

## 천무 발사대와 복합항법장치의 정렬절차 개선을 위한 연구

배공명<sup>\*1)</sup> · 이시호<sup>2)</sup> · 김성광<sup>1)</sup> · 강태우<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 국방기술품질원 기동화력2팀

<sup>2)</sup> 한화디펜스 광전자연구센터

### A Study on Align Process Improvement for K-MLRS Launchers and Position Navigation Unit

Gong-Myeong Bae<sup>\*1)</sup> · See Ho Lee<sup>2)</sup> · Sung-Kwang Kim<sup>1)</sup> · Taewoo Kang<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Land Systems Center, Defense Agency for Technology and Quality, Korea

<sup>2)</sup> Optoelectronic System Team, Hanwha Defense Systems, Korea

(Received 23 November 2017 / Revised 12 February 2018 / Accepted 11 May 2018)

#### ABSTRACT

Boresight process is to match the misalignment between PNU(Position Navigation Unit) and the reference axis of K-MLRS cage. It is important process to ensure accuracy of K-MLRS. When PNU is removed from cage in the previous alignment procedure, there is a misalignment angle with cage of K-MLRS during reassembly process. Therefore, boresight process is always need to align reference axes between PNU and K-MLRS cage. However, this study has proposed the case alignment process that it enable to correspond to reference axes between ISA (Inertial Sensor Assembly) block and PNU case. So, improved alignment procedure enables to install PNU in the reassembly process without additional boresight process.

Key Words : K-MLRS(천무 발사대), PNU(복합항법장치), Boresight(조준감사)

#### 1. 서론

천무 발사대(230 mm급 다련장)는 최첨단 정밀타격 화력장비로 동시에 여러 발의 로켓탄을 발사하여 밀집된 표적을 제압하는 다용도의 포병 무기체계이다. 천무 발사대에 장착되는 복합항법장치(PNU, Position

Navigation Unit)는 위성항법장치(GPS, Global Positioning System)와 관성항법장치(INS, Inertial Navigation System)의 링레이저 자이로(Ring Laser Gyroscope)와 가속도계(Accelerometer)를 사용하여 발사대의 위치, 속도, 자세의 항법정보를 제공한다<sup>1,2)</sup>. 따라서 이는 포병의 정밀타격 능력 향상과 아군의 생존력 향상에 기여하는 핵심장비이다. 복합항법장치는 ISA(Inertial Sensor Assembly) 블록의 구성품인 자이로와 가속도계로부터 회전과 선형가속도를 ISA 블록을 기준축으로 발사대

\* Corresponding author, E-mail: gmbae@dtqa.re.kr  
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

의 위치와 자세정보를 계산한다<sup>3,4)</sup>. 복합항법장치를 발사대에 장착 시 복합항법장치의 ISA 블록과 발사대 케이스의 기준축 조립공정 중에 미세하게 틀어지기 때문에 비정렬각이 존재하게 된다. Fig. 1(다)와 Fig. 2는 PNU의 케이스, ISA 블록의 기준축의 비정렬각을 개념적으로 나타낸 것이다.

