

## 퍼지추론을 이용한 무인잠수정의 하이브리드 항법 시스템

이 판 목\* · 이 중 무\* · 정 성 욱\*\*

(97년 3월 5일 접수)

### A Hybrid Navigation System of Underwater Vehicles Using Fuzzy Inference Algorithm

Pan-Mook Lee\* · Chong-Moo Lee\* · Seong-Wook Cheong\*\*

**Key Words** : Sensor Fusion(센서 퓨전), AHFRS(Attitude, Heading and Flow Reference System), SSBL(Super Short Baseline), Failure Detection(오류감지), Fuzzy Inference Logic(퍼지추론)

#### Abstract

This paper presents a hybrid navigation system for AUV to locate its position precisely in rough sea. The tracking system is composed of various sensors such as an inclinometer, a tri-axis magnetometer, a flow meter, and a super short baseline(SSBL) acoustic position tracking system. Due to the inaccuracy of the attitude sensors, the heading sensor and the flowmeter, the predicted position slowly drifts and the estimation error of position becomes larger. On the other hand, the measured position is liable to change abruptly due to the corrupted data of the SSBL system in the case of low signal to noise ratio or large ship motions. By introducing a sensor fusion technique with the position data of the SSBL system and those of the attitude heading flowmeter reference system (AHFRS), the hybrid navigation system updates the three-dimensional position robustly. A Kalman filter algorithm is derived on the basis of the error models for the flowmeter dynamics with the use of the external measurement from the SSBL. A failure detection algorithm decides the confidence degree of external measurement signals by using a fuzzy inference. Simulation is included to demonstrate the validity of the hybrid navigation system.

#### 1. 서 언

수중에서 자율항주하는 AUV가 정밀한 항해를

위해서는 한 개 이상의 관성항법 시스템(INS: Inertial Navigation System), GPS(Global Positioning System) 수신기, 유속계, 수심계, 선수각

\* Korea Institute of Machinery and Materials

\*\* Samsung Heavy Industry

센서 및 수중 초음파 측위 장치 등과 같은 항해보조 센서를 갖추는 것이 일반적이다. INS 시스템과 GPS를 기능적으로 통합함으로써, 이동 물체의 항해성능을 개선시킬 수 있으며 이에 대한 연구가 항공산업분야를 중심으로 발전해오고 있다<sup>1)~3)</sup>.

AUV는 수중에서의 운동이 크지 않고 장시간 심해에서 작업을 수행해야 하는 반면에, GPS 수신 신호는 수상에서만 유용하고 심해로 전파되지 않으므로, 비행기, 자동차 또는 선박과 같은 자유 공간에 존재하는 시스템의 항법시스템 보다 성능이 뛰어나지 않으면 항법에 직접 사용하는 것에 한계가 있다. Kwak<sup>5)</sup>은 소형의 AUV에 대하여 GPS/INS가 통합된 항법에 관한 실험 연구를 수행하였으나, 관성 항법 시스템에 관한 연구라기 보다는 운동계측 시스템에 가까운 것이었다.

Bennamoun<sup>4)</sup>은 AUV의 항해를 위한 시스템으로써 GPS/INS/SONAR이 통합된 항법 시스템에 관하여 연구를 수행한 바 있다. 이 시스템은 잠수정이 수상에 있을 경우에는 INS와 GPS를 이용하여 위치를 추적하고, 수중에 있을 경우에는 INS와 SONAR를 이용하여 수중 잠수정의 위치를 추적하는 시스템으로서, 위치 추적 성능이 개선되고 오차가 감소하는 결과를 보였다.

본 연구는 저급한 성능의 자세 계측 시스템, 방위각 센서, 유속 계측 센서 및 저급의 소나 시스템으로 구성된 다중 센서 시스템을 이용하여 열악한 해상에서 작업하는 잠수정의 위치를 보다 정확하게 추적하기 위한 하이브리드 항법 시스템에 관한 것으로서, 연구의 목적은 센서 융합 기법 및 센서 고장 검출을 포함하는 잠수정의 위치 추적 알고리즘을 개발하는 것에 있다.

## 2. 계측 센서의 특성 및 모델링

### 2.1 자세 선수각 유속 계측시스템(AHFRS : attitude, heading & flow reference system)

스트랩 다운형 관성계측 유니트(Strap-Down Inertial Measuring Unit, SD-IMU)는 일반적으로 3 개의 자이로 및 3 개의 가속도 센서를 이용하여 운항선체의 6자유도 자세 및 운동을 계측하고, 이

를 선체 고정 좌표계로부터 항법 좌표계로 변환하고 적분하여 위치를 계산하게 된다. 장착된 IMU가 고정밀도를 갖는다면, 추측항법(Dead Reckoning)을 이용하여 자유 공간에서 항해하는 선체의 위치를 추정할 수 있으며, 간헐적으로 외부로 부터 위치보정 신호를 수신하여 오차가 누적되는 것을 방지할 수 있다. 그러나, 본 연구에서는 비행기에서 사용되는 것과 같은 수준의 IMU가 아닌 저급한 관성 센서를 탑재한 수중 무인잠수정의 수중 위치를 추적하는 시스템의 성능을 개선하고자 한다. 이를 위하여 여러 가지의 센서를 보조 시스템으로 하고 이들을 융합하는 방법을 모색하고자 한다. AHFRS는 선체의 운동을 계측하는 센서 시스템으로 관성계측센서, 마그네틱 센서 및 유속계 등의 세 종류 센서로 구성되었다. 관성센서에 내장된 자이로는 진동형으로 정적인 오차가 주변상황 및 작동조건에 따라 변동하게 되어 각속도 신호의 저주파수 성분이 부정확하다. 이를 적분하여 위치를 구하게 되면 시간이 지남에 따라 발산하는 결과를 나타낸다. 따라서, 이 IMU는 관성센서라기 보다는 잠수정의 운동 및 자세계측을 위한 센서 역할 만이 가능하다. 저주파수 운동 성분에 대하여는 중력에 의한 각 축의 가속도 센서 신호값 변화를 저역통과 필터링하여 이로부터 잠수정의 롤(Roll) 및 피치(Pitch) 자세를 계측하고, 고주파수의 운동에 대해서는 자이로 신호와 가속도 신호를 좌표변환하여 운동을 얻을 수 있다. 선수각 방향(Yaw) 가속도 센서의 드리프트는 마그네틱 센서를 이용하여 보정할 수 있다.

