

입자 군집 최적화(PSO) 알고리즘 기반 다층 레이더 흡수 구조체 설계

최영두*, 한민석**

Design of a Multilayer Radar Absorbing Structure Based on Particle Swarm Optimization Algorithm

Young-Doo Choi*, Min-Seok Han**

요약 본 논문에서는 입자 군집 최적화 (Particle Swarm Optimization: PSO) 알고리즘을 이용하여 다층 레이더 흡수 구조체를 설계하고, 다층 레이더 흡수 구조체의 특성을 분석하였다. 다층 레이더 흡수 구조체 설계에 PSO를 적용함으로써 빠르고 정확하게 설계 값을 도출할 수 있음을 보였으며, 특히 경사 입사에 대한 경우에 대해서도 최적의 다층 레이더 흡수 구조체를 설계할 수 있음을 보였다. 또한, 다양한 설계 파라미터의 조합에서도 성능 요구 조건에 부합하는 최적의 값이 결정될 수 있음을 보였다. 각 단계별로 필요한 방정식 및 모든 변수에 대한 자세한 설명을 포함해서 포괄적인 순서도를 통해 제시하였고 본 논문의 결과로부터 다층 레이더 흡수 구조체를 설계하기 위한 복잡하고 많은 계산을 생략할 수 있으며, 다양한 복합 재료를 활용한 다층 레이더 흡수 구조체 설계 및 개발에 활용할 수 있다.

Abstract In this paper, a multilayer radar absorbing structure was designed using the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm, and the characteristics of the multilayer radar absorbing structure were analyzed. It was shown that design values can be derived quickly and accurately by applying PSO to the design of a multilayer radar absorbing structure, and it is also shown that the optimal multilayer radar absorbing structure can be designed especially for an oblique incident. In addition, it was shown that the optimal value that meets the performance requirements can be determined even in a combination of various design parameters. It is presented through a comprehensive flowchart including the equations and detailed descriptions of all variables for each step. From the results of this paper, it is possible to omit complex and many calculations for designing a multilayer radar absorbing structure, and it is possible to use various composite materials. It can be utilized in the design and development of multilayer radar absorbing structures.

Key Words : Stealth Technology, PSO(Particle Swarm Optimization), RCS(Radar Cross Section), Optimal Design, RAS(Radar Absorbing Structure), Wave Absorbing Characteristics

1. 서론

현대의 무기체계는 고성능 전자장비를 기반으로 첨단화되고 있으며, 상대방의 지상, 해상, 공중 탐색 장비에 감지될 확률을 감소시키는 스텔스 기술 (stealth technology)은 육해공 무기체계를 망라하고 중요한 전략적 요소로 평가받고 있다. 이러한

스텔스 기술은 세부적으로 레이더(radar), 적외선 (infrared), 음향(acoustic), 광학(optic) 신호 등을 축소, 통제하는 기술로 구분된다.

이 중에서 레이더 유효 단면적(Radar Cross Section, RCS)은 레이더에서 방사된 전파가 물체에 반사되어 되돌아온 크기를 면적의 단위로 나타낸 값으로, 항공기 및 함정의 스텔스 성능과 생존

This Paper was supported by Research Fund of Republic of Korea Naval Academy in 2022.

*Department of Mechanical and System Engineering, Republic of Korea Naval Academy

**Corresponding Author : Department of Electronics and Control Engineering, Republic of Korea Naval Academy (mshan1024@navy.ac.kr)

Received September 30, 2022

Revised October 13, 2022

Accepted October 13, 2022

성을 평가하는데 가장 중요한 수치 중 하나이다[1].

레이더 유효 단면적을 줄일 수 있는 기술은 3가지로 분류할 수 있다. 첫 번째로, 레이더 반사 단면적을 최소화할 수 있도록 아군 무기체계 형상을 최적화하는 형상화(shaping) 기술이며, 그 방법 중의 하나로 상대방의 레이더파를 탐지 가능성이 낮은 몇 개의 특정 방향으로만 집중 반사시키는 기술이다. 두 번째로, 반사각도 조절 기술로서, 각 구조물의 표면이 적 레이더파에 대해서 최적 경사 각도를 갖도록 설계하는 것으로, 레이더파가 수직 반사되어 되돌아가는 것을 최소화하는 기술이다. 세 번째로, 무기체계 표면에 각종 형태의 전파흡수 재료를 코팅하거나, 구성품 자체를 전파흡수 구조체로 제작하는 기술로서, 입사된 전자기파 에너지를 흡수하고 재 배열하여 반사파를 최소화시키는 방법이다. 또한 전자파 흡수재료를 다층구조로 확장시키면 광대역 스텔스를 구현할 수 있는데, 이때 다층형 전자파 재료의 설계 시 적층 방법에 있어서, 입사되는 면으로부터 배면으로 소재 고유의 임피던스가 지수적으로 증가하는 방향으로 배치해야 전자기파가 공기의 매질로부터 흡수체로 입사하였을 때의 양쪽 매질 간 발생하는 임피던스의 부정합을 줄일 수 있다. 특히 표면층에는 손실이 매우 작은 물질을 배치하고, 흡수층에는 손실이 매우 높은 물질을 배치하는 것이 유리하다. 보편적으로 사용되는 대표적인 변수는 흡수율, 대역폭, 두께, 이 3 항목으로 대변된다. 두께를 줄이면서, 보다 넓은 주파수 범위에서, 높은 흡수율을 보이는 전파흡수체의 설계/개발이 필요하다.

기존의 전파흡수체 (Salisbury 스크린, Dallenbach 흡수체)는 아래와 같은 공통의 문제점들을 보인다. 첫째로 제기되는 문제는 흡수체의 두께이다. 대부분은 적어도 $\lambda/4$ 의 두께가 필요하고, 만약 광대역 특성의 다층구조 (Jaumann 흡수체), 또는 피라미드 구조가 필요하다면 두께는 급격히 증가된다. 최근 들어 제안된 메타소재 흡수체의 경우, 공진기의 L, C 특성에 의해 박형 흡수체의 설계가 가능하나, 흡수대역이 공진 주파수에 국한되는 극도의 협대역 특성을 보인다는 것이 단점

이다. 구조물의 형상을 고려하여 RAS를 설계하기 위한 방법은 해석기법과의 연동을 통하여 RCS를 최소화하도록 최적설계를 수행하는 것이다[2, 4]. 그러나 RCS를 목적함수로 사용할 경우에는 계산량이 크게 증가되어 최적설계에 많은 시간이 요구된다. 더군다나 적층 복합재 특성을 고려해 두께를 불연속 변수로 고려하기 위하여 다수의 함수계산이 필요한 확률론적 최적화 기법을 주로 사용하기 때문에 RCS의 해석에는 단지 몇 초만이 소모된다 할지라도 전체 최적 설계에는 많은 시간이 요구되어 효율성이 크게 저하된다[3, 5, 6, 14].

