

1D CCM 탄도수정 성능예측 및 알고리즘 구현 연구

A Study on Course Correction Performance Expectation & Algorithm Implementation of 1D CCM

김 기 표*

Kim, Ki-Pyo

ABSTRACT

The trajectory of an current artillery munition is subject to a variety of different error sources resulting in more or less big deviation from the nominal predicted flight path. The 1D CCM(Course Correction Munition) has appeared to solve this problem and the mechanism of 1D CCM is a simple and low cost one using the influence of drag to range behavior of an artillery munition. In the paper 1D CCM concept has been simulated using wind tunnel experiment results of the specified Korean munition with CCF(Course Correction Fuze) and calculated the performance of its rang error reduction. From the simulated results it can be numerically explained that the possibility of adaptation of 1D CCM concept to Korean artillery munitions.

주요기술용어(주제어) : 1D CCM(Course Correction Munition)(1D 탄도수정탄), 1D CCF(Course Correction Fuze)(1D 탄도 수정 신관), Range Error Reduction(사거리 오차 감소), Drag Break(항력 브레이크)

1. 머리말

미래의 전장환경에서 요구하는 탄약 기술 분야로는 사거리 연장, 정밀 타격, 탄두 위력 증대 및 지능화 분야 등이 있다. 그 중 최근 선진국에서는 표적 탐지 센서와 GPS 항법 유도 장치 등을 탄약 체계에 적용하여 지능탄을 비롯한 각종 정밀 특수 탄약들이 개발되고 있다^[1,2].

그 중 1D 탄도 수정탄(CCM)은 신관의 항력 브레이크 전개를 통해 비행 중 탄의 항력을 증대시켜 사

거리 방향의 탄도 수정이 가능하도록 고안된 탄약이며, 그 방법이 비교적 간단하고, 저비용으로 탄착 정확도를 개선할 수 있다는 점이 특징이다^[3]. 이는 항력 브레이크가 내장된 1D 탄도 수정 신관(CCF : Course Correction Fuze)을 현용 야포탄에 적용할 수 있기 때문이다.

선진국의 대표적인 탄도 수정탄으로는 미국의 LCCM(Low Cost Competent Munition), 독일의 1D 또는 2D CCF(Course Correction Fuze), 프랑스의 SPACIDO, 영국의 STAR 등이 있다^[1].

1D CCM은 일반적으로 사거리 30km 이내에서 원형공산오차(CEP) 50m 이내로 정확도 개선 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 독일의 현용 L15A1 야포탄에 1D 탄도 수정 신관을 적용하였을 경우 그 운용

† 2006년 12월 5일 접수~2007년 3월 2일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD) 기술연구본부 3부 3팀

주저자 이메일 : kpkim@add.re.kr

분석 결과(Operational Research Results) L15A1은 최대 사거리 27km에서 사거리 방향 표준편차(1σ)가 160m 이지만, 1D 탄도 수정 신관(CCF)을 적용할 경우 표준 편차 50m 이내로의 달성이 가능해지며, 그에 따라 표적 파괴에 필요한 탄약 소모량이 50% 감소하게 된다^[4].

선진국의 1D CCF 유형에는 항력브레이크의 재질에 따라 Metal형과 Fabric형이 있으며 그 형상에 따라 Baffle형과 Disk형 등이 있다. Metal형보다는 Fabric형이, Disk형의 경우는 그 직경이 클수록 항력 증대 효과가 우수하다.

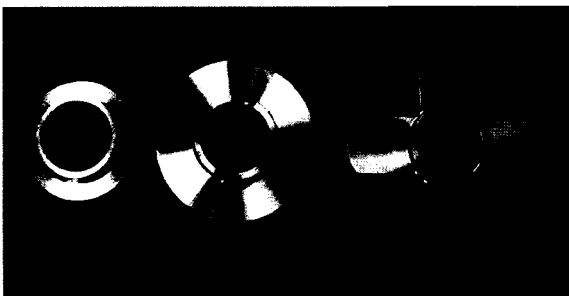
국내에서는 Metal형 탄도 수정 신관의 설계 제작 및 비행 시험을 통해 1D 탄도 수정탄에 대한 특성 연구를 수행한 바 있으며,^[3] 본 논문에서는 국내에서 설계 제작된 1D 탄도 수정 신관과 현용 K3xx 탄에 대한 풍동 실험 결과를 바탕으로 탄도 수정 개념의 모델링 및 1D 탄도 수정 신관의 유형별 탄도 수정 성능을 예측 비교 분석하였으며, 탄도 수정 알고리즘 구현 방법에 대해 고찰하였다.

