

고분자의 전과정평가(Life-Cycle Assessment) 기법

허 탁

1. 서 론

현대사회에서의 일상생활과 각종 산업활동 및 서서비스의 증가는 천연자원의 수요, 공급에 영향을 미치게 되었고 그 결과로 환경의 질도 저하시키게 되었다. 지구의 환경에 대한 관심이 증가함에 따라, 자연환경을 유지하고 사회환경을 개선시키기 위한 책임이 강조되어 환경에 대한 부담을 정량화해야 할 필요성이 대두되었다. 국제표준화기구(ISO : International Standards Organization)에서는 지구의 환경을 보호하고 관리하기 위한 취지로 국제환경경영의 표준화작업을 추진하고 있으며, 이는 세계무역기구(WTO : World Trading Organization)체제하에서 그린라운드(UR)라는 이름으로 우리에게 빠르게 다가오고 있다. 우리 파이라운드(UR)의 타결을 계기로 보호무역장벽이 무너지고 자유무역체제가 도입된 시점에서, 그린라운드는 선진국보다 환경비용을 적게 들일 경우 차액만큼 과세를 물거나 오염유발 상품은 아예 수출, 수입을 할 수 없도록 하자는 것이다. 이는 환경보호의 기치아래 새로운 무역장벽으로 활용될 가능성이 매우 크다. 따라서, 환경을 보호하는 한편, 그린라운드에도 대비해야 하는 우리의 입장에서는 최종제품 뿐만 아니라 그 원료와 제조과정 및 사용후의 폐기 처리까지를 포함하는 전과정(Life-Cycle)이 환경에 미치는 영향을 생각하지 않으면 안되게 되었다.^{1,2}

일반적으로 고분자는 환경에 적합하지 않은 물질로 평가되고 있다. 고분자는 다른 천연자원에서는 얻을 수 없는 우수한 특성들로 인해 금속, 목재, 천연섬유 등의 대체물질로서 각광을 받아왔다. 이에 고분자에 대한 활발한 연구로 수많은 합성 고분자가 탄생되고, 상품화되어 이제는 각종 공업용품에서부터 생활용품에 이르기까지 그 용도가 매우 다양하다. 그러나, 최근에는 그 큰 부피와 자연환경에서 분해되지 않는 단점 때문에 환경오염의 주된 요인으로 지적되고 있는 실정이다. 발포 폴리스티렌의 경우를 보면,

외관, 방수성, 수송 및 저온 저장의 용이성, 경량, 강도 등과 같은 제 특성의 우수함으로 인해 제품의 유통체제를 혁신시켰다고 할 수 있다. 그러나, 그 우수한 특성에 대해서는 간과하고 그들이 사용된 후에 강가나 매립지에 보기 흉하게 방치된 것에 대해서만 목소리를 높이는 경향이 있다. 발포 폴리스티렌이 환경에 미치는 영향을 객관적이고 총체적으로 평가하기 위해서는 폐기 단계에서 뿐만 아니라 원료취득, 제조, 가공 및 성형, 유통 단계들에 대해서도 과학적인 평가가 이루어져야 한다. 즉, 환경적 영향은 원료의 취득에서부터 폐기에 이르는 전과정에 걸쳐서 발생되므로, 한 제품이나 공정의 전과정과 관련된 모든 환경영향(Environmental Impact)을 평가하는 기법이 사용되어야 한다. 그 평가 기법은 감정적이거나 감상적이어서는 안되고 반드시 과학적인 근거하에서 이루어 져야 한다.

제품이나 공정의 전과정 동안에 발생하는 환경영향을 과학적이며, 정량적으로 평가하려는 취지에서 대두된 것이 전과정평가(LCA : Life-Cycle Assessment)기법의 개념이다. 전과정평가는 어떤 제품이나 공정, 활동의 전과정에 걸쳐서 소모되고 배출되는 에너지 및 물질들의 양을 정량화하여 이들이 환경에 미치는 영향을 평가하고 이를 통하여 환경개선의 방안을 모색하고자 하는 객관적인 환경영향 평가기법을 말한다. 따라서, 이는 총체적인 환경영향을 평가



허 탁

1981 서울대학교 공업화학과(공학사)
1983 서울대학교 공업화학과(공학석사)
1988 미국 Lehigh대(공학박사)
1988~ 미국 Lehigh대 Post-Doc.
1990
1990~ 건국대학교 공업화학과, 부교수
현재

Life-Cycle Assessment of Polymers

건국대학교 공업화학과(Tak Hur, Dept. of Industrial Chemistry, College of Eng., Konkuk Univ., Seoul 133-140, Korea)

할 수 있으며 진정한 의미에서 환경개선 방안을 모색할 수 있는 매우 값진 도구이다. 본문에서는 전과정평가 기법에 대한 소개와 어떻게 고분자 산업의 환경영향 평가와 개선에 응용될 수 있는지를 소개하고자 한다.

2. 전과정평가

2.1 전과정평가의 국내외 동향

1990년대에 들어서면서 미국과 유럽의 선진국들에 의해 전과정평가 기법의 개발 및 제용활동이 활발히 전개되고 있다. 미국의 경우에는 환경청과 환경독성화학회(SETAC)를 주축으로 하여 많은 심포지엄이 개최되었고 P&G, Kodak, Coca Cola, 3M, Franklin 연구소 등과 같은 기업과 연구소에서 다양한 수준의 전과정평가 연구가 수행되고 있다.^{3~7} 유럽에서도 세부사항에 대한 방법론을 개선하고 있으며, 전과정목록(Life-Cycle Inventory)과 관련된 데이터베이스와 소프트웨어의 개발에도 노력을 기울이고 있다. 영국의 Open 대학, 네덜란드의 Leiden 대학, 독일의 Oke 대학, 프랑스의 Bilan사 등에서는 학문적인 측면에서 전과정평가에 대한 새로운 방법론을 연구하여 그 지침서를 발표하고 있으며 영국 제철, BASF, Bayer 등의 여러 기업에서도 지속적인 연구를 수행하고 있다.^{8~10}

한편, 국제표준화기구는 국제환경경영의 표준화를 위하여 환경기술위원회(TC207)를 1993년 1월에 발족시켜 환경경영에 대한 구체적인 표준화작업을 개시하였다. 전과정평가에 대한 표준화 작업은 TC207 산하에 있는 6개의 소위원회 중에서 제5소위원회에서 이루어지고 있다. 1993년 11월에 파리에서 제1차 회의를 개최한 이래 지난 10월에 일본에서 열린 제5차 회의에 이르는 동안에 표준화에 대한 규격은 어느 정도 갖추어져 있는 상태이다. 1997년까지는 전과정평가에 대한 표준화 작업이 완료되어 ISO 14040-14049로 제정될 예정이다.²

우리나라의 경우는 제품에 대한 전과정평가 작업이 구체적으로 이루어진 것이 아직 없다. 다만 1992년 종이기저귀 제조 단체에서 외국의 자료를 근거로 하여 환경 부담금의 불필요 또는 감소를 요청한 적이 있고 1993년에 경제정의 실천연합 산하 환경개발센터에서 포장용기에 대한 외국의 결과를 비교하였을 뿐이다. 최근에는 일부 대기업을 중심으로 전과정평가 기법이 도입되어 부분적이고 극히 초보적인 연구가 진행되거나 추진 중에 있다. 정부에서는 표준화 관장부서인 공업진흥청이 1993년 TC207 창립 총회에 참석한 이후 표준화 과제별 분과회의에 적극 참여하고 있으며 이에 발맞추어 국내에서도 경영자총합회를 총사무국으로 하고 5개 대기업 및 환경보존협회를 각 작업반 간사로 하는 6개의 실무작업반이 구성되었다. 제5작업반인 전과정평가 분야에도 학계의 자문위원과 기업체의 관련자들이 참여하

여 개념과 방법론에 대한 이해와 국내외의 관련자료를 수집, 분석하고 있으나 재원, 조직, 전문인력, 기업의 대응력 등의 미비로 인하여 그 실적은 저조한 실정이다.

