

전투차량체계의 개념설계를 위한 통합성능 최적화

김 한 수¹⁾ · 성 지 환¹⁾ · 민 승 재²⁾ · 이 태 희³⁾

한양대학교 미래자동차공학과¹⁾, 한양대학교 전산설계 연구실²⁾, 한양대학교 민감도 해석 및 설계 연구실³⁾

The concept of combat vehicle systems integrated performance for design optimization

Hansu Kim¹⁾ · Jihwan Sung¹⁾ · Seungjae Min²⁾ · Taehee Lee³⁾

^{1), 2), 3)}Department of Automotive Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

Abstract : This study proposed and simulated weapon-vehicle system for analysis of performance related to system design factors. For dynamic analysis of vehicle during passing over a bump and firing, six wheel car model was modeled containing spring-damper of tires and suspensions. To estimate the maximum firing range, an interior ballistic and an exterior ballistic model were built by using Le Duc method and point mass trajectory model. And all design factor are optimized by set performance indicator.

Key words : Combat vehicle(전투차량), Interior ballistics(강내탄도), Exterior ballistics(강외탄도), Mobility(기동성능), Optimization(최적화), Vertical acceleration(수직가속도), Stabilization time(안정화 시간), Range(사거리), Safety factor(안전계수)

1. 서 론

1.1 연구배경

정보통신 기술과 컴퓨터성능의 발달로 인해서 모의분석(Modeling and Simulation, M&S)기술이 부각되고 있다. 이를 통해 다양한 분야의 개념설계 단계에서의 적용이 활발히 이루어지고 있는 실정이다.

이러한 추세는 무기체계 개발에도 빠르게 적용되고 있다. 무기체계 운용환경의 급변과 이에 따른 요구조건의 다양화로 무기체계 개발과정에서 M&S 기술을 반드시 적용하도록 하고 있으며 체계적으로 확산되는 추세이다.

1.2 연구의 필요성

국내에는 전투차량 체계와 같은 경우에 선진국 체계의 기준에 따라 결정되어 독자적인 설정의 기회가 적었기 때문인지 M&S 기술의 적용이 미흡하였다. 그렇기 때문에 전투차량의 개념설계에 M&S 기술을 적용하여 시간과 비용을 절감하고 이에 대한 시스템을 구축해야 한다.

본 연구에서는 이러한 여건을 고려하여 군과 같은 수요자가 자체의 효과를 분석하기 위해 필요로 하는 입력제원을 과학적인 근거를 통해서 작성할 수 있도록 가상의 전투차량체계에 대한 개념모델을 설계하는 것을 목표로 한다.

2. 전투차량체계의 특성

2.1 설계인자 선정

화력성능의 주요 입력 자료로는 탄의 질량, 추진체의 질량, 포신의 외경 등이 있다. 이는 사거리 계산, 발사율 계산을 위한 인자로 사용된다.

^{*)} Corresponding author, E-mail: seungjae@hanyang.ac.kr

^{*)} Corresponding author, E-mail: thlee@hanyang.ac.kr

*초록색 글씨 부분은 그대로 두시면 됩니다.

기동성능의 주요 입력 자료로는 서스펜션 및 타이어의 스프링상수, 댐퍼상수가 있고 가운데 바퀴의 위치, 무게중심의 위치가 설계 변수로 들어간다. 이는 수직가속도를 성능 지표로 나타내기 위해 들어가는 입력 변수로 이를 만족하는 현가장치 성능을 최적화 하도록 연구를 진행한다. 이렇게 진행한 설계인자와 성능지표를 정리하면 Table 1 과 같다.

performance	설계인자	성능지표
화력성능	추진제질량, 발사체 질량, 포신의 외경	최대사거리, 안정화시간, 포신 안전계수
기동성능	서스펜션(댐퍼상수, 스프링상수), 타이어(댐퍼상수, 스프링상수), 가운데바퀴의 위치, 무게중심의 위치	안정화 시간, 수직가속도

Table 1 Design factor and indicator for each performance

2.2 설계인자 -성능지표 관계

Table 2 내용을 통해 설계인자가 각각의 성능에 따른 해석 모델을 거치고, 여기서 나온 해석결과로부터 성능지표를 판단함을 알 수 있다.

