

# 승용 전조등 LED 램프의 방열판 자연 냉각특성

유재용\*, 박설현\*\*,#

\*현대자동차 광주 서비스 센터, \*\*조선대학교 기계시스템 미래자동차 공학부

## Natural Cooling Characteristics of a Heat Sink for LED Headlight used in Passenger Cars

Jae-Young Yoo\*, Seul-Hyun Park\*\*,#

\*Hyundai Motor Company, Gwangju service Center, Gwangju 61738, Korea

#School of Mechanical System & Automotive Engineering, Chosun University, Korea

(Received 17 March 2017; received in revised form 18 March 2017; accepted 3 April 2017)

### ABSTRACT

The objective of this study is to investigate the cooling characteristics of a heat sink for an LED headlight used in passenger cars. To this end, this study conducts the experimental and numerical analysis of the heat sink heated at constant heat fluxes without air flow applied. In the experiments, heat was transferred at a constant heat flux through the bottom of a heat sink. The measured temperature on pre-selected locations of the heat sink was in good agreement with the numerically predicted one. The experimental and numerical results indicate that the convective heat transfer coefficient for the natural convection mode was decreased by increasing the heat flux applied to the bottom of heat sink, lowering the cooling capabilities.

**Key Words** : Heatsink(방열판), Natural Cooling(자연냉각), LED Headlight(LED 전조등), Heat Transfer(열전달)

### 1. 서 론

1880년대 후반, 첫 자동차가 등장하면서 그 부속품인 전조등도 함께 발전해 나가기 시작했다. 최초의 전조등은 불꽃이 쉽게 꺼지지 않는 아세틸렌 전등을 사용하였으며 빛의 직진성이 없이 주변만 비추주는 정도였다. 그 후, 필라멘트를 이용한 백열전구를 주로 사용했었으나 항상 움직이는 자동차의 특성으로 인해 수명이 짧고 휘도가 낮아 전조등으로서의 한계가 있었다. 이러한 단점들을 보완하기 위해 여러 단계를 거쳐 현재에도 전조등의 광원으로서 가장 많이 사용되고 있는 할로겐램프가

개발되었다. 할로겐 가스를 충전하여 백열전구에 비해 텅스텐증발을 더욱 억제한 이 램프는, 빛의 확산 각이 넓고 시야 확보가 용이하며<sup>[1]</sup>, 소형화가 가능해 편의성도 향상되었다. 전조등의 발전은 여기서 멈추지 않고 형광등과 같은 원리인 고압 전조등 HID(High intensity discharge) 램프가 개발되었고 제논등을 지나 이제 LED로 향하고 있다.

전조등의 상향등은 전방 100m를 비출 수 있어야 하고 하향은 전방 40m를 비춰야하기에 너무 어두워 서도, 밝아서도 안 된다<sup>[2]</sup>. 따라서 현재에는 카메라 및 센서 등을 이용하여 시인성을 높이고, 자동차의 방향보다는 운전자의 시각에 초점을 맞추어지는 기술을 실현할 수 있는 지능형 전조등(AFLS, Adaptive Front Lighting System)이 시장에 각광을 받고 있다

# Corresponding Author : isaac@chosun.ac.kr

Tel: +82-62-230-7174, Fax: +82-62-230-7171

[3-5]. AFLS는 밀폐된 공간 안에서 LED 램프가 발광 시 발생하는 열로부터 각종 센서의 수명과 성능을 유지시켜 주기 위해 LED 램프의 온도상승을 억제하여 한다. 아울러 LED 램프의 온도 상승은 광 출력의 불안정성을 초래하기 때문에 LED의 방열성능을 향상시키기 위한 방안과 그 대책이 필요하다. 방열문제의 해결책으로 현재 전조등의 LED 램프에 적용중인 방열 시스템은 히트싱크<sup>[6]</sup>이다. 히트 싱크 (Heat Sink)는 발열체에서 발생하는 열을 확산, 배출 시켜주는 구조물로 일반적으로 흰(fin) 길이 및 두께, 거리 등이 주요 성능을 결정하는 요소이며 주로 알루미늄 재질로 제작 된다<sup>[7]</sup>.

