

물질흐름분석(MFA)의 의의와 정책적 함의

조영탁* · 최정수**

Material Flow Analysis and its Implication for Sustainability Policy

Young-Tak Cho* · Jung-Su Choi**

국문요약

이 글은 물질흐름분석(MFA)이 지속가능성을 둘러싼 추상적인 개념 대립(약지속가능성과 강지속가능성)을 극복하고 지속가능성의 문제를 구체적인 정책 수준에서 논의할 수 있음을 보인다. 이를 위해 물질흐름분석이란 동일한 논리구조가 현실의 국민경제(EW-MFA)에서부터 산업(PIOT/NAMEA) 그리고 제품(LCI)에 이르기까지 구체적이고 일관성 있게 적용될 수 있음을 보이고, 각 유형의 MFA가 지닌 의의와 정책적 함의를 구명한다.

주제어 : 물질흐름분석, EW-MFA, PIOT, NAMEA, LCI, LCA, 강지속가능성, 약지속가능성

ABSTRACT

This paper reveals Material Flow Analysis(MFA) has the possibility of reconciling the two contending theoretical viewpoints(weak sustainability v.s. strong sustainability) and thereby makes the concept of sustainability useful at operational level. For this purpose, this paper shows that the theoretical logic of MFA can be applied from national level to product level (EW-MFA, PIOT/NAMEA, LCI), and investigates the meanings and policy implications of MFA at each level.

Keywords : Material Flow Analysis, EW-MFA, PIOT, NAMEA, LCI, LCA, strong sustainability, weak sustainability

* 한밭대학교 경제학과 교수(ytcho@hanbat.ac.kr)
** 통계청 통계정책국 사무관(jschoi@nso.go.kr)

I. 서론

일명 브룬트란트 보고서에 의해 제기된 ‘지속가능한 발전(sustainable development)’은 환경과 경제 간의 적대적 관계를 넘어 양자 간의 조화를 강조하고, 선진국과 개도국 간의 이해대립을 탈피하여 차별화된 책임에 기초한 상호협력을 주장함으로써 경제성장과 환경에 대한 새로운 문제제기로 평가받고 있다. 그럼에도 불구하고 지속가능한 발전 개념이 다소 선언적으로 제시된 까닭에 지속가능한 발전을 둘러싼 논의들이 추상적인 패러다임 수준에서 진행될 뿐, 지속가능성의 구체적 내용과 기준이 무엇이며 어떤 자료와 지표로 분석하고 그 성과를 어떻게 검증할 것인지에 대해 합의와 진전을 보지 못하고 있다.

이러한 상황에서 지속가능성 문제에 대해 다소 실용적인 차원으로 접근하려는 시도들이 나타나고 있는데, 경제활동의 물질 흐름을 추적하는 물질흐름분석(Material Flow Analysis: 이하 MFA)은 그 대표적인 예이다.¹⁾ 특히 ‘패러다임에서 구체적 실천으로’(from paradigm to practice of sustainability : Bringezu et al., 1997)라는 슬로건이 말해 주듯이, MFA는 지속가능성의 문제를 추상적인 패러다임이나 당위적인 선언 차원이 아닌 정책적 실천 수준으로 접근한다는 데에 그 특징이 있다. 이와 관련하여 최근 주요 OECD 선진국들이 Agenda 21의 구체화 전략 그리고 21세기 환경전략의 일환으로 MFA에 주목하고 있다는 점은 매우 시사적이다(OECD, 2001 ; WGEIO, 2005a).

MFA와 관련해서 국내에 몇 가지 관련 연구들이 진행된 바 있다. 우선 최정수·김중호(2004)는 SEEA와 관련하여 국민경제 수준의 MFA를 소개하고, 이에 기초하여 우리나라의 DMI(Direct Material Input)를 추계한 바 있다. 환경부(2003, 2004)는 직접 MFA를 소개한 것은 아니지만 환경경제통합계정의 일환으로 MFA의 일부를 소개하고 있다. 이들의 논의는 주로 국민경제 수준의 MFA를 연구하거나 통계계정(Material Flow Accounting)에 중점을 두고 있기 때문에 지속가능한 발전과 관련하여 MFA가 지닌 이론적 의의와 정책적 함의를 종합적으로 다루지는 않고 있다.

이 글은 MFA의 개념과 틀을 소개하고 지속가능성의 문제와 관련하여 MFA가 지닌 이론적 의미와 정책적 함의를 종합적이고 체계적으로 정리·평가하고자 한다. 이를 위해 우선 이론적 차원에서 MFA가 지속가능성 개념 논쟁 속에서 지니는 의의를 정리하고, 이를 통해 지속가능성의 새로운 전략으로서 탈물질화(dematerialization)와 MFA 간의 관계를 강조한다. 둘째, 방법론의 차원에서 MFA가 경제활동의 유형과 수준에 따라 다양한 형태를 띠면서도

1) MFA는 물질흐름분석을 위해 구축된 통계계정, 즉 Material Flow Accounting의 약어로 사용되기도 한다.

동일한 논리구조를 공유하고 있어 지속가능성 문제에 대한 체계적인 방법론으로 진화할 가능성이 있음을 보인다. 셋째, 정책적 차원에서 경제활동의 지속가능성을 제고하기 위해 MFA에 의거한 다양한 정책 처방과 관련 지표들이 개발될 수 있음을 보인다. 이러한 정리·평가 과정을 통해 MFA와 이에 기초한 탈물질화 전략이 이론적으로 지속가능성 개념 논쟁의 추상성을 극복함과 동시에 방법론상의 체계화를 통해 지속가능성의 정책적 실천에 새로운 시야를 제공할 가능성이 있음을 보이고자 한다.

이하 글의 순서는 다음과 같다. 제II장에서는 MFA의 이론적 배경을 지속가능성 개념 논쟁의 차원에서 검토하고, MFA와 탈물질화 전략이 지속가능성 문제에서 갖는 이론적 의미를 살펴본다. 제III장에서는 MFA의 특징과 유형을 전체적으로 개관하고, 제IV장은 경제활동의 수준에 따른 MFA 유형별 개념과 정책적 함의를 검토한다. 끝으로 제V장은 MFA가 환경 및 자원정책 나아가 지속가능성 문제에서 갖는 의의와 함의를 종합적으로 요약·정리한다.

II. 물질흐름분석(MFA)의 이론적 배경

1. 환경 문제에 대한 두 가지 접근

보통 경제활동의 성과나 지표는 경제주체들에게 익숙한 화폐 단위로 표현되는 것이 일반적이다. 하지만 MFA는 이를 화폐 단위가 아닌 물적 단위, 화폐 흐름이 아닌 물질 흐름의 관점으로 접근하려는 시도이다. MFA가 화폐 단위가 아닌 물적 단위로 경제활동에 접근하려는 것은 경제활동의 지속가능성을 파악하는 관점과 관련이 있다.

경제활동의 지속가능성을 어떻게 정의하고, 이를 어떤 잣대로 측정·평가·실천하는가는 경제활동과 자연환경 간의 관계를 어떤 관점에서 파악할 것인가에 의해 결정된다. 이에 관해서는 크게 두 가지의 접근방식이 있다. 하나는 주지하는 바와 같이 경제활동에 따른 자연환경의 변화를 화폐 단위로 측정하고, 이를 토대로 시장원리에 기초하여 환경이나 자원 문제에 접근하는 방식이다. 이른바 시장실패의 문제로서 환경 및 자원 문제를 파악하는 이 입장은 환경오염이나 자원고갈에 적절한 화폐가치를 부여하고 이를 특정 경제활동의 시장가격에 포함시키거나(외부성의 내부화) 정부가 소비자들의 선호를 추정하여 적절한 환경서비스를 직접 공급하는 방식(공공재 공급)을 통해 환경이나 자원 문제에 접근한다. 이는 가격이 없거나 불완전한 자연환경에 대해 소비자로서 인간의 효용가치를 화폐 단위로 표현하고(정보로서 자연환경의 화폐가치화), 시장기구나 정부가 이를 반영하여 자연환경을 효율적으로 사용하도록 한다는 점(의사결정기구로서 시장기구 혹은 Cost-Benefit Analysis : 이하 CBA)에서

‘화폐-시장적 접근’이라고 할 수 있다.

이와 달리 경제활동에 따른 자연환경 변화를 화폐 단위가 아닌 생태물리적 단위로 측정하고, 이를 토대로 경제성과 사회성 그리고 환경성이란 다기준적 의사결정방식으로 환경이나 자원 문제에 접근하는 방식이 있다. 이 관점은 화폐-시장적 접근의 의의와 중요성을 인정하면서도 그 문제점에 주목한다. 우선 이들은 정보의 차원에서 환경이나 자원의 시장가격 혹은 소비자들의 화폐가치표현이 자연생태계에 대한 객관적인 정보를 담기에 부족하다고 본다. 또 의사결정기구로서 시장기구나 CBA가 환경적 요인을 포함한 다양한 가치들을 화폐 형태로 통합하여 보여 준다는 점에서 유용하다는 점은 인정하지만 이에 대한 과도한 의존을 경계한다. 오히려 이 접근방식은 모든 요인을 화폐 단위로 환원하지 않는 다기준 의사결정방식(Multi-Criteria Decision Making : 이하 MCDM)에 주목한다. 이는 환경의 화폐가치화에 우선하여 환경에 대한 생태물리적 정보를 중시하고(정보로서 생태물리적 지표), 환경성과 사회성 등을 화폐가치로 환원하지 않는 다기준 의사결정(의사결정수단으로서 MCDM)을 강조한다는 점에서 ‘생태물리적-다기준적 접근’이라고 할 수 있다(조영탁, 2003).

2. 지속가능성과 지표 문제 : 약지속가능성과 강지속가능성

전술한 두 가지 접근법 간의 차이는 다시 지속가능성 개념의 차이로 연결되는데, 전자의 연장선상에서 제기된 개념이 약지속가능성(weak sustainability : 후생적 지속가능성)이고, 후자의 관점에서 제기된 것이 바로 강지속가능성(strong sustainability : 생태물리적 지속가능성)이다. 약지속가능성이 경제활동과 자연환경의 관계를 화폐적 관점에서 파악하여 인간 후생의 지속가능성을 중시하는 접근이라면, 강지속가능성은 자연환경에 대한 생태물리적 관점에 입각하여 자연생태계 자체의 지속가능성을 중시하는 접근이라고 할 수 있다.²⁾

우선, 약지속가능성의 개념에 따르면 세대 간 후생을 지속적으로 유지하기 위해 자본스톡의 총량, 즉 인공자본과 자연자본(자연환경)의 합을 일정하게 유지하는 것이 중요하다. 이는 화폐 단위로 측정되는 인공자본과 합산하기 위해서 자연자산(자연자본의 스톡)을 화폐적 가치로 환산해야 함을 의미한다. 나아가 지속가능한 소득을 계산하기 위해서도 소득창출 과정에서 발생하는 인공자본의 스톡변화(고정자본소모)와 자연자본의 스톡변화(환경오염비용+자원소모비용)를 화폐가격으로 환산해야 한다.

