J. Microelectron. Packag. Soc., 25(4), 149-154 (2018) https://doi.org/10.6117/kmeps.2018.25.4.149
Print ISSN 1226-9360 Online ISSN 2287-7525

Chip-on-board 형 세라믹-메탈 하이브리드 기판을 적용한 50와트급 LED 어레이 모듈의 제조 및 방열특성 평가

허유진 · 김효태†
한국세라믹기술원 나노융합소재센터

Fabrication and Evaluation of Heat Transfer Property of 50 Watts Rated LED Array Module Using Chip-on-board Type Ceramic-metal Hybrid Substrate

Yu Jin Heo and Hyo Tae Kim†
Nano Materials and Convergence Center, Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, 101, Soho-ro, Jinju-si, Gyeongsangnam-do 52851, Korea

(Received December 4, 2018: Corrected December 24, 2018: Accepted December 28, 2018)

초 록: 가로등 및 방폭등용 고출력 LED 조명 시스템의 광원으로서, 다수의 LED 칩이 실장된 50와트급 LED 어레이 모듈을 chip-on-board형 고방열 세라믹-메탈 하이브리드 기판을 사용하여 제작하였다. 고방열 세라믹-메탈 하이브리드 기판은 고열전도 알루미늄 금속 열확산 기판에 저온소결용 글라스-세라믹 절연 페이스트와 은 전극 페이스트를 후막 스크린 공정에 의해 도포한 다음, 건조 후 515°C 에서 동시소성하여 LED 칩을 실장할 세라믹 절연층과 은전극 회로층을 형성하여 제조하였다. 이 하이브리드 기판의 방열특성 평가를 위한 비교 샘플로서 기존의 에폭시 기반 FR-4 복합수지로 만든 써멀비아형 PCB 기판에도 동일한 디자인의 LED 어레이 모듈을 제작한 다음, 다중채널 온도측정장치와 열저항 측정기로 방열특성을 비교 분석하였다. 그 결과, 4 × 9 type LED 어레이 모듈에서 세라믹-메탈 하이브리드 기판의 열저항은 써멀비아형 FR-4 기판에 비하여 약 1/3로 나타났으며, 이것은 곧 방열성능이 적어도 3배 이상 높은 것으로 볼 수 있다.

Abstract: This paper describes the fabrication and heat transfer property of 50 watts rated LED array module where multiple chips are mounted on chip-on-board type ceramic-metal hybrid substrate with high heat dissipation property for high power street and anti-explosive lighting system. The high heat transfer ceramic-metal hybrid substrate was fabricated by conformal coating of thick film glass-ceramic and silver pastes to form insulation and conductor layers, using thick film screen printing method on top of the high thermal conductivity aluminum alloy heat-spreading panel, then co-fired at 515°C. A comparative LED array module with the same configuration using epoxy resin based FR-4 PCB with thermal-via type was also fabricated, then the thermal properties were measured with multichannel temperature sensors and thermal resistance measuring system. As a result, the thermal resistance of the ceramic-metal hybrid substrate in the 4 × 9 type LEDs array module exhibited about one third to the value as that of FR-4 substrate, implying that at least triple performance of heat transfer property as that of FR-4 substrate was realized.

Keywords: Heat transfer, LED module, ceramic-metal, hybrid substrate, thermal resistance

1. 서 론

지금까지 일반 도로, 광장, 그리고 건물 및 공장 플랜트와 같은 실외 조명용 가로등과 방폭등(anti-explosive lighting) 조명 시스템은 일반적으로 할로겐, 제논 램프 등 다양한 제품이 많이 사용되어 왔다. 이들 광원은 대체로 높은 에너지 소모, 짧은 수명, 취약한 내구성과 폐기시 각종 유해물질의 유출로 환경 오염을 야기시키는 문제가 있다. 이에 따라 최근에는 친환경, 저 에너지, 그리고 장수명이 특징인 LED (light emitting diode) 소자를 광원으로 하는 고출력 실외 조명 제품이 많이 등장하고 있으며, 보다 저전력에 높은 효율의 광 출력과 장수명화를 위한 연구가 많이 진행되고 있다.[1-5] LED 광원의 조명시스템을 가로등이나 방폭등으로 사용하기 위해서는 적어도 50~

†Corresponding author
E-mail: hytek@kicet.re.kr

© 2018, The Korean Microelectronics and Packaging Society
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

200 와트(watts) 급의 고출력 LED 모듈이 필요하다.

