

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 46(4), 297-305(2018)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2018.46.4.297

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

IR 저감 설계가 무인전투기의 RCS에 미치는 영향

송동건*, 양병주*, 명노신**

Effects of IR Reduction Design on RCS of UCAV

Dong-Geon Song*, Byeong-Ju Yang* and Rho-Shin Myong**

School of Mechanical and Aerospace Engineering and ReCAPT, Gyeongsang National University*,**

ABSTRACT

The role of UCAV is to carry out various missions in hostile situations such as penetration and attack on the enemy territory. To this end, application of RF stealth technology is indispensable so as not to be caught by enemy radar. The X-47B UCAV with blended wing body configuration is a representative aircraft in which modern RCS reduction schemes are heavily applied. In this study, a model UCAV was first designed based on the X-47B platform and then an extensive RCS analysis was conducted to the model UCAV in the high-frequency regime using the Ray Launching Geometrical Optics (RL-GO) method. In particular, the effects of configuration of UCAV considering IR reduction on RCS were investigated. Finally, the effects of RAM optimized for the air intake of the model UCAV were analyzed.

초 록

UCAV는 적진 중심으로의 침투, 공격 등 적대적 상황에서 임무를 수행하는 것을 목표로 한다. 일차적으로 적의 레이더에 포착되지 않아야 하므로 RF 스텔스 기술의 적용이 필수적이다. 최신 RCS 저감 기술이 적용된 대표적인 비행체로는 Blended Wing Body 형태의 X-47B UCAV이다. 본 연구에서는 X-47B와 유사한 모델 UCAV 형상을 설계한 다음, Ray Launching Geometrical Optics(RL-GO) 기법을 활용하여 모델 UCAV의 고주파수 영역에서의 RCS 특성을 분석하였다. 특히 IR 저감이 고려된 UCAV 형상이 RCS에 미치는 영향성을 조사하였다. 마지막으로 모델 UCAV의 공기 흡입구에 최적화된 RAM을 적용하였을 때의 RCS 변화를 분석하였다.

Key Words : Unmanned Combat Aerial Vehicle(무인 전투기), Radar Cross Section(레이더 포착면적), Geometrical Optics(기하 광학법), Radar Absorbing Material(전파 흡수재료)

† Received : October 12, 2017 Revised : February 11, 2018 Accepted : March 8, 2018

** Corresponding author, E-mail : myong@gnu.ac.kr

I. 서 론

UAV(Unmanned Aerial Vehicle)는 조종사가 직접 탑승하지 않고 원격 또는 자동 조종이 가능한 비행체를 말한다. 특히, UAV 중 전투 임무 목적으로 설계한 무인 전투기인UCAV(Unmanned Combat Aerial Vehicle)는 적대적 환경 중에서도 극한 상황의 임무 수행이 가능하여 그 활용도가 증가하고 있는 추세이다[1-2].

그러나UCAV는 최신 레이더를 사용한 추적, ECM(Electronic Counter Measures), 지대공 미사일 등 위협에 노출되어 있다.UCAV는 이러한 위협 상황에서도 주어진 임무 수행이 가능해야하므로 스텔스 기술을 적용하여 높은 생존성을 확보해야 한다. 생존성이란 항공기가 모든 적대적 환경을 피하거나 타격을 견딜 수 있는 넓은 의미의 생존 능력[3]을 뜻하며, 스텔스 기술은 적의 레이더, 적외선 탐지 등 탐지에 대항하는 신호 저감, 재밍, 진술, 은폐, 위장 기능을 의미한다[4].

스텔스 성능을 향상시키는 대표적인 방법으로 두 가지 기술이 주로 사용된다. 센티미터 파장대의 RCS(Radar Cross Section; 레이더 포착면적) 감소 기술과 마이크로 파장대의 IR(Infrared; 적외선) 신호 저감 기술이다.

이 중 IR은 항공기로부터 배출되는 적외선 신호로써, 주요 발생 요소로는 엔진 및 노즐 표면, 엔진의 Plume 기체이다[5]. IR 저감으로는 노즐의 세장비 조절 방식과 배기덕트 곡률 적용 설계 방식이 있다. 세장비를 크게 하고 배기덕트의 곡률을 고려하여 설계할 경우 엔진이 직접적으로 노출되지 않는 효과가 있으며, 또한 노즐 하류의 Plume이 주위의 차가운 대기와 잘 혼합되므로 IR 신호를 상당히 감소시킬 수 있다. 그리고 IR 신호 감소 효과로 인해 열추적 미사일 등에 의한 탐지 가능성을 줄일 수 있다.

RCS는 물체의 표면에 부딪힌 전자기파를 반사시키는 양을 의미하며, 이를 줄이기 위해 다양한 방법들이 개발되어 있다. RCS 감소 기술 중 주로 사용되는 방법으로는, 위협 부분의 형상을 변경하여 레이더 반사 강도를 낮추는 형상화 기술이 있다. 다음으로는, 레이더 파를 흡수하여 레이더로 반사되는 에너지를 줄일 수 있는 RAM(Radar Absorbing Material; 전파흡수체)과 레이더 파를 흡수할 수 있는 구조인 RAS(Radar Absorbing Structure; 전파흡수구조) 방식이 있다. RCS 감소에 큰 영향을 미치는 요소는 형상이며, RAM의 경우 형상화로 비행체의 RCS를 일차적으로 낮춘 후 추가적으로 RCS를 감소시

키기 위한 부분에 주로 적용한다.

