

SiC 세라믹복합소재 특징과 국방 활용 방안

송동현*, 심지수, 성용훈
국방기술진흥연구소

Features of SiC ceramic composites and its applications for defense

Dong-Hyun Song*, Jee-Soo Sim, Yong-Hoon Sung
Korea Research Institute for defense Technology planning and advancement(KRIT)

요약 SiC ceramic composite는 대표적인 세라믹 복합재(CMC: Ceramic matrix composites)이다. 본 논문은 SiC 세라믹 복합재의 우수한 특징을 이용한 국방 신소재 적용을 제고하기 위하여 작성하였다. 세라믹 복합재는 세라믹 재료의 단점인 취성과 낮은 파괴인성을 극복하기 위하여 세라믹 매트릭스에 탄화물, 산화물 등의 강화재를 복합화하여 단점을 극복한 극한환경 소재이다. 세라믹복합재는 보강된 섬유 종류와 매트릭스 종류에 따라 구분할 수 있으며(C_f/SiC , SiC_f/SiC 등) 각각 다른 특성을 보유하고 있다. 세라믹복합재 제작은 일반적으로 보강재(탄소섬유, 탄화규소섬유 등) 선정, 프리폼 성형, 계면층 형성, 치밀화, 그리고 표면코팅 공정의 순서로 제작된다. 그중 C_f/SiC 와 SiC_f/SiC 에 대해 중점적으로 살펴보았다. C_f/SiC 는 고강도, 높은 열전도도, 낮은 열팽창 계수 등이 특징이고 불활성 분위기에서 높은 화학적 안정성을 지닌다. SiC_f/SiC 또한 C_f/SiC 와 유사한 특성을 가지지만, 내산화성이 우수한 재료로서 열충격에도 강한 편이다. 이러한 특징들로 인해 $C_f(SiC_f)/SiC$ 복합소재는 극초음속 유도무기체계의 침투부 및 연소실 부품, 우주비행체 열방호 소재, 항공기 첨단엔진 부품 등에 활용 가능한 극한환경용 구조소재이고, 앞으로 무기체계가 발전함에 따라 기술기획 및 연구개발의 대상으로서 그 수요가 더욱 증가할 것으로 예상된다.

Abstract SiC ceramic composites are a representative example of ceramic matrix composites (CMCs), and this study was undertaken to evaluate their defense applications. Ceramic composites are produced by incorporating reinforcing carbides and oxides into ceramic matrices to overcome the brittleness and low fracture resistance of traditional ceramics. They can be categorized based on the type of reinforcing fibers and the matrix used. The production of ceramic composites involves selecting reinforcements, preform shaping, interfacial layer formation, densification, and surface coating. This paper focuses on C_f/SiC and SiC_f/SiC . C_f/SiC is characterized by high strength, high thermal conductivity, a low thermal expansion coefficient, and chemical stability in inert environments. SiC_f/SiC is distinguished from C_f/SiC by its excellent oxidation and thermal shock resistance. Due to these properties, CMCs are used in extreme environments, such as in the nose cones and combustion chamber components of hypersonic guided missile systems, thermal protective materials for spacecraft, and advanced engine components for aircraft. As weapon systems evolve, the demand for these materials will undoubtedly increase, which makes them essential components of technological planning, research, and development programs.

Keywords : CMC, C_f/SiC , SiC_f/SiC , TPS, High-Temperature, Defense

*Corresponding Author : Dong-Hyun Song(KRIT)

email: sdh3024@gmail.com

Received May 7, 2024

Accepted June 7, 2024

Revised June 5, 2024

Published June 30, 2024

1. 서론

현재 우크라이나-러시아 전쟁이 장기화되는 가운데 최근 이스라엘-이란 전쟁으로 촉발된 중동지역의 불안감이 전 세계로 확산되는 등 전쟁의 불확실성에 직면하고 있다. 이런 때에 북한 등 주변국의 잠재적 위협에 대한 효과적인 대응을 위해서는 국방력을 강화하는 것이고, 이는 다양한 임무를 수행할 수 있는 드론이나 적의 방공망을 무력화시킬 극초음속 미사일, 우주 무기체계, 스텔스 무인기 체계 등 게임체인저로 작용할 첨단 무기를 개발하는 것이다.