2.2 전과정평가의 개요

환경경영의 근간인 환경감사(Environmental Auditing), 환경마크(Environmental Labelling), 환경성능평가(Environmental Performance Evaluation) 등을 규정하는 기준이 될 것으로 예상되는 전과정평가는 제품이나 공정 또는 서비스의 전과정 동안에 소모되고 배출되는 에너지 및 물질의 양을 정량화하고, 이들이 환경에 미치는 영향을 평가하여, 이를 토대로 환경개선의 방안을 모색하고자 하는 객관적이며 적극적인 환경영향 평가방법이다. 이 방법은 60년대말 음료수 포장용기가 부존자원과 환경에 어떤 영향을 미치는지를 평가하는데 응용된 것을 시작으로, 70년대의 석유과동 전후에는 에너지 사용의 최소화를 위해 사용되었다. 그 후 약 20년 동안 이에 대한 연구가 꾸준히 진행되어 왔음에도 불구하고 전과정평가의 기술적 기초에 대한 지침이 제공된 것은 90년대 초의 일이다. 고형폐기물 문제가 국제적인 관심사가 되면서 녹색운동, 환경마크 등의 압력으로 재활용에 대한 노력이 증가하였으며, 이와 동시에 심각한 대기 및 수질 오염과 폐기물 관리에 대한 관심은 환경대책의 필요성을 증폭시킨 것이다. 최근에 이르러서는 이 기법이 천연자원, 에너지, 환경문제를 종합적으로 다루는 도구로 발전되었다. 아직 세부적인 사항의 방법론에 대해서는 개선과 개발의 여지가 있지만 전과정평가 방법이 ISO 14000 시리즈로 표준화되면 결국은 환경친화성의 우열을 구별하는 기술적인 토대가 될 것이다.

전과정평가 기법의 장점은 기업 내부에서 새로운 제조공정이나 제품 등을 개발할 때에 기존의 제품이나 공정과 비교하여 새로운 제품이나 공정이 진정한 의미에서 환경개선의 효과가 있는지를 확인해 볼 수 있다는 점이다. 전과정의 여러 단계 중에서 어느 단계가 가장 많은 에너지와 자원을 소비하는지, 가장 많은 오염물질을 배출하는지를 보여줌으로써 그 개선의 방향을 제시해 줄 수 있다. 이외에도 정부의 장기개발정책 및 광범위한 환경평가연구에 대한 지원, 지역사회 기반사업의 결정, 제품의 보증에 대한 기준 선택 등에 폭넓게 응용될 수 있다.

전과정평가는 목적정의 및 범위설정(Goal Definition and Scope), 목록분석(Inventory Analysis), 영향평가(Impact Assessment), 개선평가(Improvement Assessment)의 4가지로 구성된다. 수행하는 목적에 따라 연구의 방향과 깊이가 결정되므로, 우선 수행 목적을 명확히 정의하고 그 목적에 맞추어 대상제품이나 공정의 범위, 필요한 데이터, 수행기간, 수행지역 등의 범위를 설정된다. 목록분석은 원료의 추출에서부터 제조 및 가공, 수송 및 유통, 사용, 재활용, 최종 폐기에 이르는 전과정 동안의 에너지 및 원료 소요량과 환경배출물을 정량화하여 목록을 작성하

는 과정이다. 영향평가에서는 목록분석에서 규명된 자원소
요량과 환경배출물에 대한 정보를 토대로 하여 환경적 영
향을 파악하고, 개선평가는 소요되는 에너지와 원료 및 폐
기물 배출과 관련된 환경부담을 감소시킬 수 있는 방안을
체계적으로 규명하고 평가하는 과정이다. 전과정평가의 일
반적인 방법론은 다음과 같다.^{3~5,9}

2.2.1 목적정의 및 범위설정

연구목적은 정의하고 범위를 설정하는 것은 전과정평가
를 실제로 수행하기에 앞서 미리 결정되어야 할 핵심적인
부분이다. 이 과정을 거치면 문제점이 정확히 도출되고,
전과정평가 기법이 이를 해결하기 위해 적절한 방법인지의
여부를 확인할 수 있다. 연구목적에는 전과정 평가를 시행
하는 이유, 도출될 결론의 사용처 및 사용자, 필요한 자료
의 정확도, 검토와 같은 요소들이 포함된다. 특히, 전과정
평가의 나머지 구성요소(목록분석, 영향평가, 개선평가)
에서 필요한 자료와 자료의 출처가 명확하게 규정되어야
한다. 연구목적은 시스템 내의 환경성능 향상을 위한 내부
적 사용목적과 공공정책수립을 위한 외부적 사용목적으로
크게 구분할 수 있는데, 어떤 목적으로 사용되는 수행과정
과 수행결과의 투명성을 확보하는 것이 중요하다. 연구범
위의 설정에서는 연구대상 시스템, 필요한 자료의 수준,
연구수행을 위한 가정, 한계 등이 결정되며, 이 때 연구범
위는 연구목적에 충분히 달성할 수 있는 정도이어야 한다.

목적정의 및 범위설정시에 규정되는 중요한 것은 기능단
위(functional unit)인데, 이는 평가의 대상이 되는 시스템
이 기능단위로 정의되어야 상호 비교, 분석이 가능하기 때
문이다. 기능단위는 대상 시스템의 기능을 측정하는 단위
로서, 예를 들면 주어진 시간 동안 페인트로 칠하는 면적,
주어진 부피의 채소를 포장하는데 쓰이는 포장지의 양 또는
일반가정의 세탁물을 세탁하는데 필요한 표백제량 등이다.
이는 같은 기능을 하는 다른 시스템의 환경적 측면을 상호
비교하는데 필수적인 개념이므로, 각 단계에서 투입되고
산출되는 환경부담 요소를 기능 단위당 부하량으로 환산하
고 그 이유를 명시한다.

2.2.2 목록 분석

목록분석은 시스템의 투입물과 산출물을 분석하는 것이
다. 이 때 지각에서 원료를 추출하는 단계에서부터, 제조와
사용단계를 거쳐 매립, 소각 등의 최종처리 단계까지 포함
하며, 유통과 수송단계도 고려되어야 한다. 이를 위해서는
시스템을 구체적으로 정의하고, 시스템 경계를 설정해야
한다. 시스템은 물질 또는 에너지의 흐름이 연결되어서 연
구목적으로 규정한 기능을 수행하는 공정이며, 시스템의
경계는 모든 투입물과 산출물, 공정에서 발생하는 부산물
등을 포함하도록 정의한다. 실제로 시스템과 그 경계를 정
의하기 위해서는 다음과 같은 전과정단계들을 고려해야 한
다.

— 원료 획득과 에너지(Raw Acquisition and Energy) :

전과정 가운데 이 단계에는, 나무를 수확하거나 원유를 뽑
아내는 것과 같이 땅으로부터 원료와 에너지를 얻어내는
과정이다. 그 원료를 획득한 곳에서부터 원료를 가공하는
곳까지 운송하는 과정도 이 단계에 해당된다.

— 제조, 가공 및 성형(Manufacturing, Processing,
and Formulation) : 원료로부터 최종제품을 생산하는 활동
이 이루어 진다. 제조는 완제품으로의 가공이 가능하도록
원료의 형태를 변화시키는 과정이다. 예컨대, 원유로부터
폴리에틸렌 수지를 만들어내기 위해서는 여러 단계의 제조
활동을 거쳐야 한다. 원유를 정제하고, 올레핀 공장에서
에틸렌을 생산하고, 그것을 중합하여 폴리에틸렌을 만들
고, 다시 그것을 운송하여 제품 제작현장으로 가져가야 한
다. 이 모든 과정이 제조에 해당된다. 가공 및 성형은 생
산된 재료를 포장 또는 충전될 수 있는 형태로 전환시키는
것이다. 예컨대, blow molding을 통해 플라스틱 병을 만
드는 것, 알루미늄 캔을 만드는 것, 일회용 기저귀를 생산
하는 것 등이다.

— 유통과 수송(Distribution and Transportation) : 제
품 전과정의 모든 단계와 관련된다. 유통과 수송의 공통적
인 속성은 제품의 위치나 물리적인 외형 등의 변화는 일으
킬 수 있어도 재질 자체의 변형은 일으킬 수 없다는 점이
다. 수송은 다른 장소에서 시행되는 작업간의 이동을 말하
며, 이는 전과정의 어느 단계에서나 일어날 수 있다. 유통
은 제조된 생산품을 마지막 제조업자로부터 최종사용자에
게로 운반하는 과정이다.

— 사용/재사용/유지 및 보수(Use/Reuse/Maintenance)
: 생산된 제품 또는 재료가 유통된 후부터 폐기될 때까지를
가리키며, 제품 또는 포장에 사용 기간의 연장을 위해 재
조정되고 유지, 수리되는 활동도 포함된다.

— 재활용(Recycle) : 폐기물로부터 재료를 채취하여 다
시 제조/가공 단계로 돌려 보내는데 관련된 모든 활동을
의미한다.

— 폐기물 관리(Waste Management) : 폐기물은 공기,
물, 땅과 같은 환경의 구성 성분으로 방출되는 모든 물질을
말하며, 이는 전과정의 각 단계에서 유출된다. 환경으로
배출되기 전에 폐기물을 다루는 모든 과정을 폐기물 관리
단계라 한다.

