



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

LED 히트싱크용 금속 발포체 개발 및 특성분석



2016 년 8 월

부경대학교 과학기술융합전문대학원

LED융합공학 전공

장 형 일

공 학 석 사 학 위 논 문

LED 히트싱크용 금속 발포체 개발 및 특성분석

지도교수 양 현 경

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2016 년 8 월

부경대학교 과학기술융합전문대학원

LED융합공학 전공

장 형 일

장형일의 공학석사 학위논문을 인준함.

2016 년 08 월 26 일

주 심 이학박사 정 중 현



위 원 이학박사 양 현 경



위 원 이학박사 박 진 영



목 차

| | |
|-----------------------------------|----|
| Abstract | v |
| 1. 서론 | 1 |
| 2. 배경이론 | |
| 2.1 열전달 | 6 |
| 2.2 물성 측정 장비 | 9 |
| 3. 실험방법 | |
| 3.1 금속 분말을 사용한 금속 발포체 제조 | 15 |
| 3.2 금속 발포체를 이용한 LED 히트싱크 제작 | 17 |
| 3.3 특성측정 | 17 |
| 4. 실험결과 및 고찰 | |
| 4.1 금속 발포체의 단면 형태 분석 | 19 |
| 4.2 FE-SEM 및 EDS 분석 | 33 |
| 4.3 비표면적 분석 | 40 |
| 4.4 기계적 강도 분석 | 47 |
| 4.5 LED 등기구용 히트싱크 열특성 분석 | 54 |
| 5. 결론 | 63 |
| 참고문헌 | 65 |

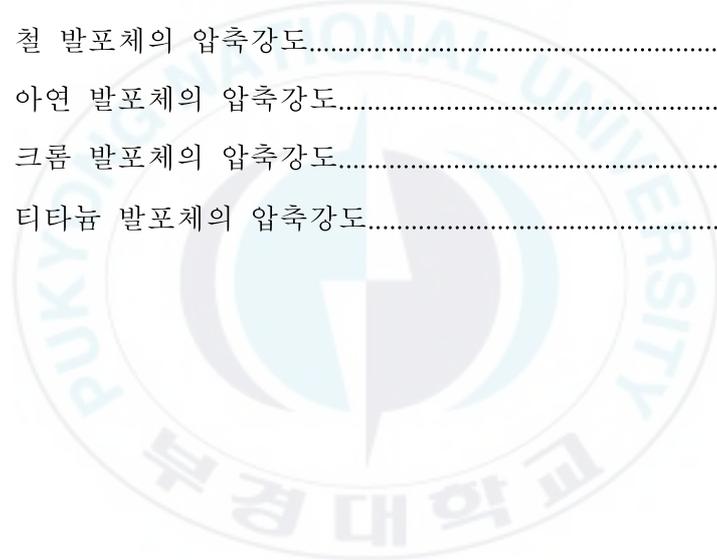
표 목차

| | |
|--|----|
| 표 1-1. 대표적인 금속재료의 열전도율..... | 4 |
| 표 1-2. 대표적인 금속재료의 가격 및 재고량..... | 5 |
| 표 4-1. 알루미늄 함량에 따른 알루미늄 발포체의 구성비(1)..... | 21 |
| 표 4-2. 이산화규소 함량에 따른 알루미늄 발포체의 구성비..... | 23 |
| 표 4-3. 알루미늄 함량에 따른 알루미늄 발포체의 구성비(2)..... | 26 |
| 표 4-4. 활성탄 분말의 첨가량을 달리 적용한 알루미늄 발포체의 구성비 | 29 |
| 표 4-5. 여러 가지 금속 분말을 포함한 금속 발포체의 구성비..... | 31 |
| 표 4-6. 알루미늄 발포체의 구성원소 비율..... | 37 |
| 표 4-7. 구리 발포체의 구성원소 비율..... | 37 |
| 표 4-8. 철 발포체의 구성원소 비율..... | 38 |
| 표 4-9. 아연 발포체의 구성원소 비율..... | 38 |
| 표 4-10. 크롬 발포체의 구성원소 비율..... | 39 |
| 표 4-11. 티타늄 발포체의 구성원소 비율..... | 39 |
| 표 4-12. 일반제품 알루미늄소재 히트싱크를 적용한 20 W 등기구 방열특성 | 55 |
| 표 4-13. 알루미늄 발포체 히트싱크를 적용한 20 W 등기구 방열특성.... | 56 |
| 표 4-14. 아연 발포체 히트싱크를 적용한 20 W 등기구 방열특성..... | 57 |
| 표 4-15. 티타늄 발포체 히트싱크를 적용한 20 W 등기구 방열특성..... | 58 |
| 표 4-16. 철 발포체 히트싱크를 적용한 20 W 등기구 방열특성..... | 59 |
| 표 4-17. 구리 발포체 히트싱크를 적용한 20 W 등기구 방열특성..... | 60 |

그림 목차

| | |
|--|----|
| 그림 1-1. 다양한 LED 응용분야..... | 3 |
| 그림 2-1. 전계 방사형 주사전자현미경 사진..... | 10 |
| 그림 2-2. 비표면적 측정장치 사진..... | 11 |
| 그림 2-3. 만능재료시험기 사진..... | 12 |
| 그림 3-1. 금속 발포체 제작공정..... | 15 |
| 그림 4-1. 알루미늄이 (a) 5 g, (b) 10 g, (c) 15 g 첨가된 알루미늄 발포체의 단면 사진..... | 20 |
| 그림 4-2. 이산화규소의 양을 (a) 0 g, (b) 0.5 g, (c) 1 g, (d) 1.5 g, (e) 2 g, (f) 2.5 g, (g) 3 g, (h) 4 g, (i) 5 g 사용해 제작한 알루미늄 발포체의 단면 사진..... | 22 |
| 그림 4-3. 알루미늄 분말을 (a) 22.5 g, (b) 25 g, (c) 30 g, (d) 35 g 포함한 알루미늄 발포체의 단면 사진..... | 25 |
| 그림 4-4. 활성탄 분말을 (a) 0.5 g, (b) 1 g, (c) 1.5 g, (d) 2 g, (e) 2.5 g, (f) 3 g, (g) 3.5 g 포함한 알루미늄 발포체의 단면 사진..... | 28 |
| 그림 4-5. (a) 알루미늄, (b) 철, (c) 아연, (d) 티타늄, (e) 구리, (f) 크롬 분말을 사용해 제조한 금속 발포체의 단면 사진..... | 30 |
| 그림 4-6. 알루미늄 발포체의 구성성분 및 미세구조..... | 34 |
| 그림 4-7. 구리 발포체의 구성성분 및 미세구조..... | 34 |
| 그림 4-8. 철 발포체의 구성성분 및 미세구조..... | 35 |
| 그림 4-9. 아연 발포체의 구성성분 및 미세구조..... | 35 |
| 그림 4-10. 크롬 발포체의 구성성분 및 미세구조..... | 36 |
| 그림 4-11. 티타늄 발포체의 구성성분 및 미세구조..... | 36 |

| | |
|--|----|
| 그림 4-12. 알루미늄 발포체의 BET 그래프 및 비표면적..... | 41 |
| 그림 4-13. 구리 발포체의 BET 그래프 및 비표면적..... | 42 |
| 그림 4-14. 철 발포체의 BET 그래프 및 비표면적..... | 43 |
| 그림 4-15. 아연 발포체의 BET 그래프 및 비표면적..... | 44 |
| 그림 4-16. 크롬 발포체의 BET 그래프 및 비표면적..... | 45 |
| 그림 4-17. 티타늄 발포체의 BET 그래프 및 비표면적..... | 46 |
| 그림 4-18. 알루미늄 발포체의 압축강도..... | 48 |
| 그림 4-19. 구리 발포체의 압축강도..... | 49 |
| 그림 4-20. 철 발포체의 압축강도..... | 50 |
| 그림 4-21. 아연 발포체의 압축강도..... | 51 |
| 그림 4-22. 크롬 발포체의 압축강도..... | 52 |
| 그림 4-23. 티타늄 발포체의 압축강도..... | 53 |



Development and characterization of Metal foam by the LED heatsink

Hyeong Il Jang

Department of LED Convergence Engineering,
Specialized Graduate School Science & Technology Convergence,
Pukyong National University

Abstract

LED is attracting the interest due to its important impacts on illumination industry. However, currently, the thermal problem that is brought by heat generated within the LED itself is still a barrier that limits the stability, reliability and lifetime of LED. Therefore, effective heat dissipation of LED packages with low thermal resistance are significant to improve the performance of LED. The previous method of manufacturing the Aluminium heatsink needs high temperature. This generally leads to growth of manufacturing cost. It is possible to make the heatsink without high temperature for the melting process of previous method.

In this study, first of all, the metal foam heatsinks were fabricated by using various metal powders and binders. The component of metal foam were investigated by using the energy dispersive X-ray spectroscopy(EDS). The microstructure was examined through field-emission scanning electron microscopy. The compressive strength was measured by universal testing machine. The Strength of Zn based metal foam was about 4.14 MPa, which was the highest among various metal foam. BET surface area of Zn based metal foam was about 9.467 m²/g, which was much higher in comparison with other metal foams. Finally, the performance of heat dissipation were measured

by using a thermal imaging camera. The metal foam heatsinks and the commercial aluminium heatsink were combined with each LED lighting fixture. We measured the actual heat dissipation effect of heatsink, the temperature of LEDs combined with Zn based metal foam and Al based metal foam is about 48.6 and 48.2 °C, which showed an efficient heat dissipation by 95% compared with commercial LED heatsink. These metal foams are expected to find potential application such as heatsink of LEDs and other electronic devices.



1. 서론

최근 여러 분야에서 사용되고 있는 전자 기기는 다양화, 경량화, 소형화, 박형화가 추구하고 있다. 전자 소자가 점차 고집적화 될수록 기존에 방출되는 양의 열보다 더욱 많은 열이 발생하는데, 방출 열은 기본적으로 소자의 기능을 저하시킬 뿐만 아니라 주변 소자의 오작동, 기관 열화 등 여러 가지 문제의 원인이 되기 때문에 이를 제어할 수 있는 방법에 대한 많은 관심과 연구가 이루어지고 있다[1].

그 중 LED의 경우는 전체 에너지의 약 85 % 정도가 열로 전환되며 이때 방출되는 고온의 열로 인해 접합부의 온도가 계속 증가함으로서 LED 반도체부분, 나아가 전체 LED 패키지의 수명저하를 야기한다. 식 (1-1)을 적용하면 일반적으로 오작동이 일어나는 평균시간은 소자의 작동 온도가 10 °C 상승할 때 수명은 2 배로 단축되는 것으로 본다. LED의 수명을 조금이라도 더 늘리기 위한 노력이 다양하게 진행되고 있는데, 특히 high power LED의 경우 고 방열 기관을 사용하고 있으며, 이에 따라 고 방열 소재 및 방열방법에 대한 수요가 급격하게 증가하고 있다[2-4].

$$T = T_0 \times 2^{\frac{T_{\max} - T_{\text{case}}}{10}} \quad (1-1)$$

… T : LED 수명

T_0 : 기본수명(최고사용온도 보증수명)

T_{Max} : 제조사 제시 최고 사용온도

T_{Case} : 실제 사용온도

가장 보편적으로 사용되고 있는 방열방법 중 하나인 히트싱크는 그 종류와 형태가 매우 다양하다. 히트싱크는 보통 알루미늄(Al)을 사용하여 제작하는데, 알루미늄은 금속 가운데 은(Ag)과 금(Au), 구리(Cu) 다음으로 열전도성이 뛰어나지만 이들 금속에 비하여 상대적으로 가격이 저렴하기 때문에 열을 발산하기 위한 소재로 많은 각광을 받고 있다. 알루미늄 히트싱크는 대부분 다이캐스팅 공정을 통하여 제조되고, 이는 필요한 구조형상에 완전히 일치하도록 정확하게 가공된 강제의 금형에 용융된 금속을 넣고 냉각시켜 금형과 똑같은 주물을 얻는 방법이다. 금속재료를 용융할 때 높은 온도가 필요하며 그렇기 때문에 사용할 수 있는 금속재료의 종류가 용융점이 비교적 낮은 금속으로 제한된다. 또한 금형은 표면이 단단하고 녹슬지 않으며 고온 고압에 잘 견디고 내산성이 있어야하는 등의 여러 가지 특성이 요구되기 때문에 제작 시 많은 비용이 필요하다는 단점이 있다.

본 연구에서는 LED 조명용 히트싱크로 적용하였을 경우 열전달 성능이 기존의 히트싱크의 성능과 비슷하지만 기존의 히트싱크 제작방법에 비하여 단순화된 공정을 가지며, 특히 매우 높은 온도가 필요한 일반적인 히트싱크 제조법과 달리 낮은 온도에서도 완성 가능한 제조과정을 가진 금속 발포체를 제조하였다. 주성분인 금속 분말(알루미늄 분말, 구리 분말, 철 분말, 아연 분말, 티타늄 분말, 크롬 분말)과 바인더로서의 역할을 하는 액상 규산나트륨 등을 혼합한 후 과산화수소(H_2O_2)를 첨가하여 금속 발포체를 생성하고, 이 발포체에 대한 여러 가지 특성분석을 수행하였으며 이후 추가적인 제조과정을 통하여 LED 히트싱크를 제작하였다. 제작된 히트싱크를 LED 패키지에 직접 적용하여 열특성 및 물리적 특성에 대하여 연구하였다.



