HWAHAK KONGHAK Vol. 36, No. 5, October, 1998, pp. 732-742
(Journal of the Korean Institute of Chemical Engineers)

환경유해성을 고려한 정량적 환경영향평가방법

차순우 · 이종협†

청정기술연구센터(CTC)/서울대학교 공과대학 응용화학부
(1998년 3월 31일 접수, 1998년 8월 31일 채택)

Evaluation of Environmental Impact with Environmental Burden Factor

Soonwoo Chah and Jongheop Yi†

Clean Technology Center(CTC)/School of Chemical Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea
(Received 31 March 1998; accepted 31 August 1988)

요 약

전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)는 제품이나 공정의 환경에 대한 잠재적 영향을 평가하는 방법으로 알려져 있다. LCA는 목적 및 범위설정, 목록분석, 영향평가, 해석으로 구성되어 있으며, 전과정 단계를 보통 원료수집단계, 제품제조단계, 수송 및 유통단계, 제품사용단계, 재활용 또는 폐기단계로 분류하여 평가한다. 본 연구에서는 전과정에 걸쳐 사용되는 모든 물질 및 에너지가 결국에는 폐기물형태로 배출된다는 점을 바탕으로 하여, 제품 및 공정에 대한 정량적 전과정평가방법을 제시하였다. 배출되는 폐기물의 형태를 기상, 액상, 고상 폐기물로 구분하고, 배출되는 각 물질이 환경에 미치는 유해 정도를 평가하기 위한 환경부담지수를 도입하였다. 본 논문에서는 이 방법을 적용하기 위한 방법론이 설명되어 있으며, 전과정이 비슷한 두 제품의 예를 통하여 이 방법을 적용하여, 제품 및 공정에 대하여 환경영향을 분석하였다. 영향평가 결과 각 단계별 환경유해성 정도를 정량화할 수 있었으며, 공정의 개선 가능성에 대한 판단기준을 제시할 수 있었다.

Abstract—Life Cycle Assessment(LCA) is known as a method investigating the potential effects of products or any processes on the environments. LCA is composed of goal & scope definition, inventory analysis, impact assessment and interpretation. The evaluation stages for the LCA are raw material collection, manufacturing products, transport, usage and recycle or disposal. In this study a LCA methodology is proposed based on the concepts that materials and energy used are converted into various types of wastes and that the wastes generated affect the environment. The wastes released are classified into gaseous, liquid and solid types. The environmental burden factor for each chemical compound in the wastes is introduced to assess the effect of hazardous waste on the environment during the LCA procedure. Results show that the proposed evaluation method of environmental impact in LCA provides the quantified criteria for the improvement of products and processes. A case study is presented to address the advantage of the proposed LCA method.

Key words : LCA, Wastes, Environmental Burden

1. 서 론

환경문제가 점점 심각해지면서, 환경에 대한 인식이 높아지고 그 해결방향도 변화해가고 있다. 과거에는 공장의 굴뚝이나 파이프를 통해 흘러나오는 배출물을 줄임으로써 환경문제를 해결하려고 하는 종말처리기술이 환경문제를 유발하는 배출물의 절감을 위한 주요 기술이었으나, 현재는 오염물질의 배출을 적게 하는 원료의 사용, 독성 화학물질의 사용제한 등의 오염물질배출 근원자체를 줄이거나 없애는 새로운 기술개발(예 : 오염방지, 청정기술, 무방류, 산업생태학 등)이 진행되고 있다[1-3].

그 일환으로 환경마크제도가 시행되고, 환경을 해치는 공장이나 기업의 물품들이 위축되는 경향이 생겨나고 있다[4]. 이에 따라, 기업들은 기존의 공정 및 제품을 오염물이 가능한한 적게 배출되는, 즉 환경적으로 보다 우수한 공정 및 제품을 개발하기 위해 많은 노력을 기울여 왔다. 그러나 한번에 모든 것을 개선하기에는 과다한 비용부담 등이 문제가 되어 왔다. 따라서, 공정 및 여러 변수의 개선을 실제로 수행하기 전에 그 타당성을 먼저 평가해 보기 위한 하나의 방법으로 전과정평가(Life Cycle Assessment ; LCA)기법을 사용하게 되었다[4].

전과정평가는 지속적인 환경개선을 위해 제품마다 공정 또는 서비스의 전과정 - 원료수집, 제조 및 가공, 수송 및 유통, 사용, 재활용 및 폐기 - 동안에 소모되고 배출되는 에너지와 물질의 양을 정량화하

†E-mail : jyiecerl@plaza.snu.ac.kr

고 이들이 환경에 미치는 총체적인 영향을 평가하는 객관적이며 적극적인 환경영향평가기법으로 알려져 있다. 이 기법은 1960년대말 음료수 포장용기가 부존자원과 환경에 어떤 영향을 미치는가를 평가하는데 응용된 것을 시작으로 1970년대의 석유파동 전후에는 에너지 사용의 최소화를 위해 사용되었으며, 90년대초에 이르러 고형폐기물 문제의 국제적 관심사가 제고되고 심각한 대기 및 수질오염문제가 등장함에 따라 환경대책의 필요성을 종합적으로 다루는 도구로 발전되었다.

전과정평가의 구성요소는 목적 및 범위설정(goal and scope definition), 목록분석(inventory analysis), 영향평가(impact assessment), 해석(interpretation)의 4단계로 이루어져 있다[4-6]. 목적 및 범위설정은 전과정평가의 목표와 적용대상범위를 설정하는 것이며, 목록분석은 제품이나 공정, 활동의 전과정에 걸친 에너지 및 원료의 사용, 대기, 수계 및 고형 폐기물의 배출에 대한 객관적 자료를 수집, 분석하는 과정이며, 영향평가는 목록에서 밝혀진 여러 요소들의 잠재적 환경영향을 조사하고 평가하는 기술적인 과정으로 이 단계에서는 생태학적, 보건학적 영향평가뿐만 아니라 주거형태의 변화, 소음공해 등의 다방면에 걸친 평가도 포함된다. 또한, 해석은 전과정에 걸친 에너지 및 원료의 사용과 폐기물 배출에 따른 환경부담을 줄일 수 있는 가능성을 규명하고 그에 필요한 방안들을 체계적으로 조사, 분석하는 과정으로, 여기에는 제품설계, 원료사용, 가공, 소비형태 및 폐기물관리 등에서의 변화와 개선을 정성, 정량적으로 분석하는 과정이 포함된다.

