

강선을 최적설계에 관한 연구

A Study on the Optimal Design of Rifling Rate

차 기 업*

Ki-Up Cha

이 영 현*

Young-Hyun Cha

이 성 배*

Sung-Bae Lee

조 창 기*

Chang-Ki Cho

Abstract

Rifling force has a torsion impulse effect on the gun tube and thus generates undesirable vibration of the gun tube about its bore axis, putting additional stress on the projectile. High rifling force at the muzzle of the gun tube may adversely influence the trajectory of the projectile. And, the service life of rifled gun barrels is known to depend on the rifling force. Rifling force along the path of the projectile in the longitudinal direction of the gun tube can be described with projectile mass, projectile velocity, gas pressure curve and rifling angle. Under the same conditions, the character of the rifling of the gun barrel decisively influences the rifling force curve. To reduce the above mentioned harmful effect, locally distinct maximum of rifling force has to be avoided and maximum rifling force needs to be minimized. The best way to minimize the maximum rifling force is to design a rifling angle function so that the rifling force curve has a near trapezoidal shape.

In this paper a new approach to make the optimal rifling force curve is described. The rifling angle determining the rifling force is developed by combined Fourier series and polynomial function to satisfy both the convergence and boundary condition matching problems.

Keywords : Optimal Design(최적설계), Rifling(강선), Rifling Force(강선력), Rifling Rate(강선율), Rifling Angle(강선각)

1. 서론

포장으로 표현되는 포열 내부는 탄약을 장전하는 약실부와 탄에 회전력을 전달하는 강선부로 구성된다. 강선부는 강선(land)과 강저(groove)로 이루어져 있으며, 일반적으로 강선의 단면은 사각형 모양을 갖는다. 강선의 직경을 포열의 통칭 직경, 즉 구경이라 한다.

탄에 전달되는 회전력은 강선각에 의해 이루어지는데 강선각(α)은 나사의 피치각과 유사하며 포강 중심선과 강저면의 접선이 이루는 각을 말한다. 강선율은 강저면의 접선 기울기($\tan \alpha$)가 된다.

강선력은 탄띠(rifling band)와 강선의 접촉면에 수직으로 발생하는 힘으로 탄의 중량, 탄의 속도, 강내 압력 및 강선각 등의 함수로 나타낼 수 있다. 이러한 강선력은 포열에 비틀림 충격을 발생시켜 불필요한 진동요소로 작용하게 되며 탄띠에 부가적인 응력을 발생시키게 된다. 특히 탄이 포구를 이탈하는 시점에서 강선력이 크다면 탄의 출발탄도에 영향을 미쳐 분산

† 2010년 8월 6일 접수~2010년 11월 19일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 차기업(undersea@add.re.kr)

도에 좋지 않은 영향을 줄 수 있다. 또한 포열의 마모 수명은 강선력과 밀접한 관계가 있는데 예를 들어 일정한 강선율을 갖도록 강선각을 설계하게 되면 강내 압력이 최대가 되는 지점에서 국부적으로 큰 강선력이 발생되며 강선에 집중응력을 발생시킴으로써 포열 수명을 감소시키는 요인이 된다.

따라서 이와 같은 현상을 해소하기 위해 강선력을 최소화 할 수 있는 방안이 강구되어야 한다. 강선력은 모든 조건(탄 중량, 강내 압력 등)이 동일한 경우 강선각 또는 강선율의 함수로 나타나게 되며 강선각 함수의 선택 여하에 따라 강선력을 최소화 할 수 있는 가능성이 있음을 확인할 수 있다.

결국 본 연구에서 목표로 하는 강선을 최적 설계는 사격시 강선에 작용하는 강선력의 크기를 최소화 시켜 특정 부위에 발생할 수 있는 국부적인 집중 하중을 분산시킴으로써 포열 수명을 증대시키고, 탄의 강내·외 탄도특성을 향상시킬 수 있도록 강선각을 산출하는 과정이 된다.

본 연구에서는 강선각의 함수를 일반화 하기 위해 다항식과 푸리에 급수의 합으로 표시하는 새로운 방법을 적용하였으며, 최적화 알고리즘을 사용하여 강선력을 최소화하는 강선각을 산출하였다.

