

워터핀치기술을 이용한 생태산업단지 내 기업간 용수 재이용망 최적화

Optimization of Water-Reusing Network among the Industries in an Eco-Industrial Park Complex Using Water Pinch Technology

김 용 수, 김 현 주, 이 인 범, 유 창 규*

(Young Soo Kim, Hyun Joo Kim, In-Beum Lee and Chang Kyoo Yoo)

Abstract : An water-reuse network design has drawn attention as a systematic method of reducing fresh water usage and increasing water-using efficiency. The final goal of an eco-industrial park(EIP) is accomplishing industrial sustainability and constructing water-reuse network can be a solution. When designing water-reuse network connecting various processes which consume water, the water pinch technology can be used frequently, since it simultaneously minimize freshwater usage and wastewater discharge. In this research, water pinch technology is applied to develop an effective water-reuse network in an EIP. Three scenarios based on different reusing strategies were developed. The results show that the final water-reuse network can reduce the total fresh water usage more than 30%, while the water expenses decrease by 20%. It can be concluded that water pinch technology is an effective tool to optimize water-reuse network among different industrial facilities.

Keywords : Eco-Industrial Park (EIP), industrial ecology, mathematical optimization, reuse between the industries, steel industrial park, water and wastewater minimization, water reuse network, water pinch technology

1. 서론

최근 환경 규제강화 추세, 폐수처리 비용증가와 더불어 원수가 부족해짐에 따라 다양한 산업 현장에서 원수 사용량과 폐수 방류량을 줄이는 방안이 설득력을 얻고 있다. 각 산업체에서는 공정 내에서 용수를 절약함과 동시에 생산 공정의 과학적이고 체계적인 분석을 통하여 용수의 이용률을 극대화한 후 최종 방류함으로써 물 이용의 효율성을 높이는 용수 재이용 기술을 도입하려는 경향을 보인다. 이러한 추세에 발맞춰 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 워터핀치 기술은 산업 전반에 걸쳐 15-40%의 원수와 20-50%의 폐수를 절약하는 성과를 보이며 성공적으로 적용되어 왔다[1-9].

한편 전세계적으로 기업 공동체를 의미하는 생태산업단지(EIP, eco-industrial park)의 개념이 대두되면서 기업들은 환경 및 자원 관련 문제를 서로 협력하고, 이러한 협력을 통하여 개별적 이익을 넘어서는 집단적인 편익을 도모하고자 하는 움직임이 활발해지고 있다. 생태산업단지는 참여 기업들의 경제적 이익을 향상시키는 동시에 환경 영향을 최소화하는

것을 그 주요 목표로 하며, 단일 부산물 교환 또는 교환 네트워크, 재활용 기업 클러스터, 환경 기술 기업 집합체, '녹색' 제품 생산 기업 집합체 등이 생태산업단지의 대표적인 적용 방식이다[10-12].

생태산업단지 구현을 위한 구체적 적용 방법으로 기업간 용수 재이용망에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 용수 재이용망의 구축은 아주 복잡하며 제조산업의 현장 특성에 영향을 받는다. 공장 내 재이용보다 발전된 형태의 기업간 재이용망은 기업간 용수 사용량을 최소화 하려는 목적을 가지고 있으며, 기술적 가능성과 경제적 이익의 두 가지 중요한 기준을 만족해야 한다. 기술적 기준의 경우 오염 물질의 제거 및 분해를 목표치까지 달성할 후보 처리방안들의 성능과, 각 공정의 운영, 공정 제어의 적절한 적용 같은 영역을 다루게 된다. 경제적 기준은 투자비용, 운영유지비, 절수, 관련 에너지와 원자재 절약을 포함하고 있다. 이러한 서로 다른 기준을 가진 세분화된 문제에 대해 최적 해를 구하는 것은 매우 어려운 일이다[10-14].

본 연구는 워터핀치 기법을 이용하여 업체 내부에서의 국한된 용수 재이용에서 탈피하여 산업단지 차원에서 배출용수를 타 산업체의 용수로 재활용할 수 있는 산업단지 내 기업간 용수재이용 네트워크 구축에 관한 응용 및 방법론을 제시한다. 워터핀치 기법을 통해 산업단지 내 기업간 용수 재이용 네트워크를 제안하였고 용수사용량과 폐수배출량을 절감하기 위한 3가지 시나리오를 제안하였다. 제안된 방법론은 산업단지 내의 재활용을 최대화하여 용수 수급을 원활히 하고 산업단지 외부로의 배출량을 최소화하여 환경, 경제, 사회적 성과의 향상을 도모할 수 있는 생태산업단지의 조성에 기여할 것으로 판단된다.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2008. 6. 30., 채택확정 : 2008. 7. 29.

김용수, 유창규 : 경희대 환경응용화학대학, 환경연구센터/그린에너지센터 (bamsu83@hanmail.net / ckyoo@khu.ac.kr)

김현주, 이인범 : 포항공대 화학공학과

(manec@postech.ac.kr / iblee@postech.ac.kr)

※ 본 연구는 Brain Korea 21프로젝트, 국가청정생산지원센터, 한국학술진흥재단(KRF-2007-331-D00089), 서울시정개발연구원의 산학협력과제(CS070160)의 지원을 받아 수행되었습니다.

II. 본론

1. 용수 재이용 최적화를 위한 워터핀치기술

1.1 워터핀치기술을 이용한 용수 재이용 최적화

워터핀치기술의 기본 모드는 오염물질의 사후처리방식보다는 공정 내에서 용수를 절약함과 동시에 용수의 이용률을 극대화한 후 최종 방류함으로써 용수 이용의 효율성을 높이고자 하는 것이다[1,10].

용수 재이용망 구축의 출발점은 모든 공정이 원수로 채워진 용수 재이용 네트워크를 구현하는 것이다. 일반적으로 분리 공정으로부터의 모든 유출 흐름들은 유출흐름처리장치에서 동시에 모아지고 처리된다. 도시와 공장의 배출용수를 즉각적으로 처리하는 폐수처리시설이 도입될 경우 처리수는 현장에 사용되거나 하수시스템으로의 유출이 가능하다. 이러한 공정에서 발생하는 용수 및 폐수를 이용하는 방식은 재이용, 재생 후 재이용, 재생 후 순환 재이용 등으로 구분된다 [1,7]. 실제 산업 현장에서는 하나의 공정에서 용수 재이용뿐만 아니라 전체 산업공정에서 사용되는 용수 사용량을 최소화시킬 필요가 있다.

