LCA 평가를 이용한 사이클론 진공청소기의 친환경성 개선방안에 관한 연구

황보석, 윤용한, 이찬현, 이화조^{†*}

영남대학교 대학원

712-749 경북 경산시 대학로 280

[†]영남대학교 기계공학부

712-749 경북 경산시 대학로 280

(2014년 7월 24일 접수; 2014년 8월 22일 수정본 접수; 2014년 9월 5일 채택)

A Study on Improving Environmental Characteristics of Cyclone Vacuum Cleaner using Life Cycle Assessment

Bo-Seok Hwang, Yong-Han Yoon, Chanhun Lee, and Hwa-cho Yi^{†*}

Graduate School, Yeungnam University

280 Daehak-ro, Gyeongsan-si, Gyeongbuk 712-749, Korea

[†]School of Mechanical Engineering, Yeungnam University

280 Daehak-ro, Gyeongsan-si, Gyeongbuk 712-749, Korea

(Received for review July 24, 2014; Revision received August 22, 2014; Accepted September 5, 2014)

요 약

본 논문에서는 사이클론 청소기들의 성능 및 환경성 평가를 실시하고, 결과를 분석하여 환경에 대한 영향을 최소화하기 위한 개선방안에 대하여 연구하였다. 환경성 평가에는 제품의 원재료 취득, 제조, 운송, 사용 및 폐기 과정에 대해서 제품이 환경에 미치는 영향을 정량적으로 평가하는 전과정 평가(life cycle assessment, LCA)를 간략한 형태로 이용하였다. 2가지의 사이클론 청소기의 성능을 각 제품의 전력량, 흡입력, 소음, 온도를 관련 규정에 따라 측정하여 비교하였으며, 환경성 평가를 통해 전과정 중 사용단계의 에너지 소모가 가장 많다는 결과를 얻었다. 이를 바탕으로 사용단계의 에너지 소모를 줄이기 위해 사이클론 청소기 내부에 배플(baffle)을 설치하고, 유지/소모품인 필터의 교환 주기를 늘려 사용단계의 에너지를 감소시키는 개선 방안을 제안하였다. 또한, 사이클론 청소기의 불필요한 원료 물질 및 부품을 제거하고 상대적으로 재활용률이 높은 원재료 물질로 대체하는 방안을 고려하여 청소기의 중량은 줄이고, 재활용률은 높여 전과정에 대한 에너지 소비를 낮춘 친환경 청소기에 관하여 연구하였다.

주제어 : 전과정 평가, 친환경, 에코디자인, 사이클론 청소기, 에너지 소비

Abstract : In this study, performance and environmental characteristics of cyclone vacuum cleaners are analyzed and product improvement methods are investigated to minimize environmental effect of the cleaners using the result. A simplified LCA method is used to analyze environmental characteristics of the cyclone vacuum cleaners. Two cyclone vacuum cleaners with similar specifications are chosen for the experiment. Typical characteristics of cyclone vacuum cleaners such as energy consumption, suction force, noise and temperature are measured and compared. Most environmental effect was caused by the energy consumption in use phase of life cycle. Some ideas are created to reduce energy consumption of the vacuum cleaners in use phase like installing baffle, and methods to extend exchange period of filter. It is analyzed how recyclability rate of vacuum cleaners could be improved to reduce the environmental effect in whole life of the vacuum cleaners.

Keywords : Life cycle assessment (LCA), Eco-friendliness, Eco-design, Cyclone vacuum cleaner, Energy consumption

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: hcyi@yu.ac.kr <http://cleantech.or.kr/ct/>

doi: 10.7464/ksct.2014.20.3.241 pISSN 1598-9721 eISSN 2288-0690

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited..

1. 서론

지구 온난화, 오존층 파괴 및 자원 고갈과 같은 환경 문제가 나타남에 따라 친환경 제품의 중요성이 나타나고 있다. 이에 맞춰 최근 기업들은 에너지를 효율적으로 소비하고 이산화탄소 배출량을 절감시킬 수 있는 친환경 제품을 개발하고 있다. 친환경 제품을 개발하기 위해서는 제품의 원재료 취득, 제조 과정, 운송 과정, 사용 및 폐기과정에 대해서 제품이 환경에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고 개선 방안을 모색하는 전과정 평가(life cycle assessment, LCA)를 수행하여 환경성을 평가하고 환경에 대한 영향을 최소화하기 위한 에코디자인(Eco-design)이 필요하다[1]. 에코디자인은 ecology와 design의 합성어로 제품을 개발할 때 환경을 고려하는 것을 의미하며, 단순히 제품을 생산하는 것뿐만 아니라 폐기 후의 재순환이 환경에 미치는 영향까지 고려하는 친환경 설계 방법이다. 또한, 제품의 전과정에서 발생할 수 있는 환경 피해를 줄이면서 제품의 기능과 품질을 높이도록 하는 환경 친화 디자인으로 오랫동안 사용 가능하고, 사용 시에 에너지 소비가 적고, 사용이 끝난 후에도 재사용 및 폐기가 용이하게 설계하는 것을 말한다. 제품 탄생의 첫 번째 단계인 디자인 단계에서부터 환경에 미치는 악영향을 최대한 줄이는 것이 에코디자인의 핵심인 것이다.

에코디자인의 배경은 1980년대 환경운동이 가속화되면서 폐기물을 줄이고, 지구의 자원을 아껴 쓰자는 근원적인 실천을 수반하는 운동으로 변화하기 시작하였다. 하지만 시대의 변화와 함께 실천도 조금씩 바뀌게 되었다. 환경운동이 나타나면서 사람들의 의식이 변화하는 운동인 만큼 환경운동으로 탄생한 제품들이 나타났고, 이후 좋은 디자인이 우리의 삶을 바꿀 수 있다는 인식이 뿌리 내릴 수 있도록 노력해왔다. 그래서 환경을 생각하며 기능성, 경제성, 디자인, 안정성 등을 고려하는 에코디자인이 이 시대에 트렌드가 되고 있다.

