

무인잠수정의 수중항법을 위한 센서융합

Sensor Fusion for Underwater Navigation of Unmanned Underwater Vehicle

서 주 노*

Joono Sur

ABSTRACT

In this paper we propose a sensor fusion method for the navigation algorithm which can be used to estimate state vectors such as position and velocity for its motion control using multi-sensor output measurements. The output measurement we will use in estimating the state is a series of known multi-sensor asynchronous outputs with measurement noise. This paper investigates the Extended Kalman Filtering method to merge asynchronous heading, heading rate, velocity of DVL, and SSBL information to produce a single state vector. Different complexity of Kalman Filter, with biases and measurement noise, are investigated with theoretically data from MOERI's SAUV. All levels of complexity of the Kalman Filters are shown to be much more close and smooth to real trajectories than the basic underwater acoustic navigation system commonly used aboard underwater vehicle.

주요기술용어(주제어) : UUV(무인잠수정), EKF(확장칼만필터), DVL(도플러속도계), SSBL(초단거리선배열), Sensor Fusion(센서융합), Navigation(항해)

1. 머리말

해양 자료 조사 및 탐사, 기뢰전, 대잠전, 정찰, 그리고 감시 등 다양한 군사목적의 활용을 위하여 세계 선진국들은 1960년대부터 다양한 무인잠수정(UUV : Unmanned Underwater Vehicle)과 이에 관련된 필요 기술을 발전 시켜 오고 있다. 무인잠수정은 수중 작업의 필수적인 장비로 인식되어 많은 기술을 발전 시켜 ROV(Remotely Operated Vehicle), SAUV(Semi-Autonomous Underwater Vehicle), AUV

(Autonomous Underwater Vehicle)등의 다양한 형태의 수중로봇에 적용하고 있는 실정이다. 초기 기술 개발은 주로 해저의 석유 탐사, 조사 등과 같은 지하 자원 개발, 해저 광통신 케이블 매설 및 보수, 그리고 해양구조물 유지 보수 등 민수분야에 집중되었다. 군수분야는 미국을 중심으로 기뢰 제거 작업, 조난된 함정 및 잠수함의 구조, 잠수함 훈련용, 특수 요원 운반기 그리고 최근에는 잠수함의 무기체계와 Network Centric Warfare의 정보교환 노드 역할 등으로 사용할 수 있도록 기술이 개발되어 오고 있다^[1]. 이와 같이 여러 가지 사용 목적에 따라 다양한 형태의 무인 잠수정이 개발되고 있으며, 이에 따른 무인잠수정의 구조설계, 추진시스템, 제어시스템, 수중도킹, 그리고 수중항법 기술 등 핵심 기술개발이 요구되고 있는 실

† 2005년 7월 29일 접수~2005년 12월 7일 게재승인

* 해군사관학교 기계공학과

주저자 이메일 : joonosur@navy.ac.kr

정이다.

해저 자원탐사, 해저 케이블 검사 및 보수, 그리고 군사목적의 기뢰전과 미래 네트워크 중심작전에서 노드 역할 수행에 사용되는 무인잠수정은 무엇보다도 수중에서 정확한 위치 산출이 매우 중요한 요소가 된다. 그러나 수중에서의 항법은 지상과 공중에서의 항법보다는 여러 가지 수중의 물리적 현상을 고려해야 하는 복잡한 요소를 갖고 있다^[2]. 수중에서는 파동의 감쇄 현상으로 전자파의 투과 및 도달이 극도로 제한되므로 GPS, LORAN 등 지상에서 사용한 다양한 형태의 항법장비가 무인잠수정의 수중 위치 산출을 위한 수중항법 시스템으로 사용하기에는 한계가 있다^[2]. 현재까지 주로 사용하고 있는 무인잠수정의 수중항법장치로는 작업의 특성에 따라 약간의 차이는 있으나 한정된 해역에서 탐색을 할 때는 12~300KHz 주파수대의 LBL(Long Base Line) System를 사용하며, 정확한 위치를 산출하고자 할 때는 LBL System에 Doppler Velocity Log를 통합하여 사용하는 항법시스템이 제안되기도 하였다^[5]. ROV와 같이 모선을 이용한 보다 광범위한 해역을 항해할 때는 SBL(Short Base Line)과 SSBL(Super-Short Base Line) System를 사용하고 있으나, LBL System 보다는 사용하기는 간편하나 정확한 위치를 산출하기에는 어려움을 가지고 있다^[3]. 최근 무인잠수정을 중점으로 연구하고 있는 미 해군대학원, WHOI(Wood Hole Oceanographic Institute), 미 아틀랜틱 대학, 등 많은 연구기관에서는 새로운 항법시스템으로 GPS/INS를 통합하여 보다 광범위한 지역에서 정확한 위치를 계산하는 SANS(Small AUV Navigation System)와 해저 지형을 이용한 방법이 제안되고 있다^[3]. SANS와 같은 방법은 INS의 시간에 따른 오차 보정을 위하여 GPS를 사용할 때 수면위로 부상해야 하므로 수심이 깊지 않은 작업의 항해시스템에만 적합하다는 단점과 해저 지형방법을 이용할 때는 많은 조사와 데이터 구축이 요구된다는 것이다.

본 연구에서는 수심이 깊고 광범위한 지역에서 임무수행을 하는 무인잠수정의 위치를 보다 정확하게 산출할 수 있는 항법시스템의 센서 구성과 관련 센서들의 데이터 융합 알고리즘을 제안하고, 제안된 알고리즘을 이용하여 한국해양연구원선박분소(MOERI)의

SAUV 이론 운항데이터를 이용하여 수중항해에 요구되는 위치, 속도, 방위 등을 산출하여 실효성을 증명하였다. 연구의 구성은 2장에서 기존에 사용되고 있는 수중항법 시스템의 개념을 설명하고, 3장에서는 새롭게 고안된 항법시스템과 알고리즘을 제안하였다. 4장에서는 제안된 항법시스템의 실용성을 위한 시뮬레이션을 실시하여 성능을 평가하였으며, 마지막으로 5장에서는 제안된 항법시스템의 결과와 향후 연구 과제를 제안하였다.

