

청정생산을 위한 전과정평가의 적용

김 상 용

(한국생산기술연구원 청정생산기술개발센터)

ABSTRACT

This review aims at introducing methodological approaches for pollution prevention through life cycle assessment(LCA). The conceptual relationship between cleaner production and LCA was explained in terms of environmental burden and system boundary. The recent trend in applications of LCA for cleaner production was investigated while emphasizing on process selection mainly for chemical processing industry.

Key words: LCA, cleaner production, pollution prevention, process selection

요 약 문

이 조사는 전과정평가와 청정생산과의 연계성과 전과정평가를 통한 오염방지 접근방법의 소개를 목적으로 하였다. 궁극적으로 오염의 원천감소를 달성하기 위한 청정생산과 전과정평가의 개념을 간략히 설명하였다. 청정생산을 위한 LCA의 적용은 공정 및 제품의 선택에 중점을 두어 최근 화학공정에 시범적용되고 있는 방법론 개발 추세를 검토하였다.

주제어: LCA, 오염방지, 청정생산, 공정선택

I. 서 론

청정생산의 개념은 첫째, 산업체 스스로 오염원으로부터 오염방지 및 감소에 우선적으로 힘쓰고, 둘째, 방지되지 않은 오염물질은 가능한 한 환경적으로 안정하게 재이용되어야 하며, 셋째, 방지되거나 재이용되지 않은 오염물질은 처리되어야 하며, 마지막으로 처리되지 않은 오염물질은 안전하게 폐기되거나 환경에 배출되어야 한다는 것이다(Fig.1)^(1,2,3) 즉, 이 개념은 우선 순위에 따라 열거되고 있으므로 생산과정에서의 원칙적 오염방지가 최우선임을 알 수 있고, UNEP의 청정생산에 관한 정의에서 보듯이 인류건강과 환경에의 장단기적인 위험을 방지하거나 최소화할 목적으로 제품이나 공정의 모든 과정을 평가하는 개념적이며 순차적인 접근방법 달성을 위해 전생산과정을 통한 오염방지가 이루어지는 것이다.

제품 LCA가 경제영역을 원료추출부터 폐기까지 즉, 요람에서 무덤까지(from cradle to grave) 포함

하기도 하지만, 오염방지나 최소화의 목적으로는 이 중의 한 단계 즉, 제조과정만을 분석대상 시스템으로 한정하게 된다.

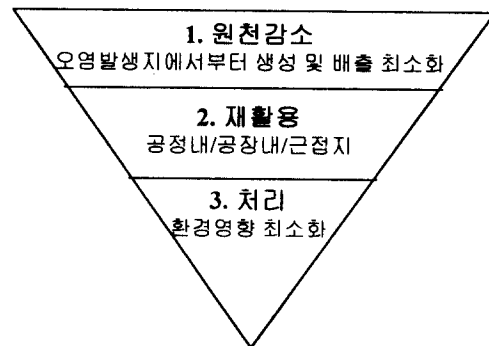


Fig. 1. Priority of pollution prevention

오염방지는 주로 현재의 공정과 제품을 고려하여 환경영향을 최소화하는데 목표를 두고 있기 때문에 전형적인 실천과 효과 기대기간은 1~2년으로 짧은 경우가 많으며, 이때는 주로 누출방지, 에너지보존과

포장개선과 같은 조업개선 실천이 이루어진다. 최근 들어서는 변경이 쉽지 않았던 공정개선, 장치변경, 공정내 재활용/재이용이 늘어나면서 분석의 난이도와 소요기간이 3~5년으로 증가하는 추세이다.

한편, 환경을 고려한 설계(DfE)는 장기적 시간에서 제품과 공정을 다루어 개발단계에서부터 모듈화, 원재료 다양성의 최소화과 공정대체를 고려한다.

LCA는 오염방지와 환경설계에 모두 적용되며, 이러한 두 가지 활동이 기업의 산업생태환경을 구성하여 환경친화적이고 지속성장이 가능한 청정생산기반을 지원해준다.

LCA는 환경에 배출된 폐기물, 사용된 에너지와 원료를 확인 후 정량화함으로써, 제품, 공정 또는 활동과 연관된 환경부하와 환경개선 기회를 평가하는 과정이다. 평가에는 원료추출 및 가공, 생산, 유통, 분배, 사용, 재이용, 보수, 재활용과 최종 폐기를 비롯한 LCA는 Fig.2에서 보듯이 자원소비와 환경으로의 배출을 시스템 분석하여 전통적으로 목적정의, 목록화, 영향평가와 개선평가의 네 단계를 지니고 있다¹⁾.