LCA의 영향평가 방법으로 가장 기초적이고도 많이 사용되는 것은 물질수지를 바탕으로 한 것이며, 이를 기초로 전과정평가방법에 관한 많은 이론들이 정립되어 왔다. 전과정 평가방법은 크게 정성적인 방법과 정량적인 방법으로 나눌 수 있는데, 정성적인 방법에는 Less is Better법, Consequences Network법, Red Flag법, Hazard Matrix법 등이 있으며, 정량적 방법에는 Ecopoints법, Eco-Indicator법, Critical Volume법 등이 있다[5-7]. Less is Better법은 대체제품을 비교하는데 있어, 공정에서의 유입물과 유출물의 변화와 범위를 검사하여 비교하는 방법이고, Consequence Network법은 생산공정과 관련된 다양한 원인과 결과를 평가함으로써 환경에 대한 영향을 평가하는 방법이며, Red Flag법은 CFC 등 생태계 및 인간보건에 치명적인 영향을 주는 물질이 배출되면 환경영향조사표에 Red Flag를 표시하여 해당제품이나 공정을 사용할 수 없도록 하는 방법을 말한다. 또한, 정량적 방법의 Ecopoint법은 어떤 영향의 중대성을 이 영향이 현재수준과 목표수준간의 거리개념으로 평가하는 방법이며, Eco-Indicator법은 100개의 서로 다른 공정에 점수를 부여한 다음 환경영향표에 기입하여 제품 전과정의 환경성을 계산하는 방법이며, Critical Volume법은 물질에 대한 임계부피를 규제정도에 대한 배출량 비율로 나타내어 최초의 목록분석 중에서 얻어진 오염물 방출량 자료에 의해 평가하는 방법이다.

본 연구에서는 모든 물질 및 에너지가 폐기물의 관점으로 해석될 수 있다는 점을 이용하여 환경유해성을 고려한 전과정평가방법을 각 단계별로 제시하였다. 이 과정에서 환경에 영향을 미치는 정도를 고려하기 위해 환경부담지수의 개념을 도입, 적용시켰으며, 사례연구를 통하여 목적 및 범위설정에서부터 해석까지의 평가방법 및 결과 분석방법에 관하여 알아보았다.

2. 이 론

2-1. 목적 및 범위설정

LCA를 수행하는 목적을 설정하고, 그에 맞는 범위를 결정한다. 일반적으로 범위 결정시 제품에 대한 전공정을 고려하는 것이 바람직하나, 공정이 매우 복잡한 경우에는 그 중 중심이 되는 몇 개의 라인으로 한정하기도 한다.

2-2. 목록분석

2-2-1. 폐기물 발생단계

전과정을 통한 폐기물 발생단계를 살펴보면 다음과 같다.

한 제품의 전과정을 분류하면, 원료수집단계, 제품제조단계, 수송 및 유통단계, 제품사용단계, 재활용 또는 폐기단계의 5단계로 분류할 수 있다.

원료수집단계란 한 제품이 만들어지기 위해 필요한 원료와 관계되는 모든 활동을 포함하는 것으로, 이 단계는 원료를 국내에서 실제로 채취하는 원료채취단계와 외국에서 사오는 원료수입단계로 나눌 수 있다. 원료채취단계는 제품의 원료가 될 수 있는 물질이 나오기 위한 모든 과정에 관한 것으로, 에너지(전기, 석유 등), 물이 들어가고, 원료, 폐기물 등이 발생한다. 예를 들어, 철을 원료로 얻고자 하는 경우, 채광장에서 불을 켜기 위한 전기에너지, 채광장비를 가동하기 위한 전기 및 석유에너지가 투입되어 원료(철), 부산물(기타 광석), 고형폐기물(파손된 장비, 받침목 등), 액상폐기물(채광도중 지하수에 섞여 발생되는 물질)이 발생된다. 반면, 원료수입단계는 외국에서 채취 혹은 제조한 원료를 국내에서 제품을 만드는데 사용하기 위해 들여오는 모든 활동을 일컫는 것으로, 원칙적으로는 외국에서 원료 채취 또는 제조시 발생하는 물질들에 관한 정보를 전과정평가시 포함시켜야 한다. 외국에서의 원료채취가 당장 국내에 영향은 미치지는 않더라도 장기적, 범세계적인 측면에서 환경에 유해한 영향을 미치는 것은 분명하므로, 국가간 데이터 공유를 통한 전과정평가를 실시하여야 한다. 그러나 아직까지 전세계적으로 전과정평가가 보편화되어 있지 않으며, 평가기준도 표준화되어 있지 않아 데이터의 공유가 불가능한 현시점에서 이러한 작업은 거의 불가능하다. 따라서 이런 경우 전과정평가의 범위 설정이 중요하게 된다. 예를 들어, 전과정평가의 범위를 한 나라로 한정시키면, 이러한 경우 원료를 수입하는 즉시 제품제조를 위한 공장으로 바로 이송되므로 원료수입에 따른 자국에서의 폐기물 발생은 없으므로, 원료단계를 고려할 필요가 없다.

제품제조단계는 실제 제품을 생산하는 것과 관련된 모든 활동을 포함하는 것으로, 이 단계에서는 주로 에너지, 물, 원료가 들어가 제품, 부산물, 폐기물이 발생한다. 또한, 제조단계가 여러 개인 경우에는 대상이 되는 최종제품 전까지의 모든 단계를 포함시킨다. 예를 들어, 전자회사에서 세탁기를 만드는데 원료가 금속, 플라스틱, 물 등이 필요하다고 할 경우, 플라스틱은 원유를 수입하여 정제한 후, 그 결과 발생한 석유를 이용하여 만들어지는데, 이 경우 원유수입단계를 제외한 정제공정 및 플라스틱제조공정을 모두 제품제조단계에 포함시킨다. 따라서, 제품제조단계에서는 석유, 플라스틱, 금속 등의 원료와 기계를 가동하기 위한 전기에너지를 투입하여 제품(세탁기)과 기타 여러 가지 폐기물(기상, 액상, 고상)이 발생한다.

수송 및 유통단계는 제품의 전과정을 통해 운반되는 모든 단계를 의미하는 것으로, 원료채취 후 제조공정으로의 수송, 제품의 생산 후 소비자에게로의 수송, 사용 후 폐기물 처리장이나 재활용공장으로의 수송 등 수송과 관련된 모든 것을 포함한다. 수송단계에서는 주로 에너지(석유)가 투입되어 폐기물(대기오염물)이 발생한다.

제품사용단계는 완성된 최종 제품을 소비자 또는 기업이 사용하는 기간을 의미하는 것으로, 이 단계에서는 제품, 에너지 등이 공급되고, 폐기물이 발생한다. 예를 들어 소비자가 세탁기를 사용하는 경우, 전기에너지와 물이 들어가서 액상폐기물(오염된 물)이 발생한다.

