

## 전달정렬 오차에 따른 수중발사체 목표 정확도 영향성 분석

이상훈\*, 김보람, 정영탁  
국방기술품질원

### Analysis of The Effect on Underwater Projectile's Target Accuracy depending on The Transfer Alignment Error

Sang Hoon Lee\*, Bo Ram Kim, Yeong Tak Jung  
Defence Agency for Technology and Quality

**요약** 수중환경에서는 항법 목표를 설정하기 어렵고, 전파 감쇠 현상이 발생하여 고정위치 항법을 적용하기에 제한이 있다. 그렇기 때문에 원거리에서 발사되어 입력된 경로를 거쳐 지정된 목표점까지 자력으로 주행하는 수중발사체가 수중 환경에서 자세, 속도, 위치 정보를 실시간으로 계산하기 위해서는 관성항법장치에 내장된 자이로 및 가속도계를 이용한다. 또한 항법을 수행하기 위해서 정렬을 통해 초기 항법 정보 획득이 필요하다. 정렬 중에서도 수중발사체는 플랫폼에 장착된 주 관성항법장치 정보를 이용하여 정렬을 수행하는 전달정렬을 통해 초기 항법 정보를 획득한다. 본 논문에서는 해상시험 간 목표 정확도가 떨어진 원인에 대해 영향을 줄 수 있는 발사체 내·외부적인 인자를 분석했다. 그 중 수중발사체의 주행 기록을 분석한 결과, 플랫폼에 장착된 주 관성항법장치와 수중발사체에 장착된 자체 관성항법장치 사이에 자세 정보를 송수신하는 과정에서 시간 지연이 있고, 전달정렬 시간 동안 플랫폼의 침로가 변하면서 자세 정보의 급격한 변화가 발생했음을 확인하였다. 이러한 현상들이 전달정렬 오차를 발생시켜 수중발사체의 목표 정확도에 영향을 미치는 것을 자료 분석 및 육상시험을 통해 입증하였다.

**Abstract** In underwater environments, it is difficult to set a navigation goal and a limit in applying position fixing navigation due to electromagnetic wave attenuation phenomena. This is why an underwater projectile launched from a long distance and traveling by its own force to a designated target point through an inputted path uses a gyroscope and an accelerometer built in the inertia navigation system to calculate the attitude, velocity, and location information on a real-time basis in an underwater environment. In addition, to perform navigation, it is necessary to acquire initial navigation information through alignments. Among the alignments, the underwater projectile obtains information through transfer alignment that performs an alignment using a master inertia navigation system information mounted on the platform. This study analyzed the internal/external factors that can affect the cause of low target accuracy between maritime tests. An analysis of the driving record of an underwater projectile confirmed that there is a time delay in the process of transmitting/receiving attitude information between the master inertial navigation system mounted on the platform and the slave inertial navigation system mounted on the underwater projectile. Moreover, a sudden change in attitude information occurs as the platform changes course during the transfer alignment time. Material analysis and a land-based test proved that such phenomena cause the error of transfer alignment that affects the target accuracy of the underwater projectile.

**Keywords** : Inertial Navigation System, INS, Transfer Alignment, Target Accuracy, Misalignment Angle

---

\*Corresponding Author : Sang Hoon Lee(Defence Agency for Technology and Quality)  
email: lsh1202@dtaq.re.kr

Received May 11, 2021

Revised June 7, 2021

Accepted July 2, 2021

Published July 31, 2021

### 1. 서론

항법(navigation)이란 자유공간을 움직이는 항체가 자신의 위치를 찾는 것이다. 자신의 위치를 찾기 위한 항법 방식은 크게 두 가지로 구분된다. 첫 번째는 초기 위치정보로부터 항체의 속도 및 방향 특성을 이용하여 현재의 위치를 계산하는 추측 항법(dead reckoning navigation)이고 두 번째는 북극성과 같이 지구로부터 멀리 떨어진 고정된 별이나 행성을 관측해 자신의 위치를 찾는 고정위치 항법(position fixing navigation)이다[1,2].

고정위치 항법은 지문항법, 천문항법, 전파항법 등 여러 방법으로 기술이 발전해왔다. 다만, 수중발사체는 수중환경이라는 특수성을 고려했을 때 항법 목표를 설정하기 어렵고, 물이란 매질 특성으로 인해 현저한 전파 감쇠 현상이 발생하여 고정위치 항법을 적용하기에 제한이 있다[3].

