LCA 기법을 활용한 스마트폰의 잠재적 환경영향평가

Assessment of the Potential Environmental Impact of Smart Phone using LCA Methodology

허영채 · 배대식 · 오치영 · 서영진 · 이건모^{*,†}

Young-chai Heo · Dae-sik Bae · Chi-young Oh · Young-jin Suh · Kun-mo Lee^{*,†}

삼성전자 · *아주대학교 환경안전공학과

Samsung Electronics, Suwon, Korea

^{*}Department of Environmental and Safety Engineering, Ajou University

(Received August 5, 2017; Revised September 20, 2017; Accepted September 26, 2017)

Abstract : Environmental concern about smart phone is growing because it has short product life span while having intensive production technology and cost. In this study environmental impact of the smart phone is quantified using the LCA methodology based on the ISO 14040 series standards. The assessment considers potential environmental impacts across the whole life cycle of the smart phone including: pre-manufacturing; manufacturing; distribution; product use; and end-of-life stages. The pre-manufacturing stage is the most dominant life cycle stage causing the highest environmental impacts among all 10 impact categories assessed. The global warming impacts of the smart phone in the pre-manufacturing, distribution, use, manufacturing, and end-of-life stages were 52.6%, 23.9%, 15.7%, 7.0%, and 0.8%, respectively. Sensitivity of the life cycle impact assessment results to the system boundary definition and assumptions made were quite high. Three components of the smart phone, PCB, battery, and display module were identified as the key components causing majority of the potential environmental impact in the pre-manufacturing stage. As such the slim and light-weight design and the use of environmental friendly materials are important design factors for reducing the environmental impact of the smart phone.

Key Words : Life Cycle Assessment (LCA), Smart Phone, Environmental Impact, Global Warming, Sensitivity Analysis

요약 : 제조공정이 기술 집약적인 반면 제품 수명이 짧아 다량으로 버려지는 스마트폰의 환경영향에 관심이 커지고 있다. 이 연구에서는 전과정평가 기법을 기반으로 스마트폰의 다양한 환경영향을 정량적으로 분석, 평가하였다. ISO 14040 시리즈 표준에 의거한 전과정평가를 수행하였고, 스마트폰의 제조전, 제조, 유통, 사용 및 폐기를 포함하는 전과정 단계를 시스템경계에 포함하였다. 평가한 10개 환경영향범주 모두에서 제조전단계가 가장 큰 환경영향을 나타내었다. 지구온난화 영향은 제조전단계, 유통단계, 사용단계, 제조단계, 폐기단계경우 각각 52.6%, 23.9%, 15.7%, 7.0%, 0.8% 이었다. 스마트폰 제조전단계의 부품별 환경영향은 PCB, 배터리, 디스플레이 모듈 순이었다. 따라서 스마트폰의 전과정 환경영향 저감을 위해서는 스마트폰 소형/경량화를 통해 자원사용량을 줄이고, 자원순환성을 높일 수 있는 친환경 소재를 적용하여 제조전단계의 환경영향을 줄이려는 노력이 필요하다.

주제어 : 전과정평가(LCA), 스마트폰, 환경영향, 지구온난화, 민감도분석

1. 서론

기후 변화와 자원고갈과 같은 전지구적 환경문제에 대한 관심이 지속되고 있다. 2015년 9월 유엔총회는 17개 지속 가능한 발전목표¹⁾에 기후변화와 자원고갈 문제에 대한 세부내용을 포함하였고, 12월에는 파리협정²⁾ 체결을 통해 기후변화 억제를 위한 노력에 주요 국가가 합의한 바 있다. 우리나라도 2030년 배출 전망치 대비 37%의 온실가스 감축을 목표로 정하고 산업부문에 대해 공장 에너지 효율 개선, 친환경 냉매 사용 확대, 폐자원 사용 확대 등 감축수단을 추진하고 있다. 이에 따라 기업들은 제품에 대한 온실가스 산정을 확대하고 고효율 제품을 개발하는 노력을 하고 있다. 다만 이러한 노력이 사무기기나 가전제품에 집중되어 있고 스마트폰과 같은 정보통신기기에 대해서 온실가스 배출과 같은 환경영향을 산정하고 개선하는 연구는 일부

해외연구^{3,4)}만 있을 뿐 국내 연구는 미비하다.

