

# 미사일/로켓 방어체계의 RPG-7에 대한 전차방호 성능분석

하종수<sup>\*,1)</sup> · 이의혁<sup>1)</sup> · 이현아<sup>1)</sup> · 박규철<sup>1)</sup> · 조규공<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 국방과학연구소

## Performance Analysis of Missile/Rocket Defense System for RPG-7 Defense of Main Battle Tank

Jong-Soo Ha<sup>\*,1)</sup> · Eui-Hyuk Lee<sup>1)</sup> · Hyun-Ah Lee<sup>1)</sup> · Gyu-Churl Park<sup>1)</sup> · Kyu-Gong Cho<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Agency for Defense Development, Korea

(Received 15 July 2013 / Revised 2 April 2014 / Accepted 25 April 2014)

### ABSTRACT

MRDS is a short range missile/rocket defense system which protects a main battle tank(MBT) from threats at a short range. It is composed of 2 radars, 2 infrared trackers(IRT)s, 1 fire control computer(FCC), 2 launchers and countermeasures. In this paper, the radar and the IRT models based on sensing errors, the FCC model based on filtering errors, the launcher model based on driving errors and the countermeasure model based on flying errors are proposed to analyze the defense performance with the approaching RPG-7 and the moving MBT. The simulation results are presented to evaluate and verify the effectiveness of the proposed method.

Key Words : Modeling(모델링), Performance Analysis(성능분석), MRDS(미사일/로켓 방어체계)

### 1. 서론

능동파괴체계(Hard-Kill System)는 근거리 미사일/로켓 방어체계로서 전차에 탑재되어 위협체를 탐지·추적하고 대응탄을 발사하여 이를 무력화시키는 것을 목적으로 한다. 본 시스템은 위협체를 탐지·추적하는 센서인 탐지추적레이더와 열상추적기(IRT : InfraRed Tracker), 위협판단 및 대응을 통제하는 사격통제컴퓨터, 위협체를 무력화시키는 대응수단인 발사장치와 대

응탄으로 구성된다<sup>1)</sup>. 이러한 구성품들은 각각의 오차 특성에 따라 체계의 방호성능에 영향을 미치게 된다.

Fig. 1에 능동파괴체계의 교전 개념을 도시하였다. 탐지추적레이더와 IRT는 전파 및 IR 영상이 제공하는 오차 범위 내에서 표적을 탐지·추적하며, 사격통제컴퓨터는 센서 데이터를 처리하여 연산 오차 범위 내에서 위협 판단 및 대응 명령을 수행하며, 대응수단인 발사장치는 기계적인 구동 오차 범위 내에서 구동하고, 대응탄은 화학적인 조성파괴 물리 법칙에 의해 탄 궤적 및 속도, 자세 오차에 따라 비행하고 일정한 속도 및 위치 분포를 가지는 파편을 발사하여 미사일 또는 로켓을 타격 및 무력화함으로써 전차를 방호하게

\* Corresponding author, E-mail: jsha@add.re.kr  
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

된다.

본 논문에서는 능동파괴체계의 방호성능을 분석하기 위해 체계 구성품들의 정확도, 즉 오차 범위에 기반하여 RPG-7에 대한 전자방호 성능분석 기법을 제안한다. 이를 위해 개별 구성품의 수학적 모델링에 기반한 모델 설계 기법과 전자방호를 위한 교전 분석의 개념 및 기법을 제안하며, 유형별 시나리오에 대한 시뮬레이션 결과를 비교·분석함으로써 제안하는 RPG-7에 대한 전자방호 성능분석 기법의 효용성을 검증한다.

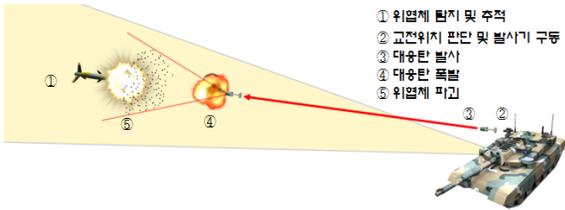


Fig. 1. 능동파괴체계 교전 개념

## 2. 관련 연구 및 교전 요소 분석

근거리 접근 미사일/로켓에 대한 방호성능분석과 관련된 기존 연구로서 소프트킬 능동방호장치의 성과와 교전효과를 분석한 연구가 있다<sup>[2]</sup>. 본 연구의 경우 유도조종 대전차미사일의 운동특성을 연구하고 사격통제 알고리즘에 기반하여 방호성능 분석기법을 제시함으로써 참고할만하지만 미사일/로켓 방어체계의 핵심 기술인 센서특성에 대한 분석이 없고, 소프트킬 방식의 방어체계 특성 상 위협체에 대한 타격에 의한 무력화 과정을 참고할 수 없다는 단점이 있다.

