

# 그래핀 신소재를 이용한 LED 방열 기술

김성인 <철원플라즈마산업기술연구원 원장> · 김용득 <철원플라즈마산업기술연구원 책임연구원>

## 1 개 요

### 1.1 LED 조명

LED chip이 조명등으로 사용되기 시작한 것은 고효율 LED chip이 개발되면서다. 가격이 비쌌어도 불구하고 에너지 효율이 높고, 환경 친화적이며, 장 수명을 갖고 있는 LED 조명은 색과 휘도를 자유롭게 용이하게 제어할 수 있어, 여타 제어 시스템과 통합 시스템화가 가능하다는 장점이 있다. 이러한 이유로 가까운 장래에 현재 조명용으로 많이 사용하고 있는 형광등이나 할로겐램프를 대체할 것으로 예상되고 있다.



그림 1. LED 조명등[Philips MR16]

### 1.2 LED 조명의 방열의 필요성

LED 조명은 친환경 조명소자로서 높은 휘도와 고효율, 장수명의 장점을 갖고 있어, 환경보호와 에너지

의 효율적 사용의 측면에서 여타 조명보다 유리하다.

그러나 고효율 LED 소자가 저휘도 구동시에는 문제가 되지 않으나, 높은 효율을 내기위한 고휘도 구동 조건하에서는 높은 열을 발생시키는 문제점을 갖고 있다. 어떠한 반도체 소자이던지 열은 소자의 특성을 악화시키며 수명을 감소시킨다. LED 소자는 특히 빛과 함께 많은 열을 발생시킨다. LED의 자체 발열은 조명소자로서의 수명을 좌우할 정도로 LED 조명에 있어서 매우 중요한 저해 요소이다. 그림 2는 소자에서 발생하는 열이 소자의 수명에 얼마나 많은 영향을 주는지를 단적으로 보여주는 도표이다. LED가 80%의 부하율로 구동하는 경우를 예로 보면, LED의 접합 온도가 10°C 상승함에도 불구하고 조명의 수명이 1/2이하로 감소하고 있다.

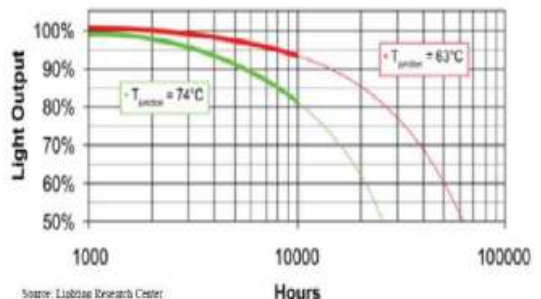


그림 2. LED junction Temperature에 따른 수명 변화

## 2. 그래핀 신소재 방열 기술

### 2.1 방열 기술

이러한 문제로 LED 조명에 있어서 방열은 매우 중요한 매우 중요한 문제로 인식되고 있다. 일반적으로 방열은 열원으로부터 열을 얼마나 빨리 제거하는가에 있다. 열원에서 열을 제거하는 방법은 복사, 대류, 전도의 방법이 있으나, 일반적으로 사용하는 가장 쉬운 방법은 높은 열전도도를 갖는 소재를 이용하여 열을 외부로 방출하는 것이다.

