

# Study on the microwave heating characteristics of polycarbosilane-based silicon carbide modified by the addition of Zirconium and Titanium precursors

Chang-Hun Hwang, Jong-Ha Beak\* and Se-Yun Kim†

Department of Advanced Materials Science and Engineering, Kyungnam University, Changwon 51767, Korea

\*Department of Mechatronics Engineering, Kyungnam University, Changwon 51767, Korea

(Received January 20, 2025)

(Revised February 14, 2025)

(Accepted March 12, 2025)

**Abstract** The microwave heating effect of SiC (silicon carbide) occurs at a specific frequency of 2.45 GHz. This investigation the microwave heating properties of SiC synthesized from composition modification polycarbosilane. Polycarbosilane powders were prepared by additive Zirconium and Titanium metallic precursors powder, followed by an investigation of their oxidation, curing, and thermal behaviors. The addition of metallic precursors effectively inhibited the formation of the amorphous phase and enhanced the growth rate of  $\beta$ -SiC crystal size. SiC prepared from pure polycarbosilane exhibited the highest temperature of 741°C however, during a 60 minute thermal stability test, the temperature continuously decreased. On the other hand, the samples with metallic precursors displayed relatively lower peak heating temperatures but showed superior long term thermal retention.

**Key words** Silicon carbide, Oxidation curing, Microwave heater, Polycarbosilane (PCS)

## Zirconium 및 Titanium 전구체 첨가를 통한 조성 개질 폴리카보실란 기반 탄화규소의 마이크로파 발열 특성 연구

황창훈, 백종하\*, 김세윤†

경남대학교 신소재공학과, 창원, 51767

\*경남대학교 메카트로닉스공학과, 창원, 51767

(2025년 1월 20일 접수)

(2025년 2월 14일 심사완료)

(2025년 3월 12일 게재확정)

**요약** 탄화규소(SiC)의 마이크로파 발열 현상은 2.45 GHz의 특정 주파수에 의해 유도되며 수백도의 급속 발열이 발생한다. 본 연구에서는 지르코늄 및 티타늄의 분말형 금속 전구체를 첨가하고 블렌딩 공정으로 폴리카보실란 조성을 개질하여 마이크로파 발열 특성을 조사하였다. 조성 개질이 산화 경화 및 열분해 공정에 미치는 영향을 분석하였다. 금속 전구체가 첨가되면 비정질상의 형성이 억제되었고  $\beta$ -탄화규소의 결정성은 향상되었다. 순수 폴리카보실란으로 제조된 탄화규소는 최대 발열 온도가 741°C로 가장 높았으나, 60분간 유지하면 708°C까지 감소하여 장시간 안정성은 낮았다. 반면, 지르코늄 및 티타늄을 첨가하면 발열 최대 온도는 574°C 및 516°C로 낮았으나, 60분의 장시간 발열 유지력은 10°C 내의 온도 변화를 보이며 우수한 것으로 나타났다.

### 1. 서론

폴리카보실란(Polycarbosilane, PCS)은 규소(Si) 기반의 폴리머 사슬과 측쇄 작용기로 구성된 고분자 물질로,

1970년대 Yajima[1,2] 연구팀이 초기 탄화규소 함유 제조에 관한 연구를 발표한 이후 현재까지 탄화규소 함유 제조용 주요 전구체로 사용되고 있다. 탄화규소 함유는 세라믹 복합재의 보강재로 활용되며, 우주항공, 방위산업, 수송, 원자력 발전소의 핵연료 대체 피복재 등 다양한 첨단 산업 분야에서 높은 활용도를 보인다[3-5]. 또한, 폴리카보실란 고분자 원료는 탄화규소 박막, 내산화 보

†Corresponding author  
E-mail: kimseyun@kyungnam.ac.kr

호막, 촉매 지지체 등 다양한 응용 분야에서 활용된다 [6-8]. 최근에는 전자파 흡수 특성과 관련된 연구가 활발히 진행되고 있으며, 5세대 스텔스 전투기용 전자파 흡수 코팅 소재로의 적용에 많은 관심이 집중되고 있다 [9,10].

공업에서 마이크로파를 이용한 공정은 1970년대부터 시작되었으며, 현대에 와서는 금속 공정을 대표하는 소결 공정의 한 분야로 자리잡고 있다[11]. 마이크로파 소결의 장점이자 단점은 마이크로파에 의한 시편 내부발열 현상으로 인한 소결체의 불균질한 밀도이며, 이를 보완하기 위해 마이크로파에 발열하는 탄화규소(SiC)를 보조 발열체인 서셉터(susceptor)로 사용한다[12,13]. 탄화규소는 유전 손실이 큰 물질로써 2.45 GHz의 특정 마이크로파를 조사하게 되면 1분 이내에 최대 1,000°C 이상의 고온으로 금속 발열한다. 마이크로파 조사에 의한 탄화규소 금속 발열은 재료 내의 다이폴의 회전 및 충돌에 의한 쌍극자 손실(Dipolar loss) 및 외부 자기장에 의한 전자 이동 및 충돌에 의한 전도 손실(Conduction loss)에 의한 현상으로 메커니즘이 제안되고 있으나 추가적인 논의가 필요하다[14-17]. 특히, 폴리카보실란을 기반으로 하는 마이크로파 발열 소재 제조 연구는 Joo[18]가 소개한 바 있으며, 섬유 및 블럭을 제조하여 마이크로파 발열 특성을 조사하였으며 시편의 형상에 따라 발열 온도 및 열 발생 거동의 차이에 대하여 보고한 바 있다. 또한, Khishigbayar[19]는 탄화규소 섬유 시트를 제조하여 마이크로파 발열 특성을 조사하고 소개한 바 있다.

