

실린더형 MoSi₂계 발열체의 유도가열 적용

이성철^{*,**,*} · 김요한^{*,*} · 명재하^{*,†} · 김배연^{*,†}

*인천대학교 신소재공학과
 22012 인천광역시 연수구 아카데미로 119
 **위너테크놀로지
 17817 경기도 평택시 안중읍 금곡3길 14-12
 (2019년 2월 28일 접수, 2019년 4월 8일 수정본 접수, 2019년 4월 10일 채택)

Induction Heating of Cylindrical MoSi₂-based Susceptor

Sung-Chul Lee^{*,**,*}, Yo Han Kim^{*,*}, Jae-ha Myung^{*,†} and Bae-yeon Kim^{*,†}

*Department of materials science and engineering, Incheon National University, 119, Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon, 22012, Korea
 **Winner Technology, 14-12, Geumgok 3-gil, Anjung-eup, Pyeongtaek-si, Gyeonggi-do, 22012, Korea
 (Received 28 February 2019; Received in revised form 8 April 2019; accepted 10 April 2019)

요 약

본 연구에서는 슬립캐스팅 성형법을 이용하여 실린더형 MoSi₂계 세라믹 서스셉터를 개발하여 고온 유도가열에 적용시켰다. MoSi₂계 소재는 SHS법(Self-propagating High-temperature Synthesis)으로 합성하였고 XRD 분석을 통해 합성된 상과 결정구조를 확인하였다. 합성된 소재로 실린더 성형체를 제작하기 위해 슬립캐스팅을 진행하였고 슬립의 고형분 함량 및 유지시간을 조절하여 실린더 성형체의 두께를 제어하였다. 최종적으로 성형체 소결을 통해 유도가열 발열체를 제작하였고 열처리과정 중 표면에 형성된 SiO₂층은 SEM/EDS 분석을 통해 확인하였다. 서스셉터로서의 가열 성능을 평가하기 위해 유도가열기로 일정한 출력을 인가하였을 때 (Mo, W)Si₂ 실린더 서스셉터의 표면온도를 측정하여 출력 2 kW를 인가하였을 때 발열특성을 분석하였으며, 서스셉터 표면의 최고 온도는 1457 °C, 평균 승온속도는 19 °C/s로 우수한 가열 특성을 나타냈다.

Abstract – In present study, the cylindrical susceptor by the slip casting method was designed to apply high-temperature induction heating by using (Mo, W)Si₂ ceramics. MoSi₂-based materials were synthesized by SHS (Self-propagating High-temperature Synthesis) method. The phase and crystal structure of MoSi₂-based materials were confirmed by XRD analysis. The shape of cylindrical mold was synthesized for various thickness by using the slip casting method. Finally, the susceptor for induction heating was processed by sintering and heat treatment to form SiO₂ layer, which was confirmed on the surface of susceptor by SEM/EDS analysis. To evaluate the heating performance of (Mo, W)Si₂ cylinder susceptor, we measured the maximum surface temperature and heating rate in comparison with the rod heating element under constantly applied power. The induction heating of the (Mo, W)Si₂ cylinder showed excellent heating performance, reaches the maximum temperature of 1457 °C, with the average heating rate of 18.64 °C/s at 2 kW.

Key words: Induction heating, Slip casting, (Mo, W)Si₂ cylinder susceptor

1. 서 론

유도가열(Induction heating)은 전자기유도 현상을 이용하여 전기 에너지를 열로 변환하는 방법으로 출력 및 온도 제어가 용이하고 연

소반응을 이용하지 않아 유해물질을 배출하지 않는다. 또한 매질 없이 많은 에너지를 빠르게 전달할 수 있어 높은 효율(90%이상)을 가지고 급속가열(100 °C/min이상)이 가능하여 열처리, 주조, 용접, 표면처리 등 산업 전반에 이용되고 있다. 다만 실제로 가열되는 발열체가 전자기유도가 되는 물질만 가능하여 일반적으로 전도성이 우수한 Pt, Mo, Ni-Cr 등 금속이나 합금소재의 서스셉터를 사용하지만 1400 °C 이상의 고온에서는 산화에 의한 치명적인 열화 문제로 장기간 사용이 어렵다는 문제점이 존재한다. 이에 따라 세라믹 특성인 고온에서의 산화저항성과 금속 특성인 전기전도성을 동시에 가지고 있는 소재가 주목 받고 있다[1,2].

[†]To whom correspondence should be addressed.
 E-mail: mjaeha@inu.ac.kr

^{*}이 논문은 연세대학교 설용건 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

^{**}These authors contributed equally to this work.

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.

