

M&S의 V&V활동에서 통계기법을 통한 신뢰성 확보 연구

이동준[†] · 이상복 · 노광현 · 윤주일

Study on Securing Credibility by Statistical Techniques to V&V of M&S

Dongjoon Lee[†] · Sangbok Lee · Kwanghyun Ro · Juil Yoon

ABSTRACT

This study proposes a way to secure the reliability of M&S using statistical techniques. In particular, I would like to present statistical verification techniques and analysis to supplement the empirical and intuitive verification (face-validation) of experts, which was mainly used in the existing V&V process. Through this, an objective and quantitative evaluation of M&S tools and results is performed during the V&V process, thereby deriving more reliable M&S results. Among the various statistical techniques that can be applied in M&S verification and confirmation, we present ways to use statistical techniques such as hypothesis testing, experimental design (DoE), regression analysis, and confidence intervals through case studies, with a focus on implementation verification and result confirmation.

Key words : Verification and verification, modeling simulation, statistical methods

요 약

본 연구는 통계적 기법을 활용하여 M&S의 신뢰성을 확보하는 방안을 제시하는 데 있다. 특히, 기존의 V&V 과정에서 주로 사용되던 전문가들의 경험적, 직관적 검증(Face-Validation)을 보완하기 위해, 통계적 검증 기법과 분석을 제시하고자 한다. 이를 통해 V&V 과정에서 M&S 도구와 결과에 대한 객관적이고 정량적인 평가를 수행함으로써, 보다 신뢰성 있는 M&S 결과를 도출하는 것이다. M&S 검증 및 확인에서 적용할 수 있는 다양한 통계적 기법 중에서, 구현 검증과 결과 확인 중심으로 적합한 방법론을 사례 연구를 통해 통계적 기법을 사용하는 방안을 제시한다.

주요어 : 검증과 확인, 모델링 시뮬레이션, 통계적 방법

1. 서론

모델링 및 시뮬레이션(Modeling and Simulation, M&S)은 실제 상황을 재현하거나 현실에서 수행하기 어려운 복잡한 시스템의 예측 및 의사결정을 지원하기 위한 중요한 도구로 사용되고 있으며 M&S의 결과에 대한 신뢰성이 확보되어야 한다. M&S의 신뢰성을 높이기 위해서는 모델의 정확성, 구현된 시뮬레이션 도구의 성능, 그리고 결과의 적합성을 평가하는 검증(Verification) 및 확인

(Validation, V&V) 과정이 필수적으로 수행되어야 한다. 선진국에서는 V&V 활동과 이를 검토하는 활동을 통해 사용 의도의 충족 여부를 공식적으로 결정하는 인정(Accreditation) 절차(2011a)를 적용하고 있으며, 국내에서도 검증, 확인 및 인정(VV&A) 절차(2019)를 시행하고 있다.

미 국방부 V&V 기법 실무가이드북(2011b)에서는 75개의 V&V 기법과 특히, 복잡하고 큰 노력이 필요한 18개의 통계 기술을 제시하고 있다.

본 연구의 목적은 통계적 기법을 활용하여 M&S의 신뢰성을 확보하는 방안을 제시하는 데 있다. 특히, 본 연구에서는 기존의 VV&A 절차를 수행하며 V&V 과정에서 주로 사용되던 주관적 판단을 보완하기 위해, 통계적 방법을 통해 M&S 도구와 결과에 대한 객관적이고 정량적

Received: 11 December 2024, **Revised:** 30 January 2025,
Accepted: 3 February 2025

[†] **Corresponding Author:** Dongjoon Lee

E-mail: kopoleon@hansung.ac.kr

Defence Institute of Accreditation Technology Research

인 평가를 수행함으로써, 보다 신뢰성 있는 M&S 결과를 도출하는 것이다.

대부분의 M&S 도구를 활용한 문제해결 과정에서 M&S 결과는 문제해결에 초점이 있으므로 그림 1과 같이 M&S를 활용하는 내용에 대해서는 통계적 방법을 활성화하여 사용하고 있으나, M&S 도구의 신뢰성, M&S 도구를 사용한 결과값의 신뢰성에 대한 과정을 생략하고 있다.

M&S 도구의 개발 및 활용면에서 검증 및 확인이란 M&S도구를 구성하는 모델과 내부 입력 데이터가 개발 계획대로 잘 개발되었는지를 보는 검증, 개발된 M&S 도구를 활용하여 출력데이터로 도출된 결과가 실제와 일치하는지를 보는 확인이라고 할 수 있다.

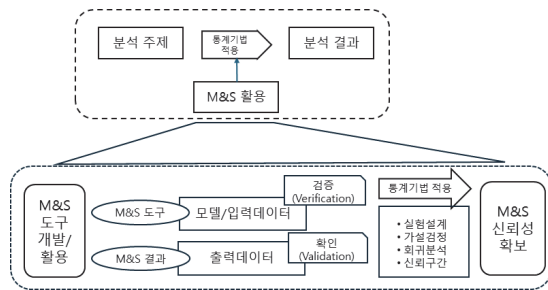


Fig. 1. Securing Credibility Concept of M&S V&V

본 연구에서는 통계 기법을 잘 활용하여 일반적으로 소홀하게 다루어지고 있는 M&S의 신뢰도를 확보하기 위한 검증과 확인 방법에서의 적용에 대해 연구한다.