그림 1-1. 다양한 LED 응용분야

| 원자번호 | 원소기호 | 원 소 명 | 열전도율 (300 K 기준) |
|------|------|-------|--------------------|
| 12 | Mg | 마그네슘 | 156.0 |
| 13 | Al | 알루미늄 | 237.0 |
| 22 | Ti | 티타늄 | 21.9 |
| 24 | Cr | 크롬 | 93.9 |
| 26 | Fe | 철 | 83.5 |
| 29 | Cu | 구리 | 403.0 |
| 30 | Zn | 아연 | 116.0 |
| 47 | Ag | 은 | 429.0 |
| 50 | Sn | 주석 | 66.8 |
| 78 | Pt | 백금 | 72.0 |
| 79 | Au | 금 | 318.0 |
| 82 | Pb | 납 | 35.3 |

표 1-1. 대표적인 금속재료의 열전도율 (단위 : W/(m·K))

| 비철 상품 | Cash(Official) | | 금액변동폭 | | 재고량(t) | | 재고량 변동폭(t) | | |
|----------|----------------|--------|--------|--------|--------|-----------|---------------|--------|--------|
| | 날짜 | 5/26 | 5/25 | 금액(\$) | 비율(%) | 5/26 | 5/25 | 5/26 | 5/25 |
| Cu | | 7,705 | 4,636 | 69 | 1.49 | 155,975 | 155,250 | 725 | -450 |
| Al | | 1,553 | 1,539 | 14 | 0.91 | 2,539,900 | 2,544,325 | -4,425 | -8,575 |
| Zn | | 1,882 | 1,821 | 61 | 3.35 | 385,025 | 385,075 | -50 | -775 |
| Pb | | 1,667 | 1,646 | 21 | 1.28 | 185,275 | 185,550 | -275 | -1,050 |
| Ni | | 8,375 | 8,340 | 35 | 0.42 | 400,896 | 401,874 | -978 | -588 |
| Sn | | 15,725 | 15,500 | 225 | 1.45 | 7,045 | 6,980 | 65 | -15 |

표 1-2. 대표적인 금속재료의 가격 및 재고량 (단위 : 달러, 톤)

2. 배경이론

2.1 열전달

2.1.1 열전달 개념

물질 내부의 여기 된 분자의 진동상태의 강도에 따라 열의 높고 낮음을 구분한다. 물체에서 발생 되는 열에너지가 높을 경우 발생된 열은 강한 진동으로 인한 것으로, 이때 주변과 평형상태를 유지하고자 하는 물성으로 인하여 평형온도에 도달하게 된다. 어떠한 임의의 물질이 평형 온도에 도달하기까지에 대한 변수는 여러 가지가 존재하지만, 질량과 잠복 열에 대한 변수가 가장 큰 역할을 하며, 평형온도에 도달하는 속도는 주변온도와 임의의 물질간의 온도차와 얼마나 빠른 시간 내에 열이 뜨거운 물질에서 차가운 물질로 전달되는 가에 따라 달라진다[5].

열전달이란 열의 흐름을 의미하며 전도(conduction), 복사(radiation), 대류(convection)의 세 가지 방법으로 나뉜다. 전도는 고체내부에서만 발생되는데, 하나의 고체 내부 또는 두 인접한 고체 사이에서 다른 원자에 의하여 움직이지 않고 분자의 진동에 의해 열에너지가 점차 주위로 확산되며 전달되는 것을 말한다. 복사는 전도와 유사하게 물질 내부 원자들의 진동에 의하여 발생한 전자기파의 방사로 열에너지가 전달되는 것을 말한다. 대류는 앞의 전도나 복사와 유사한 열전달 방법이지만, 유체를 통하여 여기 된 입자가 진동 뿐 아니라 이동을 하여 열에너지를 전달하므로 진동에 의하여 열에너지를 전달한다는 열전달의 정의가 일부분으로만 적용된다. 하지만, 대류 또한 높은 온도에서 낮은 온도로 에너지가 전달된다는 열전달의 기본 개념을 준수하기 때문에 ‘열전달’의 분류에 포함시키고 있다[6].

2.1.2 열역학의 열에 관한 여러 가지 식

열전달의 경우 총 전달되는 열의 양은 식 (2-1)과 같이 전도(conduction), 복사(radiation), 대류(convection)의 세 가지 흐름의 합과 같으며 열전달 방법에 따라서 각각 사용되는 열역학에서 열에 관한 식을 보면 다음과 같다.

$$Q_{Total} = Q_{Conv} + Q_{Cond} + Q_{Rad} \quad (2-1)$$

$$Q_{Cond} = -kA \frac{dt}{dx} \quad (2-2)$$

… k : Thermal conductivity[W/(m·K)]

A : Surface area(m²)

dt : Temperature difference

dx : Thickness

$$Q_{Conv} = hA(T_{(t)} - T_{Env}) \quad (2-3)$$

… h : Heat transfer coefficient[W/(m²·K)]

A : Surface area(m²)

T : Temperature of the object's surface and interior

T_{Env} : Temperature of the environment

$$Q_{Emit} = e\sigma AT^4 \quad (2-4)$$

… e : Emissivity($0 < e < 1$)

A : Stefan-Boltzmann constant($5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)

A : Surface area(m^2)

T : Temperature(Kelvins)

식 (2-2)의 푸리에법칙(Fourier's law)에서 k 는 열전도율을 뜻하며 이를 통하여 효과적인 열 흐름을 위해서는 높은 열전도율을 가진 소재를 사용하는 것이 유리한 것을 확인할 수 있다. 또한 (2-3)의 뉴턴 법칙(Newton's law of cooling), (2-4)의 스테판-볼츠만 법칙(Stefan-Boltzmann's law of radiation) 등 제시된 모든 식에서 A (면적)이라는 요소를 확인할 수 있으며, 이는 열관리의 측면에 있어서 유효 방사 면적의 중요성을 보여주며 여러 가지 방법을 사용하여 방사면적을 넓히는 것이 중요하다. 따라서 히트 싱크의 열관리에 있어서 방사면적은 매우 중요한 역할을 하며 방사면적을 넓히는 것이 매우 중요하다[7-11].

2.2 물성 측정 장비

2.2.1 전계 방사형 주사전자현미경 (FE-SEM : field emission scanning electron microscope)

일반적인 광학 현미경의 경우에는 빛을 시료면에 조사하여 시료를 통과한 빛이나 반사된 빛이 여러 렌즈 계를 거쳐 망막에 상을 맺는 방식인데 반해 전자현미경의 경우에는 빛의 역할을 전자선이 하게 된다. 고 진공 (10^{-5} Torr 이상)하에서 필라멘트에 고전압을 가하면 열 전자빔이 방출되고, 이 열 전자빔이 도전성을 가진 시료표면에 입사되면 에너지의 대부분이 열 발생으로 사라지며, 나머지 전자는 시료의 구성원자를 여기 또는 전리시키고, 일부는 산란되어 시료에서 밖으로 나오게 된다. 이 때 여러 가지 정보를 가진 신호를 방출하게 되며 이들 신호 중에서 2차 전자를 포집하여 광증폭기를 통해 확대된 이미지를 CRT(cathode ray tube)에 나타낸다. 또한 특성X선(characteristic X-ray)을 방출하는데, 이 특성X선의 에너지 값을 분류하여 시료의 화학조성에 대한 정성 및 정량분석을 가능하게 한다. 주사전자현미경은 광학현미경에서 이용되어지는 가시광선보다 극히 짧은 파장을 가지는 전자를 광원으로 이용하기 때문에 해상력이 극히 우수하고 초점심도가 깊어 초미세 표면구조를 입체감 있게 관찰할 수 있는 장비이다. EDS(energy dispersive X-ray spectrometer)가 부착 되어있는 경우 이를 통하여 해당 시료의 정성 및 정량분석을 할 수 있다.



그림 2-1. 전계 방사형 주사전자현미경 사진

2.2.2 비표면적 측정장치 (Surface Area & Pore Size Analyzer)

비표면적 측정장치는 활성탄(activated carbon), 제올라이트(zeolite), 실리카(silica) 등 다공성 물질의 비표면적(specific surface area)이나 기공의 크기(pore size) 및 분포(distribution) 등을 기체흡착법을 사용하여 측정하는 장비이다.



그림 2-2. 비표면적 측정장치 사진

2.2.3 만능재료시험기 (Universal Testing Machine)

서보(servo) 유압 제어 시스템을 이용하여 구조물에 정적인 혹은 동적인 힘이나 변위를 가하여 시험체 고유의 압축, 인장, 굽힘강도 등의 특성을 평가 한다.



그림 2-3. 만능재료시험기 사진

2.2.4 열화상 카메라의 측정이론

열화상 카메라로 어떤 물질의 온도를 측정할 경우에 이미 반사율을 알고 있는 기준시료와 측정시료의 측정치에 대한 비를 통하여 반사율을 구할 수 있다. 복사에너지가 임의의 물체에 입사되었을 경우, 에너지보존의 법칙에 따라 식 (2-5)와 같이 나타낼 수 있는데 흡수율의 고려 유무에 따라 불투명한 물체표면인 경우 식 (2-6)으로 나타내기도 한다.

$$\rho_{\lambda}(T) + \alpha_{\lambda}(T) + \tau_{\lambda}(T) = 1 \quad (2-5)$$

$$\rho_{\lambda}(T) + \tau_{\lambda}(T) = 1 \quad (2-6)$$

여기서 ρ 는 반사율(reflectivity), a 는 흡수율(absorptivity)이며, τ 는 투과율(transmissivity)이다. 반사율(ρ), 흡수율(a), 투과율(τ)는 다음과 같은 식 (2-7)에 의해서 나타낼 수 있다.

$$\rho = \frac{\textit{Reflected flux}}{\textit{incident light flux}} \times 100\% \quad (2-7)$$

$$\tau = \frac{\textit{Transmitted luminous flux}}{\textit{incident light flux}} \times 100\%$$

$$\alpha = \frac{\textit{Absorption luminous flux}}{\textit{incident light flux}} \times 100\%$$

반사율 및 흡수율은 매질의 종류와 파장에 의존적인데 불투명한 일반 물체 표면의 열복사 에너지는 투과율(τ) = 0 이므로 $\rho_\lambda(T) + a_\lambda(T) = 1$ 이며 이상적인 흑체복사에너지는 반사율(ρ) = 0 이고, 흡수율(a) = 1 이 된다. 물체 표면에서 반사되는 에너지를 제외하고 나머지 에너지는 물체 내부로 흡수되는데, 키르히호프의 법칙에 의하면 임의의 어떤 물체의 방사율과 흡수율의 관계는 아래의 식 (2-8)과 같다.

$$\epsilon_\lambda(T) = \alpha_\lambda(T) \quad (2-8)$$

측정치에 대한 기준 물질의 반사에너지를 $E_{1\lambda}(T)$ 으로 측정하고, 측정 물질의 반사에너지를 $E_{2\lambda}(T)$ 로 측정하면 식 (2-9)에 의해 반사율이 계산된다.

$$\rho(\lambda, T) = \frac{\epsilon_{2\lambda}(\lambda, T)}{\epsilon_{1\lambda}(\lambda, T)} \quad (2-9)$$

간단하게 임의의 수치를 적용해보면 기준 물질의 반사에너지가 100이고 측정 물질의 반사에너지가 50이면 이 물질의 반사율은 0.5가 된다[12].

3. 실험방법

3.1 금속 분말을 사용한 금속 발포체 제조

본 실험은 LED 조명 히트싱크로의 적용에 필요한 여러 가지 특성들에 부합하는 성능을 가지며 제조과정이 간단하고 무게가 가벼운 금속 발포체를 제조하기 위해 진행하였으며, 알루미늄(Aluminium ; Al), 구리(Copper; Cu), 철(Iron; Fe), 아연(Zinc; Zn), 크롬(Chromium; Cr), 티타늄(Titanium; Ti) 등 각각의 금속 분말과 이산화규소(SiO_2), 활성탄 분말(activated carbon), 액상규산나트륨(sodium silicate), 과산화수소(H_2O_2), 증류수(H_2O)를 재료로 사용하였다. 그림 3-1은 금속 분말을 사용해 만든 히트싱크의 전반적인 제작 공정을 나타낸다.

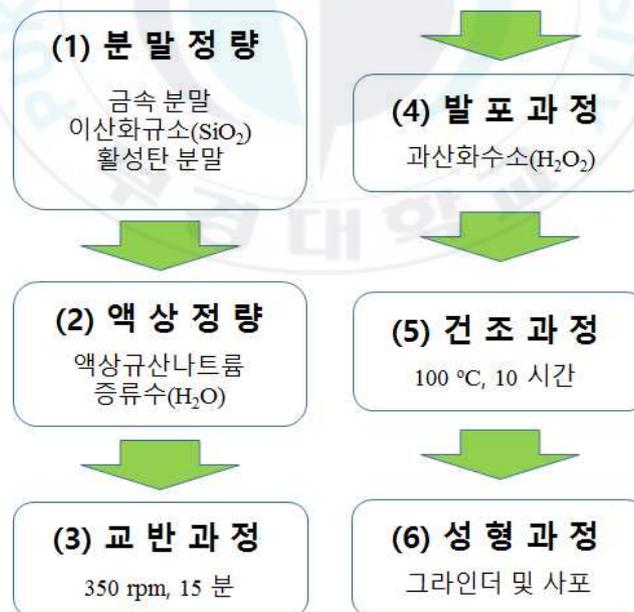


그림 3-1. 금속 발포체 제작공정

(1) 분말 분쇄 및 혼합

알루미늄 분말, 구리 분말, 철 분말, 크롬 분말, 아연 분말, 티타늄 분말 등 각각의 금속 분말과 활성탄 분말, 이산화규소 등을 사용하였다. 이러한 여러 분말들과 볼 밀(ball mill)용 플라스틱 용기에 알루미나 볼(지름 5 \varnothing)을 1 : 1로 넣고 봉합한 다음, 볼 밀을 사용하여 350 rpm(rotate per minute)으로 60 분간 분쇄 및 혼합하였다.

(2) 액상 정량

위의 분말 분쇄 및 혼합 과정을 통해 균일하게 섞인 분말과 액상규산나트륨과 증류수를 비커에 함께 넣고 반죽형태로 만들었다.

(3) 교반

혼합물을 비커에 넣은 채로 기계식 교반기(mechanic stirrer)를 사용해 350 rpm으로 15 분간 교반하여 분말과 액상이 균일하게 혼합되도록 하였다.

(4) 발포

교반과정이 끝난 혼합물에 과산화수소를 첨가하여 내부에서 발포가 생기도록 하였다.

(5) 건조

최종적으로 제작할 히트싱크의 크기와 유사한 틀에 위의 과정들을 통해 만들어진 혼합물을 넣은 후 열풍건조기에서 100 $^{\circ}\text{C}$ 의 온도로 10 시간 동안 건조를 진행하였다.

(6) 가공 및 성형

건조가 완료된 금속 발포체는 단단하게 경화되어 일정한 모양을 갖추게 되는데 이를 LED 조명용 히트싱크로 적용하기 위하여 그라인더 및 사포 등을 사용하여 알맞은 크기로 절단하고 표면을 매끄럽게 다듬어주었다. 금속 발포체는 매우 단단한 강도를 가지고 있지만 성형가공성이 좋아서 원하는 형태로 제작이 가능하다. 알맞게 성형된 금속 발포체를 기존 LED조명의 기판과 결합시켜서 LED 히트싱크를 완성하였다.