본 연구에서는 자세 센서 및 선수각 센서는 고장나지 않고 다만 정적인 계측 오차와 랜덤한 백색 Gaussian 노이즈를 받는다고 가정하였다. IMU의 모델링을 다음식과 같이 정리하였다.

$$\phi_{attitude} = K_{\phi}\phi_{real} + \Delta\phi_{offset} + \Delta\phi_{noise} \quad (1)$$

여기서,  $\phi_{attitude}$ 는 몸체 좌표계에서의 각 축의 계측된 회전각도이며  $\phi_{real}$ 은 선체의 실제 자세각도이다.  $K_{\phi}$ ,  $\Delta\phi_{offset}$  및  $\Delta\phi_{noise}$ 는 각각 IMU의 계인, 오프셋 오차 및 계측 노이즈를 나타내며, 설치 오차 또는 센서의 드리프트 특성에 따라 좌우된다.

자율 무인 잠수정(AUV)은 일반적으로 전진방향으로 이동한다. AUV는 전진방향의 속도가 지배적이므로 이 성분만을 계측하는 기계식 또는 도플러 방식의 유속 계측 시스템을 고려한다. 유속계는 잠수정의 절대 속도를 계측하는 것이 아니고 유체와의 상대속도를 계측하게 되며 또한 선수각의 변화에 따른 유체의 이동방향의 변화에 신속하게 대응하지 못한다. 잠수정의 운동 속도가 조류속도보다 크다고 가정을 하면, 유속계는 다음과 같이 모델링될 수 있다.

$$V_{fm} = K_V Y_{real} + \Delta V_{offset} + \Delta V_{noise} \quad (2)$$

여기서,  $V_{fm}$ 는 유속계로 계측된 전진방향 속도이며  $V_{real}$ 는 잠수정의 절대 속도이다.  $K_V$ 는 유속계의 계인이며  $\Delta V_{offset}$ 는 조류와 계측센서의 정적인 오프셋에 기인하는 오차 성분이다. 선체의 운동 속도를 정확히 계측하기 위해서는 조류의 속도를 보상해야 하며, 본 연구에서는 가변 비득을 이용하여 보정한다. 이러한 AHFRS 시스템과 연계되어 수중 초음파 계측 시스템이 칼만 필터를 위한 외부 계측 신호를 제공하게 된다.

### 2.2 초음파 위치 추적 시스템 (Super Short Baseline, SSBL)

Fig. 1은 SSBL 시스템을 이용한 무인 잠수정의 위치 추적을 수행하는 전체 시스템의 개념도를 나타낸 그림이다. 수상 지원선에 장착된 트랜스듀서를 통하여 초음파(Ping)을 발사하고 수중 잠수정으로부터의 응답신호를 수신하고, 반면에 AUV에 장착된 트랜스폰더는 ping을 감지하고 지원선에 응답하는 역할을 수행한다. SSBL은 센서 어레이로 구성된 트랜스듀서를 이용하여 수신신호의 위상차를 구해서 잠수정의 거리, 방향각 및 경사각을 계측하는 초음파 장비이다. 이 장비는 수신신호의 위상차를 이용하여 위치를 계측하기 때문에, 주변환경 및 작업조건에 따른 노이즈, 선체 운동에 의한 수신 신호의 교란 및 보정 오차, 수중 초음파의 다중 경로에 의한 교란 등에 기인하는 외란에 민감하다. 교란신호에 의해서 부정확한 계측이 이루어지는 경우에는 고장이 발생하며, 이러한 신호는 위치

추적을 위한 신호처리에서 제거하는 것이 바람직하다. 센서 고장이 발생했는지 아닌지를 판정하는 것은 AUV의 작업 거리 및 해상 환경에 따라 크게 좌우하므로 이를 일정하게 정하는 것은 용이하지 않으며 시스템이 발산할 가능성이 있다. 이러한 센서 고장은 실제 위치로부터의 분산 값에 따라 소프트(Soft Failure) 및 하드 센서 고장(Hard Failure)로 구분한다. 통상 소프트 센서 고장은 작업 거리가 멀어지거나 주변 잡음의 레벨이 증가할 경우에 발생하며, 하드 센서 고장은 선체 운동의 보정이 부정확하거나 수신신호의 신호잡음비가 낮을 경우에 발생한다. 이러한 계측 특성을 고려하여 측정된 SSBL 신호의 정확성을 판정하기 위하여 측정 모델을 다음과 같이 정하였다.

