니켈 무전해 도금된 유전체 섬유를 활용한 UHF 열가소성 폴디드 코어 전자파 흡수 구조

Nickel-plated UHF folded core thermoplastic radar-absorbing composite

Abstract

본 연구에서는 니켈이 무전해 도금된 유전체 섬유를 활용한 ultra-high frequency (UHF) 대역(0.3-3 GHz) 전파 흡수 폴디드 코어 샌드위치 복합재 구조물을 제안하였다. UHF 대역에서 우수한 흡수성능을 발휘하기 위해 유전체 섬유에 니켈 무전해 도금을 수행하여 전자기적 손실특성을 향상시켰다. 또한 강자성체인 sendust 입자를 활용하여 높은 투자율을 확보함으로써 흡수체의 두께를 감소시켰다. 폴디드 코어 형상에 대한 매개변수 연구 및 최적설계를 수행하여 입사하는 전자기파의 강도를 효과적으로 감소시켰다. 제안된 구조물은 기존의 저주파 흡수체와 비교하여 0.1424 g/cm³의 매우 낮은 밀도와 UHF 대역에서 1.67 GHz의 대역폭으로 -10 dB 이하의 우수한 흡수성능을 발휘하였다.

Key Words : Thermoplastic composite, Radar-absorbing structure, Folded core, Ultra high frequency, Nickel plated fiber

1. Introduction

전자기파를 탐지하는 센서인 레이더 신호는 긴 탐지 거리를 가지고 있고 기상과 상관없이 물체의 위치, 거리, 방향 등의 다양한 정보를 알 수 있기 때문에 비행체의 경우 레이더 신호를 줄이는 것이 가장 중요하다. 레이더 신호는 입사되는 전자기파와 반사되는 전자기파의 양을 면적으로 나타내는 레이더 반사 단면적(Radar cross section, RCS)으로 표현된다. 레이더 탐지 거리는 RCS의 네 제곱에 비례하기 때문에 항공기의 생존성을 증가시키기 위해서 RCS를 최소화해야 한다^(1,2).



Fig. 1. 비 스텔스 항공기와 스텔스 항공기의 레이더에 대한 위험도⁽¹⁾

RCS를 감소시키는 방법으로는 항공기 형상을 이용하여 전파를 산란시키는 형상 기술(shaping technology), 레이더 흡수 물질(Radar absorbing material, RAM)을 도포하는 방법, 레이더 흡수 구조(Radar absorbing structure, RAS)를 적용하는 방법이 대표적인 레이더 스텔스 기술이다. 특히 레이더 흡수 구조는 비행체의 하중을 지지하면서 동시에 전자기파를 흡수하여 항공기의 생존성을

(1)

확보하는 다기능 복합재 구조물이다⁽³⁾. 이와 같은 레이더 스텔스 기술들은 주로 높은 해상도를 가지고 있기 때문에 적의 감지, 추적 및 요격에 가장 많이 사용되는 X-band (8.2-12.4 GHz) 레이더를 목표로 하는 연구들이 활발히 수행되어 왔다^(4~11). 그러나 이렇게 스텔스 기술이 발달함에 따라서 이에 대응하는 카운터 스텔스 기술 또한 발전해 오고 있다^(12,13).



(b) 전파 산란 영역에 따른 RCS의 변화⁽¹⁷⁾

대표적인 카운터 스텔스 기술 중 하나인 저주파 레이더는 X-band와 그 근처 대역의 주파수를 표적으로 하는 기존의 스텔스 기술을 무력화하는 것에 최적화 되어있다. UHF (Ultra-high frequency) 및 VHF (Very High frequency) 대역과 같은 저주파 대역 주파수의 파장은 항공기의 날개, 비행 조종면 등의 구조물의 길이와 유사하기 때문에 파의 산란이 creeping wave와 반사파의 공진 현상이 발생하는 Mie (resonance) 영역으로 진입하여 더욱 큰 RCS를 가진다^(15~17). 이때, RCS는 10배 혹은 그 이상까지도 증가하여 항공기 생존성에 큰 위협이 된다⁽¹⁸⁾. 따라서 카운터 스텔스 기술의 발전에 따른 항공기의 생존성을 확보하기 위해 저주파 대역 레이더에 대한 스텔스 기술 연구가 필요하다.

$$\left|\ln \rho_0\right| (\lambda_{\max} - \lambda_{\min}) < 2\pi^2 \sum_j \mu_{s,j} d_j$$

Rozanov는 재료와 흡수체의 두께에 따른 흡수 대역폭의 제한을 이론적으로 설명하였다⁽¹⁹⁾. Eq. (1) 에서 흡수체가 목표로 하는 파장의 대역폭이 클수록 높은 투자율 또는 두꺼운 두께가 요구됨을 알 수 있다. ρ₀ 는 반사 계수, λ 는 목표 주파수의 파장, μ 와 d 는 각각 투자율과 흡수체의 두께를 의미한다.UHF 대역은 0.3-3 GHz의 주파수 대역을 의미하며 파장은 0.1-1 m의 범위를 가지고 있다.X-band (8.2-12.4 GHz)의 파장(25-38 mm)과 비교하면 매우 큰 파장 대역폭을 가지기 때문에 높은 투자율이나 두꺼운 흡수체가 요구된다. 따라서 UHF 대역 흡수체의 두께를 줄이기 위해서는 높은 투자율 값이 필요하다. 높은 투자율을 확보하기 위해서는 주로 페라이트나 자성 합금을 이용한다^(20~22). 페라이트 또는 자성 합금을 활용한 기존의 흡수체는 매우 높은 무게분율이 요구된다^(23~31). Y. Tang 등⁽²⁸⁾은 페라이트 계열의 자성 물질을 활용하여 얇은 UHF 대역 흡수체를 구현하였다. 그러나 제안된 흡수체는 UHF 대역 일부에서만 성능을 발휘하고, 두께가 얇지만 50 wt.%의 높은 무게 분율이 요구되어 흡수체의 무게가 증가한다. 또한 매트릭스로 파라핀을 사용하여 기계적 성능이 현저히 떨어진다. 자성 합금의 한 종류이자 강자성체인 sendust는 페라이트에 비해 더 큰 포화자화도를 가지고 있으므로 높은 투자율을 확보할 수 있다⁽³²⁾. 또한 자성 입자의 형상도 투자율에 영향을 미치는데, 평면이방성이 큰 입자일수록 높은 투자율 값을 가진다⁽³³⁾.

