

국가수준의 물질흐름분석 방법론 개발 및 적용

김익·김만영

친환경상품진흥원

Development and application of material flow analysis in a national scale

Ik Kim·Mann-Young Kim

Korea Eco-Products Institute

ABSTRACT

Material flow analysis(MFA) is one of representative methods that can evaluate the sustainability of country, company and product in the environmental aspect. This study developed the MFA method in a national scale. It proposed the detailed direct and/or indirect material flow indicators per each life cycle stage in order to support the effective management of material in a national level. Also a case study on steel was conducted to analyze the feasibility of the proposed method. As a results of MFA on steel, the life cycle material flow chart and the indicator results on both resource productivity and domestic material input per capita from 1992 to 2004 were presented.

Key word : Material flow analysis, life cycle, national scale, material management

요약문

물질흐름분석은 국가 또는 기업, 제품의 지속가능성을 평가할 수 있는 대표적인 방법론중의 하나이다. 본 연구에서는 국가수준의 물질흐름분석 방법론을 개발하였다. 본 연구에서는 국가차원에서 효율적인 자원관리를 지원하기 위하여 전과정 각 단계에서 세부 직·간접 물질흐름지표를 제안하였다. 또한 제안한 방법론에 대한 실행가능성 분석을 위하여 철강에 대한 사례연구를 수행하였다. 그 결과, 철강의 전과정에 대한 물질흐름도와 1992년부터 2004년까지의 자원생산성 및 1인당 물질투입량에 대한 지표결과가 제시되었다.

주제어 : 물질흐름분석, 전과정, 철강, 국가수준, 자원관리

1. 서론

과학기술의 발전속에서 환경기술도 눈부신 발전을 가져왔지만 지구 환경의 질은 날로 악화되어 왔다. H.Brezet et. al.(1997)은 지구환경이 갈

수록 악화되는 주원인을 도시화와 산업화에 따른 대량생산과 대량소비라고 지적하였다 [1]. 1992년 브라질 리우에서 개최된 세계환경개발 회의(UNCED)에서는 지구환경개선을 위한 행

동강령으로 의제 21(Agenda 21)을 채택하고 대량생산과 대량소비의 패턴을 지속가능한 생산·소비패턴으로 전환할 것을 촉구하였다. 지속가능한 생산·소비를 위해서는 녹색구매에 따른 소비패턴의 변화도 중요하지만 환경계(ecosphere)와 경제계(technosphere) 사이의 물질과 에너지의 흐름을 체계적이고 효율적으로 분석·관리할 수 있는 지속가능자원관리(sustainable material management, SMM) 체계를 구축하는 것도 무엇보다 중요하다.

1971년 노벨 경제학상을 수상한 우크라이나 출신의 사이먼 쿠즈네츠(Simon Smith Kuznets)는 경제개발 초기에는 경제가 성장할수록 환경오염이 커지지만 성장소득이 어느 수준을 넘어서면 성장할수록 오히려 환경오염이 줄어드는 U자 곡선을 나타낸다는 환경쿠즈네츠 이론(Environmental Kuznets Theory)을 발표한 바 있다. 이 이론은 고도로 발전된 산업사회일수록 자원관리의 효율성이 증대되어 일회성 자원흐름이 아닌 순환적 자원흐름, 즉 순환형 사회를 형성한다는 것을 의미한다.

그럼 우리나라는 지금 어느 단계와 와 있는가? 이를 분석하기 위해서는 국가수준의 물질흐름분석(material flow analysis, MFA)을 수행하는 것이 필요하다. Paul H. Brunner et. al.(2004)은 그의 저서인 'Practical Handbook of Material Flow Analysis'에서 물질흐름분석이란 정해진 시간과 공간내의 시스템에서 물질흐름과 물질 재고량(stocks)을 체계적으로 평가하는 방법이라고 정의하였다.

본 연구에서는 국가수준에서 효율적인 자원관리를 위해 필요한 물질흐름분석 방법론을 제안하고자 한다. 이 방법은 단지 환경계와 기술계 사이에서 물질과 에너지의 흐름만을 보는 것이 아니라 기술계 내에서의 물질과 에너지의 전과정(life cycle)을 고려한 세부흐름을 계산

할 수 있는 방법론을 제안함으로써 자원관리의 효율성을 높일 수 있는 방안을 제시하고자 한다. 또한, 제안한 방법론에 대한 실행가능성을 분석하기 위하여 환경개선 효과가 크고 경제성도 우수한 철강을 소재로 사례연구를 수행하였다.

