

주기패턴 레이더 흡수 구조의 저속충격 후 흡수 성능 평가

신준형* · 곽병수*[†]

Evaluation of the Absorbing Performance of Radar-absorbing Structure with Periodic Pattern after the Low-velocity Impact

Joon-Hyung Shin*, Byeong-Su Kwak*[†]

ABSTRACT: In this paper, the microwave absorbing characteristics after the impact of the radar-absorbing structure (RAS) consisting of periodic pattern sheet (PPS) and glass fiber-reinforced plastic (GFRP) were experimentally investigated. The fabricated RAS effectively absorbed the microwave in the X-band (8.2-12.4 GHz). In order to induce the damage to the RAS, a low-velocity impact test with various impact energy of 15, 40, and 60 J was conducted. Afterward, the impact damage was observed by using visual inspection, non-destructive test, and image processing method. Moreover, the absorbing performance of intact and damaged RAS was measured by the free-space measurement system. The experiment results revealed that the delamination damage from the impact energy of 15 J did not considerably affect the microwave absorbing performance of the RAS. However, fiber breakage and penetration damage with a relatively large damaged area were occurred when the impact energy was increased up to 40 J and 60 J, and these failures significantly degraded the microwave absorbing characteristics of the RAS.

초 록: 본 논문에서는 주기패턴 레이더 흡수 구조(RAS)에 다양한 손상을 모사하기 위한 저속충격시험을 수행하고 파손모드에 따른 전자기파 흡수 성능 특성 변화를 평가하였다. 주기패턴 레이더 흡수 구조는 주기패턴시트(PPS) 및 유리섬유강화플라스틱(GFRP)으로 구성되며 설계 및 제작된 구조는 X-band(8.2-12.4 GHz)에서 효과적으로 전자기파를 흡수하였다. 제작된 레이더 흡수 구조에 다양한 손상을 유도하기 위해 충격에너지에 따른 저속충격시험을 수행하였으며, 육안검사, 비파괴 검사 및 이미지 프로세싱을 이용하여 발생한 손상모드 확인 및 손상영역을 정량화하였다. 충격 전, 후 레이더 흡수 구조의 전자기파 흡수 성능은 자유공간 측정 시스템을 이용하여 평가하였다. 시험결과, 15 J의 낮은 충격에너지로 인해 발생한 크기가 작은 층간분리는 레이더 흡수 구조의 전자기파 흡수 성능 변화에 큰 영향을 미치지 않았다. 그러나 충격에너지를 40 J 또는 60 J로 증가시켜 상대적으로 넓은 영역의 섬유파손 또는 관통파손이 발생한 구조에서는 전자기파 흡수 성능이 크게 저하되는 것을 확인하였다.

Key Words: 다기능 복합재(Multi-functional composites), 레이더 흡수 구조(Radar-absorbing structure), 주기패턴시트(Periodic pattern sheet), 저속충격(Low-velocity impact), 반사손실(Return loss)

1. 서 론

현대전의 전장 환경에서 우위를 선점하기 위해 저피탐

전투기 및 무기체계의 요구도는 계속해서 증가하고 있다 [1]. 저피탐 항공기를 구현하는 방법으로는 대표적으로 Shaping 기술, 레이더 흡수 물질(RAM; Radar absorbing material)의

Received 31 October 2022, received in revised form 19 December 2022, accepted 21 December 2022

*School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University

[†]Corresponding author (E-mail: bs.kwak@gnu.ac.kr)

적용 등이 있다. Shaping 기술은 항공기를 특정한 외부 형상을 갖도록 설계하는 기술로 스텔스 항공기의 근간이 되는 기술이다. B-2, F-22, Su-57 등의 대부분의 스텔스 전투기에는 Shaping 기술이 적용되어 있다. RAM은 항공기 구조의 표면에 페인트와 유사한 방식으로 도포되어 입사된 전자기파를 흡수하는 방식으로 저피탐 성능을 나타낸다. RAM은 전자기파를 흡수하는 성능이 우수하나 주기적인 보수가 필요하며 항공기의 중량을 증가시켜 성능을 저하시킨다는 단점이 수반된다. 레이더 흡수 구조(RAS; Radar absorbing structure)는 하중을 지지하는 복합재 구조가 전자기파를 흡수하는 성능을 동시에 나타내는 다기능 복합재 구조의 일종이다. 단일 구조가 두 가지 성능을 동시에 나타내기 때문에 항공기에 적용될 경우 항공기의 경량화와 저피탐 성능을 동시에 확보할 수 있어 전체적인 항공기 성능 증가에 기여하는 바가 크다. 레이더 흡수 구조는 다양한 방식으로 구현이 되며 대표적인 예는 주기패턴 흡수체[2-7], 나노 물질 기반의 흡수체[8-13], 특수 처리된 섬유 기반의 흡수체[14-19] 등이 있다. 레이더 흡수 구조에 대한 연구는 현재까지 수 많은 연구자에 의해 수행되어 왔으며 이에 따라 레이더 흡수 구조가 실제 항공기에 적용되는 사례도 점차 증가하고 있다. 항공기 구조에 레이더 흡수 구조의 적용이 증가함에 따라 새로운 문제가 제기되었다. 이는 바로 항공기는 운용 중 구조에 손상을 일으킬 수 있는 다양한 충격에 노출되어 있다는 것이다. 저피탐 항공기는 전투시 적의 공격으로부터의 구조파손 뿐만 아니라 정비 중 발생할 수 있는 Tool drop, 활주로 잔해와의 충돌, 조류 충돌 등에 의해서도 손상이 발생할 가능성이 있다[20-23]. 하지만 손상이 발생한 복합재 구조의 기계적 성능 평가에 대한 연구는 광범위하게 수행되었지만, 손상이 발생한 레이더 흡수 구조의 전자기파 흡수 성능을 평가하고 이에 대한 수리기술 및 수리효과에 대한 연구는 상당히 제한적이다. Eun 등[24]은 충전분리손상이 레이더 흡수 구조의 전자기파 흡수 성능에 대해 연구하기 위해 Spacer를 활용하여 인공 충전분리를 모사하고 그 성능을 평가하였다. Go 등[25]은 주기패턴 흡수체를 제작하고 충격에너지에 따른 전자기파 흡수 성능을 평가하였으나, 다양한 손상에 대한 효과는 고려하지 않았다.

