



J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 47(12), 865-873(2019)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2019.47.12.865

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

## 고고도에서의 피탐성 최소화 유도탄 최적자세 연구

문규진<sup>1</sup>, 정의택<sup>2</sup>, 김정훈<sup>3</sup>, 유창경<sup>4</sup>

### Optimum Missile Attitude to Minimize Radar Exposure at a High Altitude

Kyujin Moon<sup>1</sup>, Ui-Taek Jeong<sup>2</sup>, JeongHun Kim<sup>3</sup> and Chang-Kyung Ryoo<sup>4</sup>

Inha University

#### ABSTRACT

To improve the survivability of a missile, it needs to be lowered that the detection possibility by radars on the ground. The radar exposure of the target is given as a function of relative distance from the radar to the target and RCS (Radar Cross Section). The RCS of the missile is determined by the incidence angle of the target to electromagnetic radiation emitted from the radar. Under the assumption that the missile equips appropriate attitude control system, the attitude of the missile to minimize radar exposure at a high altitude is investigated in this paper. Two different types of performance cost are considered: the total sum of RCS and the total sum of SNR during the flight. Optimal solutions against multiple ground radars are found by using a SQP (Sequential Quadratic Programming)-based optimization technique.

#### 초 록

유도탄의 생존율을 향상시키기 위해서는 레이더에 의한 피탐성을 낮춰야 하는데 이는 레이더 반사 면적과 레이더에서 목표까지의 상대 거리의 함수로 주어진다. 또한 유도탄의 레이더 반사 면적은 레이더에서 방출되는 전자기파에 대한 목표물의 입사각에 의해 결정된다. 본 논문에서는 유도탄이 적절한 자세 제어 시스템을 갖추고 있다는 가정 하에 고고도에서 레이더에 의한 피탐성을 최소화하기 위한 유도탄의 자세를 조사한다. 레이더 반사 면적의 총합과 신호 대 잡음 비의 총합, 두 가지 다른 유형의 성능 비용을 고려한다. SQP 기법을 이용하여 단일 레이더 및 다수의 레이더에 대한 최적해를 산출한다.

**Key Words** : Survivability(생존율), Radar Exposure(피탐성), Optimization(최적화), RCS(레이더 반사 면적), Missile(유도탄)

#### 1. 서 론

일반적으로 지대공 유도탄은 지상 스테이션에서 예상한 요격 지점(PIP, Predicted Intercept Point)으로 중기 유도를 수행한다. 그런 다음 탑재된 RF(Radio Frequency), IR(Infrared) 탐색기를 이용한 종말 호밍

유도를 통해 지대공 유도탄을 대지유도탄으로 유도한다. 따라서 대지유도탄의 생존율을 높이기 위해서는 우선적으로 지상레이더에 의한 피탐성을 낮춰야 한다. RCS는 레이더 전자기파에 의해 측정되는 물체의 면적을 의미하며 피탐성을 결정하는 요소이다. 이 값은 전자기파가 물체에 입사하는 각도에 따라 값이

† Received : August 29, 2019    Revised : October 21, 2019    Accepted : October 29, 2019

<sup>1,2,3</sup> Graduate Student, <sup>4</sup> Professor

<sup>4</sup> Corresponding author, E-mail : ckryoo@inha.ac.kr

© 2019 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

결정된다. 전자기파가 입사하는 각도는 레이더와 물체의 상대 좌표와 물체의 자세에 따라 결정된다. 실제 상황에서 레이더는 한 위치에 고정되어 있고 유도탄은 목표를 향해 비행하기 때문에 레이더와 유도탄의 상대 고각, 방위각은 시나리오에 따라 그 결과가 결정되어 있다. 그렇기 때문에 유도탄의 자세를 변경함으로써 전자기파의 입사각을 변경하여 RCS를 낮추는 것이 타당하다.

기존에 피탐성을 최소화하는 국내 연구는 무인항공기에 대상으로 수행되었다[1]. 본 논문과는 달리 피탐성을 최소화하는 최적제적에 대해 산출하는 연구이다. 유도탄의 RCS에 대한 해외 연구는 1960년대부터 수행되어져 왔으며 대부분 유도탄을 입체도형의 조합으로 가정하여 RCS를 산출하였다[2-4]. 국내에서는 이지스함의 BMD(Ballistic Missile Defence)를 위한 유도탄 RCS 특성분석을 위해 유도탄을 실린더형과 절두체형으로 가정하여 수식을 통해 RCS를 산출하여 분석하였다[5].

본 논문에서는 유도탄을 입체도형의 조합으로 가정하여 RCS를 모델링을 수행하고 이를 통해 유도탄의 생존을 향상을 위한 피탐성 최소화 최적자세에 대한 연구를 진행한다. 최적화는 MATLAB의 내장함수인 fmincon에서 SQP 기법을 사용하였다[6].

## II. 본 론

### 2.1 RCS 모델링

유도탄의 RCS를 보다 정확하게 산출하기 위해서는 PO(Physical Optics) 같은 고주파 해석기법[7,8]이나 실제 형상을 RCS 측정장치로 측정할 필요가 있다. 본 논문에서는 피탐성을 최소화하기 위한 유도탄의 최적자세를 SQP를 이용하여 산출한다. 최적자세를 산출할 때 유의할 점은 유도탄의 외형 특성으로 인하여 어떠한 RCS 해석방법을 사용하더라도 유도탄의 RCS 특성이 유사하게 나와 최적자세 산출경향이 달라지지 않는다는 것이다. 따라서 본 연구에서는 유도탄의 형상을 입체도형의 조합으로 가정하고 Fig. 1과 같이 노즈는 원뿔로 몸통은 원통과 원판으로 구성한다. 여기서 유도탄의 형상은 노즈 부분에 해당하는 원뿔의 반각  $\gamma$ 와 반지름  $a$ , 몸통 부분에 해당하는 원통의 길이  $L$ 을 통해 정의할 수 있으며 절두체형의 유도탄의 형상을 고려할 경우 원뿔에 해당하는 형상만 고려하면 된다.