재활용 또는 폐기단계는 제품을 사용한 후 재활용 또는 폐기하는 모든 단계를 말한다. 특히 폐기단계는 제품을 폐기하는 경우 발생되는 모든 것을 의미하는 것으로, 에너지, 물, 사용한 제품이 들어가서

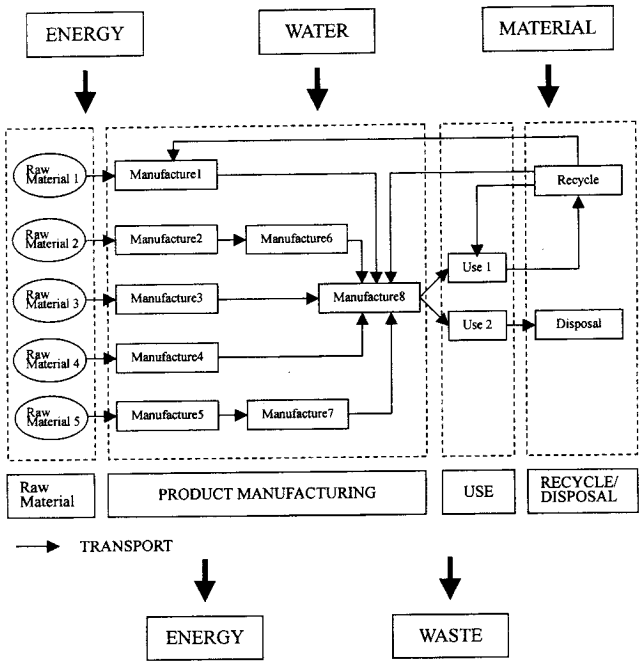


Fig. 1. Life cycle of a product.

폐기물과 에너지가 발생한다.

위의 단계를 정리하여 도시하면 Fig. 1과 같다. 결국 한 제품은 전 과정을 통하는 동안 에너지, 물 및 물질이 들어가서 에너지와 폐기물(기상, 액상, 고상)이 발생하는 것으로 대표될 수 있다. 여기서 에너지는 생성시에 폐기물이 발생하므로, 에너지의 사용은 곧 폐기물의 발생을 의미한다고 할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 제품의 전과정을 평가하기 위한 방법으로 각 물질 및 에너지에 대한 흐름을 폐기물의 관점에서 해석하고자 하였다.

2-2-2. 에너지

한 제품의 전과정에서 나타나는 에너지의 형태를 살펴보면, 원료단계, 제품제조단계, 제품사용단계, 재활용 및 폐기단계에서 기계를 작동시키기 위해 사용되는 전기에너지와 제품의 전과정에서 사용되는 석유 및 석탄 등의 연료에너지로 분류될 수 있다.

전기에너지를 사용하는 경우에는, 사용시에 폐기물이 발생하지 않는 대신에, 전력을 공급하기 위한 발전과정에서 다량의 폐기물이 배출된다. 따라서 이를 기준으로 에너지를 폐기물의 관점으로 전환시킬 수 있다. 전기에너지원을 세분하면, 화력발전, 수력발전, 원자력발전 등이 있으며, 화력발전의 근원은 석탄, 석유, 천연가스 등으로 구분할 수 있다. 따라서 전기에너지 사용에 대한 환경영향을 평가하기 위해서는 Table 1과 같은 표를 조사, 작성한다. Table 1 작성시 주의할 점은 각각의 항이 전기 1 kWh를 생산할 때 배출되는 폐기물의 양으로 작성되어야 한다는 것과 현재 사용하고 있는 전기에너지가 어느 발전소에서 만들어진 것인지를 모르므로, 그 나라 전체 발생량에 대한 조사를 하여야 한다는 것이다.

연료에너지의 경우는 전기에너지와 상황이 다르다. 전기에너지는 사용시에 폐기물이 발생하지 않는데 비해, 석탄이나 석유 등을 연료로 사용하는 경우에는 그 결과 폐기물이 발생하게 된다. 또한, 연료에너지는 그 이전에 석탄이나 석유 등을 만드는 경우에도 폐기물이 발생하게 된다. 따라서, 이 경우(사용 전단계)에 대해서도 전기에너지의 경우처럼 환경영향평가를 위한 표를 작성할 수 있으며, 이것을 기준으로 에너지를 폐기물의 관점으로 전환시킬 수 있다. 석탄은 무연탄과 유연탄으로 석유는 휘발유, 등유, 경유, 중유, 벙커C유 등으로 나뉘며 가스는 천연가스, 도시가스 등으로 나뉘므로, 각각에 대하여 Table 2와 같은 표를 조사, 작성한다. 이 표는 연료 제조시 발생되는 폐기물에 관한 정보만을 담고 있으므로, 이용하는 단계에서 발생되는 폐기물에 관하여는 각각의 단계에서 별도의 계산을 해야 한다. 또한, Table 2 작성시 주의할 점은 각각의 항이 단위량을 생산할 때 배출되는 폐기물의 양으로 작성된다는 것이다.

2-2-3. 물

물은 여러 단계에서 사용된다. 이 경우, 물이 오염되어 액상폐기물로 나가는 경우는 각각의 단계에서 계산이 된다. 그러나 물을 생산하는 단계에서도 폐기물이 발생하므로, 이 점을 고려해 주어야 한다. 물은 원수를 그대로 사용하는 경우와 처리장에서 정화되어 공급되는 경우로 나눌 수 있으며, 각각의 경우 사용지까지 운송되기 위한 에너지의 사용도 고려해 주어야 한다. 이를 바탕으로 Table 3과 같은 표를 조사, 작성한다. 여기서 물생산시 사용된 에너지의 개념은 결국 Table 1과 2에 의해 다시 폐기물의 형태로 전환이 가능하다. 그러므로, Table 1, 2의 자료를 바탕으로 Table 3에 의해 물생산 과정을 폐기물의 형태로 표시한다. Table 3 작성시 주의할 점은 각각의 항이 물 1 ton을 생산할 때 배출되는 폐기물의 양으로 작성되어야 한다는 것이다.

2-2-4. 각 단계별 폐기물의 양

에너지와 물의 공급을 제외하면, 나머지는 모두 물질이 들어가 폐기물로 나온다고 할 수 있다. 그러므로 한 제품에 대한 길(route)을 먼저 파악한 후, 각 단계에 대하여 발생하는 기상, 액상, 고상 폐기물의 양을 Table 4와 같은 형식으로 정리한다.

