Journal of the KIMST, Vol. 17, No. 3, pp. 342-349, 2014
ISSN 1598-9127
DOI http://dx.doi.org/10.9766/KIMST.2014.17.3.342

Research Paper 체계공학 부문

다중 좌표계간 각도오차 보정을 통한 체계정렬 기법

하종수*,1) · 이의혁1) · 이현아1) · 박규철1) · 조규공1)

1) 국방과학연구소

Methodology of System Alignment using Angular Error Compensation Among Multi-Axes

Jong-Soo Ha*,1) · Eui-Hyuk Lee1) · Hyun-Ah Lee1) · Gyu-Churl Park1) · Kyu-Gong Cho1)

1) *Agency for Defense Development, Korea*

(Received 15 July 2013 / Revised 1 April 2014 / Accepted 11 April 2014)

ABSTRACT

MRDS is a short range missile/rocket defense system which protects a main battle tank(MBT) from threats in a short range. It is composed of 2 radars, 2 infrared trackers(IRTs), 1 fire control computer(FCC), 2 launchers and countermeasures. To guarantee the performance of the MRDS, these components have to be mounted on the vehicle with the known positions and directions and it is required to compensate the alignment errors. In this paper, a system alignment method using angular error compensation is proposed to install its components within a tolerance on the MBT. The test results are presented to evaluate and verify the effectiveness of the proposed method.

Key Words : System Alignment(체계정렬), MRDS(미사일/로켓 방어체계)

1. 서 론

능동파괴체계(Hard-Kill System)는 근거리 미사일/로켓 방어체계로서 전차에 탑재되어 위협체를 탐지·추적하고 대응탄을 발사하여 무력화시키는 것을 목적으로 하며, 탐지·추적센서인 탐지추적레이더와 열상추적기(IRT : InfraRed Tracker), 위협판단 및 대응을 통제하는 사격통제컴퓨터, 대응수단인 발사장치와 대응탄으로 구성된다[1].

이 때 각 구성품들은 전차[2]에 분산 장착되어 각각의 독립적인 좌표계를 형성하며 그 기능을 수행한다. 3차원 센서인 탐지추적레이더는 거리·방위각·고각의 구 좌표계에서, 2차원 센서인 IRT는 열상 화면인 평면 좌표계에서 위협체를 탐지·추적하며, 사격통제컴퓨터는 센서에서 획득한 데이터를 바탕으로 포탑 좌표계를 기반으로 교전연산을 수행하여 발사장치에 발사장치 중심 직각 좌표계를 기반으로 구동 및 발사 명령을 내리고 발사장치는 이 명령을 수행한다.

따라서 각 구성품들의 좌표계는 혼재[3]하게 되므로

* Corresponding author, E-mail: jsha@add.re.kr
Copyright ⓒ The Korea Institute of Military Science and Technology

각 구성품들의 좌표계 변환에 있어 오차가 발생하게 되면 고정밀 대응을 요구하는 근거리 방어체계 특성상 교전성능이 떨어질 수밖에 없다. 따라서 각 구성품들은 설계값을 바탕으로 탑재체계에 정밀하게 장착되어야 하며, 장착 후 장착오차를 보정하는 과정이 필요하다.

이를 위해 본 논문에서는 다중 좌표계간 각도오차 보정을 통한 체계정렬 기법을 제안한다. 체계정렬 기법과 관련된 기존 연구와 오차요소를 분석하고, 체계정렬을 수행하기 위한 이론 및 기법을 제안하며, 실제 시험 결과를 통해 제안하는 기법의 효용성을 검증한다.

2. 기존 연구 및 오차요소 분석

체계정렬과 관련한 기존 연구로서 전차의 경우 조준경과 주포의 조준점 정렬을 위해 시험표적법을 사용하고 있다[4]. 본 기법은 주포의 십자점과 조준경의 지향점 오차를 전차 내부에서 관측·보정하는 방법으로서 공장에서 체계조립 시 사용가능한 장점이 있으나, 조준경과 주포가 포탑 중심을 기준으로 전방에 장착되어있고 장비들 간 지향 방향 또한 동일한 점에서, 각 구성품들이 포탑 중심을 기준으로 산개해서 장착되어있고 지향 방향 또한 제각각인 능동파괴체계에는 적용할 수 없다는 단점이 있다.