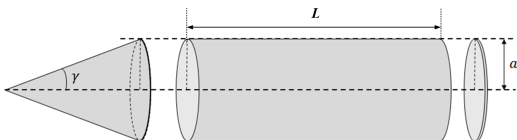


Fig. 1. Shape of missile

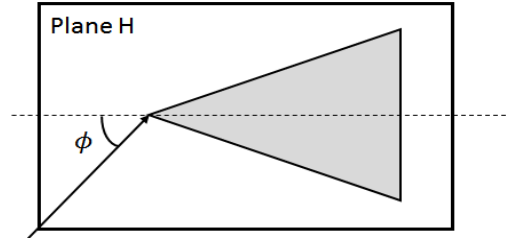


Fig. 2. Definition of the incidence angle

RCS를 구하기 위해서는 Fig. 2와 같이 평면 H에서 레이더 전자기파가 유도탄의 중심에 입사되는 각도  $\phi$ 를 정의해야 한다. 여기서 평면 H는 레이더에서 유도탄까지 연결되는 직선과 유도탄의 중심선이 포함된 평면으로 정의된다. 원뿔 형상의 RCS는 식 (1)~(6)과 같이 정의한다. 이 식들은 레이더 전자기파의 입사각  $\phi$ 를  $0 \sim 180^\circ$  범위에서, 각 범위에 따른 RCS를 정리한 것으로 본 연구에서는 수직편파만 고려한다[2-3].

For  $\phi = 0$ ,

$$\sigma = \frac{\lambda^2}{\pi} \left( \frac{ka \sin(\pi/n)}{n} \right)^2 \left[ \cos \frac{\pi}{n} - \cos \frac{3\pi}{n} \right]^{-2} \quad (1)$$

For  $0 < \phi \leq \gamma$

$$\sigma = \frac{ka}{4\pi} \left( \frac{\sin(\pi/n)}{n} \right)^2 \frac{\lambda^2}{\sin\phi} \left| \begin{array}{l} \exp \left[ -i \left( 2ka \sin\phi - \frac{\pi}{4} \right) \right] \\ \left[ \left( \cos \frac{\pi}{n} - 1 \right)^{-1} \right. \\ \left. - \left( \cos \frac{\pi}{n} - \cos \frac{3\pi - 2\phi}{n} \right)^{-1} \right]^{-1} \\ + \exp \left[ i \left( 2ka \sin\phi - \frac{\pi}{4} \right) \right] \\ \left[ \left( \cos \frac{\pi}{n} - 1 \right)^{-1} \right. \\ \left. - \left( \cos \frac{\pi}{n} - \cos \frac{3\pi + 2\phi}{n} \right)^{-1} \right]^{-1} \end{array} \right|^2 \quad (2)$$

For  $\gamma < \phi \leq \frac{\pi}{2}$ ,  $\phi \neq \frac{\pi}{2} - \gamma$

$$\sigma = \frac{ka}{4\pi} \left( \frac{\sin(\pi/n)}{n} \right)^2 \frac{\lambda^2}{\sin\phi} \left[ \left( \cos \frac{\pi}{n} - 1 \right)^{-1} \right. \\ \left. \mp \left( \cos \frac{\pi}{n} - \cos \frac{3\pi - 2\phi}{n} \right)^{-1} \right]^2 \quad (3)$$

For  $\frac{\pi}{2} < \phi < \pi$

$$\sigma = \frac{ka}{4\pi} \left( \frac{\sin(\pi/n)}{n} \right)^2 \frac{\lambda^2}{\sin\phi} \left| \begin{array}{l} \exp \left[ -i \left( 2ka \sin\phi - \frac{\pi}{4} \right) \right] \\ \left[ \left( \cos \frac{\pi}{n} - 1 \right)^{-1} \right. \\ \left. - \left( \cos \frac{\pi}{n} - \cos \frac{3\pi - 2\phi}{n} \right)^{-1} \right]^{-1} \\ + \exp \left[ i \left( 2ka \sin\phi - \frac{\pi}{4} \right) \right] \\ \left[ \left( \cos \frac{\pi}{n} - 1 \right)^{-1} \right. \\ \left. - \left( \cos \frac{\pi}{n} - \cos \frac{2\phi - \pi}{n} \right)^{-1} \right]^{-1} \end{array} \right|^2 \quad (4)$$

$$\text{For } \phi = \frac{\pi}{2} - \gamma$$

$$\sigma = \frac{8}{9} \pi \frac{a^3}{\lambda} [\sin^2 \gamma \cos \gamma]^{-1} \quad (5)$$

$$\text{For } \phi = \gamma$$

$$\sigma = \frac{\lambda^2 (ka)^4}{4\pi} \quad (6)$$

where

$\sigma$ : RCS,  $\lambda$ : wave  $\leq$  ngth,  $k=2\pi/\lambda$ ,  $n=1.5+\gamma/\pi$

다음으로 원통과 원형 판의 조합으로 고려한 유도탄의 몸통에 대하여, 레이더 전자기파의 입사각  $\phi$ 를  $0^\circ \sim 180^\circ$  범위에서 각 범위에 따른 RCS를 정리한 식은 7~9와 같다[4].

$$\text{For } \phi = 0, \pi \quad \sigma = \frac{4\pi^3 a^4}{\lambda^2} \quad (7)$$

$$\text{For } \phi = \pi/2 \quad \sigma = \frac{2\pi L^2 \sin \phi}{\lambda} \quad (8)$$

where  $L = \text{cylinder} \leq \text{ngth}$

$$\text{For } \phi \neq 0, \pi/2, \pi$$

$$\sigma = \frac{\pi a^2}{\tan^2 \phi} \left[ J_1 \left( \frac{4\pi a \sin \phi}{\lambda} \right) \right]^2 + \frac{\lambda a^2 \sin \phi}{8\pi \cos^2 \phi} \quad (9)$$

$J_1$ : 1차 Bessel function

$$J_a(x) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m}{m! \Gamma(m+\alpha+1)} \left( \frac{x}{2} \right)^{2m+\alpha}$$

위 식은 각 도형의 RCS를 계산하는 식이기 때문에 유도탄의 순수 RCS를 나타내지는 않는다. 따라서 식 10과 같이 복합적인 형상의 RCS를 각 형상에 대한 RCS를 합한 것으로 고려하는 Random phase method를 바탕으로, 유도탄 전체 형상에 대한 RCS 값을 고려한다[4].

$$\sigma = \sum_{j=1}^N \sigma_j \quad N: \text{조합형상의수} \quad (10)$$

본 논문에서 사용된 유도탄 제원은 반지름 0.325 m, 원뿔의 반각  $6.18^\circ$ 이며 레이더 파장은 0.03m이다. Fig. 3은 위의 제원을 바탕으로  $\phi$ 에 따른 RCS 측정치를  $0^\circ \sim 180^\circ$ 까지 분석한 것으로 크게 2가지 특징을 보인다. 첫 번째는  $\phi$ 가  $83^\circ, 90^\circ$ 인 부근에서 RCS가 크게 튀는 것을 확인할 수 있는데 이는 각각 전자기파가 원뿔과 원통에 수직하게 입사하여 발생하는 현상이다. 두 번째는  $120^\circ \sim 180^\circ$  사이구간에서 RCS가 진동하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 진동은 입체도형을 모서리에서 전자기파가 불규칙하게