추측 항법은 이미 알고 있는 초기 항법정보를 기준으로 시간에 따라 측정치를 갱신하며 항법정보를 계산하는 원리로 동작한다[4].

대표적인 추측 항법장치인 관성항법장치(INS : Inertial Navigation System, 이하 INS)는 운동을 감지하는 관성센서, 센서 구동 및 신호처리, 항법 컴퓨터로 구성되어 있다. 관성센서는 운반체의 각속도와 가속도를 측정하여 컴퓨터에 입력한다. 컴퓨터는 입력 자료를 이용하여 좌표변환, 적분, 필터링 등의 복잡한 계산과정을 거쳐 Fig. 1과 같이 항법에 필요한 위치, 속도, 자세, 방향, 고도 등을 출력한다.

이를 통해 이미 알고 있는 출발점에 대한 운반체의 위치와 속도를 결정하는 일련의 처리과정을 관성항법이라고 한다[5].

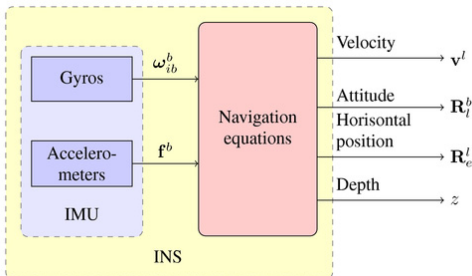


Fig. 1. Inertial Navigation System Block Diagram[6]

관성항법장치는 항법 수행 전 정렬이라는 과정을 통해 위치, 속도, 자세 등 초기 항법정보 획득이 필요하다. 정렬에는 관성항법장치 자체에서 출력되는 항법 정보를 이용하여 정지 상태에서 정렬하는 자체 정렬과 움직이는 동안 외부 정보를 이용하여 정렬하는 운항 중 정렬로 나눌 수 있다[4].

운항 중 정렬에서도 Fig. 2에서 보는 바와 같이 플랫폼에 장착된 기준 관성항법장치(MINS : Master Inertial Navigation System, 이하 MINS) 정보를 이용하여 자체 관성항법장치(SINS : Slave Inertial Navigation System, 이하 SINS) 항법의 오류를 정정하는 것을 전달정렬이라 한다.

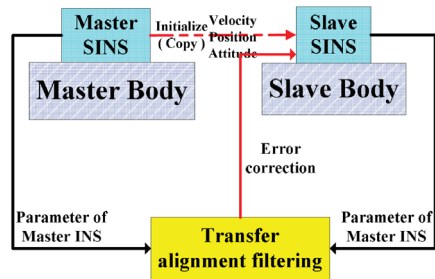


Fig. 2. Measurement matching transfer alignment[7]

전달정렬을 이용하는 이유는 정밀도가 상대적으로 낮은 SINS의 정렬을 상대적으로 정밀한 MINS로부터 정렬에 필요한 항법 정보를 획득하여 수행하면 보다 더 정밀한 항법이 가능하기 때문이다.

본 논문은 Fig. 3과 같이 연구하고자 한다. 2장에서 해상시험 결과 수중발사체의 목표 정확도가 설계한 오차보다 멀리 떨어진 위치에 도착한 상황에 대해 기술하고, 3장에서 목표 정확도 오차에 대한 원인을 발사체 내·외부 인자들로부터 분석한다. 4장에서는 수중발사체의 주행 기록 분석을 통해 전달정렬 오차를 발생시킨 요인을 확인하며, 5장에서는 지금까지 분석한 원인을 육상시험을 통해 재현하여 본 논문의 분석결과를 입증하고자 한다.

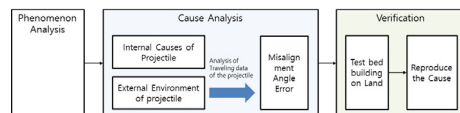


Fig. 3. Research Process Flowchart

## 2. 해상시험 결과

수중발사체의 주요한 성능 요구조건 중 하나인 목표 정확도를 확인하기 위해 수중 플랫폼에 장착하여 발사하는 해상시험을 수행했다. 2개의 수중발사체가 Fig. 4와 Fig. 5에서 보는 바와 같이 목표 위치로부터 각각 000m, 000m 떨어진 지점에 도착하였다. 이는 설계 당시 수중발사체에 요구되는 원형 공산오차(CEP : Circular Error Probable, 이하 CEP) 000m 기준 각각 2.02배, 1.27배로 수중발사체가 목표에 도달하지 못했다는 결과를 확인하였다.

