

# 다구찌 실험계획법을 이용한 소구경화기 총열 내부용 Cr-Mo-V강의 질화공정 최적화

권혁린<sup>\*,\*\*\*\*</sup>, 김동은<sup>\*</sup>, 손형동<sup>\*</sup>, 신재원<sup>\*\*</sup>, 박재하<sup>\*\*\*,\*\*\*\*</sup>, 강명창<sup>\*\*\*\*,#</sup>

<sup>\*</sup>(주)S&T모티브, <sup>\*\*</sup>국방기술품질원, <sup>\*\*\*</sup>(주)이레테크, <sup>\*\*\*\*</sup>부산대학교 융합학부

## Optimization of Inner Nitriding Process for Cr-Mo-V Steel of Small Arms Barrel by using Taguchi Experimental Design Method

Hyuk-Rin Kwon<sup>\*,\*\*\*\*</sup>, Dong-Eun Kim<sup>\*</sup>, Hyung-Dong Son<sup>\*</sup>, Jea-Won Shin<sup>\*\*</sup>, Jae-Ha Park<sup>\*\*\*,\*\*\*\*</sup>

Myung-Chang Kang<sup>\*\*\*\*,#</sup>

<sup>\*</sup>S&T Motiv Co., Ltd., <sup>\*\*</sup>Defense Agency for Technology and Quality, <sup>\*\*\*</sup>Ireatech Co., Ltd.,

<sup>\*\*\*\*</sup>The Graduate school of Convergence Science, Pusan National Univ.

(Received 13 May 2018; received in revised form 17 May 2018; accepted 23 May 2018)

### ABSTRACT

When shooting small arms, the inner surface temperature is heated up to about 700~1,000°C by the friction of the bullet and the inner wall of the barrel and the combustion of propellant. High-temperature propellant gas and high-speed movement of the bullet cause corrosion of the inner wall, which is noticeable immediately in front of the chamber. In this study, the mechanical properties of Cr-Mo-V steel, which is the base material, were tested using Taguchi experimental design to find the best nitriding treatment conditions. For the nitriding process, the working time, salt bath temperature, and salt concentration were combined as three conditions and placed in the  $L_9(3^4)$ , orthogonal array table. The thicknesses of the white layer and the nitrogen diffusion layer were measured after nitriding under each condition in a salt bath furnace. Durability was evaluated by measuring the degree of dispersion through actual shooting because it was difficult to evaluate the mechanical properties of the cylinder inner structure. As a result, it was confirmed that the durability was optimal at 565°C, 1 hour, 0.5%. These optimal conditions were selected by the statistical analysis of the Minitab program(ver.17).

**Key Words** : Cr-Mo-V Steel(크롬몰리브덴바나듐강), Nitriding Process(질화공정), Durability(내구수명), Optimization(최적화), Taguchi Experimental Design(다구찌 실험계획법)

### 1. 서 론

소구경 화기(Small Arms)는 사격시 탄약(Bullet)의 추진제로부터 발생하는 고온, 고압의 연소가스 및 탄자 전진시 발생하는 마찰력에 의해 총열 내부

온도가 고온으로 상승하며 팽창하게 된다. 사격 후, 총열은 대기에 의한 냉각과정에서 상변태(Phase transformation)에 따른 내부응력이 발생하는데 이러한 팽창 및 수축 과정을 반복하며 총열 내부의 표면층에 미세 균열이 발생한다. 열응력에 의해 취약해진 총열 내부를 탄자(Bullet)가 지속적으로 마찰하게 되면 표면층이 급격히 침식, 탈락되는 현상이 발생하여 수명이 단축된다<sup>[1]</sup>.

