

Matlab Simulink를 이용한 회전안정탄의 6 자유도 탄도 모델링

김기표¹⁾, 윤상용¹⁾, 김진석¹⁾, 홍종태¹⁾

국방과학연구소¹⁾

6 - DOF Trajectory M&S of Spin - stabilized Munitions using Matlab Simulink

Ki Pyo Kim¹⁾, Sang Yong Yun¹⁾, Jin Seuk Kim and Jong Tai Hong¹⁾

¹⁾Technical R&D Center, ADD, Yuseong P.O.Box 35-5, Daejeon, Korea

Abstract : With the advent of low cost, miniature and high-g hardened inertial sensors and actuators, many kind of smart munitions are becoming practical such as 1D or 2D TCM, SFM, Range Extended GPS guided munitions and so on. They have more complicated trajectory control algorithm than conventional munitions'. Therefore it is necessary to study the complicated operation algorithm of smart munitions with M&S in advance of developing them. The purpose of this paper is to introduce a practical M&S method to study an operation concept of smart munitions using PRODAS and Matlab.

Key Words : 6 DOF Trajectory (6자유도), Spin-stabilized munition (회전안정탄), M&S(모델링 & 시뮬레이션)

Subscripts

TCM: Trajectory Correction Munition

SFM: Sensor Fuzed Munition

PRODAS: PROjectile Design and Analysis System

6 DOF: 6 Degree Of Freedom

접목하여 시뮬레이션하는 기술에 관련한 것으로 현재 선진각국에서 개발 중이거나 개발예정인 지능화 탄약(Smart Munition)의 6자유도 탄도와 탄도 수정 알고리즘 연구의 토대를 마련하기 위한 것이다.

기존의 야포용 탄약 체계는 일정한 정확도를 가진 탄약을 확실적인 목표 수량만큼 충분히 발사함으로써 원하는 목적을 달성하는 것으로 비용 대비 효과 측면에서 지능화 탄약 체계의 운용효과를 따를 수 없는 것으로 알려져 있다.¹⁾

1. 서론

본 논문은 Matlab Simulink를 이용하여 야포탄과 같은 회전안정탄두의 6자유도 탄도방정식을 적용하여 탄도 분석한 결과에 탄도조종기법을 추가,

현재 개발 중이거나 개발되어진 대표적인 지능 탄으로는 SFM 계열의 독일의 SMArt155, 프랑스의 BONUS, 사거리 연장 및 GPS 유도 계열의 미국의

* 교신저자 : kipyo1871@hanmail.net

Excalibur XM982, 탄도수정 계열의 프랑스의 Spacido 등이 있다.^{2),3)} 지능탄의 체계운동과 관련한 기술로는 1D 또는 2D 탄도 수정, 사거리 연장 및 활공, GPS 유도조종, 지능자탄 방출 및 실시간 제어 기술 등 다양한 탄도 제어기술이 있으며, 기존의 6자유도 탄도해석기술과 접목할 필요가 있다.

PRODAS(미국, Arrowtech사) S/W는 탄체의 설계와 강내 및 강의 탄도해석용으로 개발된 Semi-Empirical Analysis Code로 탄의 물성과 공력 제원 획득이 용이하고, 탄의 비행안정특성과 비행자세 및 탄도(Trajectory) 등의 시뮬레이션이 가능하여 범용적으로 사용되고 있다.⁵⁾ 최근 지능화 탄약의 탄도 모사기능을 가시화한 모듈이 추가되었는데, 해당모듈이 수출제한(EL)이 되어 탄도 조종 알고리즘을 이용한 실시간 제어 연구가 어려운 형편이다.

본 논문에서는 PRODAS S/W를 이용하여 공력계수를 획득, 사용하였고, 본 논문에 의한 탄도 계산 결과와 PRODAS S/W에서 얻은 계산 결과를 비교 분석하였다. 그리고, Matlab 모델링을 이용한 탄약의 6자유도 탄도 운동 모델링 과정을 설명하고 지능탄의 탄도제어 알고리즘 구현 가능성에 대해 간단히 언급하고자 한다.

2. 회전 안정탄의 6자유도 탄도 모델링

2.1 탄도 모델링 과정

회전안정탄은 탄약 발사 시 발생하는 탄의 회전운동을 이용하여 안정적인 비행 자세를 유지하는 탄약으로서 회전방향에 따라 좌 또는 우로 탄착지점이 굴절되는 편류현상이 그 특징이다.

