

전과정평가(LCA)를 통한 LED스탠드의 환경성평가 및 개선방안

박성수, 이창손, 최봉구, 서혜진, *이화조
영남대학교 대학원, *영남대학교 기계공학부

Environmental Impact Evaluation and Improvement of LED Stand by Life Cycle Assessment

SungSu Park, ChangSon Lee, BongGu Choi, HyeJin Seo, *Hwa-Cho Yi

Graduate school, Yeungnam University

*School of mechanical engineering, Yeungnam University

drdd1@naver.com, dlckdths@naver.com, bgwrite@naver.com, seohaemin511@nate.com, *hcyi@yu.ac.kr

Abstract

It is a trend to use LED lamps which have high efficiency and long life time to save the consumption of electricity. LED's are used already not only in automotive, TV, road and highway lighting but in many household as lighting lamps. One problem of LED lamps is generation of heat which causes decline of efficiency. In this study heats generated from two different commercial LED desk lamps depending on lighting time and effects on brightness was analysed. The brightness levels of lamps were measured in a dark room. The temperature, brightness, and electricity of each lamp were measured every 30 minutes. Lux per used electricity was calculated and compared. By the experiment we could determine that temperature of lamp rise and brightness falling with time. In this work two experiments are done to improve this characteristics of LED stand lamp.

Keywords: LCA, LED stand Lamp, Brightness falling, Energy Saving, Temperature Control

1. 서론

환경에 대한 의식이 높아지고 현대인의 생활수준이 향상되면서 에너지 절감을 통한 이산화탄소의 배출을 억제하는 정책과 지원이 급증하고 있다. 그 중 저탄소 녹색성장산업의 하나로 LED(Light Emitting Diode)의 응용을 확대시키고 있다. 현재 LED 조명은 기존의 백열전구, 형광등, 전등에 비해서 높은 효율과 소비전력이 낮고 친환경적인 LED으로 각광받고 있다. 하지만 LED스탠드의 구성상 기존의 램프보다 발광 효율은 뛰어나지만 스탠드를 제어하기 위한 회로들이 복잡해지면서 재활용이 불가능한 PCB와 부품들이 많이 사용되고 있고, 재활용이 어렵기 때문에 환경적인 측면에서 문제점이 되고 있다.(1) 또한 방열 문제도 하나의 과제인데, LED 칩의 온도가 높아지면 칩이 열화하게 되고, 결국 이것이 발광 효율의 저하와 칩의 수명이 감소하게 되며, LED소자에서 발생하는 열을 제대로 방열처리하지 못해 밝기가 떨어지는 등의 품질 신뢰성에 문제를 초래 할 것이라고 예상된다.(2)

LED스탠드를 기존의 제품들 보다 친환경적이고 또한 수명 연장과 발광효율을 높이기 위해서는 칩에 방열판을 부착하여 열을 외부에 확산시키는 기술이 필요하다.

환경문제에 따른 지속가능한 환경으로 바꾸기 위한 방안은 바로 전과정평가(LCA)이다. 전과정평가는 원료 취득에서부터 운반, 가공/생산, 유통, 사용 및 폐기/재활용의 모든 단계에서 발생하는 환경 오염물질을 배출 및 자원 소모량을 과학적이면서도 계량적으로 측정하는 것이며, 이 결과를 토대로 환경성 개선 방안이 마련된다.

전과정평가를 통해서 기대할 수 있는 효과는 여러 가지가 있다. 우선, 제품의 전 과정에 걸쳐 다양한 지점에서 제품의 환경적 측면을 분석을 통해 전략적 계획을 수립하여 우선순위의 부여 및 제품이나 공정의 설계, 재설계 등과 같은 산업계나 정부 및 비정부 기관의 의사결정에 도움을 줄 수 있다.

본 논문에서는 성능과 크기가 비슷한 가지 다른 친환경 LED스탠드를 데이터 분석을 하여 환경에 부정적인 영향을 미치는 요인을 파악하고 제품의 전 과정(Life cycle) 중 방열판을 부착하여 문제점을 개선하고 에너지 효율성을 높이고 소비자의 요구에 맞는 제품을 설계하고자 한다.

