

재귀적 베이시안 필터를 적용한 소화기탄의 총돌속도 추정 연구

김종환^{*,1)} · 조성식¹⁾¹⁾ 육군사관학교 기계·시스템 학과Recursive Bayesian Filter based Strike Velocity Estimation
for Small Caliber ProjectileJong-Hwan Kim^{*,1)} · Seungsik Jo¹⁾¹⁾ Department of Mechanical & Systems Engineering, Korea Military Academy, Republic of Korea

(Received 30 September 2015 / Revised 22 January 2016 / Accepted 25 March 2016)

ABSTRACT

This paper presents a strike velocity estimation using the recursive Bayesian filter that operates both correction and prediction models to probabilistically remove noises of sensors and accurately estimate the strike velocity during the real-time experiments. Four different types of bullets such as 5.56 mm M193, 7.62 mm M80, 5.45 mm 7N10 and 7.62 mm MSC were used to validate the proposed method. Compared to the existing method, the proposed method statistically results in higher stability of the strike velocity estimation as well as its reliability for the ballistic limit velocity computation.

Key Words : Ballistic Limit Velocity(방호한계속도), Strike Velocity(총돌속도), Live Bullet Experiment(실탄실험), Recursive Bayesian Filter(재귀적 베이시안 필터), Velocity Estimation(속도 추정)

기 호 설 명

v_s : 총돌 속도	i : 탄의 형상인자
v_{loss} : 손실 속도	Z_k : k 번째 보정값
G : 항력 계수	X_k : k 번째 속도변수
W : 장약 중량	$X_k = [v_{k,1}, v_{k,2}, v_{k,s}]^T$

1. 서 론

총돌속도(Strike Velocity)는 탄자가 표적에 충돌하는 순간의 속도로서, 소화기의 위협으로부터 전투원의 생명을 보호하기 위한 방탄복 또는 장갑의 방호성능을 평가할 때 중요한 요소로 사용된다. 일반적으로 방호성능은 실제사격을 통해 평가되며 총돌속도에 기초한 각 탄종별 방호 한계 속도(Ballistic Limit Velocity, v_{50})에 의해서 결정된다.

이러한 총돌속도는 탄자가 표적에 출동하는 지점에서 측정하는 것이 타당하나, 충돌하는 순간에 발생하

* Corresponding author, E-mail: jongkim@kma.ac.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

는 파편과 충격의 영향 때문에 장비 또는 센서의 안정성을 고려하여 충돌지점으로부터 이격하여 사용하고 있는 실정이다. 그러나 이것은 이격된 측정 장비 또는 센서로부터 얻어진 측정값을 통해 충돌속도를 추정해야하는 어려움을 갖고 있다.

일반적으로 충돌속도를 추정하는 방법은 국제규격인 MIL-STD-662F^[1], NIJ-STD-0101.06^[2]에서 제시하는 방법과 속도 변화량을 사용한 추정 방법^[3]이 있다. 이 방법들은 측정 장비 또는 센서로부터 얻어진 측정값을 그대로 사용하여 장비 또는 센서가 갖고 있는 잡음 또는 오차를 그대로 결과값에 반영한다는 치명적인 문제점이 존재한다. 이런 문제점은 실험간 각 장비 또는 센서의 잡음 및 오차가 누적되어 이상치(outlier)를 갖는 충돌속도를 추정하게 되고, 결과적으로 방호한계속도를 산출하는데 상당한 어려움을 야기한다.

재귀적 베이지안 추정법은 측정 장비 또는 센서의 측정값으로부터 잡음과 오차의 불확실성을 확률적으로 산출하고 제거하여 실제값에 근접한 값을 실시간으로 추정하는데 효과적인 방법이다. 특히, 다양한 센서를 통해 얻어진 데이터를 정확하고 안정되게 실시간 제어를 해야 하는 로봇분야에서는 제어시스템(Control System), 자기위치추정(Localization), 수색정찰(Searching) 및 추적(Tracking) 등 다양한 용도로 이 추정법을 활용하고 있다^[4-6].

본 연구는 이러한 재귀적 베이지안 추정법을 적용하여 기존 충돌속도 추정방법들이 가지는 장비 또는 센서의 잡음과 오차를 충돌속도에 그대로 포함된다는 문제점을 해결하고, 이를 통해 보다 안정적인 충돌속도를 추정하고자 하였다. 또한, 기존 방법의 모델을 기초로 새로운 확률기반의 보정모델과 예측모델을 제시하였고, 이 두 모델을 실시간 재귀적으로 처리하여 실제값에 보다 근접한 추정값을 구현하고자 하였다. 아울러, 기존의 충돌속도 방법과 재귀적 베이지안 추정법을 적용한 결과를 비교 및 분석하여 제안된 충돌속도 추정방법의 효율성과 실효성을 확인하였다.

