

히트파이프를 적용한 LED조명용 핀확장형 냉각시스템 개발

정태성¹ · 강환국[#]

Development of Fin Expansion Type Cooling System using Heat Pipes for LED Lightings

T. S. Jung, H. K. Kang

(Received November 29, 2011 / Revised January 25, 2012 / Accepted January 26, 2012)

Abstract

With the advantages of power savings, increased life expectancy and fast response time over traditional incandescent bulb, LEDs are increasingly used for many applications including automotive, aviation, display, and special lighting applications. Since the high heat generation of LED chips can reduce service life, degrade luminous efficiency, and cause variation of color temperature, many studies have been carried out on the optimization of LED packaging and heat sinks. In this study, a fin expansion type cooling device using heat pipe, instead of a solid aluminum heat sink, was designed for LED security lightings based on thermal resistance analysis. Numerical analysis and experimental validation were carried out to evaluate its cooling performance.

Key Words : LED, Heat Pipe, Heat Sink, Cooling Performance, Heat Transfer, Free Convection

1. 서 론

LED (Light Emitting Diode)는 광효율이 높고 수명이 길며 환경유해물질을 사용하지 않기 때문에 차세대 친환경 광원으로서 기존 광원들을 대체할 수 있을 것으로 기대된다[1]. LED 조명은 공급된 전력 중 80% 이상이 열에너지로 전환되며, 이에 따른 온도증가가 광출력 저하 및 파장이동의 원인이 되고, 수명을 급격하게 감소시키는 것으로 알려져 있다[2~3].

냉각 장치를 설계하고자 하는 경우 방열량과 최대 허용온도 등에 대한 목표를 결정한 후 환경과 방법에 따른 열전달 계수의 예측과 구조 등의 설계가 수행되어야 한다. 특히, 보안등 및 가로등과 같이 수십에서 수백 와트의 전력이 가해지는 고출력 LED 조명용 냉각 장치는 대부분 자연 대

류 상황에서 설치되므로 광효율과 수명 확보를 위해 더욱 정교한 냉각 설계가 요구되고 있다[5].

본 연구에서는 LED 보안등의 사양에 적합한 냉각장치를 개발하기 위하여 LED의 발열특성에 의한 실험결과와 LED칩의 내부 저항에 관한 사양, LED와 히트싱크 베이스와의 열저항 실험자료 등을 기초로 직관형 히트파이프를 이용하여 열저항 0.46K/W의 성능을 가지는 90W급 LED 보안등용 고효율 냉각기를 개발하였다.

2. 냉각장치의 사양

히트파이프를 이용한 냉각기구 설계를 위해서는 히트파이프 및 핀의 대류 열전달에 이르는 요소 열저항 해석이 필요하며 특히 냉각장치의 구성 요소인 베이스의 열전도, 히트파이프의 열저항,

1. 인하공업전문대학 기계설계과
교신저자: (주)루티마,
E-mail: hkkang67@hanmail.net

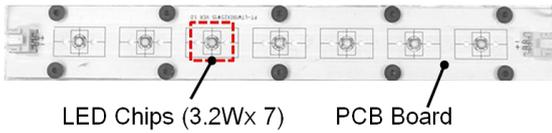


Fig. 1 Photograph of PCB with LED chips

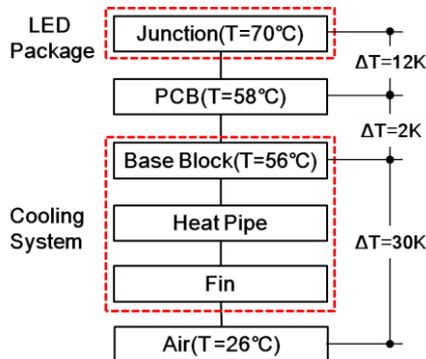


Fig. 2 Designed temperature difference for cooling system

Table 1 Design specification of cooling device for LED security light

Input energy for LED light	90W
Input electric power for LEDs	81W
Heat generation at LEDs	65W
Temperature difference (PCB-Heat sink)	2K
Inner temperature difference of LED chip	12K
Outdoor temperature	25.8℃
Thermal resistance of cooling system	30K/65W
Expected junction temperature	70℃