2. 국가수준 물질흐름분석 방법론 제안

2.1 특징

본 연구는 국가차원에서 효율적이고 체계적인 자원관리를 위한 방법론을 개발하는데 그 목적이 있다. 이를 위하여 국내로 수입되고 국내에서 폐기되는 주요 자원들의 흐름에 더하여 주요 자원의 전과정 단계를 규명하고 각 단계별로 세부적인 직접(direct) 또는 간접(indirect) 물질흐름 지표와 지표결과를 산출하는데 필요한 계산식을 제시하였다.

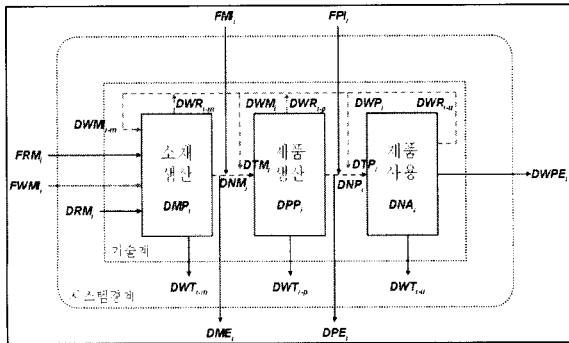
2.2 물질흐름도 작성

(1) 시스템 경계 설정

국가수준의 물질흐름분석을 위하여 시스템경계(system boundary)는 먼저 국내와 국외의 경계([그림 1]에서 둥근점선 사각형)를 설정하였고, 다음으로 환경계와 기술계의 경계([그림 1]에서 점선 직사각형)를 추가적으로 설정하였다. 국내·외의 경계는 해외에서 수입하거나 해외로 수출하는 물질흐름을 파악함으로써 국내의 자원생산성을 평가하고 관리하기 위함이며, 환경계와 기술계의 경계는 경제활동을 통하여 국내 환경에서 채취하거나 국내 환경으로 버려지는 물질흐름을 파악하고 기술계에서의 물질흐름을 파악하기 위함이다. [그림 1]에서 시스템경계와 기술계 사이 영역은 국내의 환경을 의미한다.

(2) 물질흐름 정의

[그림 1]과 같이 물질흐름은 직접흐름(direct flow)과 간접흐름인 중간흐름(intermediate flow)으로 구분하였다. 직접흐름은 환경계와 기술계 사이의 흐름이며 실선으로 표시하였다. 간접흐름은 기술계 내부의 흐름으로 점선으로 표시하였다. 이들은 본 연구에서 독자적으로 제시한 세부 물질흐름지표들로, 직접흐름에 대한 지표결과를 산출하는데 효율적으로 활용된다. [표 1]은 전과정 각 단계별 세부 직·간접 물질흐름지표를 열거한 것이다.



[그림 1] 전과정 단계별 직·간접 물질흐름도

2.3 세부 직·간접 물질흐름 지표 계산

(1) 국내 재생원료 투입량 (DWMI_{i-m})

국내 재생원료 투입량(domestic waste-material input)은 중간흐름으로 식(1)과 같이 전과정 각 단계에서 발생한 재활용 폐기물량에서 제품생산과 제품 사용단계에서 직접 재사용되는 양을 제외한 흐름이다. 국내 재생원료 투입량이 많을수록 신재 투입량이 적어지기 때문에 이는 자원순환형 사회의 평가지표인 자원순환율을 산출하는데 활용될 수 있다. 여기서 i는 해당 물질을 의미하며, m은 소재 생산단계, p는 제품 생산단계, u는 제품 사용단계를 의미한다.

