

전투차량체계의 개념탐색을 위한 화력성능분석

Fire Power Analysis for Concept Exploration of Combat Vehicle

임 오 강† 최 은 호* 류 재 봉**

Lim, O-Kaung Choi, Eun-Ho Ryoo, Jae-Bong

(논문접수일 : 2009년 3월 4일 ; 심사종료일 : 2009년 6월 11일)

요 지

개념설계단계에서 전투차량은 크게 화력성능, 기동성능과 체계의 물리적 특성으로 나누어진다. 본 연구에서는 전투차량 체계를 구성하는 3가지 특성 중 화력성능의 최적화로 제한한다. 체계의 개념설계 단계에서 화력성능에 영향을 미치는 주요 인자로 파괴효과에 직접적인 영향을 주는 탄의 중량과 원거리 사격을 고려한 최대사거리를 분석대상으로 선정하였다. 최대 사거리 분석을 위하여 강내탄도와 강외탄도해석은 질량 집중 모델, Le Duc모델과 질점탄도모델을 사용하여 분석하였다. 실험계획법과 회귀분석으로 반응표면식을 구성하고 선정된 인자를 반응표면법으로 최적화하였다.

핵심용어 : 전투차량체계, 강외탄도, 강내탄도, 실험계획법, 반응표면법

Abstract

At the stage conceptual design, combat vehicle is classified into three general categories of fire power, mobility and physical properties of system. The present research is restricted to fire power and its optimization. At the stage of conceptual designing of system, it is appropriate to consider major variables affecting fire power - including the weight of bullet, which exerts a direct influence on destroying effect, maximum range which takes long range firing in consideration. To estimate the maximum firing range, a simple interior ballistic and an exterior ballistic model were built by using the lumped parameter method, Le Duc method and point mass trajectory model. Design of experiment and regression analysis was used to derive simulations of fire power. Finally, response surface models were built and design variables were analyzed.

Keywords : combat vehicle system, exterior ballistics, interior ballistics, design of experiment, response surface method

1. 서 론

지상에서 전투임무를 수행하는 전투차량의 개발은 기동에 서 사격까지의 임무수행을 위해 기동성능과 화력성능을 갖추어야 한다. 이를 위해서 전투차량체계는 크게 차량, 무장 및 탄과 같은 부체계로 구성되며, 기동성능은 주로 차량의 성능에 좌우되고, 화력성능은 탄의 사격과 무장의 사격효율의 결과로 나타난다.

이러한 통합체계의 개발은 위게임 모델과 교전시나리오를 이용한 모의분석을 수행하여 효과도를 확인하고, 그 결과 확정된 요구 성능을 개발자에게 제시하여 개발이 시작된다(R.

O. K Joint chiefs of staff, 2007). 그러나 이 과정에서 사용자가 효과도 분석을 수행하기 위해서는 전투차량의 가상 모델을 모사하기 위한 성능, 제원 등과 같은 자료를 입력해야 하는데, 이 때 입력자료의 타당성은 교전 효과도 분석결과에 영향을 미치므로 중요하다. 특히 설계제원과 성능들 사이에는 서로 교호작용을 하는 요소가 있을 수 있어, 과학적인 근거에 의한 자료의 구성이 매우 중요하다.

무기체계의 개발과정은 소요제기를 위한 개념연구단계, 체계형상을 구체화하고 체계·부체계의 분야별 핵심기술을 확보하는 탐색개발, 그리고 구성품 단위까지 기본설계 및 상세설계를 완성하는 체계개발로 나눌 수 있다.

† 책임저자, 정회원 · 부산대학교 기계공학부 교수
Tel: 051-510-2306 ; Fax: 051-512-9835
E-mail: oklim@pusan.ac.kr

* 부산대학교 기계설계공학과 박사과정

** 부산대학교 기계공학과 박사과정

• 이 논문에 대한 토론을 2009년 8월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2009년 10월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

본 연구에서는 소요제기 단계에서 전투차량의 체계개발자(system integrator)가 화력에 관한 부체계수준의 성능을 분석할 수 있는 방안을 제시함으로써 제안자가 효과적인 의사결정을 할 수 있도록 지원하고자 한다.

2. 화력성능 특성

2.1 효과도 분석과 설계인자

전투차량체계의 개념설계를 위한 화력성능 분석모델은 Fig. 1과 같이 차량, 탄약, 무장(gun)으로 구성되어 있다.

화력성능에 미치는 인자로는 탄약의 고유 제원(탄의 구경, 중량, 최대사거리, 탄의 낙하속도/각도, 추진제의 양), 운용상의 제원(발사각도, 조준오차) 및 화기의 제원(발사율)로 구분되는데, 이중 구경은 운용의 호환성을 고려하여 사전 결정되며, 탄의 낙하속도/각도는 정해진 발사각도 등 탄도의 운용조건과 사거리계산을 위한 탄도의 특성에 따라 결정된다. 그러므로 화력성능은 탄과 추진제의 중량, 사거리 및 발사율로 대표할 수 있다고 판단된다. 그 외의 조준오차, 탐지, 식별성능 등은 선택된 센서와 구성품의 개별의 성능으로 결정되며, 세부 설계단계에서 결정되는 요소들이다.

