

## LCA와 DfE기법을 이용한 친환경적인 지게차 제조공정의 설계

박광호 · 황용우<sup>†</sup> · 박일도\*

인하대학교 환경공학과 · \*대우중공업 생산기술팀

(2004년 3월 12일 접수, 2005년 6월 24일 채택)

### Design of Environmentally Sound Manufacturing Process of Fork Lift using LCA and DfE Methodology

Kwang-Ho Park · Yong-Woo Hwang<sup>†</sup> · Il-Do Park\*

Department of Environmental Engineering, Inha University · \*Production Technology Team, Daewoo Heavy Industries Ltd.

**ABSTRACT** : Life Cycle Assessment(LCA) and Design for Environment(DfE) method were applied to design the environmentally sound manufacturing process of folk lift in this study. Not only external movement of LCA and DfE method in the legal and systemic phase, but also active researches of those in the development phase of case study and application to the industrial field, have been going on. In concretely, the manufacturing processes of the folk lift generating the most environmental impact were examined by applying LCA method, and the environmentally sound manufacturing process was designed by applying DfE method to the processes. As the results of LCA, environmental impacts for the eco-toxicity and human toxicity of seven major environmental categories were in high value, and so be in the cutting & welding process and painting process among the manufacturing processes. High solid paints, increasing the solid content of the existing solvent paints used in painting process, were developed to reduce the environmental impacts generated in the painting process. By utilizing the high solid paints, about 20% of environmental impacts (as environmental index of LCA) could be reduced.

**Key Words** : Life Cycle Assessment, Design for Environment, Environmental Impacts, Fork Lift, High Solid Paints

**요약** : 본 연구에서는 국내외에서 법적, 제도적 측면의 외적 정비뿐만 아니라, 학계 및 산업계의 제품별 사례분석 및 적용 측면에서 활발한 연구가 진행되고 있는 LCA와 DfE기법을 제조공정에 적용하였다. 구체적으로, 지게차 제조공정을 대상으로 LCA 기법을 적용하여 환경부하가 가장 큰 제조공정을 규명하고, 그 공정에 DfE 기법을 적용하여 친환경적인 제조공정을 설계하였다. 지게차 제조공정에 대해 LCA를 수행한 결과, 영향범주별로는 생태독성과 인간독성에 대해, 그리고 공정별로는 제관공정과 도장공정에서 환경부하가 크게 나타났다. 제관공정에서 환경부하를 줄이기는 현실적으로 어렵기 때문에, 도장공정에서 발생하는 환경부하를 저감하고자 하였다. 이를 위해 지게차의 도장공정에 기존에 사용하고 있는 용제형 도료의 고형분 함량을 늘려 high solid형 도료를 개발하여 적용한 결과, 환경영향(LCA의 환경영향지수)이 20% 저감되었다. 또한, VOC발생량은 약 32%, 도료 사용량은 약 20%의 저감효과를 얻을 수 있었다.

**주제어** : LCA, 환경친화적 설계, 환경영향, 지게차, High Solid형 도료

## 1. 서론

전세계적으로 환경문제의 심각성이 더해감에 따라, 전 지구적 환경부하를 줄이기 위해 확대생산자책임제도(Extended Producer Responsibility; EPR)와 같이 제품을 생산하는 기업에 대한 책임부하가 증가되고 있으며, 또한 기업은 법규, 소비자 및 NGOs 등의 요구에 의해 제품 및 공정에 있어서 높은 환경기준과 사회적, 도덕적 의무를 요구받고 있는 상황이다. 과거에 기업들은 환경문제를 “End of Pipe”라는 접근 방법에 의해 사후처리시스템으로 대응해 왔으나, 이러한

방법은 생산의 증가, 환경법규의 강화로 인한 추가적인 처리비용이 많이 들어 비효율적이라는 것이 증명되었으며, 오염물질의 발생원을 원천적으로 줄이는 사전오염예방(Pollution Prevention; P2)의 개념이 설득력을 더해가고 있는 실정이다.<sup>1,2)</sup> 이에 선진 기업들은 환경부하를 줄이는 동시에 이윤을 제고시킬 수 있는 방안들을 고려하기 시작하였다. 즉, 환경문제대응을 단순히 비용부담으로 간주하는 것이 아니라, 수익을 창출할 수 있는 새로운 수단으로 활용하고자 생산 공정 및 제품에 의해 발생하는 환경영향을 원천적으로 줄이는 환경친화공정과 기술을 개발·적용하여 제품의 경제성 및 시장성을 제고시키고 있는 것이다.

이러한 P2 개념을 가지고 도입된 방법 중 하나가 친환경적인 제품설계 (Design for Environment; DfE) 기법이며,

<sup>†</sup> Corresponding author

E-mail: hwangyw@inha.ac.kr

Tel: 032-860-7501

Fax: 032-863-4267

이를 지원하는 제품의 환경성 평가방법이 전과정평가 (Life Cycle Assessment; LCA) 기법이다. ISO(International Organization for Standardization) 14062<sup>3)</sup>인 DfE와 ISO 14040s<sup>4)</sup> 규격인 LCA를 포함한 환경경영시스템(ISO 14000) 모델은 이미 규격이 완성된 상황이며, 각 산업별로 제품에 적용하는 단계에 있다고 할 수 있다. 우리나라의 경우, 환경부에서 2002년 3월에 LCA 평가결과를 활용하여 제품의 환경성 정보를 제공하여 친환경상품의 생산, 소비를 촉진할 목적으로, ISO 14040s LCA규격과 ISO/TR 14025(Type III) 규격을 기반으로 한 환경성적표지제도<sup>5)</sup>를 본격 시행하였으며, 산업자원부에서도 산하기관인 국가청정생산지원센터(KNCPC)<sup>6)</sup>를 통하여 LCA와 DfE기법은 물론 환경경영시스템(Environmental Management System; EMS), 환경성과평가(Environmental Performance Evaluation; EPE), 환경회계(Environmental Accounting; EA), 그리고 환경라벨링(Environmental Labeling; EL) 등과 같은 청정생산 및 환경경영기법들을 국내 기업에 확산시키기 위한 많은 기술적, 재정적 지원을 하고 있다.