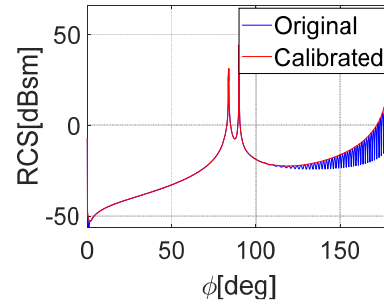


Fig. 3. RCS model

산란하면서 나타나는 현상이다. 본 논문에서 사용하는 최적화 알고리즘은 SQP로 이 알고리즘은 Fig. 3 같은 문제에 대해서 최적의 해를 산출하기 힘들다. 그렇기 때문에 진동하는 부분에 대해서 보정이 필요하다. 따라서 진동의 각 첨두치를 spline 기법을 이용하여 Fig. 3과 같이 보정하였다.

## 2.2 최적화

### 2.2.1 최적화 문제정의

본 논문에서는 레이더와 대지 유도탄의 특성에 따라 교전 기하 관계가 제한적인 것을 고려해 자세 변경을 통한 피탐성을 최소화를 고려한다. 이때 유도탄 자세를 변경하여도 전체 궤적에는 영향이 없어야 하기 때문에 초기 가속 단계와 공력 모멘트가 발생하는 저고도 구간을 제외하고 Fig. 4처럼 고도( $h_t$ )가 40km 이상이고 레이더로부터의 상대거리가 레이더 최대 탐지거리  $R_{\max}$  이내인 궤적을 관심궤적( $R_B$ )로 정의한다. 또한 유도탄의 고도  $h_t$ 가 40km일 때의 상대거리를 최소 상대거리  $R_{\min}$ 으로 정의한다.

### 2.2.2 목적함수

본 논문에서는 생존을 향상을 위해 피탐성을 최소화하여야 하는데 레이더의 피탐성은 레이더에 의해 측정되는 면적을 의미하는 RCS로 판단할 수 있다. 그러므로 식 (11)처럼 탐지 시작시점  $t_0$ 부터 최소 상대거리에 도달하는 시점  $t_f$ 까지의 RCS 총합을 최소화 하는 것을 목적함수 1로 정의한다.

$$J = \min \int_{t_0}^{t_f} RCS \quad (11)$$

여기서,  $t_0$ 은 레이더 탐지 시작시점,  $t_f$ 는 레이더 탐지 종료 시점을 의미한다.

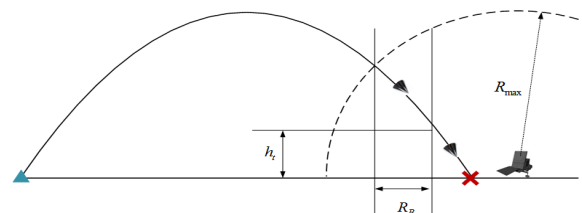


Fig. 4. Definition of trajectory of interest

RCS 이외에 SNR을 통해서도 피탐성을 판단할 수 있다. 레이더에서 목표물을 탐지할 때, 잡음이 섞이게 된다. 그리고 이 잡음은 관측오차를 발생하고 레이더가 목표물을 인식하는 것을 방해한다. 그렇기 때문에 신호 대 잡음비인 SNR도 피탐성을 판단할 수 있는 변수이다. 기본적인 레이더의 SNR 수식은 식 (12)와 같다.

$$SNR = \frac{S_r}{N_r} = \frac{P_r G^2 \lambda^2 \sigma PC}{(4\pi)^3 K T_s B L R^4} \quad (12)$$

여기서  $R$ 은 레이더에서 탐지대상까지의 상대거리,  $\sigma$ 는 RCS를 의미하며 나머지 변수는 레이더의 고유 제원이다. 식 (12)를 보면 RCS에 비례하고 상대거리의 4승에 반비례하는 성질을 가진 것을 확인할 수 있다. SNR는 레이더의 고유 특성이 반영되기 때문에 제원이 알려져 있지 않는 이상 값을 산출하기 힘들다. 그러므로 상대거리를 가중치처럼 고려하면 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$J = \min \int_{t_0}^{t_f} \frac{RCS}{R^4} \quad (13)$$

만약에 식 (13)에서 레이더의 최대 탐지거리인 40km에서는  $(40km)^4$ 이 분모에 위치하기 때문에 성능지수가 매우 작아지게 된다. 이는 목적함수로서 적절치 않은 성질을 가진다. 그렇기 때문에 가중치로 작용하는 항을 변경시켜줄 필요가 있다. 본 논문에서는 가중치가 1~0의 범위를 갖고 가장 레이더와 가까울 때의 가중치가 1이 되도록 식 (13)에서 최소 상대거리  $R_{min}$ 을 이용하여 식 (14)와 같이 정의하고 이를 목적함수 2로 정의한다.

$$J = \min \int_{t_0}^{t_f} \frac{RCS}{(R/R_{min})^4} \quad (14)$$

### 2.2.3 최적화 변수

유도탄의 자세는 기본적으로 롤, 피치, 요 각으로 구성되어 있다. 그러나 2절에서 유도탄의 RCS 모델을 날개를 무시한 입체도형으로 구성된 대칭형상으로 가정했기 때문에, 롤에 따른 유도탄의 자세 변화를 무시할 수 있다. 그러므로 최적화 변수는 피치각  $\theta$ , 요각  $\psi$ 만 고려한다. 각 변수의 경계값은 피치각  $-90^\circ \sim 90^\circ$ , 요각은  $-180^\circ \sim 180^\circ$ 로 설정한다. 그리고 유도탄의 자세는 NED 좌표계에서 나타내므로 요각이  $0^\circ$ 일 때 유도탄이 북쪽을 바라보게 된다.

