

## 산업단지형 물질흐름분석(MFA) 적용방안 연구

안상전, 정재수, 임송택, 정윤화

(주)에코아이

## Study of MFA application for Industrial Complex

Sangjueon Ahn, Song-taek Lim, Nahyun Cho  
Ecoeye. co., LTD ([www.ecoeye.com](http://www.ecoeye.com))

### ABSTRACT

The material flow analysis(MFA) methodology for industrial complex which used input-output table and field data of industrial complex was developed for the purpose of information utilization to quantify the material flow and to promote efficient resources management in industrial complex. Utilization value of the macro-analysis method that used input-output table application is easy when we plan environmental policy, and the more quality of statistical data is high, the more reliability of the results is high. Developed model was applied to Shiwa-Banwol industrial complex and resource intensity index and eco-efficiency index derived from industrial categories. The main resources consumption category of business was ascertained through the derived results, and analyzed the cause. The result was that category of business that eco-efficiency index was largest was given to the chemical categories of business, by the following index list index appeared high in order nonmetallic minerals, a general machine, wood-paper and transportation equipment. In case of electric-electronic categories of business, DMO(Domestic Material Output) index was highest compare with other categories of business, and eco-efficiency index showed lowest.

### 요약문

산업단지내의 물질흐름 정량화 및 자원관리방안을 위한 정보 활용을 목적으로 산업연관표 및 산업단지의 현장데이터를 이용한 산업단지형 물질흐름분석(MFA, Material Flow Analysis) 방법론이 개발되었다. 산업연관표를 이용한 거시적 MFA 분석방법은 환경정책 입안 시 활용가치가 높으며 적용이 비교적 수월하고, 통계자료의 데이터 품질이 높을수록 결과의 신뢰성이 높다. 개발된 산업단지형 MFA 모델은 시화·반월 산업단지에 적용하였고, 자원집약도지수 및 생태경제효율성 지수를 업종별로 도출하였다. 이들 도출된 결과를 통해 주요 자원소비 업종을 규명하였고, 원인을 분석하였다. 분석결과 시화·반월산업단지의 생태경제효율성 지수가 가장 큰 업종은 화학업종이고 다음으로 비금속광물, 일반기계, 목재·종이 및 수송장비 순으로 생태경제효율성이 높았다. 전기·전자업종의 경우 환경배출(DMO; Domestic Material Output) 지수가 타 업종에 비해 가장 높으면서 생태경제효율성도 가장 낮은 수치를 나타냈다.

주제어 : MFA, Eco-efficiency, 산업연관분석, 생태산업단지, 자원집약도

## 1. 서론

산업단지는 수많은 기업이 일정한 공간에 집적하여 생산활동을 전개하고 있기 때문에 환경문제의 발생빈도와 발생가능성도 높고, 환경문제 발생 시 주변지역과 입주업체에 대한 파급효과와 위험성도 상대적으로 큰 편이다. 한 예로 반월 시화공단과 같이 주거지역과 인접한 산업단지의 경우, 도시화가 진전됨에 따라 생산활동에 따른 환경오염의 파급효과가 직접적으로 주거지역에 미칠 가능성이 매우 증가되고 있다. 이처럼 많은 기업이 일정한 공간에 집적하여 환경문제를 빈번히 발생시키는 산업단지 환경문제는 전체 국토관리 및 지역사회 관리에 있어 중요한 과제로 대두되고 있다.

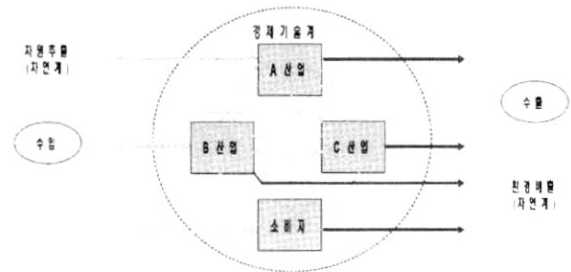
물질흐름분석(MFA, Material Flow Analysis)은 국가 및 산업의 물질 흐름을 정량적으로 파악하고 환경성을 평가하는데 유용한 기법으로, 유럽 및 일본 등에서 환경관리, 자원관리, 폐기물 관리 및 생태산업단지의 구축 시 평가 또는 최적화 설계 도구로 활용되고 있다.

