

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2009.33.12.947

팬과 히트 싱크를 이용한 LED 전조등의 냉각성능 해석

고만석[†] · 이주한* · 오상준* · 조현석* · 서태범**

(2009년 6월 15일 접수, 2009년 11월 17일 수정, 2009년 11월 17일 심사완료)

Cooling Performance of LED Head Lamp with Heat Sink and Cooling Fan

Manseok Ko, Juhan Lee, Sangjune Oh, Hyenseok Cho and Teabeom Seo

Key Words: Head Lamp(헤드램프), Free Convection(자연대류), Forced Convection(강제대류), Cooling (냉각), LED(발광소자)

Abstract

LED has the merits of high reliability, semi-permanent life, rapid-response and its small size for use as light source of head lamp. But the dependence of its performance and life on temperature affect on its practical use. Which dependence makes problem when the LED is heated up to a higher temperature level by self-generation of heat, due to "highly integration" to get enough quantity of light. To solve this problem, effective cooling system is needed that consider conduction, convection and radiation. This study points out the limits of natural convection cooling system and propose of forced convection with heat sink. Also, it describes a correlation between heat sink area and fluid velocity using numerical analysis to optimize the cooling system.

1. 서론

최근 자동차의 에너지 효율 향상과, 감성디자인에 대한 소비자의 선호를 충족시키기 위한 노력이 증가하였다. 이러한 노력의 결과로 차량 계기판을 비롯하여 실내등, 오디오 시스템 등의 자동차의 조명시스템에 발광소자(이하 LED)를 사용하게 되었다.

LED는 기존의 전구형 램프에 비해 작은 크기로 제작이 가능하여 불필요한 공간 낭비 없이 설치 가능하며, 전구형 램프를 사용했을 경우 장착이 불가능 했던 공간에도 외관상의 큰 변화 없이 설치가 가능하여 제품 설계비용을 줄일 수 있다. 또한 수명이 반영구적이며 뛰어난 내구성과 빠른 응답성을 갖는다는 장점이 있다.

LED를 자동차의 헤드램프 광원으로 사용하기 위해서는 기존의 할로겐램프와 유사한 성능을 내는 고효율 LED의 사용이 불가피하다. 현재 기술로 제작할 수 있는 LED는 입력전력의 약 15%를 빛으로 변환시키고 나머지 85%는 열로 변환되는데,⁽¹⁾ 이렇게 발생된 열은 LED의 작동 온도를 상승하게 한다. 기존의 할로겐램프와는 달리 LED는 Fig. 1, 2와 같이 작동 온도의 상승에 따라 수

[†] 책임저자, 회원, 인하대학교 기계공학과
E-mail : ahdslidi@nate.com
TEL : (032)874-7327 FAX : (02)873-7327

* Graduate school of Mechanical Engineering,
Inha University, Incheon, Korea

** Department of Mechanical Engineering,
Inha University, Incheon, Korea

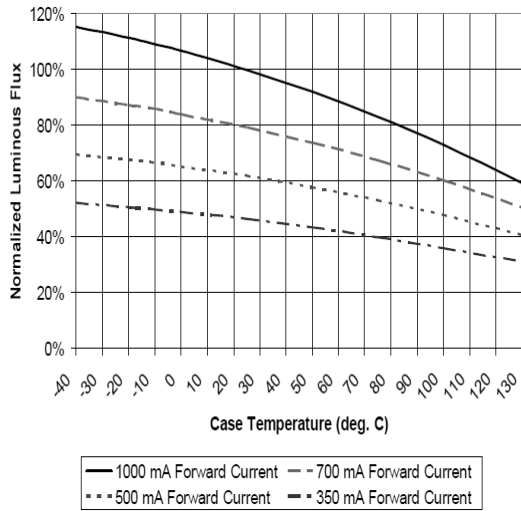


Fig. 1 Change in Luminous Flux vs. Temperature

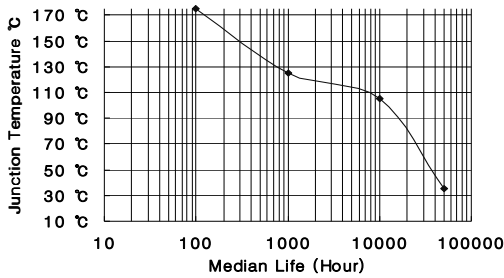


Fig. 2 Change in Median Life vs. Temperature

명감소, 성능저하 등의 문제를 발생시키는 주요 원인으로 작용하게 된다.⁽²⁾ 따라서 고출력LED를 전조등에 사용하기 위해서는 효과적인 방열시스템을 설계하는 것이 필수적이다.