LED 광원을 사용한 조명 패키지에서 동작시의 온도상승은 LED 소자의 광출력과 수명에 매우 큰 영향을 주는 요인으로 알려져 있다. 현재 LED 패키지의 개발에 있어서 효율적인 방열(heat dissipation)을 위한 수단으로서 가장 많이 시도된 접근으로는 LED 소자의 밀봉소재(encapsulation material)나 패키지 기판의 열전달(heat transfer) 효율을 증대시키기 위해 기판이나 기타 패키지 소재, 예를 들면 thermal interface material (TIM)의 열전도도(thermal conductivity)를 높이는 데 주력하고 있다.[5-7] 다른 한편으로는 LED 패키지 기판의 아키텍처를 변화시켜 방열효과를 향상시키는 연구로서 써멀비아(thermal-via)형, chip-on-board (COB) 형, chip-on-heatsink (COH)형 등 다양한 패키지 기판의 디자인에 대한 연구도 함께 진행되어 왔다.[2-5,7,9,10]

본 연구는 가로등용 150와트급의 고출력 LED 조명 시스템을 제조하기 위하여, 다수의 LED 소자가 실장된 50와트급의 LED 어레이 서브 모듈(LED array sub-module), 이하 LED 어레이 모듈, 을 제작하고 이 서브 모듈 3개를 함께 어셈블리한 150 와트급 고효율 가로등용 LED 조명 시스템을 개발하는 것에 관한 것이다. 구체적으로는 50와트급의 LED 어레이 모듈을 제작함에 있어서 고방열성능의 chip-on-board 형의 세라믹-메탈 하이브리드 절연기판에 LED 어레이 모듈을 제작하여 이것과 동일 규격의 기존의 써멀비아형(thermal-via type) FR-4 PCB로 제작한 모듈과의 방열성능, 즉 열저항(thermal resistance)을 비교 평가하는 데 그 목적이 있다.

2. 실험 방법

본 연구에서 50와트급 LED어레이 모듈을 위해 제작할 두 가지의 방열기판의 구조 및 LED 어레이 실장 기판에 대한 개념도를 아래 Fig. 1과 Fig. 2에 각각 도시하였다. COB 형 세라믹-메탈 하이브리드 PCB (Fig. 1(a))의 경우 1.5 mm 두께의 알루미늄합금(Al-5052) 판넬 (표면을 약 1 μm 두께의 산화알루미늄 피막으로 아노다이징 전처리함)에 저온소성 글라스세라믹(glass-ceramic), ZnO-B_2O_3-SiO_2 기반의 glass frit 분말(D_{50} = 1 μm)로 만든 유전체 페이스트(dielectric paste)를 후막 스크린 인쇄법(thick film screen printing method)으로 도포하여 건조하였다. 이 유전체 층 위에 36개의 LED 칩(Luxeon Rebel, Philips) 이 4 × 9 어레이 형태의 직병렬(series-parallel)로 배열된 회로망(Fig. 2)을 구성하기 위한 전극 패턴을 형성하기 위해 은(Ag) 전극 페이스트를 인쇄하였다. 이 후 일련의 열처리 공정으로서 300-400ºC 구간에서 바인더 탈거(binder burn-out)와 515ºC에서의 소결(sintering)을 거쳐 두께가 약 120-150 μm 인 절연막(insulation layer)과 두께가 약 10 μm 인 도체 회로(conductor circuit)를 형성하였다. 완성된 세라믹-메탈 하이브리드 PCB에 스테인레스 스틸 메탈마스크(t = 100 μm)를 써서 솔더 페이스트(solder paste)를 인쇄한 다음 근적외선(near infrared: NIR) 오븐에 넣어 215ºC에서 15-30초간 열처리함으로써 LED 어레이 모듈이 완성되었다.

