

총 설

청정 생산을 위한 생태산업단지 구축과 주요기술

유창규[†] · 허순기 · 유동준 · 이승준 · 신지나* · 박용준** · 윤학모** · 전희동*** · 문정기*** · 이인범

포항공과대학교 화학공학과, 환경공학부
794-754 경북 포항시 남구 효자동 산31
*고려대학교 환경생태공학부
136-709 서울시 성북구 안암동 5가 1
**(주)포스코 환경에너지부
790-704 경북 포항시 남구 괴동동 1
***포항산업과학연구원 환경연구실
790-330 경북 포항시 남구 효자동 산32
(2005년 10월 10일 접수, 2005년 10월 21일 채택)

Eco-Industrial Park (EIP) Development and Key Technologies for Clean Production

ChangKyoo Yoo[†], Soon-Ki Heo, Dong Joon Yoo, SeungJun Lee, Ji Na Shin*, Yong Joon Park**,
Hack Mo Yoon**, Hee Dong Chun***, Jeong Ki Moon*** and In-Beum Lee

Department Chemical Engineering and School of Environmental Engineering, POSTECH, San 31, Hyoja-dong, Nam-gu, Pohang 790-784, Korea

*Department of Environmental Ecological Engineering, Korea Univ., 1, 5-ka, Anam-dong, Sungbuk-gu, Seoul 136-709, Korea

**Environment & Energy team, POSCO. Ltd, 1, Geodong-dong, Nam-gu, Pohang 790-704, Korea

***Environmental Research Lab., Research Institute of Industrial Science & Technology, San 32, Hyoja-dong, Nam-gu, Pohang 790-330, Korea

(Received 10 October 2005; accepted 21 October 2005)

요 약

최근에 환경오염과 자원고갈에 의해서 인류활동의 생태적 영향을 최소화하는 지속 가능한 산업 개발(sustainable industrial development)이 많은 관심을 받고 있다. 이를 위해서는 기존에 있던 산업단지를 환경친화적으로 변화시키거나 새로운 산업단지를 건설하여 개별 공장 내뿐만 아니라 한 산업단지 내의 각 기업들이 물질 및 에너지를 최대한 효율적으로 이용하는 생태산업단지로의 전환이 전 세계적으로 활발하게 이루어지고 있다. 생태산업단지(eco-industrial park, EIP)는 산업단지 내의 각 기업들이 물질, 용수 및 에너지를 최대한 폐기물, 에너지, 물질, 용수 등을 서로 효율적으로 재이용함으로써 경제, 환경, 사회적 이익을 얻는 것을 목표로 한다. 본 총설에서는 국내외 생태산업단지의 사례연구와 생태산업단지 개발의 중요한 기술들(에너지 교환, 물질 재이용, 용수 재이용, 환경영향평가)에 대하여 소개한다.

Abstract – Sustainable industrial development which can minimize an ecological effect by the mankind exertion is recently interested due to an environmental contamination and a resource exhaustion problem. An eco-industrial park (EIP) is a community of manufacturing and service businesses seeking enhanced environmental and economic performance through collaboration in managing environmental and resource issues, including energy, water, and materials. EIP developments which improve a production plant within an eco-friendly greenfield and design a new industrial ecosystem are accomplished recently, which can efficiently re-use the waste and resources from each company within EIP. In this review, the outside and domestic case studies of EIP and cornerstone technologies to develop the EIP, such as energy integration, waste reuse, mass flow analysis, water pinch, and life cycle assessment, are summarized.

Key words: Eco-Industrial Park (EIP), Heat Pinch, Energy Integration, Life Cycle Assessment (LCA), Mass Flow Analysis (MFA), Mathematical Optimization, Network Design, Reuse Network, Waste Minimization, Water Pinch

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: ckyoo@postech.ac.kr

1. 서 론

1-1. 생태산업단지 정의

생태산업단지(eco-industrial park, EIP)는 산업생태학(industrial ecology)을 도입한 개념으로, 청정 생산 공정을 기본으로 하여 설계, 개발, 운영되는 제조/서비스업의 집단지이다. 이 용어를 처음 사용한 indigo development는 생태산업단지를 '에너지, 용수, 물질 등을 포괄하는 환경 및 자원문제를 다루는 데 있어 협력을 통해 발전한 환경적/경제적 성과를 추구하는 제조업 및 서비스업체들의 공동체'라 정의하였다[1-5]. 산업단지 내의 기업들은 생태학적으로 연결되어 있어, 물질 및 에너지의 사용과 오염물 발생을 최소화하는 유기적 관계가 된다. 이러한 기업 간 협력은 개별적으로 환경개선활동을 하는 것보다 몇 배의 효과와 생산성을 부수적으로 얻을 수 있으며, 국가에서도 기업에 대한 개별지원보다 많은 성과를 거둘 수 있다.

생태산업단지의 목표는 참여 기업들의 환경에 대한 영향은 최소화하고 경제적 성과는 증진시키는 것이다. 이 목표는 공단구조의 녹색 설계, 청정 생산, 오염 방지, 에너지 효율, 기업 간 협동과 같은 요소를 사용하여 달성할 수 있다. 또한, 생태산업단지는 이웃하는 집단의 이익을 위함으로서 개발이 긍정적인 결과를 낳도록 한다. Fig. 1은 기존의 산업단지와 생태산업단지의 개념도와 차이점을 나타낸다 [3, 5]. 기존의 산업단지는 원료와 제품위주로 연계되는 데에 비해 생태산업단지는 기존의 산업단지에서 고려하지 않은 부산물이나 폐기물의 연계를 통해 네트워크가 구성되는 점이 가장 큰 차이점이다.

일반적으로 생태산업 프로젝트는 아래와 같이 세 가지 기본적인 범주로 구분할 수 있다.

(1) 생태산업단지(EIP)-산업단지내에서 에너지, 물, 물질을 포함한 자원의 재활용을 통해 강화된 환경과 경제 활동을 추구하는 제조 및 서비스업 집단지이다.

(2) 부산물 교환(BPX)-에너지, 용수, 물질과 같은 부산물들을 폐기물로 배출하지 않고 서로 유효자원으로 취급하는 기업들의 재활용을 말한다. 참여기업들은 오염을 감소시키고 생산비용을 절감하며 새로운 이익을 얻기 위해서, 사용한 자원을 폐기물로 배출하지 않는다. 예를 들어, 중국 남부의 한 설탕 공장은 부산물 교환을 위해 제지 공장, 알코올 정제소, 콘크리트 공장 등을 세웠다.

(3) 생태산업망(EIN)-지역 내의 환경, 사회, 경제적 성과를 증진시키기 위한 기업들의 연결망을 말한다. 생태산업망은 부산물 교환의 범위를 넘어서 환경과 사업 성과를 개선하기 위한 도구로 넓은 영역에까지 확장되고 있다. 이 네트워크는 생태산업단지를 포함할 수도 있고, 독립적인 기업일 수도 있다. 예를 들어, 필리핀의 PRIME 프로젝트에서는 다섯 개의 산업단지가 협력하여 지역적인 부산물 교환을 이루어 내고, 자원 재생 체계와 네트워크 구성을 가능케 하였다[1, 3].

1-2. 기대효과

기존의 산업단지에서는 산업과 환경 분야의 정책이 개별적으로 적용되어서, 산업시설에 환경기초시설을 갖추는 방향으로 환경문제를 해결하려 했다. 그러나 이런 식의 접근은 분명한 약점이 있다. 공장에 환경오염 처리시설을 설치하는 것은 폐기물의 발생을 암묵적으로 허용하고, 오염이 발생한 이후에 처리하겠다는 의미이다. 사후처리방식으로는 환경오염에 대해 총체적으로 접근하고 예방하기가 어려우며, 경제적으로도 매우 비효율적이다. 또한, 처리시설의 설치에만 치중하다 보면 심각한 자원고갈의 문제도 해결하기가 어렵다. 생태산업단지(EIP)는 이러한 약점을 보완하여 환경문제에 종합적으로 접근하는 방식으로 크게 산업적 측면, 환경적 측면 그리고 사회적 측면에서 다음과 같은 세 가지 효과를 기대할 수 있다[1].