Table 4는 Table 1-3과 모양은 비슷하나, Table 1-3은 설정된 범위 전체를 기준으로 계산하는데 반해, Table 4는 한 제품이 거치게 되는 길을 따라 계산하게 된다. 예를 들어, 한 제품을 만드는데, 원료수집단계, 제품제조단계, 수송 및 유통단계, 제품사용단계, 재활용 및 폐기단계를 거치는 동안 전기에너지, 물, 원료를 사용한다면, 전기에너지는 우리 나라 전체 전력생산량을 단위 전력당 계산한 후 사용한 전기량에 비례하여 폐기물이 배출되며, 물은 해당 공장에 공급하는 처리장의 물생산량을 단위수량당으로 계산한 후 사용한 수량에 비례하여 폐기물이 배출된다는 개념하에 계산하는데 반하여, 그 밖의 것들은 각 단계를 거치면서 발생되는 폐기물의 양을 조사하여, 작성된 모든 조사표를 합하는 방법으로 계산한다. 따라서, 에너지(전기에너지, 연료에너지) 및 물에 대한 목록은 한 나라 혹은 해당 지역을 범위로 환경영향평가를 실시하는한 동일한 데이터를 쓰게 되지만, 각 단계별 폐기물의 양에 관한 목록은 제품의 생산라인별로 각기 다르게 나타나게 된다.

또한, 체류시간, 사용한 에너지의 양, 사용한 물의 양에 관한 데이터는 단위 제품을 생산할 경우에 필요한 양을 기재한다. 그러므로, 10시간 동안 100 kWh의 전기 및 100 ton의 물을 사용하여 100개의 제품을 생산하였다면, 체류시간은 6분(100시간/100개=0.1시간), 사용 전기량은 1 kWh(100 kWh/100개), 사용물량은 1 ton(100 ton/100개)이 된다.

지금까지 한 제품의 전과정에 따른 모든 대상(에너지, 물, 물질)이 모두 폐기물의 관점으로 표현가능함을 보였다. 따라서, 본 연구에서는 폐기물의 양을 기준으로 하는 환경영향평가방법에 관하여 논의할 것이다.

2-3. 환경영향평가

2-3-1. 환경부담지수

2-2에서 작성한 Table을 보면, 모든 대상이 기상, 액상, 고상의 폐기물 형태로 나타내어진다. 그러므로, 대기, 수질, 토양 등으로 배출

Table 1. Inventory Table of electrical energy

Power		Electrical energy production(unit : kg/kWh)											
		Gaseous waste				Liquid waste				Solid waste			
		Waste	Con.	Q	EBF_i	Waste	Con.	Q	EBF_i	Waste	Con.	Q	EBF_i
Thermal power ($[\delta_1+\delta_2+\delta_3+\delta_4]$ %)	Coal(δ_1%)												
	Oil(δ_2%)												
	LNG(δ_3%)												
	Others(δ_4%)												
Hydraulic power(δ_5 %)													
Nuclear power(δ_6 %)													
Others(δ_7 %)													
EB													

되는 여러 가지 폐기물에 대한 평가를 객관적으로 하는 것이 본 연구에서의 환경에 대한 영향을 평가하는데 가장 중요한 자료가 될 것이다. 이것을 위해서는 이 세 가지 폐기물 사이의 공통된 평가기준이 필요하게 되는데, 이 평가기준의 방법으로 환경부담지수(Environmental Burden Factor; EBF)의 개념을 도입하였다. 환경부담지수란 해당 화학물질이 그 고유의 화학적 성질로 인하여 환경에 미치는 영향을 수치로 나타낸 것으로, 지금까지 알려진 것으로는 환경부담을 해석하는 목적 또는 기준에 따라 지구온난화지수(Global Warming Potentials), 광화학산화물생성지수(Photochemical Ozone Creation Potentials), 산성화지수(Acidification Photochemical), 오존감소지수(Ozone Depletion Potentials), 생태독성지수(Ecotoxicity), 부영양화지수(Eutrophication Photochemical) 등이 있다.

2-3-2. 환경영향평가

(1) 전기에너지

우리 나라는 화력발전, 수력발전, 원자력발전 등을 통해 얻은 전기에너지를 한 곳(예 : 한국전력)에서 모아 송전하므로, 각 가정이나 공장에서 전기에너지를 사용한다는 것은 각 에너지생산원(화력, 수력, 원자력, 기타 발전)에서 그만큼의 폐기물이 배출되었다는 것을 의미한다. 즉, 에너지 생성에 대한 폐기물발생은 어떤 한 에너지원이 아닌, 전기에너지 생산을 위해 사용된 화력, 수력, 원자력 및 기타 발전시에 발생하는 모든 폐기물을 기준으로 하여야 한다.

Table 1에서 얻어진 값(농도, 유량, 환경부담지수)을 이용하여 전체에서 사용하는 에너지에 대한 환경부담이 다음 식에 의해 계산될 수 있다.

Table 2. Inventory Table of fuel

Source		Fuel production(unit : kg/ton)											
		Gaseous waste				Liquid waste				Solid waste			
		W	C	Q	EBF_i	W	C	Q	EBF_i	W	C	Q	EBF_i
Quantity of using electrical energy : kWh													
Quantity of water supply : ton													
Coal	Lead coal												
	No-lead coal												
EB by coal													
Quantity of using electrical energy : kWh													
Quantity of water supply : ton													
Gas	LPG												
	LNG												
	Others												
EB by gas													
Quantity of using electrical energy : kWh													
Quantity of water supply : ton													
Petroleum	Kerosene												
	B-C												
	Others												
EB by coal													
Quantity of using electrical energy : kWh													
Quantity of water supply : ton													
Others	A												
EB by coal													

$$EB_{ijk} = C_{ijk} \times Q_{ijk} \times EBF_i \quad (1)$$

$$EB_{jk} = \sum_{i=1}^{n} EB_{ijk} \quad (2)$$

$$EB_j = \sum_{k=1}^{m} \frac{\delta_k}{100} EB_{jk} \quad (3)$$

식 (1)은 Table 1에서 얻은 각각의 폐기물에 농도, 배출량, 환경부담 지수를 곱함으로써 각각의 환경부담을 구하는 것으로, 여기서 농도와 배출량은 해당물질별, 상태별, 종류별로 구분이 되므로 i, j, k로 표시하고, EBF_i는 물질별 고유의 값이므로 i에 대해서만 구분한다. 식 (2)는 (1)에서 구해진 환경부담을 상태별, 종류별로 분류하여 발생한 물질에 의한 환경부담을 합한 것이며, 식 (3)은 그 값들을 실제로 사용하는 비율에 따라 전체적인 발생량을 상태별로 구하는 것이다. 따라서 이 식들에 의해 전기에너지 생산시 발생하는 기상, 액상, 고상폐기물의 환경부담을 구할 수 있다.

위의 식의 EB_j는 단위 사용량당 발생하는 기상(j=1), 액상(j=2), 고상(j=3) 폐기물 각각에 대한 환경부담이므로, LCA를 실시할 경우는 실제과정에서 사용한 에너지의 양에 위에서 구한 EB_j를 상태별로

Table 3. Inventory Table of water

Water production(unit : kg/ton)												
Name of water treatment plant :												
Quantity of using electrical energy : Wh												
Quantity of using fuel energy : Kinds- Quantity-												
Water	Gaseous waste				Liquid waste				Solid waste			
	W	C	Q	EBF_i	W	C	Q	EBF_i	W	C	Q	EBF_i
Raw water(δ_1%)												
Treated water(δ_2%)												
Others(δ_3%)												
EB	Gaseous waste				Liquid waste				Solid waste			
EB by electrical energy												
EB water												
Total EB												

곱하여 계산한다.