스마트폰의 경우 일반 가전제품에 비해 제품 교체주기가 짧고 생산과정도 기술집약적이다. 2016년 정부통계⁵⁾에 따르면 국내 스마트폰 보급률은 85%이나 평균 교체주기는 2년 7개월에 불과하여 폐기량도 지속 증가할 것으로 전망되어 스마트폰의 환경영향에 대한 체계적인 연구가 필요하다. 따라서 이 연구는 전과정평가(LCA) 방법론을 기반으로 스마트폰의 잠재적 환경영향을 평가하는 것을 목적으로 설정하였다. 구체적으로는 첫째, 원료물질의 채취부터 부품제조, 제품 조립, 운송, 사용, 폐기의 전과정 동안 발생하는 잠재적인 환경영향을 정량적으로 평가하는 것이다. 둘째는 스마트폰을 구성하는 특정 재질, 부품 등이 유발하는 환경영향을 파악하여 비교함으로써 친환경적 스마트폰 설계에 적용될 수 있는 개선 요소를 규명하는 것이다. 셋째, 민감도분석을 통해 전과정영향평가 값의 신뢰도를 평가하는 것이다.

[†] Corresponding author E-mail: kunlee@ajou.ac.kr Tel: 031-219-2405 Fax: 031-215-5145

2. 연구방법

이 연구는 국제 표준화 기구의 ISO (International Organization for Standardization) 14040 시리즈(ISO 14040 및 14044) 표준^{6,7)}에 근거한 전과정평가 방법론을 적용하였다. 연구 방법론에는 연구 대상 및 범위 정의, 전과정 목록분석, 전과정 영향평가 및 전과정 해석을 포함하였고, Simapro7 소프트웨어^{8,9)}를 활용하여 전과정평가를 수행하였다. 구체적인 연구 방법은 아래와 같다.

2.1. 연구대상 및 범위정의

연구 대상은 통화, 인터넷, 동영상 촬영 등 기능을 가진 5.1인치 스마트폰이며 스마트폰 1대를 기능단위(functional unit: fu.) 및 기준흐름(Reference Flow)으로 각각 정의하였다. 전과정평가를 위한 시스템경계는 환경부 탄소성적표지 작성지침¹⁰⁾을 참조하여 제조전단계부터 제조, 유통, 사용, 폐기 단계를 포함하여 설정하였다. 전과정 단계별 시스템 경계 범위와 데이터 수집 시 사용된 가정/제한사항과 전과정 공정도(process tree)를 Table 1과 Fig. 1에 각각 나타내었다.

2.2. 전과정 목록분석

스마트폰의 부품목록(Bill of Material, BOM), 해당부품의 운송거리 정보, 제조공정 생산데이터, 스마트폰 사용시 소모전력, 폐기 과정 등 데이터를 수집하였다. 기본적으로 현장 데이터를 수집하였으며 이것이 불가능할 경우 문헌자료를 사용하였다. 비기본흐름(non-elementary flow)인 수집 데이터를 Life Cycle Inventory (LCI) 데이터베이스(database: DB)를 활용하여 기본흐름(elementary flow)으로 전환시켰다. Table 2에 전과정 단계별로 사용한 LCI DB를 모두 나타내었다. 데이터수집 및 가공방법은 전과정 단계별로 별도 기술하였다.

2.2.1. 제조전단계(Pre-manufacturing stage)

제조전단계는 원자재 채취부터 원료물질 생산, 부품의 제조 및 해당 부품의 운송과정을 포함하였다. 연구대상 제품의 부품목록을 기준으로 부품별 재질과 중량을 수집하였다. 해당부품의 제조과정 투입물 및 배출물은 국내외 LCI DB^{11,12)}를 활용하였다. 부품의 운송 데이터는 부품의 제조공장(1st tier supplier)에서부터 중국에 위치한 제품 제조공장까지 운

Fig. 1. Process tree.

