

## 관성항법장치를 이용한 K2전차 전차포 자세측정 방법 및 명중률에 미치는 영향에 대한 연구

김성호<sup>\*,1)</sup> · 김건국<sup>1)</sup> · 권혁민<sup>1)</sup> · 유석진<sup>1)</sup> · 박병훈<sup>2)</sup> · 이병길<sup>3)</sup> · 김의환<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> 현대로템주식회사 중기사업본부

<sup>2)</sup> 국방과학연구소 제5기술연구본부

<sup>3)</sup> 방위사업청 전차사업팀

<sup>4)</sup> 아주대학교 시스템공학과

### A Study on Measurement of Gun's Attitude of K2 MBT Using Inertial Navigation System and Its Effects on the Hit Probability

Sungho Kim<sup>\*,1)</sup> · GunKook Kim<sup>1)</sup> · Hyukmin Kwon<sup>1)</sup> · Sukjin Yu<sup>1)</sup> ·  
Byunghoon Park<sup>2)</sup> · Byunggil Lee<sup>3)</sup> · Euiwhan Kim<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> Defence Systems, HYUNDAI ROTEM COMPANY, Korea

<sup>2)</sup> The 5th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

<sup>3)</sup> MBT Project Team, Defence Acquisition Program Administration, Korea

<sup>4)</sup> Department of Systems Engineering, Ajou University, Korea

(Received 18 June 2015 / Revised 17 September 2015 / Accepted 26 February 2016)

#### ABSTRACT

In the original design of K2 tank the Vertical Sensor Unit(VSU) was mounted to measure the attitude of the main gun to enhance the hit probability. In this research, as a part of efforts to reduce the cost of K2, it was theoretically simulated and evaluated to use the data from Inertial Navigation System(INS) for the calculation of the gun attitude instead of the direct measurement using VSU. It was found that the negative effect of INS approach is negligible and the elimination of VSU is technically possible and beneficial to the system.

Key Words : K2 MBT, VSU(수직감지유닛), INS(관성항법장치), Gun's Attitude, Hit Probability, Fire Control System

#### 1. 서론

K2전차는 대한민국의 차세대 주력 전차이며 세계적

으로 현존하는 3.5세대 전차 중 최고 성능을 보유하고 있다. 이러한 K2전차에 탑재되는 수직감지유닛(이하 VSU, Vertical Sensor Unit)은 전차포의 자세(롤/피치)를 측정하는 기계식 자이로(Gyro)로서 고가의 장비임에도 명중률 제고를 위하여 대부분의 전차에 사용되어 왔다. 전차의 사격통제장치는 VSU로 측정된 전차포의

\* Corresponding author, E-mail: sunghokim@hyundai-rotem.co.kr  
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

자세(롤/피치)를 선도각 및 초고각 계산에 사용함으로써 특히 경사지에서의 명중률을 향상시킨다. 하지만 이러한 기계식 자이로인 VSU를 적용하는 대신, 최신 전차들은 스트랩다운 관성항법장치(이하 INS, Strap-Down Inertial Navigation System)를 탑재함에 따라, 이들 INS 테이터를 이용하여 전차포의 자세(롤/피치)를 계산하는 방법으로 대체하는 연구가 진행되고 있다. INS는 관성센서인 자이로와 가속도계의 정보를 이용하여 동체의 위치, 속도 및 자세를 제공하는 장치이다. INS는 동적특성이 우수하고 짧은 시간동안의 정확도가 높으며, 주위 환경에 관계없이 연속적인 항법이 가능하여 다양한 무기체계의 기본 항법시스템으로 이용되고 있다<sup>7)</sup>. 그러나 장시간 연속사용하는 경우 적분연산에 의한 항법계산과정에서 관성센서 오차와 중력오차가 누적 되어 동작시간에 따라 위치오차와 고도오차가 기하급수적으로 증가하는 특성을 가지고 있다<sup>7)</sup>. 이러한 INS의 단점을 보완하기 위해 GPS(Global Positioning System)와 속도계(Odometer) 등과 같은 보조센서를 INS와 결합한 복합항법시스템을 구성하는 것이 일반적이다<sup>7)</sup>. 또한 항법오차를 보상하는 대표적인 방법인 영속도 보정(ZUPT, Zero Velocity Update)이 있는데 K2전차에 적용된 INS는 위의 두가지 방법이 적용되었으므로 항법누적오차에 따른 영향은 없다고 할 수 있다. 본 논문의 연구목적은 K2전차의 INS와 차체와 포탑의 선회각을 측정하는 엔코더, 포탑과 전차포의 고저각을 측정하는 포고저감지기(GTR, Gun Trunnion Resolver)를 이용하여 전차포의 자세(롤/피치)를 계산하여 그 자세정보를 사격제원 계산에 사용 할 수 있는 방법을 제안하고, 이 방법의 사용 가능 여부를 판단하기 위한 연구이다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장은 VSU의 기능에 대하여 기술하였고, 제 3장에서는 INS를 이용한 전차포 자세계산방법을 제안하였다. 제 4장, 5장은 명중률 계산과 탄도해 계산 결과를 통하여 VSU를 제거하고 INS를 이용하여 전차포 자세를 계산하는 방법이 문제없음을 기술하였다. 제 6장은 K2전차에서 INS 비정렬오차의 측정 및 보정 방법을 기술하였고, 제 7장은 실제 시험한 결과를, 제 8장에서는 결론을 기술하였다.

