

# 포신 마모 예측의 정확도 향상을 위한 적합 근사식 유도(I)

Derivation of Fitting Approximate Formula to Enhance  
the Accuracy of Cannon Tube Erosion Rate

정동윤\*                      오명호\*\*  
Chung, Dong-Yoon      Oh, Myoung-ho

## Abstract

We predict the unknown cannon tube erosion rate by using observed values of the standard cannon, 155mm Howitzer M185. We know the standard cannon's ten erosion observation values each 400 rounds. An approximate formula fitting the erosion values of the standard cannon has been derived. Numerical simulation applying this formula to the Rauf Imam's erosion equations is presented.

주요기술용어 : Cannon Tube Erosion(포신 마모), Curve Fitting(곡선 적합), Approximate Formula(근사식), Erosion Equation(마모 방정식), Empirical Method(실험적 방법)

## 1. 서론

포병 전투력의 효율적인 관리에 있어 포신 수명의 예측은 중요한 요소이다. 포신 개발과 유지에 관련된 문제점 중 하나는 포신의 마모에 대한 정확한 예측이다.

정확한 포신 마모 값 측정을 위해 가장 좋은 방법은 각종 포들을 대상으로 무제한의 실제 사격을 실시하여 일정한 포탄 발 수마다 포신의 마모 값을 측정하는 것이다. 하지만 이러한 방법은 엄청난 예산과 시간을 들여야 하므로 현실적으로 불가능하다.

따라서 경제적으로 효율적인 포신 마모 값

예측을 위해 여러 가지 시뮬레이션을 이용한 실험적 방법들(Empirical Methods)을 사용하고 있다.

구체적으로 기준 포(Standard Cannon)인 155mm 곡사포 M185 포신의 포신 마모 값을 이용하여 다른 여러 가지 포들의 포신 마모 값들을 예측하는 방법들이 사용되고 있다.

장약 무게, 포신 길이, 압력, 포구 속도 등 각종 곡사포와 직사포들에 대한 탄도 자료 값(Ballistic Data)들이 알려져 있다.

또한 평균적으로 400 Rounds 마다의 기준 포에 관한 포신 마모 측정치 10개 값이 주어져 있다. 이 측정값들을 기준 포와 미지의 포에 대한 탄도 자료 값들과 함께 마모 방정식(Erosion Equation)에 대입하여 미지의 포에 대한 포신 마모 값을 계산하고 있다.

\* 육군사관학교 무기공학과 교수

\*\* 육군사관학교 전산학과 부교수

기준 포에 대한 포신 마모 측정값이 10개 밖에 없으므로 중간 값들을 정확하게 예측하는 것이 매우 중요하다. 본 논문에서는 주어진 기준 포의 포신 마모 측정값들을 적합 시킬 수 있는 근사식을 유도한다.

또한 적합 근사식을 이용하여 구한 기준 포 포신 마모 측정 값 사이의 중간 값들에 대한 근사 값들을 기준 포와 미지의 포에 대한 탄도 자료 값들과 함께 Rauf Imam이 제안한 마모 방정식에 대입하여 얻은 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 제시한다.

## 2. 포신 마모 예측 방법<sup>(1)</sup>

탄을 발사하는 과정에서 약실은 고온, 고압의 추진 가스를 생성한다. 여기서 생성된 압력은 탄을 포신을 통하여 고속으로 밀어내게 된다. 강선포의 경우 탄의 회전대가 강선과 맞물려서 탄자에 회전을 제공하는 과정에서 강선에 마모가 발생한다. 그러나 이러한 상대운동에 의한 정상적인 마모 외에도 고온 및 고압에 반복적으로 노출되어 재료의 강도가 저하된 포신에 추진 가스와 불완전 연소로 인한 잔재물 등이 충돌하여 심각한 마모를 일으킨다.<sup>(2-4)</sup>

이 마모 현상은 약실 바로 앞에서 두드러지게 나타난다. 일반적으로 포신이 마모되면 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 포구를 떠날 때 탄자의 편주각이 크게 되어 결과적으로 사거리 감소를 일으킨다.<sup>(6)</sup>

포신 수명의 예측과 기준 설정은 새로운 화기 체계를 개발함에 있어서 반드시 요구되는 것으로 화기의 성능을 평가하는 주요 변수이다. 포신의 마모로 인한 수명은 마모가 가장 심각하게 일어나는 부분에서 측정하며 일반적으로 마모로 인한 직경의 차이가 0.1 inch에 도달할 때로 정하고 있다.<sup>(3)</sup>

포신 마모 값 측정을 위해 가장 정확한 방법은 곡사포 및 전차포들을 대상으로 실제 사격을 실시하여 일정한 포탄 발 수마다 포신의 마모 값을 측정하는 것이다. 하지만 이와 같은 실제 사격을 통한 자료 획득은 예산과 시간을 고려할 때 현실적으로 불가능하다.