이와 달리 위성체의 경우 2대 이상의 광파기를 이용해서 각 구성품의 위치를 측정하여 3차원 공간에서의 위치오차를 보정하는 방법으로 정렬을 수행한다[5]. 이는 센서와 같은 각 구성품의 위치 정확도를 1차적으로 향상시킬 수 있는 장점이 있으나, 센서의 지향방향은 보정하지 못하고 영상신호처리와 같은 후처리에 위임한다는 점에서, 각 구성품들의 유기적인 동작을 통해 실시간으로 정확한 교전지점을 산출해야하는 능동파괴체계의 경우에는 적용할 수 없다는 단점이 있다.

이들을 참고하여 능동파괴체계의 시험평가를 위해 시험치구전용 정렬기법을 개발하였다[6]. 시험치구의 경우 각 구성품은 전차 주포와 조준경처럼 치구 중심에 몰려있고 동일방향을 지향하게 되는데, 위성체 체계정렬처럼 광파기를 이용하여 장착위치를 측정하고 각 구성품의 관측 장비의 지향점을 확인함으로써 각도오차를 보정할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 본 기법은 시험용 특수기법으로서 전용시험치구가 아닌 전차에는 앞선 두 기법과 유사한 사유로 적용할 수 없다는 단점이 있다.

체계정렬을 수행하기 위해서는 구성품의 장착위치 (x, y, z)와 장착각도 (θ, ϕ, γ) 모두 보정해야 한다. 그러나 이 경우 다루어야할 변수가 6가지나 되고 고려해야할 경우의 수 또한 매우 많아진다.

그런데 전차의 경우 제작 시 장착위치 가공 오차가 0.xxmm로서 구성품 오차보다 정밀하므로 이를 반영하여 교전성능분석[7]을 수행해도 성능의 저하가 거의 없는 것으로 분석되었다. 따라서 본 논문에서는 장착위치 정확도는 신뢰하고 장착각도 오차에 대해서만 보상을 수행한다. 구성품 별 좌표계[8] (X_L, Y_L, Z_L)와 기본 좌표계 (X_c, Y_c, Z_c)의 관계는 Fig. 1과 같다. 그림에서 구성품 별 좌표계는 기본 좌표계로부터의 P만큼 떨어진 점 (X_p, Y_p, Z_p)에 위치하며 고유의 장착각도 (θ, ϕ, γ)를 가진다. 따라서 체계정렬을 위해서는 장착각도 (θ, ϕ, γ)를 어떻게 보상할 것인지에 대한 기법을 설계해야 한다.

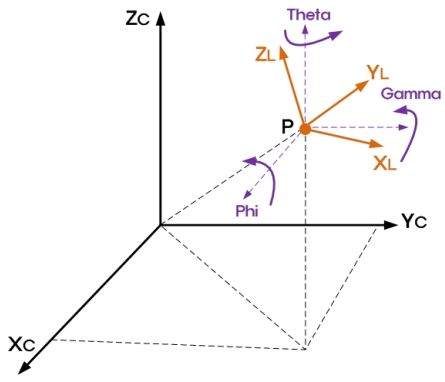


Fig. 1. 좌표계 및 오차요소

3. 제안하는 체계정렬 기법

Fig. 2에 능동파괴체계 구성품의 배치와 지향방향, 각 구성품별 회전반경을 나타내었다. 각 구성품은 포탑 중심에 대해 고유의 반경을 가지면서 회전하고, 지향 방향은 포탑 중심의 법선 방향에 대해 일정 각도만큼 비틀어져 있다. 이러한 능동파괴체계의 체계정렬을 위해서는 광파기, 레이저포인터 및 조준경, 표적판을 이용하여 포탑 중심을 기준으로 원 평면을 구성하

고, 설계사양 대비 각 구성품의 장착각도를 도출하여 보정하는 방법을 수립해야 한다. 이를 위해 본 논문에서는 회전 원주 상에 있는 각 구성품들의 장착 각도를 원과 관련된 수학식을 활용하여 보상한다.

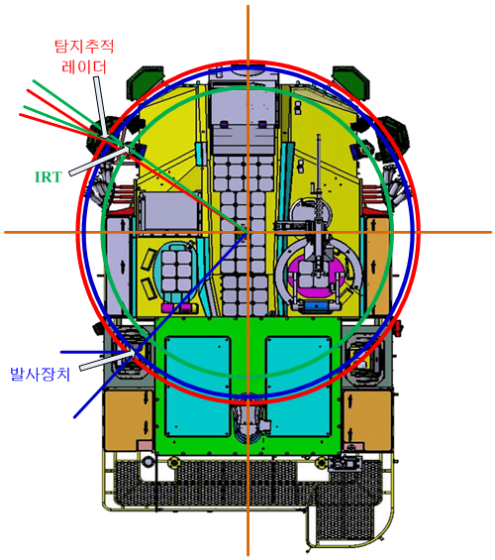


Fig. 2. 능동파괴체계 구성품 포탑 배치도

3.1 기준 좌표 설정

Fig. 3에 구성품의 각도오차를 계산하기 위한 기준좌표 설정 개념도를 제시하였다.

