

# Life-Cycle Engineering : A state-of-the-art survey

이기숙 · 서광규

상명대학교 산업정보시스템공학과

# Life-Cycle Engineering : A state-of-the-art survey

Ki-Sook Lee · Kwang-Kyu Seo

Department of Industrial and Information Systems Engineering, Sangmyung University

## 요 약

Life-Cycle Engineering(LCE) is a decision-making methodology that considers environmental and cost needs during the product life-cycle. Environmental conscious design and manufacturing has become more and more important and it has been enforced by governmental regulations and used as trade restriction. LCE involves integrating environmental consideration into new product development including design, material selection, manufacturing processes and distribution of the product to the consumers, plus the end-of-life management such as disassembly, material recovery, remanufacturing of the product after discarding it. In this paper, a state-of-the-art survey of LCE is presented.

**Key Words** : Life-cycle Engineering, Environmental conscious design and manufacturing, Life Cycle Assessment

## 1. 서론

Life-cycle engineering은 제품의 life-cycle동안의 수행능력, 환경보호, 요구비용 고려하는 의사결정 방법론이다. 이것은 완전한 Life-cycle동안 최소한의 환경적인 영향을 주는 제품의 생산과 설계를 핵심 개념이다. 또한 설계, 유지, 유지보수 그리고 사용 중지의 문제점을 고려하여 투자의 관점을 더욱 안정시키는 것을 지원한다. 이러한 접근은 초기 설계 과정에 있어서 설계의 결정이 시간, 비용, 디자인 품질 등과 같은 life-cycle을 결정하는 기준에 다양한 영향을 미칠 수 있기 때문에 중요하다. LCE의 동기부여는 환경, 경제, 규정, 그리고 표준이다. 환경성을 고려한 설계(DFE)는 LCE의 한 요소로 DFE의 궁극적인 목표는 재생 가능한 자원을 효과적으로 관리하고 재생 불가능한 자원의 사용을 감소시키며 환경으로의 유해물질 방출을 최소화하는 것이다. 제품의 환경성 평가방법으로서의

전과정평가(LCA)의 기술은 목적 및 범위정의, life-cycle동안의 전과정 목록분석, 환경영향평가 그리고 환경개선을 포함한다. LCE 방법론의 응용을 촉진하고 강화하기 위하여 최소한의 사용자 정보입력이 요구되고 이로서 설계과정의 바탕에서 자동적으로 운영되는 많은 컴퓨터 도구와 효율적인 방법론이 개발되어 왔다. 최근 들어서는 이러한 기술은 e-Transition을 촉진하기 위해 인터넷기반의 Client-Sever모형을 기본으로 발전되고 있다.

본 논문에서는 최근들어 그 중요성이 더욱 더 증대하고 LCE 분야의 이슈와 연구분야 그리고 기개발된 방법론 및 도구 등을 조사하여 이를 서술하고자 한다.

## 2. Life-Cycle Engineering(LCE)

### 2.1. 환경성을 고려한 설계(DFE)

환경성을 고려한 설계(Design for Environment ; DFE)는 전통적인 철학과 함께 환경문제를 고려하는 새로운 설계공학 철학이다. 환경문제는 제품

의 Life-cycle의 각 단계에 대하여 논의되어진다. DFE의 궁극적인 목적은 재생 가능한 자원의 효과적인 관리와 재생 불가능한 자원사용의 감소, 환경으로서의 유해물질 방출의 최소화를 목적으로 한다. 이러한 목적을 달성하기 위해 다섯가지 원리가 적용될 수 있는데 예방, 기능적 사고, life-cycle 사고, 연속관리(chain management), 패러다임의 변화이다. 많은 회사들은 전체 사업전략 중에 DFE 도입 단계에서 다른 영향을 가져왔다. 예를 들어, 내부적/외부적 요인(drives), 내적 능력과 자원은 전자산업의 DFE의 발전에 영향을 끼쳤다는 것이 보고되고 있다. 외적 운영의 예가 고객 요구와 조정한 반면에 내적 운영의 예는 회사 내부적 절약과 비용 절감이다. 효과적으로 DFE를 수행하기 위하여 DFE는 설계의 초기단계로 통합 되어야만 한다.

