

허니컴 구조 SiC 발열체 성능 평가 시뮬레이션

이종혁¹ · 조영재¹ · 김찬영¹ · 권용우^{1†} · 공영민^{2‡}

¹홍익대학교 신소재공학과, ²울산대학교 첨단소재공학부

Simulation of Honeycomb-Structured SiC Heating Elements

Jong-Hyuk Lee¹, Youngjae Cho¹, Chanyoung Kim¹, Yongwoo Kwon^{1†} and Young-Min Kong^{2‡}

¹Department of Materials Science and Engineering, Hongik University, Seoul 121-791, Korea

²School of Materials Science and Engineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea

(Received Jun 29, 2015 : Revised September 1, 2015 : Accepted September 1, 2015)

Abstract A simulation method to estimate microstructure dependent material properties and their influence on performance for a honeycomb structured SiC heating element has been established. Electrical and thermal conductivities of a porous SiC sample were calculated by solving a current continuity equation. Then, the results were used as input parameters for a finite element analysis package to predict temperature distribution when the heating element was subjected to a DC bias. Based on the simulation results, a direction of material development for better heating efficiency was found. In addition, a modified metal electrode scheme to decelerate corrosion kinetics was proposed, by which the durability of the water heating system was greatly improved.

Key words SiC, heating element, porous material, simulation.

1. 서 론

탄화규소(SiC)는 반도체 물질로서 금속과 절연체 중간 정도의 전기전도도를 갖고, 높은 열전도도와 우수한 고온강도, 내식성, 내열성, 열충격 저항성 등으로 인하여 고 전력용 발열체 물질로 최적이다.¹⁾ 거기에 더하여 탄화규소를 Fig. 1과 같이 허니컴 구조로 만들게 되면 표면적이 극대화되어 주변과의 열교환 효율이 높아지게 되어 주변 유체를 매우 효과적으로 가열할 수 있게 된다.²⁾ 이와 같이 제조된 허니컴 구조의 SiC 발열체는 현재 주로 사용되고 있는 Ni-Cr, kanthal wire, alumina plate 등에 비해 소비 전력 및 내구성 측면에서 훨씬 나은 성능을 발휘하게 된다. 거기에 덧붙여서 허니컴 구조는 전류 이동 경로 측면에서 본질적으로 병렬이므로 발열체의 일부가 파손되더라도 열린 회로(Open-Circuit)가 되지 않아 시스템의 안정성 측면에서 더 낫다. 기존의 금속선 발열체의 경우 일부가 파손되면 국소적으로 저항이 커지

게 되어 화재의 위험성이 있다.

허니컴 구조 발열체는 SiC 분말, 소결조제(Si), 그리고 유기용매를 혼합하여 페이스트를 만들고 이를 주형(Mold)에 통과시키는 압출(Extrusion) 및 건조(Drying), 그리고, 액상소결(LPS, Liquid Phase Sintering)을 거쳐 만들어진다.^{1,3)} 건조과정에서 유기용매가 제거되고, LPS 공정 중에 소결 조제가 액상이 되어 SiC 분말 입자들을 접합시키는 접착제와 같은 역할을 하게 되어 SiC, 소결조제, 기공으로 이루어진 다공성 미세구조를 얻게 된다. 이러한 다공성 재료로 이루어진 허니컴 발열체의 성능은 재료 특성 및 기공 구조 최적화를 통하여 크게 향상될 수 있다. 발열체의 성능은 줄열에 의한 발열과 발생한 열의 전달, 이 두 가지 요소에 의해 결정되게 된다. 발열은 전기전도도와 전류 밀도에 의해 결정되며 전자는 재료 특성으로 미세구조에 의해 결정되며, 후자는 발열체 형상에 의해 결정된다. 열전달도 재료와 형상에 의해 결정되며 재료 특성으로는 열전도도, 밀도, 열용량에

[†]Corresponding author

E-Mail : ykwon722@hongik.ac.kr (Y. Kwon, Hongik Univ.), longmin2@ulsan.ac.kr (Y.-M. Kong, Univ. of Ulsan)

© Materials Research Society of Korea, All rights reserved.

