

저장기간 경과에 따른 박격포탄의 탄속과 안정제함량 분석 및 수명 추정

김원석, 정덕교
국방기술품질원
e-mail:kws819@dtaq.re.kr
duckkyo84@dtaq.re.kr

Analysis of Muzzle Velocity and Stabilizer Content over Storage Period and Life Estimation on Mortar Ammunition

KIM WONSEOK, JUNG DUCKKYO
Defense Agency for Technology and Quality

요약

이론에 따르면 저장기간이 경과할수록 추진제 주요성분이 자연분해가 되고, 이에 따라 추진제의 에너지가 감소하고 탄속이 감소한다고 하였다. 본 논문에서는 실질적으로 저장기간이 경과함에 따라 안정제함량과 탄속의 감소가 이루어지는 지 '05년도~'20년도 81mm 고폭탄 KM374 ASRP (Ammunition Stockpile Reliability Program) 시험결과 데이터를 회귀분석을 적용하여 확인하였고, 회귀분석 결과를 가지고 탄의 수명을 추정해보았다.

이러한 안정제의 분해억제력은 오랜 기간에 걸쳐 이루어지며
장기간 저장시 안정제가 점차 소진된다[1].

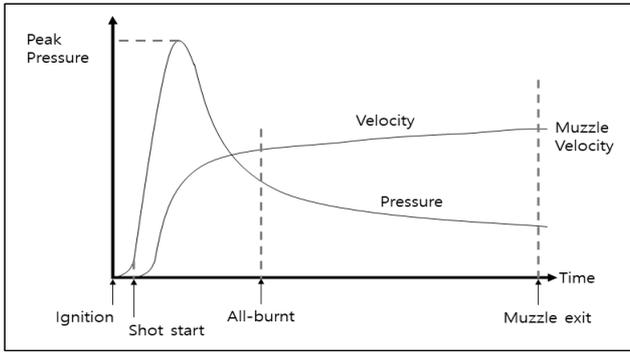
본 연구에서는 '05년도~'20년도 81mm 고폭탄 KM374
ASRP 시험결과 데이터를 활용하여, 실질적으로 저장기간에
따라 안정제함량, 탄속이 감소하는지 회귀분석을 통해 검증
해보았다. 또한, 탄속과 안정제함량이 서로 상관관계를 보이
는지도 확인해보았으며 회귀분석 결과로 KM374의 저장수명
을 추정해보았다.

1. 서론

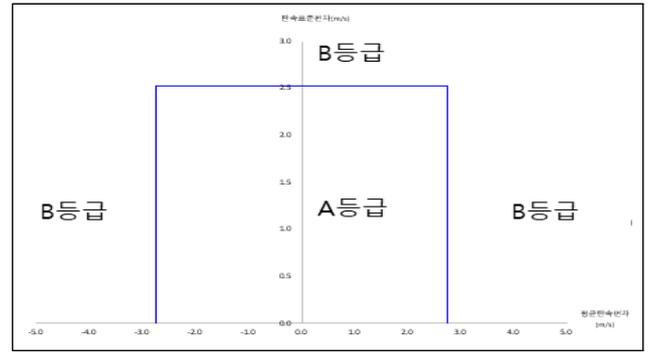
박격포, 곡사포 등 재래식 탄약에 사용되는 추진제는 일반
적으로 단기, 복기, 다기 추진제로 나눌 수 있다. 단기 추진제
는 NC(Nitrocellulose)를 주요 기제로 하여 제조된 초기 형태
의 추진제로서 안정제는 대부분이 DPA(Diphenylamine)가
사용된다. 복기추진제는 NC와 NG(Nitroglycerine)로 구성되
어 있으며 주로 EC(Ethylcentralite)를 안정제로 사용하지만
DPA가 사용되기도 한다. 그리고 다기 추진제는 NC, NG,
NGd(Nitroguanidine) 3개의 주요성분으로 구성되어 있으며
높은 에너지를 필요로 하는 대구경의 포탄약에 주로 사용된
다. 추진제의 주요구성 성분 중 NC는 질산에스테르 화합물로
서 대기 중 또는 자체 내의 함유수분과 결합하여 쉽게 가수분
해가 된다. 따라서, 저장기간 경과에 따른 NC의 자연분해가
추진제의 에너지 감소로 이어지고 탄속이 감소한다. 그리고
가수분해로 발생된 생성물은 분해반응의 촉매역할을 하게 되
므로 추진제의 분해 반응을 더욱 가속화시킨다. 이러한 자연
분해반응이 활성화되면 자연발화하거나 폭발 가능성도 있다.
이러한 추진제의 분해반응이 활성화 되는 것을 방지하기 위
하여 안정제를 첨가한다. 안정제는 에스트르화합물의 자연분
해를 억제할 수 없으나 자연분해과정에서 생성되는 니트로화
합물을 고정시킴으로써 분해반응이 가속되는 것을 막아준다.

2. 81mm 고폭탄 KM374

박격포탄은 포강 내부로 낙하된 탄이 자체 중량에 의하여
포강 하단부로 내려가서 충격식 뇌관이 포강하부의 공이에
부딪힘으로써 폭발하여 점화약통을 점화(Ignition)하고, 외부
로 뚫린 구멍을 통해 추진장약을 점화하게 된다. 마지막 단계
는 발사작용으로 추진장약의 연소에 의해 생긴 높은 압력의
가스 힘으로 포탄이 발사(Shot start)되어 포구를 떠나 비행
에 들어간다. 그림 1은 탄이 점화에서부터 포구를 나가는 시
간 까지의 포강 내의 압력과 탄속을 나타낸 것이며, Peak
Pressure는 포강 내 최대압력을 말하고, All-burnt는 추진제
가 완전 연소되는 시점을 말한다[3].



[그림 1] 탄 발사 시 시간에 따른 포구 내 압력, 속도 그래프



[그림 2] KM374 등급선 그래프

2.1 추진제

81mm 고폭탄 KM374는 약포형태의 KM90 추진장약이 사용되며, KM90 추진장약은 9개의 단위장약으로 구성되어 있다. KM90 추진장약에 사용되는 추진제는 KM9 조성의 복기 추진제로 NC와 NG가 주성분으로 구성되어 있다. 형상은 박편형(Flake)으로 되어 있으며 저장성을 높이기 위한 안정제는 EC로 0.65~0.85% 정도 사용되고 있다[2].

안정제함량의 분석은 로트 당 3발을 시료 채취하여 진행된다. ASTP(Ammunition Stockpile Test Procedures)상의 시험절차를 거쳐 분광분석기를 사용하여 흡광도를 측정한다. 측정 결과는 산식을 통하여 안정제함량이 산출된다. 추진제의 안정제함량에 따른 저장등급은 표1과 같다[6].

[표 1] 저장등급 내용

저장등급	안정제함량 (%)	처리방안
A	0.3% 이상	계속저장
C	0.2%~0.29%	1년내 소모
D	0.2% 미만	60일내 폐기

2.2 탄속

탄속(Muzzle Velocity)은 ASRP 기능시험을 통해 측정되며, 도플러레이더라고 하는 장비로 측정이 된다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 도플러레이더로 측정하는 탄속은 탄이 포구를 나가는 시점(Muzzle exit)의 탄속을 측정하게 된다. 기능시험은 ASTP에 따라 진행되며, 그림 2의 등급선을 기준으로 로트의 탄속표준편차와 평균탄속에 의해 기능변수 A, B 등급으로 분류된다. 로트의 평균탄속이 264±2.75 m/s를 벗어나게 되거나 탄속표준편차가 2.53 m/s를 초과하게 되면 기능변수 B 등급으로 분류된다[5].

3. 데이터 분석

81mm 고폭탄 KM374의 ASRP 결과의 탄속과 안정제함량을 가지고 회귀분석을 실시해 보았다. 회귀분석은 독립변수(중속변수에 영향을 주는 변수)들과 종속변수 간의 함수관계를 규명하는 통계적인 분석방법이다. 본 분석에서는 한 개의 독립변수와 종속변수의 관계를 직선관계로 가정하고 단순회귀분석을 하였다.

회귀선에 대한 가설검정은 $F = \frac{MSR}{MSE}$ (검정통계량) $\geq F_{0.05; (1, n-2)}$ (기각역)이면 회귀모형이 유의하다고 판정한다. MSR(회귀제곱합의 평균)은 SSR(회귀제곱합)를 자유도 1로 나눠 값이 동일하며, MSE(잔차제곱합의 평균)은 SSE(잔차제곱합)를 자유도 n-2로 나눈 값이다. $SSR = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$, $SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ 로 y_i 는 실측값, \hat{y}_i 는 추정값, \bar{y} 는 실측값의 평균값이다[4].

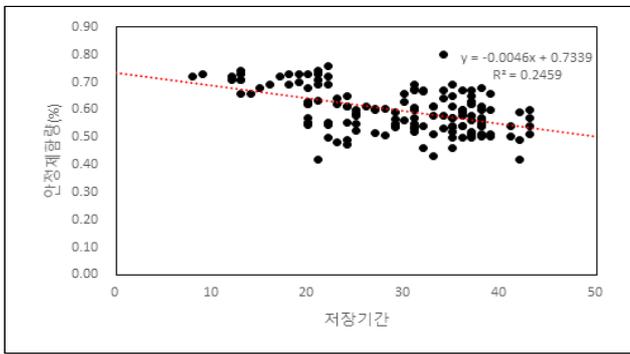
회귀분석에 대한 결과로 주어진 독립변수 값 X_0 에서 $(1-\alpha) \times 100\%$ 의 자료가 있게 될 Y_0 의 예측구간은 다음 식으로 구할 수 있다. $\hat{Y}_0 - t_{\alpha/2; n-2} S_{Y_0 - \hat{Y}_0} \leq Y_0 \leq \hat{Y}_0 + t_{\alpha/2; n-2} S_{Y_0 - \hat{Y}_0}$ (1) 여기서 $S_{Y_0 - \hat{Y}_0} = S_e \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(X_0 - \bar{X})^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}} = S_e \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(X_0 - \bar{X})^2}{\sum_{i=1}^n X_i^2 - n\bar{X}^2}}$ 이며, X_0, Y_0 =독립변수, 실제 종속변수의 값, \bar{X} = 표본 평균, n=관측 수, α =유의수준, \hat{Y}_0 =회귀식에 의해 추정된 값, $S_{Y_0 - \hat{Y}_0} = Y_0 - \hat{Y}_0$ 의 표준편차, $t_{\alpha/2; n-2}$ = 신뢰계수이다[1].

3.1 상관관계 검증

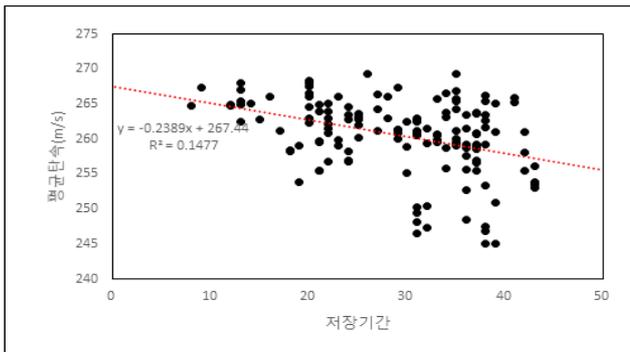
81mm 고폭탄 KM374의 2005~2020년까지의 시험데이터를 가지고 저장기간에 따른 안정제함량 저장기간에 따른 평균탄속, 안정제함량에 따른 평균탄속을 회귀분석을 유의수준 5%로 실시하였다. 표2는 회귀모형을 분석한 표이다.

[표 2] 2005~2020년 시험데이터 회귀분석표

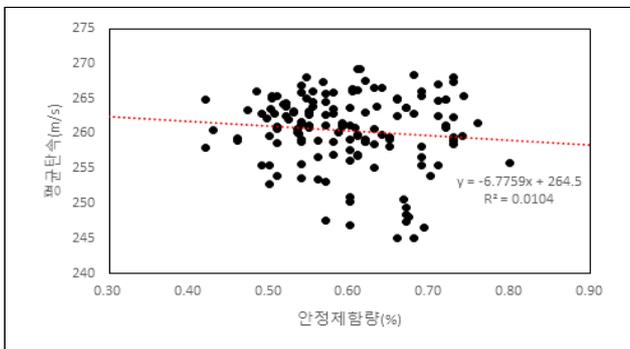
구분	값		
	저장기간에 따른 안정제함량	저장기간에 따른 평균탄속	안정제함량에 따른 평균탄속
회귀식	$Y = -0.0046x + 0.7343$	$Y = -0.2389x + 267.44$	$Y = -6.7759x + 264.5$
상관계수	0.4959	0.3843	0.1022
검정통계량	45.9871	24.4268	1.4879
기각역	3.9083	3.9083	3.9083
p-값	3.02×10^{-10}	2.16×10^{-6}	0.2246



[그림 3] 저장기간에 따른 안정제함량의 회귀분석 결과



[그림 4] 저장기간에 따른 평균탄속의 회귀분석 결과



[그림 5] 안정제함량에 따른 평균탄속의 회귀분석 결과

그림 3은 저장기간에 따른 안정제함량의 회귀분석 결과이며, 저장기간이 경과함에 따라 안정제함량은 감소하는 현상이 보인다. 검정통계량 $F = 45.9371 \geq F_{0.05;(1,141)} = 3.9083$ 으로 기각역에 해당되고 p-값이 3.02×10^{-10} 으로 0.05보다 작아 회귀분석 결과는 유의하다고 할 수 있다.

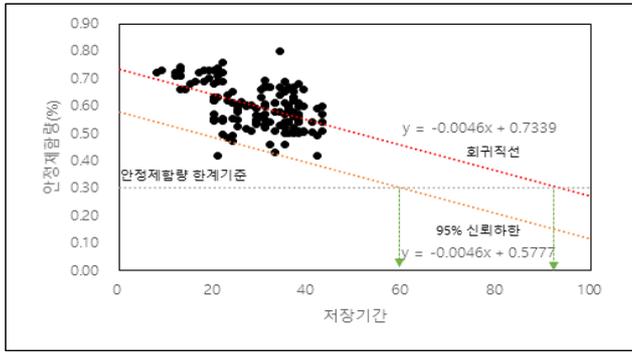
그림 4는 저장기간에 따른 평균탄속의 회귀분석 결과이며, 저장기간이 경과함에 따라 평균탄속은 감소하는 현상이 보인다. 검정통계량 $F = 24.4268 \geq F_{0.05;(1,141)} = 3.9083$ 으로 기각역에 해당되고 p-값이 2.16×10^{-6} 으로 0.05보다 작아 회귀분석 결과는 유의하다고 할 수 있다.

그림 5는 안정제함량에 따른 평균탄속의 회귀분석 결과이며, 데이터 분포의 상관관계가 낮고 분석표에서도 검정통계량 $F = 1.4879 < F_{0.05;(1,141)} = 3.9083$ 으로 기각역에 해당되지 않으며, p-값도 0.2246으로 0.05보다 커 회귀분석 결과는 유의하지 않다.

추진제의 NC는 저장기간이 경과함에 따라 자연분해로 인해 에너지가 감소하고 이는 탄속 감소로 이어진다는 것을 확인했고, 안정제함량 또한 NC의 자연분해로 나온 생성물과 반응하여 감소한다는 것을 확인했다. 이에 따라, 안정제함량과 평균탄속의 회귀분석 결과 또한 유의할거라 예상했지만 안정제함량과 평균탄속의 회귀분석 결과는 통계적으로 유의하지 않았다. 저장기간에 따른 안정제함량과, 평균탄속의 회귀분석 결과를 보면 상관계수가 각각 0.4959, 0.3843로 나왔다. 상관계수는 1과 가까울수록 두 변수가 상관관계가 높다는 것을 의미하는데 저장기간에 따른 안정제함량과 평균탄속의 상관계수는 1과 거리가 있다는 것을 알 수 있다. 이는 안정제함량, 평균탄속 모두 저장기간 이외의 요인들의 영향이 적지 않게 작용하는 것을 알 수 있다. 안정제함량 분석 시험은 시료 선정의 차이, 시료의 저장상태 등의 외부요인이 작용했을 것이고, 탄속은 포신의 차이, 시험 당시 온도, 습도, 대기압 등의 외부요인이 영향이 미쳤다고 추측이 된다. 안정제함량과 평균탄속의 회귀분석 결과가 유의하지 않은 것도 저장기간의 변화뿐만 아니라 여러 외부요인이 안정제함량과 탄속에 영향을 미쳤기 때문에 나온 결과라고 판단된다.

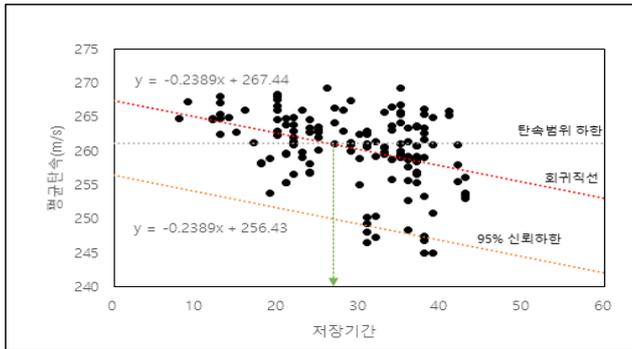
3.2 KM374 수명 추정

회귀분석 결과 통계적으로 유의하다고 나온 저장기간에 따른 안정제함량과 평균탄속을 통하여 KM374의 수명을 추정해보았다. 그림 6은 저장기간에 따른 안정제함량의 회귀분석을 통한 수명 추정 결과이며, 그림 7은 저장기간에 따른 평균탄속의 회귀분석을 통한 수명 추정 결과이다.