산업적 측면-EIP는 참여 기업들이 물질과 에너지의 효율성을 높

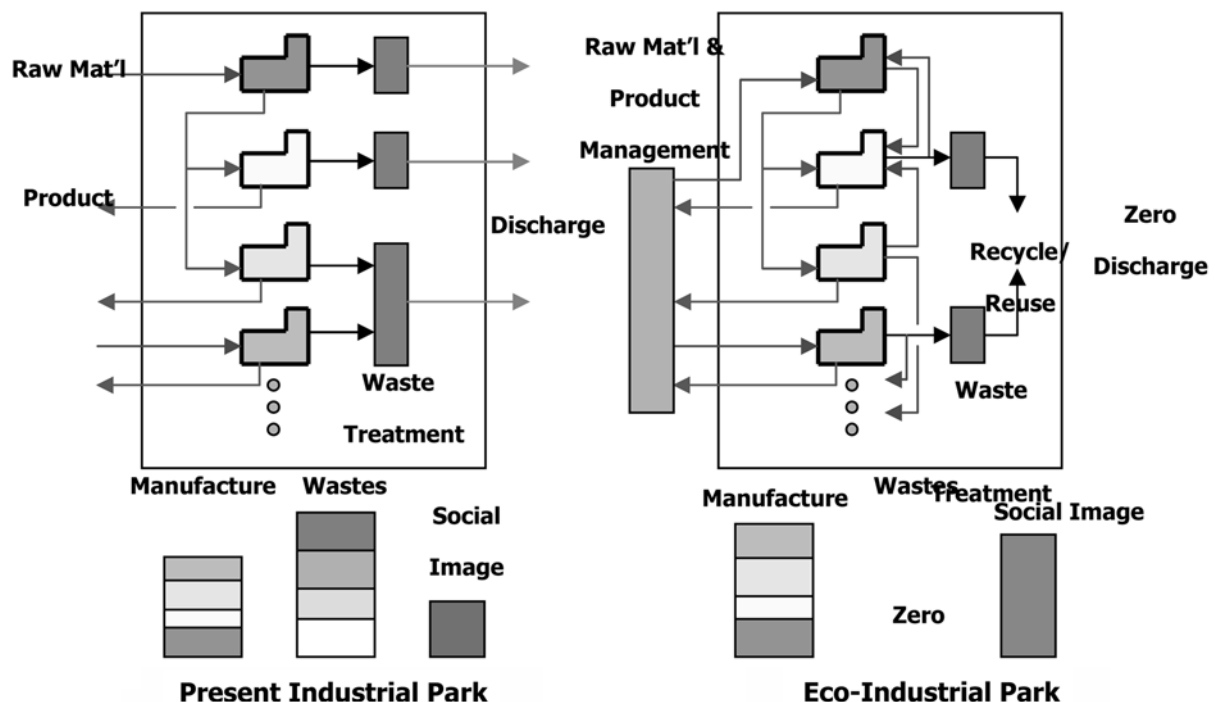


Fig. 1. The basic concept of eco-industrial park[3].

이고, 폐기물 재활용을 늘리며, 규제에 의한 처벌을 피할 기회를 제공하여 생산 비용을 절감할 수 있게 해준다. 또한, 생태산업단지 내의 기업에게는 폐기물 처리나 교육, 물품 구매, 비상사태 관리, 환경정보 시스템 같은 공동의 서비스가 제공된다. 산업비용의 분담을 통해 기업들은 경제적 효율을 향상시킬 수 있다. 생태산업단지는 산업시설이 과잉상태인 지역에 특히 중요한 산업적 이득을 제공한다.

환경적 측면-EIP는 자연자원 사용량이나 오염/폐기물을 발생시키는 요인들은 감소시키고, 청정 생산에 혁신적으로 접근하여 환경 부담을 덜어준다. 오염 방지, 에너지 효율화, 용수 관리, 자원 재생, 그 외의 환경 관리 체계와 기술 등이 청정 생산 공정이다. EIP는 개발업자들과 경영자들에게 환경과 사회의 기준은 높게 충족시키면서 기업 이익은 어떻게 증진시킬 수 있는지 제시해주는 모형이 된다.

사회적 측면-참여기업들의 경제적 성과가 향상되면 생태산업단지는 새로운 경제 발전 모형으로 나타날 수 있고 개발된 산업단지는 첨단 기술을 가진 기업들을 유치하고, 지역의 벤처 기업에게 사업 영역을 개방하여 결과적으로 고용을 창출하는 효과가 있다. EIP 내 폐기물 재순환으로 인한 오염감소로 더 깨끗한 자연환경을 제공하게 된다[1, 3].

2. 생태산업단지 사례 연구

생태산업단지는 미국을 비롯하여 유럽, 아시아, 남아프리카, 남미 등 전 세계에서 계획이 활발하게 추진되고 있어 산업단지 개발의 한 방식으로 잡아가고 있다. 그 중 덴마크 Kalundborg, 중국의 Guigang 생태산업도시, 국내 P 철강공장의 부생가스의 최적 재이용망 구축에 관한 사례연구를 예를 들어 소개한다.

2-1. 덴마크 Kalundborg의 산업공생(industrial symbiosis)

생태산업단지 중에서 가장 역사가 오래된 산업단지는 덴마크의 코펜하겐 인근에 있는 Kalundborg 산업단지이다. 인구가 약 2만 명 가량되는 덴마크의 Kalundborg라는 곳에는 환경적 공생관계를 추구하는 기업들의 클러스터가 있다. 엄밀하게 말하면 Kalundborg는 생태산업단지라기보다는 부산물과 에너지 교환에 집중한 산업공생체이다. 산업공생체가 생태산업단지로 발전하려면 좀 더 종합적인 접근이 필요하지만, Kalundborg의 경우는 매우 성공적인 사례로 평가받는다. 산업단지와 기업 간 그리고 인근 지역과의 물질 및 에너지 교환망을 잘 형성하고 있기 때문이다. 공장들은 다른 공장의 폐기물을 원료로 사용하여 원료, 에너지, 물, 폐기물 등에서 효과적인 공생관계를 형성한다. 공생관계를 이루는 다섯 개의 큰 주체를 살펴보면 화력발전소, 대규모 정유회사, 석고 보드 생산업체, 제약업체 그리고 Kalundborg시 이다[1, 3].

이미 1970년대 초반에 이들 간에는 원자재의 교환이 이루어졌으며 1980년대와 1990년대를 걸쳐 그 공생관계가 더 두터워졌다. 약 30년의 역사가 있는 이곳의 산업공생은 1972년 Statoil 정유소에서 나오는 butane gas를 Gyproc 석고보드공장이 이용하면서부터 시작되었다. 그 후에는 제약공장과 석고보드공장에서 나오는 질소 및 인을 함유한 대량의 슬러지를 주변의 농장에 비료로 사용하기 시작하고, 화력 발전소에서 부산물인 석탄재를 Kalundborg 산업단지 외부에 있는 시멘트공장에 공급하기 시작했다. 1981-1982년부터 Asnaes 화력 발전소는 공정에서 발생한 증기를 정유소와 제약공장, 도시에 공급했다. 이렇듯 10년 동안에는 중합적인 공생은 이루어지지 않았

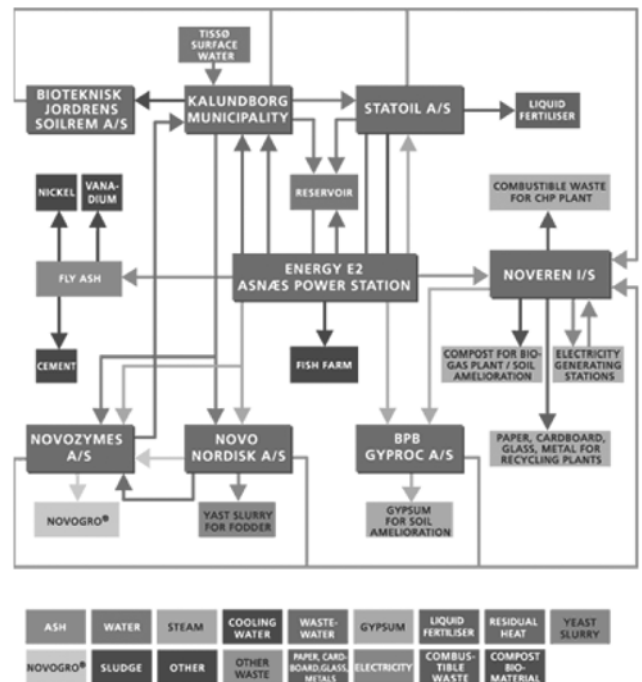


Fig. 2. Industrial Symbiosis at Kalundborg city (www.symbiosis.dk).

고, 2-3개의 개별적인 계약들이 만들어졌을 뿐이었다. 이렇게 시작된 산업공생은 그 후 10년 동안 공생 범위를 더욱더 넓혀나가기 시작했다[1, 3, 5]. Fig. 2는 Kalundborg 산업공생체의 물질, 용수 및 에너지 교환망을 나타낸다. Kalundborg 단지에서 진행되어온 과제 중 용수 재순환망은 9개, 에너지 교환망은 6개, 폐기물 재순환망은 7개로서 전체적으로 공생체 내부 재활용의 경우가 더 많은 것으로 보고되어 있다[3].

Kalundborg 산업공생체는 시간이 지날수록 기업들의 공생관계가 점점 더 복잡해지고 재생되는 자원의 양도 많아졌다. 이들 간의 공생관계로부터 얻어지는 경제적 혜택은 1997년 기준으로 봤을 때 연간 3만 톤의 석탄사용 절감, 60만 톤의 물 사용 절감, 13만 톤의 이산화탄소 배출 감소, 3700톤의 황산가스 배출 절감 등을 들 수 있다. 이들을 모두 합한 경제적 절감 효과는 연간 6천만 달러에 이르며 1천만 달러의 예산을 감축시키고 있다. 요컨대, Kalundborg의 공생관계는 경제적, 환경적인 큰 혜택을 발생시키고 있는 것이다[2-4].

Kalundborg 산업단지에서는 정부나 제3자에 의해서 강제적으로 교환망이 이루어지지 않고, 기업 사이에 경제적인 인센티브가 존재해서 자발적인 에너지와 물질 교환이 이루어졌다. 그러므로 파트너들은 서로 위험요소를 최소화하기 위해 최선의 노력을 했으며, 거래 내용에 대해서 기업들이 직접 측정했다. 또한, Kalundborg 내의 주요 기업이 아닌 경우에 대해서는 산업공생이 큰 효과를 나타내지 못했다[3]. Kalundborg의 생태산업단지 구축의 경험으로부터 부산물 교환이 성공적으로 이루어지기 위한 조건을 생각해 볼 수 있다. 첫째, 산업단지 내의 산업분야는 서로 어느 정도 달라야 하고, 동시에 잘 맞아야 한다. 산업분야가 같으면 경쟁관계가 형성되어 효율성을 저하하기 때문이다. 둘째, 교환망에서 기업들의 배열이 상업적으로 이득이 되도록 이루어져야 한다. 공생관계에서 경

제적 이득이 없다면 기업들의 자발적 참여 의지가 적어지기 때문이다. 셋째, 규제 기관과 긴밀한 협력 관계를 맺어야 하고 개발은 자발적이어야 한다. 넷째, 공장 간 거리가 짧아야 한다. 거리가 짧을수록 효율이 높아지고 운송비용도 적게 들어, 생산비용을 절감할 수 있기 때문이다. 마지막으로 단지 내 기업 경영자들과 회사들은 서로 믿음을 가지고 EIP구축에 협조적인 관계를 유지하여야 한다[3-9].

