

이산 사건 및 역학 기반 이산 시간 혼합형 모델링에 의한 잠수함의 잠항 부상 시뮬레이션

차주환*, 노명일^{†**}, 이규열^{***}

서울대학교 조선해양공학과 대학원*
울산대학교 조선해양공학부**
서울대학교 조선해양공학과 및 해양시스템공학연구소***

Submarine Diving and Surfacing Simulation Using Discrete Event and Dynamic-based Discrete Time Combined Modeling Architecture

Ju-Hwan Cha*, Myung-Il Roh^{†**} and Kyu-Yeul Lee^{***}

Department of the Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University*
School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan**
Department of the Naval Architecture and Ocean Engineering, and Research Institute of
Marine Systems Engineering, Seoul National University***

Abstract

In this study, a discrete event and dynamic-based discrete time combined simulation modeling architecture, which can be used to calculate equations of motions among discrete events, is developed. This is composed of a command model, which is in charge of discrete event simulation, a numerical integration model, which finds motions by numerically integrating equations of motions, and an external force and control force model, which calculates the force and transmits it to the equations. Using this architecture, we can develop dynamic-based simulation by simply connecting and combining models, and handle simultaneously discrete event and discrete time simulation. To verify the efficiency of the architecture, it is applied to the submarine diving and surfacing simulation.

※Keywords: Submarine(잠수함), Diving(잠항), Surfacing(부상), Simulation(시뮬레이션), Discrete event(이산 사건), Discrete time(이산 시간)

1. 서론

접수일: 2009년 2월 15일, 승인일: 2010년 1월 14일

†교신저자: miroh@ulsan.ac.kr, 052-259-2165

잠수함의 잠항/부상 시뮬레이션은 설계 단계에서 다양한 설계안을 반영하여 요구하는

성능을 낼 수 있는지 확인하는 용도로 사용될 수 있다. 예를 들어 어떠한 추진 체계를 선택하는가에 따라, 또는 함수미 수평타의 면적과 형상, 위치에 따라 잠수함의 잠항/부상 시 운동이나 목적 수심에 도달하는 시간이 영향을 받는다(Fig. 1 의 ①). 또한 운용 단계에서는 복잡한 잠항/부상 절차에 따라 잠수함의 운동을 확인하고, 잠항/부상에 소요되는 시간을 측정할 수 있다(Fig. 1 의 ②).

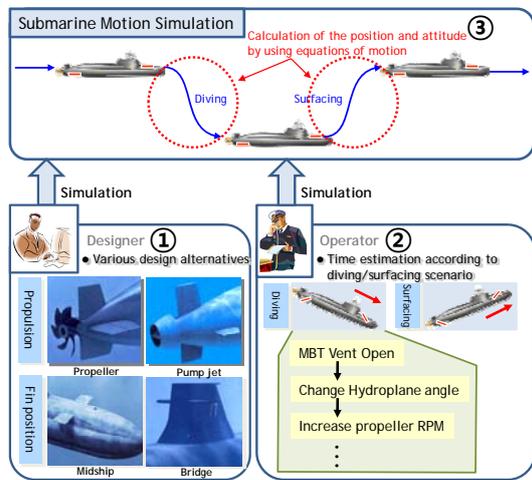


Fig. 1 Examples of submarine motion simulation for the purpose of design and strategy

잠수함의 잠항/부상을 위해서는 일반적으로 여러 단계의 명령을 거치게 된다. 각각의 명령을 사건(Event)이라고 할 때, 일련의 사건에 의해 진행되는 시뮬레이션을 이산 사건 시뮬레이션(Discrete Event Simulation)이라고 한다. 잠수함의 잠항/부상을 이산 사건 시뮬레이션으로 수행할 경우, 각각의 사건을 경험식 또는 합리적인 가정을 사용해 소요되는 시간이나 동작을 예측하게 된다. 이산 사건 시뮬레이션을 여러 번 수행하여 확률론적으로 전체 잠항/부상에 소요되는 시간을 예측할 수 있는데, 이를 Monte-Carlo 방법이라고 한다.

한편, 경험이나 가정에 의해서 시뮬레이션을 수행할 경우 실제와는 다를 수 있다. 따라서, 잠항/부상 시 잠수함의 자세와 작업 시간을

정확하게 구해야 할 경우에는 운동 방정식을 세우고, 매 단위 시간 잠수함의 자세와 위치를 계산해야 한다(Fig. 1 의 ③). 매 단위 시간마다 진행되는 시뮬레이션을 이산 시간 시뮬레이션(Discrete Time Simulation)이라고 한다.

본 논문의 목적은 잠수함의 잠항/부상 전체의 과정을 모델링하고 시뮬레이션 하는 것이다. 이를 위해 Bang et al.(2007)에서 개발한 이산 사건 및 이산 시간 혼합형 시뮬레이션 커널을 사용하여 이산 사건 시뮬레이션을 수행하는 동시에 운동 방정식을 계산하는 이산 시간 시뮬레이션을 수행할 수 있는 *이산 사건 및 역학 기반의 이산 시간 혼합형 시뮬레이션 모델 구조* (Discrete event and Dynamic-based Discrete Time Combined Simulation Modeling Architecture)를 개발하였다. 이는 이산 시간을 수행하던 중 손쉽게 동역학 시뮬레이션이 가능한 모델 구조를 가지고 있다.

