

## 이산사건 및 이산시간 혼합 표준모델구조를 활용한 수중운동체 정상잠항 시뮬레이션

손명조\*, 이현진\*, 함승호\*, 이효광\*\*, 김태완†\*\*\*,  
이규열\*\*\*, 한순흥\*\*, 나영인\*\*\*\*

서울대학교 대학원 조선해양공학과\*, 한국과학기술원 대학원 기계공학과\*\*  
서울대학교 조선해양공학과 및 해양시스템공학연구소\*\*\*  
국방과학연구소 제 6 기술연구본부\*\*\*\*

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

Myeong-Jo Son\*, Hyun-Jin Lee\*, Seung-Ho Ham\*, Hyo-Kwang Lee\*\*,  
Tae-Wan Kim†\*\*\*, Kyu-Yeul Lee\*\*\*, Soon-Hung Han\*\* and Young-In Nah\*\*\*\*

Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University\*  
Dept. of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology\*\*  
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, and Research Institute of Marine  
Systems Engineering, Seoul National University\*\*\*  
Agency for Defense Development\*\*\*\*

### Abstract

When it comes to design and acquire underwater vehicles such as a submarine and a torpedo according to the process of SBA(Simulation Based Acquisition)/SBD(Simulation Based Design), it is necessary to predict the performance of interest precisely and to perform the test over and over again using the M&S(Modeling and Simulation) of the engineering and the engagement level. In this paper, we research the DEVS(Discrete Event System Specification) and DTSS(Discrete Time System Specification) formalism based standard model architecture for the underwater vehicle which can support both the heterogeneous level of the M&S(Engineering/Engagement) and the different system of the M&S(Discrete Event System and Discrete Time System). To validate this standard modeling architecture, we apply it to the submarine normal diving simulation.

※Keywords: Underwater vehicle(수중운동체), Modeling & simulation(모델링 및 시뮬레이션), Model architecture(모델구조), Diving(잠항), Discrete event system(이산사건시스템), Discrete time system(이산시간 시스템), Hybrid system(이산사건/이산시간 혼합 시스템)

## 1. 서론

잠수함, 어뢰와 같은 수중운동체는 개발에 막대한 예산과 기간이 소요되기 때문에 설계 및 건조 시 겪을 수 있는 시행착오로 인한 개발위험성을 최소화하고 최적 설계를 수행하기 위하여 모델링 & 시뮬레이션을 통한 정확한 성능예측과 시험평가가 필수적이다. 이러한 모델링 & 시뮬레이션을 활용하는 대표적인 예로는, 수중운동체의 체계/부체계를 수학적 또는 역학적으로 모델링하고 각각의 성능을 분석하는 공학급 시뮬레이션과 시나리오에 기반하여 수중운동체 간의 상호작용을 모사하고 이를 통하여 특정 무기체계나 전술의 효과도를 분석하는 교전급 시뮬레이션이 있다. 본 논문에서 제안하는 DEVS(Discrete Event System Specification) (Zeigler 1990, Zeigler et. al 2000)/DTSS(Discrete Time System Specification) (Bang 2006)기반의 표준모델구조는 이러한 공학급 시뮬레이션과 교전급 시뮬레이션을 모두 지원하며, 교전급 시뮬레이션에 대해서는 이미 Son et al.(2007)에서 검증한 바 있다. 따라서, 본 논문에서는 공학급 시뮬레이션 예제인 잠수함의 정상잠항 시뮬레이션에 대해서만 다루기로 한다.

### 1.1 진행방법에 따른 시뮬레이션의 분류

시뮬레이션을 분류하는 방법에는 목적, 시간 진행방법, 실행 속도, 실행 환경 등에 따라 다양하게 분류된다(Lee 2006). 시뮬레이션의 표준모델구조를 다루는 본 논문에서는 이와 가장 연관이 많은 진행 방법 위주로 시뮬레이션을 분류하도록 한다. 진행 방법에 따른 시뮬레이션은 크게 세가지 시뮬레이션으로 나뉜다. 이산사건(Discrete Event)을 중심으로 하는 이산사건 시뮬레이션과 일정한 시간간격(Discrete Time)으로 진행되는 이산시간 시뮬레이션, 그리고 마지막으로 두 가지 방법이

혼재된 이산사건/이산시간 혼합형 시뮬레이션이 그것이다.

#### 1.1.1 이산사건 시뮬레이션

이산사건 시뮬레이션이란 사건(event)이 발생할 때마다 시간을 진행시키는 시뮬레이션이다. 이산사건 시뮬레이션 안에서 각 이벤트들은 발생하는 시점, 즉 이벤트가 처리되어야 하는 시점을 가지고 있고, 이 이벤트들은 시간 순서대로 나열되어 순차적으로 처리된다. 이벤트가 처리될 때에 시스템의 상태가 변화하므로 시뮬레이션 시간도 그때마다 진행시키면 된다.

Fig. 1은 이산사건 시뮬레이션에서 이벤트가 처리될 때마다 시스템의 상태가 변화되는 예를 보여주고 있다. x-축에는 각 이벤트들이 처리되는 시점이 표시되어 있으며, 이 시점마다 y 값, 즉 상태 변수의 값이 변화한다. 이벤트를 기반으로 시뮬레이션을 진행하기 때문에 event-driven(이벤트 기반) 시뮬레이션이라 불리기도 한다.

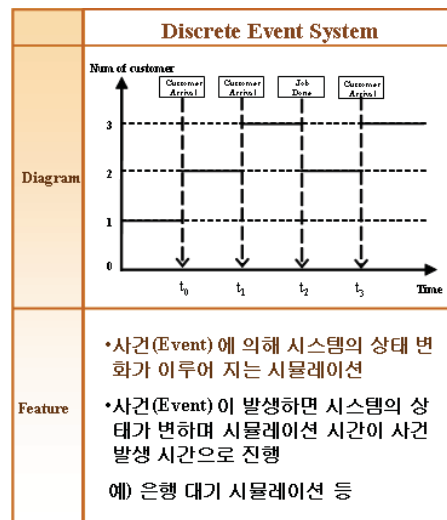


Fig. 1 Outline of discrete event simulation

조선 분야에서 이산 사건 시뮬레이션은 공정분석 및 자원의 최적 배치 등을 결정하는데 주로 활용된다. 조선소의 옥외 물류 흐름을 이산 사건으로 시뮬레이션한 Lee et al.(2007)와 신규 조선소의 자원의 최적 배치를 시뮬레이션을 통해 분석한 Song et al.(2008) 등이 대표적인 관련 연구 사례이다. 잠수함 시뮬레이션의 경우, 잠수함 운용 측면에서 전술을 개발하고, 무기 체계의 효과도를 분석하는 교전급 시뮬레이션에 이러한 이산 사건 시뮬레이션이 적용되며, Son et al.(2007)이 관련 연구 사례로 있다.

