

청정생산을 위한 산업체의 용수 및 폐수 최소화와 수자원관리기술

유창규, 이태영, 이인범

포항공과대학교 화학공학과/환경공학부 {ckyoo, solanic, iblee}@postech.ac.kr

서론

최근 환경 규제강화 추세, 폐수처리 비용증가와 더불어 원수가 부족해짐에 따라 다양한 산업에서 원수 사용량과 폐수 방출량을 줄이는 방안이 설득력을 얻고 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. 기존의 배출수를 고도 처리하여 재이용하는 기존의 방법에서 벗어나 공정 내에서 용수를 절약함과 동시에 생산 공정의 과학적이고 체계적인 분석을 통하여 용수의 이용률을 최대화한 후 최종 방류함으로써 물 이용의 효율성을 높이하고자 하는 용수재이용 기술이 많은 관심을 받고 있다. 이에 따라 제지산업, 석유화학산업, 발전소 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. 그 동안 워터핀치기술은 산업 전반에 걸쳐 15-40%의 원수와 20-50%의 폐수를 절약함으로써 성공적으로 적용 되어져 왔다. 본 기술소개에서는 공정 설계 단계에서 병목을 찾아 용수의 사용을 최소화하는 워터핀치 기술을 소개하고 생태산업단지에서 기업간 용수 재이용 같은 최신 연구동향을 소개하고자 한다.

용수 및 폐수 최소화 기회

용수 재이용을 위한 출발점은 모든 공정들은 원수로 채워진 용수 재이용 네트워크를 이용하는 것이다. 흔히 있는 일이지만, 분리 공정으로부터의 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), 재생후 순환 재이용 (Regeneration recycle)등으로 구분된다.

워터핀치기술을 이용한 용수 재이용 최적화

워터핀치기술의 기본 모토는 다음과 같다. 즉 오염물질을 최소화하는 가장 좋은 방법은 오염물질의 사후처리방식보다는 공정 내에서 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’, Wang and Smith, 1994). 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. 기본적인 개념은 source 와 sink 사이의 하나 또는 주요 대상이 되는 오염물의 선정하여 공정 흐름도를 작성하는 것이다. 그림 1 의 source 와 sink 사이의 전체적인 분석을 통해서 핀치점 (pinch point)를 찾아내고 여기서 성립되는 제한 조건에 의해 용수의 재이용 양과 그 대상공정을 효과적으로 찾아낼 수 있는 방법이다. 그림 1 에서 보면 용수의 source 는 오염도가 낮은 수치를 나타내는 용수 흐름으로 오염물에 의한 오염이 거의 없는 상태를 말한다. 그러나 공정이 운전되면서 용수가 각각의 공정을 지날 때 마다 오염물의 이동현상에 의해서 공정수의 오염도는 점점 증가하게 된다. 이것은 공정수의 흐름에 있어서 source 와 sink 의 관계를 정리하는 것으로 오염물의 물질 이동에 의해서 용수의 오염 정도가 증가하게 되는 것을 말한다. 이 관계에서 각각의 공정의 오염농도는 공정의 제한 유입농도를 설정할 수 있는 자료로서 활용될 수 있다.

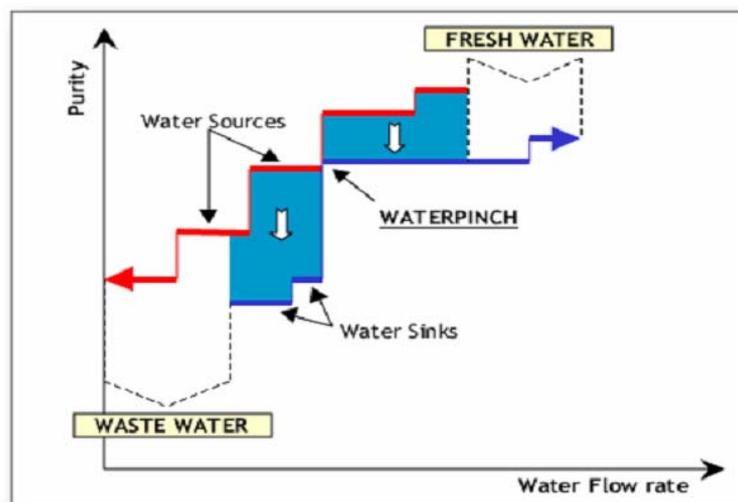


그림 1. Source and sink composite curves (WaterTarget™, 2004).