**2.2 환경친화설계 및 제조(ECD&M)**

환경친화설계 및 제조 (Environmentally Conscious Design and Manufacturing ; ECD&M)는 설계와 제조단계로부터 실재하고 있고 잠재적인 유해한 환경적 영향력을 줄이기 위한 제품과 공정의 설계에 대한 접근이다. 이러한 방법론을 얻기 위해서는 해로운 물질의 발생과 사용을 최소화하고 에너지 소비를 최소화하며, 혁신적인 제품설계의 창조를 통하여 환경 적인 부담을 줄이기 위한 기회를 용이하게 해야한다.

ECD&M의 몇가지 이득에 대한 특징은 폐기에 드는 미래비용을 절감하고, 자연과 건강에 대한 위험을 감소시키며 적은 비용으로 제품의 품질을 개선시키고 또한 더 안전하고 깨끗한 공장, 그리고 더 나은 공공의 모습이다[9]. 소비자들은 제품을 사용하는 동안 발생하는 위험한 환경적 영향력을 설계팀이 고려하도록 요청해야한다. 원료 재생은 이용에 대한 공정, 제품의 부분에 대한 재제조와 재사용을 의미한다. 폐제품의 분해는 제품이 수명을 다하고 난 이후에 더 용이하게 이루어질 수 있다.

이 마지막 두 개의 전략은 설계 기술자가 분해 용이성을 고려한 설계를 수행하게 하며, 수명이 다 된 설비를 재사용하고 재활용하며 안전하고 경제적으로 폐기하도록 한다. 동시공학설계방법은 이러한 설계의 의사결정을 내리는데 도움을 준다.

**2.3 전과정평가(LCA)**

LCE는 환경과, 설비의 유지동안의 요구비용과 수행을 고려하는 의사결정 방법론이다. 이것은 제품의 전체 life-cycle 동안 최소한의 환경적 영향력을 가지는 제품의 생산과 설계에 중점을 둔다.(Stuart and Sommerville 1998) 이 전체론적인 LCE는 환경적 부담에 대한 정량화 및 경제성 평

가를 가능하게 한다. 이러한 접근은 초기 디자인 과정에 있어서 디자인 결정이 시간, 비용, 디자인 품질과 같은 life cycle을 결정하는 기준에 다양한 영향을 미칠 수 있기 때문에 중요하다.

Prasad는, life-cycle의 비용을 운영하는 세가지 요소인 기업, 소비자, 사회에 주목하였다. 비용 운영자는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{drivers} = f[C_{company}, C_{users}, C_{society}] \quad (1)$$

여기에서  $C_{company}$ ,  $C_{users}$  그리고  $C_{society}$ 는 기업, 소비자, 사회와 관련된 비용의 기여도를 나타낸다. 제품의 환경적 영향력을 분석하기 위해 사용되는 대중적인 방법의 하나는 전과정 평가(LCA)이다. 이것은 원료추출로부터, 제조, 수주 및 일정관리에 이르는 제품의 수명전체에서 발생하는 다양한 환경적 영향력에 주목한다. (Muller et al.2000).

Stuare and Sommerville (1998)는 LCA를 목록 분석, 영향평가와 개선평가 이 세가지 환경적 분석 기법에 의한 것이라고 하였다. 목록분석은 입력과 출력에 대한 증명이다. 환경영향평가는 일정 기간에 환경에 대한 입/출력평가이다. 영향분석은 상품과 관련된 주된 영향력을 분석한다. 영향력 분석결과와 마지막은 제품시스템의 환경적인 태도이다. 모델은 제품시스템에서 환경을 오염시키는 쓰레기의 방출과 자원의 고갈을 나타내기 위해 사용된다. 환경적 영향력은 자원의 고갈, 생태학적인 타락, 인간의 건강과 복지에 대한 영향을 포함한다.

