

3차원 픽셀 기반 패턴이 적용된 광대역 허니컴 흡수체 설계

Design and Optimization of a Broadband Honeycomb Electromagnetic Absorber with Three-Dimensional Pixelated Structure

초 록

본 연구에서는 3차원 픽셀 기반 패턴을 적용하여 광대역 전파 흡수 성능과 경량성을 갖춘 허니컴 흡수체를 설계 및 제작하였다. 설계 과정에서 허니컴 벽면을 메타 공간으로 활용하여, 0.5 mm x 0.5 mm 크기의 픽셀 단위로 분할하고 전도성 패터닝이 가능하도록 구현하였다. 그라비아 인쇄 기법을 통해 아라미드(Aramid) 페이퍼 위에 픽셀 패턴이 인쇄되었고, 이를 이용하여 허니컴을 제작하였다. 허니컴의 셀 크기는 1/8 인치로 설정하였으며, FDTD 해석 기법과 유전 알고리즘(GA)을 이용해 S, C, X, Ku 밴드 대역(2~18 GHz)을 포함하는 광대역 주파수 범위에서 전파 흡수 성능을 극대화하는 픽셀 패턴을 설계하였다. 제작된 두께 20 mm 허니컴은 NRL Arch 반사 측정 장비를 통해 2~18 GHz에서 -5 dB 이하, 동일한 20 mm 시편 구조를 직렬로 반복한 40 mm 허니컴은 4~18 GHz 대역에서 대부분 -10 dB 이하의 반사손실을 HH 및 VV 편파 모두 달성하였다. 제안된 구조는 경량화와 광대역에서 우수한 전파 흡수 성능을 확인하였다.

Key Words : Broadband Radar Absorption(광대역 전파 흡수), Pixelated Honeycomb(픽셀 기반 허니컴)

1. Introduction

최근 항공기와 무인 비행체의 임무 환경은 점차 복잡해지고 있으며, 특히 차세대(6세대) 전투기 설계에서는 플랫폼의 생존성 향상을 위해 전 대역에 대한 스텔스 기능이 주요 요구도로 부각됨에 따라 저피탐(Low Observability) 기술의 중요성이 더욱 강조되고 있다. 최신 레이더 시스템은 탐지 가능한 주파수 범위가 S, C, X, Ku – Band(2~18 GHz) 이상으로 확장되고 있어, 특정 주파수 대역에서만 작동하는 기존 스텔스 설계로는 한계가 존재한다. 특히 차세대 전투기는 광대역, 다중 편파, 능동위상배열(AESA) 레이더의 위협 하에서 운용되므로, 이러한 복합적 탐지 환경에 대응하기 위해서는 광대역에서의 RCS 저감이 필수적이다. 레이더 단면적(Radar Cross Section, RCS) 저감은 이러한 환경에서 스텔스 성능을 유지하기 위한 핵심 기술로, 이를 위해 기체 형상 변경, 전파흡수재(Radar Absorbing Material, RAM) 적용 등 다양한 기법이 활용되고 있다.

RAM은 입사된 전자기파를 반사시키지 않고 내부에서 흡수, 소산 시키는 기능을 갖춘 재료로 특정 대역에서의 반사손실을 최소화한다. 기존 RAM 설계 방식으로는 자성 손실재 기반 복합재^(1~3) 또는 다층 적층형 Jaumann 구조^(4~7), 공진기 기반 메타물질^(8~14), 픽셀화 메타표면^(15~20), 다층 유전체 결합 구조 등이 대표적이다. 그러나 이러한 방식들은 흡수 대역확장을 위해서는 중량 증가가 수반되거나, 복수개의 전자기 손실 재료를 확보 및 관리해야 한다는 번거로움이 존재한다. 이에 따라 경량성과 광대역 흡수 성능을 동시에 달성할 수 있는 새로운 구조 설계 전략이 필요하다. 이러한 요구에 부합하는 구조로 벌집(Honeycomb) 구조체로써 허니컴은 내부가 대부분 빈 공간으로 구성되어 밀도가 낮으며, 육각형 셀 구조로 인해 높은 기계적 강성을 제공한다. 특히 아라미드(Aramid) 기반 허니컴은 고성능 섬유의 특성을 지녀 경량성과 강도를 모두 확보할 수 있어 항공우주 구조물에 적합하다. 이러한 특성을 지닌 허니컴을 전파흡수 구조와 결합하면, 경량화와 흡수 성능을 동시에 구현 가능하기에 차세대 흡수체 플랫폼으로 주목받고 있다^(21~23).

본 연구에서는 셀 크기 1/8 인치(3.175 mm), 벽면 두께 20 mm의 아라미드 허니컴 구조 벽면을 메타 공간(Meta-space)으로 활용하였다. 여기서 메타 공간이란, 구조물 표면을 단순한 기계적 요소가 아닌, 전자기파의 반사, 흡수, 편파 변환 등 전자기적 응답을 설계, 제어할 수 있는 영역으로 정의한 것이다. 이를 위해 허니컴 벽면 적체를 0.5 mm x 0.5 mm 크기의 3차원 픽셀 패턴으로 분할하고, 각 픽셀에

전도성 잉크를 도포하거나 비 도포하는 방식으로 전자기적 특성을 부여하였다. 1/8 인치 셀 크기는 항공기용 허니컴에서 주로 사용되는 규격이며, 상대적으로 높은 기계적 강도, 강성을 기대할 수 있다. 2~18 GHz에서는 셀 형상으로 인한 전파 차단 효과 없이 안정적인 메타 표면 특성을 구현할 수 있다.

픽셀 패턴은 MATLAB 환경에서 수행되었으며, 각 픽셀의 전도성 잉크 도포 여부를 이진 값(0, 1)으로 설정하여 설계 변수로 사용하였다. 최적화에는 유전 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)이 적용되었는데, GA는 자연 선택과 진화 원리를 모방하여 해 집합을 세대별로 진화시키는 전역 탐색 기법으로, 복잡한 설계 공간에서 전역 최적해를 찾는 데 강점을 가진다. 본 연구에서는 다중 주파수 대역에서 흡수 성능을 극대화하기 위해, 다중 편파에서의 반사손실이 -10 dB 이하가 되도록 주파수별 가중치를 반영한 목적함수를 구성하여 다중 주파수 대역에서의 흡수 성능을 극대화하였다. 제작된 시편은 경량 특성을 확인하기 위하여 밀도를 측정하였으며 NRL (Naval Research Laboratory) Arch 반사 측정 장비를 이용하여 S, C, X, Ku 대역에서의 반사손실을 측정하였으며, 결과를 상용프로그램인 CST Studio Suite의 시뮬레이션 값과 비교하였다. 분석 결과, 제안된 3차원 픽셀 패턴 허니컴 구조는 광대역 전파 흡수 성능을 발휘함을 확인하였다.

