Journal of the The Korean Institute of Defense Technology Vol. 01, No. 1, pp. 001-003, 2018

시험평가용 M&S V&V 과정에서의 통계 기법 적용 연구

Study on the Application of Statistical Techniques in the M&S V&V Process for Test & Evaluation

이동준*,1), 김용선1), 이상복2), 노광현3), 윤주일4)

Dongjoon Lee*,1), Yongseon Kim1), Sangbok Lee2), Gwanghyun Roh3), Juil Yoon4)

[초 록]

본 연구에서는 모델링 및 시뮬레이션(M&S)을 이용한 시험 평가의 검증(Verification) 및 확인(Validation) 과정에서 통계적 기법을 적용방안을 제시한다. V&V 과정에서 산출되는 다양한 시험결과값의 특성에 따른 예시를 중심으로 시험항목에 따라 적용이 필요한 각 사례에서의 데이터수집, 처리, 결과해석을 제시하였다. 시험평가시 M&S 적용의 확대가 필요하지만 결과값의 신뢰성 확보가 필수적이다. 본 연구를 통해 시험평가용 M&S의 신뢰성을 확보함으로써 시험평가간 다양한 M&S 적용이 활성화되기를 기대한다.

[ABSTRACT]

In this study, we propose a method of applying statistical techniques in the verification and validation process of test evaluation using modeling and simulation (M&S). We present data collection, processing, and result interpretation for each case that requires application according to the test items, focusing on examples according to the characteristics of various test results produced in the V&V process.. It is necessary to expand the application of M&S in test evaluation, but it is essential to secure the credibility of the results. Through this study, it is expected that the credibility of M&S for test evaluation will be secured and various M&S applications will be activated in test evaluation.

Key Words : 모델링 시뮬레이션(Modeling&Simulation), 검증 및 확인(Verification&Validation), 시험평가(Test&Evaluation)

1. 서 론

모델링 및 시뮬레이션(Modeling and Simulation, M&S)은 복잡한 시스템의 성능을 평가하고 다양한 시나리오를 실험할 수 있는 강력한 도구로, 특히 무기체계 시험평가에 적용하는 경우에는 매우 효과적이라 할 것이다. 무기체계의 시험평가에 M&S를 활용하면 실제 장비나 무기 체계를 운용하는 과정에서 발생하는 비용과 안전 위험을 줄일 수 있으며, 현실적으로 실험이 어려운 조건에서도 신뢰성 있는 평가가 가능하기 때문이다. M&S의 신뢰성을 확보하기 위한 검증(Verification) 및 확인(Validation, V&V) 과정 또한 필수적이며, 선진국에서는 V&V를 통해 사용의도의 충족여부를 공식적으로 결정하는 인정(Accreditation)절차[1]를 적용하고 있으며, 국내에서도 검증, 확인 및 인정(VV&A) 절차[2]를 적용하고 있다. 미 국방부이 V&V 기법 실무가이드북[3]에는 75개의 V&V 기법과 18개의 통계기술을 예시하고 있으며. 국내에서도 이를 참조로 적용하고 있으나 통계 기술의 적용은 미흡한 실정이다. 실물시험을 하는 시험평가시 통계적 기법을 적용하는 방법에 대한 연구는 다수 연구되어왔으나 M&S를 활용한 결과값 분석이나 V&V의 기술로 적용하는 구체적인 방법에 대한 연구는 많지 않은 편이다.

본 연구의 목적은 시험 평가 과정에서 실물 시험이 어려운 항목에 활용하는 M&S 도구와 그 결과값의 신뢰성을 확보하기 위한 통계기법을 적용하는 V&V 방법론을 제시하는 데 있다. 설계와 제작을 위한 과학적 분석 수단으로 활용되는 M&S는 확보가능한 실제 또는 유사 데이터의 활용을 통한 검증 및 확인으로 신뢰성을 확보하며, 다양한 분석과 추정을 하고 있다.

1) 한성대학교 국방M&S인정기술연구원(The Defense Institute of Accreditation Technology Research, Hansung University, Korea)
2) 한성대학교 산업시스템 공학부 교수
3) 한성대학교 AI응용학과 교수
4) 한성대학교 기계전자공학부 교수
* Corresponding author,
E-mail:kopoleon@hansung.ac.kr
Copyright ⓒ The Korean Institute of Defense Technology
Received : Revised :
Accepted :

그러나 무기체계의 경우 실제 시험이 불가능한 경우에 M&S의 활용을 권장하지만 이를 검증 및 확인하는 실제 데이터를 충분히 확보하기가 어렵다.

본 연구의 실효성을 위하여 기동 체계(도하 장비), 지휘통제 체계(전술 C4I 체계), 감시 및 정찰 체계(감시 레이다), 정밀 타격 체계(대공 유도 무기) 등 예시로 제시하였으나 해당 무기 체계로 제한하지 않고 시험항목의 특성에 따라 통계적 기술은 적용되어야할 것이다.

