

담금 냉각되는 LED 조명엔진의 열특성에 대한 연구

Study on the Thermal Behavior of Immersion Cooled LED Lighting Engines

김 경 준*†

Kyoung Joon Kim*†

(접수일 : 2014년 04월 18일, 수정일 : 2014년 05월 20일, 채택확정 : 2014년 06월 05일)

Abstract: This study is aimed at investigating the thermal behavior of immersion-cooled high power LED lighting engines. 3D CFD models have been generated for the numerical analysis. Five cases in terms of the configuration of LED chips have been explored for various passive cooling conditions of the lighting engine, i.e., the natural air convection with a lens, the natural air convection without a lens, the deionized water-immersion cooling condition with a lens. The numerical study reveals that the deionized water-immersion cooled lighting engine has nearly twice better thermal performance than the natural air convection cooled lighting engine containing a lens. The investigation has also demonstrated that the four chips configuration has the better thermal performance than the single chip configuration.

Key Words : LED Lighting, Immersion Cooling, Thermal Behavior, CFD

— 기 호 설 명 —

g : 중력가속도 [m/s²]
h : 엔탈피 [J/kgK]
k : 열전도율 [W/mK]
p : 압력 [Pa]
T : 온도 [K]
u : 유동속도 [m/s]
x : 좌표 [m]

μ : 점성계수 [Ns/m²]

하첨자

i : Tensor
j : Tensor
k : Tensor

그리스 문자

δ_{ij} : $i=j$ 이면 1이고 그 외엔 0인 함수
 ρ : 밀도 [kg/m³]

1. 서 론

백열등, 형광등 조명과 같은 기존의 조명에 비해 월등한 장수명, 고에너지효율, 친환경성등의 우수성을 지닌 LED 조명에 대한 관심도와 실제 적용범위가 크게 증가하고 있다. 광전자 반도체

*† 김경준(교신저자) : 부경대학교 기계자동차공학과
E-mail: kjkim@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6168

*† Kyoung Joon Kim (corresponding author): Department of Mechanical & Automotive Engineering, Pukyong National University. E-mail : kjkim@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6168

소자인 LED 칩의 특성상 인가되는 전기에너지에서 광에너지로 방출되는 에너지를 제외한다면, 열복사에 의해 외부 대기로 방출되는 열에너지는 소량인 반면에 발열되어 소산되는 열에너지가 대부분이다. 따라서 고출력 LED 칩의 열밀도는 전형적인 고직접도 연산칩에 비해서도 크다. 이러한 고열밀도에 기인하는 LED의 온도 증가에 따라 LED 칩, 형광체, 조명기기의 성능과 신뢰성은 현저히 저하되므로 LED 조명엔진의 온도 및 열관리는 필수적이다.¹⁻³⁾

최근에는 LED 칩 또는 모듈의 온도조절을 위해 냉각수를 이용한 미소 채널 냉각판^{4,5)}, vapor chamber⁶⁾, 미소 제트^{7,8)} 등 다수의 냉각기술들이 연구되어 보고되었지만, LED 칩의 담금 냉각기술에 대해 보고된 연구결과는 상대적으로 미미하다. 따라서 본 연구에서는 LED 조명엔진을 위한 탈이온수 담금 냉각기술의 성능과 특성을 탐구하고, 조명엔진의 열성능에 대한 LED 칩배열의 영향도 조사한다.

본 논문에서는 열해석을 위해 상용 CFD 코드를 이용하여 개발된 LED 조명엔진 열모델의 물리적 구조에 대해서 논하고, LED 조명엔진 열모델을 적용하여 전산모사된 열유동 해석결과에 대하여 논하며, 열모델을 적용하여 결정한 단일 LED 칩과 4가지 LED칩의 배열에 대하여 탈이온수에 의해 담금 냉각되는 LED 조명엔진, 렌즈내부 및 외부공기에 의한 자연대류상의 LED 조명엔진, 렌즈 없이 LED칩이 외기에 직접 노출되는 LED 조명엔진의 열특성에 대하여 논의한다.

