

직사화기 무기체계의 무기효과지수 계산을 위한 메타모델 생성방법 연구

이예림 · 이상진 · 오현식[†]

A Study on Generating Meta-Model to Calculate Weapon Effectiveness Index for a Direct Fire Weapon System

Ye Lim Rhie · Sangjin Lee · Hyun-Shik Oh[†]

ABSTRACT

Defense M&S(Modeling & Simulation) requires weapon effectiveness index which indicates Ph(Probability of hit) and Pk(Probability of kill) values on various impact and environmental conditions. The index is usually produced by JMEM(Joint Munition Effectiveness Manual) development process, which calculates Pk based on the impact condition and circular error probable. This approach requires experts to manually adjust the index to consider the environmental factors such as terrain, atmosphere, and obstacles. To reduce expert's involvement, this paper proposes a meta-model based method to produce weapon effectiveness index. The method considers the effects of environmental factors during calculating a munition's trajectory by utilizing high-resolution weapon system models. Based on the result of Monte-Carlo simulation, logistic regression model and Gaussian Process Regression(GPR) model is respectively developed to predict Ph and Pk values of unobserved conditions. The suggested method will help M&S users to produce weapon effectiveness index more efficiently.

Key words : Meta-Model, Weapon Effectiveness Index, Probability of Kill, Modeling&Simulation, AddSIM

요약

개체단위 M&S의 교전 결과에 대한 정확도를 높이기 위해서는 신뢰성 있는 무기효과지수를 바탕으로 피해 정도가 모의되어야 한다. 무기효과지수는 특정 교전 환경에서 무기체계와 표적에 대한 명중확률(Ph)과 살상확률(Pk)을 지수화한 값으로, 주로 JMEM 데이터나 JMEM 방법론에 따라 생산된 데이터가 활용되고 있다. 그러나 JMEM 방법론은 표적 중심부를 기준으로 원형공산오차를 통과하는 파편이나 탄의 격자 통과량으로 살상확률을 계산하기 때문에 지형, 대기, 장애물 등의 추가적인 환경 요소를 고려하기 위해서는 전문가에 의한 보정이 요구된다. 따라서 본 논문에서는 다수의 교전 및 환경요소가 반영된 무기효과지수 생산을 위해 공학급 무기체계 모델을 활용하여 몬테카를로 시물레이션을 수행하고, 그 결과 데이터를 바탕으로 메타모델을 생성하였다. 명중확률과 살상확률 메타모델로 로지스틱 회귀모델과 가우시안 프로세스 회귀모델이 각각 생성되었으며, 예시 시나리오에 적용하여 모델 적합도를 관찰하였다. 본 연구에서 제시한 절차를 따르면 개체단위 M&S의 입력자료를 효율적으로 생산할 수 있을 것으로 기대한다.

주요어 : 메타모델, 무기효과지수, 살상확률, 모델링&시물레이션, AddSIM

1. 서론

무기체계 M&S(Modeling and Simulation)는 다양한

환경에서 무기체계의 성능과 효과를 분석함으로써 소요 타당성을 검증하고 시행착오를 줄여 개발비용 및 획득기간을 단축시킨다(DAPA, 2017). 개체단위 교전 시물레이션은 단위 무기체계간 교전 성능 예측을 목적으로 하며, 공학급 M&S보다 해상도가 낮은 무기체계 모델로 방책 분석, 단위무기 운용효과분석, 데이터 표본 산출 등을 수행한다. 개체간 교전으로 인한 표적의 탄 피격 시에는 피해평가를 위해 미리 작성된 명중확률(Probability of Hit;

Received: 3 March 2021, **Revised:** 22 April 2021,
Accepted: 26 April 2021

[†] **Corresponding Author:** Hyun-Shik Oh
E-mail: hyunshik96@gmail.com
Agency for Defense Development

Ph)과 살상확률(Probability of Kill; Pk) 등을 참조하여 표적의 피해정도를 평가하고 추후 상태에 반영하는데, 이때 참조하는 데이터가 무기효과지수이다. 무기효과지수는 무기체계가 특정 조우조건과 사거리, 표적의 은폐/엄폐 정도 등의 상황조건에서 표적에게 피해를 입힐 능력 또는 가능성에 대한 확률적 표현으로(Driels, 2004), 본 논문에서는 명중확률과 살상확률로 한정한다. 현재 우리 군이 운용하는 M&S체계는 미국에서 제공한 JMEM (Joint Munition Effectiveness Manual) 데이터와 국내에서 JMEM 방법론에 따라 생산한 데이터 등을 무기효과지수로 사용한다. 이 데이터는 신뢰도가 높으나 생산에 필요한 시간과 비용이 많이 소요되기 때문에 일부 국내 무기체계와 표적에 대한 한정된 데이터만이 확보되었다. 또한 통제된 조건에서의 데이터를 생산하므로, 지형·대기 등의 추가적인 환경 요소를 고려하기 위해서는 전문가의 판단 하에 보정값이 적용되어야 한다. 이러한 한계를 극복하기 위해 고해상도 무기체계 M&S를 활용한 몬테카를로 시뮬레이션으로 살상확률 데이터를 산출하는 방법이 연구되고 있다(Choi et al., 2017; Anderson, 2004; Chulsilp, 2014).

