

CART 회귀분석 기반 일회성 시스템 81mm 고폭탄 사거리에 영향을 미치는 요인 분석

김명성¹⁾, 최준혁²⁾, 김영민^{1)*}

1) 아주대학교 시스템공학과, 2) 국방기술품질원

A Study of Factors Influencing the Range of 81mm HE shells One-Shot systems based on CART Regression analysis

Myung Sung Kim¹⁾, Jun Hyeok Choi²⁾, Young Min Kim^{1)*}

1) Department of Systems Engineering, Ajou University, 2) Defense Agency for Technology and Quality

Abstract : For one-shot systems such as 81mm high-explosive ammunition, research on performance prediction is insignificant due to research manpower infrastructure and lack of interest and difficulties in securing field data, which can only be done by special task workers. In order to evaluate the actual range of ammunition, the storage ammunition reliability evaluation checks the range by firing actual ammunition through a functional test. Test evaluation is a method of extracting a sample from the population, launching it, and recording the results accordingly. As a result of these tests, the range, which is an indicator of ammunition performance, can be measured differently according to meteorological factors such as temperature, atmospheric pressure, and humidity according to the location of the test site. In this study, various environmental factors generated at the test site and storage period analyze the correlation with the range, which is the performance of ammunition, and analyze the priority of importance for each factor and the numerical standards that environmental factors affect range. Through this, a new approach to one-shot system performance prediction was presented.

Key Words : One-shot systems, HE shells, CART, Regression analysis, Performance prediction

Received: May 3, 2023 / **Revised:** June 22, 2023 / **Accepted:** June 26, 2023

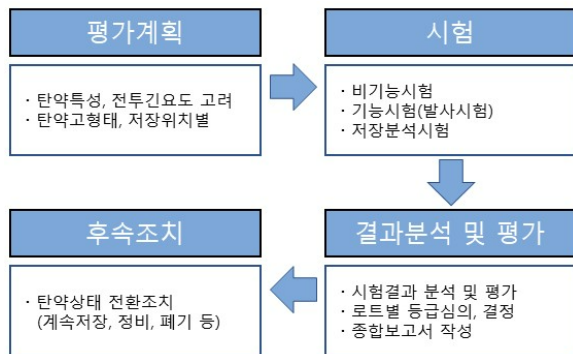
* 교신저자: Young Min Kim / Department of Systems Engineering, Ajou University / pretty0m@ajou.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

1. 서론

1.1 연구배경

탄약은 중요한 무기체계 중 하나로 목표물을 직접적으로 파괴하는 무기이다. 탄약은 한번 사용하게 되면 재사용할 수 없는 특성을 가지고 있어 일회성 시스템(One-Shot system)으로 분류된다. 이러한 특성 때문에 탄약은 사용되기 전 저장되어 대기상태로 오랜 시간동안 보관하게 된다. 저장기간이 늘어날수록 탄약의 신뢰도가 낮아지며, 탄약을 실제로 사용하기 전에는 탄약의 성능이나 안전성을 확인할 수가 없어 대표 샘플을 추출한 시험을 통해 신뢰도를 평가하게 된다. 탄약을 시험 할 시에는 발사 후 파괴되는 특성과 시험비용 등으로 인하여 전체를 대상으로 시험하지 않고 같은 년도에 제작된 로트를 모집단으로 삼아 해당 로트로부터 표본을 추출하여 시험을 수행 및 신뢰도 분석을 진행한다.[1]



[Figure 1] Procedure of Ammunition Stockpile Reliability Program

국내에서는 국방기술품질원이 저장탄약신뢰성평가(Ammunition Stockpile Reliability Program: ASRP)라는 이름으로 탄약의 신뢰성 평가에 대한 업무를 주관하고 있으며, 군이 보유한 저장탄약에 대하여 주기적으로 비기능, 기능, 저장분석 시험 등을 수행하여 탄약의 신뢰성, 사용가능성, 안정성, 성능을 통계적으로 분석·평가한다.[2] 이를 근거로 국방부에서는 계속저장, 제한사용, 우선불출, 정비, 개수, 폐기 등을 결정한다. 하지만 인력 및 비용 등 평