유도탄이 별도의 자세제어용 추력기를 장착하지 않은 경우 가속 단계 이후 고고도에서 자세 변경 수단이 없기 때문에 일정한 자세로 비행하게 된다. 반대로 유도탄이 자세제어용 추력기를 장착할 경우 고고도에서 비행 중에도 자세 변경이 가능하다. 따라서 최적화 변수를 두 가지로 하여 관심궤적동안 일정한

자세로 비행하는 경우와 시간에 따라 자세가 변하는 경우를 모두 고려하였다. 일정자세에 대한 최적화 변수는 식 (15)와 같이 관심궤적동안 일정한 피치각  $\theta_c$ 와 요각  $\psi_c$ 로 정의한다.

$$X = [\theta_c, \psi_c] \quad (15)$$

시변자세에 대한 최적화 변수는 소요시간을  $n$ 개로 나눠서 일정 시간 간격마다 변수를 정의한다. 중간 구간에서는 식 (17)과 같이 선형 근사 시켜서 최적화 변수를 정의한다.  $n$ 의 개수가 커지면 자세 그래프가 실제 유도탄의 움직임과 도출되나 최적화 결과가 도출되기 어렵고 작아지면 최적화 결과가 도출되기 쉽지만 자세가 부자연스럽기 때문에 적당한  $n$  값을 선정하여 찾아야 한다. 본 논문에서 모든 교전 시나리오에서 시간을 30개의 구간으로 나눠서 결과를 산출한다.

$$X = [\theta_0, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n, \psi_0, \psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n] \quad (16)$$

$$u(t) = u_i + \frac{t-t_i}{\Delta t} (u_{i+1} - u_i) \quad \text{for } t_i \leq t \leq t_{i+1} \quad (17)$$

## 2.3 최적화 결과

### 2.3.1 Case 1 : 단일 레이더

다수 레이더일 때의 최적자세를 산출하기 이전에 단일 레이더일 때 레이더 위치에 따른 경향성 분석을 수행할 필요가 있다. Fig. 5처럼 유도탄은 북쪽으로 발사되며, 레이더는 1~6과 같이 목표물을 기준으로 사방에 위치한다. Fig. 6은 북쪽으로 비행하는 유도탄의 시간 및 사거리에 따른 고도를 나타낸다.

목적함수 1을 고려한 각 레이더에 대한 최적자세 산출 결과는 Fig. 7과 Table 1과 같다. Fig. 7에서 왼쪽 그래프는 기준, 일정, 시변 자세에 대한 레이더 전자기파의 입사각과 그에 따른 RCS, 오른쪽 그래프는 각각의 자세를 나타내며 Table 1은 각각의 목적함수 값을 나타낸다. 여기서 기준 자세는 발음각이

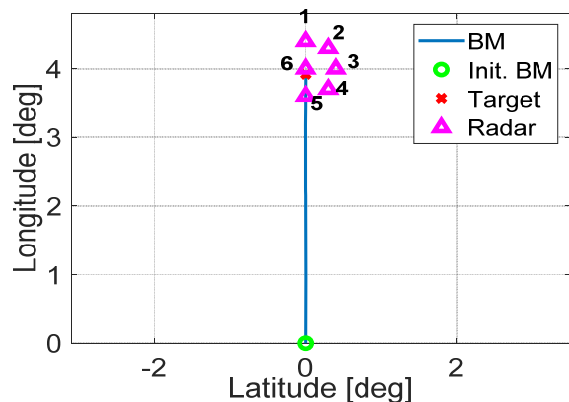


Fig. 5. Case 1 : Missile trajectory & radar position

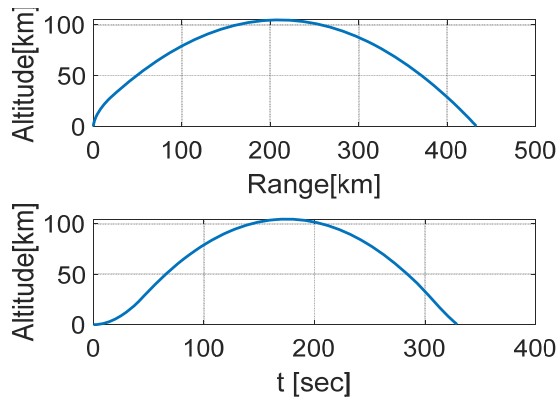


Fig. 6. Case 1 : Missile Altitude

0°인 자세에 대해 산출하였다. 일정자세 문제를 적용하여 산출한 최적자세 결과를 보면 전반적으로 낮은 RCS를 형성하기 위해 궤적의 중간 부분에서 노즈 방향이 레이더를 바라보는 자세를 가지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 궤적 초반에는 전자기파의 입사각이 상대적으로 큰 값을 가지다가 중간에 최소가 된 뒤 표적에 다다름에 따라 다시 커지게 된다. 시변 자세의 경우 유도탄이 항상 RCS가 최저가 되는 입사각(1.5°,  $\phi_{min}$ )을 유지하도록 하는 자세가 산출된다.

Table 1. Case 1 : Result of Object function 1

	Reference	Constant	Time varying
Radar 1	-5.1632e+03	-5.5293e+03	-5.5393e+03
Radar 2	-5.0468e+03	-5.8798e+03	-6.0141e+03
Radar 3	-6.2436e+03	-7.4836e+03	-7.9133e+03
Radar 4	-7.7739e+03	-9.2899e+03	-1.0182e+04
Radar 5	-8.6688e+03	-1.0143e+04	-1.1184e+04
Radar 6	-7.4607e+03	-8.2257e+03	-8.2826e+04

목적함수 2를 고려한 각 레이더에 대한 최적자세 산출 결과는 Fig. 8과 Table 2와 같다. 앞서서와 마찬가지로 Fig. 8의 왼쪽 그래프는 기준, 일정, 시변 자세에 대한 레이더 전자기파의 입사각과 그에 따른 RCS, 오른쪽 그래프는 각각의 자세를 나타내며 Table 2는 각각의 목적함수 값을 나타낸다. 일정자세 문제를 적용하여 산출한 최적자세 결과를 보면 목적