(2) 연료에너지

연료에너지에 대한 계산도 위의 식 (1)-(3)과 거의 비슷하다. 단지 다른 것이 있다면, 전기에너지의 경우는 사용하고 있는 전기의 근원이 어떤 것인지를 알 수 없으므로, 전체 생산비율을 이용하여 통합적으로 계산하는데 반해, 연료에너지의 경우는 그 분류가 가능하므로, 그 각각 항목별로 계산하여야 한다. 그러므로, 식 (1)-(3) 중 식 (3)을 제외한 식 (1)-(2)에 의해 계산된다. 연료에너지 생산시 발생하는 폐기물에 의한 환경부담이 계산되면, 연료 생산시 사용하는 전기에너지 및 물의 양에 의한 환경부담을 포함하여 전체적인 환경부담을 구한다.

(3) 물

물 생산시에 발생하는 폐기물에 관한 계산은 식 (1)-(3)과 동일하다. 그러나 물 생산시에는 에너지의 사용이 첨가되므로, 사용한 에너지만큼의 폐기배출량을 첨가해 주어야 한다. 예를 들어, 물을 공급하기 위해서 정화처리를 하는데 500 Wh의 전력을 사용하였으며, 1 Wh 전력 생산시 발생하는 기상, 액상, 고상폐기물의 환경부담(EB_1, EB_2, EB_3)이 각각 1, 2, 3이라면, 물생산시 발생하는 폐기물에 의한 환경부담 계산시 기상폐기물에 대해서는 500 * 1을, 액상폐기물에 대해서는 500 * 2를, 고상폐기물에 대해서는 500 * 3을 더해주어야 한다.

(4) 각 단계별 폐기물의 양

실제적인 환경영향평가는 이 단계에서 이루어진다. Table 1-3에서 얻어진 환경부담값들을 바탕으로 Table 4의 내용을 합하여 실제 제품에 대한 환경영향평가를 실시하는 것이다.

환경영향평가를 위한 제품이 선정되면, Table 4와 같은 표를 제품의 길(route)를 따라 각 단계별로 작성한다. 완성된 여러 개의 Table 4가 모아지면, 그것을 5개의 단계(원료수집단계, 제품제조단계, 수송단계, 제품사용단계, 재활용 또는 폐기단계)로 나누어 각 단계별 환경부담을 다음 식에 의해 계산된다.

$$EB_{ijxy} = C_{ijxy} \times Q_{ijxy} \times EBF_i \tag{4}$$

$$EB_{jx} = \sum_{y=1}^{l} \left(\tau_y * \sum_{i=1}^{n} EB_{ijxy} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{해당단계에서 사용한} \\ \text{에너지 및 물에 의한 환경부담} \end{array} \right) \tag{5}$$

각 단계, 상태, 공정에 대한 각 배출물질에 대한 농도, 양, 환경부담을 구하여 조사한 후, 식 (4)에 의해 환경부담을 계산한다. 식 (4)는 성분별, 상태별, 단계별, 공정별로 세분화되어 계산된다는 것만을 제외하면, 식 (1)과 거의 유사하다. 이것으로 한 공정내에서의 환경부담을 성분별, 상태별로 계산한 후, 그 공정 체류시간을 고려하여 합산한다. 이때, 각 단계에 해당하는 공정이 여러 개인 경우에는 합하여, 단계별, 상태별의 환경부담을 구한다[식 (5)의 앞부분]. 또한, 그 물질을 생산하기 위해 사용한 에너지 및 물의 양에 의한 환경부담[식 (5)의 뒷부분]도 고려하여야 한다. 그러므로 Table 1-3을 통해 구한 값을 바탕으로, 각 단계에서의 성분별 전체적인 환경부담을 식 (5)와 같이 구한다.

이를 이용하여 Table 5를 작성한다. Table 5의 작성이 완료되면, 이

Table 4. Inventory Table of energy/water/wastes quantity for each stage

Quantity of using energy/water & of generated wastes

Stage of LCA :

Company name :

Responsible person : Reporting date : / /

1. Residence time(Elapsed Time for producing a product) : hour

2. Quantity of using energy supply

1) Electrical energy : Wh

2) Fuel energy : Kinds- Quantity-

3. Quantity of water supply : ton

4. Quantity of generated waste for a product(unit : kg/hr)

Gaseous waste				Liquid waste				Solid waste			
Waste	Conc.	Quan.	EBF_i	Waste	Conc.	Quan.	EBF_i	Waste	Conc.	Quan.	EBF_i

EB	Gaseous waste	Liquid waste	Solid waste
EB by energy 1)			
EB by energy 2)			
EB by water			
EB by waste			
Total EB			

Table 5. Environmental burden of product

LCA Stage	Environmental burden			Total EB for each stage
	Gaseous waste	Liquid waste	Solid waste	
Raw material extraction/ import				
Product manufacturing				
Transport				
Product use				
Recycle/Disposal				
Total EB for each state				Global EB

표를 분석함으로써 전과정 평가를 실시한다. Table 5의 각각의 칸은 단계별, 상태별 환경부담을 의미하는 것으로 이 값을 통해 어떤 단계에서 어떤 상태에 의한 환경부담이 가장 큰가를 판단할 수 있다.

또한, 식 (6)을 통해 전체적인 환경부담을 하나의 값으로 표시함으로써, 한 제품에 대한 개선 전후의 간단한 비교평가가 가능하다.

$$EB = \sum_{x=1}^{5} \sum_{j=1}^{3} EB_{jx} \tag{6}$$

예를 들어, A라는 제품을 만드는데, 기존의 공정에서는 환경부담이 47이었다고 하자. 그 후 폐기물처리공정의 개선을 통한 전과정평가시 환경부담이 40이 되었다면, 이것은 환경적인 측면에서 좋아졌다고 할 수 있다. 그러나 이 경우 복잡한 공정 전체에 대한 평가를 단지 하나의 지표로 판단한다는데는 어느 정도 무리가 따른다. 즉, (6)을 통해 산출된 값은 공정을 평가하는데 절대적인 평가기준은 될 수 없으며, 공정개선 전후의 개선정도에 대한 참고자료로 사용될 수 있다.