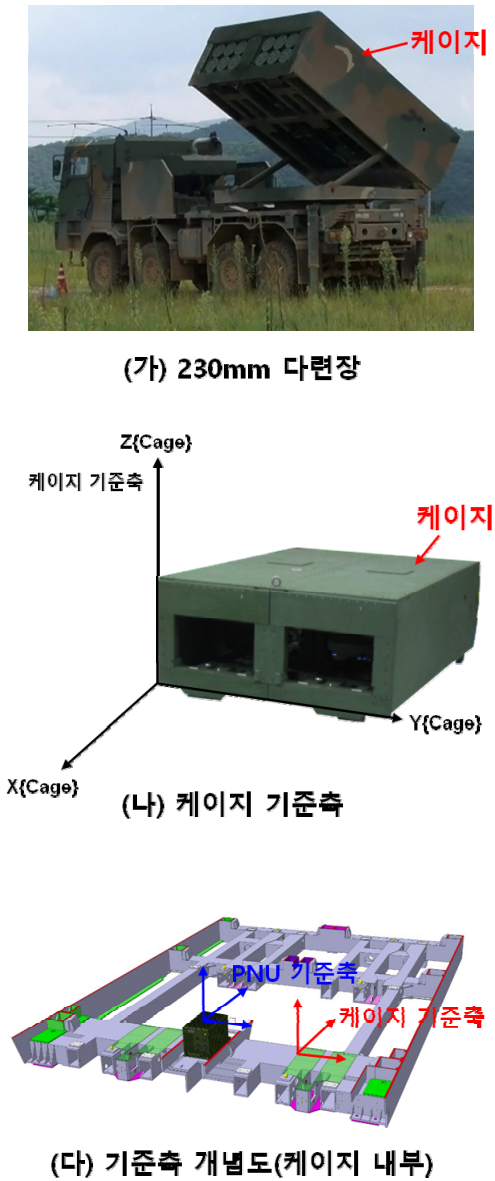


Fig. 1. Schematic diagram of reference axes of K-MLRS launcher

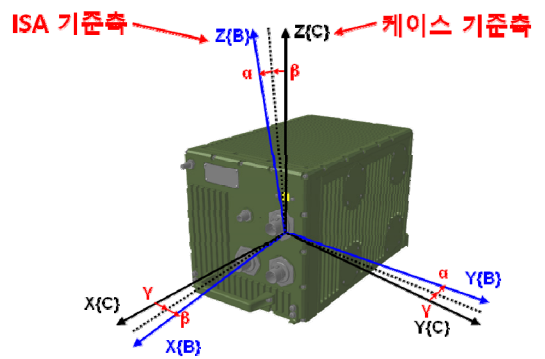


Fig. 2. Reference axes of PNU

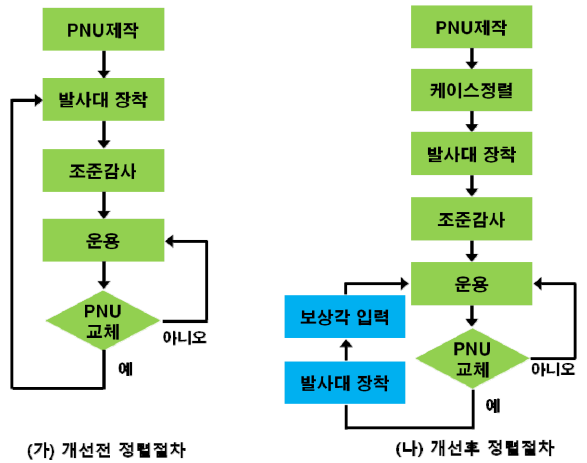


Fig. 3. Schematic diagram of align process improvement

따라서 천무 발사대의 사격 정확성을 확보하기 위해서는 반드시 복합항법장치와 발사대 케이스의 기준축 간의 비정렬각을 일치시키는 조준감사(Boresight)가 필요하다. 조준감사는 복합항법장치의 자세데이터인 롤(Roll), 피치(Pitch), 요(Yaw)와 디지털수평계(Clinotronic 2000(WYLER))와 데오도라이트(Theodolite, TM6100 A(Leica))로 측정된 자세데이터로부터 각 축의 비정렬각을 일치시키는 과정이다. 기존 공정에서는 정비를 위해 복합항법장치를 탈거하여 재장착시에 복합항법장치와 발사대 케이스 간에 비정렬각이 존재하기 때문에 발사대 장착 시에 항상 조준감사를 수행해야만 하는 취약점을 안고 있다(Fig. 3 (가)).

본 연구에서는 기존의 정렬절차를 간소화시키기 위하여 복합항법장치의 케이스와 ISA 블록간의 기준축을

일치시키는 케이스 정렬을 이용하여 항법장치와 발사대의 정렬절차를 개선하는 공정을 제안하였다<sup>6)</sup>. 이는 복합항법장치 교체 시에 추가 조준감사 없이 최초 조준감사에서 획득한 보상각 입력으로 복합항법장치와 발사대간의 정렬절차를 가능하게 한다(Fig. 3 (나)). 그리고 개선된 정렬절차의 검증을 위해서 케이스 정렬 반복시험 및 복합항법장치 탈부착 반복시험을 수행하여 성능을 확인하였다.

## 2. 케이스 정렬

복합항법장치 내에 ISA 블록의 자세는 제작공정에서 공정오차가 존재하기 때문에 모든 복합항법장치에서 동일 할 수가 없다. 따라서 복합항법장치와 발사대 정렬시 ISA 블록 기준으로 정렬하게 되면 복합항법장치에 따라서 기준축이 조금씩 틀어지게 된다. Fig. 4의 (가)는 ISA 블록 기준축과 케이스 기준축이 일치하지 않다는 것을 개념적으로 나타낸 것이다.