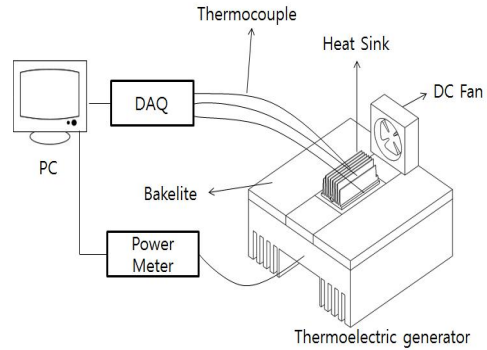
본 논문에서는 LED 전조등 내부의 협소한 공간에 장착되어 있는 히트싱크의 성능을 분석해보기 승용 모델의 전조등 장착되어 있는 히트싱크를 탈거하여 자연대류 상태에서 열전달 특성을 고찰해보고자 하였다. 특히 히트싱크에 임의의 열유속을 가한 뒤 자연대류상에서 히트싱크와 주위와의 열전달 특성을 고찰해 보았다. 히트싱크와 주위와의 열전달 특성을 파악하기 위해서 열유속이 인가된 히트싱크의 주요 지점에서 온도를 먼저 실험적으로 측정한 뒤, 수치해석 결과와 비교하여 검증하였다. 아울러 온도측정결과와 시뮬레이션 결과를 자연대류상태의 대류열전달계수를 계산하여 열전달 특성을 파악해 보았다.

## 2. 실험 및 수치 해석방법

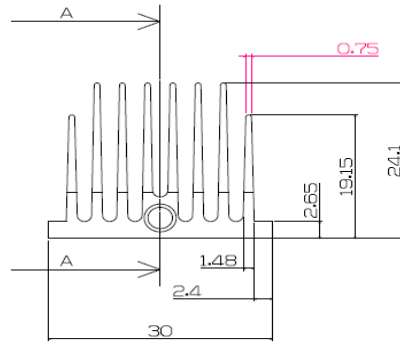
### 2.1 실험장치 및 방법

본 연구에서 실험에 사용된 히트싱크는 알루미늄 재질의 압출 성형품으로 표면은 무광 에노다징(anodizing) 처리가 되어있다. LED 램프의 작동 시 열전도로 인해 히트싱크가 가열되는 현상을 모사하기 위해서 인가전압의 크기조절을 통해 가열 표면의 온도 제어가 가능한 열전 소자(thermoelectric generator)를 사용하였다.

Fig. 1에서 볼 수 있는 것처럼 히트싱크는 열전 소자 어셈블리의 정중앙에 설치되어 있으며 실험에 사용된 히트싱크에는 3쌍의 K타입 열전쌍이 설치하여 실험이 진행되는 동안 데이터 수집 장치(data acquisition device, DAQ)를 통해 열전쌍이 설



(a) Configuration of experimental apparatus



(b) Dimension of heat sink used

Fig. 1 Schematics of experimental apparatus

치된 위치의 온도 정보를 실시간으로 PC에 기록하였다. 열전쌍은 히트싱크의 상단부에 3쌍을 각각 설치하였으며 자세한 위치는 Fig. 2에 표시되어있다. 히트싱크가 장착된 표면을 가열하기 위해 사용된 열전소자는 가열표면의 온도를 일정하게 유지하기 위해서 (열전소자의 가열면의) 반대편 편인 냉각표면에 (가열표면에 장착된 히트싱크에 비해) 상대적으로 부피가 히트싱크와 팬을 장착하였다.

또한 가열된 표면에 장착된 히트싱크의 앞·뒷면과 좌·우면은 베이클라이트(bakelite)로 단열 처리하였다. 히트싱크를 통해 전달된 열전달율(heat transfer rate)을 측정하기 위해 전력량계(power meter)를 설치하고 전압과 전류를 실시간으로 기록하였다.