첨단 무기체계 개발 및 고성능화가 진행됨에 따라 기존 재료의 한계를 극복하기 위한 첨단소재의 개발도 요구되는 실정이다. 국방부는 국가안보 유지, 미래전장 선도 및 국가 과학기술 융합의 관점에서 국방목표 달성을 위해 Table 1과 같이 30개 세부기술로 구성된 국방전략 기술 10대 분야를 선정하고 전략적 투자 및 육성을 진행

Table 1. Defense strategic technology

Fields	Detailed technologies	Fields	Detailed technologies
Artificial Intelligence	Intelligent battlefield awareness/decision	Space	Space-based surveillance reconnaissance
	Intelligent integrated command/decision		SBAS(Space-based augmentation system)
	Smart force support		Space domain awareness
	Defense AI platform		Spacecraft
Manned/unmanned Teaming	Manned/unmanned cooperation	Advanced materials	High-performance semiconductor/electronic materials
	Autonomous mission performance		Structural materials for extreme environment
	Next-generation warrior platform		Special functional materials
Cyber/network	Hyper-connected network	Sensor/electromagnetic warfare	Next-generation sensor
	Cyber warfare response		Sensor fusion
	Metaverse training		Electromagnetic warfare response
Propulsion	Advanced engine	WMD response	Missile defense
	Hypersonic propulsion		High-powered precision strike
	Underwater propulsion		Intelligent CRB defense
Energy	Directed energy	Quantum	Quantum cryptography communication
	Next-generation power source		Quantum sensor

하고 있다[1]. 첨단소재는 10대 분야 중 하나로서 미래전장 신개념 무기체계의 핵심·원천소재 개발을 위한 고성능 반도체/전자소재, 극한환경 구조소재, 특수기능 소재로 구성되어 있다.

국방기술진흥연구소에서는 매년 위 국방전략기술의 국내 기술수준을 조사하고 있는데, 최고 선진국 대비 첨단소재 분야의 국내 기술수준은 아래 Table 2과 같다[2].

Table 2. The results of the technical level evaluation

Classification	Defense		Civil	
	Technical level (%)	Differential (Year)	Technical level (%)	Differential (Year)
High-performance semiconductor/electronic materials	82.8	4.0	90.6	2.4
Structural materials for extreme environment	77.3	3.8	76.2	4.2
Special functional materials	80.2	4.0	77.3	4.4

위와 같이 첨단소재 분야에서도 극한환경 구조소재는 국방/민간분야 모두 선진국 대비 기술 수준이 매우 낮음을 알 수 있다. 하지만 극한환경 구조소재 기술은 기술이전 및 수입이 제한되는 경우가 많아 국내 개발이 요구되는 소재 분야이다.

국방 분야, 특히 극초음속, 우주 및 첨단 항공무기체계에 활용을 위해서는 핵심 구조의 열보호 및 고온 내구성인 우수한 내열 소재 기술이 필요하다. 초내열 합금으로 주로 사용되는 니켈기 초내열 합금은 900 °C 미만의 내열온도를 가진다. 반면, 세라믹 복합소재는 1,300 °C 이상의 높은 내열온도를 지니며 금속 대비 밀도가 1/3 수준으로 터빈엔진 고온 부품이나, 극초음속 엔진 연소기 등에 적용하는 사례가 증가하고 있다[3,4]. 세라믹 복합소재는 고내열 부품의 열방호, 경량, 내산화를 위한 핵심 소재에 적용할 수 있기 때문에 기술 개발이 필수적이다[5,6].

본 논문에서는 기존의 고내열 금속재료를 대체할 수 있는 세라믹 복합재료 특성과 극초음속 비행체 등 전장의 게임체인저에 활용 가능한 극한환경 구조소재 중 SiC 세라믹 복합재에 대하여 소개하고, 대표적으로 C₁/SiC와 SiC/SiC의 특성 비교를 통한 국방 분야의 활용 방안을 제시하고자 한다.

2. 세라믹 복합소재

비금속 무기질 고체로 표현되는 세라믹 재료는 일반적으로 취성이며 전기전도도와 열전도도가 매우 낮은 특징을 가진다. 취성은 세라믹스 활용에 제약이 되므로 이러한 단점을 보완하기 위해 설계된 재료가 세라믹 복합재료이다. 복합재는 두 가지 또는 그 이상의 재료나 상을 함께 사용하여 복합화한 것으로 강성, 강도, 무게, 고온 성능과 같은 특성의 특별한 조합을 얻기 위하여 만들어진다[7]. Fig. 2와 같이 복합재의 분류는 매트릭스의 종류와 강화재의 특성, 기하학적 구조 및 크기에 따라 분류할 수 있다[8].