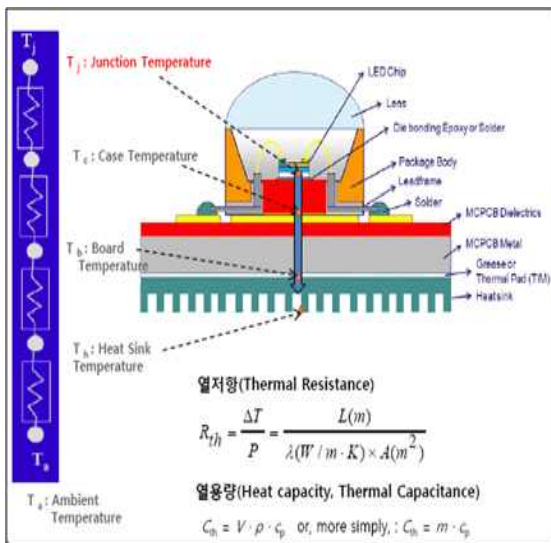


그림 3. LED 조명의 열전달 구조

여기서 방열을 위해서 중요한 것은, LED 소자에서 발생한 열을 빠르게 히트싱크로 보내기 위한 소재 즉 TIM(Thermal Interface Materials) 소재와 히트싱크(heat-sink)이다. TIM 소재는 온도가 높은 열원에서 낮은 온도의 히트싱크로 빠르게 열을 전도시키는 것이 목적이므로 열전도도가 높은 소재를 사용한다. 여기에는 thermal grease나 thermal sheet 등을 주로 사용하고 있으나, 열전도도가 1~3W/mK 수준으로 매우 낮다.

히트싱크는 열을 빠르게 공기 중으로 방사할 수 있는 소재를 사용하는 것이 좋다. 여기에는 특성, 중량, 가격을 고려하여 알루미늄을 많이 사용하고 있으나, 이 또한 높은 열방사 특성을 갖는 소재를 코팅하는 등 특성을 개선하기 위한 노력을 기울이고 있으나, 크기, 중량을 더욱 현격히 줄여야 한다.

### 2.2 방열소재로서의 그래핀

TIM 소재로 많이 사용하고 있는 thermal sheet는 폴리머에 고전도성 소재인 실리콘을 첨가한 것이 주류를 이루고 있다. 그러나 실리콘 계열의 소재는 특허권에 묶여 있어 소재 가격이 비싸다. 최근에 이를 대체하기 위한 수단으로 탄소계열의 그래파이트, 탄소나노튜브, 그래핀 등이 소개되고 있다. 이들 탄소계열의 소재는 실리콘 계열의 소재에 비하여 매우 높은 열전도도 특성을 갖는 것으로 알려져 있다. 따라서 유용한 TIM 소재로 개발이 된다고 하였을 때, 기존의 방열소재에 비하여 매우 높은 효율을 가질 수 있고, 이러한 소재를 LED 조명의 방열소재로 사용하였을 때, 소자의 수명 개선에 큰 도움이 될 것은 자명한 일이라고 할 수 있다.

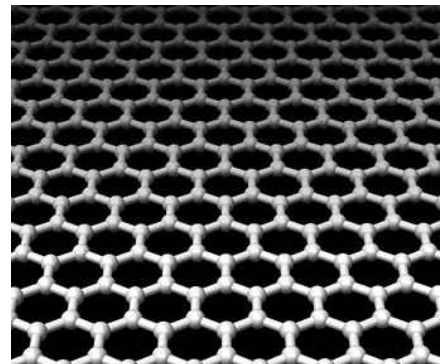


그림 4. 탄소원자가 육각형 벌집 모양을 한 그래핀

탄소계열의 소재 중에서 특히, 그래핀은 탄소 원자들이 육각형 구조로 공유결합으로 연결된 단위자층의

2차원 구조의 소재로, 전류전달속도는 실리콘보다 100배 이상 빠르고, 구리보다 100배 이상의 전류밀도를 가지며, 다이아몬드보다 2배 이상의 우수한 열전도도를 가지며, 구조적으로 화학적으로 안정하며 높은 광 투과도를 갖는 것으로 알려져 있다. 특히 그래핀은 열전도도가 5,000W/mK 이상으로 매우 높아 방열 소재로 각광을 받고 있으며, 투명전도성 소재, 전자파차폐 소재, 플렉시블 소재와 같은 신소재로도 활용가치가 매우 큰 소재로 널리 알려져 있다.

