



<연구논문>

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

한국표면공학회지
J. Kor. Inst. Surf. Eng.
Vol. 48, No. 6, 2015.

<http://dx.doi.org/10.5695/JKISE.2015.48.6.297>

CVD 다이아몬드가 코팅된 알루미늄 방열판의 방열 특성

윤민영, 임종환, 강찬형*

한국산업기술대학교 신소재공학과

Heat Spreading Properties of CVD Diamond Coated Al Heat Sink

Min Young Yoon, Jong Hwan Im, Chan Hyoung Kang*

Department of Advanced Materials Engineering, Korea Polytechnic University, 237 Sangidaehak-ro, Siheung-Si, Kyonggi-Do, 15073, Korea

(Received December 4, 2015 ; revised December 28, 2015 ; accepted December 30, 2015)

Abstract

Nanocrystalline diamond(NCD) coated aluminium plates were prepared and applied as heat sinks for LED modules. NCD films were deposited on 1 mm thick Al plates for times of 2 - 10 h in a microwave plasma chemical vapor deposition reactor. Deposition parameters were the microwave power of 1.2 kW, the working pressure of 90 Torr, the CH₄/Ar gas ratio of 2/200 sccm. In order to enhance diamond nucleation, DC bias voltage of -90 V was applied to the substrate during deposition without external heating. NCD film was identified by X-ray diffraction and Raman spectroscopy. The Al plates with about 300 nm thick NCD film were attached to LED modules and thermal analysis was carried out using Thermal Transient Tester (T3ster) in a still air box. Thermal resistance of the module with NCD/Al plate was 3.88 K/W while that with Al plate was 5.55 K/W. The smaller the thermal resistance, the better the heat emission. From structure function analysis, the differences between junction and ambient temperatures were 12.1°C for NCD/Al plate and 15.5°C for Al plate. The hot spot size of infrared images was larger on NCD/Al than Al plate for a given period of LED operation. In conclusion, NCD coated Al plate exhibited better thermal spreading performance than conventional Al heat sink.

Keywords : Nanocrystalline diamond, Heat sink, Thermal resistance, Junction temperature

1. 서 론

최근 전자기기의 고집적화가 추진되면서 소자의 발열 양이 증가되어 국부적으로 온도가 상승하게 되면 기기 열화의 원인이 되어 방열(放熱) 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 전력 소모가 많은 전력소자나 LED 모듈에서는 방열 특성이 우수한 기판의 개발이 한층 더 요구되고 있다.

천연 단결정 다이아몬드는 재료 중에서 가장 높은 열전도도(약 2,000 W/mK)를 갖고 전기적으로 부

도체이기 때문에 방열용 기판으로 기대가 되어 왔으나, 가격과 프로세스 상의 문제 등으로 실제 적용에 제약이 있었다.^{1,2)} 근래에 들어서 나노결정질 다이아몬드(Nanocrystalline Diamond; NCD) 박막이 개발되면서³⁾ 다이아몬드가 방열 재료로서 재조명을 받게 되었다. 특히 NCD 박막은 열전도도가 단결정 다이아몬드의 70~80% 수준이며, 나노미터 크기 수준의 결정립과 표면조도로 인하여 증착 후 표면 가공 처리 없이 그대로 방열기판으로 사용이 가능하다^{4,5)}.

본 연구에서는 LED 모듈의 방열판 재료로 사용되고 있는 알루미늄 판재 위에 마이크로웨이브 플라즈마 화학증착법(Microwave Plasma Chemical Vapor Deposition; MPCVD)으로 NCD 박막을 증착

*Corresponding Author : Chan Hyoung Kang

Department of Advanced Materials Engineering, Korea Polytechnic University
E-mail : chkang@kpu.ac.kr

하여 방열 특성을 평가하였다. 통상적으로 알루미늄 기판 위에서는 다이아몬드 입자의 핵생성이 어려워 다이아몬드 박막 코팅이 불가능한 것으로 알려져 있다^{6,7)}. 본 연구에서는 시편 홀더의 가열 없이 기판 위에 DC Bias 전압을 인가하고 다이아몬드 핵 생성과 입자 성장을 촉진시키는 BEN (Bias Enhanced Nucleation) 방법⁸⁻¹⁰⁾을 적용함으로써 알루미늄 기판 위에서 다이아몬드 박막을 형성할 수 있었다.