그리고, 본 논문에서 개발한 모델 구조의 효율성을 검증하기 위해 먼저 잠수함의 잠항/부상 절차를 정리한 다음, Son et al.(2008)에서 제안한 수중운동체의 체계 및 부체계 모델을 참고하여 모델을 구성하였다. 그리고, 이산 시간 시뮬레이션을 수행할 때, MBT(Main Ballast Tank)를 비롯한 여러 탱크 내부의 중량 변화를 고려하였다. 또한 잠항/부상 시에 잠수함의 자세 및 위치를 변경시키기 위해 PID (Proportional, Integral, Derivative) 제어를 사용하였다.

본 논문의 2 장에서는 잠수함의 잠항/부상 관련 연구 및 잠수함의 운동과 관련된 연구에 대해 살펴보고, 본 논문에서 개선한 점에 대해 언급한다. 3 장에서는 잠수함의 잠항/부상의 절차에 대해 언급한 다음 Monte-Carlo 방법에 따른 이산 시간 시뮬레이션 과정에 대해 설명한다. 4 장에서는 본 논문에서 개발한 이산 사건 및 역학 기반의 이산 시간 혼합형 시뮬레이션 모델 구조에 대해 설명한다. 그리고 5 장에서는 잠수함/잠항 부상 모델링, 6 장에서는 잠수함 잠항/부상 시뮬레이션을 수행한 결과를 설명한다. 마지막으로 7 장에서는 결론 및 향후 연구 계획을 기술한다.

2. 관련 연구 현황

Bang et al.(2007)에서는 Zeigler et al.(2000), Praehofer(1991)의 연구를 바탕으로 이산 사건 및 이산 시간 혼합형 시뮬레이션을 개발하기 위한 이산 사건 및 이산 시간 혼합형 시뮬레이션 커널을 개발하였다. 그리고 이를 블록 탑재와 같은 조선 공정 시뮬레이션에 적용하였다.

Son et al. (2008)은 Bang et al.(2007)에서 개발한 이산 사건 및 이산 시간 혼합형 시뮬레이션 커널을 사용하여 잠수함의 잠항/부상 시뮬레이션을 위한 체계 및 부체계의 표준모델구조에 대한 연구를 수행하였다. 그러나 복잡한 운동 방정식을 사용하는 대신, 간단한 경험식을 사용하여 타각의 변화에 따른 잠수함의 자세 변화를 가정하였기 때문에 실제 잠수함의 운동을 시뮬레이션 하는 것에는 한계가 있다.

Lee and Choi(1996)은 무인 잠수정(ROV : Remote Operated Vehicle)에 대해 6 자유도 운동방정식을 세우고, LQG(Linear Quadratic Gaussian), H_∞ 제어, Fuzzy 제어 등 다양한 제어 이론을 사용하여 무인잠수정의 운동을 제어하였다.

Lee(2004), Yun et al.(2005), Choi et al.(2006)은 Gertler and Hagen(1967)에서 제안한 잠수함의 6 자유도 운동 방정식을 사용하여 목표 추적, 안전운항영역 평가, 심도 유지 등의 제어를 수행하였다.

Prestero(1994)는 AUV (Autonomous Underwater Vehicle)에 대한 실험을 통해 조종미계수를 추정하고, 이를 바탕으로 AUV 의 6 자유도 조종 운동 방정식을 구성하였다. 다음으로 수직면에 대한 운동 방정식을 선형화시킨 뒤 PD 제어를 통해 수직면 상에서 AUV 의 심도를 변경하는 제어를 수행하였다.

Lee and Choi(1996) 이후에 언급된 관련 연구의 경우 대부분 6 자유도 운동 방정식을 사용하여 신뢰도 높은 시뮬레이션을 수행하고, 다양한 제어 기법을 사용하여 수중운동체의 자세와 위치를 제어하였다. 그러나 이산 사건 시뮬레이션처럼 다양한 사건에 의해 진행되는 시뮬레이션을 수행하지는 못하였다. 또한 특정

목적에 따라 개발되었기 때문에 다른 목적에 그대로 적용하기 어렵다는 한계점이 있다.

따라서 본 논문에서는 이산 사건 및 역학 기반의 이산 시간 혼합형 시뮬레이션 모델 구조를 개발하여 신뢰도를 높이면서도 유연하게 사건에 따른 시뮬레이션을 수행할 수 있는 환경을 구축하였다.

3. 잠수함의 잠항/부상 절차에 따른 이산 사건 시뮬레이션과 Monte-Carlo 방법

잠수함의 잠항/부상 전체의 과정을 모델링하고 이를 시뮬레이션 하기 위해서 먼저 HDW(1992)에서 정의한 잠수함의 운항 상태의 종류에 대해 설명하고, 그 중에서 개략적인 잠수함의 잠항 및 부상의 절차에 대해 상세히 알아본다. 이로부터 이산 사건 시뮬레이션의 명령(사건)을 정의한다.

3.1 잠수함 운항 상태의 종류

HDW(1992)에서는 잠수함의 운항을 다음 8 가지 종류로 분류하여 지침을 내리고 있다.