Fig. 2는 4개의 LED 칩이 직렬회로(series circuit)로 연결되고, 이 직렬회로가 9개의 병렬(parallel)로 연결되어 구성되는 4 × 9 = 36 chips 형태의 LED 어레이 모듈에 대한 회로설계도이다. 본 연구에서는 LED 어레이 모듈의 단위 패널당 50와트의 파워로 설계하고자 하였으므로, LED 단위 칩당 직류(DC) 3볼트(volts)의 정격전압(rated voltage)을 기준으로 설계할 때 4개의 칩이 직렬로 구성되면 12 볼트의 바이어스(bias)가 형성된다. 따라서 패널 전력 50와트를 12 볼트로 나누면 패널에 인가할 총 전류 값

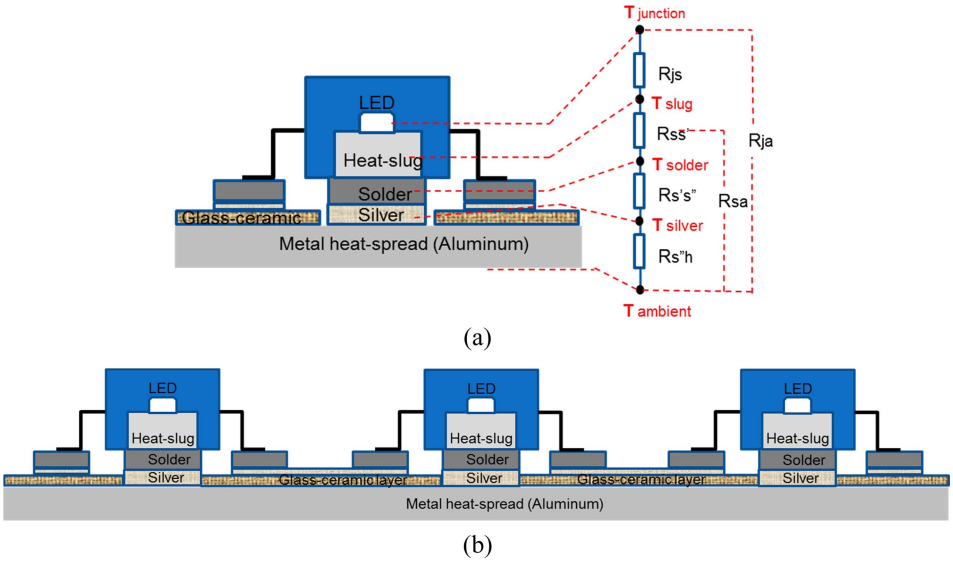

Fig. 1. Schematic illustration of chip-on-board (COB) type LED array module with ceramic-metal PCB: (a) single chip and (b) multichip mounted module.

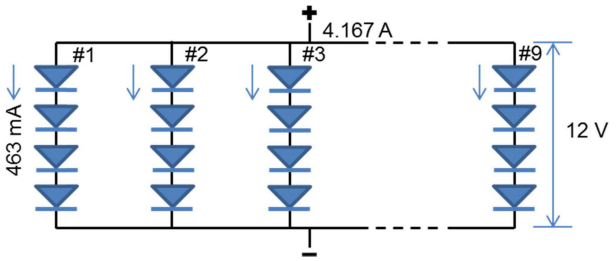

Fig. 2. Circuit diagram of 50 watts rated LED array module consisted of 36 LED chips.

은 4.167 A (ampere)가 되고, 이것을 다시 9개의 병렬 분지회로(split circuit)로 나누면 분지회로당 463 mA의 전류를 인가하게 된다.

한편 본 연구의 대조군(comparative sample)으로 사용할 써멀비아형 FR-4 PCB의 구조도는 Fig. 3의 (a)와 같으며 $100 \times 100\ mm^2$의 패널면적에 $\varphi = 80$ mm의 반구형 투명 캡을 어셈블리 할 수 있도록 상기 세라믹-메탈 하이브리드 PCB와 동일한 규격의 회로 패턴을 구성하였다. 본 써멀비아형 FR-4 PCB샘플은 외주 가공하여 준비하였다. Fig. 1과 3의 그림 (b)는 각각 세라믹-메탈 하이브리드 PCB와 써멀비아 FR-4 PCB에 다수의 LED 칩이 마운팅 된 멀티칩 어레이(multichip array) 모듈에 대한 개념도를 나타낸 것이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 50와트급 LED 어레이 모듈의 제조