앞서 언급한 스텔스 성능에 관련하여 BWB 형태의UCAV에서 수직 미익 제거와 불연속면이 많이 존재하지 않는 이유는 형상화 기술 관점에서 RCS 감소를 위한 목적이 크다고 할 수 있다.

RCS 예측 기법으로는 Maxwell 방정식을 직접적으로 계산하는 Full-Wave 수치기법과 고주파 근사해석 기법으로 분류된다. Full-Wave 수치기법 중 하나인 MOM(Method of Moments)은 모든 산란 메커니즘 현상과 모든 주파수 영역에 대해 계산이 가능하다. 하지만 해석모델의 정확도는 매우 높은 반면, 많은 변수를 다루므로 계산 메모리 및 해석 시간이 막대하게 소요된다.

반면 고주파 근사해석 기법인 PO(Physical Optics)와 GO(Geometrical Optics)는 고주파수 영역이나 물체의 크기가 입사파의 파장에 비해 상대적으로 클 경우 적용되는 기법이다. 고주파수 영역에서 해석 결과의 신뢰를 보장할 수 있지만, 회절과 같은 특정 산란 현상을 반영하는데 한계가 있어 정확한 해석 결과를 도출하기 어려운 단점이 있다. 이러한 고주파 근사해석 기법들은 Full-Wave 수치기법에 비해 해석 시간이 적게 소요되므로 비행체 예비설계 단계에서의 RCS 해석 시 주로 사용된다[2].

현재UCAV의 RCS에 관한 연구는 활발히 진행되고 있다. 해외에서는 BWB(Blended Wing Body)UCAV의 생존성 및 스텔스 성능과 관련된 연구를 활발히 수행 중이다. 미국의 X-47 시리즈, 프랑스의 nEURON, 영국의 Taranis 등이 대표적이다. 스텔스 성능 향상을 위해 수직 미익 제거, 날개와 동체 사이의 불연속적인 면 감소, 각 모서리의 Angle-Alignment 등의 기술을 적용하였다[6-7]. 국내의 경우 전파흡수구조가 적용된 저피탐 형상에 대한 RCS 예측, RCS 감소 설계기법, 공력과 RCS 성능을 동시에 고려한 최적화, 비행체 통합설계를 위한 비행체 공력, 구조, RF 스텔스 통합 시스템 등에 관한 연구가 존재한다[1,8-10]. 특히, 최근에는 무인기를 포함한 전투기 설계 시, 공력-구조 측면의 설계뿐만 아니라, 생존성으로 인해 스텔스 기술이 주요 설계 요소로 부각되고 있으므로 통합 시스템 설계가 중요시 되고 있다.

본 연구에서는 FEKO 소프트웨어를 활용하여 저피탐UCAV 비행체 중 하나인 X-47B의 유사 형상에 대해 고주파(10 GHz) 영역에서 RL-GO(Ray Launching Geometrical Optics) 기법을 적용하여 실제 크기의 1/2인 형상인 모델UCAV의 RCS 특성을 분석하고자 한다. 또한 IR 저감을

위한 설계가 RCS에 미치는 영향을 파악하기 위해, IR 저감 노즐과 추가적인 IR 감소를 위한 후방 Plate 적용 형상에 대하여 RCS 해석을 수행한다. 마지막으로 공기 흡입구에 RCS 감소 기술인 RAM을 적용하였을 때의 RCS 감소 효과를 확인하고자 한다.

II. RCS 해석기법

2.1 모델 UCAV 형상 설정

본 연구에서는 Northrop Grumman의 X-47B 형상을 참조하여 시험용 모델 UCAV를 설계하였다. X-47B는 다양한 저피탐 요소(수직 미익 제거, 불연속적인 면 최소화, 각 모서리의 Angle - Alignment 적용)들이 반영된 BWB 형태의 UCAV이다. Fig. 1의 X-47B 유사 모델은 실제 크기에서 1/2로 축소한 모델로, 동체 길이는 약 5.9 m, 날개 길이는 약 9.5 m로 설계하였다. 그리고 X-47B의 전방 RCS를 감안하여 공기 흡입구를 S-Duct 구조로 설계하였으며, 엔진 내부 파트는 형상의 복잡성과 해석 시간이 길어지는 어려움으로 인해 구현하지 않았다.

그리고 X-47B 모델 UCAV에서 형상 변경에 대한 RCS 해석을 수행하기 위해 날개의 Sweep Angle을 변경하였으며, IR 저감을 위한 노즐 또는 후방동체 형상의 변화가 RCS에 미치는 영향을 분석하기 위해 원형 노즐이 아닌, 세장비와 곡률이 반영된 변형 노즐과 노즐 후방 Plate를 적용하였다.

