

탄도탄 요격시험 안전구역 산출을 위한 모델링 및 시물레이션

이성균[†] · 고진용 · 한용수 · 김창환

Estimation of Safety Area for Intercept Debris by Using Modeling and Simulation

Sungkyun Lee[†] · Jinyong Go · Yongsu Han · Changhwan Kim

ABSTRACT

The ballistic missile threat continues to increase with the proliferation of missile technology. In response to this threat, many kinds of interceptors have been emphasized over the years. For development of interceptor, systematic flight tests are essential. Flight tests provide valuable data that can be used to verify performance and confirm the technological progress of ballistic missile defense system including interceptor. However, during flight tests, civilians near the test region could be risk due to a lot of intercept debris. For this reason, reliable estimate of safety area for the flight tests should be preceded. In this study, prediction of safety area is performed through modeling and simulation. Firstly, behaviors of ballistic missile and interceptor are simulated for those entire phase including interception to obtain the relative intercept velocity and the relative impact angle. By using obtained data of kinetic energy, the fragment ejection velocity is calculated and fragment trajectories are simulated by considering drag, gravity and wind effects. Based on the debris field formation and hazard evaluation of debris, final safety area is calculated.

Key words : ballistic missile, interceptor, intercept debris, flight test, safety area, modeling, simulation

요약

과학기술의 발전에 따라 탄도탄에 대한 위협이 나날이 증대되고 있으며, 이러한 위협에 대처하기 위한 탄도탄 요격미사일에 대한 개발이 요구되고 있다. 대탄도탄용 요격미사일의 개발을 위해서는 요격시험이 필수적이다. 시험을 통해 얻은 계측자료를 활용하여 요격미사일을 포함한 전체적인 요격 시스템의 성능을 확인할 수 있다. 그러나 요격시험 시에는 요격에 의한 파편이 발생되기 때문에 안전을 위한 민간인의 접근 통제가 필요하다. 따라서 요격시험에 앞서 요격 파편에 대한 안전구역의 신뢰도 높은 추정이 선행되어야 한다. 본 논문에서는 모델링 분석 및 시물레이션을 활용하여 요격 파편에 대한 안전구역의 산출하였다. 우선, 탄도탄과 요격미사일의 발사단계에서 요격까지의 전 과정에 대한 시물레이션을 수행하였고, 요격 시점에서의 상대 속도 및 상대 각도를 산출하였다. 이 결과를 활용하여 요격 시의 에너지를 계산하고 요격 파편의 방출속도를 산출하였다. 이후, 파편에 작용하는 항력과 중력을 고려하여 낙하 궤적을 산출하였고, 파편의 낙하 지점과 위험도를 종합적으로 고려하여 최종 안전구역을 산출하였다.

주요어 : 탄도탄, 요격미사일, 요격 파편, 요격시험, 안전구역, 모델링, 시물레이션

1. 서론

최근 탄도탄에 대한 위협이 증가함에 따라 이러한 위협에 대처하기 위한 대탄도탄용 요격미사일에 대한 개발이 요구되고 있다. 한국형 미사일방어체계는 적군의 탄도탄 공격효과를 무력화 또는 감소시키는 역할을 하며, 탄도탄이 대기권 내부에서 돌입한 후에 요격하는 종말단계

Received: 13 December 2019, Revised: 31 March 2020,
Accepted: 31 March 2020

[†] Corresponding Author: Sungkyun Lee
E-mail: sungkyun.lee@lignex1.com
LIGnex1, Republic of Korea

(Terminal phase) 요격체계를 집중적으로 구성하고 있다. 이러한 요격미사일 체계의 신뢰성 확보를 위해서는 요격 시험을 통한 성능의 확인이 필수적이나, 탄도탄 요격시험은 안전상의 문제로 시험조건에 많은 제약이 존재한다. 우리나라의 경우, 영토 및 영해의 면적이 좁고 대부분의 지역에 인구가 분포하고 있는 국내 여건 상 탄도탄 요격시험 시 안전을 최우선으로 고려해야 한다. 요격시험 시 자산 및 민간인의 피해를 막기 위해서는 시험의 안전을 위한 안전구역의 설정이 필요하다. 안전구역이란 요격시험 시, 파편 낙하의 위험이 있는 위험구역을 제외한 안전을 위해 확보되어야 하는 영역(Safety Area)을 의미한다. 안전구역 설정에 대해서는 이미 많은 연구들이 수행되어 왔다.

탄도탄 표적의 직격 요격으로 발생하는 파편모델은 주로 실험식을 기반으로 모델링하여 활용하고 있으며 새로운 실험데이터가 추가되어 모델의 신뢰도를 향상시키는 추세이다(이승만 등, 2016). 또한, 통계학적인 회귀분석을 통해 요격 파편의 분산거리 및 반경 추정식을 도출하는 연구가 수행된 바 있으며 국내 시험장의 여건을 고려한 탄도탄 요격 파편 모델링 및 안전구역 설정방안에 대한 연구가 진행되었다(이승만 등, 2017; 이희진 등, 2015).

