용수 재이용 네트워크의 설계 분야이다. 본 절에서는 이 두 가지 분야의 최신 연구 동향을 소개한다.

6.1. 에너지와 용수 동시 재이용 네트워크 설계

공정산업에서 에너지와 용수는 둘 다 중요 원료이자 자원으로 사용되고 있다. 살균이나 세척 같은 특정한 공정에서는 많은 양의 용수가 가열되고 냉각되는데 이러한 상황에서 온도와 용수의 질이 둘 다 중요하게 된다. 또 어떤 경우에는 용수흐름과 공정 흐름을 분리할 수 없는 경우가 발생하여 에너지와 용수흐름을 동시에 고려해야 하는 경우가 발생한다. 현재까지 대부분 산업현장에서는 에너지 최소화와 용수최소화 문제가 각각 분리되어서 설계시 고려되어 왔고 교환망 구축의 경우에도 각각 따로 고려되어왔다. 그런데 최근 높은 유가 상승에 따라 생산현장에서는 에너지와 용수를 동시에 고려하여 교환망을 설계하는 것이 새로운 연구분야로 대두되고 있다. 이러한 경우 핀치 분석기술은 두 자원(용수와 에너지)의 최적 사용에 응용 될 수 있다.^{27,28)}

동시에 에너지와 용수 최소화를 고려하는 경우 주요 목적은 최소 용수 사용과 최대에너지 회수를 가진 폐수 생성에 있다. 일반적으로 공정에 공급되는 용수와 단위 공정 사이의 온도차이 때문에 용수의 가열이나 냉각이 필요하다. 공정 내에서 용수배분흐름에 따라 가열이나 냉각이 필요할 수도 있고 폐수는 농도와 온도의 배출 기준치에 따라 냉각하여 방출할 필요가 있다. 이러한 에너지와 용수 교환망 설계의 특징이 Fig. 16에 나와있다. 이 그림에서 나와있는 것과 같이

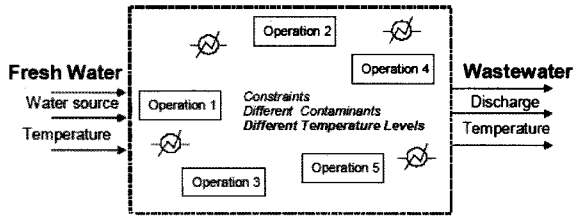


Fig. 16. Features of the problems of simultaneous energy and waste minimization.²⁶⁾

용수 및 폐수의 수질과 온도가 시스템의 입출력 변수이고 각 공정의 경우에도 용수수질과 온도가 제약조건으로 포함되어야 한다. 이러한 경우 용수 시스템과 에너지 시스템의 경우 각각의 상호작용에 대한 함수가 먼저 고려되어야 하므로 교환망 설계의 최종 목적함수를 풀때 쉽게 풀리지 않는 난점이 있다. 용수와 에너지 수치를 동시에 고려하여 교환망을 설계할 경우 각각의 방법으로는 구해질 수 없는 폐수의 최대 에너지 회수가 가능한 새로운 교환망이 가능하다.²⁸⁾ 최근 높은 유가가 상당기간 유지될 것으로 예상되므로 이러한 에너지와 용수를 동시에 고려하여 교환망을 설계하는 것이 석유화학 및 에너지 산업에서 워터핀치기술의 새로운 연구분야로 대두되고 있다.

6.2. 생태산업단지내 기업간 용수 교환망 설계

최근에 환경오염과 자원고갈에 의해서 인류활동의 생태적 영향을 최소화하는 지속가능한 산업개발이 최근 관심을 받고 있다. 이 개념은 대규모 산업 시스템에 대한 혁신을 통하여 환경적 영향과 경제적 성과를 동시에 증진시킴으로써 지속가능한 발전을 이루자는 의미를 담고 있다. 이를 위해서는 기존에 있던 산업단지를 환경친화적으로 변화시키거나 새로운 산업단지를 건설하여 개별 공장 내뿐만 아니라 한 산업단지 내의 각 기업들이 물질, 용수 및 에너지를 최대한 효율적으로 이용하는 생태산업단지(eco-industrial park, EIP)로의 전환이 전 세계적으로 활발하게 이루어지고 있다.^{28~31)} Fig. 17에는

기존 산업단지와 생태산업단지를 비교하여 나타내었다. 그동안 유럽, 미국, 남미, 남아프리카 그리고 아시아 여러 나라가 생태산업단지에 관심을 갖고 다양한 프로젝트를 추진 중에 있고, 국내에서도 2006년 현재 6개의 생태산업단지 시범사업이 진행 중이며 15년의 장기계획을 통한 본격적인 생태산업단지 구축 사업이 추진되고 있다.

