

초음파 거리계를 갖는 수중복합항법시스템의 초기오차 수렴 특성

이판목* · 전봉환* · 김시문* · 최현택* · 이종무* · 김기훈*

*한국해양연구원 해양시스템안전연구소 해양탐사장비연구사업단

Convergence of Initial Estimation Error in a Hybrid Underwater Navigation System with a Range Sonar

PAN-MOOK LEE*, BONG-HUAN JUN*, SEA-MOON KIM*, HYUN TAEK CHOI*, CHONG-MOO LEE* AND KIHUN KIM*

*Ocean Exploration System Research Division, MOERI-KORDI, Daejeon, Korea

KEY WORDS: Range Sonar 초음파 거리계, Inertial Measurement Unit 관성계측센서, Doppler Velocity Log 도플러 속도계, Underwater Navigation 수중항법, Initial Estimation Error 초기추정오차

ABSTRACT: Initial alignment and localization are important topics in inertial navigation systems, since misalignment and initial position error wholly propagate into the navigation systems and deteriorate the performance of the systems. This paper presents the error convergence characteristics of the hybrid navigation system for underwater vehicles initial position, which is based on an inertial measurement unit (IMU) accompanying a range sensor. This paper demonstrates the improvement on the navigational performance of the hybrid system with the range information, especially focused on the convergence of the estimation of underwater vehicles initial position error. Simulations are performed with experimental data obtained from a rotating arm test with a fish model. The convergence speed and condition of the initial error removal for random initial position errors are examined with Monte Carlo simulation. In addition, numerical simulation is conducted with an AUV model in lawn-mowing survey mode to illustrate the error convergence of the hybrid navigation system for initial position error.

1. 서 론

무인잠수정의 항법시스템에 있어서, 스트랩다운 관성항법 시스템은 소형의 관성센서(Inertial measurement unit, IMU)가 내압선체에 내장되어 외부의 도움 없이 자신의 위치를 알 수 있는 장점이 있다. 관성항법시스템은 시간경과에 따라 오차가 누적되는 단점이 있으므로 이를 극복하고 성능을 향상시키기 위하여, 비관성 센서인 GPS, 심도계, 도플러 속도센서(Doppler velocity log, DVL), 경사계 또는 마그네틱 컴파스를 보조센서로 사용하는 것이 필요하다. 또한 관성항법시스템은 정밀한 위치추정을 위하여 시스템의 초기 정렬과 위치 초기화가 반드시 필요하다. 본 논문은 초음파 거리계를 보조항법센서로 이용함으로써 초기 정렬 및 위치 초기화가 필요하지 않은 수중복합항법 시스템에 관한 논문이다.

무인잠수정의 수중항법을 위하여 초음파 속도계를 이용하고 관성센서의 신호를 융합하여 IMU-DVL 기반의 수중 복합항법 시스템을 구현하는 방법이 많이 사용되고 있다 (Larsen, 2000; Kinsey and Whitcomb, 2004; Lee et al., 2003a~b). 가장 보편적으로 쓰이며 실용적인 방법으로는 관성센서로 무인잠수정의 자세를 측정하고 계측된 속도를 적분하는 맹목항법(Dead

Reckoning)을 이용하고 있다(Whitcomb et al., 1999). 천해역에서 수면에 주기적으로 부상하는 무인잠수정의 경우에는 GPS신호를 이용하는 복합항법시스템으로 구성하기도 한다 (Macro and Healey, 2001). 한편 심해에서 LBL(Long Base Line)의 위치 추적 정밀도를 높이기 위하여 DVL 신호를 융합하는 항법에 관한 연구(Whitcomb et al., 1999; Kinsey and Whitcomb, 2004)도 수행되었다.

이판목등 (2004a~b)과 Lee et al. (2004a, 2004c)는 IMU-DVL 기반 무인잠수정의 복합항법시스템의 성능을 개선시키기 위하여 해저의 기준점에 대한 무인잠수정의 거리정보를 얻을 수 있는 초음파 거리계를 도입하였다. 이 방법은 관성항법시스템이 갖는 위치추적오차의 누적을 피하면서, LBL 보다 운용이 편리한 잇점이 있다.

관성센서를 기본센서로 사용하는 항법시스템에서 초기정렬 및 위치 초기화는 항법 성능을 좌우하므로 대단히 중요하며, 이에 대한 연구가 보고되고 있다 (Dissanayake et al., 2001; 홍현수 외, 2002). 지금까지의 수중 복합항법 연구는 무인잠수정의 초기위치가 정확히 얻어진다는 가정에 근거하여 위치를 정밀하게 추정하는 기법에 대해서만 논하였다. LBL과 같은 방법은 초기위치 오차에 무관하게 위치추정이 가능하다. 그러나 관성센서를 기반으로 하면서 거리계측 소나를 사용하지 않는 수중 복합항법의 경우는 초기위치 오차가 시스템의 성능에 직접 영향을 미치는 단점이 있다.

제1저자 이판목 연락처: 대전광역시 유성구 장동 171
042-868-7532 pmlee@moeri.re.kr

본 논문은 이판목등 (2004a)이 제안한 초음파 거리계를 이용하는 수중 복합항법시스템이 초기 위치추정 오차를 갖는 경우에도 안정적으로 오차를 보정하는 특성을 검토하였다.

본 논문에서는 수중 복합항법시스템의 성능검증을 위하여 회전팔 시험으로 얻어진 관성신호를 얻었으며, 방위각과 심도 신호를 동시에 계속하였다. 한편, 거리신호는 거리계를 모사하여 생성한 데이터를 이용하였다. 불특정 초기위치오차를 갖는 경우에 대하여 몬테카를로 기법으로 수중 복합항법시스템의 오차수렴특성을 검토하였다. 초기위치추정이 기준점과의 상대방향은 일치하는 경우와 방향도 알 수 없는 과도한 오차를 갖는 경우로 나누어 분석하였다. 또한, 초음파 거리계를 이용한 실제 적용 가능성을 검토하기 위하여 AUV의 '르' 모드 운항 시뮬레이션을 수행하여 초기 위치추정오차의 수렴특성을 확인하였다.