2. LED스탠드의 성능평가

2.1. 제품 선정

제품 A사는 DIASONIC DL-95TH, B사는 INNOLIGHT IL-720E로 두 제품 중 A사를 자사로 B사를 타사로 선정하였다.

2.2. 측정 장치

본 연구는 조도 측정기, 전력 측정기, 온도 측정기, LED스탠드로 진행되었다.

2.3. 실험 방법

빛이 완전히 차단되는 암실에서 평균외부온도 (27.4°C), 평균습도 (50RH%)을 유지하였다. 빛의 조도 (Lux)를 1단계 (500 Lux), 2단계 (755 Lux), 3단계 (900 Lux) 단계별로 기준을 설정하여 각 제품별로 30분 동안 온도변화와 전력사용량을 초기 5분 동안은 초(s)단위로 시간을 측정하고 이후 온도와 전력의 변화가 느려져서 30분까지는 분(min) 단위로 측정하였다. 또한 제품의 밝기조절이 수동 조작이기 때문에 A사 제품을 기준으로 B사 제품에 대해 조도 5%의 오차가 발생하였다.

2.4. 수행과정

제품을 모델링 하는 단계로 제품을 분해하고 BOM을 작성하고 환경성 파라미터 정보를 수집한 다음 제품 환경성분석을 위해 전과정 사고를 통해 파라미터를 규명한 이후 이해관계자 요구사항을 만족하기 위해 EQFD, EBM을 통하여 환경성 파라미터를 도출하고 QFDE를 통해 제품특성과 부품 간 관계규명을 위해 환경적으로 개선이 필요한 부품을 도출하였다. 마지막으로 친환경 개선전략 및 과업, 해결방안 수립을 도출하기 위해 설계 대안을 선정, 평가, 검토를 하여 설계를 하였다.

3. 성능의 측정결과 및 전과정평가

3.1. 기존 제품 성능 평가

조도 1단계 (500 Lux), 2단계 (750 Lux), 3단계 (900 Lux) 각 단계에서 최초 상태에서부터 30분 동안의 온도 (°C), 전력 (w), 조도 (Lux)를 측정하고 대상제품의 전력사용량이 다름으로 이를 비교하기 위하여 전력/Lux을 계산하여 비교하였다.

Fig. 1은 A와 B사의 제품으로 각 단계별로 시간에 따른 전력/Lux의 변화량을 측정된 것이다. 1단계에서는 B사가 우수하게 측정되었지만 2, 3단계에서는 반대의 결과로 나타났다. 또한 이번실험을 통하여 LED스탠드가 각 단계에 따라 온도가 증가함에 따라 밝기(Lux)가 감소하는 것을 볼 수 있다.

이 후 이러한 성능 이외에도 환경성을 평가하기 위해서 전과정평가(LCA : Life Cycle Assessment)를 시행하였다.

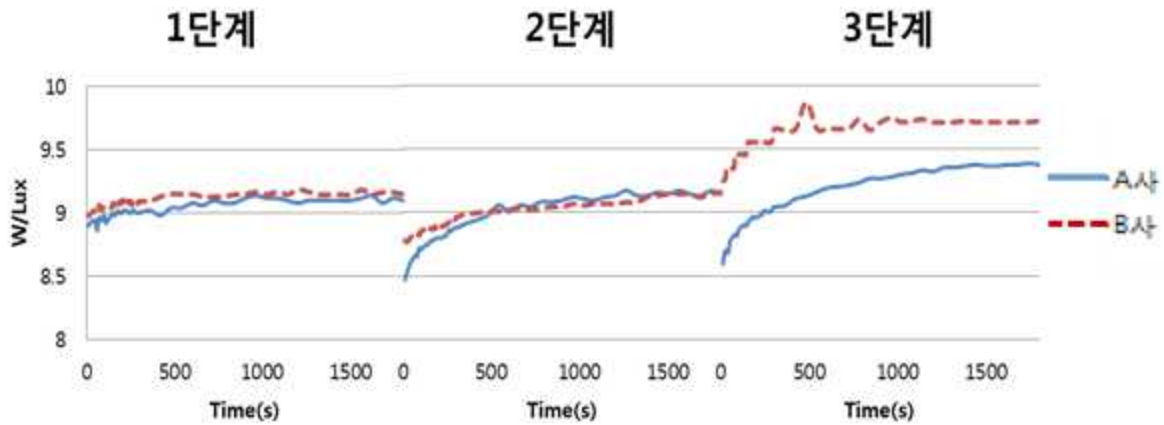


Fig. 1. Comparison LED stand A with LED stand B for electric power and brightness.

