

◆특집◆

환경 친화적 설계 기술 - 배경 및 방법론

강무진*, 황오현**

Backgrounds and Methods for Design for Environment

Mujin Kang*, and Oh-Hyun Hwang**

Key Words : Product Life Cycle (제품 수명 주기), Design for Environment (환경 친화적 설계), Environmental Effect (환경 영향), Legislation (법제화), Recycling (재활용), Incineration (소각), Landfill (매립)

1. 서론

생산시스템에 있어서 제품 설계는 기업의 자원을 할당하는 데에 지대한 영향을 준다. 즉, 기업이 생산할 제품의 성능과 원가, 재료비와 제조비, 제품의 궁극적인 신뢰성, 그리고 제품 전주기적 비용 등에 관한 사항을 결정하는 것이다. Fig.1 에서 볼 수 있는 바와 같이, 전형적인 제조업체에서 설계 활동에는 가용 자원의 5% 이하만이 투입되지만, 그것은 가격이나 성능 등 제품의 Life Cycle 을 거의 80% 이상 결정해 버린다.

종래의 생산시스템 관점은 제품의 설계에서부터 생산 준비, 제조에 이르는 과정만을 관심 대상으로 하였으나, 환경 보존 이슈가 사회적으로 중요해 짐에 따라 제품이 사용되고 폐기되는 이후까지의 전과정을 포함하게 되었다. 지금까지의 관례상, 제품생산과 환경문제는 각각 독립적으로 취급되어 왔고 제품 개발 과정에서는 환경에 대한 고려가 거의 이루어지지 않았다. 그러나, 설계와 제조가 환경에 매우 직접적인 영향을 줄 수 있다

는 점이 명확해짐에 따라, 제품과 생산시스템이 주변 생태계에서 어떤 영향들을 미치는 지에 대해서 고려하지 않을 수 없게 되었다. 환경적 문제가 고려되려면, 제품과 관련된 환경 비용의 대부분이 설계 단계에서 정해진다는 생각으로 설계 관행이 변화되어야 한다.

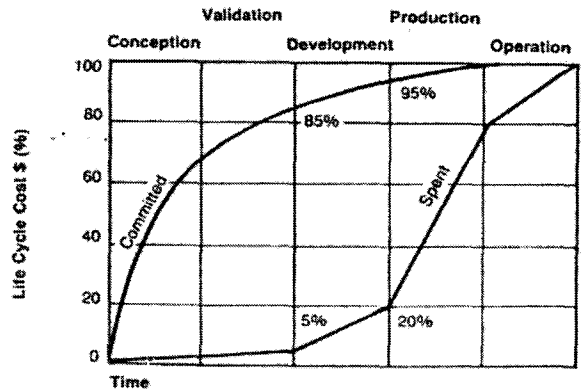


Fig. 1 Product life cycle costs

제품 설계 과정의 복잡성은 설계자들을 지원하기 위한 다수의 방법론과 도구들을 요구하고 제품 개발 시간을 단축하기 위한 동시공학 같은 접근을 필요로 한다. 이 접근 방식에 있어서 제품의 전주기적 관점을 고려한다는 것은 설계 과정이 더욱 복잡해지는 결과를 초래할 수도 있지만, 그럼에도 불구하고 환경 친화적 동시설계 방법론의 개발이 절실히 요구된다.

* 성균관대학교 기계기술연구소

** 성균관대학교 기계공학부 대학원

Tel. 031-290-7441, Fax. 031-290-5849

Email mjkgang@skku.ac.kr

생산 시스템 관련 통합화, 지능화, 원격 엔지니어링, 가상현실 기법, 시뮬레이션 등에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

본고에서는, 제품을 설계하는데 있어서 설계자가 환경 영향 요소를 다룰 수 있게 도움을 주는 환경 친화적 설계 방법론(DFE: Design for the Environment)을 설명하고자 한다. 동의어로서 영어권에서는 Green Design, Design for Sustainability, Environmentally Conscious Design 등과 같은 표현들이 혼용되고 있지만, 여기서는 DFE로 표기하기로 한다. DFE는 현 제품 개발 체계에서 수행할 수 있는 설계 패러다임으로서, 전 수명주기에 걸쳐 제품 또는 시스템에 관계되는 모든 환경적 영향을 다루고 기능, 품질, 비용 그리고 외형 등의 다른 관점과 타협하지 않으면서 영향을 최소화하려는 노력이라 할 수 있다. 흔히, 환경요소를 고려하게 되면 제품 개발 기간이 그만큼 길어지고 비용도 증대될 것이라는 생각에, 환경적 관점은 경시되어 왔던 게 사실이다. 그러나, 이제는 다음과 같은 일련의 이유 때문에 환경 문제에 정면으로 도전하지 않을 수 없는 상황이 되고 있는 것이다.