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

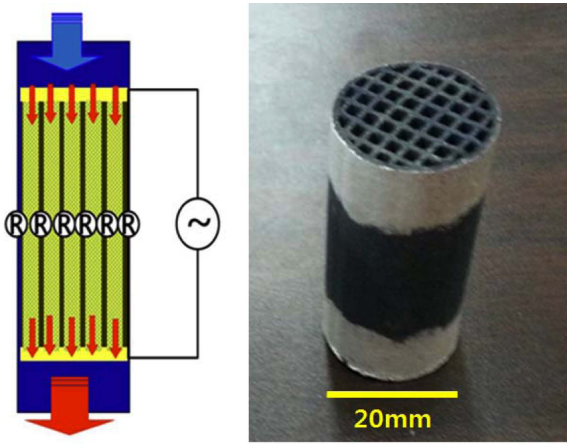


Fig. 1. Schematic (left) and photograph (right) of SiC heating element with honeycomb structure.

의해 영향을 받는다. 밀도와 열용량은 단순히 특성값과 조성비율의 선형 결합으로 표현되므로 원료분말의 조성 및 기공률로부터 쉽게 예측 가능하다. 그러나, 전기 및 열전도도 예측은 조성비로부터 쉽게 예측할 수 없다. 이는 3차원 공간에서의 각 상의 연결성(Connectivity)에 따라 값이 달라지게 되기 때문이다.

본 연구는 두 가지 종류의 수치해석으로 이루어져 있다. 첫째는 SiC, 소결조제, 기공으로 이루어진 복잡한 미세구조를 갖는 물질의 유효 전기/열전도도를 계산해내는 것이며, 둘째는 유한요소해석(FEA, Finite Element Analysis) 패키지를 이용하여 허니컴 발열체의 온도 분포를 계산하는 것이다. FEA는 재료의 물성과 발열체 형상이 입력되며 온도 분포가 출력된다. 두 번째 계산인 FEA를 통해 발열 성능 효율화를 위한 재료 물성 개선 방향을 도출해내고, 이러한 재료 물성 변화를 위한 미세구조 제어 방향을 첫 번째 계산으로부터 도출해내는 수치해석 방법론을 확보하였다.

2. 전산모사 방법

2.1 다공성 복합 재료의 유효 물성 계산

위에 기술된 SiC, 소결조제(Si), 기공을 각각 α -상, β -상, γ -상이라 하자. LPS 공정 과정에서 액상인 β -상이 고상인 α -상 위에서 Wetting이 되게 되고, Wetting의 정도, 즉, 젖음성(Wettability)에 따라 다른 미세구조를 얻게 된다. 이를 모식도로 Fig. 2에 표현하였다. 젖음성이 높고, 기공률이 낮을수록 β -상의 연결성(Connectivity)이 높아지게 됨을 알 수 있다. LPS 공정 온도는 SiC의 녹는점보다 낮고, 소결조제인 Si의 녹는점보다는 높은 1,600 °C 근처이다. 따라서, 우리는 α -상, 즉, SiC 분말의 모양은 변하지 않고, 액상인 β -상, 즉, 소결조제만 젖음성에 따

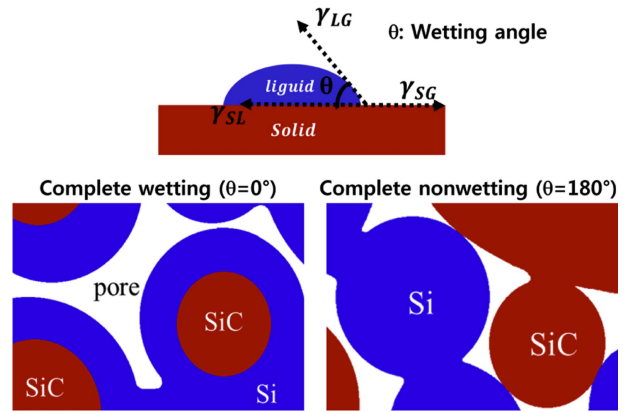


Fig. 2. Schematics of microstructures resulted from different wetting angles.

