

공학급/교전급 모델의 연동 시뮬레이션을 통한 화학전 효과도 분석 : 방법론 및 구현 환경 Effectiveness Analysis of Chemical Warfare System through Interoperation between Engineering Level and Engagement Level Models: Methodology and Environment

석 문기* 송 해상** 김 탁곤*
Seok, Moon-Gi Song, Hae-Sang Kim, Tag-Gon

ABSTRACT

It is an important issue to evaluate the effectiveness of chemical warfare through modeling and simulation (M&S) technology. In this paper, we propose the M&S methodology and environment for the chemical warfare for effectiveness analysis. In detail, for modeling perspective, we propose three fundamental component models according to their behaviors, which are a chemical weapon, a detecting device system, and an engaging unit system. Among proposed models, the chemical weapon and the detecting device system models are represented by engineering-level system models, whereas the engaging unit system model are described as an engagement-level system model. For simulation perspective, we apply a hybrid simulation environment using High Level Architecture(HLA) to interoperate with the proposed engineering and engagement-level models. The proposed M&S methodology and environment enables to evaluate the effectiveness of the chemical warfare system considering the doctrines, the performance of device or weapon, and weather factors. To verify the efficiency of the proposed methodology and environment, we experimented three categorized case studies, which are related with those considering factors.

주요기술용어 : Chemical Warfare System(화학전투체계), System Effectiveness Analysis(체계 효과도 분석), Hybrid System Simulation(하이브리드 시스템 시뮬레이션), Simulation Interoperability(연동 시뮬레이션)

1. 머리말

화학 무기는 인체에 유해한 화학 작용제를 이용해 인체에 피해를 가하는 무기로, 넓은 지역에 위치한 부대들을 공격할 수 있는 치명적인 공격 수단이다. 이런 화학무기는 국제사회에서 화학 무기 금지 조약 (Chemical Weapons Convention)을 통해 폐기되는 추세이지만, 북한은 이 조약에 가입하지 않고 무기를 보유 중이다⁽¹⁾. 화학 무기를 보유한 북한의 테러에 대비하여 아군의 화학전투체계의 효과도 분석이 요구된다. 그러나 기존 화학전 관련 연구는 북한 화학전 위협 대응을 위한 정책이나 화학작용제가 인체에 미치는 영향

에 대한 연구가 이루어져 왔고, 화학전장상황을 고려하여 무기/장비 체계, 교리/방어 태세, 환경 정보 등을 고려하여 화학전투체계 효과도 분석은 이루어지지 않았다. 따라서 본 논문은 효과도 분석을 위해 화학 무기, 장비 체계와 교리 체계, 환경 정보를 함께 고려하기 위한 화학 전투체계 모델링 및 시뮬레이션 방법론 및 환경을 다루고자 한다.

화학전투체계는 그림 1과 같이 화학 무기 체계, 이를 감지하여 아군 부대에 경보하는 탐지/경보기 장비 체계와 교리를 따르는 부대들로 구성되어 있다. 화학 전투체계에서 무기/장비 체계는 이들을 운용하는 부대들은 서로 밀접하게 연관 되어 있어 함께 고려하는 것이 중요하고, 특히 화학전의 무기/장비의 성능은 체계 효과도에 큰 영향을 미치기 때문에, 무기/장비 체계를 상세하게 묘사하는 것이 중요하다. 상세한 수준의 무

†

* 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (Electrical Engineering Dept., Korea Advanced Institute of Science and Technology)

** 서원대학교 컴퓨터공학과 (Computer Engineering Dept., Seowon University)

책임저자 : 석문기(mgseok@smslab.kaist.ac.kr)

