

한국형 피해산정형 전과정 영향평가 지표 개발

The Development of Korean Life Cycle Impact Assessment Index Based on a Damage Oriented Modeling

박필주[†] · 김만영

Pil-Ju Park[†] · Mann-Young Kim

한국환경산업기술원

Korea Environmental Industry & Technology Institute

(2010년 1월 19일 접수, 2010년 5월 26일 채택)

ABSTRACT : This study proposed a life cycle impact assessment index that can indicate the environment-related information of the product in monetary value such that the national geographical, environmental, and social features are fully reflected based on a damage-oriented model. First, the estimation process was classified into characterization, damage assessment, and integration stages considering the six biggest impact categories: resource depletion, global warming, ozone depletion, acidification, eutrophication, and photochemical oxidant creation. Moreover, this study came up with the 16 category endpoints related to the 6 impact categories, and the damage function, to the 4 largest safeguard subjects. The integration indices of finally identified impact categories were KRW 21.8/kg Sb, KRW 6.19/kgCO₂, KRW 53,000/kg CFC-11, KRW 13,100/kg SO₂, KRW 2,310/kg PO₄³⁻, and KRW 3,030/kg C₂H₄. Using the results of this research, environmental impacts based on the environmental load generated throughout the entire life cycle of a product can serve as a single index in monetary value; thus enhancing understanding and utilization of the results of life cycle impact assessments.

Key Words : *Damage oriented model, Life cycle impact assessment, Single index, Monetary value*

요약 : 이 연구에서는 피해산정형 모델에 기초하여 제품 환경성 관련 정보를 국내 지리적, 환경적, 사회적 특성을 최대한 반영하여 '화폐가치'로 나타낼 수 있는 전과정 영향평가 지표를 제시하였다. 먼저 평가단계를 '특성화', '피해평가', '통합화'의 3단계로 구분하였으며, 자원소비, 지구온난화, 오존층영향, 산성화, 부영양화 및 광화학산화물 생성의 6대 영향범주를 고려하였다. 아울러 6대 영향범주와 관련된 16개 범주별 종말점과 4대 보호대상에 대한 피해합수 및 피해계수를 도출하였다. 최종적으로 도출된 영향범주별 기준물질의 통합화 지수는 21.8원/kg Sb, 6.19원/kg CO₂, 53,000원/kg CFC-11, 13,100원/kg SO₂, 2,310원/kg PO₄³⁻, 3,030원/kg C₂H₄로 나타났다. 이 연구결과를 활용하여 제품 전과정에 걸쳐 발생하는 환경부하가 보호대상에 미치는 영향을 화폐가치로 단일 지수화할 수 있으므로 도출되는 전과정 영향평가 결과의 이해도와 활용도를 높일 수 있다.

주제어 : 피해산정형 모델, 전과정 영향평가, 단일 지수화, 화폐단위

1. 서론

대량생산과 소비, 대량폐기로 인해 발생하는 CO₂ 등 환경부하를 저감하기 위한 산업계, 정부의 노력들이 '저탄소 녹색성장'이라는 새로운 국가발전 패러다임의 출현으로 더욱 가속화되고 있다. 환경부하를 효율적으로 줄이려면 먼저 환경부하에 따른 환경영향이 어느 정도인지를 정량적으로 평가하는 게 바람직하다. 이때 쓰이는 주요 평가방법으로 전과정 평가(LCA, Life Cycle Assessment)를 들 수 있다.

LCA는 제품(물질, 부품, 제품 및 서비스를 총괄)의 원료 물질 취득부터 가공, 제조, 사용, 운송, 폐기 및 재활용 단계

의 전과정 각 단계에 걸쳐 발생하는 환경부하를 분석하여 잠재적 환경영향을 평가하는 체계적인 분석 도구인데, 제품 환경성을 정량화하고 개선·홍보하거나 기업의 녹색경영을 촉진하기 위한 수단으로 널리 사용되고 있다. LCA는 목적 및 범위 정의, 전과정 목록분석(LCI, Life Cycle Inventory analysis), 전과정 영향평가(LCIA, Life Cycle Impact Assessment), 전과정 결과해석의 4단계로 구성된다. 이 가운데 LCIA는 LCI 결과를 바탕으로 환경영향을 정량적으로 산정함으로써 주어진 시스템이 환경에 미치는 영향을 종합적으로 평가하는 과정으로 평가결과 해석의 용이성 제고를 위해 가장 중요시되어야 하는 단계이다.

[†]Corresponding author : E-mail : parkpj@keiti.re.kr Tel : 02-3800-282 Fax : 02-3800-271

LCIA 방법은 1980년대 후반 환경독성화학회(SETAC, The Society of Environmental Toxicology and Chemistry)에서 LCA를 연구 테마로 채택하여 정기적으로 논의를 시작한 이래 지속적인 발전을 거듭해 왔다. 초기 LCIA 방법은 LCI 결과로부터 중간점(midpoint level) 수준에서의 영향범주(지구온난화, 오존층영향, 산성화, 부영양화, 광화학산화물 생성 등)별 잠재적인 환경영향을 정량화하는 형태였다. 이후 영향범주별 결과를 통합화하여 단일 지수화하는 시도가 이루어졌다. 처음에는 소비자를 대상으로 한 설문조사 결과 또는 전문가 등으로 구성된 패널 논의 결과를 바탕으로, 각각의 영향범주에 중요도를 부여하여 단일 지수화하는 문제비교형 모델이 주를 이루었다. 이후 문제비교형 모델에 대한 문제점이 지속적으로 지적됨에 따라 피해산정형 모델이 대안으로 대두되었다. 피해산정형 모델은 각각의 영향범주에 중요도를 부여해 통합화하는 문제비교형 모델과는 달리, 환경영향 정도를 파악할 수 있는 범주별 종말점 수준(category endpoint level)에서 환경영향을 집계한 후 보호대상(safeguard subject)에 가중치를 부여하여 단일 지수화하는 방법으로 Eco-indicator 99¹⁾, LIME²⁾ 및 EPS 2000³⁾이 대표적이다.

동일한 환경오염이 발생되었다고 하더라도 인간 및 생태계에 미치는 환경영향은 지역적 특성에 따라 다르게 나타나기 때문에 외국의 피해산정형 영향평가 방법들을 국내에 그대로 적용하기에는 무리가 있으며, 이에 국내의 지리적, 환경적 특성을 고려한 피해산정형 영향평가 방법 개발이 필요하다. 국내에서는 1990년대 초반부터 LCA에 대한 연구 및 적용이 이루어졌으나 대부분이 사례조사 중심의 LCI 산출에

집중되었다. LCIA 방법론과 관련해서는 문제비교형 모델에 기초하여 영향범주간의 가중치를 산출하여 통합화한 연구⁴⁾가 유일하다고 할 수 있으며, 피해산정형 모델을 이용한 부분적인 정량화⁵⁻⁷⁾는 시도된 적이 있으나, 전체 환경영향에 대한 통합화 시도는 이루어지지 않고 있다.