합성은 전체 공정을 워터핀치분석에 적용할 수 있도록 농도에 따른 공정들 사이의 용수 재이용을 합성(process integration) 하는 것이다. 공정 합성은 공정간의 오염물의 농도나 종류에 따라서 합성을 하여 간략한 블록모식으로 표시할 수 있도록 하는 합성과정이다.

먼저 pinch 분석을 통해 공정수의 오염물과 종류를 파악한 후에 그려지는 composite curve 를 통해서 오염물의 흐름을 알 수 있다. 오염물의 이동현황에 대해서 파악하면 공정 간에 이동되는 오염물에 따라서 공정합성을 수행하는 것이다. 비록 이러한 접근법이 간단하지만, 워터핀치는 많은 흐름과 다양한 오염물질에 의해 매우 복잡해질 수 있다. 이 과정은 한번에 하나의 오염물에 대한 각각의 최적화를 요구하며 각각의 분석 결과는 전체 최적 해를 구하기 위하여 종합되어야 한다.

수학적 최적화를 이용한 용수 재이용 네트워크 설계

앞에서 기술한 워터핀치 방법은 근본적으로 경험에 의한 것이고 여러 가지 오염물질의 경우 다루기가 어렵다. 이에 따라 용수 재이용 네트워크를 분석, 합성, 개선, 설계를 위한 수학적 최적화 기반 접근법이 제안되었다. 수학적으로 구축된 모델은 재생공정, 유량제한, 다성분 오염물질을 포함하는 비선형 모델로 구성이 가능하고 비선형 프로그래밍 (nonlinear programming)에 의해 해를 구함으로써 재이용 망이 설계될 수 있다. 비선형 문제에서는 전역 최적 해를 보장할 수 없으므로 초기치를 잘 선택하여 좋은 결과를 얻어야 한다. 이러한 워터핀치와 수학적 최적화 방법은 서로의 단점을 보완하고 장점을 강화할 수 있다. 엔지니어나 사용자는 위의 두 가지 방법을 용수망을 설계하는 동안 계속해서 서로 전환할 수 있다. 다성분이고 많은 수의 공정을 가진 커다란 문제의 경우 수학적 모델로 먼저 시작하여 모델을 만들고 그 후에 단순화된 해에 대해 워터핀치방법을 사용하여 시각화가 가능하다. 즉 두 가지 방법은 공학적 이해와 시각화를 개선하는 워터핀치 방법과 복잡한 문제를 다루는 것이 가능한 수학적 방법의 상호 보완이 가능하다. 워터핀치의 기본이론과 용수 재이용 네트워크 설계의 자세한 이론은 2003년 1월 나이스지 지상강좌에 소개된 “공정산업의 용수 및 폐수 최소화를 위한 Water Pinch 기술” 논문(유창규외)을 참조.

워터핀치 과제 수행단계

그림 2는 실제 산업공정에서 워터핀치 과제 수행 시 체계적인 과제 수행단계를 나타낸 것이다. 이 그림은 공정모사기의 공정 모델링 및 합성기능을 사용하여 용수재이용 과제의 총괄적인 작업흐름을 예시하고 있다. 중요한 단계는 공정 데이터 습득 단계, 공정 모델의 개발 단계, 설계의 제약 조건 규정 단계, 재이용 기회를 확인용 개선 선택사항 단계, 개선된 설계의 재모델링 단계로 구성된다. 가격 분석 및 민감도 분석 등은 추가적으로 사용이 가능하다.