본 논문에서는 친환경적인 디자인을 위한 제품을 선정하고, 제품의 친환경적인 설계가 되기 위해서 어떠한 개선방향이 있는지를 분석해보고자 하였다. 대상 제품은 일반적인 진공청소기에 비해 흡입력, 유지비, 청결성 등이 뛰어난 싸이클론 청소

기로 선정하였다. 선정된 싸이클론 청소기는 회사, 디자인은 다르지만 사양은 비슷한 두 가지 제품이다. 본 논문의 2장에서는 친환경적인 시스템 개선을 위한 연구 방법에 대해 서술하고, 3장에서는 싸이클론 청소기의 제품 성능을 측정하여 비교하였으며, 4장에서는 전과정 평가와 유사한 방법으로 환경성 평가를 실시하고, 이를 바탕으로 친환경적 시스템을 제안하였다. 그리고 5장에서는 결론 및 향후 과제에 대해 기술한다.

2. 연구방법

본 논문은 Table 1과 같이 A사, B사의 싸이클론 청소기를 평가한다. 싸이클론 청소기의 특성(제품 사진, 무게, 소비전력, 정격전압, 사용된 필터, 부피, 집진방식)은 Table 1과 같으며, A사 청소기는 10만원 중반 대, B사 청소기는 20만원 초반 대의 가격(2013년 기준)으로 책정되어 있다. 두 가지 싸이클론 청소기의 특성은 거의 비슷하나 차이가 나는 부분은 집진방식이다. 두 회사 모두 싱글 싸이클론(single cyclone)의 집진 방식을 가지지만 먼지방의 구조가 A사는 2개의 방을 가지는 구조(twin room)이고, B사는 1개의 방을 가지는 구조(single room)이다.

본 논문은 두 가지 싸이클론 청소기의 성능 평가를 수행한 후 친환경적 디자인 절차에 따라 전과정 평가를 실시하였다. 두 가지 싸이클론 청소기 제품의 성능은 환경마크 대상제품 관리 번호 ‘EL406. 전기 진공청소기(EL-406-2001/3/2005-107)’에 의한 전기 진공청소기 관련규정에 따라 전력량, 흡입력, 소음, 온도의 4가지 성능을 측정하여 평가하였다. 제품 성능 평가 이후에는 각 싸이클론 청소기에 대한 전과정 평가를 실시하여 환경성을 비교 평가하고, 이를 바탕으로 친환경적인 디자인 및 개선 전략을 제안하였다.

3. 제품 성능 평가

제품 성능 평가는 두 가지 싸이클론 청소기에 대하여 전력량, 흡입력, 소음, 온도를 측정하고 이를 비교 분석하는 순서로 진행하였다.

Table 1. Specifications of cyclone vacuum cleaner

	Company A	Company B
Illustration
Weight [kg]	4.6	4.3
Power [W]	1,200	1,050
Voltage [V, Hz]	220, 60	220, 60
Size [mm ³]	272 × 398 × 232	260 × 352 × 265
Filter	HEPA H11	HEPA H13
Dust collection method	Single cyclone (twin room)	Single cyclone (single room)

Table 2. Result of power measurement

Measurement	Company A [W]	Company B [W]
Out bottom (Max)	1,061	935
Out bottom (Min)	264	487
On bottom (Max)	1,049	872
On bottom (Min)	268	484

3.1. 전력량 평가

본 논문에서 두 가지 제품의 전력량 측정은 청소기 흡입구를 바닥에 닿았을 경우와 바닥에 닿지 않았을 경우로 나누고, 각각 흡입 조절 스위치를 최대로 하였을 경우와 최소로 하였을 경우로 다시 나누어 총 4가지 경우로 설정하여 전력량을 측정하였다. 전력량 측정값은 총 10분 동안 30초 간격(단, 3분 이하는 10초 간격)으로 총 3회 전압측정기에 표시되는 전력 값을 기록하고, 기록한 전력 값의 평균을 최종 전력량으로 선정하였다.

두 가지 청소기의 전력량을 측정한 결과 Table 2와 같은 결과가 나왔으며, A사가 B사보다 조금 더 넓은 범위의 전력량을 이용할 수 있었다. 따라서 전력량 측정 평가 부분은 A사가 B사보다 우수한 것을 확인할 수 있다.

3.2. 흡입력 평가

본 논문에서 두 가지 제품의 흡입력 측정은 10분 동안 30초 간격(단, 3분 이하는 10초 간격)으로 총 3회 청소기 흡입구의 압력을 측정하고, 평균값을 기록하였다. 여기서 주의할 점은 두 가지 사이클론 청소기의 전력량이 다르기 때문에(A사: 1,200 W, B사: 1,050 W) 동일한 전력량인 850 W를 기준으로 하여 흡입력을 측정하였다. 흡입력 측정 방법은 청소기 흡입구를 제거하고, 길이조절 연장관 끝에 흡입력 측정관을 연결하였다. 이때, 바람이 새지 않도록 고무 찰흙으로 측정관 안쪽을 일부 막고 흡입력을 측정 하였다.

두 가지 제품의 흡입력 측정 결과는 Table 3과 같으며, A사가 B사보다 평균 흡입력이 216 Pa 만큼 높게 측정되었다. 즉, 같은 850 W의 전력량일 때, A사가 B사보다 적은 힘으로 높은 효율을 낸다고 할 수 있으며, 흡입력 측정 평가 부분도 A사가 B사 보다 우수한 것을 확인할 수 있다.

