

프로빗 회귀 모델을 사용한 120mm 박격포 체계 불발율 분석 연구

김도영¹, 이재관¹, 김기수², 엄태일², 김동길^{3*}

¹국방기술품질원 유도탄약센터, ²(주)풍산 방산기술연구원, ³경일대학교 기계자동차학부

Study on the Misfire Rate of 120mm Mortar System using Probit Regression Model

Doyoung Kim¹, Jaegwan Lee¹, Ki-su Kim², Tae-il Eom², Dong-gil Kim^{3*}

¹Department of PGM and Ammunition Center, Defense Agency for Technology and Quality

²Defense Research and Development Institute, Poongsan Corporation

³Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kyungil University

요 약 120mm 박격포 체계는 대한민국 국군에서 운용중인 최신에 무기체계 중 하나로, 기존 4.2인치 박격포 체계를 대체하기 위해 개발되었다. 120mm 박격포 체계는 포구장전식 무기체계로, 기존의 박격포 체계와 동일한 낙하식 사격 모드와 탄약이 장입되어 있는 상태에서 공이 뇌관을 타격하는 격발식 사격모드으로도 탄약을 발사할 수 있어 상황에 따라 가변적인 운용이 가능하다. 낙하식 사격모드에서는 공이 돌출 길이가 뇌관의 작동 여부에 큰 영향을 주게 되며, 이에 따른 불발 현상으로 인하여 원인분석이 필요한 실정이다. 뇌관 불발 여부는 이진 데이터 분석에 적합한 프로빗 회귀 모델로 결과를 예측할 수 있다. 본 연구에서는 프로빗 회귀 모델을 사용하여 120mm 박격포 체계에서 낙하식 사격 모드의 뇌관 불발율을 분석하였으며, 이에 따른 최적의 공이 돌출 길이는 약 3.1mm로 예측되었다. 본 연구 결과가 낙하식 무기체계 성능 개선에 기여할 것으로 기대된다.

Abstract The 120mm mortar system is a state-of-the-art weapon system operated by the Republic of Korea Armed Forces and was developed to replace the existing 4.2-inch mortar system. The 120mm mortar system is a muzzle-loading weapon system and can be operated flexibly in the same drop-type and strike-type firing modes as the existing mortar system. In the drop-type shooting mode, the length of the firing pin greatly affects whether the detonator works, and cause analysis is necessary due to the resulting misfire. This can be predicted with a probit regression model suitable for binary data analysis. In this study, the misfire rate of the drop-type firing mode in the 120mm mortar system was analyzed using the probit regression model. The optimal length of the firing pin was predicted to be 3.1 mm. The results are expected to help improve the performance of drop-type weapon systems.

Keywords : Probit Regression, Logistic Regression, Mortar, Misfire Rate, Ammunition

1. 서론

1.1 배경

기존 4.2인치 박격포 체계를 대체하기 위해 개발된 120mm 박격포 체계는 2019년 국내 방위산업체에서 개

발 완료되어 대한민국 육군에 인도되기 시작한 무기 체계이다. 120mm 박격포 체계는 기존의 4.2인치 박격포 체계와 비교하여 사거리가 최대 0 배, 살상능력이 약 0 배 증가된 것으로 알려져 있으며, 박격포가 탑재된 상태에서 360도 전방위로 회전할 수 있어 목표물을 빠르게 변경할 수 있는 장점이 있다.

*Corresponding Author : Dong-gil Kim(Kyungil Univ.)

email: dgkim@kiu.kr

Received August 29, 2023

Accepted November 3, 2023

Revised September 19, 2023

Published November 30, 2023



Fig. 1. 120mm Mortar System

120mm 박격포 체계는 포구장전식 무기체계의 일종으로써, 기존의 60mm, 81mm 및 4.2인치 박격포와 같이 공이가 돌출된 상태에서 탄약의 낙하에너지로 뇌관을 기폭시키는 낙하식 사격모드와 탄약이 장입되어 있는 상태에서 뇌관을 타격하여 기폭시키는 격발식 사격모드 등 두 가지 사격모드로 운용할 수 있는 특징이 있다.