2. 풍동 실험 및 탄도 모델링

가. 풍동 실험 및 결과^[3]

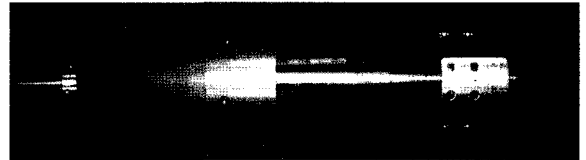
현용탄 K3xx 탄에 1D 탄도 수정 신관을 적용할 경우 항력의 변화 영향을 보기 위한 풍동 실험이다.

그림 1은 시험에 이용한 항력 브레이크로서 왼쪽에서부터 직경 90mm, 120mm인 Disk형 항력 브레이크(Drag Brake), 직경 158.2mm의 Baffle형 항력 브레

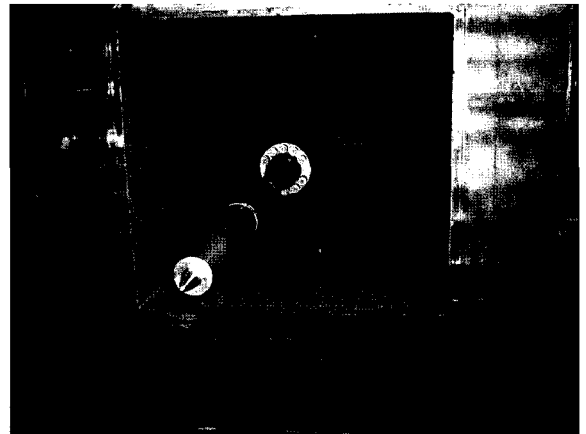


[그림 1] 항력브레이크(왼쪽부터 $\phi 90$, $\phi 120$, 4 Baffles $\phi 158.22$)

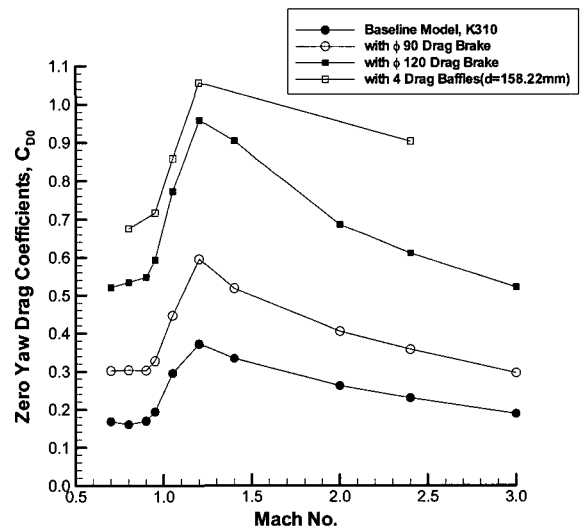
이크의 실험모델 사진이다. 그림 2는 K3xx 155밀리 야포탄의 축소모델이며 그림 3은 1D 탄도 수정 신관이 체결된 K3xx 탄의 풍동 실험 장면이다. 국과연 삼중음속 풍동에서 Mach Number 0.7~3.0의 조건에



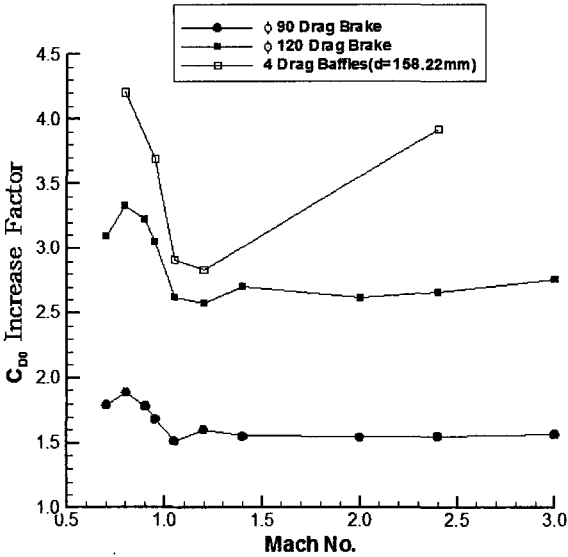
[그림 2] K3xx 155밀리 야포탄 축소모델



[그림 3] 풍동실험



[그림 4] 항력브레이크에 따른 항력 계수



[그림 5] 항력브레이크에 따른 항력계수 증가계수

대하여 수행하였다.