본 논문에서는 복잡한 구조물의 형상 및 적층 복합재의 두께 특성을 충분히 고려하면서도 RCS 해석에 따른 계산량을 줄이기 위해 PSO 알고리즘을 이용하여 다층 레이더 흡수 구조체를 설계하고, 다층 레이더 흡수 구조체의 특성을 분석하였다. PSO를 적용함으로써 빠른 수렴과 탐색능력을 바탕으로 짧은 시간 안에 최적의 해를 생성할 수 있으며 다른 확률적 방법들보다 안정적인 수렴 특성을 갖는다. 또한, 다양한 설계 파라미터의 조합에서도 성능 요구 조건에 부합하는 최적의 값이 결정될 수 있음을 보였다.

2. 다층 레이더 흡수 구조체 모델링

2.1 전파의 반사, 투과

전파는 그림1과 같이 매질의 경계에서 일부는 반사되고 일부는 투과되며, 투과전파는 매질을 통과하면서 매질의 전자기 물성(유전율, 투자율, 전기 전도도 등)에 따라 열에너지 등으로 소실된다. 입사된 전파가 매질의 경계에서 반사, 투과되는 크기는 식 (1)과 같이 입사장(incidence field, E_i), 반사장(reflection field, E_r) 및 투과장(transmission field, E_t)의 비로 정의되는 반사계수(reflection coefficient, Γ)와 투과계수(transmission coefficient, T)로 나타낼 수 있다. 반사계수와 투과계수의 관계는 식 (2)와 같다.

$$\Gamma = \frac{E_r}{E_i}, \quad T = \frac{E_t}{E_i} \quad (1)$$

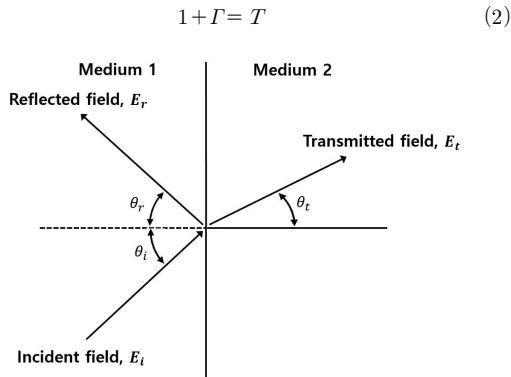


그림 1. 매질 경계에서 전파의 반사, 투과
Fig. 1. Reflection and transmission at an medium interface

편파에 따른 반사계수의 계산식은 식 (3)~(5)와 같다. 여기서 Z_n 은 매질 표면에서의 입력 임피던스(input impedance)이고, θ 는 입사각이다.

$$\Gamma_{normal} = \frac{Z_n - Z_0}{Z_n + Z_0} \quad (3)$$

$$\Gamma_{TE} = \frac{Z_{n,TE} - Z_0/\cos\theta}{Z_{n,TE} + Z_0/\cos\theta} \quad (4)$$

$$\Gamma_{TM} = \frac{Z_{n,TM} - Z_0/\cos\theta}{Z_{n,TM} + Z_0/\cos\theta} \quad (5)$$

반사계수는 $|\Gamma| \leq 1$ 의 범위에 있으며, $|\Gamma|=0$ 은 반사가 일어나지 않음을 의미한다. 또한 $|\Gamma|=1$ 은 입사된 전파가 전체적으로 반사됨을, $|\Gamma|=-1$ 은 입사된 전파의 위상이 180° 변화되어 반사됨을 나타낸다. 일반적으로 반사계수 무차원(non-dimension) 값으로, 식 (6)과 같이 데시벨(decibel, dB) 단위로 나타낸다. 따라서 $\Gamma=-10$ dB는 입사파의 약 30%가 반사됨을 의미하며, $\Gamma=-20$ dB는 약 1%만이 반사됨을 나타낸다.

$$\Gamma[dB] = 20\log|\Gamma| \quad (6)$$

2.2 입력임피던스

반사계수의 계산에 필요한 매질 표면에서의 입력

임피던스는(Z_n)는 전송선로 이론 또는 전파 전송 행렬(wave transmission matrix)로 계산할 수 있다. 수직 입사파($\theta = 0$)에 대해 그림 2와 같이 하나의 전파 흡수층과 완전 전기 전도체(perfect electric conductor, PEC)층으로 구성된 1층형 전파흡수체 표면에서의 입력임피던스 계산식은 식 (7)과 같다 [6]. 여기서 Z_c 는 흡수층의 특성임피던스, Z_L 은 PEC층의 특성임피던스이며, d 는 흡수층의 두께이다. PEC의 특성임피던스는 일반적으로 0이다.

$$Z_n = Z_c \frac{Z_L + Z_c \tanh \gamma d}{Z_c + Z_L \tanh \gamma d} \quad (7)$$

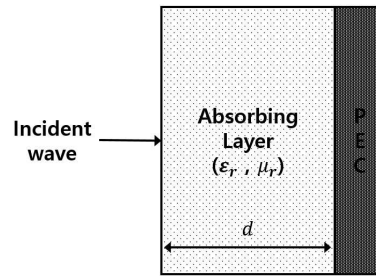


그림 2. 1층형 전파흡수체
Fig. 2. Single layer radar absorbing structure

따라서 $Z_L = 0$, $Z_c = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}}$ 을 식 (7)에 대입하여 정리하면 식 (8)과 같이 흡수층의 전자기물성에 대한 입력임피던스 식을 계산할 수 있다. 유전체의 경우 투자율($\mu_r = 1$)을 적용하면 식 (8)은 식 (9)와 같이 정리된다.

$$Z_n = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh(j \frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r \mu_r}) \quad (8)$$

$$Z_n = Z_0 \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \tanh(j \frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r}) \quad (9)$$

그림 3과 같이 경사 입사의 경우 식 (10)은 TE파와 TM파로 구분하여 계산할 수 있으며, 각 편파 조건에 대한 유전체 표면에서의 입력임피던스는 각각 식 (10), (11)과 같다.

