

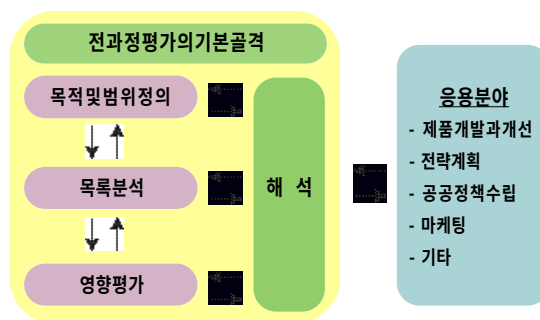
<석유화학산업의 LCA>

근본적 원인파악이 환경문제 철폐!

21세기 들어 환경문제는 세계가 가장 집중하는 문제 중 하나로 부각되고 있다. 인류의 무분별한 개발로 인해 자원고갈과 환경오염문제가 누적되면서 인류 삶의 터전이던 지구 환경이 이제는 인류의 존폐를 위협하는 존재가 됐기 때문이다. 그러나 환경오염문제가 갈수록 심각해짐에도 불구하고 인류의 발전은 더욱 가속화되고 있으며, 이에 따른 자원고갈과 환경오염도 가속화되고 있다.

이에 환경문제를 해결하기 위해 인류의 복지증진과 환경보호라는 2가지 상반되는 속성을 모두 만족시키기 위한 「지속가능한 개발(Environmentally Sound and Sustainable Development)」 패러다임이 출현하게 됐다.

ISO 14040s(LCA) 기본골격



지속가능한 개발은 인류의 복지증진을 위해 환경오염을 무시하거나 환경보호를 위해 인류의 발전을 억제하는 형태가 아닌 인류의 개발활동을 지속시키면서도 환경을 보호할 수 있는 개발활동이다.

지속가능한 개발활동은 대부분 자발적인 형태가 아닌 규제의 형태로 이루어지고 있다. 지구온난화를 유발하는 온실가스 배출을 규제하는 교토의정서, 오염물질을 유발시킨 자가 부담을 지는 오염자 부담원칙(Polluter Pay Principle, PPP), 특정 공정 및 생산방식을 규제하는 PPMs(Process and Production Methods) 등이 한 예이다. 세계가 지구촌이 되는 시점에서 규제 아닌 규제로 다가오는 환경경영시스템(EMS), 환경라벨링 등도 있다. 환경문제는 더 이상 선택이 아닌 의무의 형태로 바뀌고 있는 것이다.

석유화학산업은 생활과 가장 밀접한 관계를 맺고 있는 산업 중 하나로 규모가 매우 큰 분야여서 석유화학 산업활동에 따른 배출물이 환경에 막대한 악영향을 미치고 있다.

이에 여러 형태로 배출되는 환경오염물질을 적절한 처리과정을 통해 친환경적인 물질로 변환시켜 환경으로 배출시키려는 노력을 많이 했으나 환경오염물질 배출은 계속 누적되고 있으며, 처리비용도 막대한 실정이다.

따라서 기존의 사후처리개념(End-of-Pipe)보다는 좀 더 근본적인 오염통제(Pollution Control)의 관점에서 환경문제에 접근하는 근본적인 전환이 필요한 시점이다.

석유화학산업도 P2(Pollution Prevention), RC(Responsible Care) 등을 통해 보다 근본적·사전예방적 차원에서 환경오염을 최소화하고자 노력하고 있다.

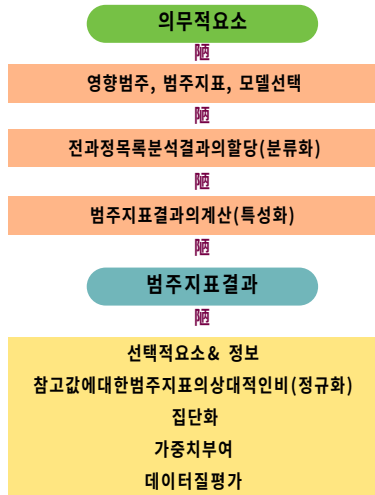
석유화학산업과 관련된 환경영향의 근본적인 원인을 파악해 환경피해를 최소화하기 위해서는 석유화학제품의 환경성을 평가해 각 제품의 환경성을 개선하는 것이 효율적이다.