Table 1. System boundaries, assumptions and limitations of the study

Life cycle stages	System boundaries	Assumptions and limitations
Pre-manufacturing	- Parts and components manufacturing - Include transportation from supplier to the product manufacturing site	Secondary data is used
Manufacturing	- Product assembly in China	Production data assumed to be similar to that in Korea
Distribution	- Transport from manufacturing site in China to the distribution center in US by air and truck	Distribution to the individual consumers is excluded
Use	- Consumer use for 2 years - Consider electricity for charging	packaging is assumed to be discarded in the use stage
End-of-life	- Recycling, incineration and landfill	environmental benefit from recycling is excluded

Table 2. Life cycle inventory database used

Life cycle stage	Items	LCI DB (Ecoinvent2,2)
Pre-manu-facturing	Battery	Battery, Lilo, rechargeable, prismatic
	Corrugated fiber board	Packaging, corrugated board, mixed fibre
	Glass	Flat glass, uncoated
	Graphite	Graphite
	LCD module	LCD module
	Metal	Steel, low-alloyed
	Metal(AL)	Aluminium, primary
	Paper	Paper, newsprint
	Plastic(ABS)	ABS
	Plastic(PA)	Nylon 6
	Plastic(PC)	Polycarbonate
	Plastic(PET)	Polyethylene terephthalate
	Plastic(PPE)	Polyphenylene sulfide
	Polyester	Polyester resin, unsaturated
	Printed Circuit Board	Printed wiring board, surface mounted
	Rubber	Synthetic rubber
Manu-facturing	Electricity, CN	Electricity, low voltage, CN
Distri-bution	Road	Transport, lorry 16-32t, EURO5
	Air	Transport, aircraft, freight
Use	Electricity, US	Electricity, low voltage, US
	Corrugated fiber board_Incineration	Disposal, packaging paper, incineration
	Metal_Incineration	Disposal, steel, municipal incineration
	Plastic(PC)_Incineration	Disposal, plastics, mixture, incineration
	Plastic(PET)_Incineration	Disposal, polyethylene terephthalate, incineration
	Corrugated fiber board_Landfill	Disposal, packaging paper, landfill
	Metal_Landfill	Disposal, steel, landfill
	Plastic(PC)_Landfill	Disposal, plastics, mixture, 15.3% water, to sanitary landfill/CH U
	Plastic(PET)_Landfill	Disposal, polyethylene terephthalate, landfill
	Dismantling process	Dismantling, mechanically
Disposal	Shredding process	Shredding, electrical and electronic scrap
	Graphite_Incineration	Disposal, municipal solid waste, incineration
	Plastic(ABS)_Incineration	Disposal, plastics, mixture, incineration/CH U
	Plastic(PET)_Incineration	Disposal, polyethylene terephthalate, incineration
	Rubber_Incineration	Disposal, rubber, incineration
	Battery_Landfill	Disposal, inert material, landfill
	Glass_Landfill	Disposal, glass, material landfill
	Metal_Landfill	Disposal, steel, inert material landfill
	Metal(AL)_Landfill	Disposal, aluminium, landfill
	Plastic(ABS)_Landfill	Disposal, plastics, mixture, landfill
	Plastic(PET)_Landfill	Disposal, polyethylene terephthalate, landfill

송 거리와 운송량 데이터를 수집하였다. 부품 공급회사가 중국에 위치한 경우 육상운송으로 고려하였고, 중국 외 다른 국가에 위치한 부품공급회사 경우 해당 국가 내에서의 육상운송, 중국까지의 항공운송 그리고 중국 내 육상운송 데이터를 모두 수집하였다.

2.2.2. 제조단계(Manufacturing stage)

제조단계는 스마트폰을 조립, 검사하고 포장하는 공정을 포함하며 제조설비에 직접 사용되는 전기뿐만 아니라 제조 공정에서 사용되는 압축공기의 생산과 공정냉난방에 소비되는 전기의 사용량까지 고려하였다. 제품 1대 생산에 소비되는 전기 사용량은 데이터 수집기간 동안의 생산 제품 댓수를 기준으로 할당(allocation) 하였다. 조립공정에서 발생하는 폐기물은 발생량이 미미하여 시스템 경계에서 제외하였다.

2.2.3. 유통단계(Distribution stage)

중국에 위치한 제품 제조 공장에서 출하된 제품은 육상 운송 및 항공운송을 통해 미국에 위치한 물류센터로 이동된다. 유통단계의 전과정 목록분석을 위해 각 운송과정에 대해 운송수단, 물류량 및 운송거리 정보를 수집한 후 LCI DB에 연계하였다.

2.2.4. 사용단계(Use stage)

사용단계는 소비자의 스마트폰 사용패턴에 따라 소비전력량과 대기전력량을 계산하였다. 영국 Carbon Trust 의 전과정 탄소발자국 산정 사례¹³⁾를 참조하여 스마트폰 기능별로 평균사용시간을 정의하고 해당 기능별 소비전력을 실측하였다.