2. Design and Optimization

2-1. Design Concept of the Pixelated Honeycomb Absorber

본 연구에서는 경량성을 확보하면서도 높은 압축 및 전단 강성을 제공하는 허니컴 구조를 기반으로, 메타 공간(Meta-space) 개념을 적용한 3차원 픽셀 패턴을 설계하였다. 사용된 허니컴은 아라미드 소재로 제작되었으며, 이는 고성능 섬유의 특성상 낮은 밀도와 높은 기계적 강도를 동시에 확보할 수 있어 항공우주 구조물에 적합하다. 허니컴의 셀 크기는 1/8 인치(3.175 mm)로 설정하였고, 벽면 두께는 20 mm로 구성하였다. 각 셀의 벽면은 0.5 mm x 0.5 mm 크기의 픽셀로 분할하였으며, 이 경우 하나의 허니컴 셀에는 16 x 40 개의 픽셀이 포함된다. 각 픽셀은 전도성 잉크의 도포 여부에 따라 이진 값(0 또는 1)으로 정의하였고, 이러한 데이터를 변수로 활용하였다 (Fig. 1.).

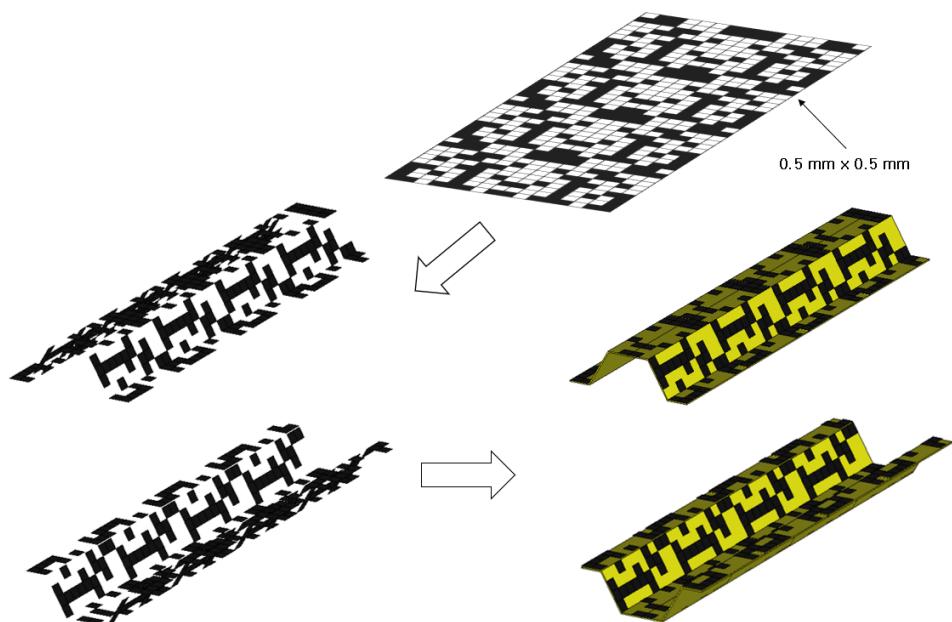


Fig. 1. Design process of Pixelated Honeycomb

설계 과정에서 최적화된 픽셀 패턴은 2차원 전개 형태로 생성된 후, 아라미드 허니컴 셀 벽면의 곡면 형상과 각도에 맞춰 적용되었다. 패턴은 셀의 윗면과 아랫면에 동일하게 배치하여 전자기파 입사 방향에 관계없이 흡수 성능을 유지하도록 설계하였다. Fig. 1.은 최적화된 픽셀 패턴의 전개 형상과 이를 허니컴 셀 양면에 적용한 구조를 나타낸다. 전파 흡수 성능 분석에는 CST Studio Suite 상용 시뮬레이션 프로그램을 사용하였다. 해석 방식은 Time Domain Solver를 기반으로 하였으며, 여기서 계산되는 S-Parameter는 셀 구조가 주기적으로 반복되는 경우 하나의 셀만 해석해도 전체 구조의 전자기 응답을 나타낼 수 있다는 점을 활용하였다 (Fig. 2.).

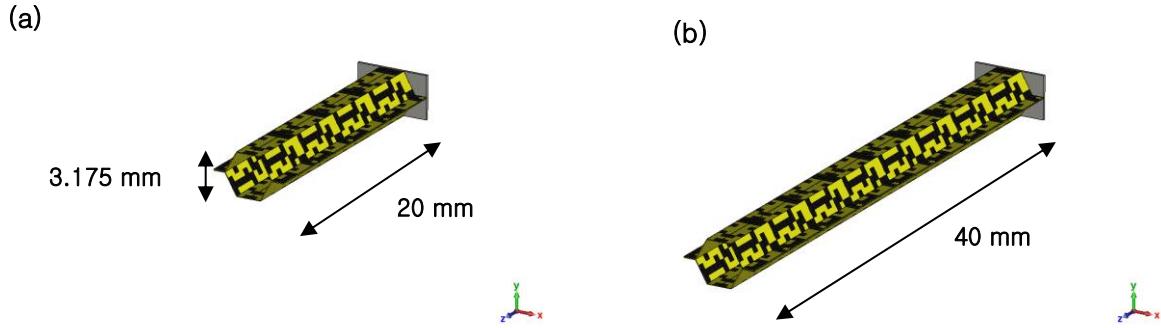


Fig. 2. (a) 20 mm Honeycomb with Pattern, (b) 40 mm Honeycomb with Pattern

기존 연구에 따르면, 이와 같은 Pixelated 표면 구조는 표면 임피던스를 세밀하게 조정할 수 있어 주파수 전 대역에서 보다 안정적인 흡수 성능을 확보할 수 있으며, 주기적 패턴에 의한 편파 변환(Polarization Conversion) 효과도 기대된다. 이러한 특성은 결과적으로 레이더 반사 면적(RCS) 감소로 이어질 수 있다. 본 연구에서 사용한 셀 크기 3.175 mm는 직사각형 도파관의 컷오프 주파수 식에 대입하면 약 47.2 GHz에서 차단(Cut-off)이 발생하는 것으로 계산된다. 이는 본 연구의 최적화 주파수인 2~18GHz보다 훨씬 높은 주파수이므로, 해당 주파수 범위에서는 전자파가 셀 내부로 깊게 전파되지 못하고 입구에서부터 감쇠 될 가능성이 높다.⁽²⁴⁾

$$f_c = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{n\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{m\pi}{b}\right)^2} \quad (1)$$

위의 공식에서 a 와 b 는 직사각형 도파관 길이이며, n 과 m 은 모드 숫자이다. 따라서 본 구조는 셀의 형상 자체의 차단 효과, Pixelated 표면 패턴에 의한 전자기파 흡수 효과가 결합되어, 외부에서 볼 때 연속적인 유전 매질처럼 동작하는 특성을 예상한다.

