

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 41(4), 268-274(2013)

DOI:<http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2013.41.4.268>

항공기 날개 앞전의 레이더흡수구조 최적화

장병욱*, 박선화*, 이원준**, 주영식**, 박정선***

Optimization of Radar Absorbing Structures for
Aircraft Wing Leading Edge

Byung-Wook Jang*, Sun-Hwa Park*, Won-Jun Lee**, Young-Sik Joo** and Jung-Sun Park***

Graduate School of Korea Aerospace University*, Agency for Defence Development**,

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

ABSTRACT

In this paper, objective functions are defined for optimization of radar absorbing structures (RAS) on the aircraft wing leading edge. RAS is regarded as a single layer structure made of dielectrics. Design variables are the real and imaginary parts of complex permittivity. Reflection coefficient(RC) and radar cross section(RCS) are used in the objective function respectively. Transmission line theory is employed to calculate the RC. The RCS is evaluated by using physical optics(PO) for a leading edge part model. Genetic algorithm(GA) is used to perform optimization procedures. The radar absorbing performance of designed RAS is assessed by the RCS of a wing which has RAS on the leading edge.

초 록

항공기 날개 앞전의 레이더흡수구조 최적화를 위한 목적함수를 정의하였으며, 유전체로 구성된 단층형 레이더흡수구조를 설계하였다. 설계변수는 흡수체의 복소유전율이며 반사계수와 레이더반사면적을 각각 목적함수로 사용하였다. 반사계수는 계산이 간단하여 최적화에 효과적으로 사용될 수 있지만 대상을 평판형태로 가정하기 때문에 구조물의 형상을 충분히 반영하기 어렵다. 반면 레이더반사면적은 형상을 충분히 반영할 수 있지만 계산에 많은 시간이 요구된다. 반사계수는 전송선로이론을 통하여 계산하였으며, 레이더반사면적은 형상조건을 반영하기 위하여 날개 앞전 부분모델에 대해 물리광학법을 사용하여 평가하였다. 최적설계는 유전자알고리즘을 사용하였고, 설계된 레이더흡수구조를 날개 앞전에 적용하여 레이더반사면적을 계산함으로써 레이더흡수 성능을 확인하였다.

Key Words : Radar Absorbing Structures(레이더흡수구조), Reflection Coefficient(반사계수), Radar Cross Section(레이더반사면적), Physical Optics(물리광학법)

1. 서 론

레이더반사면적(radar cross section, RCS)은 방사된 레이더파가 기체에 반사되어 되돌아온 에너

지의 크기를 수치적으로 나타낸 것으로, 반사면적의 감소는 레이더 탐지거리를 축소시킴으로 항공기의 생존성 향상을 위한 중요한 요소이다[1]. 레이더반사면적은 항공기의 형상설계를 통해 레

† Received: October 12, 2012 Accepted: March 12, 2013

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

<http://journal.ksas.or.kr/>

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

이더파를 입사 방향과 다른 방향으로 반사 또는 산란시켜 감소시킬 수 있다. 하지만 레이더반사면적 감소를 위한 구조설계 단계에서는 외부형상의 변경이 불가능하므로 레이더흡수구조(radar absorbing structures, RAS)를 적용하거나, 레이더흡수재료(radar absorbing materials, RAM)를 기체에 부착하여 추가적인 레이더반사면적 감소 성능을 확보한다[2].

초기의 레이더흡수재료는 도료 또는 시트로 만들어져 사용이 용이하다는 장점이 있지만 지속성이 낮고 유지보수에 많은 비용과 노력이 필요했다. 최근에는 섬유강화 복합재료(fiber reinforced composite material)로 제작되어 지속성이 향상되었으며 구조재료로서의 역할도 담당하는 레이더흡수구조로 발전되었다[3,4]. 레이더흡수구조의 흡수 성능은 재료의 전자기적 물성, 두께, 구조형상 및 입사파의 특성에 영향을 받으며 구조적인 성능을 배제한 전자기적 특성은 레이더흡수재료와 유사하다. 레이더흡수구조의 설계에 있어 기본적인 방법은 반사계수(reflection coefficient, Γ)의 최소화로부터 도출되는 무반사곡선과 Cole-Cole plot을 이용하는 것으로 지금까지 많은 연구들이 진행되었다[5,6]. 또한 근래에는 보다 뛰어난 성능의 레이더흡수구조와 재료를 개발하기 위하여 반사계수를 목적함수로 하는 최적화 기법이 적용되고 있다[7]. 이러한 연구들은 대부분 재료적인 측면에서 연구되었으며 평판형태에서의 레이더흡수 성능만을 평가하였다.