무기체계 M&S를 활용한 몬테카를로 시뮬레이션은 교전 결과에 영향을 미치는 입력변수와 그 수준을 정의하고, 발생 가능한 모든 경우의 수를 조합하여 각 입력조건에 대한 반복실험 결과로 살상확률을 계산한다. 그러나 이 방식은 입력 변수를 더 세분화하여 관찰하고 싶은 경우(예를 들어, 무기체계와 표적간의 거리 단위가 1,000 m 단위에서 500 m 단위로 세분화되는 경우) 기존에 계산되지 않은 입력값에 대한 살상확률을 산출하기 위해 추가적인 시뮬레이션 수행이 요구된다. 또, 입력 변수의 수준이나 환경조건이 변경될 때마다 분석시간이 기하급수적으로 증가하게 되므로, 모든 변수의 조합에 대한 무기효과지수를 계산하는데 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서는 시뮬레이션 결과를 바탕으로 메타모델을 생성하고, 이를 활용하여 무기효과지수를 계산하는 방법을 제안한다.

메타모델(Meta Model)은 복잡한 시뮬레이션의 계산 비용을 줄이기 위해 시뮬레이션의 입·출력특성과 유사하게 동작하는 통계적 모델을 의미한다. 본 연구에서는 무기체계 특성, 상황조건, 환경조건 등의 입력값에 대한 명중확률과 살상확률을 예측하는 메타모델로 로지스틱 회귀모델(Logistic Regression Model) 가우시안 프로세스 회귀모델(Gaussian Process Regression Model; GPR)을 생성하였다. 또한 사례연구로 전차가 장갑차를 공격하는 시나리오에 대한 시뮬레이션 결과를 바탕으로 메타모

델을 만들고 적합도를 관찰하였다.

본 논문의 2장은 기존의 무기효과지수 생산방법과 방법론에 관련한 개념 등의 연구배경을 설명하고, 3장에서는 메타모델을 활용한 무기효과지수 생성절차와 적용 사례를 소개한다. 4장은 연구의 의의와 한계점을 다룬다.

2. 기존 연구

2.1 JMEM 살상확률 계산 방법

교전급 M&S는 무기체계 교전 시 표적의 피해를 모의하기 위해 다양한 교전환경 조건에 대한 무기효과지수를 입력받는다. 무기효과지수는 특정 무기체계와 표적에 대한 단발살상확률(Single Shot Probability of Kill)을 지수화한 값으로, ‘발사 플랫폼과 표적 간의 거리’, ‘조우 방향’, ‘탄의 종류’ 등 무기체계의 특성과 환경조건에 대한 표적의 명중확률과 피해 유형별 살상확률을 표 형태로 제공한다. 현재 우리 군에서 여단급 이하 지상분석에 사용 중인 지상무기효과분석모델(AWAM; Army Weapon Effectiveness Analysis Model)과 전구/임무급 부대단위 지상 작전을 위한 모델의 표본 데이터 생성용 모델인 COSAGE(Combat Sample Generator)는 결과 데이터에 대한 신뢰도를 높이기 위해 JMEM 데이터나 JMEM 방법론에 따라 생산된 무기효과지수를 활용하고 있다.

JMEM 방법론에 따른 데이터 산출 절차는 Table 1과 같다. 1단계에서는 표적에 대한 정보를 식별 및 취합하고, 2단계에서는 1단계의 정보를 바탕으로 표적에 대한 기하학적 구성, 부품의 배치, 재질 특성 등을 CAD 도구를 활용하여 구현한다. 3단계는 탄의 특성을 고려하여 표적에 대한 파편 등의 영향을 계산하는 단계로, 일반적으로 표적에 격자를 구성하여 각 격자 중심에 파편 등이 통과할 때 표적의 피해 정도를 계산한다. 4단계에서는 표적의 취약성 데이터에 무기체계의 전달 정확도를 반영하여 살상범주별 무기효과지수를 계산하고, 5단계는 무기효과지수를 이용하여 살상확률과 소요량 등을 산출한다.

Table 1. JMEM Process

Step	Task
1	Intelligence collection/production
2	Target geometric model development
3	Vulnerability data development
4	Effectiveness indices or lethal areas generation
5	Damage calculation/estimation

JMEM 방법론에서 살상확률 데이터는 표적 중심부에 원형공산오차(Circular Error Probable; CEP) 중심을 맞춘 후 파편이나 탄의 격자 통과량을 계산하여 산출된다. 발사 조건과 탄의 조준오차(Aiming Error), 그리고 탄도오차(Ballistic Error)에 대한 영향은 원형공산오차의 크기에 반영되지만 지형, 풍속, 온도 등 환경조건의 영향은 반영되지 않으므로 이를 반영하기 위해서는 전문가의 견해에 따른 보정이 필요하다. 본 연구는 전반적으로 JMEM 절차에 따라 살상확률을 계산하지만, 5단계에서 환경의 영향을 고려하여 탄착지점을 계산함으로써 이러한 단점을 보완하였다.

