

LCA를 이용한 친환경 세제의 개발

안석원 · 이재란

(LG화학 기술연구원 분석센터)

Application of LCA to The Design of Environmentally Friendly Detergent

S. W. Ahn, J. R. Lee

(LG Chemical Ltd., Research Park, Analytical R&D Center
swahn@lgchem.co.kr · jrlee@lgchem.co.kr)

ABSTRACT

For development of environmentally friendly detergent, we have applied LCA method to a laundry detergent. The procedure of LCA was followed to goal & scope definition, classification, characterization, normalization, weighting by using CML method. Therefore, we have achieved the life cycle inventory of laundry detergent, and have done with impact assessment about acidification, ozone layer depletion, eutrophication, greenhouse effect and ecotoxicity. Especially, the ecotoxicological classification factor for aquatic ecosystem was derived from basis of detergent ingredient toxicity data. As a result of impact assessment, we have found that the most environmentally loaded impact category was ecotoxicity and the most environmentally loaded process was raw material production stage. In addition, we derived environmental indicator from each detergent ingredients. Finally, we have developed the method of design for environment that is minimized the environmental impact considering environmental, economical, and washing performance properties in coincidence. By using this, we have developed the environmentally friendly detergent that has improved on the ecotoxicity.

요약문

친환경 세제 개발을 위하여 전과정 평가 기법을 분말형 세탁세제에 적용하였다. 전과정 평가 수행 절차는 목표 및 범위 설정, 목록 분석, 특성화, 정규화, 가중치 적용으로 행해졌으며 CML 방법을 적용하였다. 이에 따라 분말형 세탁세제에 대한 전과정 목록이 도출되었으며 이를 산성화, 오존층 파괴, 부영양화, 지구온난화, 수계독성의 영향범주로 나누어서 영향평가를 실시하였다. 특히, 수계독성에 대한 특성화 지수는 세계 원료들에 대한 수계독성자료를 바탕으로 도출하였다. 영향평가의 결과로써, 영향범주별로는 수계 독성의 환경 영향이 크게 나타났고, 공정별로는 원재료 생산 단계가 환경 영향이 큰 것으로 나타났다. 또한, 세계 각 원료 성분들에 대한 환경 지수 산출을 통하여 환경 점수를 부여하였다. 본 연구의 결과로 연구 개발 단계에서부터 세탁세제의 환경성, 경제성, 세정 성능적 측면을 동시에 고려하여 환경영향을 최소화할 수 있는 제품의 설계 방법을 개발하였으며, 이를 적용하여 수계 독성을 많이 개선한 친환경세제를 개발하였다.

I. 서 론

가정에서 사용하는 분말 세탁세제는 1986년 이후부터 사용량이 크게 증가하였고 90년대 후반에 들어

서는 일반세제의 증가세는 둔화되고 있지만 농축세제는 계속 증가세에 있다.¹⁾ 이러한 소비 변화와 더불어 소비자들의 환경에 대한 인식도 높아짐에 따라 세탁세제가 환경에 영향을 주는 요소를 구체적으로 파악하고 이에 따른 환경 개선안 마련이 요구되어졌

Table 1. Types of Impact Categories

Depletion	Pollution	Damage
depletion of abiotic resources	enhancement of the greenhouse effect	damage to ecosystems
depletion of biotic resources	depletion of the ozone layer	and landscapes
	human toxicity	victims
	ecotoxicity	
	photochemical oxidant formation	
	acidification	
	eutrophication	
	waste heat	
	odor	
	noise	

다.

이에 대해 유럽에서는 세제에 대한 환경마크를 부여하여 소비자로 하여금 환경 친화적인 제품을 구매하도록 하는 방안을 마련하였고²⁾ 국내에서도 97년부터 환경부 주관 하에 세탁세제에 대한 환경마크 부여 기준안 마련을 위한 프로젝트가 진행되었다.

이러한 시대 상황에 맞추어 본 연구에서는 당사에서 생산하고 있는 분말 세탁세제가 환경에 미치는 영향을 파악하고 이를 바탕으로 제품의 환경적 개선을 도모하고 환경 친화적인 제품개발을 위한 수단으로서 세탁세제에 대한 전과정평가(Life Cycle Assessment)를 실시하였다.

