

## 論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 43(2), 118-124(2015)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2015.43.2.118

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

## 임피던스정합을 이용한 레이더반사면적 최소화 단층형 전파흡수구조 설계

장병욱\*, 박정선\*\*

### Design of Single Layer Radar Absorbing Structures(RAS) for Minimizing Radar Cross Section(RCS) Using Impedance Matching

Byung-Wook Jang\* and Jung-Sun Park\*\*

Graduate School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University\*

Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University\*\*

#### ABSTRACT

The design of radar absorbing structures(RAS) is a discrete optimization problem and is usually processed by stochastic optimization methods. The calculation of radar cross section(RCS) should be decreased to improve the efficiency of designing RAS. In this paper, an efficient method using impedance matching is studied to design RAS for minimizing RCS. Input impedance of the minimal RCS for the specified wave incident conditions is obtained by interlocking physical optics(PO) and optimizations. Complex permittivity and thickness of RAS are designed to satisfy the calculated input impedance by a discrete optimization. The results reveal that the studied method attains the same results as stochastic optimization which have to conduct numerous RCS analysis. The efficiency of designing RAS can be enhanced by reducing the calculation of RCS.

#### 초 록

전파흡수구조(RAS)의 설계는 이산최적화 문제로 확률론적 최적화기법이 적용되며, 효율성을 향상시키기 위해서는 오랜 시간이 소모되는 RCS의 계산량을 감소시켜야 한다. 본 논문에서는 임피던스정합을 이용해 RCS 최소화 단층형 RAS를 설계하기 위한 효과적인 방법을 연구하였다. 연구방법에서는 물리광학법(PO)과 최적화기법의 연동을 통해 전파입사조건에 대해 대상의 RCS가 이상적으로 최소화되는 입력임피던스를 계산하였다. 다음으로 RAS의 복소 유전율 및 두께는 이산최적화를 통해 계산된 입력임피던스를 최대한 만족하도록 설계되었다. 연구결과 이러한 방법은 다수의 함수계산이 필요한 확률론적 최적화기법으로 RCS를 직접 최소화한 경우와 동일한 RAS 설계치를 도출하였으며, RCS 해석의 수를 효과적으로 줄임으로써 RAS 설계를 위한 최적화에 소모되는 시간을 크게 감소시켰다.

**Key Words** : Radar Absorbing Structure(레이더흡수구조), Design Optimization(최적설계) Radar Cross Section(레이더반사면적), Impedance matching(임피던스정합)

† Received : October 23, 2014 Revised : January 20, 2015 Accepted : January 23, 2015

\*\* Corresponding author, E-mail : jungsun@kau.ac.kr

## I. 서 론

현대의 항공기에서는 생존성 향상에 대한 요구 증가로 스텔스(stealth) 성능이 중요시되며, 구조적 역할과 레이더반사면적(radar absorbing section, RCS)의 감소를 동시에 만족할 수 있는 전파흡수 구조(radar absorbing structure, RAS)의 적용이 증가되고 있다[1]. 일반적으로 RAS는 적층복합재(laminate composite)를 기반으로 제작되며, 반사계수(reflection coefficient) 또는 RCS를 최소화하도록 설계된다[2,3]. 반사계수는 무한평면에 대해 도출되는 특성으로 구조물의 형상을 고려할 수 없어 평판 이외의 형상을 가지는 RAS의 성능을 향상시키기 위해서는 RCS를 직접적으로 최소화하도록 최적설계(optimization)를 수행할 필요가 있다[4]. RCS는 해석기법으로 계산되므로 목적함수(objective function)로 사용될 경우 계산량이 크게 증가되어 최적화에 많은 시간이 요구된다. 또한 RAS 설계 시에는 적층복합재의 두께를 이산변수(discrete variable)로 취급한 후, 다수의 함수 계산이 필요한 확률론적 최적화기법(stochastic optimization)이 주로 사용되기 때문에 RCS 해석 시간이 단지 몇 초만이 필요하다 할지라고 최적화에는 수십 시간 이상이 요구되어 효율성이 크게 저하된다[5]. 이러한 RAS 설계의 어려움을 해결하기 위해서는 구조물의 형상과 이산변수를 충분히 고려하면서도 RCS 해석에 따른 계산량을 감소시킬 수 있는 설계방법의 연구가 필요하다.

