

포열 마모예측용 소프트웨어 개발 및 적용

The Development and Application Wear of Prediction Tool for Gun Barrel

김 건 인*
Gun-In Kim

정 등 윤*
Dong-Yun Chung

박 송 구*
Song-Gu Park

이 규 섭**
Gyu-Seop Lee

ABSTRACT

The erosion wear of gun barrel occurs due to heat and chemical reactions. The high pressure and temperature in chamber increase the erosion wear. It is known that the metal phase transfer is the primary wear factor in a gun barrel under high temperature. In this paper, the tool of wear prediction in high pressure gun tube has been developed. The program developed has three modules such as DIRECT(interior ballistics analysis module), INVERSE(gun design module), and WEAR(wear prediction module). The prediction of wear was compared with the experimental data which was collected in the field unit. The prediction results shows good trend with the collected data.

주요기술용어(주제어) : Wear(마모), Gun Barrel(포신), Interior Ballistics(강내 탄도)

1. 머리말

포열마모는 포열, 추진제 및 탄자의 상호작용으로 발생하며 근본 원인은 탄자의 밴드와 강선 사이의 마찰에 의한 기계적 마모(mechanical wear)와 고온, 고압의 추진가스에 의한 열 마모(heat wear) 및 화학적 마모(chemical wear)로 구분할 수 있다. 이러한 마모현상은 추진제의 형상, 점화시스템, 소진탄피의 사용 등 탄약시스템의 차이에 따라 복잡한 메카니즘으로 나타나며 이를 정확히 예측하기 위한 S/W Tool의 개발은 해석적 방법만으로는 매우 어려우며 실사격 시험에서 제시되는 다양한 결과를 피드백하는

것이 일반적이다.

본 연구에서는 PC에서 운용할 수 있는 포열마모 예측 S/W의 개발을 위해 lump parameter model과 Euler 방정식으로 알려진 1차원 강내 해석기법을 이용한 프로그램을 작성하여 강내의 탄자운동과 강내압력 및 강내온도 등을 해석하고, 이 해석 결과를 근간으로 마모해석을 하기 위해 포열벽과 추진가스 간의 열전달 특성과 포열소재의 열물리학적 특성을 강내압력 및 온도의 함수로 표현하여 포열의 마모 기준에 적용하도록 하였다.

그림 1은 강내해석 결과를 이용하여 포열 마모를 해석하는 과정의 개략도를 나타내고 있다. 일반적으로 무장체계의 설계는 경제적인 측면에서 기존 탄약에 대한 무장설계, 주어진 무장체계에 대한 탄약의 개선 등이 많으며 새로운 개념의 무장체계 설계에 있어서는 탄약과 무장의 설계가 이루어진다.

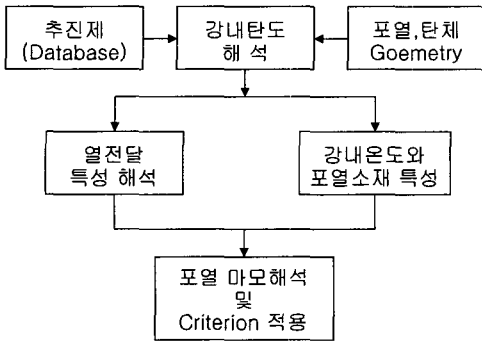
따라서, 본 S/W에서는 추진제 및 무장설계에 활용

† 2004년 5월 14일 접수 ~ 2004년 6월 17일 심사완료

* 육군사관학교(Korea Military Academy))

** (주) 대한 선행기술 대표이사

주저자 이메일 : gunin@kma.ac.kr



[그림 1] 포열 마모해석 과정의 개략도

할 수 있도록 주어진 탄약, 무장체계에 대한 강내 탄도 해석(Direct Internal Ballistic Analysis) 뿐 아니라 추진제를 변화시킨 경우 최적의 포열 형상을 결정하기 위한 무장설계 과정(Inverse Analysis)을 추가하였다. 그러나, 지면상 강내탄도 해석과 포열의 마모해석에 대한 역학적 과정유도는 간략히 언급하고 주로 포열마모 예측을 위한 S/W의 작성위주로 소개하였다.

