

## 집중변수모형을 이용한 LED조명등 방열기구의 성능분석

김익광<sup>†</sup> · 조영철\* · 이승신\*\* · 안영훈\*\*

한국원자력연구원, \*한국원자력연구원, \*\*에이팩

(2017년 3월 2일 접수, 2017년 5월 16일 수정, 2017년 5월 19일 채택)

### Performance Analysis of Heat Sink for LED Downlight Using Lumped Parameter Model

Euikwang Kim<sup>†</sup> · Youngchul Jo\* · Seungshin Yi\*\* · Younghoon An\*\*

Korea Atomic Energy Research Institute, \*Korea Atomic Energy Research Institute, \*\*APACK

(Received 2 March 2017, Revised 16 May 2017, Accepted 19 May 2017)

#### 요 약

중동지역 환경에 적합한 70 W급 LED 조명등의 성능분석을 집중변수모형을 이용하여 수행하였다. LED 조명등은 발열기판, 히프파이프, 방열판으로 구성된다. LED 조명등을 4개의 물체로 구분하고, 각각에 대해 에너지평형을 적용하여, 4 개의 연립 비선형미분방정식 형태의 집중변수모형을 수립하였다. 연립 방정식의 해는 Runge-Kutta 법을 이용하여 구하였다. 집중변수모형의 대류열전달계수는 다차원해석을 통하여 구하였으며, 실험결과와 비교한 결과, 발열기판은 1.5 °C, 상부방열판에서 1.8 °C의 오차를 가지며, 상대오차는 약 0.6 %임을 확인하였다. 이 모델을 이용하여 대기온도가 55 °C인 정상 운전조건, 태양광만 주어질 때의 조건, 태양광이 주어진 상태에서의 비정상 운전조건, 상부방열판이 없는 경우 등에 대한 온도분포분석을 수행하였다.

**주요어** : LED, 히프파이프, 집중변수모형, 방열기구

**Abstract** - The performance analysis of the 70 W class LED lighting system suitable for the Middle East environment was performed using the lumped parameter model. The LED light is composed of a heating substrate, a heat pipe, and a heat sink. We divided the LED lights into four objects and applied energy equilibrium to each of them to establish four lumped nonlinear differential equations. The solution of the simultaneous equations was obtained by the Runge-Kutta method. Convective heat transfer coefficients of the lumped model were obtained by multidimensional CFD analysis. As a result of comparison with experiment, it was found that the heating substrate had an error of 1.5 °C and the upper heat sink had an error of 1.8 °C and the relative error was about 0.6 %. Using this model, temperature distribution analysis was performed for normal operating conditions with an ambient temperature of 55 °C, with sunlight only, with abnormal operating conditions with sunlight, and without an upper heat sink.

**Key words** : LED, Heat Pipe, Lumped Parameter Model, Heat Sink

## 1. 서론

천연자원 고갈로 인한 에너지 문제, 기후 변화 등의

환경 문제가 대두되면서 전 세계적으로 친환경 및 고효율 에너지에 대한 수요가 증가하고 있다. 조명 분야에서는 LED(light-emitting diodes) 조명이 이에 기여할 수 있는 차세대 조명 기술로 인식되고 있다. LED는 고체 조명기구로 환경 친화적이고, 광효율이 약 30%에 달하므로, 기존의 일반 조명기구에 비하여 에

<sup>†</sup>To whom corresponding should be addressed.  
Tel : +82-042-868-2244 E-mail : ekkim1@kaeri.re.kr

너지 절약 효과가 우수할 뿐만 아니라, 수명이 반영구적이라는 장점이 있어, 주요국 정부에서는 LED 조명으로 전환하기 위한 정책을 수립하여 시행하고 있다. 최근 중동 국가들도 세계 각국의 정책 방향에 발맞추어 LED 조명으로 대체하려는 정책을 펴고 있으며, 이에 따라 LED 조명 수요도 크게 증가하고 있다. 그러나 중동 지역은 미세먼지가 심하고, 외부온도가 높은 환경적 요인으로 인해 LED 조명 측면에서도 기술적인 장벽이 있다고 평가된다.

본 연구에서는 70W급 LED 엔진을 이용하여 280W급 LED 가로등을 개발하는 것을 목표로 하고 있다. 기술의 기본개념은 방열판과 발열기판 사이를 히트파이프로 연결하여 방열하는 방식이다. 대부분의 조명기구들은 소음문제로 인하여 팬을 이용한 강제대류를 이용할 수 없으므로 복사와 자연대류 열전달을 이용하여 열을 제거한다. 그러나 고강도의 LED 조명기구는 이와 같은 피동적인 방법에 의한 냉각능력 한계를 초과하는데, 히트파이프는 열저항이 매우 적을 뿐만 아니라, 열확산을 향상시킬 수 있기 때문에 고강도의 LED 조명기구의 방열기구로 적용할 수 있다.