본 논문에서는 항공기의 스텔스 성능 향상을 위해 반사계수와 레이더반사면적을 각각 목적함수로 사용하여 날개 앞전의 레이더흡수구조를 설계하였다. 항공기 날개의 앞전은 날개 부분 중 전면에서 입사되는 레이더파가 가장 크게 반사되는 부분으로 고성능 항공기에서는 레이더흡수체가 적용된다. 앞전에는 공기역학적 성능을 위한 곡률이 존재하며 레이더흡수구조의 흡수성능은 이러한 형상의 영향을 받는다. 레이더흡수구조의 성능은 반사계수 또는 레이더반사면적을 사용하여 평가할 수 있다. 반사계수는 계산이 간단하여 최적화에 효과적으로 사용될 수 있지만 계산시에 대상물을 평판으로 가정하기 때문에 형상을 충분히 반영하기 어렵다는 단점이 있다. 반면 레이더반사면적은 해석기법으로 계산함으로써 물체의 형상을 충분히 고려할 수 있으나 계산에 많은 시간이 요구된다. 목적함수로 사용된 반사계수는 앞전의 형상을 평판으로 가정한 후 수직입사파(normal incident wave)에 대하여 계산하였고, 레이더반사면적은 앞전의 형상을 반영한 해석모

델을 사용하여 평가하였다. 최적설계기법으로는 유전자알고리즘을 사용하였으며 설계된 레이더흡수구조를 날개 앞전에 적용한 후 레이더반사면적을 계산함으로써 레이더흡수구조의 성능을 평가하고 날개 앞전의 레이더흡수구조 설계에 타당한 목적함수를 선정하였다.

II. 본 론

2.1 레이더파의 반사 특성

레이더파는 전기장과 자기장의 상호작용으로 전파되는 전자기파(electromagnetic wave)이다. 일반적으로 전자기파는 공기와 같은 자유공간에서는 특성이 변화되지 않지만 전기적 물성이 다른 매질을 통과할 경우 매질의 경계에서 일부는 반사되고, 일부는 투과된다. 투과된 전자기파는 매질의 감쇠 특성에 의해 열에너지 등으로 소실된다. 전자기파의 반사와 투과에 영향을 미치는 기본적인 재료의 물성은 유전율(permittivity, ϵ_r), 투자율(permeability, μ_r)과 특성임피던스(characteristic impedance, Z_c)이다[8]. 유전율과 투자율은 각각 식 (1), 식 (2)와 같이 복소수로 나타내며 유전율의 실수부는 재료가 함유할 수 있는 전기력의 크기를 나타내고 투자율의 실수부는 물체가 자기를 투과시킬 수 있는 크기를 의미한다. 유전율과 투자율의 허수부는 분자간의 저항에 의해 소실되는 에너지의 크기를 나타낸다. 특성임피던스는 식 (3)과 같이 유전율과 투자율 및 공기 중의 특성임피던스(Z_0)로 정의된다. 일반적으로 공기 중의 특성임피던스는 약 377Ω 이다.

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \tag{1}$$

$$\mu_r = \mu_r' - j\mu_r'' \tag{2}$$

$$Z_c = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tag{3}$$

입사된 레이더파가 물체의 표면에서 반사되어 돌아가는 에너지의 크기는 식 (4)와 같이 정의되는 반사계수(Γ)로 표현된다[9]. 여기서, Z_{in} 은 물체 표면의 입력임피던스(input impedance)로 전송선로이론(transmission line theory)으로 계산한다.

