

자율무인잠수정의 항법성능 사전 검증을 위한 시험치구 개발

Development of Test-Equipment for AUVs' Navigation Performance Pre-verification

이 한솔^{1†}·이 권수²·김 호성³·최 기 환³·추 진 우⁴·강 형 주⁴
Hansol Lee^{1†}, Gwonsoo Lee², Ho Sung Kim³, Kihwan Choi³,
Jinwoo Choo⁴, Hyungjoo Kang⁴

Abstract: This paper describes the development of a test-equipment for the pre-verification of navigation performance in cluster-based AUVs (Autonomous Underwater Vehicle). In the development of an AUV, conducting hardware and software development sequentially is not efficient due to the limited research and development period. Therefore, in order to reduce the overall development time and achieve successful development results, it is essential to pre-validate the navigation system and navigation algorithms. Accordingly, this paper explains the test-equipment for pre-verification of navigation performance, and ultimately confirms the stability of the navigation system and the performance of the navigation algorithms through the analysis of five types of navigation sensor data stored during real-sea experiments. The results demonstrate that through the development and verification of the test-equipment, it is possible to shorten the overall development period and improvement of product quality in the process of developing multiple AUVs.

Keywords: AUV, Navigation, Underwater Robots, Unmanned-system, Test-equipment, Pre-verification

1. 서 론

무인잠수정은 무선으로 운용되는 AUV (Autonomous Underwater Vehicle, 자율무인잠수정)과 유선으로 운용되는 ROV (Remotely Operating Vehicle, 원격제어무인잠수정)으로 구분되며, 본 논문에서 다룰 자율무인잠수정의 경우 현재까지는 보편적으로 단독 운용되며 수중환경 수색/탐색 등의 목적으로 개발 및 연구가 진행되었다^[1].

하지만, 단독으로 운용되는 자율무인잠수정의 경우 본래 목적인 수중수색 혹은 탐색 과정에서 한계가 존재하며^[2], 이는 크게 시간적인 한계와 물리적인 한계로 구분할 수 있다. 시간적인 측면에서 자율무인잠수정은 모션과 분리되어 개별 전원으로 운용되기 때문에 임무 수행 시간에 한계가 존재한다. 또한, 물리적인 측면에서 하나의 자율무인잠수정이 수색하고 탐색할 수 있는 범위는 센서의 성능으로 인해 제한적이기 때문에 광범위한 범위를 탐색하는데 있어서 매우 제한적인 요인으로 반영된다. 그렇기 때문에 단독으로 운용하는 것이 아닌, 다중으로 운용되는 자율무인잠수정에 대한 연구가 필요 시 된다^[3]. 이러한 현상은 비단 수중로봇에서만 보이는 단점이 아니다. 지상 로봇과 공중 로봇(드론)에서도 유사한 이유로써 군집 제어와 충돌 방지 및 회피, 편대 구축 등 군집 로봇의 운용을 위한 군집 로봇에 대한 연구 및 개발이 활발히 진행되고 있다^[4-6]. [Fig. 1] 은 본 연구에서 수행 중인 군집 수색 자율무인잠수정 과제의 시스템 구성 및 운용개념을 나타내며, USV (Unmanned Surface Vehicles)와 다수의 자율무인잠수정의 군집화 운용 기술에 대한 연구를 진행중이다^[7-10].

Received : Jun. 30. 2023; Revised : Jul. 20. 2023; Accepted : Aug. 15. 2023

※ This research was supported by AUV Fleet and its Operation System Development for Quick Response of Search on Marine Disasters of Korea Institute of Marine Science & Technology Promotion (KIMST) funded by the Korea Coast Guard Agency (KIMST-20210547)

1.† Researcher, Corresponding author: Hanwha Systems, Gumi, Korea (hansol.lee@hanwha.com)

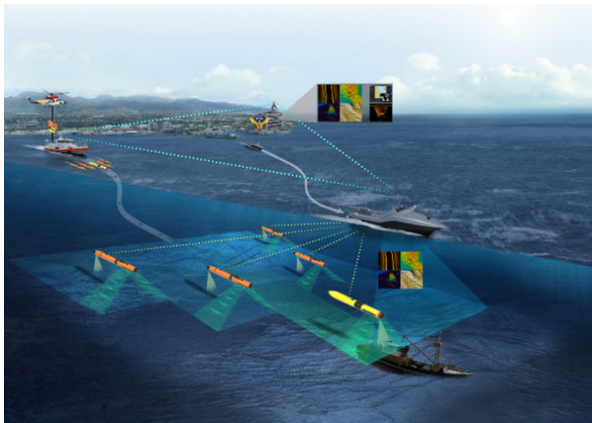
2. Researcher, Mechatronics Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Korea (kali55@o.cnu.ac.kr)

