



J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 52(10), 825-834(2024)

DOI: <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2024.52.10.825>

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

편대 비행하는 비행체의 거리와 대형 변화에 따른 RCS

조성진¹, 박보근², 최수민³, 명노신⁴

RCS of Vehicles Flying in Formation with Changes in Distance and Configuration

Seong Jin Jo¹, Bo Geun Park², Su Min Choi³ and Rho Shin Myong⁴

School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, Republic of Korea

ABSTRACT

Recently research on Manned-Unmanned Teaming (MUM-T) that integrates manned and unmanned aircraft systems is attracting attention. MUM-T has the advantage of increasing operational efficiency by expanding the operational capabilities of manned aircraft and enabling the performance of various missions such as surveillance and gunfire support through unmanned aircraft. However, the increase in susceptibility due to changes in radar cross section (RCS) due to the operation of multiple aircraft affects the survivability of the aircraft. In this study, we analyzed the RCS of vehicles flying in formation with changes in distance and configuration using simple shapes. A commercial software FEKO's physical optics code was used to compute RCS in the high-frequency regime. Assuming vehicles were flying at the same altitude, the effect of formation configuration was more important than the number of aircraft and lateral/longitudinal distance.

초 록

최근 유인 항공기 시스템과 무인 항공기의 통합 운용하는 Manned-Unmanned Teaming(유무인 복합 운영체계; MUM-T)에 대한 연구가 주목받고 있다. MUM-T는 유인 항공기의 운용 능력을 확장하고, 무인 항공기를 통한 정찰 및 화력 지원 등 다양한 임무 수행을 가능하게 함으로 작전 효율성을 증대시키는 이점을 가진다. 그러나 MUM-T에서 여러 항공기가 편대를 이루어 비행할 때 발생하는 전자파 간섭은 레이더 포착 면적(Radar Cross Section; RCS)의 변화로 인한 피탐지성의 증가로 이어져 항공기의 생존성에 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 단순 형상을 활용하여 편대비행 중인 비행체의 거리와 형태에 따른 RCS 변화를 분석하였다. 고주파 영역에서의 RCS 해석에는 상용 소프트웨어인 FEKO의 Physical Optics 기법을 활용하였다. 형상의 개수, 형상 간 사이 거리, 편대 대형을 주요 변수로 고려하였다. 동일 고도에서 비행한다고 가정했을 때, 비행체의 개수와 횡·종 거리보다는 대형의 효과가 가장 중요하게 나타났다.

Key Words : Manned Unmanned Teaming(유무인 복합 운영체계), Formation Flight(편대비행), Radar Cross Section(레이더 포착 면적), Physical Optics(물리광학)

1. 서 론

군용 항공기는 전술적 측면과 임무 수행 효율성을 고

려하여 편대로 비행할 경우가 있다. 또한 최근에는 4차 산업혁명으로 인한 인공지능(AI) 기술이 발달함에 따라 이를 활용한 새로운 무기 체계 중에 하나로 편대비행이

+ Received : April 10, 2024 Revised : August 1, 2024 Accepted : August 16, 2024

¹⁻³ Graduate Student, ⁴ Professor

⁴ Corresponding author, E-mail : myong@gnu.ac.kr, ORCID 0000-0002-1424-6728

© 2024 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

고려되고 있다. 그 대표적인 사례가 유무인 복합 운영 체계(Manned Unmanned Teaming; MUM-T)이다[1,2]. 무인체계의 발전은 무인체계만의 독자적인 임무 수행뿐만 아니라 유인 체계와 합동작전을 통한 운영 능력을 확장하고, 정찰 및 화력 지원 등 다양한 임무 수행을 가능하게 함으로 작전 효율성 증대에 이점을 가진다. 전투기간의 MUM-T는 유무인기를 통합으로 운영하며, 주로 편대를 이루어 비행한다. 복수의 항공기가 편대를 이루어 비행을 하게 되면 레이더 포착 면적(Radar Cross Section; RCS)에 대한 변화가 발생하고 이는 항공기의 생존성에 대한 영향을 미친다.

항공기의 생존성이란 항공기가 적대적 환경을 피하거나 타격에 대한 저항력을 가지는 생존 능력을 의미한다[3]. 항공기의 생존성을 높이는 스텔스 기술은 넓은 의미에서 적군의 레이더, 적외선 탐지, 음향 탐지 및 육안에 의한 탐지까지를 포함한 모든 탐지 기능에 대항하는 기술을 포괄적으로 의미하며, 좁은 의미에서는 적군의 레이더망에 포착되지 않는 기술을 의미한다[4].

스텔스 성능을 향상시키는 대표적인 기술로는 두 가지 방법이 주로 사용된다. 센티미터 파장 대역의 RCS를 감소시키는 방법과 마이크로 파장대의 적외선(Infrared; IR) 신호를 저감시키는 방법이다[5].

이 중 IR 신호는 항공기로부터 배출되는 적외선 신호이며, 주로 엔진과 노즐 표면, 엔진의 Plume 기체에서 발생한다. IR 신호 저감 방법으로는 주로 노즐의 세장비 조절과 배기 덕트의 곡률 적용 설계 방식이 있다[6-8].

RCS는 레이더의 입사파가 항공기의 표면에 반사되는 양을 나타내며, 이를 최소화하는 방법으로는 항공기 외형 변화, 전자파 흡수재료(Radar Absorbing Material; RAM) 및 구조(Radar Absorbing Structure; RAS)를 통해 주로 이루어지고 있다[9-11]. 그러나 MUM-T에서 여러 항공기가 편대를 이루어 비행할 때 발생하는 전자파 간섭은 RCS의 변화를 야기할 수 있다. 따라서 이러한 변화를 파악하는 것이 항공기 생존성을 향상시키는 중요한 요소가 된다.

본 연구에서는 Sphere와 Almond 형상을 이용하여 편대비행을 하는 항공기들의 거리와 대형 조건에 따라 RCS의 변동성을 분석하였다. RCS 해석은 상용 소프트웨어인 Altair사의 FEKO를 사용하였고, Maxwell 방정식 근사적 해석기법인 PO(Physical optics) 기법을 활용하여 고주파 영역에서의 RCS 변동성을 분석하였다. RCS의 해석은 형상의 개수, 사이 거리, 대형에 따라 분석을 수행하였으며, 형상의 개수는 1~4개, 형상 간 사이 거리는 형상의 길이에 따라 좌우 간격 0~4D, 앞뒤 간격 0~4L 대형은 일렬횡대 대형, V 대형, Diamond 대형에 대한 RCS 변동성을 분석하였다.

