

## 40 mm 장축공동실린더의 마모경험식 유도

정동윤<sup>†</sup> · 오명호\* · 신내호\*\*

육군사관학교 무기체계공학과, \*육군사관학교 전자·정보학과, \*\*육군사관학교 물리화학과

### Derivation of Empirical Erosion Equation of the 40 mm Long Hollow Cylinder

Dong-Yoon Chung<sup>†</sup>, Myoungho Oh\* and Nacho Shin\*\*

Dept. of Weapons System & Mechanical Engineering, Korea Military Academy

\*Dept. of Electronics & Information Science, Korea Military Academy

\*\*Dept. of Physics & Chemistry, Korea Military Academy

(Received April 7, 2009; Revised May 10, 2009; Accepted May 15, 2009)

**Abstract** – One of the critical issues associated with the 40mm long hollow cylinder's development and maintenance is the prediction of cylinder erosion. The actual firing test is the most accurate method to measure the cylinder erosion rate. But it costs a great deal and requires a long measurement time. Hence many empirical methods have been proposed to predict the erosion rate and life span of long hollow cylinders. An EFC formula is calculated. An approximate erosion formula for the ammunition type A is derived to interpolate 16 observation values up to 4,000 rounds. A new erosion equation and muzzle velocity formula are also suggested. Several numerical results are presented.

**Keywords** – approximate formula(근사식), curve fitting(곡선 적합), erosion equation(마모 방정식), empirical method(경험적 방법), long hollow cylinder erosion(장축공동실린더 마모)

## 1. 서 론

### 1-1. 개요

각종 장축공동실린더로부터 탄을 발사하는 과정에서 약실은 고온, 고압의 추진 가스를 생성한다. 여기서 생성된 압력은 탄을 실린더를 통하여 고속으로 밀어내게 된다. 강선 장축공동실린더의 경우 탄의 회전대가 강선과 맞물려 탄자에 회전을 제공하는 과정에서 강선에 마모가 발생한다. 그러나 이러한 상대운동에 의한 정상적인 마모 외에도 고온 및 고압에 반복적으로 노출되어 재료의 강도가 저하된 장축공동실린더에 추진 가스와 불완전 연소로 인한 잔재물 등이 충돌하여 심각한 마모를 일으킨다. 이 마모 현상은 약실 바로 앞에서 두드러지게 나타난다. 일반적으로 장축공동실린더가 마모되

면 탄자가 받는 초기 저항과 초기 탄자 출발 압력을 낮추는 효과는 있으나 유효 약실 체적이 증가되고 또한 추진 가스의 누출 등으로 인하여 최고 압력과 포구 속도의 감소를 유발한다. 또한 탄자가 장축공동실린더를 떠날 때 탄자의 편주각이 크게 되어 결과적으로 사거리 감소를 일으킨다[1,2].

장축공동실린더 마모율(Wear or Erosion Rate)과 장축공동실린더의 마모 수명(Erosion Life)을 예측하기 위한 여러 가지 시도들이 진행되고 있다. 마모 수명은 함축적으로 장축공동실린더의 폐기 기준(Criteria of Condemnation)을 의미하는데 각종 장축공동실린더의 특성이 다르므로 정형화하기가 쉽지 않다.

마모량 측정값을 이용한 장축공동실린더 마모식 유도를 위해 여러 대의 장축공동실린더들을 대상으로 40 mm 장축공동실린더에서 사용하는 각종 탄종들을 적절하게 혼합하여 사격을 실시하였으며, 사격 간 다양한 측정

<sup>†</sup>주저자 · 책임저자 : dychung@kma.ac.kr

통하여 마모량, 포구속도, 분산도 등 유용한 자료들을 확보하였다. 내마모 실험을 위한 장축공동실린더를 대상으로 A탄, B탄, C탄 등 3가지 탄종을 총 268발에 걸쳐 사격하였다. 또한 내구도 실험용 장축공동실린더의 경우 주로 A탄을 사용하여 총 4,000여발을 발사하였으며, 약 250발 간격으로 16회에 걸쳐 장축공동실린더 마모량을 측정하였다.

이러한 자료들을 활용하여 EFC(Equivalent Full Charge) 계산식, 기준 탄종인 A탄에 대한 장축공동실린더 마모 경험식, 기준 탄종 마모량 계산값을 활용한 임의의 탄종 장축공동실린더 마모 경험식 등을 유도하였다.