3. Researcher, Hanwha Systems, Gumi, Korea (hosung0608.kim@hanwha.com)

3. Researcher, Mechatronics Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Korea (hwann218@o.cnu.ac.kr)

4. Researcher, Hanwha Systems, Gumi, Korea (jinwoo.choo72@hanwha.com)

4. Researcher, Korea Institute of Robotics & Technology Convergence, Pohang, Korea (hjkang@kiro.re.kr)



[Fig. 1] Cluster-based AUVs and Operating System Configuration

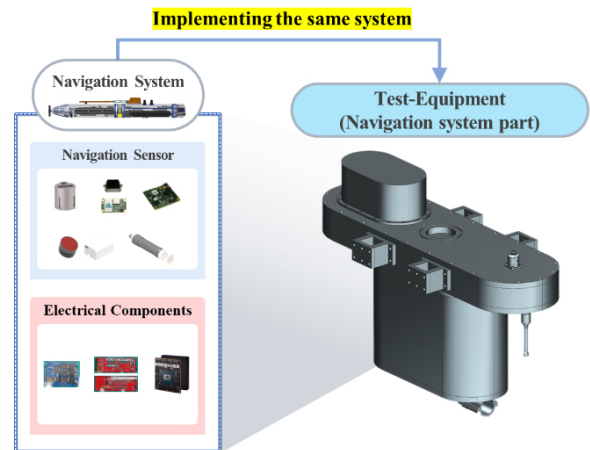
군집용 자율무인잠수정 제작을 위해서는 하드웨어 측면에서 플랫폼, 추진부, 전장부, 전원부, 통신부, 센서부에 대한 최적화 설계/제작이 필요하고, 소프트웨어 측면에서 수중복합항법, 수중 경로계획, 제어알고리즘, 통신 인터페이스 설계를 포함한 운용에 필요한 다양한 프로그램 개발이 필요하다. 하지만, 제한적인 연구 개발 기간 내에 모든 하드웨어 및 소프트웨어 구성품을 순차적으로 개발을 진행하는 것은 일정 상 리스크를 크게 가지고 갈 수밖에 없다. 장비의 각 구성품에서 발생 가능한 위험요소를 최소화하기 위해 전체 장비 개발 진행 간 특정 구성품의 성능 검증을 독립적으로 선 진행이 가능하다면 제품의 품질 향상에 큰 기여가 가능하다.

본 논문에서는 군집용 무인잠수정의 핵심 소프트웨어인 수중복합항법 소프트웨어와 항법센서/전장부로 구성된 항법시스템의 성능을 사전에 검증하기 위한 시험치구 개발 내용을 담고 있으며, 논문의 구성은 2장에서 항법 시험치구의 기구부 및 항법 센서/전장부 설계 내용, 3장에서 항법 시험치구의 소프트웨어 설계 내용, 4장에서 항법 시험치구의 실험역 시험 내용 및 5종 항법 센서 데이터 저장 결과와 분석, 항법 시스템의 안정성/성능을 확인한 결과/분석 내용을 담고 있다. 마지막으로 5장에서는 항법 시험치구 개발 필요성 및 타당성을 확인하고 추후 연구에 대한 내용을 기술하며 본 논문의 끝을 맺는다.

2. 항법 시험치구

2.1 항법 시험치구 설계 개요

[Fig. 2]는 항법 시험치구 설계 개념을 나타내며, AUV 항법 시스템을 동일하게 구현하여 사전에 본 장비의 항법시스템 성능을 검증할 수 있도록 개발되었다.



[Fig. 2] Design Overview of Test-Equipment for AUVs' Navigation

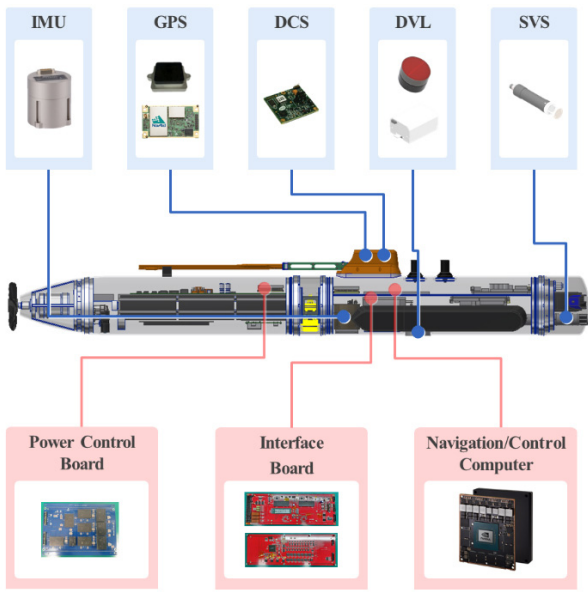
2.2 항법 센서 및 전장부

자율무인잠수정의 항법시스템은 항법센서와 전장부로 구성되며, 본 시스템은 총 5종의 상용 항법 센서 정보를 실시간성이 보장된 상태로 항법/제어컴퓨터와 연동되어 수중복합항법 알고리즘이 수행되도록 설계되었다.

[Table 1]과 [Fig. 3]은 자율무인잠수정에 탑재되는 항법센서의 사양 및 배치 설계 내용을 나타낸다. 항법센서는 3축 가속도 및 3축 각속도 측정을 위한 IMU (Inertial Measurement Unit), 동체 기준 3축 속도 측정을 위한 DVL (Doppler Velocity Logger), 위치 측정을 위한 GPS (Global Positioning Sensor), 압력센서 옵션을 추가하여 수심과 음속 측정을 위한 SVS (Sound Velocity Sensor), 3축 자세 측정을 위한 디지털 자력센서(Digital Compass)를 포함하여 총 5종의 센서로 구성되어 있다^[11,12].

[Table 1] Types and Specifications of 5 Navigation Sensors

	Specifications			
	IMU	Bias	Gyroscope	Accelerometer
0.5°/h			1 mg (1 σ)	
	Sampling time	100 Hz		
GPS	Accuracy	L1: 1.5 m or L1/L2: 1.2 m		
	Sampling time	1 Hz		
DCS (Digital Compass)	Accuracy	Roll	Pitch	Heading
		±0.4°	±0.2°	±0.3°
	Sampling time	10 Hz		
DVL	Accuracy	±0.2% ±0.2 cm/s		
	Sampling time	10 Hz		
SVS	Accuracy	Sonic speed	pressure sensor	
		±0.02 m/s	±0.05% range	
	Sampling time	(max) 32 Hz		



[Fig. 3] The Configuration of AUV Navigation Sensors and Electrical Components

전장부는 항법/제어컴퓨터, 연동보드, 전원제어보드로 구성되며, [Fig. 3]은 전장부의 배치 설계를 나타낸다.