2. 관련 연구 및 현황

2.1 무기 체계 시험 및 평가에서 M&S의 역할

무기 체계의 시험 및 평가(Test & Evaluation, T&E)는 그 복잡성과 비용, 그리고 위험성으로 인해 매우 중요한 과정으로, 이 과정에서 모델링 및 시뮬레이션(Modeling & Simulation, M&S)은 필수적인 역할을 수행한다. 전통적으로 무기 체계의 성능을 확인하고 안전성을 검증하기 위해 실물 실험이 주로 사용되었으나, 이러한 실험은 비용이 많이 들고, 시간과 자원이 많이 소모되며, 실제 테스트 환경을 완벽히 재현하기 어려운 경우가 많다. 이에 따라 M&S는 무기 체계 T&E에서 중요한 도구로 자리잡게 되었다.

M&S는 무기 체계의 동작과 성능을 가상 환경에서 모의 실험함으로써 실제 시험의 복잡성을 줄이고, 다양한 환경과 시나리오에서 시스템을 평가할 수 있는 기회를 제공한다. 예를 들어, 다양한 전장 환경에서의 무기 성능을 평가하거나, 극한의 온도, 압력, 기후 조건에서의 시스템 반응을 분석할 수 있다. 이는 실물 실험으로는 어려운 상황을 시뮬레이션을 통해 재현함으로써, 무기 체계의 설계 및 작동 원리의 검증을 가능하게 한다.

또한, M&S는 실물 테스트 전에 무기 체계의 설계 단계를 평가할 수 있도록 하여, 조기 오류 발견 및 수정에 기여한다. 이는 개발 과정에서의 리스크를 줄이고, 개발 비용과 시간을 크게 절감할 수 있는 장점을 제공한다. 궁극적으로 M&S는 무기 체계의 효율적인 시험과 평가를 통해 체계의 신뢰성을 높이고, 더 나아가 국방 예산 절감에도 기여할 수 있다.

2.2 V&V의 주요 기법

미국 국방부 가이드북[3]에서 제시하는 V&V의 주요 기법은 비정형(Informal), 정형(Formal), 정적(Static), 동적(Dynamic) 기법 등 4가지 범주로 분류하고 있다.

비정형 V&V 기법은 가장 일반적으로 사용되는 기술로 도구와 접근 방식이 엄격한 수학적 형식보다는 인간의 추론과 주관성에 크게 의존하는 기법이다.

정형적 V&V 기법은 형식을 갖춘 수학적 증명으로 정확성을 확보하는 방법으로 상당한 노력이 필요하고 간단한 방법으로는 처리할 수 없는 복잡한 문제에는 적용이 필요하다.

정적 V&V 기법은 정적 모델 설계 및 소스 코드의 정확도를 평가하는 것으로 모델의 실행이 필요하지 않지만 많은 자동화 도구를 사용할 수 있다. 일반적으로 정적 기법은 모델의 구조, 사용된 모델링 기법, 모델 내의 데이터 및 제어 흐름, 구문 정확도에 대한 다양한 정보를 확인하는 방법이다.

동적 V&V 기법은 모델 실행 동작에 따라 모델을 평가한다. 입출력이 가능한 모델을 실행하여 모델 출력을 분석하고 동적 모델 동작을 평가하는 것이다. 운용 시나리오에 의한 실행이전에 필요한 기본적인 동적시험에는 자동화 도구도 활용된다.

2.3 국내 M&S V&V 관련연구

2.3.1 실제 시험평가에서의 통계적 방법 적용

비용 및 기간 등의 제한에 의해 발생하는 실제시험의 횟수 제한을 극복하기 위해 통계적 방법을 적용해 시험횟수를 결정하고 있다. 시험횟수에 대한 주요 연구로는, 실제시험 수량을 결정할 때 통계적 관점에서 적정 신뢰수준으로 고려한 이항확률분포를 적용하는 것이 합리적이라는 연구[4], 시험수량을 결정할 때 신뢰수준을 결정하고 요구명중률과 표본오차를 고려한 해야 한다는 연구[5], 실제시험 횟수 산정에 적용할 적정 신뢰수준을 산정하기 위한 미군 및 한국군 등의 기준을 비교한 결과 60%의 신뢰수준 적용이 적절하다는 판단을 제시한 연구[6], 통계적인 방법을 고려해 합격률을 결정하고 적정 시험횟수를 결정할 때 유의수준(허용오차), 검정력, 표본오차, 효과크기(유효크기)를 고려해야 한다는 연구[7] 등이 있다. 위 연구들의 공통점은 시험평가 횟수를 결정하기 전 명중률 또는 합격률을 설정해야 한다는 것으로 시험평가의 결과를 판정할 때에 중요한 요소로 작용한다.