3.3. 소음 평가

본 논문에서 두 가지 제품의 소음 측정은 청소기를 장애물이 없는 조용한 장소에 두고, 그 위치에서 청소기의 배기구를 기준으로 1 m, 2 m, 3 m의 거리에서 소음을 측정하였다. Figure 1

Table 3. Result of suction power measurement

Measurement	Company A [Pa]	Company B [Pa]
Primary	933.8	719.2
Secondary	928.7	715.1
Tertiary	932.8	713.2
Average	931.8	715.8

Figure 1. Noise measurement environment.**Table 4.** Result of noise measurement

Measurement	Company A [dB(A)]	Company B [dB(A)]
1 m	71.2	76.9
2 m	67.4	71.3
3 m	65.8	69.2

은 소음 측정 환경 및 측정 중의 모습을 나타내었고, 바닥에 청소기의 배기구를 기준으로 1 m 마다 표시를 하였다. 소음 측정은 10분 동안 30초 간격(단, 3분이하는 10초 간격)으로 총 3회로 소음측정기에 나타난 수치를 확인하고, 평균값을 기록 하였다. 여기서 주의할 점은 흡입력 평가와 마찬가지로 두 가지 사이클론 청소기의 전력량이 다르기 때문에 동일한 전력량이 850 W를 기준으로 하여 소음을 측정하였다. 소음 측정 장비인 'SL-4001'로 측정한 소음의 단위는 사람의 귀가 민감하게 반응하는 dB(A)로 설정하고, 소음을 측정한 장소의 배경소음은 46.5 dB(A)로 측정되었다.

소음 측정 결과는 Table 4와 같으며, 모든 거리(1~3 m)에서의 측정 소음이 A사 보다 B사가 약 5~6 dB(A) 높게 측정되었다. 따라서 소음 측정 평가 부분도 A사가 B사보다 우수한 것을 확인할 수 있다.

3.4. 온도 평가

본 논문에서는 A사, B사 청소기의 온도를 청소기 배기구를 기준으로 측정하였다. 청소기의 열은 모터가 위치한 본체에서 발생되며, 본체의 배기구로 배출된다. 청소기의 온도를 측정 할 때의 A사, B사 청소기 전력량은 동일 값인 850 W로 하였고, 10분 동안 10초 간격(단, 1분 이하는 5초 간격)으로 총 3회 청소기의 온도를 측정하여 평균값을 기록하였다. A사와 B사의 온도변화는 Figure 2에서 볼 수 있듯이 시간이 지날수록 증가하는 경향을 보였고, 최고온도에 따라서는 시간 2분 이내로 비슷했다. A사 청소기의 평균 최고 온도는 46.8 °C로 측정되었으며, B사 청소기의 평균 최고온도는 43.6 °C로 측정되어 A사가 B사에 비해 평균 최고온도가 3.2 °C 높은 것으로 나타났다. 즉, 동일한 소비전력(850 W)으로 정상상태 일 때, Figure 2(c)와 같이 A사의 본체 온도가 B사보다 높은 온도에서 유지가 되므로 두 제품의 온도 특성은 B사가 A사 보다 우수한 것으로 확인되었다.

(a) Company A

(b) Company B

(c) Time-temperature graph

Figure 2. Temperature change by time.**Table 5.** Result of performance measurement

	Power	Suction power	Noise	Temperature
Company A	Excellent	Excellent	Excellent	
Company B				Excellent

3.5. 제품 성능 평가 결과

A사와 B사 청소기의 성능(전력량, 흡입력, 소음, 온도)을

(a) Company A

(b) Company B

Figure 3. Disassembly of cyclone vacuum cleaner.

측정한 결과 Table 5와 같이 온도 특성을 제외한 나머지 특성이 A사 청소기가 B사 청소기에 비해 우수한 것으로 나타났다. 이는 A사 청소기가 성능 면에서 B사 청소기보다 전반적으로 뛰어나다는 것을 나타낸다.

4. 환경성 평가를 통한 개선방안 도출

전과정 평가는 제품의 원료생산과 제품 생산, 수송 및 유통, 사용, 폐기 등의 전과정에서 자원 투입량과 오염물질의 배출량을 정량화하고 이들이 환경에 미치는 잠재적 영향을 체계적으로 평가하는 환경성 평가 도구이며, 최근 국제적인 환경성 평가 인증 도구로 활용되고 있다. 본 논문에서는 A사와 B사 싸이클론 청소기의 전과정 평가를 통해 환경성 평가를 실시하였다.

4.1. 청소기 분해 및 물질 구성 정보 작성

청소기의 성능을 평가한 후 전과정 평가를 실시하기에 앞서 A사, B사의 청소기를 분해하여 제품의 물질 구성정보(bill of material, BOM)를 작성한다. 제품의 물질 구성정보는 특정 제품이 어떠한 부품으로 구성되는지에 대한 정보와 관계를 정의하는 도구이다. 본 논문에서 제품의 물질 구성정보를 작성하기 위해 각각의 청소기 제품을 Figure 3과 같이 최하 물질 단위까지 분해하였다.

싸이클론 청소기 완제품에 대하여 포장단계부터 분해를 하여 조립단위, 재질, 중량, 분해시간, 지구온난화 지수(global warming potential, GWP), 재활용률(recyclability rate, RCR), 재활용 중량 등 제품의 상세 정보를 작성한다. 여기서 지구온난화 지수, 재활용률은 식 (1), (2)로 산출된다.

$$GWP[kg CO_2 - eq] = \sum_{i=1}^n (w_i \times GWP_i) \quad (1)$$

$$RCR[\%] = \frac{\sum_{i=1}^n (w_i \times RCR_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (2)$$

No.	Assembly					Part name (Manufacturer)	Material name (Manufacturer)	Weight [g]	Disassem- ble time [min]	Material name (LCI DB or EUP Eco report)	Material Weight [kg]	GWP [kg CO ₂ eq.]	RCR [%]	Recycle Weight [kg]
	0	1	2	3	4									
1	0					Cleaner		7500.0	49.8		0.00	0.00000	0%	0.00
2		1				Cleaner body		5814.0	24.4		0.00	0.00000	0%	0.00
3			2			Cleaner head		280.2	1.5		0.00	0.00000	0%	0.00
4				3		Upper head	ABS	90.0	0.3	ABS(Acrylonitrile Butadiene Styrene Powder)	0.09	0.26910	85%	0.08
5					3	Head neck	ABS	70.0	0.1	ABS(Acrylonitrile Butadiene Styrene Powder)	0.07	0.20930	85%	0.06
6					3	Head nonslip pad	EPDM	2.6	0.2	Rubber, EPDM(Ethylene-Propylenediene Rubber)	0.00	0.01173	0%	0.00
7					3	Head wheel	PP	5.6	0.3	PP(poly propylene)	0.01	0.01106	85%	0.00
8					3	Head wheel fixed base	PP	0.8	0.1	PP(poly propylene)	0.00	0.00158	85%	0.00
9					3	Bottom head	ABS	110.0	0.3	ABS(Acrylonitrile Butadiene Styrene Powder)	0.11	0.32890	85%	0.09
10					3	Head brush	ABS	1.2	0.2	ABS(Acrylonitrile Butadiene Styrene Powder)	0.00	0.00359	85%	0.00
11			2			Cleaner hose		623.4	10.7		0.00	0.00000	0%	0.00
12				3		Handle	ABS	150.0	0.2	ABS(Acrylonitrile Butadiene Styrene Powder)	0.15	0.44850	85%	0.13
13					3	Handle cover	ABS	30.0	0.1	ABS(Acrylonitrile Butadiene Styrene Powder)	0.03	0.08970	85%	0.03

