ISSN 1225-8024(Print)
ISSN 2288-8403(Online)

한국표면공학회지
J. Korean Inst. Surf. Eng.
Vol. 49, No. 2, 2016.
http://dx.doi.org/10.5695/JKISE.2016.49.2.218

<연구논문>

흑연 및 탄소나노튜브 혼합 방열도료의 특성

이지훈[a], 송만호[b], 강찬형[a,*]

[a]한국산업기술대학교 신소재공학과, [b](주)하나나노텍 기술연구소

Characteristics of Thermal Radiation Pastes Containing Graphite and Carbon Nanotube

Ji Hun Lee[a], Man-Ho Song[b], Chan Hyoung Kang[a,*]

[a]Department of Advanced Materials Engineering, Korea Polytechnic University, 237 Sangidaehak-ro, Siheung-si, Gyeonggi-do, 15073, Korea
[b]Technical Research Institute, Hana Nano Tech, 37 Segyosandan-ro, Pyeongtaek-si, Gyeonggi-do, 17843, Korea

(Received April 4, 2016 ; revised April 21, 2016 ; accepted April 25, 2016)

Abstract

Thermal radiation pastes were prepared by dispersing carbon materials as fillers with a content of 1 weight percent in an acrylic resin. The kind of fillers was as follows; 25 μm graphite, 45 μm graphite, 15 μm carbon nanotube(CNT), a 1:1 mixture of 25 μm graphite and 15 μm CNT, and a 1:1 mixture of 45 μm graphite and 15 μm CNT. Thermal emissivity was measured as 0.890 for the samples with graphite only, 0.893 for that with CNT only, and 0.892 for those containing both. After coating prepared pastes on a side of 0.4 mm thick aluminium plate and placing the plate over an opening of a box maintained at 92°C with the coated side out, the temperatures on the uncoated side of the plates were measured. The samples containing graphite and CNT showed the lowest temperatures. The paste with mixed fillers was coated on the back side of the PCB of an LED module and thermal analysis was carried out using Thermal Transient Tester (T3ster) in a still air box. The thermal resistance of the module with coated PCB was measured as 14.34 K/W whereas that with uncoated PCB was 15.02 K/W. The structure function analysis of T3ster data revealed that the difference between junction and ambient temperatures was 13.8°C for the coated case and 18.0°C for the uncoated. From the infrared images of heated LED modules, the hottest-spot temperature of the module with coated PCB was lower than that of the uncoated one for a given period of LED operation.

Keywords: Thermal radiation, Filler, Emissivity, Thermal resistance, Junction temperature

1. 서 론

전자제품의 고집적화에 따른 전력 밀도의 증가는 열 밀도의 증대로 이어져 제품 열화의 원인이 되므로 최근 방열(放熱) 기술이 중요한 이슈로 떠오르고 있다. 특히 전력 소모가 많은 전력소자나 LED 모듈에서는 방열 기능의 강화가 한층 더 요구되고 있다[1-4]. 전자제품의 방열을 극대화하는 방법으로 팬이나 방열판 부착 등의 기계적 방법이 사용되고 있으나 제품의 전체 부피를 최소화할 수 있는 방열 코팅 방법도 연구되어 왔다[5-9].

방열코팅 재료는 대부분 고분자 기지에 충전제(filler)로서 탄소재료[9-14]나 세라믹 분말[15-21]이 분산되어 있는 복합재료이다. 세라믹 충전제는 열전도도 향상을 위해 고함량을 사용해야 한다는 단점이 있으며, 뛰어난 내부식성, 낮은 열팽창계수, 큰

*Corresponding Author: Chan Hyoung Kang
Department of Advanced Materials Engineering, Korea Polytechnic University
Tel: +82-31-8041-0587 ; Fax: +82-+82-31-8041-0599
E-mail: chkang@kpu.ac.kr

열전도도를 가진 탄소 재료가 유망한 충전제로 관심을 받고 있다.