RAS의 전파흡수성능에 영향을 미치는 주요한 인자로는 전파(레이더파)의 주파수(frequency), 입사각도(incident angle), 편파(polarization)와 구조재의 전자기물성(electromagnetic property), 두께(thickness) 및 구조형상이 있다. 이 중 주파수, 입사각도, 편파조건 등의 입사조건 및 구조형상은 설계를 위한 조건으로 정해지며, 유전체(dielectric) RAS의 경우 설계변수(design variable)는 재료의 복소유전율(complex permittivity) 및 두께로 축소된다. 본 논문에서는 전파입사조건에 대하여 RCS 최소화를 위한 RAS를 효과적으로 설계하기 위해 도함수기반(gradient based) 최적화기법인 순차적이차계획법(sequential quadratic program, SQP)과 확률론적 최적화기법인 유전자알고리즘(genetic algorithm, GA)을 함께 사용하였으며, 우선적으로 SQP와 RCS 해석 알고리즘인 물리광학법(physical optics, PO)의 연동으로 대상모델의 RCS를 이상적으로 최소화하는 RAS의 복소유전율 및 두께를 도출하고, 전송선로이론(transmission line theory)을 이용해 이에 따른 입력임피던스

(input impedance)를 계산하였다. 다음으로 GA를 이용해 이산최적화를 수행하였으며, 계산된 입력 임피던스에 근접하도록 RAS의 복소유전율 및 적층복합재의 두께를 설계하였다. 연구의 대상재료로는 참고자료에서 발취한 카본나노섬유(carbon nano-fiber, CNF)가 함유된 유리섬유 직조복합재의 복소유전율 데이터를 이용하였으며, NACA-0012 및 NACA-2412 에어포일(airfoil) 형상의 항공기 날개모델에 연구방법을 적용하여 단층형 RAS를 설계하였다[6]. 또한 연구방법을 검증하기 위해 동일한 설계조건에서 GA를 이용해 RCS를 직접 최소화한 RAS를 설계하였으며, 설계치의 유사성 및 소요시간을 비교하여 연구의 유용성을 고찰하였다.

## II. 본 론

### 2.1 전파흡수구조 설계

전파흡수구조(RAS)는 강성을 가지는 전파흡수체로 적층복합재를 기반으로 제작되며, Fig. 1과 같이 전파흡수를 위한 흡수층(absorbing layer)과 후면에서의 반사를 위한 완전전기전도체(perfect electric conductor, PEC)층으로 구성된다. 이러한 RAS는 흡수층을 구성하는 물성이 다른 재료 층의 수에 따라 단층(single) 및 다층(multi)형으로 구분되며, 일반적으로 계산이 간단한 반사계수를 최소화하도록 설계된다. 항공기 날개의 앞전(leading edge)과 같이 구조물이 곡면형상인 경우에는 반사계수와 RCS 감소량이 비례하지 않아 반사계수의 최소화만으로는 목표주파수에서의 RCS를 충분히 감소시키기 어렵다. 따라서 평판이 아닌 형상의 RAS를 설계하기 위해서는 반사계수 보다는 해석모델을 기반으로 계산되는 RCS를 최적설계의 목적함수로 직접 사용할 필요가 있다.