첫째, 지구상의 자원의 감소와 오염은 자원 조달 비용을 증가시킨다. 많은 기관과 단체들이 환경 친화적 행동이 더 이상 윤리적인 문제가 아니라 상업적으로도 필수사항이 되고 있다는 것을 인식시키고 있다.

둘째, 법률상의 문제가 산업 활동 안에서 환경을 고려할 수 밖에 없도록 하는 주요한 강압적인 요소의 하나가 되고 있다. 국가와 지역에 따라 그 엄중성의 정도가 다르긴 하지만, 일정 수준의 환경 친화적인 순응성을 규정하는 법률의 시행이 확대되고 있고 그 기준은 증가할 것이다.

셋째, 과거에는 환경 친화적 제품들이 기능과 외관, 그리고 가격 면에서 다소 뒤떨어지는 경향이 있었다. 그러나 새로운 기술의 개발로 이러한 문제점들이 극복되어 경쟁력 있는 제품들이 등장하게 되었다.

넷째, 일반 소비자들도 환경문제에 대한 인식이 깊어지면서 기업이 환경 친화적인 생산 활동을 하도록 압력을 증대시키고 있다. 하지만, 많은 방면에서 환경에 대한 큰 영향력을 가지고 있는 설계에서 하나 하나의 의사결정이 어떤 환경 영향을 가지게 될지를 가시화하는 것은 매우 어렵다. 잘 보존된 미래를 지킬 수 있도록 설계가 어떻게 도움을 줄 수 있는 지를 완전히 이해하기 위해서는 이하에 다루어 지는 다양한 문제들을 지켜볼 필요가 있다. Table 1은 이러한 환경 관련 문제들을 분

류한 예를 보여준다.

Table 1 Environmental issues

Depletion	Pollution	Disturbances
Abiotic resources	Ozone depletion	Desiccation
Biotic resources	Global warming	Physical ecosystem degradation
	Photochemical oxidant formation	Landscape degradation
	Acidification	Direct human victims
	Human toxicity	
	Ecotoxicity	
	Nitrification	
	Radiation	
	Dispersion of heat	
	Noise	
	Smell	
	Occupational health	

2. 설계 활동의 환경에 대한 영향

제품 개발 과정에서 설계자들은 그 중심 위치에 있으므로, 그들의 의사결정은 초래하는 환경적인 결과에 대해서 뚜렷한 영향력을 가진다. DFE를 위한 다양한 접근방식을 비교하여 각각의 장단점을 파악할 필요도 있지만, 환경 영향의 최적화를 위해서 설계시에 고려해야 할 일반적인 목표도 분명하게 이해되어야 한다. 즉, 환경과 관련된 설계의 의사결정이 제품 개발 과정 동안에 쉽고 빨리 이루어질 수 있기 위해서는, 설계자들에게 직접적인 도움을 주는 방법론 및 지침이 필요하다. 재료 및 성분, 제조 공정, 부품의 조성, 제품 사용시의 효율성, 보수유지의 범위, 재활용성 등에 관한 결정이 환경 영향의 주요 변수를 결정한다.

재료의 선택은 보통 기능성과 가용성, 제조성(Processability), 그리고 비용 간의 trade off로 결정된다. 요구되는 기계적 강도와 강성, 전기적 특성, 부식에 대한 내구성 정도에 따라 사용되는 재료가 결정된다. 그러나 재료의 선정은 동시에 환경적 영향을 동반한다. 재료의 획득에는 자원 고갈과 환경 오염이 동반되며 에너지가 사용된다. 보크사이트의 알루미늄으로의 정제나 오일 제품의 열가소성 물질로의 화학적 변환과 같은 전처리 공정은 추가적인 환경 부담을 유발한다. 재활용, 폐기 등

의 사용후 처리 공정 또한 오염이나 쓰레기를 발생시킨다. 제품의 폐기는 환경적 관점에서 가장 복잡하고 어려운 사안일 것이다. 첨가물과 재료의 혼합은 직접적인 재활용을 어렵게 만들며, 소각과 그에 동반되는 에너지 획득은 대기 오염을 초래한다. 이 모든 영향들이 재료의 선정시에 신중하게 고려되어 가능한 한 정량적으로 명시되어야 한다.

제조 공정들은 그 변환 과정에서 폐기물을 생성한다. 주조, 단조, 사출 성형, 진공 성형등과 같은 Near net shape 성형 공정은 기계 가공이나 예칭과 같이 재료를 제거하는 공정보다 효율적이다. 제거된 재료들은 원재료로 재사용 될 수도 있지만 대개는 일련의 재처리 과정을 필요로 하는데, 이때 에너지 소비와 환경 오염이 동반된다. 단순한 형태의 제조에는 압출 등으로 근사 형상으로 준비된 재료를 사용하는 것이 재료 및 에너지 소비의 관점에서 유리하다. 역설적으로 주조 등의 성형 공정은 그 자체가 에너지 소비를 크게 필요로 하지만, 재료의 절감과 후속 공정에서의 에너지 절약 효과가 더 커서 전체적으로는 더 유리하다 할 수 있다.