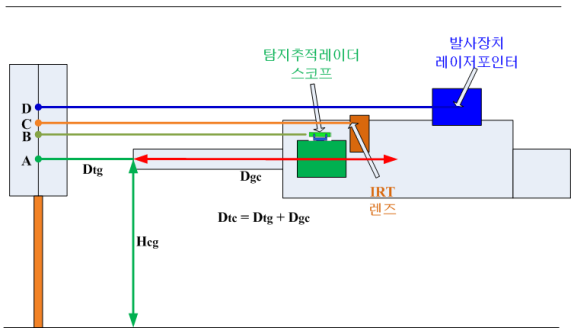


Fig. 3. 체계정렬 기준좌표 설정 개념도

본 논문에서는 포탑 회전면을 중심으로 좌표계를 설정한다. 이를 위해 전차 포신의 수평을 유지한 다음, 전차 조준경을 이용하여 전차 포신과 기준 표적판을 정렬시켜 전차 포신과 기준 표적판 사이의 수평거리 D_{tg}를 측정하고 포탑 중심으로부터 바닥면까지의 수직거리 H_{cg}를 측정한다. 이 때 수평중심거리 D_{tc}는 포신과 포탑 중심 사이의 설계값 D_{gc}와 측정값 D_{tg}의 합을 통해 구한다. Fig. 3에서 A는 전차 포신의 참조점, B는 탐지추적레이더 스코프의 참조점, C는 IRT의 참조점, D는 발사장치 레이저포인터의 참조점이다.

3.2 체계정렬 알고리듬

Fig. 4에 체계정렬 알고리듬을 제시하였다.

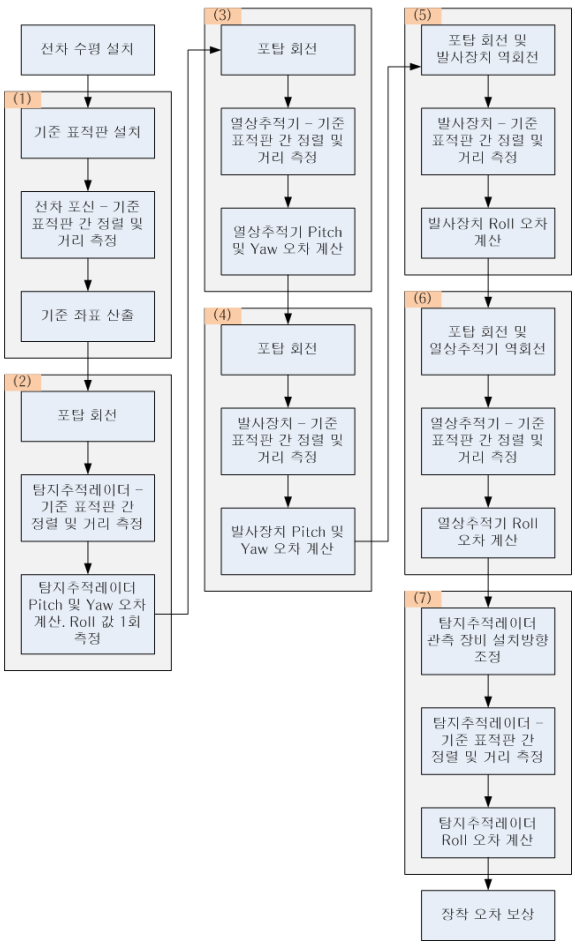


Fig. 4. 체계정렬 알고리듬

Fig. 4의 과정 (1)에서 전차 포신과 기준 표적판 간 정렬 및 거리 측정을 통해 수평거리 D_{tc}와 수직거리 H_{cg}를 구하고, 과정 (2)에서 탐지추적레이더와 기준 표적판 간 정렬 및 거리 측정을 통해 거리 D_e를 구하고 수직거리 오차 H_e를 구하여 Pitch 각도 오차 E_{pitch}를