2. 강내탄도 해석

강내탄도의 해석은 추진제가 강내에서 연소하여 발생하는 팽창압력으로 탄자가 가속되어 강내에서 이탈되는 순간까지의 역학적 과정을 해석하는 것으로 탄자의 운동상태와 추진제의 연소상태에 따라 점화과정(ignition period), 정적 연소과정(pyrostatic period), 동적 연소과정(pyrodynamic period), 열역학 과정(thermodynamic period), 천이탄도 과정(after action period)의 5단계로 구분되며, 각 단계는 탄자의 운동과 추진제 연소에 의한 추진가스의 상태방정식에 의해 해석된다.^[1]

3. 포열의 마모해석

포열 마모해석은 대구경 장사거리 혹은 고속탄자를 갖는 화기에 대한 마모해석에 중점을 두었으며 고압 추진가스에 의한 열전달로 포열 내벽 금속구조의 조

직 및 상변화로 인해 발생하는 열부식, 화학부식 및 역학적 부식에 의한 마모의 해석을 중점 수행한다. 해석방법은 고속 추진가스에 의한 강내벽면에 발생하는 열, 유동 경계층을 통한 대류열전달(convective heat transfer)과 포열 벽을 통한 열전달(conductive heat transfer)해석, 이로 인한 포열 내벽 조직과 상변화를 고려한 마모해석으로 나누어진다.^[2]

4. 프로그램의 작성

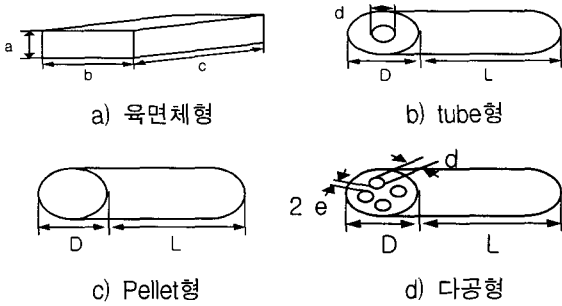
가. 프로그램의 구조

프로그램은 Fortran으로 작성되었으며, 주 프로그램은 DIRECT(강내탄도 해석), INVERSE(무장설계) 및 WEAR(마모해석)의 3가지 해석을 선택적으로 수행하도록 구성되어 있으며 보조 프로그램은 주 프로그램 수행에 필요한 subroutine들로 구성되어 있다.

그 주요내용으로서 추진제는 PowderDisplay(추진제 선택 및 획득방법 출력), ChargeNames/Charge Display(charge의 종류와 물성치 결정 및 화면출력), ModifyData/DataInput(추진제 수정 및 데이터 작성), KeyboardInput(새 추진제 데이터 작성), SelectItem(수정 항목 지정), ChargeShape(category로 결정한 추진제의 형상 매개변수 이용 새로운 Charge 데이터 생성), Coefficient(연소합수 구성에 필요한 상수 및 계수 생성)로 구성되며, 포열은 GunGeometry(포열 형상 및 치수), Prolog(무장설계의 category 결정), BasicValue(추진제 및 무장설계 parameter의 범위 설정), GunInit(설계 초기값), GunParameter(설계요구), ResultGun(설계 결과)로 구성된다. 또한, 강내탄도해석은 Calculation으로, 마모해석은 Physical Property(포열소재의 물성치 입력)와 BarrelGeometry(포열의 기하학적 형상 및 치수 데이터)로 구성되어 있다.

