

추진장약 수락시험시 포구속도 확률분포에 기준탄이 미치는 영향

박성호¹⁾ · 김재훈^{*,2)}

¹⁾ 국방과학연구소 종합시험본부

²⁾ 충남대학교 기계설계공학과

Effects of Calibration Rounds on the Statistical Distribution of Muzzle Velocity in Acceptance Test of Propelling Charge

Sung-Ho Park¹⁾ · Jae-Hoon Kim^{*,2)}

¹⁾ Agency for Defense Development, Korea

²⁾ Chungnam University, Korea

(Received 13 November 2013 / Revised 4 February 2014 / Accepted 8 March 2014)

ABSTRACT

The purpose of this paper is to investigate the effects of calibration rounds on the statistical distribution of the muzzle velocity in acceptance test of propelling charge. It is shown that the normal distribution fits best among statistical distributions from goodness-of fit test. The 3p-Weibull distribution is also acceptable because the shape of the probability density function curve is similar to that of normal distribution and it also has near zero skewness value. Muzzle velocities of test rounds uncompensated by calibration rounds showed high variation and had comparatively higher skewness. Because the skewness of normal distribution is defined to be zero, calibration rounds make the normality of data higher.

Key Words : Acceptance Test(수락시험), Calibration Rounds(기준탄), Normal Distribution(정규분포), Goodness-of-fitness(적합도), Skewness(왜도), Normality(정규성)

1. 서론

추진장약(propelling charge)은 화포에 장전된 탄두를 추진제의 연소 시 발생하는 고압가스로 의도된 위치에 도달하도록 초기 추진력을 제공한다. 로트(lot) 단

위로 대량 생산된 추진장약의 성능은 시사장(proving ground) 수락시험(acceptance test)을 통하여 국방규격서가 요구하는 수락 조건을 만족하여야 한다. 일반적으로 추진장약의 성능은 사격시험 시 측정한 포구속도와 강내 최대압력으로 평가한다. 즉, 포구속도의 평균이 규정된 범위이내 이어야 하며 이는 추진장약 성능의 정확도(accuracy)를 보증하기 위함이다. 또한, 포구속도의 표준편차가 규정치를 벗어나지 않아야 하며 이

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

는 정밀도(precision)를 보증하기 위함이다.

시사장 수락시험으로 추진장약 성능의 정확도와 정밀도를 평가하기 위하여 사격시험에 영향을 줄 수 있는 시험조건이 규정된 표준조건으로 유지될 필요가 있다. 즉, 추진장약 로트별 생산과정에서 시험로트가 고유하게 가지고 있는 성능의 평균 및 분산을 측정하기 위하여 사격시험간 시험조건으로 발생하는 측정치의 변동요인이 제거되어야 한다. 이를 위하여 수락시험 절차서에 시험시료의 준비, 시험에 적합한 화포 및 계측장비의 사양, 기준탄(calibration round)의 사용 및 시험방법 등의 표준 시험조건과 절차를 기술하고 있다.

모든 시험환경과 절차는 표준조건에서 시험하도록 규정하고 있기 때문에 비표준조건의 제거, 보정 또는 환산 등의 적절한 조치가 필요하다. 사표(firing table)는 야전포병에서 화포운용을 위하여 표준조건에서 사격할 때의 탄도학적 성능(포구속도, 사거리 및 공산오차 등)과 비표준조건(포구속도의 변화, 기온, 기압, 습도 등)에서 사격할 때의 보정치를 제시하고 있다. 즉, 사표에서 제시된 보정치는 각 요인이 사거리에 미치는 영향을 계통적으로 알 수 있기 때문에 보정이 가능하다.

이제까지 시사장 수락시험 시 발생 가능한 오차요인과 발생원인 및 오차의 제거방법에 대한 연구는 부분적으로 이루어졌으나 체계적으로 정리, 분류되지는 않았다. 일반적으로 오차는 정규분포와 관련이 있는데 실제 로트 단위로 사격 시험되는 추진장약의 시험 성능이 어떠한 확률분포를 따르는지에 관한 실험적 연구가 이루어지지 않았다. 본 논문에서 추진장약의 시사장 수락시험 시 발생 가능한 오차의 발생 원인을 분류하였다. 또한, 추진장약의 로트별 시사장 수락시험 시 측정된 포구속도 결과로부터 가장 적합한 확률분포 모형을 확인하였고 기준탄이 확률분포 모형의 특성에 미치는 영향을 통계적으로 분석하였다.

2. 이론적 배경

2.1 계통적 오차와 정확도

측정값은 여러 가지 원인에 의하여 항상 오차가 개입되기 때문에 참값일 수 없다. 오차(error)는 규격에 있는 기준값 또는 참값과 실제 제품의 측정값과의 차이이며 계통적 오차와 우연오차로 나눌 수 있다^[1]. 계

통적 오차(systematic error)는 계측기 자체의 오차 또는 개인 오차와 같이 동일한 측정조건 또는 상태에서 어떤 일정한 영향을 주는 원인에 의해 발생하며 항상 같은 크기와 같은 부호를 가진다. 따라서, 원인이 명백하며 보정이 가능하다. 우연오차(random error)는 수학적으로 계통적이지 않고 무질서한 무작위 오차로 독립적으로 발생하기 때문에 보정이 어렵다. 어떤 측정을 독립적으로 여러 번 반복하였을 때 나타나는 오차는 완전히 불규칙하며 정규분포를 따르는 것으로 기대된다^[2].