전과정목록의 각 단계는 재료와 에너지를 투입 받아서
다음 단계에 필요한 물질을 만들어내며, 이 과정에서 폐기
물이 환경으로 방출될 수도 있다. 에너지의 출처는 천연가
스, 석유, 석탄, 원자력, 수력전기, 태양, 바람 및 나무
등을 포함한다. 시스템과 그 경계가 정의되면 전과정 각
단계를 포함하는 계산 모델을 구성한다. 투입, 산출물과 그
양에 관련된 데이터를 하나의 계산 골격구조로 통합하는
것이다. 각 단계들이 연결되어 구성된 전체 시스템 흐름도
는 최종제품의 하위시스템들을 수치적으로 서로 연결시켜
주므로 계산모형의 구성에 매우 중요하다. 이 때 전체 시

시스템에 대한 각 하위시스템들의 상대적인 기여도를 정량적으로 나타내 주는 비례인자를 사용한다. 예를 들어, 비누의 특정 성분 X에 관한 데이터가 1000톤의 X생산에 맞춰져 있고, 1000톤의 비누를 생산하기 위해 250톤의 X가 필요하다면, 전체 시스템에 대한 X의 기여도를 알기 위해서는 1000톤의 X에 대한 데이터에 0.25의 비례인자를 적용시킨다.

2.2.3 영향평가

전과정평가는 산업의 공정, 제품, 또는 서어비스로부터 발생하는 자원의 소모, 생태계의 영향, 인간 건강의 영향들을 이해하여 감소시키는데 매우 중요한 수단이 되고 있다. 따라서, 전 과정 목록분석에서 얻은 많은 파라미터들이 환경에 어떤 영향을 미치는가를 평가하는 것이 필요하다. 영향평가는 전과정평가의 목록분석에서 규명된 파라미터들을 환경영향의 범주로 분류하고, 그 특성을 분석하여, 가치를 평가하는 기술적인 과정이므로 과학적인 방법론의 틀 내에서 이루어진다. 점진적으로 더 높은 수준의 환경영향(예, 국부적인 영향, 지역적인 영향, 전세계적인 영향)의 범주로 통합해 나가는 반복적인 과정이라고 할 수 있다. 이때 바람직한 통합의 수준과 형태는 전과정평가의 목표에 따라 좌우되며, 이는 목적정의 및 범위설정 단계에서 명시되어야 한다. 전과정평가 사용자가 원하는 다양한 정보를 제공해 주기 위해서는 주로 3개-분류화(classification), 특성분석(characterization), 가치평가(valuation)-의 연속적인 절차가 필요하다. 분류화는 목록표(Inventory Table)에 포함되어 있는 투입물과 산출물들이 환경에 어떤 영향을 미치는지를 효율적으로 평가하기 위해 환경영향 범주별로 분류하는 것이다. 따라서 영향 평가를 하고자 할 때, 환경에 대한 영향에는 어떤 것이 있는지를 먼저 결정하고 각 환경영향에 대한 정확한 정의가 선행되어야 한다. 현재 환경에 대한 영향을 크게 구분한 일반적인 범주는 자원고갈(resource depletion), 생태계 영향(ecological impact), 인간건강 영향(human health impact)이며, 이 범주는 더 세분화되어질 수도 있으며, 또 과학의 발전에 따라 변경될 수도 있을 것이다(표 1).⁴ 실제 사용에 있어서는 범주에 대한 정의를 명확히 규정하고, 이를 목록의 파라미터들과 교차검사해야 할 것이다.

특성분석이란 투입, 산출요소들이 각 범주에서 차지하는 정도를 평가하여, 그 기여도를 범주내에서 집산화시키는 것으로 각 목록에 대한 충분한 연구결과가 뒷받침되어야 한다. 현재 지구온난화, 성층권 오존고갈부문에서는 상당한 연구가 이루어져 있으나, 산성화, 부영양화, 광화학물 생성, 생태독성학적 영향 부문에서는 몇 년이 지나야만 전문가들의 동의가 이루어질 것이라는 전망이다. 그 나머지 부분(에너지 고갈등)에서는 앞으로도 상당한 시간이 소요될 것으로 보인다. 또한 폐기물 배출에 대한 평가에 있어서는 각 배출물에 대한 영향분석이 필요하며, 특히 배출정

표 1. Relationship Between General Areas for Impact Categories

Specific impact categories (Examples)	General areas for protection		
	Resources	Human health	Ecol. health
Resource depletion			
- depletion of abiotic resources	+		
- depletion of biotic resources	+		
Pollution			
- global warming		(+)	+
- ozone depletion		(+)	(+)
- human toxicity		+	
- ecotoxicity	(+)	+	
- photochemical oxidant formation	+	+	
- acidification	(+)	+	
- eutrophication		+	
Degradation of ecosystems and landscape			
- land use			

+ means a direct potential impact

(+) means an indirect potential impact

도에 대해서는 기능단위당 배출량과 배출된 화학물질의 변화과정이 추적, 조사되어야 한다.

가치평가는 특성분석 단계의 결과들을 상대적으로 비교하는 과정이다. 이는 매우 주관적이므로 모든 과정이 투명성을 확보하도록 해야 한다. 가치평가의 목적은 영향평가 결과들의 중요도를 결정하는 것이므로, 특성분석 단계에서 얻어진 데이터들을 통합하여 상대적인 가중치를 적용시켜서 등급을 정한다. 만일 한 공정이 지구온난화에는 작은 영향을 미치는 반면에, 그 대안이 될 수 있는 다른 공정은 인간건강에 작은 영향을 미친다고 가정하자. 이 경우에 영향범주들 사이에 상대적인 중요성이 비교될 수 없다면, 어느 공정이 전체적으로 작은 환경 영향을 미치는지 말하기 어렵다. 서로 다른 환경범주들 사이의 비교는 주관적인 과정이 될 것이며, 그 결과 가치평가 단계는 사회적인 경향이나 가치를 반영하게 된다. 환경범주의 상호 비교시에-그것이 정량적이든, 정성적이든 관계없이-사용된 가정이나 인자들은 반드시 정당화되고 설명되어야 한다. 현재 존재하는 가치평가 방법들은 다른 관점(과학적인 기초, 정치적인 기초, 대중의 인식에 기초)에서 가치를 평가하기 때문에 서로 다른 접근방식을 나타낸다. 어떤 유형의 가치평가 방법이 구체적인 목적에 가장 적합한지를 선택하는가는 전적으로 사용자에게 달려 있다. 그러나 어떤 가치평가 방법을 사용하더라도 일반적으로 통용되는 다음과 같은 필요조건을 만족시킬 수 있어야 한다. 일관성이 있어야 하며, 명확하고, 반복하기 쉽고, 감도분석이나 오차분석이 가능해야 한다. 현재 몇 개의 가치평가 방법이 전과정평가에서 사용되고 있기는 하지만, 널리 통용되기 위해서는 많은 연구와 시험이 필요할 것이다.

2.2.4 개선평가

개선평가란 시스템의 기능을 변화시키지 않는 범위 내에서 시스템이 환경에 미치는 영향을 최소화하기 위한 방안을 연구하는 것이다. 이 때 비교되는 것은 제품이나 재료가 아니라 같은 기능을 가지는 공정단위가 된다. 개선평가시에는 개선될 수 있는 요소 중에 가장 중요하거나 관련성이 큰 것을 규명하게 되는데, 이 때 모든 변화가능성이 반드시 포함되어야 하는 것은 아니다.

다음과 같은 요소들이 개선을 위한 평가대상으로 고려될 수 있다.

- ① 원료 사용의 최적화
 - 폐기물 또는 산출물 발생 조절
 - 원료 소비량 최소화
 - 높은 재활용율(환경적으로 가치가 있는 경우에)
 - 재생불가능한 자원의 사용을 최소화
- ② 에너지 자원의 최적화
 - 에너지 손실의 최소화(특히, 운송과정에서)
- ③ 공정의 대체(환경적으로 가치가 있는 경우에 한해서)
- ④ 제품과 서비스의 재설계
 - 제품의 사용수명
 - 사용 효율
 - 제품의 무게 및 부피
 - 운송과정

최종적으로, 모든 결과는 보고서로 작성되어 제출되는데 개선요소에 대한 규명, 평가 및 보고는 의사 결정권자의 결정을 돕게 된다. 개선요소에 대한 평가결과는 사용된 자료의 수준에 의존한다.