MoSi₂계 소재(Mo_xW_{1-x}Si₂)는 높은 용점(2020 °C 이상)과 고온에서의 산화저항성을 지니고 있으며, 세라믹임에도 우수한 전기전도성을 갖추고 있는 대표적인 발열체 소재로 고온 유도가열용 서스셉터에 적용시킬 수 있다. 또한 실제 900 °C 이상 고온에서 형성되는 SiO₂층은 표면에서 외부기체와의 반응을 차단해주기 때문에 고온작동 중에도 안정적인 내산화성을 유지한다[3-6]. 실제로 MoSi₂계 소재는 이러한 고온특성으로 스웨덴의 Kanthal사, 미국의 I squared R 사, 한국의 위너테크놀로지사 등 국내외 여러 기업에서 압출성형 및 가공을 통해 봉(rod)상 전기저항 발열체로 제작되어 응용되고 있다[7]. 다만 MoSi₂계 소재는 상온에서의 높은 취성으로 인한 가공이 어렵기 때문에 내부에 피가열체를 담을 수 있는 실린더와 같은 복잡한 형상을 요구하는 유도가열용 서스셉터로는 적용시키지 못하고 있는 실정이다.

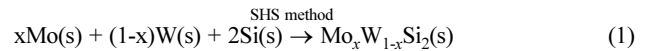
슬립캐스팅(Slip Casting) 성형법은 압출성형과 달리 대형장비를 필요로 하지 않으며, 다양한 성형틀 구성이 가능하고 비교적 낮은 점도의 슬러리를 이용하기 때문에 공정면에서 형상제어가 간단하다. 성형체의 두께는 성형시간에 따라 증가하게 되며 슬립물성, 외부압력 등 슬립캐스팅 조건에 따라 층 형성속도를 제어할 수 있다. 따라서 유도가열용 서스셉터에 슬립캐스팅을 적용시키면 원하는 형상의 성형체를 제작할 수 있으며, 성형시간 및 슬립 조건 제어에 따른 성형체 두께제어를 통해 추가적인 가공없이 원하는 두께의 최종 실린더 서스셉터를 얻을 수 있을 것으로 기대된다[8].

본 연구에서는 고온에서의 내산화특성이 우수한 MoSi₂계 소재를 초고온 유도가열에 적용하기 위해 슬립캐스팅 성형법을 이용한 실린더 서스셉터 제조방법을 개발하고 발열특성을 평가하고자 하였다. MoSi₂계 소재의 합성방법에는 대표적으로 기계적합금화[9], SHS법(Self-propagating High-temperature Synthesis) 등이 알려져 있으며, 본 실험에서는 합성반응시 자체적으로 발생하는 반응열을 이용하는 SHS법을 적용하였다. SHS법은 발열반응을 통해 실제 합성하는 시료를 가열하여 합성반응을 극대화한다. 이를 통해 반응시간과 에너지소모를 최소화할 수 있으며, 효율적으로 고순도 소재를 합성할 수 있다[10,11]. 소재합성 후 슬립 제조를 위한 미세분말화를 진행하였으며 고품분 함량과 성형시간을 달리하여 실린더 성형체를 제작하였다. X선회절분석(XRD)을 이용하여 시료의 결정상 및 구조를 분석하였으며, 주사전자현미경을 이용하여 미세구조를 분석하였다. 또한 실린더형 서스셉터는 유도가열장치에 장착하여 승온속도와 상승온도 등 발열 특성을 분석하여 유도가열용 서스셉터로서의 성능을 평가하였다.

2. 실험

2-1. MoSi₂계 시료 합성

본 실험에 사용한 출발원료는 Mo (Chengdu Hongbo Industrial Co., LTD., 99.97%), W (Ganzhou Grandsea W&Mo Group Co., LTD., 99.95%), Si (Fuzhou Hokin Chemical Technology Co., LTD., 99.99%) 분말로 반응식 (1)의 화학량론에 맞도록 정량하고 6시간동안 볼밀링을 통해 혼합한 후 일축가압성형으로 펠렛형태로 제조하였다. 제조된 펠렛은 전기로에서 예열한 뒤 점화장치를 이용하여 SHS법(Self-propagating High Temperature Synthesis)으로 MoSi₂계(Mo_xW_{1-x}Si₂) 소재를 합성하였다. 합성된 MoSi₂계 소재는 약 2~4 μm의 분말로 분쇄하여 실험에 사용되었다.



2-2. 발열체 시편 제작

분쇄된 MoSi₂계 시료와 분산매(H₂O)의 비율을 75:25~80:20 (wt%)로 하여 습식혼합하고, 이후 슬립캐스팅 과정에서 적절한 점도 및 강도를 부여하기 위해 바인더 Methyl cellulose (MC)를 첨가한 후 24시간 볼밀링을 진행하여 슬러리를 제조하였다. 제조된 MoSi₂계 슬러리를 실린더 형상 제작용 석고몰드에 주입하고 7.5~15분동안 유지한 후 슬립을 배출하였다. 몰드 표면에 형성된 성형체는 12시간 건조하고, 탈형 후 1주일 동안 상온에서 건조하였다. 건조 후에는 먼저 1550 °C 수소분위기에서 2시간동안 소결하고 표면에 SiO₂층을 형성하기 위해 최종적으로 1600 °C 대기분위기에서 2시간 열처리를 진행하였다.