나. 프로그램의 실행

본 프로그램에서는 추진제의 형상을 그림 2와 같이 4가지 형으로 구분하였으며 a, b, c의 치수변화에 따라 연소모델이 관형, cube형, 막대형 등으로 구분되듯이 이 4가지의 기본형상에서 확장된 10여개의 추진



[그림 2] 추진제 grain의 형상 구분

[표 1] 추진제 데이터 파일 구조

항 목	1	2	3	4	5
Charge Name	tube	plate	7holes	19holes	cube
Force Const. f (MJ/kg)	0.927	0.95	1.00	0.98	0.865
Impulse Const. Jk (Mpa/kg)	1.1265	1.0	1.05	1.00	0.91
Adiabatic gas Const. θ	0.24	0.2	0.23	0.225	0.25
Covolume α (dm ³ /kg)	0.975	0.98	0.98	1.05	0.6
Flame Temp. T ₁ (K)	3015	2890	2920	3100	2430
Powder Density δ (kg/m ³)	1667	1600	1600	1560	1700
Burning thickness, z ₁	1.0	1.0	1.522	1.532	1.0
Surface Coef., A ₁	1.1	1.06	0.7343	0.5804	2.5
Surface Coef., A ₂	0.0	0.0	0.5508	0.717	0.0
Form Coef., λ_1	-0.091	-0.056	0.2337	0.4162	-0.6
Form Coef., λ_2	0.0	0.0	-0.941	-0.941	0.0
Form Coef., μ_1	0.0	0.0	-0.022	-0.022	0.0
Form Coef., μ_2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Temp. Coef. of force, KfT	0.0003	0.0003	0.0005	0.0005	0.0
Temp. Coef. of Imp., KJT	0.0016	0.0016	0.0016	0.0016	0.0
Mass of charge, ω (kg)	5.0	1.0	2.0	2.5	0.2

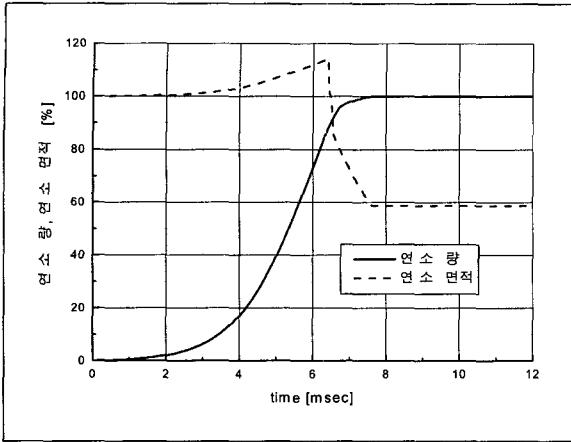
[표 2] 포열, 탄자의 제원 및 치수

항 목	값
Bore Diameter [mm]	120
Muzzle Velocity [m/s]	1540
Propellant Mass [kg]	10.7
Projectile Mass [kg]	10.34
Chamber Volume [cm ³]	14460
Shot Travel [m]	9.7126
Crush Pressure [Mpa]	320
Shoulder Degree	1.85
Rifle Coef.	0.785
Pressing Pressure [Mpa]	15
Resistance Coef.	1.03
Primer Pressure [Mpa]	3.1
Primer Gas Temp. [°C]	2800
Primer Covol. [dm ³ /kg]	0.95
Primer Mass [kg]	0.03
Primer f [MJ/kg]	0.9
Pressure Design Fact.	1.12
Air Temp. [°C]	15
Air Pressure [Mpa]	0.1
Twist Angle [°]	1.5
Radius Gyrat. [mm]	60
Friction Coef.	0.3
Recoil Mass [kg]	1500

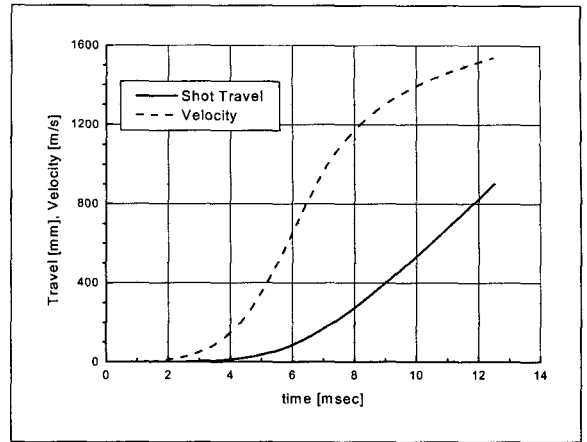
제 형상모델이 프로그램 상에서 생성된다. 또한 추진제에 관한 입력자료는 표 1, 포열 및 탄자의 제원과 치수는 표 2와 같다.