이상과 같은 전과정평가 기법을 실제 제품에 적용한 사례중의 일부는 다음과 같다. 표 2는 전과정평가 기법을 액체세제 제품의 다양한 포장전력 가능성에 대하여 응용한 결과이다.¹¹ 기능단위는 동일농도의 세제 1000g을 담을 수 있는 포장재로 하였으며, HDPE(High Density Polyethylene) 64oz 병을 기준으로 하여 각 대안들의 경우에 에너지와 환경배출물의 감소를 백분율로 나타내었다. 그 결과, 재활용율 25%의 경우나 HDPE병 25% 재사용의 경우보다 내용물의 고농축에 의한 원천감축(Source Reduction)의

표 2. 제품포장 전과정평가의 예

포장개선의 방법	에너지 사용의 감소 %			환경배출물의 감소 %		
	공정	수송	원료	고형	수질	대기
1. 25%의 재활용 HDPE를 순수 HDPE병 제조에 사용	3	0	9	9	[+4]	4
2. 사용자 25%의 순수 HDPE병에 주입시판	3	2	11	11	[+4]	5
3. 3배 농축 제품의 작은 순수 HDPE병에 주입 시판	55	53	56	55	54	55
4. 3배 농축제품의 HDPE병 재충전용으로 순수 종이봉에 주입 시판	53	58	94	91	40	62

표 3. 세탁기 전과정 각 단계별 목록

제품 수명	에너지 (MJ)	대기오염물질 배출량(1000m ³)	수질오염물질 배출량(dm ³)	고형폐기물 (kg)
생 산	2,072	37,025	11,763	51
유 통	146	1,654	2,132	4
사 용	48,000	2,457,000	307,000	622
치 분	33	705	240	36
계	50,251	2,496,384	321,135	713

경우가 전과정 에너지와 환경배출물에 있어서의 감소가 월등함을 보여주고 있다. 특히, 고농축 내용물과 더불어 HDPE 병을 재 사용하면 그 효과가 더욱 증가하였다.

표 3은 세탁기의 전과정평가를 하고 그 결과를 제조, 유통, 사용, 폐기 등과 같은 전과정 각 단계의 환경영향을 나타낸 것이다.¹² 세탁기의 경우에는 환경에 가장 큰 영향을 미치는 전과정 단계가 세탁기를 사용하는 단계임을 알 수 있다. 세탁기에 대한 환경영향을 증진시키기 위해서는 세탁기 사용중에 있어서의 환경영향을 줄이는데 많은 노력이 기울여져야 함을 의미한다. 이를 위해서는 세탁기의 효율증진 및 에너지소비 절감, 사용중 오염물질 배출절감을 위한 기술적 개량이 뒷받침되어야 할 것이다.

한편, Franklin Associates에서는 1990년에 발포 폴리스티렌컵과 판지컵, 유리컵의 전과정평가 결과를 보고하였다.¹³ 연구의 배경은 일회용 제품의 사용이 국가차원의 폐기물 처리 위기로 인하여 곤란을 겪게 되자, 제품의 진정한 환경적인 측면을 평가하기 위해서는 그 제품의 전과정에 걸쳐서 발생하는 환경배출물을 고려해야 함을 강조하게 된 것이다. 그 결과는 에너지 소요량은 발포 폴리스티렌이 가장 적고, 그리고 판지컵, 유리컵의 순서였으며, 고형폐기물의 양은 폴리스티렌의 경우가 가장 많았으나 재활용율을 30%수준까지 높이면 판지컵의 경우와 거의 비슷하였다. 이외에도 자동차 부품, 플라스틱, 식품용기, 철강, 섬유 등에 대한 전과정평가의 수행이 활발하게 진행되고 있다.^{14,15}

3. 전과정평가와 고분자

여타 산업 공정들과 마찬가지로, 고분자 관련 산업의 공정들도 제품을 생산하기 위해 원료와 에너지를 공급받고 제조공정 동안에 고형, 수계, 대기 폐기물들을 배출하게 된다. 따라서, 고분자 관련 산업체, 고분자 폐기물 처리 당국, 그리고 소비자들 모두는 각 고분자의 유형별로 사용과 최종 처리에 있어서 최선의 방법을 찾는 데 많은 관심을 기울이고 있다. 제조와 사용의 전 공정 동안에 소모되는 원료와 에너지, 그리고 발생하는 배출물에 대한 정확한 데이터와 자세한 지식이 없이는 최선의 방법이 무엇인지를 정의하는 것이 불가능하다. 그러므로, 환경적인 그리고 자

표 4. Examples of Life Cycle Inventory of the Production of 1kg of Polyethylene

		Unit	Average
Fuels	Coal	MJ	2.75
	Oil	MJ	3.07
	Gas	MJ	11.53
	Hydro	MJ	0.46
	Nuclear	MJ	1.53
	Other	MJ	0.14
	Total fuels	MJ	19.48
Feedstock	Coal	MJ	<0.01
	Oil	MJ	32.76
	Gas	MJ	33.59
	Wood	MJ	<0.01
	Total feedstock	MJ	66.35
Total fuel plus feedstock		MJ	85.35
Raw materials	Iron ore	mg	200
	Limestone	mg	150
	Water	mg	18,000,000
	Bauxite	mg	300
	Sodium chloride	mg	7,000
	Clay	mg	20
	Ferromanganese	mg	<1
Air emissions	Dust	mg	2,000
	Carbon monoxide	mg	800
	Carbon dioxide	mg	1,100,000
	Sulphur oxides	mg	7,000
	Nitrogen oxides	mg	11,000
	Hydrogen chloride	mg	60
	Hydrogen fluoride	mg	1
	Hydrocarbons	mg	21,000
	Aldehydes	mg	5
	Other organics	mg	5
	Metals	mg	1
	Hydrogen	mg	1
Water emissions	COD	mg	1,000
	BOD	mg	150
	Acid as H+	mg	70
	Nitrates	mg	5
	Metals	mg	300
	Ammonium ions	mg	5
	Chloride ions	mg	120
	Dissolved organics	mg	20
	Suspended solids	mg	400
	Oil	mg	100
	Hydrocarbons	mg	100
	Phenol	mg	1
	Dissolved solids	mg	400
	Phosphate	mg	5
	Other nitrogen	mg	10
	Sulphate ions	mg	10
Solid waste	Industrial waste	mg	3,100
	Mineral waste	mg	22,000
	Slags & ash	mg	7,000
	Toxic chemicals	mg	70
	Non-toxic chemicals	mg	2,000

표 5. Examples of Life Cycle Inventory of the Production of 1kg of Polyethylene

		Unit	Average
Fuels	Coal	MJ	1.66
	Oil	MJ	5.88
	Gas	MJ	9.06
	Hydro	MJ	0.81
	Nuclear	MJ	1.00
	Other	MJ	0.06
	Total fuels	MJ	18.47
Feedstock	Coal	MJ	<0.01
	Oil	MJ	48.90
	Gas	MJ	12.66
	Total feedstock	MJ	61.56
Total fuel plus feedstock		MJ	80.03
Raw materials	Iron ore	mg	300
	Limestone	mg	200
	Water	mg	3,100,000
	Bauxite	mg	400
	Sodium chloride	mg	5,000
	Clay	mg	30
	Ferromanganese	mg	<1
Air emissions	Dust	mg	2,000
	Carbon monoxide	mg	700
	Carbon dioxide	mg	1,100,000
	Sulphur oxides	mg	11,000
	Hydrogen sulphide	mg	10
	Nitrogen oxides	mg	10,000
	Hydrogen chloride	mg	40
	Hydrogen fluoride	mg	1
	Hydrocarbons	mg	13,000
	Metals	mg	5
Water emissions	COD	mg	400
	BOD	mg	60
	Acid as H+	mg	90
	Nitrates	mg	20
	Metals	mg	300
	Ammonium ions	mg	10
	Chloride ions	mg	800
	Dissolved organics	mg	30
	Suspended solids	mg	200
	Oil	mg	40
	Hydrocarbons	mg	300
	Dissolved solids	mg	200
	Phosphate	mg	20
	Other nitrogen	mg	10
	Other organics	mg	250
Solid waste	Industrial waste	mg	4,000
	Mineral waste	mg	14,000
	Slags & ash	mg	5,000
	Toxic chemicals	mg	30
	Non-toxic chemicals	mg	8,000

표 6. Examples of Life Cycle Inventory of the Production of 1kg of Emulsion PVC

		Unit	Average
Fuels	Coal	MJ	12.26
	Oil	MJ	5.80
	Gas	MJ	20.56
	Hydro	MJ	0.65
	Nuclear	MJ	7.77
	Other	MJ	0.08
	Total fuels	MJ	47.11
Feedstock	Oil	MJ	18.14
	Gas	MJ	9.63
	Total feedstock	MJ	27.77
Total fuel plus feedstock		MJ	74.88
Raw materials	Iron ore	mg	580
	Limestone	mg	24,000
	Water	mg	15,000,000
	Bauxite	mg	200
	Sodium chloride	mg	720,000
	Sand	mg	1,600
Air emissions	Dust	mg	5,400
	Carbon monoxide	mg	1,600
	Carbon dioxide	mg	2,741,000
	Sulphur oxides	mg	18,000
	Nitrogen oxides	mg	19,000
	Chlorine	mg	4
	Hydrogen chloride	mg	300
	Hydrocarbons	mg	26,000
	Metals	mg	3
	Chlorinated organics	mg	1,389
Water emissions	COD	mg	1,200
	BOD	mg	60
	Acid as H+	mg	130
	Metals	mg	220
	Chloride ions	mg	39,000
	Dissolved organics	mg	1,000
	Suspended solids	mg	4,200
	Oil	mg	50
	Dissolved solids	mg	760
	Other nitrogen	mg	2
	Chlorinated organics	mg	4
	Sulphate ions	mg	4,000
	Sodium ions	mg	2,000
Solid waste	Industrial waste	mg	1,300
	Mineral waste	mg	110,000
	Slags & ash	mg	210,000
	Inert chemicals	mg	11,000
	Regulated chemicals	mg	3,500

원보존의 관점에서 다음과 같은 5개의 주요 집단의 파라미터들에 대한 전 과정목록의 작성이 필요하다.