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \tag{4}$$

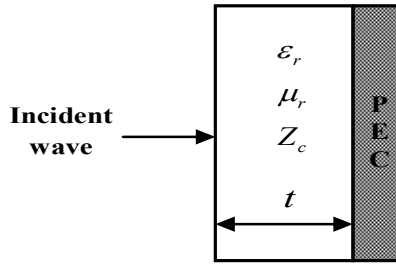


Fig. 1. Single Layer RAS

반사계수는 복소수로 계산됨으로 식 (5)와 같이 데시벨(decibel, dB) 단위로 나타내며, -10dB는 약 30%, -20dB는 약 10%의 입사파가 반사되어 돌아감을 의미한다.

$$\Gamma(\text{dB}) = 10 \log I^2 \quad (5)$$

반사계수는 입력임피던스가 공기 중의 특성임피던스와 일치할 때 최소가 되며 이를 임피던스정합(impedance matching)이라 한다[10]. 본 논문에서는 Fig. 1과 같이 두께(t)를 가지고 뒷면에 완전 전기전도체(perfect electric conductor, PEC)가 있는 단층형 레이더흡수구조를 설계하였으며 입력임피던스는 식 (6)으로 계산하였다.

$$Z_{in} = Z_c \frac{Z_{PEC} + Z_c \tanh \gamma t}{Z_c + Z_{PEC} \tanh \gamma t} \quad (6)$$

여기서, Z_{PEC} 는 종단 부하인 완전 전기전도체의 특성임피던스, γ 는 전파정수(propagation constant)로 식 (7)과 같이 유전율, 투자율, 입사레이더파의 주파수(f) 및 전파속도(c)를 통하여 정의된다.

$$\gamma = j2\pi f \sqrt{\epsilon_r \mu_r} / c \quad (7)$$

2.2 물리광학법

물리광학법(physical optics, PO)은 입사전기장(incident electric field, \overline{E}_i)과 경계조건에 의해 물체 표면에 발생하는 표면전류(surface current, \overline{J}_s)에 관한 근사식을 이용하여 레이더반사면적을 계산하는 방법이다. 이 기법은 고주파 근사(high frequency approximation)법으로 Maxwell 방정식의 적분형인 Stratton-Chu 방정식에 근거하며, 산란구조물의 크기가 입사 레이더파의 파장에 비해 상대적으로 큰 경우 적용이 가능하다[11]. 물리광학법은 계산에 많은 시간이 요구되는 복잡한 적분과정이 다소 생략됨으로 Maxwell 방정식을

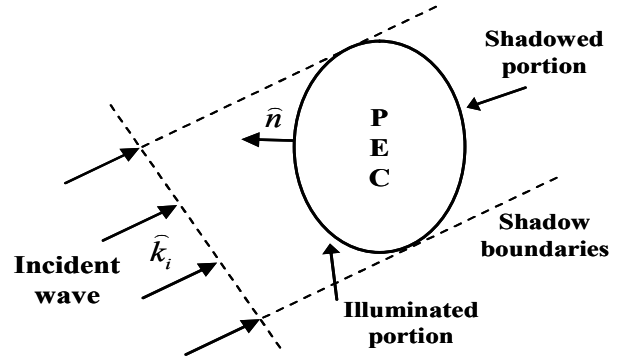


Fig. 2. Physical Optics Approximation[14]

직접적으로 풀이하는 모멘트법(method of moment, MOM), 유한요소법(finite element method, FEM), 유한체적법(finite volume method, FVM) 등에 비해 계산 시간이 짧은 장점이 있으며, 항공기의 초기설계 단계에서 주로 활용된다[12,13].

물체가 전자기파에 노출될 때, 물리광학법에서는 Fig. 2와 같이 물체를 반사(illuminated)영역과 그늘(shadowed)영역으로 구분한 후 각 영역에서 발생하는 표면전류를 근사식으로 나타낸다. 전자기파가 완전 전기전도체에 입사할 경우 표면전류는 식 (8)과 같이 계산한다[14].

$$\overline{J}_s \approx \begin{cases} 2\hat{n} \times \overline{H}_i, & \text{for the illuminated portion} \\ 0, & \text{for the shadowed portion} \end{cases} \quad (8)$$

여기서, \hat{n} 은 표면법선벡터(normal vector), \overline{H}_i 는 입사자기장(incident magnetic field)이다. 물체가 완전 전기전도체가 아닌 레이더흡수체인 경우 반사 영역에서의 표면전류는 반사계수(Γ)를 사용하여 식 (9)와 같이 계산한다.