II. RCS 해석기법

2.1 RCS 정의

레이더 포착 면적(Radar Cross Section; RCS)은 레이더로부터 발신된 입사파가 표적에 의해 산란되어 레이더 수신 안테나로 다시 들어오는 반사파의 크기를 나타내는 수치이다. 표적에 입사되는 평면파에 의한 입력 전력 밀도의 크기에 대해 표적으로부터 산란되어 레이더 방향으로 산란되는 반사 전력 밀도의 비율로 아래 식과 같이 표현된다.

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} \quad (1)$$

여기서 σ 는 RCS, E_s 는 표적으로부터 산란되는 전계 강도, E_i 는 표적에 입사하는 전계 강도이다. 표적에 입사되는 입사파는 산란, 흡수 또는 다른 방향으로 반사되는데 레이더 방향으로 돌아오는 총 에너지의 크기를 RCS로 표현한다[11].

2.2 RCS 해석기법 및 검증

2.2.1 전산 해석기법

항공기가 편대를 이루어 비행할 때의 RCS 변화를 해석하기 위해 Maxwell 방정식을 기반으로 하는 전자기장 해석 상용 소프트웨어인 Altair사의 FEKO를 사용하여 해석하였다. FEKO의 경우 전자기파 문제를 계산하기 위해 Maxwell 방정식을 해석하는 Full Wave simulation 기법인 Method of Moments(MOM), Multi-Level Fast Multipole Method(MLFMM) 등을 제공하고 고주파 근사 기법인 Physical Optics(PO), Ray Launching-Geometrical Optics(RL-GO) 등의 Solver 들을 제공한다. Full Wave 해석기법인 MOM이나 MLFMM Solver는 전자기파 해석의 정확도가 뛰어나지만, 시간과 컴퓨터 메모리와 같은 계산 자원이 많이 드는 단점이 있다[12-14]. PO 기법은 계산 자원을 적게 사용하면서 빠른 계산 속도를 가지고 있지만 Edge와 Tip에서의 산란이나 회절에 대한 해석의 정확도가 떨어지는 단점을 가지고 있어 이에 대해 추가적인 Physical Theory of Diffraction(PTD)를 적용하여 해석의 정확도 높였다[15-17].

PO 기법은 전자기파 지배 방정식인 Maxwell 방정식의 적분 형태인 Stratton-Chu 방정식을 기반으로 하는 고주파 근사 기법이다. PO 기법은 고주파수 영역(2GHz~18GHz)에 대한 해석 정확도가 높고 물체의 특성 길이가 입사 전자기파의 파장의 10배 이상인 경우, 정확도가 상승한다.

PO 기법은 특정 입사장과 경계조건이 주어졌을 때, 임의의 물체 표면에서 발생하는 Current에 대한 근사식을 사용하여 RCS를 계산하는 방법이다. 만약 물체가 완전한 전도체(Perfect Electric Conductor; PEC)일 경우,

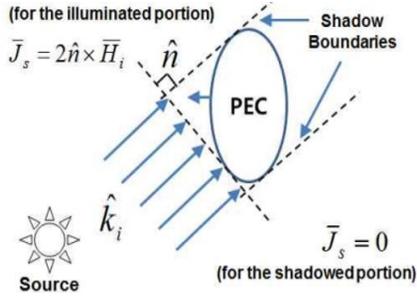


Fig. 1. Principle of the physical optics method

물체 표면에서의 current (\bar{J}_s) 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{J}_s = \begin{cases} 2\hat{n} \times \bar{H}_i, & \text{반사영역} \\ 0, & \text{그늘영역} \end{cases} \quad (2)$$

여기서 \hat{n} 은 표면의 법선 벡터, \bar{H}_i 는 입사되는 자기장을 나타낸다. 물체 표면에 생성되는 Current에 의한 산란 자기장은 다음 적분식으로 나타낼 수 있다.

$$\bar{E}_s = \frac{e^{-jkr_s}}{r_s} (\bar{E}_{i,\phi} \hat{\theta}_i - \bar{E}_{i,\theta} \hat{\phi}_i) \times \left(\frac{j}{\lambda} \right) \iint_S \hat{n} e^{jk(\hat{r}_i + \hat{r}_s) \cdot \bar{r}} ds \quad (3)$$

j 는 복소 단위, k 는 Wave 벡터($k = 2\pi/\lambda$)를 의미한다. 입사되는 자기장이 아래 식과 같을 때, 식 (3)의 산란 자기장과 입사 자기장을 사용하여 물체의 RCS를 식 (1)에서 구할 수 있다.

$$\bar{E}_i = (E_{i,\theta} \hat{\theta}_i + \bar{E}_{i,\phi} \hat{\phi}_i) e^{-jkr_i \cdot \bar{r}} \quad (4)$$

RCS의 단위는 아래 식을 이용하여 데시벨(dBsm) 단위로 나타낼 수 있다.

$$\text{RCS(dBsm)} = 10 \log_{10} \left[\frac{\text{RCS}(m^2)}{1m^2} \right] \quad (5)$$

2.2.2 RCS 해석 프로그램 및 기법 검증

FEKO 소프트웨어를 사용하기 앞서 연구에서 다루는 RCS 해석기법에 대한 검증을 위해 NASA Almond 형상을 사용하여 RCS 해석을 수행하였다. 해석 조건은 9.92 GHz에서의 Monostatic Radar의 HH-Polarization으로 설정하여 해석을 수행하였다. Almond 형상은 아래의 식으로 정의된다[18].

for $-0.41667 < t < 0$ and $-\pi < \psi < \pi$

$$x = dt \text{ inches}$$

$$y = 0.193333d \sqrt{1 - \left(\frac{t}{0.41667}\right)^2} \cos \psi$$

$$z = 0.064444d \sqrt{1 - \left(\frac{t}{0.41667}\right)^2} \sin \psi$$

for $0 < t < 0.58333$ and $-\pi < \psi < \pi$

$$x = dt \text{ inches}$$

$$y = 4.83345d \left[\sqrt{1 - \left(\frac{t}{2.08335}\right)^2} - 0.96 \right] \cos \psi$$

$$z = 1.6115d \left[\sqrt{1 - \left(\frac{t}{2.08335}\right)^2} - 0.96 \right] \sin \psi$$

Figure 2는 $d = 9.936$ inch일 때 NASA Almond 형상에 대해 실험값[18]과 FEKO의 MLFMM 기법과 PO+PTD 기법을 사용하여 RCS 해석 결과를 나타낸 것이다.