폴리카보실란 원료는 고성능 탄화규소 섬유 제조를 목적으로 여러 분야에서 다양한 방법으로 연구되고 있다. 금속 전구체 첨가, 고분자의 분자량 제어 및 초기 원료 합성 공정 개선 등이 대표적이다. Ishikawa[20]는 알루미늄(Alumina)를 소결 첨가제로 첨가하여 탄화규소의 소결 온도를 낮춰 비교적 낮은 온도에서 3세대급 탄화규소 제조 공정을 발표한 바 있다. Song[21]은 티타늄(Titanium) 전구체를 첨가하여 미세구조에 TiC를 비정질에 미세하게 분산시키는 방법으로 섬유의 인장강도 향상 연구를 발표한 바 있다. Yu[22]는 티타늄(Titanium)을 첨가하여 방사 및 열분해 온도를 감소 및 공기중 열분해 공정으로 섬유를 제조하여 TiO<sub>2</sub> 나노입자가 존재하는 섬유를 제조하였다. Su[23]는 폴리카보실란에 폴리프로필렌(Polypropylene)을 첨가하여 용융방사 효율증가 연구를 발표한 바 있다.

금속 전구체가 첨가되면 폴리카보실란의 조성이 변화하고, 이에 따라 폴리카보실란의 열적 거동 및 열분해 거동이 달라지며, 이는 최종적으로 제조되는 탄화규소의 물성 변화에 영향을 미친다. 본 논문에서는 금속 전구체를 첨가하여 폴리카보실란의 조성을 개질하고, 산화 경화 및 열분해 공정에 미치는 영향을 조사하고 제조한 탄

화규소의 마이크로파 발열 성능 시험을 1분 이내 급속 승온 성능 및 60분의 발열 안정성 성능에 미치는 영향을 조사하였다.

## 2. 실험 방법

폴리카보실란(Polycarbosilane, PCS, Mn: ~1,320 g/mol, 대호아이엔티, 한국)을 톨루엔(Toluene, 108-88-3, Daejung, 한국)에 1:1의 무게비로 용해한 후 1시간 동안 초음파 처리하여 폴리카보실란 용액을 제조하였다. 준비된 용액에 지르코늄 아세틸아세토네이트(Zirconium Acetylacetonate, Zr(acac)<sub>4</sub>, Sigma-Aldrich, USA)와 티타늄 아세틸아세토네이트(Titanium Acetylacetonate, Ti(acac)<sub>4</sub>, Sigma-Aldrich, USA)를 금속 전구체로 5 wt% 첨가하였다. 금속 전구체를 추가한 후 1시간 동안 초음파 처리를 하여 블렌딩하였다. 이후, 제조된 용액은 100°C 오븐에서 약 20일 동안 건조하여 조성 개질된 폴리카보실란 분말을 제조하였으며, 각각 ‘PZr’(지르코늄 첨가)과 ‘PTi’(티타늄 첨가)로 명명하였다. 장시간의 건조 공정이 조성변화에 미치는 영향을 조사하기 위해 금속 전구체를 첨가하지 않은 폴리카보실란 용액을 동일 공정으로 건조하여 분말을 비교군으로 제조하였고 ‘T-PCS’로 명명하였다.

조성 개질 폴리카보실란 분말은 알루미늄 유발을 이용하여 약 10분간 분쇄하였다. 분쇄된 분말은 160°C의 오븐에서 1시간, 2시간, 4시간, 6시간, 8시간, 10시간, 12시간 동안 산화 경화 처리하였고, 경화 시간에 따른 시편의 무게 변화를 측정하였다. 마이크로파 발열 시험용 시편은 8시간 산화 경화한 분말을 35 mm 프레스 몰드를 사용하여 5톤의 압력으로 3분 동안 가압하여 디스크형 성형체를 제조하였다. 아르곤 분위기하에 1,300°C에서 3시간 동안 열분해 처리하여 탄화규소 디스크 시편을 제조하였다.

마이크로파 발열 성능 시험은 마이크로파 발생장치((주)대호아이엔티, 한국)를 이용하여 2.45 GHz(전력 2.28 kW)의 마이크로파를 60 분간 시편에 조사하였다. 열화상카메라(PI1M, OPTRIS, 독일)를 이용하여 실시간으로 시편의 발열 온도를 기록하였다. 기록된 프로파일은 60 초(1초 스텝) 및 60 분(1분 스텝)으로 분류하여 승온 속도 및 발열 안정성을 조사하였다.

조성 개질 폴리카보실란 분말의 산화 경화 및 열분해 공정에서 발생하는 열적 거동을 TGA(Thermo plus EVO2/SDT, Rigaku Corporation, Japna)를 이용하여 조사하였다. 공기 분위기에서 350°C까지 분당 5°C의 가열 조건으로 시료의 산화 경화 열적 거동을 조사하였다. 열분해 공정에서 시편의 열적 거동을 조사하기 위해 아르곤 분위기에서 1,300°C까지 분당 5°C의 가열 조건으로 시험하였

다. WD-XRF(ZSZ Primus IV/WD, Rigaku Corporation, Japan)을 이용하여 초기 분말 및 경화 시간에 따른 조성 분석을 수행하였다. XRD(SmartLab SE/40KV/50mA, Rigaku Corporation, Japan)를 이용하여 1,300°C에서 3시간 열분해 된 시편 및 마이크로파 발열 후의 결정구조를 분석하였다. 마이크로파 발열 시험 전/후의 미세구조를 분석하기 위해 디스크 시편의 중간지점을 기준으로 파단하였고, 파단면에 대하여 주사전자현미경(SEM, S4200, Hitachi, Japan)을 이용하여 미세구조를 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