케이스 정렬은 복합항법장치 내부에 ISA 블록 기준의 자세 출력을 복합항법장치 케이스의 자세 출력으로 변환하기 위하여 Fig. 4의 (나)와 같이 두 축사이의 비정렬각을 ISA 블록과 케이스의 기준축을 일치시키는 것이다. 이는 복합항법장치의 자세출력을 케이스라는 가상의 기준축으로 정렬시키게 된다. 그러므로 발사대에 복합항법장치를 케이스 기준으로 장착하게 되면 모든 복합항법장치는 동일한 기준축으로 자세를 출력할 수 있게 된다. 따라서 제안한 공정은 복합항법장치 교체 시에 최초 조준감사에서 획득된 값으로 추가 조준감사 없이 교체가 가능하게 한다.

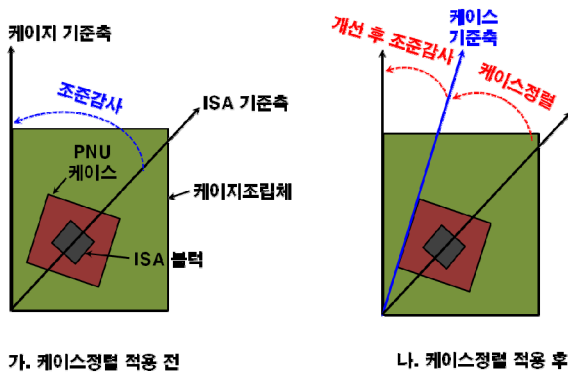
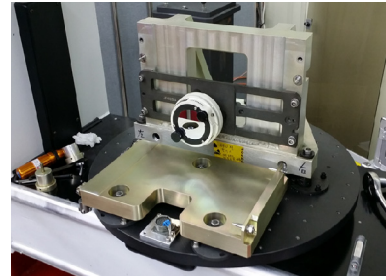


Fig. 4. Schematic diagram of case align process



(가) 케이스 정렬용 치공구



(나) PNU 장착

Fig. 5. Jig for case alignment

일반적으로 관성항법장치에서 제공하는 자세는 ISA 블록의 가속도계 3축으로 이루어진 몸체좌표계(Body Frame, {B})와 항법좌표계(Navigation Frame, {N}) 사이의 자세변환 행렬( $C_B^N$ )으로 제공된다. 하지만 케이스 기준의 자세가 필요한 경우에는 케이스 좌표계(Case Frame, {C})와 항법 좌표계 사이의 자세변환 행렬( $C_C^N$ )이 제공되어야 하고, 케이스 기준축과 몸체좌표계의 기준축 사이의 비정렬각( $\alpha, \beta, \gamma$ )의 보상행렬( $C_B^C$ )을 구해야만 한다.

비정렬각 보상행렬은 Fig. 5와 같이 케이스 기준으로 진북을 향해 정렬되어 있는 2축 레이트 테이블(Rate Table, Acutronics)을 이용하여 자세보상시험을 실시하여 구한다. 자세보상시험은 롤, 피치, 요 테스트로 구성된다. 획득된 자세데이터는 N×3행렬로 구성되어있다. 행(N)은 테스트 횟수이고 열(3)은 롤, 피치, 요로 구성된다. 요 테스트 13회, 롤 테스트 10회, 피치 테스트 18회로 총 31회의 시험을 수행한다. 이를 케이스정렬 알고리즘(식 (1)~(4))에 입력하여 최소자승법(Least square method)으로 케이스와 ISA 블록 사이의 비정렬각을 추출한다. 몸체좌표계{B}와 케이스 좌표계{C} 사이의 비정렬각인 미소각(Small angle rotation) 롤( $\alpha$ ), 피치( $\beta$ ), 요( $\gamma$ )의 미소각 변환행렬(Direction cosine matrix)

은 식 (1)과 같다.

$$C_B^C = I + \Delta\theta^H = \begin{bmatrix} 1 & -\gamma & \beta \\ \gamma & 1 & -\alpha \\ -\beta & \alpha & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\text{where } \Delta\theta^H = \begin{bmatrix} 0 & -\gamma & \beta \\ \gamma & 0 & -\alpha \\ -\beta & \alpha & 0 \end{bmatrix}$$

$$\vec{M} = \begin{bmatrix} M_{11} - R_{11} \\ M_{21} - R_{21} \\ M_{31} - R_{31} \\ M_{12} - R_{12} \\ M_{22} - R_{22} \\ M_{32} - R_{32} \\ M_{13} - R_{13} \\ M_{23} - R_{23} \\ M_{33} - R_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