2.3.2 M&S 시험평가에서의 통계적 방법 적용

비용 및 기간 등의 제한에서 실제 시험보다는 자유로운 방법인 M&S 시험평가에 대한 통계적 방법의 주요 연구는 신뢰성 보장에 중점을 두고 있다. AWAM(Army Weapon effectiveness Analysis Model, 지상무기효과분석모델)의 최소 반복수행횟수는 신뢰성 있는 결과를 획득하기 위해서 1500회 이상의 시뮬레이션을 반복수행해야 한다고 실험을 통해 제시했다[8].

2.3.3 시험평가 신뢰도 향상을 위한 유형별 적용

기존의 통계적으로 신뢰할 수 있는 적정 시험 횟수 판단에 대하여 최근 연구에서 유형별로 횟수를 제안한 연구가 있는데, 시험평가 유형을 세 가지(평균과 기준 비교, 성공률 검증, 3개 이상 집단의 평균 비교)로 구분하여 평균과 기준을 비교시에는 Wilcoxon 부호순위 검정의 횟수, 성공률 검증시에는 정확 방법(Exact method)의 횟수, 3개 이상 집단의 평균 비교시에는 분산분석의 가정을 만족할 시에는 ANOVA(Analysis of variance, 분산분석)를 적용하고 그 이외의 경우에는 Kruskal-Wallis 방법이 적절하다고 제시했다[9].

2.4. 시험평가 결과 판단에서의 통계적 방법 적용

시험평가 결과 판정시 정량적인 기준과 정성적인 기준으로 인한 일부 불협화음이 존재한다. 예를 들어, 정량적인 기준은 '최대사거리 40km 이상인 요구사항에 대해 39.97km를 달성하여 불합격'인 상황을 들 수 있고, 정성적인 기준은 '군운용 적합성의 용이성과 적절성'이 사람에 따라 다른 기준일 수 있다는 것이다. 이러한 상황을 개선하기 위해 사업 초기에 '개발 목표에 대한 허용오차'와 '정성적 평가 항목에 대한 수치화 설

정'을 제시했다[10].

3. V&V 과정에서의 통계 기법

3.1. 제안하는 방법론

실제 시험 평가가 제한된 상황에서 M&S 결과로 시험평가하기위해서는 신뢰성이 확보되어야한다. 이를 검증하고 확인하기 위한 방법은 다음과 같다.

첫째 최고 성능, 극한 조건 등에 대한 시험이 필요하나, 제한된 실제 시험만 가능한 경우이다. 무기 체계 개발 중 실제 시험 평가가 제한된 경우, 예를 들어 100km/s 속도로 테스트 할 수 없고 70km/s 속도로만 가능한 경우, 해당 실제 테스트 데이터를 활용하여 M&S 모델을 검증하고 이를 바탕으로 100km/s의 성능을 추정하는 방법으로 통계적 기법을 적용한다. 이 방법은 실제 데이터를 사용해 M&S의 신뢰성을 높이고, 이를 통해 추가적인 성능 추정을 가능하게 한다.

둘째, 충분한 시험 횟수, 4계절 시험 등의 반복이 필요한 경우로 예를 들면 최소 30회 시험 평가 결과 추정이 필요하나 일반적으로 무기 체계 시험에서는 최소 30회 이상의 반복 테스트가 필요하지만, 물리적 시험이 불가능한 경우 M&S를 통해 30회 테스트 결과를 추정할 수 있는 방법을 제안한다. 이는 제한된 실제 테스트 결과와 시뮬레이션 결과를 결합한 통계적 기법을 통해 가능하다.

셋째는 실제 시험이 불가능한 경우에 가상 데이터 기반으로 시험해야 하는 경우이다. 실제 시험시에도 적이나 표적의 임의 운용에 대한 대응, 다양한 상황변화에 대한 대응은 시험이 불가능하다. 이때에 사용하는 M&S 검증은 인공지능 기반으로 실제 데이터를 사용할 수 없는 상황을 가정하고, 가상의 데이터를 통해 M&S 결과를 검증하는 방법을 적용해야한다. 이 경우는 M&S가 현실적인 상황을 얼마나 정확하게 모사할 수 있는지 평가해야한다.

3.2 통계기법 적용에 대한 분석

3.2.1 회귀 분석

회귀 분석은 도하 장비와 같은 기동 체계에서 제한된 실제 데이터를 기반으로 성능을 추정하는 데 매우 유용한 기법이다. 본 연구에서는 제한된 도하 실험 데이터를 사용하여 다양한 유속 조건에서 이동 성능을 추정한다. 회귀 분석을 통해 실제 도하 시간과 M&S 추정 결과 간의 관계를 모델링한 결과, 두 데이터 간 차이가 통계적으로 유의미하지 않는다면, 이를 통해 M&S가 실제 성능을 신뢰성 있게 반영하고 있음을 확인할 수 있다. 회귀 분석의 장점은 연속형 변수를 다루는 데 있어 추정 능력이 뛰어나며, 다양한 시나리오에서 성능을 확장하여 평가할 수 있다는 점이다. 특히 실제 테스트가 비용이나 시간의 제약으로 인해 제한될 경우, 회귀 분석은 추정의 정확도를 높이는 도구로 효과적으로 활용될 수 있다. 다만, 충분한 양질의 데이터를 확보할수록 추정의 신뢰성이 더욱 높아진다.