어떤 프로젝트에서든 첫 번째 단계는 공정에 사용되는 모든 용수와 공급되는 유틸리티의 위치를 정하는 것이다. 공정도의 작성을 통하여 용수 시스템의 간략한 모델을 만드는 것

이다. 공정도 분석을 통해서 용수의 source와 sink를 명확히 구분하여 용수 수지(water balance)를 만들게 된다. 가장 큰 유량의 10%내의 정확도를 가지는 용수에 대한 수지를 세우는 것이 중요하다. 연속공정이 아닌 회분식 공정에 대해서는 실험을 통해서 대체적인 값을 정한다. 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. 구조적인 접근에 있어서 다음 단계는 핵심 오염물질을 선택하는 것이다. 핵심 오염물질은 재사용하는 용수의 흐름에 방해가 되는 어떤 성질로써 정의되고, 오염물질에는 부유물질, 전도도, 온도, 산성도, pH 등이 포함되고 특히 공정수 재이용에 사용될 경우 침전이 가능한 물질에 대한 금속이온도 대상이 된다. 현장 과제의 단순화를 위해서 복잡하고 주요 오염물질의 수를 제한하는 것이 중요하다. 목표농도, 즉 각 하수시설들에 대해 허용되는 최대의 농도와 공급원들에 대한 실제적인 최소의 농도에 해당하는 설계 농도들이 선택되어야 한다. 모든 오염물질이 알려지게 될 때, 모든 공급원들의 수질이 평가된다.

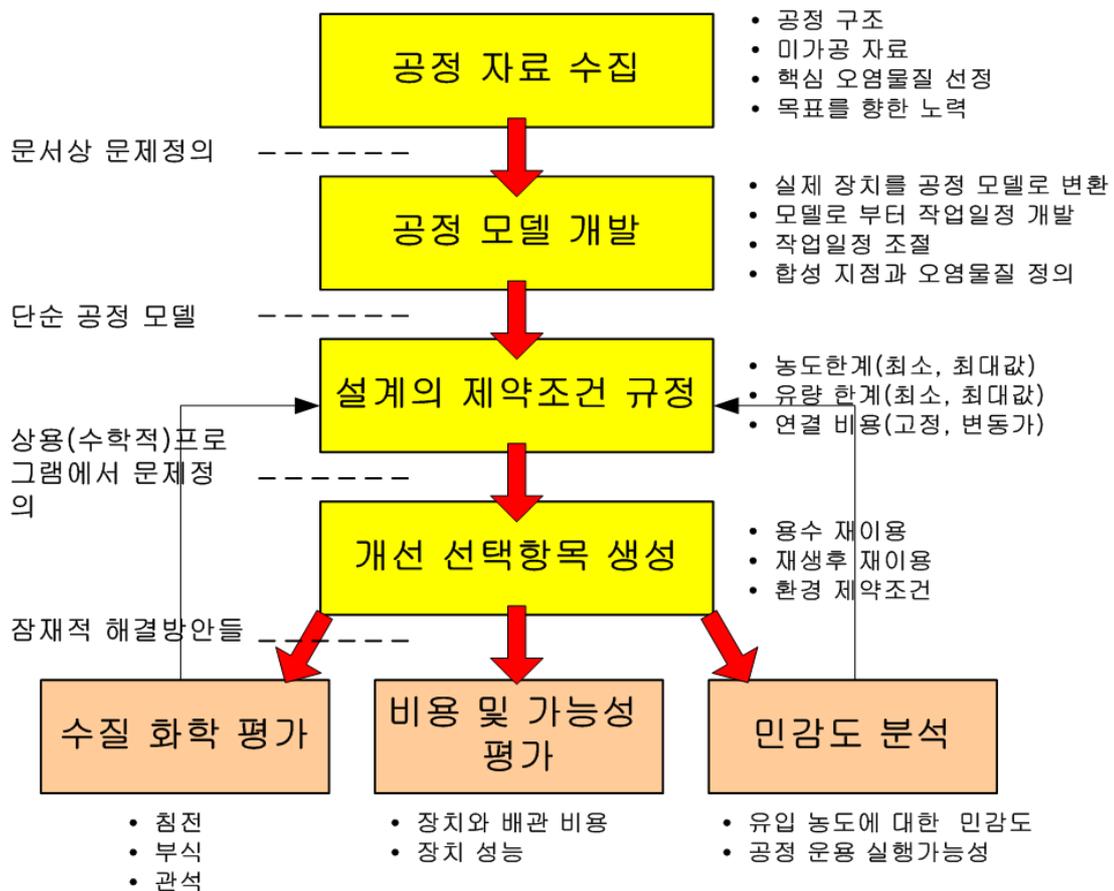


그림 2. 공정산업에서 워터핀치를 적용한 용수재이용 과제 흐름도 (Aspen water™, 2002).

