

X-Band 영역에서의 세라믹/샌더스트-알루미노실리케이트 복합재의 초고온 전자파 흡수 거동

최광식* · 심동영** · 최원우** · 신준형** · 남영우***†

Ultra-high Temperature EM Wave Absorption Behavior for Ceramic/Sendust-aluminosilicate Composite in X-band

Kwang-Sik Choi*, Dongyoung Sim**, Wonwoo Choi**, Joon-Hyung Shin**, Young-Woo Nam***†

ABSTRACT: This paper presents the development of thin and lightweight ultra-high temperature radar-absorbing ceramic composites composed of an aluminosilicate ceramic matrix-based geopolymer reinforced ceramic fiber and sendust magnetic nanoparticles in X-band frequency range (8.2~12.4 GHz). The dielectric properties with regard to complex permittivity of ceramic/sendust-aluminosilicate composites were proportional to the size of sendust magnetic nanoparticle with high magnetic characteristic properties as flake shape and its concentrations in the target frequency range. The characteristic microstructures, element composition, phase identification, and thermal stability were examined by SEM, EDS, VSM and TGA, respectively. The fabricated total thicknesses of the proposed single slab ultra-high temperature radar absorber correspond to 1.585 mm, respectively, exhibiting their excellent EM absorption performance. The behavior of ultra-high temperature EM wave absorption properties was verified to the developed free-space measurement system linked with high temperature furnace for X-band from 25°C to 1,000°C.

초 록: 본 연구에서는 초고온 환경에서 내화학적 및 열적 안정성이 우수한 지오폴리머 기반의 알루미노실리케이트 레진과 세라믹 섬유를 활용한, 목표주파수 X-band(8.2 GHz to 12.4 GHz)에서 전자파를 흡수하는 세라믹 복합재(Radar-absorbing ceramic composite, RACC)를 구현하였다. 주 성분이 FeSi인 판형 구조의 샌더스트 자성 입자를 분산시킨 알루미노실리케이트 레진은 목표 주파수 대역에서 자성 및 유전손실 특성을 발휘하였고, 입도와 무게분율별 유전특성을 Cole-Cole Plot으로 표현하였다. 샌더스트가 분산된 알루미노실리케이트 레진의 미세구조, 화학적 성분 및 결정, 자기 및 열적 특성 등을 분석하기 위해 SEM, EDS, VSM 및 TGA를 측정하였다. 샌더스트의 입도 크기 35 μm , 무게분율 40 wt.%를 분산시킨 레진의 유전손실 특성을 활용하여, X-band에서 약 1.51 GHz 대역폭에 대해 -10 dB 이하의 반사손실 성능을 발휘하는 단층형($t = 1.585 \text{ mm}$) RACC를 설계 및 제작하였다. 제작된 RACC의 초고온(25°C to 1,000°C)에서 전자파 흡수 거동을 살피기 위해 개발된 초고온 환경 자유공간측정 장비를 활용하여 X-band 대역에서 그 성능을 검증하였다.

Key Words: 초고온 환경(Ultra-high temperature condition), 전파흡수구조(Radar-absorbing structure), 세라믹 섬유(Ceramic fiber), 알루미노실리케이트 세라믹 레진(Aluminosilicate ceramic matrix), 샌더스트 자성입자(Sendust magnetic particle)

Received 12 May 2022, received in revised form 24 June 2022, accepted 28 June 2022

*School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University and Korea Aerospace Industries, Ltd.

**School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University

***†School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University, Corresponding author (E-mail: ywnam@gnu.ac.kr)

1. 서 론

전투기의 전투 생존성은 적의 위협에 탐지될 가능성과 적에게 탐지되어 공격을 받아 피격되었을 때, 피해를 버틸 수 있는 정도에 따라 결정되기 때문에, 전투기의 생존성을 향상시키기 위해서는 적에게 잘 탐지되지 않기 위한 특성, 즉 저피탐(LO, Low Observable) 성능을 향상시킬 필요가 있다. 이러한 전투기를 탐지하는 대표적인 4가지 방법은 전자기파 신호, 적외선 신호, 음향 신호, 시각 신호가 있으며, 그중 레이더 파를 기반으로 하는 전자기파에 의한 탐지의 방법이 가장 먼 거리에서 효과적으로 탐지가 가능하기 때문에 이에 의한 탐지 가능성을 최소화하는 것이 매우 중요하다[1]. 레이더에서 송출된 전자기파 에너지가 탐지대상체인 전투기에 맞아서 반사되는 에너지의 양을 면적으로 나타낸 레이더 단면적(RCS, Radar Cross Section)을 최소화할 수 있다면, 전자기파에 의한 탐지 가능성을 낮출 수 있다. 이를 위해 전투기에 입사되는 전자기파가 입사되는 위치로 돌아가지 않도록 형상을 통해서 반사 각을 제어하는 방법이나, 입사된 전파를 흡수하기 위한 전파흡수소재(RAM, Radar Absorbing Materials)를 적용하는 방법이 대표적이나, 이러한 방법은 형상과 중량을 증가시키기 때문에 전투기의 성능에 영향을 주며, 특히 소재의 적용은 유지보수비용의 증가를 유도하게 된다. 최근에는 이러한 단점을 극복하기 위해서 복합소재를 활용하여, 전파흡수와 동시에 구조적 하중을 견딜 수 있는 전파흡수구조(RAS, Radar Absorbing Structure)에 대해 활발한 연구가 진행되고 있다. 하지만, 근래에는 전투기를 탐지하는 방법이 고정식 레이더(Mono-Static)만 이용하는 것이 아닌, 두 개 이상의 레이더를 이용하는 Bi-static 방식의 활용도 증가하면서, 이를 극복하고 전투기의 생존성 향상을 위해 전방만이 아닌 전방위에서의 RCS 감소가 필요하다. 이를 위해서, 전투기에서 초고온 환경인 노즐 부위 및 고온 환경인 노즐 주변부에 전파흡수기능을 부여할 수 있어야 한다. 일반적인 전파흡수구조는 폴리머 기반의 매트릭스 소재와 전자기파 특성이 좋은 유리 섬유와 같은 섬유 강화 복합재료를 활용하여 구성되지만, 이러한 유리섬유강화 복합재료의 경우, 낮은 유리 전이 온도와 낮은 열 안정성, 불안정한 산화 저항성 등에 의해서 고온영역에서 적용하기 어려운 단점이 있다. 그렇기 때문에, 고온 환경에서도 우수한 열 안정성 및 산화 안정성, 내화학적 성 등을 가질 수 있도록 세라믹소재를 활용한 세라믹 기지 기반의 복합재료가 기존의 고분자 기지에 비해, 고온 영역에 적용하여 전파흡수 기능과 구조적 역할을 할 수 있도록 개발하기에 더 적합하다. Yang 등[2]은 세라믹 복합재 위에 알루미늄 코팅을 통한 고온 전파흡수 코팅을 제안하였으며, Wan 등[3]은 SiC 섬유와 인산알루미늄의 복합재에 코팅하는 방법을 제안하였다. 하지만 고온 상황에서 측정값은 제시하지 않았다. 또한, Wang 등[4], Tian 등[5]과 Song 등

[6]은 고온 상황에서의 측정값은 제시하였지만 700°C 수준의 결과를 보여주고 있다. Baskey 등[7], 1,000°C 수준에서의 측정결과를 보여주고 있다. Wang 등[8], Li 등[9], Song 등[10] Liu 등[11]와 Cao 등[12]의 연구는 섬유 자체의 물성 및 섬유의 코팅 등을 처리하여 고온 전파흡수구조를 구현하고 있다. 이와 같이 기존 연구들은 1,000°C 이상의 초고온 영역에 대한 연구가 미흡하게 보이며, 세라믹 섬유와 세라믹 레진에 성능이 좋은 자성 필러를 사용한 전파흡수구조를 구현하는 부분에 대해 미흡하다. 따라서 본 연구는 손실 성능이 좋은 우수한 필러를 기반으로 하는, 세라믹기지 소재와 세라믹 섬유를 적용한 전파흡수구조를 설계하고, 이를 제작하여 초고온 환경에서의 X-Band 대역의 전파흡수 거동을 관찰하고자 한다.

2. 재료선정 및 방법

2.1 세라믹 섬유 및 세라믹 레진

초고온 전파흡수구조를 구현하기 위해 초고온 환경에서 열적 안정성 확보가 필요하며, 이를 위해서 세라믹 섬유와 세라믹 레진을 조합한 복합재료를 구성하는 방식으로 이를 구현하고자 한다. 세라믹 섬유는 3M사에서 상용으로 판매하고 있는 Nextel 소재를 선정하였다. Nextel 소재는 금속 산화물로 구성되어 있으며, 이를 직조하여 복합재료의 세라믹 섬유로 활용하여, 고온환경에서의 운용되는 구조물에 적용할 수 있다. 또한, 3M의 Nextel 세라믹 섬유는 운용 온도조건에서 낮은 신장률과 수축율을 보유하고 있기 때문에, 제작 치수 안정성을 보장할 수 있다. 또한, 소재 자체의 준수한 화학 저항성, 낮은 열 전도율 및 열충격에 대한 내성을 지니고 있기 때문에, 초고온에서 적용이 가능한 세라믹 복합재의 원재료로 활용이 가능하다. Nextel은 원사의 구성성분에 따라 제품을 312, 440, 610과 720으로 구분하여 생산하고 있고, 특히 구조용 원사로는 610계열과 720계열의 원사를 사용하며, 610계열 원사는 Table 1과 같이 높은 인장강도를 보유하고 있다.

610계열 원사의 구성 성분은 산화알루미늄(Al_2O_3)이 99% 이상을 차지하고 있으며, 이 원사를 활용하여 4매 수자직(4 harness satin weave)으로 직조하여, 610 DF-6의 제품명을 가지는 소재(dry fabric)를 롤 형태의 구입 확보하였다. 세라믹 섬유의 두께는 0.2 mm, 면중량은 250 g/m² 수준이고

Table 1. Properties of Ceramic yarn (3M Nextel™ 610)

Chemical Composition (wt.%)	Al ₂ O ₃ 99%	Continuous Use Temperature (°C)	1,000
Filament Tensile Strength (MPa)	2800	Filament Tensile Modulus (GPa)	370
Dielectric Constant @9.5GHz	4.7	Loss Tangent @9.5GHz	0.002

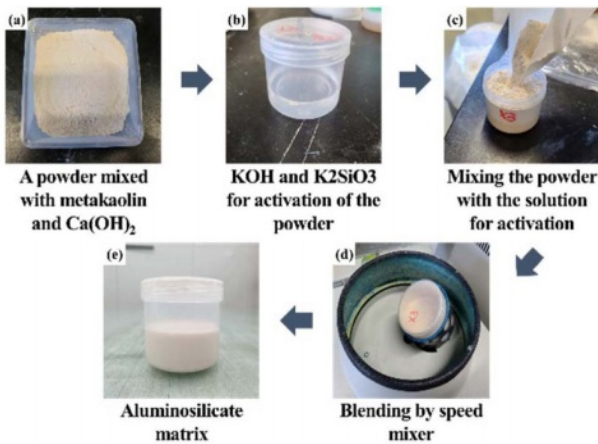


Fig. 1. Blending Process for Aluminosilicate

물의 너비는 910 mm의 소재이다. 세라믹 복합재료를 구성하기 위해서 필요한 레진으로는 알루미늄노실리케이트 (Aluminosilicate)를 활용하였으며, 이는 지오폴리머 기반의 세라믹 레진이다. 지오폴리머는 무기성분의 세라믹 소재로써, 우수한 내화화성 및 열 안정성을 가지고 상온에서 경화가 가능한 특징을 지닌다. Fig. 1과 같이 메타카올린 (Metakaolin)에 경화속도 조절을 위한 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 를 첨가하여 혼합한 혼합물과 활성화 용제($\text{KOH}(2)+\text{K}_2\text{SiO}_3(1)$)를 섞은 후, 스피드 믹서의 원심력을 이용하여, 세라믹 레진인 알루미늄노실리케이트를 얻을 수 있다. 여기서 메타카올린은 덕산약품을 통해서 구입한 Product# 2015 제품을 활용하였다.