Snoek's limit 법칙에 따라서 주파수와 투자율의 곱은 일정한 수치 내로 제한되어 있다^(34,35). 따라서 높은 투자율 값을 확보하기에는 한계가 있기 때문에 흡수 대역폭이 큰 흡수체의 설계를 위해서는 적절한 높이의 두께가 요구된다. 그러나 두께의 증가는 곧 항공기의 무게 증가로 이어진다. W. Xu 등⁽³⁶⁾은 얇은 저주파 흡수체 설계를 위해서 능동형 주파수 선택 표면을 활용하였다. 외부에서 인가되는 전압에 따라 얇은 두께로 목표 주파수 전 대역에서 흡수 성능을 발휘하며 우수한 결과를 보였다. 그러나 동시에 전 대역에서의 흡수 성능을 확보할 수 없으며 금속으로 이루어진 주파수 선택 표면층이 삽입되어 복합재의 층간 결합력이 약하다는 단점이 있다. 저주파 대역과 같이 파장 대역폭이 큰 기존의 광대역 연구에서는 충분한 두께를 가지면서도 가벼운 샌드위치 구조물을 사용하였다^(37~41). 샌드위치 구조물 중에서도 폴디드 코어는 기존의 허니컴 코어와 비교하여도 동일 밀도, 동일 높이 대비 우수한 전단 및 굽힘 특성을 가졌고 형상 설계에 따라서 더욱 뛰어난 기계적 특성을 나타내며 허니컴 구조의 잘 알려진 문제점 중 하나인 닫힌 셀 구조로 인한 수분 축적의 문제를 해결할 수 있다^(42~47). 또한 단순히 3차원 형상을 접어서 제작하기 때문에 대량 생산에 이점이 있다. 특히 V-pattern의 형상으로 인해 입사되는 전자기파가 내부에서 반복적인 다중 산란을 일으켜 갇힌 전자파를 효율적으로 감소시킬 수 있는 RAS 관점에서 큰 이점이 있다⁽⁴⁸⁾.

따라서 본 연구에서는 유전체 섬유에 니켈 무전해 도금을 수행하여 전자기적 손실 특성을 향상시키고 자기 특성이 우수한 sendust 입자를 활용하여 높은 투자율을 확보하였다. 해당 재료들을 활용하여 폴디드 코어 샌드위치 구조물에 대한 형상 매개변수 연구와 최적 설계를 수행하였다. 기존의 흡수체와 비교하여 매우 낮은 밀도와 UHF 대역에서 우수한 흡수 성능을 발휘하는 열가소성 폴디드 코어 전자파 흡수 구조를 제안하였다.

2. Material and methods

2.1 Material preparation

금속 도금된 섬유의 전파 흡수 원리는 표피 효과에 의해 형성되는 skin depth의 영향을 받아서 전자파의 전파 깊이를 결정한다⁽⁴⁹⁾. Skin depth가 유전체 섬유에 도금된 금속의 물리적 두께보다 작으면 입사하는 전자파의 완전한 반사가 발생한다. 반면, skin depth가 금속 도금층의 두께보다 크면 반사와 전파의 투과 및 손실이 모두 발생한다. 이런 현상은 electromagnetic field 시뮬레이션을 통해 설명할 수 있다. Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)는 각각 skin depth (δ)보다 금속 도금층의 물리적 두께(t)가 큰 경우와 작은 경우를 보여준다. Fig. 3(a)와 같이 skin depth가 금속층의 두께보다 큰 경우, 재료를 투과하지 못하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 Fig. 3(b)에서 skin depth가 금속층의 두께보다 작으면 입사하는 전자기파의 일부가 재료의 반대편으로 투과하는 것을 확인할 수 있다. 이는 금속 도금된 섬유가 전파 흡수체로 사용할 수 있는 유전손실재료의 특성으로 변환됨을 의미한다. 따라서 흡수체 설계에 있어서 금속 도금된 유전체 섬유의 도금 두께를 조절하는 것이 중요하다.



Fig. 3. Skin depth보다 (a) 금속 도금층이 두꺼운 경우(t>δ), (b) 금속 도금층이 얇은 경우(t<δ)의 electromagnetic field 시뮬레이션 결과



Fig. 4. (a) 니켈 무전해 도금 공정 및 일반 유리섬유와 니켈 도금된 유리섬유의 (b) Scanning electron microscopy (SEM) 사진, (c) Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) 결과

TADIE 1, LDD 친구를 이에 구승한 혼만 开니면까지 너를 포함한 开니면까지 승만	Table 1.	. EDS 🖁	분석을	통해	측정된	일반	유리섬유와	니켈	도금된	유리섬유의	성분	ΗI
--	----------	---------	-----	----	-----	----	-------	----	-----	-------	----	----

Comple	Weight percentage (wt.%)/Atomic percentage (at.%)							
Sample	С	0	AI	Si	Ca	Ni		
Pristine glass fabric	12.41/	48.09/	5.57/	18.42/	15.50/	0.00/		
	19.54	56.84	3.90	12.40	7.31	0.00		
Nickel-plated glass fabric	9.71/	45.30/	4.26/	18.75/	11.19/	10.78/		
	16.41	57.45	3.20	13.55	5.66	3.73		