2-3. 발열체 소재의 상 및 미세구조 분석

합성한 MoSi₂계 시료의 상과 결정구조는 XRD (X-ray Diffraction, Rigaku, Cu Kα radiation, λ=1.54056Å)를 통해 분석하였다. 각 시료의 X선 회절 패턴은 JADE 9.0 소프트웨어 프로그램을 통해 합성시료의 레퍼런스 패턴들과 대조하여 상을 확인하였고, 각 회절 피크에서 결정면 간 거리를 측정하여 격자상수를 계산하였다.

최종 소결한 실린더형 서스셉터의 미세구조와 표면에 형성된 SiO₂ 피막은 FE-SEM (Field Emission Scanning Electron Microscopy, JEOL, JSM-7001F)와 EDS (Energy Dispersive Spectroscopy)을 이용하여 분석하였다. 또한 연마된 단면의 이미지 분석을 통해 기공면적을 측정하여 다음 식 (2)과 같이 기공률을 계산하여 아르키메데스법 (3)으로 측정한 겉보기 기공률과 비교하였다.

$$\text{Porosity (\%)} = \frac{A_{\text{pore}}}{A_{\text{total}}} \times 100 (\%) \quad (2)$$

$$\text{Apparent porosity (\%)} = \frac{W_3 - W_1}{W_3 - W_2} 100 (\%) \quad (3)$$

위 식에서 A_{pore} 은 기공면적, A_{total} 은 전체면적, W_1 은 건조 중량, W_2 은 수중중량, W_3 은 포화중량이다.

2-4. 유도가열 평가

(Mo, W)Si₂ 실린더 서스셉터의 특성을 평가하기 위해 압출성형으로 제작된 지름 Φ9 mm, Φ12 mm의 MoSi₂계 봉상 발열체 제품과 비교하여 유도가열 성능을 분석하였다. 실험에는 Φ6 mm Cu를 원통형으로 4번 감은 가열코일을 사용하였고 고주파 유도가열기(HF

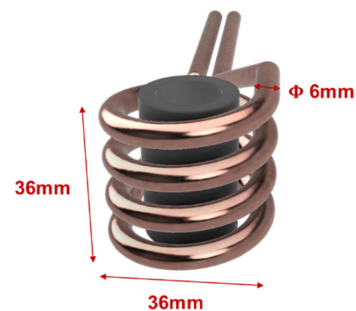


Fig. 1. Heating Cu coil and cylinder susceptor for induction heating system.

Induction Heater, Insung)를 통해 63 kHz의 고주파 교류전류를 일정한 출력으로 인가하여 시편을 가열했다. 출력을 일정하게 인가하는 동안 적외선 온도계(Marathon MR Ratio Thermometer, Raytek)를 이용하여 시편의 표면온도를 측정하여 시간에 따른 온도변화를 측정하였고 최고온도 및 승온속도를 분석하여 유도가열 특성을 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

SHS법으로 합성한 MoSi₂계 소재(Mo_xW_{1-x}Si₂, 0.5 < x < 1),의 합성상 및 결정구조를 확인하기 위해 MoSi₂, WSi₂ 와 비교하여 XRD 분석을 진행하였다. Fig. 2(a)는 합성한 MoSi₂계 시료들의 X선 회절 패턴들로 JADE 9.0 프로그램에서 MoSi₂의 레퍼런스 회절패턴을 비교해본 결과 합성된 시료들이 모두 다른 2차 상이 없는 Tetragonal 상으로 모두 MoSi₂과 동일한 결정구조로 확인되었다. 각 시료마다 비교하면 Mo이 W보다 큰 이온반지름을 가지기 때문에 Mo의 함량이 높을수록 전체 결정격자 크기는 증가하게 되고 동일한 X선 파장(Cu K α radiation, $\lambda = 1.54056\text{\AA}$)에서 결정 면의 Fig. 2(d)이 증가함에 따라 Bragg's Law를 나타내는 식 (4)에 의해 각 시료의 X-선 회

절각(θ)은 감소하게 된다.

$$\text{Bragg's Law : } n\lambda = 2d\sin\theta \quad (4)$$

실제로 (002)면에서 MoSi₂, (Mo, W)Si₂, WSi₂의 면 간 거리는 각각 3.93108, 3.92765, 3.91059 \AA 으로 측정되었고(Mo, W)Si₂의 결정격자크기는 MoSi₂와 WSi₂에서의 중간 값을 가졌다.

