

국방 시스템의 요구 성능 분석을 위한 역 방향 시뮬레이션 소프트웨어 아키텍처

홍정희*, 서경민°, 김탁곤*

Reverse Simulation Software Architecture for Required Performance Analysis of Defense System

Jeong Hee Hong*, Kyung-Min Seo°, Tag Gon Kim*

요 약

국방 시스템 분석에서 순 방향 시뮬레이션은 주로 전장 환경에 주어진 국방 시스템의 공학 제원이나 운용 전술을 바탕으로 이에 대응하는 체계 효과도를 분석하는 과정에 활용된다. 이러한 순 방향 시뮬레이션 과정은 다양한 교전 시나리오에 대한 전투 결과를 분석하기에는 용이하나, 목표 효과도를 달성하기 위한 국방 시스템의 요구 성능을 역으로 도출할 때는 비효율적이다. 본 논문은 국방 시스템의 요구 성능 분석을 위해 역 방향 시뮬레이션 소프트웨어 아키텍처를 제안한다. 제안하는 아키텍처는 기능적으로 구분된 하위 모듈들을 바탕으로 시스템 모델을 그대로 활용하되 역 모델 설계 유무에 따라 적합한 역 방향 시뮬레이션 방안을 선택할 수 있게 하였다. 사례 연구로 수상함의 대공대잠전 시나리오에 제안한 소프트웨어 아키텍처를 적용하였는데, 국방 시스템의 요구 성능 분석을 하는데 있어 순 방향 시뮬레이션과 비교하여 동일한 수준의 요구 성능 분석을 보다 신속히 수행할 수 있음을 보였다. 마지막으로 본 논문의 연구 결과는 국방 시스템의 운용 전술 개발 뿐 아니라 다양한 시스템의 문제 해결에 적절한 해결 방안을 제시할 것으로 기대한다.

Key Words : Modeling and Simulation, Reverse Simulation, Defense Analysis, Measure of Performance

ABSTRACT

This paper focuses on reverse simulation methods to find and analyze the required performance of a defense system under a given combat effectiveness. Our approach is motivated that forward simulation, that traditionally employs the effectiveness analysis of performance alternatives, is not suitable for resolving the above issue because it causes a high computational cost due to repeating simulations of all possible alternatives. To this end, the paper proposes a reverse simulation software architecture, which consists of several functional sub-modules that facilitate two types of reverse simulations according to possibility of inverse model design. The proposed architecture also enable to apply various search algorithms to find required operational capability efficiently. With this architecture, we performed two case studies about underwater and anti-air warfare scenarios. The case studies show that the proposed reverse simulation incurs a smaller computational cost, while finding the same level of performance alternatives compared with traditional forward simulation. Finally we expect that this study provides a guide those who desire to make decisions about new defense systems development.

* 본 연구는 “KAIST-Valley RED&D 사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

• First Author : Pusan National University, jeonghee.hong@pusan.ac.kr, 정희원

° Corresponding Author : Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering, kmseo.kumsung@gmail.com, 정희원

* Korea Advanced Institute of Science and Technology, tkim@ee.kaist.ac.kr

논문번호 : KICS2014-09-340, Received September 1, 2014; Revised November 7, 2014; Accepted April 1, 2015

I. 서 론

전장 환경에서 국방 시스템의 전투 효과도(Combat effectiveness) 분석은 무기/전투 체계(Weapon/Combat system)의 전투 논리 측면인 전술 분석 뿐 아니라 해당 체계의 전장 기능 측면인 요구 성능(ROC: Required operational capability) 분석을 필요로 한다^{1,2}. 이러한 국방 시스템의 전투 효과도 분석은 모델링 시뮬레이션 (M&S: Modeling and simulation) 기술을 통해 달성 가능한데, 예를 들어 군사 훈련이나 무기 체계의 성능 분석 및 획득과 같은 다양한 국방 분야에서 M&S가 활용되어 왔다³.

최근까지 수행된 국방 M&S 연구의 접근 방안은 국방 시스템의 요구 성능이나 운용 전술을 바탕으로 전투 효과도를 도출하는 이른바 순 방향 시뮬레이션 (Forward simulation)이 대부분 이었다^{4,5}. 순 방향 시뮬레이션이란 기 정의된 시나리오를 시스템 모델의 입력으로 하여 시뮬레이션을 통해 모델의 결과를 분석하는 과정이다. 이러한 순 방향 시뮬레이션은 다양한 입력 시나리오를 식별하여 이에 대한 시뮬레이션 결과를 분석하는 “what-if” 분석에 유용하다.

그러나 목표한 전투 효과도를 달성하는데 필요한 국방 시스템의 요구 성능을 역으로 도출해야 하는 경우 시나리오를 바탕으로 모델의 결과를 분석하는 순 방향 시뮬레이션은 비효율적이다. 왜냐하면 순 방향 시뮬레이션에서 전투 효과도의 목표 달성 여부를 판단하기 위해서는 요구 성능과 운용 교리/전술을 포함한 모든 입력 시나리오를 시뮬레이션 수행 전에 식별해야 하는데 이는 실제로 불가능한 경우가 많고 가능할 지라도 이들을 시뮬레이션 하는 과정에서 시간과 비용의 문제가 발생하기 때문이다.

이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문은 역 방향 시뮬레이션(Reverse simulation) 방안을 제안한다. 역 방향 시뮬레이션은 시스템 모델에 대하여 역 모델을 설계하여 기존 시스템 모델의 출력을 역 모델의 입력으로 대치하여 시뮬레이션을 수행하는 개념이다. 따라서 역 모델의 설계가 가능하다면 역 방향 시뮬레이션은 쉽게 달성 가능하지만 이것이 어려운 경우에는 시스템 모델에 대한 시뮬레이션 자체를 역으로 수행해야 하므로 현실적으로 불가능하다. 이러한 이유로 역 방향 시뮬레이션의 기존 연구들은 시스템 모델에 대하여 역 모델을 직접 설계하여 이에 대한 시뮬레이션을 수행하거나, 역 모델 설계가 불가능한 경우 기존 시스템 모델에 제한적으로 전문가 시스템을 연동하여 순 방향 시뮬레이션을 통해 결과를 도출하는 방법을

활용해 왔다.

