

시물레이션 모델기반 국방체계 설계를 위한 역방향 시물레이션

최선한[†] · 김탁곤 · 진기병 · 박경태 · 신동조

A Reverse Simulation for Developing Defense Systems based on Simulation Models

Seon Han Choi[†] · Tag Gon Kim · Ki Byung Jin · Kyung Tae Park · Dong Cho Shin

ABSTRACT

When analyzing the effectiveness of a defense system in a virtual battlefield with a simulation model is referred to as forward simulation, reverse simulation is required to design a good defense system with high effectiveness. That is, using the simulation model, it is necessary to find the engineering factors, measures of performance, and operational tactics that are demanded to achieve high effectiveness of the system. However, the efficiency of reverse simulation is still a concern since many replications of forward simulation are required for conducting reverse simulation. In this paper, we introduce various efficient algorithms to reduce the number of replications and a reverse simulation tool for utilizing these algorithms easily. The tool allows practitioners to easily and efficiently conduct reverse simulation for design a good defense system based on simulation models. This is demonstrated with the case studies on the design of warship's defense system and the design of military network system.

Key words : Reverse simulation, Reverse simulation algorithms, Reverse simulation tool, Defense system, Model-based design

요약

시물레이션 모델을 통해 가상 전장에서 국방체계의 효과도를 분석하는 것을 순방향 시물레이션이라고 할 때, 높은 효과도를 가지는 국방체계를 설계하기 위해서는 역방향 시물레이션이 요구된다. 즉 효과도 분석 모델을 바탕으로 높은 효과도를 달성하기 위한 군사 장비들의 제원 및 성능, 그리고 운용 전술을 역으로 도출해야 한다. 하지만 역모델을 도출할 수 없는 시물레이션 모델의 특성상 역방향 시물레이션은 많은 순방향 시물레이션 반복을 요구하므로 효율성의 문제를 초래한다. 본 논문에서는 반복 횟수를 줄임으로 역방향 시물레이션을 효율적으로 수행하기 위한 다양한 알고리즘을 제시하고, 실무자들이 손쉽게 활용하기 위한 역방향 시물레이션 도구를 소개한다. 실무자는 본 도구를 바탕으로 다양한 역방향 시물레이션 알고리즘을 활용하여 국방체계 설계를 위한 역방향 시물레이션을 손쉽게, 또 효율적으로 수행할 수 있다. 전함의 방어 시스템 설계와 군사 네트워크 시스템 설계에 대한 사례 연구는 이를 입증한다.

주요어 : 역방향 시물레이션, 역방향 시물레이션 알고리즘, 역방향 시물레이션 도구, 국방체계, 모델 기반 설계

* 본 논문은 국방과학연구소(과제명: 모델기반 전자전체계 설계분석기술)의 지원을 받아 수행한 연구 결과입니다.

Received: 27 July 2020, **Revised:** 13 August 2020,
Accepted: 13 August 2020

† Corresponding Author: Seon Han Choi
E-mail: shchoi@pknu.ac.kr
Dept. of IT Convergence and Application Engineering,
Pukyong National University, Busan, Republic of Korea

1. 서론

모델링 시물레이션(M&S: Modeling and simulation)은 실전을 통한 국방체계의 테스트가 불가능한 상황에서 체계 효과도(MOE: Measure of effectiveness)를 평가하고 분석하는데 효과적으로 활용되어 왔다(Kim, 2007; Hong and Kim, 2010; Kang and Kim, 2018). 체계 효과도 분석을 위한 시물레이션 모델은 기본적으로 장비의

공학적 제원(Engineering factors) 및 성능(MOP: Measure of performance) 또는 그 운용 전술(Operational tactics)에 대해서 가상 전장에서의 그 효과도를 분석한다. 예를 들어서 Seo et al. (2011)은 M&S를 사용하여 기만기의 다양한 제원에 대해서 전함의 생존율을 분석하였으며, Choi et al. (2016)은 F-16 전투기의 미사일에 대한 회피기동 전술을 분석하였다. 이러한 시뮬레이션의 활용을 순방향 시뮬레이션이라고 정의할 때, 역방향 시뮬레이션은 반대로 목표로 하는 효과도를 달성하기 위해서 필요한 시스템의 제원 및 성능 또는 운용 전술을 도출하는 것을 의미한다(Hong et al., 2015). 즉, 역방향 시뮬레이션은 시뮬레이션 모델의 출력에 대한 주어진 요구조건을 만족하는 입력 집합을 도출하는 것으로, 수상함의 생존율을 90%이상 달성할 수 있는 기만기의 제원을 찾는 것이 그 예시가 될 수 있다. Figure 1은 순방향 시뮬레이션과 역방향 시뮬레이션을 나타낸다.

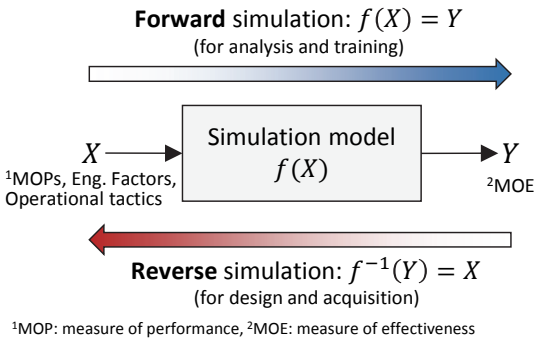


Fig. 1. Concept of the forward and reverse simulation

M&S를 바탕으로 국방체계를 분석하고 평가하는 것은 순방향 시뮬레이션이 효과적이지만, 국방체계를 설계하고 개발하는 것은 역방향 시뮬레이션을 요구한다. 높은 효과도를 가지는 국방체계를 설계하기 위해서는 역방향 시뮬레이션을 통하여 목표하는 효과도를 만족하는 장비들의 제원 및 성능, 그리고 운용 전술을 찾을 필요가 있다. 하지만 역모델을 도출할 수 없는 시뮬레이션 모델의 특성상 역방향 시뮬레이션은 많은 순방향 시뮬레이션 반복을 요구하기 때문에 효율성의 문제를 초래한다(Xiao et al., 2014; Xu et al., 2015; Choi and Kim, 2018a). 본 논문에서는 반복 횟수를 줄임으로 역방향 시뮬레이션을 효율적으로 수행하기 위한 다양한 역방향 시뮬레이션 알고리즘을 제시한다. 그리고 이 알고리즘을 손쉽게 적용하기 위한 역방향 시뮬레이션 도구를 소개한다. 실무자는

본 도구를 바탕으로 다양한 역방향 시뮬레이션 알고리즘을 활용하여 국방체계 설계를 위한 역방향 시뮬레이션을 손쉽게, 또 효율적으로 수행할 수 있다. 전함의 방어 시스템 설계 및 NCW 네트워크 시스템 설계에 대한 사례 연구를 통하여 이를 보여준다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 역방향 시뮬레이션의 개념과 다양한 알고리즘을 제시하며, 3장에서는 역방향 시뮬레이션 도구를 소개한다. 4장에서는 이 도구를 적용한 사례연구를 제시하며, 5장에서 결론을 맺는다.

2. 역방향 시뮬레이션

역방향 시뮬레이션은 시뮬레이션 모델의 가능한 입력 집합 중에서 원하는 출력의 요구조건을 만족하는 입력의 집합을 도출하는 것으로 정의된다. 이는 잘 알려진 시뮬레이션 기반 최적화(Simulation-based optimization)와 맥락을 같이 하지만, 시뮬레이션 기반 최적화는 출력을 최대화 또는 최소화하는 입력을 찾는다. 반면에 역방향 시뮬레이션은 이를 확장시켜서 입력들의 순위, 최적의 하위 집합, 제약조건 하에서 실현가능한(feasible) 집합 등 실제 설계 문제에서 주어지는 다양한 요구조건에 대한 해답을 찾는다(Kim, 2018a).

Reverse simulation problem definition

We have ...