따라서 포신 마모 값 예측을 위해 여러 가지 컴퓨터 시뮬레이션과 수학적 모델링을 응용한 실험적 방법들(Empirical Methods)을 사용하고 있다.

구체적으로는 기준포(Standard Cannon)인 155mm 곡사포 M185의 포신 마모 값을 이용하여 다른 여러 가지 포들의 포신 마모 값들을 예측하는 방법들이 사용되고 있다. 이에 따라 장약 무게, 약실 부피, 포신 길이, 압력, 포구 속도 등 각종 곡사포와 직사포들에 대한 탄도 자료 값(Ballistic Data)들이 알려져 있다.

포신 마모율(Wear or Erosion Rate)과 포신의 마모 수명(Erosion Life)을 예측하기 위한 여러 가지 시도들이 진행되고 있다. 마모 수명은 함축적으로 포신의 폐기 기준(Criteria of Condemnation)을 의미하는데 각종 곡사포와 전차포의 특성이 다르므로 정형화하기가 쉽지 않다. 일반적인 마모 한계(Wear Limit)의 경우 105mm 곡사포는 약 0.08 inch이며, 155mm 포는 0.070~0.153 inch이다.

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

Rauf Imam은 포신 마모에 직접적인 영향을 미치는 요소들을 면밀히 분석하였다. 장약 무게는 각종 포와 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 포신의 마모에는 간접적으로 작용한다고 추론하였다.

한편 관찰 결과 포구 속도가 90 m/s 증가함에 비례하여 포신 마모율이 4배 내지 5배 높아짐을 밝혀내었다. 포구 속도가 610 m/s 이하이면서 추진제로 M1을 사용하는 곡사포들은 마모율이 비교적 낮고 포구 속도가 610 m/s와 915 m/s 사이이면서 포구 직경이 8 inch 이하인 포들은 포신 마모율이 적당하게 높으며, 포구 속도가 915 m/s 이상이면서 포구 직경이 8 inch 이상인 포들은 포신 마모율이 대단히 높음을 알아내었다. 따라서 Rauf Imam은 무엇보다도 포구 속도가 포신 마모에 관한 가장 중요한 변수라는 결론을 도출하였다.

이러한 분석을 토대로 Rauf Imam은 기존의 마모 방정식들을 개선한 다음과 같은 마모 방정식을 제시하였다.

$$w_2 = w_1 \frac{D_2}{D_1} \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1/2} \frac{L_2/V_2}{L_1/V_1} \times \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^3 \quad (1)$$

여기서

$w$  : 마모율(Erosion Rate)

$D$  : 밀도(장약의 무게/약실의 부피)

$P$  : 최대 압력

$V$  : 포구 속도(Muzzle Velocity)

$L$  : 포신 길이(Barrel Length)

이고, 아래 첨자 1은 기준 포인 155mm 곡사포 M185 포신을 의미하며, 아래 첨자 2는 알고자 하는 임의의 다른 포를 나타낸다. 즉  $w_1$  은 기준 포의 포신 마모 값을 의미한다.

마모 방정식 (1)은 M185 포신과 같이 어떠한 윤활제도 첨가되지 않은 M6 추진제로 이루어진 장약을 사용하는 곡사포 및 전차 포

의 포신 마모율 예측에 사용되었다.

다양한 연구 기관들의 포신 마모에 대한 연구 결과 추진제 M30과 M30E1에 대한 추진제 인자(Propellant Factor) 효과가 M6 보다 2.5배 정도이며, M6는 M1에 비해 3배 정도의 추진제 인자 효과가 있음이 밝혀졌다. 여기서 추진제 인자 효과가 3배라는 것은 추진력이 3배나 강하다는 것을 의미한다.

또한 윤활제 인자(Coolant Factor) 효과 역시 고려해야 됨이 밝혀졌다. 즉 이산화 티타늄 덮개(Titanium Dioxide Jacket)가 사용되는 장약의 경우 윤활제 인자 효과로 포신 마모에 미치는 영향이 1/3 정도 감소한다는 것이다. 이러한 결과를 반영하여 Rauf Imam은 방정식 (1)을 수정한 다음과 같은 마모 방정식을 제안하였다.

$$w_2 = w_1 \frac{D_2}{D_1} \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1/2} \frac{L_2}{L_1} \times \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^3 (PF) (CF) \quad (2)$$

여기서

PF : 추진제 인자

CF : 윤활제 인자

이다.