본 논문은 기존 연구들을 보완하여 시스템 모델을 그대로 활용하되 역 모델 설계 유무와 관계없이 역 방향 시뮬레이션을 수행할 수 있는 범용의 소프트웨어 아키텍처를 제안한다. 제안하는 아키텍처는 기능적으로 구분된 하위 모듈들을 바탕으로 역 모델 설계의 유무에 따라 다른 시뮬레이션 과정을 수행할 수 있게 하였다. 특히, 역 모델 설계가 어려운 경우에는 아키텍처 내부에 피드백 루프(Feedback loop) 제어를 제안하였고, 루프 내에서 시뮬레이션 조건에 따라 입력 시나리오를 효율적으로 찾기 위해 다양한 탐색 알고리즘이 적용 가능하게 하였다.

본 논문에서 제안한 소프트웨어 아키텍처의 실증적인 목적은 역 방향 시뮬레이션을 통해 목표한 국방 시스템의 전투 효과도를 만족하는 성능 제원을 최적으로 도출하는 것이다. 이를 위해 아군 수상함의 대공 대잠전 방어 시나리오에 대한 사례 연구를 수행하였다. 아군 수상함의 대공전 시나리오는 역 모델 설계가 가능한 경우로 목표한 적 탐지율을 만족하는 수상함의 탐지 성능을 도출하였고, 대잠전 시나리오는 역 모델 도출이 어려운 경우로 목표한 생존률을 만족하는 기만기의 공학 성능을 분석하였다. 이 중 대잠전 시나리오는 국방 시스템의 요구 성능 분석을 하는데 있어 순 방향 시뮬레이션과 비교하여 동일한 수준의 요구 성능 분석을 보다 신속히 수행할 수 있음을 보여 준다.

본 논문은 다음 순서로 구성된다. II장에서 역 방향 시뮬레이션의 관련 연구를 살펴보고, III장에서 국방 시스템 분석과 관련하여 연구 동기를 제시한다. IV장에서는 본 논문에서 제안하는 역 방향 시뮬레이션 소프트웨어 아키텍처를 설명하고, V장에서 사례 연구를 제시한 후, VI장에서 결론을 맺는다.

II. 관련 연구: 역 방향 시뮬레이션

역 방향 시뮬레이션은 시뮬레이션 목표치를 만족하기 위한 시스템 모델의 입력 요인을 분석하는 “how to” 문제에 유용하다. 아래 표는 “how to” 문제를 해결하기 위해 역 방향 시뮬레이션 기법을 활용한 기존 연구들을 정리한 것이다.

표 1과 같이 기존 연구는 크게 역 모델의 설계 가능 유무로 구분된다. 먼저, 역 모델 설계가 가능한 경우는 주로 연속 시스템으로 표현 가능한 시스템 모델에 대하여 연구가 진행되었는데, 예를 들어 항공기나 기계 시스템과 같은 도메인 특화된 시스템에 대하여 모델리카(MODELICA)나 다이몰라(DYMOLA) 등의

표 1. 역 방향 시뮬레이션에 대한 기존 연구 비교
Table 1. Comparison between previous works for reverse simulation

Previous works	Analytical solution	System type	Application
[6]	Available	continuous system	civil aircraft
[7]	Available	continuous system	Mechanical system
[8]	Not available	discrete event system	queuing system
[9]	Not available	discrete event system	queuing system

모델링 도구를 이용하여 역 모델을 설계하였다^{6,7)}. 이와 대조적으로 대기(Queuing) 시스템과 같은 이산 사건 시스템은 역 모델을 설계하기란 쉽지 않다. 이로 인해 이산 사건 시스템의 역 방향 시뮬레이션은 주로 해당 시스템 모델을 전문가 시스템과 결합하여 시뮬레이션을 수행하는 방안을 활용하였다^{8,9)}. 구체적으로 사용자는 전문가 시스템에 시스템 목표치와 우선순위 정보를 입력하면 전문가 시스템이 시스템 모델의 순 방향 시뮬레이션 과정에서 상호 작용하면서 해당 시스템의 상태를 추적한다. 그러나 이 같은 접근 방법은 역 방향 시뮬레이션의 성능과 안정성이 전문가 시스템의 핵심 요소인 규칙 베이스(Rule base)에 매우 큰 영향을 받는다.

따라서 본 연구는 이러한 기존 연구들을 보완하여 역 모델 설계 가능 여부와 관계없이 시스템 모델을 활용하여 범용으로 역 방향 시뮬레이션을 수행할 수 있

는 방법을 제안한다.

III. 국방 시스템 분석

3.1 연구 동기

국방 시스템은 교리, 조직, 훈련, 물자, 인력, 장비, 지휘관의 경험 등 다양한 기능 요소들에 기반한 복합 체계(System of systems)로 구성된다. 이러한 복합 체계 기반의 국방 시스템은 목적에 맞게 시스템 모델로 추상화되어 군사 전문가의 의사 결정에 활용된다.

아래 그림은 국방 시스템 분석을 위한 군사 전문가의 두 가지 의사 결정 과정을 나타낸다. 그림 1의 군사 전문가는 하나의 추상화된 시스템 모델을 바탕으로 시뮬레이션 수행의 방향에 따라 국방 시스템의 전투 효과도 분석과 함께 성능 분석을 하려 한다. 서론에서 설명하였듯이, Q1은 정의된 전투 시나리오를 바탕으로 목표로 하는 전투 효과도인 MOE(Measure of effectiveness)를 분석하는 과정이고, Q2는 목표한 MOE를 만족하기 위한 국방 시스템의 요구 성능인 ROC를 도출하는 과정이다.

