한국CAD/CAM학회 논문집
Transactions of the Society of CAD/CAM Engineers

Vol. 19, No. 4, pp. 316-323. December 2014
DOI http://dx.doi.org/10.7315/CADCAM.2014.316

〈특집호–국방M&S〉

pISSN 1226-0606
eISSN 2288-6036

화력과 기동의 통합성능을 고려한 미래 전투차량의 해석 기반 설계 프레임웍 연구: (1) 통합성능분석 모델개발

임성훈[1] · 임우철[1] · 민승재[1†] · 이태희[1] · 류재봉[2] · 변재정[2]

[1]한양대학교 미래자동차공학과, [2]국방과학연구소

Model-Driven Design Framework for Future Combat Vehicle Development based on Firepower and Mobility: (1) Integrated Performance Modeling

Sunghoon Lim[1], Woochul Lim[1], Seungjae Min[1†], Tae Hee Lee[1], Jae Bong Ryoo[2], and Jai-Jeong Pyun[2]

[1]Department of Automotive Engineering, Hanyang University
[2]Agency for Defence Development

Received 15 September 2014; received in revised form 22 October 2014; accepted 24 October 2014

ABSTRACT

This paper proposes the 3D modeling and simulation technique for predicting the integrated performance of combat vehicle. To consider the practical driving and firing condition of a combat vehicle, the full vehicle model, which can define the six degrees-of-freedom of vehicle motion and various firing angles, is developed. The critical design parameters such as the stiffness and damping coefficient of suspension system are applied to construct the analysis model of vehicle. A simple ballistic model, which incorporates the empirical interior ballistic model and the point mass trajectory model, is built to estimate the firing range and the firing recoil force. To predict the integrated performance and analyze the effect of system parameters, MATLAB/SIMULINK model of a combat vehicle for performing the real time simulation is also developed. Several simulation tests incorporating the road bump and the firing recoil force are presented to confirm the effectiveness of the proposed vehicle model.

Key Words: Combat vehicle, Firepower, Integrated performance, Mobility, Modeling and simulation, 3D vehicle model

1. 서 론

다양한 운용조건에 노출되어 있는 미래 전투차량의 효율적인 설계를 위해서는 전투차량의 특성을 정확히 예측할 수 있는 모의분석(modeling and simulation) 기법을 정립하고 이를 개념설계 단계에 적용할 필요가 있다. 전투차량은 화력 및 기동성능에 영향을 주는 무장체계와 기동체계로 세분화할 수 있으며, 각 성능의 신뢰성 높은 분석 결과

†Corresponding Author, seungjae@hanyang.ac.kr
©2014 Society of CAD/CAM Engineers

를 도출하기 위한 연구가 다양하게 수행되었다. 그러나, 개념연구 초기에는 주요 변수들을 이용한 단순화된 모델을 사용할 수 밖에 없는데, 화력성능에 있어서 Lumped parameter 모델[1]이나 이상유동 해석 기법[2,3]을 이용하여 무장체계의 중요한 특성인 강내 압력분포 및 포구 속도를 예측하기 위한 연구가 수행되었고 차량의 현가 특성 등의 기동성능은 quarter car[4], half car[5], full car 모델[6]을 이용하여 분석되어 왔다.

과거 전투차량의 성능 분석은 무장 및 기동체계 분야별로 독립적으로 이루어 졌고 두 분야를 동시에 통합하여 분석할 필요성이 적었으나, 향후 미래의 전투차량 개념설계는 다양한 환경과 설계 조건을 고려하면서도 신속한 분석을 요구하고 있다. 이를 위해서는 성능분석에 기반한 전투차량의 개념설계 프레임웍의 정립과 화력 및 기동성능을 동시에 통합하여 분석할 수 있는 분석모델이 개발되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 통합성능 분석을 위한 3차원 전투차륜차량 해석 모델을 개발하여 미래 전투차량의 가상설계 프레임웍에 적용하고자 한다. 전투차량의 기동 및 화력성능에 영향을 미치는 3차원 입력변수들을 선별하고 수학적 해석 모델을 생성하여, 설계자가 다양한 기동 환경에서의 차량 특성을 판단하고 최적설계 프레임웍에 효과적으로 적용할 수 있도록 하였다. 또한, 통합성능 분석 모델을 MATLAB/SIMULINK 환경으로 구현하여 실시간 모의분석이 가능하도록 하였다. 이전 연구에서 제시된 실제 전투차량의 제원을 활용하여 범프 통과 후 차체 가속도, 사거리 등 전투차량의 중요한 성능을 도출하고 개발한 전투차량 모델의 타당성을 검증하였다.