Fig. 4는 각각 세라믹-메탈 하이브리드형 PCB와 써멀비아형 FR-4 PCB 위에 4×9 LEDs 어레이로 표면실장(surface mounting) 된 LED 어레이 모듈의 실사 사진이다. 그림의 (a)는 4×9 어레이로 LED 칩이 실장된 모습을 보여주기 위한 것으로 각 LED 마운팅 솔더 패드(solder pad)가 노출된 사진이며, (b)는 솔더패드와 어레이 회로 실버(Ag) 전극패턴을 접점부를 제외하고 절연 페이스트로 제조한 보호층(protection layer)으로 커버한 최종 제품이다.

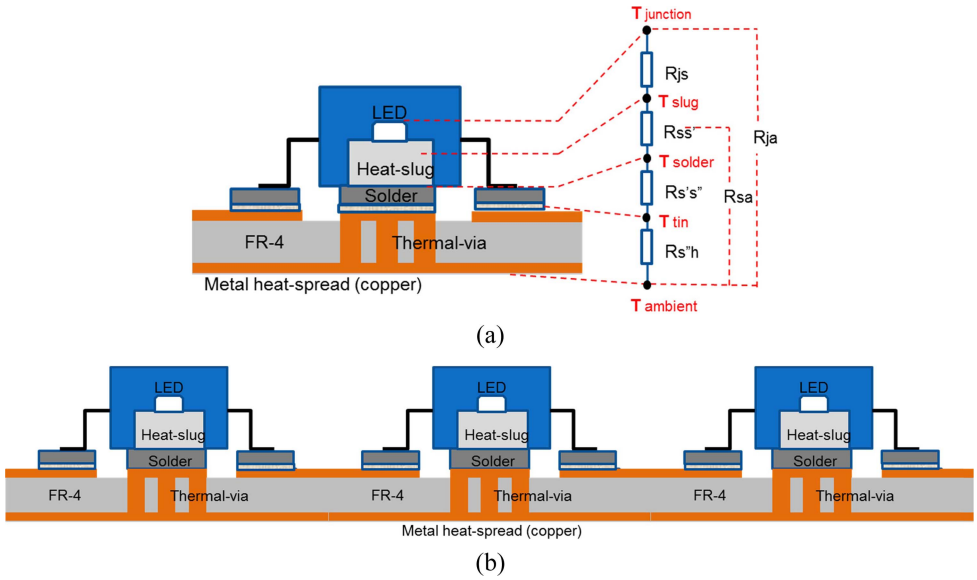

Fig. 3. Schematic illustration of LED array module with thermal-via type FR-4 PCB: (a) single chip and (b) multichip mounting module.

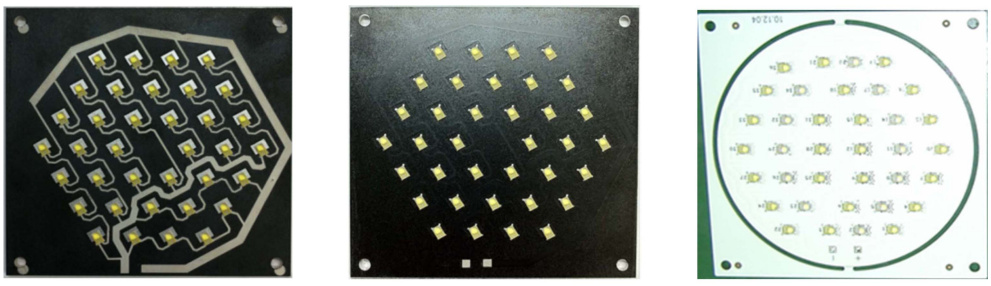

Fig. 4. Optical images of fabricated 50 watts rated LED array module panels: circuit layout of 4×9 LEDs arrayed on ceramic-metal hybrid PCB panel (a) without top protection layer, (b) with top protection layer, and (c) comparative LED array module made with thermal-via FR-4 PCB.