1.1.2 이산시간 시뮬레이션

이산시간 시뮬레이션이란 사용자가 동일한 시간 간격을 설정한 후 각 단위 시간마다 시스템의 상태를 계산하는 시뮬레이션이다. 예를 들어 운동하는 물체가 있을 때에, 1 초를 단위 시간으로 설정하고 매초마다 그 물체의 위치를 계산하는 시뮬레이션이라면 이산시간 시뮬레이션에 해당된다고 할 수 있다. 즉, Fig. 2에 보이는 것과 같이 이산시간 시뮬레이션에서는 시스템의 상태변수의 값이 동일한 시간 간격마다 계산된 후, 갱신된다. 그렇기 때

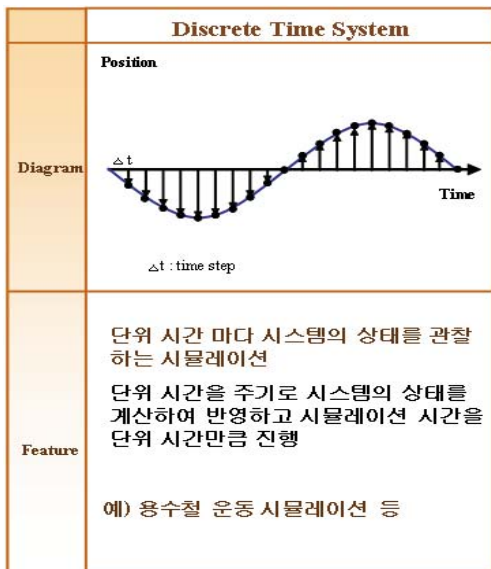


Fig. 2 Outline of discrete time simulation

문에 이를 time-stepped 시뮬레이션이라고도 한다.

조선 분야에서 이산 시간 시뮬레이션은 유동장 해석, 구조의 피로 해석 등과 같은 CAE(Computer Aided Engineering)과 연계된 시뮬레이션과, 화재 발생시 승객대피 시뮬레이션과 같은 분석 시뮬레이션으로 주로 활용된다. 수면 근처에서 운동하는 잠수함의 운동성능을 분석한 Choi et al.(2006)과 선박화재 시뮬레이션을 위한 도구 분석과 이를 적용한 Choi et al.(2007) 등이 대표적인 관련 연구 사례이다.

1.1.3 이산사건/이산시간 혼합 시뮬레이션

이산사건/이산시간 혼합 시뮬레이션은 시간 진행을 사건과 이산시간을 함께 사용하는 시뮬레이션 방식이다. 대부분의 경우, 이산사건 기반으로 빠르게 시뮬레이션이 진행되지만, 사용자가 지정한 특정사건을 통해, 이산시간 방식의 진행으로 변경되어 사용자가 의도하는 성능분석 및 해석, 동역학 시뮬레이션을 수행할 수 있게 된다. 이산시간 진행 중에도 특정사건으로 다시 이산사건 시뮬레이션으로 전환이 가능한 형식이기 때문에 hybrid 시뮬레이션이라고도 한다.

Fig. 3의 에어컨 제어의 예를 보면, 사용자가 지정한 온도(30 °C)가 넘기 전에는 에어컨이 IDLE 상태로 있다가, 온도가 지정한 온도를 넘는 순간 Job Start 사건이 발생됨과, 동시에 에어컨이 동작 상태가 되며, 단위시간 별로 계속해서 에어컨의 동작에 따른 주변 온도를 계산하는 이산시간 시뮬레이션으로 전환된다. 주변 온도가 다시 지정한 온도 아래로 내려가게 되면, Job Done 사건이 발생하게 되며, 에어컨은 다시 IDLE 상태가 되고, 시뮬레이션은 이산사건 시뮬레이션으로 전환된다.

1.2 논문의 구성

본 연구에서는 수중운동체의 이산사건/이산시간 혼합 시뮬레이션을 지원하는 표준모델구조를 개발하였고, 공학급 예제인 잠수함 정상장항 시뮬레이션을 통해 그 효용성을 보였다. 또한, 시뮬레이션의 실시간 가시화를 위해, 공개용 가시화 프로그램

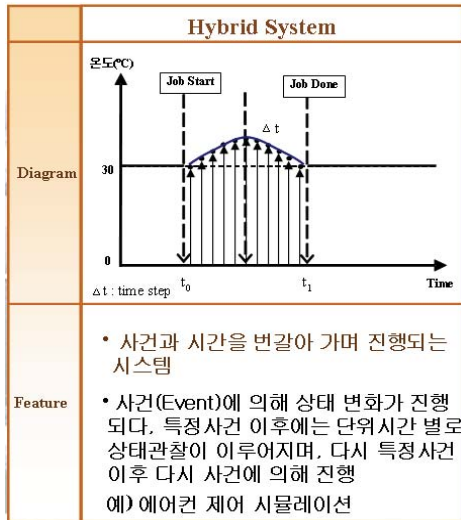


Fig. 3 Outline of combined discrete event/discrete time simulation

램인 OSG(Open Scene Graph)를 이용하여 3 차원 가시화 프로그램을 구현하였다. 가시화 프로그램은 구성된 잠수함 정상잠항 시뮬레이션 모델과의 실시간 통신을 통해 실제 잠수함의 위치와 자세 등을 3 차원으로 가시화하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 장에서는 이산사건/이산시간 시뮬레이션의 공통예제로 잠수함의 정상잠항 시뮬레이션의 시나리오를 설명하고, 3 장에서는 이산사건/이산시간 혼합 시뮬레이션을 위한 표준모델구조에 대하여 설명하고 4 장에서는 실시간 시뮬레이션 3 차원 가시화 결과를 보여주고, 5 장에서 시뮬레이션 수행 결과를 분석하고 결과의 활용방안에 대하여 토의한다. 마지막으로 6 장에서는 결론과 향후 연구방향을 제시한다.