Matlab을 이용하여 회전안정탄의 6자유도 탄도 모델링을 하기 위해서는 일반적인 탄도 방정식의 모델링은 가능하나 공력계수 및 탄약의 무게, 무게 중심 위치(C.G. point), 관성 분포 행렬(Inertial Matrix) 등과 같은 물성 자료가 필요하게 된다. 이러한 물성자료는 탄약 설계값을 입력하여

PRODAS를 실행시키면 그 결과 값으로 얻을 수 있다. 그림 1은 지능탄 체계의 탄도 분석을 위한 연구 과정을 나타내었다.

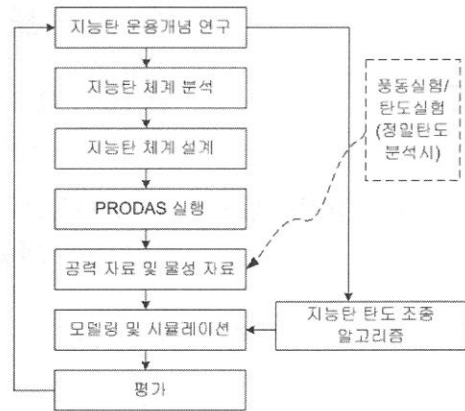


Fig. 1 Block Diagram of M&S Process

2.2 6자유도 탄도 모델링을 위한 수식¹⁾

Matlab Simulink에서의 6자유도 운동 모듈을 이용하여 아래의 탄도 방정식을 모델링하였다. 주요 입력 값으로는 탄약의 무게와 관성 분포 행렬 그리고 탄체의 C.G.에 가해지는 힘 X, Y, Z와 모멘트(Momnet) L, M, N 등과 운동방정식의 공력 계수 등 이다.

식 (1)~(6)은 힘(Force)과 모멘트(Moment)에 대한 6자유도 운동 방정식이다.

$$X = -F_p - mgsin(\theta) \quad (1)$$

$$Y = \frac{-v_a}{\sqrt{w_a^2 + v_a^2}} F_n + mgsin(\phi) \cos(\theta) \quad (2)$$

$$Z = \frac{-w_a}{\sqrt{w_a^2 + v_a^2}} F_n + mg \cos(\phi) \cos(\theta) \quad (3)$$

$$L = M_r \quad (4)$$

$$M = \frac{w_a}{\sqrt{w_a^2 + v_a^2}} M_p \quad (5)$$

$$N = \frac{-v_a}{\sqrt{w_a^2 + v_a^2}} M_p \quad (6)$$

F_p 와 F_n 는 각각 탄체의 무게 중심에 작용하는 항력(Drag Force)과 측력(Normal Body Force)이다. M_p 와 M_r 는 피치모멘트(Pitching Moment)과 롤모멘트(Rolling Moment)이다. u_a , v_a , w_a 는 무게 중심에서의 X, Y, Z 축에 대한 속력이고 φ , θ , ψ 는 X, Y, Z 축에 대해 각각 뱅크(Bank Angle), 피치(Pitch Angle), 롤(Roll Angle)의 오일러 각(Euler Angle)을 나타낸다.

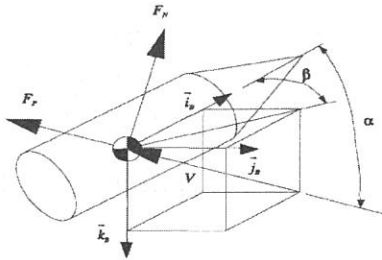


Fig. 2 Projectile Body Aerodynamic Force

아래 수식(7)~(10)은 F_p , F_n , M_r 그리고 M_p 에 대해 나타내고 있다. 여기서 ρ 는 공기 밀도, D 는 탄체의 직경(Diameter)을 나타낸다. 각각에 대한 공력 계수는 받음각(angle of attack)과 Mach Number를 변수로 가지는 함수로 나타낸다.

$$F_p = \frac{1}{2} \rho (u_a^2 + v_a^2 + w_a^2) \frac{\pi D^2}{4} C_{FP}(\alpha, M_a) \quad (7)$$

$$F_n = \frac{1}{2} \rho (u_a^2 + v_a^2 + w_a^2) \frac{\pi D^2}{4} C_{FN}(\alpha, M_a) \quad (8)$$

$$M_r = \frac{1}{2} \rho (u_a^2 + v_a^2 + w_a^2) \frac{\pi D^3}{4} C_{MR}(\alpha, M_a) \quad (9)$$

$$M_p = \frac{1}{2} \rho (u_a^2 + v_a^2 + w_a^2) \frac{\pi D^3}{4} C_{MP}(\alpha, M_a) \quad (10)$$

식 (11)과 (12)는 각각 탄체의 받음각과 Mach Number를 나타낸다. 식 (12)에서 a 는 음속(Speed of Sound)를 나타낸다.