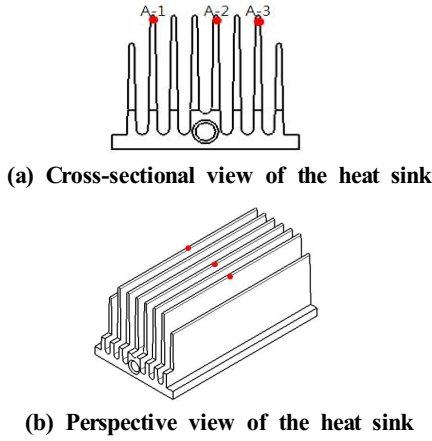


Fig. 2 Location of thermocouples attached to the heat sink

## 2.2 수치해석 방법 및 지배방정식

수치해석은 상용 열유체 코드인 Fluent를 사용하여 수행하였다. 유체의 열적 특성과 거동을 모사하기 위해 널리 쓰이는 유한체적법을 사용하였으며 대류열전달의 예측을 위해 1차 Upwind differential scheme이 적용하였다. 직교좌표계의 텐서(cartesian tensor)항으로 나타낸 지배방정식은 다음과 같다.

연속방정식(Continuity equation)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial}(\rho u_j) = S_m \quad (1)$$

운동량방정식(Momentum equation)

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + S_i \quad (2)$$

에너지방정식(Energy equation)

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho H u_j + F_{h,j} - u_i \tau_{ij}) = \frac{\partial p}{\partial t} + S_i + S_h \quad (3)$$

부력(Buoyant forces)

$$S_i = g_i(\rho - \rho_0) \quad (4)$$

여기서,  $\rho$ 는 공기의 밀도(Air density),  $\rho_0$ 는 기준공기의 밀도(Reference air density),  $t$ 는 시간,  $u_j$ 는  $x$ 축 방향요소의 절대유속(Absolute fluid velocity component in direction  $x_i$ ,  $\tau_{ij}$ 는 응력 텐서(Stress tensor components),  $H$ 는 엔탈피(Total enthalpy),  $F_{h,j}$ 는 확산에너지

Table 1 Thermal properties of aluminum heat sink <sup>[8]</sup>

Properties in 300 K			
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (J/kg.K)	$k$ (W/m.K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)
2702	903	237	97.1

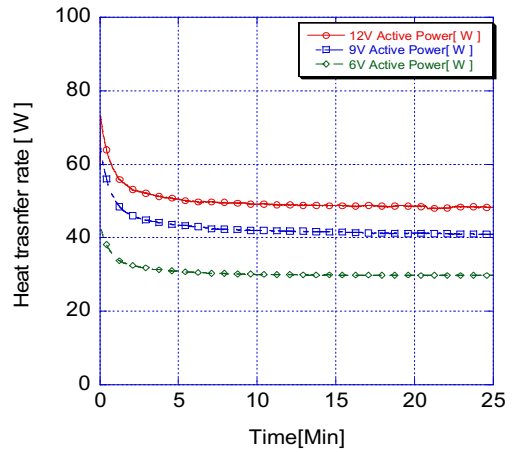


Fig. 3 Measured heat transfer rates as a function of time

(Diffusion energy flux in direction  $x_j$ ),  $p$ 는 압력 (Piezometric pressure),  $S_i$ 는 운동량(Momentum source),  $S_m$ 은 질량 소스(Mass source),  $S_h$ 는 에너지 소스 (Energy source),  $x_i$ 는 직교좌표(Cartesian coordinate),  $g_i$ 는 중력가속도(Acceleration of gravity)이다.

해석 영역 (domain)의 절점(node) 수는 539,975개, 히트싱크 상의 총 절점(node)는 175,307개이며 해석에 사용된 히트싱크의 알루미늄의 열물성치는 Table. 1에 정리되어 있다.