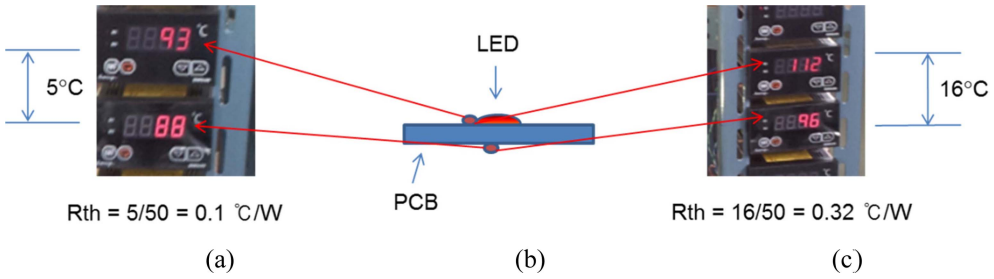

Fig. 5. Measurement of T_a in 50 watts LED array modules using multipoint temperature sensors (without thermal tape): (a) with COB type ceramic-metal PCB, (b) temperature measuring point, and (c) with thermal-via type FR-4 PCB.

그림 (c)는 대조군인 써멀비아형 FR-4 PCB로 만든 50와트급 LED 어레이 모듈이다. DC bias를 인가하기 위한 단자패드(terminal pad)는 그림의 하단에 각각 위치하고 있으며, 모듈 패널의 네 모서리에는 힛싱크에 결합 또는 150와트급 가로등 조명 시스템 하우징에 어셈블리 하기 위한 리벳팅 홀을 만들었다.

3.2. 50와트급 LED 어레이 모듈의 방열특성 평가

3.2.1. 다채널 온도센서에 의한 LED 어레이 모듈의 방열특성

우선 Fig. 4(b)와 (c)의 50와트급 LED 어레이 모듈에 대한 방열특성을 알아보기 위해, 다채널 온도센서(multi-channel temperature sensor)에 K-type 열전대(thermo-couple) 와이어의 센서팁(sensor tip)을 Fig. 5의 (b)와 같이 PCB모듈의 LED 칩부와 반대편 열확산판(세라믹-메탈 PCB의 경우 알루미늄 패널, FR-4 PCB의 경우 구리패널)에 접착 테이프로 고정시켜 LED 발열부와 외부공기 접촉부의 온도를 감지코자 하였다. 그림의 (a)와 (c)는 각각 COB형 세라믹-메탈 하이브리드 PCB와 써멀비아형 FR-4 PCB 패널로 만든 LED 어레이 모듈의 구동 시, 발열 및 방열접점에서의 온도 모니터링 사진이다. 세라믹-메탈 PCB의 경우 발열부(heat source point: LED 칩)와 방열부(ambient point: 알루미늄 또는 구리 열확산판이 외부공기와 닿는 점)의 온도 차이가 포화전류 상태에서 5ºC로 측정된 반면, FR-4 PCB의 경우 온도 차이가 16ºC에 달했다. 이 값을 인가한 정격 전력 50와트로 나눈 값이 겉보기 열저항 값(apparent thermal resistance value) 으로 볼 수 있으며, 각각 0.10 K/W (kelvin per watt)와 0.32 K/W 로 나타났다. 방열성능에 있어서 열저항 값이 낮을수록 시스템의 열전달 효율이 좋은 것이므로, 본 결과에 의하면 세라믹-메탈 하이브리드 PCB를 적용한 LED 어레이 모듈이 써멀비아형 FR-4 PCB 를 적용한 모듈에 비해 방열(heat dissipation) 특성이 약 3배 우수하다고 할 수 있다.