정확도(accuracy)는 측정치가 얼마만큼 참값에 가까운가를 나타내는 정도이며, 계통적 오차의 작은 정도 즉 참값에 대한 한쪽오로의 치우침(편차)의 정도를 나타낸다. 정오차(constant error)와 착오(mistake)를 얼마나 제거하였는지를 나타내는 척도로 볼 수 있다. 정오차는 일정조건하에서 같은 방향과 같은 크기로 발생하는 오차로 원인과 상태만 알면 제거가 가능하다. 또한, 착오는 관측자의 미숙, 부주의 등에 의한 오차로 주의하면 방지가 가능하다. 정확도는 특정한 기준치가 있어야만 하며 백분율 오차로 표기하며 백분율 오차가 작을수록 정확도가 높다. 정밀도(precision)는 측정값의 재현성(관측의 균질성)을 표시하는 척도로 우연오차 즉 측정값의 흩어진 정도를 의미한다. 정밀도는 관측과정 및 우연오차와 밀접한 관계를 가지며 흔히 표본의 표준편차로 표현한다. 표준편차가 작을수록 정밀도가 높다.

시사장 수락시험은 사격시험을 통하여 양산품 성능의 수락여부를 판단한다. 추진장약의 시사장 수락시험은 대개 포구속도의 평균이 요구범위 내에 있으며 표준편차가 요구수준 미만임을 요구한다. 시사장 수락시험 수행 시 양산품의 품질정도를 정확하게 판단하기 위해서는 오차가 개입되지 않아야 한다. 따라서, 계통적 오차는 보정 또는 교정을 통하여 제거되어야 하며 우연오차가 최소화되도록 노력하여야 한다. 그러기 위하여 오차발생 원인을 분석하여 종류를 구분하고 제거 또는 감소할 수 있는 방안을 마련해야 한다.

2.2 확률분포 모형과 적합도 검정

시사장 수락시험은 의뢰된 군수품의 성능이 국방규격서의 요구사항을 만족하는지 여부를 확인하기 위한 사격시험 체계를 의미한다. 탄약은 로트(lot) 단위로 생산되며 표본(sample)에 대한 사격시험으로 로트의 품질상태(성능)를 판단한다. 로트로 구분되는 (모)집단의 특

성은 전체를 하나의 수치로 표현한 대푯값과 집단의 흩어진 정도를 나타내는 산포도로 나타낸다. 일반적으로 각각 (산술)평균과 분산(또는 표준편차)이 사용되며 평균은 허용 하한과 상한이 규정되어 있으며 표준편차는 허용 상한을 초과할 수 없다.

자료의 흩어짐은 자연현상의 불확실성(uncertainty)으로 발생하며 오차(error)와 관련되어 있다. 특히, 어떠한 사건이 발생할 가능성은 확률(probability)로 표현되며, 무한히 시행할 경우 발생가능한 모든 사건에 대한 확률을 분포모형으로 설명한 것이 확률분포(statistical distribution)이다. 확률분포로 정규분포가 일반적으로 많이 사용되고 있으며 로그-정규분포와 와이블분포가 신뢰성평가 분야에서 많이 활용되고 있다. 각 확률분포는 확률밀도함수(probability density function, pdf)로 정의되며 확률밀도함수를 적분한 형태가 누적분포함수(cumulative distribution function, cdf)이다. 일반적으로 자료의 산포도는 표준편차로 표현되지만 상대적인 크기를 비교하기 위하여 표준편차를 평균으로 나눈 변동계수(coefficient of variation)를 많이 활용하며, 확률분포의 대칭성을 나타내는 척도로 비대칭도(또는 왜도, skewness)가 사용된다. 정규분포는 평균을 중심으로 좌우 대칭이므로 비대칭도가 영(0)이다.

실험으로 얻은 측정값이 수학적으로 정의된 특정 확률분포 모형을 잘 따르고 있는지 여부를 확률분포 모형이 가지고 있는 특성을 이용하기 전에 적합도 검정(goodness-of-fitness test)으로 반드시 확인하여야 한다. 적합도 검정 방법으로 수정 콜모고로프-스미르노프(K-S)법, 최대우도예측(L-K)법, 회귀분석(ρ) 그리고 확률지 도시법의 4가지 방법이 주로 사용된다³⁾. K-S 값은 이론적 확률분포와 시험자료간의 차이를 의미하므로 값이 작을수록 적합도가 크다. 또한, L-K값이 클수록 적합도가 크며, 회귀분석 결과로 얻어지는 결정계수(coefficient of determination)가 1에 가까울수록 강한 상관관계를 가지므로 적합도가 크다고 할 수 있다. 본 논문에서 적합도 검정을 위하여 상용 S/W인 Weibull++^{®7}을 사용하였으며 적합도와 확률분포의 파라미터를 예측하기 위하여 SRM(표준 회귀법), FM(피셔행렬의 이용), MED(메디안랭크)의 3가지 옵션을 제공하고 있다⁴⁾.