워터핀치는 기존의 용수 수지 (water balance)를 조사한 후 용수의 오염 물질의 흐름에 기초하여 공정을 구성하는 단계 공정 별 오염물질의 농도변화를 파악하면서 시작한다. 용수 수지를 통해 각 공정에서 사용되는 공정수의 유량과 함께 주요 오염물질로 지정된 각 물질이 공정 내에 얼마나 존재하며 유입 및 유출되는 것인가를 알 수 있다. 이러한 분석을 통하여 그림1에서와 같이 전체 공정에서 오염물질의 농도에 따른 흐름도인 용수복합선도(water composite curve) 그래프로 용수 수지를 표시한다. 용수를 공급하는 흐름 (water source)과 용수가 필요한 공정(water sink) 사이의 주요 대상이 되는 오염물질을 선정하여 각 공정마다 통합 청정도로 나타낸다. 통합 청정도 그래프의 가로축은 용수 유량을 나타내고 세로축은 수질을 나타내며 최소오염농도에 대한 상대치를 표시한다. 여기서 세로축은 높은 청정도(낮은 오염도)에서 낮은 청정도(높은 오염도)로 표시한다.

그림 1에서 보면, 용수는 청정도가 높은 수치를 나타내는 용수 흐름으로 오염물질에 의한 오염이 거의 없는 상태를 말한다. 그림 1의 그래프에서 깨끗한 용수를 기준으로 하여 오염물질이 추가됨에 따라 나타나는 농도변화에 맞추어 용수에서부터 폐수까지 공정을 통과할 때 마다 나타나는 공정수

의 농도변화를 세밀히 분석할 수 있다. 공정이 운전되면서 (그래프의 우측에서 좌측으로 갈수록) 용수공급선이 각각의 공정을 통과할 때마다 용수공급흐름의 청정도는 점점 낮은 수치를 나타내게 된다. 이것은 공정수의 흐름에 있어서 용수공급흐름과 용수이용흐름의 관계를 정리하는 것으로 오염물질의 이동에 의해서 용수의 오염도가 증가하게 되는 것을 의미한다. 이 관계에서 각각의 공정의 오염농도는 공정의 제한 유입농도를 설정할 수 있는 자료로서 활용될 수 있다[7].

이 청정도 그래프에서 용수공급선과 용수이용선이 수평으로 겹치게 되는 면적은 용수 재이용이 가능한 범위를 나타내며 두 그래프가 만나는 점을 핀치점 (pinch point)라 정의한다. 용수 재이용은 기본적으로 이 핀치점에 의해 제한된다. 또한, 핀치점 우측에서 용수공급흐름이 용수이용흐름과 중복되지 않은 면적이 필요한 최소용수필요량이며 핀치점 좌측에서 용수공급선이 용수이용흐름과 중복되지 않은 면적을 최소폐수배출량으로 정의한다. 이 핀치점을 기준으로 공정에서 필요한 용수공급량과 폐수 배출량이 계산될 수 있다.

따라서 그림 1의 빗금 친 용수공급과 용수흐름이 겹치는 부분 내에서 용수재이용을 최대화 하는 것이 최소용수 및 최소 폐수 배출을 가능하게 한다. 원칙적으로 이러한 청정도 그래프는 각각의 주요 오염물질에 대하여 분석된다. 용수공급선과 용수흐름선 사이의 전체적인 분석을 통해서 핀치점을 찾아내고 여기서 성립되는 제한 조건에 의해 용수의 재이용 양과 그 대상공정을 효과적으로 찾아낼 수 있다. 마지막으로 모든 오염물질에 공통적으로 유용한 용수 재이용 네트워크를 구성하게 된다[8].

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 오염물질의 농도나 종류에 따라서 합성을 하여 간략한 블록모식도로 표시하는 합성과정이다. 먼저 워터핀치분석을 통해 공정수의 오염물질과 종류를 파악한 후, 복합선도를 구축하여 오염물질의 흐름을 알 수 있다. 오염물질의 이동현황에 대해서 파악하고 공정 간에 이동되는 오염물질에 따라서 공정 통합을 수행한다.

이상의 워터핀치 방법론은 간단하지만, 실제 적용되는 워터핀치 사례는 많은 흐름과 다양한 오염물질에 의해 매우 복잡해질 수 있다. 일반적으로 이 과정은 한 번에 하나의 오염물질에 대한 각각의 합성이 필요하고 다성분 오염물질을 고려할 때는 각각의 분석 결과는 전체 최적 해를 구하기 위하여 종합되어야 한다.

2. 워터핀치 과제 수행단계 방법론

재이용 용수를 사용하게 되는 대상공정은 수질분석결과, 현장조사, 현장 운전자들과의 협의, 물질수지 분석결과, 용수 및 물질수지 등의 조사결과를 바탕으로 하여 재이용수가 생산되는 지점을 제한요건으로 하여 선정한다. 구조적인 접근 방법에서 다음 단계는 핵심 오염물질을 선택하는 것이다. 핵심 오염물질은 재사용하는 용수의 흐름에 방해가 되는 특정 성질로 정의된다. 일반적으로 오염물질에는 부유물질, 전도도, 온도, 산성도, pH 등이 포함되고 특히 공정수 재이용에 사용될 경우 침전이 가능한 물질에 대한 급속이온도 대상에

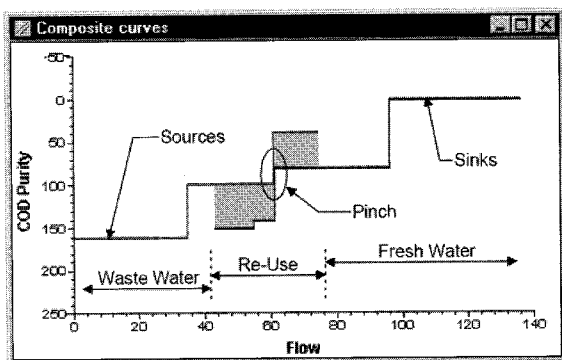


그림 1. 용수공급과 용수이용의 복합선도[13].

Fig. 1. Source and sink composite curves[13].

포함 된다. 현장 과제의 단순화를 위해서, 주요 오염물질의 수를 제한하는 것이 중요하다. 또한 이 단계에서는 목표 농도, 즉 각 하수시설들에 대해 허용되는 최대의 농도와 공급원들에 대한 실제적인 최소의 농도에 해당하는 설계 농도들이 결정되어야 한다. 모든 오염물질이 정의된 뒤, 공급원들의 수질이 이 기준에 맞추어 평가된다.

용수와 오염물의 수지를 확인한 후에, 워터핀치 분석을 시작하며 이 분석과정에는 전 단계로부터 얻은 모든 정보가 포함된다. 특히 유입농도의 민감도 분석을 통해 반응기로 들어가는 유입농도의 증가에 따라 용수 사용에서 최대 절수가 가능한 공정을 파악할 수 있다. 워터핀치분석은 ① 핀치기술을 이용하여 최소 원수 유량을 확인하고, ② 예비 용수재이용 네트워크를 구축한 후, ③ 재이용 수를 줄이면서 경험적인 방법을 통해 예비 용수재이용망을 단순화한 후에, ④ 재이용이 제한된 지역을 확인하고 최소원수유량을 더 줄이기 위해 공정변화를 제안하고 몇 가지 용수 재이용 시나리오를 제시하는 과정을 통해 이루어진다.