2. 열모델

다양한 구조와 냉각방식에 대한 LED 조명엔진의 열특성을 해석하기 위해 상용코드인 ANSYS IcePak을 사용하여 3-D CFD모델인 LED 조명엔진 열모델이 개발되었고, 열모델에는 약 20만개의 계산노드가 포함되었다.

공기와 탈이온수의 유동은 비압축, 정상유동으로 가정되었고, 다음의 연속방정식 (1), 운동량방정식 (2), 에너지 방정식 (3) 은 모델의 지배방정

식으로 사용되었다.⁹⁾

$$\frac{\partial u_k}{\partial x_k} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[-p\delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho u_j \left(h + \frac{1}{2} u_i^2 \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = 0 \quad (3)$$

위 식들에서 u_k 는 유체의 속도 (m/s), x_k 는 직각 좌표계에서의 방향(m), ρ 는 밀도(kg/m³), p 는 압력 (Pa)을 지칭한다. δ_{ij} 는 $i=j$ 이면 1이고 그 외엔 0으로 정의되는 함수이며, μ 는 점성계수(N·s/m²), g_i 는 중력가속도(m/s²), h 는 엔탈피(J/kg·K), k 는 열전도율(W/m·K), T 는 온도(K)를 지칭한다.

효과적인 열해석을 위해 LED 조명엔진 열모델의 구조는 단순화되어 LED 칩, 방열판, 렌즈(top case)로 구성되며, 그 물리적 구조는 Fig. 1이 보여 준다.

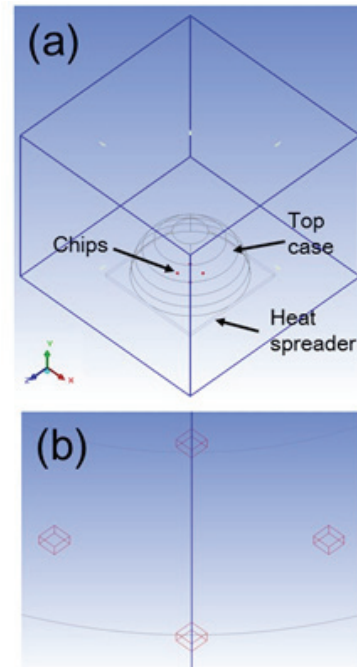


Fig. 1 The thermal model of a LED lighting engine

모델에서 렌즈의 직경은 60mm, 구리 방열판의 폭과 길이는 각각 60mm, 두께는 2mm이다.

Fig. 2가 보여주는 것처럼 칩크기 영향과 열밀도 영향을 분석하기 위해서, 5mm x 5mm, 10mm x 10mm의 단일 칩, 칩사이 거리가 다른 네 개의 1mm x 1mm 칩들의 집합체로 구성되는 총 5가지 경우의 칩배열이 열모델에 의해 해석된다. 또한 각각의 칩배열을 지닌 조명엔진은 렌즈 내부가 공기로 채워져 있는 경우, 렌즈 없이 외부공기와의 자연대류인 경우, 렌즈내부가 탈이온수로 채워진 경우에 대해서 열모델에 의해 해석된다.

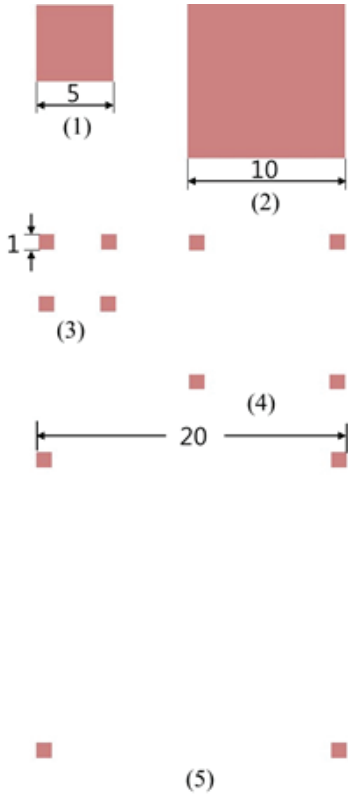


Fig. 2 Configurations of the LED chip array

3. 열유동해석

본 3절에서는 칩에서 소산되는 총열유량이 2W,

외부대기온도는 20°C의 가정하에 LED 조명엔진 열모델을 적용하여 전산모사된 열유동 해석결과에 대하여 논한다.

