韓國精密工學會 2001年度 秋季學術大會論文集 pp.115~120 KSPE 01F038

환경친화적 설계를 위한 제품 전주기 데이터 관리

황오현(성균관대 대학원)*, 강무진(성균관대 기계공학부) , 이화조(영남대 기계공학부),
최병욱(한국생산기술연구원)

Management of Product Life Cycle Data for Environmental Design

O. H. Hwang(Graduate School, Dept. SKKU) , M. Kang(Mechanical Eng. Dept. SKKU) ,
H. J. Lee(Mechanical Eng. Dept. YNU) and B. U. Choi(KITECH)

ABSTRACT

Environmental Product Life Cycle Management is an activity for defining and describing the product, process or activity environmentally. Especially, the main responsibility for the environmental impact of products lies in the design phase of product. Designers carry a heavy responsibility to determine technical, economic and ecological properties of the product. So in order to help designers, structured understanding and application of treating large amount of data and information should be considered. This paper presents a methodological approach for decision supporting to build Product Life Cycle Management system and show a set of database modeling. Additionally, a key issue for databases is the quality of the provided information.

Key Words : Product Life Cycle(제품 수명 주기), Life Cycle Assessment(전과정 영향평가), Environmental Effect(환경 영향), Design for Environment(환경 친화적 설계), Recycling (재활용), Decision Support System(의사 결정 지원 시스템)

1. 서론

오늘날 국제사회에서 환경의 중요성은 이미 무역장벽과 수출문제에 밀접한 연관성을 가지며 그에 대한 관심은 나날이 증대되고 있다. 이에 따라서 환경친화적인 제품과 기술에 대한 사회적인 관심이 높아지고 환경친화적 이슈에 대한 다양한 기술과 개념들이 제안· 발전되고 있다. 좋은 설계가 좋은 공정을 만들고 그리고 결국 좋은 제품을 만들어 낸다는 기본적인 인식에 따라 제품 자체의 환경친화성뿐만 아니라 설계단계의 중요성도 커지게 되었다. 제품기획과 같은 설계의 초기 단계가 제품의 환경성에 미치는 영향은 크다. 이 제품 기획단계에서 설계자의 의사결정을 도울 수 있는 방안이 필요하다. 이 논문에서의 초점은 설계단계에서 설계자에게 제품의 환경성과 그 환경성평가의 근거에 대한 정보를 제공함으로써 설계자를 도울 수 있는 시스템을 제안하고 제품의 전 주기 동안에 다루어 지는 제품의 환경성에 대한 데이터를 효과적으로 관리할 수 있는 모델을 제안하고 있다.

2. 관련연구

제품의 환경성을 평가하고 설계자의 설계활동을 지원하기 위한 여러가지 방법론과 툴들이 개발되고 있다. LCA 방법론을 통해서 제품의 환경친화적인 정도를 나타내는 지수를 제공하게 되는데 단순히 여기에서 머물지 않고 S.W.LYE, S.G.LEE, M.K.KHOO (2001) [1] 는 제품들의 환경성평가가 좀 더 효율적으로 이루어 질 수 있는 방법론을 제안하였다. 이 논문에서는 그 중 일부 개념이 사용되었고 다음과 같다.
제품의 환경성평가는 다음의 6 범주에 대해서 나누어 이루어진다.

- Product Cost
- Design for Recovery
- Material/Assembly Impact
- Process Impact
- Usage Impact
- End-of-Life Impact

Product Cost 제품의 총 비용은 제품 생산 비용과 제품 사용 후 처리 비용의 종 합이다. 비용은 고정비용과 가변비용으로 나누어지는데 장비, 보험, 재산세 등은 고정비용으로 보고 직접노동비용, 원자재 등은 가변비용으로 볼 수 있다.

Unit Production Cost = unit fixed and variable costs

Design for Recovery 수명을 다한 제품이 처리단계에서 재활용이나 재생되려면 경제적으로 가치를 가져야 한다. 제품의 최종적인 재활용 가치는 회수비용에서 재활용을 위해서 필요한 비용을 빼고난 이후의 비용이 된다.