3.2 금속 발포체를 이용한 LED 히트싱크 제작

기존의 히트싱크로 가장 많이 사용되고 있는 알루미늄 분말을 사용하여 3.1의 실험과정을 진행하였으며 이때 반복적인 실험을 통하여 히트싱크를 제작하기 위한 최적의 구성비를 도출하고 이후 구리, 철, 아연, 크롬, 티타늄 등을 사용하여 3.1의 실험과정을 반복해 구성비를 최적화하였다. 각각의 금속 분말을 사용해 제조한 금속 발포체를 그라인더 및 사포를 사용하여 LED 조명용 히트싱크로 가공하였다.

3.3 특성 측정

본 연구에서 사용된 금속 발포체의 내부 발포 형태를 관찰하기 위해 소형 시편을 제작하고 그라인더로 절단하는 방법을 통하여 단면과 대략적인 강도를 알아보았다. 미세조직 및 형상을 관찰하고 구성성분의 확인을 위하여 FE-SEM 및 EDS를 사용하였고, 금속 발포체의 정확한 기계적 강도를 확인하기 위하여 만능재료시험기를 사용해 각 금속 발포체의 압축강도를 측정하였다. 또한 비표면적 측정장치(Surface Area & Pore Size Analyzer)

를 사용하고 BET식을 적용하여 다공성인 금속 발포체의 비표면적을 구하였다. 제작된 금속 발포체 히트싱크를 LED조명(20 W)에 적용 시켜 실제 조명 구동 중의 열 흐름을 열화상카메라로 측정하였다.



4. 실험결과 및 고찰

4.1 .금속 발포체의 단면 형태 분석

LED 조명용 히트싱크로 적용하기 위한 금속 발포체를 생성할 때 금속 분말을 필러로 사용하고 바인더 역할로 액상규산나트륨 및 여러 가지 물질을 사용하게 되는데, 이 때 금속의 경우 수십 $W/(m\cdot K)$ 에서 수백 $W/(m\cdot K)$ 까지 높은 열전도율을 가질 수 있는데 반해 고분자 폴리머의 경우 수 $W/(m\cdot K)$ 또는 대부분 1 $W/(m\cdot K)$ 이하의 열전도율을 가지고 있다.

이를 고려하면 금속 분말을 최대한 많이 첨가하여 금속 발포체를 만드는 것이 방열효과적인 측면에서 우수할 것으로 생각되지만 히트싱크로 적용하기에 필요한 강도 및 발포상태를 만족하기 위해서는 어느 정도의 바인딩 물질이 필요하기 때문에 금속 분말과 나머지 구성성분과의 비율의 최적점을 찾는 것이 가장 선결되어야 할 부분이다. 발포형태가 균일하게 일어날 경우 높은 비표면적을 가지게 되며 이를 통하여 우수한 열전달 능력을 확보할 수 있다. 그러나 내부 발포상태가 균일하지 못하면 외부에서 주어지는 압축강도를 확보하기 어려울 뿐만 아니라 열의 흐름을 방해하는 요인으로 작용할 수 있기 때문에 주재료인 금속 분말과 바인더로 사용되는 물질들의 구성비를 최적화 하는 것이 중요하다.

알루미늄 분말을 주재료로 하여 이산화규소와 활성탄 분말, 액상규산나트륨, 과산화수소, 증류수 등의 부재료들을 최적의 발포 상태로 만들기 위해 다양한 구성비로 혼합하여 금속 발포체를 제작하고 단면을 확인하였다.

그림 4-1과 표 4-1은 알루미늄 분말의 첨가량을 (a) 5 g, (b) 10 g, (c) 15 g으로 변화시켜 제작한 금속 발포체의 단면사진과 구성비를 나타낸다.

알루미늄 분말의 양과 상관없이 모든 금속 발포체가 매우 약한 강도를 가졌다. 금속 발포체의 강도를 향상시키기 위하여 소량의 활성탄 분말을 첨가하여 제조해본 결과 강도가 향상되는 것을 확인 하였다.



그림 4-1. 알루미늄이 (a) 5 g, (b) 10 g, (c) 15 g 첨가된 알루미늄 발포체의 단면 사진

| 구성성분 | (a) | (b) | (c) |
|-------------|-------|-------|-------|
| 활성탄 분말(g) | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 알루미늄 분말(g) | 5.00 | 10.00 | 15.00 |
| 이산화규소(g) | 5.00 | 5.00 | 5.00 |
| 증류수(ml) | 4.50 | 4.50 | 5.00 |
| 액상규산나트륨(ml) | 10.00 | 10.00 | 10.00 |
| 과산화수소(ml) | 0.25 | 0.25 | 0.25 |

표 4-1. 알루미늄 함량에 따른 알루미늄 발포체의 구성비(1)

그림 4-2와 표 4-2는 이산화규소의 첨가량을 (a) 0.0 g, (b) 0.5 g, (c) 1.0 g, (d) 1.5 g, (e) 2.0 g, (f) 2.5 g, (g) 3.0 g, (h) 4.0 g, (i) 5.0 g까지 변화시켜 제작한 금속 발포체의 단면사진과 구성비를 나타낸다. 이산화규소의 양이 상대적으로 적은 0.0 g, 0.5 g, 1.0 g 첨가된 경우에는 약한 충격에도 매우 잘 부서지는 것을 확인했으며, 반대로 이산화규소를 상대적으로 많은 5.0 g을 넣은 경우에도 매우 잘 부서지며 원형을 유지하기 어려웠다. 이산화규소의 첨가량이 1.5 g에서 4.0 g인 경우에는 금속 발포체가 일정 형태를 유지하면서 매우 단단하게 제조된 것을 확인하였으며, 이러한 결과를 통하여 이산화규소의 첨가량을 적절하게 조절하는 것이 금속 발포체의 강도에 영향을 줄 수 있음을 알 수 있었다. 이산화규소를 4.0 g 첨가했을 때, 제조된 금속 발포체가 단단하고 가장 균일한 발포상태를 나타내었다.

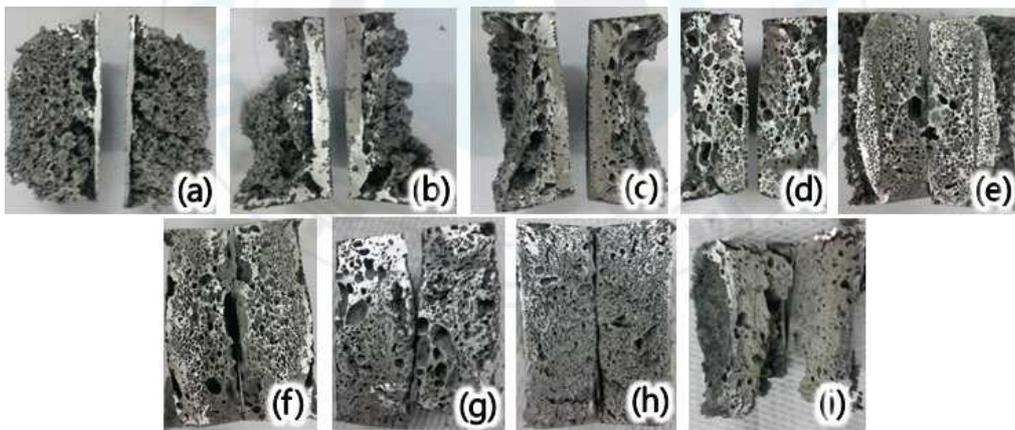
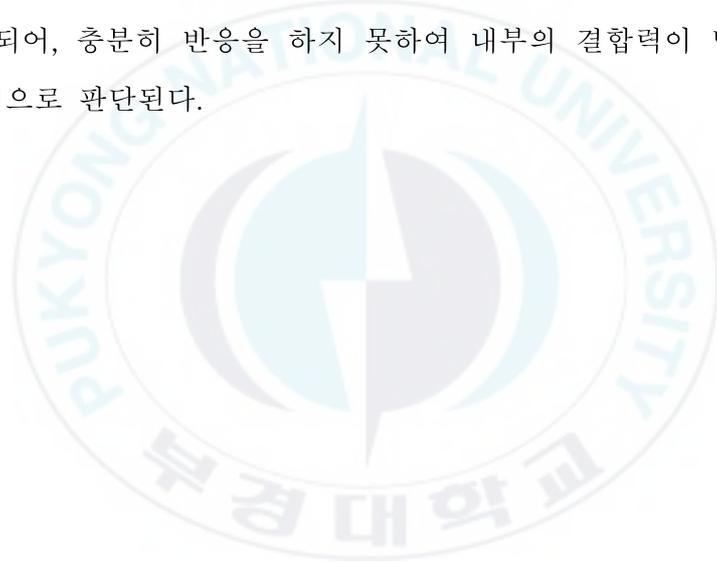


그림 4-2. 이산화규소의 양을 (a) 0.0 g, (b) 0.5 g, (c) 1.0 g, (d) 1.5 g, (e) 2.0 g, (f) 2.5 g, (g) 3.0 g, (h) 4.0 g, (i) 5.0 g 사용해 제작한 알루미늄 발포체의 단면 사진

| 구성성분 | (a) | (b) | (c) | (d) | (e) | (f) | (g) | (h) | (i) |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 활성탄 분말(g) | 1.50 | 1.50 | 1.50 | 1.50 | 1.50 | 1.50 | 1.50 | 1.50 | 1.50 |
| 알루미늄 분말(g) | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 20.00 |
| 이산화규소 (g) | 0.00 | 0.50 | 1.00 | 1.50 | 2.00 | 2.50 | 3.00 | 4.00 | 5.00 |
| 증류수(ml) | 1.50 | 2.00 | 2.50 | 2.50 | 3.00 | 3.00 | 3.50 | 4.00 | 5.50 |
| 액상 규산나트륨 (ml) | 10.00 | 10.00 | 10.00 | 10.00 | 10.00 | 10.00 | 10.00 | 10.00 | 10.00 |
| 과산화수소 (ml) | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 |

표 4-2. 이산화규소 함량에 따른 알루미늄 발포체의 구성비

그림 4-3은 알루미늄 분말의 첨가량을 (a) 22.5 g, (b) 25.0 g, (c) 30.0 g, (d) 35.0 g으로 변화시켜 제작한 금속 발포체의 단면 사진이며, 금속 발포체의 제작에 사용된 물질의 조성비는 표 4-3과 같다. 알루미늄 분말을 22.5 g, 25.0 g, 30.0 g 첨가해 만든 알루미늄 발포체의 경우 매우 단단하였으며, 알루미늄 분말의 첨가량이 증가할수록 발포의 형태가 균일하게 나타났다. 알루미늄 분말을 더 증가시켜 35.0 g을 넣었을 경우에 알루미늄 발포체의 외부는 매우 단단하게 만들어졌지만 내부는 쉽게 부서지면서 가루가 되었다. 이는 알루미늄 분말이 액상규산나트륨 등의 바인더 물질보다 많이 첨가되어, 충분히 반응을 하지 못하여 내부의 결합력이 떨어져 강도가 낮은 것으로 판단된다.



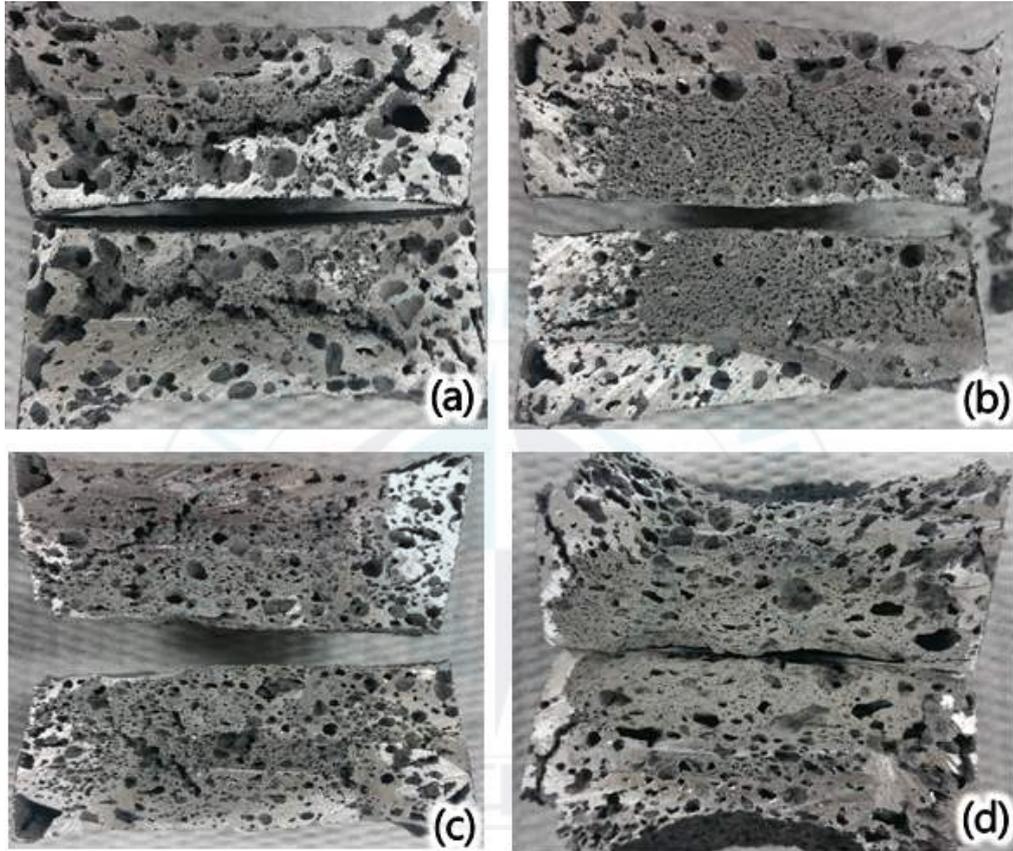


그림 4-3. 알루미늄 분말을 (a) 22.5 g, (b) 25.0 g, (c) 30.0 g, (d) 35.0 g 포함한 알루미늄 발포체의 단면 사진

| 구성성분 | (a) | (b) | (c) | (d) |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|
| 활성탄 분말(g) | 1.50 | 1.50 | 1.50 | 1.50 |
| 알루미늄 분말(g) | 22.50 | 25.00 | 30.00 | 35.00 |
| 이산화규소 (g) | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 |
| 증류수(ml) | 5.50 | 6.50 | 8.00 | 10.50 |
| 액상 규산나트륨 (ml) | 10.00 | 10.00 | 10.00 | 10.00 |
| 과산화수소 (ml) | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 |

표 4-3. 알루미늄 함량에 따른 알루미늄 발포체의 구성비(2)

표 4-4는 활성탄 분말의 함량에 따른 알루미늄 발포체의 구성비이며, 그림 4-4는 표 4-4의 구성비에 따라 제작한 알루미늄 발포체의 단면사진이다. 먼저 활성탄 분말의 첨가량을 (a) 0.5 g에서 (c) 1.5 g, (e) 2.5g, (f) 3.5 g, (g) 4.5 g, (h) 5.5 g까지 1.0 g 간격으로 나누어 알루미늄 발포체를 제조하였다. 활성탄 분말을 0.5 g, 1.5 g을 넣었을 경우 강도는 매우 단단하였지만 발포상태가 균일하지 않았고, 2.5 g, 3.5 g, 4.5 g 넣었을 경우 발포상태는 균일하였지만 강도가 매우 약해 약한 충격에도 쉽게 부서졌다. 더욱 세밀하게 활성탄 분말의 함량에 따른 변화를 알아보기 위하여 추가적으로 활성탄 분말 (b) 1.0 g과 (d) 2.0 g을 넣고 제조하였다. 활성탄 분말을 1.0 g 넣어서 제조한 경우 균일한 발포형태를 가지며 단단하였다. 활성탄 분말을 2.0 g 넣어서 제조한 경우 발포형태가 균일하고 단단하였으나 내부는 쉽게 부서져 가루가 되었다.