**2.4. 제품의 폐기(End-of-life Disposal)**

값비싼 제품의 폐기를 대비하기 위해, 설계자들은 제품의 폐기단계에서의 경제성 및 환경적인 이득을 얻기위해, 제품의 고유의 기능적 특성에 대한 이해는 물론, End-of-life 폐기단계의 전략도 명확히 이해하여 설계시 이를 고려하여야 한다[6]. 제품 폐기단계 전략은 제품수명을 다했을 때의 제품의 재이용, 재제조, 재순환, 복구를 포함한다.

Knight와 Sodhi[3]는 대량재생 그리고 대량재생과 분해와의 조합을 위해 제품설계의 평가 지원에 사용될 수 있는 분석절차를 소개하였는데, 이 절차는 원료 분류시 누적되는 순수익이나 비용을 평가지수로 사용한다.

Williams와 Shu[8]는 폐기되는 이유와 조합된 핵심요인의 동일성을 포함하여 전기기계 제품의 낭비 흐름의 분석결과를 소개하였다. 이 정보는 재제조의 장애를 완화하기 위한, 새로우면서도 기존제품의 통합이 유용하다는 것을 설계자에게 보여준다. Mabee는 재제조 능력을 평가하기 위하여 일련의 설계 도표를 cross-functionality에 입각하여 구조적으로 접근하였다.

## 2.5 재료(Material)

LCE에서 재료의 선택은 매우 중요하다. 친환경적인 재료와 제조과정의 선택은 기술적인 능력과 생산성, 뿐만 아니라 환경적인 영향력도 감소시킨다. 연구자들 다수가 Life-cycle costing의 약80%는 제품의 설계의 초기 전략에서 결정을 내리는 사람들에게 의해 결정된다는 것에 동의했다[1]. 재료의 선택은 제품설계의 초기 단계에서 이루어지기 때문에 이러한 결정은 수명주기에 중대한 영향을 끼친다. 가장 적절한 재료와 과정의 선택에 대한 임무는 새로운 명세(specifications)의 증가, 이용가능한 재료와 과정의 빠른증가, 원료의 부족 등으로 인해 용이하지 않다. 이러한 것들은 호환가능한 대용품의 대한 연구가 요구된다[9]. 원료의 선택에 있어서 비용과, 수행능력, 품질은 반드시 만족되어야 한다. 설계 단계에서 설계팀은 life-cycle동안 초래되는 유해한 폐기물의 감소를 위한 재이용 가능한 재료와 원료를 선택해야한다. 새로운 제품의 제조에 이용되는 복구된 원료의 가치나 품질을 유지하기 위해서 적합한 원료들이 함께 재순환된다. 제품수명의 연장되면, 환경영향은 감소될 것이다. 더 적은 원료의 사용은 천연원료의 추출, 공정, 사용과 폐기 그리고 사용하는 동안의 에너지 소비를 감소할 수 있다.

## 3. 산업적용사례

### 3.1 자동차 산업

리사이클링(recycling)은 자동차의 life-cycle에서 가장 중요한 부분으로 자동차는 세계적으로 가장 완벽하게 순환되어 제조되는 제품으로 자동차 무게의 약 75%는 복구되며 나머지(주된 플라스틱이나 고무 및 유리)는 매립식 쓰레기처리 안에 버려진다(Freemantle and London 1995). 자동차의 life-cycle은 환경적 기술, 경제 그리고 정치적인 요소를 포함하고 있는 복잡한 가변성을 포함한다. 과거 포드 자동차 회사는 전기자동차(EV)와 가솔린 동력의 내부연소 차량(ICV)에 대한 완전한 life-cycle 에너지의 비교를 위해 모델을 개발하였고, 자동차 life-cycle의 모든 측면이 연구되었다. 배터리동력의 EV는 적은 방사수준(ICV는 덜 가속화하고 더 짧은 범위를 운전하며 연료를 보급하는 시간이 더 오래걸리고 비용도 더 많이 든다)과 함께 더 적은 에너지가 소비되는 것을 발견하였다. 그러나 배터리 재충전을 위한 동력기계의 높은 수준의 전기 방출을 발생시켰다. 현재 포드의 리사이클링 전략은 (1) 플라스틱내에 존재하는 리사이클링 납-산성배터리포장은 차외장을 오염시킨다. 포드는 리사이클링하기 위한 배터리수집에 대한 프

