

분산도 분석기법을 통한 총열 신뢰성 예측에 관한 연구[§]

김현준^{**} · 채제욱^{*} · 최의중^{*}

* 국방과학연구소

Study of Prediction of Reliability of Barrel in Small Arms by Dispersion Analysis

Hyun Jun Kim^{**}, Je Wook Chae^{*} and Eui Jung Choe^{*}

* The 5th R&D Institute-1, Agency for Defense Development

(Received July 10, 2012 ; Revised October 10, 2012 ; Accepted October 17, 2012)

Key Words: Reliability(신뢰성), Barrel(총열), Dispersion(분산도), Small Arms(소구경화기)

초록: 본 연구는 소구경 화기의 총열 수명 신뢰성 분석에 대한 내용이다. 연구의 진행은 총열의 잔여수명을 예측할 수 있는 변수를 선정하는 것에서 출발하였으며 기존의 예측기법인 총열의 내경을 Gage 계측을 통해 확인하여 마모정도를 측정하는 방법과는 달리, 야전에서 사용가능한 분산도와 사격량과의 관계를 예측하여 총열의 신뢰성 및 잔여수명 예측에 대한 가설을 설정하고 연구를 진행하였다. 실사격을 통해 수행한 선행시험을 통해 나온 결과를 바탕으로 회귀분석 기법을 통해 적합한 실험식을 유도한 이후 검증시험을 통해 수식이 사용 가능함을 확인하였으며, 사용군의 운용시험을 통해 검증하고 결과를 분석하였다.

Abstract: This study proposes a method for predicting the reliability of the barrel in small arms by analyzing the dispersion. The periodicity with which the barrel needs to be changed can be determined by detecting the inner surface directly or by inspecting scratches inside the barrel using an optical sensor. However, soldiers and directors in the logistics command need a more easy way to check the periodicity of barrel. Therefore, this study focuses on the relation between the firing round and the dispersion. A simple equation can be experimentally derived from pre-tests and analyses. This equation is confirmed through firing tests. In this sense, it can be easily applied to determine the periodicity with which the barrel of small arms needs to be changed in the field army.

- 기호설명 -

1. 서론

- a, b : 마모량 계산을 위한 계수
- x : 사격량(발수)
- K_m : 장약호수
- D_{mil} : 분산도(mil)
- A : 상수
- B_1, B_2 : 계수
- L_{round} : 누적사격발수

대구경, 중구경 화포무기체계와는 달리 소구경 화기 분야에서는 무기체계 운용 시 화포이력부를 관리하고 있지 않으며, 이로 인해 총열 및 총의 내구신뢰성을 예측할 수 없어 군수지원분야에 어려움을 겪어왔다. 또한 한계수명을 넘은 총열을 가진 총으로 사격할 경우 탄이 총열내 회전탄대를 통해 회전하지 못하고 텀블링⁽¹⁾하며 날아가게 되어 정해진 목표에서 크게 벗어나게 되며, 야전에서 이러한 현상이 빈번하게 벌어지고 있다.

총열의 신뢰성을 예측하는 방법으로 중구경 화포의 경우 외국의 사례를 기준으로 포열의 폐기처분 기준을 제시하였으나, 탄도학적 성능에 관해서는 연구된 바가 없으며, 대구경 화기의 경우에도 K9

§ 이 논문은 2012년도 대한기계학회 춘청대회 춘계학술대회(2012. 5. 10., 한국원자력연구원) 발표논문임

† Corresponding Author, hyunjuns@empal.com

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

자주포 개발 시 압흔을 이용한 포신의 마모와 수명에 대한 예측에 관한 연구^(2,3)를 진행한 바 있다.

소총 사격량을 예측하는 방법으로 가장 확실한 방법은 총열의 내경을 Gage 계측을 통해 확인하여 마모정도를 측정하는 것이 가장 일반적인 방법이며 정비부대에서 적용하고 있는 기법이다. 그러나 현재 K2와 같은 소구경 화기의 형상특성과 보급규모 및 사용군의 운용정비 절차를 고려해봤을 때, 일일이 Gage를 통해 확인하고 소총의 내구수명을 각 야전부대에서 확인하기에는 어려운 점이 많다. 또한 기존의 연구방법인 마모를 측정하는 다른 방법인 침식마모 측정센서를 삽입하여 마모량을 측정하는 방법과 대구경 화포의 연구에서처럼 압흔을 이용하여 총열의 수명을 예측하는 방법^(2,3)도 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.