- 원료 소비
- 에너지 소요량
- 대기 배출물
- 수계 배출물
- 고형폐기물 발생량

각 집단별 데이터에 대한 전과정목록의 작성이 완료되면

재활용, 매립, 소각에 의한 에너지 재활용 등과 같은 고분자 폐기물 회수 절차에 대하여 더욱 정확한 환경영향을 평가할 수 있다. 뿐만 아니라, 고분자 제품의 각 제조단계나 사용단계들 사이의 환경영향을 상호비교하여 개선의 방안을 모색할 수 있게 된다. 1990년에 설립된 유럽 플라스틱 제조업체 협회(APME : Association of Plastics Manufacturers in Europe)에서는 폴리에틸렌,¹⁶ 폴리프로필렌,¹⁷ 폴리스티렌,¹⁸ PVC¹⁹ 등과 같은 범용 플라스틱의 전과정에 걸친 에너지 소요량과 총 환경 배출물을 포함하는 상세한 전과정 목록표를 작성하였다(표 4, 5, 6). 이와 같은 목록표의 주요 용도 중의 하나는 폐기물 관리 단계에서 수행되는 매립, 소각, 재활용 등과 같은 고분자 폐기물 처리방법들이 원료 및 에너지 소모와 환경배출물에 미치는 영향을 각각 평가하고, 최선의 폐기물 관리방안을 제시하는데 사용될 수 있다. 이와 같은 목적으로 고분자 재료 또는 제품과 관련된 전과정목록을 작성하기 위해서는 다음과 같은 사항들이 고려되어야 한다.

3.1 시스템의 정의

시스템은 정의된 기능을 수행하는 일련의 작업들의 조합을 의미한다. 시스템은 제품만으로 정의될 수 없으며 기능의 관점에서 정의되어야 한다. 폴리에틸렌의 중합 시스템은 에틸렌을 폴리에틸렌으로 변환시키는 기능으로 정의되며, 폴리에틸렌 제조시스템은 원유를 폴리에틸렌으로 변환시키는 기능으로 더 넓게 정의된다. 일단 시스템이 정의되면, 관심이 되는 모든 작업들을 포함하여 그림 1과 같이 간단하게 도식적으로 나타낼 수 있다. 여기서 주의할 점은 시스템이 정의될 때는 항상 전과정평가의 목적정의 및 범위

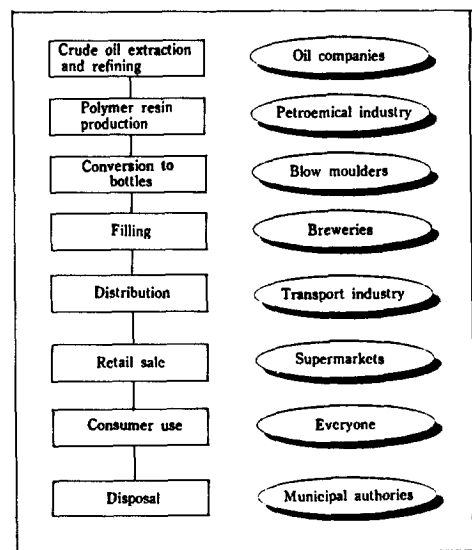


그림 1. Sequences of operations for delivering beer system.

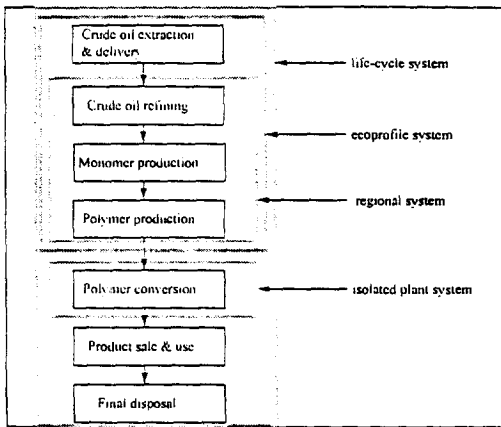


그림 2. Outline flow chart showing the production, use and disposal of a polymer product identifying the different type of system that can be described.

설정 단계와 일관되게 정의되어야 한다. 서로 다른 기능을 수행하는 시스템들 간의 비교는 많은 논란을 발생시킬 수 있으므로, 기능단위를 사용하여 같은 기능을 갖는 시스템들만 비교한다. 일반적으로, 정의된 시스템은 그림 2에서 보는 바와 같이 크게 4가지 유형으로 나누어 볼 수 있는데 이들 사이의 한계를 살펴보는 것은 환경적인 측면에서 매우 중요하다.²⁰

— 단일공정(Single isolated plant) 시스템 : 이 시스템의 경계는 한 공장내의 단일공정의 시스템 경계와 일치한다. 이런 시스템의 배출물들은 그 지역의 오염 규제에 따른다.

— 지역적인(Regional) 시스템 : 특정 지역내에 존재하는 공장들을 다 포함한다. 그림 2의 원유정제, 단량체 생산, 고분자 생산 등이 같은 지역에서 수행된다면 이 시스템에 포함될 수 있다. 이 때의 환경영향은 해양이나 대류 등에 의해 영향을 받는다.

— 생태윤곽(Eco-profile) 시스템 : 원료추출에서부터 최종제품 생산에 이르는 과정들을 포함한다. 이는 전과정 시스템의 흐름도를 구성하는데 큰 도움이 된다.

— 전과정(Life-cycle) 시스템 : 사용과 폐기까지를 포함하는 모든 과정을 포함한다. 이는 지구 전체의 환경과 관련된다.

3.2 연료와 원료 에너지

일반 산업 공정과 마찬가지로, 고분자 산업의 공정도 연료의 공급으로부터 얻는 에너지를 사용하여 각 공정들을 가동시키게 되며, 이 때 제품의 생산과 더불어 많은 양의 대기 배출물을 발생시키게 된다. 에너지는 일반적으로 크게 연료 에너지와 원료(feedstock) 에너지로 나누어 진다. 대부분의 고분자 관련 시스템에는 많은 양의 연료 에너지와 원료 에너지가 필요하며, 그 대부분은 재생불가능한 화석

연료로부터 추출되므로 한 시스템의 전체 에너지 수요를 가능한한 감소시키는 것이 중요하다. 연료는 1차연료와 2차연료로 분류된다. 석유, 석탄, 천연가스 등은 땅으로부터 얻어지는 1차연료이고, 전기와 같이 1차연료로부터 생산되는 것은 2차연료이다. 이와 같은 연료들은 에너지 단위(MJ)로 환산되어 전과정 평가 목록에 포함된다.

대부분의 경우에, 연료를 제외하고 시스템으로 들어가는 모든 투입물들을 원료라고 하며 이들의 양은 연료와는 다르게 무게나 부피의 단위로 나타낸다. 그러나, 고분자와 같이 석유화학 관련 공정의 경우에는 석유가 연료 뿐만 아니라 원료로도 사용되므로 간단하지 않다. 즉, 석유가 연료로 사용될 때는 연소되어 에너지를 생산하면서 그 과정에서 대기 배출물을 발생시키지만, 고분자의 원료로 사용될 때는 그 고유에너지가 파괴되지 않고 최종제품에 남아 있게 된다. 이와 같이 고분자로 변형되는 연료 물질을 전과정 평가에서는 “원료 에너지”라고 하고, 그 양은 에너지의 단위(MJ)로 나타낸다. 원료 에너지의 일부는 고분자가 소각될 때 에너지로 회수될 수 있다. 따라서, 시스템의 총 에너지는 전체 시스템을 “요람에서 무덤까지(cradle-to-grave)” 가동시키기 위해서 필요한 에너지이며, 고분자 시스템의 경우에는 이를 시스템의 연료 에너지와 원료 에너지의 합으로 나타낸다. 고분자가 재활용되는 경우에는 새로운 고분자의 사용을 대체하므로 필요한 원료 에너지의 양을 절약할 수 있는 반면에, 사용된 고분자를 재활용시키는 과정에서 추가의 연료 에너지가 필요하게 된다. 따라서, 사용된 고분자를 회수하여 세척하고 재가공시키는데 필요한 연료 에너지가 새 고분자를 제조하고 폐기 처분하는데 필요한 연료 에너지보다 작다면 재활용으로부터 전체적인 연료 에너지를 절약할 수 있을 것이다.