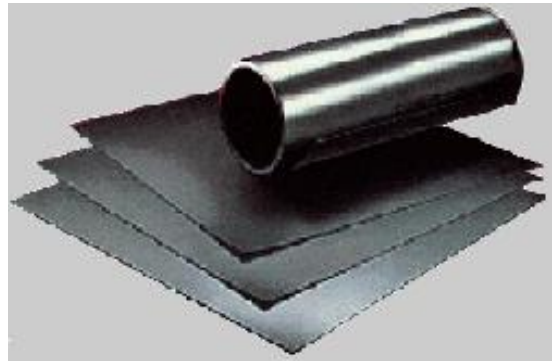


그림 5. 그래핀 시트(Graftech사)

표 1. 그래핀의 특징

| 성질     | 특성                                | 그래핀                  | 비고                    |
|--------|-----------------------------------|----------------------|-----------------------|
| 전기적 성질 | 전하이동도<br>cm <sup>2</sup> /V · sec | 200,000              | Si의 100배,<br>Cu의 150배 |
|        | 최대전류밀도<br>A/cm <sup>2</sup>       | ~5.0x10 <sup>8</sup> | Cu의 100배              |
|        | 면저항<br>Ω · □                      | < 50                 | < Cu의 35%             |
|        | band-gap<br>eV                    | 0~0.3                | Si 1.11               |
| 기계적 성질 | 강도<br>Gpa                         | 1,100                | 다이아몬드의<br>2배          |
|        | 유연성 /<br>신축성                      | 원면적의<br>20%          | ITO는 1%미만             |
| 열적 성질  | 열전도율<br>W/mK                      | 5,000                | 다이아몬드의<br>2배          |
| 광학적 성질 | 투명도                               | 98%/층                | ITO의 80%<br>이상        |

### 2.3 그래핀 신소재 방열시트

앞서 언급하였듯이 그래핀은 뛰어난 특성을 인하여 많은 분야에서 사용될 수 있는 꿈의 신소재이다. 특히 방열 소재로서 많은 연구가 되고 있으며 상용화 되고 있다. Graftech사(미국)는 그래핀을 이용한 방열시트 관련 원천 특허를 갖고 500W/mK이상의 방열시트를 양산하고 있다.

### 2.4 그래핀-메탈 신소재 방열시트 개발

앞서 언급하였듯이, 그래핀은 방열소재로서 매우 좋은 특성을 보유하고 있으며, 양산에 적용하고 있다. 그러나 단순히 그래핀을 방열소재에 적용한 것은 이미 미국의 Graftech사의 원천 특허에 의한 독점권에 묶여 있다.

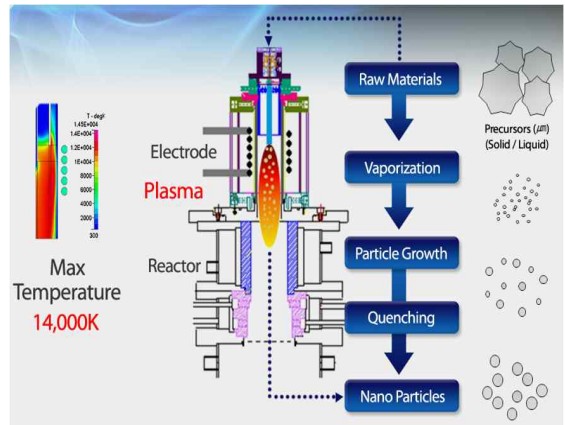


그림 6. RF 열플라즈마 기술을 이용한 그래핀-메탈 융합체의 제조

따라서 원천특허를 회피한 새로운 소재가 필요하다. 철원플라즈마산업기술연구원은 RF 열플라즈마 기술을 이용하여 그래핀 표면상에 나노금속물질을 입힌 새로운 소재인 그래핀-메탈 융합체를 개발하여 국