가물량 대비 소화여력이 부족하여 보유 중인 모든 탄약에 대해 저장탄약 신뢰성평가를 주기적으로 수행하기는 어려운 실정이다. 그림 1은 저장탄약신뢰성평가에 대한 과정을 도시한다.[3]

또한 탄약을 시험할 시 시험장의 외부적 환경요인인 기온, 기압, 풍향, 풍속, 인적요인 등의 여러 환경 요인들로 인하여 사거리가 다르게 측정될 수 있으며, 통계적 수치만을 가지고는 어떠한 요인이 사거리의 더 큰 영향을 미치는지 직관적으로 알기 힘들다. 기존의 통계분석 기법인 요인별 상관관계를 분석하는 상관분석으로는 여러 가지 요인들이 혼합되었을 때 각 요인들간의 상관관계를 계산하기가 더욱 복잡해지며, 각 요인들의 수치가 어느 정도를 기준으로 결과에 영향을 끼쳤는지를 분석하기 힘들다는 한계가 있었다.

따라서 본 연구에서는 81mm 고폭탄 탄약과 같은 일회성 시스템의 성능 중 사 거리에 영향을 주는 요인을 분석하기 위해서 시험장에서 발생된 여러 가지 환경요인들과 저장기간 등이 탄약의 성능인 사거리와 상관관계를 분석하고 요인별 중요도 우선순위, 환경요인이 성능에 영향을 미치는 수치기준 등을 분석하여 향후 탄약과 같은 일회성 시스템의 성능개선과 탄약에 영향을 미치는 요인들의 저감대책 마련 및 일회성 시스템의 시스템 공학 기반 체계적 설계를 이뤄낼 수 있는 기반이 될 것으로 예상된다.

1.2 관련선행연구

CART(Classification And Regression Tree) 분석이란 의사결정나무법 (Decision tree) 중 하나이다. CART 알고리즘은 1984년 Briemen에 의해 발표되어 의사결정나무 분석을 형성하는데 있어서 가장 보편적인 알고리즘이라고 할 수 있으며 오늘날 머신러닝 실험의 시초가 되고 있다. CART는 종속 변수가 범주 혹은 숫자인 타입의 따라 출력변수가 연속형인 회귀나무(regression tree)와 범주형인 분류나무(classification tree)를 생성하는 비모수 결정 나무 학습법이다.[4]

CART는 의사결정 규칙을 도표화하여 독립변수에 의한 종속변수를 예측 및 분류할 때 사용하게 된다. 분석과정이 결정나무구조로 표현되기 때문에 판별분석이나 회귀분석 등과 같은 방법들에 비해서 쉽게 이해하고 설명할 수 있다는 장점이 있어서 분석의 정확도보다 분석과정의 설명이 필요한 경우에 사용하기 좋은 방법이다.[5-6] CART에서 데이터가 범주형 종속 변수인 경우에는 각 마디에서 불순도를 재는 측도 중 하나인 지니지수를 사용하고 연속형 종속 변수인 경우에는 분산의 감소량을 사용하여 최적의 분류를 수행한다.[7] CART 알고리즘은 이진 트리구조로 모형을 형성하여 목표 변수를 가장 잘 분리하는 설명변수와 그 분리시점이 되는 수치를 찾는 것이다. 처음 분리기준으로 두 개의 마디를 형성하고, 목표 변수를 한 방향의 값으로 분류시킬 수 있는 기준을 찾아서 계속 나무를 형성해 나간다. 더 이상의 분리가 이루어지지 않고 다양성이 줄었을 때 끝 노드를 형성한다.

