

크롬도금 포열의 포구속도 확률분포 특성 분석

김재갑¹⁾ · 김재훈^{*2)}

¹⁾ 국방과학연구소 제5기술연구본부

²⁾ 충남대학교 기계공학부

Analysis of Probability Distribution of Muzzle Velocity for Chrome Plated Barrel

Jaekab Kim¹⁾ · Jaehoon Kim^{*2)}

¹⁾ The 5th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

²⁾ Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University, Korea

(Received 22 February 2021 / Revised 30 April 2021 / Accepted 4 June 2021)

Abstract

To confirm the change of muzzle velocity and the most suitable probability distribution model of the 155 mm K9 howitzer barrel with chrome plating and changed rifling. Using a statistical program, the muzzle velocity were plotted on a normal distribution, a 2-parameter and 3-parameter Weibull distribution on a probability paper. Also, statistical parameters were estimated and muzzle velocity fitness test and probability of K676 charge were plotted. In both the chrome-plated with standard rifling and changed rifling for K9 barrel, the 2-parameter and 3-parameter Weibull distribution were skewed to the left compared to the normal distribution. It was confirmed that the muzzle velocity of the K9 barrel with chromium-plated is suitable for the normal distribution and 3-parameter Weibull distribution model.

Key Words : Chrome Plating(크롬도금), Goodness-of-Fitness(적합도), Normal Distribution(정규분포), Weibull Distribution(와이블분포), K9 Barrel(K9 포신)

1. 서론

포신의 마모는 포신에서 발사된 탄두의 마찰과 추진장약의 연소 등 복합적인 원인에 의해 발생한다.

포신을 이용한 사격은 탄두를 포신내부에 장전하고 뇌관의 점화에 의해 추진장약이 연소 후 압력이 발생되고 탄두가 강선을 따라 이동한다. 탄두가 강선을 이동하는 시간은 매우 짧고 탄두와 강선 사이에 충격력과 마찰력 및 모멘트 등이 발생하며, 이때 포신 강선의 마모가 발생한다. 강선이 마모되면 포강면이 손상되고 확장되어 정확도와 유용성이 저하된다. 사격에

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

의해 포신 마모량이 어느 기준량 이상이 되면, 포구속도 등의 탄도학적 데이터에 영향을 주기 때문에 더 이상 사용할 수 없는 폐기한도에 이르게 된다^[1].

사격에 의한 강선 마모량을 작게 하고 포신을 계속적으로 사용하기 위한 방법이 필요한 상태이다.

국내에서는 일부 소구경 포신에 크롬도금이 적용되어 있고 외국에서의 적용사례는 있지만 국내에서 개발된 대구경 포신에 적용하기는 적합하지 않은 상태이다.

강선의 마모를 감소시키고 포신을 계속적으로 사용하고자 포신 내부 강선에 크롬도금의 적용을 고안하였다. 현재 사용하는 155 mm K9 포신에서는 포신내부에 크롬도금이 없는 강선을 갖고 있으며, 크롬도금이 없는 강선 포신은 사격수량에 비례하는 선형적인 포구속도 감소를 나타낸다. 포신내부에 크롬도금이 된 포신에서의 포구속도 감소 및 분포에 대해서는 알려져 있지 않다.

특히, 곡사포의 포구속도는 사거리 및 분산도에 영향을 미치는 중요한 요소이기 때문에 크롬도금이 된 포신과 강선에 변화를 준 포신에 대한 포구속도 확률분포에 대한 연구가 필요하다^[2,3].

본 연구에서는 155 mm K9 포신을 대상으로 하였으며, 크롬도금된 포신에서 강선변화 유무에 따른 포구속도 변화를 정규분포, 2모수 와이블 분포 및 3모수 와이블 분포에 대하여 확률지에 포구속도 데이터를 도시하고, 통계적 파라미터 추정을 통해 가장 적합한 확률분포 모형을 확인하고자 한다.