- (1) Diving station: 수상에서 운항 중인 잠수함이 수면 아래로 잠항하는 단계
- (2) Surfacing station: 수면 아래에서 운항 중인 잠수함이 수면 위로 부상하는 단계
- (3) Surface running: 수상에서 운항 중인 상태
- (4) Submerged running: 잠항하여 운항중인 상태
- (5) Battle station: 전투 중인 상태
- (6) Emergency or abandon ship station: 잠수함의 파손 또는 기기 고장으로 긴급 상황이거나 잠수함을 버리고 탈출해야 하는 상태
- (7) Man overboard: 수상에서 정박 또는 서행 중에 선원이 밖에 나와 있는 상태
- (8) Snorkeling: 디젤전기추진 잠수함의 경우 수면 밖의 공기를 받아서 디젤 엔진을 구동, 배터리를 충전하고 내부의 공기 교환을 하는 상태

이상에서 기술한 잠수함의 8 가지 운항 상태 중 본 논문에서 초점을 맞추고 있는 (1), (2)의 보다 상세한 절차에 대해 설명한다.

3.2 잠수함 잠항 절차(Diving Procedure)

수상에서 운항 중인 잠수함이 잠항하기 위해서는 일반적으로 Fig. 2 의 과정을 따른다.

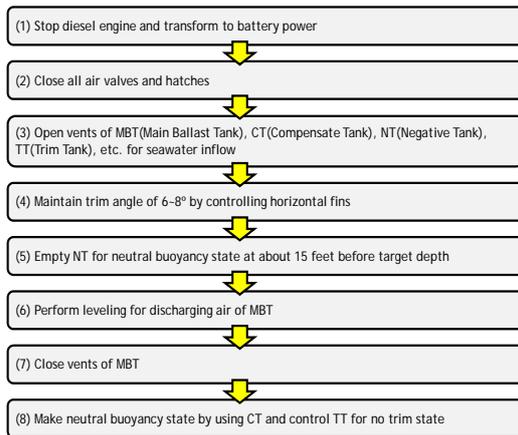


Fig. 2 General submarine diving procedure with diesel engine

3.3 잠수함 부상 절차(Surfacing Procedure)

수면 아래에서 운항 중인 잠수함이 부상하기 위해서는 일반적으로 Fig. 3 의 과정을 따른다.

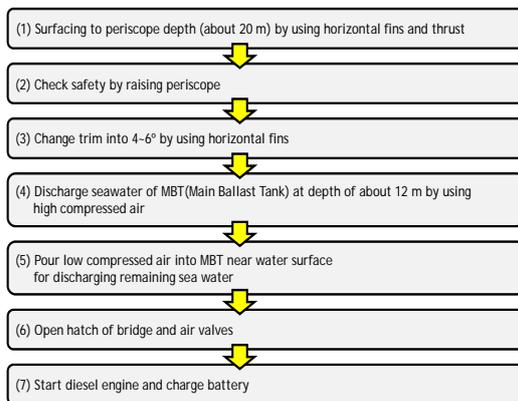


Fig. 3 General submarine surfacing procedure with diesel engine

3.4 잠수함 잠항/부상에 대한 이산 시간 시뮬레이션과 Monte-Carlo 방법

잠수함이 정해진 절차에 따라 잠항/부상을 수행할 때, 총 수행 시간이 관심의 대상이 된다.

총 수행 시간을 계산하기 위한 방법으로 각각의 절차에 소요되는 시간을 평균과 표준편차를 사용하거나 경험식 또는 간단한 수식으로 계산할 수 있다.

이산 사건 시뮬레이션을 수행하여 한 번의 작전에 소요되는 총 수행 시간을 계산할 수 있다. 이러한 시뮬레이션을 여러 번 수행하여 확률적으로 소요되는 총 수행 시간을 계산할 수 있는데 이를 Monte-Carlo 방법이라고 한다.

4. 이산 사건 및 역학 기반의 이산 시간 혼합형 모델 구조

Monte-Carlo 방법에 의한 시뮬레이션을 수행할 경우, 주어진 경험식이나 소요 시간에 대한 평균 시간과 표준편차 등의 정보가 전체 시뮬레이션의 신뢰도에 영향을 주게 된다. 따라서 보다 정확한 계산이 필요한 경우에는 이산 사건 시뮬레이션을 통해 매 단위 시간 마다 계산한 결과로부터 시간을 측정하게 된다. 특히 잠수함의 운동과 같이 운동 방정식을 풀어야 하는 경우에는 따로 계산을 수행하여 그 결과를 이산 사건 시뮬레이션에 반영해야 하는 불편함이 있다.

따라서, 본 논문에서는 이산 사건 시뮬레이션을 수행하던 중 운동 방정식을 계산할 필요가 있는 경우, 예를 들면 잠수함 잠항 시 항수미 수평타의 타각을 조절하는 경우(Fig. 2 의 (4)), 역학 기반의 이산 시간 시뮬레이션을 수행할 수 있는 모델 구조를 개발하였다.

4 장에서는 먼저 Bang et al.(2007)에서 개발한 이산 사건 및 이산 시간 혼합형 시뮬레이션 커널에서 정의한 시뮬레이션 모델의 구성 요소에 대해 간략히 기술하고, 이를 사용해 본 논문에서 개발한 이산 사건 및 역학 기반의 이산 시간 혼합형 시뮬레이션 모델 구조에 대해 설명한다.