2. 통합성능분석 모델 개발

2.1 전투차량의 성능

전투차량의 성능은 화력성능과 기동성능으로 구분할 수 있지만 기동간 사격 등 특수한 운용환경을 고려해야 하기 때문에 통합성능분석을 수행하여 판단해야 한다. 본 연구에서는 전투차량 개발 시 반드시 고려해야 하는 3가지 성능을 아래와 같이 선별하여 성능분석 모델 개발에 적용하였다.

먼저 사거리는 전투차량의 화력성능을 평가하는 가장 대표적 지표이다. 사거리를 평가하기 위해서는 포구에서의 탄두(projectile) 속도 및 항력 등을 고려할 수 있는 탄도 모델의 개발이 필요하다. 또한, 사격 시 발생하는 차체의 피치(pitch)나 롤(roll) 방향의 거동은 사거리나 발사율(rate of fire)에 큰 영향을 미치기 때문에 사격 후 반동력(recoil force)에 대한 차체 안정화 시간도 반드시 고려해야 하는 성능 지표이다. 이를 예측하기 위해서는 사격 충격력을 계산하기 위한 탄도 모델뿐만 아니라 차량의 현가특성이 고려된 차량 동역학 모델의 분석이 필요하다.

범프(bump) 통과 시 발생하는 차체의 수직 가속도 역시 차량의 야지주행속도를 결정짓는 중요한 성능 지표이다. 전투차량은 야지 구동을 목적으로 설계되기 때문에 노면으로부터의 수직 변위에 항상 노출되어 있고 전투원이 느끼는 수직 가속도가 차량 운용성에 큰 영향을 준다. 따라서 다양한 노면 정보를 고려할 수 있고 타이어의 현가 특성도 고려할 수 있는 동역학 모델을 개발하여 전투차량 설계에 반영할 수 있어야 한다.

2.2 화력성능 분석

전투차량의 화력성능을 평가하기 위해서는 추진체(propellant)가 연소하여 탄두가 포구를 떠나는 순간까지의 거동을 예측하는 강내 탄도 해석과 탄도 궤적 및 사거리를 평가하기 위한 강외 탄도 해석을 수행해야 한다. 본 연구에서는 무장체계를 표현할 수 있는 최소한의 입력변수로 강내 탄도의 특성을 분석할 수 있는 Le Duc 경험식[7]과 직사화기의 강외 탄도 분석에 유용하게 사용되고 있는 질점탄도 모델(point mass trajectory model)[8]을 적용하여 화력성능 분석을 위한 탄도 해석 모델을 개발하였다.

2.2.1 강내 탄도 분석

Le Duc 경험식에서는 튜브 내에서 탄두의 속도(v)를 다음과 같이 발사체의 위치(x_p)에 따른 곡선 형태로 가정한다.

$$v(x_p) = \frac{a(m_c, m_p)x_p}{b(m_c, m_p, L) + x_p} \quad (1)$$

여기서 a와 b는 추진제 질량(m_c), 탄두 질량(m_p) 및 튜브의 길이(L) 등에 의해 결정되는 Le Duc 상수이다. 또한, 강내에서 발생하는 압력(p)은 다음과 같이 탄두의 위치와 탄 구경(D)을 이용하여 계산

할 수 있다.

$$p(x_p) = m_p \frac{4a^2 b x_p}{\pi D^2 (b + x_p)^3} \quad (2)$$

이와 같이 Le Duc 경험식은 통합성능 분석에 필요한 탄두의 포구 속도 및 발사 반동력 등을 간단한 수식을 이용하여 정확히 예측할 수 있기 때문에 전투차량 설계를 위한 강내 탄도 분석 모델에 적용하였다.

