

Thermal Characteristics of a Heat Sink with Helical Fin Structure for an LED Lighting Fixture

Young-Hoon Kim, Hae-Dong Yim, and Beom-Hoan O[†]

Department of Information & Telecommunication Engineering, University of INHA, Incheon 402-751, Korea

(Received August 4, 2014; Revised manuscript November 3, 2014; Accepted November 3, 2014)

In this paper, we design a helical fin structure for the heat sink for a high-power LED lighting module, and analyze its thermal properties. By means of the helical fin structure, we can obtain about 14% larger surface area for the limited volume and it can decrease the LED chip temperature by about 12%. Because this helical fin heat sink has 15% less total volume than a conventional one, we can also expect to reduce the production cost due to these structural properties.

Keywords: LED, Thermal characteristics, Heat sink, Helical Fin structure

OCIS codes: (000.6850) Thermodynamics; (230.0230) Optical devices; (230.3670) Light-emitting diodes

헬리컬 핀 구조를 가진 LED 조명용 히트싱크의 열 특성

김영훈 · 임해동 · 오범환[†]

인하대학교 정보통신공학과

Ⓣ 402-751 인천시 남구 인하로 100

(2014년 8월 4일 받음, 2014년 11월 3일 수정본 받음, 2014년 11월 3일 게재 확정)

본 논문에서는 LED 모듈의 방열성능을 개선하기 위하여 히트싱크의 새로운 핀 구조를 설계하고 열 특성을 분석하였다. 대부분의 히트싱크는 판상형이나 침상형의 핀으로 구성되는 것이 일반적이거나, 스프링 모양의 헬리컬 핀 구조를 설계변수와 함께 도입하여 제한된 부피 대비 넓은 표면적을 갖는 히트싱크를 설계하였다. 약 14% 넓어진 표면적을 통해 방열 효율을 개선하였고, 그에 따라 LED 칩의 온도를 약 12% 정도 저감하는 효과를 가져 올 수 있었다. 또한, 기존의 히트싱크 보다 넓은 표면적을 가지는데 비해 형성 부피는 약 15% 감소하게 되어 재료비 절감은 물론 공정상의 이점에 따른 공정 생산비의 절감을 기대할 수 있는 새로운 고성능 LED 조명용 히트싱크를 설계하였다.

Keywords: 발광다이오드, 열특성, 방열판, 헬리컬 핀

OCIS codes: (000.6850) Thermodynamics; (230.0230) Optical devices; (230.3670) Light-emitting diodes

I. 서 론

LED 광원은 반도체 소자으로써, 전류 인가 시에 전자와 정공의 재결합을 통해 방출되는 에너지를 높은 효율로 직접 빛으로 변환한다. 이때 매우 좁은 부피영역에 국한되어 있는 활성층에서 비 발광 손실 에너지인 열 또한 방출하는데, 소형의 LED 소자에서 발생한 지속적인 고열은 소자의 수명을 단축시키며 열화현상으로 인한 조명 품질의 악영향과 광원의 광속효율도 감소시키게 된다.^[1-4] 따라서 LED 광원의 발열문제를 해결하기 위한 방열방식은 경제성이 높으면서도 활성층에서 방출되는 빛을 방해하지 않아야 한다.

통상적인 방열 방식은 LED 칩 배면에 히트싱크를 부착하는 것으로써, 히트싱크의 구조는 판 또는 원통 등 목적에 맞는 구조로 형성된 몸체에 침상(針狀; needle shape) 또는 얇은 판상(板狀; plate) 등의 형태로 제작한 다수의 방열 핀을 압출 또는 접합으로 세워 형성한다. 하지만 이러한 기존 히트싱크 구조는 타 방열제품에 사용되던 형상을 그대로 본떠 만든 것이지, LED 광원의 특성에 최적화된 구조는 아니다. 따라서 LED 조명 특성에 맞는 구조적 개선이 필요하며, 경제성과 생산성이 높은 설계가 필요하다.

본 논문에서는 LED 조명용 히트싱크의 방열 효율을 최대한으로 높이면서 경제성과 생산성 또한 높은 새로운 히트싱

[†]E-mail: obh@inha.ac.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

크를 설계하였다. CFD기법을 사용한 전산모사 프로그램을 통해 히트싱크의 열 특성을 분석하였으며, 헬리컬 핀의 각 부분적 요소를 설계 변수로 설정하여 설계 변수에 따른 최적화를 도출하였다.