3.2.2. 표준 열저항 측정 시스템에 의한 LED 어레이 모듈의 방열특성 평가

한편 방열패키지에 있어서 국제공인 시험 규격(JEDEC STD 51-1)에 의한 방열특성을 알아보기 위하여, 이 규격에 준하는 열저항 측정기(transient thermal resistance tester, model-T3Ster, Micred, Hungary)를 사용하여 두 가지 모듈의 열저항값을 시험하였으며, 그 결과를 Fig. 6(a)에 도시하였다. 써멀비아형 FR-4 PCB 패널을 사용한 50 와트급 LED 어레이 모듈(II)의 열저항 값은 0.81 K/W 로 측정되었고, 반면 COB형 세라믹-메탈 하이브리드형 PCB 패널을 사용한 모듈(I)의 열저항 값은 0.43 K/W 로 종래의 FR-4 PCB 대비 1/2로 낮아졌다. 즉 모듈 전체 관점에서의 방열성능으로 보면 약 두 배가 향상된 값을 나타냈다. 여기서, 동일 PCB 패널에서 다채널 온도센서에 의한 측정값보다 상대적으로 높은 열저항 값을 나타낸 것은, 앞서 다채널 온도 센서법에서는 칩 단자와 PCB 기판 방열부 열확산판에 온도센서 팁을 직접 접촉하여 측정하는 반면, T3Ster 열저항 측정기에 시료를 장착할 때에는 측정모듈 PCB 패널의 금속(구리 or 알루미늄) 열확산판을 열저항 측정기 챔버의 알루미늄 소재의 플레이트(cold plate) 바닥에 고정시키기 위해 열간접착재(thermal interface material: TIM)로서 써멀 테잎(thermal tape) 을 붙여서 측정하는 것도 한 가지 요인이 될 수 있다.[11] 본 연구에서는 두께 0.5 mm 이고 열전도도(thermal conductivity)가 2 W/m·K 인 써멀 테잎을 사용하였다. 즉 Fig. 6에서 보는 바와 같이 본 T3ster 장비로 측정한 LED 어레이 모듈의 전체(junction-to-ambient) 열저항 값(R_{ja})에는 LED 칩부와 패키지 기판부, 이 두 가지 구성요소 간의 접합부(silver/solder), 그리고 시료 모듈을 T3ster 측정 챔버에 고정시키기 위한 TIM 소재(thermal tape)와 cold plate에 대한 각각의 열저항 요소가 부가되어 있기 때문이다.

따라서, 위 두 가지 아키텍처의 패키지타입에 대한 순수 기판의 열저항 값을 도출해 내기 위해서는 Fig. 6과 같이 상기 T3ster 장비로 측정한 누적구조함수(cumulative structure function) 를 Cauer-type RC ladder model에 따른 일련의 등가 열저항 값(R_{th})과 열용량(thermal capacitance) 값(C_{th})에 대한 근사 모델[11]을 Fig. 6의 (b)와 같이 나타낼 필요가 있으며, 이것을 Fig. 6(a)의 누적구조함수 곡선에 대해 LED 어레이 패키지의 각 구성요소 즉 구조물 단위로 해치박스(hatched box)로 묘사하였다. 여기서 각 구조물에 대한 열저항 값의 경계(boundary)는 Fig. 6의 누적구조함수를 다시 1차 미분하여 얻어지는 미분구조함수

