

전자력 발사기의 최적 구조 설계

Optimal Structural Design for the Electro-magnetic Launcher

이 영 신*
Lee, Young-Shin
안 충 호**
Ahn, Choong-Ho

요 약

구조 및 전기적 제약조건을 고려한 전자력 발사기의 최적설계에 대해 연구하였다. 펄스형 대전류가 흐르는 발사기의 단면적이 최소화되었으며 각 요소(레일, 측면벽, 세라믹 및 강철)의 허용응력과 예하중을 고려하였다. 전기적 제약조건은 발사기의 성능을 저하시키는 와전류 효과를 방지하기 위한 세라믹의 두께로 정하였다. 90mm 발사기의 설계에서 응력해석과 최적화는 ANSYS 코드를 사용하여 수행 되었다. 예하중을 받는 최적설계에서는 예하중을 받지 않는 최적설계보다 53%의 단면적이 감소되었다. 레일의 원호각이 45°일때 발사기의 성능이 가장 양호하다. 레일의 원호각이 45°일 때 Fahrenthold 연구결과와 비교하여 9%의 변형량 감소와 10.4%의 변형량 감소를 얻었고, 예하중도 186 Mpa에서 59.8 Mpa로 감소되었다. 연구결과는 설계 요구조건을 충분히 만족시켜 주고 있음을 보여 주었다.

Abstract

The optimal design for Electro-magnetic Launcher (EML : Rail Gun) considering structural and electrical constraints are presented. For the structure of EML under high pulsed current, the cross section is minimized subject to maximum stress of each element (rail, side wall, ceramic, and steel) within allowable stress and preload limits. The electrical constraint is the effective ceramic thickness which prevents the eddy current effect reducing the performance of EML.

The stress analysis and optimization procedure of 90mm EML is conducted with ANSYS Code. The optimal design under preload is reduced to 53% of area compared with optimal design without preload. In case of rail with arc angle $\theta=45^\circ$, the performance of EML is the best among the other rail arc angles. The optimal design for rail with arc angle $\theta=45^\circ$ results in the reduction of 9% of area and 10.4% of deformation compared with Fahrenthold's design. The optimal preload 59.8 MPa is much lower than Fahrenthold's design (186 MPa). The results show that the optimal design of EML meets the design requirements.

Keywords : optimal, design, electro-magnetic, launcher, rail

* 정회원 · 충남대학교 공과대학 기계설계공학과
** 국방과학연구소

• 이 논문에 대한 토론을 1996년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 1997년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

물체를 높은 속도로 가속시키려는 기술은 화학의 발명이래 눈부신 발전을 거듭하여 왔다. 화학 추진제의 가스팽창력으로 탄자를 가속시키는 현재의 방식은 그 기술적 한계가 약 2500m/sec¹⁾로 예상되며 현재의 기술수준은 약 2000m/s 정도 달성되고 있는 실정이다. 세계 각국에서는 이러한 탄자 속도의 한계를 극복하기 위한 대체 추진 기술을 연구하고 있으며 그 중 전자력에 의한 가속 방식(일명 : Rail Gun)이 활발하게 연구되고 있다.

오래전 부터 이 전자력에 의한 추진원리와 소규모의 실험이 발표되었으나 상당히 높은 전류를 공급할 수 있는 대규모의 전원장치의 개발이 따르지 못하여 화학적 폭발에 의한 추진력에 비하여 훨씬 떨어진 결과를 얻게 되어 연구가 활발하지 못하였다. 1978년 호주국립대학의 Marshall²⁾이 500MJ의 동급발전기를 이용하여 3g의 소형 물체를 5900m/s로 가속시키는데 성공한 이후 전자력에 의한 추진기술이 세계적으로 활발하게 연구되고 있으며 종래의 기술로서 얻을수 없는 초고속을 얻을 수 있다는 점에서 항공 우주분야 및 군사적 무기 체계에 적용하는데 관심이 높아졌다^{3,4)}.

