

탄저압력계수를 이용한 5.56mm 소총의 압력-이동거리 곡선 산출

A Study on the Pressure-travel Curve of 5.56mm Rifle Obtained
from the Empirical Base Pressure Factor

이 상 길*
Lee, Sang-Kil

이 강 영*
Lee, Gang-Young

ABSTRACT

As the propellant mass is being accelerated out of the gun chamber along with the projectile, a continuous pressure gradient exists between the end of chamber and the base of the projectile.

For this reason, the base pressure-travel curve is very important to design a conventional gun barrel in the interior ballistics, but it is not obtained briefly by empirical or theoretical method.

In this paper, a simple relation between chamber pressure and base pressure was determined by the factor of base pressure(C_b) obtained from the experimental method. The simple relation gives a reasonable prediction for the reduction of pressure between the breech and the base of projectile owing to the axial gradient in the gun tube. The predictions have been validated by the infrared screen sensor and the PRODAS(PROjectile Design and Analysis System) for interior ballistic systems. Therefore, the base pressure-travel curve could be calculated from the chamber pressure measured by piezoelectric sensor.

The base pressure-travel curve obtained from the simple relation offers initial information to gun barrel designer and is used for calculation of muzzle velocity.

주요기술용어(주제어) : Chamber Pressure(약실압력), Base Pressure(탄저압력), Pressure-travel Curve(압력-이동거리 곡선), Factor of Base Pressure(탄저압력계수), Muzzle Velocity(총구속도)

1. 서론

강내탄도이론에서 압력-이동거리 곡선은 강내에서

탄자의 운동을 비롯하여 많은 정보를 제공해 주며 포신설계 시 매우 중요한 기초자료가 된다. 그러나 강내에서 탄자의 이동은 약 1msec(소총의 경우)라는 아주 짧은 시간에 이루어지며 추진제의 연소가 탄자의 운동에너지로 변환되는 과정도 매우 복잡함으로 정확한 압력-이동거리 곡선을 구하는 것은 어렵다.

실험을 통한 압력-이동거리 곡선을 얻기 위해 일반

† 2007년 6월 19일 접수~2007년 8월 3일 게재승인

* 육군사관학교(Korea Military Academy)

주저자 이메일 : whitesky72@kma.ac.kr

적으로 약실압력(chamber pressure)을 사용하나, 약실과 탄자 사이에는 총열 축 방향 압력구배가 존재하여 약실압력과 이동 중인 탄자를 직접적으로 가속시키는 탄저압력(base pressure) 간에 차이가 발생한다^[1~3]. 따라서 약실압력을 측정하여 탄자의 이동속도를 산출하는 방법은 실제 탄자의 속도와는 큰 오차를 보이며, 오차를 줄이기 위해서는 탄자와 총열간의 마찰, 추진가스의 유동 및 열손실 등을 고려해야만 한다. 약실압력 대신 탄저압력을 측정하여 압력-이동거리 곡선(pressure-travel curve)과 총구속도(muzzle velocity)를 산출한다면 강내에서의 복잡한 추진가스의 유동 및 열손실을 고려하지 않고 탄자와 총열간의 마찰만 고려하여 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있다. 그러나 이동 중인 탄자에 작용하는 연속적인 탄저압력을 측정하는 것은 매우 어려우며 측정방법에 따른 오차를 피할 수 없게 된다. 또한 탄자와 총열간의 마찰은 측정이 곤란하므로 상용프로그램(PRODAS)의 해석 결과를 활용하였다.

본 연구에서는 약실압력과 탄저압력간의 실험적 관계식을 구함으로써 추진가스의 복잡한 유동 및 열손실 등의 고려 없이 약실압력 측정값으로부터 강내탄도 전 구간에 대한 탄저압력 곡선을 산출하고자 하였으며, 탄자와 총열간의 마찰은 실험을 통한 측정이 곤란하므로 상용프로그램(PRODAS)의 해석 결과를 활용하였다.

탄저압력 곡선으로부터 계산된 총구속도와 적외선 스크린센서를 통해 직접적인 방법으로 측정된 값을 비교 분석하였으며, 이를 통해 산출된 탄저압력 곡선의 신뢰성 정도를 확인하고 약실압력과 탄저압력의 관계식의 적절성 여부를 판단하였다.