2. 강선력의 유도

Fig. 1은 강선의 단면으로 각 기호는 강선경(D), 강저경(D_z), 강선폭(f), 강선깊이(t)와 강저폭(b)을 나타낸다.

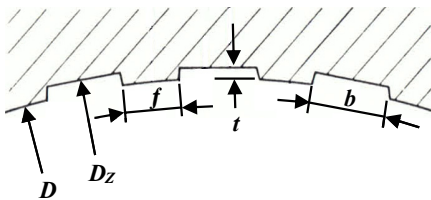


Fig. 1. 강선의 단면

Fig. 2는 탄이 추진가스 작용력에 의해 포장을 이동할 때 강선과의 사이에 발생하는 작용력을 나타낸 그림으로 강저면을 포함하는 접선 평면에 대하여 힘과 모멘트 평형 관계를 적용함으로써 강선력($R(x)$)을 유도할 수 있다. 먼저 탄저면에 작용하는 추진가스 작용

력($P(x)$)은 강내압력($p(x)$)를 사용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

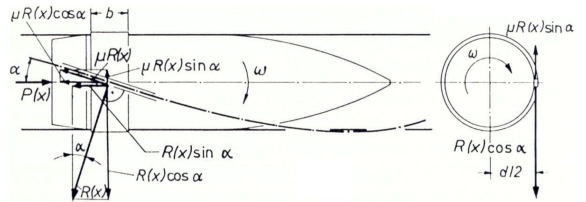


Fig. 2. 탄에 나타나는 작용력 도해^[1]

$$P(x) = p(x) \left(\frac{\pi}{4} D^2 + nbt \right) \quad (1)$$

여기서 x 는 탄 진행방향을 n 은 강저의 수를 나타낸다.

x 방향의 힘 평형조건으로부터

$$m_p \frac{dv}{dt} = P(x) - R(x) [\sin \alpha(x) + \mu \cos \alpha(x)] \quad (2)$$

x 방향에 대한 모멘트 평형조건으로부터

$$J_p \frac{d\omega}{dt} = R(x) [\cos \alpha(x) - \mu \sin \alpha(x)] \frac{D}{2} \quad (3)$$

여기서 m_p : 탄 질량, v : 탄 속도, μ : 마찰계수, $\alpha(x)$: 강선각, J_p : 탄의 질량 관성 모멘트, ω : 각속도를 나타낸다.

탄의 각속도(ω)와 속도(v)는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{2}{D} v \tan \alpha(x) = \frac{2}{D} v \frac{dy}{dx} \\ \rightarrow \frac{d\omega}{dt} &= \frac{2}{D} \left(\frac{dv}{dt} \frac{dy}{dx} + v^2 \frac{d^2y}{dx^2} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

여기는 y 는 강선각의 형상곡선이며 $\frac{dy}{dx}$ 는 강선율을 나타낸다.

(4)식을 (3)식에 대입하여 정리하면

$$R(x) = J_p \left(\frac{2}{D} \right)^2 \frac{\frac{dv}{dt} \frac{dy}{dx} + v^2 \frac{d^2y}{dx^2}}{\cos \alpha(x) - \mu \sin \alpha(x)} \quad (5)$$

여기서 강선각($a(x)$)이 매우 작으므로

$$\begin{aligned} \mu \sin \alpha(x) &\approx 0, \cos \alpha(x) \approx 1 \\ P(x) &= m_p \frac{dv}{dt}, \mu R(x) \ll P(x) \end{aligned} \quad (6)$$

(6)식을 (5)식에 적용하면 다음식과 같이 단순화된 강선력을 얻을 수 있다.

$$R(x) = \frac{4}{D^2} \frac{J_p}{m_p} \left[\frac{dy}{dx} P(x) + \frac{d^2y}{dx^2} v^2 m_p \right] \quad (7)$$

3. 강선율과 강선력의 관계

(7)식에서 확인할 수 있듯이 강선력은 구경, 탄 질량, 추진가스 작용력, 탄 속도, 탄의 질량 관성모멘트 및 강선율로 나타낼 수 있다. 따라서 탄종에 따라 포신 길이에 따른 강선력 곡선이 결정되며 일정한 탄종에 포신의 강선율을 달리함으로써 강선력을 변화시킬 수 있게 된다.