2.2 샌더스트(Sendust) 자성재료

본 연구에서 초고온 환경에서 운용 가능한 전파흡수구조의 구현을 위한 전자기 성능을 발휘하기 위한 필러는 샌더스트 소재를 선정하였다. 샌더스트 소재는 전자기장에 의해서 자성을 보유할 수 있는 연자성을 지닌 금속 합금으로 그 형태는 판형(Flake Shape)이며, 분말상태로 제조된다. 큰 이방성과 높은 투자율 그리고 잘 매칭되는 유전율을 지니고 있으며, 낮은 손실 특성 및 낮은 보자력과 우수한 온도 안정성으로 본 연구에 적용하기 유리한 소재로 판단하였으며, 제조업체에서 제공하는 기술 데이터 시트(Technical Data Sheet, TDS)를 확인하면, 다음의 Table 2와 같은 원소비율로 구성된 소재임을 알 수 있다. 주 성분은 Fe와 Si, Al로 이루어져 있고, 약간의 탄소 성분을 함유하고 있으며, 강자성체의 Fe와 반도체의 특성을 지닌 Si와 상자성체인 Al 원

Table 2. Nominal Composition of Sendust

Materials	Nominal Composition (wt.%)			
	Fe	Si	Al	C
Sendust	85.08	9.5	5.4	0.02

Table 3. Physical Properties of Sendust

Type	1	2	3	4	5
Particle size [μm]	20-30	30-40	45-55	40-60	88.94
Apparent density [g/cm^3]	1.0~1.4	0.6~0.8	0.3~0.6	0.3~0.6	0.27

소로 이루어진 것을 알 수 있다.

본 연구의 샌더스트 소재는 우수한 손실성능과 고온 환경에서 열적 안정성을 바탕으로 다양한 상용제품이 존재하며, 여러가지 입도의 분말 제품이 제조 판매되고 있다. 초고온 전파흡수구조를 구현하기 위해서 첨가되는 샌더스트 분말의 입도 크기와 레진에 첨가되는 무게분율에 따른 유전율과 투자율의 변화를 측정하고, 그에 따른 전파흡수 거동의 영향성을 관찰하여 최적의 샌더스트 분말의 입도와 무게분율을 선정하기 위해, Table 3과 같이 5종류의 샌더스트 소재를 확보하였다.

먼저 제조사를 통해 확보한 샌더스트 분말의 입도 정보는 입도 검사 장비를 통해 측정된 정보이므로 본 연구를 위해서 구매하여 확보한 샌더스트 분말의 구조를 관찰하기 위하여, 주사전자현미경(SEM, Scanning electron microscopy)을 이용하여 기본 단위 $100 \mu\text{m}$ 수준의 이미지를 각각의 입도 별로 얻었다. 대표적으로 $35 \mu\text{m}$ 입도에 대해서 Fig. 2와 같이 SEM의 크기 측정 기능을 활용하여, 분말에 대해 대표적인 크기를 측정하였다.

상용으로 판매하는 샌더스트 분말의 경우 최초 조성된 원소재는 구형의 분말 형태를 지니며, 이를 기계적인 방법을 활용하여 판형으로 가공하는 과정을 수행한다. 그렇기 때문에, 기계적인 가공 과정에서 목표 입도보다 큰 분말 제작될 수 있으며, 이것을 SEM 이미지를 통해서 확인할 수 있다. 업체에서 제공하는 입도 정보는 전체 분말의 입도에서 50% 수준에 대한 대표 값이다.

다음으로 Table 2에서 제시된 조성이 실제로 분말의 입도에 따른 영향성이 있는지 확인하기 위해, 각 입도 별 분말

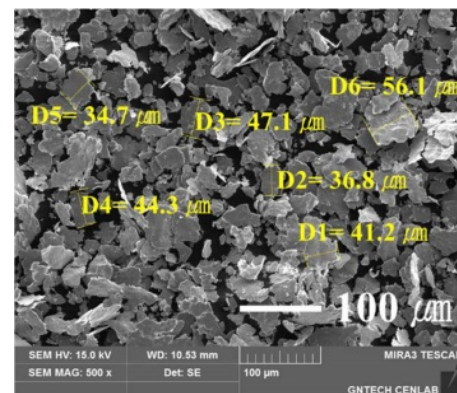


Fig. 2. SEM images of (a) $35 \mu\text{m}$ size Sendust powder

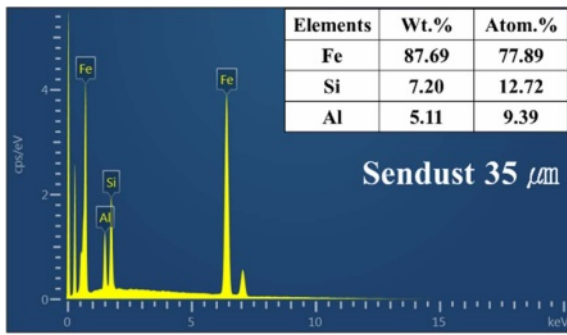


Fig. 3. EDS results of 35 μm size Sendust powder

에 대해 에너지 분산 X선 분광법(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDS)을 측정하여, 원소의 구성요소를 확인하였다. EDS는 SEM 이미지 측정장비에 부착된 장비를 활용하여 측정하며, 가속된 전자가 시료와 충돌하여 시료 내부의 전자를 밀어내어 입사전자를 외부로 방출시키면, 시료의 원자에 빈자리가 생성된다. 이렇게 전자가 방출되면서 원자 내부 생긴 빈공간에 의해서, 원자 에너지 준위가 높아지면서, 원자는 열역학적으로 안정을 추구하기 때문에, 원자의 빈자리로 상위 궤도의 전자가 천이 되어 빈자리를 메꾸면서 에너지 준위를 맞추기 위해서 에너지를 X-ray가 형태로 방출하게 된다. 이 방출되는 X-ray는 원자의 종류에 따라, 각각 다른 에너지 준위를 가지게 되므로, EDS는 이 원리를 활용하여 원자의 종류를 확인할 수 있는 장비이다. 본 논문에서 EDS를 활용하여 측정한 결과로 대표적으로 35 μm 입도에 대해서 Fig. 3과 같은 결과를 얻었다. 측정 결과는 무게분율 및 원자분율로 표시를 하였다. 전체 EDS 측정의 결과는 Table 4과 같이 정리하였으며, 각각의 입도별 분말에 대한 원자의 조성결과는 Table 2의 결과와 유사한 것을 알 수 있다. 하지만, 전체적으로 현재 확보되어 측정된 샌더스트 분말은 제조사의 제공 문서에 대비하여, 상대적으로 Fe 성분은 약간 높으며, Si성분은 대체적으로 약간 낮은 것을 알 수 있다.

앞에서 언급한 샌더스트 소재의 연자성 자성 특성을 확인하기 위해서 각 입도별 분말을 진동시료형 자력계(Vibrating Sample Magnetometer, VSM)를 활용하여 측정한 결과를

Table 4. EDS results of each size Sendust powder

Sample	Weight percentage (wt.%) / Atomic percentage (at. %)		
	Fe	Si	Al
25 μm	87.54/77.67	7.63/13.46	4.83/8.86
35 μm	87.69/77.89	7.20/12.72	5.11/9.39
50 μm	87.80/78.08	7.48/13.22	4.73/8.70
60 μm	87.76/78.01	7.38/13.05	4.86/8.94
88 μm	86.16/75.50	8.47/14.77	5.37/9.73

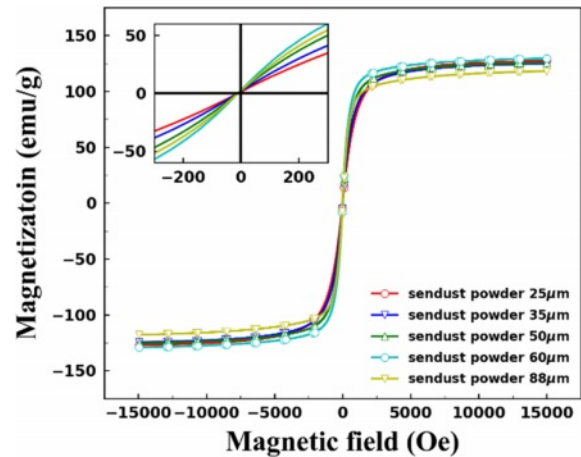


Fig. 4. Hysteresis loops of Sendust powder

Fig. 4에 그래프로 표현하였다. VSM의 원리는 시료에 진동을 가하게 되면, 패러데이 전자기 유도법칙에 따라서, 자성에 의한 유도 기전력이 발생하고 이를 검색코일(Search Coil)을 활용하여, 시료와 같은 주기로 진동하는 성분만을 검출하여 시료의 자화 값을 측정할 수 있다.

측정한 자화 값을 통해 hysteresis loop를 얻을 수 있으며, 이를 통해, 자기 포화, 잔류 자기, 보자력을 관찰할 수 있다. 보자력이 작을수록 시료의 자화가 적은 에너지로도 발생하기 때문에 높은 투자율을 가질 수 있는 것을 알 수 있다. 측정된 hysteresis loop 그래프는 샌더스트 분말의 입도 변화에 따라, 큰 특징적 변화가 없는 것을 알 수 있다. 또한 자기장 -300 Oe에서 300 Oe 영역에 대해서, 확대한 그래프의 기울기를 보면 60 μm 분말이 제일 큰 기울기를 지닌 것을 알 수 있다.

이를 통해서 연자성을 띄고 있는 샌더스트 분말은 입도에 따른 투자율 영향성은 크지 않을 것을 예측할 수 있으며, 분말 입도가 커지면 분말의 표면에서 분극 효과가 증가하기 때문에, 분말의 크기와 투입량에 따른 유전율의 차이가 발생할 것으로 예측할 수 있다.