실험 결과는 그림 4, 5와 같다. 그림 5는 항력 증가 계수(Increase Factor)는 항력 브레이크 적용 시의 항력 계수를 항력 브레이크가 미적용 시의 항력 계수로 나눈 값으로서 Mach Number 1.0 이상에서 Disk 직경이 90mm인 경우 항력 증가 계수(Increase Factor)가 1.5, 직경이 120mm인 경우 2.5임을 확인할 수 있으며, 4 Baffle의 경우는 Mach Number 1.0 이상에서 탄속에 비례하여 증가하는 경향을 보인다. 탄속에 대한 항력 증가 계수를 입력 값으로 하여 항력 변화 영향을 모델링하였다.

나. 탄도 모델링

1) 6자유도 탄도 방정식

식 (1)~(6)은 탄의 무게중심(Center of Gravity)에 대한 힘(Force)과 모멘트(Moment)의 일반적인 6 자유도 탄도 방정식이다. m은 탄의 무게, g는 중력 가속도를 나타낸다.

$$X = -F_p - mg \sin(\theta) \tag{1}$$

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

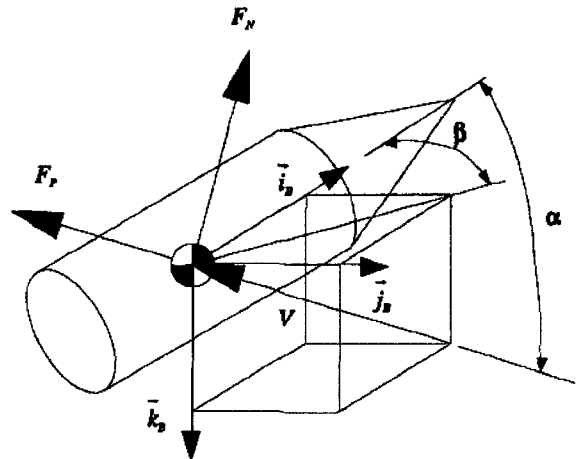
$$Z = \frac{-w_a}{\sqrt{w_a^2 + v_a^2}} F_n + mg \cos(\phi) \cos(\theta) \tag{3}$$

$$L = M_r \tag{4}$$

$$M = \frac{w_a}{\sqrt{w_a^2 + v_a^2}} M_p \tag{5}$$

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

여기서 F_p 와 F_n 는 각각 탄체의 무게 중심에 작용하는 항력(Drag Force)과 축력(Normal Body Force)이다. M_p 와 M_r 은 피치모멘트(Pitching Moment)와 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.



[그림 6] 야포탄의 힘과 모멘트

아래 식 (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 함수이다.

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

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

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

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

식 (11)과 (12)는 각각 탄체의 받음각과 Mach Number를 나타낸다. 식 (12)에서 a는 음속(Speed of Sound)을 나타낸다^[5].

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

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

위의 식을 이용하여 그 결과를 확인하기 위해 M107 탄의 공력자료를 입력하여 시뮬레이션 한 결과와 탄도 해석 상용 프로그램인 PRODAS의 결과와 비교하였다. 그 결과 표 1과 같이 사거리에 대하여 약 1%의 오차범위 내에서 만족할만한 결과를 얻을 수 있었다^[6].

2) Matlab Simulink 모델링

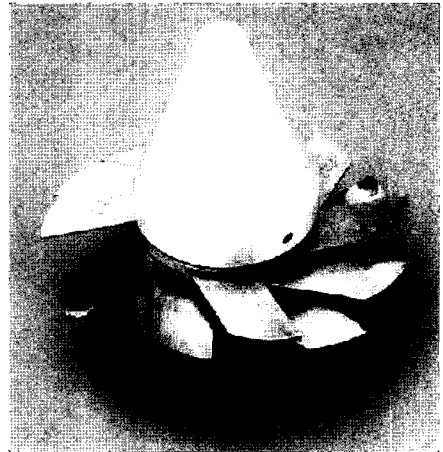
탄도 수정탄의 개념을 K3xx 탄에 적용하기 위하여 K3xx의 공력 계수를 탄도 식 (1)~(12)에 대입하여 모델링 및 시뮬레이션을 수행하였으며, 항력 브레이크는 그림 5의 항력 증가 계수 자료를 바탕으로 일정 시간에 탄의 비행 항력을 증가시키는 방법으로 탄도 수정 개념을 구현하였다.

모델링의 신뢰성 확인을 위해 그림 7에서 보는 바와 같이 국내에서 설계 제작된 Baffle형 탄도수정 신관을 K3xx에 적용한 최종 비행 시험(Flight Test)^[3] 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하여 표 2에 나타내었다.