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{\sqrt{v_a^2 + w_a^2}}{u_a} \quad (11)$$

$$M_a = \frac{\sqrt{u_a^2 + v_a^2 + w_a^2}}{a} \quad (12)$$

식 (13)~(16)는 각각의 힘과 모멘트에 대한 공력 계수 방정식이다. 각 방정식의 계수는 PRODAS를 실행시켜 구할 수 있다. PRODAS와 본 논문에서의 공력 계수 방정식의 표현방식에서 다소 차이가 있으며 PRODAS의 공력 계수 자료를 적용하기 위해 표 1과 같이 대응시켜 적용하였다.

$$C_{FN} = c_{fn1}(M_a)\alpha + c_{fn3}(M_a)\alpha^3 + c_{fn5}(M_a)\alpha^5 \quad (13)$$

$$C_{FP} = c_{fp1}(M_a) + c_{fp2}(M_a)\alpha^2 \quad (14)$$

$$C_{MP} = c_{mp1}(M_a)\alpha + c_{mp3}(M_a)\alpha^3 + c_{mp5}(M_a)\alpha^5 + C_{mpq} \frac{\sqrt{q^2 + r^2} D}{2\sqrt{u_a^2 + v_a^2 + w_a^2}} \quad (15)$$

$$C_{MR} = c_{mr1}(M_a) + c_{mr2}(M_a) \frac{bD}{2\sqrt{u_a^2 + v_a^2 + w_a^2}} \quad (16)$$

그 외 환경적인 조건으로서 탄의 고도에 따른 공기밀도(air density)와 음속(speed of sound)의 변화를 나타내는 국제환경표준 모듈과 바람의 영향 등을 모델링 하였다.

Table 1 Aerodynamic Coefficients Matching

논문의 공력계수	PRODAS 공력계수
C_{fp0}	C_{x0}
C_{fp2}	C_{x2}
C_{fn1}	C_{Na1}
C_{fn3}	C_{Na3}
C_{mp1}	C_{ma1}
C_{mp3}	C_{ma2}
C_{mp5}	C_{ma3}
C_{mpq}	C_{mp}
C_{mri}	C_{ip}

3. 시뮬레이션 결과

3.1 시뮬레이션 결과

회전안정탄은 탄체의 회전운동에 의해 발생하는 탄의 진행방향 모멘트(L)를 이용하여 탄의 자세를 유지하는 탄약으로서 탄착지점이 발사방향에 대하여 오른쪽으로 비행하는 편류 현상이 그 특징이다.

Mxxx 탄약에 대한 표 2의 시뮬레이션 조건에 대하여 PRODAS 실행 결과와 Matlab 모델링의 결과를 비교하여 보았다. 시뮬레이션 조건은 추진제 4호, 6호, 8호에 대하여 각각 저사계, 고사계의 발사조건에 대하여 비교하였으며 그 결과는 표 3에 정리하였다.

Table 3 The Simulation Condition

구분 (장약-고각)	포구 속도 (m/s)	사격 고각 (mil)*	포구 회전속도 (rpm)
4L	277.4	300.0	5,369
4M		690.4	
4H		1,200.0	
6M	475.5	758.4	9,203
6H		1,200.0	
8M	684.3	781.5	13,245
8H		1,200.0	

*1 [mil]=360/6400 [deg]

Table 2 The Simulation Condition

구분	F.T. (sec)	사거리 (m)	편류 (m)	탄속 (m/s)	회전률 (rpm)	
4L	P.	16.06	3,974	-25.2	243.7	4,870
	M.	16.05	3,972	-26.5	243.7	4,870
	diff.	0.01	2	1.3	0	0.0
	%	0.06	0.05	5.24	0	0.0
4M	P.	33.96	6,518	-118.3	234.0	4,536
	M.	33.94	6,516	-122.4	243.1	4,536
	diff.	0.02	2	4.1	0.1	0.0
	%	0.06	0.03	3.43	0.03	0.0
4H	P.	49.76	4,588	-276.2	243.9	4,525
	M.	49.64	4,559	-284.4	243.6	4,526
	diff.	0.12	29	8.2	0.3	1
	%	0.24	0.63	2.94	0.12	0.02