2. 실험 방법

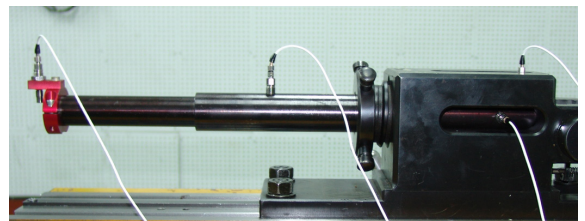
그림 1은 실험 장치들을 설치한 사진이다. 발사 장치는 AVL사의 B299 장치대에 5.56×45mm EPVAT 시험총열을 결합하였으며, 탄자의 총구속도를 직접적인 방법으로 측정하고 압력측정을 통해 산출된 총구속도와 비교하기 위하여 적외선스크린센서를 총구 앞에 1m 간격으로 3대를 설치하였다. 또한 압력측정을

위하여 압력센서를 총열 및 약실에 설치하였다.

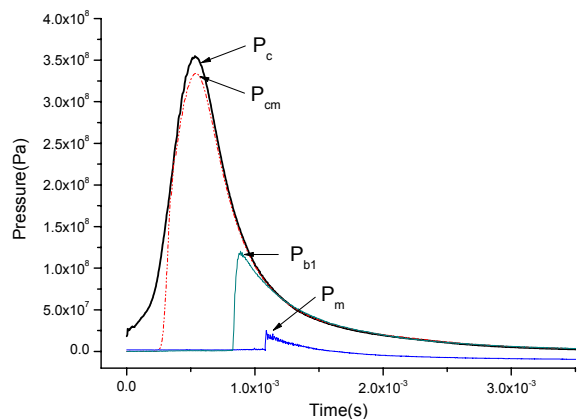
압력센서는 그림 2와 같이 총 4개소에 설치하였는데 약실(chamber)과 변이부(cartridge mouth)의 압력을 측정하기 위해 2개소, 탄자가 280mm 이동하는 순간의 탄저압력을 측정하기 위해 시험총열 중앙부분(Point 1 : 총미에서 총구방향으로 280mm 지점)에 1개소 그리고 총구에 1개소를 설치하였다. 그림 3은 약실압력(P_c), 변이부 압력(P_{cm}), Point 1 압력(P_{b1}) 그리고 총구압력(P_m)을 3.5msec 동안 4.0×10^{-6} sec 간



[그림 1] 실험장치 구성



[그림 2] 압력센서 설치 위치



[그림 3] 압력 측정 결과

[표 1] 5.56mm M193 탄약의 제원

탄 길이	57.137mm
탄 질량	10.668g
탄피 길이	45mm
탄자 길이	19.126mm
탄자 질량	3.639g
추진제 질량	1.8g
추진제 형태	구형

격으로 측정된 신호(전압)를 압력단위로 변환시킨 것이다.

실험에 사용한 탄약은 5.56mm M193탄이며 자세 한 탄약의 제원은 표 1과 같다.

실험은 총 20회에 걸쳐 실시하였으며, 실험결과를 통해 탄저압력계수(Cb)를 산출한 후 총구속도와 탄저 압력 곡선을 얻었다. 계산과정 중 탄자가 움직이기 시작한 시점(shot start time)은 변이부 압력을 참고 하였고 탄자가 총구를 벗어나는 시점(shot exit time) 은 총구압력이 급격히 상승하는 시점을 확인하여 계 산 시 반영하였다.

3. 탄저압력 곡선 산출

가. 탄저압력(base pressure)

강내에서 탄자를 이동 및 가속시키는 가장 직접적 인 원인은 탄저에서 받는 압력(base pressure)이다. 그림 4는 약실에서 탄저부분까지 연속적인 압력구배 가 발생한다는 것을 잘 보여주는데, 이러한 압력구 배는 추진제의 연소로 발생한 압력이 탄자를 가속시 킬 뿐만 아니라 연소된 추진가스를 함께 가속시키기 때문에 발생한다. 압력구배는 C/M(추진제 질량/탄 자 질량)값에 의해 가장 큰 영향을 받으며, C/M 값 이 클수록 압력구배는 커진다^[1]. 결국, 탄자가 출발 하여 일정거리를 이동한 동일한 시점에서 약실압력 (chamber pressure)과 탄저압력(base pressure)을 측정한다면 약실압력이 탄저압력보다 높게 나타나게 될 것이다.

그림 5는 약실압력과 탄저압력을 개략적으로 나타

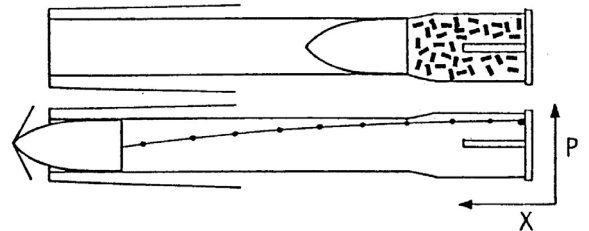
낸 것이다. 그림에서 약실압력과 탄저압력의 최고값 은 동일한 시점에서 발생하며, 압력-시간 곡선의 형 태가 매우 유사하다는 것을 알 수 있다^[2~3].