2. 기존 충돌속도 추정방법

2.1 MIL-STD-662F 충돌속도 추정방법

국제규격 MIL-STD-662F과 NIJ-STD-0101.06에서 충돌속도를 추정하는 방법은 동일하다. 이 방법은 총구에서 탄자의 속도가 가장 높고 거리가 멀어질수록 속

도는 저하된다는 점을 고려하여, 기준이 될 탄자의 속도를 측정하고 손실되는 속도량을 계산하여 충돌속도를 추정하는 것이다. 이에 수학적 모델은 다음과 같다.

$$v_s = v_1 - v_{loss} \tag{1}$$

$$v_{loss} = \frac{\rho i d^2 D G}{W} \tag{2}$$

먼저 Fig. 1과 같이, 탄자가 상대적 시간측정장치인 스크린 #1과 #2를 통과할 때 측정된 각각의 시간(t_1, t_2)과 두 스크린간의 거리(L)를 기초로 기준속도(v_1)를 산출하고, 식 (1)과 같이 기준속도(v_1)에서 손실속도(v_{loss})를 차감함으로써 충돌속도(v_s)를 추정한다. 손실속도(v_{loss})는 식 (2)과 같이 상대공기밀도(ρ), 탄 형상인자(i), 탄자의 직경(d), 속도 측정지점으로부터 표적까지의 거리(D), 항력계수(G)와 탄자의 중량(W)을 통해 도출할 수 있다.

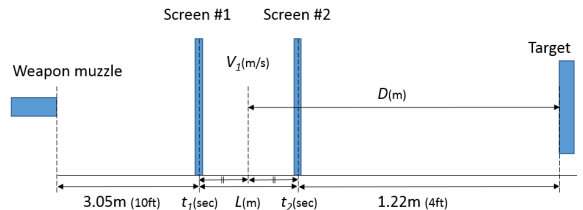


Fig. 1. Experimental setup for strike velocity estimation by MIL-STD-662F and NIJ-STD-0101.06^[1,2]

그러나 MIL-STD-662F과 NIJ-STD-0101.06에서 제시한 충돌속도 추정 방법은 많은 시간과 비용을 소비해야하는 어려움이 존재한다^[3]. 예를 들면, 충돌속도 추정 시 손실속도 산출에 필요한 항력계수(G)는 풍동실험을 통해 실험적으로 구하는 것이 유일하다. 그러나 각 탄종별로 신뢰성이 높은 항력계수를 구하기 위해선 충분한 실험 데이터가 구축되어야 하는데 아직 국내에서는 관련 연구가 부족한 실정이다. 뿐만 아니라, 탄 형상인자(i)의 경우는 아래의 식 (3)과 같이 탄자의 표준항력계수(G_{STD})와 탄자의 속도에 대한 항력계수(G_D)의 비로 산출할 수 있으나, 정확한 형상인자(i)를 도출하기 위한 충분한 실험 자료가 부족하고, 이런 실험 자료의 대부분은 미국의 연구기관이 거의 독점하고 있어 자료획득에 어려움이 존재한다.

$$i = \frac{G_D}{G_{STD}} \quad (3)$$

2.2 속도변화량을 통한 충돌속도 추정방법

이러한 MIL-STD-662F 및 NIJ-STD-0101.06가 제시한 충돌속도 추정방법의 한계를 극복하기 위해, 속도 변화량을 통해 충돌속도를 추정하는 방법이 연구되었다^[3]. 이 방법은 국내에서 주로 사용되는 방식으로, Fig. 2에서 제시된 바와 같이 탄자가 스크린 #1, #2 그리고 #3을 통과할 때 측정된 각각의 시간을 통해 두 개의 기준속도(v_1, v_2)를 측정한다. 그리고 식 (5)와 같이 이 속도들의 변화량과 표적까지의 거리를 통해 손실속도(v_{loss})를 산출하고, 식 (4)와 같이 기준속도에서 손실속도를 차감하여 표적 상에서의 충돌속도(v_s)를 추정한다.