2.2 취약성 데이터

표적 취약성데이터는 탄의 특성과 피해기구(Damage Mechanism), 표적의 특성을 고려하여 표적이 파괴되는 정도를 정량화한 것이다. 취약성 분석도구(Target Vulnerability Analysis Tool)는 표적의 노출 형태를 특정 크기의 격자로 나누고, 탄이 해당 격자에 명중할 경우 피해 유형별(기동 상실(Mobility Kill; M), 화력 상실(Fire Kill; F), 기동 또는 화력 상실(Mobility or Fire Kill; MorF)) 살상확률을 계산하는데, 이를 위해서는 무기체계의 내·외부 형상, 재질, 두께 등의 정보가 필요하다(Lee & Kim, 2013). 취약성데이터가 확보된 경우 개별탄의 탄착위치를 모의함으로써 표적의 피해유형별 살상확률을 알 수 있다. Fig. 1은 본 연구에서 사용된 전차의 취약성데이터를 도식화한 것으로, 각 격자의 크기는 10 cm×10 cm이고, 붉은색이 진할수록 요격되는 경우 살상확률이 높아짐을 의미한다.

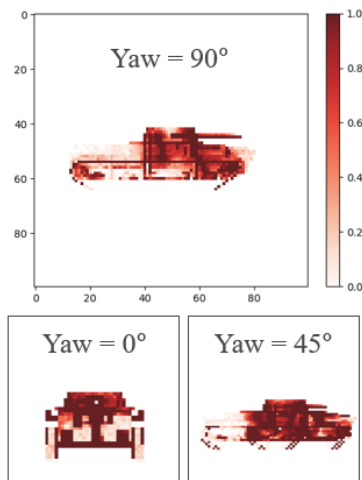


Fig. 1. Example of vulnerability data

2.3 AddSIM 3.0

본 논문에서는 탄도계산과 살상확률 계산을 위해 컴포넌트 기반 체계모의환경(Advanced Distributed Simulation Environment; AddSIM)을 활용하였다. AddSIM은 무기체계의 성능 및 효과도 분석을 돕는 무기체계 통합시뮬레이션 소프트웨어로, 사용자는 분석목표에 따라 무기체계 모델을 개발하고 시나리오를 설정, 실행하여 결과를 확인할 수 있다(Oh et al., 2014). AddSIM 버전 3.0에서는 21종의 검증된 공학급 무기체계 BSM(Base System Model)을 플레이어로 제공하고 있으며, 한반도의 지형 및 대기정보를 제공함으로써 신뢰도 높은 무기체계 효과 분석을 지원한다(Lee, 2020; Lee & Oh, 2019).

기존의 교전급 M&S가 발사 플랫폼에 조준오차와 탄도오차를 확률적인 수치로 반영하는 반면, AddSIM은 더 높은 해상도를 가진 물리모델에 내적, 외적 잡음 요소를 반영하여 개별탄의 궤적을 계산한다. 이 과정에서 자연환경과 장애물에 대한 영향이 반영되며, 탄의 종말단계에서는 탄착위치에 따라 표적의 취약성데이터로부터 살상유형별 피해확률을 획득한다. 조준오차와 탄도오차 등 확률적인 요소를 반영하기 위해서는 몬테카를로 시뮬레이션으로 반복적으로 살상확률을 산출하고 평균을 계산한다.

2.4 메타모델

교전상황과 같이 실제 데이터를 획득하기 힘든 경우 시뮬레이션을 통해 다양한 상황을 모의할 수 있다. 메타모델은 대상에 대한 이해 또는 효율성을 높이기 위해 시뮬레이션의 입력 대비 출력을 근사함수로 표현하는 것으로, 작업공간 설계(Kang et al., 2006; Ligetti & Simpson, 2005), 의료 서비스 설계(Jalal et al., 2013; Zeinali et al., 2015), 군수물자 운용가용도 예측(Kim et al., 2014) 등 여러 분야에서 연구되고 있다. 본 연구에서는 메타모델로 로지스틱 회귀모델과 가우시안 프로세스 회귀모델을 적용하였다.