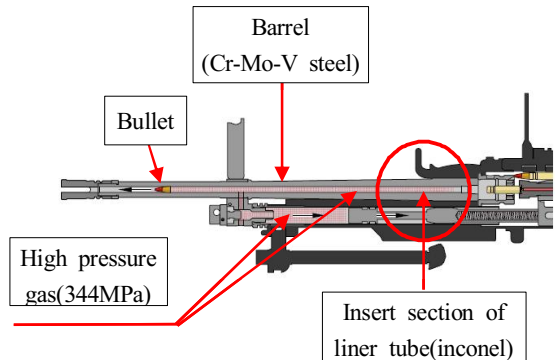
# Corresponding Author : kangmc@pusan.ac.kr

Tel: +82-51-510-2361, Fax: +82-51-510-7396

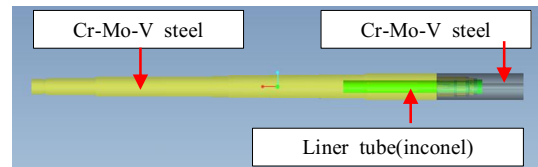
이에 총열의 정도, 내식성 및 내마모성을 향상시키기 위해 질화처리, 크롬도금 등의 표면처리를 실시하여 수명을 확보하고 있다<sup>[2-3]</sup>. 그러나 Fig. 1(a)에서의 기관총은 고속으로 연발사격을 지속 실시함에 따라 총열 내부에 발생하는 열응력이 보다 크게 작용하므로 현재의 표면처리보다 더 높은 수준의 내구성이 요구된다. 이를 충족시키고자 Fig. 1(b)와 같이 내열성이 강한 인코넬 소재를 열박음하여 요구강도를 확보하고 있는데, 이러한 인코넬 소재는 고비용, 난삭성의 특성으로 가공비가 많이 들고, 열박음에 의한 3중 구조의 총열로 비효율적 공법의 한계에 직면해 있다.

한편, 질화처리를 실시하면 표면에 유용한 화합물이 형성되고, 그 내부에는 백층(White layer) 및 질소확산층(Diffusion layer)이 형성된다. 이는 800℃ 이상에서 처리되는 침탄이나 침탄질화 등의 표면경화법과 같이 조직변태를 일으키는 경화방법이 아니라 580℃의 저온에서 화학작용에 의한 처리방법이기 때문에 퀴칭(Quenching)이 필요치 않고, 부품의 변형이 적게 일어나는 것이 특징이다. 또한 560℃ 이하에서 생성되는 화합물층은 취성 때문에 장애가 되어 제거해야 하지만, 560℃ 이상의 질화처리에 의한 화합물층은 그 유용한 특성 때문에 이를 오히려 이용하며, 질화강 뿐만 아니라 모든 철계 금속에 적용되는 것이 큰 특징이다<sup>[4-5]</sup>.

따라서 본 연구에서는 기존의 인코넬 소재를 대체할 수 있는 새로운 공법을 찾기 위하여 총열 소재 Cr-Mo-V강의 기계적 성질을 향상시키고자 다구찌(Taguchi) 실험계획법을 이용하여 질화처리 공정을 강건 설계하였다. 질화처리에 영향을 미치는 인자들을 특성요인도(Cause & Effect Diagram) 및 계층적 분석방법(Analytic hierarchy process, AHP)으로 중요도를 분석하였다. 가장 중요도가 높게 나타난 염욕로(Salt bath)온도, 유지시간(Time), 질화제 농도(CN density)를 설계 주요인자로 선정하였고, 이를 각각 3가지 수준으로 조합하여 3수준계 직교배열표(Tables of orthogonal arrays)  $L_9(3^4)$ 에 배치하였다. 질화처리에 의해 생성되는 백층(White layer) 두께를 출력 신호값으로 선정하였고, 백층두께에 따른 내구수명 평가는 이와 상관관계가 있는 분산도 사격 시험을 통해 실시하였다.



