

Research Paper 지상무기 부문

이상적인 강선력 곡선에 의한 강선각 설계기법

차기엽^{*,1)} · 안상태¹⁾ · 조창기¹⁾ · 최의중¹⁾

¹⁾ 국방과학연구소 제5기술연구본부

A Study on the Design of Rifling Angle by Setting up an Idealized Rifling Force Curve

Kiup Cha^{*,1)} · Sangtae Ahn¹⁾ · Changki Cho¹⁾ · Euijung Choi¹⁾

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

(Received 3 February 2014 / Revised 18 August 2014 / Accepted 12 December 2014)

ABSTRACT

Rifling Force can be described with projectile velocity, gas pressure and rifling angle, etc. Under the same conditions, the character of the rifling angle decisively influences the rifling force. To reduce the harmful effect, locally distinct maximum of rifling force has to be avoided. The optimal design methodology of rifling angle curve had been developed by combined Fourier series and polynomial function. When it was tried newly to design the rifling angle curve, this design trial caused not to produce the lower rifling force than the existing design. Normally, the curve of the rifling angle is designed first, then the rifling force is set according to the rifling angle curve. However during the cause analysis, new design methodology was established to design the ideal rifling force curve before the rifling angle design. With this new methodology, the above optimal design method was analyzed and its limitation was confirmed.

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

기 호 설 명

a_i 다항식 계수
 b_j 푸리에 함수의 계수
 D 직경
 J_p 탄의 질량 관성 모멘트

m_p 탄 질량
 $p(x)$ 강내압력
 $P(x)$ 추진가스 작용력
 $R(x)$ 강선력
 $v(x)$ 탄 속도
 x 포열 위치
 α 강선각
 dy/dx 강선율(= $\tan \alpha(x)$)
 d^2y/dx^2 강선율 도함수

* Corresponding author, E-mail: undersea@add.re.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

1. 서론

포강으로 표현되는 포열 내부는 탄약을 장전하는 약실부와 탄에 회전력을 전달하는 강선부로 구성된다. 강선부는 강선과 강저로 이루어져 있으며, 일반적으로 강선의 단면은 사각형 형상을 갖는다. 탄의 회전은 강선각에 의해 이루어지는데 강선각은 나사의 피치각과 유사하며 포강 중심선과 강선의 접선이 이루는 각을 말한다. 강선력은 탄피와 강선의 접촉면에 수직으로 발생하는 힘으로 탄의 중량, 탄의 속도, 강내압력, 강선율 및 강선을 도함수의 함수로 나타낼 수 있다. 탄종이 정해지면, 즉 탄 중량, 강내압력 등이 정해지면 “포열 길이방향에 따른 강선력의 크기”(이하 강선력 곡선)는 “강선각 형상”(이하 강선각 곡선)에 의해 결정되게 된다. 예를 들어 강선각을 포열 전장에 걸쳐 일정하게 설계하면 강내압력이 최대가 되는 지점에서 최대 강선력이 발생되며 집중응력에 의한 국부적인 마모, 충격진동의 발생, 강내탄도의 불안전 등 여러 부정적인 효과를 유발하게 된다. “강선각 최적설계”란 강선각 곡선에 의해 결정되는 강선력 곡선에 있어 최대 강선력을 최소화하는 과정이며 이때 최대 강선력이 최소화된 강선력 곡선은 최대 강선력의 크기가 일정한 사다리꼴 형태로 나타나게 된다. 강선각 최적설계는 설계변수인 강선각 곡선의 변화에 따라 최대 강선력이 최소화 되었는지를 살펴야 하는데 먼저 설계변수인 강선각 곡선을 어떠한 형태의 곡선으로도 변화될 수 있도록 계수를 포함하는 일반화된 함수로 전개를 하여야 한다. 이 일반화된 함수의 각 계수 값을 변화시키면서 최대 강선력의 크기를 비교하여 강선력을 최소화 하는 계수 값을 탐색해 나가게 되는데 이 과정은 “수치 최적화 알고리즘^[1]”을 이용하여 체계적으로 수행하게 된다. 일반화 함수로의 전개는 다항식과 푸리에 함수가 이용되는데, 강선각 최적설계에 있어서는 푸리에 함수만으로 전개하였던 기존의 방식^[2]과는 달리 다항식과 푸리에 함수의 조합 형식으로 전개하는 새로운 기법을 개발하여 제안한 바 있다^[3].