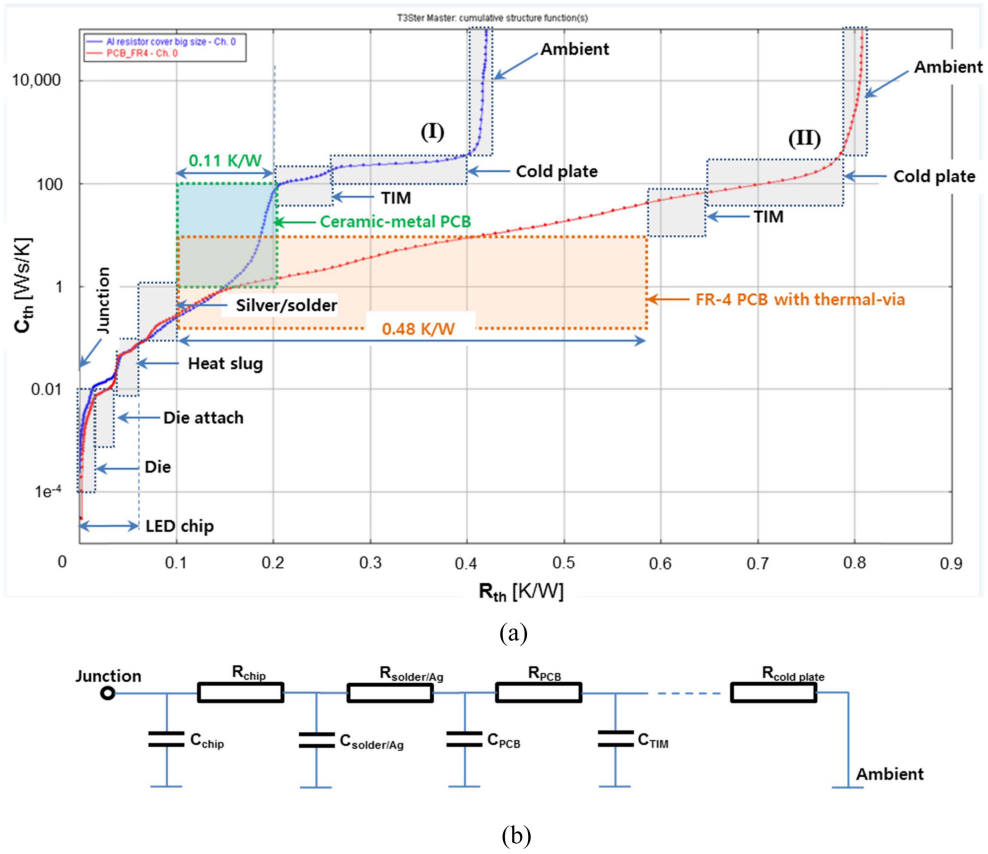

Fig. 6. (a) Thermal resistance data obtained by cumulative structure functions of 50 watts rated 4 × 9 LEDs array modules with (I) COB type ceramic-metal PCB and (II) thermal-via type FR-4 PCB and (b) equivalent thermal resistances and thermal capacitances circuit by Cauer-type RC ladder model.

(differential structure function)에서 나타나는 변곡점의 피크 값에 의한 근사치로 얻어진 것이다.[11] 이 결과에 의하면 50와트급 4 × 9 칩LED 어레이 패키지에서, 세라믹-메탈 PCB자체의 열저항 값은 약 0.11 K/W로, 써멀비아형 FR-4 PCB의 열저항 값은 약 0.48 K/W로 두 가지 패키지 기판의 열저항 값이 거의 4배 이상 차이가 나는 것으로 나타났다. 이 표준 열저항 측정기에 의한 값이 앞서 다채널 온도센서에 의한 모듈의 방열온도 실측 값에서는 두 종류 기판에서 약 3배의 성능차이가 보였던 것과는 다소 차이가 있으나, 상기 두 가지의 측정방법에 의한 결과를 종합적으로 고려해 보면 두 종류 기판의 방열성능 차이는 적어도 3배 이상이 된다고 볼 수 있다. 이와 같은 결과는 두 가지 PCB의 아키텍쳐 구조와 기판 소재에 따른 영향으로 분석된다. 즉, 세라믹-메탈 하이브리드형 PCB에서는 높은 열전도도의 글라스-세라믹 절연층(3 W/m·K), 그리고 고열전도의 두꺼운 알루미늄(120-150 W/m·K) 열확산판에 LED 칩의 열이 수직 및 수평으로 빠르게 확산할 수 있는 구조인 반면, 써멀비아형 FR-4 PCB는 LED 칩의 열방출이 대부분 상대적으로 낮은 열전도도의 에폭시 수지(0.2-0.3 W/m·K) 기반 절연층 사이에 형성된 좁은 통로의 써멀 비아를 통해 거의 수직으로만 방출되는 데 기인한 것으로 보인다. 다만, 본 연구에서 검토한 두 가지 패키지의 기판 소재와 아키텍처 구조에 대한 별개의 정량적 방열특성 분석을 위해서는 향후 각각 동일한 패키지 소재로 구성된 COB 형과 써멀비아형 LED 어레이 패키지를 제조하여 비교 평가하는 것이 바람직하다고 사료된다.