항법/제어컴퓨터는 Nvidia사의 Jetson AGX Javier 모듈을 적용하였다. 본 모듈은 다차원 행렬연산에 특화된 GPU (Graphic Processing Unit)가 탑재되어 항법알고리즘 연산에 적합하다. 또한, 512개의 GPU 코어(CUDA core)를 통해 병렬연산으로 항법 연산 성능 극대화가 가능하다. 본 프로세서의 장점을 극대화하기 위해 CPU는 항법 센서를 포함한 주변 장비들과의 연동을 담당하고, GPU는 항법 연산을 담당하여 프로세서 자원을 효율적으로 사용할 수 있도록 설계되었다.

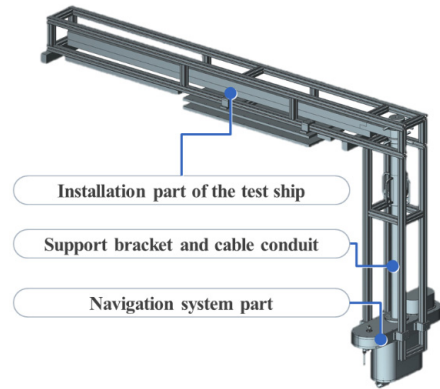
연동 보드는 탑재 장비의 물리적 인터페이스 분석을 통해 FPGA 기반의 최적의 연동 인터페이스를 설계하였으며, Board to Board 커넥터 방식을 적용함을 통해 케이블을 최소화하여 시스템의 안정성을 확보하고, 분해/조립의 편의성을 확보하였다.

전원제어보드는 탑재 장비 특성을 고려하여 안정적인 전원 공급이 가능하도록 설계하였다.

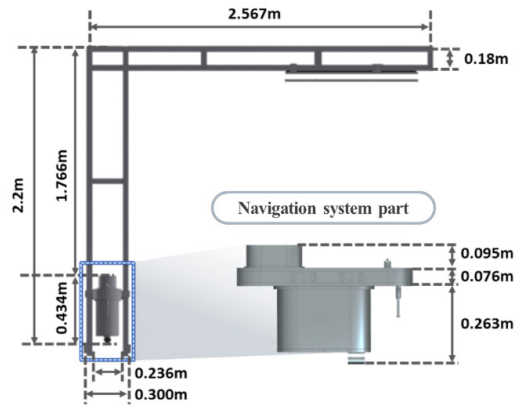
2.3 항법 시험치구 설계 구성

[Fig. 4]는 항법 시험치구의 전체 시스템 구조를 나타내며, 항법 시험치구는 항법시스템부, 지지대 및 케이블관, 시험선 설치부로 구성되며, [Fig. 5]는 전체 시스템의 규격을 나타낸다.

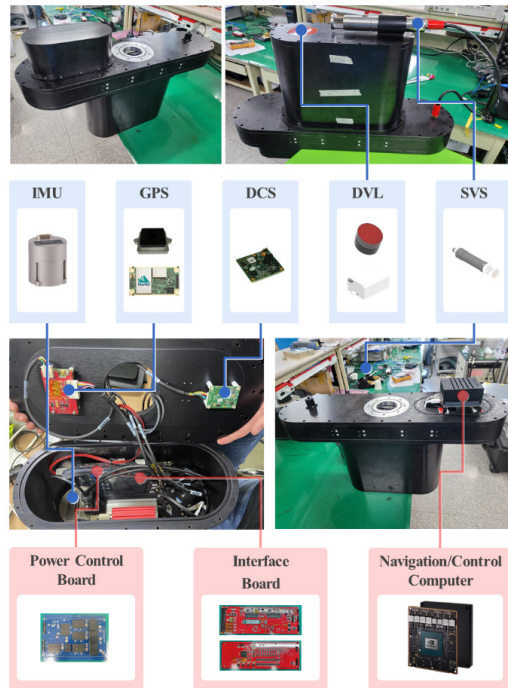
항법시스템부는 자율무인잠수정의 항법시스템을 구성하는 항법센서와 전장부를 포함하는 조립체이며 [Fig. 6]는 항법 시스템부의 구성을 나타낸다.



[Fig. 4] The Overall System Architecture of Test Equipment for AUVs' Navigation



[Fig. 5] The System Specifications of Test Equipment for AUVs' Navigation



[Fig. 6] The Configuration of Navigation Sensors and Electrical Components in Test Equipment for AUVs' Navigation

지시대 및 케이블관은 항법시스템부를 해양 수중환경 약 1m 수심에 진수한 상태에서 시험선으로 견인할 때에 충분한 강성을 지닐 수 있도록 지지해주는 역할과 전원 및 데이터 연동 케이블이 시험선으로 올릴 수 있는 역할을 지닌다.

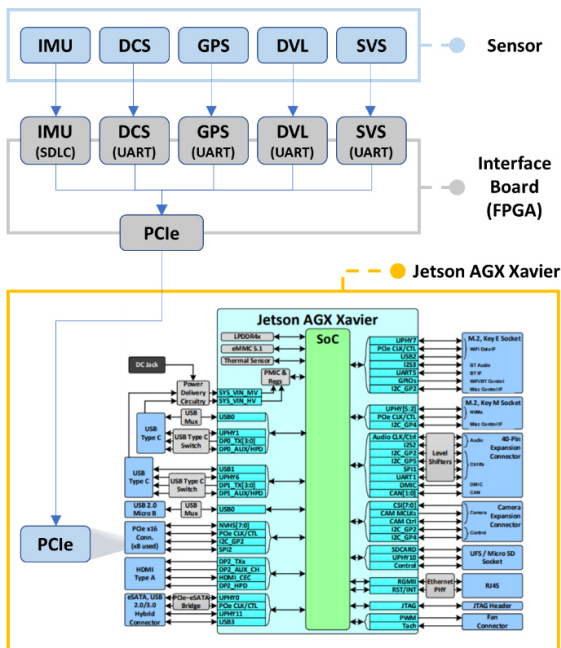
시험선 설치부는 전체 시스템이 시험선에 안정적으로 설치될 수 있도록 마운팅하는 역할을 담당한다.