사용단계 총 전기사용량(kWh) =

$$\left\{ \left(\text{사용패턴별 작동시간} \left(\frac{\text{hr}}{\text{yr}} \right) \times \text{소비전력(kW)} \right) + \left(\text{대기시간} \left(\frac{\text{hr}}{\text{yr}} \right) \times \text{대기전력(kW)} \right) \right\} \times \text{제품수명(yr)} \quad (1)$$

사용단계 초반에 발생하는 제품 포장재 폐기의 경우 제조단계를 통해 수집된 포장재 재질 및 무게만큼 폐기되는 것으로 산정하였다. 이때 제품은 미국 시장에 유통되어 사용되기 때문에 미국 연방환경청(EPA)에서 제공하는 생활 폐기물 및 포장재 폐기관련 통계자료¹⁴⁾를 활용하여 포장재의 소각 및 매립, 재활용 비율을 정하였다. 포장재 재질별 폐기처리 방법에 따라 해당 LCI DB를 연결하였다.

2.2.5. 폐기단계(End-of-life stage)

스마트폰은 사용자에게 의해 버려진 후 전량 폐기 처리되는 것으로 간주하였다. 폐기된 제품은 분해 및 파쇄공정을 거쳐 재질별로 분류되며, 분류된 재질은 IEC/TR 62635¹⁵⁾에 정

Table 3. End of life scenario

Material type	Weight (g/EA)	End of Life Scenario		
		Recycling	Incineration	Landfill
Battery	38.9	0%	0%	100%
Glass	12.1	0%	0%	100%
Graphite	0.0	0%	90%	10%
LCD module	26.6	0%	0%	100%
Metal	24.0	93%	0%	7%
Metal (AL)	0.2	90%	0%	10%
Plastic (ABS)	4.0	60%	30%	10%
Plastic (PA)	0.4	60%	30%	10%
Plastic (PC)	11.6	60%	30%	10%
Plastic (PET)	3.4	60%	30%	10%
Plastic (PPE)	0.0	0%	90%	10%
Polyester	0.2	60%	30%	10%
PBA	22.7	15%	75%	10%
Rubber	0.7	0%	90%	10%

의된 비율에 따라 재활용 및 소각, 매립되는 것으로 정의하였고 이를 Table 3에 나타내었다. 재활용 및 소각, 매립에 의한 재질별 환경영향은 LCI DB를 적용하여 산출하였고, 적용된 DB는 앞서 Table 2에 기술한 바 있다.

2.3. 전과정 영향평가

ISO 14040s 표준에 준하여 분류화 및 특성화 과정을 진행하였다. 영향평가를 위해 CML 방법론¹⁶⁾을 적용하여 환경영향을 산정하였고, 환경영향범주는 10가지 영향범주 즉, 지구온난화(Global Warming: GW), 자원고갈(Abiotic Resource Depletion: ARD), 오존층파괴(Ozone Depletion: OD), 산성화(Acidification: AD), 부영양화(Eutrophication: EP), 광화학산화물생성(Photochemical Oxidant Creation: POC), 인체독성(Human Toxicity: HT), 생태독성 3종(Eco-toxicology to Terrestrial: ECT, Eco-toxicology to Aquatic: ECA, Eco-toxicology to Marine: ECM)을 포함하였다.

2.4. 전과정 해석

기여도 분석은 주어진 영향범주에서 각 전과정단계(또는 각 부품)의 영향 값이 전과정 영향 값에 미치는 기여도를 백분율로 나타낸 것이다(ISO 14044). 민감도분석(sensitivity analysis)은 주어진 영향범주에서 기준 영향 값에서 비교되는 대안 영향 값을 구하고 이를 기준 영향 값으로 나누어 절대값을 취한 값이다(ISO 14044). 이는 각 전과정단계(또는 부품)가 주어진 영향범주의 영향 값에 미치는 민감도를 파악하는데 사용된다.

3. 결과 및 토의

3.1. 전과정 환경영향 분석결과

Table 4에 영향 범주별 환경영향 특성화 결과값을 나타내었다.

