

물질흐름분석을 통한 생태산업단지의 모델링

이승준 · 유창규*[†] · 최상교** · 전희동** · 이인범

포항공과대학교 화학공학과/환경공학부
794-784 경북 포항시 남구 효자동 산 31
*경희대학교 환경응용화학대학 환경학 및 환경공학/환경연구센터
446-701 경기도 용인시 기흥군 서천동 1번지
**포항산업과학연구원 환경에너지연구센터 환경연구실
790-330 경북 포항시 남구 효자동 산32
(2006년 7월 27일 접수, 2006년 8월 18일 채택)

Modeling of Eco-Industrial Park (EIP) through Material Flow Analysis (MFA)

Seungjun Lee, ChangKyoo Yoo*[†], Sang Kyo Choi**, Hee Dong Chun** and In-Beum Lee

Dept. of Chemical Engineering, POSTECH, San 31, Hyoja-dong, Namgu, Pohang 790-784, Korea

**Dept. of Environmental Science and Engineering/Center for Environmental Studies, College of Environmental and Applied Chemistry, Kyung Hee University, Seocheon-dong, Giheung-gu, Yongin-Si, Gyeonggi-Do, 446-701, Korea*

***Environmental Research Lab., Research Institute of Industrial Science & Technology(RIST),*

San 32 Hyoja Dong, Pohang, 790-330, Korea

(Received 27 July 2006; 2006 18 August 28, 2006)

요 약

최근 지속 가능한 산업 개발을 위한 생태산업단지(eco-industrial park, EIP)의 개발이 각 국가별로 활성화 되고 있다. 생태산업단지(eco-industrial park)는 사업의 특성상 기업 및 정부, 그리고 자치단체가 모두 참여하는 성격을 지니지만 이를 구체적으로 실현하는 데는 공학적인 모델링 과정이 필요하다. 생태산업단지를 위한 주요 기술로는 에너지 교환, 물질흐름분석, 용수 이용 최적화, 전과정 평가를 통한 환경영향평가 등이 있다. 생태산업단지를 공학적으로 설계하는데 있어서 해당 기업들의 물질흐름이 어떻게 진행되고 이것을 어떻게 최적화 하여 모델링 할 것인가가 주요 목적이므로 물질흐름분석(material flow analysis, MFA) 방법론은 생태산업단지 설계에 유용하게 적용될 수 있다. 본 연구에서는 물질흐름분석 방법론 기술과 포항 생태산업 시범단지의 사례연구를 바탕으로 물질흐름 분석방법을 생태산업단지 모델링에 적용하는 방법, 그리고 MFA 모델링을 위한 소프트웨어의 활용을 제시한다.

Abstract – Recently, each country has been trying to promote Eco-Industrial Park (EIP) development for industrial sustainability. Technological modeling is required to realize EIP practically even though the project contains the political concerns for many companies, government, and self-governing bodies. The four main technologies of the EIP developments include energy exchange, material flow analysis, water pinch, and life cycle assessment. Material flow analysis (MFA) methodology can be utilized in EIP modeling in view of the fact that the analysis of material flows and the optimized modeling are major purposes for the technological modeling of EIP. Through MFA methodology in POHANG EIP project, how to apply MFA modeling to EIP modeling and how to utilize software for MFA modeling are shown in this research.

Key words: Clean Technology, Eco-Industrial Park(EIP), Material Flow Analysis(MFA), Modeling, Reuse and Recycling, Sustainable Developments, Systems Analysis

1. 서 론

1970년대 이후 유럽의 자생적인 Karlunborg 생태산업단지와 함께 1990년대에 기업의 경제적 효율성과 환경저감 효과를 극대화 하는 생태산업단지(eco-industrial park, EIP) 사업이 일부 선진국에서 시작되면서 현재는 유럽, 북미, 일본을 포함한 많은 국가들이 생태

산업단지 구축을 시도하고 있다. 한편, 1990년대 초부터 유럽 일부 국가나 일본 등지에서는 국가적인 차원에서 물질 흐름 수지를 파악 하는 물질흐름분석(material flow analysis, MFA)이 시작되었으며 초 기의 국제적인, 혹은 전국 단위의 물질흐름 연구에서 현재는 지역 단위의 물질 흐름 연구가 활발하게 진행 중이다.

EIP 구축의 성공 여부는 사전 조사와 지역적 적합성, 기업 간의 논의, 물질 교환 등 수많은 문제를 얼마나 합리적이고 적절하게 해결하느냐에 달려 있다. 특히, 원료 물질이나 에너지, 그리고 부산물

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

의 효율적 교환 문제는 사전 조사에 있어서도 많은 시간을 필요로 하고, 정확하게 계획하고 설계하는데 많은 어려움이 따른다. 따라서 산업단지 전체에서 원료, 에너지, 폐기물 등의 물질 흐름 수치를 파악하는 MFA는 EIP구축 같은 지역단위의 물질 흐름 연구에 꼭 필요한 기술이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 생태산업단지와 물질 흐름 분석 방법의 발전 과정 및 특성과 방법론을 각각 분석하고 동시에 생태산업단지 구축의 설계 과정에서 물질흐름 분석 방법론을 적용하여 최근에 진행 중인 포항 생태산업 시범단지에 이를 실증함으로써 생태산업단지 모델링에 있어서 물질흐름 분석 방법론의 유용성을 제시하고자 한다.

2. 생태산업단지

생태산업단지는 인디고 개발(indigo development)에서 창안한 개념으로 '에너지, 용수, 물질 등을 포괄하는 환경 및 자원문제를 다루는 데 있어 협력을 통해 발전된 환경적, 경제적 성과를 추구하는 제조업 및 서비스업체들의 공동체'로 정의하였다[1]. 생태산업단지는 기업뿐만 아니라 사회와 환경의 측면에서도 편익을 가져다 준다. 먼저 기업의 측면에서 생태산업단지는 입주 기업들에게 원료 및 에너지 효율의 향상, 폐기물 재활용, 처벌적 규제를 유발시키는 관행의 근절을 통해 생산비를 저감할 수 있는 기회를 제공 한다[2]. 일반적으로 중소기업들은 정보, 자문, 기술적 접근에 어려움을 겪는데, 생태산업단지 개발의 통합적 접근방식은 중소기업들이 이러한 장벽을 극복하고 성과 향상에 필요한 투자를 받을 수 있도록 지원 한다[3]. 한편 생태산업단지 개발로 환경적 편익을 얻을 수 있다. 생태산업단지의 구축으로 관련 산업분야 간에 원료 및 부산물 교환이나 공동의 환경관리를 통해 오염물질을 최소화 하고 자원을 효율적으로 이용함으로써 산업 활동으로 인한 생태계 파괴를 최소화 할 수 있다. 이러한 기업 활동과 환경에 주는 생태산업단지의 긍정적 영향으로 인해 지역 발전과 함께 새로운 일자리 창출 및 고객 확보 등의 사회적 효과를 창출하게 된다.

