

지대공 교전모의를 위한 대공포 모델 설계

A Design of Anti-Aircraft Artillery Model for the Surface-to-Air Virtual Engagement

양창덕* 양지연* 김천영* 홍영석* 류태규*

Chang Deok Yang Jiyoun Yang Cheonyoung Kim Youngseok Hong TaeKyu Reu

Abstract

In this paper, we have designed the Anti-Aircraft Artillery(AAA) model for the surface-to-air virtual engagement. The AAA model for the virtual combat simulation needs to detect the present target and estimate the target flight trajectory to find the aiming point. To find collision point of projectile fired from the artillery with the moving air target, we have presented the estimating technique for artillery aiming point. And we have analyzed the target probability of kill using Calton Hit function. Anti-air threat envelopes are presented when the target velocity, position and the arrangement of four AAA are varying. Then we have compared the analyzed result using developed model with AEM model of MSA program.

Keywords : Anti-Aircraft Artillery(대공포), Surface-to-Air Engagement(지대공 교전), Probability of Kill(살상확률)

1. 서론

대공포 시스템은 대공방어를 목적으로 해상이나 지상의 최종 방어선에 사용되는 무기체계로, 4~5km 이내의 저속 비행체에 효율적인 위협을 가할 수 있다. 이는 미사일의 사각지대인 저고도 영역의 공백을 메우는데 효과적이며, 효율적인 대공방어를 위해서는 미사일과 대공포의 적절한 배치가 필요하다^[1]. 대공포 시스템은 일반적으로 유도기능이 없는 직격형태이기 때문에 사격에 조절되는 방위각과 고각이 탄의 궤적을 결정하는 유일한 제어수단이다. 따라서 발사시각 이전에

이동하는 표적항공기의 위치, 속도, 가속도 등의 데이터를 획득한 후 항공기의 경로를 예측하여 조준점을 계산하고 탄을 발포하는 절차가 필요하다.

대공포의 효과도 평가 모델로는 MGEM(Modern Gun Effectiveness Model)과 MSA(Military Systems Analysis) 모델의 AEM(Artillery Effectiveness Model) 등이 있다. MGEM^[2]은 표적항공기의 비행 상태를 평가하는 Kalman Filter 그리고 표적항공기의 위치예측에 대한 2차형(Quadratic)모형 등의 특징을 포함하는 현대 사격통제이론의 제반기술에 근거하여 현대 사격통제 시스템을 갖는 대공포에 일반적으로 적용할 수 있다^[3]. 하지만 MGEM은 대공포와 표적과의 1대1교전만을 모의하며 표적은 비행항로의 시작부터 탐지(Detection)되고 완전히 추적(Tracking)되는 것으로 모의한다. 또한 포탄의 비행은 Siacci's theorem을 이용하여 모사 한다.

† 2011년 5월 6일 접수~2011년 7월 8일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 양창덕(cdyang@add.re.kr)

AEM모델^{3~5)}은 소화기에서 100mm까지의 대공포를 대상으로 표적항공기의 속도와 기동이 묘사된 궤적파일, 대공포의 포구속도 등과 같은 기술적 성능자료 등을 바탕으로 표적 살상확률을 계산 할 수 있는 프로그램이다. AEM모델은 발사한 탄환의 탄 궤적을 공기저항에 의한 속도감소만을 고려하여 직선으로 가정한다. 또한 표적을 명중할 가능성이 있는 조준점을 찾기 위해 표적항공기의 각 위치에 대해 Interpolation기법을 이용하기 때문에 시뮬레이션 시작 전 표적항공기의 모든 비행궤적의 입력을 필요로 한다.

교전모의 시스템은 다대다 공대공/공대지 교전모의 수행을 위해 공군의 작전 및 임무/과업을 기준으로 조종사의 행위를 모의하고, 전투기 및 무기체계 성능, 위협 및 환경 등을 모의해야 한다⁶⁾. 이를 위한 대공포 모델은 실시간으로 표적 항공기를 포착하고 사격 후 표적의 위치를 파악하여 표적의 피해율을 계산해야 해야 한다. 따라서 표적 항공기의 현 위치를 추적하여 포사격을 실시하게 되면 포탄의 표적으로 비행하는 시간동안 표적항공기도 비행하기 때문에 이동표적에 대해서는 조준점을 예측하는 기법이 필요하다.

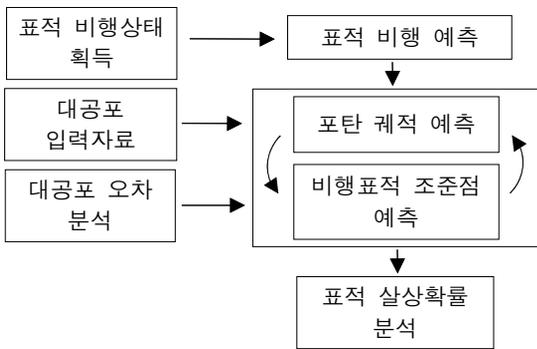


Fig. 1. 대공포 모델 흐름도

본 연구에서는 참고문헌⁷⁾의 기법을 이용하여 현재 목표물의 비행 상태에서부터 명중가능한 포의 조준점을 예측하였다. 조준점으로 발사된 포탄의 비행시간동안의 표적항공기의 위치를 포착하고 CALTON FUNCTION⁸⁾을 이용하여 표적의 피해율을 계산하였다. 본 연구에서 설계한 대공포 모델의 흐름도는 Fig. 1과 같다. 설계된 대공포 모델을 이용하여 이동 표적 항공기의 속도변화에 따라서 살상확률이 변화하는 정량적 수치결과를 본문에 제시하였다. 동일한 표적 항공기 자료를 이용하여 정량적 생존성 분석 결과를 MSA의

AEM모델 결과와 비교하였다. 그리고 대공포 4문의 여러 배치 상황에 대해서 표적항공기의 살상확률 및 누적 살상확률을 비교하였다.