히트싱크의 방열 성능을 비교하기 위하여 히트싱크 바닥면에 일정한 열유속(constant heat flux)을 열하중 조건을 설정하였다. 계산 조건 별 열유속은 6~12 Volt 사이의 직류 전압을 열전소자에 인가하고 전력량계에서 측정된 열전달율을 히트싱크의 바닥 단면적으로 나누어서 결정하였다. 전력량계로 측정된 열전달율은 Fig. 3에 도시되어 있으며, 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 전압이 인가된 후 5분

이 지나면 히트싱크의 바닥면으로 전달되는 열전달율은 일정하게 유지되는 것을 관찰할 수 있다.

### 3. 실험/수치해석 결과 및 고찰

본 연구에서는 앞서 기술한 것처럼 열전소자에 6~12 Volt 사이의 직류 전압을 인가하였고 인가된 전압의 크기 따라 증가하는 열전소자의 표면의 온도를 Fig. 4에 도시하였다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 인가된 전압의 크기가 증가함에 따라 측정된 표면의 온도도 비례하여 증가함을 관찰할 수 있다. 전압을 인가한 초기에는 표면의 온도가 급격히 증가하지만 모든 실험조건 (6V, 9V, 12V)에서 10분이 지나면서 표면의 온도는 각각 약 58°C, 84°C, 101°C 로 일정하게 유지됨을 확인하였다.

그림에서 볼 수 있는 바와 같이 인가전압이 6V에서 12V로 증가함에 따라 측정 지점의 온도는 약 53°C에서 89°C로 증가하였으며 모든 경우에서 측정 지점 3곳 간의 온도 편차는  $\pm 1.5^\circ\text{C}$  이내였다.

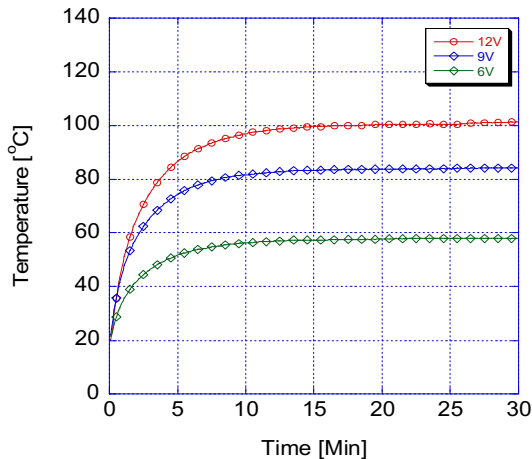
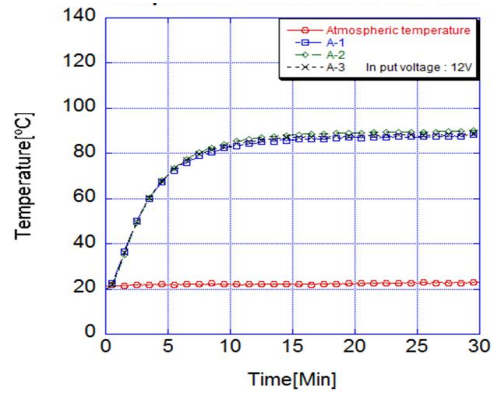
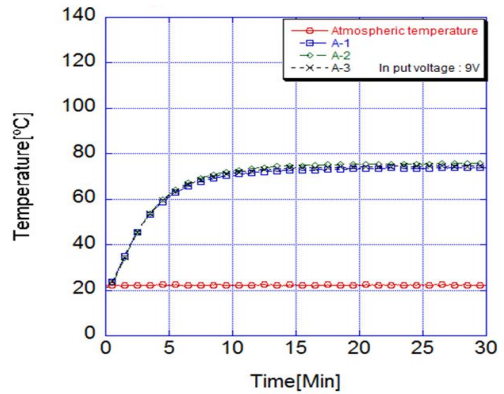