A simulation model: $X_i \rightarrow f(X) \rightarrow \hat{Y}_i = Y_i + \mathcal{N}(0, \sigma^2)$
Stochastic noise

A set of input alternatives: $\{X_1, X_2, \dots, X_k\}$

Then, which input alternatives have Y_i greater than 20?
 → Reverse simulation problem: $S = \{X_i | Y_i \geq 20\}$

Since there is no inverse model of $f(X)$

Reverse simulation

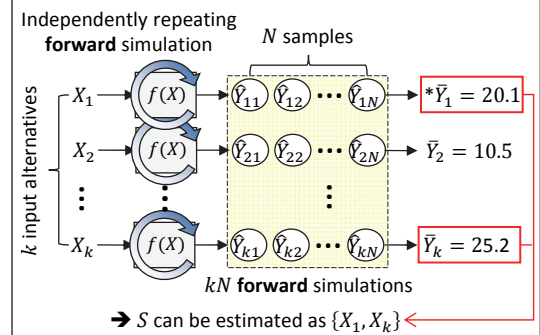


Fig. 2. Conducting reverse simulation

Table 1. Various R&S algorithms based on the four approaches

Output requirements	Indifference-zone (IZ)	Optimal computing budget allocation (OCBA)	Expected value information (EVI)	Uncertainty evaluation (UE)
Best input	Selecting the best input that maximizes(or minimizes) simulation output.			
	Kim and Nelson (2001)	Chen et al. (2000)	Chick and Inoue (2001)	Choi and Kim (2018c); Choi et al. (2019b)
Best and worst inputs	Selecting the best input that maximizes simulation output and the worst input that minimizes the output simultaneously			
	-	Zhang et al. (2017b)	-	Choi and Choi (2020)
Best subset (best- m inputs)	Selecting the best- m inputs of which the simulation output is within top- m .			
	Wang et al. (2011)	Chen et al. (2008); Zhang et al. (2016a); Xiao and Gao (2018)	Gao and Chen (2015)	Choi and Kim (2018a)
Best and worst subsets (best- m and worst- n inputs)	Selecting the best- m inputs of which the simulation output is within top- m and the worst- n inputs of which the output is within bottom- n .			
	-	Xiao et al. (2017)	-	-
Ranking within best subset	Selecting the best- m inputs of which the simulation output is within top- m , and identifying the ranking of the best- m inputs simultaneously			
	-	Xiao and Lee (2014)	-	Choi and Kim (2018d)
Complete ranking	Identifying the ranking of all inputs completely.			
	Beirlant et al. (1982)	Xiao et al. (2014); Xiao et al. (2019b)	-	Choi and Kim (2018d)
Subset ranking	Identifying the ranking of subsets that consist of several inputs.			
	-	Zhang et al. (2017a)	-	-
Pareto set in multi-objective	Selecting Pareto set in multi-objective domain			
	Butler et al. (2001); Teng et al. (2010)	Lee et al. (2010a) Li et al. (2018)	Lee et al. (2010b); Frazier and Kazachkov (2011)	Choi and Kim (2018b)
Best feasible input with constraints	Selecting the best feasible input that maximizes(or minimizes) simulation output under given stochastic constraints.			
	Andrad'ottir and Kim (2010)	Lee et al. (2012)	-	Choi et al. (2019a)
Best feasible subset (feasible best- m inputs) with constraints	Selecting the best- m inputs of which the simulation output is within top- m under given stochastic constraints.			
	-	Xiao et al. (2019a)	-	-
Feasibility determination	Selecting all feasible inputs that satisfy given stochastic constraints.			
	Batur and Kim (2005)	-	-	-

일반적으로 출력에 따른 입력을 찾기 위해서는 역모델을 구할 수 있어야 하지만, 시뮬레이션 모델의 경우 수학적 닫힌 형태로 묘사되지 않는 복잡한 시스템을 묘사하기 때문에 역모델을 도출할 수 없다. 따라서 역방향 시뮬레이션의 경우 Figure 2와 같이 입력들에 대한 순방향 시뮬레이션의 반복을 통해서 이루어진다. 예를 들어서, k 개의 입력들 중에서 c 이상의 출력을 가지는 입력 집합을 찾

는 역방향 시뮬레이션은 각 입력에 대한 순방향 시뮬레이션을 통해 출력을 구하고, 이를 바탕으로 해당하는 집합을 찾는 것이다. 각 입력에 대해 한 번의 순방향 시뮬레이션을 통해서 출력을 정확하게 구할 수 있다면 다행이지만, 많은 경우 시뮬레이션 모델은 실제계의 불확실성을 나타내는 랜덤 변수 또는 프로세스를 가지며 이로 인해 출력에 확률적 노이즈가 발생한다(Xu et al., 2016).

따라서 한 입력에 대한 시뮬레이션 출력은 독립적인 반복 순방향 시뮬레이션을 통해 얻어진 출력 샘플들의 평균으로 추정된다. 각 입력에 대해서 출력을 얻기 위해 N 개의 샘플을 추출한다고 한다면 역방향 시뮬레이션을 위해 필요한 총 순방향 시뮬레이션 횟수는 kN 이다. 만약 k 가 커지거나, 출력의 노이즈가 큰 경우 (즉, 출력의 정밀도를 맞추기 위해 N 이 커진다) 이 횟수는 굉장히 커질 수 있다. 특히 시뮬레이션 모델의 경우 최근 시스템의 복잡도가 증가함에 따라서 한 번의 순방향 시뮬레이션에 소요되는 시간이 증가하고 있으며, 이는 역방향 시뮬레이션에서 효율성 문제를 야기한다(Xiao et al., 2014; Xu et al., 2015; Choi and Kim, 2018a).

역방향 시뮬레이션을 효율적으로 수행하기 위하여 지금까지 다양한 알고리즘들이 제안된바 있으며, 이는 가능한 입력 집합의 크기에 따라서 크게 두 가지로 구분될 수 있다(Chen and Lee, 2011). 가능한 입력 집합의 크기가 굉장히 크거나 무한한 경우 유전 알고리즘(Genetic algorithm)(Holland, 1975), 입자 군집 최적화(Particle swarm optimization)(Eberhart and Kennedy, 1995), 담금질 기법(Simulated annealing)(Kirkpatrick et al., 1983) 등의 메타휴리스틱(Metaheuristic) 알고리즘이 활용될 수 있으며, 반면에 입력 집합의 크기가 작거나 한정적인 경우 순위 및 선택(R&S: ranking and selection) 방법이 효과적이다. 메타휴리스틱 알고리즘은 랜덤하게 선택된 시작 입력으로부터(또는 소규모 입력 집합) 충분히 괜찮은 (good enough) 해를 찾을 때 까지 반복적으로 입력을 개선해 나가는 방식이다. 예를 들어서 유전 알고리즘은 교차(Crossover)와 변이(Mutation)의 유전 법칙을 바탕으로 입력 집합을 개선하며, 입자 군집 최적화는 군집 지능(Swarm intelligence)을 바탕으로 입력에 대응하는 각각의 입자들이 더 좋은 해를 찾도록 속도와 방향을 조정한다.

R&S의 경우 한정적인 입력 집합에 대해서 Figure 2처럼 N 개의 샘플을 추출하는 것이 아닌, 각 입력에 대한 순방향 시뮬레이션 횟수를 시뮬레이션 결과에 따라 지능적으로 조정하여, 한정된 샘플링 횟수로 주어진 요구조건을 만족하는 입력 집합을 찾는 것을 목표로 한다(Branke et al., 2007). R&S는 크게 4가지의 접근 방식을 바탕으로 다양한 요구조건에 대응할 수 있는 많은 효율적인 알고리즘들이 Table 1과 같이 개발되었다. R&S 알고리즘들은 공통적으로 한정된 샘플링 횟수가 T 만큼 주어질 때 이를 작은 단위 Δ 로 쪼개어서 순차적으로 할당한다. 즉 Δ 을 입력 집합에 대해서 할당을 하고, 추가 샘플링 횟수를 할당받은 입력에 대해서 순방향 시뮬레이션을 통해

출력 샘플을 도출하여 표본 평균, 표본 분산과 같은 통계치를 갱신한다. 그리고 이 갱신된 정보를 바탕으로 다시 Δ 를 할당한다. 이를 순차적 할당 절차(Sequential allocation procedure)라고 정의하며, Algorithm 1은 이를 나타낸다. Algorithm 1의 파라미터 중에서 n_0 는 Δ 를 반복적으로 할당하기 이전에, Δ 할당을 위해서 입력 집합 내의 모든 입력에 대해 수집되는 최소한의 샘플 개수를 의미한다.

