

세라믹 코팅된 3D 금속 메타구조를 활용한 고온용 전자기파 흡수체 설계

Design of a High-Temperature Electromagnetic Wave Absorber Utilizing Ceramic-Coated 3D Metal Metamaterial Structure

초 록

본 연구는 고온 환경에서 전자기파 흡수성을 극대화하기 위해 SRR 메타물질 구조를 설계하고, YSZ 세라믹을 1.7 mm 두께로 코팅하여 내열성과 내구성을 향상시킨 고온 전자기파 흡수체를 설계하였다. CST Studio Suite와 유전 알고리즘을 사용하여, X-band (8~12 GHz) 대역에서 최적의 흡수성을 확보하기 위해 YSZ 코팅을 고려한 SSR 매개 변수를 제어하며 설계를 최적화하였다. 고온 환경에서도 YSZ 성능을 유지할 수 있도록 다른 첨가물을 사용하지 않고 순수 YSZ만 사용하였다. 메타물질 구조는 금속 3D 프린팅 방식인 DED을 사용하여 제작함으로써 분말 손실을 최소화하는 경제성을 확보하였다. 플라즈마 고온 전자기파 측정 장비를 통해 1000 °C 이상의 극한 환경에서 전자기파 흡수성을 확인하였고, X-band 대역에서 1 GHz 대역폭에 걸쳐 -10 dB 이하의 반사손실을 확인하였다.

Key Words : High-Temperature Stealth(고온 스텔스), Electromagnetic Wave Absorption(전자기파 흡수), Metal Metamaterial Structure(금속 메타물질 구조)

1. Introduction

전자기파 흡수체는 스텔스 기술의 핵심 요소로, 항공기와 군사 시스템의 생존 가능성을 높이는 데 중요한 역할을 한다. 이 기술은 적의 레이더 탐지에 대응하여 항공기, 드론, 군사 장비의 위치를 은폐하는 데 필수적이며, 특히 스텔스 항공기에서 활용된다. 기존의 전자기파 흡수체는 주로 상온 환경을 고려한 설계가 되어 사용되었으나, 극초음속 비행체 및 차세대 항공우주 시스템에서는 고온 환경에서도 우수한 전자기파 흡수성을 유지하는 기술이 요구되고 있어 1,000 °C 이상의 극한 환경에서도 안정적인 전자기파 흡수성을 유지하는 기술의 필요성이 대두되고 있다(1). 하지만 고온에서도 성능을 유지할 수 있는 재료 선택, 고온 환경에서의 흡수 성능 저하 등 주요 도전 과제이다. 이러한 이유로 고온 스텔스 관련 내용은 극비 사항으로 관리되고 있다. 이에 따라, 최근 연구에서는 전자기파 흡수성이 없는 세라믹 기반 소재와 전자기 손실 소재를 첨가하여 고온 환경에서도 안정적인 전자기파 흡수성을 유지할 수 있는 소재와 구조를 개발하기 위한 다양한 시도가 이루어졌다(2).

YSZ(Yttria Stabilized Zirconia) 세라믹 소재는 우수한 내열성과 내구성을 가지며, 1,000°C 이상의 고온 환경에서도 변형 없이 사용할 수 있다는 장점이 있어(3) 항공기 엔진의 터빈 블레이드나 배기구와 같은 극한 환경에서 사용되는 검증된 재료이며(4), 메타물질은 기존의 물질을 이용해 주기 구조를 설계함으로써 특정 조건에서 자연에 존재하지 않는 특성을 나타내도록 설계 및 제작된 물질을 말한다. 특히 SRR(Split Ring Resonator) 메타구조는 공진 회로를 기반으로 전자기파 흡수성에 중요한 역할을 하고 있다. 본 연구에서는 YSZ 세라믹과 SRR 금속 메타물질을 결합한 전자기파 흡수구조를 설계하여 고온 환경에서의 전자기파 흡수성을 극대화하는 것을 목표로 하였다.

본 연구에서 제안한 세라믹 코팅된 3D 금속 메타물질 구조는 기존의 전자기파 흡수체와 비교하여 내구성과 성능 면에서 우수하며, 궁극적인 목표는 고온 환경에서 안정적인 전자기파 흡수성을 제공할 수 있는 전자기파 흡수체를 개발하는 것이다. 이를 위해 YSZ 세라믹과 SRR 메타물질 구조를 결합한 전자기파 흡수구조를 설계하고, 고온에서 자유공간 측정 장비를 사용하여 1,000 °C 이상의 고온 환경에서 X-band의 전자기파 흡수 가능성을 확인하였다.

2. Design of High-Temperature Radar Absorbing Structure

2-1. Material Selection

고온용 RAS(Radar Absorbing Structure) 설계를 위해 고려해야 할 사항으로는 재질 선택이다. SUS(Steel Use Stainless)는 고온에서의 내열성과 내식성이 뛰어난 스테인리스 스틸로, 800 °C 이상의 고온에서도 성능을 유지할 수 있으며 금속이기 때문에 전자기파를 반사하는 특성을 갖지만, 전자기파 흡수 메타물질 설계를 사용하여 공진 특성을 통해 전자기파 흡수성을 극대화할 수 있으며, 특정 주파수에서 강한 공진 현상을 유도하기에 적합한 재료이다.

또한, YSZ는 고온 환경에서도 안정적인 성능을 유지하는 우수한 내열성을 가지고 있으며, ZrO₂(지르코니아)에 Y₂O₃(이트리아)가 첨가된 형태로, 고온 환경에서도 균열이 생기지 않고 구조적으로 안정성을 유지할 수 있다. 또한, YSZ는 고온에서도 높은 내구성과 낮은 열전도율을 가지기 때문에, 열 차단 코팅(Thermal Barrier Coating, TBC)에 주로 사용되어⁽⁵⁾, 고온의 연소 가스에 지속적으로 노출되는 터빈 엔진 블레이드나 엔진 배기구에 이를 보호하기 위한 코팅 재료로 널리 사용되고 있다⁽⁴⁾.