세탁세제와 관련된 LCA 연구는 유럽 연합에서 발표한 Detergent Surfactant Production에 관한 LCI 연구가 1995년도에 발표된 바 있고³⁾, 1993년 P&G에서 세탁세제에 대한 LCA를 발표한 적이 있다. 국내에서는 아직 세탁세제에 대한 LCA 연구 결과가 발표된 사례가 없다.

본 연구에서는 세탁세제 중 농축세제에 대한 LCA를 수행하였으며 그 절차상의 방법은 SETAC Guideline⁴⁾ 및 ISO 14040 기준을 따랐으며, 영향평가 방법은 네델란드 라이덴 대학의 CML method를 사용하였다.⁵⁾

II. 세탁세제 LCA 적용

1. 목표 정의 및 범위 설정

본 연구의 목적은 분말형 세탁세제에 대한 전과정

목록(Life Cycle Inventory) 작성, 환경 개선부문 도출 및 환경성을 고려한 제품의 개발에 있다.

기능 단위는 리필형 농축세제 0.67gr(표준 사용량 적용)⁶⁾으로 정하였으며, 적용 범위는 원재료 취득 및 제조, 제품의 제조 및 포장과 관련된 생산 단계, 제품 사용단계, 제품 폐기 및 폐기물 처리를 포함하였다.

데이터의 수집과 분석에 사용된 가정은 다음과 같다.

- ① 세제 생산 단계의 데이터는 LG생활건강 청주 공장의 자료를 사용하였다.
- ② 사무실 운영에 사용되는 전기, 물 등 utility 사용량은 제외하였다.
- ③ 세제 운송과정에서 사용된 에너지 등은 고려하지 않았다.
- ④ 사용된 원·부자재의 공정 자료 조사에서는 1% 규칙을 적용하여 전체 중량 대비 사용 비율이 1% 미만인 재료에 대해서는 고려하지 않았다.

영향평가 시 CML method에서 고려하는 환경 영향 범주는 표 1과 같이 분류된다.⁵⁾

Table 2. Impact Categories

영향범주	원인물질
Acidification	SOX, NOX
Ozone Depletion	CFC, HCFC 등
Eutrophication	Ammonia 등
Greenhouse effect	CO ₂ , CFC 등
Ecotoxicity	AOX, Phosphate 등

표 1에서 분류된 환경영향범주들은 규정된 계산식

Table 3. Category Indicators

environmental effect	effect score	unit	classification factor
depletion of abiotic resources	abiotic depletion	-	1/reserves
depletion of biotic resources	biotic depletion	yr-1	BDF
enhancement of the greenhouse effect	greenhouse effect	kg	GWP
depletion of the ozone layer	ozone depletion	kg	ODP
human toxicity	human toxicity	kg	HCA, HCW, HCS
ecotoxicity	aquatic ecotoxicity	m3	ECA
	terrestrial ecotoxicity	kg	ECT
photochemical oxidant formation	oxidant formation	kg	POCP
acidification	acidification	kg	AP
eutrophication	eutrophication	kg	EP
waste heat	aquatic heat	MJ	1
odor	malodourous air	m3	1/OTV
noise	noise	Pa2 · s	1
damage to ecosystems & landscapes	damage	m2 · s	1
victims	victims	-	1

에 의해 환경영향 평가의 값으로 나타나며, 각각의 영향범주에 대한 영향평가의 단위는 표 3과 같다.

본 세탁세제에 대한 연구에서는 위의 항목들 중 표 2와 같은 5가지 영향범주를 선택하여 실시하였다.

2. 목록 분석

분말형 세탁세제 제조 공정에 관련된 자료는 당사 공장의 공정 자료를 바탕으로 만들었다. (Fig.1) 그리고 외부에서 들어오는 원재료에 대해서는 업체 요청자료, 논문⁷⁾이나 SRI 자료⁸⁾ 및 소프트웨어 (TEAM 2.0)에 있는 database를 이용하였다. 특히,

여러 가지 계면활성제에 대한 자료는 European Life Cycle Inventory for detergents production (the ECOSOL project)를 참고하였다.⁹⁾

본 연구에서 데이터 수집 및 계산과정에 사용된 할당방법은 다음과 같다.

- ① 원·부자재 사용량은 연간 세제 총 생산량을 기준으로 할당하였다.
- ② 제조 공정 중 포장 단계에서는 포장라인 당 전력 소모량이 동일하다는 가정 하에서 생산량 대비 가동시간을 할당한 후 전력량을 할당하였다.