이외에도 소프트킬 능동방호장치의 탐지레이더의 특성을 분석하고 이를 기반으로 성능분석을 수행한 연구가 있는데<sup>[3]</sup> 이 경우 센서 수신신호에 대한 상세한 모델링을 수행했다는 의미가 있으나 방어체계의 다른 구성품에 대한 고민이 없다는 단점이 있다. 함정용 미사일 방어체계의 잔류효과를 분석한 연구의 경우<sup>[4]</sup> 파괴된 미사일의 파괴특성을 분석하고 이를 기반으로 함정에 대한 잔류효과를 분석한 의미는 있으나 역시 체계 전체에 대한 고민은 없다는 한계가 있다.

이와 같이 근거리 미사일 방어체계와 관련하여 일부 성능에 집중한 관련 연구의 한계를 극복하고 근거리에서 접근하는 미사일/로켓에 대한 능동파괴체계의 전자방호 성능분석 연구의 토대를 마련하기 위해, 체

계적 관점에서 각 구성품의 특성분석 및 방호성능분석과 관련한 기초 개념을 연구하고<sup>[5]</sup> 능동파괴체계의 탑재체계인 전차의 동특성에 대한 분석을 수행한 연구를<sup>[6]</sup> 본 논문에서는 참고하였다.

능동파괴체계 각 구성품의 성능특성을 분석하고 이를 기반으로 방호성능을 분석하기 위해서는 교전 요소에 대한 분석이 필요하다. 이와 관련하여 능동파괴체계의 방호성능은 식 (1)과 같이 무력화 확률  $P_k$ 로 나타낼 수 있다.

$$P_k = P_d \cdot P_{h/d} \cdot P_{k/h} \quad (1)$$

$P_d$ 는 센서가 위협체를 탐지·추적하는 확률,  $P_{h/d}$ 는 위협체가 탐지되었을 때 파편에 의해 타격될 확률,  $P_{k/h}$ 는 파편이 위협체를 타격했을 때 위협체가 무력화될 확률을 나타낸다.  $P_{k/h}$ 는 파편위력이 결정적인 성능요소가 되므로 파편위력이 강하면 1발만으로도 위협체를 무력화할 수 있고 약하면 충분한 개수의 파편이 위협탄두와 충돌해야 한다. 이는 별도의 파편-위협탄두 간 파괴 시뮬레이션과 실험 등을 통해 분석되므로 본 논문에서는  $P_{k/h}$ 와 연동하여 유의미한 결과를 도출하기 위한 파편-위협탄두 간 충돌개수별 충돌사건 발생확률 즉, 충돌확률(교전확률)  $P_h (= P_d \cdot P_{h/d})$ 을 구함으로써 방호성능을 분석한다.

이와 관련하여 교전 분석의 기본 개념을 Fig. 2에 도시하였다<sup>[5]</sup>. 능동파괴체계 각 구성품의 성능 요소는 교전 좌표계 상에서 각각의 오차 요소를 독립적으로 가지게 되므로 교전 시 이들의 조합에 의해 최종 방호성능이 결정된다.

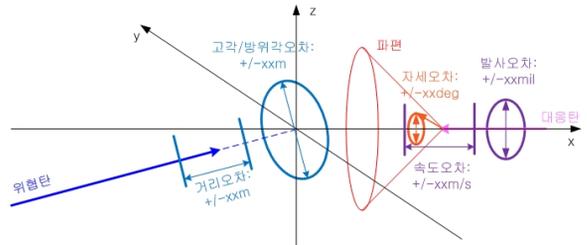


Fig. 2. 교전 분석 기본 개념

이러한 교전 개념을 바탕으로  $P_h$ 를 분석하기 위해 본 논문에서는 시간 변위에 따른 파편의 공간 좌표  $A(t) = (x_{frg}(t), y_{frg}(t), z_{frg}(t))$ 와 위협탄두 좌표

$B(t) = (x_{trt}(t), y_{trt}(t), z_{trt}(t))$  간의 거리가 탄두의 반경  $\alpha(t)$ 보다 작을 때 각 좌표 간 충돌을 식 (2)와 같이 규정함으로써 충돌여부를 판단하게 되고 이를 Monte-carlo 시뮬레이션 횟수에 대한 충돌사건횟수의 비로써 충돌확률  $P_h$ 를 구한다.

$$|A(t) - B(t)| \leq \alpha(t) \tag{2}$$

### 3. 제안하는 방호성능분석 기법

제안하는 능동파괴체계 분석 모델을 Fig. 3에 나타내었다.