2. 신뢰성 확보를 위한 통계적 방법

M&S의 문제해결 과정은 연구실에서 간단하게 이루어지는 작은 규모의 시뮬레이션으로부터 수년간의 프로젝트를 통해 다양한 M&S 상용 도구를 활용하거나 해당 프로젝트에 필요한 M&S 도구를 별도로 개발하기도 하며 군에서는 M&S 도구를 개발하는 프로젝트도 있다.

신뢰성 확보 활동이 필수적이므로 규모에 따라 확대하지만, 소규모에서도 계획단계, 사용 도구의 검증, 결과의 해석을 위한 확인에서 최소한의 통계 기법 적용이 필요하다.

M&S 도구를 활용하는 프로젝트의 경우 신뢰성을 확보하기 위한 통계 기법으로는 계획단계에서는 M&S 도구로 실험하는 경우이므로 실험 설계가 필요하다. 도구의 검증은 대부분 간과되고 있는데 의도대로 사용 가능한지

를 검증하기 위해서는 가설 검정 등이 필요하다. 결과의 해석도 단순히 결과값의 평균이나 추세로 해석하지만, 더욱 강력한 회귀 분석 등의 방법이 필요하다. 또한 실제 데이터와의 비교 등에서는 신뢰구간 기법 적용이 필요하다.

2.1 실험 설계(Design of Experiments, DoE)

실험 설계(DoE)는 실험 횟수를 최소화하면서도 통계적으로 유의미한 결론을 도출할 수 있는 강력한 방법이다. 특히 V&V 과정에서 실험 설계는 민감도 분석을 통해, 특정 입력값이 모델의 결과에 얼마나 큰 영향을 미치는지 평가하는 데 유용하다. DoE를 사용하면 변수 간의 상호작용뿐만 아니라 개별 변수의 효과를 독립적으로 평가할 수 있으며, 복잡한 시스템에서 다양한 시나리오를 효율적으로 테스트할 수 있다. 이는 M&S에서의 모델 검증과 확인에 있어 통계적 신뢰성을 확보하는 중요한 기법의 하나이다.

M&S V&V에서의 DoE는 시뮬레이션의 목적과 목표의 설정으로 변수를 정의하고 요인과 수준의 실험 설계로 평가할 변수를 정의하며 결과값 해석으로 시뮬레이션 목적 충족 여부 확인하는 것이 핵심이다. 실험 설계가 불명확한 경우 단순히 결과값의 평균, 빈도, 그래프를 이용한 직관적 해석으로는 더 구체적인 분석과 결과 검증을 위한 추가적인 연구가 필요하게 된다.

국방 M&S에서 실험 설계는 M&S의 사용 의도와 요인을 변수로 하는 효과 및 성능척도를 선정하고 이에 따른 모의범위와 모의 대상별 수준을 구체화하는 것이다. 사용 의도는 결과값이 어디에 사용하는 데 필요한가를 정하는 것이다.

2.2 가설 검정(Hypothesis Test)

가설 검정은 두 개 이상의 데이터 집단 간 차이가 통계적으로 유의미한지를 판단하기 위해 사용되는 방법이다. V&V 과정에서 t-검정, 카이제곱 검정(chi-square test) 등이 있으며, 이들은 모델의 결과와 실제 관측값 간의 차이를 정량적으로 평가하여 모델의 결과가 실제 데이터를 얼마나 정확하게 반영하는지를 평가하는 데 활용된다.

M&S에서 가설 검정은 M&S 결과값에 대한 해석이 M&S 사용 의도를 충족하는 유용성에 대한 근거이다. M&S 자체가 목적이 아니라 시뮬레이션 결과값이 유의미한 값인가 하는 것이다. 이러한 유의미한 해석에 적합한 통계적 설명 방법이 필수적이다.

최선한(2019)은 통계적 가설 검정 기법의 리샘플링 기법을 통하여 최적해를 구하는 연구로 노이즈 환경에서

입자 군집 최적화 알고리즘 성능향상에 대하여 전투기의 미사일 회피 전술에 적용하는 사례를 제시하였다.

M&S의 추정과 검증은 실제에서 모집단의 일부를 표본으로 추출하여 모집단의 특성을 추정하는 경우와는 조금 다르다. M&S 결과를 활용하는 추정은 현상 모의한 결과(표본)를 이용하여 실제 현상(모집단)의 값을 추정하는 것이다. 또한, 가설 검증은 주장하는 추정(가설)의 채택 또는 기각을 결정하는 것이다. 즉, 시뮬레이션으로 추정하고 가설검정으로 유의미한 결과를 해석해야 하는 것이다.

2.3 회귀 분석(Regression Analysis)

회귀 분석은 종속 변수와 하나 이상의 독립 변수 간의 관계를 모델링하고, 이를 통해 결과를 예측하는 통계적 방법이다. V&V 과정에서 회귀 분석을 통해 모델이 예측한 결과와 실제 관측된 값 간의 상관 관계를 파악할 수 있으며, 이 상관 관계가 강할수록 모델의 신뢰도가 높다고 평가할 수 있다. 특히 다중 회귀 분석은 M&S에서 복잡한 시스템의 여러 변수들이 결과에 미치는 영향을 동시에 고려할 수 있어 매우 유용하다.

이예림 등(2021)은 무기체계 효과지수 계산을 위한 메타모델로 로지스틱 회귀모델, 가우시안 프로세스 회귀모델을 생성하는 방법을 연구하였다.

M&S에서의 회귀 분석은 실제 세계에서 획득한 일부 데이터를 근거로 만들어진 통계적인 회귀모형, 실제 세계를 모델링한 M&S, 그리고 실제값이 없이 추정하고자 하는 현상에 활용된다.