구한다. 이를 바탕으로 수평거리 D_{tu}를 구하여 Yaw 각도 오차 E_{yaw}를 구한다. 과정 (3)에서는 과정 (2)와 동일한 방법으로 IRT의 Pitch 각도 오차 E_{pitch}와 Yaw 각도 오차 E_{yaw}를, 과정 (4)에서는 발사장치의 Pitch 각도 오차 E_{pitch}와 Yaw 각도 오차 E_{yaw}를 구한다. 과정 (5)에서 포탑을 순방향으로 회전하고 발사장치를 역방향으로 회전하여 발사장치와 기준 표적판을 재정렬시키고 거리 측정을 통해 D_{tu2}를 구하여 Roll 각도 오차 E_{roll}을 구한다. 과정 (6)에서는 과정 (5)와 동일한 방법으로 열상추적기의 Roll 각도 오차 E_{roll}을 구한다. 과정 (7)에서는 다른 방향으로 Roll 관련 값을 구하고 과정 (2)에서 구한 값과 함께 연산하여 탐지추적레이더의 Roll 각도 오차 E_{roll}을 구한다.

3.3 전차 수평 설치

Fig. 5에 전차의 수평유지를 위한 설치도를 나타내었다. 앞서 언급한 바와 같이 본 논문에서는 포탑의 회전면을 중심으로 구성품들의 장착 각도를 보상하므로 포탑 회전면의 수평이 전제되어야 한다. 그러나 전차의 궤도유압장치는 능동파괴체계에서 요구하는 수준의 수평상태를 유지하지 못하므로 전차 주포 정렬 시 요구되는 수준으로 제작공장 바닥면과 버팀목을 정밀 가공하여 수평상태를 유지하도록 한 다음, 전차를 버팀목 위로 이동시키고 궤도유압장치를 조절하여 전차 궤도가 바닥면과 닿지 않도록 조절하면 수평 상태의 버팀목과 접촉하는 전차는 수평을 유지하게 된다.

Fig. 5. 전차 수평 설치도

3.4 Pitch 정렬

Fig. 6에 Pitch 각도오차 보상 개념도를 제시하였다. 본 논문에서는 발사장치의 Pitch 각도오차를 정렬하고 동일한 방법으로 탐지추적레이더와 IRT의 Pitch 각도 오차를 정렬한다. 먼저 포탑을 회전하여 발사장치의 레이저포인터와 기준 표적판의 수평선을 일치시키는데, 발사장치의 Pitch 값에 오차가 없다면 레이저포인터가 기준 표적판의 D점을 지향하여야 하나 오차가 있다면 E점을 지향하게 되고 이때의 Pitch 값이 각도 오차 E_{pitch}가 되므로 식 (1)과 같이 각도 오차를 구할 수 있다.

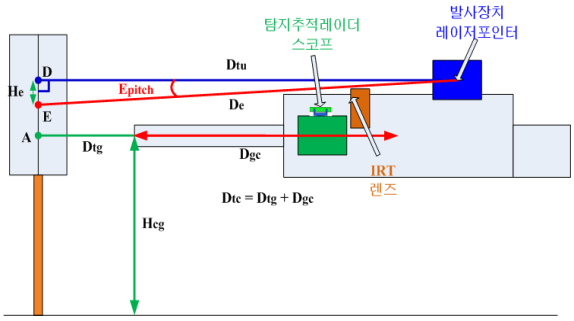


Fig. 6. Pitch 각도오차 보상 개념도

$$E_{pitch} = \sin^{-1}\left(\frac{H_e}{D_e}\right) \tag{1}$$

E_{pitch}를 이용하여 구성품의 관측 장비와 기준 표적판까지의 수평거리 D_{tu}를 식 (2)와 같이 구한다.

$$D_{tu} = D_e \times \cos(E_{pitch}) \tag{2}$$

탐지추적레이더와 IRT의 경우 각 관측 장비의 관측점이 중심선 상에 있으므로 문제가 없지만 발사장치의 레이저포인터는 Fig. 7과 같이 관측점이 중심선에서 벗어나 있으므로 발사장치와 기준 표적판의 거리를 D_{eo}, 이격 옵셋을 D_{off}라 할 때 식 (3)과 같이 D_e를 구한 다음 식 (2)에서 D_{tu}를 구한다.

$$D_e = \sqrt{D_{eo}^2 - D_{off}^2} \tag{3}$$

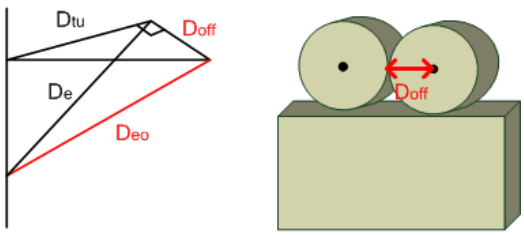


Fig. 7. 발사장치 레이저 포인터 위치 보상도

3.5 Yaw 정렬

Fig. 8에 Yaw 각도오차 보상 개념도를 제시하였다.