일반 유전체 유리섬유(Minhu Composite Co. Ltd)에 자기촉매화학반응을 통해 니켈 무전해 도금(AJIN-ELECTRON Co. Ltd)을 수행함으로써 전자기적 손실 특성을 향상시켰다^(50,51). Fig. 4(a)에서 니켈 도금된 유리섬유를 제작하기 위한 니켈 무전해 도금 공정을 보여준다. 일반 유리섬유 및 니켈 무전해 도금된 유리섬유의 표면과 단면의 Scanning electron microscopy (SEM; MIRA3 LM, TESCAN,CZECHIA)의 이미지를 Fig. 4(b)에 나타내었다. 일반 유리섬유의 표면은 매끄럽게 보이지만, 니켈 도금된 유리섬유의 단면 SEM 사진에서 대략 20 ~ 60 nm 정도의 니켈이 균일하게 도금되어 있는 것을 확인할 수 있다. 일반적인 니켈의 전도도인 1.45 × 10⁷ S/m를 통해 skin depth를 구하면. UHF 대역의 중심 주파수인 1.65 GHz에서 3.24 µm이다. 본 연구에서 사용한 니켈 도금층의 물리적 두께는 이론으로 계산된 skin depth보다 작기 때문에 UHF 대역에서의 흡수체 구현을 위한 손실 특성을 가지고 있다. 유리섬유의 조성은 Energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS; JSM-7610F, JEOL, JAPAN)으로 분석했다. Fig. 4(c)에서 일반 유리섬유의 표면 성분조성에서는 니켈이 검출되지 않은 반면 니켈 무전해 도금 공정 후 유리섬유의 표면 조성비가 10.78 wt.% (3.73 at.%)까지 증가한 것을 확인할 수 있다. 니켈 무전해 도금된 유리섬유의 성분 비는 Table 1에 나타내었다. Fig. 5은 일반 유리섬유와 니켈 무전해 도금된 유리섬유의 X-ray photoelectron spectroscopy (XPS; NEXSA, Thermo Fisher Scientific, CZECHIA) 결과를 보여준다. 일반 유리섬유는 peak가 나타나지 않았고 니켈 무전해 도금된 유리섬유의 경우 856.08 eV에서 가장 큰 binding energy를 보이는 것으로 보아 수산화니켈 이온 (Ni(OH)₂)의 존재를 확인할 수 있다.



Fig. 5. 일반 유리섬유와 니켈 도금된 유리섬유의 X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) 곡선

긴 파장 대역폭으로 인해 흡수체의 두께가 두꺼워지는 것을 해결하기 위해 강자성체인 sendsut를 폴리우레탄 폼에 분산시켜 투자율을 향상시켰다. Sendust는(Green Resource C. Ltd.) 철, 규소, 알루미늄이 각각 85 wt.%, 9.6 wt.%, 5.4 wt.%의 구성비로 이루어져 있다. 입자의 형상은 평면이방성의 큰 flake type에 입도 크기는 D50 = 25 um 이다. 폴리우레탄 폼은 Dow Chemical Co. Ltd.와 KPX Chemical Co. Ltd.의 MDI와 polyol을 사용하였다. Fig. 6의 three-roll-mill을 사용하여 폼의 두 원료인 MDI와 polyol에 각각 sendust를 10, 30, 50 wt.%씩 분산하였다. Sendust가 분산된 MDI와 polyol을 1.5:1의 무게분율로 계량하고 2000 RPM으로 10초간 혼합 및 자유 발포하여 자성 폼을 제작하였다.



Fig. 6. Three-roll-mill 장비를 이용한 sendust 분산

Sendust의 무게분율에 따른 SEM 사진과 EDS 결과를 Fig. 7에서 나타내었다. Fig. 7(a)의 SEM 사진에서 sendust의 무게분율이 클수록 폼이 자유 발포될 때 형성되는 폼 셀의 크기가 줄어들어 밀도가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 특히 sendust 50 wt.%가 혼합된 폴리우레탄 폼에서 눈에 띄게 폼 셀의 형성이 줄어든 것을 볼 수 있다. Table 2에 EDS를 통해 측정한 sendust의 무게분율에 따른 조성비의 변화를 나타내었다. Sendust가 분산되지 않은 일반 폴리우레탄 폼에서는 폴리우레탄 폼의 구성 성분인 탄소와 산소 및 염소를 제외한 다른 성분은 검출되지 않았다. 그러나 sendust가 50 wt.% 분산된 폴리우레탄 폼은 sendust의 구성 성분인 알루미늄, 규소, 철이 검출되는 것을 확인할 수 있다. Sendust가 분산된 폴리우레탄 폼의 자기 특성을 Vibrating sample magnetometer (VSM; 7404, Lake Shore Cryotronics, USA)로 분석하였다. Fig. 8에서 sendust의 무게분율이 클수록 히스테리시스 루프의 기울기가 큰 것으로 외부 자계에 민감하게 반응하는 높은 투자율 특성을 보인 것을 알 수 있고, 최대 자화값을 보아 높은 포화자화도를 나타내는 것을 확인할 수 있다. Section 1의 Eq. (1)을 통해 설명한 바와 같이, sendust를 활용하여 높은 투자율을 확보함으로써 요구되는 흡수체의 두께를 감소시켰다.



Fig. 7. Sendust 무게분율에 따른 폴리우레탄 폼의 (a) Scanning electron microscopy (SEM) 사진, (b) Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) 결과 (※ PU: Polyurethane)

Table 2.	EDS	분석을	통해	측정된	일반	폴리우	레탄	폼과
sendu	ist 50	wt.%가	분산	된 폴리	우레티	난 폼의	성분	Ы

Sampla	Weight percentage (wt.%)/Atomic percentage (at.%)							
Sample	С	0	CI	AI	Si	Fe		
PU foam (sendust 0 wt.%)	76.34/	20.15/	3.51/	0.00/	0.00/	0.00/		
	82.39	16.33	1.28	0.00	0.00	0.00		
PU foam + sendust 50 wt.%	66.68/	15.76/	0.40/	0.51/	0.90/	15.75/		
	80.68	14.31	0.16	0.28	0.46	4.10		