이에 본 연구에서는 국내외에서 법적, 제도적 측면의 외적 정비뿐만 아니라, 학계 및 산업계의 제품별 사례분석 및 적용 측면에서 활발한 연구가 진행되고 있는 LCA와 DfE기법을 제조공정에 적용하여 보았다. 구체적으로, 지게차 제조공정을 대상으로 LCA 기법을 적용하여 환경부하가 가장 큰 제조공정을 규명하고, 환경부하가 큰 제조공정에 DfE 기법을 적용하여 제조공정에서 발생하는 환경부하를 저감시키는 동시에 원가절감이 가능한 제조공정을 설계하였으며, 이를 실제 생산라인에 적용해 보았다. 본 연구의 결과는 향후 기업의 EMS, 청정생산 등을 위한 벤치마킹 대상으로 활용될 수 있을 뿐만 아니라, 환경성적표지제도 (Type III)에 탄력적으로 대응할 수 있는 참고자료로 활용될 수 있을 것이다.

## 2. 지게차 제조공정에 대한 LCA

본 연구에서는 LCA의 수행을 Fig. 1과 같이 ISO 14040<sup>4)</sup>에서 제시하고 있는 목적 및 범위설정(Goal and Scope Definition), 목록분석(Life Cycle Inventory Analysis), 영향평가(Life Cycle Impact Assessment), 결과해석(Interpretation) 등 4단계로 나누어 수행하였다.

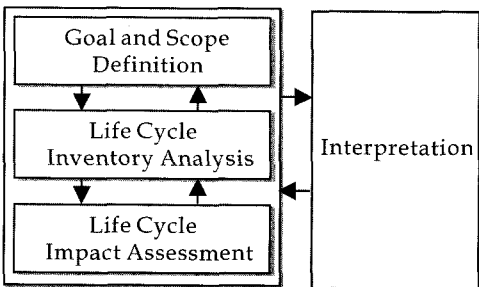


Fig. 1. LCA Framework based on ISO 14040.

### 2.1. 목적 및 범위설정 (Goal and Scope Definition)

본 연구에서의 LCA 실시 목적은 지게차 제조공정에서 발생하는 환경부하를 평가하여, 환경부하가 가장 큰 공정이 어느 공정인가를 규명하고, 이를 저감하기 위한 환경적 기초 자료를 제공하는 것이다. LCA를 수행하는데 기본이 되는 단위인 기능단위(Functional Unit; f.u.)는 시스템이 나타내는 성능지수를 의미하는데 이는 목적을 서술할 때 발생할 수 있는 모호성을 피하고, 범위선정의 근거를 확실하게 하기 위해서 필요하다. 또한, 기능단위를 설정할 때에는 측정가능하며 입출력 데이터와 연관성을 가질 수 있도록 작성되어야 한다. 본 연구에서는 지게차 1대(model: 2.5 ton G25S-2)를 기능단위로 설정하여 LCA를 수행하였다.

시스템 경계란 제품의 전과정의 각 단계, 즉 원료취득, 제조, 유통 및 수송, 폐기단계 중 얼마나 많은 부분을 환경 평가기준 설정시 포함시킬 것인가를 결정하는 것이다. 시스템 경계는 어디까지를 고려할 것인가에 따라 결과 값이 상이하게 나타날 수도 있으므로, 수행하고자 하는 목적에 맞게 설정되어야 한다. 시스템 경계의 설정에 대한 절대적인 방법은 없지만, 일반적으로 제품의 기능에 필요한 투입물 및 배출물 항목들이 포함될 수 있도록 설정하는 것이 바람직하다. 본 연구는 지게차 제조공정 중 환경부하가 높게 나타난 공정에 대하여 환경부하를 저감할 목적으로 수행되었으며, 지게차의 특성상, 사용지역 및 용도가 다양하고, 내구연한도 일정하지 않아 사용 및 폐기단계에서의 자료들을 평균화하기가 곤란하기 때문에, Fig. 2에 나타난 바와 같이 cradle to gate인 원료취득에서 제품 출하공정까지를 지게차의 시스템경계로 설정하였다.

또한, 제조공정에 대한 데이터는 지게차 생산업체인 D업체의 최근 1년간 자료를 이용하였다. 국내의 지게차 생산업체로는 4개의 업체가 있으나, 공장의 규모가 비교적 크고 시장점유율이 60%에 해당하여 이 업종을 대표할 수 있는 D업체를 선정하였다.

### 2.2. 지게차 제조공정별 목록분석

지게차의 제조공정은 Fig. 3에 나타난 바와 같이, 제관, 도장, 조립, 시운전, 보수, 출하공정으로 크게 6단계로 나누어진다. 각 제조공정에 대하여 간략히 설명하면 다음과 같다.

제관공정은 크게 기계가공과 용접공정으로 구성되는데, 기계 가공에는 절삭가공, 연삭가공이 있고, 용접은 산소용접, 레이저 용접, GMAW(Gas Metal Arc Welding) 등이 있

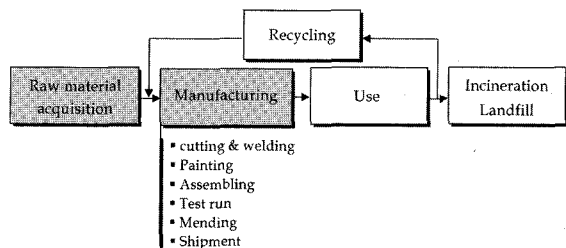


Fig. 2. System boundary of this study.

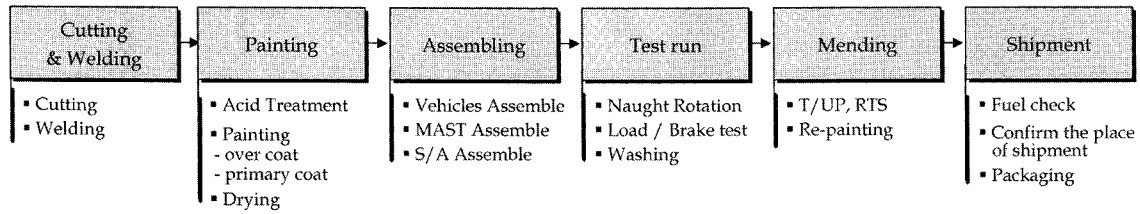


Fig. 3. Manufacturing process of fork lift.