1) 강내탄도 해석

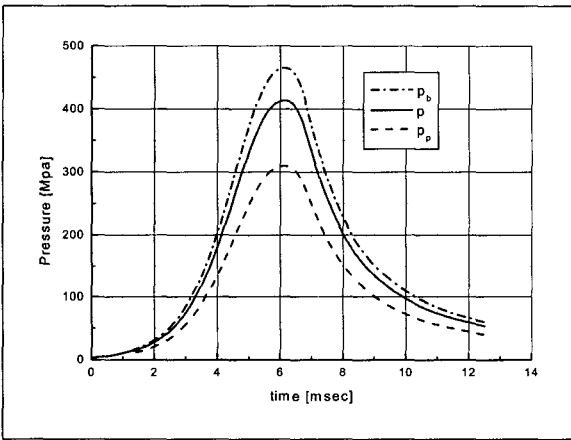
위의 표 1 추진제 데이터와 표 2 포열제원을 이용하여 강내탄도 해석을 수행한 결과 다음의 그림과 같은 결과를 얻었다. 여기서 그림 3~6은 강내 주요 상태변수들에 대한 정보를 제공해 주며, 그림 7은 동적 연소과정(I) 및 열역학과정(II)의 변화와 상태변수의 상호관계를 규명해준다.^[3]



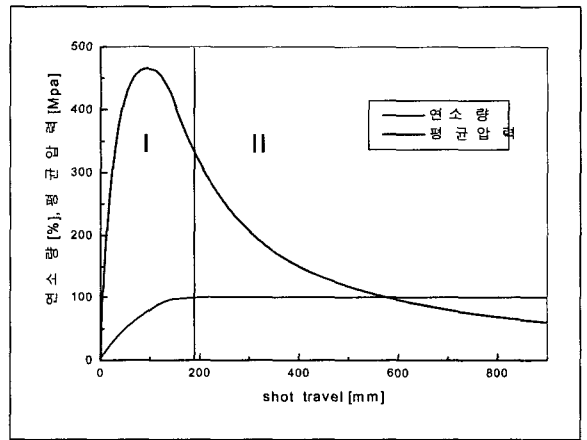
[그림 3] 추진제의 연소량과 연소면적



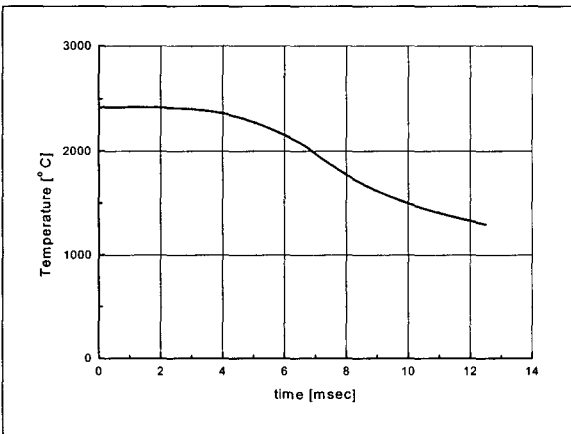
[그림 6] 탄자의 변위 및 속도



[그림 4] 강내 압력



[그림 7] 탄자위치에 따른 연소량과 평균압력



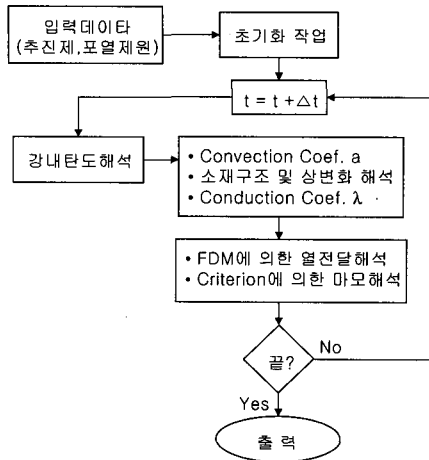
[그림 5] 추진가스 평균온도

2) 포열 마모해석

그림 8은 마모해석의 흐름도를 나타낸다.

