

회귀분석을 이용한 탄속 추정 방법의 검증

전병욱*, 박중화, 이정호, 조성환
국방기술품질원

A study on the verification of regression analysis projectile velocity Estimating method

Byung-Wook Jun*, Joong-Hwa Park, Jeong-Ho Lee, Seong-Hwan Cho
Defense Technology and Quality

요약 본 논문은 방탄시험 시 탄속 산출에 사용하는 MIL-STD-662F 탄속 추정 방법의 한계점을 드러내며, 그 한계 해결의 해결 방법인 회귀분석을 이용한 탄속 추정을 제시하고 검증하였다. 제안방법 검증을 위해 K100(5.56mm), KM80(7.62mm)탄약 각 20발을 사격하여, 루미라인 스크린과 도플러 레이더를 통해 1-100m 사거리에서의 탄속 변화를 계속하였다. 그 후 기존 탄속 추정 방법과 제안 방법의 탄속 집단 간 비교를 실시하였다. 먼저 기존 추정 방법의 유효성을 검증하기 위하여 시험탄약 5.56mm K100으로 사격한 결과, 최대 편차는 측정위치 100m 지점에서 V_L 과 V_S 간 2.94m/s이었다. 유의수준 0.05수준에서 F-test, T-test를 실시한 결과, 측정위치 50m, 100m에서 모두 "P값>0.05"으로, 이는 곧 집단 간 유의미한 통계적 차이가 없는 것을 확인하였다. 하지만 제안방법을 활용하기 위해서는 기존에 계속한 기초 데이터가 필요하고, 실제 계측을 수행한 사거리 내에서 적용이 가능한 점과 회귀분석으로 산출한 수식과 표본 간 신뢰도에 의존적이라는 한계점을 갖고 있다. 본 논문의 의의는 탄속 추정을 위해 필요한 데이터 획득 연구가 부재한 현실을 지적하고 이를 해결할 수 있는 대안을 제시하고 검증했다는 점에 있다. 향후 본 논문에서 제안한 방법은 실내·외 환경 내 다양한 측정 위치에서 계속 탄속 간 지속적인 비교·검증이 필요하고, 나아가 기초 데이터 없이 제안방법 활용이 가능하도록 각 탄종별 고유 계수 및 수식을 만들어 제시하는 방향의 연구가 수행되어야 한다.

Abstract This study analyzed the projectile velocity estimating method of MIL-STD-662F and the instruments in ballistic resistance tests and suggested and verified alternatives. K100 (5.56 mm) and KM80 (7.62 mm) bullets were used to fire at a range of 1 to 100 m to verify the proposed method. The projectile's velocity was measured using a lumiline screen and a doppler radar. Cross-validation of the results was performed between the existing and the proposed methods. This validation confirmed no statistical difference between the population mean and the variance observed in the F-test and T-test between populations, with "P-value>0.05". However, the proposed method is limited because it is implemented using the existing data and applied only at a specific range. Moreover, the proposed method is dependent on the reliability indicating the correspondence between the equation calculated by SRA and the sample. Nevertheless, this study is meaningful because it points out the absence of data-related research necessary for the projectile velocity estimation method and suggests an alternative solution. In the future, it is necessary to continuously compare the projectile velocity at various locations in indoor and outdoor environments. Further research is also needed to create unique coefficients and formulas for each bullet type that can be used without the base data.

Keywords : Ballistic Resistant Test, Projectile Velocity, Strike Velocity, MIL-STD-662F, Regression Analysis

*Corresponding Author : Byung-Wook Jun(Defense Technology and Quality)

email: zzoo7373@daq.re.kr

Received November 1, 2021

Accepted January 7, 2022

Revised December 10, 2021

Published January 31, 2022

1. 서론

1.1 연구배경

방탄시험이란, 규정된 조건에서 방탄제품에 탄약을 사격하여 방호성능을 얼마나 발휘하였는지를 확인하는 것이다. 여기서 규정된 환경조건은 일반적으로 생각할 수 있는 시험장 내 온·습도, 조도, 풍향 등 자연 환경적 요인이 있으며, 사거리, 탄종, 탄속 등 사격 요인이 있다. 방호성능을 평가하는 방법은 크게 3가지로 나눌 수 있다. 첫 번째, 관통여부(BL: Ballistic Limit, 이하 BL)를 확인하는 방법으로 사격 후 시편에 관통(Penetration)이 발생했는지 확인하는 방법이다. 두 번째, 후면변형(P-BFS: Perforation and Backface Signature, 이하 P-BFS)을 측정하는 방법으로 시편을 후면재에 부착해 사격하고, 후면재의 변형량을 통해 측정하는 방법이다. 마지막으로 세 번째, V50 산출하는 방법으로 시편에 사격 후 부분관통과 완전관통을 조합해 시편에 관통 발생 가능성이 50%가 되는 지점을 찾는 방법이다.

이처럼 방탄성능 평가를 위한 다양한 조건과 방법들이 있으며, 방탄제품의 최종 사용자가 사용 환경 등의 요인을 고려하여 요구사항을 기술하는데, 이것을 시험규격이라고 하며, 민수용, 군수용 및 지역적 특성을 고려하여 선택할 수 있다. 서방 국가와 우호적인 관계를 갖는 대한민국의 1987년 미국 국방부에서 작성한 방탄 소재(ballistic material)에 대한 V50 산출 방법인 MIL-STD-662F[1] 규격을 근간으로 하는 방탄시험을 수행한다.