2.2.2 강외 탄도 분석

포구를 떠난 탄두의 궤적은 질점탄도 모델을 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$m_p \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \Sigma \mathbf{F} + m_p \mathbf{g} \quad (3)$$

여기서 **v**는 3차원 공간에서의 탄두 속도이고 **g**는 중력 가속도를 의미한다. 강외 탄도 분석에 적용되는 공기역학적 외력(**F**)은 본 연구에서는 고려하지 않은 풍력과 다음과 같이 계산되는 항력($\mathbf{F}_{drag}$)으로 구분할 수 있다.

$$\mathbf{F}_{drag} = -\frac{1}{2}\rho S(D) C_D |\mathbf{v}| \mathbf{v} \quad (4)$$

여기서 ρ는 공기의 밀도, C_D는 탄두의 항력계수이고 S는 탄의 구경에 의해 결정되는 대표면적이다.

2.2.3 탄도 모델의 입력변수

사거리와 강내 압력 분포에 큰 영향을 미치는 탄두 및 추진체의 질량과 튜브의 기하학적 인자(D, L)를 포함한 4개의 인자를 화력성능 해석을 위한 주요 입력 변수로 평가하고 해석을 수행하였다. Le Duc 상수(a, b)를 계산하기 위해 추가적으로 필요한 추진제의 에너지 상수, 충진율 등은 물질의 특성에 관계된 상수이므로, 본 연구에서 변수로 선정하지는 않았다.

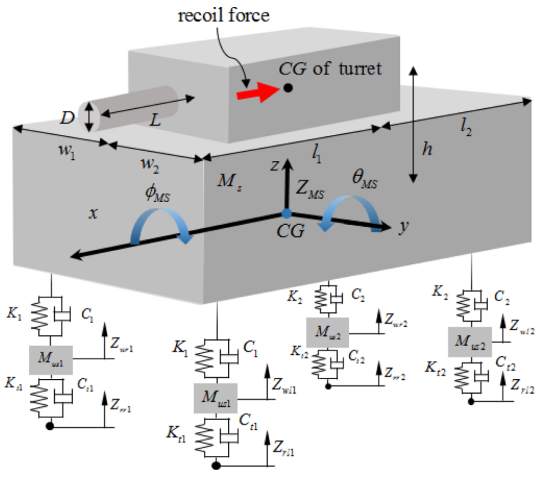

Fig. 1 3D combat vehicle model

2.3 기동성능 분석

전투차량은 평지뿐만 아니라 험로 주행이 가능해야 하고 다양한 자세에서 사격하는 기동 특성이 있기 때문에 3차원의 모든 방향에서 발생하는 하중에 항상 영향을 받는다. 따라서 전투차량의 설계를 수행할 때는 발생 가능한 모든 기동 조건을 고려해야 하고 차량의 수직 가속도 및 롤(roll) 운동 특성을 정확하게 예측할 수 있는 차량 동역학

Table 1 State variable for vehicle dynamic model

State variable	Description	Symbol
X_1	Vertical displacement of suspended mass	Z_{MS}
X_2	Vertical velocity of suspended mass	$\dot{Z}_{MS}$
X_3	Pitch angle of suspended mass	θ_{MS}
X_4	Pitch angular velocity of suspended mass	$\dot{\theta}_{MS}$
X_5	Roll angle of suspended mass	ϕ_{MS}
X_6	Roll angular velocity of suspended mass	$\dot{\phi}_{MS}$
X_7	Vertical displacement of front right unsuspended mass	Z_{wr1}
X_8	Vertical velocity of front right unsuspended mass	$\dot{Z}_{wr1}$
X_9	Vertical displacement of front left unsuspended mass	Z_{wl1}
X_{10}	Vertical velocity of front left unsuspended mass	$\dot{Z}_{wl1}$
X_{11}	Vertical displacement of rear right unsuspended mass	Z_{wr2}
X_{12}	Vertical velocity of rear right unsuspended mass	$\dot{Z}_{wr2}$
X_{13}	Vertical displacement of rear left unsuspended mass	Z_{wl2}
X_{14}	Vertical velocity of rear left unsuspended mass	$\dot{Z}_{wl2}$

모델의 개발이 필요하다.