2.2 해석기법 검증 및 RCS 해석

2.2.1 전산 해석 기법

모델 UCAV에 대한 RCS를 해석하기 위해 Altair사의 FEKO 소프트웨어를 사용하였다. FEKO는 다양한 형상, 특정 면에 대한 유전체 적용 등 여러 유형에 대한 전자기적 해석이 가능하다. FEKO에서 지원하는 대표적인 해석 Solver로

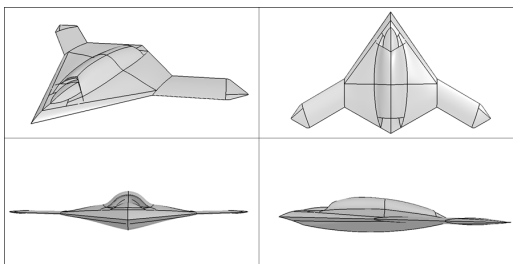


Fig. 1. A model UCAV based on the X-47B

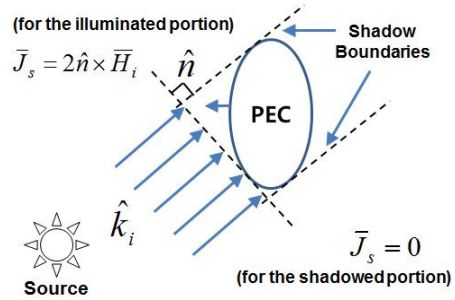


Fig. 2. Principle of the physical optics approximation

는 Full-wave 수치기법인 MOM (MLFMM), 고주파 근사해석 기법인 PO와 RL-GO가 있다.

본 연구에서는 10 GHz 고주파수 광학 영역에서 모델 UCAV의 RCS를 해석하기 위해 PO와 RL-GO 기법을 활용하였다.

Figure 2는 PO 기법의 원리를 나타내며, PO 기법은 입사장(Incident Field)과 경계조건에 의해 물체의 표면에 생성되는 Current를 통해 Maxwell 방정식의 적분형인 Stratton-Chu 방정식을 기반으로 직접 RCS를 계산한다. 물체가 PEC (Perfect Electric Conductor)일 때, 물체 표면에서의 Current (\vec{J}_s)는 아래와 같이 식 (1)처럼 근사시킬 수 있다.

$$\vec{J}_s = \begin{cases} 2\hat{n} \times \vec{H}_i, & \text{반사 영역} \\ 0, & \text{그늘 영역} \end{cases} \quad (1)$$

이 식에서 \hat{n} 은 표면의 법선방향 벡터, \vec{H}_i 는 입사 자기장(Incident Magnetic Field)을 나타낸다.

그리고 RCS (σ)는 물체와 레이더 사이의 거리인 r 이 무한대로 표현할 때 아래의 식 (2)처럼 나타낼 수 있다.

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

RCS 근사 해석기법 중 다른 하나인 GO 기법은 일반적으로 Ray Optics라 하며 Ray Tracing과 Ray Launching의 방식이 있다. Ray Tracing은 출발점이 수신기 또는 관측점이며 벽, 건물의 반사를 분석하여 광원의 경로를 찾는 방식이다. 반면 Ray Launching은 광원으로부터 여러 광선이 출발하므로, 수신기 또는 관측점에 도달 할 때까지 독립적으로 추적하는 방식이다[11].

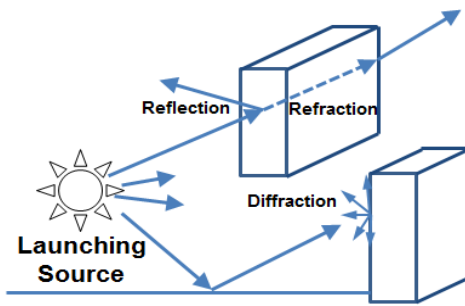


Fig. 3. Principle of the Ray Launching Geometrical Optics

RL-GO은 Fig. 3과 같이 빛의 전파, 반사 및 굴절 이론에 따라 물체를 모델링하는 SBR (Shooting and Bouncing Rays) 기반이며, 전기적으로 큰 물체의 문제를 해결하는데 적합하다 [12].

RL-GO는 SBR 방식으로 인해 임의의 수에 대한 다중 반사 문제를 해결할 수 있어 매우 효율적이며, Cavity 문제와 같이 다중 반사가 발생하는 경우에도 해석의 정확도가 높은 편이다.

2.2.2 RCS 해석 프로그램 및 기법 검증

FEKO 소프트웨어를 활용하기 전, 본 연구에서 다루는 RCS 예측 문제에 대해 검증하기 위해 일차적으로 구 형상에 대한 RCS 해석을 수행하였다. 해석 조건은 Monostatic 레이더, 주파수 1-2 GHz, 반지름 1m로 설정하였다.

Figure 4는 구 형상에 대해 MLFMM, RL-GO, PO 기법을 이용한 RCS 해석 결과를 비교하였다. 2 GHz를 기준으로 Mesh를 생성하였으며, MLFMM과 PO 기법의 경우 약 95,600개, RL-GO 기법의 경우 약 5,800개의 Mesh로 구성하였다. 일반적으로 구의 RCS 값은 주파수가 증가할수록 구의 단면적의 크기에 수렴한다. 즉, 구의 반지름이 1일 경우 RCS는 3.14m^2 (4.97dBsm)에

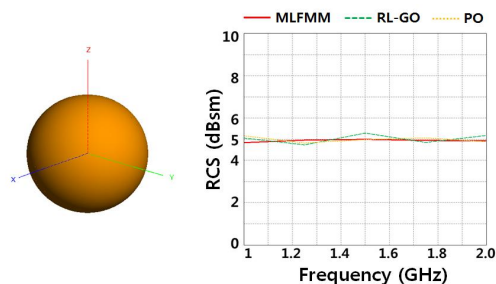


Fig. 4. Verification of RCS analysis method (Sphere)

Table 1. Analysis conditions for 1 GHz case

Parameters	Conditions
Frequency	1 GHz
Surface Condition	PEC
Azimuth Angle	$0^\circ - 360^\circ$ (Interval 1°)
Elevation Angle	0°
Number of Mesh (MLFMM)	89,848
Number of Mesh (RL-GO)	30,488
Number of Mesh (PO)	279,362
Number of Mesh (PO with Inlet Blocked)	272,078

접근한다. 시뮬레이션 결과, MLFMM, RL-GO, PO 기법 모두 RCS 해석 값이 5dBsm 수준으로 유사하게 나타났다.