마모 방정식 (2)를 적용하여 측정해본 결과 대부분의 포는 대체적으로 만족할만한 수준이었으나 105mm XM205, 155mm XM199, 175mm M113 등의 경우 예상 보다 오차가 컸다. 따라서 Rauf Imam은 마모 방정식 (2)에 포구 속도 효과를 한층 강화시킨 다음과 같은 새로운 마모 방정식을 제시하였다.

$$w_2 = w_1 \frac{D_2}{D_1} \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1/2} \frac{L_2 / V_2}{L_1 / V_1} \times$$

$$\frac{e^{2V_2}}{e^{2V_1}} (PF) (CF) \quad (3)$$

### 3. 적합 근사식

평균적으로 400 Rounds 마다의 기준 포 155mm 곡사포 M119에 관한 포신 마모 측정값 10개가 다음과 같이 알려져 있다.

[표 1] 기준 포 마모 측정 값

Rounds	마모 측정 값(inch)
391	0.045
812	0.070
1,217	0.088
1,600	0.100
2,000	0.110
2,388	0.117
2,801	0.121
3,198	0.126
3,542	0.130
4,000	0.135

이 측정값들을 기준 포와 미지의 포에 대한 탄도 자료 값들과 함께 마모 방정식(2), (3)에 대입하여 미지의 포에 대한 포신 마모 값을 계산하고 있다. Rauf Imam은 [표 1]의 측정값들에 대하여 보간법(Interpolation)을 적용하여 마모 방정식 (2)나 (3)의  $w_1$  값으로 사용하였다.

[표 1]에서 기준 포에 대한 포신 마모 측정값이 10개 밖에 없으므로 중간 값들을 정확하게 예측하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 포신 마모 예측의 정확도 향상을 위해  $w_1$ 을 정밀하게 묘사할 수 있는 적합 근사식을 유도한다. 포신의 마모로 인한 포신 수명은 일반적으로 마모로 인한 구경의 차이가 0.1

inch에 도달할 때로 정하고 있으므로 본 논문에서는 기준 포의 측정 마모 값이 0.11 inch인 2,000 Rounds까지의 포신 마모 측정값들을 적합 시킬 수 있는 근사식을 유도하도록 한다. 적합 근사식은 기준 포의 포신 마모 값을 Rounds의 함수로 표현한 것이다.

먼저 첫 번째 단계로 기준 포 측정 마모 값이 0.11 inch인 2,000 Rounds까지의 포신 마모 측정값들에 대한 대략적인 추세 함수를 구하도록 한다.

곡선 적합(Curve Fitting)을 위해 적당한 추세 함수는 다음과 같은 형태를 가짐을 쉽게 알 수 있다.

$$y = aR^b \quad (4)$$

여기서

$y$  : 기준 포 마모 측정 값 근사 함수

$a, b$  : 상수

$R$  : Rounds

이다.

Rounds 구간별 근사 함수를 유도하면 다음과 같다.

Rounds	마모 측정값	근사 함수
391	0.045	$y = 0.0012R^{0.607}$
812	0.070	

Rounds	마모 측정값	근사 함수
812	0.070	$y = 0.00154R^{0.57}$
1,217	0.088	

Rounds	마모 측정값	근사 함수
1,217	0.088	$y = 0.00281R^{0.485}$
1,600	0.100	

Rounds	마모 측정값	근사 함수
1,600	0.100	$y = 0.00428R^{0.427}$
2,000	0.110	

다음 두 번째 단계로 기준 포 측정 마모 값이 0.11 inch인 2,000 Rounds까지의 포신 마모 측정값들에 대한 정확한 적합 근사식을 구하기 위해  $a, b$ 를 상수가 아닌 Rounds에 대한 함수로 보고 그 함수를 유도하도록 한다.

스프레드시트 프로그램인 엑셀을 이용하여 대략적인 추세선을 구하여 형태를 예측한 뒤 정확한 근사 함수를 유도한 결과 얻게되는  $a$ 와  $b$ 에 대한 근사 함수는 다음과 같다.

$$a = 0.00079532 e^{0.001052R} \quad (5)$$

$$b = -0.000149 R + 0.6652 \quad (6)$$

Rounds별로  $a$ 와  $b$ 의 참값과 근사값을 비교한 것이 [표 2]와 [표 3]에 나타나 있다.