따라서, 체계의 개념설계 단계에서 체계의 물리적 특성 결정과 화력성능에 영향을 미치는 주요 인자로는 파괴효과에 직접적인 영향을 주는 탄의 중량, 원거리 사격을 고려한 최대사거리, 그리고 화력의 집중효과와 연관된 발사율을 고려하는 것이 타당하며 이와 관련된 인자를 분석대상으로 선정하는 것이 필요하다.

2.2 설계인자 선정

화력성능이란 정해진 구경의 탄, 추진제로 탄을 원하는 사거리로 발사하여 원하는 위치에서 무기효과를 발휘할 수 있는 능력을 말하나, 본 연구에서는 발사에서 표적 도달까지의 운동과 관련된 효과만을 다루기로 한다. 이를 위해서는 튜브 내 추진제의 점화 이후 튜브 내의 탄의 역학적 운동특성과 및 튜브를 떠나 대기 중을 비행하는 탄의 궤적에 대한 해석이 필요한데, 성능과 설계인자 특성에 대한 이해를 위해 탄의 발사와 비행 과정의 기능 및 원리를 먼저 살펴본다.

튜브 내부에서 연소된 추진제의 에너지는 밀폐된 공간에 고온, 고압의 가스를 발생시켜 탄을 가속시키고, 탄은 v_p 의 속도로 튜브를 출발하여 대기 중을 비행하게 된다. 이때 대기 중으로 발사된 탄의 사거리는 탄의 형상, 중량, 출발 속도, 사격각도, 기상에 따라 비행거리와 비행시간이 결정된다.

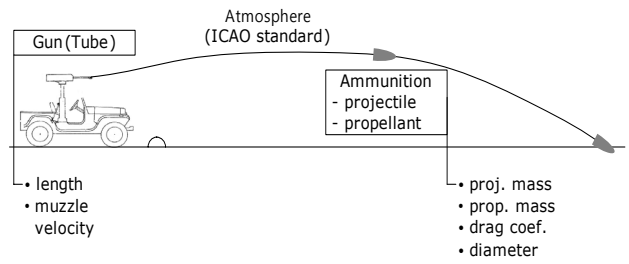


Fig. 1 Fire power model of a combat vehicle

비행간 사거리에 직접적 영향을 주는 저항은 형상에서 결정되는 항력계수와 중량과 단면적의 비로 정의되는 탄도계수(ballistic coefficient)에 의해 큰 영향을 받는데, 이들 계수는 탄의 상세설계 시 결정되므로 체계개념 단계에서는 고려하지 못하며, 경험적 자료를 사용한다. 또한 비행중의 대기조건에 따른 사거리에 변화가 크므로 이를 고려해야 하나 최초 설계 단계에서는 국제규격에서 정한 표준대기조건을 적용하여 탄도를 설계한다. 따라서 본 연구에서는 위의 강외탄도(exterior ballistics) 특성고찰결과 및 연구목적상 탄과 표준대기조건하에서 추진제의 중량, 출발속도를 주요 인자로 고려하였다.

약실내의 압력은 튜브설계 시 두께와 중량에 결정적인 영향을 주는 기본 자료가 되며, 탄의 운동과 반대방향으로 무장을 후퇴시켜 차체와 지지대에 힘(사격 충격력)을 가하여 운동하게 한다. 이때 차량 운동은 다음 사격의 조건에 영향을 주므로 안정화 시간은 발사율을 결정하는 주요 요인이 된다. 이러한 충격력과 탄의 출발속도 등 강내탄도(interior ballistics)의 특성은 압력의 추진제의 양, 압력분포 특성의 계산을 통해 결정된다.

이상과 같이 본 연구목적상 개념 설계 시 화력성능에 고려할 주요 설계인자는 탄의 중량, 추진제의 양이라 판단하였으며, 이를 통해 탄의 속도 및 튜브 내 압력의 분포 및 충격량을 계산하고, 그 결과로 나타나는 화력성능의 지수로서는 사거리를 정의하였다.

3. 화력성능 구성

사거리분석을 위해서는 탄 발사에 필요한 속도를 얻기 위한 튜브 내의 강내탄도 해석과 대기 중의 비행궤적을 해석할 수 있는 강외탄도 해석이 필요하다. 발사율은 각 탄의 발사 후, 다음 사격이 가능한 안정된 조건(pitch 기준)에 이르기까지 소요되는 시간주기의 역수로 정의된다. 이의 분석을 위해서는 탄의 발사 시 차체에 작용하는 충격력(impulse)의 크기를 계산하기 위한 강내탄도 해석이 필요하다.

3.1 강내탄도 모델

강내탄도의 해석은 전투차량의 화력성능분석에서 가장 먼저 이루어져야 하는 필수적인 과정이며, 탄의 운동이 시작되고 충격력이 발생하는 역학적 과정을 포함하고 있다. 또한 강내탄도 해석에서 계산된 튜브 내의 압력, 탄의 운동 속도는 차체의 미치는 충격력과 사거리계산의 중요한 입력 자료가 된다.