안전구역 설정을 위해서는 요격 파편이 지상 및 해상으로 떨어질 때의 위험도 역시 고려되어야 하며 요격 파편의 형상 및 질량에 따른 피해정도에 대한 실험적 연구가 진행된 바 있다(Cole 등, 1997). 파편의 형상 및 질량에 따라 낙하 후 지표면에 충격 시 파편이 갖는 에너지가 다를 수 있고 이를 감안하여 인체 및 자산의 피해를 추정하고 낙하영역의 경계를 설정할 수 있다.

지금까지의 많은 연구는 지표면에서의 파편 낙하영역의 크기를 산출하는 것에 집중되었다. 본 논문에서는 탄도탄과 요격미사일의 발사단계에서 요격까지의 전 과정을 전체 시뮬레이션에 포함하였다. 요격 시점에서의 탄도탄과 요격미사일의 상태를 산출하여 파편 낙하영역의 크기 뿐 아니라 구체적인 위치를 산출함으로써 안전구역의 신뢰도를 높였다. 또한 요격 파편의 형상 및 파편 방출속도와 같은 불확실성 요인의 영향을 몬테카를로(MonteCarlo) 시뮬레이션을 통해 확인하였고 이에 따른 낙하영역의 변화를 제시하였다.

2. 안전구역 산출을 위한 모델링

본 논문에서는 안전구역 산출을 위한 시뮬레이션 프로그램을 MATLAB을 활용하여 자체 개발하였다. 안전구역 산출을 위한 모델링은 크게 탄도탄과 요격미사일의

요격 과정 모의, 요격 시의 파편 방출 과정 모의, 자유 낙하 파편의 궤적 모의, 그리고 지표면 도달 파편의 위험도 판별로 구분된다. 개발된 안전구역 산출 프로그램의 흐름도는 Fig.1과 같다.

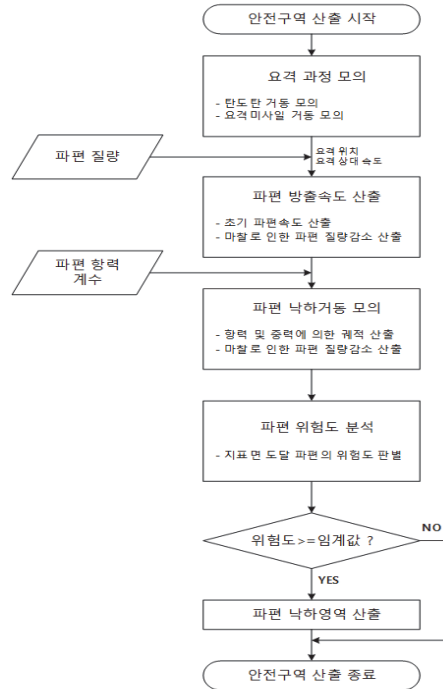


Fig. 1. Flow diagram of simulation

2.1 요격 과정 모의

탄도탄 요격 모의에 대해서는, 탄도탄의 궤적을 모의하고 표적탐지거리에 대한 요격고도를 산출하거나 탄도탄 방어를 위한 발사대 배치에 대한 분석 등의 많은 연구가 수행되어 왔다(권용수 등, 2006; 권용수 등, 2011; 권혁훈 등, 2013).

본 논문은 이러한 요격 과정 자체보다는 요격 파편의 거동에 대한 연구에 집중하였기에 요격 과정은 단순화하여 모의하였다. 탄도탄은 3자유도 질점모델로 가정하여 질량, 추력 그리고 중력을 반영하였다. 요격미사일의 공력은 Fleeman(2012)이 제안한 모델을 활용하여 항력, 수직항력 및 공력중심점을 산출하였으며 지배방정식은 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 C_D &= C_{D,friction} + C_{D,base} + C_{D,wave} & (1) \\
 C_N &= [|\sin(2\alpha)\cos(\alpha/2)| + 1.3(l_N/d)\sin^2\alpha] \\
 x_{AC}/l_N &= 0.63(1 - \sin^2\alpha) + 0.5(l_B/l_N)\sin^2\alpha
 \end{aligned}$$

여기서 C_D 는 전체항력, $C_{D,friction}$ 은 마찰항력, $C_{D,base}$ 는 기저항력, $C_{D,wave}$ 는 조파항력, C_N 은 수직항력, α 는 받음각, d 는 미사일직경, x_{AC} 는 공력중심점, l_B 는 미사일전장, l_N 은 미사일노즈 길이를 의미한다.