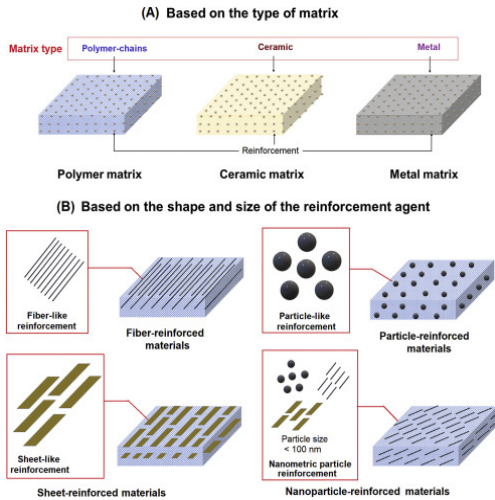


Fig. 1. Illustration of composites according to matrix type (A) and type of reinforcement agent (B) [8]

복합재료를 만드는 과정에서 중요한 것은 매트릭스 성분이 강화재 사이로 균일하게 들어가도록 하는 것이고, 이렇게 함으로써 강도, 내구성 등에서 더 나은 특성을 얻을 수 있다. 세라믹 복합재에 사용되는 섬유는 고온에 잘 견디는 성분이 사용되고 있어, 장시간의 고온 및 산화분위기에서 안정적이고, 크리프 저항성이 좋아야 한다. 이러한 요구조건들은 응용되는 형태에 따라 다르지만, 유기질 섬유나 폴리머 섬유는 500 °C 이하에서 물성이 저하되고, 일반적인 유리섬유는 700 °C 이하에서 녹거나 연화되기 때문에 세라믹 복합소재로는 부적합하다. 세라믹 복합소재에 사용되는 강화재(섬유)의 종류에 따라 Fig. 3과 같이 분류할 수 있다[9].

세라믹 복합재료는 구성 형태에 따라 다양한 종류로 구분할 수 있으나, 본 논문에서는 세라믹 매트릭스와 탄

소계 섬유상으로 구성된 복합재를 세라믹 복합재로 칭하기로 한다.

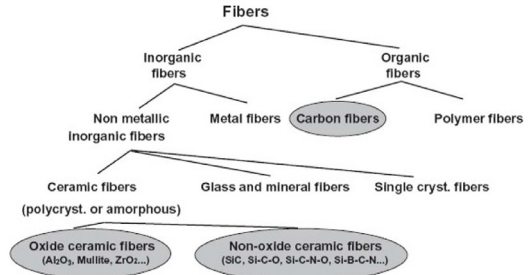


Fig. 2. Classification of different fiber types[10]

세라믹복합재 물성은 보강된 섬유와 매트릭스의 종류와 프리폼의 형태, 섬유의 부피비율, 제조공정의 방법, 최종 밀도 등에 의해서 큰 차이를 나타낸다. 이러한 성질은 복합재료의 일반적인 특성으로 구조재로 적용하는 것에 큰 장점이자 단점으로 작용한다. 물성을 설계 값에 맞게 디자인하여 제작할 수 있다는 것은 큰 장점이지만, 단일 소재와 다르게 제조되는 공정에 따른 물성의 변화(작업 별 물성변화)가 존재하므로 재료의 신뢰도를 높이기 위한 공정연구와 평가가 수행되어야 한다. 이러한 특성은 세라믹 복합재의 성능을 설계하는 것이 가능하지만, 유일한 물성으로 규정할 수가 없다는 의미이며, 세라믹 복합재 종류와 특징에 대해 소개하고자 한다.

세라믹 복합재는 보강된 섬유의 종류와 매트릭스의 종류에 따라서 구분할 수 있다. 비산화물계 섬유는 혹독한 환경에서 사용이 가능하므로 개발을 위해 많은 연구가 진행되고 있지만 현재 상용화된 비산화물계 섬유는 SiC 섬유가 유일하다.