본 연구에서는 손상이 발생한 레이더 흡수 구조의 수리기술을 개발하기 위한 사전연구로 손상모드에 따른 레이더 흡수 구조의 전자기파 흡수 성능 특성을 평가하였다. 주기패턴시트(PPS; Periodic pattern sheet)를 기반으로 X-band에서 전자기파를 효과적으로 흡수하는 레이더 흡수 구조를 설계하고 제작하였다. 제작된 구조에 다양한 손상을 모사하기 위해 충격에너지를 변수로 하는 저속충격시험을 수행하였으며, 충격 전, 후 레이더 흡수 구조의 전자기파 흡수 성능을 측정하고 그 결과를 분석하였다.

2. 설계 및 제작

2.1 주기패턴 레이더 흡수 구조 설계

본 연구에서는 주기패턴 레이더 흡수 구조를 설계하기 위해 주기패턴 흡수체의 전자기파 흡수 원리를 적용하였다. Fig. 1은 본 연구에서 설계한 레이더 흡수 구조의 개념도이며 PPS와 유리섬유강화플라스틱(GFRP; Glass fiber-reinforced plastic)으로 구성된다. PPS에 관하여 D 는 사각형 주기패턴의 크기, w 는 패턴 사이의 간격, R_s 는 코팅된 전도성 잉크의 면저항, t_{GFRP} 는 GFRP의 두께를 의미한다. PPS는 저항(Resistance, R)과 인덕턴스(Inductance, L), 커패시턴스(Capacitance, C)로 구성된 등가회로로 표현할 수 있다. Fig. 2는 주기패턴 레이더 흡수 구조의 등가회로를 나타낸다.

PPS 기반의 레이더 흡수 구조는 임피던스 정합(Impedance matching)을 통해 설계할 수 있는데 이는 식 (1)-(6)을 통해 도출할 수 있다. 식 (1)은 반사계수의 크기를 나타내는 것으로 Z_{in} 은 입력 임피던스를 의미하고 Z_0 은 자유공간의 특성 임피던스를 의미한다[26].

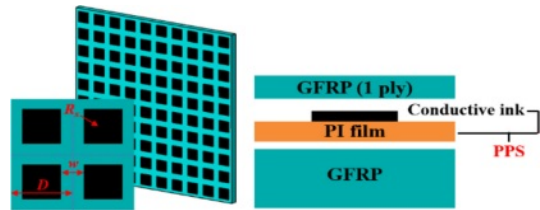


Fig. 1. Conceptual diagram of the RAS with periodic pattern sheet (PPS)

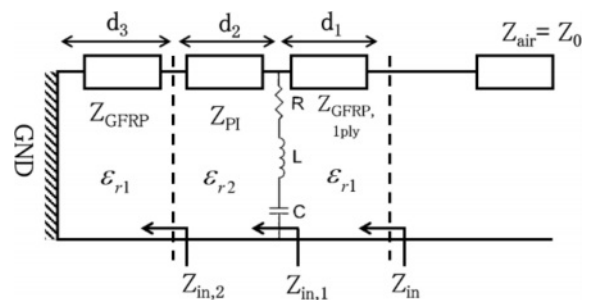


Fig. 2. Equivalent circuit model of the proposed RAS with periodic pattern sheet (PPS)

Table 1. Optimized parameters obtained from the simulation

Symbol	Definition	Designed values
D	Periodicity of patterns	8.35 mm
w	Gap size between patterns	3.15 mm
t_{GFRP}	Thickness of GFRP substrate	2.60 mm
R_s	Surface resistance	81 ohm/sq

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (1)$$

Conductive ink로 제작된 주기패턴의 임피던스인 $Z_{Pattern}$ 는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있으며 입력 임피던스 Z_{in} 은 식 (3)-(6)을 통해 계산할 수 있다. 여기서 ϵ_{r1} , ϵ_{r2} 는 GFRP와 PI film의 복소유전율, d 는 각 층의 두께를 의미한다.

$$Z_{Pattern} = R + \frac{1}{j\omega C} + j\omega L \quad (2)$$

$$k = 2\pi \frac{1}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (3)$$

$$Z_{in,2} = Z_0 \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{r1}}} j \tan(k_1 d_1) \quad (4)$$

$$Z_{in,1} = Z_{Pattern} // \left(Z_0 \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{r2}}} \cdot \frac{Z_0 \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{r1}}} j \tan(k_3 d_3) + Z_0 \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{r2}}} j \tan(k_2 d_2)}{Z_0 \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{r2}}} + Z_0 \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{r1}}} j \tan(k_1 d_1) j \tan(k_2 d_2)} \right) \quad (5)$$