2. 관련이론

2.1 통계적 변수 추정

2.1.1 최소제곱법

최소제곱법(least square principle)은 잔차제곱합이 최소가 되는 확률모수를 예측하는 방법으로 잔차는 관측값과 확률모형간의 차이를 의미하며 Y에 관한 랭크회귀 RRY(Rank Regression on Y)와 X에 관한 랭크회귀 RRX(Rank Regression on X)의 2가지 모형으로 구분된다. RRY 모형은 회귀식이 $y = a + bx$ 로 가정하고 RRX 모형은 $x = a + by$ 로 가정하며 아래의 식과 같이 표현된다^[4,5].

$$\sum_{i=1}^N (\hat{a} + \hat{b}x_i - y_i)^2 = \min(a, b) \sum_{i=1}^N (a + bx_i - y_i)^2 \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^N (\hat{a} + \hat{b}y_i - x_i)^2 = \min(a, b) \sum_{i=1}^N (a + by_i - x_i)^2 \quad (2)$$

NLRR(Non Linear Rank Regression)은 비선형 랭크회귀이며 3모수 와이블 분포에 사용된다.

2.1.2 최대우도예측법

최대우도예측법(MLE, Maximum Likelihood Estimation)은 우도함수(L) 또는 로그우도함수(A)를 최대화하는 확률모수($\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k$)를 찾는다.

$$L(x_1, x_2, \dots, x_N | \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k) = \prod_{i=1}^N f(x_i; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k) \quad (3)$$

$$A = \ln L = \prod_{i=1}^N \ln f(x_i; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k) \quad (4)$$

일반적으로 식 (7)로부터 A가 최대값을 갖도록 하는 통계적 파라미터의 추정치($\hat{\theta}_j$)를 구한다.

$$\frac{\partial A}{\partial \theta_j} = 0, \quad (j = 1, 2, \dots, k) \quad (5)$$

2모수 와이블분포에 있어서 MLE값은 척도모수가 50 이상일 경우 계산할 수 없다^[4,5].

2.1.3 적합도 검정

실험에서 확보한 데이터가 수학적 모형으로 특정 확률분포모형을 따르는지 확인하기 위해 적합도 검정(goodness of fitness)을 실시해야 한다. 적합도 검정을 거치지 않고 특정 확률분포에 적합한 것으로 결론짓는 것은 오류가 발생할 확률이 높아진다. 본 연구에서는 확률분포의 적합도 검정 방법으로 아래의 4가지 방법을 주로 사용하였다.

첫째, modified K-S 테스트(modified Kolmogorov-Smirnov test)이다.

누적분포함수의 차의 최대값을 이용한 방법으로 보편화 되었으며, 분포의 꼬리와 중앙에 동일한 가중치를 부여한 방법이며 100 %에 가까운 값일수록 해당 확률분포가 데이터에 적합하지 않는 분포인 것으로 검정한다.

둘째, L-K 방법이다. 최대우도예측법(M.L.E.)과 동일

한 방법으로써 큰 값을 가지는 확률분포가 데이터에 가장 적합한 것으로 검정한다.

셋째, 회귀분석결과로 얻어지는 상관계수(correlation coefficient) ρ 를 이용하여 회귀모델의 적합도를 검정하는 방법이다. 상관계수는 최소제곱법에서 데이터간 선형관계의 강도를 설명해 주는 척도가 된다. 상관계수는 $-1 \leq \rho \leq 1$ 의 값을 가지며 $|\rho| \rightarrow 1$ 이면 선형관계가 강하므로 해당 확률분포와 데이터가 적합한 것으로 판단한다. 또한 $\rho = \pm 1$ 인 경우 모든 점은 직선상에 위치한다.