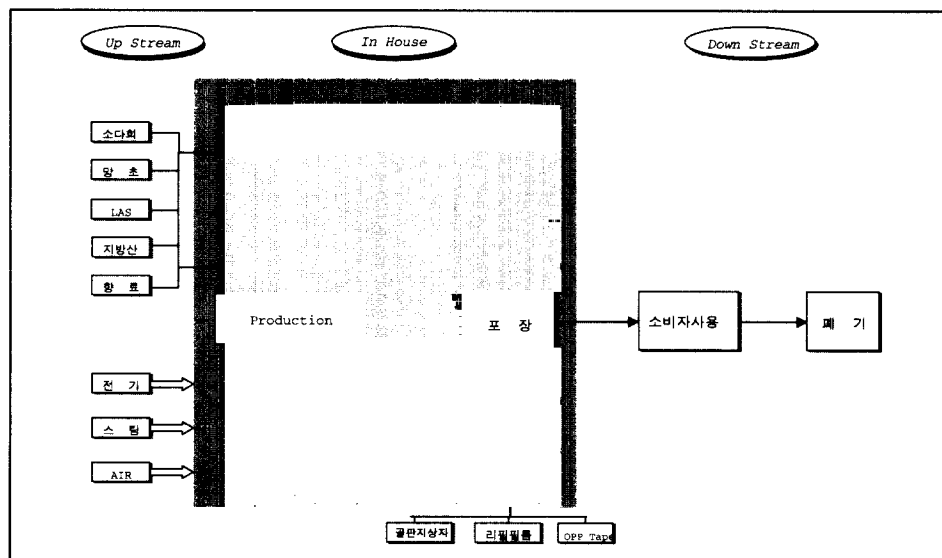


Fig. 1. Laundry detergent system.

- ③ 사용 단계에서의 물의 양 및 전기량에 대한 기준은 LG 전자의 10Kg 세탁기(WF- T101)를 사용하여 full-load 시, 평균 2회를 기준으로 한 물 및 전기 사용량을 적용하였으며 투입되는 세제량은 표준 세제 사용량을 적용하였다.(0.67gr/l)
 - ④ 폐기단계에서는 국내 하수처리율을 30%로 가정하였으며 사용 후 하수처리 장치를 거친 후 제거되지 않고 수계로 배출되는 잔류 세제 성분들의 양은 각 성분들의 생분해도를 고려하여 산출하였다. 여기서 화합물 각각에 대한 생분해도 시험 방법은 OECD guideline(10)을 따랐다.
 - ⑤ 폐기 단계에서는 사용된 리필 필름은 50% 대 50%로 매립 및 소각되는 것으로 가정하였다.
- 위의 할당 방법들을 바탕으로 각 단위 공정에 대하여 기능단위를 기준으로 input과 output 물질을 규명한 후 이를 전과정에 대하여 합산하여 정량화한 전과정 목록(Life Cycle Inventory)은 표 4와 같으며, 이 때 공정별로 수집한 데이터의 inventory 계산은 Ecobilan사의 LCA software인 TEAM 2.0 을 사용하였다.

3. 영향 평가

영향평가는 전과정 목록에서 규명된 input, output 요소들로 인한 잠재적 환경영향정도를 파악하기 위하여 classification, characterization, normalization, weighting 단계로 나누어 실시된다.

그러나 국제적으로 아직 합의된 영향평가방법은 없으며 본 연구에서는 네덜란드의 라이덴 대학의 CML method를 사용하여 단계별로 정리하였다.

(1) Classification

목록분석 단계에서 작성된 input 및 output emission 항목들을 산성화, 오존층 파괴, 부영양화, 지구온난화, 생태독성의 5가지 영향 범주별로 나누어서 정리하였다.

(2) Characterization

Classification 과정을 거쳐서 분류된 각 영향 범주들의 환경 영향정도를 파악하기 위해서 각각의 영향범주별로 input 및 output 항목들에 대해 각 영향범주들의 기준물질과 비교한 가중치(CF, Characterization Factor)를 곱하여 해당 영향범주 내에서 통합하였다.

$$\text{Effect Score} = \sum (\text{배출량} \times \text{characterization factor})$$