Fig. 8. Sendust 무게분율에 따른 폴리우레탄 폼의 Vibrating sample magnetometer (VSM) 곡선

폴디드 코어 샌드위치 복합재 구조물의 설계를 위해 열가소성 복합재를 제작하고 전자기적 물성을 확인하였다. 복합재의 기지재료는 열가소성 소재를 사용하였다. 열가소성 소재는 열경화성 소재에 비해 내충격성, 내환경성 등 우수한 기계적 특성을 발휘하며 재활용이 가능하고 OOA (Out of autoclave) 공정인 고속 열성형 공정을 활용하여 시간적, 비용적인 측면의 장점을 가진다^(52,53). 열가소성 기지재료 중에서도 Victrex PLC의 필름형 polyether ether ketone (PEEK)를 사용하였으며, 필름형 PEEK와 니켈 무전해 도금된 유리섬유 또는 일반 유리섬유를 교대로 가접하여 preform 복합재를 제작하였다. 이후 Fig. 9의 hot press장비를 사용하여 preform 복합재에 21 bar를 가압한 상태로 380℃에서 10분간 유지 후 5℃/min의 냉각 과정을 거쳐 제작했다.



Fig. 9. Hot press 공정을 이용한 열가소성 복합재 제작

2.2 Methods

제작된 재료의 유전율 및 투자율을 측정하기 위해 신호분석기를 활용한 co-axial airline 방법을 사용하였다. Co-axial airline은 open, short, load (OSL method)의 세 가지 임피던스 표준을 활용하여 교정을 진행하였다. 제작된 복합재 시편을 내경 3.04 mm, 외경 7 mm의 형태로 가공하여 UHF 대역인 0.3-3 GHz의 주파수 범위에서 측정하였다. Sendust가 분산된 폼 또한 같은 형태로 가공하여 동일 주파수 범위에서 측정하였다. 측정 결과는 Fig. 10에 나타내었다. 니켈 무전해 도금된 유리섬유/PEEK복합재가 일반 유리섬유/PEEK 복합재보다 유전율 및 투자율이 높은 것을 확인할 수 있다. 니켈 무전해 도금으로 인하여 재료의 손실 특성이 증가했기 때문이다. Sendust가 분산된 폼 또한 마찬가지로 자성 재료인 sendust가 분산되지 않은 일반 폼에 비해 높은 값의 유전율 및 투자율 특성을 가지고 있다.

샌드위치 복합재 구조는 코어 구조를 등가 유전체층으로 고려함으로써 다층 유전체 구조로 모델링 할 수 있다^(54,55). 1부터 N층으로 이루어진 다층 유전체 구조에 대해 다음과 같은 임피던스 정합 식을 사용하여 반사 손실 특성을 예측할 수 있다⁽⁵⁶⁾. 전송선 이론에 따르면 수직 입사의 경우 반사 계수(Γ)는 Eq. (2)과 같이 쓰인다.

$$\Gamma = \frac{Z_1 - \eta_0}{Z_1 + \eta_0} \tag{2}$$

이때, η_0 는 자유공간의 임피던스, Z_1 은 첫 번째 층의 입력 임피던스이며 Eq. (3)의 재귀 함수를 사용하여 계산할 수 있다.

$$Z_n = \eta_n \frac{Z_{n-1} + j\eta_n \tanh(\gamma_n d_n)}{\eta_n + jZ_{n-1} \tanh(\gamma_n d_n)}$$
(3)

 Z_n 은 n번째 층의 입력 임피던스, d_n 은 n번째 층의 두께, η_n 과 γ_n 은 각각 n번째 층의 특성 임피던스와 전파 정수를 의미하며 Eq.(4)에 나타내었다.

$$\eta_n = \eta_0 \sqrt{\frac{\mu_n}{\varepsilon_n}}, \quad \gamma_n = \frac{j\omega\sqrt{\mu_n\varepsilon_n}}{c}$$
(4)

위 식에서 c는 빛의 속도, ω는 입사하는 파의 각 주파수, μ_n 와 ε_n는 각각 n번째 층의 유전율과 투자율이다. 만약 N+1번째 층이 완전전도체라면 Z_{N+1} = 0 이 되고, Z_N = η_N tanh(γ_nd_n) 이 된다. 목표 주파수 영역에서 반사 손실 특성은 Γ=0 이 되도록 Z₁ = η₀ 에 해당하는 Z₁을 조정하여 최적화 할 수 있다. Z₁은 재료와 각층의 두께 및 층수의 조절을 통해 조정할 수 있다. 그러나 기존의 다층형 흡수체와 달리 제안된 폴디드 코어는 형상에 의한 다중 산란으로 추가적인 전자기파의 감쇠를 일으킨다. 따라서 최적의 설계를 위해서 폴디드 코어의 형상 변수에 대한 연구를 수행하였다.



Fig. 10. 일반 유리섬유 및 니켈이 도금된 유리섬유의 (a) 복소 유전율, (b) 복소 투자율 및 sendust의 무게분율에 따른 PU foam의 (c) 복소 유전율, (d) 복소 투자율

3. Optimal design of thermoplastic folded core RAS

3.1 Design

폴디드 코어는 평면 기본 재료를 접어서 3차원으로 구성된 구조이다. 따라서 평평한 면들이 특정 각도로 형성되어 구조 내부에 입사파를 가둠으로써 손실 물질에 의해 반복적인 다중 산란으로 우수한 마이크로파 흡수 성능을 나타낸다. 이런 폴디드 코어의 단위셀을 구성하는 변수는 Fig. 11에 나타냄과 같이 두 개의 각도와 두 개의 길이, 코어의 두께까지 하여 5가지의 매개변수로 이루어진다. 또한 샌드위치 구조이기 때문에 위, 아래의 스킨 두께를 고려하여 총 7가지의 변수와 재료의 물성을 이용하여 설계를 진행하였다. 설계는 상용 software인 CST Microwave Studio 프로그램을 통해 목표 주파수 영역인 0.3-3 GHz에서 단위 셀 형상의 구조물을 모델링하여 수행되었다.