(a) Direction of bullet and gas flow in barrel



(b) Barrel consist of 3-piece parts

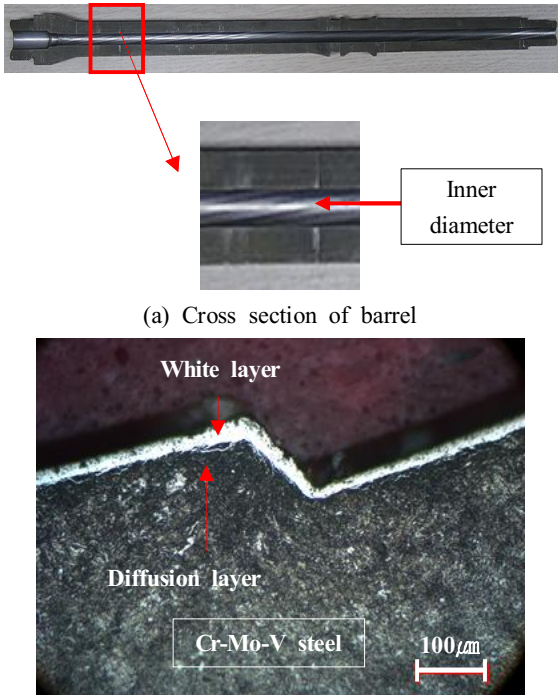
Fig. 1 High temperature about 1,000℃ at inner barrel according to high pressure propelling gas and high movement of bullet

## 2. 출력인자 선정 및 내구수명 평가

### 2.1 출력인자(백층두께) 선정

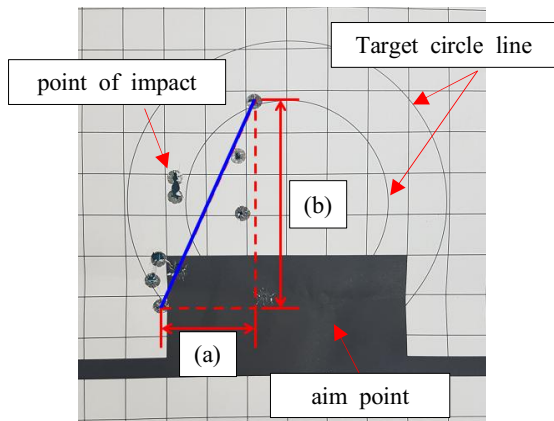
질화처리를 하면 Fig. 2와 같이 백층(White layer)과 질소 확산층(Diffusion layer)이 생성되는데 백층이란 화합물층(Compound layer)라고도 하며, 질소가 표면으로부터 확산해 들어가면서 최표면층에는 질소 농도가 짙은 조직인 Fe<sub>4</sub>N, Fe<sub>2-3</sub>N의 ε층이 생성되고 그 이하에는 확산층이 생성된다<sup>[6-8]</sup>.

질화처리된 제품은, 모재와 대기와의 직접적인 접촉을 차단하므로 내식성이 우수하며, 마찰열에 의한 용착마모(Scouring), 슬딩마모(Sliding), 부식마모(Corrosion) 등에 강하기 때문에 일반 기계부품에 많이 이용된다. 그러나 경도가 높은 백층은 고온 및 고압의 강한 충격력을 받는 총열 내부 환경에서 어떻게 작용 할지 알 수 없으므로 백층두께에 따른 내구수명 평가실험을 통해 총열 수명이 가장 오래 유지되는 적절한 백층의 두께를 찾고자 한다.



(a) Cross section of barrel  
(b) White layer and diffusion layer observation using scanning electron microscope at cross section of inner diameter

**Fig. 2 Nitrogen diffuser layer observation of nitrided Cr-Mo-V steel of barrel**



**Fig. 3 Degree of dispersion at target, where is (a)horizontal maximum distance and (b) vertical maximum distance**

## 2.2 분산도(총열 내구수명) 상관관계

총열 마모량을 측정하는 방법에는 침식마모 측정 센서를 이용하는 방법이 있는데, 이는 내경 측정용 광학 장비가 필요하며, 총열에 동피(Cooper powder) 축적시 내경을 정확하게 측정하기 어려운 단점이 있다. 따라서 총열 내경 마모량을 비교하기 위하여 상관관계가 있는 다른 변수가 필요하다.