CART의 형성은 성장, 가지치기, 타당성평가, 해석 및 예측으로 이루어진다. 성장단계에서는 적절한 분할 규칙과 정지규칙을 활용하여 나무를 성장시키는 과정이다. 가지치기에서는 오차가 큰 가지나 부적절한 추론 규칙을 가진 가지, 성능 향상에 기여하지 못하는 가지를 제거하는 단계이다. 가지치기는 나무의 가지가 너무 많아져 결과가 좋지 않게 나오는 과적합(overfitting)을 피하기 위하여 사용된다. 타당성평가 단계에서는 모형의 타당성을 평가하기 위하여 훈련자료(training data)와 검증자료(test data)로 분리 적용한다. 수집된 자료의 양이 모형을 생성하는데 부족하다고 판단이 되는 경우에는 K배 교차 검증법(k-fold cross validation method)이라는 주어진 자료를 최대한 이용하여 신뢰성을 높이는 방법을 주로 사용한다. K배 교차 검증법이란 주어진 자료를 K등분하여 $(K-1)/K$ 는 훈련자료로 사용하고 나머지 $1/K$ 는 검증자료로 사용하여 모형의 산정력을 평가하는 방법이다. 총 K번을 반복하여 실시하며, 모든 자료가 한 번씩 검증자료에 속하고, 이를 통해 모든 자료에 대한 모형을 생성하게 된다.

선행된 연구들에 의하면, K가 10일 경우 적절하다고 알려져 있으며 본 연구에서도 10배 교차 검증법을 적용하였다.[8]

CART 모델은 본 연구 대상과 같이 대용량의 데이터를 분석할 때 유용하고 모델 생성 후에도 대량의 샘플을 처리하는 것이 용이하며 자동화하기가 쉽고 이상치의 영향을 적게 받으며 결측치를 쉽게 다룰 수 있다는 장점을 가지고 있지만, CART 모델의 단점은 데이터의 변화에 민감하기 때문에 데이터의 작은 변화에 완전히 다른 모형을 형성하기 때문에 데이터 정제에 세심한 주의가 필요하다.[9]

Choi[10]는 단기추진제로 구성된 국내 105밀리 고폭탄(KM1)의 저장탄약 신뢰성 평가 ASRP 자료를 활용하여, 단기추진제로 구성된 탄약의 저장수명과 관련된 속성을 찾고, 분석된 결과를 토대로 단기추진제의 저장수명을 예측하여 신뢰성 확보에 기여하고자 하였다. 생산연도와 저장기간 안정제 함량 등을 고려하여 그 외 다른 속성과 어떠한 관계를 가지고 있는지 의사결정나무 기법을 이용하여 분석을 실시하여 속성간의 관계를 평가하였다. 분석의 결과를 기반으로 안정제 함량에 따른 저장기간수명을 예측하였다. 본 연구는 여러 분석 기법을 사용하였으나 적절한 분석기법을 선정하였는지에 대한 근거는 기술하지 않았다. Lee[11]는 120MM 대전차고폭예광탄에 대해서 수명기간 내 안정 물질의 종류가 탄약의 품질 수준에 미치는 영향에 대한 연구를 진행하였다. 이를 통해 안정 물질 ECL 및 DPA가 탄약 구성품에 미치는 질적 영향을 분석하여, 국내 전차 탄약 소진탄피에 적합한 안정 물질을 비교·분석함을 목표로 한다. 본 연구는 저장수명에 관한 품질을 연구하였으나, 저장수명이 길어짐에 따른 탄약 성능의 저하는 고려되지 않았다. Kim[12]은 송탄통 분리형 날개안정철갑탄의 관통자를 대상으로 텅스텐 중합금 관통자의 재료의 강도 및 인성 등과 같은 기계적 성질이 관통능력에 어떠한 영향을 미치는지에 대하여 상관관계 분석을 실시하였다. 본 연구의 결과로, 인장강도 및 충격에너지에 가장 큰 영향을 받는 것으로 분석되어, 열처리 고정의 개선을 통해

