

LED 가로등용 압출형 방열 구조물 경량화를 위한 최적 설계

Design Optimization of an Extruded-type Cooling Structure for Reducing the Weight of LED Streetlights

박승재(Seung-Jae Park)¹, 이태희(Tae-Hee Lee)^{2†}, 이관수(Kwan-Soo Lee)^{1†}

¹한양대학교 기계공학부, ²수원과학대학교 건축기계설비과

¹Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea

²Department of Building Technology, Suwon Science College, Hwaseong, 18516, Korea

(Received June 3, 2016; revision received August 27, 2016; Accepted: September 2, 2016)

Abstract The configuration of an extruded-type cooling structure was optimized for the light-emitting diode (LED) streetlights that have recently replaced convectional metal halide streetlights for energy saving. Natural convection and radiative heat transfer over the cooling structure were simulated using a numerical model with experimental verification. An improved cooling structure type was suggested to overcome the previous performance degeneration, as confirmed by analyzing the thermal flow around the existing cooling structure. A parameter study of the cooling structure geometries was also conducted and, based on the numerical results, the configuration was optimized to reduce the weight of the cooling structure. Consequently, the mass of the cooling structure was reduced by 60%, while the thermal performance was improved by 10%.

Key words Cooling structure(방열 구조물), Natural convection(자연 대류), LED(엘이디), Optimization(최적화)

† Corresponding author, E-mail: thlee@ssc.ac.kr, ksleehy@hanyang.ac.kr

기호설명

c_p : 정압 비열 [kJ/kg · K]
 d : 깊이 [mm]
 g : 중력 가속도 [m/s²]
 h : 높이 [mm]
 I : 복사 강도 [W/m² · sr]
 k : 열전도계수 [W/m · K]
 l : 길이 [mm]
 M : 질량 [kg]
 M_w : 공기분자량 [kg/kmol]
 \vec{n} : 수직 벡터
 P : 압력, 전력 [Pa, W]
 p : 간격 [mm]
 \dot{Q} : 발열량 [W]
 R : 일반기체상수 [J/mol · K]
 R_{th} : 열저항 [°C/W]
 \vec{s} : 방향 벡터
 T : 온도 [°C]
 u : 속도 성분 [m/s]
 w : 너비 [mm]

ε : 방사율
 η : 전원공급장치 효율
 θ : 설치 각도 [°]
 μ : 동점성 계수 [m²/s]
 ρ : 밀도 [kg/m³]
 σ : 스테판-볼츠만 상수 [W/m² · K⁴]
 Ω : 입체각 [sr]

하첨자

ex : 기존
 op : 동작
 ref : 기준값
 uv : 상부 벤트
 s : 방열 구조물
 sv : 측면 벤트
 ∞ : 주변 공기

1. 서 론

에너지 절약을 위한 대체 조명으로 고효율, 장수명의 장점을 가지고 있는 light-emitting diode(LED) 조명이 대두되고 있다.⁽¹⁾ LED 조명 도입 초기에는 형광등, 전구,

그리스 문자

γ : 엘이디 칩 광효율

다운라이트와 같은 저출력 조명을 대체하였다.^(2,4) 최근 LED 광효율과 수명 증가 및 생산 단가 인하에 따라 가로등, 투광등, 공장등 등의 고출력 조명이 개발되고 있다. 특히 가로등에 LED 조명을 사용할 경우, 짧은 수명, 낮은 에너지 효율, 밝기 제어 불가, 저온에서 성능이 악화되는 기존 메탈 할라이드 등의 단점을 보완할 수 있다.⁽⁵⁾ 하지만 LED chip 온도가 최대 허용 junction 온도 이상으로 상승하게 되면, LED 수명이 급격히 감소하게 된다.⁽⁶⁾ 따라서 고출력 LED 가로등 개발에 있어서, 충분한 방열량 확보를 위한 방열 구조물 설계가 중요하다. 또한 LED 가로등 사용시, 방열 구조물과 switched-mode power supply(SMPS)가 추가되어 기존 조명에 비해 질량이 증가한다. 무거운 LED 가로등을 기존 가로등용 기둥에 설치하면 안전 문제가 발생할 위험이 높아진다. 따라서 방열 구조물의 경량화 또한 LED 가로등의 중요한 개발 목표이다.