## 2. 시스템 구성 및 기능

Fig. 1은 K2전차 전차포에 VSU가 장착되는 위치와

형상을 나타낸다. VSU는 회전중심축이 지구중심을 향하는 수직 기계식 자이로(Gyro)로써 전차의 전차포 하단에 장착되어, 전차포의 상하/좌우 2축(Two degree of Freedom)에 대한 위치변위를 사격통제장치로 전달하여 사격 정확도를 향상시키는 기능을 수행한다.

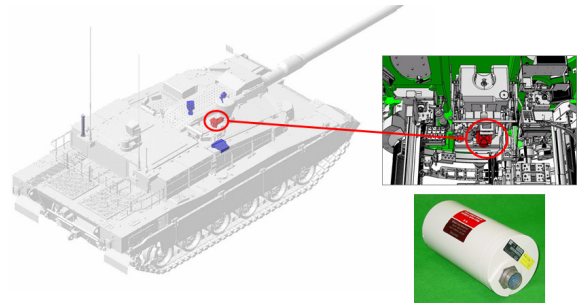


Fig. 1. Position of VSU on K2

VSU의 기능은 전차가 수평면을 기준으로 Fig 2와 같이 기울어졌을 경우 초고각과 선도각을 보상하는데 필요한 정보를 제공한다. 초고각은 전차포가 중력에 의해 발생하는 오차를 보상하는 값이고, 선도각은 표적의 진행방향으로 발생하는 오차를 보상하는 값이다.

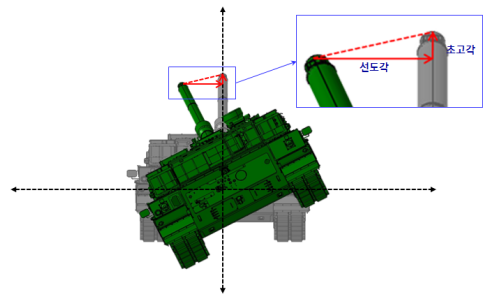


Fig. 2. VSU function

## 3. 전차포 자세 계산 방법

### 3.1 관성항법장치를 이용한 전차포 자세 계산 방법

K2전차 전차포 자세를 계산하기 위해서는 Fig. 3과 같이 전차 차체에 장착되어 있는 INS와 차체와 포탑의 선회각(Azimuth)을 측정하는 차체포탑위치감지기(엔코더), 그리고 포탑과 전차포의 고각(Elevation)을 측정하는 GTR(레졸버)을 이용하여 사격통제컴퓨터에서 전차포의 자세(롤/피치)를 계산할 수 있다.

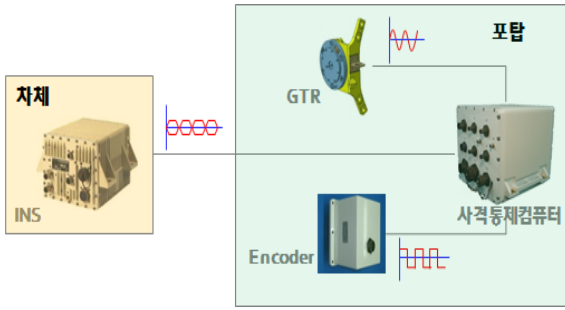


Fig. 3. Components used for gun's attitude calculation

INS가 측정한 자세(롤/피치)값에 차체포탑위치감지기와 GTR의 측정값을 이용하여 DCM(Direction Cosine Matrix)<sup>[6]</sup>으로 좌표변환하여 전차포의 자세를 계산한다.

### 3.2 전차포 자세 계산 알고리즘

전차포 자세를 계산하기 위해서는 DCM(Direction Cosine Matrix)을 이용한다<sup>[6]</sup>.  $C_{\alpha}^{\beta}$ 의 형태로 표현되는 식은  $\alpha$ 좌표계( $\alpha$ -Frame)와  $\beta$ 좌표계( $\beta$ -Frame)에 대한 좌표변환을 나타내고, 이러한 방법을 이용하여 아래와 같은 순서로 좌표변환에 의해 전차포의 자세를 계산할 수 있다<sup>[6]</sup>.