기능과 형상 및 크기 등 사용 효율 극대화를 위한 설계의 초점은 제품의 속성에 따라 달라진다. 제품의 포장과 운송은 수동적인 에너지 소비의 좋은 예이다. 이 경우에는 제품의 경량화가 운송차량의 연료 소비에 영향을 미쳐 에너지 소비와 오염을 감소시킨다. 반면, 능동적인 에너지 소비 제품의 경우에는 효율성이 가장 중요한 요소이다. 예를 들어, 차량은 그 수명이 다할 때까지 연료를 소비하면서 환경 부담을 발생시킨다. 이때의 효율은 다양한 관점을 포괄하는데, 엔진 자체의 효율, 차량 경량화에 의한 연료 소비 저감 등이 그것이다. 컴퓨터의 경우에는 디스플레이와 드라이브 등 고효율 주변 장치의 기술 개발을 통해 에너지 소비를 40% 가량이나 줄일 수 있다. 디지털 이동통신 분야에서는 전력 소모 극소화, 배터리와 부품 및 케이스의 소형화를 추구한다. 이런 모든 것들은 종래의 아날로그 제품에 비해서 제조는 물론 제품 사용 관점에서도 환경적으로 유리하다.

체결 요소와 조립 등 상세 설계의 의사결정은 유지보수와 재생산 및 재활용 가능성에 결정적인 영향을 미친다. 신뢰성 평가, 결합 유형 및 영향 분석(FMEA) 등의 통계적 방법은 제품의 가용성(Serviceability) 제고를 위한 합리적인 수단을 제공

한다. 혼합 성형이나 접착 등의 영구성 체결 방식으로 부품을 조립하면, 저비용의 재활용이 어렵거나 아예 불가능하게 된다. 호환성이 없는 재료로 얇은 막을 입히거나 라벨링 또는 인쇄하는 경우 등도 마찬가지로 결과를 초래한다.

3. 환경 친화적 설계 지침

3.1 환경 친화적 설계 방법론

생산과 관련된 환경 문제들과 설계 의사결정 간의 관계를 고찰함으로써 설계자들을 위한 환경 친화적 목표를 도출할 수 있다. 근래에 이런 환경 친화적 설계 방법론이 많이 개발되었으며, 그들에 있어서의 일반적인 지침들은 다음과 같다.

- 제품 생명주기의 각 단계를 환경적 관점에서 고찰할 것
- 재료, 에너지, 기타 자원의 사용 효율 증대
- 재활용 재료와 생물학적 가분해성 재료의 사용
- 환경 부담과 오염을 최소화하는 재료 사용
- 제품의 기대 수명이 적절한 지 확인할 것
- 제품 사용시 장기적인 환경 영향을 고려할 것
- 재활용, 재사용, 재생산이 용이한 설계

제품의 폐기를 고려할 때의 핵심 원리는 분해 용이성 설계(Design for Disassembly)로서, 재사용과 재활용을 위해 분해가 용이하도록 부품을 배치하는 체계적 방법을 취급한다.

DFE 방법론이 개발되기 위해서는 먼저 DFE 가 무엇인가에 대한 완전한 정의가 정립되어야 할 것이다. DFM(Design for Manufacture)이 제품을 생산할 때 일어날 수 있는 모든 문제와 기회를 다루고 있고 DFA(Design for Assembly)가 조립 공정을 개선하려는 의도로 설계의 관점에서 제품의 조립 공정을 주목하는 것처럼, DFE 에서는 제품 생산 동안에 일어날 수 있는 모든 환경 문제와 기회에 주목하고 적절한 설계 대책으로써 실현하고자 한다. 다른 동시공학적 DFX 원리(Design for Quality, Design for Cost 등)에서처럼 DFE 는 매우 넓은 범위에 대해 “요람에서 무덤까지”의 전주기적 접근방식을 취한다. 제품의 전 수명주기는 재료의 확보에서부터 최종 폐기 단계까지를 포괄하며, 결정해야 할 대단히 많은 trade-off 가 있기 때문에 DFE 는 제품 수명주기에서 각각의 단계에서 독립적으로 수행될 수 없다. 예를 들어, 후속 수명 단계에 대한 참조 없이 재료 선택 단계가 수행된다면 문제가 발생될

수 있다. 최소의 환경 부담을 갖는 재료가 아주 큰 환경 오염을 초래하는 공정을 필요로 할 수도 있다. 즉, 여러 대안들 중 제품 전 수명주기를 전체적으로 고려하여 가장 환경 친화적인 해를 찾는 것이 관건인 것이다. 이런 형태의 trade-off 가 제품 수명주기의 각 단계에서 고려되어야 하고, 동시공학은 이것을 뒷받침하기에 가장 좋은 접근법이다.