2-2. 중국의 Guitang Group과 Guigang 생태산업단지

중국에 있는 539개의 설탕공장에서는 매년 1,500만 톤의 설탕을 생산해왔는데 지난 몇 년 동안 중국의 설탕산업은 심각한 재정난에 시달렸다. 국제 시장에서 중국 설탕의 낮은 가격은 다른 국가들의 설탕 산업에도 재정난을 일으켰다. Guigang 지역은 중국 설탕 생산량의 40% 이상을 생산하는 곳으로 설탕 공장들의 규모도 작으며 대부분 부산물 교환에도 실패했다. 이런 경제적 어려움은 환경오염 물질을 더 많이 배출하게 하여서 설탕산업은 많은 오염 물질을 배출하는 오염산업으로 알려져 왔다[1, 3]. Guitang 그룹은 이 지역에 있는 1954년 생성된 중국 최대 규모의 국유 설탕 기업으로 사탕수수 재배를 위한 14,700 ha의 농지와, 3,800명이 넘는 직원을 보유하고 있다. Guitang 그룹의 설탕 공장을 통하여 많은 양의 오염물질이 배출되는데, Guitang Group은 Guigang 지역의 여러 기업을 통합하여 부산물 교환망을 형성함으로써 오염물질 배출량을 줄이도록 하는 생태산업단지를 건설하였다. 통합된 산업단지에는 알코올 공장, 제지 공장, 휴지 공장, 탄산칼슘 공장, 시멘트 공장, 발전소 등이 포함되어 있고 최종 목표는 부산물의 재이용을 활발히 하여 환경오염과 오염 처리비용을 줄이는 것이다. Fig. 3에는 Guigang 시의 생태산업단지의 물질교환망을 나타낸다. 이에 따라 설탕공장의 부산물을 Guitang 시의 생태산업단지에 보내어 부산물 이용 효율을 늘리고, 사탕수수 경작지를 통합하여 공생을 이루고 정부와 기업의 간부들은 산업생태학의 원리를 습득하여 청정 생산의 범위를 더욱 확대하고 있다[1, 3].

2-3. 철강공장의 각 공장단위 부생가스의 최적 재이용망 구축

P 철강공장은 국내 유일의 일관제철소로서 철강제품 생산이 주요한 목표이고, 철강제품 이외에 부수적으로 발생하는 다양한 종류의

부산물과 사용 후 남은 잉여 생산물의 재활용이 상당히 높은 편이다. 제철소에서 부산물로 생성되는 타르, 중질타르, 조경유, 황, 산소, 질소, 아르곤 등의 잉여 가스 그리고 제철 생산의 에너지 부산물인 부생 가스 등이 있다. 기존 연구에서 제철소와 기업들 사이의 부산물 교환망이 보고되고 있고 Fig. 4에 정리되어 있다[9].

본 총설에서는 P 철강공장의 각 공장단위 부생가스의 에너지 재활용에 관한 예를 소개하고자 한다. P 철강공장 내의 많은 공장에서는 제철 생산시 부산물인 여러 가지 부생 가스가 발생한다. 우선, 석탄을 건류하여 코크스로 만드는 과정에서 COG(coke oven gas), 코크스와 철광석을 고로에 장입하여 쇳물을 만드는 과정에서 BOG(blast furnace oven gas), 쇳물의 함유조성을 조절하고 이를 가공 가능하도록 하는 제강 공정에서 LDG(linze donawitz gas) 그리고 앞으로 고로를 대체할 신제강 공정에서 발생하는 COG(corex oven gas) 등이 있다. 이들 부생가스는 모두 유독성 가스이기 때문에 그냥 배출할 수 있는 것이 아니고 연소시켜서 배출해야 한다. 다행히 이때 발생하는 열량이 연료로 쓰기에 가치가 충분히 있기 때문에 각각 탱크에 저장해서 연료가 필요한 다른 공장에서 사용할 수 있도록 한다. 이것은 한 부분에서는 폐기물처럼 여겨지지만 다른 곳에 가면 주요 연료로 사용된다는 의미가 된다(산업공생). 부생가스를 사용하는 공장으로는 제철 제품 생산과정에 열이 있어야 하는 단위공장들도 있지만, 가장 많이 사용하는 곳은 제철소 내의 발전소로 지속적으로 발생하는 부생가스를 방산하지 않고(환경적 측면) 동시에 남은 양을 최대한 소비할 수 있는 방안(재활용 측면)이 필요하다.

다음은 제철 공장의 발전소 운용현황에 맞추어 부생가스를 가장 효율적으로 소비하도록 최적 분배를 결정하는 사례이다. 주어진 데이터로는 각 부생가스의 발생량, 각 부생가스의 발열량, 발전소의 연료 사용 가능 범위, 발전소 효율 및 발전 용량 그리고 제철소 내의 전력 부하, 스팀 요구량 등이 있다. 목적함수는 부생가스의 열량을 이용하지 못하고 연소시켜 방산하는 열량의 최소화이다.

$$Efflu = \sum_{T \in R} \left(Gas(R, T) - \sum_{P \in P_R} X(P, R, T) \right) \times Heat(R) \quad (1)$$

Efflu는 부생가스의 방산열량을 나타낸다. 여기서 R은 부생가스, P는 발전소, T는 시간이고 Heat(R)는 부생가스 R의 발열량을 나타낸다. Gas(R,T)는 사용해야 할 부생가스의 양이고, X(P,R,T)는 발전소에서 사용한 부생가스 양이며, P_R 는 부생가스 R을 사용하는 발전소 P를 나타낸다. 여기서 결정해야 할 변수는 부생가스의 발전소 분

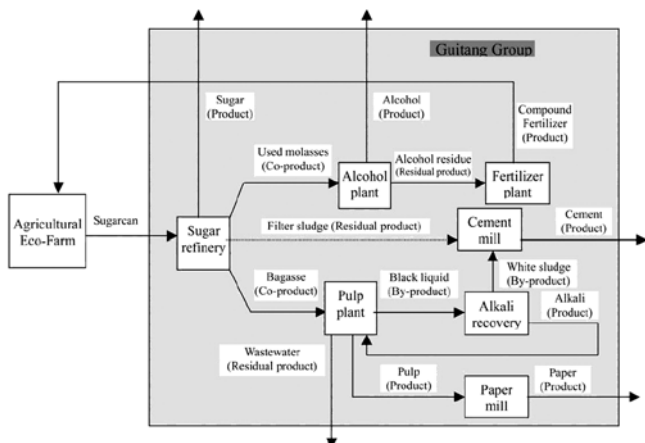


Fig. 3. Ecological cycle of Guitang Group[1].

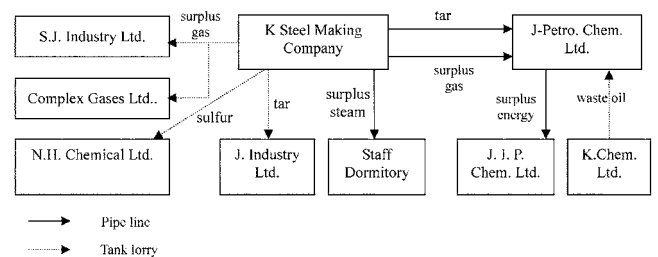


Fig. 4. Waste reuse networking of the steel company among industries[9].

배, 발전소의 발전량 및 스팀 발생량 등이다. 그러나 공정 상황이 항상 일정한 것은 아니고 수시로 변하게 된다. 각 공장의 가동은 공장별 설비의 수리계획에 따르게 되는데 수리 시에는 부생가스를 발생시키거나 사용하지 못하게 되므로 이 점을 고려해야 한다. 수리계획 정보를 반영하기 위해서는 먼저 제철소 내의 공장 중에서 부생가스를 발생하거나 사용하는 공장이 단위 시간당 얼마만큼 양의 부생가스를 배출하고 사용하는지에 대한 정보를 알아야 하고 그것을 바탕으로 해당 공장의 수리계획이 있을 경우 이 점을 반영하여 결과적으로 발전소에서 소비해야 할 부생가스의 양이 어떻게 되는지를 계산해야 한다. 이러한 최적 조업을 결정하기 위해서 수학적 모델을 이용해야 하는데 위와 같은 문제는 혼합정수 선형계획법(MILP: mixed integer linear programming)을 이용할 수 있다.

부생가스의 발생 및 사용 공장들의 앞으로 2주간 수리계획에 따라 발전소에 할당된 부생가스의 데이터와 발전소 운용 데이터가 주어졌을 때 2주간 부생가스의 방산을 최소로 하는 부생가스의 최적 분배와 각 발전소의 운용 계획을 앞서 제시한 혼합정수 선형계획법으로 해결한 결과가 보고되어 있다[11]. 이러한 방법은 각 공장단위 부생가스 분배량 구축시 발전소와 생산 공정에서 최적으로 재활용할 수 있는 최적 부생가스 분배량 구축에 사용되었고 유틸리티 수배급 최적화를 통해 부생가스 발생 및 소비하는 공정의 밸런스 예측 및 최적 조건 도출, 저압증기 발생 및 소비 공정의 수배급 모사 등에 사용되고 있다.