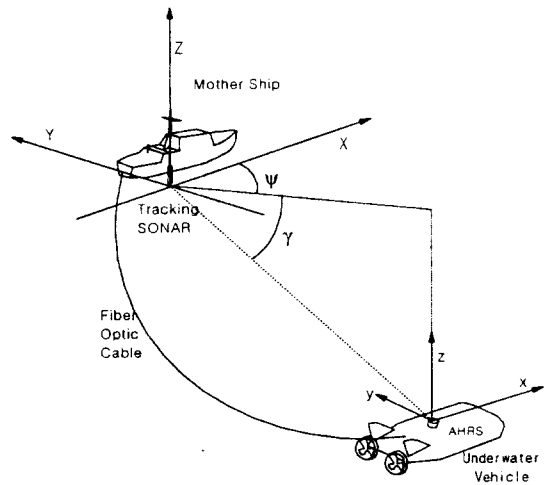


Fig. 1 The hybrid navigation system for an underwater vehicle equipped with the SSBL and AHFRS

$$P_{ssbl} = P_{real} + \Delta P_{ssbl} + P_{\delta} \delta(t - \tau) \quad (3)$$

여기서,  $P_{ssbl}$ 은 항법 좌표계에서 계측된 잠수정의 상대 위치를 나타내며  $P_{real}$ 은 실제의 AUV의 상대 위치를 나타낸다.  $\Delta P_{ssbl}$ 는 소프트 센서 고장을 나타내고,  $P_{\delta} \delta(t - \tau)$ 는  $t = \tau$  시간에 발생한 하드 센서 고장을 나타낸다. 한편, 작업영역에 따라 경사각 계측에 오차가 심하게 발생할 수 있으나 압력계를 이용하여 수심을 보정하는 것이 가능하다.

### 3. 무인잠수정의 항법필터 알고리즘

#### 3.1 퍼지추론을 이용한 칼만필터 및 센서고장 복구

다중 센서 시스템에 있어서 각각의 센서를 융합하는 방법이 대단히 중요하다. 칼만 필터는 센서의 항법 신호를 필터링하는 일반적인 방법으로서, 하나의 항법 센서를 주 센서로 정하고 나머지를 리던던트 시스템으로 정하거나 보조센서로 처리하여 주 센서의 오차를 보상하는 형식을 취한다<sup>8)</sup>. 항법 시스템을 위한 칼만 필터에 있어서, 상태변수의 추정은 외부 측정 신호와 시스템 모델을 통하여 전과된다. 주 센서에 대한 모델이 적절히 설계되고 다중 센서의 계측 특성이 알려져 있다면, 이를 근간으로 칼만 필터를 사용하여 최적 추정치를 구할 수 있다. 그러나, 외부 계측 신호가 하드 센서 고장과 같은 큰 노이즈 성분을 포함하게 되었을 경우에, 이 칼만 필터는 오차가 크게 내포된 추정치를 만들어 낸다. 따라서, 다중 센서 신호중에서 고장 신호를 제거하는 별도의 필터가 필요하다.

본 연구에서는 퍼지 추론법을 적용하여 고장 감지를 구현하였다. 사용된 무인 잠수정의 항법 시스템은 AHFRS로 구성된 추측 항법 시스템과 외부 계측 입력인 SSBL 시스템으로 구성된다. 수중에서의 잠수정의 운동 변화 속도가 느리고 환경이 급격하게 변화하지 않으므로, AHFRS는 잠수정의 경사각도, 선수각도 및 유속계의 상대 속도 신호를 이용하여 짧은 시간 동안에 추측 항법으로 잠수정의 위치 및 선속을 산출한다. 그러나, 유속계는 계측 자체에 오차가 포함되며, 또한, 유체의 상대 속도만을 계측하게 되므로 해조류의 속도 및 방향에 영향을 받게 되므로, 이를 적분하여 위치를 추정하는 방법은 오차가 누적되어 발산하게 된다. 따라서, AHFRS 시스템 단독으로 추측 항법 시스템을 구현하는 것은 불가능하며 위치 오차를 보정해 줄 수 있는 외부 계측신호를 필요로 하며, 본 연구에서는 이를 위하여 SSBL 시스템을 사용하였다.

SSBL은 작업 조건에 따라 쉽게 오류 신호를 발생 시키므로, 제안된 항법 시스템은 고장 감지를 위한 필터 및 고장 조치를 취할 수 있는 알고리즘

이 필요하다. 이를 위하여 다음과 같은 점을 고려하였다: 고장 신호의 가관측성, 고장 감지를 위한 소요시간, 하드 센서 고장과 소프트 센서 고장에 대한 민감도, 고장 신호의 제거 성능, 및 고장 복구 기능. 이와 같은 기준에 근거하여 퍼지 추론에 의한 감지법을 구현하였다. 퍼지 추론법은 시스템의 차수, 비선형성, 시스템의 시변특성에 무관하며, 고장 정도를 용이하게 관정할 수 있다. SSBL에 하드 센서 고장이 일어났을 경우에 칼만 필터는 외부 계측 신호를 완전히 무시하고 AHFRS를 이용하여 추측 항해를 한다. 소프트 센서 고장이 일어났을 경우에, 퍼지 추론법을 이용하여 SSBL 신호와 AHFRS에 의한 추측 신호에 대해 가중치를 갖고 융합하고 칼만필터의 외부 계측 신호로 사용하는 구조로 시스템이 작동된다. 이러한 방법으로 칼만 필터는 두 항법 시스템 사이에서 연속적으로 위치 추정을 수행한다.