Fig. 11. 단위 셀 폴디드 코어의 형상 매개변수

Table 3. Parametric 연구(에 사용된	형상	매개변수	정보
-------------------------	-------	----	------	----

Structures [materials]	Parameters	Design range [unit]
	Dihedral fold angle (\angle a)	20 ~ 60 [degree]
	Acute angle (∠b)	20 ~ 60 [degree]
Folded core	Half of width (X)	30 ~ 100 [mm]
	Height (Y)	30 ~ 100 [mm]
	Core thickness (t)	0.125 ~ 1.5 [mm]
Skin	Upper skin thickness (U _t)	0.25 ~ 2 [mm]
[Glass fabric/PEEK]	Lower skin thickness (L $_{t}$)	0.25 ~ 2[mm]

형상 매개변수에 따른 UHF 대역의 흡수 성능에 미치는 영향을 파악하기 위해 parametric 연구를 진행하였다. Table 3에 parametric 연구에 사용된 각 매개변수의 명칭 및 범위를 나타내었다⁽⁵⁷⁾. Parametric 연구 결과, Fig. 12는 흡수 성능에 지배적인 주는 세 가지 변수의 변화에 따른 시뮬레이션 결과이다. Fig. 12(a), (b)에서 예각 b가 50°에서 20°까지 감소할수록 peak 주파수를 포함한 -10 dB 이상의 흡수 성능을 발휘하는 주파수 대역이 저주파 대역으로 이동하며 더 우수한 흡수 성능을 나타낸다. 반면 Fig. 12(c), (d)와 Fig. 12(e), (f)에서는 코어의 벽 두께와 코어의 높이가 증가할수록 전체 주파수 대역이 더 낮은 주파수 대역으로 이동하며 더 우수한 흡수 성능을 나타낸다. 특히, 시뮬레이션 결과를 보면 folded 코어의 높이 Y가 다른 변수에 비해 가장 지배적인 영향을 미치는데, 이는 Section 1의 Eq. (1)의 Rozanov's 이론으로 증명될 수 있다.

설계 변수의 범위를 결정하기 위해 세 변수에 따른 흡수 성능 변화를 분석하였다. Fig. 13(a), (b)는 -10 dB 이하의 흡수 성능을 발휘하는 주파수의 대역폭(bandwidth)을 보여준다. UHF 대역에서 최소 1.6 GHz 이상의 흡수 대역폭을 가지는 영역을 설계 목표 영역으로 설정하였다. Fig. 13(c), (d)에서는 변수에 따른 최소 return loss값의 변화를 보여준다. 최소 return loss값은 최대 흡수 성능을 의미하며, -30 dB 이하의 흡수 성능을 발휘하는 영역을 설계 목표 영역으로 설정하였다. 분석한 결과를 바탕으로 UHF 대역 열가소성 폴디드 코어 구조물의 최적 설계를 진행하였다.







(b,d) 높이 Y와 예각 ∠b에 따른 설계 목표 영역

t [mm] (wall thickness)	X [mm]	Y [mm]	∠a [degree]	∠b [degree]	Lt [mm] (Lower skin)	Ut [mm] (Upper skin)
0.5	54.52	80	50	40	0.8	0.8

Table 4. 설계된 폴디드 코어 샌드위치 복합재 구조물의 형상 매개변수

최적 설계 결과, 결정된 형상 매개변수는 Table 4에서 보여준다. Fig. 14에서 기존 연구에서 제안된 저주파 흡수체와 본 연구에서 제안하는 폴디드 코어 샌드위치 구조물의 밀도 대비 흡수 대역폭을 나타내었다. 기존 연구에서 제안된 저주파 흡수체는 주로 파라핀과 같은 매트릭스에 자성 입자를 높은 비율로 분산 시켜 제작하였기 때문에 밀도가 큰 반면 구조적 성능은 현저히 떨어진다. 그러나 본 연구에서 제안한 폴디드 코어 샌드위치 구조물은 0.1424 g/cm³의 낮은 밀도를 가지면서 폴디드 코어의 우수한 기계적 물성을 가졌고 UHF 대역에서 뛰어난 흡수 성능을 발휘하였다.



Fig. 14. 기존 연구에서 제안된 저주파 흡수체와 폴디드 코어 샌드위치 구조물의 밀도 대비 흡수 대역폭 비교

4. Fabrication

최적 설계를 통해 제안된 열가소성 폴디드 코어 구조물을 제작하였다. 구조물의 제작과정을 Fig. 15에 나타내었다. 폴디드 코어와 스킨을 제작하기 위해 니켈이 도금된 유리섬유 및 일반 유리섬유와 PEEK 열가소성 필름형 매트릭스를 교대로 적층 후 가접하였다. 가접된 복합재를 Fig. 9과 같은 hot press 공정을 거쳐 420 mm × 420 mm의 평판형 blank 시편을 제작하였다. 폴디드 코어는 니켈 도금된 유리섬유/PEEK 복합재를 활용하여 고속 열성형 공정으로 제작되었다. 고속 열성형 공정의 성형 사이클은 Fig. 15(a)와 같이 사전예열(preheating), 자재 이동(transfer), 가압을 이용한 성형(forming) 그리고 냉각(cooling)을 통한 고형화(consolidation)의 4단계를 거친다. 첫 단계로 제작된 평판형 blank 시편을 IR heater 내부에 고정한 뒤, 380℃에서 1분간 예열하였다. 예열된 시편을 IR heater와 연결된 레일을 따라 몰드가 장착된 press 장비로 이동시킨 뒤, 250℃의 온도에서 7 bar의 압력으로 2분간 가압하여 성형하였다. 이후, 압력은 유지하고 3.8 ℃/min의 속도로 냉각을 통해 폴디드 코어를 제작하였다. 한 번의 성형 공정으로 제작된 코어의 크기는 가로 220 mm, 세로 185 mm, 높이 80mm이며 설계된 단위 셀 코어 두 개의 크기이다. Fig. 15(b)와 같이 three-roll-mill 장비를 활용하여 MDI와 polyol에 sendust를 각각 50 wt.%씩 분산하였다. Sendust가 분산된 MDI와 polyol을 1.5:1의 무게분율로 계량하고 2000 RPM으로 10초간 혼합한 뒤 제작된 폴디드 코어의 빈 공간에 발포를 진행하였다. 스킨은 hot press 공정을 통해 제작한 일반 유리섬유/PEEK 복합재를 사용하였다. 최종적으로 스킨과 코어는 adhesive (FM 73, Cytec, USA)를 활용하여 120℃에서 3시간의 오븐 경화 공정으로 부착하여 구조물을 제작하였다. 제작된 구조물의 크기는 가로 650 mm, 세로 650 mm에 높이 81.6 mm이다.