$\gamma$ ,  $\theta$ ,  $\phi$ 는 INS에서 측정된 Roll, Pitch, Yaw이고,  $\text{deg}_{Encoder}$ 는 포탑의 선회각,  $\text{deg}_{GTR}$ 은 전차포의 고저각으로 식 (1), (2), (3)과 같이 정의한다.

$$R_1(\gamma) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\gamma) & \sin(\gamma) \\ 0 & -\sin(\gamma) & \cos(\gamma) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$R_2(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & -\sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$R_3(\phi) = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & \sin(\phi) & 0 \\ -\sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

INS의 기준좌표계( $n$ -Frame)로부터 차체좌표계( $b$ -Frame)를 계산하면 식 (4)와 같다.

$$C_n^b = R_1(\gamma) R_2(\theta) R_3(\phi) \quad (4)$$

차체좌표계( $b$ -Frame)로부터 포탑 선회각 식 (5)를 받

여하여 포탑좌표계( $t$ -Frame)를 계산하면 식 (6)과 같다.

$$C_b^t = \begin{bmatrix} \cos(\text{deg}_{Encoder}) & \sin(\text{deg}_{Encoder}) & 0 \\ -\sin(\text{deg}_{Encoder}) & \cos(\text{deg}_{Encoder}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$C_n^t = C_b^t C_n^b \quad (6)$$

전차포 고저각 식 (7)을 이용하여 포탑좌표계( $t$ -Frame)에서 전차포좌표계( $g$ -Frame)를 계산하면 식 (8)과 같다.

$$C_t^g = \begin{bmatrix} \cos(\text{deg}_{GTR}) & 0 & -\sin(\text{deg}_{GTR}) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\text{deg}_{GTR}) & 0 & \cos(\text{deg}_{GTR}) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$C_n^g = C_t^g C_n^t \quad (8)$$

따라서, 계산된 전차포좌표계( $g$ -Frame)의 결과를 정리하면 식 (9)와 같다.

$$C_n^g = C_t^g C_b^t C_n^b \quad (9)$$

식 (9)에서 전차포 자세를 계산하기 위하여 식 (10)과 같이 다시 쓰면, Roll은 식 (11)<sup>[6]</sup>, Pitch는 식 (12)<sup>[6]</sup>와 같다.

$$C_n^g = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$Roll = \tan^{-1}\left(\frac{C_{23}}{C_{33}}\right) \quad (11)$$

$$Pitch = \sin^{-1}(-C_{13}) \quad (12)$$

여기서,  $C_n^g$ 의 요소는 아래와 같다.

$$C_{11} = \cos(\text{deg}_{GTR})\cos(\text{deg}_{Encoder})\cos(\theta)\cos(\phi) \\ - \cos(\text{deg}_{GTR})\sin(\text{deg}_{Encoder})\cos(\gamma)\sin(\phi) \\ + \cos(\text{deg}_{GTR})\sin(\text{deg}_{Encoder})\sin(\gamma)\sin(\theta)\cos(\phi) \\ - \sin(\text{deg}_{GTR})\sin(\gamma)\sin(\phi) \\ - \sin(\text{deg}_{GTR})\cos(\gamma)\sin(\theta)\cos(\phi)$$

$$C_{12} = \cos(\text{deg}_{GTR})\cos(\text{deg}_{Encoder})\cos(\theta)\sin(\phi) + \cos(\text{deg}_{GTR})\sin(\text{deg}_{Encoder})\cos(\gamma)\cos(\phi) + \cos(\text{deg}_{GTR})\sin(\text{deg}_{Encoder})\sin(\gamma)\sin(\theta)\sin(\phi) + \sin(\text{deg}_{GTR})\sin(\gamma)\cos(\phi) - \sin(\text{deg}_{GTR})\cos(\gamma)\sin(\theta)\sin(\phi)$$

$$C_{13} = -\cos(\text{deg}_{GTR})\cos(\text{deg}_{Encoder})\sin(\theta) + \cos(\text{deg}_{GTR})\sin(\text{deg}_{Encoder})\sin(\gamma)\cos(\theta) - \sin(\text{deg}_{GTR})\cos(\gamma)\cos(\theta)$$

$$C_{21} = -\sin(\text{deg}_{Encoder})\cos(\theta)\cos(\phi) - \cos(\text{deg}_{Encoder})\cos(\gamma)\sin(\phi) + \cos(\text{deg}_{Encoder})\sin(\gamma)\sin(\theta)\cos(\phi)$$

$$C_{22} = -\sin(\text{deg}_{Encoder})\cos(\theta)\sin(\phi) + \cos(\text{deg}_{Encoder})\cos(\gamma)\cos(\phi) + \cos(\text{deg}_{Encoder})\sin(\gamma)\sin(\theta)\sin(\phi)$$

$$C_{23} = \sin(\text{deg}_{Encoder})\sin(\theta) + \sin(\text{deg}_{Encoder})\sin(\gamma)\cos(\theta)$$

$$C_{31} = \sin(\text{deg}_{GTR})\cos(\text{deg}_{Encoder})\cos(\theta)\cos(\phi) - \sin(\text{deg}_{GTR})\sin(\text{deg}_{Encoder})\cos(\gamma)\sin(\phi) + \sin(\text{deg}_{GTR})\sin(\text{deg}_{Encoder})\sin(\gamma)\sin(\theta)\cos(\phi) + \cos(\text{deg}_{GTR})\sin(\gamma)\sin(\phi) + \cos(\text{deg}_{GTR})\cos(\gamma)\sin(\theta)\cos(\phi)$$