II. 헬리컬 핀 구조 분석 및 논의

LED 모듈의 방열은 전도, 복사, 대류의 세 가지 방식이 모두 중요하다. LED 칩에서 발생한 열을 히트싱크 표면까지 전달하는 과정은 전도이다. 전도에 따른 방열문제는 열전도율이 높은 물질을 사용하는 재료적방법과 효율적인 열전달 경로를 구성하는 설계적방법 등을 통한 최적화로 해결한다.

전도에 의해 히트싱크의 표면에 도달한 열은 복사와 대류의 방법을 통해 외부로 방출된다. 복사는 히트싱크의 표면에서 전자기파의 형태로 열이 방출되는 것을 말하며 아래의 식(1)에 기술된 것과 같이 방사율(ϵ)과 표면적(A)에 비례한다.

$$q = \epsilon \sigma AT^4 \quad (1)$$

방사율은 표면의 거칠기, 결정분포와 재질 등에 영향을 받으며, 통상적인 방사율의 증가방법은 샌드블라스트, 표면 코팅 또는 애노다이징 기법 등이 있다. 하지만 방사율을 증가시키더라도 복사가 일어나는 실제 표면적이 작다면, 복사에 의한 방열 효과는 미약하기 때문에 복사가 일어나는 표면을 증가시키는 것이 중요하다.

대류는 언급한 위 두 가지 방열 방식 보다 방열에 미치는 영향력이 강하다. 물체 표면온도와 외부 온도의 차이에 의해 일어나는 대류는, Newton의 냉각법칙을 이용하여 표현하면 식(2)과 같다.^[5]

$$q = hA(T_w - T_\infty) = hA(\delta T) \quad (2)$$

위 식에서 대류 열 전달률(q)은 열 전달계수(h), 온도차(δT) 그리고 표면적(A)에 비례하는 것을 알 수 있다. 즉, 온도차를 제외한 변수 중 표면적을 최대화 하는 형상이 대류 방열 효과의 증가와 히트싱크의 성능을 향상 시키는 주요한 설계이다.

일반적으로 히트싱크의 표면적을 증가시키는 방법은 방열 핀의 개수를 증가시키거나 핀의 크기를 증가시키는 방법을 사용한다. 하지만 핀의 수를 증가시키는 방법은 제한된 몸통에 다수의 방열핀이 삽입되어 핀 간격이 좁아지게 되고, 이러한 좁은 핀 간격은 열 경계층의 중첩을 발생시켜 온도차(δT)의 감소에 따른 방열효과의 하락을 야기한다. 또한 핀의 크기만을 증가시키는 방법은 생산비가 증가하고, LED모듈의 규격제한 문제에 부딪힌다.

본 논문에서는 이러한 기존의 구조적 한계를 벗어나기 위해 핀의 구조를 판상 또는 침상이 아닌 스프링 모양의 헬리컬 구조로 새롭게 설계하였다. 헬리컬 구조의 핀은 기존 핀

에 비해 형상 특성상 넓은 유효 방열 표면적을 가지며, 식(1)과 (2)에 따라 복사 및 대류에 의한 방열 효율이 증가한다. 이러한 히트싱크의 향상된 방열 성능을 확인하고자 전산모사를 수행하였고 구조의 공정이점을 분석하였다.

헬리컬 핀 히트싱크의 방열 특성을 파악하기 위해 3D CAD 설계 소프트웨어인 Solidworks를 이용하여 히트싱크의 모델링을 수행하였다. 시판하는 MR16용 히트싱크의 원통형 몸체에 핀(Fin)의 구조를 헬리컬 핀 구조로 변경하여 Fig. 1(a)와 같이 설계 하였다. 또한 방열 특성 및 공정이점의 비교를 위해 기존 MR16용 히트싱크의 모습을 본떠 Fig. 1(b)와 같이 모델링 하였다.

헬리컬 핀 히트싱크의 설계 시 최적화를 위해, Fig. 1(c)와 같이 설계변수를 지정하여 모델링을 수행 하였으며, 설계변수로는 핀의 간격($2\pi r/N$), 핀의 굵기(R), 헬리컬의 반지름(D)과 상하 피치(P)를 지정하였다.

