성능/교전 효과도의 상호 분석이 가능한 전투 개체 기반의 모델링 방법론 - 제2부 : 상세 모델 설계 및 모델 구현

서경민^{*,1)} · 최창범¹⁾ · 김탁곤¹⁾

¹⁾ 한국과학기술원 전기 및 전자공학과

Combat Entity Based Modeling Methodology to Enable Joint Analysis of Performance/Engagement Effectiveness - Part 2 : Detailed Model Design & Model Implementation

Kyung-Min Seo^{*,1)} · Changbeom Choi¹⁾ · Tag Gon Kim¹⁾

¹⁾ Korea Advanced Institute of Science and Technology, Korea

(Received 7 November 2013 / Revised 20 January 2014 / Accepted 8 March 2014)

ABSTRACT

Based on two dimensional model partition method proposed in Part 1, Part 2 provides detailed model specification and implementation. To mathematically delineate a model's behaviors and interactions among them, we extend the DEVS (Discrete Event Systems Specification) formalism and newly propose CE-DEVS (Combat Entity-DEVS) for an upper abstraction sub-model of a combat entity model. The proposed CE-DEVS additionally define two sets and one function to reflect essential semantics for the model's behaviors explicitly. These definitions enable us to understand and represent the model's behaviors easily since they eliminate differences of meaning between real-world expressions and model specifications. For model implementation, upper abstraction sub-models are implemented with DEVSim++, while the lower sub-models are realized using the C++ language. With the use of overall modeling techniques proposed in Part 1 and 2, we can conduct constructive simulation and assess factors about combat logics as well as battle field functions of the next-generation combat entity, minimizing additional modeling efforts. From the anti-torpedo warfare experiment, we can gain interesting experimental results regarding engagement situations employing developing weapons and their tactics. Finally, we expect that this work will serve an immediate application for various engagement warfare.

Key Words : Discrete Event System(이산 사건 시스템), DEVS Formalism(DEVS 형식론), Model Semantics(모델 의미론), Naval Warfare(해전), Effectiveness Analysis(효과도 분석)

---

* Corresponding author, E-mail: kmseo.kumsung@gmail.com
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

1. 서 론

성능/교전(Performance/Engagement) 효과도 (Effectiveness)의 상호 분석(Joint Analysis)은 전투 논리 (Combat Logic) 요소와 전장 기능(Battlefield Function) 요소를 균형 있게 고려하여 분석하는 방법이다. 본 연구의 1부에서는 이러한 성능/교전 효과도의 상호 분석을 모델링 및 시뮬레이션(M&S : Modeling and Simulation)의 목적(Objective)으로 하여 전투 개체 (Combat Entity) 기반의 개념 모델 설계(Conceptual Model Design) 방법을 제안하였다. 제안하는 방법은 2차원 모델 분할 기법(Two Dimensional Model Partition Method)으로써 전투 개체 모델의 전투 논리 요소를 과업(Task), 행동(Action), 파라미터(Parameter)로 세분화하여 제시하고, 이를 기동/탐지와 같은 전장 기능 요소와 결합하여 전체 모델을 구성하는 방안이다. 본 연구의 2부에서는 1부에서 제안한 개념 모델 설계를 바탕으로 M&S 개발 단계^[1] 중 상세 모델 설계 및 모델 구현을 다룬다.

상세 모델 설계는 실세계 시스템을 직접적으로 표현할 수도 있지만 대부분의 경우에는 시스템의 특성에 맞는 수학적 형식론(Mathematical Formalism)을 바탕으로 시스템을 추상화(Abstraction)하고 동작 원리를 표현한다^[2]. 따라서 본 연구는 전투 개체를 포함하는 국방 시스템을 이산 사건(Discrete Event) 시스템으로 간주하고 이산 사건 시스템의 수학적 형식론인 DEVS (Discrete Event System Specification)를 적용한다. DEVS 형식론은 이산 사건 시스템을 계층적이고 모듈러하게 설계할 수 있는 대표적인 수학적 모델링 틀^[3]로서 국내·외의 많은 연구에서 국방 시스템을 모델링하는 데 있어 DEVS 형식론^[4-6]을 적용해 왔다.

전투 개체에 대한 수학적 모델링은 1부에서 제시한 과업/행동/파라미터와 같은 전투 논리 요소의 의미론(Semantics)과 함께 과업 모델(TM : Task Model)과 행동 모델(AM : Action Model)로 분할된 개념 모델 설계를 반영할 수 있어야 한다. DEVS 형식론은 범용의 이산 사건 시스템 명세이기 때문에 시스템의 특정한 목적이나 상황에 따라 표현력의 확장이 필요하다. 예를 들어, 실시간 시뮬레이션에 적용하기 위한 RT-DEVS (Real Time DEVS)^[3]나 도메인 전문가와 M&S 전문가의 협업을 위한 COMAS(Collaborative Modeling and Simulation) 방법론^[7] 등이 그 대표적인 경우이다. 본 연구에서도 이러한 연구들과 마찬가지로 1부에서 제

안한 전투 개체 시스템의 특성과 요소를 명확하게 기술할 수 있도록 DEVS 형식론의 표현력을 확장한다.

다시 말해 본 연구의 2부는 전투 개체 모델의 개념 설계에 적합한 CE-DEVS(Combat Entity-DEVS) 형식론을 제안한다. 제안하는 CE-DEVS는 기존의 DEVS 형식론의 원자(Atomic) 모델을 확장하였다. 확장된 표현력은 크게 두 가지인데, 첫 번째는 모델의 상태 변수(State Variable)를 표현할 때 전투 개체가 수행해야 할 과업을 기존의 이산 사건 시스템의 상태 변수와 구분하여 독립적인 상태 변수로 처리한 것이고, 두 번째는 계층적으로 분할된 TM과 AM의 상호작용(Interaction)을 위한 함수를 정의한 것이다.

이러한 확장된 표현력은 1부에서 제시한 전투 논리의 의미론(과업과 행동)을 수학적으로 명확하게 정의할 수 있고, 이로 인해 현실과 모델의 의미적 차이 없이 실세계를 효과적으로 반영할 수 있다. 또한, 수직적으로 분할 설계된 TM과 AM은 동시 공학적(Concurrent Engineering)으로 모델 기술/개발이 가능하고, 이들은 정의된 상호작용 함수를 통해 목적에 따라 얼마든지 재구성이 가능하며, 개발 과정 중에 확장된 교전 시나리오에 대해서도 유연하게 모델링을 할 수 있다. 제안하는 CE-DEVS는 전투 개체의 수평적 부 모델(Sub-model)인 탐지/제어/기동 모델을 기술하는데 이용하고, 이들의 결합은 기존 DEVS 형식론의 결합(Coupled) 모델로 표현하여 하나의 전투 개체를 수학적으로 모델링한다.