3.3 재활용

앞에서 설명한 바와 같이, 고분자 시스템의 전과정 목록표는 폐기물 처리방법들의 환경영향을 평가하여 최선의 폐기물 관리방안을 제시해 줄 수 있다. 일반적으로, 고분자 폐기물을 처리하는 방법으로는 주로 재활용, 매립, 단순소각, 그리고 에너지를 회수하는 소각의 4가지가 많이 거론된다. 과거에는 첫번째 방안으로 고분자 폐기물을 매립에 주로 의존하여 왔으나 최근에는 도시고형폐기물(MSW : Municipal Solid Wastes)로부터 특징의 고분자 폐기물을 회수하여 재활용하는 방법이 환경적으로 가장 효율적인 수단으로 인식되고 있다.^{21, 22} 그러나 재활용구조를 도입하기 전에 재활용을 통하여 달성하고자 하는 최종 목적이 무엇인지를 미리 구체화시켜야 한다. 재활용을 하는 목적은 크게 다음과 같은 3가지로 생각해 볼 수 있다.

— 원료 소비의 최소화

— 에너지 소모의 최소화

— 고형폐기물 발생의 최소화

만일, 재활용의 목적이 원료를 절약하고 고형폐기물의

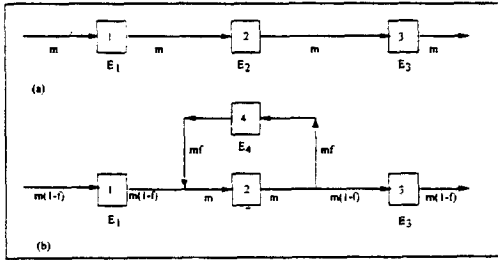


그림 3. (a) Simple linear production sequence with no recycling. (b) The same production sequence when a recycling loop is incorporated.

양을 경감시키는 것이라면, 재활용은 항상 시도되어야 한다. 그러나, 에너지를 절약하기 위해서 재활용을 한다면, 그 시스템의 연료에너지와 원료에너지의 변화를 주의깊게 분석해야 한다. 그러므로, 고분자 제품이 원료 취득에서 폐기과정에 걸쳐 환경에 미치는 영향을 조사하고, 과연 재활용이 자원을 보존하고 환경오염을 개선시키는지를 전과 정평가기법을 통하여 알아보는 것이 중요하다. 재활용 시스템의 형태는 여러가지가 있으나 본문에서는 그 중 간단한 것인 닫힌 고리형 재활용(Closed loop recycling)과 열린 고리형 재활용(Open loop recycling)에 관해서만 살펴보기로 한다.²³

3.3.1 닫힌 고리형 재활용

그림 3(a)는 3개의 단위공정 1, 2, 3이 선형으로 간단하게 연결되었고, 그림 3(b)는 동일 시스템이지만 폐기물의 일부가 다시 생산 시스템으로 들어가는 재활용 고리를 포함하고 있다. 소비자는 공정 2 내에 존재하고 (a)처럼 재활용이 없는 경우에는 질량 m 의 원료가 시스템으로 들어가서 질량 m 의 제품이 소비자에 의해 사용된다고 가정하자. 그리고, (b)에서는 공정 2로부터 나가는 폐기물 중에 f 분율이 재가공되어 물질의 손실없이 주 생산공정으로 돌아간다고 가정하자. 이 경우 원료에 대한 수요와 발생되는 고형 폐기물이 m 에서 $m(1-f)$ 로 감소된다. 한편, 소비자를 거쳐가는 제품의 양은 재활용이 없을 때는 m , 첫 번째 재활용으로부터 mf , 두 번째 재활용으로부터 mf^2 등이다. 따라서, 재활용 회수율을 계속 증가시키면, 제품의 총량, M 은 다음과 같이 된다.

$$M = m + mf + mf^2 + mf^3 + mf^4 + \dots$$

$$= \frac{m}{(1-f)} \quad (1)$$

재활용이 없을 경우에는 $M=m$ 이 되고, 공정 2로부터 나가는 재료의 50%가 재활용된다면 $M=2m$ 이므로 1kg의 원료로부터 2kg의 제품을 얻게 된다. 따라서, 재활용의 목적이 원료 소모와 고형 폐기물의 발생을 감소시키는 것이라면 재활용율을 가능한 높이는 것이 바람직하다.

필요한 에너지를 계산하는 것은 원료의 계산보다 복잡하다. 각 단위공정의 단위 산출물 당 필요한 에너지를 각각 E_1, E_2, E_3, E_4 라고 하면 그림 3(a)의 시스템 에너지 E_s 는 다음과 같다.

$$E_s = mE_1 + mE_2 + mE_3$$

$$= m(E_1 + E_2 + E_3) \quad (2)$$

그림 3(b)의 시스템 에너지 E_s' 는

$$E_s' = (1-f)mE_1 + mE_2 + (1-f)mE_3 + fmE_4$$

$$= m(E_1 + E_2 + E_3) + fm(E_4 - E_1 - E_3) \quad (3)$$

$$E_s' = E_s + fm(E_4 - E_1 - E_3) \quad (4)$$

$$\Delta E_s = E_s - E_s' = fm(E_1 + E_3 - E_4) \quad (5)$$

ΔE_s 가 양의 값이면 에너지가 절약될 것이고, 반대로 음의 값이면 재활용 고리의 도입으로 인해 추가의 에너지가 필요하게 된다. 일반적으로 E_3 는 E_1 과 E_4 에 비해 작은 값을 나타내므로 에너지 절약의 효과는 E_1 과 E_4 의 상대적인 크기에 의존한다.

그림 4와 같은 3가지 유형의 닫힌 고리 재활용 시스템을 살펴보자. (A), (B), (C)가 모두 동일한 주요 생산 공정으로 이루어져 있으나 재활용된 물질은 각각 다른 공정으로 되돌아 간다고 가정하자. (A)의 예로는 병회수 시스템이 있다. E_1 에 비하여 E_4 가 매우 작으므로 상당한 양의 에너지를 절약할 수 있을 것이다. 플라스틱을 회수하여 세척한 후에 입자로 만들어서 다시 제품으로 만드는 경우는 (B)에 해당한다. 재활용 공정에 필요한 에너지, E_4' 는 (A)의 경우보다 클 것이다. 동시에 E_1' 은 감소하므로 에너지 절약이 (A)의 경우보다 작게 된다. (C)는 플라스틱을 회수하여 세척하고 화학적으로 처리하여 단량체로 전환시키는 경우를 말한다. E_4' 는 E_4 와 E_4' 보다 크고 동시에 E_1' 은 E_1 과 E_1' 보다 작으므로 예상되는 에너지 감소의 범위는 훨씬 줄어들 것이다. 한편, 식 (5)로부터 정해진 시스템에서의 에

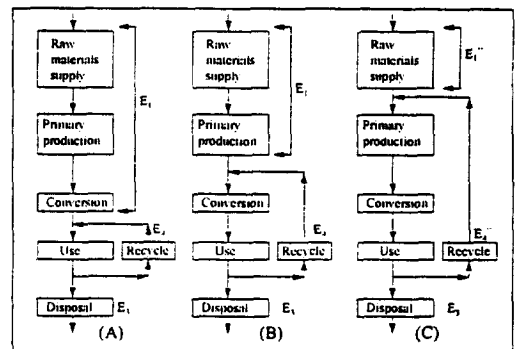


그림 4. Three different types of recycling process associated with the same production and use system.

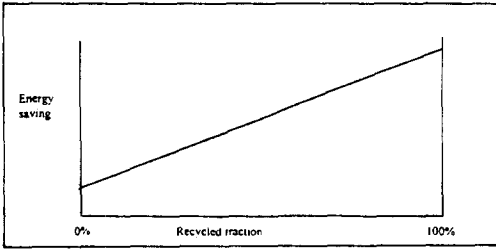


그림 5. Energy saving as a function of recycled fraction if energy terms are constant and $E_1 + E_2 - E_4 > 0$.