라 달라진다고 가정할 수 있다.

이론적으로 복합재료의 유효 전도도는 Effective Media Approximation(EMA)에 의해 계산된다.⁴⁾ EMA는 매트릭스 상에 구형, Wire 형태 등의 어떤 특정한 기하학적 모양을 갖는 다른 상들이 분산되어 있는 경우에 대한 수학적 모델이다. 이 모델은 더 복잡한 미세구조를 갖는 우리 발열체의 경우에 직접 적용하기 어렵다. 따라서, 우리는 간단하지만 다양한 기하학적 모양에 적용할 수 있는 수치해석 모델을 적용하였다. 위의 3가지 상의 전기 또는 열전도도를 각각 $\sigma_\alpha, \sigma_\beta, \sigma_\gamma$ 라 하자. 그러면 재료 내에서 위치에 따른 전도도는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\sigma(\vec{r}) = \begin{cases} \sigma_\alpha(\text{inside } \alpha\text{-phase}) \\ \sigma_\beta(\text{inside } \beta\text{-phase}) \\ \sigma_\gamma(\text{inside } \gamma\text{-phase}) \end{cases} \quad (\text{Eq. 1})$$

3차원 좌표 상의 모든 위치는 3가지 상 중 하나에 속할 수 밖에 없다. 상과 상 사이의 계면(Interface)에서는 전도도값이 급작스럽게 변하지 않고 서서히 변한다고 가정하였다. 그러나, 서서히 변하는 영역은 미세구조의 크기보다는 훨씬 작다. 즉, 계면 근처에서만 어느 정도 연속적으로 변화도록 만들었다. 이는 미분방정식 수치해석 중에 필요한 미분 연산에서 안정성을 확보하기 위함이다.

직육면체 시편 내에서 미세구조가 주어지고, 두 마주보는 면에 각각 양극, 음극의 전극이 있어서 전위차가 V 만큼 걸려 있으면, 샘플 내에서는 전류의 연속방정식 $\nabla \cdot \vec{J} = 0$ 이 만족되어야 한다. 여기서 \vec{J} 는 전기 또는 열의 Flux이다.

$$\nabla \cdot \vec{J} = -\nabla \cdot \sigma(\vec{r})\nabla\phi(\vec{r}) = 0 \quad (\text{Eq. 2})$$

이를 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\nabla \sigma \cdot \nabla \phi + \sigma \nabla^2 \phi = 0 \quad (\text{Eq. 3})$$

위의 식 (3)을 뉴턴 법(Newton Method)에 기반한 유한 차분법(Finite Difference Method)으로 수치해석을 하여 주어진 전도도 분포 $\sigma(\vec{r})$ 로부터 전기포텐셜 분포 $\phi(\vec{r})$ 를 얻어낸다. 얻어진 전기포텐셜 분포로부터 전극 사이의 총 전류량 I 를 계산할 수 있고, 이를 옴(Ohm)의 법칙 $R = V/I = (A/L)(1/\sigma_{eff})$ 으로 샘플의 저항을 구한 후, 샘플 크기에 무관한 다공성 물질의 유효전도도(σ_{eff})를 계산할 수 있다. 여기서 A 는 전극 면적, L 은 전극 사이의 거리이다. 이 방법으로 각 상의 분율 및 젖음성이 다른 샘플에 대하여 유효 전기전도도와 유효 열전도도(k_{eff})를 얻을 수 있다.

2.2 유한요소해석에 의한 허니컴 발열체 성능 전산 모사

앞서 미세구조에 따른 유효 전도도들과 기타 물성값들을 입력 변수로 하여 허니컴 구조 및 전극의 모양에 따른 발열체 성능을 유한요소해석(FEA, Finite Element Analysis)에 의하여 해석할 수 있다. 발열체 직경 및 길이, 단위 셀의 크기(공극 크기 및 재료 두께), 집전부 전극의 크기 등에 따른 온도의 분포 및 최고 온도 등을 비교적 쉽게 얻을 수 있다. 본 연구에서는 정지된 유체만을 대상으로 하기 때문에 유동은 고려하지 않고, 열전도만을 고려하여 전산모사하였다.