## 2. 잠수함 정상잠항 시뮬레이션

본 연구에서 제안하는 수중운동체 표준모델구조를 검증하기 위해, 이산사건 및 이산시간, 이산사건/이산시간 혼합 시뮬레이션을 수행할 공학급 시뮬레이션예제로서 잠수함 정상잠항 시뮬레이션을 제시하며, 그 구체적인 시나리오는 다음과 같다.

### 2.1 공통시나리오

시뮬레이션 대상이 되는 수중운동체는 1800 톤의 배수량을 지닌 재래식 연안 잠수함이며, 초기 수심 0m(해수면) 에서 목표수심 50m 로의 잠항 명령을 가정하고, 잠항을 수행하는 과정을 Fig. 4 와 같이 시뮬레이션 한다. 잠항은 추진장치를 이용한 증속없이, 주 밸러스트 탱크의 충수와 함수 잠항타, 함미 잠항타의 조종을 통해서 잠항을 수행하는 정상잠항으로 가정한다. 잠수함의 잠항과정은 Son and Park(2001)가 설명한 것과 같이, 아래의 순서로 진행한다(Fig. 5 참조).

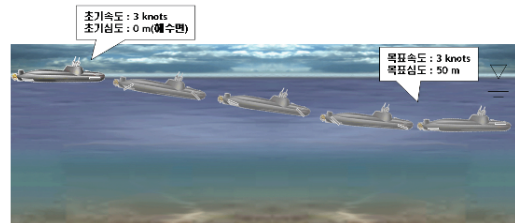


Fig. 4 Process of the submarine normal diving

- ① 해수면을 초기속도 3 knot 로 순항하는 잠수함은 목표수심 50m 로 정상잠항을 명령 받는다.
- ② 주 밸러스트 탱크 통풍구(Vent.)를 열고, 함수잠항타를 아래로 내린다. 이 영향으로 음의 부력이 발생하게 되고, 전부 밸러스트 탱크가 후부 밸러스트 탱크보다 빠르게 해수가 유입되어, 함수 쪽이 먼저 잠수된다.

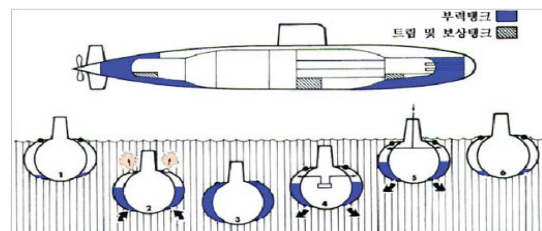


Fig. 5 The relation between main ballast tank of the submarine and diving/surfacing<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 해군홈페이지 자료실(<http://navy.go.kr>)

- ③ 잠수함의 함미부도 입수되면, 함미잠항타를 아래로 내린다. 이때, 원하는 횡경사 각도(정상 잠항의 경우 함수트림 5°)에 도달하면, 함미잠항타를 조정하여, 자세를 유지 한다.
- ④ 목표심도에 가까워지면, 함수잠항타를 들어올리고, 함수잠항타를 조정하여 자세를 평형상태로(횡경사 0°) 변화시킨다.
- ⑤ 목표심도에 도달하면, 함수잠항타와 함미잠항타를 수평 상태로 유지한다.

잠수함의 횡경사 각도는 잠수함의 주 밸러스트 탱크, 트림 탱크, 잠항타 등이 영향을 미칠 수 있으나, 본 시나리오에서는 함수미 잠항타의 각도의 영향만을 고려하기로 한다.

이러한 공통시나리오를 이용하여 이산사건 시뮬레이션, 이산시간 시뮬레이션, 이산사건/이산시간 혼합 시뮬레이션을 각각 다음과 같이 구성하였다.

**2.2 이산사건 시뮬레이션 시나리오**

한 시뮬레이션을 이산사건 단위로 진행하여, 빠르게 시뮬레이션을 수행할 수 있는 특성으로 인해, 이산사건 시뮬레이션은 주로 효과도 분석용으로 활용된다.

이산사건 시뮬레이션을 위해, 위의 공통 예제에서 사용되는 함수미 잠항타의 상태를 Fig. 6 과 같이 5 개의 상태로 정의한다.

각 상태는 함수미 잠항타의 각도에 따라 High(45°), Low(15°), Even(0°) 세 가지 상태변수와, 잠항타의 방향에 따라 Up(들어올려진 상태), Down(내려진 상태) 두 가지 상태변수를 이용하여, 정의된다.

이러한 다섯 가지 상태가 모두 사용되어 하나의 정상잠항 과정을 완수하는데, 이때, 각 상태로 전환되는 순간을 이산사건으로 처리한다. 본 연구에서는 이러한 이산사건 시뮬레이션의 활용예로서 주어진 속도에서, 잠수함이 가장 빠르게 목표 심도에 도달할 수 있는 이산사건 사이의 간격(각 상태가 유지되는 시간)의 조합을 찾아내는 시뮬레이션을 수행하였다.

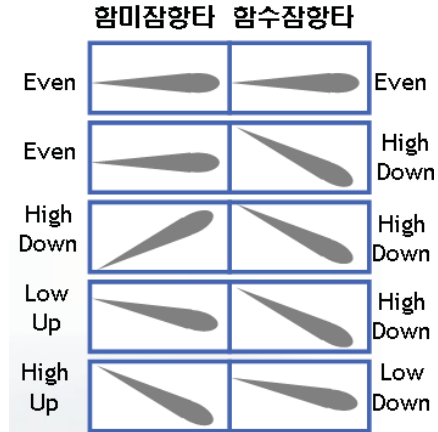


Fig. 6 Hydroplane state for the normal diving

**2.3 이산시간 시뮬레이션 시나리오**

한 시뮬레이션을 미리 정해진 단위시간 간격으로 진행하며, 실제 시간과 동기화를 시킬 경우, 실시간 시뮬레이션으로 활용될 수 있는 특성으로 인해, 이산시간 시뮬레이션은 주로 훈련용으로 사용된다. 또한, 이산시간 시뮬레이션은 진행시간을 적절히 조정하여, 실시간으로는 오랜 시간이 소요되는 시뮬레이션을 빠른 속도로 가시화하는데 효과적으로 사용될 수 있다.