영향 범주별 환경영향은 그 본질에 있어서 해당 영향범

Table 4. Characterization result of the smart phone in its entire life cycle stages

Impact category	Unit	Pre-manufacturing	Manufacturing	Distribution	Use	End-of-life
GW	kg CO ₂ -eq/fu.	1.29E+01	1.72E+00	5.84E+00	3.83E+00	1.95E-01
ARD	kg Sb-eq/fu.	7.27E-02	1.03E-02	3.81E-02	2.80E-02	7.23E-05
AD	kg SO ₂ -eq/fu.	6.87E-02	1.72E-02	2.20E-02	2.74E-02	7.18E-05
EP	kg PO ₄ ³⁻ -eq/fu.	1.35E-02	7.47E-04	3.76E-03	1.27E-03	6.02E-05
ODP	kg CFC ₁₁ -eq/fu.	2.24E-05	8.69E-09	7.51E-07	9.74E-08	7.06E-10
POC	kg Ethylene-eq/fu.	3.47E-03	6.52E-04	9.19E-04	1.07E-03	2.29E-06
HT	kg 1,4DCB-eq/fu.	1.38E+01	3.07E-01	4.56E+00	1.09E+00	1.24E+00
ECA	kg 1,4DCB-eq/fu.	3.48E+00	1.40E-01	4.13E-02	3.36E-01	5.15E-01
ECM	kg 1,4DCB-eq/fu.	3.43E+03	2.95E+02	1.39E+02	7.75E+02	1.92E+02
ECT	kg 1,4DCB-eq/fu.	6.85E-02	2.16E-03	2.54E-03	4.13E-03	5.70E-05

주에 특수한 값이기 때문에 각각 서로 다른 단위를 지니고 있다. 따라서 영향범주의 영향 값을 토대로 영향범주의 상대적 중요도를 직접적으로 비교할 수 없다. 영향범주 간의 비교를 위해서는 정규화 및 가중치 부여를 수행해야 한다. 그러나 이 연구에서는 영향범주간 비교에 목적이 있지 않았기 때문에 각 영향 범주별 기여도분석(contribution analysis)만을 수행하였다. 이 분석을 통하여 각 영향 범주에서 5개 전과정 단계가 각각 해당 영향범주에 미치는 기여도를 파악하였다.

Fig. 2에 나타난 바와 같이 모든 영향범주에서 제조전단계가 가장 큰 영향을 차지하고 있는 것으로 나타났다. 지구온난화 영향범주(GW)의 경우 제품전과정 동안 배출되는 24.4 kg의 온실가스 중 제조전단계에서 52.6%가 배출되며, 유통단계 23.9%, 사용단계 15.7%, 제조단계 7.0%, 폐기단계 0.8%순으로 배출되고 있다.

다른 환경영향 범주에서도 마찬가지로 제조전단계, 유통단계, 사용 단계 순의 크기로 환경영향이 나타나고 있다. 한국 탄소성적표지 인증제품 정보집¹⁷⁾에 따르면 일반적으로 전기를 사용하는 가전제품의 경우에는 제품 사용단계가 가장 큰 환경영향을 나타낸다. 그러나 스마트폰과 같은 모바일 기기의 경우 부품 제조를 위해 기술 집약적인 생산공정이 필요한 반면, 상대적으로 제품이 실제로 사용되는 기간이 짧기 때문에 제조전단계의 환경영향이 사용단계보다 높

Fig. 2. Percent contribution of the characterization result of each life cycle stage to the impact of the impact category.

게 나타난 것으로 판단된다.

더불어 영향범주 중 인간독성(HT), 담수생태독성(ECA) 및 해수생태독성(ECM) 영향범주에서 폐기단계가 상대적으로 환경영향이 큰 것으로 도출되었는데, 이는 Battery 및 printed circuit board (PCB)에 포함되어 있는 중금속이 폐기될 때 나타내는 잠재적인 환경영향 때문이라고 판단된다.

제조단계의 환경영향은 모든 환경영향범주에서 제조라인에 사용되는 전기에 의한 환경영향이 74% 이상을 차지하고 있고, 나머지 26% 정도가 냉난방 등 전기 사용에 의한 간접적인 환경영향으로 파악되었다. 유통단계는 항공운송으로 인한 환경영향이 큰 영향을 미치며 지구온난화(GW) 영향범주 뿐 아니라, 자원소모(ARD), 인간독성(HT) 범주에서 20% 이상의 환경영향을 차지하고 있다. 스마트폰 사용단계 환경영향은 전기 사용에 의한 환경영향이 90% 이상을 차지하였으며 제품 포장재 개봉 후 포장재 소각 및 매립에 의한 영향이 1.1%에 불과하였다.