$$C_{32} = \sin(\text{deg}_{GTR})\cos(\text{deg}_{Encoder})\cos(\theta)\sin(\phi) + \sin(\text{deg}_{GTR})\sin(\text{deg}_{Encoder})\cos(\gamma)\cos(\phi) + \sin(\text{deg}_{GTR})\sin(\text{deg}_{Encoder})\sin(\gamma)\sin(\theta)\sin(\phi) - \cos(\text{deg}_{GTR})\sin(\gamma)\cos(\phi) + \cos(\text{deg}_{GTR})\cos(\gamma)\sin(\theta)\sin(\phi)$$

$$C_{33} = -\sin(\text{deg}_{GTR})\cos(\text{deg}_{Encoder})\sin(\theta) + \sin(\text{deg}_{GTR})\sin(\text{deg}_{Encoder})\sin(\gamma)\cos(\theta) + \cos(\text{deg}_{GTR})\cos(\gamma)\cos(\theta)$$

#### 4. 명중률 시뮬레이션

명중률은 사격의 정확도를 결정하는 통계학적 수치이다. 명중률에 영향을 미치는 요소는 크게 해당 시스템의 성능과 탄 분산 및 포구 초속과 같은 탄 자체의 성능, 그리고 시스템이 운용되는 환경적인 영향과 그 시스템을 운용하는 사람의 운용능력에 따른 각종 영

향 등으로 분류할 수 있다<sup>1,2</sup>. 또한 명중률은 전투 시 나리오를 바탕으로 실제 사격을 통하여 결정되어지게 된다. 그러나 실제 사격을 통한 명중률 분석 방법은 사격 순간 여러 가지 환경적 요인으로 인하여 정확한 분석이 어렵다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 배제하고 일관성 있는 결과를 획득하기 위해서 이상적인 표준조건하에서 이론적으로 K2전차가 가질 수 있는 최대 명중률을 사전 예측 및 평가할 수 있는 파라미터를 사용하여 수학적으로 계산된 명중률을 사용하였다<sup>2,4</sup>. 파라미터는 위에서 언급한 명중률에 영향을 미치는 요소들의 오차를 통계학적인 방법인 표준편차로 정의한 후 탄 정보와 함께 활용하였다<sup>2</sup>. Fig. 4는 K2전차의 성능 파라미터 중 VSU의 정확도가 사거리에 따라 명중률에 어느 정도 영향을 미치는지 분석한 그래프이다<sup>3,4</sup>. VSU의 전차포 자세 측정 정확도를 각각 현재 사양 대비 10%, 20%, 30% 향상시켰을 경우 정지간 정지표적 조건하에서 거리별로 명중률 향상에 얼마나 영향을 미치는지 계산하였다<sup>3,4</sup>. Fig. 4와 같이 계산된 결과는 명중률에 영향을 미치는 요소 중 K2전차의 VSU 정확도만을 고려하고 다른 요소는 배제한 결과로서 2.5 km까지 VSU의 성능이 직접적으로 명중률에 영향을 미치지 않는 것으로 판단할 수 있다<sup>3</sup>.

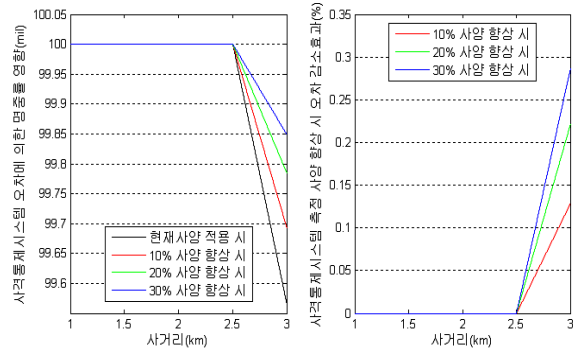


Fig. 4. Effect of VSU's accuracy change on the hit probability by distance<sup>[3]</sup>

K2전차의 VSU를 적용한 경우 명중률과 본 논문에서 제안한 INS를 적용하였을 경우의 명중률에 대한 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 명중률의 비교는 전차 명중률에 영향을 미치는 여러 가지 요소 중 전차포 자세값에 대한 오차요소가 없다고 가정하여 명중률을 먼저 계산한 후 VSU에 대한 오차요소를 반영하여 계

산한 명중률과의 차이값과 INS의 오차요소를 반영하여 계산한 명중률의 차이값을 비교하였다.

Fig 5, 6, 7, 8의 가로축은 전차 사거리(단위: m), 세로축은 명중률 100 % 중 VSU 또는 INS의 오차요소가 영향을 미치는 명중률의 차이(단위: %)를 나타낸다.