$$v_s = v_2 - v_{loss} \quad (4)$$

$$v_{loss} = \frac{D}{l}(v_1 - v_2) \quad (5)$$

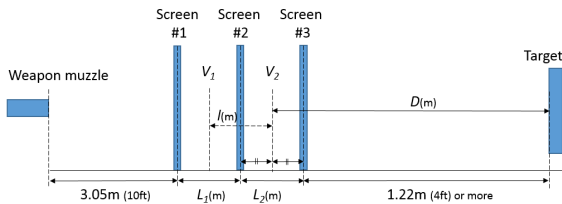


Fig. 2. Experimental setup for strike velocity estimation using velocity difference method^[3]

이 방법은 MIL-STD-662F의 기초자료 획득의 한계점을 극복하였으며, 충돌속도를 추정하는 데에 실험장비 설치가 간단하고 실험 실시가 편리하다. 또한, 회전 및 큰 항력이 존재하는 음속구간 외의 구간에서는 산술적인 오차가 적게 나온다는 장점이 있다. 그러나 이 방법도 계측장비의 값을 그대로 사용하기 때문에 계측 오차가 충돌속도에 그대로 포함되고, 실사격 실험 시 발생할 수 있는 시스템/센서의 잡음과 오차가 충돌속도에 내재되는 문제점이 있다. 이런 문제는 센서의 오차가 심할 경우, 또는 시스템 잡음이 높을 경우 일관성이 없는 결과값을 제공하게 되어, 실험 지연 및 정확한 방호한계 속도를 산출하는데 많은 어려움을 야기시킨다.

3. 재귀적 베이지안 필터 충돌속도 추정 방법

3.1 재귀적 베이지안 필터

재귀적 베이지안 필터는 선형, 비선형 그리고 비가우시안 필터 등의 다양한 형태로 사용되어, Monte Carlo 방법, Gauss Quadrature 방법과 Particle Filter 등의 확률기반 추정방법에 응용되고 있다. 또한, 재귀적 베이지안 필터는 보정모델과 예측모델을 통해, 오차가 포함된 데이터와 시스템이 가지는 잡음을 재귀적으로 처리하여 최적의 통계적 추정 결과를 실시간으로 제시하는 장점이 있다. 이것은 잡음이 많은 센서 사용 시, 데이터의 이상치 존재 시, 실제값에 근접한 최적의 추정값을 도출하는 분야인 컴퓨터 비전, 로봇제어, 자기위치추정(Localization), 수색정찰(Searching) 및 추적(Tracking) 등에 많이 활용되고 있으며 그 성능은 많은 논문을 통해서 검증되었다.

본 연구에서는 재귀적 베이지안 필터를 적용하여 기존 방법이 가지는 시스템 잡음 및 오차를 제거하고, 안정적인 충돌속도 추정값을 산출하기위해 확률기반의 보정모델과 예측모델을 수학적으로 구현하였다. 또한, 측정된 기준속도와 추정할 충돌속도와의 거리가 2.5 m로 상당히 짧기 때문에 두 속도의 관계는 선형으로 가정하였고, 불확실한 시스템 잡음 및 오차는 정규분포를 따른다고 가정하였다. 이 두 가지의 가정을 통해 복잡한 비선형 및 비가우시안 모델은 선형 및 가우시안 모델로 단순화 할 수 있었으며, 그에 따른 보정모델과 예측모델은 아래와 같다.

3.2 보정 모델(Correction Model)

보정 모델은 k 번째 탄자를 세 개의 스크린을 통해서 얻어진 기준속도(v_1, v_2)와 충돌속도(v_s)를 포함한 속도변수($X_k = [v_{k,1}, v_{k,2}, v_{k,s}]^T$), 처음부터 이전 상태까지의 보정값 $p(X_k|Z_{1:k-1})$ 과 현상태의 보정값 Z_k 을 기초로 예측모델에 사용되는 사후확률 $p(X_k|Z_{1:k})$ 을 구하는 것이다. 이러한 사후확률(Posterior Probability)은 마지널 분포(Marginal distribution)와 조건부 독립(Conditional independence)을 사용하여 식 (6) 및 (7)과 같이 표현될 수 있다.

$$p(X_k|Z_{1:k}) = \frac{p(Z_k|X_k)p(X_k|Z_{1:k-1})}{p(Z_k|Z_{1:k-1})} \quad (6)$$

$$p(Z_k|Z_{1:k-1}) = \int p(Z_k|X_k)p(X_k|Z_{1:k-1})dX_{k-1} \quad (7)$$

여기서 $p(Z_k|X_k)$ 는 k 번째 탄자의 보정값과 속도변수를 통해 얻어진 측정우도(Observation likelihood)를 의미하며, 기준속도와 충돌속도 관계가 선형이고 시스템 잡음과 보정값의 오차가 가우시안 분포를 따른다는 가정을 적용함으로써 이것은 식 (8)과 같이 표현될 수 있다.

$$Z_k = h(u_k) + v_k, \quad v_k \sim N(0, R_k) \quad (8)$$

여기서 u_k 는 입력값으로 각 탄종별 표준장약의 중량을 의미하고, $h(u_k)$ 는 육군사관학교에서 수년간 실험을 통해 누적된 각 탄종별 장약중량과 충돌속도의 데이터를 회귀분석을 통해 통계적 상관관계를 도출한 결과값을 사용하였다.