Table 1. Inputs in each manufacturing process

Item	Unit	Manufacturing process					
		cutting & welding	Painting	Assembling	Test run	Mending	Shipment
Raw materials	Steel	kg	482.2				
	Acrylic Polyol Resins	L		9.0		0.05	
	Epoxy Resins	L		6.0			0.9
	Hydrocarbon	L			77.28		
	Gasoline	L			20		
	Ethylene glycol	L			5.6		
Ancillary materials	CO <sub>2</sub> gas	m <sup>3</sup>	35.5				
	Cut wire	kg		2.45			
	Sodium silicate	g		40			
	Hydrochloric acid			2650			
	Zinc phosphate	g		938			
	Rust preventive oil	L			0.23		0.23
Utility	LPG	kg	0.66	9			
	O <sub>2</sub>	m <sup>3</sup>	15.16				
	Electricity	kwh	95.8	81.5	36.8	13.4	22.85
	Water	kg		2000		56.5	12.5

는데, 지게차 제조시에 사용되는 용접방법으로는 일반적으로 GMAW방법을 사용한다. 가공 및 용접 후 물체의 보호 기능과 외관이나 형상의 변화(색, 광택의 변화, 미관, 표식, 평활화), 기타 특수성능(광학적 기능, 열적기능, 기계적 기능, 전기전자적 기능, 환경보호 기능, 생물저항 기능)을 위해 도장을 하게 되는데, 지게차 도장은 공업용 액체도료를 도장하는 산처리 도장과 대물류 도장으로 구성된다.<sup>7,8)</sup> 조립공정은 각각의 부분조립 후 추가 되는 차량의 조립에 각 부분 조립한 부품을 조립하여 총 조립이 이루어진다. 세부적으로 살펴보면, 차량조립은 차량의 바디에서 엔진을 장착하고, 타이어조립과 연료를 주입하는 공정이고, 마스트는 각각의 단품 마스트와 캐리지, 사이드 슈프터 등을 조립하게 된다. 조립이 완성되면 시운전을 하게 되는데, 이는 차량의 성능시험을 하는 공정으로 공회전, 하중시험, brake test를 실시하는 것을 의미한다. 마지막으로, 차량외관의 도장 손상정도에 따라서 부분도장 및 재도장 등을 실시하며, 차량을 최종 조립완료 후 연료를 점검하고, 출하될 지역을 국내, 국외로 분리하여 최종 출하지역으로 포장해서 선적하게 된다.

지게차 제조공정별로 지게차 1대를 생산하는데 투입되는 투입물에 대한 데이터를 D사의 자료를 토대로 주요 물질들만 정리하여 Table 1에 나타내었다. D사의 자료는 ISO 14001 인증시 지게차 제조공정에서 투입되는 원자재 및 부자재량을 산출한 자료이며, 이를 주원료, 부원료, 유틸리티로 나누어 정리하였다.

지게차 제조공정 각 단계에 대하여 Table 1에 나타난 지게차 생산 현장에서 조사된 자료, 국내 환경부 및 산업자원에서 구축한 국가 LCI DB,<sup>9,10)</sup> 그리고 LCA평가용 Software인 TEAMTM 3.0, Gabi 등에 내장되어 있는 화학물질 및 에너지에 대한 Database를 이용하여 목록분석을 수행하였다. 그 결과, Table 2에 나타난 바와 같이, 배출물로는 Carbon Dioxide(CO<sub>2</sub>, fossil), Carbon Monoxide(CO), Sulphur Oxides(SO<sub>x</sub> as SO<sub>2</sub>), Nitrogen Oxides(NO<sub>x</sub> as NO<sub>2</sub>), Methane(CH<sub>4</sub>), Hydrocarbons(except methane)등의 물질이 지게차 제조공정 중에 제관, 도장에서 가장 많이 배출되는 것으로 나타났으며, 수질 배출물로는 Chlorides(Cl<sup>-</sup>), Sulphates(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), Iron(Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>), COD(Chemical Oxygen Demand), Aluminium(Al<sup>3+</sup>), Suspended Matter 등이 배출되는 것으로 나타났다.