3.2. 주요 부품별 환경영향 분석결과

부품의 환경영향이 제품의 환경영향에 미치는 기여도 분석을 수행하였다. 지구온난화 영향범주의 경우 스마트폰 제조전단계의 영향이(GW) 반 이상을 차지하므로 스마트폰 제조전단계의 각 부품들의 GW 영향이 제조전단계의 GW 환경영향에 미치는 기여도를 분석하였다.

Fig. 3에 나타난 바와 같이 제조전단계에서 부품 생산에 의한 환경영향은 PCB가 가장 큰 환경영향을 나타냈으며 Battery와 Display 모듈순서대로 환경영향이 큰 것으로 도

Fig. 3. Global warming impact of parts and components of the smart phone during the pre-manufacture stage.

출되었다. PCB 43.1%, Battery 30.2%, Display 모듈 20.3%로 세 부품이 스마트폰 전체 부품 중 93% 이상을 차지하고 있다. PCB는 integrated circuit (IC)칩을 생산할 때 많은 양의 전기를 사용하며 다량의 금, 실리콘 웨이퍼, 구리 등 원료물질을 사용하고 있어 환경영향이 큰 것으로 파악되었다. Battery는 제조 공정에서의 전기 및 스티를 많이 사용하고 원료물질인 Tetrafluoroethylene 생산공정에서 발생하는 환경영향이 큰 것으로 확인되었다. Display 모듈은 모듈조립공정 및 모듈 구성품인 IC칩 제조공정에서 소비되는 전기로 인해 환경영향이 크고, 더불어 Display모듈제조공정에서는 배출되는 SF₆로 인해 잠재적 지구온난화 영향이 큰 것으로 확인되었다.

이러한 결과는 스마트폰, Tablet 등 IT제품 전과정평가에 대한 선행 연구들에서 매우 유사하게 확인된다. Emely 등¹⁸⁾은 스마트폰의 전과정 지구온난화 영향 중 제조단계(제조전단계 포함)가 65%를 차지하는 것으로 보고하였고, Paul¹⁹⁾은 Tablet PC 전과정평가 연구에서 제품 사용단계 보다 부품 제조를 포함한 제조단계가 지구온난화 영향이 더 크며, Display, IC칩, PCB를 환경영향이 큰 부품으로 분석하였다. Markus 등²⁰⁾은 랩톱PC의 전과정 온실가스 분석을 통해 메인보드의 PCB와 디스플레이를 제조전단계 온실가스 배출이 가장 큰 부품으로 보고하였다.

4. 유사 연구사례 비교

ISO14040 시리즈 표준을 바탕으로 평가한 이 연구의 지구온난화 영향값과 동일 제품군으로 영국 Carbon Trust 인증을 취득한 스마트폰 B의 탄소발자국(지구온난화영향) 산정결과를 Table 5에서 비교하였다. 이 연구인 스마트폰 A의 지

Table 5. Global warming impact of two different smart phone cases

Product name		Smart Phone A		Smart Phone B	
Methodology		ISO 14040s		Carbon Footprint (by Carbon Trust)	
Functional Unit		A 5,1 inch smart phone			
System boundaries	Geography (manufacturing / Use)	China / US		Korea / Europe	
	time horizon	2015		2014	
	Pre-manufacturing	12,86	53%	10,33	63%
Global Warming Impact (kg CO ₂ -eq/f.u.)	Manufacturing	1,72	7%	1,07	7%
	Distribution	5,85	24%	2,85	17%
	Use	3,83	15%	2,12	13%
	End-of-life	0,20	1%	0,01	0,1%
	Total	24,46	100%	16,38	100%

구온난화 영향 값은 스마트폰 B의 지구온난화 영향 값과 약 33%의 차이를 나타냈다. 두 연구사례 모두 제조전단계의 환경영향이 전체 환경영향의 53% 및 63%를 차지하고 있어 모든 전과정 단계 중에서 가장 큰 것으로 나타났기 때문에 제조전단계의 차이가 가장 큰 원인으로 파악된다.

스마트폰 A와 B는 동일 제품군으로 재질구성, 제조(조립) 방식이 유사한 반면, 제조전단계의 시스템 경계, 적용된 LCI DB, 제조/운송/사용단계의 지역적 경계, 폐기시나리오 등에 차이가 있다.