3.2.2 카이제곱 검정

카이제곱 검정은 범주형 데이터 간의 일관성을 평가하는 데 적합한 통계 기법으로, 전술 C4I 체계에서 M&S 결과와 실제 통신 성공률을 비교하는 데 사용할 수 있다. 이 기법은 M&S가 추정한 통신 성공률과 실제 성공률 간의 차이가 통계적으로 유의미한지를 분석하여, 전술 네트워크의 성능을 검증하는 데 중요한 역할을 할 수 있다. 두 데이터 간 차이는 통계적으로 유의미하지 않음이 확인되면 이는 M&S가 실제 통신 성능을 정확하게 반영하고 있음을 시사한다. 카이제곱 검정의 장점은 이진 데이터나 범주형 데이터를 효과적으로 다룰 수 있다는 점이며, 전술 C4I 체계과 같은 통신 체계의 성공/실패 데이터를 평가하는 데 매우 적합하다. 다만, 이 기법은 연속형 데이터에는 적용할 수 없으며, 데이터가 충분히 확보되지 않은 경우 통계적 검증의 한계가 있을 수 있다.

3.2.3 분산 분석

분산 분석(ANOVA)은 세 그룹 이상의 평균 차이를 비교하는 데 유용한 통계 기법으로, 감시 레이더 체계의 다양한 거리 및 기상 조건에서 탐지 성능을 평가하는 데 적용되었다. 이 기법을 통해 M&S 추정 결과와 실제 데이터 간의 성능 차이를 다양한 조건에서 분석한 결과, 특정 거리에서 약간의 차이는 있었으나 전반적으로 M&S가 실제 성능을 잘 반영하고 있음이 확인되었다. 분산 분석의 강점은 여러 그룹 간의 평균 차이를 효과적으로 비교할 수 있다는 점이다. 이는 감시정찰 체계처럼 다양한 환경 조건에서 성능 평가가 필요한 경우 매우 유용하다. 그러나 분산 분석은 그룹 간의 분산이 클 경우 결과 해석이 어려워질 수 있으며, 데이터가 균등하게 분포되어 있지 않은 경우 통계적 정확도가 떨어질 수 있다는 한계가 있다.

3.2.4 베이지안 추정

베이지안 추정은 기존 데이터와 새로운 데이터를 결합하여 추정 성능을 강화하는 통계 기법으로, 대공 유도 무기에서 실제 데이터가 제한된 상황에서도 M&S 결과를 업데이트하고 신뢰성 있는 성능 평가를 수행하는 데 사용되었다. 10회의 실제 사격 시험 데이터를 바탕으로 500회 M&S 추정 데이터를 보완하여 타격 정확성을 더욱 신뢰성 있게 추정한다. 베이지안 추정의 주요 장점은 사전 확률과 새로운 데이터를 결합하여 불확실성을 줄이고 추정의 신뢰도를 높일 수 있다는 것이다. 이는 특히 제한된 실제 데이터를 보완하는 데 매우 유용하며, M&S의 성능을 강화하는 데 효과적이다. 그러나 베이지안 추정은 사전 확률 설정에 오류가 있는 경우, 초기 가정이 결과에 미치는 영향을 신중히 고려해야 한다는 한계가 있다.

3.3 무기체계별 적용 예시

3.3.1 기동 체계(도하 장비)

제한된 실제 도하 시험 데이터를 활용하여, 다양한 환경에서 도하장비의 성능을 추정하는 M&S 검증. 회귀 분석을 통해 다양한 지형에서 성능을 추정하고, 신뢰 구간을 산출한다

1) 사용의도

회귀 분석은 도하 장비의 성능을 추정하기 위한 중요한 통계 기법으로, 도하 성능 데이터를 바탕으로 고유속 환경에서 이동 성능을 추정하는 데 사용된다. 특히, 제한된 실제 시험 데이터를 활용하여 다양한 유속 조건에서 얼마나 효율적으로 도하할 수 있는지를 추정할 수 있다. 이 방법은 실제 시험이 불가능하거나 위험한 상황에서 M&S를 통해 정확한 성능 추정

을 가능하게 한다.

2) 통계기법 설명

회귀 분석은 변수 간의 관계를 모델링하여 한 변수가 다른 변수에 미치는 영향을 분석하는 기법이다. 자주포 도하 장비의 경우, 도하 성능(시간, 속도 등)을 설명 변수로 사용하고, 고유속 조건에서의 성능을 종속 변수로 하여 회귀 모델을 구축한다. 이를 통해 M&S를 통해 추정된 성능이 실제 데이터와 얼마나 일치하는지를 분석하고, 추가적인 유속 조건에서 성능을 추정할 수 있다.