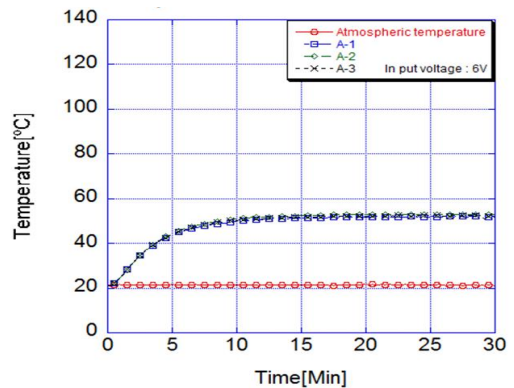
Fig. 4 Measured temperature of the heated surface on a thermoelectric generator as a function of time



(a) with 12 volts applied



(b) with 9 volts applied

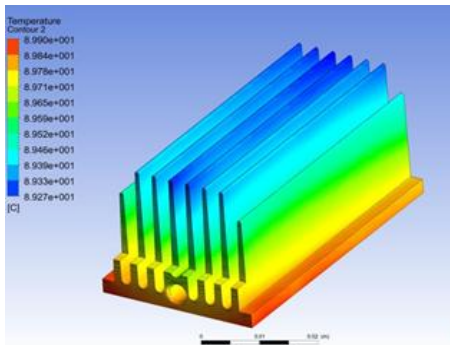


(c) with 6 volts applied

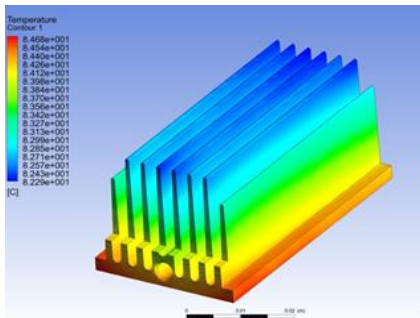
Fig. 5 Measured temperatures at pre-selected location on the heat sink

**Table 2 Summary of average temperature of the heat sink for applied voltages**

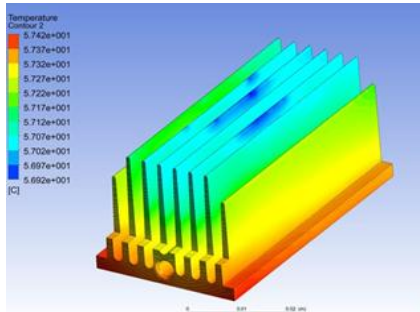
Applied voltages [V]	Average Temperature [°C]
6	56
9	83
12	88



(a) with 12 volts applied



(b) with 9 volts applied



(c) with 6 volts applied

**Fig. 6 Computed temperature distributions of the heat sink**

Fig. 6은 열전소자에 인가된 전압이 6V에서 12V로 증가함에 따라 증가하는 열유속을 경계조건으로 하여 계산된 히트싱크의 흰 표면의 온도분포이다. 그림을 살펴보면, 인가된 전압의 크기와 상관없이 히트싱크에서 최고 온도부인 바닥면과 최저 온도부인 히트싱크 상단면의 온도 차는 약 2°C 이내로 정상상태에 이르면 거의 열평형이 되어가는 것을 알 수 있다. 다만 인가된 전압의 크기에 따라 차이는 있지만 히트싱크의 표면적이 상대적으로 줄어드는 좌우 측면과 전면의 온도가 히트싱크 흰 표면의 온도 평균값(Table. 2)보다 높은 것을 알 수 있다. 수치해석을 통해 계산된 히트 싱크의 흰의 평균 온도는 실험 결과와 잘 일치하고 있어 수치 해석 결과의 타당성을 확보했다고 할 수 있다.

가열된 흰의 표면 온도와 주위와의 온도 차로 인해 히트싱크 부근에 유체의 온도가 상승하면서 밀도가 감소하고, 이로 인한 부력의 작용으로 발생하는 자연대류현상이 전조등의 내부 유동에 지배적이라고 할 수 있다.