본 연구는 기존에 설계되어 있던 강선각 곡선에 대해 설계변경을 통해 최대 강선력의 수준을 낮추고자 강선각 최적설계 기법을 적용하였을 때 목적인 바와는 달리 최대 강선력이 오히려 증가하는 현상이 발생하였는데 그 원인에 대한 분석을 수행한 내용이다. 강선각 곡선은 탄의 탄도특성과 연계되는 설계항목으로

강외탄도의 호환성을 위해 탄이 포구를 이탈하는 “포구 끝단의 강선각”(이하 강선 끝각)은 동일하게 설계해야 한다. 그러나 “강선 시작점에서의 강선각”(이하 강선 시작각)은 강외 탄도특성에 크게 영향을 주지 않기 때문에 강선력을 감소시킬 수 있는 방향으로 설계변경을 진행할 수 있다. 그러나 기존에 설계되어 있던 강선 시작각을 낮추면 일정각도까지는 최대 강선력이 감소되지만 그 이하로는 강선 시작각을 낮출 수 없었다. 강선 시작각을 강제로 “0°”로 설정한 경우에는 오히려 최대 강선력이 증가하는 현상을 나타내었다. 강선 시작점을 낮출 수 없거나 최대 강선력이 증가하는 원인에 대한 분석을 수행하는 과정에서 강선각 최적설계와는 반대로 최대 강선력이 일정한, 사다리꼴 형태의 곡선 즉 “이상적인 강선력 곡선”을 미리 설정한 후 이에 대응되는 강선각 곡선을 산출할 수 있는 기법^[4]을 확립할 수 있었다. 목표로 하는 이상적인 강선력 곡선의 설정을 통해 산출된 강선각 곡선과 앞서의 강선각 최적설계를 통해 산출된 강선각 곡선을 비교함으로써 강선각 최적설계 적용 시 강선 시작각을 낮출 수 없거나 최대 강선력이 증가되는 원인을 분석할 수 있었다.

2. 강선각 최적설계

강선각 최적설계는 설계변수인 강선각 곡선을 다항식과 푸리에 함수의 조합 형식으로 전개한 후 수치 최적화 알고리즘을 적용하여 최대 강선력이 최소화 되도록 각 함수의 계수를 찾는 기법으로 이를 간략히 정리하면 다음과 같다.

2.1 강선력의 유도

Fig. 1은 탄이 추진가스 작용력에 의해 포강을 이동할 때 강선과의 사이에 발생하는 작용력을 나타낸 그림으로 강선의 접선 평면에 대하여 힘과 모멘트 평형 관계를 적용함으로써 식 (1) 같이 강선력 곡선($R(x)$)을 유도할 수 있다.

$$R(x) = \frac{4}{D^2} \frac{J_p}{m_p} \left[\frac{dy}{dx} P(x) + \frac{d^2y}{dx^2} v(x)^2 m_p \right] \quad (1)$$

식 (1)에서 모든 조건이 동일한 경우, 즉 탄종이 선정되어 탄 질량, 추진가스 압력 등이 결정되면 강선력

은 강선율과 강선을 도함수 만의 함수로 정의되며 따라서 강선을 함수(또는 강선각 곡선)의 선택 여하에 따라 최대 강선력을 최소화 할 수 있음을 예상할 수 있다.