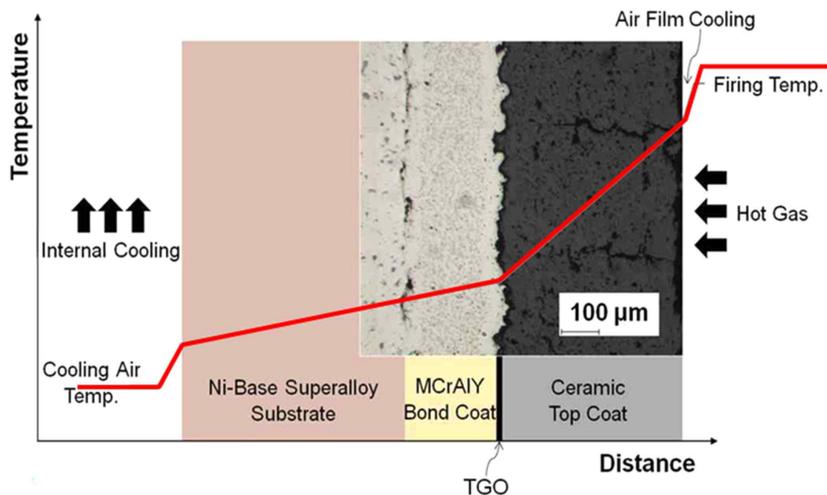


Fig 1 Illustration of thermal barrier coating.

2-2. Manufacturing method

고온용 RAS 제작을 위해 고려해야 할 사항으로는 제작 방식이다. 금속 3D 프린터는 복잡한 형상을 정밀하게 제작할 수 있고, 재료 낭비를 최소화하며 고온 내열성을 요구하는 부품을 만드는 데 뛰어난 기술이다. 전통적인 기계가공 제조 방식으로는 표현하기 어려운 복잡한 구조도 쉽게 제작할 수 있어, 항공우주, 군사, 의료 등 고정밀 산업에서 필수적으로 사용되고 있다. 3D 프린팅은 설계에서 복잡한 기하학적 구조를 정밀하게 구현할 수 있고, 금속 재료로 복잡한 메타물질이나 전자기파 흡수체와 같은 고성능 부품을 제작할 때 유리하다, 또한 기존의 절삭 가공과 달리 3D 프린팅은 필요한 만큼의 재료를 적층해 사용하기 때문에 재료 낭비를 최소화할 수 있다.

이러한 금속 3D 프린팅 주요 방식은 다음과 같다. SLM(Selective Lase Melting)은 금속분말을 레이저로 녹여 층층이 적층하는 방식으로, 복잡한 금속 구조물을 높은 정밀도로 제작할 수 있고, 매우 단단하고 정밀한 부품을 제작할 수 있으나 비용이 상대적으로 높다. EBM(Electron Beam Melting)은 전자빔을 사용해 금속분말을 녹여 부품을 적층하는 방식으로, 매우 높은 온도에서 작업할 수 있어 고내열성 부품 제작에 적합하여, 항공우주 및 의료 분야에서 사용된다. DED(Directed Energy Deposition)방식은 레이저 또는 전자빔으로 금속분말이나 와이어를 녹여서 층층이 쌓아 구조물을 제작하는 방식으로 다른 방식에 비해 재료 낭비가 적고 고정밀 구조 제작이 가능하며, 이미 제작된

부품에 추가로 구조를 덧붙이는 수리 작업에도 적합하다⁽⁶⁾.

본 연구에서는 고온 전자기파 흡수체 기본 구조물을 제작하기 위해 DED 방식을 채택하였다. DED 방식은 금속분말을 필요한 만큼 사용하는 방식이기 때문에 항공기 엔진 배기구나 극초음속 비행체와 같은 부피가 큰 제품을 생산하는 경우 고가의 금속 재료를 절감할 수 있어 경제성을 확보할 수 있게 된다.

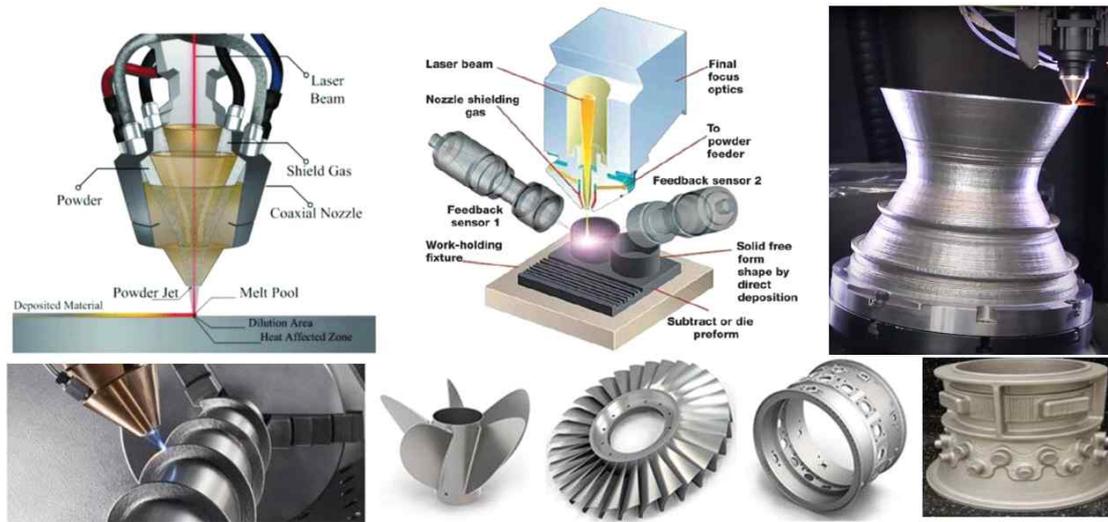


Fig 2 Direct Energy Deposition
(Source : Google, InssTek Image reconstructions)

2-3. SRR Pattern Design

DED 방식을 활용하기 위해서는 본 출력물에 대한 서포트 구조가 없어 표면 패턴의 방식을 단순한 구조로 설계해야 한다. 또한, SUS 재료의 유도 전류에 대한 공진 특성을 활용하기 위해 메타물질 구조인 SRR을 사용했다. SRR은 공진 특성을 통해 전자기파 흡수성을 극대화할 수 있으며, 특정 주파수에서 강한 공진 현상을 유도하여 전자기파를 효과적으로 흡수할 수 있다. SRR은 LC(인덕턴스, 캐패시턴스) 공진을 통해 유전율(Permittivity) 제어 효과를 활용한다. 두 원형의 개방 루프(loop)에 외부시간에 따라 변하는 자기장이 발생하면, 이로 인해 두 개방 루프에 전류가 유도된다. 유도된 전류는 두 개방 루프에서 인덕턴스(Inductance, L)를 생성하고, 루프 사이에는 유도된 전류에 의해 전압 분포가 Fig 3 와 같이 형성된다. 또한, 안쪽과 바깥쪽의 개방 루프 사이에는 캐패시턴스(Capacitance, C) d_2 가 발생하게 된다.