2.3 확률모수의 예측

확률모수의 예측을 위한 방법으로 Weibull++^{®7}은 최소제곱법(LSM)과 최대우도예측법(MLE)을 제공한다.

최소제곱법은 잔차제곱합이 최소가 되는 확률모수를 예측하는 방법으로 잔차는 관측값과 확률모형간의 차이를 의미하며 Y에 관한 랭크회귀(RRY)와 X에 관한 랭크회귀(RRX)의 2가지 모형으로 구분된다. RRY 방법은 회귀식이 $y = a + bx$ 로 가정하고 RRX 방법은 $x = a + by$ 로 가정한다. 최대우도예측법은 우도함수(L) 또는 로그우도함수(Λ)를 최대화하는 확률모수($\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k$)를 찾는다. 2모수 와이블분포에 있어서 MLE값은 척도모수가 50 이상일 경우 계산할 수 없다⁴⁾.

3. 시험 및 자료분석 방법

3.1 시험방법

155mm 추진장약의 시사장 수락시험 결과를 분석하였다. 표준 포구속도는 928.0m/s이며 시사장 수락시험 시 Weibel社 제품인 도플러 신호방식의 MVRS-700으로 포구속도를 측정하였다. 시사장 수락시험은 관련 국방규격서와 수락시험 절차서에 따라 수행하였다. 수락시험 절차서에 의하면 사격시험을 수행하기 전 모든 추진장약은 장약통 형태로 24시간 이상 $21 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 항온실에서 온도처리 되어야 한다. 3발의 가운데탄을 사격한 후 8발의 기준탄과 15발의 시험탄을 교대로 사격하며, 잔여수명 75% 이상의 포신에서 사격되어야 한다. 가능한 분당 3발 정도의 시험 속도를 유지하며 항온실에서 나온 추진장약은 5분 이내에 사격되어야 한다. 10분 이상 사격이 중단되어 항온실이 아닌 야외에 노출된 상태로 대기할 경우 3발의 가운데탄을 사격 후 기준탄 또는 시험탄에 대한 사격시험을 재개한다. 이는 매발 동일한 시험조건을 유지하도록 하기 위함이다.

3.2 시사장 수락시험 시 오차의 구분과 대책

시사장 수락시험 시 포구속도 변동에 영향을 주는 요인과 발생원인 및 대처방법을 Table 1에 정리하였다.

포열의 마모는 계속된 사격으로 탄두와 포열 내벽간에 열적, 화학적, 기계적 작용이 지속되어 나타난다. 포열 마모로 내경의 확장에 따른 압력의 손실로 포구속도가 저하되며 사격발수에 따른 포구속도의 평균 저하량이 사표에 기술되어 있다. 탄약의 시사장 수락시험 절차서에 포열의 마모로 인한 잔여수명은 사용가능한 포신의 요구조건으로 제약하고 있다. 본 논문의 분석대상인 추진장약의 시사장 수락시험은 포신

Table 1. Factors causing muzzle velocity variation in the proving ground

포구속도 변동 요인	대처방법	오차의 구분	탄도학적 영향
포열의 마모	잔여수명 규제 및 사표 보정	계통적 오차	정확도 저하
탄속오름 효과	탄속오름 특성분석 및 보정	계통적 오차	정확도 저하
탄두 중량	허용공차 관리	우연 오차	정밀도 저하
회전탄대의 직경	허용공차 관리	우연 오차	정밀도 저하
금속약협치 치수	허용공차 관리	우연 오차	정밀도 저하
추진장악의 온도	장전 대기중 노출시간 최소화, 당일 시험완료	우연 오차	정밀도 저하
포열의 온도	일정한 발사속도 유지와 적절한 점검탄 사격	우연 오차	정밀도 저하
장전깊이	일정한 장전방법 유지	우연 오차	정밀도 저하
포구속도 측정장비 오차	정기적인 측정장비의 교정	계통적 오차	정확도 저하
포구속도 계산 파라미터 선정	탄종별 동일 파라미터 유지	계통적 오차	정확도 저하
화포의 거치상태	거치상태별 보정치 획득/보정	계통적 오차	정확도 저하

잔여수명 75% 이상에서 수행되어야 한다.