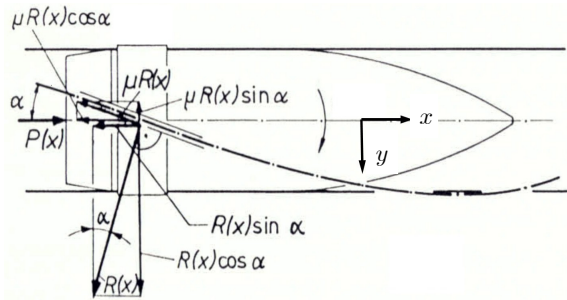


Fig. 1. Force diagram on a bullet(sorce : Handbook on Weaponry^[5])

2.2 강선각 함수의 전개

강선각 최적설계는 설계변수인 강선각 곡선을 일반화 함수로 전개한 후 수치 최적화 알고리즘을 적용하여 최대 강선력이 최소가 되도록 일반화 함수의 계수를 찾는 과정이 된다. 강선율(dy/dx)과 강선각 곡선(α(x))은 dy/dx = tanα(x)의 관계가 있다. 따라서, 강선력 곡선은 강선각 곡선의 함수이며 최적의 강선력 곡선을 구하기 위해서는 설계변수인 강선각 곡선에 대해 함수전개가 필요하게 된다. 함수전개란 설계변수를 어떠한 형식의 곡선으로도 표현할 수 있도록 계수를 포함하는 일반화된 수식으로 나타내는 것을 말한다. 일반적으로 설계변수의 함수 전개에 가장 많이 사용되는 함수는 다항식과 푸리에 함수가 있다. 다항식은 주어진 경계조건을 정확히 만족하는 장점이 있는 반면 항의 수를 증가시켜도 수렴성이 보장되지 않으며, 푸리에 함수는 항의 수를 증가시킬수록 수렴성은 보장되지만 경계조건을 만족시키지 못하는 경우가 있다. 따라서 다항식과 푸리에 함수를 결합함으로써 상기의 각 함수가 갖는 단점을 상호 보완하여 다항식을 통해 경계조건은 충족하면서 푸리에 함수의 항을 통해 수렴성을 보장 받을 수 있게 된다^[6,7]. 다항식과 푸리에 함수를 결합한 형태의 강선각 곡선의 함수는 식 (2)와 같다.

$$\alpha(x) = \sum_{i=0}^k a_i x^i + \sum_{j=1}^l b_j \cos\left(\frac{j\pi x}{x_e - x_i}\right) \tag{2}$$

2.3 수치 최적화 알고리즘

수치 최적화 알고리즘은 상기의 식 (2)에서 각 계수를 변화시키면서 산출된 강선력 곡선에서 최대 강선력의 크기를 비교하여 최대 강선력이 최소가 되는 계수를 찾는 알고리즘으로 계산된 강선력을 바탕으로 계수 변화를 체계적으로 수행하게 된다. 본 연구에서는 수치 최적화 알고리즘으로 “PCON^[1]” 사용하였다.

2.4 최적설계 대상 모델

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

- D = 40 mm
- J_p = 0.42 kg·m²
- m_p = 0.52 kg
- x_e - x_i = 2,783 mm

기존 설계된 강선은 강선 시작각과 강선 끝각이 각 3.90°와 6.64°로 설계되어 있다. 또 다른 입력으로는 Fig. 2의 강내압력과 탄 속도 곡선을 사용하였다. 강내압력은 포강내의 추진가스가 연소하면서 탄의 뒷부분을 미는 압력을 나타낸다.

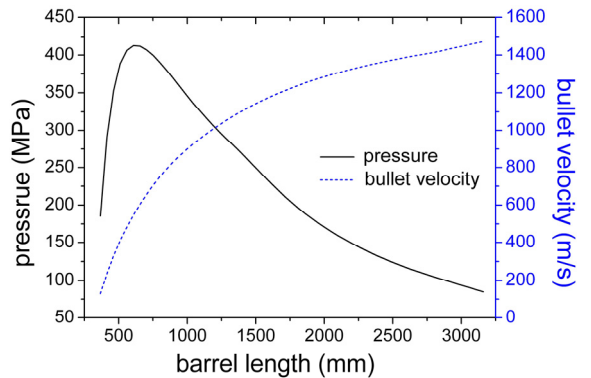


Fig. 2. Gun barrel pressure and bullet velocity curve

2.5 기존설계에 대한 강선각 최적설계 결과

Fig. 3과 4는 2.4절의 기존 설계제원을 적용하여 산출한 강선각 곡선과 이에 해당된 강선력 곡선을 나타낸다. 강선력 곡선은 Fig. 4에서 보는바와 같이 국부적인 최대치가 없는 사다리꼴 형태로 산출 되었다. 3.90°의 강선 시작각으로부터 6.64°의 강선 끝각으로 진행하면서 최대 강선력 8.32 kN을 나타내었다.