2. 포탄 궤적 예측

대부분의 대공포는 유도과정이 없는 개회로 방식이므로 탄환을 발사하고 난 후 포탄의 비행궤적을 수정할 수 없다. 따라서 포 사격 이전에 표적의 비행 상태를 획득하고 포탄의 비행시간 동안 표적의 이동을 예측하여 표적과 포탄의 충돌 위치를 계산하여야 한다.

사격 이후 포탄의 비행궤적은 4차 Runge-Kutta 방법을 이용하여 아래의 운동방정식을 풀이하여 예측하였다. 항력과 중력을 고려한 포탄의 운동방정식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \Sigma m \ddot{x} &= D_x \\ \Sigma m \ddot{y} &= D_y \\ \Sigma m \ddot{z} &= D_z - W \end{aligned} \tag{1}$$

위 식 (1)의 각 방향 항력은 공기밀도, 포탄 단면적, 각 축방향 속도를 이용하여 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} D_x &= \frac{1}{2} C_{D0} \rho A_\gamma \dot{x}_A \\ D_y &= \frac{1}{2} C_{D0} \rho A_\gamma \dot{y}_A \\ D_z &= \frac{1}{2} C_{D0} \rho A_\gamma \dot{z}_A \end{aligned} \tag{2}$$

여기서, ρ 는 공기밀도, A_γ 는 포탄의 기준 면적 $\frac{\pi d_p^2}{4}$ 이다.

따라서 포탄의 운동방정식은 아래와 같은 미분방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= \frac{1/2 C_{D0} \rho A_\gamma V \cdot}{m} x_A \\ \ddot{y} &= \frac{1/2 C_{D0} \rho A_\gamma V \cdot}{m} y_A \\ \ddot{z} &= \frac{1/2 C_{D0} \rho A_\gamma V \cdot}{m} z_A - g \end{aligned} \tag{3}$$

여기서 공기밀도는 고도의 함수로 계산하고 포탄의 항력계수는 상수를 이용하였다.

포의 조준각은 표적의 조준점에 대해서 포탄의 비행궤적을 계산하고 방향각(ψ)과 고각(θ) 오차를 되먹임 하여 반복 계산한다. 포탄과 표적간의 직선거리가 오차 이내로 들어올 때의 방향각과 고각을 이용하여 사격하는 방식으로 포탄의 운동을 모의 하였다.

$$\begin{aligned} \theta_{ele_{x+1}} &= \theta_{ele_x} + E_{\theta_{ele}} \\ \theta_{azi_{x+1}} &= \theta_{azi_x} + E_{\theta_{azi}} \end{aligned} \quad (4)$$

3. 표적 조준점 예측기법

대공포 시스템은 획득된 현재의 표적항공기 정보로부터 예상경로를 구하고 조준점을 예측하여 발포하면 탄환은 더 이상 추가 보정 없이 표적을 향해 날아가게 된다. 따라서 표적을 추적하고 포탄의 경로와 조준점을 예측하는 과정에서 발생하는 오차가 대공포의 성능을 결정하게 된다. 표적의 궤적이 레이더 탐지 거리 이내로 들어오면 탐지를 시작한다. 이때 획득된 표적의 정보로부터 예상 진로를 예측하고 표적의 예상 진로가 대공포의 사거리 이내로 들어오면 조준점을 예측하여 사격을 실시한다.

본 연구에서는 임의의 시간 t 후의 비행표적의 위치를 아래식의 2차(Quadratic) 함수를 이용하여 예측하였다.

$$X_p = X_o + \dot{X}_o t + \frac{1}{2} \ddot{X}_o t^2 \quad (5)$$

여기서, $\vec{X} = \hat{X}\hat{i} + \hat{Y}\hat{j} + \hat{Z}\hat{k}$ (vector) ($X_p = \vec{X}$)
 $\vec{X}_o, \dot{X}_o, \ddot{X}_o$ 는 각각 목표물의 현 위치, 속도, 가속도 벡터이다.

표적의 조준점은 포탄이 표적으로 발포된 후 포탄의 비행시간과 그 시간동안 표적의 이동을 고려하여 예측하여야 한다. 획득된 표적의 상태와 포탄의 탄도 특성을 사용하여 포탄의 비행시간과 표적의 조준점을 계산한다.