탄소 동소체 중에서 흑연은 육방정 구조로써 기저면은 강한 방향성 결합력을 갖는 sp^2 공유결합을 하고 있으나 c축 방향으로는 약한 반데르발스 결합을 하고 있기 때문에 열전도도나 열방사율이 이방성을 나타내고 있다고 알려져 있다. 한편 탄소나노튜브(CNT)는 sp^2 공유결합을 갖는 기저면이 동그랗게 말린 나노구조 소재로서 열전도도가 보통 흑연의 10배 이상을 보이는 특성을 갖고 있다. 탄소 재료를 충전제로 사용한 복합재료의 합성법과 열적 특성에 관한 연구는 있으나[10-14], 이 재료의 열방사율에 대한 연구는 흑연을 포함한 복합재료에 대해 일부 보고[9]가 있을 뿐이므로 이에 대한 체계적인 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 아크릴계 수지에 충전제로 열방사능력이 우수한 인조 흑연과 열전도도가 큰 CNT를 첨가하고 용제, 분산제, 희석제 등을 혼합하여 방열도료(잉크)를 제조하고, 열방사율 및 열적 물성을 평가 분석하였다. 또한 방열도료를 전자부품의 방열판 소재로 널리 이용되는 알루미늄 기판 위에 코팅한 후 열방사율과 온도 변화를 측정하고 실제 LED 모듈의 PCB에 도료를 코팅한 후 열유동시험을 진행하여 방열 특성을 평가하였다.

2. 실험방법

방열도료는 중량비로 95% 이상의 아크릴 수지에 방열 효과 부여와 열전도도 향상을 위한 충전제(탄소재료), 수지의 용해와 점도 조정을 위한 용제(Isophoron), 분산성 증대와 고른 밀도를 위한 분산제(Antiterra-U)와 기타 조제와 희석제를 소량 혼합한 후 250 rpm으로 12 h 볼밀링을 실시하여 제조하였다. 충전제로 인조 흑연은 평균 입도 25 μm과 45 μm 두 종류의 분말을 사용하였고, CNT는 평균 입도 15 μm 분말(MWCNT, 순도: >95%)을 사용하였다. 표 1과 같이 다섯 종류의 충전제를 함유한 방열도료를 준비하였다. 충전제로 흑연이나 CNT가 단독으로 포함될 경우 충전제의 함량은 중량비로 전체 도료의 1%를 유지하였다. 흑연과 CNT가 동시에 같이 첨가될 경우에는 각각 0.5%의 함량으로 탄소재료의 전체 함량이 1%가 되도록 조정하였다.

Table 1. Five paste samples with different filler materials.

Sample Number	Graphite (25 μm)	Graphite (45 μm)	Carbon Nanotube (15 μm)
#1	√(1 w/o)		
#2			√(1 w/o)
#3		√(1 w/o)	
#4	√(0.5 w/o)		√(0.5 w/o)
#5		√(0.5 w/o)	√(0.5 w/o)

전자부품의 방열판 소재로 널리 사용되는 알루미늄(Al 5052)으로 95 × 53 × 0.4 mm 크기의 기판을 제작하고, 준비한 도료를 스크린 프린트 방법으로 기판에 코팅한 후 오븐을 이용하여 120 ~ 150°C에서 30 min 동안 건조하였다. 실험에 사용된 각 탄소재료 분말의 형상과 다섯 종류(#1 ~ #5)의 방열도료를 알루미늄 기판에 코팅했을 때 탄소재료 분말들의 분산 정도 및 입자 표면의 형상을 주사전자현미경(FE-SEM)을 이용하여 관찰하였다.

다섯 종류의 방열도료를 도포한 알루미늄 기판의 열방사율을 원적외선 측정 장치인 FTIR Spectrometer (M2400-C, MIDAC, USA)를 이용하여 40°C에서 측정하였다. 측정 과정은 다음과 같다. 측정 시편을 저온 Chamber에 장착한 후 시편 표면의 온도가 측정온도에 도달하면 방사에너지 및 열방사율을 측정한다. 시편에 다른 외력을 가하지 않고 시편 표면에만 열을 주어 표면에서 나오는 에너지와 흑체에서 나오는 에너지를 비교하여 분석한다. 흑체의 열방사율은 1이고 샘플에서 나오는 열방사율은 흑체에 대하여 상대적으로 측정한다.