[표 1] 탄도 모델링과 PRODAS의 결과비교^[6]

구분	F.T. (sec)	사거리 (m)	탄속 (m/s)	회전률 (rpm)	
4L	P.	16.06	3,974	243.7	4,870
	M.	16.05	3,972	243.7	4,870
	diff.	0.01	2	0	0.0
	%	0.06	0.05	0	0.0
6M	P.	51.88	12,373	303.7	6,966
	M.	51.81	12,359	303.6	6,968
	diff.	0.07	14	0.1	2
	%	0.13	0.11	0.03	0.03
8M	P.	66.64	17,930	329.6	9,311
	M.	66.48	17,888	329.5	9,317
	diff.	0.16	42	0.1	6
	%	0.24	0.23	0.03	0.06

*P. : PRODAS M. : Matlab



[그림 7] 탄도 수정 신관(φ129.9mm)

표 2에서 보는 바와 같이 항력 브레이크가 없는 경우 K3xx 탄은 포구 속도 811m/s, 고각 900mil의 발사 조건에 대하여 정상 사거리가 약 24km 이지만, 항력 브레이크 전개 시간을 발사 후 17초로 설정하였을 경우 포발사 비행시험 결과, 사거리 17.5km로서

시뮬레이션 결과 17.9km와 0.4km 차이가 있었으며, 기존 예측결과인 19km와 1.5km의 차이가 있어 기존 방법에 비해 더욱 근접한 예측이 가능하였다^[7].

[표 2] 사거리 예측 결과 비교

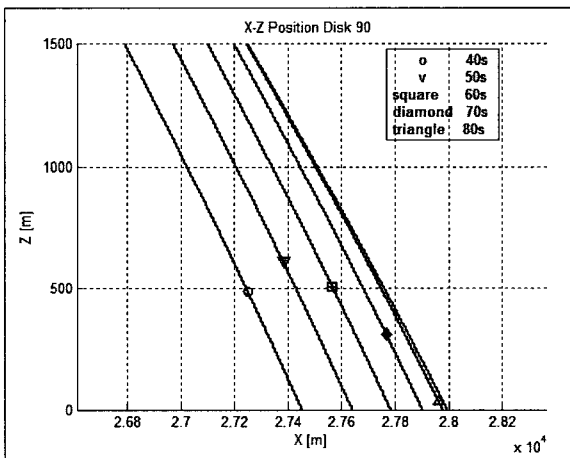
조건	탄속 (mps)	사거리(km)		
		예상	측정값	시뮬레이션
2	812.5	19.0	17.4	-
3	809.5	19.0	17.6	-
평균	811	19.0	17.5	17.9

3. 성능 예측

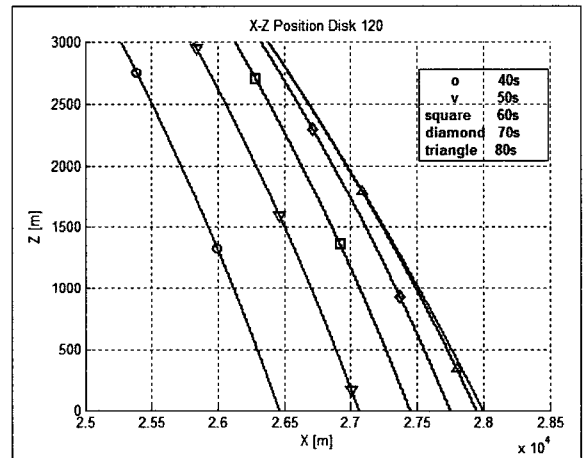
그림 1의 항력 브레이크 3가지 유형별 탄도 수정 특성을 알아보기 위하여 각 항력 브레이크의 항력 증가 계수 자료를 바탕으로 사거리 방향 탄도 수정 성능을 시뮬레이션을 통해 비교분석 하였다.

가. 항력 브레이크의 유형별 분석

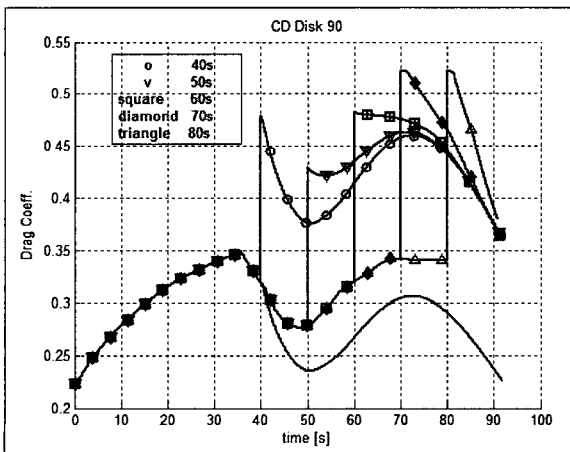
그림 5에서 직경이 90mm인 Disk90, 직경이 120mm인 Disk120 그리고 직경이 158mm인 4 Baffle 형태의 항력 증가 계수 값을 K3xx 탄약의 항력 브레이크 전개시간 이후의 항력 계수로 적용하였다.