강선을 차이에 따른 강선력의 변화를 살펴보도록 하겠다.

가. 강성율이 일정한 경우

강성율이 일정하다는 것은 강선 시작점에서의 강선율(a_i)로부터 포구 끝단의 강선율(a_e)까지가 동일하다는 것으로 강선율과 강선율의 도함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dx} &= \tan \alpha_i = \tan \alpha_e \\ \frac{d^2y}{dx^2} &= 0 \end{aligned}$$

(7)식으로부터 강선력은 다음과 같이 정리된다.

$$R(x) = \frac{4}{D^2} \frac{J_p}{m_p} P(x) \tan \alpha_e \quad (8)$$

Fig. 3은 일반적인 강내압력 곡선을 나타낸다. 추진제가 점화된 직후 급격한 가스팽창을 통해 강선 시작점 부위에서 최대가 되었다고 포구쪽으로 가면서 점

차 낮아지게 된다.

(8)식에 따른 강선력 곡선을 Fig. 4에 예시하였다. 그림을 살펴보면 강선력은 추진가스 작용력(또는 강내압력)에 정비례하므로 강내압력이 최대가 되는 지점, 즉 강선 시작위치에서의 강선력이 최대가 되게 된다. 강선 시작위치에서는 가스온도 또한 매우 높기 때문에 탄 밴드와 강선 모두 심한 응력을 받게 된다.

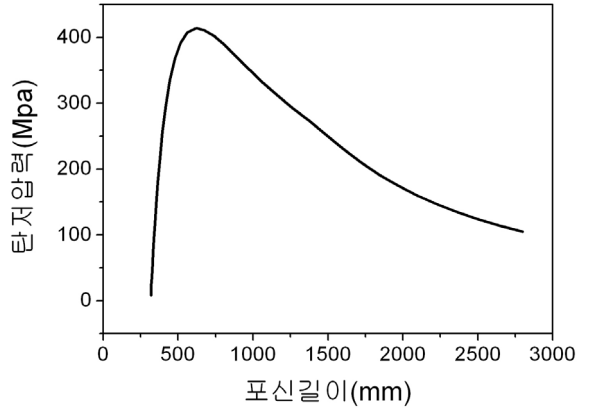


Fig. 3. 강내압력 곡선 예시

반면에 포구에서의 강선력은 낮기 때문에 포구를 이탈하는 순간에 탄에 작용하는 영향력이 작아지고 출발탄도의 오차가 상대적으로 작아서 탄 분산 또한 상대적으로 양호해 질 것으로 판단된다.

나. 강성율이 1차 함수형인 경우

1차 함수형의 강선율과 도함수는 다음과 같다.

$$\frac{dy}{dx} = c_1 x + c_2 \rightarrow \frac{d^2y}{dx^2} = c_1$$

아래의 경계조건을 적용하면,

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dx} &= \tan \alpha_i \quad \text{at } x = x_s \text{ (강선 시작위치)} \\ \frac{dy}{dx} &= \tan \alpha_e \quad \text{at } x = x_e \text{ (강선 끝위치)} \\ \rightarrow c_1 &= \frac{\tan \alpha_e - \tan \alpha_i}{x_e - x_s}, \quad c_2 = \tan \alpha_i \end{aligned}$$

(7)식으로부터 강선력은 다음과 같이 정리된다.

$$R(x) = \frac{4}{D^2} \frac{J_p}{m_p} [P(x) \tan \alpha_i + \frac{P(x)x + m_p v^2(x)}{x_e - x_i} (\tan \alpha_e - \tan \alpha_i)] \quad (9)$$

(9)식에 따른 강선력 곡선을 Fig. 4에서 확인할 수 있다. 강선율이 일정한 경우와 비교하여 전체적으로 일정한 값을 갖지만 포구 끝에서의 강선력은 매우 크다.