이러한 워터핀치를 적용한 용수 재이용 과제의 총괄 흐름도는 다양한 산업에서의 용수 재이용을 위해 워터핀치를 적용하는 과정에 있어서 단계적 방법론으로 사용될 수 있다.

그림 2은 실제 산업공정에서 워터핀치 구축 과제 수행 시 체계적인 수행단계를 나타낸 것이다. 이 그림은 용수 공정 모델링 및 합성 기능을 사용하여 용수 재이용 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 설계를 다시 모델링하는 단계로 구성된다. 워터핀치를 이용한 최적 용수 네트워크의 목적함수에는 원수 비용뿐만 아니라 배관비용, 재생비용 폐수배출비용을 포함할 수 있다. 공정들 사이의 거리, 저장조의 사용 가능한 공간, 재활 장치 (regeneration unit) 등을 고려하여 기술적으로 가능한 시나리오들 중에서 선택하면, 필요한 투자, 운영 비용 등이 계산된다 [11,14,15].

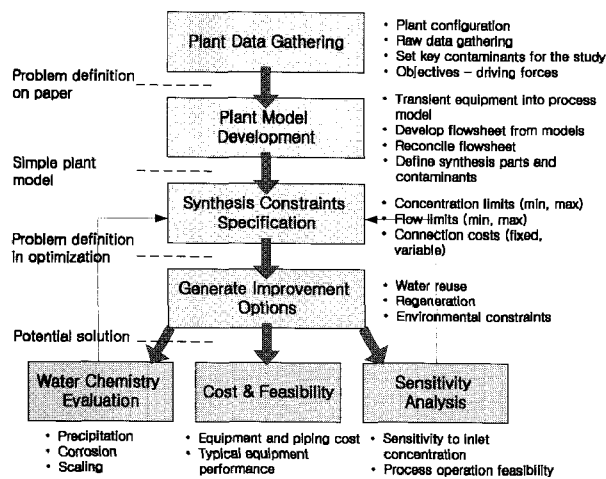


그림 2. 공정산업에서 워터핀치를 적용한 용수재이용 과제 흐름도 [14].

Fig. 2. Project work flow of water reuse network using water pinch technology in process industries [14].

3. 생태산업단지 내 기업간 용수 교환망 설계

환경오염과 자원고갈에 의해서 인류활동의 생태적 영향을 최소화하는 지속 가능한 산업개발이 최근 관심을 받고 있다. 이 개념은 대규모 산업 시스템에 대한 혁신을 통하여 환경적 영향과 경제적 성과를 동시에 증진시킴으로써 지속 가능한 발전을 이루자는 의미를 담고 있다.

기존 산업단지의 경우 단일 기업 내 용수 사용 최소화의 기본 목표는 각 기업 공장을 구성하는 공정에서 적절한 운영과 환경 기준을 유지하면서 비용 효율적인 방법으로 용수 요구와 수질을 만족시키는 것이다. 그러나 단지내의 수자원 제한 및 강화되는 환경 규제에 의해 관련 수자원 비용 및 배출 용수 처리비용의 증가가 두드러지며, 이는 산업단지 내 기업간 용수 재이용 네트워크 구축을 통한 산업단지 전체적인 용수 재이용에 대한 필요성을 증가시킨다.

이러한 요구에 따라 워터핀치 기법을 생태산업단지 내 용수교환망에 적용하여 기업간 용수 재이용에 대한 연구와 과제에 대한 필요성이 증가하고 있다. 기업간 재이용을 고려할 경우 단일 기업 내에서 재이용이 불가능하다고 판단되는 폐수나 용수를 다른 기업에서는 재사용할 수 있는 기회를 제공하게 된다. 예를 들어 제조공정에서 초순수를 필요로 하는 반도체 공장에서 나오는 폐수는 다양한 종류의 산업에서 재이용될 수 있다. 이에 따라 산업단지 내에서 재이용이 가능한 용수를 소비하고 배출하는 공장들을 주요 대상으로 하여 이들 기업간 용수 재이용의 가능성을 확인하고 재이용 네트워크를 구축하여 최적의 용수 재사용 구축에 대한 연구가 진행 중이다[11]. 이는 생산활동에서 용수뿐만 아니라 폐수를 감소시킴으로써 생산비용과 환경오염을 감소시키므로 사전 예방 원칙에 부합하여 사후처리방법보다 더 효과적인 방법이다.

4. 산업단지 내 기업간 용수재이용

4.1. 공단 내 재이용 가능업체의 용수수지

워터핀치기술은 생태단지 내 용수 재이용 네트워크 구축이 체계적으로 진행하는데 필수적인 이론의 정립, 경제성 평가와 실제 적용 시 보완해야 할 사항 등을 제시할 수 있다. 이는 기업 내에서의 용수 재이용이 아닌 기업간 또는 산업단지 내의 재활용을 극대화함으로써 용수 수급을 원활히 하고

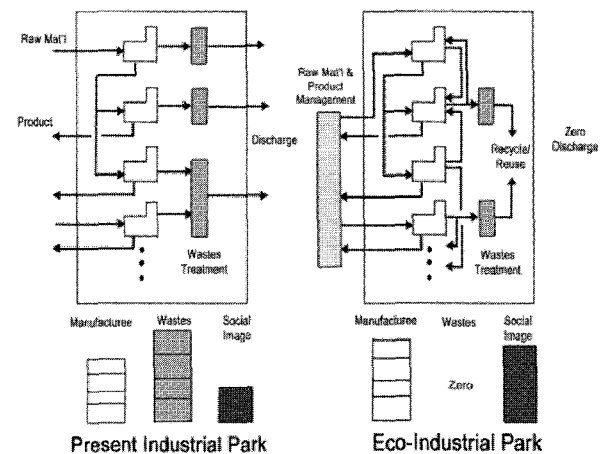


그림 3. 생태산업단지의 기본 개념[10].

Fig. 3. Basic concept of eco-industrial park[10].

산업단지 외부로의 배출량을 최소화하여 환경, 경제, 사회적 성과의 향상을 도모할 수 있는 생태산업단지의 구성에 크게 기여할 것으로 판단된다[10,11].

본 연구에서는 워터핀치 기법을 통해 P산업단지 내 13개 기업들에 용수사용량과 폐수배출량을 절감하기 위한 용수 재이용 네트워크를 제안하였다. P공단 내 11개 업체 (DA, SA, IS, PKC, SS, DY, HK, PKA, DK, CS, NS, 업체 명은 약어)와 청림 지구의 2개 업체(DSC, PR)를 포함하여 총 13개 주요기업들의 용수 수지를 작성하였다. 선정된 13개 업체는 P공단의 입주업체 중 공업용수 사용량이 일 300톤 이상인 곳으로 경제성 측면에서 타당성이 나올 것으로 예상되는 업체들이며 인근 업체와 용수교환망 구성이 가능할 것으로 예상되는 업체를 선정하였다. 기업간 재이용 네트워크 문제를 단순화하기 위해 사용되는 용수는 공업용수(process water, PW)로 통일하였다.