총열의 내구수명을 평가하는 방법에는 치수 측정 이외에 분산도(Degree of dispersion, D) 사격, 총구 속도 측정 등이 있는데 이 중 분산도는 탄착점(Point of impact)의 최대직경(Maximum diameter)을 의미한다. 총열 내경이 마모될 경우 탄자(Bullet)와 총열 내경 사이에 발생한 틈새로 추진제 가스가 누출됨에 따라 운동에너지가 저하되어 탄자가 정확하게 비행하지 못하고 분산도가 커지게 된다. 분산도는 식 (1)과 같이 계산하며, 식에서 a, b는 Fig. 3에서 정의하고 있는 바와 같이 가장 멀리 떨어진 탄착점의 가로와 세로 길이를 나타낸다.

$$\text{분산도}(D) = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (1)$$

## 3. 실험장치 및 방법

### 3.1 염욕로 구성

Cr-M-V강으로 총열을 제조하여 Fig. 4와 같은 스테인레스 열처리로에서 질화처리하였다. 그 방법은 액체 침질법의 한 종류인 염욕에 재료를 넣어 질소를 재료내에 확산시키는 연질화법을 사용하였다. 상부는 대기와 접촉해 있는 구조이며, 온도 조절이 가능한 열전대(Thermo couple)와 전 구간에서 동일한 온도를 유지하기 위한 팬이 설치되어 있다. 질화처리에 쓰는 약품은 나이트로(Nitro)로 주성분은 Na, K, Li,의 탄산염( $M_2CO_3$ )와 시안산염(MCNO)으로 되어있으며, 유기화합물인 복원제가 있다. 약품 소요량은 포트 용적(Liter)의 1.4~1.5배(kg)가 적당하며, 염의 액면은 열처리로 입구에서 15cm 아래에 있도록 하였다. 이때 온도가 일정수준보다 낮으면 염이 굳게 되고, 너무 높으면 투입소재 조직의 상변태(Phase transformation) 및 스테인리스 포트가 손상될 수 있으므로 주의가 필요하다.

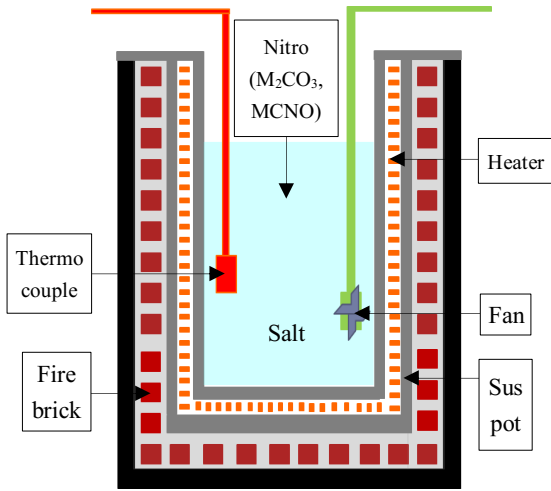


Fig. 4 Component of salt bath for nitriding process

### 3.2 재료 및 실험계획법(직교배열표)

본 실험은 자연의 유일한 해를 찾으려는 것보다 품질과 비용의 최적해를 구하려는 목적에서 출발된 것으로 다구치(Taguchi)의 직교배열표를 이용하여 가장 안정적인 주요인자의 조합을 찾아 최적화된 질화처리 공정을 도출하고자 하였다<sup>9-11)</sup>.

실험에 사용한 재료는 충열소재로 주로 사용되는 고크롬강인 Cr-Mo-V강으로 Table 1에 화학적 조성비를, Table 2에 기계적 성질을 나타내었다<sup>12)</sup>. Table 3은 최소실험횟수로 백층 생성경향 파악 및 분석을 통해 충열의 질화처리공정을 강건설계하고자  $L_9(3^4)$ 의 직교 배열표(Orthogonal array)에 각각의 수준을 배치하였다. 이때 배치한 제어인자(Control factor)는 특성요인도 및 계층분석을 통하여 질화층에 가장 큰 영향을 미치는 요인들이다.