2.3.1 동역학 모델의 상태변수와 입력변수

전투차량의 기동성능 분석 모델을 개발하기 위해서는 먼저 차량의 거동을 표현하는 상태변수(state variable)를 설정해야 한다. 본 연구에서는 다양한 노면 조건과 사격자세에 대한 차량 현가 특성을 평가하기 위하여 Table 1과 같이 차체의 3방향(수직, 피치, 롤) 변위와 4개의 비현가질량(unsuspended mass)에 대한 수직 변위를 표현할 수 있는 14개의 상태변수를 설정했다[9].

차량 동역학 모델의 입력변수로는 Fig. 1과 같이 현가질량(M_s), 전·후륜의 비현가질량($M_{us(i)}$), 차체의 무게중심에서 전·후륜까지의 거리($l_{(i)}$), 현가 시스템과 타이어의 강성($K_{(i)}$, $K_{t(i)}$) 및 감쇠 계수($C_{(i)}$, $C_{t(i)}$) 등을 포함한 16개의 인자를 설정하고 모델링에 이용하였다. 2D 차량 모델과는 달리 현가질량의 무게중심에서 측면까지의 거리(w_1, w_2)를 입력변수로 추가했고 사격 반동력에 의한 차체 거동을 분석하기 위해 터렛(turret)까지의 수직거리(h)도 변수로 설정하였다.

2.3.2 3차원 차량 동역학 모델

전투차량의 3차원 거동을 분석하기 위해 다음과 같이 각 변수에 대한 운동 방정식을 연립하여 전투차량 모델링을 수행하였다.

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{AX} + \mathbf{BU} + \mathbf{R} \tag{5}$$

여기서 **X**는 상태변수 벡터이고 **R**은 사격 반동력 벡터이다. **A**는 다음과 같이 현가 및 형상 변수로 구성된 현가질량에 대한 시스템 행렬이다.