[표 2]  $a$ 의 참값과 근사값 비교

$R$ (Rounds)	$a$ (참값)	$a$ (근사값)
391	0.00120	0.001200
812	0.00154	0.001869
1,217	0.00281	0.002860
1,600	0.00428	0.004281
2,000	0.00862	0.006521

[표 3]  $b$ 의 참값과 근사값 비교

$R$ (Rounds)	$b$ (참값)	$b$ (근사값)
391	0.6070	0.6069
812	0.5700	0.5442
1,217	0.4850	0.4839
1,600	0.4270	0.4268
2,000	0.3350	0.3672

식 (5)와 식 (6)을 식 (4)에 대입하면 기준 포 측정 마모 값이 0.11 inch인 2,000 Rounds까지의 포신 마모 측정값들을 예측할 수 있는 다음과 같은  $w_1$ 에 대한 적합 근사식을 얻게 된다.

$$y = 0.00079532 e^{0.001052R} \times R^{-0.000149R+0.6652} \quad (7)$$

#### 4. 시뮬레이션 및 고찰

새로 유도한 적합 근사식 (7)을 이용하여 기준 포인 155mm 곡사포 M185의 마모 값을 예측한 근사 값을 실제 마모 측정값과 비교한 것이 [표 4]에 나타나 있다.

두 값을 비교하여 상대 오차 및 절대 오차를 계산해보면 적합 근사식이 매우 정확함을 알 수 있다.

[표 4] 기준 포 포신 마모 값 비교

$R$ (Rounds)	측정 값	근사 값
0		0
200		0.028444
391	0.045	0.044924
600		0.059474
812	0.070	0.071605
1,000		0.080541
1,217	0.088	0.089009
1,400		0.094775
1,600	0.100	0.099785
2,000	0.110	1.062760

시뮬레이션 대상인 포들의 포신 수명 예측에 필요한 자료, 즉 장약 무게, 포신 길이, 압력, 포구 속도 등이 [표 5]에 나타나 있다.

[표 5-1] 탄도 자료

포	기준 포	A(155mm)
장약무게(Lbs)	20.4	30.9
약실부피(Cu. in)	1,150	1,596
밀도	0.0177	0.0194
포신길이(In.×100)	2.80	2.33
압력(ksi)	30.2	45.3
포구속도 (1000 ft/sec)	2.245	2.800
CF	1	1
PF	1	1
추진제	P-1	P-2

[표 5-2] 탄도 자료

포	B(8 inch)	C(8 inch)
장약무게(Lbs)	43.6	38.0
약실부피(Cu. in)	1,950	1,950
밀도	0.0224	0.0195
포신길이(In.×100)	2.74	2.74
압력(ksi)	39.6	32.5
포구속도 (1000 ft/sec)	2.530	2.300
CF	1/3	1/3
PF	2.5	2.5
추진제	P-3	P-4

적합 근사식 (7)을 이용하여 구한 기준 포

의  $w_1$ 을 기준 포와 A(155mm), B(8 inch), C(8 inch) 등의 시뮬레이션 대상 포에 대한 탄도 자료 값들과 함께 Rauf Imam이 제안한 마모 방정식 (2)와 (3)에 대입하여 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하였다.

Imam의 방법과 적합 근사식 (7)을 이용해 얻은  $w_1$  값을 마모 방정식 (2), (3)에 대입한 결과를 실제 대상 포의 포신 마모 값과 비교 분석한 결과가 [표 6]에 나타나 있다.

[표 6-1] 계산된 포신 마모 값 비교  
(마모 방정식 (2) 적용)

포	A (155mm)	B (8 inch)	C (8 inch)	
측정된 포신 마모 값 (inch/Rounds)	0.11/ 700	0.15/ 1,500	0.1/ 2,000	
계산된 마모값	Imam 방법	0.11/ 827	0.15/ 1,400	0.15/ 2,300
	적합 근사식	0.11/ 667	0.15/ 1,630	0.1/ 1,745

[표 6-2] 계산된 포신 마모 값 비교  
(마모 방정식 (3) 적용)

포	A (155mm)	B (8 inch)	C (8 inch)	
측정된 포신 마모 값 (inch/Rounds)	0.11/ 700	0.15/ 1,500	0.1/ 2,000	
계산된 마모값	Imam 방법	0.11/ 529	0.15/ 1,200	0.15/ 2,200
	적합 근사식	0.11/ 338	0.15/ 1,017	0.1/ 1,555

A(155mm), B(8 inch), C(8 inch) 등

의 시뮬레이션 대상 포에 대한 계산된 포신 마모 값을 측정 마모 값과 비교해 보면 마모 방정식 (2)와 (3)에서  $w_1$ 을 제외한 나머지 항에 있어서는 동일한 자료를 적용하였는데도 불구하고 차이가 있음을 알 수 있다.

