

교전시물레이션에의 활용을 위한 적정해상도의 차량 연막유탄 M&S 개발

민서정[†] · 이상진

Developing Vehicle-launched Smoke Grenade M&S of Moderate-resolution for Applications in Engagement Simulation

Seojung Min[†] · Sangjin Lee

ABSTRACT

Smoke grenade is the most primary counteract of tank for its survival against threats, therefore a number of related researches and developments of M&S are being conducted.

In this research, a vehicle-launched smoke grenade model is developed, that covers the essential engineering-level parameters, and also is applicable to engagement-level simulations because of its unheavy computational load. First of all, input parameters of the model were determined to include the principal factors from engineering to engagement level. In the model, smoke and LOS are modeled as simple figures, a disk and a line, so that the computational load is not as much as that of particle-model-based M&Ss. A test simulation is also carried out to analyze the effect of smoke grenade for a tank.

This model is to be inserted into a basic tank model on AddSIM. The users of AddSIM will be able to simulate various scenarios including smoke grenades.

Key words : Vehicle-launched smoke grenade, Screen effect, Defense Modeling&Simulation, Engagement simulation

요약

차량 연막 유탄은 전차에서 적의 탐지체계를 교란하기 위해 가장 우선으로 운용하는 방호 장비로, 전차의 교전효과 분석 시 필수적인 요소라고 할 수 있다.

본 연구에서는 주요한 공학급 파라미터를 포함하면서도, 연산 부하가 크지 않아 교전 시물레이션에 활용하기 적절한 차량 연막 유탄 모델을 개발하였다. 먼저 교전급에서 공학급까지의 주요한 입력 파라미터를 포괄하여, 다양한 조합 모의를 가능케 하였다. 내부 모델은 간단한 연산을 사용함으로써, 여러 개체가 포함되는 교전 시물레이션에 적용하기 쉽도록 하였다. 연막운과 가시선을 각각 원반과 선분 형상으로 모델링하여, 기존 연막 M&S들에서 활용한 입자모델보다 비교적 낮은 해상도로 모의하였다. 또한, 테스트 시물레이션을 수행하여 전차의 연막 유탄 운용 효과를 분석해 보았다. 본 모델을 사용함으로써 운용 개념 수립에서부터 연구개발까지 넓은 해상도 범위를 포괄 가능하다는 점을 확인할 수 있었다.

본 모델은 추후 국과연 2본부 4부에서 개발한 AddSIM 버전 3.0 환경에서, 전차 및 전투차량 모델에 삽입될 것이며, AddSIM의 사용자들은 이 모델들을 활용하여 연막 유탄을 이용하는 다양한 교전 시나리오를 구성할 수 있을 것이다.

주요어 : 차량 연막 유탄, 차장 효과, 국방 모델링&시물레이션, 교전 시물레이션

1. 서론

연막이란, 지상전에서 적군의 EO/IR 탐지체계가 아군을 탐지하는 것을 방해하기 위하여 밀리터파라, 적외선, 가시광선 등 특정 대역의 전자기파를 차장하는 연막제를 뿌려 아군을 보호하는 장비이다. 그 중에서도 차량 연막

Received: 31 December 2018, Revised: 4 May 2019,
Accepted: 20 May 2019

[†] Corresponding Author: Seojung Min
E-mail: seojungmin9008@gmail.com
Team 4, 4th Directorate, the 2nd R&D Institute,
Agency for Defense Development, Daejeon, Korea

유탄은, 전차나 장갑차가 회피 기동하기 전에 발사하는 연막탄으로, 적의 위협을 감지하면 가장 우선으로 이용하는 능동방호수단이다. 연막 유탄 사용 시 아군 전차의 치사 가능성은 최고 80%로 감소한다고 알려져 있다(ROKA, 2010).

이처럼 연막탄은 지상 무기체계의 교전에서 전차의 생존 가능성을 결정짓는 매우 필수적인 요소이기에, 연막탄의 유도무기 교란 성능을 높이기 위한 연구들이 다방면으로 진행되고 있다. 예를 들어 연막탄의 운용개념 연구에서부터 연막탄 발사체 설계(Shim, 2005), 연막제 개발(Hwang et al., 2014), 그리고 대전차 유도무기의 탐지체계 개발 등(Park et al., 2016)의 분야에서 활발한 연구가 진행됐으며, 계속하여 연구개발의 필요성이 요구되고 있다.

연막 관련 연구개발의 각 분야에서, M&S 기술 역시 체계 요구 성능(Required Operational Capability, ROC) 도출, 또는 개발 후 성능 측정(Measurement of Performance, MOP) 등의 목적을 달성하기 위해 적극적으로 활용되어 오고 있다. 현재 알려진 대표적인 연막 M&S 체계들은 모델링 기법에 따라 크게 세 분류로 나누어볼 수 있다. 첫 번째는 연막제 입자의 움직임을 반영하는 모델링 방식으로, 가장 고해상도에 해당한다. 국방과학연구소에서 전차 복합연막탄의 효과분석을 위해 개발한 SEAS(Cho, 2007)와 화생방 작전 통제 지원 목적으로 개발한 NBC_RAMs(Sim, 2011)는 모두 연막제의 분산패턴을 라그랑지안 입자모델로 모델링한다. 감쇠지수를 비롯한 연막제의 특성 정보, 연막탄 발사 조건, 위협체의 조건, 전차의 조건, 기상 조건 등을 반영하여 연막제의 분산패턴, 가시선(Line of Sight, LOS)상 투과도 변화 등을 시뮬레이션한다. 두 번째는 연막운의 분포를 확률분포로 모의하는 경우이다. 미군의 COMBIC(Wetmore et al., 2000)은 연막차장효과를 계산하기 위한 목적으로 개발되었으며, 연막운을 3차 정규분포로 모의한다. 바람, 기온, 습도, 지면 및 연막제의 특성이 반영되어 연막운의 확산과 소멸이 계산되며, 이에 따른 전자기파 에너지의 감소 정도가 산출된다. 마지막은 기하 모델에 기반한 가장 저해상도의 방식으로, 대표적으로 지상 무기체계의 교전급 시뮬레이션인 AWAM(KIDA, 2013)이 이에 해당한다. 공간에서 마름모 형태의 평면으로 연막운이 모의되어, 가시선과 마름모의 교차 여부에 따라 개체 간 서로에 대한 탐지 여부가 결정된다. 연막운의 크기와 위치 정보, 지속시간 등을 입력할 수 있고, 각 개체의 탐지 결과에 영향을 미쳐 교전 시뮬레이션의 전체 상황에 영향을 미친다.