이에 본 연구에서 접근한 방법인 분산도를 통한 총열의 신뢰성을 예측하는 기술은 기존에 소구경 화기 연구분야에서는 한번도 접근한 적이 없는 기법으로, 사용군에 의해 가장 편하게 사용 가능한 연구방법이다. 또한 사격량과 분산도의 관계가 복잡한 함수형태를 보일 수 있으며, 수만 발의 실험을 통한 식의 유도 및 검증은 어떠한 연구자도 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 본 연구에서는 실험을 통한 방법으로 연구를 수행하였으며, 분산도를 통한 총열 수명 예측에 대한 가설을 설정하고 실험을 수행하였다. 또한 소구경화기를 통해 확인할 수 있는 다양한 변수들도 함께 검토하여 총열의 수명을 확인할 수 있는 최적의 파라미터를 선정하고 실험식을 얻은 후 검증하였다.

2. 총열 신뢰성 예측기술

2.1 상관관계 분석

일반적으로 소총의 누적 사격량은 총열내경의 마모량과 직접적인 관련이 있으며, 내경마모량을 확인할 수 있다면 총열의 현재 및 한계수명까지의 잔여 사격량을 쉽게 알 수 있게 된다.

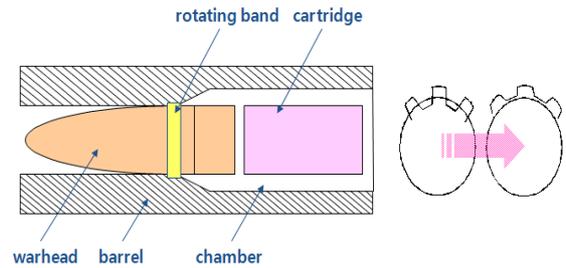


Fig. 1 The reason of barrel wear

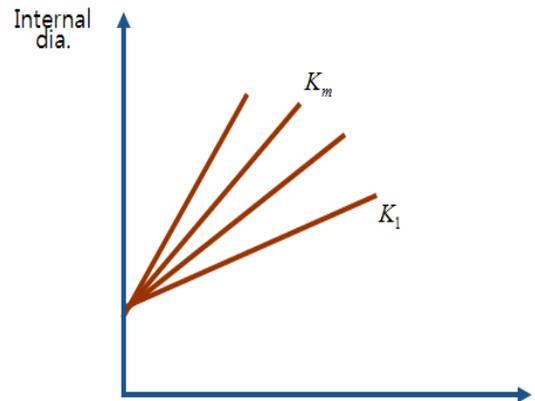


Fig. 2 The graph of internal diameter-firing rounds

따라서 잔여수명을 예측하기 위해서는 내경마모량을 직접 확인하거나, 내경마모량과 다른 변수와의 상관관계를 분석하는 것이 가장 정확한 접근방법이다. 소구경화기 분야에서의 총열 잔여수명을 예측할 수 있는 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.

위의 파라미터중 분산도는 소구경화기 분야에서는 10발 사격중 9발의 최대분산직경⁽⁴⁾을 의미하며, 1발을 제외하는 이유는 통상의 소구경화기 사격에서 발생하는 사격자에 의한 오차를 보정하기 위함이다.

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

사격량에 따른 내경의 마모량은 대구경 화포의 경우 측정하는 노력은 계속되어 왔고, 식 (2)와 같이 마모모델도 어느 정도 검증된 모델이 존재한다.

$$\text{마모량} = (a+bx)K_m \quad (2)$$

대구경의 경우 사격량과 내경마모량의 도식 관계는 마모모델로 알려진 이론으로서 일반적으로 Fig. 2와 같이 사격량에 따라 내경마모량이 일차함수의 형태를 보이며 증가하는 경향이 있다.⁽²⁾

이런 이론을 바탕으로 분산도와 총열 내경 마모량, 내경 마모량과 사격량과의 상관관계를 예측할 수 있다면 분산도와 사격량과의 관계식도 유도가 가능하여 분산도 측정을 통해 총열의 신뢰성 및 수명 예측도 가능하게 된다.

5.56 mm K100 보통탄을 주로 사용하는 소구경 화기의 경우 장약의 양은 탄피내에 내장된 약량을 의미하며, 약량은 탄종별로 일정하므로 장약호수 K_m 가 상수이다. 따라서 식 (2)에 의해 마모량은 선형적으로 증가할 것이라는 예측을 하였으며, 이 때 마모량을 분산도로서 표현할 수 있다면, 즉 사격량에 따라 마모량과 분산도가 선형적으로 증가한다면 총열 누적 사격량은 분산도의 함수로 나타낼 수 있다.