빛의 양이 클수록 고전류가 필요하고, 이에 따라 많은 열이 LED 소자에서 발생한다. 소자접합부의 온도가 상승하면 광출력이 감소하고, 또한 고온에 장시간 노출되어 있을 때에는 그 수명도 기하급수적으로 줄어들기 때문에 이에 대한 방열설계가 매우 중요하다.

일반적인 LED조명에서 열원으로부터 외부 대기로 열이 전달되는 과정을 살펴보면, LED 소자의 상부는 소자에서 발생한 열을 균일하게 분산시킬 수 있도록 열전도도가 높은 금속재질의 발열기판에 부착되어 있고, 그 위에 설치된 방열기구를 통해 대기로 열을 방출한다. 이 과정에서 열저항은 발열기판과의 접합부, 발열기판, 방열기기 등에서 발생한다. 그러나 발열기판과의 접합부, 발열기판의 열저항은 재질, 두께, 면적에 따라 결정되므로 거의 고정된 값이고, 외부 대기온도 또한 일정한 값이기 때문에 LED 조명의 방열설계에서 가장 중요한 것은 방열기구가 고효율이 되도록 설계하는 것이다.

본 연구에서는 방열판, 발열기판, 히트파이프로 구성된 70W급 LED 엔진의 열전달을 다차원해석으로 분석하고, 결과를 이용하여 집중모델을 개발하였다. 먼저 STAR-CCM+ 상용전산코드를 이용하여 LED 엔진을 대상으로 다차원 전산유체해석을 수행하고, 해석결과로부터 LED 엔진의 각 위치에서 자연대류열

전달계수와 온도분포 특성을 파악하고, 이를 집중모델 개발에 적용하였다. 개발된 집중모델은 실험자료와 비교하였으며, 이를 이용하여 여러 운전조건의 경우에 LED의 성능분석을 수행하였다.

## 2. 집중모델

70W급 LED 엔진의 방열판, 발열기판의 물체내부는 높은 열전도도의 알루미늄 재질이고, 표면은 자연대류로 열전달이 이루어지므로, 물체내부는 열저항이 매우 적고, 자연대류의 열전달계수는 매우 적으므로 열저항이 매우 크다. 따라서 비요트 수(Bi Number)가 적은 경우이므로 집중모델(Lumped Model)을 적용할 수 있다.

### 2-1. 70W급 LED 가로등

본 절은 70W급 LED 가로등 방열모듈을 대상으로 방열모듈과 주위 자연순환 공기영역에 대한 다차원열유동 해석에 관한 것으로, 70W급 LED 가로등의 실제 기하구조 및 운전조건을 반영한 다차원 열유동 해석을 수행하여 70W급 LED 가로등 방열모듈 주위의 유동현상과 온도분포를 예측하고, 향후 집중모델 개발에 필요한 주요 자료 생산을 목적으로 한다.

현재 개발중인 70W급 LED는 중동지역으로 수출을 겨냥하는 신개발제품으로 엔진모듈 1개는 그림 1과 같다. 상부덮개의 가로길이는 250 mm, 세로는 140 mm, 높이는 75 mm, 두께는 3 mm 이다. 발열기판의 두께는 20 mm이며, 아래바닥에는 45 개의 LED가 부착되어 있고, 유리덮개로 보호되어 있다. 각 LED 당 에너지 분포를 보면 30%의 빛과 70%의 열로 변환되어 1.09 W의 열을 발생하여, 총 49 W의 열이 발생한다. 이 열은 발열기판 표면과 히트파이프[1]를 통하여 상부덮개로 전달되어 자연대류와 복사열전달로 대기로 방열된다.

### 2-2. 집중모델을 이용한 해석모델 개발

LED엔진모듈을 4개의 부품으로 나누고, 각각에 대한 집중모델(lumped model)을 개발하였다. 다차원 해석은 많은 선행 작업시간과 계산시간이 소요되나, 집중모델은 계산시간이 짧으므로 설계인자 조건의 변화 시 빠르게 해석결과를 파악할 수 있는 장점이 있다.