이번 연구에서는 산업단지내의 물질흐름 정량화 및 자원관리방안을 위한 정보 활용을 목적으로 산업연관표 및 산업단지의 현장데이터를 이용한 산업단지형 물질흐름분석(MFA, Material Flow Analysis) 방법론을 개발하였다. 개발된 산업단지형 MFA 모델은 시화반월 산업단지에 적용하였고, 자원집약도지수 및 생태경제효율성 지수를 업종별로 도출하였다. 산업단지내에 입주한 산업구조와 한국은행에서 제공한 산업연관분석표 상의 산업구조가 동일하다는 가정하에 결과가 도출되었기 때문에 실제와는 차이가 있을 수 있고, 향후 지역산업연관표를 활용할 시 결과의 신뢰성을 더욱 높일 수 있다.

## 2. 물질흐름분석(Material Flow Analysis: MFA)의 개요

물질흐름분석(MFA)의 기본개념은 경제계가

환경의 하위시스템에 물리적으로 속해있다는 개념에서 출발하여 대상 시스템경계에서 투입물과 산출물의 상관관계를 분석함을 의미한다. 원료물질(무생물 및 생물자원)은 투입물로 자연계에서 경제계로 유입되고 제품으로 생산 및 소비되며 최종적으로 자연계로 배출된다. 질량보전의 법칙에 따라 전체 투입물은 전체 산출물과 대상 시스템 내에서 물질의 순 축적량(Net accumulation)과 같다. 이러한 개념은 국가, 지역 및 기업 등의 하위 그룹에서도 동일하게 적용된다. 물질흐름분석을 위해서는 경제계와 환경계 사이를 구분하는 시스템경계에 대한 정의가 우선적으로 고려되어야 한다(그림 1 참조).



[그림 1] 산업단지 시스템경계

경제계 모든 흐름은 경제활동의 3가지 형태, 생산, 소비 및 스탁(Stock)변화와 밀접한 관련이 있다(United Nations, 1993, 2001). 시스템경계로의 투입물은 자원(Resource) 및 수입으로 구분되고 시스템경계에서의 배출물은 가공원료 또는 생산제품과 같은 수출(Export)과 환경배출물로 구분한다.

현재까지 국가 및 산업의 물질흐름을 정량적으로 분석하는 기법으로 MFA(Material Flow Analysis)가 주로 사용되어 왔다. 그러나 전 세계적으로 국가차원의 MFA 방법론 개발을 통한 적용사례는 많이 수행되고 있는 반면 산업단지와 같은 지역적 수준의 MFA 연구는 제한적으로 수행되고 있다. 지역적 수준의 MFA 연구가 제한적인 이유는 다음과 같다.

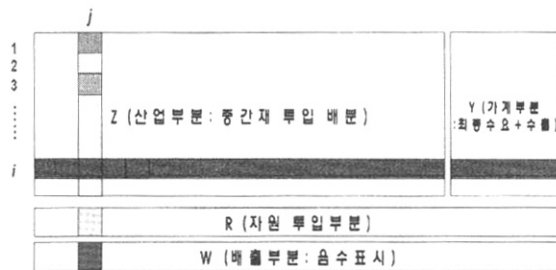
- 지역 통계데이터(기업정보, 환경관련 데이터 등) 부족
- 데이터 품질
- 입주업체의 변동(공장이전, 업종변경, 업종폐쇄 등)
- 업종 간 물질흐름의 복잡성

산업단지를 포함한 지역MFA가 위와 같은 현실적인 어려움으로 인해 적용이 제한적이긴 하지만 지역MFA는 산업단지 내 물질흐름을 정량화 하고 목표지수를 통해 물질의 효율적 사용이라는 측면에서 그 의의가 크다. 따라서 현재 분산 관리되고 있는 지역 통계데이터를 물질관리 목적에 맞게 DB화 하고 지속적으로 개선하는 작업이 선행될 필요가 있다. 또한 장단기 전략을 수립하고 단계적으로 각 생태산업단지 구축목적에 맞는 MFA 수행방법이 개발되어야 한다.