2.3 샌더스트 분말이 분산된 세라믹 레진의 열 중량 분석

초고온 전파흡수구를 구현하기 위해서 앞에서 분석한 샌더스트 분말을 세라믹 레진에 분산시켜서 준비하여야 한다. 이를 위해 Fig. 1과 같은 기존의 방법만을 활용하기에는 분산 시 발생할 수 있는 점도 증가와 뭉침을 해소하기 위한 추가적인 방법이 적용되어야 하며, 다음의 Fig. 5와 같은 절차로 샌더스트 분말을 분산한 세라믹 레진을 준비하였다. 먼저 분산의 효율을 증가시키기 위해서 혼합물에 샌더스트 분말을 필요한 무게분율 만큼 첨가하여, 혼합물과 골고루 섞는다. 기존 과정과 마찬가지로, 활성 용제와 함께 스피드믹서 넣고 원심력을 이용한 1차 혼합을 수행한다. 앞에서 언급한 것과 같이, 분말상태에서 혼합물과 샌더스트

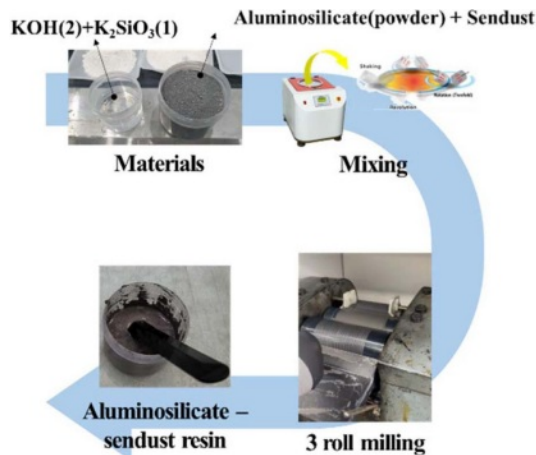


Fig. 5. Resin Preparation

분말을 섞고 스피드믹서를 통해서 혼합하는 과정에서 샌더스트 분말에 의해서 분산용액의 전체적인 점도가 상승되어 결과적으로 분말이 뭉치는 현상이 발생한다. 이를 해소하기 위해 3-roll mill을 이용한 기계적 분산을 추가로 수행하여, 최대한 샌더스트 분말이 균일하게 분산된 세라믹 레진 얻을 수 있었다.

Fig. 5의 공정을 통하여, 샌더스트 분말을 세라믹 레진에 각각 무게분율 20 wt.% 부터 40 wt.%까지 총 5종의 샌더스트/세라믹 레진을 제작하였다. 하지만, Type 3(50 μm 샌더스트 분말)부터 Type 5(88 μm 샌더스트 분말)는 무게분율 40 wt.%에 대해서는 3-roll milling을 활용한 세라믹 레진에 대한 분산은 문제없이 수행이 되었으나, 전자기물성 측정을 위한 시편 제작과정에서 몇 가지 문제가 발생하였다. 이는 50 μm , 60 μm , 88 μm 의 샌더스트 분말을 40 wt.% 무게분율로 분산한 레진의 점도가 다른 경우에 비해서 상대적으로 많이 증가하여 시편의 제작성에 영향을 미쳤으며, 점도를 해결하기 위해서 투입한 활성용액이 증가하여, 경화공정을 수행하였지만, 경화가 제대로 이루어지지 않는 문제가 발생하였다. 이와 같은 현상이 발생한 원인으로 추정하기 위해서, 먼저 샌더스트 분말의 입도에 따른 겔보기 밀도의 변화를 앞의 Table 3에서 확인하면 샌더스트 분말의 입도가 증가할 수록 겔보기 밀도가 낮아지는 것을 알 수 있다. 이는 샌더스트 분말의 입도가 증가할수록 같은 무게분율을 세라믹 레진과 분산시킬수록 더 많은 부피로 투입되어, 원소재와 활성용액이 충분히 경화를 할 수 있는 수준의 반응이 일어나는 것보다 샌더스트 분말이 차지하는 비율이 늘어나기 때문인 것으로 예상되었다. 또한 이를 완화하기 위해서 활성용액의 비율을 높이면, 경화가 되고 나서 충분한 강도가 나오지 않는 경향을 보이게 되었다. 하지만, 본 연구의 기본적인 목적은 초고온에서 내열성과 적절한 강도/강성을 가지는 초고온 전파흡수구조 구현과 그에 따른 전파흡수 거동을 관찰하는 것이 목표이기 때문에, 현 시

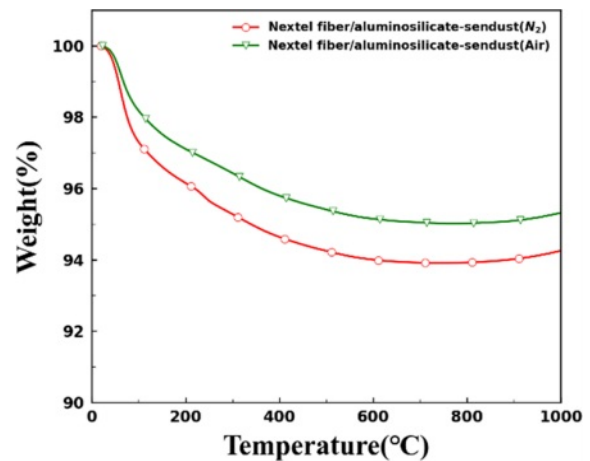


Fig. 6. TGA thermograms of Nextel fiber/aluminosilicate-sendust composite in N_2 atmosphere, and in air atmosphere

점에서는 경화가 되지 않는 무게분율의 경우를 제외하고 전자기 물성 측정 준비를 수행하였다. 앞에서 언급한 본 연구의 목적을 달성하기 위해서, Nextel 세라믹 섬유/알루미노실리케이트-샌더스트 세라믹 복합소재에 대한, 열적 내구성을 확인하기 위해서 Nextel 세라믹 섬유/알루미노실리케이트-샌더스트 복합재에 대한 열 중량 분석법 (Thermogravimetric analysis, TGA)을 수행하였고, Fig. 6과 같은 결과를 확보하였다.

TGA는 온도 변화에 따른 중량 변화를 정량적으로 분석하는 것으로 질소 분위기에서 분석을 수행하면 재료 자체의 내열성을 평가할 수 있으며, 산소 분위기에서 분석을 수행하면 재료의 내산화성을 평가할 수 있다[13,14]. Fig. 6에서 Nextel 섬유/알루미노실리케이트-샌더스트 복합재의 질소 분위기에서의 열 중량 분석을 수행한 결과에 따라, 1,000°C까지 최대 5.75%의 감량을 보였으며, 산소 분위기에서는 마찬가지로 조건에 대해서 최대 4.69% 감량을 보였다. 약 800°C에서 산소와 질소의 경우에 대해서 중량이 증가하는 것을 알 수 있으며, 이는 경화과정에서 잔류한 활성용액에 의한 추가 반응으로 추정된다. 열 중량 분석법의 결과로 본 연구에서 적용할 세라믹 복합재에 대해서는 내열성 및 내산화성이 우수한 편인 것을 확인할 수 있으며, 이를 활용한 초고온 전파흡수구조를 구현하기에 적합한 것을 확인할 수 있다.

2.4 샌더스트가 분산된 세라믹 복합소재의 전자기 물성 측정

샌더스트 분말에 대해서 5가지 입도와 시편이 형성되는 무게분율에 따라 구분하여 총 12종의 전자기물성 측정을 위한 시편을 제작하였다. 제작된 시편의 전자기물성은 S-parameter를 측정하여, 복소 유전율과 복소 투자율을 계산할 수 있는 Fig. 7과 같은 자유공간 측정 시스템을 활용하여 X-band(8.2 GHz to 12.4 GHz) 대역에서의 전자기 물성을 측

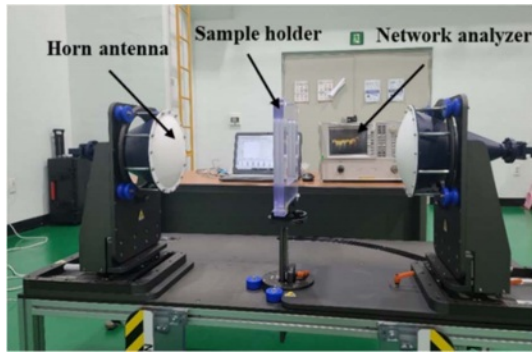


Fig. 7. Free Space Measurement System

정하였다. 본 연구에서 활용하는 자유 공간 측정 시스템은 자유공간 측정 시, 시편의 끝단에서 발생할 수 있는 전파의 회절 영향성을 최소화하기 위해 양쪽의 혼 안테나에 앞 부분에 특정 초점을 지닌 유전체 렌즈를 부착하고 통과된 전파가 굴절하여, 일정한 형태의 Focused Beam을 발생시키고, 이 전파가 Sample Holder 안에 거치된 시편의 중심부 영역에 평면파(Plane wave)로 입사할 수 있도록 구성한다. 이 구성을 활용하여, 전파에 대해 Vector Network Analyzer를

이용하여, 반사파(S11)와 투과파(S12)를 측정함으로써 시편의 전자기 물성을 비교적 정확하게 측정할 수 있다. 본 자유 공간 측정 시스템을 활용하여 측정한 세라믹 복합소재의 유전율 물성은 Fig. 8에 투자율 물성은 Fig. 9에 각각 그래프로 표현하였다.

Fig. 8의 유전율 측정 결과를 보면, 동일한 무게분율을 지닌 샌더스트 분말의 입도가 증가하는 경우 유전율의 실수부가 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 마찬가지로, 샌더스트 분말의 입도가 동일한 경우에서 무게분율이 증가하면, 유전율 실수부는 대체적으로 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 유전율 허수부 역시, 유전율 실수부와 동일한 경향을 증가하는 것을 확인할 수 있다. 샌더스트 분말 각각의 동일 입도 및 무게분율에 대해서는 주파수가 증가하면, 유전율의 실수부, 허수부가 갈수록 조금씩 감소하는 경향을 볼 수 있다. 이는 Debye의 이론과 Harciriak-Negami의 이론을 보면, 주파수가 증가할 수록 분극이 주파수의 변화를 따라가지 못하는 현상에 의해서 유전율의 실수부, 허수부가 낮아지는 이론을 따르는 것을 알 수 있다.