본 절에서는 Fig. 2와 같이 주어진 튜브, 탄, 추진제의 제원에 의해 탄이 튜브를 떠나기까지 튜브 내에서 일어나는 운동역학적 현상을 이론적으로 설명하고, 다음으로 탄의 속도에 영향을 미치는 추진제 양 및 튜브의 영향에 대해 설명한다. 이러한 강내탄도 해석과정을 통해 최종적으로 구해지는 탄의 속도 및 충격량과 각 설계인자들의 연관성을 판단할 수 있다. Fig. 2와 같이 탄도의 해석에 사용되는 인자들은 탄의 이동거리 x_p , 튜브 길이 L , 탄의 질량 m_p , 추진제 질량 m_c , 튜브 내의 압력 p 그리고 탄이 튜브를 떠나는 순간의 속도 v_p 이다.

기존의 강내탄도의 해석은 화학적, 열적 및 운동학적 이론이 복합적으로 작용함에 따라 여러 가지 이론적, 경험적 분석결과가 제시되어 있으며, IBHVG2(Anderson 등, 1987)와 PRODAS(Arrow tech associates Inc., 2007) 등과 같은 전용프로그램이 개발되어 사용되고 있다. 그러나 이러한 프로그램들은 추진제 성분의 형상, 화학적, 열적 특성 및 튜브와 탄의 상세한 형상과 제원을 입력해야 하므로 추진제 및 탄의 상세설계 단계에서 사용되며 많은 비용이 든다.

따라서 개발초기 개념연구 시 운동역학적인 면에서 성능분석을 하기 위한 모델로 2장에서 선정된 탄과 추진제의 질량, 구경, 포구속도, 최대약실압력, 포신길이 등에 대한 개략적 정보를 이용하여 탄의 강내운동의 역학적 관계를 해석하는 것이 편리하다.

본 연구에서는 탄의 튜브 내의 운동역학적인 해를 구하는 방법으로서 오랜 기간 동안 많이 적용되고 있는 집중질량모델(lumped parameter model)(Her majesty's stationery, 1987)과 Le Duc 모델(Department of defense, 1988)을 적용하였다.

집중질량모델은 압력, 운동속도, 에너지 등 주요 특성을 평균값의 향으로 묘사하는 방법으로서 튜브 내의 연소특성 해석, 시공간의 온도의 분포계산 등과 같은 탄과 추진제의 상세설계에는 적용할 수는 없으나, 개념적인 분석에는 매우 유용하여 널리 사용되고 있다. Le Duc모델은 실험을 하지 않고 튜브 내의 압력분포와 탄의 운동을 계산하는 경험식으로서, 기존의 연구결과에서 제시된 여러 경험모델(Carlucci,

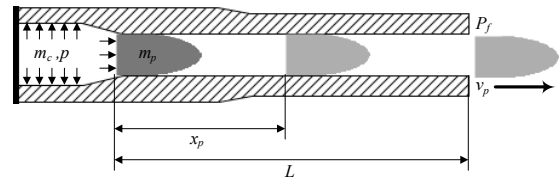


Fig. 2 Interior ballistic component of gun tube

2007) 중 실험치에 잘 일치하는 것으로 알려진 모델이다. 위의 두 모델과 뉴턴의 2법칙을 이용하면 튜브 내에 작용하는 힘과의 탄의 운동사이의 관계를 유도할 수 있다.

3.1.1 추진제 양과 탄의 속도

추진제 연소로 발생된 에너지는 탄의 운동(전진 및 회전), 추진제의 운동, 완충장치의 기계적 운동, 강선변형 등에 대부분 사용되고 나머지는 열과 마찰로 잃게 되는데, 운동역학적 관점의 에너지에 대한 관계식을 추진제 질량 m_c 와 탄의 속도 v_p 의 결과식을 유추하면 다음과 같다(Oerlikon-Bührle AG, 1981).

$$v_p \propto \sqrt{m_c} \tag{1}$$

즉, 동일한 추진제를 사용한 강내탄도 해석에서 탄의 질량 m_p 가 결정되면, 탄의 속도는 추진제 양의 제곱근에 비례함을 알 수 있다.

3.1.2 추진제 양과 탄의 속도

튜브 내에서 탄의 운동과 압력-시간(또는 이동거리) 곡선(pressure-time curve)은 작용압력으로부터 외부로 작용하는 충격력을 계산하는데 필요하다.

Le Duc은 튜브 내의 탄의 속도, v_p 를 다음과 같이 탄의 이동거리, x_p 를 이용한 경험식으로 근사화하였다.

$$v_p = ax_p / (b + x_p) \tag{2}$$

식 (2)에서 연쇄법칙(chain rule)으로 가속도 a_p 를 구하고 뉴턴의 2법칙을 이용하면 다음과 같이 탄의 최대추진력(F_m)을 구할 수 있다.

$$F_m = m_p \frac{p_m \cdot A}{m_p + 0.5m_c} \tag{3}$$

또한, 유도된 최대압력과 평균압력의 관계는 다음과 같다.

$$\frac{F_m}{F_e} = \frac{p_m}{p_e} = \frac{2p_m AL}{(m_p + 0.5m_c)v_0^2} \quad (4)$$

여기서, F_e 는 평균추진력, p_m 은 최대압력, p_e 는 평균압력, A 는 튜브 면적, L 은 튜브의 길이이고 v_0 는 튜브 끝에서의 탄의 속도이다.