관계	설계인자	해석모델
화력성능	추진제질량 발사체 질량 포신의 외경	탄도모델
기동성능	서스펜션(댐퍼상수, 스프링상수), 타이어(댐퍼상수, 스프링상수), 가운데바퀴의 위치, 무게중심의 위치	차량동역학 모델

해석모델	해석결과	성능지표
탄도모델	출구속도	→ 최대사거리
	포신 내부압력	→ 안정화시간
차량동역학 모델	충격량	→ 수직가속도
	pitch 각도	→ 포신 안전계수
	수직가속도	

Table 2 Relationship from factor to indicator

3. 화력성능 분석

화력성능이란 발사부터 대기 중의 포탄의 운동

과 관련된 효과를 말한다. 이를 연구하기 위해서 추진체의 점화 이후에 튜브 내 탄의 역학적 운동 특성 및 대기 중에서 비행 후 사거리에 관한 해석이 필요하다. 성능과 설계인자 특성에 대한 이해를 위해서 탄의 발사와 비행 과정의 기능 및 원리를 살펴 볼 것이다.

3.1 강내탄도 모듈

강내탄도의 해석은 탄의 운동이 시작되고 충격력이 발생하는 역학적 과정을 포함하고 있다. 또한 강내탄도 해석에서 계산된 튜브내의 압력, 탄의 출구속도는 차체의 미치는 충격력과 사거리계산의 중요한 입력 자료가 된다.

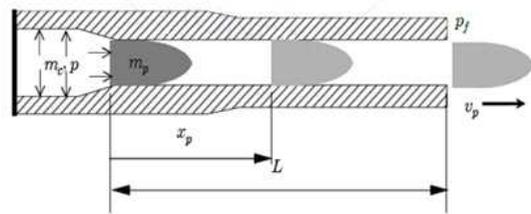


Fig. 1 Interior ballistic component of gun tube

Fig. 1에서 탄도의 해석에 사용되는 인자들은 탄의 이동거리 x_p , 튜브 길이 L , 탄의 질량 m_p , 추진제 질량 m_c , 튜브내의 압력 p 그리고 탄이 튜브를 떠나는 순간의 속도 v_p 이다.

3.1.1 탄의 출구 속도

탄의 출구 속도 v_p 는 경험식인 르덕 방정식(Leduc's equation) $v_p = \frac{aL}{b+L}$ 을 사용하여 구하였다. 이때 르덕 상수 a, b는 각각 다음과 같은 관계식으로 성립된다.

$$a = J \sqrt{\frac{m_c}{m_p}} \Delta^n$$

[Δ = 장전밀도율

($\Delta = \frac{m_c}{m_{H_2O}}$, m_{H_2O} = 튜브에 채운 물의 질량)

n: Δ 에 대한 지수=1/12

J=681.53(m/s) (추진체의 특성을 나타내는 계수)

$v_p = \sqrt{\frac{2m_c}{m_p m_{cs}}}$ (m_{cs} : 동일한 탄에서 속도와 추
체 질량간의 관계(고유값) = 7.1739×10^{-6})

$$b = \left(\frac{a}{v_p} - 1\right)L$$

3.1.2 포신 내부압력

르덕 방정식을 이용하여 연쇄법칙(chain rule)
에 따라 가속도 a_p 를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} a_p &= \frac{dv_p}{dt} = \frac{dv_p}{dx_p} \frac{dx_p}{dt} \\ &= \frac{ab}{(b+x_p)^2} \frac{ax_p}{(b+x_p)} = \frac{a^2bx_p}{(b+x_p)^3} \end{aligned}$$

또한 가속도를 이용하여 힘 F_p 에 대하여 뉴턴
의 2법칙을 이용하여 구하면 다음과 같다.

$$F_p = \frac{a^2bx_p}{(b+x_p)^3}$$

이동거리에 대한 힘의 변화를 구하기 위해 x_p 에
대해 미분하면 다음과 같다.

$$\frac{dF_p}{dx_p} = m_p \frac{a^2b(b-2x_p)}{(b+x_p)^4}$$

여기서 F_p 는 이동거리 $x_p = b/2$ 일 때 최대치가
됨을 알 수 있으면, 이를 포신의 단면적 A 를 나누
면 P_{max} 는 다음과 같이 된다.

$$P_m = \frac{4}{27} m_p \frac{a^2}{b} \frac{1}{A}$$

3.1.3 포신의 피로해석

그리고 기존연구 내용과 차별적으로 포신의 피
로설계를 추가했다. 굿맨 기준에 의한 피로 설계를
진행하였고 이에 따른 수식은 다음과 같다.

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} \leq \frac{1}{n}$$

위의 식에서 무한수명일 때를 고려하여 안전계
수 n 을 고려하여 수식에 넣게 된다.