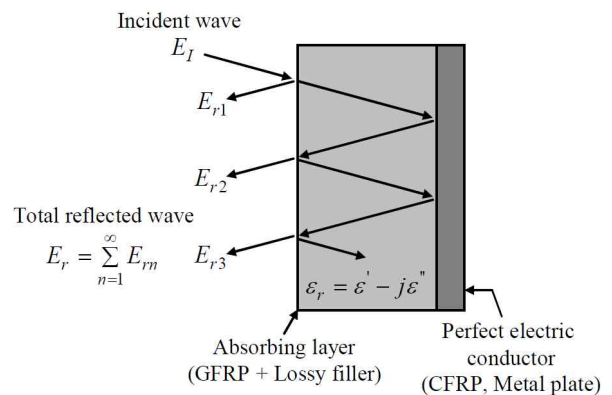


Fig. 1. Schematic drawing of single layer RAS

이러한 RAS 설계를 위한 최적화는 연속변수와 이산변수가 동시에 존재하는 문제이기 때문에 많은 경우 확률론적 최적화기법으로 수행되며, 주로 GA가 적용된다. 단층형 RAS의 설계에서는 목표 주파수( $f_t$ )를 포함한 전파의 입사조건에서 대상물의 RCS가 최소화되는 흡수층의 복소유전율과 두께를 계산해야한다. 따라서 최적화의 목적함수는 입사조건에 따른 RCS이며, 설계변수는 복소유전율의 실수항( $\epsilon_r'$ )과 허수항( $\epsilon_r''$ ) 및 흡수층의 두께( $t$ )이다. 이때 복소유전율의 허수항( $\epsilon_r''$ )은 대상재료 콜콜도표(cole-cole plot)의 회귀함수(regression function)를 이용해 실수항에 대한 값으로 계산함으로써 설계변수를 줄일 수 있다. 콜콜도표는 손실첨가제(lossy filler)의 함량에 따른 재료 복소유전율의 실수항과 허수항을 각각 x-y축으로 나타낸 도표이다[7].

## 2.2 물리광학법

물리광학법(physical optics, PO)은 전파에 의해 물체 표면에 발생하는 표면전류(surface current,  $\overline{J}_s$ )에 관한 근사식을 이용하여 RCS를 계산한다. 이 기법은 고주파 근사(high frequency approximation)법으로 Stratton-Chu 방정식에 근거하며, 산란구조물의 크기가 입사 레이더파의 파장(wave length,  $\lambda$ )에 비해 상대적으로 큰 경우 유효하게 사용될 수 있다[8]. PO는 전자기장 계산을 위한 적분과정이 다소 생략됨으로 Maxwell 방정식을 직접적으로 계산하는 모멘트법(method of moment, MOM), 유한요소법(finite element method, FEM), 유한체적법(finite volume method, FVM) 등에 비해 계산량이 적다는 장점이 있으며, RCS를 위한 초기설계 단계에서 주로 활용된다[9].

전파환경에 대해 PO에서는 물체를 Illuminated 영역과 Shadowed영역으로 구분한 후, 발생하는 표면전류를 근사식을 이용해 나타낸다. PEC에 대한 표면전류  $\overline{J}_s$ 의 근사식은 식 (1)과 같다.

$$\overline{J}_s \approx \begin{cases} 2\hat{n} \times \overline{H}_i, & \text{for the illuminated portion} \\ 0, & \text{for the shadowed portion} \end{cases} \quad (1)$$

여기서,  $\hat{n}$ 은 표면법선벡터(normal vector),  $\overline{H}_i$ 는 입사자기장(incident magnetic field)이다. 물체가 전파흡수체인 경우 표면전류는 반사계수( $\Gamma$ )를 사용하여 식 (2)으로 계산한다.

$$\overline{J}_s \approx (1-\Gamma)\hat{n} \times \overline{H}_i \quad (2)$$

반사계수는 입사파에 대한 반사파의 비를 나타내는 값으로 수직입사(normal incident)에 대해서

는 식 (3)과 같이 물체 표면에서의 입력임피던스( $Z_n$ )와 자유공간의 특성임피던스(characteristic impedance,  $Z_0$ )인  $377\Omega$ 을 이용해 계산한다[10].

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

이때, 입력임피던스는 전송선로이론으로 계산할 수 있으며, 수직입사에 대해 단층형 유전체 RAS에서의 계산식은 식 (4)와 같다.

$$Z_n = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \tanh(j \frac{2\pi t}{\lambda} \sqrt{\epsilon_r}) \quad (4)$$

표면전류가 계산된 후에는 반사면에 대한 적분으로 산란전기장(scattered electric field,  $\overline{E}_s$ )을 계산하며, RCS( $\sigma$ )는 식 (5)와 같이 입사전기장( $\overline{E}_i$ )과 산란전기장( $\overline{E}_s$ )의 비로 계산한다[11]. 여기서,  $R$ 은 레이더에서부터 목표물까지의 거리이다.

$$\sigma(m^2) = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|\overline{E}_s|^2}{|\overline{E}_i|^2} \quad (5)$$

## 2.3 임피던스정합을 이용한 RAS 설계

임피던스정합(impedance matching)은 매질경계에서 반사에 의한 손실이 없도록 매질에 의한 입력임피던스를 동일하게 하는 것이며, 일반적으로 공기중에 위치한 평판형 물체에 대해서는 입력임피던스가 자유공간의 특성임피던스와 일치하여 반사계수가 최소가 되는 경우를 의미한다[11]. 이러한 임피던스정합은 전송선로 및 전파흡수체의 설계에 널리 사용되지만, 평판이외에는 반사계수 최소화로 RCS 최소화를 수행하기 어렵기 때문에 RAS의 전파흡수성능 향상을 위해서는 적절한 설계방법의 연구가 필요하다.