$$\overline{J}_s \approx (1 - \Gamma)\hat{n} \times \overline{H}_i \quad (9)$$

표면전류가 계산된 후에는 반사면에 대한 적분으로 산란전기장(scattered electric field, \overline{E}_s)을 계산하며, 레이더반사면적은 식 (10)과 같이 입사전기장과 산란전기장의 비로 계산한다[15]. 여기서, R 은 레이더에서부터 목표물까지의 거리를 의미한다. 일반적으로 레이더반사면적은 제곱미터(m^2)와 같은 면적의 단위로 계산되며, 식 (11)과 같이 단위면적에 대한 상대적 크기인 데시벨제곱미터

$$\text{RCS}(m^2) = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|\overline{E}_s|^2}{|\overline{E}_i|^2} \quad (10)$$

(decibel square meter, dBsm)로 나타낸다.

$$RCS(dBsm) = 10 \log_{10} [RCS(m^2)] \quad (11)$$

물리광학법과 같은 해석기법을 통하여 물체의 레이더반사면적을 계산하기 위해서는 대상물의 표면을 유한개의 면(요소)으로 이산화한 후 생성된 각 면에서 발생된 레이더반사면적의 합으로 물체 전체의 레이더반사면적을 계산한다. 따라서 물리광학법의 계산시간은 물체를 구성하는 면의 수에 따라 증가된다.

2.3 날개 앞전의 레이더흡수구조 최적설계

2.3.1 대상 모델

본 논문에서는 최적화를 통하여 항공기 날개 앞전의 레이더흡수구조를 설계하였다. 사용된 날개 모델은 Fig. 3과 같으며, 길이는 약 3m이다. 설계에 앞서 레이더흡수구조가 적용되지 않은 날개의 레이더반사 특성을 파악하기 위하여 날개의 스킨을 완전 전기전도체로 가정한 후 물리광학법으로 레이더반사면적을 계산하였다. 해석조건은 레이더파의 송수신부가 동일한 mono-static radar, 자기장이 입사면과 수직인 transverse magnetic (TM) wave 및 목표 주파수 10GHz를 사용하였다. 레이더파의 입사각(incident angle, θ)은 고도각(elevation angle)을 기준으로 정의하였으며, Fig. 4와 같이 날개 수평면의 고도각을 0° 로 한 후 $\pm 30^\circ$ 범위에서 레이더반사면적을 계산하였다. 고도각에 따른 대상 날개의 레이더반사면적 변화 양상은 Fig. 5와 같다. 계산 결과 에어포일 형상

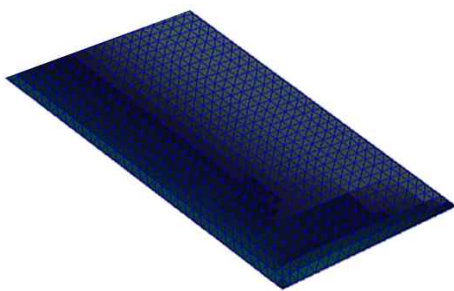


Fig. 3. Wing Model

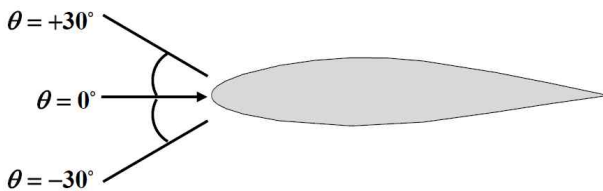


Fig. 4. Angle of Elevation

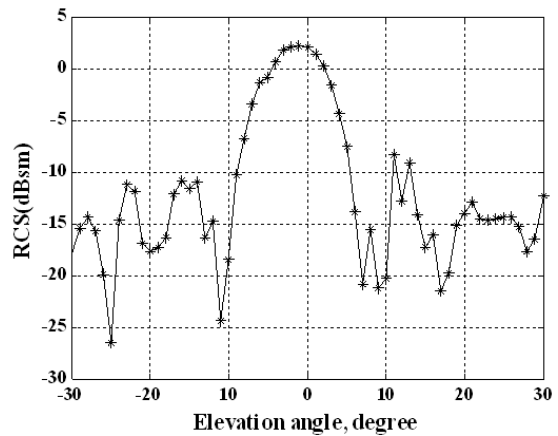


Fig. 5. Wing RCS Plot(PEC, 10GHz)

의 비대칭성으로 인해 레이더반사면적 또한 비대칭적으로 나타났으며, 앞전에서 최대 레이더반사면적은 고도각 -1° 에서 2.20dBsm 이다.