$$\mathbf{A} = [A_1\ A_2\ \cdots\ A_{14}]^T \tag{6}$$

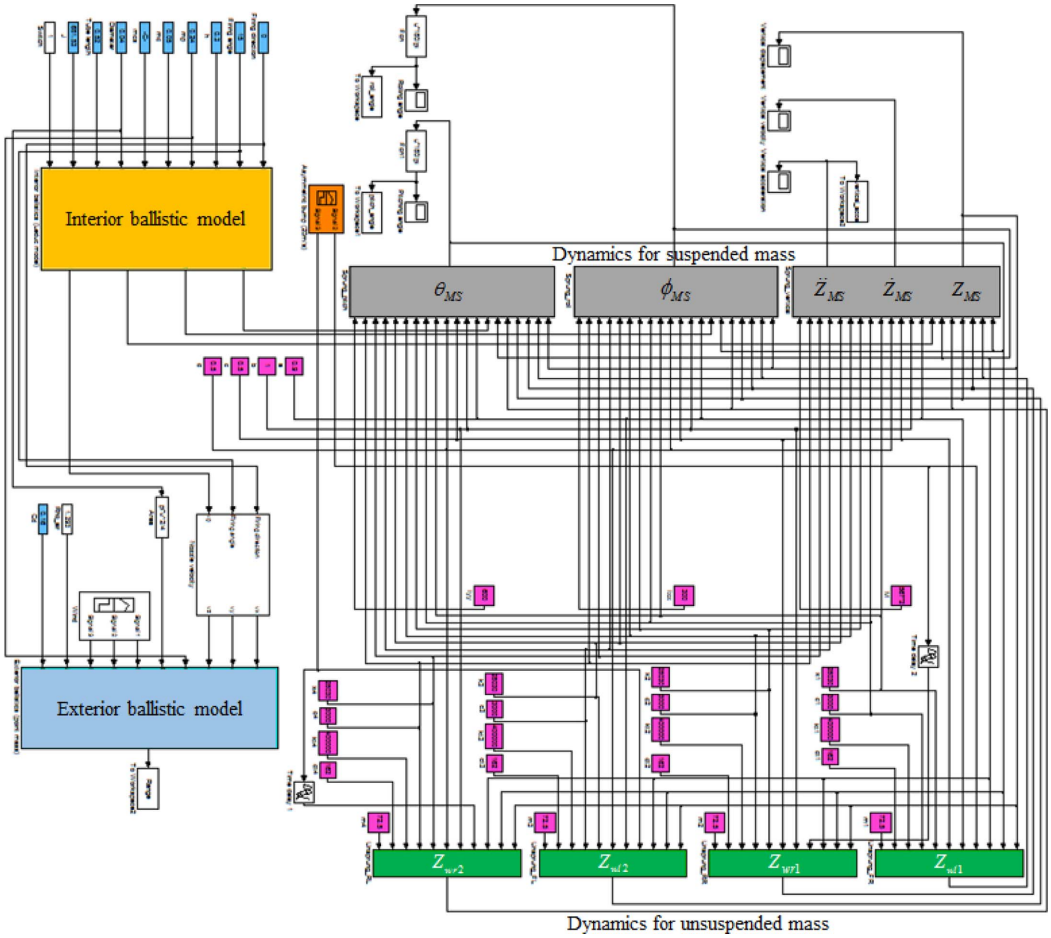

Fig. 2 MATLAB/SIMULINK model for combat vehicle

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}^T \quad A_2 = \frac{1}{M_s} \begin{bmatrix} (-2K_1 - 2K_2) \\ (-2C_1 - 2C_2) \\ (2K_1 l_1 - 2K_2 l_2) \\ \vdots \\ C_2 \end{bmatrix}^T \cdots \quad (7)$$

비현가질량에 입력되는 노면으로부터의 수직변위(**U**)는 다음과 같은 비현가시스템 행렬(**B**)를 통해 가속도로 변환하여 동역학 해석에 적용한다.

$$\mathbf{U} = [0 \cdots Z_{wl1}\ 0 \cdots Z_{wl0}\ 0]^T \quad (8)$$

$$\mathbf{B} = [B_1 \cdots B_{13}\ B_{14}]^T \quad (9)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T \cdots B_{10} = \frac{1}{M_{us1}} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ K_{t1} \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}^T \cdots B_{14} = \frac{1}{M_{us2}} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ K_{t2} \\ C_{t2} \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

2.4 통합성능분석 모델 구현

제안한 탄도 모델과 동역학 모델을 연계하여 통합성능분석 모델을 개발하고 Fig. 2와 같이 MATLAB/SIMULINK를 이용하여 실시간 시뮬레이션 모델을 구현하였다. 이때 전투차량 통합성능분석을 위한 입력변수는 탄도 모델과 차량 동역학 모델의 시스템 특성과 기하학적 형상을 표현할 수 있도록 앞서 정의한 총 20개의 인자로 선정하였고 Fig. 3과 같이 최대사거리, 차체 안정화 시간 등 3개의 대표적인 성능을 도출할 수 있는 통합성능분석 모델을 개발하였다. 이 때, 입력질량 벡터(**M**)는 현가질량, 전·후륜질량 등 3개의 요소를 갖고 있으며 강성(**K**) 및 감쇠 계수(**C**) 벡터는 현가장치와 타이어를 구분하여 각각 4개의 입력변수를 포함하고 있다. 각각의 탄도 모델과 차량 동역학 모델은 포구속도(v_{final}), 사격 반동력 등의 연성변수(coupled variable)로 서로 연동되어 있고 노면정보 및 3차원 거동 특성을 예측하기 위한 관성 모멘트(I_{xx}, I_{yy})가 입력되는 것을 확인할 수 있다.