명중률에 대한 시뮬레이션 조건은 다음과 같다. 첫 번째는 전차의 명중률에 영향을 미치는 요소 중 전차포 자세값을 제외한 나머지 요소는 고정변수로 가정하였다. 그 이유는 전차포 자세값에 대하여 VSU와 INS를 적용한 시스템의 명중률 결과를 비교하기 위해서이다. 두 번째는 전차는 이동하지 않고 고정되어 있는 상태에서 표적이 고정되어 있는 상태(Stationary Vehicle-Stationary Target, S-S)와 표적이 이동하는 상태(Stationary Vehicle-Moving Target, S-M)에서 명중률을 계산하였다. 세 번째는 명중률 시뮬레이션에 사용한 탄종은 K2전차 전용탄인 K279(APFSDS, 날개안정철갑탄), K280(HEAT-MP, 다목적 성형작약탄)을 적용하였다. K279는 날개안정철갑탄(APFSDS)으로서 공기저항력을 극소화 시켜 빠른 속도를 유지할 수 있는 고밀도의 텅스텐 관통자를 이용한 운동에너지탄이다. K280은 다목적 성형작약탄(HEAT-MP)으로서 탄두에 들어 있는 주장약과 정밀 라이너의 촉발을 이용한 화학에너지탄이다.

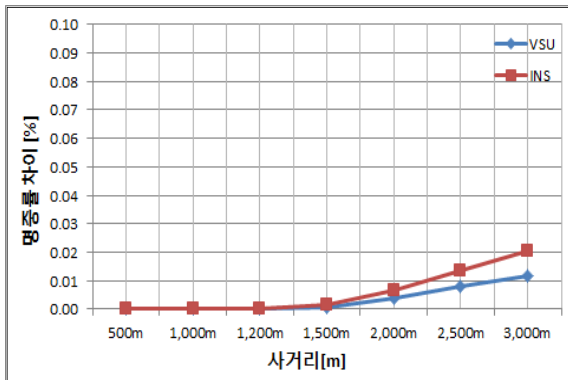


Fig. 5. Result of hit probability simulation for K279 ammunition on S-S condition

Fig 5는 K279탄을 적용하여 전차는 이동하지 않고 고정되어 있고 표적도 고정되어 있는 상태(Stationary Vehicle-Stationary Target, S-S)에서의 VSU와 INS의 오차요소를 각각 반영하여 명중률을 계산한 후 전차포 자세값에 대한 오차요소가 없다고 가정한 명중률의 각

각의 차이를 비교한 그림이다.

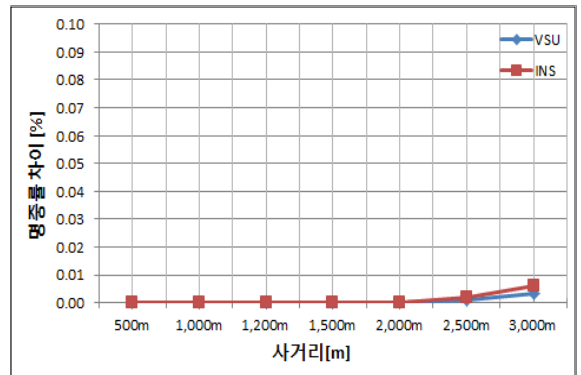


Fig. 6. Result of hit probability simulation for K279 ammunition on S-M condition

Fig. 6은 K279탄을 적용하여 전차는 이동하지 않고 표적이 이동하는 상태(Stationary Vehicle-Moving Target, S-M)에서의 VSU와 INS의 오차요소를 각각 반영하여 명중률을 계산한 후 전차포 자세값에 대한 오차요소가 없다고 가정한 명중률의 각각의 차이를 비교한 그림이다.

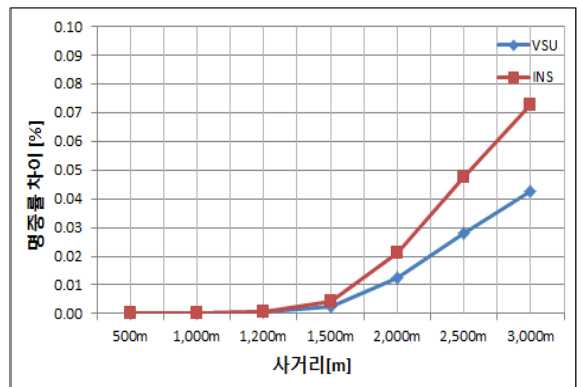


Fig. 7. Result of hit probability simulation for K280 ammunition on S-S condition

Fig. 7은 K280탄을 적용하여 전차는 이동하지 않고 고정되어 있고 표적도 고정되어 있는 상태(Stationary Vehicle-Stationary Target, S-S)에서의 VSU와 INS의 오차요소를 각각 반영하여 명중률을 계산한 후 전차포 자세값에 대한 오차요소가 없다고 가정한 명중률의 각각의 차이를 비교한 그림이다.