유도미사일의 유도과정 모의를 위해 식 (2)와 같은 비례항법유도(PNG: Proportional Navigation Guidance)를 활용하였다.

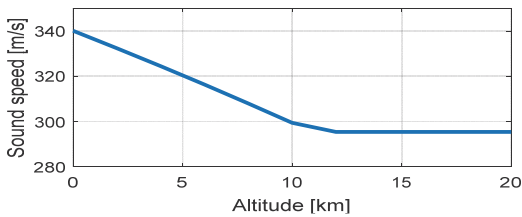
$$a_{M_c} = N V_c \dot{\sigma} \quad (2)$$

여기서 a_{M_c} 는 유도가속도, N 은 항법상수, V_c 는 접근속도, σ 는 시선각을 각각 의미한다.

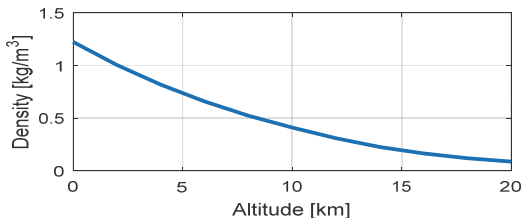
높은 고도에서의 비행궤적을 적절하게 모의하기 위해 국제표준대기(ISA: International Standard Atmosphere) 모델을 기반으로 고도에 따른 음속과 공기밀도를 산출하였다. 모의에 사용된 탄도탄의 제원은 Table 1과 같으며 국제표준대기모델을 활용했을 때의 고도에 따른 음속 및 공기밀도는 Fig. 2와 같다.

Table 1. Principal dimension of ballistic missile

Max. range [km]	Length [m]	Diameter [m]	Mass [kg]	Mass ratio
180	4	0.6	1500	5



a) Sound speed



b) atmospheric density

Fig. 2. Variation of Sound speed and atmospheric density with respect to altitude

Fig. 3은 탄도탄과 요격미사일의 발사단계에서 탄도탄이 요격미사일과 충돌하는 요격 시점까지의 시뮬레이션 결과이며, Table 2는 요격 시점에서의 요격속도 및 상대 충돌 각도를 보여준다. 해당 결과를 활용하여 이후 요격 파편의 방출 및 낙하 과정을 모의하였다.

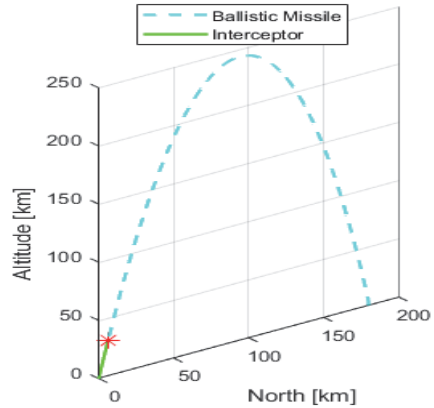


Fig. 3. Simulation result of intercept procedure

Table 2. Velocity and relative impact angle at interception

Absolute velocity		Relative impact angle [deg]
Ballistic Missile [km/s] (Mach)	Interceptor [km/s] (Mach)	
1.89 (M5.56)	2.04 (M6.00)	178.0

2.2 요격 파편 방출 모의

요격 파편의 방출속도를 산출하기 위해 아래와 같은 CLOUD 모델을 적용하였다. CLOUD 모델은 NASA에서 우주 궤도 잔해를 모델링하기 위해 개발하였다(이승만 등 2016). NASA는 많은 실험을 통해 초고속 충돌로 인해 발생하는 파편들의 방출속도를 추정할 수 있는 모델을 식 (3)과 같이 제안하였다.

$$\log\left(\frac{V}{V_P}\right) = \begin{cases} A - B \left(\log \frac{d}{d_m} \right), & d > d_m \\ A, & d < d_m \end{cases} \quad (3)$$

여기서 V 는 파편의 방출속도, V_P 는 상대 요격속도, d 는 파편 직경, d_m 은 경험 상수를 의미한다. 식 (3)의 A 와 B 는 상수이며 A 는 0.1-0.25 범위의 값, 그리고 B 는 0.10의 값을 각각 갖는다.

Fig. 4는 식 (3)으로 얻어진 최대 방출속도의 예시이다. 100kg의 요격미사일에 의해 생성된 파편의 질량에 따른 최대 방출속도를 상대 요격속도 별로 나타낸 것이다.