3.3 예측 모델(Prediction Model)

예측모델은 현 속도변수(X_k)와 처음부터 현 상태까지의 보정값($Z_{1:k}$)을 통해, 표적상에 발생하는 충돌속도를 예측하는 모델이다. 이를 위해 예측된 속도변수(X_{k+1})의 사후확률 $p(X_{k+1}|Z_{1:k})$ 은 식 (9)와 같이 표현된다.

$$p(X_{k+1}|Z_{1:k}) = \int p(X_{k+1}|X_k)p(X_k|Z_{1:k}) \quad (9)$$

여기서, $p(X_k|Z_{1:k})$ 은 보정모델로부터 산출된 값이고, $p(X_{k+1}|X_k)$ 는 확률적 Markov 모델로 정의된 것으로, k 번째 탄자의 속도변수와 $k+1$ 번째 탄자의 속도변수의 확률적 관계를 의미하며, 이것은 식 (10)과 같이 표현된다.

$$X_{k+1} = f(X_k, u_k, w_k), \quad (10)$$

$$w_k \sim N(0, \Sigma_k)$$

보정모델과 동일하게 측정된 기준속도와 추정할 충돌속도와의 관계가 선형이고 이들의 시스템 잡음과 보정값의 오차가 정규분포를 따른다고 가정을 하였을 경우 식 (10)은 아래와 같이 간략화된 수학적 모델 식 (11)로 표현이 된다.

$$f(X_k, u_k, w_k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\frac{D}{l} & (1 + \frac{D}{l}) & 0 \end{bmatrix} X_k + w_k \quad (11)$$

여기서, D 와 l 은 Fig. 2에서 보여진 것과 같이 스크린 사이의 속도측정지점으로부터 표적까지의 거리를 의미하고 두 개의 기준속도(v_1, v_2) 측정지점 사이의 거리를 각각 의미한다.

4. 실험 방법 및 결과

4.1 실험 구성 및 장비

재귀적 베이지안 추정법을 적용한 본 연구는 아래 Fig. 3과 같이 총 세가지 단계로 구성된다. 먼저, 실제 사격전에 탄의 장약을 측정하고, 기존의 속도변화량 충돌속도 추정방법을 통해 세가지 변수 $u_k, v_{k,1}, v_{k,2}$ 값을 얻는다. 이 값은 재귀적 베이지안 필터에 입력되어 확률기반의 보정모델과 예측모델에 반영되고 실시간 재귀적으로 처리된다. 보정모델은 현재까지의 얻어진 누적된 데이터를 기초로 $p(X_k|Z_{1:k})$ 를 계산하며, 이 값은 예측모델에서 $p(X_{k+1}|Z_{1:k})$ 를 산출하는데 사용된다. 또한, 예측모델에서 얻어진 $p(X_{k+1}|Z_{1:k})$ 은 다음번 실험($k = k+1$)의 보정모델의 $p(X_k|Z_{1:k-1})$ 으로 사용되어 지속적으로 두가지 모델은 서로 상호작용을 함으로써 재귀적으로 공분산을 계산함과 동시에 우리가 최종적으로 얻고자 하는 충돌속도(v_s)를 실시간으로 추정하게 된다.

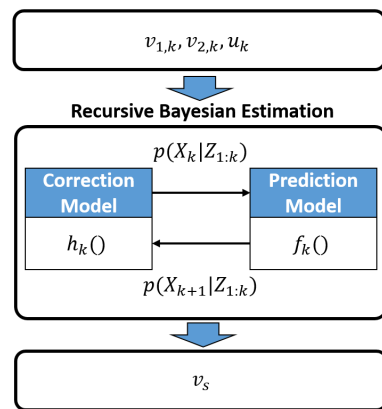


Fig. 3. System architecture for strike velocity estimation

이번 실험에 사용된 주요장비는 Fig. 4에서 제시되었다. (a) 상대적 시간측정 장치인 3개의 적외선 스크린, (b) 레이저 초점 광학장비, (c) 약실/총열장치 그리고 (d) 원격격발/계측 및 연산 장치이다. 또한, 실험실에는 이종의 소음방지 시스템과 사격안전장비가 설치 되어 있으며, 실험간 온도는 섭씨 20도(± 5도)로 그리고 습도는 75%(± 15%)로 일정하게 유지되었다.