다음으로 Full-Wave 기법과 고주파 근사해석 기법을 활용한 해석 결과를 비교, 검증하였다. 해석 대상은 S-Duct 공기 흡입구와 IR 저감 노즐이 장착된 X-47B 형태의 모델 UCAV이며, 해석 조건은 Table 1에 나타내었다. MLFMM과 RL-GO, PO 기법 (Inlet이 존재하는 경우와 Inlet을 평평한 면으로 대체한 경우(Inlet Blocked)) 적용 시 컴퓨터의 Core, 메모리, 해석 시간을 고려하여 공기 흡입구와 노즐 부분의 Local Mesh 크기를 조절하였다.

Figure 5는 주파수가 1 GHz 영역일 때, MLFMM, RL-GO, PO 기법을 적용한 RCS 해석 결과를 비교한 그래프이다. MLFMM 기법의 경우 전방 S-Duct 공기 흡입구와 Nose 끝단에 의한 Diffraction 효과까지 모두 해석되어 RCS가 높게 예측되었다. 반면 PO 기법의 경우, 모서리 부분에서 발생하는 회절 현상과 같은 전자파 산란 해석이 어려우며, 또한 공기 흡입구(0°)는 S-Duct 구조로 인해 Inlet 평판이 직접적으로 노출되지 않아 Specular Reflection이 감소하여 RCS 결과가 낮게 예측되었다. 그리고 Cavity 입구를 평판으로 대체한 형상(PO; Inlet Blocked)의 경우에도, 평판 Specular Reflection에 의한 RCS만 $-45^\circ \sim +45^\circ$ 영역에서 높게 예측되어 MLFMM과 비교하였을 때 낮은 정확도를 나타내었다. 그러나, RL-GO 기법의 경우 회절 현상과 같은 산란 현상 해석은 어려우나 Cavity 형상에 대한 근사해석이 가능하므로 PO 해석에 비해 높은 RCS 결과를 예측하였다. 추가적으로 측, 후방 영역($120^\circ \sim 240^\circ$)에서도 PO 기법은 MLFMM 기법의 경향과 유사하지도

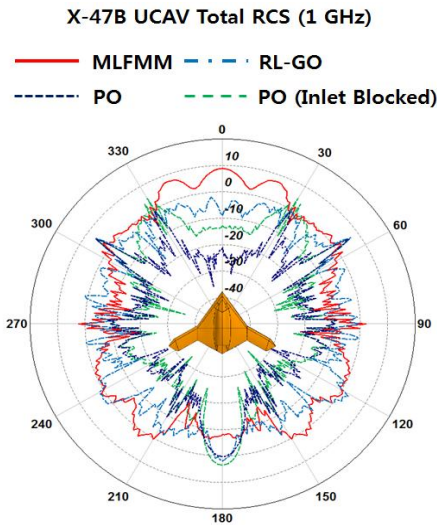


Fig. 5. Comparison of various RCS analysis methods (1 GHz)

않으며 결과의 차이 또한 크게 나타난다. 그러나 RL-GO 기법의 경우 또한 근사기법이므로 결과에 선 조금 차이가 존재하나 MLFMM 기법과 비교하였을 때 유사한 경향성을 나타내므로 적용에 무리가 없다고 판단된다. 특히 MLFMM 기법 적용 시 소요되는 시간에 비해 RL-GO 기법은 매우 효율적으로 해석 시간 단축이 가능하므로, 본 연구에서는 RL-GO 기법을 적용하여 X-47B 모델 UCAV의 RCS를 해석하였다.

2.2.3 RCS 해석용 모델 UCAV 종류

Figure 6은 RCS 해석에 사용된 모델 UCAV의 여러 형상을 보여준다. 최초 모델 UCAV 형상인 A, 날개의 Sweep Angle이 변경된 B, 후방 동체에 Plate를 추가한 C, IR 저감 노즐이 아닌 원형 노즐을 장착한 D 형상들을 고려하였다. B 형

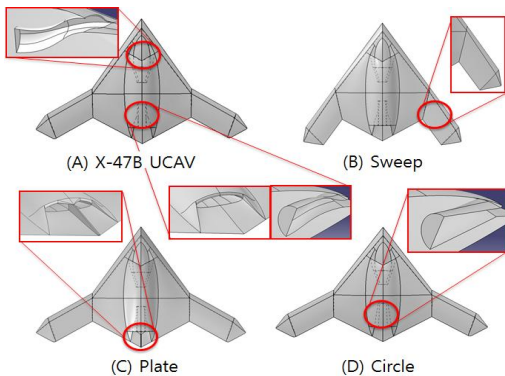


Fig. 6. Different configurations of a X-47B model UCAV

Table 2. Analysis conditions for 10 GHz case

Configurations	Number of Mesh
A	74,406
B	77,446
C	69,384
D	76,352

상의 경우, 기존의 모델 UCAV의 날개에 Sweep Angle을 변경하여 동체와 날개의 각이 같도록 변경해 앞전에 의한 RCS Spike가 기존 형상보다 측면 영역에서 생성되도록 설계하였다. C 형상은 IR 저감 노즐에서의 Plume 적외선 신호를 저감시키기 위해 후방 동체의 노즐 출구 부분에 Plate를 추가한 것으로, IR 저감을 위한 형상 변형이 RCS에 미치는 영향을 확인하고자 하였다. 모델 UCAV A, B, C의 모든 노즐 형상은 An의 논문[13]의 “IR 저감 노즐” 형상과 유사하게 노즐 입구 평판이 후방에서 최대한 노출되지 않도록 설계하였으며, 길이 방향으로 곡률이 적용되고 출구는 세장비가 큰 타원형으로 설계하였다. 마지막으로, D는 IR 저감 설계 노즐 자체가 RCS에 미치는 영향을 파악하고 RCS를 비교하기 위해 일반 원형 노즐을 설계하였다.