2. 수중 항법시스템

무인잠수정의 정확하고 신속한 수중에서 자함 위치 결정은 임무수행과 수중에서 획득한 자료 분석을 위하여 매우 중요한 요소가 된다. 특히 기뢰 탐색 및 제거, 적 잠수함 추적, 모선과의 도킹, 그리고 수중정보 획득의 군사목적으로 사용되는 무인잠수정의 항법은 정확성과 신뢰성이 확보되어야 한다. 무인잠수정에 탑재되는 항법시스템은 위험요소와 장애물을 탐지하고 회피하는 소나시스템, 잠수정의 운동에 대한 정보를 제공하는 침로, 속도 및 수심을 측정하는 센서들이 있으며, 보다 정확한 위치 산출을 위한 외부의 보조적 항법 시스템인 LBL, SBL, SSBL과 이들을 복합하여 사용하는 복합형 항법시스템 등이 있다.

가. 하이드로폰

수중에서 수동적으로 발신되는 음향신호를 수신하여 음향의 강도와 발신지의 거리, 방위에 대한 정보를 획득하고 분석하며 음원의 위치를 계산할 수 있는 시스템이다. 또한 수중통신을 위하여 데이터를 송수신할 수 있는 시스템으로 수중음향 항법장치 구성의 기본적 시스템으로 사용된다.

나. 가속도계(Inertial Measurement Unit : IMU)

무인잠수정의 방위별 가속도를 측정하는 장비로 사용하는 도구에 따라 Seismic 질량 가속도계, Piezo-Electric 가속도계, Force Balance 가속도계 등으로 구분된다. 정밀한 측정이 요구될 때는 Force Balance 가속도계가 사용되고 있으나 최근에는 반도체를 이용

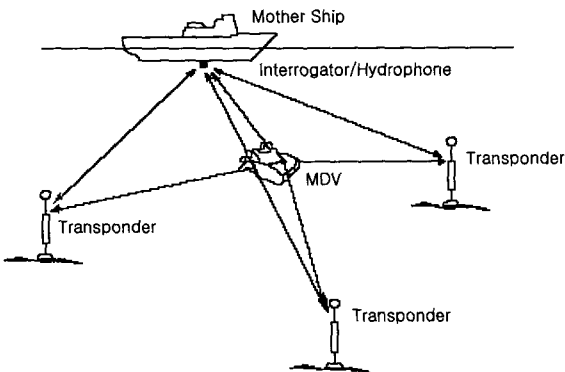
한 소형 실리콘 가속도계가 개발되고 있다.

다. LBL 시스템

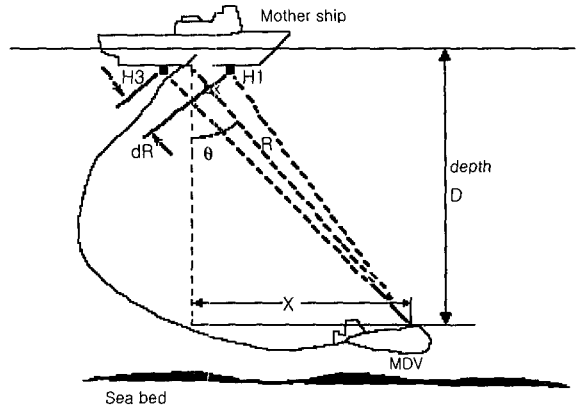
LBL 시스템은 일반적으로 해저에 기준이 되는 트랜스폰더(Transponder)를 1~5km 간격으로 설치하여 트랜스폰더로부터 수중신호를 수신하여 선체의 위치를 계산한다. 이 시스템은 좌표 측정 시 해저를 기준으로 하기 때문에 자북에 대한 좌표변환이 필요 없고 절대좌표계나 상대좌표계로 변환이 자유롭다는 장점이 있다. LBL 시스템에서 사용하는 트랜스폰더들은 각각 다른 주파수대에 반응하므로 서로간의 신호를 구분하여 신호의 발신 시각과 수신 시각을 측정하고 측정된 시간의 절반에 해당되는 시간에 음속을 곱하여 해저에 설치된 트랜스폰더까지의 거리를 계산할 수 있다. LBL 시스템의 일반적 형태는 그림 1과 같으며 수 킬로미터 떨어져 있는 3개의 트랜스폰더로부터 신호를 받아 UUV에서 위치를 계산하고 그 정보를 모선에 제공한다.

라. SBL 시스템

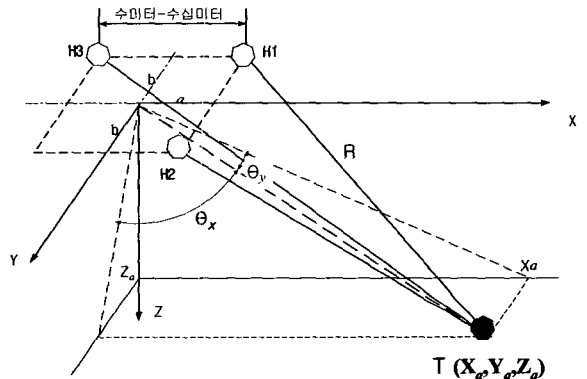
SBL 시스템은 고가의 비용과 운용의 어려움이 있는 LBL 시스템을 개선하여 몇 개의 하이드로폰을 무인잠수정을 운영하는 모선의 선체 표면에 약 30cm 간격으로 설치하고 무인잠수정에 트랜스폰더를 부착하여 무인잠수정의 3차원 위치를 측정한다. 즉, 무인잠수정에 설치된 한 개의 트랜스폰더나 동기화된 신호장치(Beacon)로부터 선체에 장착된 각 수중 청음기에 도달된 신호의 도착 시간을 측정하여 무인잠수