Design for Recovery, DfR = Net Salvage Value
= Salvage Revenue – Recycling Cost

Material/Assembly Impact (MI) 재료의 impact value 는 그 재료의 eco-indicator 값에 무게를 곱하여 계산된다. 그리고 Eco-indicator 는 LCA methodology 나 툴을 통해서 eco-indicator point(Pt) 또는 milli-indicator points(mPt)로 표현될 수 있다.

$$MI = \sum_{i=1}^{N_T} (IM_i \cdot W_i)$$

N_T is the total number of materials in the product,
IM_i is the environmental impact of material i,
W_i is the weight of material I (in kg)

Process Impact (PI) 공정활동에서 그것이 원자재의 가공이던 제품 제조 공정이든 복잡하고 다양한 형태의 배출물이 발생된다. Material/Assessment 처럼 공정에 대한 eco-indicator 값도 구해질 수 있다.

$$PI = \sum_{i=1}^{N_P} (IP_i \cdot RP_i),$$

NP is the number of processes involved in manufacturing the product,
IP_i is the environmental impact of process i, (Product Ecology Consultants 1999)
RP_i is the usage requirement process I

Usage Impact (UI) 제품이 사용될 때 자원이 소비되고 그 각각은 정도에 따라 환경에 영향을 미친다.

$$UI = \sum_{i=1}^{N_R} (IP_i \cdot RU_i),$$

IR_i is the environmental impact of usage resource i,
RU_i is the usage requirement of resource i,
NR is the number of resources needed for usage of product

End-of-Life Impact (EOLI) 제품의 처리 경로는 소각, 매립, 재활용, 재사용의 네 단계로 이루어 진다. 이중에서 재사용과 재활용이 바람직한 방향이다. Eco-indicator 는 사용된 재료의 타입, 크기, 적용된 처리 공정에 따라서 결정된다.

$$EOLI = \sum_{i=1}^{N_T} (IE_i \cdot W_i),$$

N_T is the total number of materials in the product,
IE_i is the end of life impact of material i,
W_i is the weight of material I (in kg)

이렇게 구해진 각 분류의 eco-indicator 값을 이용해서 각 제품들 간의 비교에 직접적으로 이용될 index 값을 구하게 된다. Material/Assessment 의 index 값은 다음과 같다.

$$\frac{\text{Worst Material Impact - Material Impact}}{\text{Worst Material Impact - Best Material Impact}} \times 100$$

이 식에 의해서 구해진 index 값은 같은 타입의 제품들 중에서 상대적인 index 값을 나타낸다. 즉 가장 우수한 material impact 값을 갖는 제품과 가장 나쁜 material impact 값을 갖는 제품을 함께 비교해서 현재의 제품이 그 사이에서 어느 정도의 수준을 갖는 지를 나타낸다. 그러므로 값은 1 부터 100 사이의 값을 가질 것이다. Material/Assessment 뿐만 아니라 Process Impact, Usage Impact, EOL Impact 에 대한 index 값도 마찬가지의 방법을 통해서 구해진다. 그리고 Product Cost, Design for Recovery 에 대한 식은 다음과 같다.

$$\frac{\text{Worst Product Cost - Product Cost}}{\text{Worst Product Cost - Best Product Cost}} \times 100$$

$$\frac{\text{Net Salvage Value - Worst Salvage Value}}{\text{Best Salvage Value - Worst Salvage Value}} \times 100$$

설계자가 동일하지 않은 다른 제품에 대한 환경성을 설계단계에서 비교해보고자 할 때는 앞에서 6 가지로 나눠진 각 분류에 대한 index 값을 비교함으로써 개선이 요구되는 부분을 발견하고 개선의 의사를 결정할 수 있게 될 것이다.