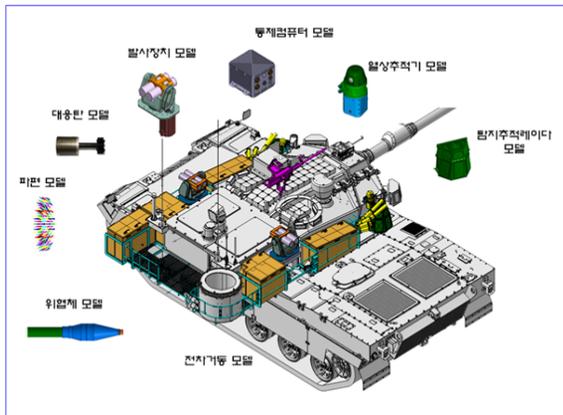


Fig. 3. 능동파괴체계 분석 모델

전차방호 성능분석을 위해서는 능동파괴체계의 구성품인 탐지추적레이더, IRT, 사격통계컴퓨터, 발사장치, 대응탄 모델과 더불어 위협체와의 교전을 분석하기 위한 파편 모델, 위협체 모델을 설계해야한다. 이 때 능동파괴체계 각 구성품의 고유좌표계는 지구좌표계로 변환되어 계산되며 능동파괴체계가 탑재되는 전차 방호성능을 분석하기 위해 전차 거동에 따른 좌표변환이 계산과정에서 반영되어야하므로 체계 좌표계를 제공하는 전차 거동에 대한 모델과의<sup>[6]</sup> 연동이 필요하다. 본 논문에서는 이러한 분석 모델을 주요 성능에 대한 오차 모델로서 설계하며 위협체로서 RPG-7 모델과 전차 거동 모델은 대상의 사양 및 특성을 반영하여 설계한다. Table 1에 각 분석 모델의 사양을 정리하였으며 이를 활용한 교전 분석 알고리즘을 Fig. 4에 제시하였다.

Table 1. 분석 모델 사양

모델	항목	사양
위협체	종류	RPG-7
	유효 직경	60 mm (라이너)
	속도	시험 데이터
	궤적	직선/시선유도
탐지추적레이더	거리 오차	xx cm
	방위각/고각 오차	xx cm
	속도 오차	xx m/s
IRT	픽셀 오차	xx pixel
사통컴퓨터	연산 오차	xx cm
발사장치	구동 오차(방위각)	± xx mil
	구동 오차(고각)	± xx mil
대응탄	자세 오차	± xx °
	속도 오차	xx ± yy m/s
파편	직경	xx mm
	속도 분포 오차	시험 데이터
	위치 분포 오차	시험 데이터
전차 거동	기동 속도	시험 데이터
	포탑 회전 속도	시험 데이터
	자세	시험 데이터

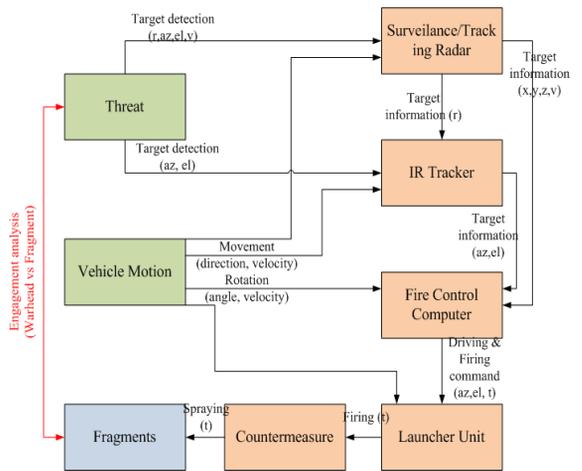


Fig. 4. 교전 분석 알고리즘

3.1 위협체 모델

본 논문에서는 위협체 모델로서 RPG-7을 설정하였다. 탄두와 파편 간 충돌을 분석해야 하므로 탄두 형상을 12각\*10등분으로 분할하여 모델링하였으며 위협체의 속도 시험 데이터를 획득하여 각 구간에서의 속도값을 curve-fitting하여 추정하였다. 위협체의 궤적은 직선 궤적 또는 유도조종에 의한 궤적을<sup>[2]</sup> 적용하였다. Fig. 5에 위협체 모델 개념을 나타내었다.