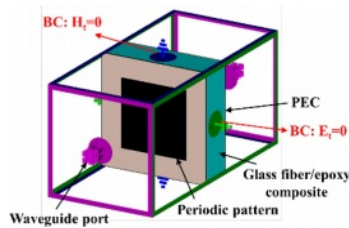


Fig. 3. Unit-cell model of the RAS for the simulation

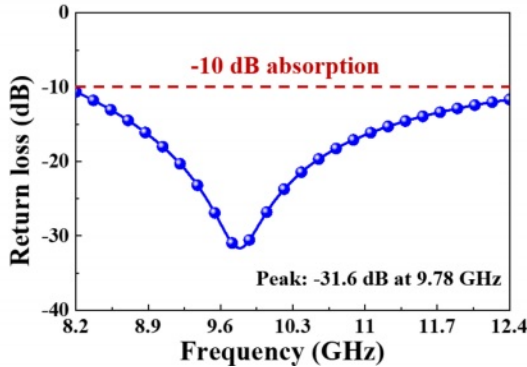


Fig. 4. Simulated return loss of the designed RAS in the X-band

$$Z_{in} = \left(Z_0 \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{r1}}} \cdot \frac{Z_{in,1} + Z_0 \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{r1}}} j \tan(k_1 d_1)}{Z_0 \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{r1}}} + Z_{in,1} j \tan(k_1 d_1)} \right) \quad (6)$$

레이더 흡수 구조의 설계는 상용 전자기장 해석 프로그램인 CST-MWS를 활용하여 수행하였다. Fig. 3은 레이더 흡수 구조의 설계를 위한 Unit-cell 모델을 나타낸다. 그림에서 나타냈듯이 무한평판 상태를 고려하기 위해 $E_t = 0$, $H_t = 0$ 의 경계조건을 부여하였다. 그림에는 나타나 있지 않으나, 주기패턴시트의 보호 목적으로 0.13 mm 두께의 GFRP를 최외곽층에 적용하였다. 이후 Unit-cell 모델을 바탕으로 매개변수에 따른 레이더 흡수 구조의 최적 설계를 수행하였다. 본 연구에서 레이더 흡수 구조의 목표 주파수 대역은 X-band 이므로 8.2-12.4 GHz 범위에서 해석을 수행하였다. Table 1은 최적 설계의 결과를 요약한 것이며 주기 패턴의 크기(D), 패턴 사이의 간격(w), GFRP의 두께(t_{GFRP}), 코팅된 패턴의 면저항(R_s)이 각각 8.35 mm, 3.15 mm, 2.60 mm 및 81 ohm/sq으로 도출되었다. Fig. 4는 설계된 레이더 흡수 구조의 X-band 주파수 대역 전자기파 흡수 성능을 보여주고 있다. 최종적으로 설계된 구조는 X-band 전 대역에서 90% 이상의 전자기파 흡수 성능을 나타내었고, 공진 주파수인 9.78 GHz에서 -31.6 dB의 반사손실(Return loss) Peak를 보였다.

2.2 주기패턴 레이더 흡수 구조 제작

Fig. 5는 설계된 주기패턴 레이더 흡수 구조의 제작 과정을 보여주고 있다. PPS는 패턴이 가공되어 있는 얇은 금속 시트인 메탈마스크와 Bar-coater 장비를 이용하여 제작하였다. PPS 제작에는 75 μ m 두께의 PI 필름과 Loctite社의 M 2012RS 전도성 잉크를 사용하였다.

레이더 흡수 구조를 제작하기 위해 사용된 유리섬유/에폭시 프리프레그는 SK chemical社의 GEP 224이다. 프리프레그를 적층하기 전에 GEP 224의 경화 후 1장 당 두께를 확인 할 필요가 있었다. 따라서 5, 10, 20 및 30장의 프리프레그로 구성된 복합재 적층판을 제작하여 1장 당 평균 두께를 확인하였으며, 그 두께는 0.13 mm로 확인되었다.

레이더 흡수 구조를 제작하기 위한 첫 번째 단계로 유리

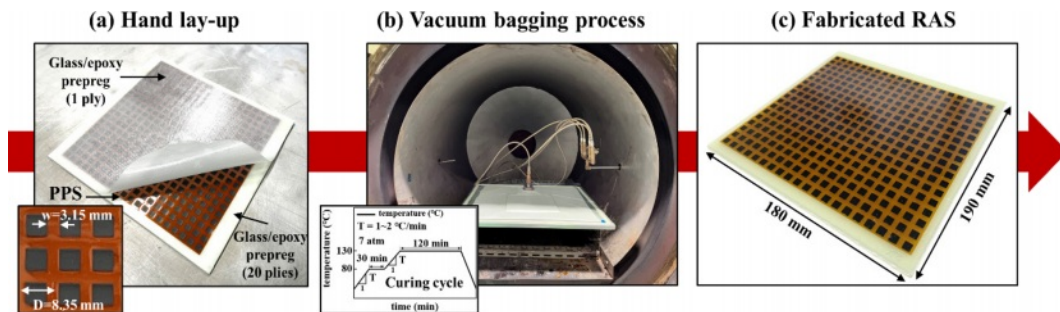


Fig. 5. Manufacturing process of RAS using periodic pattern sheet and glass/epoxy prepreps