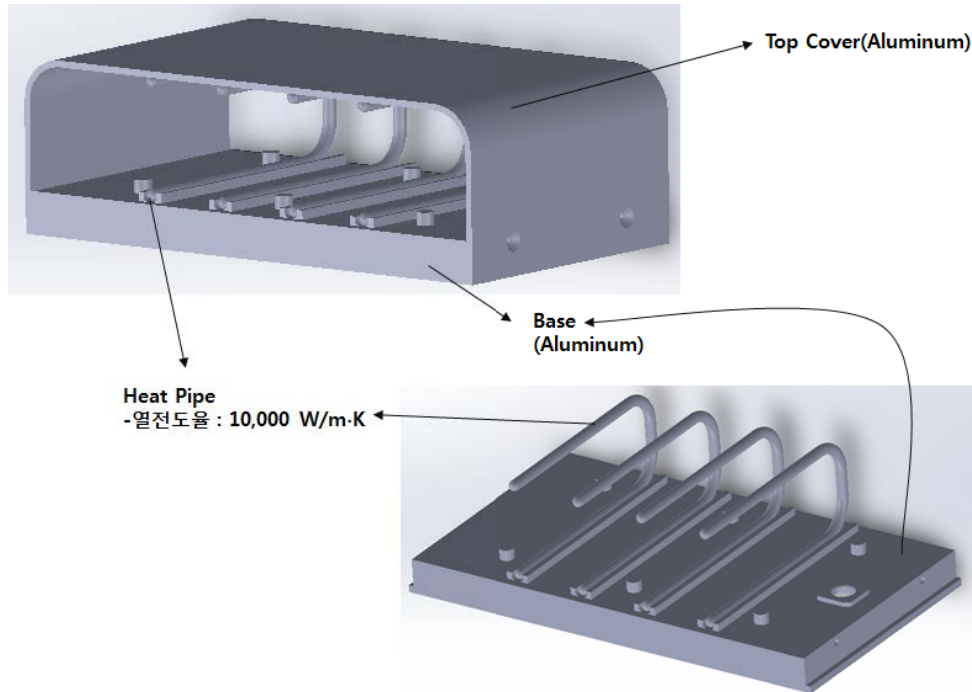


Fig. 1. Structure of 70 W LED engine

집중모델은 Biot number,  $(h*S)/k$ , 즉, 물체 내부열 전도의 열저항 대비 표면의 대류열전달의 열저항비가 0.1이하일 때 적용이 가능하다[2]. 물체표면의 열전달은 대류열전달과 복사열전달에 의해 이루어지므로 유효대류열전달계수는 두 가지 열전달효과를 고려하여 산정한다. LED의 주요 구조물인 발열기판과 상부덮개의 재질은 열전도도가 높은 알루미늄이고, 수평 물체표면의 온도를  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 대기온도를  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 가정하면, 비요트 수는 0.1보다 훨씬 적은 값을 알 수 있다. 4개의 부품에 대한 전도열전달, 대류열전달, 복사열전달에 의한 열평형을 적용하면, 각 부품의 열평형식은 다음과 같다.

발열기판;

$$\begin{aligned} \rho C_p V_1 \frac{dT_1}{dt} &= -Q_{12} - Q_{conv} - Q_{rad} + Q_{LED} \\ &= -UA_2(T_1 - T_2) - h_1 A_1(T_1 - T_{\infty}) - \alpha_{low} \sigma A_1(T_1^4 - T_{\infty}^4) + Q_{LED} \end{aligned} \quad (1)$$

히트파이프;

$$\rho C_p V_2 \frac{dT_2}{dt} = +Q_{12} - Q_{23} \quad (2)$$

상부덮개;

$$\begin{aligned} \rho C_p V_3 \frac{dT_3}{dt} &= -Q_{34} + Q_{23} - Q_{conv} - Q_{rad} + Q_{solar} \\ &= -UA_{th}(T_3 - T_4) + UA_2(T_2 - T_3) - h_3 A_3(T_3 - T_{\infty}) \\ &\quad - \alpha_{low} \sigma A_3(T_3^4 - T_{\infty}^4) + Q_{solar} \end{aligned} \quad (3)$$

옆면덮개;

$$\begin{aligned} \rho C_p V_4 \frac{dT_4}{dt} &= Q_{34} - Q_{conv} - Q_{rad} \\ &= -UA_{th}(T_3 - T_4) - h_4 A_4(T_4 - T_{\infty}) - \alpha_{low} \sigma A_4(T_4^4 - T_{\infty}^4) \end{aligned} \quad (4)$$

$$Q_{12} = \frac{kA_2}{0.5L}(T_1 - T_2) \quad (5)$$

$$Q_{23} = \frac{kA_2}{0.5L}(T_2 - T_3)$$

$$Q_{34} = \frac{kA_{th}}{0.5(L_1 + L_2)}(T_3 - T_4)$$

위의 복합집중모델은 4개의 비선형 연립미분방정식으로 표현되므로 초기조건을 이용하여 Runge-Kutta 방법으로 적분한다. 이 방법은 양함수방법이기 때문에 조건적 안정(conditionally stable)하며, 시구간(time step)