이 연구에서는 피해산정형 모델에 기초하여 제품 환경성 관련 정보를 국내 지리적, 환경적, 사회적 특성을 최대한 반영하여 ‘화폐가치’로 나타낼 수 있는 ‘피해산정형 모델에 기초한 한국형 전과정 영향평가 지표(KOLID, KOrean Life cycle Impact assessment index based on a Damage oriented modeling)’를 제시하였다.

2. KOLID 계산방법

2.1. 평가단계

ISO 14044⁸⁾에서는 LCIA 수행에 있어서 목록항목(환경부하)을 각각의 영향범주에 배정하는 ‘분류화’와 영향범주별 결과를 계산하는 ‘특성화’를 필수요소로, ‘정규화’, ‘그룹화’, ‘가중치 부여’를 임의요소로 구분하고 있다. 또한 Eco-indicator 99에서는 ‘경로분석’, ‘노출 및 효과분석’, ‘피해분석’, ‘정규화 및 가중치 부여’의 단계로, LIME에서는 ‘특성화’, ‘피해평가’, ‘가중치 부여’의 3단계로 구분하고 있다. 각 방법들은 용어 차이만 있을 뿐 거의 동일한 원리와 절차를 따르고 있다. 이 연구에서는 KOLID 평가 절차를 Fig. 1에 나타낸 것처럼 ‘특성화’, ‘피해평가’, ‘통합화’의 3단계로 구성하였다.

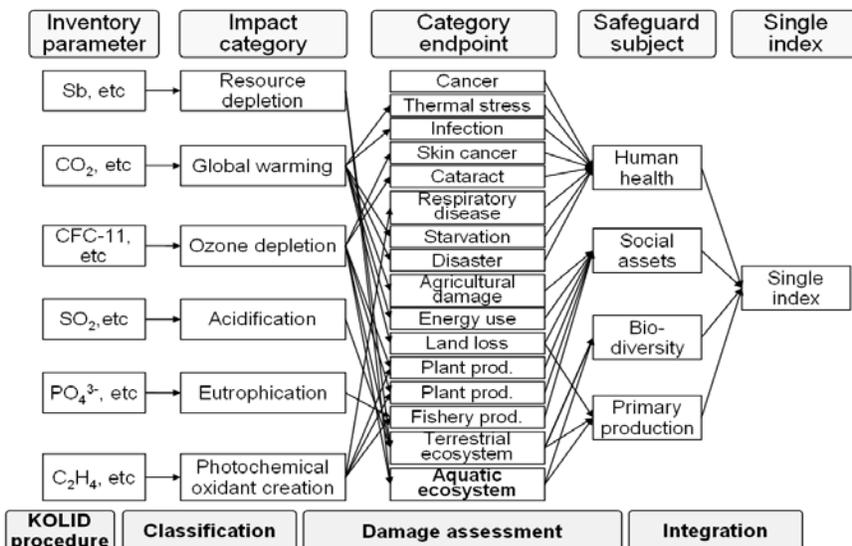


Fig. 1. The structure of KOLID.

Table 1. The comparison of safeguard subject between KOLID and existing LCIA methods based on damage oriented model

Safeguard		LCIA method	KOLID	LIME	Eco-indicator 99	EPS 2000
Human	Human health		Human health	Human health	Human health	Human health
	Direct resource (Abiotic)	Social assets	Social assets	Social assets	Fossil fuel	Abiotic stock resource
	Direct resource (biotic)				-	Ecosystem
Bio-diversity	Ecosystem (direct)	Biodiversity	Biodiversity	Biodiversity	Ecosystem	Biodiversity
	Indirect resource (biotic)	Primary production	Primary production	-	-	

LCI 수행을 통해 도출된 목록항목 값들에 의한 영향은 LCIA를 수행함으로써 알 수 있는데, ‘분류화’ 및 ‘특성화’ 등을 거쳐 영향범주별 결과 값으로 나타낼 수 있다. 이들 범주별 영향평가 값들을 단일 지수화하는 방법을 개발하기 위해서는 영향평가 단계와 더불어 통합화를 위한 보호대상을 정의하고, 보호대상별 피해지표를 결정해야 하며, 보호대상에 피해를 주는 영향범주 범위를 결정해야 한다. 각 단계별 내용은 다음과 같다.

2.2. 보호대상

피해산정형 LCIA 방법에서 고려되는 보호대상은 자연환경 중에서 어떠한 구성요소를 보호해야 하는가에 대해 구체화한 것이라 할 수 있다. 그만큼 보호대상 설정시 배경이 되는 견해와 이론을 명확히 함으로써 객관성을 확보하는 게 중요하다. 본 연구에서는 보호대상을 선정하는 기존 방법 가운데 국내 실정에 비교적 적합한 방법을 선택하였다. 국내 상황에서는 유럽의 환경 상황을 반영한 Eco-indicator 99보다는 보호대상을 선정하기 위한 철학적 논의부터 시작하여 보호대상 선정 근거 및 이유에 대해 명확하게 기술하고 있는 LIME이 보다 적절하다고 판단하였다. LIME에서는 보호대상을 정할 때 환경윤리⁹⁾라는 철학적 사상에 근거해 정했기 때문에 지역적 특성이 없어서 일본뿐만 아니라 전세계적으로 적용할 수 있으므로, 국내에서도 이를 그대로 적용할 수 있다고 보았다.

환경윤리 사상의 시각에서는 환경을 크게 ‘인간’과 ‘생태계’로 구분하고 있다. 인간의 구성요소는 생명뿐만 아니라 생활의 풍요로움도 포함하고 있으므로 ‘인간’은 다시 ‘인체건강’과 더불어 농작물과 자원 등 인간사회를 지탱하는 ‘사회자산’으로 세분화할 수 있다. 동식물 등의 생태계에 대해서도 인간과 동등한 권한을 부여해야 한다는 주장에 따라 ‘생태계’ 역시 구성요소를 ‘생물다양성’과 더

불어 생물 다양성 유지하는데 필수조건인 ‘일차생산’으로 세분화할 수 있다. 이에 따라 이 연구에서는 ‘인체건강’, ‘생물다양성’, ‘사회자산’, ‘일차생산’의 4가지를 보호대상(safeguard subject)으로 결정하였으며, Table 1에 이들 보호대상과 기존 피해산정형 영향평가 방법에서 고려한 보호대상을 비교하였다.

2.3. 피해지표

앞에서 도출된 4가지 보호대상이 환경부하에 따라 받게 되는 피해량을 정량화하는데 필요한 보호대상별 피해지표, 피해지표별 단위 및 평가 범위 등을 Table 2에 나타냈다.