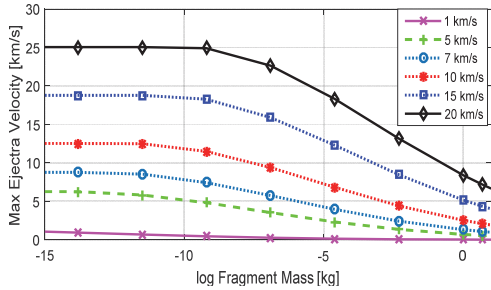


Fig. 4. Maximum ejecta velocity with respect to fragment mass

Fig. 5는 Table 2의 정보를 활용하여 산출한 요격 파편 별 방출속도를 나타낸 것이다.

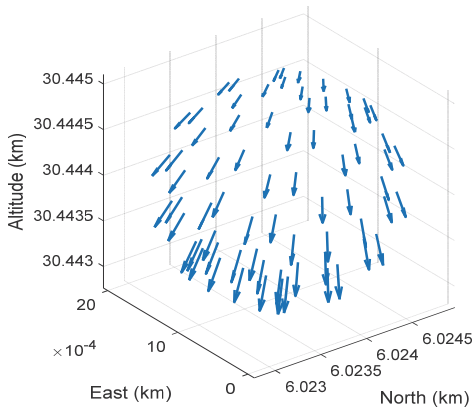


Fig. 5. Ejecta velocity of fragments

초고속으로 방출되는 파편의 경우 대기와의 마찰로 인한 삭마로 질량이 감소할 수 있다. Scott (1991)은 대기 마찰로 인한 파편 질량 감소량에 대한 연구를 통해 식 (4)와 같은 경험식을 제안하였고, 본 논문에서는 이를 적용하였다.

$$\frac{dm}{dt} = \begin{cases} -\frac{C_H \rho_M A}{2\zeta} (v^2 - v_{CR}^2), & v > v_{CR} \\ 0, & v < v_{CR} \end{cases} \quad (4)$$

여기서 C_H 는 열전달계수로 0.01-0.6 사이의 값, ρ_M 은 해당 재질의 밀도, ζ 는 상수로 5×10^6 J/kg, v_{CR} 은 임계 속도로 강철의 경우 3 km/s의 값을 각각 갖는다. 이렇게 얻어진 파편들의 초기 상태를 반영하여 이후 파편들의 낙하 궤적을 모의하였다.

2.3 낙하 궤적 모의

파편의 낙하 궤적을 모의하기 위해, 파편에 작용하는 항력, 중력, 고도에 따른 공기밀도를 식 (5)과 같이 고려하였다.

$$Drag = \frac{1}{2} C_D \rho V^2 S \quad (5)$$

위 식에서 C_D 는 항력계수, V 는 파편의 속도, ρ 는 공기의 밀도, S 는 파편의 면적을 각각 의미한다.

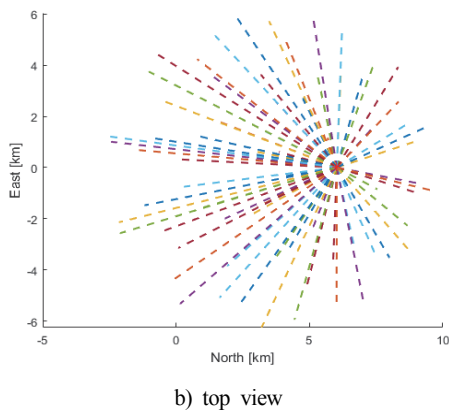
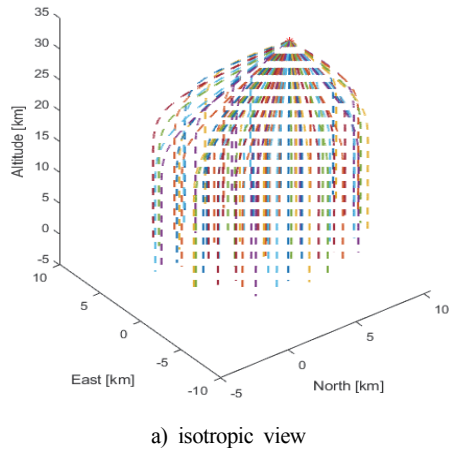


Fig. 6. Trajectories of fragments

Fig. 6은 항력계수를 1로 설정했을 때, 질량 20g인 파편의 낙하 궤적이다. 항력계수는 파편의 형상에 따라 각각 변화하므로 몬테카를로 시뮬레이션 시 파편 항력계수의 범위를 지정하여 항력계수의 변화에 따른 낙하궤적의 변화를 확인하였다.