3. 항법시스템 소프트웨어

3.1 항법센서 및 항법/제어컴퓨터 연동 구조

5종의 항법센서는 [Fig. 7]과 같이 FPGA 기반의 연동보드를 거쳐 최종적으로 항법/제어컴퓨터와 연동된다.

연동보드 5종 항법센서 각각의 통신 인터페이스에 따라 수신하여, PCIe 통신을 통해 항법/제어컴퓨터와 연동되도록 설계되었다. 이는 무인잠수정 내부의 협소한 공간으로 인해 통신 인터페이스 장비를 최소화하며, 센서의 실시간성이 보장될 수 있도록 설계하기 위함이다.

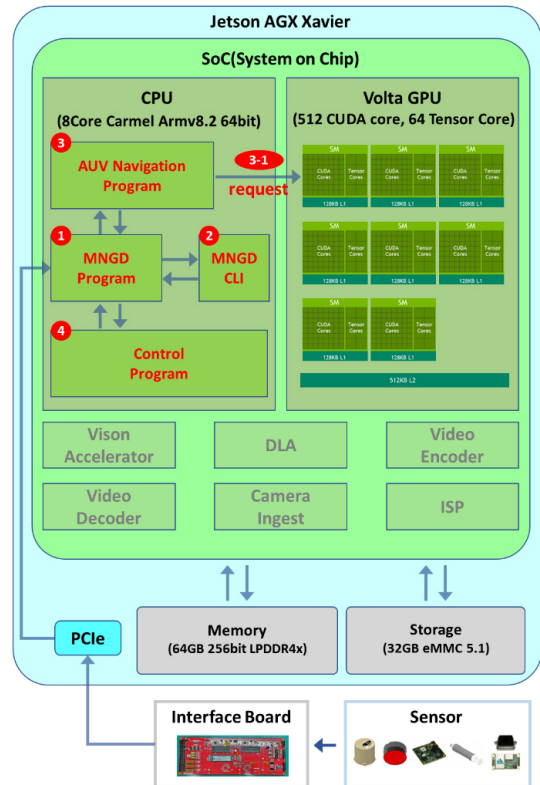


[Fig. 7] The Communication and Integration Structure Between Navigation Sensors and Navigation/Control Computers

3.2 항법/제어컴퓨터 소프트웨어 구조

항법/제어컴퓨터는 앞서 2.2절에서 언급한 바와 같이 Nvidia사의 Jetson AGX Xavier 모델로 CPU는 8개의 ARM 코어, GPU는 512개의 CUDA (Compute Unified Device Architecture)

코어 및 64개의 Tensor Core로 구성되어 있다. [Fig. 8]은 항법/제어컴퓨터의 프로그램 구조에 대해 상세히 나타낸다.



[Fig. 8] The Software Architecture of the Navigation/Control Computer

3.2.1 MNGD (Managed) Program

항법/제어컴퓨터의 주변 모든 장비 및 프로그램과 연동/관리 역할을 담당하는 프로그램이다. 5종의 항법센서 정보는 연동보드를 거쳐 PCIe 통신으로 MNGD Program을 통해 연동/관리되며, 센서데이터 저장 및 시뮬레이션 기능 또한 포함한다.

3.2.2 MNGD CLI (Command-Line Interface) Program

MNGD 프로그램 동작 간 디버깅 및 기능(연동메시지출력, 센서데이터출력/저장, 시뮬레이션 등)에 대한 CLI 명령 입력이 가능한 명령프롬프트 기능을 담당한다.

3.2.3 AUV Navigation Program

본 논문에서 언급한 사전 검증하고자 하는 AUV의 항법상태를 추정하기 위한 항법 초기정렬 알고리즘과 칼만필터 기반의 항법알고리즘¹³⁾이 적용된 프로그램이다.

3.2.3.1 Request (GPU)

선형대수 기반의 연산이 수행되는 항법프로그램에서 GPU

[Table 2] The Flow of GPU Process Computation Requests

	Content
1	- Copying Main Memory to GPU Memory - Zero-copy memory allocation that allows both CPU and GPU to access it in common
2	- Directing a process from CPU to GPU
3	- Performing parallel computations on each core where the GPU has received instructions
4	- Copying the computation results from GPU memory to main memory or reading them from memory through Zero-copy

에 프로세스를 지시함으로 컴퓨팅 파워를 최적화할 수 있다. 연산의 일련 과정은 [Table 2]와 같이 이루어진다.

3.2.4 Control Program

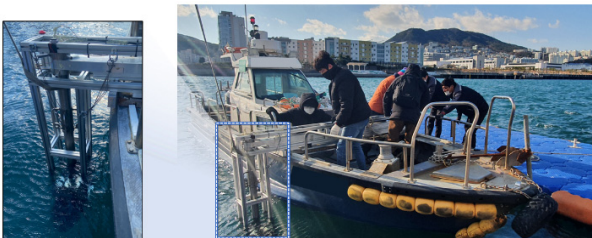
AUV의 경로계획, 경로추종을 위한 LOS 알고리즘, 강인제어기/PID제어기 등이 포함된 프로그램이다.

4. 항법 시험치구 시험

4.1 시험 환경

실해역 시험은 [Fig. 9]와 같이 시험선에 항법 시험치구를 설치하고 임의의 경로를 특정시간동안 운항하며 항법센서 데이터 취득하고, 사후에 항법알고리즘 출력 결과를 확인하는 방법으로 시험을 진행하였다.