두 히트싱크의 특성차를 알아보기 위해 헬리컬 핀 구조의 설계 변수 값은 임의 값인 $N=10$, $D=0.5\text{mm}$, $R=5\text{mm}$, $P=2\text{mm}$ 로 설정하여 모델링 하였다. 기존 MR16 히트싱크 모델과 헬리컬 핀 구조 히트싱크 모델의 형상 특성을 비교한 결과, 기존의 히트싱크 보다 헬리컬 핀 히트싱크의 부피는 약 15% 작고, 표면적은 약 14% 넓게 나타났다. 이는 히트싱크의 공정 시, 형성 재료비의 절감으로 이어질 수 있으며 제품의 경량화가 가능한 것을 나타낸다.

모델링한 구조를 이용하여 히트싱크의 열전달 특성을 파악하고자 전산 유체 역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 소프트웨어 Ansys ICEPAK을 이용하여 열 해석을 수행하였다. 전산모사 환경은 정상상태 자연대류 조건이며, 주변온도는 293.15K(20°C)으로 설정 하였다.

전산모사 소자의 적층구조는 실제 LED 패키지의 배치구조를 본떠, Fig. 2와 같이 상단에서부터 LED Chip, PCB, Thermal tape 그리고 Heat sink 순서로 배치하였다. LED소자는 1W급 5개를 상단에서 보았을 때 열십자 형태가 되도록 배치하였으며, 각 LED 소자에서 전체 에너지의 77%가 열로 발생한다고 가정하고 총 3.85W의 열이 LED 소자에서 발생하여

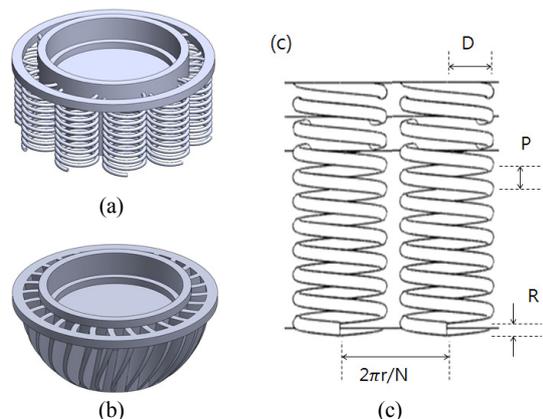


FIG. 1. (a) Helical Fin Heat sink model, (b) Reference model of MR16 Heat sink, (c) Parameters for Helical Fin structure.

Heat sink에서 냉각되도록 설계하였다. 히트싱크의 재질은 전도에 의한 방열 효과를 극대화하기 위해 열전도도가 가장 우수한 금속이 적합하나 무게와 경제성, 강도 및 가공성 등을 고려하여 알루미늄으로 설정하여 열 특성을 분석하였다. 전산모사에 사용된 각 소자의 특성은 Table 1과 같으며, 히트싱크의 재질로 비교된 금속들의 특성은 Table 2와 같다.^[6] 전산모사 열 분포 해석 결과는 Fig. 3을 통해 나타내었다. 히트싱크 중앙의 수직 절단면을 기준으로 열 분포를 비교해 보았을 때, Fig. 3(b)의 헬리컬 핀 히트싱크가 전체적으로 낮은 열 분포를 이루고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 전산모사 구조에서 LED소자의 온도는 기존 MR16용 히트싱크에 비해

헬리컬 핀 히트싱크가 약 6°C 정도 더 낮음을 확인할 수 있다. 이때 온도 개선효율은 $(T_{ref} - T_{helical}) / (T_{ref} - T_{ambi}) \times 100$ 으로 정의되며, $T_{ref} = 70, T_{ambi} = 20, T_{helical} = 64$ 를 감안했을 시, $\frac{6}{50} \times 100 = 12\%$ 가 된다. 이는 기존 히트싱크에 비해 헬리컬 핀 히트싱크의 표면적이 더 넓어 대류에 의한 방열효율이 상승하였고 그에 따라 온도가 낮아짐을 입증해준다. 외부와 칩의 온도차가 60°C일 때 선형적 모양으로 광속이 약 20% 감소하게 되므로, 히트싱크를 통한 6°C의 온도 감소는 방출되는 광속을 약 2% 이상 증가시켜 줄 것으로 예상된다.^[3,4]

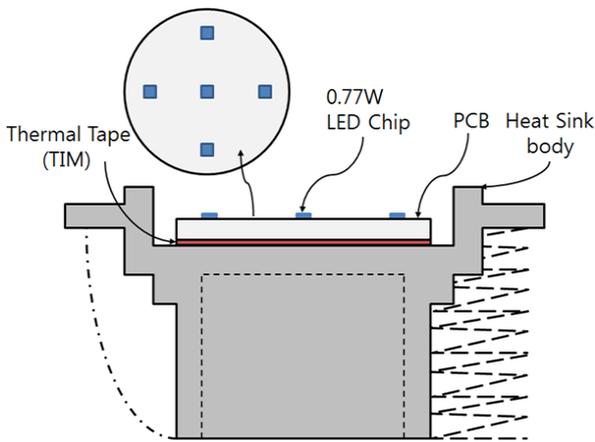


FIG. 2. Schematic diagram for element's stack structure.