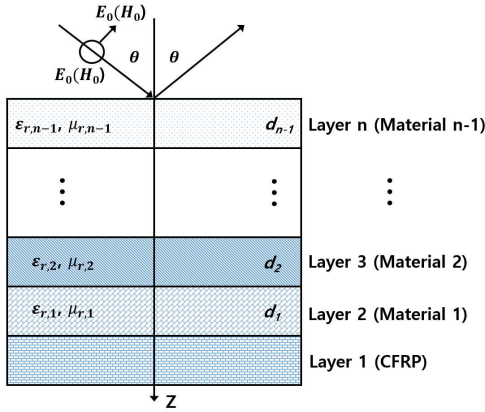


그림 3. 다층 레이더 흡수 구조체의 경사 입사 모델링 [2]
Fig. 3. Modeling of obliquely incident polarized wave multi-layer radar absorbing structures [2]

$$Z_{n,TE} = \frac{Z_0}{\sqrt[3]{\epsilon_r - \sin^2\theta}} \tanh\left(j\frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt[3]{\epsilon_r - \sin^2\theta}\right) \quad (10)$$

$$Z_{n,TM} = \frac{Z_0 \sqrt[3]{\epsilon_r - \sin^2\theta}}{\sqrt[3]{\epsilon_r} \cos\theta} \tanh\left(j\frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt[3]{\epsilon_r - \sin^2\theta}\right) \quad (11)$$

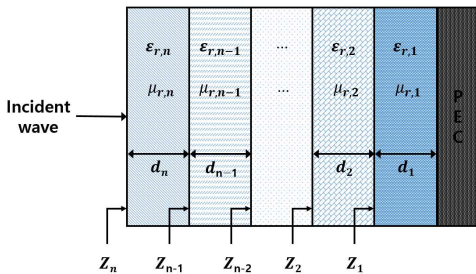


그림 4. 다층 레이더 흡수 구조체
Fig. 4. Multi-layered radar absorbing structure

다층 레이더 흡수 구조체의 성능을 광대역 주파수로 확장하기 위해서는 그림 4에서 표현된 바와 같이 흡수층의 수를 늘리는 다층화가 필요하다[4].

다층형 전파흡수체의 경우 PEC 층에서 시작해 각 흡수층의 복소 유전율($\epsilon_{r,n} = \epsilon'_{r,n} - j\epsilon''_{r,n}$), 복소 투자율($\mu_{r,n} = \mu'_{r,n} - j\mu''_{r,n}$) 및 두께(d_n)가 정의되면, n번째 층 표면에서의 입력임피던스는 1번째 층에서부터 n번째 층까지의 입력임피던스를 순차적

으로 계산하여 획득한다. 다층형 전파흡수체의 최외각 표면에서의 정규화된 입력임피던스(normalized input impedance, Z_n)의 계산식은 식 (12)와 같다.

$$\theta_i = \gamma_i l_i = \omega \sqrt{\epsilon_{r,i} \mu_{r,i}} l_i \quad (12)$$

2.3 전파 전송행렬

다층형 전파흡수체의 경우 표면에서의 입력임피던스는 전송선로 이론을 통하여 각 흡수층 경계에서의 입력임피던스를 순차적으로 계산함으로써 획득할 수 있다[1]. 하지만 이러한 전송선로적인 접근 방법은 전파흡수체가 다층화 되거나, 전파가 수직 입사하지 않을 경우($\theta \neq 0$)에는 계산식이 복잡해져 효율성이 떨어진다. 따라서 이러한 문제를 해결하고자 순차적인 계산과정을 행렬식으로 정리한 전파전송행렬이 적용된다[9].

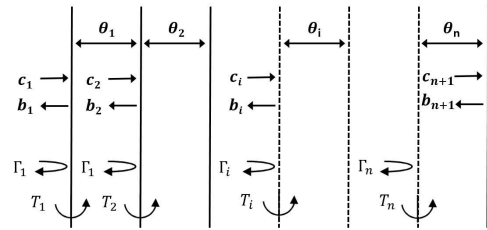


그림 5. 다층 레이더 흡수 구조체 내부의 각 층 경계에서 전파의 반사, 투과 현상 [9]
Fig. 5. Reflection and transmission in the multi-layered radar absorbing structures [9]

그림 5는 다층형 전파흡수체 내부의 각 층 경계에서 전파의 반사, 투과 현상을 나타내며, Γ_i 와 T_i 는 각 층의 경계에서의 반사계수와 투과계수, θ_i 는 식 (13)과 같이 계산되는 각 층의 전기적 길이(electric length)이다[8, 10]. 또한 c_i 는 표면에서부터 두께 방향으로 진행하는 전파를, b_i 는 각 층에서 반사되어 반대 방향으로 진행하는 전파이며, l_i 는 각 층의 두께이다.

$$\theta_i = \gamma_i l_i = \omega \sqrt{\epsilon_{r,i} \mu_{r,i}} l_i \quad (13)$$

따라서 C_i 은 표면에서의 입사파, b_i 은 표면의 반사파이며, C_2 는 최외각 층을 투과하여 진행하는 투과파이다. 이들의 관계를 행렬식으로 나타내면 식 (14)와 같다.

$$\begin{bmatrix} c_1 \\ b_1 \end{bmatrix} = \frac{1}{T_1} \begin{bmatrix} e^{j\theta_1} & \Gamma_1 e^{-j\theta_1} \\ \Gamma_1 e^{j\theta_1} & e^{-j\theta_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_2 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

2층과 3층 경계에서의 반사, 투과는 식 (14)와 동일하게 2층과 3층의 계수들을 사용하여 나타낼 수 있으며, 이러한 과정을 반복하면 전파흡수체의 n 층 표면에서 반사, 투과되는 전파는 식 (15)와 같이 정리된 전파전송행렬로 계산할 수 있다. 여기서 A_{ij} 는 최종적으로 2×2 행렬로 나타난다[4].

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} c_1 \\ b_1 \end{bmatrix} &= \prod_{i=1}^n \frac{1}{T_i} \begin{bmatrix} e^{j\theta_i} & \Gamma_i e^{-j\theta_i} \\ \Gamma_i e^{j\theta_i} & e^{-j\theta_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{n+1} \\ b_{n+1} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{n+1} \\ b_{n+1} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

전파는 진행하여 최종적으로 그림 5의 우측면에 도달한다. 이때 전파흡수체의 후면에 PEC층이 없을 경우 반사는 일어나지 않는다. 따라서 $b_{n+1} = 0$ 이 되며, 식 (15)는 식 (16)과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} c_1 &= A_{11}c_{n+1} \\ b_1 &= A_{21}c_{n+1} \end{aligned} \quad (16)$$

위에서 설명한 것과 같이 c_1 은 표면에서의 입사파, b_1 은 표면에서 반사파를 의미한다.