2.3.2 레이더흡수구조 최적화를 위한 정식화

레이더흡수구조의 성능은 재료의 유전율, 투자율, 두께 및 레이더파의 입사각, 주파수, 편파형태에 따라 변화되며 설계 시에는 사용목적에 맞는 요소들의 정의가 필요하다. 본 논문에서는 날개 앞전의 레이더흡수구조를 상대적으로 적은 무게 증가로 높은 레이더흡수 성능을 획득할 수 있는 유전소재(dielectric material)로 제작된 단층형으로 고려하였으며 최적화를 위한 설계변수로는 유전율의 실수부(ϵ_r')와 허수부(ϵ_r'')를 사용하였다. 설계변수의 탐색범위는 점유강화 복합재료 구현 가능한 $1 \leq (\epsilon_r', \epsilon_r'') \leq 30$ 으로 한정하였다 [16]. 전파흡수구조의 두께는 유전율의 구현 가능성을 고려하여 $2mm \leq t \leq 3mm$ 로 하였으며, 0.1 mm씩 증가시켜 두께에 따른 유전율을 계산하였다. 설계를 위한 목표주파수는 10GHz이다.

일반적으로 레이더흡수구조의 흡수성능은 전자기파의 입사량과 반사량의 비를 나타내는 반사계수를 통하여 평가한다. 반사계수는 계산방법이 간단하여 최적설계에 적용이 효율적이지만 구조물을 평판으로 가정한 후 이차원적인 특성만을 계산하기 때문에 구조의 형상으로 인한 영향을 충분히 고려하기 어려운 단점이 있다. 레이더흡수구조의 성능을 평가하는 또 다른 방법은 레이더반사면적을 사용하는 것이다. 레이더반사면적은 계산에 많은 시간이 소모되지만 구조물의 형상을 반영하기 때문에 보다 정밀하게 레이더흡수구조의 성능을 평가할 수 있다. 따라서 날개 앞전의 레이더흡수구조 최적설계에 사용가능한 목적함수를 선정하기 위하여 반사계수와 레이더반

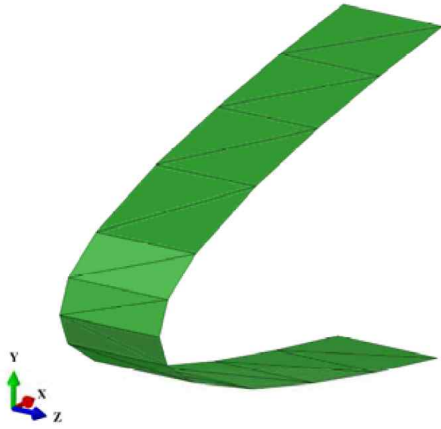


Fig. 6. Leading Edge Part Model

사면적을 각각 사용하여 최적설계를 수행하였다. 반사계수는 날개의 앞전을 평판으로 가정한 후 수직입사($\theta=0$)에 대해 식 (4)와 식 (6)을 사용하여 계산하였다. 레이더반사면적은 물리광학법으로 평가하였으며, 날개 앞전의 형상을 고려하고 계산 시간을 감소시키고자 Fig. 6과 같은 앞전의 부분 모델을 사용하였다. 앞전 부분모델의 z방향 길이는 30mm이며, 총 24개의 면으로 구성되었다. 레이더반사면적은 mono-static radar, TM wave 및 고도각 -1° 에서 계산하였다. 레이더흡수구조를 적용하지 않은 경우 앞전 부분모델의 최대 레이더반사면적은 약 -27dBsm 이다.