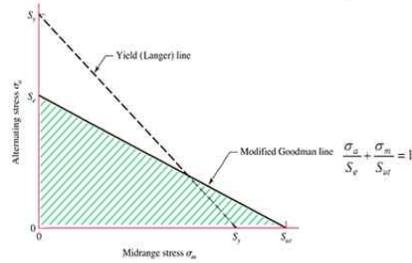


Fig. 2 Goodman line graph

Fig.2를 볼 때 빗금 친 부분에 각각의 stress가
들어 가야 무한수명의 조건에 들어간다고 할 수 있
다.

σ_m, σ_a 은 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}, \quad \sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$

σ_m, σ_a 에서 $\sigma_{max}, \sigma_{min}$ 은 각각 cylinder의 von
mises stress 와 최소값인 0이다. 탄에 미치는
최대 압력을 추진체의 효과질량 $0.5m_c$ 를 고려하
고, 최대압력 p_m 항을 표현하면 다음과 같다.

$$p'_m = p_m \frac{m_p}{m_p + 0.5m_c}$$

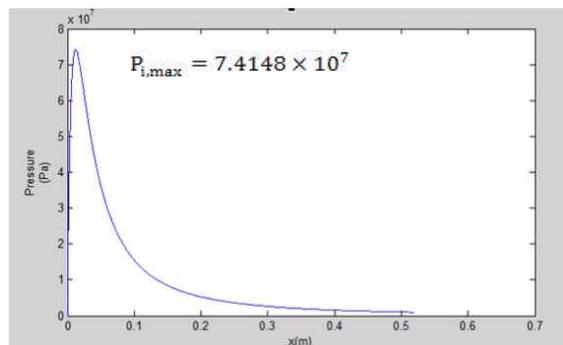


Fig. 3 Position vs pressure in barrel

*초록색 글씨 부분은 그대로 두시면 됩니다.

Fig. 3의 최대압력을 통한 cylinder의 von mises stress은 다음과 같다.

$$\sigma_r = -p_i = -p_{max}$$

$$\sigma_\theta = \frac{(r_o^2 + r_i^2)p_i}{r_o^2 - r_i^2}$$

$$\sigma_a = \frac{(r_i^2)p_i}{r_o^2 - r_i^2}$$

$$\sigma_{von-mises} = \sqrt{\frac{(\sigma_\theta - \sigma_r)^2 - (\sigma_r - \sigma_a)^2 - (\sigma_a - \sigma_\theta)^2}{2}}$$

Se 는 Endurance limit 으로 현재 제원으로 사용하는 4140chrome moly steel에서 Sut 즉, ultimate strength의 1/2이다.

※40 mm gun barrel 을 만들기 위한 조건으로 steel 재질을 고르면, 600 MPa(ultimate strength) 이상이어야 한다. 포신의 재질로 선정한 4140 chrome moly steel의 경우 화학적 특성 때문에 통상적인 포신의 색깔인 흑색을 내기 쉽고, 값이 싸다. 4140 chrome moly steel의 특성은 Table 3와 같다.

	Sut(MPa)	Se(MPa)	Hardness(Brinell)
4140 chrome moly steel	655	328	197

Table 3 4140 chrome moly steel property

따라서 goodman 식을 통한 안전계수 n 을 구하기 위해 다음과 같은 수식을 사용하였다.

$$n_f = \frac{1}{\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}}}$$

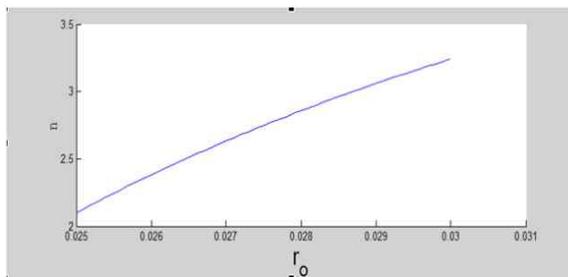


Fig. 4 Outer radius vs safety factor n

위의 그림 Fig. 4와 같이 설계변수인 포신의 외경이 증가 할 경우 안전계수 n 이 증가한다는 것

을 plot을 통해 확인 할 수 있다.

3.2 강외탄도 모듈

화력성능의 구성요소 중 하나인 사거리를 계산하기 위해 탄이 대기 중 비행하는 동안 운동특성과 그에 따른 최대 거리를 구하는 방법에 대해 설명한다. 본 연구에서는 고도에 따른 풍속의 변화까지 고려하여 실제와 유사한 해를 구했고 Fig. 5와 같은 질점탄도 모델을 적용하여 연구를 진행하였다.