4.1 이산 사건 및 이산 시간 혼합형 시뮬레이션 모델의 구성

Zeigler(2000)는 이산 사건 시뮬레이션을 수행하기 위해서 독립적인 기능을 수행하는 단위 시뮬레이션 모델(Atomic simulation model)과

단위 시뮬레이션 모델을 연동하여 더 큰 단위의 모델을 만들기 위한 결합 시뮬레이션 모델(Coupled simulation model)을 가지는 DEVS(Discrete Event system Specification) 형식론을 제안하였다. 한편, Praehofer(1991)는 이산 사건 모델에 이산 시간 시뮬레이션을 처리하기 위해 몇 가지 함수와 변수를 추가하여 이산 사건 및 이산 시간 혼합형 단위 시뮬레이션 모델을 제안하였다(Fig. 4).

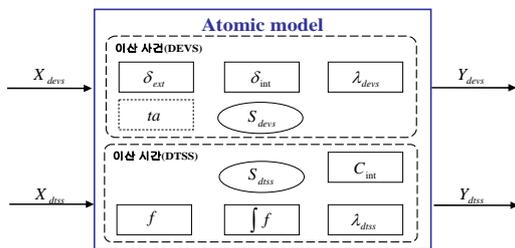


Fig. 4 Configuration of combined discrete event and discrete time simulation model

Fig. 4에 나타나 있는 모델의 구성 요소에 대한 설명을 Table 1에 정리하였다.

Table 1 Components of discrete event and discrete time simulation Model

S_{devs}	State variables for discrete event
X_{devs}	Input events
Y_{devs}	Output events
δ_{ext}	External state transition function
λ_{devs}	Output function for discrete event
δ_{int}	Internal state transition function
ta	Time advance function
S_{dtss}	State variables for discrete time
\int	Integral function for state variables for discrete time
f	Function for determining state variables for discrete time to be integrated
λ_{dtss}	Output function for discrete time
C_{int}	Function for checking state variables for discrete time

4.2 이산 사건 및 역학 기반의 이산 시간 혼합형 시뮬레이션 모델 구조

본 논문에서는 이산 사건 및 이산 시간 혼합형 시뮬레이션 커널을 사용하여 손쉽게 운동 방정식을 수치적으로 계산할 수 있는 모델 구조를 개발하였다. 이를 통해 이산 사건 시뮬레이션을 수행하는 중에 필요할 경우 운동 방정식에 기반을 둔 이산 시간 시뮬레이션을 수행할 수 있다.

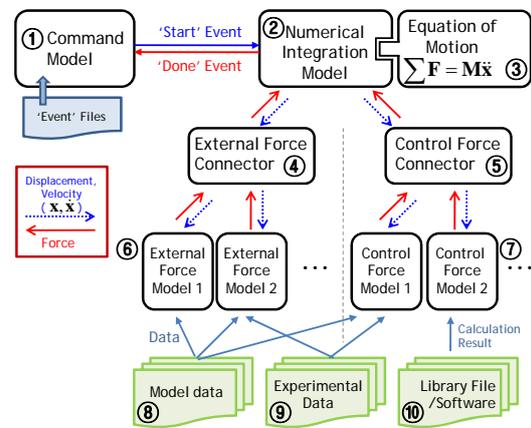


Fig. 5 Model architecture of discrete event and dynamic-based discrete time simulation

Fig. 5은 이산 사건 및 역학 기반 이산 시간 시뮬레이션 혼합형 모델 구조를 나타내고 있다. Fig. 5에서 네모로 표현된 model 및 connector는 변위, 속도 및 힘을 주고 받고, 사건(event)에 따라 동작할 수 있도록 Fig. 4와 같은 Atomic model로 구성되어 있다.

Command Mode(Fig. 5의 ①)은 일반적인 이산 사건 시뮬레이션을 수행하는 모델로, 외부로부터 정의된 시나리오를 받아들일 수 있는 기능이 있다. 운동 방정식에 의한 계산이 필요한 경우, Command Model 모델에서 Numerical Integration Model(Fig. 5의 ②)을 실행하라는 명령을 내보낸다. 이산 시간 시뮬레이션이 수행되면 매 단위 시간 Numerical Integration Model에 연결된(Plug-in) Equation of Motion(Fig. 5의 ③)에 외력을 전달해 준 다음 적분을 수행하여 속도와 변위를 구해낸다. 수치 적분

방법으로는 Runge-Kutta 방법, Adams-Bashforth 방법 등이 구현되어 있으며, 필요에 따라서 사용자가 추가할 수 있다. 운동 방정식에 사용되는 외력은 매 단위 시간마다 *External Force Connector*(Fig. 5 의 ④)와 *Control Force Connector*(Fig. 5 의 ⑤)로부터 전달받게 된다. 두 Connector 는 매 단위 시간 외력/제어력 모델들로부터 힘을 받아 합력을 구한 뒤 수치 적분 모델로 전달해주고, 다시 변위와 속도를 받아와 *External Force Model*(Fig. 5 의 ⑥), *Control Force Model*(Fig. 5 의 ⑦)에게 전달해주는 중계 역할을 한다. Control Force Model 은 제어를 위한 목표값이나 이동 경로 등의 정보를 추가로 받아서 제어력을 계산하는데 사용하게 된다. 외력과 제어력을 계산하는데 사용되는 모델에 대한 정보(Fig. 5 의 ⑧) 및 실험 데이터(Fig. 5 의 ⑨)는 따로 저장하여 필요할 경우 입력 받아 사용할 수 있게 구성되어 있다. 만약 다른 라이브러리나 소프트웨어를 사용할 경우, 계산 결과를 입력 받아 사용하면 된다(Fig. 5 의 ⑩).