Fig. 15. 고속 열성형 공정을 활용한 니켈 도금된 유리섬유/PEEK UHF 열가소성 폴디드 코어 구조물의 제작 과정

5. Results and discussion

제안된 폴디드 코어 샌드위치 복합재 구조물의 UHF 대역 전자파 흡수 성능 및 해석 모델의 단위 셀 형상을 Fig. 16에서 보여준다. 코어의 높이(Y)는 80 mm이며 각각 0.8mm의 위아래 스킨 두께를 고려하여 전체 구조물 높이는 81.6 mm이다. 단위 셀 폴디드 코어의 가로 길이(2X)는 109.04 mm이고 세로 길이(Z₂)는 182.61 mm이다. 구조물의 위, 아래 스킨은 일반 유리섬유/PEEK 복합재이고 폴디드 코어는 니켈이 도금된 유리섬유/PEEK 복합재로 구성된다. Sendust가 50 wt.% 분산된 폴리우레탄 폼이 폴디드 코어의 빈 공간을 채우고 있다. 전자파 흡수 성능을 확인하기 위해 설계된 단위 셀 모델은 X축과 Z축을 따라 magnetic field (H_t=0)와 electrical field (E_t=0) 경계조건을 주었다. 최소 1.02 GHz에서부터 -10 dB 이하의 흡수 성능을 발휘하였고, UHF 대역에서 약 1.67 GHz 대역폭으로 -10 dB 이하의 흡수 성능을 발휘하였다. 또한 1.98 GHz에서 -33 dB의 가장 강한 공진 peak가 발생하였다.



Fig. 16. 최적 설계를 통해 제안된 폴디드 코어 샌드위치 복합재 구조물의 전자기파 흡수 성능

제안된 폴디드 코어 샌드위치 구조물이 입사된 전자파에 미치는 영향을 확인하기 위해 구조물의 Efield strength 해석 결과를 Fig. 17에 보여주었다. 입사되는 전파가 코어 내부에 갇혀 다중 산란을 통해 코어를 통과함에 따라서 전계 강도가 효과적으로 감소하는 것을 확인할 수 있다.



Fig. 17. 제안된 폴디드 코어 구조물의 E-field strength 분포

6. Conclusions

본 논문에서는 새로운 개념의 UHF 대역 열가소성 폴디드 코어 전자파 흡수 구조를 제안하였으며 그 가능성을 확인하였다. 파장의 대역폭이 큰 UHF 대역에서 흡수체의 두께를 줄이기 위해 강자성체 자성 합금인 sendust를 폴리우레탄 폼에 분산하여 높은 투자율을 확보하였다. UHF 대역 흡수체 설계를 위해 일반 유전체 유리섬유에 니켈 무전해 도금공정을 수행하여 손실 특성을 향상시켰다. 폴디드 코어의 형상에 대한 매개변수 연구 및 최적 설계를 수행하여 UHF 대역에서 우수한 열가소성 폴디드 코어 전자파 흡수 구조를 제안하였다. 니켈 도금된 유리섬유와 PEEK 열가소성 매트릭스를 활용하여 고속 열성형 공정으로 폴디드 코어를 제작하였다. 폴디드 코어의 형상에 의해 입사된 전자기파는 코어 내부에 갇혀 반복적인 다중 반사를 발생시키고 전계 강도를 효과적으로 감소시키는 것을 확인하였다. 제안된 구조물은 UHF 대역에서 1.67 GHz의 대역폭으로 -10 dB 이하의 우수한 성능을 발휘하였다. 또한 본 연구에서는 기존 연구에서 제안된 저주파 흡수체와 비교하여 우수한 저주파 흡수 성능을 유지하면서 0.1424 g/cm³의 매우 낮은 밀도를 갖는 UHF 대역 흡수 구조물을 구현하였다.

7. Acknowledgment

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 항공 피탐지 감소기술 특화연구실 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- R.P. Haffa and J.H. Patton, "Analogues of stealth: Submarines and aircraft," Comparative Strategy, vol. 10, no. 3, pp. 257–271, 1991
- [2] R. Grant, The Radar Game: Understanding Stealth and Aircraft Survivability, Arlington, TX, 2010.
- [3] K.J. Vinoy, R.M. Jha, Radar Absorbing Materials: From Theory to Design and Characterization, Boston, 1996.
- [4] F. Ye, L. Zhang, X. Yin, Y. Liu, L. Cheng, "The improvement of wave-absorbing ability of silicon carbide fibers by depositing boron nitride coating," Applied Surface Science, vol. 270, pp. 611– 616, April 2013.
- [5] A. Manda, D. Ghosh, A. Malas, P. Pal, C.K. Das, "Synthesis and microwave absorbing properties of Cu-doped nickel zinc ferrite/Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O₃ nanocomposites," Journal of Engineering, vol. 2013, pp. 1–8, Dec 2012.
- [6] W.S. Chin, D.G. Lee, "Development of the composite RAS (radar absorbing structure) for the X-band frequency range," Composite Structures, vol. 77, no. 4, pp. 457-465, Feb 2007.
- [7] J.B. Kim, S.K. Lee, C.G. Kim, "Comparison study on the effect of carbon nano materials for single-layer microwave absorbers in X-band," Composites Science and Technology, vol. 68, no. 14, pp. 2909–2916, Nov 2008.
- [8] W.H. Choi, J.B. Kim, J.H. Shin, T.H. Song, W.J. Lee, Y.S. Joo, C.G. Kim, "Circuit-analog (CA) type of radar absorbing composite leading-edge for wing-shaped structure in X-band: practical approach from design to fabrication," Composites Science and Technology, vol. 105, pp. 96-101, Dec 2014.
- [9] W.H. Choi, B.S. Kwak, Y.H. Noh, J.G. Yook, J.H. Kweon, Y.W. Nam, "Radar-absorbing nickelcoated fabric composite for wing-shaped structure in the X-band," Composite Structures, vol. 239, pp. 111885, May 2020.
- [10] H.B. Baskey, M.J. Akhtar, T.C. Shami, "Investigation and performance evaluation of carbon black- and carbon fibers-based wideband dielectric absorbers for X-band stealth applications," Journal of Electromagnetic Waves and Applications, vol. 28, no. 14, pp. 1703-1715, Jul 2014.
- [11] C. Wang, M. Chen, H. Lei, K. Yao, H. Li, W. Wen, D. Fang, "Radar stealth and mechanical properties of a broadband radar absorbing structure," Composites Part B, vol. 123, pp. 19–27, Apr 2017.
- [12] M. Sharon, Stealth Counter Stealth and Nanotechnology, Nanotechnology in the Defense Industry: Advances, Innovation, and Practical Applications, New Jersey, Hoboken, 2019.