2.4 요격 파편 위험도 판별

안전구역의 설정을 위해서는 지표면에 도착하는 파편들의 위험도를 파악하여 경계값을 결정하는 것이 중요하다. 일반적으로 탄도탄 요격시험에서 대부분의 파편은 1g 이상의 무게를 가지는데, 항공기나 인공위성의 경우에는 1g의 파편과의 충돌로 큰 피해를 입을 수 있지만 지상 또는 해상에 낙하 시에는 큰 피해가 없는 수준이다(이희진 등, 2015). 요격시험으로 인한 파편의 위험도는 일반적으로 지상 또는 해상에 도달할 때의 운동에너지가 주요 기준이 된다. 또한 동일한 에너지를 갖는 파편일지라도 형상에 따라 자산 또는 인체에 미치는 피해가 다를 수 있다. 예를 들어, 동일한 에너지를 갖는 구체 형상의 파편 대비 바늘처럼 뾰족한 형상의 파편은 인체에 관통상과 같은 큰 피해를 줄 수 있다. Cole 등(1997)은 다양한 형상과 에너지를 갖는 파편들에 대한 피해의 정도를 실험적으로 연구한 바 있다. Table 3은 지표면에 도달하는 파편의 에너지에 따른 인체 피해의 정도를 나타낸다(Cole 등, 1997). Table 3에서 알 수 있듯이 14.91 Nm 이상의 에너지를 가진 파편에 대해 인체 부상이 발생하게 되며, 115.24 Nm의 에너지를 가진 파편의 경우 전체 부상 중 90%의 확률로 치명상이 발생하였다. Table 4는 낙하 물체 및 상황에 따른 관통 가능성을 나타낸다(Cole 등, 1997).

본 논문에서는 Table 3의 임계값(Threshold)을 기준으로, 14.91 Nm를 초과하는 에너지를 갖는 파편을 위험파편으로 분류하였다. Fig. 6의 요격 파편들은 파편 질량 20g, 지표면 도달 속도 약 37.9 m/s로, 에너지가 약 14.4 Nm이다. 최종 안전구역을 선정하기 위해서는 이러한 자료 및 보호 자산의 중요도를 고려하여 파편 에너지의 경계값을 결정해야 한다.

Table 3. Energy levels associated with personnel injury from fragments

Injury Level	Energy (Nm)
Threshold	14.91
90% Injury (10% Fatal)	54.23
50% Injury (50% Fatal)	78.64
10% Injury (90% Fatal)	115.24

Table 4. Injury characteristics for some common objects

Object	Mass (gm)	Velocity (m/s)	Area (cm ²)	Kinetic Energy (Nm)	Probability of Skin Penetration
Golf Ball	46	32.31	14.91	24.40	0.011
Bullet	3	100.28	54.23	14.91	1.000
Penny	3	94.18	78.64	13.29	1.000
Nut & Bolt	14	28.35	115.24	5.56	0.018

3. 시뮬레이션 결과 및 분석

앞에서 언급한 기법을 활용하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 결과를 1회 시뮬레이션 결과와 몬테카를로 시뮬레이션 결과로 나누어 제시하였다. 1회 시뮬레이션 결과의 경우, 요격과정을 포함한 안전구역 설정에 대하여 기술하였다. 몬테카를로 시뮬레이션의 경우, 시뮬레이션 과정에서 불확실성에 기여할 수 있는 대표적인 변수들을 선정하고 불확실성 변수들에 대한 안전구역의 변화를 살펴보았다.

3.1 1회 시뮬레이션

탄도탄과 요격미사일의 거동을 포함한 요격과정의 시뮬레이션을 통해 Table 2와 같은 초기조건을 설정하였고, 이를 활용하여 요격 파편의 궤적을 산출하였다. 이후 지표면에 낙하한 파편들을 고려하여 안전구역을 설정하였다. Fig. 7과 Fig. 8은 탄도탄 및 요격미사일, 요격 파편 거동에 대한 시뮬레이션 결과와 파편 낙하영역 범위를 보여준다.

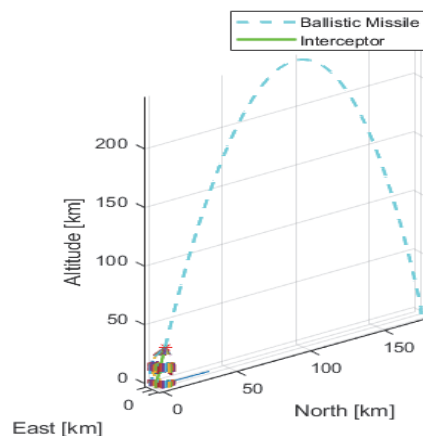


Fig. 7. Simulation results (1-Run)

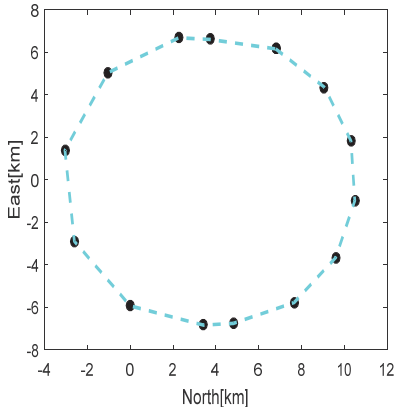


Fig. 8. Footprint of fragment (1-Run)

안전구역 설정과 관련된 요격 파편 및 위험도에 대한 정보는 Table 5에 나타내었다. 안전구역은 요격 파편 방출속도에 영향을 받으며 Table 5는 식 1의 초기 방출속도 경험식에서 계수 A를 0.175의 값으로 설정했을 때의 결과이다. 시뮬레이션 결과분석을 통해 파편 낙하의 위험이 있는 영역으로서 안전을 위해 확보되어야 하는 영역을 산출하였다.