특히 이러한 추진 기술을 적용하는 발사기에 있어서 많은 구조적인 문제도 중요하게 되었다. 추진력을 발생시키는 전자력과 로렌츠 힘은 레일을 서로 분리시키려고 작용하므로 기하학적 형상을 유지하기 위한 구조물에 강성이 요구되고 있다.⁵⁾

구조해석에 대한 연구는 1983년 Wang⁶⁾이 3차원 유한요소법을 이용한 발사기의 구조응답에서 발사기와 탄자 사이의 틈이 시스템의 성능을 저하시킨다고 제시하였으며, 1986년 Davidson등⁷⁾은 발사 하중하에서 시스템 구성품의 응력해석을 통하여 강내변형을 예측하고 이 변형으로 틈이 발생하고 시스템의 성능이 저하되므로 강내변형을 최소화 해야 한다고 제시하였다. 1988년 Fahrenthold등⁸⁾은 원형 강내형상을 갖는 발사기의 응력해석을 하였으며, 1989년 Price등⁹⁾은 발사기의 강성(stiffness) 연구에서 예하중을 적용하는 4가지 방

법(볼팅체계 방법, 필라멘트 감김방법, 열박음방법 및 유압적용방법)중 열박음 방법(shrink-fit)이 가장 우수한 방법이라고 제시하였다. 1991년 Thakore와 Fahrenthold¹⁰⁾은 발사기에 예하중과 발사 하중하에서 절연체 소재로서 구조적 강성을 증대시키기 위하여는 이방성을 갖는 복합재료보다는 등방성을 갖는 세라믹이 우수하다고 제안하였으며 2차원 유한요소 모델로서 충분한 해석이 가능하다고 제시하였다.

이상의 연구 결과들은 전자력 발사기의 구조해석을 통하여 강내 형상의 변형과 그 방지 방안에 대한 제시였으며, 전자력 발사기의 최적화에 대한 연구는 이루어 지지 않았다.

본 연구에서는 구조적인 측면에서 최적 설계를 도출하는 원형 구조물을 설계하기 위하여 전기가 레일에 흐르면서 주변의 도체에 의해 발생하는 와전류에 의한 추진에너지 감소를 방지하기 위한 내부지지 절연체의 두께를 제한하는 조건과 기계적으로 고려한 예하중과 구성요소의 기하학적 관계 조건 및 발사 하중하에서 구성요소의 허용응력을 초과하지 않는 범위내에서 중량을 최소화 시키기 위하여 최적화 기법을 사용하여 설계하는데 그 목적이 있다.

2. 전자력 발사기의 해석

2.1 작동원리 및 구조

전자력 발사기 시스템의 작동원리⁸⁾는 Fig. 1에 도시된 바에 같다. 즉 전원으로 부터 대전류가 평행한 금속 레일에 흐르면 플라즈마(plasma) 형태의 아마추어에 의하여 회로가 형성되며, 레일사이

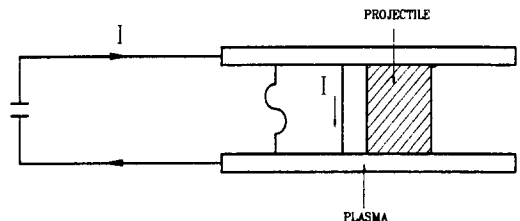


Fig. 1 Concept of electro magnetic launcher system

의 공간에 자장이 형성된다. 이 자장과 아마추어에 흐르는 전류와의 상호작용에 의하여 좌측에서 우측으로 로렌츠(lorentz)힘을 발생시켜 탄자를 가속시킨다. 이때 발생된 전자력과 로렌츠 힘은 레일을 서로 분리시키려고 작용하므로 기하학적 형상을 유지시키기 위하여 지지구조물에 강성이 요구된다.

본 연구에서 적용하고자 하는 복합원통체의 기하학적 형상 및 좌표계는 Fig.2와 같다. Fig. 2은 구조물의 기본 형상을 나타내고 있으며, (1) 도전성이 높은 평행한 금속레일(Rail), (2) 강내에서 탄자와 플라스마 아마추어를 구속하고 레일을 분리시켜 주는 절연체인 측면벽(side wall), (3) 레일과 절연체를 고정시키고 레일과 외부 강철과의 와전류 효과(eddy current effect)를 방지하는 절연체인 내부구조물 세라믹(ceramic), (4) 예하중을 발생시키고 2차 구속력을 갖는 외부지지 구조인 강철(Steel)로 구성된다.

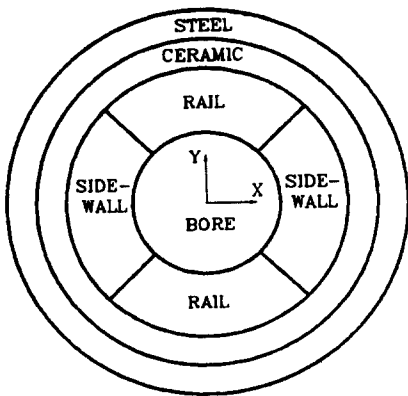


Fig. 2 Cross section of a round bore launcher

발사하중 작용시 강내(bore)의 변형은 다음과 같은 문제점을 발생시킨다. 강내의 직경이 탄자의 직경보다 커지게 되면 탄자가 강내를 따라 가속되면서 요동(balloting)하므로 탄자가 강내에서 파열되거나 강내를 손상시키게 된다. 강내 변형에 의한 레일과 측면벽 사이의 틈과 강내와 탄자사이의 틈은 플라스마가 누출되어 탄자 앞에서 로렌츠

힘이 작용하므로 발사기의 효율이 급격히 떨어지게 된다.

