

함포교전 시뮬레이션 시스템

Gun-oriented Engagement Simulation System

이동훈* **김철호*** **김태수***
Dong-Hoon, Lee Cheol-Ho, Kim Tae-Su, Kim

ABSTRACT

A gun is still one of the major weapons of a combat ship. To assess the ship's fire control capability which is influenced by tracking system, fire control algorithm, gun, the ship itself, target behavior, environment and engagement situation, simulation system for gun-oriented engagement for surface ship is needed. This paper proposes the process for designing and implementing a gun-oriented engagement simulation system using DEVS(Discrete Event Simulation Specification), which is a formalism based on the set theory. It consists of the following activities : 1) analyzing the characteristics of a gun-oriented engagement, 2) constructing the deterministic model of the combat ship of study with DEVS, 3) modeling properties of each entity showing as stochastic errors. With this process, the gun-oriented engagement simulation system is developed and applied for the combat system under development.

주요기술용어(주제어) : DEVS(Discrete Event Simulation Specification), SBD(Simulation Based Design), M&S(Modeling and Simulation), FCS(Fire Control System), Error Model, Gun-oriented Engagement Simulation

1. 서론

무기체계의 발전과 더불어 다양한 무장이 함정 및 전차 등 탑재체에 운용되고 있으나, 포는 여전히 탑재체의 기본 전투 임무수행과 생존성확보 측면에서 주요 역할을 담당하고 있다. 포를 이용한 교전의 효과도는 표적 명중확률^[1]의 함수로 표현되며, 표적 명중확률을 높이기 위해서는 탑재체의 무장 및 센서, 사격통제체계를 분석하고 종합적으로 판단할 수 있는

자동화된 알고리즘을 연구하는 과정이 필요하다^[2,3].

포를 이용한 교전 문제는 탑재체의 플랫폼용(Platform), 포 및 포탄, 탐지/추적 센서, 사격통제장비, 탑재체의 기동 및 자세를 추정하는 센서(자이로, 풍향풍속계 등)의 특성뿐만 아니라, 각종 환경적 요소 및 전술적 요소가 결합된 복잡한 상황을 분석하고 해석해야 한다. 특히, 전술적 영역의 문제는 고전적인 운용분석(Operations Research) 등 해석적인 방법^[4~6]을 적용해 왔고, 나아가 상세한 기술적 문제를 해결하기 위해서는 공학적 수준(Engineering Level)의 시뮬레이션 기법을 적용^[7]하여 문제를 해결해 왔다.

함포를 이용한 사격통제 문제의 경우의 교전 문제는 탑재체가 함정이고 구조적으로 매우 복잡하고 동

† 2006년 10월 16일 접수~2007년 1월 26일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

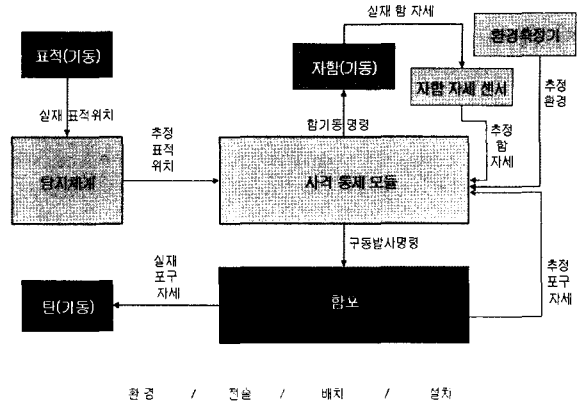
주저자 이메일 : dhlee@add.re.kr

적인 특성(Dynamic Characteristics)과 확률적 특성(Stochastic Characteristics)이 포함되어 있을 뿐만 아니라 한정된 공간 내에 여러 가지 체계가 결합되어 있다. 이러한 복합적 요소가 결합된 체계의 경우, 단순히 성능의 선형적 결합이나 수치적인 해석으로 사격문제를 해결하기는 어렵다. 이를 해결하는 방법은 사격통제 시스템을 중심으로 연관된 무기체계를 모델링하여 시뮬레이션 기반으로 사전에 반복적으로 분석하는 것이 보다 효율적이다^[8]. 국과연에서는 Spafire^[9]를 도입하여 함포 명중률의 계산에 이용하였으나 Spafire는 특정한 함정과 사격통제장치, 센서 및 함포로 국한되는 제한점이 있었으며, 또한 함포를 이용한 교전이라는 확장된 범주의 요구사항분석 및 테스트 베드(Test Bed)용으로 사용하기에 제한점이 많았다.