CML보고서에서는 세계 원료 성분들의 수계 생태

Table. 4. Life Cycle Inventory

Article	Units	Life cycle	Raw material	Use	End of life
InFlows: (r) Bauxite (Al ₂ O ₃ , ore)	Kg	0.14096	0.14096		0
(r) Bentonite	Kg	1.55E- 06	0.00000155		0
(r) Clay (in ground)	Kg	6.69E- 07	0.000000669		0
(r) Coal (in ground)	Kg	0.150022	0.132568716	0.0171034	2.00E- 05
(r) Dolomite	Kg	2.63E- 05	0.0000263		0
			1.70E- 07	0.00000017	0
			0.00380393		0
(r) Lead (Pb, ore)	Kg	중	락		
Outflows: (a) Aldehyde (unspecified)	g	0.00352789			0
(a) Aldehydes	g	0.0072627	0.006436334	0.000811102	1.24E- 06
(a) Ammonia (NH ₃)	g	0.29232	0.291990411	0.000323172	5.23E- 07
(a) Carbon Dioxide (CO ₂)	g	1139.86	998.0566	113.873	9.1376
	g	0.664534	0.58532987	0.0709472	0.00487613
			0.00000027		0
(w) Chlorides (Cl ⁻)	g	중	락		
(w) Chromium	g	0.00094078			0
(w) Cobalt	g	0.00363475	0.00363475		0
(w) COD	g	1.45926	1.458558056	0.000690714	9.36E- 07
(w) Copper (Cu ⁺ , Cu ⁺⁺)	g	1.53E- 05	0.0000153		0

독성(Aquatic Ecotoxicity)에 대한 characterization factor 가 정의되어있지 않아⁵⁾, 본 연구에서는 세제 성분에 대한 독성 실험 자료가 들어 있는 DID list(Detergent Ingredient Database)를 바탕으로, EPA의 provisional method에 따라 MTC(Maximum Tolerable Concentration)를 계산하여 사용하였다.

다음은 수계 독성에 대한 특성화 지수(Characterization Factor)인 ECA(Ecotoxicological Classification factor for Aquatic ecosystems)를 계산한 식이다.

$$ECA = X_a \times E_a = \frac{1}{MTC_{EPA}}$$

MTC_{EPA}=maximum tolerable concentration

X_a=Provisional exposour factor(여기서는 "1"로 간주)

Fig. 2는 농축 세제(리필 제품)의 원재료 생산, 세제 생산공정, 소비자 사용 및 제품 폐기 단계에 대한 characterization의 결과를 나타낸 것이다.

각 공정별로 살펴보면 원재료 생산 단계에서 지구 온난화와 원재료 생산 시 방출되는 수계 배출물로 인해 수계 독성에 의한 환경 영향이 크게 나타났고 폐기 단계에서는 세제 사용 후 배출되는 수계 배출물에 의한 수계 독성에서 환경 영향이 크게 나타남을 알 수 있다.

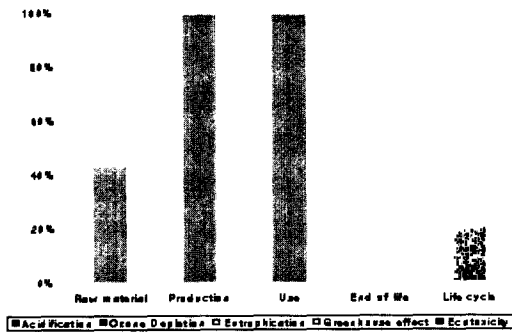


Fig. 2. Characterization.

(3) Normalization

Characterization을 통해서 얻은 수치들은 normalization을 통해서 해당 영향 범주 내에서의 상대적 기여도를 평가하였다.

$$\text{Normalization Score} = \text{Effect Score} / \text{Normalization Factor}$$

normalization score 산출에 사용된 normalization factor는 그 지역 내에서 각 영향 범주별로 발생하는 emission들의 연간 발생량들에 대한 데이터를 필요로 하며, 국내에는 아직까지 신뢰성 있는 데이터가 조사되어 있지 않아 본 연구에서는 CML에서 발표한 normalization 값을 GNP 비율로 환산한 자료를 사용하였다.^{11), 12)}

Fig. 3은 농축세제(리필 제품)에 대한 normalization 결과를 나타낸 것이다.

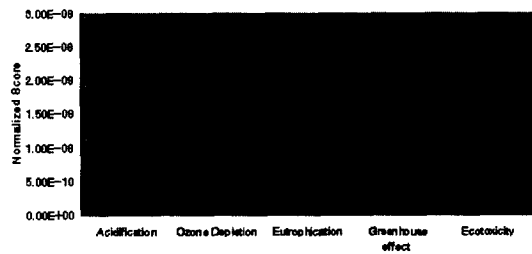


Fig. 3. Normalization.