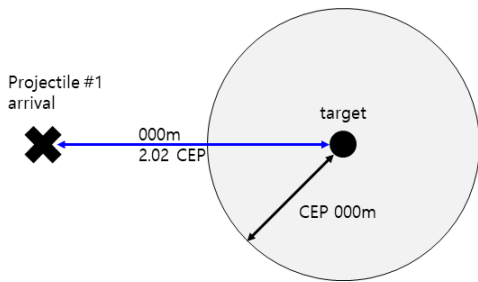


Fig. 4. Arrival position of projectile #1

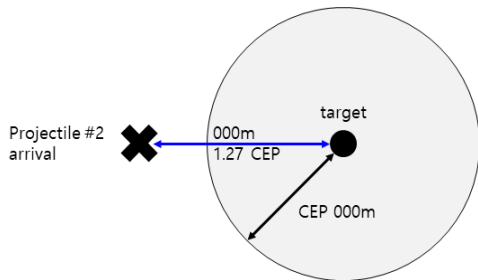


Fig. 5. Arrival position of projectile #2

이러한 현상은 Table 1에서 보는 바와 같이 이전 해상시험에서 나타난 목표 정확도에서 확연하게 차이가 있음을 확인하였다.

Table 1. Results on other target accuracy tests

Section	Time for transfer alignment(s)	Misalignment angle(°)	Target accuracy (CEP=1 base)
1	907	-0.28	0.40
2	2505	0.6	0.35
3	1533	-0.63	0.61
4	1088	0.41	0.18
5	1016	-0.53	0.35

## 3. 원인 분석

수중발사체의 목표 정확도에 영향을 줄 수 있는 원인을 Table 2에서 보는 바와 같이 도출하였다.

Table 2. Review on the causes effecting the projectile's target accuracy

Section	Factor	Effects	Occurrence of errors
Internal causes of projectile	Inertial Course Equipment	High	Attitude and position information
	Velocity Calibration Equipment	High	Traveling velocity information
	Guidance Equipment	High	Attitude and position control
External environment of projectile	Input data	Mid	The arrival coordinate input due to insufficient operation
	Arrival coordinate	Low	The test result analysis
	Interface between platform and projectile	High	Time delay between the transmitting and receiving platform attitude information

수중발사체 내부 주요 구성품 및 외부 환경 요인으로 나눠 고려하였으며, 각 항목에 대해 발생할 수 있는 오류를 통해 수중발사체의 목표 정확도 미충족 현상을 파악하고자 하였다.

Table 3. Analysis results on the internal causes of projectile

Section	Factor	Check Point	Result
Internal causes of projectile	Body	·Macrography and Inspection ·Check on the internal status after separating each component	Good
	velocity Calibration Equipment	·Check on the operation status ·Detailed inspection	Good
	Battery	·Check on the battery residual capacity and voltage ·Analysis of battery consumption and traveling distance	Good
	Recording Equipment	·Mechanical interface check ·Electrical interface check ·Record data analysis	Good
	Guidance Equipment	·Check on the fuction and operation status	Good
	Inertial Course Equipment	·Check on alignment, velocity, attitude accuracy	Good

먼저 수중발사체 내부 원인을 검토하기 위해 조립의 역순으로 본체 외부부터 육안 검사를 실시하여 누수 등을 점검하고 외부 점검 이후 각 구성품을 분리하여 내부 상태 검사를 실시하였다. 그 결과, Table 3과 같이 점검한 항목들에 대해서 모두 양호한 것을 확인하였다.

다음 조류, 장애물 등 재현 불가능하거나 예측 불가능한 수중환경을 제외한 발사체 외부 환경에 대해 수중발사체 발사 전 플랫폼의 주행, 소나 정보 등 기록 자료를 비교하여 원인을 분석하였다.

분석 결과 해상시험에서의 플랫폼의 주행 궤적은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 복원되며, 전달정렬을 수행하는 시간동안 플랫폼과 수중발사체의 INS 헤딩은 Fig. 7에서 보는 바와 같이 비교할 수 있다.