비행표적이 대공포 위치로 접근 또는 퇴각하는가의 판단과 포탄의 조준점을 예측하기 위해 다음과 같은 연산이 필요하다^[7]. 시간 t 에서 포착한 목표물의 위치

$P1$ 에 대해서 앞 절의 포탄궤적 예측 방법을 이용하여 포탄을 발포하고 대공포 위치로부터 목표물까지의 거리 $D1$ 과 이때 포탄의 비행시간 T_{Proj1} 을 계산한다. 포탄의 비행시간 T_{Proj1} 동안 목표물을 이동시켜 시간 $t + T_{Proj1}$ 에서의 목표물 위치 $P2$ 를 얻는다. 목표물 위치 $P2$ 로 포를 발포하여 대공포에서 목표물까지의 거리 $D2$ 와 포탄이 비행시간 T_{Proj2} 를 계산한다. 여기서 대공포와 목표물과의 거리 $D2$ 가 $D1$ 보다 크면 퇴각하는 비행표적을 의미하며, $D2$ 가 $D1$ 보다 작으며 대공포 위치로 접근하는 비행표적을 의미한다.

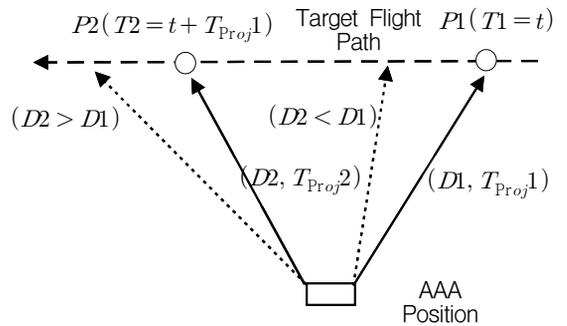


Fig. 2. 비행표적 조준점 예측

대공포의 목표물 조준점은 목표물을 포착하고 포탄을 발포한 시간 $T1$ 에서 목표물이 살상될 때까지 비행한 시간 $T2 - T1$ 이 포탄이 목표물을 타격할 때까지 비행한 시간 T_{Proj2} 와 같아지는 시간에서의 목표물 좌표로서 이를 위해 아래와 같은 반복계산이 필요하다.

- ① 시간 $T1$ 에서의 목표물 포착점 $P1$ 으로 발포하여 대공포와의 거리 $D1$ 과 이때 포탄의 비행시간 T_{Proj1} 을 계산한다.
- ② T_{Proj1} 동안의 표적 이동거리를 예측한다.
- ③ 이동지점 $P2$ 에 대해 발포하고 이때의 거리 $D2$ 와 시간 T_{proj2} 를 계산한다.
- ④ T_{Proj2} 와 $T2 - T1$ 을 비교하여 오차이내이면 중지하고 $P2$ 로 발포한다.
- ⑤ 그렇지 않으면 표적의 접근을 판단한다.
 $D2 < D1$: Approaching Target
 $D2 > D1$: Receding Target
- ⑥ 표적을 다시 $T_{Proj1} \pm \Delta T$ 동안의 이동거리를 예측하고 ③~⑤를 반복한다.

여기서, Approaching Target : ΔT , Receding Target : $-\Delta T$

4. 대공포 오차

가. 탄 분산 오차

대공포 시스템은 하나의 목표물에 대해 일제사격 (Salvo)단위나 장전 단위로 공격을 수행한다. 이 때 발표된 각 탄은 여러 가지 요인으로 인하여 오차가 발생하고 조준점에 대한 빗맞힘 거리가 발생한다.

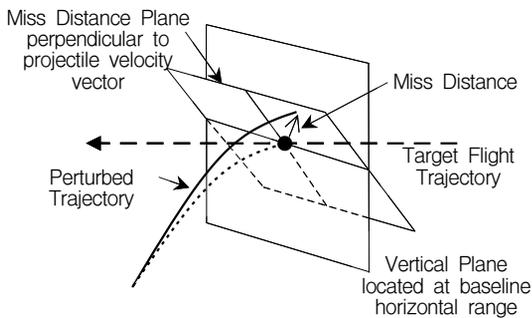


Fig. 3. 대공포 탄 분산 오차

빗맞힘 거리는 포탄의 속도벡터에 수직인 평면인 빗맞힘 평면상에 나타내며 Fig. 3과 같다. 대공포의 정확도에 대한 주요 오차 발생요인은 다양하며 조준점에 대한 빗맞힘 거리 발생요인 즉, 탄분산에 영향을 주는 주요요인은 다음과 같다^[1].

- σ_{iv} : 초기 속도
- σ_{ρ} : 공기밀도
- σ_{temp} : 공기 온도
- σ_{rwind} : 방향풍(Range Wind)
- σ_{cwind} : 측풍(Cross Wind)
- σ_{wt} : 대공포탄 무게(Projectile Weight)
- σ_{elea} : 고각 조준(Elevation Aiming)
- σ_{azia} : 방위각 조준(Azimuth Aiming)

각 오차요인에 대한 탄분산 오차는 식 (6)와 같이 분산 효과와 오차요인 값의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_i = \delta_i \sigma_{iN} \quad (6)$$

여기서, σ_i 는 i 번째 탄분산 오차, δ_i 는 i 번째 분산효과, σ_{iN} 은 오차요인 값을 나타낸다.