이러한 모델 구조의 장점은 첫째, 이산 사건 시뮬레이션 수행 중에 손쉽게 역학 기반의 이산 시간 시뮬레이션을 수행할 수 있다. 둘째, 외력 모델의 추가, 삭제 및 재사용이 용이하다. 셋째, 모델과 실험 데이터를 공유하기 때문에 잦은 모델과 데이터의 변경에도 제한적인 수정만 하면 된다.

5. 잠수함의 잠항/부상 시뮬레이션 모델링

시뮬레이션을 위한 모델을 만드는 과정을 모델링이라고 한다. 우선 잠수함의 6 자유도 운동 방정식을 분석한 다음, 본 논문에서 개발한 이산 사건 및 역학 기반의 이산 시간 혼합형 시뮬레이션 모델 구조를 활용하여 잠수함 잠항/부상 시뮬레이션 모델링을 수행하였다.

5.1 잠수함 6 자유도 운동 방정식

잠수함의 6 자유도 운동 방정식은 관련 연구 현황에서 언급했던 Gertler and Hagen(1967)의 잠수함의 6 자유도 조종 운동 방정식을 참고하였다(Fig. 6).

Fig. 6 에 나타난 수식은 순서대로 물체 고정 좌표계(body-fixed coordinate)에서 기술된 잠수함의 surge, sway, heave, roll, pitch, yaw 운동 방정식이다. 외력 성분으로는 유체력, 프로펠러에 의한 추력, 함미 수직타와 함수미 수평타에 의한 힘, 중력과 부력 등이 있는데, 외력도 좌변과 마찬가지로 물체 고정 좌표계를 따른다. 외력의 경우 외력에 영향을 주는 변수(가속도, 속도, 변위)의 함수라 가정하고, Taylor series 로 나타낸 다음, 실험적으로 그 계수를 구하는 방법을 많이 사용한다.

잠수함의 잠항/부상 시뮬레이션을 위해서는 수직면 상의 운동만을 고려하면 된다. 따라서, 위 6 자유도 운동 방정식 중에서 surge, heave, pitch 운동 방정식을 사용한다.

Equations of motion 6 DOF equations of motion for underwater vehicles

$$m[\ddot{u} - vr + wq - x_G(q^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})] = X_{fluid} + X_{rudder} + X_{hydroplane} + X_{propeller} + X_{buoyancy} + X_{gravity}$$

$$m[\ddot{v} - wp + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})] = Y_{fluid} + Y_{rudder} + Y_{hydroplane} + Y_{propeller} + Y_{buoyancy} + Y_{gravity}$$

$$m[\ddot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})] = Z_{fluid} + Z_{rudder} + Z_{hydroplane} + Z_{propeller} + Z_{buoyancy} + Z_{gravity}$$

$$I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pr - \dot{q})I_{xy} + m[y_G(\dot{w} - uq + vp) - z_G(\dot{v} - wp + ur)] = K_{fluid} + K_{rudder} + K_{hydroplane} + K_{propeller} + K_{buoyancy} + K_{gravity}$$

$$I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp - (\dot{p} + pq)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{zx} + (qp - \dot{r})I_{yz} + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] = M_{fluid} + M_{rudder} + M_{hydroplane} + M_{propeller} + M_{buoyancy} + M_{gravity}$$

$$I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq - (\dot{q} + rp)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (rq - \dot{p})I_{zx} + m[x_G(\dot{v} - wp + ur) - y_G(\dot{u} - vr + wq)] = N_{fluid} + N_{rudder} + N_{hydroplane} + N_{propeller} + N_{buoyancy} + N_{gravity}$$

▶ Working of external forces([Hydrostatic & hydrodynamic forces](#), [Thrust](#), [Forces by rudder & hydroplane](#), [Gravitational force](#), [Buoyancy](#), etc.) ◀

Fig. 6 6 DOF(degree of freedom) equations of motions for a submarine

5.2 잠수함의 잠항/부상 시뮬레이션을 위한 이산 사건 및 역학 기반의 이산 시간 혼합형 시뮬레이션 모델

Son et al.(2008)에서는 수중운동체의 체계 및 부체계 모델로 명령 체계, 기동 체계, 자세 제어 체계, 추진 체계의 4 가지를 정의하였다. 명령 체계는 4.2 절에서 설명한 Command Model 과 동일한 역할을 한다. 또한 잠수함의 위치와 자세를 계산하는 기동 체계는 Equation of Motion 과 Numerical Integration Model 로, 추진 체계와 자세 제어 체계는 External Force Model 및 Control Force Model 로 구성할 수 있다.

Fig. 5 에서 설명한 모델 구조에 따라 잠항/부상을 위한 이산 사건 및 역학 기반의 이산 시간 혼합형 시뮬레이션 모델을 구성하면 Fig. 7 과 같다.