인체건강의 경우 특정 질병 또는 물리적 요인에 의한 인체 건강 손상 정도를 정량화한 값으로 인체건강 손상 정도를 생존년수 손실 개념으로 나타낸 값인 장애보정 생존년수(DALY, Disability Adjusted Life Year)를 사용하였다. DALY는 질병 또는 사고 때문에 일찍 죽는 경우뿐만 아니라 장애가 발생하여 건강하게 살지 못하는 경우를 모두 합해 평가할 수 있다.¹⁰⁾ 예를 들어 1 DALY는 질병, 사고 등의 이유로 죽게 되거나 건강하게 생활하지 못하는 햇수가 1년이라는 의미다. DALY는 식 (1)과 같이 질병 또는 사고 때문에 기대수명보다 일찍 죽는 햇수인 ‘기대수명 손실(YLL, Years of Life Lost)’ 과 장애를 안고 살아가는 햇수인 ‘장애기인 손실년수(YLD, Years Lost due to Disability)’의 합으로 나타낼 수 있다. 여기서 YLD는 식 (1)과 같이 장애 중요도(D), 사망시 나이의 사회적 가치(연령 중요도)($Cxe^{-\beta x}$), 시간 할인($e^{-r(x-a)}$)을 적분하여 얻을 수 있다. 이 연구에서는 관련 데이터의 부재로, 본래 DALY에서 고려하고 있는 연령 중요도와 시간 할인을 고려하지 않고 장애 중요도만을 고려하였으며, 사망과 장애를 통합한 손실수명을 나타내는 지표로 사용하였다. 참고로 Eco-indicator 99나 LIME에서도 연령 중요도와 시간 할인을 고려하지 않고 있다.

Table 2. Safeguard subject and damage index in KOLID

Safeguard subject	Damage index	unit	Evaluation range
Human health	DALY*	year	Years of life lost and lived with disability due to disease, injury
Social assets	KRW		Agricultural production, Fishery production, Plant production, Resource loss etc
Biodiversity	EINES**	Extinct Species (Expected)	Extinction of biological species such as vascular plant, aquatic plants
Primary production	NPP***	(dry)kg/m ₂ · yr	Terrestrial ecosystem, aquatic plankton

* DALY : Disability Adjusted Life Year

** EINES : Expected Increase in Number of Extinct Species

*** NPP : Net Primary Production

$$DALY = YLL + YLD = \int_{x=a}^{x=a+L} Cx e^{-\beta x} e^{-\gamma(x-a)} dx + \int_{x=a}^{x=a+L_a} DCx e^{-\beta x} e^{-r(x-a)} dx \quad (1)$$

여기서,

a : 특정 장애가 발생한 연령 또는 사망한 연령

L : 대기수명과 사망연령의 차이

L_a : 장애 계속기간

D : 장애 중요도

C, β : 상수, 각각 0.1658, 0.04

사회자산은 생물계에 해당하는 '생태계 생산능력' 과 비 생물계 요소와 관련된 '비생물계 자원' 으로 구분할 수 있다. 이 연구에서는 생태계 생산능력에 해당되는 삼림자원, 수산자원, 농작물과 비생물계 요소에 해당되는 화석연료, 광물자원 등을 평가범위에 포함시켰다. 결정된 각 항목별 피해량을 측정하는 지표로는 실제 시장 거래가격을 이용하는 화폐가치 평가방법을 채택하였다.

생물다양성(biodiversity)은 종내 다양성(유전적 다양성, genetic diversity), 종간 다양성(species diversity) 및 생태계 다양성(ecosystem diversity)의 세 가지로 구분할 수 있다.¹¹⁾ 그러나 생물다양성을 평가할 때는 미국의 멸종위기종 보호법(Endangered Species Act), 야생동식물종의 국제 거래를 제한한 워싱턴 조약(CITES, Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Flora and Fauna), 국제자연보호연합(IUCN, International Union for Conservation of Nature)이 발행하는 레드데이터북(RDB, Red Data Book) 등에서와 같이, 생물종을 구분하고 구분된 생물종별 수준에서 평가하는 것이 일반적이다. 기존 피해산정형 영향평가 방법들도 이러한 현실을 반영하듯이 실제 정량화할 수 있는 생물종에 착안한 평가를 수행하고 있다. 이 연구에서는 보전 생태학에 기초하여 과학적이

며, 지표의 의미 해석이 용이할 뿐 아니라 레드데이터북의 데이터와 일치시킬 수 있는 멸종종수의 기대치인 '멸종종수 증가분 기대치(EINES, Expected Increase in Number of Extinct Species)' 를 피해지표로 채택하였다. 환경부하로 인해 발생하는 생물종의 멸종 위험 증가분으로부터 얻을 수 있는 EINES는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$EINES = \sum_s \Delta R_s = \sum_s \left(\frac{1}{T_{a,s}} - \frac{1}{T_{b,s}} \right) \quad (2)$$

여기서,

ΔR_s : 환경부하에 의한 생물종 s의 멸종 위험 증가분

T_{a,s} : 환경부하 발생 후 멸종시간

T_{b,s} : 환경부하 발생 전 멸종시간

일차생산에 미치는 영향을 평가하기 위한 피해지표로서는 총일차생산력(GPP, Gross Primary Production), 순일차생산력(NPP, Net Primary Production), 현재량(plant biomass)을 들 수 있다. 소비자에게 식물의 공급이라는 관점에서 GPP, NPP, 현재량이라는 3가지 지표를 대비하면 일정량 이상의 식물이 확보되어야 한다는 의미에서는 현재량이 최적인 것처럼 보인다. 그러나 일정량의 식물 축적량을 지속적으로 공급한다는 관점에서 보면 특정한 시점에서 축적량이 많은 것만으로는 요건을 만족하지 않으며, 항상 일정 이상의 속도로 성장하는 것이 요구된다. 이 요건을 만족하는 지표로서는 NPP가 가장 적절하다고 할 수 있다. 아울러 산소공급이라는 관점에서 3가지 지표를 살펴보면, 산소공급은 광합성을 통한 생산활동에 의해 생성되므로 현재량과는 상관없으며, GPP는 식물 자신의 호흡분을 포함하므로 산소 소비분도 포함하게 된다. 따라서 식물 자체의 호흡분을 제외한 생산 활동을 나타내는 NPP가 가장 적절하다고 할 수 있다. 이에 따라 일차생산에 대한 피해계수는 환경부하 단위량당 NPP의 변화량으로 나타낼 수 있다.