핀과 히트파이프의 접촉저항, 핀의 자연대류 열전달 등 매우 복잡한 열전달 메카니즘에 대한 엄밀한 해석과 설계가 요구된다. 한편, 이러한 관련 요소 저항에 대해서는 국내에서도 90년대부터 철도차량용 냉각기의 개발 및 CPU 쿨러의 개발과정에서 많은 관련 연구가 수행되어 공개되고 있으며, 본 논문에서는 이러한 관련 연구를 기초로 요소 열저항 해석을 수행하여 냉각기의 대체적인 사양을 결정하였다.

본 연구에서의 90W급 보안등은 Fig. 1과 같이 3.2W급 LED소자 7개를 직렬 연결하고, 600mA의 전원을 공급하는 PCB를 4개 병렬 연결하여 구성하였으며, LED소자는 미국 Cree사의 XLamp® LED

XP-G 를 사용하였다.

본 연구에서 개발하고자 하는 보안등의 공급전력량은 90W이므로 직류전원공급장치(SMPS)의 효율을 90% 및 LED소자의 열변환율 80%를 고려하면 발열량은 약 65W로 예측되며[2~4], Fig. 2 와 Table 1과 같이 LED조명용 냉각기의 사양을 결정할 수 있다.

LED 소자의 수명을 고려하여 조명의 동작 시 LED 접합부(Junction) 온도를 70℃ 정도로 결정하였다. LED 소자 제조사에서 제공하는 LED 접합점과 외부단자 간의 열저항, 열적, 전기적 특성을 고려하면, LED소자 접합부와 PCB간의 온도차는 약 12℃로 예측되므로, 접합부 온도가 70℃일 경우 PCB온도는 약 58℃로 계산되며, 관련 문헌에 의하면 PCB와 접합면간의 열접촉저항을 2℃미만임을 알 수 있다[5].

이상에서 PCB와 접합되는 냉각 장치의 베이스 온도는 약 56℃로 설계되어야 하고, 서울의 하절기 평균기온은 25.8℃를 고려하면 냉각장치의 허용 온도차는 약 30℃미만일 것이 요구된다.

따라서, 본 연구에서의 90W급 LED 조명을 위한 냉각장치는 열저항 $R=30K/65W=0.46K/W$ 의 수준으로 설계되어야 한다.

3. 냉각장치의 설계 및 제작

3.1 히트파이프의 열전달 한계

본 연구에서 사용된 히트파이프는 구리 소결워ick(sintered metal wick)형 모세관이 형성된 구조이며, 작동 유체는 물을 사용하였다. 자세한 제원은 Table 2 와 같다.

Table 2 Specification of heat pipe

Powder material	Copper
Powder number	ACU-80
Wick thickness	700 μm
Container material	Copper
Outer diameter	6.0 mm
Inner diameter	4.4 mm
Working fluid	Water

히트파이프를 이용한 냉각 장치를 개발하기 위해서는 히트파이프의 열적 특성에 대한 이해와 고찰이 중요하다. 히트파이프는 상변화 열전달에 의하여 전달하는 최대 수송부하에 제한이 되므로

정확한 설계를 위해서는 직접 실험을 통하여 히트파이프의 최대 열부하를 확인한 후 수량을 결정하여야 하고, 히트파이프의 열부하에 대한 열저항 자료를 확보함으로써 열저항 해석 및 설계에 적용하여야 한다.

그러나, Hong 등의 연구에 본 연구와 동일 제원을 가지는 히트파이프에 대한 실험, 분석 결과가 수행된 바 있으므로, 본 연구에서는 이를 참고하여 히트파이프형 냉각기를 설계하였다[7].

Hong 등의 관련 연구에 의하면, 히트파이프의 증기온도가 작동온도를 대표한다고 가정하였을 때 수평상태에서 증기온도 40℃에서 최대 열전달율은 약 18W 를 보이며, 증기온도가 증가에 따라 최대 열전달율도 증가하여 60℃에서 약 22W 의 최대 열전달율을 나타내었다.