RCS 해석 결과 PO+PTD 기법은 모서리 회절 효과에 대한 해석 정확도가 낮기 때문에 $150^\circ \sim 180^\circ$ 부분에서 MLFMM 기법보다 RCS가 낮게 나타났지만, 그 외 범위($0^\circ \sim 150^\circ$)에서의 평균 RCS 차이는 거의 발생하지 않았다. 또한 PO+PTD 기법과 MLFMM 기법 간 해석 결과가 유사한 경향성을 보인다.

Figure 3은 다수의 형상에 대해 MLFMM 기법과 PO+PTD 기법의 해석 결과를 나타낸 그래프이다. 다수의 형상에 대한 해석기법 간 차이를 확인하기 위해 NASA Almond 형상의 크기를 3배 증가시켜 Full Wave 해석기법인 MLFMM 기법과 PO+PTD 기법에 대한 RCS를 비교하였다. 앞선 Almond 형상이 하나 일 때 보다 두 개를 사용하였을 경우, MLFMM 기법과 PO+PTD 기법 사이의 차이는 더 줄어들었으며, $0^\circ \sim 30^\circ$ 부분을 제외한 그 외 범위에서는 거의 동일한 결과를 보였다.

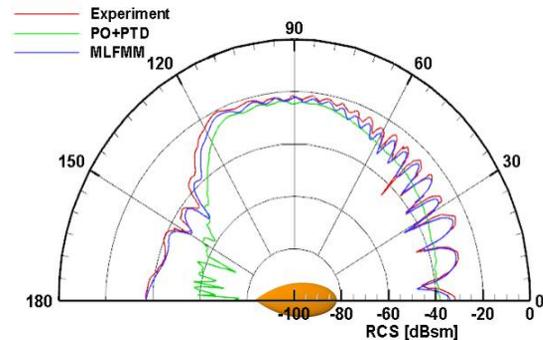


Fig. 2. Validation of methods using an almond

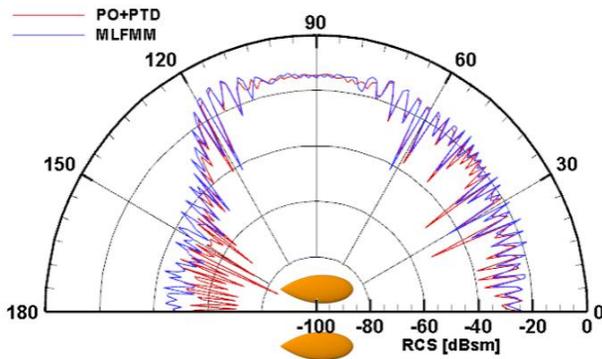


Fig. 3. Validation of methods using two almonds

MLFMM 기법과 PO+PTD 기법에 대한 큰 차이를 보이지 않았고 경향성도 동일하게 나타나 자원과 시간의 효율성을 고려하여 PO+PTD 기법을 사용하여 연구를 수행하였다.

III. RCS 해석 형상 및 조건

3.1 RCS 형상 및 경계조건

편대의 간격 및 대형에 따른 RCS의 변화에 대해 분석하고자 Sphere와 Almond 형상을 사용하여 연구를 수행하였다. 실제 항공기와와의 크기를 고려하여 Figs. 5, 6과 같이 각각 Sphere 반지름은 4m로 하였고, Almond 형상의 길이는 17.5 m, 폭 6.8 m 크기로 하여 해석을 수행하였다. Sphere와 Almond 형상의 넓이를 거의 동일하게 맞추어 연구를 수행하였고, 전자기와 해석 격자는 격자 하나당 Element의 길이를 파장의 2배 크기로 약 16만 개로 구성하였다.

RCS는 항공기를 탐지하는 레이더의 주파장 대역인 X-band 대역(8~12GHz) 중 하나인 10GHz로 해석을 수행하였다. 레이더는 단방향 레이더(Monostatic Radar)를 사용하고 형상 사이의 간격에 따른 RCS 값의 차이가 더 크게 나타나는 HH-Polarization로 해석을 수행하였다. 해석 방위각은 0°~360°를 1° 간격으로 수행하고 정면에서 관측되는 상황을 고려하여 고도각은 0°에서 해석을 수행하였다.

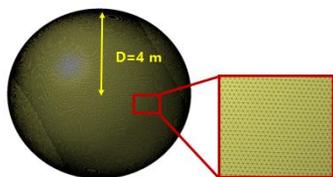


Fig. 4. Sphere geometry and grid

Table 1. RCS analysis condition

Parameters	Conditions
Frequency	10 GHz
Radar Type	Monostatic Radar
Polarization	HH-Polarization
Azimuth Angle	0°~360°(Interval 1°)
Elevation Angle	0°

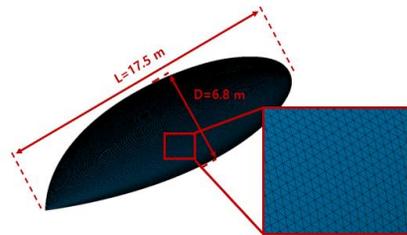


Fig. 5. Almond geometry and grid

3.2 RCS 해석 대형

Figures 6, 7은 Sphere와 Almond 형상에 대한 각각의 RCS 해석 대형을 나타낸 것이다. 해석 대형은 개수, x 방향과 y 방향의 사이 거리, V 대형과 Diamond 대형에 대한 해석을 수행하였다.

Sphere 형상의 개수 변화를 고려한 RCS는 형상 간 y 축 거리를 1D로 하여 1~4개까지 변화시키며, RCS를 해석하였고 거리 변화에 대한 RCS 해석은 형상 2개의 y 방향의 사이 거리를 0, 1, 2, 4D로 하여 해석을 수행하였다. 대형 변화에 대한 해석은 형상 3개를 사용하여 일렬형대 대형에서 양측의 형상을 1D만큼 -x축 방향으로 이동시킨 V자 대형에 대한 해석 비교를 하였다. 형상 4개를 사용한 경우, Diamond 대형에서 제일 뒤쪽에 위치한 형상을 2D만큼 +y 방향으로 이동한 V자 대형과 비교하였다.