3.2 환경 친화적 설계의 단계

Inputs. 대부분의 환경 부담은 재료의 선택과 공정, 그리고 제품의 사용 및 최종 폐기와 관련하여 발생한다. 제품 또는 시스템의 환경 영향에 대한 실질적인 상황을 나타내기 위해서는 수명주기의 모든 단계를 고려해야 한다. 재료의 소비는 실제 사용되는 원자재의 종류와 양으로 표시된다. 각각의 재료는 환경에 영향을 미치는 제조 공정을 거치며, 각각의 공정들은 가공된 재료의 양에 비례하는 에너지 소비와 부산물을 발생시킨다. 아마도, 제품 또는 시스템의 소비량 통계는 해독하기 가장 어려운 단계일 것이다. DFE 를 위해서는 에너지나 연료 소비의 추정치를 입력단계에서 정의하여야 한다. 이 값들을 얻기 위하여 때로는 별도의 연구가 수행될 필요도 있을 것이다. 그리고, 각각의 재료들이 사용된 후 어떻게 처리될 것인지, 즉 재활용될 지 소각될 지 아니면 매립될 지에 대해서도 명시되어야 한다.

Data Processing. 입력 단계에서 주어진 모든 정보들은 환경적인 항목에 대한 많은 분량의 적절한 자료를 제공한다. 데이터 처리 단계는 이 자료들을 더 상세하게 분석한다. 예를 들어, 입력 단계에서 0.3kg 의 고밀도 폴리에틸렌의 사용이 정의된다면, 데이터 처리 단계에서는 이것을 원자재의 전체 양과 사용되는 에너지, 그리고 방출 물질과 쓰레기 양으로 분류한다. 이 절차는 재료의 사용, 공정 경로, 산출된 이행 자료(projected in-use data), 그리고 폐기 과정에 대해 수행된다. 일단 자료들이 이러한 각 단계에 대해 처리되면 그 자료들은 대상 제품 또는 시스템에 대한 총괄적인 “환경 프로파일”로 정리될 수 있다.

Outputs. DFE 수행의 결과는 대기 오염, 수질 오염, 에너지 소비, 배출 쓰레기 등을 포함하는 소위 “환경 프로파일”로 표현된다. 환경 프로파일은 매우 복잡 다양해서 설계자들에게 유용한 방식으로 주어지기 어려울 지도 모른다. DFE 의 결과는 여

러 가지 형태로 주어져야 한다. 환경 분석을 완전하게 수행할 수 있도록 이해하기 쉬운 표 형태로 자료가 설계자들에게 제공되어야 한다. 한편, 자료의 양이 방대한 경우에는 설계 대안들을 신속하게 비교할 수 있도록 압축되고 요약되어야 한다.

Data Analysis. 각각의 환경 부담 요인은 상대적으로 비교되어 등급화되어야 한다. “어떤 오염이 다른 것보다 더 심각한 지” 그리고 “얼마나 더 심각한 지”를 어떻게 결정할 것인가? 이에 대한 연구가 수행되고 있지만 아직은 실용적으로 쓰일 만한 확실한 방법이 없다. 한 가지 방법은 제 4 장 사례연구에서 소개할 MAC and O.v.D 수치의 이용이다. 이것은 공기 또는 물을 인간이 사용하기에 부적절하게 만드는 오염의 정도를 정부가 명시하는 체계이다. 각각의 대기 방출물과 하수 방출물은 각각 mg/m^3 단위의 MAC 값과 O.v.D 값을 갖는다. 사례연구에서는 설계 대안들을 비교하기 위해서 사용되는 환경 지표로 대기 오염 지수(API: Air Pollution Indices)와 수질 오염 지수(WPI: Water Pollution Indices)를 사용하게 된다. 이 지표는 설계로부터 나오는 각 배출량을 취하고 각기 적절한 MAC 또는 O.v.D 값으로 나눔으로써 계산된다. 예를 들어서 물에서 $200,000 mg/m^3$ 의 O.v.D 값을 갖는 염소가 200mg 하수로 방출된다면 WPI 값은 다음과 같이 계산된다.

$$WPI = \frac{200}{200,000} = 0.001$$

이와 같이 각각의 하수 방출 물질에 대한 WPI 값을 계산하여 합하면 설계 대안들의 환경 영향 정도를 비교하는 데에 사용할 종합 WPI 값을 얻는다. API 도 같은 방법으로 계산할 수 있다. 비교를 위해서는 이런 종합 API 와 WPI 값을 사용하는 것이 유용하다. 법적인 문제는 데이터 분석에서도 아주 중요한 사안이다. 모든 DFE 의 수행은 계획된 제품이나 시스템이 법적 조항을 만족하거나 가능하다면 더 능가하도록 해야 한다. 앞으로 다가 올 법제화 방향을 좇고, 가능하면 법적 강압성을 갖기 이전에 만족시키는 것이 중요하다.