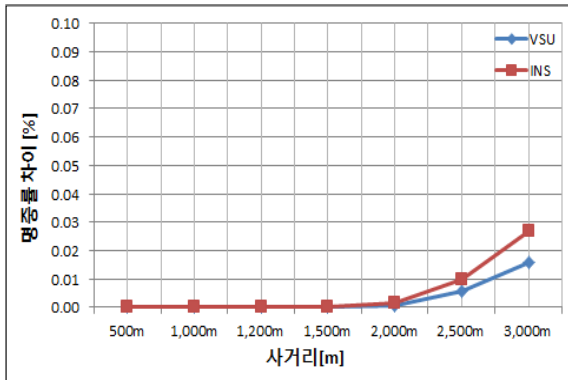


Fig. 8. Result of hit probability simulation for K280 ammunition on S-M condition

Fig. 8은 K280탄을 적용하여 전차는 이동하지 않고 표적이 이동하는 상태(Stationary Vehicle-Moving Target, S-M)에서의 VSU와 INS의 오차요소를 각각 반영하여 명중률을 계산한 후 전차포 자세값에 대한 오차요소가 없다고 가정한 명중률의 각각의 차이를 비교한 그림이다. Fig. 5, 6, 7, 8에서 나타나듯이, 본 논문에서 제안하는 INS를 이용하여 전차포 자세를 계산하는 방법으로 전차 명중률을 시뮬레이션 한 결과, 사거리 1,500 m까지는 전차 명중률에 영향이 거의 없고, 사거리 2,000 m 이후부터 명중률에 약 0.1 % 이하 정도의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 INS를 이용하여 전차포 자세를 계산하는 방법을 적용하여도 전차 명중률에 미치는 영향은 무시할만한 수준인 것으로 판단된다.

### 5. 탄도해 비교

포수조건 및 표준대기조건 상태에서의 전차 탄도해를 비교하였다. 탄도해는 K276, K277, K279, K280탄에 대해 각각 수행하였고 이를 비교한 값이 Table 1에 나타나 있다. 탄도해 결과값은 선도각과 초고각 오차값(단위: mil)으로 표현하였다. K276은 K279와 같은 날개안정철갑탄(APFSDS)이며, K277은 K280과 같은 다목적 성형자약탄(HEAT-MP)이다. 기준이 되는 값은 VSU의 오차가 “0”인 경우 계산되는 초고각과 선도각이며, 비교되는 값은 VSU의 오차가 +0.046 mil로 최대인 경우와 INS의 오차가 +0.236 mil로 최대인 경우의 확정적인 값이다.

Table 1. Result of ballistic error for each ammunition

(a) Maximum error of VSU by K276 [mil]

K276탄	VSU 최대 오차인 경우		
	1 km	1.5 km	2 km
선도각 오차	0.007	0.010	0.015
초고각 오차	-0.007	-0.005	-0.003

(b) Maximum error of INS by K276

K276탄	INS 최대 오차인 경우		
	1 km	1.5 km	2 km
선도각 오차	0.036	0.055	0.076
초고각 오차	-0.018	-0.013	-0.010

(c) Maximum error of VSU by K277

K277탄	VSU 최대 오차인 경우		
	1 km	1.5 km	2k m
선도각 오차	0.018	0.031	0.046
초고각 오차	-0.008	-0.005	-0.005

(d) Maximum error of INS by K277

K277탄	INS 최대 오차인 경우		
	1 km	1.5 km	2 km
선도각 오차	0.095	0.158	0.236
초고각 오차	-0.020	-0.016	-0.016

(e) Maximum error of VSU by K279

K279탄	VSU 최대 오차인 경우		
	1 km	1.5 km	2 km
선도각 오차	0.007	0.010	0.015
초고각 오차	-0.007	-0.004	-0.003

(f) Maximum error of INS by K279

K279탄	INS 최대 오차인 경우		
	1 km	1.5 km	2 km
선도각 오차	0.036	0.055	0.076
초고각 오차	-0.018	-0.013	-0.010

(g) Maximum error of VSU by K280

K280탄	VSU 최대 오차인 경우		
	1 km	1.5 km	2 km
선도각 오차	0.012	0.019	0.027
초고각 오차	-0.007	-0.005	-0.004

(h) Maximum error of INS by K280

K280탄	INS 최대 오차인 경우		
	1 km	1.5 km	2 km
선도각 오차	0.061	0.098	0.139
초고각 오차	-0.019	-0.015	-0.013

탄도해 계산결과 탄종별 선도각 및 초고각 최대오차는 +0.236 mil로써, 이 오차는 전차 시스템에 반영될 수 없는 아주 작은 값의 오차이다. 따라서 탄도해 계산 비교결과 전차에서 VSU를 제거하고 INS를 이용하여 전차포 자세값을 계산할 경우에도 시스템에 실효적인 영향이 무시할 만한 수준임을 알 수 있다.

### 6. INS 비정렬 오차 보정방법

K2전차에서 VSU를 제거하고 INS를 이용하여 전차포 자세값을 계산할 경우에 이론적으로 시스템에 미치는 영향은 무시할 만한 수준이다. 하지만 INS가 전차의 차체에서 정확한 차체의 자세를 측정하여야 한다. 따라서 K2전차 차체에 장착되어 있는 INS의 장착 비정렬 오차를 정확히 측정하여야 하고 측정된 장착 비정렬 오차를 보정하여야만 정확한 전차포 자세값을 계산할 수 있다.