3) 적용 방법

가) 데이터 수집 : 실제 도하 성능 데이터를 바탕으로 회귀 분석을 수행한다. 유속이 다른 여러 환경에서 수집된 도하 시간 및 속도 데이터를 기반으로 추정 모델을 구성한다.

나) 모델 구축 : 고유속 환경에서 도하 성능을 추정하기 위해 회귀 방정식을 생성한다. 예를 들어, 유속(X)과 도하 시간(Y)의 관계를 분석하여, X의 변화에 따라 Y가 어떻게 변화하는지 추정하는 모델을 만든다.

다) 추정 : 고유속 환경에서 실험이 제한될 경우, 회귀 모델을 활용하여 추정된 도하 성능을 평가하고, 그 결과의 신뢰 구간을 계산하여 모델의 추정력을 보완한다.

4) 예시

실제 도하 성능 데이터를 통해 유속 Am/s에서 평균 도하 시간이 12분, 유속 Bm/s에서 15분이라고 가정한다. 이를 바탕으로 회귀 모델을 구축한 후, 유속이 Cm/s일 때 도하 시간이 18분일 것으로 추정할 수 있다. 회귀 분석을 통해 다양한 유속에서의 성능을 추정하고, 이를 통해 실제 시험을 대체하거나 보완하는 결과를 도출할 수 있다.

5) 신뢰 구간 계산

회귀 분석을 통해 추정된 결과의 신뢰 구간을 산출하여, 추정된 성능이 실제로 어느 범위 내에서 일어날지를 평가한다. 예를 들어, 유속 Cm/s에서 도하 시간이 18분으로 추정되었다면, 신뢰 구간을 계산하여 ±2분 내에서 실제 도하 성능이 발생할 가능성을 평가할 수 있다. 이는 추정의 불확실성을 최소화하고, M&S의 신뢰성을 높이는 데 기여한다.

이러한 회귀 분석 기법을 활용하면, 도하 장비의 도하 성능을 다양한 유속 조건에서 추정할 수 있으며, 이를 통해 실제 시험의 한계를 보완하고, 성능 평가의 신뢰성을 높일 수 있다.

3.3.2 지휘통제 체계(전술 C4I 체계)

제한된 실제 송수신 데이터를 활용하여 전술 C4I 체계 (지휘통제 체계)의 성능을 추정하는 M&S에 대해서는 실제 데이터와의 차이를 분석하여 카이제곱 검정(Chi-Square Test)기법을 사용하여 M&S의 신뢰성을 확보한다.

1) 사용의도

전술 C4I 체계에서 M&S를 통해 추정된 통신 성공률과 실제 네트워크 데이터의 통신 성공률 간의 일관성을 평가하는 것이 목적이다. 이를 통해 M&S가 실제 네트워크 통신 성공률을 얼마나 정확하게 반영하는지 검증하고, 두 데이터 간의 차이가 통계적으로 유의미한지를 확인한다.

2) 통계기법 설명

카이제곱 검정(Chi-Square Test)은 두 범주형 변수 간의 분포 차이를 평가하는 데 사용되는 통계 기법이다. 전술 C4I 체계에서는 M&S 결과와 실제 데이터에서의 통신 성공 및 실패 횟수를 비교하여, 두 그룹 간의 성공률 분포가 유의미하게 다른지를 검증할 수 있다. 이 기법은 두 집단의 성공/실패 데이터 빈도를 비교함으로써, M&S가 실제 성능을 얼마나 잘 반영하는지 평가하는 데 적합하다.

3) 적용 방법

가) 데이터 수집: 실제 전술 네트워크에서의 통신 성공률과 M&S로 추정된 성공률 데이터를 수집한다. 예를 들어, 여러 통신 시나리오에서의 성공 횟수와 실패 횟수를 기록한다.

나) 모델 비교: 카이제곱 검정을 사용하여 M&S에서 추정된 성공률과 실제 네트워크에서 관측된 성공률을 비교한다. 이 과정에서 성공/실패 데이터를 범주화하여 두 집단 간의 빈도를 비교한다.

다) 유의미성 평가: p값을 통해 M&S 결과와 실제 데이터 간 차이가 통계적으로 유의미한지 평가한다. 만약 p값이 0.05보다 크면 두 집단 간 차이는 유의미하지 않다고 판단할 수 있다.

4) 예시

예를 들어, M&S에서 추정된 통신 성공률이 80%이고, 실제 데이터에서 측정된 성공률이 75%인 경우, 두 그룹 간 성공/실패 데이터를 비교하여 차이가 유의미한지를 검토한다. M&S에서 80회의 성공과 20회의 실패가 추정되었고, 실제 데이터에서 75회의 성공과 25회의 실패가 측정되었다면, 카이제곱 검정을 통해 두 데이터의 차이가 유의미한지를 확인할 수 있다.