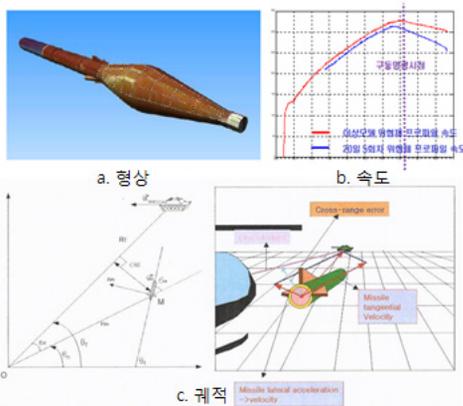


Fig. 5. 위협체 모델 : a. 형상, b. 속도, c. 궤적

3.2 탐지추적레이더 모델

탐지추적레이더는 거리/방위각/고각/속도 오차가 주요 오차 요소로서 작용한다. 거리 및 방위각/고각 정확도는 SNR(Signal to Noise Ratio)에 따라 변하므로 Blake's chart를 통해 관련 변수를 분석하여 식 (3)에 의해 SNR를 구한 다음 해당 오차 요소를 분석한다.<sup>[7]</sup> 반면 속도 정확도는 SNR과는 관련이 없으며 식 (4)와 같이 중심주파수, FFT 개수 등에 따라 분석할 수 있다.

$$SNR = \frac{P_t \tau N_p G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 L_s k T F} \quad (3)$$

$$\Delta v = \frac{f_{PRFC}}{2f_c N_{FFT}} \quad (4)$$

이러한 오차 요소는 위협체 정보에 대해 거리에 따라, 빔폭에 따라, 가변적으로 적용되어 획득 정보를 사격통제컴퓨터와 IRT 모델에 제공한다. 이와 같이 레이더 획득 정보에 오차 요소를 반영하는 모델링 알고리즘을 Fig. 6에 제시하였다.

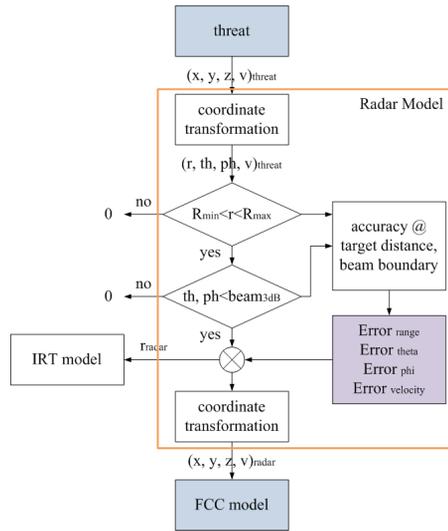


Fig. 6. 탐지추적레이더 모델

3.3 IRT 모델

IRT는 방위각/고각 오차가 주요 오차 요소로서 작용한다. 방위각 및 고각 정확도는 IRT의 화면 상에서 픽셀 오차로서 표현되며 광학계의 시계 오차  $\sigma_{p,FOV}$ , 정렬 오차  $\sigma_{p,align}$ , 추적 오차  $\sigma_{p,tracking}$ 에 따라 식 (5)와 같이 구할 수 있다. 이와 같이 분석된 오차 요소는 입력되는 레이더 거리 정보에 따라 가변적으로 적용되어 획득 정보를 사격통제컴퓨터 모델에 제공한다. 이러한 모델링 알고리즘을 Fig. 7에 제시하였다.

$$\sigma_{p,total} = \sqrt{\sigma_{p,FOV}^2 + \sigma_{p,align}^2 + \sigma_{p,tracking}^2} \quad (5)$$

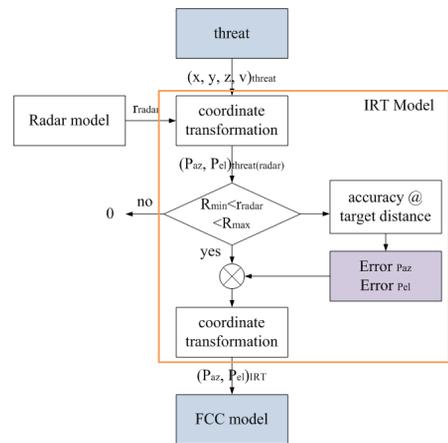


Fig. 7. IRT 모델

### 3.4 사격통제컴퓨터 모델

사격통제컴퓨터는 탐지추적레이더와 IRT의 표적 획득정보를 융합·추적하여 교전 위치와 교전 시간을 예측함으로써 발사장치를 구동시키고 대응탄을 발사시킨다. 따라서 센서 융합 필터와 추적 필터 성능에 따라 교전 위치에서의 연산 오차가 발생하게 된다. 이와 관련한 모델링 알고리즘을 Fig. 8에 제시하였다.