낙하식 사격모드는 탄약의 낙하 및 뇌관과 공이와의 접촉과 동시에 발사되므로, 신속한 사격이 가능하다는 장점이 있으나, 뇌관이 일정 수준 이상 둔감하거나 탄약의 낙하속도가 부족할 경우 충격에너지가 충분히 확보되지 않아 불발 가능성이 높아진다는 점이 문제점으로 꼽히고 있다. 이러한 문제로 인하여 낙하식 사격모드를 사용하는 화력체계에서는 뇌관의 충격감도를 중요하게 제어함으로써 불발 위험을 해소하고 있는 실정이다[1,2].

또한, 뇌관 자체의 특성 외에 외부 환경적 요인으로 인하여 뇌관 불발 현상이 발생할 수 있는데, 뇌관으로 충격에너지를 전달하는 과정에서 불발 현상을 야기할 수 있는 요소는 아래와 같다.

첫 째, 탄약 자체의 낙하속도이다. 이는 앞서 설명한 바와 같이, 중력가속도에 의한 탄약의 낙하속도가 일정 수준 이하일 경우, 뇌관으로 충분한 충격이 전달되지 않아 불발의 위험성이 커지게 된다.

둘 째, 공이의 돌출 길이이다. 돌출 길이가 짧을수록 뇌관으로 충격이 전달되는 시간이 짧아지고, 이에 따라 충격량이 적어져 뇌관으로 전달되는 에너지가 감소하여 불발 위험성이 증가하게 된다. 단, 공이의 돌출 길이가 일정 수준 이상 길어질 경우 뇌관의 파손 또는 탄약의 조기격발 가능성이 증가하기 때문에 무작정 공이 길이를 증가시킬 수는 없다.

1.2 프로빗 회귀 모델

공이의 길이에 따른 뇌관의 불발 여부를 종속변수라고

할 때, 뇌관의 불발은 0과 1로 구분되는 이진 데이터로 볼 수 있다. 뇌관의 불발 여부는 0(불발)과 1(기폭)로 구분할 수 있으므로, 0과 1 사이 구간의 이진 데이터로 볼 수 있는데, 이는 직선 형태의 선형회귀모델로 예측하기에 적합하지 않다. 따라서, 뇌관의 불발 여부는 이진 데이터를 분석할 수 있는 모형을 사용해야 하는데, 프로빗 회귀 모형(Probit Regression Model)은 종속변수가 이진 데이터일 때 사용할 수 있는 회귀 모형 중 하나로, 위와 같은 현상을 분석 및 예측에 매우 적합한 모형이라고 할 수 있다[3]. 프로빗은 “Probability Unit”의 약자로, 사건이 발생할 확률 p 를 Eq. (1)을 통해 누적분포함수형 태인 프로빗 함수 P_r 로 변환할 수 있다[4].

$$\int_{-\infty}^{P_r} f(x)dx = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{P_r} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)dx \quad (1)$$

where, $P_r[-\infty \leq X \leq P_r]$

본 연구에서는 120mm 박격포 체계의 불발 현상의 개선을 목적으로, 공이의 돌출 길이에 따른 뇌관 불발율을 분석하여 최적의 공이 길이를 예측하였다. 뇌관의 작동 여부는 “기폭”과 “불발” 두 가지인 이진데이터로 가정하였으며, 공이의 돌출 길이를 스트레스 변수로 가정한 프로빗 회귀 모형(Probit Regression Model)을 사용하였으며, 확률 모델로는 로지스틱 회귀 모델(Logistic Regression Model)을 사용하였다[5]. 뿐만 아니라 이산적인 데이터 추세를 가장 간편하게 설명할 수 있는 선형(Linear Regression Model) 및 다항 회귀 모델(Polynomial Regression Model)로도 데이터를 분석하였으며, 각 회귀 모델에 따른 결과를 비교하였다.