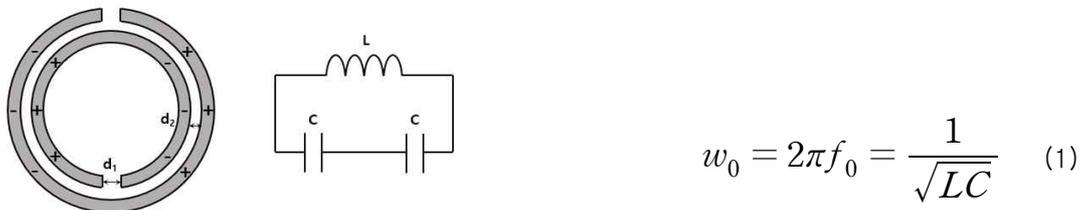


Fig 3 Equivalent circuit and general structure of a SRR

또한, 루프 끝단에 있는 개방 루프 부분에는 캐패시턴스 d_1 이 발생하므로, 총 캐패시턴스는 루프 사이의 캐패시턴스 d_2 와 끝단의 개방 구조에서 발생하는 캐패시턴스 d_1 의 합으로, 등가 회로에서 이들이 직렬로 연결되어 있다고 가정할 수가 있다. SRR의 등가 회로는 LC 공진 회로와 같으므로, 공진 주파수는 식 (1) 과 같이 계산된다. 여기서 C 는 루프 사이의 단위 길이당 캐패시턴스를 의미하고, L 은 SRR의 두 원형 개방 루프에서 발생하는 총 인덕턴스이다.

SRR 구조 설계에서 중요한 매개 변수는 내부 반경, 외부 반경, 도체 두께이다. 이러한 매개 변수들이 공진 주파수와 흡수 성능에 영향을 미친다. 최적의 매개 변수 값을 도출하기 위해 최적 설계를 진행하였다.

2-4. Optimization Design and Simulation Results

SRR 패턴의 최적의 매개 변수 값을 도출하기 위해 X-band(8 ~ 12 GHz)에서 흡수 성능을 가지는 전자기파 흡수구조 단위 셀을 Fig 4와 같이 설계 하였다.

설계된 RAS 패턴 모델링의 기본 물성은 PEC(Perfect Electric Conductor)으로 하였고, 코팅된 물질은 세라믹 소재인 YSZ를 사용했다. 유전율 ϵ_r 은 27, 손실 탄젠트 $\tan\delta_c$ 는 0.1이며, 흡수 특성을 X-band 내 위치시키기 위한 목적함수를 설정하였고, 특정 편파에 의존하지 않고 차이를 최소화하기 위해 단위 패턴을 90° 회전하여 배치한 모델링을 하였다. Fig 5와 같이 RAS 패턴 매개 변수를 지정하여 하나씩 증/감 해보며 최적값 도출을 위한 범위를 지정하였고, CST Studio Suite의 Optimizer 기능을 활용하여 최적의 매개 변수 값을 도출하였다.