1.2 MIL-STD-662F 문제점 및 해결방안

MIL-STD-662F는 방탄시험 수행 시 빈번히 참고되는 규격이지만, 규격 내 기술된 탄속 산출 방법을 사용하기 위해 필요한 인자의 정보 획득이 매우 제한돼 탄속 산출에 어려움이 있으며, 또한 그 정보는 각 방탄시험소 간 차이가 있어 동일한 발사체의 측정 탄속 결과가 시험소마다 다를 수 있다. 규격에 따르면 탄속 추정 방법은 다음과 같다.

$$V_S = V_I - V_L \quad (1)$$

Eq. (1)에서, V_S 는 충돌 탄속이며, V_I 는 측정 탄속, V_L 는 감속을 의미한다. 충돌 탄속이란, 발사된 탄두가 목표물에 충돌하기 직전의 속도이다. 측정 탄속 V_I 는 루

미라인 스크린(lumiline screen) 계측 장비로 측정된 탄속이며, 식으로는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_I = \frac{d}{t} \quad (2)$$

Eq. (2)에서 d 는 속도 측정을 위해 설치한 루미라인 스크린 간 거리이며, t 는 d 에서 탄이 비행한 시간이다. 감속 V_L 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_L = \frac{\rho i d^2 X G}{w} = \frac{(X G \rho)}{C} \quad (3)$$

Eq. (3)에서, ρ 는 상대 공기 밀도(단위 : kg/m^3), i 는 탄자 형상인자(projectile form factor), d 는 탄자 직경(단위 : cm), X 는 루미라인 스크린 간 중앙지점부터 시편까지의 거리(단위 : m), G 는 항력함수(drag function), w 는 탄두 무게(단위 : kg), C 는 탄도계수(ballistic coefficient)이다. 이때, Eq. (3)으로부터 탄도계수 C 를 아래와 같이 도출할 수 있다.

$$C = \frac{w}{i d^2} = \frac{SD}{i} \quad (4)$$

Eq. (4)에서, SD 는 단면밀도(sectional density)로 탄자 직경 d 제곱 값에 탄자 무게 w 를 나눈 값이다. 탄도계수 C 는 탄자가 항력에 반하여 탄속을 유지하며 비행할 수 있는지를 가늠하는 척도이다. 탄자 형상인자 i 는 다음과 같이 나타낼 수 있다[2].

$$i = \frac{C_B}{C_G} \quad (5)$$

Eq. (5)에서 C_B 는 비교대상 탄약의 항력계수(drag coefficient)이며, C_G 는 표준 탄자모델의 항력계수로 Fig. 1과 같이 G7과 같은 모델이 존재한다.

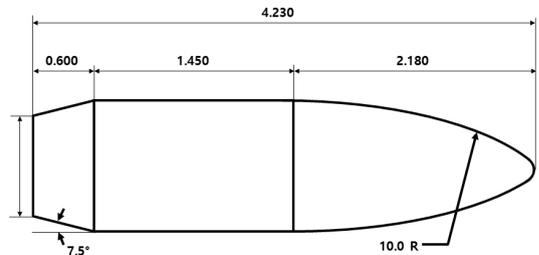


Fig. 1. Standard bullet model G7

항력함수 G 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G = K_D \rho_{std} V \quad (6)$$

Eq. (6)에서, K_D 는 탄자가 갖는 항력계수, ρ_{std} 는 표준 공기 밀도로 1.225 kg/m^3 (해수면 기준)값을 갖는다. V 는 탄속(단위 : mach number)이다. Eq. (6)이 의미하는 것은 표준 공기 밀도에서 탄속에 따라 변하는 탄자에 발생 항력계수이다. 항력함수 G 와 탄도계수 C 를 얻기 위해서는 탄마다 가지는 고유 항력계수(drag coefficient)가 필요한데, 항력계수를 얻기 위해서는 풍동시험(wind tunnel test)을 수행해야 한다. 하지만 풍동시험은 인프라 구성에 높은 비용과 반복적인 계산으로 인하여 많은 시간이 소요된다는 문제점이 있다. 계수는 공식적으로 공유되는 것이 없고, 정보를 획득하는 것이 굉장히 제한된다. 국내에서는 현재까지 탄약의 항력계수를 구하기 위한 연구 수행 이력이 전무한 상태이고, 관련 데이터 또한 전혀 없는 것이 현실이다. 이런 문제 해결을 위해 탄 형상 수치에 따라 구하는 여러 준실험적 방법이 제시가 되었다. 그 중 대표적인 방법 중 하나인 Eq. (7)의 McCoy(1981)[3] 방법이다[4,5].

$$C_{D_o} = C_{D_H} + C_{D_{BT}} + C_{D_B} + C_{D_{nb}} + C_{D_{sf}} \quad (7)$$

Eq. (7)에서 C_{D_o} 가 총 항력계수(편주각 0°) 일 때, 각 인자는 C_{D_H} 는 탄두부(projectile head), $C_{D_{BT}}$ 는 탄미부(boattail), C_{D_B} 는 탄저부(blunt base), $C_{D_{nb}}$ 는 탄자 회전대(rotating band), $C_{D_{sf}}$ 는 탄자 재질 따라 발생한 표면 마찰(skin friction)에서 항력계수이다. C_{D_H} 탄두부 항력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{D_H} = \frac{(C_1 - C_2\tau^2)[\tau\sqrt{M_\infty^2 - 1}]^{(C_3 + C_4\tau)}}{(M_\infty^2 - 1)} \quad (8)$$