2) 이 글에서는 지속가능성의 일반적 분류인 약지속가능성과 강지속가능성이란 용어를 그대로 사용하되, 기존의 자본접근법이나 UN(2003)의 분류법과 달리 강/약을 인간의 후생적 지속가능성(약지속가능성)과 환경의 생태물리적 지속가능성(강지속가능성)의 의미로 사용한다.

이는 곧 약지속가능성의 지표가 화폐 단위로 표현됨을 의미한다. 총자본형성에서 고정자본소모와 자연자본소모를 차감한 ECF(환경조정순자본형성, Environmentally adjusted net Capital Formation)나 국내순생산(NDP)에서 환경악화비용(유지비용법) 및 자연자원소모비용(순가격법 혹은 사용자비용법)을 차감한 EDP(환경조정국내순생산=녹색GDP, Environmentally adjusted net Domestic Product)는 그 대표적인 예이다.³⁾

약지속가능성이 제시하는 화폐적 지표들은 경제주체들에게 익숙한 화폐적 단위를 채택하고 일상적인 국민경제활동이나 이를 나타내는 국민계정(SNA)과의 연관성이 높다는 점에서 장점이 있다. 하지만 ECF와 EDP와 같은 화폐적 지표를 얻기 위해서는 자연자본스톡이나 그 변화(자원고갈과 환경오염)에 대한 화폐가치평가가 필요한데, 이에 대한 방법론상 합의가 어렵다는 문제가 있다. 설령 추정 방식상의 합의가 이루어지더라도 추정된 가격이 경제활동에 영향을 주는 실제적인 수치가 아니라 가상적인 수치(귀속비용의 문제)이기 때문에 현실의 경제활동과 직접 연관되지 않는다. 독일이나 네덜란드 등 일부 국가들이 EDP 개념을 포기한 것은 바로 이에 기인한다.⁴⁾

하지만 무엇보다 지속가능성의 문제와 관련하여 화폐적 지표가 지닌 가장 큰 약점은 생태계의 변화를 화폐 단위로 통합함으로써 자연환경의 지속가능성을 제대로 반영하지 못한다는 점이다. 어떤 방식의 가치평가나 시장가격이라고 하더라도 화폐로 표현된 모든 수치는 주어진 자원들 간의 상대적 희소성(즉 상대가격체제)이기 때문에 자연환경의 객관적이고 물리적인 희소성과 유리될 수 있기 때문이다.⁵⁾ 예컨대 특정 자연환경의 화폐가격은 해당 자원의 총량스톡만이 아니라 소비자의 선호와 기술, 시장형태 등 다양한 변수에 의해 결정되기 때문에 자원총량이 고갈되어 감에도 불구하고 시장가격이나 평가가치가 하락하여 고갈을 가속화시킬 수 있다. 반대로 고갈되는 자원에 상대적으로 높은 가격이 부여된다 하더라도 해당 자

3) 계정의 차원에서는 UN의 초기 SEEA(환경경제통합계정)가 이러한 흐름을 대변한다. 하지만 최근 SEEA는 환경과 경제자료 간의 통합성(화폐적 통합성)을 추구하는 경향에서 벗어나 화폐적 계정과 물적 계정을 모듈의 형태로 병존시키는 경향으로 바뀌고 있다.

4) 가치평가방법 중 특히 진술선호에 의한 방식(CVM)은 소비자잉여를 포함하는 것이어서 국민계정과 부합하기 어렵다. 또한 화폐가치 평가가 외부성을 제대로 반영하지 못한다는 약점(혹은 외부성을 감안한 잠재가격의 객관성 문제)도 지적되고 있다. El Serafy, S. 1999. "Natural Resource Accounting" In van den Bergh, J.C.J.M. (ed.) *The Handbook of Environmental and Resources Economics*. Edward Elgar 참고.

5) 이러한 논의가 환경이나 자원에 대한 화폐가치의 부여 자체를 부정하는 것은 결코 아니다. 이와 관련하여 지속가능성의 실현에 있어서 정책목표 설정을 위한 화폐적 가치 부여와 외생적으로 주어진 생태물리적 정책목표의 달성수단으로서 화폐적 가치 부여를 구별할 필요가 있다. 전자의 경우 소비자의 주관적인 선호가 중심이 되어 특정 자연자원의 상대가격을 결정하는 방식이지만, 후자의 경우 외적 기준(생태적 기준)이 중심이 되어 특정 자연자원의 가격이 결정되는 방식이다(예컨대 배출권 가격 결정이 바로 후자에 해당된다). 후자의 방식은 지속가능성 정책에 매우 유용하다.

원에 대한 고소득자의 선호가 강할 경우 높은 가격자체만으로는 해당 자연자원의 고갈을 방지하지 못하게 된다. 또 자연환경에 대한 화폐가치 평가는 해당 자원이 특정 지역이나 공간의 생태계 유지에서 차지하는 생태학적 역할과 특성을 반영하는 데에 제한적이며, 생태계의 비연속적인 변화나 급작스러운 임계점을 반영하는 데에도 한계가 있다(Ree & Wackernagel, 1999 ; Ropke, 1999).

화폐적 지표가 지닌 이러한 약점 때문에 강지속가능성이 강조하는 것이 바로 생태물리적 지표이다. 경제활동이 자연환경에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 화폐적 지표보다 생태물리적 지표가 더 유용하다고 보기 때문이다.⁶⁾ 이런 문제의식하에서 제기된 대표적인 생태물리적 지표들이 바로 HANPP 지표(Human Appropriation of Net Primary Production), EF 지표(Ecological Footprint), ES지표(Environmental Space), 생물다양성지표(Biodiversity) 등이다(*Ecological Economics*, Vol. 29, No.1 특집 및 Martinez-Alier, 2002 : 제3장).

Vitousek의 HANPP 지표는 1차 순광합성 총량에서 인간이 차지하는 비율을 통해 지구생태계의 수용능력(carrying capacity)과 경제활동 규모 간의 관계를 파악하는 것이고, EF 지표란 특정 지역의 인구를 부양하기 위해 필요한 모든 물질총량을 토지면적으로 환산한 값으로 특정 지역의 수용능력을 보여주기 위한 지표이다. ES지표는 지구생태계의 수용능력과 지구 자원에 대한 인류의 접근형평성을 결합한 개념으로 지구의 수용능력이란 전제하에서 세계 전체의 자원이 얼마나 공평하게 사용되고 있는가를 나타내는 지표이다. 생물다양성 지표는 특히 토지 문제와 관련하여 자연환경의 건강함을 나타내는 지표로서 생물다양성 수치가 감소하면 그만큼 생태계의 안정성이 감소하는 것을 의미한다.

이러한 지표들은 경제활동 규모와 자연환경 간의 관계를 간결한 형태로 나타낸다는 점에서 매우 유용하다. 하지만 이들 지표 역시 몇 가지 문제점을 안고 있다. 첫째, 이들 지표들은 화폐적 지표가 표시할 수 없는 자연환경의 수용능력, 자연환경 이용과 관련된 분배나 사회적 형평성을 알려주는 데에는 유용하지만 기술변화를 부차화시킨 정태적인 총량스톡 개념에 의존하고 있다는 점이다. 둘째, 자연환경의 수용능력(총량스톡)이 분명 존재하지만 자연생태계의 복잡계적 성질을 감안할 때 이를 하나의 수치로 계산하기가 매우 어렵다는 것이다. 셋째, 화폐적 지표들이 경제활동이나 정책 지표 및 도구와 비교적 쉽게 연계될 수 있는 것에 비해 생태물리적인 지표들의 경우 특별한 상황을 제외하고는 정책 설정이나 경제활동과 직접 연

6) 생태물리적 연관관계나 지표를 중시하는 접근방식들에 대한 정리는 Daniels, P. and S. Moore. 2002a. "Approaches for Quantifying the Metabolism of Physical Economies Part I : Methodological Overview" *Journal of Industrial Ecology* 5(4): 69-93 및 Daniels, P. and S. Moore. 2002b. "Approaches for Quantifying the Metabolism of Physical Economies Part II : Review of Individual Approaches" *Journal of Industrial Ecology* 6(1): 65-88 참고.

결되기가 쉽지 않다는 점이다. 복잡한 경제활동이 다양한 투입자원과 오염물질과 연관되는 상황에서 자연환경의 수용능력에 치중하는 생태물리적 지표는 ‘상징’이나 ‘레토릭’으로서는 의미가 있지만 구체적으로 정책을 설계하고 실행하는 데에는 크게 도움이 되지 않는다. 따라서 생태물리적 지속가능성을 중시하면서도 생태물리적 지표의 문제점을 보완하는 접근이 필요한데, 탈물질화(dematerialization) 전략과 이를 뒷받침하는 MFA가 그 가능성을 보여 주고 있다.