발사기에서 발사하중과 변형량의 비를 강성(stiffness)이라 할 때 구조물 강성에 영향을 주는 요소로는 구성품의 재료특성, 구성품에 가해지는 예하중(preload), 구조물의 기하학적 형상을 들 수 있다. 발사기의 설계에서 구성품의 재질과 형상을 먼저 결정하고 예하중을 적용시켜 강성을 증대시킨다. 실제 설계에 있어서 강성을 증대시키기 위하여 발사기의 크기와 중량을 무한정 크게할 수는 없기 때문에 각종의 제약조건을 고려하여 그 크기와 중량을 최적화할 필요가 있다.

2.2 발사하중

발사기에 탄자를 추진시키는 추진력은 전자력에 의한 힘과 플라스마 아마추어에 작용하는 로렌스 힘으로 대별할 수 있다. 구조물에 작용하는 주하중은 레일에 작용하는 전자력이며, 단위길이당 작용하는 힘은 다음과 같다.

$$F' = \mu_0 I^2 / (2\pi d) \tag{1}$$

여기서 μ_0 는 자유 공간의 투자율이고 I는 레일에 흐르는 전류이며 d는 강내의 직경이다. 강내에서 탄자의 통과시간이 10 msec 로 짧으므로 전류의 확산은 레일의 표면으로 한정한다. 여기서 구조적 주하중은 레일 표면에 수직으로 균일하게 작용하는 균일 압력으로 가정⁸⁾ 할 때 그 크기는,

$$P_m = F' / (d \sin \theta) \tag{2}$$

여기서, 2θ 는 한쪽 레일의 원호각이다. 이 하중의 시간적 변화는 전원으로 부터 발생하는 전류 펄스에 의하여 결정된다.

플라스마 아마추어 또는 탄자에 작용하는 로렌스 힘은,

$$F = L' I^2 / 2 \tag{3}$$

여기서 L'은 발사기 단위길이당 인덕턴스이다. 로렌스 힘은 플라스마 아마추어의 가스 압력을 거쳐 탄자에 전달되며, 이 힘은 탄자 부근의 강내면

에 작용하는 균일 압력의 형태로 다음과 같이 부가적인 구조하중으로 나타나게 된다.

$$P_a = F / (\pi d^2 / 4) \quad (4)$$

그러나 본 연구에서는 부가적인 구조하중 P_a 는 약 5cm 정도의 프라즈마에 의해 순간적인 탄자의 이동에 따라 강내 벽면에 작용하므로 무시하였으며 강내표면의 단위 길이당 발사하중은 식(2)의 전자력에 의한 발사하중만 고려하였다.

3. 해석 모델

전자력 작용하의 발사기 구조물에 대한 응력 해석에 적용된 2차원 모델은 Fig. 3과 같다

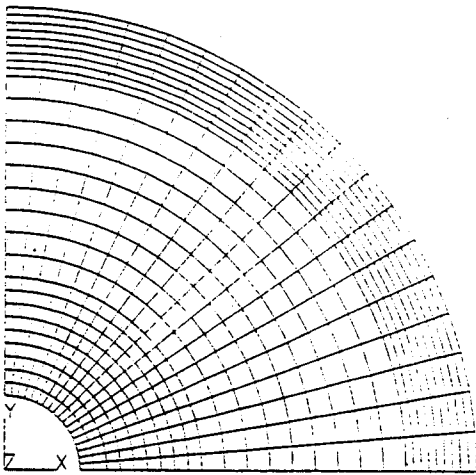


Fig. 3 2-D Model for launcher

위와 같은 2차원 모델은 다음과 같은 가정으로 단순화 시켰다.

- 발사기의 구성 요소인 레일, 측면벽, 내부지지 절연체 및 외부지지강철은 모두 등방성(isotropic)이며, 균질성(homogenous)을 갖는다.

- 전자력에 의해 가해지는 발사하중은 레일의 길이 방향에 대하여 어디에서나 균일하게 레일의 단면적에 수직한 방향으로 작용하고, 길이 방향으

로 변형이 일어나지 않는다고 가정하여 평면변형 문제를 단순화 한다.