Algorithm 1: Sequential allocation procedure

- 1: **collect** n_0 output samples (i.e., \hat{Y}_i) for each input X_i , where the input index $i \in \{1, \dots, k\}$
 - 2: **set** the number of allocated samples at X_i , $N_i \leftarrow n_0$ for each i
 - 3: **calculate** the sample mean \bar{Y}_i and sample variance s_i^2 using the collected output samples for each i
 - 4: **while** $\sum_{i=1}^k N_i < T$ **do**
 - 5: **set** $\Delta \leftarrow \min(\Delta, T - \sum_{i=1}^k N_i)$
 - 6: **allocate** Δ depending on R&S algorithm (i.e., **calculate** additional number of samples to be allocated at X_i , a_i for each i , where $\sum_{i=1}^k a_i = \Delta$ and $a_i \geq 0$)
 - 7: **collect** a_i output samples for each i
 - 8: **set** $N_i \leftarrow N_i + a_i$ for each i
 - 9: **update** \bar{Y}_i and s_i^2 using the collected output samples for each i so far
 - 10: **return** solution selected from \bar{Y}_i by R&S algorithm
-

접근 방식에 따라 R&S 알고리즘들이 가지는 차이점은 주어진 출력 요구조건을 만족하는 해를 효율적으로 찾기 위해 추가 샘플링 횟수 Δ 를 할당하는 전략에 있다. 예를 들어서 무차별 영역(IZ: Indifference-zone) 접근법이 기반한 알고리즘들은 해가 될 확률이 높은 입력 주변 영역에 속한 입력들에 대해서 샘플링 횟수를 할당한다. 또한 불확실성 평가(UE: Uncertainty evaluation) 접근법에 기반한 알고리즘들은 가설 검정을 바탕으로 각 입력에 대해 수집된 시뮬레이션 결과가 해의 정확한 선택을 위한 통계적으로 유의미한(Significant) 증거가 되는지를 판단하는 지표인 불확실성을 정의하고, 각 입력의 불확실성에 따라서 샘플링 횟수를 할당한다. 각 접근 방식은 그들의 할당 전략에 따라서 장단점을 가지며, 이는 풀고자 하는 역방향 시뮬레이션 문제의 종류와 특징에 대해서 어떠한 알고리즘을 선택하는 것이 효율적인지를 선택하는 기준이 된다. 예를 들어서 시뮬레이션 모델의 확률적

노이즈가 크고 아주 정확하게 해를 찾아야 하는 경우 (예를 들어서 찾은 해의 정확도($P\{CS\}$: Probability of correct selection)가 90% 이상) UE 기반의 알고리즘이 효과적이다. 반면에 노이즈가 작으면서 정확도를 희생하더라도 빠르게 해를 찾아야 하는 경우 컴퓨팅 예산 최적 할당 (OCBA: Optimal computing budget allocation) 기반 알고리즘이 효과적이다. 또한 정확하지 않더라도 시스템의 안전성 등을 위해서 최악의 선택은 피해야 하는 경우 기댓값 정보(EVI: Expected value information) 기반 알고리즘이 효과적이다. 한편, R&S는 역방향 시뮬레이션 외에도 오토마타(Automata) 학습(Zhang et al., 2016b), 강화학습(Reinforcement learning)(Jia, 2012), 희귀 사건 시뮬레이션(Rare-event simulation)(Shortle et al., 2012) 등의 시뮬레이션이 활용되는 다양한 분야에 적용된다.

메타휴리스틱 알고리즘의 경우 굉장히 크거나 무한한 입력 집합에 대해서 괜찮은 해를 찾을 수 있다는 장점이 있으나, 다양한 출력 요구조건에 대한 해를 찾는 것에는 어려움이 있다. 특히 찾은 해가 최적이라는 수학적인 보장이 불가능하며, 알고리즘의 다양한 파라미터 설정에 따라서 수렴하지 못하는 경우도 많이 발생한다. 이러한 단점들은 실제 설계 문제에서 메타 휴리스틱 알고리즘의 활용에 제약을 가한다. 반면에 R&S 방법의 경우 입력 집합의 크기가 한정적이고 상대적으로 작을 때 적용할 수 있다는 단점이 있으나, 메타휴리스틱 알고리즘과 달리 다양한 요구조건에 대응할 수 있으며, 이를 만족하는 해를 정확하게 찾을 수 있다. 다시 말해서, 찾은 해가 정확한 것을 수학적으로 보장할 수 있으며(Chen and Lee, 2011), 이는 정확한 해를 찾을 수 없는 메타휴리스틱 알고리즘에 대해서 큰 장점이다. 또한 상대적으로 설정해야 할 알고리즘 파라미터의 개수가 적으며 설정에 민감하지 않다. 실제 설계 문제의 많은 경우 유의미한 단위 및 다양한 오차 요소를 고려하고, 물리적으로 가능하지 않은 입력 범위를 배제하면 한정적인 입력 집합을 만들 수 있다. 예를 들어서 자항식 기만기의 배터리 용량이 kW 단위로 개발된다고 할 때, 몇십 W를 증감하는 것은 무의미하므로 의미있는 값을 기준으로 연속적인 용량의 범위를 이산화할 수 있다. 또한 생산되는 배터리 용량을 고려할 때 이 이산화된 값의 개수가 상당부분 줄어들게 되고, 이는 R&S가 실제 설계 문제에서 효과적으로 활용될 수 있도록 한다. 이러한 과정을 적용하였음에도 입력 집합의 크기가 큰 경우 이를 분할하여서 R&S의 반복적인 적용을 통해서 해를 찾을 수도 있다. 이는 R&S가 찾은 해에 대한 수학적 보장을 해줄 수 있기 때문에 가능하다.

지금까지 Table 1과 같이 많은 R&S 알고리즘이 제안되었으나, 실무자들은 주어진 시뮬레이션 기반 모델 설계 문제에 대해서 어떤 알고리즘을 활용하는 것이 효과적일지, 알고리즘의 파라미터를 어떻게 결정해야 할지 판단하는 것이 쉽지 않았다. 또한 적절한 알고리즘을 결정하더라도, 이를 활용하기 위해서 구현 등의 번거로운 과정을 거쳐야 한다. 다음 장에서 R&S 알고리즘을 손쉽게 활용하기 위한 역방향 시뮬레이션 도구를 소개한다.

3. 역방향 시뮬레이션 도구

역방향 시뮬레이션 도구는 역방향 시뮬레이션 엔진 서버와 어댑터, 그리고 GUI(Graphical user interface) 클라이언트로 구성된다. Figure 3은 전체 구조를 나타낸다 (Kim, 2015). 각각의 요소는 네트워크를 통하여 연결되어 있으므로, 시뮬레이션 모델 또는 실무자가 물리적으로 떨어져 있는 경우에도 활용이 가능하며, 어댑터가 제공되는 경우 시뮬레이션 모델이 구현된 플랫폼에 관계없이 역방향 시뮬레이션을 적용할 수 있다.