2.4. 영향범주

앞서 정의한 4가지 보호대상에 영향을 미치는 영향범주와 범주별 종말점(category endpoint)을 결정할 때는 기존 피해산정형 영향평가 방법 뿐 아니라 문제비교형 영향평가 방법까지 포함하여 검토했다. 또한 영향범주와 관련해서는 현재 국내 연구수준에서 특성화 및 피해평가가 가능한 자원소비, 지구온난화, 오존층영향, 산성화, 부영양화 및 광화학산화물 생성의 총 6개 범주를 연구범위에 포함시켰다. 이들 6개 영향범주는 국내에서 운영중인 환경성적표지제도에서 적용되고 있는 영향범주와 일치한다. 참고로 인체독성(human toxicity)과 생태계독성(eco-toxicity)에 대한 피해평가 방법에 대해서는 상대적 위해도 수준에서 단일 지수화한 국내 연구결과가 존재하나,¹²⁾ 본 연구에서와 같이 장애보정 생존년수(DALY)나 멸종종수 증가분 기대치(EINES)와 같은 보호대상에 대한 종말점으로써 정량화하기에는 관련 정보가 부족하다.

3. KOLID DB 구축

3.1. 특성화 DB

특성화에 앞서 반드시 LCI에서 도출된 목록항목들을 해당 영향범주로 모으는 과정인 분류화를 수행해야 한다. 특성화란 특정 영향범주로 분류된 항목들이 각각의 영향범주에 미치는 영향의 크기를 정량화하는 과정이다. 특성화는 다시 목록항목이 영향범주에 미치는 영향의 크기를 정량화하는 단계와 특정 영향범주에 속하는 모든 목록항목들의 영향을 합산하는 단계로 구분된다. 특정 영향범주 i 로 분류된 모든 목록항목들이 소속된 영향범주에 미치는 영향의 크기 C_i 는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있으며, 각 영향범주별 특성화 계수인 $CF_{i,j}$ 의 집합을 특성화 DB라 한다.

$$C_i = \sum_j C_{i,j} = \sum_j (Load_{i,j} \times CF_{i,j}) \quad (3)$$

여기서,

$C_{i,j}$: 목록항목 j 가 영향범주 i 에 미치는 영향의 크기

$Load_{i,j}$: 영향범주 i 로 분류된 목록항목 j 의 환경부하량(g/f,u.)

$CF_{i,j}$: i 라는 영향범주에 속한 목록항목 j 의 특성화 계수(g물질-eq/g)

특성화를 수행하기 위해 필요한 각 영향범주별 특성화 DB는 Table 3에 나타난 기준물질 및 참고문헌을 사용하였다. 참고로 Table 3에 나타난 6대 영향범주의 기준물질은 국내 외 대부분의 연구에서 사용되고 있으며, 특성화 DB는 지구온난화 범주를 제외하고는 국내 환경성적표지제도에서 사용되고 있는 특성화 팩터(factor) 값과 동일하다.¹³⁾ 지구온난화 범주의 경우 기후변화에 관한 정부간 패널(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)에서 출판한 최신 데이터로 업데이트하였다.

3.2. 피해계수 DB

피해평가는 자연과학적 지식을 최대한 활용하여 다양한 환경문제를 통해 발생하는 환경영향의 피해량을 공통된 보호대상으로 집약하여 나타내는 단계다. 보호대상에 미치는 영향으로 평가 결과가 집약되기 때문에 결과의 항목수를 줄일 수 있을 뿐만 아니라 자연과학의 지식에 기초하여 평가됨으로서 개인의 가치판단을 최대한 피할 수 있다. 특정 보호대상 k 로 분류된 모든 목록항목들이 소속된 보호대상에 미치는 영향의 크기 D_k 는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있으며, 각 영향범주별 피해계수인 $DF_{k,i,j}$ 의 집합을 피해계수 DB(damage factor database)라 한다.

$$D_k = \sum_i \sum_j D_{k,i,j} = \sum_i \sum_j (Load_{i,j} \times DF_{k,i,j}) \quad (4)$$

여기서,

$D_{k,i,j}$: i 라는 영향범주에 속한 목록항목 j 가 보호대상 k 에 미치는 피해량

$DF_{k,i,j}$: i 라는 영향범주에 속한 목록항목 j 가 보호대상 k 에 미치는 피해계수

Table 3. The reference of characterization DB

Impact category	Reference material	Reference
Resource depletion	Sb	Reserve-to-use base value of Guinee & Heijungs(1995)
Global warming	CO ₂	100 year base value of IPCC 3 rd report(2001)
Ozone depletion	CFC-11	World Meteorological Organization (1998)
Acidification	SO ₂	Hauschild & Wenzel(1998)
Eutrophication	PO ₄ ³⁻	Heijungs et al (1998)
Photochemical oxidant creation	C ₂ H ₄	Jenkin & Heyman(1999)

Table 4. The Category endpoints considered in building damage assessment DB

Safeguard subject / Impact category	Human health	Social assets	Biodiversity	Primary production
Resource depletion		-Resource loss (social cost)	-Species diversity of terrestrial organism	-Terrestrial ecosystem
Global warming	-Thermal · cold stress -Infection(Malaria, Dengue) -Disaster -Starvation	-Agricultural production -Energy use -Land loss		
Ozone depletion	-Skin cancer -Cataract	-Agricultural production -Plant production		-Terrestrial ecosystem -Aquatic ecosystem
Acidification	-Respiratory disease	-Plant production		-Terrestrial ecosystem
Eutrophication		-Fishery production		
Photochemical oxidant creation	-Respiratory disease	-Agricultural damage -Plant production		-Terrestrial ecosystem

피해평가를 수행하기 위해 고려한 각 영향범주별 종말점을 Table 4에 나타냈다. 6개 영향범주 중 자원소비, 지구온난화, 오존층영향은 범지구적 영향이므로 피해계수 DB 산정 시 지구를 시스템 경계로 설정하였으며, 산성화, 부영양화, 광화학산화물 생성 범주는 지역적 영향이므로 국내를 시스템 경계로 설정하였다.

자원소비의 피해계수 DB는 ‘사회자산’과 ‘생물다양성’, ‘일차생산’의 3가지 보호대상에 대해 구축하였다. ‘사회자산’의 경우 자원 손실에 의한 사용자의 자원사용 비용 증가는 광물자원 및 화석연료에 대해 세계 전체의 고갈성 자원의 생산량, 매장량, 가격 정보를 이용하여 계산하였다. ‘생물다양성’에 대한 피해함수는 관속식물(관다발식물)종을 평가대상으로 하여 토지이용 변화에 따른 피해량을 산정하였으며, ‘일차생산’의 피해량 산정은 토지 점유와 토지 변화의 두 경우 모두를 고려하였다.