표 1은 기업간 용수 최적화를 위한 현재 P공단 내 13개 기업들의 용수 수지이다. 공정에 사용되는 원수는 전부 공업용수로 구성된다. 단지의 13개 업체는 총 642.3 ton/h의 공업용수가 사용되며 재이용가능 폐수처리장의 배출용수는 552.2 ton/h로 파악되었다.

용수 재이용의 중요한 목적은 용수, 방출용수, 폐수처리비용의 운전비용과 관련된 비용을 줄이는 것이다. 비용 단위는 각 원수 가격, 폐수 처리비용, 운전 비용, 배관 비용을 동일한 기준에서 처리하기 위한 통일된 상대 비용개념으로 정의된다[13]. 여기서 가능한 최대 투자 비용은 50 비용단위 (cost unit, cu)로 제한하였다. 기업간 용수 재이용의 경우 공업용수

표 1. 산업단지 내 13개 기업들의 용수 수지.

Table 1. Water balance of 13 industries in an industrial park.

| | Industry | PW usage | Process output |
|-------------------|----------|----------|----------------|
| | | m3/h | m3/h |
| 1 district | DA | 145.5 | 108.3 |
| | SA | 19.8 | 18.75 |
| | IS | 40.8 | 32.9 |
| | PKC | 18.5 | 12.6 |
| | SS | 13.7 | 12.5 |
| | DY | 28.5 | 24.5 |
| | HK | 17.2 | 16.6 |
| | PKA | 33.3 | 33.3 |
| | DK | 47.7 | 39.5 |
| | CS | 16.5 | 16.5 |
| | NS | 21.5 | 20.0 |
| ChungRim district | DSC | 32.9 | 29.1 |
| | PR | 206.0 | 187.5 |

비용, 배출용수 비용, 폐수처리비용, 배관비용 같은 기본 데이터가 필요하고 사용된 비용관련 데이터는 다음의 표 2와 같다.

여기서 h는 운전 시간 (hour)이고, 주요 오염물질은 현장 과제의 단순화를 위해서 공정과 용수중의 유기물질(COD), 고형물(SS), 이온전도도 (conductivity)로 3가지 오염물질로 한정하였다.

표 3은 연구에서 사용된 재이용가능 용수의 유량, 수질, 비용을 나타낸다. 단지 내의 용수 재이용을 위하여 연결되어야 하는 기업 간의 거리에 따라서 배관의 길이와 그에 따르는 투자비용이 결정되므로 표 3의 재이용관련 비용이 최적화 목적함수에 반영되었다.

기업간 재이용을 하고자 하는 경우 거리나 경제성 측면에서 재이용 유량이 많아야 경제성이 높아지므로, 공정 내 재이용의 최소유량으로 알려진 1 ton/hr의 5배인 5 ton/hr = 120 ton/day를 기업간 재이용 가능한 용수 최소유량으로 설정하였다.

경제성 평가를 위해 1000원을 1 Euro(1원 = 0.001 Euro)로 계산 하고 투자비, 운영비, 건설비용을 용수재이용 시나리오 최적화 과정에서 고려하였다. 또한 거리나 현장 여건상 각

표 2. 생태산업단지에서 용수재이용의 비용인자.

Table 2. Cost unit of water reuse in an EIP.

| Basic | Cost unit (Cu) |
|--------------------------|----------------------------|
| Process water | 0.6 cu per ton/h |
| New pipe(fixed cost) | 2 Cu |
| New pipe(operation cost) | 0.02 Cu/ton/h |
| sewer cost | 0.2 cu/ton/h of wastewater |

표 3. 용수의 주요 오염농도 및 용수가격.

Table 3. Water cost and concentration in water reusing project.

| | Flowrate (ton/h) | COD (ppm) | SS (ppm) | Conductivity (mS/cm) | cost (won/ton) |
|---|------------------|-----------|----------|----------------------|----------------|
| Clean water (CW) | | 0.5 | 0 | 1 | 600 |
| Process water (PW) | 642 | 1 | 0.5 | 2 | 400 |
| Water from Wastewater Treatment (WWT) | 100 | 10 | 50 | 30 | 100 |
| Filtered Water from Wastewater Treatment (FWWT) | 100 | 1 | 1 | 1 | 200 |
| Reservoir Water (RW) | 100 | 10 | 50 | 30 | 100 |
| Filtered Reservoir Water (FRW) | 100 | 2 | 2 | 2 | 200 |

공단내의 업체들 사이에 재이용이 가능하도록 한정하여 각각 단지 밖 기업들과의 재이용은 없다고 가정하였다.

전술한 바와 같이 본 연구의 대상인 P산업단지에서는 최소 재이용 유량의 규모가 5 ton/hr이상으로 가정하였고 업체 폐수처리장의 배출용수, 그리고 종말처리장 배출용수, 저수지 처리용수 (reservoir, RW)의 수질은 저농도 처리가 가능한 세정용수, 정원수 및 화장용수, 그리고 냉각 탑(CTM, cooling tower makeup)에서의 수질조건을 만족하도록 처리하여 재이용 가능하도록 하였다.

4.2 산업단지 내 기업간 용수 재이용의 3가지 시나리오

본 연구는 P산업단지에 워터핀치기술을 적용하여 재이용 유량이 5 ton/hr이상인 각 업체 폐수처리장의 배출용수, P하수종말처리장 배출용수, 저수지 처리용수, 우수처리수의 재생 처리용수를 이용하여 저농도 처리가 가능한 세정용수, 화장용수, 냉각 탑에서 요구하는 제한 농도수치에 맞게 처리한 후 재이용하는 네트워크를 구축하는 것을 그 목표로 하였다.

산업단지 내 기업간 용수재이용의 잠재적 비용효율을 높일 수 있는 3가지 시나리오를 도입한 기업간 용수 재이용망을 모델링 하고 결과를 기존 상황과 비교함으로써 최적의 생태산업단지 구성을 도출하고자 하였다. 표 4는 P공단 기업간 용수 재이용의 3가지 시나리오를 나타낸다. 각 시나리오는 재이용 가능한 기업 최종 배출용수를 이용한 기업간 용수재이용(시나리오1), 기업 최종 배출용수의 재생 후 재이용(시나리오2), P종말폐수처리장 배출용수의 기업간 재이용 (시나리오3)이며, 이들은 경제적 효과 및 환경적 효과를 중심으로 평가하였다.