4. 결 론

고열전도 알루미늄 금속 열확산 기판에 저온소결용 글라스-세라믹 절연 페이스트와 은 전극을 사용하여 COB 형 고방열 세라믹-메탈 하이브리드 기판에 4 × 9배열로 36개의 LED 칩이 실장된 50 와트급 고출력LED 어레이 모듈을 제작하였다. 이와 함께 이 하이브리드 기판의 방열특성을 기존의 에폭시 기반 FR-4 복합수지로 만든 써멀비아형 PCB 기판과 비교 평가하기 위하여, 동일한 사이즈의 LED 어레이 모듈을 제작한 다음, 다중채널 온도측정장치와 표준 열저항 측정기로 방열특성을 비교 분석하였다. 그 결과, LED 어레이 모듈에서 세라믹-메탈 하이브리드 PCB의 열저항은 0.10~0.11 K/W 범위로서 써멀비아형 FR-4 PCB의 0.32~0.48 K/W 보다 1/3~1/4로 낮게 측정되었다. 이로써, 본 연구에 의한 세라믹-메탈 하이브리드 기판을 사용한 LED 어레이 모듈이 기존의 써멀비

아형 FR-4 PCB를 사용 것에 비하여 방열성능이 적어도 3배 이상 높은 것으로 평가되며, 이러한 결과는 두 종류의 PCB 패널의 기판소재와 아키텍처에 기인하는 것으로 설명하였다. 다만, 본 연구에서 검토한 두 가지 패키지의 기판 소재와 아키텍처 구조에 대한 별개의 정량적 방열 특성 분석을 위해서는 향후 각각 동일한 패키지 소재로 구성된 COB 형과 써멀비아형 LED 어레이 패키지를 제조하여 비교 평가하는 것이 바람직하다고 사료된다.

감사의 글

This work was supported by the R&D support program of the Small & Medium Business Administration (SMBA), Korea (Grant No. S1071285). The authors also would like to express special thanks to Shinwoo Tech for 50W FR-4 PCB fabrication and multichannel temperature measurement.

References

1. Philips, “White Paper: Street Lighting”, (2014), from www.philips.com.
2. S. Liu and X. B. Luo, “LED Packaging for Lighting Applications: Design, Manufacturing and Testing”, Wiley and Chemical Industry Press (2011).
3. P. Mottier, “LEDs for Lighting Applications”, Wiley (2008).
4. H. W. Shin, H. S. Lee, J. H. Bang, S. H. Yoo, S. B. Jung, and K. D. Kim, “Variation of Thermal Resistance of LED Module Embedded by Thermal Via”, J. Microelectron. Packag. Soc., 17(4), 95 (2010).
5. M. Arik, C. Becker, S. Weaver, and J. Petroski, “Thermal Management of LEDs: Package to System”, Third International Conference on Solid State Lighting, Proc. 48th SPIE. 5187, 64 (2004).
6. M. Kang and S. Kang, “Influence of Al_2O_3 Additions on the Crystallization Mechanism and Properties of Diopside/anorthite Hybrid Glass-ceramics for LED Packaging Materials”, J. Cryst. Growth., 326, 124 (2011).
7. J. K. Sim, K. Ashok, Y. H. Ra, H C. Im, B. J. Baek, and C. R. Lee, “Characteristic Enhancement of White LED Lamp using Low Temperature co-fired Ceramic-chip on Board Package”, Curr. App. Phys., 12, 494 (2012).
8. Y. J. Heo, H. T. Kim, S. Nahm, J. H. Kim, Y. J. Yoon, and J. H. Kim, “Ceramic-metal Package for High Power LED Lighting”, Frontiers of Optoelectronics, 5(2), 133 (2012).
9. Y. J. Heo and H. T. Kim, “Low-temperature Co-firing of Camber-free Ceramic-metal Base LED Array Package,” J. Microelectron. Packag. Soc., 23(4), 35 (2016).
10. H. M. Cho, H. J. Kim, C. S. Lee, K. S. Bang, and N. K. Kang, “Warpage of Co-fired High K/Low K LTCC Substrate”, J. Microelectron. Packag. Soc., 11(3), 77 (2004).
11. A. Poppe, G. Farkas, and G. Horvath, “Electrical, Thermal and Optical Characterization of Power LED Assemblies”, Proc. 12th International Workshop on Thermal Investigations of ICs (THERMINIC 2006), Nice, France (2006).