실제를 확인(Validation)하는 방법 중 유사 상황을 근거로 한 확인이며 이는 회귀 분석 결과를 참조하여 전문가에 의한 방법을 병행한다. M&S 도구의 검증(Verification)에서 실제 획득한 값과 M&S 결과값의 상관 분석에 사용할 수 있다.

그 외에도 결과의 해석을 더욱 명확하게 하도록 다양한 구성 요인들의 요인과 수준을 나누어 이들의 인과관계에 의한 분산분석 등이 활용 가능하다.

2.4 신뢰 구간(Confidence Interval)

모집단의 특정 모수가 포함될 것으로 예상되는 범위를 제공하는 통계적 기법으로, 신뢰 구간은 점 추정치(point estimate) 하나만 제시하는 것보다 불확실성의 범위를 나타내는 장점이 있다. 구간이 좁을수록 추정의 정확도가 높음을 의미하며, 이는 V&V 과정에서 모델의 결과에 대한 신뢰성을 평가하는 데 중요한 지표로 작용한다. 특히,

M&S에서 결과는 모두 추정된 표본이므로 추정값에 대한 신뢰도는 M&S와의 신뢰도와 직결된다.

실제 데이터를 수집가능한 경우 표본 추출의 숫자로 신뢰구간이 정해진다. 신뢰도 95%라면, 100번의 실험(혹은 표본 추출)에서 95번은 신뢰 구간이 참값을 포함하게 되는데 여기서 참값을 포함할 확률이 신뢰도를 의미하는 것이다. 특정 신뢰 구간은 참값을 포함하거나 포함하지 않지만, 전체 실험에서 참값을 포함할 확률은 신뢰도에 의해 결정된다. 따라서 실험 횟수별로 나온 값이 참값이 될 확률이 신뢰도에 해당한다.

실제 레이터를 운용하여 레이터 탐지 여부를 표적이 이동하는 궤적에 대해 100회 데이터를 확인한 결과 탐지 85회 미탐지 15회이라면 실제 평가결과는 95% 신뢰도에서 최저 76.7% 최고 90.7%의 신뢰구간을 갖는다. 90% 신뢰도에서는 [78.2%, 89.9%]이며 99%의 신뢰도를 요구하면 [73.7%, 92.0%]이다.

이를 M&S에 적용하는 예를 들면 100회의 시간별 레이터 탐지 정보를 산출하는 30회의 시뮬레이션을 하여 각 회의 탐지율을 계산한 결과로 평균 85% 표준편차 2.55%라는 통계량을 얻을 수 있으며 이때 신뢰 구간은 99% [83.8%, 86.2%], 95% [84.1%, 85.9%], 90% [84.2%, 85.8%]를 얻을 수 있다.

신뢰도와 신뢰구간은 이러한 의미로 검증 및 확인된 시뮬레이션 결과값에 대한 해석을 제공한다.

3. M&S V&V에서의 통계 기법 적용

M&S의 신뢰성은 해당 도구의 신뢰성, M&S 도구로 시뮬레이션한 결과값의 신뢰성으로 나누어 볼 수 있다.

해당 도구의 신뢰성면에서 보면, 기존 M&S 도구를 사용하는 경우 도구 자체의 신뢰성은 기존 활용 결과에서 확보한 것이며, 상용 도구일 때 이번 프로젝트 사용에 적합한 도구인지 검증이 필요하다. 신규 개발의 경우에는 도구 자체의 신뢰성을 검증하기 위한 개발 과정에 관한 것을 포함하여 더 많은 절차가 필요하다. 이때의 검증은 개발 과정의 추적성, 도구로서의 안정성에 초점을 맞추지만 도구의 신뢰성은 데이터의 검증을 통해 가능하다.

도구를 통해 사용 의도에 맞는 시나리오로 결과를 도출하면 그 결과값이 문제해결에 부합되는 값인지를 확인해야 한다. 시뮬레이션을 사용하는 것은 대부분 실제를 대체하여 실험하는 경우이다. 따라서 결과의 확인을 위한 실제값은 대부분 소량이거나 없는 경우이다.

3.1 M&S 도구의 검증(Verification)

M&S 도구의 검증(Verification)은 요구사항 검증, 설계 검증, 구현 검증, 데이터 검증이다. 요구사항 - 설계 - 구현으로 이어지는 검증은 추적성이 중점적으로 검토되고, 통계 기법의 적용이 필요한 검증은 구현 검증과 데이터 검증 대상 중에 포함되는 수치적 요소이다.

구현 검증은 시뮬레이션 모델이 원래 설계 및 개발의도에 맞게 정확하게 구현되었는지를 검토하는 과정이며, 데이터 검증은 모델의 개발자나 엔지니어가 모델의 구조, 코드, 알고리즘을 확인하고, 주어진 시나리오에서 모델이 요구된 사양에 따라 작동하는지를 평가한다. 통계적 기법이 필요한 검증은 주어진 시나리오대로 개발의도에 맞게 모델이 정확히 구성되었는가에 초점을 맞추며, 모델 내부의 논리적 일관성과 기능적 완전성을 점검하는 활동으로 코딩(프로그램 개발)의 결과를 검증하는 것이다. 이는 도구의 완전성을 시험하는 것으로 사용 의도에 부합되는 도구로서 개발의도에 부합되도록 개발되었는지를 검증하는 것이다.

무기체계의 시험평가 과정에서, 실제로 많은 시험 항목이 요구되지만, 여러 가지 현실적인 제약 때문에 일부는 제한된 범위에서만 수행할 수 있다. 제한된 실험 시험 데이터로 더 많은 다양한 시험이 필요할 때 M&S를 사용하므로, 이러한 M&S는 실험 시험과 동일한 시나리오에서 동일한 결과가 출력되는지를 통해 시뮬레이션 모델을 검증한다.