넷째, 확률지의 사용이다. 3모수 와이블 분포는 와이블 확률지에 adjusted point와 unadjusted point 두 가지 점들로 타점되는데, 전자는 후자에서 location 파라미터(γ) 만큼 수평이동한 점들로서 2모수 와이블 분포의 형태($\gamma = 0$)를 취하게 되므로 와이블 확률지에 선형적으로 표시되어 상관계수를 구하기 쉬운 형태를 취한다. 반면에 unadjusted point는 와이블 확률지에 비선형적으로 표시된다⁶⁻⁸⁾.

3. 시험 및 시험자료 분석

사격은 155 mm K9 포신에 사용되는 K307 고폭탄 두에 신관을 결합하여 K676 추진장약을 장전 후 사격하였으며 탄두의 포구속도를 측정하였다.

3.1 시험대상

포신 내부 강선에 크롬도금을 하였으며, 강선율의 변화를 준 것과 변화를 주지 않은 155 mm K9 포신을 시험대상으로 하였다.

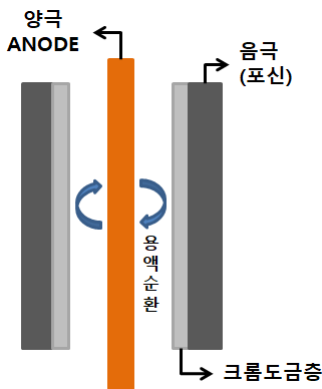


Fig. 1. Circulation of chromium liquid

크롬도금 공정은 재료의 가공 및 검사와 전처리(용제 탈지, 알칼리 탈지, 장착, 전해 탈지, 전해연마, 예칭 등), 크롬도금, 후처리(수세, 제품분리, 취성 제거)의 공정으로 구분된다. Fig. 1은 크롬도금 공정에서 크롬도금액을 포신내부에 순환시키면 크롬도금액이 음극인 포신 내부 단면에 붙는 모습을 나타낸 것이다⁹⁾.

3.2 포구속도 및 강선변화

포신에서 발사된 탄두 속도는 아래의 Fig. 2 장비를 사용하여 측정하였으며, 각각 MVRS(Muzzle Velocity Radar System)-3000과 MVRS-3000에서 측정된 포구속도를 자동으로 계산하는 포구속도 분석기(Analyzer)이다.

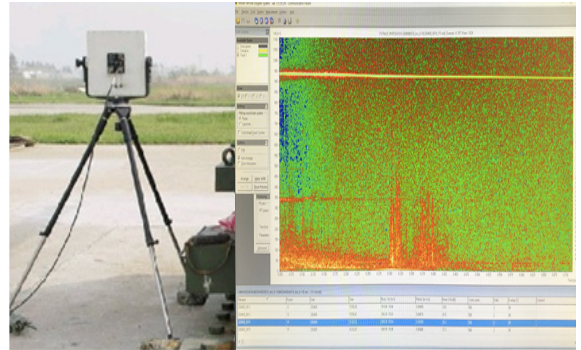


Fig. 2. MVRS-3000 and analyzer

포강내에서 강선의 각도를 변화시킨 것을 강선율이라 하며, 강선 시작부에 낮은 강선력을 주어 포신 마모를 감소시키기 위하여 가변형 강선율을 적용하였다. 또한 특정부위에 강선력이 집중되지 않는 선형적 증가 아닌 최적의 강선율을 적용하였다¹⁰⁻¹²⁾.

3.3 적합도 검정 결과

최소제곱법과 최대우도예측법을 적용한 각 확률 분포별 적합도 검정결과는 Table 1과 Table 2와 같다.

Table 1의 고정강선은 정규분포가 가장 큰 L-K값과 가장 낮은 K-S 값을 보이며, 3모수 와이블 분포가 가장 큰 ρ 값을 보인다. L-K값은 클수록, K-S값은 작을수록 그리고 ρ 값 100%에 가까울수록 적합도가 크기 때문에 정규분포와 3모수 와이블 분포의 적합도가 가장 크며, 2모수 와이블 분포와 3모수 와이블 분포 ρ 값의 차이는 거의 없다.