3. 환경친화적 제품 전 주기 관리 시스템

3.1 시스템 개요

환경친화적인 제품 전 주기 관리를 위해서 데이터를 효율적으로 관리할 수 있고 설계자의 의사결정을 지원하기 위한 모델을 제안한다. 제품 전 주기 관리 시스템은 크게 데이터베이스, 제품 전 주기 데이터 관리 모듈, 의사결정 지원 모듈로 구성된다. Fig.1 은 환경친화적 제품 전 주기 관리 시스템의 구조를 보여주고 있다.

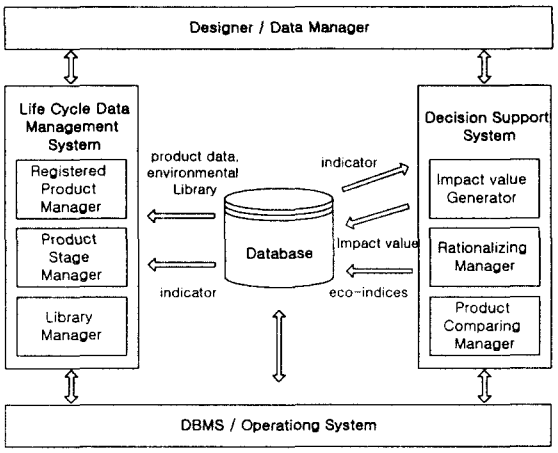

Fig.1 System Architecture of Environmental Product Life Cycle Management

3.1.1 데이터베이스

기본적으로 제품의 환경성을 평가하기 위해서 필요한 6 가지 범주, 즉 Product Cost, Design for Recover, Material/Assessment Impact, Process Impact, Usage Impact, End-of-Life Impact 에 대한 제품의 전 주기 관리 프로세스 정보를 포함한다. 전 주기 관리 프로세스는 Material, Energy, Transport, Processing, Use, End-of-Life, Cost, Recovery 로 나누어 진다. 그리고 환경성 평가의 기본이 되는 environmental library 와 indicator 에 관한 정보들을 담고 있다.

3.1.2 전주기 관리 시스템

제품 전 주기 데이터 관리 시스템은 크게 Registered Product Manager, Product Stage Manager, Library Manager 모듈로 구성된다.

Registered Product Manager 는 전 주기 관리 시스템을 시작하기 위한 가장 첫 단계로서 설계자에게 있어서 관심의 대상이 되는 제품명을 등록하고 등록된 제품명을 검색하기 위한 모듈이다. 설계자는 이 모듈을 통해서 제품을 선택하면 시스템은 Product Data Manager 모듈을 통해서 선택된 제품에 대한 제품 전 주기 목록들과 그에 해당하는 세부 데이터들을 보여준다. 이를 통해서 process 나 material 같은 각 세부 항목에 대한 환경 목록들도 검색이 가능하다.

Product Stage Manager 는 선택된 제품에 대한 각 수명 주기를 나열해 준다. 그리고 각 단계에 대한 데이터들이 검색 가능하다. 각 단계는 Assembly(Sub-assembly), Use, Disposal scenario, Cost 로 이루어 진다. Assembly 는 Material 정보와 그와 연관된 Process 정보를 담고 있다. Disposal scenario 에서는 제품의 처리 시나리오를 관리하고 좀 더 구체적인 정보는 데이터베이스의 Library 로 부터 얻을 수 있다. 실제로 이 모듈의 각 분류와 세부 항목을 통해서 eco-indicator 를 생성하게 된다.

Library Manager 는 Material, Energy, Processing, Transport, Use, Waste Treatment 와 같이 제품의 수명 주기 각 단계에 속하는 목록들과 그 목록들의 환경 요소 그리고 indicator 값을 관리하게 된다. 예를 들면 material 의 metal 중에서도 non-ferro 에 속하는 aluminum ingots B250 1000 kg 은 699 mPt 의 indicator 값을 가진다. 다른 단계들에 대해서도 비슷한 형태를 가진다. Waste Treatment 는 기본적으로 Incineration, Landfill, Recycling, Others 로 나누어진다.