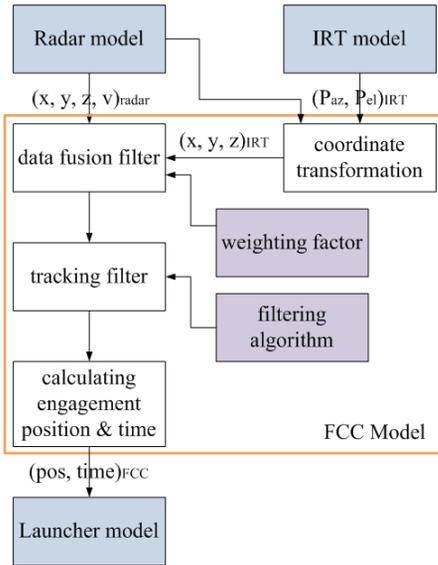


Fig. 8. 사격통제컴퓨터 모델

### 3.5 발사장치 모델

발사장치는 구동 시 방위각/고각 오차가 주요 오차 요소로서 작용한다. 이 때 시간에 따른 방위각/고각 변화 특성이 성능에 영향을 미치므로 위치제어루프 및 속도제어루프를 기반으로 오차 요소 분석을 수행하였으며 Fig. 9에 분석 결과를 나타내었다.

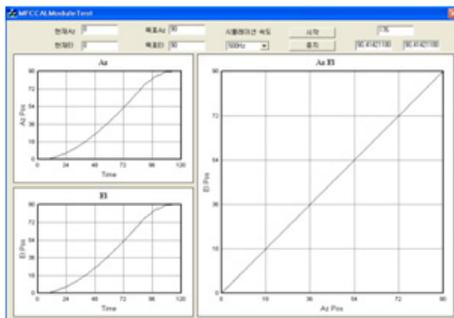


Fig. 9. 발사장치 오차 분석 결과 : 방위각/고각

발사장치는 사격통제컴퓨터의 구동 명령을 받아 구동 후 일정 시간 뒤에 대응탄을 발사하는데 앞서 분석된 오차 요소를 반영하는 모델링 알고리즘을 Fig. 10에 제시하였다.

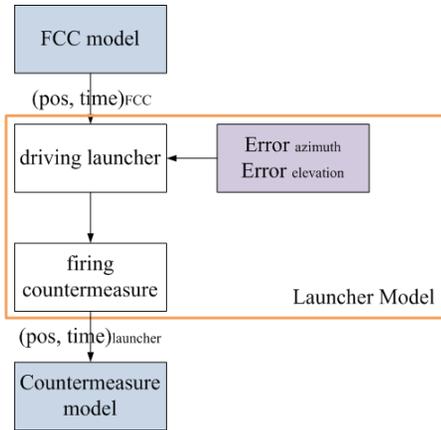


Fig. 10. 발사장치 모델

### 3.6 대응탄 모델

대응탄은 발사 후 속도 및 자세 오차가 주요 오차 요소로 파악된다. 대응탄의 반응각과 비행궤적, 비행 속도에 대한 시뮬레이터를 기반으로 대응탄의 오차 요소를 분석하였으며 Fig. 11에 분석 결과 예를 나타내었다.

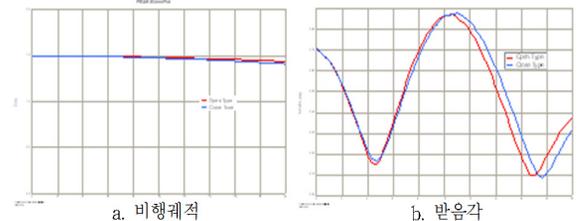


Fig. 11. 대응탄 오차 분석 결과 :  
a. 비행궤적, b. 반응각

대응탄은 발사장치 발사 후 설계된 궤적으로 비행하며 설계된 지연 신관값에 따라 일정 시간 후에 파편을 분사한다. 따라서 파편 분사 시 앞서 분석된 대응탄의 속도 오차로 인한 신관기폭 지연 오차와 대응탄의 자세 오차가 파편과 위협체 간 충돌에 영향을 미치게 된다. 이러한 모델링 알고리즘을 Fig. 12에 제시하였다.