2. 실험

2.1 대상

대한민국 국군에서 사용중인 120mm 자주박격포 체계와 동일한 장비(포신, 공이 등)와 탄약(뇌관 등)을 사용하였으며, 각각의 장비 및 탄약은 Table 1의 국방규격 및 품질요구서의 요구조건을 만족하는 사양의 제품을 사용하였다.

Table 1. Specifications

Category	Spec.
Muzzle	KDS 1015-4013
Firing Pin	QAR A60145215
Ammunition	KDS 1315-4013
Primer	QAR A30004851

2.2 분석방법

뇌관을 타격하는 공이의 돌출 길이를 선형, 다항 및 프로빗 회귀분석을 위해 필요하다고 판단되는 각각 다른 길이를 가진 5 그룹의 공이를 가공하였다. 각각의 공이의 길이는 2.44 mm, 2.61 mm, 2.70 mm, 2.78 mm, 2.96mm로, 무기체계의 운용 환경에서 축적된 데이터를 기반으로 회귀분석에 적합하다고 판단되는 길이를 선택하였다. 각각의 그룹은 모수 추정을 위해 최소의 표본 수로 여겨지는 15 발의 시료를 사용하였다. 각각의 그룹에 대한 불발율 데이터를 앞서 설명한 모형을 활용, 실제 뇌관 불발 데이터를 기반으로 통계분석 툴인 Minitab® 21을 사용하여 회귀분석 및 적합도 검정을 시행하였으며, 뇌관 불발에 대한 확률 및 생존확률을 예측하였다.

3. 결과

3.1 선형 및 다항 회귀 모델 분석

각각의 그룹에 대한 불발율은 Table 2와 같다.

선형 및 다항 회귀분석 결과, 각각의 공이 돌출 길이에 대하여 2차 다항 추세로 감소하는 형태를 확인할 수 있다. 공이 돌출 길이가 증가함에 따라 선형 회귀 모델 및 2차 다항 회귀 모델에서 신뢰도 높은 수준으로 상관관계를 유추할 수 있었다. Fig. 2와 같은 선형 회귀 모델에서의 R^2 은 83.5%, Fig. 3와 같은 2차 다항 회귀 모델에서의 R^2 은 86.7%으로 모델의 신뢰도는 높게 확인되었다.

Table 2. Misfire Rate on Firing Pin Length

Firing Pin Length (mm)	Test Number (EA)	Misfire Number (EA)	Misfire Rate (%)
2.44	15	15	100.0
2.61	15	14	93.3
2.70	15	12	80.0
2.78	15	3	20.0
2.96	15	0	0

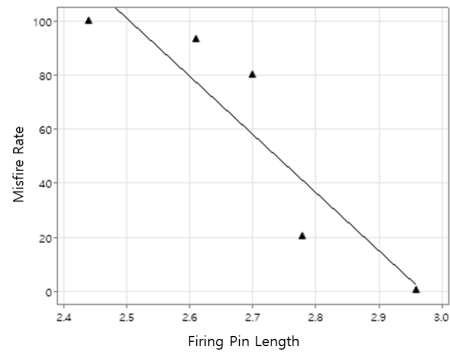


Fig. 2. Linear Regression Graph

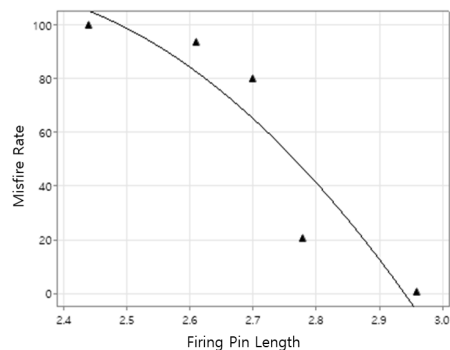


Fig. 3. Polynomial Regression Graph

선형 회귀 모델 및 2차 다항 회귀 모델에서는 공이 돌출 길이가 약 2.95mm 이상일 때, 뇌관 불발율이 0%에 근접하는 모습을 볼 수 있었다.