- 체적력은 무시하며 발사하중이 가해지는 동안 미소변형이 일어난다.

- 기하학적 대칭 관계로 1/4단면만 모델링하여 사용한다.

또한 Fig. 3에 나타난 바와 같이 해석모델은 580개의 절점과 각 구성요소인 레일, 측면벽, 측면벽과 내부지지 절연체 및 외부지지 강철은 ANSYS의 2차원 4절점 평면요소(STIF 42) 482개의 요소를 사용하여 모델링하고, 구성요소와 구성요소 사이인 레일과 측면벽, 측면벽과 내부지지 절연체, 레일과 내부지지 절연체 사이에는 비선형 요소인 GAP요소(STIF 12) 30개를 사용하여 함께 516개의 요소로 모형화하였다.

4. 최적 설계

4.1 최적화 기법

본 연구에서 최적설계를 하고자 하는 전자력 발사기는 비선형 최적화문제로 다음과 같이 수학적 모델로 표시할 수 있다.

$$\text{Minimize } F(\underline{X}) \quad (5)$$

$$\text{Subject To } G_j(\underline{X}) \leq 0 \quad j=1, 2, \dots, m \quad (6)$$

$$L_i \leq X_i \leq U_i \quad i=1, 2, \dots, N \quad (7)$$

위의 식의 $F(\underline{X})$ 는 최소화 되어지는 목적함수이며 설계변수 \underline{X} 의 연속함수 이어야 한다. 설계변수 X_i 는 구조물의 단면 치수나 부재의 길이 또는 물성치 등이며, 각각의 설계변수는 L_i (하한값)과 U_i (상한값)로서 식(7)과 같이 허용설계 범위를 제한한다. 식(7)은 구조물의 변형 및 파괴를 방지하는 응력 및 변위 제약 조건식이다.

식 (5), (6), (7) 으로 표현된 비선형 최적화 문제는 초기 설계변수 X_0 를 임의의 값으로 선정하고 이 초기값으로부터 식(8)를 사용하여 반복적으로 최적 설계변수를 결정한다.

$$\underline{X}^{(q+1)} = \underline{X}^{(q)} + \underline{a}^* S^q \quad q=0, 1, 2, \dots \quad (8)$$

여기에서 q 는 반복횟수이며, S^q 는 설계공간에서 탐색방향이며, α^* 는 탐색 방향을 따라 설계목적함수가 모든 제약조건들에 위배되지 않으며 최소화시킬 수 있는 크기(step size)이다.

4.2 목적함수

발사기의 중량을 최소화하는 최적화 문제로서 Fig.4에 제시된 바와 같이 길이방향의 변형을 고려하지 않는 2차원 모델을 적용하였다.

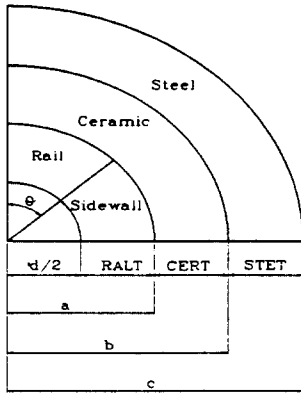


Fig. 4 Dimension of launcher

단면적을 최소화하는 목적함수는 다음과 같다.

$$\text{Minimize AREA} = \text{ARL} + \text{ASW} + \text{ACM} + \text{AST} \quad (9)$$

여기서 ARL은 레일의 단면적, ASW는 측면벽의 단면적 ACM은 세라믹의 단면적 AST는 강철의 단면적이다.

4.3 설계변수

발사기 구조설계에 있어서 여러가지 설계변수를 사용할 수 있으나 구조 해석시 2차원 유한 요소법을 사용하여 응력 분포 및 변위를 계산하기 때문에 Fig.2 에 도시된 발사기 구조에서 설계변수는 반경방향의 레일의 두께(RALT), 세라믹의 두께(CERT) 및 외부 강철의 두께(STET) 등 구성요소의 기하학적 형상을 결정하는 치수를 설계변수로 하였다. 또한 발사기의 강성을 높이기 위하여 예하중을 적용하는 열박음(Shrink-fit)방법을

사용하므로 예하중을 결정하기 위한 외부지지 강철의 예열온도(TEMP)를 설계변수로 선정하였다. 여기서 측면벽의 두께는 레일 두께와 동일하다. 각 구성요소의 물성치는 Table 1과 같다.

Table 1 The material properties of components⁸⁾

Components	Materials	$\rho(\text{Kg}/\text{m}^3)$	E(GPa)	ν	$\sigma(\text{MPa})$
Rail	Molybdenum	10241	324	0.325	551.6
Side wall	Polycarbonate	1522	11.6	0.25	10.0
Inner supporter	Ceramic	3605	276	0.22	221.0
Outer supporter	Steel	7833	207	0.29	1100.