### 3. MFA 방법론 개발

#### 3.1 산업단지 모형개발

산업에 의해 야기된 환경부하는 산업에서 소비된 최종산출물의 양에 비례한다는 가정하에 MFA방법론이 개발되었다. 산업단지 MFA 방법론에 대한 기본구조는 아래그림과 같다.



[그림 2] 산업단지 MFA 기본구조

위 표의 Z(산업부분)부분은 산업연관분석표이며 세로방향은 투입구조를 나타내는데, 이는 각 산업에서 생산활동을 위해 사용한 중간투입액을 나타낸다. 또한 가로방향은 각 산업에서 생산된 산출물에 대한 수요를 나타내는 배분구조를 나타내는 것으로 중간재로 판매되는 중간

수요와 최종수요 및 수출상품 등으로 구성된다. 표의 세로방향의 합계인 총투입액과 가로방향의 총합계에서 수입을 차감한 총산출액은 서로 일치한다.

자원투입(R)은 산업단지 경계 외부에서 투입되는 자원(천연자원, 원자재 및 부자재)을 의미하며 배출(W)은 자연계로 배출되는 환경부하를 의미한다. 물질수지(Material Balancing)를 맞추기 위해 배출부분은 음수로 표현된다.

#### 3.2 자원집약도 지수 산출

자원집약도( $t_1$ )은 산업단지내 기술수준을 나타내는 지수로 산업단지로 투입된 각 업종별 원자재 및 부자재 투입량(DMI ; Directed Material Input)을 부가가치액(VA ; Value Added)으로 나눈 결과값으로 다음과 같이 계산된다.

$$\text{자원집약도}(t_1) = DMI / VA \quad \text{〈식 1〉}$$

여기서,

DMI : 직접물질투입량(톤)

VA : 부가가치(원)

자원집약도 지수( $t_1$ )를 통해 현재 각 업종별 자원집약도를 정량적으로 가늠할 수 있다.

#### 3.3 총환경부하량 산출

산업단지내 업종간의 산업연관분석을 이용한 직간접에 의한 총환경부하량( $g_1$ )은 자원고갈측면에서의 직접투입량(DMI)과 자연계로 배출되는 환경부하량(DMO)의 합으로 정의하고 다음과 같이 계산한다.

$$g_1 = t_1 \times (1 - A)^{-1} \times f + t_2 \times f \quad \text{〈식 2〉}$$

여기서,

$g_1$  : 총환경부하량(톤)

$t_1$  : 자원집약도(톤/원)

$(1 - A)^{-1}$  : 생산유발계수

$f$  : 총매출액

$t_2$  : 원단위 환경부하(톤/원)

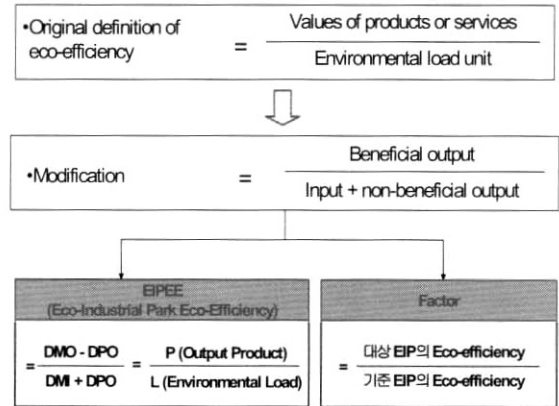
$t_1$ 은 앞서 산출한 업종별 자원집약도로 투입물의 자원고갈 측면을 다룬다. 예로, 자원집약도 지수가 높다는 의미는 자원의 사용이 높다는 의미이고 자원고갈 측면과도 연결된다.