본 논문에서는 복잡한 시스템에 대한 집합론적인 완벽성을 갖는 DEVS 형식론^[10]을 적용하여 함포 교전 시뮬레이션을 설계하고 구축하는 과정을 제시하고자 한다. 또한 이 과정 속에서 함포 교전을 구성하는 다양한 요소들의 행태(Behavior)들을 확률론적으로 모사함으로써 실세계에서의 교전상황과 확률적으로 동등한(Stochastically Equivalent) 시뮬레이션 환경 및 시스템을 구축할 수 있도록 함으로써 사격통제체계 설계시 명중률 향상과 관련된 주요 요소 도출 및 설계 검증을 위한 테스트 베드(Test Bed)로 활용될 수 있도록 하였다.

2. 함포 중심 교전

그림 1은 함정의 함포 교전을 위한 시뮬레이션(Gun-oriented Engagement Simulation System, 이하 GuESS)의 구성도이다. 이 그림은 또한 일반적인 함정의 사격통제 시스템 및 각 하부 시스템과 이들의 연동관계를 잘 보여주고 있다. 교전 과정을 간단히 설명하자면, 먼저 탐지체계에서 적 세력을 탐지하면 현재 위치를 추정하게 되는데 이 때 다른 센서들(자세 센서, 환경 센서)을 이용하여 값을 보정한다. 지속적으로 탐지 센서가 생성하는 적 세력의 위치 값을 가지고 사격통제모듈은 미래 위치예측과 탄도 계산을 하여 무장에게 사격 명령을 준다. 그러면 무장은 각



[그림 1] GuESS 구성도

종 센서를 이용해서 자신의 자세를 교정함과 동시에 사격 명령에 따른 위치로 자세를 변경하고 정확한 시점에 사격을 한다.

3. 함포 교전 시뮬레이션

가. DEVS를 이용한 설계 방법론

1) DEVS 형식론

DEVS(Discrete Event Simulation Specification) 형식론은 집합 이론에 기반하여 이산사건 시스템을 개발하기 위한 시뮬레이션 이론으로, 3개의 집합(입력집합(Input Set), 출력집합(Output Set), 상태집합(State Set))과 4개의 함수(External Transition Function, Internal Transition Function, Output Function, Time Advanced Function)를 이용해 시스템을 분석하고 설계하기 위한 틀을 제공한다. 이를 통해 개발자는 시뮬레이터의 구현을 위한 모델의 완전성을 확보 할 수 있게 되고, 모델의 확장성 및 유지보수성을 높일 수 있게 된다^[10].

DEVS는 시스템을 표현하기 위해 원자 모델(Atomic Model, 이하 AM)과 결합 모델(Coupled Model, 이하 CM)의 두 가지 형태의 모델을 제시한다. AM은 시스템에서 사용되는 각 컴포넌트들의 기능을 표현해 주고, CM은 시스템 전체를 계층적/구조적으로 표현할 수 있는 기능을 제공한다. DEVS 모델의 전체적인 흐름은 외부로부터 입력을 받으면 현재의 상태와

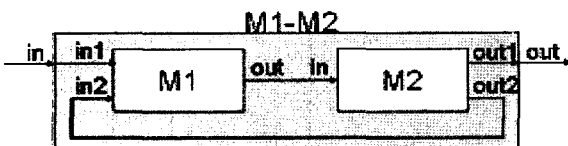
조건에 따라 출력을 내보내고 현재의 상태를 바꾸어 시스템을 변화시킨다. 그리고 현재 상태에서 머물 수 있는 시간을 지정하여 지정된 시간이 경과하게 되면 모델 스스로 현재의 상태를 변화시키게 된다. 세부적인 AM의 내용은 다음을 따른다.