위의 두 모델링 방식은 공간상에서 연막제의 분포를

비교적 상세하게 모의하기 때문에, 여러 개체가 포함되는 교전을 시뮬레이션하기에는 연산 부하 차원에서 한계가 있을 수 있다. 반면에 세 번째 기법은 다양한 교전상황을 모의하는 목적으로 개발된 만큼, 연막제의 특성이나 연막 유탄의 설계요소 등 공학 수준의 세세한 효과를 분석하는 데에는 활용하기 어렵다.

한편, 무기체계가 보다 복잡해지고 교전 양상이 점차 다양화되면서, 무기체계의 소요 및 효과 분석을 종합적으로 수행하는 것에 대한 필요성이 대두되고 있다. 이를 위해서는 무기체계 개발 시에 개발자가 전장 상황에서의 무기체계 효과분석을 다양한 조건에서 수행할 수 있어야 한다. 그러나 각 군에서 운용하는 분석모델들은 해상도가 너무 낮아 무기체계 모델의 특성과 기능이 거의 모의되지 않는다. 반면에 무기체계 연구 개발을 위해 개발된 고해상도의 모델들은 대부분 구체적이고 특수한 목적에 의해 개발되다 보니 각 체계 또는 부 체계들의 성능에 초점이 맞추어져 있으며, 연산 부하가 높아 무기체계간 교전 분석에는 활용하기 어렵다.

이러한 간극을 극복하기 위하여, 국방과학연구소에서는 한국군 관련 무기체계 표준화 모델, 즉 기본체계모델(Base System Model, BSM)을 컴포넌트 형태로 개발하여 라이브러리로 구축하기 위한 ‘무기체계 컴포넌트 모델 라이브러리 연구’를 수행하고 있다. 지상, 해양, 공중, 유도, 감시정찰의 5개 분야에서 총 21종 이상의 무기체계들이, 기존의 전구/임무급 M&S 체계들과 연구 개발용 공학급 M&S들 사이를 연결하는 중간 해상도 수준으로 모델링된다(Oh et al., 2016) 이와 같이 라이브러리 형태로 제공되는 각 무기체계 모델들 간의 교전을 모의할 수 있도록, 운용 환경이자 도구인 ‘컴포넌트 기반 무기체계 통합 시뮬레이션 환경(AddSIM)’도 함께 제공된다.(Kim et al., 2018) 각 무기체계 모델들은 기동, 탐지, 공격 등 기본적인 기능들에 대한 모델과 체계 수준의 운용 논리 모델을 내부에 갖추고 있어, 설계특성 등의 공학급 파라미터를 반영 가능하면서 소수 대 소수의 교전 시뮬레이션에도 적용 가능하다(Kim et al., 2018).

본 연구는 지상 분야의 전차 체계와 전투차량 체계 BSM 개발의 일환으로 수행되었다. 제안하는 연막유탄 모델은, 앞서 설명한 기존 연막 M&S 모델링 기법 중 두 번째와 세 번째 방식의 중간 정도 수준의 해상도에 해당된다. 공학급 파라미터를 반영하면서도, 교전급 시뮬레이션에 적용하기 위해 연산부하를 낮추었다. 따라서 연막운 용전술에서부터 연막유탄의 설계특성까지, 즉 교전급에서 공학급까지의 입력 파라미터를 포괄하여 다양한 조합

의 모의가 가능하도록 하면서, 연산 부하가 크지 않은 비교적 간단한 모델을 이용하여 교전 시물레이션 적용이 용이하도록 연막유탄 모델을 개발하였다. 연구 과정에서는 모델의 입/출력 정의 및 모델 내부 해상도의 적절한 수준 선택이 중요하였다. 모델의 입/출력 변수의 정의는 기존의 연막 관련 M&S체계들 및 연막관련 연구개발내용을 참고하여 선정하였다. 연막의 차장효과를 계산하기 위한 내부 모델은, 연막운을 간단한 형상으로 모의함으로써 연산 부하가 크지 않도록 하였다. 연막탄 2차 폭발 시의 운 형상을 3차원 원반 형상으로 모델링하고, 운 형상 모델과 위협체 가시선의 기하학적 관계에 따라 차장 효과를 결정하였다.

개발된 연막 유탄 모델은, AddSIM 버전 3.0을 이용해 재 작성되어 전차 BSM 및 전투차량 BSM에 물리모델 컴포넌트 형태로 포함될 예정이다. AddSIM의 사용자들은 이 BSM들을 기반으로 차량연막의 방호 성능을 분석하거나 연막운용전술을 연구하는 등, 각자의 목적에 부합하는 다양한 교전시나리오를 구성하여 시물레이션을 수행할 수 있을 것이다.

2. 연막탄 모델 개발

2.1 모델 입/출력 변수 설정

2.1.1 모델 개요

본 모델은 연막탄과 관련된 각종 환경, 상황 및 특성 조건들을 입력받고, 연막탄의 차장 효과와 관련된 변수들을 출력한다. 모델에서 출력된 값은 적 무기체계의 EO/IR 탐지 모델에 입력되어 전차에 대한 탐지율에 영향을 미치게 된다. 모델 및 시물레이션은 MATLAB R2017a (The Mathworks, Inc.)에서 구현하였다.

2.1.2 EO/IR 탐지 및 연막 차장의 원리

연막 유탄 모델은 결국 전체 교전 M&S에서 적군 무기체계의 EO/IR 탐지 모델에 입력되어 반영되어 탐지확률을 산출하는 데에 활용되어야 한다. 따라서 연막 차장 효과를 모델링하기 전에, 먼저 표적탐지와 연막으로 인한 차장에 대해 물리적인 원리를 이해할 필요가 있다.