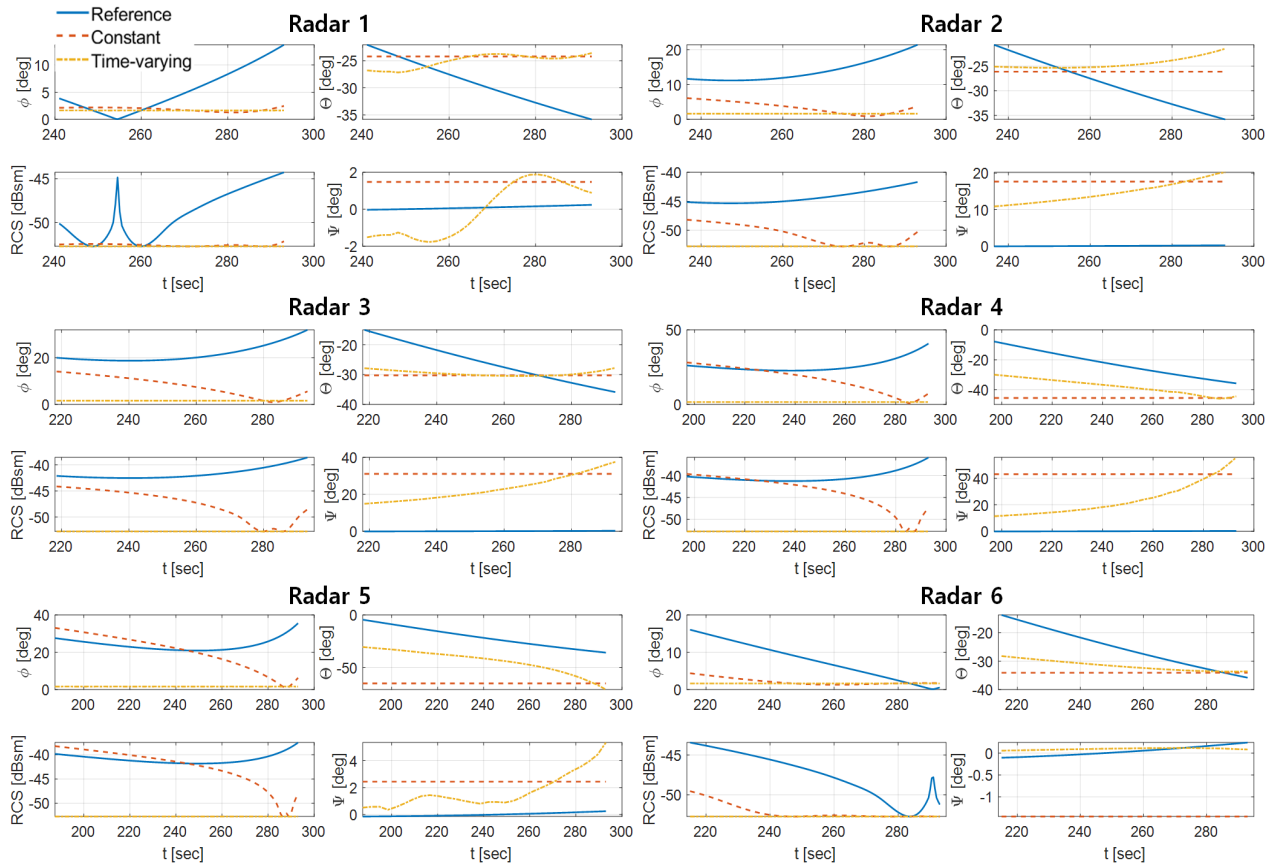


Fig. 7. Results of Case 1 : Object function 2 (L) Incidence angle & RCS, (R) Attitude

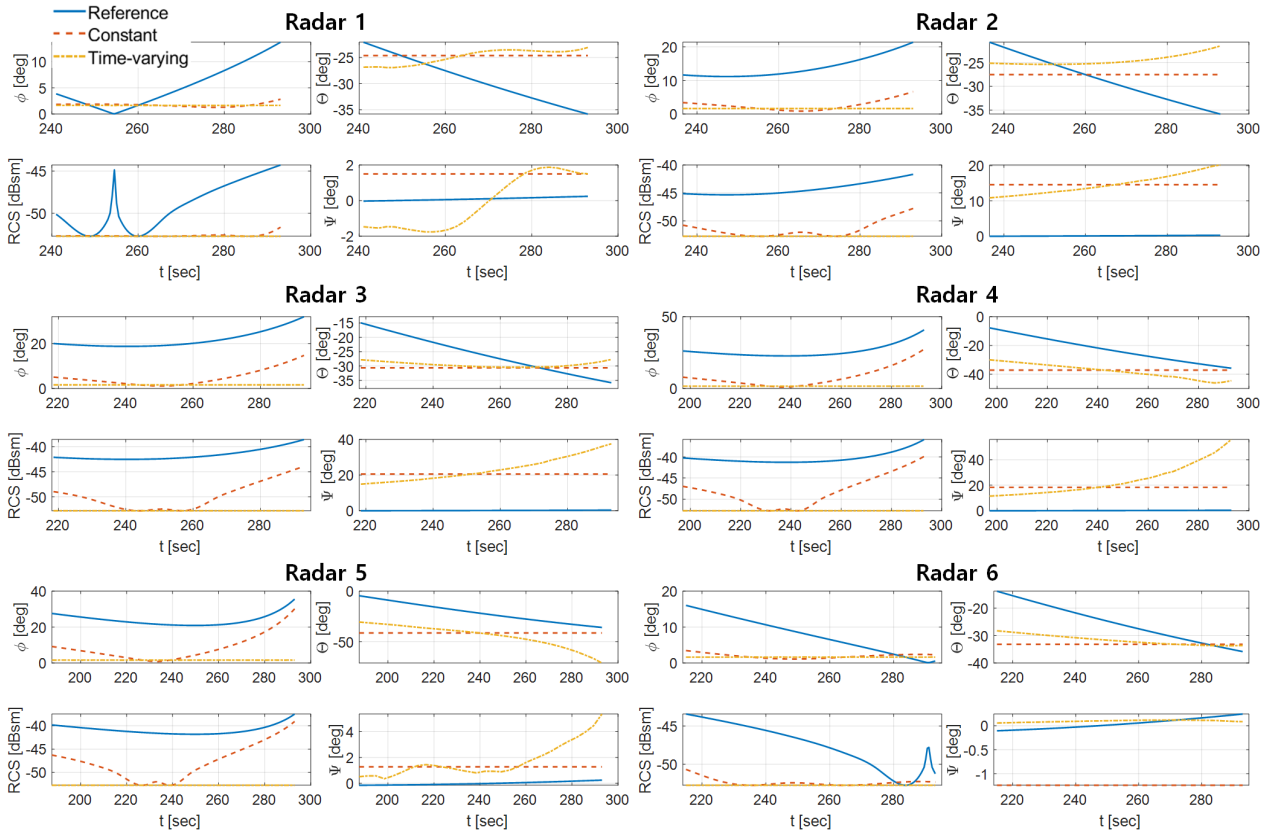


Fig. 8. Results of Case 1 : Object function 1 (L) Incidence angle & RCS, (R) Attitude

Table 2. Case 1 : Result of Object function 2

	Reference	Constant	Time varying
Radar 1	-1.6820e+03	-1.8664e+03	-1.8711e+03
Radar 2	-1.5596e+03	-1.8505e+03	-1.8945e+03
Radar 3	-1.3394e+03	-1.6504e+03	-1.7450e+03
Radar 4	-9.9519e+02	-1.2564e+03	-1.3677e+03
Radar 5	-7.3471e+02	-9.0950e+02	-9.8300e+02
Radar 6	-1.3059e+03	-1.3714e+03	-1.3738e+03

함수 1과는 달리 상대거리가 가장 가까운 표적지 부근에서 낮은 RCS를 형성하기 위해 궤적의 마지막 부분에서 노즈 방향이 레이더를 바라보는 자세를 가지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 궤적 초반에는 전자기파의 입사각이 큰 값을 가지며 표적에 다다라는 낮은 값을 가지게 된다. 시변자세의 경우 목적함수 1과 같이 유도탄이 항상 RCS가 최저가 되는 입사각을 유지하도록 하는 자세가 산출된다.