평균 추진력을 평균압력과 튜브의 면적으로 다시 정리하면,

$$F_e = p_e \cdot A = (m_p + 0.5m_c) \frac{v_0^2}{2L} \quad (5)$$

평균 작용시간 t_e 는 다음 식과 같다.

$$t_e = \frac{2L}{v_0} \quad (6)$$

충격력은 식 (5)와 (6)을 이용하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\text{Impulse}(I) = F_e \cdot t_e = (m_p + 0.5m_c)v_0 \quad (7)$$

3.2 강외탄도 모듈

화력성능의 구성요소 중 하나인 사거리를 계산하기 위해 탄이 대기 중 비행하는 동안의 운동방정식으로는 현재 실제의 표준대기 조건하에서 풍속의 변화까지 고려하여 운용조건을 가장 적절히 반영하여 실제와 가장 유사한 해를 구할 수 있는 질점탄도 모델(point mass trajectory model)이 개발되어 가장 널리 적용되고 있다.

본 연구에서도 운동방정식으로는 질점탄도 방정식을 사용하고, 국제 민간항공기구(International Civil Aviation Organization, ICAO)의 표준대기조건을 적용하여 고도에 따른 대기의 온도, 압력의 변화를 고려하였다.

본 연구에서는 이상의 과정에 따라 탄도계산프로그램을 작성하였고, 이미 McCoy에 의해 작성되고 입증된 MCTRAJ 프로그램을 포트란(fortran)언어로 재작성하여 사용하였다(McCoy, 1998).

4. 화력성능 분석

전투차량체계의 개념연구 단계에서 주된 목표성능은 가능한 한 중량이 무거운 탄을 가능한 멀리, 짧은 시간에 많이 발사하는 것으로 두었다. 따라서 사거리와 발사율(또는 충격

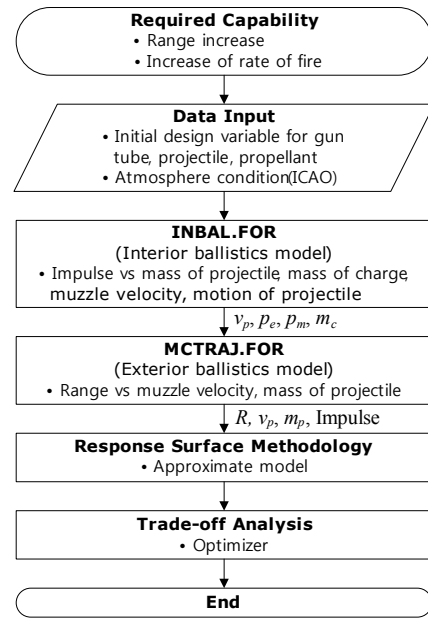


Fig. 3 Flow chart of ballistic computation

Table 1 Initial values for items

Items	Symbol	Value
Caliber(m)	D	0.04
Tube length(m)	L	0.52
Mass of projectile(kg)	m_p	0.24
Mass of propellant(kg)	m_c	0.05
Muzzle velocity(m/s)	v_p	241.0
Maximum pressure(MPa)	P_m	81.81
Maximum range(m)	R	2.193
Coefficient of drag	C_D	Fig. 4

량)을 목표성능으로 두었으며, 실험계획법을 적용하여 설계인자들의 주효과 및 교호작용 등의 영향을 분석하고 근사모델을 구하여 최적화하였다.

가상의 40mm 자동화기(Automatic Machine Gun, AMG) 모델에 대해서 Fig. 3의 과정에 따라 계산을 수행하였다. 프로그램은 3장에서 소개한 이론에 근거하여 작성한 강내탄도 계산 프로그램 INBAL과 MCTRAJ를 사용하였다.

AMG에 대해 적용된 기준 체원은 Table 1과 같으며, 설계인자의 변동범위는 기준체원의 $-10\% \sim +10\%$ 이내로 제한하여 중심합성계획법을 실시하였다.

4.2 강내탄도

4.2.1 튜브 내 운동 및 역학적 특성

Le Duc모델을 사용한 강내탄도 분석프로그램(INBAL)을 AMG에 적용하여 튜브 내의 탄의 이동, 속도 및 가속도 운동과 및 압력특성을 계산한 결과, 최고압력은 74.8MPa로서

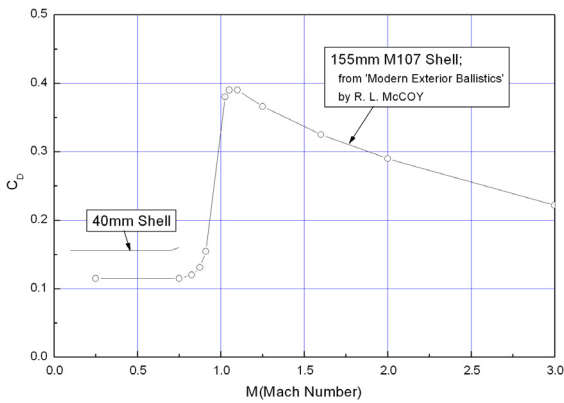


Fig. 4 Drag coefficient of 40mm and 155mm projectiles

입력 기준치인 81.8MPa보다 8.6% 낮게 평가되었으며, 탄의 운동거리, 튜브 끝 탄의 출발속도는 기준 입력치와 잘 일치하였다. 최고압력이 낮게 평가된 이유는, Le Duc모델에서는 압력을 식 (4)와 같이 탄에 미치는 힘의 최대값(F_m)으로부터 구하는데, 이 과정에서 식 (4)와 같이 입력된 최대 압력(p_m)에 비해 $m_p/(m_p + 0.5m_c)$ 의 비율만큼 낮게 계산하기 때문인 것으로 확인되었다.