즉 히트싱크와 같은 열원은 LED 전조등 내부의 한정된 공기의 자연대류를 유발할 수 있으며 이와 같은 자연대류 현상을 해석하기 위해서는 부력의 영향을 (5)을 이용하여 고려해야 된다<sup>[9]</sup>.

$$Ra_L = Gr \times Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} \times Pr \quad (5)$$

L은 형상의 특성 길이(m), RaL는 Rayleigh 수, Gr은 Grashof 수, Pr은 Prandtl 수, g는 중력가속도, β는 체적팽창계수, Ts는 흰의 표면온도, T∞는 흰 면에서 멀리 떨어진 유체의 온도, ν는 유체의 동점성계수이다. 히트싱크의 설계 시 주어진 바탕면적에서 조밀하게 배열된 흰과 넓게 배열된 흰을 고려할 수 있다. 조밀하게 배열된 흰을 갖은 히트싱크는 넓은 열전달면적을 갖지만 흰 사이를 통과하는 유체에 추가적인 저항이 생기므로 열전달 계수가 낮아진다. 반면 넓게 배열된 흰을 갖은 히트싱크의 열전달 계수는 높지만 열전달 면적이 좁아진다. 이러한 영향은 Nusselt 수 (NuL)와 Rayleigh 수의 상관관계를 통해 도출된 대류열전달계수, h (convective heat transfer coefficient)를 통해 살펴 볼 수 있다<sup>[9-10]</sup>.

$$h = \frac{Nu_L k}{L} \quad (6)$$

$$Nu_L = 0.68 + \frac{0.67 Ra_L^{1/4}}{[1 + (0.492/Pr)^{1/16}]^{4/9}} \quad (7)$$

한편 주어진 열전달율과 히트싱크의 표면적, 온도차를 알 수 있는 경우, 대류열전달계수는 (8)에 의해서 구할 수 있다.

$$h = \frac{\dot{Q}}{A \Delta T} \quad (8)$$

Fig. 7은 열전소자에서 인가된 전압의 크기에 따라 히트싱크로 전달되는 열전달에 의해 발생하는 자유대류의 대류열전달계수를 도시한 그래프이다. 결과에 제시되어 있는 바와 같이 히트싱크로 유입되는 열전달율이 증가할수록 대류열전달계수는 57.6 W/m<sup>2</sup>K에서 46.7 W/m<sup>2</sup>K로 작아진다. 즉, 열전소자의 인가전압 크기가 증가하여 히트싱크로 유입되는 열량이 증가하는 경우, 주어진 조건에서 자연대류에 의한 냉각성능이 저하됨을 의미한다. 따라서, 히트싱크의 냉각성능 향상을 위해서는 강제대류를 통해 열전달계수의 개선이 필요한 것으로 사료된다.