본 연구에서는 이산시간 시뮬레이션의 활용예로서, 잠수함의 잠항장교 교육/훈련용 시뮬레이션을 구성하였다. 잠수함은 정해진 속도로 움직이며, 훈련참가자가 직접 함수잠항타와 함미잠항타를 원하는 각도와 방향으로 조정할 수 있다. 잠수함은 입력된 함수미 잠항타 각도 및 방향으로 실시간으로 자세를 계산하고 이를 실시간으로 3 차원 가시화를 한다. 훈련참가자는 실시간 3 차원 가시화 화면을 보며, 직접 잠수함의 조종할 수 있으며, 잠항타의 조종 효과를 쉽게 익힐 수 있게 된다. 또 다른 이산시간 시뮬레이션으로서, 600 초가 넘게 걸리는 정상잠항 시뮬레이션을 20 배속으로 진행하여, 30 초 만에 정상잠항 과정을 수행하였으며, 이를 가시화 하였다.

**2.4 이산사건/이산시간 혼합 시뮬레이션 시나리오**

이산사건/이산시간 혼합 시뮬레이션은 한 시뮬레이션을 이산사건 기반으로 빠르게 진행하면서, 성능을 분석하고자 할 때나, 시뮬레이션 진행 도중, 실시간으로 전환하여 사용자가 모델을 직접 조종하고자 할 때만 이산시간 기반으로 전환하여 시뮬레이션을 진행할 수 있어 무척 효율적이다.

이산사건/이산시간 혼합 시뮬레이션을 위한 예제로 이산사건 기반으로 정상상태 시뮬레이션을 진행하다가, 잠수함이 정해진 잠항 트림각(횡경사 5°)를 넘어갈 경우, 이산시간 시뮬레이션(실시간 시뮬레이션)으로 전환되고, 사용자가 직접 잠항타의 타각을 조종하여, 잠수함이 잠항 트림각(횡경사 5°)이하로 진입하면 다시 이산사건 시뮬레이션으로 전환되는 시나리오를 사용하였다.

### 3 이산사건/이산시간 혼합 모델구조

#### 3.1 이산사건/이산시간 혼합 시뮬레이션 모델 구조

본 논문의 시뮬레이션에 사용된 모델구조는 이산사건 시뮬레이션과 이산시간 시뮬레이션을 혼합한 방법으로(Praehofer 1991) 이산사건 시뮬레이션에 대한 체계적인 모델링 방법인 DEVS(Discrete Event system Specification) 형식론을 기본으로 하여 이산시간 시뮬레이션을 처리할 수 있도록 몇 가지 함수와 변수를 추가하였다. 또한, 이산사건과 이산시간 혼합형 시뮬레이션은 시뮬레이션 모델과 시뮬레이션 엔진으로 구성되어 있으며, 이러한 구조가 이산사건 시뮬레이션의 구조와 다른 점은 단위 시뮬레이션 모델의 정의방법과 시뮬레이션 엔진의 진행방법이다. 이산사건과 이산시간 혼합형 시뮬레이션의 형식론을 정리하면 다음과 같다.

이산사건/이산시간 시뮬레이션 모델은 두 종류의 시뮬레이션 기능이 혼합되어 있는 시뮬레이션 모델이므로 크게 두 부분으로 나눌 수 있다. 한 부분은 이산사건 성격의 상태 변수(state variable)와 그 상태 변수를 변경시키는 상태 변경 함수(state transition function)를 정의하고, 그 상태 변수에 영향을 주는 이산 사건 성격의 입력(input),

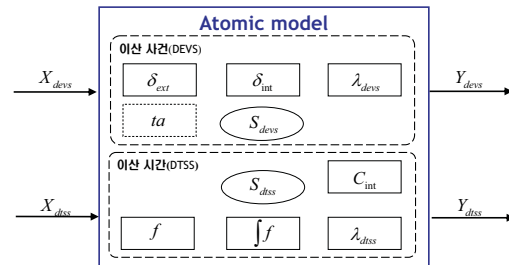


Fig. 7 Atomic model based on the combined DEVS and DTSS formalisms

출력(output)을 정의한 부분이다. 그리고 나머지는 이산시간 성격의 상태 변수와 그 상태 변경 함수, 입력, 출력을 정의한 부분이다. 이 두 부분이 서로 상호 작용을 하여 혼합형 시뮬레이션 모델의 기능을 구현한다.

보다 자세히 살펴 보면 혼합형 단위 시뮬레이션 모델은 Fig. 7 과 같이 구성된다. 이산사건 부분은 이산 사건 상태 변수를 나타내는  $S_{devs}$ , 그 상태 변수에 영향을 주는 이산 사건 입력인  $X_{devs}$ , 그에 따른 출력을 나타내는  $Y_{devs}$ , 입력에 따라 이산사건 상태 변수를 변경시키는 함수인  $\delta_{ext}$ , 특정 상태일 때 출력을 하는 함수인  $\lambda_{devs}$ , 아무런 입력이 들어 오지 않고 이산 시간 상태 변수  $S_{dtss}$  가 특정 값을 넘었을 때 이산사건 상태 변수를 변경시키는 함수인  $\delta_{int}$  로 구성된다. 외부 입력이 없을 경우 내부 상태의 최대 지속 시간을 정의하는  $ta$  는 필요에 따라서 정의한다. 이는 이산시간의  $C_{int}$  함수가 이 기능을 대체할 수 있기 때문이다. 이산시간 부분은 매 단위 시간 마다 이산시간 상태 변수  $S_{dtss}$  를 계산하는 적분 함수인  $\int$  와 그 적분 함수의 피적분 함수를 결정해 주는 함수인  $f$ , 이산시간 상태 변수의 변화에 따라 출력하는 함수인  $\lambda_{dtss}$ , 단위 시간마다 이산시간 상태 변수  $S_{dtss}$  가 특정 값을 넘었는지를 판단하는 함수인  $C_{int}$  로 구성된다.

#### 3.2 이산사건/이산시간 혼합 시뮬레이션 엔진 정의

혼합형 시뮬레이션도 다른 시뮬레이션과 같이



시뮬레이션을 진행하기 위해 각 시뮬레이션 모델들을 관리하고 시뮬레이션 시간을 진행시키는 시뮬레이션 엔진이 필요하다. 이 시뮬레이션 엔진은 시뮬레이션 모델의 구조와 동일한 계층 관계를 이용하여 시뮬레이션을 진행시킨다(Zeigler 1990, Praehofer et al. 2001)

Fig. 8 과 같이, 혼합 시뮬레이션 엔진은 전체적인 단위 시뮬레이션 모델을 관리하는 시뮬레이터(simulator), 결합 시뮬레이션 모델을 관리하는 코디네이터(coordinator), 전체 시뮬레이션을 관리하는 루트 코디네이터(root coordinator)의 구조를 가진다.