1-2. 기존의 포신 마모 예측 방법

대부분의 장축공동실린더 관련 전문가들은 다양한 장축공동실린더 마모 값들에 대한 실제 사격 측정 결과 높은 장축공동실린더 마모율은 일반적으로 포구 속도(Muzzle Velocity), 장약 무게, 압력 등의 증가에 가장 크게 좌우된다고 판단하였다.

Rauf Imam[3]은 장축공동실린더 마모에 직접적인 영향을 미치는 요소들을 면밀히 분석하였다. 장약 무게는 각종 장축공동실린더와 장약에 따라 전제 조건과 계산법이 다르므로 이를 단순하게 하기 위하여 장약의 무게를 약실의 부피로 나눈 밀도를 사용하는 것이 보다 효과적일 것이라고 판단하였다. 또한 압력은 속도와 연소 가스의 밀도에 영향을 주기는 하지만 장축공동실린더의 마모에는 간접적으로 작용한다고 추론하였다.

Rauf Imam은 무엇보다 포구 속도가 장축공동실린더 마모에 관한 가장 중요한 변수라는 결론을 도출하였다. 이러한 분석을 토대로 Rauf Imam은 기존의 마모 방정식들을 개선한 다음과 같은 대구경 장축공동실린더 마모 방정식을 제시하였다.

$$w_2 = w_1 \frac{D_2 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1/2} L_2 \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2 (PF)(CF)}{D_1} \quad (1)$$

- w : 마모율(Erosion Rate)
- D : 밀도(장약의 무게/약실의 부피)
- P : 최대 압력
- V : 포구 속도(Muzzle Velocity)
- L : 포신 길이(Barrel Length)
- PF : 추진제 인자
- CF : 율활제 인자

그러나 장축공동실린더 구경에 따라 포구 속도가 차이가 난다는 점을 간과했기에 Rauf Imam의 방정식은

어느 특정한 대구경 장축공동실린더에는 잘 적용되는 반면 다른 대구경 장축공동실린더들에게는 오차를 보이는 한계를 드러내었다. 따라서 정동윤과 오명호는 새로운 대구경 장축공동실린더 마모 방정식을 다음과 같이 유도하였다.

$$w_2 = w_1 K \frac{V_2^{cPF_2}}{V_1^{cPF_1}} \quad (2)$$

$$K = \frac{D_2}{D_1} \sqrt{\frac{P_2}{P_1} \frac{L_2/V_2}{L_1/V_1}} PF CF$$

여기서 c는 장축공동실린더 구경에 따라 변하는 경험 상수로서 155 mm 장축공동실린더의 경우 0.6이며, 203 mm 장축공동실린더는 0.7이다. 새로 제안한 마모 방정식 (2)가 Rauf Imam의 장축공동실린더 마모 방정식에 비해 보다 정확한 장축공동실린더 마모 예측 값을 산출함을 알 수 있었다[4,5].

2. 탄종별 EFC 결정

장축공동실린더의 잔여 수명은 크게 추진 장약 연소 때 발생하는 고압이 포신에 반복적으로 작용함에 따라 생기는 피로 마모, 고온·고압의 가스 및 연소 잔재물과 포탄의 고속운동 등으로 장축공동실린더 내벽이 깎이는 침식 마모 등과 관련이 깊다.

장축공동실린더를 폐기하는 기준으로 크게 두 가지를 들 수 있다. 첫 번째 기준은 물리적(물질적)인 마모 허용 오차인데 누적 발수에 따라 증가하는 장축공동실린더 마모량의 한계 값이다. 두 번째 기준은 포탄을 1번 발사하는데 소모되는 에너지와 그에 따라 수반되는 장축공동실린더의 미세구조에 있어서의 피로 또는 약화의 정도인데 이것을 특정 사격발수에 대한 EFC라고 한다.

EFC는 포탄을 실험 발사하여 얻은 효과를 평가하여 장축공동실린더의 성능을 확인하기 위한 기준으로 탄종, 장약의 양과 종류 등에 의해 결정되는 가중 계수라고 할 수 있다. 특히 EFC는 장축공동실린더의 정확한 잔여 수명을 측정하기 위해 사용된다. EFC는 특정 사격발수에 대한 마모율로 나타낼 수 있으며, 이것은 일정 수의 포탄을 발사한 뒤 발생한 마모량을 발사 탄수로 나눈 값이다.