본 연구에서는 대공포로부터 단위거리에 있는 목표물을 향해 발사하였을 때 각 오차요인에 대한 분산효과를 1, 오차 값은 Table 1과 같이 정의하였다. 각 오차는 bias오차와 round오차로 구분 할 수 있으며 오차의 특성에 따라 고각 또는 사각 편차에 영향을 준다. 각 오차 요소에 대해서 bias오차와 round오차, 고각과 사각으로 구분하여 정리하면 식 (7)~(10)과 같이 나타낼 수 있다^[1].

$$\sigma_{ele-\delta} = \sqrt{\sigma_{iv-\delta}^2 + \sigma_{\rho-\delta}^2 + \sigma_{wt-\delta}^2 + \sigma_{elea-\delta}^2} \quad (7)$$

Table 1. 오차 요인 및 오차 값

Error Contributor	$\delta_{ele-\delta}$	$\delta_{azi-\delta}$	$\delta_{ele-bias}$	$\delta_{azi-bias}$
σ_{iv} (m/s)	3.7	-	7.5	-
σ_{ρ} (% std)	0.6	-	0.8	-
σ_{temp} (deg C)	0.0	-	5.0	-
σ_{rwind} (Knots)	0.0	-	6.0	-
σ_{cwind} (Knots)	-	0.0	-	7.0
σ_{wt} (% std)	0.4	-	0.5	-
σ_{elea} (Mils)	1.2	-	1.8	-
σ_{azia} (Mils)	-	1.5	-	2.1

$$\sigma_{azi-\delta} = \sqrt{\sigma_{azia-\delta}^2} \quad (8)$$

$$\sigma_{ele-bias} = \sqrt{\sigma_{iv-bias}^2 + \sigma_{\rho-bias}^2 + \sigma_{temp-bias}^2 + \sigma_{rwind-bias}^2 + \sigma_{wt-bias}^2 + \sigma_{elea-bias}^2} \quad (9)$$

$$\sigma_{azi-bias} = \sqrt{\sigma_{cwind-bias}^2 + \sigma_{azia-bias}^2} \quad (10)$$

위 식은 bias오차와 round오차를 구분하였는데 bias방향도 무작위성을 포함하고 있다. bias오차와 round오차를 하나의 표준편차로 묶으면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{ele} = \sqrt{\sigma_{ele-bias}^2 + \sigma_{ele-\delta}^2} \quad (11)$$

$$\sigma_{azi} = \sqrt{\sigma_{azi-bias}^2 + \sigma_{azi-\delta}^2} \quad (12)$$

나. 조준오차 (δ_{aiming})

탄분산에 있어서 대공포의 오차는 대공포 자체에서 목표물을 조준할 때 발생하는 조준오차가 지배적인 오차로 작용한다. 이 조준 오차의 발생원인은 발사통제 컴퓨터의 정확도, 비행의 불안정성, 대공포의 추적장치의 구성 그리고 거리 추정 등이다. 조준 디스퍼전의 표준편차는 5가지 종류의 대공포(소형 포, 12.7/14.5 mm, 23~100mm(Optical/On-Carriage, Radar/Radar, Radar/Optical))에 의한 실험데이터로부터 만들어진 경험식을 이용하여 계산하였다⁵⁾.

다. 추적오차 (δ_{track})

대공포는 개회로 형식이기 때문에 한번 발사된 탄은 궤적보정이 불가능하다. 또한 발사 시에 작용하는 여러 가지 예측 불가능한 외부효과로 인하여 포탄을 발사하지 않고 탄의 비행궤적을 추정하는 것은 어려운 일이다. 일반적인 대공포 시스템에서는 이전에 발사된 탄의 궤적을 근거로 하여 다음 탄의 운동을 예측하는 방법을 사용한다. 대공포의 포신이 표적을 추적하기 시작할 때의 초기오차는 이러한 원인으로 인해 추적이 오랫동안 진행된 후의 오차보다 크다. 본 연구에서는 조기추적 또는 추적 실패-회복에 의한 오차를 초기추적의 최대크기와 최대 초기추적 오차를 수습하는데 소요되는 시간의 입력으로부터 아래와 같은 관계식을 이용하여 근사화하였다.

$$\sigma_{track} = \sigma_{max} \times \left[1 - \left(\frac{t_{fire} - t_{initrack}}{t_{set}} \right) \times 0.001 \times D \right] \quad (13)$$

여기서, σ_{max} 는 초기 추적오차의 최대 크기, t_{fire} 는 포탄 발사 시간, $t_{initrack}$ 은 목표물 추적 시작시간, t_{set} 은 최대 초기 추적오차를 수습하는데 소요되는 시간, D 는 대공포에서 포탄까지의 거리 이다.

5. 대공포 살상확률

대공포의 살상확률은 대공포의 공격에 대해 표적 항공기가 피격될 확률을 정량적으로 나타낸 값이다.

대공포는 표적을 직격하는 방식으로 일제사격 살보(Salvo)단위나 장전단위로 공격하기 때문에 각 포탄이나 일제사격에 대한 살상확률과 누적살상확률을 계산해야 한다. 즉 대공포의 효과도 또는 전투기의 생존성은 단일 살보와 누적된 살보의 명중확률 및 단일 살보와 누적된 살보에 대한 전투기의 생존확률로 표현된다.