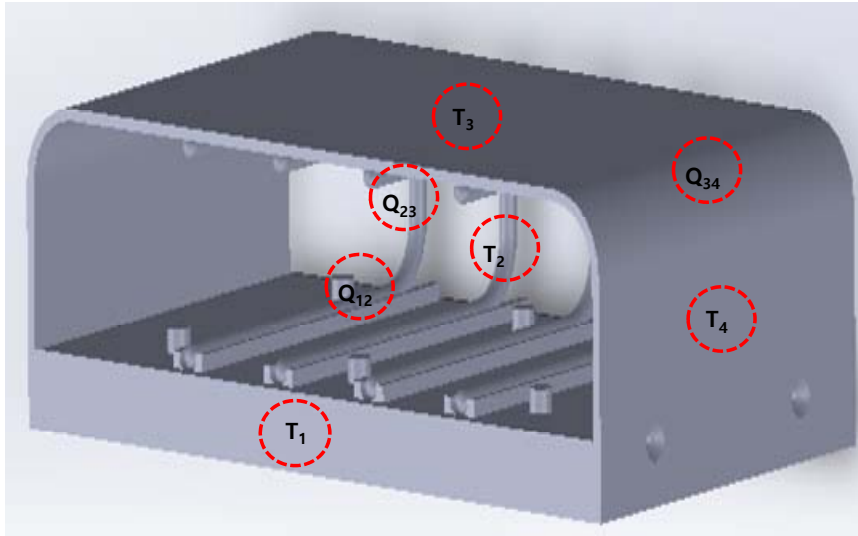


Fig. 2. Symbols of the lumped model

은 0.001 초를 적용하고, 10초까지 계산을 수행하였다. 상부덮개를 가열하는 태양입사에너지는  $1200 \text{ W/m}^2$ , 알루미늄의 방사율은 0.8을 적용하였다[3]. 집중모델 계의 기호는 그림 2에 있다.

대기온도  $55 \text{ }^\circ\text{C}$  운전조건에 대해 복사열전달을 무시한 경우에 대하여 열유동 특성을 상용 CFD 코드인 STAR-CCM+를 이용하여 해석한 결과, 방열기판과 상부덮개 중앙부분의 온도분포는 거의 균일하다. 히트파이프를 통한 열전달은 가운데 2개를 통해서는 각각 약  $4.74 \text{ W}$ , 바깥쪽 2개는 각각  $7.79 \text{ W}$ 의 열을 상부덮개로 전달시킨다. 따라서 히트파이프를 통한 전열량은  $25 \text{ W}$ 로, 전체 전열량중 51%를 차지하고, 방열기판을 통한 전열량은  $24 \text{ W}$ 로, 전체 전열량중 49%를 차지한다. 방열모듈의 양 측면에서 속도가 최대 약  $0.76 \text{ m/s}$ 에 이르고, 대부분의 영역에서는 정체되어있다. 상부덮개 윗면은 재순환 유동이 있고, 방열기판의

바닥면 양쪽모서리는 상승기류에 접하고 있다. 해석결과로부터 각 부위의 대류열전달계수는 상부덮개 윗면이 약  $5 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$ , 상부덮개 측면이 약  $10 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$ , 상부덮개 안쪽면은  $2.5 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$ 를 보였다.

### 2-3. 집중모델의 검증

70W급 LED 가로등 방열모듈을 대상으로 외기온도가  $11.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 인 경우에 대해 실험을 수행하였다. 표 1은 실험결과와 모의해석결과를 비교한 것이다. LED1, LED2, LED3는 방열기판의 온도측정 위치, HP1, HP2, HP3, HP4는 히트파이프의 온도측정 위치를 나타내고, Top Cover와 Ambient는 상부 및 측면덮개와 외기온도 위치를 나타낸다. 전체구조물 온도분포는  $41 \text{ }^\circ\text{C} \sim 34 \text{ }^\circ\text{C}$ 이다. 오차는 최대  $1.8 \text{ }^\circ\text{C}$ 로, 복사항 계산에 사용되는 절대온도를 기준으로 평가하면 상대오차는 약 0.6 %이다.

Table 1. Comparison of experiment and lumped model results

T/C location	LED1	LED2	LED3	HP1	HP2	HP3	HP4	Top Cover (Center)	Top Cover (Side1)	Top Cover (Side2)	Ambient
Experiment T(°C)	42.4	42.8	41.4	36.8	38.2	38.3	37.3	38.9	36.0	35.6	11.6
Lumped Model T(°C)		41.3			39.8			38.4	34.2		-
error		-1.5						-0.5	-1.8		
Relative error(%)		0.5						0.02	0.6		