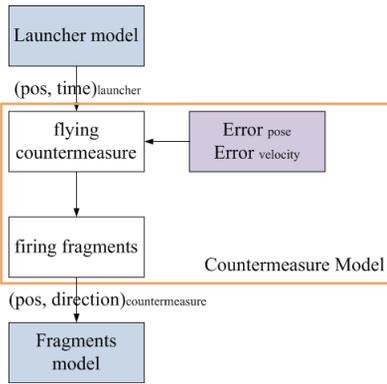


Fig. 12. 대응탄 모델

### 3.7 파편 모델

파편은 분사 후 속도 및 위치 분포 오차가 주요 오차 요소로 파악된다. 시험 데이터를 통해 이를 분석하였으며 평균 및 분산을 산출해 파편의 속도 분포와 위치 분포를 재구성하였다. Fig. 13에 파편의 속도 및 위치 분포를 도시하였다.

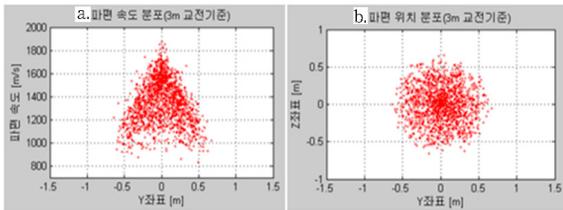


Fig. 13. 파편 오차 분석 및 재구성 :  
a. 속도 분포, b. 위치 분포

이에 따라 파편은 분사되는 대응탄의 위치 및 각도에서, 파편의 속도 및 위치 분포에 따라 분사된다. 모델링 알고리즘을 Fig. 14에 제시하였다.

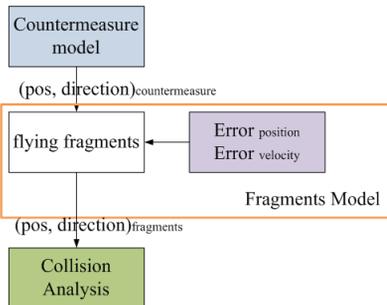


Fig. 14. 파편 모델

### 3.8 전차 거동 모델 연동

본 논문에서는 체계 거동 모델로서 능동과외체계의 탑재체계인 전차를 설정하였으며 관련 연구 결과를 활용하였다<sup>16)</sup>. 전차의 기동, 포탑 회전, 진동에 의한 전차의 roll, pitch 운동은 능동과외체계의 체계 좌표계를 왜곡시키기 때문에 Fig. 15와 같이 사격통제컴퓨터, 탐지추적레이더, IRT, 발사장치의 고유 좌표계를 전차 위에 설정하고 전차의 거동에 따른 전차방호성능을 분석하였다.

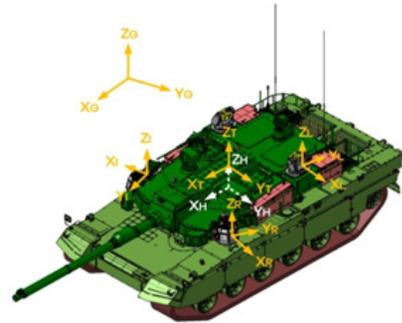


Fig. 15. 전차 탑재 시 좌표계 간 관계

위 좌표계 상에서 각 구성품 좌표는, 예를 들어 탐지추적레이더의 구 좌표  $p(\theta_p, \phi_p, r_p)$ 는 식 (6)에 의해 직교 좌표  $p(x_p, y_p, z_p)$ 로 변환되어<sup>8)</sup> 분석되므로 이와 같은 좌표계 간 변환을 전차 거동 모델과 연동하여 미리 정해진 수식에 따라 분석함으로써 전차방호 성능 분석을 수행한다.

$$\begin{aligned} x_p &= r_p \cdot \cos(\phi_p) \cdot \cos(\theta_p), \\ y_p &= r_p \cdot \cos(\phi_p) \cdot \sin(\theta_p), \\ z_p &= r_p \cdot \sin(\phi_p) \end{aligned} \tag{6}$$

## 4. 시뮬레이션 결과 분석

이상과 같이 교전 분석 기법과 분석 모델을 설계하여 Fig. 16과 같이 분석 시뮬레이터를 구현하였다. 이를 통해 위협체 궤적 및 속도 등의 조건, 전차 이동 경로 및 포탑 회전 등의 조건을 설정하고, 분석하고자 하는 각 구성품의 오차 요소를 설정한 후 Monte-carlo 시뮬레이션을 수행하여 시나리오별  $P_h$  통계값을 도출하였다.

