

시간 개념을 고려한 전과정평가 방법

H. Phungrassami · 박정건 · 이진모[†]

아주대학교 환경공학과

(2007년 3월 29일 접수, 2007년 6월 22일 채택)

Life Cycle Assessment Considering Time

H. Phungrassami · Jeounggun Park · Kun-Mo Lee[†]

Department of Environmental Engineering, Ajou University

ABSTRACT : Life Cycle Assessment(LCA) is a tool that quantifies the inputs and outputs, and evaluates the potential environmental impacts during the entire life cycle of a product, material and/or service. Inputs and outputs encompass the consumption of natural resources and emission of pollutants to the environment. One of the deficiencies of the conventional LCA methodology is that it does not consider time explicitly. In addition, there are problems associated with the temporal boundary in the normalization step of LCA. The objective of this study is to propose a new life cycle assessment method that considers time in LCA as called 'Time Load LCA'. Basically Time Load LCA is a method that divides environmental load in each life cycle stage by time duration in each life cycle stage. Time consideration in the proposed method indicated that the new LCA method not only renders new perspective on the environmental impacts of a product system but also rectifies inconsistency in temporal dimension of the normalization step. Basic premise of the time load LCA method is that same amount of load over a shorter time period would affect more seriously on the environment than over a longer time period. therefore, load per time is necessary for the assessment of an impact of the inventory parameters on the environment.

Key Words : Time Load LCA, LCA, Characterization, Normalization, Time Consideration

요약 : 전과정평가(Life Cycle Assessment; LCA)는 전과정에 걸친 투입과 산출을 정량화하고, 잠재적인 환경 영향을 평가하는 도구이다. 기존 LCA 방법은 시간을 명확하게 고려하지 않는다는 결함이 있다. 또한 정규화(normalization)단계에서도 시간 경계에 관한 문제가 존재한다. 본 연구의 목적은 시간이 고려된 새로운 LCA 방법을 제안하는 것이다. 본 연구에서 제안하는 새로운 LCA 방법론인 '시간-부하 LCA'는 각각의 전과정단계에서 발생하는 환경 부하를 해당 전과정단계에서 소요되는 시간으로 나누는 것이다. 전과정평가에서 시간 고려를 명확히 함으로써 제품 시스템의 환경 영향에 대한 새로운 관점을 제공할 수 있을 뿐만 아니라 정규화 단계의 시간 단위 불일치를 보완할 수 있다. 시간-부하 LCA의 기본 전제는 같은 양의 환경 부하라 하더라도 짧은 시간 동안 발생하는 환경부하가 긴 시간 동안 발생하는 환경 영향보다 더 큰 환경 영향을 미칠 수 있다는 것이다. 그러므로 목록 파라미터가 환경에 미치는 영향을 평가할 때 시간 당 부하를 고려할 필요가 있다.

주제어 : 시간-부하 전과정평가, 전과정평가, 특성화, 정규화, 시간 고려

1. 서론

전과정평가(Life Cycle Assessment; 이하 LCA)는 에너지와 물질의 사용 및 환경 배출물을 규명 하고 이를 정량화함으로써, 제품, 프로세스 또는 활동(activities)과 관련된 환경부하를 평가하고, 환경성을 개선해야 할 부분을 규명하는 도구이다. LCA는 목적 및 범위정의, 전과정 목록분석(life cycle inventory analysis; 이하 LCI), 전과정 영향평가(life cycle impact assesment; 이하 LCIA), 전과정해석의 4단계로 구성된다.¹⁾ 본 연구에서는 LCA 단계 중 전과정 목록분석(LCI)과 전과정 영향평가(LCIA) 단계에 초점을 맞춘다.