$$DWMI_{i-m} = (DWR_{-m} + DWR_{-p} + DWR_{-u}) - (DWM_{-p} + DWP_i) \quad (1)$$

[표 1] 전과정단계별 직·간접 물질흐름 지표

구분		물질흐름 지표	
소재 생산	직접	투입	-국내 원료 채취량(DRM _i) -해외 원료 수입량(FRMI _i) -해외 재생원료 수입량(FWMI _i) -해외 소재 수입량(FMI _i)
		산출	-국내 소재 생산량(DMP _i) -국내 소재 수출량(DME _i) -국내 재생소재 수출량(DWME _i) -국내 폐기물 처리량(DWT _{i-m})
	간접	투입	-국내 재생원료 투입량(DWMI _{i-m})
		산출	-국내 폐기물 ¹⁾ 재활용량(DWR _{i-m})
제품 생산	직접	투입	-해외 제품 수입량(FPI _{ij})
		산출	-국내 제품 수출량(DPE _{ij}) -국내 폐기물 처리량(DWT _{i-p})
	간접	투입	-국내 소재 순 유통량(DNM _{ij}) -국내 소재 총 유통량(DTM _{ij}) -국내 재생소재 투입량(DWM _{ij-p})
		산출	-국내 제품 생산량(DPP _{ij}) -국내 폐기물 재활용량(DWR _{ij-p})
제품 사용	직접	투입	
		산출	-국내 중고 제품 수출량(DWPE _{ij}) -국내 폐기물 처리량(DWT _{ij-u})
	간접	투입	-국내 제품 순 유통량(DNP _{ij}) -국내 제품 총 유통량(DTP _{ij}) -국내 소재 순 축적량(DNA _i) -국내 중고제품 재사용량(DWP _{ij})
		산출	-국내 폐기물 발생량(DWG _{ij-u}) -국내 폐기물 재활용량(DWR _{ij-u})

(2) 국내 소재 생산량 (DMP_i)

국내 소재 생산량(domestic material production)은 식(2)와 같이 국내 원료 채취량(DRM_i)과 해외 원료 수입량(FRMI_i), 해외 재생원료 수입량(FWMI_i), 국내 재생원료 투입량(DWMI_{i-m})에서 국내 폐기물 처리량(DWT_{i-m})과 국내 폐기물 재활용량(DWR_{i-m})을 제외하여 얻어진다. 본 지표는 해당 소재에 대한 국내의 평균 생산수율을 계산하는데 활용될 수 있다.

$$DMP_i = (DWMI_{i-m} + DRM_i + FRMI_i + FWMI_i) - (DWR_{i-m} + DWT_{i-m}) \quad (2)$$

1) 여기서 폐기물은 기체 상태와 액체상태, 고체상태의 폐기물을 포함함. 즉, 일반적으로 기체상태의 폐기물은 대기배출물이라 칭하고, 액체 상태의 폐기물은 수계 배출물이라 부름.

(3) 국내 소재 순 유통량 (DNM_{ij})

국내 소재 순 유통량(domestic net material distribution)은 소재 생산단계를 통하여 국내에 실제 유통되는 소재량으로, 국내 소재 생산량(DMP_i)과 해외 소재 수입량(FMI_i)의 합에서 국내 소재 수출량(DME_i)을 제외하여 얻어진다. 식(3)은 산업군별 국내 소재 순 유통량을 나타낸 것으로 이를 계산하기 위해서는 국내 소재 순 유통량에 산업군별 분배계수(X_j)을 곱하면 된다. 여기서 산업군별 분배계수는 해당 소재가 서로 산업군에서 어느 정도 사용되는지를 나타내는 계수로 일반적으로 한국은행의 투입산출표를 활용한다. j는 산업군을 의미한다.

$$DNM_{ij} = X_j \times (DMP_i + FMI_i - DME_i) \quad (3)$$

(4) 국내 소재 총 유통량 (DTM_{ij})

국내 소재 총 유통량(domestic total material distribution)이란 소재 생산단계의 최종 흐름으로 제품생산단계와 가교역할을 한다. 이는 국내 소재 순 유통량(DNM_{ij})과 국내 재생소재 투입량(DWM_{ij-p})을 합하고, 국내 재생소재 수출량(DWME_i)을 제외하여 얻어진다. 국내 소재 순유통량과 총 유통량을 구분한 이유는 자원순환의 측면에서 재생소재 흐름을 구체적으로 파악하기 위함이다.

$$DTM_{ij} = X_j \times (DNM_i + DWM_{i-p} - DWME_i) \quad (4)$$

(5) 국내 제품 생산량 (DPP_{ij})

국내 제품 생산량(domestic product production)은 국내 소재 총 유통량(DTM_{ij})에서 국내 폐기물 재활용량(DWR_{ij-p})과 국내 폐기물 처리량(DWT_{ij-p})을 제외하면 얻어진다.

$$DPP_{ij} = DTM_{ij} - (DWR_{ij-p} + DWT_{ij-p}) \quad (5)$$

(6) 국내 제품 순 유통량 (DNP_{ij})

