

# 기뢰 탐색 작전용 무인잠수정 효과도 분석 시뮬레이션을 위한 시뮬레이션 모델 연구

## A Study of Simulation Model for Effectiveness Analysis Simulation of Unmanned Underwater Vehicle for Mine Searching

황 아 름\*                      김 문 환\*\*                      이 심 용\*\*\*  
Arom Hwang                      Moonhwan Kim                      Sim Yong Lee

### Abstract

In recent years, unmanned underwater vehicles(UUVs) have emerged as viable technical solution for conducting underwater search, surveillance, and clearance operations in support of mine countermeasure missions(MCMs) because of her autonomy and long time endurance capability. It is necessary for UUV for MCM system design to define system specification from various configuration alternatives. This paper introduces a simulation model for mine countermeasure mission effectiveness analysis and presents some simulation results under various tide conditions for validation of the proposed simulation model

Keywords : Unmanned Underwater Vehicle(무인잠수정), Mine Countermeasure(기뢰전), Simulator(시뮬레이터), Motion Model(운동 모델), Navigation Model(항법 모델), Path Planning Model(경로 계획 모델), Tide Model(조류 모델)

### 1. 서 론

해양 자원 개발을 위한 해양 탐사 활동에서 활용도가 높아지고 있는 무인잠수정(UUV : Unmanned Underwater Vehicle)은 국방 분야에서도 기뢰 탐색 작전과 같이 인명 손실을 가져 올 수 있는 작전에 대해

서는 무인화를 통한 인명 손실 방지 및 감시 정찰 작전과 같은 긴 작전 시간을 요구하는 임무에서는 유인 함정과 비교 해봤을 때 장시간 운용 가능한 특성 때문에 보다 효율적인 작전 운용이 가능하기 때문에 사용이 증대될 것으로 기대되고 있다<sup>[1]</sup>. 이러한 이유에서 미 해군은 무인잠수정을 활용하는 작전 개념을 수립하고 작전 개념에 적합한 무인잠수정 개발 계획을 가지고 있다<sup>[2]</sup>. 실제로 미 해군은 기뢰 탐색 작전에 민수용으로 개발된 무인 잠수정을 활용하기 시작했다<sup>[3]</sup>. 기뢰 탐색 작전 및 감시 정찰 작전 등은 장시간 운용 시간을 요구하기 때문에 국방 임무에는 길이 1 m 내외 소형 무인잠수정 보다는 길이 6 m 내외의 대

† 2012년 5월 3일 접수~2012년 7월 13일 게재승인

\* 거제대학교(Koje College)

\*\* LIG 넥스원(LIG Nex1)

\*\*\* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 황아름(aromhwang@koje.ac.kr)

형 무인잠수정이 적합하다고 할 수 있지만, 현재 민수 무인잠수정에 대한 시장은 대형 무인잠수정 보다는 소형 무인잠수정 위주로 구성되어 있기 때문에 소형 무인잠수정에 비해서 대형 무인 잠수정에 대한 연구 및 개발이 미진하지만, 향후 개발에 대한 요구는 증대되고 있다. 대형 무인잠수정 개발 시 선결되어야 하는 문제가 무인잠수정에 요구되는 임무에 적합한 무인잠수정 및 임무에 필요한 각종 장비에 대한 제원을 결정하는 것이다. 잠수함을 포함한 일반적인 선박 설계 시에는 비슷한 임무/용도에 이미 사용되고 있는 선박 및 탑재 장비에 대한제원을 이용하여 설계하고자 하는 선박에 대한 제원 및 성능을 결정하는 방법이다. 모션을 활용한 초기 설계는 선박 설계 시 요구되는 여러 가지 선박 안전 및 성능에 대한 계산에 필요한 시간을 단축시킬 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 무인잠수정은 보통 연구 등 고유 목적을 가지고 개발되기 때문에 실적선을 이용하여 개발하는데 어려움이 존재하고 새로운 무인잠수정 개발에 많은 시간이 요구되고 있다. 이러한 이유에서 모델링과 시뮬레이션(M&S : Modeling & Simulation)을 통한 효과도 분석을 활용하여 결정하는 것이 시간과 비용 측면에서 가장 효율적인 방법 중 하나라고 할 수 있다<sup>14)</sup>.