[그림 1] LBL 시스템 설치 개념도



[그림 2] SBL System의 운영개념도



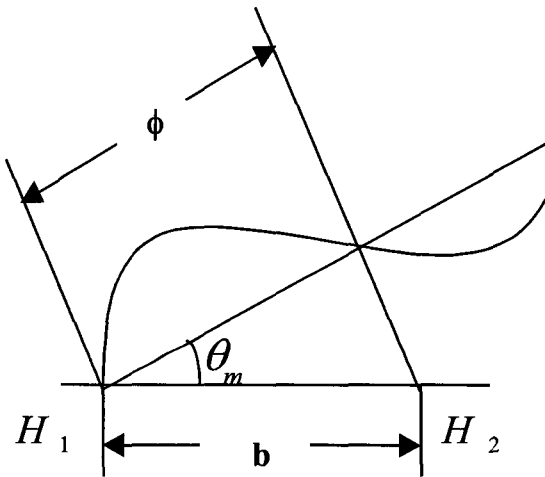
[그림 3] 모선의 하이드로폰 배열 및 무인잠수정의 트랜스폰더의 기하학적 관계도

정에 대한 상대적인 모선의 위치를 계산한다. LBL 시스템에 비해 Base Line 이 짧고 수상 모함에 있으므로 운용이 간편하고 상대적으로 낮은 비용이 든다. 그림 2는 SBL System의 운영 개념도를 묘사한 것이며, 그림 3은 모선에 배열된 하이드로폰과 무인잠수정의 트랜스폰더 발신음과의 기하학적 관계를 도식한 것이다.

마. SSBL 시스템

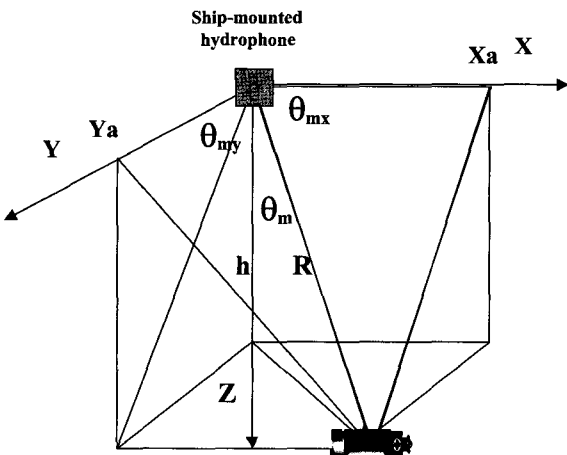
SSBL 시스템은 원리적 측면에서 SBL과 유사하나 구조가 간단하고 소형으로 모선의 크기에 제한을 받지 않고 사용이 가능하다. 230mm 정도크기의 직경으로 되어있는 SSBL은 내부에 5~20cm 배열로 하이드로폰과 트랜스듀스가 하나로 통합되어 있다. 이 시

시스템은 SBL 시스템과 달리 Base Line 이 매우 짧기 때문에 각각의 응답기에서 수신되는 음향신호의 시간 차이를 그림 4와 같이 음파의 위상차이로 측정하며, 이것을 이용하여 목표물까지의 거리 및 방향을 산출한다. 센서 배열 간격이 짧아서 정확성은 LBL 및 SBL 보다도 낮으나 이동의 편리성과 비용이 저렴하고 그림 5와 같이 간단한 시스템으로 구성할 수 있는 장점이 있다.



[그림 4] 수신신호 Phase Delay 측정 개념도

ψ : Phase Delay
 b : Length of Base Line
 θ : Incidence Angle



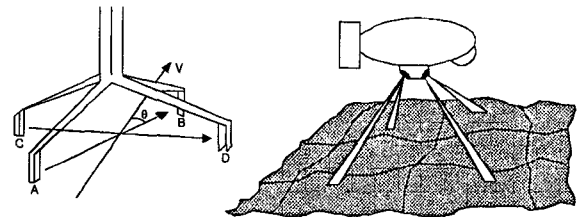
[그림 5] SSBL 위치측정 개념 및 운영도

바. DVL(Doppler Velocity Log)

DVL은 음향신호를 이용하여 수중에서 운동하는 무인잠수정의 절대, 상대속도를 측정하는 속도계이다. DVL은 도플러 원리를 응용한 시스템으로서 움직이는 선체로부터 발생하는 주파수와 수신된 신호의 주파수의 차이가 해저 기준점에 대한 선체 속도에 비례한다는 아래 관계식을 이용한다.

$$df = 2Vf_0 \cos\theta / v \tag{1}$$

여기서 df 는 도플러 효과로 발생하는 주파수 차이(Hz) 이고, f_0 는 발생시킨 음파의 주파수, V 는 선체 속도, v 는 물속에서의 음속, 그리고 θ 는 수평에 대한 음파의 각도이다. 일반적으로 DVL은 1~0.1% 이내의 속도 및 방위 결정 오차 범위를 갖는 정밀한 장비들이 생산되고 있어 무인잠수정의 보조 항법 센서로 우수한 성능을 발휘하고 있다. 그림 6은 DVL 원리의 개념도와 해저에서 적용되고 있는 모습이다.