3.2. BOM (Bill Of Material)

온도 및 조도 측정 후, 제작 회사의 BOM이 있었다면, 제품을 분해할 필요가 없지만 이 BOM은 회사에서 제공을 하지 않으므로 BOM 작성을 위하여 2가지 종류의 LED스탠드의 모듈별로 분해 후 역 BOM을 작성하였다. 다음은 표는 역 제작된 BOM을 보여준다.

Table 1. BOM of LED stand A and LED stand B

Product	Disintegration time (min)	Weight(g)	Recycling rate (%)	CO ₂ Emissions (kg CO ₂ eq)
A	35	1621.8	90	5.69672
B	32	1695.5	90	6.69825

3.3. 환경성파라미터

환경성파라미터는 제품정보, 원재료사용, 제조단계, 운송 단계, 사용단계, 폐기단계까지를 포함한 것이다. 특히 운송, 사용시간, 소비전력에 관한 시나리오는 중국 연태에서 대구까지 총 898Km이며 하루 5시간 월 30일 12개월 사용하는 것으로 가정하고 계산했다. 그리고 동작 중 소비전력은 6.8W이며 대기전력이 0.13W이기 때문에 연간 총 전력 사용량은 266.231W로 계산되었다. 제품수명은 지침에 따라 20년을 선정하였다.

3.4. 제품 환경성 분석 (LCT)

제품 환경성 평가는 원재료 종류 (원재료 종, 운송단계), 에너지 사용량, 배출물, 폐기물, 재활용률로 구성 되어있다. 사용된 원재료 종류 (원재료 종, 운송단계)와 에너지 사용량에 대해서만 시나리오를 가정했다. 원재료 종으로 총 10종이고, 운송단계에서는 중국에서 대구까지의 898Km에 대해서 환경성파라미터와 동일하게 적용했다. 에너지에 대해서는 연간 총 전력 사용량으로 266.231W를 적용했다. 특히 사용측면에서 CO₂-eq값이 가장 높게 나타났다. Table 2에서 A사가 사용단계에서 가장 많은 132.05kg CO₂-eq, B사는 212.55kg CO₂-eq의 배출량을 보였다. 폐기물 단계에서는 A사가 재활용으로 인한 2.29kg CO₂-eq, B사는 2.17kg CO₂-eq 배출량 감소를 볼 수 있다.

Table 2. CO₂-eq value of each life cycle steps

Life cycle	A(kg CO ₂ -eq)	B(kg CO ₂ -eq)
Raw Materials	5.70	6.70
Manufacture	6.56	6.59
Transit	40.59	42.43
use	132.05	212.55
Disposal	-2.29	-2.17
Total	183.63	266.10

3.5. EQFD (Environment Quality Function Deployment)

EQFD단계에서 유해물질 사용금지, 에너지 절약, 재활용률, 제품 내구성 향상, 분해 조립 용이성의 5가지가 가장 높은 중요도를 나타냈으며, 유해물질, 부품수, 부품 체결 방식을 선정하였다.

3.6. EBM (Environment Bench Marking)

EBM단계에서는 LED스탠드 2제품 중 A사 제품을 자사제품으로 선정하고 다른 경쟁사 제품과 비교를 하여 제품의 장점과 단점을 파악하는 단계이다. Table 2로부터 LED스탠드의 A 제품 (자사제품)을 경쟁사 제품과 비교해본 결과 에너지 소비 (전력, W)에서 큰 차이가 없는 것으로 확인되었다. 즉 에너지 관점에서도 LED스탠드가 비슷한 양상으로 최적으로 되었다는 것을 확인할 수 있었다.