모델 구현은 DEVS 모델의 시뮬레이션 환경인 DEVSIM++^[8]를 이용하였다. 구현된 모델을 바탕으로 수상함의 대함어뢰전(Anti Torpedo Warfare)에 대한 시뮬레이션 실험을 수행하여 어뢰 방어 전술(전투 논리 요소)과 기만기의 성능 요구 사항(전장 기능 요소)를 도출하였다. 마지막으로 본 연구에서 제안하는 연구 결과는 향후 차기 전투 플랫폼/무기 체계의 다양한 성능/교전 효과도 분석에 유연하고 신속하게 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

본 연구의 2부 구성은 다음과 같다. 2장에서는 전투 개체 모델의 시스템 분류에 대하여 설명하고, 3장에서 배경 지식으로 DEVS 형식론을 간단히 소개한다. 4장은 DEVS 형식론을 확장한 CE-DEVS를 제안하고, CE-DEVS를 이용한 전투 개체 모델링 예를 설명한다. 그리고 5장에서는 모델 구현 방안을 설명한다. 6장은 사례 연구로 수상함의 대함어뢰전에 대한 성능/교전 효과도의 상호 분석 결과를 설명하고, 마지막으로 7장에서는 본 연구의 결론을 맺는다.

2. 접근 방법 - 이산 사건 시스템 특성의 전투 개체 모델

모델링은 대상 시스템을 모델링 목적에 맞게 추상화하는 과정이다. 시스템은 시스템의 입력, 출력, 상태 변수를 정의한 후 상태 변수가 시간에 따라 변하는 규칙을 기술한 동작 명세서(Behavioral Specification)^[2]이다. Kim의 연구결과^[2]에 따르면 시스템은 상태 공간(State Space)과 시간 영역(Time Region)에 따라 크게 연속(Continuous) 시스템, 이산 시간(Discrete Time) 시스템, 이산 사건 시스템, 디지털(Digital) 시스템으로 분류된다. 상태와 시간에 따라 분류된 시스템은 동작 특성이 다르기 때문에 적용하고자 하는 모델링 이론과 구현에서도 차이점이 발생한다. 본 절에서는 모델링 형식론을 제안하기에 앞서 전투 개체 시스템이 분류 기준에 따라 어떠한 시스템에 해당하는지를 살펴본다.

Fig. 1. Discrete event system approach for combat entity

Fig. 1은 전투 개체의 교전 시나리오와 동작에 따른 시스템 분류를 나타낸다. Fig. 1 왼쪽의 교전 흐름도(Flow Chart)는 실제 군에서 사용하는 전술 흐름도를 간략히 나타낸 것이다^[9]. 본 연구의 1부를 통해 전투 개체의 교전 시나리오(전술 운용)는 과업과 행동, 파라미터의 조합으로 표현됨을 제안하였고, 본 절에서는 간단하게 과업만을 이용하여 시스템 특성을 설명한다. 교전 시나리오에서 전투 개체의 전술 운용은 과업의 실행(Execution)과 이행(Transition)으로 볼 수 있다. 다시 말해서, 실세계에서 전투 개체는 정찰, 식별, 접근, 공격, 회피와 같은 과업들을 순차적 혹은 동시적

으로 수행하면서 임무를 달성한다. 이를 시스템 특성 관점에서 설명하면 다음과 같다. 과업은 전투 개체 시스템의 상태 변수(State Variable)이고, 과업의 실행과 이행은 상태 천이(State Transition), 그리고 과업 실행의 원인과 결과는 시스템의 입출력 변수(Input/Output Variable)로 볼 수 있다. 즉, 전투 개체 시스템은 시스템 내부 혹은 외부 요인으로 인하여 불규칙한 시간 간격(Continuous and Non-periodic Time)으로 사건이 발생하고, 사건 발생 시점에서만 유한개의 상태 변수(Discrete State)가 천이하는 이산 사건 시스템이다.

예를 들어, 교전 상황에서 전투 개체가 예상치 못한 적 세력을 탐지하고, 탐지 정보(입력 변수)를 바탕으로 과업(‘식별’ 과업)을 실행/이행(상태 천이)하며 식별을 위한 기동 명령(출력 변수)을 전달하는 일련의 교전 상황은 이산 사건 시스템에 가장 적합하다. 이러한 근거를 바탕으로 실제 많은 연구에서 국방 M&S를 이산 사건 시스템 기반으로 연구를 진행해 왔으며^[10], 본 연구 역시 전투 개체 기반의 국방 시스템을 이산 사건 시스템으로 간주한다. 이어지는 장에서는 이산 사건 시스템을 수학적 형식론으로 명세할 때의 장점과 대표적인 수학적 형식론인 DEVS 형식론에 대하여 알아본다.

3. 배경 지식

이산 사건 시스템의 M&S를 위하여 GASP, GPSS, SIMAN, SIMSCRIPT, SLAM 등과 같은 시뮬레이션 전용 언어들이 제안된 바 있다^[11]. 하지만 이들 언어들은 언어에서 제공하는 제한된 블록들을 사용하여 시스템을 모델링해야 하므로 시스템으로 수학적으로 기술하는 의미론(Semantics)이 불명확하고 모델의 표현력도 제한적이어서 복잡한 시스템의 모델링 작업에 비효율적이다. 이와 달리 수학적 형식론은 대상 시스템의 행위를 표현할 수 있는 수학적 의미론에 기반한 모델링 틀(Frame)을 제공한다. 따라서 수학적 모델링의 장점은 모든 사람이 동일한 틀에 의해 모델을 표현하기 때문에 모델의 해석과 실행에 있어 애매모호함이 없고, 특히 모델의 명확한 표현과 검증이 필요한 시스템의 모델링에 적합하다^[12].

DEVS 형식론은 대표적인 이산 사건 시스템의 수학적 모델링 틀로써 1976년 Zeigler에 의해 제안된 집합론에 근거한 모델링 틀이다. DEVS 형식론은 시스템을

계층적으로 모듈화 하여 단위 모델과 이들 모델 사이의 연결 명세로 시스템을 표현한다. 이를 위해 원자 모델과 결합 모델이라는 두 개의 모델 클래스를 정의한다. 원자 모델은 더 이상 분해 할 수 없는 컴포넌트이며 결합 모델은 부 모델들의 결합체로서 부 모델들은 각각 원자 모델 혹은 결합 모델이다. *Definition 1*은 DEVS 형식론 중에서 원자 모델(M)의 수학적 명세를 나타낸다. DEVS 형식론의 자세한 설명은 Zeigler의 연구 결과^[3]를 참고하기 바란다.