$(I-A)^{-1}$ 는 생산유발계수로 최종수요가 한 단위 증가하였을 때 이를 충족시키기 위하여 각 산업부문에서 직·간접으로 유발되는 생산액 수준을 나타낸다. 산업단지에 대한 생산유발계수는 현재 공식적으로 공개하고 있지 않기 때문에 국가 산업연관분석표를 이용한 생산유발계수를 이용한다. 지역 산업연관분석표를 이용할 경우 산출 결과의 신뢰성을 더욱 향상시킬 수 있다. 총매출액( $f$ )은 산업단지내 각 업종의 매출액을 의미하며 산업단지에서 외부로 판매되는 가계수요 및 수출을 모두 포함하고 있다.

원단위 환경부하( $t_2$ )는 산업단지 시스템경계로 배출되는 환경부하를 의미하며 대기, 수계 및 폐기물을 포함한다. 또한 재활용 물질 중 시스템경계 외부로 배출되는 재활용 물질은 환경부하물질로, 시스템내부에서 재활용 또는 재사용되는 물질은 자원순환물질로 간주하여 각각 적용하였다. 이번 연구에서는 환경부하 배출중 자원투입에 따른 폐기물 흐름에 중점을 두어 환경부하는 폐기물집약도( $t_2$ )값으로 결정하여 원단위당 업종별 폐기물 배출량이 산출되었다.

### 3.4 생태경제효율성 계수(Factor) 산출

생태경제효율성은 환경부하에 대한 경제적가치로 정의되며 이 기본개념을 토대로 생태산업단지에 적합한 생태경제효율성 지수 도출방안을 아래 [그림 3]에 나타내었다.



[그림 3] 생태경제효율성 지수 도출방안

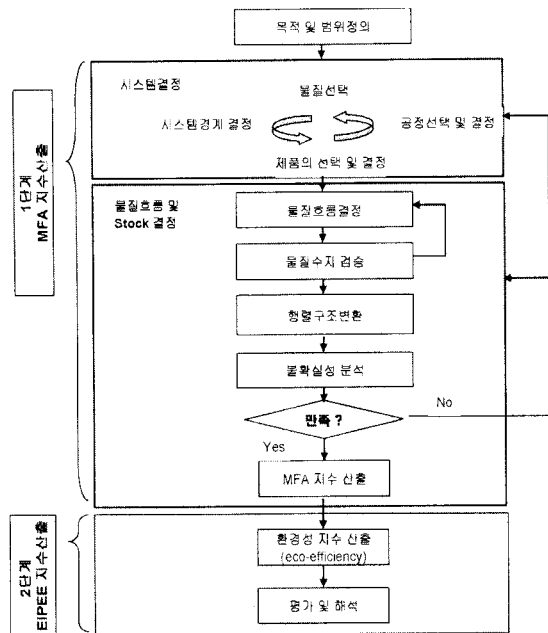
총환경부하량( $g_1$ )은 투입물인 자원사용량(DMI) 및 산출물인 폐기물 배출량(DPO)의 합이 사용되었다. 자원사용량은 자원고갈 측면에서 폐기물 배출량(Non-beneficial output)은 자연계의 환경부하로서 고려되었다. 이번 연구에서는 투입물에 대한 자원고갈 측면과 산출물에 대한 자원회수율(재사용율 또는 재활용율)을 향상시키기 위한 통합지수산출 방안으로 투입물 및 배출물의 합을 총환경부하량( $g_1$ )으로 정의하여 사용하였다.

본자의 경제적 가치로 자원집약도 지수 산출과 동일하게 각 업종별 매출액의 합을 적용하였다. 각 업종별 매출액이 증가할수록 시스템경계내의 경제적 가치는 증가한다고 가정하였다.

## 4. 사례연구

반월·시화 국가산업단지를 대상으로 개발된 MFA 모델을 적용하였다. 반월·시화 국가 산업단지는 국내 최대 생산중심의 중소기업 집중지역으로 주변에 기아자동차, 대우자동차, 삼성전자, LG전자, 현대전자 등 국내 산업의 주축인 기업들이 산재하고 있어 국가 기술경쟁력의 핵심 산업단지이다. 이번 사례연구에서는 개발된 MFA 모델에 대한 적용 및 결과해석에 중점을 두었다.

산업단지형 MFA 방법론의 수행절차는 아래 [그림 4]와 같다.