- [13] K.Zikidis, A. Skondras, C. Tokas, "Low Observable Principles, Stealth Aircraft and Anti-stealth Technologies," Journal of Computations & Modeling, vol. 4, pp. 129–165, Jan 2014.
- [14] Ajunews, "https://www.ajunews.com/view/20180411102121975", 2018.
- [15] M. Skolnik, Introduction to radar systems, 2nd Ed., New York, 1980.
- [16] C. Kopp, "NNIRT 1L119 Nebo SVU/RLM-M Nebo M: Assessing Russia`s First Mobile VHF AESAs," Technical Report APA-TR, April 2008.
- [17] R.C. Dorf, The Electrical Engineering Handbook, Boca Raton, Florida, 2005.
- [18] C. Kopp, "Evolving technological strategy in advanced air defense systems," Joint Force Quarterly, vol. 57, pp. 86–93, 2010
- [19] K.N. Rozanov, "Ultimate thickness to bandwidth ratio of radar absorbers," IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 48, no. 8, pp. 1230–1234, Aug 2000
- [20] K.Y. Kim, Y.C. Chung, T.W. Kang, H.C. Kim, "Dependence of microwave absorbing property on ferrite volume fraction in MnZn ferrite-rubber composites," IEEE Trans. on Magnetics, vol. 32, no. 2, pp. 555-558, Mar 1996.
- [21] Y.B. Feng, T. Qiu, C.Y. Shen, "Absorbing properties and structural design of microwave absorbers based on carbonyl iron and barium ferrite," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 318, no. 1-2, pp. 8-13, Nov 2007.
- [22] S. Sugimoto, K. Haga, T. Kagotani, K. Inomata, "Microwave absorption properties of Ba Mtype ferrite prepared by a modified coprecipitation method," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 290-291, pp. 1188-1191, Apr 2005.
- [23] H. Wu, L. Wang, H. Wu and Q. Lian, "Synthesis and significantly enhanced microwave absorption properties of hematite dendrites/polyaniline nanocomposite," Applied Physics A: Materials Science & Processing, vol. 115, pp. 1299–1307, Jun 2014.
- [24] Y. Hou, L. Cheng, Y. Zhang, Y. Yang, C. Deng, Z. Yang, Q. Chen, P. Wang, L. Zheng, "Electrospinning of Fe/SiC hybrid fibers for highly efficient microwave absorption," ACS Applied Materials & Interfaces, vol. 9, no. 8, pp. 7265–7271, Feb 2017.
- [25] X. Cai, J. Wang, K. Cui, H. Shi and J. Yin, "Crystallization processes and microwave absorption properties of amorphous LiZn ferrite hollow microspheres," Journal of Materials Science: Materials in Electronics, vol.28, pp. 9596–9605, Mar 2017.
- [26] N. Chen, J.T. Jiang, Y. Yuan, C. Liu, C.Y. Xu and L. Zhen, "Effects of microstructure and filling ratio on electromagnetic properties of Co microspheres," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 421, pp. 368–376, Jan 2017.
- [27] C.C. Chen, W.F. Liang, Y.H. Nien, H.K. Liu, R.B. Yang, "Microwave absorbing properties of flake-shaped carbonyl iron/reduced graphene oxide/epoxy composites," Materials Research Bulletin, vol. 96, no. 2, pp. 81-85, Dec 2017.
- [28] Y. Tang, P. Yin, L. Zhang, J. Wang, X. Feng, K. Wang, J. Dai, "Novel carbon encapsulated zinc ferrite/MWCNTs composite: preparation and low-frequency microwave absorption investigation," Ceramics International, vol.46, no. 18, pp. 28250-28261, Dec 2020.
- [29] K. Shimaba, N. Tezuka, S. Sugimoto, "Magnetic and microwave absorption properties of polymer composites with amorphous Fe-B/Ni-Zn ferrite nanoparticles," Materials Science and Engineering: B, vol. 177, no. 2, pp. 251-256, Feb 2012.
- [30] Y. Liu, X. Liu, X. Wang, "Double-layer microwave absorber based on CoFe2O4 ferrite and carbonyl iron composites," Journal of Alloys and Compounds, vol. 584, pp. 249-253, Jan 2104.
- [31] Y. Feng, T. Qiu, "Preparation, characterization and microwave absorbing properties of FeNi alloy prepared by gas atomization method," Journal of Alloys and Compounds, vol. 513, pp. 455-126, Feb 2012.
- [32] Z.H. Yang, Z.W. Li, Y.H. Yang, L. Liu and L.B. Kong, "Dielectric and magnetic properties of

NiCuZn ferrite coated Sendust flakes through a sol-gel approach," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 333, pp. 232-236, Apr 2013.