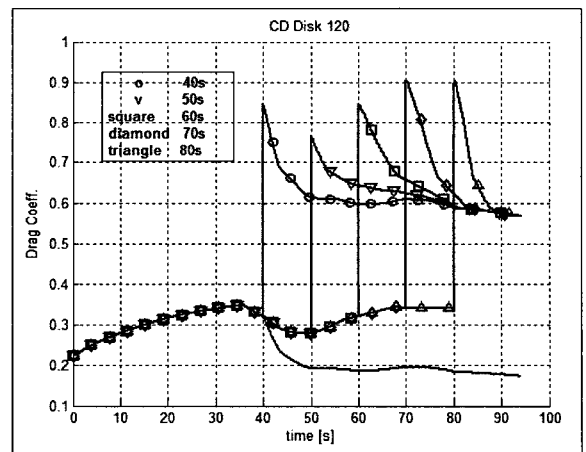
[그림 8-1] Disk90 탄도수정 거리



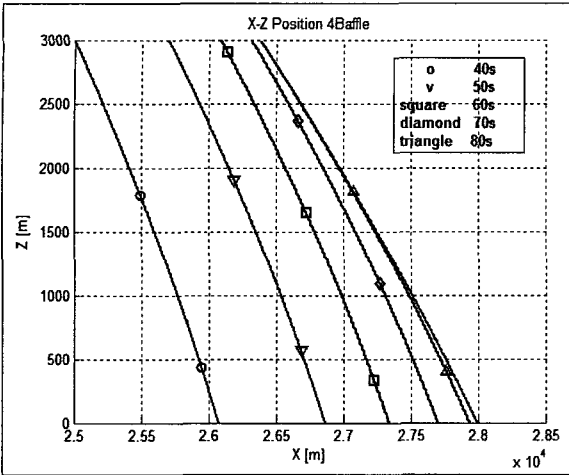
[그림 9-1] Disk120 탄도수정 거리



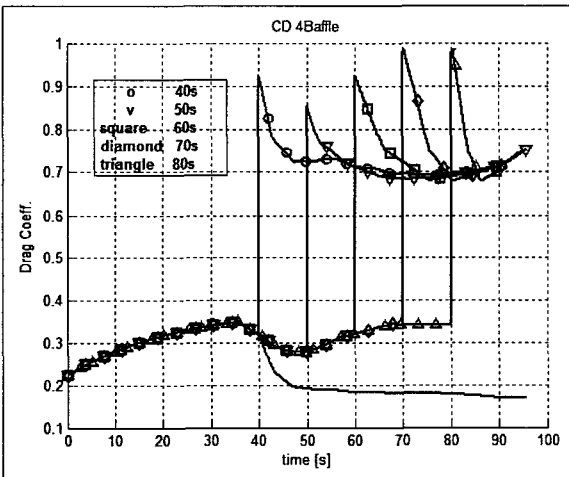
[그림 8-2] Disk90 항력 계수



[그림 9-2] Disk120 항력 계수



[그림 10-1] 4 Baffle 탄도수정 거리



[그림 10-2] 4 Baffle 항력 계수

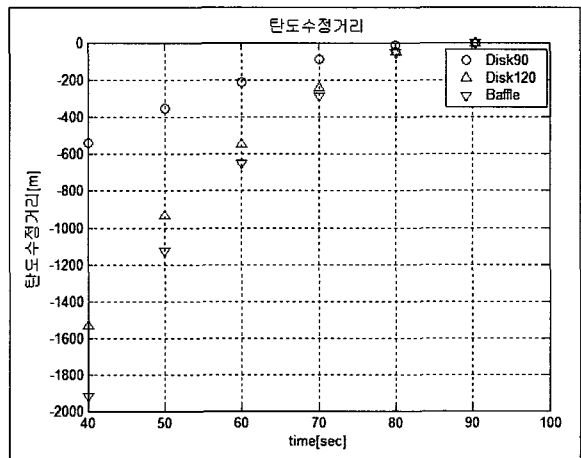
탄속 811m/s, 고각 800mil의 발사 조건에서 위의 3가지 유형별로 그 전개 시간을 발사 후 40초, 50초, 60초, 70초, 80초로 설정하여 시뮬레이션을 하였다.