반사계수와 레이더반사면적을 각각 목적함수로 사용한 경우에 대하여 최적화를 위한 정식화는 각각 식 (12), 식 (13)와 같다.

$$\text{Find}(\epsilon_r', \epsilon_r''), 1 \leq (\epsilon_r', \epsilon_r'') \leq 30$$

$$\text{Min}(\Gamma_{\text{Transmissionline}(10\text{GHz}, \text{normal incident})}) \quad (12)$$

$$\text{Min}(\text{RCS}_{\text{PO}(10\text{GHz}, \theta=-1^\circ, \text{TMwave}, \text{mono-static radar})}) \quad (13)$$

2.3.3 레이더흡수구조 최적설계 결과

최적설계는 유전자알고리즘으로 수행하였으며 결과는 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 유전자알고리즘의 실행을 위한 개체군(population)은 20개, 세대수(generation)는 50,000회, 교배확률(crossover)은 95%을 사용하였다. 설계결과 유전율의 실수부(ϵ_r')와 허수부(ϵ_r'')는 레이더흡수구조의 두께가 증가함에 따라 감소되는 양상을 나타내었으며, 반사계수와 레이더반사면적을 목적함수 사용한 경우에서 근사한 수치를 나타내었다. 반사계수를 목적함수로 사용한 경우에는 계산된 입력임피던스(Z_{in})가 공기 중의 특성임피던(Z_0)인 377Ω

Table 1. Optimization Results(Min(Γ))

t (mm)	ϵ_r'	ϵ_r''	Z_{in}	Γ (dB)
2.0	14.47	4.75	376.18	-52.50
2.1	13.16	4.52	376.33	-53.99
2.2	12.03	4.31	376.46	-52.82
2.3	11.04	4.12	376.50	-53.68
2.4	10.17	3.95	376.16	-55.04
2.5	9.40	3.79	376.21	-58.51
2.6	8.72	3.64	376.42	-60.80
2.7	8.12	3.50	376.59	-56.30
2.8	7.58	3.38	375.76	-54.41
2.9	7.09	3.26	375.98	-57.61
3.0	6.65	3.15	375.90	-58.26

Table 2. Optimization Results(Min(RCS))

t (mm)	ϵ_r'	ϵ_r''	RCS (dBsm)	Z_{in}
2.0	14.17	4.97	-50.65	362.63
2.1	12.89	4.74	-50.52	362.08
2.2	11.77	4.52	-50.60	362.44
2.3	10.80	4.33	-50.52	361.84
2.4	9.94	4.15	-50.62	361.80
2.5	9.19	3.98	-50.61	362.08
2.6	8.52	3.83	-50.65	361.74
2.7	7.93	3.69	-50.59	361.43
2.8	7.40	3.55	-50.63	362.14
2.9	6.92	3.43	-50.68	361.81
3.0	6.49	3.32	-50.67	361.23

에 근접하여 정합조건을 만족하였으며, 각 두께에서 반사계수는 모두 -50dB 이하로 계산되었다. 레이더반사면적을 목적함수로 사용한 경우에는 반사계수와 비교를 위하여 설계결과를 평판에 적용하여 입력임피던스를 계산한 결과, 입력임피던스는 앞전의 형상에 의한 영향으로 공기 중의 특성 임피던스와는 다소 차이가 있었지만, 레이더흡수구조는 높은 흡수 성능을 나타내어 앞전 부분 모델의 레이더반사면적은 모두 -50dBsm 이하로 계산되었다.

레이더흡수구조에 의한 날개의 레이더반사면적 감소성능을 평가하기 위해 Table 1, Table 2에 나타낸 최적설계 결과를 Fig. 3에 나타낸 날개 모델의 앞전에 적용하여 레이더반사면적을 계산한 최대값은 Table 3, Table 4와 같다. 날개의 레이더반사면적 계산을 위한 해석조건은 앞전 부분 모델에서의 경우와 동일하다. 계산 결과 반사계

수와 레이더반사면적을 목적함수로 사용한 경우 모두에서 레이더흡수구조를 앞전에 적용했을 때 날개 레이더반사면적은 -10dBsm 이하로 계산되었다. 이는 날개를 완전 전기전도체로 가정하여 계산했을 때의 값인 2.20dBsm 보다 12dBsm 이상 감소된 것이다. 레이더의 탐지거리는 레이더 반사면적 감소의 4승에 비례하여 축소되며, 10dBsm의 레이더반사면적 감소는 약 45%의 레이더 탐지거리 축소를 의미한다. 따라서 설계된 레이더흡수구조는 항공기 생존성 향상에 큰 효과를 가질 것으로 예상된다. 두 목적함수를 사용한 경우를 비교할 때 전체 결과에서 레이더반사면적을 목적함수로 한 경우에서 날개의 레이더반사면적이 약 0.6dBsm 이상 낮게 계산되었다. 이는 레이더흡수구조를 평판으로 가정하여 계산한 반사계수를 곡면인 날개의 앞전에 적용함으로써 발생하는 형상적인 영향에 의한 것으로 생각된다. 그러나 이러한 차이는 레이더흡수구조 제작시 발생하는 여러 불확실 인자를 고려할 때 무시할 수