폴리카보실란을 톨루엔에 용해한 후 금속 전구체를 첨가하여 장시간 건조 공정을 거쳐 제조한 조성 개질 폴리카보실란 분말의 조성 분석 결과를 Table 1에 나타내었다. 순수 폴리카보실란의 조성은 산소 3.66 wt%, 탄소 31.1 wt%, 규소 65.1 wt%였다. 지르코늄 및 티타늄 금속 전구체를 첨가한 경우, 산소 함량은 각각 6.78 wt%, 7.39 wt%였다. 금속 전구체를 첨가하지 않고 동일한 공정으로 제조한 T-PCS 분말의 조성 분석 결과에서 산소가 8.05 wt% 검출되었다. 이는 장시간 건조 공정 중에 유입된 산소가 주요 원인으로, 용액 상태에서는 산소의 유입

Table 1  
WD-XRF compositional analysis of the powder used in this study

	C	Si	O	Additive
PCS	31.10	65.10	3.66	-
T-PCS	30.00	61.80	8.05	-
PZr	30.50	61.20	6.78	1.41
PTi	29.70	62.00	7.39	0.75

(wt%)

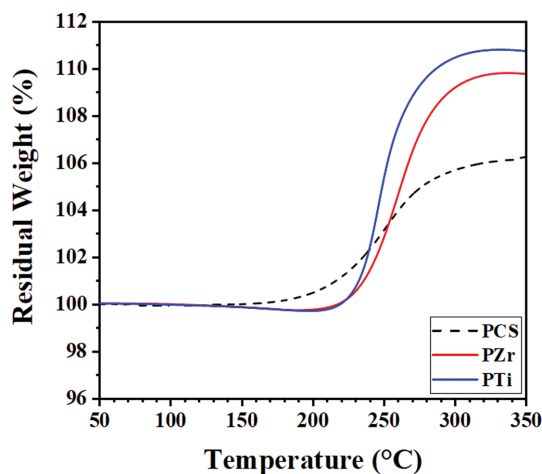


Fig. 1. Thermal behavior of polycarbosilane powders with and without metal precursor addition under oxidation curing conditions (TGA).

이 상대적으로 용이하기 때문에 100°C의 온도에서도 가교결합이 형성된 것으로 판단된다.

산화 경화에서 조성 개질된 폴리카보실란의 열적 거동을 조사하기 위해 TGA 분석을 수행하였고, 그 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 톨루엔에 용해하지 않은 순수 폴리카보실란은 160°C부터 350°C까지 총 6.2 wt%의 무게가 증가하였다. 반면, 티타늄 및 지르코늄을 첨가하면 140°C에서 210°C까지 약 0.5 wt%의 무게 감소가 발생하였고, 210°C부터 350°C까지 유지하면 10.7 wt%와 9.7 wt%로 무게는 다시 증가하였다. 순수 폴리카보실란의 산화 경화 공정 중 무게 변화 시점은 160°C였고, 이를 기준 조건으로 설계하여 조성 개질 분말에 대한 산화 경화 공정을 수행하였다.

산화 경화는 1시간에서 최대 12시간까지 수행되었으며, 설계된 시간 조건에 따라 시편을 회수하여 무게를 측정한 결과는 Fig. 2에 나타내었다. 톨루엔에 용해하지 않은 순수 폴리카보실란은 8시간 동안 4.3 wt%의 무게 증가가 발생하였으며, 최대 12시간 경화 후에도 더 이상 무게 증가는 발생하지 않았다. 지르코늄 및 티타늄 전구체를 첨가한 분말은 1시간 경화 시점에서 각각 0.48 wt% 및 0.26 wt%의 무게 감소가 발생하였으며, 이후 최대 12시간 경화 후에는 각각 0.45 wt% 및 0.4 wt%의 무게 증가가 발생하였다.

폴리카보실란의 산화 경화 공정은 대기 중에서 150~200°C의 온도 조건에서 진행된다. 충분한 온도와 산소 공급이 이루어지는 환경에서 Si-H, Si-Si, C-H 결합은 유입된 산소와의 반응에 의해 Si-O-C 및 Si-O-Si 결합으로 재결합하여 가교결합을 형성한다[24-27]. 이로 인해 시편의 무게가 증가하고 색상 변화가 관찰된다. 금속 전구체를 첨가한 분말에서 초기 무게 감소 현상은 건조 공정 중 제거되지 않은 잔류 톨루엔 및 전구체 잔여물의

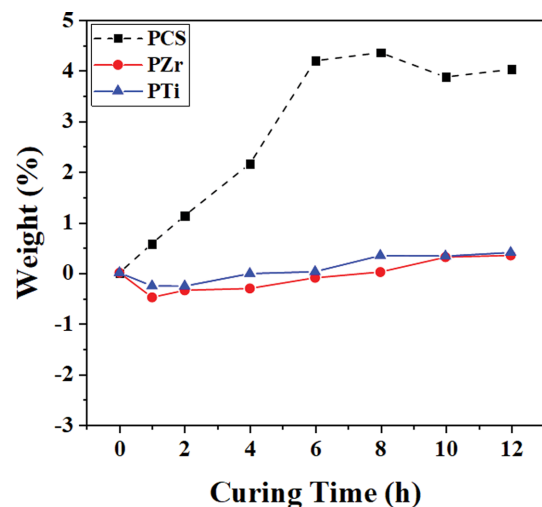


Fig. 2. Weight increase according to oxidation curing time at 160°C.