합성된 MoSi₂계 소재를 유도가열용 서스셉터에 적합한 실린더형상으로 제작하기 위해 슬립캐스팅 성형법을 적용하였고 슬립의 물성과 성형시간에 따른 두께 형성을 분석하여 실린더형 성형체의 두께를 제어하였다. 슬립캐스팅을 통한 층 형성은 슬립과 다공성 몰드 사이의 여과과정으로 설명할 수 있다. 이때, 슬립캐스팅 조건과 성형체 두께의 관계는 D. S. Adcock과 I. C. Mcdowall이 Kozeny 식으로부터 유도한 식 (5)으로 다음과 같이 나타낼 수 있다[12-14].

$$L^2 = \frac{2PtE^3c}{5S^2\rho^2\eta(1-E)^2(1-c-E)} \quad (5)$$

$$L^2 = Ct \quad (6)$$

상기의 식에서 L은 성형체 두께, P는 캐스트 압력, t는 유지시간,

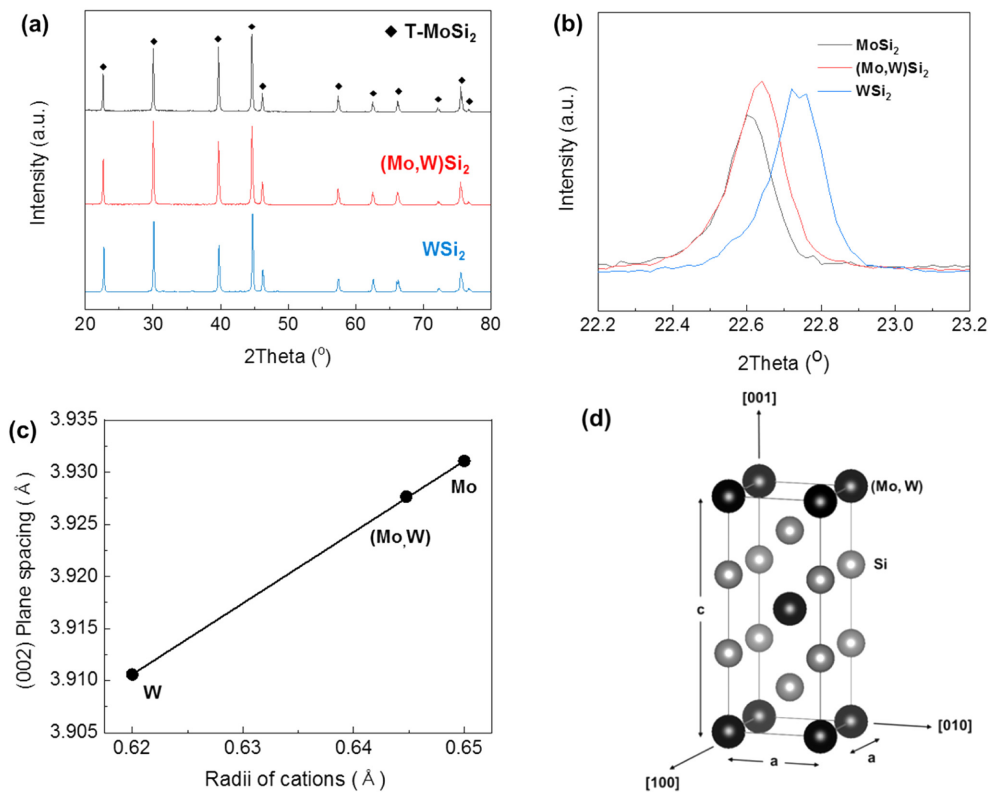


Fig. 2. X-ray Diffraction Patterns and lattice structure of synthesized samples. (a) XRD patterns, (b) diffraction peaks at (002), (c) (002) plane spacing and (d) Tetragonal crystal structure of MoSi₂.

Table 1. Crystal information of the MoSi₂-based materials with different cations

	Space Group	Cell Parameters (\AA)	B ($^\circ$)	V_p (\AA^3)
MoSi ₂	I4/mmm	a = 3.209657 c = 7.862160	90	80.9952
(Mo, W)Si ₂	I4/mmm	a = 3.209657 c = 7.855298	90	80.9244
WSi ₂	I4/mmm	a = 3.203459 c = 7.821161	90	80.1639

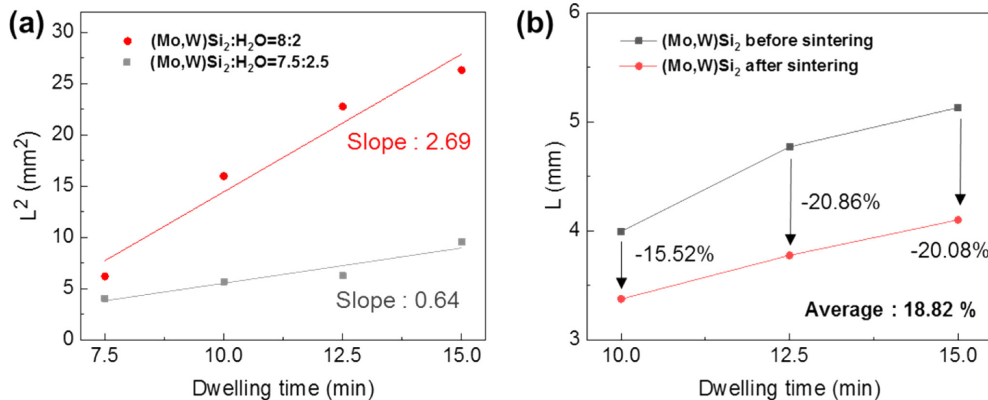
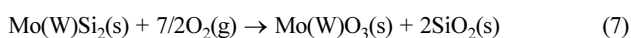


Fig. 3. Thickness change of (Mo, W)Si₂ cylinder by slip casting process on different dwelling time. (a) Thickness square of cylinder with different solid contents of slurry and (b) Thickness of cylinder using (Mo, W)Si₂ contents of 80 wt% slip before/after sintering.