40 mm 장축공동실린더에 대한 내마모 실험을 위해 정밀한 마모센서를 제작한 뒤 장축공동실린더의 포미로부터 396 mm 떨어진 부분의 12시 방향(0°) 및 6시 방향(180°)에 설치하였다. A탄, B탄, C탄 등 3가지 탄

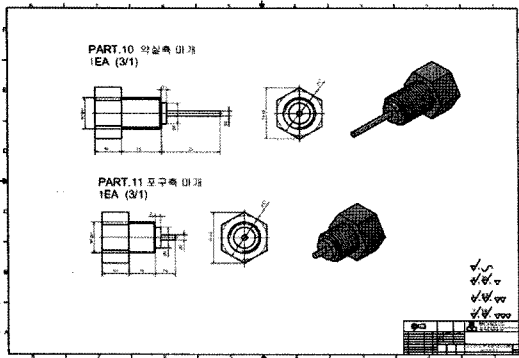


Fig. 1. Erosion Sensor.

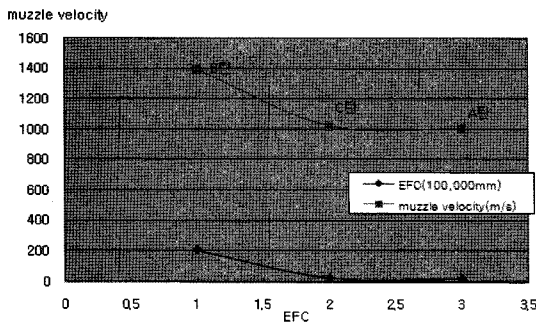


Fig. 2. EFC & muzzle velocity for 3 ammunitions.

종을 총 268발에 걸쳐 사격하였으며, 마모센서를 마이크로게이지로 측정하여 정확하고 신뢰할 수 있는 마모량 측정값을 얻었다.

3가지 탄종에 대한 EFC와 포구속도가 Table 1과 Fig. 2에 나타나 있다. A탄을 기준 탄종으로 설정하여 A탄의 마모율을 1.0으로 할 경우 탄종별 마모율 상대 비교값이 B탄은 9.3, C탄은 1.2가 됨을 알 수 있다.

A탄을 기준 탄종으로 선정하였는데 그 이유는 40 mm 내구도 시험용 장축공동실린더의 경우 주로 A탄을 사용하여 1주기 당 약 250발씩 모두 16주기에 걸쳐 총 4,000여발의 사격을 실시하였으며, 1개 주기가 끝날 때마다 총 16번에 걸쳐 내구도 시험용 포의 장축공동실린더 마모량을 측정하였기에 어느 탄종 보다도 풍부하고 정확한 마모량 측정값을 얻었기 때문이다.

기준 탄종(A탄)의 EFC와 임의의 탄종(B탄 또는 C탄)의 포구 초속을 이용하여 임의의 탄종들에 대한 EFC 계산식을 구하면 다음과 같다.

$$(EFC)_2 = (2.96 \times 10^{-5} V_2^2 - 0.005 V_2 + 21.35326) (EFC)_1 \quad (3)$$

Table 1. EFC & Muzzle Velocity for 3 Ammunitions

탄종	EFC(10 <sup>5</sup> mm)	포구속도(m/sec)
A탄	22.5	1,005
B탄	210	1,400
C탄	27	1,015

Table 2. Values of EFC

탄종	측정값(mm)	계산값(mm)	비고
A탄	0.000225	0.000225	기준 탄종
B탄	0.002100	0.002108	
C탄	0.000270	0.000270	

(EFC)<sub>2</sub> : 기준 탄종 A탄의 EFC

(EFC)<sub>1</sub> : 임의의 탄종(B탄 또는 C탄)의 EFC

V<sub>2</sub> : 임의 탄종의 포구 초속

EFC 계산식 (3)을 이용하여 단발사격에 대한 탄종별 EFC를 구하여 비교한 것이 Table 2에 나타나 있는데 EFC 계산식의 정확도가 매우 높음을 알 수 있다.

### 3. 마모량에 의한 마모경험식 유도

OECD에서 분류한 12가지의 마모 형태로부터 장축공동실린더와 같은 무기체계의 핵심부품에서 예상되는 가장 지배적인 마모로 응착마모(Adhesive Wear), 침식마모(Erosion Wear), 절삭마모(Abrasive Wear), 피로마모(Fatigue Wear)등을 들 수 있다.

마모는 하중, 결정구조 그리고 재료의 화학적 특성에 따른 복잡한 과정이기 때문에 마모법칙은 일반적이지 못하며 아직 완벽하지 않다. 그럼에도 불구하고 마모에 관한 법칙을 공식화하려는 노력이 이어져 왔고 특히 가장 대표적인 응착마모와 절삭마모 및 피로마모 등에 관하여 많은 연구들이 진행되어 왔다[2].