FEA는 고체(발열체) 내에서 Laplace 방정식, 줄열(Joule Heating), 그리고, 열전도 방정식을 적용하고 Eq. (4-6), 또한, 고체와 주변 유체 계면에서의 대류(Convection) 효과를 고려한 열전달 방정식(Eq. (7))을 Self-Consistent하게 수치적으로 풀어내는 과정으로 전극에 일정한 전위가 주어졌을 때의 온도 분포를 얻어내게 된다.

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \quad (\text{Eq. 4})$$

$$g_{Joule} = \sigma |\vec{J}|^2 \quad (\text{Eq. 5})$$

$$\nabla(k \nabla T) + g_{Joule} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{Eq. 6})$$

$$\vec{q} = h(T - T_{fluid}) \quad (\text{Eq. 7})$$

여기서 k 는 열전도도[W/cm·K], T 는 온도[K], ρ 는 밀도[g/cm³], c_p 는 비열[J/gK], g_{Joule} 은 줄열(Joule Heating) [W/cm³], h 는 열전달계수(Heat Transfer Coefficient) [W/cm²K]이며, 모두 위치의 함수이다. 즉, 발열체 물질 내부, 유체(공기 또는 물), 용기, 공기 등에 따라 물질 상수가 달라지며 온도 역시 위치의 함수로 얻어진다. 먼

저 전극 사이의 전위차가 주어지면 그를 통해 포텐셜 분포 및 전류밀도 분포를 얻는다. 전류밀도 분포로부터 줄열의 분포를 얻고, 그로부터 Eq. (6)과 (7)을 이용하여 온도 분포를 계산하게 된다. 우리는 전극에 주어진 전위차가 15 V일 때의 온도 분포를 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 미세구조에 따른 유효 전도도 계산 결과

SiC, Si, 기공으로 이루어진 다공성 재료의 유효 물성을 계산하였다. 각 물질의 전기 및 열전도도는 Table 1에 정리되어 있다. SiC의 열전도도는 결정구조에 따라 3.2~4.9 W/cm·K의 범위를 보이며 우리는 4.0 W/cm·K을 선택하였다.⁵⁾ 반도체인 SiC의 전기전도도는 도판트(Dopant) 역할을 하는 불순물의 함량에 크게 영향을 받으며 본 연구에서 사용된 분말의 경우 상온에서 0.01 S/cm로 평가되었다. 이러한 물성들은 원래 온도의 함수이나, 본 연구에서는 기공율 및 함량에 따른 유효 물성의 변화만을 보기 위해 상수값으로 가정하여 계산하였다. 본 발열체의 작동 온도 범위는 상온에서 60~70 °C까지이며 이 영역에서는 물성값의 변화가 크게 변하지는 않으므로 상수로 놓아도 무방하다. 그러나, 수백도 이상의 고온 영역에서는 온도 의존성을 반영해야만 올바른 결과를 얻을 수 있다. 재료 간의 물성 차이가 여러 Order 이상 차이 나는 경우는 실질적으로 높은 값만 반영하고 나머지는 무시하여 0으로 놓고 계산하였다. 즉, 공기의 열전도도와 전기전도도는 0으로 가정하였다. 그 결과 Eq. (8)에 주어진 Bruggeman 모델로 표현되는 이론식의 결과와 정량적으로는 약간 차이가 나지만 경향성이 일치하는 결과를 얻었다.

$$\sum_i \delta_i \frac{\sigma_i - \sigma_{eff}}{\sigma_i - 2\sigma_{eff}} = 0 \quad (\text{Eq. 8})$$

위의 식을 세 가지 상을 가진 복합재료에 적용한 경우는 Fig. 3에서 적색 선으로 표시되어 있고, 청색 원과 세모로 표시된 점들이 본 연구에서 계산한 결과이다. 기공률은 30%로 고정하였으며 소결조제와 SiC의 부피비율의 함수로 표시하였다. 실제로는 Si의 함량이 더 적고, 이 경우는 그래프로부터 Si/SiC 부피비가 1이하인 부분으로부터 유추할 수 있다. 전기전도도의 경우는 Wetting과