Formalism 1. $AM = \langle X, Y, S, \delta_{ext}, \delta_{int}, ta \rangle$ 여기서 X 는 입력값의 집합이고, Y 는 출력값의 집합이며, S 는 상태들의 집합이다. $\delta_{ext} : Q \times X \rightarrow S$ 는 외부 상태 천이 함수(External Transition Function)이고, Q 는 전체 상태의 집합인데 다음과 같이 정의된다. $Q = \{(s, e) | s \in S, 0 \leq e \leq ta(s)\}$ 여기서 e 는 마지막 상태 천이 후 흐른 시간을 말한다. $\delta_{int} : S \rightarrow S$ 는 내부 상태 천이 함수(Internal Transition Function)이다. $\lambda : S \rightarrow Y$ 는 출력함수(Output Function)이다. $ta : S \rightarrow R+0, \infty$ 은 0과 ∞ 사이의 양의 실수(實數)이다.

AM의 특징은 다음과 같다^[11].

- AM은 특정 시간에 하나의 상태에만 머물 수 있다.
- 외부 입력 없이 하나의 상태에 머물 수 있는 시간은 시간전이함수 $ta(s)$ 에 의해 결정된다.
- AM의 상태($0 \leq e \leq ta(s)$)는 외부 입력에 의한 실행함수인 δ_{ext} 에 의해 변화된다.
- 하나의 상태에서 머물 수 있는 시간이 지나면 출력함수(λ)를 생성하고 δ_{int} 에 의해 현재의 상태가 변화된다.

그림 2는 DEVS형식론의 CM을 보여준다. M1과 M2는 DEVS 형식론의 AM이다. M1은 "in1"과 "in2"의 두 개의 입력을 가지고 "out"이라는 하나의 출력을 가진다. M2는 "in1"의 하나의 입력을 가지고 "out1"과 "out2"의 두 개의 출력을 가진다. M1의



[그림 2] DEVS 결합 모델

출력("out")은 M2의 입력("in")과 연결되어 있으며 이를 Internal Coupling(IC)이라 한다. 또, M1의 입력("in1")은 CM인 M1-M2의 외부에서 들어오는 입력("in")과 연결되어 있는데 이것을 External Input Coupling(EIC)라 한다. 마지막으로 M2의 출력("out1")은 M1-M2의 전체의 출력("out")과 연결되어 있는데 이를 External Output Coupling(EOC)라 한다.

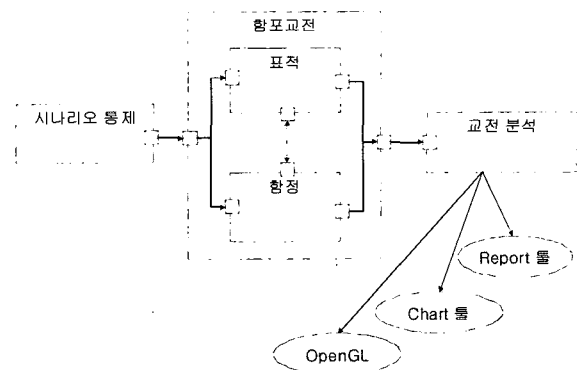
2) DEVSim++^[11]

DEVSim++은 C++에 기반한 시뮬레이션 엔진으로 Microsoft Visual Studio .NET으로 개발할 수 있는 시뮬레이션 라이브러리를 제공한다. DEVSim++을 이용하면, 시뮬레이션 엔진 자체에서 시뮬레이터 전체의 시간 관리를 자동으로 해주므로, 개발자는 시뮬레이션 전체의 시간 관리를 위한 코딩을 일일이 해줄 필요가 없으며, 제공된 라이브러리를 이용해 쉽게 시뮬레이터를 개발할 수 있는 장점을 가지게 된다.