그림 1은 방열도료를 코팅한 알루미늄 기판의 상하 온도를 측정하기 위해 제작한 장치이다. Polystyrene 단열재로 박스를 제작하여 하단 부분에 히터를 설치하고 상단 부분에 Al 기판 치수에 맞게 개구부(opening)를 만들고 알루미늄 기판을 올려놓은 후 히터를 3시간 동안 가열하여 일정한 온도가 유지됨을 확인한 후 열전대(thermocouple)와 data logger를 이용하여 박스 외부온도(①), 기판 상부온도(②), 기판 하부온도(③), 박스 내부온도(④)를 측

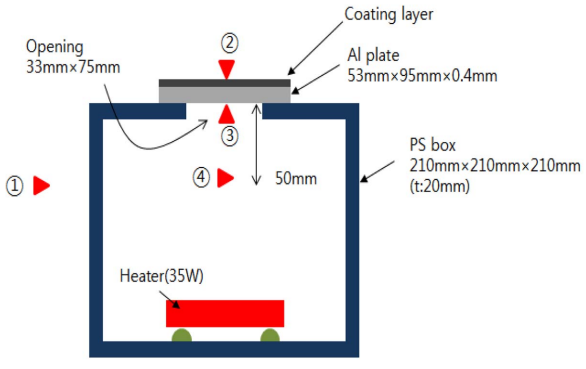

Fig. 1. Schematics diagram of the apparatus for measuring the temperatures above and below the paste coated Al plates.

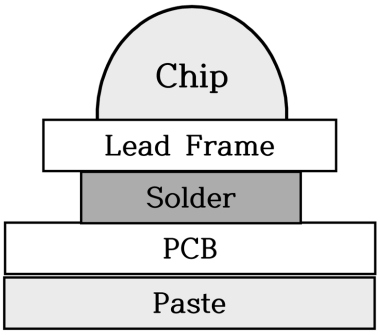

Fig. 2. Schematics of thermal transient test samples.

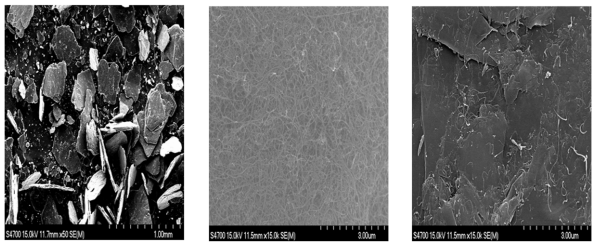

Fig. 3. SEM images of graphite (left), carbon nanotube (middle), and graphite + carbon nanotube (right) fillers.

정하였다.

제조한 방열도료 중 #4를 그림 2와 같이 LED 소자(전력: 3 W, 전압: 3.6 ~ 4 V, 전류: 700 mA, 광속: 200 ~ 220 lm, 색상: 백색)가 실장된 LED 모듈의 PCB 하부에 코팅한 후 열유동측정기(Thermal Transient Tester)인 T3ster(MicRed사)[22]를 사용하여 JEDEC JESD-51 표준에 따라 모듈의 방열특성을 평가하였다. 그림 2에는 나타나 있지 않지만 PCB에 Via를 만들어 전선을 연결하고 LED Chip을 작동시켜 발열을 유도하였다. T3ster는 그림 2와 같이 준비한 시료에 일정 전력을 인가하여 열원(LED)에서 발열되어 수직으로 열이 방출되는 과정을 분석하고 열통로에 있는 각 구조(재료)의 열저항 값을 측정하는 장비이다. T3ster를 이용한 열유동 분석 방법은 이전 논문[23]에 언급되어 있다.

한편 열화상카메라(Inpitron사, Timage IR Pro+)[24]를 사용하여 그림 2와 같이 준비한 시료를 발열시킨 후 30초 간격으로 총 3분 동안 열화상을 촬영하였다. 또한 카메라 상에서 각 시료의 최고 발열 부위(hot spot)의 온도를 측정하였다.

3. 실험결과 및 검토

그림 3은 서로 다른 충전제 #1(25 μm 흑연), #2 (15 μm CNT), #4(25 μm 흑연 + 15 μm CNT) 분말의 SEM 이미지이다. 흑연 분말은 입자들이 판상을 이루고 있으며, CNT 분말은 긴 fiber 형상을 이루며, 두 분말을 혼합한 경우 판상의 흑연에 CNT가 분산되어 있는 것을 볼 수 있다.