현재 개발되어 있는 M&S 기반 무인잠수정용 시뮬레이터들은 대부분 설계 완료된 무인 잠수정의 운동 모델 등을 수조 시험 및 실험역 시험 이전에 검증하는데 활용되고 있거나 연구 목적으로 개발되어 실제 무인 잠수정이 없는 경우, 이를 활용하여 학술 및 연구 목적으로 활용되고 있다<sup>15-18)</sup>. 이처럼 학술적 연구 목적 등을 위한 시뮬레이터 효과도 분석을 통하여 요구사항 검증 및 초기 제원 도출을 통한 무인 잠수정의 개발 과정에 반영하는 경우는 매우 드문 현실이다. 무인잠수정 성능 분석을 위한 시뮬레이터를 활용하여 각종 작전에 요구되는 무인잠수정의 최고 속도, 항법 오차 및 추진력과 같은 제원을 결정할 수 있어야 하기 때문에 체계 성능 분석 시뮬레이터 개발에서 가장 중요한 것은 무인잠수정의 운동 및 위치를 모사할 수 있는 모델이라고 할 수 있다. 또한 실제 개발된 무인 잠수정이 없기 때문에 적합한 운동 모델을 설계 하는 것이 매우 어려운 일이 될 수 있다. 운동 모델 이외에도 무인잠수정 실제 운용에 필요한 제어기, 항법 시스템, 경로 계획 알고리즘 등에 대한 모델 역시 무인잠수정 성능 분석을 위한 시뮬레이터에 필요한 모델이다.

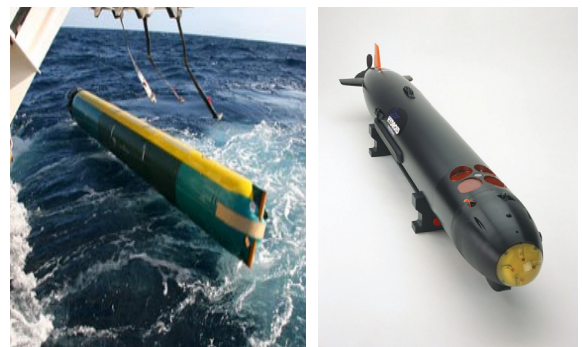
본 논문에서는 무인잠수정 체계 성능 분석을 위한

시뮬레이터에 적용하기 위하여 조류 환경에서 사용할 수 있는 공개되어 있는 무인 잠수정의 제원, 운동 모델, 유체 동역학 계수 등을 이용하여 개발한 무인잠수정 운동 모델, 슬라이드 모드 기반 제어 모델, 경로 계획 모델 및 항법 모델을 소개하고 개발한 체계 성능 분석 시뮬레이터를 활용하여 조류 환경에서의 제안된 운동 모델, 제어 모델 및 항법 모델의 성능을 검증하고 그 결과를 제시하였다.

## 2. 시뮬레이션 모델

### 가. 운동모델

본 논문에서는 우리 해군 소해 작전에 사용을 목표로 개발하고자하는 무인잠수정으로 길이 6 미터 내외, 지름 60 cm 내외이며 1축 추진기를 가진 어뢰형 무인잠수정 선택하였다. 소해작전 특성 상 작전 해역에서 장시간 운용이 가능하여야 하기 때문에 미국 해군이 개발한 Long Term Mine Reconnaissance System(LMRS)(Fig. 1 a))을 모션으로 하였다. LMRS는 현재 주요 제원 이외의 세부적인 유체역학적 특성이 알려지지 않아 정확한 운동 모델을 개발하기 어렵기 때문에 학술적으로 공개되어 있는 REMUS 100(Fig. 1 b))의 운동 모델을 기반으로 LMRS 규격의 운동 모델을 추정하였다. REMUS 100은 학술 목적으로 개발된 1축 추진기를 가진 어뢰형 무인잠수정으로서 본 논문에서 목표로 하고 있는 무인잠수정과 운동 특성이 가장 유사할 것으로 판단되며, 개발 완료 이후 많은 실험, 해양탐사 활동 군사 작전 등에 적용되어 운동 성능 및 자율 운항 성능에 대한 검증을 거쳤기 때문에 선정하였다.