Fig. 9는 전차의 INS 장착 비정렬 오차를 측정하는 것이다. 가로축은 차체를 기준으로 포탑의 선회위치이고, 세로축은 포탑 선회 위치에서 전차포의 계산된 자세값과 측정된 자세값을 비교하여 나타낸 것이다. (자세값은 Roll과 Pitch로 나타나지만 본 논문에서는 사격에 민감한 요소로 작용하는 Roll값을 위주로 표현한다.) Fig. 9에서 붉은색 그래프선은 INS를 이용한 전차포 자세를 계산한 값이고, 파란색 그래프선은 전차포 자세를 직접 측정하는 값으로, INS의 장착 비정렬 오차를 측정하는 그래프이다. 전차포 자세는 좌우경사측정기

로 전차포의 자세를 직접 측정하였다.

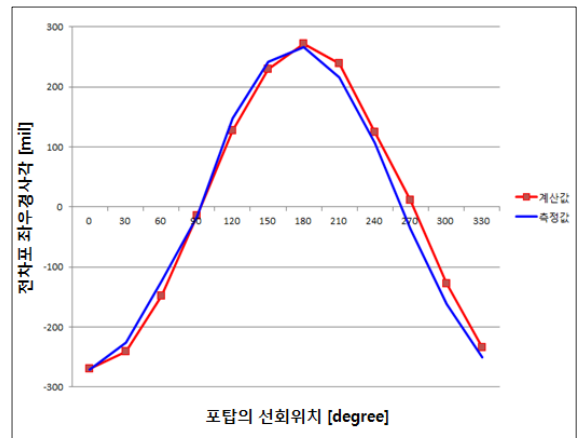


Fig. 9. Mis-alignment of INS to install in K2 MBT

Fig. 9의 그래프에서 수평축은 포탑의 선회각도(단위: degree)를 나타내고, 수직축은 각 포탑의 선회각에서의 좌우경사값(단위: mil)을 나타낸다. 포탑 선회 위치에서 전차포의 계산된 자세값(붉은색 그래프)에서 측정된 자세값(파란색 그래프)을 빼면 INS의 장착 비정렬 오차가 측정되고, 이렇게 측정된 INS 장착 비정렬 오차의 평균( $C_b^c$ )은 Roll -1.24 mil, Pitch 20.66 mil 이다. 측정된 INS 장착 비정렬 오차( $C_b^c$ )를 전차포 자세 계산식인 식 (9)에 반영하여 DCM(Direction Cosine Matrix)으로 표현하면 식 (13)과 같다.

$$C_n^g = C_t^g C_e^t C_b^c C_n^b \tag{13}$$

이렇게 표현된 식 (13)을 Matlab을 이용하여 타당성을 검증하였다. Fig. 10에서 파란색 그래프는 INS의 장착 비정렬 오차가 적용된 전차포 자세를 계산한 값이고, 붉은색 그래프는 INS의 장착 비정렬 오차가 없는 전차포 자세값이다.

Fig. 10은 Fig. 9의 실제 측정된 오차가 INS의 장착 비정렬 오차 때문에 발생함을 보여주는 그래프이다.

이처럼 K2전차 차체에 장착되어 있는 INS의 장착 비정렬 오차를 보정하여야 정확한 전차포 자세값을 계산할 수 있다. K2전차 차체에 장착되어 있는 INS의 장착 비정렬 오차를 보정하는 방법은 Fig. 11과 같다.

우선 전차장 운용전시기에서 INS의 자세값(Roll, Pitch)값과, 경사측정기로 전차포의 자세(Roll, Pitch)를

측정한 값의 차가 INS의 장착 비정렬 오차이고, 이 장착 비정렬 오차를 전차장 운용전시기에서 보정하는 절차<sup>[5]</sup>에 맞추어 보정한다.