특집 : 그래핀 및 신소재를 활용한 신조명 융합기술의 현황

내 특허 등록을 마쳤다. 이 기술은 그래핀과 나노크기의 메탈(Ni, Sn, Ag 등)을 RF 열플라즈마 장치에 투입하여, RF 열플라즈마에 의한 높은 열에 메탈을 기화시킨 후, 급속한 냉각 기술에 의한 입자 재성장 기술에 의하여, 그래핀 표면에 금속 입자를 성장시켜 그래핀의 탄소와 금속이 결합시켜 성장시키는 공정으로 되어 있다(그림 6). 특히 이 기술은 Ni, Sn 등 금속 및 Si, Zr 등 다양한 소재를 그래핀 상에 성장시킬 수 있으며, 그 밀도뿐만 아니라 크기도 수십 나노에서 수백 나노 사이즈로 제어할 수 있다.

그림 7은 RF 열플라즈마 공정기술을 적용하여 생산한 그래핀-메탈 융합체의 사진이다.

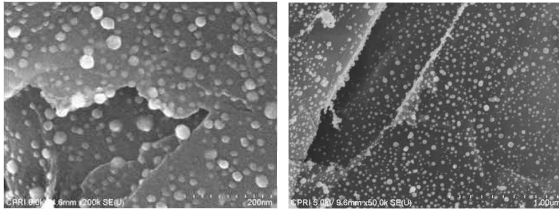


그림 7. 생산된 그래핀-메탈 융합체

그래핀-메탈 융합체의 신소재가 방열소재로서의 사용가능성을 확인하기 위하여, 분산-압착공정 기술을 적용하여 heat-spreader를 제작하였다.

그래핀의 열전도도는 단일 층내에서 갖는 수평열전도도를 의미한다. 그러나 상용화되고 있는 그래핀 입자의 크기는 수십 마이크로미터의 크기로 매우 작은 분체의 형태로 이루어져 있다. 대형의 그래핀 단일층 시트를 양산 제작하는 것은 매우 어려우며 가격 또한 매우 비싸기 때문에 방열시트 소재로 적합하지 않다.

그래핀에 있어서 수평열전도도 5,000W/mK의 의미는 그래핀 평판 내에서 나타나는 물성이다. 매우 작은 입자로 이루어진 그래핀 소재를 이용하여, 얇고 넓은 방열 시트 즉 heat-spreader를 제작하여 높은 열전도도를 얻기 위해서는 입자와 입자 사이의 열전도를 원활하게 할 수 있는 기술이 요구된다. 즉 입자와

입자 사이에서 열전달 저항 역할을 하는 공극을 없애야 하고, 산소 공유결합에 의한 저항을 없애야 한다.

상업 그래핀은 제조공정에서 산소의 함유량을 제어한다 하여도 운송 및 보관 중에 그래핀 표면에서 산소와 반응하여 산화 그래핀이 형성될 수 있다. RF 열플라즈마 공정기술은 14,000°C 이상의 높은 플라즈마 에너지원 공간에서 공정이 일어나면서 높은 에너지에 의하여 산소와 탄소사이의 결합이 파괴되면서 그래핀 입자 표면에 붙어 있는 산소를 분해해내므로, 그래핀-메탈 융합체는 열전달 저항체 성분인 산소가 제거된다. 그림 8은 XG Sciences사의 M25 grade의 RF 열플라즈마 처리 공정 전/후의 산소 농도를 EDX로 측정한 결과이다. 그림에서 보는 것과 같이 플라즈마 처리 전 상용 제품의 그래핀은 탄소성분의 89.1%를 나타내고 있으나, 플라즈마 처리 후에 산소등 타원소의 탈착현상으로 탄소의 농도가 98.2%로 크게 개선된 결과를 얻었다.