#### 3.2 퍼지-칼만 필터 알고리즘의 구조

간접 순방향계환 칼만 필터 알고리즘(Indirect Feedforward Kalman Filter)을 이용하여 AUV의 항해를 위한 필터를 구현하였다. 선체 운동 및 위치 추정을 위한 계측 모델 (1) 및 (2) 는 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$\begin{aligned} (x_{ahf} \ y_{ahf} \ z_{ahf})^T &= (x_{true} + \delta x \ y_{true} + \delta y \ z_{true} + \delta z)^T \\ V_{fm} &= V_{true} + \delta V \\ \psi_{ahf} &= \psi_{ahf} + \delta \psi \\ \gamma_{fm} &= \gamma_{true} + \delta \gamma \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,  $\psi_{ahf}$  및  $\gamma_{ahf}$ 는 각각 측정된 잠수정의 선수각 및 퍼치 경사각을 나타낸다. 잠수정의 실제 속도에 의한 3차원 운동은 선체 고정 좌표계로부터 항법 좌표계로 변환하고, 식 (4)를 이용하여 유속계로 계측된 속도항으로 근사적으로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_{true} &= V_{true} \sin \psi_{true} \cos \gamma_{true} \\ &\cong V_{fm} \sin \psi_{ahf} \cos \gamma_{ahf} - V_{fm} \delta \psi \cos \psi_{ahf} \cos \gamma_{ahf} \\ &\quad - \delta V \sin \psi_{ahf} \cos \gamma_{ahf} + V_{fm} \delta \gamma \cos \psi_{ahf} \sin \gamma_{ahf} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \dot{y}_{true} &= V_{true} \cos \psi_{true} \cos \gamma_{true} \\ &\cong V_{fm} \cos \psi_{ahf} \cos \gamma_{ahf} + V_{im} \delta \psi \sin \psi_{ahf} \cos \gamma_{ahf} \\ &\quad - \delta V \cos \psi_{ahf} \cos \gamma_{ahf} + V_{im} \delta \gamma \cos \psi_{ahf} \sin \gamma_{ahf} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \dot{z}_{true} &= V_{true} \sin \gamma_{true} \\ &\cong V_{im} \sin \gamma_{ahf} - \delta V \sin \gamma_{ahf} + V_{im} \delta \gamma \cos \gamma_{ahf} \end{aligned} \quad (7)$$

측정된 유속의 각방향의 속도성분을 항법좌표계의 x, y 및 z 방향으로 나타내면  $u_{fm} = V_{fm} \cos \psi_{ahf} \cos \gamma_{ahf}$ ,  $v_{fm} = V_{fm} \sin \psi_{ahf} \cos \gamma_{ahf}$  및  $w_{fm} = V_{im} \sin \gamma_{ahf}$  으로 나타내어 질 수 있으며,  $\delta \dot{x}$ ,  $\delta \dot{y}$  및  $\delta \dot{z}$  를 각각  $u_{true} - u_{fm}$ ,  $v_{true} - v_{fm}$  및  $w_{true} - w_{fm}$  으로 나타내므로써, 식 (4)는 다음으로 정리된다.

$$\begin{aligned} \delta \dot{x} &= -v_{fm} \delta \psi - \delta V \sin \psi_{ahf} \cos \gamma_{ahf} \\ &\quad + w_{fm} \sin \psi_{ahf} \delta \gamma \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \delta \dot{y} &= u_{fm} \delta \psi - \delta V \cos \psi_{ahf} \cos \gamma_{ahf} \\ &\quad + w_{fm} \cos \psi_{ahf} \delta \gamma \end{aligned} \quad (9)$$

$$\delta \dot{z} = -\delta V \sin \gamma_{ahf} - \delta \gamma \sqrt{u_{fm}^2 + v_{fm}^2} \quad (10)$$

$$\delta \dot{V} = -K_v \delta V \quad (11)$$

$$\delta \dot{\psi} = -K_\psi \delta \psi \quad (12)$$

$$\delta \dot{\gamma} = -K_\gamma \delta \gamma \quad (13)$$

이 식을 이용하고, AHFRS의 측정오차를 시스템의 교란 성분으로 고려하여 칼만 필터 설계를 위한 AHFRS에 대한 오차 모델을 정의할 수 있다. 여기서, 외부 계측 신호는 SSBL 신호와 추측된 위치 신호와의 차이로 주어진다.

$$\dot{X} = F X + \xi \quad (14)$$

$$Z = H X + \eta \quad (15)$$

여기서,

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -\sin \psi_{ahf} \cos \gamma_{ahf} & -v_{fm} & \omega_{im} \sin \psi_{ahf} \\ 0 & 0 & 0 & -\cos \psi_{ahf} \cos \gamma_{ahf} & -u_{fm} & \omega_{im} \cos \psi_{ahf} \\ 0 & 0 & 0 & -\sin \psi_{ahf} & 0 & -\sqrt{u_{im}^2 + v_{im}^2} \\ 0 & 0 & 0 & -K_v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -K_\psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_\gamma \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$X = \{\delta x \ \delta y \ \delta z \ \delta V \ \delta \psi \ \delta \gamma\}^T$$

$$\xi = \{\xi_{\delta x} \ \xi_{\delta y} \ \xi_{\delta z} \ \xi_{\delta V} \ \xi_{\delta \psi} \ \xi_{\delta \gamma}\}^T$$

$\delta x$ ,  $\delta y$ , 및  $\delta z$ 는 항법 좌표계에 있어서 잠수정의 위치 오차를 나타내며,  $\xi$ 는 AHFRS 변수 각각에 대한 시스템 교란성분을 나타낸다. 여기서, 시스템 교란과 계측 노이즈  $\eta$ 는 서로 통계적으로 독립적이며 백색 Gaussian 잡음이고, 공분산 행렬이 다음과 같이 주어진다고 가정한다.

$$E[\xi(t)] = 0, \quad E[\xi(t)\xi(t+)] = Q(t)\delta(t-), \quad (16)$$

$$E[\eta(t)] = 0, \quad E[\eta(t)\eta(t+)] = R(t)\delta(t-)$$

계측 센서에 고장이 없을 경우에는 일반적인 칼만 필터 알고리즘이 다음과 같은 상태변수의 최적 추정식으로 주어진다.