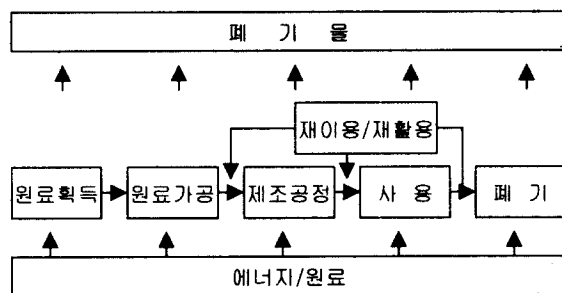


Fig. 2. Conceptual framework of LCA

LCA는 이상의 단계를 통해 청정생산활동의 기회 식별과 대안평가란 두 가지 단계에서 이용될 수 있다.

최근조사에 의하면, 산업계에서는 LCA를 제품설계, 자사 제품분석, 공정최적화, 자원평가, 원료선택 등에 사용해 오고 있으며, 산업분야 외적으로는 청정 관련 정책결정, 소비자 정보 및 상품 소비지침 정보 제공 등에 활용되고 있다.

20년 남짓의 LCA 적용사를 보면 주로 LCA는

제품에 적용되어 환경수행평가의 도구로 사용되어 왔으나, 최근 점차 공정의 선택, 설계, 최적화에서 지속가능한 대안의 식별을 지원할 수 있도록 발전적 제안이 이루어지고 있다.

이같이 새로이 도래되는 LCA의 수요는 화학공업 산업에서 과거의 협의의 시스템 정의와 환경시스템 경영개념에서 벗어나 환경수행을 개선하려는 압력이 집중되며 더욱 늘어나고 있다.

II. 오염방지를 위한 LCA의 적용

1. 공정선택

LCA는 폐기물 감소 또는 방지를 위한 잠재력이 가장 큰 공정을 선택하는 목적으로 이용될 수 있다. 즉, 청정생산을 위한 최상위 개념으로서 발생가능 오염의 원천 감소를 추구하는 공정개선의 주요한 도구로 활용되고 있다.

1997년 영국 환경국에서는 통합 오염제어규정에서 LCA를 실천 가능한 최상의 환경 선택(BPEO: Best Practicable Environmental Option)의 공정평가 방법으로 언급하였으며, 1999년에는 획득가능한 최고기술(BAT: Best Available Technology)을 확인할 때 간접배출, 원료소비 및 배출물 폐기를 포함한 전체 환경 영역에서의 LCA 적용을 인정하였다.

Azapagic¹⁾은 대상 시스템의 경계를 주영역(foreground)과 배경영역(background)으로 구분하여 전자는 목표 및 영역설정 시 규정되는 기능단위가 직접 영향을 받는 공정으로 구성되어 있는 구체적 공정자료가 요구되는 영역인 반면, 후자는 주영역시스템에 에너지와 원료를 공급해주며 통상적으로 타 기술과 공정에 관한 개별적이기보다는 혼합된 자료로 묘사되는 영역으로 구분하여 정의하였다.

이러한 정의를 기초로 SO₂, NO_x, VOC 감소 기술에 대한 BPEO 선택을 위한 LCA를 수행한 결과, 기존의 좁은 영역을 주영역과 배경영역으로 구분하여 확장한 점과 농도, 유량 등의 공정변수 변화에 따라 LCA 평가 전 알려진 BPEO의 선택이 달라질 수 있음을 확인하였다.

2. 공정최적화

화학공정에서의 복잡한 산업 시스템의 행동을 예측하기 위해 경제적 수행의 극대화에 초점을 두고 개발되어온 시스템 최적화의 수학적 모델링은 최근 10년 동안 환경수행의 최적화를 전통적 경제영역에 포함시켜 취급되어 왔지만 주로 공장 내에서의 환경 배출에만 집중되어 폐기물 최소화 기술의 개발위주로 활용되어 왔다.

이 같은 접근 방법은 오염발생의 확인을 원료재취나 사용단계 등으로 확대할 수 없어 실질적인 전과정에 걸친 환경영향을 고려한 최적화 기술이 요구되고 있다.

최근 들어 Clift 등⁵⁾은 기존의 LCA 연구에 추가하여 환경 및 경제영역에서의 다목적 최적화(MO : Multi-objective Optimization), 다수영역 결정분석(MCDA : Multi Criteria Decision Analysis), 최적절충방안선택을 포함한 최적 LCA 수행방법(OLCAP : Optimum LCA Performance)(Fig.3)을 개발하였으며 보존 생산 공정에 시범 적용함으로써 전과정에 걸친 제조 시스템의 지속적 수행을 위한 LCA와 경제·환경 영역을 모두 만족시키는 최적화 기술의 조합을 시도하였다.