[그림 6] DVL의 작동원리와 적용 모습

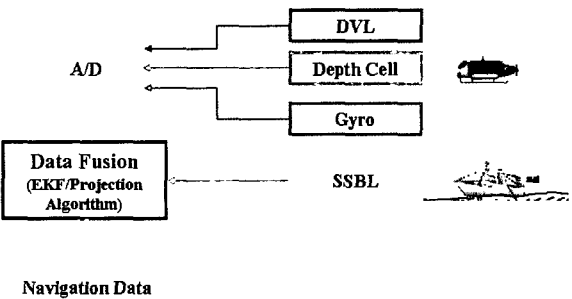
3. 센서구성 및 센서융합 알고리즘

가. 항법센서 구성

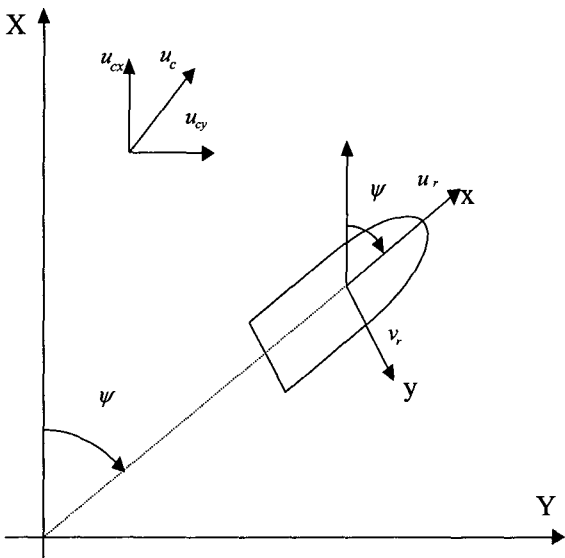
일반적으로 수중운항체의 수중항해를 위한 항해 및 보조 항해 장비로는 DVL, INS, DGPS, Gyro compass, LBL, SBL, SSBL, 심도계 등이 있으며 무인잠수정의 사용 목적에 따라서 적절하게 구성하여 사용하고 있다. 군사목적의 기뢰 탐색 및 제거에 사용되는 무인잠수정은 운용범위가 광범위하고 수심이 깊은 해역이므로 SSBL 시스템을 가장 많이 사용하고 있다. 앞 절에서 언급한 것과 같이 SSBL은 사용하기는 용이하나 음향신호를 수신하는 센서배열 간

격이 짧아 오차 발생이 크게 되어 정밀한 항해가 요구되는 수중항해에는 문제점을 가지고 있다. 따라서 기뢰 탐색 및 제거, 그리고 정밀한 수중항해를 위한 항법 시스템 구성을 아래 그림 7과 같이 초음파 시스템(SSBL)을 모선에 위치하고, IMU를 무인잠수정의 주장비로 사용하며, 심도계, DVL 등을 무인잠수정의 보조 장비로 사용하여 각 장비로부터 획득한 정보를 이용하여 보다 정확한 항해정보를 얻을 수 있게 하였다.

그림 7과 같은 항법 시스템을 구성한 무인잠수정의 수중에서의 운동좌표는 그림 8과 같이 묘사될 수 있으며 항법의 정밀도 계산에 따라서 상태벡터를 6, 9, 12 등으로 확장시켜 항법 알고리즘을 전개할 수 가있



[그림 7] 무인잠수정 항법센서 구성도



[그림 8] 무인잠수정 항법 시스템의 좌표계

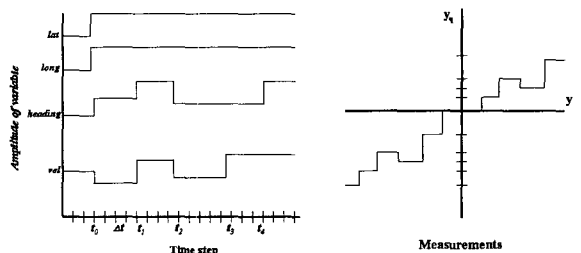
다. 여기에서는 기본적으로 6 상태 시스템을 갖는 방정식 (2)만을 고려하기로 한다.

$$\begin{aligned} \dot{X} &= dop_u * \cos(\Psi) - dop_v * \sin(\Psi) \\ \dot{Y} &= dop_u * \sin(\Psi) + dop_v * \cos(\Psi) \\ \dot{\Psi} &= \gamma \\ \dot{\gamma} &= 0 \\ dop_u &= 0 \\ dop_v &= 0 \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 X, Y는 무인잠수정의 절대좌표에 대한 거리이고 dop_u, dop_v는 x, y 방향의 속도, 그리고 ψ는 방위각을 나타낸다. 구성된 항법 시스템에 의한 출력은 식 (3)으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} y_1 &= dop_u \\ y_2 &= dop_v \\ y_3 &= \Psi \\ y_4 &= \gamma \\ y_5 &= X \\ y_6 &= Y \end{aligned} \tag{3}$$

여기서 y₁, y₂는 DVL로부터 측정된 속도이고, y₃, y₄은 자이로컴퍼스로부터 측정된 무인잠수정의 방위와 방위 변화율이며, y₅, y₆은 SSBL로부터 측정되는 x, y 방향의 거리이다. 구성된 항법센서로부터 얻어지는 정보(y₁, y₂, y₃, y₄, y₅, y₆)는 아래 그림 9와 같이 비동시성(Asynchronous)^[7-9]과 이산성(Discrete)의 특성을 가지고 있는 쿼타이즈(Quantized) 형태



[그림 9] 비선형성의 항법센서의 출력

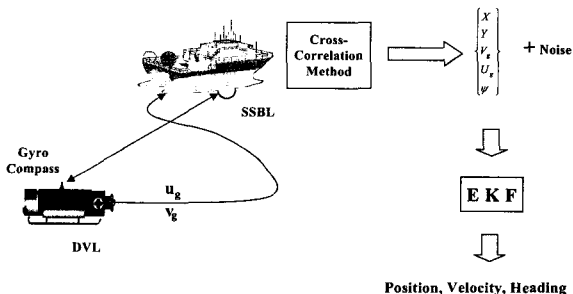
[10,11]의 출력이다. 쿼타이즈 형태의 출력 정보는 시스템을 비선형화 시키는 역할을 한다.