그림 8~10에서 보는 바와 같이 항력 브레이크가 없는 경우(w/o CCF) 비행 시간이 약 90초이고 사거리가 약 28km였으나, 발사 후 항력 브레이크 전개 시간에 따른 사거리 감소 영향을 확인할 수 있다.

그림 11은 그림 8~10의 결과를 Disk 90, Disk 120, 4 Baffle형의 항력 브레이크의 전개 시간에 따른 사거리 감소 결과를 하나의 그래프로 나타낸 것이다. 항력 브레이크가 없는 경우 전체 비행 시간은 약

[표 3] 탄도수정 거리 비교

전개시간	Disk90	Disk120	4Baffle
w/o CCF	0m	0m	0m
80초	17m	49m	57m
70초	92m	245m	290m
60초	211m	547m	652m
50초	352m	933m	1,127m
40초	542m	1,532m	1,919m



[그림 11] 탄도수정 성능 비교

90초이며, 항력 브레이크 전개 시간을 비행 시간 40초에서 80초까지 10초씩 변화시키며 사거리 감소 거리를 나타내고 있다.

항력 브레이크 전개 시간이 빠를수록 사거리 감소량이 크며, Disk 90, Disk 120, 4 Baffle 형의 순서로 직경이 클수록 사거리 감소 효과가 커짐을 확인할 수 있다.

나. 탄도수정 거리 예측

항력 브레이크의 직경이 클수록 항력이 증가하지만, 항력 브레이크는 탄의 발사 초기 항력에 영향이 없도록 신관 내부에 탑재되어야 한다. 따라서 항력 브레이크의 직경에는 구조적인 설계 제한이 있으며, 항력 브레이크의 내구성 측면에서 탄속이 비교적 큰 발사 초기에 전개할 경우 항력 브레이크 전개 시 파

손되는 등의 어려움이 예상된다.

선진국의 체계 설계 개념 분석 결과 목표 탄착지에 대하여 사거리 방향의 탄착 분포 범위를 $\pm 2\sigma$ (σ : 탄착지 표준 편차)라고 하였을 때 최대 목표 사거리 (Nominal Trajectory) $+2\sigma$ 경우에 대하여 항력 브레이크는 -4σ 의 탄도수정 성능을 보유하면 충분한 것으로 해석된다^[4].

따라서 주어진 탄도 수정 성능을 확보하기 위한 탄도 수정 거리에 대한 예측이 필요하다. 탄도 수정 성능 예측을 위해 그림 11의 탄도 수정 결과를 3차 방정식으로 나타내면 식 (11)~(13)과 같다. t 는 발사 후 항력 브레이크 전개 시간(Deployment Time)을 나타내고, Δx 는 사거리 방향 탄도수정 거리를 나타낸다. 탄도수정 거리를 브레이크의 전개 시간에 대한 함수로 나타냄으로써 탄도수정 거리에 대한 예측이 가능해진다.

Disk 90 :

$$\Delta x_{disk90} = -0.0012t^3 + 0.026t^2 + 23t - 1400 \quad (11)$$

Disk 120 :

$$\Delta x_{disk120} = 0.0024t^3 - 1.1t^2 + 140t - 5600 \quad (12)$$

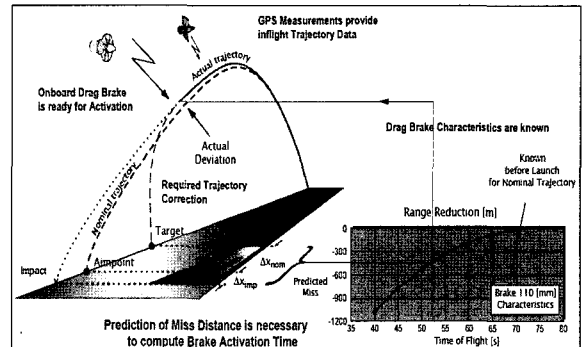
4Baffle :

$$\Delta x_{4Baffle} = 0.0059t^3 - 2t^2 + 220t - 7800 \quad (13)$$

4. 탄도 수정 알고리즘 구현

가. 탄도수정 개념

그림 12는 1D 탄도 수정 알고리즘에 대한 개념을 설명하고 있다. 1D 탄도 수정탄은 발사 전 표적(Target)의 위치, 최대 목표 사거리의 탄도(Nominal Trajectory), 항력 브레이크의 특성 자료 및 최대 목표 사거리를 고려한 항력 브레이크 초기 전개 시간 등이 신관에 입력되어진다. 발사 후 3~6초 이내 GPS(Global Positioning System)가 위성으로부터 신호를 수신하기 시작하면 실시간 탄도(Actual Trajectory) 좌표가 획득되어지고 예상 탄착 지점(Predicted Impact Point)의 계산이 가능하다.