[그림 4] MFA 수행절차

#### 4.1 연구목적 및 범위

산업단지내 업종별 자원소비 현황을 MFA 분석방법을 통해 물질흐름을 정량화하고 지속적인 자원관리 방안 수립을 위한 시스템구축이 이번 사례연구의 목표이다. 세부실천 과제는 다음과 같다.

- 업종별 자원의 생산성 도출
- 업종별 직접(Direct) 및 간접(Indirect) 자원소모량 규명
- 산업단지 생태경제효율성 지수 도출

#### 4.2 시스템경계

시화·반월 산업단지 내 모든 업종을 대상 시화반월 산업단지의 행정구역을 지역적경계로 결정하였다. 또한 2000년부터 2004년도를 시간적 경계로 설정하였다. 이들 사항을 <표 1>에 나타내었다.

<표 1> 시스템 경계

시스템 경계	세부내용
지역적 경계	시화·반월 행정구역
시간적 경계	산업연관분석표 : 2000년 통계데이터 : 2000 ~ 2005년 수집데이터 : 2000 ~ 2005년
기술적 경계	음식료, 섬유유복, 목재종이, 석유화학, 비금속, 철강기계, 전기전자, 운송장비 및 기타 업종의 생산기술

#### 4.3 데이터 범주 및 수집

이번 MFA 연구의 주요목적 중 하나가 산업단지내 자원의 소비량 및 배출 폐기물에 대한 물질흐름분석을 통한 자원집약도 지수도출이다. 따라서 시스템경계 외부에서 대상지역으로 투입되는 원부자재를 자원사용량으로 정의하였다. 폐기물의 경우 각 업종별 일반폐기물 및 지정폐기물량, 폐기물 처리방법(소각, 매립, 재활용 및 해양투기 등)에 대한 데이터 범주를 결정하였다.

#### 4.4 데이터분석 및 자원집약도 산출

데이터 수집은 크게 현장데이터 및 통계데이터로 구분한다. 산업단지에 입주해 있는 모든 업체를 대상으로 현장데이터를 수집하는 대신 매출 규모가 큰 업체를 대상으로 3개 업체를 조사하고 자원집약도( $t_1$ )는 이들 3개 업체의 평균 및 표준편차값을 사용하였다. 이들 평균 및 표준편차값이 대상업종의 대표값으로 정의되었다.

- 통계데이터 : 2005 한국산업단지 총람, 국가산업단지동향(한국산업단지공단, 2005), 산업연관분석표(2000), 한국산업단지 홈페이지(<http://www.kicox.or.kr>) 등
- 현장데이터 : 각 산업단지 내 입주기업 중 업종별로 매출순위 규모가 큰 업체를 선정하여 투입 및 산출데이터 수집

#### 4.5 MFA 지수산출

산업연관분석을 이용하기 위해 각 업종별 원부자재의 사용량에 대한 자원집약도( $t_1$ ) 지수 산출이 무엇보다 중요하다. 자원집약도는 각 업체의 단위 매출액에 대한 원부자재 사용량으로 정의한다. 각 업종별 3개 업체를 통해 도출된 자원집약도 지수는 평균 및 표준편차를 산정하고 이들 지수를 각 업종에 대한 대표 지수로 정의하였다. 다음 < 표 3-11 >에 각 업종별 자원집약도 및 표준편차를 나타내었다.

<표 2> 업종별 자원집약도( $t_1$ ) 및 표준편차

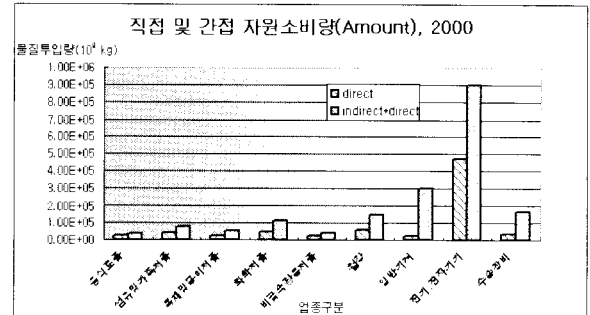
업종구분	업종별 물질투입량 (kg/억원)	표준편차 (kg/억원)
음식료품	1.94E+00	1.55E+00
섬유 및 가죽제품	1.94E+00	1.55E+00
목재 및 종이제품	1.50E+00	2.30E-01
화학제품	7.68E-01	4.38E-01
비금속광물제품	1.41E+00	2.64E-01
철강	1.24E+00	9.09E-02
일반기계	2.92E-01	1.26E+00
전기, 전자기기	7.72E+00	7.19E+00
수송장비	7.28E-01	4.72E-01