세탁세제 전과정에 대한 영향 평가 결과, ecotoxicity가 가장 높게 나오는 반면 오존층 파괴에 의한 영향은 거의 나타나지 않음을 알 수 있다.

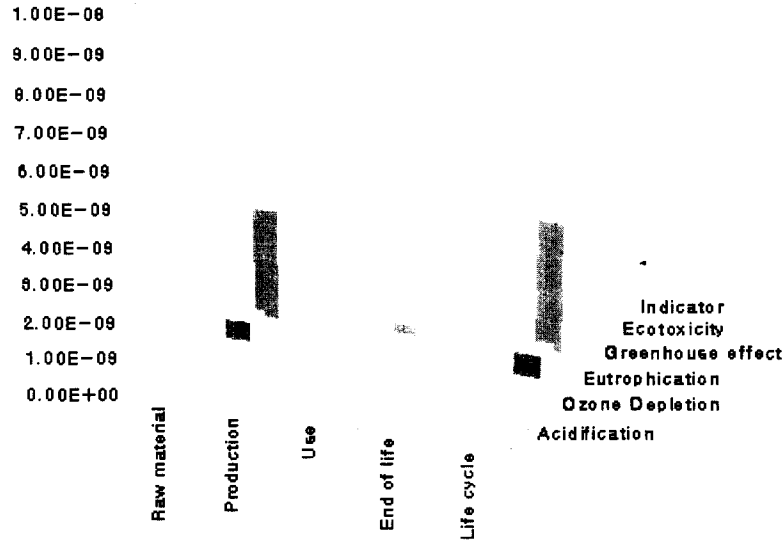
(4) Weighting

지금까지 normalization을 통해 해당 제품의 특정 환경 영향범주에 대한 기여도를 파악하였다. 그러나, 지역별로 환경 영향 범주들간의 중요도에 대한 인식의 차이가 있을 수 있으며 이러한 차이를 고려한 최종적인 환경영향 정도를 평가하기 위하여 영향범주별로 가중치(Weighting Factor)를 부여하였다.

$$\text{Weighting} = \text{Normalization Score} \times \text{weighting factor}$$

가중치 부여방법에는 Distant to Target Method, Environmental Damage Cost, Environmental Control Cost 등이 있으나 국내에는 환경관리 목표치 등에 대한 데이터가 아직까지 없으며 특히, 본 연구에 포함된 생태 독성(Ecotoxicity)에 관한 가중치 적용은 그 사례가 많이 알려져 있지 않다.

Fig. 4. Weighting.



따라서 본 연구에서는 독일 Fh-IUCT 에서 전문가 집단 300명을 대상으로 한 2차에 걸친 설문 조사 (Delphi법) 결과를 적용하였다.¹³⁾

Table 5. Weighting Factor

영향 범주	Weighting Factor(%)
Acidification	12
Ozone Depletion	16
Eutrophication	9
Greenhouse Effect	16
Ecotoxicity	15

그러나 가중치 부여는 매우 주관적이며 사회적인 가치나 선호도에 따라 달라질 수 있기 때문에 국내 데이터를 적용 할 경우 그 결과에 있어 약간의 차이가 있을 것이라 판단된다.

Fig. 4 에서는 weighting의 결과를 나타내었다.

세탁세제의 전과정 즉 원료생산, 세제제조, 사용, 폐기단계 중에서 원료 생산단계의 환경 영향이 가장 크며, 다음으로는 폐기 단계인 것으로 나타났다. 또한, 환경영향범주별로는 수계 생태독성에 의한 영향이 가장 크게 나왔으며 다음으로 지구온난화에 의한 영향이 높게 나오는 반면, 오존층 파괴영향은 거의 무시해도 될 정도였다.