세부적으로 살펴보면 ① 지점까지 전달정렬을 통해 수중발사체의 헤딩과 플랫폼의 헤딩의 차이가 1.1°로 안정화되어 가는 것을 확인할 수 있다. ② 지점에서 플랫폼의 침로가 급격히 변한 후 다시 침로가 안정화되는 ③ 지점에서 수중발사체를 발사하였다. 하지만, ③ 지점에서 수중발사체의 헤딩과 플랫폼의 헤딩의 차이가 2.2°로 증가한 상태였다. 즉, 수중발사체의 발사 전 플랫폼의 침로 변경이 전달정렬을 통해 안정화된 플랫폼과 수중발사체의 INS 헤딩의 차이 다시 증가시킨다는 것을 확인할 수 있다.

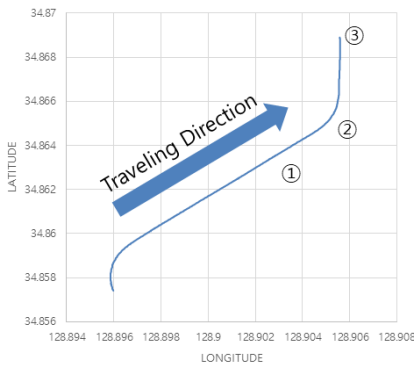


Fig. 6. Traveling trajectory of the platform

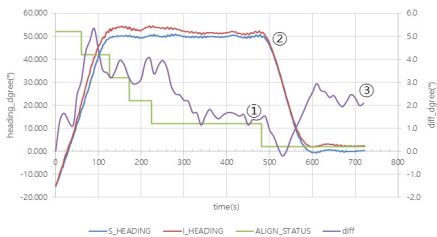


Fig. 7. Changes in the heading angle difference between the platform and projectile during transfer alignment

수중발사체의 헤딩과 플랫폼의 헤딩의 차이인 비정렬각(misalignment angle)은 초기 자세 정보 및 센서 오차에 의해 발생하기 때문에 전달정렬의 초기 오차는 수중발사체의 목표 정확도에 치명적인 결과를 가져올 수 있다. 자력으로 주행하는 수중발사체는 플랫폼과 분리된 이후에는 자체 정보만을 가지고 자세, 거리, 속도 등 항법 정보를 통해 자기 위치를 계산하기 때문이다.

즉, 초기 방향을 가리키는 항법 정보를 바탕으로 방위 각 정보를 다시 계산하는데, 초기 전달정렬을 통해 획득한 추정 비정렬각과 실제 비정렬각 사이에 오차가 발생하면 Table 4에서 보는 바와 같이 작은 각도 오차에도 큰 거리 오차가 발생하게 된다.

Table 4. Target error depending on the misalignment angle (under the assumption on 20 km straight traveling)

Misalignment angle(°)	0.1	0.5	1.0	2.0	3.0
Target error (m)	34.9	174.5	349.1	698.4	1,048.2

#### 4. 전달정렬 오차 분석

전달정렬은 Fig. 8에서 보는 바와 같이 MINS의 속도, 자세와 SNIS에서 출력되는 속도, 자세 정보를 정합하여 비정렬각을 추정해 초기 자세를 결정하는 방법으로 이때 속도 및 자세정합 전달정렬 칼만필터는 간접 되먹임(feedback) 방식으로 구성된다[8].

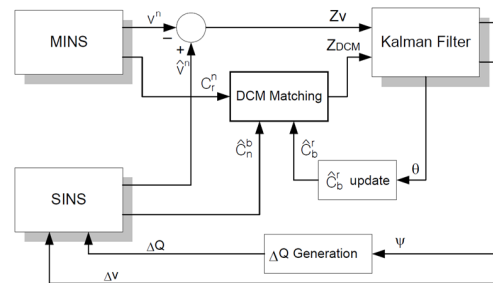


Fig. 8. Configuration of velocity and DCM matching transfer alignment[8]

시간 지연된 속도 및 자세정보를 근사해 대입하여 정리한 측정방정식은 Eq. (1), (2), (3)와 같다[9].

