

M&S의 V&V활동에서 통계기법을 통한 신뢰성 확보 연구

이동준*, 김용선, 이상복, 노광현, 윤주일

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

Dongjoon Lee, Yongseon Kim, Sangbok Lee, Kwa nghyun Ro, Juil Yoon

Abstract

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 가설 검정, 실험 설계(DoE)와 회귀분석, 신뢰구간 등의 통계적 기법을 사용하는 방안을 제시한다.

Key Words : 검증 및 확인, 모델링 시뮬레이션, 통계적 방법

1. 서론

모델링 시뮬레이션(Modeling and Simulation, M&S)은 실제 상황을 재현하거나 현실에서 수행하기 어려운 복잡한 시스템의 예측 및 의사결정을 지원하기 위한 중요한 도구로 사용되고 있다. M&S의 결과에 대한 신뢰성 확보는 필수적인데 특히, 모델링의 정확성, 구현된 시뮬레이션 도구의 성능, 그리고 결과의 적합성을 평가하는 검증 및 확인(V&V, Verification & Validation) 과정이 핵심이다.

국방분야의 경우 시험평가에 활용하는 M&S의 경우에는 그 결과가 미치는 영향이 매우 중대하므로 실물시험이 아닌 M&S로 대체시에는 심도 있는 V&V활동이 필요하다.

본 연구에서는 기존의 V&V 과정에서 주로 사용되던 경험적, 주관적 판단을 보완하기 위해, 통계적 추정과 검증 기법을 제시하고자 한다. 이를 통해 M&S 도구와 결과에 대한 객관적이고

정량적인 평가를 수행함으로써, 보다 신뢰성 있는 M&S 결과를 도출하는 것이 목표이다.

2 신뢰성 확보를 위한 통계적 방법

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 입력 값이 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 기법 중 하나이다.

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.

2.3 회귀 분석(Regression Analysis)

회귀 분석은 종속 변수와 하나 이상의 독립 변수 간의 관계를 모델링하고, 이를 통해 결과를

* 이동준, 한성대 국방M&S인정기술연구원, 교수,

kopoleon@hansung.ac.kr

김용선, 한성대 국방 M&S인정기술연구원, 연구위원

이상복, 한성대학교 산업시스템 공학부, 교수

노광현, 한성대학교 AI응용학과, 교수

윤주일, 한성대학교 기계전자공학부, 교수

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.

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.

3. M&S V&V에서의 통계 기법 적용

3.1 M&S 도구의 구현 검증(Verification)

구현 검증(Verification)은 시뮬레이션 모델이 원래 설계 및 개발 의도에 맞게 정확하게 구현되었는지를 확인하는 과정이다. 구현 검증과 이에 포함되는 데이터 검증은 모델의 개발자나 엔지니어가 모델의 구조, 코드, 알고리즘을 확인하고, 주어진 시나리오에서 모델이 요구된 사양에 따라 작동하는지를 평가한다. 즉, 검증은 모델이 정확히 구성되었는가에 초점을 맞추며, 모델 내부의 논리적 일관성과 기능적 완전성을 점검하는 활동이다.

무기 체계의 시험 평가 과정에서, 실제로 많은 시험항목이 요구되지만, 여러 가지 현실적인 제약 때문에 일부는 제한된 범위에서만 수행할 수 있다. 제한된 실험시험 데이터로 더 많은 다양한 시험이 필요할 때 M&S를 사용하므로, 이 M&S는 실험시험과 동일한 시나리오에서 동일한 결과가 출력되는지를 통해 시뮬레이션 모델을 검증한다. 예를 들어, 실험시험은 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 정확성을 검증할 수 있다.

따라서 검증의 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.

또한 기본적으로 구현 검증은 모델의 내부적인

정확성을 보장하는 과정이며, 주로 개발된 도구나 코드가 의도한 대로 작동하는지를 확인하는 것을 전제로 한다.

3.2 M&S 실행의 결과 확인(Validation)

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.

무기 체계 시험 평가에서 실제로 모든 시나리오를 시험하기 어렵기 때문에, 예를 들어 다수의 표적을 대상으로 한 테스트는 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 실험시험이 없는 상태에서 M&S의 결과가 현실적인지를 판단해야 한다. 따라서 통계적 기법을 통해 M&S 결과에 대한 불확실성을 평가하고, 모델이 적절한 결과를 도출하는지를 확인한다. 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation)을 사용하여 다양한 시나리오에서 결과의 분포를 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 변수들이 함께 평가되는 경우에도 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 타당성을 평가하는 데 중점을 둔다.