섬유/에폭시 프리프레그를 설계된 GFRP의 두께를 고려하여 20 장을 적층하고 그 위에 PPS를 적층하였다. 그런 다음 PPS의 보호를 위한 목적의 한 장의 추가 유리섬유/에폭시 프리프레그를 최외곽층에 적층하였다. 적층된 복합재는 오토클레이브를 이용하여 진공백 성형 공정으로 경화하였다. 경화조건은 Fig. 5(b)에 제시한 바와 같이 80°C에서 30분, 130°C에서 120분 경화이다. Fig. 5(c)는 제작이 완료된 레이더 흡수 구조를 나타낸다. 저속충격 및 전자기파 흡수 성능 평가 시험을 고려하여 190 mm × 180 mm 크기의 샘플 3개를 제작하였으며 제작된 샘플의 두께 측정결과 평균 두께는 약 2.89 mm였다.

3. 시험 방법

3.1 저속충격시험

다양한 형태의 손상이 발생한 주기패턴 레이더 흡수 구조의 충격 후 전자기파 흡수 성능을 평가하기 위해 저속충격시험을 수행하였다. 저속충격시험은 경남테크노파크 항공우주센터에서 보유하고 있는 자유낙하시험기(HIT600F, Zwick Roell)를 활용하였으며, 저속충격시험의 셋업은 Fig. 6에 나타내었다. 자유낙하시험은 장비 상단부의 가이드를 따라 충격체가 자유낙하하여 구조에 충격에너지를 가한다. 자유낙하시험은 시편에 가하고자 하는 충격 에너지를 낙하 높이 또는 충격체의 중량을 변경하여 결정할 수 있으나, 본 연구에서는 충격체의 중량을 고정하고 낙하높이를 조절하는 방식을 채택하였다.

모든 시험은 관련 시험규격인 ASTM D7136을 준수하여 수행하였다. 본 연구에서는 레이더 흡수 구조에 충격에 의한 다양한 손상이 발생하였을 때 손상모드에 따른 전자기파 흡수 성능의 변화를 평가하는 것이 주요 목표이다. 따라서, 제작된 레이더 흡수 구조의 시험을 수행하기 전 충격에너지에 따른 손상모드를 확인하기 위한 시험을 수행하였다. 20 장의 프리프레그로 제작된 GFRP에 다양한 충격에너지를 인가하는 시험을 수행하였고 시험 결과 층간분리,



Fig. 6. Experimental setup of a low-velocity impact test for the fabricated RAS

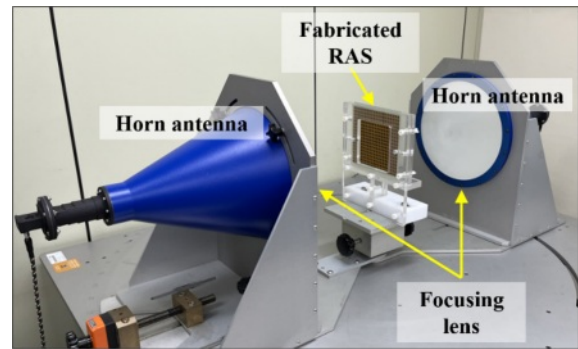


Fig. 7. Free-space measurement system consisting of two horn antennas with focusing lens

층간분리 및 섬유 파손, 관통파손을 발생시키는 충격에너지는 각각 15, 40 및 60 J인 것을 확인하였다. 결과적으로 이와 같은 3가지 충격에너지 조건으로 제작된 레이더 흡수 구조의 저속충격시험을 수행하였다.

3.2 레이더 흡수 성능 측정

주기패턴 레이더 흡수 구조의 충격 전, 후 전자기파 흡수 성능을 평가하기 위해 한국재료연구원에서 보유하고 있는 자유공간 측정 시스템(LLC, Microwave Measurement Systems)을 사용하였다. 자유공간 측정 시스템은 두개의 혼 안테나, 시편 홀더, 네트워크 분석기(Vector network analyzer)로 구성된다. 해당 장비의 혼 안테나에는 포커싱 렌즈가 부착되어 있어 안테나를 통과하는 전파가 굴절하여 포커스 빔(Focus beam)을 발생시켜 측정하고자 하는 시편의 중심부에 평면파(Plane wave)가 입사되도록 한다. 이를 통해 시편의 끝단에서 발생할 수 있는 전자기파의 산란과 같은 측정 오차를 최소화하여 신뢰도 높은 레이더 흡수 성능 측정 결과를 획득할 수 있다[27].

Fig. 7은 전자기파 흡수 성능을 평가하기 위한 시험 셋업이다. 그림에서와 같이 두 개의 혼 안테나 사이에 위치하는 시편 홀더에 제작한 레이더 흡수 구조를 거치하고 네트워크 분석기를 통해 반사손실을 측정하였다.