생태산업단지는 그 학문적 근간을 산업 생태학(industrial ecology)에 두고 있다고 할 수 있다. 산업 생태학은 자연 시스템과 상호 의존하는 생명 시스템처럼 산업 시스템을 디자인하고 운영하기 위한 학제간 연구라고 할 수 있다. 일부 전문가들은 산업 생태학을 '지속가능성의 과학'으로 정의하기도 한다. 산업 시스템의 설계가 어느 정도까지 생태계를 기초 모델로 하여 가능하다는 산업 생태학의 입장에서부터 산업 생태학의 기본 이론들을 생태산업단지에 적용하는 것이 가능하다.

생태산업단지는 해당 지역과 지역이 소유하고 지향하는 산업의 종류와 밀접한 연관을 가지기 때문에 각 지역적, 산업적 특성을 고려한 설계 전략이 중요하다. 따라서 1990년대 초부터 해외에서 추진해 온 몇 가지 생태산업단지 사업의 구체적 사례들을[4] 연구함으로써 유사성을 가지는 부문에 관해 벤치마킹이 가능하다. 먼저 유럽 지역은 다른 지역에 비해 빠른 산업화와 높은 인구 밀도에 따라 환경 문제에 매우 적극적으로 대응하고 있으며, 특히 덴마크 칼룬보그(Kalundborg)는 자생적으로 탄생한 생태산업단지의 효시라 할 수 있다(<http://www.symbiosis.dk>). 칼룬보그 생태산업단지는 단지 내에 Asnaes, Gyproc, Novo Nordisk, Novozymes, Soilrem, Statoil 등 몇 개의 대기업이 지리적으로 가까이 위치해 있으면서 산업적으로 협력이 가능하여 자생적으로 약 30년 간 꾸준히 발전해 온 형태

이다. 칼룬보그 생태산업단지 내에서 용수 재순환, 에너지 교환, 폐기물 재순환 등의 프로젝트가 진행됨으로써 자원 소비 절약, 폐기물 배출의 저감, 폐기물 재활용 등의 혜택을 얻었다. Table 1은 1998년 기준으로 칼룬보그 생태산업단지에 의해 산출된 경제적, 환경적 이익을 표로 나타내고 있다. 1998년 총 18개의 프로젝트에 900억 원을 투자하여 1,900억원의 비용 절감 효과를 얻었다. 칼룬보그의 생태산업단지 case에서는 공생주체간의 지리적 근거리, 부산물의 교환에 유리한 서로 다른 사업 성격, 공생 주체간의 정신적 공감대 등이 주요 성공요인으로 작용했다고 할 수 있다. 무엇보다도 유럽 지역에서 생태산업단지가 발전할 수 있었던 계기는 환경에 대한 인식과 더불어 ERDF(유럽지역 발전 기금) 등으로 인해 개발에 필요한 자금을 확보하기에 용이하였고 경영자간의 정신적 공감대가 유지되었기 때문이라 분석할 수 있다.

최근 생태산업단지에 대한 많은 연구가 진행됨에 따라 생태산업단지 개발에 중요한 몇 가지 전략들이 소개되었고 이는 자연적인 시스템의 교환망 구축, 에너지 교환, 물질 재이용, 지속 가능한 설계와 건설, 지역 사회로의 통합으로 정리된다. 그리고 이러한 전략을 성취하기 위한 몇 가지 기술로 에너지 교환망 구축을 통한 열통합 기술, 물질 재활용망 구축을 위한 물질흐름분석, 용수 교환망 구축을 위한 water pinch, 환경 영향 평가(life cycle assessment, LCA) 등을 들 수 있다.

먼저 에너지 교환망 구축을 통한 열통합 기술에서는 고 에너지 비용을 줄이기 위한 하나의 방법으로 에너지 회수와 재활용 공정을 포함하는 에너지 교환망을 합성하게 되었다. 이에 대한 많은 연구가 진행되었는데 그 중에서 가장 주목 받고 있는 것은 heat pinch 기술이다[2].

두 번째 물질흐름분석(material flow analysis)은 초기에는 전세계적 단위, 혹은 국가적 단위로 물질의 흐름에 대한 데이터를 수집하고 이를 계산함으로써 하나의 국가 혹은 대륙에서 사용되는 물질 및 에너지의 양을 추정하는 도구로 이용되었다. 이후 지역단위의 연구가 진행되면서 하나의 지역 내에서 인간 활동을 유지하기 위해 사용되는 물질 및 에너지의 흐름을 분석함으로써 생태적 발자취(ecological footprint)에 대한 양을 도출하였고 이를 토대로 실제로 사용 가능한 자원의 양과 인간의 활동을 위해 필요한 자원의 양 사이의 균형을 맞추는 방향으로 정책을 수립하는데 도움을 주었다[3]. 초기 발전과정에 비해 현재는 작은 지역단위의 물질흐름 분석이 이루어짐으로써 생태산업단지에의 응용 가능성을 보여주고 있다.

세 번째 water pinch 기술은 산업단지의 운용에 필수적인 공업용수의 내부 재순환을 최적화하는 기술로써 유입되는 공업용수를 최

Table 1. Economic and environmental profits in Kalundborg EIP

Annual resource saving	
Petroleum	45,000 ton
Coal	15,000 ton
Water	600,000 m ³
Annual reduction of waste	
CO ₂	175,000 ton
SO ₂	12,000 ton
Annual recycling of waste	
Sulfur	4,500 ton
Plaster	90,000 ton
Fly ash	130,000 ton

소화 하고 용수를 재활용 하며 폐수의 방류량을 줄임으로써 최적의 공정용수 재이용 라인을 구축하는데 활용된다[4]. 현재 체계적인 water pinch 방법론에 대한 연구가 진행 중이다.

마지막으로 전 공정에 대한 환경 영향 평가(life cycle assessment, LCA)는 원료의 채굴, 수송, 가공 및 제품의 생산, 유통, 사용, 폐기, 재활용 등에 수반되는 자원소비 및 환경부하와 이에 따르는 환경영향을 정량적으로 평가하고 연구의 목적에 맞추어 결과를 해석하는 기술이다[5]. LCA는 1980년대부터 본격적인 연구가 진행되었으며 1993년에 LCA 표준화 작업이 ISO/TC207에 따라 시작되었고 1997년에 ISO 14040이 제정되었다.

3. 본 론

3-1. 물질흐름분석(mass flow analysis, MFA)