이러한 기계적 성질을 조정하여 관통능력을 개선함으로써 입증하였다. 본 연구의 결과는 관통자의 관통능력을 개선하였으나 탄약의 사거리에 관해서는 고려되지 않았다. Kim[13]은 수락시험 시 적용된 기준탄 사격데이터를 기반으로 포구속도에 영향을 미칠 것으로 예상되는 탄 저장기간, 시험 당시 주변 온도, 점검탄 사격을 상관분석과 쌍체검정을 통해 분석하였다. 본 연구의 결과로, 겨울철 평균 포구속도가 낮게 나오는 현상이 있음을 발견하였고, 점검탄 사격 시 포신이 가열되어 포신 내경을 확장시켜 이로 인한 압력강화로 평균 포구속도가 영향을 받아 수락시험의 신뢰도를 위해서는 점검탄 사격이 필수적이라는 결과를 도출하였다.

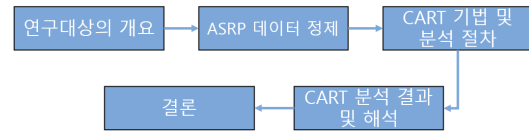
이와 같이 탄약의 성능 및 저장수명에 관련된 연구는 진행중이나 CART 알고리즘을 사용한 탄약 대상의 연구는 미미한 실정이다.

1.3 문제정의

탄약과 같은 폭발물의 경우, 특수 업무 종사자만 가능한 연구인력 인프라 및 관심 부족, 데이터 확보를 위한 취급 안전성, 장기저장 후 사용한 필드 자료 확보 애로 등으로 저장 수명예측 및 성능예측에 대한 연구는 미미한 수준이다.[14] 앞서 언급했던 것과 같이, 탄약의 시험평가는 샘플링을 통한 모집단의 표본을 추출하여 발사하고 그에 따른 결과를 기록하는 방식이다. 이러한 시험의 결과는 시험장 위치에 따른 기온, 기압, 습도와 같은 기상영향인자에 따라 탄약의 성능 지표인 사거리가 다르게 측정될 수 있다.

본 연구에서는 81mm 고폭탄 KM374의 22년도 4월부터 10월까지의 33개 로트 발사시험 데이터를 활용하여 머신러닝 기법인 CART (Classification And Regression Tree) 회귀 분석을 실시하여 저장기간, 기온, 습도, 기압의 다변수 요인을 고려하여 사거리에 영향을 미치는 요인의 우선순위를 설정하였고, 각 요인들의 수치가 어떻게 사거리에 영향을 미치는지에 대하여 분석하였다.

1.4 논문의 구성



[Figure 2] Scope

본 연구는 다음과 같이 구성된다. 2장에서 연구 대상인 81mm 고폭탄 KM374에 대하여 설명하고, 81mm 고폭탄 사거리에 영향을 주는 인자들을 선별하여 22년도 ASRP 데이터를 정제한다. 다음으로는 CART 기법과 분석 프로세스에 대해서 설명한다. 마지막으로 3장에서는 본 연구의 결과로써 CART 기법을 통하여 도출된 영향 인자들의 우선순위를 식별하고 그에 따른 기준 수치를 정의함으로써 본 연구의 결론을 제시한다. 그림 2는 이에 대한 개념을 도시한다.

2. 81mm 고폭탄의 사거리 영향 인자 분석 및 도출 프로세스 구축

2.1 81 mm 고폭탄 개요 및 고폭탄 사거리 영향 요인

본 논문의 연구 대상인 81mm 고폭탄은 인원 및 시설 및 물자 파괴를 목적으로 사용하는 탄약이며 신관과 탄두, 날개결합체, 추진장약으로 구성되어 있다. 탄약의 발사과정은 박격포 포신 내부로 탄약이 미끄러져 포신 하단부의 공기가 뇌관을 격침하여 점화약통을 점화시키고 점화된 불꽃은 추진장약을 연소시켜 탄약을 발사시킨다. 발사된 탄약은 날개에 의해 비행 안정성을 유지하고 목표물에 충격이 가해지면 폭발하게 된다.