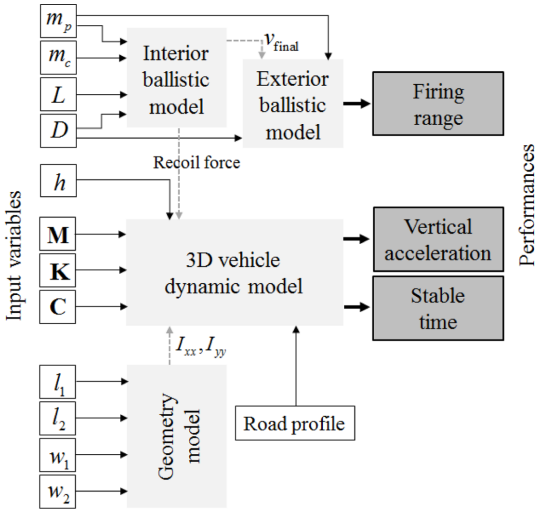

Fig. 3 Relation between input variables and output performances

3. 성능분석 결과

3.1 성능분석 모델 검증

통합성능분석 모델의 효용성을 검증하기 위해 이전 연구에서 제시한 전투차량의 제원[10,11]을 이용하여 해석을 수행하였다. 입력변수는 Table 2에 정리하였다. 검증한 성능은 최대 사거리와 강 내 최대 압력, 0.1 m 범프 통과 시 발생하는 최대 수직 가속도이다. 3개의 성능 수치를 Fig. 4와 같이 정규화하여 비교한 결과, 모두 5% 이내로 일치하는 것을 확인할 수 있었고 가장 오차가 심한 성능은 무기체계의 최대 사거리였다. 이는 고도에 따

Table 2 Input variables for combat vehicle

Input variable	Description	Value
M_s	Suspended mass	1,134 kg
M_{us1}, M_{us2}	Unsuspended mass	72.5 kg
K_1, K_2	Spring coefficient	28,030 N/m
C_1, C_2	Damping coefficient	3,000 Ns/m
K_{t1}, K_{t2}	Tire spring coefficient	400,000 N/m
C_{t1}, C_{t2}	Tire damping coefficient	162 Ns/m
l_1	CG to front wheel	0.9 m
l_2	CG to rear wheel	1.0 m
w_1, w_2	Half width	0.5 m
h	CG to turret	0.5 m
m_p	Mass of projectile	0.24 kg
m_c	Mass of propellant	0.05 kg
L	Tube length	0.52 m
D	Caliber	0.04 m

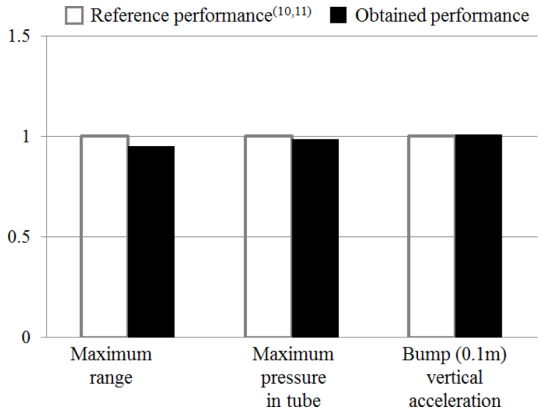

Fig. 4 Comparison of firepower and mobility

른 공기의 밀도 변화를 고려하지 않아서 탄두의 항력이 다소 높게 평가되었기 때문으로 판단된다. 그 외 강내 탄도 해석 결과인 최대 압력 수치나 차량 현가특성은 2% 오차 이내에서 정확히 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