Table 2의 가변강선은 정규분포가 가장 큰 ρ 값과 가장 낮은 K-S 값을 보이고, 2모수 와이블 분포가 가

장 작은 L-K값을 보이기 때문에 정규분포와 2모수 와이블분포의 적합도가 가장 크다.

3모수 와이블 분포를 제외하고 분석방법에 따른 차이는 작으며 RRX법 또는 RRY법을 사용하는 것이 유리하다고 판단된다. MLE법은 ρ 값을 계산하지 않으며 2모수 와이블 분포에 있어서 척도모수가 50 이상으로 MLE값이 계산되지 않았다^[4].

Table 1. Results of goodness-of-fit test (Standard Rifling)

Statistical distribution	Analysis method	Modified K-S(%)	L-K	ρ
Normal	RRX	21.73 %	-109.6956	0.9768
	RRY	26.04 %	-109.8578	0.9768
	MLE	21.64 %	-109.6945	-
2p-Weibull	RRX	35.41 %	-109.1918	0.9889
	RRY	41.90 %	-109.0124	0.9889
	MLE	-	-	-
3p-Weibull	MLE	35.74 %	-108.4781	-
	NLRR	38.72 %	-108.4843	0.9890

Table 2. Results of goodness-of-fit test (Changed Rifling)

Statistical distribution	Analysis method	Modified K-S(%)	L-K	ρ
Normal	RRX	6.38 %	-106.9723	0.9893
	RRY	9.06 %	-107.0466	0.9893
	MLE	4.89 %	-106.9481	-
2p-Weibull	RRX	36.54 %	-119.1063	0.9544
	RRY	60.28 %	-114.7524	0.9544
	MLE	-	-	-
3p-Weibull	MLE	41.73 %	-109.2685	-
	NLRR	30.05 %	-110.0517	0.9740

Fig. 3부터 Fig. 5까지는 크롬도금된 고정강선의 포구속도를 각 확률지에 나타낸 것이다. 가로축은 포구속도를 나타내며 세로축은 확률을 나타낸다. 각 분포

의 상관계수(ρ)는 정규분포가 97.68 %, 2모수 와이블 분포가 98.89 %이며, 포구속도 데이터가 확률지에 일직선으로 정렬된 것이다. 3모수 와이블 분포에서는 adjusted point와 unadjusted point 두 가지 점들로 타점되는데 adjusted point는 unadjusted point에서 위치 파라미터(γ)만큼 이동한 점들로서 2모수 와이블 분포($\gamma = 0$)의 형태를 나타낸다. 각 데이터의 분포 중 정규분포와 3모수 와이블 분포에 가깝게 분포하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6부터 Fig. 8까지는 크롬도금된 가변강선의 포구속도를 각 확률지에 나타낸 것이다. 각 분포의 상관계수(ρ)는 정규분포가 98.93 %, 2모수 와이블 분포가 95.44 %이다. 각 데이터의 분포 중 정규분포에 가깝게 분포하는 것을 확인할 수 있다^[13].

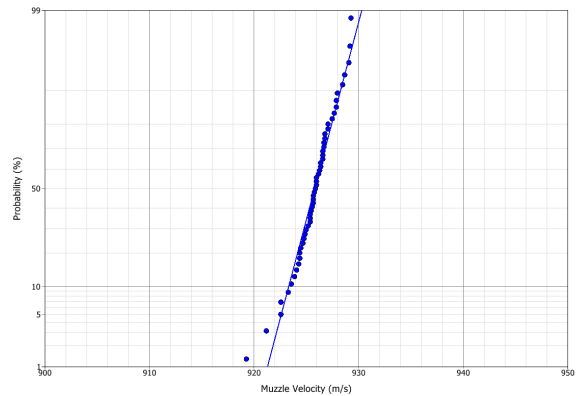


Fig. 3. Probability plot for normal distribution (standard rifling)