생태산업단지가 아닌 일반 산업단지의 경우 단일 기업내 용수 최소화 of 기본 목표는 각 기업 공장의 공정에서 적당한 운영과 환경 기준을 유지하면서 비용 효율적인 방법으로 용수 요구와 수질을 만족시키는 것이다. 그러나 산업단지내 수자원 관리의 경우 제한된 수자원을 위한 경제과 환경 규제 때문에 용수의 비용증가가 최근 발생하고 있다. 이러한 상황에 따라 산업단지내 기업간 용수 재이용 네트워크 구축에 대한 가능성이 대두되고 있다. 최근 워터핀치 기법을 생태산업단지내 용수교환망에 적용하여 기업간 용수 재이용에 대한 가능성이 대두하였다. 이는 기업간 재이용을 고려할 경우 단일 기업내에서 재이용이 불가능하다고 판단되는 폐수나 용수를 다른 기업에서는 재사용할 수 있는 기회를 제공하게 된다. 예를 들어 제조공정에서 초순수를 필요한 반도체 공장에서 나오는 폐수는 다양한 종류의 산업들에서 재이용 될 수 있다. 이에 따라 산업단지내에서 재이용이 가능한 용수를 많이 소비하고 배출하는 공장들을 대상으로 하여 이들 기업간 용수 재이용의 가능성을 확인하고 재이용 네트워크를 구축하여 최적의 용수 재사용 구축에 대한 연구가 현재 진행 중에 있다.³⁰⁾ 이는 생산활동에서 용수뿐만 아니라 폐수를 감소시킴으로써 생산비용과 환경오염을 감소시킴으로써 사전 예방 원칙에 부합하여 사후처리방법보다 더 효과적인 방법이다. 워터핀치기술은 생태단지내 용수 재이용 네트워크 구축이 체계적으로 진행 할 수 있도록 이론의 정립, 경제성 평가와 실제 적용시 보완해야 할 사항 등을 제시할 수 있을 것으로 예상하고 있다. 워터핀치 기술은 기업 내에서의 용수 재이용이 아닌 기업간 또는 산업단지 내의 재활용을 극대화함으로써 용수 수급을 원활히 하고 산업단지 외부로의 배출량을 최소