Design Refinement. 설계를 환경적 관점에서 정교하게 고찰하려 할 때에 Table 2 의 항목들을 참조하면, 어떤 환경 친화적 항목이 덜 만족되었는지 신속하게 찾을 수 있다. 만약 어떤 목표가 미달성되어 설계자가 개선 방안을 찾고 있다면, 데

이더 분석과 체크리스트에 대한 설계 평가를 반복적으로 수행한다. 필요시에는, DFE 입력 단계로 돌아가 다른 재료와 공정 경로 정보를 수정하거나,

데이터 분석 단계로 돌아가야 할 것이다. 모든 환경 목표가 달성될 수 없는 경우에는 가장 중요도가 높은 것을 만족시켜야 한다.

Table 2 Environmental checklist

Life Cycle Stage	Design Goals	Addressed?	Method of Achievement	Level of Achievement
Materials	Min. energy content			
	Min. air pollution			
	Max. use of recycle			
	Min. use of materials			
Processing	Minimize waste			
	Minimize energy usage			
Disposal	Max. recyclable materials			
	Max. biodegradable materials			
	Energy recovery possible			
Legislation	Relevant legislation met or exceeded			

3.3 환경 친화적 설계의 구성 요소

DFE는 대개 재료 선정, 공정, 사용, 폐기 등으로 구성되는 형식을 따른다. 선택된 폐기 처리 방법에 따라 그 구성 요소는 약간 차이가 있을 수 있지만, Fig.2는 재활용의 경우에 대한 제품 수명주기 계산 모형을 보여 준다. 원재료의 생산과 소비는 대기나 물로의 물질 방출과 부산물을 발생시킨다. 특별한 제품의 사용은 환경에 대한 특정한 영향을 가질 것이다. 예를 들어, 자동차의 사용은 연료의 연소로부터 발생하는 배기 가스가 생기는 반면, 우유병의 사용은 단지 재사용시 우유병의 세척으로부터 수질 오염이 유발될 것이다. 폐기 경로는 또한 제품의 유형, 사용된 재료, 그리고 특정 제품과 재료에 대한 가능한 폐기 방법에 따라 달라진다.

재활용이 재료 또는 제품의 폐기 경로로 지정되면, 그것은 두가지 방식으로 환경에 영향을 미친다. 재료의 재활용을 위해서 추가적인 에너지와 원재료의 투입이 필요하게 되는 한편, 제품과 시스템에 필요한 재료 순소요량은 감소된다. DFE를 수행할 때에, 재료의 재활용으로부터 발생하는 환경 오염이 본래의 원재료에 의해 야기되는 환경 부담보다 작다는 것을 확인하는 것이 중요하다. 재생 가능 자원(Renewable resources)이 없는 경우에 재활용은 환경 관점에서 볼 때 가장 의미있는

방법이다.

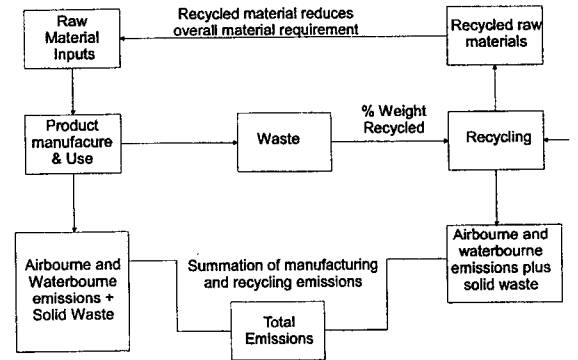


Fig. 2 Recycling calculation model

소각이 폐기 수단으로 택해지는 것은 여러가지의 이점과 단점이 있다. 소각은 에너지의 획득과 매립 할 폐기물 양의 감소를 초래하지만, 동시에 제품 또는 시스템의 전체적인 대기 배출량을 증가시킨다.

매립이 폐기 경로로 지정되면, 다소 복잡해 지긴 하지만 DFE의 구성 요소는 적어진다. 현재, 매립에 의해서 발생하는 방출 효과는 알려져 있지 않다. 땅의 오염을 정량화하는 것이 가능하다 하더라도 시간의 경과에 따른 쓰레기 퇴화에 의한

방출을 평가하기는 매우 어렵다. 따라서, 매립에 대한 현재의 계산 모델은 매립을 단지 쓰레기 증가량으로서만 취급한다.