있는 정도의 크기로 판단된다. 물리광학법을 사용하여 레이더흡수구조가 적용된 물체의 레이더 반사면적을 계산하기 위해서는 대상을 구성하는 모든 면(요소)에 대한 표면전류 및 반사계수를 계산해야 한다. 따라서 레이더반사면적의 계산 시간은 물체의 표면을 구성하는 면의 수에 따라 증가하며, 최적설계에 소모되는 시간 또한 늘어난다. 본 논문에서 사용된 앞전 부분모델은 24개의 면으로 구성되었기 때문에 레이더반사면적이 목적함수인 경우의 최적설계가 반사계수를 사용한 경우에 비하여 많은 시간이 소모되었지만, 두 경우에서 날개의 레이더반사면적 감소량은 많은 차이를 보이지 않았다. 따라서 설계된 레이더흡수구조의 성능 및 계산의 효율을 고려할 때 반사계수를 날개 앞전 레이더흡수구조의 최적설계를 위한 타당한 목적함수로 선정할 수 있었다.

동일한 재료를 사용하여 레이더흡수구조를 제작 할 경우 두께의 증가는 무게 증가를 야기한다. 항공기 설계에서 무게는 가장 중요한 고려 대상이며, 구조강도를 보장할 수 있을 경우 가장 가벼운 구조로 설계함이 바람직할 것이다. 설계된 레이더흡수구조에 대해 레이더파의 입사각에 따른 레이더 흡수성능을 평가하기 위하여 각 경우에서 설계된 결과 중 두께가 가장 얇은 2.0mm의 레이더흡수구조에 대하여 입사각을 변화시켜 계산된 날개의 레이더반사면적은 Fig. 7, Fig. 8과 같다. 계산 결과 설계된 레이더흡수구조는 넓은 입사각 범위에서 레이더 흡수성능을 나타내었으며, 각 경우에서 유사한 양상을 보였다.

III. 결 론

항공기 날개 앞전의 레이더흡수구조 설계를 위한 연구를 수행하였다. 이를 위해 반사계수와 레이더반사면적(RCS)을 각각 목적함수로 사용하여 최적설계를 수행하였으며, 설계된 레이더흡수구조를 날개 앞전에 적용한 후 계산된 레이더반사면적을 비교하여 레이더흡수 성능을 평가한 후 타당한 목적함수를 선정하였다. 연구결과 반사계수와 레이더반사면적을 목적함수로 사용하여 설계된 레이더흡수구조 모두에서 레이더반사면적 감소성능을 나타내었으며, 날개의 앞전을 평판으로 가정한 후 계산된 반사계수로도 뛰어난 성능의 레이더흡수구조를 설계할 수 있었다. 따라서 설계된 레이더흡수구조의 성능 및 계산의 효율을 고려할 때 반사계수가 날개 앞전 레이더흡수구조의 최적설계에 타당한 목적함수임을 결론지었다.

Table 3. Maximum RCS of RAS Wing(Min(Γ))

t (mm)	ϵ_r'	ϵ_r''	RCS (dBsm)
2.0	14.47	4.75	-10.49
2.1	13.16	4.52	-10.50
2.2	12.03	4.31	-10.50
2.3	11.04	4.12	-10.51
2.4	10.17	3.95	-10.52
2.5	9.40	3.79	-10.54
2.6	8.72	3.64	-10.55
2.7	8.12	3.50	-10.53
2.8	7.58	3.38	-10.53
2.9	7.09	3.26	-10.55
3.0	6.65	3.15	-10.56