4.2.1 시나리오 1: 재이용 가능한 기업 공정수 및 배출용수를 이용한 기업간 용수 재이용

워터핀치를 이용한 각 기업들의 공정 배출용수 및 폐수처리장 방류용수를 세정용수, 화장실 용수, 냉각용수, 세정수로 재이용하는 방안에 대해 워터핀치기술을 이용하여 평가하였다.

재이용수의 선정과 대상 공정은 앞에서 말한 바와 같이 공정의 한계 유입 농도와 배관 연결에 따르는 비용, 처리 시설 도입에 따른 경제성 평가 등과 같은 요소들을 고려하여 선정되었다. 재이용이 가능한 4개 업체에서는 세정용수, 화장용수, 그리고 냉각용수로 사용되므로 각 기업의 COD, Conductivity, SS의 제한 농도 수치는 각각 25, 10, 5로 설정하였다.

본 연구에서는 재이용 판단 기준으로 3가지의 오염물질을 고려하였기 때문에 다성분 오염물질 수학적 최적화 방법을

표 4. 공단 기업간 용수재이용의 3가지 시나리오.

Table 4. Three scenario of water reuse between industries in P industrial complex

| | |
|------------|--|
| Scenario 1 | water reuse among industries using process output and effluent |
| Scenario 2 | water reuse among industries using the regeneration of process output and effluent |
| Scenario 3 | water reuse among industries using the effluent of wastewater treatment plant |

이용하여 기업간 용수 재이용 최적화를 수행하였다. 수학적 최적화 방법에서는 엔지니어가 미리 설정한 제약조건들에 따라 최소원수유량을 구한다. 이를 위해 재이용이 가능한 공정흐름도 구성을 위한 간략한 모식도로서 각 공정의 유량이나 오염물의 농도, 양, 배관의 구성자료로 데이터가 필요하고 순차적으로 흐르게 되는 각각의 계산식이 필요하다. 각각의 공정은 실제 해당공정에서 오염물질이 반응하거나 투입되어 실제 변화가 일어나는 과정이 물질수지 식으로 표시되므로 용수가 지나갈 때 발생하는 오염물질의 농도변화를 파악할 수 있다.

시나리오 1의 경우 13개 업체들로 가능한 모든 재이용 가능성을 포함하는 은구조(superstructure)로 나타내고 각 업체 공정의 입구와 출구에서 허용되는 오염 농도가 $(C_i^{in})_{max}$, $(C_i^{out})_{max}$ 인 용수 흐름을 모사한다. 기업간 용수 최적화의 목적함수는 원수 사용을 최소화 하는 것으로 공정의 원래 목적을 만족하면서 최소의 원수를 사용할 수 있는 최적의 용수 재이용 네트워크를 결정하는 것으로 이러한 최적화 문제는 다음과 같이 구성할 수 있다.

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

여기서 W_i^f 는 각 기업에서 사용하는 원수 사용량이고, N 은 기업의 수를 나타낸다. 제시된 최적화 문제는 공정의 형태에 따라 비선형 최적화나 혼합 정수 비선형 최적화 문제로 나타난다. 기업간 용수 최적화 문제의 제약조건은 재이용 가능한 최대 연결 수는 5개로 한정 하였고 최소 재이용 유량은 5 ton/h로 제한 조건을 두었다. 재이용수의 새로운 배관 고정비로 1 Cu 그리고 변동비로는 0.04 Cu로 설정하였고 기존 공업용수(PW)는 고정비 0 Cu, 변동비 0.4로 설정하였다. 단지 내 재이용 가능 기업들 사이의 거리는 500미터로 설정하였고 단지 사이의 거리 때문에 1단지와 청림 지구 사이에서는 재이용이 불가능 하도록 하여 각 기업들의 배출용수 재이용의 가능성을 타진하였다.

그림 4는 위 2개의 용수 재이용 시 수학적 최적화의 결과를 나타낸 것이고 최적화 결과 공단 내 기업간 재이용 가능 업체 4곳으로 각 기업들의 폐수처리장 배출용수를 1단지 2개 업체(A, B업체)와 청림 지구 2개 업체(C, D업체)의 세정용수, 화장용수, 그리고 냉각용수로의 재이용이 가능한 것으로

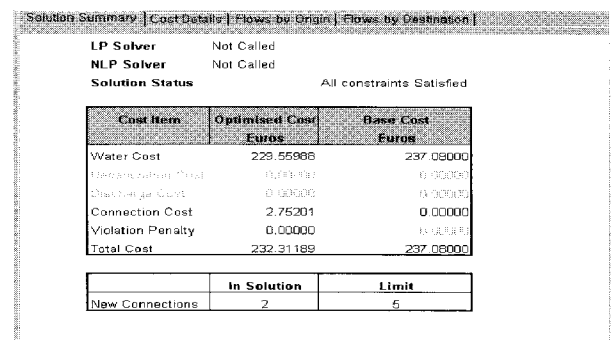


그림 4. 기업 배출수의 용수 재이용 최적화 결과 (시나리오 1).
Fig. 4. Optimization result of water reusing network through the industries (scenario 1).

파악되었다.

그림 5는 생태산업단지 내 기업 최종 배출 수를 이용한 기업간 용수 재이용 네트워크를 나타낸다. 1단지에서 배출용수 중 가장 재이용 가능성이 많은 것으로 파악된 SA(제철업종)의 최종 배출용수는 가까운 B업체의 세정용수 및 화장용수로 기존의 공업용수대신 10 ton/h로 재이용가능하며 가까운 A업체의 세정공정에 공업용수 대신 8.8 ton/h로 재이용이 가능하다. 청림 지구에서 워터핀치 적용결과 재이용이 가능한 최종 배출용수는 없는 것으로 파악이 되었다. 위 2개의 용수 재이용 시 경제성 평가 배출용수의 재이용 자료로 기존의 용수 공급라인을 이용할 경우 237.08 Cu이고 A와 B업체의 공업용수중 18.8 ton/h를 세정용수 및 화장실 용수로 재이용 할 수 있고, 최적화된 비용은 232.31 Cu이다.