먼저, Q1을 순 방향 시뮬레이션을 통해 해결하는 과정을 예를 통해 살펴보면 그림 2와 같다. 전투 시나리오의 인자(Factor)는 크게 국방 시스템의 공학 제원(F_E)이나 운용 기술(F_T)로 구분되는데, 여기서 F_E 는 주로 해당 시스템의 성능 지수인 MOP(Measure of performance)를 의미한다. 그림 2의 예에서 전투 시나리오는 3개의 $F_E(F_1, F_2, F_3)$ 와 2개의 $F_T(F_4, F_5)$ 로 구성되고, 각 인자는 차례로 N_1 에서 N_5 의 인자 수준(Level of factor)을 가진다. 따라서 시스템 모델은 모

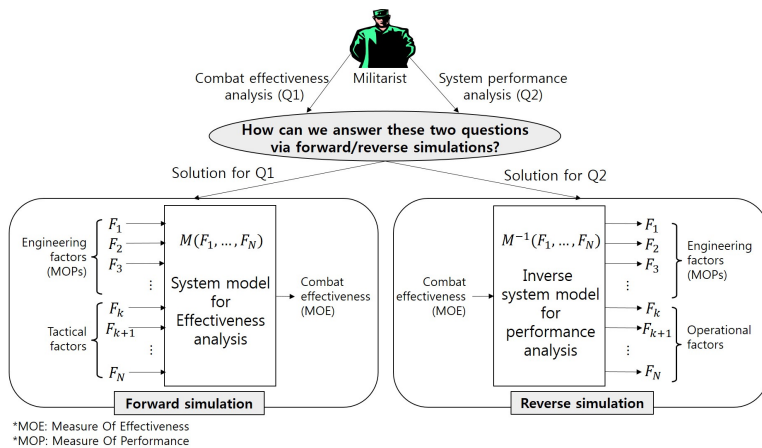


그림 1. 국방 시스템 분석의 두 가지 관점
Fig. 1. Two perspectives in defense system analysis

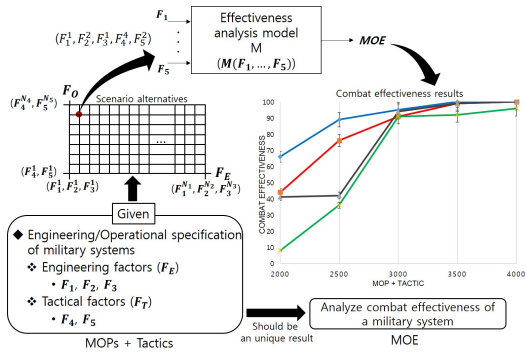


그림 2. 입력에 대한 출력이 유일한 순 방향 시뮬레이션
Fig. 2. Forward simulation with a unique result in effectiveness analysis

든 인자들의 조합을 시나리오 대안으로 하여 순 방향 시뮬레이션을 수행하고 도출된 출력을 통해 그림 2의 오른쪽 그래프와 같이 MOE 경향을 분석한다. 이러한 순 방향 시뮬레이션은 개별 입력에 대한 시스템 모델의 결과가 유일하게 결정되기 때문에 시나리오 대안과 그에 따른 MOE가 일대일 혹은 다대일 대응 관계를 갖는다.

다음으로, 그림 3은 Q2를 역 방향 시뮬레이션을 통해 달성하는 과정을 예로 나타낸다. 그림 3에서 왼쪽 그래프의 음영 표시된 영역은 목표하는 전투 효과도를 의미한다. 따라서 본 예는 국방 시스템의 전투 효과도가 95% 이상을 만족하는 전투 시나리오 대안을 역 모델을 통해 도출하는 것이 목적이다. 여기서 중요한 점은 주어진 전투 효과도를 만족하는 시나리오 대안이 유일한 경우도 있지만 그림 3과 같이 다양한 인자의 조합으로 복수의 시나리오 대안들이 대응될 수 있다는 것이다. 왜냐하면 국방 시스템의 서로 다른 전

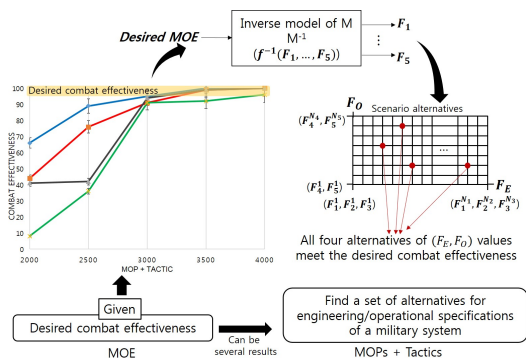


그림 3. 입력에 대한 복수의 출력이 가능한 역 방향 시뮬레이션
Fig. 3. Reverse simulation with several results in ROC design

술과 성능 제원의 조합들이 시스템 모델 내부에 복합적으로 적용되어 모델의 결과인 전투 효과도에 동일한 영향을 미칠 수 있기 때문이다.

정리하면 순 방향 시뮬레이션은 시스템 모델의 입력과 출력 사이를 유일한 방법으로 연결해 주는 반면 역 방향 시뮬레이션은 역 모델의 개별 입력이 복수의 출력으로 대응 가능하다. 즉, 방향성이 다른 두 시뮬레이션은 서로 역 관계를 가진다. 예를 들어, 순 방향 시뮬레이션에서 다대일 대응 관계의 입출력을 가지는 시스템 모델이 역 방향 시뮬레이션에서는 역 모델이 일대다 대응의 입출력 관계를 보인다.

본 논문은 국방 시스템 분석 중 주로 Q2를 해결하기 위하여 역방향 시뮬레이션을 적용하고자 하며 특히, 역 모델의 입출력이 일대일 대응과 일대다 대응 관계에 모두 적용할 수 있는 범용의 시뮬레이션 소프트웨어 아키텍처를 제안한다.

IV. 역 방향 시뮬레이션 소프트웨어 아키텍처

본 논문에서 제안하는 역 방향 시뮬레이션 소프트웨어 아키텍처를 블록선도(Block diagram)로 나타내면 그림 4와 같다. 기본적으로 역 방향 시뮬레이션은 시스템 모델과 함께 목표로 하는 시스템 모델의 결과가 주어져야 하는데, 그림 4에서 이들을 음영 처리된 블록(Model, Goal)으로 표시하였다.