나. 센서융합 알고리즘

항법 센서에 따라서 다양한 항법 알고리즘을 이용하여 수중에서의 위치를 추정하고 운항제어를 하고 있으며, 일반적으로 많이 사용하고 있는 간단한 추측 항법(Dead Reckoning)^[2] 알고리즘이 개략적인 위치 추정과 항해를 위하여 사용되고 있다. 그러나 기뢰 탐색 및 제거와 같이 정확한 위치의 추적계산이 요구되는 정밀한 임무를 수행하기 위해서는 보다 정밀한 위치 예측이 이루어 질 수 있는 새로운 항법 알고리즘의 개발이 필요하다. 따라서 본 절에서는 무인기뢰 처리기(Mine Disposal Vehicle : MDV)와 같이 고도의 정밀한 위치 추적항해가 요구되는 무인잠수정에 사용하기 위하여 새로운 형태의 센서융합 알고리즘을 제안하였다.

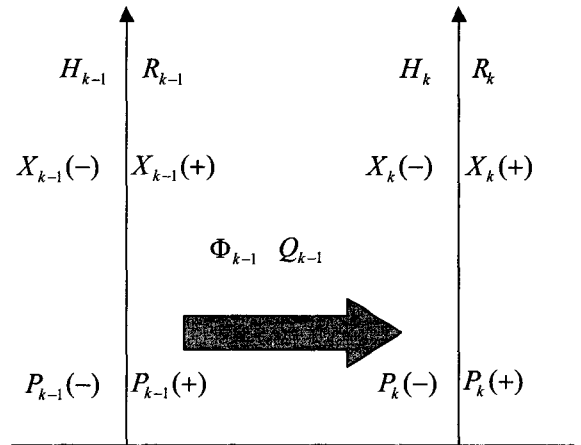
항법 알고리즘을 이용 무인잠수정의 항법 정밀도와 구성 장비의 경제성을 만족시키기 위하여 X, Y, Z 방향의 조류에 대한 상대속도 측정은 DVL이 하며, 위치와 방위 측정은 SSBL이, 그리고 무인잠수정의 운동 방향은 자이로컴퍼스를 사용하여 아래 그림과 같은 절차를 통하여 위치 정보를 산출하였다^[4-6].

항법 알고리즘 데이터 융합을 위하여 일반적으로 사용되고 있는 칼만 필터를 비선형 쿼타이즈 출력 시스템에 적용하였다. 칼만 필터는 노이즈와 결합되어 측정된 출력을 계속 반복적으로 필터링하여 시스템의 상태변수를 정밀하게 추정하는 하나의 알고리즘이다. 비선형 출력 시스템에 적용되는 EKF(Extended Kalman Filter)는 6상태변수의 시스템에 기본을 두고



[그림 10] 센서융합 및 알고리즘 구성도

알고리즘을 개발하였으며 본 알고리즘에 사용되는 부호는 다음과 같다. 수중에서 운동하는 무인잠수정의 시스템 모델 행렬은 A, 시스템 노이즈 대각 행렬은 Q, 항법 센서에 의해서 측정되는 출력모델 행렬은 C, 측정 노이즈 대각 행렬은 R, 그리고 임의의 초기화된 오차 공분산(Covariance) 행렬은 P로 각각 표시하였다. 상태벡터, $X(t)$ 가 Δt 사이에 계산되는 과정은 그림 10의 절차와 같으며 다음과 같이 설명될 수 있다.



[그림 11] Discrete Kalman Filter Timing Diagram

만약 새로운 값 $[y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6]$ 이 구성된 항법 장비들로부터 측정되어 가용될 수 있으면 이노베이션 오차 값이 계산되며, 동시에 $P_k(+)$ 가 칼만필터 이론에 따라 계산된다^[8]. 상태 벡터 $X_{k-1}(+)$ 와 $P_k(+)$ 는 R_k 와 H_k 을 계산하는데 사용되며, 칼만필터 이득 K가 구해지면, 최종적으로 $X_k(+)$ 을 계산하게 된다. 다음은 부호들의 설명이다.

- $X_{k-1}(+)$: 초기 상태 벡터
- $P_{k-1}(+)$: 초기 공분산 행렬
- Φ_{k-1} : 초기 변이 행렬 = $e^{A\Delta t}$
- Q_{k-1} : 초기 시스템 화이트 노이즈
- H_{k-1} : 초기 선형화된 출력 행렬(C_{k-1})
- R_{k-1} : 측정 노이즈
- $X_k(-)$: 진행상태 벡터

- $P_k(-)$: 진행 공분산 행렬
- H_k : Update 출력행렬
- $R_k = R_{k-1}$: 측정 노이즈
- $X_k(+)$: Update된 상태 벡터
- $P_k(+)$: Update된 공분산 행렬

칼만 필터의 기본적 이론은 추측 상태 변수 X 와 실제 무인잠수정의 상태 변수 X 사이의 오차를 최소화시킬 수 있는 값을 찾아내는 것이다. $P = E[XX^T]$ 로 계산되므로 P 는 대칭행렬이고, P 행렬의 대각선 항들은 상태변수의 평균제곱 오차를 표시하게 되며, 그 이외의 항들은 상태변수의 상호 상관관계(Cross Correlation)이 된다. 상태변수들 사이의 오차는 화이트 노이즈로 가정하면 상호 상관관계는 0이므로 P 의 대각선 항들은 측정된 상태변수와 실제 상태변수의 차이를 제공하게 된다. 따라서 P 행렬의 대각선 항들의 합을 최소화시키기 위한 K 행렬은 아래와 같이 구할 수 있으며 이 행렬을 확장 칼만 이득 이라고 부르며, 식 (4)로 계산된다^[12].