전과정목록 분석(LCI)은 대상 제품 시스템과 관련한 물질

과 에너지의 투입 및 산출 데이터를 수집하고 이를 정량화하기 위한 계산과정으로 구성되어 있다.¹⁾ 전과정 영향평가(LCIA)는 일련의 목록 분석 결과가 연산되어 환경영향 및 사회적 선호(societal preferences)로 해석되는 단계이다. 먼저 영향범주 항목이 정의되고, 투입물 및 산출물을 적절한 범주 지표에 연결하기 위한 모델이 선택된다. 실제적인 모델링 결과가 특성화 단계에서 계산되고, 전 세계, 또는 전 지역에 대한 기여도가 얼마인지를 나타내기 위해 정규화 단계(선택 사항)를 거친다.

기존 LCA는 목록 분석 결과로부터 환경 영향을 평가할 때 목록 파라미터의 시간 단위를 고려하지 않는다. 보통 1년 동안 목록 데이터를 수집하지만, 목록 데이터에는 시간 단위가 명백하게 나타나 있지 않다.¹⁾ 여기서 데이터 수집 기간이 1년이라고 해서 제품 시스템과 관련한 실제적인 시간이 1년을 의미하는 것은 아니며, 원료물질 취득 단계에서부터 폐기 단

[†] Corresponding author
E-mail: kunlee@ajou.ac.kr
Tel: 031-219-2409

Fax: 031-215-5145

계까지 걸리는 실제 시간은 1년의 데이터 수집 기간과는 아무런 상관관계가 없다는 사실에 주목해야 한다. 단지 데이터 수집 기간 동안 발생된 환경부하만이 관심 대상이다. LCIA 단계에서 계산된 특성화된 환경영향 역시 시간 단위를 포함하지 않는다. 기존의 LCA는 제품 시스템이 환경에 미치는 영향을 평가하는데 시간 단위를 명확히 고려하지 않는다고 할 수 있다.

LCIA의 제약 중 하나는 이 단계에서 공간 및 시간적 정보, 배출 한계치 그리고 용량-반응(dose-response) 정보가 명확하게 고려되지 않는다는 것이다. 단지 제품의 전과정 각각 또는 전과정 동안의 공간 및 시간에 걸친 배출물과 활동을 합칠 따름이다.²⁾ 또한 정규화 기준값(normalization reference)의 시간 경계에도 문제가 있다. 본 논문에는 상기 제약을 극복하기 위해서 목록 데이터와 특성화된 환경영향 값에 시간 단위가 포함되도록 하였다.

2. 방법론

일반적으로 시간은 기존 LCA의 3개 단계에서 고려된다. 첫 번째는 목적 및 범위정의 단계에서 기능 단위의 시간이다. 여기서의 시간 측면은 기능 단위와 함께 목적 정의에서 설정되어야 하는 경계를 말하는 것이다.³⁾ 두 번째는 전과정 목록 분석 단계에서의 시간이다. 일반적으로 데이터 수집을 위한 목표기간은 1년으로 한다.¹⁾ 세 번째는 LCIA에서의 시간 설정이다. 정규화 기준값(normalization reference)에 시간이 고려되어 있으며, 시간적 경계는 보통 1년으로 설정된다.¹⁾ 하지만 Hofstetter는 정규화 기준값의 기간이 일정한 기준 없이 1년으로 설정 될 뿐만 아니라, 제조 시스템의 많은 공정들이 설정된 기준 기간에 일어나지 않고 있다는 사실을 지적하고 있다.³⁾

기존 LCA 방법에서, 일단 목적 및 범위가 설정되면, 제품 시스템의 투입 및 산출 데이터를 계산하는 LCI 단계가 시작된다.⁴⁾ 목록 데이터의 전형적인 단위는 기능단위 당 무게(또는 에너지), g/fu(또는 MJ/fu)이다. 목록 데이터 단위의 어디에도 시간 단위가 나타나 있지 않다.