본 논문에서는 RCS 최소화 단층형 RAS를 효과적으로 설계하기 위하여 임피던스정합을 이용하였으며, 전파입사조건에 따라 목표주파수( $f_t$ )에서 대상의 RCS가 최소화되는 입력임피던스( $Z_{n,\min}(\sigma)$ )를 계산한 후, 최적화를 통해 RAS가 계산된 입력임피던스를 가장 근접하게 나타내도록 흡수층의 복소유전율과 두께를 설계한다. 연구방법의 수행을 위한 최적화의 정식화는 식 (6)과 같다. 연구방법에서 설계변수는 연속변수인 흡수층 복소유전율의 실수항( $\epsilon_r'$ )과 이산변수인 두께( $t$ )이며, 복소유전율의 허수항( $\epsilon_r''$ )은 콜콜도표의 회귀식을 이용해 실수항에 대한 함수로 계산한다. 따라서 식 (6)의 최적화는 연속변수와 이산변수가 함께 존재하기

때문에 GA를 사용해 수행한다. 이때, 복소유전율의 실수항 및 두께의 범위는 대상재료의 특성을 고려하여 제한한다.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } |Z_n(\epsilon_r', \epsilon_r'', t) - Z_{n, \min}(\sigma)| \\ \text{S.T. } & 1) \epsilon_r'_{\min} \leq \epsilon_r' \leq \epsilon_r'_{\max} \\ & 2) t_{\min} \leq t \leq t_{\max} \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)에서  $Z_{n, \min}(\sigma)$ 은 대상모델 및 전파입사조건에 따라 계산되는 복소 상수이다.  $Z_{n, \min}(\sigma)$ 은 식 (7)의 최적화를 통해 고정된 두께( $t_{fix}$ )에서 대상의 RCS를 최소화시키는 임의의 복소유전율을 계산한 후 식 (4)로 산정한다. 평판형태 물체에서  $Z_{n, \min}(\sigma)$ 은  $377\Omega$ 으로 계산된다.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } \sigma(\epsilon_r', \epsilon_r'', t_{fix}) \\ \text{S.T. } & 1) \epsilon_r'_{\min} \leq \epsilon_r' \leq \epsilon_r'_{\max} \\ & 2) \epsilon_r''_{\min} \leq \epsilon_r'' \leq \epsilon_r''_{\max} \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)에서는 복소유전율을 특정한 재료의 것으로 한정하지 않고, 대상의 RCS를 이상적으로 최소화시키는 값을 계산하기 위해 설계변수로 복소유전율의 실수항( $\epsilon_r'$ )과 허수항( $\epsilon_r''$ )을 독립적으로 사용한다. 따라서 설계변수에서 이산변수가 제거되어도 함수기반 최적화 기법이 효과적으로 적용될 수 있어, 최적화 알고리즘으로는 고차함수에서 수렴성이 뛰어난 SQP를 사용한다. 도함수기반 최적화 기법은 설계변수의 초기점(initial point)에 따라 수렴성이 크게 달라진다. 연구방법에서는 초기점으로 식 (8)의 최적화로 계산되는 고정된 두께에 대해 목표주파수에서의 반사계수( $\Gamma$ )의 크기를 이상적으로 최소화시키는 복소유전율 값을 사용한다. 설계변수의 초기점을 계산하기 위한 최적화 문제에서도 설계변수로는 복소유전율의 실수항( $\epsilon_r'$ )과 허수항( $\epsilon_r''$ )이 독립적으로 사용되며, 이는

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } |\Gamma(\epsilon_r', \epsilon_r'', t_{fix})| \\ \text{S.T. } & 1) \epsilon_r'_{\min} \leq \epsilon_r' \leq \epsilon_r'_{\max} \\ & 2) \epsilon_r''_{\min} \leq \epsilon_r'' \leq \epsilon_r''_{\max} \end{aligned} \quad (8)$$

전역 최적화를 위해 GA로 수행된다. 앞에서 설명한 바와 같이 연구방법은 3단계의 최적설계 문제로 구성되며 최적화의 순서는 Fig. 2와 같다.