상기 표의 각 업종별 기술생산성 지수는 기술의 개발 또는 자원집약도 향상으로 인한 변수값을 의미이다.

#### 4.6 결과분석

아래 [그림 5]은 업종별 직접 및 간접 자원소비량의 총량을 산출한 결과이다. 간접자원소비량은 대상 업종과 연결된 자원의 사용량을 의미하며 대상 업종의 경제적 가치가 1단위 증가할 경우 대상 업종과 연결된 업종의 자원사용량을 통해 대상 업종으로 인한 전체 산업단지의 파급효과를 간접적으로 확인할 수 있다. 산업연관분석표를 이용한 간접흐름 계산 시

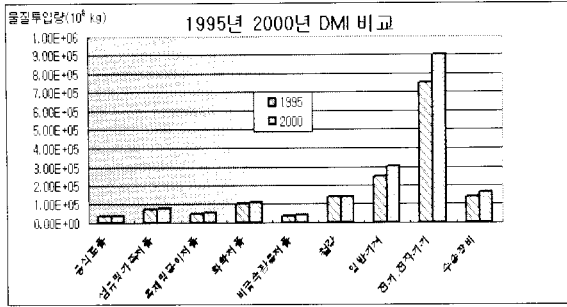
산업연관분석표 상의 업종구분은 대분류가 27개 업종으로 분류되어 있고 산업단지 통계상의 분류는 9개 업종임으로 산업연관분석표 상의 업종을 9개 업종으로 통합하여 결과를 도출하였다.



[그림 4] 직접 및 간접 자원소비 총량

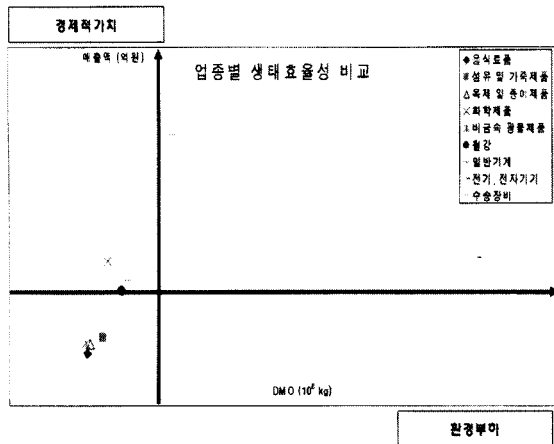
위 그림을 통해 직접 및 간접에 의한 자원소비량이 가장 큰 업종은 전기·전자업종으로 약 9.00E+13kg의 자원을 소비한다. 다음으로 일반기계 업종이 3.01E+13kg의 자원을 소비한다. 일반기계의 경우 간접배출에 의한 영향이 다른 업종에 비해 크다. 그 이유는 일반기계 업종은 주로 조립 공정이고 타업종(철강, 전기전자 및 비금속 등)과 연결된 흐름이 많아 간접에 의한 자원사용량이 많기 때문이다.

아래 [그림6]는 산업연관분석표의 1995년 및 2000년 생산유발계수를 이용하여 산출한 결과값이다. 자원집약도를 고정시키고 생산유발계수를 연도별로 비교해봄으로써 산업구조의 변화에 따른 자원소비량의 변화를 분석할 수 있다.



[그림 6] 산업구조의 변화에 따른 자원소비량 비교

위 [그림6]를 통해 산업구조가 1995년에서 2000년으로 시간이 지남에 따라 자원소비량이 증가함을 알 수 있다. 그 중 일반기계, 전기전자 및 수송 장비 업종의 증가율이 각각 13.7%, 13.2% 및 14.9%로 상대적으로 높다. 아래 [그림7]에 시화반월 생태경제효율성(EE)에 대한 결과를 나타내었다. 자원사용량은 자원의 고갈 측면에서 폐기물 배출량은 자연계의 환경부하로서 고려되었다. 분자에는 데이터 수집의 어려움으로 인해 각 업종별 부가가치액 대신 매출액을 적용하였다.