3. 공정설계

가장 최근 대두되는 LCA의 적용 분야로서 제품과 공정의 설계가 있다. 이 분야에서는 전과정제품 및 공정설계(LCPD : Life Cycle Product and Process Design)⁶⁾와 같은 새로운 LCA 관련 도구가 개발되면서 진전을 보이고 있다. 최근의 공정설계를 보면 기존의 시스템 영역을 모든 기술과 원료에 대한 일차 자원의 추출에서부터 생산까지로 확대한 다음 LCA를 초기 기준 공정에 사용하고 있다. 환경적 요소를 전통적 기술 및 경제 영역과 함께 합병고려하고 전과정에 걸쳐 최상의 원료와 공정을 선택함으로써 공정개념과 구조의 기술적 혁신을 가져올 수 있는 잠재력을 제공하게 된다.

이러한 다목적 최적화 접근을 통해 미래 공정산업이 지속발전 가능한 대안을 확인할 수 있는 강력한 의사 결정 도구를 지닐 수 있게 된다.

공정설계에서의 또 다른 접근은 완벽한 자원의 재 활용에 초점을 두고 있다. Yu와 Chen⁷⁾은 LCA의 요소로서 생물물리학적 환경에서의 물질 및 에너지 수지 확인과 자원의 효율적 사용을 중시하여 제품과 원료의 100% 재활용을 산업생태측면에서의 지속가능성장 목표로 삼았다. 이를 위해 기존의 정적인 재활용 취급에서 공정설계와 조업에 중점을 둔 동적

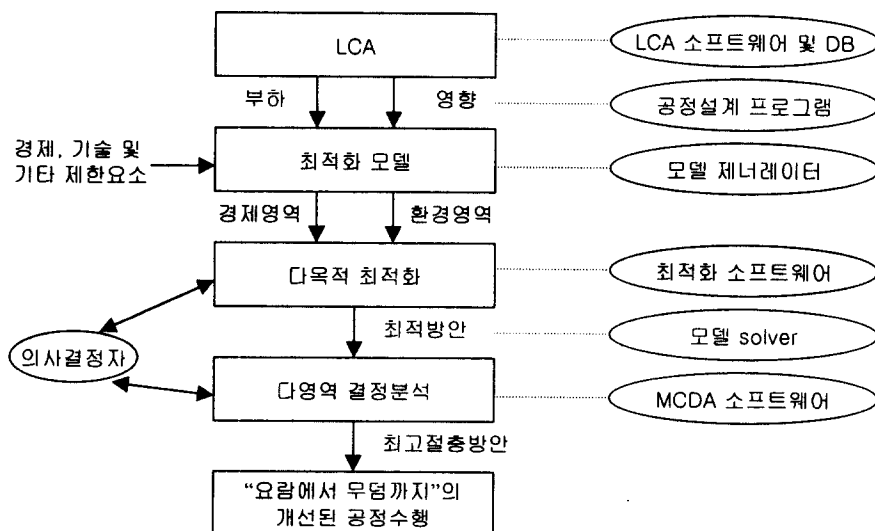


Fig. 3. Methodological system of OLCAP

물질 재활용 모델(Dynamic Positive Feedback System)을 제안하여 시장 수요에 부응한 공장의 융통성을 제공하고자 하였다.

4. 오염방지 결정

오염방지 활동대상 중 적용시점에서의 오염 원천 감소 잠재성의 효율에 기초한 선택영역을 구성하여 오염방지 평가접근법으로 LCA를 수행한 예로 영향 분석 매트릭스(IAM : Impact Assessment Matrix)를 들 수 있다.

여기서에는 투입 및 배출 목록 변수로서 원료, 에너지, 대기배출, 수계배출, 폐기물 배출의 5개 항목과 지구온난화를 비롯한 7개 환경영향범주 항목이 선정되어 있으며 전문위원회의 비교표를 통한 환경영향 분석 수행에 따른 합의가 도출된다.

실례로 Jacobs Eng. Group²⁾에서는 1992년 할로젠 화합물인 TCA를 사용한 세정공정의 VOC 배출 감소를 위해 대체세정제를 채택할 지 또는 배가스처리 기술로 수증기 탈지법과 가성소다액 세정법을 비교하기 위해 IAM에 기초한 오염방지 방안 결정을 시도하였다.

5. 원료 및 공급자의 선택

Scott paper사는 원료와 공급자 선정의 결정기준으로서 전과정 고려사항의 통합을 시도하여 펄프 구매 결정에 환경기준을 세우기 위한 공급자 평가 프로그램을 개발 수행하였으며 내부 결정과정을 위해 지역적 환경 우선 순위를 반영한 순위결정시스템을 개발하여 전과정에서 오염부하를 최소화하는 전략의 일부로서 최적의 원료 공급자를 결정하는데 LCA를 사용하였다.

6. 환경영향평가

환경영향평가(EIA)나 환경감사(EA)와 같은 환경 분석방법은 시스템을 단일 산업체 공장으로 한정하여 직접적 환경에 미치는 영향 평가에 집중하는 절차인 반면, LCA는 시스템 영역을 제품이나 공정 전 과정에서 부하와 영향을 포함하여 특정 대체 제품이나 공정의 비교를 주로 하는 도구로 볼 수 있다.