Figure 4. BOM of cyclone vacuum cleaner-A.

88				3		Cleaner cable reel part #3	Copper	4.9	0.1	Copper pipe	0.00	0.01730	90%	0.00
89					3	Bottom body frame	ABS	330.0	0.2	ABS(Acrylonitrile Butadiene Styrene Powder)	0.33	0.98670	85%	0.28
90					3	Bottom body frame rubber ring	Rubber	10.9	0.1	Rubber, Natural coagulum	0.00	0.00000	0%	0.00
91					3	Bottom body wheel	PP	161.8	0.3	PP(poly propylene)	0.16	0.31948	85%	0.14
92					3	Bottom body wheel fixed base	PP	3.6	0.1	PP(poly propylene)	0.00	0.00711	85%	0.00
93			1			Packing material		1767.3	1.8		0.00	0.00000	0%	0.00
94				2		Packing material - box	Paper	1640.0	0.2	Paper, waste paper below 50%	1.64	2.68960	95%	1.56
95					2	Packing material - styrofoam	PS	39.5	1.0	PS(Polystyrene)	0.04	0.08216	85%	0.03
96					2	Packing material - vinyl #1	LDPE	63.0	0.3	LDPE(Low-Density polyethylene)	0.06	0.11718	85%	0.05
97					2	Packing material - vinyl #2	HDPE	24.9	0.3	HDPE(High-Density Polyethylene)	0.02	0.05010	85%	0.02
98					1	Cleaner manual	Paper	37.4	0.1	Paper, virgin fiber	0.04	0.03740	95%	0.04
99					1	Copper Wire	Copper	180.9	20.0	Copper rod(8mm)	0.18	0.82952	90%	0.16
100					1	Screw(51 piece)	steel	70.7	15.0	Steel Billets	0.07	0.12302	98%	0.07
Total									74.9 min		7.68	17.57307	81%	6.25

Figure 5. BOM of cyclone vacuum cleaner-B.

식 (1), (2)에서 w_i 는 i 성분의 중량, GWP_i 는 i 성분의 GWP , RCR_i 는 i 성분의 RCR 을 나타낸다. 제품 분해를 완료한 A사 청소기의 물질 구성정보는 Figure 4와 같이 작성되었으며, 제품의 총 중량은 7.50 kg, 조립단위는 0 Level에서 3 Level인 4단계로 분해하였다. 조립단위는 크게 본체(5814.0 g), 포장재(1298.9 g), 청소기 사용설명서(18.2 g), 전선 구리(340.3 g), 나사(27.5 g)로 나누어 각각의 하위레벨로 다시 나누었다. 총 분해시간은 49.8분이며, 지구 온난화 지수는 식 (1)에 의해 17.28712 kg CO₂-eq, 재활용률은 식 (2)에 의해 83%로 산출되었다. 또한, A사 청소기의 투입 원재료 현황은 ABS (acrylonitrile butadiene styrene powder) 외 16종으로 총 17종으로 나타났다.

마찬가지로 제품 분해를 완료한 B사 청소기의 물질 구성정보는 Figure 5와 같이 작성되었으며, 제품의 총 중량은 7.68 kg, 조립단위는 A사 청소기와 동일하게 0 Level에서 3 Level인 4단계로 분해하였다. 조립단위는 크게 본체(5634.3 g), 포장재(1767.3 g), 청소기 사용설명서(37.4 g), 전선 구리(180.9 g), 나사(70.9 g)로 나누어 각각의 하위레벨로 다시 나누었다. 총 분해 시간은 74.9분이며, 지구 온난화 지수는 식 (1)에 의해 17.57307 kg CO₂-eq, 재활용률은 식 (2)에 의해 81%로 산출되었다. 또한, B사 청소기의 투입 원재료 현황은 ABS 외 17종으로 총 18종으로 나타났다.

A사와 B사의 청소기 제품을 분해하여 제품의 물질 구성정보를 작성한 결과 B사 청소기는 A사 청소기에 비해 많은 분해시간을 가지며, 지구 온난화 지수는 조금 높은 것으로 나타났고, 재활용률은 2% 낮은 것으로 확인되었으며, 투입 원재료가 1종 더 많은 것으로 나타났다.

4.2. 환경성 파라미터

제품의 환경성 파라미터는 제품의 환경성을 파악하는데 지

표로 사용되는 것들을 칭하며, 제품의 정보 및 제품에 사용된 원재료 물질과 제조, 운송, 사용, 폐기, 단계에서의 기본적인 정보를 작성한다. 이는 앞서 작성한 물질의 구성정보를 토대로 작성하였다. 본 논문에서는 EU의 에코디자인 지침인 [2]의 ‘eco-design parameter (Annex I, Part 1)’를 사용하였다.