4.4 제약조건

4.4.1 기계적 제약조건

구조물 요소에 발사하중이 작용하였을 때 구성요소의 최대응력이 허용응력 범위내에서 설계될 수 있도록 하는 제약조건을 사용한다. 또한 강철 실린더에서 발생하는 예하중을 제한하는 조건식은 Fahrenthold⁸⁾로 부터 다음과 같이 제시할 수 있다.

$$P_s \leq (1 - b^2/c^2)\tau_{\max} \quad (10)$$

여기서 P_s 는 예 하중에 의해 발생하는 압력이며, b 는 원심에서 세라믹 외측벽 까지의 반경이고 c 는 원심에서 외부 지지강철 외벽까지의 반경이다. 외부 지지강재의 최대 전단응력 τ_{\max} 는 414 MPa을 사용하였다. 또한 예하중 작용시 온도변화에 따른 강철의 자연 수축에 따라 세라믹에 압축응력이 작용한다. 이 응력은 강철의 반경방향 주 변형률(principal strain)이 T 와 동일하므로

$$e_r = \frac{\Delta r}{r_s} = a\Delta T \quad (11)$$

이다. 위의 관계식에서 강철의 반경이 작으면 작을수록 즉, 두께가 얇으면 온도 변화량 ΔT 가 커지므로 이를 방지하기 위하여 세라믹과 강철의 두께비가 3배가 되지 않도록 설계 제약조건을 사용하였다.

4.4.2 와전류 효과(Eddy current effect)에 의한 세라믹 두께 제약조건

발사기에서 탄자의 속도를 증가시키기 위해서는 탄자에 작용하는 힘이 증가되어야 한다. 힘 F는 인덕턴스 L'에 비례하므로 발사기의 성능을 향상시키기 위해서는 L'을 크게 하여야 한다. 따라서 절연체인 세라믹의 두께는 무한정 작게 할 수 없는 제약조건이 성립된다. 세라믹 두께에 따른 인덕턴스 변화는 Fig.5에 도시하였다. 본 연구에서는 세라믹 두께가 0.12m 이상인 경우 인덕턴스가 0.6μH로서 변화량이 적기 때문에 세라믹의 두께는 0.12m 보다 항상 커야 한다는 제약조건을 고려하였다.

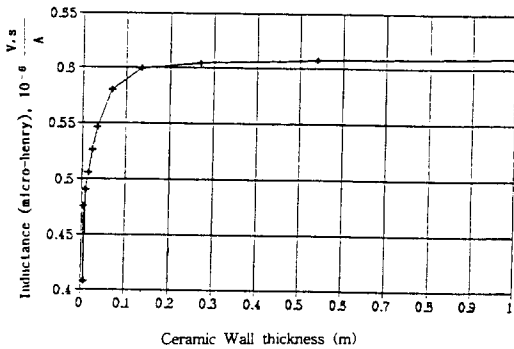


Fig. 5 Inductance variations with ceramic wall thickness

5. 설계 예 및 고찰

5.1 90mm 발사기 최적화설계

설계에 적용된 전자력 발사기의 길이는 8000mm이고 탄자의 직경은 90mm, 발사기의 레일에 흐르는 전류는 3.27MAmp이고 인덕턴스(L')는 0.6μH로 하였다. 유한요소 해석과 최적화 설계에는 상용 package ANSYS¹¹⁾를 사용하였다.

외부지지강철에 예하중을 적용하지 않은 경우 레일의 원호각 30°, 45° 및 60° 일때의 최적 설계값은 Table 2에 제시되었으며, 각 구성 요소의 응력 분포 및 변형은 Fig.6, 7, 8에 각각 제시되어 있다.

Table 2 Optimal design of launcher with preload

Optimal design		Arc angle		
		30°	45°	60°
Design Variable	Rail thickness(m)	0.1955	0.1416	0.1996
	Inner supporter thickness(m)	0.1820	0.1655	0.1317
	Outer supporter thickness(m)	0.0636	0.0552	0.0463
Total thickness(m)		0.4411	0.3623	0.3776
Maximum stress	Rail(MPa)	417.7	336.8	312.8
	Side wall(MPa)	0.4	0.08	0.01
	Inner supporter(MPa)	220.2	211.2	220.9
	Outer supporter(MPa)	82.6	61.4	76.0
Deformation	ux(d/2,0) x 10 ⁻³ (m)	-0.1607	-0.0729	-0.0642
	uy(0,d/2) x 10 ⁻³ (m)	0.3852	0.2476	0.3054

