

통계분석을 통한 ○○○○ 탄약 규격검토에 관한 연구

김영철*

*국방기술품질원 유도탄약센터

e-mail: baraem91@dtaq.re.kr

A Study on the Specification Review of ○○○○ Ammunition through Statistical Analysis

Young Chul Kim*

*PGM & Ammunition Center, Defense Agency for Technology and Quality

요약

본 연구는 ○○○○ 탄약에서 발생할 수 있는 결함에 대하여, 통계적 분석을 통하여 현행 품질보증 규격의 타당성을 검증하고 향후 품질개선 시 요구되는 시험(탄약 발사시험)의 기준을 제시하는 데 목적이 있다. 기존의 단순 비율 추정(Wald 근사법)이 가지는 한계를 극복하기 위해 Clunies-Ross, Bayesian, Bootstrap 등 수치해석 및 이산분포 확률 모델을 적용하여 검증을 수행하였다. 분석 결과, 95% 신뢰수준 하에서 발생 가능한 최악의 미사출 상한 확률은 0.36%로 도출되었다. 이는 현행 국방규격 상 추진부조립체의 중결점 합격품질한계인 AQL 0.40 범위 내에 완벽히 진입하는 수치로, 현재의 양산 체계와 샘플링 판정 기준($n=200$, $Ac=2$, $Re=3$)이 무기체계의 결함을 통제하기에 통계적으로 타당함을 입증한다. 또한, 향후 원인 분석을 통한 품질 및 공정 개선이 적용될 경우, 추진부조립체의 무결함(성공확률 99.64%)을 객관적으로 입증하기 위해서는 최소 831발의 무고장 연속 사격시험이 요구됨을 수학적으로 산출하여 후속 대책의 가이드라인을 제시하였다.

1. 서론

현대 전장에서 ○○○○탄약은 기존 △△△△탄약을 대체하여 신속한 기동력과 막강한 화력을 바탕으로 보병 부대의 핵심적인 근접 화력 지원 수단으로 자리매김하고 있다. 특히 ○○○○ 탄약은 사거리 연장을 위해 추진장약의 대폭적인 증가가 필요하였고 증가된 장약을 수용하고 발사간 발생하는 연소 가스를 제어하기 위해, 기존 포병탄약과 구별되는 구조가 새롭게 도입되었다.

그러나 최근 실시된 정부품질보증 수락 사격시험에서 결함(미사출(Misfire)) 현상이 드물게 발생되었다. 미사출은 전술적 공백을 초래할 뿐만 아니라, 미사출 처리 과정에서 운용요원의 생존성에 심각한 위협이 되는 치명적 결함(Critical Defect) 또는 중결점(Major Defect)으로 분류된다.

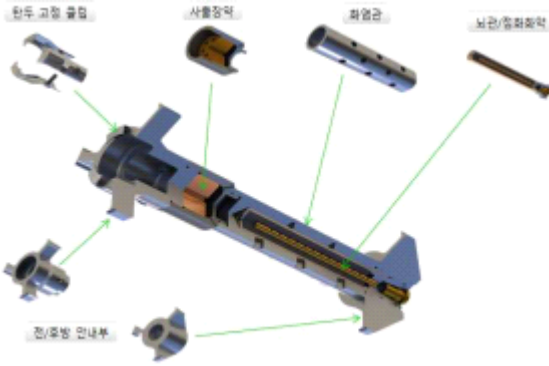
이에 따라 현행 국방규격에서 설정하고 있는 샘플링 검사 기준과 합격품질한계(AQL, Acceptable Quality Level)가 이와 같은 치명적 결함을 사전에 걸러내고 야전 신뢰성을 보장하기에 충분히 엄격한지에 대한 과학적이고 통계적인 재검토 요구가 대두되었다. 본 연구에서는 이산분포 확률과 통계적 수치해석 기법(Clunies-Ross, Bayesian 등)을 종합 분석하여 미사출 발생 확률의 최대 상한선을 수학적으로 규명

하였다. 도출된 상한 확률을 현행 규격치와 비교 분석하여 양산 체계의 안정성을 입증하고, 나아가 향후 품질 개선품에 대한 수락시험 기준(Sample Size)을 제안함으로써 군수품 품질보증 정책 수립에 기여하고자 한다.