2. 수중 복합 항법시스템

초음파 거리계는 Fig. 1에 나타나 있는 것과 같이 AUV에 초음파 트랜스듀서가 장착되어 초음파 신호를 발생하고, 기준점의 트랜스폰더가 이에 응답신호를 보내면 AUV는 기준점으로부터의 거리를 환산할 수 있다. 본 논문에 적용된 초음파 거리계를 보조센서로 사용하는 수중 복합항법시스템의 상태방정식을 간략히 정리하면 다음과 같다 (이판목 등, 2004a).

$$\dot{x}(t) = F(t)x(t) + u(t), \quad w \sim \mathcal{N}(0, Q(t)) \quad (1)$$

여기서,

$$x = [\delta L \ \delta l \ \delta h \ \delta V_n^T \ \phi^T \ \nabla_a^T \ R_b^T \ h_b \ a_v \ \psi_b]^T$$

$$w = [\ 0_{1 \times 3} \ 0_{1 \times 3} \ 0_{1 \times 3} \ w_a^T \ w_g^T \ 0 \ 0 \ 0_{1 \times 3}]^T$$

F(t)는 Titterton과 Weston (1997)이 정리한 것과 같은 스트랩다운 IMU의 시스템 행렬로서, AUV의 위치, 속도, 자세를 계산하는 미분방정식으로부터 얻어진다. 시스템의 상태변수 x(t)는 21개의 상태오차를 나타내며, 각각의 기호는 문헌 (이판목등, 2004a)과 동일하다.

k번째 시간 스텝에서 얻어지는 측정방정식은 오차 상태변수로 다음과 같이 표현된다.

$$y_k = \begin{Bmatrix} \mathcal{R} - \mathcal{R}_{meas} \\ \mathcal{h} - \mathcal{h}_{meas} \\ \mathcal{V}^n - \mathcal{V}_{meas} \\ \mathcal{\psi} - \mathcal{\psi}_{meas} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$= \begin{bmatrix} X/R & Y/R & Z/R & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 6} & -1 & 0 & 0_{1 \times 3} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 6} & 0 & -1 & 0_{1 \times 3} & 0 \\ 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & -V^{n \times} & 0_{1 \times 6} & 0 & 0 & -C_b^n & 0 & & \\ 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 2} & -1 & 0_{1 \times 6} & 0 & 0 & 0_{1 \times 3} & -1 & \end{bmatrix} x(t_k) + \begin{Bmatrix} v_R(t_k) \\ v_h(t_k) \\ v_V(t_k) \\ v_{\psi}(t_k) \end{Bmatrix}$$

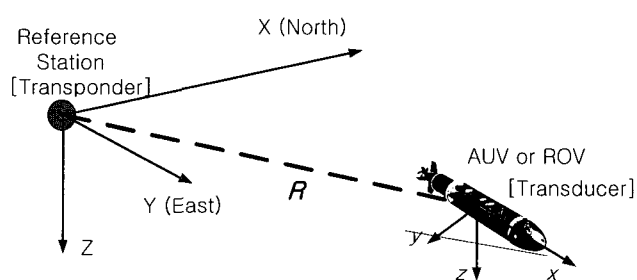


Fig. 1 Navigational coordinate of the underwater vehicle with range measurement.

항법시스템은 외부신호의 입력이 주어지지 않을 경우에는 확장형 칼만필터 (Gelb, 1974)를 이용하여 IMU 단독으로 위치를 추정하며, 외부의 측정 신호가 있는 경우에 오차를 갱신하고 상태변수를 보정한다.

3. 수중 복합 항법시스템의 오차 수렴성 검토

3.1 회전팔 시험 및 항법센서 특성

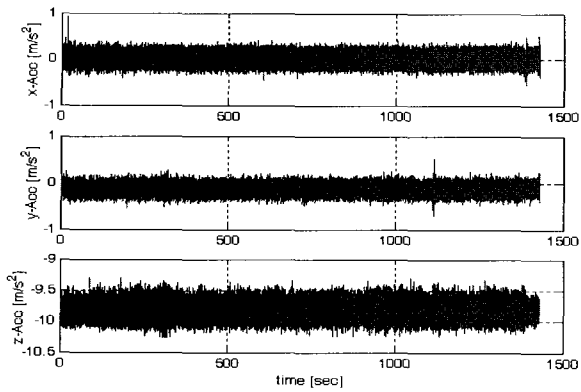
수중 복합항법시스템의 성능을 검증하기 위하여 회전팔 시험이 실시되었고, 실험은 한국해양연구원 해양시스템안전연구소의 해양수조에서 수행되었다. 항법시험을 위하여 물고기형태의 소형 항체에 IMU로 하니웰사의 HG1700AG11과 DVL로 RDI사의 WHN300을 탑재하였으며, 이 항체를 해양공학수조의 회전 팔(Rotatin a,b Arm)에 스트럿을 이용하여 부착하였다 (이종무외, 2003a,b). Table 1은 수중 복합항법시스템에 사용되는 센서의 사양을 정리하였다.

Table 1 Sensor model in the IMU-DVL navigation system with range measurement

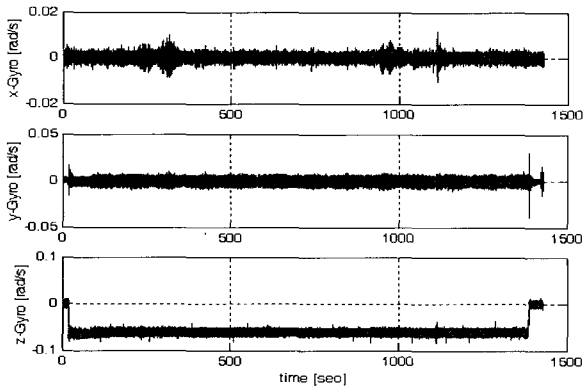
	Bias Error	Random Noise (std.)
Accelerometer	1.0 mg	50 mg
Gyro	1.0 deg/h	0.3 deg/s
DVL	0.01 m/s	0.1 m/s
Magnetic Compass	10.0 deg	1.0 deg
Depth-meter	0.5 m	0.5 m
Range Sonar	0.25 m	0.5 m

본 논문에서는 항체를 8미터 지점에 설치하였고, 수중항체의 기준속도를 0.5m/s로 정하여 실험이 수행되었다. 시험은 신호취득 초기 10초 동안에 수중항체가 정지 상태를 유지하여 항법 프로그램에서 초기정렬을 수행할 수 있게 하였으며, 10초 이후에 서서히 회전수를 높여 기준속도에 다다를 때까지 속도를 올리고 이후에는 정속으로 유지하며 약 23분간 연속 데이터를 취득하였다.