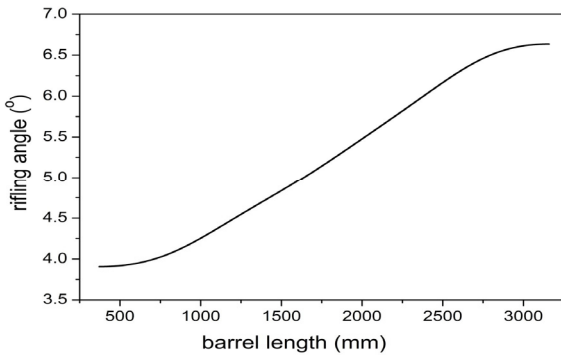


Fig. 3. Existing designed rifling angle curve

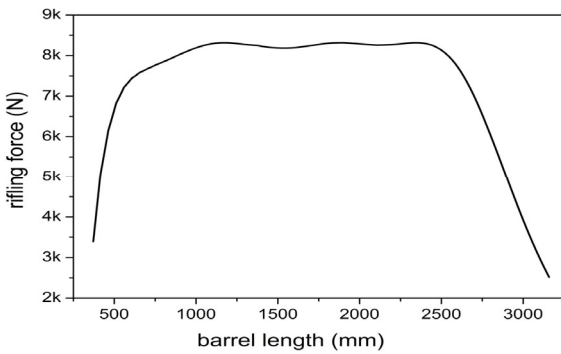


Fig. 4. Existing designed rifling force curve

3. 강선각 곡선의 설계변경

강선 끝각은 탄의 강외탄도 및 밀접한 관련이 있어 기존 탄과의 강외탄도 호환성을 위해서는 동일하게 설계해야 하지만 강선 시작각은 강외탄도에 영향을 주지 않으므로 기존설계 대비하여 최대 강선력을 낮추고 강선 시작각에 대한 설계변경을 수행하였다. 강선각 곡선을 일반화 함수로 전개한 식 (2)에 수치 최적화 알고리즘을 적용함에 있어 강선 시작각, 강선 끝각, 강선 시작점과 끝점에서의 기울기($|d\alpha/dx|_{x=x_i, x_e} = 0$) 등 총 4가지의 제한조건을 적용할 수 있다. 급격한 변화를 없애기 위해 양단에서의 기울기는 “0”으로 설정할 필요가 있으며 강외탄도 호환성과 관련하여 강선 끝각은 6.64°로 고정해야 한다. 강선 시작각의 경우 강제로 일정 각도로 제한할 수도 있지만 제한조건을 해제하여 수치 최적화 알고리즘에 결과 산출을 맡길 수도 있다. 먼저 나머지 제원과 제한조건은 동일하게 하고 3.90°의 강선 시작각에 대한 제한조건을 해

제하여 수치 최적화 알고리즘을 수행하였다. 시작 전에는 강선 시작각을 0°까지 낮출 수 있을 것으로 생각하였으나 강선 시작각은 기존 3.90°에서 3.78°까지 밖에 낮출 수 없었다. 최대 강선력은 8.08 kN으로 기존설계 대비하여 약 3% 수준 감소시킬 수 있었다. 다음으로는 강선 시작각을 0°로 제한하여 수치 최적화 알고리즘을 적용하였다. 강선 시작각은 0°로부터 시작하였으나 산출된 강선각 곡선의 형태는 앞서의 매끄러운 대칭형과는 달리 무정형의 곡선 형태를 나타내었으며 특히 최대 강선력이 9.38 kN으로 강선 시작각이 3.78°인 경우 대비하여 16% 이상 증가되었고 기존설계 보다도 최대 강선력이 증가하였다. Fig. 5와 6은 각 강선각 곡선과 강선력 곡선으로 강선 시작각의 제한조건을 해제하여 강선 시작각이 3.78°인 경우를 “1차 시도”로, 강선 시작각을 0°로 제한한 경우를 “2차 시도”로 표기하였고 기존설계 결과와 비교하였다.