물질흐름분석(mass flow analysis, MFA)은 물질흐름 수치에서 얻은 정보를 통해 물질사용의 효율성을 평가하는 방법이다[6]. 물질의 흐름에 대한 연구는 질량 보존과 관련된 이론이 이미 2000년 전부터 있었지만 1970년대 Ayres에 의해[8] 물질과 에너지 균형에 대한 이론이 소개되었고, 국가적인 차원의 MFA는 주로 1990년대 오스트리아와 일본에서 이루어 졌으며, 그 이후 다양한 물질흐름 분석 방법론이 개발되었다[9]. 1990년대 후반에는 지역적인 물질 흐름에 대한 연구와 더불어 MFA와 연계하여 생태 발자취(ecological footprint)를 산출함으로써 특정 지역의 경제, 환경적인 측면의 지속적인 개발 가능성에 대한 연구가 진행되었다[10]. 실제로 York에서는 해당지역에서 인간활동에 의해 사용되는 물질과 에너지의 양을 산출하여 생태 발자취와 실제 이용 가능한 자원의 양을 비교하는 연구를 행하였다[11]. MFA는 물질의 흐름에 관한 분석이 필요한 분야라면 충분히 응용이 가능하다. 몇 가지 응용분야의 예를 들면 환경 관리, 자원 관리, 폐기물 관리, 산업 생태학, 인간활동 영역의 대사(anthropogenic metabolism) 등이 있다[12]. 지속 가능한 환경의 측면에서 산업대사(industrial metabolism)의 물질유출에 관한 MFA의 전략목표는 크게 두 가지로 나눌 수 있는데[13], 초기 환경오염이 심각했던 시기의 물질 중심의 독성 및 오염제거에 대한 전략에서 그 이후 비물질화 및 재구조화로 전략이 변화되어 왔다. 생태산업단지는 산업 생태학을 그 학문적 기반으로 두고 있기 때문에 MFA의 비물질화 및 재구조화 전략을 함께 이용해 물질의 흐름을 분석하고 생태산업단지를 설계할 수 있다. MFA 방법이 EIP의 모든 과정을 해결해 주는 것은 아니지만 EIP를 설계하는데 있어서 효율적인 물질흐름이 중요하다는 사실로부터 MFA가 하나의 중요한 방법이 될 것이라는 사실은 비교적 명확하다.

MFA를 수행하는 과정은 몇 가지 단계로 나눌 수 있지만 일반적으로는 대략적인 추측과 예비 데이터를 이용해서 요구되는 결과가 도출될 때까지 수정과 개선을 반복하면서 수행하게 된다[7]. MFA의 첫 번째 과정은 먼저 해당 시스템에 관련되는 물질을 선택하고 포함된 물질들의 비율을 정리하는 것이다. 이 때 관련되는 물질을 선택하는 기준은 물질흐름분석의 목적이나 시스템의 성격에 따라 결정된다. 두 번째는 시간과 공간에서 시스템을 정의하는 과정이다. 공간적인 시스템 영역은 주로 프로젝트의 범위에 따라 결정되는데 정치적으로 정의된 지역이나 회사와 관련된 영역, 또는 수문학적으로 정의된 영역과 일치하는 경우가 많지만 주로 국가나 주, 도시 단위의 행정구역으로 나누는 경우가 많다. 시간에 대한 시스템 정의

는 시스템의 정상상태를 고려하여 조사기관과 관련한 필요한 만큼의 기간을 설정하면 된다. 결국 시간과 공간을 어떻게 정의하는가에 따라 물질흐름의 양이나 물질의 종류가 달라진다. 세 번째는 관련된 흐름, 축적 및 프로세스를 정의하는 과정이다. 특정 시스템과 관련하여 물질의 흐름이나 축적의 종류를 정의하고 각 프로세스에서 input과 output에 대한 정보를 정의한다. 대부분의 경우 15개 이상의 프로세스를 포함하는 시스템은 불필요하게 복잡하게 보이므로 간단하고 실제적인 물질흐름을 보여주는 신뢰할 만한 모델을 작성하는 것이 중요하다. 네 번째로 물질 흐름, 축적, 그리고 농도를 결정하는 과정이 진행된다. 세 번째 과정에서 정의된 흐름과, 축적, 그리고 프로세스를 바탕으로 해당하는 각 과정의 물질흐름 비율이나 물질의 농도 등을 결정한다. 이 때 데이터 스프레드시트를 작성하여 물자(goods)와 흐름의 비율, 물질(substance)의 농도와 물질 흐름의 비율 등을 정리하면 데이터를 쉽게 관리할 수 있다. 결과적으로 input과 output 사이의 균형에서 에러가 총 흐름의 10%이하로 나타나도록 한다. 다섯 번째 과정은 총 물질흐름과 축적을 평가하는 것이다. 축적된 물질의 양을 평가하는 데는 두 가지 방법이 있다. 먼저 오랜기간동안 축적된 양이 크게 변화하지 않을 때($m_{storage}/m_{stock} < 0.01$) 축적물의 부피와 밀도를 측정함으로써 평가할 수 있다. 큰 호수나 토양의 경우가 그에 해당한다. 그리고 빠르게 변화하는 축적의 경우($m_{storage}/m_{stock} > 0.05$) 적절한 시간간격에서 input과 output의 차이를 계산함으로써 축적을 계산하게 된다. 마지막 과정은 결과를 표현하는 것이다. 이 때 데이터의 출처를 명확하게 밝히고 추후에 추가나 수정이 용이하도록 과정의 재생산성과 투명성을 높여야 한다. 플로차트(flowchart)에 시스템 영역을 표시하고 과정들과 축적, 흐름 등의 과정이 올바르게 표기되고 그 양이 명확하게 표시되어야 한다. MFA의 수행 과정은 Table 2로 정리할 수 있으며 Fig. 1은 이를 도식화 한 그림이다.

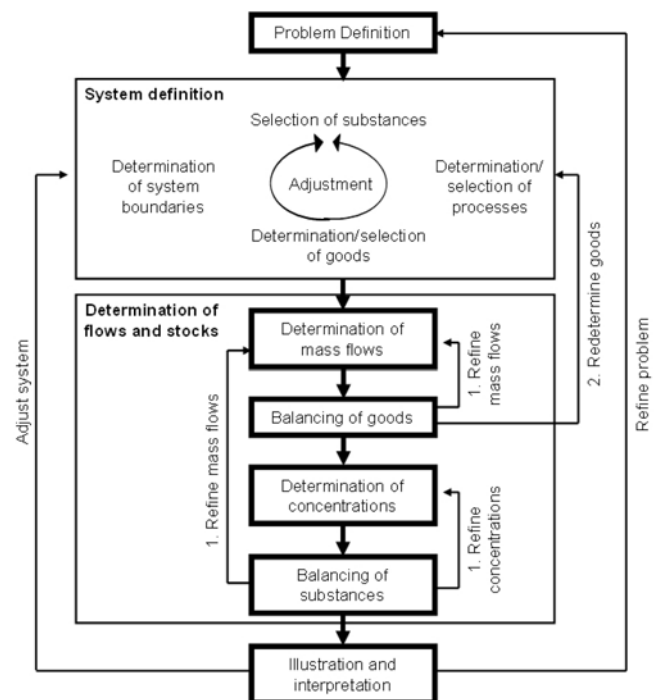


Fig. 1. Procedures for MFA[6].