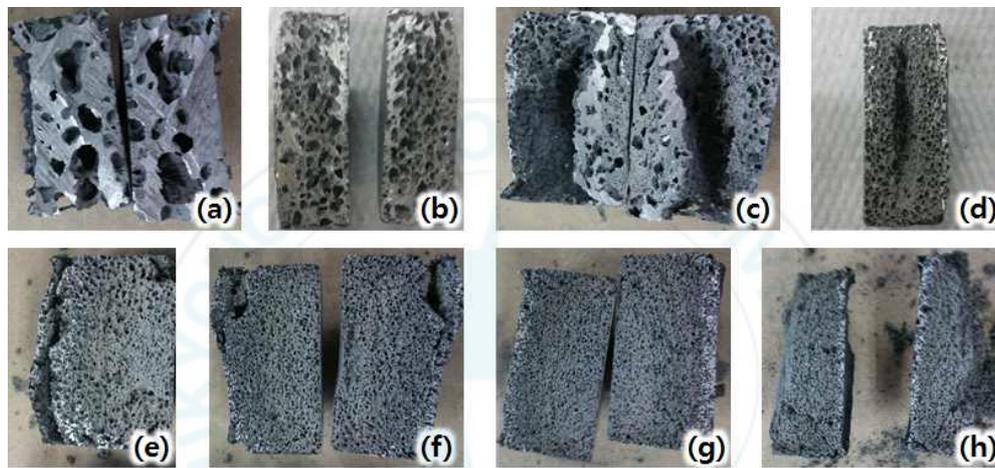


그림 4-4. 활성탄 분말을 (a) 0.5 g, (b) 1.0 g, (c) 1.5 g, (d) 2.0 g, (e) 2.5 g, (f) 3.5 g, (g) 4.5 g, (h) 5.5 g 포함한 알루미늄 발포체의 단면 사진

| 구성성분 | (a) | (b) | (c) | (d) | (e) | (f) | (g) | (h) |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 활성탄 분말(g) | 0.50 | 1.00 | 1.50 | 2.00 | 2.50 | 3.50 | 4.50 | 5.50 |
| 알루미늄 분말(g) | 30.00 | 30.00 | 30.00 | 30.00 | 30.00 | 30.00 | 30.00 | 30.00 |
| 이산화규소 (g) | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 |
| 증류수(ml) | 5.00 | 6.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 | 8.00 | 9.00 |
| 액상 규산나트륨 (ml) | 10.00 | 10.00 | 10.00 | 10.00 | 10.00 | 10.00 | 10.00 | 10.00 |
| 과산화수소 (ml) | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 |

표 4-4. 활성탄 분말의 첨가량을 달리 적용한 알루미늄 발포체의 구성비

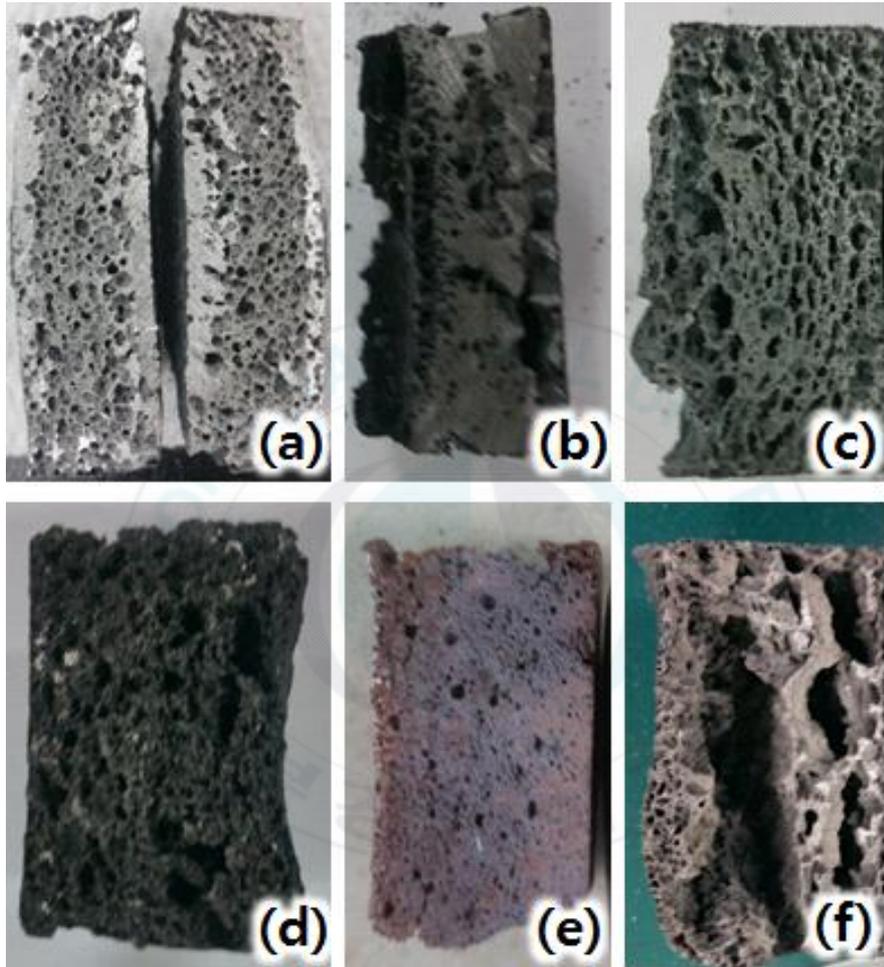
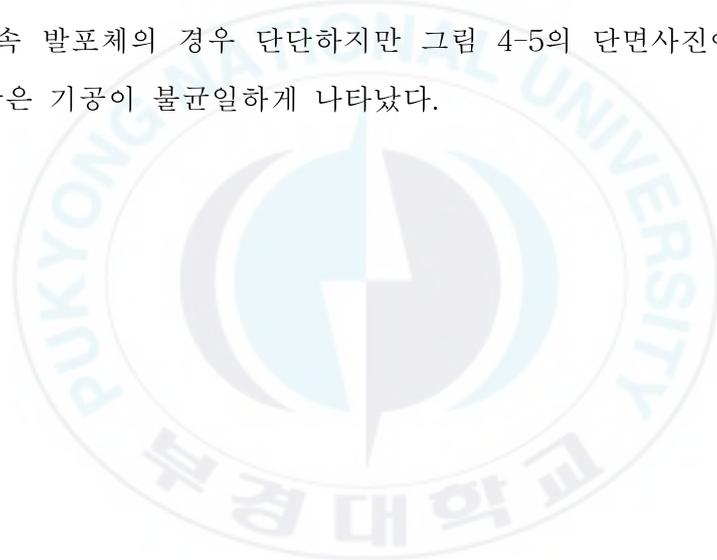


그림 4-5. (a) 알루미늄, (b) 철, (c) 아연, (d) 티타늄, (e) 구리, (f) 크롬 분말을 사용해 제조한 금속 발포체의 단면 사진

| 구성성분 | (a) | (b) | (c) | (d) | (e) | (f) |
|---------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 활성탄 분말(g) | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 금속 분말(g) | 30.00 (Al) | 30.00 (Fe) | 30.00 (Zn) | 30.00 (Ti) | 30.00 (Cu) | 30.00 (Cr) |
| 이산화규소 (g) | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.00 |
| 증류수(ml) | 6.00 | 4.00 | 5.00 | 3.00 | 4.50 | 3.00 |
| 액상 규산나트륨 (ml) | 10.00 | 10.00 | 10.00 | 10.00 | 10.00 | 10.00 |
| 과산화수소 (ml) | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 |

표 4-5. 여러 가지 금속 분말을 포함한 금속 발포체의 구성비

알루미늄 분말과 이산화규소, 활성탄 분말의 양을 조절하여 알루미늄 발포체를 제조해본 결과 알루미늄 분말 30.00 g, 이산화규소 4.00 g, 활성탄 분말 1.00 g, 액상규산나트륨 20.00 ml, 과산화수소 0.25 ml을 넣고 만들었을 경우 강도가 높고 균일한 발포상태를 얻을 수 있었다. 표 4-5와 같이 (a) 알루미늄 발포체 제조 시와 동일한 구성비로 알루미늄 대신 (b) 철, (c) 아연, (d) 티타늄, (e) 구리, (f) 크롬 분말을 1 : 1의 중량비로 대체하여 금속 발포체를 제작하였다. 철, 아연, 티타늄, 구리 분말을 사용하여 만든 금속 발포체는 발포상태가 균일하며 단단하게 제조되었으나 크롬 분말로 제조한 금속 발포체의 경우 단단하지만 그림 4-5의 단면사진에서 나타나듯 크고 작은 기공이 불균일하게 나타났다.



4.2 FE-SEM 및 EDS 측정

그림 4-6부터 그림 4-11까지의 사진과 그래프는 알루미늄, 철, 아연, 티타늄, 구리, 크롬 등의 금속 발포체의 FE-SEM(field emission scanning electron microscope)과 EDS(energy dispersive X-ray spectrometer) 측정 결과이다. FE-SEM 사진으로부터 금속 발포체의 미세 구조 및 형태를 확인할 수 있으며, 큰 덩어리와 함께 작은 입자들이 혼재해있다. EDS 측정 결과, 금속 발포체 제조에 사용된 알루미늄, 구리, 아연, 티타늄, 크롬, 철 등 금속 분말들의 각 원소들과 함께 액상규산나트륨과 이산화규소에 포함된 Si, 액상규산나트륨에 포함된 Na, 그리고 O 등이 검출되었으며 그 밖의 다른 불순물은 포함되어 있지 않음을 확인하였다. 표 4-6부터 표 4-11은 EDS 측정으로 검출된 구성원소의 비율을 나타낸다. 일반적으로 복합물에 포함된 산소량이 증가할수록 열전도도는 낮아지며 산소량이 감소할수록 열전도도가 높아지는 경향을 보인다[19,20].