지금까지 소개한 생태산업단지 외에도 세계 여러 나라에서 생태산업단지 개발을 계획 중이거나 실제 조성 중이다. 예를 들어 일본의 가와사키 에코타운외 6개 단지, 북미의 볼티모어 페어필드 산업단지 외 11개 지역 캐나다의 3개 지역, 영국의 험버사이드 외 8개 단지, 유럽 독일의 하이델베르크와 오스트리아의 스티리아 재순환 단지 외 20여 단지 등이 생태산업단지의 개발사례로 알려져 왔다[3, 5-10].

3. 생태산업단지 개발에 필요한 주요 요소 기술

Lowe[1]과 많은 연구자는 기존 생태산업단지의 경험을 바탕으로 생태산업단지를 개발할 때 중요한 전략으로 자연적인 시스템의 교환망 구축, 에너지 교환, 물질 재이용, 지속 가능한 설계와 건설, 지역 사회로의 통합으로 정리하였다. 본 절에서는 이러한 생태산업단지 개발의 주요 전략들을 달성하기 위한 중요한 요소 기술들(에너지 교환, 물질 재이용, 용수 재이용, 환경영향평가)에 대하여 소개한다.

3-1. 에너지 교환망 구축을 위한 열통합 기술

화학 및 원유정제 공정 같은 많은 에너지 소비공정의 규모가 커지면서 많은 설비가 복잡하게 얽혀있어서 많은 에너지를 소모하게 되어 생산비용의 증가를 가져왔다. 특히 에너지 비용이 점차 증가하면서 이와 같은 에너지의 낭비를 줄이고, 투입된 에너지를 최대한 활용하기 위한 방편으로 에너지를 회수하여 재사용하는 에너지 교환망 또는 열교환망(energy/heat exchange network, HEN)을 합성하게 되었다. 즉 에너지 교환망은 냉각을 시켜야 하는 공정 흐름과 가열을 시켜야 하는 공정 흐름을 서로 연결하여 에너지 회수의 효과를 보면서 유틸리티 비용을 절감하는 것이다. 이러한 에너지 교환망의 합성은 공정합성문제에서 합성 구조가 가장 확실하며 실제 화학 공정에 도입이 되어 약 20-30%의 에너지 절감을 가져 올 수

있기 때문에 많은 연구가 진행되어 왔다. 에너지 교환망의 연구분야에서 가장 주목을 받고 있는 기술은 핀치(heat pinch) 기술이다. 이는 Linhoff[12]에 의해 처음으로 도입이 되었고 이때부터 일반적인 열교환망의 연구, 선형계획법을 통한 공정의 분석, 수학적 접근 방식을 통한 열교환망의 합성에 관한 연구도 계속되고 있다[12-20].

3-1-1. 열교환망 이론

열교환망 합성을 위해서는 우선 각 공정 흐름의 정보를 이용하여 시스템을 분석해야 한다. 즉 두 유체 간의 열전달이 일어나기 위해서는 두 유체 간 온도차이가 최소 접근 온도차 이상이어야 하고 이를 이용하여 시스템에 첨가하여야 할 최소 가열량과 제어하여야 할 최소 냉각량 및 핀치점을 계산한다. 에너지 목표치들은 공정의 열 자료로부터 정의된다. Fig. 5는 composite선도 또는 T-Q 선도라 불리는 이 그림은 열교환망에서 온류들과 냉류들을 각각 T-H (temperature-enthalpy) 선으로 나타내고, 온류는 온류끼리 더하여 하나의 연속선인 초온류를 냉류는 냉류끼리 더하여 초냉류를 T-H 좌표상에 도시한 것이다[14, 16, 17]. 두 선을 같은 그래프에 중첩하여 그리면 두선 사이의 면적이 최대 가능 열회수량이 된다. 여기서 수직으로 연속선 사이를 그었을 때 가장 가까운 점이 핀치점(pinch point)에 해당한다. Fig. 5를 보면 ΔT_{min} 이 생기는데 이것을 최소 접근 온도차라 하며 ΔT_{min} 이 클수록 에너지 요구량이 많아 에너지 비용이 많이 들고 또한, 보다 큰 열전달의 구동력을 가지므로 투자비는 낮아진다. 이런 ΔT_{min} 이 생기는 점을 열 회수 핀치라 하고 그 핀치를 중심으로 핀치점보다 높은 온도 영역(above the pinch zone, AP)과 핀치점보다 낮은 온도 영역(below the pinch zone, BP)으로 나누어진다. 이러한 두 영역에서 각 흐름의 엔탈피 수치를 세울 수 있다.

3-1-2. 핀치를 이용한 망구조 설계법

열교환망 합성은 간단한 것처럼 보이나 미리 공정구조가 결정되어 있지 않아 종래의 최적화 기법을 적용하지 못하며 또 주어진 흐름끼리를 열교환 시킬 수 있는 방법이 너무 많아 문제해결에 어려움이 있다. 이를 위해 시스템에 첨가되어야 할 최소 가열량과 제거하여야 할 최소 냉각량 및 핀치점을 계산한다. 이상에서 구한 최소

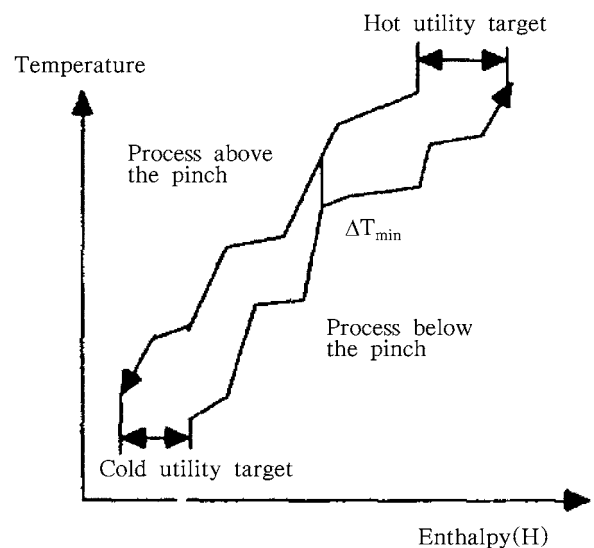


Fig. 5. Composite curve which contains super hot stream and super cold stream[16].

냉각 가열량과 핀치점을 가지고 여러 가지 전략을 고안하여 최적 열 교환망의 합성의 해를 얻어낸다[16].

핀치기술은 열역학적 원리를 기초로 한 열회수 공정 설계법으로 간략히 정의할 수 있는 기법인 만큼, 논리적 전개나 그 결과의 우수성은 보장받고 있으나 한계점을 안고 있다. 즉 기존의 에너지 통합 공정 설계를 최소의 비용으로 최대한 에너지를 회수할 수 있는 에너지 통합공정의 개보수(retrofit)에는 아직 방법론이 정확하게 정립되어 있지 않은 실정이다. 그래서 최근 에너지 통합기법을 이용한 에너지 회수 설비[16], 특히 열교환망의 설계 상태의 재점검[17], 새로운 에너지 회수 설비의 설계[18], 기존 설계의 최적 개보수 기법[16] 그리고 몇 개의 공장 사이에서 에너지 재활용의 방법[18-20] 등이 활발히 연구 되고 있다[16-20]. 이러한 국내외적 연구 결과들과 연구 경험들을 집적시켜 생태산업단지의 다양한 설비에 적합한 에너지 통합 사례, 진단 및 개보수에 우수한 방법을 도출하여 생태산업단지 내 대부분의 기업이 안고 있는 에너지 과잉소모를 줄일 수 있고 앞으로 도래할 에너지 고갈과 환경오염에 대응하여야 할 것이다.

3-2. 물질 재활용망 구축을 위한 물질흐름분석(mass flow analysis)

3-2-1. MFA의 목표 : 환경과 경제의 지속성 추구

지구라는 계(system)는 에너지와 물질의 흐름으로 해석될 수 있다. 태양계라는 관점에서 비록 그 영향이 크지 않다 하더라도 이미 지구는 외부의 에너지가 유입되고 유출되는 열린 계(open system)로 볼 수 있으나, 물질 흐름의 측면에서 볼 때 지구는 외부와 특정한 물질교환을 하지 않는 닫힌 계(closed system)로 해석할 수 있다. 이러한 관점에서 닫힌 계인 지구 내부의 물질 순환을 조사하고 연구하는 일은 자원고갈과 파괴의 심각성이 드러나는 환경문제와 더불어 자원의 효율성을 강조하는 경제적 문제, 이 두 가지 측면의 지속성에 대해 미래 지향적인 지표를 제공한다고 할 수 있다. MFA(material flow analysis)는 물질 흐름 수치에서 얻은 정보를 통해 물질사용의 효율성을 평가하는 방법이다[22].

3-2-2. MFA의 역사적 배경 및 이론

Adriaanse 등[21]이 연구한 자원 흐름(Resource Flows) 보고서로부터 정치적인 논쟁과 앞으로 MFA 연구방향이 구체적으로 이슈화되기 시작했다[23]. 이들의 보고서에서는 1970년대부터 1990년대까지 세계 주요 경제 국가(EU 국가를 포함하여 일본, 미국)들의 자원별 흐름 데이터를 기초로 분석하여 국가별로 유입, 유출되는 자원 흐름의 경향 및 GDP 대비 TMR(total material requirement)[24] 및 DMI(direct material input)의 변화 추이 등을 보여주었다. 이러한 자료를 바탕으로 각 국가는 자원의 경제적 효율성을 높이고 환경 친화적인 방향으로 정책 수립을 할 수 있는 지표를 마련한 셈이다.