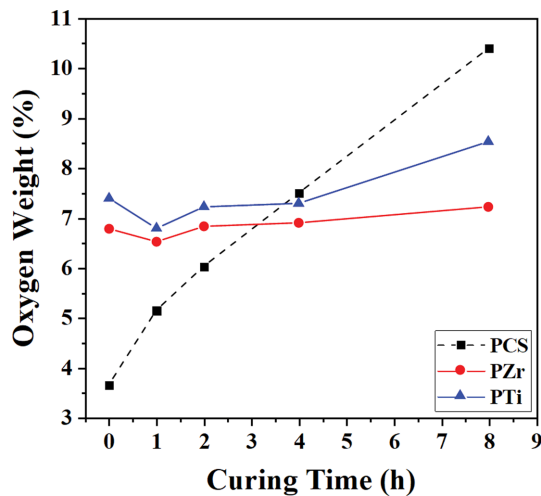


Fig. 3. Oxygen content according to oxidation curing time at 160°C.

증발에 기인한 것으로 추정된다. 또한, 경화 공정을 12 시간 동안 수행했음에도 약 0.5 wt%의 작은 무게 증가가 나타난 원인은 100°C의 건조 공정에서 이미 가교결합이 형성되었기 때문으로 판단된다.

산화 경화 처리된 분말의 산소 함량을 조사하기 위해 WD-XRF를 이용하여 분말의 조성 분석을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 톨루엔에 용해하지 않은 순수 폴리카보실란의 산소 함량은 산화 경화 전에는 3.66 wt%였으며, 8시간 유지하면 6.38 wt% 증가하여 총 10.4 wt%였다. 반면, 지르코늄 및 티타늄 전구체를 첨가한 분말의 산소 함량은 산화 경화 전에는 6.78 wt% 및 7.39 wt%였으며, 8시간 동안 산화 경화하면 각각 0.46 wt% 및 1.14 wt% 증가하여 총 7.22 wt% 및 8.53 wt%였다.

조성 개질 폴리카보실란 분말의 산소 함량이 높은 원인으로 장시간 건조 공정에서 산화 경화가 발생하고 이로 인해 가교결합이 형성되었다고 해석된다. 이러한 가교결합은 세라믹의 수율을 증가시킨다. 산화 경화 처리를 하지 않은 분말을 아르곤 분위기에서 분당 5°C의 가열 속도로 1,300°C까지의 조건으로 TGA분석을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 순수 폴리카보실란은 700°C까지 29%의 무게 감소가 발생하였다. 반면, 지르코늄 및 티타늄 전구체를 첨가한 분말은 700°C까지 총 21%의 무게가 감소하였으며 700°C 이후 무게 감소는 비교적 안정화하는 것으로 확인되었다.

일반적으로 열분해 공정에서 300°C 이하의 저온 영역의 무게 감소는 탈수소화( $H_2$ ) 및 메탄( $CH_4$ )으로의 기화 현상에 의한 것이며[28], 약 400°C부터는 저분자량 화합물의 방출 및 유기물(organic groups)의 분해에 의한 것으로 알려져 있다[29-31]. 700°C부터는 세라믹화 반응이 시작되는 온도 구간으로 탄화규소가 본격적으로 형성됨

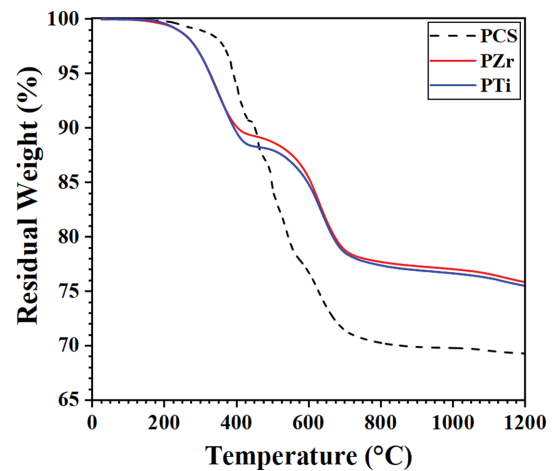


Fig. 4. TGA analysis of powders performed up to 1,300°C in argon atmosphere.

과 동시에 잔류물의 기화로 인해 미량의 무게 감소가 추가로 발생한다[32,33]. 열분해 공정 전에 가교결합을 형성시켜 화학 구조의 안정성을 확보하면 세라믹 수율은 증가한다. 그러나 가교결합을 충분히 형성하지 못한 경우 열분해 과정에서 더 많은 탈가스 반응이 발생하여 구조적 안정성이 급격히 낮아지며, 가교결합이 과하면 산소 함량이 증가하므로 열분해 공정에서 비정질을 형성한다. 일반적으로 비-경화 폴리카보실란의 세라믹화 수율은 약 65% 수준으로 보고되며, 경화 처리를 하면 약 80% 이상의 수율을 달성할 수 있는 것으로 알려져 있다[34]. 따라서, Fig. 4의 TGA 분석 결과 세라믹화 수율이 증가하고, Fig. 2 및 Fig. 3에서 장시간의 산화 경화 공정에도 무게 및 산소 증가가 미미한 원인은 100°C의 건조 과정에서 발생한 가교결합에 의한 것으로 해석함이 타당하다.

아르곤 분위기 중 1,300°C에서 3시간 열분해하여 제조한 마이크로파 발열 시편의 파단면 미세구조를 분석한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 열분해 전 성형체의 두께는 약 2 mm였으며 열분해 후 두께는 평균 1.5 mm로 약 25% 수축하였다. 모든 시편의 파괴 거동은 입내 파괴에 의한 취성파괴 거동을 보였다. Figure 6(a, b)는 톨루엔에 용해하지 않은 순수 폴리카보실란으로 제조된 시편으로 파단면은 입자크기가 작아 거친 미세구조를 보이고 있었다. 반면, 금속 전구체를 첨가한 시편은 다수의 기공이 관찰되었으나, 입자크기가 거대하여 미세구조의 높낮이는 완만하였다.