LED 칩이 내장된 모듈을 기존의 알루미늄 방열판과 이번에 준비한 NCD 박막이 증착된 알루미늄 방열판 위에 각각 실장한 후 두 시편의 방열 특성을 비교 평가하였다.

2. 실험방법

2.1 NCD 박막 증착

LED 모듈 제조업체에서 사용하고 있는 알루미늄 기판(직경: 3.5 mm, 두께: 1 mm)을 제공 받아 표면 연마를 통하여 표면 조도를 100 nm 이하로 낮추었다. 기판에 다이아몬드 핵생성 자리를 만들기 위해 나노 다이아몬드 분말이 분산된 에탄올에 1 h 동안 초음파기기(UIL-920)에서 seeding 처리하고 MPCVD 공정으로 다이아몬드 박막을 증착하였다. 공정 조건으로 반응 시 진공도 90 Torr, 반응가스 비율 Ar : CH₄ = 200 : 2 sccm, 마이크로웨이브 전력 1.2 kW, DC 바이어스 전압 -90 V였다. 증착시간을 2 ~ 10 h로 변화시켜 증착한 다이아몬드 시편의 표면을 SEM으로 관찰하였다. 또한 시편을 집속이온빔(FIB)으로 가공하여 수직단면을 만들고 SEM으로 관찰하였다. 박막의 결정성을 평가하기 위하여 X선회절(Rigaku사, D/Max-220PC) 시험과 라만분광(Jobin-Yvon사, LabRamHR) 시험을 실시하였다.

2.2 방열 특성 평가

기존 Al 방열판과 NCD/Al 방열판 위에 각각 LED 소자(전력: 3 W, 전압: 3.6 ~ 4 V, 전류: 700 mA, 광속: 200 ~ 220 lm, 색상: 백색)를 그림 1과 같이 부착한 후 방열 특성을 평가하였다. Via를 통하여 전선을 연결하고 LED를 작동시켜 방열을 유도하였다.

모듈의 방열특성은 열유동측정기(Thermal Transient Tester)인 T3ster(MicRed사)¹¹⁾를 사용하여 JEDEC JESD-51 표준에 따라 평가하였다. T3ster는 그림 1과 같이 준비한 시료에 일정 전류를 인가하여 열원(LED)에서 방열되어 수직으로 열이 방출되는 과정을 분석하고 열 통로에 있는 각 구조(재료)의 열저항 값을 측정하는 장비이다.

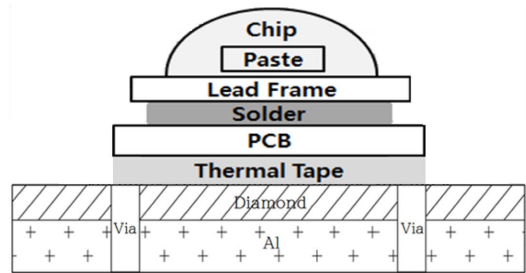


Fig. 1. Schematics of thermal emission test samples.

한편 열화상카메라(Inpitron사, Timage IR Pro+)¹²⁾를 사용하여 그림 1과 같이 준비한 시료를 발열시킨 후 시료의 열화상을 촬영하였다. 열화상 카메라는 피사체에서 나오는 적외선을 분석하여 온도에 따라 다른 색으로 표현하여 이미지를 볼 수 있게 한 카메라이다. 기존 Al 방열판과 NCD/Al 방열판을 사용한 두 LED 모듈의 발열 후 앞면과 뒷면을 촬영하여 최고 발열 부위(hot spot)의 크기를 비교하였다.

3. 실험결과 및 검토

3.1 Al 기판에서 다이아몬드 성장 거동

그림 2는 MPCVD 장치에서 Al 기판에 -90 V의 직류 전압을 인가한 상태로 증착시간을 2 ~ 10 h로 변화시켜 얻은 시편의 표면 SEM 사진이다. 그림 2의 각 사진으로부터 다이아몬드 입자가 성장하여 박막으로 형성되는 과정을 볼 수 있다.