따라서 전체적인 반사계수는 식 (17)과 같이 계산한다.

$$\Gamma = \frac{b_1}{c_1} = \frac{A_{21}}{A_{11}} \quad (17)$$

전파흡수체 후면에 PEC층이 존재하는 경우에는 식 (18)와 같이 전반사를 나타내는 행렬을 곱하고,

최종적으로 계산된 A_{ij} 를 사용하여 반사계수를 계산한다.

$$\begin{bmatrix} c_n \\ b_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{n+1} \\ b_{n+1} \end{bmatrix} \quad (18)$$

3. 입자 군집 최적화 알고리즘

본 논문에서는 다층 레이더 흡수 구조체 설계를 위한 파라미터 및 최적값 추출을 위해 PSO 알고리즘을 적용한다. 1995년 J. Kennedy와 R. C. Eberhart[11]에 의해 발표된 입자 군집 최적화 (Particle Swarm Optimization, PSO) 알고리즘은 동물들의 사회적 행동에 착안한 최적화 알고리즘이다. 새 떼나 물고기 떼 등의 생물 군집이 먹이를 탐색하거나 포식자를 피해 도망치는 경우 이에 속한 각 개체들은 탐색을 수행할 때 각자의 경험뿐만 아니라 군집 전체의 움직임으로부터 얻은 정보를 함께 반영하게 된다. 이를 통해 군집에 속한 각 개체들 모두는 탐색이 반복될수록 점차 최적의 결과에 가까워질 수 있다. 이와 같은 생물 군집의 탐색 패턴은 전형적인 최적화로 해석할 수 있다[7]. PSO 알고리즘에서 군집(swarm)은 여러 입자 (particle)들로 구성되고 각 입자들은 위치 (position)와 속도(velocity)라는 두 가지 속성을 가지고 있다. 입자들의 위치는 탐색 공간 내 임의의 위치로 초기화되고 속도는 사용자가 정한 한계 속도 내의 임의의 값으로 초기화된다. 이후 매 탐색마다 각각의 입자는 개체의 최적위치(P_{best})와 군집의 최적위치(G_{best})를 함께 반영하여 속도를 갱신하고 갱신된 속도에 따라 다음 탐색위치로 이동한다. 그리고 다음 탐색위치에서 그 적합도를 평가하고 기존 최적 위치에서의 적합도보다 점수가 높을 경우 개체의 최적위치와 군집의 최적위치를 갱신한다[12, 13]. 이때 각 입자의 위치 이동은 아래 그림 6처럼 시각화될 수 있다.

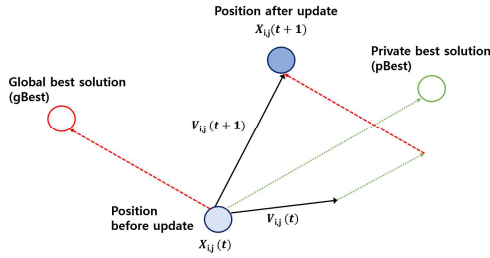


그림 6. 군집 내 입자의 위치 이동 방식 [12]
Fig. 6. How particles move within a cluster [12]

3.1 PSO의 기본요소와 연산자

다층 레이어 흡수 구조체 설계를 위해 사용되는 PSO의 기본요소와 연산자는 아래와 같다. 입자들 (particles)은 탐색 공간 내에서 최적의 장소로 이동하며, 각각의 입자(particle)의 위치는 두 개의 최적값을 통해 업데이트되어 새로운 위치에 대한 값을 갖게 된다. 첫 번째는 각 입자들이 수행해온 목적함수 값들 중에서 좋은 값을 말하며, P_{best} 라 정의한다. 탐색 공간을 움직이는 입자들은 현재 위치정보에 대한 적합도를 구하고 최적의 위치정보를 위해 비교된다. 두 번째는 모든 입자들 중에서 목적 함수가 가장 좋은 값이며, G_{best} 라 정의한다. 최적의 위치정보를 가지는 입자들, 즉 P_{best} 의 모든 입자 중 가장 최적의 위치정보를 나타내는 입자이다. 즉, 매 반복(iteration)이 진행되면서 P_{best} 는 객체 수만큼, G_{best} 는 하나가 존재하게 된다. 따라서 G_{best} 는 주어진 문제의 최적해가 된다. 이 값들을 이용해 각 입자들의 속도($v_{i,j}$)는 다음 식(19)와 같이 이전 속도 값과 하중계수를 결합한 방법이 제안되었다[3, 5]. 속도($v_{i,j}$)는 유일한 연산자이며, 입자들의 이동속도를 나타내는 m-차원 실수 벡터이다.

$$v_{i,j} = \omega v_{i,j} + c_1 rand() (P_{best\ i,j} - x_{i,j}) + c_2 rand() (G_{best\ i,j} - x_{i,j}) \quad (19)$$

여기서 c_1 과 c_2 (일반적으로 2.0 또는 1.49)는 가속상수(acceleration constant)이며, 일반적으

로 같은 값을 가지며, $rand()$ 은 0과 1 사이의 무작위로 추출된 실수이다.

$$x_{i,j} = x_{i,j} + \Delta t v_{i,j} \quad (20)$$

식 (19)에서 계산된 속도 값을 이용하여 새로운 위치로 이동하는 과정이 기존 위치에 단순히 속도를 더하는 것으로 표현되어 있는데, 이는 PSO 알고리즘에서 속도를 단위시간 당 위치의 변화량으로 정의하고 있기 때문이고 식 (20)을 이용하여 객체들이 위치를 업데이트하게 된다. 여기서 Δt 는 시간 스텝으로서 일반적으로 1로 놓는다. x 의 초기값은 랜덤한 값으로 시작한다. PSO 알고리즘의 전체 절차를 의사코드로 표현하면 그림 7과 같다.

Algorithm PSO algorithm (for maximization)	
1:	for each particle $i = 1, \dots, S$ do
2:	Initialize particle's position with Uniformly distributed random vector: $x_i \sim U(b_{low}, b_{up})$
3:	Initialize particle's $P_{best} : P_{best} \leftarrow x_i$
4:	If $fit(P_{best}) > fit(G_{best})$ then // for the case of maximization
5:	Update particle's $G_{best} : G_{best} \leftarrow P_{best}$
6:	end if
7:	Initialize particle's velocity: $V_i \sim U(- b_{up} - b_{low} , b_{up} - b_{low})$
8:	end for
9:	while termination criterion is not met do
10:	for each particle $i = 1, \dots, S$ do
11:	for each dimension $d = 1, \dots, S$ do
12:	Pick random numbers: $c_1, c_2 \sim U(0, 1)$
13:	Update particle's velocity: $V_{i,j} \leftarrow \omega v_{i,j} + c_1 rand() (P_{best\ i,j} - x_{i,j}) + c_2 rand() (G_{best\ i,j} - x_{i,j})$
14:	end for
15:	Update particle's position: $x_{i,j} \leftarrow x_{i,j} + \Delta t v_{i,j}$
16:	If $fit(x_i) > fit(P_{best})$ then // for the case of maximization
17:	Update swarm's $G_{best} : P_{best} \leftarrow x_i$
18:	if $fit(P_{best}) > fit(G_{best})$ then
19:	Update swarm's $G_{best} : G_{best} \leftarrow P_{best}$
20:	end if
21:	end if
22:	end for
23:	end while

그림 7. PSO 알고리즘의 의사코드 [11]
Fig. 7. Pseudocode of PSO Algorithm [11]

3.2 PSO를 이용한 다층 레이더 흡수 구조체 최적화 알고리즘

N 계층 레이더 흡수 구조체의 최적 설계를 위해 PSO 기반 알고리즘 구현을 위한 단계별 절차는 아래와 같다. 각 단계별로 방정식 및 모든 변수에 대한 자세한 설명을 포함해서 포괄적인 순서도를 통해 제시하도록 한다.