실제 DFE 수행시에 이 모든 요소들은 각각 다른 정도로 이용된다. 제품이나 시스템의 재료가 모두 재활용되지는 않고, 어느 정도의 소각과 매립도 병행될 것이다. 실제로, 많은 경우에 100%의 재활용이 최선의 선택은 아니다. 재활용 용지의 경우, 최상의 수준은 약 60%를 재활용하는 것으로 알려져 있다.

4. 환경 친화적 설계 평가 사례

4.1 환경 친화적 설계 전산화

설계팀을 위한 지원 도구로서, 전산화된 좋은 DFE 지원 툴의 개발이 필요하다. 그 시스템은 DFE 관련 최신 데이터를 즉시 사용할 수 있는 형태로 가공하여 설계자에게 제공할 수 있어야 한다. 또한, 환경적 수명주기의 관점에서 제품을 개선할 수 있는 설계 변경의 대안들을 제시할 수 있는 기능을 포함하고 있는 것이 바람직하다. DFE 동시공학 지원 시스템에 요구되는 원리를 정리하면 다음과 같다.

- 다양한 관점에서 설계 문제를 접근할 수 있도록 유연해야 한다.
- 설계자들이 완전한 정보를 가지고 있지 않아도 설계할 수 있도록 데이터를 제공해야 한다.
- 방대하고 다양하고 상호 연관된 수명주기 관련 정보를 취급해야 한다.
- 처리 속도가 빠르고 신뢰성이 있어야 한다.
- 데이터베이스 관리와 CAD 시스템에 대한 연계가 가능해야 한다.
- 좋은 사용자 인터페이스를 가져야 한다.
- 환경적 관점에서의 설계 결과에 대한 추적(Audit)을 지원해야 하고, 새로운 데이터가 확보됨에 따라 쉽게 갱신될 수 있어야 한다.

DFE 설계 과정에 부합하기 위하여, 시스템은 재료 선정, 공정, 사용 및 폐기 등 DFE의 주요 단계를 따라야 한다. 목표를 정의하는 초기 단계는 설계자에 의해서 수행되는데, 먼저 설계의 목표와 범위가 결정된 후 다음 각 단계를 따라 컴퓨터의 도움을 받아 진행된다.

재료 선정. 컴퓨터의 데이터베이스는 많은 재료들에 대한 광범위한 환경 데이터를 포함한다.

모든 재료는 이 목록으로부터 선택되어지며 설계자는 사용할 각각의 가중치만 입력하면 된다.

공정. 재료 선정 과정이 완료되면 컴퓨터는 데이터베이스를 검색하여 그 재료에 대한 가능한 여러가지의 공정 경로를 사용자에게 제시한다. 예를 들어, 재료가 강철이면 주조, 단조, 절삭등과 같은 공정 목록이, 그리고 합성수지의 경우에는 사출 성형, 진공 성형 등의 목록이 제시될 것이다.

사용 단계는 환경 평가를 내리기에 가장 어려운 단계이다. 설계의 사전 평가에서는 사용 통계에 관한 예측만이 가능할 뿐이므로, 사용(Use) 단계의 환경 영향은 주로 컴퓨터 사용자인 설계자가 결정한다. 즉, 설계자는 제품이나 시스템이 수명주기 동안에 사용할 에너지의 종류와 양을 컴퓨터에 입력한다.

폐기 단계에서는 먼저 선정된 재료에 대한 폐기 방식을 지정한다. 현재는 재료의 분리와 분해 문제까지는 고려되지 않고 있다. 설계자는 선택된 재료 중 어떤 것이 재활용될 것이며 어떤 것이 폐기될 것인지를 구체화한다. 폐기되는 물질 중에서 컴퓨터는 소각과 매립에 대한 비율을 입력하도록 요구한다. 폐기물 처리 시설에서는 재활용 재료는 분리하여 나머지는 매립하거나 소각한다.

이제 컴퓨터는 제품 또는 시스템의 수명주기에 대한 환경 프로필을 생성하기 위해 필요한 모든 정보를 확보한 셈이다. 환경프로필은, 설계자의 입력값에 따라 수명주기 동안 발생하는 모든 배출물과 부산물들 값이 추가되어, 입력값, 배출물, 부산물, 그리고 재생된 에너지 또는 재료 등의 수치를 포함하는 목록으로 주어진다.

이상에 소개한 컴퓨터 프로그램은 설계를 개선할 목적으로 사용될 수 있다. 일례로, Nox의 방출량이 법적 제한 조건보다 아주 높을 지도 몰라 이것을 감소시킬 수 있는 방법을 찾아야 할 경우, 컴퓨터는 이 문제를 해결할 재료, 공정, 폐기 방법이 혼합된 대안을 제시할 것이다. 사용되는 재료는 기계적 성능과 같은 특정 요구조건을 만족해야 하고 컴퓨터는 그것을 고려한다. 대안을 찾아 적합성을 확인한 후 컴퓨터는 사용자에게 대안이 될 수 있는 재료를 제안한다.