a) LMRS

b) REMUS

Fig. 1. UUV for motion model used in simulator

목표 무인잠수정의 운동 모델은 식 (1)~(6)과 같이 참고문헌<sup>[9]</sup>에 제시되어 있는 무인잠수정의 6자유도 운동 방정식을 사용하여 유도하였다. 수식의 간략화를 위하여 부력중심에 원점을 두었으며, 상하좌우 대칭이라 가정 하였다.

$$m[\dot{u} - vr + wq + z_G(pr + \dot{q})] = \sum X \quad (1)$$

$$m[\dot{v} + ur - wp + z_G(qr - \dot{p})] = \sum Y \quad (2)$$

$$m[\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2)] = \sum Z \quad (3)$$

$$I_{xx}\dot{p} + (I_{xx} - I_{yy})qr - (\dot{r} + pq)I_{zx} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pr - \dot{q})I_{xy} - mz_G(\dot{v} + ur - wp) = \sum K \quad (4)$$

$$I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})pr - (\dot{p} + qr)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{zx} + (qp - \dot{r})I_{yz} + mz_G(\dot{u} - vr + wq) = \sum M \quad (5)$$

$$I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq - (\dot{q} + rp)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (rq - \dot{p})I_{zx} = \sum N \quad (6)$$

식 (1)~(6)에 적용하기 위한 각종 운동력 계수는 참고문헌<sup>[10,11]</sup>에 제시한 REMUS의 주요 유체력 계수를 적용하여 추정하였다. 추정 방법은 목표로 하는 LMRS 급 무인잠수정과 REMUS의 제원을 비교하여 유체력에 가장 큰 영향을 주는 인자인 Aspect ratio를 일치시키고 이에 따른 스케일비 3.2를 사용하여 주요 유체력 계수들을 무차원화하여 스케일비에 맞추어 확장하였다.

나. 유도제어모델

유도 추적을 위해서는 무인잠수정의 운동 특성을 고려한 제어 오차 모델이 필요하다. 본 논문에서는 운동 제어기 설계를 위해서 제어에 필요한 경로 오차를 아래 Fig. 2와 같이 CTE(Cross Track Error)을 정의 하고 이를 최소화 하는 제어기를 설계하였다. CTE를 산정한 이유는 수평면 운동에서 선수제어 각과 경로 오차를 함께 고려할 수 있기 때문이다.

본 논문에서는 PID 제어 기법을 기반으로 작성 수평면 제어와 수직면 제어 분리하여 개발하였다. 수평면 제어를 위해서는 CTE를 최소화 하도록 방향타각

산출하는 PID제어기를 설계하였다.

수직면 제어를 위해서는 목표 수심과의 현재 관측 수심과의 오차를 최소화하는 승각타각 산출하는 PID 제어기를 설계하였다. 무인잠수정의 전진 속도 제어를 위한 별도의 되먹임 제어기는 없으며, 단순히 원하는 속도를 입력받아 미리 정해진 RPM을 출력하는 방법을 이용하였다