그림 3은 그림 2의 각 시편의 표면에서 다이아몬

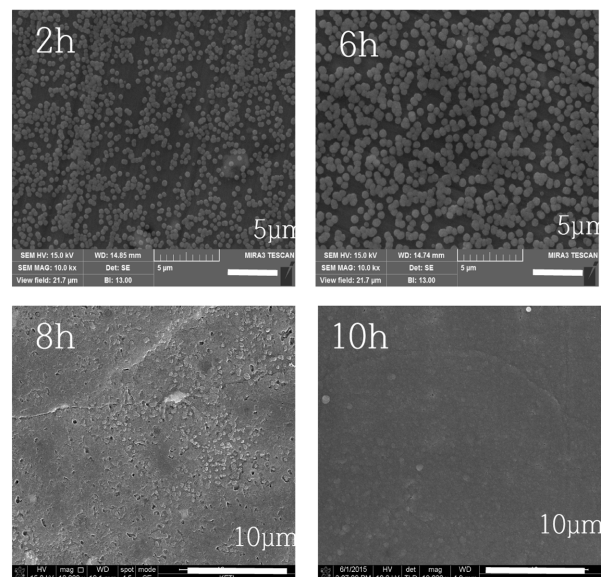


Fig. 2. Surface SEM images of the diamond deposited on Al substrate for different times.

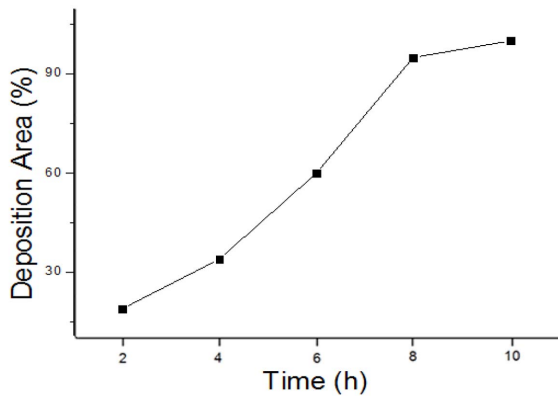


Fig. 3. Percent of diamond deposition area on Al substrate for different times.

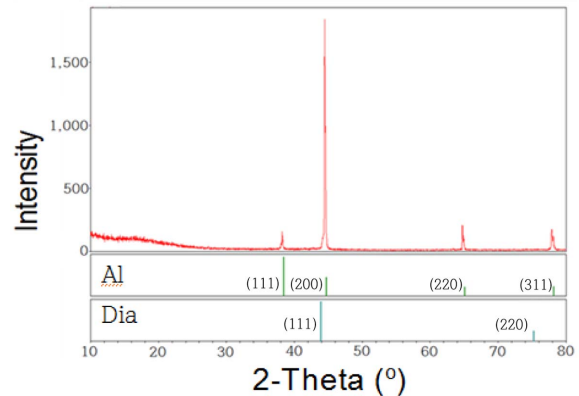


Fig. 5. XRD pattern of diamond/Al plate.

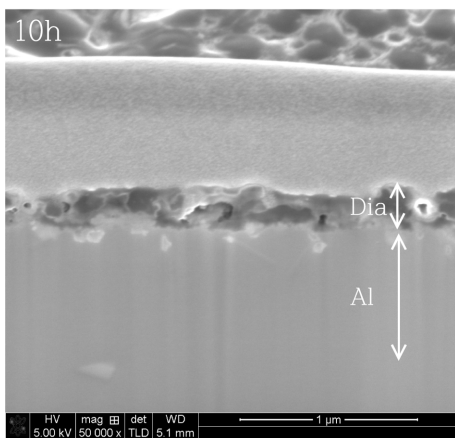


Fig. 4. Cross-sectional SEM image of the diamond deposited on Al substrate for 10 h.

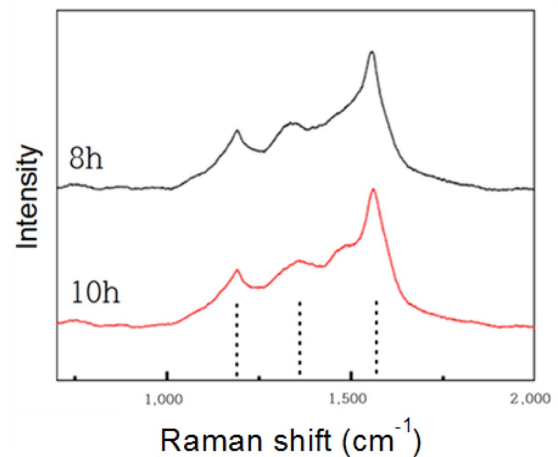


Fig. 6. Raman spectra of the diamond films deposited on Al substrate for 8 h and 10 h.