대공포의 살상확률 예측을 위한 비행표적의 3차원 모델은 표적의 길이(l), 폭(w), 높이(h)의 입력으로부터 직육면체 형태로 생성하여 사용한다. 대공포에서 바라본 표적의 크기는 표적의 3차원 모델을 빗맞힘 평면으로 정사영한 크기로 설정하였다. 비행표적의 3차원 모델에서 각 꼭지점의 위치벡터를 \vec{T} 라 할 때 이를 빗맞힘 평면으로 정사영한 위치벡터 \vec{P} 는 다음과 같다.

$$\vec{P} = \vec{T} - \vec{C}_{salvo} \times \left(\frac{(\vec{C} \cdot \vec{T}) - (\vec{C} \cdot \vec{S})}{\vec{C} \cdot \vec{C}} \right) \quad (14)$$

$$\vec{P} = [\vec{P}_x, \vec{P}_y, \vec{P}_z]^T \quad (15)$$

$$\vec{T} = [\vec{T}_x, \vec{T}_y, \vec{T}_z]^T \quad (16)$$

$$\vec{C}_{salvo} = [\vec{C}_{salvo_x}, \vec{C}_{salvo_y}, \vec{C}_{salvo_z}]^T \quad (17)$$

여기서, \vec{C}_{salvo} 는 대공포의 살보벡터, \vec{S} 는 빗맞힘 평면에서의 포탄의 위치벡터이다.

정사영된 표적을 직사각형 형태로 근사화 하여 대공포 시야에서 표적의 면적에 대한 길이(l_T)와 높이(h_T)를 구하였다.

미사일에 대한 살상확률은 참고문헌⁸⁾로부터 식 (18)과 같이 나타낼 수 있으며 본 연구의 대공포의 단일발포에 대한 표적의 살상확률은 미사일의 접촉신관에 대한 살상확률로 고려하였다.

$$P_{K/SS} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \rho(x,y) P_F(x,y) V(x,y) dx dy \quad (18)$$

여기서, $\rho(x,y)$ 는 miss distance frequency distribution, $P_F(x,y)$ 는 proximity of fusing(근접 전파정도) 그리고 $V(x,y)$ 는 vulnerability(취약성)의 함수이다.

Miss distance frequency distribution 함수 $\rho(x,y)$ 는 조준능력과 정확성을 표현한 함수이다. 포탄의 목표물 타격점 (μ_x, μ_y) 에 대해서 다음과 같은 함수로 가정한다.

$$\rho(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left(-\frac{(x-\mu_x)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y-\mu_y)^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (19)$$

여기서, σ_x, σ_y 는 탄 분산 값이며 x, y 는 표적의 중심위치벡터로 정의 하였다.

Proximity of fusing($P_F(x,y)$)은 유효 피해 거리를 기준으로 살상률에 영향을 어느 정도 고려하는지를 결정하는 함수로서 0~1값을 사용한다. 본 연구의 대공포의 살상확률에서는 $P_F(x,y)$ 를 접촉신관과 같은 값인 1로 정의 하여 사용하였다.

Vulnerability($V(x,y)$) 취약성 함수는 표적의 종류와 상태에 따라 계산된다. 본 연구에서의 취약면적은 표적의 6개의 면에 대한 취약면적을 입력으로 받아 계산하였다. 포탄의 충돌 순간 포탄과 표적의 상대적인 위치에 따라 최대 3개의 면이 타격을 받을 수 있게 된다. 따라서 포탄에 대한 표적항공기의 상대적인 자세를 고려하여 각 면의 방향벡터를 이용하여 가중치를 고려하여 취약면적을 계산한다.

빗맞힘 평면에 정사영 된 표적의 면적을 $L(l_T, h_T)$ 라 하면 포탄이 표적에 맞을 확률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_H = \int \int_L \rho(x,y) dx dy \quad (20)$$

본 연구에서는 참고문헌^[8]의 Calton Function을 이용하여 단일 탄에 대한 목표물 살상확률을 계산하였다. 식 (20)의 포탄이 표적에 맞을 확률을 Calton Function을 이용하여 다시 정리하면 식 (21)과 같다.

$$P_H = \frac{A_p}{\sqrt{(2\pi\sigma_x^2 + l_T^2)} \sqrt{(2\pi\sigma_y^2 + h_T^2)}} \times \exp\left(-\frac{\pi\mu_x^2}{2\pi\sigma_x^2 + l_T^2} - \frac{\pi\mu_y^2}{2\pi\sigma_y^2 + h_T^2}\right) \quad (21)$$

여기서, $A_p = l_T \times h_T$

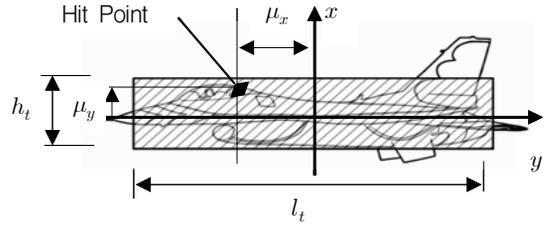


Fig. 4. 표적 살상확률

식 (21)의 공격목표물 면적에 대한 타격확률에 취약면적 비(A_v/A_p)를 곱하면 다음과 같이 살상확률을 계산 할 수 있다.

$$P_{K/SS} = P_H \left(\frac{A_v}{A_p} \right) = \frac{A_v}{\sqrt{(2\pi\sigma_x^2 + l_T^2)} \sqrt{(2\pi\sigma_y^2 + h_T^2)}} \times \exp\left(-\frac{\pi\mu_x^2}{2\pi\sigma_x^2 + l_T^2} - \frac{\pi\mu_y^2}{2\pi\sigma_y^2 + h_T^2}\right) \quad (22)$$

여기서, A_v 는 표적항공기의 취약면적이다.