Table 2. Procedures for MFA[6]

1	Selection of substances
2	System definition in space and time
3	Identification of relevant flows, stocks, and processes
4	Determination of mass flows, stocks, and concentrations
5	Assessment of total material flows and stocks
6	Presentation of results

3-2. 물질흐름분석을 통한 생태산업단지 모델링 및 소프트웨어의 필요성

생태산업단지 프로젝트를 수행하기 위해서는 구성 가능한 산업단

지내의 물질흐름에 대한 데이터와 각 데이터를 이용한 생태산업단지 내의 물질흐름의 정의, 그리고 정의된 생태산업단지에 대한 평가가 필요하다. 생태산업단지 내의 물질흐름이 복잡할 경우 데이터베이스를 효율적으로 관리하고 수많은 물질흐름 데이터를 정리하고 다이어그램을 작성해 줄 수 있는 도구가 필요하다. 생태산업단지 내 물질흐름은 기본적인 mass balance를 따르고 각 단위간의 프로세스를 효율적으로 도식화할 수 있는 물질흐름분석 방법이 기본적인 이론으로 적용될 수 있으며, 소프트웨어의 활용은 MFA의 기본적인 방법론에 덧붙여 물질흐름분석의 구성과 데이터 관리를 용이하게 해 준다. Fig. 2는 MFA 방법론에 따라 지역내의 물질흐름을 분석한 그림이다. 동일한 방식으로 생태산업단지 물질흐름 구성이 가능

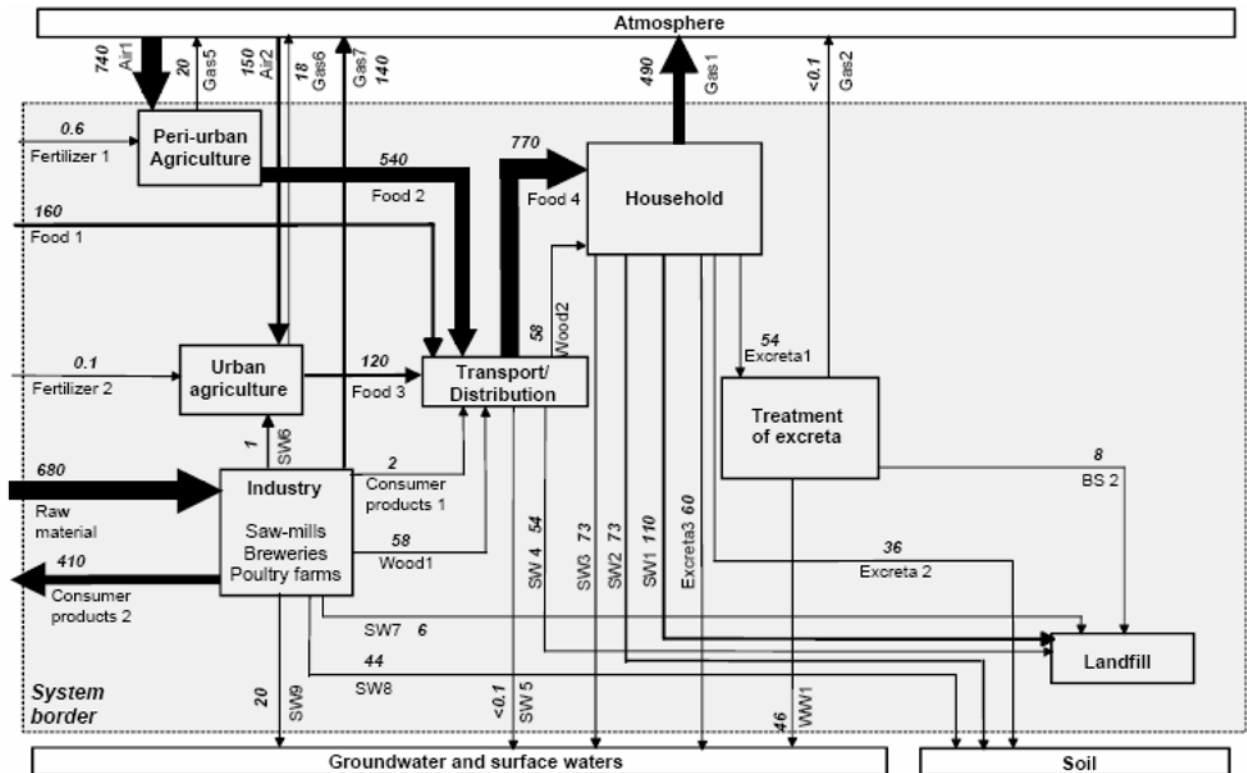


Fig. 2. Diagram of MFA[7].

Table 3. Evaluation of life cycle assessment software[6]

	Excel	GaBi 4	Umberto 4
Operating system	MS Windows, MAC	MS Windows	MS Windows
User friendliness	O	O	O
Stability	O	O	O
Speed	Δ	O	Δ
Programmability	O	X	O
Data import/export	O	Δ	O
Static simulation	O	O	O
Dynamic simulation	O	Δ	O
Uncertainties	Δ	O	Δ
Sensitivity analysis	Δ	O	X
Monte Carlo error simulation	Δ	O	X
MFA terminology/methodology	O	Δ	Δ
Trial version	X	O (free/90 days)	O (€300/30 days)

Note: O = good, Δ = average, X = not available

함을 예측할 수 있다. 한편 생태산업단지의 환경평가를 위해 LCA의 도입이 필요하며 소프트웨어의 활용은 다양한 환경평가 도구를 제공함으로써 환경평가를 용이하게 한다. Table 3는 몇 가지 LCA와 관련된 소프트웨어를 평가한 표이다. 현재 MFA를 위한 소프트웨어는 없지만 LCA를 위한 소프트웨어 중 몇 가지는 생태산업단지 모델링에 필요한 기능들을 제공하므로 이를 활용할 수 있다.

3-3. 소프트웨어 GaBi의 활용

보다 복잡하고 다양한 물질흐름을 분석하기 위해서는 소프트웨어와 데이터베이스 활용을 통한 관리 및 설계가 필요하다. Table 4에 생태산업단지 기술의 일종인 물질흐름분석의 복잡성을 해결하고 전과정 환경 영향 평가 분석을 용이하게 해줄 수 있는 소프트웨어 GaBi 4의 주요 장단점을 정리하였다.

GaBi는 사용자 편의성을 고려한 전과정 평가 도구로써 다양한 환경영향 분석 도구를 제공하며 모듈 구조에 의해 각 객체별로 데이터를 관리할 수 있다. 그러나 Excel과 달리 프로그래밍이 불가능하며 물질흐름분석에 대한 balance 조정이 불가능하다는 단점을 가지고 있다. 생태산업단지의 중요한 기술들인 물질흐름분석과 전과정 환경영향 평가를 수행하는데 GaBi 4를 사용하기 위해서는 몇 가지 장점을 파악하고 단점을 개선할 필요가 있다. 먼저 전과정 평가를 위한 GaBi의 다양한 분석도구를 이용하면 환경영향에 대한 분석을 용이하게 할 수 있다. 그리고 데이터베이스에 의한 관리를 통해 특정 프로젝트나 프로젝트간에 데이터를 공유할 수 있다. 또한 각 개체 별로 물질흐름에 대한 데이터를 관리함으로써 물질 혹은 에너지의 흐름을 세부적으로, 그리고 전체적으로 관리할 수 있다. 그러나 실제 프로젝트에서 복잡한 물질흐름에 대한 balance 조정이 불가능하고 사용자의 필요에 따른 세부적인 프로그래밍이 불가능하기 때문에 이 부분을 보완하거나 GaBi로부터 데이터 호환이 가능한 Excel을 추가적으로 활용한다면 단점을 보완할 수 있다.