국내 제품 순 유통량(domestic net product distribution)이란 국내 제품 총 유통량을 산출하는 중간과정의 흐름으로 국내 제품 생산량(DPP_{ij})에 해외 제품 수입량(FPI_{ij})을 더하고 국내 제품 수출량(DPE_{ij})을 제외하면 얻어진다.

$$DNP_{ij} = (DPP_{ij} + FPI_{ij}) - DPE_{ij} \quad (6)$$

(7) 국내 제품 총 유통량 (DTP_{ij})

국내 제품 총 유통량(domestic total product production)은 국내 제품 순 유통량(DNP_{ij})에 국내 중고제품 투입량(DWPE_{ij})을 더하면 얻어진다. 이는 제품의 재사용을 구체적으로 파악하기 위한 흐름이며, 해당 소재에 대한 국내 자원 축적량을 계산하는데 직접 활용된다.

$$DTP_{ij} = (DNP_{ij} + DWPE_{ij}) \quad (7)$$

(8) 국내 소재 순 축적량 (DNA_{ij})

국내 소재 순 축적량(domestic net material accumulation)은 국내 제품 총 유통량(DTP_{ij})에서 국내 폐기물 재활용량(DWR_{ij-u})과 국내 폐기물 처리량(DWT_{ij-u}), 국내 중고제품 수출량(DWPE_{ij})을 제외하면 얻어진다. 이 지표는 미래에 가용한 자원이라는 측면에서 지속가능한 자원관리를 위해 매우 중요한 흐름이다.

$$DNA_{ij} = DTP_{ij} - (DWR_{ij-u} + DWPE_{ij} + DWT_{ij-u}) \quad (8)$$

3. 사례연구

철강은 구리, 플라스틱 등과 더불어 가장 범용적으로 사용되는 소재로써 다른 소재들에 비하여 물질흐름의 전과정이 명확하다는 특징이 있다. 본 연구에서는 철강의 전과정을 고려한 세부 물질흐름도를 작성하였으며, 이를 토대로

연도별 자원생산성(resource productivity)과 일인당 물질투입(domestic material input per capita) 추이를 분석하였다.

3.1 연구범위 설정

철강에 대한 물질흐름분석을 위하여 지역적, 시간적 시스템경계를 설정하였다. 지역적경계는 국내로 한정하였으며, 시간적경계는 2003년으로 설정하였다. 한편 철강의 전과정 흐름은 강재 생산, 철강제품 생산, 철강제품 사용으로 구분하였다. 또한, 전과정 단계별 세부 직·간접 물질흐름은 [표 1]을 토대로 정의하였다.

3.2 직·간접 물질흐름 데이터 수집 및 계산

전과정 단계별 세부 직·간접 물질흐름을 산출하기 위하여 한국철강협회로부터 연도별 철광석 수입량 및 강재 수출입량, 연도별 철강제품 수출입 동향, 연도별 철강축적량 동향에 대한 데이터를 수집하였으며, 한국철스크랩공업협회로부터 연도별 고철 발생량 데이터를 수집하였다. 본 연구에서는 수집한 기초 데이터를 활용하여 국내 철강 소재 유통량 및 철강 제품 유통량, 철강 순 축적량, 고철 매립량 등의 세부 물질흐름을 계산하였다.