제조전단계에서 A사례는 PCB, Battery에 대해 부품모듈 LCI DB를 사용하여 부품 제조공정의 환경부하를 포함한 반면, B 사례는 해당 부품의 재질 LCI DB 만을 사용하여 부품제조공정에 대한 환경부하가 고려되지 않았다(기타 부품 및 재질은 두 경우 모두 유사한 LCI DB를 적용하고 있다). 제조단계는 생산지역의 전력사용에 의한 온실가스 배출계수에 차이가 있었으며 유통단계에서도 A사례는 중국에서 제조되어 미국으로 운송되나 B사례는 한국에서 제조되어 유럽으로 운송되는 것으로 지역적 경계가 달라 발생하는 차이이다. 사용단계는 제품이 사용되는 국가의 전기 생산에 의한 온실가스 배출계수 차이에 기인하며, 폐기단계는 제품이 사용되고 폐기되는 국가에서의 재질별 재활용, 소각, 매립 비율이 다르기 때문에 발생되었다. 이러한 차이점을 이 연구에 적용된 시나리오에 대한 최악의 경우(Worst

Case Scenario)로 상정하여 지구온난화 영향값에 어떤 영향을 미치는지 민감도를 분석하였다.

Table 6의 시나리오 ①의 경우 이 연구에서 제조전단계의 지구온난화 영향 값은 12.86kgCO₂-eq/f.u.이며, 이 중 PCB 및 Battery 두 부품에 대해 재질만을 고려한 LCI DB를 사용했을 경우, 제조전단계 지구온난화 영향은 5.53 kgCO₂-eq/f.u.으로 작게 나타났고, 전과정 지구온난화 영향은 24.46 kgCO₂-eq/f.u.에서 17.13 kgCO₂-eq/f.u.으로 30% 만큼 차이가 났다. 즉 부품 제조공정의 환경부하 고려여부에 대해 지구온난화 영향값의 민감도가 매우 높다는 것을 확인하였다. 제조, 유통, 사용 및 폐기 단계에 대한 시나리오 ②~⑤에서 지구온난화 환경영향 값의 민감도는 각각 2.7%, 12.3%, 7.0% 및 0.8%이었다. 결과적으로 부품 제조공정의 환경부하 고려여부, 제품 운송의 지역적 경계, 사용단계 및 제조단계의 전력 그리드 순으로 평가 결과에 민감하였다. 이처럼 민감도 분석을 통해 전과정평가에서 산출한 환경영향 값의 한계를 파악할 수 있으므로 전과정평가 결과를 이용하여 올바른 의사결정을 내리기 위해서는 민감도 분석이 반드시 필요하다고 판단된다. 이 연구의 경우 유사사례 비교를 통한 민감도 분석을 통하여 지구온난화 영향 값에 관여하는 주요 인자와 지구온난화 영향값의 한계치를 확인하였다.

5. 결론

스마트폰을 대상으로 전과정평가를 수행하고 환경영향을 정량화 하였다. 제조전단계부터 제조, 유통, 사용, 폐기단계까지 제품 전과정 단계별로 10가지 환경영향 범주에 대해 평가한 결과 모든 영향 범주에서 공통적으로 제조전단계가 가장 큰 환경영향을 발생시키는 것을 알 수 있었다. 지구온난화 영향범주의 경우 제조전단계가 52.6%의 환경영향을 차지하고 있으며 유통단계 23.9%, 사용단계 15.7%, 제조단계 7.0%, 마지막으로 폐기단계가 0.8%로 가장 작았다. 제조전단계의 환경영향을 부품별로 분석한 결과 PCB, 배터리, Display 모듈이 환경영향을 크게 나타내는 부품이었다. 따라서 스마트폰에 의한 전과정 환경영향 저감을 위해서는 첫째, 스마트폰의 소형화, 경량화를 통해 자원의 사용량을 줄이고, 자원 순환성을 높일 수 있는 친환경 소재를 사용하여 제조전단계의 환경영향을 줄이려는 노력이 필요하다고 판단된다. 민감도분석 결과 전과정 영향평가 결과는 부품 제조공정