4.3. 제품 환경성 분석

제품 환경성 분석(life cycle thinking, LCT) 단계에서는 제품 전과정 평가를 통해 제품이 환경에 가장 부정적인 영향을 미치는 단계를 찾아내기 위해 ‘환경성 분석’을 진행한다. 여기에서는 LCT matrix를 바탕으로 제품 전과정 평가 단계별 ‘환경성 측면’에 대한 자료를 입력하고, CO₂-eq로 변환하여 서로를 비교한다. 이 단계에서는 정밀한 환경성 분석을 목적으로 하는 것이 아니라 환경에 가장 부정적인 영향을 미치는 단계를 찾아내는 것이 목적이다. 본 논문에서는 싸이클론 청소기의 전과정 평가에 대해 ‘원재료 취득’, ‘제조단계’, ‘운송단계’, ‘사용단계’, ‘폐기단계’의 과정별로 CO₂-eq 배출량을 탄소성적표시 에너지사용 제품 공통기준[3]을 참고 하여 계산하였다. ‘원재료 취득’에서는 분해한 각 원재료 물질에 대해서 재료를 취득할 시 발생하는 GWP를 계산하고, ‘제조단계’에서는 원재료 물질을 이용하여 완제품을 제조할 때 사용되는 전기, 프레스, 사출성형 등의 작업에 대하여 발생하는 GWP를 일반적인 시나리오에 따라 계산한다. ‘운송단계’에서는 전 세계 다수의 전자제품이 중국 상하이(Shanghai, China)에서 제조되는 것을 고려하고, 최종 판매처가 대한민국 대구(Daegu, Republic of Korea)인 시나리오를 가정했을 때 운송 중에 발생하는 GWP를 계산한다. 이에 따라, 운송 시나리오는 중국 상하이에서 인천까지 해양운송(982 km)과 인천에서 대구까지 육로운송(344 km)으로 가정하여 운송 중에 발생하

Figure 6. GWP based on LCT.

는 GWP를 계산하였다. 또한, ‘사용단계’에서 배출되는 이산화탄소량은 청소기 제품의 대기전력과 동작 중 소비전력의 실제 측정된 값을 이용한다. 청소기의 제품수명은 7년이고, 월간 21일, 1일 20분 청소기의 사용 시나리오로 가정하여 총 전력 사용량을 계산한다. 그리고 계산된 총 전력 사용량을 이용하여 ‘사용단계’에서의 GWP를 계산한다. 마지막으로 ‘폐기 단계’에서는 원재료 물질의 재활용을 고려하여 GWP를 계산한다.

각 과정에서의 GWP는 Figure 6과 같으며, 전자 제품인 싸이클론 청소기의 특성상 사용단계에서 가장 많은 이산화탄소(226.1 kg CO₂-eq)가 배출되는 것을 알 수 있다. A사와 B사 청소기는 같은 소비전력인 850 W를 기준으로 사용 시나리오를 가정하였기 때문에 ‘사용단계’에서의 GWP는 동일한 값으로 산출되었다. A사 청소기와 비교했을 때 B사 청소기는 ‘원재료 취득’, ‘운송 단계’의 GWP가 높은 것으로 나타났는데, 이는 B사 청소기가 A사 청소기에 비해 원재료 물질이 1종이 더 많고, 포장재를 포함한 전체 무게가 더 많기 때문인 것으로 분석된다. 하지만, ‘폐기 단계’에서는 A사 청소기에 비해

B사 청소기가 이산화탄소 배출량을 더 절감할 수 있는 값이 나타났다. 이는 B사가 A사에 비해 종이 재질의 원재료 물질이 더 많이 포함되어있기 때문에 ‘폐기 단계’에서 더 낮은 GWP값을 나타낸 것으로 분석된다. 따라서 제품의 전과정 중 환경에 가장 부정적인 영향을 미치는 ‘사용 단계’에서 에너지 소비를 절감하여 배출되는 이산화탄소의 양을 줄일 필요성이 있다.

4.4. 이해관계자 요구사항 분석

이해관계자 요구사항 분석 과정에서는 이해관계자들의 요구사항을 분석하여 제품의 개선대상 부품을 도출하는 작업을 진행하는 단계이다. 이해관계자 요구사항 분석 과정은 환경성 품질 기능 전개(environmental quality function deployment, EQFD), 환경성 벤치마킹(environmental benchmarking, EBM)으로 구성되어있다[4][5].

4.4.1. 환경성 품질 기능 전개

환경 품질 기능 전개는 제품의 설계단계에서 ‘고객 요구사항’으로부터 ‘설계 요구사항’을 도출하기 위해 QFD (quality function deployment)를 사용하는데, EQFD는 QFD의 ‘고객 요구사항’을 ‘환경적 고객 요구사항’으로, ‘설계 요구사항’을 ‘환경적 설계 요구사항’으로 바꾸어 사용한다. 즉, ‘환경적 고객 요구사항’으로부터 ‘환경적 설계 요구사항’을 도출한다[3].

본 논문에서는 환경적 이해관계자 요구사항으로 개선이 필요한 환경성 파라미터를 도출하기 위해 Figure 7과 같은 EQFD 표를 작성한다. 이해관계자(정부-환경관련법규, 기업, 소비자-고객의 요구사항)에 따른 환경적 이해관계자 요구사항 항목을 작성하고, 각 요구사항 항목별로 가중치 점수(1점: 중요하지 않음, 3점: 중요함, 9점: 매우 중요함)를 부여하고, 환경적 이해관계자 요구사항과 환경성 파라미터와의 상관관계 점수(1점: 약간 관계있음, 3점: 관계있음, 9점: 매우 관계있음)를 부여하여 식 (3)을 이용한 환경성 파라미터 별 비중을 계산한다.