3. 탈물질화 전략 : 강지속가능성의 우회 접근

독일 부퍼탈 연구소를 중심으로 제기된 탈물질화 전략은 모든 경제활동에 반드시 에너지나 원료 등의 물질이 소요되고 이로 인해 자연환경에 부담이 발생한다는 점에 주목하여 경제활동에 소요되는 물질의 사용량을 줄여 지속가능한 경제활동을 실현하려는 시도이다. 이 전략의 특징을 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 생태물리적 접근을 지향하면서도 자연환경의 수용능력 자체보다 경제활동과 자연환경 간의 물질 흐름을 줄이는 것을 강조한다. 이는 계산이 복잡하고 논란의 여지가 있는 자연환경의 수용능력 자체에 중점을 두기보다 경제활동에 투입되는 물질 흐름이 감소되면 자연환경의 부담이 감소할 가능성이 높아진다는 다소 느슨하면서도 실용적인 입장을 취하고 있다. 둘째, 경제활동에 소요되는 물질의 흐름은 줄이면서도 경제활동과 인간의 후생을 유지하기 위한 물질 생산성의 획기적인 제고를 강조한다. 이는 지속가능성 문제와 관련하여 흔히 등장하는 기술 낙관주의와 비관주의라는 양 극단을 벗어나서 경제활동의 물질 흐름 축소를 전제로 하는 기술혁신(즉 물질절약형 기술)을 강조한다는 점에서 지속가능성 문제에서 과학기술의 적절한 위치를 모색하고 있다. 셋째, 경제활동에 따른 물질 흐름의 감소를 강조하면서도 자연환경의 수용한계와 국가 간 형평성을 배경으로 하여 선진국의 물질사용량 축소를 우선적으로 요구한다. 그 대표적인 사례가 바로 Factor 4 전략, 즉 선진국들이 현재의 물질투입량을 1/2로 줄이고 생산량을 2배로 높이는 제안이다. 이는 탈물질화 전략이 다소 느슨한 형태이기는 하지만 지구환경의 수용능력과 국가 간 형평성이라는 가치판단을 그 바탕에 깔고 있음을 의미한다.

하지만 경제활동의 물질 흐름을 줄이고자 하는 탈물질화 전략이 추상적인 구호나 선언을 넘어 경제정책의 일환으로 구체화되기 위해서는 경제활동과 물질 흐름 간의 관계 파악이 필수적이다. 그리고 이들 양자 간의 관계 파악에서 제시되는 물리적 자료들이 추상적이거나 단편적인 형태가 아니라 경제활동과 관련하여 ① 구체적이고 경험적 차원에서 정의될 수 있고

② 시스템 전체의 관점에 입각해야 하며 ③ 경제적 자료와 조응하는 틀을 지녀야 한다 (Lange, 1999).

이러한 관점에서 MFA는 중요한 의미를 지닌다. 첫째, MFA는 구체적인 경제활동을 대상으로 물질 흐름을 추적한다는 점에서 구체적이고 경험적인 차원에서 정의될 수가 있다. 둘째 모든 MFA는 분석대상이 되는 경제활동의 물질 흐름을 전 과정(life-cycle)에 걸쳐 추적하는 시스템적 성격을 지니고 있다. 셋째, MFA가 사용하는 개념과 틀이 경제활동의 화폐적 흐름을 보여주는 경제적 자료와 조응할 수 있는 구조로 되어 있다.⁷⁾

따라서 MFA가 이와 같은 조건들을 충족할 수 있다면, 국가 수준에서 산업 그리고 기업 단위에 이르기까지 각 경제활동의 물질 흐름을 추적할 수 있고 이에 기초하여 각 경제활동 수준에 적합한 탈물질화 전략과 이를 위한 목표 수립과 정책 추진이 가능하게 된다. 이런 차원에서 MFA는 국가 수준에서부터 기업 수준에 이르기까지 다양한 경제활동의 물질 흐름을 분석함으로써 지속가능성에 대한 화폐적 접근이 지닌 약점 그리고 스톡 개념 중심의 생태물리적 접근이 지닌 단점을 보완하면서 지속가능성의 문제에 실용적으로 접근하는 통로를 확보해 줄 가능성이 높다(Hinterberger et al., 1997 ; Spangenberg et al., 1999 ; Bartelmus, 2003).

III. 물질흐름분석(MFA)의 기본 관점과 유형

1. MFA의 기본관점

MFA는 이른바 물질균형법칙에 입각하여 ‘경제시스템이 사용하는 물질 흐름을 추적하여 경제시스템과 자연환경 간 그리고 경제시스템 내부의 물적 연관관계를 구축’(Bringezu *et al.*, 2003)함으로써 지속가능성의 문제에 실천적으로 접근하려는 시도이다. MFA가 강조하는 물질균형법칙은 기본적으로 자연환경과 경제활동 간의 관계를 물질 흐름으로 파악하는 하위개방계 이론과 관련이 있으며, MFA가 지속가능성 문제와 관련하여 경제활동의 물질 흐름을 분석하려는 이유도 바로 이와 무관하지 않다.

7) 생태물리적 관점에 입각하면서 구체적인 경제활동의 전 과정에 걸쳐 생태물리적 흐름을 분석하는 접근으로는 MFA 이외에 EA(emergy analysis) 접근이 있다. MFA가 특정 경제활동에 투입되는 물질의 무게를 계산하는 것이라면, EA는 특정 경제활동에 투입되는 유용한 에너지(즉 에머지)를 계산하는 것이다.

하위개방계 이론에 의하면 경제시스템은 자연생태계 속에 배태(embedded)된 하위개방계(open sub-system)로서 에너지와 물질 흐름인 관류(throughput)에 의해 자연생태계와 연결되어 있다.⁸⁾ 이 과정에서 경제시스템으로 유입된 물질의 양은 궁극적으로 자연생태계로 유출되는 물질의 양과 동일하다(물질균형법칙). 아울러 유입되는 물질은 저엔트로피의 상태로 유입되어 생산 및 소비과정을 거친 후 오염물질이라는 고엔트로피로 변형되어 자연생태계로 다시 방출된다(엔트로피 법칙). 이러한 관점은 마치 생명체가 음식물의 흡수와 배설에 기초한 생물학적 신진대사(bio-metabolism)를 통해 스스로 유지·성장하듯이, 경제시스템 역시 저엔트로피의 물질을 흡수하고, 동일한 양만큼의 고엔트로피의 물질을 방출하는 산업적 신진대사(industrial metabolism)를 통해 유지·성장한다고 보는 것이다.⁹⁾ 이 과정에서 경제활동에 투입되는 저엔트로피의 물질이 많을수록 이들의 채취과정에서 환경부담이 발생하고, 투입된 물질은 모두 생산·소비·폐기과정에서 고엔트로피의 오염물질로 방출되어 자연환경을 오염시키게 된다.

이러한 하위개방계의 관점에서 본다면 경제활동의 물질 흐름은 경제활동의 지속가능성 문제에서 매우 중요한데, MFA가 물적 단위에 기초하여 경제활동의 ‘물질(material)’ ‘흐름(flow)’을 ‘전 과정(life-cycle)’에 걸쳐 분석하려는 이유도 바로 여기에 있다. 우선, 지속가능성의 문제와 관련해서 MFA는 화폐보다 물질의 관점에서 경제활동을 분석하는 것이 더 유용하다고 본다. 전술한 바와 같이 자연생태계로부터 유입되어 경제활동에 이용되고 다시 생태계로 유출되는 과정에서 자신의 형태, 공간 및 시간, 방출매개의 변화를 통해 자연환경에 영향을 주는 것이 바로 ‘물질’이기 때문이다. 따라서 MFA는 경제활동과 관련하여 가격보다 물질에 더 중점을 둔다(Materials matter).

아울러 MFA는 지속가능성 문제와 관련하여 스톡보다 플로우 개념을 더 중시한다. 전술한 바와 같이 지속가능성에 대한 기존의 접근은 화폐적 접근이든 생태물리적 접근이든 주로 스

8) 관류란 자연생태계에서 경제시스템으로 유입되어 경제활동에 이용되고 오염물질의 형태로 자연생태계로 방출되는 모든 에너지와 물질의 흐름을 지칭한다. 관류와 하위개방계에 대한 보다 상세한 내용은 조영탁. 2002a. “생태경제학: 비전의 모색과 그 의미” 『사회경제평론』 18: 85-129 및 조영탁. 2002b. “환경거시경제이론의 소개와 그 평가” 『한밭대학교 논문집』 19: 36-383. 참고. 흔히 에너지와 물질을 구별하는 것과 달리 MFA에서는 물질이란 용어를 에너지와 물질을 모두 포괄하는 ‘물질 일반’의 의미로 사용한다.

9) 산업적 신진대사(industrial metabolism)란 생물학과 생태학에 적용되는 생물학적 신진대사(bio-metabolism)개념을 산업에 적용한 것으로 산업생태학(industrial ecology)의 핵심 개념이다. Fischer-Kowalski, M. 1998. “Society’s Metabolism: The Intellectual History of Material Flow Analysis, Part I 1860-1970” *Journal of Industrial Ecology* 2(1): 61-78. 및 Fischer-Kowalski, M. and W. Hüttler. 1999. “Society’s Metabolism: The Intellectual History of Material Flow Analysis, Part II 1970-1998” *Journal of Industrial Ecology* 2(4): 107-136.

특개념을 중시하였다. 하지만 이로 인한 이론적 논란과 정책적 접근의 어려움을 감안할 때, 자연환경의 수용능력이나 자본총량 스톡보다 자연환경에 영향을 주는 경제활동의 물질 ‘흐름’에 주목하는 것이 더 생산적이다. 생태계의 수용능력이 어느 정도인가도 중요한 문제지만 경제활동과 관련한 물질 흐름을 파악하여 사전예방적 관점에서 경제활동의 물질 흐름, 즉 관류의 양 자체를 축소하는 것이 시급하기 때문이다.

끝으로 경제활동의 물질 흐름을 총체적으로 접근하기 위해서는 경제활동의 특정 단계만이 아니라 경제활동 전 과정에 걸친 물질 흐름을 파악할 필요가 있다. 따라서 MFA는 경제 전체든 제품 하나든 간에 경제활동의 수준과 범위와 무관하게 항상 해당 경제활동이 야기하는 물질 흐름의 ‘전 과정’을 분석하는 방식을 취한다(life-cycle analysis).