로그램을 가지고 있다. (2) US와 해외에서 수집된 폴리탄산에스테르 범퍼의 리사이클링으로부터 새로운 라디에이터그릴과 테일램프를 제조한다. (3) 엔지니어나 기술자 또는 공급자에 의한 자동차의 분해를 용이하게 하기 위한 포드사의 세계적인 recycling 지침서를 개발하고 재생이용되거나 재생이용 가능한 원료사용의 활성화를 강화한다. (4)중합체 명세에 대한 세계적인 소비자의 목표를 설정하는 것이다.

독일의 BMW는 기동성에 대한 고려사항, 환경보호 및 경제에 초점을 둔 재고, 평가, 정의의 목표로 둔 LCA 모델을 개발하였다. 하나의 연구에서 다섯가지 원료의 선택, 즉 강철시트, 알루미늄 합성물, 알루미늄과 플라스틱 표면, 마그네슘과 알루미늄 합성물 알루미늄은 BMW차의 문으로 고려되고 있다.

프랑스 자동차 산업 또한 자동차 프레임과 차체 패널(body panels)에 대한 알루미늄과 강철의 사용을 비교하기 위하여 LCA를 이용했다. 자동차의 life-cycle전체는 자동차의 생산과 사용, 자동차의 폐기에서 재료의 리사이클링, 재료의 기간을 고려한다.

### 3.2 가전산업

전자와 전기기계제품에 의해 초래되는 환경오염은 논쟁의 이슈가 되었다. Hofmann et al(2001)은 PCB부터 가지고있고 재이용 가능한 요소들의 추출을 위하여 유연한 분자동 분해 전지의 개발을 위한 데모 설비 프로젝트에 대해서 수행하였다. 이 프로젝트로부터 전자 서브어셈블리와 요소의 공급자와 협력하의 분해에 대한 설계 척도가 추출되고 순회관에 대한 새로운 분해지향적 지침서가 통합되었다.

Texas Instruments(TI)는 환경친화적 공정과 제품을 포함하고 있는 지속 가능한 개발 프로그램을 가지고 있다. 이 프로그램은 공정과 제품의 전체 life-cycle에 초점을 둔 설계적으로 통합된다. TI의 프로그램은 제품의 life-cycle의 폐기단계에서 리사이클링을 위한 설계기술과 설계로부터 위험한 원료의 제거와, 최적의 공정에 초점을 둔다

Hewlett-Packard(HP)는 컴퓨터 제품의 제품 책무 프로그램을 통하여 life-cycle을 제품의 설계에 접근시켰다. 재순환가능성, 에너지 사용의 효율성, 재사용과 재제조를 포함하고 있는 새로운 제품의 개발을 위해 환경적 전략을 정의하였고, 원료와 설계, 제조, 포장에 대한 이점을 소개하였다.

IBM은 1992년 Environmentally Conscious Products(ECP)프로그램에 착수하였다. 이 프로그램은 제품의 수명 확장, 재사용가능과 재순환 가능, 안전한 폐기, 에너지 효율의 개선 또는 에너지 소비의 감소를 위해 업그레이드 가능한 제품의 개

발에 큰 뜻을 품고 있다.

모토로라는 환경, 건강, 안전에 대한 가치를 보호하고 증진시키는 동시에 전자공학 제품을 개발하고 있다. 모토로라는 제품설계, 개발, 제조에 대한 환경적 고려사항에 대한 통합의 방법으로 기술자의 교육과 모든 고용자의 환경적인 의식에 대한 과정을 제공한다.

#### 4. 도구(Tool)

최소한의 사용자 정보가 요구되고 설계 공정의 배경에서 자동적으로 운영되기 때문에 DFE의 컴퓨터 기술과 Utilities에 대한 발전이 필요하게 되었다.