2.4.1 로지스틱 회귀분석

로지스틱 회귀모델은 종속변수가 이진 형태인 경우 적용되며, 독립변수와 종속변수의 관계를 선형적으로 설명하는 장점이 있으며, 종속변수는 식 (1)과 같이 계산된다. 본 연구에서 식의 p_i 는 명중확률을 의미하며, 이를 로짓(Logit)변환한 값은 식 (2)와 같이 독립변수의 선형조합으로 표현된다.

$$p_i = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k}} \quad (1)$$

$$\ln\left(\frac{p_i}{1-p_i}\right) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k \quad (2)$$

p_i : 종속변수가 1이 될 확률(명중 성공하는 확률)
 β_i : 로지스틱 회귀계수

2.4.2 가우시안 프로세스 회귀분석(GPR)

GPR은 비선형 회귀에 사용되는 지도학습(Supervised Learning) 기법 중 하나로, 인공신경망 모델보다 단순하게 표현할 수 있으며 계산시간이 빠르다는 장점이 있어 여러 분야에 적용되고 있다. GP 모델은 식(3)와 같이 평균함수(Mean Function)와 공분산 함수(Covariance Function)로 정의되며, 이 때 임의의 두 점 X와 X'의 공분산을 계산하기 위한 공분산 커널(Kernel)로 RBF (Radial-Basis Function)와 Matern 등 다양한 종류의 함수가 적용될 수 있다(Rasmussen & Williams, 2016). 식 (3)의 $k(X, X')$ 은 Matern 커널식으로, 학습이 진행됨에 따라 함수의 특성을 결정짓는 하이퍼파라미터(Hyper-parameter)인 l 과 ν 의 값이 조정된다. 회귀식의 smoothness를 조정하는 ν 가 무한대가 되면 RBF 커널과 동일해진다.

학습 결과 주어진 데이터에 대한 분포가 정의되면 새로운 데이터에 대한 사후분포를 계산함으로써 새로운 입력조건에 대한 결과값을 추론할 수 있다.

$$f(X) \sim GP(m(X), k(X, X')) \quad (3)$$

$$m(X) = E[f(X)]$$

$$k(X, X') =$$

$$\frac{1}{\Gamma(\nu)2^{\nu-1}} \left(\frac{\sqrt{2\nu}}{l} d(x_i, x_j)\right)^\nu K_\nu\left(\frac{\sqrt{2\nu}}{l} d(x_i, x_j)\right),$$

- l : length parameter
- ν : smoothness parameter
- $d(x_i, x_j)$: x_i, x_j 의 Euclidean distance
- Γ : 감마함수(gamma distribution)
- K_ν : ν 차수를 갖는 베셀함수(Bessel function)

3. 방법 및 결과

연구절차는 Fig. 2와 같이 (1) 시나리오 작성, (2) 시물

레이션 실행, (3) 데이터 분석, (4) 데이터 생산을 따른다. 본 장에서는 각 단계의 세부내용을 설명하고, 사례에 적용한 결과를 설명한다.

3.1 시나리오 작성

시나리오 작성 단계에서는 시뮬레이션에 참여하는 무기체계 플레이어를 적절한 위치에 배치하고 시뮬레이션 진행에 필요한 초기값을 설정한다. 이 초기값에는 무기체계의 속성 외에도 지형정보와 대기정보 등 환경모델에 대한 선택 정보가 포함된다. 표적의 살상확률을 산출하기 위해서는 공격 무기체계의 피해기구를 구현한 피해평가 플레이어가 배치되어야 하며, 표적에는 취약성데이터가 적용되어야 한다.

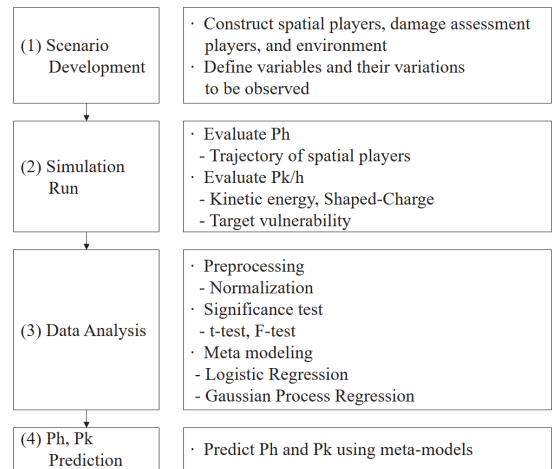


Fig. 2. Analysis Procedure

본 연구에서는 직사화기 무기체계에 의한 살상확률 산출을 위한 무기체계 효과분석의 예시로 탱크가 장갑차를 공격하는 1:1 교전상황을 구성하였다. 지상무기체계 플레이어는 AddSIM의 검증된 BSM 플레이어를 활용하였으며(Lee & Oh, 2019), 탱크에서 발사되는 탄의 궤적은 국과연에서 전차 개발 시 사용한 직사화기 탄도계산모델(Direct fire Ballistic COMputation; DBCOM)을 활용하여 계산하였다(Kim, 1996).