Drysdale, W. H.등은 약실압력이 최고($P_{c,max}$)일 때 탄자에 작용하는 탄저압력($P_{b,max}$)은 Lagrange correlation을 통해 다음과 같이 나타내었다^[1~3].

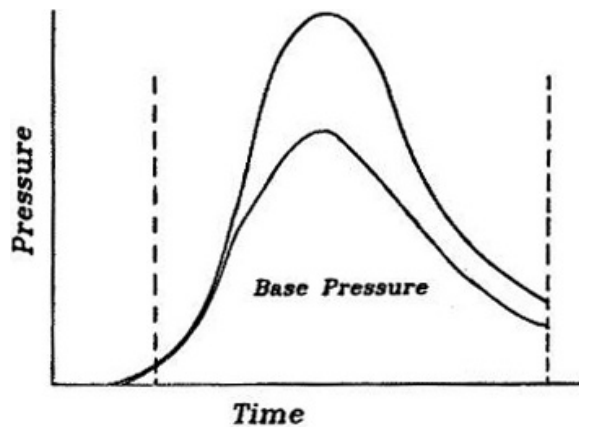
$$P_{b,max} = \frac{P_{c,max}}{1 + (C/2M)} \quad (1)$$

C : 추진제 질량, M : 탄자 질량

이것은 강내에서 총열방향으로의 압력구배에 의해 발생하는 약실압력 최대값과 탄저압력 최대값의 관계 를 나타내며, 이 식의 타당성은 강내탄도 실험을 통 하여 입증되었다^[3]. 그림 5를 보면 총열설계 시 탄저 압력이 중요한 정보가 될 수 있다는 것을 쉽게 예측 할 수 있다. 즉, 약실압력을 기준으로 총열을 설계하



[그림 4] Conventional-gun pressure gradient



[그림 5] Variation of chamber and base pressure with time

는 것은 총열이 받는 압력을 지나치게 과대평가하여 총열의 무게를 증가시키게 될 것이다.

나. 탄저압력계수 산출

강내에서 이동하는 탄자의 탄저압력을 직접적인 방법으로 측정하는 것은 매우 어렵다. 또한 탄저압력은 탄자의 가속과 강내에서의 추진가스의 복잡한 유동 특성에 따라 변화하므로 이론적으로 정확한 값을 계산하는 것도 곤란하다. 본 연구에서는 탄저압력 곡선과 약실압력 곡선의 형태가 유사한 점에 착안하여 Drysdale, W. H. 등이 제안한 식 (1)을 탄저압력계수를 사용하여 강내탄도 전 구간에 대해 적용하였다.

탄자 질량이 M, 추진제 질량이 C일 때, 임의의 시간 t에서 탄자의 속도를 V, 탄자의 가속도를 a, 약실압력을 P_c, 탄저압력을 P_b, 총강의 단면적을 A라 한다면,

$$P_b \times A = Ma \tag{2}$$

의 관계가 성립한다.

또한, 추진가스의 평균속도를 $\frac{V}{2}$ 라 한다면,

$$(P_c - P_b) \times A = C \times \frac{a}{2} \tag{3}$$

가 되며, 식 (2)와 식 (3)을 정리하면 아래와 같은 압력구배에 관한 식을 얻을 수 있다.

$$P_c - P_b = \frac{1}{2} \left(\frac{C}{M} \right) P_b \tag{4}$$

식 (4)를 탄저압력에 대해 정리하면,

$$P_b = \frac{P_c}{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{C}{M} \right)} \tag{5}$$

가 되어 식 (1)에 최고압력 대신 임의의 시간 t일 때의 압력을 대입한 것과 같은 식이 유도된다.

그러나 식 (4)에서와 같이 압력구배가 추진제의 가속에 의해서만 발생하는 것은 아니기 때문에, 추진가

스와 총강 벽과의 마찰, 열전달에 의한 손실 등으로 인한 압력강하를 고려한다면 0.5(C/M)보다는 작은 값일 것이라는 것을 예측할 수 있다. 이러한 요소들을 실험적으로 측정하는 것은 곤란하므로 압력구배를 아래와 같이 탄저압력계수(C_b)를 포함한 식으로 만든 다음, 실험을 통해 탄저압력계수(C_b)를 산출하였다.

$$P_c - P_b = C_b \left(\frac{C}{M} \right) P_b \tag{6}$$

식 (6)을 탄저압력에 대해 정리하면 다음과 같다.