탄속 오름 효과(ballistic hump effect)는 포신의 사용 초기에 누적된 사격에 의하여 약실압력과 포구속도가 저하되지 않고 오히려 증가한 이후 일정한 시점에서 감소하는 현상이다^[5]. Tao 등^[6]의 연구에 의하면 포열의 강선과 탄두의 회전탄대(driving band)와의 기계적 작용에 의하여 발생하며 나타나지 않거나 이중 오름으로 나타날 수도 있다. 포신의 사용 초기에는 포열의 마모로 포열의 강선이 탄두의 회전탄대에 작용하는 각인력(engraving force)의 감소로 탄두의 추진저항력이 감소하여 포구속도가 증가하나, 일정 수준이상으로 포열이 마모되면 포열 내경의 확장으로 인한 강내 압력의 손실이 더 커지기 때문에 포구속도가 감소한다. 화포별 탄속 오름 효과에 의한 포구속도의 증가량과 강하 시점에 관한 특성치를 파악하여 보정되어야 한다.

탄두중량, 탄두와 회전탄대의 직경 및 금속약협치의 치수 등은 제조공정상 주어지는 허용공차로 발생하는 변동요인이며 수락시험을 통하여 평가되어야 한다. 탄두중량의 변동은 사격시험 시 탄두의 운동에너지와 직접적인 관련이 있으며 운동에너지의 변동은 포구속도의 변동과 관련이 있다. 회전탄대의 직경 변동은 강선과의 접촉으로 발생하는 소성변형에 의한 운동저항력의 변동 원인이 된다. 반고정식 탄약의 경우 금속약협치의 치수 변동은 사격시험 시 발생하는 약협내부 압

력에 의한 탄두 분리력의 변동의 원인이 되며 탄두 분리력은 규격서의 요구조건을 만족하여야 한다.

대부분의 경우 초기에 발사된 포탄의 포구속도가 후속 발사된 포탄의 포구속도보다 다소 낮은 경향을 보이며 적절한 사격발수 후에 일정하게 유지되는 현상을 볼 수 있는데 이를 속도경향이라 한다^[7]. 일반적으로 시사장 수락시험 전 최초로 점검탄을 3발정도 사격하는데 포강온도 변화에 따른 포구속도의 증감을 없애기 위하여 또는 장비점검 목적으로 사격된다. 초기 발사포탄의 포구속도와 이후 사격에 의한 포구속도의 증가는 포신온도 및 마모로 인한 잔여수명 보다는 점검탄 사격에 따른 발사탄수에 기인한다^[8]. 즉, 적절한 포열의 가온상태 유지가 중요하다.

추진제에 대한 일반시험절차^[9]에 점검탄 사격에 의한 포신의 가온상태 유지와 탄약의 온도 유지에 관하여 규정되어 있다. 만일 시험이 중지되면 시료를 항온실에서 보관하여 대기온도에 의한 영향을 최소화하며 사격시험을 재개할 경우 점검탄의 추가 사격으로 중단시점 이전 화포의 가온상태와 동일한 조건을 조성한다. 일반적으로 사격시험 지연시간이 10분~30분이면 1발, 30~60분이면 2발, 60분이상은 3발의 점검탄이 추가 사격되어야 한다. 또한, 발사속도는 사격시험 전에 결정하여 마지막 시험탄이 발사될 때 까지 엄격하게 고수해야 한다. 모든 추진장악은 시험전 시사장

수락시험 절차서에 규정된 온도범위와 지속시간 동안 항온실에서 온도처리 되어야 하며 대기온도에 따른 추진장약의 온도변화는 적극적으로 차단되어야 한다. 또한, 추진장약은 포장용기에서 꺼내어진 후 5분 이내에 사격해야 하며 5분이 경과되면 항온실에 다시 넣어 추진제가 요구온도에 도달할 때까지 보관되어야 한다. 탄약은 사격직전에 적당한 발수를 항온실에서 꺼내어 사격진지 근처로 운반한 후 한 발씩 포장용기에서 꺼내어 사격한다. 대기온도의 일간편차를 피하기 위하여 추진제 시험은 당일 종료되어야 하며 사격시험이 지체 또는 지연될 수 없음을 시험요원들에게 주시시켜야 한다.

포구속도 측정 장비의 정확도는 각종 포구속도 측정 장비에 대하여 ITOP 4-2-805에서 규정하고 있는 수준이내에 들어야 한다^[9]. 따라서, 포구속도 측정 장비는 시험 전 요구되는 정확도를 보증하기 위하여 교정되어야 한다. 도플러 레이더 방식의 포구속도 측정 장비는 도플러 신호로 얻어진 데이터의 회귀분석으로 포구속도를 계산한다. 포구속도를 계산하기 위한 계산 파라미터 값으로 FFT time, FFT points, Fitting order, Overlap 등이 있다. 포구속도 계산은 특히 FFT time과 Fitting order의 영향을 많이 받는데 탄의 비행특성에 적합한 파라미터의 선정이 매우 중요하다^[10]. 따라서, 탄종별 적절한 계측 파라미터의 설정과 계측자간 일관된 파라미터의 적용이 중요하다.