본 연구에서는 대공포의 조준오차와 추적오차를 고려하기 위하여 식 (23)를 이용하여 단일 탄에 대한 목표물 살상확률을 계산하였다.

$$P_{K/SS} = \frac{A_v}{\sqrt{(2\pi\sigma_x^2 + l_T^2)} \sqrt{(2\pi\sigma_y^2 + h_T^2)} \sqrt{\sigma_{track}^2 + \sigma_{aiming}^2}} \times \exp\left(-\frac{\pi\mu_x^2}{2\pi\sigma_x^2 + l_T^2} - \frac{\pi\mu_y^2}{2\pi\sigma_y^2 + h_T^2}\right) \quad (23)$$

여러 발의 포탄이 발사되었을 때 전체 누적 살상확률은 식 (23)의 단일 탄에 대한 목표물 살상확률을 이용하여 구할 수 있다. 목표물의 누적 생존 확률은 식 (24)와 같다.

$$Q = \Pi (1 - P_{K/SS}) \quad (24)$$

따라서 누적 살상확률은 전체 사건이 발생할 확률과 누적 생존 확률의 차로부터 구할 수 있으며 식 (25)와 같이 표현된다.

$$P_{K/CUM} = 1 - \Pi (1 - P_{K/SS}) \quad (25)$$

6. 비행표적 살상확률 분석

23mm Radar/Optical 대공포를 대상으로 비행표적에 대한 살상확률 및 누적 살상확률을 분석하였다. 가상의 표적 항공기의 크기와 취약면적 그리고 해석에 사용한 가상 대공포의 주요 제원은 아래 표와 같다.

Table 2. 대공포 주요 제원

포구속도, m/s	1000
구경, m	0.03
사각 및 방위각 한계, deg	90
유효사거리, km	4
발사율, salvo/sec	1

Table 3. 표적 항공기 자료

표적 항공기 크기	Length, m	3.05
	Width, m	6.1
	Height, m	1.5
취약면적	Top/ Bottom, m ²	2.3
	Left/ Right, m ²	1.86
	Front/ Back, m ²	0.186
속도	km/h(M)	360(0.33)
고도	m	100

Table 3과 같이 속도 및 고도가 각각 M0.33, 100m인 표적항공기를 기동을 하지 않고 등속 수평비행으로 대공포 기지 상공을 통과 시키며 해석을 수행하였다.

Fig. 5, 6은 비행표적의 이동 위치에 따른 각 살보당 살상확률 분포와 누적 살상확률을 나타낸 것이다. 표적이 대공포에 접근함에 따라 살상확률이 커지고 다시 멀어지면 확률이 떨어지는 것을 볼 수 있다. 해석에 사용된 표적에 대해서 각 살보당 살상확률이 최대 0.14를 넘지 않는 것을 볼 수 있다. Fig. 6은 표적의 누적 살상확률을 나타낸 그림으로 표적이 대공포에 접근함에 따라 누적살상확률이 커지다가 대공포의 최대 유효사거리를 벗어나면 일정하게 유지된다.

Fig. 7은 대공포의 발사가능영역 및 살상확률 분포를

나타낸 그림이다. 측방 1km이상 이격하여 통과하는 표적에 대해서 살보당 살상확률은 최대 0.002로 나타났고 누적살상확률 또한 0.1을 넘지 않는 것을 확인하였다.