3.2 전투차량의 비대칭 거동

이전의 2차원 전투차량 모델[10,11]에서는 예측할 수 없는 비대칭 거동에 대한 해석도 추가로 수행하였다. 이를 위해 Table 2와 같이 1 m의 전폭(overall width)을 사용하고 비대칭 범프와 측방 사격의 조건을 입력하였다. 차량의 우측 휠만 0.1 m의 범프를 통과할 때 발생하는 수직 가속도와 롤각의 변화는 Fig. 5와 같다. 대칭 범프를 통과할 때 발생하는 최대 수직가속도를 1로 정규화한 결과를 살펴보면, 비대칭 범프에서 발생하는 최대 수직 가속도는 50% 감소했다는 사실을 확인할 수 있다. 그러나 대칭 범프에서는 고려할 필요가 없는 롤각의 변화가 발생하는 것을 확인할 수 있는데 이러한 차체의 거동은 사격 명중률과 사거리에 큰 영향을 줄 수 있다.

사격 후 발생하는 전투차량의 거동을 분석해 보면 전방 사격에서 발생하는 최대 피치각과 비교하여 Fig. 6과 같이 측방사격 시 발생하는 최대 롤각이 3배 이상 높은 것을 확인하였다. 대부분의 차량은 축간거리(wheelbase)가 전폭에 비해 긴 구조를 갖기 때문에 측방사격 시 발생하는 차체의 변동이 더 크게 발생할 수 밖에 없다. 그러나 이러한 롤 방향의 거동은 2차원 모델에서 표현되지 않기 때문에 전투차량의 성능분석은 반드시 3차원 차량 모델을 기반으로 수행해야 하는 사실을 알 수 있다.

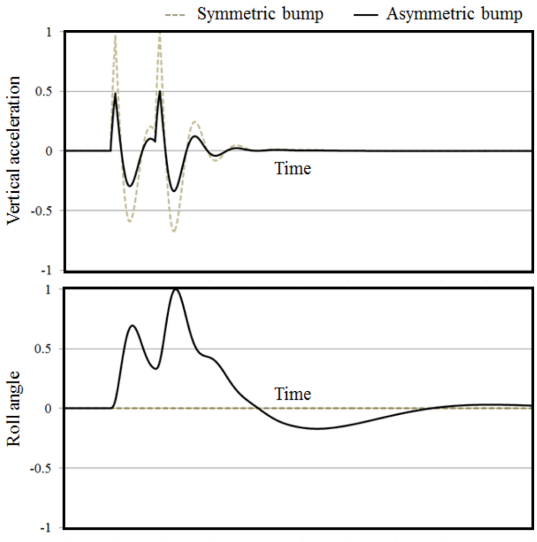

Fig. 5 Vertical acceleration and roll angle when passing a bump

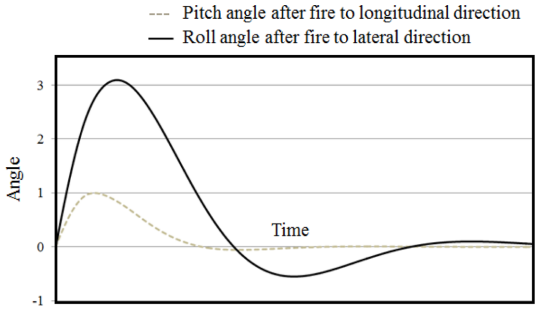

Fig. 6 Variation of angle after fire

4. 결 론

개념설계 단계에서 전투차량의 다양한 거동 특성을 고려하고 기동 및 화력성능을 효율적으로 예측하기 위한 성능분석 모델을 제안하였다. 또한, 각 성능간의 연성 관계를 파악하여 통합성능분석을 위한 3차원 전투차량 모델을 구현하고 최적설계를 위한 입력변수를 선정하였다. 검증을 위한 시뮬레이션 수행 결과 기존의 2차원 모델에서는 확인할 수 없었던 전투차량의 거동 특성을 도출하였고 제안한 모델의 유용성을 확인하였다. 본 연구에서 제안한 통합성능 분석기법은 미래전투차량 설계를 위한 프레임웍 개발에 적용될 예정이다.