2-4. 해석

2-4-1. 개선대상 및 방안 결정

환경영향평가를 통해 환경부담이 큰 단계가 파악되면, 개선대상 및 방향을 먼저 결정한다. 예를 들어, 환경영향평가 결과 재활용 또는 폐기단계에서의 고상폐기물의 환경부담이 가장 큰 것으로 나타났다면, 이 단계에서 고상폐기물을 줄이기 위한 방법을 생각하여 그 방법에 대하여 Table 4와 같은 표를 작성한다.

Table 6. Environmental burden for each process improved by the recycle or disposal methods

Recycle/Disposal Method	Environmental burden			Total EB for this stage
	Gaseous waste	Liquid waste	Solid waste	
Incineration				
Landfill				
Recycle by A technique				
Recycle by B technique				

2-4-2. 개선평가

Table 4에서 얻은 값을 바탕으로 2-3-3에서 설명한 방법에 의해 계산을 하여 Table 6과 같은 표를 작성한다. Table 6은 재활용 또는 폐기단계에 고상폐기물에 의한 환경부담을 줄이기 위한 방법으로 소각, 매립, A방법에 의한 재활용, B방법에 의한 재활용을 실시하였을 경우에 대한 환경부담에 관한 표이다.

이 결과를 통해 이 단계에서 어떤 방법을 사용하였을 경우에 가장 개선도가 높은지를 판단할 수 있다.

3. CASE STUDY

3-1. 목적 및 범위설정

본 연구는 S사의 제품 A에 대한 환경부담을 줄이기 위한 방법을 제공하기 위한 것으로, 먼저 제품 A와 거의 비슷한 전과정단계를 거치는 제품 B와의 비교를 통해 환경부담이 크게 나타나는 단계를 찾고, 그에 따른 개선방향을 제시하는데 있다. 이때, 국가간 데이터의 공유가 불가능하므로 전과정평가의 범위는 우리 나라로 국한시켰으며, 환경부담지수로서는 독성지수를 이용하였다. 본 논문에서는 위에서 제안한 방법을 설명하기 위한 것에 중점을 두고, 가능한 계산을 간략히 하였다.

3-2. 목록분석

3-2-1. 제품의 전과정 분석

제품 A는 국내에서 생산되지 않는 원료를 이용하므로, 원료를 100 % 수입하여 제조공정을 거쳐 제품이 생산된 후 소비자에게로 운송되어 사용단계를 거친 후 폐기되고 있었다. 이에 반하여 제품 B는 원료의 대부분을 국내에서 생산한 것을 이용하였으며, 제품 A와 거의 비슷한 제조공정을 거쳐 제품을 완성하여 운송, 사용된 후 재활용 및 폐기단계를 거치고 있었다. 제품 A와 제품 B의 전과정단계를 통한 차이는 원료수집단계에서 사용되는 원료의 근원지가 다르다는 것과, 제품 B의 경우는 자체기술 개발을 통해 제조공정을 수정하였다는 것과 폐기물의 수집을 회사차원에서 실시하여 가능한 많은 양을 재활용하고 있다는데 있었다.

3-2-2. 에너지

위 두 제품은 전과정을 통해 연료에너지가 사용되지 않으므로, 전기에너지만을 대상으로 계산하였다. 전기에너지원을 화력, 수력, 원자력의 3가지로만 나누어 각각에 대하여 1 kW를 발전하는데 발생하는 기상, 액상, 고상폐기물을 조사한 후, 우리 나라에서 의존하는 전력생산비율(화력 : 약 60 %, 수력 : 약 3 %, 원자력 : 약 37 %)을 적용시켜 계산하였다.

3-2-3. 물

두 제품의 제조 및 사용단계가 주로 수도권 근처에서 일어나므로, 물생산에 관한 자료는 수도권 주위에 위치한 정수장을 중심으로 물 1 ton을 생산하는데 발생하는 폐기물자료를 조사하였다.

Table 7. Normalization scores for human toxicity(kg/1-kg human body)[4]

Substance	HT_I
2-Propanol($CH_3CHOHCH_3$)	0.022
Acrilonitrile(CH_2CHCN)	23
Ammonium(NH^{4+})	0.02
Benzene(C_6H_6)	3.9
Cadmium(Cd)	580
Carbon monoxide(CO)	0.012
Chlorobenzene(C_6H_5Cl)	5.7
Cr^{6+}	4.7e+04
Dichlorodifluoromethane	0.022
Hydrogen sulfide(H_2S)	0.78
Lead(Pb)	160
Mercury(Hg)	120
Nitrate(NO_3^-)	9.9e-03
Nitrite(NO_2^-)	0.26
Nitrogen oxide(NO_x)	0.78
Phosphate(PO_4^{3-})	4.8e-04
Pyrene	1.7
Styrene($C_6H_5CHCH_2$)	0.15
Sulfur dioxide(SO_2, SO_x)	1.2
Trichloromethane	3.3
Copper	0.24
Tin	0.017
Zinc	0.033

3-2-4. 각 단계별 폐기물의 양

제품 A와 제품 B의 원료수집단계에서 재활용 및 폐기에 이르는 단계를 따라 각 지점에서 사용하는 전기에너지 및 물의 양을 조사하고, 각 단계별로 발생하는 폐기물에 관한 자료를 조사하였다.

3-3. 환경영향평가

3-3-1. 환경부담지수

위의 자료를 바탕으로 환경영향평가를 실시하기 위한 환경부담지수로는 Table 7의 독성지수를 사용하였다. 그러나 독성지수가 아직 모든 화학물질에 대하여 나와 있지 않기 때문에, 위에서 조사한 폐기물 중 Table 7에 나타나 있는 물질에 대해서만 계산하였다.

3-3-2. 환경영향평가

제품 A와 제품 B에 대한 환경영향평가를 실시한 결과가 Table 8

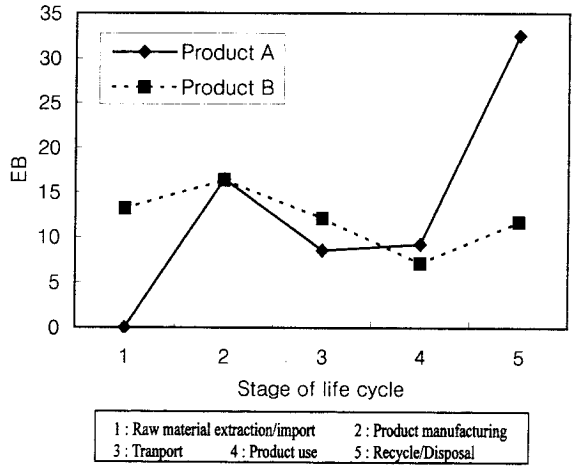


Fig. 2. Comparison of EB for product A and product B.