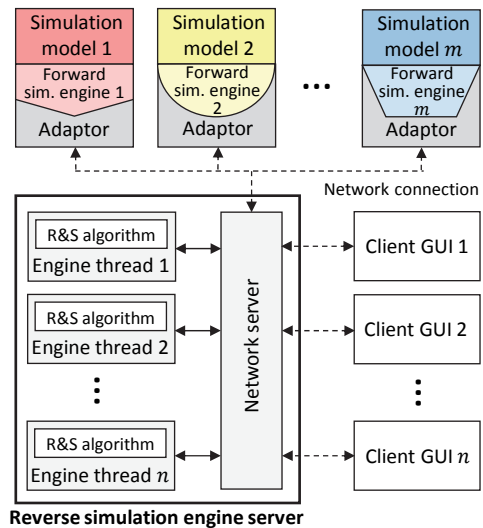


Fig. 3. Structure of the reverse simulation tool

가장 핵심이 되는 역방향 시뮬레이션 엔진 서버는 Table 1에 명시된 다양한 R&S 알고리즘을 탑재하고 있으며, 새로운 알고리즘을 쉽게 추가할 수 있다. 또한 실무자가 해결하고자 하는 설계 문제에 적합한 알고리즘들을 제시하며 알고리즘에 대한 설명과 함께 적절한 파라미터 설정 제안을 제공한다. 엔진 서버는 m 개의 연결된 시뮬

레이션 모델에 대해서 n 개의 클라이언트로부터 동시에 역방향 시뮬레이션을 진행할 수 있다. 각 클라이언트에 대해서 대응하는 엔진 스레드(Thread)가 생성되며, 이 스레드는 클라이언트가 선택한 알고리즘을 바탕으로 역방향 시뮬레이션을 독립적으로 진행한다. 각 스레드는 알고리즘 진행에 따라서 입력에 대한 출력 샘플들을 수집하기 위해 네트워크 서버에 연결된 시뮬레이션 모델에 순방향 시뮬레이션을 요청한다. 시뮬레이션 모델의 경우 클라이언트와 독립적이며 따라서 다수의 클라이언트로부터 동시에 시뮬레이션을 요청받을 수 있다. 이 요청들은 엔진 서버와 시뮬레이션 모델을 연결하는 어댑터에 의해서 관리된다. 네트워크 서버는 어댑터로부터 전달받은 입력에 대한 순방향 시뮬레이션 결과를 스레드에 전달하고, 이를 바탕으로 알고리즘에 따른 역방향 시뮬레이션을 수행한다. 시뮬레이션 요청과 결과를 전달하는 것 외에도 네트워크 서버는 클라이언트 및 시뮬레이션 모델의 연결을 관리한다.

```
#include "RSAdaptor.h"
#include "RSSimWrapper.h"
#include <iostream>

static CRSSimWrapper *g_wrapper = new CRSSimWrapper();

double Simulator(int _gui_id, std::map<int, CSimParamDesign> &_param_list)
{
    g_wrapper->SetParam(_param_list);
    return g_wrapper->simulate(_gui_id);
}

int main(int argc, char* argv[])
{
    if(argc < 2){
        std::cout<< "[EIE] [SERVER_IP] [SERVER_PORT]"<<std::endl;
        return 0;
    }

    CRSSAdaptor _adaptor(g_wrapper->GetSimInfo(), Simulator, argv[1], atoi(argv[2]));
    _adaptor.Start();

    delete g_wrapper;
}
```

Fig. 4. Example of implementing C++ callback function in the adaptor.

어댑터는 C/C++/C#/JAVA 등 다양한 플랫폼에 기반한 시뮬레이션 모델이 수정 없이 엔진 서버에 연결될 수 있도록 한다. 동적 연결 라이브러리(DLL: Dynamic link library)로 구현된 어댑터는 네트워크 서버와의 연결을 위한 네트워크 라이브러리와 순방향 시뮬레이션 요청을 관리하기 위한 큐(Queue), 그리고 순방향 시뮬레이션을 수행하기 위한 콜백(Callback) 함수로 이루어진다. 엔진 스레드로부터 받은 시뮬레이션 요청은 네트워크 서버를 거쳐 어댑터의 큐에 저장되고, 차례대로 콜백 함수를 통해 시뮬레이션 결과를 얻는다. 콜백 함수는 클라이언트 아이디와 시뮬레이션 결과를 도출할 입력 집합을 매개변수로 가지며, 내부에서 전달받은 입력에 대해 기존 시뮬레이션

모델을 실행(또는 호출) 하여 얻어진 결과를 반환한다. Figure 4는 C++ 플랫폼을 기반으로 개발된 시뮬레이션 모델에 대해서 구현된 콜백 함수를 나타낸다. 콜백 함수 호출을 통해 얻어진 결과는 다시 네트워크 서버로 전달되어 엔진 스레드의 역방향 시뮬레이션에 활용된다.

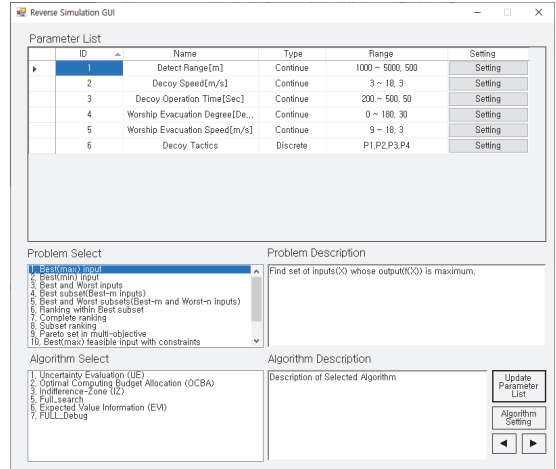
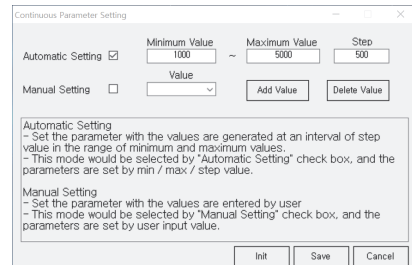
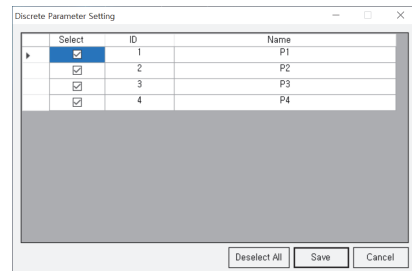


Fig. 5. Screenshot of reverse simulation GUI client: input parameters' configuration, output requirement selection, and R&S algorithm selection(Kim, 2015)



(a)



(b)

Fig. 6. Screenshots of reverse simulation GUI client: (a) continuous input parameter setting, and (b) discrete input parameter setting(Kim, 2015)

GUI 클라이언트는 실무자로 하여금 편리하고 또 직관적으로 역방향 시뮬레이션을 활용할 수 있도록 한다. 실무자는 엔진 서버에 접속한 뒤 서버로부터 연결되어 있는 시뮬레이션 모델 중에서 역방향 시뮬레이션 모델을 수행하기 위한 모델을 선택한다. 다음으로 Figure 5와 같이 역방향 시뮬레이션을 위한 가능한 입력 집합을 생성하고 역방향 시뮬레이션 알고리즘을 설정한다. Figure 6과 같이 시뮬레이션 모델의 입력을 구성하는 파라미터들의 종류에 따라서 범위 또는 값을 조정하면 엔진은 이를 바탕으로 가능한 입력 집합을 자동 생성한다. 또한 설계 문제에 필요한 출력 요구조건을 선택하면 엔진 서버는 이를 만족하는 해를 찾기 위한 효율적인 역방향 시뮬레이션 알고리즘들과 추천 파라미터 설정을 제시한다. 필요에 따라서 알고리즘의 파라미터를 수동으로도 조정할 수 있다. 이 모든 설정은 저장이 가능하며, 필요시 불러오기를 통하여 빠르게 이 과정을 마무리 할 수 있다.

실무자가 설정을 마무리하면 엔진 서버에서 이에 대응하는 엔진 스레드가 생성되어 역방향 시뮬레이션이 수행된다. 실무자는 Figure 7과 같이 GUI를 통해서 역방향 시뮬레이션의 전 과정을 모니터링하고 제어할 수 있다.