다음으로 투자율 측정 결과 Fig. 9를 분석해보면, 앞선 VSM 측정결과인 Fig. 4의 hysteresis loop에서 예측된 것과 같이,

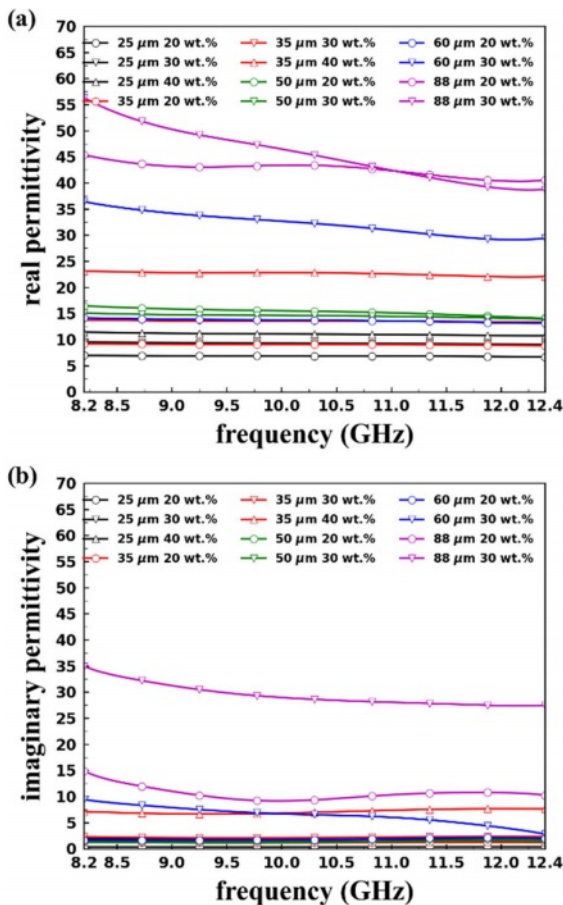


Fig. 8. Real (a) and Imaginary (b) permittivity of Nextel Fabric/aluminosilicate-sendust composite

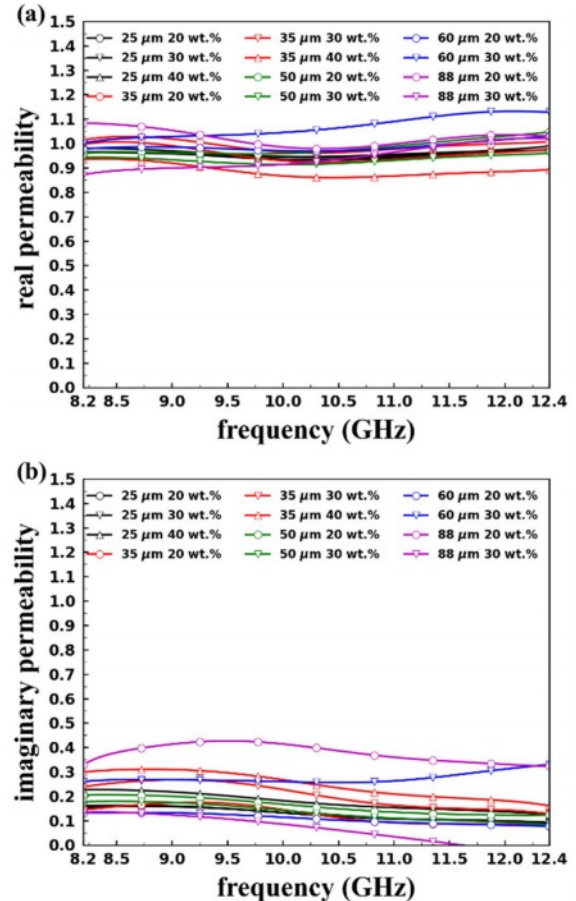


Fig. 9. Real (a) and Imaginary (b) permeability of Nextel Fabric/aluminosilicate-sendust composite

분말의 입도와 무게분율에 따른 변화가 크지 않음을 알 수 있다. 투자율의 경우는 실수부는 0.85에서 1.1 수준의 변동성을 가지면서 변화하고, 허수부의 경우는 0.1에서 0.4 수준에서 변동하는 것을 확인할 수 있다. 이는 자성체의 경우 저주파에 비해서 고주파에서 전기장의 변화로 유도되는 자기장의 변화를 자성체가 따라가지 못해 자화가 감소되어, 나타나는 현상에 따라서 고주파에서는 변화가 크지 않음을 알 수 있다. 측정된 결과를 활용한 초고온 전파흡수구조 설계를 위해 X-band 대역의 중심 주파수인 10 GHz 측정결과를 Table 5에 정리하였다. 또한 설계에서 활용하기 위한 두께 변수를 정의하기 위한 ply당 두께를 구하기 위해 입도

Table 5. Comparison of complex permittivity and permeability of the ceramic/sendust-aluminosilicate composites different with particle size and weight percentage

Pristine Ceramic Fiber/Aluminosilicate Composite				
Sendust Contents	ϵ'	ϵ''	μ'	μ''
0 wt. %	4.260	0.062	0.973	0.007
Particle Size: 25 μm				
Sendust Contents	ϵ'	ϵ''	μ'	μ''
20 wt. %	6.853	0.305	0.946	0.132
30 wt. %	9.304	1.385	0.934	0.132
40 wt. %	11.071	1.755	0.943	0.181
Particle Size: 35 μm				
Sendust Contents	ϵ'	ϵ''	μ'	μ''
20 wt. %	9.046	1.126	0.964	0.145
30 wt. %	13.518	2.079	0.929	0.227
40 wt. %	22.840	6.792	0.867	0.267
Particle Size: 50 μm				
Sendust Contents	ϵ'	ϵ''	μ'	μ''
20 wt. %	15.514	1.563	0.958	0.167
30 wt. %	14.626	1.186	0.913	0.142
Particle Size: 60 μm				
Sendust Contents	ϵ'	ϵ''	μ'	μ''
20 wt. %	32.657	6.679	1.044	0.259
30 wt. %	84.800	50.289	0.806	0.314
Particle Size: 88 μm				
Sendust Contents	ϵ'	ϵ''	μ'	μ''
20 wt. %	43.366	9.145	0.985	0.414
30 wt. %	46.475	28.953	0.914	0.085

Table 6. Thickness per ply of Ceramic composite with Sendust

	25 μm 20 wt. %	47 μm 20 wt. %	88 μm 20 wt. %
Thickness per ply (TPP) (mm)	0.669	0.676	0.734

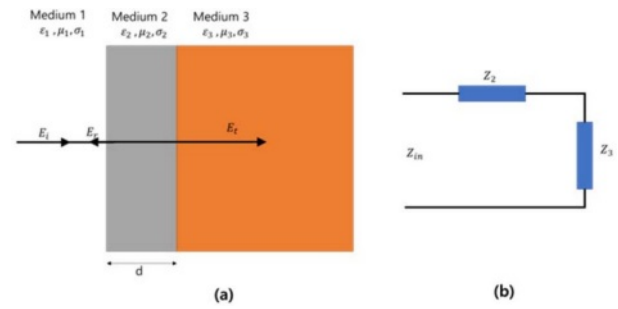


Fig. 10. (a) Schematic and (b) transmission line equivalent circuit for EM wave propagation through a thin slab between semi-infinite media

가 25 μm , 5 μm , 88 μm 의 입도를 지닌 샌더스트 분말을 무게분율 20 wt.%로 분산한 레진을 활용하여, Nextel 섬유 알루미노실리케이트-샌더스트 세라믹 복합재를 제작하고 그 두께 측정의 결과를 Table 6에 정리하여 작성하였다.

2.5 전자파흡수구조 설계 이론

단층의 전파흡수구조를 설계하기 위해서, Fig. 10(a)와 같이 무한한 두께의 1번 층과 상대적으로 작은 2번 층 그리고 상대적으로 큰 3번 층으로 구성된 물질이 각각의 유전율, 투자율, 전도도를 가지고 있을 때, Fig. 10(b)와 같이 전송선로 등가회로로 표현할 수 있다. 이때, 입력 임피던스(Z_{in})는 다음과 같이 식 (1)으로 표현하였다[15-18].

$$Z_{in} = Z_2 \frac{Z_3 \cosh(\gamma d) + Z_2 \sinh(\gamma d)}{Z_2 \cosh(\gamma d) + Z_3 \sinh(\gamma d)} \quad (1)$$

식 (1)에서 γ 는 전파 상수를 나타내며, 3번 층을 완전 도전체로 두면 즉, Short 시킨 회로로 보게 되면 반사계수 R 은 다음의 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \frac{Z_{in} - Z_1}{Z_{in} + Z_1} \quad (2)$$

식 (1)에 대해서 3번 층이 완전 도전체이므로 임피던스 Z_3 을 0으로 하여, 식 (2)에 대입하면, 다음의 식 (3)을 얻을 수 있다.

$$R = \frac{Z_2 \tanh(\gamma d) - Z_1}{Z_2 \tanh(\gamma d) + Z_1} \quad (3)$$

(3) 식에서 반사계수 R 을 0으로 하기 위해서는 식 (3)의 분자가 0이 되는 경우 이므로 식 (4)에 대한 해를 구하면, 이론적으로 반사가 일어나지 않는 단층의 전파흡수구조를 설계할 수 있다.

$$Z_2 \tanh(\gamma d) - Z_1 = 0 \quad (4)$$

초고온 전파흡수구조를 설계하기 위해서, 추가적으로 온

도에 따른 재료의 전자기 물성의 변화를 예측하여야 한다. 일반적으로 유전율은 주파수와 온도의 함수로 구성되며, Debye 이론과 Arrhenius의 이론을 활용하여 설명할 수 있다[6,12,19-23]. Debye 이론에 따르면 복소 유전율은 다음의 식 (5)과 식 (6)과 같다.

$$\epsilon' = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{1 + \omega^2 \tau(T)^2} \quad (5)$$

$$\epsilon'' = \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{1 + \omega^2 \tau(T)^2} \omega \tau(T) + \frac{\sigma(T)}{2\pi\epsilon_0 f} \quad (6)$$

여기서 ω 는 각 주파수, $\tau(T)$ 는 온도에 따른 이완 시간, ϵ_s 는 정적 유전율, ϵ_{∞} 은 고주파 유전율, ϵ_0 는 진공에서의 유전 상수 값, f 는 주파수, $\sigma(T)$ 는 온도에 따른 전기 전도도를 의미한다. 여기서 Arrhenius 이론에 의거하여, 온도에 따른 이완 시간 $\tau(T)$ 는 다음의 식 (7)과 같다[23,24].

$$\tau(T) = \tau_0 \exp\left(\frac{E_a}{KT}\right) \quad (7)$$

여기서 E_a 는 활성화 에너지, τ_0 는 자유 상수이며, K 는 볼츠만 상수이다. 식 (7)을 보면, 온도 T 가 증가할수록 이완 시간이 짧아지는 것을 알 수 있다. 식 (7)을 식 (5)에 대입하여 정리하면 다음의 식 (8)을 얻을 수 있다.

$$\epsilon' = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{1 + \omega^2 \tau_0^2 [\exp(E_a/KT)]^2} \quad (8)$$

식 (8)를 보면, 결론적으로 온도 T 가 증가할수록 이완 시간이 짧아지다가 포화되며 이에 따라 유전율의 실수부는 주파수에 의한 영향이 지배적으로 나타나게 된다. 유전율의 허수부도 마찬가지로 식 (7)을 식 (6)에 대입하여 정리하면, 유전율 실수부와 마찬가지로 이완시간에 영향을 받으며, 추가적으로 온도에 따른 전기전도도의 영향을 받는다. 일반적인 경우 금속재료의 경우 온도가 증가할수록 자유전자의 움직임이 방해받음으로써 전기 전도도가 감소하며, 반도체의 경우는 반대로 열에너지에 의해서 에너지 갭을 뛰어넘을 수 있는 자유전자의 숫자가 많아져서 전기 전도도가 증가하게 된다. 마지막으로 부도체의 경우는 상온에서는 전기전도도가 매우 작고, 온도가 증가함에 따라 큰 차이가 없지만, 특정온도에 도달하게 되면 자유전자가 증가하기 때문에 온도가 증가할수록 전기 전도도가 높아지게 되는 특성을 가지고 있다. 본 연구에서 손실소재로 적용한 샌더스트 분말의 경우, 앞에서 확인한 바와 같이 Fe-Si-Al로 구성되어 있기 때문에, 온도에 따른 유전율의 변화를 관측하면 전기전도도가 어떤 특성을 따라가는 지를 알 수 있다. 또한, 투자율의 경우는 큐리 온도에 따른 상관관계를 예측할 수 있다. 큐리 온도는 강자성체가 강자성 상태에서 상자성(paramagnetism) 상태로 변하거나 그 반대로 가

는 경우에 대한 임계온도를 의미한다. 예를 들면, 강자성 상태와 같은 자성을 특정온도로 가열하게 되면 자성을 잃게 되며, 이는 큐리 온도 이상의 열 에너지로 강자성체에 가해질 때, 원자의 열에너지가 자기 모멘트의 결합에너지와 같아져서 자기모멘트가 결합하지 못해서 발생하는 현상이다. 널리 알려진 소재별 큐리 온도는 철의 경우 770°C, 코발트의 경우는 1130°C, 니켈은 358°C, 산화철은 622°C의 큐리 온도를 가지고 있다.