이러한 81mm 고폭탄의 실제 성능을 평가하기 위해 저장탄약신뢰성평가에서는 기능시험을 통해 실제 탄약을 발사하여 성능을 확인하고 있다. KM374의 경우 로트당 시료수 40발로 저장약, 고장약 각 20발로 나누어 진행하게 된다. 또한 해당품목에 대한 로트는 제조년도별 재고량과 탄약상태 등

을 고려하여 적절하게 선정함으로써 고장약의 경우 추진장약의 성능을 시험할 수 있으며 성능을 위해서 도플러레이더를 활용하여 포구속도 데이터를 획득, GPS를 활용하여 사거리 데이터를 획득한다. 기능시험은 외부에서 진행됨에 따라 외부 환경요인에 의해 탄약 성능측정에 영향을 미칠 수 있다.

따라서 본 연구에서는 81mm 고폭탄의 기능시험 당시 현지 외부 기상요인인 기온, 기압, 습도와 해당 로트의 저장기간이 사거리에 어떤 영향관계에 있는지를 분석하기 위해 평가대상을 81mm 조명탄 KM374 1개 품목으로 선정하고, 제조년도별 재고량 및 탄약상태 등을 고려하여 33개 로트를 선정하고 이를 머신러닝 분류 및 회귀 알고리즘인 CART 기법으로 평가하였다.

2.2 영향 인자 분석 프로세스

본 논문에서는 81mm 고폭탄 KM374의 22년도 4월에서 10월까지의 ASRP 발사시험 데이터를 활용하여 연구대상의 성능인 사거리와 발사시험시 현지의 기상데이터를 정제하여 Minitab 19 툴을 활용하여 CART 회귀분석을 실시한다. 도출된 의사결정나무 모델에서 적절한 가지치기를 통하여 모델을 구성한 후 이에 관한 결과를 분석함으로써 어떠한 인자가 발사 사거리에 영향을 미치는지에 대한 우선순위와 분류기준 수치에 대하여 해석한다.

3. 영향인자 도출 절차 및 산출물

3.1 81 mm 고폭탄 ASRP 데이터 정제

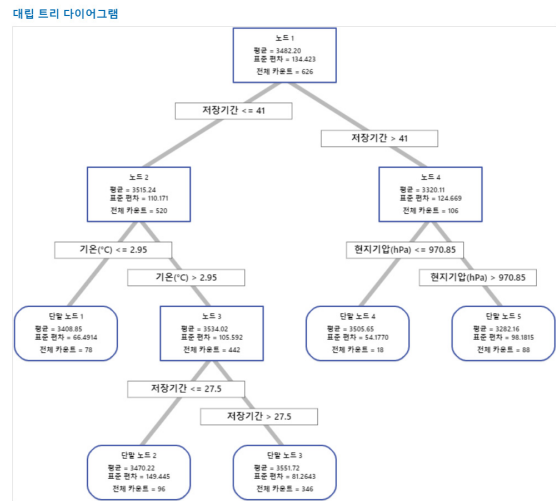
81mm 고폭탄의 22년도 4월에서 10월까지의 한 로트당 20발씩 33개 로트 ASRP 발사시험 데이터를 활용하여 불발데이터를 제외한 총 627개의 데이터를 고려하였다. 발사시험 당시 사거리에 영향을 미칠것으로 예상되는 기상요인으로는 기온, 현지 기압, 습도로 선정하였으며, 저장기간 또한 사거리에 영향을 미칠것으로 예상되었다. 표 1은 각 속성들의 단위와 세부설명을 포함한다.

<Table 1> Influence Factor Introduction

영향요인	단위	설명
저장기간	년	탄약이 저장되어 있던 햇수
기온	° C	발사시험 당시 현지 기온
현지 기압	hPa	발사시험 당시 현지 기압
습도	%	발사시험 당시 현지 습도

3.2 CART 기법 수행

정제한 데이터를 가지고 CART 회귀분석을 진행하였다. 검증 방법은 K배 교차 검증으로 진행하였으며, 10배 교차 검증법을 적용하였다. 모델의 일반화를 진행하여 예측변수인 영향인자들의 분류 기준을 보기 위해 모델의 단말노드 수를 제한하는 가지치기를 수행하였다.