E는 성형체 기공률, S는 비표면적, ρ 는 슬러리 밀도, η 는 슬러리 액체의 점도, c는 슬립에서 고체 부피비, C는 비례상수를 의미한다. 즉 동일한 슬립 및 캐스팅 조건에서는 두께(L), 유지시간(t)를 제외한 나머지 변수들이 고정되기 때문에 L^2 은 t에 비례하는 식 (6)과 같은 관계를 가지게 되고 비례상수 C는 층 형성속도와 관련이 있다. 따라서 Fig. 3(a)처럼 동일한 슬립을 이용한 성형체들은 공통적으로 유지시간이 길어질수록 두께가 두꺼워지는 경향을 나타내며, 두께의 제곱(L^2)은 유지시간(t)에 따라 선형적으로 증가하게 된다. 또한 슬립의 원료 함량이 높을수록 슬립캐스팅 과정에서 수분이 여과될 때, 더 많은 양의 입자가 층을 형성하기 때문에 시간에 따른 층 형성속도가 빨라진다. 실제로 원료가 80 wt%로 함유된 슬러리를 사용한 실린더의 경우 원료함량이 75 wt%일 때보다 층 형성속도가 크게 증가하였으며, 이를 통해 고형분 함량이 성형체 두께 형성에 영향이 크다는 것을 확인할 수 있었다. 종합적으로 발열체 실린더 두께는 유지시간이 길수록 두꺼워지며, 슬립의 원료함량비에 따라 충분히 제어 가능하다는 것을 확인할 수 있다.

제작한 실린더형 성형체는 실제 유도가열 발열체로 적용하기 위해 수소분위기 1550 °C에서 먼저 소결을 진행하고, 대기분위기 1600 °C에서의 최종 소결을 통해 표면에 SiO₂ 보호피막을 형성시켰다. 성형체는 위 열처리 과정을 거치면서 소결에 따른 수축이 발생하기 때문에 두께 수축을 측정을 측정하여 소결 후 발열체의 두께를 예측하고자 하였다. 두께 수축율은 원료함량 80 wt%의 슬러리로 제작한 실린더에서 유지시간 10, 12.5, 15분에 대하여 각각 15.52, 20.86, 20.08%의 수축율을 보였고 평균적으로는 18.82%로 측정되었다. 본 실험에서는 슬립캐스팅을 통한 성형체 두께형성뿐만 아니라 소결에 의한 수축도 고려하여 외경 23.5 mm, 내경 15.4 mm, 두께 4 mm의 서스셉터를 제작하였고 이후 실험을 진행하였다.

MoSi₂계 세라믹은 고온에서 산소를 포함하는 대기분위기에 노출되면 그 표면에서 다음 식 (7)과 같이 산소와의 반응이 자발적으로 일어나게 된다.



위 반응으로 표면에는 (Mo, W)O₃와 SiO₂가 생성되는데, (Mo, W)O₃는 휘발성이 있어 외부로 기화되고 표면에는 SiO₂만 남아 보호피막을 형성한다[15,16]. Fig. 4(a), (b)는 실제로 발열체 표면에 SiO₂층이 형성되었는지 확인하기 위해 SEM과 EDS분석을 진행한 결과이다.

Fig. 4(a)의 SEM 이미지에서 피막은 그 두께가 23.5 μm 로 발열체 표면에 매우 치밀하게 형성되었다. 형성된 피막의 화학적 성분을 측정하기 위해 발열체 표면에 EDS 분석을 진행한 결과, (Mo, W)Si₂의 성분인 Mo와 W는 각각 0.36, 0.80 at%로 거의 존재하지 않았고 대부분 Si와 O가 주성분으로 이루어진 것을 확인하였다. 또한 발열체 표면에 측정된 Si와 O의 성분비가 1:1.89로 SiO₂의 조성비와 매우 흡사한 것으로 보아 표면 위에 치밀하게 형성된 피막은 고온 열처리과정 중에 산소와 반응하여 생성된 SiO₂층임을 알 수 있다. 이처럼 후속 열처리를 통해 표면에 보호용 SiO₂층을 형성시키면 발열체 소재 특성은 변화 없이 유지되고 발열체가 산화분위기에 노출되었을 때 산소와의 접촉을 차단하여 산화에 의한 열화를 방지할 수 있다. 또한 SiO₂층이 외부충격에 의해 파손되더라도 다시 고온의 산화분위기에 노출시키면 SiO₂가 생성되어 파손된 부분을 회복한다.