정확한 장축공동실린더 마모 값 측정을 위해 가장 좋은 방법은 각종 장축공동실린더들을 대상으로 다양한 탄종을 사용하여 무제한의 실제 사격을 실시하면서 일정한 포탄 발 수 마다 장축공동실린더의 마모 값을 측정하는 것이다. 하지만 이러한 방법은 엄청난 예산과 시간을 들여야 하므로 현실적으로 상당한 제약이 따른다. 따라서 경제적으로 효율적인 장축공동실린더 마모 값 예측을 위해 여러 가지 컴퓨터 시뮬레이션과 수학적 모델링을 이용한 실험적 방법들(Empirical Methods)을 사용하고 있다.

전차에 장착된 직사포 및 포병에서 주로 운용되는

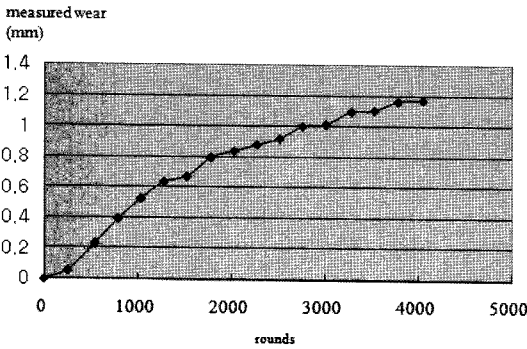


Fig. 3. measured wear for ammunition Type A.

포사포들을 실제 사격하여 장축공동실린더 마모 측정을 해보면 장축공동실린더의 마모율은 일반적으로 포구 속도, 장약 무게, 압력 등의 요소에 가장 크게 영향을 받음을 알 수 있다.

40 mm 장축공동실린더의 마모 예측을 위해 장축공동실린더 마모 방정식 (2)를 이용할 수도 있다. 하지만 (2)식은 155 mm, 203 mm 등과 같은 대구경 장축공동실린더를 기준으로 했기에 40 mm 장축공동실린더와는 직경에서 큰 차이가 나고 이를 보정하는 것이 쉽지 않으므로 (2)식을 활용하는 것에 많은 어려움이 따를 수 있었다. 또한 여러 변수를 사용하였으므로 여전히 복잡하다는 점이 문제점으로 대두되었다.

따라서 장축공동실린더 마모 방정식 (2)를 개선하기 보다 장축공동실린더 마모에 가장 큰 영향을 미치는 포구 속도를 중심으로 간편하면서도 정확도가 우수하며 40 mm 장축공동실린더 특성에 맞는 마모 경험식을 별도로 유도하기로 결정하였다.

기준 탄종인 A탄의 누적 발수와 장축공동실린더 마모량을 그림으로 표현하면 다음과 같다.

Mathematica 5.0 등을 이용하여 적합 근사식을 구하는 방법으로 기준 탄종인 A탄에 대한 40 mm 장축공동실린더 마모 경험식을 다음과 같이 유도하였다.

$$\begin{aligned}
 &1) 0 \leq R \leq 548 \\
 &W_1 = 10^{-3} (4.00329R^{1/3} - 4.08999\sqrt{R}) \\
 &\quad + 0.618991R - 0.0024955R^2 \\
 &\quad + 8.50844 \times 10^{-6}R^3 - 7.66353 \times 10^{-9}R^4 \quad (4)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &2) 548 \leq R \\
 &W_1 = 10^{-3} (15733.4R^{1/5} - 25061R^{1/4}) \\
 &\quad + 9911.37R^{1/3} - 661\sqrt{R} \\
 &\quad + 0.588635R^3 - 3.83523 \times 10^{-6}R^2
 \end{aligned}$$

W<sub>1</sub> : 기준 탄종(A탄)의 마모량 계산값

Table 3. Erosion Values of Ammunition Type A

누적 발수	측정값(mm)	계산값(W1)	
0	0	0	
253	0.057	0.064	
548	0.237	0.236	0.238
794	0.396	0.398	
1284	0.637	0.620	
1529	0.673	0.704	
1786	0.799	0.778	
2031	0.839	0.841	
2276	0.882	0.896	
2521	0.922	0.945	
2766	1.003	0.990	
3011	1.015	1.030	

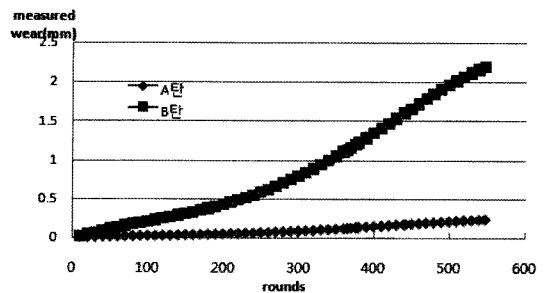


Fig. 4. Calculated Erosion Values for Ammunition Type A & B.