나. GuESS 모델링

1) GuESS 구조

GuESS의 최상위구조는 그림과 같다. 모든 DEVS 객체는 포트를 통한 메시지를 기반으로 연동된다. 시나리오 통제 객체는 UI를 통하여 입력된 시나리오를 함포교전이라는 최상위 객체에 전달하고 이 메시지는 해당되는 하부 객체에 상응하는 시나리오를 전달하며, 시간이 경과하면서 표적과 자함간의 상호작용에 의해서 시뮬레이션이 진행된다. 시뮬레이션 간의 분석을 위한 자료는 교전분석 객체에 메시지로 보내지

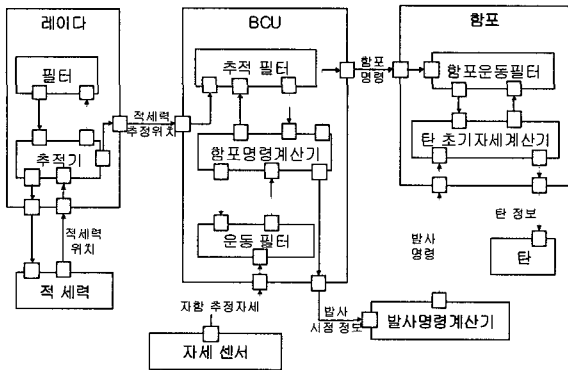


[그림 3] GuESS 최상위 구조

고 실시간적으로 또는 사후에 분석할 수 있도록 상용 툴(OpenGL, Chart 분석 도구, 보고서 생성 툴)을 이용하여 연동하였다.

2) GuESS 모델의 상세 구조

그림 1의 함포교전을 DEVS 구조로 다시 표현하면 그림 4와 같다. 함포교전 모델은 표적과 자함으로 이루어지며, 표적은 원자모델로 바로 구현되며, 자함은 크게 자함, 레이더, BCU, 함포, 탄으로 구성된다. 레이더는 일정한 간격으로 표적을 추적하여 BCU에 제공하면 BCU는 함포통제 알고리즘의 계산을 통하여 함포를 통제하며, FiringOrderCalculator의 명령이 주어지면 탄이 발사되며, 탄은 탄도 알고리즘에 따라서 비행하여 표적을 맞추게 된다.

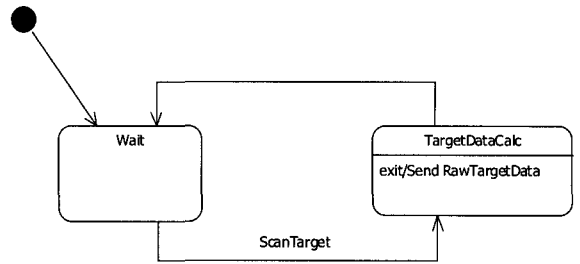


[그림 4] GuESS 모델 상세 구조도

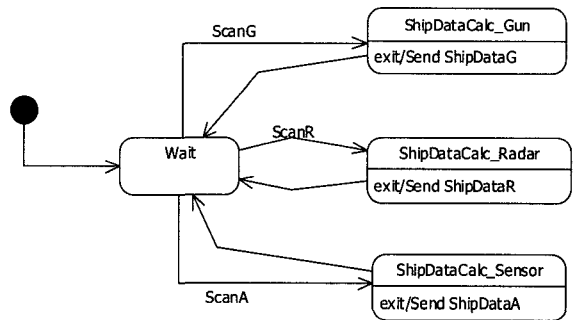
3) 행태(behavior) 모델링

원자 모델의 행태는 UML 표기법으로 상태천이 다이어그램의 형태로 모델을 표현하는 것이 가능하며 그 결과는 그림 5에서 9와 같다.

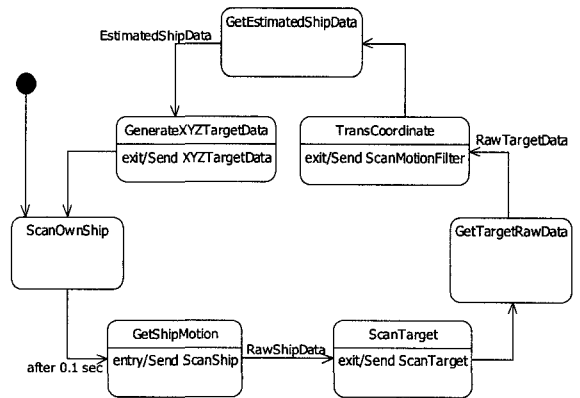
행태 모델링의 주안점은 원자 모델의 행태를 정확하고 효율적으로 묘사하는 것이다. 정확성은 모델의 시간적인 행태를 오류없이 묘사하는 것을 의미하며 DEVS에서의 상태천이 다이어그램은 이것을 가능하게 한다. 효율성은 사건중심으로 모델링함으로써 가능하며 예를 들어 표적은 독립적으로 기동하도록 모델링하는 것이 상식적이나 레이더가 원하는 시점에만 표적의 실제 위치만을 생성하도록 함으로써 훨씬 효율적이다.