4.2.2 시나리오 2 - 폐수처리장 방류수의 재생(regeneration)후 재이용

두 번째 시나리오는 보다 현실적인 대안으로 P공단 내 3

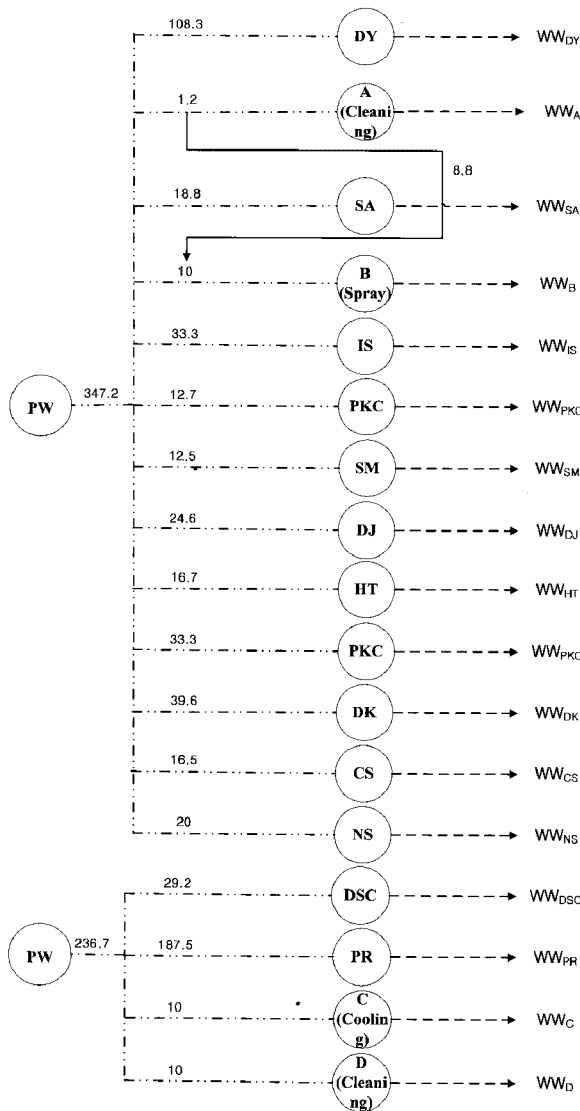


그림 5. SA기업의 배출용수의 재이용 시 기업간 용수 재이용 네트워크 (시나리오 1).

Fig. 5. Water-reusing network through the industries using water reuse from SA steel effluent (scenario 1).

개 업체의 폐수처리장 방류용수를 재생 후 재이용하는 방안이다. 재생대상인 3개 업체는 1단지에서 SA 업체, PKC 업체 (도금공장) 그리고 다른 지구의 PR 업체를 선택하였다. 재이용의 경제성 평가를 위해 Linhoff 와 Aspen[13-14]의 연구과제에서 제시된 비용단위를 이용하였다. 재이용수의 새로운 배관 고정비로 1 Cu, 변동비로는 0.04 Cu로 설정하였고, 기존 공업용수(PW)는 고정비 0 Cu, 변동비 0.4로 설정하였다. 재생의 고정비는 0.05 Cu, 그리고 변동비는 0.03 Cu로 설정하였다.

워터핀치 적용결과 1단지에서 배출용수 중 재생 후 재이용 가능성이 가장 많은 것으로 파악된 SA업체의 재생 배출용수는 가까운 B업체의 세정용수와 화장실 용수로 기존의 공업용수대신 10ton/h 으로 재이용 가능하다. 그리고 PKC업체의 도금공장 재생 배출용수는 가까운 A업체의 세정공정에 공업용수대신 10.0ton/h로 재이용 가능하며 다른 지구에서는

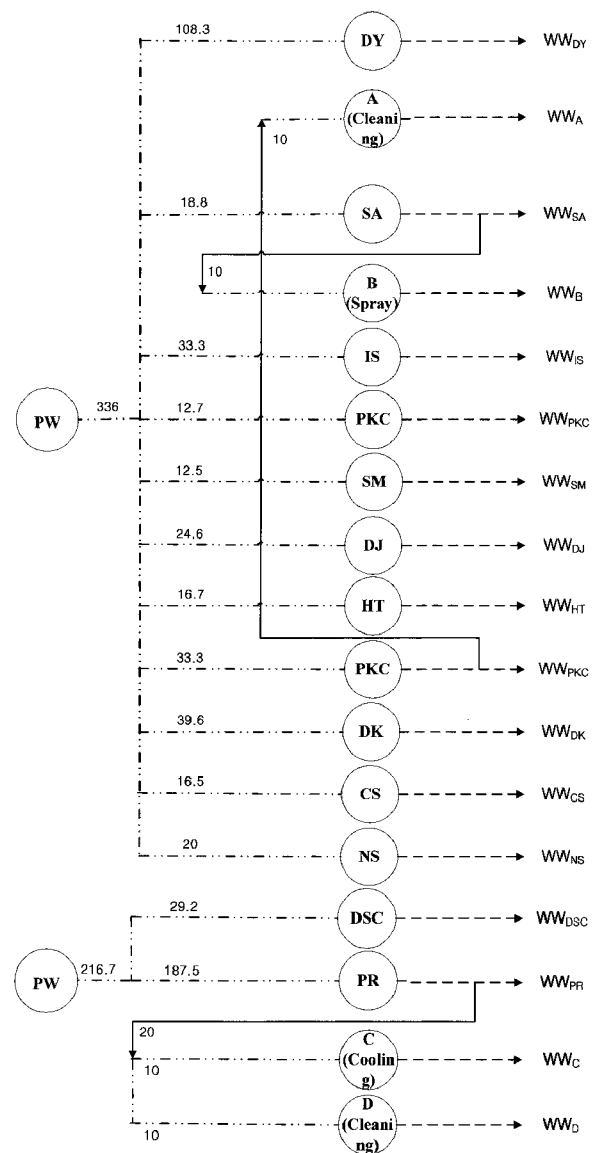


그림 6. 4개 업체 최종 배출용수 재생 후 재이용을 통한 4개 용수 재이용 시 철강공단 내 기업간 재이용 네트워크 (시나리오 2).

Fig. 6. Water-reusing network through the industries using the effluent reuse from 4 industries (scenario 2).

PR업체의 재생 배출용수로서 가까운 인근의 C업체의 냉각수와 D업체의 세정수로서 각각 10 ton/h로 재사용될 수 있는 것으로 파악이 되었다.

4개 업체의 용수 재이용 시 경제성 평가 배출용수의 재이용 자료로 기존의 용수 공급라인을 이용할 경우 237.08 Cu이고 A, B, C, D 4개 업체의 공업용수중 40.0 ton/h를 세정용수, 냉각용수 및 화장실 용수로 재이용할 수 있고 최적화된 비용은 225.08 Cu이다.

그림 6은 4개 업체 최종 배출용수 재생 후 재이용을 통한 4개 용수 재이용 시 P공단 재이용 용수 수지를 나타낸다. 워터핀치 방법론의 적용 결과 기업 배출용수의 재생 후 재이용 방안은 이에 따른 부정적 영향(관식, 부식, 생산 품질 등)을 추가적으로 고려하여야 한다. 민감도 분석 결과 소량의 유기물 증가는 예상되나 그 정도가 미미하여 용수의 화학적 성질은 크게 변하지 않을 것으로 예상하고 있다. 배출용수의 기업간 재이용 시 각 기업들의 배출용수의 상세한 화학적 성분을 조사하지 않아 추가조사를 통해 더 현실성 있는 대안을 파악할 수 있다.