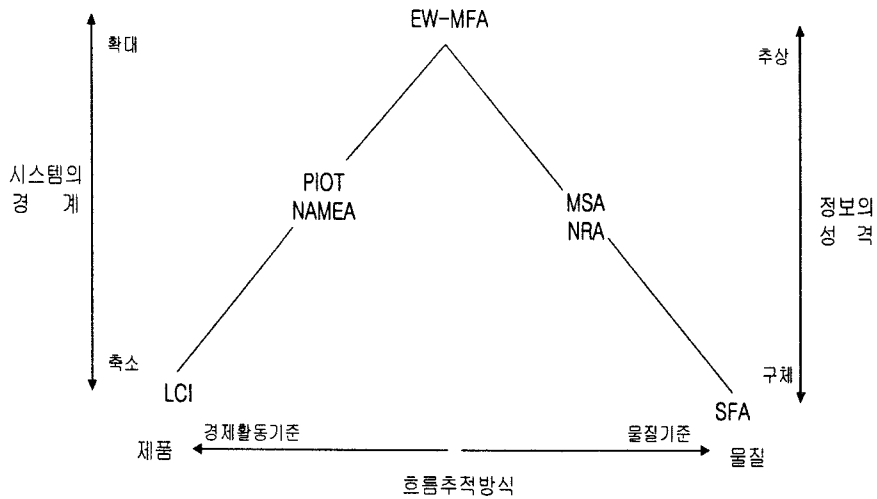
2. MFA의 유형 분류

MFA에는 분석대상이 되는 경제활동의 수준과 범위에 따라 다양한 유형이 존재한다. 더구나 이들 유형들이 사전에 통일된 방법론에 입각하여 순차적으로 정립된 것이 아니고, 또 일부 유형의 MFA는 아직 방법론상으로 논의 중에 있다. 이러한 이유로 다양한 MFA들을 특성별로 유형화한다는 것이 다소 이른 감이 있다. 하지만 MFA에 대한 이해를 돕고, MFA가 방법론상 하나의 통일된 체계로의 발전 가능성을 보여 주기 위해서 이들을 체계화시켜 보기로 한다(Femia and Moll, 2005).

우선, MFA가 분석하는 ‘대상 시스템의 경계’에 따른 분류이다. <그림 1>에서 수직축이 이를 나타내는데 크게 Macro 수준(경제 전체 혹은 물질 전체), Meso 수준(산업부문 혹은 복합물질) 그리고 Micro 수준(제품 혹은 특정 화학물질)으로 분류할 수 있다. 수직축에서 위로 갈수록 대상 시스템의 경계가 확장되는데, 이 과정에서 물질 흐름에 대한 자료가 집계되면서 해당 자료가 포함하고 있는 정보는 추상적이 된다. 반대로 아래로 올수록 대상 시스템의 경계가 작아지면서 자료가 세분화되고 정보도 구체적이 된다.

다음, ‘물질 흐름의 추적방식’에 따른 분류이다. <그림 1>에서 수평축이 이를 나타내는데, 경제 혹은 물질 전체를 나타내는 중심축을 경계로 왼쪽은 경제활동(산업 및 제품)에 초점을 맞춘 것이고, 오른쪽은 물질 자체에 초점을 맞춘 것이다. 수평축의 왼쪽으로 갈수록 구체적인 경제활동에 따른 물질흐름분석이 되고, 오른쪽으로 갈수록 구체적인 물질의 공간적 흐름 분석이 된다.

<그림 1> MFA의 유형분류



자료 : Femia and Moll(2005)의 그림에서 일부 수정

이상 두 가지의 분류를 종합하여 정리하면 다음과 같다. 우선, Macro 수준에서는 국민경제 전체 수준의 물질 흐름을 표현하는 EW-MFA(Economy-Wide MFA : 이하 EW-MFA)가 존재한다. Meso 수준에서는 왼쪽에 산업 및 부문별 경제활동의 물질 흐름을 나타내는 PIOT(Physical Input-Output Table : 이하 PIOT) 혹은 NAMEA(National Accounting Matrix including Environmental Accounts : 이하 NAMEA)가 존재하며, 오른쪽에 물질 전체가 아닌 철이나 바이오매스와 같은 합성물질(compound materials)을 추적하는 MSA(Materials System Analysis : 이하 MSA) 혹은 환경자원별 계정을 의미하는 NRA(Natural Resources Account : 이하 NRA)가 존재한다.¹⁰⁾ Micro 수준에서는 왼쪽에 경제활동의 최소 단위로서 특정 제품이나 서비스 단위의 물질 흐름을 추적하는 LCI(Life-Cycle Inventories : 이하 LCI)가 존재하며, 오른쪽에 물질의 최소 단위로서 수은이나 염소와 같은 특정유해물질의 흐름을 추적하는 SFA(Substances Flow Analysis : 이하 SFA)가 존재한다. 전체적으로 왼쪽에 존재하는 유형들은 사회과학적 관점과 친화성이 있으며, 오른쪽의 유형들은 공학적 관점과 친화성이 있다. 이하에서는 유형별 개념과 정책적 함의를 분석하되 주로 경제활동과 관련된 EW-MFA, PIOT(NAMEA) 그리고 LCI에 중점을 두기로 한다.

10) PIOT나 NAMEA의 경우 국민경제와 환경 및 해외경제 간의 관계를 포함하고 있다는 점에서 Macro적인 요소도 겸비하고 있다.

IV. 유형별 물질흐름분석(MFA)의 개념과 정책적 함의

1. EW-MFA : Macro 수준

1) 기본개념

국민경제 전체를 물질의 흐름으로 파악하려는 시도는 이미 1970년대 초에 Ayres et al.(1970)에 의해 시도된 바가 있다. 하지만 EW-MFA가 본격화된 것은 1990년대 후반 ConAccount 그룹의 연구작업인 Bringezu et. al.(1997)과 WRI의 연구작업인 Adriaanse et al.(1997)과 Matthews et al.(2000)부터이다(Hinterberger et al., 2003). 이후 이들 작업을 토대로 유럽통계국은 EW-MFA에 대한 가이드라인으로 EUROSTAT(2001)을 발간하였고, 현재 OECD는 WGEIO(Working Group on Environmental Information and Outlooks)를 통해 EW-MFA 및 관련 지표들에 대한 후속작업을 진행하고 있다.

EW-MFA는 국민경제 전체를 대상으로 하여 일정 기간(주로 1년) 동안에 이루어진 국민경제와 그 외부(자연환경과 해외국민경제) 간의 물질 흐름을 나타낸다(<그림 2> 참고 : 다만 물과 공기는 다른 물질의 양에 비해 압도적인 비중을 차지하기 때문에 별도로 처리한다). 전술한 바와 같이 모든 MFA가 전 과정을 대상으로 하기 때문에 EW-MFA도 기존의 자원수출입이나 국내자원통계로 표현되는 물질이동이나 채취만이 아니라 이들이 야기하는 숨은 흐름까지 추적한다.¹¹⁾

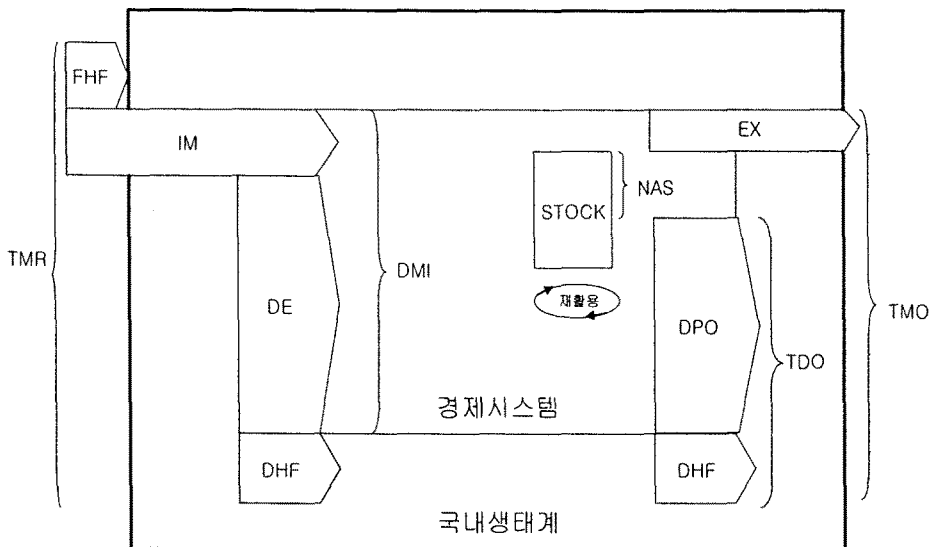
우선, 물질유입과정에서 국민경제는 국내에서 채취한 물질과 해외에서 수입한 물질을 이용하여 경제활동을 수행한다. 따라서 외부에서 경제시스템으로 직접 유입되는 직접물질유입량(DMI : Direct Material Input)은 국내채취량(DE : Domestic Extraction)과 물질수입량(IM : Import)의 합계로 주어진다($DMI = DE + IM$). 이와 아울러 EW-MFA는 국내채취량과 물질수입량이 유발하는 숨은 흐름까지 추적한다. 예를 들어 국내자원채취의 경우 채굴이나 농업경작과정에서 발생한 모든 물질이 다 경제시스템 내로 들어오는 것이 아니라 일부만 경제시스템에서 사용되고 나머지는 사용되지 않은 채(unused flow) 환경에 그대로 남아 부담

11) 이는 EW-MFA가 Schmidt-Bleek(1993a,b)이 제기한 MIPS(Material Input Per unit Service) 및 생태적 배낭(ecological rucksack) 개념에서 출발하였기 때문이다. MIPS는 재화 및 서비스 단위당 물질투입을 무게로 집계하여 잠재적 환경부담을 평가하는 것으로 대상 제품 생산에 투입된 물질총량 무게에서 대상 제품 자체의 무게를 뺀 값을 생태적 배낭(ecological rucksack)으로 정의한다. 즉 생태적 배낭은 해당 제품의 숨은 흐름을 표현하는 개념이다. MIPS와 생태적 배낭의 개념에 대해서는 Ritthoff, M. et al. 2002. *Calculating MIPS : Resource Productivity of Products and Services*, Wuppertal Spezial 27e, Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy. 참고.

으로 작용한다(DHF : Domestic Hidden Flow). 해외로부터 수입되는 물질 역시 숨은 흐름인 간접 플로우를 야기하는데, 이는 다시 수출국가의 경제시스템에서 사용되지 않은 부분(unused flow)과 수입된 물질 자체에 포함되어 있지 않지만 그 수출품을 만드는 데에 사용된 부분(used flow)으로 구성된다(FHF : Foreign Hidden Flow).¹²⁾

따라서 물질 흐름의 전 과정이란 측면에서 국민경제가 사용한 물질의 총량, 즉 총물질필요량(TMR : Total Material Requirement)은 직접물질유입량에 숨은 흐름을 합한 수치가 된다($TMR = DMI + DHF + FHF$). 또한 국민경제가 경제활동과정에서 소비하는 물질량, 즉 국내 물질소비량(DMC : Domestic Material Consumption)은 직접물질유입량(DMI)에서 물질수출량(EX : Export)을 뺀 수치가 된다($DMC = DMI - EX$). 숨은 흐름을 감안한 총물질소비량(TMC : Total Material Consumption)은 총물질필요량(TMR)에서 수출 및 수출과 관련된 숨은 흐름을 뺀 수치가 된다.