몸체 좌표계{B}와 케이스 좌표계{C} 사이의 관계를 표현하면 식 (2)와 같다.

$$C_N^B = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} = C_C^B \cdot C_N^C \quad (2)$$

$$C_C^B \cdot C_N^C = \begin{bmatrix} 1 & \gamma & -\beta \\ -\gamma & 1 & \alpha \\ \beta & -\alpha & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix}$$

위 변환행렬을 풀면 식 (3)과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} 0 \cdot \alpha - R_{31}\beta + R_{21}\gamma &= M_{11} - R_{11} \\ R_{31}\alpha + 0 \cdot \beta - R_{11}\gamma &= M_{21} - R_{21} \\ -R_{21}\alpha + R_{11}\beta + 0 \cdot \gamma &= M_{31} - R_{31} \\ 0 \cdot \alpha - R_{32}\beta + R_{22}\gamma &= M_{12} - R_{12} \\ R_{32}\alpha + 0 \cdot \beta - R_{11}\gamma &= M_{22} - R_{22} \\ -R_{22}\alpha + R_{11}\beta + 0 \cdot \gamma &= M_{32} - R_{32} \\ 0 \cdot \alpha - R_{33}\beta + R_{23}\gamma &= M_{13} - R_{13} \\ R_{33}\alpha + 0 \cdot \beta - R_{11}\gamma &= M_{23} - R_{23} \\ -R_{23}\alpha + R_{11}\beta + 0 \cdot \gamma &= M_{33} - R_{33} \end{aligned} \quad (3)$$

$$A \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = \vec{M} \quad \text{where } A = \begin{bmatrix} 0 & -R_{31} & R_{21} \\ R_{31} & 0 & -R_{11} \\ -R_{21} & R_{11} & 0 \\ 0 & -R_{32} & R_{22} \\ R_{32} & 0 & -R_{11} \\ -R_{22} & R_{11} & 0 \\ 0 & -R_{33} & R_{23} \\ R_{33} & 0 & -R_{11} \\ -R_{23} & R_{11} & 0 \end{bmatrix}$$

식 (3)을 행렬식으로 변환하면 식 (4)와 같고, 이로부터 최소자승기법을 통하여 미소 비정렬각을 구할 수 있다.

$$\vec{F}x = \vec{S} \quad \text{where } F = A^T A, \vec{S} = A^T \vec{M} \\ \vec{x} = F^{-1} \vec{S}$$

$\vec{x}$ 는 몸체좌표계{B}가 케이스 좌표계{C}로 변환되기 위한 미소각 벡터이며, 식 (1)에 대입하여  $C_B^C$ 를 구할 수 있다. 이로부터 ISA 블록 기준의 자세출력을 케이스 기준의 자세출력으로 변환가능하다.

### 3. 조준감사

조준감사는 Fig. 3과 같이 발사대에 복합항법장치 장착 시에 발사대 케이스와 복합항법장치 간에 자세 차이 값인 조준감사 각(Boresight Angle)인 롤(Roll,  $\pi$ ), 피치(Pitch,  $\theta$ ), 요(Yaw,  $\psi$ )를 구하여 복합항법장치의 케이스 좌표계와 발사대 케이스의 좌표계를 일치시키는 작업이다. 먼저 복합항법장치의 자세데이터를 이용하여 계산된 DCM( $C_n^b$ )과 케이스의 자세데이터를 이용하여 계산된 DCM( $C_n^p$ )으로 복합항법장치와 케이스 사잇각 변환행렬 DCM( $C_p^b$ )을 구한다(식 (5)). 케이스의 자세데이터는 Fig. 6과 같이 디지털 수평계 및 광학측정기로 측정된 값이다. 식 (5)로 부터 조준감사각인 롤( $\phi$ ), 피치( $\theta$ ), 요( $\psi$ ) 값을 구할 수 있다. 이를 전용 프로그램으로 복합항법장치에 입력하면 보상과정을 거쳐 케이스의 각 기준축이 일치되게 된다.