Table 2는 모델 UCAV의 RCS 계산에 사용된 격자 수를 나타내며, 주파수와 격자 수를 제외한 나머지 조건은 Table 1과 동일하다.

III. 모델 UCAV의 RCS

3.1 모델 UCAV 형상별 RCS 변화

Figure 7은 RL-GO 기법을 활용하여 모델 UCAV 및 형상 변형에 대한 Total RCS 해석 결과를 나타내었다. UCAV 공기 흡입구 부분(0°)은 Fig. 6의 S-Duct 형태로 흡입구 평판이 정면에 노출되지 않아 평판에 의한 Specular Reflection이 감소되었다. Figs. 8-11의 전방 영역(315°-45°)을 확인하였을 때 Median RCS는 약 0dBsm 수준으로, 전방 Mean RCS(약 -2dBsm)와 큰 차이를 보이지 않았다.

모델 UCAV의 측면(90°, 270°)의 경우, C 형상은 IR 저감 설계를 위해 추가된 Plate의 평평한 옆면으로 인해 Specular Reflection이 추가적으로 발생하였다. 그로 인해 A, B, D 형상의 Median RCS 예측 결과인 -2, -4, -2dBsm 수준에 비해 상대적으로 높은 결과인 16dBsm 수준으로 예측되었다. 그리고 Figs. 8-11의 Side 영

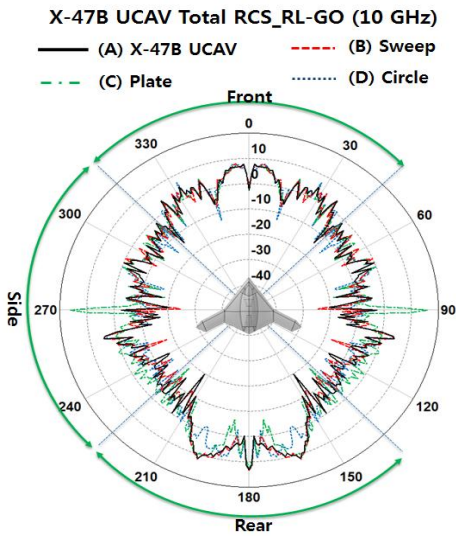


Fig. 7. Comparison of RCS of different configurations of a model X-47B UCAV using RL-GO method (10 GHz)

역(225°-315°)에서 C 형상은 Median RCS(270°) 뿐만 아니라 Mean RCS(약 -4.6dBsm) 또한 타 형상(A, B, D는 약 -7dBsm)에 비해 조금 높게 예측됨을 확인하였다. 한편 B 형상의 경우 Mean RCS는 A와 유사하지만 Median RCS에서 약 2.1 dBsm 수준의 차이가 발생함을 확인하였다. 이는 A 형상 중 동체-날개의 각도 변경으로 인해 EM Boundary의 변화가 발생하였으며, 결과적으로 RCS가 증가했다고 판단된다.

모델 UCAV의 후방(180°)은 전방의 공기 흡입구와 달리, 노즐 내부 평판이 후방에서 관측될 경우 직접 포착되므로 Specular Reflection에 의한 반사가 많이 발생한다. Figs. 8-11과 같이 Median RCS가 13dBsm 수준으로 다른 영역의 RCS 결과에 비해 높게 예측되었다. 그리고 IR 저감을 위한 설계 요인(노즐 형상 변경, 후방 동체 변경)이 RCS에 어떤 영향을 미치는지 파악하기 위해 A, C, D 형상을 비교하였다. Fig. 7 C의 후방부 영역 중 일부(170°-190°)에서 Plate와 노즐 내부에서의 다중 반사로 인해 노즐 내부로부터 반사되어 나오는 레이더 파 수준이 A에 비해 상대적으로 적어 Mean RCS가 더 낮게 예측되었다고 판단된다. 또한, A와 D 형상 비교시 IR 저감 노즐이 일반 원형 노즐에 비해 RCS가 더 높게 측정되었는데, 이는 IR 저감 노즐 내부의 표면 곡률 변화와 불규칙하게 발생한 다중 반사로 인해 RCS가 증가되었다고 판단된다. 이로부터

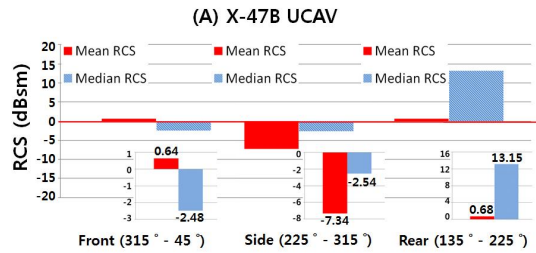


Fig. 8. Diagrams of mean and median RCS of a model X-47B UCAV (10 GHz)