포열의 마모해석을 위해서는 포열소재와 포열의 부형상에 관한 입력자료가 추가로 필요하게 된다. 표 3은 포열소재에 대한 데이터 파일의 구성 예를 보여 준다.

Critical depth는 포열의 마모수명을 결정하는 기준의 하나이며, 마모수준이 critical depth에 도달하면 포열의 마모수명에 도달한 것으로 판단한다. Increment of z_coordinate는 탄자이동 방향으로 포열마모 해석결과의 출력 위치를 강선 시작부부터 시작하여 0.2m 간격으로 결정한다는 의미이다.



[그림 8] 모열 마모해석의 흐름도

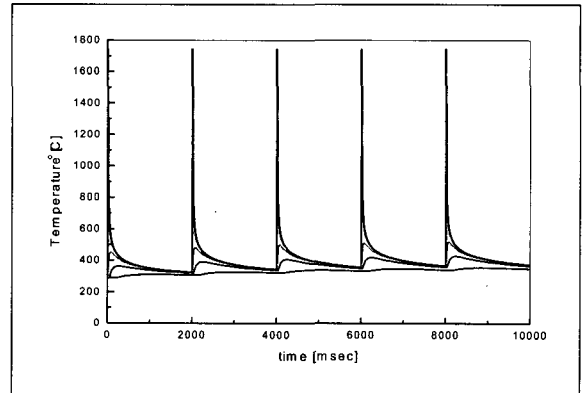
[표 3] 포열소재 데이터 파일의 구성 예

항 목	값
Barrel Density [kg/m ³]	7,850
Critical Temperature [deg.C]	1,470
Critical depth of wear [mm]	2.0
Carbon Concentration [%]	0.4
Initial Austenite Concentr. [%]	15
Initial Martensite Concentr. [%]	85
Shot Rate [rnd/s]	0.5
Number of shots [rounds]	5
Increment of z_coord. [m]	0.2

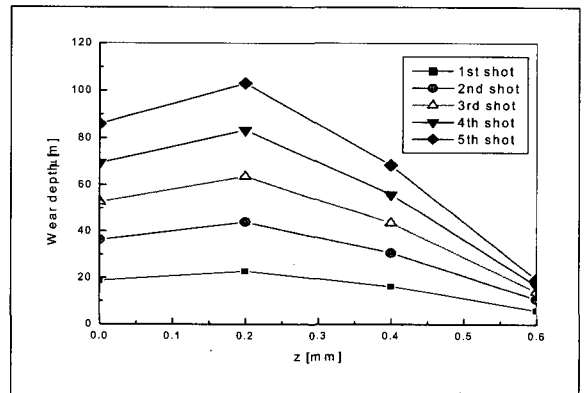
포열 마모해석은 FDM(Finite Difference Method)를 사용하였으며 unexplicit triangular scheme에 의한 mesh size의 안정성 기준은

$$\left| 1 + \frac{4\lambda}{cp} \frac{\tau}{h^2} \right| > 1 \quad (1)$$

이므로 항상 안정한 결과를 보여준다. 그러나 정확도 (accuracy) 측면에서 공간좌표 size $h = 4\mu\text{m}$, 시간 축 상의 size $\tau = 2\mu\text{sec}$ 가 적절한 것으로 확인되었다. 다음 그림은 강내탄도 해석의 결과를 이용하여



[그림 9] 사격간 포열내벽의 온도변화(5발 사격)