Table 5. Safety area for fragment (1-Run)

Mass (gm)	Fragment			Safety Area (km ²)
	Drag Coeff. (C _D)	Velocity at Ground (m/s)	Energy at Ground (Nm)	
20	1.0	abt. 37.9	abt.14.4	abt. 138

3.2 몬테카를로 시뮬레이션

안전구역 설정을 위한 시뮬레이션에는 다양한 불확실성 요인이 존재한다. 요격 파편의 항력계수, 초기 방출속도 및 파편 질량과 같이 안전구역을 변화시키는 변수들을 하나의 값으로 설정하고 안전구역을 산출하는 방법은 현실적이지 않다. 요격시험 시 탄도탄과 요격미사일의 요격으로 생성되는 파편들은 다양한 형상과 질량을 가지며, 이에 따라 다양한 방출속도와 항력계수를 갖게 된다. 최근에는 전문적 모델을 활용하여 요격 파편 각각의 형상 및 질량을 산출하기 위한 연구도 활발히 진행되고 있으나(김보훈, 등 2014), 정확도와 계산 소요시간의 측면에서 추가적인 연구 및 개선이 필요한 상황이다.

파편 분산 분포를 분석하기 위한 또 다른 방법은 시뮬레이션 변수 중 불확실성에 기여하는 요인들을 선정하여

각 요인들의 범위를 선정하고 그 영향을 살펴보는 것이다. 심형석 등(2016)은 우주발사체의 파편 분산 관련 연구에서 불확실성 요인을 선정하고 파편 분산에 적용한 바 있다. 본 논문에서는 안전구역에 영향을 주는 불확실성 요인들을 선정하고 각 불확실성 요인에 대한 안전구역의 변화를 살펴보았다.

Table 6은 선정된 불확실성 요인 및 균등분포 된 값의 범위이다. 요격 파편의 항력계수의 범위는 여러 형상에 따른 항력계수 자료들을 참고하여 선정하였고, 파편 방출속도 계수 ‘A’의 범위는 경험식의 제안 범위를 반영하였다. 파편 질량은 2장에서와 같이, 파편의 에너지가 위험 임계값을 갖도록 20g을 기준으로 설정하고 그 범위를 변화시켰다. 파편 질량의 경우, 최종 낙하 시의 위험도에 따라 질량의 경계를 설정해야 하며 경계값은 시험상황에 따라 동적인 특성을 가진다. 단, 몬테카를로 시뮬레이션은 파편 질량에 따른 낙하영역 변화의 경향성을 확인하기 위함이므로 위험도에 따른 경계값은 적용하지 않았다.

Table 6. Range of Variable for Monte-Carlo simulation

Drag Coeff. (C _D)	A (Constant for calc. of ejecta velocity)	Fragment mass (gm)
0.5 - 1.5	0.1 - 0.25	10 - 40

Fig. 9는 파편 질량에 따른 요격 파편의 궤적을 비교한 것이다. 가시성을 위해 각 파편의 궤적 중 안전구역의 경계를 형성하는 파편의 궤적만을 도시하였다.

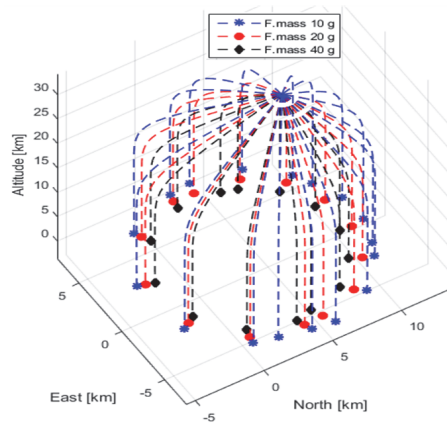


Fig. 9. Trajectories of fragment with respect to fragment mass (C_D: 1.0, A: 0.175)

파편의 형상을 동일하다고 가정했을 때, 파편 질량이 작을수록 항력이 작용하는 기준면적이 감소하며 초기 방출속도는 높아지기 때문에 낙하영역은 넓어진다.