4. 결과 및 분석

4.1 온전한 레이더 흡수 구조의 성능

손상이 발생한 주기패턴 레이더 흡수 구조의 성능평가를 위한 기준지표를 획득하기 위해 손상이 발생하지 않은 온전한 구조의 전자기파 흡수 성능을 먼저 확인하였다. Fig. 8은 시뮬레이션 및 실제 측정을 통해 획득한 반사손실을 나타낸다. 총 3개 샘플의 측정을 수행한 결과 모두 유사한 전자기파 흡수 성능을 보였다. 측정에 사용된 3개의 레이더 흡수 구조 샘플은 8.28-12.13 GHz 주파수 대역에서 -10 dB 이상의 반사손실을 보였으며, 9.7 GHz 부근에서 반사손실

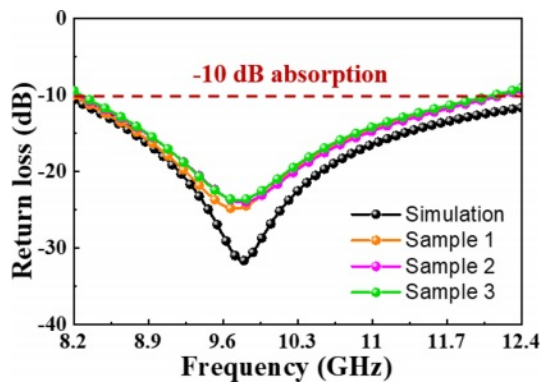


Fig. 8. Experimental and numerical return loss of RASs in the X-band

의 Peak를 나타냈다. 시뮬레이션 결과와 측정결과를 비교했을 때 반사손실의 경향은 유사하게 나타났으나 전자기파를 90% 이상 흡수하는 주파수 대역 및 공진 주파수가 소폭 감소하였다. 이는 레이더 흡수 구조의 설계로 획득한 두께와 실제 제작된 구조의 두께의 차이와 각 패턴에서의 면저항이 정확히 일치하지 않음에 의해 발생한 오차로 판단된다. 오차 요인은 설계 과정에서 고려되지 않기 때문에 일정 수준의 오차를 갖게 된 것으로 보인다. 시뮬레이션 결과와 측정결과가 정확히 일치하지는 않지만 그 경향은 유사하였고, 목표로 하는 X-band 대역에서의 흡수 성능은 우수하였다. 또한 본 연구에서는 레이더 흡수 구조의 성능 저하를 평가하는 것이 주요 목표이기 때문에 발생한 오차를 용

Table 2. Summary of the damage mode and damaged area

Impact energy (J)	Damage mode	Damage area (mm ²)
15	Dent and delamination	143.2
40	Dent, delamination, and fiber breakage	970.2
60	Dent, delamination, fiber breakage, and penetration	1251.8

인하고 계속해서 연구를 진행하였다.

4.2 손상된 레이더 흡수 구조의 성능

손상 모드에 따른 주기패턴 레이더 흡수 구조의 전자기파 흡수 성능의 특성 변화를 명확하게 평가하기 위하여 15, 40 및 60 J의 충격에너지로 자유낙하시험을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 9에 제시하였다. 시험결과에는 시험 후 구조에 발생한 손상모드, 외부에서 확인이 힘든 내부 손상을 관찰하기 위한 비파괴검사(C-scan) 결과 및 손상면적 확인을 위한 이미지 프로세싱 결과를 함께 제시하였다. 15 J의 충격 에너지를 가한 경우 충격이 가해진 면에 Dent가 발생하였으나 섬유 파손 없이 구조 내부에 층간분리가 발생하였다. 그러나 충격 에너지를 40 J로 증가하였을 때 복합재 구조에는 Dent와 층간분리 뿐만 아니라 섬유의 파손이 발생하였다. 60 J의 충격 에너지를 가한 경우 레이더 흡수 구조는 충격 에너지를 효과적으로 흡수하지 못하고 넓은 파손

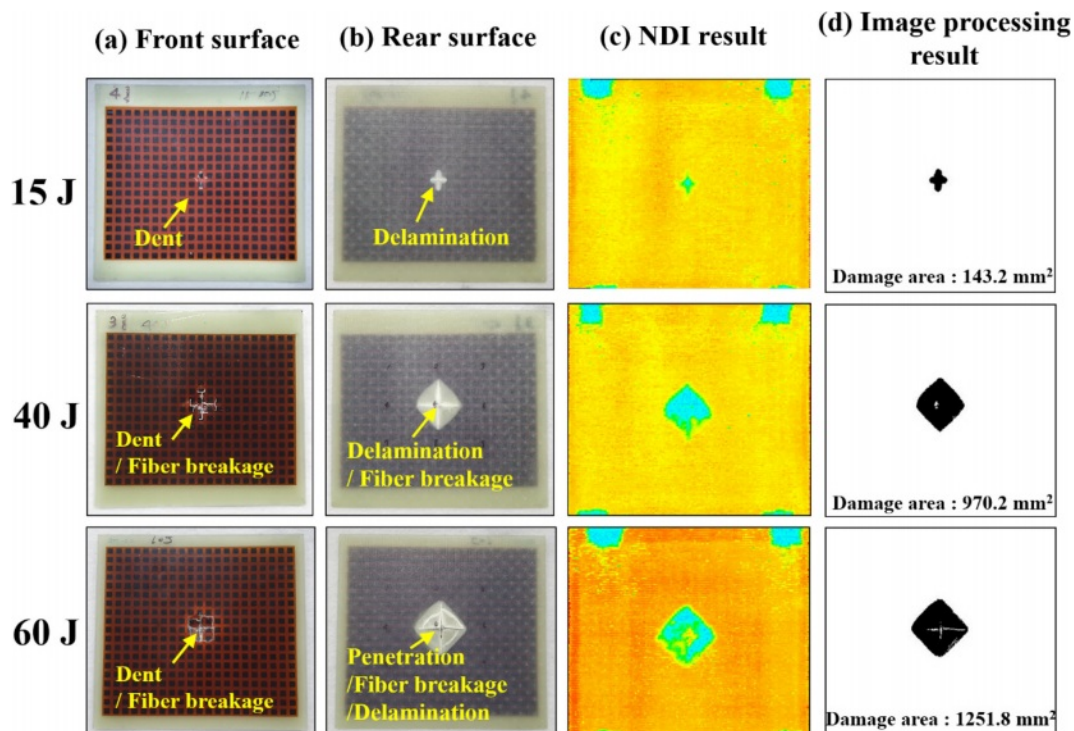


Fig. 9. Evaluation of the damages occurred in the RAS after the low-velocity impact test