Table 8. Environmental burden of product A and B

LCA stage of product A	Environmental burden			Total EB for each stage
	Gaseous waste	Liquid waste	Solid waste	
Raw material extraction/ Import	0	0	0	0
Product manufacturing	13.21	1.37	1.876	16.456
Transport	5.578	2.97	0	8.548
Product use	1.327	7.878	0.01	9.215
Recycle/Disposal	3.71	2.03	26.78	32.52
Total EB for each state	23.825	14.248	28.666	Global EB 66.739

LCA stage of product B	Environmental burden			Total EB for each stage
	Gaseous waste	Liquid waste	Solid waste	
Raw material extraction/ Import	2.488	8.44	2.31	13.238
Product manufacturing	12.4	1.43	2.55	16.38
Transport	8.567	3.54	0	12.107
Product use	2.56	3.46	1.112	7.132
Recycle/Disposal	0.001	0.23	11.442	11.673
Total EB for each state	26.016	17.1	17.414	Global EB 60.53

과 같으며, 이를 도시하면 Fig. 2와 같다. Fig. 2는 제품 A와 제품 B에 대한 환경부담을 전과정시간 단계별로 나타난 것이다. 단계별로 제품 A와 제품 B를 분석하면 다음과 같다. 원료수집단계에서는 제품 A의 경우 원료를 전부 수입하므로 국내에서 원료생산시에 발생하는 환경부담은 전혀 없는 반면, 제품 B는 국내 원료를 위주로 생산을 하므로, 어느 정도의 환경부담을 발생시킴을 볼 수 있다. 제조공정 단계에서는 제품 B의 경우는 기술개발을 통해 제조공정을 개선하여 제품 A에 비해 원료의 순도는 좀 떨어지나, 보다 적은 환경부담을 발생시키면서 제품을 생산해 냄을 알 수 있다. 수송단계면에서는 제품 B의 경우 폐기될 물질들을 수거하므로, 그에 따라 제품 A의 경우보다 환경부담이 크게 나타난다. 제품사용단계에서는 제품 A가 제품 B에 비해 에너지를 많이 소비하여 약간 높게 나타나며, 재활용 및 폐기단계에서는 제품 A의 경우는 대부분을 그냥 매립시키는데 반해, 제품 B의 경우는 수거하여 재활용하므로 환경부담이 적게 나타나며, 이 효과는 수송단계에서 발생한 환경부담 이상의 효과를 발생시킴을 알 수 있다. 보다 구체적으로 살펴보기 위해 단계별, 상태별로 분석을 하면 Fig. 3과 같다. Fig. 3을 보면 제품 A와 제품 B가 대부분의 단계에서는 비슷한 경향을 나타내는 반면, 재활용 및 폐기단계의 고상폐기물에 의한 환경부담에서 가장 큰 차이를 나타냄을 볼 수 있다. 따라서 제품 A의 환경부담을 줄이기 위해서는 재활용 및 폐기단계의 고상폐기물을 줄이는 방법을 연구하여야 한다는 결론이 나왔다.

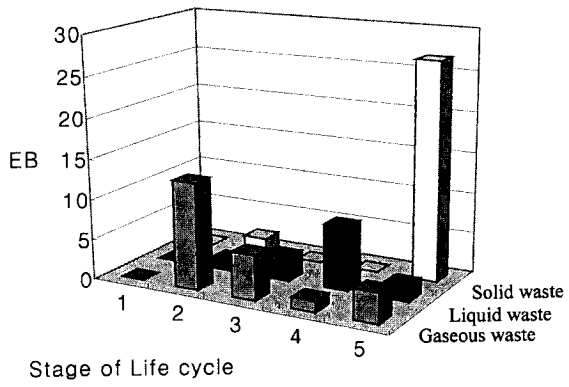
3-4. 해석

3-4-1. 개선대상 및 방안 결정

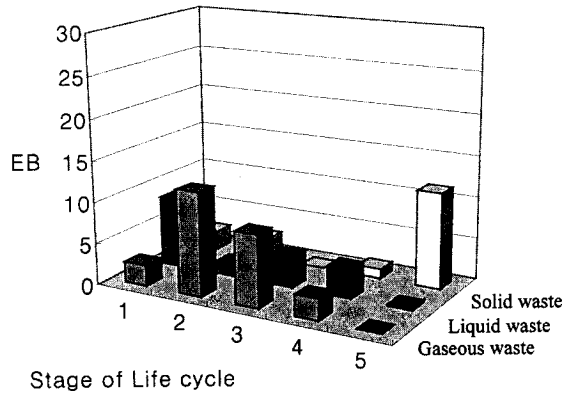
재활용 및 폐기단계에서의 제품 A의 고상폐기물을 줄이는 것을 개선방향으로 선정하고, 소각 및 재활용의 2가지 방법으로 개선하였을 경우에 대하여 개선평가를 실시해 보았다.

3-4-2. 개선평가

위의 2가지 개선공정에 대하여 환경영향평가를 실시한 결과가 Table 9와 같았으며, 이 결과를 전과정 단계별로 나타내면 Fig. 4와 같았다. 매립을 하던 개선전의 경우와 비교를 해보면, 소각법을 이용하였을



(a)



(b)

Fig. 3. Environmental burden of (a) product A and (b) product B for each stage and each state.
(1 : Raw material extraction/import, 2 : Product manufacturing, 3 : Tranport, 4 : Product use, 5 : Recycle/Disposal)

Table 9. Environmental Burden for each process improved by the recycle or disposal methods of product A

Recycle/Disposal				
Method	Environmental burden			Total EB for this stage
	Gaseous waste	Liquid waste	Solid waste	
Landfill	3.71	2.03	26.78	32.52
Incineration	15.66	7.48	5.44	28.58
Recycle	10.56	6.34	3.27	20.17

경우에는 기상폐기물과 액상폐기물에 의한 환경부담은 증가하였으나 고상폐기물에 의한 환경부담이 현저히 감소하였다. 또한, 재활용 방법을 이용하였을 경우에는 재활용된 물질을 운반하여 일부는 원료로 재사용하고 나머지는 다른 곳으로 이동하므로 원료수집단계 및 수송단계에서의 환경부담은 약간 증가하였으나, 재활용 및 폐기단계에서 고상폐기물에 의한 환경부담의 많은 양을 줄여 결국 전체적인 환경부담은 적은 효과를 나타냈다.

즉, 재활용 및 폐기단계의 공정개선을 통해 제품 A의 환경부담은 훨씬 줄어들 수 있음을 알 수 있었으며, S사의 제품 A의 경우 특히 재활용 방법이 가장 효과적임을 알 수 있었다.