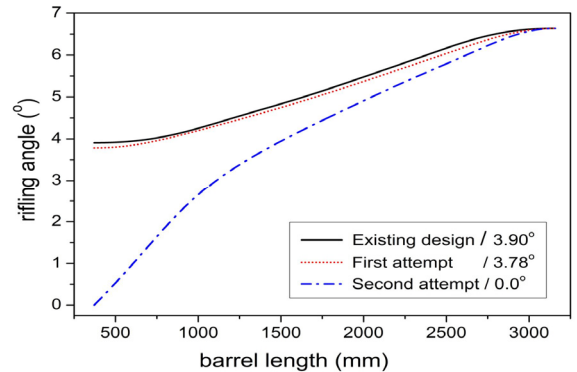


Fig. 5. Comparison of rifling angle curve by starting angle

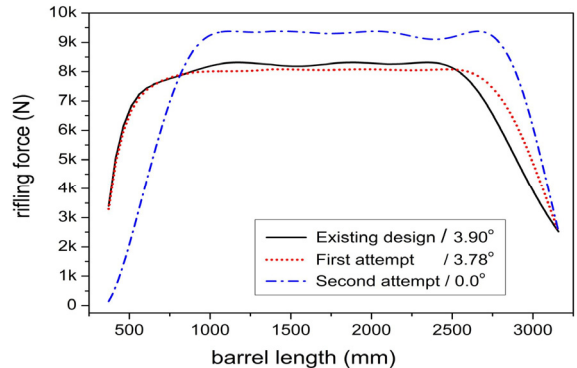


Fig. 6. Comparison of rifling force curve by starting angle

강선각 최적설계를 적용하여 강선각 곡선에 대한 설계변경을 시도함에 있어 원인 분석이 필요했던 항목은 초기 판단과는 달리, 강선 시작각의 제한조건을 해제한 경우 강선 시작각이 일정각도 이하로 감소되지 않는다는 점과 강선 시작각을 0°로 제한한 경우 최대 강선력이 기존 설계보다도 증가된 결과를 산출하고 있다는 점이였다.

4. 이상적인 강선력 곡선의 강선각 설계기법

강선각 최적설계는 설계변수인 강선각 곡선을 일반화 함수로 전개한 후 일반화 함수의 계수 값을 변화시키면서 강선력의 변화를 분석하는 기법으로, 먼저 강선각 곡선의 형태가 설정되고 이에 해당하는 강선력 곡선을 통해 최대 강선력을 확인하게 된다.

이상적인 강선력 곡선에 의한 강선각 곡선의 설계는 이와는 반대로 최대 강선력이 일정한 사다리꼴 형태의 이상적인 강선력 곡선을 먼저 설계하고 이에 해당하는 강선각 곡선을 산출하는 기법이다.

식 (1)에서 강선력은 강선율과 강선율 도함수의 함수로 나타낼 수 있었다. 식 (1)에서 강선율 도함수를 강선율과 강선력의 함수로 재정리하면 식 (3)과 같다. 이렇게 재정리된 강선율 도함수(d^2y/dx^2)를 포신길이(x)에 따라 적분을 하면 그 해를 통해 강선각 곡선($\alpha(x) = \tan^{-1}(dy/dx)$)을 구할 수 있게 된다.

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{D^2R(x)}{4J_p v^2(x)} - \frac{P(x)}{m_p v^2(x)} \frac{dy}{dx} \quad (3)$$

적분 시 강선력 곡선($R(x)$)을 일정한 형태, 예를 들면 Fig. 7과 같이 “최대 강선력을 1N으로 하는 사다리꼴 형태”(이하 기본형)로 먼저 설계를 하고 이 기본형을 입력으로 처리하면 산출된 강선각 곡선은 제한조건인 강선 끝각($\alpha_e = 6.64^\circ$)를 만족시키지 못할 것이다. 그러면 1N의 최대 강선력을 갖고 있는 기본형에 일정 배수를 곱하면서 제한조건이 만족할 때까지 반복하게 된다.