1단계) 사용자 정의 입력 사양

먼저 다층 레이더 흡수 구조체의 층 수(N), 입자 수(P), 재료 수(M), 반복 횟수(Iteration), 주파수 포인트의 수(FR_P), 그리고 각 레이어의 두께의 최대값 및 최소값 등은 사용자 정의 입력 사양으로 각각의 값을 입력 값으로 입력한다. 또한, 각 층의 두께에 대한 최대값과 최소값 뿐만 아니라 각 레이어에 해당하는 재료 수(M)에 대한 최대값과 최소값을 다음 행렬 DIM_{max} 및 DIM_{min} 에 각각 저장하도록 한다. 여기서 t 는 레이어의 두께를 의미하고 m 은 재료의 수를 의미한다.

$$\begin{aligned}
 DIM_{max} &= \begin{bmatrix} 1 & t_{1max} \\ 2 & t_{2max} \\ \vdots & \vdots \\ N & m_{N+1max} \\ N+1 & m_{N+2max} \\ \vdots & \vdots \\ 2N & m_{2Nmax} \end{bmatrix} \\
 DIM_{min} &= \begin{bmatrix} 1 & t_{1min} \\ 2 & t_{2min} \\ \vdots & \vdots \\ N & m_{N+1min} \\ N+1 & m_{N+2min} \\ \vdots & \vdots \\ 2N & m_{2Nmin} \end{bmatrix} \quad (21)
 \end{aligned}$$

2단계) 속도의 경계 정의

모든 차원에 대한 속도의 최대값과 최소값(행렬 VEL_{max} 및 VEL_{min} 형식)은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 VEL_{max} &= DIM_{max} \\
 VEL_{min} &= -VEL_{max} \quad (22)
 \end{aligned}$$

3단계) 임의의 위치 및 속도 생성

모든 입자의 초기 위치와 초기 속도는 무작위로 초기화되어 적절한 배열에 저장되어야 한다. 그만큼 모든 입자의 초기 위치를 포함하는 행렬 (POP)은 다음과 같이 쓸 수 있다. 여기서 P는 입자의 수를 의미한다.

$$POP = \begin{bmatrix} 1 & t_{11} & t_{21} & t_{31} & \dots & t_{1N} & m_{11} & m_{12} & m_{13} & \dots & m_{1N} \\ 2 & t_{21} & t_{22} & t_{32} & \dots & t_{2N} & m_{21} & m_{22} & m_{23} & \dots & m_{2N} \\ 3 & t_{31} & t_{32} & t_{33} & \dots & t_{3N} & m_{31} & m_{32} & m_{33} & \dots & m_{3N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ P & t_{p1} & t_{p2} & t_{p3} & \dots & t_{pN} & m_{p1} & m_{p2} & m_{p3} & \dots & m_{pN} \end{bmatrix} \quad (23)$$

특정 행에서 첫 번째 요소는 입자 번호를 나타내고 그 뒤에 오는 요소는 해당 입자의 위치에 해당된다. 또한, 위치에는 각각의 재료 수에 대응되는 다른 레이어의 두께가 포함된다. 이 때 각각의 입자에 상응하는 모든 매개변수의 초기 속도를 포함하는 행렬(VEL)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$VEL = \begin{bmatrix} 1 & v_{11} & v_{21} & v_{31} & \dots & v_{1N} & v_{m11} & v_{m12} & v_{m13} & \dots & v_{m1N} \\ 2 & v_{21} & v_{22} & v_{32} & \dots & v_{2N} & v_{m21} & v_{m22} & v_{m23} & \dots & v_{m2N} \\ 3 & v_{31} & v_{32} & v_{33} & \dots & v_{3N} & v_{m31} & v_{m32} & v_{m33} & \dots & v_{m3N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ P & v_{p1} & v_{p2} & v_{p3} & \dots & v_{pN} & v_{mp1} & v_{mp2} & v_{mp3} & \dots & v_{mpN} \end{bmatrix} \quad (24)$$

POP와 유사하게 특정 행에서 첫 번째 요소는 입자 번호를 나타내고 그 뒤에 오는 요소는 동일한 입자에 해당하는 모든 매개변수의 속도를 나타낸다. 이 때 POP 및 VEL 행렬의 크기는 $P \times (2N+1)$ 이다.

4단계) P_{best} 좌표 초기화

알고리즘 시작 시 초기 위치가 유일한 위치이므로 모든 입자가 볼 수 있는 위치에서 이러한 위치는 각 입자 각각의 P_{best} 좌표에 상응하는 값을 취해야 한다. 이때 P_{best} 좌표는 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$P_{best} = POP \quad (25)$$

5단계) 각 입자에 해당하는 재료 데이터를 포함하는 텍스트 파일 생성

데이터 처리를 쉽게 하기 위해 재료 데이터(주파수, 복소 유전율의 실수 및 허수, 복소 투자율의 실수 및 허수, 위상 상수의 실수 및 허수)가 포함된 텍스트 파일을 서버루틴을 통해서 생성할 수 있다. 이 때 재료 데이터는 각 입자에 의해 각 층에 대해 선택된 재료에 해당된다.

6단계) 각 입자의 초기 위치에 해당하는 fitness 함수(F) 계산

$$F = \sum_i^{n_f} \sum_j^{n_a} (|\tilde{R}|^n + |\tilde{T}|^n) \quad (26)$$

식 (26)과 같이 표현되는 fitness 함수(F)에 대한 표현식을 이용해 각 입자의 초기 위치에 해당하는 fitness 함수값(FIT_VAL)을 계산한다.