Yu 등은 실험을 통해 LED의 수명에 영향을 주는 온도, 단파 복사량, 인광체의 위치 등 3가지 요소 중 열에 의한 영향이 가장 크다는 것을 밝혀냈다.⁽³⁾ Kang 등은 2차적 열원에 대한 차량용 LED의 열적 특성을 분석하기 위해 엔진룸 모사 챔버를 제작하고 LED의 방열판 슬러그와 동일한 크기의 히터를 이용한 실험을 진행하였다. 그는 히트 싱크의 방열 면적과 흰(fin)의 길이 변화에 대한 상관관계를 도출하였고, 히트 싱크에 의한 LED 방열 시스템이 2차 열원의 영향을 크게 받는다는 결론을 내렸다.⁽⁴⁾

앞선 연구를 통해 LED의 수명과 성능에 가장 크게 영향을 주는 요인을 밝히고, 히트싱크의 형상 변화를 통한 LED의 전도 열 전달 특성 및 2차 열원에 의한 열전달 해석이 진행되었으나 고

온으로 인한 성능 저하 방지를 해결하기 위한 냉각시스템의 최적화 방안은 제시하지는 못하였다.

본 연구에서는 헤드램프의 광원으로 사용되는 고출력 LED램프의 성능과 수명의 저하를 방지하기 위한 냉각시스템(자연대류형/능동형)의 최적 설계를 위해 수치해석을 사용하여, 방열판의 면적과 냉각팬에 의한 유속 변화에 따른 냉각 성능과의 상관관계를 도출하고, LED Head Lamp의 냉각성능 최적화 방안에 대하여 논의하고자 한다.

2. 냉각방식 검토

높은 열 발생 밀도를 갖는 고출력 LED의, 고온 작동환경으로 인한 기능 저하를 방지하기 위해서는 효과적인 방열 시스템이 구축되어야 한다. 하지만 헤드램프의 구조적 문제와 공간적 한계에 의해 방열공간과 열전달 통로가 제한되어 기존의 방열 기술을 적용하는 것은 용이하지 않다.

방열시스템은 냉각 방식에 따라, 자연대류를 이용한 자연대류형 히트싱크(Passive Heat Sink)와 팬을 이용한 능동형 히트싱크(Active Heat Sink), 냉각액을 사용하여 열전달을 증가시킨 수냉식 냉각판(Liquid Cooled Cold Plates), 상변화에 의한 내부적인 순환을 이용한 히트파이프(Heat pipe) 등으로 구분할 수 있다.

수냉식 냉각판과 히트파이프의 경우 자연대류형 히트싱크와 능동형 히트싱크에 비하여 방열 능력이 뛰어나지만 시스템을 구성하기 위한 비용이 많이 들고, 부가적인 장치를 부착하기 위한 공간을 확보해야 하는 단점이 있기 때문에, 상대적으로 간편하고 저렴하게 방열 시스템을 구성할 수 있는 자연대류식 히트 싱크와 능동형 히트 싱크의 방열 성능에 대한 고려가 우선시 되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 1차적으로 자연대류형 히트 싱크를 사용한 냉각시스템의 적용 가능성을 알아보기 위하여, 기준 모델에서 팬을 제거하고 히트 싱크의 방열 면적을 변화시켜 그에 따른 온도변화에 대하여 수치모사를 실시하였고, 2차적으로 능동형 히트 싱크의 방열성능과 유속변화에 따른 온도 변화에 대한 수치 모사를 실시하여 그에 따른 LED 접합부 온도(Junction Temperature)의



Fig. 3 Commercial Head Lamp

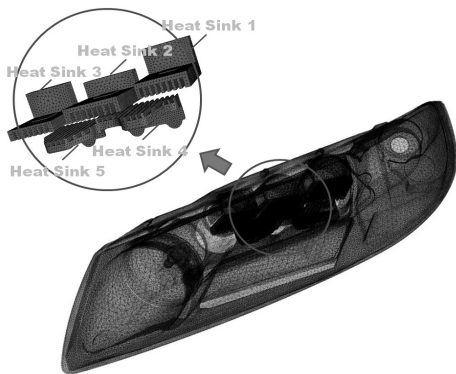


Fig. 4 Mesh generation and Region

변화를 살펴보았다.