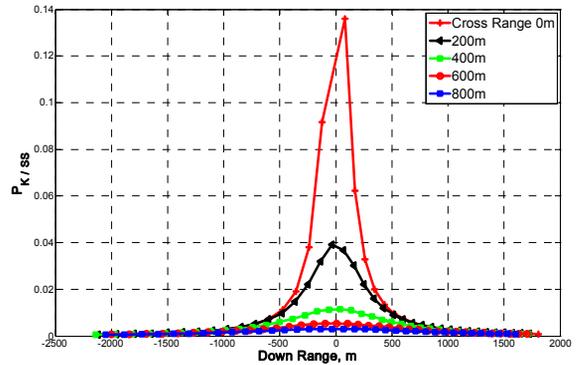


Fig. 5. 단일 살보당 표적 살상확률

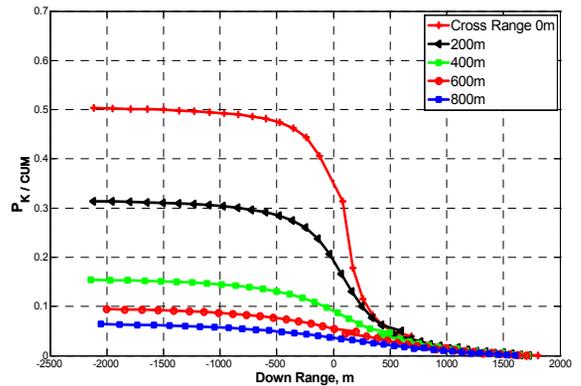


Fig. 6. 누적살상확률

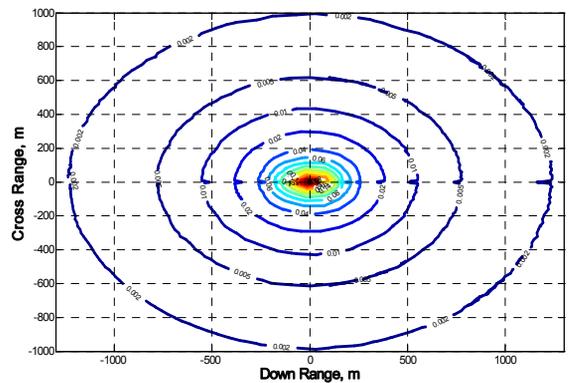


Fig. 7. 대공포 발사가능 영역 및 살상확률 분포

Fig. 8은 동일한 대공포 입력자료와 표적항공기에 대해서 본 연구에서 해석한 결과와 참고문헌^[9]의 MSA의 대공포 모델인 AEM의 누적살상확률을 비교한 것이다.

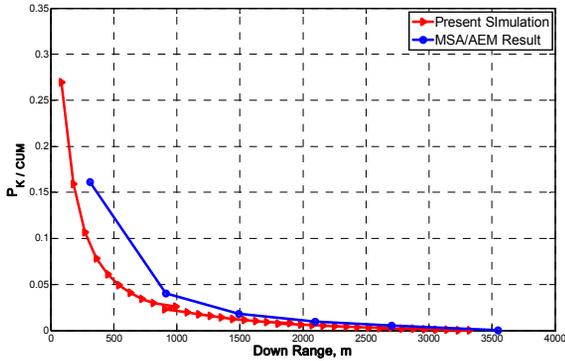


Fig. 8. AEM모델 누적살상확률 비교

동일한 수의 대공포를 이용하여 보다 효율적인 방어를 수행하기 위해서는 대공포의 적절한 배치가 고려되어야 한다^[10]. Fig. 9는 대공포 4문의 여러 배치 상황에 대해서 표적항공기의 살상확률 및 누적 살상확률을 비교하였다. 표적 항공기는 등속 직선비행으로 좌표 (0,0,0)을 통과하는 상황으로 해석을 수행하였다. 일반적으로 포가 4문일 경우에는 ‘N’자 형태로 5문일 경우에는 ‘W’자 형태의 배치가 효과적인 것으로 알려져 있다. Fig. 9의 해석결과에서도 ‘N’자 형태로 배치한 결과가 0.9로 가장 높은 누적살상확률을 보였다.

Table 4. 4문 대공포 배치형 및 좌표

대공포 배치	대공포 좌표(m)			
1 일자형 배치	1:(0.0, 600.0)	2:(0.0, 200.0)	3:(0.0, -200.0)	4:(0.0, -600.0)
2 일자형 배치	1:(600.0, 0.0)	2:(200.0, 0.0)	3:(-200.0, 0.0)	4:(-600.0, 0.0)
3 정사각형 배치	1:(400.0,400.0)	2:(400.0,-400.0)	3:(-400.0,400.0)	4:(-400.0,-400.0)
4 ‘N’형 배치	1:(-200.0,600.0)	2:(200.0,200.0)	3:(-200.0,-200.0)	4:(200.0, -600.0)

Fig. 10~12는 표적 항공기의 비행속도가 M = 0.3, 0.7, 1.0으로 변화하는 경우에 대해서 표적항공기의 누

적살상확률을 나타낸 것이다. 대공포 기지를 정면으로 접근하는 표적의 경우 비행속도가 M = 0.7, 1.0으로 증가할 때 누적살상확률은 0.25, 0.1로 급격하게 감소하는 결과를 얻었다.