전차는 장갑으로 보호받는 다른 전차나 장갑차 표적을 공격하기 위해 운동에너지탄(Kinetic Energy; KE)과 성형작약탄(Shaped-Charge; SC)을 활용한다. 운동에너지탄과 성형작약탄은 충격부위를 직접 뚫고 들어가기 때문에 고풍탄(High Explosive)에 의한 폭압이나 파편에 의한 효과보다는 탄이 뚫고 지나가는 부분에 대한 피해만

을 계산한다. 즉, Fig. 1의 취약성데이터에서 탄착위치에 해당하는 피해 확률값을 읽는다. 본 연구는 다양한 종류의 취약성 데이터에 대한 메타모델의 적용가능성을 확인하기 위하여, 운동에너지탄과 성형작약탄이 각각 두 가지 종말 속도로 표적을 요격하는 경우에 대한 취약성데이터를 COVART 프로그램으로 생산하였다.

무기효과지수를 생성하기 위한 시나리오의 입력 변수와 그 변동범위는 Table 2와 같이 구성하여 총 $3 \times 15 \times 5 \times 2 \times 5 = 2,250$ 개의 시나리오를 생성하였으며, 조준오차와 탄착오차에 대한 영향을 반영하기 위해 시뮬레이션을 200회 반복 시행하였다. 표적의 위치는 발사플랫폼의 위치로부터 사거리와 시선각의 설정값을 기준으로 계산되고, 풍향은 동풍으로 고정하여 풍속의 영향만을 실험하였다.

Table 2. Experimental design

variable	level
target yaw angle (°)	0, 45, 90
range (m)	1000, 1100, 1200, ..., 2400
angle of sight (°)	0, 1, 2, 3, 4
temperature (°C)	20, 30
wind velocity (m/s)	0, 5, 10, 15, 20

3.2 시뮬레이션 실행

예시로 작성한 시나리오는 무기체계와 표적이 모두 정지 상태일 때 탄을 한 발 쏘는 간단한 시나리오이다. 탱크가 탐지거리 내에 위치한 표적을 감지하고 포신각도를 조정한 후 탄을 발사하면 탄은 3자유도 방정식에 따라 궤적을 형성하여 탄착위치를 계산한다.

실험계획 단계에서 설정한 표적의 yaw 각과 살상유형(M, F, MorF)에 따라 다른 취약성데이터가 적용된다. 표적은 90°를 기준으로 대칭하므로 본 연구에서는 0°, 45°, 90°인 경우의 취약성데이터를 관찰하였다.

취약성데이터는 특정 크기의 격자(Cell)로 구성되어있어 격자의 크기에 따라 해상도에 차이를 갖는다. 피해평가 플레이어는 탄착위치가 맵핑되는 격자를 계산하여 표적의 피해정도를 산출한다. 본 연구에서는 격자의 크기 설정으로 인한 한계를 보완하기 위해 식 (4)과 같이 동일한 격자점 내에서도 탄착점에 더 가까운 위치의 주변 격자의 영향을 더 많이 받도록 가중평균하여 살상확률을 계산하였다.

$$P_k = \frac{P_0 \sum_{i=1}^8 r_i + r_0 \sum_{i=1}^8 P_i}{8 \times r_0 + \sum_{i=1}^8 r_i} \quad (4)$$

P_i : i 격자에서의 피해확률

r_i : i 격자 중심점 사이의 거리

$i=0$: 탄이 위치한 격자

$i=1 \sim 8$: 탄의 상하좌우, 대각선 방향의 격자

3.3 데이터 분석

3.3.1 독립변수 정규화

전처리 단계에서는 독립변수의 단위가 메타모델의 성능에 미치는 영향을 없애기 위한 정규화를 실시하였다. 최소-최대 정규화는 식 (5)에 따라 각 변수를 최소값 0, 최대값 1 사이의 값을 갖도록 변환한다.

$$X_{normalized} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (5)$$

3.3.2 독립변수 선택

메타모델의 독립변수는 시나리오 작성 단계의 입력변수가 탄착 위치에 유의미한 영향을 미치는 것으로 선정된다. 이는 입력변수의 수준이 달라짐에 따라 출력변수의 평균에 통계적으로 유의미한 차이가 발생하는지 검정함으로써 이루어진다. 관찰하고자 하는 변수가 두 가지 수준을 갖는 경우 Student's t-test를 시행하고, 세 가지 이상의 수준을 갖는 경우 분산분석(ANOVA)을 시행한다. 표본 수가 충분히 크므로 정규성을 가정하였다.

Fig. 1의 취약성데이터에서 중심점으로부터 가로축으로의 편차를 방위각, 세로축으로의 편차를 고각이라 할 때 결과는 Table 3과 같다.

Table 3. Result of Mean Difference Test

variable	azimuth	elevation
temperature	t = 0.0 (p = 1.000)	t = -0.044 (p = 0.965)
range	F = 127.0956 (p < 0.0001)	F = 128.940 (p < 0.0001)
angle of sight	F = 0.0 (p = 1.000)	F = 1438.755 (p < 0.0001)
wind velocity	F = 7281.835 (p < 0.0001)	F = 0.0 (p = 1.000)

최대 사거리 조건에서 t-test 결과 풍속과 시선각이 0 일 때, 온도는 유의미한 영향을 미치지 않았다. F-test 결과 사거리는 방위각과 고각에 모두 유의미한 영향을 미쳤으며, 시선각은 고각에, 풍속은 방위각에 유의미한 영향을 미쳤다. 따라서 사거리, 시선각, 풍속을 메타모델의 독립변수로 선택하였다.