우측 그래프에서 가능한 입력들의 시뮬레이션 결과에 대한 표본 평균, 오차 범위, 표본 분산 등의 통계치를 확인할 수 있으며, 좌측 그래프에서는 역방향 시뮬레이션

알고리즘에 따라서 각 입력에 할당되는 샘플링 횟수 및 누적 할당 횟수를 확인할 수 있다. 아래쪽에는 그래프로 표시되지 않는 관련 정보 및 로그, 그리고 각 입력에 대한 세부적인 모델 파라미터 값의 구성을 확인할 수 있다. 실무자는 GUI를 통해서 Algorithm 1의 순차적 절차에 따라서 역방향 시뮬레이션 알고리즘의 반복을 제어할 수 있으며, 더 이상 반복을 진행하지 않고 종료하여 결과를 도출할 수도 있다. 역방향 시뮬레이션이 종료되면, 주어진 출력 요구조건을 만족하는 입력 집합들이 표시가 된다. 실무자는 역방향 시뮬레이션 결과를 파일로 저장하여 분석할 수 있으며, 동일한 설정으로 역방향 시뮬레이션을 다시 수행할 수도 있다.

본 역방향 시뮬레이션 도구는 역방향 시뮬레이션뿐만 아니라 개발한 시뮬레이션 모델을 검증하는데도 활용이 될 수 있다. R&S 알고리즘이 아닌, 모든 가능한 입력 집합에 대해서 동일한 샘플링 횟수를 할당하는 동등 할당 알고리즘을 사용하여서, 시뮬레이션이 입력에 대해서 적절한 출력을 도출하는지를 검증할 수 있다. 또한 순차적 절차를 제어할 수 있으므로, 새로운 R&S 알고리즘의 동작을 검증하고 개발하는데도 활용될 수 있다. 다음 장에서는 전함의 방어 시스템 설계와 NCW 네트워크 시스템 설계에 대한 사례 연구를 통하여, 실무자가 본 도구를 사용하여 국방체계 설계를 위한 역방향 시뮬레이션을 손쉽게

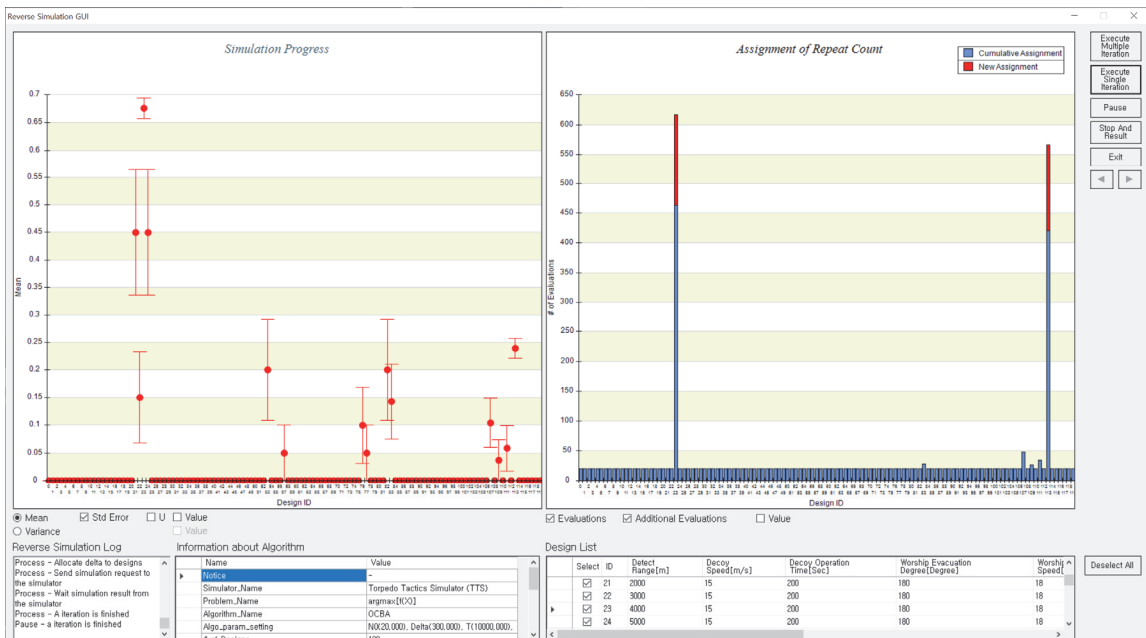


Fig. 7. Screenshot of reverse simulation GUI client: monitor and control the process of reverse simulation(Kim, 2015)

계, 또 효율적으로 수행할 수 있음을 보여준다.

4. 사례 연구

4.1 전함의 방어 시스템 설계

전함으로 날아오는 공대함 미사일(ASM, Air-to-surface missile)을 방어하기 위한 방어 시스템은 3단계로 구성되어 있다. 1단계는 함대공(SAM, Surface-to-air missile)을 발사하여 날아오는 ASM을 격추하는 것이며, 이것이 실패하면 2단계로 전자전(Electrical warfare)을 수행하게 된다. 이 전자전은 방해전파(ECM, Electric counter measure)를 발사하여 ASM의 레이더를 교란하는 것과, 알루미늄 혹은 아연 조각으로 구성된 채프(Chaff)를 뿌려서 ASM이 목표물을 착각하도록 하는 것으로 구성된다. 2단계가 실패할 경우 3단계에서 근접방어무기체계(CIWS, Close-in weapon system)를 통해서 ASM 격추를 시도하게 된다. 현대 전장에서 전함은 지휘 통제(C2, Command and control) 체계의 중심으로 해군 전력의 핵심이기 때문에, 단 1%라도 그 생존율을 높이는 것은 중요하다. 본 사례 연구에서는 시뮬레이션 모델을 바탕으로 전함의 생존율을 최대화하는 방어 시스템을 설계하고자 한다.

Table 2는 방어 시스템 설계시 고려해야 하는 시스템의 파라미터들과 그 범위를 나타낸다. 이 파라미터의 조합으로 도출된 방어 시스템의 한 설계에 대해서 3단계 방어체계 시뮬레이션 모델(Lee et al. 2006)를 통해서 전함의 생존율을 도출할 수 있다. 이 시뮬레이션 모델은 동시에 다가오는 4개의 ASM에 대해서 설계된 방어 시스템을 적용하였을 때 전함의 생존 여부를 출력한다. 하지만 이 모델은 실제 시스템의 불확실성을 반영하기 위해 다양한 랜덤 변수를 포함하고 있기 때문에, 매번 순방향 시뮬레이션마다 다른 결과를 도출한다. 따라서 전함의 방어 시스템 설계에 대한 전함의 생존율은 이 모델에 대한 독립적인 반복 순방향 시뮬레이션을 통해서 얻은 출력 샘플들의 평균으로 추정될 수 있으며, 반복 횟수가 증가할수록 정밀한 값을 얻을 수 있다.

전함의 생존율을 최대화하는 방어 시스템을 설계하기 위해서 Table 2를 바탕으로 설계 오차 요소를 고려하여 가능한 입력 243개를 생성하였고, 시뮬레이션 모델을 바탕으로 이 입력 집합 중에서 최대의 생존율을 가지는 입력을 찾아야 한다. 이는 Table 1의 Output requirements 중에서 Best input에 해당한다. 본 시뮬레이션 모델의 출력은 베르누이 분포를 따르기 때문에 높은 확률적 노이즈를 가지며, 또한 군체계의 특성상 정확한 해를 찾을 필

요가 있으므로, UE 접근법에 기반한 Choi and Kim (2018c) 알고리즘이 효과적이다.