[그림 12] 1D 탄도수정 개념

표적 위치(Target)와 예상 탄착 지점(Predicted Impact Point)에 대한 정보로부터 계산되어진 사거리 오차 값을 보상하기 위한 항력 브레이크 전개 시간이 성능 예측 식으로부터 계산되어지고, 계산되어진 시간 t 에서의 항력 브레이크 전개를 통해 실제 탄도에 대한 탄도 수정이 이루어진다. 만약 GPS 위성 수신에 불가능할 경우 발사 초기의 목표 탄착지(Aimpoint)와 표적 위치(Target) 정보로부터 계산되어진 항력 브레이크 전개 시간을 이용하게 된다^[4].

나. 실제 탄도(Actual Trajectory) 모델링

오차를 포함한 실제 탄도를 시뮬레이션하기 위하여 K3xx 탄을 대상으로 표 4의 3가지 발사 조건에 대하여 아래에 표시된 오차 조건을 포함하였다.

[표 4] 오차 포함에 따른 사거리 비교

조건	탄속 (mps)	고각 (mil)	정상 사거리 (m)	비행 시간 (초)	오차포함 사거리 (m)
1	702	300	13,613	33.4	13,774
2	913	300	19,010	41.1	19,223
3	913	800	28,016	91.5	28,422

○ 오차 조건(사거리 증가방향)

- 발사고각 : 0.08deg
- 탄속 : 2m/s
- 바람 : 2m/s

위와 같이 사거리가 증가하는 방향으로 오차 조건을 입력하여 시뮬레이션을 수행한 결과 표 4에서 보는 바와 같이 조건 1에서는 161m, 조건 2에서는 213m, 조건 3에서는 406m의 사거리가 증가 오차가 발생하였음을 확인할 수 있었다.

나. 탄도 수정 개념 적용

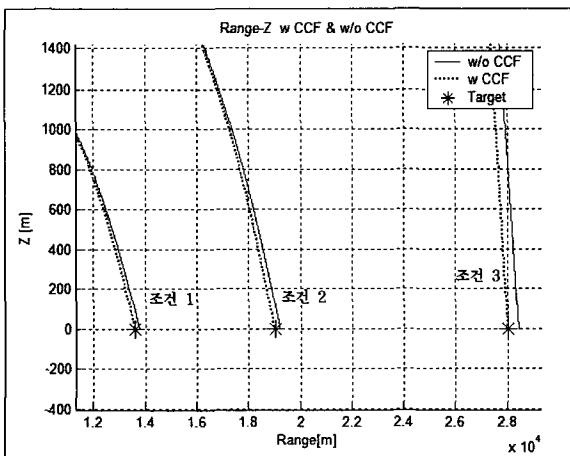
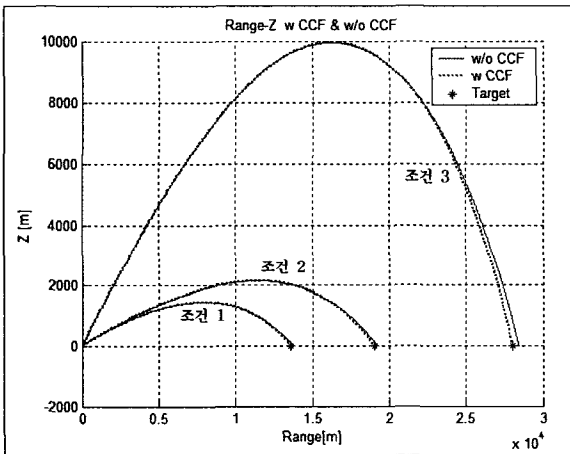
표 4와 같이 발생되어진 오차에 대하여 직경이 90mm인 항력브레이크의 탄도 수정 거리를 추정한 식 (11)을 이용하여 탄도 수정탄의 개념을 적용해 보았다.

우선 각 사거리 오차에 대한 항력브레이크 전개 시간을 식 (11)을 이용하여 계산한 결과 조건 1, 2, 3의

각 경우에 대하여 발사 후 18.5초, 24초, 47초를 항력브레이크 전개 시간으로 설정하였다.

그림 13은 탄도 수정 전후의 시뮬레이션 결과를 나타내었으며 표 5는 그 결과를 정리하였다. 그림 13의 아래 그림은 최종 탄도를 확대한 것으로 표적(Target)에 대하여 탄도 수정탄이 더욱 근접하였으며 그 오차 거리는 조건 1에서 1.2m, 조건 2에서 -9.6m, 조건 3에서 4.1m이다.