3. 수치해석

본 수치 모델은 상용으로 사용되고 있는 헤드 램프를 기준으로 실제 형상의 90%이상을 해석 모델에 반영하였고, 상용코드인 STAR-CCM+ (Ver. 3.02)를 통해 수치해석을 실시하였다. 실제 실험을 통해 얻어진 데이터를 기반으로, 수치 해석 모델과 비교를 통해 수치 모델에 대한 검증을 실시하였다.

Fig. 3은 방열 성능 분석 대상인 상용 헤드 램프로, LED와 방열판으로 구성된 5개의 LED 모듈과 2개의 할로겐 광원 및 반사판 등으로 구성되어 있으며 하우징에 의해 반 밀폐되어 있다. 각 LED 모듈은 히트 싱크와 팬에 의한 헤드 램프 내부에서의 유동 흐름에 의해 냉각이 이루어진다.

LED 헤드 램프의 난류유동을 해석하기 위하여 K-Epsilon 모델이 사용되었으며, 자연대류에 의한 냉각에서 내부 유동의 주 구동원으로 작용하는 부력과 복사열전달에 대한 영향이 고려되었다. 강제 대류에 의한 냉각에서는 부력과 복사열전달, 팬에 의해 유입되는 유동의 영향이 고려되었다. 팬에 의해 유입되는 유체는 자동차 엔진 룸

Table 1 Analysis Condition

Passive Heat Sink				
면적	A=0.0958m ²	A=0.479m ²	A=1.0538m ²	
Active Heat Sink (A=0.0958m ²)				
유속	2.20m/s	3.30m/s	4.40m/s	8.80m/s

의 온도조건과 동일한 88℃의, 유입 면적에 대해 균일한 유속을 갖는 공기로 설정하였고, LED와 방열판의 접촉면에 대해 균일한 열 유속 (Heat flux)를 갖는 열원을 사용하여 LED에 의해 발생되는 열을 모사하였다.

LED소자 내부에 위치하는 접점은 특성상 모사가 어렵기 때문에 히트싱크와 접촉하는 면적의 평균온도와 제작사에서 제공하는 열 저항계수를 이용하여 각각의 접합점 온도를 구하였다.

Fig. 4는 수치해석을 위해 생성한 Mesh로, 상용 헤드 램프의 복잡한 형상에 대한 정확한 해석을 위해 125만개의 격자(Mesh)를 사용하였으며, 보다 정확한 벽면온도 기울기를 찾기 위해, 벽 근처에서는, Polyhedral Mesh에 Layer (Trimmed mesh)를 적용하였다.

방열성능의 비교를 위하여 유속과 방열면적을 변수로 설정하였고, Table 1과 같이 조건을 변화시켰다. 히트 싱크의 방열면적은 실제 헤드 램프의 방열면적과 같은 0.0958m²를 기준으로, 흰(fin)의 길이를 연장하는 방법으로 변화를 주어 수치 해석을 수행하였고, 강제대류의 해석은 방열면적이 고정(0.0958m²)된 상태에서 팬에 의한 유속 변화만을 경계조건으로 설정하여 수치해석을 수행하였다.

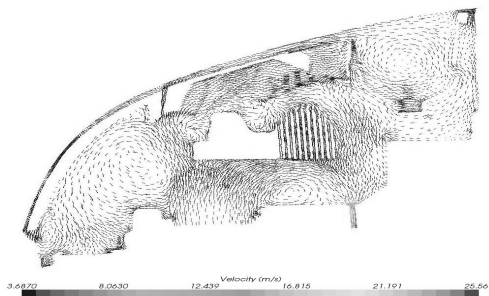
4. 결과 및 고찰

본 연구는 1차적으로 자연 대류형 히트 싱크의 방열 면적 변화에 따른 방열 성능해석을 통해 접합부(Junction)의 온도가 목표온도(130℃)에 도달하게 되는 방열면적을 찾고자 하였고, 2차적으로는 능동형 히트싱크에서의 유속 변화에 따른 방열 성능 해석을 통해 유속과 방열 면적의 상관 관계를 찾고자 하였다.