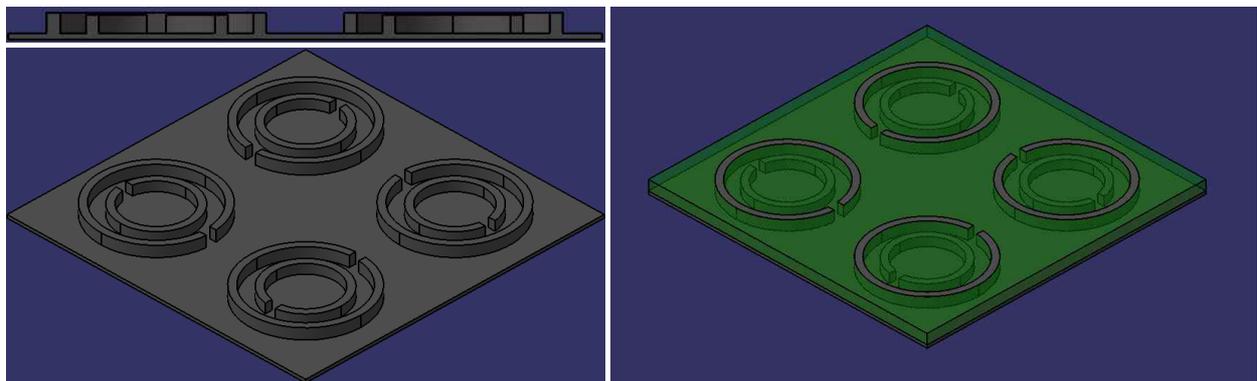


Fig 4 SRR Pattern Modeling

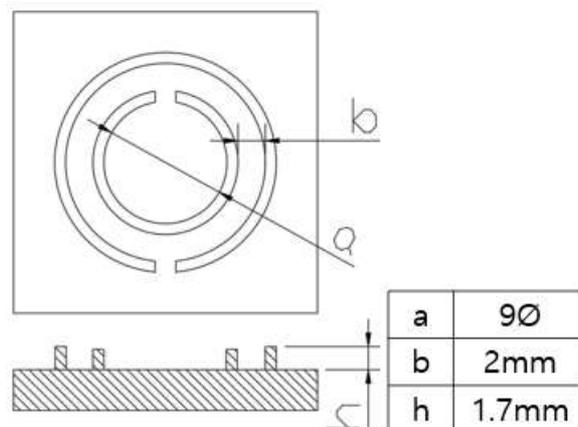


Fig 5 Parameters of SRR Pattern

매개 변수는 유전 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)을 사용하여 최적화하였다. GA는 진화론적 원리를 바탕으로 최적화 문제를 해결하기 위해 개발된 알고리즘이다. 자연 선택(Natural Selection)과 진화론을 바탕으로 만들어졌으며, 복잡한 문제에서 최적의 해를 찾는 데 매우 유용한 방법이다. GA의 주요 원리는 다음과 같다. 개체군 초기화(Population Initialization), GA는 여러 개의 변수로 이루어진 개체군에서 시작된다. 각 개체는 문제의 해를 나타내는 유전자를 가지며 유전자들은 일반적으로 이진수로 표현된다. 초기에는 주로 무작위로 이루어진다. 적합도 평가(Fitness Evaluation), 각 개체의 적합도는 문제를 해결하는데 얼마나 좋은 해인지 평가된다. 이 적합도는 문제에 따라 다르게 정의되며, 설계 최적화에서는 주로 성능지표 본 논문에서는 전자기파 흡수성을 기준으로 평가하였다. 선택(Selection), 적합도가 높은 개체일수록 더 많이 유전된다. 즉, 더 나은 해를 가진 개체가 다음 세대에 더 많이 선택된다. 주로 사용하는 방법에는 룰렛 휠 선택(Roulette wheel Selection), 토너먼트 선택(Tournament Selection)이 있다. 교차(Crossover), 두 개의 부모 개체가 교차하여 자식 개체를 생성하는 과정이다. 교차는 부모의 유전자를 조합하여 자손을 만들어 낸다. 이는 새로운 해를 탐색하는 데 중요한 역할을 하며 다양한 조합을 통해 더 나은 해를 찾을 가능성을 높인다. 일반적으로 단일 교차 또는 다중 교차 방법이 사용된다. 변이(Mutation), 변이는 작은 확률로 개체의 일부 유전자가 무작위로 변경되는 과정이다. 이는 탐색 공간을 넓히고, 최적해에 도달할 가능성을 높이는 데 도움을 준다. 변이는 통해 기존 세대에서 찾을 수 없었던 새로운 해를 찾을 수 있다. 세대교체(Generation Replacement), 새로 생성된 자식 개체들은 기존 개체와 대체되며, 이렇게 세대가 바뀌는 과정을 통해 전체 개체군이 진화하게 된다. 수많은 세대에 걸쳐 적합도가 높은 해들로 이루어진 최종 결과가 나오게 된다⁽⁷⁾.

이러한 과정을 통해 GA는 다차원 설계 공간에서 효율적으로 탐색을 수행하며, 설계 변수 조합에서 얻을 수 있는 전자기파 흡수성을 평가하여 가장 우수한 성능을 가진 매개 변수를 도출할 수 있다.

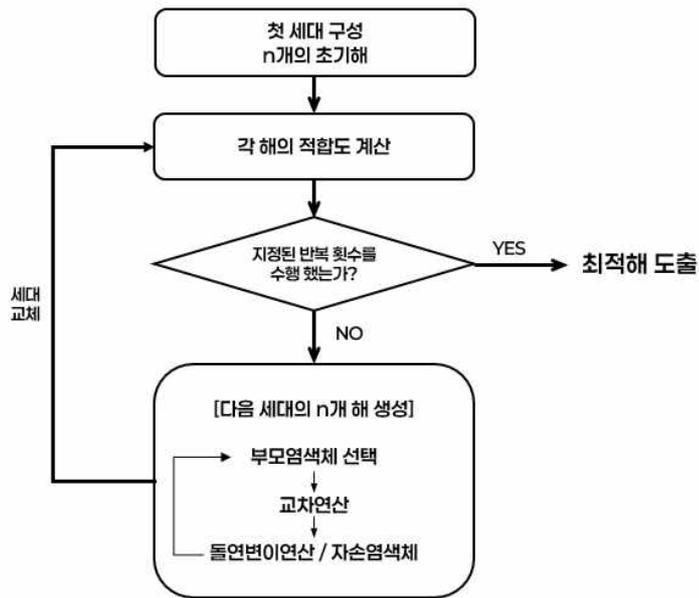


Fig 6 Genetic Algorithm Flowchart

목적함수(Objective Function)를 지정하는 것은 유전 알고리즘에서 최적화를 수행할 때 가장 중요한 부분 중 하나이다. 목적함수를 설계 성능을 평가하는 기준이 된다. 본 논문에서는 각 해에 대한 시뮬레이션 결과를 산출한 뒤 Fig 7 와 같이 X-band 내 주파수 대역별과 반사손실 값(S-parameter)에 가중치를 주었다. 짙은 색으로 갈수록 더 낮은 점수를 받도록 설정하여 X-band

내 흡수성을 극대화하였고, 9.5 ~ 10.5 GHz 사이에 흡수체의 최소 반사손실 피크 값이 발생하도록 최적화 과정을 통해 GA가 최소화하는 걸 목표로 작성하였다.

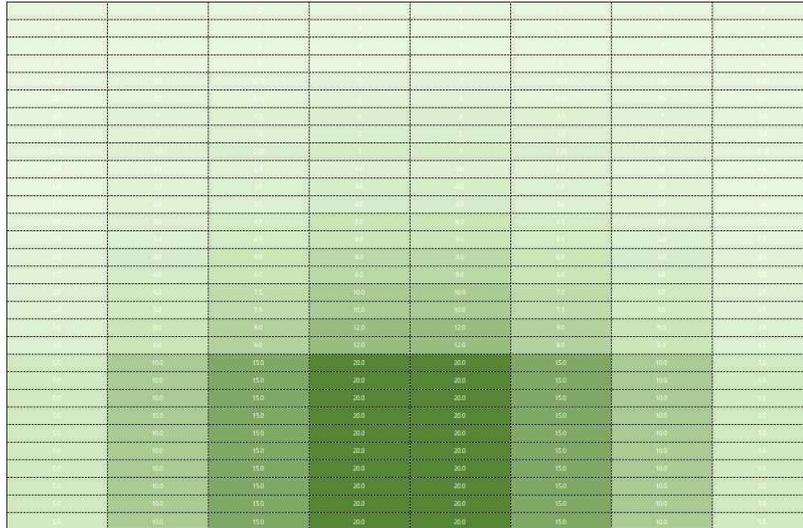


Fig 7 Objective Function Schematic

최적화를 위해서는 많은 반복 시뮬레이션이 필요하며, 매개 변수 변화에 따른 전반적인 반응을 효과적으로 최적화할 수 있는 T-Solver (Time Domain Solver)를 사용하였다. CST의 T-solver를 통해 최적 설계 결과로 얻은 S-Parameter의 S11 결과값으로 Fig 8은 GA의 500번째, 1000번째의 시뮬레이션 값이다. Iteration 1000의 경우 X-band에서 약 1GHz (9.1 ~ 10.1 GHz) 대역폭에 대해 -10 dB 이하의 반사손실을 보여준다.