[그림 10] 포열 축상에서의 마모량

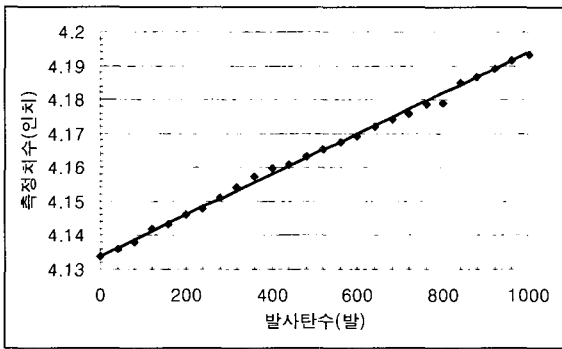
강내 추진가스 대류열전달계수(convective coefficient) a 및 확산계수와 초기 열전도계수(conductive coefficient) λ 를 결정하여 해석된 결과의 출력의 예를 나타낸다.

5. 측정값과 비교

프로그램의 적용 가능성 확인을 위해 야전 운용중인 화포들에서 매년 측정된 마모량과 비교하였다. 야전에서 화포의 수명은 화포별로 한계 마모량을 결정해 놓고 주기적으로 마모량을 측정하여 발사탄수와 함께 기록 유지하며, 폐기 구경에 도달하면 폐기하기도 하고 또는 포신의 발사탄수를 규정하여 잔여 포신의 수명을 유지하는 방법을 사용하기도 한다.

가. 포신 평가 방법

105밀리 전차포의 포신 마모에 관하여 기술교범에 명시한 포신 마모에 대한 기준은 기본 구경 4.134인치, 폐기 구경 4.209인치이며 포신 수명은 1,000발에 도달시 폐기하는 것으로 최초 규정하였다.^[4] 그러나, 현재는 포신의 마모값이 예상보다 적게 측정됨으로 인하여 마모수정인수를 적용하여 발당 0.6E-04인치씩 마모가 발생한다고 가정하여 다음 그림과 같이 선형의 기준으로 마모기준을 적용하고 있다.



[그림 11] 전차포신(105밀리)의 마모기준

나. 포신 마모 자료수집

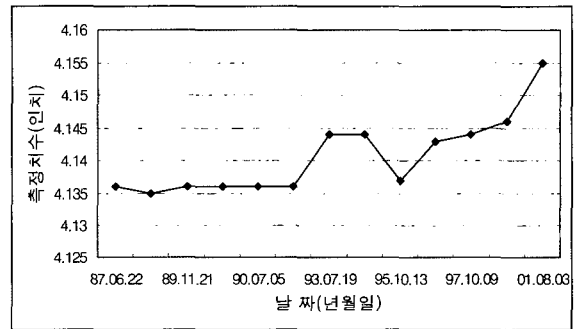
포신의 마모량은 매년 측정하여 기록을 유지하고 있다. 마모량 측정자료를 수집한 부대는 기계화사단과 기갑여단 및 보병사단 전차대대의 105밀리 전차포신과 일부 155밀리 자주포대대이며 그 예는 다음 표와 같다.

OO사단 전차대대의 경우에는 발사탄수에 관계없이 마모량이 모두 일정하다고 기록하고 있으며 일부 부대에서는 수명을 1,000발로 가정하여 포신수명을 선형으로 가정하 기술교범에서 제시한 마모량을 계산하여 기록 유지하고 있는 실정이다. 하지만 이러한 자료도 탄의 발사방법에 대한 기록이 없어 일정 기간별 로 발사탄수를 누적할 뿐이다.