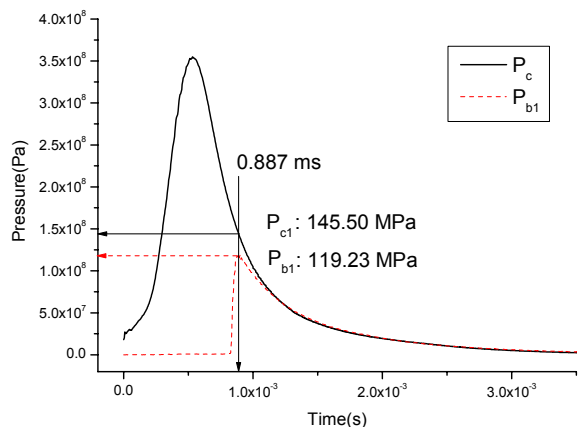
$$P_b = \frac{P_c}{1 + C_b \left(\frac{C}{M} \right)} \tag{7}$$

C : 추진제 질량, M : 탄자 질량

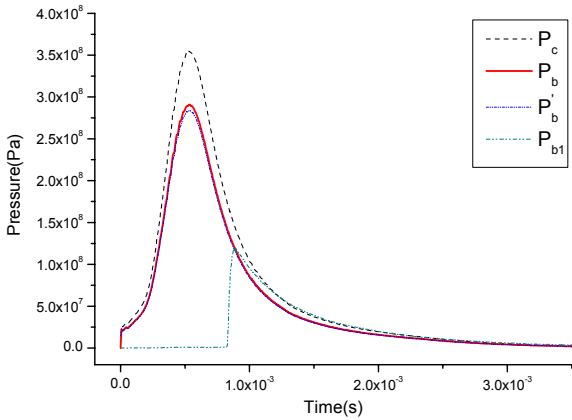
그림 6은 약실압력과 총미로부터 280mm 지점(Point 1)에서 측정한 압력 나타낸 것이다. Point 1에서 측정한 압력 곡선의 최대값은 탄자가 이 지점을 통과할 때의 탄저압력이 되며, 실험을 통해 약실압력과의 관계를 분석하여 탄저압력계수를 아래 식을 이용하여 결정하였다.

$$C_b = \left(\frac{P_c}{P_b} - 1 \right) \frac{M}{C} \tag{8}$$

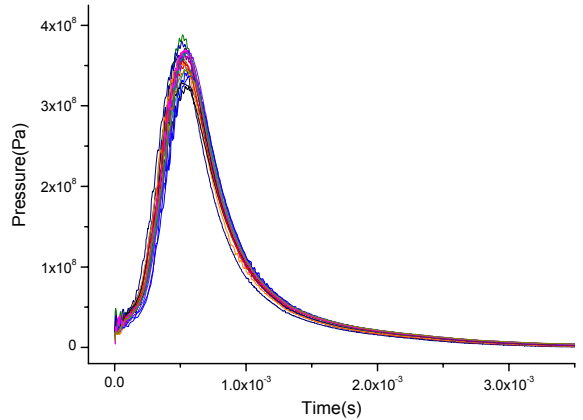
실험결과 탄저압력계수(C_b)는 0.445였다.



[그림 6] Point 1에서의 약실압력과 탄저압력 비교



[그림 7] 탄저압력 곡선 산출 결과

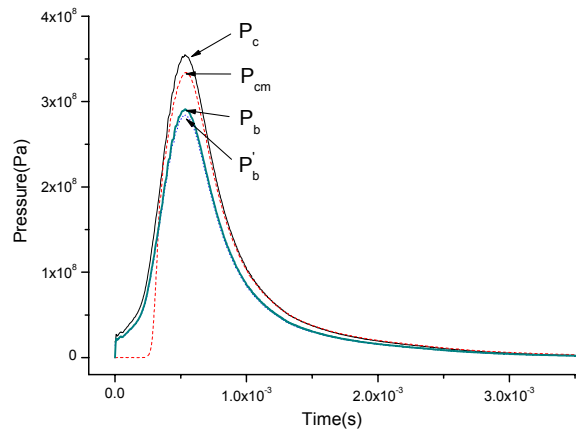


[그림 8] 약실압력 측정 결과

따라서 5.56mm 총열, M193 탄약을 사용할 경우 약실압력으로부터 탄저압력을 구하는 식은 다음과 같다.

$$P_b = \frac{P_c}{1 + 0.445 \left(\frac{C}{M}\right)} \quad (9)$$

그림 7은 식 (9)를 이용 산출한 탄저압력(P_b) 곡선과 탄저압력계수를 적용하지 않은 식 (5)를 통해 산출한 탄저압력(P'_b)을 비교한 것이다. 탄저압력계수 적용 시 탄저압력이 약간 상승하였으며, 그 결과 총구의 속도는 평균 22.8m/s의 차이를 보였다.