Eq. (8)에서 각 인자들의 계수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} C_1 &= 0.7156 - 0.5313\left(\frac{R_T}{R}\right) + 0.5950\left(\frac{R_T}{R}\right)^2 \\ C_2 &= 0.0796 + 0.0779\left(\frac{R_T}{R}\right) \\ C_3 &= 1.587 + 0.049\left(\frac{R_T}{R}\right) \end{aligned} \quad (9)$$

$$C_4 = 0.1122 + 0.1658\left(\frac{R_T}{R}\right)$$

$$\tau = \frac{1 - d_M}{L_N}$$

Eq. (9)에서, R_T/R 는 탄두부 형상(head shape)에 따른 매개변수이다. Fig. 2에서 보는 바와 같이, R 는 탄두부 곡선(tangent ogive)을 그리는 반지름 값이고, R_T 는 탄두부의 정점 수평선 상에서 탄두부 곡선과 접점하는 원의 반지름이다.

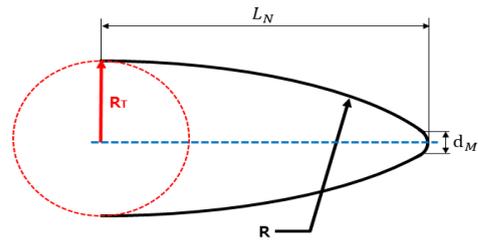


Fig. 2. Tangent ogive nose cone.

R_T 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_T = (L_N)^2 + \frac{1}{4} \quad (10)$$

Eq. (9)와 (10)에서의, L_N 는 탄두부의 길이가 된다. $C_{D_{BT}}$ 탄미 항력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} C_{D_{BT}} &= \frac{4A \tan\beta}{k} [(1 - e^{-kL_{BT}}) \\ &+ 2 \tan\beta (e^{-kL_{BT}} (L_{BT} + \frac{1}{k}) - \frac{1}{k})] \end{aligned} \quad (11)$$

Eq. (11)에서 β 는 탄미부 각도, L_{BT} 는 탄미부 길이, A 는 탄미부 압력계수, k 는 압력 회복 인자(pressure recovery factor)이다. Eq. (11)에서 각 인자들은 다음 Eq. (12), (13), (14)와 같이 산출 가능하다.

$$\begin{aligned} A &= A_1 e^{-\sqrt{\frac{2}{\gamma M_\infty}} L_{CVL}} + \frac{2 \tan\beta}{\sqrt{M_\infty^2}} \\ &- \frac{[(\gamma + 1)M_\infty^4 - 4(M_\infty^2 - 1)] \tan^2\beta}{2(M_\infty^2 - 1)^2} \end{aligned} \quad (12)$$

$$A_1 = \left(1 - \frac{3(R_T/R)}{5M_\infty}\right) \left(\frac{5\tau}{6\sqrt{M_\infty^2 - 1}} \left(\frac{\tau}{2}\right)^2 - \frac{0.7435}{M_\infty^2} (\tau M_\infty)^{1.6}\right) \quad (13)$$

$$k = \frac{0.85}{\sqrt{M_\infty^2 - 1}} \quad (14)$$

Eq. (12)에서 L_{CYL} 는 원통부(cylinder section)길이, γ 는 비열율(ratio of specific heat)이다. Eq. (13)에서 A_1 는 초음속 내 탄미부가 갖는 항력 보정 계수이다. 본 논문에서 사용하는 시험탄은 회전대가 없으므로 생략한다. $C_{D_{sf}}$ 재질에 따른 표면 마찰 항력계수는 다음처럼 나타낼 수 있다[4].

$$C_{D_{sf}} = \frac{4}{\pi} C_F S_F \quad (15)$$

Eq. (15)에서 C_F 는 탄자 표면 마찰 계수 이고, S_F 는 탄자 표면적이다. C_F 는 다음처럼 나타낼 수 있다.

$$C_{F_T} = \frac{0.455}{(\log_{10}^{Re})^{2.58}} (1 + 0.21(M_\infty)^2)^{-0.32} \quad (16)$$

Eq. (16)는 대개 탄두부에서 난류(turbulent)가 발생할 때 적용할 수 있다. 실제 사용 탄약의 형상과 재질을 고려한 수식 적용이 필요하다. S_F 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{W_n} = \frac{\pi}{2} L_N \left(\frac{1 + 8L_N^2}{8L_N^2}\right) \left(1 + \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{50L_N^2}\right) \left(\frac{R_T}{R}\right)\right) \quad (17)$$

$$S_{W_{cy}} = \pi(L_T - L_N) \quad (18)$$

Eq. (17)는 탄두부의 표면적을 구하는 식이고, Eq. (18)는 원통부의 표면적을 구하는 식이다. 이 때, L_T 는 탄자 전체 길이(단위 : caliber)이다. C_{D_B} 탄저부 항력계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{D_B} = \frac{2d_B^2}{\gamma M_\infty^2} \left(1 - \frac{P_B}{P_\infty}\right) \quad (19)$$

Eq. (19)에서 D_B 는 탄저부 직경(단위:caliber), P_∞ 는 자유기류 내 정적압력, P_B 는 탄저부 압력 추정값이다. 각 인자는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{P_B}{P_\infty} = (1 + 0.09M_\infty^2 (1 - e^{-L_{CYL}}) * \left(1 + \frac{M_\infty^2}{4} (1 - d_B)\right) \quad (20)$$

Eq. (20)의 L_{CYL} 는 원통부 직경(단위:caliber)이다.