이것은 Imam 방법의 경우 주어진 기준 포 마모 측정값들 사이의 중간 값들에 대한 예측이 부정확했음을 나타내 준다.

한편 [표 6]의 자료를 검토해 보면 마모 방정식 (2)를 적용하여 계산된 마모 값이 방정식 (3)을 적용했을 때 보다 측정된 포신 마모 값에 근접해 있어 마모 방정식 (2)가 상대적으로 정확함을 알 수 있다.

마모 방정식 (3)의 경우 적합 근사식 (7)을 이용해 얻어져 정확도가 개선된  $w_1$  값을 대입한 결과가 오히려 측정된 포신 마모 값 보다 더 많은 오차를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 마모 방정식 (3) 자체가 부정확하다는 것을 의미한다. 즉 Rauf Imam이 마모 방정식 (2)에 포구 속도 효과를 강화하기 위하여 포구 속도 항을 제곱이 아닌 지수 함수 형태로 바꾼 것이 무리였음을 알 수 있으며, 마모 방정식 (3)은 포신 마모 값 예측을 위한 실험적 방법으로 부적당함을 알 수 있다.

이러한 결과를 종합해 볼 때 포신 마모 방정식 (2)와 (3) 대신 포신의 마모를 보다 정확하게 예측할 수 있는 새로운 실험적 포신 마모 방정식을 도출하기 위한 추가적인 연구가 요망된다.

## 5. 결론

기준 포(Standard Cannon)인 155mm 곡사포 M185 포신의 포신 마모 값을 이용하여 다른 여러 가지 포들의 포신 마모 값들을 예측하는 방법들이 사용되고 있다.

기준 포에 대한 포신 마모 측정 값이 평균적으로 400 Rounds 마다 1개씩 총 10개 밖

에 없으므로 중간 값들을 정확하게 예측하는 것이 매우 중요하다. 본 논문에서는 포신의 마모로 인한 수명은 일반적으로 마모로 인한 직경의 차이가 0.1 inch에 도달할 때로 정하고 있으므로 기준 포 측정 마모 값이 0.11 inch인 2,000 Rounds까지의 포신 마모 측정 값들을 적합 시키는 근사식을 유도하였다. 제안한 적합 근사식은 포신 마모 값을 Rounds의 함수로 표현한 것이다.

또한  $w_1$ 에 대한 적합 근사식 (7)을 이용하여 구한 기준 포 155 mm 곡사포 M185의 주어진 포신 마모 측정 값 사이의 중간 값들에 대한 근사 값들을 기준 포와 미지의 포에 대한 탄도 자료 값들과 함께 Rauf Imam이 제안한 마모 방정식에 대입하여 시뮬레이션을 실시하였으며 그 결과를 분석하였다.

Rauf Imam이 제안한 마모 방정식 (2)의 경우 적합 근사식에 의해 정확도가 제고되었으나 측정된 값들과 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 또한 마모 방정식 (3)의 경우는 오차가 더욱 심해 졌음을 알 수 있었다. 따라서 보다 정확한 포신 마모 값 예측을 위한 새로운 실험적 마모 방정식의 유도가 요구된다.

## 참 고 문 헌

1. Imam, Rauf, An Empirical Approach to Predicting Cannon Tube Erosion Rate, AD-786 531, Benet Weapons Lab., August 1974.
2. Kruczynski, D. L., Stobie, Irvin. C., Krummerich, M. B., Gun Tube/ Charge/ Projectile Interactions and Gun Tube Wear: BRL-TR-3004, U.S. Army Lab. Command, June 1989.
3. Evaluation of Cannon Tubes, TM 9-1000-202-14, 1976.

4. Montgomery, R. S., Sautter, F. K., Erosion and Its Control: Arlcb-Tr-82040, U.S. Army Armament Research and Development Command, December 1982.
5. Chapra, S. C., Canale, R. P., Numerical Methods for Engineers, McGraw Hill, 1988.
6. Chung, D., "A Study on the precision wear measurement for a high friction and high pressurized gun barrel by using a diamond indenter ", WEAR 225-229 Elsevier, June 1999.