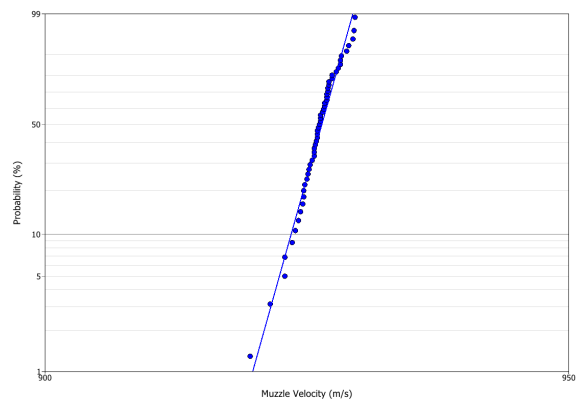


Fig. 4. Probability plots for 2p-Weibull distribution (standard rifling)

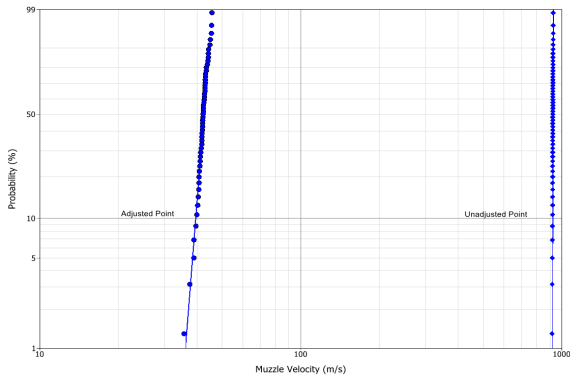


Fig. 5. Probability plots for 3p-Weibull distribution (standard rifling)

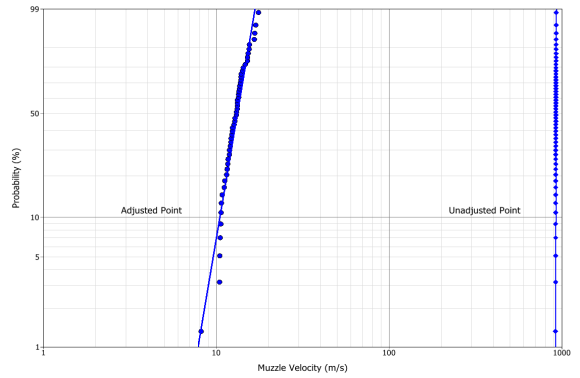


Fig. 8. Probability plots for 3p-Weibull distribution (changed rifling)

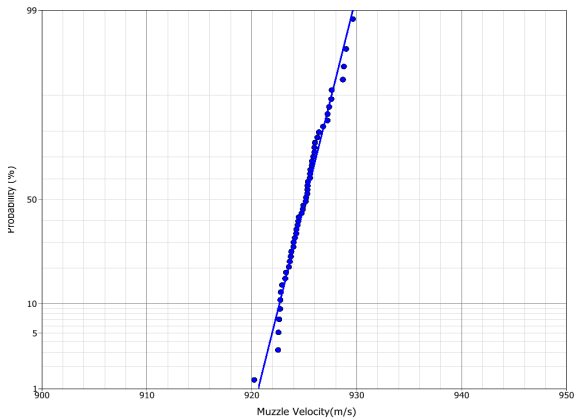


Fig. 6. Probability plot for Normal distribution (changed rifling)

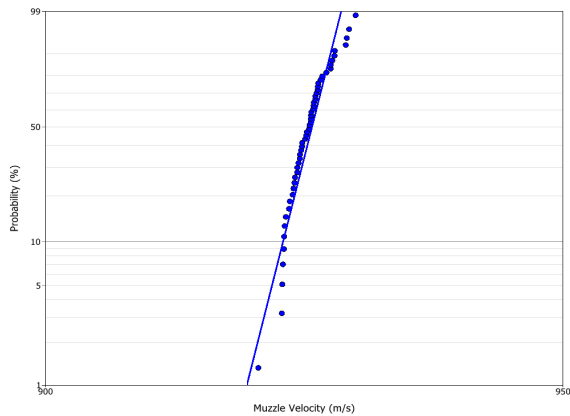


Fig. 7. Probability plots for 2p-Weibull distribution (changed rifling)