항법 시험치구 실해역 시험 장소는 한국해양대학교(부산) 앞바다이며, [Fig. 10]~[Fig. 12]와 같이 시험선을 운항하며 5종 항법센서 데이터를 취득하였다. [Table 3]은 경로 별 운항 시간 및 운항 거리를 나타낸다. 운항 거리는 취득된 GPS 데이터 기준으로 산출하였다.



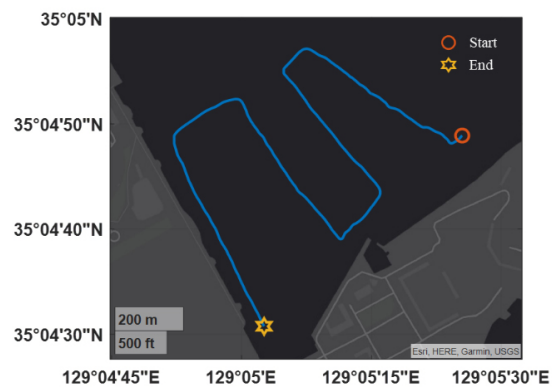
[Fig. 9] The Test Environment for AUVs' Navigation Test Equipment

[Table 3] Test Information by Acquisition Pathway

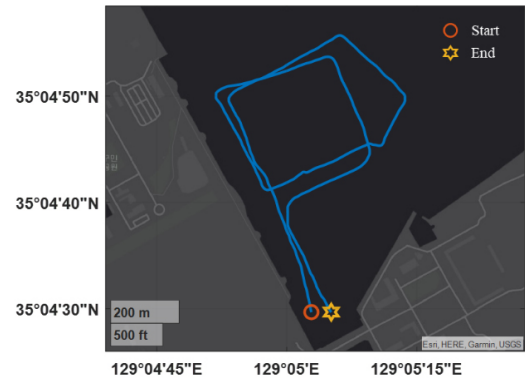
	Operating Time (s)	Operating Distance (m)
Path-A	1600	2049.38359
Path-B	2029	2647.02372
Path-C	2600	3447.28926



[Fig. 10] Data Acquisition Path-A



[Fig. 11] Data Acquisition Path-B



[Fig. 12] Data Acquisition Path-C

4.2 항법센서 저장 결과

항법 시험치구 시험 목적의 첫째는 항법시스템의 정상적인 항법센서 연동 및 저장 기능에 있다. [Table 4]는 4.1 절에 기술된 경로A, B, C에서 취득된 5종 항법 센서의 저장결과를 나타낸다.

각 경로 별 운항된 시간동안 저장된 5종 항법센서 데이터 개수를 통해 각 센서의 샘플링타임에 맞게 누락된 데이터 없이 연동/저장되었음을 확인할 수 있고, 각 센서의 샘플링타임 표준편차를 통해 5종의 항법센서 모두 샘플링타임 간격이 규칙적으로 보장된 상태로 연동/저장되었음을 확인할 수 있다.

[Table 4] Navigation Sensor Logging Results

	IMU	GPS	DCS	DVL	SVS
Sampling Time	100 Hz	1 Hz	10 Hz	10 Hz	30~32 Hz
Path-A: 1600 sec					
Number of Logs	160,000	1,600	16,001	16,001	48,169
Standard Deviation of Sampling Time	6.69	1.67	3.43	8.40	3.36
Path-B: 2029 sec					
Number of Logs	202,900	2,029	20,290	20,291	61,082
Standard Deviation of Sampling Time	6.87	1.38	3.61	7.52	3.42
Path-C: 2600 sec					
Number of Logs	260,000	2,600	26,001	26,000	78,265
Standard Deviation of Sampling Time	8.70	1.92	3.95	6.08	3.41

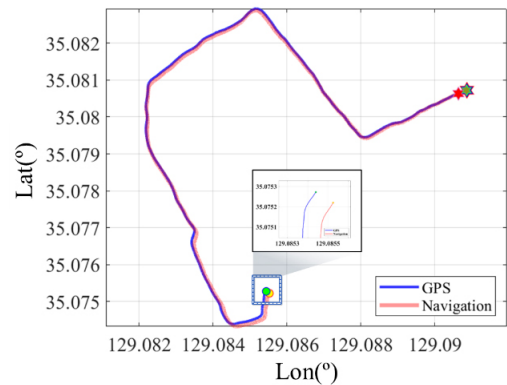
4.3 항법 알고리즘 성능

항법 시험치구 시험 목적의 둘째는 3.2절에서 기술된 칼만 필터 기반의 항법 알고리즘의 기본성능 검증이다. 자율무인잠수정의 항법시스템을 그대로 모사하여 제작된 항법 시험치구 시스템에서 항법 알고리즘의 정상적 동작과 요구 성능인 이동거리 0.5% 이하의 오차를 만족하는 것을 확인하고자 한다.

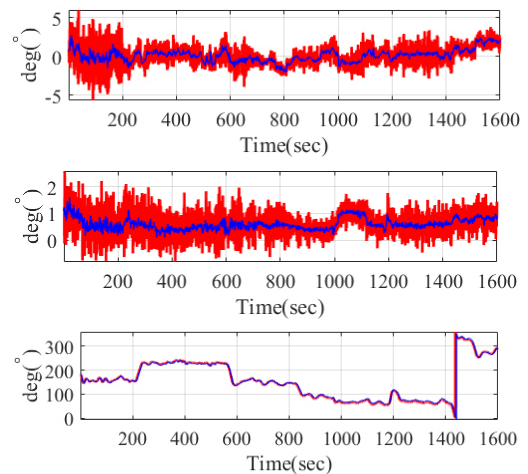
[Fig. 13]~[Fig. 24]는 4.1 절에 기술된 경로A, B, C를 운항하며 저장된 항법알고리즘의 추정 값과 계측된 항법센서의 출력 값을 나타낸다. 추정하는 항법 상태는 위치(위도/경도), 자세(Roll/ Pitch/Heading), 속도(u/v/w), 심도이다. 빨간색 실선은 추정된 항법알고리즘의 결과 값을 나타내며, 파란색 실선은 계측/저장된 항법센서 출력 값이다. 항법센서는 GPS (위치), DCS (Digital Compass, 자세), DVL (Doppler Velocity Log, 속도), 압력센서(심도)를 통해 비교 분석하였다.