직교배열표에 따라 9회 실험실시 후 주사전자현미경(Scanning electron microscope, SEM)으로 백층의 두께를 측정하고, 신호대 잡음비(Signal to noise, S/N)를 구하여 각 제어인자들이 출력인자(백층의 두께) 산포에 어떠한 영향을 미치는지 분석하였다. 또, 충열에서 백층두께별 내구성을 비교분석하기 위해 실제 검사규격에 따라 10,000발 사격 실시 후, 분산도 시험 및 충열 내경 표면을 관찰하여 백층의 탈락 유무를 비교하였다.

Table 1 Chemical composition of Cr-Mo-V steel (wt%)

Ingredient	Content	Unit
C	0.41~0.49	%
Si	0.20~0.35	%
Mn	0.60~0.90	%
P	0.040Max.	%
S	0.040Max.	%
Cr	0.80~1.15	%
Mo	0.30~0.40	%
V	0.20~0.30	%
Cu	0.35Max.	%
Al	0.04Max.	%

Table 2 Material characteristic of Cr-Mo-V steel

Ingredient	value	Unit
Young's module	205	GPa
Poisson's ratio	0.3	-
Density	7,850	kg/m <sup>3</sup>
Tensile yield strength	850	MPa
Tensile ultimate strength	1,020	MPa

Table 3 Orthogonal arrays( $L_9(3^4)$ )

Control factor	1 level	2 level	3 level
Temperature(°C)	555	565	575
Time(Hr)	1	2	3
Density(%)	1.0	0.5	1.5

No.	Temperature (°C)	Time (Hr)	Density (%)
1	1 level	1 level	1 level
2	1 level	2 level	2 level
3	1 level	3 level	3 level
4	2 level	1 level	2 level
5	2 level	2 level	3 level
6	2 level	3 level	1 level
7	3 level	1 level	3 level
8	3 level	2 level	1 level
9	3 level	3 level	2 level

## 4. 실험결과 및 고찰

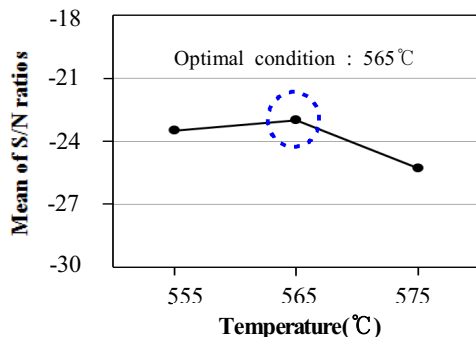
### 4.1 질화처리 조건에 따른 백층두께

Table 4는 질화처리 제어인자의 조합조건에 따른 백층두께 측정 결과이다. 경제적인 측면에서 낮은 온도, 짧은시간, 얇은 농도에서 작업했을 때 내구성을 만족시키는 조건을 찾는 것이 중요하다. 이러한 관점에서 백층두께를 망소특성으로 적용하여 Fig. 5와 같이 S/N비를 분석한 결과 가장 큰 영향을 주는 인자는 시간이었으며 이는 곧, 백층의 두께를 결정짓는 주효과라고 볼 수 있다.