Definition 1. DEVS 원자 모델(DEVS Atomic Model)

$$M = \langle X, Y, S, \delta_{ext}, \delta_{int}, \lambda, ta \rangle$$

X - 이산 사건 입력 집합

Y - 이산 사건 출력 집합

S - 일련의 이산 사건 상태의 집합

$$\delta_{ext} : Q \times X \rightarrow S$$

단, $Q = \{(s, e) | s \in S, 0 \leq e \leq ta(s)\}$

- 외부 상태 천이(External Transition) 함수

$$\delta_{int} : S \rightarrow Q$$

- 내부 상태 천이(Internal Transition) 함수

$$\lambda : S \rightarrow Y$$

- 출력(Output) 함수

$$ta : S \rightarrow R_{0, \infty}^+$$

- 시간 전진(Time Advance) 함수

일반적으로 국방 시스템은 계층적으로 복잡한 구조로 이루어져 있기 때문에, DEVS 형식론으로 기술하기에 적합한 시스템으로 볼 수 있다. 본 연구의 전투 개체 모델 역시 영역 별로 분할된 모델 구조와 계층을 가지기 때문에 DEVS 형식론을 적용한다. 대신, 1부에서 제안한 개념 모델 설계를 잘 반영할 수 있도록 기존의 DEVS 형식론에서 몇 가지 확장된 표현력을 제안한다.

4. 전투 개체의 모델링 형식론 - CE-DEVS

본 장에서는 전투 개체의 수학적 표현을 위해 필요한 의미론을 설명하고, 이를 바탕으로 제안하고자 하는 CE-DEVS 형식론을 설명한다.

4.1 전투 개체의 수학적 모델링을 위한 의미론 요소

전투 개체 모델은 TM과 AM의 계층적 구조로 표현되고, 2장을 통하여 TM은 이산 사건 시스템의 특성을 보임을 설명하였다. AM은 TM이 과업을 수행하는 데 있어 필요한 세부적인 행동을 처리하는 모델이기 때문에 AM의 모델링 기법은 수학적 형식론 대신에 특정한 알고리즘(Algorithm)이나 오퍼레이션(Operation)의 형태로 기술된다. 따라서 AM을 수학적 형식론으로 기술하는 것보다 TM이 AM 내부의 행동 알고리즘을 실행할 수 있도록 해당 AM에 접근할 수 있는 API(Application Programming Interface)와 같은 인터페이스(Interface)를 정의하는 것이 필요하다.

Fig. 2. Representation of task and action sets for combat entity model

이상의 설명을 바탕으로 전투 개체 모델의 수학적 표현을 위해 필요한 의미론 요소를 Fig. 2에 간단히 나타내었다. 먼저, 전투 개체의 수학적 형식론은 과업을 표현할 수 있어야 하고, 내/외부적 사건에 의한 과업의 실행/이행을 정의할 수 있어야 하며, 마지막으로 과업과 행동 사이의 상호작용을 기술할 수 있어야 한다. 예를 들어, Fig. 2에서 정찰, 접촉, 식별, 접근, 공격 및 회피의 과업이 표현되어야 하고, 이러한 과업이 내/외부적 사건에 의해 천이되는 과정, 그리고 현재 '접근' 과업에서 어떠한 AM(AM_1 , AM_2 , AM_3)이 실행되어야 하는지에 대한 상호작용의 정의가 필요하다. 이어지는 절에서는 이러한 부분들을 기술하기 위한 CE-DEVS 형식론을 제안한다.

4.2 제안하는 CE-DEVS 형식론

제안하는 CE-DEVS는 전투 개체의 TM을 명세하는 수

학적 형식론이다. CE-DEVS는 DEVS 형식론의 원자 모델을 확장하였고, CE-DEVS로 기술된 원자 모델 (CEAM)의 수학적 표현은 Definition 2와 같다.

Definition 2. 전투 개체 원자 모델(Combat Entity Atomic Model: CEAM)

$$CEAM = \langle X, Y, S_{situation}, S_{task}, I_{action}, \delta_{ext}, \delta_{int}, \lambda, \psi, ta \rangle$$

- X - 이산 사건 입력 집합
- Y - 이산 사건 출력 집합
- $S_{situation}$ - 모델의 상태에 관한 상태 변수 집합
- S_{task} - 모델의 임무에 관한 상태 변수 집합
- I_{action} - 행동 인터페이스 집합

$$\delta_{ext} : Q \times S_{task} \times X \rightarrow S_{situation} \times S_{task}$$

단, $Q = \{(s, e) | s \in S_{situation}, 0 \leq e \leq ta(s)\}$

- 외부 상태 천이 함수

$$\delta_{int} : S_{situation} \times S_{task} \rightarrow S_{situation} \times S_{task}$$

- 내부 상태 천이 함수

$$\lambda : S_{situation} \times S_{task} \rightarrow Y$$

- 출력 함수

$$\psi_I : S_{task} \rightarrow I_{action}$$

- 과업과 행동의 상호작용(Interaction) 함수

$$ta : S_{situation} \times S_{task} \rightarrow R_{0, \infty}^+$$

- 시간 전진 함수

CEAM은 기존의 DEVS 원자 모델에서 두 개의 집합과 하나의 함수를 추가적으로 명세하였다. 먼저, 집합 명세를 설명하면, 이산 사건 입/출력 집합은 기존의 원자 모델과 동일하게 사용하였고 상태 변수 집합은 $S_{situation}$ 와 S_{task} 로 세분화하였다. $S_{situation}$ 는 대기(WAIT), 갱신(UPDATE), 종료(END) 등과 같이 CEAM이 동작하는 데 있어 일반적인 상황(Situation)을 나타낸다. 반면, S_{task} 는 보다 구체적인 모델의 상태로써 CEAM이 수행해야 하는 과업의 집합을 의미한다. Fig. 2에서는 $S_{task} = \{\text{정찰, 접촉, 식별, 접근, 공격, 회피}\}$ 로 나타낼 수 있다. 이렇게 S_{task} 를 일반적인 $S_{situation}$ 와 구분함으로써 얻을 수 있는 이점은 다음과 같다. 먼저, 과업을 의미론적으로 명확하게 표현할 수 있기 때문에 모델의 동작을 이해하고 해석하기 쉽다. 즉, S_{task} 는 해당 전투 개체 모델이 어떠한 과업을 수행하

는지에 대한 직접적인 정보를 제공한다. 또한, 실세계의 과업을 형식론에 그대로 적용하였기 때문에 모델링을 수행할 때 실세계 영역과 모델링 영역 간의 의미적 차이 없이 실세계를 효과적으로 반영할 수 있다. S_{task} 와 함께 추가로 정의된 I_{action} 은 접근 가능한 AM의 인터페이스 집합이다. 이들 S_{task} 와 I_{action} 은 과업과 행동의 상호작용에 대한 의미론을 정의하는 데 있어 기틀을 마련한다.