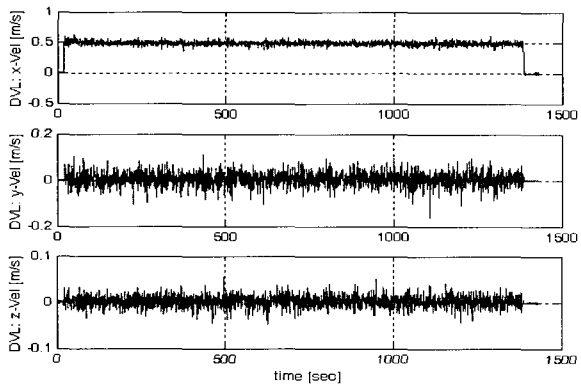
초음파 거리계는 정지상태에서 약 10cm 정밀도를 유지하면서 측정이 가능하나, 무인잠수정이 운항중인 경우에는 초음파 전달시간 경과에 따른 위치변동오차와 다중경로 오차 등의 외



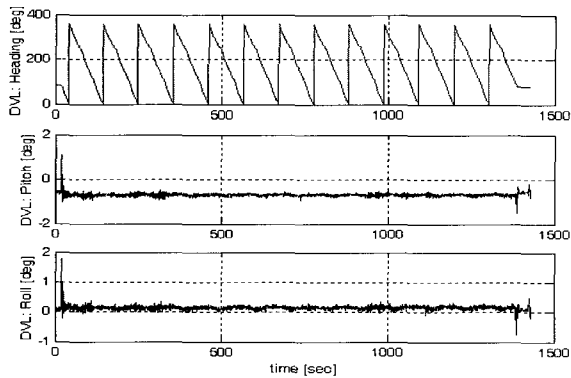
(a) Acceleration in x, y, and z direction



(b) Gyro in x, y and z direction



(c) Velocity in x, y, z, direction



(d) Heading, pitch and roll

Fig. 2 Measured motion data of the fish from the rotating arm test with 0.5m/s of speed.

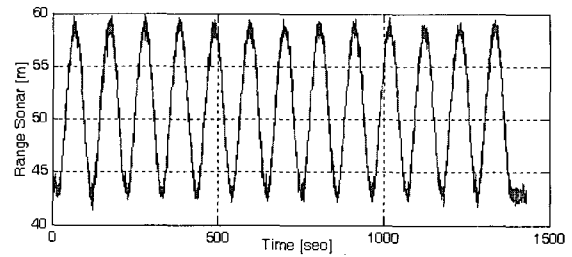


Fig. 3 Simulated range data with two samples per second, of which the reference station is at (30, -30, -10) meters from the initial position (0, 0, 0) of the fish model.

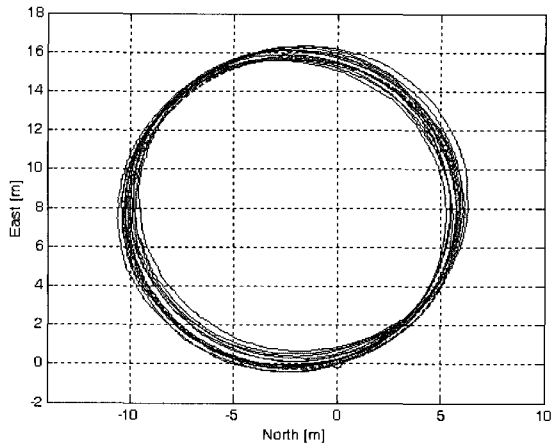
란이 존재한다. 초음파 거리계는 측정범위에 따라 샘플 시간간격이 정해지며, 본 시뮬레이션에서는 500m 이내 거리에서 작동하는 것을 기준으로 2sps로 정하였다. AUV의 속도가 1.0 노트인 경우 초음파 거리계의 랜덤오차가 0.5m, 바이어스 오차가 최대 0.25m가 되는 것으로 정하였다.

Fig.2는 23분 동안 계측된 회전팔 시험 데이터를 나타낸다. 수중선체가 초기 10초 동안 정지상태를 유지한 후 0.5m/s의 속도로 회전할 때의 가속도, 각속도, 속도 및 방위각 신호를 나타낸다. IMU 신호는 100Hz, DVL 신호 및 방위각 신호는 2Hz로 취득한 결과이다. Fig. 2(a)에서 10초 이후 항체가 전진하기 시작함에 따라, x 방향의 가속도에 변화를 일어났으며, 원심 가속도가 발생하여 y 방향으로 움직이 발생하였으며, Fig. 2(b)에서 z 방향의 각속도가 발생한 것을 알 수 있다. 그림에서 IMU의 각 관성센서의 신호는 항체의 속도가 증가함에 따라 유체항력이 증가하고 보오택스 발생에 기인하는 진동으로 인하여 노이즈 레벨이 커진 것을 보이고 있다. Fig. 2(d)에서 항체가 등속 회전운동을 하는데 방위각은 비선형적으로 계측되었다, 이는 수조의 철구조물 전차에 의한 영향으로 RMS 10° 오차를 보이고 있다.

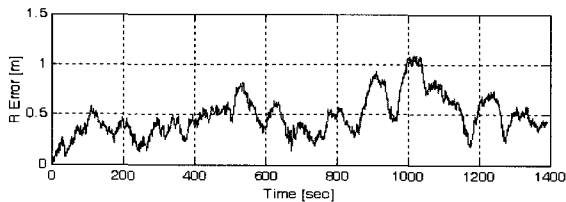
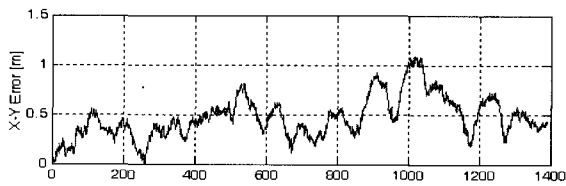
초음파 거리신호는 해저기준점이 절대좌표계로 (30,-30,-10)에 위치하고 수중항체는 원점에 있다고 가정하여 Table 1에 주어진 계측오차를 더하여 생성하였다. Fig. 3은 0.5초마다 얻어진 거리신호를 나타낸다. 항법 알고리즘은 IMU 신호를 이용하여 적분하면서 거리계 신호와 DVL 신호가 취득되는 순간 마다 식(2)를 이용하여 칼만필터의 오차 공분산과 상태변수를 보정한다.