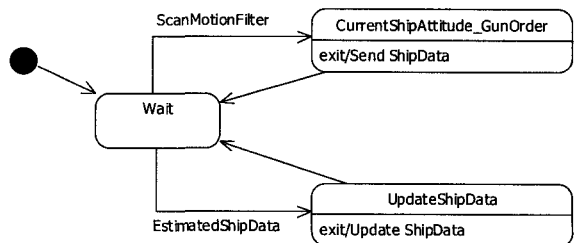
[그림 5] 표적의 행태 모델링



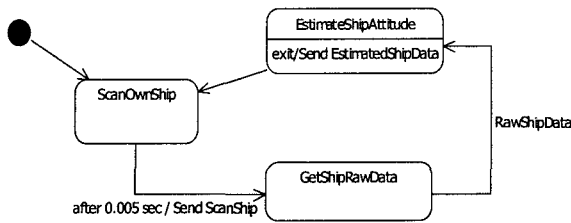
[그림 6] 자함의 행태 모델링



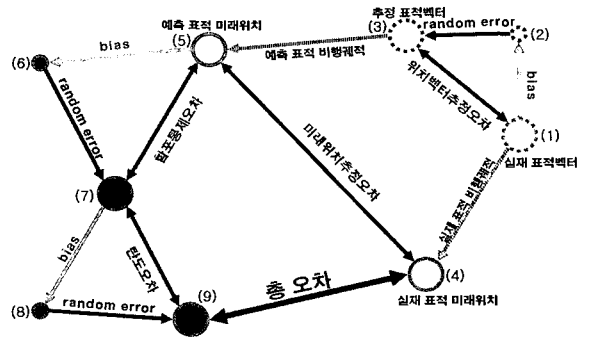
[그림 7] 추적 센서의 행태 모델링



[그림 8] 자세 필터의 행태 모델링



[그림 9] 자세 센서의 행태 모델링



[그림 10] 오차 모델

4. 적용 오차 모델

중요 구성 요소인 각종 센서(자세 센서, 환경 센서, 탐지체계), 무장, 사격통제 시스템에 모두 오차 발생 가능성이 있다. 또, 하나의 장비가 생성한 오차는 연관된 다른 장비들의 오차를 유발하므로 오차 생성 관계가 유기적으로 연결되어 있다. 이에 우리는 먼저 각 장비에서 발생할 수 있는 구체적인 단위 오차들을 도출하고 또 상위 개념으로 명중률에 영향을 주는 성능/효과도 관점의 오차를 찾아내어 이들 사이의 관계를 분석하였다.

가. 총 오차의 분할

시스템 성능/효과도 관점에서 발생하는 오차들도 서로 관계가 있으며 이것이 전체 오차 모델의 뼈대가 된다. 이 관계를 분석하여 최종적으로 도출한 오차 모델이 그림 10에 나타나 있으며, 함포를 이용해서 표적을 명중시키기 위해서 추적 센서와 미래위치 예측 탄도 등의 오차가 중요하며 총 오차를 탄과 표적과의 최근접 거리 개념으로 했을 때 이 오차가 어떻게 분할되는지를 나타내고 있다.

그림 10은 현재 (1)의 위치에 있고 특정 시간 후 (4)의 위치로 이동하는 적 세력을 함포 사격하는 경우에 발생하는 오차들의 관계를 보여준다.