6M	P.	51.88	12,373	-339.8	303.7	6,966
	M.	51.81	12,359	-360.3	303.6	6,968
	diff.	0.07	14	20.5	0.1	2
	%	0.13	0.11	6.03	0.03	0.03
6H	P.	70.98	8,835	-648.3	323.7	7,018
	M.	70.72	8,764	-680.6	323.5	7,022
	diff.	0.26	71	32.3	0.2	4
	%	0.37	0.08	-4.98	0.06	0.06
8M	P.	66.64	17,930	-659.0	329.6	9,311
	M.	66.48	17,888	-708.5	329.5	9,317
	diff.	0.16	42	49.5	0.1	6
	%	0.24	0.23	7.51	0.03	0.06
8H	P.	90.03	13,007	-1,109.6	338.4	9,515
	M.	89.67	12,799	-1,149.9	338.1	9,529
	diff.	0.36	208	40.3	0.3	14
	%	0.40	1.60	3.63	0.09	0.14

* P.:Prodas M.:Matlab diff.: P.- M.

표 3에서 보는 바와 같이 전체적인 포구속도, 회전속도 그리고 고각 등 발사조건에 대하여 비행 시간(F.T.), 사거리, 편류, 최종 탄속 및 회전률이 PRODAS 결과와 1%내외로 유사하다. 단 편류에서 7% 내외의 오차를 보이고 있다.

그림3~8은 탄도 요소별로 각각의 변화 경향을 살펴보기 위하여 6L, 6M, 6H의 조건에 대하여 PRODAS와 Matlab 모델링의 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 보는 바와 같이 그 변화 경향이 거의 일치함을 알 수 있다.