Table 6. Sensitivity analysis for worst case scenario

Scenario		Case		Total GWP		Deviation (A-B)	Sensitivity (A-B)/A
		Base (Phone A)	Worst case (Phone B)	Base (A)	Worst case (B)		
①	LCI DB applied to PCB, Battery	Module	Material for the part	24,46	17,13	7,33	30,0%
②	Electricity grid In manufacturing	China	Korea	24,46	23,81	0,65	2,7%
③	Geography for Transportation	China to US	Korea to Europe	24,46	21,46	3	12,3%
④	Electricity grid in use	US	Europe	24,46	22,75	1,71	7,0%
⑤	EoL statistics	US EPA	IEC TR	24,46	24,27	0,19	0,8%

의 환경부하 고려여부, 제품 운송의 지역적 경계, 사용단계 및 제조단계의 전력 그리드 순으로 영향평가 결과에 민감하게 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다. 민감도 분석 결과를 토대로 환경영향 값의 민감도 및 한계를 파악할 수 있으므로 의사결정을 목적으로 하는 전과정평가에서는 민감도 분석이 반드시 필요하다고 판단된다. 이 연구 결과에서 도출된 주요한 환경영향 요인들 및 민감도 분석결과는 향후 친환경 스마트폰 개발을 위한 친환경성 평가나 전과정평가 결과의 신뢰성 연구에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

KSEE

References

1. United Nations, The Sustainable Development goals report, Department of Economic and Social Affairs (DESA), New York, pp. 34~37(2016).
2. United Nations Framework Convention on Climate Change Home Page, Paris Agreement, http://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf(2015).
3. Teehan, P. and Kandlikar, M., "Comparing Embodied Greenhouse Gas Emissions of Modern Computing and Electronics Products," *Environ. Sci. Technol.*, **47**(9), 3997~4003(2013).
4. O'Connell, S. and Stutz, M., "Product carbon footprint (PCF) assessment of Dell laptop - Results and recommendations," in Proceedings of the 2010 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology, IEEE Computer Society, Pittsburgh, pp. 1~6(2010).
5. Korea Internet and Security Agency, 2016 Survey on the Internet Usage Summary Report, <http://isis.kisa.or.kr>, April(2016).
6. ISO, ISO14040 Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework, Geneva, Switzerland(2006).
7. ISO, ISO14044 Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines, Geneva, Switzerland (2006).
8. PRe Consultants, Simapro Home Page, <https://simapro.com>, September(2017).
9. Herrmann, I. and Moltesen, A., "Does it matter which Life Cycle Assessment (LCA) tool you choose? - a comparative assessment of SimaPro and GaBi," *J. Cleaner Production*, **86**, 163~169(2015).
10. Korea Environmental Industry and Technology Institute, Guidelines for carbon footprint of products, <http://www.epd.or.kr/en/carbon/confirm02.asp>, December(2013).
11. Korea Environmental Industry and Technology Institute, Korea LCI Database Information Network, http://www.edp.or.kr/en/lci/lci_intro.asp, Sempter(2011).
12. Frischknecht, R. and Rebitzer, G., "The ecoinvent database system: a comprehensive web-based LCA database," *J. Cleaner Production*, **13**, 1337~1343(2005).
13. Carbon Trust Home Page, <https://www.carbontrust.com/our-clients/s/samsung>, April(2015).
14. US EPA, Municipal Solid Waste Generation, Recycling and Disposal in the United States-Facts and Figures for 2012, https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/document/s/2012_msw_dat_tbls.pdf, February(2014).
15. International Electrotechnical Commission, IEC TR 62635: 2012 Guidelines for end-of-life information provided by manufacturers and recyclers and for recyclability rate calculation of electrical and electronic equipment, 1st ed, Geneva (2012).
16. Guinee, J., Gorree, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R. and De Koning, A., Life cycle Assessment; An operational guide to the ISO standards; Part 3. scientific background. Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (VROM) and Centre Environmental Science (CML), Den Haag and Leiden, The Netherlands(2001).
17. Korea Environmental Industry and Technology Institute, Information book of carbon footprint certified product, <http://www.epd.or.kr>, November(2016).
18. Rodriguez, E., Carrasquillo, O., Lee, C., Lee, J. and Zhou, A., "iGo Green: A Life cycle Assessment of Apple's iPhone," iConference 2015 Proceedings, iSchools, illinois(2015).
19. Teehan, P., "Life cycle assessment studies of tablet PCs," Green Electronics Council Slates/Tablets workshop, Dallas (2013).
20. Stutz, M. and Moriarty, M., "Product carbon footprint (PCF) assessment of Dell laptop-Results and recommendations," Going Green - CARE INNOVATION 2010 proceedings, Vienna (2010).