* EQFD : Keijiro Masui and Takeshi Ishida, 2003(MSTC, Society of Manufacturing Science and Technology Center Japan)																				
	Environmental parameter Requirements of environmental stakeholder	Weight High Low	Usage of raw material		Product production		Product transportation				Product usage					Product disposal				
			Used raw materials	Toxic substance	Energy consumption in use	Emission in production	Product weight	Product volume	Packing materials	Energy consumption on transportation	Energy consumption in use	Emission in use	Consumables	Product lifespan	Repairability	Recycling rate	Disassembling time	The number of parts	Method of assembly for parts	Usability
Regulations for environment	Prohibition on use of toxic substances (RoHS, REACH etc)	9		9																
	Energy saving (EuP etc)	9			3	1				3	9						1	1	1	
	Recycling rate (WEEE etc)	9	9						1				3			9			1	1
	Waste management(law 11980th) compliance	9	3	1		3						3	9			9				
Eco label	Reduction of raw materials	3	3	1			9	3	3				1					3	1	
	Increment of biodegradability material	3	9			1				3		1				9		3		
Requirement of customers	Improvement of product durability	3	3								3		1	9	3				1	
	Maintainability	3						1					1		9		1	3		
	Optimization of transportation	3					3	3	3	9			1					1		
	Easiness of assembly and disassembly	3									9		3	3	3					
	Decrement of harmful substance	9	3			3							1			1				
	Total	~	180	93	27	66	36	21	36	54	117	30	138	36	45	198	12	39	15	18
	Proportion	~	15.5	8.0	2.3	5.7	3.1	1.8	3.1	4.7	10.1	2.6	11.9	3.1	3.9	17.1	1.0	3.4	1.3	1.6
~ Weighted score (1:Not important, 3:Important, 9:Very important), Interrelation score(1:Slightly related , 3:Related, 9:Highly related)																				

Figure 7. EQFD (environmental quality function deployment).

$$weight_i [\%] = \frac{\sum_{j=1}^m s_j \times r_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m s_j \times r_{ij}} \quad (3)$$

여기서 $weight_i$ 는 i 열의 비중, s_j 는 j 행의 가중치, r_{ij} 는 i 열과 j 행의 상관관계이다. 식 (3)을 이용하여 환경성 파라미터 별 비중을 계산한 결과 환경적 이해관계자 요구사항으로 개선이 필요한 환경성 파라미터는 제품 폐기 단계의 ‘재활용률’, 원재료 사용단계의 ‘사용된 원료물질’, 제품 사용 단계의 ‘유지/관리 소모품’, ‘사용 중 에너지 소비’순으로 4개가 선정되었다.

4.4.2. 환경성 벤치 마킹

환경성 벤치 마킹은 제품 설계단계에서 경쟁사 제품대비 자사제품의 취약점을 찾아내기 위해 경쟁사 제품을 벤치마킹 하는데, 경쟁사 제품과 자사 제품의 ‘환경성 특성(환경성 파라미터)’을 비교한다[4].

본 논문에서는 A사와 B사 사이클론 청소기의 제품 특성 측정 결과와 제품 환경성 평가를 바탕으로 A사 사이클론 청소기를 경쟁사로 정하고, B사 사이클론 청소기를 자사로 정하여 EBM 표를 작성한다. 사용된 원료 물질 외 17가지 환경성 파라미터를 비교하였을 때, B사 청소기가 A사 청소기보다 더 나은 환경성 파라미터는 ‘제품 부피’밖에 나타나지 않았다.

앞서 측정한 사이클론 청소기의 제품 특성과 제품 환경성 평가를 토대로 이해관계자 요구사항 분석을 한 결과 B사 제품이 A사 제품에 비해 성능이 떨어지며, 환경적으로도 불리한 제품임을 확인할 수 있었다. 이러한 결과에 따라 본 논문은 B사 사이클론 청소기의 성능을 향상시키고, 친환경적인 제품으로 소비자들에게 다가갈 수 있는 방안을 제안하고자 한다.

4.5. 개선 대상 부품 도출

개선대상 부품 도출단계에서는 품질환경 기능전개(quality function deployment for environment, QFDE)기법을 사용하여 환경성 측면의 중요도가 높은 부품을 선정하는 과정이다. QFDE I에서는 이해관계자 요구사항에 대하여 개선대상 환경성 파라미터와 제품의 주요특성간의 상관정도를 평가하고, 개선대상 환경성 파라미터와 제품의 주요특성 별 가중치를 식 (3)을 이용하여 값을 계산한다. QFDE II에서는 개선대상 환경성 파라미터와 사이클론 청소기 제품의 구성 부품간의 상관정도를 평가하여 부품별 가중치를 식 (3)을 이용하여 값을 계산한다.

품질환경 기능전개 기법을 B사의 청소기에 적용하여 시트를 작성하였다. B사의 사이클론 청소기의 개선대상 부품 분석 결과 ‘모터(30.1%)’, ‘청소기 몸체(15.2%)’, ‘포장재(13.2%)’, ‘유지/관리 소모품-필터’(12.5%)순으로 가중치의 값을 보였다. 다시 말해, B사의 청소기를 친환경적인 제품으로 만들기 위해 ‘모터, 청소기 몸체, 포장재, 유지/관리 소모품-필터’를 개선한다면 사용된 원료 물질을 줄이고, 재활용률을 높이며,

청소기의 사용 중에 발생하는 에너지 소모를 줄일 수 있을 것이다.

4.6. 대상 부품의 개선 방안 및 환경성 평가

대상 부품의 개선 전략 및 방안 단계에서는 지금까지의 평가를 통해 파악된 과업별 결과들을 이용하여 B사의 사이클론 청소기의 성능을 향상시키고, 친환경적인 제품으로 소비자들에게 다가 갈 수 있는 개선전략을 기술한다.

두 회사의 서로 다른 사이클론 청소기 제품에서의 에너지 소비 결과 분석을 통해 제품 전과정 중 사용단계의 에너지 소비가 가장 크며, 이를 개선해야 할 대상임을 알 수 있었다. 또한, 사용단계에서의 에너지 소비에 가장 주된 부품은 모터임을 알 수 있었다. 이를 개선할 수 있는 방안으로 동일한 효율 대비 전력 사용량이 낮은 모터를 사용하는 것을 고려할 수 있다. 하지만, 이러한 고효율 모터를 사용한 친환경 청소기는 일반 모터를 사용한 청소기에 비해 2배 높은 가격을 책정하여 시중에서 판매하고 있어 소비자들에게 부담만 줄 뿐이며, 구매욕구가 오히려 감소해 ‘친환경 제품 = 값 비싼 제품’이라는 이미지를 각인 시키고 있다. 이에 따라 본 논문은 사이클론 청소기의 사용 단계뿐만 아니라 원재료 취득, 제조, 운송, 폐기단계에서의 에너지 소비를 줄이는 방안을 모색하고, 더 나아가 소비자에 대한 부담을 줄 일 수 있는 방안을 제안한다.