4.2.2 충격량의 계산 및 검증

탄의 튜브 내 이동간 탄에 작용하는 힘은 탄의 진행과 반대방향으로 튜브의 후진 운동을 일으키게 되는데, 튜브를 이탈하기 전까지 누적된 힘은 차체에 충격량으로 전달된다. 이 충격량은 탄에 작용하는 힘의 곡선을 적분하여 구하고, 평균력으로 구한 결과와 비교하였다. AMG모델에 대해 위의 힘을 적분하여 계산한 결과는 탄의 튜브 이탈 시 62.5N·s 이 작용함을 알 수 있다.

이의 적절성을 확인하기 위해 식 (7)을 이용하여 충격력을 구하면, 충격량은 63.9N·s이다. 따라서 프로그램의 계산결과는 2%의 오차수준에서 서로 잘 일치하며, Le Duc모델을 이용한 계산과정 및 결과가 일반적인 물리적 운동관계를 잘 반영하고 있음을 알 수 있다.

4.2.3 탄과 추진제 질량에 대한 탄의 속도 회귀 분석

탄과 추진제의 질량 m_p , m_c 와 탄의 속도 v_p 의 관계를 구하기 위해 중심합성계획법으로 m_p 와 m_c 의 각 $\pm 10\%$ 설계범위내에서 계산하였다. 또한 속도에 대한 회귀방정식을 구하기 위해 다중회귀분석 및 다항회귀분석을 수행하였으며, 그 결과의 회귀방정식은 Table 2와 같다.

모두 결정계수가 0.99이상으로 유용하나 잔차분석 결과 다중회귀식의 잔차 오차의 합이 상대적으로 큰데, 이는 잔차

Table 2 Regression analysis of muzzle velocity

Item	Multiple regression	Polynomial regression
Regression eq. (v_p)	$241 - 500m_p + 2392m_c$	$241 - 1012m_p + 4840m_c + 1599m_p^2 - 11642m_c^2 - 5177m_p m_c$
R ²	99.2%	100.0%
Residual sum. square error	81	0.5
Residual mean square error	1.7	0.0

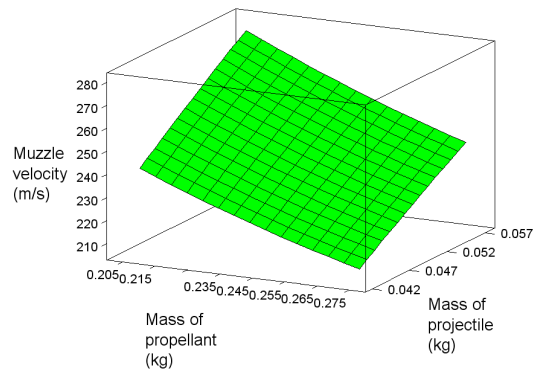


Fig. 5 Surface plot of muzzle velocity versus m_c and m_p

오차 분포가 경계부분에 상대적으로 증가한 때문이다. 따라서 다항회귀식에서 잔차 오차가 현저하게 개선되므로 분석을 위한 근사모델로 채택한다.

탄의 속도에 대한 반응표면을 나타내면 Fig. 5와 같은데 표면은 곡률효과가 매우 작아서 거의 평면에 가깝다. 이는 설계인자에 대해 강한 선형성을 갖는 것으로 판단되며, 탄의 속도에 대한 최적치를 m_p , m_c 의 설계영역에서 구할 때 최적해가 경계치에서 결정될 수 있음을 의미한다.

4.2.4 탄과 추진제 질량에 대한 충격량의 회귀 분석

충격량은 식 (7)과 같이 탄과 추진제의 질량 m_p , m_c 와 탄의 속도 v_p 를 이용하여 구할 수 있다. 그러나 v_p 는 상태변수로서 사거리 계산에도 입력되어 강내탄도와 강외탄도도 해석의 연성변수로 작용하여 화력성능의 분석을 복잡하게 할 수 있다. 따라서 가능한 연성을 제거하기 위해 독립된 설계변수로 충격량을 표현하는 것이 바람직하다. 따라서 각각의 속도에 대해 설계변수 m_p , m_c 를 각 $\pm 10\%$ 설계 범위내에서 구한 후, 식 (7)에 따라 계산한 충격량을 설계변수 m_p , m_c 로 근사모델을 구성할 필요가 있다. 그 결과는 다음과 같다.

$$I = 4.176 + 72.8648m_p + 742.21m_c - 9.79526m_p^2 - 1923.2m_c^2 + 864.817m_p m_c \quad (8)$$