3.1 유동장

Fig. 3은 렌즈내부가 공기로 채워져 있고, 외부는 외기와 자연대류 조건이며, LED 칩배열은 Fig. 2의 (4)와 같으며, 칩의 총 열유량은 2W인 LED 조명엔진을 열모델에 의해 전산모사한 유동장을 보여준다. 유동장 결과는 렌즈 내부의 유동이 렌즈 외부에서의 유동에 비해 미미함을 보이는데, 이는 렌즈내부의 공간상 제약에 기인한 것으로 보인다.

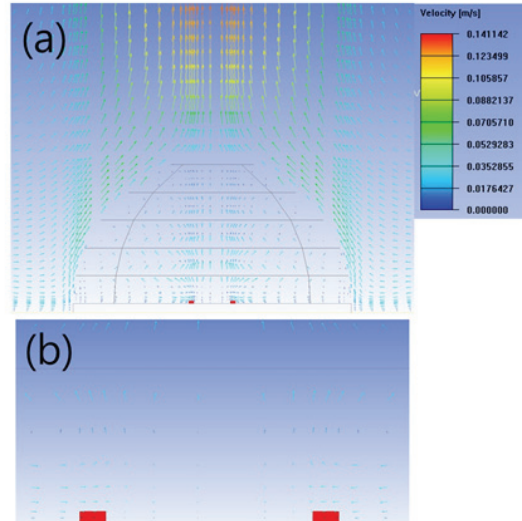


Fig. 3 Flow fields (a) at a LED lighting engine and (b) near LED chips

3.2 온도장

Fig. 4는 Fig. 3에 상응하는 동일 LED 조명엔진에서 전산모사한 온도장을 나타낸다. Fig. 4(a)에서 보여주는 온도장 결과는 렌즈 내부공기의 온도 구배가 상당함을 보인다.

이러한 온도구배는 외부유동에 비해 상대적으로 미약한 렌즈 내부유동에 기인한 내부공기 온도의 상승으로 설명이 가능하다.

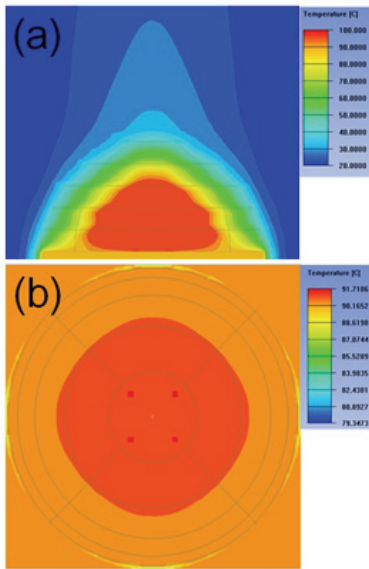


Fig. 4 Temperature fields (a) at a LED lighting engine and (b) near LED chips

4. 열성능

Fig. 5에서 Fig. 7은 렌즈내부가 공기로 채워져 있는 경우 (Fig. 5), 렌즈 없이 외기와의 자연대류인 경우 (Fig. 6), 렌즈내부가 탈이온수로 채워진 경우 (Fig. 7), 각각의 냉각방식에 대하여 5가지 칩 배열별로 전산모사로 획득된 칩의 평균온도, 렌즈 내부유체의 평균온도를 보여주고, Fig. 8은 각 냉각방식에 대한 조명엔진의 열저항을 칩 배열의 함수로 나타낸다. Fig. 5~8에서 Case 1~5는 Fig. 2의 (1)~(5) 배열을 지칭한다.

Fig. 5는 렌즈내부에 공기가 존재하고, 외부대기와의 자연대류에 의해 조명엔진이 수동적으로 냉각되는 경우의 온도 결과이다. Fig. 5는 단일 칩보다는 4개 칩 배열이 평균온도가 더 작고, 칩 사이의 거리가 멀어질수록 칩의 평균온도도 감소함을 보여준다. 이 결과는 조명엔진에서 열원인 칩 사이의 거리 증가에 따라 감소하는 칩 주변의 열밀도에 기인한 것으로 보인다.