2.2 선행시험

총열 신뢰성 예측을 위한 여러 파라미터들의 상관관계를 시험적으로 분석하기 위해 선행시험을 수행하였다. 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.⁽⁵⁾ 크롬도금 총열과 표준총열을 각각 제작하여 시험한 이유는 과거에는 군에는 표준총열을 장착한 소총이 보급되었으나, 최근 신뢰성 향상을 위해 크롬 도금이된 총열이 보급될 예정이므로, 두 총열에 모두 적용이 가능하며 특히 크롬도금 총열에 반드시 적용이 필요한 파라미터를 추출해야 하기 때문이다. 사전에 총열의 이상 유무를 검사하기 위해 각 총열에 대하여 두격검사, 기능검사, 강내

검사, 진직도검사 등의 예비검사⁽⁵⁾를 실시하였다.

그리고 각 총열에 대하여 20,000발 내구도 사격시험을 수행하고 시험중 정해진 주기에서 측정된 데이터(분산도, 총구속도, 내경 마모량)를 기준으로 잔여수명 예측 곡선을 도출하였다.

시험을 통해 나온 Fig. 3의 그래프를 분석해보면 표준 총열의 경우 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 발사시 마찰에 의해 탄에서 탈착된 동피가 크롬도금 총열에 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.

사격량과 총구속도의 관계는 Fig. 4와 같이 5,000발 사격이전에 부분적인 오차는 있었으나, 사격량에 따라 선형적으로 감소함을 확인할 수 있었다. 즉 총열 수명과 총구속도는 매우 깊은 연관성을 가짐을 확인하였다. 하지만 야전에서도플러 타입의 총구속도 측정장치를 설치하여 운용하는 데는 매우 큰 비용이 소요되며, 일반적인 저가형 총구속도 측정장치를 사용하더라도 광량, 수평/수직도, 장비설치 위치 등 외부 환경조건에 따라 측정값이 영향을 많이 받기 때문에, 야전에서 사용하기에는 적합한 방법은 아님을 선행시험 중 확인하였다.

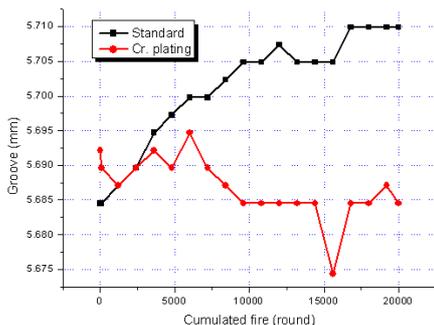


Fig. 3 The graph of bore wear-firing rounds

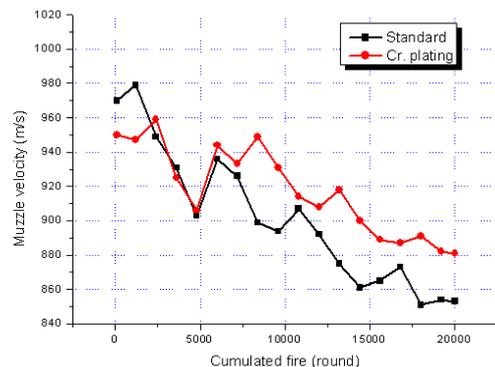


Fig. 4 The graph of velocity-firing rounds

Table 1 The constants of linear regression

coeff.	1st order	2nd order	3th order
<i>A</i>	0.87608	0.91031	0.97663
<i>B</i> ₁	4.63236×10^{-5}	3.55885×10^{-5}	-9.74048×10^{-6}
<i>B</i> ₂	0	5.29160×10^{-10}	6.28856×10^{-9}
<i>B</i> ₃	0	0	-1.90081×10^{-13}
Adj. R-Square	0.80936	0.80021	0.7993