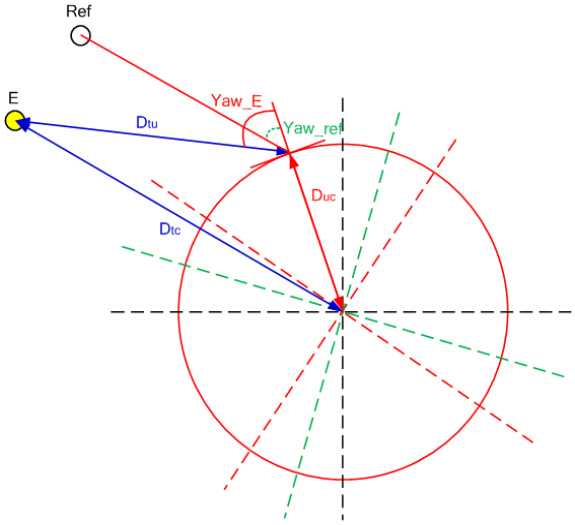


Fig. 8. Yaw 각도오차 보상 개념도

Pitch 정렬을 탐지추적레이더, IRT, 발사장치 각각에 대해 수행하면 각 구성품과 기준 표적판과의 거리 D_{tu}를 구할 수 있는데 이를 이용하여 Fig. 8과 같이 각 구성품의 Yaw 각도 오차 E_{yaw}를 구한다. Fig. 8에서 구성품의 Yaw 값에 오차가 없다면 구성품 관측 장비의 참조점은 Ref 점이 되어야 한다. 그러나 오차가 있다면 구성품의 관측 장비는 E 점을 지향하게 되고 이때의 Yaw 값은 Yaw_E가 된다. Yaw_E와 Yaw_{ref}의 차이가 Yaw 각도 오차가 되며, Yaw_E는 앞서 계산한 D_{tu}와 D_{tc}를 활용하여 식 (4)와 같이 구한다.

$$Yaw_E = \pi - \cos^{-1}\left(\frac{D_{tu}^2 + D_{uc}^2 - D_{tc}^2}{2D_{tu}D_{uc}}\right) \tag{4}$$

위에서 구한 Yaw_E로부터 E_{yaw}를 식 (5)와 같이 구한다.

$$E_{yaw} = Yaw_E - Yaw_{ref} \tag{5}$$

3.6 Roll 정렬

Fig. 9에 IRT와 발사장치의 Roll 각도오차 보상 개념도를 제시하였다.

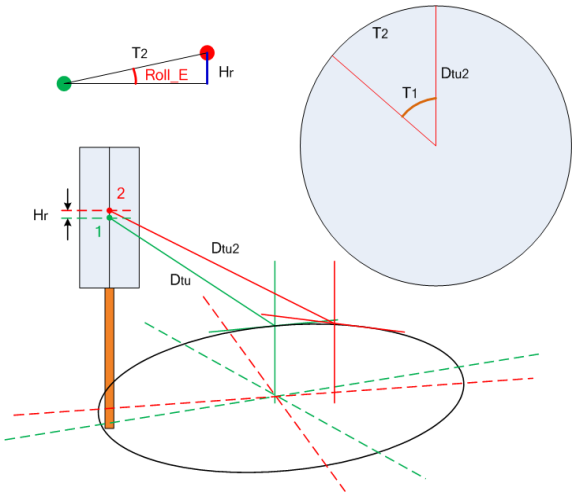


Fig. 9. IRT/발사장치 Roll 각도오차 보상 개념도

앞서 구한 E_{pitch}를 반영하여 구성품의 Pitch 각도오차를 보정한 다음 포탑을 구성품과 기준 표적판을 정렬한 위치보다 순방향으로 20도 더 회전하고 구성품을 역방향으로 회전하여 구성품의 관측점과 기준 표적판을 정렬한다. 구성품 별 참조점을 점 1이라 할 때 새롭게 측정한 구성품 관측 장비의 참조점을 점 2라 하면, 두 점 간 차이 H_r을 구할 수 있으며, 구성품 관측 장비와 참조점의 거리 D_{tu2}와 구성품의 수평회전각도 T_1을 이용하여 구성품의 수평구동거리 T_2를 식 (6)과 같이 구한다.

$$T_2 = D_{tu2} \times T_1 \tag{6}$$

이와 같이 연산한 H_r와 T_2를 이용하여 Roll 각도오차 E_{roll}은 식 (7)과 같이 구한다.

$$E_{roll} = \sin^{-1}\left(\frac{H_r}{T_2}\right) \tag{7}$$

Fig. 10에 탐지추적레이더의 Roll 각도오차 보상 개념도를 제시하였다. 이를 기준으로 탐지추적레이더의 Roll 각도오차 E_{roll}을 구하고 광파기를 이용하여 표적판을 탐지추적레이더의 관측 장비가 지향하는 3곳 중 2곳에 거리가 동일하도록 정렬한다.