최근 LED 조명의 방열 구조물로서 히트 싱크를 적용하기 위한 연구가 진행되었다.⁽⁷⁾ 히트 싱크의 양산 방식은 크게 압출과 다이캐스팅으로 나뉜다. 다이 캐스팅 양산 히트 싱크의 경우, 3차원적인 디자인 설계가 가능하지만, LED 가로등 출력에 따라 다른 디자인의 금형을 새로 만들어야 하기 때문에 양산 효율성이 낮은 단점이 있다.⁽⁸⁾ 압출 양산 히트 싱크의 경우, 2차원적인 형상 설계와 단순한 후가공만 가능 하지만, 하나의 금형으로 압출 길이 조절을 함으로써 다양한 출력용 히트 싱크를 제작할 수 있는 장점이 있다. 대부분의 LED 가로등 히트 싱크에 관한 연구에서, 히트 싱크는 외부에 노출되어 있다.⁽⁹⁻¹¹⁾ 이 경우, 가로등 주위에 있는 나뭇잎 또는 새의 둥지 및 분비물로 인한 오염으로 방열 성능이 급격히 악화되는 문제점이 발생하였다. 이에 따라 Fig. 1과 같이 히트 싱크가 외부 구조물속에 내장되어 있는 방열 구조물이 개발되었다⁽¹²⁾. 하지만 히트 싱크가 내장 될 경우, 외부 구조물로 인해 외부 공기의 유출입이 자유롭지 않아 방열 성능 확보에 어려움이 있다. 따라서 열전달 및 공기 유동을 고려한 효율적인 방열 구조물 설계가 필요하다. Ishizuka and Nakagawa⁽¹³⁾는 전자 장비 케이스에서 vent의 사이즈 및 형태에 따른 자연 대류 열전달을 연구하였다. 하지만 그들이 제안한 전자 장비 케이스는 LED 가로등의 방열 구조물과 형상이 상이하고, 발열원인 전자 장비의 위치가 다르다. Petroski et al.⁽¹⁴⁾은 flexible graphite를 적용한 LED 가로등용 히트 싱크 내장 방열 구조물을 설계하였다. 그들이 제안한 방열 구조물은 flexible graphite의 적용 가능성만을 검토하고, 방열 성능 개선 또는 경량화를 위한 최적 설계는 진행되지 않았다.

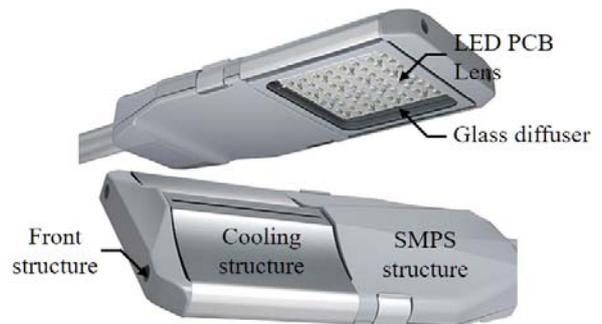
본 연구에서는 LED 가로등용 압출형 방열 구조물을 최적 설계한다. 방열 구조물의 자연 대류와 복사 열전달을 모사할 수 있는 수치 모델을 사용하고, 검증 실

험을 진행한다. 열유동을 분석하여 방열 구조물의 내부 구조와 vent 형상을 제안하고, 가장 방열 성능이 뛰어난 개선 방열 구조물 타입을 정한다. 방열 구조물 형상 인자들의 인자 영향도를 조사하고, 기존 제품의 방열 성능을 유지하면서 방열 구조물을 경량화 시킬 수 있는 최적 설계를 진행한다.

2. 수학적 모델링

2.1 수치 해석 모델

Fig. 1은 본 연구의 대상인 180 W LED 가로등이다. Fig. 1(a)와 같이 LED 가로등은 전면 구조물, 방열 구조물, SMPS 구조물로 구성되어 있으며, 구조물들은 나사로 결합되어 있다. 방열 구조물 하단에는 LED chip이 마운트 된 printed circuit board(PCB)와 폴리 메틸 메타크릴레이트(PMMA) 렌즈가 설치되어 있고, 유리 광확산판과 알루미늄 구조물로 밀폐되어 있다. 압출형 방열 구조물은 Fig. 1(b)와 같이 방열을 위한 환이 설치된 아랫면과 이물질 유입 방지를 위한 윗면이 일체형으로 되어 있다. Fig. 2는 방열 구조물과 주변 공기를 포함한 해석 영역과 형상 인자들을 보여준다. 방열 구조물에는 양쪽의 side vent와 위쪽의 upper vent가 설치되어 있다. 계산 시간을 최소화 하기 위해 대칭 조건을 사용하여 절반에 해당하는 영역을 해석하였다. 열유동을 해석하기 위해 다음과 같은 가정이 적용되었다.



(a) Configuration of LED streetlight



(b) Cross section of cooling structure

Fig. 1 LED streetlight.⁽¹²⁾

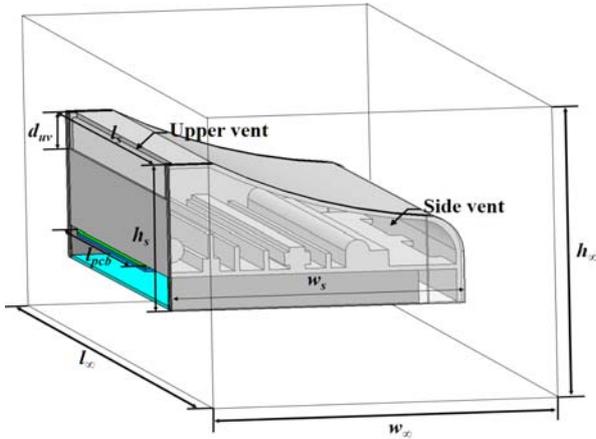


Fig. 2 Computational domain.