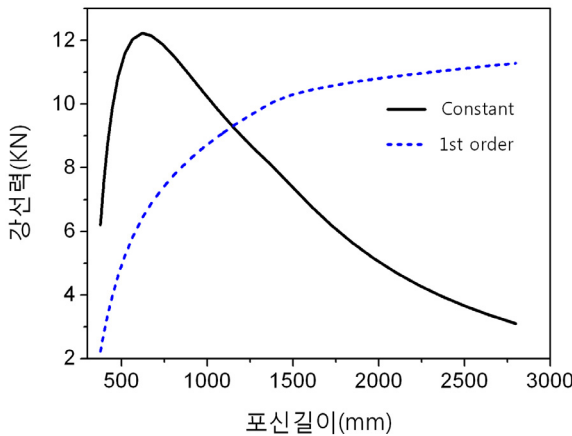


Fig. 4. 강선율에 따른 강선력 곡선

다. 2차 함수형 강선율의 경우

2차 함수형의 경우 강선력 곡선은 강선 시작점에서부터 완만하게 상승하고, 포구 끝으로 가면서 점진적으로 감소되어 전체적으로 언덕 형태를 이루게 된다. 일정한 강선율의 경우와 비교하면 강선력의 최고값은 작고 포구 끝에서의 크기는 유사하게 된다.

4. 강선율 최적 설계

강선율 최적 설계는 사격시 강선에 작용하는 강선력의 크기를 최소화 시켜 특정 부위에 발생할 수 있는 국부적인 집중 하중을 분산시킴으로써 포열 수명을 증대시키고, 탄의 강내·외 탄도특성을 향상시킬 수 있도록 강선각을 산출하는 과정이 된다. (7)식에서 강선력은 모든 조건이 동일한 경우에 강선율의 함수로 정의되며 앞 절을 통해 몇 가지 강선율 함수를 적용하여 강선력의 변화를 확인한 바 있다. 따라서 강선율

함수(또는 강선각 함수)의 선택 여하에 따라 강선력을 최소화 할 수 있는 가능성이 있음을 예상할 수 있다.

가. 목적함수의 정의

최소화 하고자 하는 대상은 강선력이므로 강선력의 최대값을 최소화 시키면 된다.

$$\text{minimize } J = \text{maximum } R(x) \quad (10)$$

모든 제한조건을 만족하는 수많은 강선력 함수 중에서 그 최대값이 가장 작은 $R^*(x)$ 를 구하면 된다.

나. 강선각 함수의 전개

강선율($\frac{dy}{dx}$)과 강선각($\alpha(x)$)은 다음과 같은 관계에 있다.

$$\frac{dy}{dx} = \tan \alpha(x)$$

따라서, 강선력은 강선각의 함수로 나타낼 수 있으며 최적의 강선력 함수($R^*(x)$)를 구하기 위해서는 변수인 강선각 함수($\alpha(x)$)에 대해 함수전개가 필요하기 된다.

일반적으로 변수의 함수 전개에 가장 많이 사용되는 함수는 다항식과 푸리에 함수가 있다. 다항식 함수는 주어진 경계조건을 정확히 만족하는 장점이 있는 반면 항의 수를 증가시켜도 수렴성이 보장되지 않는 단점이 있다. 반면 푸리에 함수는 항의 수를 증가시킬수록 수렴성이 보장되는 장점이 있는 반면 경계조건을 만족시키지 못하는 단점이 있다.

Krumm^[2]은 강선각 함수를 푸리에 함수로 전개하여 강선력을 최적화하는 방안에 대해 특허를 제출한 바 있다. 그러나 특허 내용 중에는 경계조건 처리에 대한 방안은 언급하지 않고 있다. 박경조^[3]와 이영현^[4]은 잔류진동 감소를 위한 경로설계에서 설계변수인 경로에 대해 다항식과 푸리에 함수를 결합한 방식을 적용하여 경로를 전개시킨 바 있다. 본 연구에서도 다항식과 푸리에 함수를 결합하여 두 함수의 장점만을 갖는 함수 전개를 통해 강선각 함수를 정의하고 이를 통해 목적함수인 강선력을 최소화 하고자 한다.