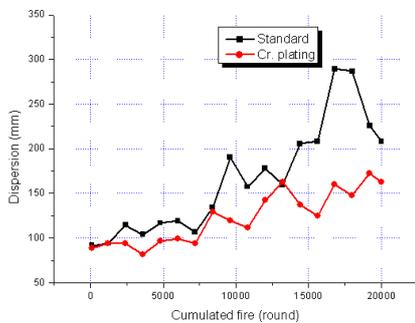


Fig. 5 The graph of dispersion-firing rounds

2.3 분산도 파라미터 선정

사격량과 분산도는 Fig. 5와 같이 크롬도금처리 여부와는 상관없이 사격량에 따라 선형적으로 증가함을 확인하였다. 1만발 사격이후 계속된 시험으로 인한 계측자의 교체 및 그로인한 오차가 있었으나 전체적으로 선형적으로 증가하였으며, 특히 향후 교체 배치 예정인 크롬도금총열을 대상으로 하여 시험결과를 분석했을 때 사격량과 분산도의 상관관계가 일차함수의 관계를 보이는 것으로 확인되었다. 결과적으로 5.56 mm 총열에 크롬도금을 적용할 경우 분산도 측정을 통해 총열의 누적 사격량을 예측하는 방법이 가능함을 확인하였다.

2.4 수명예측식 유도

사격량과 분산도의 관계를 선행시험 결과를 바탕으로 실험식으로 유도하였다. 실험식 유도를 위해 크롬 도금한 총열의 20,000발 사격간 분산도 데이터를 분석해서 선형회귀법을 적용하면 Fig. 7과 같다. 현재 야전 사격장 환경을 고려하여 다양한 사격거리에서도 적용이 가능토록 분산도를 mil 단위로 환산하였으며, 프로그램 적으로

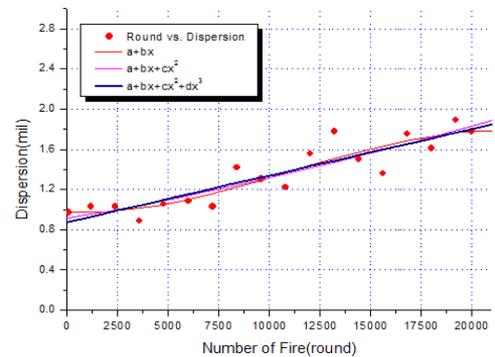


Fig. 6 The graph of linear regression

여러 가지 Curve Fitting 방법론을 적용해 본 결과 야전에서도 쉽게 계산할 수 있는 일차함수 형태로 표현해도 충분하다는 것을 확인할 수 있었다.

사격량과 분산도와의 상관관계에서도 볼 수 있듯이 총열 수명은 내구도 사격량을 기준으로 할 때에 충분히 총열 신뢰성 기준을 상회하여 조건을 보장함을 알 수 있다. 또한 이를 분석하기 3차항까지 표현한 수식은 식 (3)과 같다.

$$D_{mi} = A + B_1 \mathcal{A}_{rand} + B_2 \mathcal{A}_{rand}^2 + B_3 \mathcal{A}_{rand}^3 \quad (3)$$

여기서, 함수별로 선형회귀분석을 수행한 결과 각항의 상수는 Table 1과 같다.

본 회귀분석은 Origin 프로그램을 이용하여 수행하였으며, 이 때에 각 상수들에 대한 결정계수 (R-Square)들은 0.799~0.809 수준으로 대등하여 특히 1차식이 결정계수가 더 높은 값을 보이며, 1차 함수 형태로 수식 유도가 가능함을 확인하였다.

일반적으로 기울기와 절편을 갖는 일차식 형태의 Linear Fitting 방법론은 아래와 같다.

Table 2 The result of verifying test

Round	Est. value	Result	Error	
			mil	%
First disp.	0.87	0.84	0.04	4.55
1,050rd.	0.92	0.90	0.02	2.17
1,890rd.	0.96	1.00	0.04	4.17
2,940rd.	1.02	1.04	0.03	2.97
3,990rd.	1.06	1.10	0.04	3.77
5,040rd.	1.11	1.10	0.01	0.90
6,090rd.	1.16	1.16	0.00	0.00
6,930rd.	1.20	1.22	0.02	1.67
7,980rd.	1.25	1.26	0.01	0.80
9,030rd.	1.29	1.30	0.01	0.78

각 실험데이터에 대하여 식 (4)와 같이 정의하였을 때, 절편 A는 식 (5)와 같이 표현할 수 있으며, 이 식의 기울기값 B는 식 (6)과 같이 정의된다. 이때 표준편차 σ 는 식 (7)과 같다.

$$Y_i = A + BX_i \quad (4)$$

$$A = \bar{Y} - B\bar{X} \quad (5)$$

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

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

여기서, 20,000발 사격간 사격량과 분산도 실험 데이터를 적용하면 식 (8)과 같이 유도가 가능하며 식 (8)을 분산도를 기준으로 사격량을 계산하는 식으로 변환하면 식 (9)와 같다.