산화물계 복합재료의 경우 Al₂O₃/Al₂O₃ 복합재를 활용한 항공기 엔진 부품을 연구 개발한 사례는 있지만, 상용화가 이뤄진 산화물계 복합재는 거의 전무한 상황이다.

비산화물 복합재료 중에 적용성이 높은 내열 복합재는 주로 고온 소재로 이루어져 있다. 이런 경우 보강된 세라믹 섬유와 세라믹 매트릭스가 다른 종류의 세라믹스 재료로 구성되어 있는데, 상호 열팽창계수의 차이가 크면 경계면에 과도한 응력이 걸리게 되어 결함이 발생하고 결국 소재의 고온 물성이 현격하게 저하된다. 그러므로 산화물계 섬유는 산화물계 매트릭스를, 탄화물계 섬유는 탄화물계 매트릭스를 활용하여 복합재를 제조하는 것이 일반적이다.

세라믹 복합재료는 세라믹의 단점인 취성과 낮은 파괴

인성 등을 극복한 소재이다. Fig. 4에서 세라믹 복합재가 파괴메커니즘과 파괴인성이 증가하는 원리를 설명하고 있다. 초기 매트릭스의 균열 이후 섬유와 매트릭스 간에 디본딩(Debonding)과 미끄러짐, 섬유의 빠짐과 같은 메커니즘이 복합재에서 균열이 전파되는 동안 에너지를 흡수하여 균열의 틈에서 응력이 감소되고 균열이 전파되는 것을 막는다[11,12].

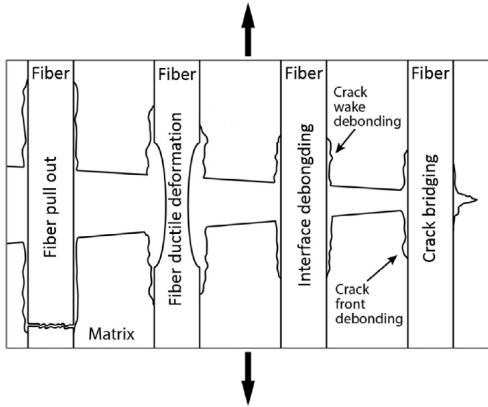


Fig. 3. Energy dissipation mechanisms typically considered in W_i/W and other fibre-reinforced composites [12]

세라믹 복합재는 앞서 설명한 파괴인성을 향상시키고 동시에 세라믹의 특징인 경량성과 내열성이 우수하고 강도가 높은 특징을 가지고 있기 때문에 다양한 연구가 진행되고 있다. 특히 고내열 및 내식이 필요한 분야에서 그 수요가 높는데, 대표적으로 우주비행체의 재진입체, 액체 추력기 노즐 및 고온 가스터빈 부품에 활용되고 있다.

본 논문에서는 세라믹복합재 중 SiC를 매트릭스로 하는 C_f/SiC, SiC_f/SiC에 관해서 특징과 활용성을 알아볼 것이다.

3. SiC 세라믹 복합소재의 특징과 활용

3.1 C_f/SiC 복합소재

Fig. 4는 다양한 금속재료와 세라믹 복합재료(C_f/C, C_f/SiC, SiC_f/SiC)의 온도 성능을 나타낸 그래프이다. 그림에서 볼 수 있듯이 C_f/C 복합재는 2,000℃ 이상의 초고온에서 사용이 가능한 유일한 소재이다.

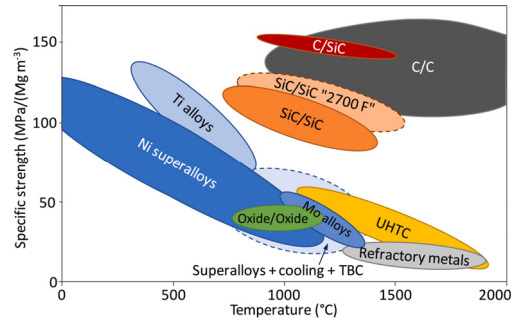


Fig. 4. Specific strength as a function of the temperature for various metals and CMCs[13]

C_f/C 복합재는 카본 혹은 흑연 재료에 탄소섬유(혹은 흑연섬유)가 보강된 재료로서 우수한 물성의 탄소섬유 보강으로 인하여 기존의 흑연 재료에 비하여 높은 강도와 인성을 보유하며, 그로 인한 높은 열충격 저항성을 나타낸다. 또한, 흑연 재료와 마찬가지로 윤활특성과 마모 특성을 보유하고 있어서 항공기용 브레이크 디스크 소재로 활용되고 있다. 그러나 800℃ 이상의 온도에서는 산소와 반응하여 CO₂ 기체로 변하는 치명적인 단점으로 인하여 산소가 존재하는 대기 중에서 고온-장시간 사용은 어렵다.

