

물질흐름분석을 이용한 국내 지속가능한 자원관리 시스템 모형 연구

김유정^{1*} · 김성용¹ · 허은녕²

¹한국지질자원연구원, ²서울대학교

Modelling Study on Sustainable Resources Management System Using Material Flow Analysis(MFA) in Korea

Yu-Jeong Kim^{1*}, Seong-Yong Kim¹ and Eunnyeong Heo²

¹Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM) Gwahang-no 92, Yuseong-gu, Daejeon, 305-350 Korea

²Seoul National University Gwanang-no 599, Gwanak-gu, Seoul, 151-744, Korea

Sustainable resource management(SRM) is regarded as the core strategy to achieve Dematerialisation and Decoupling of economic growth from the use of natural resources and environmental degradation. This paper presents status SRM policy and research in worldwide, and analyzes decoupling of economic activity from energy consumption of domestic manufacturing, using decoupling factor. Also This paper suggests methodologies and strategies of SRM in Korea. SRM is established through various analysis and survey as following; forecasting of resource demand, material flow analysis and value chain analysis, resource market structure analysis. Through these analysis, we can obtain hot-spot and solution of environmental burden, recycling market management, recycling technology and best-optimal supply rate of primary and secondary resource. In Korea, resource management system must be linked with national and regional material flow analysis, and it is necessary to make SRM-law of national dimension for effective run of sustainable resource management system.

Key words : Material flow analysis, Decoupling, Dematerialization Decoupling factor, Sustainable Resource Management

지속가능한 자원관리모형(SRM)구축은 탈물질화 및 환경과 경제의 디커플링을 이루기 위한 핵심적 요소로 여겨지고 있다. 본 연구에서는 세계 각국의 지속가능한 자원관리 정책 및 연구방향을 살펴보고, decoupling factor를 이용하여 국내제조업의 경제활동과 에너지소비간의 디커플링현상을 살펴보았다. 마지막으로 이를 바탕으로 국내 실정에 맞는 SRM모형구축과 전략을 제시하였다. 자원관리 시스템은 수요전망, 물질흐름분석과 가치사슬분석, 시장구조분석 등의 분석과 조사 등을 바탕으로 구축된다. 이러한 분석들을 통해 환경적 문제 해결, 재활용시장관리방안 및 시장의 구조적 문제점 도출, 필요 재활용기술 도출, 1차자원과 2차자원의 최적 공급비율 등의 Hot-spot 도출 및 해결방안모색이 가능하다. 또한 지속가능한 자원 관리시스템과 국가단위, 권역단위의 물질흐름분석을 유기적으로 연계하고, 효과적인 이의 운영을 위해서는 국가차원의 법제화와 뒷받침이 이뤄져야 할 것이다.

주요어 : 디커플링, 디커플링팩터, 탈물질화, 지속가능한자원관리시스템, 물질흐름분석

1. 서 론

20세기 이후의 경제성장 위주 사회발전은 자원고갈을 현실화하였고, 환경파괴의 심각화와 개발의 불균형으로 인한 피해가 본격적으로 나타나기 시작했다. 유럽환경청(The Ecological Footprint(2005))에 따르면

지구의 자정능력(Earth's biocapacity)을 유지하기 위해서는 1인당 ecological footprint¹⁾가 1.8ha를 초과할 수 없으나 현재 세계적으로 1인당 평균 2.2ha에 이르고 있다. 또한 전 세계에서 지구가 연간 생산할 수 있는 자원의 25%를 초과해서 사용하고 있는데, 이는 2003년을 기준으로 우리가 사용하는 자원을 생산하기 위해 지구

*Corresponding author: kyj@kigam.re.kr

가 1년 3개월을 일해야 함을 뜻한다. 그리고 UN의 '21세기 환경시스템 평가보고서(UN 2005 Millennium Ecosystem Assessment)'에 의하면 1960년대 초기에 비해서 모든 환경시스템이 2/3로 감소되었으나 천연자원에 대한 수요는 같은 기간에 70%가 증가하였다. 이러한 현상은 지속가능한 발전에 역행하는 것으로 이에 대한 대비책 마련이 절실한 상황이다.

자원의 지역적 편재성 및 희소성 증가와 더불어 최근 5년간(2002.03-2007.03) 텡스텐은 2배, 인듐은 10배, 구리는 9배 등 자원가격 급등하는 등 원자재의 가격상승이 계속되고 있고 기후변화 협약과 같은 각종 환경국제협약 및 유럽의 환경무역 규제 등으로 인해 자원은 이제 중요한 생산요소의 하나로 여겨지며 더 나아가 환경성과 경제성을 해결하는 핵심요소로 작용하고 있다.

따라서 자원 생산성(Resource productivity), 생태경제 효율성(Eco-efficiency), 자원 절약, 온실가스 배출 저감 등 환경성과 경제성을 모두 감안한 해결책이 바로 지속

가능한 자원관리모형의 구축이라고 판단할 수 있다. 우리에게 필요한 것은 더 많은 자원보다는 더 높은 이용 효율성이다. 지속가능한 자원관리는 원료추출, 생산, 소비, 재활용 및 처분 등 제품의 전생애주기(life-cycle)에 걸쳐 발생하는 환경적 외부효과를 내재화함으로써 환경보전과 동시에 자원사용의 경제적 효율성을 제고하기 위해 반드시 구현되어야 하며, 환경적 지속성, 경제성장, 사회적 형평성 등이 균형을 이뤄야만 가능한 것이다(Kim *et al.*, 2006).

최근의 지속가능한 자원관리를 위한 연구개발 등을 수행하는 국내기관은 국립환경과학원, 국가청정생산지원센터, 한국지질자원연구원, 환경 컨설팅 기업 등이 있다. 환경부는 브롬계난연체를 대상으로 유해물질관리를 위한 SFA(SFA: Substance flow analysis)를 수행한적 있으며, 수년전부터 물질흐름계정(EW-MFAcc: Economic Wide Material Flow Accounts)을 바탕으로 하는 환경통합계정을 구축하기 위한 작업을 진행하고 있다. 그리고 현재는 국립환경과학원의 폐기물 자원화를 위한 연구, 국

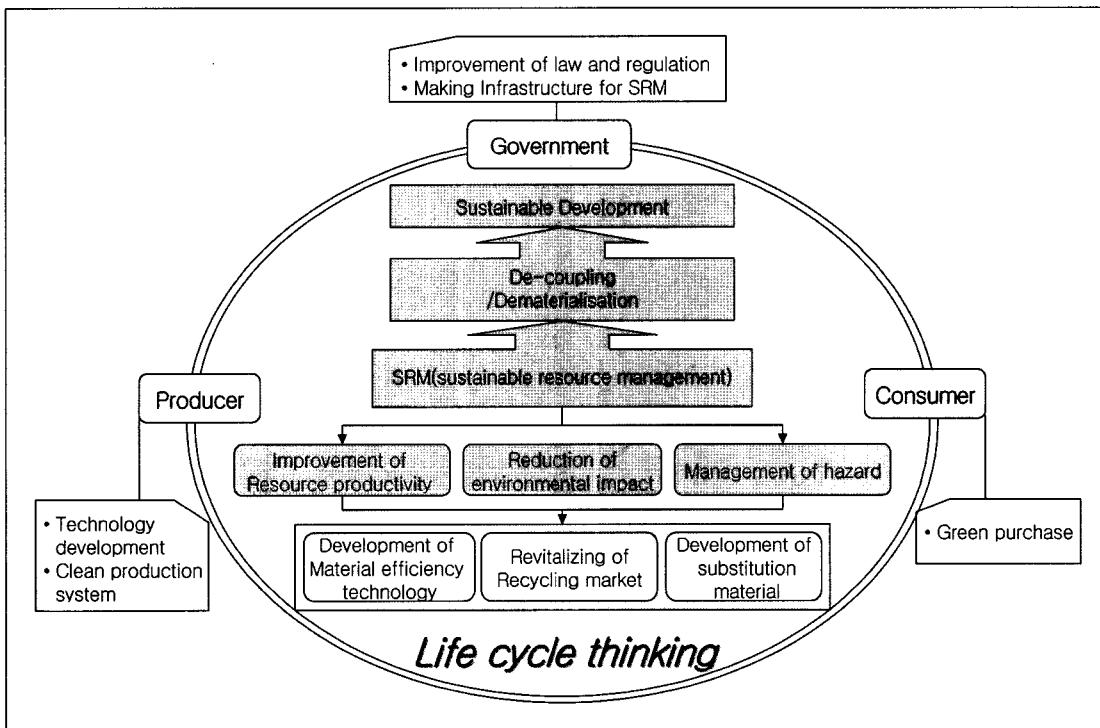


Fig. 1. Strategy of sustainable resource management.