지속 가능한 환경의 측면에서 산업 대사(industrial metabolism)의 물질 유출(output)에 관한 MFA의 전략 목표는 크게 두 가지로 나눌 수 있는데[24], 초기 환경오염이 심각했던 시기의 물질 중독의 독성 및 오염제거(detoxification and pollution reduction)에 대한 전략에서 그 이후 비물질화 및 재구조화(dematerialization and eco-restructuring)로 전략이 변화되어 왔다. 하지만, 이 두 가지 전략은 상충적이라기 보다 상보적으로 함께 추구되어야 할 전략이라고 할 수 있겠다. MFA는 환경 및 경제에 대한 중요한 지표(indicator)가 될 수 있는 데이터베이스를 제공하는데, MFA 연구에서 주로 사용되는 지표를 살펴보면 다음과 같다[25].

Input indicators

- DMI(direct material inputs) 국내 원료(domestic extraction)+수입
- TMR(total material requirements) 국내 사용된 원료 + 수입 + 사용되지 않은 원료(unused extractions)

Output indicators

- DPO(domestic processed output) 산업현장이나 가정 등에서 배출되는 모든 배출물의 합
- TDO(total domestic output) DPO + 사용되지 않은 국내 원료(unused domestic extractions)

Consumption indicators

- DMC(domestic material consumption) DMI - 수출
- TMC(total material consumption) TMR - (수출 + 간접적인 수출 흐름)
- NAS(net additions to stock) 경제의 외형적인 성장률

Fig. 6은 EU 내의 주요한 몇 나라와 그 외 나라들의 MFA의 결과를 나타낸 것이다. Fig. 6으로부터 각 나라의 자원에 따른 TMR과, GDP 대비 DMI, 국가별 유출물 경향 그리고 국가별 NAS 지수 등을 살펴볼 수 있고 이로부터 여러 가지 유용한 정책을 제시할 수 있다. 즉, 국가별 GDP와 TMR, DMI 등의 경향을 분석하여 어떤 특정한 국가가 자원의 효율성, 환경, 성장의 측면에서 어떠한 정책을 수립해야 할지 제안할 수 있을 것이다[22].

3-2-3. MFA의 사례

기존의 국가단위의 MFA 분석에서 최근 지역단위의 MFA 분석이 증가하는 추세이다. 그 중 최근 2001년 11월부터 영국 York 지역의 주민들이 필요로 하는 음식과 물질의 양을 데이터화 하고 이와 관련된 생태범위를 측정함으로써 York 지역의 지속 가능성 및 전 지구적 환경에 미치는 영향을 분석하는 연구가 스톡홀름 환경연구소(Stockholm environment institute at York)에 의해 시행되었다 [26]. 이 연구에서는 York 주민들의 생활에 필요한 다음과 같은 사항들의 양이 데이터로 수집되었다.

- 48개의 서로 다른 식음료 제품
- 지역의 고체 폐기물의 분해
- 재활용에 의한 에너지 절약
- 교통, 전기전자 제품
- 도로 및 건축, 하우징 등

이러한 여러 가지 사항들을 유지하는데 필요한 원료의 양이 톤(ton) 단위로 데이터화 되었다. 결론적으로 York 시민이 생활을 유지하기 위해서는 1인당 연간 19톤의 원료물질이 필요하고 이를 위해서는 그들이 차지하는 지역 면적보다 약 70% 더 많은 생태영역이 있어야 하는 것으로 나타났다. 따라서, 지속 가능한 환경과 경제의 유지를 위해서는 York시에 자원의 효율적 이용과 배출물질에 대한 절제를 유도할 수 있는 특정한 정책이 필요하다고 볼 수 있다. 2010년을 목표로 하여 유효성과 충족성을 바탕으로 몇 가지 시나리오가 제시되었으며 다음과 같다.

(1) 에너지 시나리오

- lighting efficiency scenario: CFLs(compact fluorescent lights)가 GLS(incandescent)보다 5배 높은 효율을 가진다는 사실에 근거하여 GLS를 CFLs로 대체. CFL을 50% 정도 비율로 사용할 경우 2010년

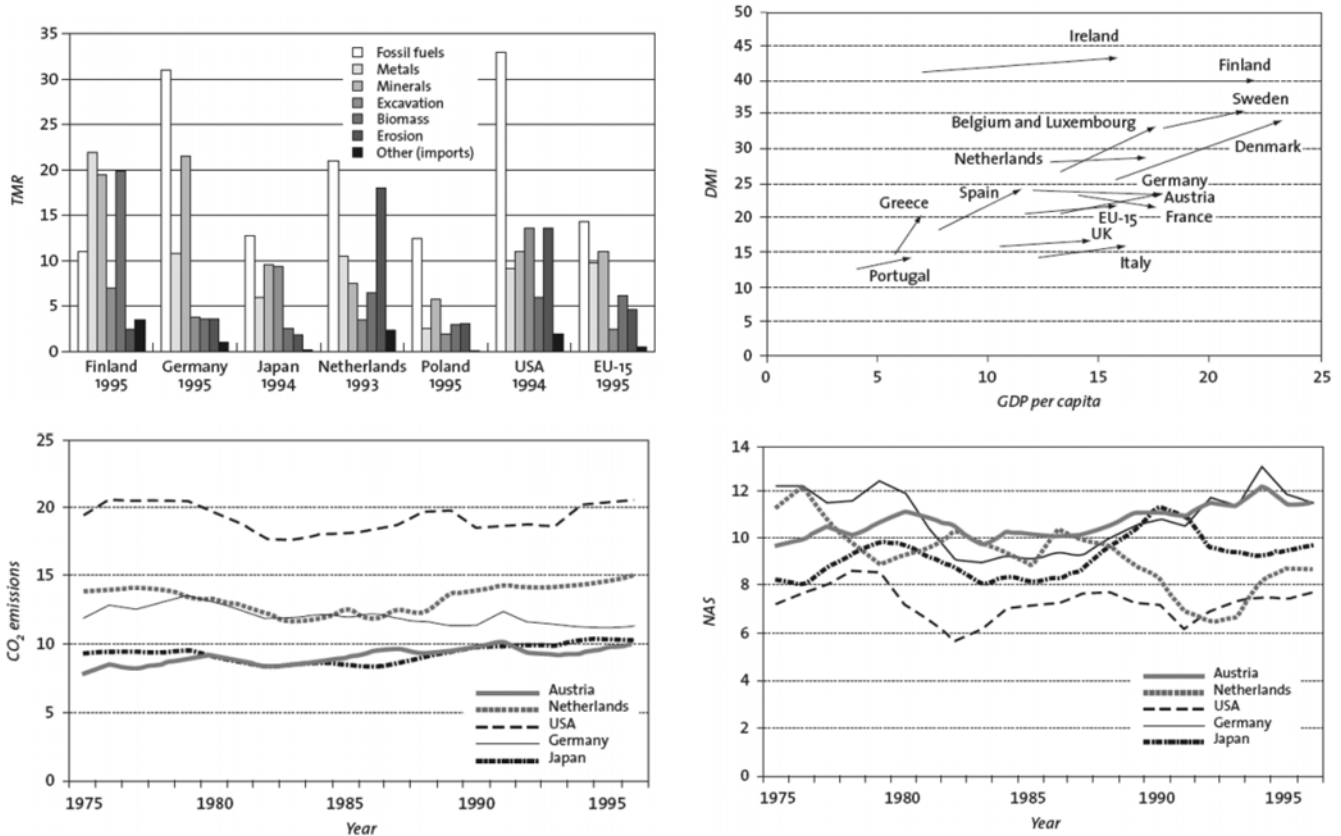


Fig. 6. MFA indicators of the EU compared with selected member states and other countries[22].

까지 약 1,793 ha의 생태영역 감소 효과를 볼 수 있다.

- space heating and water heating sufficiency scenario: 80%의 York 가정에서 이중창과 같은 장치와 50% 이상의 가정이 84% 효율 이상의 보일러를 설치한다면 7,200 ha, 즉 30% 정도의 생태영역 감소 효과를 볼 수 있다.

(2) 쓰레기 처리 시나리오

쓰레기 처리 시나리오에서는 재활용을 통한 유효성과 쓰레기 배출량의 최소화를 통해 충족하면서 동시에 만족시킴으로써 쓰레기 매립에 필요한 생태 영역을 최소화할 수 있다.

- curb-side collection recycling scenario: 이 재활용 시나리오로 인해 비록 2010년까지 4,787 생태 영역이 증가하는 경향을 보이지만, 기존의 쓰레기 처리에 따른 생태 영역 증가량보다 약 63,000 ha 정도 낮은 생태 영역의 증가 추세를 보인다.

- 유효성과 충족성을 혼합한 폐기물 처리 시나리오: 효율적인 재활용과 합성 그리고 쓰레기양의 최소화를 통해 2010년까지 약 10%의 생태 영역 감소 효과가 있을 것이다. 이러한 효과를 통해 이미 캐나다의 Ontario에서는 1년 만에 매립지로 버려지는 쓰레기의 약 42%를 감소시키는 결과를 가져왔다.