또한, 수평을 기준으로 응축부가 증발부보다 높아짐에 따라 최대 열전달율은 감소하는 경향을 보여 논문에서 제시한 실험 범위 내에서는 약 5W 의 최대 열전달율의 감소가 나타났다.

따라서, 수평상태를 기준으로 적용할 때 히트파이프 하나에 대하여 안정성을 고려하면 본 연구에서의 히트파이프는 20W 미만의 열부하를 최대 열전달 한계로 파악하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

한편, 히트파이프의 열저항을 증발부와 응축부의 평균온도차와 열전달율에 대한 비율로 정의할 때, 열저항은 약 0.23 K/W 의 값을 보였으며, 이는 히트파이프 하나의 작동 열부하를 10W 로 하는 경우 약 2K 정도의 온도차를 나타내는 것을 의미한다.

이상의 결과로부터 안전을 고려하여 냉각장치의 열부하를 70W로 가정한다면 필요한 히트파이프 수량은 5-10개 정도의 수량이 소요되는 것으로 판단된다. 다만, 히트파이프의 열저항이 핀의 대류 열저항에 비하여 상대적으로 낮은 값이라 하더라도 블록의 열전도에 의한 온도 분포 및 핀에서의 열저항을 보다 감소시키고자 할 경우에는 히트파이프의 수를 증가하는 것도 설계의 한 방안으로 파악된다.

3.2 냉각장치의 설계

본 연구의 개발목표와 앞 절의 히트파이프에 대한 열적 특성 분석 결과 그리고 요소 열저항 해석결과를 기초로 냉각시스템을 설계하였다.

기존의 LED 조명에서 많이 사용되는 일반적인

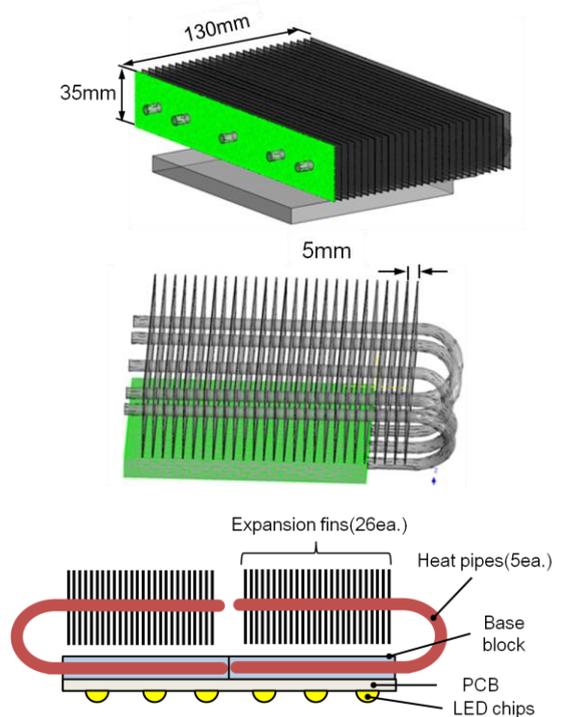


Fig. 3 Architecture of developed cooling device

Table 3 Specification of heat pipe type cooling device

Component	Spec.	
Heat pipe	Outer dia.(mm)	6
	Length(mm)	300
	Working fluid	Water
	Number of heat pipes	10EA
Fin	Size(mm)	170x35x0.3
	Material	Aluminum
	Number of pins	54EA
Block	Size(mm)	240x145x8
	Material	Aluminum

히트싱크의 경우 수직으로 냉각핀이 설치되고 냉각판의 베이스가 수평으로 설치됨에 따라 부력에 의한 상향 유동의 저해 및 재순환과정이 냉각성능 저하의 원인이 된다. 또한 외기와의 온도차가 접촉저항뿐 아니라 냉각판의 경우에도 매우 높아 LED 칩의 접합부 온도가 상승하여 수명과 효율 저하가 우려된다. 이러한 관점에서 냉각성능을 높여 접합부 온도를 낮춤과 동시에 무게를 감소시킬 수 있는 냉각 구조에 대하여 검토하였다.