각 입자의 초기 위치에서 fitness 함수 값 (FIT_VAL)은 Particle_value라는 $P \times 2$ 행렬에 저장된다.

$$Particle\ value = \begin{bmatrix} 1 & FIT_VAL_1 \\ 2 & FIT_VAL_2 \\ 3 & FIT_VAL_3 \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ P & FIT_VAL_p \end{bmatrix} \quad (27)$$

7단계) 반사계수 최소화를 위한 최적화

$$\begin{aligned} & Minimize \sum_{i=1}^n w_i | \Gamma_i | \\ & = \sum_{i=1}^n w_i \left| \frac{Z_{n,f_i}(f_i, \epsilon'_i, \epsilon''_i, t_i) - Z_0}{Z_{n,f_i}(f_i, \epsilon'_i, \epsilon''_i, t_i) + Z_0} \right| \end{aligned} \quad (28)$$

8단계) G_{best} 선정

모든 입자 중에서 fitness 함수의 가장 좋은 값은 $G_{best\ value}$ 에서 선택되고 G_{best} 라는 변수에 저장되어야 한다. 전체 재귀 반사와 주파수 및 사고 범위에 대한 진송 계수 각도는 fitness 기준으로 사용되며 최소값은 해당 최고값에 상응하는 값이다.

9단계) 새로운 위치 및 속도 평가

각 입자에 해당하는 모든 차원의 초기 속도를 포함하는 행렬 VEL은 아래 식(29)를 사용하여 업데이트해야 한다.

$$VEL(J,I) = W \times VEL(J,I) + PP + GG$$

where,

PP

$$= c_1 \times rand(r_1) \times (G_{best\ coordinate}(J,I) - POP(J,I))$$

GG

$$= c_1 \times rand(r_1) \times (P_{best\ coordinate}(J,I) - POP(J,I)) \quad (29)$$

VEL(J,I)

$$= \min(VEL_{max}(J,I), \max(VEL_{min}(J,I), VEL(J,I))) \quad (30)$$

$$POP(J,I) = POP(J,I) + VEL(J,I) \quad (31)$$

10단계) 9단계에서 미리 정의된 반복 횟수가 완료 될 때까지 반복되어야 한다.

일단 모든 반복 횟수가 완료되면 $G_{best\ coordinate}$ 에 저장된 최종 값은 필요한 최적화 솔루션에 해당하는 값이 된다.

앞에서 각 단계별로 언급한 입자 군집 최적화 알고리즘 기반 다층 레이더 흡수 구조체 설계 프로세스에 따른 세부동작 순서도는 그림 8과 같다.

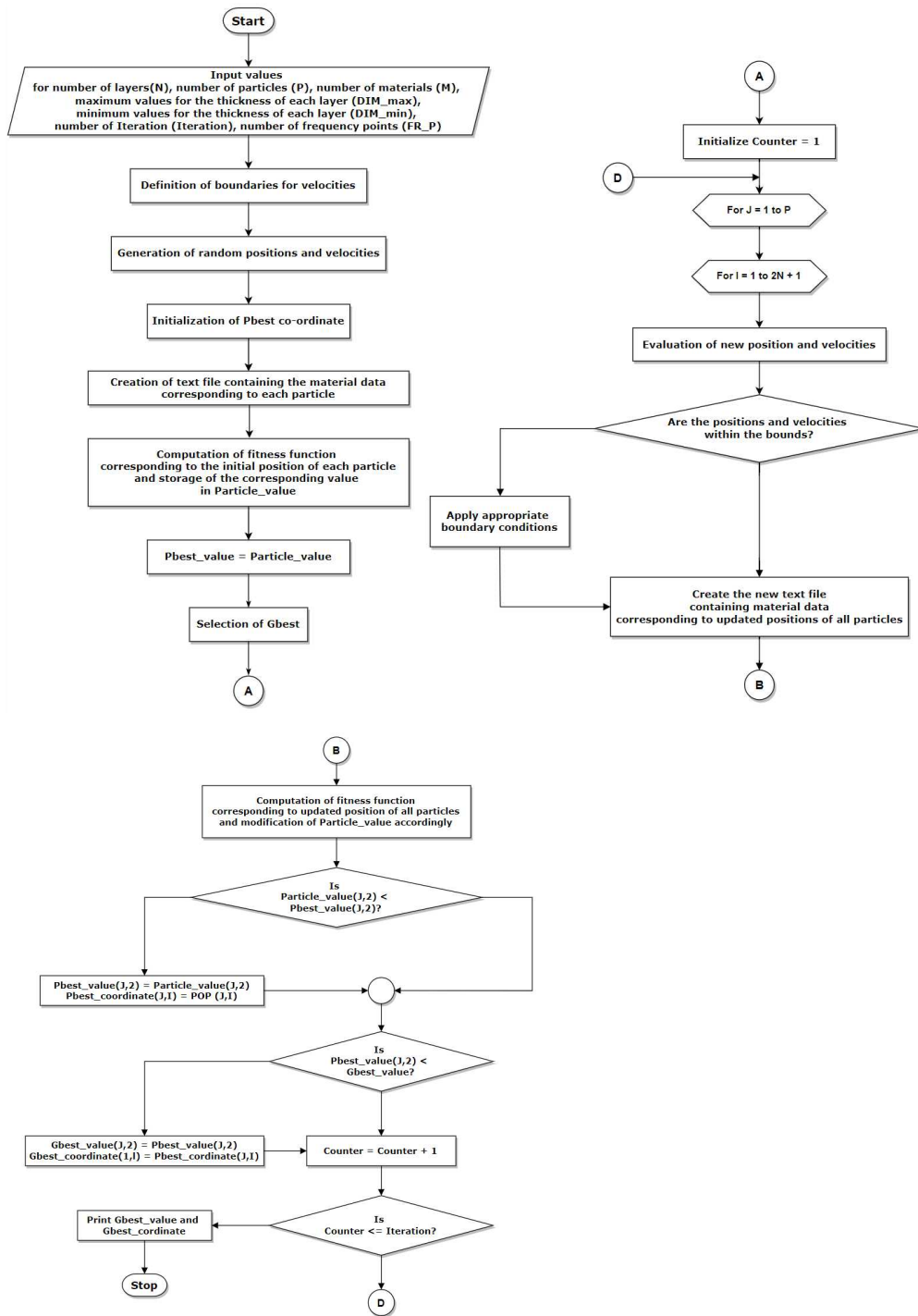


그림 8. 세부 동작 순서도
Fig. 8. Detailed operation flowchart

4. 시뮬레이션 결과 분석

4.1 적용 모델 및 재료

앞에서 제시된 입자 군집 최적화 알고리즘 기반 다층 레이더 흡수 구조체 설계 프로세스에 따른 세부 동작 순서도를 바탕으로 시뮬레이션 검증을 위해 그림 9처럼 3층으로 구성된 레이더 흡수 구조체를 대상으로 적용한다.