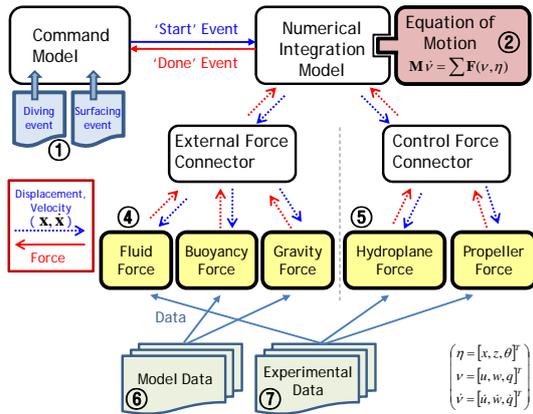


Fig. 7 Simulation model for submarine diving and surfacing simulation

우선 3 장에서 언급한 잠항 또는 부상 절차에 따라 Command Model 에서 이산 사건 시뮬레이션을 수행할 수 있도록 잠항 사건 파일과 부상 사건 파일을 작성한다(Fig. 7 의 ①). Fig. 7 의 ②는 Fig. 6 에 나와 있는 6 자유도 운동 방정식 중 surge, heave, pitch 가 연성되어 있는 운동 방정식으로 변위, 속도, 가속도를 각각 $\eta = [x, z, \theta]^T$, $v = [u, w, q]^T$, $\dot{v} = [\dot{u}, \dot{w}, \dot{q}]^T$ 라 할 때,

식 (1)과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$M\dot{v} = \sum F(v, \eta) \tag{1}$$

$$M = \begin{bmatrix} m - \frac{\rho}{2} l^3 X_{\dot{u}} & 0 & mz_G \\ 0 & m - \frac{\rho}{2} l^3 Z_{\dot{w}} & -mx_G - \frac{\rho}{2} l^4 Z_{\dot{q}} \\ mz_G & -mx_G - \frac{\rho}{2} l^4 M_{\dot{w}} & I_y - \frac{\rho}{2} l^4 M_{\dot{q}} \end{bmatrix}$$

식 (1)에서 ρ 는 밀도, l 은 잠수함의 길이, m 은 질량, x_G, z_G 는 질량 중심을 의미한다.

식 (1)의 우변에 들어갈 외력으로 유체력, 부력, 중력이 있고(Fig. 7 의 ④), 제어력으로는 타력과 추력(Fig. 7 의 ⑤)이 있다. 각각의 힘들은 Fig. 7 의 ⑥, ⑦에 저장된 모델 데이터와 실험 데이터, 그리고 매 단위 시간마다 External Force Connector 와 Control Force Connector 로부터 전해진 변위와 속도를 사용해 힘을 구하게 된다. 본 논문에서 사용한 외력을 식 (2), (3), (4), (5)로 나타내었다.

$$F_{Fluid} = \begin{bmatrix} -mwq + mx_G q^2 + \frac{\rho}{2} l^3 X_{wq} wq \\ muq + \frac{\rho}{2} l^3 Z_{\dot{q}} uq + \frac{\rho}{2} l^3 [Z_{\dot{u}} u^2 + Z_{\dot{w}} uw] \\ -mz_G wq - mx_G uq + \frac{\rho}{2} l^4 M_{\dot{q}} uq + \frac{\rho}{2} l^3 [M_{\dot{u}} u^2 + M_{\dot{w}} uw] \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$F_{Hydroplane} = \begin{bmatrix} \frac{\rho}{2} l^2 u^2 [X_{\delta\delta} \delta s^2 + X_{\delta\dot{\delta}} \delta \dot{s}^2] \\ \frac{\rho}{2} l^2 u^2 [Z_{\delta\delta} \delta s + Z_{\dot{\delta}\delta} \delta \dot{s}] \\ \frac{\rho}{2} l^3 u^2 [M_{\delta\delta} \delta s + M_{\dot{\delta}\delta} \delta \dot{s}] \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$F_{Gravity} = \begin{bmatrix} -W \sin \theta \\ W \cos \theta \\ -x_G W \cos \theta - z_G W \sin \theta \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$F_{Buoyancy} = \begin{bmatrix} B \sin \theta \\ -B \cos \theta \\ x_B B \cos \theta + z_B B \sin \theta \end{bmatrix} \tag{5}$$

식 (2)~(5)에서 W 는 잠수함의 무게, B 는 부력, $\delta b, \delta s$ 는 선수, 선미 타각을 의미한다. 그리고,

X_{qq}, X_{ii}, M_q 등의 값은 조종 미계수로 실험 또는 경험식으로부터 구해야 하는 값이다.

본 논문에서 사용한 모델은 현재 한국에서 가장 많이 건조한 Type 209/1200 ton 급 잠수함의 제원을 사용하였고(Table 2), 유체력과 타력의 계산을 위해 사용된 조종 미계수는 Babaoglu(1988)의 실험 데이터를 사용하였다.

Table 2 Principle dimensions of type 209/1200 ton submarine

Displacement (Surface)	1,180 [ton]	Displacement (Submerged)	1,290 [ton]
L X B X T	55.9 X 6.2 X 5.5 [m]		
Speed (Surface)	11 [knot]	Speed (Submerged)	21.5 [knot]

Reference : <http://en.wikipedia.org>

6. 잠수함의 잠항/부상 시뮬레이션 수행 결과

5 장에서 모델링 한 이산 사건 및 역학 기반 이산 사건 혼합형 모델을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 우선 4 장에서 정의한 잠항/부상 절차에 따라 이산 사건 시뮬레이션을 수행하여 Monte-Carlo 방법에 따라 확률론적으로 잠항/부상 시간을 계산하였다. 그리고, 특정 사건 사이에 운동 방정식을 사용한 이산시간 시뮬레이션을 수행하였다.