3.3.3 로지스틱 회귀분석

탄이 표적에 명중했는지의 여부를 예측하기 위해 로지스틱 회귀분석을 시행하였다. 로지스틱 회귀분석은 Python3.5의 scikit-learn 패키지를 이용하여 계산하였다. 앞서 시행한 영향력 검정 결과 탄착지점에 유의미한 영향을 미치는 사거리, 방위각, 고각을 독립변수로, 이진변수인 명중여부를 종속변수로 사용하였다.

로지스틱 회귀분석 결과 표적의 yaw 각 (0°, 45°, 90°) 각각에 대한 로지스틱 회귀모델은 식 (6)과 같으며, 적합도를 관찰하기 위해 모델 예측값과 실험조건별 명중 성공률(명중 횟수/실험반복횟수)을 비교하였다. 그 결과 명중 성공과 실패를 예측하는 정확도는 0.947, 0.929, 0.976이고, R²값은 0.973, 0.929, 0.963으로 로지스틱 회귀모델이 명중확률을 적절하게 예측함을 확인하였다. 식 (6)에서 사거리, 시선각, 풍속 순으로 명중확률에 영향을 많이 미치는 것을 볼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \text{logit(Ph)}(0^\circ) &= 2.117 - 0.231 \times \text{풍속} - 2.345 \times \text{사거리} - 0.417 \times \text{시선각} \\
 \text{logit(Ph)}(45^\circ) &= 2.140 - 0.232 \times \text{풍속} - 2.668 \times \text{사거리} - 0.313 \times \text{시선각} \\
 \text{logit(Ph)}(90^\circ) &= 2.117 - 0.231 \times \text{풍속} - 2.345 \times \text{사거리} - 0.417 \times \text{시선각}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

3.3.4 가우시안 프로세스 회귀분석

가우시안 프로세스 회귀분석은 Python3.5의 scikit-learn 패키지를 이용하였으며, Matern 커널의 하이퍼파라미터의 초기값으로 $l = 1.0$, $\nu = 1.5$ 를 입력하였다. 모델의 유효성을 검증하기 위해 80%의 데이터로 학습하고, 20%의 데이터로 검증하는 교차검증(Cross-Validation)을 10회 반복하였다.

Fig. 3은 사거리가 2000 m인 경우 풍속과 시선각에 대한 데이터와 메타모델의 예측 결과로, 데이터가 비선형적으로 피팅(fitting)되는 것을 볼 수 있다. Fig. 3에서 “x”로 표기된 점은 모델의 훈련에 사용된 데이터이고, “●”

로 표기된 점은 검증 데이터로 사용된 데이터를 의미한다. 가우시안 프로세스 회귀모델이 훈련 데이터뿐 아니라 검증 데이터도 유사하게 예측하는 것을 확인할 수 있다.

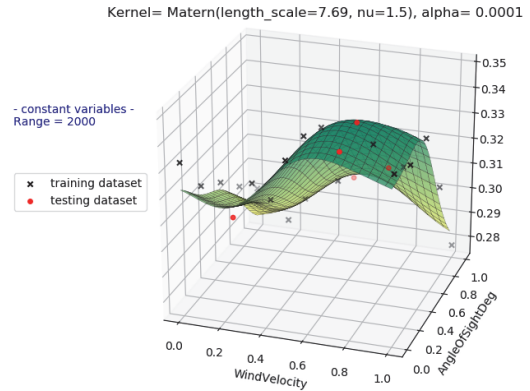


Fig. 3. Surface plot of Gaussian Process Regression

메타모델의 적합도는 검증 데이터셋에 대한 RMSE (Root Mean Square Error)를 10회 반복 계산한 평균값으로 관찰하였다. Table 4는 표적의 조우각과 탄의 피해 기구(운동에너지탄(KE), 성형작약탄(SC))에 대한 살상 유형(기동 상실(M), 화력 상실(F), 기동 또는 화력 상실(MorF))별 모델의 적합도를 나타낸다.

Table 4는 다양한 종류의 취약성데이터에 대한 RMSE 값이 0.01 정도임을 보여 가우시안 프로세스 회귀모델이 살상확률을 예측하는 메타모델로 활용될 수 있음을 보였다. 실험계획 단계에서 소개된 취약성데이터는 탄의 피해 기구와 종말조건에 따라 상이한 양상을 보였다. Table 4의 $P(\text{Pk}/h > 0)$ 열은 취약성데이터의 장갑차 면적 대비 피해가 발생하는 면적을 계산한 것으로 KE탄이 SC탄보다 전반적인 피해정도가 낮은 특성을 보였으며, 탄의 종말속도가 낮은 조건(KE1, SC1)보다 높은 조건(KE2, SC2)의 피해정도가 큰 것을 볼 수 있다. 화력상실(F)이나 기동성 상실(M)은 특정 부품이 있는 영역 외에는 모두 0의 값을 갖는 특성을 보였으며, KE1의 경우에는 취약성데이터의 대부분이 0이었기 때문에 RMSE값이 0에 더욱 근접한 경향을 보였다.