2.1. 기존 LCA 방법

2.1.1. 기존 LCA방법에 의한 목록(inventory) 환경부하

기존 LCA 방법론에서, LCI 단계의 목록 파라미터는 아래와 같이 정의된다.

m번째 전과정 단계,
j번째 목록 파라미터가 미치는 환경부하 = $Load_{j,m}$

여기서 $Load_{j,m}$: m번째 전과정 단계, j번째 목록 파라미터가 미치는 환경부하, g/fu
fu : 기능 단위
m : 전과정 단계(원료 물질 취득, 제조, 사용, 폐기 단계)

2.1.2. 기존 LCA 방법에 의한 특성화(characterization) 환경부하 분류화(classification) 단계에서 정량적으로 해당 영향 범주와 연결된 투입 및 산출은 LCIA의 특성화(characterization) 단계에서 해당 범주의 공통 단위에 대해 정량화 된다. 특정한 영향 범주의 결과 값은 범주 지표(category indicator) 결과로써 언급되고, 범주 지표의 완전한 세트가 환경성 프로파일의 결과로서 도출된다.

주어진 영향 범주의 목록 파라미터에 의해 야기된 환경 영향을 정량화하는데 있어서 핵심 사항은 특성화 계수(또는 등가 계수; equivalency factor)이다. 특성화 계수는 화학에서 이용되는 등가 원리에 근거를 두고 있다. 이것은 배출 한계치를 고려하고 있지 않으므로 목록 파라미터 농도와 그것이 환경에 미치는 영향에는 직선적인 관계가 있다는 사실이 가정되어 있다.

일단 특성화 계수가 이용가능하다면, 식 (1)을 이용하여, 주어진 영향 범주의 목록 파라미터에 의한 환경 영향을 정량화할 수 있다.

$$CI_{i,j,m} = Load_{j,m} \times eqv_{i,j} \tag{1}$$

여기서, $CI_{i,j,m}$: m번째 전과정 단계, j번째 목록 파라미터가 미치는 i번째 영향 범주에서의 특성화된 영향, g x-eq/fu

$eqv_{i,j}$: i번째 영향 범주, j번째 파라미터의 등가(특성화) 계수, g x-eq/g

g x-eq : 특정 물질에 대한 등가 그래람

제품 시스템의 i번째 범주 전체의 특성화된 환경영향 값은 식 (2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$CI_i = \sum_m \sum_j CI_{i,j,m} \tag{2}$$

여기서, CI_i : 제품 시스템의 i번째 범주 전체의 특성화된 환경영향 값

2.2. 제안된 LCA 방법

LCI 단계에서 수집된 j번째 목록 파라미터의 환경부하는 2가지 다른 형태, 즉 m번째 전과정 단계에서 발생하는 환경부하인 $Load_{j,m}$ 와 $Load_{j,m}$ 을 전과정 단계의 소요 시간(T_m)으로 나눈 $Load_{j,m}/T_m$ 으로 표현될 수 있다. 전자는 어느 전과정 단계에서 발생한 기존-부하(conventional load)이며, 후자는 본 연구에서 새롭게 제안하는 시간-부하(time load)이다. 전자는 크기성질(extensive property)이고, 후자는 세기성질(intensive property)이다.

일반적으로 전과정평가에서 사용되는 부하의 개념은 발생되는 환경부하의 총량을 나타내지만, 새로 제안된 방법에 의한 부하는 해당 시간동안 환경부하가 얼마나 강한지를 나타낸다. 이것이 기존 방법에 의한 환경부하와 새로운 방법에 의한 환경부하에 대한 논점이다. 짧은 시간 동안 환경부하의

요동은 해당 영향 범주의 생태계 한계 수준을 초과할 수 있다. 만약 긴 시간에 걸쳐 환경부하가 축적되었다면 이것이 환경에 미치는 영향은 줄어들 수 있다. 왜냐하면 에코시스템에 존재하는 동적 평형(dynamic equilibrium) 기작과 희석, 분해, 흡착과 같은 다른 요소가 오랜 시간에 걸쳐 환경 영향을 줄이는데 중요한 역할을 하기 때문이다. 다시 말해, 기존의 방법에 의해 계산된 긴 기간에 걸친 환경부하는 실제로 생태계의 한계 수준을 초과하지 않을지도 모른다. 그렇기 때문에, 새로 제안된 방법에 의한 부하와 기존 부하는 구분될 필요가 있다.