3. 설계 및 제작

3.1 초고온 전파흡수구조 설계

앞에서 측정한 각각의 입도별, 무게분율별 소재의 전자기 물성 값을 활용하여, 단층형 초고온 전파흡수구조 설계를 위해, 상대적으로 큰 변화가 없는 투자율을 1로 고정하고, 각각의 두께에 대해 10 GHz 주파수에 대해서, 식 (3)의 반사계수가 최소가 되도록 하는 이상적인 유전율의 실수부 및 허수부에 대한 값을 계산하여, 다음의 Cole-Cole Plot을 Fig. 11과 같이 검정색 선으로 표시하였다.

또한, Cole-Cole Plot에 10 GHz에서 측정한 전자기 물성인 유전율을 같이 표시하였다. 이 물성 중에서, 이상적인 반사계수를 지니는 유전율 실수부와 허수부와 가장 근접한 물성을 선정하였고, 그 물성은 각각 샌더스트 분말 입도 35 μm , 무게분율 40 wt.%와 샌더스트 분말 입도 60 μm , 무게분율이 20 wt.%인 Nextel 섬유 알루미늄실리케이트-샌더스트 세라믹 복합소재이다. Cole-Cole Plot에서 선정한 두 개의 물성을 활용하여, 각각 단층형 초고온 전파흡수구조를 설계하였다. 설계를 위해서 상용 소프트웨어 MATLAB R2011b (MathWorks Inc., USA)으로 식 (1)을 이용하여 입력 임피던스를 계산하고 이 값이, 자유 공간의 임피던스와 정합이 되어 일치하도록 하는 즉, 식 (2)의 반사계수가 0이 되도록 하

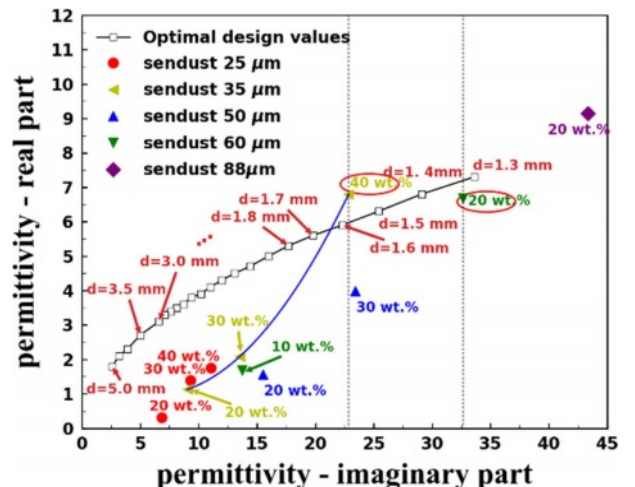


Fig. 11. Cole-Cole plot (optimal calculated values) and measured complex permittivity at 10 GHz

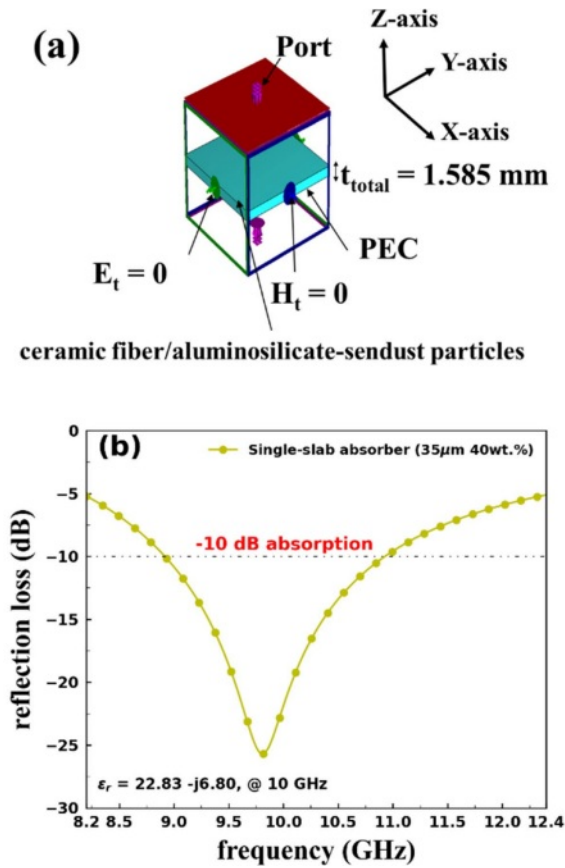


Fig. 12. (a) Analysis Model for Electromagnetic analysis software (b) Microwave Absorption performance of designed single-slab RAS in the X-band (8.2-12.4 GHz) using Sendust 35 μm particle size and 40 wt.%

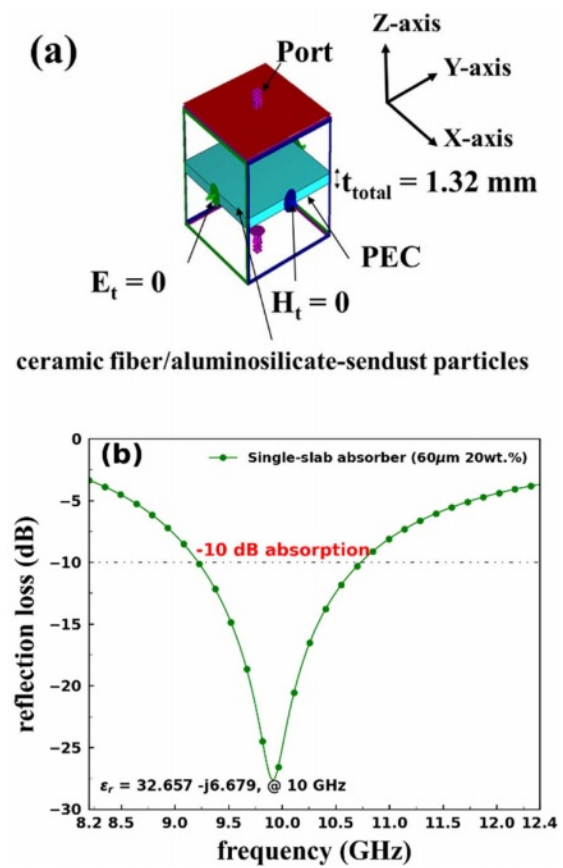


Fig. 13. (a) Analysis Model for Electromagnetic analysis software (b) Microwave Absorption performance of designed single-slab RAS in the X-band (8.2-12.4 GHz) using Sendust 60 μm particle size and 20 wt.%

기 위해서, 유전자 알고리즘을 활용하여 최적 두께를 구하였으며, 그 결과 샌더스트 분말의 입도 35 μm , 무게분율 40 wt.%의 초고온 전파흡수구조의 최적 두께는 1.585 mm이다. 동일한 알고리즘을 활용하여, 샌더스트 분말의 입도 60 μm , 무게분율 20 wt.%의 초고온 전파흡수구조의 경우 최적 두께는 1.32 mm로 최적 두께가 산출되었다. 이렇게 도출된 최적 값을 상용 전자기해석 소프트웨어인 CST Microwave Studio(Computer System Technology GmbH, Germany)를 활용하여, 성능을 예측하기 위해서에 각각의 샌더스트 분말을 포함하는 세라믹 복합재를 모델링 하고 해석한 결과를 검토하였다. 먼저 첫번째로, Fig. 12(a)는 샌더스트 분말의 입도 35 μm , 무게분율 40 wt.% 조건의 유전율 값과 두께 1.585 mm를 적용한 해석모델과 경계 조건을 보여주고 있다. 해석은 unit cell 형태로 모델링하여, 경계조건을 PBC(Periodic Boundary Condition)로 만족시키기 위해 그림의 X축 방향을 따라 전계(Electric field)의 수직방향의 성분을 전계가 0인 조건으로, Y축 방향을 따라 자계(Magnetic field)의 수직방향 성분에 대해서 자계가 0인 조건으로 각

각의 경계 조건(Boundary condition)을 설정하였다. 평면파를 입사조건을 구현하기 위해서 Z축 방향에 포트를 설정하여, 평면파를 인가하였으며, 전파흡수를 구현하기 위해서 식 (4)의 조건과 동일하게 전자기해석 모델 제1 하부면을 완전 도체(PEC, Perfect electric conductor)로 적용하였다. 해석 주파수는 8.2 GHz에서 12.4 GHz로 정의하였다. 반사손실 해석 결과는 다음의 Fig. 12(b)와 같으며, 결과는 공진 주파수는 약 9.8 GHz이며, 반사손실은 약 -25.7 dB임을 알 수 있다. 또한 -10 dB 이하의 반사손실을 만족하는 영역은 주파수 8.92 GHz에서 10.93 GHz로 약 2.01 GHz 수준의 대역폭을 가지는 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 12의 단층 설계는 최적 두께인 1.585 mm의 비교적 얇은 두께로 X-Band 중심주파수를 포함하는 약 2 GHz의 대역폭에 대해 90% 수준의 전파흡수율을 만족할 수 있는 설계임을 확인할 수 있다. 동일한 방법으로 샌더스트 분말 입도 60 μm , 무게분율 20 wt.%에 대해서 Fig. 12와 동일하게 Fig. 13(a)와 같이 전자기 해석 모델링을 수행하였으며, 그 해석의 수행 결과는 Fig. 13(b)와 같다. 결과 그래프를 확인해보면 공진 주파수

는 약 9.9 GHz이며, 그때의 반사손실은 약 -27.7 dB임을 알 수 있다. -10 dB 이하의 반사손실을 만족하는 영역은 주파수 9.22 GHz에서 10.73 GHz로 약 1.51 GHz의 대역폭임을 알 수 있다. 결과를 비교하면, 샌더스트 분말의 입도 35 μm , 무게분율 40 wt.%에 비해서, 샌더스트 입도 60 μm , 무게분율 20 wt.%의 경우 공진 주파수에서의 반사손실은 2 dB 정도 낮지만, 대역폭이 0.5 GHz 감소함으로써 상대적으로 협대역적인 특징을 지니는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 초고온 전파흡수구조의 전파흡수 경향 분석을 위해 조금 더 광대역 특성인 샌더스트 분말의 입도 35 μm , 무게분율 40 wt.%인 경우에 대해 초고온 전파흡수구조를 제작하여 온도 별 전파흡수 거동을 확인하겠다.