마이크로파 발열 시험 전과 후의 결정구조 분석을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 순수 폴리카보실란 시편은 약 20~25°의 범위에서 비정질 패턴이 검출되었다. 반면, 금속 전구체를 첨가한 시편에서는 비정질 패턴은 검출되지 않았으며,  $\beta$ -탄화규소 결정만 검출되었다. 해당 분석 결과를 기반으로 셰러 방정식(Scherrer's

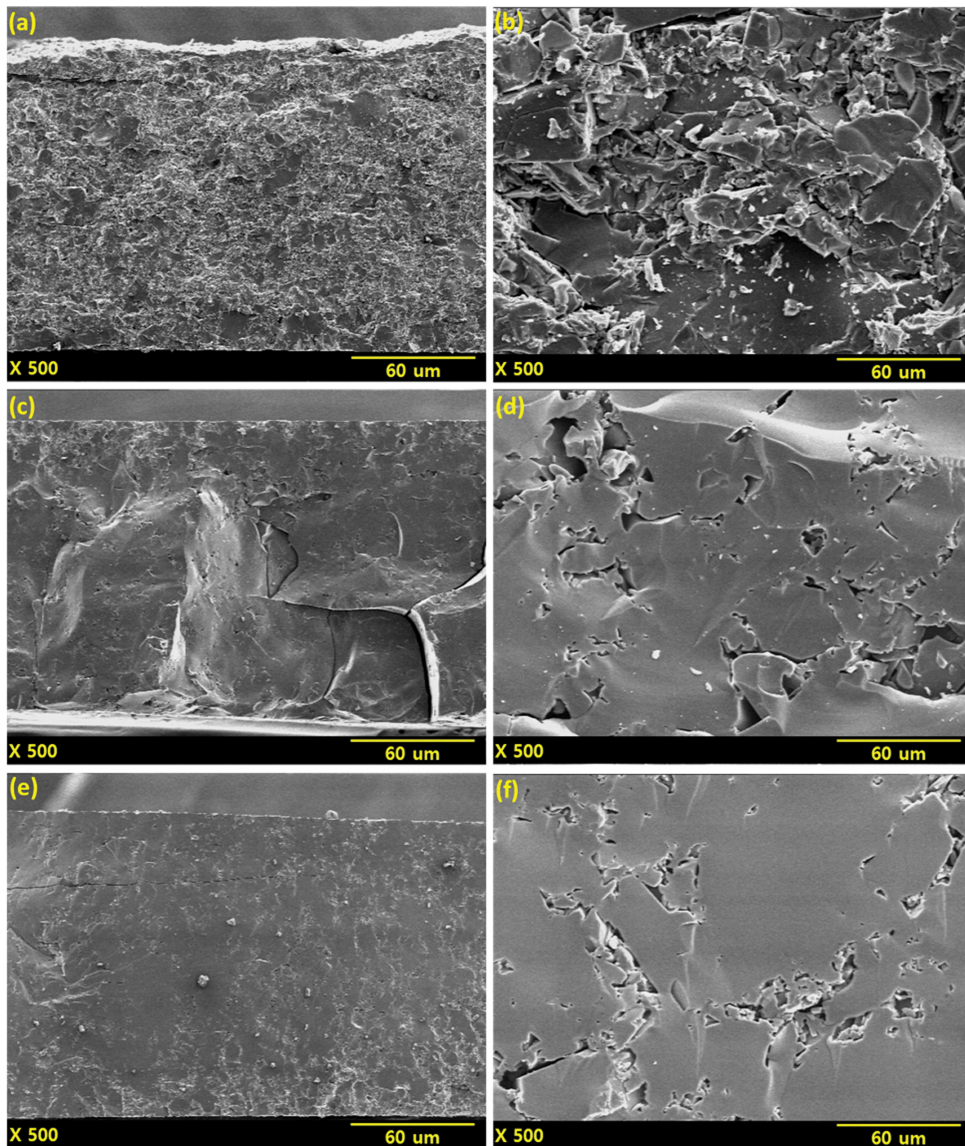


Fig. 5. Fracture surface microstructure of samples fabricated by pyrolysis at 1,300°C for 3 hours, (a), (b) pure polycarbosilane, (c), (d) PTi, (e), (f) PZr.

equation)을 이용하여  $\beta$ -탄화규소의 결정 크기를 도출한 결과 순수 폴리카보실란은 1.46 nm였고, PTi 및 PZr은 각각 2.12 nm 및 2.15 nm였으며 전구체 첨가된 시편의 결정크기가 더 큰 것으로 나타났다. 이는 금속 전구체 첨가에 따라 탄화규소 결정 형성 및 성장 속도가 증가하는 것으로 볼 수 있다. 마이크로파 발열 시험 전후로는 결정구조의 변화는 발견되지 않았으며, 이는 마이크로파 발열 온도가 비교적 낮았기 때문으로 판단된다.

폴리카보실란의 산소 함량에 따라서 이산화규소( $\text{SiO}_2$ ) 및 산탄화규소( $\text{SiOC}$ )와 같은 비정질과 탄화규소가 혼재되어 존재한다. 이러한 비정질 상은 탄화규소 결정형성을 방해할 수 있고, 비정질 상은 기계적 물성 감소 유발한다. 금속 전구체가 첨가되면 산화 경화를 추가로 수행하더라도 산소의 유입이 제한적이고 열분해 공정에서 형

성되는 비정질 상을 최소화 할 수 있어  $\beta$ -탄화규소의 결정 성장 속도를 증가시키는 효과를 가지는 것으로 고찰된다.

