

## 실험계획법에 의한 장파장 대역 전파흡수 메타구조 설계

## Design of Long-Wavelength Microwave Absorption Metastructure Based on Design of Experiments

백상원<sup>1</sup> · 원세정<sup>2</sup> · 최원우<sup>3</sup> · 최태인<sup>4</sup> · 이학주<sup>5</sup> · 김기출<sup>6</sup>Sangwon Baek<sup>1</sup> · Sejeong Won<sup>2</sup> · Wonwoo Choi<sup>3</sup> · Taein Choi<sup>4</sup> · Hak Joo Lee<sup>5</sup> · Kichul Kim<sup>6</sup>

## 요 약

본 논문에서는 장파장 대역 전파흡수 메타구조를 효율적으로 설계하기 위해 실험계획법을 활용한 새로운 최적화 방법을 제안한다. 설계되는 전파흡수 메타구조는 유리섬유 강화 플라스틱-메타표면-유전체-완전도체 반사층으로 구성된다. 최적화된 전파흡수 메타구조는 0.98~2.74 GHz에서 -10 dB 이하의 반사 성능을 보여준다. 총 두께는 최저 동작 주파수 기준 약 0.07  $\lambda$ 의 얇은 두께로 비자성 물질만을 사용하면서도 높은 흡수 효율을 보여준다. 또한 유전 알고리즘에 의한 최적화 설계 결과와 비교할 때, 제안 방법은 더 적은 해석 시간으로 목표 대역을 만족하는 성능을 확보하여 설계 접근법의 타당성을 입증한다.

## Abstract

In this study, a new optimization method using the design of experiments for the efficient design of a long-wavelength microwave absorption metastructure is proposed. The designed structure consisted of a glass fiber-reinforced plastic, metasurface, dielectric layer, and perfect electric conductor layer. The optimized metastructure achieves reflection losses below -10 dB over the range of 0.98~2.74 GHz with a thickness of approximately 0.07  $\lambda$  at the lowest operating frequency. A comparison with other optimization methods using a genetic algorithm showed that the proposed method satisfies the target band performance with substantially reduced computation time.

Key words: Design of Experiments, Genetic Algorithm, Long-Wavelength Microwave Absorption, Metastructure, Optimization

## I. 서 론

최근 장파장 대역 레이다가 스텔스 표적의 탐지 수단으로 주목받으면서<sup>[1]</sup>, 해당 대역에서의 전파 흡수 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 기존의 전파흡수 기술은 고주파 대역 레이다 위협에 대응하여 발전해 왔으며, 장파장 대역에서는  $\lambda/4$  기반 흡수체의 두께가 수십 cm에 달하여 상대적으로 연구가 제한적이었다<sup>[2]</sup>. 이에 따라, 얇은 두께로 장파장 대역 흡수 성능을 구현할 수 있는 메타구

조 기반의 설계 접근이 요구된다<sup>[3]</sup>.

전파흡수 메타구조의 설계에는 유전 알고리즘 등의 전역 최적화 기법이 널리 활용된다. 이는 넓은 설계 공간을 탐색할 수 있으나, 설계 변수와 반복 횟수의 증가에 따라 계산 비용이 급격히 상승한다. 본 논문에서는 이러한 계산 비용의 한계를 해소하기 위해 실험계획법(DOE, design of experiments)을 활용한다<sup>[4]</sup>. 실험계획법은 제한된 횟수의 해석만으로 설계 변수 간 효과와 교호작용을 파악할 수 있어, 전역 최적화 기법에 비해 계산 자원을 크게

†이 논문은 2025년도 국방기술진흥연구소가 지원한 연구개발 프로그램의 지원을 받아 수행된 연구 결과임(KRIT-CT-23-046).」

파동에너지극한제어연구단(Center for Advanced Meta-Materials)

1: 선임연구원(https://orcid.org/0000-0003-3461-7802), 2: 책임연구원(https://orcid.org/0000-0003-4400-5121), 3: 선임연구원(https://orcid.org/0000-0001-7759-313X),

4: 책임연구원(https://orcid.org/0009-0009-4914-7023), 5: 책임연구원(https://orcid.org/0000-0002-2573-1761), 6: 책임연구원(https://orcid.org/0009-0005-2639-521X)

· Manuscript received March 26, 2026 ; Revised April 4, 2026 ; Accepted April 29, 2026. (ID No. 20260326-020)

· Corresponding Author: Kichul Kim (e-mail: kckim@cammm.re.kr)

절감할 수 있다. 실험계획법에는 완전요인설계, 부분요인설계, 반응표면설계, 혼합물 설계 등이 있으며, 본 논문에서는 메타표면 단위셀의 설계 변수들의 합이 배열 주기로 구속되는 특성에 부합하는 혼합물 설계를 채택한다<sup>[5]</sup>. 혼합물 설계는 설계 변수들의 총합이 일정한 조건에서 설계 공간을 대표하는 계산 포인트를 선정하고, 각 포인트에서 계산된 목적함수를 바탕으로 변수 간 교호작용을 고려한 예측 모델을 도출하여 최적 조합을 탐색한다.