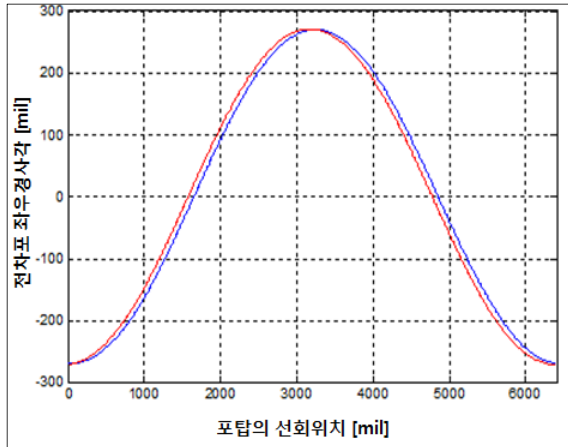


Fig. 10. Mis-alignment of INS to install by Matlab



Fig. 11. Compensation for the mis-alignment of INS installation



Fig. 12. K2 MBT test

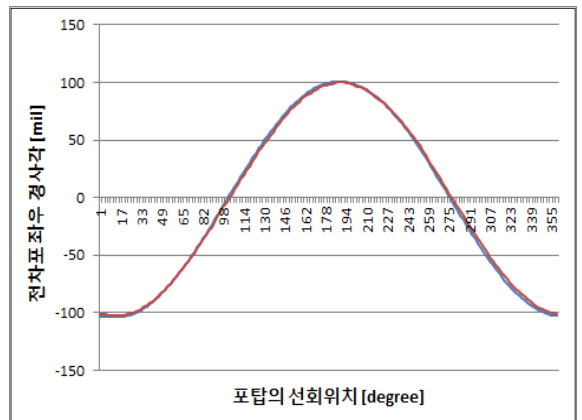


Fig. 13. Test result

## 7. K2전차 시험 결과

본 논문의 3장, 6장에서 기술한바와 같이 K2전차에서 VSU를 제거하고 INS를 이용하여 전차포 자세값을 계산하기 위하여 INS의 장착 비정렬 오차를 보정하여 시험하였다.

Fig. 12는 K2전차를 이용하여 시험하는 형상이고, Fig. 13은 INS의 장착 비정렬 오차를 보정한 후 전차포의 자세값을 계산한 결과와 전차포의 자세를 측정할 결과를 비교한 그래프이다.

Fig. 14는 Fig. 13의 계산결과와 측정결과의 편차를 나타내는 그림이며, 최대편차는 4.3 mil로 K2전차 완성차 규격<sup>[5]</sup>에 만족한다.

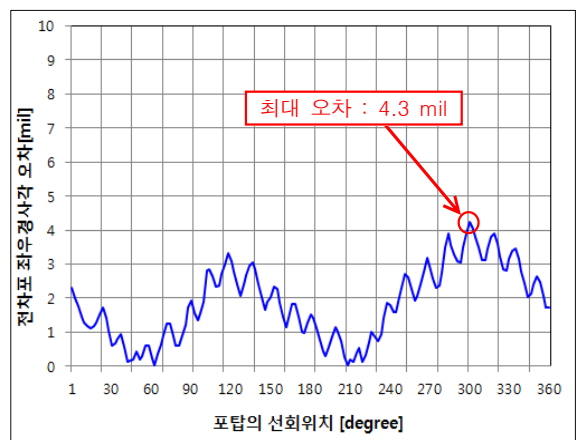


Fig. 14. The error of gun's roll for turret azimuth



## 8. 결 론

본 논문에서는 K2전차의 수직감지유닛(VSU, Vertical Sensor Unit)을 대체할 수 있는 스트랩다운 관성항법 장치(INS, Strap-Down Inertial Navigation System)를 이용한 전차포 자세(롤/피치) 계산방법을 제시하였다. 이 방법에 대한 검증방법으로는 명중률에 대한 시뮬레이션, 탄도해의 비교, K2전차에서의 시험으로 적용가능성을 분석하였다.

K2전차 INS의 장착 비정렬 오차를 측정하여 보정한 후 전차 명중률에 대해 시뮬레이션 하면 VSU를 적용하였을 경우와 비교하여 전차 명중률에는 0.1 % 이하의 영향을 미치므로 K2전차 체계성능에는 무시할만한 수준이라 할 수 있다. 또한 K2전차 탄도해 계산을 한 결과, 탄종별 선도각 및 초고각 최대오차는 0.236 mil 로써, 전차 시스템에서 보상할 수 없는 작은 크기의 오차이므로, 역시 K2전차 체계성능에는 영향이 없다고 할 수 있다. 마지막으로 K2전차에서 VSU를 제거하고 INS를 이용하여 전차포 자세값을 계산한 결과 K2전차 완성차 규격에 만족하는 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 이러한 명중률 시뮬레이션, 탄도해 비교, K2전차 시험으로 검증한 방법인 INS(관성항법장치)를 이용하여 전차포 자세(롤/피치) 계산방법은 K2전차에서 적용 가능한 것으로 판단한다.

## References

- [1] Hyundai Rotem Company, "An Analysis of Hit Probability of Tank's Gun," 1995.
- [2] General Dynamics, "Error Budget Analysis," 1999.
- [3] G. Kim, H. Kwon, B. Kim, Y. Park, H. Ahn, Y. Kim, "Analysis of the Effect on the First Round Hit Probability(FRHP) by Target Distance which is Affected by the Error Source of the Fire Control System," KIMST Annual Conference Proceedings, June, 2011.
- [4] G. Kim, Y. Jung, H. Kwon, S. Yu, "A Technical Analysis Method and System which can be Applied to Predict the First Round Hit Probability of the Main Battle Tank," Patent No. 10-2015-0019033, In Korea, 2015.
- [5] KDS 2350-4003, TANK, COMBAT, FULL-TRACKED, K2.
- [6] Christopher Jekeli, "Inertial Navigation Systems with Geodetic Applications," de Gruyter, New York, pp. 9-19, 2000.
- [7] Young-Bum Park, "Design and Performance Analysis of NHC/ZUPT Kalman Filter with Mounting Misalignment Estimation," Journal of the KIMST, Vol. 12, No. 5, pp. 636-643, 2009.