열분해하여 제조한 탄화규소 시편의 마이크로파 발열 성능시험을 수행하고 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Figure 7(a)는 60초 동안의 금속 발열 성능시험 결과를 나타낸 것으로 톨루엔에 용해하지 않은 순수 폴리카보실란은 703°C까지 발열하여 발열 성능이 가장 우수한 것으로 나타났다. 지르코늄과 티타늄을 첨가한 시편의 발열 온도는 각각 574°C 및 514°C까지 승온하여 금속 전구체가 첨가되면 마이크로파 발열 최대 온도는 감소하는 것으로 나타났다. 탄화규소의 마이크로파 발열은 주로 쌍극자 손실과 전도 손실에 의해 발생하는 것으로 제안되며, 이는 탄화규소의 결정 비율이 마이크로파 발열 특

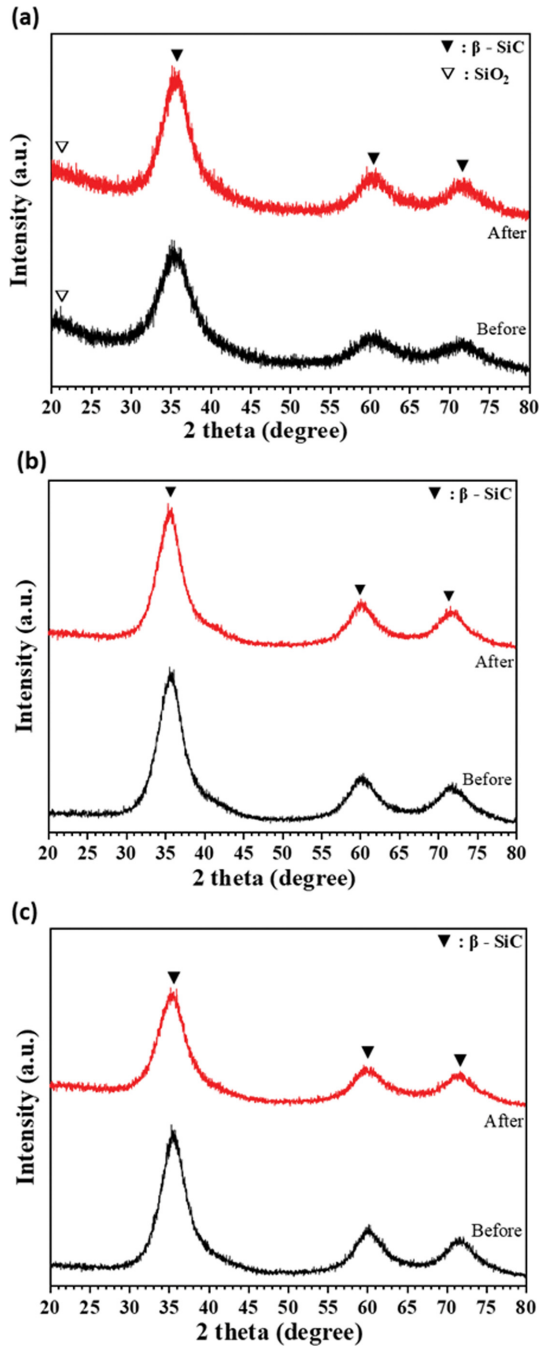


Fig. 6. Crystal structure analysis of before microwave heating test specimens: (a) pure polycarbosilane, (b) PTi, (c) PZr.

성에 영향을 미칠 수 있음을 시사한다. 금속 전구체를 첨가하면 입자크기 및 결정 크기가 증가하며, 이로 인해 마이크로파 발열 특성이 변화하는 것으로 해석된다. 한편, 탄화규소는 높은 유전 손실을 갖는 물질로서 마이크로파 흡수에 따른 발열량이 매우 크지만, 산화물 계열 물질의 경우 유전 손실이 상대적으로 낮아 산화물의 함량이 최종 발열 온도에 영향을 미친 것으로 판단된다 [35-37].

Figure 7(b)는 60분 동안의 마이크로파 발열 안정성

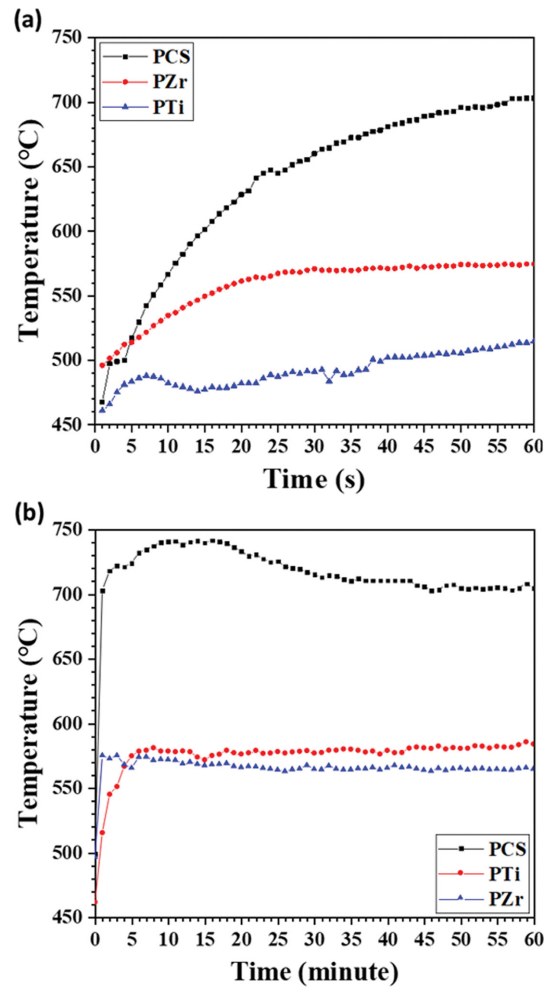


Fig. 7. Microwave heating test (a) 60 s heating rate test, (b) 60 min thermal stability test.