[그림 9] 평균압력 곡선

4. 압력-이동거리 곡선 산출

가. 압력-시간 곡선 측정

그림 8은 약실압력을 20회 측정된 결과를 나타낸 것이다. 실험조건에 의한 편차를 최소화 하더라도 생산 시에 발생한 탄자 및 추진제의 특성 차이 그리고 추진제의 온도차 등 여러 가지 원인에 의해서 강내압력의 측정결과는 그림과 같은 불규칙한 분포를 나타낸다.

Dr. Zhang Xiaobing 등은 Monte-Carlo method을 사용하여 최대 약실압력과 총구속도의 불규칙한 분포에 대하여 연구하였으며, 연구결과 불규칙한 최

대 약실압력과 총구속도는 정규분포를 나타낸다는 것을 확인하였다^[5].

본 논문에서 실험결과 분석은 측정 케이스별로 실시하였으나, 분석결과 및 그래프는 주로 실험 결과의 평균값을 통해 설명하였다. 압력곡선의 편차가 정규분포를 나타내므로 평균값으로 전체적인 경향을 설명하는 데는 큰 무리가 없다.

약실압력(P_c), 변이부 압력(P_{cm}) 그리고 산출된 탄저압력(P_b, P'_b)의 평균 곡선을 나타낸 그림 9를 보면 약실압력-시간 곡선과 탄저압력-시간 곡선은 큰 차이가 발생한다는 것을 확인할 수 있다.

변이부의 압력은 탄자가 이동하기 시작하는 시점을 확인하기위하여 측정하였다. 변이부의 압력-시간 곡

선을 보면, 일정시간(shot start time) 이후 탄자가 탄피를 벗어나는 시점부터 압력이 급격히 상승하는 것을 볼 수 있다.

탄저압력-시간 곡선으로부터 압력-이동거리 곡선과 총구속도를 산출하기 위해서는 출발압력(shot start pressure)과 총열과의 마찰을 고려해야 한다. 탄저압력을 산출하지 않고 약실압력-시간 곡선으로부터 압력-이동거리 곡선과 총구속도를 산출하려면 총열 내의 추진제의 유동과 열전달 현상을 고려해야 한다.

나. 출발압력(shot start pressure)과 마찰

탄자가 아무런 저항을 받지 않는다면 추진제가 연소하여 약실 내에 압력이 높아지는 순간 이동을 시작할 것이다. 그러나 탄자가 탄피에서 벗어나고 총열과의 저항보다 큰 압력을 받아야 움직이기 시작한다. 저항을 이기고 이동하기 시작하는데 필요한 압력을 출발압력이라고 하며 일반적으로 최대 가스압력(P_{c,max})의 10% 정도에 해당한다^[6].

PRODAS 해석결과를 통해 얻은 저항압력(P_r)을 나타낸 그림 10을 보면, 추진제가 연소하기 시작한지 0.173ms 후에 탄자가 움직이기 시작하면서 저항압력(P_r)이 급격히 감소하며 이후 일정한 값(약 5MPa)을 유지하는 것을 볼 수 있다. 출발압력을 의미하는 저항압력(P_r)의 최대값은 43.36MPa(평균 P_{c,max}의 12.24%)이었다. 일반적인 출발압력을 설정하는 기준보다는 해석결과가 2.24% 높게 나왔으나 총구속도를 산출해보면 그 차이가 0.2m/s 정도로 적게 나타났다.

PRODAS에서 0.5cal 이하의 탄자가 받는 저항압력(P_r)을 구하는 식은 다음과 같다.

$$P_r = \frac{P_{r(ref)} * (BandDia - 1.0) * Bandlength * FF * 50.5}{\cos \frac{\theta}{2} * G/L Ratio} + K \tag{10}$$