다음으로, CEAM의 함수 명세에 대하여 설명한다. 상태 집합의 분할(S_{task} 와 $S_{situation}$)로 인해 기존의 네 함수들은 Definition 2에서 나타내었듯이, 기존의 S 가 모두 $S_{situation}$ 와 S_{task} 의 Relation($S_{situation} \times S_{task}$)으로 확장되었다. 물론, 네 함수의 의미론은 기존의 원자 모델과 동일하게 내/외부적인 상태를 천이하고 출력을 내보내며, 시간 진행을 수행한다. 추가적으로 기술된 함수는 ψ_I 로 과업과 행동의 상호작용 함수이다. 즉, CEAM은 현재의 과업 상태에서 실행하고자 하는 행동을 ψ_I 를 통해 정의한다. Fig. 2의 예에서는 ‘식별’ 과업에서 수행하고자 하는 행동(AM_1 , AM_2 , AM_3 중 하나)을 ψ_I 를 통해 기술할 수 있다. 따라서 ψ_I 는 계층적으로 분할된 TM과 AM을 결합하게 하는 의미론을 제공한다. 또한, ψ_I 는 Sung의 연구결과^[7]와 마찬가지로 TM과 AM의 동시 공학적 모델링이 가능하게 한다.

제안하는 CEAM은 수평적으로 분할된 탐지/제어/기동 부 모델들에 동일하게 적용 가능하다. 그리고 전투 개체 모델은 이러한 탐지/제어/기동 부 모델들이 복합 체계(System of Systems)를 이루어 내부적으로 서로 상호 작용을 하고, 또한 전투 개체 모델들 사이에서도 상호 작용을 주고받으면서 교전 시나리오를 수행한다. 이렇게 복합체계의 상호작용을 수행하는 방법으로 본 연구의 1부에서 모델 결합(Integration) 방법과 모델 연동(Interoperation) 방법을 소개하였다. 본 연구는 이 중 모델 결합 방법을 기반으로 하여 DEVS 형식론에서 정의한 기존의 결합 모델 명세를 그대로 이용한다.

4.3 CE-DEVS를 이용한 모델링 예

본 절에서는 CE-DEVS를 이용한 전투 개체의 모델링 예를 몇 가지 살펴본다.

4.3.1 전투 개체 결합 모델

Fig. 3은 단일 전투 개체 모델을 모델 결합의 형태

로써 DEVS 결합 모델로 나타내었다. 전투 개체 모델은 하위 모델로 탐지/제어/기동 부 모델을 포함한다. 잠수함이나 전투기, 수상함 등과 같은 전투 세력은 내부적으로 어뢰, 미사일 등과 같은 무장 세력을 탑재할 수 있기 때문에 Fig. 3에서와 같이 전투 개체 모델이 내부에 하위 전투 개체 모델을 포함하는 구조로 표현 가능하다. 물론, 하위 전투 개체 모델 역시 내부적으로는 탐지/제어/기동 부 모델로 구성된다. 하위 모델들 사이의 입출력 관계를 간단히 설명하면 탐지 모델은 모든 전투 개체들의 위치 정보(*moveResult*)를 바탕으로 위협이 되는 전투 개체의 정보(*threatInfo*)를 제어 모델로 보낸다. 제어 모델은 위협 세력에 대한 입력력 메시지(*threatInfo*)를 바탕으로 전술 운용을 수행하는데, 이러한 전술 운용의 결과가 기동 모델에게 기동 명령(*moveCmd*)으로 전달되거나 무기 발사 명령(*WPLaunch*) 혹은 무기 제어 명령(*WPGuidance*)으로 하위 전투 개체 모델에 전달된다.

Fig. 3. DEVS diagram of combat entity coupled model

4.3.2 전투 개체 하위 모델: 제어 모델

본 절은 전투 개체 모델의 하위 모델인 탐지/제어/기동 모델들 중에서 제어 모델의 CE-DEVS 모델링 예를 설명한다. 본 연구에서는 제어 모델을 결합 모델로 모델링하고 내부적으로 Updater 원자 모델과 Actor 원자 모델로 구성하였다. 아래 *Example 1*은 Updater 원자 모델에 대한 CE-DEVS 모델링 결과이다.

Example 1. 제어부 Updater 원자 모델(Updater Atomic Model)

$TM_{ControlUpdater}$

$$=< X, Y, S_{situation}, S_{task}, I_{action}, \delta_{ext}, \delta_{int}, \lambda, \psi_I, ta >$$

$$X = \{scenInfo, threatInfo\}$$

$$Y = \{targetInfo\}$$

$$S_{situation} = \{WAIT, UPDATE\}$$

$$S_{task} = \{Identification\}$$

$$I_{action} = \{I_{kntfy}\}$$

$$\delta_{ext} : WAIT \times \forall s (\in S_{task}) \times scenInfo \rightarrow WAIT \times \forall s (\in S_{task})$$

$$WAIT \times \forall s (\in S_{task}) \times threatInfo$$

$$\rightarrow UPDATE \times Identification$$

$$UPDATE \times Identification \times threatInfo$$

$$\rightarrow UPDATE \times Identification$$

$$\delta_{int} : UPDATE \times Identification$$

$$\rightarrow WAIT \times Identification$$

$$\lambda : UPDATE \times Identification \rightarrow targetInfo$$

$$\psi_I : Identification \rightarrow I_{kntfy}$$

$$ta : WAIT \times \forall S_{task} \rightarrow \infty$$

$$UPDATE \times Identification \rightarrow t_1$$

두 원자 모델에 대하여 간단히 설명하면, Actor 원자 모델은 전반적인 전술 운용을 담당하고 Updater 원자 모델은 탐지 모델로부터 받은 정보를 갱신하여 표적 식별 여부를 판단한다. Fig. 4는 제어 모델을 다이어그램(Diagram)으로 표현하였는데, Fig. 4(a)는 제어 결합 모델, Fig. 4(b), 4(c)는 제어 결합 모델의 하위 모델인 Updater, Actor 원자 모델을 가리킨다. CE-DEVS 모델의 다이어그램은 기존에 제안되었던 DEVS 다이어그램을 확장하였으므로, 공통적인 설명은 Song의 연구^[13]를 참고하기 바라며, CE-DEVS를 위해 확장된 부분만 설명하면 다음과 같다. $S_{situation}$ 와 S_{task} 로 세분화된 상태 변수는 ($WAIT, \forall s (\in S_{task})$)와 같이 상태 변수들의 조합으로 표현하였다. 그리고 행동 인터페이스 집합인 I_{action} 은 다이어그램의 하단에 기술하였고, 상호작용 함수는 출력 사건과 함께 ‘/’ 기호 뒤에 표시된다.