먼저 각종 단위 오차들에 의해 현재 위치가 (1)이 아닌 (3)으로 추정되어 위치벡터 추정오차가 생긴다. 이 추정 오차는 그대로 미래위치 추정 오차에 영향을 주는데 이 뿐 아니라 비행궤적 모델의 선택에도 영향을 줘서 더욱 오차가 크게 만드는 역할을 한다. 이에 따라 미래 추정 위치 (5)가 조준점이 되고 사격통제 시스템은 포 명령을 내리게 된다. (7)은 함포를 실제

통제오차가 포함된 조준점, (9)는 탄도 오차가 반영된 탄착점이다. 함포통제 오차에 의해 (5)가 조준점이 되지 않고 (7)에 조준을 하게 된다. 또 탄도오차에 의해서 실제 탄착점은 최종적으로 (9)가 된다. 이렇게 해서 총 오차는 (4)와 (9)의 차이가 되고, 그 원인은 앞에서 설명한 것과 같다. 결정론적 관점에서 오차를 부여하지 않고 계산 오차가 없다면, (1)과 (3)은 같은 지점이 되고, (4), (5), (6), (7), (8), (9)가 같은 지점이 되어 포탄은 적 세력에게 무조건 명중하게 된다.

나. 성능 오차

또 교전 과정에서 적 세력에게 함포를 발사하는 과정을 각 단계별로 살펴보면서 함포의 명중률에 영향을 주는 성능/효과도 관점에서의 오차들은 다음과 같다.

- ① 위치벡터 추정 오차
 - 적 세력의 현재 위치/속도 추정 값에 대한 오차
 - 센서의 설치 오차와 성능 오차에 기인
- ② 미래위치 추정 오차
 - 특정 시간 후에 적 세력의 위치 추정 값에 대한 오차
 - 표적 기동 모델 적용 오류에 기인
 - 위치벡터 추정 오차에 의존적임
- ③ 함포통제오차
 - 함포 발사 위치/자세에 대한 오차
 - 함포의 통제 성능과 설치 오차에 기인
- ④ 탄도오차
 - 계산한 탄도와 실제 탄도의 차이
 - 탄 특성 및 환경 등에 기인

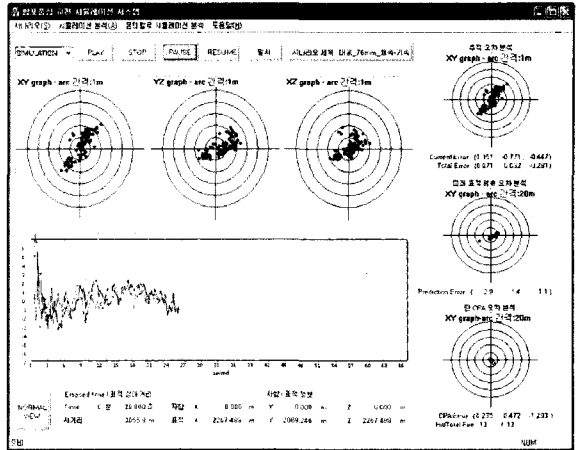
다. 오차의 근원

성능 오차를 결정짓는 근원이 되는 요소는 다음과 같다. 근원 요소들의 오차의 분포는 각각 서로 독립이고 정규분포를 따른다고 가정한다. 함포교전 시뮬레이션 시스템은 각 오차의 근원에 대한 분포의 형태 및 파라메타의 특성을 수치로 입력하여 전체 시스템의 성능에 미치는 영향을 분석할 수 있다.

- ① 탐지체계 성능(거리, 방위, 고각) 오차
- ② 자함 센서의 위치/자세/속도 측정 오차
- ③ 환경센서(풍향/풍속/기온/기압 등) 오차
- ④ 함포 구동오차
- ⑤ 탄 특성(중량/포구속도 등) 오차
- ⑥ 표적기동모델의 BCU 적용 오류(등속/등가속/선회/popup 등)
- ⑦ 장비 설치 오차

5. GuESS 구축결과 및 활용

본 논문에서 제안하는 오차 모델은 실제 개발중인 차기 함정의 함포 중심 교전 효과도 분석 시뮬레이터에 적용되었다. 그림 11은 시뮬레이터의 주 화면이다. 주 화면 오른쪽에 있는 세 개의 차트가 각각 현재 위치, 미래 위치, 탄도 오차에 대한 실시간 추이를 보여준다.