지구온난화에 따른 피해함수는 온실가스(GHG, Green House Gas) 단위량 배출에 따라 보호대상의 잠재적 피해가 얼마만큼 증가하는지를 나타내게 되는데, 지구온난화의 피해계수는 ‘인체건강’과 ‘사회자산’의 2가지 보호대상에 대해 구축하였다. ‘인체건강’과 관련하여 기온 상승으로 인한 열 스트레스, 말라리아·뎅기열 등 감염증, 재해로 인한 사망, 영양부족으로 인한 기아 등을 평가하였다. ‘사회자산’에 미치는 영향에 대해서는 현실적으로 정량화 가능한 기온 및 강수량 변화에 따른 ‘농업생산 변화량’, 현재 및 미래의 냉난방지수 추산치를 이용한 ‘에너지 소비량 변화’, 해수면 상승으로 인한 ‘토지유실’의 3가지 범주별 종말점에 대해서 정량화하였다.

오존층영향의 피해계수 DB는 ‘인체건강’, ‘사회자산’과 ‘일차생산’의 3가지 보호대상에 대해 구축하였다. ‘인체건강’에

미치는 피해함수는 자외선 증가로 인한 피부암과 백내장 증가율의 상관관계를 이용하여 도출하였으며, ‘사회자산’에 미치는 영향은 자외선 증가로 인한 대두, 벼, 완두콩 등의 농작물 변화량 및 목재 생산량 피해에 대해 정량화하였다. 또한 ‘일차생산’에 미치는 영향은 UV-B 변화량에 대한 육지·수역 생태계에서의 NPP 변화량 상관관계 규명을 통해 피해량을 산정하였다.

산성화의 피해계수 DB는 ‘인체건강’, ‘일차생산’과 ‘사회자산’의 3가지 보호대상에 대해 구축하였다. ‘인체건강’에 대해서는 산성화 물질의 단위 배출량에 대한 대기중 농도 증가와 산성화 물질 1단위 증가에 따른 각 범주별 종말점의 DALY 손실값을 토대로 인체건강에 대한 피해함수를 도출하였으며, ‘일차생산’에 미치는 영향은 산성화 물질 배출에 따른 수소이온 양과의 상관관계 산정, 토양 내 pH 변화에 따른 알루미늄 이온 농도 변화량 및 식물 생산량 산정, 현존 식생의 순일차생산량 산정 등의 과정을 거쳐서 계산하였다. ‘사회자산’에 미치는 영향은 일차생산에 미치는 피해 중에서 목재생산에 미치는 영향만을 고려하였다.

부영양화의 피해계수 DB는 ‘사회자산’에 대해 구축하였다. 빈산소·무산소의 직접적 영향을 가장 강하게 받는 저생생물 군집의 종수 및 현존량의 감소를 ‘사회자산’ 피해지표로 사용하였다. 구체적으로 진해만의 부영양화로 인한 피해량을 산출하고 이를 국내 전체로 확대하는 방식을 통해 피해계수를 계산하였다.

광화학산화물 생성의 피해계수 DB는 ‘인체건강’, ‘사회자산’, ‘일차생산’의 3가지 보호대상에 대해 구축하였다. 광화학산화물 생성이 보호대상에 미치는 피해는 VOCs 배출량과 대기 중 오존 농도 증가의 관계에 대해 정량화, 오존 농도 증가와 각 종말점의 피해량 관계에 대해 정량화, 각 종말점의

Table 5. The damage factors for each impact category

Safeguard subject	Reference material	Human health (DALY/kg)	Social assets (KRW/kg)	Biodiversity (EINES/kg)	Primary production (kg/kg)
Resource depletion	Sb	-	1.42E+1	8.90E-14	1.53E-1
Global warming	CO ₂	1.23E-7	2.72E+0	-	-
Ozone depletion	CFC-11	1.35E-3	1.30E+3	-	2.79E+2
Acidification	SO ₂	2.38E-4	5.09E+3	-	2.63E+1
Eutrophication	PO ₄ ³⁻	-	2.31E+3	-	-
Photochemical oxidant creation	C ₂ H ₄	3.22E-5	8.23E+2	-	2.64E+1

피해함수 산정의 3단계 과정을 거쳤다. ‘인체건강’에 미치는 영향은 ExternE¹⁴⁾의 ‘오존 농도 1단위에 대한 각 종말점의 사망률 증가율 및 발병률’ 값을 활용하였으며, ‘사회자산’에 미치는 영향과 관련하여 농작물 및 목재생산의 피해함수는 벼 및 농작물 수확량 산정식, 목재 성장속도 등을 고려하여 계산하였다. 또한 ‘일차생산’에 미치는 영향은 ‘사회자산’에 미치는 각 농작물의 재배면적과 대한민국(남한)의 NPP 값을 활용하여 계산하였다.

Table 4에 나타난 6대 영향범주별 기준물질 1kg에 대한 범주별 종말점으로 정량화한 피해계수 $DF_{k,i,j}$ 값을 Table 5에 나타냈다. 참고로 CO₂의 경우 대기 중 농도 증가에 따라 벼 및 옥수수 생산량이 증가하게 되는 비료효과가 발생하게 되며, 이러한 비료효과도 고려하였다.

3.3. 통합화 DB

통합화는 각각의 보호대상간 상대적인 우위인 ‘중요도’를 결정하는 과정이다. 상대적인 우위를 결정하는 과정은 과학적 사실에 근거하기 보다는 보호대상에 대한 개인과 사회의 가치판단, 선호도 등 사회적·정치적·윤리적 기준에 더 의존한다. 통합화를 통해 다양한 환경문제를 비교·계량한 다음 종합적인 환경영향을 단일 지수화함으로써 평가결과를 쉽게 해석할 수 있을 뿐만 아니라, LCA의 틀을 넘어 에코효율성(eco-efficiency), 환경회계 등과 같은 다른 환경성 평가도구에 활용할 수 있다. 통합화를 통한 시스템 전체의 환경영향 TI는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있으며, 각 보호대상별 피해계수인 IF_k 의 집합을 통합화 DB라 한다.

$$\begin{aligned}
 TI &= \sum_k I_k = \sum_k (D_k \times IF_k) \\
 &= \sum_k \sum_i \sum_j (Load_{i,j} \times DF_{k,i,j} \times IF_k) \quad (5)
 \end{aligned}$$

여기서,

I_k : 보호대상 k의 환경영향

IF_k : 보호대상 k의 통합화계수

Table 6. The integration factors for each safeguard subject

Safeguard subject	Damage index	Integration factor(KRW)
Human health	1 DALY	2.82E+07
Social assets	10 ⁴ KRW	1.00E+04
Biodiversity	1 species	5.69E+05
Primary production	1 ton	4.93E+04

통합화를 위해 4대 보호대상인 인체건강, 사회자산, 생물다양성, 일차생산에 대해 통합화 DB는 통계학과 경제학의 양쪽 이론을 기반으로 한 대표성이 높은 보호대상간의 중요도를 얻을 수 있을 것으로 판단되는 컨조인트 분석방법(conjoint analysis)을 사용하였다. 컨조인트 분석방법은 다양한 속성과 이들 속성의 다양한 수준에 대해 악화비용 또는 개선편익을 구할 수 있을 뿐 아니라 속성간의 상쇄효과를 추정할 수 있는 방법이다.¹⁵⁾

컨조인트 분석을 위해 시장조사, 조사표 작성, 설문조사 및 결과분석의 단계를 거쳤다. 시장조사 단계에서는 2000년 기준 국내 자원소비 및 환경오염물 배출량 조사를 통한 보호대상별 현 수준을 파악하였으며, 설문조사 단계에서는 서울 및 수도권 거주 400명에 대한 1대 1 설문 조사를 통해 총 1,600개의 설문결과를 회수하였다. 마지막으로 설문조사 결과 분석을 통해서 각 보호대상 피해지표별 통합화 계수인 IF_k 를 Table 6에 나타냈다.