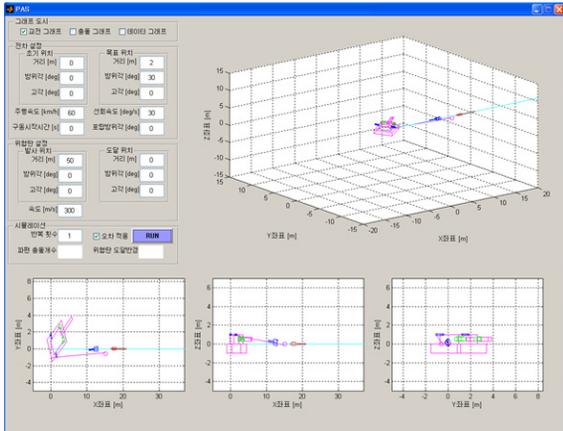


Fig. 16. 시뮬레이션 GUI

본 논문에서는 제안하는 성능분석 기법의 효용성을 검증하기 위해 능동파괴체계 구성품의 성능 유형별  $P_h$  분석 결과를 제시한다.

4.1 발사장치/대응탄 유형별  $P_h$  비교 분석

발사장치와 대응탄의 경우 발사장치의 후방개방여부에 따라 개방형과 폐쇄형 두 가지 유형으로 구분되는데 이에 따라 각 성능 요소가 달라진다. 발사장치와 대응탄의 오차 요소는 이러한 성능 요소에 영향을 받게 되므로 Table 2와 같이 이를 정리하였다.

Table 2. 분석 성능 요소(발사장치/대응탄 유형)

항목		개방형	폐쇄형
발사장치	구동시간	xx ms	xx ms
	충격회전각	xx °	xx °
	고각변위량	xx °	xx °
대응탄	자세오차	± xx °	± xx °
	속도오차	xx ± yy m/s	xx ± yy m/s

발사장치의 구동시간, 발사충격에 의한 회전각 오차, 고각 변위량은 개방형이 폐쇄형보다 유리하며 대응탄의 자세 오차와 속도 오차는 폐쇄형이 개방형보다 유리한데 Monte-carlo 시뮬레이션 1000회 수행 결과 Fig. 17과 같은 결과를 얻었다. 분석 결과 개방형의  $P_h$ 가 폐쇄형의  $P_h$ 보다 우수함을 확인하였다.

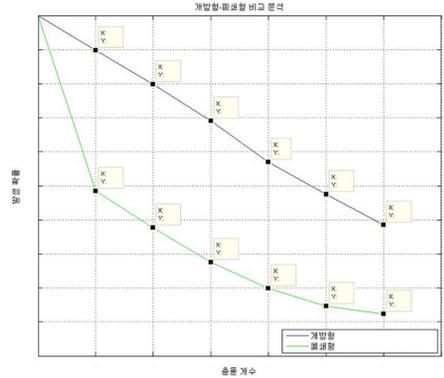


Fig. 17. 시뮬레이션 결과 : 발사장치/대응탄 유형

4.2 파편 유형별  $P_h$  비교 분석

파편의 경우 볼, 14면체A, 14면체B 유형이 있는데 Table 3과 같이 각 성능 요소를 구분하였다.

Table 3. 분석 성능 요소(파편 유형)

항목	볼	14면체A	14면체B
파편 개수	xx 개	xx 개	xx 개
파편 속도 오차	xx±yy m/s	xx±yy m/s	xx±yy m/s

파편의 개수 및 속도 오차 모두 볼형이 다른 유형보다 우수하므로 Monte-carlo 시뮬레이션 1000회 수행 시 Fig. 18과 같은 결과를 얻을 수 있다. 예상한대로 볼형의  $P_h$ 가 가장 우수하나 그 차이가 크지 않기 때문에 충돌 시 무력화 확률인  $P_{k/h}$ 를 파편 유형별로 반영할 경우, 방호확률  $P_k$ 는 Fig. 18의  $P_h$ 와는 다르게 평가될 수도 있다.

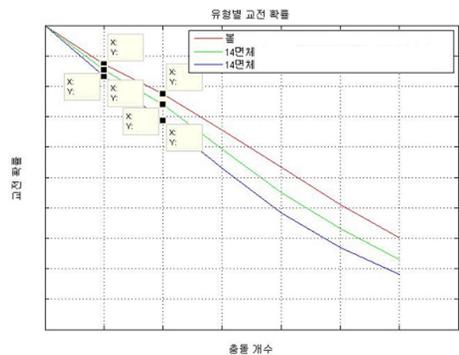


Fig. 18. 시뮬레이션 결과 : 파편 유형

4.3 전자 주행 시  $P_h$  비교 분석

능동파괴체계는 전자에 탑재되기 때문에 교전성능이 전자 거동에 어떻게 영향 받는지 분석할 필요가 있다. 이를 위해 Table 4와 같이 전차가 주행할 때를 가정하여  $P_h$ 를 분석하였다.