새로운 LCA 방법을 아래에 제안하였다. 본 제안에는 시간-부하(time load)의 목록(inventory)과 시간-부하에 의해 특성된 환경부하에 대한 정의가 포함되어 있다.

2.2.1. 새로운 LCA 방법의 목록(inventory)

시간-부하 LCA(time load LCA)라 불리는 새로 제안된 LCA 방법의 LCI 단계 목록 파라미터는 아래 식 (3)와 같이 표현될 수 있다.

$$L^*_{j,m} = \frac{Load_{j,m}}{T_m} \tag{3}$$

여기서, $L^*_{j,m}$: m번째 전과정 단계, j번째 목록 파라미터의 단위시간당 환경부하, g/(fu · time)
 $Load_{j,m}$: m번째 전과정 단계, j번째 목록 파라미터의 환경부하, g/fu
 T_m : m번째 전과정 단계에서의 소요 시간, day
 fu : 기능 단위

2.2.2. 새로운 LCA 방법의 특성화

시간-부하 LCA를 이용하여 계산된 제품의 특성화된 환경영향은 아래 식 (4)와 같이 표현될 수 있다.

$$CI^*_{i,j,m} = L^*_{j,m} \times eqv_{i,j} \tag{4}$$

여기서, $CI^*_{i,j,m}$: m번째 전과정 단계에서 j번째 목록 파라미터의 시간-부하가 i번째 영향범주에 미치는 특성화된 환경영향, g x-eq/(fu · time)
 $eqv_{i,j}$: i번째 영향 범주의 j번째 목록 파라미터의 등가(특성화) 계수

2.3. 새로운 LCA 방법에서의 시간

사용단계를 제외하고 전과정 단계 동안에 소요되는 시간은 어느 정도 고정되어있다. 사용단계의 시간 소요는 사용자의 습성에 따라 달라진다. 그러므로 서로 다른 사용 시나리오를 작성하고, 그에 따라 환경부하가 계산되어야 한다. 이는 제품의 수명 또는 제품을 소유하고 있는 시간이 아니라 제품이 하루에 사용되는 시간에 대한 시나리오를 작성하여 이에 의하여 발생하는 환경부하를 산출해야 함을 의미한다. 새로운

LCA 방법에서 각각의 단계, 즉 원료 물질 취득 단계, 제조, 운송, 사용, 폐기 단계에서 소요되는 시간은 T_R , T_M , T_D , T_U and T_{EoL} 로 나타낸다. 제품의 전체 전과정 단계에서 소요되는 시간 T_{Total} 은 각각 전과정 단계에서 소요되는 시간의 총합이다. 아래 식 (5)에 이를 나타내었다.

$$T_{Total} = T_R + T_M + T_D + T_U + T_{EoL} \tag{5}$$

여기서, T_R : 원료 물질 취득 단계에서 소요되는 시간
 T_M : 제조단계에서 소요되는 시간
 T_D : 운송단계에서 소요되는 시간
 T_U : 축적된 제품의 실제 작동 시간(사용자에 의해 소유된 시간이 아님)
 T_{EoL} : 폐기단계에서 소요되는 시간(실제로 환경 배출, 자원 소모와 관련된 시간을 말할)

아래 Table 1은 각각의 전과정에서 시간과 제품 시스템의 공정 흐름을 보여준다.