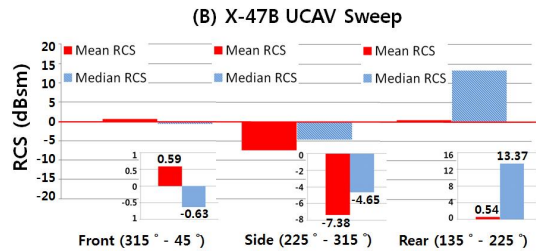


Fig. 9. Diagrams of mean and median RCS of a model X-47B UCAV (Sweep; 10 GHz)

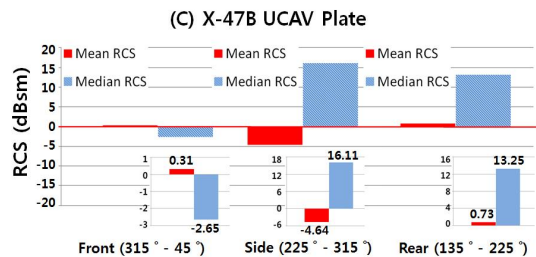


Fig. 10. Diagrams of mean and median RCS of a model X-47B UCAV (Plate; 10 GHz)

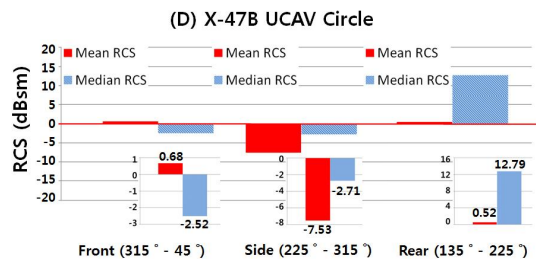


Fig. 11. Diagrams of mean and median RCS of a model UCAV (Circle; 10 GHz)

터 IR 저감 형상은 RCS를 증가시키는 효과를 야기할 수 있으므로, 목적에 따라 IR과 RCS를 종합적으로 고려한 후 형상 설계를 진행해야 할 것으로 판단된다.

3.2 RAM 적용 효과

다음으로는, 모델 UCAV에 RAM 적용과 미적용에 따른 RCS 해석 결과를 비교하였다. 본 연구에서 사용된 RAM의 물성치는 Table 3의 MnZn Ferrite와 Optimum RAM에 정리하였다.

첫 번째 RAM은 Gama의 논문[14]의 “MnZn Ferrite”이며, 실제 Ferrite의 Permittivity(유전율, ϵ)와 Permeability(투자율, μ) 중 10 GHz에서의 해당되는 물성치를 사용하였고, Coating의 두께는 3mm로 적용하였다.

두 번째 RAM인 “Optimum RAM”은 Musal의 논문[15]의 Universal Design Chart를 활용하여 RAM의 이상적인 μ 를 이론적으로 도출하였다. Coating 두께는 동일하게 3mm로 설정하고, 해당 ϵ 과 두께/파장 비를 계산하여 MnZn Ferrite 계열 RAM의 이상적인 μ 의 물성치를 도출하였다. Fig. 12의 Universal Design Chart는 ϵ 의 실수, 허수 값 그리고 파장, 두께를 통해 이상적인 μ 의 실수, 허수 값을 도출하는 설계 방법이다.

나아가 총 6개의 변수를 간단히 4개 변수로 정리한 후 (t/λ) , ϵ 의 실수, 허수 값을 정리하면 아래와 같다.

$$t/\lambda = 0.1, \text{Re}(\epsilon) = 6.45, \text{Im}(\epsilon) = 0.48,$$

$$(t/\lambda) \text{Re}(\epsilon) = 0.645, \tan\delta_\epsilon = \frac{\text{Im}(\epsilon)}{\text{Re}(\epsilon)} = 0.074$$

위 결과를 Universal Design Chart에 적용하면, RAM의 이상적인 μ 를 도출할 수 있다.

$$(t/\lambda) \text{Re}(\mu) = 0.081, (t/\lambda) \text{Im}(\mu) = 0.045$$

Table 3. Physical properties of RAM (10 GHz)

	Parameters	Number
MnZn Ferrite	Real Component of ϵ (ϵ')	6.45
	Imaginary Component of ϵ (ϵ'')	0.48
	Tangent Loss of ϵ , $\tan\delta_\epsilon$	0.074
	Real Component of μ (μ')	0.83
	Imaginary Component of μ (μ'')	0.17
Optimum RAM	Tangent Loss of μ , $\tan\delta_\mu$	0.205
	Real Component of ϵ (ϵ')	6.45
	Imaginary Component of ϵ (ϵ'')	0.48
	Tangent Loss of ϵ , $\tan\delta_\epsilon$	0.074
	Real Component of μ (μ')	0.81
	Imaginary Component of μ (μ'')	0.45
	Tangent Loss of μ , $\tan\delta_\mu$	0.556