본 논문에서는 혼합물 설계를 활용하여 장파장 대역 전파흡수 메타구조를 효율적으로 설계하는 방법을 제안한다. 이를 통해 사각 패치와 사각 링으로 이루어진 메타구조의 설계 변수들을 최적화하여 공진 특성을 확보한 결과 0.98~2.74 GHz 대역에서 -10 dB 이하의 반사 성능을 갖는 설계 구조를 도출한다. 또한, 설계된 구조는 최저 동작 주파수 기준 약 0.07  $\lambda$ 의 두께로 비자성 물질만을 사용하면서도 높은 흡수 성능을 보여준다. 설계 결과는 유전알고리즘을 이용한 최적화 설계 결과와 비교함으로써 제안된 설계 접근법의 효율성을 제시한다.

## II. 혼합물 설계를 이용한 메타구조 설계 방법

그림 1(a)와 같이, 전파흡수 메타구조는 유리섬유 강화 플라스틱(GFRP, glass fiber reinforced polymer), 메타표면, 유전체, 그리고 완전도체(PEC) 반사층으로 구성된다. GFRP와 유전체의 상대 유전율 및 손실탄젠트는 각각  $\epsilon_r=4.1$ ,  $\tan\delta=0.02$  및  $\epsilon_r=1.13$ ,  $\tan\delta=0.0022$ 로 설정하고, 두께는 각각 1 mm와 20 mm이다.

메타표면 단위셀 패턴은 그림 1(b)와 같이 공진 구조에

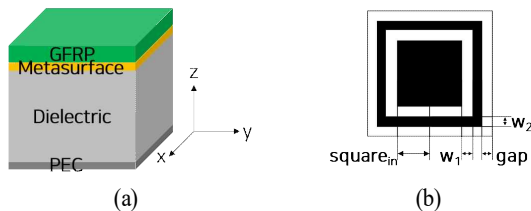


그림 1. (a) 전파흡수 메타구조 모식도 (b) 메타표면 단위셀 패턴 및 설계 변수

Fig. 1. (a) Schematic of the proposed electromagnetic microwave absorption metastructure (b) The pattern of the metasurface unit cell and the definition of the design variables.

적합한 사각 패치와 사각 링의 혼합 형태를 보여준다. 본 연구에서 활용한 설계 변수는 사각 패치 한 변의 길이의 절반 (square<sub>in</sub>), 패치-링 사이 거리 (w<sub>1</sub>), 사각 링의 선폭 (w<sub>2</sub>), 그리고 인접 패턴과의 간격 (gap)의 4가지이다. 4가지 변수 (square<sub>in</sub>, w<sub>1</sub>, w<sub>2</sub>, gap)의 합을 10.3 mm로 고정된 후 혼합물 설계를 수행한다. 메타표면의 면저항 또한 설계 변수로 지정할 수 있으나, 메타표면의 치수 설계로 국한하기 위해 여기서는 10  $\Omega/\text{sq}$ 로 고정한다.

목적함수는 목표 주파수 대역(L-대역)에서의 평균 반사계수를 기반으로 정의한다. 목표 주파수 대역에서 균등 간격으로  $N$ 개의 주파수 샘플을 취할 때 목적함수  $S$ 를 식 (1)과 같이 계산할 수 있다.

$$S(\text{dB}) = 10 \log \left( \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N 10^{\frac{S_{11,\text{dB}}(f_k)}{10}} \right) \quad (1)$$

여기서  $N$ 은 주파수 샘플의 개수,  $f_k$ 는  $k$ 번째 주파수,  $S_{11,\text{dB}}(f_k)$ 는  $f_k$ 에서의 반사계수의 dB값을 의미한다.