Fig. 10에서 관측 장비의 1곳에서의 참조점을 점 2라 할 때('3.4' 문단에서 측정한 점) 나머지 1곳에서의

관측 장비의 참조점을 점 3이라 하면, 두 점 간 차이 $H_{r1}+H_{r2}$을 구할 수 있으며, 레이더의 관측 장비와 참조점의 거리 R과 구성품의 수평회전각도 T_1을 이용하여 구성품의 수평구동거리 T_2를 식 (8)과 같이 구한다.

$$T_2 = R \times T_1 \tag{8}$$

이와 같이 연산한 $H_{r1}+H_{r2}$와 T_2를 이용하여 Roll 각도오차 E_{roll}은 식 (9)와 같이 구한다.

$$E_{roll} = \sin^{-1}\left(\frac{H_{r1}+H_{r2}}{T_2}\right) \tag{9}$$

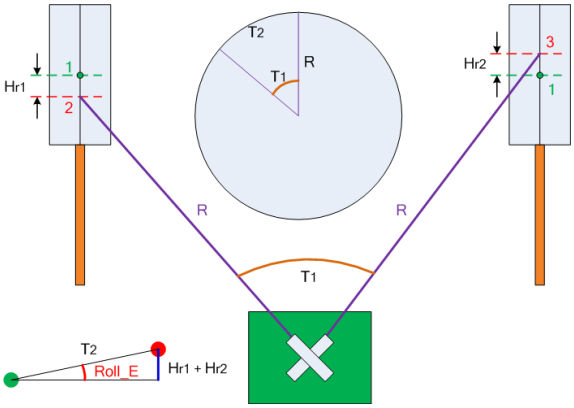


Fig. 10. 탐지추적레이더 Roll 각도오차 보상 개념도

4. 시뮬레이션 및 시험 결과

제안하는 체계정렬 기법은 전차 중심을 기준으로 구성품이 설치된 위치에 대해 원 평면을 구성함으로써 시작되기 때문에 상기와 같이 평면 중 일부 각도에 대해서만 보정을 수행하면 전 방향에 대해 오차보정이 만족되어야 한다. 이러한 설계의 타당성을 검증하기 위해 3D 작도 프로그램을 이용하여 각도 보상 시뮬레이션을 수행하였다.

4.1 시뮬레이션 결과

Fig. 11에 3D 작도 시뮬레이션의 결과를 제시하였다. Fig. 11에서는 발사장치가 Y축 기준으로 30° 회전한 위치를 지향하고 있다고 가정하고 발사장치로부터 10m 떨어진 위치에 표적판을 설치한 것으로 가정하였다. 이 때 발사장치에 각도오차를 설정하고 제안하는 정렬 기법을 이용하여 이를 보상했을 때 표적판에 투사되는 레이저포인터의 위치와 보상 전 레이저포인터 투사위치와의 거리차를 계산했을 때 설정된 각도오차와 동일한 지 확인함으로써 제안하는 기법의 타당성을 검증하였다. 여러 시나리오에 대해 이와 같은 시뮬레이션을 수행한 결과 모두 타당한 결과를 나타내었다.