설계변수를 푸리에 함수로만 전개했을 경우 수렴성은 경계조건 내부에서만 보장되며, 설계변수가 최적해에 수렴해도 설계변수의 도함수가 최적해의 도함수에

수렴한다는 보장이 없으며 수렴속도가 느려질 수 있는 단점이 있다. 다항식을 푸리에 함수와 결합함으로써 상기의 단점을 보완할 수 있게 되는데 다항식과 푸리에 함수를 결합한 형태의 강선각 함수는 다음과 같다.

$$\alpha(x) = \sum_{i=0}^k a_i x^i + \sum_{j=1}^l b_j \cos \frac{j\pi x}{(x_e - x_i)} \quad (11)$$

다항식의 상수(a_i)를 아래의 제한조건을 통해 푸리에 함수의 상수(b_j)로 나타낼 수 있게 된다.

$$\alpha(x_e) = \alpha_e \quad (12)$$

$$\frac{d\alpha(x)}{dx} = 0 \text{ at } x = x_i \quad (13)$$

$$\frac{d\alpha(x)}{dx} = 0 \text{ at } x = x_e \quad (14)$$

$$\Delta\alpha \leq x.x \quad (15)$$

제한조건 (12)는 강의탄도로부터 산출된 항목으로 포구로부터 탄이 출발할 때의 강선각을 규정한 수치이다.

제한조건 (13)과 (14)는 강선각 변화율로 강선 시작과 끝점에서의 강선력 변화를 최소화하기 위해 “0”으로 설정하였다. 제한조건 (15)는 탄 밴드와 관련된 항목으로 탄이 강선을 따라 전진하면서 강선각에 의해 발생하는 탄 밴드의 소성범위를 제한하기 위한 수치로 이 값 이상의 각도 변화에서는 무리한 소성변형에 의해 탄 밴드가 기능을 상실할 수 있게 된다.

제한조건 (15)는 최적화 과정 중에서 산출된 수치에 대해 만족 여부를 확인하기 위한 조건으로 다항식과 푸리에 함수 상수간의 연계성 산출에는 사용되지 않는다.

제한조건 (12)~(14)을 적용하여 다항식 상수를 정리하면 다음과 같다.

$$a_1 = \frac{\pi}{(x_e - x_i)^2} \left[x_e \sum_{j=1}^l j b_j \sin \frac{j\pi x_i}{(x_e - x_i)} - x_i \sum_{j=1}^l j b_j \sin \frac{j\pi x_e}{(x_e - x_i)} \right] \quad (16)$$

$$a_2 = \frac{\pi}{2(x_e - x_i)^2} \left[\sum_{j=1}^l j b_j \left(\sin \frac{j\pi x_e}{(x_e - x_i)} - \sin \frac{j\pi x_i}{(x_e - x_i)} \right) \right] \quad (17)$$

$$a_0 = \alpha_e - a_1 x_e - a_2 x_e^2 - \sum_{j=1}^l b_j \cos \frac{j\pi x_e}{(x_e - x_i)} \quad (18)$$

다. 최적화 프로그램

제한조건이 부과되어 있는 임의의 목적함수를 최소화하기 위한 최적화 프로그램으로 “PCON”^[5]을 사용하였다. “PCON”은 변화율(도함수)를 구하지 않고 2차 함수의 외삽법을 기본으로 한 직접탐색(direct search)을 수행하는 POWELL 알고리즘과 SUMT(Sequential Unlimted Minimization Technique) 알고리즘을 결합한 최적화 프로그램이다.

라. 최적설계 대상 모델

강선을 최적설계 모델은 40mm 구경의 포신을 대상으로 하였으며 사용한 제원은 다음과 같다.

- $D = 40\text{ mm}$
- $J_p = 0.42\text{ kg-m}^2$
- $m_p = 0.52\text{ kg}$
- $x_e - x_i = 2,783\text{ mm}$

포구 끝단에서의 강선각(a_e)은 강의탄도를 동일하게 유지하기 위해 6.64°를 사용하였다.