6.1 잠수함 잠항/부상 이산 사건 시뮬레이션 (Monte-Carlo 방법의 적용)

예로서, Fig. 2 의 절차에 따라 잠항을 수행하는데, 210 초(3분 30 초) 내로 잠항이 완료되어야 한다는 조건이 있다고 가정하자. 각각의 절차에는 소요 시간의 평균과 표준편차가 주어져 있다고 했을 때, 210 초 내에 잠항을 완료할 확률을 계산하는 것이 목표이다. 각 절차의 소요시간의 범위를 Table 3 과 같이 가정하였고, 이 때 Gaussian distribution 으로 가정하여 표준편차를 계산할 수 있다. 총 500 회의 이산 사건 시뮬레이션을 수행하여 Monte-Carlo 방법에 따라 결과를 나타내었다.

Table 4). 계산된 확률은 500 회 수행한 결과 중 소요된 시간 내에 들어있는 것의 개수를 500 으로 나눈 것으로, 210 초 내에 작업을 완료할 확률은 약 75.6%로 나타났다.

Table 3 Operation time of each diving procedure

Task	Duration(sec)
(1) Stop engine and transform to battery power	5 ~ 10
(2) Close all air valves and hatches	10 ~ 15
(3) Inflow of sea water into tanks like MBT	20 ~ 30
(4) Maintain trim angle of 6-8°	90 ~ 130
(5) Perform leveling	20 ~ 30
(6) Close vents of MBT	5 ~ 10
(7) Neutral buoyancy state and trim control	10 ~ 15

Table 4 Result of discrete event simulation using Monte-Carlo method

Diving time	~190 sec	~200 sec	~210 sec	~220 sec	~230 sec
Number	120	254	378	473	498
Probability	24.0 %	50.8 %	75.6 %	94.6 %	99.6 %

6.2 잠수함의 잠항/부상 시뮬레이션을 위한 이산 사건 및 역학 기반의 이산 시간 혼합형 시뮬레이션 수행 결과

잠항 시뮬레이션을 예로 들어 설명한다. 우선 Fig. 2 의 잠항 절차에 따라 이산 사건 시뮬레이션을 수행한다. 잠항 과정 중 함수미 수평타의 변화가 있는 Fig. 2 의 (4)에 대해서 역학 기반의 이산 사건 시뮬레이션을 수행하여 90 ~ 130 초의 대략적인 잠항 시간이 아니라 시뮬레이션을 통해 정확한 잠항 시간을 계산해 낼 수 있다.

초기에 10 knot 로 수면(0[m])에서 운항 중이던 잠수함이 MBT(Main Ballast tank)에 해수가 유입되면서 Trim 이 발생하고, 수면 아래로 가라앉게 된다. 또한 동시에 8 도 정도의 트림 각도를 유지하기 위해 함수미 수평타의 각도도 변경된다. 본 논문에서는 목표 심도 100m 까지 잠항하는 시뮬레이션을 수행하였다. 제어로는 PID(Proportional, Integral, Derivative) 제어를 수행하여, 목표 심도(100m)과 목표 Trim

각(8 도)이 주어졌을 때, 오차를 입력 받도록 하였다.

잠항에 걸리는 총 시간을 계산한 결과가 Table 5 와 같다.

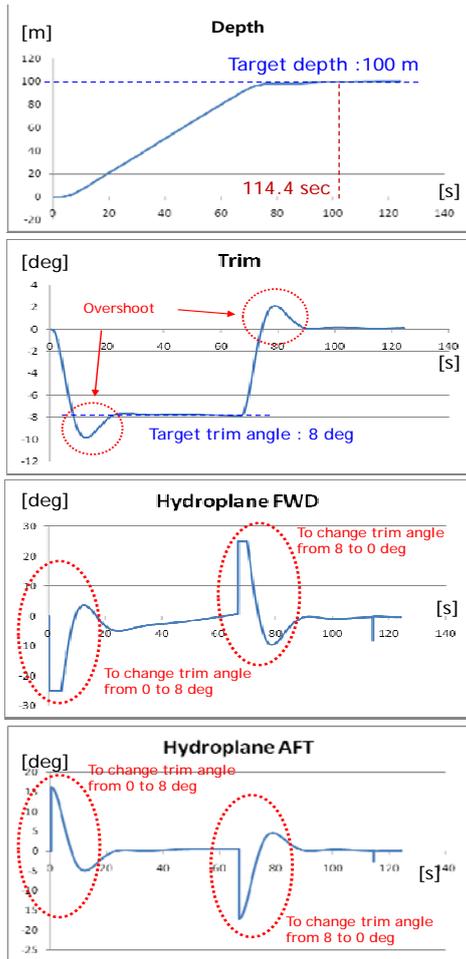


Fig. 8 Result of the diving simulation using dynamic-based discrete time model

Fig. 8 에는 시뮬레이션의 결과를 그래프로 나타내었다. 잠수함의 자세를 바꾸기 위해 타각을 변경하는 것을 확인할 수 있다. 또한 역학 기반 시뮬레이션이기 때문에 배의 자세가 8 도로 고정되는 것이 아니라 8 도를 지나쳐 10 도까지 갔다가 다시 8 도로 조정되는 것을 확인할 수 있다.