TABLE 1. Properties of element part

Element Part	Thickness (mm)	Thermal conductivity (W/mK)
LED Chip	0.15	130.0
PCB	1.2	154.0
Thermal Tape	0.5	0.5
Heat sink	25.1	105.0

TABLE 2. Thermal properties and density of various materials

Material	Thermal Conductivity (W/mK)	CTE ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	Density (g/cm^3)
Aluminum	247	23	2.7
Gold	315	14	19.32
Copper	398	17	8.9
Lead	30	39	11
Molybdenum	142	4.9	10.22
Tungsten	155	4.5	19.3
Invar	10	1.6	8.05
Kovar	17	5.1	8.36
Aluminum nitride	320	4.5	3.3

Figure 4는 헬리컬 히트싱크의 각 설계변수에 따른 LED소자의 온도와 표면적의 변화를 나타내었다. (a)와 (b)를 살펴보면, 핀의 간격($2\pi r/N$)과 헬리컬의 반지름(D)은 변수 값 변화에 따른 표면적이 증가할수록 단순히 방열 효과가 높아지는 일반적인 경향성을 보인다. 하지만 (c)와 (d)인 핀의 굵기(R)와 핀 간격(P)에서는 표면적이 증가할수록 온도가 감소하다가 다시 증가하는 최적화 특성을 나타낸다. 이는 두께나 피치의 증가에 의해 핀 간격이 좁아지게 되고, 그에 따라 열

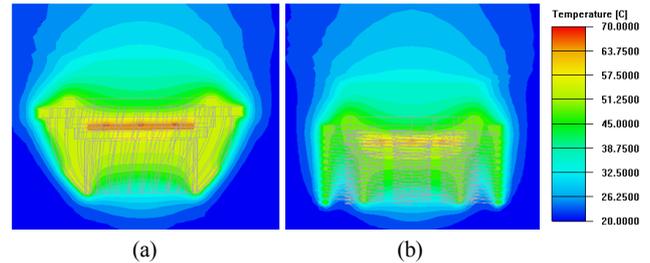


FIG. 3. Temperature distribution of heat sink (a) Reference heat sink (b) Helical heat sink.

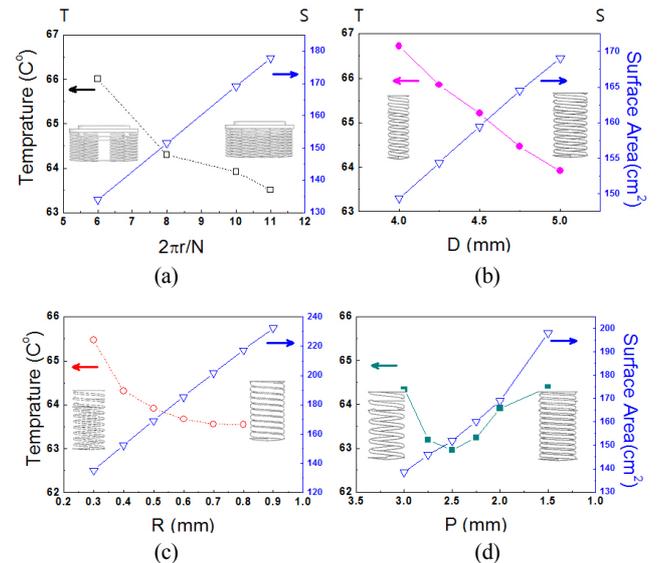


FIG. 4. Functions of parameter value properties (a) $2\pi r/N$, (b) D, (c) R, (d) P.