먼저, Updater 원자 모델의 주된 역할은 탐지 모델로부터 받은 위협 정보를 바탕으로 식별(Identification) 과업을 수행하는 것이다. Updater 모델은 외부 입력 사건인 *threatInfo*를 받으면 외부 상태 천이에 따라 ($UPDATE, Identification$)으로 상태를 천이한다. ($UPDATE, Identification$) 상태에서는 내부 상태 천이를 하면서 위협 정보의 표적 유무를 판별하기 위해 I_{kntfy} 를 통해 식별 알고리즘(행동)을 수행한다. 알고

Fig. 4. DEVS diagrams of Control model

리즘을 수행하여 위협 정보가 표적이라면 표적 정보 (*targetInfo*)를 Actor 모델에 전달하고 표적이 아니면 출력 사건을 보내지 않고 (*WAIT, \forall s(\in S_{task})*)로 내부 상태 천이만 수행한다.

Actor 모델은 식별 과업을 제외한 모든 과업을 수행하는 모델로써, Updater 모델로부터 전달되는 *targetInfo*의 수신 유무에 따라 교전 준비 과업(정찰)과 교전 실행 과업들(접근, 공격, 회피, 명령)로 나뉘어 수행된다. 예를 들어, Updater 모델로부터 아무런 외부 입력 사건(*targetInfo*)을 받지 못하는 경우는 (*IDLE, \forall s*)과 (*CTRL, Reconnaissance*) 사이에서 내/외부 상태 천이를 하면서 정찰을 위한 기동 명령 (*moveCommand*)만 기동 모델에 전달한다. Updater 모델로부터 *targetInfo*을 입력 사건으로 전달 받으면 (*CTRL, Approach*), (*CTRL, Attack*), (*CTRL, Detour*)순으로 상태 천이를 하면서 해당 과업과 행동을 수행하고, 선유도 어뢰와 같은 제어가 필요한 무

기 체계를 발사한 경우에는 (*CTRL, Command*)를 통해 해당 무기 체계에 대한 제어/명령을 수행한다. 마지막으로 교전 상황이 종료가 되면 *engageResult*를 입력 사건으로 전달받아 초기 상태인 (*IDLE, \forall s*)로 천이한다.

4.3.3 제어 부 모델과 기동 부 모델의 상호 작용

지금까지 설명한 내용을 종합하면, 전투 개체는 탐지 정보를 바탕으로 전술 운용을 수행하고, 전술 운용의 반작용(Reaction)이 전투 개체의 동적인 움직임이나 기타 명령으로 나타난다. 이를 위해 전투 개체 모델은 탐지/제어/기동 하위 모델로 구성되고, 이들은 정의된 인터페이스에 의해 유기적으로 연결되어 해당 과업과 행동을 수행할 수 있다. 이러한 유기적 연결 관계와 모델의 동작 원리를 간단하게 설명하기 위해 Fig. 5에 제어 모델과 기동 모델간의 유기적 연결 관계 중 일부를 나타내었다.

Fig. 5. Relation between Control and Moving model

제어 모델과 마찬가지로 기동 모델 역시 역할에 따라 Updater 모델과 Actor 모델로 구분하였다. 탐지 정보를 바탕으로 표적은 식별되었다고 가정하고 제어/기동 모델 간 이산 사건 발생 흐름을 설명하면 다음과 같다. 먼저, $TM_{ControlActor}$ 는 $TM_{ControlUpdater}$ 로부터 받은 표적 정보($targetInfo$)를 바탕으로 (CTRL, Approach) 상태로 천이하여 접근을 위한 세부 행동을 실행한다. 접근을 위한 세부 행동은 $AM_{Approch}$ 에 기술된 알고리즘에 따라 Point, Lead, Lag 기동 순으로 실행되는데, 현재는 Point 기동을 실행한다. $I_{Approch}$ 에 의해 전달된 Point 기동 명령은 출력 사건($moveCmd$)으로 기동 모델에 전달한다. 기동 모델의 $TM_{MoveUpdater}$ 는 기동 명령을 해석하여 물리적 정보로 변환하는 모델로써, $moveCmd$ 를 전달받은 $TM_{MoveUpdater}$ 는 기동 명령을 해석/변환하기 위해 (UPDATE, ∇s)로 외부 상태 천이를 수행한다. 실제 기동 명령을 해석하고 물리적 정보로 변환하는 알고리즘은 $AM_{CmdInterpreter}$ 에 구현이 되고 $I_{CmdInterpreter}$ 를 통해 $AM_{CmdInterpreter}$ 의 실행 결과를 도출하여 출력 사건($cmdInfo$)으로 $TM_{MoveActor}$ 로 전달된다. $TM_{MoveActor}$ 는 전달받은 물리적 정보를 바탕으로 실제 기동을 실시하는 모델이

다. 즉, $cmdInfo$ 를 받은 $TM_{MoveActor}$ 는 (MOVE, Approach)로 상태 천이를 하고, $I_{MoveEquation}$ 을 통해 $AM_{MoveEquation}$ 을 실행하여 실제 기동을 수행한다. Fig. 5에서는 $AM_{MoveEquation}$ 에 기술된 기동 알고리즘이 간단한 3차원 질점 운동 방정식이지만 모델링 목적에 따라서 자세한 기동 알고리즘을 사용해야 한다면 $AM_{MoveEquation}$ 만 수정/변경하므로써 다양한 기동 알고리즘을 적용할 수 있다.

이와 같이, TM과 AM을 분리하여 기술함으로써 기본적으로 모델의 재사용성을 높일 수가 있다. 그리고 구체적으로는 접근 방법이나 기동 알고리즘과 같이 AM에 기술된 세부 행동이 성능/교전 효과도의 상호 분석 과정 중에 점진/반복적으로 변경되더라도 제안하는 모델링 방법을 이용하면 해당하는 모델만 변경하여 재구성하는 것이 가능한 장점이 있다.

5. 모델 구현

본 연구에서 제안한 방법론을 적용한 전체 모델링 과정을 정리하면 다음과 같다. 먼저, 2차원 모델 분할

기법을 적용하여 전투 개체의 개념 모델을 설계하고, 설계된 모델은 CE-DEVS 형식론으로 수학적 모델링을 완성한다. 이렇게 CE-DEVS로 기술된 전투 개체 모델(CE-DEVS 모델)을 시뮬레이션하기 위해서는 모델을 해석하고 동작시키는 시뮬레이션 엔진이 필요하다. 시뮬레이션 엔진은 모델의 방정식(형식론)을 푸는 알고리즘을 바탕으로 모델 간 정보 전달 및 시간 진행을 관리하는 소프트웨어 구현물^[1]로써, 대표적인 이산 사건 시뮬레이션 엔진으로는 DEVSim++^[8]가 있다.