4.2 사례 연구

간단한 사례연구로서 음료수 병을 생산하기 위한 재료 선정 문제를 고찰해 보자. 많은 사안들

Table 3 Environmental profiles of bottles

1 litre LDPE bottle (25g)		1 litre PET bottle (35g)		1 litre glass bottle (650g)	
Inputs		Inputs		Inputs	
Bauxite	7.5 mg	Bauxite	10.9 mg	Energy	7.15 MJ
Clay	0.5 mg	Clay	0.035 mg	Fuels for Elec.	0.34 MJ
Energy	2.5 MJ	Energy	3.3 MJ	Glass	696 g
Ferromanganese	0.023 mg	Ferromanganese	0.035 mg	Soda	8.15 g
Iron Ore	5 mg	Iron Ore	19.2 mg	Sundries	1.94g
Limestone	3.75 mg	Limestone	9.45 mg	Atmospheric Emissions	
Sodium Chloride	200 mg	Manganese	1.75 mg	Aldehydes	6.47 mg
Water	0.6 litres	Metallurgical Coal	8.05 mg	Ammonium Ions	1.3 mg
Atmospheric Emissions		Phosphate Rock	1.05 mg	Carbon Dioxide	638 g
Other Organics		Sand	0.7 mg	Carbon Monoxide	76 mg
Sulphur Oxides	334 mg	Sodium Chloride	172 mg	Dust	555 mg
Waterborne Emissions		Water	0.595 litres	Hydrocarbons	1.45 g
BOD	5 mg	Atmospheric Emissions		Hydrogen Flouride	31 mg
COD	37.5 mg	Acidic Oxide	118 g	Lead	21 mg
Diss. Organics	0.5 mg	Water Soluble Sulfide	662 mg	NH3	1.29 mg
Diss. Solids	7.5 mg	Acidic Inorganic	146 mg	Nitrogen Oxides	2.08 g
Hydrocarbons	2.5 mg	BOD	5 mg	Other Organics	4.5 mg
Metals	6.25 mg	COD	37.5 mg	Sulphur Oxides	3.45 g
Nitrates	0.125 mg	Chlorines	24 mg	Waterborne Emissions	
Oil	5 mg	Diss. Organics	455 mg	Hydrocarbons	1.3 mg
Other Nitrogen	0.25 mg	Hydrocarbons	14 mg	Metals	1.9 mg
Phosphates	0.125 mg	Metals	4.2 mg		
Sus. Solids	12.5 mg	Na	52.5 mg		
Solid Wastes		Oil	0.7 mg		
Industrial Waste	87.5 mg	Other Nitrogen	0.035 mg		
Mineral Waste	650 mg	Phenols	0.035 mg		
Non Tox. Chems	20 mg	Phosphate	0.35 mg		
Processing Waste	505 mg	Sulphate	1.4 mg		
Slag & Ash	225 mg	Sus. Solids	21 mg		
Toxic Chems.	2.5 mg	Solid Wastes			
Recovery		Chemical Waste	4.55 mg		
Recovered LDPE	23.8 g	Industrial Waste	122.5 mg		
Energy Requirement		Inert Chem. Waste	66.5 mg		
API	173.7	Processing Waste	1.4 g		
WPI	37.8	Slag & Ash	336 mg		
		Recovery			
		Recovered PET	33.3 g		
		Energy Requirement			
		API	790.4	Energy Requirement	7.2 MJ
		WPI	73.7	API	1429.9
				WPI	129.4

중에서도 Packaging 은 특별히 까다로운 문제인 것 같다. 병은 담고 있는 제품이 사용되고 나면 바로 버려지는 아주 짧은 수명주기를 갖는다. 이 문제에 대한 해답은 환경 부담이 적은 재료의 사용, 부산물의 최소화, 그리고 재활용과 재사용의 촉진 등을 포함할 것이다. 해석을 위하여, 1 리터 용량의 병 하나만을 대상으로 하고 소프트 음료를 담은 용도라 가정한다. 여기서는 Plascams 이라는 소프트웨어를 이용하는 예를 보인다.

Preliminary Selection. 재료의 선정 기준으로

가공 용이성, 투명성, 강도, 인성(Toughness), 음식 물에 대한 적합성을 고려한다. 적절한 투명성과 중공성형 기술에 의한 성형성을 근거로 하여 재료의 초기 분류가 수행되고 상세 검토를 위한 목록이 만들어 진다. 여기에는 PET, PVC, LDPE 등 다수의 플라스틱이 포함된다. 이들은 유리 재료와 함께 다른 특성을 고려할 더욱 상세한 분석 단계로 넘겨진다. 가장 유망한 후보 재료들에 대해, 제 3 장에서 설명한 바와 같이 기능적 조건과 환경적 조건을 동시에 고려하는 것이 바람직하지만, 환경

영향 데이터의 부재로 불가능할 수도 있다.