포신의 마모를 측정하는 프로그램은 단발로 사격하였는지 또는 몇 발을 연속적으로 사격하였는지에 따라 다른 결과를 나타낸다. 따라서 정확한 포신 마모량을 결정하는 프로그램을 완성하기 위해서는 포신 수명을 예측하는 발사탄수에 대한 기록은 물론 “3발

[표 4] A 기계화사단 전차대대

호차	발사	측정치수	수명	호차	발사	측정치수	수명
222	130	4.145 "	86%	312	130	4.145 "	86%
223	255	4.154 "	74%	313	255	4.154 "	74%
231	87	4.142 "	71%	321	87	4.142 "	71%
232	228	4.152 "	76%	322	228	4.152 "	76%
233	212	4.151 "	78%	323	212	4.151 "	78%
301	166	4.148 "	83%	331	166	4.148 "	83%
302	157	4.147 "	84%	332	157	4.147 "	84%
311	605	4.179 "	39%	-	-	-	-



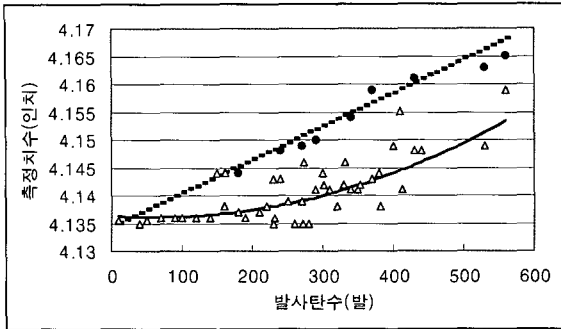
[그림 12] 마모량 변화추이(OO호 전차)

연속사, 5분후 단발사격, 2분후 10발 연속사격” 등의 형태로 발사방법도 함께 기록 유지되어야 한다. 비교적 기록방법이 정확한 OO사단의 발사탄수와 마모측정일자 그리고 마모량에 대한 자료를 통해 그림 12와 같은 마모량 변화추이를 볼 수 있다.

이는 200여발 정도를 발사하는 동안 포신의 마모는 거의 일어나지 않았으며 그 이후에는 선형보다는 2차 방정식의 형태로 변하고 있음을 알 수 있다.

다. 포신 마모 자료 비교

측정된 포신 마모량과 기술교범에 명시된 기준을 비교하면 그림 13과 같다. 또한, 기술교범에 명시된 자료에 의하면 발사탄수와 마모량은 선형관계라고 가정하였으며 이를 관계식으로 표현하면 다음과 같다.



[그림 13] 포신 마모 자료 종합

$$y = 6 \times 10^{-6} x + 4.1346 \quad (2)$$

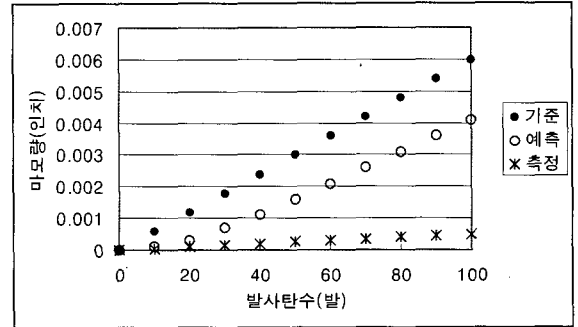
하지만, 측정된 자료에 의하면 100여발까지는 포신의 마모가 거의 일어나지 않으며 발사탄수와 마모량의 상관관계는 비선형이어서, 선형으로 가정된 기준치의 마모량에 비해 아주 작은 양의 마모만이 발생하는 것을 알 수 있었다. 수집된 자료를 토대로 마모량과 발사탄수의 관계식을 2차 방정식으로 가정하면 식 (3)으로 표시할 수 있다.

$$y = 7 \times 10^{-8} x^2 - 9 \times 10^{-6} x + 4.1364 \quad (3)$$

그림 13에서 점선 표시는 기술교범에 명시된 선형의 포신수명 직선이고, 원형의 점들은 일부 부대에서 이 직선에 근거하여 유지하고 있는 값을 예로 도식한 것이다. 삼각형으로 도식된 점들은 포신 마모측정과 발사탄수의 자료가 비교적 잘 기록 유지된 OO사단의 실제 데이터를 도시하였으며 이를 근거로 2차 방정식 형태의 추세선을 예측하였다. 또한, 가장 많이 발사된 포신이 600여발이므로 600발 이후의 자료는 획득하지 못했으며 이를 근거로 대략적인 포신수명을 결정해보면 1,100발 정도임을 알 수 있었다.