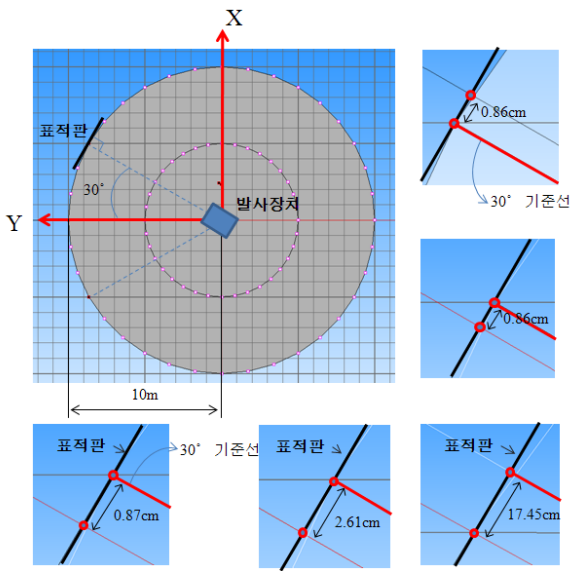


Fig. 11. 3D 작도 시뮬레이션 결과

4.2 정렬시험 결과

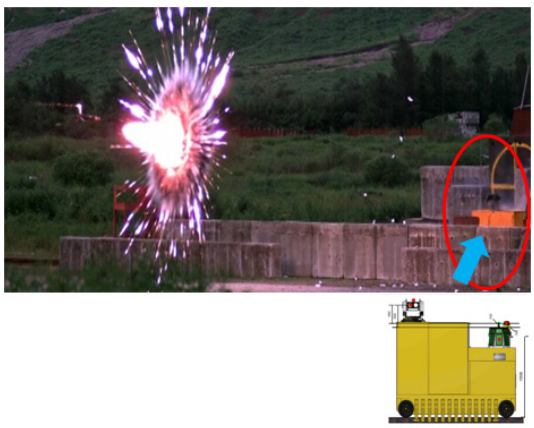
Fig. 12. 체계정렬 시험 전경

위와 같이 제안하는 체계정렬 기법을 검증하고 이를 이용하여 Fig. 12와 같이 정렬시험을 수행하였다.

설계 초기 내재되어있던 설계 오류사항들은 수차례에 걸친 시뮬레이션과 시험을 통해 보완되었으며, Table 1에 최종적으로 설계한 제안하는 정렬 기법에 대한 정렬시험 결과를 제시하였다. 본 결과는 3회에 걸쳐 반복 수행한 결과이며 Roll 정렬의 경우 측정 결과의 각도오차 폭이 매우 작기 때문에 최소단위로 표시하였다. Yaw와 Pitch 모두 각 구성품의 오차 범위를 고려할 때 정밀한 결과를 나타내었다.

Table 1. 장착각도 오차 측정 평균값

	Yaw[°]	Pitch[°]	Roll[°]
레이더	-0.119	0.056	-0.001
IRT	-0.359	-0.536	0.001
발사장치	0.575	-0.095	0.001



(a) 시험치구 탑재 교전시험 – 치구전용 정렬 기법

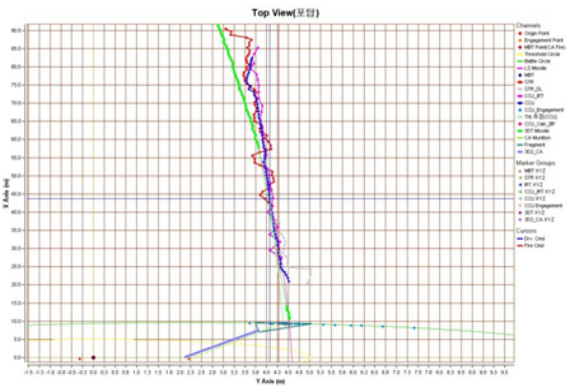
(b) 전차 탑재 교전시험 – 제안하는 정렬 기법

Fig. 13. 능동파괴체계 교전시험

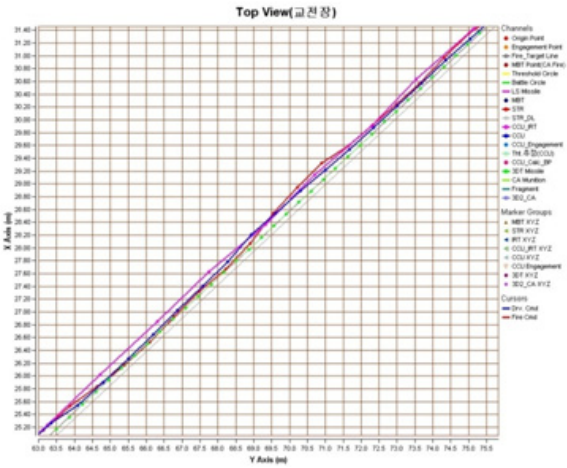
4.3 능동파괴체계 교전시험 결과

위와 같이 수행한 체계정렬 기법의 효용성을 확인하기 위해 능동파괴체계의 교전시험 결과를 분석하였다. Fig. 13에서 그림 (a)는 능동파괴체계 전용시험치구를 이용한 정지교전시험 장면이며, 그림 (b)는 제안하는 체계정렬 기법을 적용하여 능동파괴체계를 탑재한 실제 전차를 이용한 이동교전시험 장면이다.