드 입자가 차지하는 면적을 계산하여 나타낸 것으로 10 h에 이르러 연속적인 박막 층이 형성되는 것으로 확인된다. 입자가 차지하는 면적을 계산하는 방법은 다음과 같다. 즉 13 cm × 15 cm 크기의 SEM 사진으로부터 10 cm × 10 cm 사각형을 임의로 잡고 그 안에 들어가 있는 입자의 평균 크기(넓이)를 먼저 구한 뒤 입자의 개수를 세어 둘을 곱한 뒤에 전체 면적으로 나누고 100을 곱해서 구하였다. 예를 들어 2 h 증착 조건에서 입자의 평균 지름이 0.3 cm 이고 입자의 개수가 270개이면, 입자가 차지하는 면적은 $\pi(0.3/2 \text{ cm})^2 \times 270/100 \text{ cm}^2 \times 100\% = 19\%$ 이다.

그림 4는 10 h 동안 다이아몬드를 증착한 시편의 수직 단면을 FIB로 가공한 후 관찰한 SEM 사진이다. 다이아몬드 층의 두께는 약 300 nm이며, 다이아몬드 층 위는 SEM 관찰을 위해 표면에 코팅한 백금 층이다.

그림 5는 10 h 동안 다이아몬드 박막을 증착한 시편의 엑스선회절(XRD) 실험 결과로서 Al (200) 피크와 다이아몬드(111) 피크가 중첩되어 그 피크의 세기가 다른 피크들보다 월등히 크게 나타난 것으

로 사료되어, Al 기판 위에 다이아몬드 박막이 증착된 것으로 결론을 내릴 수 있다. 20도 이하의 낮은 회절 각도에서 peak-broadening이 관찰되는데 이는 결정화 탄소/유사 다이아몬드가 존재할 가능성도 있다고 볼 수 있다.

그림 6은 8 h 및 10 h 동안 다이아몬드를 증착한 시편의 Raman spectroscopy 측정 결과로서 두 시편 모두에서 세 개의 NCD 고유 피크들(1,150 cm⁻¹, 1,350 cm⁻¹, 1,580 cm⁻¹)¹³⁾이 나타나 NCD가 증착된 것을 확인할 수 있다.

그림 4의 사진으로부터 Al 기판 위에서 다이아몬드 성장 속도를 계산해 보면 약 30 nm/h이다. Si 기판 위에서 MPCVD에 의한 다이아몬드 성장 속도는 대략 500 ~ 1,300 nm/h이고¹⁴⁾, 같은 조건에서 Bias Enhanced Nucleation (BEN) 처리를 동반할 경우 성장 속도는 800 ~ 1,500 nm/h인 것¹²⁾에 비하면 이는 아주 작은 값이다. 그래도 Al 기판 위에서 BEN 처리에 의해 다이아몬드가 생성되고 박막으로 성장하였다는 것은 처음 보고하는 것으로 그 의미가 크다.

Si,^{12,14)} W,^{15,16)} Ti^{15,16)} 등과 같이 탄화물이 잘 형성

되는 금속이나 SiC^{17,18)} 같은 탄화물 위에서는 다이아몬드 박막이 쉽게 형성되고 있다. 반면에 탄화물이 형성되지 않는 Au나 Cu 기판 위에서는 다이아몬드 박막이 형성되기 쉽지 않다^{6,7)}. Al은 Al₄C₃와 같은 탄화물이 존재함에도 불구하고 다이아몬드 성장에 관한 실험보고가 아직 없다. Guo 등⁷⁾은 Cu, Al, Ti 세 가지 금속을 대상으로 이론적 계산(density functional theory)을 통해 금속의 탄화물 생성 엔탈피가 작을수록(Ti < Al < Cu), 금속과 다이아몬드의 계면에너지가 클수록(Ti > Cu > Al) 각 금속 위에서 다이아몬드 핵생성이 촉진되고 다이아몬드/금속 간의 밀착력이 커진다고 보고하였다. 즉 Al 위에 다이아몬드가 형성되지 않는 이유는 Al/다이아몬드 간의 낮은 계면에너지에 기인하는 것으로 볼 수 있다. 그 외에도 Al 표면 위에 형성되는 자연산화막이 다이아몬드 핵의 생성을 저해하는 것으로 해석하고 있다⁷⁾.