충전제의 종류를 다르게 하여 제조한 표 1의 다섯 가지 방열도료를 알루미늄 기판에 코팅한 시료의 열방사율을 40°C에서 측정한 결과를 표 2에 나타내었다. 샘플에서 나오는 방사에너지를 비교 샘플인 흑체에서 나오는 방사에너지로 나눈 값이 열방사율이 된다. 흑체의 열방사율은 1이고, 양극산화처리 알루미늄의 열방사율이 0.7 ~ 0.8[5,9] 정도이다. 표 2의 열방사율 값은 0.890 이상으로 나타났는데 높은 수준의 열방사율 수치이다. 도료의 종류에 따라 열방사율이 큰 차이를 보이지 않는다. 흑연의 입도에 따라서 열방사율이 차이를 보이지 않고 CNT를 충전제로 쓴 경우 열방사율이 약간 증가하고, 흑연과 CNT를 혼합한 도료에서 열방사율이 다소 증가하고 있다. 참고로 카본블랙, 코크스, 비정질 흑연 등 각종 탄소재료를 충전제로 유기용매에 혼합한 도료를 알루미늄 기판에 도포한 후 측정한 50°C 열방사율 값이 0.8 이상, 최대 0.877임을 얻은 연구 보고[9]가 있었다.

표 3은 표 1의 5 가지 방열도료를 알루미늄 기판 위에 도포한 후 그림 1의 장치를 이용하여 측정한 기판 상하부 온도 측정 결과이다. 방열도료를 도포하지 않은 알루미늄 기판도 측정 장치에 올려놓고 동일한 실험을 진행하였다. 표 3에서 여섯 번의 측정에서 박스 외부온도(①)는 평균 24.89°C, 박스 내부온도(④)는 평균 91.85°C로 측정별로 큰 차이를 보이지 않았다. 기판 상부온도(②)와 하부온도(③)는 측정별로 유의한 차이가 나타났다. 특히 기판 하부온도(③) 값에 유의할 필요가 있다. 방열도료가

Table 2. Thermal Emissivity Data for 5 Different Samples.

Sample	Fillers	Thickness (μm)	Emissivity
#1	Graphite (25 μm)	36	0.890
#2	CNT (15 μm)	31	0.893
#3	Graphite (45 μm)	32	0.890
#4	Graphite (25 μm) + CNT (15 μm)	45	0.892
#5	Graphite (45 μm) + CNT (15 μm)	48	0.892

Table 3. Temperatures(°C) measured at 4 Points in Fig. 1 for 6 Samples.

Sample	Point ①	Point ②	Point ③	Point ④
Bare Al	24.46	54.09	73.69	92.11
#1	24.76	47.98	71.14	91.59
#2	25.03	48.38	70.24	91.52
#3	25.06	49.27	70.63	91.79
#4	24.98	48.81	70.06	91.99
#5	25.02	47.89	69.23	92.10

도포되지 않은 기판의 경우 하부온도(③)가 가장 높고, 흑연이 충전되어 있는 도료가 도포되어 있는 기판(#1, #3)이 CNT 도료 도포 기판(#2)보다 높다. 흑연과 CNT 혼합도료(#4, #5)의 경우 그 값은 더 작다. 같은 조건에서 흑연의 입도가 큰 것(#3, #5)이 작은 것(#1, #4)보다 그 값이 작다. 다섯 종류의 방열도료 중에서 45 μm 흑연과 15 μm CNT를 혼합한 방열도료를 적용한 기판(#5)의 하부온도가 제일 낮은 것으로 측정되었다. 혼합 방열도료가 적용된 경우 기판의 하부온도가 가장 낮은 것은 흑연에 CNT가 분산되어 열전도 또는 열확산을 증가시킨 것으로 보인다.

다음에 방열도료를 도포하지 않은 PCB와 방열도료 #4를 도포한 PCB에 그림 2와 같이 LED 소자를 장착하고 열유동분석장치인 T3ster에서 전류 0.15 A, 전압 2.91 V를 인가하여 LED에서 발생하는 열의 방열특성을 비교하였다. 그림 4는 방열도료를 도포하지 않은 PCB를 갖는 LED 모듈에 대하여, 열용량(C_{th})과 열저항(R_{th})의 곱(C_{th} x R_{th})을 R_{th}으로 미분한 값 K를 y 축으로 R_{th}를 x 축으로 나타낸 구조함수곡선도이고, 그림 5는 방열도료를 도포한 PCB를 갖는 LED 모듈의 동일한 실험 데이터이다. 열용량(C_{th}) 값은 시료의 온도가 얼마나 쉽게 변하는지를 나타내고 열저항(R_{th}) 값은 열 방출의 정도를 나타낸다. R_{th} 값이 크면 그만큼 열 방출이 잘 안 된다는 의미이다.