2.3.2 Case 2 : 다수 레이더

서울에서 방위각  $-39^\circ$  방향으로 295km 떨어진 목표표를 요격하는 궤적에 대해 Fig. 9와 같이 위치한 4대의 레이더를 고려한다. Fig. 10은 유도탄의 시간 및 사거리에 따른 고도를 나타낸다. 4대의 레이더 중 Table 3과 같이 일부를 선정하여 최적자세 산출을 위한 시나리오를 구성하였으며 각 시나리오 별 레이더에 대한 상대거리와 기준 자세에 대한 레이더 전자기파 입사각 및 RCS는 Fig. 11과 같다.

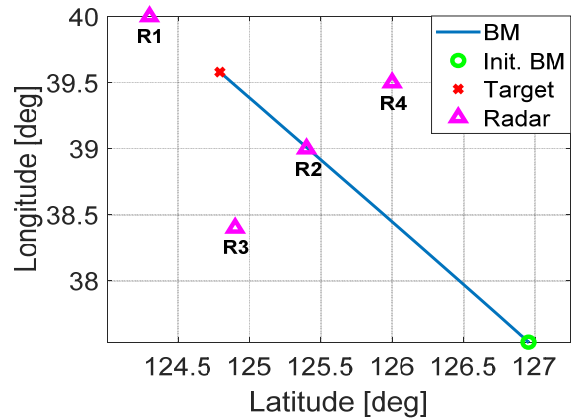


Fig. 9. Case 2 : Missile trajectory & radar position

Table 3. Scenario of Case 2

	Radar 1	Radar 2	Radar 3	Radar 4
Case 2-1	O	O	-	-
Case 2-2	-	-	O	O
Case 2-3	O	O	O	-
Case 2-4	O	-	O	O