DEVSim++는 DEVS 모델의 시뮬레이션을 위해 C++ 언어 기반으로 개발된 라이브러리 도구인데, 지난 15년간 공/해군 위 게임 시뮬레이터를 포함한 많은 국방 시스템 M&S에 응용되어 왔다^[1]. 여기서 시뮬레이터란 시뮬레이션 엔진을 바탕으로 구현된 모델을 말한다. 본 연구에서 DEVSim++를 활용하기 위해서는 CE-DEVS 형식론에서 확장된 의미론들이 DEVSim++ 환경에서 구현이 가능해야 한다. 4장에서 설명하였듯이, CE-DEVS에서 확장된 의미론은 크게 모델의 상태 집합의 세분화($S_{situation}$ 와 S_{task})와 TM과 AM 간 상호작용 함수(ψ_I)이다. DEVSim++는 객체 지향(Object-oriented) 언어인 C++ 언어를 기반으로 개발되었기 때문에 $S_{situation}$ 와 S_{task} 는 객체(Object)의 멤버 변수(Member variable)로 표현할 수 있고, ψ_I 는 C++ 내부의 함수 호출을 통해서 구현이 가능하다. 마지막으로 AM의 경우에는 C++ 클래스로 정의하여 내부 알고리즘을 구현한다.

Fig. 6. Implementation of CE-DEVS model in DEVSim++^[8]

Fig. 6은 DEVSim++를 이용한 CE-DEVS 모델의 구현 중에서, ψ_I 의 구현 예를 나타낸다. 본 연구의 1부

에서 설명하였듯이 성능/교전 효과도의 상호 분석은 점진/반복적 특성으로 인해 일부 모델의 수정이 불가피하다. 따라서 M&S 환경은 모델 수정 후 수정된 모델만을 다시 전체 모델에 플러그인(Plug-In)할 수 있는 DLL(Dynamic Link Library) 기술을 활용한 모델 재사용 및 시뮬레이터 자동 합성이 가능해야 한다. Fig. 6에서와 같이 다양한 AM(예: $AM_{Approach1}$, $AM_{Approach2}$)을 DLL로 개발하고 함수 프로토타입(Function Prototype)을 정의하여 필요에 따라 함수 프로토타입을 호출함으로써 자동 합성이 가능하다^[14].

Fig. 7. Overall simulation construction using proposed simulation model

구현된 모델(시뮬레이터)의 기본적인 목적은 입력 시나리오에 대하여 시뮬레이션 실험을 수행하여 그 결과를 분석하는 것이다. Fig. 7을 통하여 이러한 전체 시뮬레이션 구성을 간단하게 도시화하였다. 본 연구에서 개발된 시뮬레이터는 전투 개체와 환경 정보들을 입력 시나리오로 하고 시뮬레이션 실험 결과는 아군의 생존률과 같은 효과도 분석 지수가 된다. 시뮬레이션을 이용한 실험의 경우 모델 내부에는 불확실성이 고려된 확률(Stochastic) 변수 집합을 포함하게 되는데 본 연구의 시뮬레이터는 Fig. 7에서와 어뢰 수동 소나(Passive Sonar)의 방향(Bearing) 오차, 어뢰의 발사 각(Launching Angle) 오차, 수상함/잠수함의 회피 방향(Evasive Direction) 오차를 확률 변수로 적용하였다. 그리고 이러한 확률 모델은 신뢰성 있는 실험 결과를 도출하기 위해 반복 실험인 몬테 칼로(Monte-Carlo) 시뮬레이션을 수행하게 된다. 이어지는 6장에서는 본 장에서 설명한 내용을 토대로 개발된 시뮬레이터를 이용하여 실제 시뮬레이션 실험을 수행하고 시뮬레이션을 통해 얻은 결과를 분석하도록 한다.

6. 시뮬레이션 실험

시나리오는 수상함의 대함어뢰전이고, 시뮬레이션 실험의 목적은 성능/교전 효과도의 상호 분석이다. 상호 분석을 위해 교전 효과도 지수는 수상함의 회피율로 설정하고 성능 효과도 지수는 수상함의 어뢰경보 거리와 자항식 기만기의 속도로 설정하였다. 상호 분석을 위해 일부 전장 기능과 전투 논리 요소에 대하여 실험 계획을 수립하고 결과를 분석하였다.

6.1 교전 시나리오 - 수상함의 대함어뢰전

기본적인 교전 시나리오는 적 잠수함의 어뢰 공격에 아 수상함이 대항무기 전술과 회피 전술을 수행하는 것으로 Fig. 8에 간단하게 도시화하였다.

Fig. 8. Simple scenario of anti-torpedo warfare

교전 시나리오의 공통 전술^[15]은 다음과 같다. 공격 어뢰는 음향 유도 패턴형(Pattern Running) 어뢰이고, 출현 방위는 아 수상함 기준으로 10도 방향이다. 아 수상함의 방어 무기 체계는 기본적으로 기만기(Decoy)를 사용한다. 어뢰 방어를 위해 총 4대의 기만기를 사용하되 어뢰경보 전 방위에 기만기 2발, 어뢰경보 후 방위에 기만기 2발을 사용하였다. 그리고 회피 전술로 경보 방위의 -90도의 방향으로 회피 기동을 실시한다.

6.2 모델 설계/구현 및 시뮬레이션 설계

시뮬레이션 실험을 위해 설계된 모델은 교전에 참여하는 네 종류의 전투 개체(잠수함, 수상함, 어뢰, 기만기) 모델과 환경 모델, 그리고 교전 상황을 평가하는 피해 평가 모델로 구성이 된다. 이들 모델은 1부에서 제안한 2차원 모델 분할 기법을 적용하여 구조적

모델링을 수행하였고, 수학적 모델링은 2부에서 제안한 CE-DEVS를 이용하여 명세하였다. 마지막으로 기술된 CE-DEVS 모델들은 시뮬레이션을 위해 C++ 언어 환경에서 DEVSsim++로 구현하였다. 다음으로 시뮬레이션에 필요한 파라미터를 식별하여 실험 계획을 수립하였다. 자세한 시뮬레이션 실험 계획은 Seo의 연구 결과를 참고하기 바란다^[16]. 시뮬레이션을 위한 제어 요인(Controllable Factor)은 전투 논리와 전장 기능 요소의 상호 분석을 위해 세 가지 요소를 설정하였는데, Table 1을 통해 정리하였다.