$$\bar{x}(t_{k+1}) = \Phi(t_{k+1}, t_k) \hat{x}(t_k) \quad (17)$$

$$\bar{P}(t_{k+1}) = \Phi(t_{k+1}, t_k) \bar{P}(t_k) \Phi^T(t_{k+1}, t_k) + Q(t_k) \quad (18)$$

$$K(t_{k+1}) = \bar{P}(t_{k+1}) H^T(t_{k+1}) [H(t_{k+1}) \cdot \bar{P}(t_{k+1}) H^T(t_{k+1}) + R(t_{k+1})]^{-1} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \hat{x}(t_{k+1}) &= \bar{x}(t_{k+1}) + K(t_{k+1}) \\ &\quad [z(t_{k+1}) - H(t_{k+1}) \bar{x}(t_{k+1})] \end{aligned} \quad (20)$$

$$\hat{P}(t_{k+1}) = [I - K(t_{k+1}) H(t_{k+1})] \bar{P}(t_{k+1}) \quad (21)$$

여기서,

$\bar{x}(t_{k+1})$ : prior state estimation

$\hat{x}(t_{k+1})$ : posterior state estimation

$\bar{P}(t_{k+1})$ : prior variance estimation

$\hat{P}(t_{k+1})$ : posterior variance estimation

$\Phi(t_{k+1}, t_k)$  천이 행렬 ( $= \exp^{F(t_k)(t_{k+1}-t_k)}$ )

$\hat{x}(0) = x(0)$  및  $\hat{P}(0) = P(0)$

소프트 센서 고장인 경우에 칼만 필터는 고장의 정도에 따라 가중치를 조정하여 외부 계측 신호와

예측 위치를 융합한다. 이에 대한 신호의 흐름에 대한 개념도가 Fig. 2에 나타나 있다. 센서 고장 검출을 위한 퍼지 추론의 입력 변수로서 속도 성분  $\delta \bar{V}$ 와 변위 성분  $\alpha$ 를 다음과 같이 정의하였다.

$$\delta \bar{V} = | \bar{V}_{fm}(t+T) - \bar{V}_{ssbl}(t+T) | \quad (22)$$

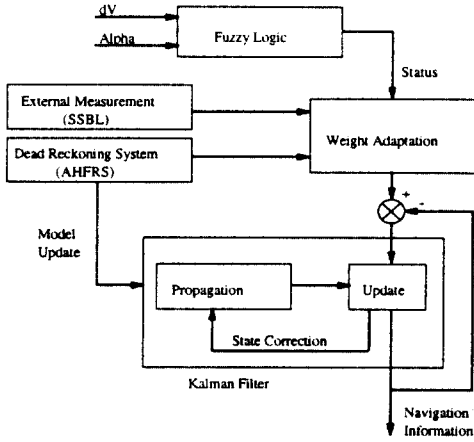


Fig 2. Schematic diagram of the hybrid navigation system

$$\alpha = \sqrt{\frac{(x_{ssbl}(t+T) - V_{fuse}(t) T \cos \psi(t) \cos \gamma(t))^2}{+(y_{ssbl}(t+T) - V_{fuse}(t) T \sin \psi(t) \cos \gamma(t))^2} + \frac{(z_{ssbl}(t+T) - V_{fuse}(t) T \sin \gamma(t))^2}{}} \quad (23)$$

여기서,

T : SSBL 샘플링 간격

$\bar{V}_{fm}(t+T)$  : 시간간격  $[t_k, t_{k+1}]$ 에서 측정된 전진방향 평균속도

$\bar{V}_{ssbl}(t+T)$  : SSBL로부터 산출되는 가상의 전진속도

$V_{fuse}(t)$  : 필터를 통하여 추정된 잠수정의 속도

센서 고장의 정도가 퍼지 추론을 기초로 하여 결정된다. 앞절에서 언급한 바와 같이, 수중에서 운항하는 무인잠수정의 운동 특성의 변화가 느리므로, 센서 고장이 발생하는 동안에는 AHFRS의 신호를 이용하여 추측 항해하고 센서 고장이 회복

되었다고 판정되면 다시 정상적인 위치 추정 작업을 수행한다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 AHFRS와 SSBL의 위치 신호가 센서 고장 정도에 따라 산출되는 가중합수에 비례하여 더해지는 융합과정을 거친다. 센서 고장 정도가 증가하면, 외부 측정의 신뢰도를 낮추고 AHFRS에 대한 가중합수를 높게 된다.

#### 4. 위치추적 시뮬레이션 및 결과 고찰

본 연구에서 제안된 무인 잠수정의 위치추적을 위한 고장 감지 및 칼만 필터 알고리즘의 타당성을 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. 시뮬레이션은 계산의 편의를 위하여 2차원 평면 운동에 국한 시켰다.

무인잠수정의 수중 운동을 만들기 위하여 전진 방향, 측방향 및 회전방향 각각에 대해 선체 운동을 2계 미분방정식으로 나타내었다. 수중 물수체의 항력 계수는 일반적으로 속도에 좌우되며 선체의 운동과 커플링되어 있다<sup>9), 10)</sup>. 본 연구에서는 AUV의 위치 추적에 대한 성능을 시험하는 것이 목적이므로 시스템의 제계수를 정상상태의 일정한 상수로 고정하였고 각각의 운동이 디커플링되었다고 정의하여 운동 신호 생성을 간소화시켰다. 시뮬레이션에 사용된 데이터가 Table 1에 주어져 있다. 해상 조건은 해조류가 존재하는 상황을 상정하였다. 조류가 0.5 m/sec의 속도로 항법 좌표계의 y축에 대하여 150도 방향에서 흘러들어와 -30도 방향으로 지나가는 조건에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 잠수정의 초기 속도는 양의 y축 방향으로 2.0 m/sec로 이동하는 조건이며 초기 위치는 모선으로 부터 (170, 0)인 위치에 있다. Table 2에 주어진 바와 같이 시간  $t=0$  순간 이후에 전진 방향으로 40 N 와 1.92 N·m의 외력과 모멘트를 받기 시작한다. AHFRS는 시정수가 1인 1계 지연 필터로 모델링되었다.