C_f/SiC 복합재는 C_f/C 복합재의 산화 단점을 최소화하기 위해 내산화성이 우수한 SiC를 매트릭스로 적용한 소재이다. 2,000℃ 이상까지도 사용이 가능하며, 1,000℃ 부근에서는 수 시간에서 수 백 시간까지 사용이 가능하다.

3.2 SiC_f/SiC 복합소재

SiC_f/SiC 복합재는 항공우주 재료로서 광범위하게 활용된다. 특히 고강도 SiC 섬유에 의해 강화된 SiC_f/SiC 세라믹 복합재는 항공우주용 엔진의 고온부를 위한 혁신적인 재료이며, 최근들어 기술의 상당한 발전이 있었다. SiC_f/SiC 복합재의 낮은 밀도, 고온 강도 및 내산화성의 특징으로 인해 초내열합금에 비해 더 높은 온도에서 부품을 사용할 수 있고, 냉각 또한 덜 필요하게 된다. 이는 곧 부품의 성능 향상과 중량 감소로 이어지게 되므로 항공우주 분야에서 매력적인 소재이다[14].

최근 SiC_f/SiC 복합재는 1,316℃의 온도 성능을 갖는 것으로 확인되었고, 이는 초내열 합금 대비 200℃를 초과하는 온도에 대한 성능 개선이 이루어진 것이다. 또한 외부 코팅을 하게 되면 더 높은 온도에서 활용 가능하다.

3.3 C_f(SiC)/SiC 연구개발 현황

미국, 독일, 일본 등 기술 선진국에서 C(SiC)/SiC 복합소재 관련 연구를 진행 중이다[15]. 독일 항공우주센터(DLR)에서 SHEFEX(Sharp Edge Flight Experiment) 프로그램으로 우주선이 지구 대기권으로 재진입할 때 발생하는 열, 압력 등의 외부 환경으로부터 기체를 보호할 수 있는 열보호시스템 연구개발 및 시험하였다. 첨부부에 C_f/SiC 복합소재의 노즈팁을 사용하여 공기역학적으로 우수한 날카로운 형상을 구현하면서도 코팅을 통해 약 2000 °C까지 안정적임을 확인하여, 열보호시스템(TPS: Thermal Protection Systems) 구조 소재로서도 우수한 소재임을 입증하였다[16].

국내 국방 분야의 C_f(SiC)/SiC 복합소재 분야의 연구개발 현황을 국방기술기획서를 통해 확인하였고, ‘극초음속 비행체용 고내열 및 전자파제어 복합소재 기술개발(‘22~‘27)’, ‘고속비행체 핵심부품 적용을 위한 고내열 코팅 및 복합재 제조기술(‘23~‘28)’, ‘고결정성 탄화규소 섬유(3세대) 및 SiC_f/SiC세라믹 복합재 기술 개발(‘26~‘31)’이 진행되거나 진행 예정에 있다.

3.4 C_f/SiC 복합소재 활용

C_f/SiC 복합소재는 높은 비강도, 낮은 열팽창계수 등으로 높은 열안정성과 내식, 내환경성을 가진 복합재이다. 또한, 고온용 C_f/C 복합재와 비교하여 산화 특성을 견디는 내산화성이 우수한 재료이다. SiC 세라믹스 재료 특성에서 기대할 수 있듯이 C_f/C 복합재보다 높은 경도를 갖고 있다. 이러한 특성들은 섬유의 분율, 공정방법, 최종 제품 밀도 등에 의해서 설계될 수 있다.

C_f/SiC 복합재의 경우 높은 내열특성으로 유도무기의 핵심부품으로 활용이 가능하며 현재 DACS(Divert and Attitude Control Systems) 부품에 적용하고 있고, 극초음속 유도무기체계와 같은 초고속 비행체에도 적용 가능하다.

초고속 비행체의 연소관은 고온 환경 뿐만 아니라, 국부적인 부분에서 충격파로 인해 매우 높은 공력 하중, 압력 변화 및 진동에 노출된다. 따라서 고온 강도가 약한 기존 금속 계열 소재를 적용하기에는 한계점이 있다.