예를 들어, 실험 시험은 소수의 표적을 대상으로 수행하고, 그 결과가 M&S 도구에서 동일한 조건으로 재현되는지를 확인하는 과정을 통해 시뮬레이션 모델이 제대로 작동하는지 검증이 필요하다. 이때, 통계적 기법을 활용하여 실제 시험 데이터와 M&S 도구의 결과를 비교하고, 그 차이가 통계적으로 유의미한지를 평가함으로써 모델의 완전성을 검증할 수 있다.

따라서 검증단계에서 통계적 기법의 적용 목적은 시뮬레이션 도구나 모델이 계획된 대로 작동하는지를 확인하는 것이며, 이 과정에서는 실제 시험 데이터와 동일한 조건에서 시뮬레이션을 수행하여 결과를 비교한다. 예를 들어, 카이제곱 검정(Chi-Square Test)이나 T-검정(T-Test)을 통해 시뮬레이션의 평균값이 실제 결과의 평균값과 유의미한 차이가 없는지를 분석할 수 있다.

신규로 M&S를 개발하는 경우 기본적으로 구현 검증은 모델의 내부적인 정확성을 보장하는 과정이며, 주로 개발된 도구나 코드가 의도한 대로 작동하는지를 확인하는 것을 전제로 한다. 시뮬레이션을 활용한 결과를 의사

결정에 사용해야 하는 경우 시뮬레이션 도구의 검증은 확보가능한 실제 데이터를 통해 검증되는 것이 적절하다.

M&S 도구의 신뢰성은 구현 검증단계에서 확보가능한 실제 데이터와 동일한 시나리오로 수행한 시뮬레이션 결과 데이터의 일치성에서 확보되어야 한다.

3.2 M&S 실행의 결과 확인(Validation)

M&S의 확인(Validation)은 개념모델 확인, 결과 확인, 데이터 확인이다. 개념모델 확인은 요구사항의 추적성이 중점적으로 검토되고 모의의 범위와 수준이 전문가에 의한 타당성 검토이다. 통계기법의 적용이 필요한 확인은 결과 확인과 데이터 확인 대상 중에 포함되는 수치적 요소이다. 결과 확인(Validation)은 M&S 도구를 사용하여 실제로 수행하기 어려운 상황을 시뮬레이션할 때, 그 결과가 현실적으로 얼마나 타당한지를 평가하는 과정이다. 즉, 결과 확인과 이에 포함되는 데이터 확인은 모델이 현실 세계를 얼마나 정확하게 반영하는가에 중점을 두며 시뮬레이션 결과를 분석하는 것이 특징이다.

무기체계 시험평가에서 실제로 모든 시나리오를 시험하기 어렵기 때문에, 예를 들어 소수의 표적은 실제로 하고 다수의 표적을 대상으로 한 시험은 시뮬레이션을 통해 수행된다. 이때 M&S 도구가 현실적으로 불가능한 상황에서 생성한 결과가 타당한지, 즉 실제 상황과 일치할 가능성이 높은지를 확인하는 것이 확인의 핵심이다.

확인 과정에서는 동일한 시나리오의 실험 시험이 없는 상태에서 M&S의 결과가 현실적인지를 판단해야 한다. 따라서 통계적 기법을 통해 M&S 결과에 대한 불확실성을 평가하고, 모델이 적절한 결과를 도출하는지를 확인한다. 다양한 시나리오에서 결과의 분포를 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation)을 사용하여 생성하고, 시뮬레이션 결과가 여러 조건에서 일관성을 유지하는지를 분석할 수 있다.

또한, 회귀 분석(Regression Analysis)을 통해 시뮬레이션 결과를 현실 시스템 결과로 추정할 수 있다. 예를 들어, 실제 실험 데이터와 비교 가능한 요소들이 있을 경우, 회귀 분석을 통해 M&S 결과와 실제 시스템 간의 상관 관계를 정량적으로 분석할 수 있다. 이 과정에서 동시 신뢰 구간(Simultaneous Confidence Interval, SCI)을 사용하여 다수의 출력 변수가 함께 평가될 때도 결과가 통계적으로 타당한지를 검증할 수 있다.

따라서 확인의 목적은 M&S 도구가 현실의 조건과 일치하는 결과를 제공하는지를 평가하는 것이며, 이는 실제로 시험이 불가능한 시나리오에서 시뮬레이션 결과의 타

당성을 평가하는 데 중점을 둔다.

M&S를 통해 의사결정을 해야 하는 경우 그 결과값이 실제에도 그렇게 될 것이라고 하는 신뢰도를 확보하여야 한다. 문제는 실제 실험이 불가능한 경우에 대한 것이므로 결과는 추정값이며 추정값에 대한 검정을 통해 신뢰도를 확보하는 것이다.

4. 시험평가용 M&S V&V 활동 예시

2장에서 대표적으로 제시한 기법 외에도 많은 통계적 기법이 사용될 수 있으며, 3장에서 제시한 M&S 도구의 검증과 M&S 실행 결과의 확인은 M&S의 목적, 운영환경, 결과의 중요도 측면에서 매우 다양하다.

따라서 본 장에서는 2장과 3장의 이해를 돕기 위하여 2장에서 제시한 통계적 방법 중 일부와 3장의 개념을 적용한 한 예시를 무기체계 시험평가 간 활용하는 M&S로 하였다.