위 방법을 적용하려면 정확한 탄약 제원이 요구되는데, 대개 비닉성 정보이므로, 관련정보 획득이 매우 제한되어 항력계수 산출로 탄속을 추정하는 것 또한 매우 어렵다. 그러므로 본 논문에서는 이 문제들을 해결하기 위해 탄 사격 시 측정 위치 2곳 이상에서 계측한 탄속 데이터를 토대로 회귀분석(regression analysis)을 수행하여 만든 감속 추정선을 가지고 탄속을 산출하는 방법을 제안하고 있다. 대부분 탄속은 거리에 따라 일차원 선형적으로 감소하기 때문에 감속 추정선을 적용한 탄속 추정 방법의 사용이 가능하다.

2. 본론

2.1 시험개요

2.1.1 목적

본 논문에서는 루미라인 스크린으로 계측한 탄속과 MIL-STD-662F의 탄속 추정 방법으로 산출한 탄속과의 비교를 실시하고 또한 1.2 해결방안에서 제시한 회귀분석을 이용한 탄속 추정 방법과의 비교를 실시하여 각 방법 간 차이 및 그 유효성을 검증하고자 한다.

2.1.2 시험환경

시험은 야외환경의 온도(17.8~22.8℃), 습도(RH, 47~51%), 상대공기밀도(relative air density, 1.14kg/m³)에서 진행됐다.

2.1.3 탄약

시험에 사용된 탄약 및 총열 제원은 다음 Table 1에 서 보는 바와 같다.

Table 1. Test barrel and bullet information

No.	bullet	DODIC	mass(g)	barrel
1	5.56mm	K100	4.1	HPI 5.56x45mm 7"
2	7.62mm	KM80	9.6	HPI 7.62x51mm NATO

시험탄약은 5.56mm K100과 7.62mm KM80 두 탄종을 사용하였는데, 두 탄종은 국군에서 사용량이 가장 많은 탄이다. 완성탄 상태로 사격하였으며, 최초로 표본 크기를 고려하여 30발 사격을 계획하였으나, K100 탄약 사격 종료 후 모든 측정 위치에서 탄속이 측정된 표본은 20발이었기에 20발에 대해서 결과를 기술하였다. 따라서, KM80 탄약도 온전히 측정된 20발에 대해서 기술하고 분석하였다. i 와 G 인자는 위 언급한 McCoy(1981)[2] 이용하여 산출하였는데, 산출한 값은 탄약 제원 및 특성이 노출되므로, 본 논문에서는 기술하지 않았다.

2.1.4 계측장비

탄속 계측장비는 루미라인 스크린과 도플러 레이더(doppler radar)를 사용하였다. 루미라인 스크린은 오스트리아의 HPI사 모델 B462와 주파수 계수기 모델

B217을 사용하였다. 측정위치는 총구에서부터 1, 50, 100, 200m 거리에 각각 설치하였고, 각 위치의 측정은 독일 LEICA사의 모델 S910 레이저 거리 측정기를 사용하였다. 각 루미라인 스크린은 독일 BOSCH사의 GLL3-80 레이저 라인 레벨기를 사용하여 조준선과 수직으로 설치하였다. 각 위치별로 설치된 2대의 루미라인 스크린의 간격은 1m이며, 각 위치에 확인지를 사용하여 편주각(yaw angle)을 확인하였다. 도플러 레이더는 덴마크 WEIBEL사의 모델 SL-528PE를 사용하였고 트리거는 광센서 장비를 사용하였다.

위 내용의 총열 및 계측장비 설치는 다음 Fig. 3에서 보는 바와 같다.



Fig. 3. Test configuration

Table 2. Result of K100 velocity

(m/s)

No.	1m		50m			100m		
	V_D	V_L	V_S	V_D	V_L	V_S	V_D	V_L
1	928.35	929.45	877.76	878.01	876.58	827.27	827.77	827.47
2	921.89	922.08	872.21	872.95	871.76	823.45	824.17	823.62
3	930.75	931.88	882.19	883.28	881.87	833.74	835.66	835.22
4	930.97	932.71	881.02	882.09	880.67	832.54	833.27	832.99
5	932.67	933.18	883.49	884.21	882.69	834.56	835.30	834.69
6	928.82	929.67	880.98	881.52	880.13	832.00	833.40	833.37
7	926.49	927.13	878.44	880.58	879.12	830.99	833.93	833.26
8	911.65	912.33	863.09	864.96	863.52	814.84	817.73	817.36
9	930.30	931.66	881.97	882.04	880.67	832.54	833.51	833.09
10	925.80	927.30	876.81	876.02	874.66	825.35	824.95	825.25
11	931.89	932.44	882.75	883.07	881.87	833.74	834.83	834.27
12	933.42	934.89	883.38	884.90	883.35	835.22	835.75	835.59
13	930.39	930.75	882.06	881.51	880.13	832.00	832.80	832.33
14	931.29	931.62	882.83	881.43	880.05	831.92	831.64	831.04
15	919.35	920.22	870.16	871.69	870.32	822.01	824.05	823.52
16	931.20	932.62	880.93	882.67	881.60	833.47	834.28	833.72
17	923.24	925.20	874.33	875.19	873.93	825.62	826.94	826.27
18	937.03	937.25	888.74	889.29	887.83	840.89	841.35	840.86
19	929.24	929.89	882.20	881.20	879.89	831.76	832.93	832.39
20	932.54	933.14	882.95	883.72	882.34	834.21	834.80	834.26

2.2 시험탄약 K100 사격

2.2.1 탄속 계측 결과

K100(5.56mm) 시험탄약의 탄속 측정결과 V_S , V_D , V_L 는 다음 Table 2에서 보는 바와 같다. V_L 와 V_D 는 각각 루미라인 스크린, 도플러 레이더로 계측한 탄속 데이터이며, V_S 는 MIL-STD-662F에서 명시한 위 Eq. (1)의 탄속 추정 방법을 이용하여 계산한 탄속이다. 1m 위치에서 V_S 는 Eq. (1)에 따라 루미라인 스크린을 이용한 1m 이전 V_L 가 없어 산출하지 않았다.