Fig. 14에 위 교전시험의 결과를 비교하였다. 그림 (a)는 정지해있는 시험치구를 이용하였기 때문에 그래프의 X축은 표적 거리를 나타내고 Y축은 이에 대한 가로축, 즉 전차 기동로를 나타낸다. 반면 그림 (b)는 전차 기동 중 교전한 결과이기 때문에 X축으로부터 접근하던 표적이 전차의 Y축 방향 이동으로 인해 마치 대각선에서 접근하는 것처럼 보인다.



(a) 정지 시험치구 – 기존 기법 적용



(b) 기동 전차 – 제안하는 기법 적용

Fig. 14. 능동파괴체계 교전시험 결과

Fig. 14에서 붉은색 선은 탐지추적레이더의 표적획득 결과, 보라색 선은 IRT의 표적획득 결과, 푸른색 선은 사격통제컴퓨터의 신호처리 결과, 연두색 선은 측각된 실제 표적 궤적을 나타낸다. 이 때 그림 (a)에서는 푸른색 선(실제 표적 궤적)과 연두색 선(표적 추적 결과) 사이에 각도 옵셋이 존재하나 그림 (b)에서는 거의 확인되지 않는다. Fig. 13의 (a)에서는 전용시험치구를 제작하여 그 위에 능동파괴체계를 탑재하고 이에 대한 각도 보상을 수행[6]하였는데, 전용시험치구의 경우 구성품들이 몰려서 장착되어있고 동일 방향을 지향하기 때문에 실제 전차에 비해 정렬이 매우 용이함에도 불구하고, 제안하는 체계정렬 기법을 적용한 Fig. 14의 (b)보다 정밀하지 못한 결과를 보여주고 있다. 특히 그림 (b)의 장비 간 획득 정보의 차이가 체계정렬 오차 xx mil 내에 있음을 고려할 때 제안하는 기법이 매우 효율적임을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 다중 좌표계간 각도오차 보정을 통한 체계정렬 기법을 제안하였다. 기존의 정렬 기법을 적용하기 어려운 문제점을 분석하고 체계정렬을 위한 기본 개념을 수립하였다. 전차 포탑에 배치되는 각 구성품의 관계를 파악하고 정밀하게 가공되어 교전성능에 영향이 거의 없는 장착위치 오차는 배제하고 교전성능에 영향이 큰 장착각도 오차인 Pitch, Yaw, Roll에 대해서만 보상하는 체계정렬 기법을 제안하였다.

3D 작도 시뮬레이션을 통해 제안하는 기법의 타당성을 검증하였으며 실제 체계정렬 시험을 통해 전차 포탑에 장착된 각 구성품의 장착각도를 보상하였다. 이와 같이 체계정렬을 적용한 능동파괴체계에 대해 실제 교전성능시험을 통해 센서 간 정렬오차가 체계정렬 오차 범위 내에 있음을 확인하였으며 발사장치 또한 수차례의 교전을 성공하였다. 특히 정렬이 용이한 시험치구에 대해 수행한 정지교전시험 결과보다 전차 포탑과 같이 정렬이 어려운 구조에 대해 수행한 이동교전시험 결과가 더 좋은 정렬 성능을 보여줌을 확인함으로써 제안하는 체계정렬 기법의 효용성을 검증하였다.

References

[1] 송영덕 외, “능동파괴장치의 체계적용성 연구,” 제14회 지상무기 학술대회, 2006.

[2] 김병운 외, “궤도차량용 반능동 현수장치 성능특성에 관한 연구,” 한국군사과학기술학회, 2003.

[3] 하종수 외, “근거리 미사일방어시스템 성능분석을 위한 전차 구동 모델링 기법”, 한국군사과학기술학회지, 제14권 제2호, pp. 173-180, 2011.

[4] 현대로템, “실시간 디지털 자동 조준감사 장치,” 대한민국특허청, 10-2006-0019227, 2006.

[5] 항공우주연구원, “데오도라이트를 이용한 위성체 얼라인먼트 측정 및 3차원좌표 계산방법,” 대한민국특허청, 10-0533439.

[6] 국방과학연구소, “표적추적시스템의 레이다 센서와 영상 센서 간 정렬오차 추정 장치 및 방법,” 대한민국특허청, 10-1036833, 2011.

[7] 조규공 외, “능동파괴체계 M&S 연구,” 한국군사과학기술학회 종합학술대회, 2011.

[8] I. M. Yaglom and A. Shields, Geometric Transformations, The Mathematical Association of America, 1962.