그림 4에서는 6개의 우물 모양이 나타나고, 그림 5에서는 7개의 우물 모양이 나타나는데 각 우물은 적층된 구조에서 하나의 레이어(재료)를 의미한다. 그림 5에서 7개의 구조는 그림 2를 참고하면 위에서부터 순서대로 LED Chip - TIM(thermal interface material) - Lead Frame - Solder - PCB - Paste - Ambient(외부)이다. LED Chip과 Lead Frame 사이에는 그림 2에 표시하지 않은 열계면 물질이 존재하고 있는 것을 고려하였다. 그림 4에서는 도료(Paste)가 없으므로 6개의 우물 즉 레이어가 존재한다고 볼 수 있다. 그림 4와 그림 5의 각 우물의 오른쪽 끝의 열저항 값(R_{th})을 비교하면 흥미로움 점

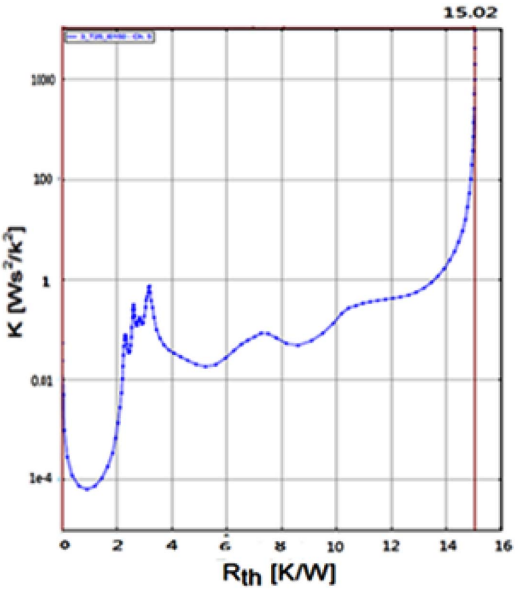

Fig. 4. Structure function curve of LED module with bare PCB.

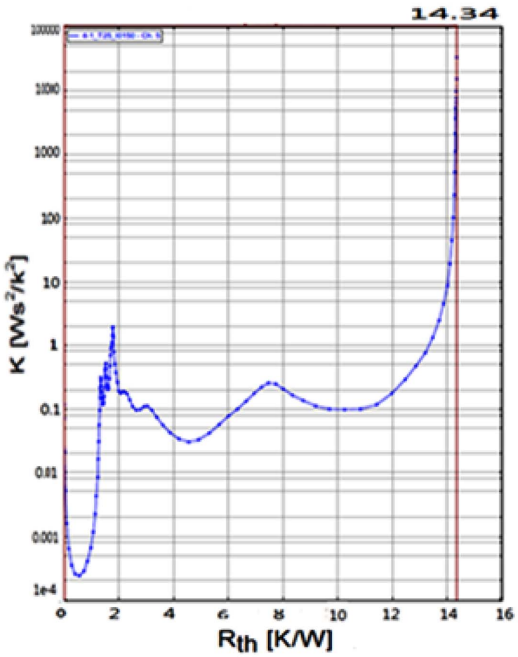

Fig. 5. Structure function curve of LED module with paste coated PCB.

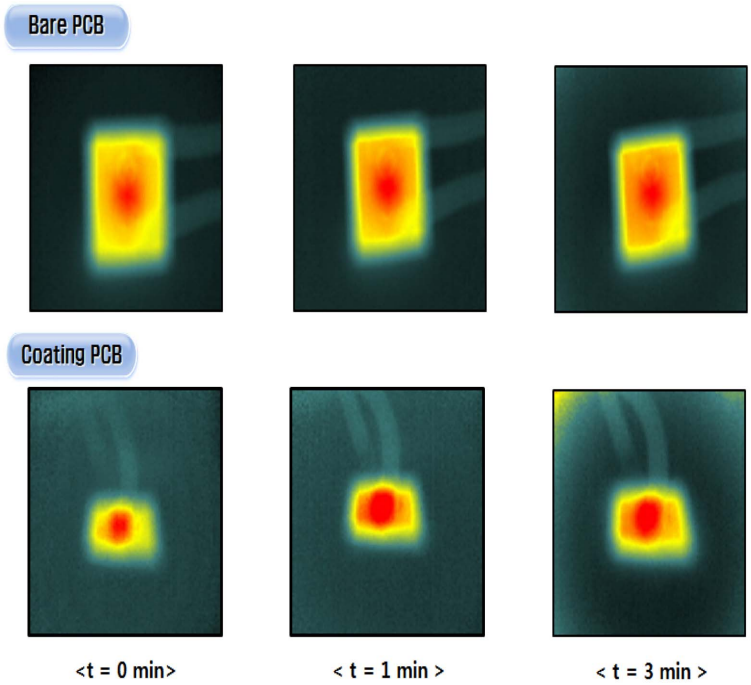

Fig. 6. Front side infrared images of LED modules with bare and coated PCBs.