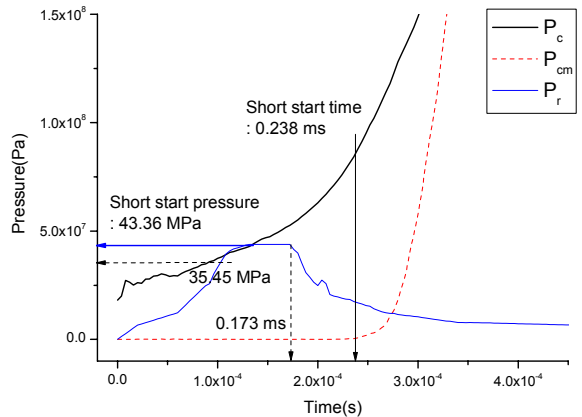
P_r = resistance pressure

FF = material code

θ = forcing cone included angle

G/L Ratio = groove th land width ratio

K = small residual constant



[그림 10] 출발압력과 출발시간 결정

그림 10에서 변이부 압력(P_{cm}) 측정 결과를 보면 탄자가 0.238msec이후에 탄자가 움직이기 시작하면서 압력이 상승하기 시작하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 PRODAS 해석결과와 다소 차이가 있다.

본 연구에서 출발시간(shot start time)은 직접적인 방법으로 측정한 변이부 압력(P_{cm})을 적용하였으며, 출발 이후의 탄자와 총열과의 마찰은 PRODAS 해석결과를 사용하였다.

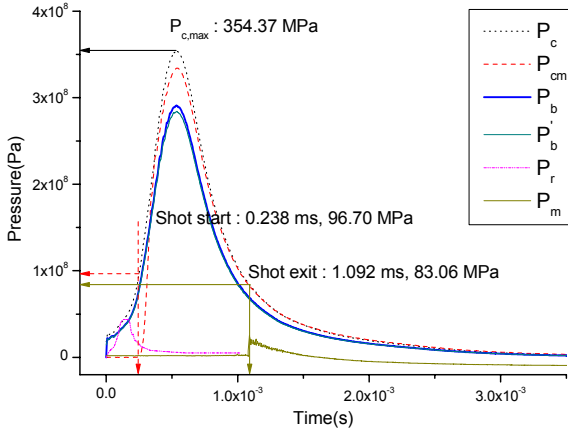
다. 강내에서 탄자의 이동속도 산출

임의의 시간 t일 때 탄자의 이동속도는 압력-시간 곡선을 아래 식과 같이 출발시간(shot start time : t_s)에서 임의의 시간 t까지 적분하여 구할 수 있다^[4].

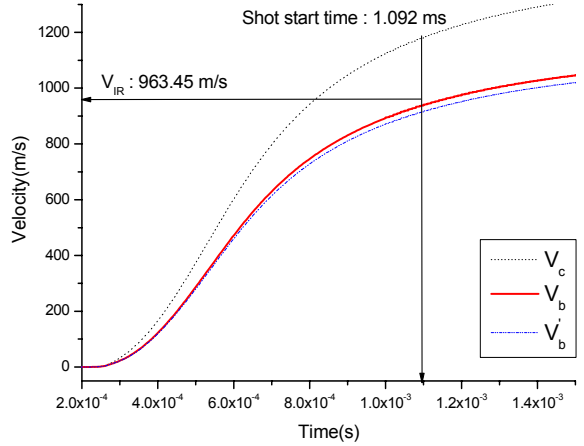
$$V = \frac{A}{M} \int_{t_s}^t P dt \tag{11}$$

A : 총강의 단면적, M : 탄자의 질량

이때 임의의 시간 t가 탄자가 총구를 벗어나는 시간(shot exit time ; t_e)이라면, 식 (11)을 계산하면 총구속도(muzzle velocity ; V_m)를 얻을 수 있다. 측정결과 탄자는 추진제가 연소를 시작한지 1.092msec 후에 총구를 벗어났으며, 그 순간 약실의 압력은 84 MPa이었다. 탄자가 벗어나는 시점은 총구에 설치된 압력센서의 측정값이 급격히 상승하는 순간을 확인하였으며, 그림 11에서 총구압력은 식별이 용이하도록 압력 값을 4배 확대하여 나타낸 것이다.



[그림 11] 탄자의 이동속도 산출



[그림 12] 속도-이동거리 곡선

마지막으로, 보다 정확한 값을 얻기 위해서는 실제 탄자가 받는 압력과 저항을 고려하기 위해 식 (11)에서 P 대신 P_b(탄저압력)-P_r(저항압력)을 대입해야 한다.

속도-시간 곡선을 구한 후, 속도(V)와 이동거리(x)의 관계인 아래 식을 이용하면 속도-이동거리 곡선을 산출할 수 있다.