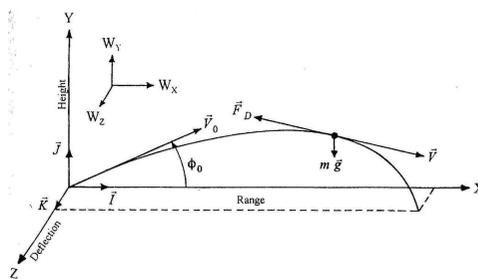


Fig. 5 point mass trajectory model of exterior ballistic

3.2.1 사거리 도출

고도에 따른 풍속을 고려하기 위해서 Deacan 식을 적용하여 사거리를 계산하였다.

$$\frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^p$$

[V₁:z₁에서의 풍속

V₂: 임의 고도에서의 풍속

z₁: 기준 높이

z₂: 임의 높이

p = 1/3 (안정한 상태의 상수)]

질점탄도 모델의 운동방정식의 각 방향 성분은 다음과 같다.

$$\dot{V}_x = -C_D V_x^2$$

$$\dot{V}_y = -C_D V_x V_y - g$$

위의 식과 발사 각도를 고려하여 MATLAB 프로그램을 통한 수치해석을 진행하여 사거리 값을 도출해 낼 수 있다.

Parameters	Symbols	Units	Values	Remarks
Vehicle speed	V	m/s	1.0	-
Suspended mass	m_s	kg	567.0	-
Pitching moment of inertia	I_s	$kg \cdot m^2$	600.0	-
Front and rear unsuspended masses	m_1, m_2	kg	72.5	-
Front and rear spring coefficients	K_1, K_2	kN/m	28,030	Design variable
Front and rear damping coefficients	C_1, C_2	$kN \cdot s/m$	3,000	Design variable
Front and rear tire spring coefficients	K_{T1}, K_{T2}	kN/m	400,000	Design variable
Front and rear tire damping coefficients	C_{T1}, C_{T2}	$kN \cdot s/m$	162	Design variable
Distance between front axle and center of gravity	a	m	0.9	-
Distance between rear axle and center of gravity	b	m	1.0	-
Bump radius	R_b	m	0.1	-

Table 4 Numerical parameters and values of the 4-wheel combat vehicle model

4. 기동성능 분석

기동성능 분석을 위하여 아래 Fig. 6와 같이 수학적 모델로 근사를 하였다.

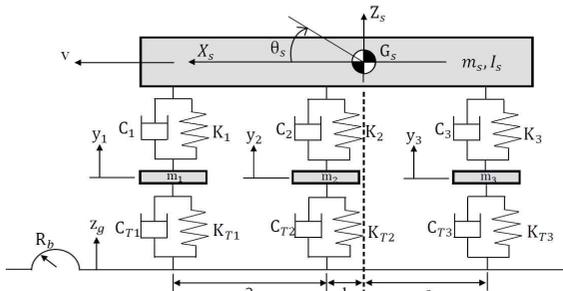


Fig. 6 A half-car dynamic model for the six-wheeled armored vehicle under consideration

Fig. 6을 미분방정식으로 나타내기 위하여 라그랑지안 운동방정식(Lagrange's motion of equation)을 사용하였다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{q}_r} \right) - \frac{\partial K}{\partial q_r} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_r} + \frac{\partial V}{\partial q_r} = f_r \quad (1)$$

where $r = 1, 2, \dots, 5$

K는 운동에너지, V는 포텐셜 에너지, D는 소산함수(Dissipation function), f_r 은 힘이다. 그리고 Fig. 6에 대해 K, V, D를 구하면 다음과 같다.

$$K = \frac{1}{2} m_s \dot{Z}_s^2 + \frac{1}{2} m_1 \dot{y}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{y}_2^2 + \frac{1}{2} m_3 \dot{y}_3^2 + \frac{1}{2} I_s \dot{\theta}_s^2$$

$$V = \frac{1}{2} K_1 Z_s - y_1 + (a+b)\theta_s + \frac{1}{2} K_2 (Z_s - y_2 + b\theta_s)^2 + \frac{1}{2} K_3 (Z_s - y_3 - c\theta_s)^2 + \frac{1}{2} K_{T1} (y_1 - Z_g)^2 + \frac{1}{2} K_{T2} (y_2 - Z_g)^2 + \frac{1}{2} K_{T3} (y_3 - Z_g)^2$$

$$D = \frac{1}{2} C_1 \dot{Z}_s - \dot{y}_1 + (a+b)\dot{\theta}_s + \frac{1}{2} C_2 (\dot{Z}_s - \dot{y}_2 + b\dot{\theta}_s)^2 + \frac{1}{2} C_3 (\dot{Z}_s - \dot{y}_3 - c\dot{\theta}_s)^2 + \frac{1}{2} C_{T1} \dot{y}_1^2 + \frac{1}{2} C_{T3} \dot{y}_3^2$$

위에서 구한 K, V, D를 식(1)에 대입을 하여 r 이 1, 2, ..., 5일 때 풀어보면 5개의 2차 연립 미분방정식을 구할 수 있다. 수치해석을 이용하여 해를 구하기 위하여 5개의 연립 2차 미분방정식을 10개의 1차 연립미분방정식으로 나누어 수치해석을 진행하였다.