전과정평가(Life Cycle Assessment)는 전과정에 걸쳐 발생하는 제품의 환경영향을 과학적·정량적으로 평가하는 기법이다. 어떤 제품이나 공정, 활동의 전과정에 걸쳐 소모·배출되는 에너지 및 물질의 양을 정량화해 환경에 미치는 영향을 평가함으로써 환경개선방안을 모색하는 객관적 환경영향평가기법이다. LCA는 총체적인 환경영향을 평가할 수 있으며, 진정한 의미에서 환경개선방안을 모색할 수 있는 값진 도구라 할 수 있다.

이러한 맥락에서 제품의 전과정에 대해 잠재적인 영향을 평가·개선하기 위해 LCA가 도입됐으며,

현재 ISO(the International Organization for Standardization) 14040s에서 국제규격으로 다루고 있다. 전과정평가는 제품의 전과정인 원료 채취부터 최종 폐기에 이르기까지 관련 투입·산출물을 정량적으로 규명하고 연관된 잠재적인 환경영향을 평가해 연구의 목적에 맞게 해석함으로써 제품과 관련된 환경측면을 파악하고 개선하는데 활용할 수 있는 환경성 평가도구이다. 현재 LCA는 ISO 14040s에서 국제규격으로 다루어지고 있으며 목적 및 범위 정의, 전과정목록분석, 전과정영향평가, 전과정해석으로 구성된다.

전과정 영향평가 요소



목적 및 범위정의는 연구의 전체적인 방향을 설정하는 단계로 전체 연구결과에도 큰 변화를 가져와 신중하고 정확한 수행작업이 필요한 단계이다.

연구의 목적정의 단계에서는 연구를 수행하는 이유와 대상청중, 연구의 의도된 적용분야를 정의해야 한다. 연구를 수행하는 단체나 기관명도 명시한다.

연구의 범위정의에서는 대상 시스템의 기능에 대한 정량화된 값이며, 제품간 환경성을 비교할 수 있는 기준인 기능단위를 설정해야 한다. 또 연구수행의 범위인 시스템경계, 수집될 데이터의 범주, 투입·산출의 초기 포함기준을 정하고 수집될 데이터의 품질요건과 연구에 사용될 가정, 사용될 영향평가 방법론 등을 설정하게 된다.

전과정 목록분석은 전과정평가의 2번째 단계로 대상 시스템의 전과정과 관련된 투입물과 산출물을 목록화하는 단계이며, 관련 데이터 수집 및 검증과 정량화,

할당 등의 과정을 포함한다.

투입물에는 원료와 보조원료, 에너지 사용 등이, 산출물에는 제품과 부산물, 대기배출물, 수계배출물, 고형폐기물 등이 포함된다.

데이터를 수집하기 이전에 대상 시스템에 대한 공정흐름도 작성, 단위공정 설정, 수집될 데이터 범주와 데이터 수집기법에 대한 기술 등을 통해 대상 시스템과 수집 대상 데이터를 파악한 후 대상 데이터에 대한 정량적·정성적 데이터를 수집한다.

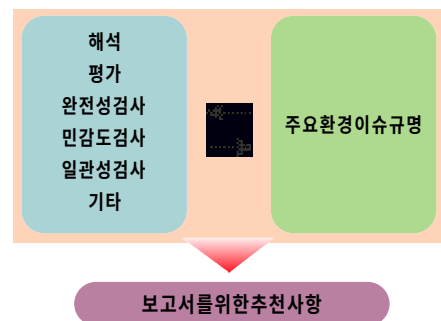
데이터를 수집하는 과정은 많은 시간과 노력이 소요되며 데이터 수집시 연구목적에 부합하는 정량적·정성적 데이터를 수집해야 하고, 차후 데이터를 확인하고 품질을 평가할 수 있도록 수집된 데이터의 출처를 반드시 기입해야 한다.

수집된 데이터는 검증, 누락된 데이터와 데이터 갭 처리, 기능단위에 맞게 환산, 단위공정별 데이터의 집산화 등과 같은 일련의 과정을 통해 전과정목록표 작성을 완성한다. 다중 투입물이나 다중 산출물 발생시 최종적인 전과정목록표를 완성하기 이전에 할당의 단계를 거치게 된다.