무기체계 시험평가에 사용되는 M&S를 예시로 한 것은 M&S 도구를 신규로 개발하기도 하지만 기존 M&S를 재사용하거나, 상용 도구로 해당 M&S 목적에 부합되도록 수정하여 사용한다. 또한 사용 목적이 다음과 같이 매우 중요한 특성이 있기 때문이다.

시험평가용 M&S의 목적은 실제 시험이 제한된 상황에서 M&S 결과의 신뢰성을 확보하여 M&S에 의한 시험평가로 성능 평가를 대체하는 것이다. 첫째, 최고 성능 및 극한 조건 시험의 경우, 실제 시험에서 획득 가능한 데이터로 M&S 모델 검증 후, 통계 기법을 사용해 극한 성능 추정하는 것이다. 두 번째로는 충분한 시험 횟수 보강이다. 실제 테스트 횟수 부족 시, 시뮬레이션 데이터와 결합해 최소 시험 횟수로 결과를 추정하는 것이다. 세 번째로는 추정 데이터 기반의 시험이다. 실제 시험이 불가능한 상황에서 M&S 도구를 활용하여 추정 데이터를 산출하고 이를 통계적 기법 기반으로 다양한 상황 변화 및 적 및 표적에 대한 대응 능력 평가를 하는 것이다.

4.1 시험평가용 M&S의 신뢰성 확보 범위

시험평가에 M&S를 활용하는 경우 일반적으로 목적과 여건에 따라 실제 체계, 제한된 실제 체계, 모델링 가상화 체계를 조합하여 시험환경을 구성한다.

시험대상 무기체계와 이러한 3가지 유형의 상호작용이 필요한 체계 및 환경에 대한 모델링 범위는 M&S를 활용하는 시험평가 항목에 부합되도록 구성한다.

표적의 경우 대부분 실제 표적과 동일하게 운용할 수

없으므로 제한된 실제 표적, 가상화한 M&S 표적을 사용한다.

시험대상 체계는 실제 체계를 사용한다. 그러나 표적 인접 체계, 환경을 모두 가상화하는 경우 이와 상호작용하기 위해서 실제 체계를 가상화하여 사용할 수 있다.

인접 체계는 대부분 현재 가동 중이므로 제한된 실제 체계를 활용하거나, 시험대상 체계와의 상호작용에 필요한 부분만 가상화한다.

환경의 경우 실제 환경보다 극한 환경에서 시험 평가하는 경우이므로 실제 무기체계가 운용되는 실제 환경을 조성하기는 매우 어려우므로 대부분 제한된 환경이다. 또한 다양한 환경에서의 시험이 요구되므로 가상화한 환경을 조성해 시험조건을 충족시킨다.

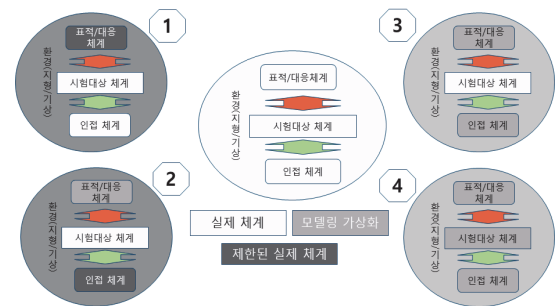


Fig. 2. Virtualized modeling of M&S for test evaluation

그림 2에서 백색은 실제 체계이며, 짙은 회색은 제한된 실제 체계, 옅은 회색은 가상화한 M&S 체계이다.

가장 이상적인 시험평가 환경은 중앙과 같이 모든 체계와 환경이 실제인 경우이다. 그러나 제한된 여건 속에서 일부 제한된 실제 체계와 가상화한 M&S 체계를 사용하여 시험한다.

1번은 현 여건 하 최대한 실제 체계로 하는 환경으로 표적과 환경은 제한된 실제 체계로 하고 모두 실제 체계로 구성되는 경우이다.

2번은 가장 일반적인 경우로 시험대상 체계는 실제 체계지만 인접 체계와 환경은 제한된 실제 체계로 하고 표적은 가상화하는 경우이다.

3번은 최근 증가하는 무기체계 추세로서 복잡하고 다양한 작전환경에서 운용되는 복합체계인 경우로 시험대상 체계 외에는 모두 가상화하는 경우이다.

4번은 모든 체계를 가상화하는 경우이다. 일반적으로 시험평가 상황은 시험대상 체계는 실제 체계를 운용해야 하지만 관련 모든 체계를 포함하여 가상화할 때 상호작용면에서 시험대상 체계도 일부 또는 전부를 가상화한 체

제일 경우도 있다.

이와 같이 M&S를 활용하는 시험평가에서의 M&S를 구성하는 요소를 고려하여 예상할 수 있는 사례로 더욱 구체적으로 검증과 확인 대상을 분석하면 그림 3과 같이 정리할 수 있다.

시험평가와 관련된 상황 시나리오는 4개의 경우이다. 실 장비로 제한된 시험평가 환경에서 실제 시험이 가능한 항목의 시험 시나리오, M&S #1 시나리오는 실제로 실시한 시험평가와 동일한 시나리오, M&S #2는 M&S로 시험하기로 한 항목에 대한 시나리오, 가장 하단의 실제 작전 시나리오는 가장 이상적인 전투 시나리오로 3개의 시나리오 조건을 조성하면서 기준으로 해야 하는 경우이다.

따라서 시험평가용 M&S의 검증과 확인의 범위를 정의하기 위해서는 실물 시험, 이와 동일한 시나리오로 실행한 시험평가용 M&S 결과, 요구되는 M&S를 활용한 시험평가, 그리고 실제 작전 상황을 모두 정밀하고, 타당하게 정의하여 필요한 모델과 데이터를 식별하고 생성 및 수집을 해야 한다.