Table 2. Results of Inventory analysis for each process

Inventory Parameter	Unit	Manufacturing process					
		cutting & welding	Painting	Assembling	Test run	Mending	Shipment
I (r) Lignite (in ground)	kg	1.35E+05	9.05E+02	8.53E-03	2.68E-05	1.63E-04	9.16E-07
I (r) Oil (in ground)	kg	1.13E+04	3.97E+02	9.49E+01	3.35E-01	6.59E-01	1.54E-02
I (r) Natural Gas (in ground)	kg	4.87E+04	2.38E+02	4.72E+00	2.43E-02	7.36E-02	2.07E-03
I (r) Pyrite (FeS <sub>2</sub> , ore)	kg	4.67E+00	1.33E+02	1.83E-03	5.95E-06	2.10E-05	9.17E-07
I (r) Clay (in ground)	kg	8.74E+04	2.99E+00	3.01E-03	2.92E-04	1.74E-04	4.40E-05
I (r) Uranium (U, ore)	kg	5.75E+00	6.18E-02	3.10E-05	2.52E-05	1.36E-05	3.88E-06
I (r) Copper (Cu, ore)	kg	8.75E+00	2.14E-03	1.11E-06	3.63E-09	1.28E-08	5.59E-10
I (r) Manganese (Mn, ore)	kg	1.18E+01	5.71E-07	1.28E-07	4.16E-10	1.47E-09	6.41E-11
O (a) Carbon Dioxide (CO <sub>2</sub> , fossil)	g	5.60E+08	6.15E+06	6.23E+04	2.42E+03	1.62E+03	3.48E+02
O (a) Sulphur Oxides (SO <sub>x</sub> as SO <sub>2</sub> )	g	1.38E+06	4.31E+04	7.07E+02	1.14E+01	9.34E+00	1.45E+00
O (a) Nitrogen Oxides (NO <sub>x</sub> as NO <sub>2</sub> )	g	1.29E+06	1.85E+04	3.22E+02	3.99E+00	3.85E+00	4.74E-01
O (a) Methane (CH <sub>4</sub> )	g	9.75E+05	1.51E+04	1.18E+02	6.33E+00	7.15E+00	9.72E-01
O (a) Zinc (Zn)	g	9.39E+01	1.30E+04	2.86E-03	6.86E-04	3.72E-04	1.06E-04
O (a) Carbon Monoxide (CO)	g	2.22E+06	6.50E+03	1.53E+01	1.25E+00	8.14E-01	1.88E-01
O (a) Organic Matter (unspecified)	g	5.65E+05	5.10E+03	6.63E-01	2.33E-03	4.29E-03	4.20E-05
O (a) Hydrocarbons (except methane)	g	2.13E+05	3.64E+03	2.04E+02	1.09E+00	1.69E+00	1.31E-01
O (a) Lead (Pb)	g	4.57E+03	2.41E+03	3.86E-03	9.22E-04	5.24E-04	1.42E-04
O (a) Hydrogen Chloride (HCl)	g	6.37E+04	1.84E+03	6.05E-01	4.35E-01	2.34E-01	6.71E-02
O (a) Silicon (Si)	g	1.43E+00	5.59E+02	1.52E-01	1.36E-01	7.28E-02	2.09E-02
O (a) Aluminium (Al)	g	1.69E-01	3.08E+02	1.01E-01	9.06E-02	4.86E-02	1.40E-02
O (a) Alkane (unspecified)	g	1.62E+00	2.91E+02	5.29E-01	1.26E-02	1.20E-02	1.91E-03
O (a) Nitrous Oxide (N <sub>2</sub> O)	g	2.85E+03	1.66E+02	7.42E+00	5.41E-02	6.26E-02	4.84E-03
O (w) Chlorides (Cl <sup>-</sup> )	g	2.40E+06	3.62E+04	9.70E+02	9.60E+00	1.02E+01	1.47E+00
O (w) Sulphates (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	g	1.49E+06	2.54E+04	1.83E+01	1.70E+00	9.32E-01	2.62E-01
O (w) Sodium (Na <sup>+</sup> )	g	1.33E+02	9.75E+03	5.82E+02	3.34E+00	4.84E+00	5.12E-01
O (w) Calcium (Ca <sup>++</sup> )	g	2.50E+01	3.59E+03	5.99E+01	3.10E-01	4.71E-01	4.76E-02
O (w) Aluminium (Al <sub>3</sub> <sup>+</sup> )	g	1.41E+05	3.56E+03	2.61E-02	9.41E-03	5.94E-03	1.45E-03
O (w) Salts (unspecified)	g	1.19E+06	3.22E+03	1.44E-02	9.35E-03	5.05E-03	1.44E-03
O (w) Magnesium (Mg <sup>++</sup> )	g	1.71E+01	2.89E+03	1.63E+00	1.09E-02	6.15E-03	1.67E-03
O (w) Iron (Fe <sup>++</sup> , Fe <sub>3</sub> <sup>+</sup> )	g	2.80E+05	2.53E+03	2.52E-01	1.18E-02	7.49E-03	1.82E-03
O (w) Strontium (Sr II)	g	2.33E+00	2.49E+03	1.12E+01	5.94E-02	9.24E-02	9.12E-03
O (w) Suspended Matter (unspecified)	g	1.08E+05	1.89E+03	5.85E+00	7.41E-02	7.79E-02	9.10E-03
O (w) Dissolved Matter (unspecified)	g	8.89E+02	1.52E+03	1.41E+02	7.90E-01	1.07E+00	5.45E-02
O (w) Potassium (K <sup>+</sup> )	g	5.06E+00	1.16E+03	8.27E+00	4.25E-02	6.35E-02	6.51E-03
O (w) TOC (Total Organic Carbon)	g	6.57E+04	4.72E+02	1.38E+01	6.37E-02	9.59E-02	9.77E-03
O (w) COD (Chemical Oxygen Demand)	g	2.23E+05	3.58E+02	1.44E+01	4.05E-02	8.33E-02	7.26E-04

I : Input, O : Output, (r) ; Resources, (a) ; Air Emissions, (w) ; Water Emissions

2.3. 지게차 제조공정별 영향평가

전과정 목록분석만으로는 비교대상이 되는 제품 또는 공정들의 상대적인 환경성 순위만 파악할 수 있을 뿐이고, 대상 제품 자체의 환경성을 파악하기는 곤란하다. 전과정 영향평가(Life Cycle Impact Assessment; LCIA)는 전과정 목록분석 결과를 이용하여 잠재적인 환경영향을 평가하는 것을 목적으로 하며, 이 환경에 미치는 영향 정도를 정량

적으로 산출하여 평가 대상이 환경에 미치는 영향을 종합적으로 평가하는 과정이다.<sup>11)</sup>

영향평가는 동일한 목록분석의 결과를 가지고 수행하더라도 환경오염물질에 대한 가중정도나 환경영향 범주 등에 따라 상이한 차이를 보인다. 본 연구에서는 세계적으로 널리 사용되는 Eco-indicator 95<sup>12)</sup>를 이용하여 영향평가를 수행하였다. 또한, 환경영향범주는 지구온난화(Global Warming;

Table 3. Results of LCIA for each process

Unit: mPt

Environmental Category \ Manufacturing Process	GW	OD	POC	AC	EU	ET	HT	Total
Cutting & Welding	1.15E+05	4.68E+03	1.37E+04	3.05E+05	1.07E+05	1.82E+05	1.09E+06	1.82E+06
Painting	1.49E+03	2.56E+02	5.23E+01	7.75E+03	1.57E+03	9.84E+05	8.87E+05	1.88E+06
Assembling	2.71E+01	6.64E+00	1.11E+01	1.27E+02	2.73E+01	1.64E+04	1.71E+02	1.68E+04
Test run	5.42E-01	3.43E-02	5.43E-02	1.98E+00	3.25E-01	8.49E+01	4.57E+00	9.24E+01
Mending	4.36E-01	5.46E-02	8.98E-02	1.66E+00	3.18E-01	1.29E+02	3.18E+00	1.35E+02
Shipment	0.00E+00	7.51E-02	5.27E-03	3.44E-03	2.50E-01	3.80E-02	1.30E+01	1.34E+01