혼합물 설계를 위해 4가지 설계 변수에 대한 27개의 계산 포인트를 도출한 뒤, 각 포인트에 대해 목적함수를 계산한다. 이 결과를 바탕으로 단계적 회귀 분석 기반 예측 모델을 구성하고, 예측 모델로부터 목적함수를 최소화하는 설계 변수 조합을 도출한다. 각 주파수에서의 반사계수  $S_{11,\text{dB}}(f_k)$ 의 계산에는 유한요소법(FEM) 기반의 COMSOL Multiphysics를 이용하여 계산한다. 단위셀에 대해  $x$ ,  $y$  방향으로 주기 경계조건을 적용하고,  $+z$  방향에 완전 정합층(PML),  $-z$  방향에 PEC 조건을 설정하여 무한 배열에 대한 수직 입사 평면파의 반사계수를 산출한다. 본 연구의 설계 목표는 목표 대역에서 목적함수  $S < -10$  dB를 만족하는 것이 1차 목표이며, 이를 만족하는 해 중 목적함수  $S$ 를 최소화하는 것이 최종 목표이다.

## III. 메타구조 설계 결과

혼합물 설계로 도출한 27개의 계산 포인트 중 일부를 표 1에서 보여주고 있으며, 각 계산 포인트에 대한 전자기 해석 결과를 이용하여 단계적 회귀 분석을 수행하고 목적함수 예측 모델을 도출한다.

각 설계 변수에 대해 1~4차항, 교호항 및 역수항을 포함한 후보 항 중 목적함수 변화에 주요하게 기여하는 유효 항

표 1. 혼합물 설계 계산 포인트(단위: mm)

Table 1. Simulation points of the mixture design (unit: mm).

| Calculation point | square <sub>m</sub> | w <sub>1</sub> | w <sub>2</sub> | gap |
|-------------------|---------------------|----------------|----------------|-----|
| 1                 | 6.2                 | 1.7            | 1.7            | 0.7 |
| 2                 | 1.7                 | 6.2            | 1.7            | 0.7 |
| ⋮                 |                     |                |                |     |
| 26                | 1.7                 | 5.4            | 1.7            | 1.5 |
| 27                | 3.0                 | 3.0            | 3.0            | 1.3 |

을 단계적 회귀 분석을 통해 선별한다. 단계적 회귀 분석에서는 후보 항의 추가-제거를 유의수준( $\alpha=0.05$ ) 기준으로 반복하여 통계적으로 유의미한 항만을 선택함으로써 과적합 없이 예측력이 높은 모델을 구성한다. 이를 통해 12개의 유효 항을 도출하며, 각 항에 대한 회귀계수는  $c_i$ 로 표현한다. 목적함수  $S$ 에 대한 예측 모델은 아래의 식 (2)와 같다.

$$S = c_1 \cdot \text{square}_m + c_2 \cdot w_1 + c_3 \cdot w_2 + c_4 \cdot \text{gap} + c_5 \cdot \text{square}_m \cdot w_1 + c_6 \cdot w_1 \cdot w_2 \cdot \text{gap} + c_7 \cdot \text{square}_m \cdot w_1^2 \cdot w_2 + c_8 \cdot \text{square}_m \cdot w_2^2 \cdot \text{gap} + c_9 \cdot \text{square}_m \cdot w_1^{-2} + c_{10} \cdot w_1 \cdot w_2^{-2} + c_{11} \cdot w_1 \cdot \text{gap}^2 + c_{12} \cdot \text{square}_m \cdot w_1 \cdot w_2 \cdot \text{gap} \quad (2)$$

예측 모델의 적합도는 수정 결정계수( $R_{adj}^2$ )와 예측 결정계수( $R_{pred}^2$ )로 평가한다. 수정 결정계수는 설계 변수의 개수에 따른 과적합 영향을 보정한 적합도 지표이며, 본 연구에서 계산된 결과는  $R_{adj}^2=99.24\%$ 이다. 예측 결정계수는 예측 모델이 목적함수의 변화를 얼마나 잘 예측하는지를 나타내는 척도이며, 계산된 결과는  $R_{pred}^2=98.60\%$ 이다. 또한, 실제값과 회귀 모델의 예측값 사이의 오차를 제공하여 더한 교차검증 기반 예측 오차 제공함은 1.897이다. 이 수치들은 본 예측 모델이 설계 공간 내 목적함수의 변화를 높은 신뢰도로 설명함을 보여준다.