전차에서 반사된 빛은 가시선을 따라 EO/IR 센서에 도달하여 전차에 대한 탐지가 가능하도록 한다. 빛은 가시선상에서 진행하면서 매질에 흡수되거나 가시선 밖으로 산란되어 에너지가 감쇠한다. 특히, 빛이 연막운을 지날 때에는 대기에서보다 에너지 감소가 훨씬 많이 일어

나, 빛의 투과율이 매우 작아진다. 이러한 매질의 특성에 따른 빛의 에너지 감쇠를 Beer-Lambert 법칙에 의해 아래와 같이 수식으로 나타낼 수 있다.

$$T = \frac{I}{I_0} = e^{-\alpha CL} \quad (1)$$

T : 투과율 (Transmittance), 매질 전후의 빛의 강도의 비
 α : 소멸계수 [m^2/g]
 C : 매질의 농도 [g/m^3]
 L : 가시선의 통과 길이 [m]

소멸계수 α 는 대기, 수증기, 연막제 등 매질의 특성으로, 본 연구에서는 연막제의 빛 흡수/산란 특성을 나타내기 위한 모델 입력값 중의 하나이다. 연막 유탄 내 연막제의 충전량과 연막운의 크기가 모델에 입력되며, 이 값들을 이용해 매질의 농도 C 가 계산된다. 가시선의 통과 길이는 위협체와 전차의 위치 및 연막운 형상에 따라, 모델 전체에 걸쳐 계산된다.

추가로 EO/IR 표적획득모델에 대해 설명하면, 탐지 모델은 가장 먼저 위의 식을 이용해 투과율, 즉 센서-표적 사이 가시선을 따라 표적 시그너처가 얼마나 감소했는지를 계산한다. 이후 과정에서 센서의 성능과 표적 특성 크기를 이용하여 탐지 여부/시간/수준을 결정한다.

2.1.3 모델 입력 변수

모델 입력 변수들은 대표적인 기존 연막탄 M&S들의 입력 변수 및 연막 관련 연구개발 자료들을 분석하여 선정하였으며, Table 1에 정리된 바와 같다. 입력 파라미터는 크게 환경/운용전술(Environment/Tactical factors), 발사 관련 요소(Launch factors), 연막 유탄 설계특성(Characteristics of smoke grenade)의 세 분류로 나눌 수 있다.

환경 정보와 운용전술을 반영하기 위한 파라미터들은 Park et al.의 대전차 유도무기의 차장 대응 성능 분석 연구(2016) 및 지상무기 효과분석모델(AWAM) 모의 논리서(KIDA, 2013)를 주로 참조하여, 풍향과 풍속(Wind velocity), 전차 및 위협체의 운동 정보와 연막탄 개수(The number of grenades to launch)로 선정하였다. 위치나 운동정보 등은 모두 Global ENU(East-North-Up) 좌표계를 기준으로 한 값으로 입력받는다. 발사 관련 요소들은 연막탄발사기 개발보고서(Shim, 2005)를 참조하여 고각(Elevation), 방위각(Azimuth), 사거리(Shooting range)로 정하였다. 연막 유탄 설계특성은 연막제 개발 연구

Table 1. Input parameters of suggested model

Category	Parameter	Notation	Unit
Environment / Tactical factors	Wind velocity	$\vec{v}_{w,gl}$	[m/s]
	Initial position of tank	$\vec{X}_{t,gl,0}$	[m]
	Avoiding velocity of tank	$\vec{v}_{t,gl}$	[m/s]
	Initial position of threat	$\vec{X}_{th,gl,0}$	[m]
	Velocity of threat	$\vec{v}_{th,gl}$	[m/s]
	The number of grenades to launch	N	[개]
Launch factors	Elevation	θ	[deg]
	Azimuth	ϕ	[deg]
	Space azimuth angle between grenades	ϕ_d	[deg]
	Shooting range	D	[m]
Characteristics of smoke grenade	Screened wavelength	λ	-
	Fill weight	m	[g]
	Dissipation coefficient	α	[m ² /g]
	Launch-explosion delay	t_d	[s]
	Smoke duration	τ	[s]
	Initial cloud radius	r_0	[m]
Initial cloud thickness	d_0	[m]	

Table 2. Output parameters of suggested model

Parameter	Notation	Unit
Screened length	L	[m]
Concentration of agent	C	[g/m ³]
Dissipation coefficient	α	[m ² /g]
Cloud radius	r	[m]
Cloud thickness	d	[m]

(Hwang et al., 2014; Cho et al., 2007; Go et al., 1992)를 참조하여 선정하였으며, 차장대역, 충전량(Fill weight), 발사 전 지연시간(Delay before launch), 지속시간(Duration), 연막운 초기 반경(Initial cloud radius), 초기 두께(Initial cloud thickness) 등으로 정의하였다.

2.1.4 모델 출력 변수

2.1.(2)에서 고찰한 바와 같이, 출력변수들은 적군 무기체계의 EO/IR 탐지 모델에 입력되어 탐지확률을 계산하는 데에 사용되어야 하므로, 이를 고려하여 선정되었다.

모델에서 계산된 값들, 즉 가시선의 차장 길이(Screened length), 연막제 농도(Concentration of agent), 연막운 크기(Cloud radius, cloud thickness)가 출력된다. 출력 변수들은 Table 2에 요약하였다.

2.2 연막운 및 가시선의 형상 모델

2.2.1 연막운의 형상

본 연구에서는 연막운을 원반으로 모사한다. Fig. 1은 육군 20사단 잠수도하훈련 중, 훈련에 참여한 K2전차가 연막 유탄을 발사한 모습이다(Ahn, 2017). 전차에서 발사된 연막탄은 설계특성인 폭발 지연시간에 따라 두 차례에 걸쳐 폭발하게 된다. 1차적으로 연막탄을 중심으로 자탄들이 평면에서 방사형으로 분사된 후, 2차적으로 자탄들이 각기 구형으로 폭발한다. 이 구형으로 분포한 연막제들이 서로 중첩되며, 전체적으로 도넛 모양을 형성하게 된다. 강한 폭발 운동량으로 인해 빠른 속도로 연막제가 확산하므로, 각각의 구형의 운이 팽창하여 짧은 시간 안에 도넛 안쪽의 공간이 메워지고, 그림과 같이 원반형상의 연막운이 형성된다.

이를 바탕으로, 연막탄 2차 폭발 시의 운 형상인 원반 모양으로 연막운을 모델링하였다. Table 3에 모델 내부에서 사용되는 변수들을 정리하였다.