Table 1. Experimental design for joint analysis

실험 인자 (factor)	인자의 수준(level)	설명
수상함 어뢰경보거리	2000, 2500, 3000, 3500, 4000 (5 수준) 내정값(default value): 3000	- 전장 기능 요소 (파라미터의 변경) - 단위 : meter - 수상함의 탐지 모델의 파라미터에 해당
기만기 분봉 전술	패턴 1, 2, 3, 4 (4 수준) 내정값(default value): 패턴 3	- 전투 논리 요소 (AM의 변경) - 수상함 제어 모델의 AM에 해당 - 패턴 1: 전후방 고정식 기만기 4발 - 패턴 2: 전후방 자항식 기만기 4발 - 패턴 3: 전방 고정식 기만기 2발, 후방 자항식 기만기 2발 - 패턴 4: 전방 자항식 기만기 2발, 후방 고정식 기만기 2발
자항식 기만기 속도	3, 6, 9, 12, 15 (5 수준) 내정값(default value): 12	- 전장 기능 요소 (파라미터의 변경) - 단위 : knts - 기만기의 기동 모델의 파라미터에 해당
집계	총 100 케이스 (5 x 4 x 5)	케이스 당 반복 시뮬레이션 횟수: 100회

전장 기능 요소에 대한 제어 요인은 아 수상함의 탐지거리와 자항식 기만기의 속도이고, 전투 논리 요소는 수상함의 기만기 운용 전술이다. 기만기 운용 전술은 운용하는 고정식/자항식 기만기의 수와 발사 방향(전/후방)을 변경하면서 Table 1에 나타난 바와 같이 총 네 가지 패턴으로 시뮬레이션을 수행하였다. 전장 기능 요소의 경우에는 모델의 파라미터 변경만으로 실험이 가능하지만 전투 논리 요소의 경우 기만기 운용 전술을 담당하는 AM을 변경하면서 시뮬레이션을 수행하였다. 세 가지 요소에 대하여 모든 실험 케이스는 총 100개이고, 몬테 카를로 시뮬레이션을 위해 케이스 당 반복 횟수는 100회이다. 따라서 총 시뮬레이션 횟수는 10,000회이다.

6.3 시뮬레이션 결과

Fig. 9는 기본적으로 수상함의 어뢰경보거리에 대하여 기만기 운용 전술의 사용패턴과 자항식 기만기의 속도를 변경하면서 시뮬레이션한 결과이다. Fig. 9(a)와 9(b)에서 알 수 있듯이 기본적으로 수상함의 어뢰경보거리가 길어질수록 수상함의 회피율은 증가함을 알 수 있다. 전투 논리 요소 측면에서는 네 가지 기만

Fig. 9. Simulation results : battle function and combat logic perspectives

기 운용 전술 중에서는 사용패턴 3이 가장 좋은 회피율을 보였는데, 예를 들어 어뢰경보거리가 3,000m에서 기만기 사용패턴 3을 사용한 경우에 수상함의 회피율은 91%이다. 전장 기능 요소 측면에서는 자항식 기만기의 속도가 9knts 이상일 경우에 대하여 비슷한 수준의 회피율을 얻을 수 있었다. 시뮬레이션 결과에 대한 자세한 분석은 다음 절에서 살펴본다.

6.4 결과 고찰

Fig. 9(a)와 Fig. 9(b)를 통해 공통적으로 분석할 수 있는 결과는 다음과 같다. 수상함의 어뢰경보거리가 3,000m 이하인 경우에는 기만기 운용 전술과 자항식 기만기의 속도가 교전 효과도 지수에 크게 작용하지 못하였다. 이를 일반화하면, 일정 이상의 전장 기능적 성능 요소(수상함의 어뢰경보거리)를 달성하지 못하면 어떠한 전투 논리(Fig. 9(a)의 기만기 운용 전술)나 전장 기능 요소(Fig. 9 (b)의 자항식 기만기 속도)도 교전 효과도에 큰 영향을 미칠 수 없음을 뜻하고, 이러한 일정 성능 지수를 해당 전장 기능 요소의 성능 요구 사항(ROC : Requirement of Capability)을 결정하는 근거로 활용 가능하다.

두 시뮬레이션 실험에 대한 개별적 분석 결과 중에서 Fig. 9(a)를 먼저 살펴보면, Fig. 9(a)를 통해 동일한 무기 체계를 사용한다 하더라도 운용 전술에 따라 교

전 효과도는 달라진다는 것을 알 수 있다. 기본적으로 사용패턴 1과 2를 비교하면 이동이 가능한 자항식 기만기를 사용한 운용 전술이 위치가 고정된 부유식(고정식) 기만기를 사용한 전술보다 더 높은 회피율을 보인다. 좀 더 중요한 분석 결과는 사용패턴 3과 4를 비교함으로써 얻을 수 있는데, 동일한 자원의 무기 체계에 대하여 효과적인 운용 전술(고정식/자항식 기만기의 혼용)은 사용패턴 3을 사용한 경우이다. 즉, 전방에 배치하는 기만기는 자항식보다 고정식 기만기를 사용하는 것이 더 나은 운용 전술로 볼 수 있다. 이런 결과가 나온 이유는 접근하는 어뢰의 방향으로 자항식 기만기를 발사하는 것이 어뢰로 하여금 수상함을 공격할 확률을 더 높이는 원인을 제공하기 때문이다. 왜냐하면 어뢰는 다가오는 자항식 기만기를 보다 빨리 탐지하여 고속 주행을 통해 기만기를 공격하게 되고, 1차 공격 후 주변을 재탐색 하는 과정에서 근처에 회피 기동을 수행하는 수상함을 탐지할 확률이 높기 때문이다. 따라서 동일한 제원의 무기 체계를 사용한다 하더라도 운용 전술(전투 논리 요소)에 따라 교전 효과도에 큰 차이를 보이고, 이는 기만기 운용 전술 방향에 대하여 해결책을 제시할 수 있다.

다음으로 Fig. 9(b)는 교전 효과도 지수가 주어졌을 때 전장 기능 요소에 대하여 성능 효과도 지수(성능 요구 사항, ROC)을 도출할 수 있음을 보여준다. 예를

들어, 수상함의 어뢰정보거리가 3,000m이고 교전 효과도 지수(수상함의 회피율)가 80% 이상으로 유지되어야 하는 상황에서는 기만기의 ROC는 9knts 이상이 되어야 한다. 여기서 중요한 점은 시뮬레이션 실험을 통하여 ROC의 하한 값(Lower Bound) 뿐 아니라 상한 값(Upper Bound)에 대한 해결책도 제시할 수 있다는 것이다. Fig. 9(b)를 살펴보면 자항식 기만기의 속도가 12knts 이상인 경우에는 교전 효과도 측면에서 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 따라서 이러한 실험 결과는 무조건적인 성능 개선은 교전 효과도 측면에서 고려해야 할 대상이 아님을 의미한다.