3.2 초음파 거리계를 이용한 수중 복합 항법시스템

Fig. 4는 초음파 거리계를 갖는 수중 복합항법시스템에 의한 위치추적 결과를 나타낸다. Fig. 4(a)에서 점선원은 수중항체의 실제 궤적을 나타내며, 실선은 추적된 궤적을 나타낸다. 수중 복합항법시스템은 적분방식을 이용하기 때문에 맹목항법과 유사한 성질을 가지나, 거리신호를 이용함으로써 거리 오차를 신속하게 감소시키는 장점이 있다. 하지만, 거리에 수직인 방향의 오차에 대해서는 보정이 이루어지지 않기 때문에 원을 이루는 거리에 수직인 방향으로 드리프트가 있을 수 있다. 이전에 발표된 결과(이관목등, 2004a)와 동일하게 위치추적오차는 1m 이내를 가지며, 시간 경과에 무관하게 증가하지 않는 결과를 보였다.



(a) Estimated position in X-Y plane



(b) Estimation errors in X-Y plane and 3-D space

Fig. 4 Estimated position and navigation errors with the IMU-DVL-RS navigation system.

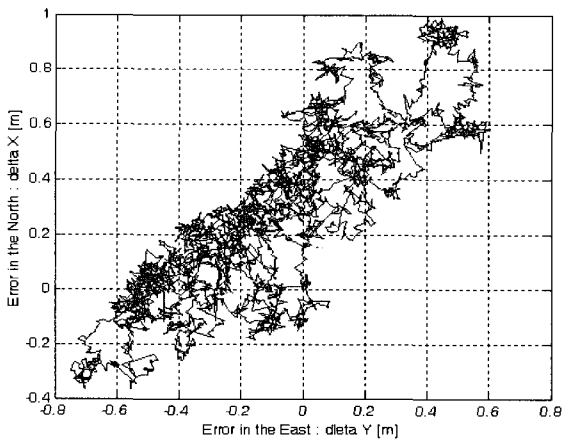


Fig. 5 The estimated position error of the fish with the IMU-DVL-RS navigation system.

Fig. 5는 수중항체의 시작점을 기준으로 좌표계의 이동을 나타내는 그림으로 거리에 수직한 방향으로 표류하는 것을 알 수 있다. Fig. 4(b)에서 1000초 근방에서 오차가 증가했다 감소하는 것은 거리에 수직한 방향으로 위치추정이 드리프트한 결과이다. 이러한 드리프트는 AUV가 이동하면서 연속적으로 위치를 바꾸

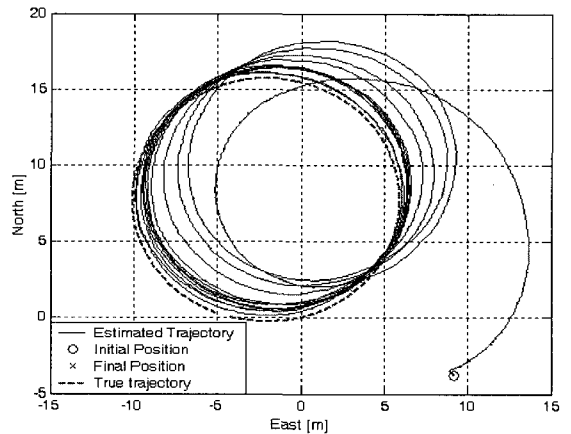
므로 원주를 따라 표류하는 것이 계속 증가하지 않고 1m 이내의 오차 범위에서 수렴한 결과를 보였다.

정지한 AUV의 거리 정보를 이용하는 경우에 표류양은 초음파 거리계측 소나를 이용하지 않는 경우와 유사하게 IMU와 DVL의 오차 범위에 있으나, 거리계측 소나의 신뢰도를 실제보다 과도하게 높여 정할 경우에는 더 커질 수 있다.

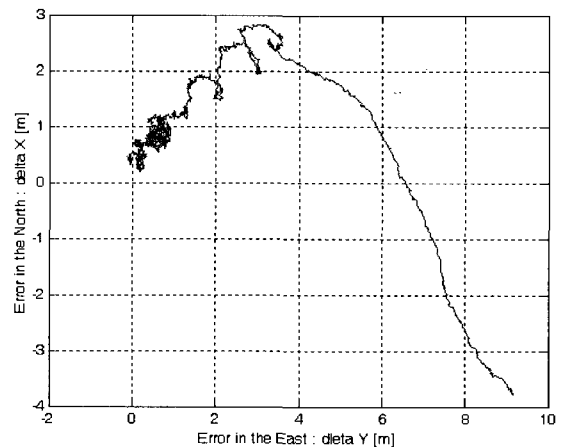
3.3 초기오차를 갖는 수중 복합 항법시스템

불특정 초기 위치추정 오차가 존재하는 경우에 수중 복합항법 시스템을 이용하여 궤도를 추적하는 Montecarlo 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 6(a)는 AUV의 초기위치를 (-3.788, 9.146, 0.0)로 잘못 추정되었을 경우에 수중 복합항법시스템을 이용하여 23분 동안 회전운동을 하는 AUV의 위치궤적을 나타낸 결과이고, Fig. 6(b)는 AUV의 좌표계가 이동해가는 궤적을 나타낸다.

그림에서 거리 계측 소나의 영향으로 거리 오차는 기하급수적으로 수렴하며, 거리오차가 영이 되는 순간은 100초 이내에 이루어졌다. 거리 오차가 수렴하는 방향은 초기 추정위치에서 기준점에 평행한 방향으로써, 이 경우는 방사방향이다. 거리오차가 오차가 줄어들어 이후에는 수중 복합항법 알고리즘에서 거리성분이 위치오차 보정에 영향을 주지 못하게 된다. 그러나, AUV



(a) Estimated position



(b) Trajectory of the position error

Fig. 6 The estimated results of the IMU-DVL-RS navigation system with initial position error (-3.788, 9.146, 0.0).

가 운동을 하면서 추정된 위치와 실제 위치 사이의 불일치에 기인하는 오차 성분이 수중 복합항법 알고리즘에서 거리오차로 작용하여 이를 줄이는 방향으로 상태변수를 보정하는 과정이 진행된다. 이 과정은 수렴속도가 느리며, 1m 이내 오차를 갖기까지 600초의 시간이 요구되었다.

Fig. 7은 비교목적으로 AUV의 주변에 동일 거리의 오차를 갖는 경우에 대하여 수렴특성을 파악하기 위하여 원주상에 45도 간격으로 추정위치를 설정하여 각각의 경우에 당초 추정좌표계의 이동궤적을 그린 결과이다. Fig. 8은 이때의 각각의 경우에 대한 위치오차의 변화를 나타내는 곡선이다. Fig. 7에서 초기 추정위치는 (-30, 30, 0) 위치의 기준좌표계를 중심으로 하며 XY 평면에 투영된 거리를 반지름으로 하는 원주 상에 방사방향으로 수렴하게 된다.