GaBi 4에서 제공하는 분석 도구로는 시나리오 분석(scenario analysis), 파라미터 변동(parameter variation), 민감도 분석(sensitivity analysis), 몬테카를로 분석(monte Carlo analysis) 등이 있다. 파라미터의 사용이 GaBi 소프트웨어의 특징 중 하나인데 파라미터를 변화시키면서 다양한 조건에 대한 시나리오를 비교 분석하는 방법이 시나리오 분석이다. 파라미터 변동에서는 주요 변수를 점차 변화시키면서 조건에 따라 시스템이 어떻게 변화하는지 분석한다. 민감도 분석은 투입값(input variables)을 변화시키면서 어떠한 변수가 결과값에 가장 민감한 영향을 주는지 찾아내는 분석방법이다. 이를 통해 사용자는 시스템에 결정적 영향을 주는 주요 파라미터를 찾아낼 수 있다. 마지막으로 몬테카를로 분석은 통계적인 임의값에 대한 반복 시행으로 특정한 결과에 대한 중요성을 판단하는 도구로 사용된다. Fig. 3는 GaBi 4의 시나리오 분석 도구를 이용하여 파라미터 값 변화에 따른 두 가지 시나리오의 결과를 그래프로 표현하고 있다.

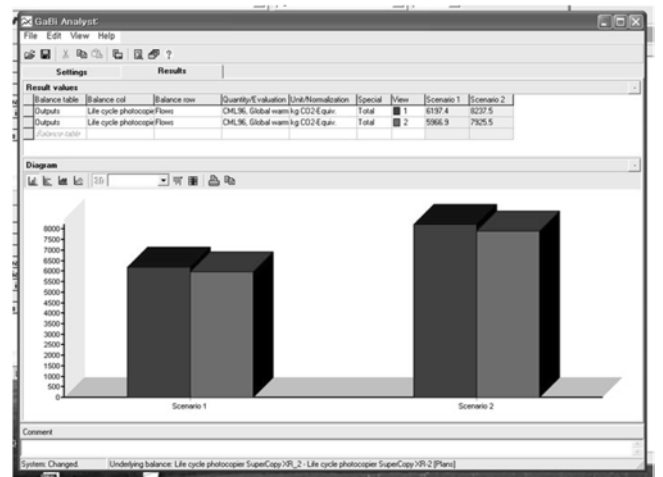


Fig. 3. GaBi Analyst.

4. 결과 및 고찰

4-1. 포항 생태산업단지(POHANG EIP)의 물질흐름분석

독창적인 아이디어에서 도출된 EIP모델은 새로운 EIP를 구성하는데 있어서 도움이 될 수 있다. 그러나, EIP 구성에는 많은 관계자들의 협의와 긴 시간 및 경제적 부담이 존재하므로 기존의 사례를 분석하고 벤치마킹 하는 것도 위험부담을 최소화 하기 위해 중요한 방법이다. 특히 EIP의 구성은 각 지역과 해당 기업, 혹은 주거지역 등의 특성과 밀접한 관련을 가지므로 가장 유사한 사례를 분석하고 이를 해당지역에 적합하게 수정하여 적용한다면 가장 효율적인 EIP를 구축함과 동시에 위험을 최소화 할 수 있다. 본 연구에서는 한국의 철강 기업인 POSCO가 위치한 포항지역 공단을 중심으로 자료를 분석하고 구성 가능한 EIP를 모델링 하였다. POHANG EIP의 Scenario는 일본의 후지사와(Fujisawa) EIP에서 그 아이디어를 얻게 되었는데, 앞의 EIP 지역 사례분석에서 언급하였듯이 Fujisawa EIP는 거대 기업인 EBARA 사가 중심이 되어 구성된 EIP로써, EBARA 사의 첨단 환경기술을 이용하여 경제적 효과를 누리고 주변의 제조업체를 비롯하여 주거지역에서 배출되는 오염물질을 정화함으로써 환경부담을 최소화 할 수 있었다. 거대 기업인 POSCO 또한 최근 우수처리 시설을 비롯하여, 집진 처리시설, SOx/NOx 처리 시설 등의 첨단 환경 시설을 도입함으로써 POSCO 자체의 물질대부분을 재활용하고 있으며 앞으로도 환경처리 기술은 더욱 발전될 것으로 예상된다. 따라서, POSCO가 포항 공단내 주변 기업과 EIP를 구성함으로써 기존에 주변 제조업체로부터 배출되는 각종 환경오염 물질의 방류를 최소화 하고 POSCO에서 정화되는 우수를 공업용수로 공급할 수 있다면 경제적, 환경적 효과를 동시에 누릴 수 있을 것이라고 가정하였다. 또한, POSCO의 부산물, 혹은 주변 기업간의 부산물 교환을 통해 자원을 순환시킨다면 자원 재활용의 측면에서 기대되는 효과가 매우 클 것이라고 가정할 수 있었다. 본 연구에서는 현재 실시되고 있는 포항공단 시범 생태산업단지 구축 사업으로부터 얻은 데이터를 토대로 생태산업단지 내 물질흐름분석 방법론을 통한 생태산업단지 모델링 방법의 적용 예를 소개하고자 한다.

Table 4. Evaluation of GaBi 4 for EIP modeling [7]

Advantage of GaBi 4	Shortcoming of GaBi 4
Database management	
Module structure	
Parameters	Unable to program
Various tools for environmental analysis	Unable to control mass balance
User friendly	

Table 5. Annual material flow of industrial manufacturers in Pohang, Korea[14]

Company	Industrial water	Waste water	dust	SOx/NOx	waste	Amount of waste	Major resource	Amount of resource
I	2,000,000		337		Steel dust	40,000	Scrap iron	2,150,000
O	800,000	284,908					Scrap iron	1,000,000
H	12,803	474,500	0.67	2.02	HCl waste	3,600	Wire Rod	3,000
J	55,000	43,800			HCl waste	5,750		
L	165,000	110,600					Zinc plate	355,933
Z	73,000	58,400	3.94	0.46	HCl waste	4,669	coil	249,000
					Wastewater sludge	489		
B	1,423,500	1,332,250			Wastewater sludge	14,400	Rolled steel	252,150
							tin	1,087,341
							Bronze	229,134
							Nickel	125,819
A	255,500	157,000			HCl waste	3,600		
C	511,000	438,000	9.05					
K	13,087	171,271			Wastewater sludge	1,695	Wire Rod	43,680
					Process sludge	185		
E	113,460	113,490			sludge	359	Wire Rod	137,400
					Process sludge	245		
S	82,000	163,900	11.83	27.79	Wastewater sludge	1,193	Hot Coil	660,650
					Dust	2,137	Black tube	182,500
F	71,124		2.10	36.32	Waste paint	83	clay	108,660
							Metal spring	21,768
L			12.68	34.00				
M			17.80				Wastewater sludge	58,907
							Steel slag	24,334
N	1,380,000	146,000			Wastewater sludge	982	Oxidized steel	134,976
Q			36.72	374.00	Process sludge	42,115		
R		0						
G	15,333		6.00	21.00	Wastewater sludge	14	Aluminum scrap	20,051
							Aluminum recycling	1,068
D		309,841	44.85	1,907.00			Coal tar(POSCO)	290,371