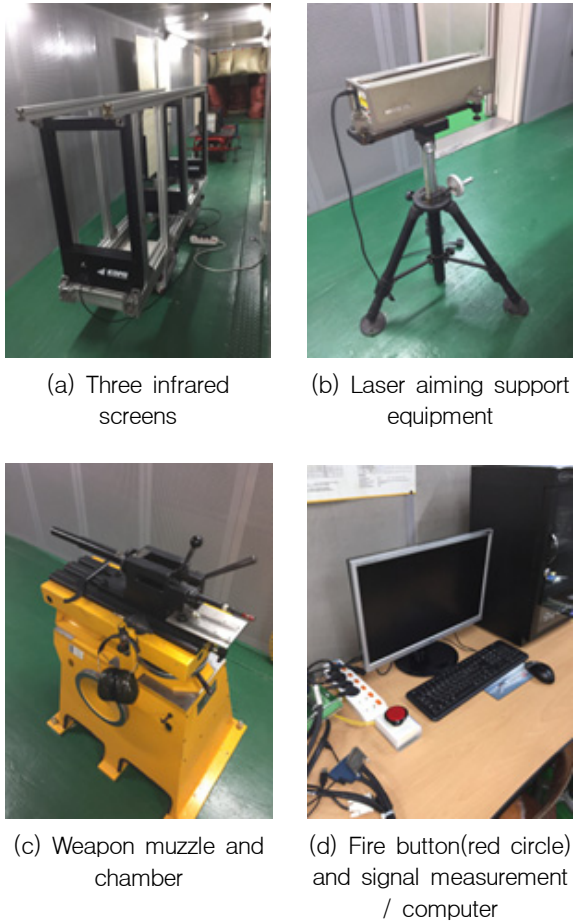


Fig. 4. Experimental equipments for the strike velocity estimation

4.2 실험에 사용된 소화기 탄

위에서 소개된 재귀적 베이지안 필터를 적용한 충돌속도 추정방법이 다양한 탄종에서도 그 안정성이 유효한지를 검증하고자 총 4가지의 서로 다른 탄종을 사용하였다. 실험에 사용된 탄은 방호시험평가에 주로 사용되는 탄으로서, 크게 NATO와 Soviet Union으로 구분

된다. NATO의 경우 5.56 mm M193과 7.62 mm M80을, Soviet Union의 경우 5.45 mm 7N10과 7.62 mm MSC를 실제로 사격하여 실험을 진행하였다. 이러한 4가지 탄종의 완성탄 제원은 Table 1에 제시되었다. 총 251발을 실제로 사격하였으며 각 탄종별 제원은 측정값의 평균값으로 하였다. 또한, Table 1에 제시된 속도와 운동에너지는 국제규격 MIL-STD-662F 및 NIJ-STD-0101.06에서 제시한바와 같이 소화기 총구로부터 15 m 이격된 지점에서 측정된 데이터를 기초로 산출되었다.

Table 1. Type Experimental data set of four different types of bullets

제 원	NATO		Soviet Union	
	5.56 mm M193	7.62 mm M80	5.45 mm 7N10	7.62 mm MSC
Bullet length(m)	18.93	28.44	25.48	26.61
Bullet weight(g)	3.55	9.54	3.59	7.92
Velocity(m/s)	948.42	828.93	880	696.23
Kinetic Energy(J)	1598	3279	1390	1919

4.3 실험 결과

본 연구는 기존 충돌속도 추정방법이 포함하고 있는 센서들의 잡음 및 오차를 확률적으로 산출하고 이를 충돌속도에서 제거하여 보다 안정적인 충돌속도를 추정하기 위해 재귀적 베이지안 추정법을 적용하였다. 이를 위해 총 4가지의 탄종이 실제 사격실험에 사용되었으며, 각 탄종별 방호한계속도를 산출하기 위한 이번 실험 목적을 고려하여 탄종별 충돌속도의 범위는 음속과 방호시험 평가간에 주로 사용되는 속도를 고려하여 400 ~ 1000 m/s으로 한정하였고 이에 맞추어 장약중량의 범위는 0.7 ~ 3.5 g으로 제한하였다.