4.1 6-wheel combat vehicle 검증

위에서 구한 식이 맞는지 검증하기 위하여 기존에 존재하던 바퀴 4개인 전투차량 제원 Table 4를 이용할 것이다. 그리고 총 3가지의 실험을 통하여 타당성을 확인 할 것인데, 첫 번째는 가운데 바퀴가 없는 상황 두 번째는 앞바퀴가 없는 상황 마지막으로 뒷바퀴가 없는 상황에 대하여 최대 수직가속도 계산을 통해 바퀴가 4개인 상황에서의 값과 같은지 알아 볼 것이다. 실험은 다음과 같은 조건이다.

$$C_2 = K_2 = C_{T2} = K_{T2} = 0 \quad (2)$$

$$a = 0.9, b = 0, c = 1.0$$

$$C_1 = K_1 = C_{T1} = K_{T1} = 0 \quad (3)$$

$$a = 0, b = 0.9, c = 1.0$$

$$C_3 = K_3 = C_{T3} = K_{T3} = 0 \quad (4)$$

$$a = 1.9, b = -1.0, c = 0$$

실험한 결과 바퀴가 4개인 상황에서의 최대 수직가속도와 (2), (3), (4) 조건에서의 최대 수직가속도가 2.4091 (G)로 같은 것을 확인 할 수 있었다. 따라서 이를 통해 바퀴가 6개인 모델을 사

*초록색 글씨 부분은 그대로 두시면 됩니다.

Subsystem	Parameters	Symbols	Units	Initial Values
Vehicle chassis	Vehicle speed	V	m/s	10.0
	Suspended mass	m_s	kg	567.0
	Pitching moment of inertia	I_s	$kg \cdot m^2$	600.0
	Unsusended mass	m_1, m_2, m_3	kg	72.5
	Spring coefficients of first suspension	K_1	KN/m	28.030
	Spring coefficients of second suspension	K_2	KN/m	
	Spring coefficients of third suspension	K_3	KN/m	
	Damping coefficients of first suspension	C_1	$KN \cdot s/m$	3.000
	Damping coefficients of second suspension	C_2	$KN \cdot s/m$	
	Damping coefficients of third suspension	C_3	$KN \cdot s/m$	
	Spring coefficients of tire	K_{T1}, K_{T2}, K_{T3}	KN/m	400,000
	Damping coefficients of tire	C_{T1}, C_{T2}, C_{T3}	$KN \cdot s/m$	162
	Distance between front axle and second axle	a	m	0.7
	Distance between second axle and center of gravity	b	m	0.2
Distance between third axle and center of gravity	c	m	1.0	
Bump radius	R_b	m	0.1	
Ammunition	Caliber	d_p	m	0.04
	Outer diameter	d_o	m	0.05
	Tube length	L	m	0.52
	Mass of projectile	m_p	Kg	0.24
	Mass of propellant	m_c	Kg	0.05
	Angle of firing	θ	$Degree$	15
	Distance between 40 mm AMG and center of gravity	d	m	0.3
	Drag coefficient	C_d	$dimensionless$	0.16

Table 5 Numerical parameters and initial values of the 6-wheel combat vehicle model

용할 수 있음을 증명하였다.

4.2 수직가속도 측정

제원 Table 5를 사용하여 모든 바퀴가 범프를 지나갔을 때 최대 수직가속도를 계산하였다.

4.3 안정화 시간 측정

안정화 시간을 측정하는 기준을 설명하면 포는 차체에 고정되어있고 포의 흔들림은 차체의 흔들림과 같다고 가정을 하였다. 포를 발사할 때 차체의 피치(pitch)각이 변하면 사거리도 변하는데, 이 때 초기 사거리에 비해 10cm 이내로 변할 때의 피치각도(이하 ‘안정화된 피치각도’)를 측정하여 안정화된 피치각도 이내로 흔들리는 순간의 시간을 안정화 시간이라고 하였다. 안정화된 피치각도와 안정화 시간은 Fig. 7과 같이 나타났다.