3.4 확률모수 예측 및 확률밀도함수

각 확률분포별 모수의 예측 결과는 Table 3과 Table 4와 같다. 고정강선에서 정규분포는 925.7925, 2모수 와이불분포 RRX 값은 926.6693, RRY 값은 926.6891이며, 가변강선에서 정규분포는 925.1267, 2모수 와이불분포 RRX 값은 925.9615, RRY 값은 926.0434이다.

Table 3. Results of parameter estimation(standard rifling)

Statistical distribution	Analysis method	Shape	Scale	Location
Normal	-	-	-	925.7925
2p-Weibull	RRX	592.8225	926.6693	-
	RRY	579.7609	926.6891	-
	MLE	-	-	-
3p-Weibull	MLE	25.6591	43.1325	883.5281
	NLRR	25.9525	43.1449	883.5281

Table 4. Results of parameter estimation(changed rifling)

Statistical distribution	Analysis method	Shape	Scale	Location
Normal	-	-	-	925.1267
2p-Weibull	RRX	621.9924	925.9615	-
	RRY	566.5689	926.0434	-
	MLE	-	-	-
3p-Weibull	MLE	7.2365	13.8873	912.0673
	NLRR	8.0718	13.8539	912.0673

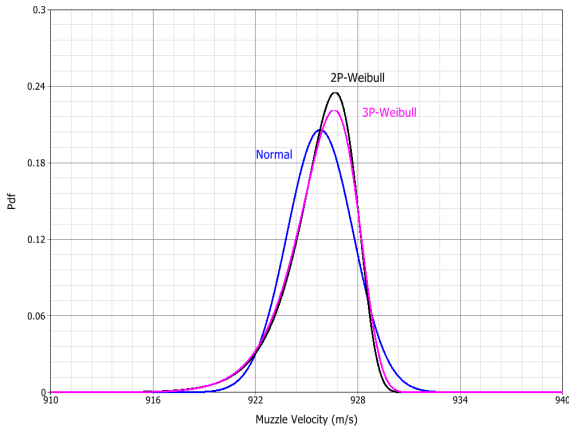


Fig. 9. Probability density function for normal, 2p and 3p-Weibull distribution(standard rifling)

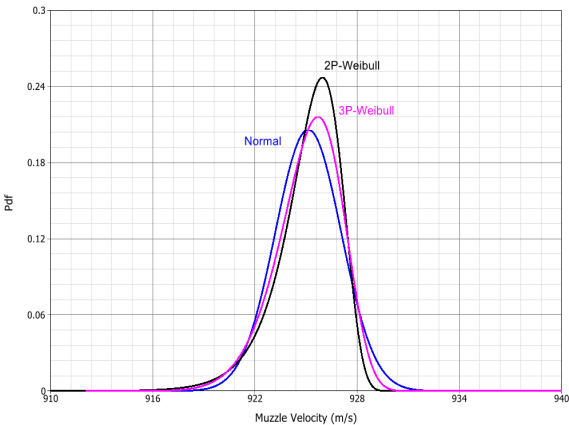


Fig. 10. Probability density function for normal, 2p and 3p-Weibull distribution(changed rifling)

Fig. 9와 Fig. 10은 크롬도금된 고정강선과 가변강선에 대한 정규분포와 2모수 및 3모수 와이블분포의 확률밀도함수 곡선이다.