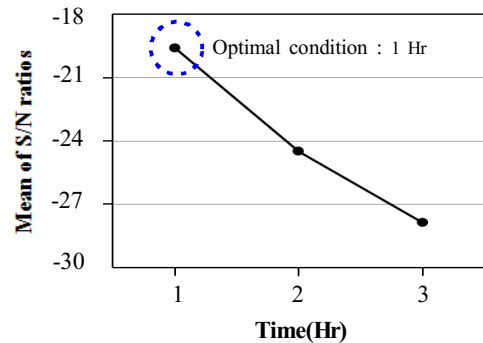
Table 4의 No. 4 조합인 염욕로 온도 565°C, 시간 1Hr, 질화제 농도 0.5%에서 백층의 두께가 최소인 6 $\mu$ m이 생성되었다. 이때, 온도 조건이 가장 낮은 555°C가 아닌 565°C에서 최소인 이유는 온도차 10°C가 실험오차 범위내의 매우 작은 값으로 백층 두께에는 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다.

Table 4 Thickness of white layer

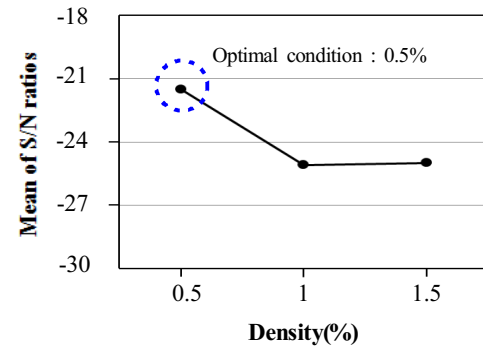
No.	Temperature (°C)	Time (Hr)	Density (%)	Thickness ( $\mu$ m)
1	1 level	1 level	1 level	11
2	1 level	2 level	2 level	12
3	1 level	3 level	3 level	25
4	2 level	1 level	2 level	6
5	2 level	2 level	3 level	18
6	2 level	3 level	1 level	26
7	3 level	1 level	3 level	13
8	3 level	2 level	1 level	22
9	3 level	3 level	2 level	24



(a) Control factor : Temperature



(b) Control factor : Time



(c) Control factor : Density

Fig. 5 Main effects plot(data means) for S/N ratios

### 4.2 백층두께에 따른 분산도 사격결과

백층두께와 내구수명의 상관관계를 확인하고자, 백층의 두께가 6 $\mu$ m, 13 $\mu$ m 및 25 $\mu$ m인 총열을 이용하여 10,000발 사격 후 내경 표면을 관찰하였고, 추가로 10발씩 20회 분산도 사격을 실시하였다.

10,000발 사격후 Fig. 2의 약실 부위를 SEM으로 관찰한 결과, Fig. 6 (C)와 같이 백층두께가 최소인 6 $\mu$ m일 때 모재로부터 백층의 탈락 정도가 가장 양호한 것으로 나타났다. 사격시 고온고압의 추진제 연소가스와 고속으로 마찰력을 발생시키는 탄자에 의해 모재는 고온의 영향으로 팽창하며, 냉각시 수축하는 과정을 반복하는데, 경도가 강한 백층이 많이 형성될수록 모재의 체적변화에 대한 유연성이 적어 탈락현상이 크게 나타난 것으로 판단된다<sup>[1]</sup>.

본 실험에서 실시한 5.56mm 총열의 분산도 규격

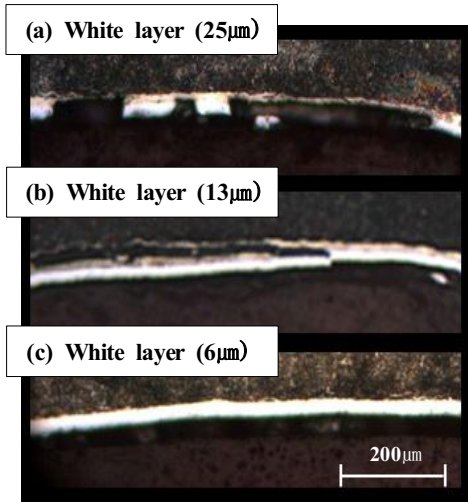


Fig. 6 Surface observation using scanning electron microscope photograph

Table 5 Result of dispersion shooting test according to each white layer thickness after 10,000 rounds shot(Cp : Process Capability)