3.4. KOLID 단계별 DB 종합

각 영향범주 기준물질별 피해계수와 피해지표별 통합화 DB를 곱하여 각 영향범주별 기준물질 1kg의 단일계수를 도출하여 Table 7에 나타냈다.

각 영향범주별 기준물질의 통합화 계수를 활용하여 나머지 영향물질의 통합화 계수를 도출하였다. 예로 지구온난화 범주의 경우 지구온난화 물질 j의 단위 배출량당 피해량 $D_{GW,j}$ 는 식 (6)에 나타난 것처럼 단위 CO₂ 배출량당 피해량 D_{GW} 과 지구온난화 물질 j의 지구온난화 범주의 특성화 계수 $CF_{GW,j}$ 의 곱으로 나타낼 수 있다.

Table 7. The integration factors of 1kg of reference product for each impact category

Safeguard subject	Reference material	Human health (KRW/kg)	Social assets (KRW/kg)	Biodiversity (KRW/kg)	Primary production (KRW/kg)	Integration factor (KRW/kg)
Resource depletion	Sb		1.42E+1	5.06E-8	7.56E+0	2.18E+01
Global warming	CO ₂	3.47E+0	2.72E+0	-	-	6.19E+00
Ozone depletion	CFC-11	3.79E+4	1.30E+3	-	1.38E+4	5.30E+04
Acidification	SO ₂	6.72E+3	5.09E+3	-	1.29E+3	1.31E+04
Eutrophication	PO ₄ ³⁻	-	2.31E+3	-	-	2.31E+03
Photochemical oxidant creation	C ₂ H ₄	9.07E+02	8.23E+02		1.30E+03	3.03E+03

$$DG_{W,j} = D_{GW}(CO_2) \times CF_{GW,j} \quad (6)$$

지구온난화 영향물질별 각 단계별 DB를 Table 8에 나타냈다. CO₂의 경우는 농작물의 생산량에 대해서는 비료효과를 포함하기 때문에 다른 지구온난화 물질에 대해서는 그 영향을 제외한 CO₂ 배출량과 피해량간 관계를 구하여 그 관계에 CFGW를 곱하게 된다. 참고로 비료효과를 고려하지 않았을 경우 CO₂ 사회자산 피해량은 4.01원/kg이다. 나머지 5개 영향범주 또한 동일한 방법과 절차에 의해 물질별 평가단계

별 DB를 계산할 수 있다.

Table 7에 나타난 KOLID의 각 영향범주별 단일계수를 일본 LIME의 단일계수와 2008년도 구매력 평가지수(PPP, Purchasing Power Parity)¹⁶⁾를 활용하여 비교한 결과를 Table 9에 나타냈다. 산성화의 경우 KOLID가 LIME에 약 18배 높은 수치를 냈으며, 그 외 5개 영향범주에서 KOLID가 LIME에 비해 26%~70% 수준으로 나타났다. 이는 우리나라의 전반적인 환경영향에 따른 지불의지가 산성화 범주를 제외하고 일본에 비해 낮게 나타남을 의미한다.

Table 8. The summary of damage and integration factors for global warming

Route	Inventory parameter	CF _{GWj} kgCO ₂ -eq/kg	Damage factor				Integration factor				Total damage KRW
			Human Health	Social asset	Biodiversity	Primary production	Human Health	Social asset	Biodiversity	Primary production	
			DALY	KRW	EINES	kg	KRW	KRW	KRW	KRW	
Air	Carbon dioxide	1	1.23E-7	2.72E+0			3.47E+0	2.72E+0			6.19E+0
Air	Methane	2.30E+1	2.83E-6	9.22E+1			7.98E+1	9.22E+1			1.72E+2
Air	Nitrous Oxide	2.96E+2	3.64E-5	1.19E+3			1.03E+3	1.19E+3			2.21E+3
Air	CFC-11	4.60E+3	5.66E-4	1.84E+4			1.60E+4	1.84E+4			3.44E+4
Air	CFC-12	1.06E+4	1.30E-3	4.25E+4			3.68E+4	4.25E+4			7.92E+4
Air	CFC-13	1.40E+4	1.72E-3	5.61E+4			4.86E+4	5.61E+4			1.05E+5
Air	CFC-113	6.00E+3	7.38E-4	2.40E+4			2.08E+4	2.40E+4			4.49E+4
Air	CFC-114	9.80E+3	1.21E-3	3.93E+4			3.40E+4	3.93E+4			7.33E+4
Air	CFC-115	7.20E+3	8.86E-4	2.89E+4			2.50E+4	2.89E+4			5.38E+4
Air	HCFC-21	2.10E+2	2.58E-5	8.42E+2			7.28E+2	8.42E+2			1.57E+3
Air	HCFC-22	1.70E+3	2.09E-4	6.81E+3			5.90E+3	6.81E+3			1.27E+4
Air	HCFC-141b	7.00E+2	8.61E-5	2.81E+3			2.43E+3	2.81E+3			5.23E+3
Air	HCFC-142b	2.40E+3	2.95E-4	9.62E+3			8.32E+3	9.62E+3			1.79E+4
Air	HCFC-123	1.20E+2	1.48E-5	4.81E+2			4.16E+2	4.81E+2			8.97E+2
Air	HCFC-124	6.20E+2	7.63E-5	2.48E+3			2.15E+3	2.48E+3			4.64E+3
Air	HCFC-225ca	1.80E+2	2.21E-5	7.21E+2			6.24E+2	7.21E+2			1.35E+3
Air	HCFC-225cb	6.20E+2	7.63E-5	2.48E+3			2.15E+3	2.48E+3			4.64E+3
Air	HFC-23	1.20E+4	1.48E-3	4.81E+4			4.16E+4	4.81E+4			8.97E+4
Air	HFC-32	5.50E+2	6.77E-5	2.20E+3			1.91E+3	2.20E+3			4.11E+3
Air	HFC-41	9.70E+1	1.19E-5	3.89E+2			3.36E+2	3.89E+2			7.25E+2
Air	HFC-125	3.40E+3	4.18E-4	1.36E+4			1.18E+4	1.36E+4			2.54E+4
Air	HFC-134	1.10E+3	1.35E-4	4.41E+3			3.82E+3	4.41E+3			8.22E+3
Air	HFC-134a	1.30E+3	1.60E-4	5.21E+3			4.51E+3	5.21E+3			9.72E+3
Air	HFC-143	3.30E+2	4.06E-5	1.32E+3			1.14E+3	1.32E+3			2.47E+3
Air	HFC-143a	4.30E+3	5.29E-4	1.72E+4			1.49E+4	1.72E+4			3.21E+4
Air	HFC-152	4.30E+1	5.29E-6	1.72E+2			1.49E+2	1.72E+2			3.21E+2
Air	HFC-152a	1.20E+2	1.48E-5	4.81E+2			4.16E+2	4.81E+2			8.97E+2
Air	HFC-161	1.20E+1	1.48E-6	4.81E+1			4.16E+1	4.81E+1			8.97E+1
Air	HFC-227ea	3.50E+3	4.31E-4	1.40E+4			1.21E+4	1.40E+4			2.62E+4
Air	HFC-236cb	1.30E+3	1.60E-4	5.21E+3			4.51E+3	5.21E+3			9.72E+3