Fig. 3. Subject of M&S verification and validation

그림 3은 그림 2의 3번 경우로 시험평가 도구 검증(Verification)의 핵심은 실물 시험 결과와 이와 동일한 시나리오(M&S #1)의 M&S 결과이며, M&S 실행 결과 확인(Validation)의 핵심은 도구를 실행하여 나온 결과(M&S #2)와 검증 결과를 바탕으로 실제 작전에서의 실제 결과를 추정하는 것이다.

그림 2의 4가지 경우들이 실제로 운용 때에는 시험대상 체계의 시험평가 항목, 인접 체계의 가용 여부, 표적(대응체계)의 특성과 요구되는 환경 조건 등 운용환경의 조건에 따라 그림 3은 실제 체계, 가상화 체계, 제한된 실제 체계 등이 구성될 수 있다.

4.2 검증 및 확인 활동 예시

시험평가용 M&S의 경우 무기체계의 큰 범주에서 동

일하므로 재사용이나 재활용이 많다.

예를 들어 XX급 A 체계의 시험평가용 M&S를 활용할 때 현재 전력화 운용 중인 XXX급 A1 체계를 참조체계로 하여 A1 체계의 M&S를 활용할 수 있다. 이때 참조체계의 시험평가시 M&S에 의한 시험평가 항목 중 일부는 재활용하고 일부는 신규로 추가한다면 다음과 같은 검증과 확인이 필요하다.

검증은 시험평가용으로 활용하기 위한 도구가 M&S에 의한 시험평가 항목을 평가할 도구로 구현되었는지를 검증하는 것이다. 구현 검증은 완성된 M&S 체계의 안정성, M&S 체계 요구사항의 충족성에 대한 검증으로 설계대로 개발 및 동작 여부를 시험하고, 특히 M&S체계의 통합시험에서는 입력값 범위 내 가능 여부, 예상된 범위 내 출력값 여부를 검증한다. 이때 입력값과 출력값의 비교를 위해 확보된 실제 데이터 또는 A1 체계의 데이터를 활용한다.

결과 확인은 시험평가 항목별 시뮬레이션 결과 제공의 완전성, 정확성, 타당성을 확인하는 것으로 시험평가 항목별 시험평가 가능 여부와 결과값의 타당성을 확인하고 M&S 요구사항의 충족성을 확인한다. 구현 검증을 통해 검증된 A 체계의 M&S 체계가 시험평가 항목 시나리오에 의거 출력한 값에 관한 확인이다.

유사한 시험평가용 M&S V&V 사례를 기반으로 하지만 공개할 수 없는 데이터의 특성상 OpenAI의 GPTs를 활용하였다. 유사한 가상 데이터를 생성하여 실제 데이터로 간주하여 예시를 제시한다.

데이터 및 구현 검증은 실제 데이터와 시뮬레이션 데이터로는 개발 완료된 시험대상(A) 체계의 운용 시험을 통해 1개 표적에 대한 탐지데이터(시간별 x, y, z 위치값) 200개(그림 3의 상단 시험평가 시나리오)와 시뮬레이션 30회로 생성한 후 추정한 데이터(그림 3의 M&S #1 시나리오)로 수행한다.

데이터 및 결과 확인은 유사 체계(A1)의 초고속 이동 표적 탐지 실제 데이터로 초고속 5개 표적의 시간별 위치 데이터 각 180~220개와 구현 검증된 A 체계의 M&S체계로 시험평가 항목 시나리오로 시뮬레이션한 결과값(그림 3의 M&S#2 시나리오)으로 수행한다.

4.2.1 검증간 통계적 방법 적용 예시

검증 활동에서 요구사항 검증과 설계 검증, 구현 검증에서 설계대로 반영 여부 등은 통계적 기법보다는 문헌의 추적성, 테스트를 통한 변경 부분에 대한 복합적인 검토 활동 등으로 진행한다. 다만 개발 의도를 충족하는지

에 대한 구현 검증 및 데이터 검증은 통계적 방법으로 수행한다.

구현 검증은 M&S 도구의 정상 작동 여부이며 데이터 검증은 M&S의 작동 결과값은 개념모델과 설계에서 계획한 예상값 도출 여부이다.

이를 검증하기 위한 데이터는 실물 시험이 가능한 시험 평가 항목에서 획득한 표 1의 실물 시험 데이터를 사용한다. 구현 검증을 위하여 실제 시험 환경과 동일한 시나리오에서 1개 표적이 일정한 속도로 이동하는 상황을 시뮬레이션하여 그림 3의 시뮬레이션 결과(그림 3의 M&S #1)를 도출하였다.

그림 4에서 이를 비교하여 모델의 신뢰성을 검증한다.