고정강선에서의 정규분포는 중심이 925.7925이며 2모수 와이블 분포는 척도모수가 926.6693, 형상모수가 592.8225이며, 3모수 와이블 분포는 위치모수가 883.5281, 척도모수가 43.1325, 형상모수가 7.2365인 확률밀도 함수를 나타내며, 가변강선에서의 정규분포는 중심이 925.1267이며 2모수 와이블 분포는 척도모수가 925.9615, 형상모수가 621.9924이며, 3모수 와이블 분포는 위치모수가 912.0673, 척도모수가 13.8873, 형상모수가 7.2365인 확률밀도함수를 나타낸다.

4. 결론

크롬도금된 고정강선과 가변강선을 갖는 155 mm K9 포신을 사용하여 K307탄두와 K676 추진장약을 사격후 포구속도를 분석하였으며, 적합한 확률분포를 확인하였다.

- (1) 강선 내부에 크롬도금된 고정강선을 갖는 K9 포신의 포구속도는 정규분포 모형과 3모수 와이블 분포 모형에 적합하며,
- (2) 강선 내부에 크롬도금된 가변강선을 갖는 K9 포신의 포구속도는 정규분포 모형에 적합함을 확인하였다.

본 연구는 크롬도금된 고정강선과 가변강선을 갖는 K9 포신의 전체 수명구간 중 일부 수명구간의 포구속도 확률분포 모형을 확인한 결과이며, 향후 전체 수명구간에 대한 연구의 기초자료가 될 것으로 사료된다.

References

- [1] R. S. MONTGORY, F. K. SAUTTER, "Erosion and its Control," AD-A123, p. 164, 1982.
- [2] J. A. LANNON, A. C., VALLADO, "Effect of Chrome Plating on the Wear Characteristic and Ballistic in the 155-mm M198 Artillery System," ARLCD-TR-80018, Weapon System Laboratory, New Jersey, pp. 17-26, 1981.
- [3] J. R. WARD, "On the Erosivity of Stick and Granular Propellant," AD-A114, p. 964, 1982.
- [4] Y. Lei, "Evaluation of Three Methods for Estimation of the Weibull Distribution Parameters of Chinese Pine," Journal of Forest Science Vol. 54, pp. 566~571, 2008.
- [5] Weibull++7 Life Data Analysis Reference, Reliasoft Inc., 2009.
- [6] James W. Evans, Richard A. Johnson, David W. Green, "Two and Three Parameter Weibull Goodness of Fit Test," FPL-RP-493, Forest Products Laboratory, Virginia, pp. 3-10, 1989.
- [7] 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* Vol. 90, pp. 60~66, 2009.
- [8] N. S. Park, S. H. Park, “A Study on Weibull 3-Parameters Estimation of Ammunition Test Data,” *KIMST Annual Conference Proceedings*, pp. 108~111, 2010.
- [9] S. B. Jun, C. G. Jeon, S. S. Jung, S. T. Ahn, T. H. Han, “Study of Low Contraction Chrome Plating Characteristics,” *Academic Conference of the KIMST*, pp. 173~174, 2018.
- [10] K. U. Cha, S. T. Ahn., C. K. Cho, E. J. Choi, “A Study on the Design of Rifling Angle by Setting Up an Idealized Rifling Force Curve,” *Journal of the KIMST*, Vol. 18, No. 1, pp. 15~21, 2015.
- [11] S. I. An, “Design of Rifling Profile to Increase Lifespan of the Gun Barrel,” *Journal of the Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 35, No. 9, pp. 887~892, 2018.
- [12] J. K. Kim., J. H. Kim, “Statistical Analysis on the Effect of Muzzle Velocity on Chrome Plating and Rifling Change Barrel,” *Korean Society Mechanical Eng. A.*, Vol. 44, No. 10, pp. 759~764, 2020.
- [13] Y. O. Park, Shin, J. E., Lee, B. I., Lee, S. H., Hwang, H. S., Lee, S. H., “Statistical Data Analysis Using SPSS,” pp. 201~218, *Kyungmoonsa*, 2016.