<그림 2> EW-MFA의 기본개념도



자료 : Matthews et al.(2000) 및 Bringezu et al.(2003)

12) 국내 비사용과 해외의 간접플로우(사용/비사용)를 모두 합하여 그냥 숨은 흐름(hidden flow)이라고 하기도 한다. 전술한 Schmidt-Bleek의 MIPS 개념에 따라 국민경제를 하나의 제품(product)으로 의제화한다면, 이는 곧 국민경제의 생태적 배당이 될 것이다. 즉 국민경제의 생태적 배당 = TMR (국민경제의 총물질필요량)-DMI(국민경제 자체의 무게)인 셈이다. 물질플로우와 관련된 분류기준인 직/간접(제품의 전 과정에서 업스트림 여부), 비/사용 혹은 가공/비가공(경제적 사용/가공 여부), 국내/외(시스템의 내외부)의 구분에 대해서는 EUROSTAT(2001)의 3장 참고.

한편, 국민경제의 물질유출과정에서 국내 환경(물, 대기, 토지 등)으로 직접 배출되는 물질량, 즉 국내가공유출량(DPO : Domestic Processed Output)은 직접물질유입량에서 국내자본스톡의 순증가(NAS : Net Addition to Stock)와 해외로 수출된 물질량(EX)을 제외한 것이다($DPO = DMI - NAS - EX$). 국내가공유출량(DPO : Domestic Processed Output)에 국내자원채취의 숨은 흐름(DHF)의 처분을 더하면, 국민경제가 국내 환경에 방출하는 물질총량, 즉 총국내유출량(TDO : Total Domestic Output)이 된다($TDO = DPO + DHF$). 여기에 다시 해외경제로 수출되는 물질수출량(EX)을 더하면 국민경제에서 외부로 빠져 나가는 물질총량, 즉 총물질유출량(TMO : Total Material Output)이 된다($TMO = TDO + EX$).

이러한 국민경제의 물질 유입 및 유출 과정에서 국민경제 간의 물질수출입 관계도 포착할 수 있는데, 국민경제 간의 물적 교역수지(PTB : Physical Trade Balance)가 바로 그것이다. 이는 경제시스템의 수입물질량(IM)과 수출물질량(EX)의 차이로 정의되며($PTB = IM - EX$), 국민경제의 물질소비량과 관련된다($DMC = DMI - EX = DE + IM - EX = DE + PTB$). 만일 물적 교역수지에 IM과 EX의 숨은 흐름까지 감안하면 국가 간의 포괄적인 물질무역수지까지 파악할 수 있다. 이처럼 EW-MFA는 국민경제의 물질유입과 물질소비 그리고 물질유출의 전체상을 보여줌으로써 국민경제와 외부 영역(해외경제와 자연환경) 간의 물적 관계를 보여 준다.

2) 정책적 함의

우선, EW-MFA는 화폐적 관점에서 파악할 수 없는 국민경제의 다양한 물적 흐름 지표(Material Flow Indicators 이하 MF 지표)를 제공한다. 뿐만 아니라 EW-MFA는 국민경제의 화폐적 표현으로서 국민계정(SNA)과 유사한 개념과 틀(시스템의 범위 및 설정기간 그리고 소비와 수출입, 고정자본형성 등의 경제활동)을 사용하기 때문에 국민계정의 화폐적 지표(GDP 등)와 결합되면 경제활동의 생태효율성(eco-efficiency)을 나타내는 자원생산성 지표(Resource Productivity Indicators : 이하 RP지표)도 산출할 수 있다.

예컨대 GDP/TMR(혹은 GDP/DMI)은 국민경제의 자원생산성을 나타내며, 그 역수인 TMR/GDP(혹은 DMI/GDP)는 물질집약도, TMO/GDP(혹은 DPO/GDP)는 오염물질집약도를 나타낸다. 이러한 MF 및 RP지표들은 아직 완벽하지는 않으나 지속가능성 문제와 환경 및 자원관리정책에 유용한 지표로 발전할 가능성이 있다(Bringezu et al., 2003 ; Moll & Bringezu, 2004 ; WGEIO, 2005b).

이 가운데에서 지속가능성 문제와 관련하여 가장 유용하게 활용할 수 있는 지표가 바로

GDP/TMR이다. 이 지표는 자원생산성 향상에 기초한 GDP와 TMR 간의 디커플링, 즉 탈물질화를 가능할 수 있는 지표이다. 다만 자원생산성(GDP/TMR)만으로는 리바운드(rebound) 효과를 가능할 수 없기 때문에, 상대적 탈물질화인지 절대적 탈물질화인지를 판별할 수 있도록 항상 순수 총량 단위의 물적 지표와 연계해서 사용해야 한다.

PTB는 국민경제 단위의 탈물질화 과정에서 야기될 수 있는 국가 간 형평성 문제, 즉 국민경제간의 환경부담 전가를 가능하는 지표로 활용될 수 있다. 이와 관련해서는 물질수출입에 따른 숨은 흐름의 추계가 매우 중요한 의미를 지닌다. 국가 간의 직접적인 물질수출입 지표만으로는 특정 국가가 실질적으로 탈물질화를 하고 있는지를 정확히 알 수 없기 때문이다. 예를 들어 선진국이 물질 흐름상 직·간접의 부담이 큰 제품을 국내생산이 아닌 수입으로 처리할 경우, 그만큼 환경부담을 제3국에 전가하는 셈이 된다. 만약 수·출입의 숨은 흐름을 파악할 수 있다면, 이러한 부담전가까지 파악할 수 있게 한다. 지속가능성의 실현이 한 나라만의 탈물질화가 아니라 장기적으로 세계경제 전체의 탈물질화에 기초한다는 점에서 국가 간 수·출입의 숨은 흐름에 대한 추계는 매우 중요하다. 그리고 NAS지표는 당장에 오염물질로 전환되는 것은 아니지만 미래의 오염물질로 전환될 가능성을 보여준다는 점에서 재활용을 비롯한 오염물질의 장기적인 관리 및 계획의 측면에서 유용하게 활용될 수 있다.

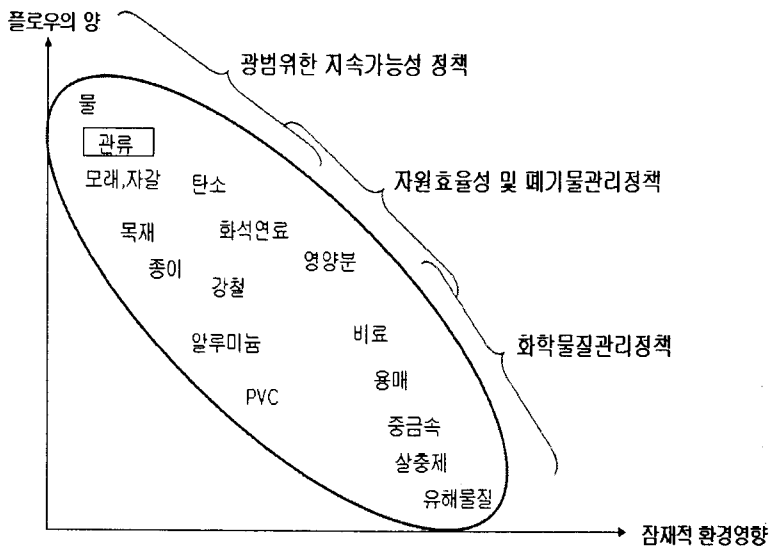
한편, 환경 및 자원관리정책과 관련하여 EW-MFA는 물질유출보다는 물질유입(TMR 및 DMI)이나 물질소비(TMC 및 DMC)와 관련된 지표를 강조한다. MFA의 기본관점인 '물질유입량 ≡ 물질유출량'의 관계가 시사하듯이, 환경오염방지를 위해서는 사후규제적(end-of-pipe policy)인 유출물 관리(output-oriented)가 아닌 사전예방적(precautionary policy)인 투입물 관리(input-oriented)가 중요하기 때문이다. 특히 경제시스템으로의 '유입물 및 유입구의 수'가 경제활동을 통과한 후의 '유출물 및 유출구의 수'보다 훨씬 적기 때문에 투입중심적 접근방식은 정책수행의 효율성 측면에서도 매우 유리하다. MFA 지표개발에서 물질유출보다 물질유입이나 물질소비 쪽이 더 활발한 것도 이와 무관하지 않다(WGEIO, 2005a).

이러한 장점과 잠재력에도 불구하고 EW-MFA 및 관련 지표가 객관적인 분석 및 지표가 되기 위해서는 보완해야 할 점이 많다. 첫째, 가장 결정적인 약점은 물질 흐름을 무게 단위로 하여 양적으로 합산하기 때문에 물질의 질적 측면이 사상된다는 점이다.¹³⁾ 경제활동이 사용하는 물질의 양적 규모만이 아니라 질적 특성도 자연환경에 중요한 영향을 미치기 때문에

13) 이러한 약점을 보완하기 위해 환경부담에 따라 물질 흐름을 범주화(가중치)하는 방식(독일)과 방출 매체와 물질의 속도(경제 내의 체류시간)를 이용하는 방식(미국의 WRI) 등이 시도되고 있다. EUROSTAT, 2001. *Economy-wide Material Flow Account and Derived Indicators : A Methodological Guide*. Statistical Office of the European Union.

이는 EW-MFA의 약점일 뿐만 아니라 물질의 양적 규모를 중시하는 모든 MFA의 약점이기도 하다. 그렇다고 EW-MFA의 지표들이 정책상 전혀 무용한 것은 아니다. 화폐적 지표로서 GDP, NDP 등이 총량지표로서 많은 약점이 있음에도 불구하고 국민경제활동의 대표적인 지표로 사용하면서 그 약점(분배 문제 등)을 다른 지표로 보완하듯이, EW-MFA 역시 마찬가지로의 방식의 보완이 가능하다. 정책이나 의사결정 시 추상 수준이 높은 지표를 사용하는 것이 문제가 아니라, 추상 수준이 높은 단일지표만 사용하는 것이 문제이기 때문이다. 예컨대 <그림 3>에서처럼 흐름의 양은 적지만 상대적으로 환경부담이 크거나(유해화학물질 등) 중간 수준에 위치하는 물질(화석연료)은 MFA의 다른 접근방법(예컨대 SFA, MSA 혹은 PIOT 및 NAMEA 등)으로 보완이 가능하다.