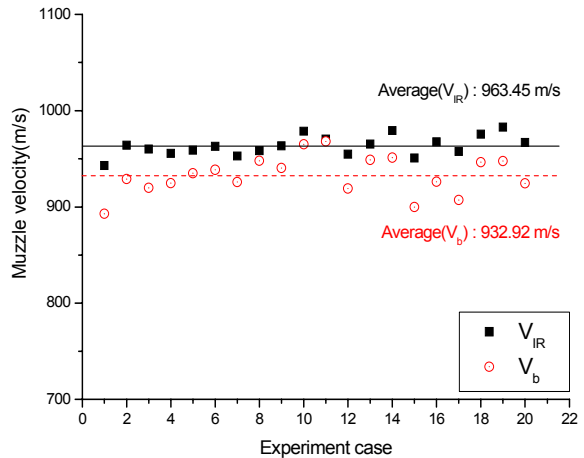
$$x = \int_{t_s}^t V dt \quad (12)$$

임의의 시간 t가 총구를 벗어나는 시간 t_e라면, 이동거리 x는 총열 길이가 될 것이다.

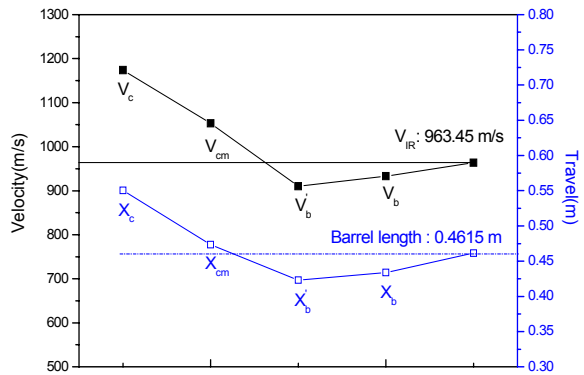
그림 12는 약실압력(P_c), 탄저압력(P_b, P_b') 측정결과와 식 (11), (12)를 이용하여 얻은 속도-이동거리 곡선이다. 그림을 보면 약실압력을 통해 얻은 곡선과 탄저압력을 통해 얻은 곡선이 큰 차이가 있다는 것을 알 수 있으며, 적외선스크린센서로 측정된 총구속도(V_{IR})와 비교하면 탄저압력계수를 적용하여 산출한 압력(P_b)을 통해 얻은 속도(V_b)-이동거리(x) 곡선이 가장 정확함을 확인할 수 있다.

그림 13은 실험 케이스 별로 탄저압력(P_b)을 통해 산출된 총구속도(V_b)와 적외선스크린센서로 측정된 총구속도(V_{IR})을 비교한 것이다. 실험결과 V_b는 V_{IR}보다 평균 30.5m/s(3.17%) 작게 나타났으며, 오차가 가장 크게 나타난 경우는 50.92m/s(5.36%)였다.

그림 14는 실험 방법별로 총구속도와 탄자의 이동



[그림 13] 실험 케이스별 총구속도 비교



[그림 14] 총구속도와 탄자의 이동거리

거리를 적외선스크린센서 측정값(V_{IR})과 총열 길이(barrel length)와 각각 비교한 것이다. 실험 방법별로 총구속도의 오차는 $V_c : 21.85\%$, $V_{cm} : 9.29\%$, $V_{b'} : 5.54\%$, $V_b : 3.17\%$ 였으며, 총열 길이 대비 이동거리의 오차는 $X_c : 19.27\%$, $X_{cm} : 2.59\%$, $X_{b'} : 8.34\%$, $X_b : 6.01\%$ 로 나타났다.

탄자가 총구를 벗어나는 시점까지 이동한 거리를 산출하면 실제 총열길리와 차이가 발생하는데, 이것은 기초 데이터인 압력-시간 곡선의 차이가 그림 12에서 보는 것과 같이 서로 다른 이동거리-시간 곡선을 만들어 내기 때문이다. 또한 변이부 압력을 이용해서 산출한 이동거리(X_{cm})가 가장 작은 오차를 나타낸 원인은 출발시간(shot start time)이후 압력이 급격히 상승하는 구간에서 왜곡된 것임을 그림 10을 통해서 확인할 수 있다.

라. 압력-이동거리 곡선 산출

약실 압력센서로부터 측정된 약실압력(P_c)-시간 곡선과 이론적으로 산출된 탄저압력(P_b)-시간 곡선 그리고 탄저압력계수를 적용 산출한 탄저압력($P_{b'}$)-시간 곡선을 이용해서 얻은 압력-이동거리 곡선을 그림 15에 각각 나타내었다. 약실압력 측정값을 통해 얻은 탄자의 이동속도와 이동거리가 가장 큰 오차를 보였듯이, 압력-이동거리 곡선도 탄저압력 곡선과는 많은 차이를 보이고 있다. 이러한 결과는 그림 11, 12에서 분석한 것처럼 실제 탄자를 가속시키는 탄저압력과 약실에서 측정되는 압력과의 차이가 크며, 이로 인해

속도-이동거리 곡선에서도 크게 왜곡되는 현상이 발생하기 때문이다.