Fig. 3은 250초 동안의 무인잠수정의 운동 결과를 나타내는 것으로, 굵은 실선은 미분방정식에 의해 얻어진 잠수정의 실제 운동 궤적이며, 가는 점선은 AHFRS만을 이용한 추측항법의 결과를 도시하였다. 그림에서 'o'와 'x' 표는 시작점과 종료

점의 위치를 나타낸다. AHFRS의 위치 오차는 AHFRS의 센서 오차에 기인하나 주로 유속계의 오차에 의해 발생하였다. 이 결과로부터, 외부 계측 신호의 도움 없이 AHFRS 단독으로는 AUV의 항법 시스템으로 사용할 수 없음을 알 수 있다.

Table 1 Vehicle model and test conditions for simulation

Item	Value	Unit
Mass	300	kg
Added mass coefficient	1.0	
Yaw moment of Inertia	390.63	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
Damping coefficient (Forward direction)	26.7	$\text{N} \cdot \text{sec}/\text{m}$
Damping coefficient (Lateral direction)	133.5	$\text{N} \cdot \text{sec}/\text{m}$
Damping coefficient (Yaw direction)	38.2	$\text{N} \cdot \text{sec}$
Thrust force	40.0	N
Yaw moment	1.92	$\text{N} \cdot \text{m}$
Current speed	0.5	$\text{m}/\text{sec}$
Direction of current	150	degree

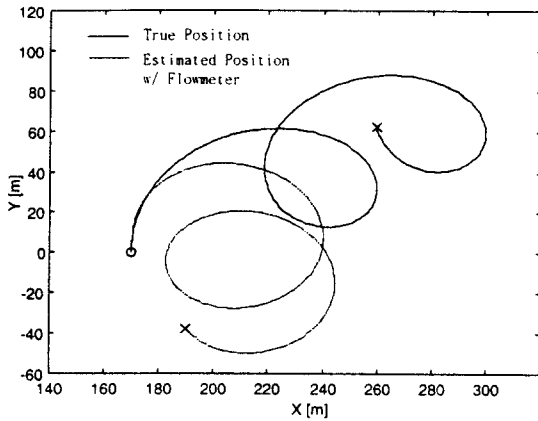


Fig. 3 The simulated tracks of the vehicle and the estimated tracks with the use of AHFRS

SSBL의 계측신호는 ORE 사의 SSBL형태의 LXT 위치추적 시스템<sup>11)</sup>을 기초하여 계측 신호를 생성하였다. 거리 계측 오차는 1.0m, 각도 오차는

0.5 도의 정확도를 갖으며 절대 크기는 거리에 따라 비례하게 된다. 이러한 정상상태의 계측신호에 두 종류의 센서 고장 신호를 포함시켜 실제의 위치 계측 신호를 만들었다. 하드 센서 고장 신호를 매 20 초 마다 50 m 크기로 랜덤하게 발생하며, 소프트 센서 고장 신호가 3번의 시간 간격 [50 70], [130 150] 및 [200 220] 사이에서 랜덤 신호의 편차가 증가하는 현상으로 가정하였다. 소프트 센서 고장은 각도 오차가 증대되는 것으로 가정하였고, 각도 오차 크기는 각각 표준편차로 5.0도, 2.0도 및 5.0도를 갖는 것으로 생성하였다.

본 연구에서는 이러한 고장 진단의 필요성을 예시하기 위하여 주어진 계측 신호에 대하여 고장을 감지하지 않는 일반적인 칼만 필터법에 의한 위치 추정을 시뮬레이션하였다. Fig. 4는 이 때의 추정

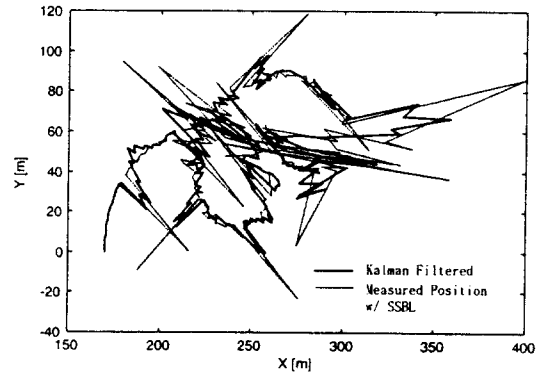


Fig. 4 The measured and the filtered tracks of the vehicle with SSBL

된 위치 신호를 xy 평면에 나타낸 그림으로, 점선은 SSBL의 계측 신호, 실선은 추정된 위치 정보이다. Fig. 5는 AUV의 x 및 y 위치 각각에 대한 추정치를 나타내며, Fig. 6은 실제 AUV의 운동 궤적과 추정된 궤적 사이의 차이를 나타낸 것이다. 그림들로부터 알 수 있듯이, 고장 신호가 시스템 전체의 신호 추정 결과에 악영향을 미치므로, 고장 신호를 제거하는 방법이 강구되어야 한다. 하드 센서 고장을 판정하기 위해서는, 간단한 방법으로, 기준치를 정해 놓고 이 범위를 넘는 값에 대해서 센서 고장이 발생했다고 할 수 있으나, 그 레벨의 정도를 정하는 것은 시스템의 작업상태 및 해상상태에 따라

변화가 심하므로 정하기 용이하지 않다. 본 연구에서는 이러한 레벨 선정 문제를 퍼지 추론법을 이용하여 계측 신호의 신뢰도 판정으로 대처시켰다.