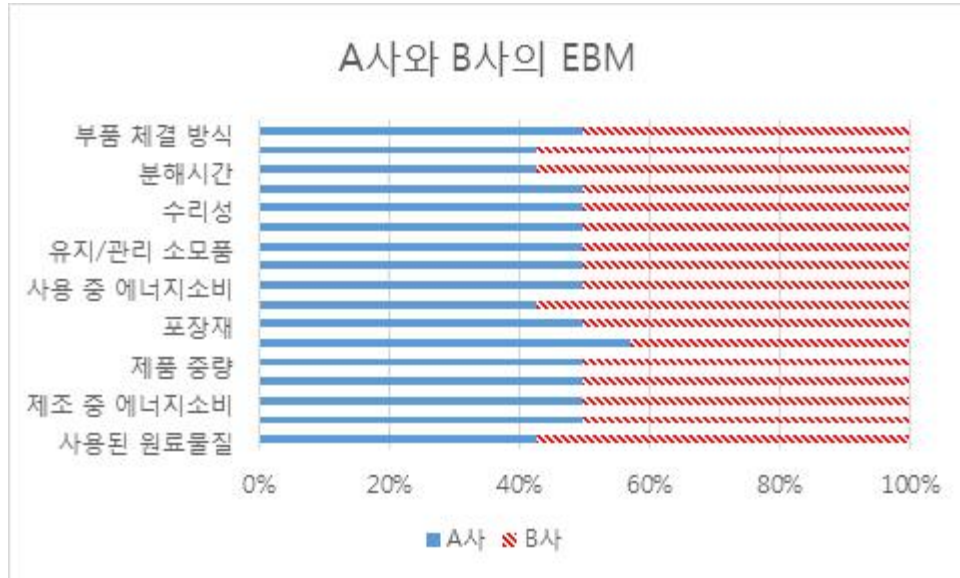


Fig. 2. Analysis of stakeholder requirements (EBM).

3.7. QFDE (Quality Function Deployment Environment)

QFDE단계에서는 제품특성과 제품구성부품으로 2가지 경우로 분류가 되는데 첫 번째 경우 부품 수, 두 번째 경우 본체머리와 컨트롤러를 주요부품으로 선정했다.

분리과정에서도 비슷한 제품 수, 부품체결방식이었고 제품마다의 크다 큰 차이점은 없었다.

Table 3. Selection of parameter

Analysis tools	Improvements of Eco-friendly design	Reason	Selection
LCT	Energy expenditure of using	Using stage has the highest CO ₂ -eq value	O
EQFD	Source Materials	Effect of RoHS, REACH regulations	O
	Packing materials	-	X
	Repair	Relation of durable	O
	Fastened method of segments	Relation of repair and dismantlement	O
EBM	Packing materials	Heavier than rival company	O

3.8. 개선 전략 및 개념설계

도출된 해결방안을 토대로 제품의 개념설계를 진행하였다. 도출된 여러 가지 해결방안 중 각 '제품설계 개선전략'별로 1개씩의 해결방안을 선정했다. 개선대상 환경성파라미터는 사용단계 에너지소비, 유해물질, 재활용률, 부품 수, 부품체결방식, 포장재가 있다. 개선전략에 대한 과업은 LED의 소비전력 저감, 친환경 에너지 사용, PCB의 소비전력 저감 및 유해물질 저감, 충전기 유해물질 저감, PCB개수 줄임, 불필요한 체결 감소, 해체 고려 설계로 변경, 친환경적인 포장재가 있다. 각 해결대안이 '제품설계 개선전략'을 어느 정도 만족하는지 평가 (5점 만점)하고, 기 부여된 '환경성파라미터'별 가중치를 곱하여 높은 점수의 설계 대안으로 선정했으며 최종적으로 선정한 대안으로 LED기판에 방열판 부착 및 개방이 선정되었다.