시행착오나 보간법을 통해 강선 끝각과 일치하는 배수가 결정되면 그 해로 산출된 강선각 곡선은 이상적인 강선력 곡선에 대응되는 강선각 곡선이 된다. Fig. 7에서 a는 강선력이 “0”인 강선 시작점에서 최대 강선력에 도달하기 까지의 길이를, b는 최대 강선력에

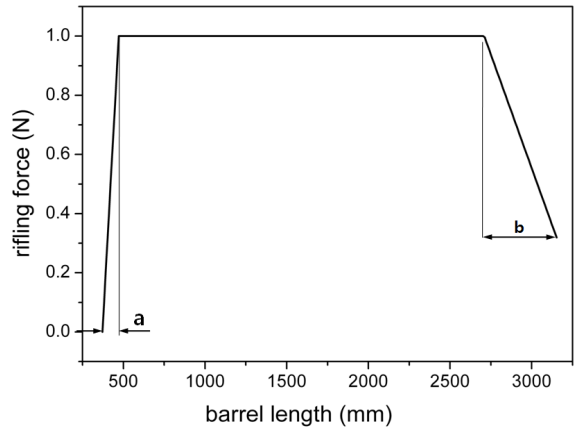


Fig. 7. Idealized rifling force curve(basic model)

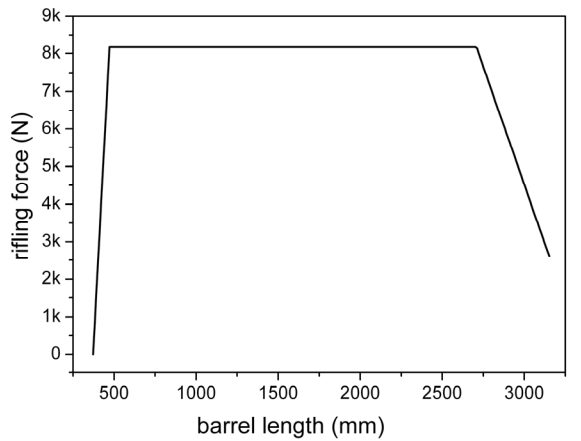


Fig. 8. Idealized rifling force curve

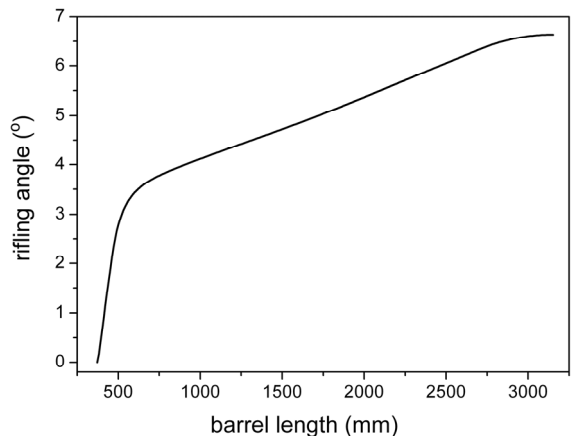


Fig. 9. Rifling Angle curve by an idealized rifling force curve

서 강선 끝각에 도달하기 까지의 길이를 나타내며 설계자가 적정 길이를 선정하여 설계를 진행하게 된다. Fig. 7의 기본형의 강선력 곡선에서 $a = 100 \text{ mm}$, $b = 450 \text{ mm}$ 로 설정하고 앞 절의 제원과 강내압력 및 탄속도 곡선을 입력으로 강선각 설계를 진행하였다. Fig. 8은 Fig. 7의 기본형에 강선 끝각이 일치하도록 배수를 곱하여 설정된 이상적인 강선력 곡선이다. 여기서 배수는 결국 최대 강선력이 되는데 설계자가 설정해야 하는 Fig. 7의 a와 b의 길이에 따라 최대 강선력이 달라질 수 있다. Fig. 8에서 최대 강선력은 8.17 kN으로 산출되었다. a와 b 길이 변화에 따른 최대 강선력의 변화는 또 하나의 최적화 문제로 본 연구에서는 다루지 않겠다. Fig. 9는 이상적인 강선력 곡선에 대응되는 강선각 곡선으로 최적설계 기법으로 산출되었던 강선각 곡선과는 달리 강선 시작으로부터 3.5° 수준까지 급격한 상승을 나타내고 있는 것을 확인할 수 있다. 앞서 기술한 바와 같이 a와 b의 길이에 따라 최대 강선력이 변화하기 때문에 최대 강선력을 좀 더 감소시킬 수 있을 것으로 판단되나 한편으로는 주어진 설계조건에서는 앞적의 강선각 최적설계에 의한 강선 시작각 3.78°의 결과가 최선일 것으로 추정되는 부분이다.