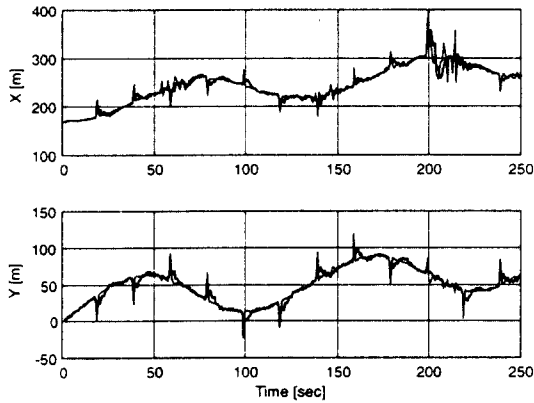


Fig. 5 The measured and the filtered tracks of the vehicle with SSBL

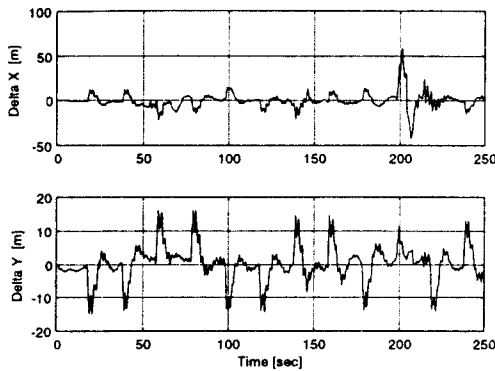


Fig. 6 The errors of the estimated position with SSBL

Table 2 Fuzzy inference rules for the detection of failure

Rule No.	$\delta V$	$\alpha$	Status
1	-	big	Failure
2	big	mid2	Failure
3	medium	mid2	Swfail
4	small	mid2	Noisy
5	big	mid1	Noisy
6	medium	mid1	Noisy
7	small	mid1	Valid
8	small	small	Valid

고장 감지를 위한 퍼지 법칙이 Table 2에 주어져 있다. Fig. 7은 사용된 입출력 멤버십 함수  $\delta V$ ,  $\alpha$  및 Status를 나타내는 그림이다. Bisector 법을 Defuzzification으로 이용하였고, Matlab의 Tool Box를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

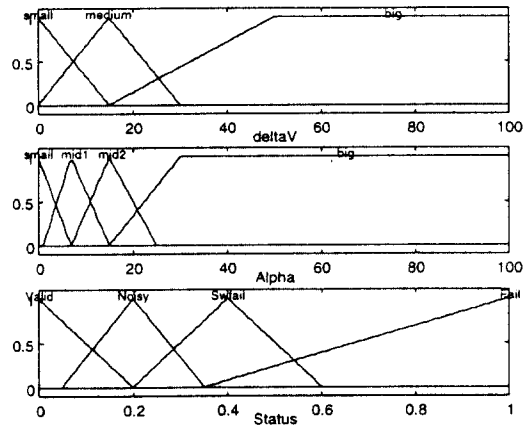


Fig. 7 The membership functions of the inputs and the output of the fuzzy inference

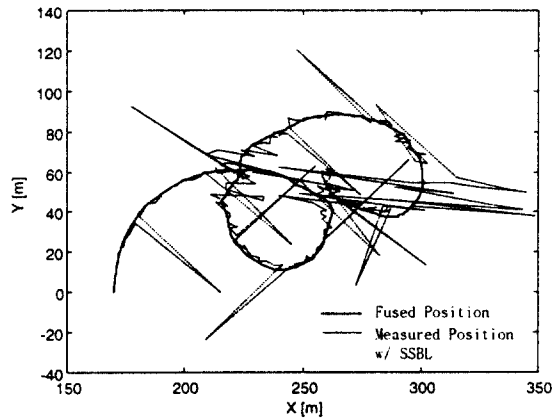


Fig. 8 The measured and the filtered tracks of the vehicle by the proposed navigation system

Fig. 8, Fig. 9 및 Fig. 10은 각각 주어진 고장 감지 및 센서 융합에 의한 위치 추적 시스템의 시뮬레이션 결과를 나타내는 그림이다. 추정된 위치 추적 신호가 하드 센서 고장 및 소프트 센서 고장 두 가지 경우에 대해서 모두 현저하게 개선된 결과를



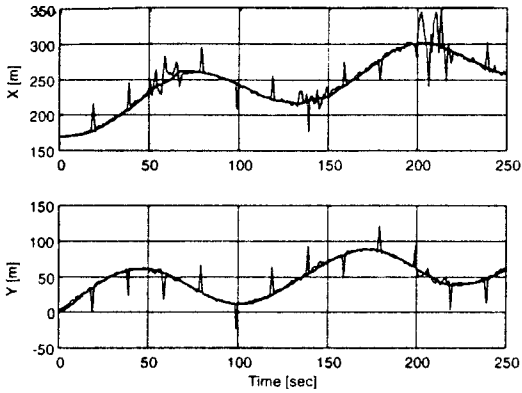


Fig. 9 The measured and the filtered tracks of the vehicle by the proposed navigation system

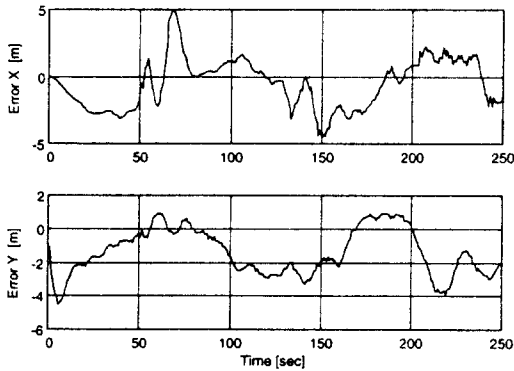


Fig. 10 The errors of the estimated position by the proposed navigation system

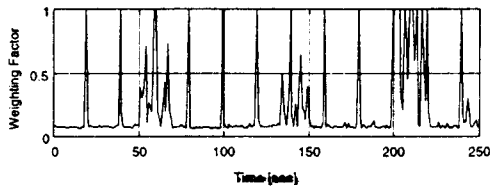


Fig. 11 The weighting factors in the process of the position estimates for the failure detection algorithm