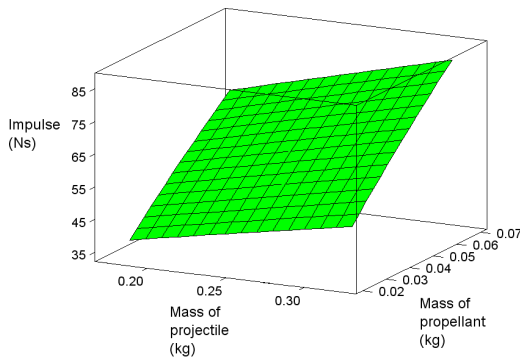


Fig. 6 Surface plot of impulse versus m_c and m_p

각 변수의 2차 항까지 고려한 반응표면의 계산결과 회귀식은 다음과 같다. 결정계수는 0.99이며, 오차 제곱합(sum square error, SSE)은 0.3, 오차 제곱의 평균(mean square error, MSE)은 0.043이다.

Fig. 6은 충격량의 3차원의 반응표면을 보여 주는데, 곡률 효과가 미미한 평면을 이루고 있으며, 앞 절의 탄의 속도처럼 설계영역의 경계치에서 최소값이 결정될 것으로 판단된다.

앞에서는 탄과 추진제의 중량에 대한 충격량을 분석하고 회귀식을 구하였다. 그러나 설계자는 탄의 중량과 속도에 따른 충격량의 직접적인 함수관계를 다음과 같이 파악할 필요가 있다.

정해진 추진제 량과 식 (7)을 이용하여 탄 질량별, 속도에 대한 충격량의 회귀식을 다음과 같이 구하였다.

$$m_p = 0.26\text{kg}(110\%): I = 0.347v_p - 13.416 \quad (9)$$

$$m_p = 0.24\text{kg}(100\%): I = 0.315v_p - 11.909 \quad (10)$$

$$m_p = 0.21\text{kg}(90\%) : I = 0.284v_p - 10.945 \quad (11)$$

충격량은 추진제의 운동에너지를 사거리의 경우와 같이 선형적인 관계이며, 탄의 중량이 증가할수록 증가율(기울기)도 크다. 운동에너지가 속도의 제곱에 비례 함에도 충격량이 선형적으로 변하는 것은, 작용시간은 속도에 반비례하여 감소하기 때문인 것으로 분석되었다. 결정계수는 모두 0.99이상이었다.

또한 반응표면이 평면에 가까우며, 따라서 충격량에 대한 탄과 추진제 질량의 최적치는 설계영역의 경계에서 결정됨을 알 수 있다.

4.3 강외탄도

4.3.1 탄 속도와 질량의 회귀 분석

MCTRAJ 프로그램의 유용성을 우선 확인하기 위해서, 기존 M107 탄의 사거리를 계산하고 기존의 규격과 비교하였다. 여기에 사용된 탄의 질량 43.1kg, 구경 0.155m이며, 항력계수는 Fig 4의 자료(McCoy, 1998)를 사용하였다. 계산 결과, 오차는 모두 2% 미만으로 아주 잘 일치하여 모델과 프로그램의 유용성을 확인할 수 있었다.

AMG 모델의 사거리계산은 탄의 속도와 중량을 -10%~+10% 범위에서 변화시켜 계산하고 회귀분석으로 고찰하였다. 사격각도는 최대사거리 사각인 41.6°로 결정하였다. 우선 탄의 출발 속도와 사거리의 상관관계를 1차 근사식으로 회귀 분석한 결과, 다음 식들과 같다.

$$m_p = 0.26\text{kg}(110\%): \text{Range}(R) = 7.533v_p + 475.9 \quad (12)$$

$$m_p = 0.24\text{kg}(100\%): \text{Range}(R) = 6.923v_p + 520.9 \quad (13)$$

$$m_p = 0.21\text{kg}(90\%) : \text{Range}(R) = 6.275v_p + 565.7 \quad (14)$$

결정계수와 상관도가 0.99이상으로 크고, 탄의 질량 및 속도가 직접적인 영향을 주는 인자로 확인되었다.

또한, 탄의 질량이 클수록 속도 증가에 따른 사거리 증가량(기울기)이 더욱 크게 나타나 질량은 사거리 증가에 상승효과를 미칠 것으로 분석되었다. 이러한 관계는 앞의 질점탄도 방정식에서 직접적으로 유추할 수 없는 특성으로서, 체계의 개념설계를 위해서는 매우 중요하고 개념설계 시 유용하게 사용될 것으로 판단된다.

탄도특성의 타당성 확인은 실제 시험으로 검증하기 어려운 현실을 고려하여, 유사한 사례로서 실제 운용되고 있는 155mm 구경 탄의 대표적인 2종에 대해 속도와 사거리간의 상관관계를 고찰하였다. 그 검토 결과는 Fig. 7과 같다. 각각의 중량이 46.9kg, 43.1kg의 최대 사거리는 19km수준이다. 회귀분석 결과 결정계수 및 상관도가 모두 0.99이상이며, 회귀식은 다음과 같다.

$$46.9\text{kg}: R = 28.58536v_p - 1111.27915 \quad (15)$$

$$43.1\text{kg}: R = 27.0206v_p - 498.84365 \quad (16)$$

40mm 탄의 경우와 같이 사거리와 탄의 속도사이의 관계는 선형회귀식과 같이 비례하며, 43.6kg보다 9%가 더 무거운 46.9kg의 기울기가 더 큰 것으로 나타났다. 또한, 사거리가 길수록 중량에 따른 증가효과가 컸으며, 이는 탄의 분석결과와 일치하므로 강외탄도 분석모델이 유용함을 알 수 있다.