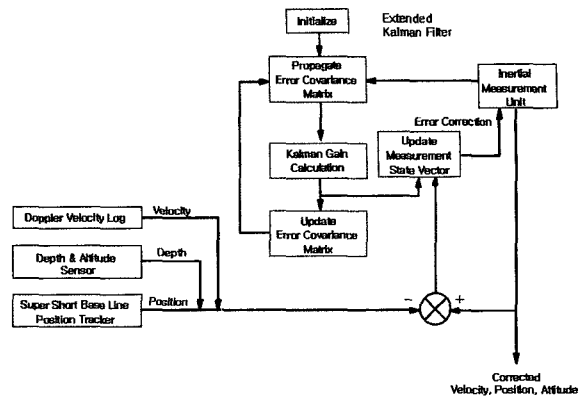
$$K_k = P_k(-) * H_k^T + [H_k P_k(-) H_k^T + R_k]^{-1} \quad (4)$$

K 를 계산하기 위하여 A , Q , C , R 그리고 P 행렬을 초기화시키며, 초기화되면 A 를 이용하여 시스템 변이 행렬 Φ 를 구할 수 있으며, Φ 는 P 행렬 계산을 위해 사용되어 진다. P 행렬은 다음과 같이 식 (5)로 구하여 진다.

$$P_k(-) = \Phi_{k-1} P_{k-1}(+) * \Phi_{k-1}^T + Q \quad (5)$$

측정값을 취하기 전 마지막으로 계산되어야 할 값은 X 벡터이다. 이 값의 계산 과정은 절대속도 v 와 시간간격 Δt 를 이용한다. 계산된 이론 값 Y 와 실제 측정된 Y 사이의 차이도 이노베이션 오차를 형성하게 된다. 칼만 이득 K 는 공분산 행렬, $P_k(-)$ 에서 $P_k(+)$ 로 이동하는 계산에 다음과 같이 사용하게 된다^[13].

$$P_k(+) = [I - K + H_k] * P_k(-) \quad (6)$$



[그림 12] 무인잠수정의 확장 칼만 필터 개념도

여기서 I 는 단위행렬이다. 만약에 $P_k(+)$ 행렬이 계산되면 최종적으로 상태 벡터가 아래와 같은 공식에 의해서 계산된다.

$$X_k(+) = X_k(-) + K * err \quad (7)$$

여기서 err 은 Innovation error이다. 상태 벡터와 오차 공분산 행렬이 새로 계산되면 다음 단계의 계산을 위하여 행렬 A , C 가 새로 계산되어 진다^[10,11]. 이와 같은 과정을 그림 12와 같이 반복적으로 수행하여 상태벡터를 추정하는 알고리즘이다.

4. 항법 알고리즘 데이터 시뮬레이션

가. 개요

제안된 알고리즘의 신뢰성을 검증하기 위하여 한국 해양연구원 선박분소에서 모의 실험한 SAUV(Semi Autonomous Underwater Vehicle)의 유체역학 계수를 사용하고 주어진 항법 장비의 오차를 적용하여 시뮬레이션을 실시하였다. 기본 항법 데이터 자료에는 시스템 오차와 측정 오차가 포함되지 않아서 현재 사용하고 있는 무인기뢰제거기의 항법장비에 따라 주어진 오차 한계를 이용한 랜덤변수를 생성하여 기본 데이터 자료에 합산하여 이론적 실측 데이터를 만들어 데이터 융합(Data Fusion)과 항법 필터 알고리즘에 사용하였다. 표 1은 현재 운용중인 항법장비의 오차

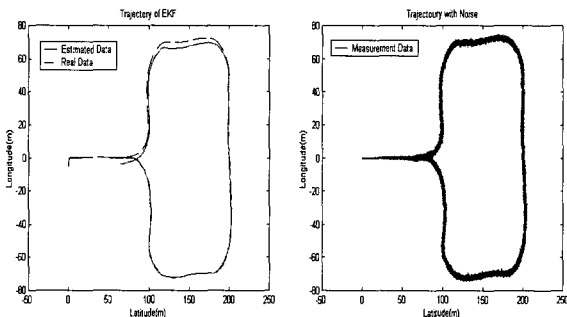
[표 1] 항법시스템의 종류와 측정오차 한계

Data	Sensor	Equipment	Error	Freq.
X	SSBL	Track Point II	±1m (±3m)	10Hz
Y	SSBL	Track Point II	±1m (±3m)	10Hz
Heading	Compass	TCM2-50	±1.5degree	10Hz
Heading_rate	Gyro	HG1700AG11	±1(rad/sec)	100Hz
ug	Doppler Log	Navigator DVL	±1% of Max	10Hz
vg	Doppler Log	Navigator DVL	±1% of Max	10Hz

한계를 나타내고 있으며 본 연구의 시뮬레이션에 사용하였다.