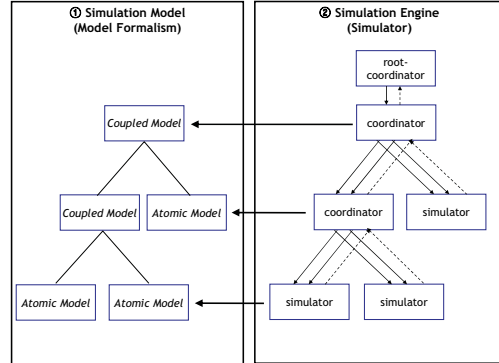


Fig. 8 The simulation engine for the hierarchal simulation model

### 3.3 이산사건/이산시간 혼합 시뮬레이션 모델의 개념설계 및 진행과정

Fig. 9 에서 보는 바와 같이, 이산사건/이산시간 혼합 모델구조는 이벤트에 따라 모델의 상태가 변화되며 시뮬레이션을 진행되는 이산사건 시뮬레이션과 모델이 특정상태일 때는 단위 시간 마다 모델의 이산시간 상태 변수를 계산한 후, 갱신하며 시뮬레이션을 진행하는 이산시간 시뮬레이션을 모두 지원 가능한 모델구조이다.

이산사건/이산시간 혼합 모델구조에서 이산사건을 처리하는 부분의 모델구조는 DEVS 형식론에 기반하여 구현하였고 진행 과정은 다음과 같다.

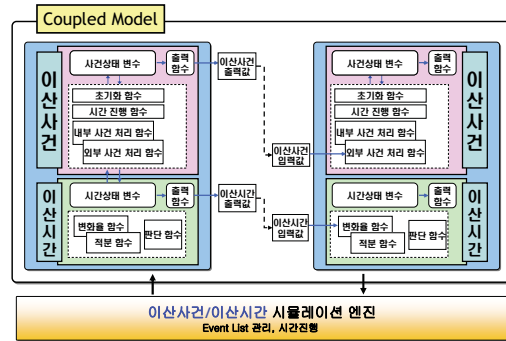


Fig. 9 Combined discrete event/discrete time model architecture

- ① 시뮬레이션 엔진이 모델에게 외부 이벤트를 입력하면 모델은 외부 사건 처리 함수를 이용하여 사건상태 변수를 변경한다.
- ② 사건상태 변수가 변경되면 시간 진행 함수를 이용하여 다음 내부 이벤트의 발생시간을 계산한다.
- ③ 계산된 발생 시간에 내부 이벤트가 발생하면 출력 함수를 이용하여 이미 정의된 출력값을 출력 한다.
- ④ 내부 사건 처리 함수를 이용하여 이산사건 상태 변수를 변경한다.
- ⑤ 만약 모델이 내부 이벤트를 기다리는 중 외부 이벤트가 입력되면 다시 외부 사건 처리 함수를 이용하여 사건상태 변수를 변경한다.

이산시간 시뮬레이션은 아래와 같이, 변화율 함수를 통해 단위시간 마다 상태를 계산, 변경한다.

- ① 외부 사건 처리 함수에 의해 모델구조에서 이산시간을 처리하는 부분의 함수인 변화율 함수가 호출된다.
- ② 변화율 함수에 의해 변화율이 결정되면 이 값을 매 단위 시간 간격으로 적분하여 모델의 시간상태 변수를 변경한다.
- ③ 매 단위 시간 마다 출력함수를 이용하여 이산시간상태 변수를 출력 한다.
- ④ 매 단위 시간 마다 이산시간상태 변수가 특정 범위를 벗어나는 지를 판단 함수를 통해 판단하고 벗어났을 경우 이산시간 모델 구

조 부분의 함수를 종료한 후 이산사건에 내부 이벤트를 발생시킨다.

이산시간과 이산사건은 사용자가 미리 지정한 속도나 자세 값에 도달할 경우 발생하는 사건에 의해 상호 전환된다. 이산사건에서 이산시간 전환 시는, 이산사건 부분의 외부사건 처리함수가 이산시간 부분의 변화율 함수를 호출하고, 이산시간에서 이산사건으로 전환 시는, 이산시간 부분의 출력함수가 이산사건 부분의 외부사건 처리함수를 호출한다. 이와 같은 이산사건과 이산시간 시뮬레이션의 전환과정에 의해 혼합 시뮬레이션이 수행 가능하게 된다.

**3.4 잠수함 정상잠항 시뮬레이션의 모델**

잠수함 정상잠항 시뮬레이션에서는 목표심도를 명령하고 시뮬레이션을 종료시키는 잠수함 최상위 명령체계(Commander), 잠수함의 현재 심도에 따른 목표 속도와 목표 자세를 결정하고 현재 속도와 현재 자세를 이용하여 현재 심도를 계산해주는 기동체계(Motion), 매 단위 시간마다 속도를 계산해주는 추진체계(Propulsion), 매 단위 시간마다 자세를 계산해주는 자세제어체계(Posture\_control), 잠수함의 현재 위치와 자세를 실제로 가시화 해주는 가시화 체계(Visualization)와 같이 5 개의 단위 모델로 구성될 수 있다. 각 모델간의 입출력 관계와 구성은 Fig. 10 과 같다(Lee et al. 2006).

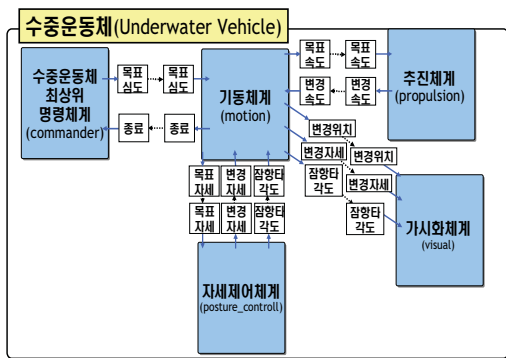


Fig. 10 Model organization of the submarine normal diving simulation

**3.5 잠수함 정상잠항 시뮬레이션 구현**

잠수함 최상위 명령체계의 경우에는 매 단위시간마다 변경 해야 할 상태변수가 없기 때문에 이산시간을 처리하는 부분이 모델구조에서 필요 없다. 엔진에서 시뮬레이션을 시작하면 최상위 명령체계의 출력함수에 의해 목표심도가 기동체계로 전달되고 내부 사건 처리함수에 의해 사건 상태 변수가 변경된다. 그리고 기동체계에 의해 시뮬레이션 종료 이벤트가 외부 사건 처리함수에 의해 들어오면 사건 상태 변수를 변경하고 시뮬레이션을 종료한다(Fig. 11).