본 연구에서는 이러한 목적으로 LED 소자가 접합될 베이스와 핀과의 간격을 적절하게 조절함으로써 핀으로의 공기 유입이 보다 원활할 수 있는 핀 설치 구조를 고려하여 열을 이송하는 유동 구조를 개선하는 냉각장치를 설계하였다.

Fig. 3과 Table 3 은 구상된 히트파이프식 냉각 장치의 사양 및 시스템 구성을 보여준다. 본 연구에서는 냉각장치와 PCB의 크기가 조명의 발열량에 따라 유연하게 적용이 가능하도록 모듈형태로 설계하였으며, 기본 모듈은 5개의 직관형 히트파이프와 130mmx35mm의 확장핀 26개로 구성되어 있다. 또한, 기본 모듈은 냉각성능의 안전성을 고려하여 자연대류 상태에서 약 30K/40W의 열저항을 가지도록 설계하였다. 따라서, 본 연구에서의 개발 목표 열저항 30K/65W를 달성하기 위해서는 기본 냉각 모듈 2개를 적용한 형태가 되어야 한다.

이상의 설계과정에서는 앞 절의 히트파이프에 대한 분석을 기초로 히트파이프 냉각장치의 설계 및 핀에서의 자연대류 열전달 상관관계에 관한 관련 문헌을 참고하여 검토하였다[7~9].

3.3 전산모사해석을 통한 설계 검증

Table 3 에서 제시한 냉각장치의 사양을 적용한 히트파이프식 냉각장치의 설계 결과의 타당성을 검토하고자 컴퓨터를 이용한 전산 모사 열유동 해석을 수행하였다.

본 연구의 히트파이프 히트싱크는 대칭인 구조를 가지므로 그 절반을 해석 대상으로 파악하였으며, 공기영역은 Fin 높이로 위로 24 배, 아래로 5 배를 설정하였으며, 대류 유동이 벽의 영향을 받지 않도록 좌, 우측으로 160mm 씩 설정하여 충분한 대류 공간을 확보하였다. 모두 사각(tetra)격자이고, 열이 발생하고 대류가 일어나는 부분인 핀 주변은 격자를 조밀하게 생성하였으며, 전체 대류영역은 다소 큰 40~2mm의 격자를 생성하였다. 노드 수는 1,676,149 개, 요소 수는 8,127,389 개이다.

본 해석에서는 히트파이프를 매우 높은 열전도율의 물질로 가정하여 해석을 수행하였다. 이러한 이유는 상변화 열전달을 메카니즘으로 하는 히트파이프의 열유동 해석의 목적보다는 핀의 자연대류 열전달 예측을 통한 설계의 유효성을 핀 주변의 유동해석 결과로부터 확인하고자 하였으며 이러한 관점에서 핀 주변의 대류 유동의 관점에서 고찰하였다.