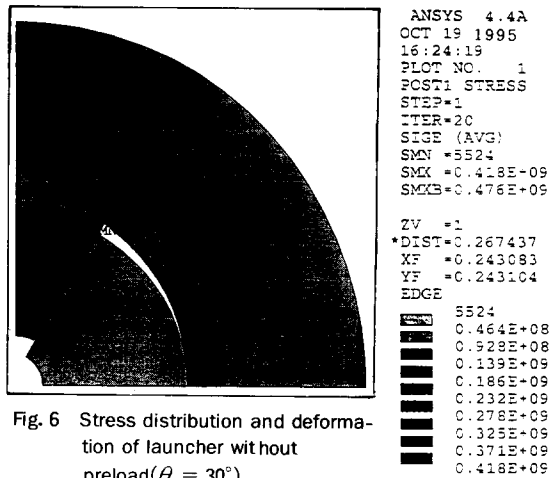


Fig. 6 Stress distribution and deformation of launcher without preload($\theta = 30^\circ$)

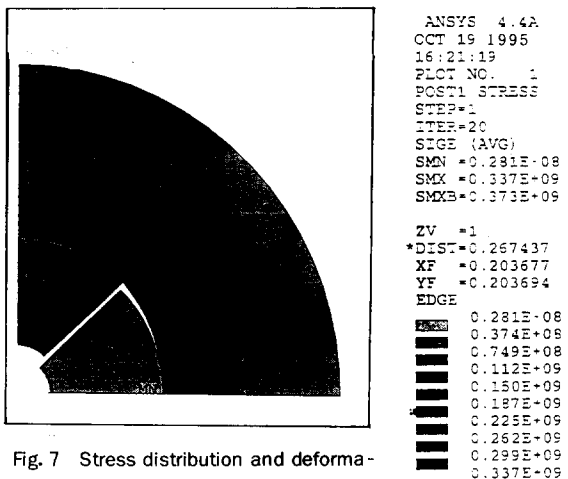


Fig. 7 Stress distribution and deformation of launcher without preload($\theta = 45^\circ$)

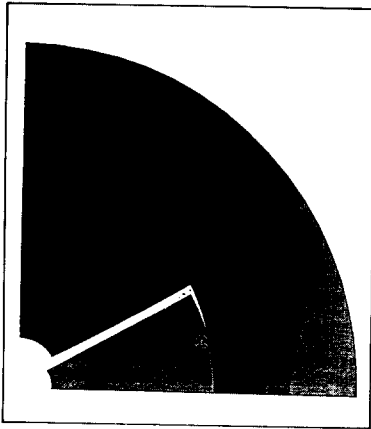


Fig. 8 Stress distribution and deformation of launcher with preload($\theta = 60^\circ$)

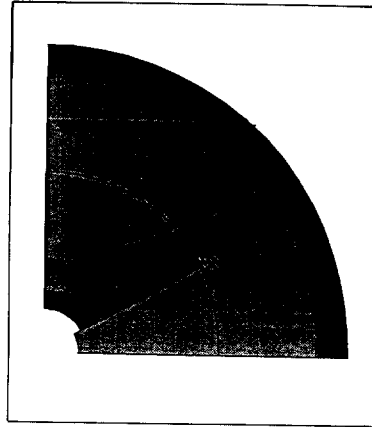


Fig. 10 Stress distribution and deformation of launcher without preload($\theta = 45^\circ$)

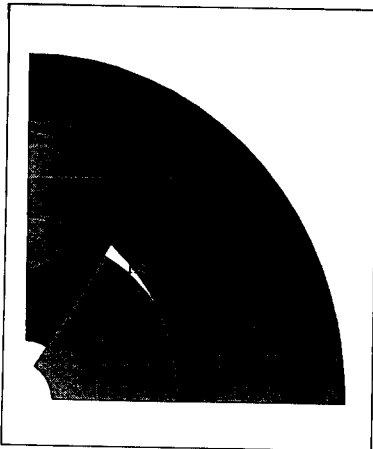


Fig. 9 Stress distribution and deformation of launcher with preload ($\theta = 30^\circ$)

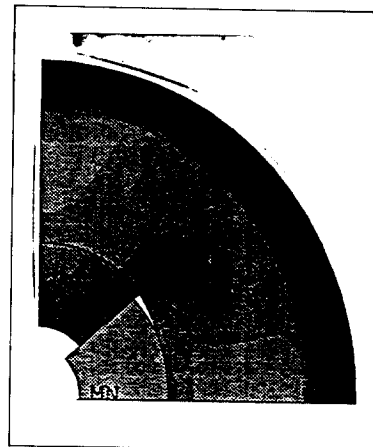


Fig. 11 Stress distribution and deformation of launcher without preload($\theta = 60^\circ$)

외부지지강철에 예하중을 적용하는 경우의 최적 설계값은 Table 3에 제시되었으며, 발사기 원호각 30°, 45° 및 60°일 때 최적 설계된 발사기 각 구성 요소의 응력분포 및 변형은 Fig.9, 10, 11에 각각 제시되어 있다.