Route	Inventory parameter	CF _{GWI} kgCO ₂ -eq/kg	Damage factor				Integration factor				Total damage KRW
			Human Health	Social asset	Biodiversity	Primary production	Human Health	Social asset	Biodiversity	Primary production	
			DALY	KRW	EINES	kg	KRW	KRW	KRW	KRW	
Air	HFC-236ea	1.20E+3	1.48E-4	4.81E+3			4.16E+3	4.81E+3			8.97E+3
Air	HFC-236fa	9.40E+3	1.16E-3	3.77E+4			3.26E+4	3.77E+4			7.03E+4
Air	HFC-245ca	6.40E+2	7.87E-5	2.56E+3			2.22E+3	2.56E+3			4.78E+3
Air	HFC-245fa	9.50E+2	1.17E-4	3.81E+3			3.30E+3	3.81E+3			7.10E+3
Air	HFC-365mfc	8.90E+2	1.09E-4	3.57E+3			3.09E+3	3.57E+3			6.65E+3
Air	HFC-43-10mee	1.50E+3	1.85E-4	6.01E+3			5.20E+3	6.01E+3			1.12E+4
Air	Methylchloroform	1.40E+2	1.72E-5	5.61E+2			4.86E+2	5.61E+2			1.05E+3
Air	Carbon tetrachloride	1.80E+3	2.21E-4	7.21E+3			6.24E+3	7.21E+3			1.35E+4
Air	Chloroform	3.00E+1	3.69E-6	1.20E+2			1.04E+2	1.20E+2			2.24E+2
Air	CH ₃ Cl	1.60E+1	1.97E-6	6.41E+1			5.55E+1	6.41E+1			1.20E+2
Air	Methylene chloride	1.00E+1	1.23E-6	4.01E+1			3.47E+1	4.01E+1			7.48E+1
Air	CH ₃ Br	5.00E+0	6.15E-7	2.00E+1			1.73E+1	2.00E+1			3.74E+1
Air	CH ₂ Br	1.00E+0	1.23E-7	4.01E+0			3.47E+0	4.01E+0			7.48E+0
Air	CHBrF ₂	4.70E+2	5.78E-5	1.88E+3			1.63E+3	1.88E+3			3.51E+3
Air	Halon-1211	1.30E+3	1.60E-4	5.21E+3			4.51E+3	5.21E+3			9.72E+3
Air	Halon-1301	6.90E+3	8.49E-4	2.77E+4			2.39E+4	2.77E+4			5.16E+4
Air	HC-131	1.00E+0	1.23E-7	4.01E+0			3.47E+0	4.01E+0			7.48E+0
Air	Sulphur hexafluoride	2.22E+4	2.73E-3	8.90E+4			7.70E+4	8.90E+4			1.66E+5
Air	Perfluoromethane	5.70E+3	7.01E-4	2.28E+4			1.98E+4	2.28E+4			4.26E+4
Air	Perfluoroethane	1.19E+4	1.46E-3	4.77E+4			4.13E+4	4.77E+4			8.90E+4
Air	Perfluoropropane	8.60E+3	1.06E-3	3.45E+4			2.98E+4	3.45E+4			6.43E+4
Air	Perfluorobutane	8.60E+3	1.06E-3	3.45E+4			2.98E+4	3.45E+4			6.43E+4
Air	Perfluorocyclobutane	1.00E+4	1.23E-3	4.01E+4			3.47E+4	4.01E+4			7.48E+4
Air	Perfluoropentane	8.90E+3	1.09E-3	3.57E+4			3.09E+4	3.57E+4			6.65E+4
Air	Perfluorohexane	9.00E+3	1.11E-3	3.61E+4			3.12E+4	3.61E+4			6.73E+4
Air	CH ₃ OCH ₃	1.00E+0	1.23E-7	4.01E+0			3.47E+0	4.01E+0			7.48E+0
Air	(CF ₃) ₂ CF ₂ OCH ₃	3.30E+2	4.06E-5	1.32E+3			1.14E+3	1.32E+3			2.47E+3
Air	(CF ₃) ₂ CH ₂ OH	5.70E+1	7.01E-6	2.28E+2			1.98E+2	2.28E+2			4.26E+2
Air	CF ₃ CF ₂ CH ₂ OH	4.00E+1	4.92E-6	1.60E+2			1.39E+2	1.60E+2			2.99E+2
Air	(CF ₃) ₂ CHOH	1.90E+2	2.34E-5	7.61E+2			6.59E+2	7.61E+2			1.42E+3
Air	HFE-125	1.49E+4	1.83E-3	5.97E+4			5.17E+4	5.97E+4			1.11E+5
Air	HFE-134	6.10E+3	7.50E-4	2.44E+4			2.12E+4	2.44E+4			4.56E+4
Air	HFE-143a	7.50E+2	9.23E-5	3.01E+3			2.60E+3	3.01E+3			5.61E+3
Air	HCFC-235da2	3.40E+2	4.18E-5	1.36E+3			1.18E+3	1.36E+3			2.54E+3
Air	HFE245cb2	5.80E+2	7.13E-5	2.32E+3			2.01E+3	2.32E+3			4.34E+3
Air	HFE-245fa2	5.70E+2	7.01E-5	2.28E+3			1.98E+3	2.28E+3			4.26E+3
Air	HFE-254cb2	3.00E+1	3.69E-6	1.20E+2			1.04E+2	1.20E+2			2.24E+2
Air	HFE347mcc3	4.80E+2	5.90E-5	1.92E+3			1.66E+3	1.92E+3			3.59E+3
Air	HFE356pcf3	4.30E+2	5.29E-5	1.72E+3			1.49E+3	1.72E+3			3.21E+3
Air	HFE374pcf2	5.40E+2	6.64E-5	2.16E+3			1.87E+3	2.16E+3			4.04E+3
Air	HFE7100	3.90E+2	4.80E-5	1.56E+3			1.35E+3	1.56E+3			2.92E+3
Air	HEF7200	5.50E+1	6.77E-6	2.20E+2			1.91E+2	2.20E+2			4.11E+2
Air	H-Galden 1040x	1.80E+3	2.21E-4	7.21E+3			6.24E+3	7.21E+3			1.35E+4
Air	HG-10	2.70E+3	3.32E-4	1.08E+4			9.37E+3	1.08E+4			2.02E+4
Air	HG-01	1.50E+3	1.85E-4	6.01E+3			5.20E+3	6.01E+3			1.12E+4