¹⁾ 'Ecological footprint'는 세계 최대 환경보호 단체인 WWF(세계 자연 보호 기금)가 적극적으로 활용하고 있는 환경 지표이다. 「어느 특정의 지역의 경제활동, 또는 어느 특정의 물질 수준의 생활을 영위하는 사람들의 소비 활동을 영속적으로 지지하기 위해서 필요하게 되는 생산 가능한 토지 및 수역 면적의 합계」로 표현되며, 지구의 환경 수용력을 측정하는데 이용되고 있다.

가청정생산지원센터의 기업중심/제품중심의 전생애주기 평가(LCA; Life-cycle Assessment), 공급망 관리시스템 SCM(Supply Chain Management), 에코 디자인(Eco-Design), 물질흐름분석(산업 및 철강, 비철금속, 회유금속)에 관한 연구 등이 진행되고 있고 한국지질자원연구원에서는 국가주요광물자원 수급통계 구축 및 관리 및 물질흐름기초연구를 수행하고 있다. 또한 환경 컨설턴트 기업들은 정부수탁에 의한 순환자원관리 및 지속가능 발전과 관련된 환경정책기획과제 등을 주로 수행하고 있다.

2. 디커플링을 위한 지속가능자원관리(SRM)

2.1. SRM을 통한 디커플링과 국내 디커플링 분석

앞서 논의한 지속가능한 성장을 위해서는 환경 부담을 경제활동에서 분리하는 디커플링(Decoupling)과 인간의 효용 및 경제활동을 물질 의존으로부터 탈각하자는 탈물질화(Dematerialisation)가 주요 전략이 되며, 이러한 전략을 수행하기 위해서는 지속가능한 자원관리가 필수적이다. 그리고 지속가능한 자원관리를 위해서는 자원생산성 제고, 환경성 제고, 위해성 관리가 필요하고 이러한 것은 정부, 산업, 민간이 다각적 측면에서 자원집중도를 낮추며 생태경제효율성을 높일 수 있는 제도개선 및 기술개발, 신소재개발 그리고 에코라벨이나 녹색구매 등의 소비패턴변화가 필요하다. 즉 지속가능한 자원관리의 성공여부는 환경으로 인한 외부효과를 반영하고, 자원흐름의 지속 가능성을 지원하며 정부, 생산 및 유통업체, 소비자, 재활용/소재업체가 합

계 해결할 수 있는가에 달려있는 것이다(Fig. 1).

OECD에서는 2001년에 디커플링을 2010년까지의 OECD환경전략의 주요과제로 정하였다. 주어진 기간에 환경부담 증가율이 경제활동(예: GDP)의 증가보다 낮을 때 디커플링이 일어났다고 말할 수 있다. 그러나 자연자원의 절대적인 사용량은 여전히 높은 상태로 이러한 상대적인 디커플링현상으로 충분하지 않다. 그래서 “절대적 디커플링(Absolute decoupling)”과 “상대적 디커플링(Relative decoupling)”을 구분하는 것이 필요하다. 경제변수가 성장하였을 때 환경 부담이 감소하였거나 정체상태이면 “절대적 디커플링”이 일어났다고 하며, 환경 부담은 증가하였지만 그 증가율이 경제성장변수보다 낮을 때에는 “상대적 디커플링”이 일어났다고 할 수 있다(Fig. 2). 또한 디커플링 지표는 자원효율성(Resource efficiency), 자원집중도(Resource intensity), 자원 생산성과 깊은 연관관계를 가지고 있다. 이러한 이유 등에 의해 지속가능한 자원관리가 디커플링을 위한 주요방안으로 여겨진다. OECD에서는 다음 수식 (1)과 (2)와 같은 decoupling factor산정을 통해 디커플링 여부를 확인하고 있다.

$$Decoupling\ ratio = \frac{(EP/DF)_{end\ of\ period}}{(EP/DF)_{start\ of\ period}} \quad \text{수식(1)}$$

$$Decoupling\ factor = 1 - decoupling\ ratio \quad \text{수식(2)}$$

수식 (1)에서 EP는 환경부담, DP는 경제성장과 같은 환경 부담을 유도하는 변수를 의미한다. 또한 수식 (2)에서 구한 decoupling factor가 0에서 1사이의 값을 가지면 디커플링이 일어났다고, 0보다 작으면 디커플

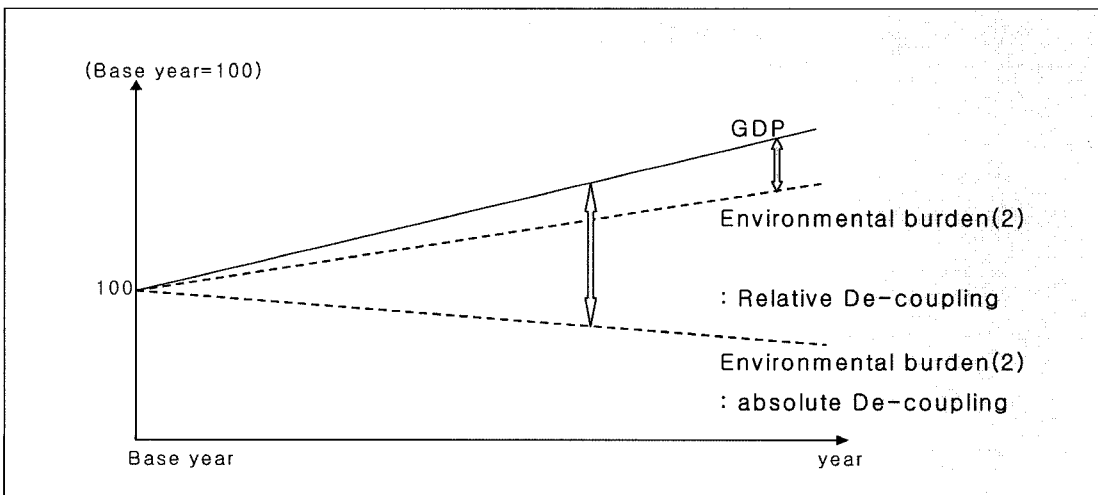


Fig. 2. Basic concept of sustainable resource management.

Table 1. Decoupling in Korea, Japan and Germany

Decoupling indicators for specific sectors		Korea	Japan	Germany
Climate change	Total GHC-emission per unit of GDP and per capita	○	○	-
	Total CO ₂ -emission per unit of GDP and per capita	○	×	-
Air pollution	Total NOx emission per unit of GDP	○	○	○
	Total SOx emission per unit of GDP	○	○	○
	Total emission of fine particulate matter per unit of GDP	○	-	○
	Total VOC emission per unit of GDP	○	○	-
Water quality	Population NOT connected to sewage treatment plants versus total population	○	○	○
	Discharges of N and P from households into the environment versus total population	-	○	-
Waste management	Municipal waste going to final disposal versus PFC	○	○	○
	Amount of glass NOT collected for recycling versus PFC	-	-	-
Material use	Direct Material Input(DMI) per unit of GDP	○	-	-
Natural resource	Total freshwater abstraction per unit of GDP	○	○	○
	Amount of paper/cardboard NOT recycled for versus GDP	○	○	○
Energy	Energy related emissions per unit of GDP of CO ₂	○	○	○
	NOx	○	-	-
	SOx	○	-	-
	CO ₂ Emission from electricity	○	○	○
Manufacturing	NOx emission from manufacturing industry vs manufact. VA	○	-	-
	CO ₂ emission from energy intensive industry versus. VA	○	×	-
	Waste generation by manufacturing industry vs manufact. VA	-	○	○
	Freshwater abstraction by manufacturing industry vs VA	-	-	-

*edited from OECD(2002)

*VA: Value Added

*○=decoupling; ×= no decoupling; -= no data

량이 일어나지 않았다고 할 수 있다.