- (1) 유동은 정상 상태이다.
- (2) 밀도를 제외한 공기의 물성치와 고체의 물성치는 온도에 독립적이다.
- (3) 공기는 이상기체이다.
- (4) 방열 구조물은 회체(gray body)이며, 확산 복사가 발생한다.

투명 유리나 PMMA는 가시 광선 영역인 0.3~2.8 μm의 단파장 복사 에너지만을 투과시킨다. 하지만 70°C 정도의 PCB에서 방사되는 열복사 에너지는 5 μm 이상의 장파장이다.⁽¹⁵⁻¹⁶⁾ 따라서 LED에서 방사되는 가시 광선은 투명 유리나 PMMA를 그대로 투과하지만, PCB에서 방출되는 열복사 에너지는 투과하지 못한다.

수치 해석 시 연속 방정식, 운동 방정식, 에너지 방정식은 다음과 같은 일반 transport 방정식을 사용하였다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S_\phi \quad (1)$$

여기서, ϕ 는 arbitrary scalar parameter, Γ_ϕ 는 diffusion coefficient, S_ϕ 는 source term이며, Table 1에서 각 방정식에 적용되는 값을 보여준다. Table 1에서 ρ_{op} 는 다음과 같이 구하였다.

Table 1 The arbitrary scalar parameter, diffusivity coefficient and source terms for Eq. (1)

Equation	ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
Continuity	1	0	0
Momentum	u_i	μ	$-\partial P / \partial x_i + S_k$ (for z-direction $S_k = -\rho_{op} g$)
Energy	T	k/c_p	0

$$\rho_{op} = \frac{P_\infty}{(R/M_w) T_\infty} \quad (2)$$

여기서, M_w 는 공기의 분자량이다. 고체면에서의 복사 열전달은 discrete ordinates 복사 모델을 이용하여 다음과 같이 계산하였다.

$$\dot{q}_{in} = \int_{\vec{s} \cdot \vec{n} > 0} I_{in} \vec{s} \cdot \vec{n} d\Omega \quad (3)$$

$$\dot{q}_{out} = (1 - \epsilon) \dot{q}_{in} + \epsilon \sigma T^4 \quad (4)$$

2.2 수치 해석 방법

본 연구의 대상인 180 W LED 가로등의 기존 방열 구조물은 길이 $l_s = 360$ mm, 너비 $w_s = 167$ mm, 높이 $h_s = 90$ mm의 형상을 가지고 있으며 하단에 설치된 PCB 길이는 $l_{pcb} = 250$ mm이다. 공기 입구인 side vent의 형상을 결정하는 기하학적 수치는 길이 $l_{sv} = 107$ mm, 너비 $w_{sv} = 7$ mm, 간격 $p_{sv} = 42$ mm이다. 공기 출구인 upper vent의 기하학적 수치는 길이 $l_{uv} = 350$ mm, 너비 $w_w = 8$ mm, 깊이 $d_{uv} = 22.5$ mm이다. 해석 영역의 길이 l_∞ 를 $1.2l_s \sim 2.4l_s$, 너비 w_∞ 는 $1.2w_s \sim 2w_s$, 높이 h_∞ 은 $1.2h_s \sim 2.4h_s$ 로 변화 시키며, PCB 중앙 온도변화가 0.5% 이내에 들어오는 해석 영역을 탐색하였다. 그 결과 해석 공기 영역은 $l_\infty = 1.5l_s$, $w_\infty = 1.5w_s$, $h_\infty = 2h_s$ 로 각각 설정되었다. 또한, 발열원인 LED chip 90개가 2 mm 두께의 메탈 PCB에 일정한 패턴으로 분산 설치되어 있어, PCB에 체적 열 생성항을 설정하여 LED chip의 발열을 모사하였다. 사면체 격자 수를 3,764,221~9,798,831개로 변화 시키며 격자 의존성을 조사하였다. 그 결과 PCB 중앙 온도 변화가 0.5% 이내인 8,776,813개 격자를 기준 격자로 정하였다. 경계층이 생성 되는 고체 표면 주변에는 작은 격자를 배치하였다. ANSYS ICEM release 16.1를 이용하여 격자를 생성하였다. 상용 CFD 해석 프로그램인 ANSYS Fluent release 16.1를 이용하여 식(1)로 표현되는 연속 방정식, 운동 방정식, 에너지 방정식을 이산화 하고 계산하였다. 종속 변수의 상대 오차 최대값이 10^{-5} 이하일 때 계산이 수렴된 것으로 판정하였다.