3.2 초고온 전파흡수구조 제작

세라믹 섬유인 Nextel은 롤 단위로 구매가 되었으며, 세라믹 레진인 알루미노실리케이트/샌더스트는 원소재 분말과 샌더스트 분말을 혼합하고, 활성용액을 이용하여 스피드 믹서를 통해 제조가 된 후, 3-roll mill을 활용하여 페이스트 형태의 레진으로 준비가 된다. 이는 섬유와 레진이 동시에 함침되어 있는 프리프레그가 아니기 때문에, 각각의 Dry fabric과 레진을 직접 작업하기에 유리한 Hand Lay-up 공정을 통하여 초고온 전파흡수구조를 제작하였다. 제작 절차는 다음 Fig. 14와 같다. 본 연구의 전자기 성능 측정은 자유공간 측정 시스템을 활용하기 때문에, Sample holder의 크기를 고려하여 가로 200 mm, 세로 220 mm의 크기로 제작한다. 이를 위해, dry Fabric을 요구 치수에 맞춰서 재단하며 이때, 섬유의 올이 풀리지 않도록 주의하여 재단한다. 재단한 dry fabric을 활용하여 제작하기 위하여, 평판을 제작할 수 있는 평평한 치구에 release Film을 한 장 최초 적층하고, 그 위에 Dry Fabric을 거치시킨다. 그 상태에서 fabric의 직조가 풀리지 않도록 주의하면서, 알루미노실리케이트와/샌더스트 레진을 일정한 두께를 유지할 수 있도록 적당한 압력을 가하면서 헤라를 이용하여 펴 바르는 형태로 적층하고 이와 동일한 과정을 수행하여 총 3 plies를 적층하여, 원

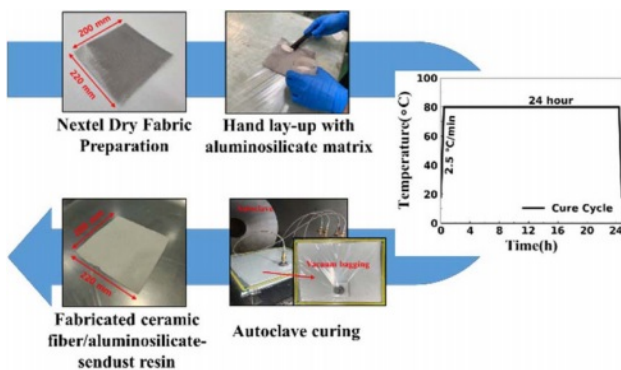


Fig. 14. Fabrication process of sendust/aluminosilicate/ceramic fiber composite specimen

하는 두께의 초고온 전파흡수구조 제작을 목표로 한다. 적층이 완료되면, release film과 breather를 적층하고, 최종적으로 Bagging Film을 치구면에 실링한 후 진공포트를 이용하여 압착하고 이후 오토클레이브를 이용하여, 80°C에서 7 기압의 압력 하에 24시간 경화 공정을 통해 제작하였다.

4. 결과 및 토의

4.1 초고온 환경에서의 전자기물성 측정

앞에서 전자기 물성 측정을 위해서 제작한 시편 중 초고온 전파흡수구조를 제작하기 위한 샌더스트 분말 입도 35 μm , 무게분율 40 wt.%이 적용된 시편을 활용하여 온도에 따른 전자기 물성의 측정을 수행하였다. 자유 공간 측정 시스템에 초고온 환경을 부여할 수 있는 초고온 열 챔버를 연동하여 측정장비를 준비하였다. 초고온 열 챔버는 고순도 내화물로 제작된 규화 몰리브덴(MoSi_2) 히터를 이용하여, 장비의 스펙 상으로 최대 1,550°C의 초고온 환경을 조성할 수 있으며, 전자기 물성 및 반사손실을 측정간 영향성을 최소화하기 위해 저 유전율을 지닌 Fibermat™ 단열재를 적용하고 전자기물성 측정 오차를 최소화하기 위해서 2-Tier gated reflect line(GRL) calibration 및 time gating 방식을 적용하여, 비교적 높은 신뢰도로 전자기물성과 반사손실을 측정을 할

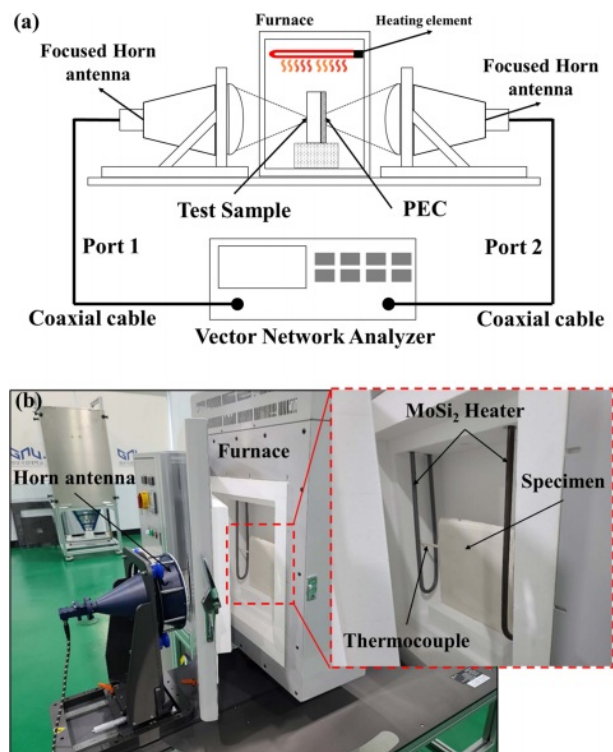


Fig. 15. (a) Schematic diagram of free-space measurement system linked with high temperature furnace for X-band from 25°C to 1,550°C, (b) Free-space measurement system with high temperature furnace

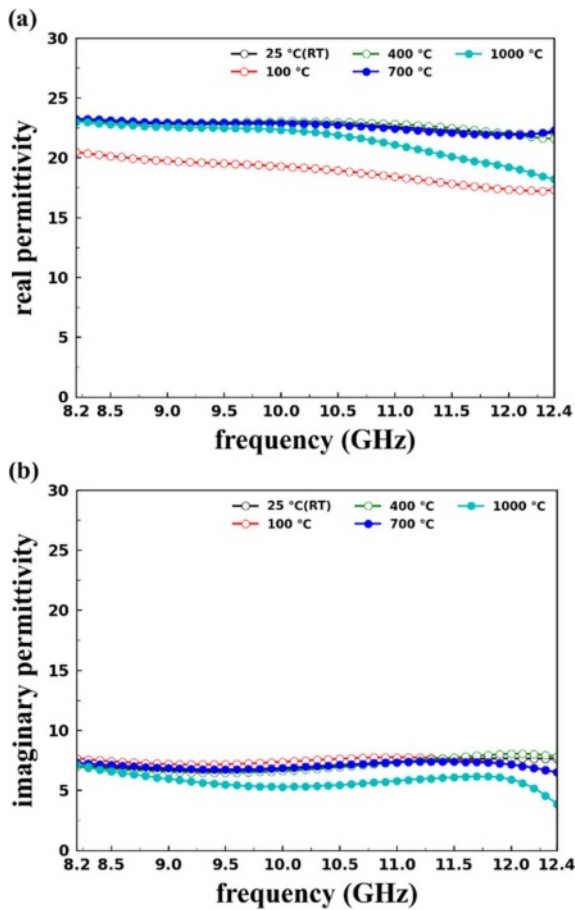


Fig. 16. The measured (a) real and (b) imaginary permittivity of Nextel fiber/aluminosilicate composite at various temperature

수 있다. 먼저 본 장비를 활용하여 전자기 물성을 측정하기 전에, calibration kit를 활용하여, horn antenna와 vector network analyzer를 연결하는 RF cable에 대한 보정을 실시하고, 장비를 준비한 Fig. 15과 같이 시편을 위치시키고, $3.3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 로 승온 속도를 설정하여, 25°C 에서 $1,000^{\circ}\text{C}$ 까지 $25^{\circ}\text{C}(\text{RT})$, 100°C , 400°C , 700°C , $1,000^{\circ}\text{C}$ 의 총 5개의 온도에 대해 전자기 물성을 측정하였다. 이때, 각각의 측정에서 측정을 위해 설정된 온도에 도달한 후 온도에 의한 오차를 감소시키기 위해서 최소 15분 동안 온도를 확인/유지한 후에 전자기 물성을 측정하였다. 온도에 따른 측정결과 중 유전율은 Fig. 16에 결과를 그래프로 나타냈으며, 투자율은 Fig. 17에 그 결과를 그래프로 정리하였다. 전자기 물성의 측정결과 중에서 먼저 유전율에 대한 결과를 확인하도록 한다.

유전율에 대한 측정 결과 보면, 실수부는 100°C 의 경우를 제외하고는 온도에 따른 유전율 실수부의 차이가 크지 않으며, $1,000^{\circ}\text{C}$ 의 경우는 유전율이 주파수에 따라 감소하는 것을 확인할 수 있다, 이는 앞선 식 (5)를 이용하여, 분석하면 온도가 올라감에 따라 이완 시간의 변화가 크지 않음을

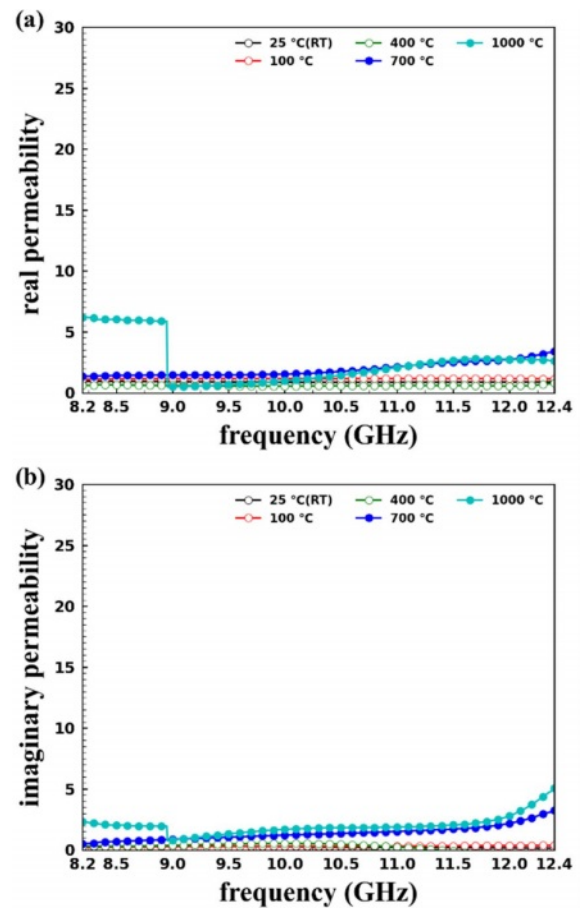


Fig. 17. The measured (a) real and (b) imaginary permeability of Nextel fiber/aluminosilicate composite at various temperature

알 수 있다. 또한 허수부를 보면, 전기전도도는 오히려 온도가 올라 갈수록 낮아지는 것을 알 수 있다[25-27]. 다음으로 투자율에 대한 측정 결과 Fig. 17을 확인하면, 샌더스트 소재는 온도가 올라 갈수록 투자율 실수부와 허수부가 조금씩 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 주파수가 증가함 상온에서의 측정결과와 다르게 특정 온도 이상에서는 약간 증가하는 것을 확인할 수 있다. 700°C 부터는 투자율의 실수부와 허수부가 증가하는 것을 알 수 있다.