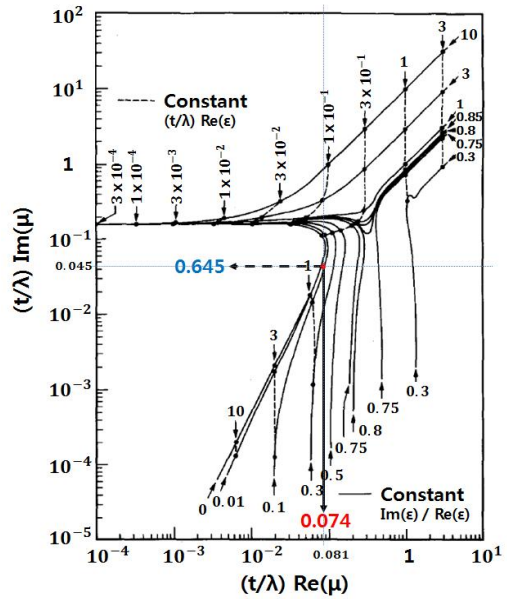


Fig. 12. Universal design chart for zero specular reflection absorber layer($Z_{load} = 0$)[15]

Figure 13은 X-47B 형태의 모델 UCAV의 공기 흡입구에 RAM Coating 적용 여부에 따른 RCS 해석 결과를 나타낸다. MnZn Ferrite RAM을 적용한 형상은 미적용 형상에 비해 전체 RCS가 약 6.7dBsm 감소하였으며, Optimum RAM 적용 형상은 약 8.4dBsm까지 감소하였다.

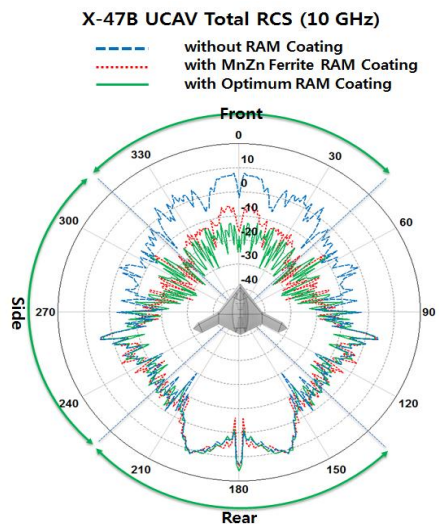


Fig. 13. Comparison of RCS with/without RAM coating using RL-GO method (10 GHz)

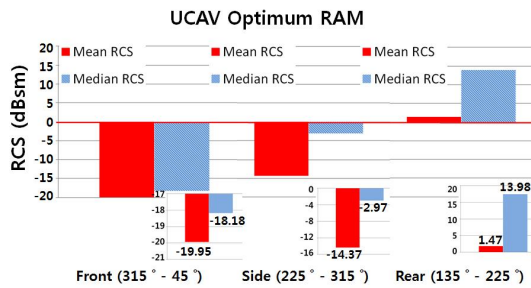


Fig. 14. Diagrams of mean and median RCS of a model X-47B UCAV (optimum RAM; 10 GHz)

Figure 14는 Optimum RAM을 적용하였을 때의 RCS 예측 결과를 막대 차트로 표현하였다. 전방 Median RCS는 -18dBsm 수준으로 매우 큰 감소 효과를 나타내었다. 그리고 Cavity와 같이 다중 반사가 발생하는 공간에서의 RAM 적용은 반사되어 나오는 레이더 파를 더욱 흡수할 수 있으므로 RCS 감소에 큰 영향을 미침을 확인하였다.

Figure 15는 RAM Coating 적용 유무에 따른 막대 차트를 나타내며, MnZn Ferrite RAM의 경우는 RAM 미적용 형상의 전방 Mean RCS (약 0dBsm)에 비해 약 14dBsm로 감소하였고 Optimum RAM의 경우 약 20dBsm 수준으로 매우 크게 감소하였다. 그리고 Side 영역 또한 MnZn Ferrite RAM과 Optimum RAM의 Mean RCS는 RAM 미적용 형상의 Mean RCS에 비해 약 -7 dBsm 감소하여, 공기 흡입구에만 RAM을 적용 하더라도 전체 RCS 감소에 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다.

IV. 결 론

본 연구는 RL-GO 기법을 적용하여 X-47B 모델 UCAV 형상과 IR 저감에 고려된 변형 형상에 따른 RCS 해석을 수행하였다. MLFMM, RL-GO, PO 기법을 비교하였을 때, RL-GO 기법은 RCS 해석 결과 MLFMM 기법과 유사한 경향성을 도출하였다. 또한 시간적 측면에서도 PO 기법 해석 속도와 차이가 크지 않으므로 초기 비행체 설계에 효율적임을 확인하였다. 모델 UCAV 형상은 입사파를 기준으로 수직인 면이 거의 존재하지 않으므로 Specular Reflection에 의한 RCS가 대폭 감소하였고, 날개와 동체 사이의 불연속적인 면을 줄여 EM Boundary의 변화를 감소시켰으므로 RCS의 발생 요소가 대폭 감소하여 일반 비행체에 비해 전반적으로 낮은

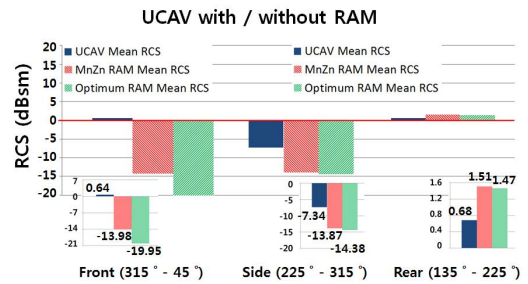


Fig. 15. Diagrams of mean RCS of a model X-47B UCAV with/without RAM (10 GHz)

RCS가 예측되었다.