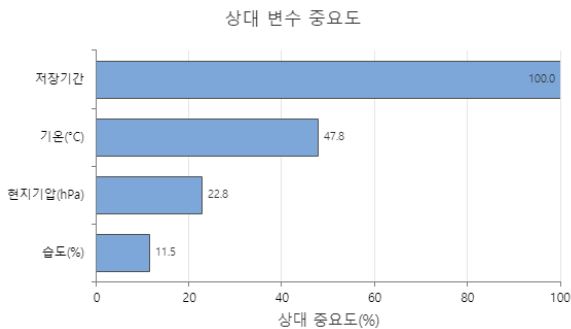
[Figure 3] Regression Tree Model

연구대상의 주요 대상이 되는 사거리를 종속변수로 설정하여 회귀나무모델을 생성한 결과 그림 3과 같다. 첫 루트 노드(Root Node)는 저장기간이 41년을 기준으로 분할되었으며, 2단계에서는 2.95°C 기온을 기준으로 분할되었고, 저장기간이 41년 이상일 경우는 현지기압 970.85hPa에서 분할되었다. 마지막으로 3단계에서는 저장기간 27.5를 기준으로 분할되어 총 5개의 가지로 분할되었다.

위 그림의 회귀나무 결과를 보면 첫 분할 단계에서 저장기간 41년을 기준으로 분할되어 41년 이상일 경우에는 평균 약 3320m로, 41년 이하일 경우 평균 3515m로 현저한 차이를 확인할 수 있었다. 즉, 저장기간 41년을 기준으로 고폍탄의 사거리가 변화하는 것을 예측할 수 있다. 다음 단계에서는 2.95°C 기온을 기준으로 2.95°C 이상일 경우 평균 약 3534m, 2.95°C 이하일 경우 평균 약 3408m로 기온 역시 사거리와 상관관계에 있는 요인으로 예측할 수 있으며, 같은 단계에서 현지기압 970.85hPa를 기준으로 평균 약 3505m, 약 3282m로 분할되는 것을 확인할 수 있다.

3.3 CART 결과 해석 및 분석

회귀나무모델 결과와 같이 상대 변수 중요도 결과는 아래 그림 4와 같다. 저장기간이 가장 중요한 변수로 측정되었으며, 저장기간 중요도를 100%라고 가정할 시, 상대적으로 기온 약 48%, 현지기압 약 23%, 습도 약 11% 순으로 중요도가 산출되었다.



[Figure 4] Relative Variable Importance Chart

이러한 회귀나무모델의 성능은 R-제곱 통계량을 기준으로 평가되는데, 일반적으로 R 제곱 결정계수를 사용하여 모형이 데이터를 얼마나 적합시키는지 확인할 수 있다. R 제곱 결정계수 값이 높을수록 모형이 데이터를 더 잘 적합시키며 R 제곱 결정계수는 항상 0%에서 100% 사이이다. 종속변수의 값이

연속형인 경우, 실제 값과 예측 값의 차이가 작을수록 우수한 모형이라고 할 수 있다. 본 회귀나무모델의 R 제곱 결정계수는 아래의 표 2와 같이 측정되었다.

<Table 2> Model summary for CART Regression

통계량	교육	검정
R-제곱	54.81%	50.54%
루트 평균 제곱 오차(RMSE)	90.366	91.54
평균 제곱 오차 (MSE)	8166.181	8937.85
평균 절대 편차 (MAD)	59.594	62.31

4. 결론

81mm 고폍탄 탄약과 같은 일회성 시스템은 특수 업무 종사자만 가능한 연구인력 인프라 및 관심 부족과 필드 자료 확보 애로 등으로 성능예측에 대한 연구는 미미한 수준이다. 탄약의 실제 성능을 평가하기 위해 저장탄약신뢰성평가에서는 기능시험을 통해 실제 탄약을 발사하여 성능을 확인하고 있다. 시험평가는 모집단의 표본을 추출하여 발사하고 그에 따른 결과를 기록하는 방식이다. 이러한 시험의 결과는 시험장 위치에 따른 기온, 기압, 습도와 같은 기상영향인자에 따라 탄약의 성능 지표인 사거리가 다르게 측정될 수 있다.