본 논문의 소프트웨어 아키텍처는 크게 4개의 기능 블록과 1개의 결과 블록으로 구성된다. 4개의 기능 블록은 시스템 모델의 입출력 대응 관계에 따라 역 방향 시뮬레이션의 접근을 다르게 수행할 수 있게 하였고, 결과 블록인 AS Table은 시스템 모델의 결과를 만족하는 입력을 채택 가능한 시나리오(Acceptable scenario)로 수집한다. 그리고 각 블록들 간에 교환하는 입력과 출력은 그림 4의 하단에 나타내었는데, 시스템 모델의 관점에서 X는 시나리오 대안, Y는 목표 전투 효과도, 그리고 F는 X의 적합성 여부를 나타내는 신호(Flag)를 가리킨다. 따라서 제안하는 아키텍처는 F에 따라 목표 값(Y*)을 만족하는 시나리오 대안(X*)의 집합을 도출하는 것이 목적이다.

제안하는 기능 블록들의 역할을 역 방향 시뮬레이션의 과정에 따라 구체적으로 설명하면 다음과 같다. 먼저, 역 방향 시뮬레이션을 수행하기 위해 Classifier는 시스템 모델에 대한 역 모델의 설계 여부를 판별한다. 이 때 판별 기준은 시스템 모델의 입출력 대응 관계와 관련이 깊다. 수학적으로 함수(모델)의 입력과

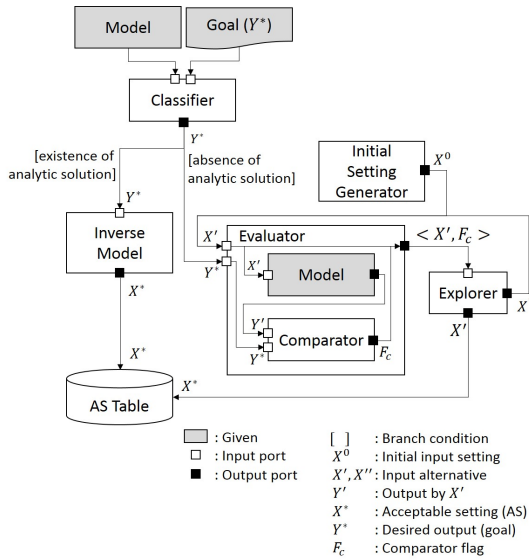


그림 4. 제안하는 역 방향 시뮬레이션 소프트웨어 아키텍처
Fig. 4. Proposed reverse simulation software architecture

출력이 일대일 대응 관계인 경우 기존 함수(모델)에 대한 역 함수(모델)가 설계 가능하지만 다대일 대응이면 이것이 불가능하다. 따라서 그림 4의 좌측과 같이 시스템 모델의 입출력이 일대일 대응 관계이고 이를 통해 역 모델(Inverse Model)을 설계할 수 있다면 Inverse Model를 통해 Y^* 를 만족하는 유일한 X^* 를 도출할 수 있다.

그러나 국방 시스템에서 입력과 출력이 일대일 대응 관계임을 식별하는 것은 현실적으로 쉽지 않다. 왜냐하면 일대일 대응 관계를 만족하기 위해서는 입력에 따른 시스템 모델의 출력 방향이 항상 일정한 단조 함수(Monotonic function)의 형태를 유지해야 하는데 복잡 체계 기반의 국방 시스템은 시스템 내부의 확률적 특성으로 인해 단조함수로 표현할 수 없는 경우가 대다수이기 때문이다. 또한 국방 시스템의 입출력이 일대일 대응 관계를 만족한다 할지라도 경우에는 따라서는 해당 시스템의 비선형성으로 인해 역 모델을 설계하는 것 자체가 매우 어려운 경우도 존재한다.

이러한 경우를 해결하기 위해 제안하는 소프트웨어 아키텍처는 Inverse Model을 직접 설계하여 X^* 를 도출하는 접근과 함께 기존의 순 방향 시뮬레이션에 피드백 루프 제어를 제안하여 역 방향 시뮬레이션을 실현하는 방법을 포함한다. 즉, 그림 4의 우측과 같이 시스템 모델에 시나리오 대안(X')을 전달하여 순 방향 시뮬레이션을 통해 얻어진 결과(Y')가 Y^* 를 만

족하도록 시나리오 대안을 순차적으로 수정/적용함으로써 역 방향 시뮬레이션을 수행한다.

피드백 루프 제어를 통한 역 방향 시뮬레이션에서 시나리오 대안의 적합성 판정을 위해서는 초기 입력 시나리오가 필요한데, Initial Setting Generator가 이러한 초기 입력 시나리오(X^0)를 생성한다. X^0 는 사용자의 편의에 따라 다양하게 생성될 수 있으며 그림 5와 같이 무작위, 메타모델, 사용자 입력 등의 다양한 기법을 사용하여 구현 가능하다. 일반적으로는 현재 국방 시스템의 기술적 환경에서 실현 가능한 범위를 바탕으로 인자들의 수준을 결정하여 X^0 를 설정하는 것이 타당하다. 이렇게 생성된 X^0 는 최초의 시나리오 대안(X')이 되어 Evaluator에 전달된다.

Evaluator는 시스템 모델(Model)과 Comparator를 하위 모듈로 가지며 시나리오 대안인 X' 과 목표 값인 Y^* 를 바탕으로 X' 의 적합성 여부를 판단하여 해당 정보를 출력한다. 구체적으로 살펴보면, 먼저 Model은 X' 을 입력으로 하여 기존의 순 방향 시뮬레이션을 수행한 후에 그 결과(Y')를 Comparator에 전달한다. Comparator는 Y' 이 목표 결과 값(Y^*)을 만족하는지를 평가하여 만족 여부에 대한 신호(F_c)를 출력한다. 따라서 Evaluator는 현재의 시나리오 대안(X')과 적합성 여부(F_c)의 쌍을 다음 블록인 Explorer에 전달한다.