III. 결과 및 개선안 도출

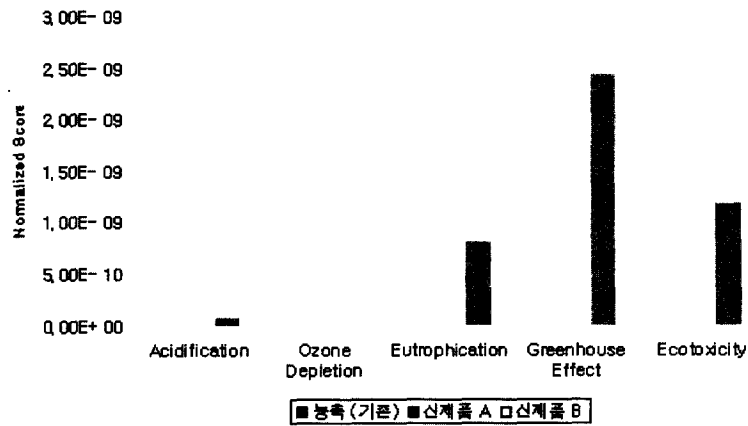
세탁세제의 환경영향은 원료 생산단계와 폐기 단계에서 사용 후 배출되는 세제 성분들에 의한 생태 독성들에 의한 영향이 큰 것으로 나타났기 때문에 환경 친화적인 세제 개발을 위해서는 먼저 환경적으로 우수한 원료를 선택함으로써 환경부하의 전체적인 양을 줄여 나가야 한다.

그러나 각각의 원료들에 대한 환경성은 일반인들이 쉽게 이해할 수 없게 되어 있으며, 또한 지금까지 원료들에 대한 환경영향평가는 각 원료들에 대한 개별 영향범주(즉, 수계에 미치는 환경독성이나 부영양화에 미치는 영향 등)로 한정함으로써 제품의 전 과정이나 다른 환경영향에 미치는 정도의 측면에서 볼 때 잘못된 결론을 내릴 가능성이 있었다.

LCA는 지금까지의 이러한 환경영향평가와는 달리 원재료 채취에서 폐기에 이르는 전과정에 걸친 여러 가지 환경적 요소들을 종합적으로 다룰 수 있기 때문에 환경 친화적 제품 개발에 매우효과적으로 사용될 수 있다.

그러나, LCA는 그 수행에 있어서 많은 시간이 소요되므로 개발단계에서부터 제품에 대한 full LCA를 수행하여 신제품을 개발한다는 것은 현실적으로

Fig. 6. Improvement assessment.



불가능하기 때문에 보다 간략화 된 방법론적인 접근이 필요하다고 판단된다.

따라서 본 연구에서는 지금까지 수행한 LCA 결과를 바탕으로 각 원료로 인한 환경영향의 정도를 쉽게 알 수 있게 하기 위하여 새로운 환경지수(Environmental Indicator)를 개발하여, 환경에 대한 전문 지식이 없어도 실험실에서 간단하게 제품에 대한 환경성 평가를 수행하고 이를 통한 제품 개발(DfE, Design for Environment)을 할 수 있는 방법(Tool)을 제시하였다. 이를 위하여 세계 원료들을 대상으로 CML method를 사용하여 영향 평가를 수행하였으며, 그 결과를 환경성으로 나타내는 하나의 지표(Env. indicator)로 나타내었다.

$$\text{Env. indicator} = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{Emission} \times \text{Characterization Factor})}{\text{Normalization Factor}} \times \text{Weighting Factor}$$

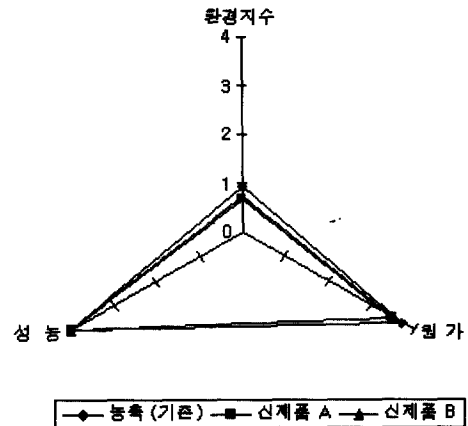
위의 순서에 따라 도출된 각 원료 물질들의 환경지수는 가격 및 성능과 더불어 제품에 대한 환경성 및 가격 경쟁력 등을 평가하는데 사용되며 이것은 또한 환경을 고려한 기존 제품의 개선에 활용 할 수 있다.

Fig. 5는 위 세 가지 인자를 고려하여 작성한 새로운 평가도구로서 이것을 이용하여 제품의 성능, 원가 및 환경과의 상관 관계를 알 수 있고, 그 제품에 대한 경쟁력을 평가할 수 있는 도구로 활용할 수 있다.