기동체계는 잠수함 최상위 명령체계로부터 목표심도가 외부 사건 처리 함수로 들어오면 목표 심도에 도달하기까지 특정 심도에 따른 목표 속도와 목표 자세를 결정한다. 또한 외부 사건 처리 함수는 이산시간을 처리하는 부분의 변화율 함수를 호출하여 매 단위시간 마다 추진체계와 자세제어 체계로부터 들어오는 현재속도와 현재자세를 이용하여 현재 위치를 계산하고 특정 심도에 도달했을 경우에는 이산사건을 처리하는 부분의 출력함수를 호출하여 새로운 목표 속도와 자세를 추진체계와 자세제어체계에 전달한다. 그리고 내부 사건 처리 함수에 의해 사건 상태변수가 변경된다(Fig. 12).

추진체계는 기동체계로부터 목표 속도가 외부 사건 처리 함수로 들어오면 이산시간을 처리하는 부분의 변화율 함수를 호출하여 가속도를 결정하고 현재 속도가 목표 속도에 도달할 때까지 적분 함수를 이용하여 매 단위 시간마다 속도를 계산하여 기동 체계의 변화율 함수로 전달한다. 현재 속

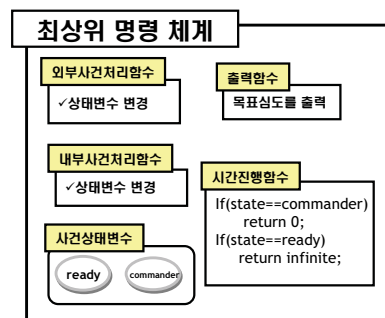


Fig. 11 Implementation of the command model



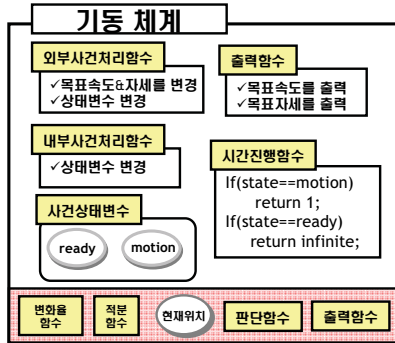


Fig. 12 Implementation of the motion model

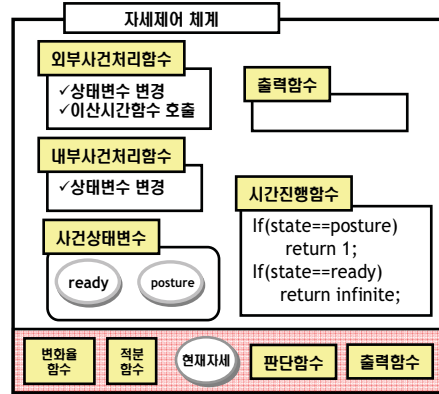


Fig. 14 Implementation of the posture control model

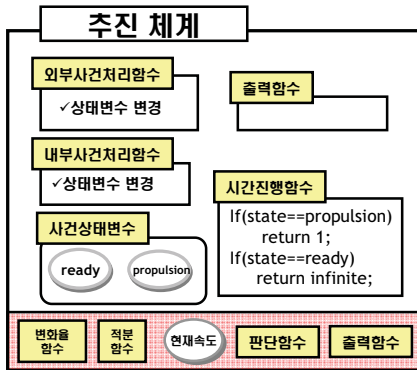


Fig. 13 Implementation of the propulsion model

도가 목표 속도에 도달 했을 경우에는 이산사건을 처리하는 부분의 출력함수를 호출하고 이산시간 부분의 함수는 종료시킨다(Fig. 13).

자세제어체계는 기동체계로부터 목표 자세가 외부 사건 처리 함수로 들어오면 이산시간을 처리하는 부분의 변화율 함수를 호출하여 함수잠항타와 함미잠항타의 각도를 결정하고 현재 자세가 목표 자세에 도달할 때까지 적분함수를 이용하여 매 단위 시간마다 자세를 계산하여 기동 체계의 변화율 함수로 전달한다. 현재 자세가 목표 자세에 도달 했을 경우에는 이산사건을 처리하는 부분의 출력 함수를 호출하고 이산시간 부분의 함수는 종료시킨다(Fig. 14).

#### 4. 시뮬레이션 가시화

시뮬레이션의 가시화 프로그램은 OSG(Open Scene Graph)<sup>2</sup>를 이용하여 구현하였다. OSG 는 Scene Graph 를 지원하는 OpenGL 기반의 공개 용 실시간 가시화 엔진으로 플랫폼에 독립적인 어플리케이션을 제작하는데 용이하다. 가상 공간에서 수중운동체의 모션을 가시화하기 위해서는 세계 좌표계에서 잠수함의 위치를 나타내는 3 개의 변수 (x, y, z)와 각 좌표축에 대한 회전각을 나타내는 세 개의 변수 ( $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ ), 함수미 잠항타의 회전각을 표현하기 위한 2 개의 변수  $\theta_f, \theta_b$  가 요구된다. 가시화 프로그램은 실시간 네트워크