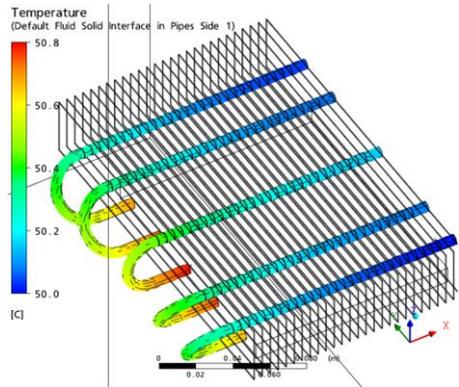


Fig. 4 Temperature profile of heat pipes

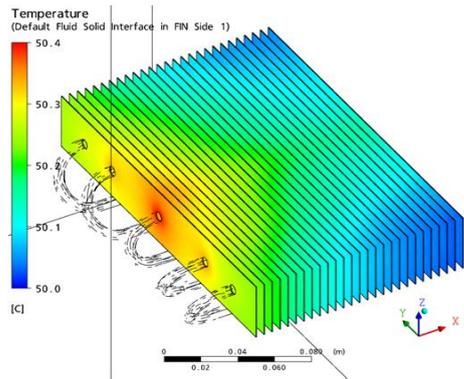


Fig. 5 Temperature profile of fins

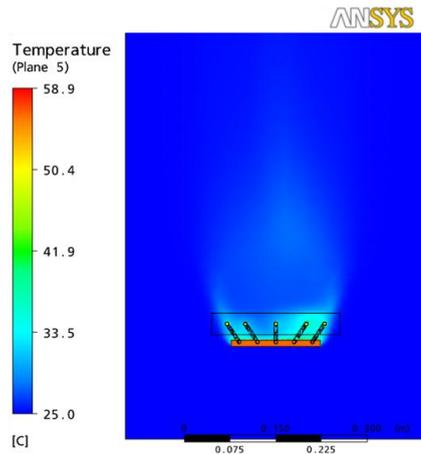


Fig. 6 Expected temperature profile of air (between 12th fin and 13th fin)

Fig. 4 와 Fig. 5 은 히트파이프 블록에 70W의 열부하가 균일하게 가해지는 조건, 즉 열유속(heat flux) 2kW/m²에서 25℃인 외부 공기의 자연대류

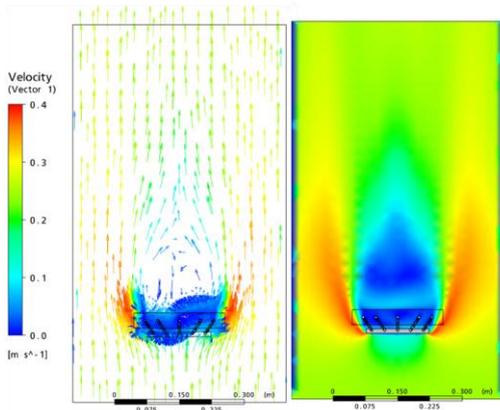


Fig. 7 Expected velocity vector and profile (between 12th fin and 13th fin)

유동에 의한 히트파이프 및 핀의 온도분포를 보여준다.

Fig. 6 은 히트파이프 히트싱크 주변의 온도 분포를 핀이 설치된 중앙부 근처 핀의 공간에서 핀의 평면을 따른 단면에서 나타낸 그림이다. 그림에서 핀 상부의 공기온도는 약 30℃정도로 가열되어 있으며, 핀의 폭방향으로 공기 온도는 비교적 균일하게 나타나고 있다. 이러한 결과는 히트싱크형 냉각판에서의 해석결과[10]와 비교해볼 때 본 연구에서의 냉각기는 핀 하부는 상대적으로 작은 면적의 블록이 설치되어 부력에 의하여 상승하는 공기의 상향유동이 상대적으로 원활하게 이루어지는 결과로 설명된다. 한편 그림에서 히트파이프의 최대 온도는 50℃정도로써 외기온도와 25K 정도의 온도차를 나타내며 히트파이프 자체의 열저항에 의한 온도차가 2K 미만으로 예측되는 점을 고려하면 본 연구에서 설계한 냉각장치는 70W의 열부하에서도 냉각장치의 온도차 30K 미만의 설계목표를 만족할 것으로 예측되고 있다.

Fig. 7 은 핀 상부의 유동 특성을 파악하고자 히트파이프를 따라 중앙부에 설치된 핀 단면에서 공기의 속도 분포를 보여준다. 그림에서 핀 상부의 유동이 앞에서 설명한 것과 같이 일반적인 히트싱크 구조와 비교하여 유속 분포가 상대적으로 균일하고 공기유동의 재순환 정도가 완화된 있음을 볼 수 있다. 이러한 결과는 LED 조명의 특성상 LED를 실장한 PCB가 수평으로 설치된다고 할 때 핀 주변의 자연대류 열전달 개선 효과로 판단될 수 있을 것으로 생각한다.