2–2. Optimization of Pixelated Honeycomb Patterns Using Genetic Algorithm

본 연구에서 사용된 허니컴 흡수체는 벽면을 0.5 mm x 0.5 mm 크기의 정사각형 픽셀 단위로 세분화하였다. 하나의 셀 벽면에는 총 16 x 40 개의 픽셀이 존재하며, 각 픽셀은 전도성 잉크 도포 여부에 따라 이진 값(0 또는 1)으로 부호화 하였다. 여기서 값이 0 이면 비도포 상태, 값이 1 이면 전도성 잉크가 도포된 상태를 의미한다 (Fig. 1.). 이러한 이진 설계 방식은 패턴의 디지털 표현이 용이하고, 전자기적 특성을 해석 및 최적화하는 과정에서 직관적으로 활용할 수 있다는 장점이 있다.

픽셀 패턴의 설계 목표는 2~18 GHz 전 주파수 범위에서 반사손실이 -10 dB 이하를 만족하는 것이다. 이를 위해 주파수별 가중치를 부여하여 특정 위험 레이더 대역에서의 성능을 우선 향상시키고, HH 및 VV 편파 결과를 평균화하여 다중 편파 환경에서도 안정적인 흡수 성능을 확보하도록 하였다. 이러한 고차원 이진 설계 공간의 탐색에는 전역 최적화 기법인 유전 알고리즘을 적용하였다. GA는 자연

선택과 유전 원리를 모사하여 세대를 거듭하며 해를 진화시키는 방법이다. 본 연구에서 최적화 절차는 무작위 패턴과 규칙 기반 패턴을 혼합하여 초기 개체군을 생성한 뒤, CST를 이용해 각 패턴의 S-파라미터를 계산하고, 가중치가 적용된 RL 성능을 기준으로 적합도를 평가한 뒤, 적합도가 높은 개체를 우선 선발하는 선택(Selection), 부모 개체의 비트열을 조합하여 새로운 개체를 생성하는 교차(Crossover), 불리한 픽 발생을 억제하는 돌연변이(Mutation), 최소 간격 및 제약 조건을 위반하는 패턴은 자동 보정 또는 패널티를 부여하는 정규화(Post-processing), 세대수 도달 또는 적합도 개선률이 설정 기준 이하일 때 최적화를 종료하는 과정을 거치게 된다.

해석 환경은 해상도를 0.5 mm로 설정하여 픽셀 형상을 정밀하게 구현하였으며, 실제 시험 조건과 동일하게 허니컴 시편 후면에 PEC(Perfect Electric Conductor)를 배치하였다. 최적화는 두께 20 mm로 수행되었으며, 이후 동일 패턴을 직렬로 적층하여 두께 40 mm 구조를 제작하였다. 이러한 적층 방식은 구조적 일관성을 유지하면서도 위상 및 임피던스 누적 효과를 통해 -10 dB 기준 달성 주파수 대역을 확장하는 것을 목표로 하였다 (Fig. 3.).

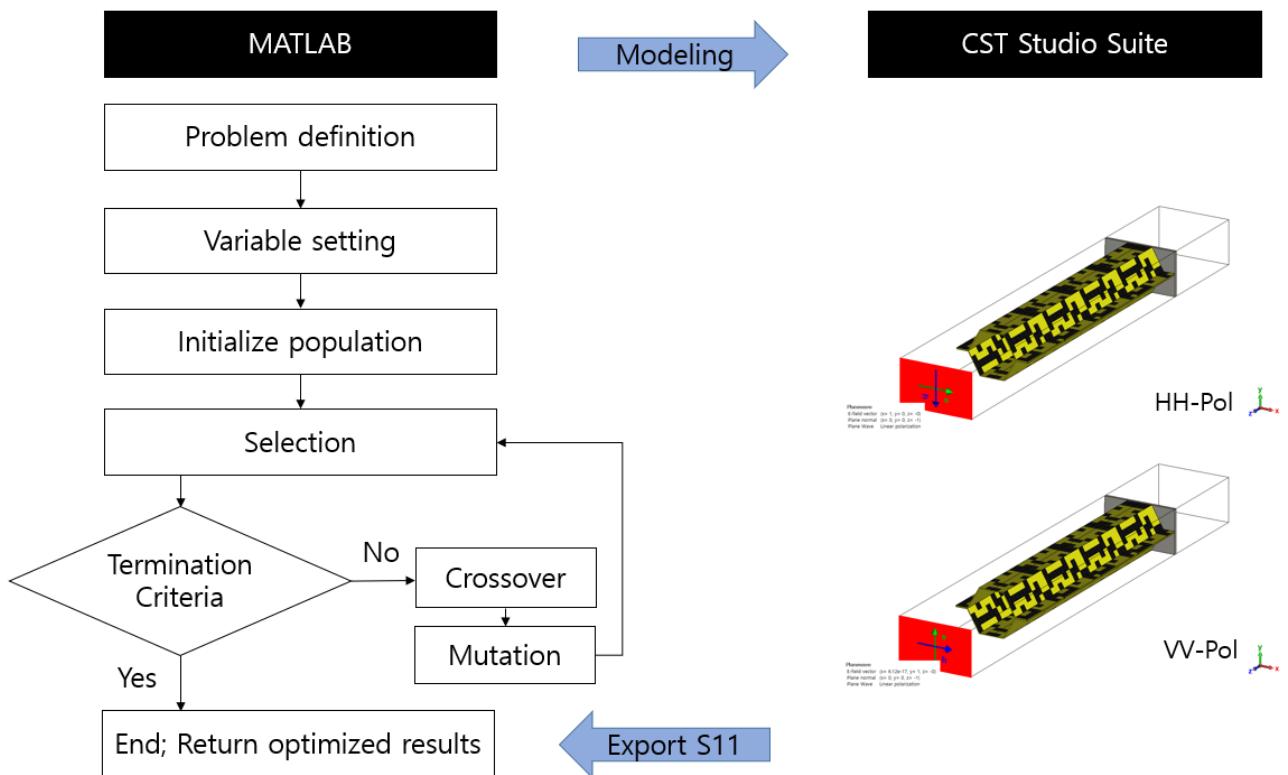


Fig. 3. Genetic Algorithm Flowchart

2–3. Optimized Design Results

최적화된 Pixelated Honeycomb 구조의 성능을 검증하기 위해 CST Studio Suite의 Time Domain Solver를 사용하여 전자기파 반사 특성을 해석하였다. Simulation은 편파에 따라 HH와 VV 두 가지 경우를 고려하였다. HH 편파는 전기장(E-field) 방향이 허니컴 셀의 가로 방향(수평 방향)에 놓이는 경우를 의미하며, VV 편파는 전기장 방향이 세로 방향(수직 방향)에 놓이는 경우를 의미한다. 경계조건은 TEM(Transverse Electro-Magnetic) 경계조건을 적용하였으며, 입사면에 포트를 생성하였다. 허니컴 후면에는 완전 도체(PEC)를 배치하여 실제 NRL Arch 측정 환경과 동일하게 구성하였다. 해석 주파수 범위는 0.5~20 GHz로 설정하였으며, 최소 격자 해상도는 0.5 mm로 유지하여 픽셀 형상을

정밀하게 구현하였다. 비교 분석을 위해 먼저 픽셀 패턴이 없는 순수 아라미드 허니컴만을 모델링하여 시뮬레이션을 수행하였으며 그 결과, 0.5~20 GHz 전 구간에서 반사손실이 0 dB로 나타나, 전자파 흡수 성능이 거의 없음을 확인하였다.