또한, 초고속 비행체의 비행속도 및 항속거리를 증가시키기 위해서는 연소실의 온도가 높을수록 유리하기 때문에 내열-내산화 특성이 우수하면서 높은 비강도를 가지는 소재의 적용이 유리하다. Fig. 4와 같이 C_f/SiC 복합소재는 조건을 만족하는 재료이며, 산화저항성과 더불어

열충격저항성 또한 우수한 재료이므로 고온구조재로서 초고속 비행체의 연소실 부품 및 노즐에 적용가능하다[17].

3.5 SiC_f/SiC 복합소재 활용

SiC_f/SiC 복합소재 역시 극초음속 비행체의 열방호 구조재료로서 활용 가능하다. C_f/SiC와 차이는 더욱 높은 온도에서 내산화성이 뛰어나다는 점이다[18].

또한 가스터빈 엔진의 고압터빈 부에 사용 가능하여 첨단 항공 엔진 개발에 활용 가능하다. 초내열 합금 대비 밀도는 1/3 수준으로 경량 소재이며, 원심 하중을 적게 받아 원심력에 유리하다. 그렇기 때문에 높은 온도에서도 강도를 유지할 수 있다.

이와 같이 고온 및 초고온 환경에서 많은 장점을 가지고 있음에도 불구하고, 금속 재료에 비해 비교적 낮은 강인성, 신뢰성 및 기계적 물성의 변동이 큰 특성으로 인해 활용이 제한되어 왔다. 그러나 세라믹 재료의 특성, 파괴메커니즘에 대한 연구와 다양한 환경조건에서의 시뮬레이션, 모델링 및 테스트를 통해 극복할 수 있고, 세라믹 복합재의 수명 예측, 복합재료 설계 기술의 발전에 기여할 수 있다.

4. 결론

본 논문은 국방 특수 소재에 대한 관심이 지속적으로 이어지고 있다는 점과 무기체계 발전 동향을 보았을 때 첨단소재의 연구개발 수요가 있다는 점을 고려하여 SiC 세라믹복합소재의 이해와 연구개발 필요성을 정리할 목적으로 작성하였다.

국방전략기술 분류에 따른 극한환경 구조소재로 대표되는 SiC 세라믹복합소재의 특성, 분류, 제조기술에 대하여 알아보았고, 연구개발 필요성 및 국방 활용성을 제시하였다.

SiC 세라믹복합소재는 세라믹의 단점인 낮은 취성과 파괴인성을 극복하고, 금속재료에 비해 내열, 고강도 및 내산화성과 고온 또는 초고온 성능이 뛰어난 재료이다. 이러한 특성들로 인해 고온 구조재료로서 활용성이 큰 복합소재이다. 또한, 섬유와 매트릭스의 종류, 프리폼 형태, 제조 공정에 따라 다른 물성을 갖는 재료로 원하는 물성치를 설계하여 활용할 수 있다. 이러한 SiC 세라믹 복합소재의 특성으로 인해 더 높은 온도와 효율성을 요구하는 우주발사체, 유도무기체계의 첨부부, 리딩엣지

및 연소기 부품과 첨단 항공엔진의 부품으로서 활용도가 높다.

그러나 상대적으로 낮은 강인성과 세라믹 재료의 낮은 파괴인성, 가공 방법의 기술적 한계, 미세구조의 복잡성 및 가변성, 변동성이 큰 기계적 특성은 여전히 세라믹 부품의 설계, 검증과 수명 예측에 어려운 요소로 남아있고, 앞으로 이러한 한계를 극복할 수 있는 연구개발이 요구된다.