실험 결과는 기존의 충돌속도 방법 중 속도변화량을 이용한 방법(Velocity Difference Method, VDM)과 본 연구에서 제안한 재귀적 베이지안 추정법(Recursive Bayesian Estimation, RBE)의 결과를 서로 비교하고, 충돌속도의 안정성 평가에 용이한 세가지의 통계적 기법을 적용하여 RBE의 개선된 정도를 수치적으로 분석하였다. 이를 위해 사용된 기법은 분산(Variance), 평균제곱근 오차(RMSE, Root-mean-square Error), 그리고 퍼센트 바이어스(PBIAS, Percent Bias) 이다. 분산은 충

충돌속도 결과값들의 흩어진 정도를 산술적으로 나타내는 것으로, 이 값이 커질수록 흩어진 정도가 심하다는 것, 즉 불안정하다는 것을 의미한다. 또한, 평균제곱근 오차는 충돌속도의 추정값과 실제 충돌속도와의 오차 정도를 나타내는 것으로 식 (12)와 같이 표현된다.

$$RSME = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{Q}_{actual,i} - Q_{estimated,i})^2} \quad (12)$$

퍼센트 바이어스는 충돌속도의 추정값과 실제값의 편향성 정도를 나타내는 것으로, 이 값이 0이면 추정값과 실제값이 완전히 일치한다는 것을 의미하고, 이 값이 증가할 경우는 편향성이 강해지는 것 즉, 충돌속도 값의 불안정성이 높아지는 것으로 볼 수 있다.

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n |Q_{estimated,i} - \hat{Q}_{actual,i}| \times 100}{\sum_{i=1}^n \hat{Q}_{actual,i}} \quad (13)$$

이 세 가지의 기법을 적용하여 실험결과를 분석할 시, 충돌속도의 실제 값을 얻는 것은 현실적으로 제한되고, 본 연구의 목적은 센서의 오차를 확률적으로 산출하여 이를 충돌속도에서 제거함으로써 보다 안정적인 충돌속도를 추정하는데 있기 때문에, 충돌속도의 실제 값에는 VDM 및 RBE 결과의 선형 회귀분석된 각각의 예측값을 사용하였다.

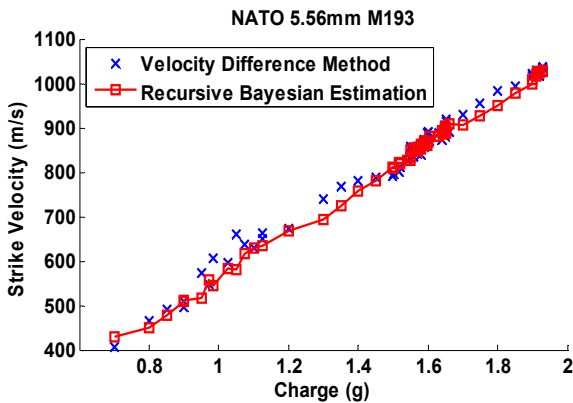


Fig. 5. NATO 5.56 mm M193 strike velocity results from both velocity difference method and recursive Bayesian estimation

Fig. 5는 NATO 5.56 mm M193의 VDM과 RBE의 결과를 제시하고 있다. VDM은 장약중량이 0.97 ~ 1.1 g, 1.5 ~ 1.7 g 구간에서 40 ~ 70 m/s의 오차가 포함된 이상치가 발생했던 반면에 RBE는 상대적으로 안정적인 결과가 나타났다. 두가지 결과의 선형 회귀분석의 R^2 , VAR, RMSE 그리고 PBIAS 값에 대한 통계적 결과는 Table 2에 수치적으로 나타나있다. RBE 값이 VDM보다 모든면에서 수치적으로 낮고, 상대비(Ratio) 측면에서도 RBE가 VDM보다 29.9 ~ 58.0 % 정도로 안정적임을 확인할 수가 있다.