화포의 거치 상태가 포구속도에 영향을 줄 수 있다. 4.2" 박격포의 경우 대형 고정포판에서 사격할 경우 일반 토양위에서 사격할 때보다 포구속도가 크다는 사실이 실험적으로 입증되어 보정치를 적용하고 있다^[11]. 화포의 거치 상태에 따른 포구속도의 차이에 관한 정량적 분석이 필요하다.

장전 깊이, 시험용 포신의 대기온도 노출시간에 따른 포강 내경 확장 등 탄약 로트가 생산단계에서 가지는 성능의 평가에 영향을 주는 많은 요인들이 존재할 것이다. 계통적 요인은 시험탄의 사격시험 결과에 보정되거나 제거되어야 한다.

3.3 기준탄에 의한 보정

기준탄(calibration round)은 강내탄도학적으로 표준성을 얻기 위하여 사격되는 탄약이다. 기준탄을 사격함으로써 시험탄이 표준조건에서 사격될 때 발휘될 수 있는 탄도학적 성능을 보정할 수 있다. 기준탄은 사사장에서 탄약의 수락시험 시 비표준조건을 보정하

기 위한 목적으로 시험절차서 ITOP 4-2-606^[12]에 따라 통계학적으로 엄격하게 설계된 시험단계를 거쳐 로트 단위로 생산한다. 기준탄은 시시장 수락시험 시 보정, 조정이 불가능한 비표준조건에 의하여 발생하는 오차를 보정하기 위한 목적으로 사용된다. 각각의 시험탄 포구속도는 다음과 같이 기준탄의 포구속도와 규격서에서 요구되는 기준값 간의 차이로 보정한다. 이러한 형태의 보정방법을 직접보정(direct calibration)^[13]이라고 하며 식 (1)과 식 (2)에서 CV는 보정값, RV는 기준값을 의미하며, r_i 와 t_i 는 각각 기준탄과 시험탄의 개별 포구속도, n_r 과 n_t 는 각각 기준탄과 시험탄의 사격발수이다. Adj. MV는 기준탄에 의하여 보정된 시험탄의 평균 포구속도이다.

$$CV = RV - \left(\sum_{i=1}^{n_r} r_i / n_r \right) \quad (1)$$

$$Adj. MV = \left(\sum_{i=1}^{n_t} t_i / n_t \right) + CV \quad (2)$$

본 논문의 대상 추진장약의 기준 포구속도는 928.0m/s이다. 만일 기준탄의 평균 포구속도가 928.5m/s이라면 보정값(CV)은 -2.0m/s이므로 시험탄의 평균 포구속도가 928.5m/s라면 기준탄에 의하여 보정된 시험탄의 평균 포구속도는 926.5m/s가 된다.

3.4 통계적 분석방법

로트의 품질 수준을 평가하기 위하여 00개 로트에 대하여 시시장 수락시험이 수행되었으며, 이때 측정된 시험탄의 포구속도 자료 전체를 대상으로 분석하였다. 일반적으로 포구속도와 같이 실험값은 정규분포를 따른다고 알려져 있지만 B. Basu^[14]은 특정한 확률분포를 일반적으로 무분별하게 사용하지 않아야 한다고 주장하였다. 포구속도 자료에 가장 적합한 확률분포를 찾기 위하여 정규분포(normal), 2모수 와이불분포(2p-Weibull), 3모수 와이불분포(3p-Weibull) 및 로그-정규분포(log-normal)에 대한 적합도 검정(goodness-of-fit test)을 실시하였으며 RRX, RRY 및 MLE의 세가지 방법으로 확률모수를 예측하였다. 각 확률분포에 대한 적합도 판단을 위하여 확률지에 타점하였다. 자료의 상대적인 산포 정도는 평균과 표준편차로부터 계산되는 변동계수(coefficient of variation)로 확인할 수 있다.

4. 기준탄의 통계학적 기능

4.1 적합도 검정 결과

각 확률분포별 적합도 검정결과는 Table 2와 같다. 여기서 ρ 는 %로 표현된 결정계수이다. 정규분포가 가장 큰 L-K값과 ρ 값을 보이며, 3모수 와이블분포가 가장 작은 K-S값을 보인다. L-K값이 클수록, K-S값이 작을수록 그리고 ρ 값 100%에 가까울수록 적합도가 크기 때문에 정규분포와 3모수 와이블분포의 적합도가 가장 크다고 볼 수 있다.

3모수 와이블분포를 제외하고 분석방법에 따른 차이는 작으며 RRX법 또는 RRY법을 사용하는 것이 유리하다고 판단된다. MLE법은 ρ 값을 계산하지 않으며 2모수 와이블분포에 있어서 척도모수가 50 이상으로 MLE값이 계산되지 않았다.

Fig. 1 ~ Fig. 3의 각 확률분포에 대한 확률지로부터 정규분포가 가장 적합함을 알 수 있다. 3모수 와이블분포 역시 조정(adjusted)되지 않았기 때문에 직선으로 보이지 않지만 적합도가 높다.