### 2.4 수치예제

본 논문에서는 연구의 검증을 위한 수치예제로 연구방법 및 RCS 최소화를 통하여 단층형 항공기 날개 RAS를 설계하였다. 적용모델은 2종으로 Fig. 3과 같이 NACA-0012, NACA-2412 에어포일 형상의 직선형 날개이며, 모델의 시위(cord)는 1,000 mm, 길이(span)는 3,000mm이다. 최적화의 목적함수 계산 및 설계된 RAS의 성능평가를 위해 PO 프로그램을 이용하여 대상모델의 RCS를 계산하였다[12]. RCS를 계산하기 위한 PO 모델은 17,440 개의 삼각형요소(triangular element)로 구성하였으며, 요소의 크기는 1~30mm로 곡면인 날개 앞전의 요소를 보다 조밀하게 생성하였다. RCS 계산시 전파입사조건으로 대상 레이더는 단방향(mono-static)으로 가정하였고, 편파는 transverse electric(TE) 및 transverse magnetic(TM)을 각각 적용하였다. 연구에서는 고도각(elevation angle)에 따른 RCS 특성만을 평가하였으며, 고도각은 날개의 윗면에서 90°, 아랫면에서 -90°으로 정의하였다. 최적화의 목적함수 계산시 전파의 입사고도각은 항공기의 RCS 성능에 주요한 영향을 미치는 -20° ~ 20°에서의 RCS를 감소시키기 위해 0°로 고정하였다[11]. 따라서 입사파는 날개모델의 시위와 평행하고, 길이방향에 수직한다.

RAS 설계를 위한 대상재료로는 참고문헌에서 발췌한 탄소나노섬유(CNF)가 손실첨가제로 함유

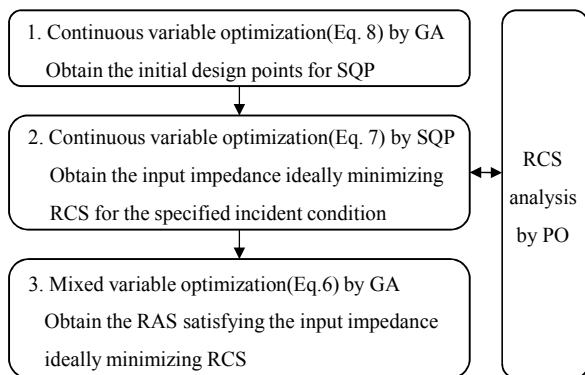


Fig. 2. Flow chart of studied method

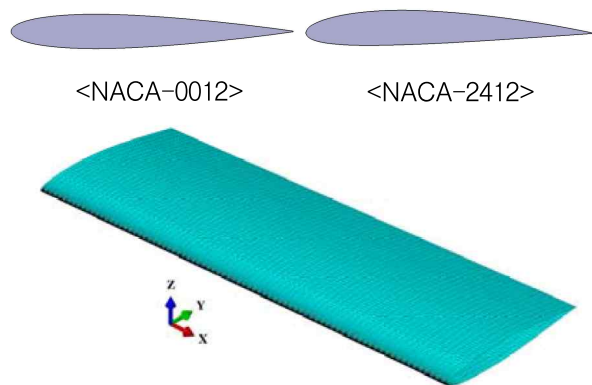


Fig. 3. RCS analysis wing models

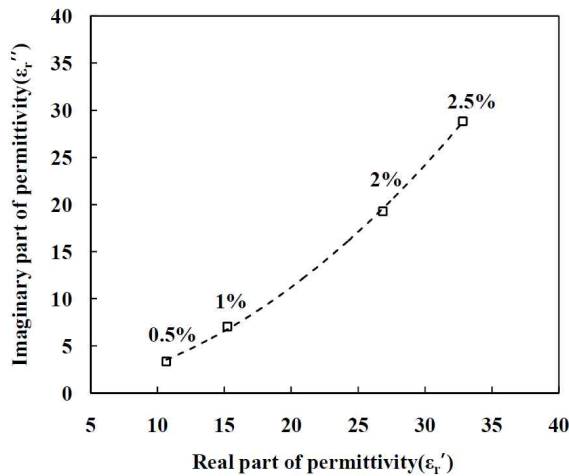


Fig. 4. Cole-cole plot of the composite with CNF[6]

된 유리섬유 직조복합재의 복소유전율 데이터를 이용하였다[6]. 손실첨가제의 함량에 따른 복합재의 콜콜도표는 Fig. 4와 같으며, 회귀분석을 수행하여 결정계수( $R^2$ )가 0.99 이상인 2차 회귀함수 ( $\epsilon_r'' = 0.024(\epsilon_r')^2 + 0.073(\epsilon_r') - 0.040$ )를 생성하여 설계과정에 적용하였다.