3.1.3 의사결정 지원 시스템

의사결정 지원 시스템은 Impact Value Generator, Rationalizing Manager, Product Comparing Manager 로 구성된다.

Impact Value Generator 은 환경성 평가를 위해서 필요한 정의된 6 가지 범주에 대한 impact 값을 구하는 모듈이다. 전 주기 데이터 관리 시스템으로부터 생성된 indicator 값을 적용함으로써 impact value(index)를 구하게 된다.

Rationalizing Manager 는 impact value 를 Rationalizing formula 에 적용하여 최종 eco-indices 값을 구하고 데이터 베이스에 저장하는 모듈이다.

Product Comparing Manager 는 각 제품에 대해서 구해진 eco-indices 값을 이용해서 비교 대상이 되는 두개 이상의 제품을 비교함으로써 설계자에게 이

시스템의 최종적인 정보를 제공하는 단계이다. 설계자는 이 단계에서 제품의 개선 사항을 발견하고 방법을 결정하는데 도움을 받을 수 있다.

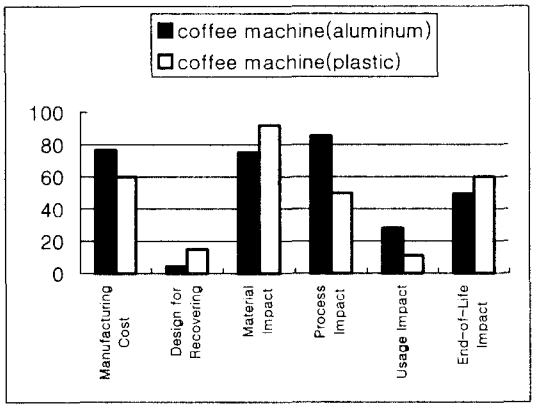

Fig.2 Example for comparing of the two cases

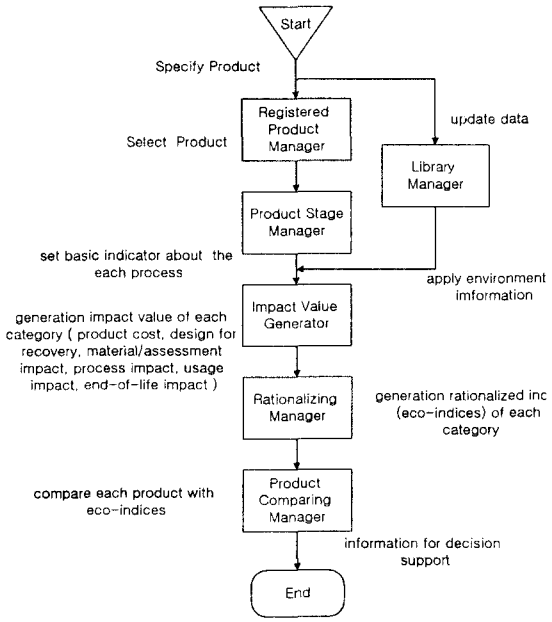

Fig.3 Process Flow of each Module

예를들어 coffee machine 의 housing 을 위한 재료로서 plastic 과 aluminium 을 선택했을 때의 eco-indices 값이 Fig.2 에 나타난 바와 같다면 coffee machine(aluminium) 이 coffee machine(plastic) 보다 Design for Recovering 과 Material Impact, 그리고 EOL Impact 범주에서 좀 더 나은 것을 알 수 있다. 그러므로 만약 설계자가 coffee machine(aluminium) 을 선택하려 한다면 이들 범주 이외에 나머지 범주에 대해서 좀 더 환경친화적인 방안을 찾아야 할 것이다.

환경친화적 전 주기 관리 시스템의 각 모듈을 따라 수행되는 Process Flow 를 보면 Fig.3 와 같다. 각 모듈의 내용은 앞에서 설명된 바와 같다.