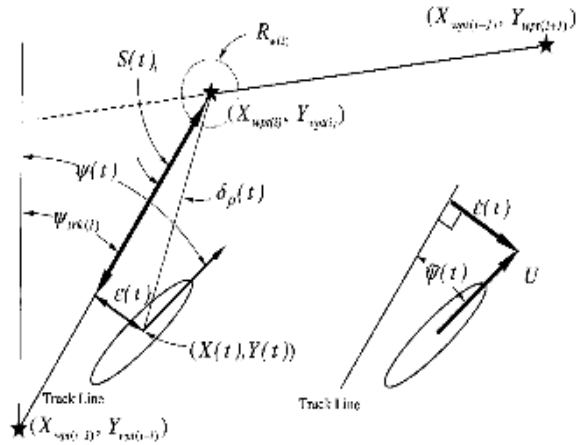


Fig. 2. Cross track error

다. 경로계획 모델

본 논문에서는 포텐셜 기법<sup>[12]</sup>을 기반으로 하는 경로계획 기법 모델을 설계하였다. 경로계획 모델의 기본적인 개념은 Key waypoint 들이 주어 졌을 때, 각각의 Key waypoint들 사이의 중간 경유점을 생성하는 하는 것이다. 경로계획은 크게 전역 경로계획 기법과 지역 경로계획 기법으로 구분되어 질 수 있다.

전역 경로기법은 Key waypoint가 설정 되었을 때, 미리 알려진 장애물 정보를 바탕으로 지역해가 없는 경로계획을 수행하는 것이며, 지역 경로계획은 알려지지 않는 장애물에 대하여 경로계획을 수행하는 것이다. 본 논문에서 제시된 경로계획 계획 모델은 시뮬레이터 적용 시 사용자가 Key waypoint를 생성하고 관리할 수 있어야 하기 때문에 전역 경로계획은 수행하지 않고 생성된 Key waypoint들에 대한 지역 경로계획만을 수행하도록 설계하였다. Fig. 3은 Key waypoint 기반 경로계획 구성을 나타낸다. 지역 경로기법은 각각의 Key waypoint로 최단거리로 이동하다 장애물을 만나면 회피 경유점을 생성하여 장애물을 회피하게 된다.

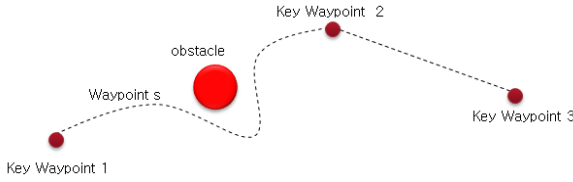


Fig. 3. Path planning based key waypoint

라. 항법 모델

REMUS의 항법의 모사하기 위해 실제 REMUS의 값에 항법 에러를 더하는 형태의 항법 모델을 사용하였다. 운동 모델이 주어질 때, 수치해석 기법을 통해 얻어진 현재 위치 값  $[x\ y\ z]^T$ 이 있다고 할 때, 항법 모델로 얻어진 위치 값  $[x_I\ y_I\ z_I]^T$  값은 다음과 같은 상한값을 갖는 랜덤 값으로 설정된다.

$$\begin{bmatrix} x_I \\ y_I \\ z_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_I \\ y_I \\ z_I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_r + E_m \cos(\sin(0.001x))R \\ E_r + E_m \cos(\sin(0.001x))R \\ M_d(E_r + E_m \cos(\sin(0.001x))R) \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서  $E_r$ 은 오프셋 에러 값이며,  $E_m$ 은 랜덤 에러 크기를 나타낸다.  $R \in [-0.5, 0.5]$ 은 -0.5와 0.5 사이 값을 가진 임의의 값이며  $M_d$ 는 심도 에러 보정을 위한 크기 값이다.

마. 조류 모델

본 논문에서 사용된 조류 모델은 REMUS의 운동 속도와 조류 속도의 상대차를 이용한 상태 속도를 구하는 형태로 구현되었다. REMUS의 운동 속도를  $[u\ v\ w]^T$ 라고 하고 조류 속도를  $[u_c\ v_c\ w_c]^T$ 라 하면 조류 영향을 받는 상태 속도  $[u_r\ v_r\ w_r]^T$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{bmatrix} u_r \\ v_r \\ w_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} - T_c \begin{bmatrix} u_c \\ v_c \\ w_c \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서,  $T_c$ 는 상태 변환 행렬로 다음과 같은 값을 가진다.

$$T_c = \begin{bmatrix} T_{c_1} & T_{c_2} & T_{c_3} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$T_{c_1} = \begin{bmatrix} c(\psi)c(\theta) \\ s(\phi)c(\theta) \\ s(\theta) \end{bmatrix}$$