5.2 결과 및 고찰

예하중을 적용하지 않은 경우 Fig.6, 7, 8에 나타난 바와 같이 전자력에 의해 힘을 받는 레일이 반경 방향으로 밀려 나가는 현상에 의하여 단면적이 달걀모양으로 변형하면서 레일과 측면벽 사이에 매우 큰 틈이 발생하게 된다. 예하중을 적용한 경우 Fig.9, 10, 11에 나타난 바와 같이 전자력에 의해 힘을 받는 레일은 반경방향으로 밀려나가는 현상이 있으며 이와는 반대로 측면벽은 중심방향

으로 밀려 들어오며, 레일과 측면벽 사이의 틈은 발생하지 않고 예하중에 의한 하중으로 인하여 레일과 측면벽이 미끄러짐에 의한 반경방향 변형을 가져 오므로서 강내에 변형이 생기게 된다.

제시된 결과에 따르면 예하중을 적용하지 않을 때 호각이 45°인 경우 최소 단면을 갖고 레일과 측면벽의 최대 변형량이 가장 적으나 발사기 성능과 관련된 강내의 틈은 호각이 30°인 경우가 가장 적다. 예하중을 적용한 경우 호각이 45°인 경우 최소 단면을 갖게되며 레일과 측면벽의 최대 변형량이 가장 적고 틈이 가장 적게 발생됨을 알 수 있으므로 발사기 설계시 레일의 호각은 45°로 하여 레일과 측면벽이 서로 축대칭이 되도록 설계하여야 한다.

Table 3 Optimal design of launcher with preload

Optimal design		Arc angle				
		30°	40°	45°	50°	60°
Preload		30.3	41.0	59.8	62.2	66.5
Design Variable	Rail thickness	0.1566	0.1082	0.0721	0.1097	0.1587
	Inner supporter thickness (m)	0.1250	0.1218	0.1218	0.1209	0.1203
	Outer supporter thickness (m)	0.0837	0.0479	0.0419	0.0431	0.0406
	Preheat temperature(℃)	38.2	58.5	93.5	110.1	139.1
Maximum stress	Rail (MPa)	431.5	417.2	458.8	317.2	627.1
	Side wall (MPa)	5.8	3.2	4.6	5.8	6.9
	Inner supporter (MPa)	220.8	203.9	200.7	185.4	154.5
	Outer supporter (MPa)	242.6	344.5	516.1	612.7	724.7
Deformation	ux(d/2,0) (mm)	0.1641	0.1375	0.0706	0.0705	0.0705
	uy(0,d/2) (mm)	0.1112	0.1960	0.1272	0.2621	0.2939
Area(m ³)		0.5225	0.3188	0.2413	0.2981	0.4113

또한 예하중을 적용할 경우와 적용하지 않을 경우를 호각 45°에서 비교하여 보면 예하중을 적용한 경우 58.5%의 단면 감소와 더불어 레일의 최대 변형량은 48.6%의 감소를 가져오며 측면벽의 최대 변형량은 3.1%의 감소를 가져오므로서 발사기

설계시 외부지지 강철에 예하중을 적용하여야 한다.

호각이 45°이며 발사하중 374 MPa에 대하여 연구한 Fahrenthold⁸⁾ 결과와 비교한 결과가 Table 4에 제시되었다.