3.4 Ph, Pk 예측

로지스틱 회귀모델과 가우시안 프로세스 회귀모델에 입력조건을 넣었을 때 나오는 출력값을 각각 명중확률(Ph)과 살상확률(Pk) 예측값으로 활용한다.

Table 4. RMSE of Gaussian Process Regression model

target yaw	damage mechanism	damage type	P(Pk/h > 0)	RMSE
0°	KE1	M	0.0288	0.000796
		F	0	-
		MorF	0.0288	0.000794
	KE2	M	0.715	0.0107
		F	0.658	0.0109
		MorF	0.794	0.0110
	SC1	M	0.266	0.00805
		F	0	-
		MorF	0.266	0.00856
	SC2	M	0.432	0.00810
		F	0.548	0.00856
		MorF	0.655	0.0122
45°	KE1	M	0.0282	0.000920
		F	0	-
		MorF	0.0282	0.000956
	KE2	M	0.703	0.0114
		F	0.575	0.0176
		MorF	0.758	0.0160
	SC1	M	0.285	0.00883
		F	0	-
		MorF	0.285	0.00877
	SC2	M	0.396	0.00913
		F	0.451	0.0128
		MorF	0.549	0.0144
90°	KE1	M	0.0641	0.00317
		F	0	-
		MorF	0.0641	0.00319
	KE2	M	0.776	0.00966
		F	0.601	0.0132
		MorF	0.849	0.0151
	SC1	M	0.307	0.00799
		F	0.0116	0.00818
		MorF	0.307	0.0112
	SC2	M	0.411	0.00871
		F	0.497	0.0104
		MorF	0.593	0.0124

4. 결론 및 토의

본 연구는 직사화기 무기효과지수를 산출하기 위해 기존의 JMEM 절차에서 고려되지 않은 전장 환경요소와 고해상도 시뮬레이션 모델을 이용한 교전상황요소를 실험조건으로 구성하였다. 또한 시뮬레이션 결과를 바탕으로 살상확률 예측모델을 생성하여 보다 효율적으로 무기효과지수를 생산하는 방법을 제안하였다.

전장 환경요소를 고려하기 위해 AddSIM 3.0을 활용하여 개별탄에 대한 반복수행을 통해 살상확률을 계산하였다. 탄도를 계산하는 과정에서 무기체계의 특성과 자연 환경에 대한 영향이 반영되었고, 반복 시뮬레이션을 통해 조준오차와 탄착오차에 대한 영향을 반영하였다. 그러나 이러한 방법은 관측변수 수 또는 수준 수가 늘어남에 따라 분석시간이 기하급수적으로 증가하는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 시뮬레이션 결과데이터를 바탕으로 메타모델을 생성하였다.

연구 결과 명중확률을 예측하는 로지스틱 회귀모델은 90% 이상의 정확도를 보였으며, 살상확률을 예측하는 가우시안 프로세스 회귀모델은 평균 오차값이 최대 0.0176으로 의미있는 정확도를 보였다. 이 정확도는 Table 2의 입력조건으로 한 시뮬레이션에 한정되기 때문에 일반화될 수는 없으나, 적절한 실험설계가 이루어진다면 신뢰성 있는 메타모델을 생성할 수 있음을 보인다.

본 연구에서 제시한 절차를 따르면 적은 시뮬레이션 실험 횟수로 비관측치에 대한 살상확률을 예측할 수 있다. 이를 지원하기 위해 AddSIM 버전 4.0에서는 다양한 통계분석 기능을 제공할 예정으로, 이 기능을 통해 개체 단위 시뮬레이션을 위한 입력자료를 손쉽게 생산할 수 있을 것으로 기대한다.

References

- Anderson, C.M. (2004), "Generalized Weapon Effectiveness Modeling", Theses of Naval Postgraduate School, Monterey, California.
- Choi, Y.H., Lee, K.T., Pyun J.J., and Jang, Y.C. (2017) "A Study on Pk(Probability of Kill) Calculation Method of the Direct Fire Weapon System using Simulation", The Journal of Korea Society for Simulation, Vol. 26(3), 115-123.
- (최연호, 이기택, 변재정, 장영천 (2017) "시뮬레이션 기반 직사화기 무기체계의 살상확률 산정 방법에 관