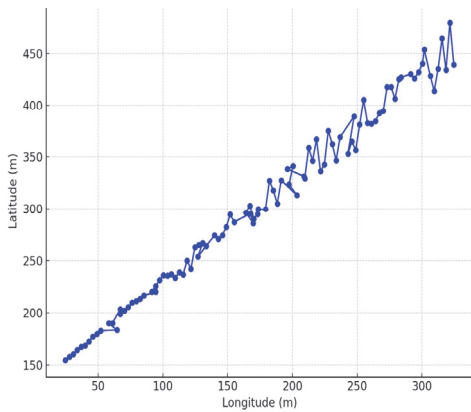


Fig. 4. Simulation Target data of A1 Radar

Table 1. 1 Real Target data of A1 Radar

Time	velocity(m/s)	x	y	z
00:00:01	300.0	45.0	1.0	0.9
00:00:02	301.5	45.5	1.1	1.2
00:00:03	298.5	44.5	1.0	1.4
-	-	-	-	-
-	-	-	-	-
00:03:19	201.5	35.5	1.1	2.2
00:03:20	198.5	34.5	1.0	3.4

시뮬레이션 결과값과 실제 데이터의 비교를 위해 그림 5와 같이 x,y,z의 차이를 비교하여 분석한 결과를 활용하여 이들 간의 차이가 통계적으로 유의미한지 아닌지를 검증하는 것으로 구현 검증을 수행한 결과 시뮬레이션 결과와 실제 데이터 비교하여 차이(Bias)가 0.3% 이하로 RMSE 1.2%로 계산되었다.

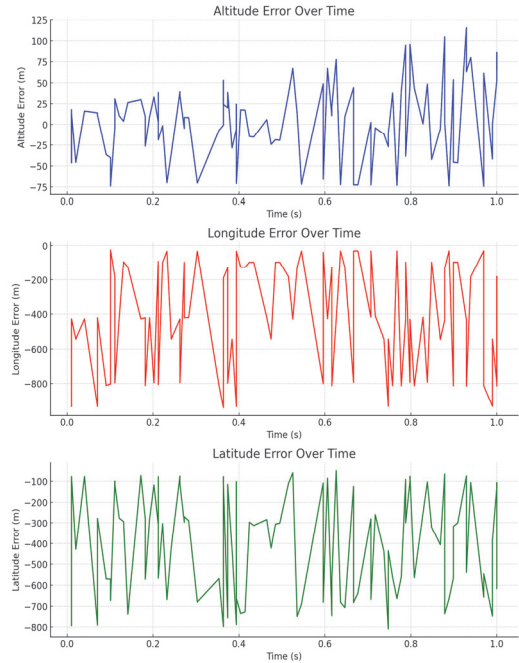


Fig. 5. Comparing differences in results

4.2.2 확인간 통계적 방법 적용 예시

시험평가용 M&S의 사용 의도는 시험대상(A) 체계의 성능 평가이므로 추정치를 통한 가설 검정은 성능 달성 여부를 가설로 설정한다. 실험계획에서 문제 정의 및 시뮬레이션 목표로 초고속 표적에 대한 탐지율을 추정하는 것으로 한다.

시뮬레이션 조건은 초고속 표적(시속 500km~700km)의 이동간 표적과의 거리, 레이더 신호 강도, 반사 단면적(RCS) 변수를 고려한 시뮬레이션을 통해 1번 표적의 데이터를 표2와 같이 도출하였고 5개의 표적의 시뮬레이션 결과는 그림 6과 같다(그림 3의 M&S #2).

Table 2. 1st Target Real data of A Radar

Time	velocity(m/s)	x	y	z
00:00:01	600.0	145.0	11.0	20.9
00:00:02	611.5	145.5	11.1	21.2
00:00:03	598.5	144.5	11.0	21.4
00:03:19	701.5	135.5	11.1	22.2
00:03:20	698.5	134.5	11.0	23.4

결과 확인은 A 체계로 초고속 표적 5개에 대해 M&S 체계로 시뮬레이션한 결과에 대한 타당성 확인이다. 여기서 참조 체계(A1)의 유사 상황 실제 데이터가 있다면 구현 검증에 사용했던 방법으로 일치 여부를 확인할 수 있다. 그러나 대부분 실제 데이터가 없는 경우의 통계적 방법은 가설 검정을 통해 신뢰도와 신뢰 구간으로 설명해야 한다.

실제 데이터가 없는 경우 1단계로 고속에서 생성한 1개 표적 데이터와 초고속으로 생성한 1개 표적에 대하여 중간 구간 민감도 분석을 통해 초고속 표적의 생성을 확인한다. 2단계는 출발과 도착이 다른 5개 표적 데이터는 1개 표적과 동일한 통계값을 갖는지 확인한다. 이때 가설은 표적 추정 데이터의 요구 성능 충족 여부로 선정하여 채택 여부를 결정해야 한다.

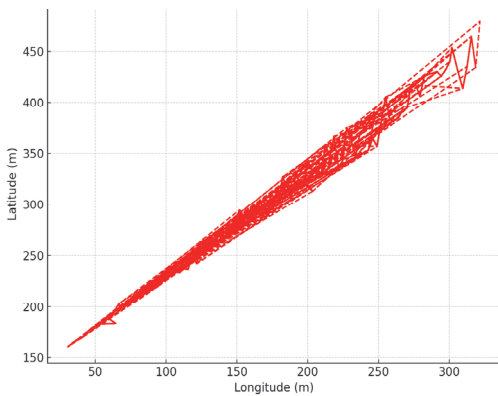


Fig. 6. Simulation 5 Target data of A1

이러한 확인 방법론은 실제 데이터가 없는 경우가 대부분이므로 데이터 및 결과 확인은 전문가의 정성적 판단을 뒷받침하는 정량적 해석이 될 것이다.

5. 결론

M&S는 다양한 분야에서 시스템의 설계, 분석, 그리고 운영을 위해 활용되며, 시간 및 비용을 절감하는 효과를 제공하고 있다. 그러나 M&S를 통해 얻은 결과가 신뢰성을 갖추지 못한다면, 이 결과를 기반으로 한 의사결정이 오류를 초래할 가능성이 높다.