5. 두 기법간의 비교

Fig. 10과 Fig. 11은 강선각 최적설계 기법으로 산출된 결과와 이상적인 강선력 곡선의 기법으로 산출한 강선력 및 강선각 곡선을 비교한 그림이다. Fig. 10과 Fig. 11에서 “1차 시도”는 강선 시작각에 대한 제한조건을 해제한 상태에서, “2차 시도”는 강선 시작각을 0°로 제한한 후 강선각 최적설계를 수행한 결과이다. Fig. 10은 강선각 최적설계로 산출된 강선력 곡선과 각 강선력 곡선에 근접하여 설정한 이상적인 강선력 곡선을 나타낸 것이다. Fig. 11은 이상적인 강선력 곡선에 대응되는 강선각 곡선과 강선각 최적설계 1차 및 2차 시도에 의한 강선각 곡선을 비교한 것이다.

Fig. 11에서 2차 시도에 해당되는 두 기법에 의한 강선각 곡선은 거의 동일한 궤적을 나타내고 있다. 이는 Fig. 10에서 2차 시도의 이상적인 강선력 곡선이 강선각 최적설계로 산출된 강선력 곡선(2차 시도)과 동일한 수준으로 설정된 결과를 반영한 것으로, 이상적인 강선력 곡선의 설정에 의한 강선각 곡선 산출의 타당

성을 확인할 수 있다. Fig. 11의 1차 시도와 관련한 강선각 곡선에서 이상적인 강선력 곡선에 의한 강선각 곡선은 0°부터 시작하여 약 3.5° 까지 급격하게 증가한 후 완만해지고 4.5° 이후로는 강선각 최적설계의 강선각 곡선과 거의 일치하여 증가하는 것을 볼 수 있다. 이러한 형태는 강선각 최적설계에 의해서는 산출할 수 없었던 강선각 곡선이었으며 두 기법으로 산출된 결과의 비교를 통해 강선각 최적설계와 관련하여 제기되었던 두 가지 문제점에 대한 원인을 분석할 수 있었다.

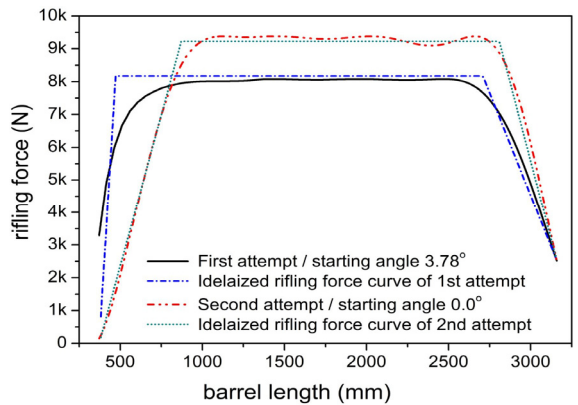


Fig. 10. Comparison of rifling force curve by design technique

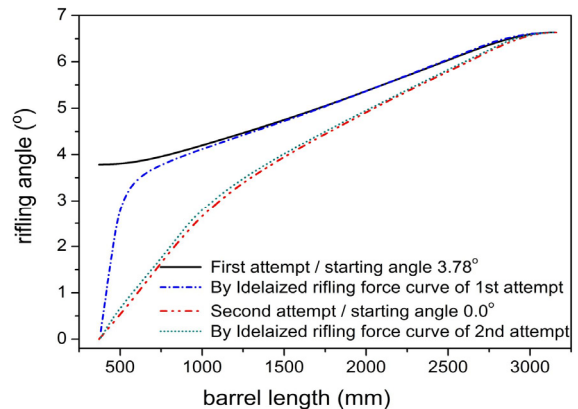


Fig. 11. Comparison of rifling angle curve by design technique

먼저 강선각 최적설계에서 강선 시작각에 대한 제한조건을 해제한 경우를 살펴보면 당연한 귀결이지만 주어진 설계조건하에서 강선 시작각을 3.78° 아래로 낮추

는 경우 최대 강선력이 증가하기 때문에 강선각 최적 설계는 최적의 결과를 제시한 것으로 판단할 수 있다.