4.6.1. 사용 중 에너지 소비 개선 방안

본 논문에서는 B사 사이클론 청소기의 사용 단계의 에너지 소비를 감소 시키기 위해 사이클론 청소기 내부의 소모품인 필터 교환 횟수를 줄여 에너지 소모를 줄이는 방안을 고려하였다. 4.1.절에서 B사 사이클론 청소기를 분해한 결과 Figure 8과 같이 3개의 필터가 원재료 물질에 포함되었고, A사 사이클론 청소기에 비해 1개 더 많은 필터가 포함되어 있었다.

Figure 8에서 Filter (a), (b)는 EVA 필터로 사이클론 청소기 내부의 필터이며, Filter (c)는 HEPA 필터로 사이클론 청소기 후면부의 필터이다. 사이클론 청소기의 필터 교환주기는 일반적으로 1년이며, 사이클론 청소기의 수명은 7년이므로 싸

Figure 8. Cyclone vacuum cleaner filter of company B.

Figure 9. Image of additional baffle.

이클론 청소기를 사용하는 동안 최소 21번의 필터를 교환해야 한다. 청소기에서 사용되고 버려지는 EVA, HEPA 필터 폐기물은 2차 오염을 유발할 뿐만 아니라 폐기 처리하는 기술이 부족하여 재활용률도 매우 낮은 상태이다. 즉, 필터의 교환주기를 늘려 필터 교환 횟수를 줄인다면 싸이클론 청소기의 사용 단계에서 발생하는 에너지 소모뿐만 아니라 전과정 측면에서 에너지 소모를 줄이는 방안이 될 수 있다.

본 논문에서는 싸이클론 청소기 필터의 교환주기를 늘리기 위해 먼지방에 배플(baffle)을 Figure 9(b)와 같이 PP(polypropylene)의 재질로 제작하였다. 싸이클론 청소기는 먼지 봉투를 사용하지 않고 먼지 방을 사용함으로써 청소기 사용주기마다 나오는 먼지 봉투로 인한 쓰레기 증가를 감소시켜 환경적으로 우수한 청소기로 각광받고 있다. 하지만, 싸이클론 청소기는 먼지 방에 집진된 먼지가 먼지 방으로 유입되는 공기로 인해 재 비산이 일어나는 경우가 생겨, 먼지가 집진되었다가 다시 먼지방을 떠나 청소기의 필터로 향하는 문제점을 가지고 있다. 본 논문에서는 이러한 싸이클론 청소기 먼지 방에서 먼지의 재비산을 방지하기 위해 배플을 설치하여 해결책을 찾고자 하였다. 배플의 설치로 먼지의 재 비산을 방지하고, 청소기 내의 유동을 개선할 수 있으며, 그에 따른 필터 교환주기를 늘릴 수 있다.

제안한 개선 방안을 실제 청소기에 적용하여 사용단계의 GWP를 시뮬레이션 해본 결과 약 4.0 kg CO₂-eq의 에너지를 절감할 수 있는 것으로 나타났으며, 더 나아가 전과정(원재료 취득, 제조, 운송, 사용, 폐기단계)에 걸쳐 GWP를 계산하면 약 4.2 kg CO₂-eq의 에너지 소모를 줄일 수 있다(Table 7). 또한, 본 논문에서는 배플 설치로 인하여 청소기의 성능(흡입력)이 변화하는지를 알아보기 위해 먼지방내에 배플을 설치했을 때와 하지 않았을 때의 흡입력을 측정하는 실험을 수행하였다.

Figure 10. Experiment diagram.

배플 설치 전과 설치 후의 흡입력은 3.2절과 같은 측정 장비를 이용하여 측정하였으며, 실험 개략도는 Figure 10에 나타내었다. 흡입력 측정 실험 과정은 MFC(mass flow controller)를 이용하여 750 Pa의 압력인 N₂(질소 가스)를 100 mL/min의 유량으로 조절하여 지속적으로 청소기의 싸이클론 입구에 주입해 주고, 10분 동안 30초 간격(단, 3분 이하는 10초 간격)으로 총 3회 흡입력을 측정하여 평균값을 최종 측정값으로 선정한다. 측정은 Figure 6(a)의 왼쪽 사진과 같이 B사 싸이클론 청소기의 먼지방과 싸이클론 구조를 결합하여 압력을 측정하였으며, 배플 설치 전과 후의 흡입력 측정 결과는 Table 6과 같다.

Table 6. Result of suction power measurement

Measurement	Before [Pa]	After [Pa]
Primary	721.5	718.5
Secondary	719.3	717.8
Tertiary	722.8	718.7
Average	721.2	718.3

배플을 설치하기 전의 측정된 흡입력은 721.2 Pa, 설치한 후의 흡입력은 718.3 Pa로 배플을 설치하기 전의 흡입력에 비해 2.9 Pa 낮아진 수치를 보였다. 하지만, 2.9 Pa의 흡입력의 손실은 극히 적으므로 흡입력의 차이는 거의 없다고 볼 수 있다. 다시 말해, 배플이 없는 동일한 싸이클론 청소기와 비교했을 때, 먼지 방 입구에 배플을 설치함으로써 동일한 성능에서 청소기 먼지 방 내의 유동을 개선할 수 있으며, 집진된 먼지의 재 비산을 방지하고, 청소기 내부의 필터의 교환 주기를 늘려 싸이클론 청소기의 사용 중 에너지 소모 및 전과정에서의 에너지 소모를 줄일 수 있는 친환경적인 싸이클론 청소기의 시스템이 될 수 있다.