2002년 OECD에서는 OECD국가를 대상으로 기후변화, 대기오염, 수질, 폐기물관리, 물질사용, 에너지 등과 그 외 다른 여러 환경부담요인(EP)에 따른 각종 디커플링 지표를 조사한바 있다(Table 1). 그 결과를 보면 독일은 거의 대부분의 지표에 있어서 디커플링이 일어났으며 또한 절대적 디커플링을 이뤄냈다. 일본의 경우 에너지집중도가 높은 산업의 이산화탄소발생에 있어서는 아직 디커플링이 일어나지 않았으나, 산업계의 폐기물발생량에 있어서는 절대적 디커플링이 일어났다. 그러나 우리나라는 전반적으로 폐기물처리에 있어서는 디커플링이 일어났음을 확인할 수 있었으나, 자원사용 부문에 있어서는 상당부분 데이터 부족으로 아직 디커플링유무를 확인하지 못하였다. 이는 우리나라 자원관련 통계부족으로 연결되며, 이에 대한 관리 방안은 제 4장에서 논하기로 하겠다.

본 연구에서는 국내 제조업 부문별 에너지소비와 경제활동간의 디커플링현상을 분석하였다. 1981년부터 2006년까지를 연구기간으로 하였으며, 에너지자료는 에너지

경제연구원과 에너지관리공단 자료를 활용하였으며, 제조업별 GDP는 한국은행의 자료로서 2000년 기준 실질금액을 이용하였다.

디커플링 현상을 분석하기 전에 우선 국내 제조업의 에너지 집중도를 살펴보면, 국내 제조업의 에너지 집중도는 1981년 0.64TOE/백만원에서 2006년 0.40TOE/백만원으로 감소하여 제조업 내 에너지 효율성이 전반적으로 개선되었다고 할 수 있으며, 특히 비금속부문에 에너지 집중도 감소효과가 가장 높은 것으로 나타났다. 그리고 2006년 기준으로 석유화학부문이 1.18TOE/백만원으로 에너지 집중도가 가장 높으며, 조립금속·기계장비부문이 0.05TOE/백만원으로 가장 낮은 것으로 나타났다(Table 2).

그리고 시기별로 국내 제조업 decoupling factor산정한 결과 모두 0~1사이의 값을 가져 모든 부문에서 디커플링현상이 나타나고 있었다. 음식료부문과 조립금속·기계장비부문은 1981년부터 1990년에서 발생한 디커플링보다 최근 1990년부터 2006년 발생한 디커플링의 정도가 큰 반면, 그 외 업종은 그 전시기보다 디

Table 2. Energy intensity of manufacturing sector in Korea

Year	Manufacturing	Food products & Beverages	Textile, Apparel & Leather	Wood, Paper & Printing	Coal, Chemical & Petroleum	Non-Metallic Mineral Product	basic metals	Fabricated Metal. Machinery
1981	1.47	0.63	0.70	0.95	2.22	4.11	4.02	0.24
1985	0.88	0.45	0.47	0.53	1.30	2.22	2.18	0.17
1990	0.72	0.37	0.45	0.49	1.31	1.40	1.50	0.13
1995	0.58	0.26	0.37	0.32	1.23	1.27	1.01	0.09
2000	0.51	0.15	0.33	0.30	1.32	0.96	0.86	0.08
2005	0.48	0.17	0.37	0.36	1.33	0.88	0.89	0.06
2006	0.45	0.16	0.33	0.34	1.32	0.90	0.87	0.05

*unit: TOE/million won

Table 3. Decoupling factors(Energy use and Economic growth) of manufacturing sector in Korea

Year	Manufacturing	Food products & Beverages	Textile, Apparel & Leather	Wood, Paper & Printing	Coal, Chemical & Petroleum	Non-Metallic Mineral Product	basic metals	Fabricated Metal. Machinery
1981-1990	0.51	0.41	0.36	0.49	0.41	0.66	0.63	0.44
1990-2006	0.37	0.56	0.26	0.31	0.00	0.36	0.42	0.63
1981-2006	0.69	0.74	0.52	0.65	0.40	0.78	0.78	0.80

커플링현상이 둔화되고 있는 것을 확인할 수 있었다 (Table 3).

2.2. 디커플링을 위한 다각적 접근

이미 독일과 핀란드를 포함한 9개 EU회원국과 일본은 디커플링 정책을 정책목표로 설정하고 정책적인 프로그램을 자연자원의 지속가능한 사용과 연결하고 있다. 이를 통해 자원사용으로 인한 환경영향과 절대적인 자원사용량을 감소시키고자 하고 있다.

이러한 탈물질화 및 디커플링을 위해 자원생산성 및 자원 집중도에 대한 관심이 고조되고 있는데 그 이유는 다음과 같다. 첫 번째, 경제적으로 유럽은 현재 제조업 생산비용의 40% 이상을 원재료비용으로 소비하고 있으며 1999년 이후 원재료비용은 폭발적으로 증가하고 있다. 독일 제조업의 생산비용 구조를 살펴보면, 2004년 기준으로 원자재비용이 41%이며, 에너지 1.6%, 노동비 20%, 기타 37.5%로 나타났다. 또한 2004년의 노동비는 1995년과 동일한 수준인데 반해 에너지비용을 제외한 원자재비용은 1995년 대비 1.35배 증가하였다(Gerhard Angerer, 2007). 또한 공급원료(Feedstock)시장은 최근에 점점 더 불안정해지고 있으며 유럽에서는 합리적인 가격으로 원자재를 공급하는 구조를 보장하는 것에 높은 우선순위를 부여하고 있다. 이러한 시장구조에서 원자재의 소비를 감소시킴으로써 유럽 산업이 세계 공급원료시장에 덜 의존하게 만들고 더불어 상품시장에서 더 경쟁력을 지닐 수 있게 해준다.

둘째, 환경적으로 천연자원의 채굴 및 제조공정은 에너지 소비 및 환경 부담을 수반하므로 환경 부담을 줄이기 위한 노력은 자원소비 감소와 직결될 수 밖에 없다. 따라서 빠르게 성장하는 글로벌 경제의 산업계에서는 비용을 절감하고 천연자원의 지속가능한 자원소모를 위한 물질효율화기술(Material efficient technologies)에 관심이 고조되고 있다. 물질효율화기술이란 '산출물의 기능을 제한하지 않고서도, 제품 산출물을 생산하기 위한 소비되는 천연자원의 양을 줄이는 기술 및 방법 및 서비스'를 의미한다. 재활용기술, 효율적 제조기술, 생태학적 건설 주의, 나노기술, 재생자원의 물질대체, 재사용기술(재제조) 등이 이에 속한다. 현재 물질효율화기술에 있어서 그 노하우와 각 산업부문에서의 경제화(Economisation)가 여전히 낮은 편이며, 에너지효율 기술과는 비교할 수 없을 정도로 낮다. 이는 곧 물질을 통한 효율화의 잠재성이 이미 효율화가 안정화된 에너지에 비해 높은 것을 의미하기도 한다. 이러한 차원에서 독일연방경제기술청(BMWI)의 물질효율국(DEMEA)에서는 물질을 통한 효율화의 잠재성을 인정하고 독일의 물질집중도는 앞으로 현재보다 20%까지 감소가능하다고 예상하고 있다.