- [33] Z. Zhang, J. Wei, W. Yang, L. Qiao and T. Wang, "Effect of shape of Sendust particles on their electromagnetic properties within 0.1-18 GHz range," Physica B: Condensed Matter, vol. 406, no. 20, pp. 3896-3900, Oct 2011.
- [34] K.N. Rozanov, M.Y. Koledintseva, "Application of generalized Snoek's law over a finite frequency range: A case study," Journal of Applied Physics, vol. 119, no. 7, pp. 073901, Feb 2016.
- [35] D.Y. Kim, S.S. Yoon, "Design of wideband electromagnetic wave absorber using magnetic materials," Journal of the Korean Magnetics Society, vol. 22, no. 6, pp. 210-215, Nov 2005.
- [36] W. Xu, Y. He, P. Kong, J. Li, H. Xu, L. Miao, S. Bie, J. Jiang, "An ultra-thin broadband active frequency selective surface absorber for ultrahigh-frequency applications," vol. 118, pp. 184903, Nov 2015.
- [37] Y. He, R. Gong, "Preparation and microwave absorption properties foam-based honeycomb sandwich structures," Europhysics Letters, vol. 85, no. 5, pp.58003, Mar 2009.
- [38] B.S. Kwak, G.W. Jeong, W.H. Choi, Y.W. Nam, "Microwave-absorbing honeycomb core structure with nickel-coated glass fabric prepared by electroless plating," Composite Structrues, vol.256, pp. 113148, Jan 2021.
- [39] W.H. Choi, C.G. Kim, "Broadband microwave-absorbing honeycomb structure with novel design concept," Composites Part B: Engineering, vol. 83, pp. 14-20, Dec 2015.
- [40] H. Wang, X. Xiu, Y. Wang, Q. Xue, W. J, W. Che, S. Lia, H. Jiang, M. Tang, J. Long, J. Hu, "Paper-based composites as a dual-functional material for ultralight broadband radar absorbing honeycombs," Composites Part B: Engineering, vol.202, pp.108378, Dec 2020.
- [41] H. Luo, F. Chen, X. Wang, W. Dai, Y. Xiong, J. Yang, R. Gong, "A novel two-layer honeycomb sandwich structure absorber with high-performance microwave absorption," Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, vol. 119, pp. 1–7, Apr 2019.
- [42] S. Fischer, K. Drechsler, S. Kilchert, A. Johnson, "Mechanical tests for foldcore base material properties," Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, vol. 40, no. 12, pp. 1941– 1952, Dec 2009.
- [43] X.M. Xiang, Z. You, G. Lu, "Rectangular sandwich plates with Miura-ori folded core under quasi-static loadings," Composite Structures, vol. 195, pp. 359-374, Jul 2018.
- [44] X. Zhou, H. Wang and Z. You, "Mechanical properties of Miura-based folded cores under quasi-static loads," Thin-Walled Structures, vol. 82, pp.296-310, Sep 2014.
- [45] S. Heimbs, P. Middendorf, C. Hampf, F. Hahnel and K. Wolf, "Aircraft sandwich structures with folded core under impact load," 8th ICSS, May 2008.
- [46] A.S. Herrmann, P.C. Zahlen and I. Zuardy, "Sandwich structure technology in commercial aviation," 7th ICCS, Aug 2005.
- [47] S. Heimbs, J. Cichosz, M. Klaus, S. Kilchert and A. F. Johnson, "Sandwich structures with textile-reinforced composite foldcores under impact loads," Composite Structures, vol. 92, no. 6, pp. 1485–1497, May 2010.
- [48] Z. Wang, C. Zhou, V. Khaliulin, A. Shabalov, "An experimental study on the radar absorbing characteristics of folded core structures," Composite Structures, vol. 194, pp. 199–207, Jun 2018.
- [49] C.A. Balanis, Advanced engineering electromagnetics, 2nd Ed., New York, 1989.
- [50] Y.W. Nam, J.H. Choi, W.J. Lee, C.G. Kim, "Fabrication of a thin and lightweight microwave absorber containing Ni-coated glass fibers by electroless plating," Composites Science and Technology, vol. 145, pp. 165–172, Jun 2017.

- [51] Y.W. Nam, J.H. Choi, W.J. Lee, C.G. Kim, "Thin and lightweight radar-absorbing structure containing glass fabric coated with silver by sputtering," Composite Structures, vol. 160, pp. 1171-1177, Jan 2017.
- [52] L. Sorrentino, D.S Vasconcellos, M. D'Auria, F. Sarasini and J. Tirillo, "Effect of temperature on static and low velocity impact properties of thermoplastic composites," Composites Part B: Engineering, vol. 113, pp. 100–110, Mar 2017.
- [53] T. Lu, X. Chen, H. Wang, L. Zhang and Y. Zhou, "Comparison of low-velocity impact damage in thermoplastic and thermoset composites by non-destructive three-dimensional X-ray microscope," Polymer Testing, vol. 91, Nov 2020.
- [54] B.S, Kwak, W.H, Choi, Y.H. Noh, G.W. Jeong, J.G. Yook, J.H. Kweon, Y.W. Nam, "Nickelcoated glass/epoxy honeycomb sandwich composite for broadband RCS reduction," Composites Part B: Engineering, vol. 191, pp. 107952, Jun 2020.
- [55] J.H. Choi, M.S, Jang, W.H. Jang, C.G. Kim, "Investigation on microwave absorption characteristics of conductive-coated honeycomb absorber," Composite Structures, vol. 242, pp. 112129, Jun 2020.
- [56] P. Zhou, L. Huang, J. Xie, D. Liang, H. Lu, L. Deng, "Prediction of microwave absorption behavior of grading honeycomb composites based on effective permittivity formulas," IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 63, no. 8, pp. 3496-3501, Aug 2015.
- [57] A. Pydah, R.C. Batra, "Crush dynamics and transient deformations of elastic-plastic Miura-ori core sandwich plates," Thin-Walled Structures, vol. 115, pp. 311-322, Jun 2017.