위치(위도/경도) 데이터 분석결과는 [Table 5]와 같으며, [Fig. 13], [Fig. 17], [Fig. 21]에 나타난 항법알고리즘 위치추정 결과와 센서(GPS)와의 최종 위치오차 비교 분석 결과에 대해 나타낸다. 운항된 3가지 경로A, B, C 모두 이동거리 대비 0.5% 이하의 위치오차 성능을 충족함을 확인하였다.

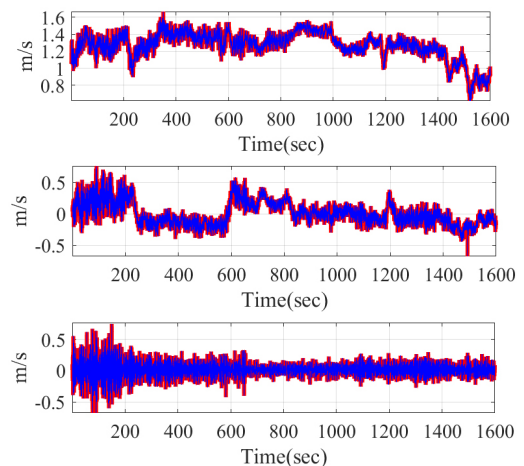
자세(Roll, Pitch, Heading) 데이터는, 파란색 실선인 센서(DCS)의 경우 반응속도가 느리며, 고주파 성분이 계측되지 않는 특성이 있기에 전체적인 경향은 센서(DCS)를 따라가되 IMU-자이로센서 기반으로 예측/추정되는 자세 값을 신뢰하도록 필터를 구성하여 빠른 반응성과 고주파 성분의 자세 추정이 누락되지 않는 항법알고리즘 추정 결과를 [Fig. 14], [Fig. 18], [Fig. 22]를 통해 확인할 수 있다.



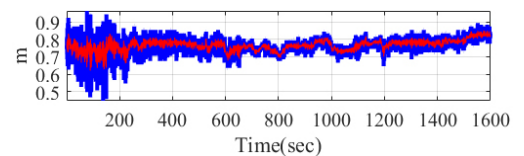
[Fig. 13] Position Results for Path-A



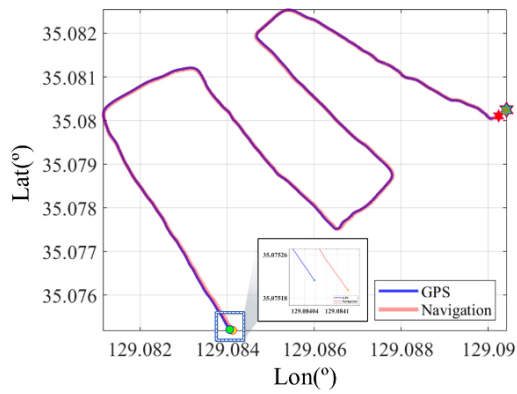
[Fig. 14] Attitude Results for Path-A (Roll, Pitch, Heading)



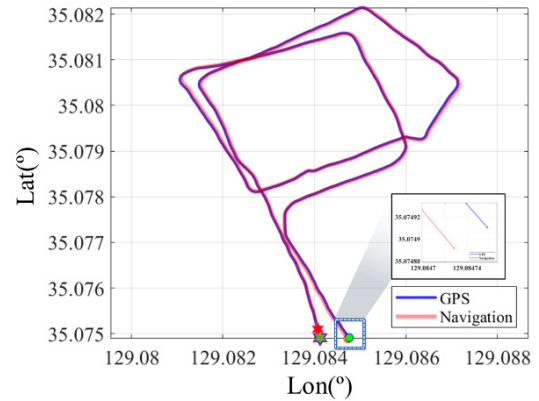
[Fig. 15] Velocity Results for Path-A (u, v, w)