Fig. 1. Explosion of smoke grenades launched from K2 tanks (Ahn, 2017)

2.2.2 발사모델

3차원 공간상에서 형상 모델을 정의하기 이전에, 연막운 형상의 초기 위치(\vec{O}_{gl})와 자세(\vec{n}_{gl})를 결정하였다. 운의 초기 위치는 연막 유탄이 발사되어 폭발하는 위치이므로, 연막 유탄은 전차의 위치로부터 발사 고각과 방위 각 방향으로 직선거리로 사거리만큼 떨어진 위치에 도달하여 t_d 초 뒤에 폭발하는 것으로 모델링하였다. 또한 운

Table 3. Interior variables of suggested model

Category	Parameter	Notation	Unit
Spatial variables of smoke w.r.t. global frame of ref.	Center of LS	\vec{O}_{gl}	[m]
	Direction vector of smoke axis	\vec{n}_{gl}	[m]
Transformation	Rotation operator	R	-
	Transition operator	C	[m]
Spatial variables w.r.t. local frame of ref.	Position of tank	$\vec{X}_{t,loc}$	[m]
	Position of threat	$\vec{X}_{th,loc}$	[m]
	Direction vector of LOS	\vec{q}_{loc}	[m]
	Direction vector of smoke axis	\vec{n}_{loc}	[m]
	Wind velocity	$\vec{v}_{w,loc}$	[m/s]
	Avoiding velocity of tank	$\vec{v}_{t,loc}$	[m/s]
	Velocity of threat	$\vec{v}_{th,loc}$	[m/s]
Screen effect w.r.t. local frame of ref.	Simulation time	t	[s]
	Discriminant	Dis	-
	Intersection of LOS&LS	P_L	[m]
	Intersection of LOS&US	P_U	[m]
	Lower intersection of LOS&SS	P_{SL}	[m]
	Upper intersection of LOS	P_{SU}	[m]

※ LOS : Line of Sight
 LS : Lower Surface
 US : Upper Surface
 SS : Side Surface

의 자세는 전차에서 운을 바라보는 방향벡터가 원반의 회전축과 일치하도록 정의하였다. 수식으로 나타내면 아래와 같다.

$$\vec{O}_{gl} = \vec{X}_{t,gl} + [D \sin \theta \sin \phi, D \sin \theta \cos \phi, D \cos \theta] \quad (2)$$

$$\vec{n}_{gl} = \frac{\vec{O}_{gl} - \vec{X}_{t,gl}}{\| \vec{O}_{gl} - \vec{X}_{t,gl} \|} \quad (3)$$

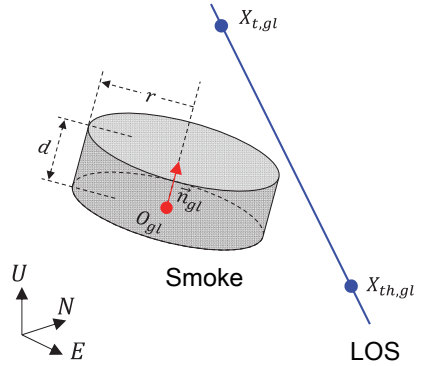


Fig. 2. Definition of variables for geometrical smoke & LOS models (w.r.t. global ENU frame of reference)

2.2.3 형상 정의

각각 원반과 선분으로 모의하는 연막운과 가시선 모델을 Fig. 2와 같이 정의한다.

먼저, 가시선(Line of Sight, LOS)은 위협체인 관찰자와 타겟의 위치를 양 끝 점으로 하는 선분으로 모의한다. 글로벌 좌표계에서의 관찰자(Threat)의 위치 $\vec{X}_{th,gl}$, 관찰 대상(Target)의 위치 $\vec{X}_{t,gl}$ 를 이용해 정의할 수 있다.

원반으로 모사하는 연막운의 경우, 원반의 반지름(r), 원반의 높이(d), 원반 밑면 중심점의 위치(\vec{O}_{gl}), 그리고 원반 회전축의 방향벡터(\vec{n}_{gl})로 정의할 수 있다.

2.2.4 좌표계 변환

이후 이어질 단계는 선분 도형이 원반 도형과 교차하는지를 결정하는 계산, 그리고 교차하는 경우에는 교차 길이를 결정하는 계산이다. 두 과정 모두 좌표계에 무관하므로, 계산 편의를 위하여 지면 기준의 글로벌(global) 좌표계에서 원반에 고정된 로컬(local) 좌표계로 좌표계를 변환한다. 원반의 회전축을 z축에, 밑면의 중심을 원점에 일치시킨 local xyz 직교좌표계를 설정한다.

변환 과정은 다음과 같다. Eq. (4)와 같이, 고각과 방위각 정보를 바탕으로 회전행렬 R 을 구하고, Eq. (5)와 같이 선 이동 연산을 위한 C를 구한다. Eq. (6)의 \vec{p}_{gl} 에 변환하고자 하는 벡터를 대입하면, 글로벌 좌표계에서 정의되었던 위치와 운동에 관한 정보 변수들을 모두 로컬 좌표계로 변환할 수 있다.

$$R = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\times \begin{bmatrix} \cos(\pi/2 - \phi) & \sin(\pi/2 - \phi) & 0 \\ -\sin(\pi/2 - \phi) & \cos(\pi/2 - \phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C = \vec{O}_{gl} \quad (5)$$

$$\text{입의 } \vec{p}_{gl} \text{에 대해, } \vec{p}_{loc} = R(\vec{p}_{gl} - C) \quad (6)$$

변환 후에는 2.2.(3)에서보다 더 적은 개수인 총 4개의 변수로 두 형상 모델을 정의할 수 있게 된다. 연막운에 대한 위협체의 상대 위치($\vec{X}_{th,loc}$), 연막운에 대한 전차의 상대 위치($\vec{X}_{t,loc}$), 원반의 반지름(r), 원반의 두께(d)가 해당한다. 이를 그림으로 나타내면 Fig. 3과 같다. 이하의 내용부터는 연막운의 로컬 좌표계를 기준으로 한다.

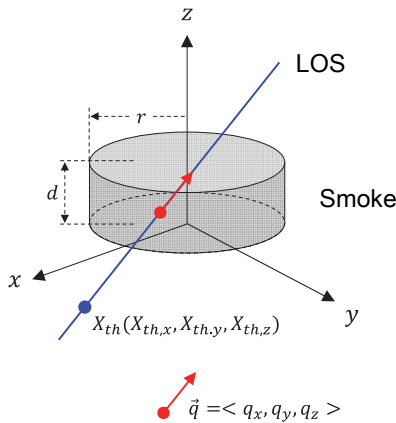


Fig. 3. Definition of variables for geometrical smoke & LOS models (w.r.t. smoke-fixed local frame of reference)

2.2.5 도형의 방정식

로컬 좌표계로의 변환을 통해 더욱 간단히 각 도형의 방정식을 구할 수 있으며, 이를 Table 4와 같이 정리할 수 있다.