영역을 동반하는 관통파손이 발생하였다. 충격 에너지에 따른 손상모드 및 손상영역은 Table 2에 정리하였다. 충격 에너지가 증가함에 따라 손상영역은 증가하는 경향을 보였다.

본 연구에서 제작된 레이더 흡수 구조는 유리섬유를 바탕으로 제작이 되었기 때문에 내부에 발생한 손상은 외부에서도 육안으로 확인이 되었다. 실제로 비파괴 검사를 수행한 결과 Fig. 9에서 보인 바와 같이 구조의 외부에서 확인되는 손상영역과 비파괴검사로 확인한 손상영역의 크기가 유사한 것을 알 수 있다.

Fig. 10과 Table 3에서 저속충격시험 전, 후 레이더 흡수 구조의 전자기파 흡수 성능 특성 변화를 설명하였다. Table 내의 Intact는 손상이 없는 구조를, Damaged는 손상이 발생한 경우를 뜻한다. 15 J의 충격 에너지를 가하여 층간분리가 발생한 레이더 흡수 구조의 경우, 충격 후 공진 주파수와 -10 dB 주파수 대역이 각각 9.69 GHz, 8.20-12.06 GHz로 손상 전과 비교하여 소폭 감소되는 것으로 나타났는데 이는 구조 내부에 발생한 층간분리로 인한 미세한 공기층 형성에 의한 것으로 판단된다. 이와 같은 결과로부터 상대적으로 크기가 작은 영역의 층간분리는 레이더 흡수 구조의 전자기파 흡수 성능에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 반면에 섬유 파손(40 J), 섬유 및 관통 파손(60 J)이 동반된 경우에는 공진 주파수 및 반사손실로 표현되는 전자기파 흡수 성능이 크게 저하되었다. 40 J의 충격에너지로 시험한 구조의 경우, 충격 전 대비 공진주파수가 9.78 GHz에서 9.38 GHz로 변화하였고, 60 J의 충격에너지를 가한 레이더 흡수 구조의 공진주파수는 9.73 GHz에서 9.31 GHz로 더 큰 변화를 보였다. 더욱 악화된 수치는 반사손실이다. 40 및 60 J의 충격에너지가 인가된 레이더 흡수 구조의 반사손실 Peak는 각각 -24.0 dB에서 -19.8 dB 및 -23.7 dB에서 -15.8 dB로 감소하였다. -10 dB 주파수 대역은 40 J의 경우 8.24-12.21 GHz에서 8.20-11.29 GHz, 60 J의 경우 8.28-12.13 GHz에서 8.20-11.08 GHz로 큰 폭으로 감소하였다. 충격시험을 수행하기 전 제작된 레이더 흡수 구조는 대부분의 X-band 대역의 전

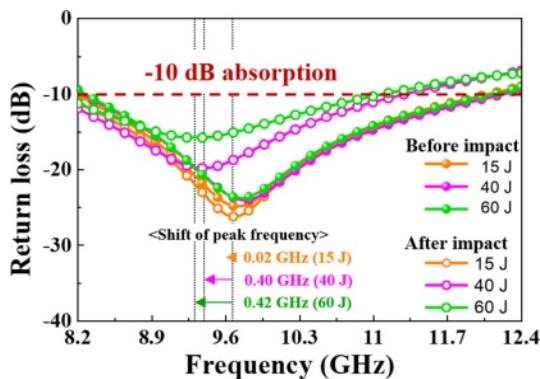


Fig. 10. Microwave absorption performance of intact and damaged RASs in the X-band

Table 3. Summary of the measured return loss of intact and damaged RASs

Impact energy	Type	-10 dB absorption bandwidth (GHz)	Resonance peak frequency (GHz) / Maximum return loss (dB)
15 J	Intact	8.20-12.19	9.71 / -24.8
	Damaged	8.20-12.06	9.69 / -26.2
40 J	Intact	8.24-12.21	9.78 / -24.0
	Damaged	8.20-11.29	9.38 / -19.8
60 J	Intact	8.28-12.13	9.73 / -23.7
	Damaged	8.20-11.08	9.31 / -15.8

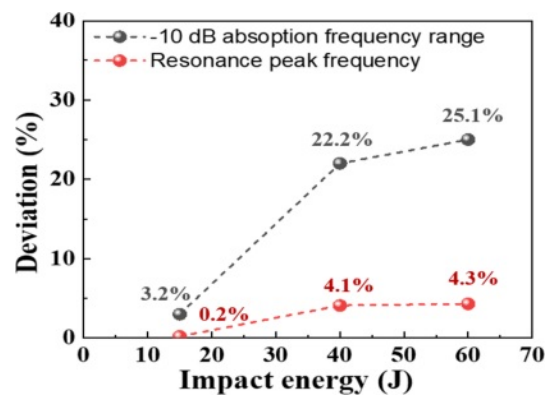


Fig. 11. Variation of resonance peak frequency and frequency range with 90% of microwave absorption