Almond 형상의 경우 개수 변화에 대한 RCS 분석은

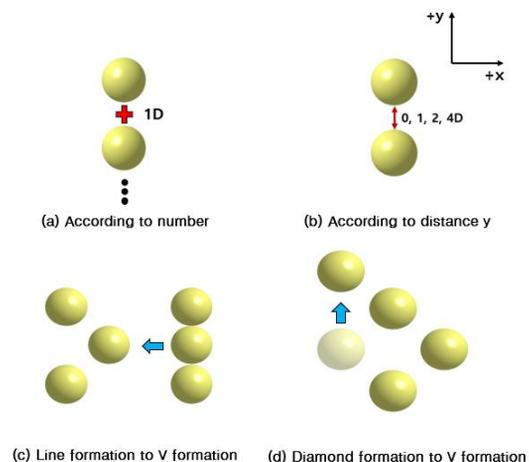


Fig. 6. Formation of multiple Spheres

Sphere와 동일하게 해석을 진행하였다. 사이 거리의 변화는 y 방향으로 대해 사이 거리를 0, 1, 2, 4D로 하여 해석을 수행하였고, x 방향으로의 사이 거리를 0, 1, 2, 4L 해석을 수행하였다. 대형별 변화에 대해서는 Sphere 형상과 동일하게 양측 면에 위치한 형상을 1L만큼 -x 방향으로 이동시킨 대형과 제일 뒤쪽에 위치한 형상을 +y 방향으로 2D만큼 이동시킨 대형의 RCS를 분석하였다.

IV. Sphere 및 Almond 형상 RCS 분석

4.1 Sphere 형상의 편대비행 RCS 분석

4.1.1 형상의 개수에 따른 RCS 변화

Figure 8은 Sphere 형상 간 사이 간격을 1D로 하여 개수를 1~4개까지 증가시키며, RCS 해석을 수행한 그래프이다. Sphere는 고주파수 영역에서 최대 RCS는 $\pi D^2/4$ 으로 구해진다. 형상 간 상호간섭으로 인한 RCS 변동성을 고려하지 않은 최대 RCS 값은 개수가 증가함에 따라 각각 17, 20, 21.7, 23 dBsm 계산된다. 형상 간 상호 작용을 고려한 최대 RCS 값은 각각 17.2, 23.31, 26.75, 29.15 dBsm로 해석되어 형상들 사이 레이더파의 상호작용으로 RCS 값이 증가하는 것을 알 수 있다. 형상이 증가함에 따라 전방(0°) RCS가 1개일 때 16.961 dBsm, 2개일 때 23.019 dBsm, 3개일 때 26.541 dBsm, 4개일 때 29.04 dBsm로 점차 증가하는 경향을 보였다. 각각의 형상 개수 증가에 따른 RCS 증가량은 1개에서 2개로 늘어났을 때 6.058 dBsm, 2개에서 3개로 늘어났을 때 3.522 dBsm, 3개에서 4개로 늘어났을 때 2.499 dBsm 증가하였다. 형상의 개수가 늘어날수록 전방(0°) RCS가 증가하였지만 각각의 개수 증가에 따른 RCS 증가폭은 감소하였다. 이는 RCS 특성상 로그 스케일로 나타내기 때문이다. RCS의 최댓값은 0°에서 해석된 값과 크게 차이가 나지 않았다. 75°~105°와 255°~285°에서의 RCS가 형상이 한 개일 때의 RCS와 동일하게 나타나는데 이는 앞쪽에 위치한 형상에 의하여 뒤쪽에 위치한 형상들이 가려져 Specular Reflection이 감소하였기 때문이다. 또한 적의 레이더가 주로 위치하는 전방 부근(315°~45°)의 평균 RCS는 전방위 평균 RCS보다 높게 나타났다.

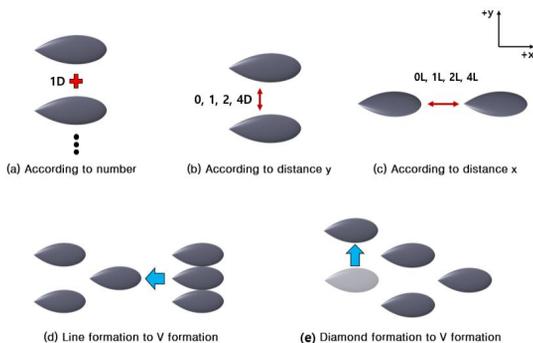


Fig. 7. Formation of multiple Almonds

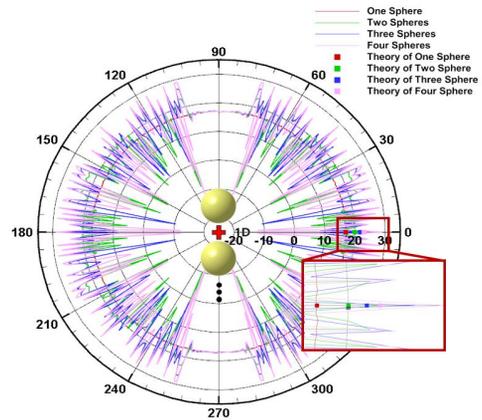


Fig. 8. RCS with different numbers of Spheres

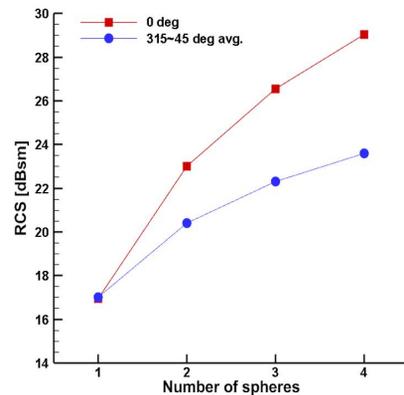


Fig. 9. RCS with different numbers of Spheres

4.1.2 형상의 사이 거리에 따른 RCS 변화

Figure 10은 형상 2개를 사용하여 형상의 y축 사이 거리가 0D, 1D, 2D, 4D일 때의 RCS 그래프를 나타낸 것이다. 거리에 상관없이 0°에서 23.01 dBsm, 90°에서 16.64 dBsm로 동일하게 나타났다. 전방위에서의 평균 RCS는 약 19.5 dBsm로 큰 차이가 나지 않았지만, 전방 부근(315°~45°)에서의 평균 RCS가 거리가 증가할수록 20.67, 20.59, 20, 18.98 dBsm로 점차 감소하였다. 이는 거리가 멀어질수록 형상 간 상호 영향성이 줄어들어 RCS가 감소했기 때문으로 판단된다.