용수와 오염물의 수지를 확인한 후에, 워터핀치 분석을 시작하되 전 단계로부터 얻은 모든 정보가 포함된다. 특히 유입농도의 민감도 분석으로부터 반응기로 들어가는 유입농도의 증가에 따라 용수 사용에서의 가장 높은 절수가 가능한 공정을 파악할 수 있다. 워터핀치 분석은 1) 핀치기술을 이용하여 최소 원수 유량을 확인한다. 2) 예비 용수재이용 네트워크를 구축한다. 3) 재이용 수를 줄이면서 경험적인 방법을 통해 예비용수재이용 망을 단순화한다. 4) 재이용이 제한된 지역을 확인하고 최소원수유량을 더 줄이기 위해 공정변화를 제안하고 몇 가지 용수 재이용 시나리오를 제시한다. 이러한 워터핀치를 이용한 최적 용수망의 목적함수에는 원수 비용뿐만 아니라 배관비용, 재생비용 폐수배출비용을 고려할 수 있다. 마지막 단계로 비용분석과 민감도분석이 이루어진다. 공정들 사이의 거리, 저장조의 사용 가능한 공간, 재생 장치 등을 고려하여 기술적으로 가능한 시나리오들 중에서 선택하면, 필요한 투자, 운영 비용 등이 계산된다. 최종적으로, 워터핀치 방법의 사용으로 용수 및 폐수최소화를 위한 방안이 제시된다.

생태산업단지의 기업간 용수 교환망 설계 (도전과 기회)

최근 들어 개별 기업과 산업단지 내에서 수자원 관리는 에너지 수배급에 못지 않는 중요한 문제로 대두되고 있다. 환경규제 강화에 대한 국제적 압력은 폐수처리 비용의 증가를 초래하여 지금도 폐수처리비용이 원수 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. 용수수급 전망(그림 3)에 따르면 2006년부터 4억톤 이상의 용수 공급량 부족이 예상되며 신규 수자원을 확보하기 위한 댐 건설을 필요로 하며 이로 인해 용수 생산 단가는 지속적으로 증가할 것이다. 이 밖에도 대부분의 산업체에서는 용수를 생산공정에 적합하게 사용하기 위해 가공, 운송하고 처리를 수행하므로 용수 구입 비용의 3-6배 정도를 지출하고 있으며 이러한 비용도 지속적으로 상승될 것으로 예상되고 기업의 경쟁력 약화의 한 요소로 작용될 것으로 판단된다 (박외, 2002). 산업단지에서는 이러한 신규수자원 확보 요구와 용수 부족 현상에 따라 수처리 및 용수 공급 비용 절감 측면에서 효율적인 수자원 관리가 요구되고 있다.

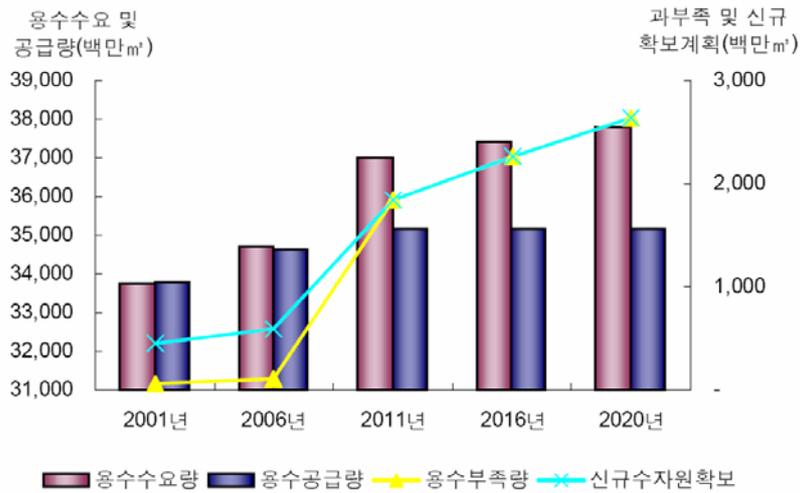


그림 3. 용수 공급 전망 (박외, 2002).