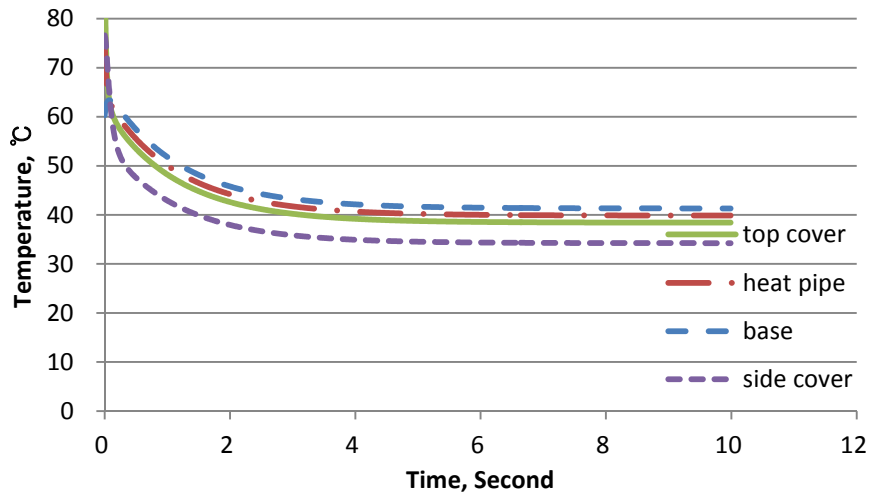


Fig. 3. Temperature Distribution at Air Temperature of 11.6 °C

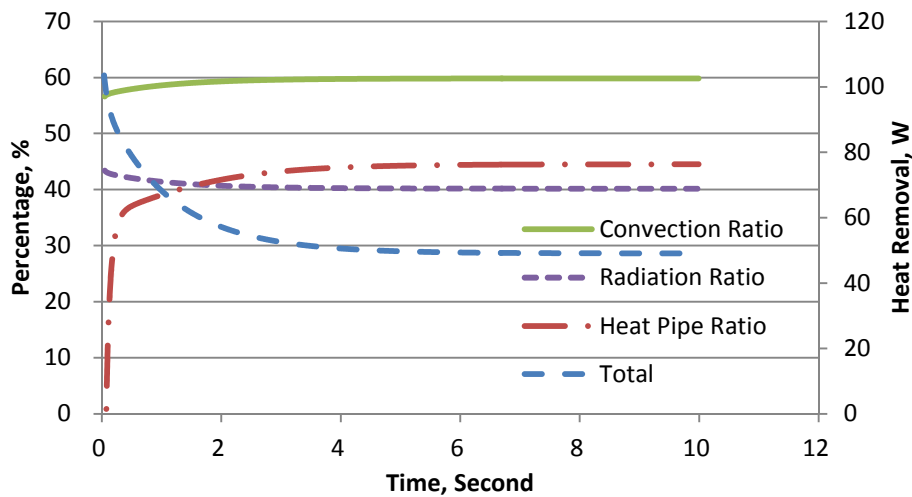


Fig. 4. Heat Removal Rate and Ratio at Air Temperature of 11.6 °C

그림 3은 10초까지 모의한 온도분포그림으로 약 6초에서 정상상태 값으로 수렴함을 볼 수 있다. 그림 4에서 LED 칩에 주어진 70 W의 에너지중에서 약 70%인 49 W가 방열됨을 볼 수 있고, 각 열전달 형태의 비율로서, 복사 전열량은 40%, 대류 전열량은 60%, 히트파이프를 통한 전열량은 44.5%임을 보이고 있다.

#### 2-4. 집중모델을 이용한 해석결과

방열기기가 없이 발열기판만 있는 경우에 대하여 외기온도가 55 °C, LED가 작동하는 경우에 해석한 결과는 그림 5에 있다. 발열기판의 온도는 약 98 °C에 이르고, 설계기준온도로 설정한 95 °C를 초과하므로 온도를 낮추기 위한 방열기기가 필요함을 볼 수 있다.

LED가 작동하는 정상운전시의 온도와 열전달 비율은 그림 6, 그림 7에 있다. 상부덮개와 발열기판의 온도는 약 77 °C, 약 80 °C이며, 방열모듈로 약 18 °C만큼 온도를 낮출 수 있음을 볼 수 있다. 대류와 복사열전달 비율은 각각 약 50 %이며, 히트파이프를 통하여 약 44 %의 전열이 있음을 볼 수 있다.

LED는 작동하지 않고, 태양광에만 노출되는 경우의 온도와 열전달 비율은 그림 8, 그림 9에 있다. 태양에 의해 주어지는 열속은 1200 W/m<sup>2</sup>로 가정하고, 상부덮개와 발열기판의 온도는 약 83 °C, 약 61 °C로 LED 반도체에 심각한 영향을 줄 수 있는 온도까지 상승하지 않음을 볼 수 있다. 대류와 복사열전달 비율은 각각 약 50 %이며, 히트파이프 구리벽을 통하여 상부덮개로부터 발열기판으로 약 20 %의 열량이 전열된다.