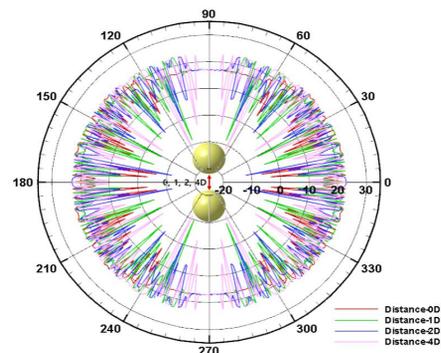


Fig. 10. RCS with different distance

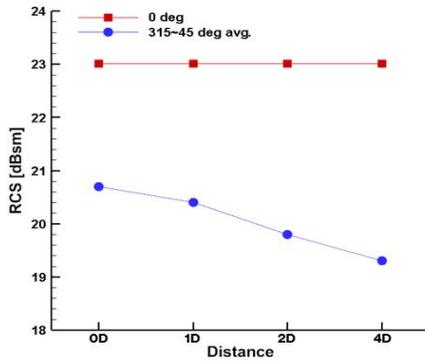


Fig. 11. RCS with different distance

4.1.3 형상의 대형 변화에 따른 RCS

Figure 12는 형상을 3개를 사용하여 일렬횡대 대형과 V자 대형 간 RCS를 비교한 그래프이다. 일렬횡대 대형은 형상 간 간격을 0D로 배치하여 RCS를 예측하였고 V자 비행은 일렬횡대 비행에서 양옆의 형상을 뒤쪽(-x)으로 1D만큼 이동한 대형이다.

0°에서 측정한 일렬횡대 대형의 RCS는 26.54 dBsm, V 대형의 RCS는 22.82 dBsm로 V 대형이 3.72 dBsm 더 낮게 나타났다. 이는 형상이 V 대형일 때 전자기파가 대형을 따라 흘러나가는 반면, 일렬횡대 대형일 때는 흘러나가는 전자기파가 적어졌기 때문으로 판단된다. 동일한 이유로 전방 부근(315°~45°)에서의 평균 RCS 또한 약 0.468 dBsm 일렬횡대 대형이 더 높게 나타난 것으로 판단된다. 일렬횡대 대형과 V대형 간 전방위 평균 RCS는 V대형이 0.344 dBsm 더 높게 예측되었는데 이는 측면(60°~120°, 240°~300°) 범위에서 형상이 뒤로 이동함에 따라 Specular Reflection이 증가하여 전방위 평균 RCS가 더 증가하는 것으로 판단된다.

Figure 13은 형상 4개를 이용하여 Diamond 대형과 V 대형 간의 RCS를 비교한 그래프이다. Diamond 대형의 제일 뒤쪽에 위치한 형상을 2D만큼 +y 방향으로 이동시킨 V 대형에 대한 RCS를 비교하였다.

Table 2. RCS values for Line- and V-formation

Formation	Angle		
	0°	315°~45°	0°~360°
Line-formation	26.54	22.97	21.15
V-formation	22.82	22.5	21.5
Difference	-3.72	-0.47	+0.35

Unit: dBsm

Table 3. RCS values for Diamond- and V-formation

Formation	Angle		
	0°	315°~45°	0°~360°
Diamond-formation	22.83	22.97	22.52
V-formation	19.99	23.59	22.77
Difference	-2.83	+0.62	+0.25

Unit: dBsm

0°에서 측정한 Diamond 대형의 RCS는 22.83 dBsm, V 대형의 RCS는 19.99 dBsm로 V 대형이 2.83 dBsm 더 낮게 나타났다. 이는 V 대형일 때는 전자기파가 흘러나가는 반면, Diamond 대형일 때는 제일 뒤에 위치한 형상에 의해 앞서 위치한 두 형상을 지나쳐 나오는 전자기파를 반사시켜 Diamond 대형의 RCS가 더 높게 해석된 것으로 판단된다. 반면 전방 부근(315°~45°)과 전방위 평균 RCS는 V 대형이 더 높게 나타났는데 형상이 측면으로 나오게 되면서 30°~60°에서의 Specular Reflection이 증가하여 RCS가 증가하였기 때문이다.

4.2 Almond 형상의 편대비행 RCS 분석

4.2.1 형상의 개수에 따른 RCS 변화

Figure 14는 Almond 형상을 Sphere 형상과 동일하게

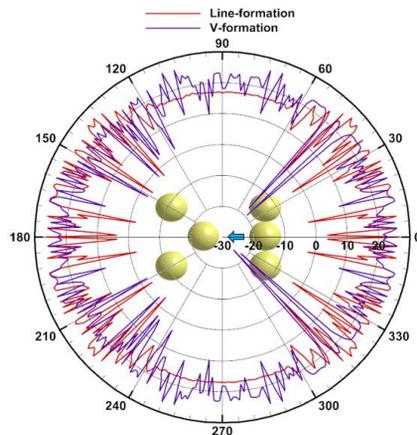


Fig. 12. RCS with different formation(Line vs V)

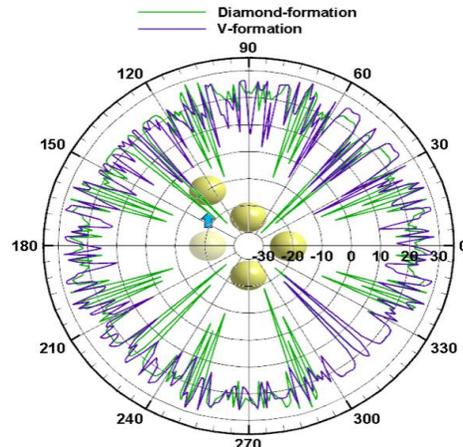


Fig. 13. RCS for different formation(Diamond vs V)