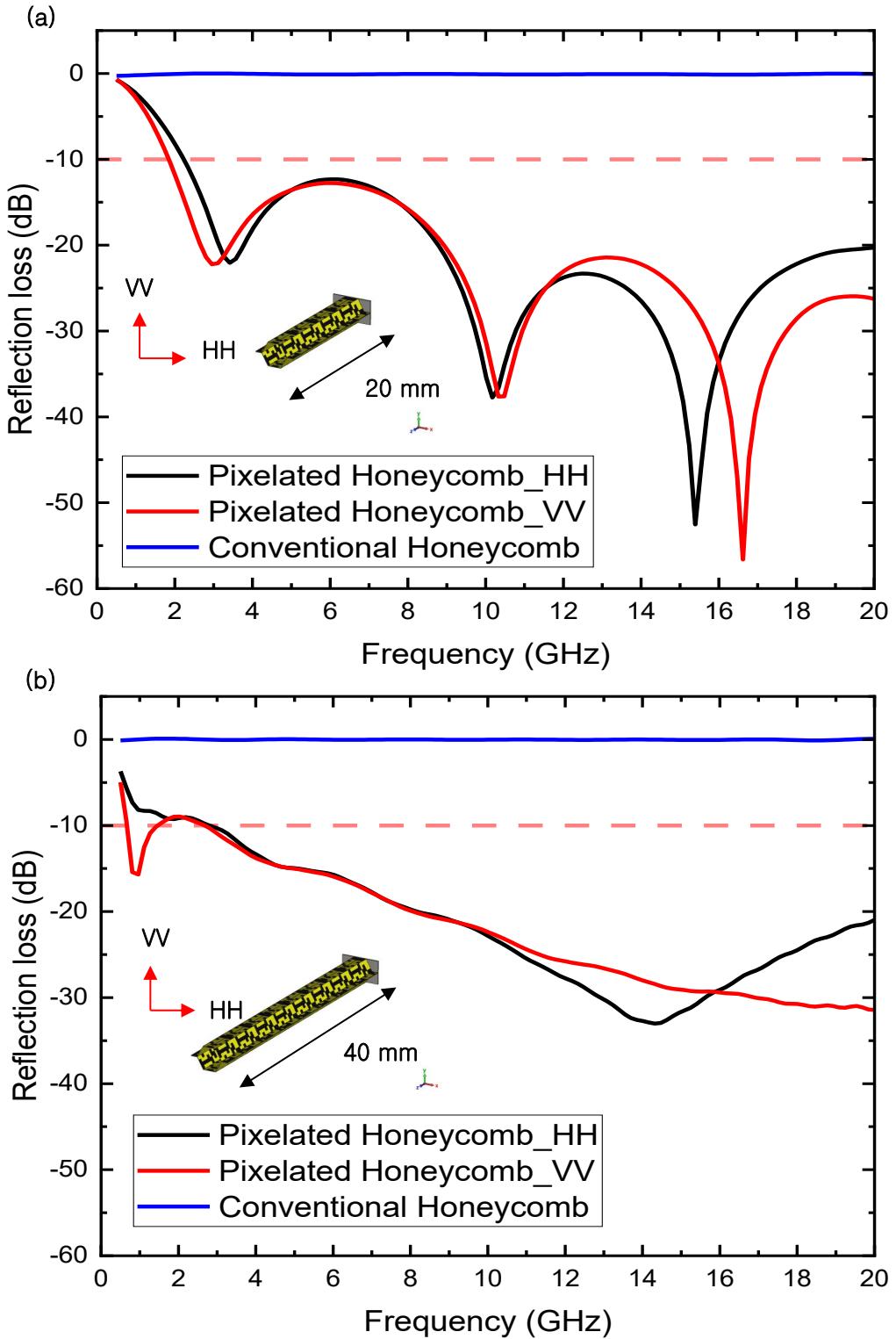


Fig. 4. Simulated RL – (a) 20 mm Pixelated Honeycomb, (b) 40 mm Pixelated Honeycomb

반면, 최적화된 픽셀 패턴을 적용한 20 mm 두께 구조에서는 약 2~20 GHz 범위에서 -10 dB 이하의 반사손실이 나왔으며, 다수의 공진 주파수가 형성되었다. 이는 픽셀 패턴에 의해 표면 임피던스가 주파수 별로 변화하면서 다양한 공진 모드가 유도된 결과로 예측된다 (Fig. 4(a).). 동일 패턴을 직렬로 적층하여 제작한 40 mm 두께 구조의 경우 약 4~20 GHz 범위에서 -10 dB 이하의 반사손실이 나오게 되었다(Fig. 4(b).).

결과적으로, 전자기적 반사손실 특성이 없는 순수 아라미드 허니컴 벽면을 ‘메타 공간’으로 활용하여, 시뮬레이션 상에서 표면을 픽셀 단위로 패턴화한 3차원 Pixelated Honeycomb 구조를 구현한 결과, 전파 흡수 특성이 발현됨을 확인하였다. 특히, 동일한 최적 패턴을 단순히 직렬로 적층하여 두께를 증가시켰음에도 불구하고, 반사손실 응답이 달라지는 현상이 확인되었다. 이는 패턴 형상과 적층에 따른 전자기적 경로 변화가 흡수 대역 및 공진 특성에 영향을 미친 결과로 해석 되어 진다.

3. Fabrication and Measurement

3-1. Fabrication

본 연구에서 사용된 픽셀 패턴은 연속 인쇄(Roll-to-Roll) 방식을 통해 구현하였다. 인쇄 기판으로는 두께 0.05 mm의 아라미드 페이퍼를 사용하였으며, 이는 경량성과 내열성을 동시에 확보할 수 있어 메타 구조 구현이 적합하다. 전도성 패턴 형성을 위해 열경화형 카본 기반 잉크를 적용하였고, 인쇄 장비에는 인라인 건조 시스템이 포함되어 있어 패턴 인쇄 직후 즉시 건조가 가능하다는 장점이 있다. 다만, 해당 인쇄 공정은 최소 구현 가능한 패턴 폭이 약 0.4 mm로 제한되므로, 설계 시 이에 따라 픽셀 크기를 0.5 mm x 0.5 mm로 설정하였다.

인쇄된 아라미드 페이퍼는 시트 형태로 절단한 후, 허니컴을 적층 하였다. 이후 허니컴 블록을 목표 형상으로 확장하고, 수지 경화 공정을 통해 패턴과 기재의 결합 강도를 높였다. (Fig. 5.).