Eq. (7)은 LOS를 한 점을 지나고 한 벡터에 평행한 직선의 방정식으로 정의하였다. Eq. (8)은 연막의 옆면을, xy평면 위의 반지름 r 을 가진 원이 z축 방향으로 연장되는 곡면으로 정의하였다. Eq. (9)과 Eq.(10)은 각각 연막의 아랫면과 윗면으로, 반지름 r 을 가진 원의 내부 점들의 집합으로 표현하였다.

Table 4. Equations of figures (w.r.t. local frame of reference)

Geometry		Equations
Line of Sight (LOS)		$\begin{cases} x = X_{th,x} + q_x t \\ y = X_{th,y} + q_y t \\ z = X_{th,z} + q_z t \end{cases} \quad (7)$
Side Surface (SS)		$\begin{cases} x^2 + y^2 = r^2 \\ 0 \leq z \leq d \end{cases} \quad (8)$
Smoke	Lower Surface (LS)	$\begin{cases} x^2 + y^2 \leq r^2 \\ z = 0 \end{cases} \quad (9)$
	Upper Surface (US)	$\begin{cases} x^2 + y^2 \leq r^2 \\ z = d \end{cases} \quad (10)$

2.3 차장여부 판단 및 가시선 차장 길이 산출

2.3.1 차장여부 판단 (기하 관계 조건 판단)

먼저 LOS가 연막운과 만나는지를 판단한 뒤, 만나는 경우 어떤 면과 만나는지를 확인 후, 교점 사이의 거리를 구하도록 모델을 설계하였다.

최종 목표는 LOS와 연막운 두 도형이 겹치는 부분의 길이를 산출하는 것이다. 두 도형은 결국에 만나지 않거나, 한 점에서 만나거나(접하거나), 두 점에서 만나게 된다. 이 중 두 점에서 만나는 경우, 두 교점 사이의 거리가 모델에서 구하고자 하는 가시선의 차장된 길이이다.

연막운은 옆면(SS), 밑면(LS), 윗면(US), 이렇게 세 면으로 이루어진 원반으로 모델링되었으므로, 세 면 중에서 어떤 면과 만났는지를 아는 것이 교점의 좌표를 구하는데 중요한 부분이다. 따라서 LOS와 연막운이 기하 도형으로서 3차원 공간상에서 어떤 상대적인 관계를 가질 수 있는지를 생각해 볼 필요가 있다. Table 5에 가능한 기하 관계 조건들을 8개로(Case #1 - #8)을 정리하였다. 각 Case는 두 도형의 상대적 기하 관계뿐만 아니라, 수식적으로 Case를 분류하기 위한 알고리즘의 용이성까지 고려하여 결정하였다.

해당하는 기하 관계 Case를 알아내기 위해서는 Fig. 4의 알고리즘 순서도를 따르면 된다. Table 6를 참조하여 구한 값들을 바탕으로 두 형상의 기하 관계가 Case #1 - #8 중 어디에 해당하는지 분류할 수 있다.

Table 6은 두 도형의 교차 여부를 판별하고 교점의 좌표를 구하기 위해, 직선의 방정식(Eq. (7))과 원반의 방정식들(Eqs. (8)~(10))을 연립한 결과이다. Eqs. (7), (8)의 연립방정식, 즉 직선과 원반 옆면의 교점을 구하는 과정이 Eqs. (11)~(13)과 같다. 원의 방정식은 2차 함수이므로, 1차 함수인 직선의 방정식과 연립 후, 2차 방정식의

Table 5. The possible cases(Case #1 - #8) for spatial relativity of figures, and corresponding results of screened segments

Case	#1 LOS is parallel to the axis of smoke, and two figures do not intersect.	#2 LOS is parallel to the axis of smoke, and two figures intersect.	#3 LOS and the extended SS never intersect. (skew)	#4 LOS and the extended SS intersect, outside of smoke.
Schematics				
Screened Segment	Not screened	$\overline{P_U P_L}$	Not screened	Not screened
Case	#5 LOS intersects with both US and SS.	#6 LOS intersects with both US and LS.	#7 LOS intersects with smoke at two points of SS.	#8 LOS intersects with both LS and SS.
Schematics				
Screened Segment	$\overline{P_U P_{SL}}$	$\overline{P_U P_L}$	$\overline{P_{SU} P_{SL}}$	$\overline{P_{SU} P_L}$

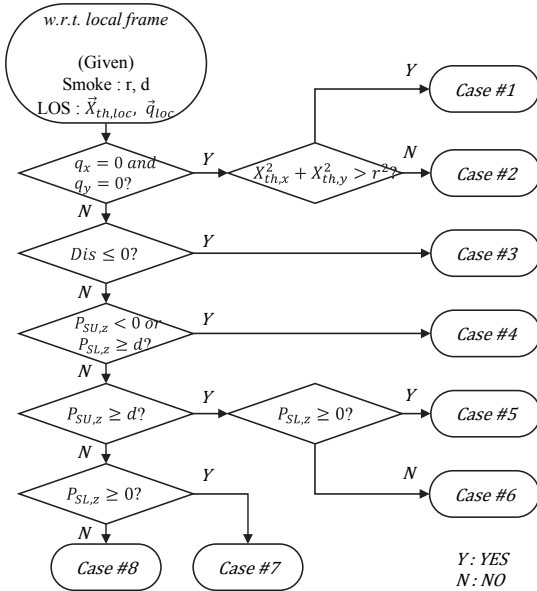


Fig. 4. Flowchart to identify the spatial relativity of figures

Table 6. Positions of intersections of figures (w.r.t. local frame of reference)