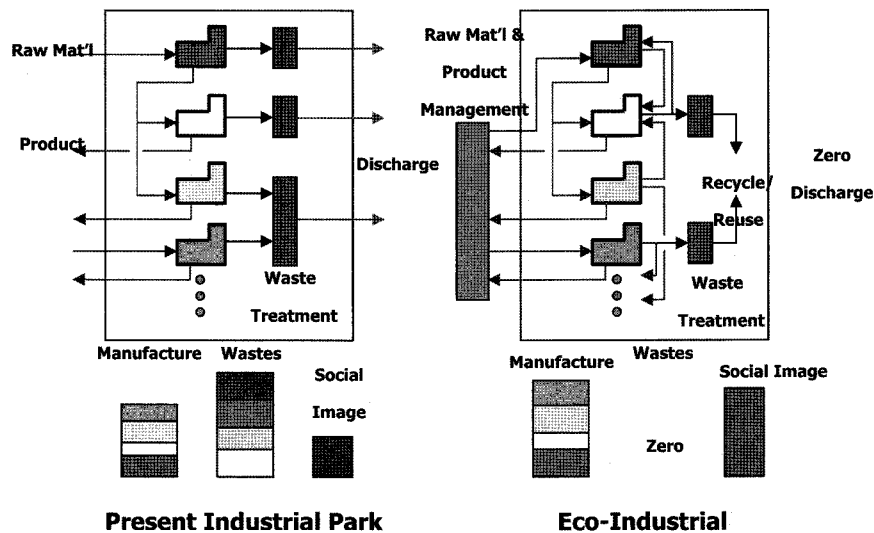


Fig. 17. Basic concept of eco-industrial park(EIP).²⁹⁾

화하여 환경, 경제, 사회적 성과의 향상을 도모할 수 있는 생태산업단지의 구성에 크게 기여할 것으로 판단되고 된다.³¹⁾

그러나 기존의 단일 공장의 워터핀치방법을 산업 단지내 용수 재이용 네트워크 설계시 직접 적용할 때 여러가지 문제점이 나타날 것으로 예상된다. 예를 들어 산업 단지내 기업간 용수 재이용 네트워크 구축 경우 목적 함수내에 너무 많은 대상공정 및 폐수처리장이 존재하여 비선형 최적화 문제가 나타나고 기업간 그리고 단위공장내 용수 및 정보의 불확실성(uncertainty) 증가, 생태 산업단지내 각 기업별의 이해관계나 서로의 trade off의 변수화 및 환경성 경제성 평가 같은 문제가 발생한다. 이를 극복하기 위해 각 단위공정뿐만 아니라 공장별/기업별 용수 재이용을 위한 체계적 워터핀치 방법론에 대한 연구와 기술 개발이 필요하다.³²⁾

7. 결론

최근의 환경법규강화나 물 부족 현상 심화 같은 환경적 요인과 용수 재사용 및 폐수 절감으로 인한 운전비용 절감과 같은 경제적 요인으로 많은 관심을 받고 있다. 용수재이용을 위한 워터핀치기술은 환경 개선(폐수처리장의 방류수의 오염물질 부하 저감, 폐수 및 슬러지 발생량의 저감), 경제성 향상(공정용수 재이용을 통한 공업용수 사용량 절감, 약품비용 및 슬러지 처리비용 절감, 공정 안정화에 따른 유지비용 절감, 수질 안정을 통한 생산성 향상, 응축용수 재이용을 통한 에너지 절감), 기술적 효과(최적 부원료 선정 및 생산공정 최적화, 청정생산을 통한 제품 및 가격경쟁력 강화, 공정용수 재이용 최적화 방안 제시, 폐수 재이용을 위한 처리기술 적용)같은 효과를 기대할 수 있다. 지금까지 해외의 경우 많은 석유화학, 정밀화학, 제지공장 같은 용수를 많이 사용하는 산업 현장에서 워터핀치 기술을 적용하여 공업용수비용 절감과 폐수처리비용의 상당부분을 감소하는 효과가 보고되어 있다. 현재 국내의 경우 최근에 들어 각 단위공장별로 용수 재사용에 대한 보고가 나오고 있긴 하지만 체계적인 방법으로 공장 전체에 대해 워터핀치 기술적용이나 그 연구에 있어서 많이 보고된 바가 아직 없다. 최근 학계에서는 생태산업단지내 기업간 용수 교환망 설계에 워터핀치의 응용 및 적용기술 개발에 많은 연구가 진행되고 있다.³¹⁾

사 사

본 연구는 2단계 BK21 프로그램과 산자부 국가청정생산지원센터의 청정생산이전확산사업인 Water Pinch 기법을 이용한 철강산업단지 내 용수 재이용 최적화 시스템 구축의 과제 지원에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