Table 2. NATO 5.56 mm M193 statistical results of variance, the root-mean-square error and percent bias

Method	R^2	VAR	RMSE	PBIAS
VDM	0.988	268.2	0.0336	1.515
RBE	0.997	80.2	0.0180	0.879
Ratio(%) ($\frac{RBE}{VDM} \times 100$)	-	29.9	53.6	58.0

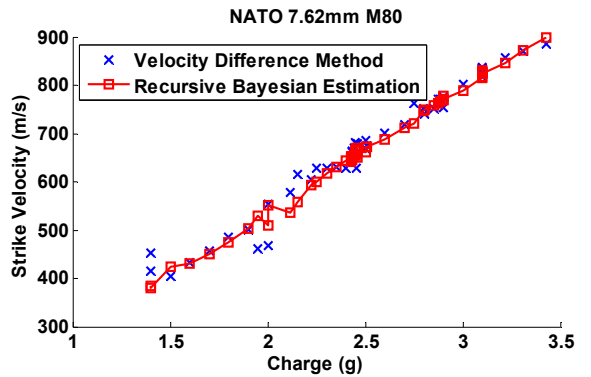


Fig. 6. NATO 7.62 mm M80 strike velocity results from both velocity difference method and recursive Bayesian estimation

NATO 7.62 mm M80의 결과는 Fig. 6과 Table 3에 나타나있다. 장약중량이 1.4 g, 1.9 ~ 2.0 g, 2.5 ~ 2.9 g 범위에서 VDM은 30 ~ 80 m/s의 오차가 포함된 이상치가 나타나 충돌속도의 분산정도가 큰 반면에 RBE는 상대적으로 낮은 분산정도를 보여 주어 안정성이

개선되었음을 확인할 수 있다. 또한, Table 3에 나타난 통계 결과를 볼 때, RBE 결과가 VDM보다 두배 이상으로 상대비가 낮음을 볼 수 있으며, 특히 분산정도는 상대적으로 17.5 %(5.7배) 낮아 RBE이 보다 안정적인 충돌속도를 추정하였음을 수치적으로 확인할 수 있다.

Table 3. NATO 7.62 mm M80 statistical results of variance, the root-mean-square error and percent bias

Method	R^2	VAR	RMSE	PBIAS
VDM	0.975	416.9	0.0792	1.864
RBE	0.996	72.9	0.0330	0.899
Ratio(%) ($\frac{RBE}{VDM} \times 100$)	-	17.5	41.7	48.2

Soviet Union 5.45 mm 7N10의 경우, Fig. 7에서 보여진 바와 같이 장약중량이 0.8 ~ 0.95 g의 범위에서 두가지 방법의 충돌속도 결과가 명확하게 차이가 나고 있다. VDM은 충돌속도의 분산정도가 높아 상당히 불안정한 결과가 나타나 반면에 RBE은 충돌속도가 일정하여 VDM에 비해 상당히 안정된 결과를 보여주었다. 뿐만 아니라, Table 4에서는 각 항목별로 RBE이 VDM보다 두배 이상으로 낮고, 분산정도는 13.3 %(7.5배) 개선된 것을 통계적으로 보여주고 있다.

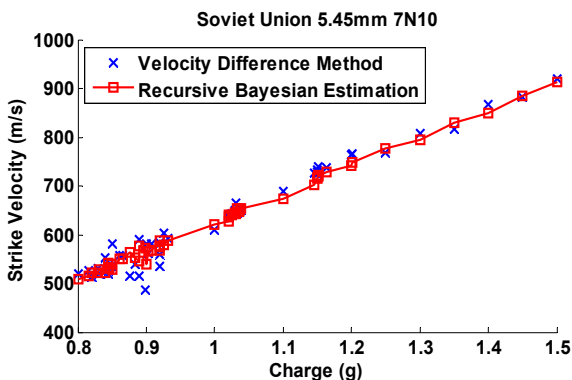


Fig. 7. Soviet Union 5.45 mm 7N10 strike velocity results from both velocity difference method and recursive Bayesian estimation

Table 4. Soviet Union 5.45 mm 7N10 statistical results of variance, the root-mean-square error and percent bias

Method	R^2	VAR	RMSE	PBIAS
VDM	0.966	394.0	0.0326	2.130
RBE	0.995	52.3	0.0124	0.877
Ratio(%) ($\frac{RBE}{VDM} \times 100$)	-	13.3	38.0	41.2

Soviet Union 7.62 mm MSC의 경우, Fig. 8에서 보여진 바와 같이 VDM은 장약중량이 1.5 ~ 1.8 g의 범위에서 불안정한 결과가 나타난 반면에 RBE은 좀더 안정적인 결과를 보여주었다. 특히, 장약중량이 1.54 g의 경우 VDM은 주변 속도값들의 분포에서 벗어난 오차가 상당히 포함된 650.9 m/s의 충돌속도를 제시하였던 반면에 RBE은 이 오차를 제거하여 주변 속도값들과 일정한 분포를 갖는 676.2 m/s의 충돌속도를 제시하였다. 이 결과는 동일한 실험 데이터를 사용할 시 RBE이 오차를 제거하여 VDM 보다 안정적인 충돌속도를 추정한다는 것을 직접적으로 보여주는 예이다. 마찬가지로, Table 5에서 제시된 바와 같이 각 통계적 기법들의 결과가 13.3 ~ 41.2 %로 상대적으로 개선됨을 확인할 수 있다.