Spicer와 Wang는 LCA의 퇴거단계의 재고평가에 대한 전형적 기술인 EDIT(Environment Design Industrial Template)을 소개하였다[7]. EDIT 모델은 마이크로소프트 기반의 graphic user interface를 사용하는 제품의 설계이다. Ishii는 PC기반의 컴퓨터 프로그램, LINKER를 소개하였는데 이것은 설계기술자가 life-cycle비용에 대한 배치 설계를 빠르게 평가할 수 있도록 한다. LINKER는 요소들과 하부결합(nodes) 그리고 노드들 사이의 관계로 구성되어 있는 계층적 의미 네트워크이다.

Rose et al.[6] End-of-Life Design Advisor(ELDA)의 방법을 증명하는 것은 설계자들에게 end-of-Life 전략을 제공할 수 있고, 제품의 필요 조건을 제공하기 위한 더 높은 단계의 생태적효과성을 가능하게 한다.

통합된 환경에 대한 의식과 경제적 이익 그리고 최적의 life-cycle로부터 제품 life-cycle을 평가하는 Life-Cycle Simulation(LCS) 시스템은 Umede et al(2000)에 의해서 제안되었다. LCS는 과거 대량 생산 패러다임(PMP)과 새로운 제조 패러다임에 기초를 두고 있다.

Mani et al.[4] 컴퓨터 프로그램은 분해 복잡성과 새로운 설계의 재순환 가능성을 분석하기 위해서 CAD 파일 데이터를 사용한다. CAD데이터는 교체 모형자 (프로/엔지니어)로부터 추출된다. 이 프로그램은 설계자에게 믿을 수 있는 분해의 평가와 리사이클링의 경제성을 제공하고 설계에 대한 노력을 위해 운영된다.

#### 5. 결론

LCE는 설비의 유효기간 동안 요구되는 비용과 성능 그리고 환경문제를 고려한 의사결정 방법론이다. 이 방법론은 발단에서부터 처분까지 제품의 책무에 대한 전제적인 접근을 제공한다. LCE와 ECD&M 그리고 DFE는 부분적으로 일치한다. 산

업에 의존하고 있는 다양한 환경적 분석 기술은 설계기술자나 재생기술 개발자 또는 정책입안자에 의해서 중요한 매트릭스나 강화된 결정을 제공할 수 있다. 여기에 수명주기나 기술을 최적화하기 위한 가상실험 같은 기술 발전에 대한 연구를 계속 해야할 필요가 있다. 또한 이러한 기술은 e-Transition을 용이하게 할 수 있는 인터넷에 기반을 둔 클라이언트-서버모델을 기초로 발전되고 있다.

#### 참고문헌

- [1] Ishii, K., 1995, Life-cycle engineering design. *Journal of Mechanical Design*, 117, pp.42 - 47.
- [2] Freemantle, M. C., 1995, Total life-cycle analysis harnessed to generate 'greener' automobiles, *Chemical & Engineering News*, 73, pp.25-29.
- [3] Knight, W. A., and Sodhi, M., 2000, Design for bulk recycling: analysis of materials separation. *Annals of the CIRP*, 49, pp.83 - 86.
- [4] Mani, W., Das, S., and Caudill, R., 2001, Disassembly complexity and recyclability analysis of new designs from CAD file data. *Proceedings of the 2001 IEEE International Symposium on Electronics & the Environment*, pp. 10 - 15.
- [6] Rose, C. M., Stevels, A., and Ishii, K., 2000, A new approach to End-of-Life Design Advisor (ELDA), *Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Electronics & the Environment*, pp. 99-104.
- [7] Spicer, A., and Wang, H. M., 1995, Software tool for end-of-lifecycle consideration within a DSS approach to environmentally conscious design and manufacturing. *Computers & Industrial Engineering*, 29, pp.501 - 505.
- [8] Williams, J., and Shu, L. H., 2001, Analysis of remanufacturer waste streams for electronic products. *Proceedings of the 2001 IEEE International Symposium on Electronics & the Environment*, pp. 279 - 284.
- [9] Zhang, H.-C., et al., 1997, Environmentally conscious design and manufacturing: a state-of-the art survey. *Journal of Manufacturing Systems*, 16, pp. 352 - 371.