초기 추정위치의 위치에 따라 기준점에서 방사방향으로 거리 오차가 줄어들게 되므로, 위상차가 큰 경우는 위치보정에 시간

이 많이 소요된다. 초기 위치가 이 원주 상에 존재하는 경우(90° 위상차를 갖는 경우)는 거리가 오차가 영이므로 거리 센서에 의한 보정이 이루어지지 않고, AUV가 운동에 따라 위치오차 불일치에 기인하는 거리 변화만이 상태변수 추정과 오차공분산에 영향을 미친다. 이 원주 상에 존재하는 최악의 경우에도 20분경과 후에 위치오차는 1.5m 이내로 수렴하는 결과를 보였다.

따라서, 초음파 거리계를 보조항법 센서로 이용하는 항법시스템은 초기 위치추정 오차를 실제 위치로 보정하는 성능을 갖는다. 거리 오차가 10m인 경우, AUV가 16m 직경 원운동으로 약 20분의 초기정렬 이후에 1.5m이내의 항법 정밀도를 갖는다.

3.4 과도한 초기 위치 오차에 대한 수렴 성능

초기위치추정이 잘못되어 임의의 위치에 AUV가 존재하는 경우에 대한 수중복합항법 시뮬레이션을 수행하였다. 초음파 응답 센서의 위치를 원점으로 하고 AUV가 (-30, 30, 10)에 존재하는 경우에 대하여, 해저 기준점 원점을 중심으로 모든 방향에 대하여 초기추정위치를 Table 2의 P₁ ~ P₁₂로 설정하였다. 이들 초기 추정위치는 각 방향에 있어서 대표적인 방향을 선정하였으며 거리오차는 임의로 정하였다. P₄ ~ P₉은 기준점을 중심으로 무인잠수정의 실제위치와 반대 방향에 초기위치가 설정된 경우이다.

Table 2 Initial positions of the vehicle

	Initial Est. Position (X _i , Y _i , Z _i) / R _{rc}	Phase Error	Radial Error (R _{XV} - R _{rc}) / R _{rc}
P ₁ , Q ₁ , R ₁	(50, -50, 10) / 30√2	0°	0.67
P ₂ , Q ₂ , R ₂	(60, 0, 10) / 30√2	45°	0.41
P ₃ , Q ₃ , R ₃	(60, 60, 10) / 30√2	90°	1.00
P ₄ , Q ₄ , R ₄	(0, 65, 10) / 30√2	135°	0.53
P ₅ , Q ₅ , R ₅	(-12, 24, 10) / 30√2	165°	-0.37
P ₆ , Q ₆ , R ₆	(-60, 60, 10) / 30√2	180°	1.00
P ₇ , Q ₇ , R ₇	(-5, 5, 10) / 30√2	180°	-0.83
P ₈ , Q ₈ , R ₈	(-36, 18, 10) / 30√2	-165°	-0.05
P ₉ , Q ₉ , R ₉	(-15, 0, 10) / 30√2	-135°	-0.65
P ₁₀ , Q ₁₀ , R ₁₀	(-55, 55, 10) / √	-90°	0.83
P ₁₁ , Q ₁₁ , R ₁₁	(0, -15, 10) / √	-45°	-0.65
P ₁₂ , Q ₁₂ , R ₁₂	(0, 0, 0) / √	-	-1.0

* √ 2 : Radius of the range circle, √ 2 : 2

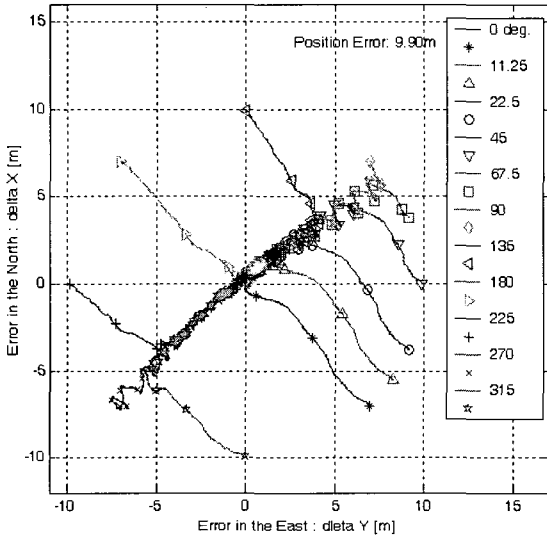


Fig. 7 Trajectories of the estimation errors with initial position errors.

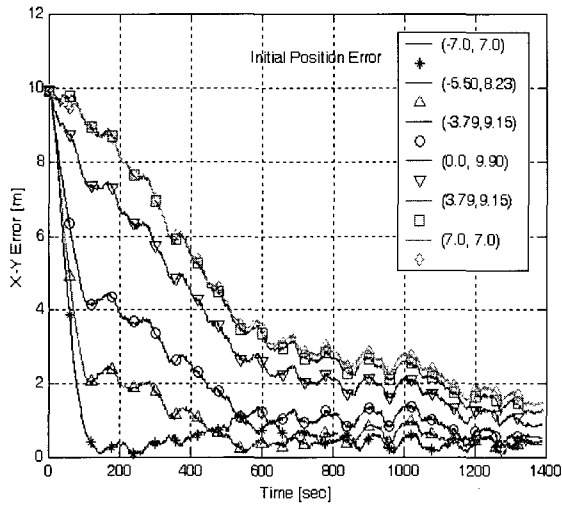
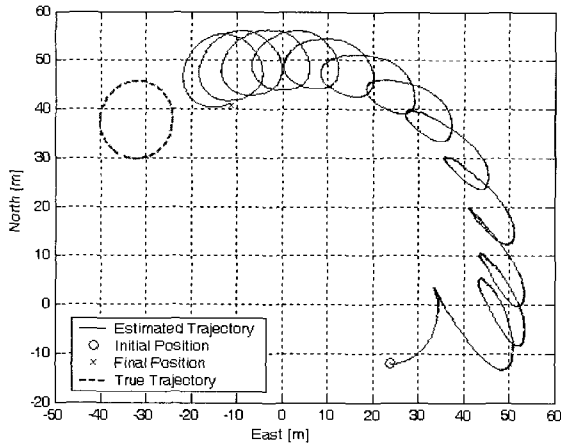
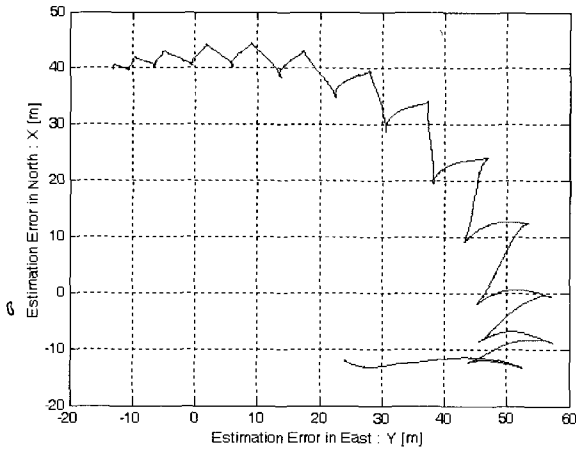


Fig. 8 The convergence rates of the position error of the vehicle with initial error.