Table 1. Input parameters for effective property calculation.

| | SiC | Si | Pore (air) |
|--------------------------------|--------|------|------------|
| Thermal conductivity (W/cm·K) | 4.0 | 1.5 | 0.0002 |
| Electrical conductivity (S/cm) | 1.0e-2 | 2e-4 | 5e-17 |

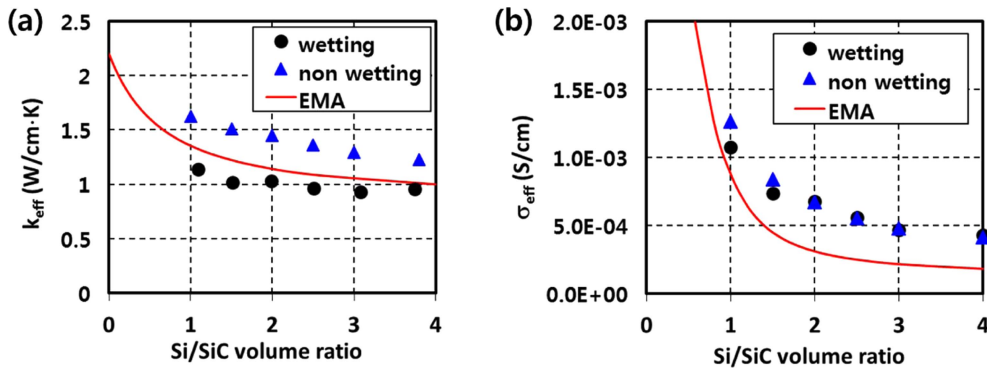


Fig. 3. Calculation of effective material properties of a porous material comprising SiC, Si, and pore phases (a) effective thermal conductivity (b) effective electrical conductivity.

Nonwetting의 경우가 크게 차이 나지 않고 있으나, 열전도도는 Nonwetting의 경우가 더 높게 나타나고 있다. 실제 재료에서는 이 두 가지 상황의 중간 정도일 것이며 문헌상으로는 약 40°의 Wetting 각도가 보고 되어 있다.⁶⁾ 표면 처리에 의해 이 각도는 변화될 수 있으며, 열전도도를 약 30%까지 조절 가능함을 알 수 있다.

3.2 FEA에 의한 발열체 성능 모델링

허니컴 발열체 구조를 생성하고, 전극을 양 끝단에 감은 형태로 잡았다. 발열체는 물 속에 잠겨 있으며, 물이 담긴 용기의 열전도도는 매우 낮아서 외부의 공기와는 단열된 상태로 가정하였다. 그 후, 발열체 자체의 온도와 유체 내의 온도를 계산하였다. 그 결과 최고 온도를 보이는 지점은 Fig. 4와 같이 집전부 주변임을 알 수 있었다. 일반적으로 알려져 있듯이 공기 중에서는 발열체 중앙 부분에 Hot Zone이 형성되는 것과는 다른 양상을 보인다. 그 이유는 물의 열전달 계수(h)가 공기보다 더 높기 때문이다. 줄열은 전류밀도의 제공에 비례하므로 전류밀도가 높은 부분에서 발열이 많이 일어난다. 물의 경우는 발생한 열이 물로 바로 빠져 나가게 되어 발열체 내에서의 열전달이 많이 일어나지 않는다. 따