본 연구에서 성장이 느리기는 하지만 BEN 처리에 의해 Al 위에 다이아몬드 박막 형성에 성공한 것은 플라즈마에 존재하는 Ar 이온이 DC 바이어스 전압에 의해 기판에 충돌하면서 표면의 Al 산화막 층을 깨고 플라즈마의 탄소 원자가 Al과 탄화물을 형성하도록 하여 다이아몬드의 핵생성을 촉진하기 때문이라고 사료된다. Al 기판 위에 바로 다이아몬드가 증착되지는 않지만, 철강이나 초경합금 기판에 스퍼터링 방법으로 입힌 Al/W 박막(두께 약 50 nm) 위에서는 W만의 박막 위에서보다 월등히 다이아몬드 핵 생성 밀도가 높고 기판과의 밀착력도 우수하다는 보고¹⁹⁻²¹⁾가 있는 것으로 보아서 Al 원자가 간접적으로 다이아몬드의 핵 생성에 기여하는 바가 있다고 판단된다.

3.2 방열 특성

그림 7은 그림 1과 같이 준비한 시료를 T3ster에 장착하고 전류 0.29 A, 전압 2.85 V를 인가하여 LED에서 발생하는 열을 토대로 측정된 시료의 열용량(C_{th})과 열저항(R_{th}) 값을 나타낸 것이다. C_{th} 값은 시료의 온도가 얼마나 쉽게 변하는지를 나타내고 R_{th} 값은 열 방출의 정도를 나타낸다. R_{th} 값이 크면 그만큼 열 방출이 잘 안 된다는 의미이다. 그림 7에서 보면 다이아몬드를 증착한 방열판을 사용한 모듈의 열저항(R_{th}) 값은 3.88 K/W이고 알루미늄 방열판 모듈의 그 값은 5.55 K/W이다. 즉 다이아몬드를 증착한 방열판이 기존 알루미늄 방열판보다 수직 방향으로 열을 더 잘 방출하고 있다고 해석할 수 있다.

그림 7의 그래프의 각 R_{th}에서 적분값(C_{th} × R_{th})을

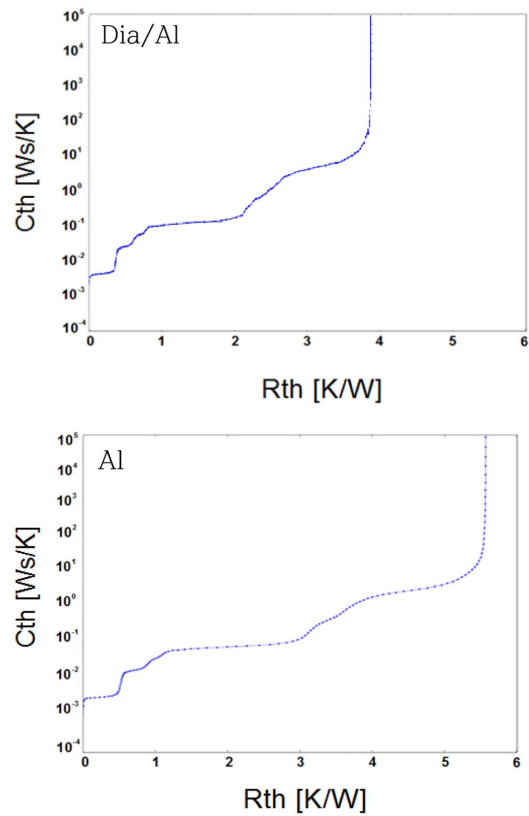


Fig. 7. Thermal capacitance versus resistance curves of LED modules containing diamond/Al (above) and Al plates (bottom).

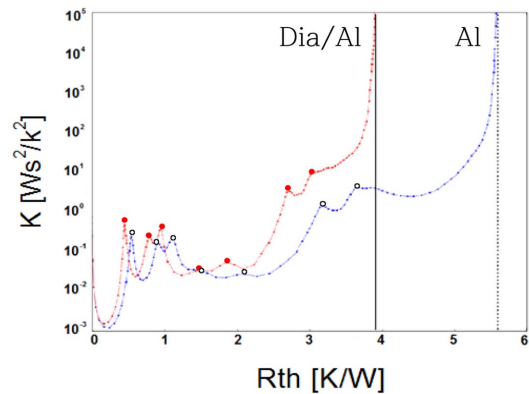


Fig. 8. Structure function curves of LED modules containing diamond/Al and Al plates.