3-2-4. MFA를 통한 EIP 구축 가능성

생태산업단지의 기본 목적 달성을 위해 물질과 에너지 흐름을 분석하고 최적화하는 것은 경제적인 측면과 환경적인 측면에서 매우 중요한 일이기 때문에 기존의 거시적인 MFA 분석 방법을 토대로 이를 EIP에 적용한다면 효율적이고 친환경적인 EIP를 구축하는데 큰 도움이 될 것이다[27]. 생태산업단지는 그 규모에 따라 작은 산

업단지가 될 수도 있고 큰 도시 전체, 나아가서는 한 국가의 산업을 효율적인 물질 흐름으로 연결할 가능성도 있다. 따라서, 기존 MFA에서 사용했던 지표들 역시 EIP 분석에서도 상황에 따라 변형하여 적용할 수 있을 것이다. 특히, 최근에는 국가 단위가 아닌 소규모 집단 단위로 MFA에 관한 연구가 진행되고 있어서 EIP의 적용에 대한 가능성을 높이고 있다. York시의 MFA 분석 사례에서도 보았듯이 EIP 구역 내의 물질흐름을 여러 가지 물질에 관해 데이터로 수집하여 현재 그 구역 내에서 경제적 그리고 환경 측면에 있어서 재활용이 가능한지 분석하고 지속 가능한 발전이 불가능하다면 문제가 되는 자원 활용 분야를 분석하여 시나리오를 작성하고 이를 정책적으로 활용할 수 있다. 물론 MFA 연구 특성상 데이터 수집의 어려움과 긴 시간의 소요라는 단점이 있지만 이는 앞으로 지속할 MFA 사례연구를 통해 조금씩 극복해 나갈 수 있을 것이다. 아울러 앞으로 지속할 EIP 및 MFA의 개발에서 데이터를 분석하고 시나리오를 작성하여 이를 정책적으로 집행해 나가는데 있어서 기준이 될 수 있는 생태효율성(eco-efficiency)에 대한 지표를 수립하는 것이 중요한 사항이 될 것이다[26-30].

3-3. 용수 교환망 구축을 위한 water pinch

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. 워터핀치기술(water pinch technology)은 공정수

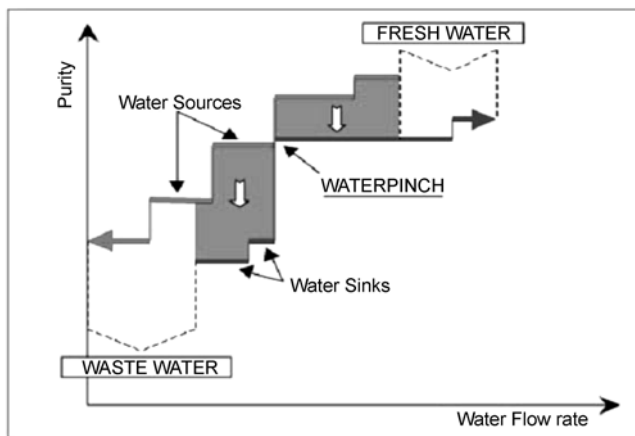


Fig. 7. Source and sink composite curves of water pinch[31, 43].

의 내부 재순환을 최적화하여 유입되는 공업용수를 줄이는 동시에 재이용수의 사용으로 전체 용수 사용량을 줄이고 폐수의 방류량을 줄이면서 전 생산 공정을 대상으로 최적의 공정용수 재이용 라인을 구축할 수 있는 것으로 알려졌다[31, 32].

3-3-1. 워터핀치 이론

용수 재이용을 위한 출발점은 모든 공정들은 원수로 채워진 용수 재이용 네트워크를 이용하는 것이다. 흔히 있는 일이지만, 분리 공정으로부터의 모든 유출 흐름은 유출흐름처리장치에서 동시에 모이고 처리된다. 만약 도시와 공장의 배출용수를 각각적으로 처리하는 폐수처리시설에서 사용된다면 처리장은 현장에 사용되거나 하수시스템으로의 유출이 가능하다. 이러한 공정에서 발생하는 용수 및 폐수를 이용하는 방식은 재이용(reuse), 재생 후 재이용(regeneration), 재생 후 순환 재이용(regeneration recycle) 등으로 구분된다[31, 32, 43].

워터핀치 방법의 기본적인 개념은 source와 sink 사이의 하나 또는 주요 대상이 되는 오염물을 선정하여 공정 흐름도를 작성하는 것이다. Source와 sink 사이의 전체적인 분석을 통해서 pinch point를 찾아내고 여기서 성립되는 제한 조건에 의해 용수의 재이용량과 그 대상공정을 효과적으로 찾아낼 수 있는 방법이다. Fig. 7에서 보면 용수의 source는 청정도가 높은 수치를 나타내는 용수 흐름도로 오염물에 의한 오염이 거의 없는 상태를 말한다. 그러나 공정이 운전되면서 용수가 각각의 공정을 지날 때마다 오염물의 이동현상에 의해서 공정수의 청정도는 점점 낮은 수치를 나타내게 된다. 이것은 공정수의 흐름에서 source와 sink의 관계를 정리하는 것으로 오염물의 이동에 의해서 용수의 오염도는 증가하게 되는 것을 말한다. 이 관계에서 각각 공정의 오염농도는 공정의 제한 유입농도를 설정할 수 있는 자료로써 활용될 수 있다[31, 34-36, 43, 44].

합성은 전체 공정을 워터핀치 분석에 적용할 수 있도록 농도에 따른 공정들 사이의 용수 재이용을 합성(process integration)하는 것이다. 공정 합성은 공정 간 오염물의 농도나 종류에 따라서 합성을 하여 간략한 블록모식도로 표시할 수 있도록 하는 합성과정이다. 먼저 핀치 분석을 통해 공정수의 오염물과 종류를 파악한 후에 그려지는 composite curve를 통해서 오염물의 흐름을 알 수 있다. 오염물의 이동현상에 대해서 파악하면 공정 간에 이동되는 오염물에 따라서 공정합성을 수행하는 것이다. 비록 이러한 접근법이 간단하

지만, 워터핀치는 많은 흐름과 다양한 오염물질에 의해 매우 복잡해질 수 있다. 이 과정은 한 번에 하나의 오염물에 대한 각각의 최적화를 요구한다. 각각의 분석 결과는 전체 최적 해를 구하기 위하여 종합되어야 한다[43].

앞에서 기술한 워터핀치 방법은 근본적으로 경험에 의한 것이고 여러 가지 오염물질은 다루기가 어렵다. 이에 따라 용수 재이용 네트워크를 분석, 합성, 개선, 설계를 위한 수학적 최적화 기반 접근법이 제안되었다[45-49]. 수학적으로 구축된 모델은 재생공정, 유량 제한, 다성분 오염물질을 포함하는 비선형 모델로 구성할 수 있고 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 서로 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 문제는 수학적 모델로 먼저 시작하여 모델을 만들고 그 후에 단순화된 해에 대해 워터핀치방법을 사용하여 시각화할 수 있다. 즉 두 가지 방법은 공학적 이해와 시각화를 개선하는 워터핀치 방법과 복잡한 문제를 다루는 것이 가능한 수학적 방법의 상호 보완이 가능하다[43, 46-49](워터핀치의 기술동향과 용수 재이용 네트워크 설계의 자세한 이론은 참고문헌[49]을 참조).

3-3-2. 워터핀치를 통한 EIP 구축 가능성

워터핀치기술은 생태단지 내 용수 재이용망 구축이 체계적으로 진행할 수 있도록 이론의 정립, 경제성 평가와 실제 적용시 보완해야 할 사항 등을 제시할 수 있을 것으로 예상하고 있다. 그러나 산업단지 내 용수 재이용망을 설계시 기존의 단일 공정의 워터핀치방법이 직접 적용할 때 문제점이 나타날 것으로 예상이 된다[49]. 예를 들어 산업 단지 내 기업 간 용수 재이용망 구축의 경우 목적 함수내에 너무 많은 대상공정 및 폐수처리장이 존재하여 비선형 최적화 문제나 기업간 그리고 단위공장 내 용수 및 정보의 불확실성(uncertainty) 증가, 생태산업단지 내 기업별의 이해관계나 서로 trade off 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[49].

3-4. 재활용망의 환경 영향 평가(life cycle assessment, LCA)

3-4-1. LCA의 개요

LCA는 제품의 라이프사이클(life cycle)인 원료의 채굴/수송/가공 및 제품의 생산/유통/사용/폐기/재활용 등에 수반되는 자원소비 및 환경부하와 이에 따르는 환경영향을 정량적으로 평가하고 연구의 목적에 맞춰 결과를 해석하는 기술로서 다음과 같이 여러 경제 주체들의 활동을 친환경적으로 유도할 수 있다. 우선 기업은 제품(또는 서비스)의 라이프사이클 동안 환경부하를 평가하고 제품생산공정을 개선함으로써 환경부하가 적은 회사로 탈바꿈하고 친환경기업이란 이미지로 브랜드가치를 높일 수 있다. 또한, 소비자들은 제품이 환경에 미치는 영향에 대한 정량적/정성적 정보를 받음으로써 친환경상품의 선택에 참고할 수 있다[50-60]. 생태산업단지 내 폐기물, 물질, 에너지 재이용망 구축시 재이용에 따른 환경영향과 환경부하를 정량적으로 평가할 때 그리고 제안된 여러 대안에 대한 환경부하 절감효과를 측정할 수 있게 되어 '지속 가능한 발전'의 실현을 위

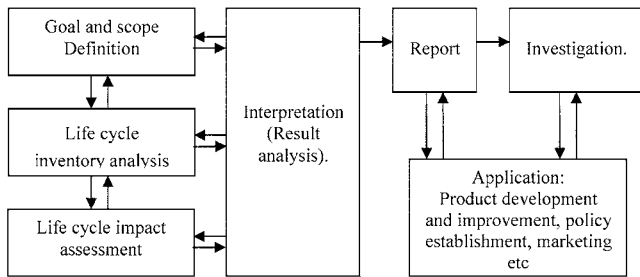


Fig. 8. LCA frameworks[50].

한 생태산업단지의 전략 수립에 활용할 수 있다.