그럼에도 불구하고 공이 돌출 길이가 2.95mm 수준에서도 불발 현상이 종종 발생하는 실제 운용 데이터에 비추어 보았을 때, 본 다항 회귀 분석 결과는 신뢰도가 높은 수준임에는 분명하지만 실제 현상을 객관적으로 예측하기에는 무리가 있다고 판단된다.

낙하식 무기체계에서 뇌관의 불발율에 가장 큰 영향을 주는 요소는 공이의 돌출 길이로 여겨지는데, 이는 뇌관 불발 여부를 이진 데이터로, 공이 돌출 길이를 스트레스 요인으로 가정한 프로빗 회귀 모델로 더 적합하게 예측할 수 있을 것으로 생각된다.

3.2 프로빗 회귀 모델 분석

프로빗 회귀 모델 및 로지스틱 분포를 사용하여 데이터를 분석한 결과, 95% 신뢰도에서 Fig. 4과 같은 예측 곡선을 확인하였다.

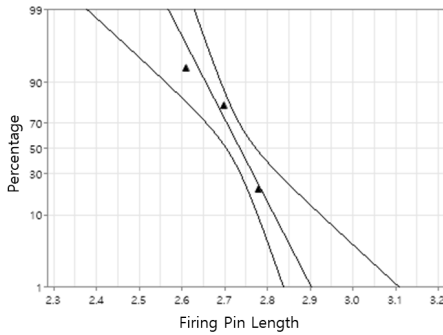


Fig. 4. Logistic Regression Graph

적합도 검정 결과, 각각의 방법에 대한 χ^2 , 자유도 (Degree of Freedom), p -Value는 Table 3과 같다.

Table 3. Goodness of Fit Test

Method	χ^2	Degree of Freedom	p -Value
Pearson	1.1573	3	0.763
Deviance	1.0612	3	0.786

공이 돌출 길이를 스트레스 인자로 하였을 때, 각 구간별 불발 발생 확률에 대한 생존확률표와 생존확률곡선은 Table 4와 같다.

선형 회귀 모델 및 다항 회귀 모델에서는 공이 돌출 길이가 약 2.95mm에서 불발율이 0%에 근접하는 모습을 보여주었지만, 로지스틱 회귀 모델을 사용한 생존확률구간에서는 약 95 ~ 100% 사이 수준의 임계영역(하한 확률과 상한확률의 사이 구간이 존재함을 확인하였다. 이는 회귀 모델에 의한 차이로, 단순한 다항 회귀 모델보다 이항 데이터 분석에 적합한 로지스틱 회귀 모델의 결과가 더 타당한 것으로 판단된다. Table 4에 대한 생존확률을 도식화 하면 Fig. 5와 같다.

Table 4. Survival Rate Table

Firing Pin Length (mm)	Misfiring Rate (%)	Lower Bound Probability (%)	Upper Bound Probability (%)
2.7	27.03	8.03	45.00
2.8	85.09	68.84	98.58
2.9	98.86	93.86	99.99
3.0	99.93	98.96	100.00
3.1	99.99	99.83	100.00

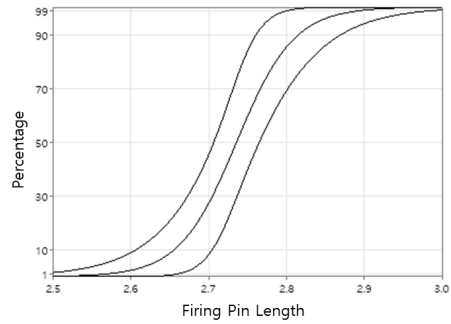


Fig. 5. Survival Rate Graph

공이 돌출 길이가 3.1mm 이상에서도 약 99.8% ~ 100.0% 수준의 임계영역이 존재하였으나, 실제 운용 환경, 군사요구도 및 비용 대비 품질 수준 등을 고려할 때 충분한 수준으로 생각된다.