3. 실험 및 검증

방열 구조물은 알루미늄 합금 6061($\rho = 2700$ kg/m³, $k = 180$ W/m·°C, $\epsilon = 0.8$)으로, 2 mm 두께의 렌즈는 투명 PMMA($k = 0.2$ W/m·°C, $\epsilon = 0.85$)으로, 유리 광확산판은 투명 유리($k = 1$ W/m·°C, $\epsilon = 0.67$)로 되어 있다. SMPS의 입력 교류 전력과 출력 직류 전력을 측정하기 위하여, SMPS 양단에 멀티미터를 설치하였다. PCB 중앙의 온도는 열전대(type-T) 4개와 데이터 수집장치(NI

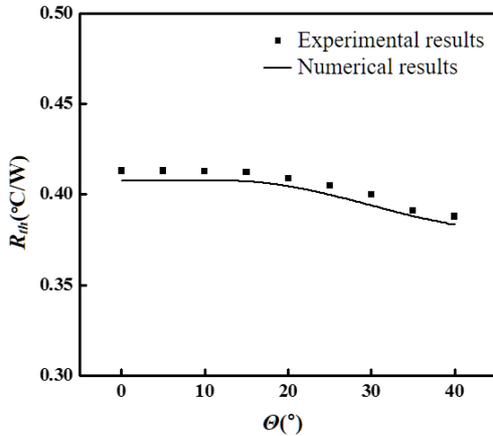


Fig. 3 Experimental and numerical results($T_{\infty} = 26^{\circ}\text{C}$).

SCXI)를 이용하여 측정 하였다. 방열 구조물의 방열 성능 인자인 열저항 R_{th} 는 다음 식으로 계산하였다.

$$R_{th} = \frac{T_{PCB} - T_{\infty}}{\dot{Q}} \quad (5)$$

여기서,

$$\dot{Q} = \eta(1 - \gamma)P_{SMPS,AC} \quad (6)$$

$$\eta = \frac{P_{SMPS,DC}}{P_{SMPS,AC}} \quad (7)$$

$T_{\infty} = 26^{\circ}\text{C}$ 조건에서 $P_{SMPS,AC} = 186\text{ W}$, $\eta = 0.95$ 로 측정되었고, $\gamma = 0.3$ 이다. LED 가로등의 설치 각도 θ 를 $0\sim 40^{\circ}$ 범위에서 5° 씩 변경하며 실험을 5회 반복하여 실시하였다. 방열 구조물 열저항 측정 결과의 최대 불확실도는 2.8%이다.⁽¹⁷⁾

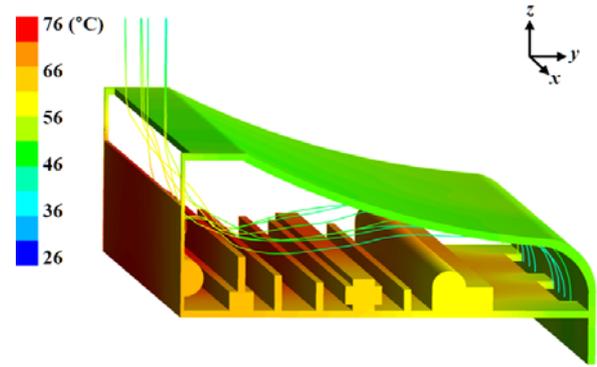
Fig. 3은 실험 결과와 수치 해석 결과를 비교한 그래프이다. 실험 결과와 수치 해석 결과의 오차가 2% 이내로 서로 잘 일치하였다. 이 그림에서 보듯이, θ 증가에 따라 방열 성능이 향상되는 것은 방열 구조물 내부 유동이 흰 길이 방향으로 형성되기 때문이다.

4. 결과 및 고찰

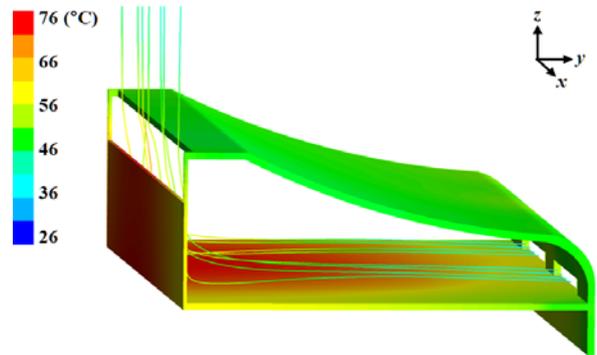
앞서 설명한 수치 해석 모델을 기반으로 기존 180 W LED 가로등용 압출형 방열 구조물에 대한 열유동 해석을 진행하여 문제점을 파악하고 이를 극복할 수 있는 개선 방열 구조물을 제안한다.

4.1 기존 방열 구조물 열유동 분석

Fig. 4(a)는 실내 온도 $T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$ 및 설치 각도 $\theta =$



(a) Existing cooling structure



(b) Improved cooling structure

Fig. 4 Streamlines of inlet air and temperature contours of cooling structures.

0° 조건에서 기존 방열 구조물의 열유동을 해석한 결과이다. $R_{th,ex} = 0.408^{\circ}\text{C/W}$, $M_{s,ex} = 4.05\text{ kg}$ 으로 계산되었다. 유선을 보면, side vent가 방열 구조물 아랫면에 설치되어 있어 외부 공기 유입 방향이 z 축 방향이다. 따라서 냉각 공기가 방열 구조물 윗면을 따라 유입되어 발열면인 방열 구조물 아랫면과 열교환을 하지 못한다. 또한 압출형 구조물 특성상 흰들이 압출 방향인 x 축 방향으로 설치되어있어 공기의 유동을 방해하고 있다. 이는 발열면과 외부 공기의 열교환량을 감소시키는 요인이다. 온도 분포를 보면, upper vent와 side vent로 인해 윗면으로의 전도 열저항이 증가하여, 방열 구조물 아랫면의 열이 윗면으로 원활히 전달되지 않고 있다. 따라서 방열 구조물 윗면을 통한 방열 효과는 거의 없다. 이로써, side vent 위치 변경 및 흰 형상 변경으로 외부 공기와 발열면과의 열교환량 증가, vent 형상 변경으로 방열 구조물 윗면을 통한 방열 효과 개선 가능성을 확인하였다.