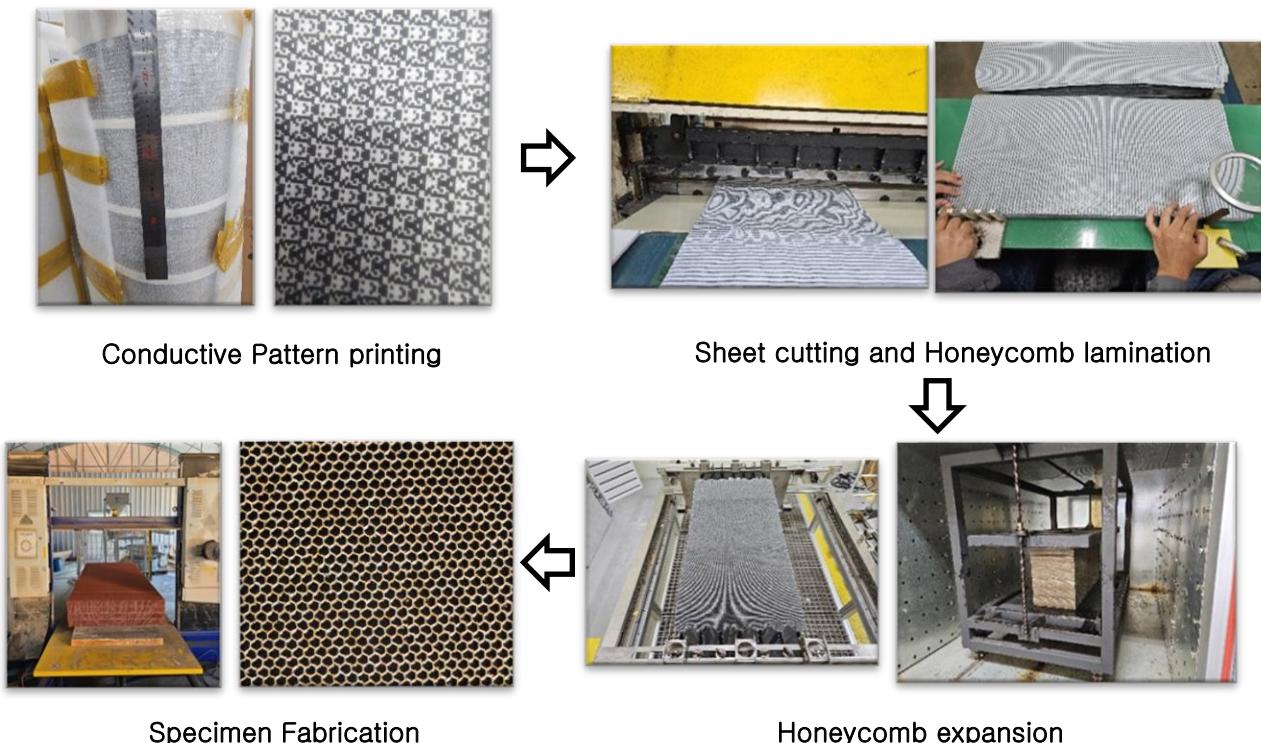


Fig. 5. Fabrication Process of the Pixelated Honeycomb EM Absorber

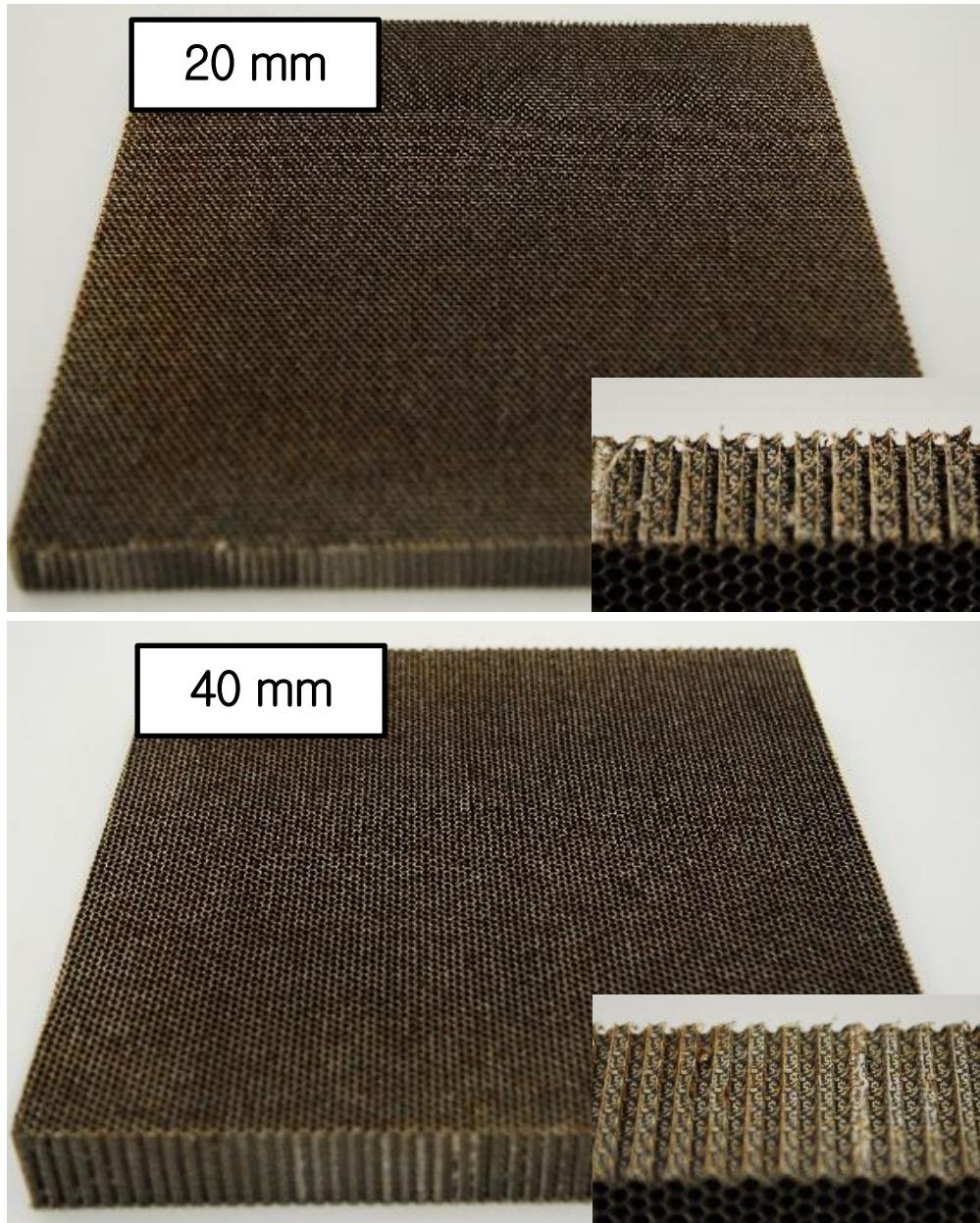


Fig. 6. 20 mm and 40 mm Absorber Specimens

제작된 시편은 전자기파 흡수 성능 평가를 위해 NRL Arch 반사 측정 방식을 위한 300 mm x 300 mm 형상으로 가공되었으며, 이는 측정에 사용된 혼 안테나의 방사 패턴의 빙폭을 고려하고, 주변 구조물들에 대한 간섭을 최소화하기 위해 설정되었다. (Fig. 6.).