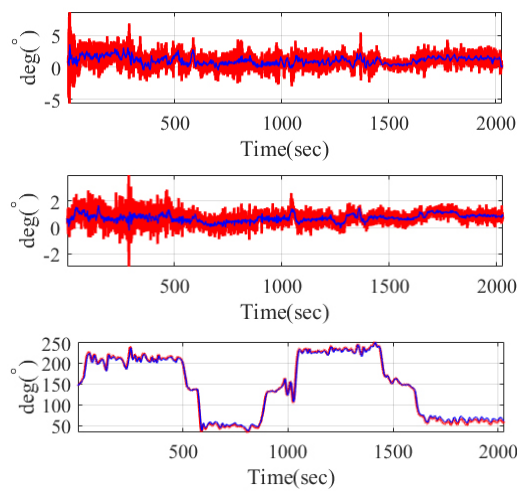
[Fig. 16] Depth Results for Path-A



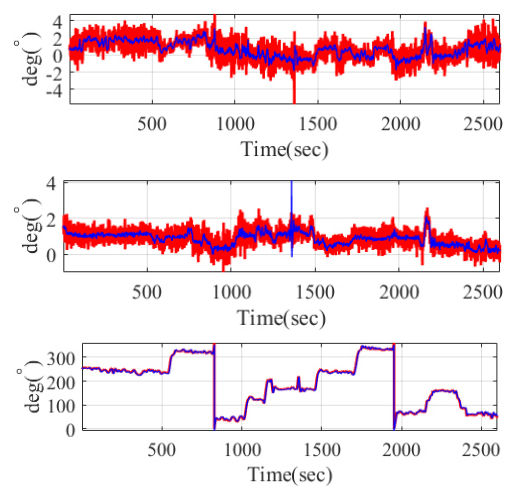
[Fig. 17] Position Results for Path-B



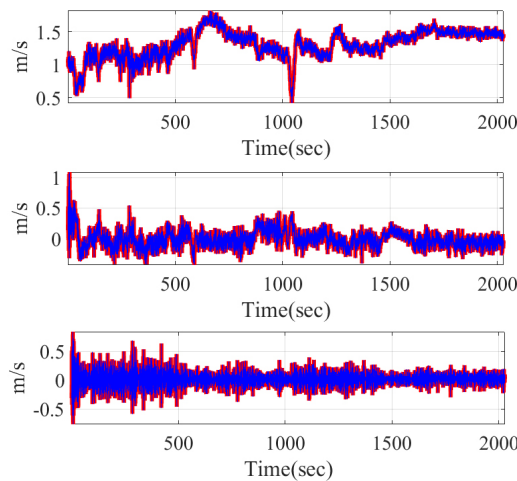
[Fig. 21] Position Results for Path-C



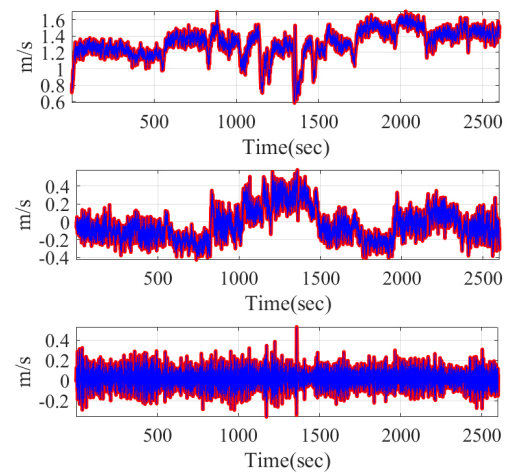
[Fig. 18] Attitude Results for Path-B (Roll, Pitch, Heading)



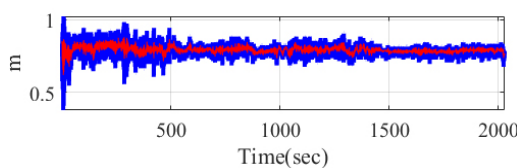
[Fig. 22] Attitude Results for Path-C (Roll, Pitch, Heading)



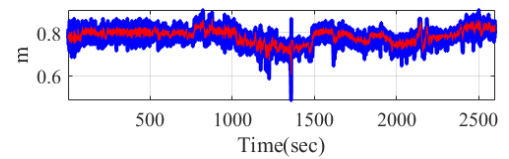
[Fig. 19] Velocity Results for Path-B (u, v, w)



[Fig. 23] Velocity Results for Path-C (u, v, w)



[Fig. 20] Depth Results for Path-B



[Fig. 24] Depth Results for Path-C

[Table 5] Performance Analysis of Navigation Algorithm for Position Estimation

Scenario	End point error (m)	Precision of Navigation (%)
Path-A	9.63	0.47
Path-B	6.04	0.22
Path-C	3.48	0.10

속도(u, v, w) 데이터는, 파란색 실선인 센서(DVL)와 IMU-가속도센서 기반으로 예측/추정되는 속도데이터를 융합하되 DVL에서 계측되는 속도 값의 신뢰도가 상당히 높게 항법 알고리즘을 설계하였다. 다만, 해저 지형 및 수중 환경 문제로 인해 DVL 센서 계측이 되지 않는 상황에서는 IMU-가속도센서에서 추정되는 속도 값으로 지속적으로 상태를 추정할 수 있도록 필터를 설계하였으며, 이에 따라 DVL 센서 계측값과 항법 추정값이 거의 유사하게 출력된 것을 [Fig. 15], [Fig. 19], [Fig. 23]을 통해 확인할 수 있다.

심도 데이터는, 파란색 실선인 센서(SVS)에서 실제적인 움직임에 비해 고주파 노이즈 성분이 계측되는 것을 실험적으로 확인되며, 고주파 성분을 걸러내도록 항법 필터를 설계하였으며 이에 따라 결과가 출력됨을 [Fig. 16], [Fig. 20], [Fig. 24]를 통해 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 군집용 무인 잠수정의 항법 시스템 개발 과정에서 발생할 수 있는 문제를 최소화하고자 사전에 설계 및 제작한 항법 시험치구의 하드웨어와 소프트웨어 구조에 대해 설명하고, 실험을 통해 항법 알고리즘의 성능 및 항법 시스템의 안정성을 사전에 검증하였다.

시험 치구에 탑재되는 항법 시스템(5종의 항법 센서와 연동 보드, 프로세서)는 실 장비(무인 잠수정)의 항법 시스템과 동일한 구성으로 이뤄졌다. 그렇기 때문에 단순히 항법 센서의 데이터를 취득하고 항법 알고리즘의 성능을 검증하는 것뿐만 아니라, 전체적인 항법 시스템의 안정성을 검증한다는 점에서 의미가 있다. 시험 결과를 통해서 실 장비에 탑재될 항법 시스템과 항법 알고리즘이 적합하게 설계되었음을 확인하였다.

추후에는 본 연구를 통해 검증된 항법시스템을 실 장비에 탑재하여 동일한 성능 및 안정성을 보이는지 검증이 필요하며 항법알고리즘 필터 추가 튜닝을 통해서 더 정확한 항법 상태 추정이 가능하도록 개발을 진행할 예정이다. 또한, GPU 프로세서에서 항법알고리즘 동작을 위한 CUDA 언어 기반의 항법 알고리즘의 최적화 과정을 통하여 CPU 단독으로 동작할 때에 비해 월등한 성능을 보일 수 있도록 추가 개발 진행 계획이다.