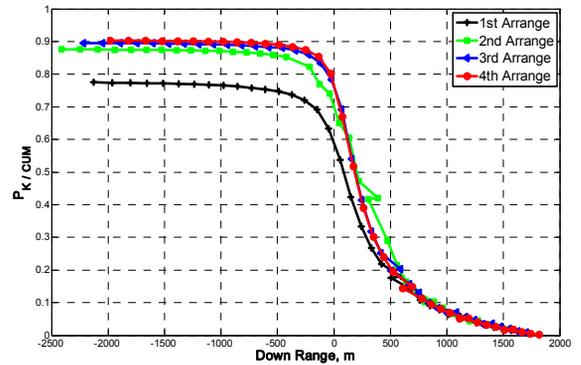


Fig. 9. 대공포 배치형태에 따른 누적살상확률

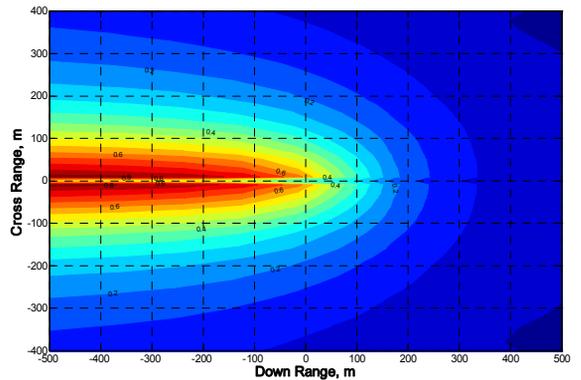


Fig. 10. 표적 속도 M=0.3인 경우 누적 살상확률 분포

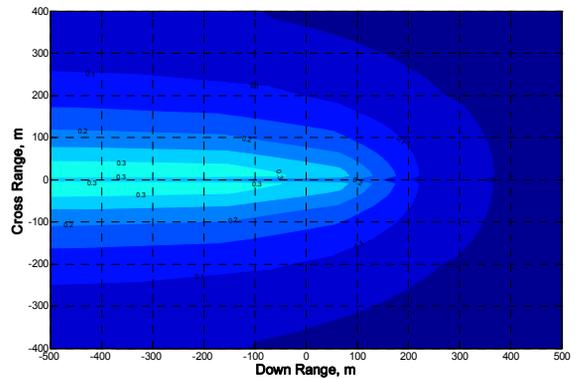


Fig. 11. 표적 속도 M=0.7인 경우 누적 살상확률 분포

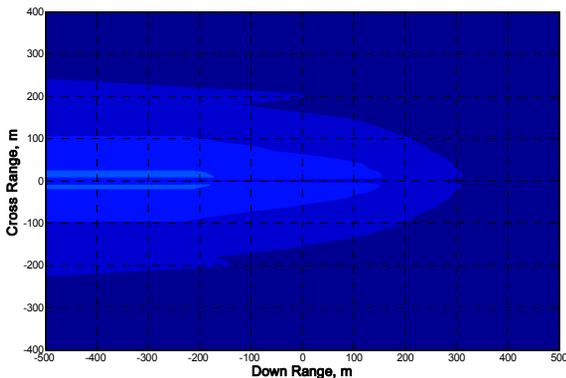


Fig. 12. 표적 속도 M=1.0인 경우 누적 살상확률 분포

7. 결론

본 연구에서는 가상공중교전 모델 개발을 위한 대공 위협 무기체계중 대공포 모델 설계하였다. 현재 획득한 표적 항공기의 비행상태로부터 조준점을 예측하고 포사격을 실시하여 살상확률 및 누적 살상확률을 해석하는 모델을 설계하였다. 또한 대공 위협영역을 통과하는 비행체에 대한 생존성을 분석하였다. 대공포의 정량적 요격영역을 해석하는 절차와 결과를 제시하였고 해석결과에 대해서 MSA의 AEM프로그램의 결과와 비교하였다. 대공포 또는 표적항공기의 위치 및 표적 항공기의 속도가 표적의 살상확률과 유효살상영역에 어떠한 영향을 미치는지를 살펴보았다. 그리고 화망을 구성하기 위해 중요한 요소인 대공포의 배치에 대해 4문의 대공포를 이용하여 여러 배치상황에 대해 살상확률을 해석하고 비교하였다.

본 연구에서 설계한 대공포 모델의 해석결과를 이용하여 가상공중교전 모델 개발을 위한 대공 위협모델의 적용 가능성을 확인하였다.

References

- [1] Robert H. M. Macfadzean, Surface-Based Air Defense System Analysis, Artech House, 1992.
- [2] Bradley M. Lufkin, "The Air Defense Modern Gun Effectiveness Model(MGEM)", Army Materiel Systems Analysis Activity(AMSAA) Technical Report No. 360, 1982.
- [3] 정경진, "경 전투기의 공대지/공대공 임무효과도 분석에 관한 연구", 한국군사과학기술학회지, Vol. 1, No. 1, pp. 92~118, 2008.
- [4] 양창덕, 양지연, 김천영, 전제환, 이정석, "가상공중교전 모의를 위한 공대지 임무분석 연구", 한국항공우주학회 2010 추계 학술발표회, pp. 1252~1255, 2010.
- [5] 백승욱, "전투기 공대지/함 임무분석 Simulation Model 개발", 국방과학연구소 연구보고서, 2005.
- [6] 김천영, 전제환, 지철규, 이호근, 이상민, "가상공중 교전 모델 시스템 아키텍처에 대한 연구", 한국항공우주학회 추계학술발표회, 2009.
- [7] Lt. Col. Deepak et. al, "Modeling of Anti Aircraft Gun Orientation", National Systems Conference NSC, pp. 206~212, 2008.
- [8] Ball, Robert E, The Fundamentals of Aircraft Combat Survivability Analysis and Design, AIAA Education Series, 2003.
- [9] 이수창, 강기륜, 김진수, "MSA 모델을 이용한 대공무기 위협도 분석 연구", 제10차 유도무기 학술대회 논문집, 국방과학연구소, pp. 28~33, 2010.
- [10] 황수진, "대공방어 무기체계의 교전효과도 향상을 위한 함상 배치 위치 분석", 한국군사과학기술학회지, Vol. 9, No. 3. 2007.