4.2 개선 방열 구조물 타입 선정

기존 방열 구조물의 문제점을 극복하기 위하여 side

vent를 구조물 옆면에 설치하고, 흰을 제거한 방열 구조물을 제안하였다. Fig. 4(b)는 개선 방열 구조물의 열 유동을 수치 해석한 결과이다. $R_{th} = 0.419 \text{ } ^\circ\text{C/W}$, $M_s =$

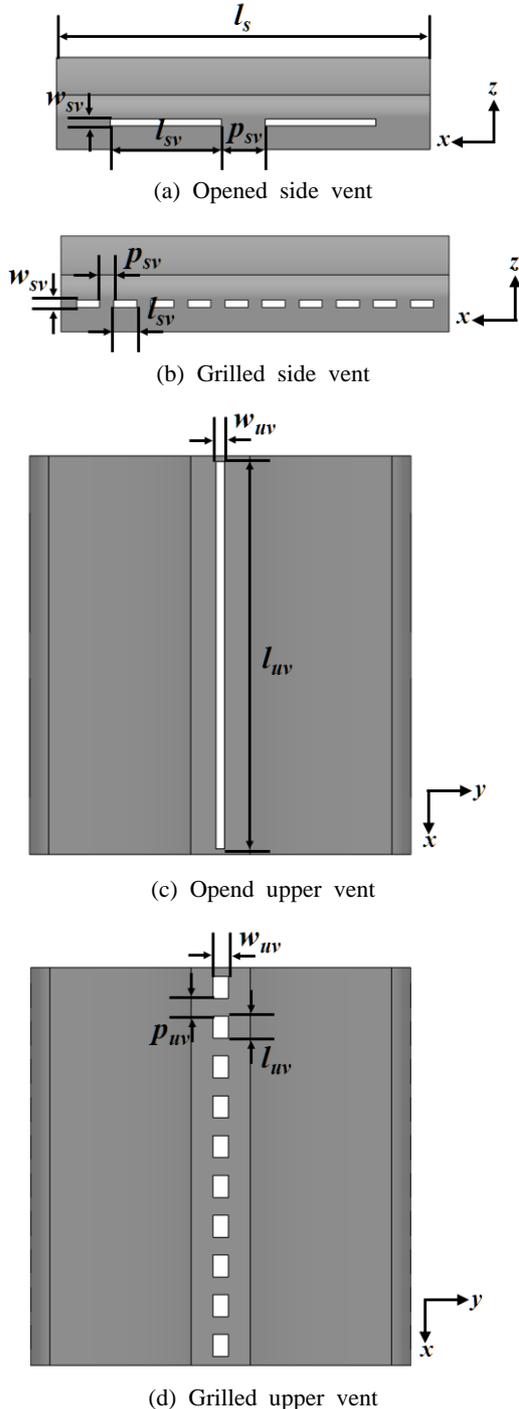


Fig. 5 Configuration and geometric factors of different vent types.

2.44 kg으로 계산되었다. 이는 기존 방열 구조물의 열 저항을 거의 같은 값으로 유지하면서 40% 경량화한 것이다. 외부 공기와 발열면과의 열교환이 수월해짐에 따라, 흰 제거로 열교환 면적이 감소함에도 불구하고 방열 성능을 유지할 수 있었다. 기존 opened vent로 인한 발열면과 윗면 사이의 높은 전도 열저항을 개선하기 위하여 Fig. 5와 같이 grided vent를 제안하였다.

Grilled side vent의 형상은 $l_{sv} = 21.4 \text{ mm}$, $w_{sv} = 7 \text{ mm}$, $p_{sv} = 13 \text{ mm}$ 이다. Grilled upper vent의 경우, vent 간격 p_{uv} 가 형상 인자로 추가 되었다. Grilled upper vent의 형상은 $l_{uv} = 20 \text{ mm}$, $w_{uv} = 14 \text{ mm}$, $p_{uv} = 16 \text{ mm}$, $d_{uv} = 22.5 \text{ mm}$ 의 형상이다. 각 vent의 opened 타입과 grided 타입의 vent 면적은 동일하다. Table 2는 side와 upper vent타입을 변경하며 수행한 수치 해석 결과이다. Side와 upper vent에 모두 grided 타입을 적용하면 전도 열저항이 개선되어 방열 구조물 아랫면으로부터 윗면으로의 열전달이 수월해진다. 이로 인해 방열 구조물의 넓은 윗면을 방열면으로 활용하게 됨으로써 방열 구조물의 질량을 유지하면서 방열 성능을 10% 개선할 수 있었다.