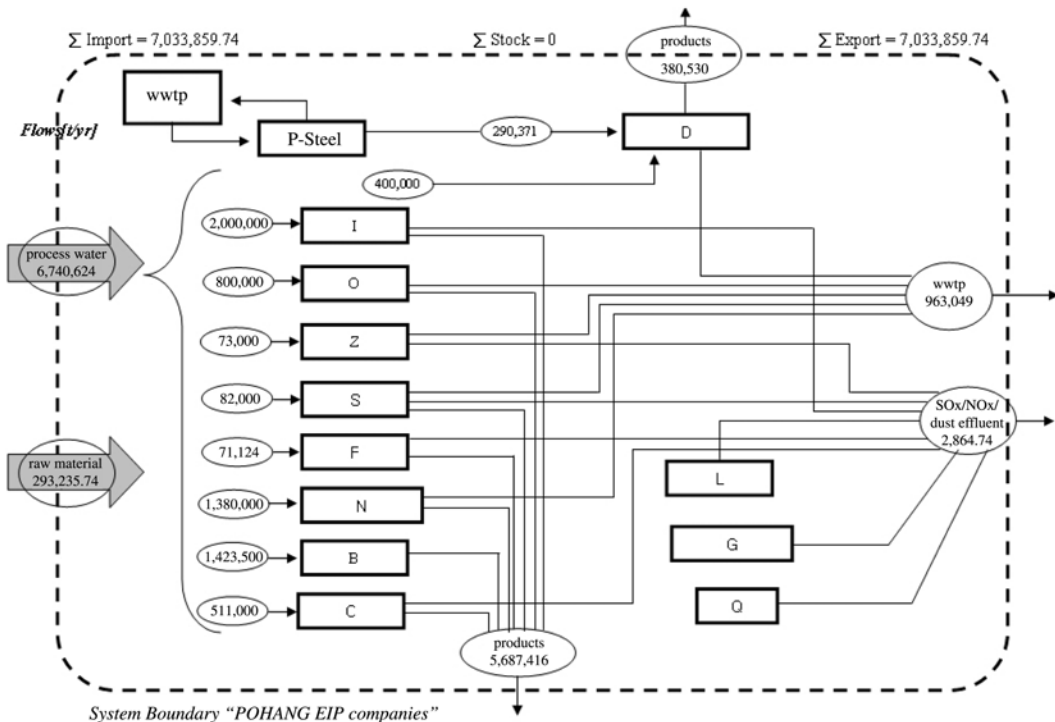


Fig. 4. Initial mass flow status in Pohang EIP.

보통 생태산업단지를 구성하는 경우 용수, 에너지, 폐기물 처리 등 각 영역별로 가능한 조합을 설정하고 사업을 추진하며 그에 따르는 효과도 각 영역에 따라 평가한다. 그러나 물질흐름 분석방법을 이용하면 하나의 시스템 내에서 용수 및 에너지, 폐기물의 흐름을 구성하고 모델링 할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한 단일한 영역에 대한 물질 흐름을 구성할 수도 있다. 에너지, 용수 등 각 영역으로서의 생태산업단지 사업이 아니라 전체적인 생태산업단지의 구성과 효과를 파악하기 위해서는 물질흐름 분석방법을 사용함으로써 이를 용이하게 할 수 있다. Table 5는 포항 생태산업단지 프로젝트를 위한 기초 데이터인 포항소재 기업들의 연간 물질흐름에 대한 데이터이다.

실제 EIP를 구성하기 위해서는 각 업체들에서 순환되는 모든 물질의 구체적 흐름을 분석함으로써 최적의 EIP를 구성해야 하지만 본 논문에서는 용수의 절약 측면과 환경배출 저감효과 및 자원 재활용을 중점적으로 고려한 EIP를 구성하고자 하였다. Table 5의 자료로부터 두 가지의 Scenario에 관한 모델링을 하고 이 두 가지 Scenario를 현재 상황과 비교함으로써 최적의 EIP 구성을 도출하고자 하였다. 두 가지의 Scenario의 내용은 Table 6과 같이 경제적 효과, 경제-환경적 효과를 중심으로 구성하였다.

물질은 공업용수 및 폐수, SOx/NOx, dust, 슬러지 및 콜타르 등의 재활용 가능한 폐기물, 그리고 기타 원료로 구성하였다. 물질흐름을 분석하는데 있어서 용수의 경제적 이용 및 환경저감 효과를 중점적으로 고려하였기 때문에 공업용수와 환경 배출물 및 재활용 폐기물을 제외한 원료나 기타 제품 등은 간단하게 mass balance를

Table 6. Three scenario analysis of POHANG EIP modeling

Scenario1	Industrial water reuse scenario by raindrop treatment system (economic effect)
Scenario2	Overall scenario by raindrop treatment system, treatment of waste dust, and recycling of resources (economic and environmental effect)

충족하도록 import, export의 통합된 수치로 나타내었다. 따라서, import와 export의 물질 흐름이 해당 기업들의 연간 총 물질 흐름을 나타내는 수치가 아님을 명확히 해야 한다. 단지 import와 export의 수치는 공업용수 및 환경배출 물질과 재활용 물질 중심의 구성을 유지하기 위한 보조수단이다.

물질흐름분석 방법론에 따라 현재 포항공단 기업들의 용수흐름 및 오염물질 배출 상태를 분석하였고 이를 Fig. 4에 나타내었다. Scenario1에서는 공업용수 공급이 가장 많은 12개 기업을 선정하여 이를 중심으로 EIP를 구성하였고, 물질흐름분석을 통해 이를 모델링 하였다. Scenario1의 MFA를 이용한 EIP 모델링을 Fig. 5에 나타내었다. Scenario2에서는 기업들 중 용수 이용과 대기오염물질 배출 및 자원 재활용 측면에서 공통적으로 영향이 있거나 하나의 측면에서 영향이 큰 기업 11개를 선정하여 EIP를 구성하였고 물질흐름분석을 이용한 Scenario2의 모델링은 Fig. 6에 나타내었다.