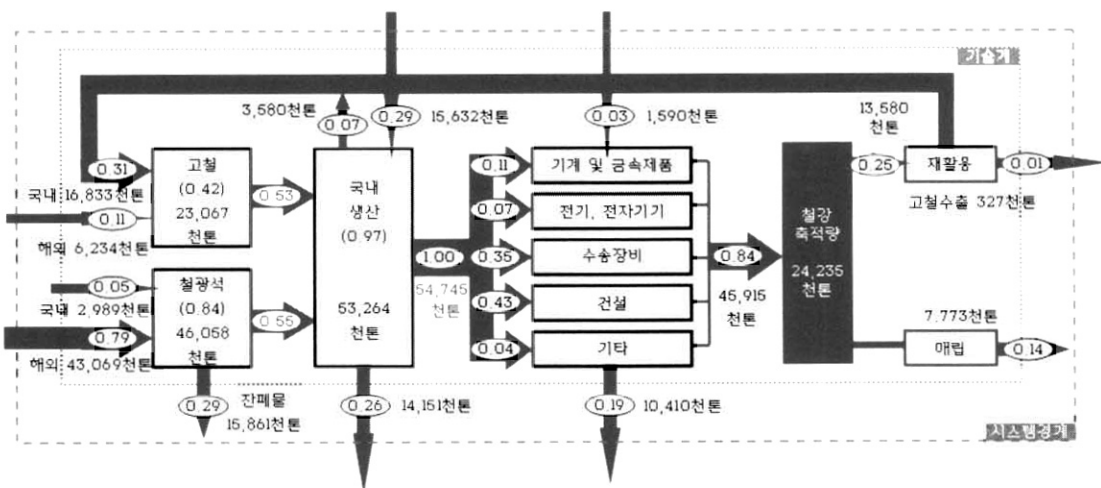
[그림 2]는 수집한 자료를 토대로 [표1]에 제시된 세부 물질흐름이 규명된 2003년도 전과정 철강 물질흐름도이다. 이는 국내 철강소재 총 유통량을 “1”로 정의하고 나머지 물질흐름을 이를 기준으로 환산한 것이다. 이에 따르면, 철광석의 수입비중이 국내 철강 총 유통량의 79%를 차지하는 것을 알 수 있었으며, 고철의 매립비율이 14%를 차지하는 것을 파악할 수 있었다. 또한, 전과정 각 단계의 재활용 흐름을 포함한 국내 고철 재활용율이 약 31%라는 것도 파악할 수 있었다.

3.3 물질흐름 지수 산출

이상에서 산출한 세부 물질흐름 분석결과를 토대로 국가 차원의 관리대상 지표인 자원생산성 지표와 일인당 물질투입 지표결과를 산출하였다. 한편, 이들 물질흐름 지표결과는 2003년도 결과를 근거로 1992년부터 2004년까지의 지표결과도 함께 산출하여 연도별 추이를 분석하였다.

(1) 자원생산성

자원생산성 지표는 경제계에 투입된 자원 1단위가 어느 정도의 경제적 가치를 창출하는지를 보여주는 지표로 식(9)와 같이 국민소득을 물질투입량(DMI)으로 나눈 것이다. 이는 환

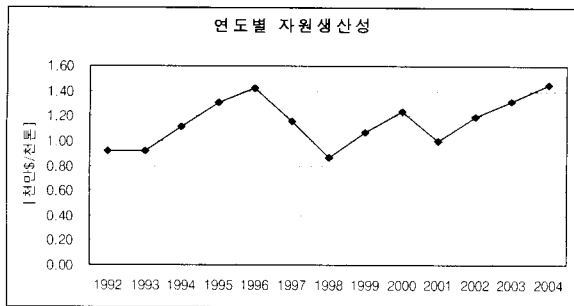


[그림 2] 철강의 전과정단계별 물질흐름량

경-경제적 측면(eco-effectiveness aspect)에서 지속가능성을 평가하는 지표로 활용될 수 있다. 여기서 국민소득이란 국내총생산(gross domestic product, GDP)을 의미한다.

[그림 3]은 연도별 자원생산성 추이를 나타낸 것이다. 우리나라의 경우 명확한 추이를 나타내지는 않지만 대체로 1998년과 2001년을 제외하고는 전반적으로 자원생산성이 향상되는 것을 알 수 있다. 이는 철강을 소재로 한 제품의 수익성이 좋아지고 있음을 보여준다.

$$RPI_i = (GDP / DMI_i) \quad (9)$$



[그림 3] 연도별 자원생산성 추이

(2) 1인당 물질투입

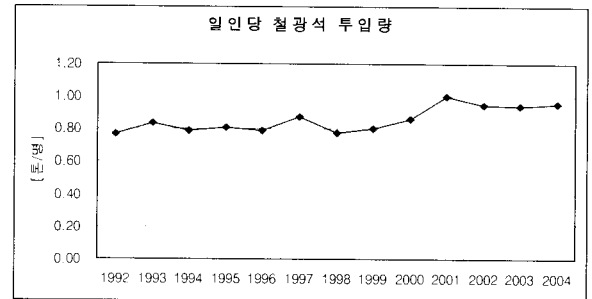
1인당 물질투입 지표는 사회-환경적 측면(socio-environment aspect)의 지속가능성 평가를 위한 지표로 식(10)과 같이 총 물질투입을 국민 총 인구수로 나눈 것이다.

$$MIC_i = (DMI_i / \text{person}) \quad (10)$$

[그림 4]는 연도별 1인당 철광석 투입량을 나타낸 것이다. 이에 따르면, 2000년도 이전까지는 1인당 평균 0.8톤의 철광석을 소비하였으나, 2001년도 이후에는 평균 0.95톤 정도를 소비하는 것으로 분석되었다. 즉, 철광석의 사용 측면에서 볼 때, 우리나라의 지속가능성 수준이 악화되고 있음을 알 수 있다.