2. 시험실패 확률의 통계적 분석

2.1 ○○○○탄약 추진부조립체 구조

○○○○ 탄약의 00구 조는 뇌관/점화화약, 화염관, 사출장약, 추진장약, 탄두 고정클립[그림 1]으로 구성된다. 공이의 타격에 의해 뇌관/점화약통이 점화되면, 추진장약이 점화되어 화염과 압력이 화염관을 따라 사출장약 및 탄두 클립에 전달되어 탄두가 발사되고 00구조물기를 사출하는 원리이다.



[그림 1] OO 구조

2.1.1 미사출(Misfire)정의

미사출이란 □□□□포가 사격을 실시하였을 때 탄두는 정상적으로 발사되었으나, OO구조가 포열 밖으로 방출되지 못하고 포열 내에 잔류하는 현상을 말한다.[1]

2.2 사격시험 결과

탄약 양산수락시험 기간 동안 누적된 □□□□포 사격 시험 데이터에 따르면 ○,○○○발의 사격시험결과 ○발의미사출이 발행하였다. 이를 단순 점추정 확률로 계산하면 0.17% 수준이다

2.3 미사출 확률의 통계적 수치해석

발생확률이 $p \rightarrow 0$ 에 가깝고 표본 수 n 이 큰 극단적 비대칭 데이터 환경에서는 일반적인 통계 추정 기법을 적용할 경우 심각한 오차가 발생한다고 알려져 있다.[2]. 따라서 각 기법별 산출식과 한계를 분석하고 최적의 신뢰구간을 도출하였다

2.3.1 Wald 근사법

일반적으로 불량률과 같은 이항분포의 신뢰구간은 정규분포에 기반한 Wald 근사법을 주로 사용한다. 산출식은 식 (1)과 같다.

$$\hat{p} \pm Z_{\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{\hat{p}(1-\hat{p})}{n}} \quad (1)$$

\hat{p} : 표본불량률, n : 표본크기, Z : 정규분포임계값

산출 결과, 미사출 95% 신뢰 상한선은 0.298%로 도출되었다. 그러나 이는 최소 데이터 환경에서 실제 신뢰수준(Coverage Probability)을 만족하지 못하고 상한치를 지나치게 과소추정(Underestimation)하는 치명적 오류가 있다고 알려져 있다. [2][3][4][5]

2.3.2 Clopper-Pearson/Clunies-Ross 구간

Wald 근사의 한계를 보완하기 위해 이항분포를 직접 이용하는 Clopper-Pearson 정확 신뢰구간(Exact Confidence Interval)과 Clunies-Ross 기법을 도입하였다. Clopper-Pearson 신뢰구간의 상한 P_U 를 구하는 산출식은 누적 이항분포를 활용하여 식 (2)와 같이 정의된다.

$$\sum_{k=0}^x \binom{n}{k} P_U^k (1-P_U)^{n-k} = \frac{\alpha}{2} \quad (2)$$

P_U : 신뢰상한확률, n : 표본크기, k : 불량(미사출) 발생수

산출 결과, 미사출 95% 신뢰상한선은 0.360%로 추정되었다.[2][5][6]

2.3.3 베이지안 및 부트스트랩 교차 검증

도출된 0.36% 신뢰상한 신뢰성을 재확인하기 위해 베이지안(Bayesian) 추론을 통한 교차 검증을 실시하였다. 먼저 무보정 평탄 사전분포(Flat prior)를 적용한 후 사후분포(Posterior distribution)를 도출하는 산출식은 (3)과 같다.

$$\pi(p|x) = \frac{p^{x-1}(1-p)^{n-x-1}}{B(x+1, n-x+1)} \quad (3)$$

P : 표본불량률, n : 표본크기(시험발수), x : 불량수(미사출발수)

산출 결과, 미사출 95% 신뢰 상한선은 0.360%로 Clunies-Ross 결과와 정확히 일치하는 결과를 얻었다. 이에 추가하여 본 미사출경우와 같이 불량률이 극도로 낮은 확률을 다룰 때, 제프리 사전분포가 최적의 구간을 제시한다고 알려져 있으므로 [2],[3] 무정보적 사전분포인 Jeffreys Prior Beta(0.5;0.5)를 적용한 신뢰구간도 산출해 보았다.