마지막으로, Explorer는 크게 다음의 두 가지 역할을 수행한다. 첫 째는 입력 받은 X' 이 F_c 에 의해 채택 가능한 시나리오라 판단될 경우 이를 X^* 으로 출력하여 결과 블록(AS Table)에 전달하는 것이고, 두 번째는 X' 의 적합성 여부와 별개로 새로운 시나리오 대안(X'')의 도출이 필요한지를 결정하여 X'' 을 피드백 루프에 전달하는 것이다. 그리고 이 때 전달된 X'' 은 Evaluator에 X' 으로 입력되어 새로운 시나리오 대안(X^*)으로 채택될 때까지 피드백 루프 내에서 반



그림 5. Initial Setting Generator의 구현
Fig. 5. Implementation of Initial Setting Generator

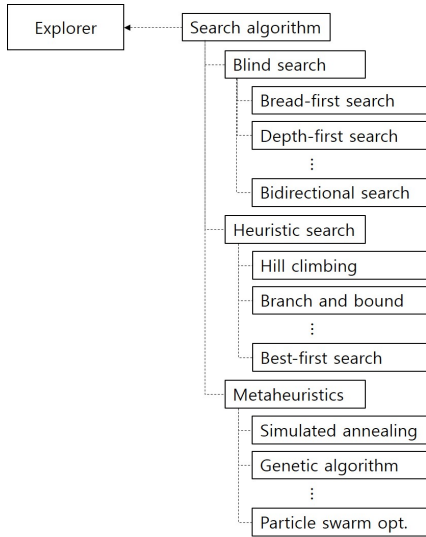


그림 6. Explorer의 구현
Fig. 6. Implementation of Explorer

복 수행된다. 이렇게 복수의 X^* 을 도출하기 위해 피드백 루프 제어를 순차적으로 반복 수행하는 과정이 다대일 대응의 입출력 관계를 가지는 시스템 모델에 대하여 역 방향 시물레이션을 해결하는 방법이 된다.

Explorer에서 X'' 을 결정하는 과정은 그림 6과 같이 다양한 탐색 알고리즘으로 구현될 수 있는데, 예를 들어 정보가 주어지지 않은 상황에서 새로운 대안을 찾는 Blind 알고리즘, 가용한 정보를 바탕으로 경험에 기반을 둔 휴리스틱 알고리즘, 그리고 특정 정보에 구속되지 않고 범용의 문제에 해결 가능한 메타 휴리스틱 알고리즘 등의 다양한 알고리즘이 적용 가능하다. 실제로 역 방향 시물레이션의 성능은 이러한 탐색 알고리즘에 영향을 가장 많이 받기 때문에 시물레이션 조건에 따라 적합한 탐색 알고리즘을 선택하여 적용하는 것이 필요하다.

지금까지 설명한 역 방향 시물레이션 소프트웨어 아키텍처는 시스템 모델의 역 모델 설계 유무에 따라 적합한 해결 방법을 취할 수 있도록 설계되었다. 특히, 제안하는 기능 블록들은 특정 도메인에 국한될 필요 없이 다양한 알고리즘으로 설계 및 구현될 수 있기 때문에 범용으로 사용이 가능하다.

V. 사례 연구

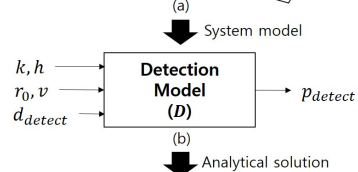
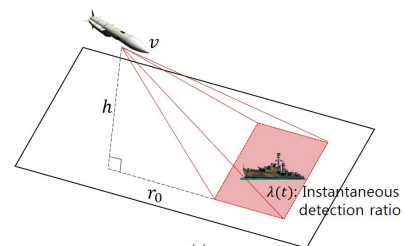
본 장에서는 제안한 역 방향 시물레이션 소프트웨어 아키텍처를 국방 시스템의 요구 성능 분석에 적용

한 두 가지 사례 연구를 설명한다. 실험 시나리오는 수상함의 대공/대잠전으로 대공전의 경우 시스템 모델에 대한 역 모델 설계가 가능하고, 대잠전은 이것이 불가능한 경우이다.

5.1 시스템 모델의 역 모델에 대한 해석적 해가 존재하는 경우: 수상함의 대공 탐지 능력

그림 7 (a)는 아 수상함을 향해 r_0 만큼 떨어진 지점으로부터 v 의 속도를 가진 적 미사일 1발이 접근해 오는 대공전 시나리오를 나타낸다. 수상함의 전투 효과도는 미사일 탐지 확률이고, 수상함이 미사일을 탐지하여 성공적으로 격추하기 위한 최소 요구 성능은 한계 탐지 거리인 d_{detect} 이다. 이는 수상함이 미사일이 d_{detect} 이내로 접근하기 전에 탐지 가능해야 함을 의미한다. 본 시나리오의 단위는 거리의 경우 마일 (mile), 속도는 시간 당 마일(mile per hour), 그리고 시간은 시간(hour)을 사용하였다.

수상함의 전투 효과도를 p_{detect} 라 하면 그림 7 (b)와 같이 5개의 입력을 바탕으로 p_{detect} 를 출력으로 하는 시스템 모델(Detection Model) D 를 설계할 수 있다. D 의 입력 중에서 k 는 고정된 값으로써 해면에 대한 항적의 대조나 관측자의 능력, 기상 조건 등과 같은 다양한 요소에 영향을 받는 상수이고 h 는 해상고도를 나타낸다. 시스템 모델 D 는 기본적으로 연속적



(c) Analytical solution

Instantaneous detection rate	$\lambda(t) = \frac{kh}{(r_0 - vt)^3} \quad r > h$
Analytical solution	$p_{detect} = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$

그림 7. 수상함의 대공 미사일에 대한 탐지율 분석을 위한 순 방향 시물레이션
Fig. 7. Forward simulation for analyzing a detection ratio of a warship against a hostile missile

인 시간의 흐름 상황에서 탐지가 가능한 경우를 가정하기 때문에 D 에 대한 입출력 관계를 수식 모델 (Analytical model)로 나타내면 그림 7 (c)와 같이 순간 탐지율 $\lambda(t)$ 에 대한 적분 식으로 표현 된다¹⁰⁾.