이상의 결과를 바탕으로 탄의 중량과 탄의 속도를 독립변

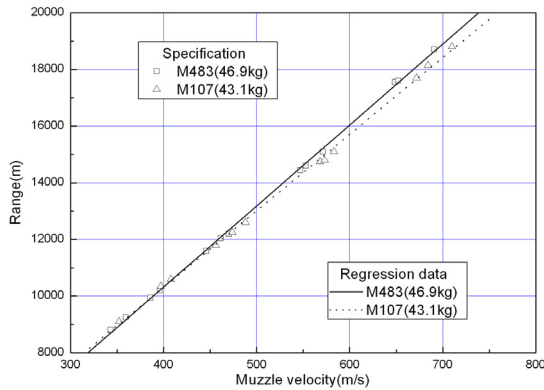


Fig. 7 Range and muzzle velocity of 155mm projectiles

Table 3 Regression analysis of range

Item	Multiple regression	Polynomial regression
Regression eq. (vp)	$-546 + 6.91v_p + 4446m_p$	$-74.9 + 6.16v_p - 0.0115v_p^2 + 1316m_p - 6643m_p^2 + 26.2v_p m_p$
R ²	99.6%	100.0%
Residual sum. square error	1446	10
Residual mean square error	60	0

수로 사거리에 대한 회귀방정식을 구하였다. 선형 다중회귀 분석과 다항회귀분석을 수행하였으며, 결과는 Table 3과 같다. 결정계수 및 잔차분석 결과 각 결과는 회귀식이므로 모두 적합하였으나, 잔차 크기 및 산포가 상대적으로 현저하게 개선된 다항회귀식을 적절한 회귀식으로 채택한다.

4.3.2 탄과 추진제 질량에 따른 사거리의 회귀 분석

사거리는 Table 3과 같이 탄과 추진제의 질량 m_p 와 탄의 속도 v_p 를 이용하여 구할 수 있으나, v_p 는 Table 2과 같이 m_p, m_c 의 함수가 되어 분석을 복잡하게 할 수 있으므로, 가능한 독립된 설계변수인 m_p, m_c 의 함수로 나타낼 필요가 있다. 따라서 강내탄도 모듈에서 계산된 $v_p = f(m_p, m_c)$ 와 Table 3의 $R = f(m_p, m_c)$ 를 이용하여 사거리를 m_p, m_c 를 독립변수로 하는 회귀식 $R = f(m_p, m_c)$ 을 구하면 다음 식과 같으며 결정계수는 99.9%이다.

$$R = 812.413 + 2664.77m_p + 20153.8m_c - 8624.1m_p^2 - 160131m_c^2 + 52085m_p m_c \quad (17)$$

Fig. 8은 사거리의 3차원의 반응표면을 보여 주는데, 약간의 곡률이 있으나 평면과 가까워 설계영역의 경계치에서

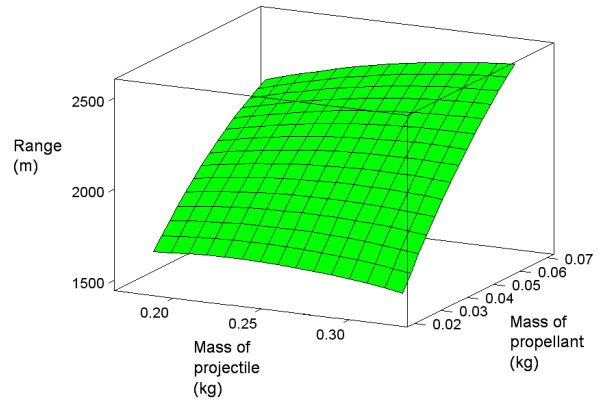


Fig. 8 Surface plot of range versus m_c and m_p

최적값들이 결정될 것으로 판단된다.

4.4 화력성능 최적화

두 개의 설계변수와 화력성능의 결정을 위해 다음과 같이 최적화 문제를 정식화하였다.

화력성능의 주요 구성요소로는 사거리와 충격량을 두었으며, 사거리의 증가와 충격량의 감소가 절충되게 각각에 의사 결정자가 가중치를 부여하도록 가중합(weighted sum) 방법을 적용하여 목적함수를 구성하였다.

$$\begin{aligned} \text{Find} & \quad m_p, m_c \\ \text{Minimize} & \quad F \equiv w_1(R)/2190 + (1 - w_1)(I)/64 \\ \text{subject to} & \quad 0.216 \leq m_p \leq 0.264 \\ & \quad 0.045 \leq m_c \leq 0.055 \end{aligned}$$

여기서, w_1 은 사거리에 대한 가중치이고 0.3, 0.5, 0.7로 두어 각각 비교 분석하였다. 최적화는 PLBA 알고리즘(Lim 등, 1987)을 적용하였으며, 구한 결과는 Table 4와 같다. 가중치별 목적함수의 반응표면을 Fig. 9~11과 같다. 가중치가 0.3, 0.5인 경우, 설계치의 변화가 없으며 사거리 비중이 많이 증가된 0.7의 경우 충격량의 증가가 동반됨을 알 수 있다. 이는 사거리 증가에 비해 충격량 증가 비율이 크기 때문인 것으로 판단된다.