Target	6µm	13µm	25µm
1	4.5	4.7	4.9
2	3.7	5.5	5.5
3	5.0	5.3	6.2
4	4.8	6.1	4.7
5	4.9	4.9	6.5
6	4.9	4.9	7.1
7	4.7	4.4	7.0
8	4.0	4.3	5.5
9	4.8	5.3	5.8
10	4.7	5.9	5.9
11	4.5	5.2	5.2
12	5.0	5.3	4.9
13	4.3	5.1	4.5
14	3.8	5.0	6.5
15	4.3	4.9	6.4
16	4.7	5.5	7.0
17	4.3	6.2	5.8
18	3.9	5.8	5.1
19	4.5	4.8	5.2
20	4.8	4.8	5.0
Average	4.5	5.2	5.7
Process capability	4.4 sigma (Cp1.97)	2.9 sigma (Cp1.48)	1.4 sigma (Cp0.97)

은 사격발수 6,000발까지 4.8inch 이내 수준을 유지하는 것이다. 본 실험에서는 3가지 총열 모두 6,000발까지 분산도 규격을 만족하였고, 뚜렷한 비교를 위해 사격발수를 4,000발 추가하여 10,000발 사격후 분산도를 측정 하였으며, 그 결과를 Table 5에 나타내었다. 분산도 평균(Average) 비교결과 백층두께 6µm의 총열은 규격을 만족하였으며, 나머지 총열은 규격을 벗어남을 알 수 있었다. 이는 총열내경 표면의 백층이 다량 탈락되어 내경이 확장되고 탄약의 추진제 연소가스가 확장된 틈새로 새어 나가면서 탄자에 전달되는 운동에너지가 불균일해짐에 따라 발생한 것으로 사료된다<sup>11)</sup>.

또한, 총열의 표면상태에 따라 나타나는 분산도의 품질편차를 확인하기 위해 분산도 사격 결과를 토대로 상한 4.8inch, 하한 0inch로 하여 공정능력(Process Capability, Cp)을 분석하였다. 그 결과 백층두께 6µm에서 Cp값이 1.97로 가장 양호한 것으로 나타났으며, 분산도 규격을 만족하지 못했던 13µm의 총열에서도 Cp값이 1보다 큰 1.48로 분산도의 표준편차는 비교적 양호한 것으로 나타났다. 그러나 백층두께가 가장 큰 25µm의 총열에서는 Cp값 0.97로 불안정한 상태인데 백층탈락이 심하여 내경확장이 가장 많이 발생함에 따라 나타난 현상으로 설명할 수 있다<sup>11)</sup>. 추가로 규격중심으로 부터 한쪽 규격까지 표준편차의 분포를 나타내는 시그마수준을 분석해본 결과 마찬가지로 백층두께 6µm의 총열에서 6시그마에 가장 근접한 4.4시그마로 가장 양호했다.

아울러, 분산도 4.8in 이내 규격을 만족하는 백층 두께를 추정하기 위해 분산도 결과를 이용하여 회귀분석(Regression analysis)을 실시한 결과 백층두께를 최대 9µm으로 작업할 경우 분산도 규격을 만족할 것으로 예측할 수 있다.

#### 4. 결론

다구찌(Taguchi) 실험계획법을 이용하여 소구경화기(Small Arms) 총열 Cr-Mo-V강 내부의 질화공정 최적조건을 찾기 위해 주요인자인 염욕로 온도, 작업시간, 질화제 농도 3가지 파라미터(Parameter)를