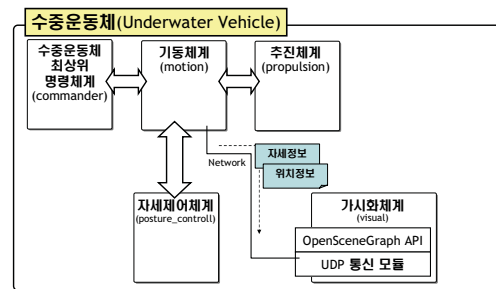


Fig. 15 Visualization model based on UDP using OSG

<sup>2</sup> OpenSceneGraph, <http://www.openscenegraph.org/>

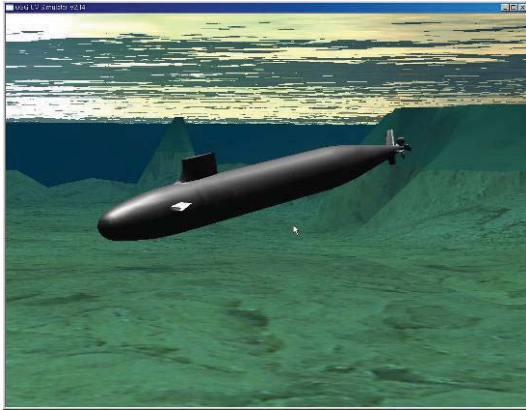


Fig. 16 Visualization of the normal diving of a submarine using OSG

통신을 통해서 이러한 8 개의 변수에 해당하는 값을 모델로부터 제공 받아 화면에 수중운동체의 모션을 가시화한다. 통신문제로 인해, 모델로부터 모션 정보가 제공 되지 않을 경우 마지막으로 전달된 정보를 반복하여 가시화 하는데 사용한다.

### 5. 시뮬레이션 결과

정상잠항 시나리오를 이산사건 시뮬레이션으로 진행하였을 경우, 목표 수심 50m, 최대정상잠항각도(maximum trim) 5°를 만족하는 범위 내에서, Fig. 6 의 다섯 가지 함수미 잠항타 상태 지속 구간을 변화시켜가며, 실험을 수행하였다. 지속 구간은 수심 1m 단위로 변화시켰으며, 가장 빠른 잠항시간을 보인 경우는 함수미잠항타-함미잠항타 순으로, High\_Down-Even=1m, High\_Down-High\_Down =9m, High\_Down-Low\_Up=25m, Low\_Down-High\_Up=15m 일 경우, 소요시간 564 초였다.

이 결과를 이산시간 시뮬레이션에 활용하여, 정상잠항 시나리오를 수행하였다. 시간에 따른 잠수함의 잠항심도는 Fig. 17 와 같다.

시간에 따른 잠수함의 trim 각도는 Fig. 18 와 같으며, 이산시간 시뮬레이션 기법은 추후, 유체 해석 모듈 및 정밀한 잠항타 모델과 연계될 경우, 잠항타 및 자세제어장치의 성능 분석 등, 여러 부

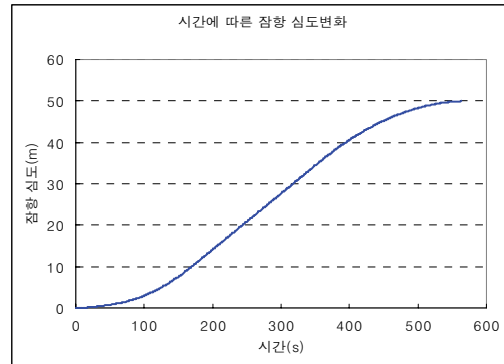


Fig. 17 Depth change of the submarine according to the time

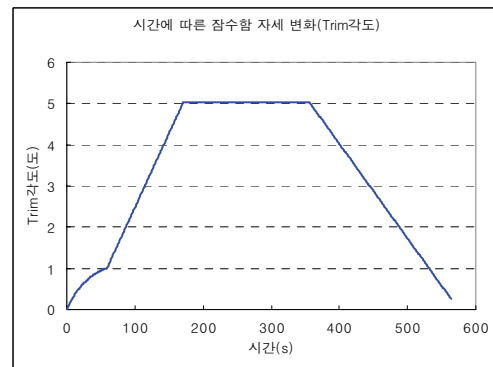


Fig. 18 Submarine trim angle change according to the time

체계 모델의 성능 분석에 효과적으로 사용될 수 있다.

이산사건/이산시간 혼합 시뮬레이션은 위의 두 시뮬레이션에서 사용한 동일한 잠수함 모델을 활용하여 진행된다. 시뮬레이션은 시작과 동시에 빠르게 사건들이 처리되고, 잠수함의 trim 각도가 5°가 넘어가는 172 초로 시뮬레이션 시간이 전환됨과 동시에 실시간 이산시간 시뮬레이션으로 바뀐다. Fig. 19 와 같이 사용자는 자신이 원하는 바대로 함수미 잠항타의 각도를 조절 가능하게 되고, trim 각도가 5° 미만으로 변화되면, 이산사건으로 전환되는 메시지가 화면에 출력되고, 시뮬레이션은 다시 정상잠항 시뮬레이션의 이벤트리스트에 대기중인 다음사건(next event)을 이용하여, 이산

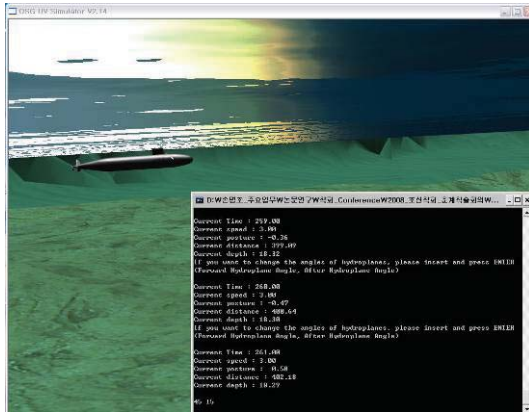


Fig. 19 Controlling the angles of the fore and aft hydroplanes to bring the submarine to the surface

사건 중심으로 진행되게 된다.

Fig. 19 에서는 trim 각도가 5°를 넘어서게 되면, 이산사건 시뮬레이션에서 이산시간 시뮬레이션으로 전환된 후, 다시 이산사건 시뮬레이션으로의 전환 조건을 설정하지 않았을 때의 상황을 가정하고 있다. 이때, 사용자는 함수미 잠항타의 각을 다양하게 조작하여, 잠수함이 부상하게끔 유도하고 있다. 이러한 이산시간 시뮬레이션 시의 제어는 오른쪽 하부 콘솔 창에 잠수함의 현재 위치 및 자세 값이 시간에 따라 출력되는데, 이 창에 사용자가 원하는 함수미 값을 입력할 수 있고, 이 값이 바로 잠수함의 속성값으로 반영되어 가능해진다.