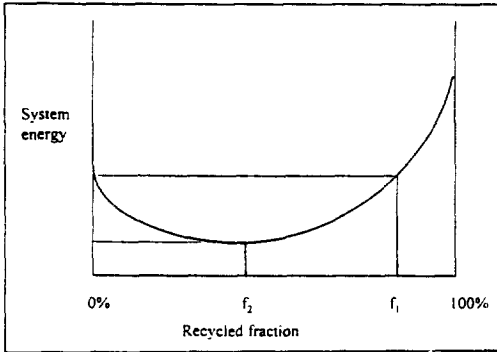


그림 6. Energy saving as a function of recycled fraction if energy terms are not constant.

너지 절약 효과, ΔE_s , 는 f 의 선형 함수이다. E_4 가 일정하다고 가정하면, 에너지 절약 효과는 재활용율을 증가시킴으로써 선형적으로 증가된다(그림 5). 그러나, 실제로 E_4 는 소비자로부터 폐기물을 회수하여, 재가공 공정으로 수송하고, 재가공한 후에 되돌려지는 등과 같은 여러 공정에서 얻어지는 복합적인 값이므로 일정하지 않다. 예를 들어 이미 회수율이 90%일 때 나머지 10%를 회수하기 위해서는 추가로 많은 에너지가 필요할 것이다. 즉, 매우 높은 회수율에서는 E_4 가 더 이상 일정하지 않고 급속히 증가한다. 그 결과 총 시스템 에너지와 재활용율과의 실제 관계는 그림 6과 같을 것이다. 그 정확한 형태는 시스템에 따라 변하지만 일반적으로 중요한 두 가지 사항을 지적할 수 있다. 첫째로 재활용 공정의 목적이 원료 및 고품 폐기물 감소에 있고 재활용되지 않는 공정보다 많은 에너지를 사용하지만 않으면 된다면, 재활용율은 f_1 을 넘지 않으면 된다. 두 번째는 재활용의 주요 목적이 에너지의 절약에 있다면, 재활용율은 f_2 가 되어야 한다.

위에서 설명한 단한 고리형 재활용 시스템의 전과정평가 예를 살펴보자. 그림 7, 8, 9, 10은 사용된 HDPE병을 회수하여 재활용, 매립, 단순소각, 에너지를 회수하는 소각 등의 폐기물 처리 방법들이 환경에 미치는 영향을 에너지, CO_2 , NO_x , 배출수의 관점에서 분석한 것이다.²⁰ 재

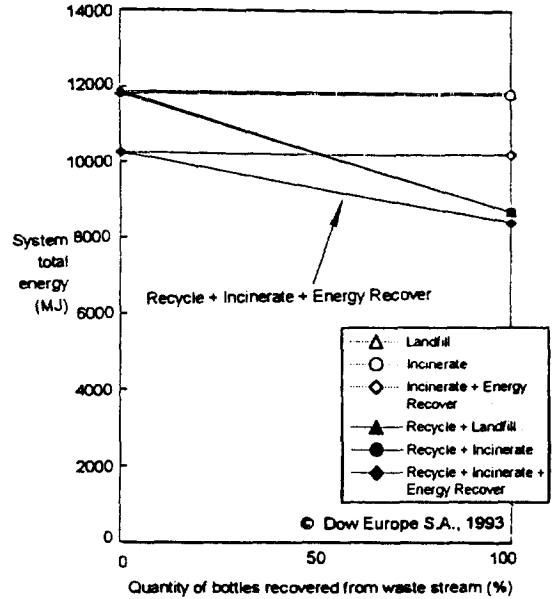


그림 7. Total energy for HDPE bottle systems utilising mechanical recycling in combination with different disposal routes including incineration with energy recovery per 1000 bottles used.

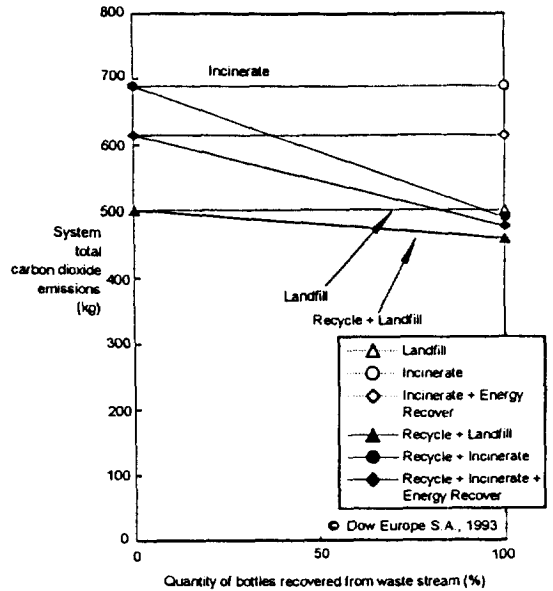


그림 8. Carbon dioxide emissions for HDPE bottle systems utilising mechanical recycling in combination with different disposal routes per 1000 bottles used.

활용공정은 HDPE병을 세척한 후 입자화시켜서 다시 병 제조공정으로 보내는 단한 고리형 재활용 시스템으로 그림 4(B)의 경우에 해당된다. 그림 7에서 보는 바와 같이, 총

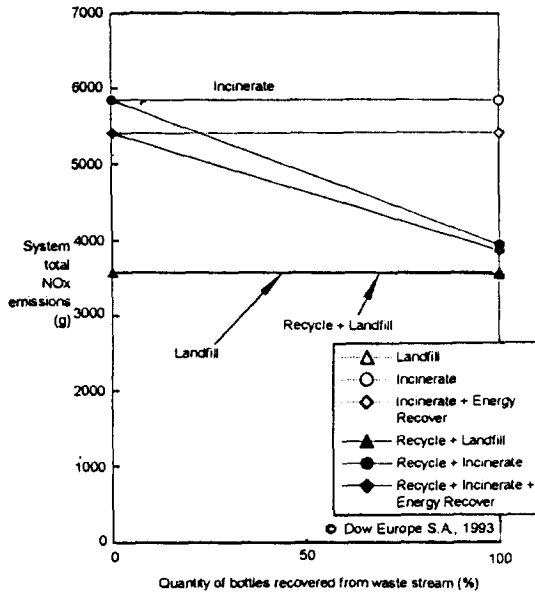


그림 9. Emissions of nitrogen oxides for HDPE bottles systems utilizing mechanical recycling in combination with different disposal routes per 1000 bottles used.

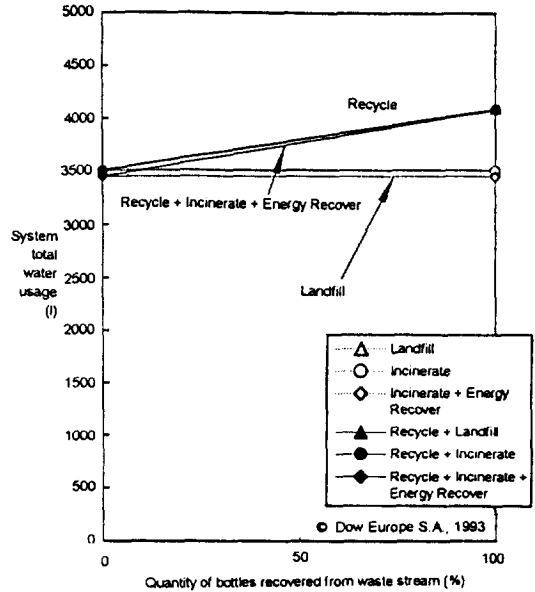


그림 10. Total water usage for HDPE bottle systems utilizing mechanical recycling in combination with different disposal routes per 1000 bottles used.

시스템 에너지는 재활용과 에너지를 회수하는 소각을 병행하였을 때 가장 작은 값을 나타냈으며, 재활용율을 증가시키면 따라 선형적으로 감소하였다. 시스템 에너지와 재활용율의 관계가 100% 재활용율에 이르도록 선형적인 것은 시스템에서 수거에 필요한 에너지를 고려하지 않았기 때문이다. 한편, 시스템의 CO₂, NO_x 배출량은 단순소각의 경우가 가장 높은 값을 보이고 있으며, 재활용과 매립을 병행하였을 때 가장 작은 값을 나타내었다(그림 8, 9). CO₂ 배출량은 재활용율이 증가함에 따라 감소하였으나, NO_x의 경우에는 재활용율에 관계없이 거의 일정함을 보여 준다. 그림 10은 재활용 방법이 가장 많은 물의 사용을 필

요로 함을 알 수 있다. 이상과 같은 결과는 표 7에 나와 있다.