형상 간 사이 간격을 1D로 하여 +y 방향으로 형상을 한 개씩 증가시키며, 1~4개까지의 개수 변화에 따른 RCS 해석을 수행한 그래프이다. 형상이 한 개씩 증가함에 따라 전방(0°) RCS가 1개일 때 -3.33 dBsm, 2개일 때 2.69 dBsm, 3개일 때 6.21 dBsm, 4개일 때 8.71 dBsm로 점차 증가하는 경향을 보였다. 각각의 형상 개수 증가에 따른 RCS 증가폭은 1개에서 2개로 늘어났을 때 6.02 dBsm, 2개에서 3개로 늘어났을 때 3.52 dBsm, 3개에서 4개로 늘어났을 때 2.5 dBsm 증가하였다. Sphere 형상과 동일하게 개수가 늘어날수록 전방(0°) RCS가 증가하였지만 각각의 개수 증가에 따른 RCS 증가폭은 감소하였다. 또한 75°~105°와 255°~285°에서의 RCS는 Sphere 형상과 동일하게 형상이 한 개일 때의 RCS와 동일하게 나타난다. RCS 증가폭의 감소와 측면에서의 RCS가 동일하게 나타나는 것은 Sphere 형상과 동일하게 RCS를 로그 스케일로 나타내는 것과 제일 앞쪽에 위치한 형상에 의한 Specular Reflection의 감소 때문이다.

4.2.2 형상의 사이 거리에 따른 RCS 변화

Figure 16은 형상 Almond 형상 2개를 사용하여 형상 y축 사이 거리가 0D, 1D, 2D, 4D일 때의 RCS 값을 나타낸 그래프이다. 전방(0°)에서의 RCS는 거리가 0D일

때 2.686 dBsm으로 거의 동일하게 나타났다. 전방 부근(315°~45°) 평균 RCS는 0D일 때 7.54 dBsm, 1D일 때 8.59 dBsm, 2D일 때 8.26 dBsm, 4D일 때 9.361 dBsm로 2D까지 감소하다가 4D일 때 증가하였다. 이는 거리가 멀어질수록 평균값보다 이하인 RCS 값이 측면에서 더 나타나게 되면서 전방 부근에서의 평균 RCS가 증가하는 것을 보인다. 측면에서 나타나는 RCS로 큰 차이가 발생하지 않았지만, 점차 감소하는 경향을 보인다. Sphere 형상은 Almond 형상에 비해 전방에서의 Specular Reflection이 높게 나타나기 때문에 Almond 형상에 비해 y축 사이 거리가 멀어질수록 감소 효과가 더 뚜렷하게 나타난다. 이를 항공기에 적용해보면 수직 꼬리날개가 있을 경우, 거리에 따른 RCS 저감효과가 더 커질 것으로 판단된다.

Figure 18은 Almond 형상의 x축 사이 거리를 0L, 1L, 2L, 4L로 하여 RCS 해석을 수행한 그래프이다. 거리에 상관없이 전방(0°)에서의 RCS는 -3.33 dBsm로 동일하게 나타났다. 앞쪽에 위치한 형상에 의하여 뒤쪽에 위치한 형상이 가려져 전자기파가 뒤쪽 형상에 영향을 거의 미치지 못하여 전방에서의 RCS가 거의 차이가 나지 않았다.