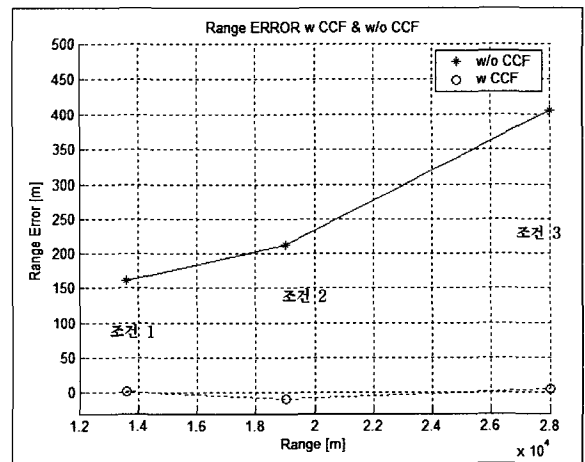
그림 14는 조건 1, 2, 3에 대하여 사 거리에 따른 탄도 수정 전후의 사거리 오차를 나타내고 있다. 탄도 수정이 없는 경우(w/o CCF) 사거리가 증가할수록 161m에서 406m로 오차가 증가하였으나, 탄도 수정 개념을 적용한 경우(w CCF) 오차가 10m 내외로 28km 사거리 전 구간에 대하여 일정한 값을 유지함을 확인할 수 있다.



[그림 13] 탄도 수정 전후 탄도

[표 5] 사거리 오차와 항력브레이크 전개시간

	조건 1	조건 2	조건 3
사거리 오차 (w/o CCF)	161m	213m	406m
t(전개시간)	18.5초	24초	47초
사거리 오차 (w CCF)	1.2m	-9.6m	4.1m



[그림 14] 탄도 수정 전후 Δx

5. 결론

본 논문에서는 항력 브레이크를 현용 K3xx 탄에 적용한 모델의 풍동 실험 결과로부터 항력 브레이크의 특성별 탄도 수정 성능을 정량적으로 예측하였고, 실제 포발사 환경에서의 오차를 고려한 탄도 수정탄의 정확도 개선 효과를 확인할 수 있었다.

90mm Disk형 항력 브레이크를 K3xx 탄에 적용하였을 경우 사거리 전 구간에 대하여 약 10m 내외의 오차를 유지할 수 있었다. 단, GPS 신호, 항력 브레이크 전개 시간 등의 오차를 포함하지 않은 경우로서 선진국의 경우는 실제 발사 시험에서 30km 전 구간에 걸쳐 원형공산오차(CEP) 약 50m 범위 내의 정확도를 유지하는 것으로 알려져 있다^[4].

1D 탄도 수정탄은 항력 브레이크와 GPS 수신장치가 탑재된 탄도 수정 신관을 체결한 것으로 발사 후 탄의 실시간 위치 정보와 항력 브레이크를 사용한 탄의 비행 항력 증가를 통해 사거리를 감소시킴으로써 사거리 오차를 보상하는 방법이다. 기존의 현용탄에 탄도 수정 신관을 체결함으로써 저렴한 비용으로 표적에 대한 사거리의 타격 정확도를 개선시킬 수 있을 것으로 사료된다. 그러나 국내에서는 현재 포발사 환경에 견딜 수 있는 GPS 수신 장치 및 관련 전자 부품의 소형화 및 내고충격화 기술 수준이 미흡한 실정이다.

참 고 문 헌

- [1] 함왕식, “지능탄약의 최근 개발동향”, 국방과학연구소, 2005.
- [2] 홍종태, 함왕식, 최상경, 이명준, 김기표, “미래 정밀 특수 탄약의 개발 동향”, 제 14회 지상무기체계 발전세미나, 국방과학연구소, 2006.
- [3] 정명지, “1D TCF 특성연구”, TEDC-519-061149, 국방과학연구소, 2006.
- [4] K. Bar, “Pre-Feasibility Study for Koera Artillery Smart Munition”, Diehl, ADD, 2004.
- [5] Mark F. Costello, “Rang Extension and Accuracy Improvement of an Advanced Projectile Using Canard Control”, AIAA-95-3461-CP, pp.324~331, 1995.
- [6] 김기표, 윤상용, 김진석, 홍종태, “Matlab Simulink를 이용한 회전안정탄의 6자유도 탄도 모델링”, 시스템 엔지니어링 학술지 제 2권 2호, 2006.
- [7] 김기표, 정명지, 최상경, 홍종태, “Matlab Simulink를 이용한 1D 탄도 수정탄의 탄도 모델링”, 제 14회 지상무기체계 발전세미나, 국방과학연구소, 2006.