$$z_v = \delta V + v + A\delta T \tag{1}$$

$$z_c = -\epsilon + C_r^n \theta - C_r^n \omega_{nr}^r \delta T \tag{2}$$

$$\omega_{nr}^r = C_r^m \omega_{ir}^r - \omega_{ic}^n - \omega_{en}^n \tag{3}$$

Where,  $z_v$  denotes velocity estimation equation,  $z_c$  denotes attitude estimation equation,  $A$  denotes MINS acceleration,  $\omega_{ir}^r$  denotes MINS angular velocity, and  $\delta T$  denotes time delay

속도 측정식에서 시간지연 보상은 MINS의 가속도(A)를 자세 측정식에서 시간지연 보상은 MINS 각속도( $\omega_{ir}^r$ )를 이용하였다. 이와 같은 시간지연 보상방법은 시간지연 값이 작고, 동체 운동의 주파수 및 크기가 작다는 가정이 포함된다. 시간지연 및 동체의 운동이 큰 경우에는 모델의 오차로 인해 시간지연 오차 보상이 부정확하여 비정렬각 추정성능이 저하되게 된다[9].

실제 이번 해상시험에서도 시간지연이 큰 이유로 비정렬각 추정성능이 저하되었는지 확인하기 위해 수중발사체 기록을 분석한 결과, Fig. 9에서 보는 바와 같이 전달정렬 중 플랫폼의 자세정보 송·수신 과정에 시간지연(약 2.7초)이 있음을 확인하였다.

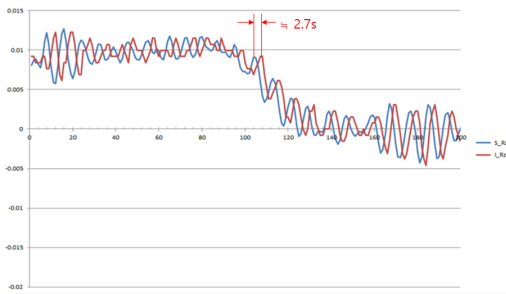


Fig. 9. Changes in the yaw angular velocity of the platform and projectile during transfer alignment

또한 수중환경을 고려했을 때, 별도의 동체 운동이 없어도 롤, 피치, 요 운동이 지속적으로 발생하지만 이전 해상시험과 달리 이번 해상시험에서는 전달정렬에 영향을 줄 정도의 동체의 운동이 큰지 확인하기 위해 수중발사체 추행데이터를 분석하였다. 분석결과 발사 전 변침하는 구간에서 피치 각의 급격한 변화가 발생했고 이에 따라 헤딩 오차도 증가한 것을 Fig. 10과 같이 확인할 수 있다.

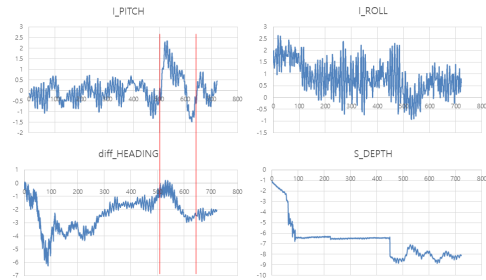


Fig. 10. Traveling data of the projectile

### 5. 원인 분석 검증

지금까지 원인 분석을 통해 플랫폼의 자세정보 송·수신 과정에 지연된 시간과 롤, 피치, 요 각운동이 지속적으로 발생하는 실제 환경 및 플랫폼이 수중발사체를 발사하기 전에 변침하여 발생한 피치 각의 급격한 변화가 전달정렬의 비정렬각 오차를 증가시켰고 이는 수중발사체의 목표 정확도에 영향을 끼치는 것을 확인하였다.

이 분석을 검증하기 위해 Fig. 11과 같이 육상에서 시험할 수 있도록 구현하였다. 현재 플랫폼과 수중발사체와 같이 MINS의 위치, 속도, 자세 등 항법 정보를 제어 및 전시 장치(CDU : Control Display Unit, 이하 CDU)를 통해 SINS로 전달한다. 이 때 CDU에서 각각 1초 이하, 2초, 3초, 4초 늦게 전달하여 전달정렬 중 플랫폼의 자세정보 송·수신 과정에 시간지연을 모사하였다. 이러한 구성에서 1000초 간 전달정렬을 실시해 지연시간에 따른 전달정렬 오차를 측정한다.