3.3.2 열린 고리형 재활용

열린 고리형 재활용은 한 생산 공정으로부터 나온 물질이 사용된 후 회수되어 다른 생산 공정으로 투입되는 것을 말한다. 사용 후의 PET병을 회수하여 PET 섬유 제조에 사용하거나, PVC병을 회수하여 파이프 생산에 사용하는 것 등이다. 이와 같은 재활용의 효과를 확인하기 위해서는 재활용 전과 후의 두 개의 생산공정을 동시에 고려해야 한다. 그림 11은 두 개의 생산공정이 재활용공정에 의해 연결된 것을 보여준다.²³ 한 생산공정의 폐기물에서 f분율이 재활

표 7. Energies and Emissions from the System Studied per kg of HDPE Bottle Passing through the Consumer Unit Operation Compared to a Cost Estimate, Relative to Landfilling with No Recycling, for the Six Disposal routes Examined, When HDPE Recovery from the MSW is at the 70% Level

	Landfill, no recycling	Incineration, no energy recovery, no recycling	Incineration, with energy recovery, no recycling	Landfill, with recycling	Incineration, no energy recovery, with recycling	Incineration, with energy recovery, with recycling
Total energy requirements(MJ/kg)	194	193	168	158	158	147
Total feedstock requirements(MJ/kg)	59	59	59	32	32	32
Total fossil fuel requirements(MJ/kg)	121	120	103	109	109	102
Total CO ₂ emissions(kg/kg)	8	11	10	8	9	8
Total Nox emissions(g/kg)	59	96	88	58	74	71
Total water usage(l/kg)	57	57	56	64	64	64
Mineral waste generated(g/kg)	241	239	118	261	260	210
Mass of plastic bottles to landfill(g/kg)	1087	97	97	513	98	98
Relative cost	100	105	104	119	124	123

© Dow Europe S. A., 1993

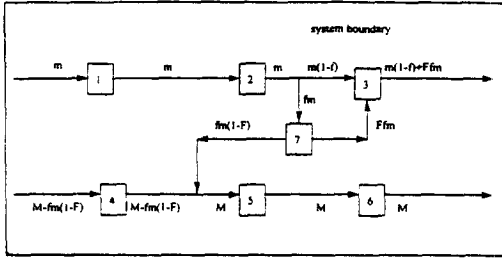


그림 11. Schematic diagram showing open loop recycling.

용되고, 재활용된 것의 F분율은 회수 및 재가공 공정에서 고형 폐기물로 손실되어 공정 3으로 보내진다고 가정한다. 이 때 투입물질의 수요량, D는 다음과 같다.

$$D = m + M - fm(1 - F) \quad (6)$$

즉, 전체 시스템에서 필요한 투입물의 양이 재활용 공정이 없을 경우보다 $fm(1 - F)$ 만큼 감소한다. 동시에, 시스템에서 배출되는 고형폐기물의 양도 $fm(1 - F)$ 만큼 감소하게 된다.

에너지의 측면을 살펴보면, 재활용 공정이 없을 경우에 필요한 에너지, E_s 는

$$E_s = m(E_1 + E_2 + E_3) + M(E_4 + E_5 + E_6) \quad (7)$$

재활용 공정이 도입되면, 시스템에서 필요한 총 에너지, E_s' 는

$$\begin{aligned} E_s' &= mE_1 + mE_2 + [m(1-f) + Ffm]E_3 + fm(1-F)E_7 \\ &\quad + [M - fm(1-F)]E_4 + ME_5 + ME_6 \\ &= [m(E_1 + E_2 + E_3) + M(E_4 + E_5 + E_6)] - [fm(E_3 \\ &\quad + E_4 - E_7)] + [Ffm(E_3 + E_4 + E_7)] \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)의 두번째 항은 손실이 없는 재활용 작업이 진행될 때 발생하는 에너지의 변화이고, 세번째 항은 재활용 공정으로부터 폐기물이 배출될 때의 에너지 변화를 나타낸다. 재활용 공정에서 폐기물이 발생되지 않는다고 가정하면, 재활용 공정의 도입으로 인해 얻어지는 에너지, ΔE_s 는 다음과 같다.

$$\Delta E_s = fm(E_3 + E_4 - E_7) \quad (9)$$

ΔE_s 는 서로 다른 제품 생산공정의 에너지(E_3, E_4)에 의존하므로 어느 제품의 공정이 에너지 절약에 대하여 더 많이 기여했는지를 판단하기가 쉽지 않다. 첫번째 생산공정(공정 1, 2, 3)에서는 두번째 생산공정을 위한 원료를 공급하므로 서로 자기들이 기여를 많이 한다고 할 수 있고, 두번째 생산공정(공정 4, 5, 6)은 그들이 폐기물을 사용했으므로 더 큰 기여를 했다고 주장할 수 있다. 한편, 다음과 같은 문제가 발생할 수도 있다. 예를 들어, 첫번째 생산공정이 PET병 제조공정이고, 두번째가 PET 섬유 제

조공정이라고 하자. PET병 제조공정의 효율을 높이기 위하여 추가로 다른 원료를 소량 사용하면, 그 병은 더 이상 재활용이 불가능하게 될 수 있다. 즉, PET 섬유 생산을 위해서는 병 생산 공정의 효율을 높이지 말아야 된다는 것이다. 그러나, 대부분의 병 제조업체와 섬유 제조업체는 서로 밀접한 관계에 있지 않으므로, 환경보호의 관점에서 공정을 개선하려면 이와 같은 문제가 해결되어야 할 것이다. 또한, 실제의 열린 고리형 재활용 시스템은 두 개의 제품 생산공정 뿐만 아니라 여러 개의 제품 생산공정이 서로 연결되어 이루어 질 수 있으므로 훨씬 더 복잡하다. 따라서, 항상 원료, 에너지, 폐기물에 대한 분석을 철저히 하여 재활용의 목적이 달성될 수 있도록 하는 것이 중요하다.

4. 결 론

전과정평가는 국제표준화기구가 추진하고 있는 환경경영의 표준화에 있어서 가장 핵심적인 분야로서 산업활동의 환경책임의 구체화하고 제품 및 공정의 환경영향을 평가하여 궁극적으로는 환경을 개선시킬 수 있는 기회를 찾는 객관적이며 적극적인 평가방법이다. 비록, 현재는 목록분석을 제외한 영향평가와 개선평가에 대한 방법론이 제대로 정립되어 있지 못한 실정이지만, 철저한 목록분석을 수행하면 고분자 관련 산업이 환경에 주는 부담을 분석할 수 있다. 최근에 큰 문제가 되고 있는 고분자 폐기물의 관리 방안에 대한 방향도 제시해 줄 수 있을 것이다. 이를 위해서는, 우선 고분자 관련 공정에 대한 데이터를 수집하여 데이터 베이스화하는 동시에, 전과정평가 전문가를 육성하는 것이 바람직하다. 산, 학, 연 공조체제를 이루어 분야별로 전과정평가에 대한 이해와 수행에 필요한 제반 사항들을 준비하는 것도 매우 중요할 것이다.

참 고 문 헌

1. E. U. Petersmann, *J. World Trade*, 43 (1993).
2. "Life Cycle Assessment", International Standards Organization, Technical Committee 207, Subcommittee 5, N30 (1994).
3. J. A. Fava, et al. "Technical Framework for Life Cycle Assessment", SETAC (1991).
4. F. Consoli, et al. "Guidelines for Life Cycle Assessment: A Code of Practice", SETAC (1993).
5. J. A. Fava, et al. "Conceptual Framework for Impact Assessment", SETAC (1993).
6. B. W. Vigon, et al. "Product Life Cycle Assessment", EPA, Cincinnati (1992).
7. M. A. Curran, *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 27, 430 (1993).
8. B. Steen and S.-O. Ryding, Swedish Environmental Research Institute, Report B1080 (1992).

9. R. Karlsson, "LCA as A Guide for The Improvement of Recycling". Leiden, SETAC-Europe, Brussels (1994).
10. Heijungs and Reinout, "Ecol. Econ.", Vol. 10, 69 (1994).
11. Franklin Associates, LTD., REPA Report (1991).
12. U. Lenel, *Metals & Materials*, 1509 (1992).
13. Franklin Associates, LTD., REPA Report (1990).
14. K. Harbersatter, Environmental Series No. 132, BUWAL, Berlin (1991).
15. "Proceeding of International Conference on Eco-Balance", Japan LCA Forum (1994).
16. I. Boustead, APME Publications on Eco-Balance of Plastics, Report 1(1992).
17. I. Boustead, APME Publications on Eco-Balance of Plastics, Report 3(1993).
18. I. Boustead, APME Publications on Eco-Balance of Plastics, Report 4(1993).
19. I. Boustead, APME Publications on Eco-Balance of Plastics, Report 6(1994).
20. D. Russel, J. O'Neill, and I. Boustead, APME Report 1(1993).
21. C. R. Fussler and B. Krummenacher, *Materials & Design*, Vol. 12, 123 (1991).
22. K. Yano, *Waste Management Research*, Vol. 4, 304 (1993).
23. I. Boustead, "Principles of Plastics Recycling", Brussels (1994).