Table 7은 불확실성 요인들에 따른 낙하영역 넓이의 변화를 보여준다. 경험식 상수 A값의 증가는 초기 방출속도의 증가를 의미하며, A값이 커질수록 낙하영역이 넓어지게 된다. 항력계수가 작을수록 넓은 범위로 파편이 흩어지게 된다. 항력계수 0.5는 원형의 형상을, 항력계수 1.0은 정육면체 형상을 가진 파편을 나타낸다. Fig. 10은 각 요격 파편들의 낙하지점을 연결한 것으로, 불확실성 요인들에 따른 파편 낙하영역의 변화를 보여준다.

Table 7. Safety area for the intercept fragments

Strewn Debris Field Area (km ²)			A (Constant for calc. of ejecta velocity)		
			0.1	0.175	0.25
mass 10 gm	C _D	0.5	265	322	392
		1.0	141	169	204
		1.5	92	110	132
mass 20 gm	C _D	0.5	209	248	312
		1.0	116	138	162
		1.5	79	93	109
mass 40 gm	C _D	0.5	162	190	226
		1.0	94	110	130
		1.5	66	77	90

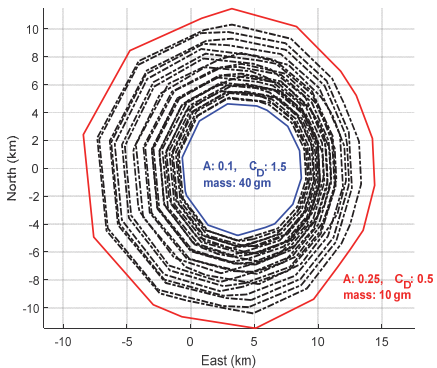
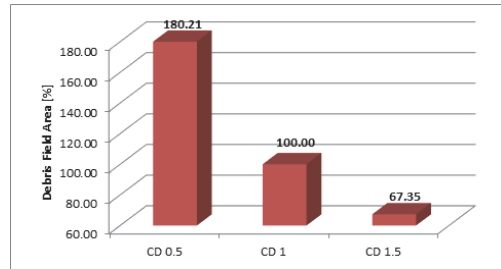


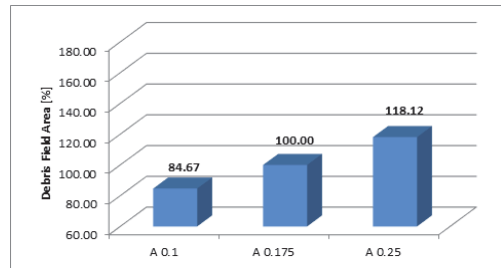
Fig. 10. Footprint of fragment (MonteCalro-Run)

Fig. 11은 불확실성 요인에 따른 파편 낙하영역의 변화를 도시한 것이다. 중간값을 100%로 설정하고 다른 변수들의 값 변화에 따른 낙하영역의 변화율을 나타내었다. Fig. 11에서 제시된 불확실성 요인들의 값 범위는 지속적

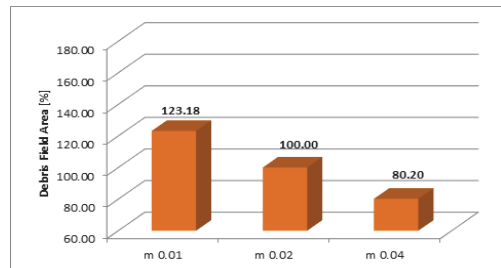
인 요격시험 자료의 수집을 통해 값 범위를 현실화시킬 수 있을 것이다.



a) variation of CD (A: 0.175, mass: 20 gm)



b) variation of A (CD: 1.0, mass: 20 gm)



c) variation of fragment mass (CD: 1.0, A: 0.175)

Fig. 11. Variation of safety area according to uncertainty variables

4. 결론

본 연구에서는 모델링 분석 및 시뮬레이션을 활용하여 요격과정이 포함된 요격 파편의 궤적을 모의하고 안전구역에 대한 분석을 수행하였다. 탄도탄과 요격미사일의 추력 및 제어 특성을 반영하여 요격 상황을 모의하였고, 요격 파편의 물리적 특성을 반영해 개발된 이론식을 활용하여 요격 파편의 궤적을 모의하였다. 또한, 지표면에 도달하는 파편의 위험성을 고려하여 안전구역을 설정하였다. 안전구역의 분산에 영향을 주는 대표적인 불확실성

요인들을 정의하고 각 요인들에 따른 파편 낙하영역의 변화를 살펴보았다. 파편들의 항력계수 및 방출속도, 그리고 질량 범위의 변화에 따라 파편의 분산 범위가 광범위하게 분포할 가능성이 있음을 확인하였다.