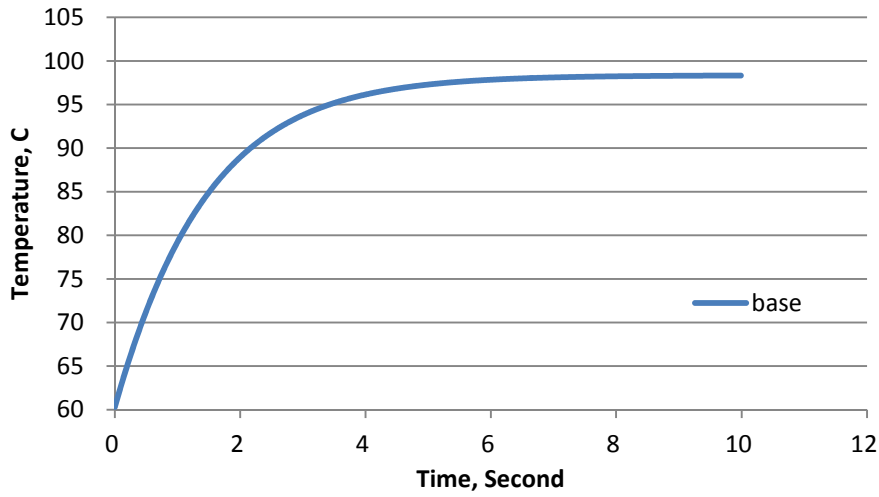


Fig. 5. Temperature of only Base at Air Temperature of 55 °C

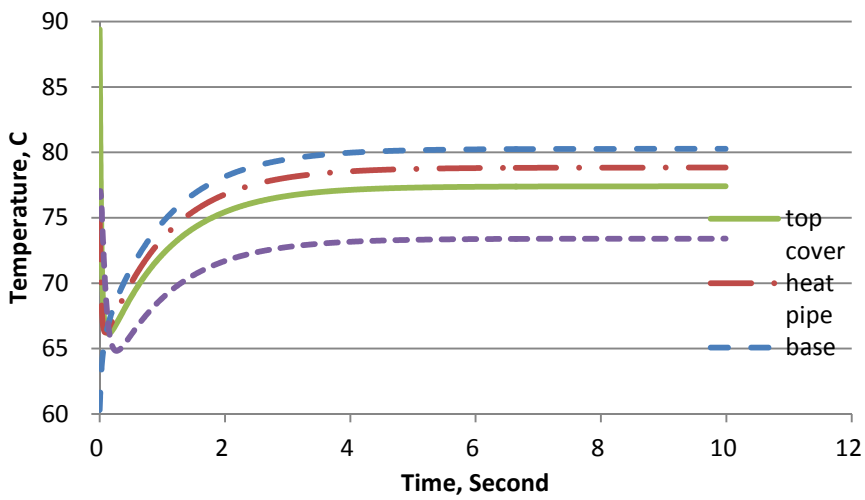


Fig. 6. Temperature of LED at Air Temperature of 55 °C

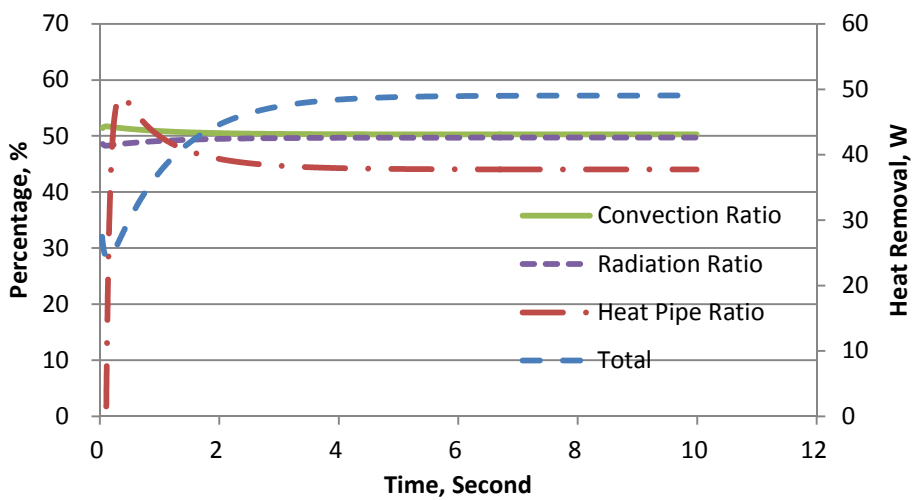


Fig. 7. Heat Removal Rate and Ratio of LED at Air Temperature of 55 °C

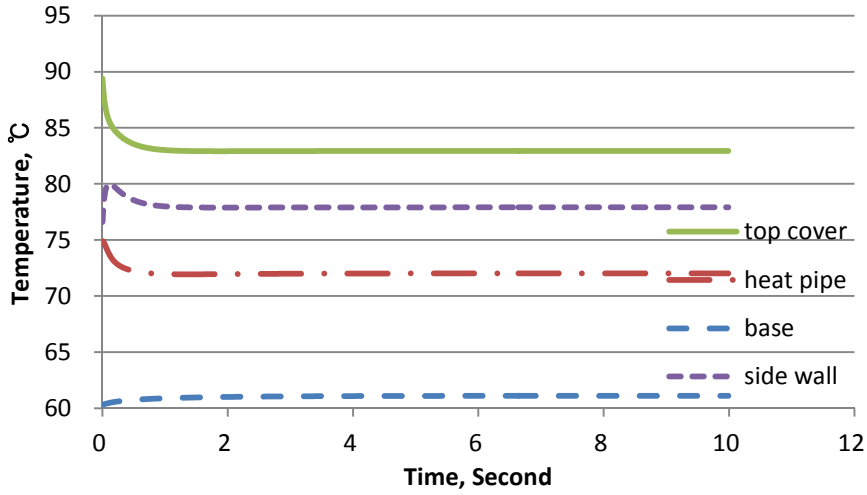


Fig. 8. Temperature of LED with Only Solar Energy

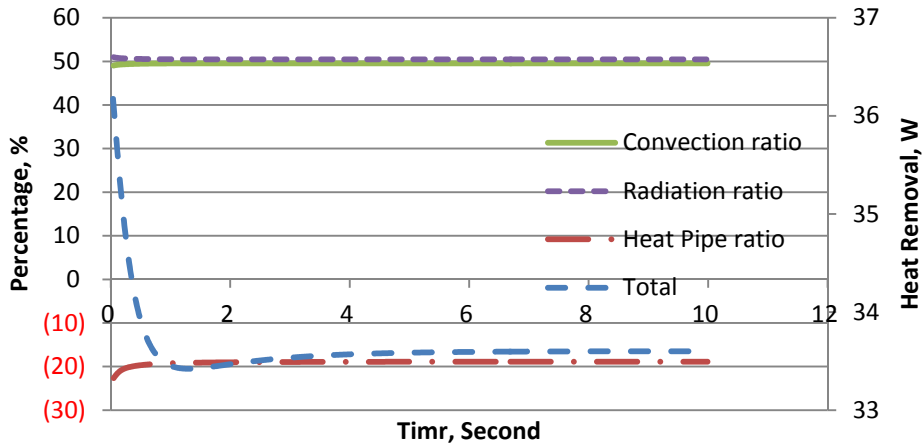


Fig. 9. Heat Removal Rate and Ratio of LED with Only Solar Energy

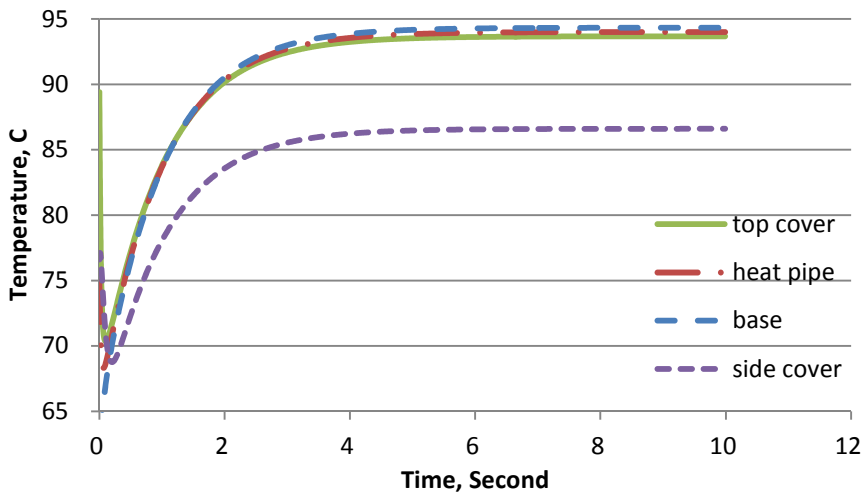


Fig. 10. Temperature of LED together with Solar Energy

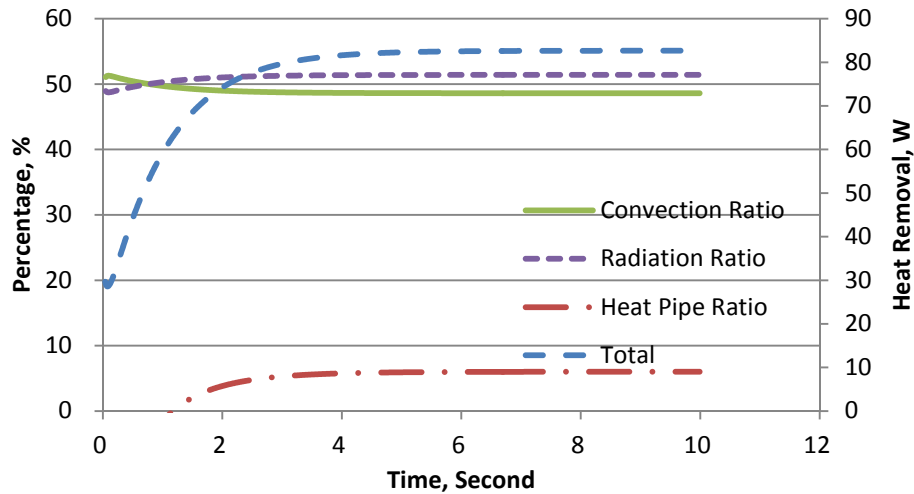


Fig. 11. Heat Removal Rate and Ratio of LED together with Solar Energy

태양광에 노출될 때 LED가 작동하는 오작동사고시 경우의 온도와 열전달 비율은 그림 10, 그림 11에 있다. 방열기판과 상부덮개의 온도는 약 94.3 °C, 약 93.6 °C에 이른다. 대류와 복사열전달 비율은 각각 약 48.5 %, 51.5 %이며, 히트파이프를 통하여 약 6 %의 전열이 있음을 볼 수 있다.

#### 4. 결론

방열기판, 히트파이프, 방열판으로 구성된 70 W급 LED 조명등의 성능분석을 집중변수모델을 이용하여 수행하였다.