Table 1. The process flow of a product system with time duration of each life cycle stage

Life cycle stage(m)	Time duration(T_m)
Raw material acquisition	Many parallel and serial processes: Longest of the serial process becomes the critical path
Manufacturing	Many parallel and serial processes: Longest of the serial processes becomes the critical path
Distribution	Entire duration of the transport from factory gate to consumers
Use	Entire duration of the product in use including actual time of operation by the user(consumer) and the intervals between uses. Not a time of possession
End of Life	Entire duration of all activities in the end of life stage including transport during collection and processing in a recycling plant and/or incineration plant. It does not include time in a landfill

Table 2. Comparison between the new LCA method and the conventional load LCA method

	New LCA Method	Conventional LCA Method
Inventory Analysis		
Value	$\frac{Load_{j,m}}{T_m} (= L^*_{j,m})$	$Load_{j,m}$
Unit	$\frac{g}{fu \cdot time}$	$\frac{g}{fu}$
Characterized Impact		
Value	$\frac{Load_{j,m} \times eqv_{i,j}}{T_m} (= L^*_{j,m} \times eqv_{i,j})$	$Load_{j,m} \times eqv_{i,j}$
Unit	$\frac{g \times eq}{fu \cdot time}$	$\frac{g \times eq}{fu}$

3. 결과 및 토의

3.1. 새로운 LCA 방법과 기존 LCA 방법 비교

Table 2는 새로운 LCA 방법과 기존 LCA 방법을 목록 분석과 특성화된 환경영향 값에 대하여 비교한 것이다.

두 방법의 차이는 시간-부하 LCA 방법에는 시간 단위가 명확하게 포함되어 있지만, 기존 LCA 방법에는 그렇지 않다는 것이다. 아래와 같이 새로운 LCA 방법에 시간을 곱함으로써, 기존 LCA 방법론과 동일한 결론을 얻을 수 있다. 목록 분석에서,

$$\begin{aligned} Load_{j,m} &= L_{j,m}^* \times T_m \\ &= \frac{Load_{j,m}}{T_m} \times T_m \\ &= Load_{j,m} \end{aligned}$$

특성화된 환경영향도 마찬가지로이다.

$$\begin{aligned} CI_{i,j,m} &= CI_{i,j,m}^* \times T_m \\ &= L_{j,m}^* \times eqv_{i,j} \times T_m \\ &= \frac{Load_{j,m}}{T_m} \times eqv_{i,j} \times T_m \\ &= CI_{i,j,m} \end{aligned}$$

그러므로 시간-부하 LCA 방법이나, 기존의 LCA 방법에 상관없이 제품 시스템의 특성화된 영향은 동일하다. 그러나 새로운 LCA 방법은 각각의 단계에 대하여 계산되었을 때에만 유효하다.

제품 시스템의 *i*번째 영향 범주의 특성화된 전체 환경영향은 아래 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$CI_i = \sum_m \sum_j CI_{i,j,m} \tag{6}$$

그러나 제품 시스템의 *i*번째 영향 범주의 특성화된 영향, CI_i 는 CI_i^* 와 T_{Total} 을 연산한 결과가 아니다. 왜냐하면 아래 식 (7)과 같이, CI_i^* 는 $CI_{i,m}^*$ 의 합이 아니기 때문이다.

$$CI_i^* \neq \sum_m CI_{i,m}^* \tag{7}$$

Table 3과 4는 가상의 목록 데이터와 특성화된 환경영향 값을 각각 보여준다. 이를 통해 CI_i^* 는 존재하지 않는다는 것을 알 수 있다.

Table 4로부터 제품 시스템의 *i*번째 영향 범주의 특성화된 환경영향의 총 합은 13,559 g CO₂ eq/fu라는 것을 알 수 있다. 만약 CI_i^* 가 계산되고, 여기에 T_{Total} 을 곱할 수 있다면, 특성화된 환경영향 값은 263,636 g CO₂ eq/fu가 된다. 이결과는 명백한 오류다. CI_i^* 가 존재하지 않는 것과 마찬가지로 각각의 전과정 단계에서의 시간은 다르다.