산출 결과, 미사출 95% 신뢰 상한선은 0.340%로 평탄사전분포 결과보다 통계적으로 더욱 엄밀하게 산출되었다. 하지만 본 검토대상과 같이 무기체계(탄약)는 엄밀성보다는 보수성 기준으로 판단이 유리함으로 본 연구는 평탄 사전분포 결과를 채택하였다

또한 100,000회 반복을 통한 부트스트랩(Bootstrap) 시뮬레이션 확인결과에서도 상한선이 0.359%로 수렴하여 수학적 무결성을 입증하였다

각 통계분석기법에 따른 산출결과를 요약하면 [표1]과 같다.

[표 1] 분석기법별 미사출 확률 상한선(95% 신뢰수준) 산출 결과

분석기법	산출결과(하한)	산출결과(상한)
Wald 근사법	0.033%	0.298%
Clopper-Pearson/ Clunies-Ross	0.061%	0.360%
Bayesian (FLAT)	0.078%	0.360%
Bayesian (Jeffreys)	0.069%	0.360%
Bootstrap(BCA)	0.055%	0.359%

3. 현행 품질보증 규격 분석

3.1 합격품질한계(AQL) 및 검사수준

현재 ○○○○탄약에 적용되는 규격에 따르면, 미사출과 같은 중결점 항목에 대해서는 KS 규격(KS Q ISO 2859-1, 계수형 샘플링 검사 절차), 국방규격(KDS xxxx-xxxx), 품질보증요구서(QAR A30004851)에 따라 AQL 0.40이 적용된다. 이는 로트(Lot) 단위 생산품에 대해 장기적으로 불량률 0.40% 이하의 품질을 요구한다는 의미이다

3.2 샘플링 검사의 검사특성곡선(OC Curve)

표 2에 제시된 바와 같이, 통상적인 양산 로트 크기에서 샘플(n)은 200발이며 합격판정개수(Ac)는 2발이다. 불량률이 p인 로트가 합격할 확률 P는 식 (4)를 (포아송분포) 통해 도출된다. 도출결과 합격확률은 95.26%(0.9526) 수준이었다.

[표 2] 현행 샘플링 검사 기준(AQL 0.40)

구분	적용기준
검사 수준	일반검사 수준 II
합격품질한계(AQL)	0.40 %
로트 크기(N)	3,201 10,000
샘플 크기(n)	200 발
합격판정개수(Ac)	2
불합격판정개수(Re)	2

$$P(X=x) = \sum_{x=0}^2 \frac{e^{-m} \cdot m^x}{x!} \quad (4)$$

p : 불량률, n : 표본크기, m : 평균불량(np), x : 불량수(미사출 발수)

이 검사특성곡선을 분석하면 공정 불량률이 AQL 0.40% 수준일 때 생산자 보호 확률은 95% 이상으로 유지되나, 불량률이 기준을 초과하면 합격 확률이 급격히 저하되도록 설계되어 있다

4. 규격타당성 검토 및 품질개선 제언

4.1 현행 규격의 통계적 타당성

2장의 통계분석결과, 현재 양산 중인 ○○○○탄약 추진부 조립체의 최악상황을 가정한 미사출 확률은 0.36%이다.

이는 제3장에서 분석한 현행 국방규격의 중결점 합격품질한계인 AQL 0.40% 한계치 이내로 완벽히 진입하는 수치이다. 결론적으로, 현재 적용 중인 샘플링 판정 기준(n = 200; Ac = 2; Re = 3)만으로도 무기체계의 치명적 결함을 사전에 통제하고 야전 운용의 신뢰성을 보장하기에 통계적으로 대단히 타당하고 안정적임을 의미한다.