기술진보 및 물질효율화기술은 미래자원수요에 중요한 요소로 작용하여 경제성장의 지속성과 환경보전 및 사회균형발전에 결정적 역할을 한다. 자원수요에측에 있어서 기술진보의 효과는 수요와 공급 균형을 장기적으로 향상시키는 수단으로 활용될 수 있다. 기술진보,

자원재활용, 가격변동 등을 반영한 미래의 천연자원 수요에 대한 예측 및 천연자원별 경제성장, 환경문제, 규제 등의 수요변화요인²⁾을 살펴봄으로써 자원별로 지속 가능한 전략을 도출할 수 있을 것이다. 이러한 접근을 통해 과거에 번번이 있었던 자원의 고갈로 인한 자원 가격 급상승을 피할 수 있다. 이런 차원에서 유럽은 이미 물질효율화기술개발에 많은 노력을 기울이고 있다. 독일환경청의 환경기술 현황에 대한 분석 보고서 (Greentech made in Germany)에 따르면 독일과 유럽이 재활용기술에 있어 강한 우위를 지니고 있다. 이것은 미래 광물자원에 대한 경쟁에 있어서 유리한 위치를 잡았음을 의미한다.

또한 기술적 요소 외에도 정책은 천연자원의 지속가능한 사용을 위한 기술적 진보의 가이드로써 강력한 힘을 발휘할 수 있을 것이다.

3. 국외 물질흐름 · 관리

3.1. EU의 물질관리 및 환경규제 동향

EU는 지속가능한 자원관리를 위한 공동대응을 마련하고 있다. 2006년 6월에 유럽위원회에서는 지속가능한 발전을 위한 원칙에 대한 가이드를 채택하였다(Guiding principles for sustainable development adopted by the European Council of 15/16, 2006. 06). 이는 지속가능한 발전을 위한 기본적인 사항들을 담고 있으며 특히 보다 더 좋은 생활과 삶을 강조하고 세대와 세대 그리고 같은 세대에서의 상호 연대를 강조하고 있다.

그리고 EU의 지속가능한 발전전략 ‘하나의 실천을 위한 기반조성’을 검토하는 의견서(Communication on the review of the EU Sustainable Development Strategy - a platform for action)에서 유럽집행위원회는 지속가능한 자원관리를 위해 다음과 같은 사항들을 제시하고 있다.

- 새롭고 비용 효과적이며 자원효율적인 방법을 찾기 위한 연구와 기술에 대해 지속적으로 투자해야만 한다.
- 천연자원에 대한 높은 의존성을 감소시키기 위해 환경 효율적이며 에너지절약 부문 기술에서 세계 시장에서 선점할 위치를 찾아야 한다.
- 자원효율성을 제고하고 재생이 불가능한 천연자원 에 대한 전반적인 사용을 감소시키는 일과 원료물

질사용에 관련된 환경영향을 감소시킨다. 그리고 재생이 가능한 천연자원은 그들의 재생가능 능력을 초과하지 않는 수준으로 사용되어야 한다.

유럽의회는 2007년 4월 천연자원의 지속가능한 사용을 위한 주제별 전략을 결의하였다. 이에 따르면 연간 자원효율성을 3% 개선해야 하고 2005년에서 2030년까지 연간 자원효율성을 거의 6% 수준으로 개선해야 하며 자원 범주별로 EU에서 사용하는 자원총량의 부정적인 효과는 절반으로 줄여야 한다. 예를 들어 건축 부문과 수송 그리고 다른 산업분야에서 자원에 대한 의존도를 감소시키고 자원사용의 환경영향을 감소시켜야 한다. 그리고 천연자원의 보다 효율적인 사용을 위해 관리방법을 개선하고 폐기물 관리와 생산과 소비습관을 지속가능하도록 해야 한다. 또한 천연자원의 사용이 환경이 감당할 수 있는 잠재적인 능력을 초과하지 않도록 해야 한다. 그리고 적어도 2008년까지는 가장 높은 환경영향을 가지는 최고 20가지 물질에 대한 특별한 정책과 실천계획 개발을 목표로 하고 있다.

EU는 자원관리에서 더 나아가 이를 바탕으로 경제적 이익 창출을 도모하고 있다. 그 대표적인 것이 유럽의 각종 환경규제 및 탄소배출권 거래시장을 들 수 있다.

유럽은 환경보전이라는 사회적 문제해결과 동시에 유럽의 경제적 배타영역 형성을 위해 타 권역에 비해 선진화되고 축적된 환경기술을 바탕으로 하여 이른바 환경 후진국들에 대한 비관세 무역장벽을 높게 만들고 있다. 전기전자제품 유해물질제한지침(RoHS: Restriction of the use of certain Hazardous Substance in electric and electronic equipment), 폐전기전자제품처리지침(WEEE: Waste Electrical and Electronic Equipment), 폐자동차처리지침(ELV: End of Life Vehicle) 화학물질등록·평가·승인지침(REACH: Registration, Evaluation, Authorization in Chemicals) 등이 이에 속한다(Table 4). 특히 2006년 말 EU의 3개 기관(집행위원회, 의회, 이사회)간의 협의 하에 현재 시행되고 있는 40여개의 관련 법규 및 제도를 대체하고 새로운 유럽 화학물질관리정책의 초석이 되는 REACH 법안이 합의되었다. REACH법안은 그 동안 개별적으로 시행하던 유사한 화학물질관련 법규를 통합하여, EU내 생산되거나 수입되는 3만여 종의 화학물질에 대한 특성을 등록하는 제도로 화학물질 관리 주체 및 책

²⁾Gerhard Angerer(2007)분석에 따르면 티타늄의 자원고갈은 주로 세계경제성장에 의해 변동할 것이며, 미래의 구리 자원 고갈은 주로 세계의 구리 리사이클링 강화정도에 따라 변동할 것이며, 형석의 자원고갈은 주로 환경적 관심 및 온실가스 방지 등과 같은 요인에 의해 변동된다.

Table 4. International environmental regulations

Regulation	Effectuation time	Related industry	Contents
WEEE	'05-'07	Electrical and Electronic Equipment	- Targets for 10 Categories of electrical and electronic equipment ('07.01.01) *Recovery: 70-80% *Reuse/Recycle: 50 -70%
RoHS	'06. 07	Electrical and Electronic Equipment	- The restricted substances : cadmium, lead mercury, hexavalent chromium, PBBs, or PBDEs
ELV	'03-'15	Automobile	- Recovery: 85%, Reuse/Recycle: 80% ('06.01.01)
EuP	'07. 10	Electrical and Electronic Equipment	- Requirement of Eco-design for energy using Products - Self declaration
EURO II, III, IV	'96, '00, '05	Automobile	- Compulsory to install on-board diagnostic (OBD) systems in private and light commercial vehicles
REACH	'07.06.-	All industry	- Subject substances: Chemical substances that are manufactured and imported into the EU in quantities above 1 ton per year

*Abbreviations :

WEEE: Waste Electrical and Electronic Equipment

RoHS: Restriction of the use of certain Hazardous Substance in electric and electronic equipment

ELV: End-of-Life Vehicle Directive

EuP: Ecodesign for Energy using Products

REACH: Registration, Evaluation, Authorization in Chemicals.

임을 정부당국에서 산업계로 이관하는 가장 강력한 환경규제법규이다. 이상의 법규들은 우리나라 자동차산업 및 전기·전자산업에 아주 큰 영향을 미치는 것으로 국내에서도 대책반을 마련하고 중소기업을 대상으로 각 내용 및 대응전략 등에 대한 교육을 실시하고 있다.

EU가 추진하는 에너지 효율 실천계획안에 따르면, 역내 25개 회원국의 에너지 사용량을 2020년까지 20% 절감하고자 한다. 이 실천계획은 가스, 석유 및 전기에 대한 수요가 세계적으로 증가하는 요즘에 유럽의 에너지 소비를 줄이는 일련의 방법들을 제시하고, 유럽이 비효율적인 사용으로 인해 적어도 에너지의 20%를 낭비하고 있으며, 2020년까지 1,000억 유로(119조 원)를 상회하는 직접 비용이 초래될 것임을 지적하고 있다. EU 집행위원회는 이 계획이 EU지역 내에 안정적인 에너지 공급을 확보하고 온실가스 배출을 감소시키며, 기업의 친환경 제품설계를 유도하여 혁신과 기술발전을 촉진할 것으로 기대하고 있다. 그리고 이미 탄소거래가 수익창출과 환경보호에 도움이 되고 있다. EU는 온실가스 배출권 거래가 2006년 200억 유로로 2배 성장하였는데, 이는 기후변화 방지에 큰 역할을 할 수 있는 제도로서 조명 받고 있다. 기업과 국가들은 탄소시장에서 이산화탄소 같은 온실가스 배출권의 구매가 가능하며, 여기에 강력한 기후변화 정책과 목표의 도입이 증가함에 따라 탄소시장이 성행하고 있다. 탄소배출권 중개회사들은 단순 중개에서 벗어나 생산업체로부터 직접 배출권을 구매하고 있으며, 대기

업들이 현재 보여주는 관심이야말로 탄소 거래가 크게 성장할 것임을 반증하는 것이다.