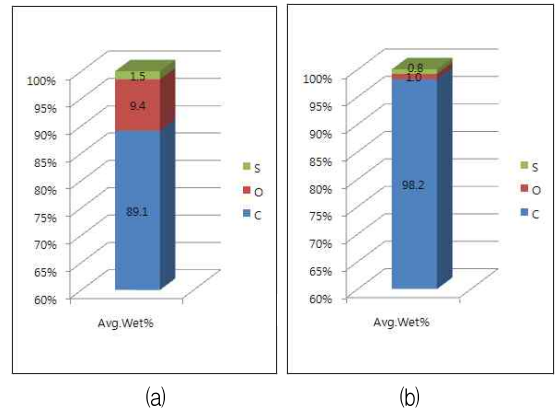


그림 8. 플라즈마 처리 전(a)/후(b)의 산소 농도

방열소재로서의 그래핀-메탈 융합체는 방열 시트 즉 heat-spreader로 제작하였을 때, 메탈이 그래핀 입자들 간의 열전달 매개체 역할을 한다. 즉 메탈이 없는 경우에 서로 단절되어 있는 나노 또는 마이크로 그래핀의 옆면(edge) 또는 표면(surface)에서의 열



저항은 매우 크다. 이때 표면 및 옆면에 붙어 있는 금속 입자는 공기층에 비하여 높은 열전도 특성을 가지면서 열전달 매개체의 역할을 한다(그림 9). 즉 그래핀 소재와 소재 사이의 공간을 채워주어 공극에 의한 열저항을 없애 준다.

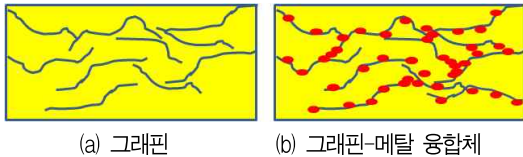


그림 9. 그래핀과 그래핀-메탈 융합체의 구성

Heat-spreader 내부의 공극을 제거하기 위해서는 높은 압력으로 압착을 해야 한다. 표 2는 그래핀-메탈 융합체를 이용하여 제작한 시편의 열전도도를 측정 한 결과를 나타낸다.(제작시 가한 압착 무게는 50 $\phi$  크기의 시편에 가해진 무게로, 열특성 측정 은 Netzsch사의 DSC 200과 LFA-447를 사용하였다.)

표 2. 압착 무게에 따른 열적 특성

| 소재                            | Filler      | 압착무게<br>[Ton<br>for 50 $\phi$ ] | 수직             |                              | 수평             |                              |
|-------------------------------|-------------|---------------------------------|----------------|------------------------------|----------------|------------------------------|
|                               |             |                                 | 열전도도<br>[W/mK] | 열확산도<br>[mm <sup>2</sup> /s] | 열전도도<br>[W/mK] | 열확산도<br>[mm <sup>2</sup> /s] |
| G(M25)/Ni<br>(2:1)            | Sn<br>(1:1) | 4                               | 2.44           | 1.60                         | 97.60          | 64.14                        |
| G(M25)/Ni<br>(2:1)            | Sn<br>(1:1) | 8                               | 6.65           | 2.50                         | 174.78         | 65.82                        |
| G(M25)/Ni<br>(2:1)            | Sn<br>(1:1) | 12                              | 6.41           | 2.59                         | 181.25         | 73.13                        |
| Reference<br>(Graftech社 SMPL) |             |                                 | 5.20           | 2.35                         | 602.83         | 272.50                       |

표 2에서 알 수 있는 것처럼, 압착이 강하게 이루어질수록 열전도도가 높아지는 것을 알 수 있으며 일정 압력이 인가되면 포화되는 것도 볼 수 있다. 그러나 상용화 제품에 비하여 1/3 수준 밖에 되지

않는다.