주어진 p_{detect} 를 만족하는 탐지 요구 성능 d_{detect} 를 도출하기 위해 제안하는 소프트웨어 아키텍처를 시스템 모델 D 에 적용하면 그림 8과 같다. 먼저, 본 사례는 시스템 모델의 역 모델이 설계가 가능하기 때문에 그림 4의 Classifier를 통해 역 모델이 존재하는 경우로 접근한다.

그림 8은 역 모델 설계를 통한 아 수상함의 탐지 요구 성능 d_{detect} 를 결정하는 과정이다. 그림 8 (a)는 시스템 모델의 역 모델인 D^{-1} 를 나타내고, D^{-1} 의 해석 해(Analytical solution)는 그림 8 (b)와 같이 시간 t 의 함수로 표현 가능하다. 여기서 시간의 함수로 표현된 이유는 t 시간 이내에 표적이 탐지되어야 함을 의미하고, t 를 알면 기존에 설정된 미사일의 속도 v 를 이용하여 탐지 요구 성능 d_{detect} 를 도출할 수 있기 때문이다. 예를 들어, 주어진 탐지 확률 p_{detect} 가 65% 이상이어야 하는 문제에서 $h = 100$, $k = 10^7$, $r_0 = 500$, $v = 10^4$ 이면, 그림 8 (b)의 해석 해를 이용하여 t 는 0.03임을 알 수 있다. 즉, 수상함은 시속 10,000마일로 접근하는 미사일의 경우 0.03시간 이내에 표적을 탐지해야 하고, 탐지 요구 성능으로 환산하면 200마일임을 알 수 있다. 따라서 본 예제의 경우 수상함의 탐지 능력에 대한 성능 제원은 200마일이다.

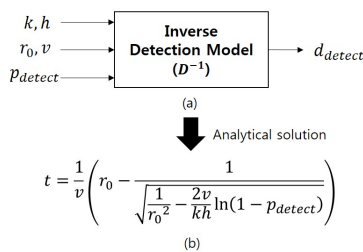


그림 8. 수상함의 대함 미사일 교전에서 목표 효과도 (수상함의 탐지율)를 만족하는 탐지 성능 제원 도출을 위한 역 방향 시뮬레이션

Fig. 8. Reverse simulation for finding specifications of sensors with a detection ratio of a warship over 65%

5.2 시스템 모델의 역 모델에 대한 해석적 해가 존재하지 않는 경우: 수상함의 기만기 성능

5.1절 사례 연구의 시스템 모델 D 는 실제로 미사일의 궤적이나 수상함의 침로와 속도 등과 같은 대부분의 성능 지수를 일정한 상수로 가정하였고, 무기 체

계의 효과에 영향을 미칠 수 있는 운용 전술과 같은 전투 논리 측면을 배제함으로써 역 모델 설계가 가능한 단조함수 형태로 표현할 수 있었다.

그러나 4장에서 설명하였듯이 시스템 모델의 입출력이 일대일 대응 관계임을 식별하는 것은 불가능하거나 이것이 가능할 지라도 역 모델을 설계하는 것이 어려운 경우가 대부분이다. 따라서 본 사례 연구는 시스템 역 모델 설계가 어려운 경우에 대한 사례로써 수상함의 대잠전 시나리오에 제안하는 소프트웨어 아키텍처를 적용하였다.

그림 9 (a)는 아 수상함의 대잠전 시나리오를 나타낸다. 일정 속도로 기동 중인 수상함은 적 잠수함으로부터 발사된 대함 어뢰를 탐지하고 기만기를 이용한 방어 전술과 함께 회피 전술을 실시한다¹¹⁾. 이러한 대잠전 시나리오는 그림 9 (b)와 같은 시뮬레이션 모델로 추상화되어 표 2의 시나리오 대안 집합에 대한 수상함의 생존율을 MOE로 분석한다. 이는 입력 시나리오를 바탕으로 모델의 출력을 분석하는 순 방향 시뮬레이션의 대표적인 예로써 입출력 관계는 그림 9 (c)와 같이 나타난다.

그림 10은 본 사례 연구에 제안한 아키텍처를 적용하는 과정을 나타낸다. 역 방향 시뮬레이션의 목적은 수상함의 생존율을 95% 이상 달성할 수 있는 시나리

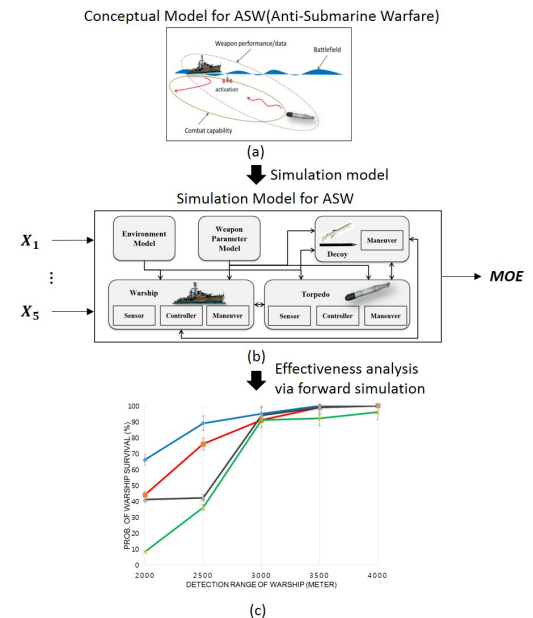


그림 9. 수상함의 대함 어뢰에 대한 생존율 분석을 위한 순 방향 시뮬레이션

Fig. 9. Forward simulation for analyzing survivability of a warship against a hostile torpedo

표 2. 시나리오 대안 집합: 기만기의 성능 제원 및 운용 교리 (X_E: 성능 제원, X_O: 운용 전술)

Table 2. Scenario alternatives: MOPs and tactics for decoys (X_E: MOPs, X_O: Tactics)

Factor	Name	Description	Number of total cases
X _E	Operating duration (X ₁)	[240, 540] (sec)	30
	Speed (X ₂)	[6,15] (knots)	3
	Source level (X ₃)	[110, 150] (dB)	10
X _O	Decoys deployment pattern (X ₄)	DP ₁ (four mobile decoys used) DP ₂ (four mobile decoys used) DP ₃ (four mobile decoys used) DP ₄ (four mobile decoys used)	4
	Decoy launch type (X ₅)	LT ₁ (mobile decoys used) LT ₂ (mobile decoys used)	2