3.2. 일본의 물질관리 사례 분석

일본의 물질 관리는 기존의 재생(recycle, single R)에 국한되었으나, 최근에는 3R(저감, 재이용, 재생: reduce, reuse, recycle)을 중심으로 이뤄지고 있다. 일본의 3R도입은 폐기물 처리 장소가 극히 제한되어 있어서 예방조치가 필요해지고, 자원해외 의존도가 높으며, 일반 대중들의 환경문제 인식이 고조된 것에서 비롯되었다. 일본의 '건전한 물질 순환사회 구축을 위한 기본법'은 일본의 물질관리 기본 철학과 국가 목표를 충실히 담고 있다고 할 수 있다. 법률에 근거하여 기본계획을 수립하였고, 달성하고자 하는 목표량과 목표 연도를 제시하고 있는 것이다. 자원생산성은 직접 물질투입(DMI: Direct Material Input) 대비 GDP를 2000년 280,000/에서 2010년 390,000/으로 높이고, 자원의 순환이용률은 전체물질투입(TMI: Total Material Input) 대비 재사용·재활용 투입으로 2000년 10%에서 2010년 14%로 높이고자 하며, 폐기물의 최종처리량은 2000년 56백만 톤에서 2010년 28백만 톤으로 50%를 삭감하고자 한다(OECD, 2005; Kim and Kim, 2007). 또한 일본 환경성은 3R정책과 연결하여 물질흐름을 관리하고 있다.

일본의 물질 관리를 위한 주요 시행방안은 통합적으로 진행되고 있다. 각 구축방안들의 촉진을 위해 법규 및 목표량을 설정하고, 폐기물 절감 및 적정처리를 촉

진하고 있다. 이에 대응하여 산업계는 상품디자인 및 생산단계에서 3R고려항목을 증진하고, 녹색 구매 및 에코 라벨을 증진하며, 자발적인 실행계획을 준비·수행하고 있다. 그리고 이해 당사자의 협력과 Eco-town 프로그램을 운영하고, 디자인과 제조단계에서 3R을 이용한 정량목표를 수정하며, 제품분류별, 부문별 재활용 지침(현재 35 종류, 18분야 등)을 마련하여 물질흐름 분석 등을 실시하고 있다(일본 환경성, 2005).

일본은 물질흐름분석(Material flow analysis)에 기초하여 자원관리의 기본방향을 모색하고 있으며 물질흐름연구가 매우 활발히 진행되고 있다. 일본 국립환경연구원(NIES: National Institute for Environmental Studies, Japan)에 의한 순환자원을 포함한 물질 투입산출표 구조와 DB 구축, 산업 연관표와 폐기물 통계와의 결합에 의한 폐기물 발생구조의 분석, 물질흐름에 기초한 순환지표의 개발 등이 있다. 일본 국립재료연구소(NIMS: National Institute for Materials Science)는 철광석과 같은 개별 자원이 가지는 환경배낭(Ecological Rucksack)의 개념을 이용하여 전 생애주기 동안의 자원 사용량을 산출하여 소재의 지속가능성을 평가하고 있다. 그리고 가와사키 생태도시에서의 산업간 물질흐름 정보 표준화를 통한 GIS데이터베이스 구축과 철강산업, 석유화학산업의 MFA적용 등 부문별 적용, E-waste, 폐자동차, 음식물 쓰레기 등 폐기물에 대한 MFA, 철, 알루미늄, 구리 등 금속자원에 대한 SFA, 탄소, 황, 질소, 인, 중금속 등 SFA, LCA 및 IOA와 결합된 MFA연구와 경제산업성이 진행되고 있는 의류, 식품, 금속부품소재, 인쇄, 주물, 전기전자제품, 화학제품 등의 제품별 MFA연구가 있다. 그리고 Nitto Denko 등 기업 및 경제산업성은 물질흐름원가회계(MFCA: Material Flow Cost Accounts) 개발·보급 조사사업을 실시하고 있다. 아울러 일본 경제산업성은 친환경소재와 물질흐름 회계에 관한 연구를 국제적으로 연대하여 집중적으로 추진하고 있다. MFCA 보급 조사 활동 사업자 단체 공모 실시를 통해 MFCA기법의 각 지역 보급 세미나, 실무자 연수실시, 도입실증사업 등의 수행하고 있다.

4. 물질흐름분석을 이용한 지속가능한 자원관리 모형

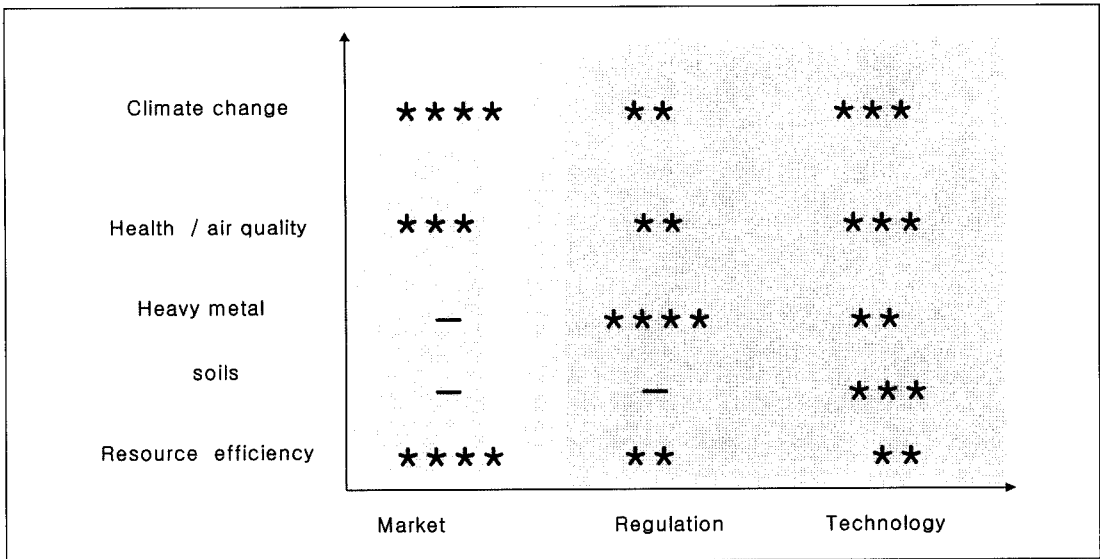
자원순환형 사회를 구축하기 위해 국내에서도 여러 노력들이 이루어지고는 있으나 주로 폐기물관리에 치우쳐 있다. 이에 최근에는 2차자원의 이용률을 높이고

산업의 자원생산성을 높이기 위한 지속가능한 자원관리 시스템 마련을 통해 자원순환형 사회로 가기위한 노력이 환경부와 산자부를 중심으로 일고 있다. 환경부에서는 그린 GDP 산출, 자원순환 기본계획 등의 사업이 추진되고 있으며, 산업자원부는 산업별 자원생산성 향상을 위한 MFA 프로젝트를 추진 중이다.