Fig. 9(a)는 P₅ 초기위치 오차를 갖는 무인잠수정에 대하여 수중 복합항법으로 초기정렬을 하였을 경우의 궤적을 나타내는 그림이며, Fig. 9(b)는 이때의 AUV 좌표계의 이동 궤적을 나타내는 그림이다. 항법 알고리즘이 작용하는 초기에는 초기 추정위치와 기준점과의 거리오차를 줄이는 방향으로 궤도가 변화한 이후에 거리오차가 수렴된 상태에서 원주상을 따라 반시계방향으로 수렴하는 결과를 보였다. 위치보정이 이루어지면서 AUV가 운동하는 원의 궤적이 변형된 형태를 보이나, 초기 위치 오



(a) Estimated position



(b) Trajectory of the position error

Fig. 9 The estimated results of the IMU-DVL-RS navigation system with the initial position P_5 (-12.0, 24.0, 10.0) over the reference station (0.0, 0.0, 0.0): the true position of the fish is (30, -30, 10).

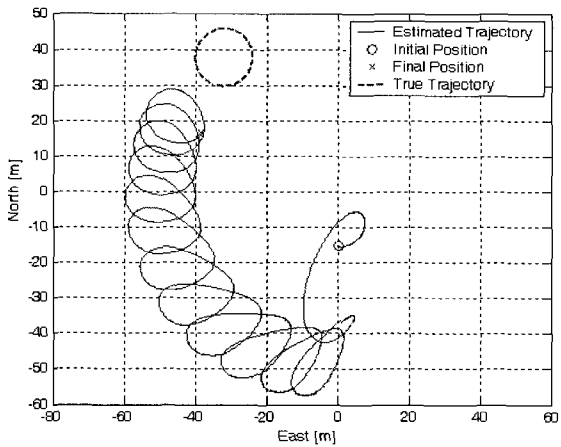


Fig. 10 The estimated position of the fish of the IMU-DVL-RS navigation system with the initial position P_9 (-15, 0, 10) over the reference station.

차가 보정되어가면서 AUV의 운동 궤적이 서서히 원형을 찾아가고 있다.

한편, P_9 초기위치오차를 갖는 경우는 Fig. 10과 같은 오차 보정 궤적을 얻었다. Fig. 9의 경우와 유사하게 초기위치 보정이 이루어지고 있으나 그 수렴하는 방향이 시계방향으로 이루어졌다. 초기에 기준점에 대하여 방사방향으로 위치보정이 이루어지는 것은 초기위치에 좌우되며, 이후의 수렴방향은 실제 AUV의 위치와 가까운 방향의 원주상을 따라 수렴하게 된다.

Fig. 11은 $P_1 \sim P_{12}$ 초기위치 각각의 경우에 대한 초기 좌표계의 이동 궤적을 나타내는 그림으로써, P_6 와 같이 AUV의 실제위치와 정반대의 방향으로 초기위치가 지정된 경우를 포함하여 모든 경우가 원주를 따라 실제 위치를 향하여 좌표계가 이동하는 결과를 보였다. 원주를 따라 수렴하는 방향은 초음파 응답센서를 기준으로 초기추정위치 오차의 위상에 따라 시간방향과 반시계방향으로 결정된다. 초기 위치오차가 클수록 방사방향으로 요동이 크게 일어나면서 원주를 따라 이동하는 속도는 빠르나, 실제위치와 정반대의 위치에서는 초기 위치오차 이탈에 시간이 소요된다.

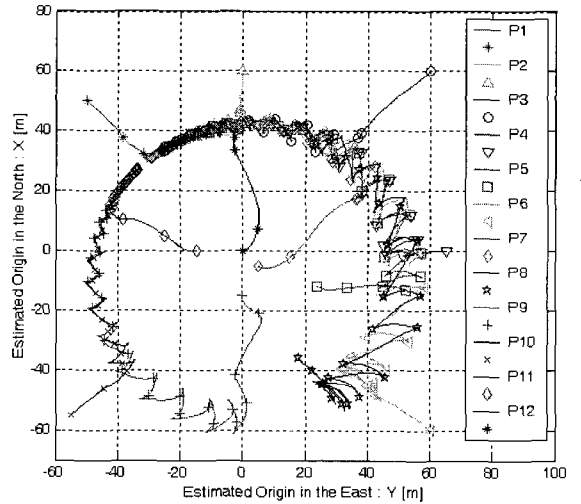


Fig. 11 Trajectories of the position errors with the IMU-DVL-RS navigation system when the initial location is (30, -30, 10).

AUV가 해저 기준점과 떨어진 거리의 영향을 조사하기 위하여 1/2배의 거리와 2배 거리만큼 떨어진 경우, 즉, (15, -15, 4)와 (60, -60, 20) 위치에 AUV가 존재하는 경우에 대하여 동일한 위상과 거리 비율을 갖는 초기 위치오차에 대한 오차 수렴성을 검토하였다. Table 2에서 $Q_1 \sim Q_{12}$ 는 1/2배 거리, $R_1 \sim R_{12}$ 는 2배의 거리가 떨어진 경우의 위치오차를 갖는 초기추정 위치를 나타낸다.