[그림 7] 환경경제효율성(Eco-efficiency) 산출

위 결과를 통해 시화반월산업단지의 생태경제효율성 지수가 가장 큰 업종은 화학제품으로 타업종에 비해 제품에 대한 부가가치가 높고 환경부하량이 적음을 의미한다. 다음으로 비금속광물, 일반기계, 목재 및 종이 및 수송장비

순으로 생태경제효율성이 높게 산출되었다. 전기·전자업종의 경우 DMO 지수가 타 업종에 비해 가장 높으면서 생태경제효율성도 가장 낮은 수치를 나타냈다. 이번 연구에서는 자원의 사용에 의한 폐기물 발생을 중점적으로 고려하였고 화학업종과 같이 용수사용에 의한 폐수발생은 결과에 반영되지 않았음을 밝힌다.

## 5. 요약

산업단지내의 물질흐름 정량화 및 자원관리방안을 위한 정보 활용을 목적으로 산업연관표 및 산업단지의 현장데이터를 이용한 산업단지형 물질흐름분석(MFA, Material Flow Analysis) 방법론이 개발되었다. 산업연관표를 이용한 거시적 MFA 분석방법은 환경정책 입안 시 활용가치가 높으며 적용이 비교적 수월하고, 통계자료의 데이터 품질이 높을수록 결과의 신뢰성이 높다. 개발된 산업단지형 MFA 모델은 시화·반월 산업단지에 사례연구에 적용하였고, 자원집약도지수, 생태경제효율성 지수 및 생태경제효율성 지수를 업종별로 도출하였다. 이들 도출된 결과를 통해 주요 자원소비 업종을 규명하였고, 원인을 분석하였다.

분석결과 시화반월산업단지의 생태경제효율성 지수가 가장 큰 업종은 화학제품이고 다음으로 비금속광물, 일반기계, 목재 및 종이 및 수송장비 순으로 생태경제효율성이 높았다. 전기·전자업종의 경우 DMO 지수가 타 업종에 비해 가장 높으면서 생태경제효율성도 가장 낮은 수치를 나타냈다.

## 6. 참고문헌

1. 한국은행, 산업연관분석해설, 한국은행 경제통계국, 2004
2. 에너지경제연구원, 2003년도 에너지총조사 보고서, 산업자원부, 2004
3. 이상용, 「지속가능한 소비 측면에서의 산업생태 네트워크 통합모델」, 졸업논문, 2005
4. 조영탁, 「생태경제학 산책: 방법론, 비전」,

- 지속가능성」, 한국사회경제학회 2003년 겨울 학술대회 발표문. 2003.
5. 조영탁, 「생태경제학의 방법론과 비전」, 사회경제평론 제22호, 한울. 2004
6. 최정수·김종호, 「환경계정과 지속가능지표 : 한국의 직접물질유입량지표를 중심으로」, 2004 경제학 공동학술대회 . 한국환경경제학회. 2004
7. 한국환경정책평가연구원, 환경경제통합계정 개발 및 녹색GDP 작성 I , 한국환경정책평가연구원. 2003,
8. 한국환경정책평가연구원, 환경경제통합계정 개발 및 녹색GDP 작성 II , 한국환경정책평가연구원. 2004,
9. Suh, S., 2004a, “Functions, Commodities and Environmental Impacts in an Ecological-economic Model” Ecological Economics, Vol. 48. pp. 451-67.
10. Suh, S., 2004b, “System Boundary Selection in Life-Cycle Inventories Using Hybrid Approaches” , Environmental Science & Technology, Vol.38 No.3, pp.657-64.
11. U.N., 2003, Intergrated Environmental and Economic Accounting(SEEA) 2003. Heijungs R., Suh, S. 2002. The Computational Structure of Life Cycle Assessment, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands.