

## 분산도 분석에 의한 총열 잔여수명 예측에 관한 연구

### A Study on the Prediction of the Remaining Life of the Barrel in Small Arms using Analyzing Dispersion

김 현 준\*

Hyun-Jun Kim

#### Abstract

This paper includes that there is the way to make the prediction of the remaining life of the barrel in small arms using analyzing dispersion. There are some ways to know the period to change the barrel such as the method of detecting the inner surface directly or inspecting the scratch using the optical sensor. However, it is a more easy way to check the dispersion for soldiers and the directors in a logistics command. Therefore, this study is conducted to focusing on the relation between firing round and dispersion. And the simple equation experimentally derives from pre-tests and analyses. Also, this equation is confirmed through the firing tests during the period of developing K11. In that sense, it can be easily applied to know the period of changing the barrel of small arms in the field army.

Keywords : Remaining Life(잔여수명), Barrel(총열), Dispersion(분산도), Small Arms(소구경화기)

#### 1. 서론

지금까지 소구경화기를 운용하는 경우, 전군이 매년 훈련용으로 각 훈련자 별로 수 백발 이상의 탄약을 사격하면서 훈련하는 나라는 많지 않다. 총열의 수명은 수 천발(각 소화기별로 다르나 일반적으로 6,000발이며, 3,500발~5,000발 정도의 사격을 할 경우, 탄도학적 성능저하가 일어남)로 정해져 있으나, 자국이 개발한 화기를 이용하여 전투력 향상을 위해 지속적으로 훈련하는 경우는 드물어, 그로 인해 대부분의 소구

경 화기의 운용자들이 총열은 수 천발 정도의 수명을 가지는 것으로 판단하고 있다<sup>1)</sup>. 따라서 소구경 화기 분야에서 총열의 현재 누적 사격량 및 한계수명까지의 잔여 사격량을 판단하기 위한 연구는 국내외 적으로 이루어지지 않고 있었다. 그러나 최근들어 사용군에서 군수지원분야를 지속적으로 강조하기 시작하면서부터 다양한 분야에 군수지원성 분석이 이루어져, 유지비용 절감 노력이 이루어져오고 있다. 이러한 노력의 일환으로 화포이력부를 작성하고 있지 않은 소화기 분야에서는 많은 사용량에도 불구하고 각각의 총열의 적기교체 시기를 알 수 없어 군수지원이 체계적으로 이루어지고 있지 않은 것에 대한 연구의 필요성이 제기되고 있다. 이러한 배경에서 본 연구는 총열의 현재 누적 사격량과 한계 수명까지의 잔여 사격량

† 2009년 1월 5일 접수~2009년 2월 27일 게재승인

\* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 김현준(hyunjuns@add.re.kr)

을 예측하기 위하여 야전운용환경에서 쉽게 접근할 수 있는 방법을 찾아내어 도표화 혹은 수식화 함으로써 야전에서 사용군이 총열 교체 시점을 쉽게 찾아내는 것이 가능하도록 하는 것을 목적으로 진행하였다.

## 2. 연구범위

본 연구의 진행은 총열의 잔여수명을 예측할 수 있는 변수를 선정하는 것에서 출발하였다. 총열의 현재 및 잔여 사격량을 예측하는 방법으로 가장 확실한 방법은 총열의 내경을 Gage 계측을 통해 확인하여 마모 정도를 측정하는 것이 가장 일반적인 방법이다. 그러나 현재 소구경 화기의 형상특성과 보급규모 및 사용군의 운용정비 절차를 고려해봤을 때, 각 야전부대에서 측정에 어려운 점이 많다. 또한 마모를 측정하는 다른 방법인 침식마모 측정센서를 삽입하여 마모량을 측정하는 방법과 대구경 화포의 연구에서처럼 압흔을 이용하여 총열의 수명을 예측하는 방법도 있으나 이러한 방법은 야전에서 사용군이 내경 측정 광학장비를 보유하여야 하는 단점과, 회전탄대가 없는 소구경 화기의 경우 총열에 동피가 묻어 압흔이 사라지는 단점이 있기 때문에 적용이 어렵다.

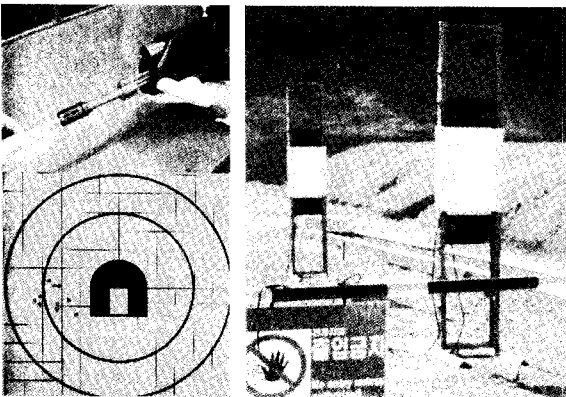


Fig. 1. 총열 잔여수명 파라미터 분석(좌상 : 마모측정법, 좌하 : 분산도계측법, 우 : 총구속도 측정법)

본 연구에서 접근한 방법인 분산도를 통한 총열 잔여수명 예측 기술은 사용군에 의해 가장 편하게 사용 가능하지만 분산도와 총열수명의 상관관계는 쉽게 예측하기 힘든 점이 있다. 소구경화기의 사격량과 분산도의 관계는 일차함수의 형태를 보일지 혹은 다차 함

수의 형태를 보일지 쉽게 예상하기 힘든 점이 많고 또한 한계수명까지 사격을 진행하여 결과를 확인해야 하는 어려운 점이 있기 때문에 쉽게 접근할 수 없는 단점이 있었다. 하지만 비용 대 효과적인 측면을 고려했을 때 분산도와 사격량과의 관계를 예측할 수 있다면 야전환경에서 사용군이 가장 편하고 쉽게 적용이 가능하기 때문에 분산도를 통한 총열 잔여수명 예측에 대한 가설을 설정하고 연구를 진행하였다.

## 3. 분산도 예측 가설 설정

### 가. 파라미터의 상관관계 분석

총열 누적 사격량은 내경의 마모량과 직접적인 관련이 있어서, 내경마모량을 확인할 수 있다면 총열의 현재 및 한계수명까지의 잔여 사격량을 쉽게 알 수 있게 된다. 따라서 잔여수명을 예측하기 위해서는 내경마모량을 직접 확인하거나, 마모량과 다른 변수와의 상관관계를 분석하는 방법이 있다. 소구경화기 분야에서의 총열 잔여수명을 예측하는 파라미터로는 내경마모량, 분산도, 총구속도 등이 있으며, 식 (1)과 같이 변수들 사이의 상관관계인 사격 발수에 따른 내경마모량을 직접 계측하는 법, 총구속도와 사격량과의 관계를 분석하는 법, 분산도와 사격량과의 관계를 분석하는 법 등을 통해 잔여수명을 예측하는 것이 가능하다<sup>[1]</sup>.

$$\begin{aligned} \text{분산도} &= f(\text{내경 마모량}) \\ \text{내경 마모량} &= g(\text{사격량}) \\ \text{분산도} &= f \circ g(\text{사격량}) \end{aligned} \quad (1)$$

일반적으로 대구경 화포의 경우 사격량에 따른 내경의 마모량을 측정하는 노력은 계속되어 왔고, 식 (2)와 같이 마모모델도 어느 정도 검증된 모델이 존재한다. 사격량과 내경마모량의 도식 관계는 화포의 마모모델로 널리 알려진 이론으로서 일반적으로 Fig. 2와 같이 사격량에 따라 내경마모량이 일차 함수의 형태를 보이며 증가함을 확인할 수 있다<sup>[5]</sup>.

이런 이론을 바탕으로 분산도와 총열 내경 마모량, 내경 마모량과 사격량과의 상관관계를 예측할 수 있다면 분산도와 사격량과의 관계식도 유도가 가능하여 분산도 측정을 통해 총열 잔여수명 예측도 가능하게 된다<sup>[6]</sup>.

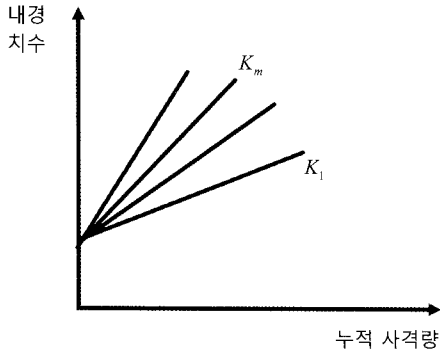


Fig. 2. 내경치수-누적사격량 그래프

$$\text{마모량} = (a+bx)K_m \quad (2)$$

여기서,  $a, b$  = 계수,  $x$  = 사격량,  $K_m$  = 장약호수이며, 5.56mm K100 보통탄을 주로 사용하는 소구경 화기의 경우 장약호수  $K_m$ 가 상수이므로 마모량은 선형적으로 증가한다는 것을 알 수 있다<sup>[4]</sup>. 이 때 마모량을 분산도로서 표현할 수 있다면, 즉 사격량에 따라 마모량과 분산도가 선형적으로 증가한다면 총열 누적 사격량은 분산도의 함수로 나타낼 수 있다.

#### 나. 선행시험 수행

상관관계를 시험적으로 분석하기 위해 선행시험을 실시하였다. 시험은 크롬도금이 되지 않은 표준 총열 및 크롬도금 총열을 각각 1개씩 제작하여 실시하였고 실제 운용상황을 모사하기 위하여 단발사격 30발, 점사사격 30발을 번갈아 210발을 1주기로 사격시나리오를 설정하였다. 각 총열에 대하여 두격검사, 기능검사, 강내검사, 진직도검사 등의 예비검사를 실시한 후 각 총열에 대하여 20,000발 내구도 사격시험을 수행하고 이때 측정된 데이터(분산도, 총구속도, 내경 마모량)를 기준으로 잔여수명 예측 곡선을 도출하였다.

표준 총열의 경우를 관찰한 결과 Fig. 3과 같이 사격이 진행되면서 내경 마모량이 선형적으로 증가됨을 확인할 수 있었다. 그러나 총열에 크롬도금처리를 수행할 경우, 내경마모모델과 일치하지 않는 결과를 확인할 수 있었는데, 이는 사격이 진행됨에 따라 마모도 진행되나 총열에 크롬도금처리를 할 경우 동피가 더 잘 고착이 되어 측정에 오차가 발생하는 것이 원인으로 파악되었다. 이 시험결과를 통해 판단해 볼 때, 표준총열의 경우 내경 측정을 통해 총열의 잔여수명을 예측하는 것은 가능하지만, 크롬도금처리를 할 경우

내경의 치수를 측정하여 총열의 누적 사격량을 예측하는 방법으로 적절치 않음을 확인할 수 있었다. 참고로 현재 대부분의 소구경화기 총열이 도금이 되어있지 않으나, 총열의 내구성 향상을 위해 크롬도금이 된 총열이 지속적으로 보급중에 있다.

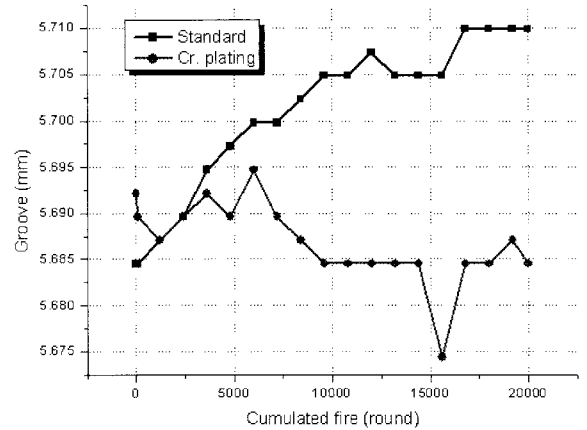


Fig. 3. 사격량-내경치수 변화

총구속도는 Fig. 4와 같이 부분적인 오차는 있었으나, 사격량에 따라 선형적으로 감소함을 확인할 수 있었다. 즉 총열 수명과 총구속도는 매우 깊은 연관성을 가짐을 확인하였다. 하지만 야전에서 총구속도 측정장치를 설치하여 운용하는 데는 매우 큰 비용이 소요되며, 총구속도 측정에 있어서 광량, 수평/수직도 등 외부 환경조건의 영향을 많이 받기 때문에, 야전에서 사용하기에는 적합한 방법이 아니라고 판단하였다.

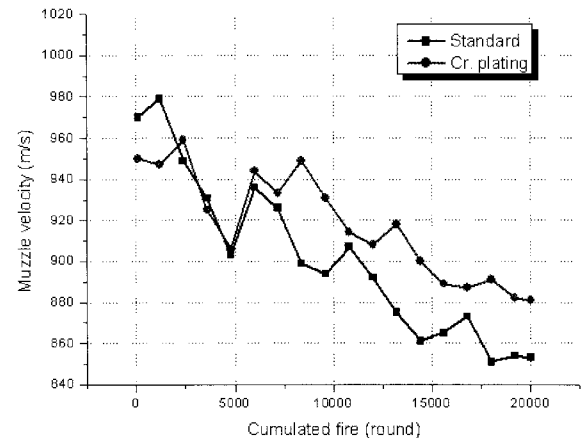


Fig. 4. 사격량-총구속도 변화

#### 4. 시험결과 분석

##### 가. 파라미터 선정

분산도는 Fig. 5와 같이 크롬도금처리 여부와는 상관없이 사격량에 따라 선형적으로 증가함을 확인하였다. 시험결과를 분석했을 때 총열 표면에 크롬도금을 할 경우 사격량과 분산도의 상관관계가 일차함수의 관계를 보이는 것으로 확인되었다. 결과적으로 5.56mm 총열에 크롬도금을 적용할 경우 분산도 측정을 통해 총열의 누적 사격량을 예측하는 방법이 가능함을 확인하였다.

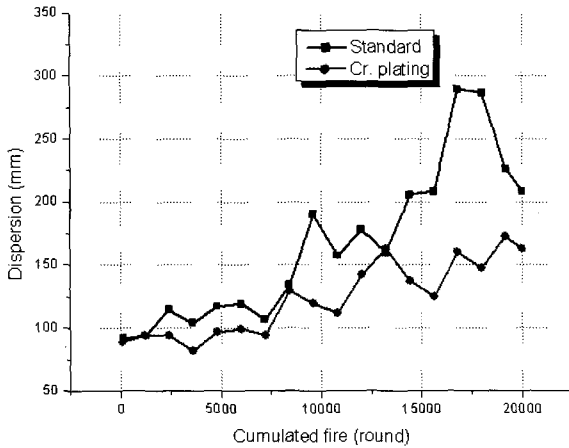


Fig. 5. 사격량-분산도 변화

##### 나. 실험식 유도

사격량과 분산도의 관계를 실험식으로 유도하였다. 크롬 도금한 총열의 20,000발 사격간 분산도 데이터를 분석해서 선형회귀법을 적용하면 Fig. 6과 같다. 다양한 사격거리에서도 적용이 가능토록 분산도를 mil 단위로 환산하였으며, 여러 가지 Curve Fitting 방법론을 적용해 본 결과 야전에서 쉽게 계산할 수 있는 일차함수 형태로 표현해도 충분하다는 것을 알 수 있었다.

사격량과 분산도와의 상관관계에서도 볼 수 있듯이 총열 수명은 국방규격에서 정한 내구도 사격량을 기준으로 할 때에 충분히 10,000발을 상회하여 조건을 보장함을 알 수 있다. 또한 이를 수식화하면 식 (3)과 같다.

$$D_{mil} = A + B_1 \times L_{round} + B_2 \times L_{round}^2 + B_3 \times L_{round}^3 \quad (3)$$

여기서, 함수별로 각항의 상수는 Table 1과 같다.

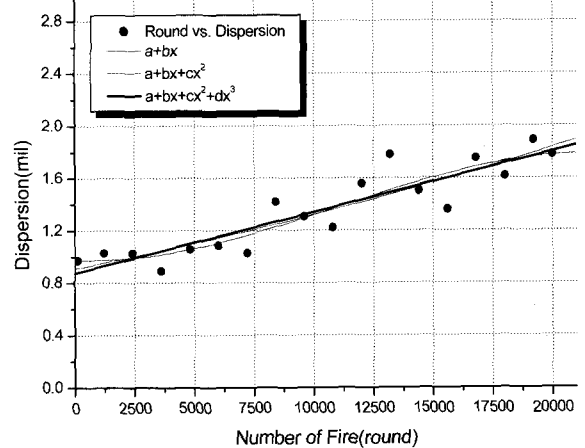
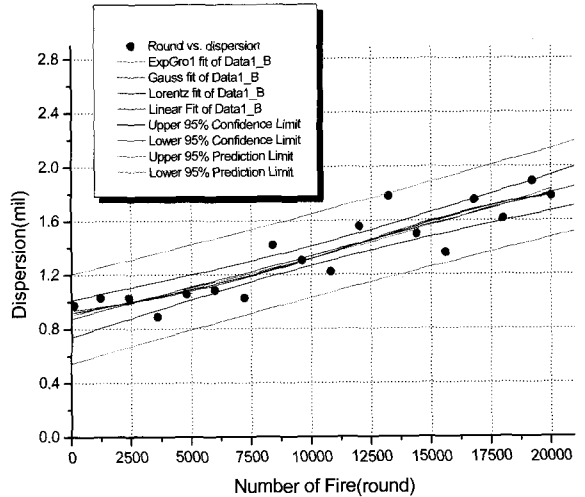


Fig. 6. 사격량과 분산도의 상관관계

Table 1. 시험결과와 표준편차값(mil)

구분 \ 상수	1차	2차	3차
A	0.87608	0.91031	0.97663
B <sub>1</sub>	4.63236×10 <sup>-5</sup>	3.55885×10 <sup>-5</sup>	-9.74048×10 <sup>-6</sup>
B <sub>2</sub>	0	5.29160×10 <sup>-10</sup>	6.28856×10 <sup>-9</sup>
B <sub>3</sub>	0	0	-1.90081×10 <sup>-13</sup>
결정계수 비교	0.82057	0.82372	0.83472

여기서 Origin 프로그램을 이용하여 각 회귀분석의 파라미터를 분석한 결과는 Fig. 7과 같다. 이때에 각 상수들에 대한 결정계수(R-Square)들은 0.821~0.835 수준으로 대등하여 1차 함수 형태로 수식 유도가 가능함을 확인하였다.

일반적으로 기울기와 절편을 갖는 일차식 형태의 Linear Fitting 방법론은 아래와 같다. 각 실험데이터에 대하여 식 (4)와 같이 정의하였을 때, 절편은 식 (5)와 같고 기울기는 식 (6)과 같이 정의된다. 이때 표준편차는 식 (7)과 같다.

$$Y_i = A + BX_i \tag{4}$$

$$A = \bar{Y} - B\bar{X} \tag{5}$$

$$B = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \tag{6}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - (A + Bx_i))^2}{N-2}} \tag{7}$$

Polynomial Regression for Data\_Dispersion:  
Y = A + B1 \* X

Parameter	Value	Error	t-Value	Prob> t
A	0.87608	0.06451	13.58077	<0.0001
B1	4.63236E-5	5.41533E-6	8.55416	<0.0001

R-Square(COD)	Adj. R-Square	Root-MSE(SD)	N
0.82057	0.80936	0.14201	18

Polynomial Regression for Data\_Dispersion:  
Y = A + B1\*X + B2\*X^2

Parameter	Value	Error	t-Value	Prob> t
A	0.91031	0.09351	9.73502	<0.0001
B1	3.55885E-5	2.14898E-5	1.65607	0.11847
B2	5.2916E-10	1.02343E-9	0.51705	0.61266

R-Square(COD)	Adj. R-Square	Root-MSE(SD)	N
0.82372	0.80021	0.14537	18

Polynomial Regression for Data\_Dispersion:  
Y = A + B1\*X + B2\*X^2 + B3\*X^3

Parameter	Value	Error	t-Value	Prob> t
A	0.97663	0.11621	8.40435	<0.0001
B1	-9.74048E-6	5.16623E-5	-0.18854	0.85316
B2	6.28856E-9	6.05394E-9	1.03875	0.31653
B3	-1.90081E-13	1.96913E-13	-0.9653	0.35077

R-Square(COD)	Adj. R-Square	Root-MSE(SD)	N
0.83472	0.7993	0.14571	18

Fig. 7. 회귀분석 파라미터 분석

여기서, 20,000발 사격간 사격량과 분산도 실험데이터를 적용하면 식 (8)과 같이 유도가 가능하며

$$D_{mil} = 0.87608 + (4.63236 \times 10^{-5} \times L_{round}) \tag{8}$$

식 (8)을 분산도를 기준으로 사격량을 계산하는 식으로 변환하면 식 (9)와 같다.

$$L_{round} = (21,587 \times D_{mil}) - 18,912 \tag{9}$$

위의 식 (8)과 식 (9)는 사격량과 분산도의 관계를 보여준다. 이 식은 소구경화기 총열의 잔여수명을 예측하는 수식으로서 활용이 가능하며, 야전에서 유용하게 사용이 될 수 있을 것이다.

### 5. 결과 검증

선행시험을 통해 유도된 실험식을 K11 복합형소총 체계개발 기간동안 시험사격을 통해 검증하는 절차를 수행하였다. 검증 시에는 선행시험에서 수행한 크롬도금기법을 동일하게 적용하여 시험을 수행하였으며, 검증은 정해진 사격절차를 준수하면서 각 사격 주기가 끝난 후의 분산도를 계측하여 결과를 기록하고 본 연구를 통해 얻어진 식에 대입하여 검증하는 방법으로 이루어졌다.

시험은 K11 복합형소총의 내구도 시험 시 추가적인 측정을 통해 사격절차(1주기 210발)와 방법에 따라 1,000발 단위로 가장 가까운 주기의 결과를 측정하여 10,000발까지 2정의 시험을 완료하였으며, 사격방법과

시나리오는 사용군의 화기 운용형태 및 TOP 3-2-045에 규정된 절차를 준용하여 30발 탄알집을 이용한 단발과 3발 점사사격을 번갈아 가며 사격을 실시하였다. 각각 사격량에서의 상관관계식을 통한 예측값과 실제 K11 실사격을 통해 검증한 값과의 관계는 Table 2와 같다.



Fig. 8. 검증시험 수행(좌 : 검증시험, 우 : 분산도 계측)

Table 2. 예측수명-실사격간의 오차

내용 발수	예측값 (mil)	실사격결과 (mil)	오차	
			mil	%
최초분산도	0.87	0.84	0.04	4.55
1,050발	0.92	0.90	0.02	2.17
1,890발	0.96	1.00	0.04	4.17
2,940발	1.02	1.04	0.03	2.97
3,990발	1.06	1.10	0.04	3.77
5,040발	1.11	1.10	0.01	0.90
6,090발	1.16	1.16	0.00	0.00
6,930발	1.20	1.22	0.02	1.67
7,980발	1.25	1.26	0.01	0.80
9,030발	1.29	1.30	0.01	0.78