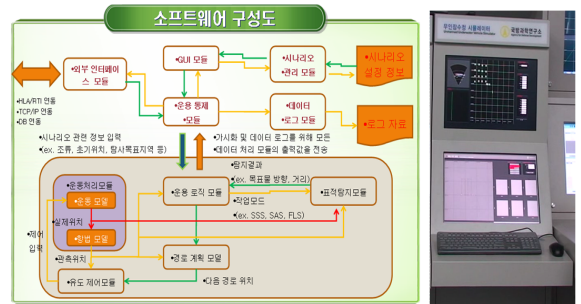
$$T_{c_2} = \begin{bmatrix} c(\psi)s(\theta)s(\phi) + s(\psi)c(\phi) \\ c(\phi)c(\psi) - s(\phi)s(\theta)s(\psi) \\ c(\theta)s(\phi) \end{bmatrix}$$

$$T_{c_3} = \begin{bmatrix} s(\psi)s(\phi) + c(\psi)c(\phi)s(\theta) \\ -c(\phi)s(\theta)s(\psi) + c(\psi)s(\phi) \\ c(\phi)c(\theta) \end{bmatrix}$$

$s() = \sin(), c() = \cos()$

3. 시뮬레이션

본 논문에서 개발한 시뮬레이션 모델을 검증하기 위하여 개발 완료된 무인 잠수정 체계 성능 분석 시뮬레이터<sup>[13]</sup>에 직접 모델을 장착하고 다양한 조류 환경에서 기뢰 탐색 작전을 수행하는 무인잠수정을 가정하고 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 4는 개발 완료된 시뮬레이터의 소프트웨어적 구조와 형상을 보여 주고 있다. 무인 잠수정 체계 성능 분석 시뮬레이터의 자세한 내용은 참고 문헌에 설명되어 있다.



a) S/W architecture

b) Simulator

Fig. 4. Simulation s/w architecture and simulator

실제 해상 환경에서 무인잠수정의 항법 오차와 주행 성능에 가장 큰 영향을 주는 인자 중 하나가 조류의 방향과 속도이기 때문에, 실제 해상실험(sea trial test) 이전에 다양한 조류 환경에서 무인잠수정의 유도제어 모델과 항법 모델의 연동 기능을 확인하는 것이 매우 중요하다. 본 논문에서 수행한 시뮬레이션 조건은 Table 1에 정리되어 있다. 시뮬레이션은 길이 4 km 폭 1 km 해역을 200 m 간격으로 ‘ㄱ’자 형태로 수심 20 m에서 3 노트로 기뢰 탐색 작전을 수행한다고 가정하였다. Table 1에 제시되어 있는 조건에서 시뮬레이션을 수행하여 획득된 무인잠수정의 궤적 결과 중 조건 1의 3차원 결과가 Fig. 5에 표시되어 있다.

Table 1. Simulation Condition

조 건	조 류	비 고
1	0	조류 없음
2	x : 1 kts	폭 방향 조류
3	y : 1 kts	길이 방향 조류

Fig. 5에서 붉은 색 원은 경로 계획 상의 key way point이며 파란 색 원은 GPS 신호 수신을 위한 수면에서의 way point를 표시한다. 또한 붉은 색 선은 경로 계획에 의해서 생성된 최적 경로이며 파란 색 선은 시뮬레이션에 의해서 구한 무인잠수정의 궤적을 표시하고 있다.

Fig. 5를 살펴보면 자동으로 생성된 기뢰탐색작전의 계획된 경로에 대해서 무인잠수정이 매우 적은 오차를 가지고 운동하고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 5의 궤