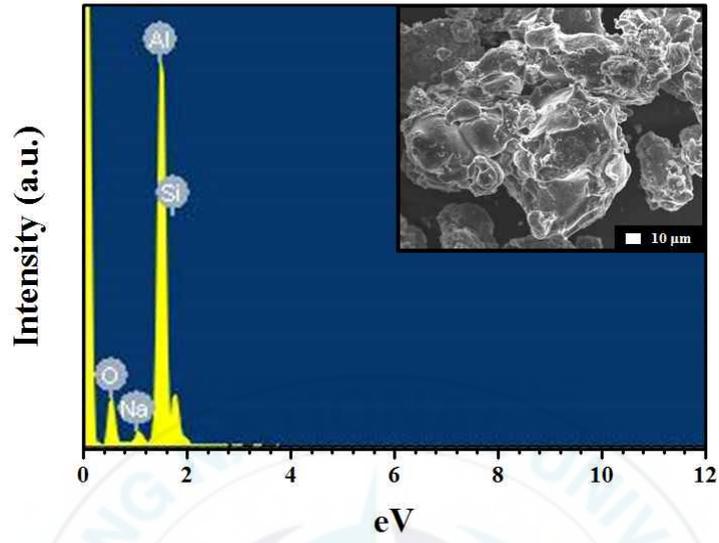


그림 4-6. 알루미늄 발포체의 구성성분 및 미세구조

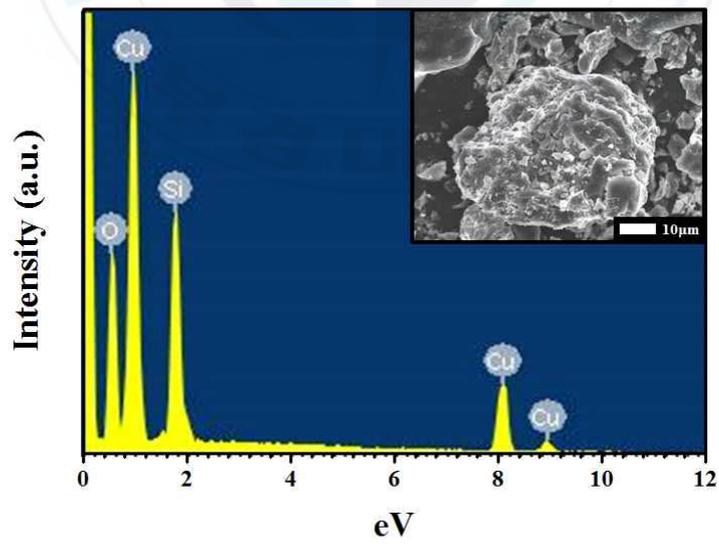


그림 4-7. 구리 발포체의 구성성분 및 미세구조

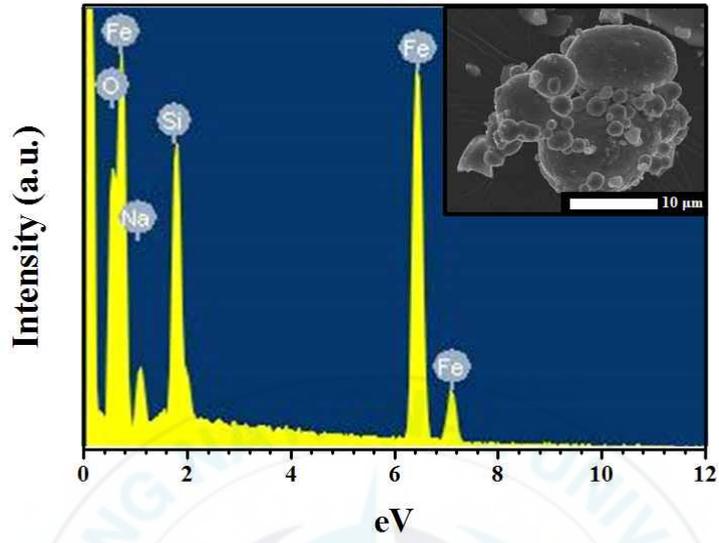


그림 4-8. 철 발포체의 구성성분 및 미세구조

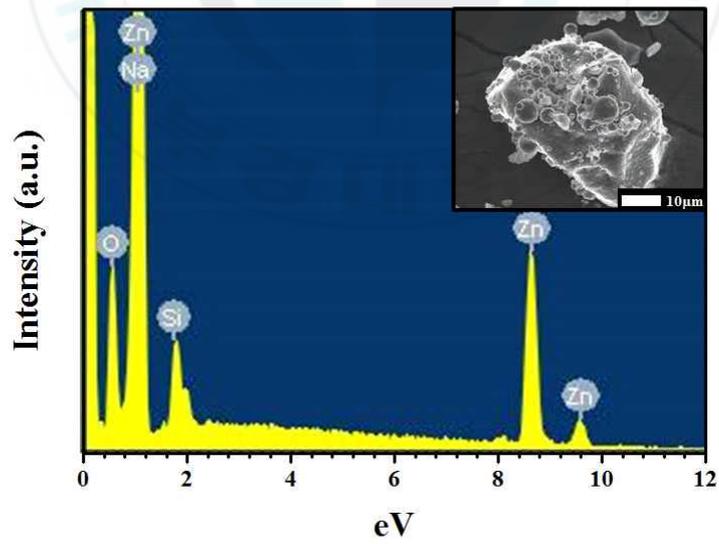


그림 4-9. 아연 발포체의 구성성분 및 미세구조

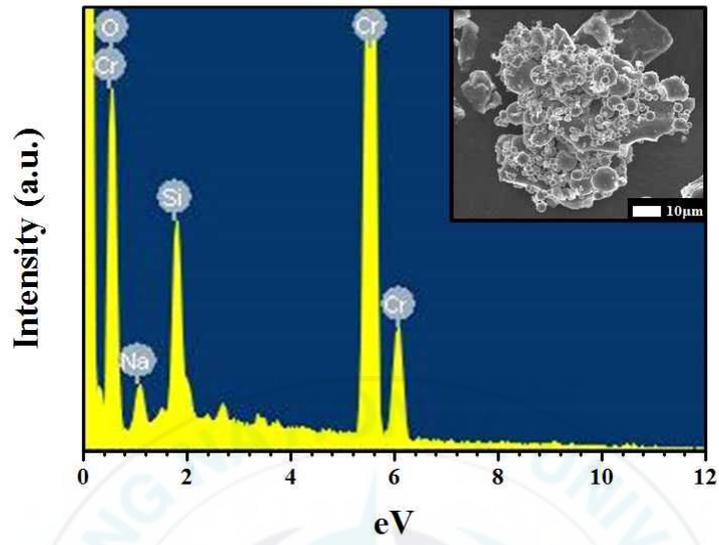


그림 4-10. 크롬 발포체의 구성성분 및 미세구조

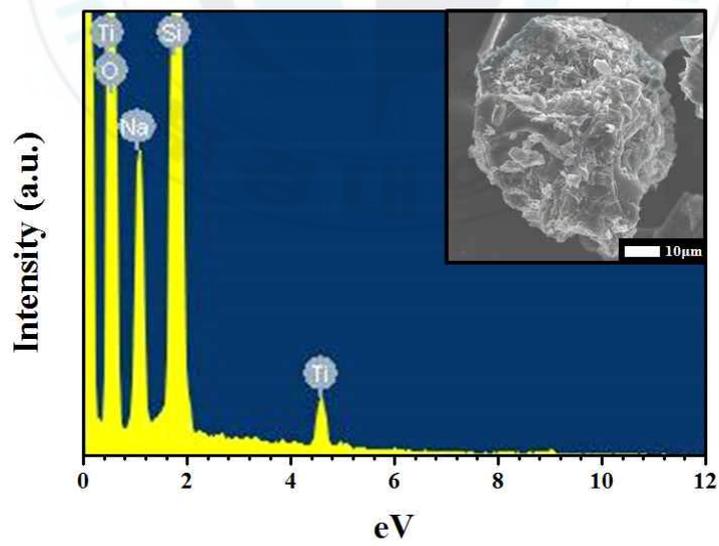


그림 4-11. 티타늄 발포체의 구성성분 및 미세구조

| Element | Weight(%) | Atomic(%) |
|---------|-----------|-----------|
| O K | 27.51 | 39.08 |
| Na K | 2.05 | 2.03 |
| Al K | 57.49 | 48.42 |
| Si K | 12.95 | 10.48 |
| Totals | 100.00 | |

표 4-6. 알루미늄 발포체의 구성원소 비율

| Element | Weight(%) | Atomic(%) |
|---------|-----------|-----------|
| O K | 28.33 | 54.93 |
| Si K | 16.34 | 18.05 |
| Cu K | 55.33 | 27.02 |
| Totals | 100.00 | |

표 4-7. 구리 발포체의 구성원소 비율

| Element | Weight(%) | Atomic(%) |
|---------|-----------|-----------|
| O K | 27.51 | 37.08 |
| Na K | 5.07 | 7.72 |
| Si K | 10.16 | 12.67 |
| Fe K | 67.82 | 42.53 |
| Totals | 100.00 | |

표 4-8. 철 발포체의 구성원소 비율

| Element | Weight(%) | Atomic(%) |
|---------|-----------|-----------|
| O K | 14.29 | 37.42 |
| Na K | 3.91 | 7.13 |
| Si K | 3.52 | 5.25 |
| Zn K | 78.28 | 50.19 |
| Totals | 100.00 | |

표 4-9. 아연 발포체의 구성원소 비율

| Element | Weight(%) | Atomic(%) |
|---------|-----------|-----------|
| O K | 26.36 | 47.40 |
| Na K | 5.28 | 6.61 |
| Si K | 17.36 | 17.78 |
| Cr K | 51.00 | 28.21 |
| Totals | 100.00 | |

표 4-10. 크롬 발포체의 구성원소 비율

| Element | Weight(%) | Atomic(%) |
|---------|-----------|-----------|
| O K | 57.34 | 69.95 |
| Na K | 8.11 | 6.89 |
| Si K | 31.64 | 21.98 |
| Ti K | 2.91 | 1.18 |
| Totals | 100.00 | |

표 4-11. 티타늄 발포체의 구성원소 비율

4.3 비표면적 분석(BET)

그림 4-12부터 그림 4-17은 각각의 금속 발포체의 비표면적(Surface Area) 데이터를 종합한 그래프이다. 식 (4-1)과 식 (4-2)를 통하여 금속 발포체의 비표면적을 구할 수 있다. 실험결과 아연 발포체는 9.467 m²/g, 알루미늄 발포체는 6.204 m²/g, 구리 발포체는 5.807 m²/g, 철 발포체는 4.771 m²/g, 티타늄 발포체는 4.550 m²/g의 표면적을 가진다.

일반적으로 비표면적이 높을수록 열확산에 유리하며 높은 열전도도를 얻을 수 있다[22]. 따라서 비표면적이 넓은 아연, 크롬, 알루미늄 발포체를 히트싱크로 사용할 경우 효과적인 열전달을 할 것으로 기대할 수 있다.

$$\frac{1}{v[(P_o - P) - 1]} = \frac{C-1}{v_m C} \left(\frac{P}{P_o} \right) + \frac{1}{v_m C} \quad (4-1)$$

- … v : Adsorbed gas quantity
- v_m : Monolayer adsorbed gas quantity
- C : BET constant
- P : Equilibrium
- P_o : Saturation pressure of adsorbates