여기서, 1인당 자원 투입량 지표결과는 자원

생산성 지표결과와 상이한 결과를 보이는데 이는 국가차원에서 제품 단위당 생산성은 좋아지고 있지만, 대량생산과 대량소비가 심화되어 상대적으로 1인당 자원 투입량은 증가되는 것으로 풀이된다.



[그림 4] 연도별 일인당 철광석 투입량 추이

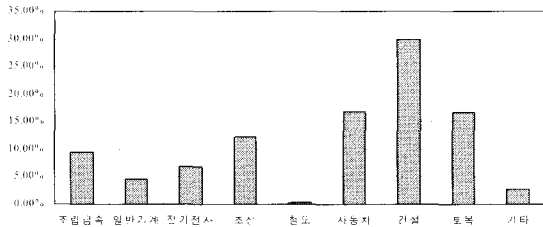
3.4 시나리오 분석

[그림 2]에서 보는 바와 같이 고철의 매립 비율은 강제 유통량의 14%를 차지하고 있다. 고철의 경우에 다른 소재들에 비하여 재활용이 용이하기 때문에 고철의 매립비율을 낮춤에 따라 1인당의 물질투입 지수의 변화를 보고자 한다.

[그림 5]는 1993년부터 2004년까지 주요 산업군별 평균 강제 사용률을 나타낸 것이다. 이에 따르면 건설분야가 평균 30% 정도로 가장 큰 비중으로 차지하는 것으로 조사되었다. 환경부에서 발표한 2003년도 전국 폐기물 발생 및 처리현황에 대한 보고서에 따르면, 건설 폐기물에서 금속류가 차지하는 비율이 0.6%이며, 금속류의 재활용, 매립의 비율을 보면 각각 87.7%, 12.3%를 차지한다고 발표하였다. 즉, 이는 강제 유통량 대비 3.8%를 차지한다는 것을 의미한다. 만일, 매립되는 고철이 100% 재활용한다고 가정하면, 연평균 2684천톤의 철광석의 수입대체 또는 2080천톤의 철 스크랩 수입대체 효과가 있는 것으로 분석된다.

또한 2003년도 11월 미국산 철 스크랩 수

입가적인 217\$/톤을 적용할 경우에 4억5136만 달러의 수입대체 효과가 있으며, 2003년도에 한국무역협회에서 발표한 2003년도 우리나라 총 수입액인 1788억 달러의 0.25%를 차지하는 것으로 분석되었다.



[그림 5] 산업군별 평균 강재 사용률

4. 결론

본 연구에서는 국가 차원에서 주요 자원에 대한 지속가능한 물질관리에 필요한 방법론을 제시하고자 하였다. 여기서는 물질의 전과정 각 단계별로 세부 직·간접 물질흐름을 정의하였고, 각각에 대한 계산식을 제시하였다.

또한, 제안한 방법론에 대한 실행가능성 분석을 위한 대상물질로 철강을 선택하고 이에 대한 물질흐름분석을 수행하였다. 그 결과 2003년도에 국내 철강 유통량 대비 약 79%의 철광석을 해외에서 수입하였으며, 약 31%가 국내에서 재활용되고 있는 것을 알 수 있었다. 또한 국내에서 연간 매립되는 고철이 약 14%이라는 점도 파악할 수 있었다. 뿐만 아니라 연도별 국내 자원생산성과 국민 1인당 자원소비량을 분석할 결과, 자원생산성은 전반적으로 향상되는 경향을 보이지만, 국민 1인당 자원소비의 측면에서는 지속가능성에 역행하고 있는 것으로 분석되었다.

5. 참고문헌

1. Paul H. Brunner and Helmut Rechberger,

Practical Handbook of MATERIAL FLOW ANALYSIS, LEWIS PUBLISHERS, 2004

2. 철강보(2005년 9월호) - 2004년도 철강 축적량, 한국철강협회(www.kosa.or.kr)
3. 한국철스크랩공업협회(www.kssia.org)
4. 2003년도 전국 폐기물 발생 및 처리현황, 환경부