4.2.3 시나리오 3 - 종말하수처리장의 배출용수를 기업들에서 재이용

점점 용수 수급이 어려워지고 용수가격이 증가함에 따라 새로운 대체 수자원 개발이 필요하다. 칠강공단 내 대체 수자원으로서 P업체 배수 처리장에서 배출되는 처리수의 공단용수로의 이용 방안, 강물을 이용한 공업용수 개발 방안, 저수조를 이용한 공업용수 개발 방안, 도시 하수처리장 처리수의 고도처리를 통한 공업용수 개발 방안 등이 있다.

본 연구에서는 대체 수자원으로 도시 하수처리장 최종 처리수의 고도처리를 통한 기업간 재이용 가능성에 대하여 연구를 수행하였다. 3번째 시나리오로서 도시 종말하수처리장 배출용수를 각 업체의 공업용수, 세정용수, 화장실 용수, 냉각수, 냉각탑 메이크업수의 대체 공급수로의 이용에 대해 평가하였다.

표 5는 종말폐수처리장의 유량과 COD와 SS의 배출용수 수질을 나타낸다. 종말처리장의 배출용수는 재생되었다고 가정하였고 재이용 가능한 종말 배출용수는 100 ton/h로 설정하였고 재생된 COD, Cond, SS농도는 1,1,1로 설정하였고 변동비는 공업용수(0.4 ton/h)보다 저렴한 0.1 ton/h로 설정하였다.

워터핀치 적용 결과 종말처리장의 배출용수 100ton/h중 62.95 ton/h이 6개 업체(HT업체, A, B 업체, DSC업체, C, D업체)에 재이용이 가능하다. 최적 용수 공급결과 최종 배출용수는 1단지에서 A업체의 세정공정과 B업체의 세정용수 및 화장실 용수로, 다른 지구의 C업체의 냉각수와 D업체의 세정수로서 기존의 공업용수대신 각각 10 ton/h로 사용될 수 있다. 또한 1

표 5. 종말폐수처리장의 배출량과 배출용수 수질.

Table 5. Effluent quality of a domestic wastewater treatment plant.

| Effluent flowrate (m ³ /d) | COD(mg/L) | SS(mg/L) |
|---------------------------------------|-----------|----------|
| 128,045 | 4.64 | 0 |
| 182,477 | 4.68 | 1 |
| 159,564 | 4.19 | 2 |
| 167,962 | 4.25 | 1 |

단지의 HT업체의 기존 공업용수16.7 ton/h는 8.35 ton/h의 배출용수는 8.35 ton/h의 기존공업용수와 섞어서 공업용수로 사용될 수 있다. 다른 지구의 DSC업체의 경우 기존 공업용수29.2 ton/h는 14.6 ton/h의 배출용수는 14.6 ton/h의 기존공업용수와 섞어서 공업용수로 사용될 수 있다. 따라서 도시 종말하수처리장의 배출용수를 62.95 ton/h의 공업용수를 대체수자원으로 이용할 수 있다.

시나리오 3의 6개 용수 재이용 포인트의 경제성 평가로 기존의 용수 공급라인을 이용할 경우 237.08 Cu이고 공업용수중 62.95 ton/h를 배출용수로 대체할 수 있고 최적화된 비용은 218.19 Cu이다. 그림 7은 도시 종말 하수처리장의 배출용수를 이용한 칠강공단 내 6개 기업 재이용 망을 나타낸다. 시나리오3의 경우 도시종말처리장 배출용수의 재생 후 재이용 방

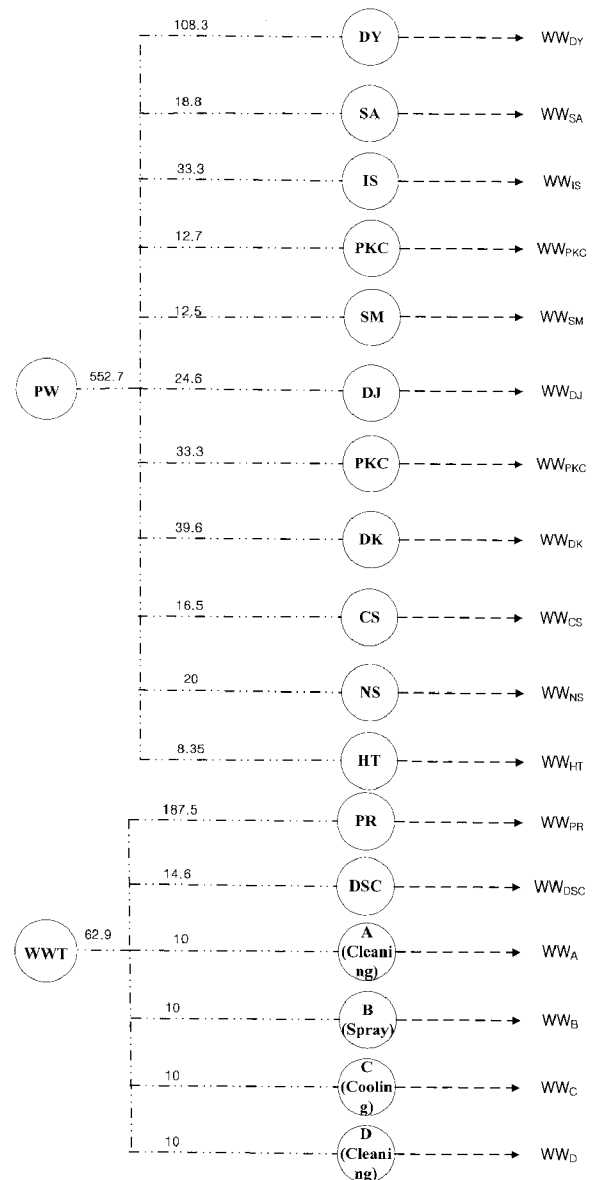


그림 7. P 종말 하수처리장의 배출용수를 이용한 칠강공단 내 6개 기업 재이용 네트워크 (시나리오 3).

Fig. 7. Water-reusing network through the industries using the effluent reuse from a domestic wastewater treatment plant (scenario 3).

표 6. 생태산업단지에서 기업간 재이용 최적화 결과,
Table 6. Result of the water reuse optimizations among the industries
in an EIP.

| | Number of reuse industries | Saved fresh water | Reduction of Cost Unit |
|-------------------------------|----------------------------|-------------------|------------------------|
| Existing water supply network | 0 | 0 | 237.08 Cu |
| Scenario 1 | 2 | 18.8 ton/h | 232.31Cu |
| Scenario 2 | 4 | 40.0 ton/h | 225.08 Cu |
| Scenario 3 | 6 | 62.95 ton/h | 218.19 Cu |

안은 이에 따른 부정적 영향(관석, 부식, 생산 품질 등)을 추가적으로 고려하여야 한다.