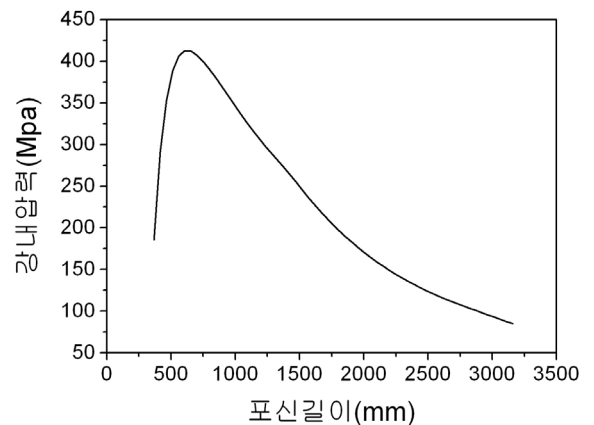


Fig. 5. 대상 모델의 강내압력 곡선

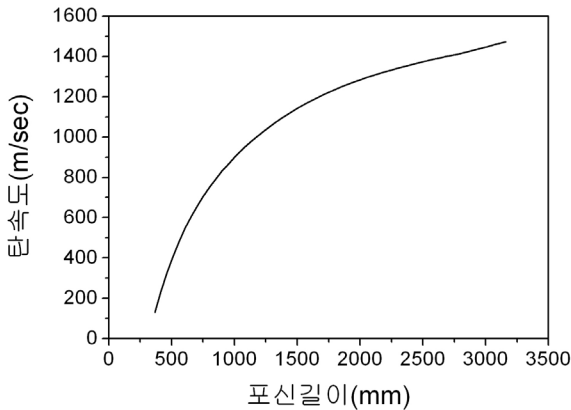


Fig. 6. 대상 모델의 탄속도 곡선

또 다른 입력으로는 Fig. 5와 Fig. 6의 강내압력 곡선과 탄 속도 곡선을 사용하였다.

그밖에 식 (15)의 제한조건으로 $\Delta a = 2.73^\circ$ 를 사용하여 탄 밴드의 재 설계 없이 사용이 가능토록 강선각을 설계하였다.

5. 최적설계 결과 고찰

가. 강선력 및 강선각의 최적화 결과

푸리에 함수의 상수 항(b) 개수 l 은 컴퓨터의 연산 능력과 최적해로의 수렴성에 따라 증가시킬 수 있으며 본 연구에서 $l = 10$ 으로도 충분하였다.

2차 다항식과 푸리에 함수로 이루어진 강선각 함수에 대해 최적화 프로그램을 적용하여 목적함수인 강선력을 최소화하여 Table 1의 다항식 계수와 Table 2와 같은 10개의 푸리에 함수의 상수를 얻을 수 있었다.

Fig. 7과 8은 산출된 다항식과 푸리에 계수로 계산된 최적 강선각과 강선력 곡선을 나타낸다. 강선력 곡선은 발생하는 최대값을 최소화하겠다는 당초의 목표를 충실히 반영한 형태 즉, 국부적인 최대치가 없는 사다리꼴 형태로 산출 되었음을 확인할 수 있다. 강선력 최대값은 8.307kN으로 계산되었다.

Table 1. 최적화된 다항식 함수의 상수항

a_1	a_2	a_3
6.1241	-0.4491	-0.0032

Table 2. 최적화된 푸리에 함수의 상수항

b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
-2.1420	-0.0116	0.0174	-0.0339	0.0366
b_6	b_7	b_8	b_9	b_{10}
0.0026	0.0080	0.0029	-0.0004	-0.0015