4. 데이터 모델링

데이터 베이스는 크게 Product Stage 부분과 Environmental Library 부분으로 나눠볼 수 있다. Environmental Library 부분은 indicator 를 담고 있는 부분으로서 모든 객체가 독립적이며 객체간에 특별한 관계를 갖지 않는다. 그러나 Product Stage 부분의 객체들은 Product 객체를 중심으로 서로 다양한 관계들을 가진다. Fig.4 은 데이터 모델링의 개념적 설계를 위해서 작성된 Product Stage 부분에 대한 객체· 관계 다이어그램을 보여주고 있다.

Product 객체는 Product Data 에서 가장 중심이 되는 객체이다. ProductName 을 포함해서 Product 의 기본적인 정보를 담고 있다. ProductID 는 설계자에 의해서 제품이 결정되었을 때 제품 평가의 일관성을 위해서 다른 대부분의 객체에서도 primary key 가 된다 그럼으로써 동일한 Product 에 대한 다른 정보들의 검색이 일관성있게 이루어 질 수 있다. Assembly 객체는 product 를 이루기 위해서 조립되는 상위 부품들에 대한 목록을 갖고 있고, Material 객체와 Process 객체를 연결시켜줌으로써 각 재료에 대한 공정정보를 담게 된다. 예를 들어 coffee machine 의 Housing 은 재료로서 aluminium ingots 를 갖고 이와 연관된 공정으로서 aluminium tube production 을 갖는다. Cost 객체는 제품의 비용에 관한 정보를 담고 있는 객체이다. 그래서 Production Cost 와 Design for Recovery 에 대한 index 값을 구하기 위해서 이용된다. EOL 객체는 제품 수명 후 처리 시에 처분과 분해, 재사용에 대한 비율을 저장하고 있다. Landfill, Incineration, Recycling, Reuse, EOL_Process 는 각각의 처리 방식에 대해서 나타내고 있는데 여기에서 Category 속성은 Waste, Disassembly, Reuse 중에 그 방식이 어디에 속하는 지를 나타내고 있다. 예를 들어서 Incineration Aluminium 은 Waste 에도 속하지만 Disassembly 이후 발생하는 Waste 에도 속하므로 Disassembly 에서도 발생하게 된다. EOL_Process 는 처리 시에 있을 수 있는 과정에 대한 정보를 담고 있는데 예를 들면 Reuse 시에 Truck 에 의한 운송이 있을 수 있다. 그러면 예를 들어 Truck 16 t 과 같은 정보가 포함 될 것이다.

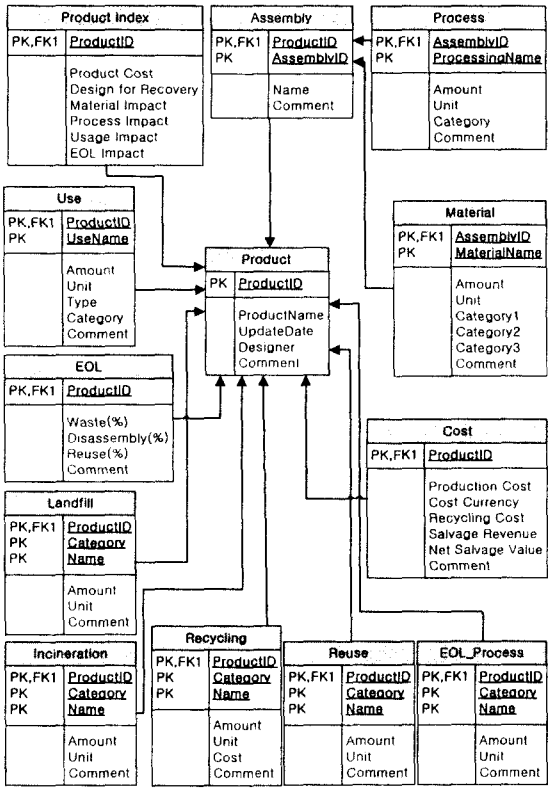

Fig. 4 Entity-Relationship Diagram

처리 시나리오를 데이터 구조의 관점에서 다시 종합해보면 다음의 Fig.5 와 같다. 우선 크게 Waste, Disassembly, Reuse, Process 로 나누고 Disassembly 는 다시 세부적으로 Landfill, Incineration, Recycle, Reuse, Process 로 나누어진다.