R_{th}으로 미분한 값 K를 나타낸 것이 그림 8이다. 그림 8에서 보면 8개의 우물모양이 나타나는데 각 우물은 적층된 구조에서 하나의 레이어(재료)를 의미한다. 8개의 구조는 그림 1을 참고하면 위에서부터 순서대로 LED Chip - Cu Paste - Lead Frame - Solder - PCB - Thermal Tape - (Diamond)Al 방열판 - 외부이다. 다이아몬드를 증착한 방열판이 기존의 알루미늄 방열판과 열적인 구조가 같게 나오는 것은 다이아몬드 박막의 두께가 0.3 μm 정도로 방

열판의 두께 1 mm보다 월등히 얇기 때문이다.

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 1과 같은 구조에서 LED 접합온도(T_J)와 주위 온도(T_A)의 차이 ΔT 는 접합(Junction)으로부터 외부(Ambient)까지의 열방출 통로에 있는 각 구조(재료)의 열저항(R_{th})의 총합과 소모 전력(P_D)의 곱으로 다음 식과 같이 나타낼 수 있다¹¹⁾.

$$\Delta T = T_J - T_A = \sum_J^A R_{th} \times P_D$$

각 구조의 열저항(R_{th}) 값은 그림 8의 각 우물의 오른쪽 끝 점의 x축 값을 읽으면 구할 수 있다. 소모 전력(P_D)은 전류(0.29 A)와 전압(2.85 V)의 곱인 0.826 W가 된다. 접합 온도와 주위 온도의 차이(ΔT)를 계산해 보면, Al 방열판의 경우, $(0.5 + 0.9 + 1.2 + 1.5 + 2.2 + 3.2 + 3.8 + 5.5) \text{ K/W} \times 0.826 \text{ W} = 15.5^\circ\text{C}$ 이고, 다이아/AI 방열판의 경우, $(0.4 + 0.7 + 0.85 + 1.4 + 1.8 + 2.7 + 3 + 3.8) \text{ K/W} \times 0.826 \text{ W} = 12.1^\circ\text{C}$ 가 된다. 즉 두 방열판 뒷면의 온도 차이가 약 3.4°C 라고 해석할 수 있다.

그림 9는 T3ster에서 직접 측정한 두 LED 모듈의 시간에 따른 온도 상승 곡선이다. 그림 9에서 60 s일 때 두 곡선의 온도 차이는 약 1.8°C 로서 앞의 분석으로부터 얻은 온도 차이 3.4°C 보다 작은 값이다. 이는 공급되는 전기에너지가 모두 열로 변환된다고 가정한 데서 비롯된다. 다이아/AI 방열판의 온도 상승치가 Al 방열판보다 더 작은 것을 확연히 알 수 있다. 즉 다이아몬드의 열전도도가 커서 다

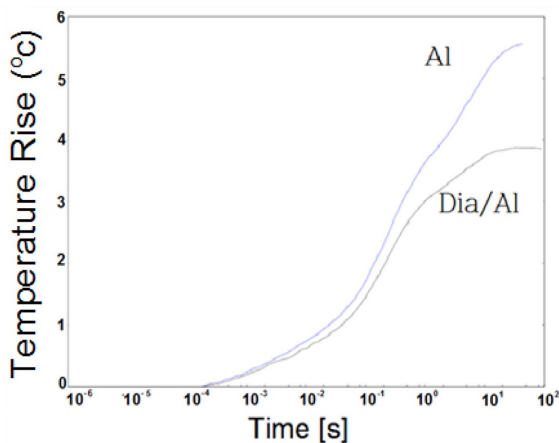


Fig. 9. Temperature rise curves of Al and diamond/AI plates with time duration.

다이아몬드 박막 증착 기판의 방열효과가 더 크고 LED의 접합온도를 더 낮추었다고 해석할 수 있다.