$$C_1 = \begin{pmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$C_2 = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix}$$

$$C_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{pmatrix}$$

$$C_4 = \begin{pmatrix} \cos\psi' & \sin\psi' & 0 \\ -\sin\psi' & \cos\psi' & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$C_5 = \begin{pmatrix} \cos\theta' & 0 & -\sin\theta' \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta' & 0 & \cos\theta' \end{pmatrix}$$

$$C_6 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi' & \sin\phi' \\ 0 & -\sin\phi' & \cos\phi' \end{pmatrix}$$

$$C_n^b = C_1 \cdot C_2 \cdot C_3$$

$$C_n^P = C_4 \cdot C_5 \cdot C_6$$

$$C_P^b = C_n^b \cdot (C_n^P)^T \quad (5)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{DCM[3,2]}{DCM[3,3]}\right)$$

$$\theta = \arcsin(-DCM[3,1])$$

$$\psi = \arctan2(DCM[2,1], DCM[1,1])$$

#### 4. 정렬절차 개선 검증시험

제안한 천무 발사대 복합항법장치 정렬절차 개선의 검증을 위한 시험을 실시하였다. 먼저 복합항법장치의 정적, 동적 시험을 통하여 복합항법장치의 자체 성능을 확인하였고, 케이스 정렬을 수행한 이후에 조준감사를 실시하여 제안한 발사대 복합항법장치 정렬절차 개선 검증을 실시하여, 간소화를 위한 케이스 정렬의 유효성을 확인하였다.



(가) Roll 측정



(나) Pitch 측정



(다) Yaw 측정

Fig. 6. Attitude measurement of launcher

케이스 정렬을 위한 보상각은 31회의 자세측정데이터(롤, 피치, 요)를 획득하여 케이스 정렬 알고리즘으로 구하였다. Table 1는 시제 1, 2에 대한 케이스 정렬 보상각 획득 결과이다. 특히 요값이 규격 0.5 mil 보다 약 6배 이상 높은 것을 알 수 있다. 이는 ISA 블록과 케이스 기준축 간의 정렬이 조립공정 시에 공정오차 등으로 미세하게 틀어져 있다는 것을 보여준다. 그러나 케이스 정렬으로 복합항법장치의 케이스 기준축으로 일치시킨 후에 자세 정확도 시험결과에서는 Table 2과 같이 성능 요구조건을 만족하는 것을 확인하였다. 또한 케이스 정렬용 시험치구 정확도를 확인하기 위해 복합항법장치 탈거 후 재장착하여서 자세 데이터를 획득하였고, 이 또한 요구조건을 만족하는 것을 확인하였다(Table 3). 따라서 본 연구에서 제안한 케이스 정렬은 복합항법장치가 ISA 블록이 아닌 케이스라는 동일한 기준축으로 자세데이터를 출력하게 하는 것을 알 수 있다.

Table 4는 케이스 정렬이 적용된 복합항법장치를 발사대에 장착 후 케이스와 복합항법장치간의 자세데이터로 조준감사를 수행한 결과이다. 복합항법장치 케이스의 자세데이터는 복합항법장치 출력 값으로 확인 가능하였고, 발사대 케이스의 자세데이터는 측정장비로 획득하였다. 이와 같은 데이터를 이용하여 조준감사 알고리즘으로 조준감사 값을 구하여 복합항법장치 케이스와 발사대 케이스간의 기준축을 일치시켰다. 조준감사 후에 시제 1, 2를 발사대에 장착하고 측정장비와 복합항법장치의 자세데이터를 비교하여 조준감사 검증을 실시하였다. 각각의 자세데이터는 Table 5과 같이 요구조건을 만족하였고, 요구조건의 4-38 % 수준을 나타내었다. 탈착 후 재장착 결과는 Table 6에 표시하였다.

Table 1. Results of compensation value for case alignment

케이스 보상각	Roll (mil)	Pitch (mil)	Yaw (mil)
시제1	-0.0044	0.1963	3.9162
시제2	-0.3294	0.0561	3.0082

Table 2. Results of attitude after case alignment

구분	시제1 (단위 mil PE)			시제2 (단위 mil PE)		
	Roll	Pitch	Yaw	Roll	Pitch	Yaw
요구 조건	≤0.25	≤0.25	≤0.5	≤0.25	≤0.25	≤0.5
결과	0.19	0.13	0.15	0.08	0.06	0.08