4. 개선 및 아이디어

Table 4. Design alternative selection

개선대상 환경성파라미터	친환경 제품설계 개선전략	과업	해결방안		
			1	2	3
사용단계 에너지소비	사용단계 에너지 소비 저감	LED의 소비전력 저감	고효율 LED로 LED 교체	LED기판에 방열판 부착	
		친환경 에너지 사용	외부 수동식 발전기 사용	태양 에너지 사용	풍력에너지사용
		PCB의 소비전력 저감	PCB내 부품을 소비전력이 적은 부품으로 교체	불필요한 기능을 제거하여 PCB부품 줄여 전력 저	
유해물질	유해물질 저감	PCB내 유해물질 저감	불필요한 유해물질 제거	유해물질 사용안된 부품 사용	
		충전기 유해물질 저감	불필요한 유해물질 제거	유해물질 사용안된 부품 사용	
재활용률	재활용률 향상	PCB개수줄임	컨트롤부 PCB-1개로 줄임		
부품수	사용된 부품 수 줄감	불필요한 체결 감소	불필요한 나사 제거	결합부품 최소화	
부품체결방식	체결 방식 개선	해체 고려 설계로 변경	체결부 부품 결합방식 구조로 개선		
포장재	환경을 고려	친환경적인 포장재	재활용률이 높은 포장재 사용	포장재 최소화	

Table 4에서는 개선대상 환경성파라미터를 사용단계 에너지 소비, 유해물질, 재활용률, 부품수, 부품체결방식, 포장재로 나누어 개선전략을 세우고 설계대안을 모색하였다. 설계대안 V1은 LED 기판에 방열판을 부착하고 유해물질이 사용되지 않은 부품을 사용하여 해결하는 방안이고, 해결방안 V2는 고효율 LED로 교체 및 불필요한 유해물질 제거를 통한 해결방안이다.

Table 5. Design alternative selection

개선대상 환경성파라미터	친환경 제품설계 개선전략	설계대안 (V1)	설계대안 (V2)	가중치	V1	V2
사용단계 에너지소비	사용단계 에너지 소비 저감	LED기판에 방열판 부착	고효율 LED로 LED교체	7.0	4	5
		태양 에너지 사용	외부 수동식 발전기 사용	7.0	5	4
		불필요한 기능을 제거하여 PCB부품 줄여 전력 저감	불필요한 기능을 제거하여 PCB부품 줄여 전력 저감	7.0	4	4
유해물질	유해물질 저감	유해물질 사용 안 된 부품 사용	불필요한 유해물질 제거	14.2	5	4
		유해물질 사용 안 된 부품 사용	불필요한 유해물질 제거	14.2	5	4
재활용품	재활용품 향상	컨트롤부 PCB 1개로 줄임	컨트롤부 PCB 1개로 줄임	9.5	4	4
부품수	사용된 부품 수 절감	결합부품 최소화	불필요한 나사 제거	18.9	5	5
부품체결방식	체결 방식 개선	체결부 부품 클릭 버튼 구조도 개선	체결부 부품 클릭 버튼 구조도 개선	16.5	4	4
포장재	환경을 고려	재활용률이 높은 포장재 사용	재활용률이 높은 포장재 사용	15.0	4	4
총점	-	-	-	109.2	396	368
백분율	-	-	-	-	363	337

Table 5는 각각의 개선대상 환경성파라미터에 대한 가중치를 두어 설계대안 V1과 V2에 0~5점 사이의 환경적 문제와 에너지 효율에 관한 점수를 주어 이들의 곱으로 총점과 백분율을 도출하였다.