방열 면적과 유속의 변화에 따른 방열 성능의 변화를 알아보기에 앞서, 기존 형상에 대한 헤드 램프의 방열성능과, 헤드 램프 내부에서 일어나는



(a) Upper Heat Sink



(b) Lower Heat Sink

Fig. 5 Flow speed distribution $A=0.0958m^2$, $V=2.2m/s$

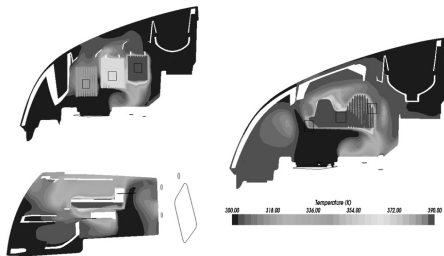


Fig. 6 Temperature Contour $A=0.0958m^2$, $V=2.2m/s$

유동을 알아보기 위한 수치해석을 수행하였다.

Fig. 5에 나타난, LED 헤드램프 내부에서의 유동흐름과 온도 구배를 살펴보면, 팬에 의해 생성된 유동 중 일부는 히트싱크와의 열 교환을 거치고, 헤드램프의 내부를 순환한 후 벤트홀을 통해 빠져나가고, 유동의 상당부분이 히트싱크를 거치지 않고 벤트홀을 통해 그대로 배출된다는 것을 알 수 있다. 그에 따른 영향으로 Fig. 8에 보는 것과 같이 1번 접합부의 온도가 가장 낮게 기록되며, 2~4번 접합부의 온도가 높게 유지되는 것을 알 수 있다.

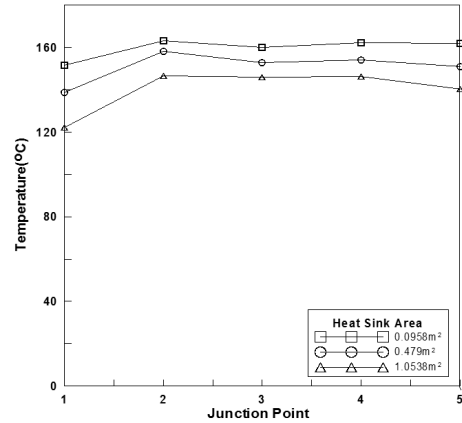


Fig. 7 Junction Temperature with Passive Heat Sink

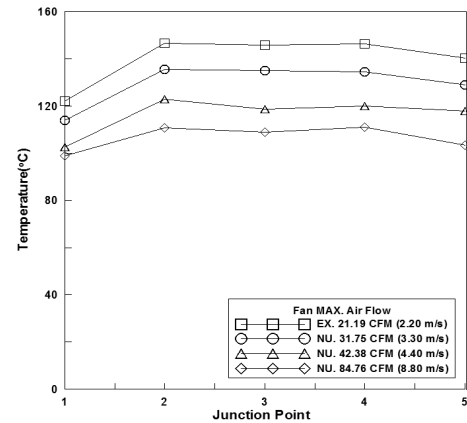


Fig. 8 Junction Temperature with Active Heat Sink

Fig. 6은 헤드램프 내부의 온도 분포를 보여주는데, 팬의 전면부에 위치하여, 강제 유동의 영향을 가장 크게 받는 히트싱크가 다른 부분에 위치하는 히트싱크에 비해 온도가 낮게 유지되는 것을 볼 수 있다.

이때 접합부의 온도는 약 140°C로 목표온도(130°C)보다 높게 유지되며, 이는 LED의 가용온도 한계(140°C)에 근접한다. 이러한 고온의 작동 조건은 LED의 수명과 성능에 악영향을 미치게 된다.

Fig. 5의 유속 분포와 Fig. 6의 온도분포의 비교를 통해, 두 분포의 유사성을 확인할 수 있으며, 히트싱크 및 유로설계의 변화를 통해 방열성능이 개선될 수 있음을 알 수 있다.