<그림 3> 물질의 환경영향과 정책분류



자료 : Steurer(1996) (WGEIO(2005b)에서 재인용)

둘째, EW-MFA는 물질을 중심으로 고찰하기 때문에 지속가능성과 관련하여 중요한 비중을 차지하는 토지(생물다양성의 측면 등)를 제대로 반영하지 못하고 있다. 이는 EW-MFA만이 아니라 다른 MFA 유형들의 약점이기도 하다. 이와 관련하여 최근 독일에서 토지관련 정보(GIS 등)에 기초한 지표를 통해 이를 보완하려는 노력이 진행되고 있어 그 성과가 주목된다.

셋째, 수치추정을 위한 방법론 개발, 특히 숨은 흐름(HF)에 대한 방법론이 보완되어야 한다. 이는 국민경제의 실질적인 탈물질화 여부와 물질사용의 국가 간 형평성을 따지는 데에 매우 중요하다. 일부 국가의 경우 TMR 및 TMC를 실험적인 수준에서 추산하고 있지만, 아직 객관적인 방법론까지 정립하지 못한 상태이다. 이로 인해 OECD 역시 당분간 직접 플로우

의 측정에 중점을 두고 숨은 흐름에 대해서는 구체적인 추계보다 방법론 개발에 주력하고 있는 상황이다(WGEIO, 2005a).

2. PIOT와 NAMEA : Meso 수준

1) 기본개념

레온티에프에 의해 창안된 IO분석은 경제시스템 내부의 산업연관을 직·간접으로 표현하고 이를 기초로 다양한 경제 분석을 수행하는 도구이다. IO의 논리구조를 경제시스템이 아닌 자연환경까지 포함한 영역으로 확대할 수 있는데 <표 1>은 이를 표현한 것이다.

<표 1> 경제-환경 계정의 기본구조

From	To	
	경제시스템	환 경
경제시스템	(2)	(1)
환 경	(3)	(4)

자료 : Daly(1968)

이에 따르면 (3)에서 투입된 자원이 (2)의 경제활동을 거쳐 (1)로 방출되고, (4)는 경제활동이 개재되지 않은 자연환경 내부의 상호관계로 처리된다. 이러한 구조는 화폐 단위만이 아닌 물질 단위까지 포함한 다차원적 IO분석이 가능함을 의미하며, 이는 일찍이 Leontief(1970)와 Leontief & Ford(1972)을 필두로 하여 에너지와 환경 문제에 다양하게 활용된 바가 있다.

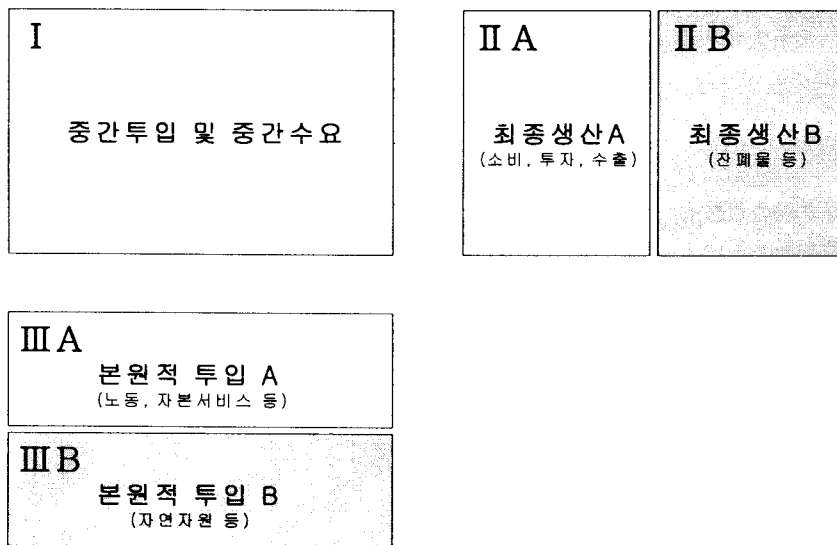
이러한 IO 분석도구는 MFA의 Meso 수준에 해당하는 PIOT나 NAMEA에 그대로 응용된다. 특히 IO분석이 각 산업의 경제활동을 고립적인 것으로 보지 않고 투입-산출관계에 의해 경제 전체에 걸쳐 연쇄적으로 연결되어 있다고 파악한 점, 특정 변화요인의 직접적인 효과만이 아니라 산업 연관에 의한 시스템 전체의 간접효과까지 포함한다는 점에서 전 과정을 중시하는 MFA의 방법론과 유사성이 있다.

PIOT는 이러한 IO원리를 이용하여 경제시스템의 내부 그리고 경제시스템과 환경 간의 물질 흐름을 정리하여(<표 1>의 (1),(2),(3) 영역) 환경IO분석의 토대를 구축하려는 것이다(Hoekstra, 2005). 즉 <그림 4>에서 알 수 있는 바와 같이 PIOT의 기본골격은 내생부문(중간 투입과 중간 수요)과 부가가치부문(본원적 투입A) 및 최종수요부문(최종생산A)으로 구성되는 통상적인 산업연관표(Monetary Input-Output Table : 이하 MIOT)의 기본골격과 매우 유

사하다. 다만 PIOT의 경우 본원적 투입에 자연자원이라는 또 다른 형태의 본원적 투입B(자연자원 투입)와 생산이나 소비과정에서 발생하는 오염물질인 최종생산B(잔폐물 등)가 결합되며, 이들 모든 거래를 물질 단위로 측정한다는 차이점이 있다.¹⁴⁾

이러한 PIOT와 MIOT의 차이에도 불구하고 PIOT의 항목분류는 기본적으로 MIOT와 동일하기 때문에 경제활동과 환경부하 간의 분석에 활용될 수 있고, MIOT와 유사하게 모델링도 가능하다. 같은 MFA 접근인 EW-MFA와 비교해 볼 때 EW-MFA가 시스템 간의 물질 흐름에 주력하고 경제시스템 내부의 물질 흐름을 보여 주지 못하는 것에 비해, PIOT는 각 시스템 간의 물질 흐름을 배경으로 하면서도 경제시스템 내부(산업이나 제품군)의 물질 흐름을 상세히 보여 준다는 장점이 있다.

<그림 4> MIOT와 PIOT의 비교



자료 : Strassert(2000)

이런 장점에도 불구하고 PIOT는 자료 구축에 엄청난 시간과 노력이 소요된다는 단점이 있다. 이는 현재 PIOT가 구축된 나라가 5개 국 정도에 불과하다는 것으로도 알 수가 있다. 그나마 극히 일부 국가만이 보다 진전된 형태(extended PIOT)로 구축되어 있고, 나머지 국가들은 모두 기본 PIOT 수준에 머물고 있는 실정이다(Hoekstra, 2005).

14) PIOT에서는 제품이나 오염물질이 모두 물질로 파악되기 때문에 가계의 경우 MIOT에서와 달리 산업이나 기업과 유사하게 생산활동(오염물질의 생산)을 하는 것으로 처리된다.

이러한 PIOT의 현실적 제약조건을 감안해 볼 때, 당분간 PIOT와 MIOT의 하이브리드 형태인 NAMEA에 주목해 볼 필요가 있다. NAMEA란 화폐 단위의 국민계정(NAM : National Account Matrix)에 물적 단위인 환경계정(EA : Environmental Account)을 결합한 것으로 화폐 단위의 통상적인 IO에 물적 단위로 표시된 환경계정이 바깥쪽에 붙어 있는 혼합계정의 구조를 지니고 있다(<그림 5> 참고). NAMEA의 경우 경제시스템 내부의 흐름이 화폐 단위로 표현되기 때문에 경제 내부의 물질 흐름을 보여 주지 못하지만, 경제활동의 변화로 인한 자연자원의 이용 및 환경부담의 변화를 보여 줄 수 있다는 장점이 있다. 또한 PIOT와 달리 기존에 구축된 통계자료를 이용하여 비교적 손쉽게 구축할 수 있다.

2) 정책적 함의

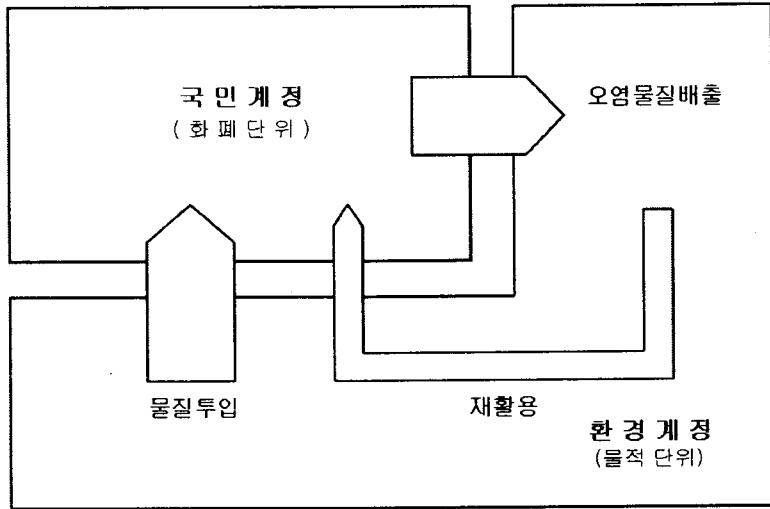
PIOT는 다른 MFA 접근들과 달리 산업(industry-by-industry) 및 제품군(product-by-product)과 환경 간의 물질 흐름을 정확히 보여 줄 수 있기 때문에, 특정 산업이나 제품군이 환경에 미치는 영향평가, 즉 환경투입산출분석(eIOA : environmental Input-Output Analysis)에 활용된다. 뿐만 아니라 특정 산업이나 제품군의 생태효율성을 분석할 수 있으며, 경제 내의 다른 산업이나 제품군 간의 비교나 외국의 동일 대상과의 비교도 가능하다. 또한 이를 화폐적 지표(부가가치 등)와 결합시키면 특정 산업부문이나 제품군의 탈물질화 지표도 산출해 볼 수 있다. 아울러 PIOT를 토대로 자원이용이나 오염물질의 환경압력지표의 산정이 가능하며, 제품의 화학적 구성까지도 분석할 수 있다. 또한 각 산업이나 제품군의 오염물질 발생량과 재활용량 그리고 환경으로의 축적량 등을 파악할 수 있기 때문에 오염물질을 관리하는데 매우 유용하다.