Table 4. Maximum RCS of RAS Wing(Min(RCS))

t (mm)	ϵ_r'	ϵ_r''	RCS (dBsm)
2.0	14.17	4.97	-11.22
2.1	12.89	4.74	-11.17
2.2	11.77	4.52	-11.18
2.3	10.80	4.33	-11.15
2.4	9.94	4.15	-11.16
2.5	9.19	3.98	-11.15
2.6	8.52	3.83	-11.15
2.7	7.93	3.69	-11.12
2.8	7.40	3.55	-11.12
2.9	6.92	3.43	-11.12
3.0	6.49	3.32	-11.10

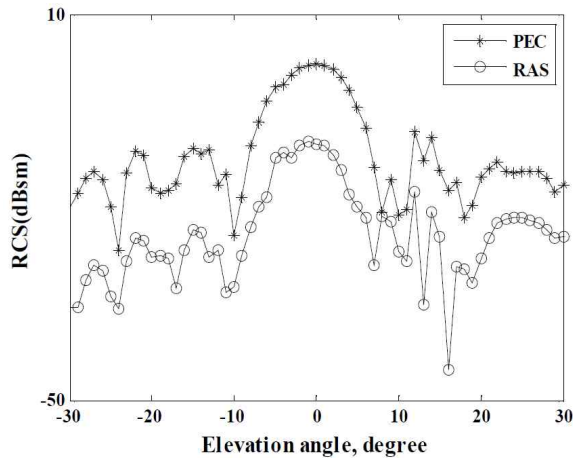
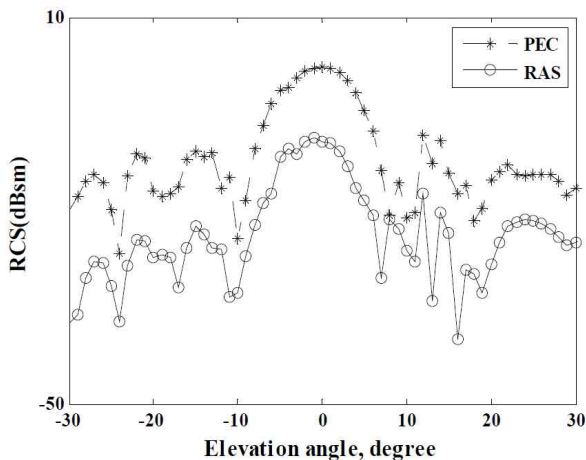
Fig. 7. RCS Plot(Min(I), 2.0mm)

Fig. 8. RCS Plot(Min(RCS), 2.0mm)

후 기

이 논문은 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다.

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, No. 3, 2005, pp.156~160.
- 3) 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, 2008, pp.2909~2916.
- 4) Chin, W. S., Lee, D. G., "Development of the composite RAS(radar absorbing structure) for the X-band frequency range," *Composite Structures*, Vol. 77, 2007, pp.457~465.
- 5) Naito, Y., Suetake, K., "Application of ferrite to electromagnetic wave absorber and its characteristics," *IEEE Trans on Microwave Theory and Technique*, Vol. 19, 1971, pp.65~72.
- 6) Musal, H. M., Hahn, H. T., "Thin-layer electromagnetic absorber design," *IEEE Trans on Magnetics*, Vol. 25, 1989, pp.3851~3853.
- 7) Weile, D. S., Michielssen, E., and Goldberg, D. E., "Genetic algorithm design of preto optimum broadband microwave absorbers," *IEEE Trans on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 38, 1996, pp.518~525.
- 8) Cheng, D. K., *Fundamentals of Engineering Electromagnetics*, Prentice Hall, 1992.
- 9) Collin, R. E., *Foundations for Microwave Engineering*, McGraw-Hill, 1992.
- 10) Kim, D. I., *Electromagnetic Wave Absorber*, Deayungsa, 2006.
- 11) Bennett, C. A., *Principles of Physical Optics*, Wiley, 2008.
- 12) Youssef, N. N., "Radar cross section of complex targets," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 77, 1989, pp.722~734.
- 13) 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, No. 4, 2005, pp.1~6.
- 14) Jenn, D. C., *Radar and Laser Cross Section Engineering*, AIAA Education Series, 2005.
- 15) Knott, E. F., Shaeffer, J. F., and Tuley, M. T., *Radar Cross Section*, Artech House, 1993.
- 16) Kim, J. B., "Design of microwave absorbing composite laminates by using semi-empirical permittivity models," Ph.D. Thesis, KAIST, 2007.