	Solutions : (x, y, z) position of intersection
	$Dis = r^2(q_x^2 + q_y^2) - (X_{th,y}q_x + X_{th,x}q_y)^2$ (11)
	$t_1, t_2 = \frac{-(X_{th,x}q_x + X_{th,y}q_y) \pm \sqrt{Dis}}{q_x^2 + q_y^2}$ (12)
Eq.(7), Eq.(8)	$P_{SU}, P_{SL} = \begin{bmatrix} X_{th,x} + q_x t_k \\ X_{th,y} + q_y t_k \\ X_{th,z} + q_z t_k \end{bmatrix}^T$, (13) where $k = 1, 2$ and $P_{SU,z} > P_{SL,z}$
Eq.(7), Eq.(9)	$P_L = \begin{bmatrix} X_{th,x} - \frac{q_x}{q_z} X_{th,z} \\ X_{th,y} - \frac{q_y}{q_z} X_{th,z} \\ 0 \end{bmatrix}^T$ (14)
Eq.(7), Eq.(10)	$P_U = \begin{bmatrix} X_{th,x} + \frac{q_x}{q_z} (H - X_{th,z}) \\ X_{th,y} + \frac{q_y}{q_z} (H - X_{th,z}) \\ H \end{bmatrix}^T$ (15)

판별식 Dis (Eq. (11))을 이용해 해의 존재 여부를 판별한다. 판별식의 크기가 0 이하이면, 원반 옆면의 연장면과 가시선은 교차하지 않거나 한 점에서 교차한다. 판별식이 0보다 커 두 개의 해가 있는 경우, 두 교점이 Eq. (13)과 같이 표현된다. 두 교점 중 z 방향이 더 큰 점을 P_{SU} , 더 작은 점을 P_{SL} 라고 정의하였다. Eqs. (7), (9)의 연립방정식의 해, 즉 직선과 원반 밑면의 교점은 Eq. (14)로 표현되며, P_L 로 정의하였다. Eqs. (7), (10)의 연립방정식의 해, 즉 직선과 원반 윗면의 교점은 Eq. (15)로 표현되며, P_U 로 정의하였다.

분류 결과 Case #1, #3, #4인 경우 가시선이 차장되지 않는다.

2.3.2 차장길이 산출

가시선이 연막운과 교차하여 차장효과가 있는 경우인 Case #2, #5 - #8은, 교차한 영역의 길이(Table 5의 Screened Segment 항목 참조)를 구한다. Table 5에 정리된 두 교점의 좌표를 Eq. (16)의 P_1, P_2 에 대입하여 두 점 사이의 길이 $\overline{P_1P_2}$ 를 계산한다.

임의의 두 점 $P_1(x_1, y_1, z_1), P_2(x_2, y_2, z_2)$ 에 대해,

$$\overline{P_1P_2} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (16)$$

3. 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 조건

테스트를 위한 시뮬레이션 시나리오를 설정하여 값을 Table 7과 같이 입력하였다. 발사 조건 및 연막 유탄 특성, 전차 이동속도 등의 값은 적외선 차장 연막 유탄 K415, 고정형 연막탄 발사기 KM250, 그리고 K1전차의 무기체계 제원을 참고¹⁾하였다. 예를 들어, KM250 발사기의 발사관 개수가 6개임에 따라, 연막운의 발사 개수 N 은 6으로 설정하였다. 또한, 모델을 테스트하기 위한 단계이므로, 간단하게 전차와 위협체가 기동하지 않고 정지해 있는 상태를 시뮬레이션하였으며, 연막탄은 다섯 발을 발사하도록 설정하였다. 소멸계수 α 는 연막 유탄의 특성으로 연막 유탄 모델에서 입력받는 것이 맞으나, 모델 내의 계산 과정에서 사용되지는 않고 탐지 모델에 그대로 출력해주는 값이며, 제원이 외부에 공개되어 있지 않다. 따라서 현 테스트 시뮬레이션에서는 값을 특별히 지정하

지 않았으며, Table 7에도 표시하지 않았다.

Fig. 5는 여섯 개의 연막운의 중심이 시뮬레이션 수행 시간 동안 이동한 경로를 나타낸 그림이다.

Table 7. Values of input parameters for test scenario

Category	Notation	Value	Unit
Environment / Tactical factors	$\vec{v}_{w,gl}$	[0.98, 0.98, 0]	[m/s]
	$\vec{X}_{t,gl,0}$	[0, 0, 0]	[m]
	$\vec{v}_{t,gl}$	[0, 0, 0]	[m/s]
	$\vec{X}_{th,gl,0}$	[0, 100, 30]	[m]
	$\vec{v}_{th,gl}$	[0, 0, 0]	[m/s]
Launch factors	N	6	[개]
	θ	65	[deg]
	ϕ	[-80, -50, -20, 10, 40]	[deg]
	ϕ_d	30	[deg]
Characteristics of smoke grenade	D	30	[m]
	λ	적외선	-
	m	1200	[g]
	α	00.00	[m ² /g]
	t_d	2	[s]
	τ	45	[s]
	r_0	4	[m]
	d_0	2	[m]

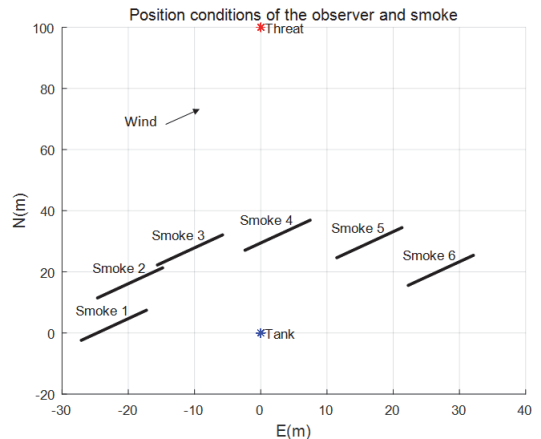


Fig. 5. Trajectories of the centers of smokes, tank and threat during the simulation

1) 각각 삼양화학, S&T중공업, 현대로템에서 제공하는 공식 자료를 참조함.

3.2 시물레이션 결과 분석

Fig. 6에 시물레이션 수행 결과를 나타내었다. Fig. 6(a)에서와 같이, 모델 내에서 연막운의 반지름과 두께는 시간에 따라 선형적으로 증가한다. 이에 따라 연막운의 부피 $\pi r^2 d$ 가 증가하고, 연막운 내부 연막제의 평균 농도는 반비례하여 Fig. 6(b)와 같이 감소하게 된다. 가시선과 연막운의 교차한 영역의 길이 역시 운의 부피가 커짐에 따라 Fig. 6(c)와 같이 증가한다.