3.3 열화상 관찰 결과

그림 10과 그림 11은 기존 Al 방열판과 다이아몬드/AI 방열판에 LED 모듈을 실장하고 전원을 연결하여 발열시킨 후 시간의 경과에 따라 모듈의 전면(그림 10)과 후면(그림 11)의 열화상을 비교하여 촬영한 사진이다. 각 사진에서 짙은 검은 색(컬러 사진에서는 빨강색) 부분이 최고 발열 부위(hot spot)이다.

그림 10에서 LED가 실장 되어 있는 전면의 사진을 보면 동일 경과시간에서 Al 방열판의 경우가 다이아몬드/AI 방열판의 경우보다 최고 발열 부위 면적이 큰 것을 확인할 수 있다. 반대로 그림 11의 LED 후면에서는 동일 경과시간에서 다이아몬드/AI 방열판의 경우가 Al 방열판의 경우보다 발열 부위 면적이 크게 나타나고 있다. 그림 10의 결과는 그림 9의 결과와 일치하는 것으로서 다이아몬드 박막이 증착되어 있는 기판이 기존 Al 기판에 비하여 열저항이 적어서(즉, 열전도도가 커서) 열이 전면에서 후면으로 빨리 확산되기 때문이다. 참고로 열저항(R_{th})은 아래 식과 같이 열전도도(ρ)와 열 통로의 단면적(A)에 반비례하고 길이(L)에 비례한다.

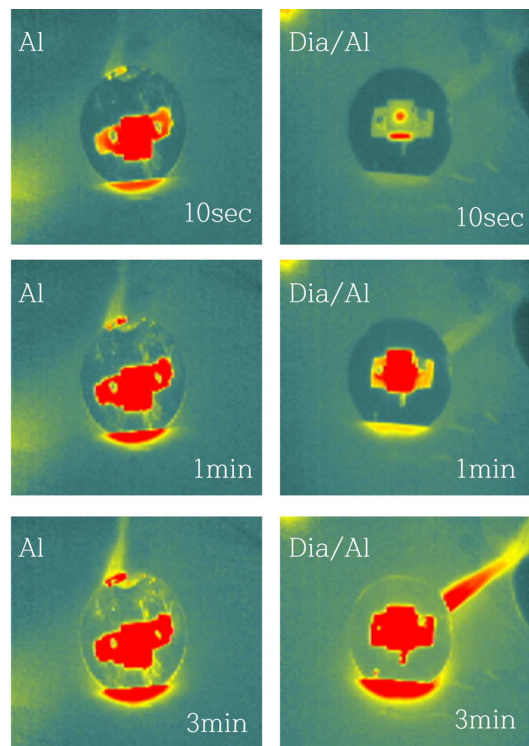


Fig. 10. Front side infrared images of LED modules with Al and diamond/AI plates.

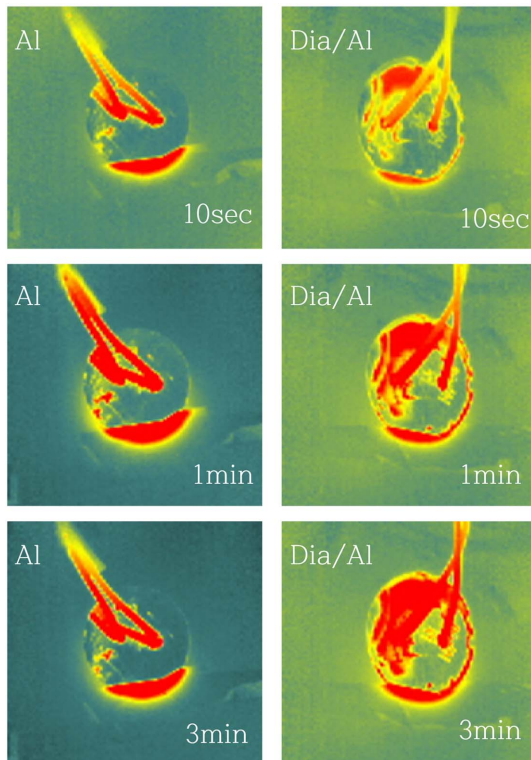


Fig. 11. Back side infrared images of LED modules with Al and diamond/Al plates.