을 발견할 수 있다. 구조함수곡선도의 앞부분 즉 LED Chip, TIM, Lead Frame, Solder까지의 열저항 값을 도포 안 한 PCB와 도포한 PCB에 대해서 비교하면 전자가 후자보다 월등히 크다. 그러나 마지막 우물 즉 외부에서의 열저항은 도포 안 한 PCB의 경우 15.02 K/W이고, 도포한 PCB의 경우 14.34 K/W으로 그 차이가 작다.

LED에 공급되는 전력(P_D)이 모두 열로 소모된다고 가정하면 열저항은 $R_{th} = \Delta T/P_D$로 나타낼 수 있다. 열저항 수치가 작을수록 열방출이 잘 되어 온도 상승치(ΔT)가 작게 된다. 그림 2에서 LED 접합온도(T_j)와 PCB 하부 온도(T_A)의 차이 ΔT는 접합(Junction)으로부터 외부(Ambient)까지의 열방출 통로에 있는 각 구조(재료)의 열저항(R_{th})의 총합과 소모 전력(P_D)의 곱으로 나타낼 수 있다. 각 구조의 열저항(R_{th}) 값은 그림 4와 그림 5의 각 우물의 오른쪽 끝 점의 x 축 값을 읽으면 구할 수 있다. 소모 전력(P_D)은 전류(0.15 A)와 전압(2.91 V)의 곱인 0.437 W가 된다. 접합온도와 주위온도의 차이(ΔT)를 계산해 보면, 도포 안 한 PCB의 경우, (2.3 + 2.8 + 3.2 + 7.4 + 10.5 + 15.0) K/W × 0.437 W = 18.0 K(°C)이고, 도포한 PCB의 경우, (1.4 + 1.5 + 1.8 + 2.1 + 3.0 + 7.4 + 14.3) K/W × 0.437 W = 13.8 K(°C)가 된다. 즉 두 PCB 뒷면의 온도 차이가 약 4.2°C라고 분석할 수 있다. 도료를 도포한 PCB의 온도 상승치가 도포하지 않은 PCB보다 더 작은 것을 확연히 알 수 있다. 도료를 도포함으로써 LED에서 방출되는 열을 수직 방향으로 방출하는 방열효과가 증대되어 LED의 접합온도를 더 낮추었다고 해석된다.

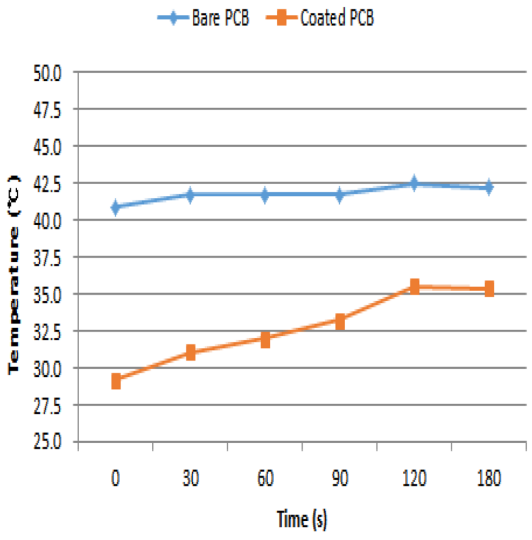

Fig. 7. Change of hot spot temperatures with time for bare and coated PCBs.

제조한 방열도료 중 #4 시료를 선정하여 도포한 PCB와 도포 안 한 PCB에 LED를 실장한 후 열화상카메라로 LED 가열 직후부터 3분 동안 각 시편의 이미지와 최고 발열 부위(hot spot)의 온도를 관찰하였다. 그림 6은 두 PCB를 LED에 장착하고 가열 후 앞면의 열화상 이미지 사진이다. 그림 7은 열화상카메라에서 도료를 도포하지 않은 PCB와 도포한 PCB의 최고 발열 부위 온도를 측정하여 그래

프로 나타낸 것이다. 발열 초기에 도료를 도포한 PCB의 발열 부위 온도가 도포 안 한 PCB에 비하여 현저히 낮고, 시간 경과에 따라 증가하다가 어느 정도 포화되고 있다. 반면에 도료를 도포하지 않은 PCB는 시간 경과에 따라 온도 변화가 크지 않다. 그림 7에서 가열 3분 뒤 두 PCB의 온도차가 약 7°C로 측정되었는데, 이는 앞서 그림 4와 그림 5의 열구조분석 결과 얻은 두 PCB의 온도차 4.2°C와 어느 정도 일치하고 있어 흥미롭다.