라. 마모 자료 분석

마모 예측 프로그램의 결과는 몇 가지의 형태가 존재한다. 단발로 사격하고 사격간 충분한 시간을 두어 포신이 충분히 냉각된다면 마모형태는 완만한 2차 곡선의 형태를 나타내지만, 연속적으로 발사할 경우에는 거의 직선에 가까운 경향을 보인다. 따라서 수집



[그림 14] 기준, 예측, 측정 마모량 비교

된 각종 자료는 연속사격을 실시하지 않은 경우라 판단된다.

본 연구에서 사용한 마모 예측용 프로그램은 기술교범에서 제시된 방법보다 실험값과 유사한 경향과 결과를 보였다. 또한, 앞서 언급했듯이 포신의 정확한 수명을 예측하기 위해서는 포발사 이력을 보다 정확히 기록하여야 하고 마모량을 주기적으로 측정할 데이터를 확보하여야 한다. 이를 위해서는 기존의 포신들에 대해 발사탄수, 마모량, 발사탄수와 포구속도의 자료들을 방대하게 수집하여 현재 우리가 사용하는 포신들의 수명에 대한 실험식을 결정할 다음, 예측 프로그램의 각종 계수들을 결정하여 사용하여야 하는 것으로 판단된다.

그림 14는 현재의 계수들을 사용하고 있는 기존의 프로그램도 선형으로 가정된 기술교범의 마모기준보다는 실험값에 가까운 값을 보여주고 있다.

하지만 보다 정확한 측정값이 전 구간에 걸쳐 존재한다면 프로그램 내의 상수를 결정하여 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

예측 프로그램은 쉬지 않고 연속적으로 발사하는 경우에는 마모량이 선형적으로 증가하나, 단발사격으로 발사하고, 발사간 충분한 시간이 경과하여 포신이 냉각할 수 있는 기간이 주어진다면 마모량은 선형적으로 변하지만 기울기는 훨씬 작아진다. 하지만 2 내지 3발을 연속으로 사격하고, 단발을 사격하고, 여러 발을 연속으로 사격하는 전투 상황의 경우에는 2차 함수의 모양으로 증가함을 볼 수 있었다. 따라서 실제 마모량의 증가는 이러한 경우의 조합으로 나타날 것이다. 이는 수집된 전차포신의 마모량 자료를 분석

한 결과에서도 잘 보여주고 있다.

본 연구에서는 측정의 용이성과 측정 기록을 유지해야 하는 특성 때문에 대구경 화기에 적용하였으나, 열에 의한 마모가 많이 발생하는 소구경 화기에도 적용가능하리라 판단한다.

효율적인 프로그램 적용을 위해서는 포열의 사격관련 데이터를 빠짐없이 주기적으로 기록 유지해야하며 특히 전투 또는 사격시의 발사형태를 세부적으로 분석하여 기록한다면 더욱 실전적인 결과를 얻을 수 있을 것이다.

6. 맺음말

본 연구에서는 추진제와 포열에 대한 가상의 데이터를 이용하여 초기화하고, 강내탄도 해석을 통해 초기 계수값을 결정하여 이를 FDM 방법과 포열의 마모 기준을 적용함으로써 포신의 마모정도를 예측토록 하는 프로그램을 개발하였으며 실제 수집된 야전 부대의 자료를 통해 그 경향과 결과가 매우 근접함을 볼 수 있었다. 그러나, 포 발사 이력이 명확하지 않아 정확한 계수값들을 결정할 수는 없었다. 따라서,

참 고 문 헌

- [1] U.S. Army Materiel Command, Interior Ballistics of Guns, 1965, pp.2-1~2-55.
- [2] 정동윤 편역, Engineering Tribology, 군사과학 대학원, pp.96~112.
- [3] U.S. Army Materiel Command, Interior Ballistics of Guns, 1965, pp.3-1~3-21.
- [4] TM 9-100-1000-202-14, 전차 105mm 포 M48A5K 및 K-1.