유의수준 0.05에서 p값이 0.05보다 크다면, M&S 결과와 실제 데이터 간의 차이는 통계적으로 유의하지 않으며, 이는 M&S가 실제 네트워크 성능을 잘 반영하고 있음을 의미한다. 반대로 p값이 0.05보다 작으면, 두 데이터 간 차이가 유의미하며 M&S가 실제 성능을 정확히 반영하지 못할 가능성이 있다는 결론을 도출할 수 있다.

3.3.3 감시정찰 체계(감시 레이더)

감시 레이더 체계는 M&S를 통해 다양한 거리와 기상 조건에서 다수의 표적을 탐지하는 성능을 추정하기위해 분산 분석(ANOVA, Analysis of Variance)을 통해 M&S 신뢰성을 평가할 수 있다.

1) 사용의도

감시 레이더 체계에서 다양한 거리에서 표적을 탐지한 데이터를 바탕으로 M&S를 통해 다수 표적을 탐지하는 성능을 추정하고, 다양한 조건에서 M&S가 실제 성능을 얼마나 정확히 반영하는지를 평가하는 것이 목적이다. 이를 통해 다수 표적 탐지 결과와 다양한 거리 탐지의 일관성을 확보하고, 다수 표적 탐지 M&S 신뢰성을 확인한다.

2) 통계기법 설명

분산 분석(ANOVA)은 세 그룹 이상의 평균 차이를 분석하는 통계 기법으로, 감시 레이더 체계의 탐지 성능을 거리, 기상 조건 등 여러 요인에 따라 비교하는 데 적합하다. 다양한 거리 표적을 탐지한 데이터를 기반으로 다수 표적 탐지 상황에서 M&S 결과를 추정하고, 그 차이를 분석하여 M&S가 실제 성능을 일관되게 반영하는지 확인할 수 있다.

3) 적용 방법

가) 데이터 수집: 다양한 거리(예: 10km, 20km, 30km)와 기상 조건에서 소수 표적을 탐지한 탐지 데이터를 바탕으로 다수 표적을 탐지한 M&S 결과를 산출한다.

나) 모델 비교: M&S 결과와 탐지 데이터를 다양한 조건에서 비교하기 위해 분산 분석을 수행한다. 이를 통해 거리와 기상 조건에 따라 표적 탐지 성능 차이를 평가하고, M&S의 신뢰성을 확인한다.

다) 유의미성 평가: ANOVA를 통해 각 조건에 따른 M&S 결과와 탐지 데이터 간의 성능 차이가 통계적으로 유의미한지 p값을 통해 평가한다. p값이 0.05 미만일 경우, M&S 결과와 탐지 데이터 간의 차이가 유의미하다는 결론을 내릴 수 있다.

4) 예시

예를 들어, 탐지 데이터에서 10km, 20km, 30km 거리에서 각각 소수 표적을 탐지한 데이터가 수집되었고, M&S에서는 다수 표적을 탐지한 결과를 산출하면, ANOVA를 통해 거리별 성능 차이를 분석할 수 있다. 탐지 데이터에서 10km에서 탐지 성공률이 85%, 20km에서 78%, 30km에서 68%로 나타났고, M&S에서는 10km에서 90%, 20km에서 80%, 30km에서 70%로 추정되었다면, 두 데이터 간의 성능 차이를 ANOVA로 분석하여 M&S의 신뢰성을 평가한다.

p값이 0.05 미만이면, 조건에 따라 M&S 결과와 실제 데이터 간의 성능 차이가 유의미함을 의미하며, M&S의 결과가 실제 성능을 충분히 반영하지 못할 가능성이 있음을 시사한다. 반면, p값이 0.05보다 크면 M&S 결과와 실제 데이터 간 차이는 통계적으로 유의미하지 않으며, M&S가 실제 성능을 잘 반영한다고 결론지을 수 있다.

5) 추가적인 고려사항

실제 데이터와 M&S 데이터를 비교하는 경우에서 실제 시험 데이터가 현저히 부족한 경우에는 두 데이터 세트를 직접 비교하는 것은 새로운 통계적 오류가 있을 수 있다. 예를 들어, 실제 표적탐지는 10개 표적 10회의 결과 데이터와 시뮬레이션 10개 표적 각 100회의 데이터를 비교한다면 표본의 숫자가 다르므로 이를 위한 전처리가 필요하고 가능한 전처리 방법에 따라 동시신뢰구간(Simultaneous Confidence Intevals) 기법을 적용하여 모델의 정확도를 확보하는 방법을 검토해야한다.