그러나 현재 국내 자원관리는 자원시장 변동에 따른 위험을 관리할 수 있는 체계적인 관리 시스템이 구축되지 않았고, 환경성과 경제적인 비용을 고려하는 지속가능성이 자원정책에 포함되지 않았으며, 자원흐름에 따라 형성되는 개별시장 및 그에 대한 총체적인 파악이 미흡하다고 할 수 있다. 우리 경제 특성을 감안할 때 개발된 많은 물질흐름지표 가운데서 통계 수집이 용이한 적절한 지표를 선택하고 이를 통한 목표설정 및 관리가 되어야만 효과적인 정책목표 달성이 가능할 것이다(Kim *et al.*, 2006). 그리고 영국의 대표적 물질흐름분석 사업인 'Mass balance UK'에 따르면 자원효율성 제고를 위한 방안으로 시장활성화, 기술개발, 규제강화 중 시장활성화를 통한 것이 가장 큰 우선순위를 가지고 있다(Fig. 3). 그러나 국내 재활용시장의 활성화가 이루어지지 못하고 있다. 국내 재활용시장은 부가가치를 생산하는 산업이 아닌 처리산업으로만 인식되고 있으며, 재활용시장의 관리가 이루어지고 있지 않아 업체 간 소득 불균형 및 관련통계의 부재가 재활용시장 활성화에 걸림돌로 작용하고 있다. 그리고 현재 EU 및 일본 등에 비해 국내 재활용기술과 재활용시장에 관한 연구와 자료가 절대적으로 부족하다고 할 수 있다.

바람직한 정책방안으로는 첫째, 천연자원과 재생자원을 연계할 수 있는 자원관리 시스템을 갖추어야 하며, 이를 위한 첫 번째 단계로서 국가 자원통계구축 및 확충이 검토되어야 할 것이다. 자원수급동향 및 통계관리는 수입 형태 변화나 산업구조 변화 등의 수급구조에 입각하여 생산부터 소비까지의 실태를 파악하기 위한 통계 조사의 확충을 검토하고, 조사 대상, 조사항목 등에 대해 확인하며, 수급 동향의 실태를 파악 가능한 통계 조사의 체제로 정비하여야 한다. 둘째, 자원순환 관련 기본법에 대한 논의에서 지속가능한자원관리(SRM) 기본원칙이 포함되어야 할 것이다. 그동안 관련 입법을 위한 노력이 2004년이래로 지속되어 왔는데, 자원순환형 경제사회형성 촉진기본법안 발의, 자원의 절약과 재활용촉진에 관한 법령 개정 추진, 자원순환 경제사회형성 기본법안 입법 예정 등이 있었다.

국내 지속가능한 자원관리 시스템을 위해 다음과 같



*source : Forum for the Future (2005)

Fig. 3. Environmental and societal demands and solutions.

이 개별자원별 관리시스템과 통합자원관리 시스템 모형을 제시코자한다.

개별자원별 관리시스템은 천연자원 공급분석, 재생 자원 공급분석, 국내의 자원가격 동향, 자원 예상수요 분석, 자원관련 기술개발 동향등을 통해 구축되어야 한다. 세부적으로 천연자원의 공급분석은 전 세계, 국가 및 지역별 매장량/ 예상 공급량을 추정하고 국내외 자원개발 기술 및 정책추진 현황을 파악하며, 재생자원 공급분석으로 국내외 폐기물 발생량 및 회수 가능성을 진단하고, 국내외 재활용 기술현황 및 재활용 비용을 추정하는 것이다. 국내외 자원가격 동향은 개도국 경제성장 변화추이 예상을 감안하여 사양산업과 신규산업구조 변화로 인한 자원수요 공급변화를 예상하고, 자원 예상수요 분석으로 새롭게 추진되는 전략산업에 필요한 요소자원관리 현황검토와 함께 새로운 용도로 사용되는 자원에 대한 관리 현황 검토가 이뤄져야 한다. 자원관련 기술개발 동향에서는 대체소재 개발을 위한 기술발전 동향 및 환경규제(RoHS, REACH 등)로 인한 자원시장 변화 예측이 이루어져야 한다.

바람직한 개별자원관리 시스템(안)은 국내의 수급동향 분석에서 시작되어 수요전망, 물질흐름분석, 가치사슬로 나누어진다. 수요전망은 장기수요, 대체성 반영, 기술동향이 반영되어야 하며, 물질흐름분석은 국내물질 흐름 경로의 확인으로 제품별 물질 함유량, 재활용 경로 및 재활용률이 해당된다. 가치사슬은 시장구조분석

으로서 물질흐름단계별 부가가치 및 경제적 가치를 파악하여야 한다. 개별자원별 관리는 수요전망으로부터 1차 수요량 예측이 이루어지고, 물질흐름분석을 통한 환경적 문제 해결, 재활용시장관리방안 및 시장의 구조적 문제점 도출, 필요 재활용기술 도출 등의 Hot-spot 도출 및 해결방안모색이 이루어지며, 시장구조분석에 의해 해당물질 및 자원의 경제성 파악이 가능해진다. 이러한 형태가 개별자원의 지속가능한 자원관리 시스템이라 할 수 있다(Fig. 4).

또한 개별자원의 지속가능한 자원관리 시스템에 의해 바람직하고 통합적인 지속가능한 자원관리 모형을 구축하여야 한다. 이를 위해서는 개별자원별 관리시스템과 국가단위, 권역단위의 물질흐름분석을 유기적으로 연계하고, 국가차원의 법제화 뒷받침이 이루어져야 한다. 그리고 통합자원관리는 경제성, 환경성, 기술성을 반영하여 실시되어야 한다. 천연자원 생산 및 소비량 변화 추이, 국내산업 구조 변화 및 주요 자원유통 구조를 파악하고, 또한 폐기물 및 재생 자원기술, 가격 및 수급 변화와 국내의 환경규제에 따른 제품시장 변화, 자원흐름에 따른 관련기관 및 경제 주체를 파악하여야 한다. 그리고 국가적 차원에서 우선 관리해야 하는 대상 물질을 선정하고 이에 대해서는 시장구조, 핵심이해관계자(key player), 관련 정책 및 제도 파악, 자원단위 환경성, 경제성 및 사회성을 포함한 지속가능성 평가가 수반되어야 한다. 한편 국가의 자원관리의 목표를 설

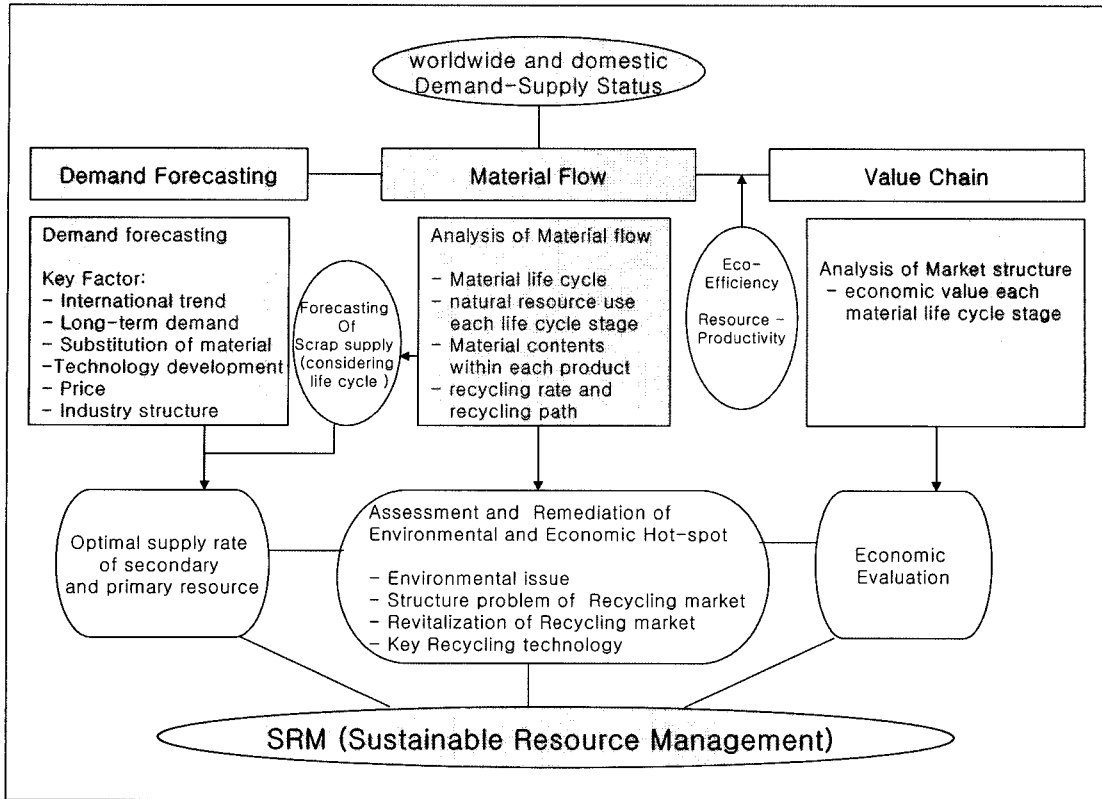


Fig. 4. Sustainable resources management system by materials.