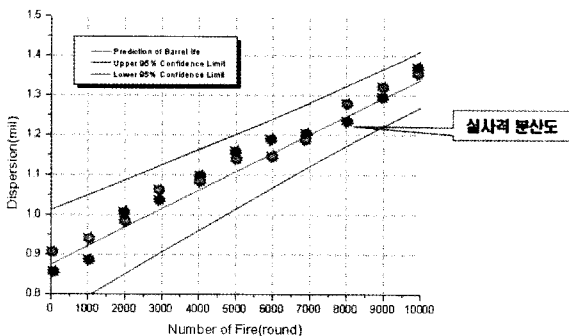


Fig. 9. 사격량-분산도 상관관계식 검증

K11을 이용한 시험결과를 분석해 보았을 때, 예측한 값과 결과는 거의 일치함을 확인하였다. 검증시험 시에는 동일한 시험자가 20,000발 내구도 시험을 수행하여 결과를 얻었으며 이는 중요한 의미를 가진다. 선행시험 시에는 40,000여발이라는 매우 많은 사격량의 한계에 의해 시험자 및 측정자를 주기적으로 교체를 하면서 시험을 진행하였다. 그러나 시험하는 인원 및 측정인원이 바뀔 경우 사격 조건이 주기별로 약간씩 달라지게 되어 오차가 발생할 수밖에 없다. 따라서 이러한 측정의 한계로 인해 분산도 측정값이 주기별로 편차를 보임을 확인하였으나, K11을 이용한 시험 시에는 이러한 편차를 없애기 위해 처음부터 끝까지 동일한 시험자 및 측정자가 시험을 수행하여 결과가 선행시험에서 얻은 실험식과 일치함을 확인한 것이다.

특히 야전에서 사용군은 모두 각자에게 할당된 소구경 화기를 가지고 운용을 하게 되는데, 이는 결국 동일한 사용자가 계속해서 사격을 진행함을 의미한다. 결국 야전에서 동일한 사용자가 매 영점 사격 시 분산도를 측정하여 자신의 총 상태를 파악하는 것이 가능함을 뜻한다.

본 연구의 분산도-사격량 상관관계식이 실제 야전 운용환경 하에서 적용 가능한지 검증하기 위해 야전 부대에서 시험을 실시하여 확인한 결과, 시험에 사용된 4정의 소총으로부터 측정된 값은 각 소총의 누적 사격량에 해당하는 분산도 예측치와 일치하였다.

Table 3. 야전부대 시험시 예측수명-실사격간의 오차

내용 소총	누적발수 (발)	예측값 (mil)	사격결과 (mil)	오차	
				mil	%
X1	1,086	0.93	0.90	0.03	3.2
X2	1,064	0.93	0.95	0.02	2.2
X3	1,091	0.93	0.97	0.04	4.3
X4	987	0.92	0.90	0.02	2.2

## 6. 결론

본 연구는 소화기의 야전 운용환경에서 간편하면서 정량화된 총열 잔여수명 예측 기술을 개발하여 현재 및 한계수명까지의 잔여 사격량의 예측을 통해 군수 지원측면에서 체계적인 총열 관리 목적으로 수행하였

으며, 본 연구의 결론은 다음과 같다.

5.56mm 크롬도금 총열 잔여수명을 예측하기 위한 변수를 설정하여 시험을 통해 사격량 증가에 따른 분산도와 관계를 회귀분석을 통하여 적합한 실험식을 도출하여 K11 복합형소총의 개발 시 검증 시험을 통해 결과를 확인함으로써 총열의 잔여수명을 예측하는데 편리하고 중요한 수식을 도출하였다.

### Reference

- [1] 이홍주, “총과 탄도학”, 청문각, pp. 91~106, 1994. 12.
- [2] “5.56mm K2 소총”, 국방과학연구소, 국방-1005-1299-1(연), pp. 11~45, 1991. 12.
- [3] “Testing of Barrel, 5.56mm”, US Army, TOP 3-2-045, pp. 11~18, 1982. 6.
- [4] 박성호, 김봉수, 김태인, “포신마모의 원리 및 CN79 포신의 마모특성 연구”, 국방과학연구소, DSTC-519-990006, pp. 2~11, 1999. 1.
- [5] Dong-Yoon Chung, Hosung Kong and Seok-Hyun Nam, “A Study on the Precision Wear Measurement for a High Friction and High Pressurized Gun Barrel by using a Diamond Indenter”, Wear 225-229, pp. 1258~1263, June 1999.
- [6] Dong-Yoon Chung, Myoungho Oh, “ New Empirical Method to Enhance the Accuracy in the Erosion Prediction of Canon Tube”, Wear 255, Issues 1-6, pp. 98~101, J. August & September 2003.