3.3.4 정밀 타격 체계 (대공 유도 무기)

대공 유도 무기는 제한된 사격 시험 데이터를 기반으로 M&S를 통해 유도 무기의 타격 정확성을 검증하며, 다양한 공격 시나리오에서 베이지안(Bayesian) 분석을 통해 성능을 평가한다.

1) 사용의도

대공 유도 무기의 타격 정확성을 다양한 속도 및 환경에서 평가하는 것이 목적이다. 제한된 실제 사격 데이터를 활용하여 M&S 결과를 업데이트하고, 베이지안 추정을 통해 추정 성능을 개선함으로써 유도 무기의 타격 정확성을 더욱 신뢰성 있게 추정한다.

2) 설명

베이지안 추정은 기존 데이터와 새로운 데이터를 결합하여 성능을 추정하는 통계 기법이다. 제한된 실제 사격 시험 데이터를 활용하여 M&S 결과를 보완함으로써, 추정 성능을 강화할 수 있다. 대공 유도 무기의 경우, M&S에서 500회의 실험 데이터를 기반으로 타격 정확성을 추정하고, 실제 사격 데이터(A회)를 추가하여 추정 결과를 업데이트함으로써 보다 신뢰성 있는 성능 평가를 수행할 수 있다.

3) 적용 방법

가) 데이터 수집: M&S를 통해 500회의 타격 정확성 데이터를 수집하고, 실제로 수행된 10회의 사격 시험 데이터를 수집한다.

나) 베이지안 추정 적용: 제한된 실제 데이터를 바탕으로 M&S 결과를 업데이트하고, 새로운 성능을 추정한다. 이 과정에서 기존의 M&S 결과와 새로운 실제 데이터를 결합하여 추정을 강화하고, 신뢰성 있는 타격 정확성 평가를 수행한다.

다) 유의미성 평가: 베이지안 추정을 통해 제한된 실제 데이터를 기반으로 M&S 결과를 업데이트한 후, 예상 성능이 실제 성능과 얼마나 일치하는지 평가한다.

4) 예시

예를 들어, M&S에서 몬테카를로 시뮬레이션으로 500회의 타격 정확성을 추정한 결과가 있다. 실제로는 3회의 사격 시험이 수행되어 각각 타격 정확성이 85%, 87%, 86%로 나타났다고 가정한다. 베이지안 추정을 통해 M&S에서 추정된 500회의 성능 데이터를 실제 10회의 데이터와 결합하여 새로운 성능을 추정한다. 이 방법은 기존 M&S 결과를 업데이트하고, 추정의 정확성을 개선하는 데 유용하다.

이를 통해 M&S에서 추정된 타격 정확성(예: 90%)이 실제 성능과 얼마나 일치하는지 평가할 수 있으며, M&S 결과가 신뢰할 만한 추정임을 확인할 수 있다. 만약 추정된 성능이 88%로 도출된다면, 이는 M&S와 실제 데이터의 결합으로 인해 성능 추정이 더 정확해졌음을 의미한다.

4. 통계기법 적용의 장점과 한계

M&S에 적용되는 V&V 과정에서 통계 기법은 M&S의 신뢰성을 높이고, 실제 시험 데이터와의 비교를 통해 모델의 성능을 확인하는 데 필수적이다. 그러나 이러한 통계적 V&V 기법에도 여러 장점과 한계가 존재한다.

4.1 장점

첫째, 비용 절감과 시간 효율성이다. T&E 과정에서 실제로 무기 체계를 테스트하는 데에는 많은 비용과 시간이 소요된다. 반면, 통계적 기법을 활용한 M&S는 제한된 실제 데이터를 바탕으로 추가적인 성능 추정을 가능하게 하며, 이는 실험 비용을 크게 절감할 수 있다. 예를 들어, 실제 사격 시험이 제한적인 대공 유도 무기에서 베이지안 추정을 활용하여 성능을 추정할 수 있는 것은 M&S의 효율성을 극대화하는 사례라 할 수 있다.

둘째, 제한된 데이터의 보완이다. V&V 과정에서 M&S 결과를 검증할 실제 데이터가 제한될 수 있지만, 회귀 분석, 분산 분석(ANOVA), 베이지안 추정과 같은 통계 기법은 이러한 제한된 데이터를 보완하여 신뢰성 있는 성능 추정을 가능하게 한다. 예를 들어, 도하 장비의 성능 추정에서 소수의 실제 도

하 데이터를 통해 다양한 유속 조건에서의 성능을 회귀 분석으로 추정할 수 있었다.

셋째, 불확실성 관리이다. 특히 베이지안 추정은 기존의 M&S 데이터를 실제 데이터를 통해 보완함으로써 불확실성을 줄이고, 추정의 신뢰성을 높일 수 있다. 이는 M&S를 통해 다양한 시나리오에서 추정된 결과가 실험 데이터와 결합되어, 보다 정확한 결과를 제공할 수 있게 한다.