자연대류를 통한 냉각 시스템 적용 가능성과 방열 면적의 변화에 따른 히트싱크의 방열 성능 변화를 알아보기 위해, 팬에 의한 유동을 제거하

고, 방열판의 면적을 변화시킨 결과 Fig. 7과 같이 $A=1.0538\text{m}^2$ 일 경우의 1번 접점을 제외한 LED의 온도가 전 구간에서 130°C 이상의 온도를 보여, 실질적으로 구현할 수 있는 면적(0.1m^2) 이상으로 히트싱크를 구성하여도 방열성능이 부족함을 알 수 있다.

능동형 히트 싱크에 의한 방열성능 해석결과, Fig. 8과 같이, 어느 정도의 차이는 있지만 유속 변화에 따른 냉각성능 변화에 대한 전체적 경향성이 비슷하게 나온다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구는 자동차용 LED 헤드램프의 방열 시스템의 최적화를 위한 기초 연구로 LED램프에 냉각팬과 방열판을 추가 장착하여 방열판 면적과 유동속도변화에 대한 냉각성능과의 상관성을 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 기존 형상에 적용된 냉각 시스템의 경우, 접합부의 온도가 LED가용온도(140°C)에 근접하므로, 유로 및 냉각 시스템의 개선등을 통한 방열성능의 개선이 필요하다는 결론을 얻을 수 있었다.

(2) 자연대류에 의한 냉각 시스템의 경우, 냉각팬 없이 방열판만으로 헤드램프내부의 온도를 가용온도까지 낮추기 위해서는 1.0538m^2 이상의 방열판 면적이 필요한 것으로 나타났다. 하지만 헤드램프 내부의 부피는 한정되어 있기 때문에 현실적으로 불가능하다는 결론을 얻을 수 있었다.

(3) 앞서 수행한 연구결과 헤드램프 내부에서 LED의 가용온도를 유지하기 위해서 반드시 추가적인 냉각장치가 필요한 것이 입증되었다.

(4) Fan의 유속이 2.20 m/s (21.19 CFM) 일 때 LED 접합부의 온도가 $136\sim 138^\circ\text{C}$ 정도로 나타났으며 최대유속인 8.80 m/s (84.76 CFM)에서는 11°C 까지 온도가 내려갔다. 팬의 유속과 냉각효과

는 비례하는 것으로 나타났다. 하지만 유속을 높이기 위해서는 팬의 크기가 커져야 하며, 작동하기 위한 전력도 많이 필요하다. 또한 유속이 필요 이상으로 강하게 되면 엔진룸의 공기가 역류하는 현상이 발생할 수도 있기 때문에 팬에 의해 공급되는 유속증가에 의한 냉각 성능 향상에는 한계가 있다.

(5) 본 연구를 통해 방열판의 면적, 유속변화와 냉각성능과의 상관관계를 도출할 수 있었고, 실제 LED 헤드램프에서 일어나는 유동 현상을 확인할 수 있었다. 추가적인 실험과 수치해석의 반복 수행을 통한 수치 모델의 신뢰성 강화가 요구되며, 이를 통하여 Fan위치의 변화와 유로 개선을 통한 히트 싱크의 방열 성능 개선을 위한 연구가 요구된다. 이를 통하여 LED 헤드램프 냉각 시스템의 최적설계가 가능 할 것으로 예상된다.

참고문헌

- (1) Lee, D. G., Roh, D. S., Choi, J. B., Dong, S. G., and Ko, C. B., 2006, "Micro Heat Dissipation Technologys for High Power LED (III)," *KIER* p. 172.
- (2) Aimal, A, Mitch, S. and William. I., 2007, "Towards Development of Thermal Standards for the Design of LED Lamps," SAE Technical Paper Series NO. 2007-01-1037.
- (3) Yu, H., Freyssinier, J. P., Deng, L., Narendran, N. and Gu, Y., 2004, "Solid State Light: Failure Analysis of White LED's," *J. Crystal Growth*, 268, pp. 449~459.
- (4) Kang, H. W., Park, K. S. and Kang, B. D., 2007, "The Effects of the Second heat Source on Heat Sink of LED Head Lamp," *KSAE07-S0179* p. 1152.