따라서 side vent 구조물 옆면에 설치, 흰 제거, side와 upper vent에 grided type을 적용한 방열 구조물을 개선 방열 구조물 타입으로 선정하였다.

4.3 인자 영향도

$T_\infty = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$, $\theta = 0^\circ$ 조건에서 방열 구조물의 형상 인자인 l_{sv} , w_{sv} , p_{sv} , l_{uv} , w_{uv} , p_{uv} , d_{uv} , l_s 가 방열 구조물의 열저항과 질량에 미치는 영향을 조사하였다. 인자 영향도에서 고려된 형상 인자들의 기준값 및 탐색 범위는 Table 3과 같다. 각각의 형상 인자들은 다음 식에 의하여 무차원화 하였다.

$$X_i = \frac{x_i - x_{i,\max}}{x_{i,\max} - x_{i,\min}} \quad (8)$$

Fig. 6(a)는 side vent의 형상 인자인 $X_1 \sim X_3$ 값을 변경시키며 계산한 방열 구조물 열저항과 질량이다.

$X_2(w_{sv})$ 이 가장 큰 영향력을 가지고 있었으며, $X_1(l_{sv})$ 과 $X_3(p_{sv})$ 는 방열 구조물 질량에 1% 미만의 적은 영향을 끼쳤다. X_2 가 커질수록 side vent의 면적 증가로 공기 유입량이 증가하여 방열 성능이 개선되었다. Fig. 6(b)는 upper vent의 형상 인자인 $X_4 \sim X_7$ 값을 변경하며 계산한 방열 구조물 열저항과 질량이다. $X_5(w_{uv})$ 과 $X_7(d_{uv})$ 이 큰 영향력을 가지고 있었으며, $X_4(l_{uv})$ 와 $X_6(p_{uv})$ 는 방열 성능에 1% 미만의 적은 영향력을 가지고 있었다. X_5 가 커질수록 upper vent의 면적 증가로 공기 유입량이 증가한다. X_7 가 작아질수록 발열면과 윗면과의 전도 열

Table 2 Thermal resistance of the cooling structures when different vent types were applied

Side vent type	Upper vent type	$R_{th}(\text{°C/W})$	Improvement(%)
opened	opened	0.419	0
grilled	opened	0.408	2.6
opened	grilled	0.385	8.0
grilled	grilled	0.378	9.8

Table 3 Reference value and range of geometric factors in the parameter study.

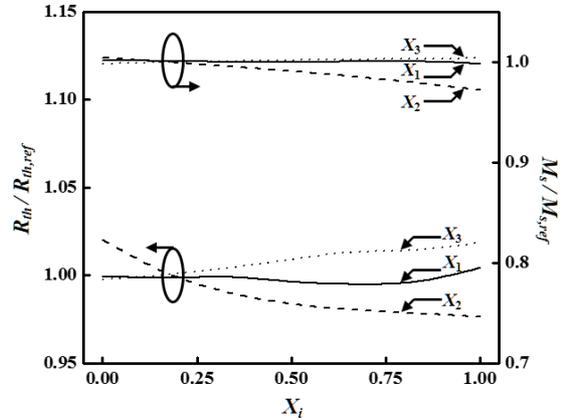
Geometric factor (non-dimensional)	Reference (mm)	Range (mm)
$l_{sv}(x_1)$	21.4	$11.4 \leq x_1 \leq 41.4$
$w_{sv}(x_2)$	7	$4 \leq x_2 \leq 22$
$p_{sv}(x_3)$	13	$8 \leq x_3 \leq 38$
$l_{uv}(x_4)$	20	$10 \leq x_4 \leq 40$
$w_{uv}(x_5)$	14	$8 \leq x_5 \leq 44$
$p_{uv}(x_6)$	16	$6 \leq x_6 \leq 36$
$d_{uv}(x_7)$	22.5	$7.5 \leq x_7 \leq 37.5$
$l_s(x_8)$	360	$260 \leq x_8 \leq 360$

저항이 감소하여 방열 성능이 개선되었다. Fig. 6(c) 구조물 길이 $X_8(l_s)$ 의 인자 영향도 분석 결과이다. X_8 은 인자 영향도 조사에서 고려된 형상 인자 중 가장 지배적인 영향력을 가지고 있었다. X_8 이 작아질수록 전열 면적이 줄어들어 방열 성능이 악화되지만, 질량은 감소하였다. 따라서 인자 영향도 조사 결과 방열 구조물의 방열 성능과 질량에 대한 영향력이 큰 X_2, X_5, X_7, X_8 을 최적 설계를 위한 설계 인자로 설정하였다.