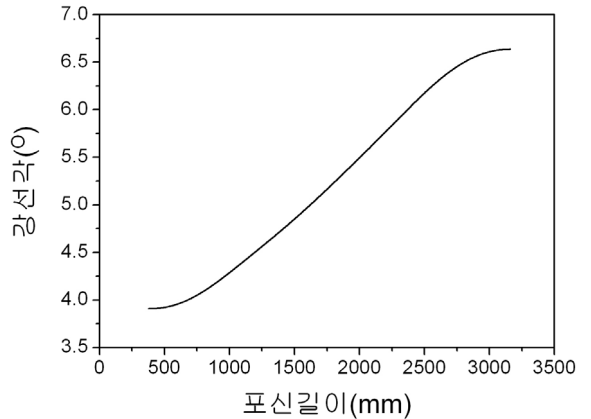


Fig. 7. 최적화 강선각 곡선

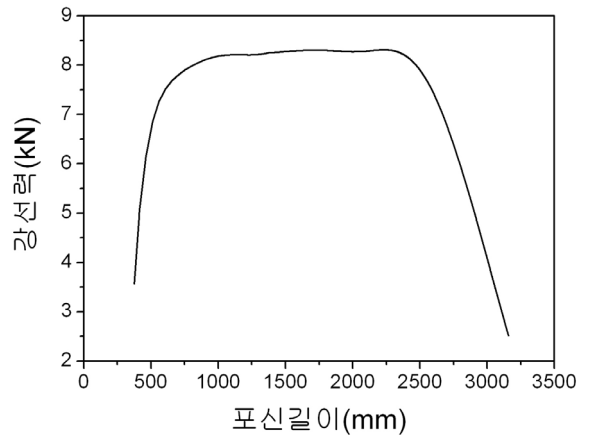


Fig. 8. 최적화 강선력 곡선

나. 강선을 함수에 따른 비교

앞서 언급한 바와 같이 강선을 함수의 선택에 따라 여러 가지 강선력 곡선을 얻을 수 있다. 3가지 강선율 함수의 강선력 곡선을 통해 최적화된 강선력 곡선의 개선 효과를 확인하였다.

강선율이 일정한 경우와 1차 함수형의 경우는 강선

율과 그 도함수에 대해 3절에서 확인할 수 있다.

2차형 함수인 강선율과 그 도함수는 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\tan\alpha_i - \tan\alpha_e}{(x_e - x_i)} x^2 + \frac{2x_e(\tan\alpha_e - \tan\alpha_i)}{(x_e - x_i)^2} x + \tan\alpha_i - \frac{\tan\alpha_i - \tan\alpha_e}{(x_e - x_i)^2} x_i^2 - \frac{2x_e(\tan\alpha_e - \tan\alpha_i)}{(x_e - x_i)^2} x_i$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{2(\tan\alpha_i - \tan\alpha_e)}{(x_e - x_i)^2} x + \frac{2x_e(\tan\alpha_e - \tan\alpha_i)}{(x_e - x_i)^2}$$

Fig. 9는 각 경우의 강선력 곡선을 나타낸다.

각 강선율에 따른 최대 강선력과 최적 강선력을 기준으로 한 비율은 Table 3에 정리하였다. Fig. 9와 Table 3에서 일정한 강선율과 2차 함수형 강선율의 경우 최대 강선력은 각 47% 및 20% 증가하는 것을 확인할 수 있으며 포구 끝단에서의 강선력은 최적 강선력과 동일하게 된다. 1차 함수형 강선율의 경우 전체적으로 균등한 강선력을 나타내고 있으나 포구 끝단에서의 강선력(6.59kN)은 최적 강선력(2.52kN) 대비 2.6 배 이상 크게 나타나게 된다. 최적 강선력의 경우 강선 시작부위나 포구 부위에서 발생하는 강선력을 최소화 시킴으로써 강선 내마모성을 증가시킬 수 있으며 포구 끝에서의 출발탄도 특성을 향상시킬 수 있게 된다.

Fig. 10은 각 경우의 강선각 함수로 최적 강선각의 경우 강선 시작점에서의 변화율(da/dx)이 “0”으로 시작하여 완만하게 증가하며 강선의 중간위치에서는 변화율이 거의 일정하므로 강선력은 더 이상 증가하지 않게 되며 강선 끝으로 갈수록 변화율은 다시 작아져 결국 강선 끝에서 다시 “0”이 되게 된다. 따라서 강선 시작 위치에서 발생하는 강선력의 최대값을 가능한 감소시키고 강선 끝 위치에서의 강선력을 최소화시키기 위해서는 양 끝점에서의 변화율은 항상 “0”이 되도록 제한 조건을 설정할 필요가 있는 것이다.