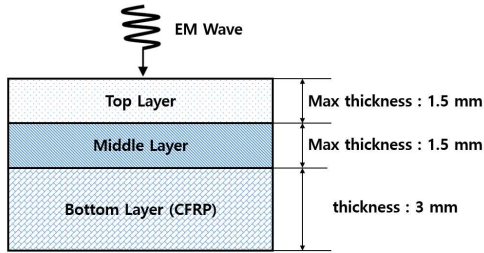


그림 9. 3층 레이더 흡수 구조체 개략도
 Fig. 9. Schematic diagram of three-layered radar absorbing structures

표 1. 중심 주파수(10 GHz)에서 재료의 매개변수
 Table 1. Constitutive parameters of materials at the center frequency (10 GHz)

Material no.	ϵ'_r	ϵ''_r	μ'_r	μ''_r
1	6.50	0.21	1.00	0.15
2	5.00	0.10	1.00	0.01
3	8.0	1.50	0.90	0.03
4	10.00	1.41	0.85	0.14
5	6.90	0.70	0.80	0.01
6	0.16	0.60	2.70	1.0
7	1.80	6.5	0.01	0.30
8	9.00	0.20	0.50	0.30
9	8.00	0.16	0.50	0.30
10	6.50	1.20	0.27	0.31
⋮				

레이더에 사용되는 주파수 중에서 X대역(8-12 GHz)을 목표로 중심주파수 10 GHz를 기준으로 본 논문에서 해석을 위해 사용된 재료의 정보는 표

1과 같다. 사전 정의된 데이터베이스 31개의 재료가 만들어졌으며 그 중에서 10개만 예를 들어 나타내었다. 데이터 처리를 쉽게 하기 위해 재료 데이터(주파수, 복소 유전율의 실수 및 허수, 복소 투자율의 실수 및 허수, 위상 상수의 실수 및 허수)가 포함된 텍스트 파일을 사용하였다. 코드를 실행하면서 사용되는 다양한 매개변수와 최종 최적화된 재료 레이어 시퀀스 및 두께는 다음과 같다.

```

Number of particles = 30
Number of Iterations = 30
Number of material in database = 31
Maximum thickness of top layer = 1.5 mm
Maximum thickness of middle layer = 1.5 mm
Maximum thickness of all layers = 0.1 mm
Bottom layer: CFRP; thickness = 3.0 mm
    
```

4.2 MATLAB 시뮬레이션 결과

```

*****
Final Results-----
bestfun =
    9.4028
bestrun =
    5
best_variables =
    0.4313    1.4604    3.1074
*****
결과 시간은 224.922319초입니다.
    
```

그림 10. MATLAB의 명령 창에 표시되는 결과
 Fig. 10. Results displayed in command window of MATLAB

개발된 PSO 기반 알고리즘의 성능 평가에 앞서, 입자의 수와 반복의 수에 따른 fitness 값의 변화를 분석하기 위한 연구가 수행되었다. 이 때 선택한 매개변수가 최적화된 솔루션에 수렴을 보장하도록 수행되었다. 두 플롯 모두 G_{best} 값이 이전에 수렴하기 때문에 30이 반복 횟수와 입자 수에 대해 안전한 옵션임을 분명히 나타낸다. 문제의 최적화된 솔루션의 스냅샷을 그림 10에 나타내고 있다.

이 그림에서 10번의 독립적인 실행 후에 얻은 목적 함수의 가장 좋은 값은 9.4028 이다. 이것은 $x(1) = 0.4313$, $x(2) = 1.4604$ 및 $x(3) = 3.1074$ 에서 최적 값을 얻을 수 있게 된다. 10개 실행 중 5번째 실행이 최상의 결과를 갖고 소요된 총 시뮬레이션 시간은 224.92초가 소요되었다. 참고로 시뮬레이션 시간은 컴퓨터 구성에 따라 약간의 차이를 보인다.

그림 11은 입자 수를 30으로 고정하고 반복 횟수에 따른 G_{best} 값의 변화를 나타내고 PSO의 수렴 특성을 보여준다.

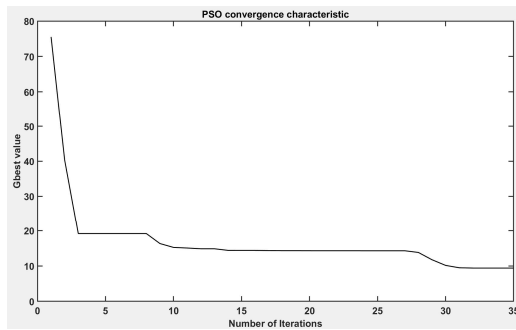


그림 11. 반복 횟수에 따른 G_{best} 값의 변화

Fig. 11. Variation in G_{best} value w.r.t number of iterations

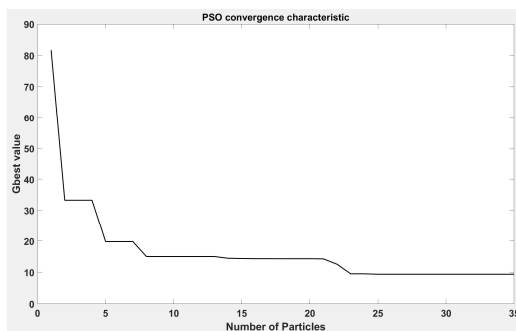


그림 12. 입자 수에 따른 G_{best} 값의 변화

Fig. 12. Variation in G_{best} value w.r.t number of particles

또한, 그림 12는 반복 횟수를 30으로 고정하고

입자 수에 따른 G_{best} 값의 변화를 나타내고 있으며 PSO의 수렴 특성을 보여준다. PSO를 적용함으로써 빠른 수렴과 탐색능력을 바탕으로 짧은 시간 안에 최적의 해를 생성하는 것을 확인할 수 있고 안정적인 수렴 특성을 갖는다.

입자 군집 최적화 알고리즘 기반 다층 레이더 흡수 구조체 설계 프로세스에 따른 최적화 설계 결과 -20dB 이하 흡수능 최대화를 위한 결과는 표 2와 표 3과 같다. 전파 흡수능 최적화 설계결과 8.8~12.5GHz 주파수 대역에서 -20dB 이상의 전파 흡수능을 가지고 동시에 경량화를 위하여 전파흡수재료의 두께를 최소화한 다층형 구조의 설계결과를 제시하였다.