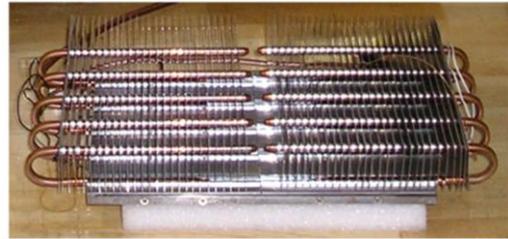


Fig. 8 Photograph of developed cooling device

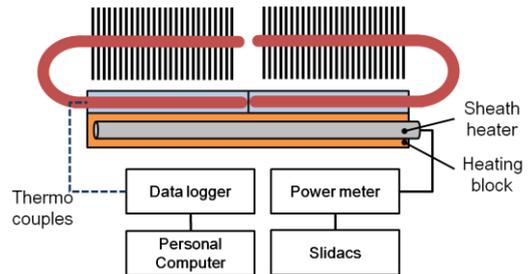


Fig. 9 Experimental setup for evaluation of cooling performance

3.4 냉각장치의 제작

실제 사양에 의하여 Fig. 8 과 같이 히트파이프를 적용한 히트싱크를 제작하였다. 히트파이프식 냉각장치를 제작하기 위하여서는 핀의 성형과 히트파이프의 설치, 히트파이프의 블록 설치 등의 과정이 요구되며 각 단계별 구조 설계와 열저항 감소를 위한 세밀한 작업 공정을 수행하였다.

4. 냉각장치의 성능시험

제작된 냉각장치의 성능실험을 위하여 Fig. 9 와 같이 실험장치를 구성하였다. 히트싱크 베이스에 시스템 히터와 블록으로 제작된 모사 발열체를 접촉경계면에 전열 그리스를 도포하여 설치하였다. 실험은 자연대류 열전달 조건에서 LED가 설치될 블록이 중력방향을 향하도록 설치하였다. 냉각장치의 작동성능은 열부하에 대한 블록의 온도와 외기 온도차로 나타나므로 히트파이프 히트싱크 블록 4개소에 0.12mm 지름의 K형 열전대를 설치하고, 각 측정점의 온도는 데이터 로거(Yokogawa, DC 100)로 계측하였다. 슬라이더스로 전압을 제어하여 열부하를 조절하였으며, 전력량은 파워메타(Yokogawa, WT-210)으로 계측하였다.

Fig. 10 은 열부하 60W의 열부하가 공급되었을 때 시간에 대한 온도 변화를 보여준다. 그림에서

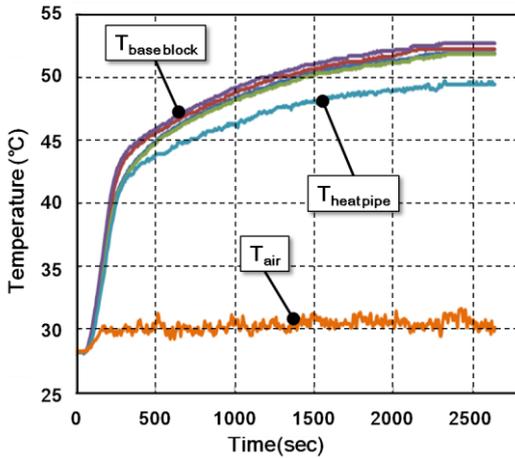


Fig.10 Wall temperature variation with time of cooling system (Q=60W)

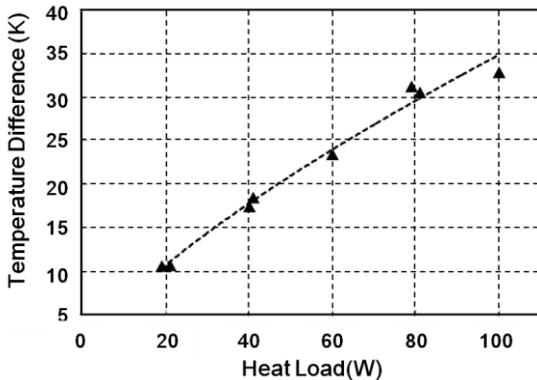


Fig.11 Temperature difference versus heat load

보이는 것과 같이 모든 측정점의 시간에 대하여 일정한 온도를 나타내면 정상상태로 파악하고 각 지점의 온도를 계측하였다.