최근 기존 산업단지에서 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. 생태산업단지가 아닌 일반 산업단지의 경우 단일 기업 내 용수 최소화 의 기본 목표는 각 기업 공장내 공정에서 적당한 운영과 환경 기준을 유지하면서 비용 효율적인 방법으로 용수 요구와 수질을 만족시키는 것이다. 한편 기업간 재이용을 고려할 경우 단일 기업 내에서 재이용이 불가능하다고 판단되는 폐수나 용수를 다른 기업에서는 재사용할 수 있는 기회를 제공하게 된다. 이에 따라 산업단지 내에서 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. 예를 들어 제조공정에서 초순수를 필요한 반도체 공장에서 나오는 폐수는 다양한 종류의 산업들에서 재이용 될 수 있다.

그러나 기존의 단일 공장의 워터핀치방법을 산업단지 내 용수 재이용 네트워크 설계 시 직접 적용할 때 여러 가지 문제점이 나타날 것으로 예상된다. 예를 들어 인접 공장의 저농도 유출수나 또는 지역오수 처리장에서 공급되는 3 차 처리된 도시하수는 잠정적 대체 용수 공급원으로서 고려되고 생태산업단지의 용수 재이용의 대표적 방법으로 제안되어 왔다. 그러나 산업단지 내 도시하수를 기존공장의 냉각탑 및 보일러의 보충수로 사용한 경우 관석 형성성, 부식성, 미생물 오염 가능성, 수질의 일관성 같은 문제점이 보고되었다 (Deul, 2002). 즉 생태산업단지내의 도시하수 중 생산공정에 중요한 특정 오염물질과 공정 운영에 미칠 잠정적 영향을 평가하고, 다음의 일반적인 질문에 대한 해답을 찾아야 한다.

- (1) 그 용수가 무기 퇴적물을 만드는가? 관석 생성 경향은 어느 정도인가?
- (2) 용수가 시스템을 부식시키는가? 부식성은 어느 정도인가?
- (3) 용수는 제어할 수 없는 미세균 성장을 만들어 내는가?

(4) 용수 공급원과 그것의 질은 일정하고 안정적인가? 신뢰성은 어느 정도인가?

(5) 특별한 장비 문제는 있지 않은가?

또한 만일 재생 처리장비를 사용한 기업간 용수 교환망의 경우 개별기업에서 배출된 높은 농도의 유출용수는 하수 시스템으로 버릴 수 없기 때문에 특별한 마지막 처리가 필요할 가능성이 있다. 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 환경영향평가를 기초로 하여 최적의 용수 교환망이 다시 결정되어야 한다. 이러한 산업단지 내 기업간 용수 재이용 네트워크 구축 경우 다양한 문제점이 발생할 것으로 예상하고 있다. 예를 들어, 목적 함수 내에 너무 많은 대상공정 및 폐수처리장이 존재하여 비선형 최적화 문제가 나타나고 기업간 그리고 단위 공장 내 용수 및 정보의 불확실성 (uncertainty) 증가, 생태산업단지 내 각 기업별의 이해관계나 서로의 trade off의 변수화 및 환경성/경제성 평가 같은 문제가 발생한다. 이를 극복하기 위해 각 단위공정뿐만 아니라 공장별/기업별 더 나아가서는 생태적 영향을 고려한 용수 재이용을 위한 체계적 워터핀치 방법론에 대한 연구와 기술 개발이 필요하다. 예를 들어, 용수 재이용시 경제 및 환경저감 효과뿐만 아니라 그로 인해 소모되는 생태적 가치 (지표)를 고려하는 Emergy기반 용수재이용 네트워크 구축 같은 방법론의 개발이 생태산업단지 구축시 지속가능한 발전에 필요하다.