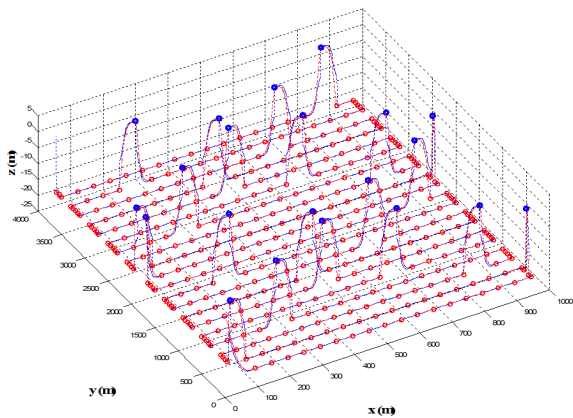


Fig. 5. Simulation result under condition 1 in Table 1

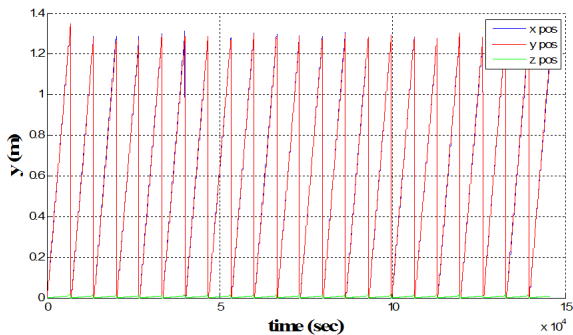


Fig. 6. Trajectory error of simulation result shown in Fig. 5.

적 결과에 대한 x, y, z 방향에 대한 위치 오차는 Fig. 6에 제시되어 있다. Fig. 5에서 각 방향의 위치 오차는 발산하지 않고 일정한 값 이내로 제한되고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 7과 8은 Table 1의 조건 2 즉 폭 방향으로 조류가 존재하는 환경에 대한 시뮬레이션의 3차원 궤적 결과와 2차원 궤적 결과를 보여 주고 있다. 그림 내 표시는 Fig. 5와 동일하다. Fig. 7과 의 표시되어 있는 사전 계획 경로를 살펴보면 사전에 입력된 조류 정보를 이용하여 key waypoint를 통과하는 경로가 생성되고 있음을 확인할 수 있다. 또한 무인 잠수정이 생성된 경로에 대해서 조류에서 방향 전환 시 일부 경로가 생기지만, 오차 누적 없이 예정 경로로 복귀하여 기동하고 있음을 확인할 수 있다.

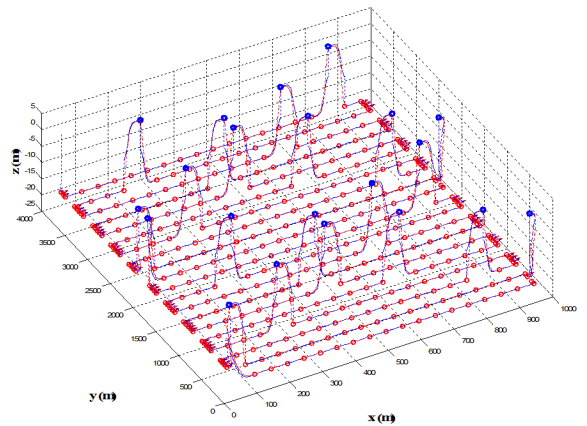


Fig. 7. Simulation result under condition 2 in Table 1

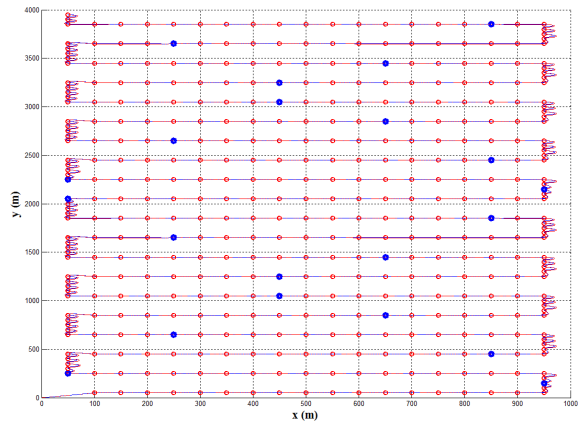


Fig. 8. Trajectory in x-y plane of simulation result shown in Fig. 7.