\*PE(Probable Error) : 50 % 이내 범위의 공산오차

Table 3. Results of attitude after reseating PNU

구분	시제1 (단위 mil PE)			시제2 (단위 mil PE)		
	Roll	Pitch	Yaw	Roll	Pitch	Yaw
요구 조건	≤0.25	≤0.25	≤0.5	≤0.25	≤0.25	≤0.5
결과	0.17	0.11	0.16	0.15	0.10	0.13

Table 4. Boresight data

구분	Roll	Pitch	Yaw
측정장비	0.004°	-0.134°	125.2419°
복합항법장치	-0.019°	-0.087°	125.0461°
조준감사 값	0.023°	-0.047°	0.1958°

Table 5. Verification of boresight

구분	시제1 (단위 mil PE)			시제2 (단위 mil PE)		
	Roll	Pitch	Yaw	Roll	Pitch	Yaw
규격	≤0.5	≤0.5	≤1	≤0.5	≤0.5	≤1
결과	-0.02	0.15	-0.29	0.05	0.14	0.38

Table 6. Results of reseating PNU after boresight

구분	오차(mil)		
	Roll	Pitch	Yaw
요구조건	≤0.5	≤0.5	≤1.0
시제1	-0.07	0.01	-0.32
시제2	-0.05	0.23	-0.76
시제1	0.08	0.08	-0.46
시제2	0.01	0.18	-0.44

본 연구에서 제안한 복합항법장치와 발사대 간의 정렬절차 개선공정의 최종 성능확인을 위하여 최초 조준감사 값으로 반복 정렬절차를 수행하였다. 시제 1, 2에 대하여 탈부착 시험을 하였고, 탈부착 순서는 시제1 → 시제2 → 시제1 → 시제2의 순으로 총 4회 실시하였다. 롤, 피치는 요구조건의 2-46 % 수준이고, 요는 32-76 % 수준임을 확인하였다.

### 5. 결론

본 연구에서는 천무 발사대와 복합항법장치의 정렬절차 개선을 위한 연구를 수행하였다. 천무 발사대와

복합항법장치 체결 시에 각각의 기준축에 대한 비정렬각이 존재하기 때문에 조준감사를 수행해야 한다. 따라서 천무 발사대의 복합항법장치의 교체 시에 발사대와 케이지 간에 정렬절차 개선을 위하여 복합항법장치 레벨에서 기준축 일치공정인 케이스정렬을 제안하였고, 자세정확도시험으로 이를 검증하였다. 케이스 정렬 후의 복합항법장치의 자세정확도는 이전과 동일하게 성능 요구조건을 만족하였고, 발사대에 복합항법장치 장착 후의 조준감사 결과에서도 요구조건을 만족하였다.

이어서 케이스정렬이 적용된 복합항법장치가 최초 조준감사에서 획득된 값을 이용하여 복합항법장치의 교체가 가능한 것을 복합항법장치의 탈거 및 부착 반복시험으로 확인하였다. 따라서 본 연구에서 제안한 케이스정렬 공정으로 천무 발사대의 복합항법장치의 교체 시에 정렬절차가 개선되는 것을 확인하였다. 그러므로 최초 조준감사에서 획득된 발사대와 복합항법장치 간에 보상각만 각인해 놓으면, 야전운용부대에서 고가의 측정 장비 없이 손쉽게 복합항법장치의 탈부착이 가능하다. 이는 소요군에서 조준감사 없이 항법장치의 교체가 가능하기 때문에 신속한 사격태세 준비가 가능하게 한다. 그러므로 소요군의 운용 유지능

력 향상 및 작전수행 능력에 크게 기여할 것으로 판단된다.

## References

- [1] M. Kim, D. Jung, H. Jang and K. Min, "Series-Type Hybrid Electric Bus Fuel Economy Increase with Optimal Component Sizing and Real-Time Control Strategy," Trans. Korean Society Mechanical Engineers, Vol. 37, No. 3, pp. 307-312, 2013.
- [2] H. Lee, J. Kim, "A Study on Friction Noise Reduction of Elevation Clutch in the Multiple Launcher Rocket System", Vol. 18, pp. 813~818, 2016.
- [3] D. T. Titterton and J. L. Weston, Strapdown Inertial Navigation Technology, Peter Peregrinus Ltd., 1997
- [4] K. R. Britting, Inertial Navigation Systems Analysis, John Wiley & Sons, Inc., 1971.
- [5] S. Lee, G. Bae, S. Kim, H. Lee, A Study on Align Process Simplification for K-MLRS INS, KIMST Annual Conference Proceedings. pp. 921-922, 2016.