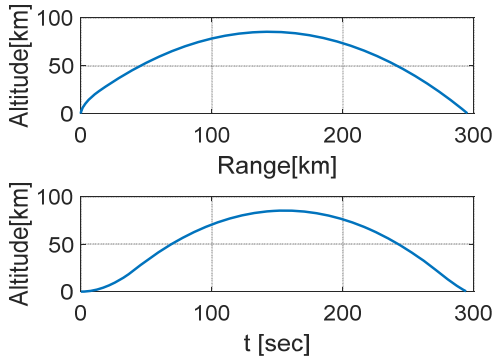


Fig. 10. Case 2 : Missile Altitude

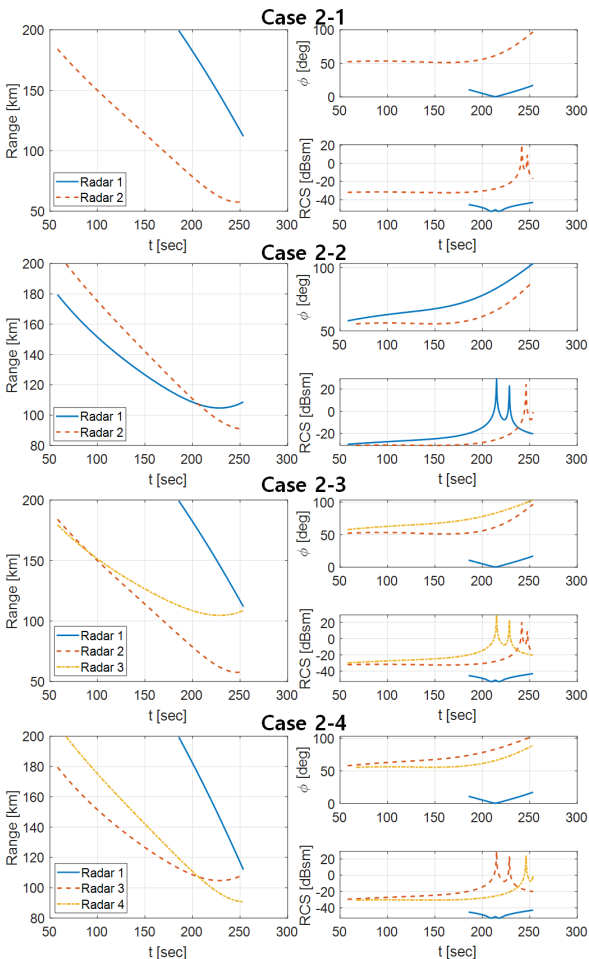


Fig. 11. Case 2 : (L) Relative range (R) Incidence angle & RCS

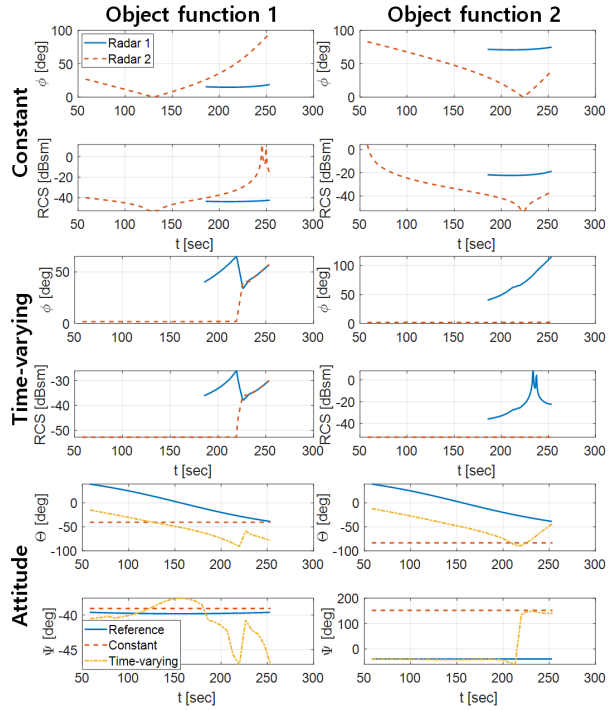


Fig. 12. Results of Case 2-1

Case 2-1은 사거리 방향으로 목표물의 앞쪽과 뒤쪽에 레이더가 위치한 시나리오로 최적자세 산출 결과는 Fig. 12와 같다. 일정자세의 경우 피탐 시간이 긴 레이더 2 위주로 RCS를 작게 하는 자세각이 산출되었다. 목적함수 1의 경우 단순 RCS 총합에 대해 고려하기 때문에 레이더 1에 의해 유도탄이 탐지가 되기 이전에는 레이더 2에 의한 RCS가 작게 유지되도록 하며 레이더 1에 의한 탐지가 시작된 이후에는 레이더 1에 대한 RCS를 작게 하는 복서쪽을 향하며 아래를 바라보는 자세가 산출되었다. 목적함수 2는 레이더 2로부터의 상대거리가 가까운 200초 이후에서 레이더 2의 전자기와 입사각을 작게 하기 위해 수직 아래를 바라보는 자세가 산출되었다. 시변자세 역시 레이더 2 위주로 RCS를 작게 하는 자세가 산출되었다. 목적함수 1의 경우 레이더 2에 대한 RCS를 작게 유지하다가 레이더 1에 의한 RCS 증가가 급격히 증가하는 전자기와 입사각 70° 부근이 되는 시점부터 두 레이더 사이를 바라보며 RCS를 감소하도록 하는 자세가 산출되었다. 반면 목적함수 2의 경우는 항상 레이더 2의 상대거리가 가까기 때문에 레이더 2만 바라보는 자세가 산출되었다.

Case 2-2는 사거리 방향에 수직인 방향으로 목표물 앞 양쪽 방향에 레이더가 위치한 시나리오로 최적자세 산출 결과는 Fig. 13과 같다. 일정자세의 경우 두 레이더에 대한 피탐 시간이 비슷하기 때문에 두 레이더에 의한 영향을 모두 고려한 자세각이 산출되었다. 다만 목적함수 2가 거리에 대한 영향을 고려하기 때문에 더 아래를 바라보는 자세가 산출되었다.

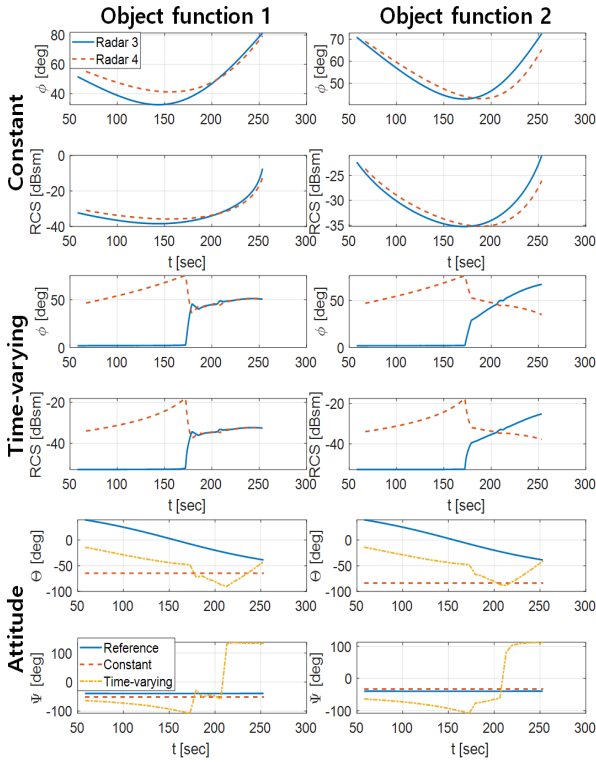


Fig. 13. Results of Case 2-2

시변자세의 경우 탐지시간이 조금 더 긴 레이더 3에 의한 RCS를 우선적으로 고려하는 결과가 산출되었다. 목적함수 1의 경우 레이더 4에 의한 전자기파 입사각이  $70^\circ$ 가 되는 부근에서부터 두 레이더의 전자기파 입사각을 동시에 고려한 자세각이 산출되었다. 목적함수 2 역시 동일한 구간부터 레이더 4에 의한 전자기파를 고려한 자세각이 산출되었으며 두 레이더에 의한 상대거리가 역전되는 215초 부근에서 각각의 레이더에 의한 RCS 크기가 역전되는 자세각이 산출되었다.

Case 2-3, 4는 Case 2-1, 2의 시나리오가 복합된 형태로 최적자세 산출 결과는 Figs. 14, 15와 같다. 앞에서와 마찬가지로 일정자세의 경우 탐지시간이 긴 레이더 중심으로 RCS를 작게 하는 자세각이 산출되었으며 그중 목적함수 1은 전체적인 RCS 합 크기, 목적함수 2는 상대거리가 가까운 곳에서의 RCS 크기를 작게 하는 것이 특징이다. 시변자세의 경우 초기에 탐지시간이 긴 레이더의 RCS를 우선적으로 작게 하는 자세각이 산출되었다. 이후 목적함수 1의 경우 다른 레이더의 전자기파 입사각이 RCS 크기가 급증하는  $70^\circ$  부근을 지나게 되면서 여러 레이더의 RCS를 고려해 레이더들의 사이를 바라는 자세가 산출되었다. 목적함수 2는 이와는 별개로 상대거리가 가까운 레이더의 RCS를 우선적으로 작게 하며 상대거리가 역전 될 때마다 RCS 크기도 역전되는 자세가 산출되었다. Tables 4, 5는 모든 시나리오에 대한