시험 결과를 보여준다. 톨루엔에 용해하지 않은 순수 폴리카보실란은 최대 741°C까지 발열되었으나, 60분 경과 시점에는 704°C에 도달하여 37°C의 온도가 감소하였다. 반면, 지르코늄을 첨가한 시편은 최대 574°C까지 발열하였고, 60분 경과 시점에는 564°C로 약간의 온도 감소가 발생하였으며, 티타늄을 첨가한 시편은 최대 574°C까지 발열하였고, 60분 경과 시점에는 584°C를 나타내며 소폭의 온도 상승을 보였다. 지르코늄 및 티타늄을 첨가한 시편의 경우 최대 발열 온도는 낮았으나 60분의 장시간 일정한 온도를 유지하여, 발열 안정성은 우수한 것으로 나타났다.

#### 4. 결론

지르코늄 및 티타늄 금속 전구체를 첨가하고 블렌딩 공정하여 폴리카보실란 원료의 조성을 개질하고 마이크로파 발열 특성을 평가하였다. 초기 순수 폴리카보실란

원료의 산소 함량은 3.66 wt%였고, 금속 전구체를 첨가하여 개질된 원료의 산소 함량은 6~7 wt%였다. 금속 전구체를 첨가하면 산화 경화 공정에서 우선 산화 경화가 진행되어 가교결합을 형성하며, 산화 경화 없이도 약 75% 이상의 세라믹 수율을 보였다. 금속 전구체를 첨가한 원료를 1,300°C의 비교적 낮은 온도에서 열분해하면 비정질 상은 검출되지 않았고,  $\beta$ -탄화규소의 결정성은 향상되었다. 마이크로파 발열 성능을 평가한 결과, 톨루엔에 용해하지 않은 순수 폴리카보실란은 60초 이내에 703°C까지 급속히 발열하였으며, 최대 발열 온도는 741°C에 달했다. 반면, 금속 전구체를 첨가하면 최대 발열 온도는 감소하였지만, 60분의 장시간 발열 안정성은 우수하였다. 금속 전구체가 첨가되면 비정질 형성을 억제하고 마이크로파 발열 성능의 안정성이 향상되었다. 향후 금속 전구체의 함량 및 열분해 온도 등 공정 조건을 다양화하여 추가 연구를 진행하면 발열 성능을 선택적으로 제어할 수 있는 마이크로파 발열 소재 개발이 가능할 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 논문은 2024년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지차체-대학 협력기반 지역혁신사업의 결과입니다(2021RIS-003).

## References

- [ 1 ] S. Yajima, J. Hayashi and M. M. Otori, "Continuous silicon carbide fiber of high tensile strength", *Chemistry Letters* 4 (1975) 931.
- [ 2 ] S. Yajima, K. Okamura and J. Hayashi, "Structural analysis in continuous silicon carbide fiber of high tensile strength", *Chemistry Letters* 4 (1975) 1209.
- [ 3 ] J.H. Eom, Y.W. Kim and S. Raju, "Processing and properties of macroporous silicon carbide ceramics: A review", *J. Asian. Ceram. Soc.* 1 (2013) 220.
- [ 4 ] Y. Wang, S. Dong, X. Li, C. Hong and X. Zhang, "Synthesis, properties, and multifarious applications of SiC nanoparticles: A review", *Ceram. Int.* 48 (2022) 8882.
- [ 5 ] R. He, N. Zhou, K. Zhang, X. Zhang, L. Zhang, W. Wang and D. Fang, "Progress and challenges towards additive manufacturing of SiC ceramic", *J. Adv. Ceram.* 10 (2012) 637.
- [ 6 ] J. Binner, M. Porter, B. Baker, J. Zou, V. Venkatachalam, V.R. Diaz and T.S.R.C. Murthy, "Selection, processing, properties and applications of ultra-high temperature ceramic matrix composites, UHTCMCs—a review", *International Materials Reviews* 65 (2020) 389.
- [ 7 ] R.K. Gupta, R. Mishra, K. Mukhopadhyay, R.K. Tiwari, A. Ranjan and A.K. Saxena, "A new technique for coating silicon carbide onto carbon nanotubes using a polycarbosilane precursor", *Silicon* 1 (2009) 125.
- [ 8 ] J. Mukherjee, S. Ghosh, A. Ghosh, A. Ranjan, A.K. Saxena and R. Banerjee, "Enhanced nano-mechanical and wear properties of polycarbosilane-derived SiC coating on silicon", *Appl. Surf. Sci.* 325 (2015) 39.
- [ 9 ] N. Eswara Prasad and R.J.H. Wanhill, "Aerospace materials and material technologies: Vol. 1: Aerospace materials", (Springer, Boston, 2017) 371.
- [ 10 ] C. Sauder, "Ceramic matrix composites: nuclear applications", *Ceramic matrix composites: materials, modeling and technology*, (Wiley, New York, 2014) 609.
- [ 11 ] E.A. Olevisky and D.V. Dudina, "Field-assisted sintering", *Science and Applications* (2018) 645.
- [ 12 ] M. Bhattacharya and T. Basak, "A review on the susceptor assisted microwave processing of materials", *Energy* 97 (2016) 306.
- [ 13 ] A. Borrell M.D. Salvador, "Advanced ceramic materials sintered by microwave technology", *Sintering Technology-Method and Application* 10 (2018) 3.
- [ 14 ] Y.J. Yoo and K.Y. Cho, "Microwave-assisted heating behavior of amorphous SiC fibers derived from polycarbosilane", *Mater. Res. Express.* 8 (2021) 035603.
- [ 15 ] C. Ke, T. Liu, Y. Zhang and Q. Xiong, "Energy absorption performances of silicon carbide particles during microwave heating process", *Chem. Eng. Process.* 172 (2022) 108796.
- [ 16 ] Z. Shen, J. Chen, B. Li, G. Li, Z. Zhang and X. Hou, "Recent progress in SiC nanowires as electromagnetic microwaves absorbing materials", *J. Alloy. Compd.* 815 (2020) 15238.
- [ 17 ] H. Sugawara, K. Kashimura, M. Hayashi, S. Ishihara, T. Mitani and N. Shinohara, "Behavior of microwave-heated silicon carbide particles at frequencies of 2.0~13.5 GHz", *Appl. Phys. Lett.* 105 (2014) 034103.
- [ 18 ] Y.J. Joo and K.Y. Cho, "Microwave-assisted heating behavior of amorphous SiC fibers derived from polycarbosilane", *Mater. Res. Express.* 8 (2021) 035603.
- [ 19 ] K.E. Khishigbayar, Y.J. Joo and K.Y. Cho, "Microwave-assisted heating of electrospun SiC fiber mats", *J. Kor. Ceram. Soc.* 54 (2017) 499.
- [ 20 ] T. Ishikawa, Y. Kohtoku, K. Kumagawa, T. Yamamura and T. Nagasawa, "High-strength alkali-resistant sintered SiC fibre stable to 2,200°C", *Nature* 391 (1998) 773.
- [ 21 ] Y.C. Song, Y. Hasegawa, S.J. Yang and M. Sato, "Ceramic fibres from polymer precursor containing Si-O-Ti bonds Part 1 The formation mechanism and the pyrolysis of the polymer", *J. mater. Sci.* 23 (1988) 1911.
- [ 22 ] Y. Yu, Y. Guo, X. Cheng and Y. Zhang, "Preparation of TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> composite fiber by thermal decomposition of polycarbosilane-tetrabutyl titanate hybrid precursor", *J. Mater. Chem.* 19 (2009) 5637.
- [ 23 ] Z. Su, M. Tang, Z. Wang, L. Zhang and L. Chen, "Processing of silicon carbide fibers from polycarbosilane with polypropylene as the additive", *J. Ameri. Ceram. Soc.* 93(2010) 679.
- [ 24 ] X. Zheng and G. Yanzi, "Polyaluminocarbosilane as precursor for aluminum-containing SiC fiber from oxygen-free sources", *Ceramics International.* 42 (2016) 10439.
- [ 25 ] Y.X. Yu, Y.D. Guo, X.A. Cheng and Y. Zhang, "Pyrolysis behavior of titanium-containing polycarbosilane in air", *J. Inorg. Organomet. Polym. Mater.* 20 (2010) 714.