3–2. Measurement

전파 흡수 특성 측정은 NRL 아크 반사 측정 방식을 기반으로 수행되었으며 송신기와 수신기로는 혼 안테나를 사용하였으며, VNA를 통해 S-Parameter를 측정하였다 (Fig. 7.). 주파수 대역별로 최적화된 혼 안테나를 각각 선택하여 L, S, C, X, Ku 대역(1–18 GHz)에서 수행되었고 Pixelated Honeycomb 후면에는 완전 도체(PEC) 금속판을 부착하여, 반사되는 전자파가 흡수체의 손실 특성만을 반영할 수 있도록

하였다. 송수신 안테나 간 거리는 각 대역에서 평면파 조건을 만족하도록 조정되었고, 편파 특성 분석을 위해 시편의 방향을 조절하여 HH 및 VV 조건에 대해 독립적으로 측정하였다.

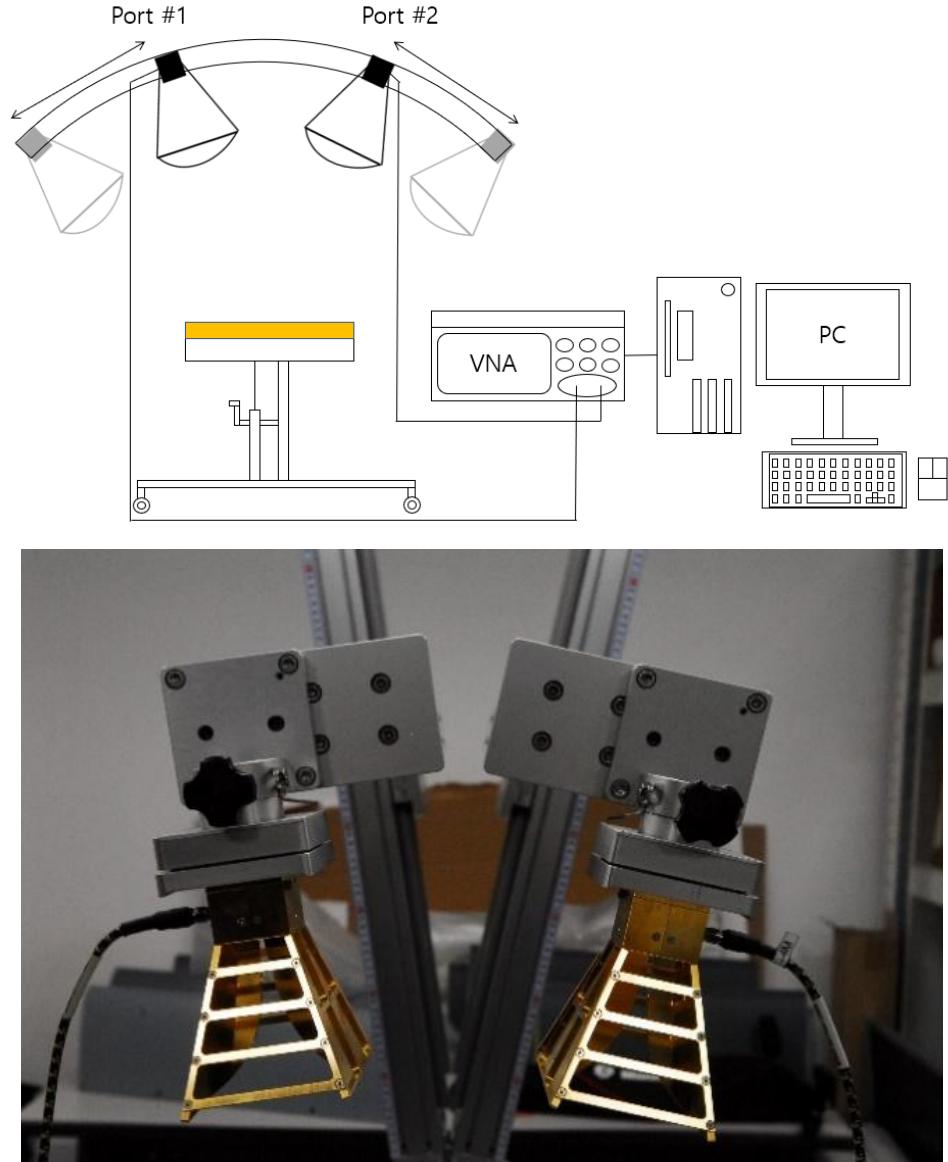


Fig. 7. NRL Measurement System

4. Conclusion

제작된 20 mm 및 40 mm 두께의 Pixelated Honeycomb 시편에 CST Studio Suite를 활용한 시뮬레이션과 NRL Arch 반사 측정 장비를 이용하여 1~18 GHz 범위에서 HH, VV 편파 반사손실 특성을 측정하였으며, 이를 비교한 결과를 Fig. 8.에 함께 도시하였다.

측정 결과 20 mm 시편은 시뮬레이션상 약 2~20 GHz에서 -10 dB 이하의 반사 손실을 유지하였으며, 실측 결과는 4~18 GHz에서 -5 dB 이하의 값이 나왔으며 시편의 밀도는 58.89 kg/m^3 로 측정되었다 (Fig. 8.).