4. 결 론

아크릴계 수지에 다섯 종류의 충전제, 즉, 입도 25 μm 흑연, 45 μm 흑연, 15 μm 카본나노튜브(CNT), 25 μm 흑연 + 15 μm CNT, 45 μm 흑연 + 15 μm CNT를 중량비로 1% 분산시켜 방열도료를 제조하고 방열 특성을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 다섯 종류의 도료를 알루미늄 기판에 도포 후 열방사율을 40°C에서 측정한 결과, 0.89 이상의 높은 수치를 보였다. 흑연의 입도에 따라서 열방사율이 차이를 보이지 않았고, CNT를 충전제로 쓴 경우 열방사율이 0.893, 흑연과 CNT를 혼합한 도료의 열방사율은 0.892였다. 열원이 내부에 위치하고 있는 박스의 상부에 개구부를 만든 후 도료를 도포한 알루미늄 기판을 올려놓고 기판 하부온도를 측정한 결과, 도료가 도포되지 않은 경우가 도포된 경우보다 기판 하부온도가 높았고, 흑연 충전 도료가 도포되어 있는 시편이 CNT 충전 도료 도포 시편보다 하부온도가 높았다. 흑연과 CNT 혼합도료의 경우 하부온도가 더 낮았다. 혼합 도료가 적용된 경우 기판의 하부온도가 가장 낮은 것은 흑연에 CNT가 분산되어 열확산을 증가시킨 것으로 해석된다. 25 μm 흑연 + 15 μm CNT 혼합도료를 LED의 PCB 아래에 도포 후 열유동측정기인 T3ster에 실장하고 열저항 및 열용량을 측정하였다. 도료를 코팅 한 PCB와 코팅 안 한 PCB를 갖는 LED 모듈의 열저항 값은 각각 14.34, 15.02 K/W이었다. 열구조분석 결과, 접합부와 외부의 온도 차이는 코팅 한 PCB를 갖는 LED 모듈의 경우 13.8°C, 코팅 안 한 PCB를 갖는 LED 모듈의 경우 18.0°C이었다. LED 동작 시 앞면의 열화상 이미지를 관찰한 결과, 동일 경과시간에서 도료를 코팅한 모듈의 최고 발열 부위(hot spot)의 온도가 코팅 안 한 모듈보다 작게 나왔는데, 이는 전자가 후자보다 낮은 열저항으로 인한 높은 열전도도 특성을 나타내기 때문이라고 해석된다. 결론적으로, 본 연구에서 개발한 도료의 방열 특성이 우수하여 이를 전자제품에 적용할 경우 제품의 효율과 수명 향상을 도모할 수 있을 것으로 기대된다.

References

[1] A. Castellazzi, M. Honsberg-Riedl, G. Wachutka, Thermal characterization of power devices during transient operation, Microelectron. J., 37 (2006) 145-151.

[2] S. Garimella, A. S. Fleischer, J. Y. Murphy, A. Keshavarzi, R. Prasher, C. Patel, S. H. Bhavnani, R. Venkatasubramanian, R. Mahajan, Y. Joshi, B. Sammakia, B. A. Myers, L. Chorosinski, M. Baelmans, P. Sathyamurthy, Thermal challenges in next-generation electronic systems, IEEE Trans. Comp. Pack. Tech., 31 (2008) 801-813.

[3] A. Castellazzi, T. Funaki, T. Kimoto, T. Hikihara, Thermal instability effects in SiC power MOSFETs, Microelectron. Reliab., 52 (2012) 2414-2419.

[4] M. Riccio, A. Castellazzi, G. de Falco, A. Irace, Experimental analysis of electro-thermal instability in SiC power MOSFETs, Microelectron. Reliab., 53 (2013) 1739-1744.

[5] D. A. Jaworske, Optical and calorimetric evaluation of Z-93-P and other thermal control coatings, Thin Solid Films, 290-291 (1996) 278-282.