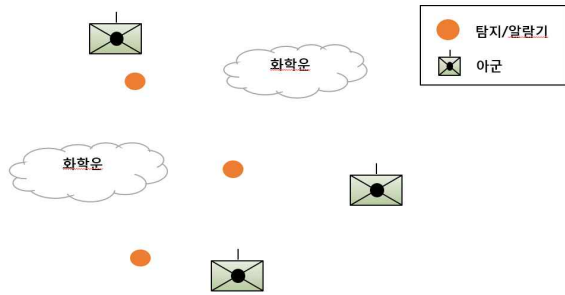


그림 1. Chemical Warfare System

기/장비 체계와 교전에 임하는 부대를 함께 고려하여 전투 체계의 효과도를 분석하는 방법⁽²⁾은 기존의 다양한 사례에서 활용되었다⁽³⁻⁴⁾. 이러한 사례들에서 무기/장비 체계는 미분방정식을 이용하여 연속 시간 기반의 공학급 모델로 표현하고, 부대는 교리를 이용하여 이산 사건 기반의 교전급 모델로 표현하며, 이들 간의 연계를 통해 체계 효과도 분석이 이루어진다. 화학전투체계 역시 화학 무기 체계, 탐지/경보기 같은 장비 체계는 관련 미분방정식을 이용하여 연속 시간 기반의 공학급 모델로 표현한다. 그리고 부대는 교리적인 측면과 피해 평가 측면으로 나누어 교리에 따르는 부대 행동은 이산 사건 기반으로 표현하고, 화학 무기에 의한 부대 피해는 연속 시간 기반으로 표현한다. 이와 같이 부대는 이산 사건 행동 모델과 연속 피해 평가 모델이 결합된 하이브리드 시스템 기반의 교전급 모델로 표현한다. 그리고 풍향, 풍속과 같은 기상 정보는 환경 모델을 통해 관리한다.

이와 같이 화학전투체계는 무기/장비 체계, 부대 피해 평가 모의를 위한 연속 시간 모델들과 교리 체계를 모의하기 위한 이산 사건 모델, 기타 환경 모델로 결합되어 있다. 이 결합된 모델을 본 논문은 HLA(High Level Architecture) 기반의 하이브리드 연동 시뮬레이션 기술이 적용된 시뮬레이션 환경을 통해 모의하고자 한다⁽⁵⁻⁶⁾. 하이브리드 연동 시뮬레이션 기술은 이산 사건 모델과 연속 모델을 분리하여 연동하기 때문에 기존의 이산 사건 혹은 연속 모델 재사용이 가능하다. 또한 다수의 컴퓨터를 시뮬레이션 연산에 활용할 수 있다는 장점이 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 관련 연구와 하이브리드 시스템 연동 시뮬레이션 방법에 대해

설명한다. 3장에서는 화학전투체계를 이루는 모델들의 모델링 방법에 대해 설명하고, 4장에서는 이들을 모의하기 위한 시뮬레이션 환경을 설명한다. 5장에서는 제안한 화학전투체계 모델링 방법 및 시뮬레이션 환경을 이용하여 특정 시나리오에 대해 실험 및 결과를 분석하고, 마지막으로 6장에서 결론을 맺는다.

2. 관련 연구

2.1 공학급/교전급 모델 연계

화학전과 관련된 기존의 연구를 살펴보면, 화학전에 사용하는 무기 혹은 장비에 초점을 맞추었다. 예를 들면 특정 화학 작용제가 인체에 미치는 영향⁽⁷⁾이나 화학 작용제 감지에 관련된 연구⁽⁸⁾ 등이 있다. 이와 같은 연구에서 무기/장비의 성능은 주로 실험자가 설정한 제한된 환경에서 평가가 이루어져 다른 요인들을 고려하지 않았다. 그렇지만 실제 화학전투체계 내에서 무기/장비들은 이들을 운용 하는 교리, 부대 방어 수칙, 환경 정보(기상, 지형) 등 다양한 요인들과 밀접한 연관이 되어있기 때문에, 체계 효과도 분석을 위해서는 무기/장비와 교리, 환경 정보들을 함께 모의하는 것이 중요하다.

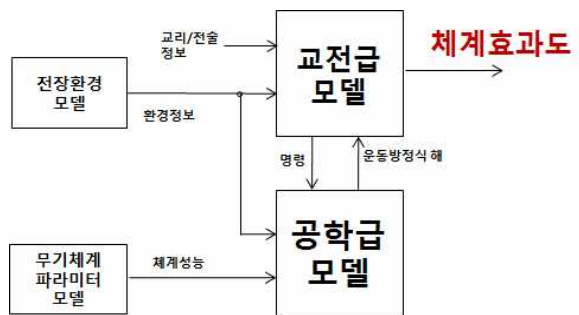


그림 2. Inter-operation between engineering level and engagement level model

이와 같이 체계 효과도 분석을 위해 무기/장비 체계, 부대를 함께 모의하는 방법은 대어뢰전⁽³⁾, 통신 체계 효과도 분석⁽⁴⁾ 등 다양한 사례에 응용되었고, 그 구조를 살펴보면 그림 2와 같다. 무기/장비 체계는 미분