이는 아무리 산소 등이 없으며 filler의 역할을 할 수 있는 메탈이 존재하는 좋은 조건의 그래핀-메탈 융합체라 하여도 그래핀 소재의 배열이 랜덤하게 분포된다면, 전체 heat-spreader의 구성에 있어서 그래핀의 원래의 열특성을 온전히 활용할 수 없다. 그래핀은 수평 열전도도는 매우 높으나 수직 열전도도는 매우 낮은 특징이 있다. 따라서, 메탈을 융합한 그래핀 입자라 하여도 입자가 랜덤한 배열을 하게 되면 무의미해 진다. 즉 단순히 수십 마이크로 사이의 그래핀 소재를 압착공정으로 압착하는 것은 그림 10과 같이 그래핀 입자가 자유자재로 배치되어 압착되기 때문에, 평면방향으로 매우 높은 열전도도를 얻고자 하는 heat-spreader에 반하여 수직으로 배치된 그래핀 입자가 수평 열전도를 방해하게 되는 문제가 발생한다. 따라서 그래핀 소재를 이용한 heat-spreader의 제작에 있어서 그래핀 입자를 일정한 방향으로 배열시키는 것은 매우 중요한 기술 요소이다.

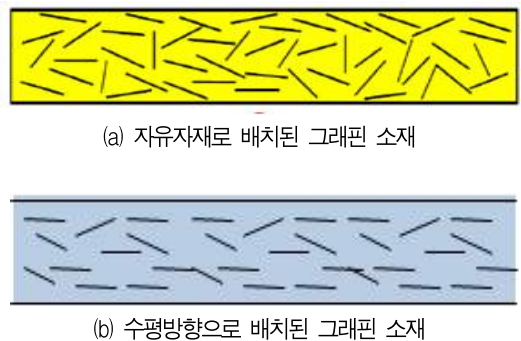


그림 10. 압착 공정에 의한 그래핀 소재의 배열

이러한 입자배열을 위해서 분산-압착공정 기술을 개발하였다(그림 11). 분산-압착 공정 기술은 그래핀-메탈 융합체를 IPA 용액에 분산한 후, IPA를 기화시켜 제거한 후, 침전된 그래핀-메탈 융합체를 가

특집 : 그래핀 및 신소재를 활용한 신조명 융합기술의 현황

온 가압하는 공정으로 구성된다. 여기서 그래핀-메탈 융합체의 원소재료 그래핀은 XGSciences사의 H25, 메탈은 주석을 사용하였다. 이러한 공정 기술은 그래핀을 일렬로 배열하기 위한 것이다. 분산하지 않은 그래핀-메탈 입자는 입자 서로간의 간섭으로 인하여 아무리 강한 압착을 하여도 완전한 일정방향 배치는 기대할 수 없다. 그러나 분산을 하면 입자들은 용액 내에서 자유로운 방향으로 배치되나, 분산용액을 증발시키면서 그래핀-메탈 입자는 표면에 하나씩 서서히 쌓이면서 일렬 방향으로 배치될 수 있다. 이 방법은 압착 후 전 영역의 heat-spreader에서 밀도를 일정하게 유지하는 데에도 유효하다. 일정한 밀도 유지는 heat-spreader의 균일성을 확보하는 수단이 된다.

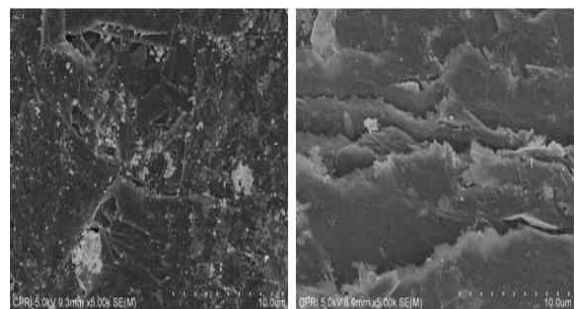


그림 11. 그래핀-메탈 융합체를 이용한 heat-spreader 제조 공정(분산/압착법)

분산-압착공정 기술로 제작한 heat-spreader 시편을 그림 12에 나타내었으며, 그림 13은 표면과 옆면의 사진을 나타내었다.