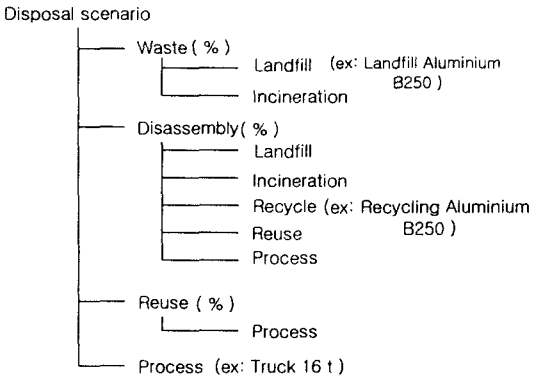

Fig.5 Disposal Scenario

Use 객체는 제품의 이용시에 소모하는 물질이나 에너지 같은 정보를 담고 있다. Category 속성 에서는 그 물질의 분류를 나타낸다. 끝으로 Product Index 객체는 설계자가 전체 시스템의 수행을 마쳤을 때 얻게 되는 최종적인 index 를 담고 있는 객체로서 최종 결과이면서 가장 주요한 객체라고 할 수 있다. 그래서 제품의 환경 평가를 위해서 다루는 6 가지 카테고리에 해당하는 각 속성들을 가지고 있다.

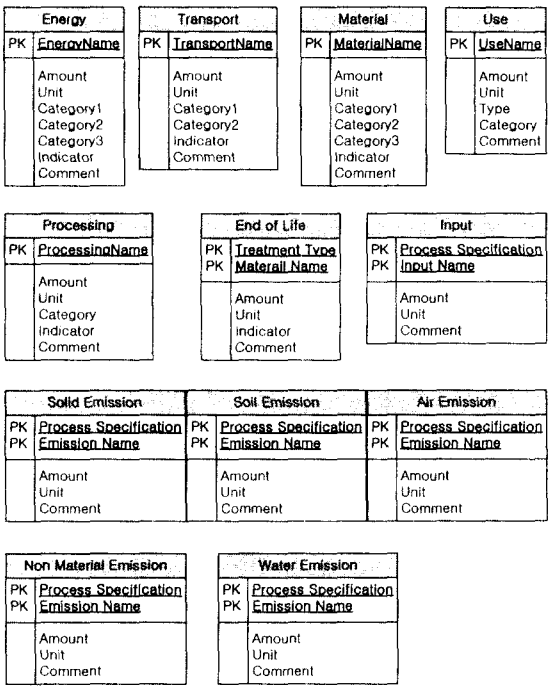

Fig.6 Entities for Environment Library

다음의 Fig.6 에서 Environment Library 부분에 해당하는 객체들과 속성들을 나열하고 있다.

Environment Library 부분에서는 indicator 에 대한 정보가 들어있는데 다음과 같다.

Material 객체는 Product 를 구성하데 가능한 재료에 대한 목록과 정보를 가지고 있다. 여기에서 Category 속성은 그 material 의 범주를 나타내고있다. 예를 들어서 stainless steel 은 금속 중에서도 철 금속에 속한다. 그러므로 Category1 은 Metal, Category2 는 Ferro 가 된다. 만약 한단계 더 분류가 이루어진다면 Category3 의 값도 가지게 될 것이다. Indicator 속성은 그 material 이 가지는 환경 척도를 나타내고 있다.