전방 부근(315°~45°)에서의 평균 RCS는 x축 사이 거

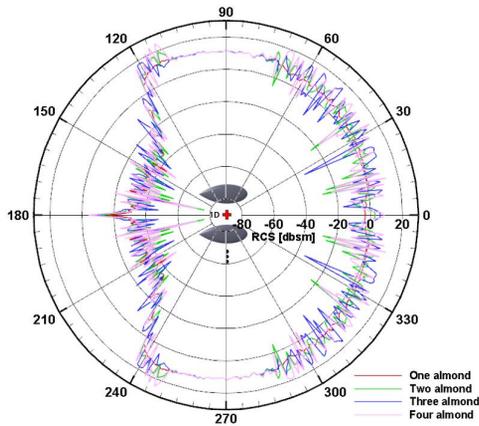


Fig. 14. RCS with different numbers of Almonds

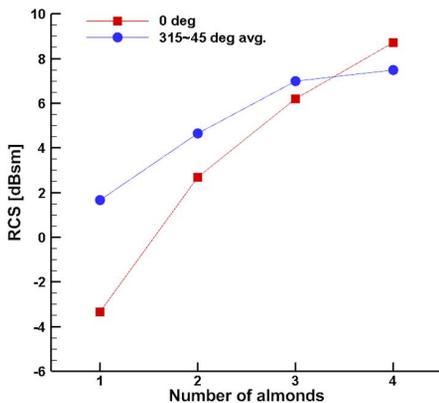


Fig. 15. RCS with different numbers of Almonds

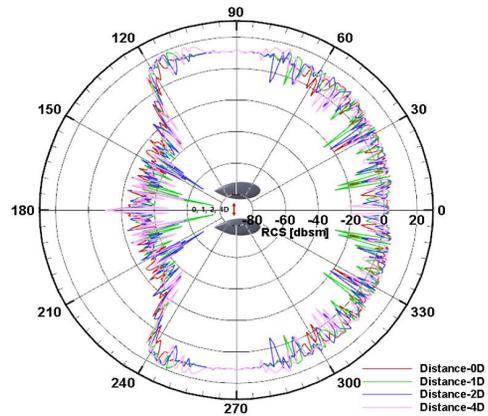


Fig. 16. RCS with different y-distance

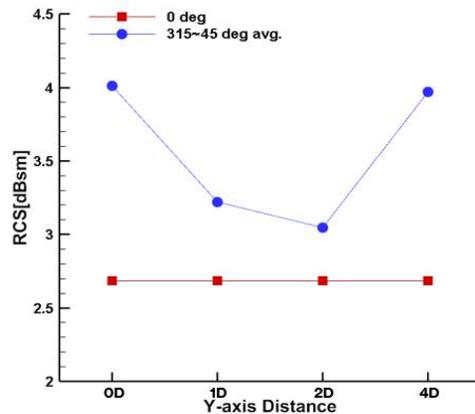


Fig. 17. RCS with different y-distance

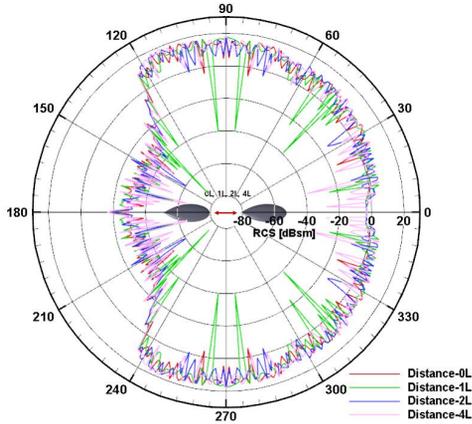


Fig. 18. RCS with different x-distance

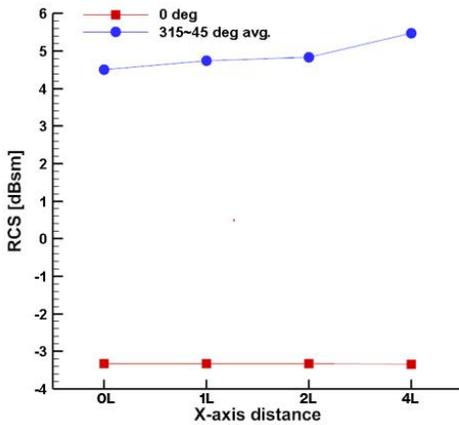


Fig. 19. RCS with different x-distance

리를 0L, 1L, 2L, 4L일 때 각각 4.5, 4.73, 4.83, 5.46 dBsm로 점차 증가하는 경향을 보였다. 형상이 뒤로 이동함에 따라 측면에서 형상이 더 빠르게 관측되게 되고, 이에 따라 Specular Reflection이 증가하여 더 낮은 해석 각도에서 RCS가 증가하였기 때문이다.

Sphere 형상과 다르게 전방에서 RCS가 동일하게 나타나는 구간이 짧은 이유는 전방에서 보이는 넓이가 Almond 형상이 Sphere 형상이 보다 더 작아 Specular Reflection이 더 감소하였기 때문이다.

4.2.3 대형 변화에 따른 RCS

Figure 20은 형상을 일렬횡대 대형과 양옆 형상의 위치를 -x축 방향으로 1L만큼 뒤로 이동한 V 대형의 RCS를 비교한 그래프이다. 전방(0°)에서의 RCS는 일렬횡대 대형에서 6.21 dBsm, V 대형에서 -1.32 dBsm로 7.53 dBsm 감소하였다. 이는 Sphere 형상과 동일하게 형상이 V 대형일 때 전자기파가 대형을 따라 흘러나가는 반면, 일렬횡대 대형의 경우 흘러나가는 전자기파가 양측면에 위치하는 형상에 의해 적어졌기 때문으로 판단된다.

전방 부근(315°~45°) 평균 RCS는 일렬횡대 대형에서 7.1 dBsm, V 대형에서 7.14 dBsm로 0.04 dBsm 증가

Table 4. RCS values for Line- and V-formation

Angle / Formation	0°	315°~45°	0°~360°
Line-formation	6.21	7.1	8.33
V-formation	-1.32	7.14	14
Difference	-7.53	+0.04	+5.68

Unit: dBsm

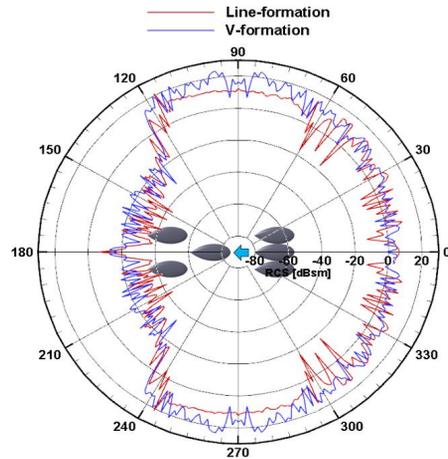


Fig. 20. RCS for different formation (Line vs V)

하였다. 형상이 뒤로 이동함에 따라 30°, 330° 부근에서의 RCS가 증가하였기 때문이다.

일렬횡대 대형과 V 대형의 전방위 평균 RCS는 각각 8.33, 14 dBsm로 V 대형이 5.68 dBsm 더 높게 나타났는데 이는 형상이 뒤로 이동함에 따라 측면(60°~120°, 240°~300)에서의 Specular Reflection이 증가하여 전방위 평균 RCS가 더 증가하는 것으로 판단된다. 하지만 주로 전방에 위치하는 적의 레이더에 의한 탐지는 일렬횡대 대형보다 V 대형이 더 효과적일 것으로 생각된다.

Figure 21은 Almond 형상 4개를 이용하여 Diamond 대형과 V 대형 간의 RCS를 비교한 그래프이다. Diamond 대형의 제일 뒤쪽에 위치한 형상을 2D만큼 +y 방향으로 이동시킨 V 대형에 대한 RCS를 비교하였다.

0°에서 측정된 Diamond 대형의 RCS는 0.44 dBsm, V 대형의 RCS는 0.68 dBsm로 거의 차이가 나지 않았다. 전방 부근(315°~45°) 평균 RCS와 전방위 평균 RCS 또한 각각 8.45 dBsm, 4.55 dBsm V 대형이 더 크게 나타났다. 제일 뒤쪽에 위치해 있던 형상이 측면으로 이동함에 의해 30°~60° 부근에서의 RCS가 더 크게 나타나 V 대형일 때 전방위 RCS가 Diamond 대형일 때보다 더 크게 나타났다.

Diamond 대형을 이용하여 편대비행을 하는 경우에 제일 뒤쪽에 위치한 항공기의 경우 앞쪽에 위치한 항공기와의 간섭으로 인해 레이더에 적게 나타나, 전체적인 스텔스 성능을 비교하였을 때 V 대형보다는 Diamond 대형이 더 효과적인 것으로 판단된다.