그림 12. 제작한 heat-spreader 시편(50 $\phi$ )



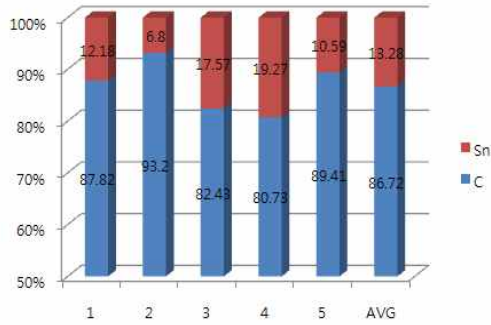
(a) 표면 사진 (b) 옆면 사진

그림 13. 분산/압착법을 적용한 heat-spreader (SEM  $\times 5,000$ )

그림 14는 제작한 heat-spreader의 표면과 옆면의 원소 성분 분포를 나타낸 것이다. 표면 및 옆면의 원소 성분 평균값은 탄소(C)가 약 86%이며, 주석(Sn)이 약 14%를 차지하고 있으며, 그 값은 거의 유사하다. 다만 표면의 경우에는 주석(Sn)이 heat-spreader의 공극부분에 주로 분포할 수 있기 때문에 위치에 따른 성분차이가 나타나고 있다.

제작한 시편의 열전도도를 측정된 결과(표 3), 기준 시편으로 삼고 있는 Graftech사의 시료보다 좋은 수평 열전도도 662W/mK를 얻었다. 다만 열확산도는 기준시료에 비하여 약 42%의 수준으로 낮았다. 이는 제작 과정 개선으로 더 좋은 열확산도를 내는 시편을 제작할 수 있다는 것을 보여준다.

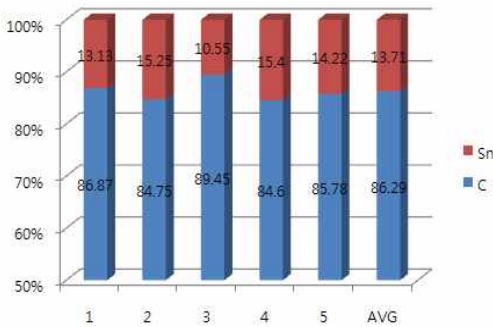
Surface



| Element | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | AVG   |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| C       | 87.82 | 93.20 | 82.43 | 80.73 | 89.41 | 86.72 |
| Sn      | 12.18 | 6.80  | 17.57 | 19.27 | 10.59 | 13.28 |

(a) 표면

Cross Section



| Element | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | AVG   |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| C       | 86.87 | 84.75 | 89.45 | 84.60 | 85.78 | 86.29 |
| Sn      | 13.13 | 15.25 | 10.55 | 15.40 | 14.22 | 13.71 |

(b) 옆면

그림 14. 제작한 heat-spreader의 원소별 농도

표 3. 열전도도 측정 결과 비교

| 소재                         | 열전도도 [W/mK] | 열확산도 [mm <sup>2</sup> /s] |
|----------------------------|-------------|---------------------------|
| G(H25)/Sn (1:1)            | 662.01      | 113.30                    |
| Reference (Graftech社 SMPL) | 602.83      | 272.50                    |

이 실험으로부터 신소재 그래핀-메탈 융합체는 방열소재로 기존 그래핀 또는 그라파이트 소재를 이용한 방열 제품 성능을 발휘할 수 있음을 확인하였다. 이것은 방열 시트 제작 메이저 업체의 특허권으로부터 자유로운 방열소재 및 제품화가 가능하다는 것을 의미하는 것으로 제품의 국산화의 관점에서도 매우 중요한 의미를 갖는다고 할 수 있다. 또한 이러한 제품은 주로 수평방향으로 빠르게 열을 확산하기 위한 제품에 소요될 수 있으며, LED 발열부와 방열재 사이의 TIM 소재로도 충분히 활용할 수 있을 것이다.