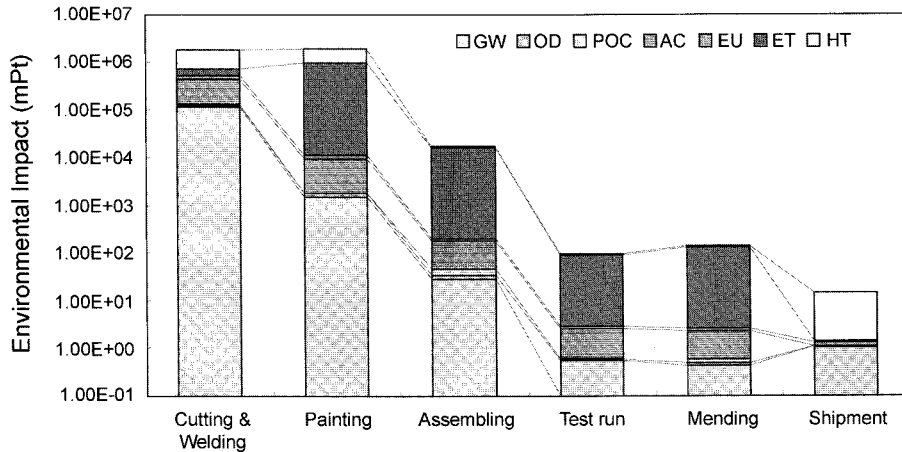


Fig. 4. Contribution of each process's environmental impact to the categories.

GW), 오존층 고갈(Ozone Layer Depletion; OD), 광화학 산화물 생성(Photochemical Oxidant Creation; POC), 산성화(Acidification; AC), 부영양화(Eutro-phication; EU), 생태독성(Eco-toxicity; ET), 인간독성(Human Toxicity; HT)의 7가지를 환경영향범주로 설정하였다.

전술한 지게차 제조공정에 대한 목록분석 결과를 이용하여 환경에 미치는 영향의 크기, 즉 환경영향지수(Environmental Impact, mPt)를 산정하여 Table 3에 나타내었다. 환경영향평가 결과를 환경영향범주별로 살펴보면, 생태독성과 인간독성 부분이 가장 크게 나타났으며, 세부 공정별로 살펴보면, Fig. 4에 나타난 바와 같이, 제관공정과 도장공정에서 환경영향지수는 각각 1.82E+06 mPt와 1.88E+06 mPt로 가장 많은 환경부하를 발생시키는 것으로 나타났다. 제관공정에서는 환경부하에 영향을 미치는 요소를 추적한 결과, 지게차의 주원료가 되는 steel인 것으로 나타났는데, 이는 주원료에 대한 대체 원료를 사용하지 않는 한 환경부하를 저감하는 것은 현실적으로 어렵다. 이에 비해, 도장공정은 paint의 부착효율을 증대시키거나 사용량을 저감함으로써 환경부하 저감에 큰 효과를 기대할 수 있어, 전체 생산공정의 50.6%의 환경영향을 차지하는 도장공정에 DfE기법을 적용하였다.

### 3. 친환경적인 지게차 제조공정의

### 설계(DfE기법 적용)

친환경 제품설계는 “제품의 설계과정에 환경적 요소를 통합하여 제품 가격과 품질 기준을 만족시키면서도 환경친화적 제품을 개발해 나가는 체계적, 공학적 접근방법”이라고 간단히 정의할 수 있다.<sup>13-15)</sup> 다시 말해 제품의 전과정(life cycle)을 통해 발생하는 환경영향을 제품의 초기 개발과정에서 체계적으로 파악·평가·정량화함으로써 환경에 부정적인 영향을 미칠 수 있는 가능성을 줄이거나 제거하는 것을 그 목적으로 하고 있는 것이다. 이러한 목적에 맞추어 ISO/TR 14062,<sup>3)</sup> UNEP(United Nations Environmental Program)<sup>13)</sup> 및 주요 선진 기업에서는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 DfE를 수행하기 위한 일반적인 가이드라인을 제시하고 있다. 이는 일반적인 제품 개발단계에 환경친화적 제품설계를 적용하여 각 단계별로 환경친화적 제품을 설계하기 위한 진행 절차를 보여주고 있다.

친환경적인 지게차 제조공정 설계를 위하여, 본 연구에서는 전 절에서 서술한 바와 같이 지게차 제조공정에서 환경부하가 가장 큰 공정은 도장공정임을 LCA를 통하여 규명하였으며, 도장공정에 대하여 전술한 일반적인 DfE 가이드라인을 따라, 목표설정(Goal specification), 구상설계(Conceptual Design), 상세설계(Detail and Manufacturing Design) 등으로 구분하여 DfE 기법을 적용하였다.

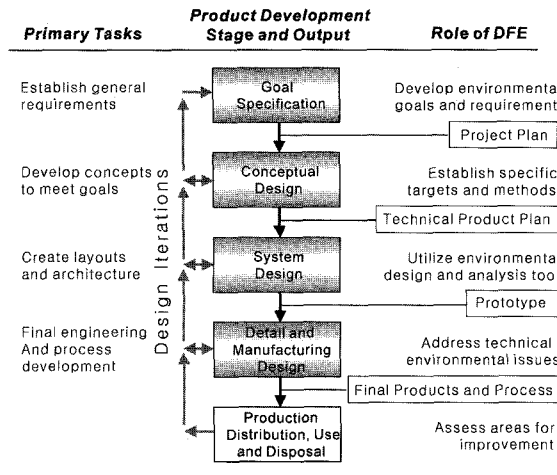


Fig. 5. Generic model of integrating environmental aspects into the product development process.

### 3.1. 목표 설정

목표설정 단계에서는 환경적으로 개선되어야 하는 부분을 명확히 정의한다. 예를 들면, 제품내의 부품들 중 95% 이상을 재활용 가능한 재질로 사용한다든지, 혹은 한 제품에 포함된 플라스틱의 수를 최소화하여 재활용성(recyclability)을 향상시킨다든지 하는 등으로 목표설정을 명확히 할 수 있다. 지게차의 도장공정에서의 환경부하 요인 중 가장 주된 요인은 도장에 주원료로 사용하는 도료와 부원료인 전처리제임을 LCA결과를 통하여 알 수 있었다. 이를 저감하기 위한 방안으로는 도장공정에서 사용되는 도료의 고형분을 높여, 즉 high solid화하여 부하를 저감시키거나, steel plate를 hot plate에서 cold plate로 변경하여 산세공정에서 사용되어지는 산세액과 용수를 저감시키는 방안을 생각해 볼 수 있다. 여기서, 도장공정의 환경부하의 요인이 도료와 전처리제임이 입증되었기 때문에 전자를 환경개선 의 목표로 설정하였다.