Table 4 Comparisons of results between Fahrenthold and present optimal design

(a) Thickness and preload

	Fahrenthold ⁸⁾	Optimal design
Rail thickness(m)	0.0381	0.0721
Inner supporter thickness(m)	0.135	0.1218
Outer supporter thickness(m)	0.0762	0.0419
Total radius(m)	0.2943	0.2808
Preload(MPa)	186	59.8

* Including inner radius 45mm

(b) Deformation

	Position	Fahrenthold ⁸⁾	Optimal design
Preload	Ux(d/2,0)(mm)	-0.033	-0.071
	Uy(0,d/2)(mm)	-0.131	-0.071
Static	Ux(d/2,0)(m)	-0.077	-0.106
Load	Uy(0,d/2)(m)	0.183	0.127

Table 4(a)에 제시된 바와 같이 Fahrenthold 결과와 비교하여 볼 때, 최적설계는 적은 예하중 하에서 적은 반경으로 설계되므로서 양호한 설계를 얻을 수 있었다. 최적설계는 32%의 예하중을 적용하여 9%의 단면적 감소를 가져 왔으며 발사 하중하에서 측면벽의 최대 변형이 생기는 Ux(d/2,0)는 0.29x10⁴m 증가한데 비하여 레일의 최대 변형이 생기는 Uy(0,d/2)는 0.56x10⁴m 감소된 결과로 나타나고 있다. 즉 이 변형으로 생기는 강내 틈은 Fahrenthold 결과와 비교할 때 전반적으로 감소되어 발사기의 성능을 향상시키는 최적설계를 제시할 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 전자력에 의한 탄자 가속기술에 있어서 발사기의 최적구조를 설계하는 문제를 취급하였다. 이는 기계적 및 전기적 제약 조건하에

서 중량을 최소화 하는 문제로서 90mm 탄자를 추진할 수 있는 발사기의 최적설계를 수행한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 예하중을 적용할 경우와 적용하지 않는 경우를 비교하였을 때 예하중을 적용 하였을 경우 레일의 원호각이 45°일 때 단면적은 53%, 강내 총 변형량은 38.3% 감소 효과가 있으므로 예하중 적용이 최적설계에 필요함을 확인하였다.

(2) 레일의 원호각이 45°인 경우 레일과 측면벽의 반경 방향 총변형량이 가장 적으므로 발사기의 성능이 가장 양호하다.

(3) 레일의 원호각이 45°인 경우 기존 설계 조건인 Fahrenthold⁸⁾ 결과에 비하여 최적 설계시 약 9% 감소된 단면적으로서 10.4%의 강내 총변형량이 감소되는 설계기준을 얻었다. 최적 예하중도 59.8MPa로서 낮은 예열온도 93.5°C에서 예하중을 작용시킬 수 있음을 확인 하였다.

(4) 본 연구 이후 추가적으로 연구해야 할 사항은 로렌츠 힘에 의한 순간적 동적 하중을 추가 적용한 동적거동, 고온 플라즈마 발생에 따른 열전달 해석 및 반복하중에 의한 피로파괴등을 고려한 발사기의 최적 설계가 필요할 것으로 사료된다.

References

1. Stiefel, L., 1989, "Gun Propulsion Technology", American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. Washington, DC, PP.499-536.
2. Rashleigh, S.C., and Marshall, R.A., 1978, "Electromagnetic Acceleration of Macroparticles to High Velocities", Journal of Applied Physics, Vol.49, No.4, pp.2540-2542.
3. Palmer, M.R., and Daboro, A., 1989, "Electromagnetic Space Launch", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.25, No.1, pp.393-399.
4. Hawke, R.S., 1979, "Railgun Accelerators for Launching 0.1g Payloads at Velocities Greater than 150Km/s", Lawrence Livermore Laboratory, Paper UCRL-82762.
5. Hawke, R.S., Brooks, A.L., Deadrick, F.J., Scudder, J.K., Fowler, C.M., Caird, R. S., and Peterson, D.R., 1982, "Results of Railgun Experiments Powered by Magnetic Flux Compression Generators", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.25, No.1, pp.82-93.
6. Wang, S.Y., 1983, "The Structural Response of a Rail Accelerator", National Aeronautics and Space Administration, N83-35412.
7. Davidson, R.F., Cook, W.A., Rabern, D.A. and Schnurr, N.M., 1986. "Predicting Bore Deformation and Launcher Stresses in Railguns", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-22, No.6, pp.1435-1440.
8. Fahrenthold, E.P., Peterson, D.R., Price, J. H., and Wu, A.Y., 1988, "Stress Analysis for Design of Electromagnetic Launchers", Trans. of ASME, Journal of Vibration, Acoustics, Stress and Reliability in Design", Vol.110, 3, pp.395-408.
9. Price, J.H., Fahrenthold, E.P., Fulcher, C.W. G., Peterson, D.R., Weldon, W.F., and Zowarka, R.C., 1989, "Design and Testing of Large-Bore, Ultra-Stiff Railguns", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.25, No.1, pp.460-466.
10. Thakore, A.K., and Fahrenthold, E.P., 1991, "Mechanical Design of Small-Bore Electromagnetic Launchers", Trans. of ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.113, pp.92-101.

(접수일자 : 1996. 3. 27)