Table 2. Design parameters of warship's defense system (i.e., input parameters of the 3-stage defense system simulation model(Lee et al. 2006))

Parameter	Range	Description
P_{SAMV}	[20,40] (Nm/min)	Velocity of SAM
P_{SAMRT}	[20,30] (sec)	Response time of SAM
P_{SAMPk}	[0.3,0.7]	SAM's probability of kill
P_{ECM}	[0,0.5]	Success probability of ECM
P_{CHAFF}	[0,0.6]	Success probability of chaff

제시한 역방향 시뮬레이션 도구를 바탕으로 역방향 시뮬레이션을 수행하였으며, R&S 알고리즘의 파라미터 n_0 와 Δ 는 각각 20과 200으로 설정하였다. 역방향 시뮬레이션의 결과로 전함의 생존율을 최대화하는 방어 시스템의 설계는 [$P_{SAMV}=40$, $P_{SAMRT}=20$, $P_{SAMPk}=0.7$, $P_{ECM}=0.5$, $P_{CHAFF}=0.6$]이며, 이 선택에 대한 $P\{CS\}$ 는 최소 99%이상이다(즉, 각 입력에 대해서 무한번의 순방향 시뮬레이션 반복을 통해서 측정된 생존율의 기댓값을 바탕으로 찾은 최고의 설계가 역방향 시뮬레이션을 통해 찾은 설계와 동일할 확률이 99%이상). Table 3은 역방향 시뮬레이션 도구를 사용하였을 때와 사용하지 않았을 때 필요한 순방향 시뮬레이션 횟수를 나타내며, 도구를 사용하는 경우에 약 97%이상의 반복 횟수를 절약할 수 있었다. 3단계 방어체계 시뮬레이션 모델의 한번 순방향 시뮬레이션에 약 1초가 소요되므로, 반복 횟수를 시간으로 환산하면 약 342시간을 절약할 수 있으며, 이는 역방향 시뮬레이션 도구의 국방체계 설계에 대한 활용 필요성을 입증한다.

Table 3. Comparison of reverse simulation time spent for warship's defense system design with and without using the reverse simulation tool

	Est. $P\{CS\}$	# of forward simulations	Time spent (hour)
Not applied	0.99	1,263,600	350.2
Applied	0.99	29,860	8.1

4.2 NCW 네트워크 시스템 설계

안정적인 네트워크 시스템은 NCW에 기반하는 현대

전장에서 승리를 위해 필수적인 전자전 장비 중 하나이다. 네트워크 시스템의 성능을 측정하는 두 가지 요소는 종단간의 지연시간(End-to-end delay)과 패킷 전달 비율(Packet delivery ratio)이다. 지연시간은 시작 노드로부터 도착 노드까지 패킷이 전달되는데 걸리는 평균적인 시간을 뜻하며, 전달 비율은 전송된 패킷이 성공적으로 전달되는 비율을 의미한다. 안정적인 네트워크 시스템에 대한 작전운용성능(ROC: Required operational capability)으로 85%이상의 패킷 전달 비율을 유지하면서 지연시간을 최소화 하는 것으로 주어졌을 때, 본 사례 연구에서는 시뮬레이션 모델을 바탕으로 ROC를 충족하는 네트워크 시스템을 설계하고자 한다.

Table 4는 네트워크 시스템 설계시 고려해야 하는 시스템의 파라미터들과 그 범위를 나타낸다. 이 파라미터의 조합으로 도출된 네트워크 시스템의 한 설계에 대해서 Figure 8의 시뮬레이션 모델을 통해서 지연 시간과 전달 비율을 도출할 수 있다(Kang et al., 2019). 이 시뮬레이션 모델은 위게임 모델과 ns-3 네트워크 시뮬레이션 모델을 시뮬레이션 연동 표준인 HLA/RTI(IEEE, 2010)를 기반으로 연동하므로 전장에서 설계된 네트워크 시스템에 대한 성능을 측정한다. 이 모델은 다양한 랜덤 요소를 포함하고 있기 때문에 지연 시간과 전달 비율은 이 모델에 대한 독립적인 반복 순방향 시뮬레이션을 통해서 얻은 출력 샘플들의 평균으로 추정될 수 있으며, 반복 횟수가 증가할수록 정밀한 값을 얻을 수 있다.

Table 4. Design parameters of NCW network system (i.e., input parameters of the simulation model in Figure 12) (Choi and Kim, 2019a)

Parameter	Type	Range (or values)	Description
P_{PS}	Cont.	[100,6400] (byte)	The size of packet
P_{TP}	Cont.	[-10,40] (dBm)	The transmission power of node
P_{TG}	Cont.	[0,20] (dB)	The transmission gain of node
P_{RG}	Cont.	[0,20] (dB)	The reception gain of node
P_{PM}	Dis.	1,2,5,5,11 (Mbps)	The 802.11 phy layer mode of DsssRate

주어진 ROC를 충족하는 네트워크 시스템을 설계하기 위해서 Table 4를 바탕으로 가능한 입력 65개를 생성하

였으며, Figure 8의 시뮬레이션 모델을 바탕으로 입력집합 중에서 85%의 패킷 전달 비율의 제약조건을 만족하면서 지연 시간을 최소화하는 입력을 찾아야 한다. 이는 Table 1의 Output requirements중에서 Best feasible input with constraints에 해당한다. Figure 8에서도 볼 수 있듯이 본 모델은 그 복잡한 구조로 인하여서 높은 확률적 노이즈를 가지며, 앞선 사례와 마찬가지로 군 체계의 특성상 정확한 해를 찾는 필요가 있다. 따라서 UE 접근법에 기반한 Choi et al. (2019a) 알고리즘을 선택하여 역방향 시뮬레이션을 수행한다.

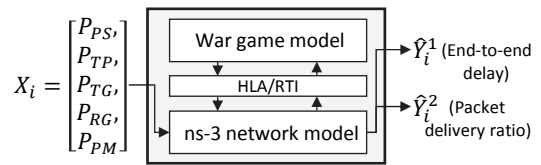


Fig. 8. Simulation model for analyzing effectiveness of NCW network system(Kang et al., 2019)

Table 5. Comparison of reverse simulation time spent for NCW network system design with and without using the reverse simulation tool

	Est. $P\{CS\}$	# of forward simulations	Time spent (hour)
Not applied	0.99	24,405	405.7
Applied	0.99	1,780	29.9

제시한 역방향 시뮬레이션 도구를 바탕으로 역방향 시뮬레이션을 수행하였으며, R&S 알고리즘의 파라미터 n_0 와 Δ 는 각각 10과 30으로 설정하였다. 역방향 시뮬레이션의 결과로 ROC를 만족하도록 도출된 네트워크 시스템의 설계는 [100,40,20,20,11]이며, 이 선택에 대한 $P\{CS\}$ 는 최소 99%이상이다. Table 5은 역방향 시뮬레이션 도구를 사용하였을 때와 사용하지 않았을 때 필요한 순방향 시뮬레이션 횟수를 나타내며, 도구를 사용하는 경우에 약 92%이상의 반복 횟수를 절약할 수 있었다. 본 시뮬레이션 모델의 경우 HLA/RTI기반의 연동으로 인하여서 한번 순방향 시뮬레이션에 약 60초가 소요되므로, 반복 횟수를 시간으로 환산하면 약 370시간을 절약할 수 있다. 앞선 사례와 마찬가지로, 본 사례 연구도 역방향 시뮬레이션 도구가 국방체계 설계에 효과적으로 활용될 수 있음을 보여준다.

5. 결론

시뮬레이션 모델을 바탕으로 높은 효과도의 국방체계를 설계하기 위해서는 역방향 시뮬레이션이 필요하다. 하지만 역방향 시뮬레이션은 가능한 입력 집합에 포함된 각 입력들에 대해서 효과도를 정밀하게 도출하기 위해 많은 반복 순방향 시뮬레이션을 요구하며, 이는 효율성 문제를 초래한다. 본 논문에서는 역방향 시뮬레이션을 효율적으로 수행할 수 있도록 하는 메타휴리스틱 알고리즘과 R&S 알고리즘을 제시하였다. R&S 알고리즘은 한정된 개수의 입력에 대해서 출력 요구조건을 만족하는 입력 집합을 효율적으로 찾기 위해 반복횟수를 지능적으로 할당한다. 메타휴리스틱 알고리즘에 비해 R&S 알고리즘은 다양한 출력 요구조건에 대응할 수 있으며, 요구조건을 충족하는 입력 집합을 정확하게 도출할 수 있으므로 실제 문제를 해결하는데 보다 적합하다.