두 번째로 강선각 최적설계에서 강선 시작각을 0°로 제한한 경우는 9.38 kN의 최대 강선력을 산출한 데 반하여 이상적인 강선력 곡선의 설정을 통해서 약 13% 감소된 8.17 kN의 최대 강선력이 산출되었다. 이는 강선각 곡선의 형상과 직접적인 연관이 있는데 강선각 최적설계의 결과가 평평한 강선각 곡선인데 반하여 이상적인 강선력 곡선에 의한 강선각 곡선은 초기에는 급격하게 증가하다가 완만해지는 곡선 형태로 나타나게 된다. 강선 시작각을 0°로 제한한 강선각 최적설계의 경우 강선 시작점에서 강선각을 급격하게 끌어 올리지 못하고 있음을 확인할 수 있다. 강선각 곡선을 표현한 다항식과 푸리에 함수의 조합은 임의의 다양한 곡선을 충분히 표현할 수 있는 방식이지만 이들 계수의 탐색 방향을 책임지는 수치 최적화 알고리즘이 강선 시작점에서 강선각을 끌어 올리는 방향으로의 탐색을 충실히 반영하지 못하는 한계인 것으로 판단할 수 있다. 강선각 최적설계의 경우 수치 최적화 알고리즘과 관련하여 일반화 함수의 계수 탐색방향 등에 대한 한계나 제한에 대한 보완이 필요한 부분이다.

6. 결론

최대 강선력을 최소화 하기 위한 강선각 설계에 있어 설계변수인 강선각 곡선을 다항식과 푸리에 함수의 조합으로 전개하는 강선각 최적설계 기법을 제안한 바 있었으나 신규로 강선각 곡선 설계에 적용시 기존의 강선 시작각을 일정 각도 이하로 감소시킬 수 없거나 강선 시작각을 0°로 설정하여 진행한 경우 최대 강선력이 오히려 증가하는 현상이 발생하였다. 이에 대한

원인 분석 과정에서 강선각 최적설계와는 반대로 이상적인 강선력 곡선을 먼저 설정하고 이에 해당하는 강선각 곡선을 산출하는 기법을 확립하였으며 두 기법의 결과 비교를 통해 강선각 최적 설계기법의 타당성과 한계를 동시에 확인할 수 있었다. 향후 강선각 최적설계와 관련하여 수치 최적화 알고리즘에 대한 추가적인 검토와 대안 수립을 수행해 나갈 것이다.

References

- [1] C. H. Suh, "Computer Aided Design of Mechanisms, Part B," Panghan Publishing Company, pp. 845-873, 1984.
- [2] Herbert Krumm, "Gun Barrel Equipped with Optimized Rifling," United States Patent No. 5,077,926, 1992.
- [3] Kiup Cha et al., "A Study on the Optimal Design of Rifling Rate," Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology Vol. 13, No. 6, pp. 998-1005, 2010.
- [4] Herbert Krumm, "Gun Tube," United States Patent No. 5,337,504, 1994.
- [5] G. Backstein et al., "Handbook on Weaponry," Rheinmetall GmbH, pp. 576-578, 1982.
- [6] Kyungjo Park, "Robot Path Design to Reduce Tip Residual Vibration," Ph D Thesis, Department of Mechanical Engineering, KAIST, pp. 65-68, 1992.
- [7] Younghyun Lee, "Path Design to Reduce Residual Vibration for a Two-Link Mechanism and its Experimental Test," MS Thesis, Department of Mechanical Engineering, KAIST, pp. 39-401, 1994.