Table 5. RCS values for Diamond- and V-formation

Angle	0°	315°~45°	0°~360°
Diamond-formation	0.44	6.83	10.78
V-formation	0.68	15.28	15.33
Difference	+0.24	+8.45	+4.55

Unit: dBsm

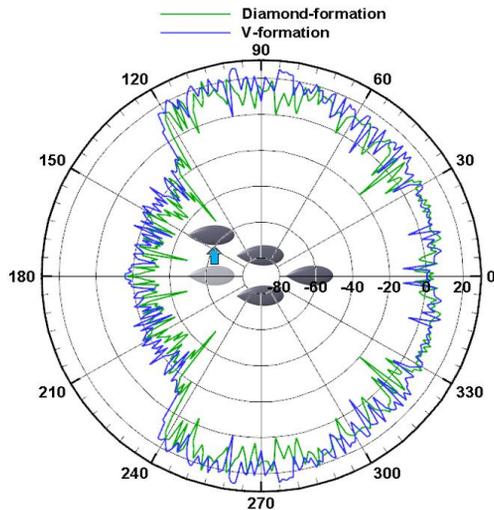


Fig. 21. RCS for different formation (Diamond vs V)

V. 결론

본 연구에서는 Sphere와 Almond 형상을 활용하여 편대 비행 중인 비행체의 거리와 형태에 따른 RCS 변화를 분석하였다. RCS 해석은 상용 소프트웨어인 Altair사의 FEKO를 사용하였고 Maxwell 방정식의 근사적 해석기법인 PO(Physical optics)기법을 활용하여 고주파 영역에서의 RCS 변동성을 분석하였다. RCS의 해석은 형상의 개수, 형상 간 사이 거리, 편대 대형에 따라 분석을 수행하였으며, 형상의 개수는 1~4개까지, 사이 거리는 0~4D, 대형은 일렬횡대 대형, V 대형, Diamond 대형에 대한 RCS 변동성을 분석하였다. Sphere 형상과 Almond 형상의 개수 증가에 따라 RCS는 증가하였지만, RCS 특성상 각각의 개수 증가에 따른 증가폭은 감소하였다.

거리에 따른 RCS 변화는 형상의 양옆 간격이 멀어질수록 상호 간섭에 의한 전자기파가 약해져 전방에 대한 RCS 저감 성능이 좋았으며, 앞뒤 간격 차이에 따른 전방 RCS 변화는 거의 나타나지 않았지만 멀어질수록 전방 부근 RCS 증가하였다.

대형에 따른 전방에서 나타난 RCS는 일렬횡대 대형보다는 V 대형이 더 낮게 나타났다. 그리고 Diamond 대형보다는 V 대형이 전방 부근에 대한 RCS가 더 높게 나타나 적에 대한 탐지를 피하기 위해서는 Diamond 대

형이 효과가 좋을 것으로 판단된다.

요약하면, 동일 고도에서 비행한다고 가정했을 때, 비행체 개수 증가에 따라 RCS는 증가하나 증가폭은 감소하였고, 횡·종 거리에 따른 RCS 변화는 그리 크지 않았다. 그리고 일렬횡대, V 대형보다는 Diamond 대형의 RCS가 감소하여, 대형이 가장 중요한 요소인 것으로 나타났다.

본 연구에서는 편대 비행하는 비행체들의 RCS 변화에 주안점을 두어 단순 형상을 이용하여 해석을 수행하였다. 실제 환경에서의 RCS의 변화를 확인하기 위해 실제 전기체를 사용하여 항공기의 수직 꼬리날개나 엔진 공기 흡입구 등에 의한 전자기파의 상호작용을 해석 범위를 확대할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 국방기술진흥연구소가 지원하는 국방 수직이착륙기 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다 (KRIT-CT-23-010).

References

- 1) Kim, B. W., "Strategies for Autonomous MUM-T Defense Industry," *Journal of Aerospace System Engineering*, Vol. 17, No. 2, 2023, pp. 56~61.
- 2) Kwak, T. J., Kim, K. H. and Jang, P. S., "Manned-Unmanned Teaming Tactical Employment," *Journal of Military Robotics Society*, Vol. 1, No. 1, 2022, pp. 9~14.
- 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) Myong, R. S., *Aircraft Survivability and Stealth Technology*, Lecture Note, Gyeongsang National University, 2013.
- 5) Song, D. G., Yang, B. J. and Myong, R. S., "Effects of IR Reduction Design on RCS of UCAV," *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 46, No. 4, 2018, pp. 297~305.
- 6) 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.
- 7) An, C. H., Kang, D. W., Baek, S. T., Myong, R. S., Kim, W. C. and Choi, S. M., "Analysis of Plume Infrared Signatures of S-Shaped Nozzle Configurations

- of Aerial Vehicle,” *Journal of Aircraft*, Vol. 53, No. 6, 2016, pp. 1768~1778.
- 8) Kang, M. J., Ryu, S. H., Jung, K. J., Lee, H. and Myong, R. S., “Shape Optimization of Single Serpentine Nozzle to Minimize Observability of UCAV,” *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 51, No. 7, 2023, pp. 477~486.
- 9) Knott, E. F., Shaeffer, J. F. and Tuley, M. T., *Radar Cross Section*, Second Edition, Artech House, 1993.
- 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 & Space Sciences*, Vol. 36, No. 1, 2008, pp. 86~91.
- 11) 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 & Space Sciences*, Vol. 33, No. 4, 2005, pp. 1~6.
- 12) Newman, E.H. and Kingsley, K., “An Introduction to the Method of Moments,” *Computer Physics Communications*, Vol. 68, No. 1, 1991, pp. 1~18.
- 13) Gibson, W. C., *The Method of Moments in Electromagnetics*, Chapman & Hall/CRC, 2008.
- 14) Lee, Y. R., Lee, J. W., Shin, C. M., Kim, J. W. and Myong, R. S., “Particle Layer Effects on Flowfield and Infrared Characteristics of Aircraft Exhaust Plume,” *Journal of Aircraft*, Vol. 59, No. 5, 2022, pp. 1320~1336.
- 15) Jang, M. U., *Development of a Hybrid RCS Analysis Code Based on Physical Optics and Geometrical Optics*, M. S. Thesis, Gyeongsang National University, 2014.
- 16) Jang, M. U., Myong, R. S., Jang, I. M. and Lee, D. H., “A Hybrid RCS Analysis Code Based on Physical Optics and Geometrical Optics,” *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 42, No. 11, 2014, pp. 958~967.
- 17) Ozturk, A. K., *Implementation of Physical Theory of Diffraction for Radar Cross Section Calculations*, M. S. Thesis, Bilkent University, 2002.
- 18) Woo, A. C., “Benchmark Radar Targets for the Validation of Computational Electromagnetics Programs,” *IEEE Antenna and Propagation Magazine*, Vol. 35, No. 1, 1993, p. 86.