3.2. 시간과 환경부하 사이의 관계

새로운 방법론에서, 각각의 전과정 단계에서의 환경부하 발생 시간을 그래프로 나타내면 아래 Fig. 1과 같다.

각각의 선(이 경우에는 직선)에 의한 면적은 기존-부하이다. 예를 들어, 빗금 친 면적(원료 물질 취득 단계)은 $Load_{j,R}$ 이다. 이것은 새로운 방법에 의한 환경부하, $L_{j,m}^*$ 와 $Load_{j,R}$ 이

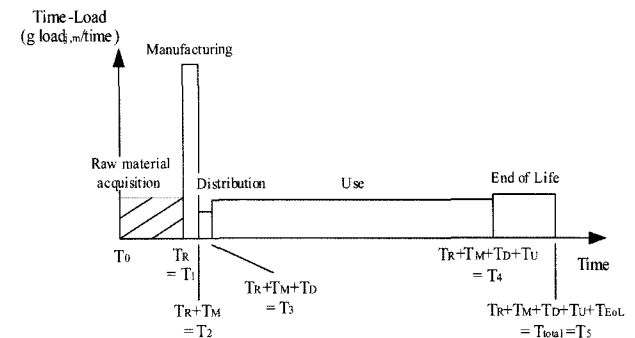


Fig 1. Relationship between time and new load method.

Table 3. Inventory data

j	Upstream		Manufacture		Distribution		Use		End of Life	
	Load _{j,m} (g/fu)	L _{j,m} [*] (g/fu · d)	Load _{j,m} (g/fu)	L _{j,m} [*] (g/fu · d)	Load _{j,m} (g/fu)	L _{j,m} [*] (g/fu · d)	Load _{j,m} (g/fu)	L _{j,m} [*] (g/fu · d)	Load _{j,m} (g/fu)	L _{j,m} [*] (g/fu · d)
CO ₂	2000	66.67	100	50	200	20	10000	10	500	50
CH ₄	10	0.33	3	1.5	-	-	15	0.015	5	0.5
Time(d)	30		2		10		1000		10	

Table 4. Characterized impact value

j	Upstream		Manufacture		Distribution		Use		End of Life	
	CI _{ij,m} (g eq/fu)	CI _{ij,m} [*] (g eq/fu · d)	CI _{ij,m} (g eq/fu)	CI _{ij,m} [*] (g eq/fu · d)	CI _{ij,m} (g eq/fu)	CI _{ij,m} [*] (g eq/fu · d)	CI _{ij,m} (g eq/fu)	CI _{ij,m} [*] (g eq/fu · d)	CI _{ij,m} (g eq/fu)	CI _{ij,m} [*] (g eq/fu · d)
CO ₂	2000	66.67	100	50	200	20	10000	10	500	50
CH ₄	230	7.59	69	34.5	-	-	345	0.345	115	11.5
Total	2230	74.26	169	84.5	200	20	10345	10.345	615	61.5

발생하는 시간, T_R 을 연산하여 얻어진다. 식 (8)은 $Load_j$ 와 m 번째 전과정단계(여기서는 원료 물질 취득 단계; R), i 번째 목록 파라미터가 미치는 시간-부하와의 관계를 보여준다.

$$Load_{j,R} = \int_{T_0}^{T_R} \frac{Load_{j,R}}{T_R - T_0} dT \quad (8)$$

기능 단위 당 m 번째 전과정단계, i 번째 목록 파라미터가 미치는 시간-부하는 아래 식 (9)과 같이 나타낼 수 있다.

$$L^*_{j,m} = \frac{Load_{j,m}}{T_m - T_{m-1}} \quad (9)$$

예를 들어, 제조단계에서의 시간-부하, $L^*_{j,m}$ 를 산출하기 위해서는, 제조단계에서 발생하는 부하 $Load_{j,m}$ 을 산출하고 이를 제조단계에서 소요된 시간, $T_2 - T_1$ 으로 나누어야 한다.