Fig. 9와 10은 Table 1의 조건 3 즉 길이 방향으로 조류가 존재하는 환경에 대한 시뮬레이션의 3차원 궤적 결과와 2차원 궤적 결과를 보여 주고 있다. 그림 내 표시는 Fig. 5와 동일하다. 조건 2의 결과와 마찬가지로 Fig. 9의 사전 계획 경로가 사전에 입력된 조류 정보를 이용하여 key waypoint를 통과하는 경로가 생성되었음 역시 확인할 수 있다. 또한 실제 무인 잠수정이 이동한 경로는 길이 방향 조류로 인해서 지속적으로 영향을 받고 있어 계속 오차가 발생하지만, 경로 발산 없이 예정 경로로 복귀하여 기동하고 있음을 확인할 수 있다.

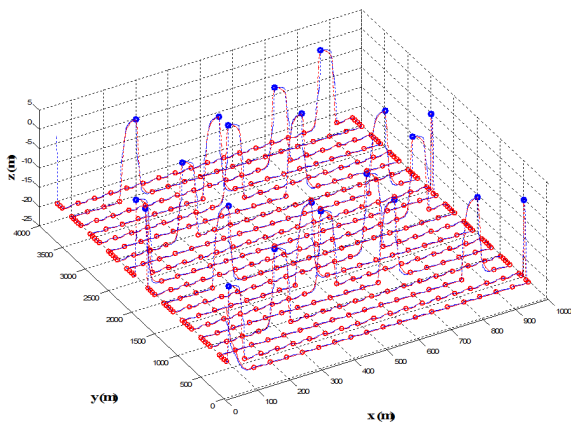


Fig. 9. Simulation result under condition 3 in Table 1

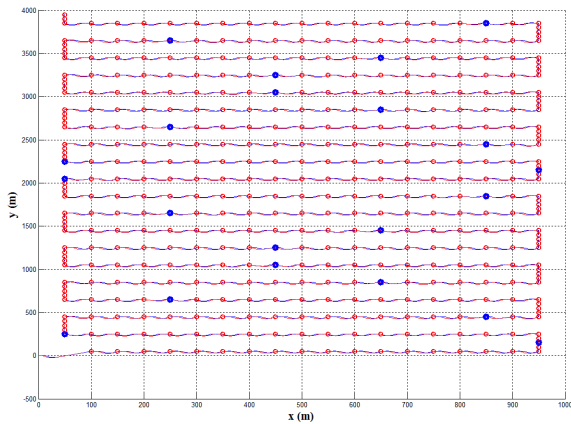
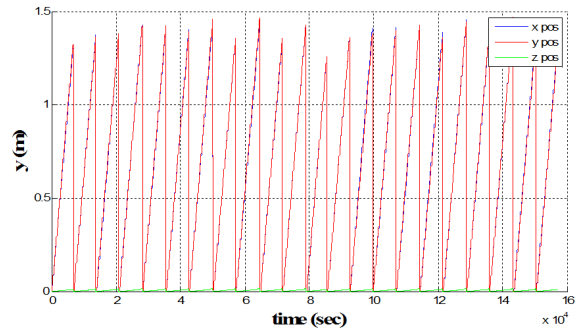


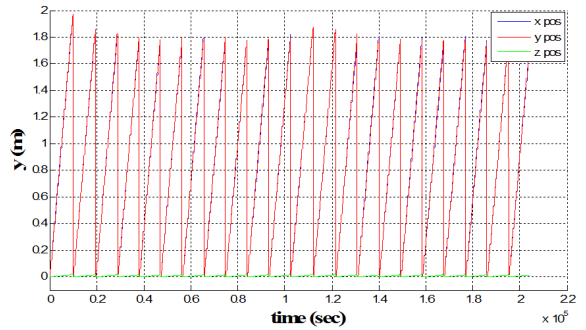
Fig. 10. Trajectory in x-y plane of simulation result shown in Fig. 9.