5. 통합성능 분석

화력성능과 기동성능은 해석영역 다르다. 왜냐하면 화력성능 해석 시 결과 값인 충격량을 기동성능 해석 시 입력 값으로 진행을 해야 하기 때문

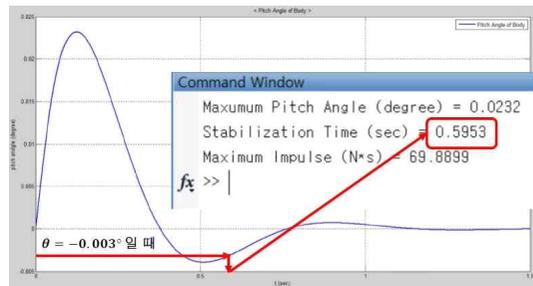


Fig. 7 Stabilization time and pitch angle

이다. 따라서 통합성능 분석은 안정화 시간을 최소화하고(목적함수 = 안정화 시간), 제한조건으로 사거리, 수직가속도, 포신 수명을 두어 최적화를 진행하였다.

5.1 최적화 과정 흐름도

설계변수는 Fig. 8과 같이 추진제 및 탄의 질량, 서스펜션의 스프링 및 댐퍼 상수, 타이어의 스프링 및 댐퍼 상수, 무게중심의 위치, 가운데 바퀴 위치로 하였다. 최적화의 순서는 화력모델을 근사하고 이를 이용하여 사거리, 충격량과 포신수명을 구한다. 그리고 충격량을 기동모델에 입력 값으로 사용하여 안정화 시간과 수직가속도를 계산한다. 최적화의 방향은 목적함수인 안정화 시간을 감소하는 방향으로 수직가속도, 사거리, 포신 수명은

제한조건에 부합하도록 최적화를 진행한다. 이러한 과정이 한번 흐르면 한 번의 최적화가 진행 된 것이고 목적함수가 특정한 값에 수렴할 때 까지 최적화를 계속 진행이 된다.

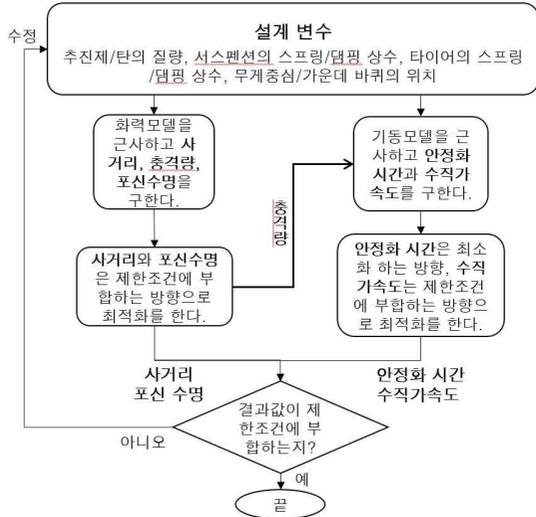


Fig. 8 Process for integrated system performance analysis

5.2 최적화 문제의 정식화

Fig. 8의 흐름도를 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 최적화를 진행하기 위해 정식화를 하면 (5)와 같이 나타낼 수 있다. 설계변수는 총 13개로 구성되어 있으며, 목적함수는 안정화시간으로 이를 감소하는 방향으로 최적화가 진행이 된다. 그리고 제한조건으로 설계변수들의 값이 하한 값과 상한 값 사이에 있어야 하며 앞바퀴와 뒷바퀴 사이의 거리는 1.9 (m)로 고정을 하였고, 수직가속도는 안전설계기준인 2.5 (G)보다 작도록 하였다. 그리고 탄의 사거리는 1,500 (m)보다 커야하고 안전계수는 2.5 보다 크도록 제한조건을 설정해주었다.