2.2.2 결과 분석

위 Table 2의 최소 및 최대편차는 다음 Table 3에서 보는 바와 같다.

Table 3. Deviation between data by location (m/s)

K100		V_S (max/min)	V_L (max/min)
1m	V_D	-	1.96 / 0.19
	V_L	2.78 / 0.03	-
50m	V_D	2.14 / 0.07	1.55 / 1.07
	V_L	2.78 / 0.03	-
100m	V_D	2.94 / 0.28	0.67 / 0.03
	V_L	2.52 / 0.03	-

위 Table 3에서의 편차 중 측정위치 100m 지점에서 V_S 와 V_D 의 탄속 차이가 2.94m/s로 가장 크고, 측정위치 50m 지점에서 V_L 와 V_S 의 탄속 차이 및 100m 지점에서 V_L 와 V_D 의 탄속 차이가 0.03m/s로 가장 적었다. 같은 측정 위치에서 각 탄속의 차이가 존재하는 주된 이유는 두 가지가 있다고 생각된다. 첫 번째, 시간과 거리 측정에 대한 불확도 요인이 계측 장비에 내재되어 있기 때문이다. 예를 들어 총구에서부터 50m 떨어진 측정위치에 장비를 설치해야 하지만 거리 측정기의 분해능에서 발생하는 불확도로 인하여 실제로는 49.8m에서 설치하여 정확한 위치에서의 탄속 측정이 불가능했다는 점이 있을 수 있다. 두 번째, 야외 사격수행으로 인하여 실내 사격에 비해 상대적으로 상시 바뀌는 풍향과 같은 통제 불가능한 환경적 요인이 작용했을 것으로 생각되며, 이외에도 여러 가지 요인이 있을 수 있다. 각 거리 구간별 감속 평균은 다음 Table 4에서 보는 바와 같다.

Table 4. Velocity loss by location section (m/s)

K100	1-50m (max/min)	50-100m (max/min)
V_S	-	49.46(0.99)
V_D	48.13(0.96)	48.86(0.98)
V_L	50.44(1.00)	47.64(0.95)

위 Table 4에서 괄호 내 값은 구간별 감속에 거리를 나눈 값으로 1m당 감속하는 값이다. 예를 들어 V_S 의 단위미터 당 감속은 50-100m거리 구간 내에서 1m당 감속은 0.99m/s 이다. Eq. (3) 각 인자에 필요한 데이터 확보가 제한되는 타 방탄시험소에서는 각 탄종을 사격하여 얻은 탄속 데이터를 토대로 위와 같이 단위미터 당 감속 값을 이용하여 총구에서부터 해당 위치까지의 거리를 계산하여 측정위치 외 탄속을 추정하는 데 사용하고 있다. 하지만 이러한 방법이 유효한지는 추후 검증이 필요할 것으로 판단된다. 단위미터 당 감속 값을 이용한 방법의 한계점은 본 논문에서 제안한 방법의 한계점과 비슷하다. MIL-STD-662F 규격 내 4.3.2 Detectors의 요구 사항에는 각 탄속 계측 장비의 계측 값의 차이가 3m/s(10ft/s) 이하일 때, 유효한 것으로 보고 사용하도록 명시되어 있다. 그러므로 위 Table 3에서 보는 바와 같이 V_S 와 계측 장비 간 최대 차이 2.94m/s이고, V_L 과 V_D 의 최대 차이 1.96m/s이므로 본 기관의 방탄시험소에서 방탄시험 수행 시 적용하는 Eq. (1)은 유효하다고 볼 수 있다. 또한 각 측정 위치별 V_S , V_D , V_L 집단 간 차이를 확인하기 위하여 통계적 기법인 일원분산분석(one-way analysis of variance)을 실시하였다. 통계 처리는 Microsoft Excel 2017 프로그램을 활용하였으며, 결과는 Table 5와 같다.

Table 5. Population variance comparison (m/s)

	50m (ANOVA)	100m (ANOVA)
SS	18.7896	11.0927
DoF	2	2
RMS	9.3948	5.5463
F-ratio	0.3015	0.1782
P-value	0.7408	0.8371
F-critical value	3.1588	3.1588

위 통계분석의 유의수준은 0.05수준이며, F비가 F기 각치보다 작고 P값이 0.05보다 크므로 집단 간 평균 차이가 없다는 귀무가설을 채택할 수 있다. 따라서 위와 같은 통계적 분석을 통해 각 위치 별 탄속 평균은 차이가 없다는 것을 확인하였다.