[6] J. Yi, Y. X. D. He, Y. Sun, Y. Li, Electron beam-physical vapor deposition of SiC/SiO_2 high emissivity thin film, Appl. Surf. Sci., 253 (2007) 4361-4366.

[7] H. Yu, G. Xu, X. Shen, X. Yan, C. Shao, C. Hu, Effects of size, shape and floatage of Cu particles on the low infrared emissivity coatings, Progr. Org. Coating., 66 (2009) 161-166.

[8] J.-S. Roh, J.-S. Ahn, B.-J. Kim, H.-Y. Jeon, S.-K. Seo, S. H. Kim, S.-W. Lee, Thermal emissivity changes as a function of degree of flakes alignment on the graphite surfaces, J. Kor. Inst. Surf. Eng., 42 (2009) 95-101.

[9] W.-Y. Eom, J.-S. Roh, S.-K. Seo, J.-S. Ahn, D.-S. Kang, S. H. Kim, Thermal emission effect of electronic parts using carbon materials, Kor. J. Mater. Res., 20 (2010) 204-209.

[10] H. Miyagawa, M. J. Rich, L. T. Drzal, Thermo-physical properties of epoxy nanocomposites reinforced by carbon nanotubes and vapor grown carbon fibers, Thermochim. Acta, 442 (2006) 67-73.

[11] K. Saeed, S.-Y. Park, H.-J. Lee, J.-B. Back, W.-S. Huh, Preparation of electrospun nanofibers of carbon nanotube/polycaprolactone nanocomposite, Polymer, 47 (2006) 8019-8025.

[12] J. S. Jeong, S. Y. Jeon, T. Y. Lee, J. H. Park, J. H. Shin, P. S. Alegaonkar, A. S. Berdinsky, J. B. Yoo, Fabrication of MWNTs/nylon conductive composite nanofibers by electrospinning, Diamond & Relat. Mater., 15 (2006) 1839-1843.

[13] S. Bellayer, J. W. Gilman, S. S. Rahatekar, S. Bourbigot, X. Flambard, L. M. Hanssen, H. Guo, S. Kumar, Characterization of SWCNT and PAN/SWCNT films, Carbon, 45 (2007) 2417-2423.

[14] M. V. Jose, B. W. Steinert, V. Thomas, D. R. Dean, M. A. Abdalla, G. Price, G. M. Janowski, Morphology and mechanical properties of nylon 6/MWNT nanofibers, Polymer, 48 (2007) 1096-1104.

[15] H. Ishida, S. Rimdusit, Very high thermal conductivity obtained by boron nitride-filled polybenzoxazine, Thermochim. Acta, 320 (1998) 177-186.

[16] W. Zhou, S. Qi, H. Li. S. Shao, Study on insulating thermal conductive BN/HDPE composites, Thermochim. Acta, 452 (2007) 36-42.

[17] W. Zhou, S. Qi, Q. An, H. Zhao, N. Liu, Thermal conductivity of boron nitride reinforced polyethylene composites, Mater. Res. Bull., 42 (2007) 1863-1873.

[18] S. Yu, P. Hing, X. Hu, Thermal conductivity of polystyrene-aluminium nitride composite, Composites: Part A, 33 (2002) 289-292.

[19] S. -H. Xie, B. -K. Zhu, J. -B. Li, X. -Z. Wei, Z. -K. Xu, Preparation and properties of polyimide/aluminium nitride composites, Polymer Testing, 23 (2004) 797-801.

[20] B. Weidenfeller, M. Hofer, F. R. Schilling, Thermal conductivity, thermal diffusivity, and specific heat capacity of particle filled polypropylene, Composites: Part A, 35 (2004) 423-429.

[21] G. -W. Lee, M. Park, J. Kim, J. I. Lee, H. G. Yoon, Enhanced thermal conductivity of polymer composites filled with hybrid filler, Composites: Part A, 37 (2006) 727-734.

[22] http://www.mentor.com/products/mechanical/micred/t3ster/?sfm=auto_suggest, Mentor Graphics T3ster, 2015. 09. 12.

[23] M. Y. Yoon, J. H. Im, C. H. Kang, Heat spreading properties of CVD diamond coated Al heat sink, J. Kor. Inst. Surf. Eng., 48 (2015) 297-302.

[24] http://guideinfrared.com/Plus/m_default/Cms/docDetail.php?ID=60, Timage IR Pro+, 2015. 09. 12.