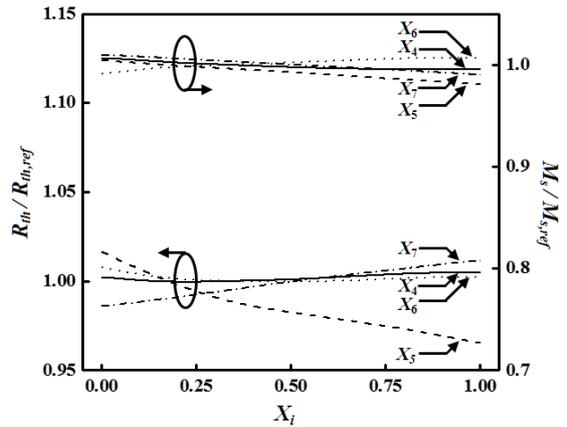
4.4 최적 설계

압출형 방열 구조물을 경량화 하기 위한 최적 설계를 진행하였다. 인자 영향도 조사 결과, 방열 구조물의 방열 성능과 질량에 영향력을 가지고 있는 형상 인자인 X_2, X_5, X_7, X_8 를 설계 인자로 정하였다. 영향력이 적어 최적 설계 인자에서 제외된 X_1, X_3, X_4, X_6 은 기준 값으로 고정하여 최적 설계를 진행하였다. 최적 설계의 목적 함수와 제한 조건은 다음과 같다.

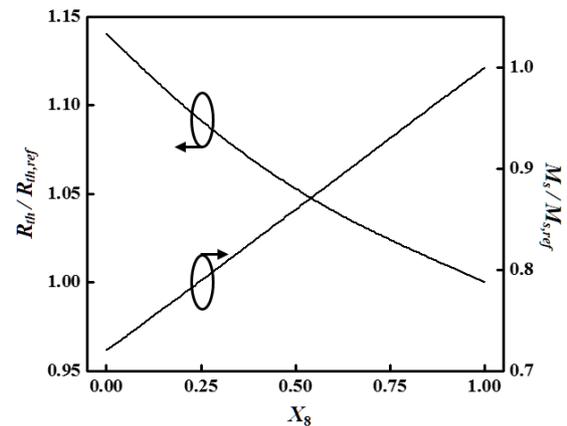
$$\begin{aligned}
 &\text{Find } X_2, X_5, X_7, X_8 \\
 &\text{To Minimize } M_s/M_{s,ex} \\
 &\text{Subject to } R_{th}/R_{th,ex} \leq 1 \\
 &\quad 0 \leq X_2 \leq 1
 \end{aligned} \tag{9}$$



(a) Geometric factors of side vent($X_1 \sim X_3$)



(b) Geometric factors of side vent($X_4 \sim X_7$)



(c) Length of cooling structure(X_8)

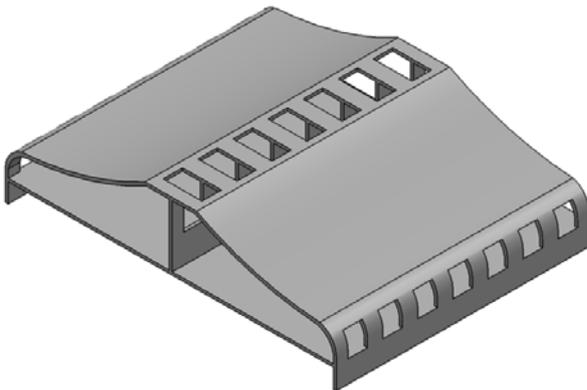
Fig. 6 Effects of geometric factors on the thermal resistance and mass of cooling structures.

$$\begin{aligned}
 &0 \leq X_5 \leq 1 \\
 &0 \leq X_7 \leq 1 \\
 &0 \leq X_8 \leq 1
 \end{aligned}$$

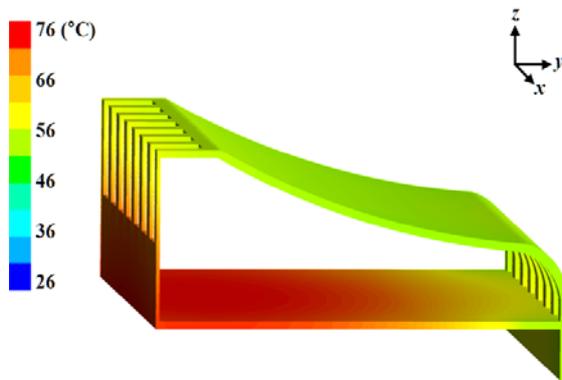
최적 설계 프로세스는 상용 최적 설계 프로그램인 PIANo version 3.2를 활용하였다. 직교 배열표 $L_{25}(5^4)$ 의 25개의 실험점을 확보하고, Kriging 모델을 이용하여 반응 표면을 생성하였다. 생성된 반응 표면을 기반으로 진화 알고리즘을 이용하여 최적 값을 도출 하였다. 진화 알고리즘에 적용된 변수 값은 다음과 같다.

- Population size : 150
- Maximum number of generation : 250
- Violated constraint limit : 0.003
- Number of consecutive generations without improvement : 15
- Mutation probability : 0.01
- Selection probability : 0.15
- Initial seed value : 150

Fig. 7은 최적 설계된 방열 구조물이다. 최적 구조물은 $l_{sv} = 21.4$ mm, $w_{sv} = 23$ mm, $p_{sv} = 13$ mm, $l_w = 20$ mm, $w_w = 40$ mm, $p_w = 16$ mm, $d_w = 36.5$ mm, $l_s = 260$



(a) Schematic diagram



(b) Temperature contours

Fig. 7 Schematic diagram and temperature contour of the optimized cooling structure.

mm 이하 수치를 가지고 있으며, 이 때 열저항과 질량은 각각 $R_{th} = 0.379$ °C/W, $M_s = 1.64$ kg으로 계산 되었다. 이는 기존 방열 구조물의 방열 성능을 10% 개선하면서 60% 경량화한 결과이다.