라서, 줄열 분포의 모양이 온도 분포의 모양으로 그대로 나타나게 된다. 그러나, 공기의 경우는 열전달 계수가 작기 때문에 발생한 열이 상대적으로 발열체 내부에서 전달되어 중앙 부분에 모이게 되어 그 부분의 온도가 가장 크게 나타난다. 물 속 발열체에 대하여 전기전도도와 열전도도를 변화시키며 조사한 결과, Fig. 5에 나타난 바와 같이 전기전도도와 열전도도 모두 높이는 방향이 더 효율적인 유체 가열을 할 수 있는 것으로 예상되었다. 비효율적 발열은 발열체 온도는 높이 올라가면서도 물의 온도는 높이 올라가지 않는, 즉, 열교환 효율이 나쁜 경우이다. 그림의 적색선 위쪽의 데이터는 나올 수 없는 영역이다. 전기전도도 및 열전도도는 앞서 Fig. 3에 보인 값들을 그대로 입력하지 않았으며, 실제 시편의 기공률, SiC/Si 함량, 미세구조 등은 계산에서 가정한 값들과 차이가 있고, 이는 추후 더 자세한 분석이 필요한 상태이다. 하지만, 경향성 측면으로는 앞서 보인 미세구조 제어와 연관 지으면 SiC 함량을 높이고, Wetting 각을 낮추는 것이 더 효율적이라는 결론을 내릴 수 있다.

허니컴 발열체를 물 속에서 사용할 경우, Fig. 6에서 보이는 바와 같이 집전부 주변의 열화 및 그로 인한 전체 저항의 크기 증가가 심각하다. 발열체의 집전부는 양

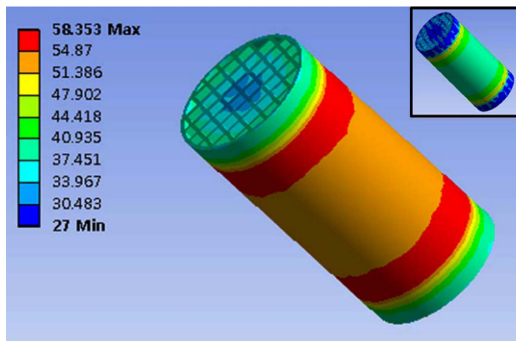


Fig. 4. Profiles of temperature (°C). The inset shows the corresponding current density profile.

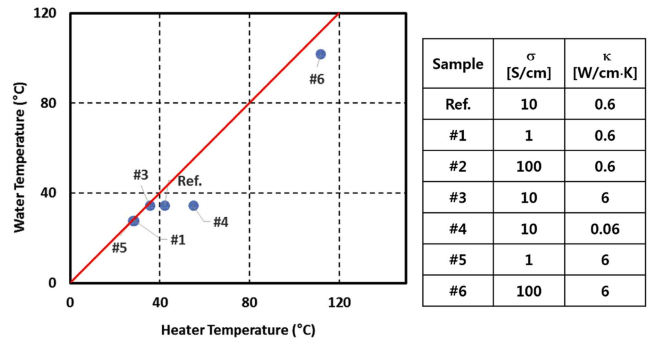


Fig. 5. Comparison of water and heater temperatures with different electrical and thermal conductivities.