Table 2. Results of goodness-of-fit test

Statistical distribution	Analysis method	K-S (%)	L-K	ρ (%)
Normal	RRX	88.20	-1099.30	99.67
	RRY	88.08	-1099.33	99.67
	MLE	88.20	-1099.30	-
2p-Weibull	RRX	93.15	-1153.98	98.36
	RRY	90.70	-1142.55	98.36
	MLE	-	-	-
3p-Weibull	RRX	24.68	-1106.01	99.64
	RRY	24.68	-1106.01	99.64
	MLE	60.30	-1103.00	-

4.2 확률모수 및 기초통계량 예측 결과

각 확률분포별 모수의 예측 결과는 Table 3과 같다. 2모수 와이블분포에서 척도모수가 50이상일 경우 MLE법은 확률모수를 예측할 수 없으며 척도모수는 3모수 와이블분포에만 해당한다.

각 확률분포별 기초통계량인 평균(E(X)), 표준편차

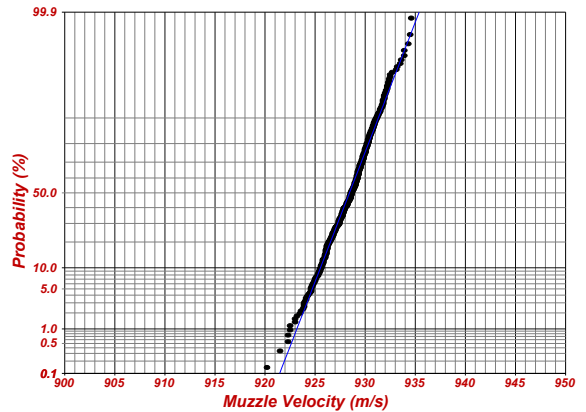


Fig. 1. Probability plot for Normal distribution

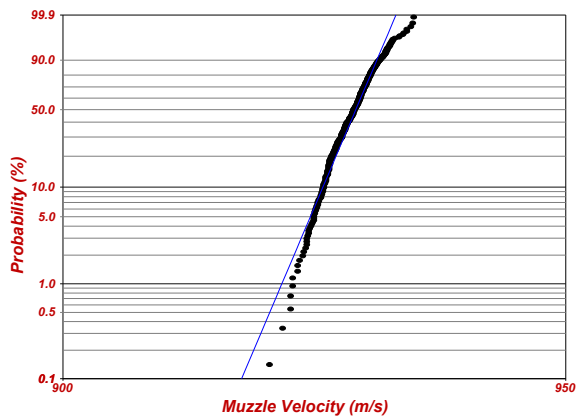


Fig. 2. Probability plot for 2p-Weibull distribution

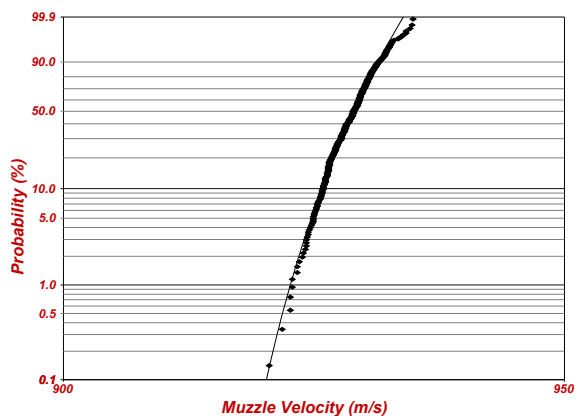


Fig. 3. Probability plots for 3p-Weibull distribution

(SD) 및 변동계수(CV)를 예측한 결과는 Table 4와 같다. 각 확률분포별 차이가 작으며 평균은 약 928.4m/s

(표준: 928.0m/s), 표준편차는 2.25 ~ 2.27m/s, 변동계수는 0.0024이다. Table 4로부터 추진장약이 매우 안정된 품질 수준으로 생산되어 왔으며, 시시장 수락시험 중 발생 가능한 각종 오차요인들이 효과적으로 보정 또는 제거되었음을 의미한다.

Table 3. Results of parameter estimation

Statistical distribution	Analysis method	Parameters		
		Shape	Scale	Location
Normal	-	-	-	928.43
2p-Weibull	RRX	532.73	929.43	-
	RRY	515.41	929.46	-
	MLE	-	-	-
3p-Weibull	RRX	8.82	17.36	912.00
	RRY	8.82	17.36	912.00
	MLE	8.86	17.39	912.00

Table 4. Expectation of basic statistics

Statistical distribution	Analysis method	Basic statistics		
		E(X)	SD	CV
Normal	RRX	928.43	2.25	0.0024
	RRY	928.43	2.27	0.0024
	MLE	928.43	2.25	0.0024
2p-Weibull	RRX	928.42	2.23	0.0024
	RRY	928.42	2.23	0.0025
	MLE	-	-	-
3p-Weibull	RRX	928.43	2.22	0.0024
	RRY	928.43	2.22	0.0024
	MLE	928.46	2.22	0.0024

4.3 확률밀도함수의 형태비교

Fig. 4는 정규분포와 2모수 및 3모수 와이블분포에 대한 확률밀도함수 곡선이다. 정규분포 곡선에 비하여 3모수 및 2모수 와이블분포 곡선이 좌로 치우쳐져 있으며(left-skewed) 분포의 질량(mass)은 우측에 집중하고 있다.