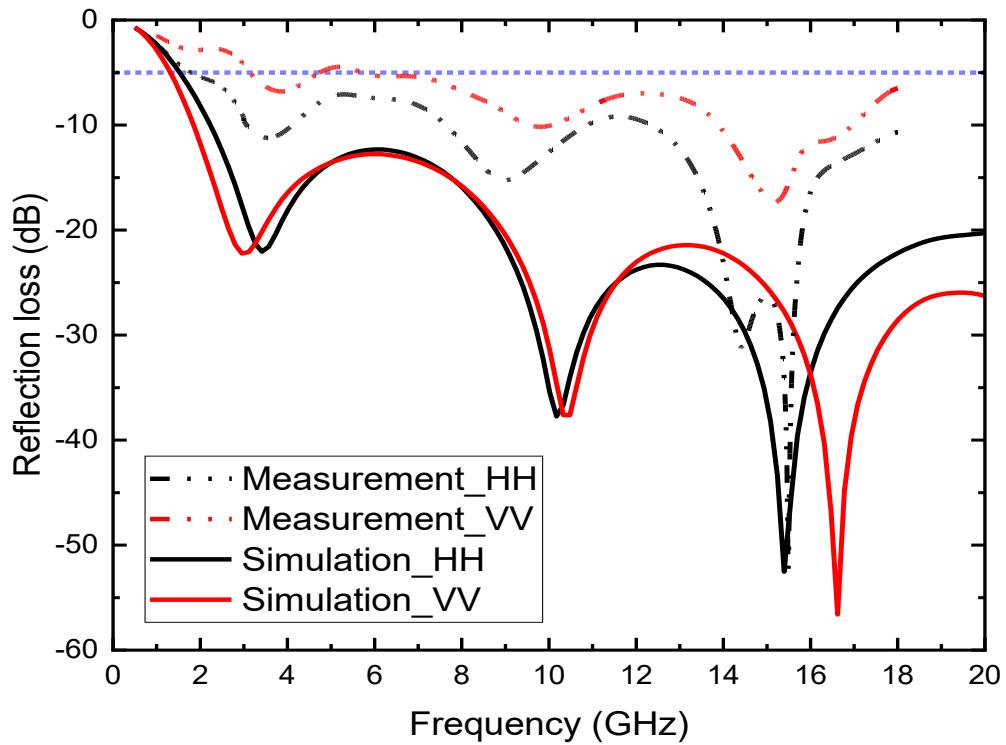


Fig. 8. 20 mm NRL Measurement System

40 mm 시편은 시뮬레이션 결과 3.5~20 GHz에서 -10 dB 이하의 반사 손실을 유지하였고, 측정 결과 4~18 GHz에서 -10 dB 이하의 반사 손실을 확인하였다. 실측 된 구조물의 밀도는 54.17 kg/m^3 로 측정되었다. (Fig. 9.).

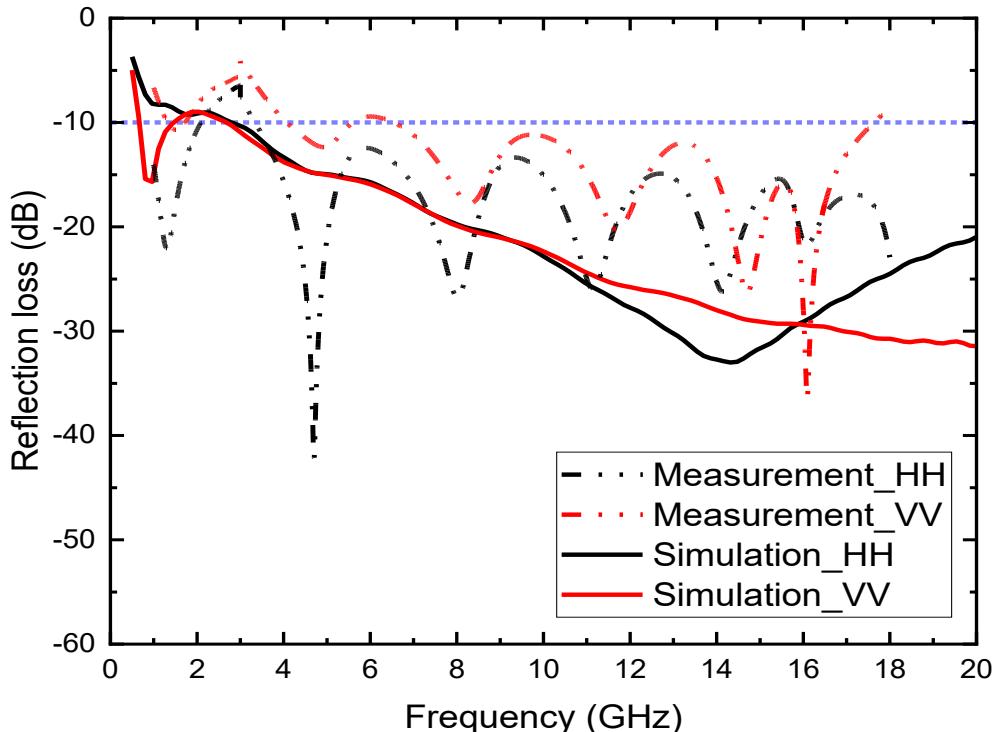


Fig. 9. 40 mm NRL Measurement System

두 시편 모두 시뮬레이션 대비 흡수 성능이 다소 저하된 양상을 보였으며 주요 원인으로는 다음과 같은 제조, 공정적 요인을 들 수 있다. Fig. 10. 과 같이 제작 과정에서 일부 픽셀이 의도와 달리 비도포 상태로 남아 전도 경로가 끊기면서, 설계된 연속 패턴의 흡수 특성이 저하되었고, 인쇄 공정에서 잉크 도포 두께, 전도도의 미세한 차이로 인해 전기적 특성이 균질하게 유지되지 못하였고, 실제 인쇄된 패턴이 시뮬레이션에서 가정한 0.5 mm x 0.5 mm 규격과 정확히 일치하지 않아, 공진 조건 및 임피던스 매칭에 영향을 미치게 되었다.

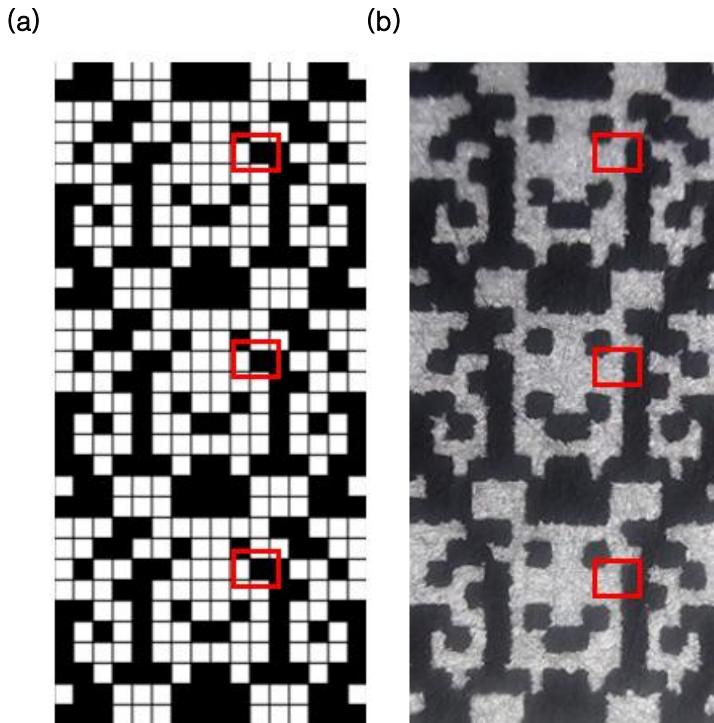


Fig. 10. (a) Simulated Pixelated Pattern, (b) Fabricated Pixelated Pattern

그럼에도 불구하고, 본 연구에서 제작된 흡수체는 흡수 성능이 거의 없는 순수 아라미드 하니컴 벽면을 메타 공간으로 재해석하여, 유전 알고리즘을 통해 최적화된 전도성 패턴을 적용함으로써 전대역에서의 우수한 전자파 흡수 성능을 실험적으로 입증하였다. 특히, 동일한 20 mm 패턴 구조를 직렬로 적층하여 40 mm 두께의 시편을 제작한 결과, 적층에 따른 전자기 경로 길이 증가와 위상, 임피던스 누적 효과로 인해 흡수 대역폭 및 공진 특성에 변화를 유도할 수 있음을 확인하였다.