전과정 목록분석을 수행한 후 대상제품에 대한 환경측면을 파악하기 위해서는 전과정 영향평가를 수행하는 작업이 필요하다. 전과정 영향평가는 목록분석의 결과를 영향범주별로 분류하는 분류화(Classification), 영향범주별로 분류된 목록파라미터들이 영향범주에 미치는 영향을 정량화하는 특성화(Characterization), 영향범주별 환경영향을 지역적인 인자, 시간적인 인자, 인구수에 의한 인자 등에 의해 기여한 환경영향으로 나누는 정규화(Normalization), 영향범주별 상대적인 가중치를 결정하는 가중치부여(Weighting) 단계로 진행된다.

분류화는 목록분석의 결과에 의해 정량화된 투입물과 배출물을 영향범주와 연결시키는 과정으로, 고

전과정해석 수행절차



려할 영향범주와 범주지표, 모델을 선택한다.

각 영향범주에 대해 투입·산출물에 의해 야기되는 환경영향을 직렬효과(Parallel Effect) 및 병렬효과(Serial Effect), 원인-효과 사슬(Cause-Effect Chain)을 통해 규명해야 하며, 일반적으로 넓은 의미에서 영향범주는 천연자원과 인간보건, 생태계 등 3가지로 구분되고, 각 범주 내에는 몇개의 세부적인 영향범주가 존재한다.

플라스틱 및 관련물질 환경DB(APME)

수행모델	수행모델
ABS Copolymer	Propylene
Epoxy Liquid Resin	Polycarbonate
SAM Copolymer	HDPE
Acetone	LDPE
Acetone Cyanohydrin	LLDPE
Acrylonitrile	PP
Ammonia	PET
Benzene	PMMA
Butadiene	GPPS
Hydrogen Cyanide	HIPS
Naphtha	EPS
Pentane	MDI
Polybutadiene	Polyols
Styrene	TDI
Toluene	VCM
Xylenes(mixed)	PVC
Nylon66	Crude-Oil
Butene	Natural Gas
Ethylene	

분류화를 통해 목록 파라미터가 영향범주별로 분류된 후에는 특성화 단계에서 각각의 파라미터들에 대해 영향범주별 상응인자를 사용해 잠재적인 환경영향을 구한다.

전과정 영향평가에서 분류화와 특성화는 의무적 단계이나 이후 단계인 정규화와 집산화, 가중치부여는 선택적인 단계로 분류된다.

정규화 단계는 전과정해석을 위한 추가적인 단계로 특성화로부터 얻은 환경프로파일을 각 영향범주별로 정규화인자인 특정시간 및 특정지역, 인구수 등을 기준으로 나타내는 과정이다.

특성화를 통해 얻어낸 특성화결과를 산출된 정규화인자로 나눔으로써 각 영향범주에서 특정상황(특정시간·특정지역·1인당 등)에 대한 대상시스템의 상대적 중요성을 보여주게 된다.

가중치부여단계는 영향범주간의 상대적인 중요도를 사회적, 도덕적, 과학적, 사회적인 기준을 중심으로 정량적·정성적으로 해석하는 단계이다.

전과정해석은 목적과 범위정의에 맞게 목록분석의 결

과나 목록분석, 영향평가의 결과를 통해 주요 환경영향을 규명하고 평가함으로써 최종 결론에 도달하는 체계화된 과정이다.

LCA의 결과를 토대로 중요한 투입·산출물의 잠재적 영향을 규명하고, 규명된 주요 이슈가 연구의 목적 및 범위에 부합해 목록분석과 영향평가의 정보를 충분히 대표하는지를 조사하는 완전성 검사와 주요 이슈의 편차가 결과에 미치는 영향을 평가하는 민감도 분석검사 단계를 거친다. 또 규명된 주요 이슈들이 목록분석과 영향평가의 결과를 대표하는지를 검토한 후 검토결과를 토대로 의사 결정권자에게 결론과 조언의 형태로 보고하게 한다.

현재 석유화학산업은 세계적인 환경규제와 관련제도에 적응하기 위해 환경분야에 많은 투자와 노력을 하고 있다. 석유화학산업이 환경오염의 주범 중 하나라는 시각에서 벗어나기 위해 각종 처리시설을 통해 엄격히 관리하고 있을 뿐만 아니라 생산효율을 높여 근본적인 오염물질을 줄이고 독성물질 사용을 억제함으로써 제품의 독성물질 포함을 방지코자 하고 있다. P2나 RC, TRI(Toxic Release Index) 관리 등 여러가지 환경오염 관리기법이 사용되고 있다.