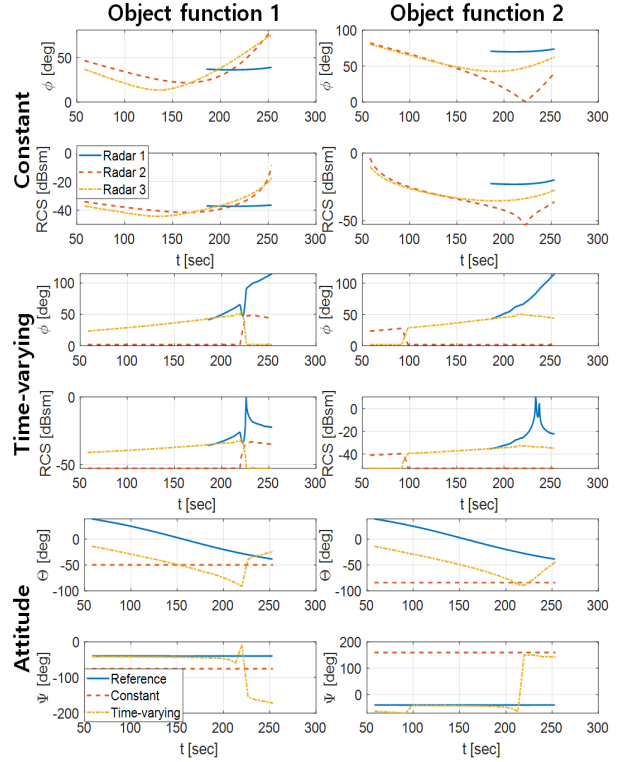


Fig. 14. Results of Case 2-3

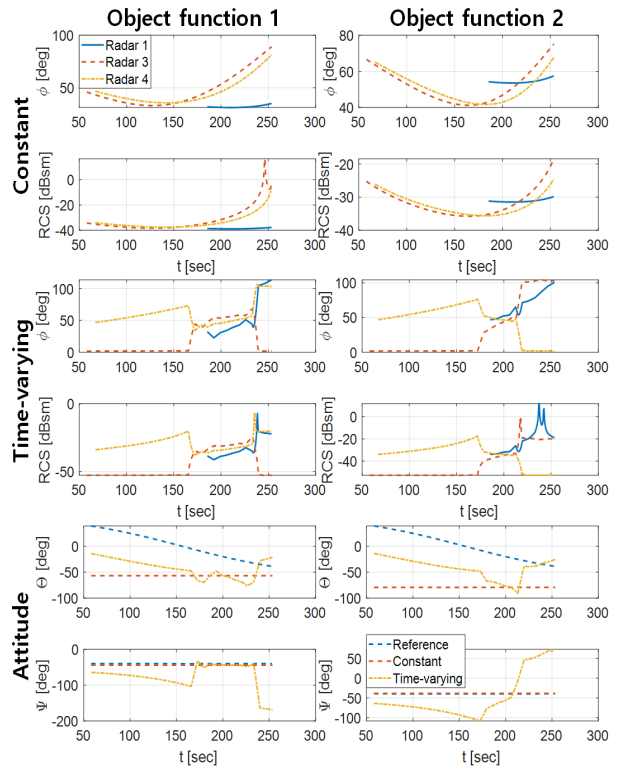


Fig. 15. Results of Case 2-4

목적함수 값을 나타내며 최적자세 산출 결과 피탐성이 감소된 것을 확인할 수 있다.



Table 4. Case 2 : Result of Object function 1

	Reference	Constant	Time varying
Case 2-1	-1.7679e+04	-2.1275e+04	-2.3995e+04
Case 2-2	-1.8016e+04	-2.5218e+04	-2.9032e+04
Case 2-3	-2.5736e+04	-3.4405e+04	-3.8591e+04
Case 2-4	-2.4594e+04	-3.0255e+04	-3.3228e+04

Table 5. Case 2 : Result of Object function 2

	Reference	Constant	Time varying
Case 2-1	-1.9622e+03	-4.0523e+03	-5.0527e+03
Case 2-2	-4.5270e+03	-7.8286e+03	-8.9053e+03
Case 2-3	-2.2830e+03	-4.6853e+03	-5.7540e+03
Case 2-4	-1.2661e+03	-1.9524e+03	-2.2894e+03

### III. 결 론

본 논문에서는 유도탄의 생존율을 향상을 위해 지상 레이더에 의한 피탐성을 최소화 하도록 하는 고고도에서의 유도탄의 최적자세에 대해 연구하였다. 이를 위해 유도탄 모델링과 RCS 모델링을 수행하여 시나리오에 따른 RCS를 산출할 수 있게 구성하였다. 그리고 피탐성을 나타낼 수 있는 목적함수를 선정하였고 단일 레이더 및 다수의 레이더에서의 최적자세를 SQP 기법을 이용하여 산출하고 결과를 기준 궤적에 대한 결과와 비교, 분석하였다.

단일 레이더를 고려하는 시나리오를 통해 최적화 경향성을 우선적으로 확인하였다. 경향성 확인 후 임의의 교전 시나리오를 정의하여 다수의 레이더에 의한 최적자세를 산출하였다. 그 결과로 피탐성을 최소화하기 위해서는 상대 거리가 가까운 레이더를 바라보며 비행하는 것이 효과적임을 확인하였으며 이는 DACS(Divert and Attitude Control System)와 같은

시스템과 결합될 경우 유도탄의 생존율을 향상시킬 수 있음을 의미한다. 이와 같은 생존율 향상을 위한 피탐성 최소화 최적자세를 산출하는 과정을 통해 실제 교전 전에 전략을 수립할 수 있다.

### 후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 한국과학기술원 초고속비행체특화센터에서 수행되었습니다(No. UD170018CD).

### References

- 1) Ahn, J. J., and Yoon, S. J., "A Study on the UAV Guidance and Control Minimizing Rader Exposure," *Proceeding of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Fall Conference*, November 2003, pp. 1285~1288.
- 2) Keller, J. B., "Backscattering from a Finite Cone," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 8, No. 2, 1960, pp. 175~182.
- 3) Bechtel, M. E., "Application of Geometric Diffraction Theory to Scattering from Cones and Disks," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 53, No. 8, 1965, pp. 877~882.
- 4) Lee, S. H., *Investigation of the Effects of Target Feature Variations on Basslistic Missile RCS*, Air Force Institute of Technology, Thesis, 2006.
- 5) Lee, K. H., Kwon, Y. S., and Kim, J. W., "A Study on the Analysis of the RCS Characeristics for Aegis BMD," *Proceeding of The 7<sup>th</sup> National Defense Technology Conference*, July 2011, pp. 92~102.
- 6) Lawrence, C., Zhou, K. L., and Tits, A. L., *User's Guide for CFSQP Version 2.5: A C Code for Solving (Large Scale) Constrained Nonlinear (Minmax) Optimization Problems, Generating Iterates Satisfying A Inequality Constraints*, Institute for Systems Research, University of Maryland, 1997.
- 7) Park, T. Y., and Lim, J. S., "RCS of Ballistic Missile Based on Radar Position," *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Science*, Vol. 40, No. 1, 2015, pp. 209~216.
- 8) Kim, H. T., "Technique for Prediction and Measurement about RCS of Military Target," *Proceeding of The Korea Electromagnetic Engineering Society*, October 2000, pp. 16~25.