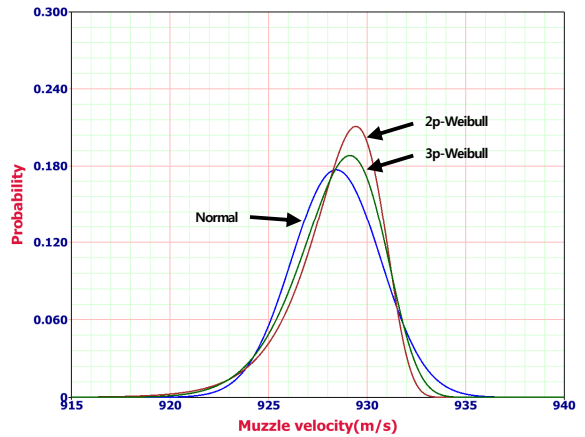


Fig. 4. Comparison of PDF curves

Table 5. Skewness and representative values for each distribution

Statistical distribution	Skewness	Representative value		
		Mean	Median	Mode
Normal	-0.26	928.43	928.43	928.43
2-p Weibull	-1.12	928.42	928.79	929.43
3-p Weibull	-0.58	928.43	928.66	929.12

Table 5는 각 확률분포별 왜도와 대푯값인 평균, 중앙값 및 최빈값이다(RRX 방법 사용). 와이블분포에 대한 평균, 중앙값 및 최빈값은 형상모수(β), 척도모수(η), 위치모수(γ)가 주어졌을 때 각각 식 (3) ~ 식 (5)와 같다. 2모수 와이블분포의 경우 식 (3) ~ 식 (5)에서 $\gamma = 0$ 이다.

$$Mean(MTTF) = \bar{T} = \gamma + \eta \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right) \tag{3}$$

$$Median = \tilde{T} = \gamma + \eta (\ln 2)^{\frac{1}{\beta}} \tag{4}$$

$$Mode = \tilde{\tilde{T}} = \gamma + \eta \left(1 - \frac{1}{\beta}\right)^{\frac{1}{\beta}} \tag{5}$$

왜도는 각 확률분포에 대하여 모두 음(-)의 값을 가지며 정규분포에 비하여 2모수 와이블분포가 가장 큰 값을 가진다. 음(-)의 왜도를 가지므로 정규분포를 제

외하고 최빈값(Mode) > 중앙값(Median) > 산술평균(Mean)의 관계이며, 왜도의 절대값이 가장 큰 2모수 와이블분포에서 더욱 뚜렷하다. 하지만, 각 확률분포 간 왜도의 차이가 크지 않고 정규분포에 비하여 작은 값을 가지기 때문에 정규분포 대신 와이블분포를 활용하는 것도 가능할 것으로 판단된다.

4.4 기준탄 보정이 정규분포 모형에 미치는 영향

기준탄 보정이 정규분포 모형에 미치는 영향을 살펴 보기 위하여 통계분석 S/W인 Minitab®14를 이용하여 Anderson-Darling 정규성 검정을 실시하였다. A-Squared 값은 Adjusted Anderson-Darling 통계량이며 Minitab®14는 D'Agostino와 Stephens의 방법을 사용한다^[15-16]. Anderson-Darling 검정법은 Kolmogorov-Smirnov(K-S) 검정법을 수정한 방법으로 K-S 검정법보다 꼬리 부분에

좀 더 가중치를 주며 모집단에서 채취한 샘플이 특정한 확률분포를 따르는지 여부를 판단하기 위하여 사용된다. Fig. 5는 기준탄 보정 전, Fig. 6은 기준탄 보정 후 자료에 대한 검정 결과이다.

기준탄 보정 후 자료에 대한 정규성 검정으로 얻은 A-Squared값은 1.07로 보정하지 않은 경우인 4.04보다 작다. 기준탄 보정 후 왜도값은 -0.2597로 보정되지 않은 경우인 -0.3839보다 영(0)에 가깝다. 즉, 기준탄 보정은 자료의 정규성을 높여준다고 볼 수 있다. 기준탄 보정의 경우 평균은 928.43m/s, 표준편차는 2.25m/s이며 보정되지 않은 경우 평균은 930.09m/s, 표준편차는 4.59m/s이다. 기준탄 보정에 의하여 평균은 표준값에 좀더 근접한 값을 보이게 되며 표준편차도 작아진다. 즉, 기준탄 보정은 시험중 발생하는 오차를 제거하기 때문에 확률분포 모형을 정규분포에 더욱 가깝게 한다.