보였다. Fig. 11은 시뮬레이션 순간의 각 시간 스텝에서의 가중치의 값을 나타낸 그림이다. 이 값이 영이되면, SSBL에서 얻어진 신호만을 이용하여 위치추적이 이루어지게 되며, 이 값이 1이 되면,

SSBL의 신호는 완전히 무시되고 추측 항법에 의해 위치가 추정된다. 소프트 센서 고장의 경우에는 가중치가 [0 1] 사이의 값을 갖게 되고, 융합된 신호가 외부 계측신호로 사용되어 신호처리가 진행된다. Fig. 10에서, AUV의 위치 추적이 5 m 범위 내에 존재하는 결과를 얻었다. 이 오차 범위는 AHFRS의 측정오류에 기인하므로, 어떤 시간 간격 동안 하드센서 고장이 연속적으로 발생하게 되면, 이 시간 동안에는 오차의 범위가 유속계의 오차에 비례하여 증가하게 된다. 하드 센서 고장 신호와 소프트 센서 고장 신호를 포함하는 계측 신호를 이용한 위치 추적 시뮬레이션을 통하여, 센서 고장 감지 및 필터링 알고리즘의 유효성을 입증하였다. 제안된 위치 추적 방법은 거친 해상에서 작업을 수행하는 AUV의 위치를 보다 정확히 추정할 수 있는 하이브리드 항법 시스템이며, SSBL과 AHFRS 센서를 갖춘 수중 무인 잠수정의 추적 장치로 실용 가능하다.

### 5. 요약

본 연구를 통하여, 자세 선수각 유속 계측 시스템 AHFRS와 초음파 측위시스템 SSBL을 이용하여 거친 해상에서 운항중인 잠수정의 정밀 위치추적을 수행할 수 있는 하이브리드 항법 시스템을 제시하였다. SSBL의 계측 신호와 AHFRS의 오차 모델을 이용하여 칼만 필터를 구성하였으며, 퍼지 추론을 이용하여 오차 및 센서 고장이 포함된 외부 계측신호의 신뢰도를 결정하는 방법을 구현하였다. 신호변동폭이 작은 경우 (소프트 센서 고장) 및 큰 경우 (하드 센서 고장) 각각에 대하여 제안된 방법은 적절하게 가중치를 조정하는 기능을 보유하여, 본 연구의 방법에 의한 결과가 단순히 필터만을 사용하는 경우 보다 잠수정의 위치 추적 성능이 현저하게 개선되는 것을 보였다. 따라서, 소나 위치추적장치를 장착한 무인 잠수정이 주변 환경에 따라 교란을 받게 되는 단점을 극복하고 위치추적 성능을 개선시키는 방법으로써, 유속계, 방위계 및 자세 센서를 탑재하고 본 연구에서 개발된 항법 시스템을 이용하면 잠수정의 위치추적 성능을 현저하게 개선시킬 수 있다.

## 후 기

본 연구는 과기처의 96년도 기관고유사업인 '200m 급 탐사용 AUV III'연구의 일부임을 밝힌다.

## 참고문헌

- 1) B.D. Brumback, and M.D. Srinath, "A Fault-Tolerant Multisensor Navigation System Design," IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 23, No. 6, Nov., pp. 738-755, 1987
- 2) G. Chen, and C.R. Chui, "A Modified Adaptive Kalman Filter for Real-Time Applications," IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 27, No. 1, Jan., pp. 149-154, 1990
- 3) R. Da, "Failure Detection of Dynamical Systems with the State Chi-Square Test," Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 17, No. 2, March-April, pp. 271-277, 1994
- 4) M. Bennamoun, F. Boashash, and F. Faruqi, "The Development of an Integrated GPS/INS /SONAR Navigation System for Autonomous Underwater Vehicle Navigation," IEEE Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology, pp. 256-261, 1996
- 5) S.H. Kwak, C.D. Stevens, J.R. Clynch, R.B. McGhee, and R.H. Whalen, "An Experimental Investigation of GPS/INS Integration for Small AUV Navigation," Proc. of the 8-th Int. Symp. on Unmanned Untethered Submersible Technology, Sep. 27-29, pp. 239-251, 1993
- 6) K.A. White, S.M. Smith, K. Ganesan, D. Kronen, G.J.S. Rae, and R.M. Langenbach, "Performance Results of a Fuzzy Behavioral Altitude Flight Controller and Rendezvous & Docking of an Autonomous Underwater Vehicles with Fuzzy Control," IEEE Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology, pp. 117-124, 1996
- 7) M.R. Napolitano, C. Neppach, V. Casdorff, and S. Naylor, "Neural-Network-Based Scheme for Sensor Failure Detection, Identification, and Accommodation," Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol.18, No.6, pp. 1280-1286, 1995
- 8) P.S. Maybeck, "Stochastic Models, Estimation, and Control : Vol.1," Academic Press Inc., 1979
- 9) M. Nahon, "A Simplified Dynamics Model for Autonomous Underwater Vehicles," IEEE Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology, pp. 373-379, 1996
- 10) A.J. Healey, D.B. Marco, and R.B. McGhee, "Autonomous Underwater Vehicle Control Coordination Using A Tri-Level Hybrid Software Architecture," Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation, Minneapolis, April, pp. 2149-2158, 1996
- 11) O.R.E. Inc, "Operation and Maintenance Manual for the ORE International, Inc. LXT Tracking System," Falmouth, Massachusetts, 1995