4.6.2. 재활용률 개선 방안

4.5.절에서 개선 대상 부품으로 청소기 몸체의 재질과 포장재가 도출되었다. 재활용률을 개선하기 위해서는 기존에 사용된 원료 물질을 교체해야할 필요성이 있다. 앞서 작성된 물질구성 정보에서 B사의 청소기는 A사에 비해 1종 더 많은 18종의 원재료 물질을 사용하고 있었으며, 총 중량에서도 더 많은 양이 측정되었다. 이러한 차이가 나는 가장 큰 특징은 B사의 청소기에 불필요한 원재료 물질을 사용하고, 재활용률이 낮은 PVC와 포장재(박스)를 A사에 비해 많은 양을 사용했다는 점으로 분석되었다.

본 논문에서는 B사의 재활용률을 개선하기 위해 불필요한 원료 물질 및 부품은 제거하고, 재활용률이 상대적으로 높은 원재료 물질로 대체하는 방안을 고려하였다. B사의 싸이클론 청소기는 재활용률이 극히 낮은 PVC (polyvinyl chloride)가 A사에 비해 2배 가까이 많은 양을 사용되어 재활용률을 떨어뜨리는 요소가 되고 있었으며, 포장재(박스)도 A사에 비해 500 g 많은 양을 사용하고 있었다. 또한, 흡입력 조절 스위치와 모터의 PCB도 A사에 비해 많은 양을 사용하여 경량화 할 필요성이 있었다.

제안한 재활용률 개선 방안을 B사 싸이클론 청소기에 적용하여 GWP를 재계산 해본 결과 원재료 물질의 양과 무게를 감소시킴으로써 원재료 취득 단계에서 3.6 kg CO₂-eq, 운송 단계에서 0.03 kg CO₂-eq의 에너지를 절감할 수 있다는 결과가 나왔다(Table 7). 재활용률 또한 85%로 기존보다 4% 상승한 결과를 얻을 수 있었으며, 전체 중량이 6.67 kg로 1.01 kg 감소한 중량을 보였다(Table 8).

Table 7. GWP improvement based on proposed methods

	Before [kg CO ₂ -eq]	After [kg CO ₂ -eq]
Raw material extraction	17.57	13.97
Manufacturing	6.59	6.59
Transportation	0.24	0.21
Utilization	226.18	222.18
Disuse	-3.49	-3.72
Total	247.09	239.13

Table 8. Changes of weight and recycling rate based on proposed methods

	Before	After
Weight [kg]	7.68	6.67
Recycling rate [%]	81	85

5. 결론

본 논문은 전과정 평가와 유사한 방법을 싸이클론 청소기에 적용하여 환경성을 평가하고 환경에 대한 영향을 최소화하기 위한 친환경적인 시스템을 제안하였다. 서로 다른 회사의 싸이클론 청소기의 성능을 평가하고 분해하여 물질의 구성정보, 제품 환경성 분석, 이해관계자 요구사항분석, 개선대상 부품도출, 개선전략 과정을 통해 ‘사용 단계’에서의 에너지 소모가 가장 크며, 청소기의 모터, 본체, 포장재, 유지/관리 소모품을 개선하는 방안을 모색했다.

본 연구에서는 개선 대상 부품 중 싸이클론 청소기의 유지/관리 소모품인 필터의 교환주기를 늘려 ‘사용 단계’의 에너지 소모를 줄이는 방법을 제안하였다. 싱글 싸이클론과 먼지 방 사이에 배플을 설치하여 먼지 방에 집진된 먼지의 재 비산을 막아 필터의 교환 주기를 늘리는 방안을 제시하고, GWP를 다시 계산하여 사용 단계의 에너지 소모를 절감할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 또한, 실제 실험을 통해 배플을 설치하기 전과 후의 성능(흡입력)이 거의 변화가 없는 것을 확인하였다.

또한, 싸이클론 청소기의 불필요한 원료 물질 및 부품은 제거하고, 재활용률이 상대적으로 높은 원재료 물질로 대체하는 방안을 고려하여 청소기의 중량을 줄이고, 재활용률은 높여 전과정에 대한 에너지 소비를 낮춘 친환경 청소기 시스템을 제안하였다. 추후에는 실제 청소기 가동실험을 통해 배플의 유무에 따른 먼지의 재 비산 감소로 인한 집진 효율을 산정하여 비교하는 연구가 필요할 것이다.

감사

본 연구는 환경산업기술원의 에코디자인 전문인력 양성사업의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- McDougall, R. R., White, P. R., Franke, M., and Hindle, P., “Integrated Solid Waste Management: A Life Cycle Inventory (2nd Edition),” Blackwell Science Inc., USA, 2001.
- EU, “ErP Directive (Eco-design Requirements for Energy Related Products),” EC, **125**, (2009).
- <http://www.edp.or.kr/carbon>
- Satoru, K., and Fumihiko, K., “Systematization of Product Life Cycle Technology Utilizing the QFD Method,” *Proc. Eco-Design*, **39**, 418-421 (2003).
- Wolfgang, W., Rainer, Z., and Lee, Kun-Mo., “ECODESIGN Implementation-A Systematic Guidance on Integrating Envi-

- ronmental Considerations into Product Development,” Alliance for Global Sustainability Bookseries, **6**, 2004.
6. Yi, H. C., Kang, H. Y., Shim, K. S., Kim, J. H., and Sim, J. S., “A Study on the Standard Method to Calculate Recyclability Rate of Electrical and Electronic Equipments,” *Clean Technol.*, **15**(1), 23-30 (2009).
7. Kim, H. H., Kwon, Y. S., Choi, Y. G., Chung, C. K., Baek, S. H., and Kim, Y. W., “Life Cycle Assessment on the Reuse of Glass Bottles,” *Clean Technol.*, **15**(3), 224-230 (2009).
8. Choi, W. S., Park, S. H., Lee, S. W., Jung, Y. M., and Yi, H. C., “Study on Compound Humidifier Employing UV-LED using Environmental Life Cycle Assessment,” *J. Korean Soc. Precision Eng.*, **29**(9), 931-937 (2012).
9. Yi, H. C., Han, D. S., Lee, K. B., Cho, Y. K., and Kang, Y. J., “Selection of Efficient Heating Appliances and Eco-Design Improvement,” *Proc. KSPE 2013 Spring Conference*, **13**, 1003-1004 (2013).