Energy 객체나 Transport 객체는 에너지나 운송에 대한 환경 정보를 담고 있다. Processing 객체는 제품 생산에 관여하는 생산 공정에 대한 각각의 공정

과 그 공정이 가지는 환경 impact 에 대한 정보를 담고 있다.
End-of-Life 객체는 제품이 수명 주기를 다한 후 처리 공정에 대한 정보를 담고 있는데 Treatment Type 속성은 Landfill, Recycling 같은 처리 시나리오에 대한 값을 갖고 Material Name 속성은 그 때의 material 값을 갖는다.
Input 객체는 앞에서 설명한 Material, Energy, Transport, Processing End-of-Life 같은 대부분의 객체에 있어서 각 프로세스가 가지는 입력 요소에 대한 정보를 담고 있다. 예를 들면 processing 에서 forging aluminum 은 1.54MJ 의 Electricity UCPTE Med. Voltage 를 입력으로 갖는다. 여기서 Field Specification 속성은 입력 물질이 속하는 Process 를 나타내는데 forging aluminum 이라면 P_forging aluminum 을 값으로 가질 것이다. Landfill 은 L_, Recycling 은 R_ 의 prefix 를 갖는다.
Air Emission, Water Emission, Soil Emission, Solid Emission, Non Material Emission 객체는 각 프로세스에서 있을 수 있는 환경 배출인자에 대한 정보를 담고 있다. 여기서 Process Specification 속성은 Input 객체에서 설명한 바와 같다. Material 중에 ammonia 에 대한 배출물 CO 라면 Process Specification 은 M_ammonia 값을 갖고 Emission Name 속성은 CO 값을 가질 것이다.

5. 결론

제품의 설계단계에서 환경성을 평가하고 설계자를 지원할 수 있는 시스템 모델과 데이터 모델링이 제안되었다. 크게 여섯 가지 영역 - Material/ Assessment, Process, Use, End-of-Life, Product Cost, Design for Recovering - 으로 나누어서 다루고 있다. 그리고 각 단계들의 환경 영향 수준은 index 로 계산되어 표시될 수 있다. 비교를 필요로 하는 각 제품들의 index 값들을 비교함으로써 그 제품이 갖는 환경친화적인 정도를 다른 비교의 제품들에 대한 상대적인 값(eco-indices)으로 표현하고 평가할 수 있게 된다. 설계자를 지원하는 시스템이나 애플리케이션은 비교되는 값을 사용자에게 친숙한 시각적인 방법으로 보여줌으로써 쉽게 설계자가 받아들일 수 있을 것이다. 이렇게 얻은 정보를 가지고 설계자는 제품의 초기 설계시에 환경영향이 크고 취약한 점을 발견하고 개선사항을 결정할 수 있다.
기업경영자와 설계자의 의사결정을 돕기 위한 성공적인 환경친화적인 제품 전 주기 관리 시스템의 구축과 적용을 위해서는 우선 방대한 양의 환경데이터와 환경 평가의 기본이 되는 method 의 수집과 적용이 명확히 이루어져야 한다. 제품이나 공정, LCA 의 결과, 비용 등의 필요로 하는 많은 데이터는 이미 데이터베이스의 형태로 가용한 상태이다. 그러므로 필요로 하는 양질의 데이터를 생성하고자 하는 노력과 더불어 존재하는 데이터의 확보와 효율적으로 적용하고자 하는 노력이 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

1. S. W. LYE, S. G. Lee and M. K. KHOO, "A design methodology for the strategic assessment of a product's eco-efficiency," International Journal of Production Research, Vol. 39, pp. 2453 - 2474, 2001.
2. B. S. Kim, "A Decision Support System for Designing Eco-effective Products," KAIST graduation essay, 2000.
3. Mahesh C. Gupta, "Environmental management and its impact on the operations function," International Journal of Operations & Production Management, Vol. 15 No. 8, pp. 34 - 51, 1995.
4. Mark Goedkoop and Renilde Spriensma, "The Eco-indicator 99 A damage oriented method for life Cycle Impact Assessment," Pre Consultants, 2000.