- 한 연구”, 한국시뮬레이션학회, 제26권, 제3호, 115-123.)
- Chulsilp, P., Charubhun, W., and Koanantachai, P. (2014) “Monte Carlo Simulations of Weapon Effectiveness Using Pk Matrix and Carleton Damage Function”, *International Journal of Applied Physics and Mathematics*, Vol. 4, No. 4, 280-285.
- Defense Acquisition Program Administration(DAPA) (2017), *M&S Application Manual*. (방위사업청 (2017) *M&S 적용 매뉴얼*.)
- Driels, M.R. (2004) *Weaponneering: conventional weapon systems effectiveness*, Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Jalal, H., Dowd, B., Sainfort, F., Kuntz, K. M. (2013) “Linear Regression Metamodeling as a Tool to Summarize and Present Simulation Model Results”, *Medical Decision Making*, Vol. 33(7), 880-890.
- Kang, J.-Y., Lee, H.-C, Um, I.-S. (2006) “A Study for Design Optimization of an Automated Distribution Center using the Simulation and Metamodel”, *The Journal of Korea Society for Simulation*, Vol. 15 (3), 103-114. (강정운, 이홍청, 엄인섭 (2006) “시뮬레이션과 메타 모델을 이용한 자동물류센터 설계 최적화”, 한국시뮬레이션학회, 제 15권, 제3호, 103-114.)
- Kim, J. H. (1996) “Ballistic Computing Program for Direct Fire Weapon-DBCOM”, Technical Report of Agency for Defense Development. (김재호 (1996) “직사화기 탄도 프로그램 - DBCOM”, 국방과학연구소 기술보고서.)
- Kim, J., Lee, S., Jung, S. (2014) “The Impact of Aircraft Spare Engine and Module Inventory Level on Wartime Operational Availability”, *Korean Management Science Review*, Vol. 31(2), 33-48. (김진호, 이상진, 정성태 (2014) “항공기 예비엔진 및 모듈 재고수준이 전시 운용가용도에 미치는 영향”, 한국경영과학회, 제 31권, 제2호, 33-48.)
- Lee, K.S. and Kim, H.S. (2013) “Target Geometry Modeling of Vulnerability Analysis”, *KIMST Annual Conference Proceedings*, 1955~1956. (이경수, 김호수 (2013) “취약성 해석을 위한 표적형상 모델링 방법 연구”, 한국군사과학기술학회 종합학술대회, 1955~1956.)
- Lee, S. (2020) “Logical Modeling of Base System Model for Tank Engagement Simulation”, *The Journal of Korea Society for Simulation*, Vol. 29 (2), 63-72. (이순주 (2020) “전차 교전 시뮬레이션을 위한 기본 체계모델의 논리 모델링 방법, 한국시뮬레이션학회 논문지, 제29권, 제2호, 63-72.)
- Lee, S. and Oh, H. (2019) “Verification and Validation of Base System Models for Ground Weapon Systems”, *Proceedings of Korea Society for Simulation*. (이상진 & 오현식 (2019) “지상 무기체계 기본체계 모델 검증 및 확인 연구”, 제 12회 육군 M&S 국제학술대회.)
- Ligetti, C. B., & Simpson, T. W. (2005). “Metamodel-driven design optimization using integrative graphical design interfaces: Results from a job-shop manufacturing simulation experiment”, *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, Vol. 5(1), 8-17.
- Oh, H.-S., Park, S., Kim, H.-J., Lee, T., Lee, S., Kim, D., Paek, O., and Park, J.-H. (2014) “AddSIM: A New Korean Engagement Simulation Environment using High Resolution Models”, *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, 2942-2953.
- Rasmussen, C.E. & Williams, K.I. (2006) *Gaussian Process for Machine Learning*, the MIT Press.
- Zeinali, F., Mahootchi, M., Sepehri, M.M. (2015) “Resource planning in the emergency departments: A simulation-based metamodeling approach”, *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 53, 123-138.



이 예 림 (ORCID : <https://orcid.org/0000-0001-5156-9406/> bsinitsaz@gmail.com)

2012 홍익대학교 산업공학과 학사
2017 서울대학교 산업공학과 박사
2017~ 현재 국방과학연구소 2본부 4부 연구원

관심분야 : 국방M&S, 무기체계 효과분석, 데이터분석



이 상 진 (ORCID : <https://orcid.org/0000-0003-1372-2056/> plusian@naver.com)

2000 고려대학교 산업공학과 학사
2002 KAIST 산업공학과 석사
2008 KAIST 산업공학과 박사
2010 현대제철
2011~ 현재 국방과학연구소 2본부 4부 연구원

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



오 현 식 (ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-7329-3479/> hyunshik96@gmail.com)

1994 한국항공대학교 항공기계공학과 학사
1996 한국항공대학교 항공공학과 석사
2017 한국과학기술원 항공우주공학과 박사
1996~ 2010 국방과학연구소 1본부 대함유도무기체계단
2010~ 현재 국방과학연구소 2본부 4부, 팀장

관심분야 : 무기체계 효과분석, 국방 M&S체계, 무기체계 모델링, 소프트웨어 아키텍처