$$v_m = \frac{1}{A + I} \quad (4-2)$$

- … A : Slope
- I : Y-intercept

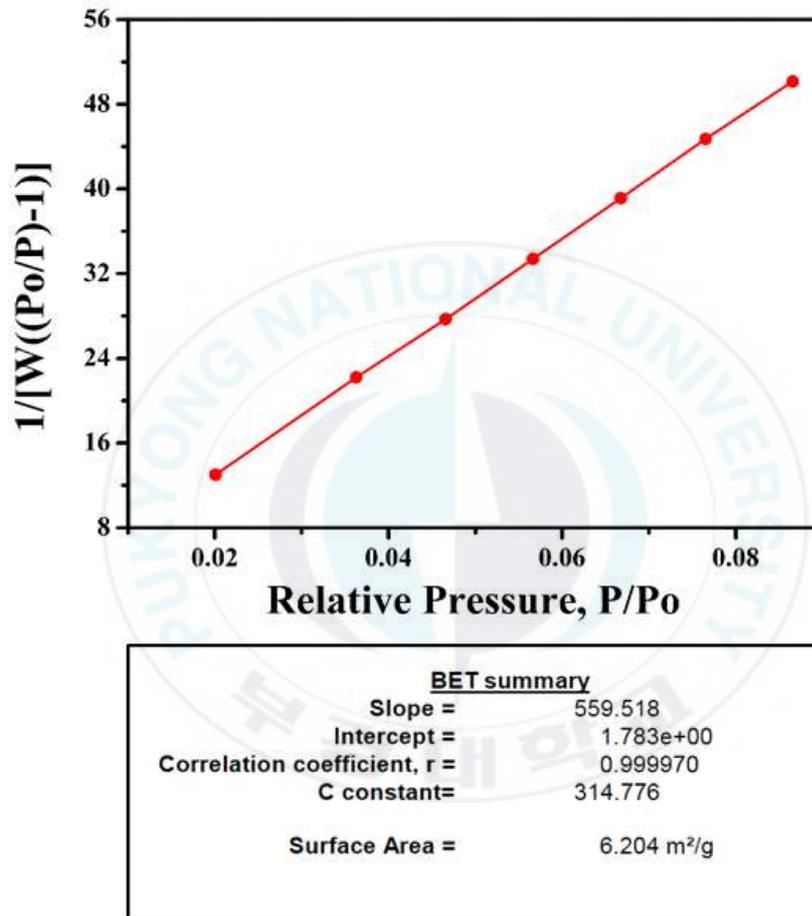


그림 4-12. 알루미늄 발포체의 BET 그래프 및 비표면적

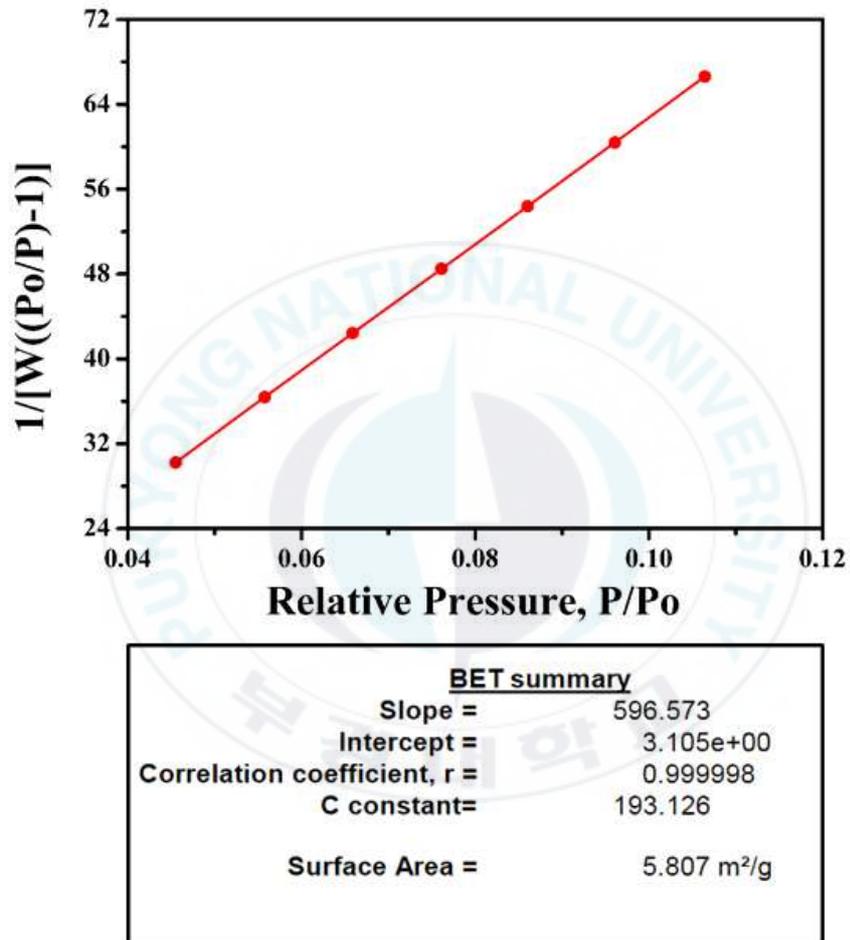


그림 4-13. 구리 발포체의 BET 그래프 및 비표면적

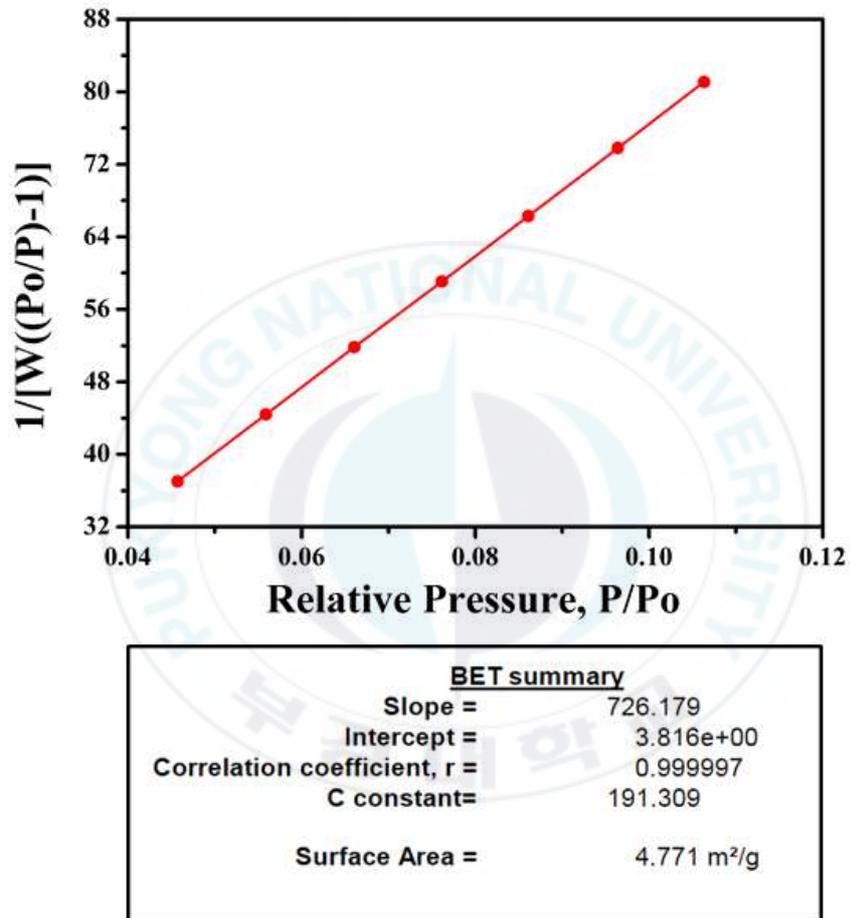


그림 4-14. 철 발포체의 BET 그래프 및 비표면적

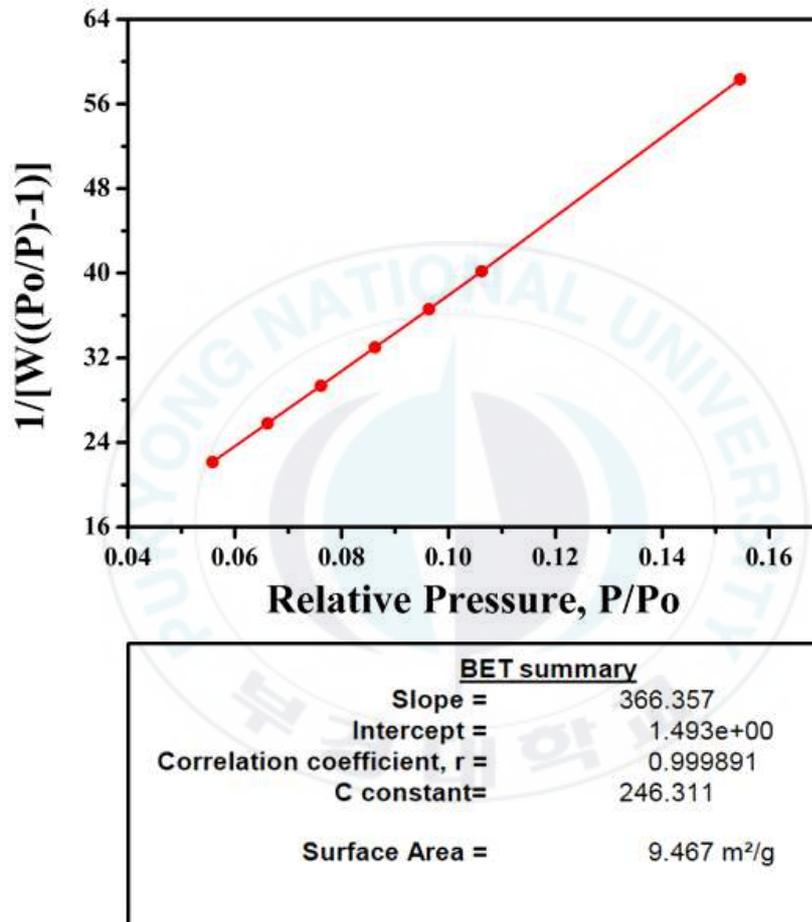


그림 4-15. 아연 발포체의 BET 그래프 및 비표면적

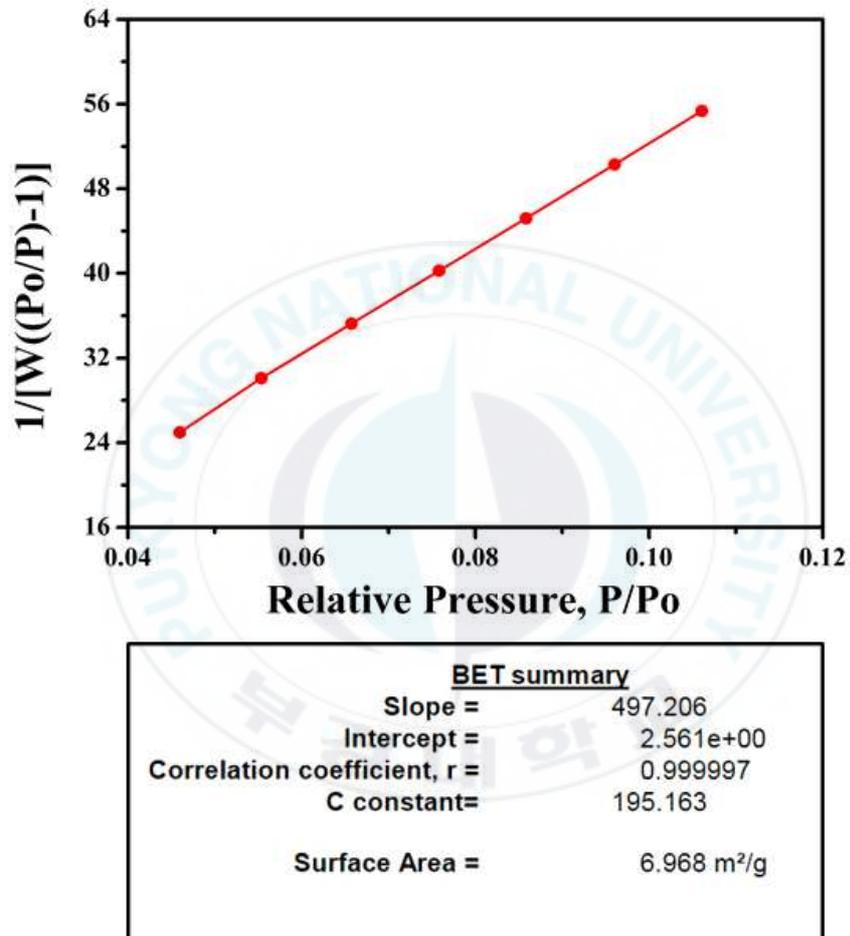


그림 4-16. 크롬 발포체의 BET 그래프 및 비표면적

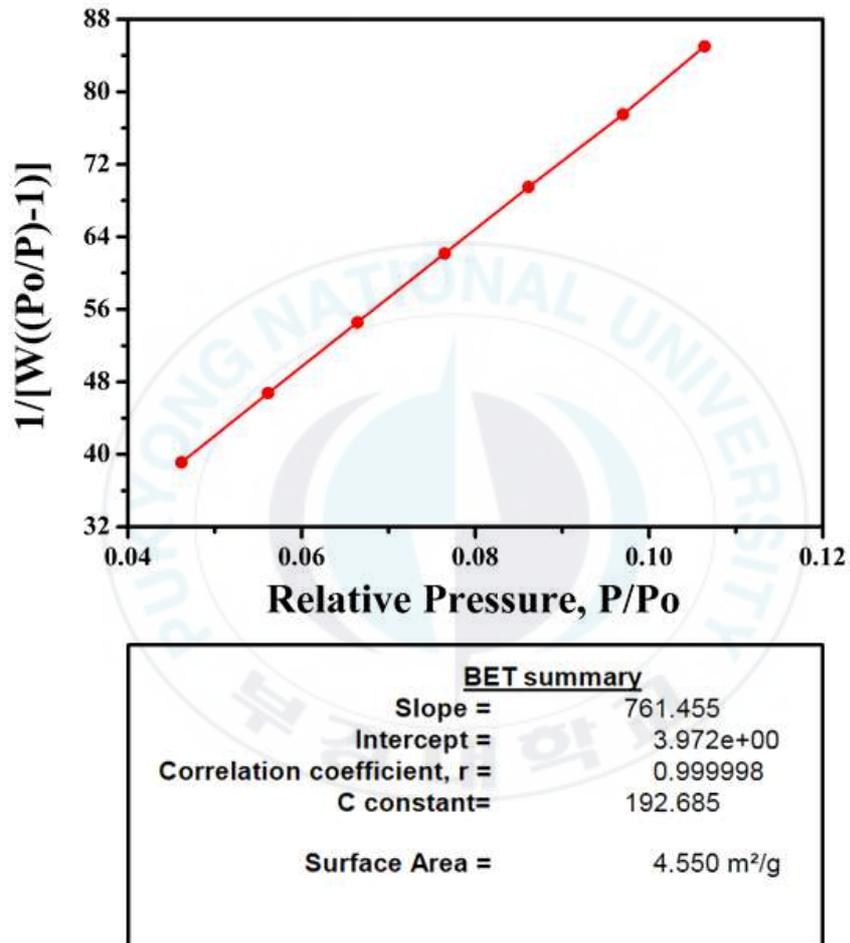


그림 4-17. 티타늄 발포체의 BET 그래프 및 비표면적

4.4 기계적 강도 분석

그림 4-18부터 그림 4-23까지의 그래프는 각각의 금속 분말로 만든 금속 발포체의 기계적인 강도를 나타낸 그래프이며, 만능재료시험기를 이용하여 시료의 압축강도를 측정 하였다. 기계적 강도 실험을 위하여 평균 지름 약 25 mm의 원기둥형 시편을 제작하였으며 최대하중(Max-load)이 걸릴 때까지 측정을 진행하였다. 기계적 강도 측정결과, 아연 발포체의 최대하중은 210 kgf, 압축강도는 $0.42 \text{ kgf/mm}^2(4.14 \text{ MPa})$ 로, 알루미늄 발포체의 최대하중은 107.2 kgf, 압축강도는 $0.20 \text{ kgf/mm}^2(1.98 \text{ MPa})$ 로, 구리 발포체의 최대하중은 140.0 kgf, 압축강도는 $0.29 \text{ kgf/mm}^2(2.84 \text{ MPa})$ 로, 철 발포체의 최대하중은 138.8 kgf, 압축강도는 $0.26 \text{ kgf/mm}^2(2.56 \text{ MPa})$, 티타늄 발포체의 최대하중은 120.0 kgf, 압축강도는 $0.23 \text{ kgf/mm}^2(2.30 \text{ MPa})$, 크롬 발포체의 최대 하중은 60.8 kgf, 압축강도는 $0.15 \text{ kgf/mm}^2(1.43 \text{ MPa})$ 로 나타났다. 측정한 시편 가운데 아연 발포체의 기계적 강도가 가장 높았으며, 크롬 발포체가 비교적 압축강도가 약한 것으로 나타났다. 크롬으로 만든 금속 발포체의 경우 발포로 인한 기공의 형태가, 다른 금속 발포체에 비하여 상대적으로 불균일하기 때문에 압축강도가 낮게 나타난 것으로 볼 수 있다.