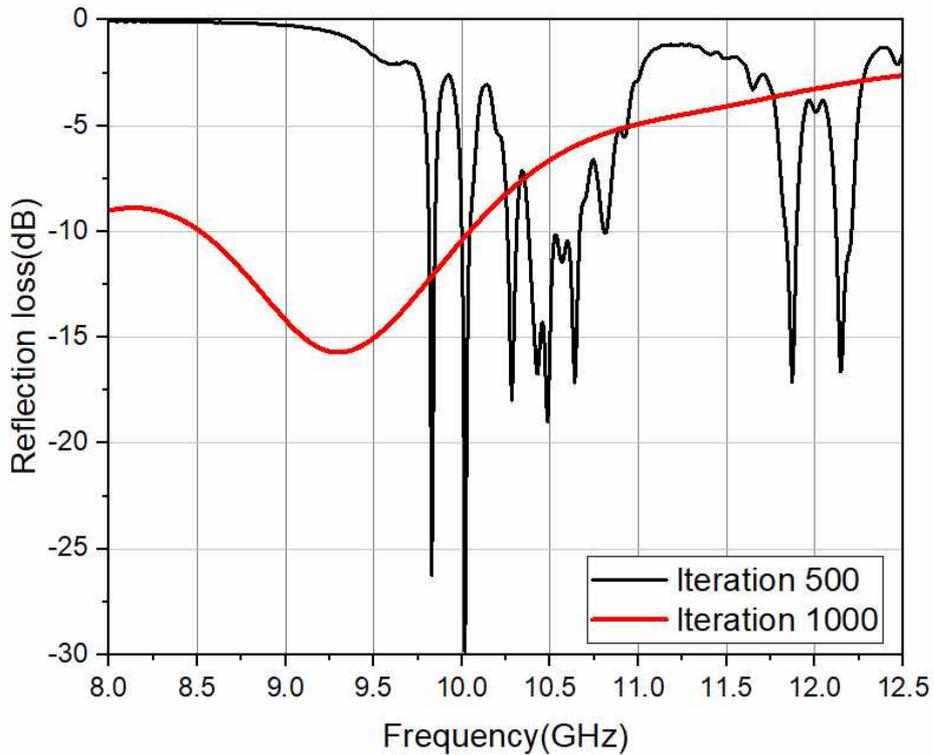


Fig 8 simulated Reflection Loss – Iteration 500 / Iteration 1000

3. Fabrication and Testing

3-1. Metal 3D Printing

RAS에 대한 최적 설계 후 시편 제작을 위해 Fig 9와 같이 단위 패턴 셀을 치수에 맞는 패턴으로 복제하고, Table 1 변수 조건으로 금속 3D 프린팅 DED 방식으로 시편을 제작하였다. (Fig 10)

Table 1 Printing Parameter

Laser source	Yttrium fiber laser (1070 nm wavelength-IR)
Laser Beam Diameter	SDM 400 (400 um)
Laser power	DMT mode (180~258 W)
Powder Material	SS304L (1.46 g)
Gas	Powder - 3.0 L/min, Coaxial- 6.0 L/min, Shield - 8.0 L/min
Traverse Speed	850 mm/min
Tool-path	CFCFC
Rotation Angle	90°

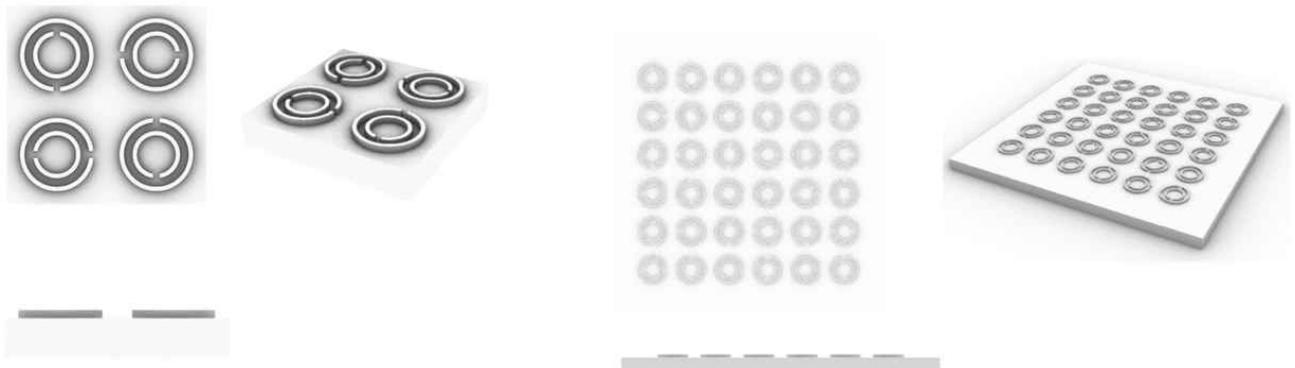


Fig 9 Replicating the patterned structure to match the specimen dimensions



Fig 10 3D printed specimen after fabrication

3-2. YSZ Coating

YSZ 코팅은 고온 환경에서 내열성과 내구성을 강화하기 위한 방식으로 많이 사용되며, 1970년대 YSZ가 TBC용으로 탁월한 재료로 확인되었으며 용사 코팅(Thermal Spray Coating) 기법을 사용하여 YSZ 코팅하는 방식을 확립했다⁽⁸⁾. 용사 코팅은 고온에서 녹인 분말 상태의 YSZ를 고속으로 분사하여 표면에 코팅층을 형성하는 기술이다. 이 방식은 내열성, 내마모성, 내식성을 동시에 제공하는데 매우 효과적으로 Metal 3D Printing 후 YSZ를 코팅하였다. (Fig 13)

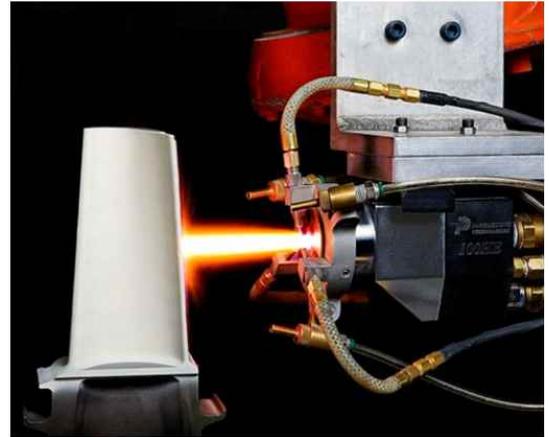
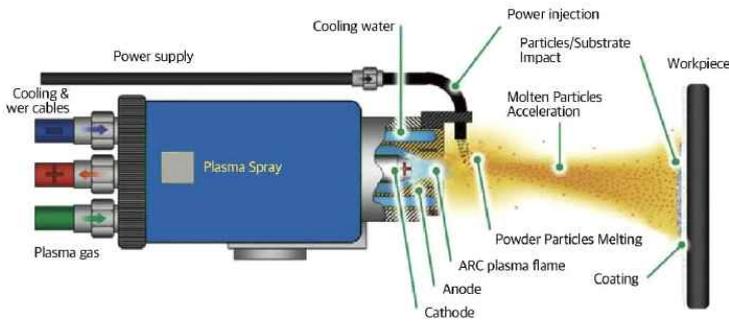