### 3.2. 구상 설계

일단 제품과 공정에 대한 일반적인 목표가 설정되면, 이러한 목표를 달성하기 위해 구체적 계획과 방법들이 수립된다. 이 단계에서는 목표를 달성하기 위해 최적의 설계를 위한 다양한 개념들이 도출되어 평가되어진다. 구상설계 단계에서는 목표설정 단계에서 설정한 저감방안을 토대로 하여 환경부하를 저감할 수 있는 방법을 제시하는 단계이다. 현 도장공정에 사용 중인 용제형 도료는 휘발분이 52%, 비휘발분이 48%인데, 휘발분이 비휘발분 보다 함유량이 크기 때문에, 도료의 손실이 크고 부작용이 많아진다. 따라서, 도료의 고형분 함량을 높여, 반대로 비휘발분을 늘리고 휘발분을 줄여 high solid화 하면 도료의 손실을 저감하고 부작용을 높이면 환경부하 저감이 가능할 것이다.

### 3.3. 상세설계

제품을 생산하는데 사용되는 제조공정을 환경적인 관점

에서 최종적으로 완성한다. 이 단계에서 친환경제품설계는 설계자들로 하여금 환경이 고려된 시스템을 개발하도록 촉진시키며, 동시에 앞으로 양산될 제품의 환경 영향을 최종적으로 평가하고, 개선할 수 있도록 할 수 있다. 상세설계 단계에서는 구상설계 단계를 구체화하여, 환경부하 저감 및 성능 향상을 도모할 수 있는 도료를 설계하고, 실험 및 평가를 거쳐 기존 용제형 도료와 동등한 품질이 확보가능한지 평가해야 한다. 본 연구에서는 도료 고형분을 높인 high solid형 도료를 개발함으로써 기존의 지게차 제조공정을 환경친화적인 공정으로 변경할 수 있도록 설계하여 보았다. 이하, 개발하고자 하는 high solid형 도료의 조성, 물성 및 양산을 위한 적용 테스트를 기존에 사용하고 있던 용제형 도료와 비교하여 설명하였으며, 최종적으로 개발 도료를 사용함으로써 변경된 친환경 제조공정에 대하여 설명하였다.

#### 3.3.1. 개발 도료의 조성

용제형 도료와 high solid형 도료의 조성을 비교하여 Table 4에 나타내었으며, 각 성분에 대하여 다음에 간략하게 설명하였다.

##### (1) 유기 용제(Organic Solvent) 함량

용제는 수지를 녹이고 도료 제조 및 도장 작업을 돕는 성분이며, 도료의 유동성, 도장 작업성에 영향을 미친다. 지게차에 사용하는 용제형 도료의 경우 aromatic, acetate, ketone 등으로 구성되어 있다. 전체적인 용제의 함량은 수지의 종류 및 작업조건 등에 따라 그 함량이 결정된다. 용제형 도료의 경우 전체 용제의 함량이 약 60% 수준인 반면, high solid형 도료는 40% 이하이다. 그러므로 high solid형 도료의 경우 VOC 함량이 약 20% 감소하는 효과를 얻을 수 있다. High solid형 도료의 경우 aromatic은 수지에 대한 용해력은 적으나, 희석제 및 휘발 속도를 조정하는 기능을 하며 14% 이하이면 휘발속도가 지나치게 되고 19% 이상이면 희석 기능이 저하된다. 또한, acetate는 고비점 용제로서 도막의 초기 건조를 늦추기 위하여 사용되며 동결기, 하절기시의 온도를 고려하여 10~15%에서 가장 적절한 물성을 나타낸다.

##### (2) 수지 및 경화제(Resin & Hardener) 함량

수지는 도막의 성능을 결정하는 근간이 되며 high solid형 도료 개발시, 용제형 도료에 사용된 수지와 비교하여 수지의 분자량, 극성, 유리전이온도를 유기 용제에 쉽게 용해되도록 조절한 Acryl Ester Polyol Resin을 사용하였다. 또한, 도료의 스프레이 작업성 측면을 고려하여 점도 및 건조시간을 용제형 도료 수준으로 조정하였다. 이를 위해 분자량이 높은 수지를 일정량 혼합하여 제조하였다.

##### (3) 안료(Pigment) 함량

지게차용 도료의 착색 안료로서 사용된 Carbon Black은 최대 2% 이하에서 최적의 색상을 확보할 수 있다. 저흡유

**Table 4.** Comparison of the components of solvent paint with high solid paint

Component		Type	Solvent paint (%)	High solid paint (%)
Resin	Polyol		12~18	20~25
Hardener	Isocyanate		2~6	5~10
Pigment	Carbon Black		1.0~1.5	1.5~2.0
	Talc		15~19	20~25
	Rust preventing pigment		3~5	5~10
Additive	Dispersion agent		over 0.3	over 0.4
	Precipitated preventing agent		over 0.5	over 0.6
Organic Solvent	Aromatic		25~35	15~25
	Acetate		15~20	10~14
	Ketone		6~10	3~7

량의 talc는 20~25% 수준에서 은폐력을 확보하면서 고휘분 함량을 증가시키는 최적의 함량이다.<sup>8)</sup> 또한 피도체의 내부식성을 향상시키기 위해 첨가되는 방청안료는 5~10% 수준에서 최적의 물성을 보였다.

**(4) 첨가제(Additive) 함량**

입자간의 반발력을 부여하여 안료 입자를 안정화시켜 재응집하지 않도록 하는 분산제는 0.4% 이상에서 최적의 물성을 보였다. 도료의 혼합이나 도장시의 전단력에 의해 점성이 떨어지고 겔보기 점도가 상승하여 칩강이 되는 것을 막아주는 칩강방지제는 0.6% 이상에서 최적의 성능을 보였다.

**3.3.2. 개발 도료의 물성**

도료 물성시험에 사용된 시험편은 인산염으로 피막 처리된 냉간압연강판(0.8×75×150 mm)을 사용하였으며, 규격은 KS M 5000이다. 주체와 경화제를 각각 규정된 혼합비로 혼합하여 스프레이한 후 10분의 Setting Time, 80℃에서 30분간 강제 건조, 1일 실온 방치 후 도막의 물성 평가를 실시하였다. 도막두께는 건조막 두께 기준으로 40±2 μm로 하였으며, 물성 측정결과를 Table 5에 나타내었다.