Fig. 6은 렌즈가 없는 LED 조명엔진의 결과를 보여준다. Fig. 5의 결과처럼 단일 칩보다는 4개

칩 배열의 평균 온도가 더 작고, 칩의 평균 온도가 칩 사이의 거리가 멀어질수록 감소함을 보인다. Fig. 6의 결과는 렌즈가 있는 경우인 Fig. 5의 결과와 비교 시 평균 칩 온도가 약 30% 낮음을 보여준다.

Fig. 7은 LED 칩이 렌즈 내부의 탈이온수에 의해 담금 냉각되는 경우에 대한 전산모사 결과이다. Fig. 5와 6의 결과처럼 단일 칩보다는 4개 칩 배열의 평균온도가 더 작고, 칩의 평균 온도가 칩 사이의 거리가 멀어질수록 감소함을 보인다. Fig. 7의 결과는 렌즈내부에 공기가 있는 경우와 비교 시 평균 칩 온도가 거의 40% 감소함을 보여준다.

Fig. 8은 각 냉각방식에 대한 LED 조명엔진의 열저항 값을 칩 배열의 함수로 보여준다. 열저항은 물리적으로 LED 칩과 외부대기와의 열저항으로 정의되며, 칩의 평균온도와 외기온도의 차를 소산되는 총 열율로 나누어 결정된다.

Fig. 8의 결과는 탈이온수에 의한 담금냉각 경우의 열저항이 렌즈내부에 공기가 존재하는 경우 열저항의 약 50%임을 보여주며, 렌즈가 없이 외기와의 자연대류 경우의 열저항 보다 약 10% 열저항이 작음을 보여준다. 또한 Fig. 8의 결과는 칩의 평균온도 결과처럼 단일 칩보다는 4개 칩 배열이 열저항이 더 작고, 칩사이 거리가 멀어질수록 열저항이 감소함을 보여준다.

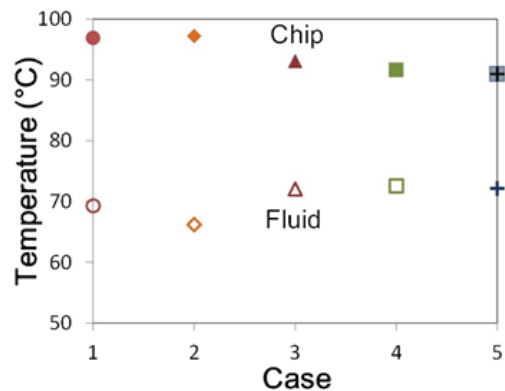


Fig. 5 Temperature values of the LED chips and the air inside the lens of a LED lighting engine for various configurations of the chip array

5. 결 론

본 연구는 고파워 LED 조명엔진의 담금냉각 성능을 조사하는 것이 주 목표이며, 담금냉각액으로는 탈이온수가 선택되었다. 비교 목적으로 렌즈 내부에 공기가 존재하는 경우와 렌즈 없이 LED칩이 외부 공기에 노출된 경우의 조명엔진이 고려되었고, 다양한 LED칩 배열도 고려되었다.

다양한 냉각방식과 칩배열 영향을 이론적으로 조사하기 위해, 상용 CFD 코드인 ANSYS IcePak 이 이용되어 LED 조명엔진의 열모델이 구축되었고, 전산모사에 의한 해석에 적용되었다. 해석결과는 탈이온수에 의해 담금냉각되는 조명엔진의 열성능이 공기에 의한 자연대류상의 렌즈가 장착된 조명엔진의 열성능보다 약 2배가 우수하고, 단일 LED칩보다 4개 LED 칩 배열의 열성능이 우수함을 논증한다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비 (2013년)에 의하여 연구되었음.