(Mo, W)Si₂ 발열체의 미세구조는 SiO₂ 층 내부에 존재하기 때문에 발열체 파단면의 SEM 이미지를 활용하여 분석하였다. Fig. 4(c)를 보면 2차상과 Crack 없이 대부분 치밀한 미세구조를 보였고 아르키메데스법으로 측정된 기공률도 0.66%로 매우 낮게 측정되었다. 그러나, 실제로 MoSi₂계 세라믹소재는 소결성이 낮아 연마된 단면에서는 기공이 남아 있는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4(d)의 SEM 이미지를 image J 프로그램을 통해 측정한 기공면적과 전체면적으로 기공률을 계산해본 결과, 평면에서의 기공률이 4.84%로 아르키메데스법의 경우 닫힌 기공(Closed pore)은 무시되어 기공률이 실제보다 낮게 측정되기 때문이다. 따라서 실제 시편은 소결 후에는 기공이 외부와 분리되어 대부분 닫힌 기공으로 형성된 것으로 추정된다. 이러한 내부 기공들은 재료 내부에서 전자 이동을 방해하여 저항이 증가될 수 있으나 저항에 의해 발생한 열을 이용하는 유도가열의 경우 성능을 저하시키지 않는다. 오히려 크랙과 같이 크기가 큰 결함의 경우 국부적인 저항증가로 발열체에 온도구배를 발생시켜 파괴 원인이 된다.

본 실험에서 제작한 서스셉터의 유도가열 성능을 평가하기 위해 가열 코일에 전류 및 출력을 일정하게 인가하였을 때의 서스셉터 표면의 온도변화를 분석하여 최고온도 및 상승속도 등의 유도가열 특성을 평가하였고, 이를 통해 동일 조성의 봉형 상용발열체 제품과 비교하여 평가하였다. 최고온도는 시간이 지속되어도 더 이상 상승되지 않고 유지되는 온도로 측정하였고, 최고상승속도는 온도변화

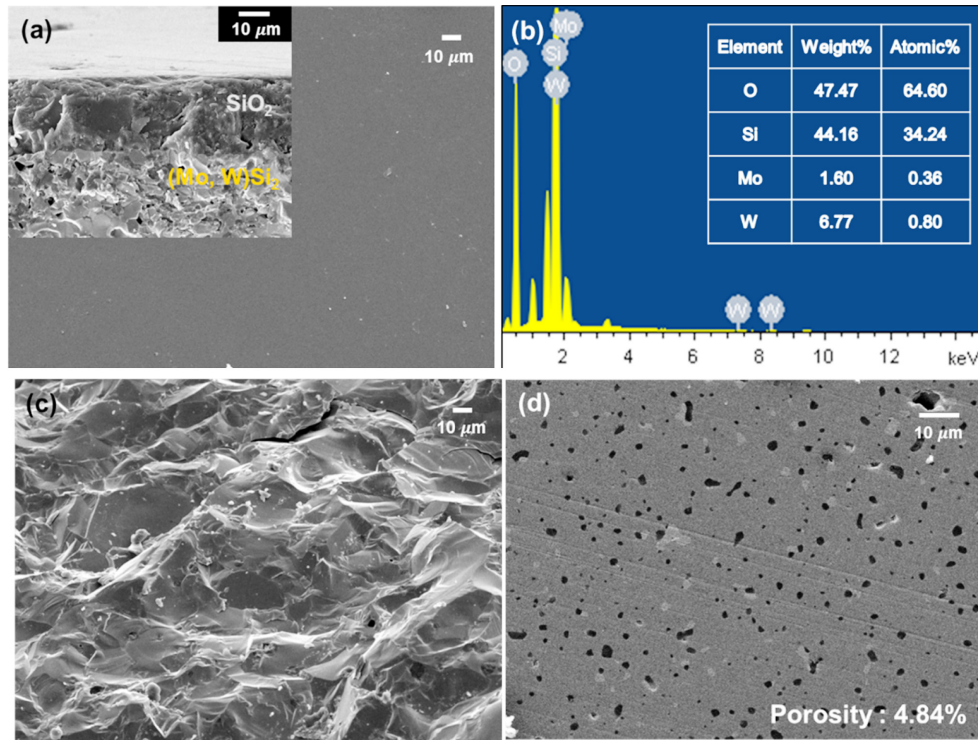


Fig. 4. Microstructures of (Mo, W)Si₂ cylinder susceptor after sintering. (a) The surface and cross section of near surface, (b) EDS analysis at surface, (c) cross section and (d) polished cross section for porosity measurement by using image J software program.