향후 본 논문에서 정리한 SiC 세라믹복합소재 개발현황과 발전추세, 무기체계 활용성과 한계점에 관한 내용이 내열복합재의 국내 기술개발을 위한 기술기획 및 연구개발의 참고자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] DARPA&KRIT, '23~'37 Defense Technology Planning Book, 335, KRIT, 2023, pp.63-68, 103-144.
- [2] KRIT, Survey of Defense Strategy and Technology Level, KRIT, 465, 2023, pp.229-270.
- [3] S.H. Kim, et al. "Development of fiber-reinforced ceramic matrix composites for high-temperature components of gas turbines and evaluation of high-temperature mechanical properties." *KSEF, KSFM, Korea*, 2022, pp. 257-258.
- [4] Shim, G., et al. "Influence of pyrolysis and melt infiltration temperatures on the mechanical properties of SiCf/SiC composites," *Ceramics International*, Vol. 48, No. 2, pp. 1532~1541, 2022.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.09.231>
- [5] Wang, X., Gao, X., Zhang, Z., Cheng, L., Ma, H., & Yang, W. (2021). Advances in modifications and high-temperature applications of silicon carbide ceramic matrix composites in aerospace: A focused review. *Journal of the European Ceramic Society*, 41, 9, pp. 4671-4688.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.03.051>
- [6] Glass, D., "Ceramic matrix composite (CMC) thermal protection systems (TPS) and hot structures for hypersonic vehicles," 2008, pp. 2682.
- [7] Askeland, Donald R., et al. The science and engineering of materials, p. 268, Springer Dordrecht. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-009-1842-9>
- [8] Palencia, Manuel, et al. Eco-Friendly Functional Polymers: An Approach from Application-Targeted Green Chemistry. p. 448, Elsevier, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.1016/C2019-0-01709-8>
- [9] T.H. Lee, "Review of the Research and Development of Ceramic Matrix Composite Materials and Future Works." *Composites Research* 27, 4, 2014 pp. 123-129.
DOI: <https://doi.org/10.7234/composres.2014.27.4.123>
- [10] Krenkel, Walter, ed. Ceramic matrix composites: fiber reinforced ceramics and their applications. John Wiley & Sons, 2008. pp. 2.
- [11] Kim, J., "Investigation of failure mechanisms in ceramic composites as potential railway brake disc materials," *Materials*, Vol. 13, No. 22, 2020, pp. 5141. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13225141>
- [12] Y. Mao, et al. "Influence of the interface strength on the mechanical properties of discontinuous tungsten fiber-reinforced tungsten composites produced by field assisted sintering technology," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 107, 2018, pp. 342-353.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.01.022>
- [13] Padture N. P., "Advanced structural ceramics in aerospace propulsion." *Nature materials* 15, 8, 2016, pp. 804-809.
- [14] D. Zhu, Aerospace ceramic materials: thermal, environmental barrier coatings and SiC/SiC ceramic matrix composites for turbine engine applications. Glenn Research Center, U.nited States.
- [15] Boyle, R. J., Gnanaselvam, P., Parikh, A. H., Ameri, A. A., Bons, J. P., and Nagpal, V. K., 2021, "Design of stress constrained SiC/SiC ceramic matrix composite turbine blades," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 143, No. 5, pp. 051013. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4049776>
- [16] H. Boehrk, H. Weihs, H. Elsäßer, "Hot structure flight data of a faceted atmospheric reentry thermal protection system," *International Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 2019, 2019, pp. 1-16.
DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/9754739>
- [17] J. C. Bae, et al. "Densification of C f/SiC Composite Using PIP with Adding of Cyclohexene." *Composites Research*, 26, 5, 2013, pp. 322-327.
DOI: <https://doi.org/10.7234/composres.2013.26.5.322>
- [18] B. Yoon, et al. "Study on the SiC Ceramic Composites Reinforced by Carbon fiber and Silicon Carbide Fiber for Thermal Protection Structure of Hypersonic Vehicle", *KSPE 2018-1016, KSPE, Korea*

송 동 현(Dong-Hyun Song)

[정회원]



- 2018년 2월 : 부산대학교 항공우주공학과 (학사)
- 2018년 12월 ~ 현재 : 국방기술진흥연구소 연구원

<관심분야>

기술기획, 국방소재

심 지 수(Jee-Soo Sim)

[정회원]



- 2020년 2월 : 부산대학교 재료공학과 (석사)
- 2020년 6월 ~ 2021년 5월 : 한국생산기술연구원 연구원
- 2021년 11월 ~ 현재 : 국방기술진흥연구소 연구원

<관심분야>

기술기획, 국방소재

성 용 훈(Yong-Hoon Sung)

[정회원]



- 2020년 2월 : 경상대학교 화학공학과 (학사)
- 2020년 9월 ~ 현재 : 국방기술진흥연구소 연구원

<관심분야>

국방기술, 재료공학, 화학공학