단층형 RAS 설계를 위한 목표주파수는 X-band 중심주파수인 10GHz이다. RAS 설계를 위한 최적화에서 복소유전율은 대상재료로 구현이 가능한 범위인  $4 \leq \epsilon_r' \leq 40$ 로 제한하였으며, 두께는 이산 변수로  $\Delta t = 0.1mm$ ,  $2 \leq t(mm) \leq 3$ 로 가정하였다. RAS 설계시 사용된 GA의 구동을 위한 계수는 개체군(population)은 20, 세대수(generation)는 1,000, 교배확률(crossover)은 0.95이다[13].

각 날개모델에 대해 RCS를 GA를 이용한 이산 최적화의 목적함수로 사용해 전파입사조건에 대한 RCS를 직접적으로 최소화하도록 설계된 RAS의 결과는 각각 Table 1, Table 2와 같다. 다음으로 연구방법을 이용해 각 날개모델의 전파입사조건에

따른 RCS를 이상적으로 최소화시키는 입력임피던스( $Z_{n,min(\sigma)}$ )를 계산한 후, 이를 최대한 만족하도록 설계된 RAS의 설계치는 Table 3, Table 4와 같다. 연구방법의 수행 중 식 (7), (8)의 최적화를 위한 두께는 일반적인 유전성 전파흡수체의 두께를 고려해 2mm로 고정하였으며, 이에 따른  $Z_{n,min(\sigma)}$ 은 NACA-0012 모델에 대해  $375.44-34.43j(TE)$ ,  $356.42+26.09j(TM)$ , NACA-2412 모델에서는  $390.46-24.53j(TE)$ ,  $349.26+9.74j(TM)$ 으로 계산되었다. 설계결과 연구방법에 의해 도출된 결과는 RCS를 GA를 이용한 이산최적화의 목적함수로 사용한 경우의 설계치와 0.1%이하의 차이를 보임을 알 수 있다. GA를 이용해 RCS를 직접적으로 최소화한 경우에는 목적함수 계산을 위한 RCS 해석의 연동으로 인해 최적화에는 오랜 시간이 소모된다. 반면 연구방법에서는 설계과정에서 반사계수와 임피던스의 계산량은 다소 증가하나, RCS 최소화시 도함수기반 최적설계기법을 사용함으로 GA를 이용한 경우와 비교해 RCS의 계산량이 크게 감소된다. 따라서 반사계수와 임피던스는 계산이 간단함으로 연구방법은 계산해야하는 변수의 수는 증가되지만 최적화에 소모되는 시간은 크게 감소된다. 결과에 나타난 것과 같이 RCS가 최소화된 RAS는 날개 모델의 형상 및 편파에 따라 상이한 복소유전율 및 두께로 설계되며, 이때 입력임피던스는 공기중의 특성임피던스( $377\Omega$ )에 정합되지 않는다. 결과 Table들에서 입력임피던스는 설계치(복소유전율, 두께)를 이용해 식 (5)로 계산한 것이다. Table 1 ~ Table 4에 나타난 RCS를 직접적으로 최소화한 경우와 연구방법을 이용한 설계결과를 각 날개 모델들에 적용한 후, 고도각에 따른 RCS의 변화를 계산하여 비교한 결과는 Fig. 5 ~ Fig. 8과 같다. 계산결과 RCS를 직접적으로 최소화 경우 (Min\_RCS)와 연구방법(IM(Min\_RCS))의 설계치는 근소한 차를 보이므로 계산된 고도각에 따른

Table 1. Design results of single layer RAS by minimizing RCS for NACA-0012 wing model

Polarization	Complex permittivity	Thickness	Input impedance	Number of calculation	Computation time
TE	11.51-3.91j	2.30mm	382.06-48.19j	20,000	127,263sec
TM	12.83-4.86j	2.10mm	353.19+27.27j	(RCS)	(35hours)

Table 2. Design results of single layer RAS by minimizing RCS for NACA-2412 wing model

Polarization	Complex permittivity	Thickness	Input impedance	Number of calculation	Computation time
TE	11.35-3.80j	2.30mm	398.50-38.05j	20,000	127,263sec
TM	13.02-5.01j	2.10mm	341.99+15.55j	(RCS)	(35hours)