## 6. 결론 및 향후 연구계획

본 연구에서는 수중운동체의 이산사건/이산시간 혼합 시뮬레이션을 지원하는 표준모델구조를 제안하였다. 이를 검증하기 위해, 공학급 예제인 잠수함 정상장항 시뮬레이션을 이용하여, 이산사건 시뮬레이션, 이산시간 시뮬레이션, 이산사건/이산시간 혼합 시뮬레이션의 세 가지 다른 진행방식의 시뮬레이션을 하나의 모델을 이용하여 수행하였다. 또한, 공개용 가시화 프로그램인 OSG 를 이용하여 3 차원 가시화 프로그램을 구현하여, 구성된 잠수함 정상장항 시뮬레이션 모델과의 실시간 통신

을 통해 실제 잠수함의 위치와 자세 등을 3 차원으로 실시간 가시화하였다. 제안된 표준모델구조를 사용하여 공학급/교전급의 수중운동체 모델을 개발하게 되면, 이산사건, 이산시간 또는 이산사건/이산시간 혼합 방식에 구애 받지 않고, 하나의 모델구조를 이용하여 일관성 있고, 상호운용성 있게 시뮬레이션을 진행할 수 있게 된다

본 논문에서는 이러한 모델구조의 검증을 위해, 개략 선형식을 이산시간 모델에 적용하였으나, 향후, 수중운동체 주위의 유동장 해석을 가능하게 하는 유체 동역학 방정식 기반의 모델을 적용하면 효율적이면서도 정확한 잠수함의 공학급 시뮬레이션으로 의미가 있을 것이다. 또한 수중에서 일주일 이상 은밀하게 잠복하여 초계 임무를 수행하는 잠수함의 교전급 시뮬레이션을 수행할 때, 이산사건 시뮬레이션 기법으로는 빠른 시간에 시뮬레이션 결과만을 얻지만, 본 논문에서 제안하는 모델구조를 활용하면, 아무런 사건이 발생하지 않은 부분은 빠르게 건너뛰고, 실제 교전이 발생하는 부분을 이산시간 시뮬레이션으로 사용자가 관찰하고자 하는 속도로(실시간, 2 배속 등) 자세하게 관찰하고, 교전이 종료되면, 다시 사건 기반으로 빠르게 시뮬레이션이 진행되어 결과를 얻을 수 있는 효과적인 시뮬레이션이 가능하게 된다.

향후 연구계획으로는 제안된 표준모델구조를 분산 시뮬레이션이 가능하도록 확장하는 연구를 진행하고자 한다. 즉, 분산시뮬레이션 국제표준인, IEEE 1516 기반의 HLA/RTI 를 지원하도록, 본 논문에서 구분한 단위 체계 모델을 federate 로 구성하고, DEVS/DTSS hybrid 모델과 HLA/RTI 를 연결해주는 어댑터 개발에 관한 연구를 수행 중이다. 이를 통해 구성된 분산시뮬레이션 federation 으로 수중운동체 체계/부체계 요소모델 간의 인터페이스를 연구할 계획이다. 또한, 본 논문의 시나리오에서 자세제어 모델 또는 잠수함 6 자유모델과 같은 요소모델을 CAE(Computer Aided Engineering) 모듈부터 제공받아, 이산사건/이산시간 혼합시뮬레이션을 구성하는데 필요한 기술을 연구하고자 한다.

### 후 기

본 연구는 (a) 국방과학연구소 수중운동체기술 특화센터 SM-11 과제 “수중 운동체의 체계/부체계 기능 및 성능 시뮬레이션을 위한 네트워크 기반의 가상(Virtual) 복합 시스템 모델 구조 (Architecture) 연구”, (b) 서울대학교 BK 21 해양 기술인력양성사업단의 지원으로 이루어진 연구 결과의 일부임을 밝히며, 이에 감사 드립니다.

### 참 고 문 헌

- Bang, K.W., 2006, Combined Discrete Event and Discrete Time Simulation Framework for Shipbuilding Process Planning, Master Thesis, Seoul National Univ., Seoul, Korea.
- Choi, J., Lee D.K. and Park, B.J., 2007, "A Study on the Analysis and Application of the Fire Simulation Tools for Ships," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 44, No. 2, pp. 83-92.
- 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. 43, No. 6., pp. 647-655.
- Lee, C.J., Lee, J.H., Woo, J.H., Shin, J.G. and Ryu, C.H., 2007, "A Study on Discrete Event Simulation of Shipyard Outdoor Block Movement," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 44, No. 6., pp. 647-656.
- Lee, S.J., 2006, A Study on Model Structure Based on High Level Architecture for Distributed Simulation of Underwater Vehicles, Master Thesis, Seoul National Univ., Seoul, Korea.
- Lee, S.J., Cho, D.Y., Kang, J.H., Lee, H.G., Lee, K.Y., Kim, T.W., Han, S.H. and Jung, H.S., 2006, "A Study on the Model Structure Based on the High Level Architecture for the Distributed Simulation of the Underwater Vehicles," In 2006 Korea CAD/CAM Conference, Korea CAD/CAM Society, pp. 913-921.
- Praehofer, H., 1991, System Theoretic Foundations for Combined Discrete-Continuous System Simulation, PhD Thesis, Johannes KEPLER University, Linz, Austria.
- Praehofer, H., Sametinger, J. and Stritzinger, A., 2001, "Concepts and Architecture of a Simulation Framework based on the JavaBeans Component Model," Journal of Future Generation on Computer Systems, Vol. 17, No. 5, pp. 539-559.
- Son, H. and Park, C., 2001, Introduction to the Submarine Engineering. Dae-Young Press.
- Son, M.J., Cho, D.Y., Cha, J.H., Kim, T.W., Lee, K.Y. and Park, J.K. 2007, "Implementation of a Tactic Manager for the Simulation of a Target Motion Analysis between a Submarine and a Surface Ship Warfare," Communications in Computer and Information Science, Vol. 5, pp. 315-326.
- Song, Y.J., Lee, D.K., Woo J.H. and Shin, J.G., 2008, "A Shipyard Layout Design System by Simulation," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 45, No. 4., pp. 441-454.
- Zeigler, B.P., 1990, Object-Oriented Simulation with Hierarchical, Modular Models, Academic press.
- Zeigler, B.P., Praehofer, H. and Kim, T.G., 2000, Theory of Modeling and Simulation, 2nd ed., Academic press.



< 손 명 조 >



< 이 현 진 >



< 함 승 호 >



< 이 효 광 >



< 김 태 완 >



< 이 규 열 >



< 한 순 흥 >



< 나 영 민 >