혼합물 설계 기반 예측 모델을 이용해 목적함수  $S$ 를 최소화하는 설계 조합을 탐색한 결과, 최적 설계는  $\text{gap}=0.3\text{ mm}$ 에서 도출된다. 그림 2는  $\text{gap}=0.3\text{ mm}$ 일 때  $\text{square}_m$ ,  $w_1$ ,  $w_2$ 의 변화에 따른 목적함수  $S$ 의 분포를 나타낸 결과이다. 목적함수  $S$ 는  $\text{square}_m=7.5\text{ mm}$ ,  $w_1=1.5\text{ mm}$ ,  $w_2=1.0\text{ mm}$ 일 때 최소값을 가지며, 해당 최적 설계 지점을 그림 2에 보여준다.

혼합물 설계 기반 예측 모델을 통해 선정된 최적 설계 조건에 대해 반사 성능 해석을 수행한 결과는 그림 3과 같다. 그림 3(a) 및 그림 3(b)는 각각 TE, TM 편파에 대해 수직 입사 및 입사각 변화에 따른 반사 성능을 나타낸다. 수

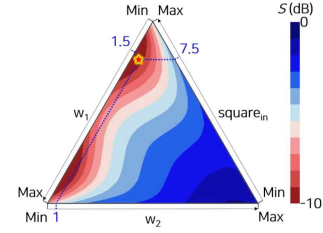
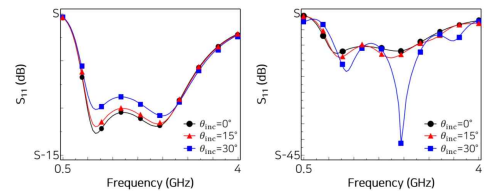


그림 2. Square<sub>m</sub>, w<sub>1</sub>, w<sub>2</sub> 변화에 따른 목적함수 분포 및 최적 설계점( $\text{gap}=0.3\text{ mm}$ )

Fig. 2. Contour map of the objective function versus square<sub>m</sub>, w<sub>1</sub>, w<sub>2</sub> and the optimal design point ( $\text{gap}=0.3\text{ mm}$ ).

직 입사 조건에서 최적화된 전파흡수 메타구조는 0.98~2.74 GHz 대역에서  $-10\text{ dB}$  이하의 반사 성능을 보여주며, 총 두께는 최저 동작 주파수 기준 약  $0.07\lambda$  (21 mm)이다. 이는 자성 재료를 활용한 메타구조(1~2.51 GHz,  $0.012\lambda$ )와 유사한 대역폭을 비자성 조건에서 달성한 결과이며<sup>[3]</sup>, 비자성 소재를 활용한 선행연구(1.01~1.78 GHz,  $0.076\lambda$ )에 비해 유사한 두께에서 대역폭을 확장한 유의미한 결과를 나타낸다<sup>[6]</sup>. 입사각 변화에 따른 반사 성능은 두 편파 모두  $15^\circ$ 까지 동일 대역에서  $-10\text{ dB}$  이하의 수준을 유지한다.

혼합물 설계 기반 최적화 기법의 계산 효율성을 확인하기 위해 설계된 전파흡수 메타구조와 동일한 구조·각층의 두께·배열 주기·면저항 조건에 대해 유전 알고리즘 기반 비트맵 메타표면의 최적화를 수행한 후 결과를 비교하여 그림 4에서 보여준다. 유전알고리즘의 집단 크기는 55, 교차율·돌연변이율은 0.25로 지정하였으며, 400세대까지 반복 최적화를 수행한다<sup>[3]</sup>. 그림 4(a)는 최적화된 비트맵 메타표면 패턴을, 그림 4(b)는 혼합물 설계 및 유전 알고리즘에 의한 반사 성능 해석 결과를 비교한 것이다. 목표 주파수 대역에 대한 유전 알고리즘 최적화 결과,



(a) TE 편파 (b) TM 편파  
(a) TE polarization (b) TM polarization

그림 3. 설계된 전파흡수 메타구조의 반사성능 해석 결과  
Fig. 3. Simulated reflection loss of the microwave metastructure.

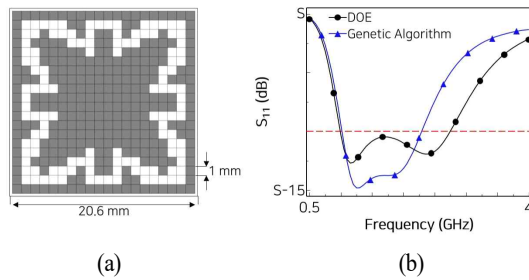


그림 4. (a) 최적화된 비트맵 메타표면 (b) 최적화 기법에 따른 반사능 해석 결과 비교

Fig. 4. (a) Optimized bitmap type metasurface (b) Comparison of simulated reflection losses according to optimization methods.