뿐만 아니라 환경성을 효율적으로 개선하기 위해 회사의 경영시스템 자체를 환경측면을 고려하도록 변화시키거나 제품의 환경성을 개선하는 등 최적화된 환경시스템을 구축하기 위해 다각적으로 노력하고 있다.

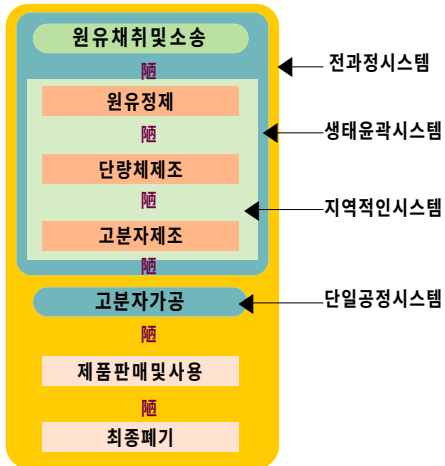
이 중 하나가 LCA를 이용한 환경데이터베이스 구축과 제품에 대한 환경성평가이다. LCA는 제품에 대한 근본적인 개선점을 찾아내기 위해 제조단계 뿐만 아니라 원료 채취·사용, 운송·폐기 및 재활용단계 등 전과정을 고려해 주요 환경측면과 원인을 규명하고 개선기회를 제공함으로써 지속가능한 발전에 기여하는 환경성 평가기법으로 사용되고 있다.

환경 DB 구축한 석유화학목록(국내)

수행모델		
Butadiene	LDPE	Benzene
Ethylene	SM	Toluene
Propylene	GPPS	Xylene
PP	HIPS	
HDPE	EPS	

LCA는 제품시스템의 전과정에 걸쳐 발생하는 환경영향을 총체적으로 평가하는데 매우 유용한 방법이다. 그러나 제품의 전과정 고려시 오랜 시간과 다단계 공정, 무한한 반복의 연속이라는 문제점이 있을 뿐만 아니라 수행과정도 복잡해 기업에서 수행하기가 쉽지 않다는 단점이 있다. 따라서 기업에서 LCA기법을 사용할 수 있도록 좀 더 단순화된 전과정평가기법이 개발돼야 하며, 이러한 개념에서 도입된 것이 데이터베이스 구축을 통한 공정의 모듈화이다.

정의된 시스템의 4가지 유형



DB 구축을 통한 공정의 모듈화는 기업의 특성적인 생산공정을 비롯 폐기나 재활용, 사용공정 등을 제외하고 공통적으로 사용하는 원료의 채취 및 생산공정 등에 대해서는 외부에서 작성된 대표적인 데이터베이스를 연결하는 방식이다. 즉 주요 원료나 공정에 대해 대표성 있는 데이터베이스가 구축되면 기업 자체의 데이터베이스와 연결시켜 LCA를 상대적으로 용이하게 수행할 수 있다. 이 방법은 중복작업을 방지해 연구에 필요한 시간과 비용을 절감하며, 연구의 오류를 줄여 신뢰성을 높일 수 있는 장점이 있다.

유럽과 북미의 선진국들은 일찍이 LCA를 위한 데이터베이스 구축작업을 주요 원료, 에너지 및 공정을 중심으로 수행해 현재 상당한 양의 데이터를 수집해 놓은 상태이다. 일본은 산업부분별 데이터베이스 구축작업에 착수해 현재 수송, 전기에너지 등의 사회간접자

본 시설과 주요 원료물질에 대한 데이터베이스가 어느 정도 구축돼 있다.

현재 석유화학산업 분야에서도 선진국을 중심으로 많은 데이터베이스가 구축됐는데, 대표적인 DB가 미국의 APC(American Plastics Council), 캐나다의 CRMD(Canadian Raw Materials Databases), 유럽의 APME(The Association of Plastics Manufacturers in Europe)에서 구축한 플라스틱 물질에 대한 전과정 데이터베이스 등이다.

APME에서는 많은 기업들의 데이터를 수집하고 평균 수치를 취함으로써 대표성을 확보한 데이터베이스를 구축했다. 데이터베이스는 효과적인 플라스틱 생산, 사용, 처리방법을 모색하기 위한 목적으로 수행됐으며, 참여 기업들은 자사의 데이터를 업계 평균 데이터와 비교해 봄으로써 자사제품의 환경적 위치와 개선점을 규명하는 기회를 얻게 됐다. 또 이 DB는 회사의 연구활동에 필요한 DB로 활용되며, 플라스틱 재료를 원료로 사용하는 최종제품을 환경친화적으로 개발하는데 크게 기여하고 있다.