Fig. 11은 각 열부하에 대한 히트파이프 히트싱크 블록의 평균온도와 대기와의 온도차를 나타낸 것이다. 그림에서 열부하 증가에 따라 온도차는 증가하나 열부하 증가율에 비하여 온도 상승률은 다소 감소하는 경향을 보이며 자연대류 열전달에서 나타나는 표면 온도 증가에 따른 부력의 증가에 의하여 열전달 계수가 증가하는 특성으로 이해할 수 있다. 그림에서 열부하가 100W일 때 약 32°C의 온도차, 40W에서는 약 17°C의 온도차를 보이고 있으며, 본 연구의 개발 목표인 65W의 열부하의 경우에 근사식을 이용하여 계산해보면 약 25.5°C의 온도차를 보일 것으로 예측된다. 이는 본 연구에서 개발 목

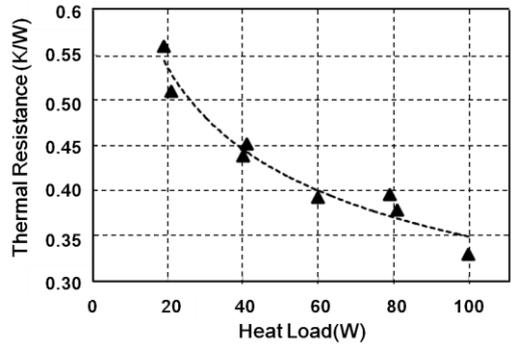


Fig.12 Thermal resistance at various heat transfer rate

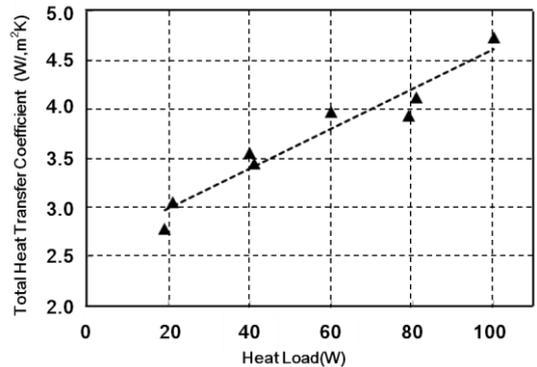


Fig.13 Heat transfer coefficient at various heat transfer rate

표로 하는 냉각장치의 온도차 30°C 미만을 충분히 만족시키는 값을 확인할 수 있다.

Fig. 12는 온도차를 열부하로 나눈 값을 열저항으로 정의하고 열부하에 대하여 나타낸 그림이다. 그림에서 열저항은 열부하에 따라 감소하는 경향을 보이며 앞에서 설명한 것과 같이 벽면온도의 상승에 자연대류 열전달계수의 증가에 의한 현상으로 이해된다. 그림에서 100W의 열부하에서 약 0.33K/W의 값을 보인다. Fig. 13는 계측된 자료를 기초로 히트파이프 냉각장치의 핀에서의 대류 열전달 계수를 나타낸 그림이다. 그림에서 자연대류 열전달 계수는 열전달 계수의 증가하는 경향을 보이며 열전달계수는 3-4.5W/m²K의 값을 보이고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 고발열 LED 보안등을 위해 히트

파이프를 이용한 고효율 냉각장치를 개발하였다. LED 조명의 열저항 해석과 히트파이프의 특성 분석을 기초로 90W 급 LED 보안등에 적합한 히트파이프 히트싱크를 설계하였으며, 전산 모사해석을 기반으로 한 열유동 예측을 통하여 타당성을 검토하였다. 또한, 고안된 냉각장치를 제작하고, 이에 대한 냉각 성능 시험을 수행하였으며, 다음의 결론을 얻었다.