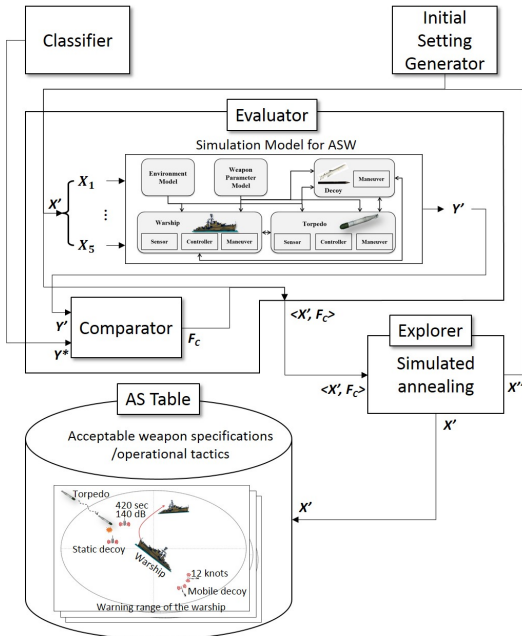


그림 10. 수상함의 대잠전에서 목표 효과도 (수상함의 생존율)를 만족하는 기만기 제원 도출을 위한 역 방향 시뮬레이션 Fig. 10. Reverse simulation for finding specifications of decoys with a survivability of warship over 95%

오 대안, 즉 기만 체계의 요구된 성능 제원을 표 2에서 찾는 것이다. 앞서 설명한 바와 같이 본 사례 연구는 시스템 모델이 시뮬레이션 모델이고 역 모델 설계가 어려우므로 Classifier에서 피드백 루프를 통한 역 방향 시뮬레이션 방법으로 접근한다. 이를 위해, 먼저

Initial Setting Generator에서 메타 모델을 이용하여 모델의 초기 시나리오 대안인 X⁰을 기만기의 성능 제원과 운용 전술을 Evaluator로 전달한다. Evaluator는 순 방향 시뮬레이션의 결과 값이 목표 효과도 이상을 달성하는지를 Comparator에서 비교한다. 예를 들어 결과 MOE와 목표 효과도를 비교하여 목표 이상을 달성하면 해당 시나리오 대안을 X*로 채택하여 AS Table로 전달한다. 추가적으로 Explorer는 다음 후보 X'를 탐색하여 Evaluator로 피드백을 전달하기도 하는데 목표 효과도를 만족하는 시나리오 대안을 모두 찾을 때까지 위 과정은 반복된다. 본 사례에서는 Explorer의 구현을 위해 SA (Simulated annealing)를 사용하였지만 그림 6에서 보인 바와 같이 어떤 탐색 기법이라도 사용 가능하다.

본 사례 연구의 실험 환경은 다음과 같다. 사용한 운영체제는 Windows 7, CPU는 Intel I-5 3550 3.3GHz 이고, RAM은 4GB이다. 시뮬레이션 모델은 이산 사건 시스템 기반으로 설계^[12]되어 DEVSim++^[13]으로 구현되었고, Initial Setting Generator는 메타 모델로 SPSS를 이용하여 구현하였으며, Explorer는 SA 알고리즘을 적용하였다.

제안한 역 방향 시뮬레이션에 의해 95%의 수상함 생존율을 달성하기 위한 시나리오 대안 집합은 표 3과 같다. 총 7개의 시나리오 대안들은 순 방향 시뮬레이션을 통해 가능한 모든 시나리오 대안들 중에서 동

표 3. 수상함의 생존율 95% 이상을 만족하는 기만기 성능 및 운용 교리

Table 3. Specifications of decoys that satisfy the desired a survivability of warship over 95%

X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	MOE
390	12	140	DP ₃	LT ₁	95
450	12	130	DP ₃	LT ₁	95
420	12	140	DP ₃	LT ₁	96
390	12	130	DP ₃	LT ₁	97
420	12	130	DP ₃	LT ₁	97
450	12	130	DP ₃	LT ₁	97
540	12	140	DP ₃	LT ₁	97

표 4. 순 방향 시뮬레이션과 제안하는 역 방향 시뮬레이션 간 성능 비교

Table 4. Performance comparison between forward simulation and proposed reverse simulation

Performance index	Forward simulation	Reverse simulation
# of iterations	1,430	432
Execution time (min)	1,132.02	353.68

일한 수준의 생존율을 보이는 시나리오 대안들과 동일하였고, 이를 통해 순 방향 시뮬레이션과 비교하여 제안하는 역 방향 시뮬레이션의 정확도를 확인할 수 있다.

마지막으로 표 4는 제안한 역 방향 시뮬레이션의 성능을 비교하기 위해 순 방향 시뮬레이션의 탐색한 방법과 비교한 결과이다. 결과에서 알 수 있듯이 제안하는 역 방향 시뮬레이션은 순 방향 시뮬레이션을 이용한 경우보다 모의실험 횟수와 실행 시간 측면에서 약 3배의 시뮬레이션 성능 개선을 보였다.

VI. 결 론

본 논문은 국방 시스템 분석을 하는데 있어 목표한 국방 시스템의 전투 효과도를 만족하는 성능 제원을 도출하기 위해 역 방향 시뮬레이션 소프트웨어 아키텍처를 제안하였다. 제안한 아키텍처는 시스템 모델을 그대로 활용하되 역 모델 설계 유무에 따라 적합한 방안을 제시하여 역 방향 시뮬레이션이 범용으로 가능하도록 하였다. 사례 연구로 수상함의 대공전과 대잠전 사례에 제안한 아키텍처를 적용하였고 순 방향 시뮬레이션 방법과 비교하여 정확도와 함께 시뮬레이션 성능 개선을 확인하였다.