4-2. 시나리오 평가

최종 모델링 한 Fig. 4-6으로부터 물질흐름을 파악할 수 있고 항

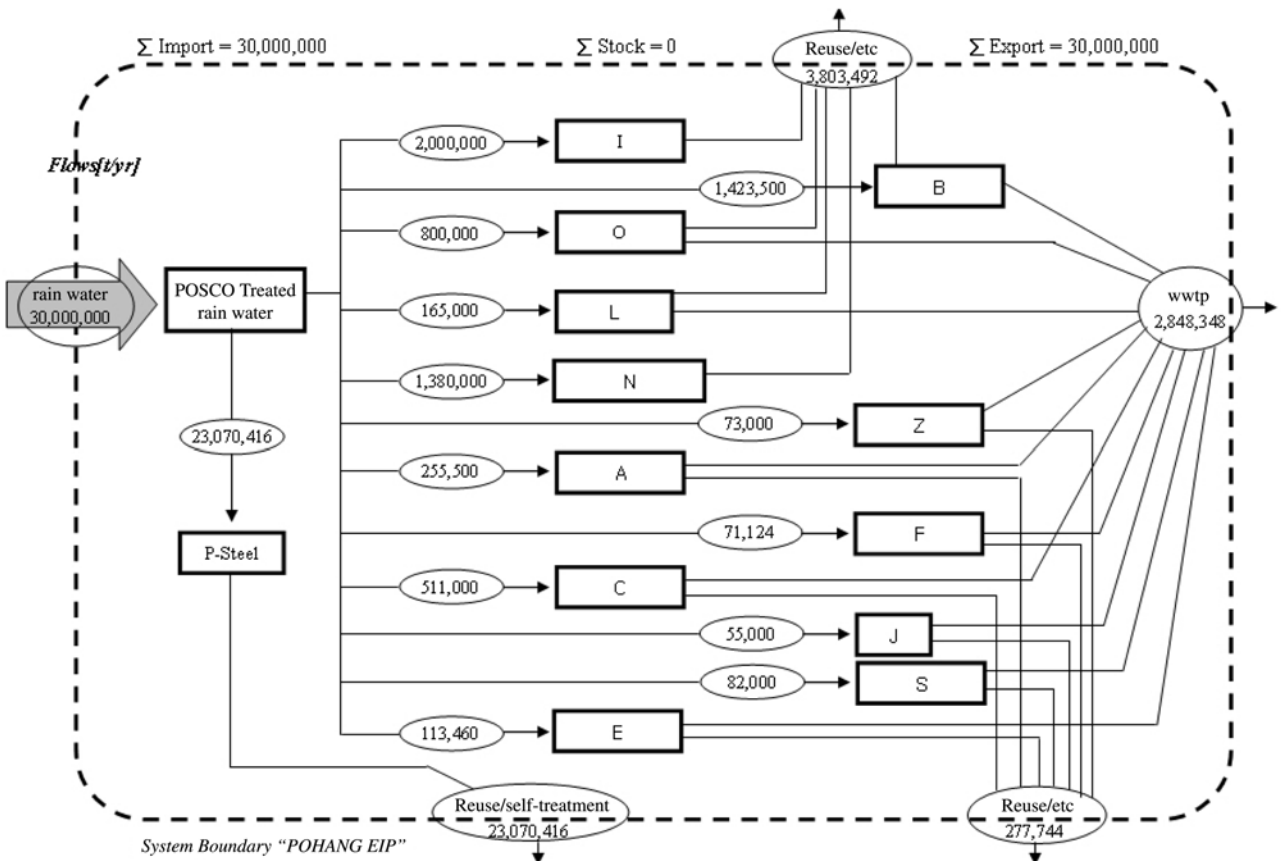


Fig. 5. POHANG EIP Scenario1 - Recycling of raindrop.

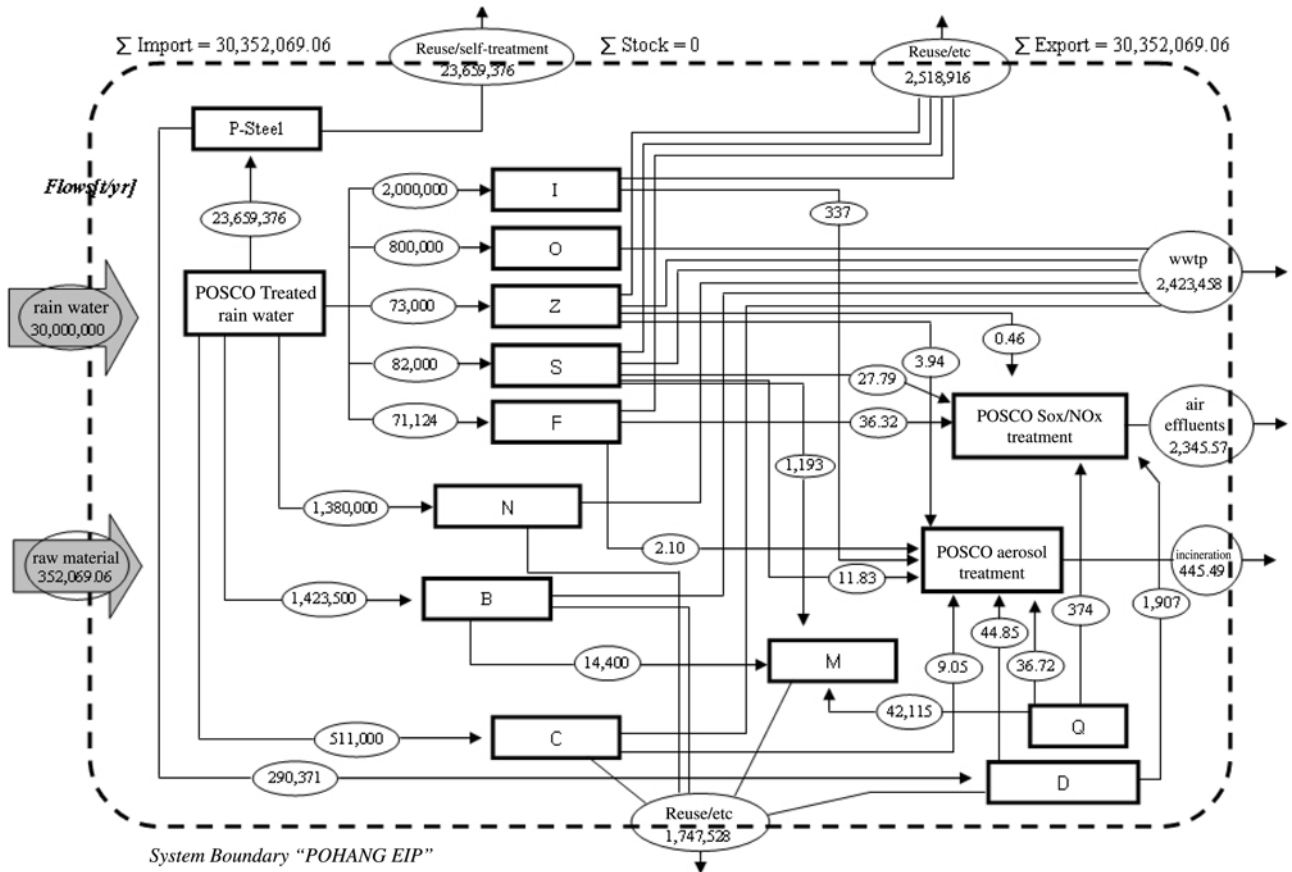


Fig. 6. POHANG EIP Scenario2 - Overall material recycling.

Table 7. Analysis of scenario 1 and scenario2

Unit [t/yr]	Raindrop treatment	Reduction of SOx/NOx	Reduction of dust	Recycling of resources
Current	N/A	- 2,400.57	- 464.17	290,371
Scenario1	6,929,584	N/A	N/A	N/A
Scenario2	6,340,624	2,345.57	445.49	348,079

*The minus sign means current discharge of waste.