본 연구에서는 81mm 고폍탄 KM374와 같은 일회성 시스템의 성능에 영향을 주는 요인을 분석하기 위해서 22년도 4월부터 10월까지의 81mm 고폍탄 KM374의 ASRP 평가결과 33개 로트 발사시험 데이터를 활용하여 머신러닝 기법인 CART 회귀분석을 실시하여 81mm 고폍탄 사 거리에 영향을 미치는 요인은 저장기간, 기온, 기압, 습도 순으로 중요하다는 결과를 도출하였다. 저장기간 41년을 기준으로 분할되어 41년 이상일 경우에 사거리가 감소하는 경향이 있었으며 2.95°C 기온을 기준으로 2.95°C 이하일 경우 사거리가 감소하여 기온 역시 사거리와 상관관계에 있는 요인으로 예측할 수 있었다. 같은 단계에서 현지기압 970.85hPa를 기준으로 사거리

가 감소하는 경향이 있었다.

81mm 고폭탄과 같은 일회성 시스템의 신뢰성, 사용가능성, 성능 판단을 위해 ASRP 평가 결과를 분석하는 성능예측 연구가 지속적으로 추진되고 있다. 본 연구에서는 시험장에서 발생한 여러 가지 환경요인들과 저장기간 등이 탄약의 성능인 사거리와 상관관계를 분석하고 요인별 중요도 우선순위, 환경요인이 성능에 영향을 미치는 수치기준 등을 분석하는 연구를 통해 일회성 시스템 성능예측에의 새로운 접근방법을 제시하였다. 본 연구를 통하여 다소 생소할 수 있는 일회성 시스템의 시스템 공학적인 분석 및 설계의 기반이 될 것으로 사료된다.

References

1. Youngseub Kim, Introduction to defense quality management, Hyungseul publishing network, p284-292, 2010.
2. Jungwoo Lee, An introduction to ASRP, Defense & Technology, 2010.
3. 장수희, 60, 81mm 박격포탄의 저장수명 요인 연구, 응용통계연구, p611-620, 2018.
4. 김광섭, CART 기법과 보조자료를 이용한 토양수분 추정, 한국수자원학회논문집, p597-608, 2010.
5. Choi, J., Data mining decision tree analysis using answer tree, SPSS academy, p17-23, 1998.
6. Choi, J., Decision Trees and Its Applications, Statistics Analysis Study, p61-83, 1999.
7. Quinlan, J. Ross, C4.5 Programs for Machine Learning, Mateo: Morgan Kaufmann, 1993.
8. 양승정, 퍼지이론을 이용한 의사결정나무의 분할 개선 방법, 대한산업공학회 추계학술대회 논문집, p44-51, 2004.
9. Shmueli G, Data mining for business intelligence: Concepts, techniques, and applications in Microsoft Office Excel with XLMiner, John Wiley and Sons, 2011.
10. 최명진, 국내 단기추진체 탄약의 저장수명 예측에 관한 연구: 105 미리 고폭탄 추진체를 중심으로, 산업경영시스템학회지, p36-42, 2014.
11. 이재관, 소진탄피 안정 물질과 탄약 품질 수주간 상관관계 연구, 한국산학기술학회 논문지, p386-392, 2022.
12. 김명현, 열처리 공정을 통한 텅스텐 중합금 관통자의 관통능력 향상에 관한 연구, 한국산학기술학회 논문지, p322-327, 2020.
13. 김원석, 기준탄 사격을 통한 박격포 포구속도의 영향인자 분석, 국방품질연구논문집, p112-117, 2022.
14. 장일호, 81 미리 조명탄용 신관 KM84A1E1 지연체의 저장수명 예측 연구, 품질경영학회지, p270, 2012.