Table 3. Design results of single layer RAS by studied method for NACA-0012 wing model

Polarization	Complex permittivity	Thickness	Input impedance	Number of calculation	Computation time
TE	11.50-3.91j	2.30mm	382.62-48.92j	20,000(RC, IM) 21(RCS)	143sec
TM	12.83-4.87j	2.10mm	352.95+27.99j	20,000(RC, IM) 24(RCS)	161sec

Table 4. Design results of single layer RAS by studied method for NACA-2412 wing model

Polarization	Complex permittivity	Thickness	Input impedance	Number of calculation	Computation time
TE	11.35-3.80j	2.30mm	398.50-38.05j	20,000(RC, IM) 21(RCS)	143sec
TM	13.02-5.01j	2.10mm	341.99+15.56j	20,000(RC, IM) 21(RCS)	143sec

RC : reflection coefficient, IM : Impedance

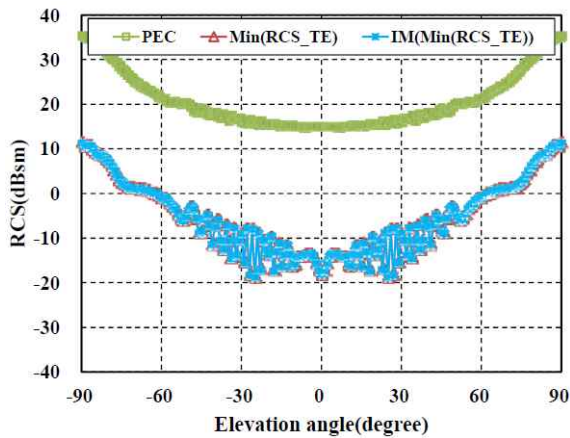


Fig. 5. Comparison of design results[NACA-0012, TE]

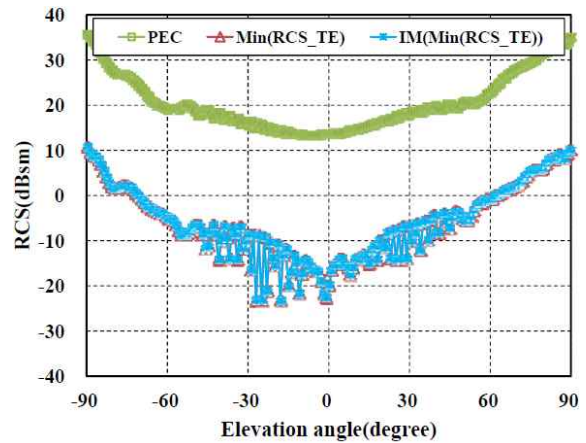


Fig. 7. Comparison of design results[NACA-2412, TE]

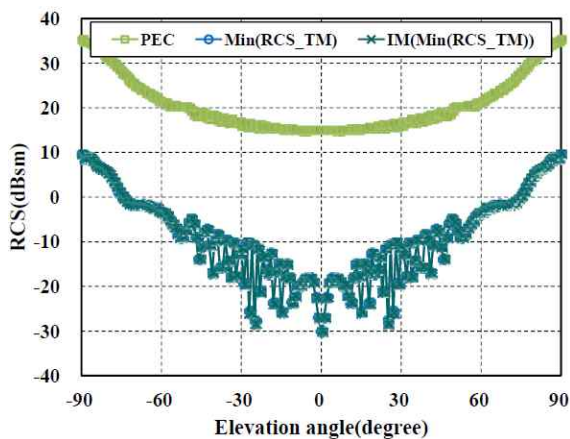


Fig. 6. Comparison of design results[NACA-0012, TM]

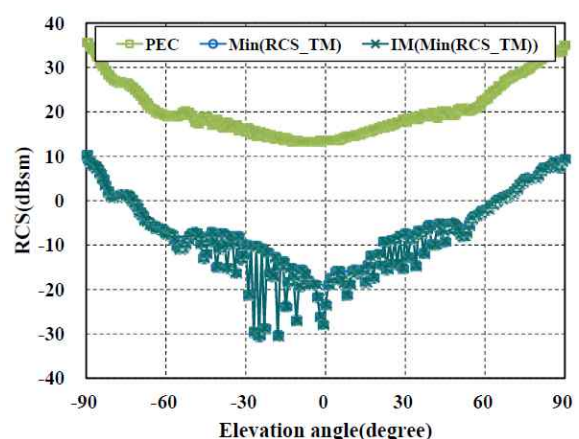


Fig. 8. Comparison of design results[NACA-2412, TM]