4.2 품질개선에 따른 수락 사격시험 제언

현행 규격은 충분히 안정된 상태이나 있으나, 향후 OO 구조의 설계 변경이나 공정개선 등 품질 개선이 이루어질 경우, 해당 개선품이 기존의 최대 상한 확률(0.36%)을 극복하고 '무결함(결함률 0%)' 상태임을 객관적으로 입증하기 위한 새로운 검증 기준이 요구된다.

개선품의 임무성공확률(Reliability, R) 은 $1 - 0.0036 = 0.9964$ (즉, 99.64%)로 정의된다. 이 신뢰도를 특정 신뢰수준(1-α)하에서 입증하기 위해 필요한 무고장 연속 사격 발수 N은 식 (5)와 같이 산출된다. [7][8]

$$n = \frac{\ln(1 - CL)}{\ln(R)} \quad (5)$$

n : 시험시료수, CL : 신뢰수준, R : 신뢰도

신뢰수준 95% (α=0.05)를 대입하면,

$$n = \frac{\ln(1 - CL)}{\ln(R)} = \frac{\ln(1 - 0.95)}{\ln(0.9964)} \cong \frac{-2.995732}{-0.0036065} \cong 830.64$$

즉, 품질개선품에 대하여 최소 831발의 수락 사격시험을 실시하여 단 한 발의 미사출도 없어야만, 95%의 신뢰수준으로 개선품의 미사출 확률이 0.36% 미만임을 확인할 수 있다.

[표 3] 신뢰도(99.64%) 입증을 위한 신뢰수준별 필요 시험 발수 (무고장 조건)

요구 신뢰수준(1-α)	위험률(α)	필요 사격 발수(N)
80%	0.20	447 발
90%	0.10	639 발
95%	0.05	831 발
99%	0.01	1,278 발

5. 결론

본 연구는 ○○○○탄약 미사출 현상에 대하여 통계적 수치해석 기법을 적용하여 미사출 발생확률을 도출하고 현행 규격을 검토한 후 개선방향을 제시하였다. 주요 연구 결과는 다음과 같다.

첫째, 발생 빈도가 극히 낮은 미사출 데이터 특성을 반영하여 Clunies-Ross 및 베이저안 수치해석 기법을 교차 적용한 결과, 95% 신뢰수준에서 최악의 미사출 확률 상한선은 0.36%로 도출되었다.

둘째, 산출된 미사출 최대 상한선(0.36%)은 현행 규격의 중결점 AQL(0.40%) 이내에 완벽히 진입하므로, 현재의 샘플링 검사 체계(n = 200)가 치명적 결함을 통제하기에 통계적으로 매우 타당함을 입증하였다.

셋째, 향후 원인 규명을 통해 부품 설계 혹은 제조 공정이 개선될 경우, 개선품의 완벽한 신뢰성(99.64%)을 보증하기 위해서는 최소 831발의 무고장 수락 사격시험이 요구됨을 산출하여 공학적 가이드라인을 제시하였다.

참고문헌

- [1] 김건인, “○○○○탄약 ○○○○ ○○○○기능 검토 및 타당성 검토연구”, 고려대학교 산학협력단·정보보호대학원, 3월, 2019년
- [2] Wang, S.-S., "A Study of Confidence Interval for Binomial Proportion," MS Thesis, Institute of Statistics, National University of Kaohsiung, 2010.
- [3] 류재복 (2009. “이항신뢰구간에 대한 소고”, *한국통계학회논문집*, **16**, 731-743
- [4] Aresti, A. and Coull, B. A. (1998). Approximate is better than “Exact” for interval estimation of Binomial proportions, *The American Statistician*, **52**, 119-126.
- [5] Ghosh, B. K. (1979). A comparison of some approximate confidence intervals for the Binomial parameter, *Journal of the American Statistical Association*, **74**, 894-900.
- [6] Vollset, S. E. (1993). Confidence intervals for a binomial proportion, *Statistics in Medicine*, **12**, 809-824.
- [7] 유도탄 ASRP 계획서 작성 가이드북, 국방기술품질원, 11월, 2024년,
- [8] Department of Defense, “MIL-STD-105E: Sampling Procedures and Tables for Inspection by Attributes,” DoD, 1989.