Fig. 12와 Fig. 13은 1/2배 거리와 2배 거리 각각에 대하여 Fig. 11과 동일한 방법으로 표현된 무인잠수정의 좌표축 이동 경로를 나타낸 그림이다. Fig. 12에서 Q_6 와 Q_8 를 포함하여 모든 초기방향의 초기추정위치가 23분 초기정렬 이후에 2m 이내의 오차를 갖는 범위로 수렴하는 결과를 보였다. 수중선체가 16m의 직경으로 운동하므로 거리 측정치에 비하여 상대적으로

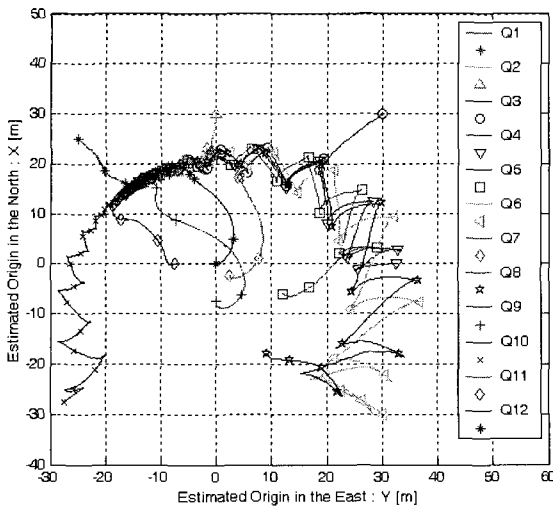


Fig. 12 Trajectories of the position errors with the IMU-DVL-RS navigation system when the initial location is (15, -15, 5).

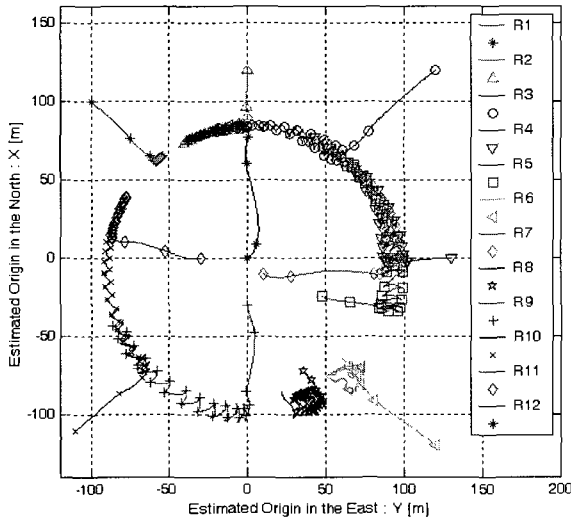


Fig. 13 Trajectories of the position errors with the IMU-DVL-RS navigation system when the initial location is (60, -60, 20).

큰 원운동을 하므로 수렴속도가 Fig. 11의 경우보다 빠르게 이루어졌다. 2배거리를 갖는 Fig. 13의 결과는 전반적으로 앞선 경우와 동일한 경향을 보이나, 대부분의 초기 위치오차가 23분의 초기정렬을 수행한 후에도 아직 큰 오차를 갖고 있다. 이는 초음파 측정 거리에 비하여 AUV가 원운동하는 직경이 상대적으로 작아 위치보정이 늦게 이루어졌다. 과도한 위치추정 오차를 갖는 경우에는 초기오차를 빠르게 수렴하기 위해서는 AUV가 크게 운동할 필요가 있다.

따라서, 과도한 위치오차가 존재하는 경우에도 초음파 거리계를 이용한 수중 복합항법이 유효함을 알 수 있다. 본 시뮬레이션 조건에서는 최악의 조건에서는 23분 동안의 초기정렬을 위한 항법 후에도 약 22m의 오차를 가지므로, 실제위치로 추정을 위해서는 약 1시간의 정렬이 요구된다. 이러한 정렬시간을 줄이는 방법으로 AUV가 큰 원운동 또는 작운동을 할 필요가 있다.

4. 초기 추정오차를 갖는 AUV 항법

초기 위치오차를 갖는 AUV가 해양탐사를 위하여 ‘c’ 모드로 운항할 경우에 초음파 거리계를 이용하는 수중 복합항법의 초기 위치추정 오차 보정 성능을 시뮬레이션하였다. AUV가 3 노트의 속도로 이동하는 조건으로 이관목 외 (2004a)의 시뮬레이션 조건과 동일한 조건에서 운항하는 시뮬레이션을 수행하였다. AUV의 초기 위치를 원점으로 하고, 수중 초음파의 기준위치는 (0, -50, 0)에 존재하며, AUV의 초기 위치추정 오차는 (-5, 5, 0)로 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다.

초기 위치추정 오차가 존재하는 경우에 일반적으로 사용되는 맹목항법이나 IMU-DVL 항법 (이종무 외, 2003b)을 이용할 경우에는 Fig. 14과 같이 초기위치오차가 전체 궤적에 읍셋으로 더해져 정확함 해져 매핑이 어려워진다. 그림에서 점선은 AUV의 실제궤적을 나타내며, 실선은 추정된 AUV의 궤적을 나타낸다.

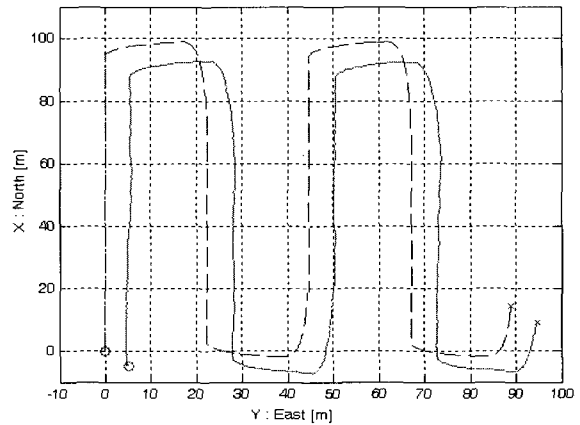


Fig. 14 Estimated trajectory with the dead reckoning navigation when initial localization error exists.

Fig. 15는 위와 동일한 초기위치오차에 대하여 초음파 거리계를 이용한 수중복합항법 시뮬레이션 결과로써, 초음파 응답센서가 (0, -50, 0) 위치에 있고, 0.5초마다 Table 1에 있는 센서 사양으로 거리 신호를 측정하여 보정한 결과이다. 기존의 IMU-DVL 항법을 이용하면 초기 위치오차가 그대로 궤적에 포함되어 정확한 해저탐사가 어려우나, 거리신호를 이용하는 수중 복합항법을 이용하면 180초 이후에 2m 이내의 거리 오차를 가지며 정확하게 궤도를 추적하였다.

따라서, 초음파 거리계를 이용한 수중 복합항법시스템을 이용함으로써 초기위치추정에 오차가 존재하는 경우에도 정밀 해저탐사가 가능하게 된다.