시뮬레이션 결과 잠항 절차 (4)에 소요되는 시간이 111.4 초로 나타났다. 위 시간을 반영하여

Table 5 Result of discrete event & dynamic-based discrete time simulation using Monte-Carlo method

Diving time	~190 sec	~200 sec	~210 sec	~220 sec	~230 sec
Number	2	100	410	480	498
Probability	0.04 %	50.8 %	82.0 %	96.0 %	99.6 %

즉, 역학 기반의 이산 시간 시뮬레이션을 통해 보다 정확하게 시간을 예측하였고, 결과적으로 210 초 내에 잠항을 완료할 확률도 75.6%에서 82.0%로 증가하였다.

7. 결론

본 논문의 목적은 잠수함의 잠항/부상 전체의 과정을 모델링하고 이를 시뮬레이션 하는 것이다. 이를 위해 본 논문에서는 이산 사건 및 역학 기반의 이산 시간 혼합형 시뮬레이션을 위한 모델 구조를 개발하고, 이를 사용하여 잠수함의 잠항/부상 시뮬레이션을 모델링 하였다. 이를 통해 이산 사건 시뮬레이션 중에 역학 기반의 이산 시간 시뮬레이션을 효과적으로 사용할 수 있음을 보였다.

향후에는 잠항/부상 시뮬레이션을 좀더 확장하여 3 장에서 언급한 잠수함의 운항 상태를 시뮬레이션할 계획이다. 또한 보다 정확도와 신뢰도를 높이기 위해 조류력이나 수면 근처에 있을 때에 발생하는 파감쇄력 등도 고려하고자 한다. 마지막으로 LQG(Linear Quadratic Gaussian), H_∞제어, Fuzzy 제어 등 다양한 제어 기법을 도입하여 잠수함의 자세(trim) 및 깊이(depth)를 제어할 계획이다.

후 기

본 연구는

a) 국방과학연구소 수중운동체기술특화센터 SM-11 과제 “수중 운동체의 체계/부체계 기능 및 성능 시뮬레이션을 위한 네트워크 기반의 가상

(Virtual) 복합 시스템 모델 구조 연구”

b) 서울대학교 해양시스템공학 연구소 및 BK21 해양기술인력양성사업단

c) 2009 년도 정부 재원(교육과학기술부)으로 한국연구재단 핵심연구지원사업(KRF-2009-0086033)의 지원으로 이루어진 연구 결과의 일부를 밝히며, 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- Babaoglu, O.K., 1998, Designing an Automatic Control System for a Submarine, M.S.thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, CA.
- Bang, K.W., Lee, K.Y., Cha, J.H., Roh, M.I. and Kim, H.J., 2007, "Proposal of a Combined Discrete Event and Discrete Time Simulation Framework and Its Application to the Block Erection Process in Shipbuilding," Proceeding of Korean Society of CAD/CAM Engineers, Pyeongchang, Korea, pp. 297-305.
- Choi, J.H., Yeo, D.J., Rhee, K.P. and Park, J.Y., 2006, "On the Vertical Plane Dynamics Modeling and Depth Control of a Submerged Body Moving beneath Free Surface," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol.c4, No.c6, pp. 647-655.
- Gertler, M. and Hagen, G.R., 1967, Standard Equations of Motion for Submarine Simulation, Naval Ship Research and Development Center.
- HDW(Howaldtswerke - Deutsche Werft), 1992, Operation and Diving Instruction, TM 0764.413.
- Lee, D.H. and Choi, H.S., 1996, "Comparison of Nonlinear Motion Control Performance of ROV," Proceeding of the Society of Naval Architecture of Korea, Spring Conference, pp. 323-326.

- Lee, J.H., 2004, A Study on the Safety Operational Envelope of a Submerged Body Considering 6-DOF Motion, M.S. thesis, Seoul National University.
- Praehofer, H., 1991, System Theoretic Foundations for Combined Discrete-Continuous System Simulation, PhD Thesis, Johannes Kepler University, Linz, Austria.
- Presterro, T., 1994, Verification of a Six-Degree of Freedom Simulation Model for the REMUS Autonomous Underwater Vehicle, M.S.thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- Son, M.J., Lee, H.J., Ham, S.H., Lee, H.K., Kim, T.W., Lee, K.Y., Han, S.H. and Nah, Y.I., 2008, "The Normal Diving Simulation of the Underwater Vehicle Using the Standard Model Architecture for the Combined Simulation of Discrete Event System and Discrete Time System," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 45, No. 6, pp. 656-668.
- Yun, K.H., Rhee, K.P. and Yeo, D.J., 2005, "A Study on the Guidance Law Suitable for Target Tracking System of an Underwater Vehicle," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 42, No. 4, pp. 299-306.
- Zeigler, B.P., Praehofer, H. and Kim, T.G., 2000, Theory of Modeling and Simulation, 2nd Edition, Academic Press.



< 차 주 환 > < 노 명 일 > < 이 규 열 >