한편 NAMEA는 경제활동별 환경투입산출분석(eIOA), 특히 거시경제정책의 주된 관심사인 최종수요(소비, 투자 및 수출 등)와 개별산업의 환경압력 간의 관계를 보여 줄 수 있으며, 특정 제품의 사용이 환경에 미치는 영향, 어떤 제품에 대한 수요변화가 환경부담에 미치는 영향도 분석할 수 있다. 또한 두 시점 이상의 자료만 주어진다면 SDA(Structural Decomposition Analysis)를 이용하여 환경 문제와 관련한 요인분석(오염물질 배출량의 변화요인)을 할 수 있으며, 여러 가지 가정을 도입한 시뮬레이션도 가능하다.

물론 PIOT와 NAMEA가 지닌 약점도 적지 않다. 이들은 모두 IO분석이라는 기본틀을 사용하기 때문에 고정계수 가정이 약점으로 작용한다. 물론 화폐 단위로 계산하는 MIOT와 달리, PIOT는 투입계수를 물적 단위로 계산하기 때문에 투입산출물 간의 가격비 일정이란 가정이 필요하지 않아 그만큼 고정계수 가정이 덜 경직적이기는 하다. 하지만 IO분석의 약점인

고정계수의 약점은 그대로 남는다. 또한 전술한 바와 같이 PIOT의 경우 아직 표준화가 미흡하고 작성과정에 방대한 자료와 시간이 소요된다는 단점이 있다. 반면 NAMEEA는 작성이 상대적으로 쉽고 정책의 활용도가 높을 뿐만 아니라 표준화가 상당히 진행되어 있다는 점에서 주목할 만하다.

<그림 5> NAMEEA의 기본개념도



자료 : 환경부(2005)

3. LCI : Micro 수준

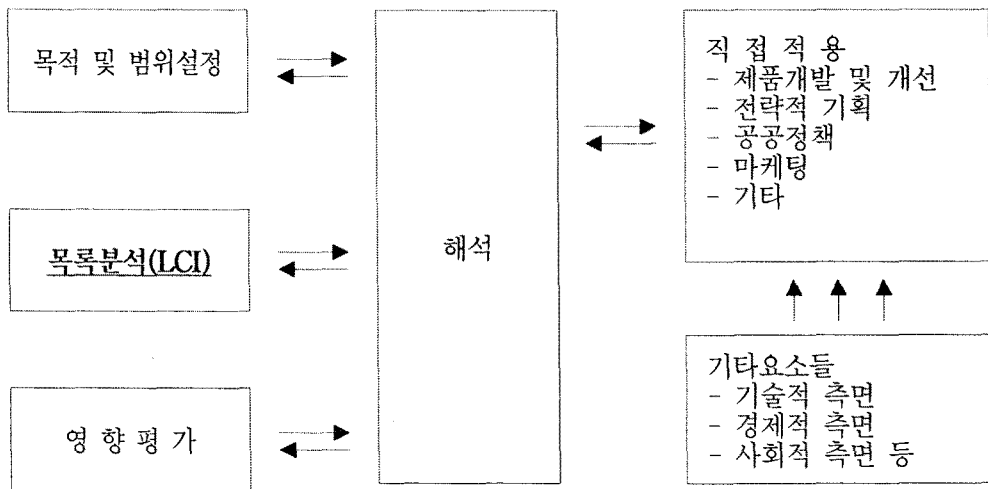
1) 기본개념

EW-MFA가 경제 전체, PIOT(NAMEEA)가 주로 경제시스템 내의 산업이나 제품군을 대상으로 하는 것이라면, LCI는 단일 제품이나 서비스 자체(functional unit)를 대상으로 한다. 즉 LCI는 특정 제품을 대상으로 생산에서 소비 그리고 폐기에 이르는 전 과정의 물질 흐름을 추적한다.

이러한 LCI는 전 과정에 걸쳐 제품의 환경성을 평가하는 전 과정평가(Life-Cycle Assessment : 이하 LCA)와 밀접한 관련이 있다(<그림 6> 참고). LCA에 의거하여 대상 제품이나 서비스의 환경성을 평가하기 위해서는 우선 해당 제품이나 서비스 단위의 전 과정에 걸쳐 어떤 종류의 물질이 얼마만큼 투입되고 배출되는지를 정량화해야 한다. 이렇게 정량화한 자료목록을 작성하는 것이 바로 LCI, 즉 '전 과정 목록분석'이다. 목록분석에서 정리된 자

료들은 다시 환경영향 범주별로 분류되고(분류화 단계) 각 범주별 환경영향을 정량화하는 과정(특성화 단계)을 거쳐 LCA의 영향평가과정에 활용된다. 따라서 영향평가의 정확성을 높이기 위해서는 LCI가 객관적이고 과학적으로 작성되어야 하며, 이런 차원에서 LCI는 4단계(목적 및 범위설정, 목록분석, 영향평가 그리고 해석)로 구성되는 LCA에서 가장 중요한 위치를 차지한다.

<그림 6> LCI와 LCA의 관계



자료 : ISO 14040(1997)

<표 2> MFA 유형별 대상 및 목적과 정책적 함의

유형	대상	목적	정책유형	정책과제	활용단계
EW-MFA	국민경제	국민경제의 물질 흐름 추적	국가전략 및 계획	지속가능한 발전 지속가능한 생산 및 소비	문제분석 목표설정 정책디자인 정책모니터링
PIOT/ NAMEA	산업/제품군	산업/제품군 간 물질 연관관계	경제적 유인수단 자발적 협약 등	기후변화 및 에너지정책 오염물질관리 및 재활용정책	
LCI	특정제품/ 서비스단위	특정제품/서비스의 물질 흐름 추적	제품규제 에코 라벨링 등	제품의 환경성 관리 화학물질 및 특정폐기물관리	

자료 : Femia & Moll(2004)에서 재작성

2) 정책적 함의

LCA의 한 단계로서 LCI가 다른 MFA와 마찬가지로 대상 시스템의 물질 흐름을 양적으로 정리한 것이지만 전술한 LCA 과정을 거쳐 환경에 대한 질적인 영향평가로 연결될 수 있기

때문에 제품의 환경영향평가에 유용하게 사용된다. 물론 PIOT에서도 제품의 환경성 분석이 어느 정도 가능하지만 PIOT의 경우 제품군 전체의 평균치를 기준으로 하여 주로 생산과정과 관련된 환경부담을 다루기 때문에 LCI 및 LCA와의 그것과 구별된다. 따라서 LCI는 LCA 분석을 토대로 제품의 전 과정의 어느 단계를 관리하고 조정하는 것이 제품의 탈물질화나 환경부담 저감에 효과적인가를 결정하는 데에 매우 유용하다. 아울러 유사한 종류의 제품들 간의 환경성 비교도 가능하다. 이처럼 LCI 및 LCA는 기업의 지속가능한 경영과 자사 제품의 환경성 관리 나아가 공공목적의 에코-라벨링제도에도 활용된다.

하지만 LCI의 경우도 몇 가지 약점을 안고 있다.¹⁵⁾ 첫째, 분석자에 따라 목록분석이 달라질 수 있다는 점이다. 조사대상이 되는 제품이나 서비스 단위의 경계를 어떻게 설정하는가가 목록분석에 영향을 주기 때문이다.

둘째, 전 과정 목록분석에서 대상 제품의 물질 흐름의 전 과정을 모두 추적하는 것이 사실상 어렵기 때문에 과정의 선별(cut-off)을 통해 사소한 2차적인 흐름을 무시하는 것이 일반적이다. 따라서 이러한 선별과정의 차이에 따라 동일 대상에 대해 서로 다른 LCI가 나올 수 있다. 물론 과정의 선별에 대한 근거와 이유를 엄격하게 요구하고 있지만, 이는 LCI의 객관성에 약점으로 작용한다.¹⁶⁾

셋째, LCI 및 LCA 역시 다른 MFA와 마찬가지로 토지이용과 관련된 부분이 반영되지 않으며, 단위 제품의 환경부담만 계산하고 여기에 실제 사용물량을 곱하는 방식이기 때문에 제품사용량 전체와 환경부담 간의 관계를 선형적인 비례관계로 상정한다는 약점이 있다.

V. 결론 : 물질흐름분석(MFA)의 의의와 함의

이상에서 살펴본 MFA의 의의와 정책적 함의를 종합하면 다음과 같다.

우선, 이론적인 차원에서 MFA는 지속가능성의 개념 논란과 관련하여 약지속가능성과 강지속가능성의 문제를 경제활동의 물질 흐름의 축소라는 탈물질화 전략을 통해 우회함으로써 지속가능성의 문제에 대해 구체적인 정책수준으로 접근할 수 있는 통로를 확보하고 있다. 즉

15) LCI 및 LCA의 약점에 대해서는 Duchin, F. and E. Hertwich. 2003. "Industrial Ecology" *Online Encyclopaedia of Ecological Economics*. 참고. LCA의 약점을 해결하기 위한 연구로는 Udo de Haes, H. et al. 2004. "Three Strategies to Overcome the Limitations of Life-Cycle Assessment" *Journal of Industrial Ecology* 8(3): 19-32 참고.

16) 이와 관련하여 선별의 문제점을 해결하기 위한 시도로서 IO-LCA에 주목할 필요가 있다. 이는 LCA가 직면하고 있는 과정 추적상의 한계를 IO분석을 이용하여 해결하려는 시도로서 IO가 지나고 있는 포괄적인 직·간접의 연관관계를 고려해 볼 때 매우 유용한 접근이다(Suh, 2004).

MFA와 탈물질화 전략은 약지속가능성 중심의 화폐적 접근이 보여 줄 수 없는 경제활동과 환경 간의 관계를 물질 관계로 인식하면서도 기존의 강지속가능성의 접근과 달리 자연자본의 스톡보다 경제활동의 물질 흐름과 그 규모의 축소라는 방식을 강조함으로써 자연환경과 경제활동 간의 관계에 보다 구체적이고 현실적으로 접근하고 있다.

한편, 방법론상으로 MFA는 ‘물질 흐름의 전 과정 분석’이라는 동일한 원칙하에 다양한 경제활동의 물질 흐름을 분석함으로써 지속가능성 문제에 대한 하나의 새로운 방법론으로 체계화될 가능성을 지니고 있다. 동시에 이 과정에서 지속가능성을 가늠할 수 있는 다양하고 객관적인 물질 지표(RF지표)와 생산성 지표(RP지표)를 산출한다는 점에서 방법론과 객관적인 지표 간의 유기적 결합이 기대된다.