4.2 초고온 전파흡수 세라믹 복합재 구조의 반사손실 측정

샌더스트 분말 입도 $35\ \mu\text{m}$, 무게분율 40 wt.%에 대한 전자기물성 측정을 통해서, 온도가 증가함에 따라 달라지는

Table 7. The thickness of designed and fabricated RAS

	Thickness (mm)	TPP (mm)
Designed RAS	1.585	N/A
Fabricated RAS	1.863	0.621

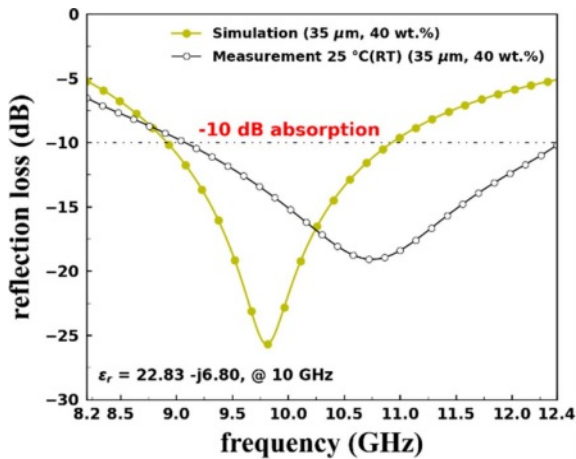


Fig. 18. Microwave absorption performance of the designed and measured single-slab RAS in the X-band (8.2-12.4 GHz) with particle size: 35 μm – 40 wt.%

특성을 확인하였다. 초고온 전파흡수구조를 구현하기 위해서 3.1에서 설계한 값을 반영하여 제작한 결과는 다음의 Table 7과 같다. 상온에서의 반사손실 측정결과와 시뮬레이션 결과는 Fig. 18와 같다. 초고온 전파흡수구조의 전자기설계 결과에 따라 제작을 목표로 하는 두께는 1.585 mm 이지만, Table 6에서 확인한 바와 같이, TPP는 평균적으로 약 0.6 mm 수준이며, 실제로 제작된 결과물 또한 0.621 mm의 TPP를 보유하고 있으므로, 3 plies에 대한 제작은 무사히 완료되었다.

제작된 초고온 전파흡수구조는 상온 측정조건의 결과를 보면 중심 주파수는 10.75 GHz이며, 이때의 반사손실은 -19.09 dB 수준이고, -10 dB 이하의 반사손실을 지는 대역은 9.08 GHz to 12.4 GHz(대역폭: 3.32 GHz)임을 측정결과를 통해서 알 수 있다. 이 결과는 설계 값이 반영된 시뮬레이션 대비하여 흡수할 수 있는 대역폭은 증가하였지만, 공진 주파수는 고주파 쪽으로 설계 값 9.8 GHz와 대비하여, 0.95 GHz 증가한 10.75 GHz로 이동하였음을 알 수 있다. 설계 값 대비하여, 제작된 두께가 두껍기 때문에 일반적인 경우에는 공진 주파수는 낮아지는 방향으로 움직여야 하지만, 시험 결과는 두께는 오히려 고주파 방향으로 움직인 것을 알 수 있다. 설계 투자율의 변화량이 크지 않아서 1로 가정한 부분이 틀린 것을 알 수 있으며, 투자율 영향성이 반영된 것임을 알 수 있다. 상온에서 측정된 초고온 전파흡수 구조에 대해서, 초고온 열 챔버를 이용하여 전자기 물성 측정과 동일한 온도에 대해서 각각의 반사손실을 측정하여 흡수 성능을 확인하였고 그 결과는 Fig. 19과 같다.

결과에 대해서 각각 공진 주파수, 공진 주파수에서의 반사손실, -10 dB 이하의 반사손실 대역에 대해서 25°C 부터 1,000°C까지의 측정결과를 Table 8에 정리하였다.

결과를 확인해보면 약 1,000°C까지는 공진주파수는 뚜렷

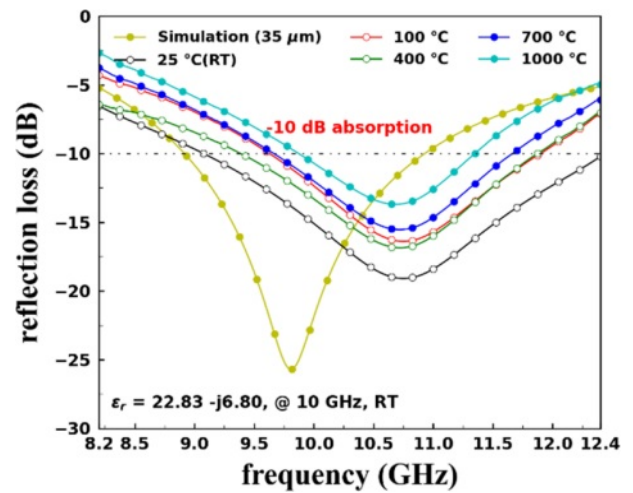


Fig. 19. The measurement results for absorption performance of the proposed RAS at various temperatures

Table 8. The measurement result for proposed RAS at various temperatures

Temperature (°C)	Resonance Frequency (GHz)	Reflection Loss(dB) @ Resonance Frequency	-10 dB frequency band (GHz)
25	10.750	-19.093	9.080 to 12.400 (Δ 3.320)
100	10.750	-16.395	9.630 to 11.895 (Δ 2.265)
400	10.725	-16.862	9.385 to 11.870 (Δ 2.485)
700	10.720	-15.538	9.665 to 11.660 (Δ 1.995)
100	10.685	-13.701	9.875 to 11.345 (Δ 1.470)

하게 변하지 않는 것을 알 수 있으며, -10 dB 이하의 대역폭은 온도가 증가할수록 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 공진 주파수에서의 반사 손실률이 온도가 커질 수록 커지는 것을 알 수 있다. 이는 온도가 올라갈수록 샌더스트 분말의 거동의 전기전도도가 낮아지는 방향으로 진행되면서 유전율의 값은 낮아지는 방향으로 변화하지만, 투자율은 커지는 방향으로 변화하기 때문에, 전체적인 공진 주파수의 변화는 작은 것으로 보이나, 유전손실이 감소함에 따라 -10 dB 반사손실 대역과 공진 주파수에서의 반사손실 성능이 감소되는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서 초고온 전파흡수구조 구현을 위해 3M사의 Nextel 세라믹 섬유와 지오폴리머 기반의 알루미늄노실리케

이트 세라믹 레진을 기본으로 하고, 전자기 성능 구현을 위한 유전/자성 특성을 부여하기 위한 연자성 소재인 샌더스트 분말을 분산시킨 소재를 활용하였다. 샌더스트 분말을 적용하기 위해서, 다양한 입도와 무게분율이 적용된 전자기적 물성을 측정 시편을 활용한 물성측정을 통하여, 이상적인 설계 두께에 대해 필요한 유전율 정보를 식별할 수 있는 Cole-Cole Plot을 활용하여, 샌더스트 분말의 입도 35 μm , 무게분율 40 wt.%의 소재를 선정하였고, 전자기 물성을 반영하여 최적 설계 두께인 1.585 mm을 도출하였다. 도출된 결과를 반영하여, 초고온 전파흡수구조를 제작/측정하였으며, 온도에 따른 전자기 물성의 변화 및 반사손실을 측정하였다. 그 결과 공진 주파수 10.685~10.750에 대해서 온도별로 최소 -13.701 dB에서 최대 -19.093 dB의 반사손실을 가지는 것을 확인하였으며, 온도가 올라감에 따라 -10 dB 이하의 반사손실을 가지는 영역이 감소하는 것을 확인하였다. 본 결과를 바탕으로 특정 온도에서 최대 반사손실을 가질 수 있도록 설계를 개선하는 방향에 대해서 연구를 진행할 예정이다.

후 기

본 연구는 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 2020년 신진연구지원사업(NRF-2020R1C1C1006166_금속 코팅된 SiC 섬유 기반 초고온 다중 대역 스텔스 복합재 구조 핵심기술 개발)과 2021년 미래 국방혁신기술 개발 사업(NRF-2021M3F6A1085892_비(非)유리섬유 계열을 활용한 고강도/고강성 전파흡수구조체 개발)의 지원을 받아 수행된 연구 결과입니다.

REFERENCES

- Rao, G.A., and Mahulikar, S.P., "Integrated Review of Stealth Technology and Its Role in Airpower", *Aeronautical Journal*, Vol. 106, No. 1066, 2002, pp. 629-642.
- Yang, Z., Luo, F., Sun, M., Xu, J., Zhou, W., Qing, Y., Zhu, D., and Huang, Z., "Design and Reflectivity Analysis of High Temperature Wave-absorbing Coatings with Circular Periodic Structure", *Materials Letters*, Vol. 151, 2015, pp. 109-111.
- Wan, F., Luo, F., Zhou, Y., Zhou, W., and Zhu, D., "A Glass Coating for SiC Fiber Reinforced Aluminum Phosphate Matrix ($\text{SiC}_f/\text{AlPO}_4$) Composites for High-temperature Absorbing Wave Applications", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 264, 2015, pp. 9-16.
- Wang, J., Zhou, W., Luo, F., Zhu, D., and Qing, Y., "Dielectric and Microwave Absorbing Properties of Quartz Fiber/amorphous Carbon/polyimide Composites at Elevated Temperature", *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 17, No. 6, 2017, pp. 3751-3758.
- Tian, H., Liu, H.T., and Cheng, H.F., "A High-temperature Radar Absorbing Structure: Design, Fabrication, and Characterization", *Composites Science and Technology*, Vol. 90, 2014, pp. 202-208.
- Song, H., Zhou, W., Luo, F., Huang, Z., Qing, Y., Chen, M., and Mu, Y., "Temperature Dependence of Dielectric Properties of $\text{SiC}_f/\text{PyC}/\text{SiC}$ Composites", *Materials Science and Engineering: B*, Vol. 195, 2015, pp. 12-19.
- Baskey, H.B., Kumar, D., Shami, T.C., Kumar, R., Kumar, S., Dixit, A.K., and Prasad, N.E., "In-situ High-temperature Electromagnetic Characterization of Ceramic Composite Tiles for Strategic Applications", *Proceeding of 2016 11th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS)*, 2016, pp. 300-303.
- Wang, H., and Zhu, D., "Design of Radar Absorbing Structure Using $\text{SiC}_f/\text{Epoxy}$ Composites for X Band Frequency Range", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 57, No. 6, 2018, pp. 2139-2145.
- Li, M., Yin, X., Zheng, G., Chen, M., Tao, M., Cheng, L., and Zhang, L., "High-temperature Dielectric and Microwave Absorption Properties of $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiC}/\text{SiO}_2$ Composite Ceramics", *Journal of Materials Science*, Vol. 50, No. 3, 2015, pp. 1478-1487.
- Song, H.-H., Zhou, W.-C., Luo, F., Luo, F., Qing, Y.-C., and Chen, M.-L., "Microwave Dielectric Properties of Nextel-440 Fiber Fabrics with Pyrolytic Carbon Coatings in the Temperature Range from Room Temperature to 700°C", *Chinese Physics B*, Vol. 24, No. 8, 2015, pp. 088107-1-4.
- Liu, H., Tian, H., and Cheng, H., "Dielectric Properties of SiC Fiber-reinforced SiC Matrix Composites in the Temperature Range from 25 to 700°C at Frequencies between 8.2 and 18GHz", *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 432, No. 1-3, 2013, pp. 57-60.
- Cao, M.-S., Song, W.-L., Hou, Z.-L., Wen, B., and Yuan, J., "The Effects of Temperature and Frequency on the Dielectric Properties, Electromagnetic Interference Shielding and Microwave-absorption of Short Carbon Fiber/silica Composites", *Carbon*, Vol. 48, No. 3, 2010, pp. 788-796.
- Hou, Y., Xiao, B., Sun, Z., Yang, W., Wu, S., Qi, S., Wen, G., and Huang, X., "High Temperature Anti-oxidative and Tunable Wave Absorbing $\text{SiC}/\text{Fe}_3\text{Si}/\text{CNTs}$ Composite Ceramic Derived from a Novel Polysilyacetylene", *Ceramics International*, Vol. 45, 2019, pp. 16369-16379.
- Yang, R., Liu, Y., Yu, J., and Wang, K., "Thermal Oxidation Products and Kinetics of Polyethylene Composites", *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 91, 2006, pp. 1651-1657.
- Vinoy, K.J., and Jha, R.M., *Radar Absorbing Materials: From Theory to Design and Characterization*, Kulwer Academic Publishers, USA, 1996.
- Balanis, C.A., *Advanced Engineering Electromagnetics*, New York: Wiley, 1989.
- Haupt, R.L., and Werner, D.H., *Genetic Algorithms in Electromagnetics*, New Jersey: John Wiley & Sons, 2007.
- Vinoy, K.J., Jha, R.M., editors. *Radar Absorbing Materials*, Boston, MA: Springer US, 1996.
- Shi, X.L., Cao, M.S., Fang, X.Y., Yuan, J., Kang, Y.Q., and Song, W.L., "High Temperature Dielectric Properties and Enhanced