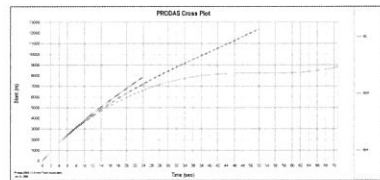


Fig. 3-1 PRODAS x vs time

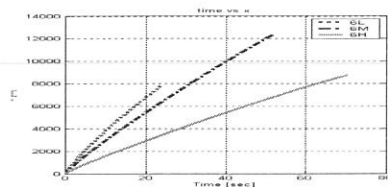


Fig. 3-2 Matlab x vs time

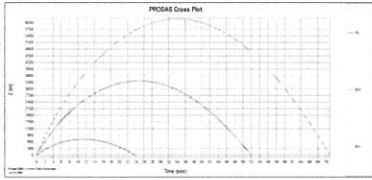


Fig. 4-1 PRODAS z vs time

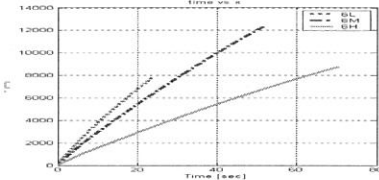


Fig. 3-2 Matlab x vs time

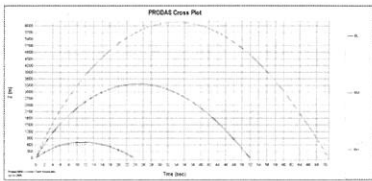


Fig. 4-1 PRODAS z vs time

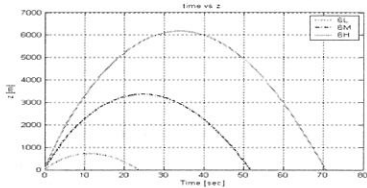


Fig. 4-2 Matlab z vs time

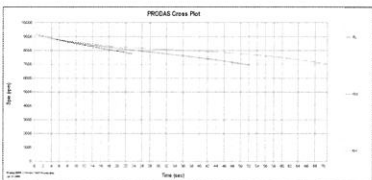


Fig. 6-1 PRODAS spin vs time

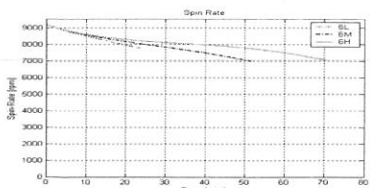


Fig. 6-2 Matlab spin vs time

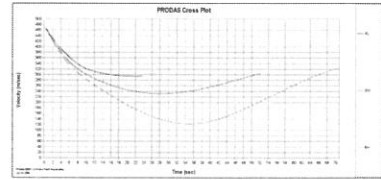


Fig. 7-1 PRODAS velocity vs time

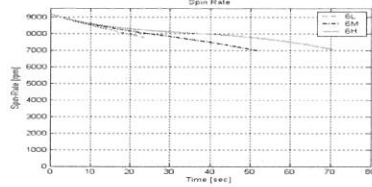


Fig. 6-2 Matlab spin vs time

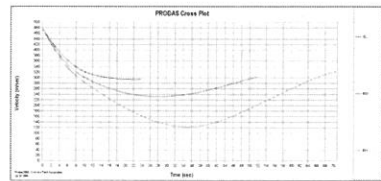


Fig. 7-1 PRODAS velocity vs time

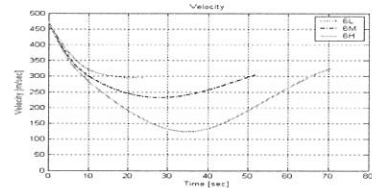


Fig. 7-2 Matlab velocity vs time

3.2 시뮬레이션 결과 분석 및 편류 오차

표 3에서 보는 바와 같이 비행시간(FT:Flight Time), 사거리, 탄속, 회전률에 대하여는 1% 내외의 오차가 있어 어느 정도 만족할만한 결과를 얻었으나, 편류에 대하여는 약 7% 미만의 오차가 발생하였다.

오차의 경향은 그림 9에서와 같이 근사식으로 추정할 수 있으며 추정된 오차를 보정하면 표 4와 같이 3% 미만의 편류 오차 결과를 나타내었다. 편류 오차 보정 방법으로는 PRODAS에서 제공되는 공력계수의 충분한 반영과 6자유도 운동 방정식의 보완 등이 있을 수 있다.

Table 4 Error Compensation

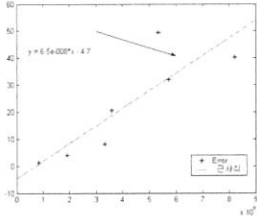


Fig. 9 편류의 오차와 근사식

구분	보정 후 편류오차	%
4L	0.6	-2.34
4M	-3.6	3.08
4H	-8.7	3.16
6M	1.8	-0.52
6H	-0.4	0.06
8L	19.4	-2.9
8H	-8.4	0.75

3. 결론

재래식 탄약에 지능화 개념이 도입됨에 따라 지능탄약의 탄도 알고리즘에 대한 연구가 대두되었다. 실시간으로 구현할 수 있는 코드의 개발이 필요하게 되었고, 본 논문에서는 Matlab을 이용하여 앞으로 연구하게 될 지능탄 알고리즘 연구의 토대를 마련하였다.

참고문헌

1. Mark F. Costello, " Rang Extension and Accuracy Improvement of an Advanced Projectile Using Canard Control", AIAA-95-3461-CP, pp.324-331, 1995.
2. J.T. Hong, Sh.K. Choi, K.P. Kim, "A Trade Study of the Top Attack Smart Tank Ammunition", System Engineering, Vol. 2, No. 1, 2006, pp.42-47, 2006.
3. 함왕식, 지능탄약의 최근 개발동향 ", 국방과학연구소, 2004.
4. K. Bar, "Pre-Feasibility Study for Koera Artillery Smart Munition", Diehl, ADD, 2004.
5. John, R. Burnet, Wane H. Hathaway, Robert H. Whyte, "Projectile Design and Analysis System(PRODAS -81)", AFATL-TR -81-43, 1981.

3.3 지능탄 탄도제어 알고리즘

회전 안정탄의 6자유도 탄도 모델링을 기본으로 하여 지능탄 탄도 제어 알고리즘에 M&S 구현 및 연구가 필요하다.

그림 10, 11은 1D 와 2D 탄도수정 지능탄의 일반적인 탄도제어 알고리즘에 관한 다이어그램이다.

1D 탄도수정의 경우 발사 후 GPS를 이용한 탄약의 실시간 위치 측정과 일정 시점에서 항력 증가 기술을 이용하여 사거리를 조정하는 방법이다.

2D 탄도수정 및 사거리 연장 지능탄의 경우는 탄도 조종 날개, 관성 센서, GPS, 탄의 회전 제어 기술, 활공기술 등을 활용하여 사거리 연장 및 정밀 타격을 가능하게 한다.

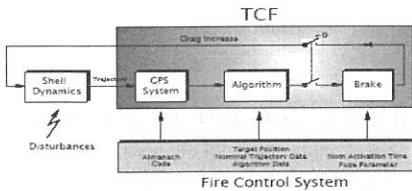


Fig. 10 1D Trajectory Correction Munition

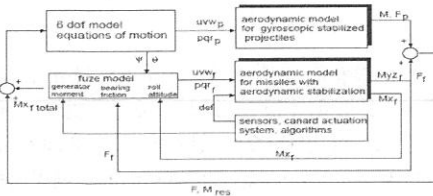


Fig. 11 2D Trajectory Correction Munition