4. 결론

본 연구에서는 120mm 박격포 체계에서 사용중인 장비 및 탄약에 대하여 뇌관 성능을 최대로 이끌어내어 불발율을 개선할 수 있는 공의 돌출 길이를 각각의 모델을 통하여 분석, 예측하였다.

불발율이 0%에 근접하는 구간은 선형 및 다항 회귀 모델에서는 약 2.95mm이었으나, 실제 이항 데이터 분석에 적합한 로지스틱 회귀 모델에서는 약 3.1mm이었다. 이는 각 회귀 모델의 특성 차에 기인한 것으로 생각되며, 불발이 발생하는 실제 운용 데이터를 감안한다면 로지스틱 회귀 모델의 예측값이 더 적합한 것으로 판단된다.

따라서, 120mm 박격포 체계에서 최적의 공이 길이는 3.1mm 이상인 것으로 예상되며, 본 연구 결과가 해당 체계 및 유사 무기체계의 불발율 개선에 기여할 것으로 기대된다.

References

- [1] Taylor, C. A., and Wm H. Rinkenbach, "Sensitivities of detonating compounds to frictional impact, impact, and heat", *Journal of the Franklin Institute*, pp.369-376, 1927.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-0032\(27\)92103-6](https://doi.org/10.1016/S0016-0032(27)92103-6)
- [2] Courtney, Elya, et al., "Performance testing of lead free

primers: blast waves, velocity variations, and environmental testing”, *arXiv preprint*, arXiv:1410.6390, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1410.6390>

- [3] Matyáš, Robert, Jakub Šelešovsky, and Tomáš Musil, “Sensitivity to friction for primary explosives”, *Journal of hazardous materials*, (213) pp.236-241, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.01.085>
- [4] Šelešovsky, Jakub, and J. Pachmáň, “Probit analysis-a promising tool for evaluation of explosive’s sensitivity”, *Central European Journal of energetic materials*, (7.3), pp.269-278, 2010.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/COMWOR.1988.4800>
- [5] Lee, Jae-Gwan, et al., “A Study on Sensitivity Characteristics of Percussion Primer by External Impact Using Probit Analysis”, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, vol.23, no. 12, pp.612-617, 2022
DOI: <https://doi.org/10.5762/kais.2022.23.12.612>

김 도 영(Doyoung Kim) [정회원]



- 2014년 9월 : UNIST 신소재공학과 (공학석사)
- 2014년 8월 ~ 현재 : 국방기술품질원 선임연구원

<관심분야>
탄약, 무기체계, 인공지능

이 재 관(Jaegwan Lee) [정회원]



- 2015년 8월 : 경북대학교 화학공학과 (공학사)
- 2016년 1월 ~ 2019년 12월 : 한화솔루션 첨단소재 개발
- 2019년 12월 ~ 현재 : 국방기술품질원 유도탄약센터 선임연구원

<관심분야>
무기체계, 재료공학, 화학공학

김 기 수(Ki-Su Kim) [정회원]



- 2007년 2월 : 건국대학교 항공우주공학과 (공기역학 석사)
- 2008년 4월 ~ 현재 : (주)풍산 방산기술연구원 재직

<관심분야>
탄약, 무기체계

엄 태 일(Tae-il Eom) [정회원]



- 2009년 2월 : 충남대학교 바이오응용화학부 정밀응용화학 (공학사)
- 2010년 8월 ~ 현재 : (주)풍산 방산기술연구원 재직

<관심분야>
탄약, 무기체계

김 동 길(Dong-Gil Kim) [정회원]



- 2015년 2년 : 경북대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
- 2014년 12월 ~ 2017년 2월 : 국방기술품질원 선임연구원
- 2017년 3월 ~ 현재 : 경일대학교 기계자동차학부 부교수

<관심분야>
네트워크기반제어, 고장대처제어, 건전성 관리