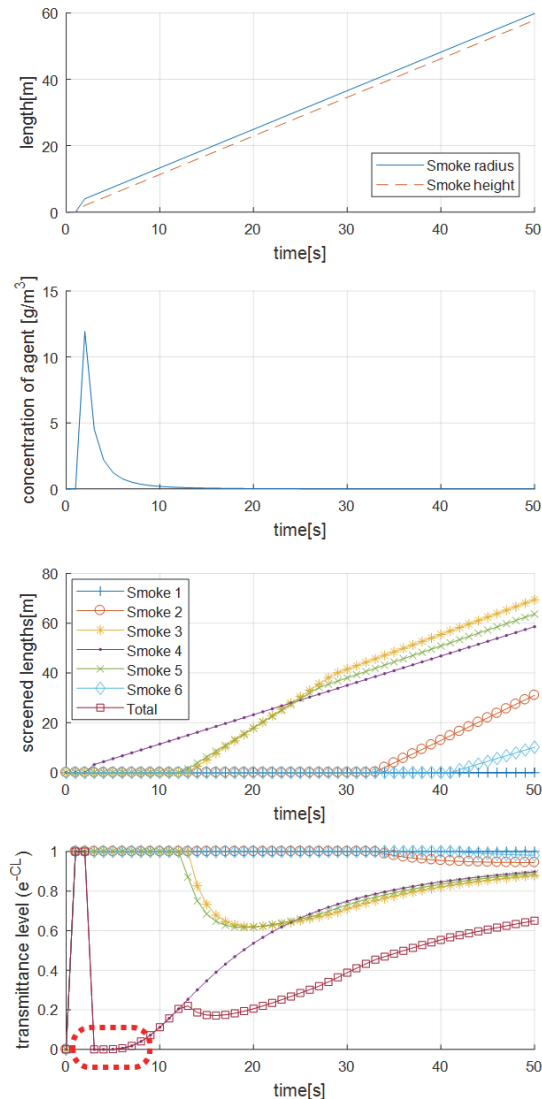


Fig. 6. Simulation results: (a) Smoke radius & thickness, (b) Average concentration of agent, (c) Screened length of LOS, (d) Transmittance level (0:screened / 1:not screened)

Fig. 6(d)에서는 최종적으로 차장효과를 분석하기 위해, 투과도 레벨 경향을 분석하였다. 정확한 투과도는 Eq. (1)과 같이 계산하는 것이 옳으나, 이 테스트 시물레이션은 소멸계수 α 값을 정하지 않고 수행하였으므로, e^{-CL} 의 값을 계산하여 투과도의 대략적인 경향을 분석하였다. 그래프의 y축 값이 0에 가까울수록 차장 효과가 크고, 1에 가까울수록 차장효과가 일어나지 않은 것이다. 여섯 개의 연막운 각각에 대한 경향을 도시하였고, 여섯 값을 곱한 값인 Total 값이 하늘색 *로 표시되었다. 차장 효과가 5초에서 10초 정도에 가장 크게 나타났다가 점차 감소하는 경향을 확인할 수 있다.

이처럼 가장 차장효과가 큰 지점을 도출해낼 수 있는 것을 확장하여, 전차의 연막 유탄 발사 시간을 결정하거나 발사 후 회피 논리를 수립하는 등, 연막장비 운용 방침에 관한 연구에 활용 가능할 것이다. 또한, 연막 유탄의 발사 대수에 따른 차장 효과를 분석하여 최적의 발사 대수를 결정하는 등, 발사기 구조를 설계하는 연구개발 측면에도 활용 가능할 것이다.

그래프를 도시하는 작업을 제외하고 6개의 연막운에 대한 시물레이션은 MATLAB 엔진 상에서 총 0.6341초가 소요되었다.

4. 결론

본 연구에서는 공학급 파라미터를 포함하면서도 교전 시물레이션에 활용하기 적절한 수준의 차량 연막 유탄 모델을 개발하였다.

먼저 연막 유탄에 관련된 연구들을 운용개념연구 수준에서부터 연구개발 수준까지 종합하여 모델의 입력 파라미터를 선정하였다. 또한, 교전 시물레이션에 사용될 것을 고려하여 탐지 모델 컴포넌트에 입력될 수 있도록, 모델의 출력 파라미터를 결정하였다. 모델 내부는 연막운과 가시선을 3차원상의 원반과 선분으로 모델링하여, 입자 모델이나 확률모델보다는 비교적 간단한 수준으로 모의하였다. 특히 좌표계 변환을 통해 2차 방정식을 쉽게 풀이할 수 있도록 변형하여, 간단한 수식으로 출력값을 구할 수 있는 단순한 모델링을 구현하였다. 간단한 연산을 사용함으로써, 여러 개체가 포함되는 다대다 교전 시물레이션에 적용하기 쉽도록 하였다.

3절에서는 테스트 시물레이션을 수행하여, 전차가 연막 유탄을 발사함으로써 위협체의 가시선을 얼마나 차장시킬 수 있는지 그 효과를 분석해 보았다. 특히 3.2절에

서는, 본 모델을 사용함으로써 운용개념 수립에서부터 연구개발까지 넓은 해상도 범위를 포괄 가능하다는 점을 살펴보았다.

실 데이터 및 비교 모델의 부재로 인하여 본 모델의 충실도는 검증되지 못했으나, 최대한 검증된 이론과 데이터들을 바탕으로 모델을 구현하고자 노력하였다. Beer-Lambert 법칙, 2차 방정식 해법, 좌표계 변환 등 교과서에서 찾을 수 있는 과학적 이론들을 바탕으로 모델링을 수행하였으며, 국방과학연구소와 국방연구소에서 개발되거나 사용 중인 M&S, 그리고 실 무기에 대한 공개된 제원들을 참조하여 파라미터들을 선정하였다.

본 모델은, 국과연에서 개발한 AddSIM 버전 3.0을 이용해 다시 작성되어, 전자 BSM 및 전투차량 BSM에 물리모델 컴포넌트 형태로 포함될 것이다. AddSIM의 사용자들은 이 BSM들을 바탕으로 연막 유탄을 이용하는 다양한 교전 시나리오를 구성할 수 있을 것이다.