다른 외부요인을 제거하기 위해 MINS와 SINS의 조립 비정렬각은 0°로 구성하여 회전 Table에 조립하고 속도가 없는 상태에서 해상시험과 유사한 롤, 피치, 요 변화를 인가한다.

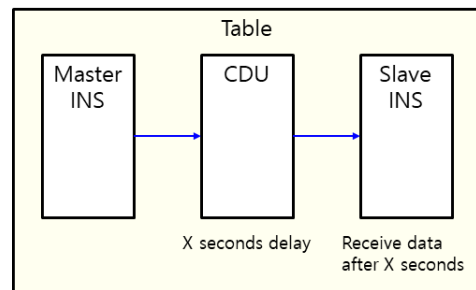


Fig. 11. Test bed building

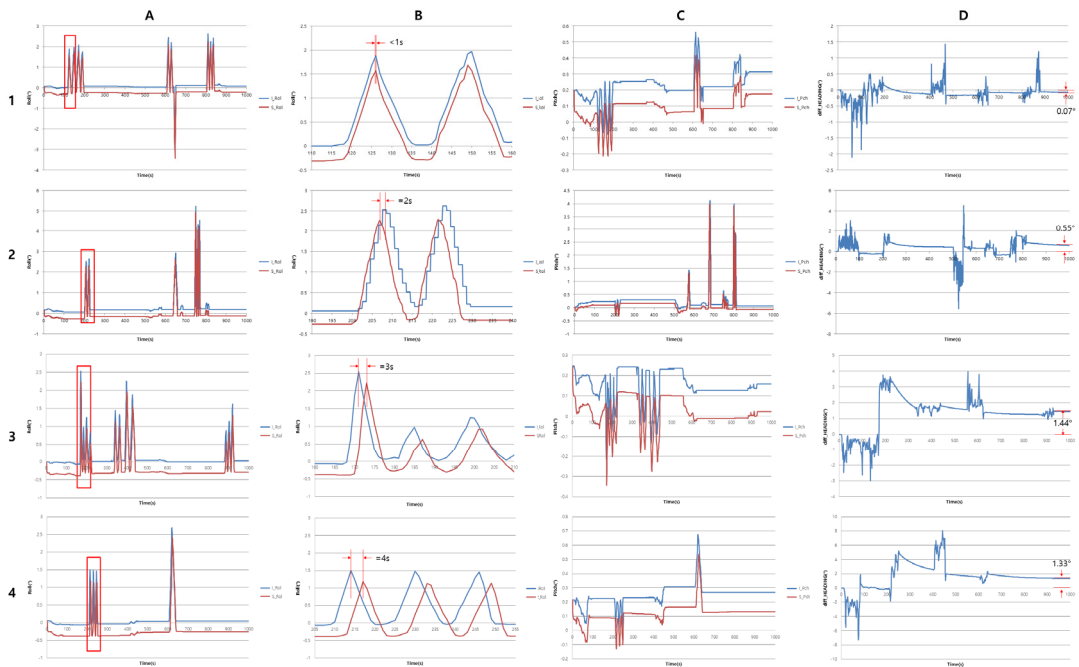


Fig. 12. The heading angle difference between the platform and projectile depending on transfer alignment time delay (a row denotes the transfer alignment time delay, that is, row 1 : under 1 second, row 2 : 2 seconds, row 3 : 3 seconds, and row 4 : 4 seconds, a column denotes changes in angle for transfer alignment, column A : roll, column B : roll for details, column C : pitch, column D : the heading angle difference between the platform and projectile)

그 결과, Fig. 12에서 보는 바와 같이 지연시간에 따른 비정렬각의 차이를 확인 할 수 있다. 해상시험과 유사한 롤, 피치 변화를 인가하는 시점에는 시간지연과 관계 없이 비정렬각 오차가 크게 발생한다. 하지만 전달정렬 종료 시점에서는 지연시간과 비례하는 경향을 보인다. 시간지연 1초 이하인 경우 전달정렬 종료 1000초 시점에서 0°에 가까운 오차를 보이나 시간지연이 길어질수록 0.5~1.4°까지 증가하였다.

판단하였으며, 육상시험을 통해 원인을 재현하여 이를 입증하였다.

그 결과, 전달정렬 오차를 줄이기 위해 플랫폼과 수중발사체 간 자세 정보 송·수신 시간지연을 감소시키고, 지연시간 동안 롤, 피치 변화 등 동체의 급격한 운동을 줄이는 것이 필요하며 이를 통해 수중발사체의 목표 정확도를 개선할 수 있다고 판단한다.