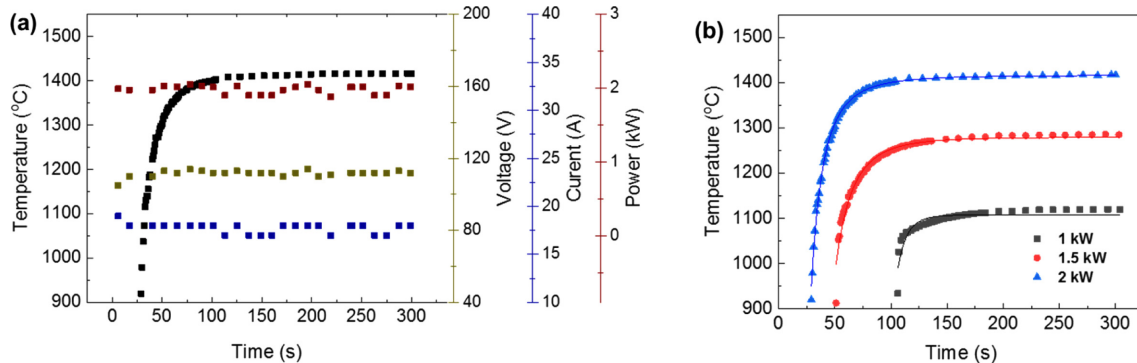


Fig. 5. Induction heating of (Mo, W)Si₂ Φ 12 mm rod. (a) The surface temperatures of (Mo, W)Si₂ rod in 2 kW and (b) various power.

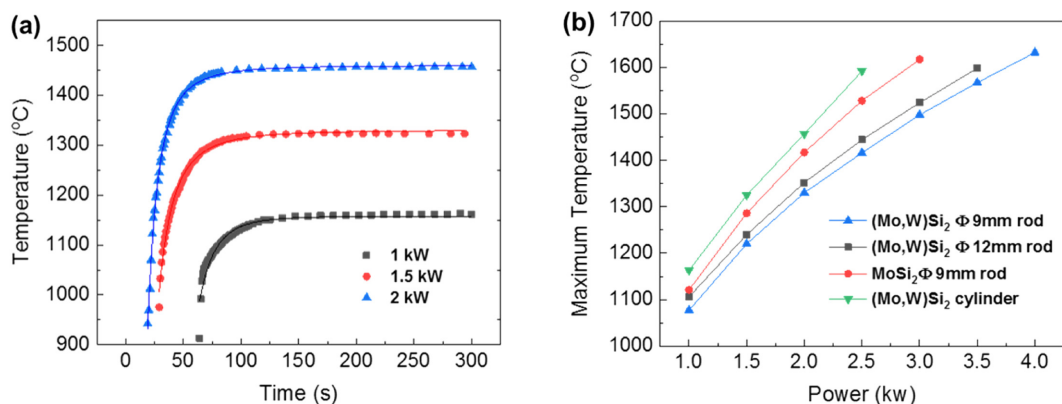


Fig. 6. Induction heating of (Mo, W)Si₂ cylinder and temperature comparison with other rod products. (a) The surface temperatures of (Mo, W)Si₂ cylinder in (b) various power.

곡선의 기울기 중 가장 높은 값으로 측정하였다. 평균승온속도는 상온부터 최고온도에 도달할 때까지의 평균속도로 측정하였다. Fig. 5(a)는

(Mo, W)Si₂ Φ12mm 상용발열체에 고주파 유도가열기로 2kW의 출력을 인가하였을 때의 온도변화를 나타낸 것이다. 출력을인가하

Table 2. Maximum temperature and heating rate of (Mo, W)Si₂ cylinder and rod with various power

Susceptor		Induction Heating		
		1 kW	1.5 kW	2 kW
(Mo, W)Si ₂ Φ12 rod	Maximum rate	15.92 °C/sec	19.18 °C/sec	43.65 °C/sec
	Average rate	6.38 °C/sec	8.91 °C/sec	13.25 °C/sec
	Temperature	1121 °C	1286 °C	1417 °C
(Mo, W)Si ₂ Cylinder	Maximum rate	12.73 °C/sec	26.11 °C/sec	56.07 °C/sec
	Average rate	9.37 °C/sec	15.12 °C/sec	18.64 °C/sec
	Temperature	1162 °C	1324 °C	1457 °C

자 온도는 매우 빠르게 상승하였고 수 분만에 최고온도까지 도달하였으며, 과열을 나타내는 overshoot는 발생하지 않고 일정하게 유지되었다. 이러한 결과는 다른 출력값을 적용하는 실험에서도 공통적으로 나타났으며 출력이 높을수록 많은 에너지가 전달되어 최고온도와 상승속도가 증가하는 경향을 보였다. 이를 통해 유도가열기의 출력을 조절함으로써 온도 및 상승속도를 제어할 수 있을 것으로 기대된다. 동일한 방식으로 슬립캐스팅으로 제작한 (Mo, W)Si₂ 실린더 서스셉터에 출력을 인가한 결과 역시 매우 빠른 속도로 승온되는 것을 확인할 수 있었으며, 과열현상도 발생하지 않았다(Fig. 6(a)). (Mo, W)Si₂ 실린더형 서스셉터의 유도가열 특성은 출력 2 kW에서 최고온도는 1457 °C, 최고 순간 승온속도는 56 °C/s, 평균 승온속도는 약 19 °C/s로 상용 제품인 봉형 MoSi₂계 발열체와 비교했을 때 거의 동일하게 우수한 성능을 가지는 것으로 평가되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 저항 발열체로서 우수한 특성을 가지면서도 고온 내산화특성이 우수한 MoSi₂계 소재를 형상제어가 용이하고 공정비용이 저렴한 슬립캐스팅법으로 유도가열방식에 적합한 실린더형 서스셉터를 제작하고 유도가열 성능을 평가하였다. SHS법으로 합성한 (Mo, W)Si₂계 소재들의 결정 구조는 모두 tetragonal 구조를 가지며, Mo와 W의 비율에 따라 결정격자의 크기가 변화됨을 확인할 수 있었다. 고형분함량과 성형시간을 조절하여 성형체의 두께 제어가 가능하였으며, 소결 및 피막형성 공정을 통하여 서스셉터를 제작할 수 있었다. 시편의 치밀한 미세구조와 피막층은 SEM/EDS 분석을 통하여 확인할 수 있었으며, 유도가열장치에 장착하여 승온 특성을 평가한 결과, 동일 출력에서 최고온도, 최고 순간승온속도, 평균승온속도 등의 가열 성능이 봉형의 상용 MoSi₂계 발열체와 거의 동일하게 우수한 결과를 나타내었다.