나. SSBL과 EKF 항적비교

표 1에서 주어진 SSBL의 오차범위를 적용하여 실측하는 좌표를 형성하였으며 형성된 좌표의 데이터를 앞 장에서 전개한 확장칼만필터(Extended Kalman Filter : EKF)에 적용하여 새로운 예측 추정치를 산출하였다. 그림 13의 왼쪽은 이론적인 항적과 항법 알고리즘 필터를 사용한 항적을 동시에 도시한 그림이며 오른쪽은 이론적인 항적에 측정 오차와 노이즈를 포함한 그림이다. 그림의 예측 항적은 측정오차를 포함한 데이터를 상호 상관관계를 이용하여 X, Y 그리고 θ 를 추정하고 다시 제안된 알고리즘(EKF)을 사용하여 추측한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 매우 빠른 시간에 기본 항적과 유사하며 최고 오차는 3m 이내로 양호한 결과를 얻을 수 있다.

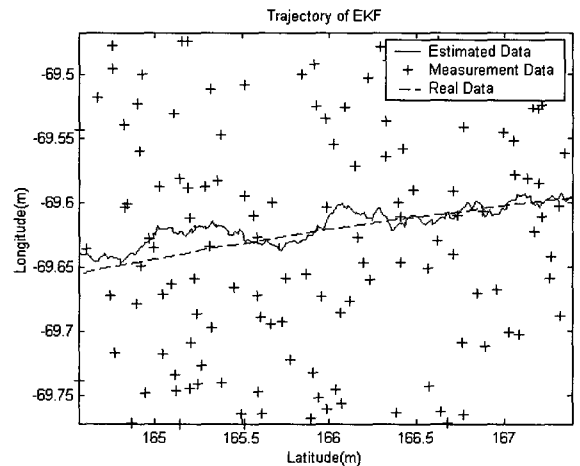


[그림 13] 기본 항적, EKF의한 항적 그리고 측정 항적

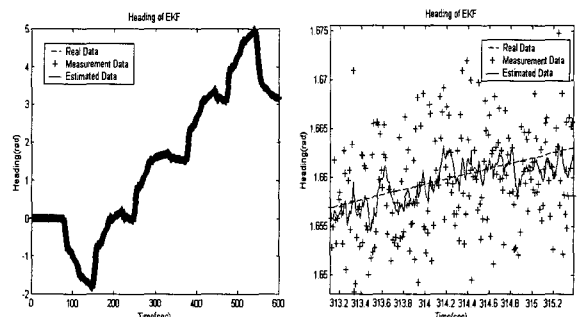
또한 그림 14는 제안된 항법 알고리즘의 항적에 대한 유연성을 보여주고 있는 그림으로 항로 제어에 이용하기에 적절이 계산된 값이다.

다. Heading과 Heading_rate 비교

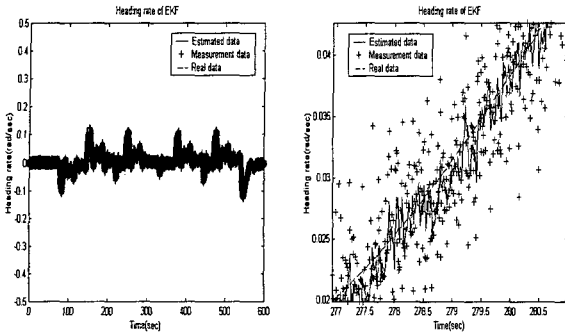
확장 칼만 필터(EKF)로부터 예측된 무인잠수정의 방위각(Heading Angle)은 그림 15에서 보여주고 있다. 그림 15에서 보는 바와 같이 측정된 방위각과 확장 칼만 필터로 계산된 값이 매우 잘 일치하고 있음을 보여주고 있으며, 특히 오른쪽 그림은 약 2.5초간 자이로컴퍼스에 의해 측정된 값을 확대한 그림으로 실측에 의해 산만하게 분산된 데이터를 제어하기 용이하며 유연성 있는 값으로 추측하고 있음을 보여주고 있다. 그림 16에서 보는바와 같이 실험에 있어서



[그림 14] EKF 알고리즘의 항적 유연성



[그림 15] 무인잠수정의 실측, 예측, 그리고 실제 움직이는 방향



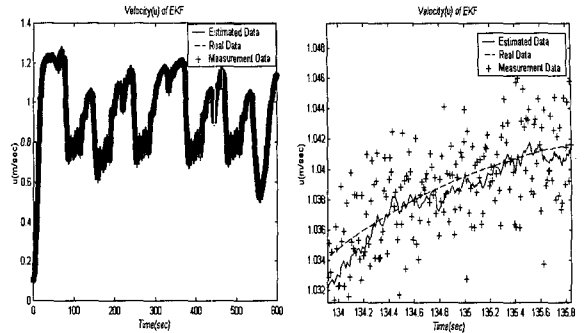
[그림 16] 무인잠수정의 실측, 예측, 그리고 실제 움직이는 방향 변화율

무인자율잠수정의 항해시 조류와 바람에 영향을 받아 무인잠수정의 방위각이 미세하면서도 빠르게 변화가 일어나고 있음을 볼 수가 있다. 그러나 자이로컴퍼스 센서로부터 측정된 값보다 EKF로부터 계산된 값이 유연성과 연속성 있어 예측 위치를 계산하는데 장점을 주고 있다.