$$\begin{aligned}
 \text{Let} \quad & X_1 = K_1, X_2 = C_1, X_3 = K_2, \\
 & X_4 = C_2, X_5 = K_3, X_6 = C_3, \\
 & X_7 = K_T, X_8 = C_T, X_9 = a, \\
 & X_{10} = a + b, X_{11} = m_p, \\
 & X_{12} = m_c, X_{13} = d_o \\
 \text{Find} \quad & X = \left\{ \begin{matrix} X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, \\ X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}, \\ X_{11}, X_{12}, X_{13} \end{matrix} \right\} \\
 \text{Minimize} \quad & \text{Pitch Angle}(X) \\
 \text{Subject to} \quad &
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
 25,227 &\leq X_1 \leq 30,833 \\
 2,700 &\leq X_2 \leq 3,300 \\
 25,227 &\leq X_3 \leq 30,833 \\
 2,700 &\leq X_4 \leq 3,300 \\
 25,227 &\leq X_5 \leq 30,833 \\
 2,700 &\leq X_6 \leq 3,300 \\
 360,000 &\leq X_7 \leq 440,000 \\
 145.8 &\leq X_8 \leq 178.2 \\
 0.63 &\leq X_9 \leq 0.77 \\
 0.81 &\leq X_{10} \leq 0.99 \\
 0.216 &\leq X_{11} \leq 0.264 \\
 0.045 &\leq X_{12} \leq 0.055 \\
 0.045 &\leq X_{13} \leq 0.055 \\
 a + b + c &= 1.9 \\
 \text{Vertical Acceleration} &\leq 2.5 \\
 \text{Range} &\geq 1,500 \\
 n_f(\text{Safety Factor}) &\geq 2.5
 \end{aligned}$$

5.3 최적화 결과분석

최적화를 한 결과는 Table 6와 같다.

Item	Initial Value	Optimum solution
K_1 (KN/m)	28,030	29,486
K_2 (KN/m)	28,030	28,226
K_3 (KN/m)	28,030	27,224
C_1 (KN·s/m)	3,000	3,300
C_2 (KN·s/m)	3,000	2,951
C_3 (KN·s/m)	3,000	2,700
K_T (KN/m)	400,000	380,013
C_T (KN·s/m)	162	163
a (m)	0.7	0.63
b (m)	0.2	0.36
c (m)	1.0	0.91
m_p (kg)	0.24	0.216
m_c (kg)	0.05	0.055
d_o (m)	0.05	0.0543
Stabilization time (sec)	0.5953	0.1976
Vertical acceleration (G)	3.0405	2.4997
Range (m)	1,461.6	1,560
Safety factor	2.1201	2.9475

Table 6 Optimum Solutions

결과를 해석해보면 스프링상수가 증가하면 수직가속도는 증가하고 안정화 시간은 감소하게 된다. 따라서 스프링상수들 중 초기 값에 비해 증가한 것도 있고 감소한 것도 있을 것이라고 예상할

*초록색 글씨 부분은 그대로 두시면 됩니다.

하였다. 최적화 결과 예상한대로 스프링상수가 결정이 되었다. 댐퍼상수는 증가하면 수직가속도와 안정화 시간 모두 감소한다. 따라서 댐퍼상수는 초기 값에 비해 모두 증가해야한다고 예상하였다. 하지만 최적화 결과를 보면 증가한 것도 있고 감소한 것도 있다. 이는 1개의 변수가 바뀌어서 나타내는 경향을 따르지 않고 여러 변수가 동시에 바뀌기 때문에 댐퍼상수는 예상한대로 변하지 않은 것이라고 생각했다. 탄의 질량은 감소하면 안정화 시간은 감소하고 사거리의 증가한다. 따라서 탄의 질량은 초기 값에 비해 감소할 것이라고 예상했다. 최적화 결과 탄의 질량이 하한 값으로 결정이 되어 예상대로 최적화가 진행된 것을 확인할 수 있다. 추진제 질량은 증가하면 안정화 시간과 사거리가 모두 증가하게 된다. 최적화는 안정화 시간이 감소하고 사거리가 증가하는 방향이므로 추진제의 질량은 쉽게 예상하지 못하였다. 최적화 결과를 보면 추진제 질량은 상한 값으로 결정이 되었는데 이는 추진제의 질량이 안정화 시간보다 사 거리에 매우 큰 영향을 준다는 뜻이다. 외경은 증가하면 안전계수가 증가를 한다. 따라서 외경은 증가할 것이라고 예상하였는데, 최적화 결과 외경이 증가한 것을 확인할 수 있다. 초기 체원과 최적화된 체원을 이용하여 수직가속도, 안정화 시간, 사거리, 안전계수에 대한 그래프는 Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12와 같다.