### 3. 결론

LED 조명은 에너지효율, 환경친화성, 장수명 등 많은 장점을 가지고 있어, 정책적으로 사용을 권장하고 있다. 그러나 LED 조명의 장점을 극대화하기 위해서는 수명과 효율을 저해하는 자체 발생 열을 잘 방열시켜야 한다. 최근에 방열소재로서 우수한 열전도도와 열확산도를 갖는 탄소계열 소재, 특히 그래핀이 집중 조명을 받으면서 기존의 저 열전도도 소재를 대체할 수 있게 되었다. 특히 그래핀 표면에 열전도도가 높은 나노 금속을 플라즈마 공정 기술로 융합한 그래핀-금속 융합체를 이용한 방열 소재가 개발되면서 단순 그래핀 소재만을 사용한 방열 제품의 내부 공극을 금속체가 필러로서 대체할 수 있게 되면서 열전도도가 향상된 그래핀-메탈 heat-spreader의 개발을 가능하게 하고 있어, 가까운 미래에 그래핀을 이용한 방열소재가 LED 조명의 열문제를 해결할 수 있을 것으로 예상된다.

### 참 고 문 헌

- [1] 김성인, “나노 메탈-그래핀을 이용한 LED 방열소재”, 차세대 LED 신소재, 신광원 기술 세미나, 2012.
- [2] S. Choi, K. Lee, M. Sin, B. Son, S. Song, S. Kim, “Production of Silicon Nano Powder Using the RF Thermal

특집 : 그래핀 및 신소재를 활용한 신조명 융합기술의 현황

- Plasma Torch”, ENCE 2012, NAP-0201, 2012.
- (3) 이규항, 신명선, 최선용, 김정현, 김중길, 조광섭, 김성인, “나노 메탈-그래핀 융합 신소재를 이용한 방열시트 연구”, 전기전자재료학회, 2012 추계학술대회, PB-64, 2012.
  - (4) 임현구, 김주현, “전자소재용 방열 복합 재료의 개발 및 기술 동향”, NICE 제29권 제5호, 2011.
  - (5) Steven Kim et al, Submitted to ICAE Jeju, 2011.
  - (6) MK Hwang, Steven Kim, JH Kim, KT Kwon, JH Kim, JY Jeong, IT Kim, GS Cho, “Effect of Thermal Dissipation by Adding Graphene Materials to Surface Coating of LED Lighting Module”, The 4th CJK Lighting Conference, pp. 385-391, Sep. 2011.



김용득(金庸得)

1971년 8월 10일생. 1995년 2월 경북대학교 전기공학과 졸업. 2006년 2월 경북대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2002년 3월~2007년 8월 오리온피디피(주) 연구소 선임연구원. 2007년 9월~2010년 8월 Sichuan COC Display Ltd.(中) R&D Center Section chief. 2011년 1월~현재 (재)철원플라즈마산업기술연구원 책임연구원.

주요관심분야 : 그래핀, 방열소재, LED, OLED, 디스플레이, 플라즈마, 제어, 기타

◇ 저 자 소개 ◇



김성인(金聖人)

1959년 12월 1일생. 1982년 2월 연세대학교 금속공학과 졸업. 1989년 6월 미국 Stevens 공과대학 물리학과 졸업(박사). 1992~1996년 미국 Stevens 공과대학 교수. 1994~1999년 미국 SKION사 대표이사. 1999~2003년 미국 Plasmion사 대표이사. 2003~2004년 미국 Tech-Inventure사 Managing Director. 2003년~2007년 미국 HealthPia America 대표이사. 2005년~2010년 미국 LED folio사 대표이사. 2010년 9월~2011년 12월 광운대학교 전자물리학과 교수. 2012년~현재 (재)철원플라즈마산업기술연구원 원장.

주요관심분야 : 그래핀, 나노소재, 나노바이오, 방열소재, 플라즈마, LED, OLED, 기타