모델 UCAV 형상에 대한 RCS 해석 결과, 기본 형상은 -3dBsm 수준의 Mean RCS 결과가 도출되었다. 그리고 Sweep Angle이 적용된 형상 또한 기본 형상과 유사하게 -3dBsm 수준의 Mean RCS 결과가 도출되었다. 또한 Plate를 적용한 형상의 경우 평균 -2dBsm, 원형 노즐의 경우 -3dBsm의 RCS 결과가 도출되었다. IR 저감 형상의 경우, 전체 RCS에는 큰 영향을 미치지 않지만 노즐 곡률 변화와 다중 반사, IR 저감을 위한 Plate 설계 등으로 인해 측면 및 후방 RCS에 적지 않은 영향을 미치는 것으로 확인하였다. 이는 스텔스 전투기 설계 시 초기설계 단계에서 IR과 RCS 종합적으로 고려해야 함을 의미한다.

마지막으로 실제 적용되고 있는 RAM 중에 하나인 MnZn Ferrite의 두께, ϵ , μ 의 물성치를 적용한 경우와 RAM의 두께 및 ϵ , Universal Design Chart를 통해 최적화된 μ 를 도출한 후 공기 흡입구 부분에 적용한 경우를 함께 고려하였다. 각각 평균 -10.1, -11.8dBsm 수준의 RCS 결과가 도출되었다. 이는 Cavity가 포함된 구성품에 RAM을 적용한다면 큰 RCS 감소 효과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 또한 RAM을 적용하고자 한다면 Universal Design Chart를 통해 최적화된 Coating 두께를 찾는 것이 중요하다고 판단된다. 그러나 Chart를 이용한 RAM 설계는 특정 주파수 영역에 대해서만 RCS 감소에 효과적이므로, 다양한 주파수 영역에 적용이 가능한 Broadband RAM 연구도 추가적으로 필요하다고 할 수 있다.

그리고 실제 비행체에 대해 정확한 RCS를 측정하기 위해선 Elevation Angle이 고려되어야 한다. X-47B의 운용 고도는 약 12.8km (42,000ft)이며, X-47B의 평균 RCS가 -3dBsm 수준이라고 가정한다면 탐지 거리는 148km로, Elevation

Angle은 약 5° 로 도출되어 정밀한 RCS 해석 시 계산에 반영해야 할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2015년 교육부와 한국연구재단의 지역혁신창의인력양성사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (NRF-2015H1C1A1035655)

References

- 1) Jo, Y. M., and Choi, S. I., "Shape Optimization of UCAV for Aerodynamic Performance Improvement and Radar Cross Section Reduction," *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol. 17, No. 4, 2012, pp. 56-68.
- 2) Myong, R. S., and Cho, T. H., "Development of a Computational Electromagnetics Code for Radar Cross Section Calculations of Flying Vehicles," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 33, No. 4, 2005, pp. 1-6.
- 3) Son, M. H., "Core Technologies of High-Performance Tactical Aircraft: Combat Survivability and Stealth Technology," *The Journal of Aerospace Industry*, Vol. 75, 2012, pp. 57-97.
- 4) Knott, E. F., Shaeffer, J. F., and Tuley, M. T., *Radar Cross Section*, 2nd Ed., SciTech Publishing Inc., Boston, 2004.
- 5) Mahulikar, S. P., Prasad, H. S. S. and Rao, G. A., "Infrared Signature Studies of Aerospace Vehicles," *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 43, 2007, pp. 218-245.
- 6) Johnston, L. J., "Predicting the Maximum-Lift Performance of Unmanned Combat Air Vehicle Planforms Using the Euler Equations," *Proceeding of the EUCASS 2013 Conference*, 2013, pp. 1-4.
- 7) Zikidis, K., Skondras, A., and Tokas, C., "Low Observable Principles, Stealth Aircraft and Anti-Stealth Technologies," *Journal of Computations & Modelling*, Vol. 4, No. 1, 2014, pp. 129-165.
- 8) Lee, W. J., Baek, S. M., Choi, K. S., and Joo, Y. S., "A Study on RAS Application for Stealth Aircraft," *Proceeding of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Spring Conference*, April 2016, pp. 130-131.
- 9) Lee, W. J., Choi, K. S., Baek, S. M., and Joo, Y. S., "A Study on the EM Wave Absorber with Directive Periodic Pattern for Stealth Aircraft," *Proceeding of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Fall Conference*, November 2015, pp. 122-125.
- 10) Park, M. J., Lee, D. H., Myong, R. S., and Cho, T. H., "An Integrated System for Aerodynamic, Structural, and RF Stealth Analysis of Flying Vehicles," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 36, No. 1, 2008, pp. 86-91.
- 11) Ahmed K., *Electromagnetic Waves Propagation in Complex Matter*, 1st Ed., InTech., 2011.
- 12) *FEKO Comprehensive Electromagnetic Solutions*, User's Manual, Suite 14.0, Altair, 2015.
- 13) An, S. Y., Kim, W. C., and Oh, S. H., "A Study on the Effect of Engine Nozzle Configuration on the Plume IR Signature," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 40, No. 8, 2012, pp. 688-694.
- 14) Gama, A. M., Rezende, M. C., and Dantas, C. C., "Dependence of Microwave Absorption Properties on Ferrite Volume Fraction in MnZn Ferrite/Rubber Radar Absorbing Materials," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 323, 2011, pp. 2782-2785.
- 15) Musal, H. M. Jr., and Smith, D. C., "Universal Design Chart for Specular Absorbers," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 26, No. 5, 1990, pp. 1462-1464.