하지만 최근 LCA의 요소를 EIA의 도구로 적용

하는 시도를 통해 EIA의 유용성을 높이는 연구가 수행되고 있다⁸⁾.

7. 청정기술개발

미국의 에너지성(DOE) 산하 연방 에너지기술센터(FETC)에서는 지구온난화를 방지하기 위한 기후변화협약에서 의결된 이산화탄소 배출감소계획에 대비하여 화학연료를 바이오매스 연료로 대체하는 방안을 검토하였다. 분석대상으로 기존의 정유공정을 바이오매스 가스화에 의한 원료 및 동력을 대체하는 공정으로 잡아 기술경영 분석과 연계된 LCA를 수행하였다⁹⁾.

환경영향과 비용부담을 최소화하기 위해 공정수행, 경제성과 공정시스템 전과정목록을 통합하는 방법론이 개발되었으며, 부족한 데이터를 모사하기 위한 프로그램을 포함하고 있다.

이 연구를 통해 기존의 표준 LCA 실천의 단점을 보완하여 석유로부터의 CO₂ 배출을 비용효과적으로 감소시킬 수 있는 최선의 R&D 방안을 수립하고 있다.

8. 청정정책개발

미국의 Dr. Vignes는 총체적 환경영향을 비교하는 전통적 LCA보다는 분석과정의 특정지점에서 발생하는 이슈를 취급할 수 있는 상대적 영향평가 방법을 제안하였다.

제한적 전과정평가(LLCA)는 원래 유럽의 Schaltegger와 Sturm에 의해 개발되어 Vignes¹⁰⁾에 의해 환경문제 해결방안의 정량적 상대평가를 위해 보완되었다. Vignes는 그의 LLCA 모델을 통해 EPA가 추진하고 있는 청정기술 적용 규정의 신규제정 검토를 제안하고 있다. 다양한 잠정 신규규정의 초안을 LLCA로 분석하여 시행단계에서부터 최소의 환경영향을 확신할 수 있는 오염방지 규정을 마련토록 하는 것이다.

III. 결 론

LCA는 ISO 표준의 일부로서 환경경영과 환경라벨링의 기준으로 사용되는 동시에 산업계에서는 제

품의 환경영향 판단의 도구로서 활용이 증대되어 오고 있다.

동시에 산업환경분야에서 오염방지를 통한 청정생산의 구현이 국가적 공동관심사로 부각되면서 기존의 제한된 영역에서의 열역학적 경제성분석과 오염제어를 넘어선 기술-환경-경제성의 통합과 전과정으로의 영역 확장을 통한 산업생태개선이 요구되는 시점이다.

청정생산에서의 LCA 적용은 지금까지 방법론과 자료의 제한, 시간과 비용의 부담이라는 한계요소에도 불구하고 새로운 제한적 LCA 방법론, 최적화 기법과 설계기법의 병합 등의 노력을 통해 오염방지를 위한 구체적 제품과 공정의 개발과 정책결정도구로서 확대 발전되고 있는 추세이다.

tegit Environ. Management, 1(4), pp.297-332 (1999).

참 고 문 헌

- 1) Allen, D.T. and Rosselot, K.S., Pollution Prevention for Chemical Process, John Wiley & Sons, pp.70-121(1997).
- 2) Freeman, H.M., Industrial Pollution Prevention Handbook, McGraw-Hill, pp.293-312(1995).
- 3) Shen, T.T., Industrial Pollution Prevention, Springer-Verlag, pp.143-162(1995).
- 4) Azapagic, A., "LCA and its Application to Process Selection, Design and Optimization", Chem. Eng. J., 73, pp.1-21(1999).
- 5) Azapagic, A and Clift, R., "The Application of LCA to Process Optimization", Computers and Chemical Eng., 23, pp.1509-1526(1999).
- 6) Pennington, D.W. and Yue, P.L., "Option for the Comparison of Process Design Alternatives in the Context of Regional Toxicological Impact", J. of Cleaner Production, 8, pp.1-8(2000).
- 7) Yu, C-C and Chen, Y-H, "Implication of Dynamic LCA in Design and Operation of Industrial Processes", AIChE Proceeding, Fall (2000).
- 8) Tukker, A., "LCA as a Tool in EIA", Environ. Impact Assessment Review, 20, pp.435-456(2000).
- 9) 김상용, "전과정평가를 통한 청정생산의 촉진", 대한환경공학회 2000 춘계학술연구발표회논문집(II), pp.12-13(2000).
- 10) Vignes, R.P.V., "Limited LCA: A Tool for the Environmental Decision-Making Toolbox", Stra-