Fig 11 YSZ Thermal Spray Coating
(Source : Thermaltec / Ansung surface technology)

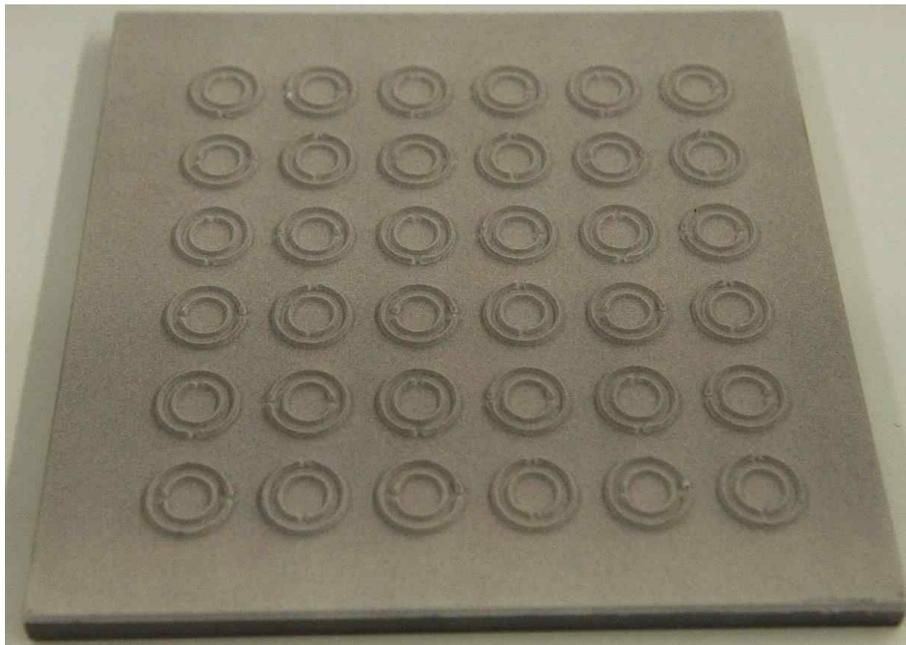


Fig 12 Specimen completed after YSZ coating

3-3.Free space measurement

제안된 RAS는 자유 공간측정법으로 측정되었다. 시편을 중심에 두고, 포커스드 렌즈 혼 안테나를 양쪽 초점거리에 배치하여 안테나로부터 송신 및 수신되는 전자기파 신호를 분석하여 S-parameter를 측정하였다. 본 시험은 상온 조건(약 22 °C)에서 수행되었으며, 측정에는 Vector Network Analyzer(VN2)와 X-band 대역 혼 안테나가 사용되었다.

시험은 세 가지 시편을 진행하였다. (Fig 13)

1. Plate_SRR : 메타표면을 가진 금속 시편으로, 코팅이 없는 메타물질 구조로 구성된 시편. (Fig 10)
2. Plate_YSZ : 시편 코팅 두께가 1.7mm인 순수 YSZ만을 코팅한 평판.
3. RAS_SRR : 금속 소재의 메타구조에 순수 YSZ를 1.7mm 코팅한 시편.

Plate_SRR, Plate_YSZ 조건에서 측정된 흡수성능은 발현되지 않았으며, 전자기파 흡수가 일어나지 않음을 확인하였다. 이는 두 물질 자체의 전자기파 흡수 특성이 없음을 의미한다.

반면, RAS_SRR 시편인 금속 소재 메타구조에 YSZ를 코팅한 시편은 X-band 내에서 약 0.8GHz (9.1 ~ 9.9 GHz) 대역폭(에서 -10dB 이하의 우수한 성능을 발휘하였다. 이는 기존 메타구조와 YSZ 세라믹 코팅의 상호작용을 통해 전자기파 흡수 특성이 발현되었음을 보여준다. 특히, RAS_SRR은 YSZ가 메타물질의 공진 특성을 보완하여, 주파수 대역에서 흡수성능을 극대화한 것으로 해석된다.

또한, 설계 변수를 제어하여 전자기파 흡수성능을 최적화하였다. 메타물질 구조의 주기, 반경, 간격 등을 조절함으로써 특정 주파수 대역에서의 공진 특성을 최적화하였다. 특히, 9.5 ~ 10.5 GHz 사이에서 최소 반사손실이 발생하도록 목적함수를 통해 설계 변수를 조정하였으며, 이를 통해 흡수성능을 극대화할 수 있었다.