Table 6. Design alternative assessment

개선대상 환경성파라미터	개선 전	개선 후	개선 전 (kg CO ₂ -eq)	개선 후 (kg CO ₂ -eq)	개선효과 (kg CO ₂ -eq외)
사용중에너지소비	0.252KWh	0.160KWh	212.55	126.52	86.03kg CO ₂ -eq감축
유해물질	2종	0종	-	-	RoHS/REACH법규 대응
재활용률	91%	96%	11.7	9	2.7kg CO ₂ -eq감축
부품수	37개	29개	-	-	경쟁사 제품대비 부품수 22% 절감
부품 체결방식	6종(분해공구)	4종(분해공구)	-	-	경쟁사 제품대비 부품수 27% 절감
포장재	PE 사용	친환경포장재사용			환경에 보다 효율적 대응
합계			224.25	135.52	88.73

Table 6은 설계 대안 V1을 통한 개선 전과 개선 후의 개선 효과를 개선대상 환경성 파라미터별로 나타내었다. 약 89 Kg CO₂eq 감축과 경쟁사 대비 22%의 부품수 절감 및 27%의 공구수 절감을 이루었다. 유해물질에 대한 RoHS와 REACH 법규 대응 및 환경에 보다 효율적인 대응이 가능하게 되었다.

Table 6에서 점수가 높았던 설계 대안 V1으로 LED기판에 방열판 부착을 통해서 LED스탠드의 에너지 및 환경성이 개선되는지를 확인을 위해 실험을 수행하였다.

LED 스탠드의 상판을 제거한 상태에서 방열판을 LED 기판에 부착하고 실험을 진행하였다.

앞서 선정된 설계 대안으로 채택된 사항으로 LED기판에 방열판 부착을 통해서 LED스탠드의 에너지 및 환경성이 개선되는 지를 확인을 위해 실험을 수행하였다.

상판을 제거한 다음 방열판을 부착한 상태에서 실험을 하였다. 기존의 LED스탠드를 기준으로 조도 1~3단계, 각 단계에서 최초 상태에서 30분 후까지의 온도(°C)를 측정하고 전력/Lux를 계산하여 비교하고 분석하였다.

Fig. 3와 Fig. 4는 온도와 시간의 그래프로 기존제품 대비 방열판을 부착한 결과이다. 상판을 제거함으로써 기존보다 기판에서 발열되는 온도를 줄이는 결과와 동시에 방열판 부착 후 온도의 민감성을 상당히 줄였다.

실험을 통해 전력, 조도, 온도를 측정하였고 계산으로부터 Lux당 전력을 수치화하여 나타내었다. Fig. 4에서처럼 기존 LED스탠드보다 온도변화가 줄어들고 그에 따라 밝기(Lux)는 증가하고 전력/Lux의 결과도 역시 예상대로 방열판 부착에 의한 효과가 있다.

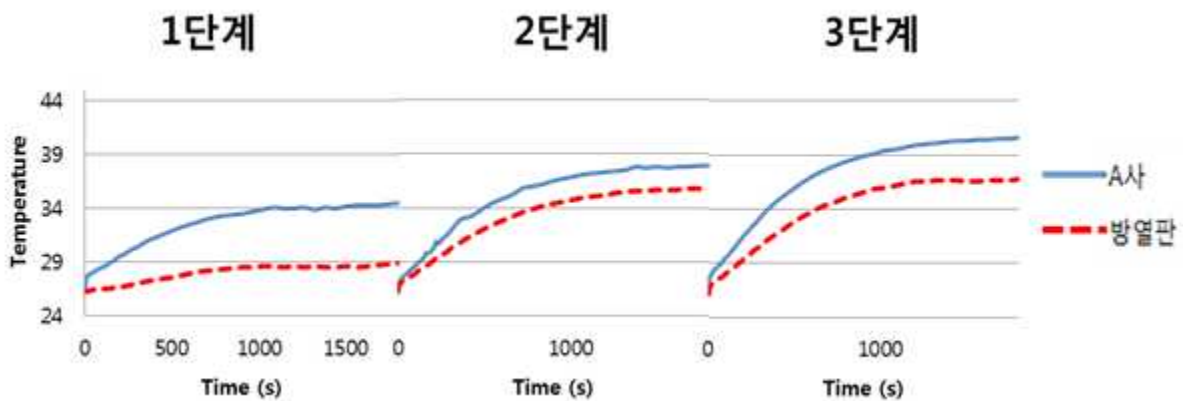


Fig. 3. Time dependent temperature.