또한 실무자로 하여금 이 R&S 알고리즘을 활용하여 역방향 시뮬레이션을 효율적으로, 그리고 손쉽게 수행할 수 있도록 하는 역방향 시뮬레이션 도구를 소개하였다. 역방향 시뮬레이션 도구는 역방향 시뮬레이션 엔진 서버와 어댑터, 그리고 GUI 클라이언트로 구성된다. 역방향 시뮬레이션 엔진 서버는 다양한 R&S 알고리즘을 탑재하고 있으며, 이를 바탕으로 n 개의 사용자로부터 m 개의 시뮬레이션 모델에 대해 동시에 역방향 시뮬레이션을 수행할 수 있도록 한다. 어댑터는 간단한 콜백 함수 구현만으로 다양한 플랫폼에서 구현된 기존의 시뮬레이터를 엔진 서버에 연결할 수 있도록 한다. GUI 클라이언트는 사용자로 하여금 역방향 시뮬레이션을 손쉽게 관리하고 제어할 수 있도록 한다. 각각의 요소는 네트워크를 통하여 연결되어 있으므로, 시뮬레이션 모델 또는 사용자가 물리적으로 떨어져 있는 경우에도 역방향 시뮬레이션을 수행할 수 있도록 한다. 전함의 방어 시스템 설계와 NCW 네트워크 시스템 설계에 대한 사례 연구는, 실무자가 역방향 시뮬레이션 도구를 바탕으로 다양한 R&S 알고리즘을 활용하여 국방체계 설계를 위한 역방향 시뮬레이션을 손쉽게, 또 효율적으로 수행할 수 있음을 보여준다.

추후 연구로는 독립적인 순방향 반복 시뮬레이션을 빠르게 수행하기 위하여 역방향 시뮬레이션 도구를 개선하여 분산 병렬 처리를 추가하고, 입력 집합을 줄일 수 없는 경우를 대비하여 R&S 알고리즘뿐만 아니라 다양한 메타휴리스틱 알고리즘도 활용할 수 있도록 한다. 또한, R&S 알고리즘과 메타휴리스틱 알고리즘을 결합하여 서로의 한계점을 보완할 수 있는 새로운 역방향 시뮬레이

션 알고리즘을 제안하고자 한다.

References

- Andrad'ottir, S. and S.-H. Kim (2010) "Fully sequential procedures for comparing constrained systems via simulation", *Naval Research Logistics*, 57(5), 403-421.
- Batur, D. and S.-H. Kim (2005) "Procedures for feasibility detection in the presence of multiple constraints", *Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference*, Orlando, FL, USA.
- Beirlant, J., E. J. Dudewicz, and E. C. van der Meulen (1982) "Complete statistical ranking of populations with tables and applications", *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 8(3), 187-201.
- Branke, J., S. E. Chick, and C. Schmidt (2007) "Selecting a selection procedure", *Management Science*, 53(12), 1916-1932.
- Butler, J., D. J. Morrice, and P. W. Mullarkey (2001) "A multiple attribute utility theory approach to ranking and selection", *Management Science*, 47(6), 800-816.
- Chen, C.-H. and L. H. Lee (2011) *Stochastic Simulation Optimization: An Optimal Computing Budget Allocation*, World Scientific, Singapore.
- Chen, C.-H., J. Lin, E. Yücesan, and S. E. Chick (2000) "Simulation budget allocation for further enhancing the efficiency of ordinal optimization", *Discrete Event Dynamical Systems: Theory and Applications*, 10(3), 251-270.
- Chen, C.-H., D. He, M. Fu, and L. H. Lee (2008) "Efficient simulation budget allocation for selecting an optimal subset", *INFORMS Journal on Computing*, 20(4), 579-595.
- Chick, S. E. and K. Inoue (2001) "New two-stage and sequential procedures for selecting the best simulated system", *Operations Research*, 49(5), 732-743.
- Choi, S. H. and C.-B. Choi (2020) "A simulation budget allocation procedure for finding both extreme designs simultaneously in discrete-event simulation", *IEEE Access*, 8, 93978-93986.

- Choi, S. H. and T. G. Kim (2018a) "Optimal subset selection of stochastic model using statistical hypothesis test", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 48(4), 557-564.
- Choi, S. H. and T. G. Kim (2018b) "Pareto set selection for multiobjective stochastic simulation model", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, doi: 10.1109/TSMC.2018.2846680.
- Choi, S. H. and T. G. Kim (2018c) "Efficient ranking and selection for stochastic simulation model based on hypothesis test", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 48(9), 1555-1565.
- Choi, S. H. and T. G. Kim (2018d) "A heuristic approach for selecting best-subset including ranking within the subset", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, doi: 10.1109/TSMC.2018.2870408.
- Choi, S. H., K.-M. Seo, and T. G. Kim (2017) "Accelerated simulation of discrete event dynamic systems via a multi-fidelity modeling framework", *Applied Sciences*, 7(10):1056.
- Choi, S. H., B. G. Kang, and T. G. Kim (2019a) "A heuristic procedure for selecting the feasible best design in the presence of stochastic constraints", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, doi: 10.1109/TSMC.2019.2894523.
- Choi, S. H., C.-B. Choi, and T. G. Kim (2019b) "An improved budget allocation procedure for selecting the best-simulated design in the presence of large stochastic noise", *IEEE Access*, 7, 154435-154446.
- Eberhart, R. and J. Kennedy (1995) "A new optimizer using particle swarm theory", *Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science (MHS '95)*, Nagoya, Japan, 39-43.
- Frazier, P. I. and A. M. Kazachkov (2011) "Guessing preferences: a new approach to multi-attribute ranking and selection", *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference*, Phoenix, AZ, USA, 4319-4331.
- Gao S. and W. Chen (2015) "Efficient subset selection for the expected opportunity cost", *Automatica*, 59, 19-26.
- Holland, J. H. (1975) *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, USA.
- Hong, J. H. and T. G. Kim (2010) "Interoperation between engineering- and engagement-level models for system effectiveness analysis", *Journal of the Korea Society for Simulation*, 19(4), 319-326.
(홍정희, 김탁곤 (2010) "체계 효과도 분석을 위한 공학/교전 모델 연동 시뮬레이션 기술 연구", 한국시뮬레이션학회논문지, 19(4), 319-326.)
- Hong, J. H., K.-M. Seo, and T. G. Kim (2015) "Reverse simulation software architecture for required performance analysis of defense system", *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, 40(4), 750-759.
(홍정희, 서경민, 김탁곤 (2015) "국방 시스템의 요구 성능 분석을 위한 역 방향 시뮬레이션 소프트웨어 아키텍처", 한국통신학회논문지, 40(4), 750-759.)
- IEEE Computer Society (2010) *IEEE standard for modeling and simulation (M&S) High level architecture (HLA) - framework and rules*, IEEE Standard 1516-2010.
- Jia, Q. S. (2012) "Efficient computing budget allocation for simulation-based policy improvement", *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 9(2), 342-352.
- Kang, B. G. and T. G. Kim (2018) "Method for analysis of C3 systems of systems using transformation of federation based on an extended DEVS formalism", *Journal of the Korea Society for Simulation*, 27(3), 13-21.
(강봉구, 김탁곤 (2018) "확장된 DEVS 형식론 기반 페더레이션의 변환을 통한 C3 복합 체계의 분석 방법", 한국시뮬레이션학회논문지, 27(3), 13-21.)
- Kang, B. G., K.-M. Seo, and T. G. Kim (2019) "Machine learning-based discrete event dynamic surrogate model of communication systems for simulating the command, control, and communication system of systems", *Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International*, 95(8), 673-691.
- Kim, T. G. (2007) "Modeling and simulation engineering", *Communication of the Korea Information Science*