(1) LED조명 장치의 열저항 해석을 통하여 분석한 결과 LED접합부의 온도를 70℃로 제한하고, 하절기 외기온도를 26℃로 가정하면, 90W급 LED조명의 냉각장치의 열저항은 30K/60W(0.46K/W)의 수준으로 설계하여야 함을 알 수 있다.

(2) 히트파이프의 열수송 한계를 감안할 때 안전을 고려한 냉각장치의 열부하를 70W로 가정한다면 히트파이프는 5-10개 정도의 수량이 소요되는 것으로 판단된다.

(3) 히트파이프를 이용한 히트싱크는 수직으로 냉각관이 설치되고 냉각관의 베이스가 수평으로 설치된 일반적인 히트싱크에 비하여 공기의 상향 유동이 상대적으로 원활하게 이루어지는 결과로 유속 분포가 균일하고 공기유동의 재순환 정도가 완화된 것을 전산해석을 통하여 확인할 수 있다.

(4) 본 연구에서 개발된 히트파이프 히트싱크 모듈은 자연대류상태에서 조명의 안정성을 고려하여 30K/40W(0.75K/W)의 열저항을 가지도록 설계되었으며, 2개의 냉각 모듈을 적용한 냉각 시스템의 경우, 목표 열부하 65W에서 25.5 K의 온도차를 보여 본 연구에서 개발 목표로 하는 냉각장치의 온도차 30K미만을 충분히 만족시키는 값임을 실험적으로 확인하였다. 또한, 직류전원장치의 역할과 LED소자의 발열율, 허용온도차를 감안하면 최대 110W급 보안등까지 적용이 가능하다.

후 기

본 연구는 2011년 중소기업청 산학협력력 기업부설연구소 지원사업에 의하여 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] E. C. Jeon, T. J. Je, K. H. Whang, 2010, A Study on Design of High Luminance Hybrid LED Package and Ultra-fine Machining of Optical Pattern, Trans. Mater. Process., Vol. 19, No.8, pp. 474~479.
- [2] I. S. Eo, 2008, Analysis of the Heat Radiation of LED Light Fixture using CF-design, J. Kor. Acad.-Ind. Co. Soc., Vol. 9, No.6, pp. 1565~1568.
- [3] S. H. Hwang, Y. L. Lee, 2011, Study on Thermal Performance of Multiple LED Packages with Heat Pipes, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng. (B), Vol. 33, No. 6, pp. 569~575.
- [4] Y. L. Lee, S. H. Hwang, 2010, Study on Thermal Design of a 3W MR16 Light with single High-Power LED, J. Kor. Acad.-Ind. Co. Soc., Vol. 11, No. 4, pp. 1023~1209.
- [5] T. S. Jung, H. K. Kang, 2011, Cooling Performance Evaluation of Free Convection Cooling device for LED Lightings, Proc. Kor. Soc. Precis. Eng. spring, Jeju, Korea, pp. 1017~1018.
- [6] S. E. Hong, S. Y. Lee, C. J. Kim, 1999, A Study on Thermal Enhancement for a Plane Contact Interfaces of Electronic Systems, J. Kor. Energy Eng., Vol. 8, No.2, pp.272~278.
- [7] S. E. Hong, K. C. Cho, H. K. Kang, S. S. Kim, 2004, Study on the Heat Transfer Limitations According to the Positions of Heat Sources in a Sintered Metal Wick Heat Pipe, Proc. Soc. Air Con. Ref. Eng. Kor., summer, pp. 858~863.
- [8] H. K. Kang, C. J. Kim, 2001, Design and Operational Characteristics, of a Heat Pipe Heat Sink for Cooling of Power Semiconductors, Trans. Kor. Inst. Pow. Elec., Vol. 6, No. 6, pp.572~681.
- [9] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, 2001, Fundamentals of Heat and Mass Transfer 5th ed., John Willey & Sons, New York.
- [10] T. S. Jung, H. K. Kang, 2011, Proc. Kor. Soc. Mfg. Tech. Eng. Autumn Conf.(eds. M. Y. Yang), Kor. Soc. Mfg. Tech. Eng., Daejeon, Korea, p. 86.