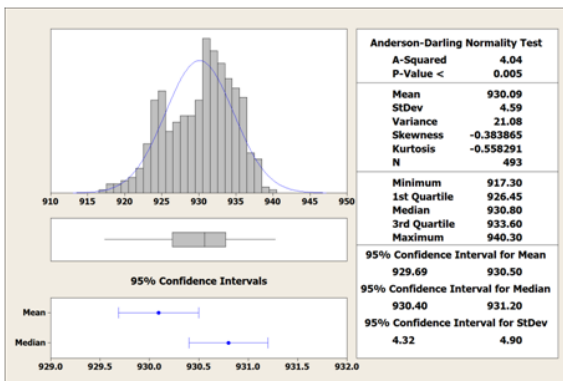


Fig. 5. Results of normality test for uncorrected test rounds by reference rounds

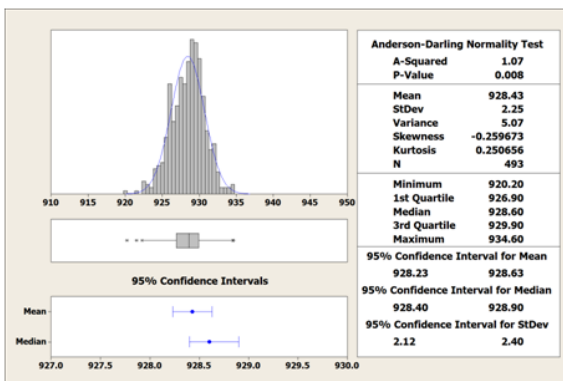


Fig. 6. Results of normality test for corrected test rounds by reference rounds

5. 결론

탄약의 시사장 수락시험에서 발생 가능한 오차의 종류와 오차를 제거 또는 보정할 수 있는 방법에 관하여 논하였다. 추진장악 수락시험 결과의 통계적 분석으로 포구속도값이 정규분포 모형을 가장 잘 따르며 3모수 와이블분포 모형도 잘 따름을 알 수 있었다. 본 논문의 대상 추진장악의 품질수준은 매우 안정되어 있으며 시사장 수락시험 시 발생 가능한 시험오차는 적절하게 제거 또는 보정되었다고 판단된다. 특히, 기준탄에 의한 보정은 자료의 정규성을 높임을 확인하였다.

References

- [1] Y. Dodge, The Oxford Dictionary of Statistical Terms, Oxford University Press, 2003.
- [2] John R. Taylor, An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements, Second ed., University Science Books, 1999.
- [3] K. W. Kang, S. K. Koh, D. K. Kim, K. J. Kim, Assessment of the Statistical Distribution of Flexural Strength of Woven-Fabric Laminates with Impact-Induced Damage, Composite Structures, pp. 60-66, 2009.
- [4] Weibull++® 7, Life Data Analysis Reference.

- Reliasoft Inc., 2009.
- [5] Heli M. Nyberg, "Evaluation of Data Collected by a Surveillance System for Gun Propelling Charges Utilizing Conscript Practice Troop Firings," *Journal of Battlefield Technology*, Vol. 10, No. 3, p. 13, 2007.
- [6] Chenli Tao, Yurong Zhang, Sanqun Li, Changzhi Jia, Yongjian Li, Xifa Zhang and Zhengjia He, "Mechanism of Interior Ballistic Peak Phenomenon of Guns and its Effects," *J. Appl. Mech.* 77(5), 2010.
- [7] 육군본부, 포병포술(사격지휘), 야전교범 32-3, 2004.
- [8] 나태흠, 한태호, 성용림, 박성호, 김재갑, 박노석, 추진장약 수락시험의 적정 점검단 분석 연구, ADDR-515-110454, 2011.
- [9] 국방과학연구소, 시사장 수락시험절차 - 추진제에 대한 일반시험절차, P-공통-1A, 1995.
- [10] 김도형, 최시홍, 포구속도 산출을 위한 속도데이터의 회귀분석, ADDR-519-120917, 2012.
- [11] 오상엽, 한충원, 조연식, 박격포탄 탄도성능에 미치는 지반조건의 영향에 관한 실험적 연구, DSTC-414-970243, 1997.
- [12] FR/UK/US ITOP 4-2-606, Establishment of Master and Reference Calibration Rounds, 1997.
- [13] Luis Cuadros-Rodriguez, Laura Gamiz-Gracia, Eva Almansa-Lopez, Jesus Laso-Sanchez, Calibration in Chemical Measurement Processes: I. A Metrological Approach, *Trends in Analytical Chemistry*, Vol. 20, No. 4, pp. 195-206, 2001.
- [14] Bikramjit Basu, Devesh Tiwari, Debasis Kundu, Rajesh Prasad, Is Weibull Distribution the Most Appropriate Statistical Strength Distribution for Brittle Materials? *Ceramics International*, pp. 237-246, 2009.
- [15] Knowledgebase ID 998, Adjusted Anderson-Darling Statistic, Minitab Technical Support Document.
- [16] R. B. D'Agostino, M. A. Stephens, Goodness-of-Fit Techniques, Marcel Dekker, Inc., 1986.