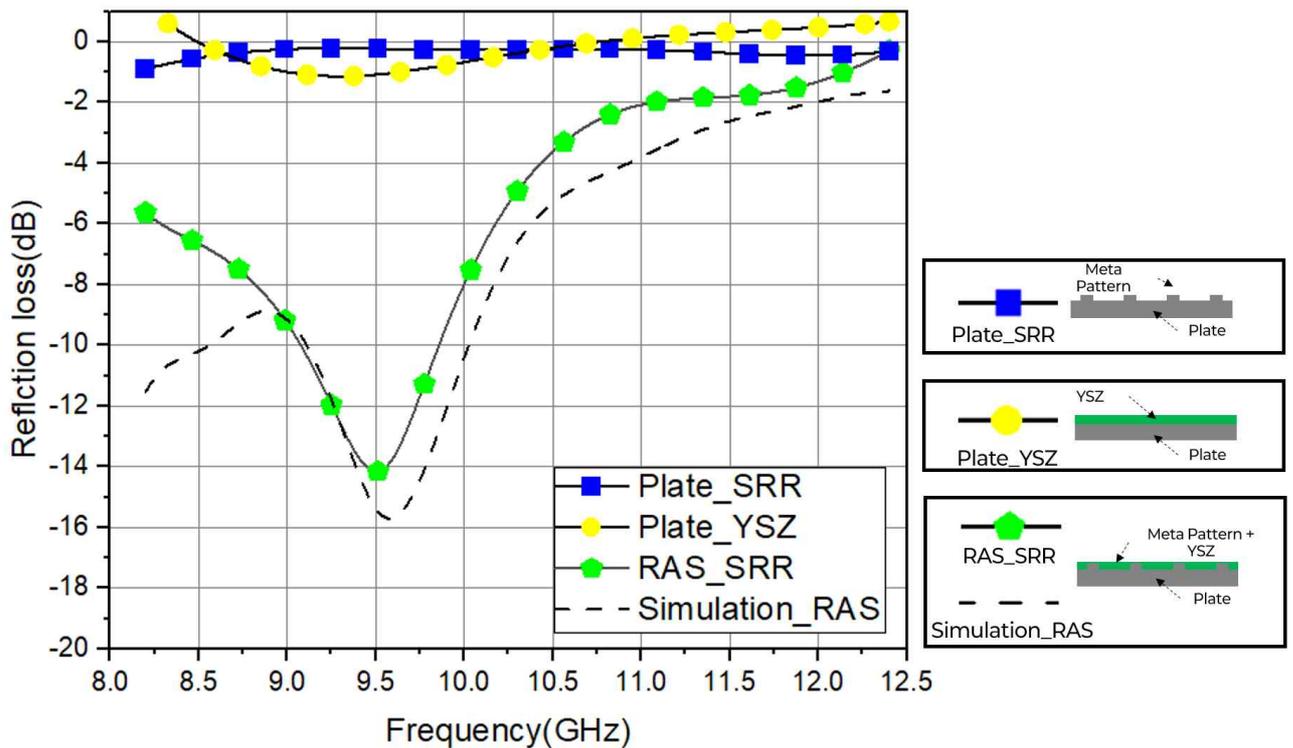


Fig 13 Reflection loss measured using free space measurement equipment

3-4. Measured using plasma high-temperature equipment

제안된 RAS를 고온 환경 모사 장비를 통해 고온 환경에서 전자기파 특성을 측정하였다. 고온 환경 모사 장비의 플라즈마를 사용하여 목표 온도까지 가열한 후, 시편을 측정 장치로 이송하여 온도 측정 장비를 통해 온도를 측정하며 전자기파 특성을 측정하였다. 1,000 °C의 고온 환경에서 측정된 결과, 상온 대비 더 넓은 대역폭에서 반사손실 성능이 개선되었으며, 700 °C에서 가장 넓고 낮은 피크 값을 보인 반사손실을 보여줬다.

고온 환경에서 YSZ 세라믹 코팅과 메타물질 구조의 상호작용이 상온에서 전자기파 흡수성을 향상 시켰다. YSZ는 고온에서 유전율이 변화하고 메타물질의 공진 특성이 보완하여 전자기파 흡수성을 변화하였다. 이로 인해 9.1 GHz에서 공진이 발생했으며, 흡수성을 더욱 향상 시켰다.

상온에서 0.8GHz 대역폭에서 -10dB 이하의 반사손실과 -14 dB의 최솟값을 보였던 RAS_SRR 시편은 700 °C 에서 1 GHz (8.6 ~ 9.6 GHz) 대역폭에서 -10dB 이하의 반사손실과 -40 dB의 최솟값을 보여준다. (Fig 16)

또한, 1,000 °C의 고온 환경에서도 시편의 구조적 안정성이 유지되었으며, YSZ 코팅은 고온에서도 산화나 열적 손상으로부터 시편을 보호하는 열 차단 코팅(TBC)을 통해 시편을 보호하며 물리적 변형 없이 전자기파 흡수성을 안정적으로 유지하였다. 고온에서도 설계된 흡수 특성을 그대로 발현할 수 있었고, 이는 고온 환경에서의 내구성과 신뢰성을 보장하는 중요한 요소로 작용하였다.