[그림 6] 저장기간에 따른 안정제한량을 통한 수명 추정 결과

그림 6에서 저장기간에 따른 안정제한량의 회귀직선이 안정제한량 한계기준(0.3%)와 만나는 지점은 회귀식에 의하여 구할 수 있다. $0.3 = -0.0046x + 0.7343$ 로 x (저장기간) = 약 94년이며, 95% 신뢰수준에서 예측구간 하한값은 식(1)에 의해서 구해지며, 안정제한량 한계기준과 만나는 지점은 $0.3 = -0.0046x + 0.5777$ 로 $x =$ 약 59년이다. 안정제한량이 한계기준에 다른 수명은 오차를 고려하여 95% 신뢰수준에서 예측구간 하한값이 안정제한량 한계기준과 만나는 59년이라고 추정할 수 있다.



[그림 7] 저장기간에 따른 평균탄속을 통한 수명 추정 결과

그림 7에서 저장기간에 따른 평균탄속의 회귀직선이 탄속범위 하한값(261.25 m/s)과 만나는 지점은 $261.25 = -0.2389x + 267.44$ 로 $x =$ 약 26년이며, 95% 신뢰수준에서 예측구간 하한값이 탄속범위 하한값과 만나는 지점은 $261.25 = -0.2389x + 256.43$ 으로 $x =$ 약 -20년이 나온다. 이 결과로 보았을 때 95% 신뢰수준에서 예측구간 하한값으로 수명을 예측하긴 어렵다. 그 이유로는 ASTP상의 탄속범위 기준(264 ± 2.75 m/s)이 좁게 정해져 있는 것과 저장기간에 따른 평균탄속의 데이터가 넓게 산포되어있어 약한 상관관계의 형성에 따른 결과라고 판단된다.

4. 결론

81mm 고폍탄 KM374 시험데이터를 회귀분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 이론에 따르면 저장기간이 경과함에 따라 탄속이 감소한다는 것과 안정제가 감소한다는 것을 회귀분석을 통하여 통계적으로 확인할 수 있었다.

둘째, 저장기간에 따른 안정제한량과 저장기간에 따른 평균탄속의 각 상관계수가 0.4959, 0.3843으로 약한 상관관계라고 판단할 수 있으며, 저장기간이외에 외부요인들도 영향을 미친 결과라고 볼 수 있다. 안정제한량 분석 시험은 시료의 선정, 시료의 저장환경 차이 등의 외부요인이 있을 것이며, 기능시험은 포신의 차이, 온도, 습도, 대기압 등과 같은 외부요인이 있을 것이라고 추측된다. 이에 따라 안정제한량에 따른 평균탄속의 회귀모형이 통계적으로 유의하지 않다는 결과가 나온 것으로 판단된다.

셋째, 81mm 고폍탄 KM374의 안정제한량이 한계기준에 도달하는 시기는 약 59년으로 추정되며 연간 0.0046%의 안정제한량이 감소한다. 그리고 평균탄속이 탄속범위의 하한값을 이탈하는 시기는 약 26년으로 추정되며 평균탄속이 연간 0.2389 m/s 감소한다.

탄의 정확한 수명 추정을 위해서는 안정제한량의 한계기준과 탄속범위의 하한값에 도달하는 시기의 차이를 감소시킬 필요가 있다. 이를 위해 ASTP 상의 탄속범위를 재설정 할 필요가 있으며, 기능시험의 외부요인을 통제하여 저장기간에 따른 평균탄속의 상관관계를 높일 필요가 있다. 안정제한량 분석시험 또한 외부요인을 파악 및 통제하여 저장기간에 따른 안정제한량의 상관계수를 높인 회귀분석 결과를 얻을 수 있다면 탄 수명 추정의 신뢰도향상에 기여할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] 윤근식, “155MM 추진장약 M4계열 신뢰도 및 저장수명 추정”, 국방기술품질원, DTaQ-13-3774-R, 11월, 2013년.
- [2] 윤근식 외6, “02추진제 저장안정성 평가 보고서”, 국방기술품질원, DQAA-02-851-P, 2002년.
- [3] C. L. FARRAR, D. W. LEEMING, “MILITARY BALLISTICS”, Battlefield Weapons Systems & Technology, Volume X.
- [4] 한국표준협회, “통계적 품질관리(SQC)”, 제조안전교육센터, Rev. 19, 4월, 2022년.
- [5] 국방기술품질원, “저장탄약 시험절차서 81MM 고폍탄 KM374 계열”, ASTP 1315-0020-4 품, 3월, 2020년.
- [6] 국방기술품질원, “저장탄약 시험절차서 추진제”, ASTP 1320-0012-1 품, 12월, 2010년.