LCA 개념은 미국의 코카콜라사가 용기의 환경성을 평가한데서 유래하며, 1980년대에 미국과 유럽에서 SETAC(society of environmental toxicology and chemistry)이 설립되면서 본격적인 연구활동이 이루어졌다. 유럽에서는 스웨덴, 스위스, 네덜란드, 독일, 프랑스 등에서 연구가 활기를 띠었고, 특히 네덜란드 Leiden University에 본부를 둔 유럽 SETAC의 활동이 두드러졌다[50, 51]. 이런 활동들을 배경으로 1993년에 ISO/TC207(환경관리)에 따라 LCA의 표준화 작업이 시작되었고, 1997년에 ISO14040이 제정되었다. 우리나라에서는 LCA 활성화의 하나로 환경부장관이 인정하는 전문인증기관의 검증을 받아 환경마크를 제품의 포장, 용기 등에 부착하여 사용도록 하는 환경성표지제도(ISO/TR14025 기반, Type III)를 2001년 2월부터 시행하고 있다[51, 54].

3-4-2. LCA 수행절차

LCA는 크게 목적 및 조사범위 설정(goal and scope definition), 목록분석(inventory analysis), 영향평가(impact assessment), 결과해석(interpretation) 등의 주요 단계로 구성되며, 이후에 보고, 검토, 응용 단계가 뒤따를 수 있다(Fig. 8). 네 가지 주요 단계에 대한 세부 절차는 다음과 같다[51, 52].

3-4-2-1. 목적 및 조사범위 설정

LCA의 출발점은 연구를 수행하는 목적, 조사범위, 기능 단위(functional unit) 및 결과물의 형식을 정하고, 필요한 가정들을 도입하는 것이다. 결과물의 형식은 연구의 목적과 이유에 부합하도록 정해야 하며, 조사범위 설정시 고려 대상을 지나치게 단순화하여 범위를 줄일 경우 총체적 분석을 통한 의미 있는 결과를 도출하기 어렵고, 반대로 범위를 지나치게 세분화할 경우 필요한 데이터를 얻지 못하게 되거나 연구에 걸리는 시간 및 비용이 한계를 초과할 수 있으므로 적절한 가정을 도입하여 조사범위를 조정하는 것이 필요하다. 기능 단위는 같은 '기능'을 하는 서로 다른 시스템(제품, 서비스, 공정 등)의 환경성을 쉽게 비교하기 위한 것으로 보편적이며 직관적인 단위(예를 들면, 발전소는 전력생산 1 MWh 당, 화학공장은 제품 1 ton 당)를 정해서 사용한다[50, 51].

3-4-2-2 목록분석

이 단계에서는 LCA의 대상 제품(또는 시스템)의 라이프사이클에 걸쳐 각 공정에 투입되는 물질과 에너지, 생산되는 제품과 부산물, 그리고 대기, 수질, 및 토양으로 배출되는 물질과 에너지에 대한 데이터를 수집하고, 목록항목(inventory data)에 관한 입출력 명세표를 작성한다. 단, 제품의 제조, 사용, 폐기 등과 관련된 데이터(foreground data)는 일반적으로 LCA 수행자가 직접 수집하지만, 원료 및 에너

지 자원의 채굴 및 운송, 전력생산 등과 관련된 데이터(background data)는 기존 LCA 사례 또는 문헌을 참조하여 계산한다. 여기서 수집된 데이터는 목적 및 조사범위와 부합해야 하며, 동일 공정에서 복수의 제품(또는 부산물)이 나올 경우 전체 환경부하를 이들에게 어떻게 나눌 것인가도 고려해야 한다[51].

3-4-2-3. 영향평가

여기서는 목록분석의 결과를 사용하여 환경영향의 중요도를 평가한다. 각각의 영향범주(impact category)가 영향받을 수 있는 단수 또는 복수의 목록항목을 선정하고, 각 연결관계마다 특성화계수(equivalency factor) 산출해서 여러 목록항목의 영향이 각각의 영향범주 별로 공통단위로 환산되어 합산될 수 있게 한다. 나아가서 영향범주 별로 가중치(weighting factor)를 부여하면 종합적인 환경영향을 평가하는 하나의 지표를 계산할 수 있다. 전형적인 영향범주로는 오존층파괴, 지구온난화, 인간독성, 생태독성, 광화학 산화물생성, 스모그생성, 자원고갈, 산성비, 부영양화 등이 있다[51-56].

3-4-2-4. 결과해석

설정된 LCA의 목적과 조사범위에 맞춰 목록분석과 영향평가의 결과로부터 결론을 이끌어 내고 권장/개선 방안을 제시하는 단계이다.

3-4-3. EIP에서 환경영향평가

LCA는 국내외에서 제지산업[52-54], 합성수지[55], 원자력 및 화력 발전시스템[56], 재활용[58-60] 등 많은 적용사례가 있다. 지금까지의 LCA 적용사례에 비추어 볼 때, 제품의 라이프사이클에서 환경부하는 제품의 생산 및 사용뿐만 아니라 원료의 채취, 수송, 그리고 폐기물의 처리 과정에서 상당량 발생함을 알 수 있었다. 따라서, 제품생산에 수반되는 물질 및 에너지의 입출력을 서로 교환할 수 있는 산업끼리 클러스터를 이루어 협력한다면 원료의 채취, 수송, 및 폐기물의 처리에 수반되는 환경부하를 대폭 줄일 수 있을 것이다. 그러나 닫힌 계(closed-loop system)내의 연속된 재활용은 전과정 평가시 재활용 물질 및 에너지의 흐름뿐만 아니라 물질 및 에너지의 질을 고려하여야 하므로 재활용에 따른 환경부하를 고려한 전과정 평가가 필요하다[58]. 한편, 이러한 자원순환형 클러스터에서 폐기물이나 용수의 재생 처리장비를 사용했을 경우 공정에서 배출된 높은 오염물질은 폐기 시스템으로 직접 버릴 수 없기 때문에 특별한 마지막 처리가 필요하다. 여기서 최종 배출물의 특별한 재생 기술을 재활용망에 포함하는 경우 만약 처리비용이 더 높다면 재활용되는 물질의 양이 제한되거나 너무 비싼 기술일 경우에는 재생처리를 하지 못할 것이며 이러한 재활용/교환망의 경우 경제성 및 LCA를 기초로 하여 최적의 재활용 방안이 결정되어야 한다[58-60].

4. EIP 구축시 미래 기술 개발적 측면

생태산업단지는 기존 산업단지가 안고 있는 여러 환경문제를 체계적으로 해결하면서 지역사회와 공존할 수 있는 지속 가능한 자원순환형 산업단지이다. 국내에서 1년 동안의 시범 사업에 이어 2005년 11월부터 본격적으로 15년 동안의 생태산업단지 구축사업이 추진되고 있다. 생태산업단지 개발에 응용되는 주요한 기술들이 앞에서 기술한 요인들 외에도 단지 내 기업 간 폐기물 및 에너지 관련 정보 공유, 통합환경영체계 구축, 구축기업들의 적극적인 참여, 지역사회와의 융화 같은 업무가 추가로 추진되어야 한다[3]. 한편, EIP 구축시 기존의 공정 최적화의 목적 함수와 다른 점은 단지 내 개별 기업마다 각 항목의 가중치를 가지고 각각의 기업을 다시 종합하는

다기준 목적함수(multicriteria objective function)를 가져서 단지 전체를 고려서 다기준 결정구조(multicriteria decision making)를 나타내게 된다. 따라서 EIP 개발에서 생태산업 교환망을 통하여 흐르는 부산물과 에너지의 공급량 변화 같은 외부 변화에 민감도가 낮은 강건한 교환망 구축 방안[7], 단원 계내에서의 재활용 되는 공정에 대한 환경영향평가 방법론 개발[58, 61], 단일 기업뿐만 아니라 전체 단지 내 기업들을 통합하여 기준이 될 수 있는 생태효율성(eco-efficiency)에 대한 지표 수립 그리고 생태산업단지 전체의 다기준 결정구조 문제를 공학적으로 해결하는 방법론 개발[61] 등이 앞으로 EIP 구축의 기술개발에 중요한 연구사항이 될 것이다.

5. 결 언

세계적으로 환경오염의 심각성을 인식하고 지속 가능한 개발을 이루기 위해 노력하고 있는 최근에 산업생태학과 생태산업단지 개발의 중요성이 최근 강조되고 있다. 본 총설에서는 생태산업단지의 기본 개념과 몇 가지 국내외 사례를 살펴보고 동시에 생태산업단지 개발의 중요한 기술들(에너지 교환, 물질 재이용, 용수 재이용, 환경영향평가)에 대하여 소개하였다. 본 논문이 화학공학분야에서 생태산업단지를 연구하거나 2005년 11월부터 본 사업에 들어가는 국내 생태산업단지 구축에 기술적인 분야에서 유용한 글이 되기를 바라며 화학공학분야에서도 EIP 개발연구에 도움이 되기를 바란다.