$$R_{th} = \frac{1}{\rho} \times \frac{L}{A}$$

4. 결 론

기존에 LED 모듈의 방열판으로 쓰이는 알루미늄 기판에 MPCVD법으로 -90 V의 직류 전압을 인가하면서 나노결정질 다이아몬드(NCD) 박막을 증착하였다. 10 h의 증착 시간에 NCD 박막의 두께가 300 nm일 정도로 느린 속도로 증착되었지만, 저자들이 아는 범위에서 처음으로 벌크 Al 기판에 NCD의 증착에 성공하였다. NCD가 증착된 Al 기판에 LED 모듈을 부착하고 열유동측정기인 T3Ster를 이용하여 방열특성을 평가한 결과, 다이아몬드/Al 방열판이 기존의 Al 방열판보다 열저항 값이 작았다. 발열 시간의 경과에 따라 다이아몬드/Al 방열판이 Al 방열판보다 LED 접합 온도가 낮은 것으로 나타났는데, 이는 다이아몬드의 높은 열전도도로 인하여 다이아몬드/Al 기판의 방열 특성이 우수하기 때문으로 판단된다. 열화상카메라를 활용하여 LED가 부착된 전면부와 열이 방열되는 후면부의 최고 발열 부위를 관찰한 결과, 전면부에서는 다이아몬드/Al 방열판이 Al 방열판보다 최고 발열 부위 면적이 더 작게 나타났고, 후면부에서는 다이아몬드/Al 방열

판이 Al 방열판보다 발열 부위의 면적이 더 넓게 나타났다. 이러한 결과를 종합할 때, 다이아몬드 박막을 적용한 방열판이 기존의 Al 방열판에 비하여 방열특성이 우수하여, 이를 적용할 경우 LED등 전자제품의 효율과 수명이 향상될 수 있다고 사료된다.

References

1. R. C. Eden, in Handbook of Industrial Diamonds and Diamond Films, (Eds: M. A. Prelas, G. Popovici, L. K. Biglow), Marcel Dekker, Inc., N.Y. (1997) 1073.
2. K. Jagannadham, Solid-State Electronics 42 (1998) 2199.
3. D. M. Gruen, Annu. Rev. Mater. Sci. 29 (1999) 211.
4. J. E. Butler, A. V. Sumant, Chem. Vap. Deposition 14 (2008) 145.
5. O. Auciello, A. V. Sumant, Diamond Relat. Mater. 19 (2010) 699.
6. Y. Qi, L. G. Hector, Jr., Phys. Rev. B. 69 (2004) 235401.
7. H. Guo, Y. Qi, X. Li, J. Appl. Phys. 107 (2010) 033722.
8. S. Yugo, T. Kanai, T. Kimura, T. Muto, Appl. Phys. Lett. 58 (1991) 1036.
9. B. R. Stoner, G-H. Ma, S. D. Wolter, J. T. Glass, Phys. Rev. B, 45B (1992) 11057.
10. I. -S. Kim, C. H. Kang, J. Kor. Inst. Surf. Eng. 46 (2013) 29.
11. Mentor Graphics T3ster, http://www.mentor.com/products/mechanical/micred/t3ster/?sfm=auto_suggest 2015. 09. 12.
12. Timage IR Pro+, http://guideinfrared.com/Plus/m_default/Cms/docDetail.php?ID=60 2015. 09. 12.
13. P. K. Chu, L. Li, Mater. Chem. Phys. 96 (2006) 253.
14. D. Y. Jung, C. H. Kang, J. Kor. Inst. Surf. Eng. 44 (2011) 131.
15. B.-K. Na, C. H. Kang, J. Kor. Inst. Surf. Eng. 46 (2013) 68.
16. D.-B. Park, J.-W. Myung, B.-K. Na, C. H. Kang, J. Kor. Inst. Surf. Eng. 46 (2013) 145.
17. J.-W. Myung, C. H. Kang, J. Kor. Inst. Surf. Eng. 47 (2014) 75.
18. J. H. Im, C. H. Kang, J. Kor. Inst. Surf. Eng. 47 (2014) 263.
19. Y. S. Li, Y. Tang, Q. Yang, J. Maley, R. Samyinaiken, T. Regier, C. Xiao, A. Hirose, Appl. Mater. Interf. 2 (2010) 335.
20. Y. Tang, Y. S. Li, Q. Yang, A. Hirose, Diamond Relat. Mater. 19 (2010) 496.
21. X. J. Li, L. L. He, Y. S. Li, Q. Yang, A. Hirose, Diamond Relat. Mater. 50 (2014) 103.