용제형 도료 대비 high solid형 도료의 고휘분 함량은 약 10~15% 증가되었음을 알 수 있었다. 지촉건조(Set to touch)의 경우, 현 사용도료에 비해 약간 늦지만 지게차 도장 라인에 적용시 사용상 문제가 없는 수준이었다. 이외 high solid형 도료의 대부분의 물성은 용제형 도료와 동등 수준이었다.

**3.3.3. 개발 도료의 양산 적용 TEST**

D사 도장 라인에서 지게차 200대 이상을 대상으로 high solid형 도료를 적용해 보았으며, 지게차 1대에 소요되는 도료 사용량, 도포면적, 작업시간, 도막두께 등에 대하여 라인 테스트를 실시하였다. Table 6에는 high solid형 도료의 적용 효과를 나타내었다.

**Table 5.** Results of property test for solvent paint and high solid paint

Test Item		Type	Solvent paint	High solid paint	Test method
Viscosity (Ford Cup #4, sec)			24~26	26~28	ASTM D856
Solid content (%)			45~48	58~61	ASTM D2697
Drying time (min)	Set to touch		below 10 min	below 12 min	ASTM D1640
	Curing		below 50 min	below 50 min	
Gloss (60°)			16~20	16~20	ASTM D523
Adhesion			good	good	ASTM D3359
Flexibility			good	good	ASTM D522
Shock resistance			good	good	Du-Pont Impact
Hardness			over 2H	over 2H	ASTM D3363
Salt spray test (5% NaCl, 240 hr)	Scribed		good	good	ASTM D1654
	Unscribed		good	good	
Water resistance (20℃, 240 hr)	Blistering		good	good	ASTM D610
	Corrosion		good	good	ASTM D714
	Adhesion		good	good	ASTM D3359
	Hardness		over H	over H	ASTM D3363
Oil resistance (20℃, 240 hr)	Blistering		good	good	ASTM D610
	Corrosion		good	good	ASTM D714
	Adhesion		good	good	ASTM D3359
	Hardness		over H	over H	ASTM D3363
Heat resistance (80℃, 240 hr)	Blistering		good	good	ASTM D610
	Corrosion		good	good	ASTM D714
	Adhesion		good	good	ASTM D3359
	Hardness		over H	over H	ASTM D3363
Acid resistance (5% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 24 hr)	Blistering		good	good	ASTM D610
	Corrosion		good	good	ASTM D714
	Adhesion		good	good	ASTM D3359
	Hardness		over H	over H	ASTM D3363
Alkali resistance (5% NaOH, 24 hr)	Blistering		good	good	ASTM D610
	Corrosion		good	good	ASTM D714
	Adhesion		good	good	ASTM D3359
	Hardness		over H	over H	ASTM D3363

**Table 6.** Effects of application of high solid paint

Line test	Type	Solvent paint	High solid paint
Average quantity for application (L/EA)		2.0	1.6
Spreading rate (EA/L)		0.5	0.625
Average thickness drying film (μm)		45	45
Average thickness wet film (μm)		100	80
Solid volume ratio (%)		45	56
Working hour (min/EA)		2.5	2.4

**(1) 실차 도장시의 작업성 및 도막 물성**

부착력 시험(ASTM D-3359) 측정결과에 의하면, 용제형 도료와 high solid형 도료 모두 양호한 수준이었으며, 연필경도 (ASTM D-3363) 측정결과 두 가지 도료 모두 2H 이상 수준으로 측정되었다. 도장의 작업성과 관련하여 도막의 건조시간은 기본적으로 수치 및 용제의 종류와 함량에 따

라 영향을 받는데, 도장 라인에서 건조로 통과 후 손자국 등의 정도가 유사하게 나타나 작업성 측면에서도 용제형 도료와 동등 수준이었다. 또한, 작업시간 측정결과와 해당 스프레이 작업시간은 약 4% 정도 단축이 가능하였다.

**(2) 도료의 사용량**

도장 후 얻어지는 평균 건조막 두께를 40±5 μm가 되도록 습도막 두께를 조정하면서 최종적으로 도장 후 도료의 소요량을 비교한 결과, high solid형 도료를 적용하였을 때 20%의 도료 사용량이 감소하였다. 따라서, high solid형 도료를 적용하면 동일한 사용량으로 25%의 도장면적 향상 효과를 얻는 것이며, 약 20%의 도료 사용량 절감효과를 가져왔다.

**(3) VOC 발생량**

용제형 도료에 비해 high solid형은 고형분 용적비가 45%에서 56%로 증가되어 동일 도료량 사용시 VOC 발생량은 상대적으로 11% 저감되는 효과가 있다. 또한, 실제 high solid형 도료를 실제 생산라인에 적용하였을 경우, 해당 도료 사용량 또한 20% 감소하므로 생산 대수를 기준으로 하였을 경우 전체적인 VOC량의 감소는 약 32% 감소 효과가 나타났다.

**(4) Paint Sludge 발생량**

도료의 스프레이 과정에서 발생되고 손실되는 것 가운데 일부 VOC 성분은 휘발되고, 휘발되지 않는 성분은 페인트 슬러지(Paint Sludge)로 남게 된다. 따라서, 도장과정에서 발생하는 Paint Sludge의 양은 도료 내에 포함된 고형분 함량에 직접적인 영향을 받게 된다. high solid형 도료는 용제형 도료에 비해 고형분 함량이 11% 높기 때문에 동일 사용량일 경우 Paint Sludge의 양은 증가하게 된다. 그러나, 실제 생산라인에 적용하였을 경우, 해당 도료 사용량이 20% 감소하므로 전체적인 Paint Sludge의 양은 오히려 약 20%의 감소하게 된다.

**3.3.4. 친환경적 지게차 제조공정**

용제형 도료를 high solid형 도료로 변경할 경우, 지게차 제조공정 중 도장공정에서 Fig. 6에 나타난 점선으로 표시한 부분과 같이 불필요한 공정을 생략할 수 있게 된다. 구체적으로, 용제형 도료에서는 고형분 함량이 낮기 때문에 1회 도장으로 55 μm을 코팅하기 어렵기 때문에 하도(Primary coat)공정과 상도(Over coat)공정에서 2회 도장을 하여 도장 품질을 만족시켜야 하지만, high solid형 도료에서는 1회 도장으로 55 μm을 코팅할 수 있기 때문에 상도공정과 건조공정의 삭제가 가능하다.