감 사

본 연구는 산자부 국가청정생산지원센터의 청정생산이전확산사업인 water pinch 기법을 이용한 철강산업단지 내 용수 재이용 최적화 시스템 구축의 과제 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Lowe, E. A., *Eco-Industrial Park Handbook for Asian Developing Countries*, Asian development bank report, USA(1997).
2. Allenby, B. R. *Industrial Ecology: Policy Framework and Implementation*, Prentice Hall, New jersey, USA(1999).
3. Lee, K. H., *Master Plan Establishment of Eco-Industrial Parks for Infrastructure of Cleaner Production*, Report, KNCPC(2004).
4. von Koppen, K. and Mol, A. P. J., *Ecological Modernization of Industrial Ecosystems*. IWA publishing(2002).
5. Kim, J. K., "Kalundborg Eco-industrial Complex in Denmark and the Application Study in Korea", 2nd International Conference of Eco-industrial Park, KNCPC, Seoul, Korea(2004).
6. Choi, J. S., "A Study on the Improvement of Industrial-Environment Policies for the Development of EIPs in Korea", 2nd International Conference of Eco-industrial Park, KNCPC, Seoul, Korea(2004).
7. Lee, T. Y. and Yoon, C. H., "Energy and Environmental Contamination Cost Minimization by EIP Developments", *NICE*, **22**(4), 420-425(2004).
8. Moon, S. Y., "Case Study of Resource Recycle Typed Industrial Development", *Environ. Resource. Economics. Review*, **12**(2), 347-382(2003).
9. Jang, Y. J., "Industrial Symbiosis Study for EIP Development: Korea Electric Power and POSCO", *Environ. Resource. Economics. Review*, **7**(2), 735-755(1999).
10. Sterr, T. and Ott, T., "The Industrial Region as a Promising Unit for Eco-Industrial Development - Reflections, Practical Experience and Establishment of Innovative Instruments to Support Industrial Ecology", *J. Cleaner Production*, **12**(8), 947-965(2004).
11. Lee, I. B., "Utility Distribution Simulation Research under FINEX System", POSTECH, Report(2005).
12. Linnhoff, B., *User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy*, Inst. Chem. Engrs.: Rugby(1982).
13. Linnhoff, B. and Hidermarsh, E., "The Pinch Design Method of Heat Exchanger Networks", *Chem. Eng. Sci.*, **38**(2), 745-752(1983).
14. Linnhoff, B., "Pinch Analysis-A State-of-the-Art Overview", *Trans. IChemE.*, **71**(A), 503-512(1993).
15. Lee, I. B., "State-of-Art and Prospective of Process Synthesis Technology", *Chem. Eng. and Technol.*, **8**(2), 147-155(1990).
16. Lee, I. B., "Toward the Synthesis of Global Optimum Heat Exchanger Networks under Multiple-Periods of Operation", *Korean J. Chem. Eng.*, **8**(2), 95-104(1991).
17. Lee, I. and Reklaitis, G. V., "Toward the Synthesis of Global Optimum Heat Exchanger Networks: the Unpinched Case", *Chem. Eng. Communication*, **75**(2), 57-88(1989).
18. Rodera, H. and Bagajewicz, M., "Targetting Procedure for Energy Savings by Heat Integration Across plants", *AIChE J.*, **45**(8), 1721-1742(1999).
19. Bagajewicz, M. and Rodera, H., "Multiple Plant Heat Integration in a Total Site", *AIChE J.*, **48**(10), 2255-2270(2002).
20. Bagajewicz, M. and Rodera, H., "Energy Savings in the Total Site Heat Integration Across Many Plants", *Comp. & Chem. Eng.*, **24**(7), 1237-1242(2000).
21. Adriaanse, A., Bringezu, S., Hammond, A., Moriguchi, Y., Rodenburg, E., Rogich, D. and Schutz, H., "Resource Flows: The Material Basis of Industrial Economies", A Joint Study of the World Resources Institute, Wuppertal Institute, the Netherlands Ministry of Housing, and the Japanese National Institute for Environmental Planning, World Resources Institute, Washington(1997).
22. EEA. Glossary on website, http://glossary.eea.eu.int/EEAGlossary/M/material_flow_analysis
23. Bringezu, S., Moll, S., Kowalski, M. F., Kleijn, R. and Palm, V., Regional and National Material Flow Accounting, From Paradigm to Practice of Sustainability, UK(1997).
24. Bringezu, S. *Industrial Ecology and Material Flow Analysis: Basic Concepts, Policy Relevance and Some Case Studies*, Perspectives on Industrial Ecology UK(2003).
25. Eurostat, "Economy-wide Material Flow Accounts and Derived Indicators", A Methodological Guide Office for Official Publications of the European Union, Luxembourg(2001).
26. Barrett, J., "A Material Flow Analysis and Ecological Footprint of York: Executive Summary", Stockholm Environment Institute(1997).
27. Brunner, P. H. and Ruchberger, H., *Practical Handbook of Material Flow Analysis*, CRC press, New York, USA(2004).
28. Bringezu, S., "Material Flow Indicators", Sustainability Indicators, J. Wiley Ltd. London(1997).
29. Christensen, C. L., Skarup, S., Maag, J. and Jensen, S. H., "Mass Flows Analysis of Mercury 2001", Technical report, Ministry of EPA, Denmark(2004).
30. Fourcade, T. "Mass Flow Analysis of Packaging in the UK",

- Development, University of Leeds, UK(2001).
31. Wang, Y. P. and Smith, R., "Wastewater Minimization," *Chemical Engineering Science*, **49**(7), 981-1006(1994).
32. Deul, A. S., *Systematic Approach to Water Resource Management in Industry*, IWA publishing(2002).
33. Dunn Mann, J. G. and Liu, Y. A., *Industrial Water Reuse and Wastewater Minimization*, McGraw-Hill(1999).
34. 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).
35. Dunn, R. F. Wenzel, H., Gottrup, L. and Kringelum, J., "Process Integration Design Methods for Water Conservation and Wastewater Reduction in Industry Part III. Experience of Industrial Application," *Clean Products and Processes*, **121**(3), 330-329(2001).
36. 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).
37. El-Halwagi, M. M., *Pollution Prevention through Process Integration*, Academic press(1997).
38. El-Halwagi, M. M. and Manousiouthakis, V., "Simultaneous Synthesis of Mass-exchange and Regeneration Networks," *AIChE J.*, **36**(8), 1209-1219(1990).
39. El-Halwagi, M. M. and Manousiouthakis, V., "Synthesis of Mass Exchange Networks," *AIChE J.*, **35**(8), 1233-1244(1989).
40. Wang Y. P. and Smith R., "Design of Distributed Effluent Treatment System," *Chem. Eng. Sci.*, **49**(18), 3127-3145(1994).
41. Wang, Y. P. and Smith, R., "Wastewater Minimization with Flowrate Constraints," *Trans IChemE*, **73**(A), 889-904(1995).
42. Kuo, W. J. and Smith, R., "Effluent Treatment System Design," *Chem. Eng. Sci.*, **52**(23), 4273-4290(1997).
43. 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," *NICE*, **21**(1), 65-73(2003).
44. 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. of Korean Society of Environmental Engineers*, **25**(12), 1550-1556(2003).
45. Yang, Y. H., Lou, H. H. and Huang, Y. L., "Synthesis of an Optimal Wastewater Reuse Network," *Waste Management*, **38**(5), 311-319(2000).
46. Lens, P., Wilderer, P. and Asano, T., *Water Recycling and Resource Recovery in Industry*, IWA publishing(2002).
47. Aspen water™ 10.2: Getting Started Guide, Manual of Aspen Water, Aspen Tech(2001).
48. Aspen water™ 10.2: Users Guide, Manual of Aspen Water, Aspen Tech(2001).
49. Yoo, C. K., Lee, T. Y., Moon, J. K., Chun, H. D. and Lee, I. B., "Water Pinch Technology and Design of Water Reuse Network," Submitted to *Korean Society of Environmental Engineers*(2005).
50. International Standards Organization, "Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Frameworks," ISO 14040(1997).
51. NamGun, E. and Hwang, Y. W., "LCA Application to Water Treatment Area", *Environment Media*, **1**(1), 92-97(2004).
52. Kim, J. G., Park, C. H., Chung, C. C., Hwang, Y. W., "Application of LCA (Life Cycle Assessment) for Paper Industry," *J. of Korean Society of Environmental Engineers*, **23**(5), 857-869(2001).
53. Kim, J. B., Hwang, Y. W., Park, K. H. and Seo, S. W., "Environmental Efficiency Assessment of Corrugated Board for Packing using the Life Cycle Assessment Method," *J. KSEE*, **25**(5), 588-594(2003).
54. Park, K. H., Hwang, Y. W., Cho, B. M. and Kim, H. J., "Environmental Impact Evaluation for Paper & Pulp Package Products - Life Cycle Assessment Case Study," *J. KSEE*, **25**(11), 1411-1419(2003).
55. Jo, H. J., Hwang, Y. W. and Park, K. H., "Environmental Assessment and Development of Program for Flexible Packages of Synthetic Resins using LCA Methodology," *J. KSEE*, **25**(10), 1289-1298(2003).
56. Ko, K. H., Hwang, Y. W., Park, K. H., Jo, H. J. and Jae, M. S., "Environmental Impact Evaluation for the Power Generation System Using the LCA Methodology," *J. KSEE*, **27**(7), 704-711(2005).
57. Lee, K. W., Hwang, T. Y., Kim, S. D. and Lee, K. M., "An Allocation Method for LCA of the Cascade Recycling System in Consideration of the Quality Degradation of Material," *J. KSEE*, **19**(4), 459-470(1997).
58. Schneider, F., "Allocation and Recycling : Enlarging to Cascade System," European Workshop on Allocation in LCA, Leiden, 39-53(1994).
59. Rydberg, T., "Cascade Accounting in Life Cycle Assessment Applied to Polymer Recycling," *Polymer Recycling*, **1**(4), 233-241(1995).
60. Kang, H. K., "Development of a New Eco-Design Tool," *Environ. Eng. Res.*, **8**(1), 1-7(2003).
61. Yoo, C. K., Heo, S. K., Yoo, D. J., Lee, S. J., Shin, J. N., Park, Y. J., Yoon, H. M., Chun, H. D. and Lee, I., "Case Studies and Design Strategies of Eco-Industrial Park (EIP)," Korean conference of Environ. Eng. Society(2005).