그리고 향후 새로운 처방이나 원료 물질이 개발

되면 새롭게 추가되는 물질의 환경지수에 대한 보완 작업을 통해 간단히 환경영향 정도를 파악할 수 있으며, 이러한 방법을 통해 환경성과 경제성을 고려한 합리적인 처방의 제품 개발이 가능하다. 예를 들어서 환경영향 및 cost가 큰 재료에 대해서는 사용량을 줄이거나 대체 물질을 사용하는 방법으로 환경성과 경제성을 개선할 수 있음을 나타낸다.

Fig. 5. Assessment of product competition.



위의 방법을 통해 실험실에서 개발코저하는 신제품들에 대하여 간략하게 전과정적 환경 영향 정도를 쉽게 계산 할 수 있으며 이렇게 하여 개발된 신규 제품의 최종적인 전과정평가 결과는 앞에서 언급한 방법 및 절차를 통해 실제 데이터를 적용하여 얻을 수 있다.

Fig. 6은 이렇게 개발된 제품에 대한 LCA 결과

를 나타내고 있다.

신규 제품은 기존 제품들에 비해 수계 생태독성이 상당히 개선되었음을 알 수 있다.

IV. 토 론

세탁세제에 대한 LCA 실시를 통해 세제가 미치는 환경영향 요소를 파악할 수 있었고, 제품 개발단계에서 세제 원료에 대한 환경영향 평가를 실시하여 환경부하가 낮은 원료의 선택 및 사용량 최적화를 통해 신규 제품의 환경성을 높일 수 있었다.

아울러 신규 제품의 환경적 개선평가에 대한 신뢰성을 높이기 위해 본 LCA 연구와는 별도로 개발제품에 대한 risk assessment를 실시 중에 있다.

본 연구에서 적용한 CML methods는 여러 영향평가 방법 중 하나로써, ISO를 중심으로 한 표준화가 완료되면 이에 대한 보완 작업이 필요하며 inventory 데이터는 향후 국내 기초소재 분야나 부품 분야 및 기간 산업(전기, 수송, 폐기물 관리)에 대한 inventory database의 작성이 완료되면 보완 할 예정이다.

아울러 국내에서 LCA가 활성화되기 위해서는 원료 제품들에 대한 inventory 작성이 활성화할 수 있는 방안이 필요하며 국내 실정에 맞는 영향평가법의 개발 및 정규화(Normalization)나 가중치 적용(Weighting)에 대한 연구 또한 뒤따라야 할 것이다.

참 고 문 헌

- 1) Modler, R. F.: Willhalm, R.: Yoshida, Y., "Surfactants, Household Detergents and their Raw Materials", *CEH Handbook*, SRI International (1997)
- 2) *EU-Ecolabelling Criteria for Laundry Detergents*, Final Proposal (1994)
- 3) "European Life-Cycle Inventory for Detergent Surfactants Production", *Tenside Surf. Det.* Vol. 32, No. 2(1995)
- 4) Vigon, B.W., Tolle, D.A., Cornaby, B.W., Latham, H.C., Harrison, C.L., Bouguski, T.L., Hunt, R.G., Sellers.J.D., *Life-Cycle Assessment: Inventory Guidelines and Principles*, US EPA, Risk Reduction Engineering Laboratory, Cincinnati, OH, EPA/600/R-92/245(1993)
- 5) Heijungs, R., Guinee, J.B., Huppes, G., Lankreijer, R.M., Udo de Haes, H.A., *Environmental Life Cycle Assessment of products* : Vol. I. Guide, Vol. II. Background CML, Leiden, the Netherlands (1992)
- 6) 의류용 합성세제, KS M 2715
- 7) Kluppel, H.J., Intemann, K., Bahn, M., *Tenside Surf. Det.*, Vol. 32, No. 5, pp. 439-442(1995)
- 8) *PEP Year Book*, SRI International (1994)
- 9) Berna, J.L., Cavalli, L., Renta, C., Schul, W., Hirsinger, F., Schick, K.P., *Tenside Surf. Det.*, Vol.32, No. 2(1995)
- 10) *Guidelines for Testing of Chemicals*, Sec.3, OECD (1993)
- 11) 정연하, 김승도, 문정호, 이진모: 대한환경공학회지, Vol. 19, No. 2, pp.269-279(1997)
- 12) Guinee, J., *Data for the Normalization Step within Life Cycle Assessment of Products*, CML, Leiden, Paper No.14(1993)
- 13) Walz, R., Herrchen, M., Keller, D., Stahl, B., *Int. J. LCA*, Vol. 1, No. 4, pp. 193-198(1996)