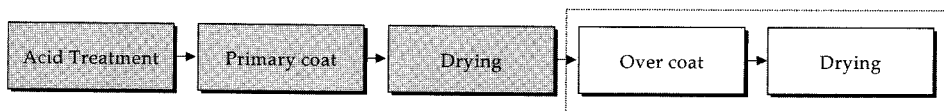


Fig. 6. Painting process of fork lift using high solid paint.

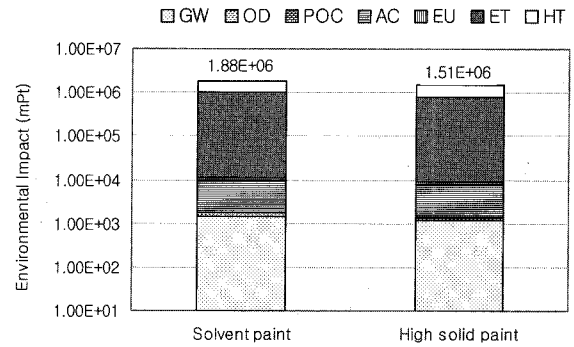


Fig. 7. Comparison of environmental impact of fork lift painting process using solvent paint and high solid paint.

상기 두 가지 도료를 각각 적용한 지게차의 도장공정에 대한 환경부하를 LCA를 수행하여 평가해 본 결과, Fig. 7에 나타난 바와 같이 1.88E+06 mPt에서 1.51E+06 mPt로 약 20% 정도의 환경영향이 저감되는 것으로 나타났다. 개발된 도료를 사용할 경우, 지게차의 도장공정에서의 환경영향 저감으로 인하여 전체 제조공정, 즉 지게차 1대를 생산하는데 약 11%의 환경영향이 저감될 수 있다는 것을 알 수 있었다.

**4. 결론**

본 연구에서는 지게차 제조공정을 대상으로 LCA 기법을 적용하여 환경부하가 가장 큰 제조공정을 규명하고, 환경부하가 큰 제조공정에 DfE 기법을 적용하여 제조공정에서 발생하는 환경부하를 저감시키는 동시에 원가절감이 가능한 제조공정을 설계하였으며, 이를 실제 생산라인에 적용해 보았다.

지게차 제조공정에 대해 LCA 수행 결과, 영향범주별로는 생태독성과 인간독성 부분에 대해 환경영향이 가장 크게 나타났으며, 공정별로는 제관공정과 도장공정에서 발생하는 환경영향이 각각 54%, 45%로 전체 제조공정의 대부분을 차지하는 것으로 나타났다. 그러나, 제관공정에서 환경부하에 영향을 미치는 원인물질은 steel로서, 이는 지게차의 원자재에 해당하는 부분으로 이를 당장 대체하기는 현실적으로 어렵기 때문에 본 연구에서는 도장공정에서 발생하는 환경부하를 저감을 시도하였다. 지게차의 도장공정에, 기존에 사용하고 있는 용제형 도료의 고형분 함량을 늘려 high solid형 도료를 개발하여 적용한 결과, 환경영향이 20% 저감되었으며, 이로 인하여 전체 지게차 제조공정에 대한 환경영향의 약 11%를 저감할 수 있음을 알 수 있었다. 이는 high solid형 도료를 적용함에 따라 고형분이 증가해서 하도공정과 상도공정에서 2회 도장을 해야 하지만, 하도공



정에서만 1회 도장이 가능한 공정으로 변경함에 따라 상도 공정의 생략이 가능했기 때문이다. 또한, VOC발생량은 약 32%, Paint Sludge의 양은 약 20%, 도료 사용량은 약 20%의 저감효과를 얻을 수 있었다.

이상과 같이 본 연구에서는 지게차 제조공정에 LCA를 이용하여 환경영향을 평가하고, DfE 기법을 적용해서 환경성과 경제성을 동시에 고려한 설계가 가능하여 양산, 적용할 수 있는 중요한 자료를 제시하였다. ISO에서 규격화하고 있는 LCA 기법은 제품의 설계변경으로 인한 환경부하의 변화추이를 파악할 수 있는 중요한 수단이 되었으며, LCA 결과는 환경을 고려한 지게차 제조공정의 설계(DfE)를 위한 중요한 자료로 활용될 수 있었다.

## 사 사

이 논문은 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었습니다.

## 참 고 문 헌

1. 황용우, "LCA와 생산기술," LG생산기술, 3(6), pp. 28~33(2000).
2. 안재욱, 강홍윤, "선진기업의 환경친화제품 설계 사례," LG생산기술, 3(6), pp. 42~47(2000).
3. ISO/TR 14062, Environmental management - Integrating environmental aspects into product design and development(2001).
4. ISO 14040, Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework(1997).
5. 환경부, 환경성적표지작성지침 및 인증기준(2002).
6. 산업자원부, 한국생산기술연구원 국가청정생산지원센터 web site; www.nccp.re.kr(2003).
7. 김용식, 문병철, 이종현, 임홍섭, 도장·접착, 기전연구사(1999).
8. 박조순, 도장 이론과 실제 : 건축도장·금속도장·가구도장, 일진사(1996).
9. 환경마크협회 web site; www.kela.or.kr(2003).
10. 한국인정원 web site; www.kab.or.kr(2003).
11. 박광호, 황용우, 조병목, 김형진, "제지 및 지류포장제품의 환경영향평가 - 전과정평가(LCA) 사례분석," 대한환경공학회지, 25(11), 1411~1419(2003).
12. Goedkoop, M., The Eco-Indicator 95. Final Report, National Reuse of Waste Research Programme, Report 9523, Amersfoot, The Netherlands(1995).
13. Brezet, H. and van Hemel, C., ECODESIGN - A promising approach to sustainable production and consumption, UNEP (1997).
14. Stevels, A., Brezet, H., and Rombouts, J., "Application of LCA in Eco-design: A critical review," J. Sustainable Product Development(1999).
15. J. Fiksel, Design for Environment, New York, McGraw-Hill(1996).