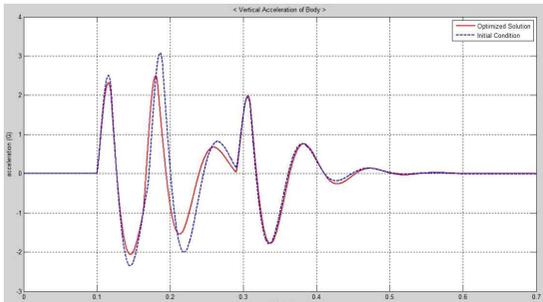


Fig. 9 Vertical acceleration between initial values and optimum solutions

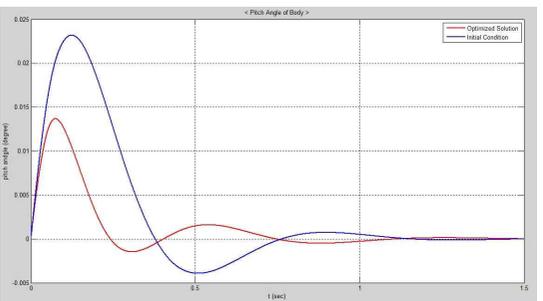


Fig. 10 Pitch angle between initial values and optimum solutions

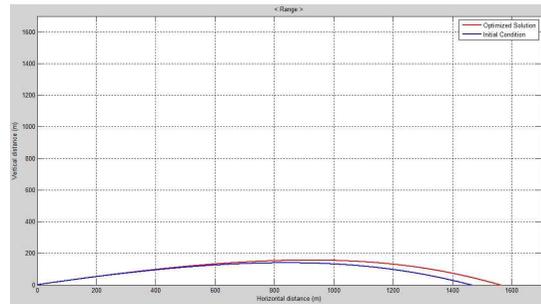


Fig. 11 Range between initial values and optimum solutions

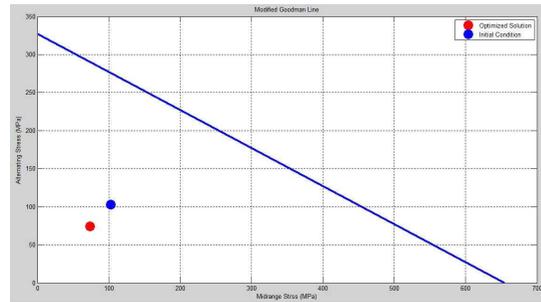


Fig. 12 Safety factor between initial values and optimum solutions

6. GUI

최적화와는 별개로 기동성능과 화력성능지표인 수직가속도, 안정화 시간, 사거리, 안전계수를 분석할 수 있는 프로그램을 MATLAB을 이용하여 Fig. 13과 같이 만들어 보았다. 사용방법은 제원을 입력한 뒤 성능지표 버튼을 누르면 해당하는 값과 그래프가 출력이 된다.

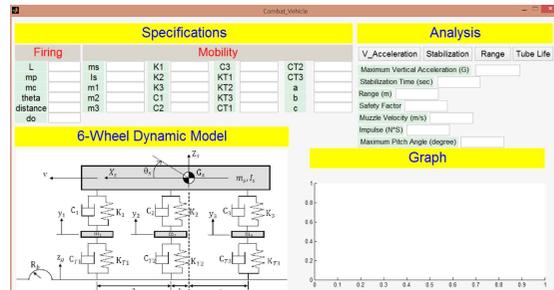


Fig. 13 GUI

7. 결론

- 1) 통합성능 최적화를 통하여 목적함수인 안정화 시간과 제한조건인 사거리, 수직가속도, 안전계수를 만족하는 설계 값을 도출할 수 있었다.
- 2) 개념설계(conceptual design)를 통하여 제품 수명주기(product life cycle)중 첫 단계를 고안하여 좋은 경험이 되었다.
- 3) 기동모델 해석에 2차원을 사용하였는데, 이를 3차원으로 확장할 수 있는 가능성을 확인할 수 있었

고 3차원으로 해석이 진행된다면 전복(roll over)에 대한 조건도 추가하여 최적화를 진행할 수 있을 것이다.

4) 향후 다양한 화력 제원이 주어진다면 해당하는 제원에 대해 화력성능 분석을 할 수 있을 것이다.

References

- 1) E. H. Choi, J. B. Ryoo, J. R. Cho and O. K. Lim, "Optimum suspension unit design for enhancing the mobility of wheeled armored vehicles", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol.24, No.1, pp.323-330, 2010.
- 2) Raza N. Jazar, Vehicle Dynamics Theory and Application, pp.828-864, Springer, New York, 2007.
- 3) J. B. Ryoo, The concept of combat vehicle systems performance analysis integrated system for exploring, Ph. D. Pusan University, Pusan, 2009.
- 4) Naver, Equation of Deacon, http://blog.naver.com/eungsun_99?Redirect=Log&logNo=100175066724, 2014.
- 5) H. J. LEE, Gun and Ballistic , Chungmungak