일본에서는 PWMI(Plastics Waste Management Institutes)에서 1991년부터 주요 플라스틱 제품의 LCA 연구를 지속적으로 실시해왔다. 일본은 원유의 정제, 나프타의 개질 및 열분해 등과 관련된 전과정목록 데이터베이스를 구축한 바 있다. 1995년부터는 각 합성수지의 원료 채취부터 수지 제조에 이르는 일련의 공정을 대상으로 목록 데이터의 수집에 착수하고 구체적으로 검토했다.

1997년 「전과정목록 데이터의 수집조사연구 보고서」에서 주요 Olefin의 전과정목록 데이터베이스를 발표했다. 또 주요 플라스틱의 제조단계를 포함해 PP, HDPE, LDPE, PS, EPS, PVC, B-PET 등 범용수지의 전과정목록 데이터로 정리해 발표했다.

수지 관련 전과정목록 데이터는 식음료용기, 자동차, 가전제품 등 생산기업 뿐만 아니라 대학, 연구기관의 전과정평가 연구자 사이에서 유용하게 활용되고 있다.

1990년대초 LCA가 도입된 국내에서도 주요 기간산업에 대한 LCA의 데이터베이스 구축작업이 진행되고 있다. 산업자원부에서는 환경친화적인 산업구조로의 전환 촉진에 관한 법률을 시행함으로써 환경정책에 있어 제품의 전과정을 고려하는 LCA의 개념과 방법론을 고려하고 있으며, 방법론 개발 및 데이터베이스 구축을 지원하고 있다.

환경부에서는 「환경친화기업 지정」 제도를 통해 LCA의 개념을 권장하고 있으며, 제품의 환경성적을 표시하는 Type III 라벨링 제도를 실행하기 위해 주요 관련원료에 대한 데이터베이스 구축작업을 진행하고 있다.

여타 산업들과 마찬가지로 석유화학 관련산업의 공정도 제품을 생산하기 위해 원료와 에너지를 공급받고 제조공정시 고품, 수계, 대기 폐기물을 배출하게 된다. 따라서 석유화학 관련기업, 석유화학 폐기물 처리당국, 소비자들은 각 석유화학제품의 유형별 생산·사용·최종처리에 있어 환경적인 측면에서 최선의 방법을 찾는데 많은 관심을 기울이고 있다.

제조와 사용의 전 공정에 소모되는 원료, 에너지, 배출물에 대한 정확한 데이터와 자세한 정보가 없으면 최선의 방법 마련이 불가능하다.

따라서 환경적이자 자원보존의 관점에서 ▷원료 소비 ▷에너지 소요량 ▷대기 배출물 ▷수계 배출물 ▷고형폐기물 발생량 등 5개 주요 집단의 파라미터에 대한 전과정목록을 작성할 필요가 있다.

각 집단별 데이터에 대한 전과정목록 작성을 완결하면 석유화학제품의 각 제조단계나 사용단계 사이의 환경영향을 상호 비교해 개선방안을 모색할 수 있게 된다.

APME에서는 주요 플라스틱의 전과정에 걸친 에너지 소요량과 총 환경배출물을 포함하는 상세한 전과정 목록표를 작성했다. 목록표의 주용도 중 하나는 폐기물 관리단계에서 수행되는 매립, 소각, 재활용 등 석유화학제품 폐기물 처리방법이 원료 및 에너지 소모와 환경배출물에 미치는 영향을 각각 평가하고, 최선의 폐기물 관리방안을 제시하는데 있다.

LCA에서 대상 시스템은 정의된 기능을 수행하는 일련의 작업들의 조합을 의미한다. 시스템은 기능의 관점에서도 정의돼야 하는데 항상 LCA의 목적 및 범위정의 단계와 일관성 있게 정의해야 한다. 서로 다른 기능을 수행하는 시스템간 비교는 논란을 일으킬 수 있으므로 기능단위를 사용해 동일기능을 하는 시스템만 비교한다. 일반적으로 석유화학 시스템은 크게 4가지 유형으로 나눌 수 있다.

단일공정(Single Isolated Plant) 시스템의 경계는 한 공장내의 단일공정의 시스템 경계와 일치한다. 단일공정 시스템의 배출물은 해당 지역의 오염규제에 따른다.