4.2 한계

첫째, 실제 데이터의 품질과 양에 의존한다는 한계가 있다. 통계 기법은 제한된 데이터를 보완할 수 있지만, 데이터의 품질과 양이 부족할 경우 추정 결과의 신뢰성이 떨어질 수 있다. 예를 들어, 대공 유도 무기의 경우 10회의 실제 시험 데이터를 기반으로 M&S를 보완했지만, 더 많은 데이터가 확보되면 추정의 신뢰성이 더욱 강화될 수 있다.

둘째, 모델의 정확성이다. 통계 기법을 통해 M&S 결과를 검증한다고 해도, M&S 자체가 부정확한 모델을 기반으로 하고 있다면 그 결과는 잘못된 방향으로 흐를 수 있다. 따라서, V&V 과정에서 통계적 기법이 적용되기 전에, M&S 모델 자체의 정확성을 검증하는 것이 중요하다.

셋째, 복잡한 체계에서의 해석 어려움이다. 복잡한 무기 체계일수록 다양한 변수를 고려해야 하므로, 이를 단순한 통계 기법으로 평가하는 데 한계가 있을 수 있다. 예를 들어, 전술 C4I 체계의 경우 통신 네트워크의 복잡성으로 인해 카이제곱 검정만으로는 모든 성능 평가를 포괄하지 못할 수 있다.

따라서 통계적 V&V 기법은 M&S의 신뢰성을 높이고 T&E 과정에서 실험적 제약을 극복하는 데 중요한 도구로 사용될 수 있지만, 데이터의 품질과 모델의 정확성에 대한 지속적인 노력이 필요하다.

5. 결 론

본 연구에서는 무기체계 시험평가 과정에서 모델링 및 시뮬레이션(M&S)의 신뢰성을 높이기 위한 검증 및 확인 방법의 통계적 기법을 제안했다. 도하 장비, 전술 C4I 체계, 감시 레이더 체계, 대공 유도 무기 등을 대상으로 회귀 분석, 카이제곱 검정, 분산 분석, 베이지안 추정과 같은 통계 기법을 적용하여 M&S 결과와 실제 데이터 간의 일관성을 평가하는 방법을 예시하였다. 본 연구에서 예시는 통계 기법의 적용 관점이므로 각 통계 기법은 무기체계의 시험항목 특성에 맞게 M&S 결과의 정확성을 제고하는 방안을 적용하여야 한다.

향후 연구에서는 다음과 같은 과제가 필요하다. 첫째, M&S와 실제 데이터를 결합하는 하이브리드 모델에 대한 연구가 필요하다. 이러한 모델은 실제 데이터를 통해 M&S를 보완하고, M&S의 추정 결과를 더욱 정확하게 만드는 데 기여할 수 있다. 둘째, 다양한 무기 체계의 복잡한 상호작용을 반영할 수 있는 다차원적인 V&V 기법이 요구된다. 이는 여러 시스템이 통합되어 작동하는 현대 무기 체계의 특성을 반영하여, 보다 종합적인 성능 평가가 가능하게 할 것이다. 마지막으로, AI와 기계 학습을 활용한 자동화된 V&V 기법에 대한 연구가 필요하다. 이러한 기법은 M&S의 정확성을 실시간으로 평가하고 개선할 수 있는 강력한 도구로 자리매김할 수 있다.

References

[1] 미 국방부 M&S VV&A RPG[3] U.S.DoD, “M&S VV&A RPG Core Document: An Overview of VV&A of Legacy”, 2011.

[2] Defense Acquisition Program Administration Manual No. 2019-10 (2019. 11. 19.)

[3] U.S.DoD, “M&S VV&A RPG Core Document: V&V Techniques”, 2011.

[4] Doo Hyun Kim, Sang Hoon Kim, "A Study on the Comparison of Test & Evaluation Method for the Guided Missile," Journal of the Korea Association of Defense Industry Studies, Vol.22 No.1 pp. 117-130, 2015

[5] Moon-gul Lee, Seung-hoon Hwang, Seung-Ryoung Baek, "Methodologies to Decide the Number of Samples and to Verify an Accuracy Rate of the Precise Guided Missiles for Test and Evaluation," Journal of the KIMST, Vol.18 No.5 pp. 558-565, 2015

[6] Bo-Gil Seo*, Seok-Jin Hong, "A study of estimating the hit probability and confidence level considering the characteristic of Precision Guided Missile," Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 17, No. 12 pp. 193-197, 2016

[7] 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

[8] Sung-Mee Park, Hyun-Jin Han, "A study on the proper number of replication to reach reliable results of AWAM simulation," Journal of the Military Operations Research Society of Korea, Vol.43 No.2 pp. 1-10, 2017

[9] 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

[10] Kyung-Min Kang, Joon Huh, "A Study on the Rational Judgement Way of the Test Results for the Weapons System," Annual Korea Institute of Military Science and Technology Conference, pp. 650-651, 2019