5. 결 론

본 연구에서는 180 W LED 가로등에 적용할 수 있는 압출형 방열 구조물을 경량화 하기 위한 최적 설계를 하였다. 이상 기체 가정과 discrete ordinates 복사 모델을 이용하여 방열 구조물의 자연 대류와 복사 열전달을 수치 해석을 통해 모사하고, 실험을 통해 수치 모델의 타당성을 검증하였다. 기존 제품의 수치해석 및 열유동 분석 결과, vent 위치, 흰 형상, vent 형상 변경을 통한 개선 가능성을 확인하였다. 기존 제품의 문제점들을 극복한 개선 방열 구조물 타입을 제안하고, 형상 인자들의 인자 영향도를 조사하였다. 이를 바탕으로 방열 구조물의 방열 성능과 질량에 영향력을 가지는 4개의 형상 인자를 최적 설계를 위한 설계 인자로 선정하였다. 직교 배열표를 이용해 실험점을 확보하고, Kriging 모델로 반응 표면을 생성하였다. 진화 알고리즘을 이용하여 방열 구조물 경량화를 위한 최적 설계를 하였다. 그 결과로 기존 방열 구조물의 방열 성능을 10% 개선하면서 60% 경량화된 압출형 방열 구조물을 제안하였다.

후 기

본 연구는 2016년도 산업통상자원부(MOTIE)의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 에너지 수요관리 핵심 기술개발사업(No. 20162010103830)과 인력양성사업(No. 20164010200860)의 지원을 받아 수행한 과제입니다.

References

1. De Almeida, A., Santos, B., Paolo, B., and Quicheron, M., 2014, Solid state lighting review : Potential and challenges in Europe, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 34, pp. 30-48.
2. Jang, D., Yu, S. H., and Lee, K. S., 2012, Multidisciplinary optimization of a pin-fin radial heat sink for LED lighting applications, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 55, pp. 515-521.
3. Yu, S. H., Lee, K. S., and Yook, S. J., 2010, Natural convection around a radial heat sink, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 53, pp. 2935-2938.
4. Yu, S. H., Lee, K. S., and Yook, S. J., 2011, Opti-

- imum design of a radial heat sink under natural convection, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, pp. 2499-2505.
5. Choi, S. H., Song, S. M., and Kim, D. N., 2011, The feasibility of LED lighting as the street light's lighting, *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning and Design*, Vol. 27, pp. 65-72.
 6. Park, S. J., Jang, D., Yook, S. J., and Lee, K. S., 2016, Optimization of chimney design for cooling efficiency of a radial heat sink in a LED downlight, *Energy Conversion and Management*, Vol. 114, pp. 180-187.
 7. Jang, D., Yook, S. J., and Lee, K. S., 2014, Optimum design of a radial heat sink with a fin-height profile for high-power LED lighting applications, *Applied Energy*, Vol. 116, pp. 260-268.
 8. Park, S. J., Jang, D., and Lee, K. S., 2015, Thermal performance improvement of a radial heat sink with a hollow cylinder for LED downlight applications, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 89, pp. 1184-1189.
 9. Luo, X., Xiong, W., and Liu, S., 2008, A simplified thermal resistance network model for high power LED street lamp, *Proceedings, International Conference on Electronic Packaging Technology and High Density Packaging, ICEPT-HDP*, pp. 1-7.
 10. Ma, H. K., Chen, B. R., Lan, H. W., and Chao, C. Y., 2010, Study of an LED device with a honeycomb heatsink, *Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*, pp. 289-298.
 11. Tang, H., Li, D., Pan, M., Yang, T., Yuan, C., and Fan, X., 2013, Thermal analysis and optimization design of LED streetlight module, *10th China International Forum on Solid State Lighting, China SSL*, pp. 193-197.
 12. www.lglighting.co.kr.
 13. Ishizuka, M. and Nakagawa, S., 2008, Study on the natural air cooling design of electronic equipment casings : Effects of the height and size of outlet vent on the flow resistance, *11th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, I-THERM*, pp. 555-560.
 14. Petroski, J., Norley, J., Schober, J., Reis, B., and Reynolds, R. A., 2010, Conduction cooling of large LED array systems, *12th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, I-THERM*, pp. 1-10.
 15. Michael, F. M., 2008, *Radiative Heat Transfer*, Second Edition, Academic Press, San Diego, pp. 8, 99.
 16. Boulet, P., Gerardin, J., Acem, Z., Parent, G., Collin, A., Pizzo, Y., and Porterie, B., 2014, Optical and radiative properties of clear PMMA samples exposed to a radiant heat flux, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 82, pp. 1-8.
 17. Moffat, R. J., 1988, Describing the uncertainties in experimental results, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 1, pp. 3-17.