표 2. 최적화 방법에 따른 최적화 결과 비교

Table 2. Comparison of results for different optimization methods.

| Method            | Bandwidth below $-10$ dB                      | $S$ (dB) | Time (h) |
|-------------------|-----------------------------------------------|----------|----------|
| DOE               | 0.98~2.74 GHz<br>(fractional bandwidth=94.6%) | -11.1    | 2        |
| Genetic algorithm | 1.01~2.29 GHz<br>(fractional bandwidth=77.6%) | -13.3    | 320      |

그림 4(b)와 같이 1.01~2.29 GHz 대역에서  $-10$  dB 이하의 반사 성능을 보여준다.

표 2는 혼합물 설계 및 유전 알고리즘을 이용한 최적화 결과를  $-10$  dB 이하 대역폭, 목표 대역에서의 목적함수, 그리고 결과 도출 시간 측면에서 비교한 것이다. 혼합물 설계는  $-10$  dB 이하 대역폭이 0.98~2.74 GHz, 비대역폭은 94.6%로 목표 대역을 충분히 포함하면서도 목적함수가  $-11.1$  dB로 계산된다. 반면에 유전 알고리즘은 목표 대역의 목적함수가  $-13.3$  dB로 더 낮게 나타났으나,  $-10$  dB 이하 대역폭이 1.01~2.29 GHz, 비대역폭은 77.6%로 감소된 결과를 보여준다.

총 연산 시간 측면에서, 혼합물 설계는 27개 계산 포인트 해석과 예측모델 도출 시간을 포함하여 약 2시간 내외에 최적 설계안 도출이 가능하다. 유전 알고리즘은 400세대 반복 해석을 통해 도출된 결과로, 결과 도출에 약 320시간이 소요되어 계산 시간이 약 160배가량 차이남을 확인할 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 장파장 대역 전파흡수 메타구조 설계를 위해 혼합물 설계를 적용하고, 한정된 해석 횟수로 최적의

설계 변수 조합을 효율적으로 도출하는 절차를 제안한다. 4개의 설계 변수에 대해 27개의 계산 포인트를 구성한 뒤, 단계적 회귀 분석을 통해 목적함수 예측 모델을 구축하여 최적 설계점을 도출한다. 도출된 최적 구조는 0.98~2.74 GHz에서  $S_{11} < -10$  dB 특성을 보이며, 총 두께는 최저 동작 주파수 기준 약  $0.07 \lambda$ 으로, 비자성 구조에서도 얇은 두께로 장파장 대역 흡수 성능 확보가 가능함을 보여준다.

또한, 동일 조건에서 유전 알고리즘을 이용한 최적화 결과와 비교한 결과, 유전 알고리즘은 목표 대역의 흡수 성능은 우수하지만,  $-10$  dB 이하 대역폭이 감소하고 계산 시간 또한 약 160배 증가한다. 이러한 결과는 혼합물 설계가 여러 변수들을 효율적으로 최적화함으로써 메타표면의 패턴 설계 복잡성을 줄이면서도 성능을 극대화할 수 있고 짧은 시간 안에 설계 결과를 도출할 수 있어 효율적인 접근법임을 보여준다.

#### References

- [1] H. Kuschel, "VHF/UHF radar. 1. Characteristics," *Electronics & Communication Engineering Journal*, vol. 14, no. 2, pp. 61-72, Apr. 2002.
- [2] T. Lopez, T. Lepetit, B. Ratni, and S. N. Burokur, "Design and measurement of a tunable metasurface low-frequency radar absorber," *Journal of Applied Physics*, vol. 135, no. 12, 124901, Mar. 2024.
- [3] S. Baek, W. Choi, S. W. Kim, M. Yoon, T. Choi, H. J. Lee, and K. Kim, "Characteristics of low-frequency metasurface microwave absorption filter with composite molding and size dependency," *Materials*, vol. 18, no. 22, 5094, Nov. 2025.
- [4] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 10th ed., Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2020.
- [5] L. Eriksson, E. Johansson, and C. Wikström, "Mixture design: Design generation, PLS analysis, and model usage," *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, vol. 43, no. 1-2, pp. 1-24, Sep. 1998.
- [6] Z. Liu, S. Liu, Z. Xu, Z. Mei, and T. Niu, "Ultra-thin metamaterial absorbers (LUTA) operating in the low-frequency L-band", *Applied Physics Letters*, vol. 124, no. 25, p. 251702, Jun. 2024.