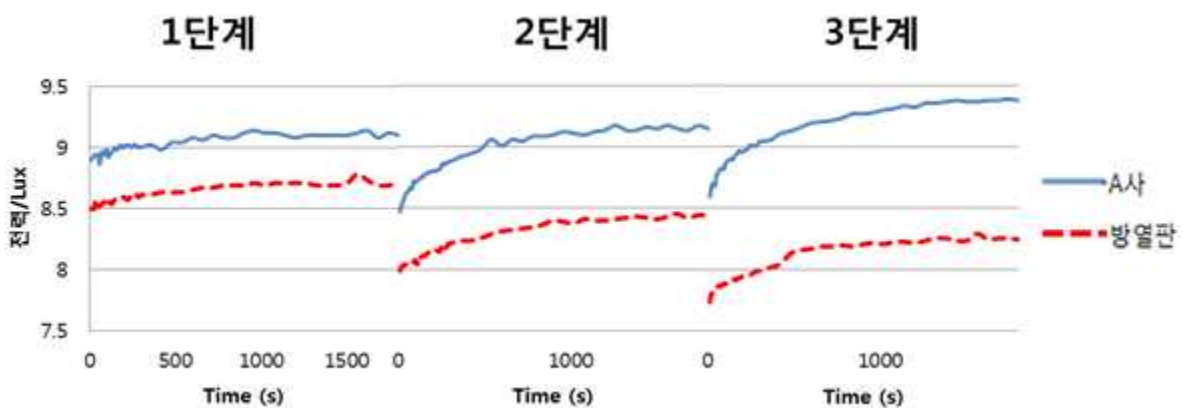


Fig. 4. Time dependent electric power and brightness correlation.

5. 결 론

본 연구에서는 LED 스탠드의 불필요한 발열을 없애기 위해 상판제거와 방열판 부착을 이용한 LED 스탠드를 개발하였다. 기존 LED제품보다 상당한 온도를 줄임으로 조도향상 시킬 뿐만이 아니라 시간에 따라 전력/Lux을 1단계 5.5%, 2단계 8.7%, 3단계 12.8% 줄이는 효과를 볼 수 있었다.

기존의 스탠드가 이미 최적으로 설계되어 있을지라도 이를 개선하고자 여러 방안으로 연구하였고 방열판 부착으로 인해 적합하지 않은 조도와 에너지 낭비를 야기하는 문제를 해결하였다. 이러한 설계대안을 통해서 탄소배출량을 40% 가량 감소시킬 수 있었다.

이러한 개선된 LED스탠드는 향후 다른 LED뿐만 아니라 일반 조명에서 적용할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 상판제거와 방열판만을 설계하여 기존제품과 고려하였지만 앞으로의 연구에서는 태양열을 이용하여 더 낮은 전력을 소모하는 제품개발도 고려할 만하다.

6. 사사

이 논문은 환경부의 에코디자인 특성화 대학원사업으로 지원 되었습니다.

7. 참고문헌.

- 1) Intellectual Property right/(2009) pp.107-110 .
- 2) ISO/TR 14062:2002, Environmental management integrating environmental aspects into product design and development.
- 3) IEC 62430, Environmentally conscious design for electrical and electronic products.
- 4) ISO 14040:2006, Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework.
- 5) T.G.Bechwith외, 한철호 역, "계측공학 (Mechanical Measurements)", 피어슨에듀케이션코리아
- 6) 환경(탄소)성표지 (http://www.edp.or.kr/carbon/carbon_intro.asp).
- 7) Yoji Akao, "QFD: Past Present, and Future, International Symposium on QFD", (1997).
- 8) G.E. Dieter, "L. C. Schmidt, Engineering design 4thedition", (2010), The McGraw-Hill
- 9) S. Pugh, "Total Design, Addison-Wesley, Reading", (1990).
- 10) Zhang, Wang, H.P., and Zhang, C., "Product Concept Evaluation Using GQFD-II anf AHP", International Journal of Environmentally Conscious Design & Manufacturing, Vol. 7, No3, pp. 1-15(1998).
- 11) 송준일, 친환경제품설계시 환경성 측면 통합 방법: 제품 전과정 및 이해관계자의 요구사항", 아주대학교, 박사학위 논문, (2007).