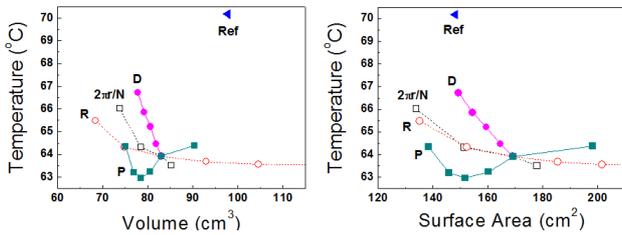


FIG. 5. Temperature of LED chip as a function of (a) Surface Area (b) Volume.

경계면의 증착이 발생하여 온도차에 의한 대류현상의 감소가 일어남을 나타낸다.

Figure 5는 설계 변수의 방열 효과 기여특성을 파악하기 위한 부피 또는 표면적과 온도관계 그래프이다. 각 설계 변수에 따른 온도 변화를 살펴보면, 헬리컬 핀의 반지름(D)은 변수 값의 변화에 따른 온도변화의 기울기가 가장 급격하게 나타나고 온도 상승에 따른 부피 또는 표면적의 변화가 가장 작다. 따라서 핀 반지름(D)의 변화는 방열 효과 및 공정상 가장 큰 이득 효과를 낼 수 있다. 반면, 핀의 굵기(R)는 부피의 증가 폭이 크고 온도의 변화 폭이 작기 때문에, 히트싱크의 성능 향상에 크게 기여하지 못하며 형성 재료비의 비효율적 증가라는 단점이 따른다. 따라서 헬리컬 히트싱크 핀의 설계 시 핀 반지름(D) 변수를 우선시 하여 최적화 설계를 진행하면 최적화된 방열 효과를 가진 히트싱크를 설계 할 수 있다.

III. 결 론

본 논문에서는 히트싱크의 방열 성능을 개선하기 위하여 전도, 대류, 복사에 대한 핵심 요소를 분석하였고, 그 중 대류 방열효과의 상승을 위해 표면적을 넓히는 히트싱크를 설계 하였다. 히트싱크의 표면적을 넓히기 위해 핀의 형상구조를 침상 또는 판상형이 아닌 헬리컬 구조로 설계하였고, 핀 설계 시 여러 가지 설계변수를 부여하여 원하는 조건에 맞는 핀의 최적화된 구조를 도출 할 수 있게 하였다.

전산모사 결과, 기존 히트싱크에 비해 부피는 약 15% 감소한 반면 표면적은 약 14%가 증가하는 효과를 나타내었고,

표면적 증가에 따른 방열 효과가 좋아짐으로써 표면온도는 약 12% 정도 개선되었다. 이를 통해 헬리컬 핀 히트싱크의 구조가 기존의 히트싱크 구조보다 방열 성능 면에서 우수함을 입증 할 수 있었으며, 부피의 감소에 따른 형성 재료비의 절감과 경량화라는 공정이점을 확인하였다. 전산모사 시 모델링의 편리함을 위해 원통형 헬리컬 구조를 형성하고 있지만, 실제 설계에선 핀의 하단 크기를 감소시키거나 하단부의 반지름을 줄여, 방열 성능은 유지 하면서도 경제성과 기능성을 더욱 개선시킬 수도 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

“본 연구는 대학 IT연구센터 육성지원 사업(지식경제부 및 정보통신산업진흥원, NIPA-2013-H0301-13-1010)과 중점연구소 지원사업(2010 한국연구재단, 2010-0020163)의 지원을 받아 수행되었습니다.”

References

1. Y. J. Kim, S. Kim, and G. Cho, “A study on heat radiation and luminous flux in led lamp,” in *Proc. The Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Autumn Meeting* (Nov. 2011), pp. 109-112.
2. S.-Y. Yang and C.-W. Yi, “A study on reliability analysis for reliability testing & field degradation data of LED lighting,” *Journal of KIIEE* **25**, 54-59 (2011).
3. C. Biber, “LED light emission as a function of thermal conditions,” *Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, Semi-Therm 2008, Twenty-fourth Annual IEEE*, 180-184 (2008)
4. S. Chhajed, Y. Xi, Yh. Gessmann, J.-Q. Xi, J. M. Shah, J. K. Kim, and E. F. Schubert, “Junction temperature in light-emitting diodes assessed by different methods,” *Proc. SPIE* **5739**, Manufacturing, and Applications IX, 16 (2005).
5. ARPACI, KAO, SELAMET, *Introduction to Heat Transfer* (Prentice Hall, 2000), p. 91.
6. D. D. L. Chung, “Materials for thermal conduction,” *Applied Thermal Engineering* **21**, 1593-1605 (2001).