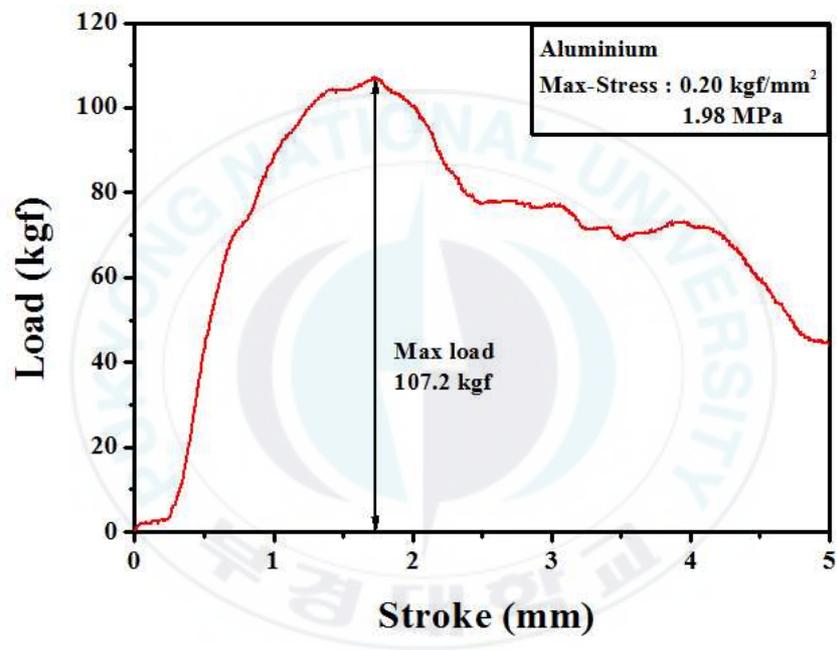


그림 4-18. 알루미늄 발포체의 압축강도

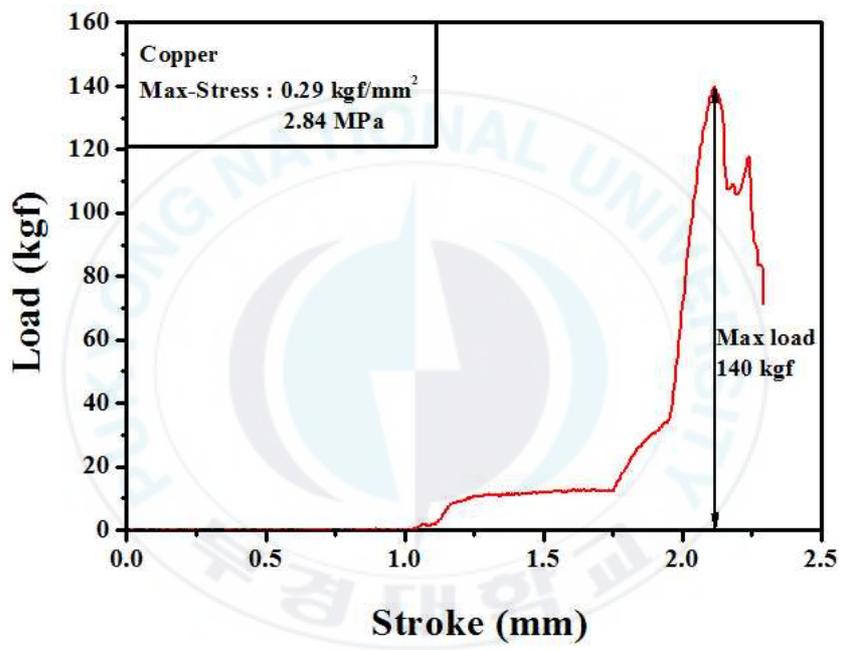


그림 4-19. 구리 발포체의 압축강도

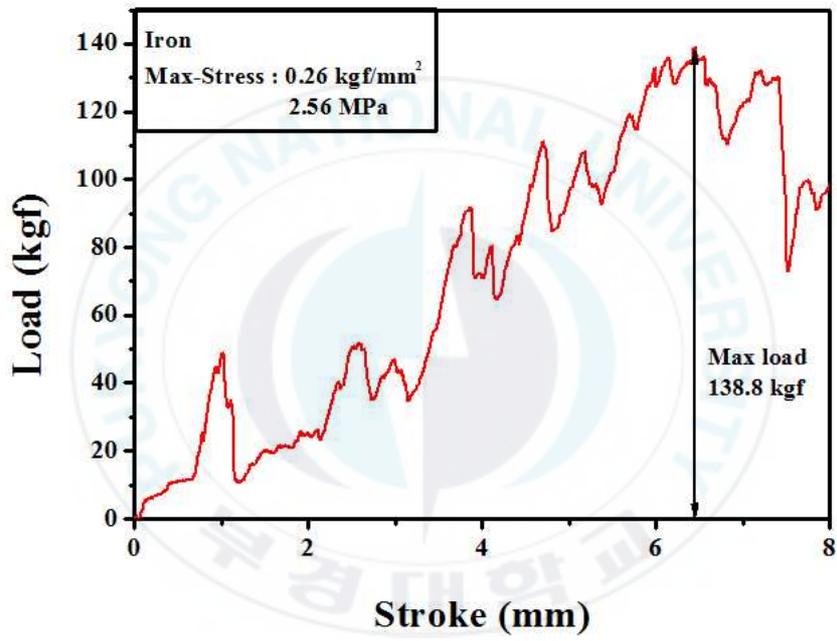


그림 4-20. 철 발포체의 압축강도

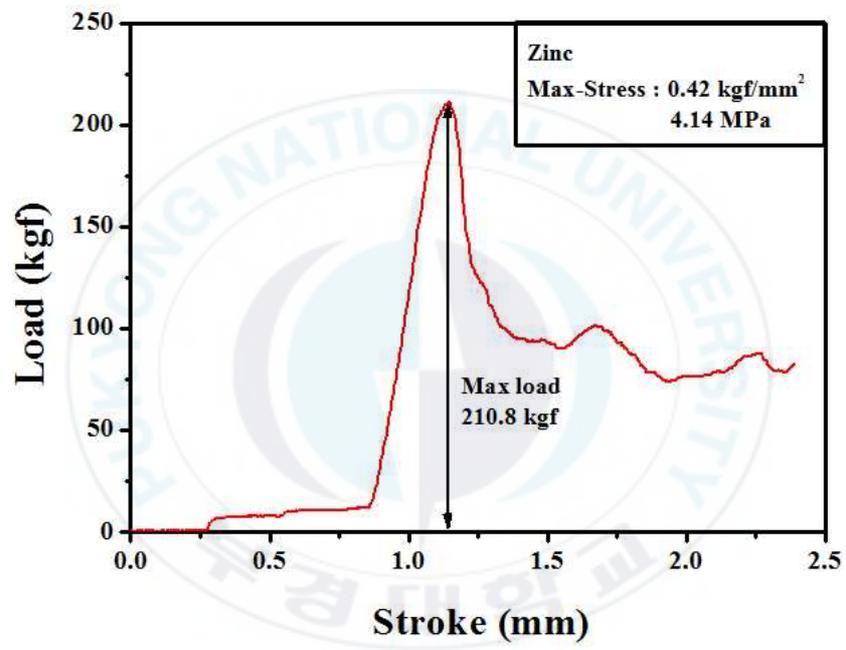


그림 4-21. 아연 발포체의 압축강도

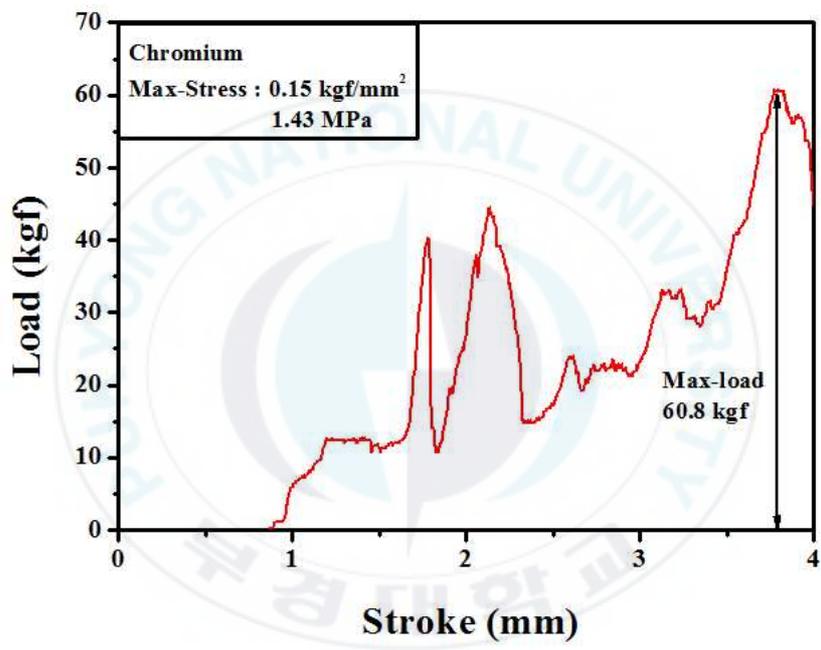


그림 4-22. 크롬 발포체의 압축강도

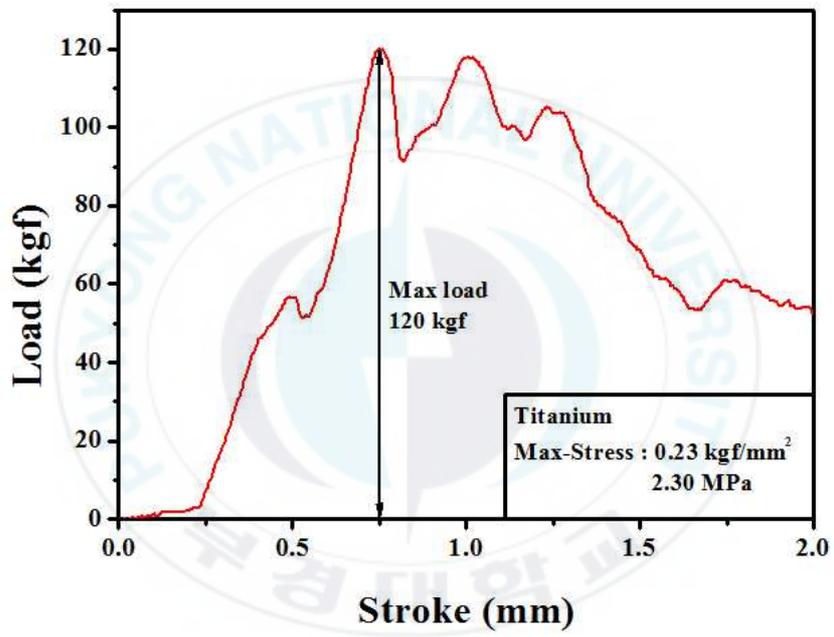


그림 4-23. 티타늄 발포체의 압축강도

4.5 LED 등기구용 히트싱크 열특성 분석

여러 가지 금속 발포체의 특성을 확인해보고 이러한 실험과정을 통해서 얻어낸 금속 분말 및 바인딩 물질의 최적 구성비를 적용시켜서 LED 조명용 히트싱크로 제작하였다. 기존 20 W용 LED 조명의 기판 크기(지름 120 mm)와 유사한 직경 140 mm X 높이 30 mm의 크기의 알루미늄 틀에 각각의 금속 분말을 적용한 금속 발포체 히트싱크를 제작하였다. 단, 크롬 발포체의 경우 히트싱크 제작에 있어 금속 발포체의 강도가 약하고 발포가 균일하게 일어나지 않아 LED 조명용 히트싱크 제작에 적합하지 않은 것으로 판단하여 열특성 실험에서 제외하였다.

제작한 히트싱크와 LED 기판은 서멀그리스(thermal grease)를 도포하고 결합하였으며, 사용한 서멀그리스는 Halziye사의 제품 HY610이며 열전도율은 3.05 W/(m·K)이상, 열저항은 0.073 °C/W 이하이다.

열화상카메라를 사용하여 전체적인 LED 조명의 열 흐름을 확인하였으며 LED 광원부와 방열부의 온도를 각각 확인하였다. 온도 측정은 상온(23±1 °C)에서 점등 후 30 분마다 진행하였으며 3 시간 이상 점등 시 더 이상 온도의 변화가 없음을 확인하였다. 각 금속 발포체 히트싱크의 열 흐름 측정은 3 회 반복하여 평균값을 표시하였다.

| 히트싱크 종류 | 시 간 | 측정부위 온도분포 | | LED 광원부 온도(°C) | 방열부 온도 (°C) | | |
|----------------------------|-------------|-------------|--|----------------------|-------------------|------|------|
| 일반제품 알루미늄 소재 히트싱크 | 점 등 전 | 광 원 부 | | 방 열 부 | | 22.1 | 22.7 |
| | | 측 면 | | | | | |
| | 1 시 간 | 광 원 부 | | 방 열 부 | | 47.0 | 42.0 |
| | | 측 면 | | | | | |
| | 3 시 간 | 광 원 부 | | 방 열 부 | | 46.0 | 41.4 |
| | | 측 면 | | | | | |

표 4-12. 일반제품 알루미늄소재 히트싱크를 적용한 20 W 등기구 방열특성

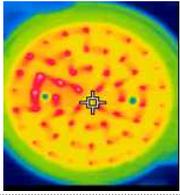
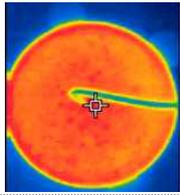
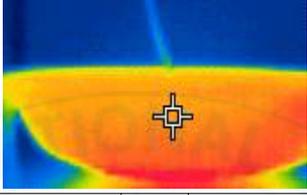
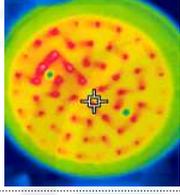
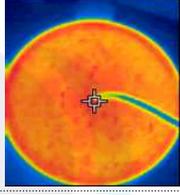
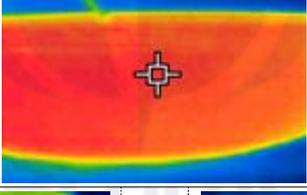
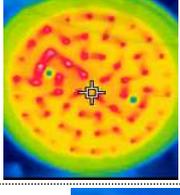
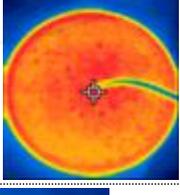
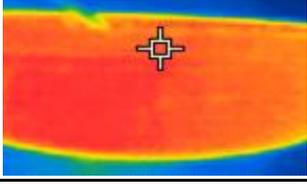
| 히트싱크 종류 | 시 간 | 측정부위 온도분포 | | LED 광원부 온도(°C) | 방열부 온도 (°C) | | |
|-----------------------------|-------------|-------------|---|----------------------|--|------|------|
| 알루미늄 (Al) 발포체 히트싱크 | 30 분 | 광 원 부 |  | 방 열 부 |  | 48.2 | 39.5 |
| | | 측 면 |  | | | | |
| | 1 시 간 | 광 원 부 |  | 방 열 부 |  | 49.0 | 40.7 |
| | | 측 면 |  | | | | |
| | 3 시 간 | 광 원 부 |  | 방 열 부 |  | 48.4 | 42.2 |
| | | 측 면 |  | | | | |

표 4-13. 알루미늄 발포체 히트싱크를 적용한 20 W 등기구 방열특성

| 히트싱크 종류 | 시 간 | 측정부위 온도분포 | | LED 광원부 온도(°C) | 방열부 온도 (°C) | | |
|-----------------------|-------------|-------------|--|----------------------|-------------------|------|------|
| 아연(Zn) 발포체 히트싱크 | 30 분 | 광 원 부 | | 방 열 부 | | 47.8 | 38.1 |
| | | 측 면 | | | | | |
| | 1 시 간 | 광 원 부 | | 방 열 부 | | 48.4 | 39.0 |
| | | 측 면 | | | | | |
| | 3 시 간 | 광 원 부 | | 방 열 부 | | 48.6 | 39.6 |
| | | 측 면 | | | | | |

표 4-14. 아연 발포체 히트싱크를 적용한 20 W 등기구 방열특성

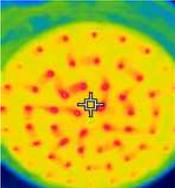
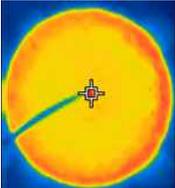
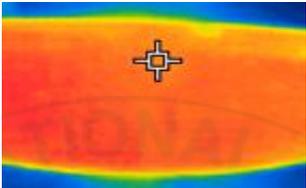
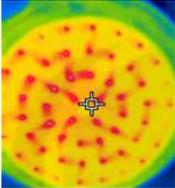
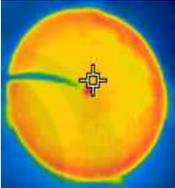
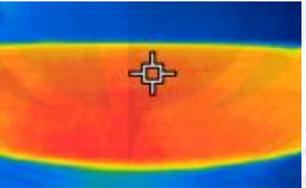
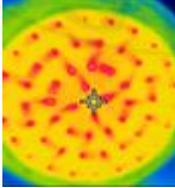
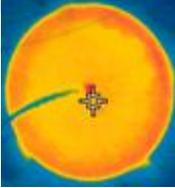
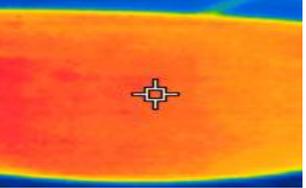
| 히트싱크 종류 | 시 간 | 측정부위 온도분포 | | LED 광원부 온도(°C) | 방열부 온도 (°C) | | |
|----------------------------|-------------|-------------|---|----------------------|--|------|------|
| 티타늄 (Ti) 발포체 히트싱크 | 30 분 | 광 원 부 |  | 방 열 부 |  | 50.6 | 37.9 |
| | | 측 면 |  | | | | |
| | 1 시 간 | 광 원 부 |  | 방 열 부 |  | 52.2 | 38.7 |
| | | 측 면 |  | | | | |
| | 3 시 간 | 광 원 부 |  | 방 열 부 |  | 52.0 | 38.6 |
| | | 측 면 |  | | | | |