지역적인(Regional) 시스템은 특정 지역 내에 존재하는 공정들을 모두 포함한다.

생태윤곽(Eco-Profile) 시스템은 원료 추출에서부터 최종제품 생산에 이르는 과정을 포함하는데 전과정 시스템의 흐름도를 구성하는데 도움이 된다.

전과정(Life-Cycle) 시스템은 사용에서 폐기까지 포함하는 전과정을 포함하며, 지구 전체의 환경과 관련된다.

산업 공정에서는 연료를 공급해 얻어지는 에너지를 사용해 각 공정을 가동하는데, 생산과 더불어 다량의 대기배출물이 발생한다. 특히, 석유화학산업은 일반 산업과는 달리 연료가 원료로 사용돼 LCA 적용시 에너지를 연료 에너지와 원료 에너지로 나누게 된다.

대부분의 석유화학 관련시스템에는 다량의 원료 에너지가 필요하며, 대부분 재생 불가능한 화석연료에서 추출하기 때문에 한 시스템의 수율을 향상시킴으로써 원료 에너지를 감소시켜 전체 에너지 수요를 최소화하는 것이 중요하다.

연료는 1차연료와 2차연료로 분류된다. 석유, 석탄, 천연가스 등은 땅으로부터 얻어지는 1차연료이고, 전기 등 1차연료로부터 생산되는 것은 2차연료이다. 1·2차 연료들은 에너지단위(MJ)로 환산돼 전과정 평가목록에 포함한다.

대부분 연료를 제외하고 시스템에 투입되는 모든 물량을 원료라 하며, 원료의 양은 연료와는 달리 무게 및 부피 단위로 나타낸다.

그러나 석유화학 관련공정에서는 석유가 연료이자 원료로 사용되므로 간단하지 않다. 석유가 연료로 사용될 때는 에너지를 생산하는 과정에서 대기배출물을 발생시키지만 석유화학제품의 원료로 사용될 때는 고유에너지가 파괴되지 않고 최종제품에 남아있게 된다. 제품으로 변형되는 연료 물질을 LCA에서는 「원료 에너지」라 하고 양은 에너지의 단위(MJ)로 나타낸다.

원료 에너지의 일부는 석유화학제품 소각시 에너지로 회수될 수 있으므로 시스템의 총에너지는 전체 시스템을 「요람에서 무덤까지(Cradle-to-Grave)」가동시키기 위해 필요한 에너지이며, 석유화학 시스템은 연료 에너지와 원료 에너지의 합으로 나타낸다. 제품 재활용시 신제품 사용을 대체하기 때문에 필요한 원료 에너지의 양을 절약할 수 있는 반면, 사용제품을 재활용시키는 과정에서 연료 에너지가 추가로 필요하게 된다.

따라서 사용된 제품을 회수해 세척하고 재가공하는데 필요한 연료 에너지가 신제품을 제조·폐기 처분하는데 필요한 연료 에너지보다 적다면 재활용함으로써 전체적인 연료 에너지를 절약할 수 있

다.

이밖에 석유화학산업처럼 복잡한 시스템에 LCA를 수행하기 위해서는 공정흐름도 작성 및 단위공정의 결정, 할당 등에 대한 세심한 주의가 필요하다.

LCA는 국제표준화기구가 추진하고 있는 환경경영 표준화의 가장 핵심적인 분야의 하나로 산업활동의 환경책임을 구체화하고 제품 및 공정의 환경영향을 평가해 궁극적으로 환경 개선기회를 찾는 객관적·적극적 평가방법이다.

국내에서는 아직 대부분의 석유화학기업들이 환경투자를 주저하고 있어 환경경영이나 LCA 참여도가 낮은 상태이지만 머지않아 환경성 개선이 경쟁력 확보를 위한 필수조건임을 인식하게 되면 LCA를 포함하는 환경경영에 적극 동참할 것으로 예상된다.

만약 석유화학기업이 LCA 도입에 적절히 대응하지 않는다면 세계화되는 현실 속에서 기업의 존폐는 위협받게 될 것이다.

따라서 우선 석유화학 관련공정에 대한 데이터를 수집해 데이터베이스화하는 동시에 LCA 전문가를 육성하는 것이 바람직하다. 아울러 산·학·연 공조체제를 이루어 분야별로 LCA에 대한 이해와 수행에 필요한 제반사항을 준비하는 것도 매우 중요하다.

<화학저널 2001/6/4>