감사의 글

본 연구는 한국 국방과학연구소의 지상체계분석특화연구실 과제의 지원을 받았으며, 이에 감사드립니다.

References

1. Lee, S., Kim, S. and Lee, G., 2008, A Study on the Calculation of Muzzle Velocity through the Gun Barrel Pressure Measurement, *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, 12(5), pp.60-66.
2. Sung, H.-G., Yoo, S.-Y., Lee, S.-B., Choi, D.-W. and Roh, T.-S., 2013, Analysis of Elements Influencing on Performance of Interior Ballistics, *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, 17(4), pp.16-24.
3. Miura, H., Matsuo, A. and Nakamura, Y., 2013, Numerical Prediction of Interior Ballistics Performance of Projectile Accelerator Using Granular or Tubular Solid Propellant, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 38, pp.204-213.
4. Agharkakli, A., Sabet, G. S. and Barouz, A., 2012, Simulation and Analysis of Passive and Active Suspention System Using Quarter Car Model for Different Road Profile, *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 3(5), pp.636-644.
5. Cho, B.-K., Ryu, G. and Song, S.J., 2005, Control Strategy of an Active Suspension for a Half Car Model with Preview Information, *International Journal of Automotive Technology*, 6(3), pp.243-249.
6. Min, K.-D. and Kim, Y.C., 2014, Three-Dimensional Dynamic Model of Full Vehicle, *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, 63(1), pp.162-172.
7. Lim, O-K., Choi, E.-H. and Ryoo, J.-B., 2009, Fire Power Analysis for Concept Exploration of Combat Vehicle, *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 22(3), pp.251-258.
8. McCoy, R.L., 1998, *Modern Exterior Ballistics*, Schiffer Military History.
9. Mitra, A., Benerjee, N., Khalane, H.A., Sonawane, M.A., Joshi, D.R. and Bagul, G.R., 2013, Simulation and Analysis of Full Car Model for Various Road Profile on a Analytically Validated MATLAB/SIMULINK model, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, pp.22-33.
10. Ryoo, J.-B., 2009, *Integrated System Analysis for Concept Exploration of Combat Vehicle*, Ph.D. Thesis, Pusan National University.
11. Choi, E.-H., 2011, *Multidisciplinary Design Optimization by Integrated Coupled Approximate Model*, Ph.D. Thesis, Pusan National University.

임 성 훈

2009년 한양대학교 기계공학부 학사
2011년 한양대학교 자동차공학과 석사
2011년~현재 한양대학교 자동차공학과 박사과정
관심분야: 멀티피직스 시스템 해석, 최적설계

임 우 철

2009년 한양대학교 기계공학부 학사
2011년 한양대학교 자동차공학과 석사
2011년~현재 한양대학교 자동차공학과 박사과정
관심분야: 메타모델, CAE기반 신뢰성해석, 최적설계

민 승 재

1999년~현재 한양대학교 공과대학 미래자동차공학과 교수
관심분야: CAE기반 구조최적설계, 멀티피직스시스템 설계 및 해석, 모델기반 설계 및 성능최적화

이 태 희

1997년~현재 한양대학교 공과대학 미래자동차공학과 교수
관심분야: 최적설계, 대체모델 및 실험계획, 설계민감도해석, 신뢰성기반 최적설계

류 재 봉

부산대학교에서 석사 및 박사학위를 취득하고, 현재 국방과학연구소에서 근무함. 주요 관심 분야는 전투차량 등 복잡한 체계 개념설계단계에서 요구되는 통합성능에 대한 효과적이고 효율적인 분석기법, 가상설계 등 SBD(Simulation Based Design) 분야임.

변 재 정

미국 일리노이공과대학교 전산학과에서 박사학위를 취득하고, 한국방연구원/국방정보체계연구소에서 군수실장, 작전체계(C4I)부장을 역임하였으며, 현재 국방과학연구소에서 수석연구원으로 재직 중임. 주요 관심분야로는 체계효과분석, 가상개발/검증, 실시간처리 등 임.