7. 결 론

본 연구는 차기 전투기/잠수함, 자항식(Mobile) 기만기, 선유도(Wire-guided) 어뢰와 같은 새로운 개념의 차기(Next-generation) 전투 플랫폼/무기 체계를 M&S 대상으로 하여 성능/교전 효과도를 분석하는 것을 목적으로 한다. 차기 전투 플랫폼/무기 체계의 M&S 적용을 위해서는 전장에서 활용되는 체계의 공학적 성능 측면인 전장 기능과 이를 운용하는 전술/교리와 같은 전투 논리를 융합한 상호 분석이 필수적이다. 이를 위해 본 연구의 1부는 2차원 모델 분할 기법을 제안하였다.

2부에서는 2차원 모델 분할 기법으로 설계된 전투 개체의 구조적 모델에 대하여 과업, 행동과 같은 모델 행위의 의미론을 수학적으로 표현하기 위해 CE-DEVS 형식론을 제안하였다. 기존의 DEVS 형식론의 원자 모델을 확장한 CE-DEVS는 TM을 명세하기 위한 형식론이다. CE-DEVS는 과업/행동의 표현과 이들 간의 상호 작용에 대한 의미론적으로 명확하게 표현하고자 두 개의 집합과 한 개의 함수를 추가적으로 정의한다. 이러한 의미론의 명확한 표현은 모델의 동작을 이해하고 해석하는 데 보다 용이하고, 모델링을 수행할 때 실세계 영역과 모델링 영역 간의 의미적 차이 없이 실세계를 효과적으로 반영할 수 있게 한다. TM들 간, 혹은 전투 개체 모델들 간의 상호 작용을 위해서는 기존의 DEVS 형식론의 결합 모델을 이용하여 기술하였는데, 이러한 방법을 복합 체계(System of Systems)의 M&S에서는 모델 결합(Integration)이라 한다. 마지막으로 모델 구현을 위해 CE-DEVS 형식론으로 기술된 TM은 DEVSim++로 구현하였고, 알고리즘이나 방정식으로 기술된 AM은 C++ 언어로 구현하였다.

제안하는 모델링 방법론을 이용하면 교전 시나리오의 집진/반복적인 개발 과정 중에서도 모델의 수정을 최소화할 수 있으며, 상호 분석적인 성능/교전 효과도를 평가하기 위해 미래 전투 개체들의 성능 요구 사항을 도출함과 아울러 교전 효과도를 높이기 위한 전술 개발에 활용될 수 있다.

향후 연구로는 크게 두 가지 방안을 고려하였다. 먼저, 모델 의미론 측면에서 DEVS 형식론의 결합 모델을 전투 개체에 보다 적합하도록 확장하는 방안을 생각해 보고, 다음으로 개별적으로 개발된 전투 개체 모델들에 대하여 자동 합성을 제공하는 시뮬레이션 환경 개발을 목표로 한다.

국방개혁 2020 및 전시작전권 환수에 대비하여 정예 과학기술군 실현을 위하여, 새로운 무기 개체를 기획하고, 획득하고, 운용하는 일련의 과정에서 국방 M&S가 폭넓게 사용되고 있으며 그 수요가 더욱 증가하고 있다. 장기적으로 볼 때 본 연구에서 제안하는 모델링 방법론을 활용하면 7대 전투발전요소 중 전술/교리와 무기/장비 요소 개발에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

References

- [1] 김탁곤, 국방 M&S 이론 및 기술 - 모델 개발편, 2012년 산학협동 공개강좌 교재, 시스템 모델링 시뮬레이션 연구실, KAIST, 2012.
- [2] 김탁곤, “모델링 시뮬레이션 공학,” 정보과학회지, 제25권, 제11호, pp. 5-15, 2007.
- [3] Bernard P. Zeigler, Herbert Praehofer, and Tag Gon Kim, Theory of Modeling and Simulation (2ND Edition), Academic Press, 2000.
- [4] 서경민, 유민욱, 권세중, 김탁곤, “동특성 알고리즘 Plug-In이 가능한 DEVS 기반 수중 운동체의 시뮬레이션 환경 구축,” 한국군사과학기술학회 '09종합 학술대회, pp. 189-192, 2009. 8.
- [5] 김호정, 이재현, 조길석, “DEVS 형식론을 적용한 HLA기반의 분산 실시간 시뮬레이션 시스템 개발,” 한국군사과학기술학회지, Vol. 9, No. 3, pp. 25-32, 2006.
- [6] Mamadou Seck, Norbert Giambiasi, Claudia Frydman and Lassaad Baati, “DEVS for Human Behavior Modeling in CGFs,” The Journal of Defense

- Modeling and Simulation : Applications, Methodology, Technology, Vol. 4, No. 3 pp. 196-228 2007.
- [7] Changho Sung and Tag Gon Kim, "Collaborative Modeling Process for Development of Domain-Specific Discrete Event Simulation Systems," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part C : Applications and Reviews, Vol. 42, No. 4, pp. 532-546, Jul., 2012.
- [8] Tag Gon Kim, Chang Ho Sung, Su-Youn Hong, Jeong Hee Hong, Chang Beom Choi, Jeong Hoon Kim, Kyung-Min Seo and Jang Won Bae, "DEVSim++ Toolset for Defense Modeling and Simulation and Interoperation", The Journal of Defense Modeling and Simulation : Applications, Methodology, Technology, Vol. 8, No. 3, pp. 129-132, July, 2011.
- [9] 해군전쟁연습모델 사업개발단, 청해모델 모의 논리서, 2004.
- [10] Raymond R. Hill, J. O. Miller, Gregory A. McIntyre, "Applications of Discrete Event Simulation Modeling to Military Problems", Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference, pp. 780-788, 2001.
- [11] 김탁곤, "이산 사건 시스템 모델링 시뮬레이션 기법," 한국전자공학회지, 제19권, 제1호, pp. 105-114, 1992.
- [12] 김탁곤, 국방 M&S 이론 및 기술 - 총론편, 2012년 산학협동 공개강좌 교재, 시스템 모델링 시뮬레이션 연구실, KAIST, 2012.
- [13] 김탁곤, 나영인, "대어뢰전 복합 운용 전술 효과도 분석," 위탁연구보고서, 국방과학연구소, ADDR-417-090376, 2008. 12.
- [14] Kyung-Min Seo, Changbeom Choi, Tag Gon Kim, Jung Hoon Kim, "DEVs-based Combat Modeling for Engagement-level Defense Simulation," Simulation, 2014. [Accepted to be published]
- [15] 김탁곤, 나영인, "대어뢰전 복합 운용 전술 효과도 분석," 위탁연구보고서, 국방과학연구소, ADDR-417-090376, 2008. 12.
- [16] Kyung-Min Seo, Hae Sang Song, Se Jung Kwon and Tag Gon Kim, "Measurement of Effectiveness for an Anti-torpedo Combat System Using a Discrete Event Systems Specification-based Underwater Warfare Simulator," The Journal of Defense Modeling and Simulation : Applications, Methodology, Technology, Vol. 8, No. 3, pp. 157-171, July, 2011.