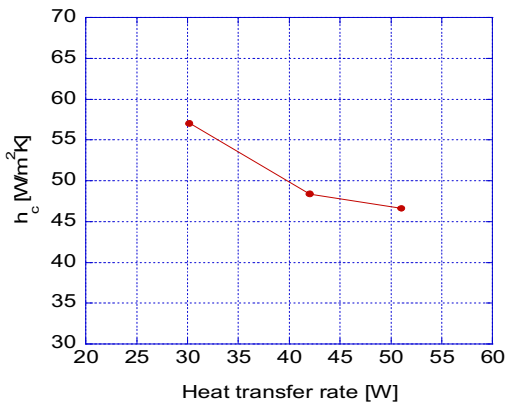


Fig. 7 Convective heat transfer coefficient plotted as a function of heat flow

## 4. 결론

본 연구에서는 승용 LED 전조등의 냉각을 위해 적용된 히트싱크의 방열 성능 알아보기 위하여 실험과 수치해석을 수행하였다. 히트싱크 주위에 공기유속이 가해지지 않고 전체 바닥면을 통해 일정한 열유속이 가해진 자연대류 상태에 대해 실험과 수치해석을 실시하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 1) 열전소자를 이용하여 가열된 히트싱크의 온도는 주위에 공기의 유속이 없는 경우 인가된 전압의 크기, 즉 열전달율이 증가할수록 히트싱크의 평균온도가 높았으며, 최고 온도와 최저 온도의 차이는 약 2℃ 이내로 정상상태를 유지하고 있음을 확인할 수 있었다.
- 2) 히트싱크의 온도 분포는 환의 형상(단면적)에 의해서 영향을 받는 것을 확인하였다. 즉 환의 길이가 짧은 히트싱크의 선단부와 외측면부의 온도분포가 다른 지점에 비해 다소 높은 것을 확인할 수 있었다.
- 3) 히트싱크의 바닥면을 통해 인가된 열유속의 크기(열전달율)가 증가할수록 대류열전달계수가 작아져 냉각효율이 떨어짐을 확인하였다.

## 후 기

“논문은 2016년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음”

## 사용 기호

- $\rho$  : Air density [kg/m<sup>3</sup>]
- $\rho_0$  : Reference air density [kg/m<sup>3</sup>]
- Absolute fluid velocity component in direction  $x_i$  [m/s]
- $\tau_{ij}$  : Stress tensor components

$t$  : Time [sec]  
 $H$  : Total enthalpy [J]  
 $F_{h_i}$  : Diffusion energy flux in direction  $x_j$   
 $S_i$  : Momentum source [kg·m/s]  
 $S_m$  : Mass source  
 $S_h$  : Energy source  
 $x_i$  : Cartesian coordinate  
 $g_i$  : Acceleration of gravity [ $m/s^2$ ]  
 $L$  : length of the feature [m]  
 $Ra_L$  : Rayleigh Number  
 $Gr$  : Grashof Number  
 $Pr$  : Prandtl Number  
 $g$  : Gravitational acceleration [ $m/s^2$ ]  
 $\beta$  : cubical expansion coefficient  
 $T_s$  : Surface temperature of fin  
 $T_\infty$  : Temperature of fluid to stay off the fin  
 $\nu$  : coefficient of kinematic viscosity [ $m^2/s$ ]  
 $h$  : convective heat transfer coefficient  
 $Nu_j$  : Nusselt number

5. Kim, D. H. "Study of Optimized Tuning in Full AFLS Head Lamps" Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress, 196, pp. 1719-1731 (2012).
6. Jung, T. S., Kang, H. K. "Investigation of Natural Convective Heat Flow Characteristics of Heat Sink." Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - B, 37.1 27-33 (2013).
7. Lee, J.S., Jang, H. S., Park, D. K., Hong, H. L. "Heat Analysis for Heat Sink of LED Lamp Using Cooling System." KSPE Conferences, 669-670 (2012).
8. Jung, H. H. "A Study on the Numerical Analysis of Heat Sink for Radiant Heat of Automotive LED Head Lamp" Master Thesis, Chosun University (2011).
9. Incropera, F. P., De Witt, D. P. "Introduction to Heat Transer.", 4th Edition., Wiley, pp.673~667 (2002).
10. Lai, Y., Cordero, N. C., Barthel, F., Tebbe F. R., Kuhn, J., Apfelbeck, R. "Liquid cooling of bright LED's for automotive application", Applied Thermal Engineering, (2009).

## REFEFENCES

1. Jeong, H. R., Kim, J. J., Song, Y. H. "Degradation Analysis of Tungsten filament in Automotive Halogen Lamp." KSME Spring & Fall Conferences, 2143-2148 (2010).
2. Road Traffic Authority Traffic Safety 종합정보지 NO. 422, 31, (2015).
3. Kang, B. D., Lee, H. S., Kim, J. G. "A Study on the Possibility of Applications of LED Headlamp." KSAE Symposium, 177-183 (2006).
4. Lee, H. S., Kang, B. D., Kim, H. G., Choi, Y. T., Hwang, J. Y. "A Study on Optimum Swivel Angle of AFLS Headlamps Considering Various Road Curvatures." KSAE Spring & Fall Conferences 1434-1439 (2006).