집중변수모델의 대류열전달계수는 다차원해석을 통하여 구하였으며, 집중변수모델의 결과를 실험결과와 비교한 결과, 방열기판은 1.5 °C, 상부방열판에서 1.8 °C의 오차를 가지며, 상대오차는 약 0.6 %임을 확인하였다.

대기온도가 55 °C인 정상 운전조건시 방열모듈을 이용하여 약 18 °C만큼 방열기판의 온도를 낮출 수 있다. 태양광만 주어질 때의 조건에서 방열기판의 온도는 약 61 °C로, LED반도체에 심각한 영향을 줄 수 있는 온도까지는 상승하지 않는다. 태양광에 노출될 때 LED가 작동하는 오작동사고시 경우의 온도는 약 94.3 °C이며, 설계제한 온도인 95 °C를 초과하지 않는다.

#### Nomenclature

##### Symbols

$A_1$	Area of base
$A_2$	Cross-sectional area of heat pipe
$A_3$	Area of top cover
$A_4$	Area of side cover
$A_{th}$	Cross-sectional area of top and side cover
$C_p$	Specific heat
$h$	Convection heat transfer coefficient of Bi number
$h_1$	Convection heat transfer coefficient of base
$h_3$	Convection heat transfer coefficient of top cover
$h_4$	Convection heat transfer coefficient of side cover
$k$	Conductivity
$Q_{12}$	Heat transfer rate from base to heat pipe
$Q_{23}$	Heat transfer rate from heat pipe to top cover
$Q_{34}$	Heat transfer rate from top cover to side cover
$Q_{conv}$	Heat transfer rate by convection
$Q_{rad}$	Heat transfer rate by radiation
$Q_{LED}$	Heat transfer rate by LED chips
$Q_{solar}$	Heat transfer rate by solar energy
$S$	Characteristic length of Bi number
$T_1$	Temperature of base



$T_2$	Temperature of heat pipe
$T_3$	Temperature of top cover
$T_4$	Temperature of side cove
$T_\infty$	Temperature of the ambient
$L_1$	Length of half of top cover
$L_2$	Length of side cover
$L$	Length of heat pipe
$U$	Overall heat transfer coefficient
$V_1$	Volume of base
$V_2$	Volume of heat pipe
$V_3$	Volume of top cover
$V_4$	Volume of side cove

### Greeks

$\rho$	density
$\alpha$	absorptivity
$\sigma$	Stefan-Boltzman constant

### References

1. ACT, 2017, Spot cooling heat pipes, <https://www.1-act.com/spot-cooling-heat-pipes/>
2. Holman, J. P., 1986, Heat transfer 6<sup>th</sup> edition, McGraw-Hill Co., pp. 134
3. Yu, S.H., 2011, Optimum design of a radial heat sink on a circular disk with application to LED downlight, Han Yang University, Ph. D. Dissertation (in Korean), pp. 36