1. Park, M. H., "Water use optimization in industrial plant,"

Technical report, Exergy engineering(2002).
 2. Deul, A. S., "Systematic approach to water resource management in industry," IWA publishing(2002).
 3. Park, D. S., Kim, Y. W., Song, B. K., Lee, I. B., and Yoo, C. K., "Optimization of water reuse network using water pinch technology in petrochemical industries," *J. Korean Society of Environ. Eng.*, **25**(12), 1550~1556 (2003).
 4. Dunn Mann, J. G. and Liu, Y. A., "Industrial water reuse and wastewater minimization," McGraw-Hill(1999).
 5. Koufos, D. and Retsina, T., "Practical energy and water management through pinch analysis for the pulp and paper industry," *Water Science and Technology*, **43**(2), 327~332(2001).
 6. Almató, M., Espuña, A. and Puigjaner, L. "Optimization of water use in batch process industries," *Comp. Chem. Eng.*, **23**, 1427~1437(1999).
 7. Lens, P., P. L. H., Wilderer, P., and Asano, T., "Water recycling and resource recovery in industry," IWA publishing(2002).
 8. WaterPinch™, "User manual," Linhoff march, UK(2004).
 9. Linhoff, B. and Hindmarsh, E., "The pinch design method of heat exchanger networks," *Chem. Eng. Sci.*, **38**(5), 745~763(1983).
 10. El-Halwagi, M. M. and Manousiouthakis, V., "Synthesis of mass exchange networks," *AIChE J.*, **35**(8), 1233~1244(1989).
 11. El-Halwagi, M. M. and Manousiouthakis, V., "Simultaneous synthesis of mass-exchange and regeneration networks," *AIChE J.*, **36**(8), 1209~1219(1990).
 12. El-Halwagi, M. M., "Pollution prevention through process integration," Academic pressure(1997).
 13. Wang, Y. P. and Smith, R., "Wastewater minimization," *Chem. Eng. Sci.*, **49**(7), 981~1006(1994).
 14. Wang, Y. P. and Smith, R., "Wastewater minimization with flowrate constraints," *Trans IChemE*, **73**(A), 889~904(1995).
 15. Wang, Y. P. and Smith, R., "Design of distributed effluent treatment system," *Chem. Eng. Sci.*, **49**(18), 3127~3145(1994b).
 16. Kuo, W. J. and Smith, R., "Effluent treatment system design," *Chem. Eng. Sci.*, **52**(23), 4273~4290(1997).
 17. Dunn, R. F. and Wenzel, H., "Process integration design methods for water conservation and wastewater reduction in industry Part I. Design for single contaminants," *Clean Products and Processes*, **121**(3), 307~318(2001).
 18. Dunn, R. F. Wenzel, H., Gottrup, L., and Kringelum, J., "Process integration design methods for water conservation and wastewater reduction in industry Part III. Ex-

- perience of industrial application," *Clean Products and Processes*, **121**(3), 330~329(2001).
19. Dunn, R. F., Wenzel, H., and Overcash, M. R., "Process integration design methods for water conservation and wastewater reduction in industry Part II. Design for multiple contaminants," *Clean Products and Processes*, **121**(3), 319~329(2001).
 20. Aspen water™ 10.2, "Getting started guide," Aspen tech(2001).
 21. Aspen water™ 10.2, "Users guide," Aspen tech(2001).
 22. Tainsh, R. A. and Rudman, A. R., "Practical techniques and methods to develop an efficient water management strategy," IQPC conference of Water Recycling and Effluent Re-Use(1999).
 23. Yang, Y. H., Lou, H. H., and Huang, Y. L., "Synthesis of an optimal wastewater reuse network," *Waste Management*, **38**(5), 311~319(2000).
 24. Bagajewicz, M. "A review of recent design procedures for water networks in refineries and process plants," *Comp. Chem. Eng.*, **24**, 2093~2113(2000).
 25. Yoo, C. K., Lee, C. K., Heo, S. K., Lee, I. B., Park, D. S., Kim, Y. W., and Song, B. K., "Water pinch technology for water and wastewater minimization in the process industry," *News and Information for Chemical Engineers(NICE)*, **21**(1), 65~73(2003).
 26. Savulescu, L., Kim, J., Smith, R., "Studies on simultaneous energy and water minimization - Part I. Systems with no water re-use," *Chem. Eng. Sci.*, **60**, 3279~3290(2005).
 27. Savulescu, L., Kim, J., Smith, R., "Studies on simultaneous energy and water minimization - Part II. Systems with maximum re-use of water," *Chem. Eng. Sci.*, **60**, 3291~3308(2005).
 28. Lowe, E. A., "Eco-industrial park handbook for asian developing countries," Asian development bank report(1997).
 29. Lee, K. H., Master Plan Establishment of Eco-Industrial Parks for Infrastructure of Cleaner Production, Report, KNCPC(2004).
 30. Yoo, C. K., Heo, S. K., Yoo, D. J., Shin, J. N., Chun, H. D., Moon, J. K., and Lee, I. B., "Review: Eco-industrial park(EIP) development and key technologies for clean production", *Korean Chemical Engineering Research*, **43**(4), 549~559(2005).
 31. Yoo, C. K., Moon, J. K., Chun, H. D., and Lee, I. B., "Optimization of water-reusing network between the process industries in an eco-industrial park complex using water pinch technology," in preparation(2006).
 32. Yoo, C. K., Lee, T. Y., and Lee, I. B., "Water reuse network," *News and Information for Chemical Engineers(NICE)*, **24**(4), 360~365(2006).