각각의 전과정 단계에서 시간-부하가 직선인 것은 T_m 동안 $Load_{j,m}$ 이 균일하게 발생한다는 가정 때문이다. 이러한 가정이 실제 상황에서는 있을 수 없는 일이지만, 새로운 방법론의 실용성을 위해서는 필요하다.

$Load_{j,m}$ 과 $L^*_{j,m}$ 를 비교함으로써, 각각의 전과정 단계 사이의 환경부하 분포에 새로운 시각을 제공할 수 있다. 이는 주요 이슈(key issue) 규명에 새로운 시각을 제공할 것이다. 여기서 주요 이슈란 전과정 단계에서 환경이나 천연 자원에 악영향을 야기하는 제품의 주요 프로세스, 활동 및 물질을 의미한다.

만일 시간-부하가 생태계(예: 호수, 토양 등)의 한계 수준을 초과한다면, 시간-부하가 야기하는 영향은 제품 시스템의 주요 이슈를 규명하는데 고려되어야 할 것이다. 한편, LCA의 일반적인 과정으로써 기존-부하는 주요 이슈를 규명하는데 또한 고려되어야 한다. 그렇기 때문에 제품 시스템의 주요 이슈를 규명하는 데는 두 가지 관점, 즉 시간-부하 관점과 기존-부하 관점 모두 필요하다.

일반적으로, 기존의 LCA 방법에서는 환경부하의 총량만을 고려할 뿐, 어디에서도 환경적으로 민감한 지역으로 배출되는 환경부하나, 특정 지역의 한계 배출량에 대하여 고려하지 않는다. 환경적으로 민감한 지역의 한계 배출량은 환경 수용능력(carrying capacity)로 대변된다. 만약 환경 부하가 특정 지역의 환경 수용 능력보다 크다면, 해당 지역은 환경적으로 심각한 피해를 입을 수 있다. 시간-부하 LCA는 특정 지역에 미치는 환경 영향의 세기를 정량화 할 수 있으므로 특정 지역의 수용 능력과의 비교를 통하여 해당 지역에 얼마나 강한 환경 부하가 가해지는지를 정량화 할 수 있다.

3.3. 정규화 문제

정규화는 제품 시스템의 영향 범주의 특성화 값을 정규화 기준값으로 나누는 과정이다. 정규화 단계의 결과물인 정규화값(정규화된 환경영향; normalized impact)은 정규화 기준값에 정의된 일정기간, 일정지역 범위 내에서 주어진 영향범

주에 대한 제품시스템의 기여도를 나타낸다.¹⁾

$$NI_i = \frac{CI_i}{N_i} \quad (10)$$

여기서, NI_i : i 번째 영향범주의 정규화된 환경영향, yr/fu
 N_i : i 번째 영향범주의 정규화 기준값

$$\sum_k \left(\frac{Load_k}{year} \right) \times eqv_{i,k}, \text{ g x-eq/yr}$$

k : k 번째 목록 파라미터
 $Load_k$: k 번째 목록 파라미터의 부하, g/yr
 $eqv_{i,k}$: i 번째 영향범주 k 번째 목록 파라미터의 특성화 계수, g x-eq/g

정규화 기준값은 특성화의 또 다른 형태라고 볼 수 있다. 다른 점이라면 지역적, 시간적 경계가 있다는 것이다.¹⁾ 특성화는 제품시스템에 국한되어 있는 반면, 정규화 기준값은 제품시스템이 속해있는 전체 지역을 포괄한다. 제품시스템에서 시간적 간격과 같이 원료 물질 취득에서부터 제품의 최종 폐기까지를 포괄한다. 제품시스템에서 시간적 경계는 원료 물질 취득에서부터 폐기 단계까지의 시간에 따라 달라진다. 반면에 정규화 기준값의 시간적 경계는 보통 1년 이다. 제품시스템의 지역적 경계 역시 정규화 기준값의 그것과 대부분의 경우 다르다. 왜냐하면 많은 제품에서 원료 물질 취득 지역, 제조 지역, 그리고 사용 지역이 각기 다르기 때문이다. 그렇기 때문에, 특성화된 영향과 정규화 기준값의 시간적인 경계 뿐만 아니라 지역적인 경계 역시 다르다.