R : 누적 발수

기준 탄종인 A탄에 대한 실제 측정값과 장축공동실린더 마모 경험식 (4)에 의한 계산값이 Table 3에 나타나 있다. 장축공동실린더 마모 측정은 포구에서 2,384 mm 지점에서 강선 수직 기준으로 이루어졌다. 마모경험식 (4)가 두 구간으로 나누어져 있는데 이것은 누적발수가 548발인 지점을 기준으로 마모량이 다른 형태를 보이기 때문이다.

또한 Mathematica 5.0 등을 활용하여 A탄을 기준 탄종으로 설정하여 다른 탄종을 사격했을 때의 40 mm 장축공동실린더 마모 경험식을 구하였으며, 그 결과를 정리하면 식 (5)와 같다.

$$W_2 = (2.96 \times 10^{-5}V_2^2 - 0.005V_2 + 21.35326)W_1 \quad (5)$$

W<sub>1</sub> : 기준 탄종(A탄)의 마모량 계산값

W<sub>2</sub> : 임의의 탄종(B탄 또는 C탄)의 마모량 계산값

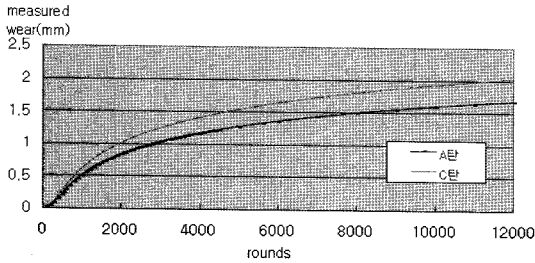


Fig. 5. Calculated Erosion Values for Ammunition Type A & C.

$W_3$  : 임의 탄종의 포구 초속

마모 경험식에 의한 탄종별 장축공동실린더 마모량을 비교한 것이 Fig. 4와 5에 나타나 있다.

#### 4. 결 론

장축공동실린더의 개발과 유지 보수에 있어서 장축공동실린더 마모 예측은 매우 중요하다. 정확한 장축공동실린더 마모 값 측정을 위해 가장 좋은 방법은 각종 포들을 대상으로 다양한 탄종을 사용하여 여러 번의 실제 사격을 실시하면서 일정한 포탄 발 수 마다 장축공동실린더의 마모 값을 측정하는 것이다. 하지만 이러한 방법은 많은 비용과 인력을 투입하여야 하므로 현실적으로 실행하기가 어렵다. 따라서 포신 마모 값 예측을 위해 여러 가지 컴퓨터 시뮬레이션과 수학적 모델링을 이용한 실험적 방법들을 사용하는 것이 효율적이다.

마모량, 포구 속도 등의 자료들을 활용하여 EFC 계

산식, 기준 탄종(A탄)에 대한 장축공동실린더 마모 경험식, 기준 탄종 마모량 계산값을 활용한 임의의 탄종 장축공동실린더 마모 경험식 등을 유도하였다. 제시한 마모 경험식들을 활용하면 40 mm 장축공동실린더 폐기 기준을 산출할 수 있을 것이다.

#### 후 기

본 연구는 국방과학연구소와 화랑대연구소 특화연구사업의 지원을 받아 수행하였음.

#### 참고문헌

1. Dong-Yoon Chung, "A Study on the Precision Wear Measurement for a High Friction and High Pressurized Gun Barrel by using a Diamond Indenter", WEAR, pp. 225-229, Elsevier, June 1999.
2. 정동윤, 공호성, 김건인, "트라이볼로지 개념을 이용한 핵심부품의 수명예측 기법 연구", ADD 용역연구보고서, 2002.
3. Rauf Imam, "An Empirical Approach to Predicting Cannon Tube Erosion Rate", AD-786 531, Benet Weapons Lab., 1974.
4. 정동윤, 오명호, "포신 마모 예측의 정확도 향상을 위한 실험적 방법 유도", 한국군사과학기술학회지, Vol. 5, No. 3, pp. 23-32, 2002.
5. Dong-Yoon Chung and Myoungoh Oh, "New Empirical Method to Enhance the Accuracy in the Erosion Prediction of Cannon Tube", WEAR, Vol. 255, Issues 1-6, pp. 98-101, 2003.