정하고 수행된 결과를 모니터링하기 위한 체계가 갖추어져야 하며, 그를 나타내는 지표는 국가적 특성을 반영하여야 한다. 이를 위해 지금까지 전 세계적으로도 같은 지표가 사용되기보다는 국가별로 독자적인 지표를 개발하여 사용하고 있다(Fig. 5).

지역 내 국가 간 물질흐름 등을 파악하고 효과적인 제도가 정착하고 지속가능한 자원관리가 이루어지려면 물질의 흐름과 자원의 이용을 측정할 수 있는 지표가 필요하다. 이러한 지표개발 및 지속가능한 자원관리 모형을 구축하는 주요 방법론 중 하나가 물질흐름 분석(MFA)이다. 이미 유럽 및 일본에서는 그 연구가 활발하고 그 결과를 정책목표 수립 및 제도에 적극적으로 반영하여 실질적으로 활용 하고 있다(Fig. 6). 그러나 국내 물질흐름분석은 이론적인 기반과 방법론에 대한 검토가 선행되지 않은 채, 단순히 분석기법만을 응용하고 있어 결과의 정확성 및 실효성이 낮은 편이다. 그리고 관련연구의 성과를 축적이 초보단계이며, 유럽 연합이나 일본의 선행연구에 대한 연구결과의 정리가 부족하다. 또한 국내외 연구자들의 정보공유를 위한 네

트워크가 구축되지 못하여 연구결과가 효율적으로 확산되지 못하고 있고 국내 물질흐름에 대한 통계자료의 구축이 불완전하여 물질흐름분석의 확대 및 적용에 한계가 있다. 좀 더 나은 국내 자원관리를 위해서는 관련통계자료 구축이 시급한 현실이다.

지속가능한 자원관리를 위한 물질흐름분석 연구 방향을 다음과 같이 제시하고자 한다. 물질흐름분석의 핵심은 단순히 통계구축에 있는 것이 아니라 그 통계자료의 활용성에 있다. 따라서 분석대상의 특징에 따라 그리고 분석의 목적에 따라 분석방법 및 범주가 달라져야 한다. 그리고 모든 물질에 대해서 물질흐름분석을 시행하여 인프라 데이터를 구축하면 좋겠지만 한정된 시간과 비용의 제약으로 인해 물질흐름분석의 대상에 대한 우선순위를 결정하여야 할 것이다. 물질별 분석이나, 화학제품 분석이나, 산업별 분석이나, 지역별 분석이나 그리고 더 세부적으로도 철을 먼저 분석할 것인지 구리를 먼저 분석할 것인지를 국내 상황과 국제적 분위기를 고려하여 우선순위를 결정하여야 할 것이다. 그리고 단순히 물질에 대한 흐름을 추적하는 것

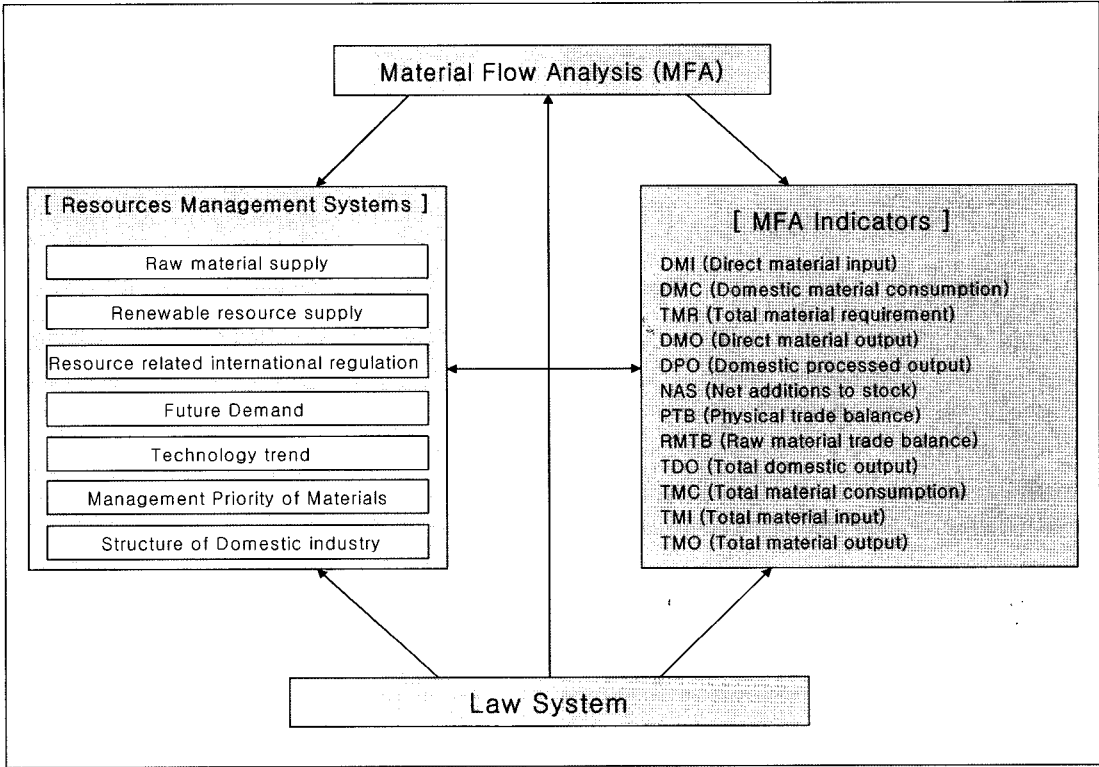


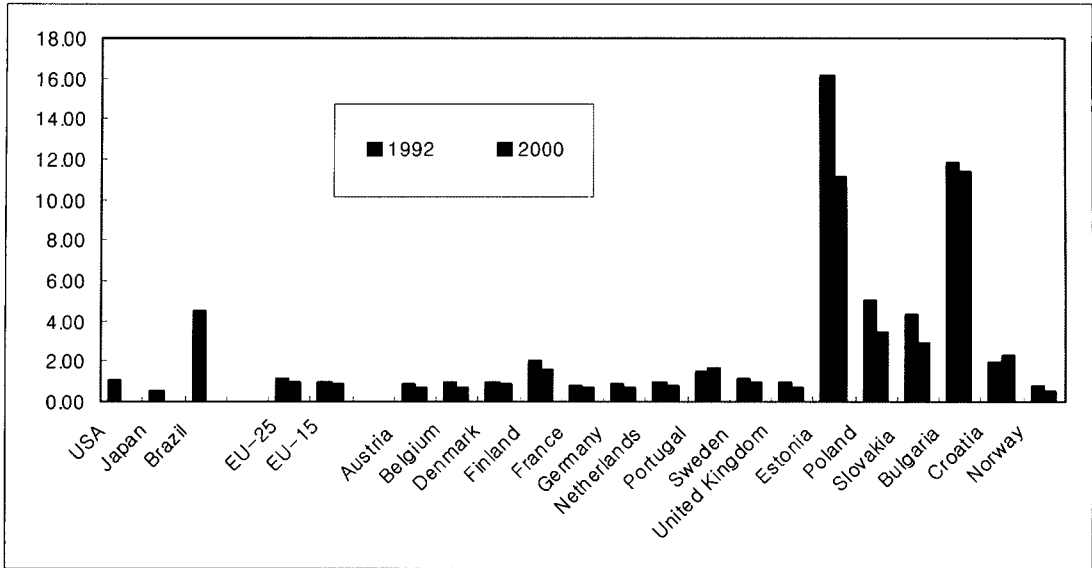
Fig. 5. National Sustainable Resources Management Model.