## 6. 결론

본 연구는 2번의 수중발사체 해상시험에서 목표 정확도가 요구되는 원형 공산오차보다 크게 벗어난 현상을 해소하기 위해 수중발사체의 목표 정확도에 영향을 미치는 요인들을 수중발사체 내외부적으로 나눠서 고려하여 분석하였다.

수중발사체의 목표 정확도에 많은 원인이 존재하지만 수중발사체 및 플랫폼의 주행 기록 분석을 통해 플랫폼과 수중발사체 간 전달정렬 오차가 치명적인 원인이라고

## References

- [1] C. G. Park, J. G. Lee, and H. W. Park, "The technology of Inertial Navigation System", *Institute of Control, Robotics and Systems(ICROS)*, Vol.3, No.2, pp.51-57, Mar. 1997.
- [2] C. G. Park and J. Yong, "INS/GPS Integration Navigation System", *Institute of Control, Robotics and Systems(ICROS)*, Vol.5, No.6, pp.20-25, Nov. 1999.
- [3] I. F. Akyildiz, D. Pompili, and T. Melodia, "Underwater Acoustic Sensor Networks : Research Challenges", *Ad Hoc Networks(Elsevier)*, Vol.3, pp 257-279, Feb. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2005.01.004>



- [4] C. J. Kim, I. S. Lee, J. H. Oh, H. S. Yu, and H. W. Park, "A Study on the Design of Correction Filter for High-Speed Guided Missile Firing form Warship after Transfer Alignment", *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol.68, No.1, pp.108-121, Mar. 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2019.68.1.108>
- [5] Y. U. Lee, "A Study on the Inertial Navigation System Technology", *Journal of information and security*, Vol.8, No.2, pp.87-94, Jun. 2008.  
UCI: G704-001662.2008.8.2.001
- [6] V. Rahmawati, A. Affandi, I. Arifin, and M. Asrofi, "Acquisition and Data Logging Inertial Navigation System(INS) on Combat Submarine Using Arduino-SD Card", *IPTEK Journal of Proceedings Series*, Vol.0, No.3, pp.58-61, 2019.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.12962/j23546026.y2019i3.5843>
- [7] D. Titterton and J. Weston, "Strapdown Inertial Navigation Technology 2nd edition", p.576, Peter Peregrinus Ltd., 2004
- [8] R. G. Brown and Patrick T. C. Hwang, "Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering 4th edition", p.400, John Wiley & Sons Inc., 2012
- [9] H. S. Lee, K. J. Han, S. W. Lee, and M. J. Yu, "A Transfer Alignment Method considering a Data Latency compensation for an Inertial Navigation Systems in High Dynamic Applications", *The Transaction of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol.64, No.12, pp.1742~1747, 2015  
DOI: <https://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2015.64.12.1742>

이 상 훈(Sang Hoon Lee)

[정회원]



- 2016년 8월 : 한국과학기술원 저기 및 전자공학부 (학사)
- 2016년 7월 ~ 2019년 7월 : 한화시스템 연구원
- 2019년 8월 ~ 현재 : 국방기술품질원(DTaQ) 연구원

<관심분야>

전자공학, 유도무기, 신호처리

김 보 램(Bo Ram Kim)

[정회원]



- 2008년 2월 : 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학과 (학사)
- 2008년 2월 ~ 2012년 4월 : 삼성 전자 LCD사업부 선행기술개발팀 연구원
- 2012년 4월 ~ 2014년 1월 : 삼성 디스플레이 개발팀 선임연구원
- 2018년 12월 ~ 현재 : 국방기술품질원(DTaQ) 연구원

<관심분야>

전자공학, 유도무기, 신호처리

정 영 탁(Yeong Tak Jung)

[정회원]



- 2010년 12월 : 경희대학교 전자공학과 (학사)
- 2019년 9월 : 경북대학교 회로 및 시스템 전공 (석사)
- 2011년 1월 ~ 2014년 8월 : 한국항공우주산업 연구원
- 2014년 8월 ~ 현재 : 국방기술품질원(DTaQ) 선임연구원

<관심분야>

전자공학, 유도무기, 회로 및 시스템