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

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

위의 식 (8)과 식 (9)는 실험결과를 통해 유도된 사격량과 분산도의 관계를 보여준다.

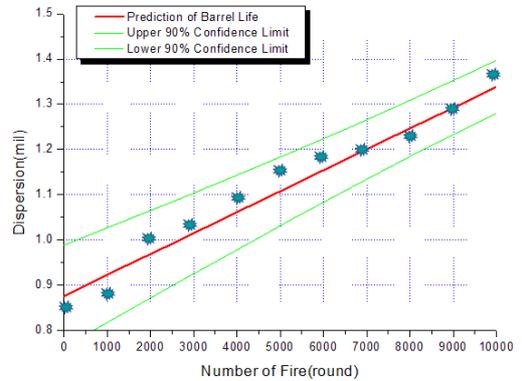


Fig. 7 The graph of verifying test

3. 수명에측식 검증

3.1 검증시험

선행시험을 통해 유도된 실험식을 기준으로 5.56mm 내구도 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 수행하고, 사격방법과 시나리오는 사용군의 소구경 화기 운용형태 및 미육군 시험규격인 TOP 3-2-045에 규정된 절차를 준용하여 30발 탄알집을 이용한 단발과 3발 점사사격을 번갈아 가며 사격을 실시하였다.⁽⁵⁾ 각각 사격량에서의 상관관계식을 통한 예측값과 실제 K11 실사격을 통해 검증한 값은 Table 2 와 같으며, 이를 그래프로 표현하면 Fig. 7 과 같다.

3.2 분석 및 추가 확인시험

K11을 이용한 시험결과를 분석해 보았을 때, 실험식을 통해 예측한 값과 실사격 시험결과는 거의 일치함을 확인하였다. 검증시험 시에는 동일한 시험자가 20,000발 내구도 시험을 수행하여 결과를 얻었으며 이는 중요한 의미를 가진다.

Table 3 The result of field test

Rifle	Rd.	Est. value	Result	Error	
				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

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 총열수명 상태를 파악하는 것이 가능함을 뜻한다.

본 연구의 분산도-사격량 상관관계식이 실제 야전 운용환경 하에서 거치 마운트가 없는 환경 하에서도 적용 가능한지 검증하기 위해 야전부대에서 시험을 실시하였다. 사수는 숙련된 인원을 선발하여 시험을 수행하였다. 짧은 기간동안 적은 발수를 사격할 수밖에 없는 제한된 시험조건 하에서 시험을 수행하였지만, 시험결과 시험에 사용된 4정의 소총으로부터 측정된 값은 각 소총의 누적 사격량에 해당하는 분산도 예측치와 5% 이하의 오차율로 일치함을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 소구경화기에 대해 야전 운용환

경에서 간편하면서 정량화된 총열의 신뢰성 예측 기술을 개발하여 한계수명까지의 잔여 사격량을 예측할 수 있는 1차식 형태의 수식을 실험적으로 도출하였다.

또한 이를 검증하는 실험을 수행하여 유도된 실험식이 실험적 환경뿐 아니라 야전운용환경에서도 사용가능함을 확인하였다.

본 연구의 결과를 토대로 실험식을 야전환경하에서 적용하면서 지속적인 실험식의 검증이 필요하며, 향후 7.62mm, 20mm 등 다른 소구경화기 무기체계에 대한 총열 신뢰성 예측기법에 대하여 계속된 연구가 필요하다고 판단된다.

참고문헌

- (1) Lee, H. J., 1996, "Gun and Ballistics," Cheong moon gak, pp. 91~106.
- (2) Park, S. H., Kim, B. S. and Kim, T. I., 1999, "The Research of the Tube Erosion Mechanism and the Erosion Characteristic of CN79 Tube," Technical Report, DSTC-519-990006, Agency for Defense Development, pp. 2~11.
- (3) Nam, S. H., Ryoo, J. B. and Kim, D. S., 2003, "The Wear of Gun Tube for XK9 Self-Propelled Howitzer," Technical Report, GSDC-419-030361, Agency for Defense Development, pp. 54~66.
- (4) Agency for Defense Development, 1991, "RIFLE 5.56mm K2," MIL-1005-1299-1 Military Specification, pp. 11~45.
- (5) US Army Test and Evaluation Command, US, 1982, "Testing of Barrel, 5.56mm," TOP-3-2-45 Military Specification, pp. 11~18.