간단한 비교를 위해 제시된 전체환경부담(Global EB)을 비교해 보아도, 재활용(59.029), 소각(62.799), 매립(66.739)의 순으로 나타

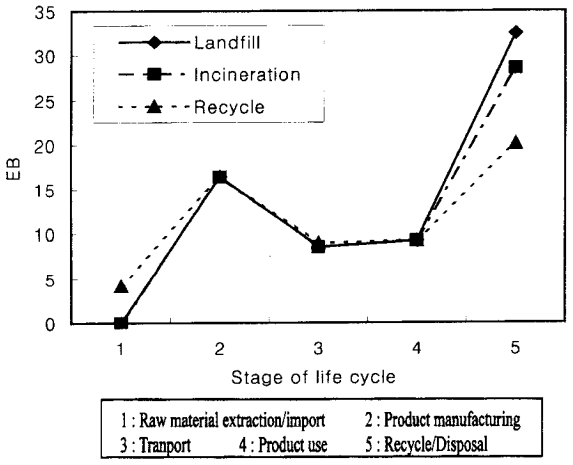


Fig. 4. Change of environmental burden of product B after process improvement.

나 위와 같은 결과를 보여주고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 모든 물질 및 에너지가 폐기물의 관점에서 해석될 수 있다는 점을 이용하여, 이를 통한 전과정평가방법을 제시하였다. 전과정평가를 위해서 먼저 목적 및 범위를 설정하고, 설정된 범위 내에서 에너지 및 물생산시에 발생하는 폐기물을 파악한 후, 전과정평가 대상 제품의 길(route)을 파악하여, 각 단계에서 발생하는 폐기물 종류 및 양을 조사하였다. 또한 환경에 영향을 미치는 지수로 환경부담지수라는 개념을 도입하여 물질별 특성을 고려하였다. 위 방법의 적용을 위하여 전과정 단계가 비슷한 A, B 두 제품을 대상으로 전과정평가를 실시하였다. 환경부담지수로는 독성지수를 사용하였는데, 그 결과 제품 A가 제품 B에 비해 환경부담이 큰 것으로 나타났다. 특히 재활용 및 폐기단계에서 고상폐기물의 발생에 따른 환경부담이 큰 것으로 파악되어, 이 부분에 대한 개선평가를 소각, 재활용방법에 의해 실시한 결과 재활용에 의한 개선이 가장 효과적임을 알 수 있었다.

위의 방법에 의하면, 에너지 및 물에 관한 데이터를 나타내는 Table 1-3은 범위가 한 나라로 정해지는 한(예 :우리 나라), 같은 데이터를 이용하게 되므로 1년에 한 번 정도만 조사를 하면 된다.

위의 방법에 의한 전과정평가는 위의 예에서 볼 수 있었던 바와 같이 각 단계별 환경부담을 통해 두 제품간의 비교가 가능할 뿐만 아니라, 한 제품상에서도 어느 단계가 가장 문제시 되고 있는지를 평가할 수 있다. 또한, 이러한 데이터가 모아지면, 전체적인 환경부담을 나타내는 값(Global EB)만을 통해서도 제품간의 대략적인 상호비교가 가능하다는 이점도 있다.

그러나 위의 전과정평가방법은 모든 화학물질에 대한 독성지수가 아직 개발되지 않은 관계로 배출되는 모든 화학물질에 대한 평가는 불가능하다. 위의 계산도 환경에 큰 영향을 주는 주요 물질들을 위주로 계산하였다. 그러므로, 위 방법의 완벽한 적용을 위하여는 실정에 알맞은 배출 화학물질별 독성지수 또는 그 밖의 환경부담을 나타내는 지수들의 개발이 시급하다.

감 사

서울대학교 청정기술연구센터와 한국생산기술원의 청정생산기술 개발사업을 통한 연구비 지원에 감사드립니다.

사용기호

i : components
j : state of wastes [gas(1), liquid(2), solid(3)]
x : each stage of life cycle (1-5)
y : a process in each stage of life cycle
k : kinds of power source
l : number of processes in each stage of life cycle
n : number of components
m : number of power source
C_{ijk} : concentration of component i at state j, power source k
Q_{ijk} : flow rate of component i at state j, power source k
C_{ijxy} : concentration of component i at state j, stage x, process y
Q_{ijxy} : flow rate of component i at state j, stage x, process y
EBF_i : environmental burden factor of component i
EB_{ijk} : environmental burden of component i at state j, power source k
EB_{jk} : environmental burden of all components at state j, power source k
EB_j : environmental burden of all components, power sources at state j
EB_{ijxy} : environmental burden of component i at state j, stage x, process y
EB_{jx} : environmental burden of all components at state j, stage x, all processes
EB : global environmental burden

그리이스 문자

τ_y : residence time for process y

참고문헌

1. Ehrenfeld, J. R.: *J. Cleaner Prod.*, **5**(1-2), 87(1997).
2. Pauli, G.: *J. Cleaner Prod.*, **5**(1-2), 109(1997).
3. Allen, D. T.: "Pollution Prevention for Chemical Processes", 1st ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, NY(1997).
4. Curren, M. A.: "Environmental Life-Cycle Assessment", 1st ed., McGraw-Hill, New York, NY(1996).
5. Anderson, K., Ohlsson, T. and Olsson, P.: *Trends in Food Sci. & Tech.*, **5**, 134(1994).
6. Graedel, T. E., Allenby, B. R. and Comrie, P. R.: *Environmental Sci. & Tech.*, **29**(3), 134A(1995).
7. Lave, L. B., Cobas-Flores, E., Hendrickson, C. T. and McMichael, F. C.: *Environmental Sci. & Tech.*, **29**(9), 420A(1995).
8. Nash, J. and Stoughton, M. D.: *Environmental Sci. & Tech.*, **28**(5), 236A(1994).
9. Masters, G. M.: "Introduction to Environmental Engineering and Science", 1st ed., Prentice Hall, Inc., NJ(1991).
10. Allen, D. T., Bakshani, N. and Rosselot, K. S.: "Pollution Prevention", 1st ed., American Institute for Pollution Prevention(1992).
11. Hertwich, E. G., Peace, W. S. and Mckone, T. E.: *Environmental Sci. & Tech.*, **32**(5), 138(1998).
12. Maclean, H. L. and Lave, L. B.: *Environmental Sci. & Tech.*, **32**(7), 322A(1998).
13. Huh, T. and Ahn, J.: *Journal of Environmental Hi-Technology*, **6**,

66(1995).
14. Yoo, Y.: *Journal of Environmental Hi-Technology,* **4**, 58(1996).
15. Yoo, Y.: *Journal of Environmental Hi-Technology,* **10**, 50(1995).
16. Chung, Y., Kim, S., Moon, J. and Lee, K.: *Journal of Korean Society of Environmental Engineer,* **19**(2), 269(1997).
17. Kim, C. and Park, S.: *Theories and Applications of Chemical Engineering,* **3**, 701(1997).
18. Moon, K. and Song, H.: *Theories and Applications of Chemical Engineering,* **3**, 2465(1997).
19. Chah, S. and Yi, J.: *'97 Fall Meeting of Korean Society of Environmental Engineers*, 519(1997).