[그림 12] 현재 위치 추정 오차 분석 화면

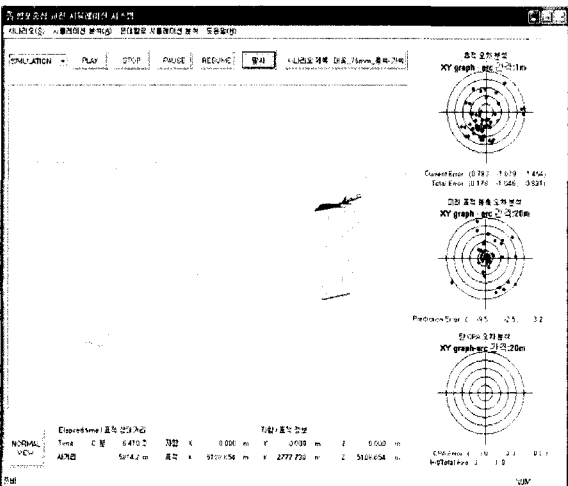
그림 12는 오차를 시간 추이에 따라 보여주는 화면이다. 이를 통해 현재 위치 추정 값이 각 축에 대해 어떻게 변하는지, 또 시간 추이와 적 세력의 기동 변경에 따른 오차 값 변화를 볼 수 있다.

GuESS는 오차 모델에서 정의한 다양한 오차의 근원의 영향이 각종 성능 오차에 어떻게 영향을 미치고, 최종적으로 명중확률로 정의되는 효과도에 어떻게 영향을 미치는지를 GUI 기반으로 분석이 가능하도록 구성하였다. 이러한 오차의 영향에 대한 분석 능력은 결과적으로 시뮬레이션 기반의 체계 설계가 가능할 수 있게 한다.

6. 모델 검증

개발 모델에 대한 신뢰성은 앞으로 이루어질 다양한 실험을 이용한 추론의 강력한 근거가 되기 때문에 중요하다. GuESS의 신뢰성은 다음과 같은 4단계 검증 절차에 따라서 수행하였다.

- 개념 모델 검증
 - 운용개념 위탁연구 수행으로 함포 교전에 대한 이론적 검토를 통한 개념 검증^[12]
- 설계 검증
 - 설계자료 검토를 통해 개념 모델과 설계가 일치함을 판단^[13,14]



[그림 11] 주 화면

- 구현 검증
 - DEVSim++ 적용으로 시뮬레이션 시간/논리 검증 용이
 - 코드 구현 내용 비교 검토
 - 소프트웨어 시험 실시로 주요 변수들의 전달상황 검증
- 운용 입증
 - 함대함 포술지침서의 자료와 비교^[15]
 - 한양대 시뮬레이션과 비교^[16]

여기서는 적용한 여러 검증방법 중 운용 입증방법으로 사용한 포술 지침서의 통계 자료와의 비교를 통한 검증 결과를 설명하였다. 검증 과정은 함대함 포술 지침서에 있는 특정 사거리별 환경 변화에 따른 거리 오차의 통계를 같은 조건에서 시뮬레이터를 통해 얻은 거리 오차의 통계와 비교하였다. 표 1에서는 이 값들의 상대 비율만을 제시하였다.

표 1에 나타난 상대 비율을 분석하면 실제 통계와 시뮬레이션 결과값의 차이가 평균 5.7%이고, 사거리 A에서 풍속 변화에 따른 거리 오차의 차이를 제외하면 3.7%에 불과하다. 이것은 함정 모델이 환경 변화에 따라 실제 함포와 거의 유사하게 영향을 받는다는 것이고 또한 함정 모델이 실제 환경을 잘 반영한다는 것을 뜻한다.