Fig. 11은 Table 1의 조건 2와 3에 대한 시뮬레이션 에러 결과를 보여주고 있다. Fig. 11을 살펴보면, 길이

방향의 조류가 폭 방향 조류보다 오차 발생에 더 큰 영향을 끼치고 있음을 확인할 수 있으면, 정해진 임무 종료 지점까지 도착을 위해서 더 많은 시간을 요구하고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 Fig. 6과 마찬가지로 위치 오차가 두 경우 모두 발산하지 않고 일정한 범위 내에서 제한되고 있음을 확인할 수 있다. 이처럼 위치 오차가 일정한 범위 내에서 제한되고 있다는 점에서 본 논문에서 제안된 시뮬레이션 모델이 조류 환경에서도 강인 모델로 사용될 수 있음을 확인할 수 있다.



a) Condition 2 at Table 1



b) Condition 3 at table 1

Fig. 11. Trajectory error of simulation result

#### 4. 결론

본 논문에서는 공개되어 있는 1.2 m 길이를 가지는 1축 추진기 탑재 어뢰형 무인 잠수정의 유체동역학적 특성을 이용하여 6 m 내외 길이의 대형 어뢰형 무인 잠수정 운동 모델, 유도제어 모델, 경로계획 모델 항법 모델을 개발하였으며, 실제 수중 운동 환경을 모사하기 위한 조류 모델을 개발하였다. 개발된 모델들의 성

능을 검증하기 위하여 다양한 조류 환경에 대한 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 제시하였다.

향후 과제로 기뢰 탐색 작전에 적합한 운용 개념 및 제원을 개발하기 위한 효과도 분석에 적용할 계획이며 검증된 운동 모델 등을 반영한 무인잠수정을 설계 및 제작하여 예인 수조 등에서의 저항 추진 시험 및 실제 해상 시험을 통한 실제 환경에서의 모델의 적절성 검증을 수행할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 국방과학연구소 선행 개발과제인 ‘무인잠수정 체계 성능 분석 시뮬레이터’의 일부로 수행되었으며, 위 기관의 후원에 감사드립니다.

## References

- [1] 최중락, “무인잠수정(UUV) 개발 추세 및 핵심기술 분석”, 국방기술플러스, Vol. 55, 국방과학연구소, 2008.
- [2] Deputy Assistant Secretary of the Navy, and OPNAV N77, “UUV Mater Plan”, <http://www.navy.mil/navydata/technology/uuvmp.pdf>, 2004.
- [3] <http://www.who.edu/page.do?pid=29858>.
- [4] 박성희, “한국에서의 모의기반 획득”, 국방과학기술플러스, Vol. 55, 국방과학연구소, 2008.
- [5] Brutzman, D. P., Kanayama V. and Zyda M. J., “Integrated Simulation for Rapid Development of Autonomous Underwater Vehicle”, Proc. of AUV' 92 pp. 3~10, 1992.
- [6] Correia L. and Steiger-Garcia A., “An AUV Simulator for test and Development of a Behavior Based Architecture”, Proc. of AUV'93, 1993.
- [7] Ridaou, P., Carreras, M., Ribas D., and El-Fakdi, A., “Graphical Simulators for AUV Development”, 1st. International Symposium on Control, Communications and Signal Processing, 2004.
- [8] Chappell S. G. and Komerska R. J., “An Environment for High-Level Multiple AUV Simulation and Communication”, CLOUT, NOAA/NASA Workshop, 2000.
- [9] T. I. Fossen, Marine Control Systems, Marine Cybernetics, 2002.
- [10] 황아름, 김문환, 김찬기, 이심용, 윤재문, “성능분석 시뮬레이션을 위한 어뢰형 무인잠수정 운동 모델 및 유도 제어 모델 연구”, 2010년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 논문집, 2010.
- [11] P. Timothy, “Verification of a Six-Degree of Freedom Simulation Model for the REMUS Autonomous Underwater Vehicle”, M.S. Thesis Massachusetts Institute of Technology, 2001.
- [12] A. Alvares, A. Caiti, and R. Onken, “Evolutionary Path Planning for Autonomous Underwater Vehicle in a Variable Ocean”, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 29, No. 2, pp. 216~227, 2004.
- [13] 황아름, 김문환, 이심용, 윤재문, 김찬기, “무인잠수정 기뢰 탐색 효과도 분석,” 한국군사과학기술학회지, 제14권 제5호, pp. 781~787, 2011.