따라서 약실에서 측정되는 압력 값을 기준으로 총구속도를 산출하거나 압력-이동거리 곡선을 얻는 것은 곤란하며, 탄저압력계수를 적용하여 산출한 탄저압력을 활용하는 것이 총열 설계 시 보다 정확한 정보를 제공할 수 있다.

5. 결론

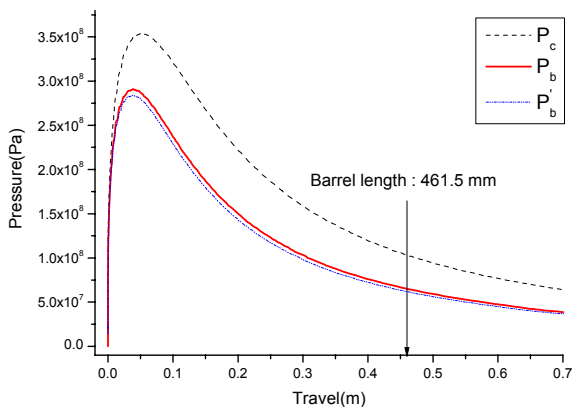
본 논문에서는 약실압력으로부터 탄저압력을 산출할 수 있는 비교적 간단한 관계식인 식 (7)을 유도하였으며, 5.56mm, M193탄약을 사용한 실험을 통해서 탄저압력계수(C_b)를 산출하여 약실압력과 탄저압력간의 관계식인 식 (9)를 완성하였다.

탄저압력을 통해 산출된 5.56mm 소총의 총구속도와 압력-이동거리 곡선은 다른 실험방법으로 얻은 결과보다 매우 신뢰성이 있다는 것을 확인하였다.

그러나 식 (9)를 적용한 탄저압력계수 및 탄저압력 곡선은 평균값을 의미하므로 탄저압력-이동거리 곡선의 편차를 고려하여야 할 것이다. 또한, 보다 정확한 탄저압력-이동거리 곡선을 얻기 위해서는 여러 위치에서 탄저압력을 측정, 탄저압력계수를 보정해야 하며 신뢰성 있는 상용 코드와의 비교분석 및 모델 적합성 검증이 필요하다고 판단된다.

[표 2] 실험 방법별 측정 오차

구 분	P_c 적용	P_{cm} 적용	$P_{b'}$ 적용	P_b 적용
총구속도(%)	21.85	9.29	5.54	3.17
이동거리(%)	19.27	2.59	8.34	6.01



[그림 15] 압력-이동거리 곡선

참 고 문 헌

[1] Paul G. Baer, Ingo W. May, "Traveling-Charge Effect", Gun Propulsion Technology, Edited by Stiefel, L., Progress in Astronautics

- and Aeronautics, Vol. 109, pp. 499~536, 1988.
- [2] Ramanujachari, V., "Gun Interior Ballistics", Modelling and performance prediction in rockets and guns, pp. 67~90, 1998.
- [3] Drysdale, W. H. and Burns, B. P., "Structural Design of Projectiles", Gun Propulsion Technology, Edited by Stiefel, L., Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 109, pp. 133~159, 1988.
- [4] 이희각 외 5인, "신편 병기공학", pp. 67~90, 청문각, 2005.
- [5] Xiaobing, Z., Ziming, J., Yaxiong, Y., "The Effect of the Random Variations of Loading Conditions on the Interior Ballistic Reliability", BALLISTICS-INTERNATIONAL SYMPOSIUM, Vol. 1, 1995.
- [6] 이흥주, "총과 탄도학", pp. 59~135, 청문각, 1996.
- [7] "기술보고서(5.56mm K2 저격용 소총 기술검토 결과)", 국방과학연구소, 2004.
- [8] AMCP 706-105, Engineering Design Handbook, Interior Ballistics of Guns, 1965.
- [9] Deas, R. W., "Pressure Gradients in High-Velocity Guns", Proceedings of the 1973 JANNAF Propulsion Meeting, CPIA, 1973.
- [10] J. Corner, "Theory of the Interior Ballistics of Guns", John Wiley, New York, 1950.
- [11] Stiefel, L., "Pressure-Time-Velocity-Travel Relationship in Typical Gun System", Gun Propulsion Technology, Edited by Stiefel, L., Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 109, pp. 61~74, 1988.