4. 시험평가용 M&S V&V 활동 예시

국방M&S 관련 규정(적용 매뉴얼)에 의거 시험평가용 M&S는 VV&A (Verification, Validation, and Accreditation) 절차를 적용하고 있다. VV&A 절차는 모델이 정확하게 구현되었는지와 모델이 현실 세계를 올바르게 반영하는지를 평가하는 과정을 거쳐, 최종적으로 모델이 적합한 용도로 사용될 수 있음을 인정(A)하는 단계로 이루어진다.

4.1 시험평가용 M&S의 신뢰성 확보 범위

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 시험으로 획득가능한 실제 데이터로 M&S 모델 검증 후, 통계 기법을 사용해 극한 성능 추정하는 것이다. 두 번째로는 충분한 시험 횟수 보강이다. 실제 테스트 횟수 부족 시, 시물레이션 데이터와 결합해 최소 시험 횟수로 결과를 추정하는 것이다. 세 번째로는 가상 데이터 기반의 시험이다. 실제 시험이 불가능한 상황에서 통계적 기법 기반으로 AI 및 가상 데이터를 통해 다양한 상황 변화 및 적 표적에 대한 대응 평가를 하는 것이다.

이를 위해 일반적으로 다음 그림 1과 같이 목적과 여건에 따라 시험대상 무기체계와 상호작용이 필요한 체계 및 환경에 대한 모델링 범위는 시험평가 항목에 부합되도록 한다.

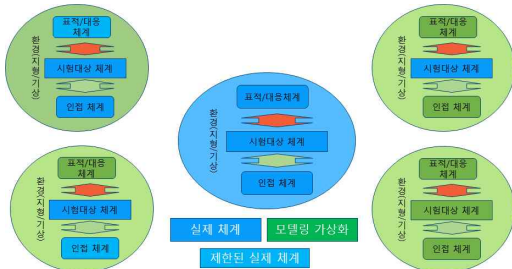


그림 1 시험평가용 M&S의 가상화 모델링

시험평가용 M&S의 검증과 확인을 위해서는 그림 2와 같이 5개의 상황 즉, 실물시험, 이와 동일한 M&S, 참조로 활용할 체계의 시험평가용 M&S 결과, M&S를 활용한 시험평가, 그리고 실제 작전 상황을 모두 정밀하고, 타당하게 정의하여 필요한 모델과 데이터를 식별하고 생성 및 수집을 해야한다.



그림 2. M&S의 검증과 확인 대상

4.2 검증 및 확인 활동(예시)

시험평가용 M&S의 경우 재사용이나 재활용이 많은데 예를 들어 XX급 A레이더 체계의 시험평가용 M&S 체계를 개발하는 경우에 참조 M&S 체계로 현재 전력화 운용중인 XXX급 A레이더 체계의 시험평가용 M&S체제로 할 수 있다.

참조체계의 M&S에 의한 시험평가 항목 중 일

부는 재활용하고 일부는 신규로 추가하는 경우에 다음과 같이 검증 및 확인을 한다.

요구사항 검증은 재사용, 재활용, 수정, 신규로 구분하여 요구사항 재정의 타당성을 검증한다. 시험평가 항목별 참조(선행, 유사)체계와의 요구사항 차이를 분석하여 구분 및 재정의 내용에 대한 타당성을 검증한다.

개념모델 확인은 개념모델의 수정 및 추가 부분에 대한 실제와의 적합성 확인으로 참조체계에 활용한 개념모델의 수정 및 추가 부분 식별 및 실 세계 반영의 적합성 확인하는 것이다.

설계 검증은 개념모델 수정 및 추가 부분에 대한 설계 반영여부와 기존 재사용 및 재활용의 통합 추적성 검증으로 기 활용 M&S 체계의 형상변경 내용의 분석 및 코드 수정 소요의 반영의 추적성, 통합의 구현 가능성을 검증한다.

구현 검증은 완성된 M&S 체계의 안정성, M&S 체계 요구사항의 충족성에 대한 검증으로 설계대로 개발 및 동작여부 검증 및 신뢰성을 시험하고, 통합시험으로 입력값 범위내 가능여부, 예상된 범위내 출력값 여부를 검증한다.

결과 확인은 시험평가항목별 시물레이션 결과 제공의 완전성, 정확성, 타당성을 확인하는 것으로 시험평가 항목별 시험평가 가능여부와 결과값의 타당성을 확인하고 M&S 요구사항의 충족성을 확인한다.

5. 결론

다양한 분야에서 M&S는 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 기법은 데이터 분석과 불확실성 관리에 뛰어난 강점을 가지고 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.

참고문헌

- [1] 박주혜, “시험평가를 위한 M&S의 V&V 프로세스에 관한 연구”, 한국산학협력학회지, 제20권, 제9호, pp. 397-404, 2019.
- [2] U.S.DoD, “M&S VV&A RPG Core Document: An Overview of VV&A of Legacy”, 2011.