2.2.3 회귀분석을 이용한 방법 검증

위에서 언급하였듯이 Eq. (1)을 이용하여 탄속을 구하는 방법은 계수에 대한 데이터가 제한되어 사용하기 어려우며, 도플러 레이더와 같은 장비는 다른 장비에 비해 매우 고가여서 확보에 어려움이 있을 수 있다. 또한 루미 라인 스크린은 정해진 측정위치 외 탄속을 계속할 수 없다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 회귀분석을 이용한 탄속 추정을 사용하여 위치별 탄속을 구할 수 있다. 각 위치별 V_L 를 토대로 회귀분석 실시한 결과 다음 Eq. (21), (22)를 얻을 수 있었다.

$$V_R = 0.934 V_L + 10.717 \quad (21)$$

$$V_R = 0.9817 V_L - 31.551 \quad (22)$$

위 수식에서 V_R 는 회귀분석을 이용하여 산출된 탄속으로 정의할 수 있다. Eq. (21)는 측정위치 1-50m 구간의 회귀분석 결과이고 Eq. (22)는 측정위치 50-100m 구간의 회귀분석 결과로 이를 적용할 때는 각 구간별 수식을 적용하여 산출하는 것이 적절하다. 분석은 Microsoft Excel 2017 프로그램을 활용하여, 단순회귀분석(simple regression analysis)을 실시하였고, Eq. (21)에서 V_L 는 측정 위치 1m에서의 탄속으로 독립변수가 된다. Eq. (22)에서 V_L 는 측정위치 50m에서의 탄속이고, 자연스럽게 V_R 는 종속변수가 된다. Eq. (21), (22)를 선형 그래프로 표현하면 다음 Fig. 4 및 Fig. 5와 같이 표현할 수 있다.

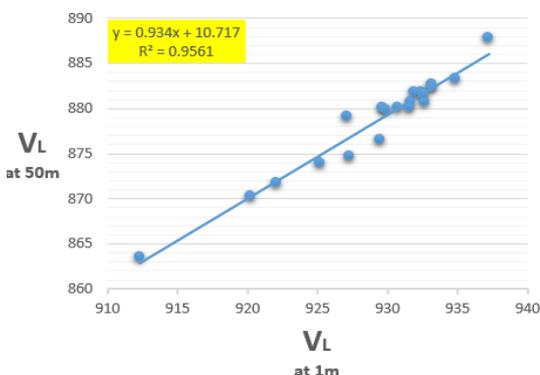


Fig. 4. linear graph of K100 velocity at 1-50m

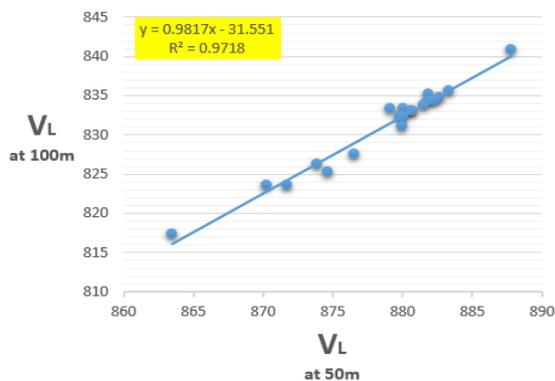


Fig. 5. linear graph of K100 velocity at 50-100m

위 Fig. 4에서의 신뢰도는 95.61%, Fig. 5의 신뢰도는 97.18%으로 나타났는데, 이는 매우 높은 신뢰도로 거리에 따라 탄속이 선형적으로 감소한다는 것을 나타낸다. 하지만, 이 데이터를 활용한 탄속 추정 방법은 회귀분석의 기반이 된 거리별 구간에서만 적용이 가능하다는 한계점을 갖고 있다. 예를 들어, Eq. (21)는 1m 이하 그리고 50m를 초과하는 거리에 적용할 수 없고, Eq. (22)는 50m 이하 그리고 100m를 초과하는 거리에 적용할 수 없다. 위 Eq. (21), (22)을 토대로 측정위치 별 V_S 와 V_R 를 나타내면 다음 Table 6에서 보는 바와 같다.

Table 6. Result of K100 SRA data (m/s)

	50m		100m	
	V_S	V_R	V_S	V_R
1	877.76	878.82	827.27	828.99
2	872.21	871.94	823.45	824.26
3	882.19	881.09	833.74	834.18
4	881.02	881.87	832.54	833.00
5	883.49	882.31	834.56	834.99
6	880.98	879.03	832.00	832.47
7	878.44	876.66	830.99	831.48
8	863.09	862.83	814.84	816.17
9	881.97	880.89	832.54	833.00
10	876.81	876.82	825.35	827.10
11	882.75	881.62	833.74	834.18
12	883.38	883.90	835.22	835.63
13	882.06	880.04	832.00	832.47
14	882.83	880.85	831.92	832.39
15	870.16	870.20	822.01	822.84
16	880.93	881.78	833.47	833.92
17	874.33	874.85	825.62	826.39
18	888.74	886.11	840.89	840.03
19	882.20	879.23	831.76	832.24
20	882.95	882.27	834.21	834.64

위 Table 6 내 최소 및 최대편차는 다음 Table 7과 같이 나타났다.

Table 7. Deviation between data by velocity (m/s)

K100		V_R (max/min)
V_S	50m	2.97 / 0.01
	100m	1.75 / 0.41

위 Table 7에서 보는 바와 같이 탄속 최대 차이는 50m 지점에서 2.97m/s이고, 50m 지점에서 최소 차이는 0.01m/s 이다. 이는 위에서 언급한 MIL-STD-662F 규격 내 4.3.2 Detectors의 요구사항인 3m/s 이하로 만족하는 수치이다. 또한 V_L 와 V_R 두 집단에 대해 F-검정과 T-검정을 한 결과는 다음 Table 8에서 보는 바와 같다.