Reference

1. M. Arik, J. Petroski, and S. Weaver, 2002, "Thermal Challenges in the Future Generation Solid State Lighting Applications: Light Emitting Diodes", Proceedings of the 8th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, San Diego, CA, United States, pp. 113-120.
2. P.C. Tsai, R. W. Chang, and Y. K. Su, 2007, "Lifetime Tests and Junction-Temperature Measurement of InGaN Light-Emitting Diodes Using Patterned Sapphire Substrates", Journal of Lightwave Technology, Vol. 25, No. 2, pp. 591-596.

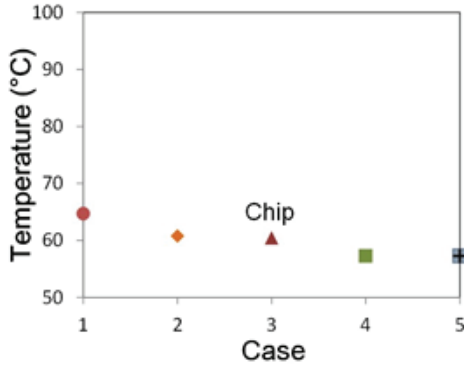


Fig. 6 Temperature values of the LED chips of a bare LED lighting engine for various configurations of the chip array

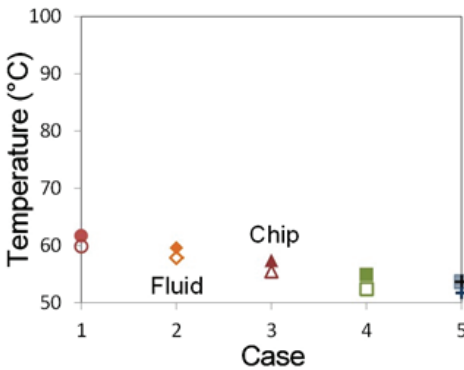


Fig. 7 Temperature values of the LED chips and the deionized water inside the lens of a LED lighting engine for various configurations of the chip array

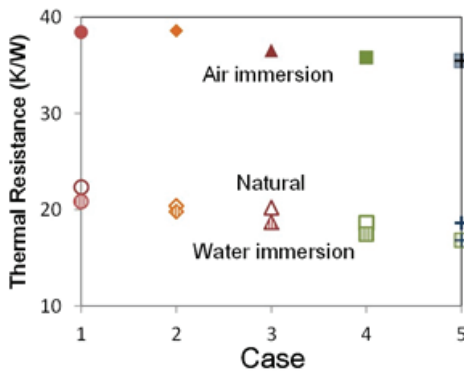


Fig. 8 Thermal resistances of LED lighting engines associated with various cooling methods for various configurations of the chip array

3. J. Kim, 2013, "Barrier-Transition Cooling in LED", Journal of the Korean Society of Power Engineering, Vol. 17, No. 5, pp. 44-51.
4. D.-W. Kim, E. Rahim, A. Bar-Cohen, and B. Han, 2010, "Direct Submount Cooling of High-Power LEDs", IEEE Transactions on Components Packaging Technologies, Vol. 33, No. 4, pp. 698-712.
5. G. Chang, C.M. Park, and E.P. Kim, 2007, "A Study on Development of Liquid Cooled Plate for Cooling of a Communication Electronic Device with High Heat Generation", Journal of the Korean Society of Power Engineering, Vol. 11, No. 2, pp. 26-31.
6. J.-C. Wang, R.-T. Wang, T.-L. Chang et al., 2010, "Development of 30Watt High Power LEDs Vapor Chamber-Based Plate", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 53, No. 19, pp. 3990-4001.
7. S. Liu, J. Yang, Z. Gan, et al., 2008, "Structural Optimization of Microjet Based Cooling System for High Power LEDs", International Journal of Thermal Science, Vol. 47, pp. 1086-1095.
8. X. Luo and S. Liu, 2007, "A Microjet Array Cooling System for Thermal Management of High-Brightness LEDs", IEEE Transactions on Advanced Packaging, Vol. 30, No. 3, pp. 475-484.
9. K. A. Hoffmann, S. T. Chiang, 1998, "Computational Fluid Dynamics Volume I", 3rd Ed., Engineering Education System, Wichita, KS, U.S.A.