목에 따른 물질 흐름의 수치를 구체적으로 표현할 수 있다. Table 7는 모델링 한 결과로부터 도출된 물질흐름의 수치들이다. 현재 포항지역의 POSCO 및 선정된 주변 기업들의 분석 결과에서 대기오염물은 dust와 SOx, NOx가 각각 연간 464.17 ton과 2,400.57 ton이 배출되고 있으며, 용수공급도 외부의 용수공급원을 이용하고 있다. 단지 P-Steel에서 배출되는 폐기물 290,371 ton을 D기업에서 재활용하는 상황뿐이다. Fig. 7은 Table 7을 그래프로 나타낸 것이다. 용수 사용량이나 재활용량에 비해 대기오염물질 배출량의 수치가 매우 낮기 때문에 그래프 상의 비교를 쉽게 하기 위해 수치의 단위를 조정하여 그래프로 나타내었다. 즉, 우수 이용 효과는 10^{-4} 을, SOx/NOx 저감효과는 10^{-1} , 자원 재활용은 해당 수치의 10^{-3} 을 곱한 결과를 그래프로 나타내었다. Fig. 7의 분석 결과 우수이용에서 Scenario1이 최대 효율을 나타낼 수 있는 EIP 구성으로 나타났다. Scenario1은 용수공급효과에서 최대의 효율을 나타낸 것으로 경제적 효과가 가장 큰 Scenario임을 의미한다. 그러나, Scenario2의 분

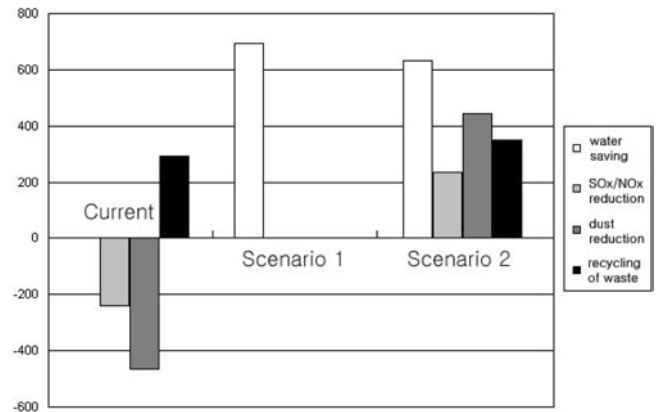


Fig. 7. Comparison of initial status, Scenario1, and Scenario2.

*)The three elements, water saving, SOx/NOx reduction, and recycling of resources are multiplied by 10^{-4} , 10^{-1} , 10^{-3} , respectively, for convenient comparison.

석 결과에서 비록 Scenario1의 경우보다 경제적 효과의 수치가 낮지만 현저하게 차이가 있다고 볼 수는 없으며 경제적, 환경적 효과를 동시에 달성할 수 있다는 점에서 Scenario2는 의미를 가진다. 특히 향후 우수 처리 시스템이나 기업간 자원 재활용 빈도가 늘어날 것으로 예측되므로 추가적인 EIP 구성으로 효율성을 높여갈 수 있을 것이다.

4.3. 물질흐름분석 방법의 향후 과제

생태산업단지 구축에는 현장 조사 및 설계부터 평가까지 다양한 작업과정이 있으며 복잡하고 다양한 문제를 해결하기 위해서 다양한 기술이 필요하다. 이 중에서 물질흐름분석 방법은 생태산업단지 설계 및 관리에 하나의 기술로 적용될 수 있다. 그러나 물질흐름분석도 단순히 하나의 방법론만으로 해결될 수 없으므로 다양한 접근 방법을 개발하는 것이 필요하다. 먼저 복잡한 데이터의 관리와 용이한 설계를 위해 물질흐름분석과 생태산업단지에 필요한 기능을 보유하는 전용 소프트웨어의 개발이 진행되어야 한다. 현재는 주로 LCA 전용 소프트웨어로 데이터베이스 관리 및 설계가 일부 가능하지만 이들 소프트웨어 만으로는 완벽하게 구현하기 어렵다. 둘째로 물질흐름분석에 대한 다양한 경험이 필요하다. 물질흐름분석 방법론이 발달된 이후로 여러 연구사례가 발표되고 있지만[15-16], 생태산업단지의 성격에 맞는 물질교환 문제나 재활용 문제와 관련된 현장사례와 연구사례가 실제 생태산업단지를 설계하는데 유용하게 적용될 수 있기 때문이다. 마지막으로 생태산업단지 설계와 관련된 물질흐름분석 방법에 영향을 주는 생태 효율성(eco-efficiency)에 대한 지표 수립 방법이 확립되어야 한다[17]. 생태산업단지를 정책적으로 활용하기 위해 생태 효율성에 대한 평가가 중요하며 생태 효율성을 정의하는 기준에 따라 실제 생태산업단지의 설계 방향이 결정되기 때문이다.

5. 결 론

생태산업단지에 대한 관심이 고조되면서 그와 관련된 다양한 기술들이 개발되고 있다. 본 논문에서는 생태산업단지의 기술인 물질흐름분석에 관해 소개함과 동시에 이를 이용한 생태산업단지 모델링의 예를 보여 주었다. 또한 이러한 기술들을 용이하게 할 수 있는 소프트웨어 GaBi에 대해 소개하였다. 이를 통해 생태산업단지를 모델링 하는데 있어 물질흐름분석 방법의 활용도를 높이고, 생태산업단지 모델링에 적합한 소프트웨어 개발이 필요함을 보였다.

감 사

본 연구는 BK 21 2단계 사업에 의해 지원받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. Lowe, E. A., *Eco-Industrial Park Handbook for Asian Develop-*

ing Countries, Report to Asian Development Bank(2001).

2. Linnhoff, B. and Hidermarsh, E., "The Pinch Design Method of Heat Exchanger Networks," *Chem. Eng. Sci.*, **38**(2), 745-752(1983).

3. Barrett, J., *A Material Flow Analysis and Ecological Footprint of York: Executive Summary*, Stockholm Environment Institute (1997).

4. Wang, Y. P. and Smith, R. "Wastewater Minimization," *Chemical Engineering Science*, **49**(7), 981-1006(1994).

5. International Standards Organization, *Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and Frameworks*, ISO 14040(1997).

6. EEA. *Glossary on website*, http://glossary.eea.eu.int/EEAGlossary/M/material_flow_analysis(2003).

7. Brunner, P. H. and Ruchberger, H., *Practical Handbook of Material Flow Analysis*, CRC press, New York, USA(2004).

8. Ayres, R. Resources, *Environment and Economics*, New York, USA(1978).

9. Hinterberger, F. et al. *Material Flow Accounting and Analysis (MFA): A valuable Tool for Analyses of Society-Nature Interrelationship*, International Society of Ecological Economics(2003).

10. Wackernagel, M. et al. *Ecological Footprint of Nations, Redefining Progress*, Oakland(2002).

11. Barrett, J., *A Material Flow Analysis and Ecological Footprint of York: Executive Summary*, Stockholm Environment Institute (1997).

12. Graedel, T. E. and Allenby, B. R. *Industrial Ecology*, Prentice Hall(1995).

13. Bringezu, S. *Industrial Ecology and Material Flow Analysis: Basic Concepts, Policy Relevance and Some Case Studies, Perspectives on Industrial Ecology*, UK(2003).

14. Chun, H. D., et al. *Design of Eco-Industrial Park for Pohang Industrial Complex*, Technical report, KNCPC, Korea(2005).

15. Christensen, C. L., Skarup, S., Maag, J. and Jensen, S. H., *Mass Flows Analysis of Mercury 2001*, Technical report, Ministry of EPA, Denmark(2004).

16. Fourcade, T., *Mass Flow Analysis of Packaging in the UK*, Development, University of Leeds, UK(2001).

17. Yoo, C. K., Heo, S. K., Yoo, D. J., Lee, S. 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).