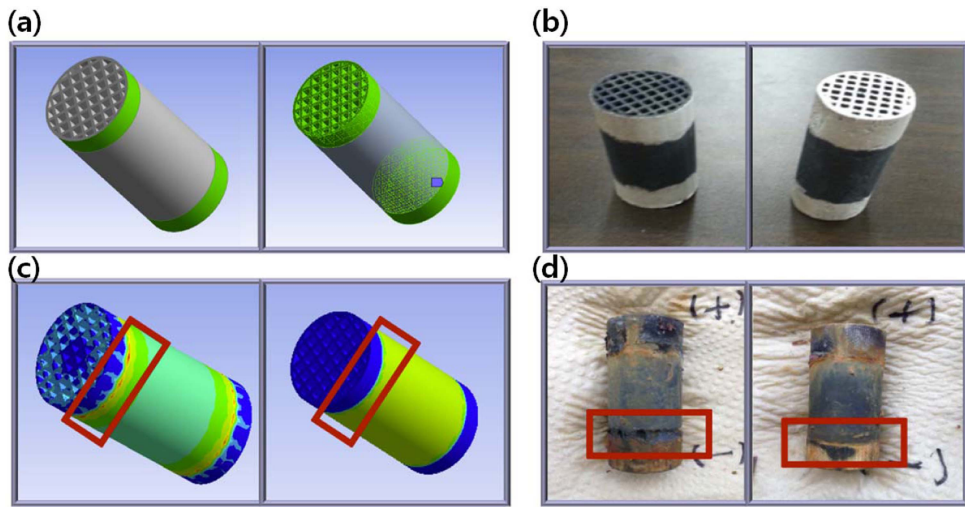


Fig. 6. Improvement of the electrodes. Simulation structures and corresponding current density profiles are shown in (a) and (c). As-fabricated and 40 hour-DC stressed samples are shown in (b) and (d). Left panels contain the old scheme and right panels contain the new scheme.

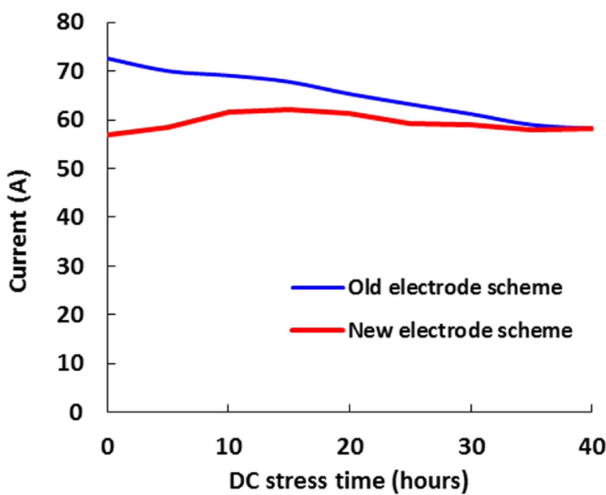


Fig. 7. Resistance vs. time during the DC stress test (DC 15 V).

끝단의 은 전극 부위 위에 SUS 재질의 메쉬 및 전극을 감아 놓은 형태이며, 물 속에서 전류밀도의 집중에 의하여 국부적으로 고온이 되게 되면 부식(Corrosion)이 진행되는 것으로 보인다. 이를 완화하기 위하여 전극 Coating 또는 물질 개선 등의 해법을 생각할 수도 있지만, 가장 쉬운 방법은 집전부 주변의 전류밀도 분포를 더 넓게 분산시킬 수 있는 구조의 고안이다. 은 전극을 Fig. 6과 같이 더 넓게 적용하는 방안을 FEA를 통해 사전 검증하였고, 적용 결과 Fig. 7에서 보이는 바와 같이 집전부 주변의 열화를 상당히 완화시킬 수 있었다.

4. 결 론

압출 및 액상 소결에 의해 제조된 허니컴 구조 SiC

발열체의 성능에 대한 전산모사를 수행하였다. 다공성 복합체의 상분을 및 미세구조 형태에 따른 유효 전기 및 열전도도의 변화와 그로 인한 발열체 성능에의 영향을 알 수 있었다. 또한, 전극 집전부 형태에 따른 전류밀도 차이를 밝혔고, 이를 반영하여 전극 형태의 개선안을 도출하여 내구성 향상을 이룰 수 있었다.

Acknowledgements

This research was funded by the MOTIE(Ministry of Trade, Industry and Energy, Grant No: 10043586) and the 2014 Hongik University Research Fund.

References

1. K. Pelissier, T. Chartier and J. M. Laurent, *Ceram. Int.*, **24**, 371 (1998).
2. Yukio Fukatsu, Yasuhiko Endo and Tetsuo Takehara, *Ceramic heat exchanger element*, US Patent 4,787,443, Nov. 29, 1988.
3. I. H. Song, J. H. Ha, M. J. Park, H. D. Kim and Y. W. Kim, *J. Ceram. Soc. Jpn.*, **120**, 370 (2012).
4. D. A. G. Bruggeman, *Ann. Phys. (Leipzig)*, **417**, 645 (1936).
5. G. L. Harris, p. 5, *Properties of Silicon Carbide*, Short Run Press, Exeter, UK (1995).
6. J. G. Li and H. Hausner, *Mater. Lett.*, **14**, 329 (1992).