Table 3. 강선율에 따른 최대 강선력 비교

항목	최적	일정	1차	2차
최대값(kN)	8.307	12.193	9.157	9.966
비율(%)	100	147	110	120

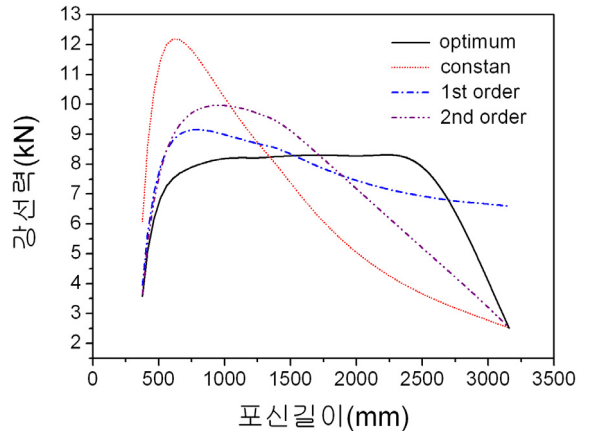


Fig. 9. 강선율에 따른 강선력의 비교

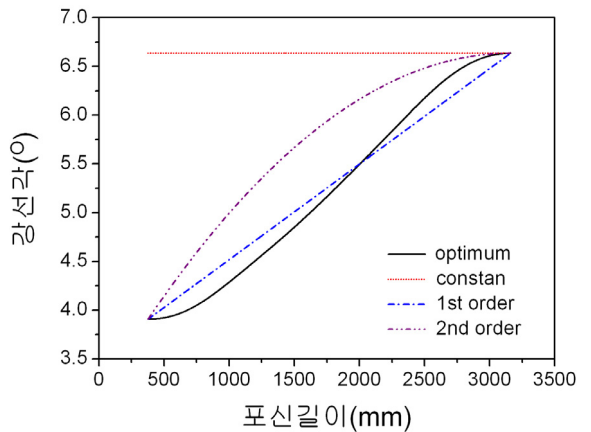


Fig. 10. 강선율에 따른 강선각 비교

6. 결론

강선력은 동일 조건하에서는 강선각 또는 강선율의 함수로 나타낼 수 있으며 강선각 함수의 선택 여하에 따라 강선력 곡선이 변화하게 된다. 본 연구에서 목표로 하는 강선을 최적 설계는 사격시 발생하는 최대 강선력을 최소화하여 특정 부위에 발생할 수 있는 국부적인 집중 하중을 분산시킴으로써 포열 수명을 증대시키고, 탄의 강내·외 탄도특성을 향상시킬 수 있도록 강선각을 산출하는 과정이 된다.

본 연구에서는 강선각의 함수를 일반화하기 위해 다항식과 푸리에 급수의 함수로 표시하는 새로운 방법을 적용하였으며, 최적화 알고리즘을 사용하여 강선력을

최소화하는 강선각을 산출하였다.

일정한 강선율과 2차 함수형 강선율에 따른 최대 강선력 대비하여서는 최적 강선력을 각각 32%, 17% 감소시킬 수 있었다.

본 연구 결과를 적용하여 소·중·대구경 화기의 최적화된 강선 설계가 가능하다.

References

- [1] G. Backstein et al., "Handbook on Weaponry", Rheinmetall GmbH, pp. 576~578, 1982.
- [2] Herbert Krumm, "Gun Barrel Equipped with Optimized Rifling", United States Patent No. 5,077,926, 1992.
- [3] Park, Kyung Jo, "Robot Path Design to Reduce Tip Residual Vibration", Ph D Thesis, Department of Mechanical Engineering, KAIST, pp. 65~68, 1992.
- [4] Lee, Young Hyun, "Path Design to Reduce Residual Vibration for a Two-Link Mechanism and its Experimental Test", MS Thesis, Department of Mechanical Engineering, KAIST, pp. 39~40, 1994.
- [5] C. H. Suh, "Computer Aided Design of Mechanisms, Part B", Panghan Publishing Company, pp. 845~873, 1984.