직교배열표에 배치하고, 실험하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

질화공정으로 생성된 백층(White layer)두께의 결과를 신호대 잡음비(Signal to noise, S/N) 분석을 통해 얻은 최적조건은 염욕로 온도 565℃, 작업시간 1Hr, 질화제 농도 0.5%이며, 가장 큰 영향을 미치는 인자는 작업시간이다. 이에 따라 시간을 10분 단위로 조정통제하면 보다 효과적인 공정설계가 가능할 것으로 예측된다. 또한, 백층두께에 따른 내구수명 비교평가를 위해 10,000발 사격 후 표면관찰 및 분산도(Degree of dispersion, D) 사격시험(규격 : 4.8 inch max.)을 실시한 결과 6 $\mu$ m의 백층이 생성된 총열에서 가장 우수한 것을 확인하였다. 이때, 백층두께 6 $\mu$ m이 생성된 질화공정 조건은 S/N비 값으로 분석된 최적조건과 동일하였으며, 내구수명을 백층두께 6 $\mu$ m일 때와 동일수준으로 유지가능한 범위를 추정하기 위해 백층두께별 분산도 사격결과를 회귀분석(Regression analysis)한 결과 최대 9 $\mu$ m임을 알 수 있었다.

향후, 확인된 질화처리 조건과 크롬도금을 복합하여 계면의 인터페이스 특성을 분석하고 기계적 특성을 평가하고자한다. 이를 통해 비효율적 공법에 따른 과도한 가공비(공수, 인시수, 품질관리, 소재비) 절감과 내부 표면처리 성능향상의 효과를 동시에 얻을 수 있을 것이다.

## REFERENCES

1. Lee, H. J., Rifle and Ballistics, Chung Moon Gak, pp. 91-107, 1994.
2. Oh, K. K., Kim, J. H., Choi, H. S., "Effect of Nitriding on Fatigue Characteristics of Cr-Mo Alloy Steel," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 39, No. 6, pp. 597-602, 2015.
3. Kim, M. W., Kim, K. H., Kang, M. C., Cho, S. H., Ryu, K. T., "Mechanical properties and cutting performance of Cr-Al-N hybrid coated micro-tool for micro high-speed machining of flexible fine die," Current Applied Physics, 12, S14-S18, 2012.
4. Wang, B., Zhao, X., Li, W., Jianfeng Gu, M. Q., "Effect of nitride-layer microstructure control on wear behavior of AISI H13 hot work die steel," Applied Surface Science 431, pp. 39-43, 2018.
5. Pinedo, C. E., Monteiro, W. A., "Surface hardening by plasma nitriding on high chromium alloy steel," Journal of materials science letters, Vol. 20, No. 2, pp. 147-150, 2001.
6. Golański, G., Pietryka, I., Slania, J., Mrozińskis, S., Jasak, J., "Microstructure and Mechanical Properties of CRMOV Steel after Long-term Service," Archives of Metallurgy and Materials, Vol. 61, No.1, pp. 51-54, 2015.
7. Zhao, J., Han, S. Q., Gao, H. B., Wang, L., "Remaining life assessment of a CrMoV steel using the Z-parameter method," International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 81, No. 9, pp. 757-760, 2004.
8. Jeong, H. D., "A study on the Variation of Mechanical Properties Due to Thermal Aging in 2.5Cr-1Mo Boiler Tube Steel," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 20, No. 5, pp. 1372-1381, 1996.
9. Kim, J. K., Kim, J. S., Lee, J. H., Kwak, J. S., "A Study on the Optimization of the Dimensional Deviation due to the Shortening of the Cycle Time for Rear Cover of Mobile Phone," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 16, No. 6, pp. 117~124. 2017.
10. Song, W. J., Lee, E. S., "A Study on the Optimal Conditions of Hole Machining of Microplate by Application of Response Surface Methodology in Wire-Pulse Electrochemical Machining," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 16, No. 5, pp. 141~149, 2017.
11. Kim, K. M., "Optimization of Sheet Metal Forming Process Using Mahalanobis Taguchi System," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15, No. 1, pp. 95-102, 2016.
12. MIL-B-11595E(1988), "Bar, Metal and Blanks, Steel (Under 2 Inches in Diameter) for Barrels Of Small Arms Weapons," Retrieved 26, July., 2004, from <http://quicksearch.dla.mil>.