Table 9. The comparison of integration factors between KOLID and LIME

Impact category	Reference material	KOLID(A) (\$/ton)	LIME(B) (\$/ton)	Rate(A/B) (%)
Resource depletion	Sb	1.98E+01	7.55E+01	26.2%
Global warming	CO ₂	5.62E+00	1.68E+01	33.4%
Ozone depletion	CFC-11	4.81E+04	1.84E+05	26.2%
Acidification	SO ₂	1.19E+04	6.51E+02	1,830%
Eutrophication	PO ₄ ³⁻	2.10E+03	3.08E+03	68.1%
Photochemical oxidant creation	C ₂ H ₄	2.75E+03	3.90E+03	70.5%

4. 토의 및 향후 연구방향

이 연구에서는 자원소비, 지구온난화, 오존층영향, 산성화, 부영양화 및 광화학산화물 생성의 6대 영향범주에 대해 피해산정형 모델에 기초한 전과정 영향평가 지표를 제시하였다. 이를 위해 6대 영향범주와 관련된 16개 범주별 종말점과 4대 보호대상에 대한 피해함수를 도출하였으며, 최종적으로 각 목록항목별 통합화계수를 도출하였다. 동일한 원리가 적용된 일본의 LIME 결과와 비교시 우리나라 보호대상별 피해계수의 화폐가치화 결과 값은 산성화를 제외한 5개 영향범주에서 LIME에 비해 26%~70% 수준으로 나타났다.

본 연구에서는 환경부하로 인한 영향을 화폐단위로 정량화할 수 있는 방법에 따라 관련 DB를 구축했다는 데 큰 의미가 있다. 도출된 방법에 따른 DB 적용을 통해 CO₂, CFC-11, SO_x, NO_x 등의 환경오염물질로 인한 피해가 어느 정도인지 과학적인 수치가 아닌 화폐 단위로 표현함으로써 제공되는 정보의 이해도를 높일 수 있을 것이다. 아울러 제품(또는 서비스)의 환경성과 경제성을 동시에 평가할 경우에도 그 결과의 해석이 용이할 것이다.

본 연구에서는 6대 주요 영향범주 중에서 과학적 수준으로 평가 가능한 중요 피해량을 산정하였으며 향후 지속적으로 보완해야 할 것이다. 특히 고려한 영향범주 중에서 피해량 측면에서 중요하지만 평가가 불가능했던 부분 - 예를 들면, 지구온난화로 인한 생물다양성 및 일차생산에 미치는 영향, 부영양화로 인한 생물다양성 등 - 에 대해서는 우선적으로 보완해야 할 것이다. 아울러, 본 연구에서 인체독성, 생태계독성, 실내공기질, 폐기물, 소음, 진동, 악취, 수자원소비 등의 영향범주에 대해서도 정량화하기 위한 노력이 필요하다. 특히, 인체독성과 생태계독성의 경우에는 우리의 삶과 직접 관련이 있는 부분이므로 정량화가 시급하다고 할 수 있다.

KSEE

사 사

본 연구는 환경부 차세대 핵심환경기술개발사업(과제번호 122-071-017, 2007. 3~2009. 3)의 일환으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Goedkoop, M. and Spriensma, R., The Eco-indicator 99-A damaged oriented method for life cycle impact assessment, Pre

consultants, Amerfoort(1999).

2. 伊坪 徳宏, 稲葉 敦, ライフサイクル環境影響評価手法 : LIME-LCA, 環境会計, 環境効率のための評価手法データベース, 産業環境管理協会(2005).
3. Steen, B, A systematic approach to environmental priority strategies in product development(EPS). Version 2000-Models and data of the default method, CPM report 1999:5, Chalmers University of Technology, Environmental Systems Analysis, Gothenburg(1999).
4. Lee, K., "A Weighting Method for the Korean Eco-indicator", International Journal of Life Cycle Assessment, 4(3), 161~165(1999).
5. 고지연, 인간건강의 손상분석을 위한 DALY의 산출, 석사논문, 건국대학교(2005).
6. 김경환, 김익, 고지연, 김만영, 허탁, "전과정위해성평가 방법론 개발 및 적용", 한국전과정평가학회지, 6(1), 57~64(2005).
7. 정인태, 이건모, 송종성, "제품의 온실가스 배출저감에 대한 성과지표 개발 - 컨조인트 분석(conjoint analysis)을 이용한 지구온난화 영향의 사회적 비용 추정", 대한환경공학회지, 30(12), 1245~1254(2008).
8. ISO 14044:2006, Environmental manage-Life cycle assessment-Requirements and guidelines(2006).
9. 조용개, "생태중심주의 환경윤리의 철학적 함의와 교육적 대안", 환경철학, 5, 33~60(2006).
10. Murray, C.J.L., "Quantifying the Burden of Disease, the Technical Basis for Disability Adjusted Life Years", Bulletin of the World Health Organization, 72(3), 429~445(1994).
11. 국가생태계정보 네트워크, 생물다양성의 정의와 분류(2009) <http://ecosystem.nier.go.kr/>
12. 친환경상품진흥원, 전과정평가 기법을 적용한 전과정위해성평가 방법론 표준화 및 관련 데이터베이스 구축, 차세대 핵심환경기술개발사업 최종보고서(2007).
13. 환경부 고시 제2008-127호, 환경성적표지 대상제품과 작성지침 개정고시, 환경부(2008).
14. European Commission, Directorate-General XII, Science, Research and Development, ExternE Externalities of Energy, Final Report, Methodology Annexes(1997).
15. 유승준, 광승준, 이주석, "컨조인트 분석을 이용한 서울시 대기 오염영향의 환경비용 추정", 지역연구, 19(3), 1~18(2003).
16. OECD, OECD.StatExtracts — 4. PPPs and exchange rates(2009) <http://stats.oecd.org/>