- Society, 25(11), 5-15.
(김탁곤 (2007) “모델링 시뮬레이션 공학”, 정보과학 회지, 25(11), 5-15.)
- Kim, T. G. (2015) “Development of reverse simulation engine for extraction of engineering specification and tactics of weapon systems from given effectiveness”, KAIST.
(김탁곤 (2015) “주어진 효과도를 만족시키는 무기 체계 성능 지수 및 운용 전술을 도출하는 역 방향 시뮬레이션 엔진 개발”, KAIST.)
- Kim, T. G. (2018a) Defense Modeling and Simulation, Hanteemedia, Seoul, South Korea.
(김탁곤 (2018a) 국방 모델링 시뮬레이션, 한티미디어, 서울, 대한민국.)
- Kim, T.-Y. (2018b) “Simulation reconfiguration using entity plug-in approach for weapon system effectiveness analysis”, Journal of the Korea Society for Simulation, 27(2), 49-59.
(김태영 (2018b) “무기체계 효과도 분석을 위한 개체 플러그인 방식의 모의 재구성 연구”, 한국시뮬레이션 학회논문지, 27(2), 49-59.)
- Kim, S.-H. and B. L. Nelson (2001) “A fully sequential procedure for indifference-zone selection in simulation”, *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, 11(3), 251-273.
- Kirkpatrick, S., C. D. Gelatt, and M. P. Vecchi (1983) “Optimization by simulated annealing”, *Science*, 220(4598), 671-680.
- Lee, L. H., E. P. Chew, S. Teng, and D. Goldsman (2010a) “Finding the nondominated Pareto set for multi-objective simulation models”, *IIE Transactions*, 42(9), 656-674.
- Lee L. H., E. P. Chew, and S. Teng (2010b) “Computing budget allocation rules for multi-objective simulation models based on different measures of selection quality”, *Automatica*, 46(12), 1935-1950.
- Lee, L. H., N. A. Pujowidianto, L.-W. Li, C.-H. Chen, and C. M. Yap (2012) “Approximate simulation budget allocation for selecting the best design in the presence of stochastic constraints”, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 57(11), 2940-2945.
- Lee, W.-B., J.-H. Kim, and T. G. Kim (2006) “War game simulation using parametric behavior modeling method”, *Journal of the Korea Contents Association*, 6(11), 126-134.
(이완복, 김재현, 김탁곤 (2006) “파라미터 행위 모델링 기법을 이용한 전쟁게임 시뮬레이션”, 한국콘텐츠 학회논문지, 6(11), 126-134.)
- Li, J., W. Liu, G. Pedrielli, L. H. Lee, and E. P. Chew (2018) “Optimal computing budget allocation to select the nondominated systems A large deviations perspective”, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 63(9), 2913-2927.
- Seo, K.-M., H. S. Song, S. J. Kwon, and T. G. Kim (2011) “Measurement of effectiveness for an anti-torpedo combat system using a discrete event systems specification-based underwater warfare simulator”, *The Journal of Defense Modeling and Simulation*, 8(3), 157-171.
- Shortle, J. F., C. H. Chen, B. Crain, A. Brodsky, and D. Brod (2012) “Optimal splitting for rare-event simulation”, *IIE Transactions*, 44(5), 352-367.
- Teng, S., L. H. Lee, and E. P. Chew (2010) “Integration of indifference-zone with multi-objective computing budget allocation”, *European Journal of Operational Research*, 203(2), 419-429.
- Wang, Y., L. Luangkesorn, and L. J. Shuman (2011) “Best-subset selection procedure”, *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference*, Phoenix, AZ, USA, 4310-4318.
- Xiao, H. and S. Gao (2018) “Simulation budget allocation for selecting the top-m designs with input uncertainty”, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 63(9), 3127-3134.
- Xiao, H. and L. H. Lee (2014) “Simulation optimization using genetic algorithms with optimal computing budget allocation”, *Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International*, 90(10), 1146-1157.
- Xiao, H., L. H. Lee, and K. M. Ng (2014) “Optimal computing budget allocation for complete ranking”, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 11(2), 516-524.
- Xiao, H., S. Gao, and L. H. Lee (2017) “Simulation budget allocation for simultaneously selecting the

- best and worst subsets”, *Automatica*, 84, 117-127.
- Xiao, H., H. Chen, and L. H. Lee (2019) “An efficient simulation procedure for ranking the top simulated designs in the presence of stochastic constraints”, *Automatica*, 103, 106-115.
- Xiao, H., F. Gao, and L. H. Lee (2019b) “Optimal computing budget allocation for complete ranking with input uncertainty”, *IIE Transactions*, 52(5), 489-499.
- Xu, J., E. Huang, C.-H. Chen, and L. H. Lee (2015) “Simulation optimization: A review and exploration in the new era of cloud computing and big data”, *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 32(3):1550019.
- Xu, J., E. Huang, L. Hsieh, L.-H. Lee, and C.-H. Chen (2016) “Simulation optimization in the era of industrial 4.0 and industrial Internet”, *Journal of Simulation*, 10(4), 310-320.
- Zhang, S., L. H. Lee, E. P. Chew, J. Xu, and C.-H. Chen (2016a) “A simulation budget allocation procedure for enhancing the efficiency of optimal subset selection”, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 61(1), 62-75.
- Zhang, J., C. Wang, D. Zang, and M. Zhou (2016b) “Incorporation of optimal computing budget allocation for ordinal optimization into learning automata”, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 13(2), 1008-1017.
- Zhang, J., Z. Li, C. Wang, D. Zang, and M. Zhou (2017a) “Approximate simulation budget allocation for subset ranking”, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 25(1), 358-365.
- Zhang, J., L. Zhang, C. Wang, and M. Zhou (2017b) “Approximately optimal computing budget allocation for selection of the best and worst designs”, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 62(7), 3249-3261.



최 선 한 (ORCID : <https://orcid.org/0000-0003-3332-7723> / shchoi@pknu.ac.kr)

2012 KAIST 전기및전자공학과 학사
 2014 KAIST 전기및전자공학과 석사
 2018 KAIST 전기및전자공학부 박사
 2019 한국생산기술연구원 선임연구원
 2019~ 현재 부경대학교 IT융합응용공학과 조교수

관심분야 : 모델링 시뮬레이션, 시뮬레이션 기반 최적화, 기계학습



김 탁 곤 (ORCID : <https://orcid.org/0000-0001-7943-6509> / tkim0303@kaist.ac.kr)

1988 Univ. of Arizona 컴퓨터공학 박사(M&S 전공)
 1980~ 1983 부경대학교 통신공학과 전임강사
 1986~ 1989 (미)아리조나 환경연구소 연구엔지니어
 1989~ 1991 Univ. of Kansas 전기및컴퓨터공학과 조교수
 1991~ 현재 KAIST 전기및전자공학부 (조교수, 부교수, 교수, 명예교수)
 - 한국시뮬레이션학회 초대 편집위원장 및 학회장 역임
 - 국제 시뮬레이션학회(SCS) Fellow
 - 아시아 시뮬레이션 연합회(ASF) Fellow
 - (미)모델링 시뮬레이션 기술사

관심분야 : M&S 및 시뮬레이션 연동 이론/방법론/도구 개발, 기계학습 Embedded M&S



진 기 병 (ORCID : <https://orcid.org/0000-0003-0398-8731> / kibyung.jin@lignex1.com)

2012 경희사이버대학교 정보통신공학 학사
1997 LG정밀 입사
2012~ 현재 LIG넥스원 전자전연구소 수석연구원

관심분야 : 전자전, 모델링, 시뮬레이션



박 경 태 (ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-8660-1282> / parkkyungtae369a@lignex1.com)

1999 고려대학교 산업공학과 학사
2002 LG이노텍 입사
2016 아주대학교 IT융합학 석사
2016~ 현재 LIG넥스원 전자전연구소 수석연구원

관심분야 : 전자전, 모델링, 시뮬레이션, 신호처리



신 동 조 (ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-2023-9938> / jdcshin@hanmail.net)

1993 충남대학교 컴퓨터과학과 학사
1995 충남대학교 컴퓨터과학과 석사
1997~ 현재 국방과학연구소 책임연구원

관심분야 : 전자전, 국방 모델링&시뮬레이션, 소프트웨어, 체계공학