제안한 기법은 다양한 전장 환경에서 기존 무기 체계의 성능을 극대화할 수 있는 운용 전술 개발 시 유용하게 적용할 수 있다. 또한, 신무기 도입 또는 개발 시에도 무기 체계의 요구 성능 제원 도출 시에도 적절한 수단이 될 수 있다. 나아가 국방 시스템 뿐 아니라 복잡성을 가지는 다양한 시스템을 이용한 문제 해결에 적절한 해결 방안을 제시할 것으로 기대한다. 예를 들어, 교통 시뮬레이션 모델을 이용한 재난 방재 대피소의 배치 문제, 공공기관 이전 시 배치 문제, 항만 물류 시스템의 업무 스케줄링 또는 설계 문제 등에 제안하는 기법을 적용할 가능성이 있다.

하지만 제안한 역 방향 시뮬레이션 기법에서 소요되는 모의실험 횟수와 시간이 순 방향 시뮬레이션보다는 적다하더라도 보다 복잡한 시스템을 이용하는 문제 해결을 위해 추가적인 성능 개선이 필요하다. 이를 위해 다중 반복 실험의 병렬화, Explorer에서 사용되는 탐색 기법의 개선, 다중 충실도 모델의 활용 방안 등에 대한 추후 연구가 필요하다.

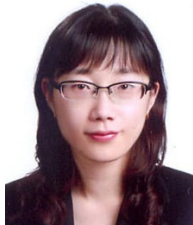
References

- [1] O. K. Lee and S. J. Kang, "A management procedure of required operational capability for 'low-cost and high-efficiency' weapon systems development," *J. KICS*, vol. 37C, no. 1, pp. 109-117, Jan. 2012.
- [2] T. G. Kim, D. S. Kim, and C. H. Sung, "Joint analysis of combat power communication system via interoperation of war game simulator with communication network simulator," *J. KICS*, vol. 37C, no. 10, pp. 993-1003, Dec. 2012.
- [3] T. G. Kim, S. J. Kwon, and B. G. Kang, "Modeling and simulation methodology for defense systems based on concept of system of systems," *J. Korean Inst. Ind. Eng.*, vol. 39, no. 6, pp. 450-460, Dec. 2013.
- [4] S. J. Kang, M. J. Kim, J. M. Park, I. G. Chun, and W. T. Kim, "LVC-interoperation development framework for acquiring high reliable cyber-physical weapon systems," *J. KICS*, vol. 38C, no. 12, pp. 1228-1236, Dec. 2013.
- [5] J. H. Kim, C. B. Choi, and T. G. Kim, "Battle experiments of naval air defense with discrete event system-based mission-level modeling and simulations," *J. Defense Modeling and Simulation: Appl., Methodol., Technol.*, vol. 8, no. 3, pp. 173-187, Jul. 2011.
- [6] J. Bals, G. Hofer, A. Pfeiffer, and C. Schallert, "Object-oriented inverse modelling of multi-domain aircraft equipment systems with Modelica," in *Proc. 3rd Int. Modelica Conf.*, pp. 377-384, Linkoping, Nov. 2003.
- [7] M. Liermann, "Backward simulation - a tool for designing more efficient mechatronic systems," in *Proc. 9th Int. Modelica Conf.*, pp. 867-876, 2012.
- [8] R. H. Wild and J. J. Pignatiello, "Finding stable system designs: a reverse simulation technique," *Commun. ACM*, vol. 35, no. 10, pp. 87-98, 1994.
- [9] Y. H. Lee, K. J. Park, and Y. B. Kim, "Single run optimization using the reverse-simulation method," in *Proc. Winter Simulation Conf.*, pp. 187-193, 1997.
- [10] C. Y. Kim, G. R. Min, S. T. Ha, S. J. Kang,

S. C. Choi, and S. Y. Choi, *Military Operations Research Theory and Applications*, DooNam Press, 2004.

- [11] J. H. Hong, K. M. Seo, M. G. Seok, and T. G. Kim, "Interoperation between engagement- and engineering-level models for effectiveness analyses," *J. Defense Modeling and Simulation: Appl., Methodol., Technol.*, vol. 8, no. 3, pp. 143-155, Jul. 2011.
- [12] K. M. Seo, C. B. Choi, J. H. Kim, and T. G. Kim, "DEVS-based combat modeling for engagement-level simulation," *Simulation: Trans. The Soc. Modeling and Simulation Int.*, vol. 90, no. 7, pp. 759-781, Jun. 2014.
- [13] T. G. Kim, C. H. Sung, S. Y. Hong, J. H. Hong, C. B. Choi, J. H. Kim, K. M. Seo, and T. G. Kim, "DEVSIM++ toolset for discrete modeling and simulation and interoperation," *J. Defense Modeling and Simulation: Appl., Methodol., Technol.*, vol. 8, no. 3, pp. 129-142, Jul. 2011.

홍 정 희 (Jeong Hee Hong)



2005년 2월 : 부산대학교 전자
전기통신공학부 졸업
2007년 2월 : KAIST 전자전산
학부 전기및전자공학 석사
2013년 2월 : KAIST 전기및전
자공학과 박사
2013년 4월~2014년 4월 : KAIST
전자정보연구소 연수연구원
2014년 9월~현재 : 부산대학교 IT기반융합산업창의
인력양성사업단 연수연구원

<관심분야> 시스템 모델링 시물레이션, 시물레이션
기반 최적화, 분산 시물레이션

서 경 민 (Kyung-Min Seo)



2006년 2월 : 부산대학교 전자
전기통신공학부 졸업
2008년 2월 : KAIST 전기및전
자공학과 석사
2014년 2월 : KAIST 전기및전
자공학과 박사
2014년 4월~현재 : 대우조선해
양 특수성능연구소

<관심분야> 시스템 모델링 시물레이션, 전투 효과
도 분석, 체계 검증

김 탁 곤 (Tag Gon Kim)



1975년 2월 : 부산대학교 전자
공학과 졸업
1980년 2월 : 경북대학교 전자
공학과 석사
1988년 2월 : University of
Arizona 전기및컴퓨터공학과
박사

1989년 3월~1991년 8월 : University of Kansas 전
기및컴퓨터공학과 조교수

1991년 9월~현재 : KAIST 전기및전자공학과 교수
<관심분야> 모델링/시물레이션 이론 및 환경개발,
시물레이터 연동