- Temperature-response Attenuation of β - MnO_2 Nanorods," *Applied Physics Letters*, Vol. 93, 2008, pp. 223112.
20. Zhou, W., Yin, R.M., Long, L., Luo, H., Hu, W.D., Ding, Y.H., and Li, Y., "Enhanced High-temperature Dielectric Properties and Microwave Absorption of SiC Nanofibers Modified Si_3N_4 Ceramics Within the Gigahertz Range," *Ceramics International*, Vol. 44, 2018, pp. 12301-12307.
 21. Song, H.H., Zhou, W.C., Luo, F., Qing, Y.C., and Chen, M.L., "Microwave Dielectric Properties of Nextel-440 Fiber Fabrics with Pyrolytic Carbon Coatings in the Temperature Range from Room Temperature to 700°C," *Chinese Physics B*, Vol. 24, 2015, pp. 088107.
 22. Wen, B., Cao, M.S., Hou, Z.L., Song, W.L., Zhang, L., Lu, M.M., Jin, H.B., Fang, X.Y., Wang, W.Z., and Yuan, J., "Temperature Dependent Microwave Attenuation Behavior for Carbon-nanotube/silica Composites," *Carbon*, Vol. 65, 2013, pp. 124-139.
 23. Correia, N.T., and Ramos, J.J.M., "On the Cooperativity of the β -relaxation: A Discussion Based on Dielectric Relaxation and Thermally Stimulated Depolarization Currents Data," *Physical Chemistry Chemical Physics*, Vol. 2, No. 24, 2000, pp. 5712-5715.
 24. Naslain, R.R., "The Design of the Fiber-matrix Interfacial Zone in Ceramic Matrix Composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 29, 1998, pp. 1145-1155.
 25. Liao, X., Ye, W., Chen, L., Jiang, S., Wang, G., Zhang, L., and Hou, H., "Flexible hC-G Reinforced Polyimide Composites with High Dielectric Permittivity," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 101, 2017, pp. 50-58.
 26. Gama, A.M., Rezende, M.C., and Dantas, C.C., "Dependence of Microwave Absorption Properties on Ferrite Volume Fraction in MnZn Ferrite/rubber Radar Absorbing Materials," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 323, 2011, pp. 2782-2785.
 27. Cao, M.S., Qin, R., Qiu, C., and Zhu, J., "Matching Design and Mismatching Analysis Towards Radar Absorbing Coatings Based on Conducting Plate," *Materials & Design*, Vol. 24, No. 5, 2003, pp. 391-396.
 28. Nam, Y.W., Choi, J.H., Lee, W.J., and Kim, C.G., "Thin and Lightweight Radar-absorbing Structure Containing Glass Fabric Coated with Silver By Sputtering," *Composite Structures*, Vol. 160, 2017, pp. 1171-1177.
 29. Son, D.S., Hyun, J.M., Chaki, S., Park, C.H., and Lee, J.R., "Evaluation of Mechanical/electromagnetic Preformation of Single-sided Active Frequency Selective Surface for Stealth Radomes," *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 22, 2021, pp. 1235-1242.
 30. Tian, H., Liu, H.T., and Cheng, H.F., "A High-temperature Radar Absorbing Structure: Design, Fabrication, and Characterization," *Composites Science and Technology*, Vol. 90, 2014, pp. 202-208.
 31. Luo, H., Tan, Y., Li, Y., Xiao, P., Deng, L., Zeng, S., Zhang, G., Zhang, H., Zhou, X., and Peng, S., "Modeling for High-temperature Dielectric Behavior of Multilayer Cf/ Si_3N_4 Composites in X-band," *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 37, 2017, pp. 1961-1968.
 32. Chan, K.K., Wong, S., and Riseborough, E., "RCS Predictions and Measurements of a Full-Size Jet Engine Model," *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2005, pp. 868379.
 33. Kim, Y.D., Lim, H., Han, J.H., Song, W.Y., and Myung, N.H., "RCS Reduction of Open-ended Circular Waveguide Cavity with Corrugations Using Mode Matching and Scattering Matrix Analysis," *Progress in Electromagnetic Research*, Vol. 146, 2014, pp. 57-69.
 34. Balakrishnan, P., John, M.J., Pothen, L., Sreekala, M.S., and Thomas, S., "Nature Fiber and Polymer Matrix Composites and Their Application in Aerospace Engineering," *Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering*, 2016, pp. 365-383.
 35. Kim, M.S., "A Study on the Mechanical Properties of MWNT-added Glass/Epoxy Fabric Composites (Master thesis)," KAIST, 2005.
 36. Yuan, X., Cheng, L., Guo, S., and Zhang, L., "High-temperature Microwave Absorbing Properties of Ordered Mesoporous Inter-filled SiC/ SiO_2 Composites," *Ceramics International*, Vol. 43, 2017, pp. 282-288.
 37. Yang, H.J., Cao, W.Q., Zhang, D.Q., Su, T.J., Shi, H.L., Wang, W.Z., Yuan, J., and Cao, M.S., "NiO Hierarchical Nanorings on SiC: Enhancing Relaxation to Tune Microwave Absorption at Elevated Temperature," *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. 7, 2015, pp. 7073-7077.
 38. Chen, I.Q., Yin, X.W., Fan, X.M., Chen, M., Ma, X.K., Cheng, L.F., Zhang, L.T., "Mechanical and Electromagnetic Shielding Properties of Carbon Fiber Reinforced Silicon Carbide Matrix Composites," *Carbon*, Vol. 95, 2015, pp. 10-19.
 39. Yang, H.J., Cao, M.S., Li, Y., Shi, H.L., Hou, Z.L., Fang, X.Y., Jin, H.B., Wang, W.Z., and Yuan, J., "Enhanced Dielectric Properties and Excellent Microwave Absorption of SiC Powders Driven with NiO Nanorings," *Advanced Optical Materials*, Vol. 2, 2014, pp. 214-219.
 40. Peng, C.H., Chen, P.S., and Chang, C.C., "High-temperature Microwave Bilayer Absorber Based on Lithium Aluminum Silicate/lithium Aluminum Silicate-SiC Composite," *Ceramics International*, Vol. 40, 2014, pp. 47-55.
 41. Wang, J., Zhou, W., Luo, F., Zhu, D., and Qing, Y., "Dielectric and Microwave Absorbing Properties of Quartz Fiber/Amorphous Carbon/Polyimide Composites at Elevated Temperature," *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 17, 2017, pp. 3751-3758.
 42. Li, M., Yin, X., Zheng, G., Chen, M., Tao, M., Cheng, L., and Zhang, L., "High-temperature Dielectric and Microwave Absorption Properties of Si_3N_4 -SiC/ SiO_2 Composite Ceramics," *Journal of Materials Science*, Vol. 50, 2015, pp. 1478-1487.
 43. Liu, H., Tian, H., and Cheng, H., "Dielectric Properties of SiC Fiber-reinforced SiC Matrix Composites in the Temperature Range from 25 to 700°C at Frequencies between 8.2 and 18 GHz," *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 432, 2013, pp. 57-60.
 44. Han, T., Luo, R., Cui, G., and Wang, L., "Effect of SiC Nanowires on the High-temperature Microwave Absorption Properties of SiC_f/SiC Composites," *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 39, 2019, pp. 1743-1756.

45. Zhou, W., Yin, R.M., Long, L., Luo, H., Hu, W.D., Ding, Y.H., and Li, Y., "Enhanced High-temperature Dielectric Properties and Microwave Absorption of SiC Nanofibers Modified Si_3N_4 Ceramics Within the Gigahertz Range," *Ceramics International*, Vol. 44, 2018, pp. 12301-12307.
46. Dou, Y.K., Li, J.B., Fang, X.Y., Jin, H.B., and Cao, M.S., "The Enhanced Polarization Relaxation and Excellent High-temperature Dielectric Properties of N-doped SiC," *Applied Physics Letters*, Vol. 104, 2014, pp. 052102.
47. Song, W.L., Cao, M.S., Hou, Z.L., Yuan, J., and Fang, X.Y., "High-temperature Microwave Absorption and Evolutionary Behavior of Multiwalled Carbon Nanotube Nanocomposite," *Scripta Materialia*, Vol. 61, 2009, pp. 201-204.
48. Yuan, X., Cheng, L., and Zhang, L., "Influence Of Temperature on Dielectric Properties and Microwave Absorbing Performances of TiC Nanowires/ SiO_2 Composites," *Ceramics International*, Vol. 40, 2014, pp. 15391-15397.
49. Wang, H., Zhu, D., Zhou, W., and Luo, F., "Electromagnetic and Microwave Absorbing Properties of Polyimide Nanocomposites at Elevated Temperature," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 648, 2015, pp. 313-319.
50. Ko, H.S., Noh, J.Y., and Lim, H.M., "Effects of Chemical Composition of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and Precursors on the Properties of Fast-Curing Geopolymers," *Korea Journal of Materials Research*, Vol. 29, No. 11, 2019, pp. 690-696.