표 6은 산업단지 기업간 재이용 최적화의 3가지 시나리오 결과를 정리한 것이다. 먼저 재이용 가능한 기업의 경우 시나리오 1은 2개 기업, 시나리오 2는 4개 기업, 그리고 시나리오 3은 6개 업체가 산업단지 내에서 재이용이 가능하였다. 앞으로 더 많은 기업 조사를 통해 훨씬 더 많은 재이용 업체 발굴이 가능할 것으로 판단된다. 공업용수중 기업 배출용수가 대체가 가능한 유량은 각각 18.8 ton/h, 40.0 ton/h, 62.95 ton/h 이고 비용인자 측면에서는 기존 용수네트워크의 경우 237.08, 3가지 시나리오의 경우 각각 232.31, 225.08, 218.19 Cu으로 공업용수 중 62.95 ton/h을 배출용수로 대체하는 시나리오 3의 최적화된 비용은 218.19Cu이다.

III. 결론

본 연구에서는 워터핀치 기법을 통한 기업간 용수 재이용 망 구축을 위한 방법론을 제안하였으며 이를 적용하여 철강 산업단지 내 용수 네트워크를 구축하기 위한 시나리오를 제시하고 이를 평가하였다. 각 시나리오는 기업 최종 배출용수를 이용한 2개 기업간 용수재이용 (시나리오 1), 4개 업체 최종배출용수의 재생 후 재이용을 이용한 기업간 용수재이용 (시나리오 2), P중말폐수처리장의 배출용수를 6개 기업에서의 재이용 (시나리오 3)로 각각 경제적 효과 및 환경적 효과를 중심으로 분석하였다. 분석결과 산업단지에서 62.96 ton/h의 용수 재이용이 가능하여 최대 6개 기업간 재이용이 가능한 것으로 판단되었다. 워터핀치기술은 산업단지 내의

용수 재활용을 극대화함으로써 용수 수급을 원활히 하고 산업단지 외부로의 배출량을 최소화하여 환경, 경제, 사회적 성과의 향상을 도모할 수 있는 생태산업단지의 조성에 크게 기여할 것으로 판단된다.

참고문헌

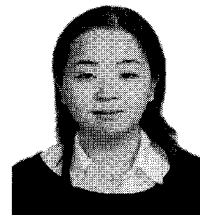
- [1] Y. P. Wang and R. Smith, "Wastewater minimization," *Chem. Eng. Sci.* vol. 49, no. 7, pp. 981-993, 1994.
- [2] Y. P. Wang and R. Smith, "Design of distributed effluent treatment system" *Chem. Eng. Sci.*, vol. 49, no. 18, pp. 3127-3145, 1994.
- [3] S. J. Doyle and R. Smith, "Targeting water reuse with multiple contaminants," *Trans. IChemE*, vol. 75, pp. 181-189, 1997.
- [4] J. G. Dunn Mann and Y.A. Liu, *Industrial water reuse and wastewater minimization*, McGraw-Hill, 1999.
- [5] M. Bagajewicz, "A review of recent design procedures for water networks in refineries and process plants." *Comp. Chem. Eng.* vol. 24, pp. 2093-2113 (2000).
- [6] Y. H. Yang, H. H. Lou and Y. L. Huang, "Synthesis of an optimal wastewater reuse network," *Waste Management*, vol. 38, no. 5, pp. 311-319, 2000.
- [7] C. K. Yoo et al., "Water Pinch Technology for Water and Wastewater Minimization in the Process Industry," *News and Information for Chemical Engineers (NICE)*, vol. 21, no. 1, pp. 65-73, 2003.
- [8] D.S. Park et al., "Optimization of water reuse network using water pinch technology in petrochemical industries," *Korean Society of Environmental Engineers*, vol. 25, no. 12, pp. 1550-1556, 2003.
- [9] A. S. Deul, *Systematic Approach to Water Resource Management in Industry*, IWA publishing, 2002.
- [10] E. A. Lowe, "Eco-industrial park handbook for asian developing countries," Asian development bank report, 1997.
- [11] C.K. Yoo, S.K. Heo, D.J. Yoo, J.N. Shin, H.D. Chun, J.K. Moon and I.B. Lee, "Review: Eco-industrial park (EIP) development and key technologies for clean production," *Korean Chemical Engineering Research*, vol. 43. no. 4, pp. 549-559, 2005.
- [12] S. E. Keckler and D. A. Allen, "Material reuse modeling: A case study of water reuse in an industrial park," *J. Industrial ecology*, vol. 2, no. 4, pp. 79-92, 1999.
- [13] WaterPinch™, "User manual," Linhoff march, UK, 2004.
- [14] Aspen water™ 12.1, "Getting started guide," Aspen tech, 2004.
- [15] Aspen water™ 12.1, "Users guide," Aspen tech 2001.

김용수

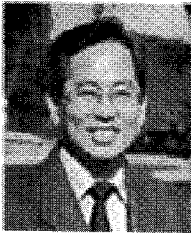


2008년 경희대학교 환경·응용 화학부 환경공학 학사. 2008년 현재 경희대학교 환경응용 과학과 석사과정. 관심분야는 환경 시스템 공학, 환경 통합관리, 환경 모니터링 및 제어

김현주

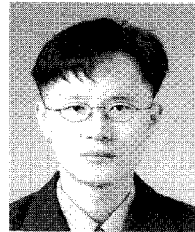


2007년 포항공과대학교 화학공학과 학사. 2008년 현재 포항공과대학교 화학공학과 석사과정. 관심분야는 환경공정설계, 이산화탄소 저감공정, 공정 경제성 평가



이 인 범

1977년 연세대학교 화학공학과 학사 1979년 KAIST 화학공학과 석사 1982년 한국과학기술연구원 연구원. 1987년 Purdue Univ. 화학공학과 박사. 1988년-현재 포항공대 화학공학과 교수. 1998년-현재 지능자동화연구센터 소장. 2004년-현재 한국공학한림원 정회원. 관심분야는 공정제어, 공정 최적화, 공정시스템공학, 공급망관리, CO₂ 저감 연구, 저탄소 철강 공정 연구



유 창 규

1993년 연세대학교 화학공학과 학사 1995년 포항공대 화학공학과 석사 1998년 두산기술원 전임연구원. 2002년 포항공대 화학공학과 박사 2004년 벨기에 겐트대학교 BIOMATH학과 Post-doc 2006년 포항공대 환경공학부 연구조교수 2006년 - 현재 경희대학교 환경응용화학대학 교수. 관심분야는 공정제어, 데이터 마이닝, 시스템즈 생물학(생명정보학), 환경시스템공학, 환경관리시스템, 환경통합관리, 원격 모니터링 및 제어, 환경최적화, 환경정보학, e-mail: ckyoo@khu.ac.kr