References

- Ahn, S.H. (2017), "Spot Coverage of Assault River Crossing of Army Division 20", Kookbangilbo.
(안승희 (2017), "장애는 없다, K2 전자 잠수 도하 '흑표처럼...' - 육군20사단 강습 도하 현장 취재", 국방일보).
- Cho, K.G. (2007), "Software to analyze the charging effectiveness of the multi-band screening smoke grenade", Technical Report, Agency for Defense Development.
(조규공 (2007), "복합연막탄 차장효과 분석 소프트웨어", 기술보고서, 국방과학연구소).
- Cho, W.H. and N.G. Kim (2007) "Feasibility Study of a Pyrotechnic Active RP/IR Obscuring Smoke", Proceedings of Korea Institute of Military Science and Technology 2007, 302-306.
(조원호, 김남곤 (2007) "연소형 RP/IR 연막제 Feasibility Study", 2007년도 한국군사과학기술학회 종합학술대회, 302-306).
- Go, E.M., D.S. Hong and M.J. Choi (1992) "The general studies on TOP or absorption coefficient measurement of smoke", Technical Report, Agency for Defense Development.
(고은미, 홍대식, 최명진 (1992) "연막제의 TOP 및 흡수계수 측정에 관한 연구", 기술보고서, 국방과학연구소).
- Hwang, J.S., C.K. Kim, W.H. Cho and N.G. Kim (2014) "Composition Design of Multi-spectral Screenign Burning Smoke and Development of Test and Evaluation Methods", Proceedings of Korea Institute of Military Science and Technology 2014, 1153-1154.
(황준식, 김창기, 조원호, 김남곤, "다영역 차장 연소형 연막제 조성설계 및 시험평가 기법 개발", 2014년도 한국군사과학기술학회 종합학술대회, 1153-1154).
- Kim, D.H., H.S. Oh, S.J. Lee, S.N. Yang, Y.L. Rhee, J.H. Park, S.J. Lee and S.J. Min (2018), "Improving the AddSIM (Advanced distributed SIMulation environment) for an integrated engagement simulation", The 11th International Army Modeling & Simulation Education Conference.
(김도형, 오현식, 이상진, 양승남, 이예림, 박주혜, 이순주, 민서정 (2018), "무기체계 통합 교전모의를 위한 AddSIM 기능 개선", 제11회 육군 M&S 국제학술대회).
- Kim, D.H., S.J. Lee, Y.L. Rhee and H.S. Oh (2018), "Architecture design of Base System Model for engagement simulation", Proceedings of The Korea Society for Simulation 2018.
(김도형, 이순주, 이예림, 오현식 (2018), "교전시물레이션을 위한 무기체계 기본체계모델 아키텍처 설계", 2018년 한국시물레이션학회 춘계공동학술대회).
- Korea Institute for Defense Analyses(KIDA) (2013), "Documentation for Logics of Army Weapon Effectiveness Analysis Model(AWAM)", 65-80.
(한국국방연구원(KIDA) (2013), "지상무기효과분석 모델(AWAM) 모의논리서", 65-80).
- Lee, E.H. and J.K. Lim (2005), "Simulation software of the soft-kill active protection system", Technical Report, Agency for Defense Development.
(이희혁, 임종광 (2005), "소프트킬 능동방호시물레이션 소프트웨어 개발", 기술보고서, 국방과학연구소).
- Oh, H.S., S.J. Park, S.J. Lee, D.H. Kim, J.H. Park and S.J. Lee (2016), "Plan of Developing Component Model Library of Weapon Systems", The 9th International Army Modeling & Simulation Education Conference.
(오현식, 박삼준, 이상진, 김도형, 박주혜, 이순주

- (2016), “무기체계 컴포넌트 모델 라이브러리 구축 계획”, 제9회 육군 M&S 국제학술대회).
- Park, G.C., J.S. Ha and K.G. Cho (2010), “The Development of Soft-Kill and analysis of APS (Active Protection System) for ground vehicle”, Technical Report, Agency for Defense Development. (박규철, 하중수, 조규공 (2010), “지상기동 장비용 능동방호장치(APS) 위협체 분석 및 유도교란형(Soft Kill) APS 개발”, 기술보고서, 국방과학연구소).
- Park, J.S., D.G. Joung and D.S. Jeon (2016), “Performance Analysis of Infrared Smoke Screen of 3rd Generation Anti-Tank Missile”, Proceedings of Korea Institute of Military Science and Technology 2016, 1729-1730. (박진서, 정동길, 전두성 (2016), “3세대 대전차 유도 무기의 적외선 연막 차장 대응 성능 분석”, 2016년도 한국군사과학기술학회 종합학술대회, 1729-1730).
- Republic of Korea Army Headquarters (2010), “Utilization of smoke grenade equipment”, Field Manual. (육군본부 (2010) “연막장비운용”, 야전교범).
- Shim, B.S. (2005), “A developmental report of the grenade anchoring system for the FTR of KNMBT”, Technical Report, Agency for Defense Development. (심봉식 (2005), “차기전차 FTR 시제용 연막탄발사기 개발보고서”, 기술보고서, 국방과학연구소).
- Sim, W.S. (2011), “Technical description of NBC_RAMS Model engine”, Technical Report, Agency for Defense Development. (심우섭 (2011), “NBC_RAMS 모델엔진 기술서”, 기술보고서, 국방과학연구소).
- Wetmore, A. and S.D. Ayres (2000), “COMBIC, Combined Obscuration Model for Battlefield Induced Contaminants: Volume 1 Technical Documentation and Users Guide”, Army Research Laboratory, Adelphi, MD.
- Wetmore, A. and S.D. Ayres (2000), “COMBIC, Combined Obscuration Model for Battlefield Induced Contaminants: Volume 2 Appendices”, Army Research Laboratory, Adelphi, MD.



민 서 정 (sejungmin9008@gmail.com)

2013 KAIST 기계공학과 학사
 2015 KAIST 기계공학과 석사 (Bio-Robotics Lab.)
 2016.7~ 2017.8 (주)삼성전자, 세탁기전문기술Lab 제어파트, Engineer
 2017.9~ 현재 국방과학연구소, 2본부 4부, 연구원

관심분야 : 무기체계 M&S, 체계효과분석, 지상/해양 분야 무기체계 물리적 모델링



이 상 진 (sangjinlee@add.re.kr)

2000 고려대학교 산업공학과 학사
 2002 KAIST 산업공학과 석사
 2008 KAIST 산업및시스템공학과 박사
 2010 현대제철
 2011~ 현재 국방과학연구소

관심분야 : M&S, CGF(Computer Generated Forces), 조립형 시물레이션 프레임워크