RCS 도표는 겹쳐져 나타난다. 따라서 각 방법으로 설계된 RAS는 동일한 전파흡수성능을 나타내며, 연구방법은 RCS의 계산량을 줄임으로써

RAS 설계의 효율성을 증가시킴을 확인할 수 있다. 계산결과 중 PEC는 날개모델의 표면을 전파를 흡수하지 않는 완전전기전도체로 가정한 것을

의미하며, RAS를 날개에 적용함으로써 설계시 주된 고려 대상이었던  $-20^\circ \sim 20^\circ$  고도각에서의 RCS는 평균적으로 20dBsm 이상 감소되었다. 고도각에 따른 RCS는 날개모델의 형상에 따라 다르게 나타나며, NACA-0012의 경우 고도각  $0^\circ$ 를 기준으로 대칭적이지만 NACA-2412의 경우에는 비대칭적이다. 또한 날개모델의 RCS는 투영 면적이 넓은 위, 아랫면에서는 크게 계산되지만 앞전에 가까워질수록 감소되는 특성을 나타낸다.

### III. 결 론

본 논문에서는 전파입사조건에 대해 RCS를 최소화하는 RAS를 효과적으로 설계하기 위한 방법을 연구하였으며, 이를 위해 도함수기반 및 확률론적 최적화기법과 임피던스정합을 이용하였다. 연구방법에서는 복소유전율을 특정재료의 것으로 한정하지 않음으로써 대상모델의 RCS가 이상적으로 최소화되는 복소유전율을 도출하였으며, 이에 따라 계산된 입력임피던스를 만족함으로써 RCS를 직접적으로 최소화한 경우와 동일한 RAS의 설계가 가능하였다. 설계과정에서는 반사계수가 최소화되는 복소유전율을 설계변수의 초기점으로 사용하고 도함수기반 최적화기법을 이용함으로써 RCS 최소화를 효과적으로 수행할 수 있으며, 도함수기반 및 확률론적 최적화기법을 병용함으로써 RAS 설계를 위한 연속 및 이산변수 혼합 최적설계를 효과적으로 수행하였다. 결과적으로 연구방법은 RCS 해석을 수를 감소시킴으로 최적화의 시간을 단축하고 RAS 설계의 효율을 향상시킬 수 있었다.

### References

- 1) Grant, R., *The Radar Game - Understanding Stealth and Aircraft Survivability*, Mitchell Institute Press, 1998.
- 2) Hong, C. S., "Stealth Aircraft and Composites," *J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 24, Jun.

2005, pp.156~160.

- 3) Jang, B. W., Lee, W. J., Joo, Y. S., and Park, J. S., "Optimization of Radar Absorbing Structures for Aircraft Wing Leading Edge," *J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 41, Apr. 2013, pp.268~274.

- 4) 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, Nov. 2008, pp.2909~2916.

- 5) Park, H. S., Choi, I. S., Bang, J. K., Suk, S. H., LEE, S. S., and Kim, H. T., "Optimized Design of Radar Absorbing Materials for Complex Target," *J. of Electromagnetic Waves and Applications*, Vol. 18, Aug. 2004, pp.1105~1117.

- 6) Kim, J. B., "Design of Microwave Absorbing Composite Laminates by Using Semi-empirical Permittivity Models," *Ph.D. Thesis, KAIST*, 2007.

- 7) Cole, K. S., Cole, R. H., "Dispersion and Absorption in Dielectrics I, Alternating Current Characteristics," *J. of Chemical physics*, Vol. 9, 1941, pp.341~352.

- 8) Jenn, D. C., *Radar and Laser Cross Section Engineering*, AIAA Education Series, 2005.

- 9) Myong, R. S., Cho, T. H., "Development of a Computational Electromagnetics Code for Radar Cross Section Calculations of Flying Vehicles," *J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 33, Apr. 2005, pp.1~6.

- 10) Cheng, D. K., *Fundamentals of Engineering Electromagnetics*, Prentice Hall, 1992.

- 11) Knott, E. F., Shaeffer, J. F., and Tuley, M. T., *Radar Cross Section*, Artech House, 1993.

- 12) <http://faculty.nps.edu/jenn/>

- 13) Goldberg, D. E., *Genetic Algorithm in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley, 1987.