- [26] Y.E. Song, Y.J. Joo, D.G. Shin, K.Y. Cho and D.J. Lee, "Thermal and rheological characterizations of polycarbosilane precursor by solvent treatment", *Compos Res.* 35 (2022) 23.
- [27] Y. Haeagawa and K. Okamura, "Synthesis of continuous silicon carbide fibre Part 3 pyrolysis process of polycarbosilane and structure of the products", *J. Mater. Sci.* 18 (1983) 3622.
- [28] N.S.C.K. Yive, R.J.P. Corriu, D. Leclercq, P.H. Mutin and A. Vioux, "Silicon carbonitride from polymeric precursors: Thermal cross-linking and pyrolysis of oligosilazane model compounds", *Chem. Mater.* 4 (1992) 141.
- [29] R. Usukawa, H. Oda and T. Ishikawa, "Conversion process of amorphous Si-Al-C-O fiber into nearly stoichiometric SiC polycrystalline fiber", *J. Korean Ceram. Soc.* 53 (2016) 610.
- [30] T. Ishikawa and H. Oda, "Structural control aiming for high-performance SiC polycrystalline fiber", *J. Korean Ceram. Soc.* 53 (2016) 615.
- [31] H. Li, L. Zhang, L. Cheng, Y. Wang, Z. Yu, M. Huang, H. Tu and H. Xia, "Polymer-ceramic conversion of a highly branched liquid polycarbosilane for SiC-based ceramics", *J. Mater. Sci.* 43 (2008) 2806.
- [32] F.I. Hfurwitz, P. Heimann, S.C. Farmer and D.M. Hembree, "Characterization of the pyrolytic conversion of polysilsesquioxanes to silicon oxycarbides", *J. Mater. Sci.* 28 (1993) 6622.
- [33] R. Riedel, G. Mera, R. Hauser and A. Klonczynski, "Silicon based polymer derived ceramics: Synthesis properties and applications a review", *J. Ceram. Soc. Jap.* 114 (2006) 425.
- [34] X. Li, Z. Xu, L. Chen, L. Hong and Y. Li, "Thermal oxidation curing polycarbosilane fibers by alternating air and vacuum process", *RSC Advances* 10 (2020) 26052.
- [35] C.H. Hwang, J.H. Beak, S.I. Kim and S.Y. Kim, "Investigation of microwave heating properties of pyrolysis temperature condition at oxygen curing polycarbosilane powder", *Crystals* 12 (2024) 1080.
- [36] A. Borrell and M.D. Salvador, "Advanced ceramic materials sintered by microwave technology", *Sintering Technology-Method and Application* 10 (2018) 3.
- [37] M.G. Burzo, P.L. Komarov and P.E. Raad, "Thermal transport properties of gold-covered thin-film silicon dioxide", *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies* 26 (2003) 80.