Table 8. Sample variance comparison (m/s)

	50m		100m	
	F-test	T-test	F-test	T-test
Var	-	30.96	-	31.16
DoF	19	38	19	38
F-ratio	1.1577	-	1.1546	-
P-value	0.3764	0.6687	0.3785	0.7304
F-critical value	2.1682	-	2.1682	-

위 Table 8의 유의수준은 0.05수준이며 측정위치 50m 지점에서의 F-검정 결과 $P > 0.05$ 수준 이므로 두 집단은 등분산이고 T-검정은 등분산을 가정한 분석으로 실시하였다. 그 결과 $P > 0.05$ 수준 이므로, 두 집단의 평균은 차이가 없는 것을 확인할 수 있다. 측정위치 100m 지점에서도 또한 F-검정 및 T-검정 결과 $P > 0.05$ 수준이므로 두 집단의 평균과 분산에서 유의미한 통계적 차이가 없음을 확인할 수 있다. 이러한 집단 간 교차 검증들을 통하여 회귀분석을 이용한 방법 또한 탄속을 산출하는 적절한 방법 중 하나가 될 수 있음을 확인할 수 있었다.

2.3 시험탄약 KM80 사격

2.3.1 목적

위에서 검증한 회귀분석을 이용한 방법을 다른 탄종에 적용 하였을 때 V_S 와의 통계적 차이가 없는 적절한 결과

가 나올 수 있는지 확인하기 위하여 KM80 시험탄약에 대하여 Eq. (1)으로 산출된 탄속과 비교·검증하고자 하였다.

2.3.2 시험구성

시험탄약 제원과 총열은 위 Table 1에서 보는 것과 같으며, K100 시험탄약 사격할 때와 같은 환경에서 시험을 진행하였다. 다만 2.2.2 결과분석에서 기술하였듯이 루미라인 스크린과 도플러 레이더 간 계측 탄속 비교를 통해 루미라인 스크린의 탄속 계측이 유효한 것을 검증하였으므로, KM80 시험탄약은 V_D 와 V_L 탄속을 제외한 나머지 V_S 와 V_R 탄속에 대해서만 비교를 실시하였다.

2.3.3 결과 분석

각 위치별 V_L 을 토대로 회귀분석을 실시한 결과 다음 Eq. (23), (24)를 얻을 수 있었다.

$$V_R = 0.9816 V_L - 22.061 \quad (23)$$

$$V_R = 0.9843 V_L - 22.673 \quad (24)$$

Eq. (23)는 측정위치 1-50m 구간, Eq. (24)는 측정위치 50-100m 구간의 단순회귀분석을 한 결과이다. KM80 시험탄약의 탄속 측정결과는 다음 Table 9에서 보는 바와 같다.

위 Eq. (23), (24)의 회귀분석 결과를 그래프로 나타내면 다음 Fig. 6 및 Fig. 7와 같이 표현할 수 있다.

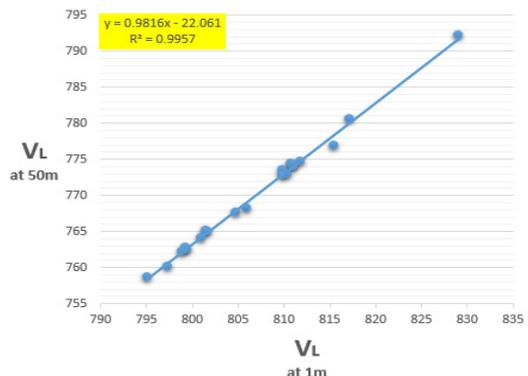


Fig. 6. linear graph of KM80 velocity at 1-50m

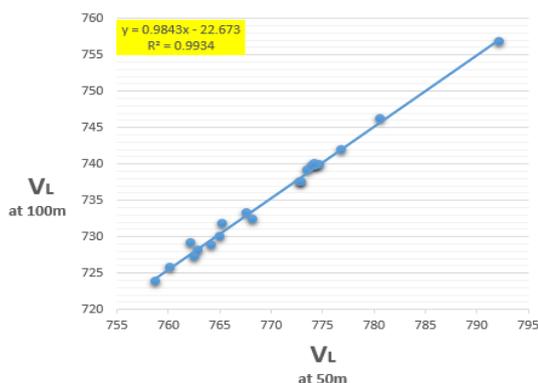


Fig. 7. linear graph of KM80 velocity at 50-100m

위 Fig. 6에서의 신뢰도는 99.57%, Fig. 7의 신뢰도는 99.34% 으로 나타났다. 이는 거리에 따라 탄속이 선형적으로 감소한다는 것이므로, KM80 시험탄약에 회귀 분석을 이용한 탄속 추정 방법 적용이 가능하다는 것을 알 수 있다. 다음 Table 9 내 최소 및 최대 편차는 다음 Table 10에서 보는 바와 같이 나타났다.