통계적 방법은 변수와 조건, 그리고 요구하는 결정 내용에 따라 매우 다른 적용이 된다. 본 연구에서 최대한 국방 분야로 범위를 좁혀 제안하였으나 예시한 사례가 방법론 전체를 설명하지 못하는 한계가 있다.

통계적 기법은 데이터 분석과 불확실성 관리에 뛰어난

강점이 있으며, M&S에서 발생할 수 있는 다양한 오류 및 불확실성을 정량적으로 분석할 수 있는 도구로 사용될 수 있다. 통계적 기법을 활용하여 M&S의 검증 및 확인 절차를 개선함으로써, 모델의 신뢰성과 결과의 타당성을 더욱 강화할 수 있다. 현재 M&S에서 통계적 기법을 활용한 V&V 연구는 아직 제한적이므로 본 연구가 체계적인 표준화에 기여하기를 기대한다.

References

- Defense Acquisition Program Administration, “M&S Application Manual”, 2019.
- (방위사업청 예규, “M&S 적용 매뉴얼”, 2019)
- U.S.DoD, “M&S VV&A RPG Core Document: An Overview of VV&A of Legacy”, 2011.
- U.S.DoD, “M&S VV&A RPG Core Document: V&V Techniques”, 2011.
- Lee Ye-rim, Lee Sang-jin, and Oh Hyun-sik (2021) “Research on metamodel generation methods for calculating the effectiveness index of direct fire weapon systems”, Korea Simulation Society vol. 30, No. 2, pp. 25-30, 2021.
- (이예림, 오상진, 오현식, “직사화기 무기체계의 무기 효과지수 계산을 위한 메타모델 생성방법 연구”, 한국시뮬레이션학회 논문지, 제30권, 제2호, pp. 25-30, 2021)
- Seon Han Choi, “Application of Resampling Techniques Based on Statistical Hypothesis Testing to Improve the Performance of Particle Cluster Optimization Algorithms in Noisy Environments,” Korea Simulation Society vol. 28, No. 4, pp. 21-32, 2019.
- (최선훈, “노이즈 환경에서 입자 군집 최적화 알고리즘의 성능 향상을 위한 통계적 가설 검정 기반 리샘플링 기법의 적용”, 한국시뮬레이션학회 논문지, 제28권, 제4호, 2019)
- Ojeong Kwon, Hoseok Moon, Chunju Lee, Sunghak Yeon, Doohyun Kim, “A study on method of planning and decision making for test & evaluation using statistical methodology,” Journal of the Military Operations Research Society of Korea, Vol.44 No.2 pp. 11-19, 2018.
- (권오정, 이춘주, 연승학, 김두현, “통계적 방법론을 이용한 시험평가 계획 수립 및 의사 결정 방법 연구”,

한국군사운영분석학회지, 제44권, 제2호, pp. 11-19, 2018)

Sueng-Won Chung, Il-Kuk Jeon, "Statistical Approach for Determining the Number of Tests to Enhance the Reliability of Test and Evaluation Items,"

Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.23 No.11 pp. 352-358, 2022.

(정성원, 전일국, "시험평가 유형별 신뢰도 향상을 위한 통계적 시험횟수 판단", 한국산학협회 논문지. 제 23권, 제11호, pp. 352-358, 2022)

이 동 준 (ORCID : <https://orcid.org/0009-0009-2008-7952> / kopoleon@hansung.ac.kr)



1981 육군사관학교 통계운영전공 학사
1993경북대학교 대학원 경영정보론 석사
2007한성대학교 대학원 산업공학과 박사
2005~ 2016 LIG 넥스원 M&S 연구센터장
2007~ 2021 한성대 대학원, 국방대학원 겸임교수
2013~ 2021 한성대 국방과학대학원 국방 M&S 학과 주임교수
2022~ 현재 한성대 국방M&S인정기술연구원 특임교수

관심분야 : 무기체계 시뮬레이션, VV&A, ABMS

이 상 복 (ORCID : <https://orcid.org/0000-0001-5597-0045> / slee@hansung.ac.kr)



2003고려대학교 산업공학 학사
2006미 퍼듀대학교 산업공학 MSIE
2009미 퍼듀대학교 응용통계학 대학원 수료
2012미 퍼듀대학교 산업공학 박사
2010~ 2012 The Center for Environmental and Regulatory Information Systems, Research Engineer
2014~ 2015 Industrial Engineering at University of New Haven, Assistant Professor
2015~ 현재 한성대학교 산업경영공학과 조교수

관심분야 : 스마트팩토리, 디지털트윈, 시뮬레이션

노 광 현 (ORCID : <https://orcid.org/0009-0002-9391-6052> / khrho@hansung.ac.kr)



1995고려대학교 산업공학과 학사
1997고려대학교 산업공학과 석사
2001고려대학교 산업공학과 박사
2002~ 2006 한국전자통신연구원 이동기술사업단 연구원
2006~ 2007 한국항공우주연구원 위성기술사업단 선임연구원
2007~ 현재 한성대학교 교수

관심분야 : 인공지능, 자율주행, 국방M&S

윤 주 일 (ORCID : <https://orcid.org/0000-0001-6818-5222> / juiyoon@hansung.ac.kr)



1994연세대학교 기계공학과 학사
1996연세대학교 기계공학과 석사
1996~ 2000 현대중공업 중앙연구소 선임연구원
2005 University of Alberta Mechanical Eng. 박사
2005~ 2008 Harvard University Post Doc & Research Scientist
2008~ 현재 한성대학교 기계전자공학부 교수

관심분야 : 기계설계, 구조해석, 국방M&S