자기파를 효과적으로 흡수하였으나, 40 및 60 J의 충격에너지를 인가한 후에는 제 성능을 나타내지 못하는 것으로 확인되었다. 이러한 전자기파 흡수 성능 저하는 충격에너지로 인해 발생한 구조 내부의 공극에 의한 것으로 판단된다. 이에 더해 상대적으로 큰 충격에너지가 인가된 경우 레이더 흡수 구조의 형상 및 두께가 변화하기 때문에 정합조건을 정확히 이루지 못하여 이와 같은 성능 저하가 발생한 것으로 보인다.

Fig. 11에는 충격에너지에 따른 레이더 흡수 구조의 90%의 전자기파를 흡수하는 주파수 대역의 너비 및 공진주파수의 변화량을 나타내었다. 15 J의 충격에너지를 가하였을 때 공진 주파수의 변화는 0.2% 수준으로 미미하였으나 충격에너지를 40 및 60 J로 증가시켰을 때 공진 주파수의 변화는 4.1 및 4.3% 수준으로 증가하였다. 더 큰 변화는 -10 dB 반사손실 주파수 대역에서 나타났다. 15, 40 및 60 J의 충격에너지를 레이더 흡수 구조에 인가하였을 때 90%의 전자기파를 흡수하는 주파수 대역의 너비는 각각 3.2, 22.2 및 25.1% 변화하였다. 이로부터 레이더 흡수 구조에 가해진 충격에너지가 클수록 전자기파 흡수 성능의 저하가 크다는 것이 확인되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 제작된 주기패턴 레이더 흡수 구조에 충격에너지를 인가하는 저속충격시험을 수행하였고 충격 후 전자기파 흡수 성능의 특성변화를 확인하였다. 충격시험 전 제작된 레이더 흡수 구조는 8.28-12.13 GHz 주파수 대역에서 -10 dB 이상의 반사손실을 나타내었다. 손상이 발생한 레이더 흡수 구조의 전자기파 흡수 성능을 분석한 결과 상대적으로 작은 충격에너지(15 J)는 레이더 흡수 구조의 흡수 성능에 큰 영향을 미치지 않았다. 그러나, 충격에너지를 증가시킴에 따라 발생한 섬유파손(40 J) 및 섬유파손을 동반한 관통파손(60 J)은 레이더 흡수 구조의 성능을 크게 저하시키는 것으로 확인되었다. 15, 40 및 60 J의 충격에너지가 인가된 레이더 흡수 구조의 공진주파수는 각각 0.02, 0.40 및 0.42 GHz 만큼 저주파 대역으로 이동하는 결과를 보였다. 손상이 발생한 레이더 흡수 구조의 90% 전자기파 흡수 주파수 대역 너비의 경우 충격 전 구조의 96.8%(15 J), 77.8%(40 J) 및 74.9%(60 J) 수준으로 큰 폭의 성능저하가 나타났다. 이로부터 충격에너지의 크기가 증가할수록 레이더 흡수 구조의 전자기파 흡수 성능이 저하된다는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구는 손상이 발생한 레이더 흡수 구조의 수리기술 개발을 위한 사전연구이며, 본 연구를 통해 레이더 흡수 구조에 발생한 손상은 흡수 성능 특성에 크게 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 따라서, 본 연구결과를 바탕으로 손상이 발생한 레이더 흡수 구조의 전자기파 흡수 및 기계적 하중 지지 성능을 동시에 회복시킬 수 있는 수리기술 개발 연구를 수행할 계획이다.

후 기

본 논문은 2022년 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단 미래우주교육센터(2022M1A3C2074536)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