석유화학 및 에너지기반 산업단지에서는 최근 높은 유가가 상당기간 유지될 것으로 예상되므로 에너지와 용수를 동시에 고려하여 교환망을 설계하는 것이 워터핀치기술의 새로운 연구분야로 생각해 볼 수 있다. 즉 용수와 에너지 수지를 동시에 고려하여 교환망을 설계할 경우 각각의 방법으로는 구해질 수 없는 폐수의 최대 에너지 회수가 가능한 새로운 교환망이 가능하다. 워터핀치 기술은 기업 내에서의 용수 재이용이 아닌 기업간 또는 산업단지 내의 재활용율을 극대화함으로써 용수 수급을 원활히 하고 산업단지 외부로의 배출량을 최소화하여 환경, 경제, 사회적 성과의 향상을 도모할 수 있는 생태산업단지의 구성에 크게 기여할 것으로 판단되고 된다. 이를 위해 물리적인 흐름보다는 생태단지의 용수 네트워크에 그 초점을 맞추므로써 망중심 전략 (chain-oriented strategy)이 필요하다. 생태산업단지의 개발과 구축시 기술소개는 2005년 10월 화학공학에 소개된 “총설: 청정 생산을 위한 생태산업단지 개발과 주요기술” 논문(유창규외)을 참조.

결론

수자원 관리에 대한 중요한 동기유발 요소는 제한된 수자원을 위한 경쟁과 환경 규제 때문에 발생하는 용수 및 폐수처리시 비용 증가이다. 용수 최소화의 기본 목표는 기업의 공장에서 최적의 용수관리를 유지하고 환경 기준을 충족시키면서 가장 경제적인 방법으로 용

수 수요량와 수질을 만족시키는 것이다. 본 기술소개의 용수 재이용은 아주 복잡한 산업들의 현장 특성에 많이 의존하며 공장의 용수사용량과 폐수 배출량을 최소화하려는 목적으로 기술적 가능성과 경제적 이익의 두 가지 중요한 기준을 만족해야 한다. 기술적 가능성에서 오염 물질의 제거 및 분해를 원하는 정도까지 해 널 처리기술들의 성과와, 각 공정의 운영성, 공정 변화의 적절한 적용 같은 영역을 다루게 된다. 경제적 분석에는 투자비용, 운영/유지비, 절수, 그리고 관련 에너지와 용수의 비용 절감 등을 포함한다. 이렇게 매우 세분화된 문제에 대한 환경적 영향을 고려하여 최적 해를 구하는 것은 아주 어려운 문제가 될 수 있다. 따라서 소개된 워터핀치방법 같은 최적 용수재이용에 대한 체계적인 접근을 도입함으로써 용수 다소비 산업에서 수자원 현황을 효과적으로 진단하고 용수 최소화 방안을 제시하며 경제적/기술적/환경적 장점에 기초하여 용수 재사용 및 재생 방안을 적용하고 유효성을 입증 효과를 기대할 수 있다. (본 논문은 화학공학의 NICE에 기술소개에 2006년에 초청논문으로 발간 예정.)

참고문헌

1. Wang Y.P. and Smith R. Wastewater minimization, Chem. Eng. Sci., 49(7), pp.981-1006(1994).
2. Water Target™, Users guide, Linhoff March (2004).
3. 유창규외, “지상강좌: 공정산업의 용수 및 폐수 최소화를 위한 Water Pinch 기술, News and Information for Chemical Engineers (NICE), 21(1), pp.65-73 (2003)
4. Aspen water™ 12.1, Users guide, Aspen tech (2002).
5. 박명호외, 산업플랜트의 용수 사용 최적화, 엑서지 엔지니어링 보고서 (2002)
6. Deul, A. S. Systematic approach to water resource management in industry, IWA publishing (2002)
7. 유창규, 허순기, 유동준, 이승준, 신지나, 박용준, 윤학모, 전희동, 문정기, 이인범, “총설: 청정 생산을 위한 생태산업단지 개발과 주요기술, 화학공학, 43(4), pp.549-559 (2005)