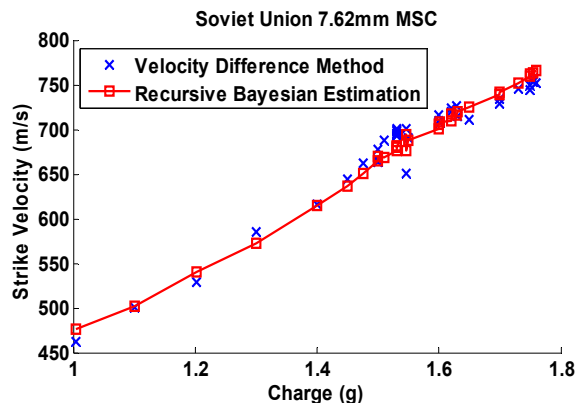


Fig. 8. Soviet Union 5.45 mm 7N10 strike velocity results from both velocity difference method and recursive Bayesian estimation

Table 5. Soviet Union 5.45 mm 7N10 statistical results of variance, the root-mean-square error and percent bias

Method	R^2	VAR	RMSE	PBIAS
VDM	0.955	202.6	0.0364	1.787
RBE	0.994	25.9	0.0129	0.596
Ratio(%) ($\frac{RBE}{VDM} \times 100$)	-	12.8	35.4	33.4

5. 결론

금번 연구는 방호성능을 평가하는데 중요한 충돌속도의 추정 방법을 개선한 것으로, 장비 또는 센서의 잡음과 오차를 그대로 반영하는 기존 방법의 문제점을 해결하여 보다 안정적인 충돌속도를 얻기 위한 추정법을 다루었다. 이를 위해, 재귀적 베이시안의 수학적 모델을 기초로 충돌속도 추정을 위한 확률기반의 보정모델과 예측모델을 제시하였고, 이 두가지 모델을 실시간 재귀적으로 처리하여 실제 충돌속도에 근접한 추정값을 도출하고자 하였다.

그 결과 기존의 속도 변화량 방법(VDM)을 통해 얻어진 충돌속도 보다 본 연구에서 제안한 추정법(RBE)이 분산의 경우 12.8 ~ 29.9 %, 평균제곱근 편차의 경우 35.4 ~ 53.6 %, 퍼센트 바이어스의 경우 33.4 ~ 58 % 정도로 개선되었음을 통계적으로 확인할 수 있었다.

다만 제안된 방법은 특정 탄종과 제한된 충돌속도 및 장약중량을 토대로 연구되었기 때문에 이외의 탄종에 대한 충돌속도 추정에는 한계가 있다. 그러나 방호성능에 대한 연구는 지속적으로 이루어지고 있고, 방호성능 평가는 실사격 실험을 통해 이루어지기 때문에 이 논문을 시작으로 다양한 기법들이 연구되어 방호성능 평가방법이 지속적으로 발전되기를 기대한다.

후 기

본 논문은 육군사관학교 화랑대 연구소의 2015년도 연구 활동비 지원을 받아 연구되었음.

References

- [1] M. Military Standard, "662F. V50 Ballistic Test for Armor," US Army Research Laboratory: Aberdeen Proving Ground, MD, Vol. 18, 1997.
- [2] N. Standard, "0101.06. Ballistic Resistance of Body Armor," Washington: National Institute of Justice, 2008.-40 p, 2008.
- [3] S. yoo and J. Kim, "A New Method to Estimate the Strike Velocity for Small Caliber Projectile," Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 15, pp. 1288-1293, 2014.
- [4] T. Furukawa, F. Bourgault, B. Lavis, and H. F. Durrant-Whyte, "Recursive Bayesian Search-and-Tracking using Coordinated UAVs for Lost Targets," in Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006. Proceedings 2006 IEEE International Conference on, 2006, pp. 2521-2526.
- [5] A. Hanif and R. E. Smith, "State Space Modeling & Bayesian Inference with Computational Intelligence," New Mathematics and Natural Computation, Vol. 11, pp. 71-101, 2015.
- [6] K. Takami, T. Furukawa, M. Kumon, D. Kimoto, and G. Dissanayake, "Estimation of a Nonvisible Field-of-View Mobile Target Incorporating Optical and Acoustic Sensors," Autonomous Robots, pp. 1-17, 2015.