5. 결 론

본 논문은 관성센서를 기반으로 하고 초음파 거리계를 보조센서로 이용하는 수중 복합항법시스템에 대하여 초기오차 수렴특성을 검토하였다. 불특정 초기 추정위치 오차가 존재하는 무인잠수정의 운항중 초기오차 보정 성능 검증을 위하여, 회전팔 시

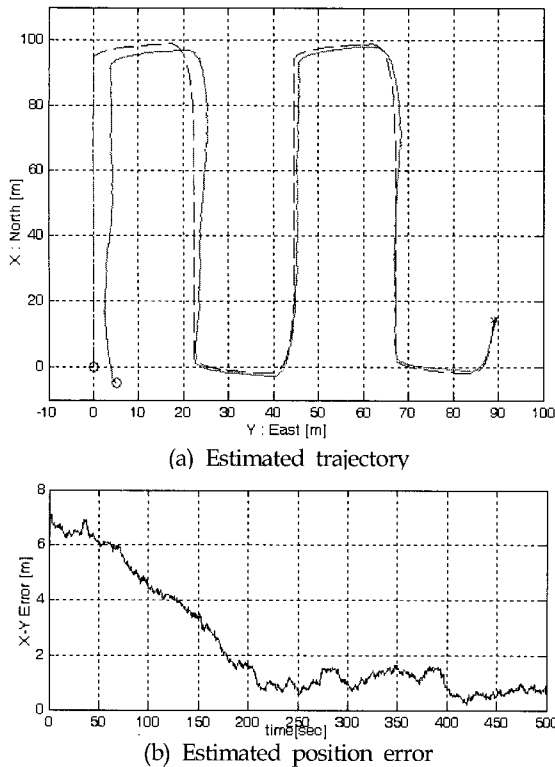


Fig. 15 Simulation results with the IMU-DVL-RS navigation system when initial localization error exists.

험 데이터를 이용하고 초기위치오차를 랜덤하게 지정하여 몬테 카를로 시뮬레이션을 수행하였다. 초음파 거리계를 보조 센서로 이용하는 수중 복합항법시스템은 고전적인 IMU-DVL 항법에 비하여 DVL에 오차가 있다라도 시간경과에 따른 위치추정오차의 누적을 방지할 수 있는 장점이 있고, 초기 추정위치 오차를 보정하는 장점을 갖는다. 10m 범위의 위치추정 랜덤 오차를 갖는 조건에 대한 시뮬레이션 결과, 무인잠수정이 16m 직경의 원운동을 하는 경우 20분 이내에 초기오차가 1.5m 이내로 수렴되었다. 초기 위치오차가 클 경우에는 수렴속도를 개선시키기 위하여 AUV의 운동반경을 크게 할 필요가 있었다. 또한, 6자유도 수중운동을 하는 AUV의 '르' 모드 운항에 대한 시뮬레이션을 통하여 초음파 거리계를 이용하는 수중 복합항법시스템의 유용성을 확인하였다.

후 기

본 논문은 해양수산부의 지원으로 수행중인 "차세대 심해용 무인잠수정 개발"과 한국해양연구원의 "무인잠수정을 이용한 열수환경탐사 기술 개발" 사업 연구결과의 일부임을 밝힌다.

참 고 문 헌

이종무, 이관목, 김시문, 홍석원, 서재원, 성우제 (2003a). "반자율무인잠수정의 수중 복합항법 시스템의 성능평가를 위한

회전팔 시험", 한국해양공학회지, 제17권, 제4호, pp 73-80.
 이종무, 이관목, 성우제 (2003b). "간접 되먹임 필터를 이용한 관성센서 및 초음파 속도센서 기반의 수중 복합항법 알고리즘", 한국해양공학회지, 제17권, 제6호, pp 83-90.
 이관목, 전봉환, 김시문, 이종무, 임용곤, 양승일 (2004a). "초음파 거리계를 이용한 무인잠수정의 수중 복합 항법시스템", 한국해양공학회지, 제18권, 제4호, pp 33-39.
 이관목등 (2004b). 차세대 심해용 무인잠수정 개발(3), 한국해양연구원 연구보고서 UCM0059A-04028.
 홍현수, 이장규, 박찬국. (2002). "초기 기수가 정보가 필요 없는 SDINS의 운항중 정렬", 제어자동화시스템공학 논문지, 제8권, 제6호, pp 524-532.
 Dissanayake G., Sukkariéh S., Neboť E., and Durrant-Whyte H. (2001). "The Aiding of a Low-Cost Strapdown Inertial Measurement Unit Using Vehicle Model Constraints for Land Vehicle Applications," IEEE Tr. on Robotics & Auto., Vol 17, No 5, pp 731-747.
 Gelb, A. (1974). Applied Optimal Estimation, MIT Press.
 Kinsey, J.C. and Whitcomb, L.L. (2004). "Preliminary Field Experience with the DVLNAV Integrated Navigation System for Oceanographic Submersibles," Control Eng. Practice, Vol 12, Issue 12, pp 1541-1549.
 Larsen, M.B. (2000). "High Performance Doppler Inertial Navigation Experimental Results," Oceans Conf., Vol 2, pp 1449-1456.
 Lee, P., Kim, S., Jeon, B., Choi, H. and Lee C. (2004a). "Improvement on an Inertial-Doppler Navigation System of Unmanned Underwater Vehicles Using a Complementary Range Sonar," UT 2004 Symposium.
 Lee, C., Lee, P., Hong, S. Kim, S. and Seong, W. (2004b). "Underwater Navigation System Based on an Inertial Sensor and a Doppler Velocity Log Using Indirect Feedback Kalman Filter," ISOPE Conf., Vol 2, pp 214-221.
 Lee, P., Jeon, B., Kim, S., Choi, H., Lee, C., Aoki, T. and Hyakudome, T. (2004c), "An Integrated Navigation System for Autonomous Underwater Vehicles with Two Range Sonars, Inertial Sensors and Doppler Velocity Log," Oceans & Techno-Ocean Conf., pp 1586-1593.
 Marco, D.B. and Healey, A.J. (2001). "Command, Control, and Navigation Experimental Results with the NPS ARIES AUV," J. of Oceanic Eng., Vol 26, No 4, pp 466-476.
 Titterton, D.H. and Weston, J.L. (1997). Strapdown Inertial Navigation Technology, Peter Peregrinus Ltd., London.
 Whitcomb, L., Yoerger, D. and Singh, H. (1999). "Advances in Doppler-based Navigation of Underwater Robotic Vehicles," Int. Conf. on Robotics & Auto, pp 399-406.

2005년 3월 25일 원고 접수
 2005년 12월 19 일 최종 수정본 채택