방정식을 바탕으로 연속 시스템 기반의 공학급 모델로 표현하고, 무기체계 파라미터 모델로부터 성능 정보를 환경 모델로부터 환경 정보를 입력받아 모의된다. 부대는 교리/전술을 바탕으로 이산 사건 시스템 기반의 교전급 모델로 모델링하고, 전체 체계 효과도는 체계를 구성하는 공학급 모델과 교전급 모델의 연계를 통해 이루어진다. 공학급/교전급 모델 연계 방법을 화학전투 체계에 적용하여 효과도를 분석한 사례가 없다. 따라서 본 논문은 화학 전투체계의 무기 및 장비들과 부대를 공학급/교전급 모델로 나누고, 추가적으로 환경 정보를 고려하여 모델링하고, 이들을 연동 시뮬레이션하는 환경을 제안하고자 한다. 제안하는 연동 시뮬레이션 환경은 하이브리드 시스템 연동 시뮬레이션 방법론을 근거로 한다.

2.2 하이브리드 시스템 연동 시뮬레이션

하이브리드 시스템이란 연속 시스템과 이산 사건 시스템으로 구성된 시스템을 말한다. 이러한 하이브리드 시스템으로 표현된 모델을 하이브리드 시뮬레이션을 지원하는 하나의 시뮬레이터를 이용하여 모의할 수도 있지만⁽⁷⁾, 본 논문에서는 연속 시스템 모델과 이산 사건 시스템 모델을 재사용하면서, 모델 간에 인터페이스를 이용한 데이터 교환 및 시간 동기화를 통해 연동하는 하이브리드 시스템 연동 시뮬레이션 방식을 취하고 있다⁽⁵⁾. 하이브리드 시스템 모델을 연동 시뮬레이션하게 되면 다수의 컴퓨터를 컴퓨팅 자원으로 활용이 가능하며, 기존의 개발된 이산 사건/연속 모델 시뮬레이터들의 재활용이 가능해진다. 높은 연산량이 요구되는 화학 무기 유체 모델^[16]을 포함하는 화학전투체계 모델의 경우 다수의 컴퓨터 활용이 가능한 하이브리드

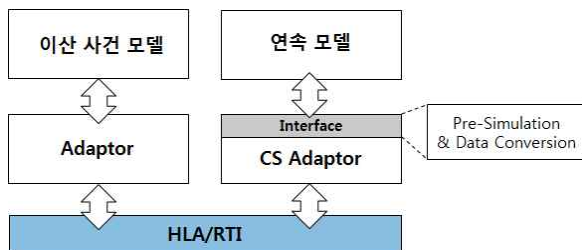


그림 3. Distributed hybrid simulation environment

연동 시뮬레이션은 더욱 효과적이다.

이와 같은 하이브리드 연동 시뮬레이션 환경 구조는 그림 3과 같고, 연동 시뮬레이션에 사용되는 미들웨어는 HLA (High Level Architecture)/ RTI (Run-Time Infrastructure) 이다⁽⁹⁻¹⁰⁾. HLA는 미 국방성 (DOD)에서 제안한 연동 인터페이스이고, RTI는 연동 인터페이스를 기반으로 구현한 소프트웨어이다. 시뮬레이션 모델들은 어댑터⁽¹²⁾를 이용하여 HLA/RTI에 참여한다. HLA/RTI는 참여한 모델들 간의 데이터 교환 및 시간 진행을 관리한다. HLA/RTI와 모델 사이에 위치하는 어댑터는 모델이 쉽게 HLA/RTI에 참여할 수 있도록 하는 도구이다. 특히 연속 모델의 어댑터는 이산 사건 모델과 연속 모델간의 데이터 변환을 돕는 인터페이스와 시간 동기화를 돕는 Pre-Simulation 알고리즘을 포함한다.