표 4-15. 티타늄 발포체 히트싱크를 적용한 20 W 등기구 방열특성

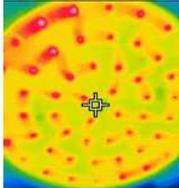
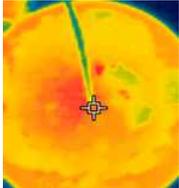
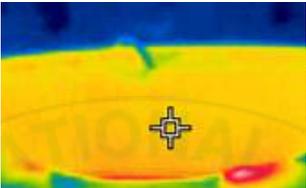
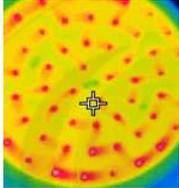
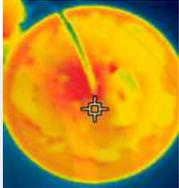
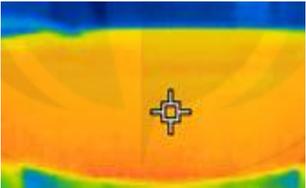
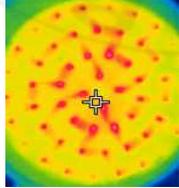
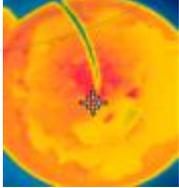
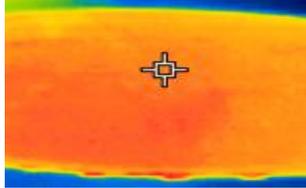
| 히트싱크 종류 | 시 간 | 측정부위 온도분포 | | LED 광원부 온도(°C) | 방열부 온도 (°C) | | |
|----------------------|-------------|-------------|---|----------------------|--|------|------|
| 철(Fe) 발포체 히트싱크 | 30 분 | 광 원 부 |  | 방 열 부 |  | 49.7 | 39.2 |
| | | 측 면 |  | | | | |
| | 1 시 간 | 광 원 부 |  | 방 열 부 |  | 50.9 | 40.6 |
| | | 측 면 |  | | | | |
| | 3 시 간 | 광 원 부 |  | 방 열 부 |  | 51.7 | 40.4 |
| | | 측 면 |  | | | | |

표 4-16. 철 발포체 히트싱크를 적용한 20 W 등기구 방열특성

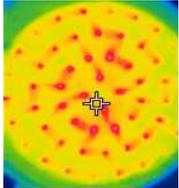
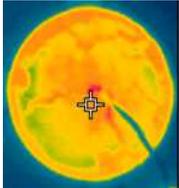
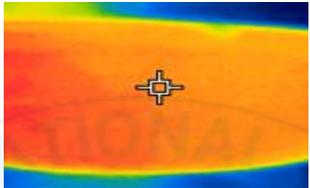
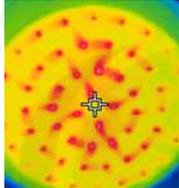
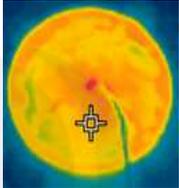
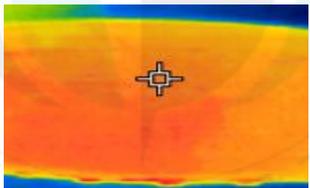
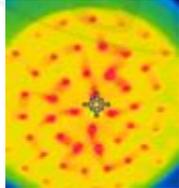
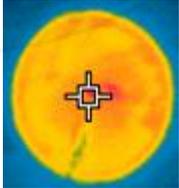
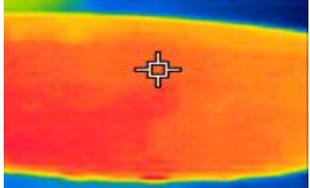
| 히트싱크 종류 | 시 간 | 측정부위 온도분포 | | LED 광원부 온도(°C) | 방열부 온도 (°C) | | |
|-----------------------|-------------|-------------|---|----------------------|--|------|------|
| 구리(Cu) 발포체 히트싱크 | 30 분 | 광 원 부 |  | 방 열 부 |  | 49.7 | 38.5 |
| | | 측 면 |  | | | | |
| | 1 시 간 | 광 원 부 |  | 방 열 부 |  | 51.8 | 39.8 |
| | | 측 면 |  | | | | |
| | 3 시 간 | 광 원 부 |  | 방 열 부 |  | 52.4 | 40.6 |
| | | 측 면 |  | | | | |

표 4-17. 구리 발포체 히트싱크를 적용한 20 W 등기구 방열특성

기존의 20 W급 LED 조명에 사용되는 알루미늄소재 히트싱크의 열특성을 기준으로 하고 각 금속 발포체를 사용해 만든 히트싱크의 열특성을 비교하였다. 일반 알루미늄소재 히트싱크의 경우 점등 전 LED 광원부(전면)의 온도는 22.1 °C, 방열부(후면)의 온도는 22.7 °C로 측정되었다. 점등 3시간 후 LED 광원부의 온도는 46.0 °C, 방열부의 온도는 41.4 °C로 측정되었으며 LED 광원부와 방열부의 온도 차이는 약 4.6 °C로 나타났다. 식 (4-3)에서 볼 수 있듯이 ΔT (열원과 방열부 사이의 온도차)가 낮을수록 낮은 열저항을 의미하며 이를 통해 기존의 일반 알루미늄 소재 히트싱크의 경우 뛰어난 열전도도를 가지는 것을 알 수 있고, 열화상 카메라를 사용하여 측정부위의 온도분포를 볼 때 전체적인 열전달이 매우 균일하게 이루어지는 것을 확인할 수 있다.

$$R_{th} = \Delta T / Q \quad (4-3)$$

… R_{th} : 전체 열저항

ΔT : 열원과 방열부 사이의 온도차

Q : 발열량

철이나 구리, 티타늄을 포함한 금속 발포체 히트싱크의 경우 열화상카메라를 통해 측정부위 온도분포를 확인했을 때 상대적으로 불균일한 분포를 가졌으며, 타 금속 발포체에 비하여 LED 광원부의 온도(철 51.7 °C, 구리 52.4 °C, 티타늄 52.0 °C)가 높았다. 구리를 사용해 금속 발포체를 제조하여 히트싱크로 적용하였을 경우, 순수 구리의 열전도도가 높은 편임에도 불구하고 열전달 능력이 상대적으로 높지 않았다. 구리 발포체의 경우 산소의

함량이 다른 발포체에 비하여 많은 것으로 나타났는데 일반적으로 복합물에 포함된 산소량이 증가할수록 열전도도는 낮아지며 산소량이 감소할수록 열전도도가 높아지는 경향을 보인다[19,20]. 따라서 구리는 발포체로 생성되는 과정에서 산화가 많이 일어나 이를 히트싱크로서 적용할 시에 성능이 비교적 좋지 않은 것을 알 수 있다.

알루미늄 발포체를 히트싱크로 적용할 경우 점등 3시간 후 LED 광원부의 온도는 48.4 °C, 방열부의 온도는 42.4 °C로 LED 광원부와 방열부의 온도 차이는 약 6.2 °C로 측정되어 금속 발포체로 제작한 히트싱크 중 LED 광원부와 방열부의 온도차이가 가장 적었다. 이는 LED 광원부의 높은 열이 효과적으로 히트싱크에 전달되어 효율적으로 열이 확산된다는 것을 의미한다. 알루미늄 발포체를 적용한 LED 광원부의 온도(48.4 °C)가 기존 알루미늄소재 히트싱크를 사용했을 때(46.0 °C)와 비교하여 볼 때 약 95 % 수준의 방열특성을 만족하는 것으로 나타났다. 열화상카메라를 통해 측정된 온도분포를 통해서도 열전달이 균일하게 이루어지는 것을 확인할 수 있다.

아연 금속 발포체를 히트싱크로 적용할 경우 LED 광원부의 온도는 48.6 °C, 방열부의 온도는 39.6 °C로 나타났으며 알루미늄을 제외한 금속 발포체 중 가장 우수한 열특성을 가진 것으로 나타났다.

5. 결론

기존 알루미늄 히트싱크의 제조공정인 다이캐스팅은 금속을 용융하기 위해 높은 온도가 필요하며 또한 내열성이 뛰어난 별도의 금형을 제작해야하기 때문에 그에 따른 비용이 비싸다는 단점이 있다. 액상규산나트륨을 이용해 금속 발포체를 제조할 경우 기존의 다이캐스팅 공법을 이용한 알루미늄 히트싱크 제조방법과 비교하였을 때 제조공정이 간단하며, 낮은 온도에서 제작이 가능하고 별도의 금형 제작이 필요 없다는 장점이 있다.

이러한 장점들을 종합하여, 본 연구에서는 알루미늄을 비롯한 구리, 아연, 철, 티타늄, 크롬 등 여러 금속 분말을 주재료로 하고 액상규산나트륨 등 소량의 바인더 및 과산화수소를 혼합, 건조시켜 저온에서 제작 가능한 금속 발포체를 생성하고 여러 가지 물성을 측정하였다. 이러한 금속 발포체를 성형하여 LED용 히트싱크를 제작하고, LED 조명에 직접 적용하여 LED 구동 시 열특성에 대하여 연구하였다.

FE-SEM 측정을 통해 금속 발포체의 미세구조를 확인하였고, EDS 분석을 통하여 금속 발포체에 공통적으로 Si, Na, O가 측정되었다. 또한 금속 분말의 원소(Al, Zn, Cu, Ti, Fe)들이 있음을 확인하였으며, 기타 불순물은 검출되지 않았다. 비표면적 분석 결과 아연 발포체의 표면적이 $9.467 \text{ m}^2/\text{g}$ 로 금속 발포체들 중 가장 넓은 표면적을 가지는 것으로 나타났다. 압축강도는 아연 발포체의 최대 강도가 4.14 MPa로 나타나 가장 높았으며, 압축강도가 1.43 MPa로 가장 낮게 나타난 크롬 발포체를 제외하고 대부분의 금속 발포체가 2 MPa이상의 압축강도를 가진 것으로 확인되었다.

20 W급 LED 조명에 금속 발포체로 제작한 히트싱크를 적용시켰을 때, 알루미늄 발포체를 사용한 히트싱크와 아연 발포체를 사용한 히트싱크의 열특성이 가장 우수했다. 기존의 LED 조명 제품에 사용되는 알루미늄 히

트싱크 대비 LED 광원부의 온도를 비교했을 때 약 95 %정도의 성능을 만족하였다. 구리, 철, 티타늄 발포체 히트싱크들 또한 기존 알루미늄 히트싱크 대비 약 87 %이상의 성능을 만족하는 것으로 확인되었다. 이러한 연구 결과로부터 금속 발포체를 이용한 히트싱크는 기존의 히트싱크 제조방법보다 간단하고 쉬운 공정으로 제조 가능하며, 생산가격이 저렴하여 LED 히트싱크 및 전자제품 등 여러 분야에 응용이 가능할 것으로 기대된다.



참고문헌

- [1] W. Zhou, D. Yu, C. Min, Y. Fu and X. Gou, J(2009). Appl. Polym. Sci., 112, 1695
- [2] 이황래, 하성민, 유영재, 이성구(2014), Polym. Sci. and Tech. 1, 24
- [3] J. Hu, L. Yang, M. W. Shin(2008), “Electrical, Optical, and Thermal Degradation of High Power GaN/InGaN Light-Emitting Diodes”, Journal of Physics, Vol. 41, no 3, 035107
- [4] N. Narendran, Y. Gu(2005), “Life of LED-based White Light Sources”, Journal of Display Technology, Vol. 1, No. 1, pp. 167-70
- [5] AnTran, “More About Heat Transfer“
- [6] 이충현(2014), “고출력 백색 LED 열저항 특성 및 신뢰성 향상”
- [7] Meibo Xing, Jianlin Yu, Ruixiang Wang(2015), “Experimental study on the thermal conductivity enhancement of water based nanofluids using different types of carbon nanotubes”, International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 88, 609-616
- [8] T. Fishedick, M. Kind, B. Dietrich(2015), “High temperature

two-phase thermal conductivity of ceramic sponges with stagnant fluid - Experimental results and correlation including thermal radiation”, International Journal of Thermal Sciences, Volume 96, 1-11

- [9] M. Roudger, J. De Coninck(2011), “Condensation heat transfer coefficient versus wettability”, Applied Surface Science, Volume 338, 15-21
- [10] Magdy A. Ezzat(2011), “Thermoelectric MHD with modified Fourier’s law”, International Journal of Thermal Sciences, Volume 50, Issue 4, 449-45
- [11] Tomoaki Kawaguchi, Hajime Honda, Kuniyuki Hatori, Ei-ichi Imai, Koichiro Matsuno(2005), “Fourier’s law of heat transfer and its implication to cell motility”, Biosystems, Volume 81, Issue 1, 19-24
- [12] 박진성(2013), “열전효과를 이용한 LED 조명의 냉각 및 성능 평가”
- [13] 최병일(2005), “비표면적 인증표준물질 개발”
- [14] 천병식, 이재영, 하광현(2002), “지반주입재 종류별 주입특성 및 환경적 유해성에 관한 연구”, 한국지반환경공학회논문집, 3(4), 37-49
- [15] 천병식(2005), “최신 지반주입 이론과 실제”, 원기술, pp. 169-170

- [16] 島田俊介, 兼松陽(1977), “最新の地盤注入工法”, 理工圓書, pp. 34-36
- [17] 이정상, 이승준, 김연중, 김태수, 도종남, 천병식 (2012). 이암 성토지반의 안정화를 위한 최적주입률 산정에 관한 실험적 연구. 한국지반환경공학회논문집, 13(7), 31-38
- [18] B.K. Yen, C.K.H. Dharan(1996), “A model for the abrasive wear of fiber-reinforced polymer composites”, *Wear*, Volume 195, Issues 1-2, 123-127
- [19] A. V. Virkar, T. B. Jackson, and R. A. Cutler(1989), “Thermodynamic and Kinetic Effects of Oxygen Removal on the Thermal Conductivity of Aluminum Nitride”, *J. Am. Ceram. Soc.*, 72 2031-42
- [20] T. B. Jackson, A. V. Virkar, K. L. More, R. B. Dinwiddie, and R. A. Cutler(1997), “High Thermal Conductivity Aluminum Nitride Ceramics: the Effect of Thermodynamic, Kinetic and Microstructural Factors”, *J. Am. Ceram. Soc.*, 80 1421-35
- [21] The London Metal Exchange(2016), “6대 비철금속 가격”
- [22] M. A. Ezzat(2011), “Thermoelectric MHD with modified Fourier’s law”, *International Journal of Thermal Sciences*, 50, 4, 449-45