References

- [1] B. Jun, P. Lee, and Y. Lim, "Trends in the Cruising-Type AUVs Technologies," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, vol. 26, no. 5, pp. 14-22, May, 2009, [Online], <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE01180732>.
- [2] X. Cao, H. Sun, and G. E. Jan, "Multi-AUV cooperative target search and tracking in unknown underwater environment," *Ocean Engineering*, vol. 150, no. 15, pp. 1-11, Feb., 2018, DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.12.037.
- [3] B. Xin, J. Zhang, J. Chen, Q. Wang, and Y. Qu, "Overview of Research on Transformation of Multi-AUV Formations," *Complex System Modeling and Simulation*, vol. 1, no. 1, pp. 1-14, Mar., 2021, DOI: 10.23919/CSMS.2021.0003.
- [4] E. Soria, F. Schiano, and D. Floreano, "SwarmLab: a Matlab Drone Swarm Simulator," *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Las Vegas, USA, pp. 8005-8011, 2020, DOI: 10.1109/IROS45743.2020.9340854.
- [5] A. E. Turgut, H. Çelikkanat, F. Gökçe, and E. Şahin, "Self-organized flocking in mobile robot swarms," *Swarm Intelligence*, pp. 97-120, Aug., 2008, DOI: 10.1007/s11721-008-0016-2.
- [6] S. Lee, W. Chung, M. Kim, S.-P. Lee, C.-H. Lee, S. Kim, and H. Son, "Path Planning for Search and Surveillance of Multiple Unmanned Aerial Vehicles," *The Journal of Korea Robotics Society*, vol. 18, no. 1, pp. 1-9, Feb., 2023, DOI: 10.7746/jkros.2023.18.1.001.
- [7] D. Kim and B. Choi, "The Development and Experimentation of Unmanned Surface Vehicles (USV) for Swarm Operation," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 28, no. 5, pp. 420-426, Mar., 2022, DOI: 10.5302/J.ICROS.2022.22.0023.
- [8] D. Choi, D. Kim, M. Kim, B. Choi, M. Jung, and Y. Choi, "Design and Implementation of Wireless Communication Topology for Swarm Unmanned Surface Vehicle(USV) Operation," *The Journal of Korean Institute of Information Technology*, vol. 20, no. 8, pp. 79-89, Aug., 2022, DOI: 10.14801/jkiit.2022.20.8.79.
- [9] K. Choi, G. Lee, P.-Y. Lee, H. S. Kim, H. Lee, D. Park, and J. Lee, "Localization Algorithm of Multiple-AUVs Utilizing Relative 3D Observations," *Journal of Korea Robotics Society*, vol. 17, no. 2, pp. 110-117, Jun., 2022, DOI: 10.7746/jkros.2022.17.2.110.
- [10] G. Lee, K. Choi, P.-Y. Lee, H. S. Kim, H. Lee, D. Park, and J. Lee, "Precise Localization of Multiple-AUVs through Reliability Assessment of Relative Observations," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 28, no. 6, pp. 558-565, Jun., 2022, DOI: 10.5302/J.ICROS.2022.22.0015.
- [11] H. Kang, G. R. Cho, M.-G. Kim, M.-J. Lee, J.-H. Li, H. S. Kim, H. Lee, and G. Lee, "Mission Management Technique for Multi-sensor-based AUV Docking," *Journal of Ocean Engineering and Technology*, vol. 36, no. 3, pp. 181-193, May, 2022, DOI: 10.26748/KSOE.2022.001.
- [12] G. Lee, P.-Y. Lee, H. S. Kim, H. Lee, H. Kang, and J. Lee, "Robust AUV Localization Incorporating Parallel Learning Module," *The Journal of Korea Robotics Society*, vol. 16, no. 4, pp. 306-312, Dec., 2021, DOI: 10.7746/jkros.2021.16.4.306.

[13] J. Choo, G. Lee, P.-Y. Lee, H. S. Kim, H. Lee, D. Park, and J. Lee, "Position Based In-Motion Alignment Method for an AUV," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 26, no. 8, pp. 649-659, Aug., 2020, DOI: 10.5302/J.ICROS. 2020.20.0071.



이 한 솔

2016 충남대학교 메카트로닉스공학과(학사)
2018 충남대학교 메카트로닉스공학과(석사)
2018~현재 한화시스템

관심분야: 수중 로봇, 자율무인잠수정, 항법, 제어



최 기 환

2022 충남대학교 메카트로닉스공학과(학사)
2022~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과
석·박사 통합과정

관심분야: 위치 추정, 수중 로봇, 항법, 제어



이 권 수

2020 충남대학교 메카트로닉스공학과(학사)
2020~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과
석·박사 통합과정

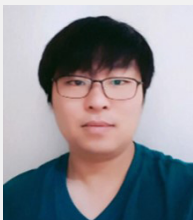
관심분야: 위치 추정, 항법, 자율무인잠수정, 수중로봇, 주행 로봇, 제어



추 진 우

2018 충남대학교 메카트로닉스공학과(학사)
2020 충남대학교 메카트로닉스공학과(석사)
2023~현재 한화시스템

관심분야: 위치 추정, 항법, 자율무인잠수정, 수중로봇, 주행로봇, 제어



김 호 성

2009 한국해양대학교 기계시스템(학사)
2011 한국해양대학교 기계공학(석사)
2011~현재 한화시스템

관심분야: 수중 로봇, 자율무인잠수정, 항법, 제어



강 형 주

2012 동명대학교 로봇시스템공학과(학사)
2014 동명대학교 기계시스템공학과(석사)
2014~현재 한국로봇융합연구원

관심분야: 인공지능, 제어이론, 해양로봇