제품과 정규화 기준값의 시간적인 경계와 지역적인 경계가 다르기 때문에 기존의 방법을 근거로 한 제품의 정규화값 계산은 오도될 수 있다. 그럼에도 불구하고, 현재 더 나은 지표가 없기 때문에 정규화 값이 여전히 활용되고 있다.

식 (11)은 정규화된 환경영향의 정의를 보여준다.

$$NI_i(\text{time}) = \frac{CI_i(\text{time})}{N_i} \quad (11)$$

여기서, $CI_i(\text{time})$: 시간이 고려된 CI_i
 $NI_i(\text{time})$: 시간이 고려된 NI_i

$CI_i(\text{time})$ 은 식 (12)과 같이 표현될 수 있다.

$$CI_i(\text{time}) = \frac{CI_i}{T_{total}} \left(\frac{365 \text{ days}}{\text{year}} \right) \quad (12)$$

식 (11)은 NI_i 에서 시간(yr) 단위를 제거한 것이다. 이는 $NI_i(\text{time})$ 를 무(無)단위로 만들어서 기능 단위당으로만 나타내게 한다. 그러므로 목록 데이터에 시간을 포함시키는 것은 특성화된 환경영향과 정규화 기준값 사이의 시간적 단위를 동일하게 한다.

새롭게 제안된 정규화된 환경영향의 정의는 기존의 정규화된 환경영향과 다른 것이 아니다. 그러나 전과정에서 제품과 관련된 시간을 도입함으로써, 기존의 정의를 어느 정도 개선할 수 있다. NIi 계산에 시간을 적용하는 것은 특성화된 영향과 정규화 기준값 사이의 시간적 경계 문제를 완화한다. 그러나 이것이 지역적 문제에 대한 해결을 제시하는 것은 아니다.

4. 결론

목록 데이터에 시간 단위를 명확하게 포함하는 새로운 LCA 방법을 사용함으로써 특성화된 환경영향과 정규화 기준값 사이의 시간적 단위에서의 불일치를 개선할 수 있다. 이것은 각각의 전과정 단계에서 발생하는 환경부하의 기여도 분석에 새로운 관점과 주요 이슈 규명에 있어서 새로운 시각을 제공할 것이다. 시간-부하 LCA는 목록 데이터에 시간 단위를 명확히 고려함으로써 시간 당 얼마나 많은 환경부하가 발생하는 지에 대해 정량화 할 수 있게 한다. 이는 해당 지역의 환경 수용 능력과 비교함으로써 얼마나 강한 환경 부하가 해당 지역으로 배출되는 지에 대한 정보를 제공해 줄 수 있

게 한다. 새로운 LCA 방법은 기존 LCA 방법을 보완한다. 그러므로 제품 시스템의 투입 및 산출에 의한 환경부하의 영향을 반영하기 위해서 기존-부하뿐만 아니라, 시간-부하 또한 LCA에서 고려되어야 한다.

참고 문헌

1. Lee, K.M. and Inaba, A., Life Cycle Assessment; Best Practices of ISO14040 series, APEC(2004).
2. International Standard. ISO 14040:2006, Environmental management - Life Cycle Assessment - Principles and framework(2006).
3. Hofstetter, P., Developments in LCA Valuation: Time in Life Cycle Assessment, Final Report of the project nr. 5001-35066 from the Swiss National Science Foundation (1996).
4. Wimmer, W.; Züst, R; Lee, K. M., Ecodesign Implementation: A systematic Guidance on Integrating Environmental Considerations into Product Development, Springer (2004).