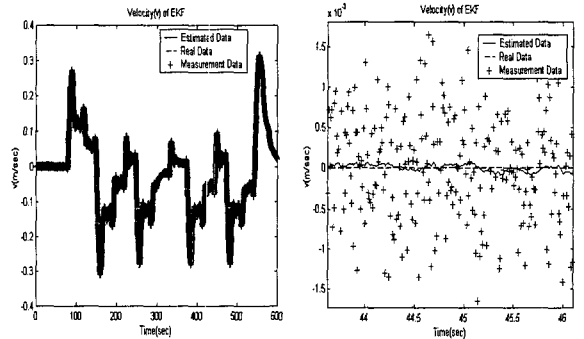
라. Doppler Velocity Log 측정치 비교

Doppler log에 의해서 측정된 실제 무인잠수정의 속도 $dot{p}_u$ 와 확장 칼만 필터(EKF)에 의해 계산된 무인잠수정의 속도가 그림 17에 비교되어 보여주고 있다. 주로 사용하고 있는 DVL은 0.1초 마다 속도를 측정할 수 있으며 오차는 최대 측정 속도의 1% 정도이다. 이 그림은 무인자율잠수정이 3Kts로 약 600초를 이동한 속도를 나타낸 것이고 오른쪽은 약 2초간의 속도를 확대한 것이다. 무인잠수정의 속도가 빠르지 않고 파도와 조류에 의한 영향을 받으므로 실측한 속도는 광범위하게 분포되어 있음을 알 수 있다. 이와 같은 측정 자료를 이용하여 확장 칼만 필터(EKF)로 계산된 속도는 Doppler log에 의해서 측정된 속도의 평균값을 계산해 놓은 것과 같은 결과를 그림 17과 18에서와 같이 얻을 수 있었다. 확장 칼만 필터를 사용하여 선세를 융합시키면 속도의 성분도 유연성을 가지되며 운항제어 사용할 수 있는 자료를 산출할 수가 있음을 보여주고 있다.

따라서 무인잠수정의 이론 데이터를 이용한 알고리즘의 신뢰성 검증은 매우 양호한 결과를 보여주고 있으며, 실용성 있는 무인잠수정의 항법 알고리즘으로



[그림 17] 무인잠수정의 실측, 예측, 그리고 실제 움직이는 X의 방향 속도



[그림 18] 무인잠수정의 실측, 예측, 그리고 실제 움직이는 X의 방향 속도

생각할 수 있다. 특히 기뢰제거기의 항법 시스템을 구성하고 있고 무인기뢰제거기의 요구되는 정확도를 만족하므로 MDV 항법 시스템 및 알고리즘으로 적합함을 알 수가 있다.

5. 맺음말 및 제언

본 연구에서는 무인잠수정의 수중항해를 위한 항법 센서 구성 및 데이터 융합 알고리즘을 개발하는데 목적이 있으며 이와 같은 목적을 달성하기 위하여 사용하고 있는 항법 시스템과 무인잠수정에 적합한 항법 센서들을 적절히 구성하였다. 구성된 센서로부터 얻은 D데이터의 비동시성(Asynchronous)과 쿼타이즈의 문제를 해결하기 위하여 EKF를 적용하였다. 구성된 항법 센서는 무인기뢰제거기에서 운용중인 장비들

로 구성하여 SSBL만을 사용하고 있는 항법 시스템보다 성능을 향상시킬 수 있었다. 한국해양연구소 선박연구센터 SAUV의 이론적 데이터를 이용한 시뮬레이션을 통해 제안한 센서 및 데이터 융합 알고리즘과 EKF의 신뢰도를 확인하였다. 이상의 결과를 바탕으로 제안된 알고리즘을 수중에서 정밀작업이 필요한 실제 무인잠수정에 적용하여 사용한다면 현재 사용 중인 무인잠수정의 항법오차를 줄여 보다 정확한 항법제어 및 수중작업이 이루어질 것으로 기대된다. 차후의 연구과제로는 본 연구에서 개발된 항법구성과 알고리즘을 실 해역에서 검증이 요구된다. 특히 수심이 200m 이상의 수중에서 본 알고리즘이 성능을 발휘할 수 있는지를 검증하는 것은 무인잠수정의 요구 성능을 고려할 때 매우 중요한 요소이다.

참 고 문 헌

- [1] Gay Robot, "Pluto Plus Systems", Pluto Plus MDV, Technical Documentation, Vol. 1, 2, 3, 4, 5, October 1990.
- [2] Jerome Vaganay, James G. Bellingham and John J. Leonard, "Comparison of Fix Computation and Filtering for Autonomous Acoustic Navigation", International Journal Systems Science, Vol. 29, No. 10, 1998.
- [3] X.Yun, E. R. Bachmann, R. B. McGhee, A. J. Healey, "Testing and Evaluation of an Integrated GPS/INS System for Small AUV Navigation(SANS)", AUSI, Sept. 7-10, 1997.
- [4] Opderbecke, J., Durieu, C., "Vehicle Localisation in a Poorly Known Environment", IEEE, 1994.
- [5] Agoros, C., "U.S Navy Unmanned Undersea Vehicle Navigation", IEEE, 1994.
- [6] Gordon, R. L., "Acoustic Doppler Current Profilers; Principles of Operation; A Practical Primer", RD Instruments, January 1996.
- [7] McClarin, D. W., "Discrete Asynchronous Kalman Filtering of Navigation Data for the Phoenix Autonomous Underwater Vehicle", M. S. Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, CA. 93943, March, 1996.
- [8] Lee, J., Gelormino. M. S., and Morari, M., "Model Predictive Control of Multi-Rate Sampled-Data Systems: A State Space Approach", International Journal of Control, Vol. I pp.153~191 1992.
- [9] Joono Sur, "State Observer for Linear Systems with Quantized Outputs", Ph.D. thesis, University of California, Santa Barbara, CA, August 1996.
- [10] Joono Sur and Anthony J. Healey, "A Multi-Sensor Asynchronous Projection Algorithm Filter(PAF) for AUV Navigation", Tenth International Symposium on UUST, AUSI, September 1997.
- [11] Joono Sur and Brad E. Paden, "State Observer for Linear Time-Invariant Systems with Quantized Outputs", ASME Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control, Vol. 120, No. 3, September 1998.
- [12] Maybeck, P. S., "The Kalman Filter; An Introduction to Concepts", Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology, Monterey, California, June, 1996.
- [13] Gelb, A., "Applied Optimal Estimation", Cambridge, Massachusetts, September, 1974.