감 사

본 논문은 중소벤처기업부에서 지원하는 2018년도 기술개발사업(No. C0637519)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

References

1. Yoo, S. B., Lee, D. Y. and Hyun, D. S., "Characteristic and System Tends of Inverter for Induction Heating," *The Korean Institute of Electrical Engineers*, **50**(2), 21-29(2001).
2. Jung, Y. C., Park B. W. and Jo, K. Y., "Induction Heating Technology of Home Appliances," *The Korean Institute of Electrical Engineering*, **50**(2), 21-29(2001).

3. Park, H. S. and Shin, K. S., "Evolution of Microstructural Change and Transformation in Mechanically Alloyed MoSi₂," *Journal of the Korean Institute of Metals and Materials*, **33**(6), 750-756(1995).
4. Panneerselvam, M., Agrawal, A. and Rao, K. J., "Microwave Sintering of MoSi₂-SiC Composites," *Materials Science and Engineering A*, **356**(1-2), 267-273(2003).
5. Lee, S. J., Jang, Y. S., Kim, I. S., Park, H. C. and Oh, K. D., "Synthesis and Sintering of MoSi₂ by SHS Process," *Journal of the Korean Ceramic Society*, **32**, 1085-1091(1995).
6. Song, I. H., Yun, J. Y. and Kim, H. D., "Fabrication of Porous MoSi₂ Material for Heating Element through Self-propagating High Temperature Synthesis Process," *Journal of the Korean Ceramic Society*, **41**(1), 62(2004).
7. Kim, W. B., Shim, K. J., Jang, D. K. and Suh, C. Y., "Fabrication of MoSi₂ Heating Elements," *Korean Journal of Materials Research*, **7**(9), 763-771(1997).
8. Hampton, J. H. D., Savage, S. B. and Drew, R. A., "Experimental Analysis and Modeling of Slip Casting," *Journal of the American Ceramic Society*, **71**(12), 1040-1045(1988).
9. Zakeri, M., Yazdani-Rad, R., Enayati, M. H. and Rahimpour, M. R., "Synthesis of Nanocrystalline MoSi₂ by Mechanical Alloying," *Journal of Alloys and Compounds*, **403**(1-2), 258-261(2005).
10. Zhang, S. and Munir, Z. A., "Synthesis of Molybdenum Silicides by the Self-propagating Combustion Method," *Journal of Materials Science*, **26**(13), 3685-3688(1991).
11. Merzhanov, A. G., "Self-propagating High-temperature Synthesis: Twenty Years of Search and Findings," *Combustion and Plasma Synthesis of High-Temperature Materials*, 1-53(1990).
12. Tiller, F. M. and Tsai, C. D., "Theory of Filtration of Ceramics: I, Slip Casting," *Journal of the American Ceramic Society*, **69**(12), 882-887(1986).
13. Adcock, D. S. and McDowall, I. C., "The Mechanism of Filter Pressing and Slip Casting," *Journal of the American Ceramic Society*, **40**(10), 355-360(1957).
14. Hoffmann, M. J., Nagel, A., Greil, P. and Petzow, G., "Slip Casting of SiC-Whisker-Reinforced Si₃N₄," *Journal of the American Ceramic Society*, **72**(5), 765-769(1989).
15. Hansson, K., Halvarsson, M., Tang, J. E., Pompe, R., Sundberg, M. and Svensson, J. E., "Oxidation Behaviour of a MoSi₂-based Composite in Different Atmospheres in the Low Temperature Range (400-550 °C)," *Journal of the European Ceramic Society*, **24**(13), 3559-3573(2004).
16. Lee, D. W., Lee, S. H., Kim, Y. N., Lee, S. C., Koo, S. M. and Oh, J. M., "Degradation Mechanism of Mo_xW_{1-x}Si₂ Heating Elements Fabricated by SHS Process," *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **30**(10), 631-636(2017).