Table 9. Result of KM80 SRA data (m/s)

	50m		100m	
	V_S	V_R	V_S	V_R
1	775.98	774.79	740.28	739.90
2	763.27	762.59	727.77	727.87
3	774.00	772.85	739.12	738.76
4	764.81	764.10	729.41	729.48
5	779.73	778.33	742.42	742.01
6	769.95	769.01	733.65	733.52
7	761.26	760.62	725.43	725.56
8	774.00	772.85	738.37	738.02
9	763.11	762.43	728.12	728.21
10	774.60	773.44	738.46	738.11
11	775.22	774.05	739.53	739.17
12	758.81	758.35	723.83	724.14
13	774.99	773.82	739.92	739.55
14	775.25	774.08	739.8	739.43
15	765.42	764.70	730.49	730.54
16	762.73	762.06	727.49	727.59
17	768.75	767.83	733.07	732.94
18	765.58	764.86	730.31	730.37
19	793.67	791.73	758.17	757.09
20	781.43	779.99	746.33	745.71

Table 10. Deviation between data by velocity (m/s)

V_S	K100	
	$V_R(\text{max/min})$	
	50m	1.94 / 0.46
100m	1.08 / 0.05	

위 Table 10에서 보는 바와 같이 탄속 차이 최대는 50m 지점에서 1.94m/s이고, 최소는 100m 지점에서 0.05m/s 이다. 또한 요구사항 3m/s 이하로 만족하는 수치이다. V_L 와 V_R 두 집단에 대해 F-검정과 T-검정을 한 결과는 다음 Table 11에서 보는 바와 같다.

Table 11. Sample variance comparison (m/s)

	50m		100m	
	F-test	T-test	F-test	T-test
Var	-	65.09	-	63.40
DoF	19	38	19	38
F-ratio	1.0044	-	1.0067	-
P-value	0.4962	0.9879	0.4942	0.9899
F-critical value	2.1682	-	2.1682	-

위 Table 11의 유의수준은 0.05수준이며 측정위치 50m, 100m 지점의 F-검정 결과 $P\text{-값} > 0.05$ 으로, 두 집단은 등분산이고 또한 T-검정 결과 $P\text{-값} > 0.05$ 이므로, 두 집단의 평균과 분산에 유의미한 차이가 없음을 확인할 수 있었다.

3. 결론

본 논문에서는 회귀분석을 이용한 탄속 추정 방법이 MIL-STD-662F에서 명시한 탄속 추정 방법이 가진 고가의 장비를 사용해야 하는 문제점이나 필요한 인자 획득의 한계점 등을 해결하기 위한 적절한 방안임을 제안하고 검증하였다. 도플러 레이더와 루미라인 스크린을 사용하여 획득한 탄속 데이터와 MIL-STD-662F 추정 방법으로 산출한 탄속 데이터를 비교·검증하였고, 이를 감속 추정식 방법을 활용한 탄속 데이터와 다양한 통계 분석을 통해 두 방식이 차이가 없음을 비교·검증하였다. 본 논문은 국내에서는 기존 MIL-STD-662F의 추정 방법을 사용하기 위해 필요한 인자 데이터를 획득하기 어렵고 국내에서 관련 연구가 전무하다는 현실을 지적하였으며, 이를 해결할 수 있는 방안을 제시하고 검증했다는 것에 의의가 있다. 하지만 본 논문에서 제안한 방법은 실제 계측한 탄속들을 기반으로 산출되어야 한다는 점과 탄속을 계측한 거리 구간 외 다른 거리의 탄속 산출에 적용할 수 없다는 점, 그리고 회귀분석 결과 그래프의 신뢰도에 의존적이라는 한계를 지니고 있다. 이러한 한계를 해결하기 위해서는 감속 추정 방정식의 신뢰도를 높일 수 있는 환경 마련이 필요하며, 이러한 탄약들에 대한 표

본의 수를 높여 개선해 나아가는 것이 필요하다. 향후 탄속 추정 방법에 대한 관련 연구의 활성화와 개선 방안에 대한 개발 및 유효성 검증을 수행하는데 본 논문이 활용되기를 기대한다.

References

- [1] U.S. the Department of Defense , "V50 BALLISTIC TEST FOR ARMOR", MIL-STD-662F, Army Research Laboratory, United States of America, Jan. 1987.
- [2] U.S. Army Test and Evaluation Command , "Projectile Velocity Measurements", TOP 4-2-805, Aberdeen Proving Ground, United States of America, Sep. 1982.
- [3] Robert L. McCoy, "MC DRAG"-A Computer program for estimating the drag coefficients of projectiles, Technical report, U.S. Ballistic Research Laboratory, United states of America, pp. 9-30, Feb 1981
- [4] Robert J. Yager, "Calculating Drag Coefficient for Spheres and Other Shapes Using C++", Technical report, Army Research Laboratory, United states of America, Jun 2014
- [5] Jinseok Kim, "Extended Range of a Projectile Using Optimization of Body Shape", Journal of The Korea society For simulation(JKSS), Vol.29, No.3, pp. 49-55, 2020
DOI : <https://doi.org/10.9709/JKSS.2020.29.3.049>

전 병 옥(Byung-Wook Jun)

[정회원]



• 2017년 12월 ~ 현재 : 국방기술품
질원 연구원

<관심분야>

정보통신, 방탄시험, 신뢰성

박 중 화(Joong-Hwa Park)

[정회원]



• 2017년 9월 ~ 현재 : 국방기술품
질원 기술원

<관심분야>

품질관리, 신뢰성, 산업공학

이 정 호(Jeong-Ho Lee)

[정회원]



• 2015년 1월 ~ 현재 : 국방기술품
질원 책임연구원

<관심분야>

정밀측정, 기계설계, 탄약신뢰성평가

조 성 환(Seong-Hwan Cho)

[정회원]



• 2017년 12월 ~ 현재 : 국방기술품
질원 연구원

<관심분야>

컴퓨터 공학, 무선통신, 신호계측