[표 1] 함대함 포술 지침서와 시뮬레이션 결과값 비교(A < B < C)

변화량 (사거리)	MV (1m/sec)	대기압 (1%)	대기온도 (1도)	풍속 (1노트)
A yds	-5%	7%	7%	-27%
B yds	-7%	6%	0%	0%
C yds	-1%	3%	-1%	4%

7. 결론

지금까지 (1)함포교전의 특성분석 (2)이를 집합론에 근거한 형식론인 DEVS를 적용하여 함포교전 시뮬레이션의 뼈대 구성 (3)상태전이 다이어그램을 이

용하여 최소 구성 요소를 모델링 (4)체계 설계를 위한 확률론적 오차 형태로 나타나는 각종 인자의 특성을 원인의 영향을 모델링함으로써 궁극적으로는 체계 효과도를 구할 수 있는 기반을 마련하였고 다단계의 검증 절차를 적용하여 시뮬레이션의 신뢰성을 확보하는 일련의 과정을 보였다.

GuESS를 구축함으로써 현재 수행 중인 전투체계를 위한 함포교전에 대한 분석과 관련된 설계 요인의 영향에 대한 분석이 가능하게 되었으며 시뮬레이션 기반으로 함포교전 분야에 대한 독자적인 분석능력을 확보하게 되었다.

GuESS는 현재 단일 표적에 대한 분석이 가능한 시스템이며 향후 이를 기반으로 다중 표적에 대한 분석이 가능한 버전과 더 나아가 유도탄 등 다른 무장과의 교호 작용의 분석이 가능한 복합교전 시스템으로 발전이 가능할 것으로 판단되며 이를 위한 DEVS 모델링과 분산 시뮬레이션 환경 등 다각도의 연구가 수행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] A. Monroe, "Naval Operations Analysis", Naval Institute Press, pp.280~297, 1997.
- [2] 김영주, "폐회로 오차 수정 기법을 통한 포 명중률 증대 방안 연구", NWS-319-931010, 국방과학연구소, 1992.
- [3] 김정기, 김재익, 이동호, "TSP탄을 위한 사격통제 알고리즘 연구", NWS-519-971260, 국방과학연구소, 1997.
- [4] 오철조, "전차용 사격통제 장치와 초탄 명중 정도", AMS-319-86309, 국방과학연구소, 1986.
- [5] 윤주홍, 김창재, 오세준, "K1 UP-GUN 전차의 명중률 분석을 위한 오차요소 해석방법 연구", GWS-519-93604, 국방과학연구소, 1993.
- [6] 김병운, 신용재, 김의환, "오차요소 해석법을 이용한 전차 명중률 평가에 관한 연구", GWS-519-950808, 국방과학연구소, 1996.
- [7] 최종호, 이기표, 박중규, 남석우, 김호찬, "사격통제체계 시뮬레이션 Package 연구", CERD-419-

- 89180, 국방과학연구소, 1989.
- [8] 김재련, 컴퓨터 시뮬레이션, 박영사, 1993.
- [9] 김경기, 이봉기, 이양원, 김영주, “Spafire를 이용한 함정용 사격통제장치(WSA-423) 성능평가 및 예측기법 연구”, SENP-519-88061, 국방과학연구소, 1988.
- [10] B. Zeigler, H. Pracehofer, and Tag-Gon, Kim, “Theory of Modeling and Simulation, Second Edition”, Academic Press, New York, 2000.
- [11] Tag-Gon, Kim, “DEVSimHLA v2.2.0 Developer’s Manual”, http://smslab.kaist.ac.kr/DES/devsim_download.htm, Korea Advanced Institute of Science and Technology(KAIST), 2004.
- [12] 홍우영, “차기고속정(PKX) 전투체계(CFCS)의 운용개념에 관한 연구”, 국방과학연구소, 2006.
- [13] 이동훈, “함포중심 시뮬레이션 시스템 개발”, NSDC-413-060275, 국방과학연구소, 2006.
- [14] 이동훈, “함포 중심 교전의 DEVS 모델링 연구”, NSDC-412-060155, 국방과학연구소, 2006.
- [15] 박윤규, “함대포술지침서”, 1함대사령부, 2000.
- [16] 송택렬, “대공사격통제를 위한 실시간처리 정밀 탄도계산 알고리즘 개발”, 국방과학연구소, 2006.