Environmental Considerations. DFE와 관련된 가장 중요한 환경 요소들을 정리하면 다음과 같다.

- 제조와 운송상의 에너지 소비,
- 재료의 소비,
- 제조시의 대기 배출물,
- 제조시의 하수 배출물,
- 고상 쓰레기,
- 재활용 재료,
- 재사용 재료

여기서, 재사용 재료란 재래적 우유병처럼 재공정이 없이 다시 사용되는 걸 말하고, 재활용 재료는 다시 녹여져서 제조공정을 다시 거치는 경우를 말한다. PET, LDPE, 유리 등을 고려해 보자. 이런 재료에 대해서는 에너지, 재료 획득과 발전을 위한 연료 등의 입력값, 대기 배출량, 하수 배출량, 고상 쓰레기 폐기물, 가능한 재활용 재료의 비율 등의 포괄적인 환경 데이터가 존재한다. 따라서, 각 재료에 대한 환경 프로필이 산출될 수 있다. 사용되는 재료의 구체적인 양으로부터 환경 프로필이 계산되고, 그것은 대체 재료에 대한 환경 프로필과 비교된다. 각 재료에 대한 공정 경로가 주어지면, 프로필은 재료의 생산과 병의 생산에 대한 내용을 모두 포함해야 한다. 그리고 나서 재활용을 포함하도록 확장할 수도 있다. 여기서는 병 생산에 사용되는 유리는 100% 재활용된 것으로 가정하고 합성수지는 초기의 원료 상태라고 가정한다.

여기에서 사용한 데이터는 유럽의 평균값으로, 에너지 1MJ 당 유발되는 환경 부담 항목 및 값은 다음과 같다.

CO ₂	100,381mg
CO	88mg
DUST	35mg
CxHy	2.6mg
Nox	330mg
Sox	495mg
API	188.1

대기 배출 자료를 근거로 계산된 대기오염지수(API)는 188.1로 추정되며, 에너지 획득시 하수로 배출되는 물질은 없으므로 수질오염지수(WPI)는 계산되지 않는다. Table 3은 PET와 LDPE, 그리고 유리에 대해 계산된 환경프로필을 보여준다. 많은 양의 데이터가 단순한 비교를 어렵게 만들지

만, API, WPI, 에너지 요구량 등의 값을 통해 종합적인 평가를 할 수 있다. 이 결과에 따르면 LDPE 병이 종합적으로 최소의 환경 부담을 준다는 것을 알 수 있다. LDPE는 우유와 내압력성을 요하지 않는 다른 적용 분야에는 적합하겠지만, 불운하게도 CO₂에 대한 투과성 문제 때문에 탄산음료에는 적합하지 않다. Table 2의 체크리스트에 비추어 보면, 아홉 개의 주요한 환경 목적 중 단지 네 가지만이 달성되었음을 알 수 있지만 그들이 가장 중요한 항목이라는 것을 확인할 수 있으면 별 문제가 안된다. 한편, 유리병은 가장 좋은 재활용 재료이며, PET 병은 최소량의 쓰레기 폐기물을 발생시킨다. 제품 운송의 관점에서는 LDPE의 가벼운 특성이 대기 오염 배출을 감소시키고 최상의 선택이 될 것이다.

후 기

이 특집 원고는 Holloway *et.al.*의 "Design for Optimal Environmental Impact"를 근간으로 하여 정리된 것임을 밝힙니다.

참고 문헌

1. Holloway, L., *et.al.*, "Design for Optimal Environmental Impact," Design for X - Concurrent Engineering Imperatives (ed. Huang, G.Q.), Chapman & Hall, 1996.
2. Jacobs, G., "Designing for Improved Value," Engineering, London, February, 1980.
3. Guineé, J.B., *et.al.*, "Quantitative Life Cycle Assessment of Products - Classification, Evaluation and Improvement Analysis," Journal of Cleaner Production, Vol. 1, No. 2, 1993.
4. Holloway, L., Tranter, I., "Environmental Design - What is best practice?," Inaugural Conference of the European Academy of Design - Design Interfaces, University of College, Salford, 1995.
5. Allenby, B., "Industrial Ecology Gets Down To Earth," IEEE Circuits and Devices Magazine, Vol. 10, No. 1, pp. 24-28, 1994.
6. Bowden, J., O'Grady, P., "Characteristic of Support Tool for Life-cycle Engineering," LJSDEM Technical Report, North Carolina State University, 1989.