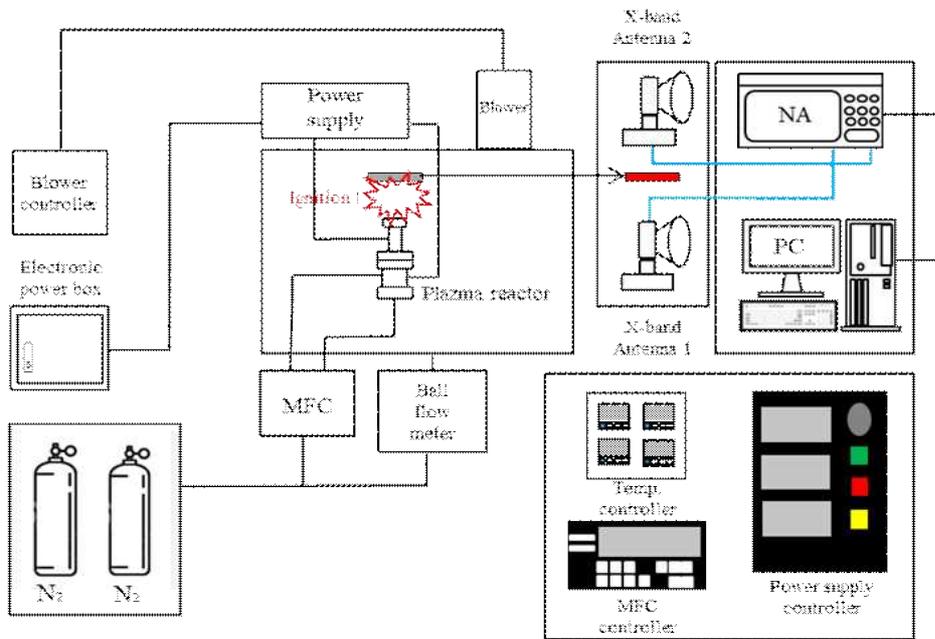


Fig 14 Schematics of the test equipment



Fig 15 High temperature free space measurement plasma equipment

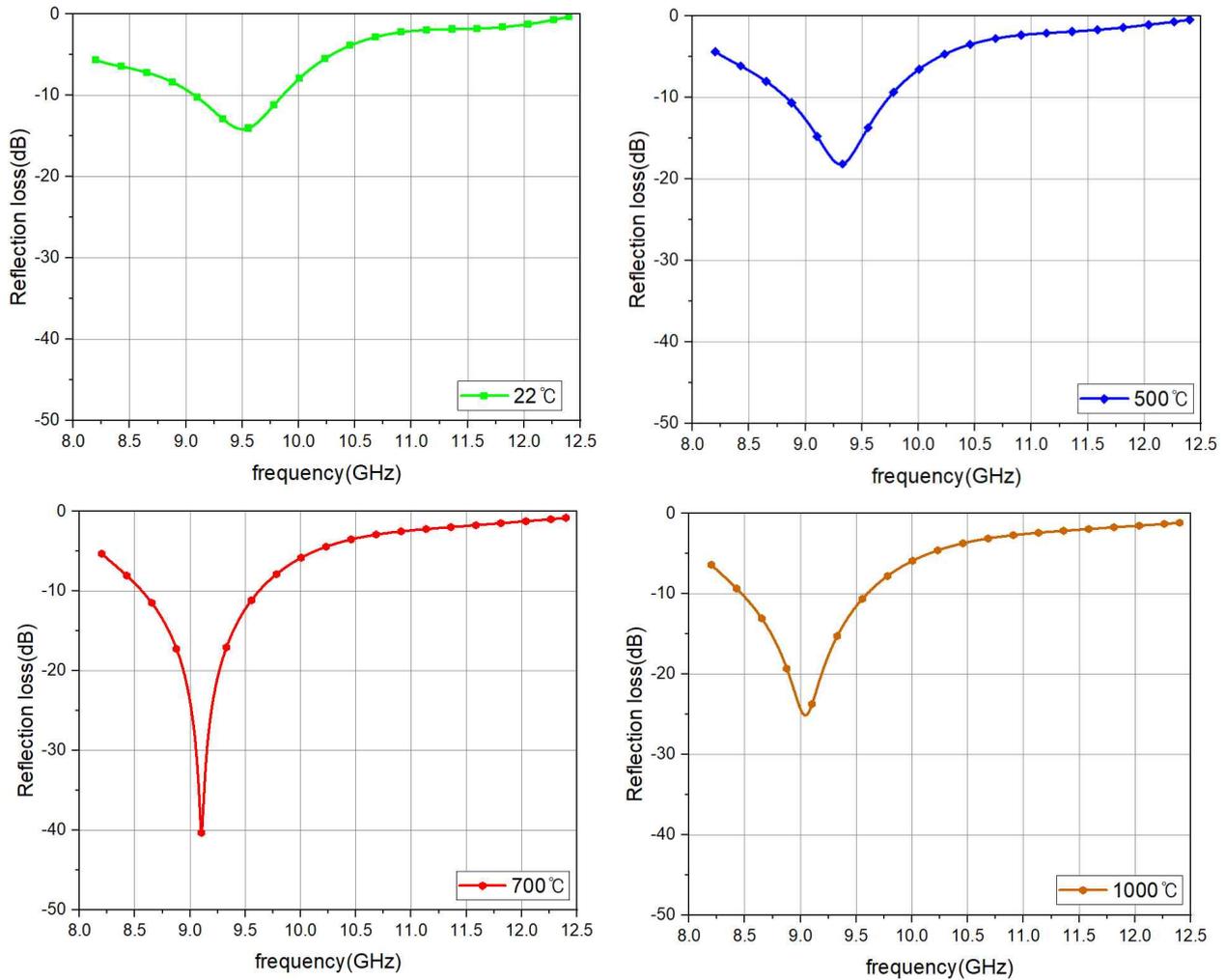


Fig 16 Reflection loss measured using high-temperature equipment

4. Conclusion

본 연구에서는 세라믹 소재인 YSZ와 3차원 형태의 금속 SRR 구조를 결합한 메타표면을 제작하여, 별도의 손실 소재가 포함되지 않은 고온용 전자기파 흡수체를 제안하였다. 자유공간 측정 장비를 사용하여 X-band 내 약 1GHz 대역폭에서 -10dB 이하의 전자기파 흡수성을 확인하였으며, 이를 통해 고온 환경에서 RCS 감소에 기여할 가능성을 제시하였다.

특히, 본 연구는 설계 변수를 조정함으로써 다양한 주파수 대역에서 전자기파 흡수성을 맞춤형으로 최적화할 수 있는 유연한 플랫폼을 제공한다. 이를 통해 항공우주뿐만 아니라 다양한 산업에서 요구되는 특정 주파수 대역에 맞춰 흡수체를 설계하고 적용할 가능성을 보여준다. 이러한 유연성은 단일 구조로 다중 대역에서 전자기파 흡수성을 구현할 가능성을 열어 X-band뿐만 아니라, Ku-band, C-Band 등의 다른 주파수 대역에서도 전자기파 흡수성을 끌어낼 수 있어 특정 주파수 대역에 국한되지 않고, 다양한 응용 분야에서 실질적인 활용이 가능할 것으로 기대된다.

REFERENCE

- [1] M.S. Cao, W.L. Song, Z.L. Hou, B. Wen, J. Yuan, The effects of temperature and frequency on the dielectric properties, electromagnetic interference shielding and microwave-absorption of short carbon fiber/ silica composites, Carbon 48, 2010
- [2] X. Zhang, B. Lin, Y. Ling, Y. Dong, D. Fang, G. Meng, X. Liu, "Highly permeable porous YSZ hollow fiber membrane prepared using ethanol as external coagulant", Journal of Alloys and Compounds. 494. 2010
- [3] W.J.Lee, S.M.Baek, "EM wave absorbing material for high temperature aerial structure", Composites research, Yeo-su, 2021, p2
- [4] Ulanowicz, L., & Dudzinski, A. Two-layer heat-resistant protective coatings for turbine engine blades. Coatings, 13(3), 588, 2023
- [5] Alexander Chee Hon Cheong and SivaKumar Sivanean, Perspective Chapter : The Application of Yttria-Stabilized Zirconia(YSZ), IntechOpen, 2023
- [6] Vafadar, A., Guzzomi, F., Rassau, A., & Hayward, K. Advances in metal additive manufacturing: A review of common processes, industrial applications, and current challenges. Applied Science, 11(3), 1213, 2021.
- [7] Narayananm S., & Azarm, S., On improving multiobjective genetic algorithms for design optimization. Structural Optimization. 18(3), 146-155. Springer-Verlag, 1999
- [8] VaBen, R., Bakan, E., Mack, D.E., & Guillon, O. A perspective on thermally sprayed thermal barrier coatings : Current status and trends. Journal of Thermal Spray Technology, 31(30), 685-698 2022