에서 벗어나 그 물질이 미치는 영향 등을 경제활동과 더불어 고용과 같은 사회적 차원에서도 접근하는 것이 동시에 진행되어야 할 것이다. 현재 자원관리 시스템은 단독요인보다는 복합적 요인으로 결정되고 활성화될 수 있기 때문이다. 그리고 유럽의 지속가능한 자원관리를 위한 공동결의에서 보듯이 정확하게 현상태를 진단하고, 정책을 세우고 연구개발을 진행하는 것에 그치지 않고, 연구개발이 정책과 연계되어 사회적으로 얼마나 효과를 발휘하고 있는지를 지속적으로 점검해 나가야 할 것이다. 또한 이러한 물질흐름분석에 기초한 지속가능한 자원관리 모형 구축을 완성하기 위해서는 다음과 같은 각계각층의 연계가 이루어져야 한다. 부문 간 자원의 흐름의 상세한 이해를 제공하기 위해 산업정보·광물·재생자원에 이르는 상세한 정보를 통합해야 하며, 각각의 방출원과 해당 경제 데이터와 통합되도록 환경부와 산업자원부가 협력해야 한다. 그리고 마지막으로 정부와 산업의 이해관계자 그리고 NGO는 국가 지속가능한 자원관리시스템 프로그램을 검토하여 잠재적 사용자의 요구를 충족시키는 데이터베이스인지를 확인하고 발달시켜야 할 것이다.

5. 결론 및 정책대안

유럽연합은 우리나라 전체 무역거래량의 15%를 차지하고 있으므로, 유럽연합이 요구하는 무역제품의 환경규정을 맞추기 위해서는 산업구조나 제조과정의 개선 등 막대한 비용 및 시간이 소요될 것이다. 유럽연합에서 제시하는 환경규제의 범위 및 영역이 광범위하여 이에 해당되지 않은 제품이 없을 정도로 국내 산업에 미치는 파급효과는 막대하다. 지금 단계에서 국내 대기업은 이에 대응할 수 있는 구조를 가지고 있으나, 중소기업은 아직 이에 대한 적극적인 대비가 부족하다고 할 수 있다. 따라서 중소기업을 지원하기 위한 체제의 마련도 필요하다고 본다.

중국, 인도 등의 BRICS국가를 중심으로, 고도 경제 성장에 따른 자원 수급 증가로 인해 세계는 지금 자원 전쟁 중이며 자원의 해외 의존도가 높은 우리나라는 이러한 변화에 매우 취약한 원자재 대의 의존 경제구조를 갖고 있다. 따라서 유럽연합의 환경규제적인 강력한 자원관리 무역규제에 사전대비전략 마련이 시급하며 효율적인 국내 자원관리 고도화 및 시스템 보완을 위해



*sources: DMC database of Wuppertal Institute after several sources; GDP after Eurostat New Cronos database.

*Note: USA for 1991

*Unit: kg/euro

Fig. 6. Resource efficiency indicator-Material intensity of the economy (DMC/GDP at constant prices, 1995=100)

실태분석 등이 체계적으로 이뤄져야 한다.

금속자원 3R에서는 금속광물 확보를 위해서는 불순물 제거기술, 분리회수기술, 대체기술, 원소합유소재 리사이클 기술, 정책개발 등이 중요하다. 3R 기술의 연구개발은 회유자원 대체기술에 의해 자원의 유효이용과 폐기물의 삭감을 실현하는 것으로서 자원순환형 생산, 소비 시스템의 설계, 평가 및 지원기술, 유용성과 유해성으로 본 순환자원의 관리기술, 리사이클링 및 폐기물 적정처리 처분기술이 있다. 불순물 제거기술은 철강, 알루미늄, 초미세립강 등에서 리사이클링 등을 위해 필요한 기술이며, 분리회수기술은 동, 아연, 납, 카드뮴 등의 회수 및 촉매 등에서의 백금족 회수, 또는 폐차잔재물(ASR: Automotive Shredder Residue)등으로부터 저품위 금속의 회수, 디스플레이 등으로부터 인듐주석산화물(ITO)분리, 폐촉매에서 바나듐(V)등 회수에 필요한 기술이다. 대체기술은 연료전지 등의 전해질막 및 촉매로 사용되는 백금계 금속의 대체기술, 인듐주석산화물(ITO)타겟에 사용되는 인듐(In)대체기술, 감광에 사용되는 은(Ag)대체기술 개발이 있다. 원소합유소재 리사이클 기술에는 자동차 부품에 포함된 첨가제 회유금속의 재이용기술, 휴대전화 등에 사용되는 마그네슘(Mg)리사이클 기술, 건축 폐기물 중 유리섬유강화플라스틱(FR.P)에 포함된 붕소의 리사이클 기술이 해

당한다. 정책개발은 금속광물 및 물질 데이터 구축으로서 향후 수요가 전망되는 희토류 등의 통계 데이터 수집 등이 된다.

국내의 환경규제의 중요성 및 시급성을 고려하여 철이나 구리 등의 주요금속과 회유금속을 중심으로 한 금속 물질흐름 통계 구축 및 국내 지속가능성 평가가 필요하다. 이러한 지속가능한 평가는 자원생산성과 물질효율성 도출을 통해 가능할 것이다.

그리고 지속가능한 자원관리 모형은 환경적 요인뿐만 아니라 경제적 요인도 함께 분석하여야 모형의 현실성 부가하여야 한다. 따라서 지속가능한 자원관리모형은 물질흐름분석과 환경영향분석과 더불어서 재활용에 따른 비용편익 분석, 재활용 업체별 수익구조 분석 등과 민감도 분석을 통해 재생자원의 가격, 재활용 비용, 재활용시스템(관리비, 회수비용)등 각 변화요인들이 자원순환의 경제성에 미치는 정도를 분석하여 효과적인 자원순환 핵심요소를 파악하여야 한다. 그리고 물질흐름분석과 경제성 분석을 바탕으로 자원순환에 장애가 되는 요소를 파악하여 이를 해결할 수 있는 관리모형시나리오 구성하고 이에 따라 물질흐름변화와 환경영향변화, 경제성변화 등을 분석하여 효율적이고 효과적인 최적의 방안을 도출해야 한다.

사 사

이 논문은 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. R01-2005-000-10894-0).

참고문헌

Gerhard Angerer (2007) 'Sustainable non Energetic Use of Mineral Resources: An Emerging Challenge', Conference of Sustainable Neighbourhood ? from Lisbon to Leipzig through Research, 8-10 May 2007, Leipzig Umwelttechnologie-Atlas für Deutschland (2007) 'Green Tech made in Germany'

Kim, S.Y. and Kim, Y.J. (2007) 'Review of the mineral resources and material flow analysis related activities in Japan', Jour. Korean Soc. Geosystem Engineering, v.44, p.71-81.

Kim, S.Y. (2006) 'Review of material flow analysis related activities of developed countries for the improvement of resources efficiency and sustainability', Jour. Korean Economic and Environmental Geology, v.39, p.615-626.

Kim, Y.J., Kim, S.Y. and Kim, I.S. (2006) 'Status of material flow analysis as a research method for sustainable resource management', Jour. Korean Soc. Geosystem Engineering, v.43, p.168-174.

Ministry of the Environment of Japan (2005) 'Outline and the first progress report of plan', Fundamental plan for establishing a sound material-cycle society, p. 11. (www.env.jp/en)

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (2005) 'Material flows and related Indicators - Inventory of Country Activities', Working Group on Environmental Information and Outlooks, Environment Directorate - Environment Policy Committee, ENV/EPOC/SE(2004)3/Final/ADD, p. 79.

Forum for the Future (2005) 'The mass balance movement: the definitive reference for resource flows within the UK environmental economy'

European Environment Agency (2005) 'The Ecological Footprint: A resource accounting framework for measuring human demand on the biosphere'

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (2002) 'Indicators to measure decoupling of environmental pressure from economic growth' ENV/SG/SD(2002)1/Final.

2008년 1월 21일 원고접수, 2008년 3월 18일 게재승인.