Table 4. 분석 성능 요소(전자 주행)

항목	사양		
	20km/h	40km/h	60km/h
전자 주행 속도	20km/h	40km/h	60km/h

Monte-carlo 시뮬레이션 수행 결과 Fig. 19와 같은 결과를 얻을 수 있었으며 20km/h, 40km/h, 60km/h 모두 방호확률  $P_k$ 로 기대되는 붉은색 범위 내에서 거의 비슷한  $P_h$  결과가 나타났다.

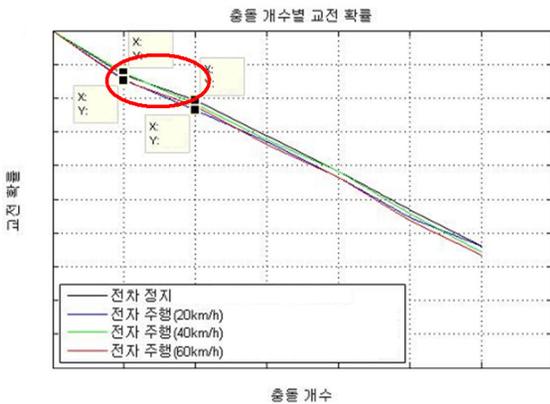


Fig. 19. 시뮬레이션 결과 : 전자 주행

5. 결론

본 논문에서는 능동파괴체계의 방호성능을 분석하기 위한 전자방호 성능분석 기법을 제안하였다. 센서의 정확도에 기반한 탐지추적레이더 및 IRT 모델, 데이터 융합 및 추적 연산 오차에 기반한 사격통제컴퓨터 모델, 발사 시 구동 오차에 기반한 발사장치 모델, 대응탄 자세 및 비행 오차에 기반한 대응탄 모델, 속

도 및 위치 분포에 기반한 파편 모델, 기동/회전/진동 운동에 기반한 전자 거동 모델, RPG-7 특성에 기반한 위협체 모델을 모델링 알고리즘 위주로 제시하였다.

파편과 위협체 탄두 간 충돌을 분석하는  $P_h$  위주의 교전 분석 기본 개념을 제시하고 이에 대한 판단 기준을 설정하여 분석 알고리즘을 제안하였으며 모델 설계와 더불어 시뮬레이션 GUI를 구현하였다. 결과로서 각 구성품의 성능 유형별 성능분석 결과를 제시하였으며 제안하는 기법이 성능분석에 어떻게 사용될 수 있는지를 보여주었다. 본 논문에서 다루고 있는  $P_h$ 의 경우 파편 충돌 개수에 따라 Fig. 19의 붉은색 원 범위 정도의 방호확률  $P_k$ 가 예측되었는데 실제 RPG-7을 대상으로 한 방호성능시험에서 능동파괴체계의 시험결과 또한 유사한 수준으로 판정됨으로써 제안하는 성능분석 기법의 효용성을 검증하였다.

References

- [1] 송영덕 외, “능동파괴장치의 체계적용성 연구,” 제 14회 지상무기 학술대회, 2006.
- [2] Jong-kwang Lim, et al, “A Survivability Analysis of Soft-Kill Active Protection System Installed Armored Vehicle Using Engagement Simulator,” Spring Simulation Multiconference 2006, pp. 329-334, 2006.
- [3] 하중수 외, “지상기동무기체계 탑재 미사일 경고 레이더 시뮬레이터 설계,” 한국전자과학회논문지, 제21권 제4호, pp. 331-339, 2010.
- [4] 이성우 외, “무력화된 대함미사일 잔류효과 M&S 연구,” 한국군사과학기술학회 종합학술대회, 2013.
- [5] 조규공 외, “능동파괴체계 M&S 연구,” 한국군사과학기술학회 종합학술대회, 2011.
- [6] 하중수 외, “근거리 미사일방어시스템 성능분석을 위한 전자 구동 모델링 기법,” 한국군사과학기술학회지, 제14권 제2호, pp. 173-180, 2011.
- [7] Skolnik, M. I., Introduction to Radar Systems, McGraw-Hill Book Company, 3<sup>rd</sup> edition 2001.
- [8] K. A. Stroud., Engineering Mathematics, 4th edition, Macmillan.