본 모의 기법은 파편 낙하영역의 넓이 뿐 아니라 구체적인 낙하영역의 위치 확인에 활용될 수 있으며, 요격 파편 위험도의 경계값 및 불확실성 요인을 반영한 안전구역 설정에도 활용 가능하다. 이를 통해 시험탄도탄의 궤적 및 발사 방향, 그리고 요격 지점 및 고도에 대한 시험 상황을 안전구역 측면에서 검토할 수 있을 것이다.

보다 정확한 안전구역 추정을 위해서는 실제 요격시험의 결과를 반영하여 모의모델을 보완해야 하며, 이를 위해서는 장기적인 관점에서 요격시험 시 발생하는 파편 분산 데이터를 축적해야 한다. 이를 기반으로 모의모델을 수정하고 안전구역 분산에 영향을 주는 요인과 그 범위를 현실적으로 선정해야 할 것이다.

References

권용수, 김정희, 이경행 (2011), “성공적 하층 미사일방어 수행을 위한 시스템 요구능력 도출”, *한국국방경영분석학회지*, 제37권, 제2호, pp.101-114

권용수, 최봉석 (2006), “탄도미사일의 비행궤적 특성 해석”, *한국국방경영분석학회지*, 제32권, 제1호, pp. 176-187

권혁훈, 이범석, 김윤환, 최관범 (2013), “탄도미사일 하층 방어 수행을 위한 발사대 배치 효과도 분석”, *한국군사과학기술학회지*, 제16권, 제5호, pp.590-597.

김보훈, 김민성, 도영대, 김창기, 유지창, 여재익 (2014),

“총탄 충격이 가해진 반응 시스템의 파괴 거동에 관한 수치적 연구”, *대한기계학회논문집 B 권*, 제38권, 제6호, pp.525-538.

심형석, 최구성, 조상연 (2016), “우주발사체 비정상탄 실패에 의한 파편 분산 분석 방법론”, *항공우주산업기술동향 14 권 1호*, pp.121-132.

이승만, 이희진, 김효창, 이근호, 홍동욱 (2016), “비행시험 안전구역 예측을 위한 파편 모델 비교 연구”, *한국항공우주학회 2016 추계학술대회 논문집*, pp. 1192-1193.

이승만, 홍동욱, 김효창, 허린, 이성우 (2017), “탄도탄 요격고도에 따른 충돌하는 탄체의 파편 분산거리 추정 프로그램 개발”, *한국항공우주학회 2017 춘계학술대회 논문집*, pp.639-640.

이희진, 이연수, 이승만, 송경록 (2015), “요격 파편분산에 대한 안전구역 설정방안 연구”, *한국항공우주학회 2015 춘계학술대회 논문집*, pp.1097-1100.

Cole, J. K., Young, L. W., Jordan-Culler, T. (1997), *Hazards of Falling Debris to People, Aircraft, and Watercraft*, Sandia Report, SAND97-0805-UC-706, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, USA.

Fleeman, E. L. (2012), *Missile Design and System Engineering*, 2nd Edition, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., Virginia, pp. 45-77.

Scott, W. B (1991), *Leap Begins Flight Tests to Demonstrate Kinetic Kill Missile Defence Capability*, Aviation Week and Space Technology 207.



이 성 균 (ORCID : <https://orcid.org/0000-0001-5153-9469> / sungkyun.lee@lignex1.com)

2007 서울대학교 조선해양공학과 공학사
2013 서울대학교 조선해양공학과 공학박사
2013~ 2016 현대중공업 선박연구소 선임연구원
2016~ 현재 LIG넥스원 M&S연구팀 수석연구원

관심분야 : 유체역학, 시뮬레이션, 국방 M&S, 선박제어



고 진 용 (ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-4418-8389> / jinyong.go@lignex1.com)

2010 서울대학교 조선해양공학과 공학사
2012 서울대학교 조선해양공학과 공학석사
2012~ 현재 LIG넥스원 M&S연구팀 선임연구원

관심분야 : 국방 M&S, 유체역학, 선박 운동, 최적화 설계



한 용 수 (ORCID : <https://orcid.org/0000-0001-7673-3372> / yongsu.han@lignex1.com)

2004 세종대학교 항공우주공학과 공학사
2006 서울대학교 항공우주공학과 공학석사
2012 서울대학교 항공우주공학과 공학박사
2012~ 현재 LIG넥스원 성능분석팀 수석연구원

관심분야 : 모델링&시뮬레이션, 비행동역학, 성능분석



김 창 환 (ORCID : <https://orcid.org/0000-0001-8832-4058> / changhwan.kim@lignex1.com)

2008 인하대학교 항공우주공학과 학사
2010 인하대학교 항공우주공학과 석사
2010~ 현재 LIG넥스원 M&S연구팀 선임연구원

관심분야 : 모델링&시뮬레이션, 비행동역학, 비행체 유도제어