Table 4 Trade analysis results of fire power

Initial values		Weight		Optimum Solution				
m_p	m_c	R	I	m_p	m_c	Obj. function	Range	Impulse
0.216	0.045	0.3	0.7	0.216	0.045	0.34329	2074.6	57.4
		0.5	0.5	0.216	0.045	-0.02545	2074.6	57.4
		0.7	0.3	0.216	0.055	-0.40885	2228.5	64.7

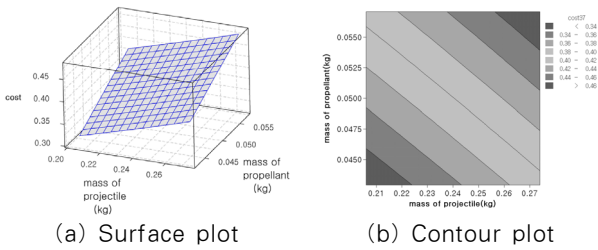


Fig. 9 Objective function weighted by $w_1=0.3$

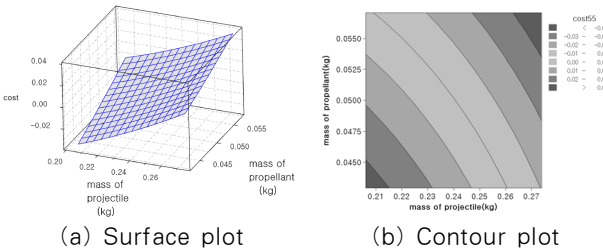


Fig. 10 Objective function weighted by $w_1=0.5$

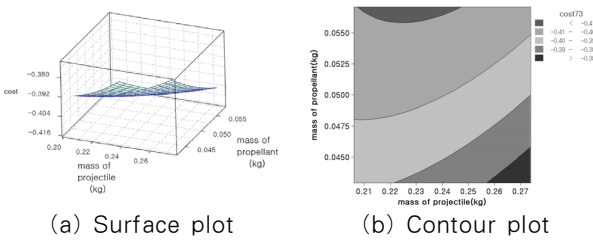


Fig. 11 Objective function weighted by $w_1=0.7$

5. 결 론

전투차량체계의 체계분석 모델은 강내탄도, 강외탄도 및 차량동특성 해석 모델로 구성 되어진다. 본 연구에서는 강내탄도와 강외탄도를 고려하여 화력성능에 대한 분석을 수행하였다.

강내외탄도의 분석결과 탄의 질량, 추진제의 질량을 설계인자로 선정하고 강내탄도에서 계산된 탄의 속도를 상변수로 하여 사거리에 대한 근사모델을 구하였으며, 유사 사례의 분석을 통해 근사모델의 유용성을 확인할 수 있었다. 설계인자에 따른 탄의 속도, 사거리 및 충격량에 대해 회귀분석을 통한 근사모델을 구하였는데 그 결과, 성능지수인 사거리, 충격량은 탄의 속도와 탄 질량에 대해 매우 선형적인 관계가

있음을 확인하였고, 회귀식은 선형 및 비선형모델로 추정된 결과 수정 결정계수가 99%이상으로 모두 유용하나 잔차의 감소가 뚜렷한 다항회귀식이 적절함을 알 수 있었다. 또한 반응표면을 이용한 회귀식이 분석에 유용할 수 있음을 확인할 수 있었다.

이상의 연구에서 전투차량의 화력성능 구성요소로 사거리와 충격량을 두고 분석한 결과, 두 개의 설계인자의 변화에 대해 서로 교호작용이 있음을 확인하였다. 또한 반응표면들은 평면에 근사하고, 최적의 설계는 설계영역의 경계에서 결정됨을 알 수 있었다. 따라서 이상의 근사모델과 최적화 방법을 이용함으로써 의사결정자는 탄의 중량 및 추진제의 중량에 대한 화력성능 분석과 설계인자의 결정을 효율적으로 할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

Anderson, R.D., Fickie, K.D. (1987) IBHVG2-A User's Guide, US Army BRL.
 Arrow Tech Associates Inc. (2007) PRODA3.
 Carlucci D.E., Jacobson, S.S. (2007) Ballistics, CRC Press.
 Department of Defense (1988) Recoil Systems, HDBK-778(AR).
 Farrel, C.L., Leeming, D.W. (1983) Military Ballistics, BRASSEY'S PUBLISHERS LIMITED.
 Her Majesty's Stationery Office (1987) Textbook of Ballistics and Gunnery, 1.
 Lim, O.K., Arora, J.S. (1987), An Active Set RQP Algorithm For Optimal Design.
 McCoy, R.L. (1998) Modern Exterior Ballistics, Schiffer Military History.
 Oerlikon-Bührle AG (1981) Oerlikon Pocket-Book
 R.O.K Joint Chiefs of Staff (2007) User's Manual: Army Weapon Effectiveness Analysis Model(AWAM).