표 2. 최적화 설계 후 설계변수 값

Table 2. Design variable values after optimal design

Layer	ϵ'_r	ϵ''_r	μ'_r	μ''_r	thickness (mm)
Top	9.00	0.20	0.50	0.30	1.36
Middle	5.41	3.16	0.98	0.05	1.41

표 3. 최적화 설계 후 전파 흡수능 및 공진 주파수

Table 3. Radio wave absorption capacity and resonance frequency after optimized design

Performance Parameters	Design results
Absorption capacity frequency band below -20dB (GHz)	8.8~12.5
Resonance Frequency (GHz)	9.2, 11.4

5. 결론

본 논문에서는 입자 군집 최적화 (Particle Swarm Optimization: PSO) 알고리즘을 이용하여 다층 레이더 흡수 구조체를 설계하고, 각 단계별로 언급한 입자 군집 최적화 알고리즘 기반 다층 레이더 흡수 구조체 설계 프로세스를 바탕으로 다층 레이더 흡수 구조체의 특성을 분석하였다. 또한 MATLAB 환경의 PSO 프로그래밍 코드의 효과를

입증하는 예가 제공되었고 성공적으로 해결되었다. 다층 레이더 흡수 구조체 설계에 PSO를 적용함으로써 빠르고 정확하게 설계 업무를 수행할 수 있음을 보였으며, 특히 경사 입사에 대한 경우에도 최적의 다층 레이더 흡수 구조체를 설계할 수 있음을 보였다. 또한, 다양한 설계 파라미터의 조합에서도 요구 성능에 부합하는 최적의 값이 결정됨을 보였다.

PSO 알고리즘은 자기학습을 통해 최적의 해를 찾는 최적화 알고리즘으로 알고리즘이 매우 간단하고 구현이 용이하여 함수 최적화, 신호처리, 자동적응제어 등의 다양한 분야에 적용 가능하다. 특히 PSO는 군집 개체를 모방하였다는 점에서 GA(Generic Algorithm)와 유사하지만 알고리즘 특성상 설계변수가 복잡한 경우 수렴 시간을 단축하면서 GA를 사용하였을 때와 거의 유사한 수렴 결과 값을 얻을 수 있다. 또한, 진화 연산처럼 방대하고 복잡한 함수에 대하여 전역적인 최적화를 할 수 있고 진화 연산보다 수행속도가 빠르기 때문에 최근 크게 주목받고 있다. 본 논문의 결과로부터 다층 레이더 흡수 구조체를 설계하기 위한 복잡하고 많은 계산을 생략할 수 있으며, 향후 다양한 성능을 가지는 다층 레이더 흡수 구조체 설계 및 개발에 활용될 수 있다.

REFERENCES

- [1] H. W. Kwon, S. Y. Hong, K. K. Lee, J. C. Kim, I. C. Na and J. H. Song, "Analysis of Radar Cross Section for Advanced Naval Vessels," *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 20, No. 5, pp.593-600, October 2014.
- [2] S. K. Goudos and J. N. Sahalos, "Microwave absorber optimal design using multi-objective particle swarm optimization," *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 48, No. 8, pp.1553-1558, August 2006.
- [3] B. J. Park, S. K. Oh, Y. S. Kim and T. C. Ahn, "Comparative Study on Dimensionality and Characteristic of PSO," *Journal of Control, Automation and Systems Engineering*, Vol. 12, No. 4, pp.328-338, April 2006.
- [4] K. W. Lee, I. P. Hong, B. J. Park, Y. C. Chung and J. G. Yook, "Design of Multilayer Radome with Particle Swarm Optimization," *The Journal of Korea Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol. 21, No. 7, pp.744-751, July 2010.
- [5] B. W. Jang, S. H. Park, W. J. Lee, Y. S. Joo and J. S. Park, "Optimization of Radar Absorbing Structures for Aircraft Wing Leading Edge," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Science*, Vol. 41, No. 4, pp.268-274, April 2013.
- [6] B. W. Jang and J. S. Park, "Design of Single Layer Radar Absorbing Structures(RAS) for Minimizing Radar Cross Section(RCS) Using Impedance Matching," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Science*, Vol. 43, No. 2, pp.118-124, February 2015.
- [7] S. B. Roh and S. K. Oh, "Design of SVM-Based Polynomial Neural Networks Classifier Using Particle Swarm Optimization," *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 67, No. 8, pp.1071-1079, August 2018.
- [8] S. Padhy, A. De, R. R. Debata, and R. S. Meena, "Design, characterization, and optimization of a multilayer U-type hexaferrite-based broadband microwave absorber," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 60, no. 6, pp. 1734-1742, 2018.
- [9] W. C. Chew, *Waves and Fields in Inhomogeneous Media*, IEEE Press, New York, USA, 1995.
- [10] A. Toktas, D. Ustun, and M. Tekbas, "Multi-objective design of multi-layer radar absorber using surrogate-based optimization," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 67, no. 8, pp. 3318-3329, 2019.
- [11] R. Eberhart and J. Kennedy, "A new optimizer using particle swarm theory," *Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, pp. 39-43, 1995.

[12] J. H. Son, O. K. Shin and H. C. Park, "Ship Route Pattern Extraction from AIS Data: Based on PSO Algorithm," Journal of KIIT, Vol. 20, No. 3, pp. 27-34, March 2022.

[13] V. Joy, V. Padwal, R. U. Mair and H. Singh, "Optimal Design of Multi-layered Radar Absorbing Structure (RAS) using Swarm Intelligence based Algorithm," Defence Science Journal, Vol. 72, No. 2, pp.236-242, March 2022.

[14] K. M. Krishna, A. Jain, H. S. Kang, M. Venkatesan, A. Shrivastava, and S. K. Singh, "Development of the Broadband Multilayer Absorption Materials with Genetic Algorithm up to 8 GHz Frequency," Hindawi Security and Communication Networks, Vol. 2022, Article ID 4400412, pp.1-12 <https://doi.org/10.1155/2022/4400412>

저자약력

최 영 두 (Young-Doo Choi)

[정회원]



- 2003년 : 해군사관학교 해양학 이학사
- 2013년 : 경북대학교 전자전기컴퓨터공학 석사
- 2016년 : 경북대학교 전자공학 박사
- 2018년 ~ 2020년 : 잠수함사 92전대 다도해함 부장
- 2021년 ~ 현재 : 해군사관학교 기계시스템공학과 교수

〈관심분야〉 수중음향 신호처리, 소나, 프로그래밍, 인공지능경망, 지능제어시스템 설계, ICT Convergence Platform

한 민 석 (Min-Seok Han)

[정회원]



- 2002년 : 아주대학교 전자공학 공학사
- 2005년 : 한양대학교 전자통신컴퓨터공학 석사
- 2011년 : 한양대학교 전자통신컴퓨터공학 박사
- 2013년 ~ 2016년 : KAIST (재) 스마트IT융합시스템연구단 연구 교수
- 2016년 ~ 2018년 : 오산대학교 전자과 교수
- 2019년 ~ 현재 : 해군사관학교 전자제어공학과 교수

〈관심분야〉 프로그래밍, 인공지능경망, 지능제어시스템 설계, 최적화 알고리즘, ICT Convergence Platform