결론적으로, 제안된 구조는 차세대 전투기 운용 환경에서 요구되는 광대역 RCS 저감 성능을 충족할 수 있으며, 표면 패턴의 유지 및 보수만으로 장기간 성능 관리가 가능하다는 점에서 정비 효율성이 높다. 또한, 구조적 경량화를 기반으로 전투기뿐만 아니라 우주 위성, UCAV, 장거리 순항미사일, 스텔스 드론 등 다양한 비행체 플랫폼에 적용 가능성성이 높다. 향후 반복 주기의 변경, 픽셀 해상도의 세분화, 공정 안정화를 통한 성능 개선을 하여 더 넓은 주파수 범위에서의 안정적인 흡수 특성을 확보할 수 있을 것이다.

Reference

- [1] Li W, Wei J, Wang W, Hu D, Li Y, Guan J (2016) Ferrite-based metamaterial microwave absorber with absorption frequency magnetically tunable in a wide range. Materials & Design 110:27–34. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.07.118>
- [2] Mu Y, Ma ZH, Liang HS, et al. (2022) Ferrite-based composites and morphology-controlled absorbers. Rare Metals 41:2943–2970. <https://doi.org/10.1007/s12598-022-02045-7>

- [3] Chen X, Lan D, Zhou L, et al. (2025) Review of recent advances in ferrite-based materials: From synthesis techniques to electromagnetic wave absorption performance. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials* 32:591–608. <https://doi.org/10.1007/s12613-024-3063-9>
- [4] Knott EF, Lunden CD (1995) The two-sheet capacitive Jaumann absorber. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 43(11):1339–1343. <https://doi.org/10.1109/8.475112>
- [5] Du Toit LJ, Cloete JH (1996) Electric screen Jaumann absorber design algorithms. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 44(12):2238–2245. <https://doi.org/10.1109/22.556452>
- [6] Kuyucuoglu F (2023) A novel approach to the design of multi section ultra-wideband Jaumann absorber. *Optik* 287:171152. <https://doi.org/10.1016/j.jleo.2023.171152>
- [7] Agrawal A, Kumar A, Panwar R (2025) Resistive ink derived FSS-based microwave absorber using equivalent circuit modelling-interfaced deep learning technique. *Applied Physics A* 131:103. <https://doi.org/10.1007/s00339-024-08216-w>
- [8] Son D-S, Hyun J-M, Lee J-R, Lee W-J (2018) Optimization of the design of radar-absorbing composite structures using response surface model with verification using scanning free space measurement. *Composite Structures* 186:106–113. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.11.075>
- [9] Shen Y, Zhang J, Wang W, Pang Y, Wang J, Ma H, Qu S (2019) Overcoming the pixel-density limit in plasmonic absorbing structure for broadband absorption enhancement. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 18(4):674–678. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2019.2900846>
- [10] Narayan S, Sreeja J, Surya VV, et al. (2020) Radar absorbing structures using frequency selective surfaces: Trends and perspectives. *Journal of Electronic Materials* 49:1728–1741. <https://doi.org/10.1007/s11664-019-07911-2>
- [11] Baek SM, Lee WJ, Kim SY, Kim SS (2021) Design of an equivalent dielectric film using periodic patterned screen printing and prediction of dielectric constants based on equivalent circuit method. *Composite Structures* 271:114151. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114151>
- [12] Kim SY, Lee WJ, Baek SM, Kim CG (2021) Control of dielectric properties of micropattern printed fabric for radar absorbing structures. *Composite Structures* 274:114361. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114361>
- [13] Yang Z, Liang Q, Duan Y, Li Z, Li D, Cao Y (2021) A 3D-printed lightweight broadband electromagnetic absorbing metastructure with preserved high-temperature mechanical property. *Composite Structures* 274:114330. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114330>
- [14] Baek SM, Lee WJ, Kim SY, Kim SS (2022) A study on the microwave absorbing honeycomb core embedded with conductive periodic patterned surfaces for the effective dielectric constant. *Composite Structures* 289:115471. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115471>
- [15] Haji-Ahmadi MJ, Nayyeri V, Soleimani M, et al. (2017) Pixelated checkerboard metasurface for ultra-wideband radar cross section reduction. *Scientific Reports* 7:11437. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11714-y>
- [16] Agrahari R, Lakhtakia A, Jain PK, Bhattacharyya S (2021) Pixelated metasurfaces for linear-polarization conversion and absorption. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications* 36(7):1008–1019. <https://doi.org/10.1080/09205071.2021.1998928>
- [17] Kim Y, Park P, Jo J, et al. (2021) Ultrawideband electromagnetic metamaterial absorber utilizing coherent absorptions and surface plasmon polaritons based on double layer carbon metapatterns. *Scientific Reports* 11:23045. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02303-1>
- [18] Lee C, Kim K, Park P, Jang Y, Jo J, Choi T, Lee H (2023) Ultra-wideband electromagnetic composite absorber based on pixelated metasurface with optimization algorithm. *Materials* 16(17):5916. <https://doi.org/10.3390/ma16175916>
- [19] Sharma G, Kumar P (2023) Pixelated metasurface for effective absorption of electromagnetic wave at desired frequency. In: 2023 IEEE Wireless Antenna and Microwave Symposium (WAMS), Ahmedabad, India, pp. 1–3. <https://doi.org/10.1109/WAMS57261.2023.10242829>

- [20] Shan H, Jiang T (2025) Double layer pixelate checkerboard optimization for ultrawideband radar absorber with light weight and optical transparency. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 67(2):437–448. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2024.3478772>
- [21] Choi WH, Kim CG (2015) Broadband microwave-absorbing honeycomb structure with novel design concept. *Composites Part B: Engineering* 83:14–20. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.08.027>
- [22] Baek SM, Lee WJ (2024) A lightweight, flexible, and polarization-insensitive microwave absorbing honeycomb core using conductive losses in printed periodic pattern. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 180:108089. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2024.108089>
- [23] Yao W, Zhou X, Gao Y, Qian Y, Lyu L (2025) Design-manufacturing-performance of electromagnetic absorbing/load bearing three-dimensional honeycomb woven composites. *Composite Structures* 351:118581. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2024.118581>
- [24] LIAO, Wen-Jiao, et al. (2025) A Broadband Low RCS Panel Based on Waveguide Cutoff and Slowed Group Velocity, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10962302>