끝으로, 정책적인 차원에서 MFA는 다양한 경제활동 수준에 걸맞은 탈물질화 정책을 가능하게 한다(<표 2> 참고). 또한 국민경제 수준을 제외한 대부분의 MFA 유형들은 구체적인 경제활동이 자연환경에 주는 잠재적 혹은 실제적인 부담을 분석하기 때문에 구체적인 경제활동(driving force)과 환경 부담(pressure) 간의 연관관계를 구명할 수 있다(이른바 PSR 구조).

이러한 분석에 기초하여 국가 전체 수준의 지속가능한 발전의 전략, 산업이나 특정 부문의 에너지 문제와 오염물질관리 정책, 제품 단위의 환경성 제고 등의 정책적 실천이 가능하게 된다. 특히 이 과정에서 MFA는 그 자체가 의사결정수단은 아니지만 정책의사결정의 전 단계로서 문제분석, 목표설정 및 정책디자인 과정에 활용될 수 있으며, 정책시행 이후에는 정책결과의 모니터링에도 활용될 수 있다. 이런 의미에서 MFA 관련 지표는 pressure의 지표임과 동시에 response 지표라는 양면성을 지닌다.

이상에서 알 수 있는 바와 같이 MFA와 이에 기초한 탈물질화 전략은 이론적으로 기존의 지속가능성 개념 논쟁의 추상성을 극복함과 동시에 방법론상의 체계화를 통해 지속가능성의 정책적 실천에 새로운 시야를 제공할 가능성이 있다. 이러한 의의와 잠재력에도 불구하고 MFA가 지닌 약점 역시 간과해서는 안 된다. 즉 물리적 단위로서 양적 합산이 갖는 한계, 방법론상의 미정립, 자료구축상 객관적 자료의 부재나 자료의 질적 문제 등은 여전히 해결해야 될 과제이다.

하지만 MFA가 아직 ‘초기단계의 도구’(young tool)라는 점, 그동안 자연환경이나 자원에 대한 물질자료 미비가 지속가능성의 정책도구화에 장애로 작용하고 있다는 점을 감안한다면 경제활동과 연관하여 제시되는 물질 정보 그리고 이에 기초한 다양한 지표의 잠재력은 매우 높다고 할 수 있다. 이러한 잠재력에 비추어 우리나라도 방법론의 표준화가 되어 있지 않은 유형은 제외하고 비교적 짧은 시간 안에 가능한 MFA 관련 자료, 특히 EW-MFA(직접 흐름과 관련된 통계와 지표)와 NAMEA의 구축에 주력하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 김종호. 2001. 「생태문제의 경제학적 수용에 관한 비판적 세 논문」 서울대학교 박사학위 논문.
- 조영탁. 2002a. “생태경제학 : 비전의 모색과 그 음미” 『사회경제평론』18: 85-129.
- _____. 2002b. “환경거시경제이론의 소개와 그 평가” 『한밭대학교 논문집』19: 361-383.
- _____. 2003. “생태경제학 산책 : 방법론, 비전, 지속가능성” 『한국사회경제학회 2003년 겨울 학술대회』 프란치스코 교육회관: 13-58.
- 최정수 · 김종호. 2004. “환경계정과 지속가능지표 : 한국의 직접물질유입량지표를 중심으로” 『2004 경제학 공동학술대회』 이화여자대학교 Session 1-4.
- 환경부. 2003. 「환경경제통합계정 개발 및 녹색GDP 작성」 환경부.
- _____. 2004. 「환경경제통합계정 개발 및 녹색GDP 작성 II」 환경부.
- _____. 2005. 「환경경제통합계정 개발 및 녹색GDP 작성 III : 최종보고회 자료」 환경부.
- Adriaanse et al. 1997. *Resource Flow : The Material Base of Industrial Economies*. World Resource Institute.
- Ayres, R. et al. 1970. *Aspects of Environmental Economics : A Materials Balance-General Equilibrium Approach*. Johns Hopkins University Press.
- Bartelmus, P. 2003. “Dematerialization and Capital Maintenance : Two Sides of the Sustainability Coin” *Ecological Economics* 46: 61-81.
- Bringezu, S. et al. 1997. *Regional and National Material Flow Accounting : From Paradigm to Practice of Sustainability*. Leinden.
- _____. 2003. “Rationale for and Interpretation of Economy-Wide Materials Flow Analysis and Derived Indicators” *Journal of Industrial Ecology* 7(2): 43-64.
- Daly, H. 1968. “On Economics as a Life Science” *Journal of Political Economy* 76: 392-406.
- Daniels, P. and S. Moore. 2002a. “Approaches for Quantifying the Metabolism of Physical Economies Part I : Methodological Overview” *Journal of Industrial Ecology* 5(4): 69-93.
- _____. 2002b. “Approaches for Quantifying the Metabolism of Physical Economies Part II : Review of Individual Approaches” *Journal of Industrial Ecology* 6(1): 65-88.
- Duchin, F. & E. Hertwich. 2003. “Industrial Ecology” *Online Encyclopaedia of Ecological Economics*.
- El Serafy, S. 1999. “Natural Resource Accounting” In van den Bergh, J.C.J.M. (ed.) *The Handbook of Environmental and Resources Economics*. Edward Elgar.

- EUROSTAT, 2001. *Economy-wide Material Flow Account and Derived Indicators : A Methodological Guide*. Statistical Office of the European Union.
- Femia, A. and S. Moll, 2005. *Use of MFA-Related Family of Tools in Environmental Policy-Making : Overview of Possibilities, Limitations and Existing Examples of Application in Practice*. European Environment Agency P3.1-2004.
- Fischer-Kowalski, M. 1998. "Society's Metabolism : The Intellectual History of Material Flow Analysis, Part I 1860-1970" *Journal of Industrial Ecology* 2(1): 61-78.
- Fischer-Kowalski, M. and W. Hüttler. 1999. "Society's Metabolism : The Intellectual History of Material Flow Analysis, Part II 1970-1998" *Journal of Industrial Ecology* 2(4): 107-136.
- Hinterberger, F. et al. 1997. "Material Flows v.s. 'Natural Capital' : What Makes an Economy Sustainable?" *Ecological Economics* 23: 1-14.
- _____. 2003. "Material Flows Accounting and Analysis(MFA) : A Valuable Tool for Analysis of Society-Nature Interrelationship" *Online Encyclopaedia of Ecological Economics*.
- Hoekstra, R. 2005. *Economic Growth, Material Flows and Environment*. Edward Elgar.
- Lange, G-M. 1999. "How to Make Progress toward Integrating Biophysical and Economic Assessment" *Ecological Economics* 29: 29-32.
- Leontief, W. 1970. "Environmental Repercussions and the Economic Structure : An Input-Output Approach" *Review of Economics and Statistics* 52(3): 262-71.
- Leontief, W. and D. Ford. 1972. "Air Pollution and Economic Structure : Empirical Results of Input-Output Computations" In Brody & Cater (eds.) *Input-Output Techniques*. American Elsevier.
- Martinez-Alier, J. 2002. *The Environmentalism of the Poor : A Study of Ecological Conflicts and Valuation*. Edward Elgar.
- Matthews et al. 2000. *The Weight of Nations : Material Outflows from Industrial Economies*. World Resource Institute.
- Moll, S. and S. Bringezu. 2004. *Aggregated Indicators for Resource Use and Resource Productivity : Their Meaning, Cross-country Comparability, and Potential Driving Factors*. European Environment Agency IP 2004-Project 3.2.2.
- OECD. 2001. *OECD Environmental Strategy for the First Decade of 21st Century*. OECD Environment Ministers, May 2001.
- Ree, W. and M. Wackernagel. 1999. "Monetary Analysis : Turning a Blind Eye on Sustainability" *Ecological Economics* 29: 47-52.

- Ritthoff, M. et al. 2002. *Calculating MIPS : Resource Productivity of Products and Services*, Wuppertal Spezial 27e, Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy.
- Ropke, I. 1999. "Price Are Not Much" *Ecological Economics* 29: 47-52.
- Schmidt-Bleek, F. 1993a. "MIPS - A Universal Ecological Measure?" *Fresenius Environmental Bulletin* 2(8): 407-12.
- Schmidt-Bleek, F. 1993b. "MIPS - Revisited" *Fresenius Environmental Bulletin* 2(8): 407-12.
- Spangenberg, J. and O. Bonniot. 1998. *Sustainability Indicators : A Compass on the Road towards Sustainability*. Wuppertal Paper No. 81, Wuppertal Institute.
- Spangenberg, J. et al. 1999. "Material Flow Analysis, TMR and the MIPS-Concept : A Contribution to the Development of Indicators for Measuring Changes in Consumption and Production Patterns" *International Journal of Sustainable Development* 2(4): 491-505.
- Strassert, G. 2000. "Physical Input-Output Accounting and Analysis : New Perspectives" 13th *International Conference on Input-Output Techniques*. Macerata(21-25 August).
- Suh, S. 2004. "System Boundary Selection in Life-Cycle Inventories Using Hybrid Approaches" *Environmental Science & Technology* 38(3): 657-64.
- Udo de Haes, H. et al. 2004. "Three Strategies to Overcome the Limitations of Life-Cycle Assessment" *Journal of Industrial Ecology* 8(3): 19-32.
- van den Bergh, J.C.J.M. and M. Janssen. 2004. "The Interface between Economics and Industrial Ecology : A Survey" In van den Bergh, J.C.J.M. & M. Janssen (eds.) *Economics of Industrial Ecology*. MIT Press.
- WGEIO. 2005a. "Material Flow and Related Indicators : OECD Approach and Work Plan for 2005-6" ENV/EPOC/SE(2004)3/Final FEB-2005.
- _____. 2005b. "Material Flow and Related Indicators : Inventory of Country Activities" ENV/EPOC/SE(2004)3/Final/ADD FEB-2005.
- _____. 2005c. "Material Flow and Resource Productivity Indicators" ENV/EPOC/SE(2005)1, *Workshop on Material Flow Indicators and Related Measurement Tools*. Berlin(May, 2005).
- _____. 2005d. "Material Flow and Resource Productivity Indicators" ENV/EPOC/SE(2005)1, *Workshop on Material Flow Indicators and Related Measurement Tools*. Berlin(May, 2005).
- U.N. 2003. *Integrated Environmental and Economic Accounting(SEEA) 2003*.