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.
- Liu, H.T., Cheng, H.F., Chu, Z.Y., and Zhang D.Y., "Absorbing Properties of Frequency Selective Surface Absorber with Cross-shaped Resistive Patches," *Materials and Design*, Vol. 28, No. 7, 2007, pp. 2166-2171.
- Lee, W.J., and Kim, C.G., "Electromagnetic Wave Absorbing Composites with a Square Patterned Conducting Polymer Layer for Wideband Characteristics," *Shock and Vibration*, Vol. 2014, 2014, 318380.
- Jang, H.K., Shin, J.H., Kim, C.G., Shin, S.H., and Kim, J.B., "Design and Fabrication of Semi-cylindrical Radar Absorbing Structure using Fiber-reinforced Composites," *Composites Research*, Vol. 23, No. 2, 2010, pp. 17-23.
- Choi, W.H., Shin, J.H., Song, T.H., Kim, J.B., Cho, C.M., Lee, W.J., and Kim, C.G., "Design of Circuit-Analog (CA) Absorber and Application to the Leading Edge of a Wing-Shaped Structure," *IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 56, No. 3, 2014, pp. 599-607.
- Choi, W.H., Kim, J.B., Shin, J.H., Song, T.H., Lee, W.J., Joo, Y.S., and Kim, C.G., "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, 2014, pp. 96-101.
- Choi, W.H., Shin, J.H., Song, T.H., Kim, J.B., Lee, W.Y., and Kim, C.G., "A Thin Hybrid Circuit-analog (CA) Microwave Absorbing Double-slab Composite Structure," *Composite Structures*, Vol. 124, 2015, pp. 310-316.
- Kim, J.B., Lee, S.K., and Kim, C.G., "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, 2008, pp. 2909-2916.
- Zou, H., Li, S., Zhang, L., Yan, S., Wu, H., Zhang, S., and Tian, M., "Determining Factors for High Performance Silicone Rubber Microwave Absorbing Materials," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 323, No. 12, 2011, pp. 1643-1651.
- Park, K.Y., Han, J.H., Kim, J.B., and Lee, S.K., "Two-layered Electromagnetic Wave-absorbing E-glass/epoxy Plain Weave Composites Containing Car Nanofibers and NiFe Particles," *Journal of Composite Materials*, Vol. 45, No. 26, 2011, pp. 2773-2781.
- Shin, J.H., Jang, H.K., Choi, W.H., Song, T.H., Kim, C.G., and Lee, W.Y., "Design and Verification of a Single Slab RAS through Mass Production of Glass/MWNT Added Epoxy Composite Prepreg," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 132, No. 22, 2015, 42019.
- Choi, I., Lee, D., and Lee, D.G., "Radar Absorbing Composite Structures Dispersed with Nano-conductive Particles," *Composite Structures*, Vol. 122, 2015, pp. 23-30.
- Micheli, D., Vricella, A., Pastore, R., Delfini, A., Giusti, A., Albano, M., Marchetti, M., Moglie, F., and Primiani, V.M., "Ballistic and Electromagnetic Shielding Behaviour of Multifunctional Kevlar Fiber Reinforced Epoxy Composites Modified by Carbon Nanotubes," *Carbon*, Vol. 104, 2016, pp. 141-156.
- Nam, Y.W., Choi, J.H., Huh, J.M., Lee, W.J., and Kim, C.G., "Thin Broadband Microwave Absorber with Conductive and Magnetic Materials Coated on a Glass Fabric," *Journal of Composite Materials*, Vol. 52, No. 10, 2018, pp. 1413-1420.
- Nam, Y.W., Choi, J.H., Lee, W.J., and Kim, C.G., "Fabrication of a Thin and Lightweight Microwave Absorber Containing Ni-coated Glass Fibers by Electroless Plating," *Composites Science and Technology*, Vol. 145, 2017, pp. 165-172.
- 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, No. 15, 2017, pp. 1171-1177.

17. Nam, Y.W., Kumar, S.K.S., Ankem, V.A., and Kim, C.G., "Multi-functional Aramid/epoxy Composite for Stealth Space Hypervelocity Impact Shielding System," *Composite Structures*, Vol. 193, 2018, pp. 113-120.
18. Choi, W.H., Choe, H.S., and Nam, Y.W., "Space Hypervelocity Impact-shielding and Microwave Absorbing Composite Composed of Cobalt-coated Aramid Fibers," *Composite Structures*, Vol. 266, 2021, 113875.
19. Choi, J.H., Nam, Y.W., Kim, C.G., and Lee, W.J., "Microwave Absorbing Structure Using Semiconductive Fiber Reinforced Composite," *Composites Research*, Vol. 29, No. 3, 2016, pp. 98-103.
20. Schoeppner, G.A., and Abrate, S., "Delamination Threshold Loads for Low Velocity Impact on Composite Laminates," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 31, No. 9, 2000, pp. 903-915.
21. Kim, H., and Kedward, K.T., "Modeling Hail Ice Impacts and Predicting Impact Damage Initiation in Composite Structures," *AIAA Journal*, Vol. 38, 2000, pp. 1278-1288.
22. Kim, C.H., Sim, H.W., An, W.J., Kweon, J.H., and Choi, J.H., "Impact Characteristics of Composite Panel Stitched by I-fiber Process," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 127, 2019, 105644.
23. Ha, S.C., Kim, I.G., Lee, S.J., Cho, S.G., Jang, M.H., and Choi, I.H., "Probability Analysis for Impact Behavior of Composite Laminates Subjected to Low-Velocity Impact," *Composites Research*, Vol. 22, No. 6, 2009, pp. 18-22.
24. Eun, S.W., Choi, W.H., Jang, H.K., Shin, J.H., Kim, J.B., and Kim, C.G., "Effect of Delamination on the Electromagnetic Wave Absorbing Performance of Radar Absorbing Structures," *Composites Science and Technology*, Vol. 116, 2015, pp. 18-25.
25. Go, J.I., Lee, W.J., Kim, S.Y., Baek, S.M., and Choi, W.H., "Electromagnetic Damage Tolerance for Radar Absorbing Composite Structure with Impact Damage," *Composites Science and Technology*, Vol. 199, 2020, 108366.
26. Costa, F., Kazemzadeh, A., Genovesi, S., and Monorchio, A., "Electromagnetic Absorbers Based on Frequency Selective Surfaces," *Forum for Electromagnetic Research Methods and Application Technologies (FERMAT)*, Vol. 37, No. 1, 2016.
27. Choi, K.S., Sim, D.Y., Choi, W.W., Shin, J.H., and Nam, Y.W., "Ultra-high Temperature EM Wave Absorption Behavior for Ceramic/Sendust-aluminosilicate Composite in X-band," *Composites Research*, Vol. 35, No. 3, 2022, pp. 201-215.