3. 화학전투체계 모델링 방법

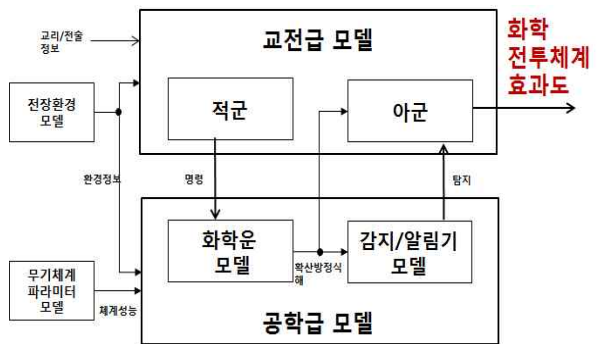


그림 4. Inter-operation between engineering level and engagement level model of chemical warfare system

공학/교전급 모델 연계 측면에서 화학 전투체계는 그림 4와 같이 적군과 아군 부대 모델로 구성된 교전급 모델들과 화학 작용제 확산을 모의하는 화학운 모델, 탐지/경보기와 같은 장비를 모의하는 공학급 모델들로 구성되어 있다. 적군 모델은 공격 수칙을 바탕으로 화학운 모델을 활성화 하고, 화학운 모델은 환경 정보와 화학 기체의 성질을 참고하여 확산이 시작된다. 아군은 탐지/경보기 공학급 모델을 통해 화학 작용제를 탐지하고, 환경 정보와 교리를 고려하여 방어 태세를

취한다. 화학 전투태세 효과도는 구성하는 교전급/공학급 모델들이 서로 연계하여 모의되는 아군의 생존률과 같은 값을 비교하여 분석한다. 각 모델의 상세한 설명은 다음과 같다.

3.1. 교전급 모델

화학전 교전급 모델은 모의 목적에 따라 중대, 소대 혹은 병사 등의 수준으로 공격 수칙을 따르는 적군 모델과 방어 수칙을 따르는 아군 모델로 나누어 표현한다. 적군 모델은 화학운 공학급 모델에게 투하 위치, 투하량 등의 공격 정보를 전달한다. 아군 모델은 탐지/경보기 모델로부터 감지 이벤트를 받거나 다른 부대로부터 명령 이벤트를 받게 되면 정해진 방어 수칙을 행하게 된다. 기존의 공학/교전급 모델 연계 사례에서 살펴보면 교전급 모델은 교리를 바탕으로 이산 사건 모델로, 공학급 모델들은 관련 미분방정식을 바탕으로 연속 모델로 모델링이 되었다. 그러나 기존 사례와 달리 화학전투체계에서는 공격 피해는 오염 지역 내에 있을 때 연속적으로 누적된다. 이와 같은 화학 무기에 의한 아군의 연속적인 피해를 평가하기 위해 연속 시간 기반의 피해 평가 모델을 추가하여, 교리적인 부분은 그림 5와 같이 이산 사건 행동 모델로 표현하고, 피해 평가부분은 연속 피해평가 모델로 표현하여 아군 모델을 이산 사건 모델과 연속 모델이 결합된 하이브리드 시스템 모델로 모의한다.

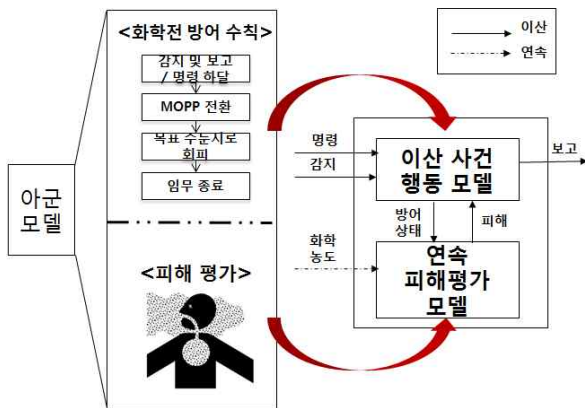


그림 5. Hybrid(Discrete event/Continuous) engagement level model

이산 사건 행동 모델은 외부의 다른 교전급 모델들과의 정보 교환(명령, 보고)과 탐지/경보기 공학급 모델로부터의 감지 이벤트를 처리한다. 그리고 부대 모델 내 연속 피해 평가 모델은 화학운 모델로부터 연속적인 화학 작용제 농도 데이터를 처리한다. 행동 모델과 피해 평가 모델 사이에는 부대 정보 (방독면 착용과 같은 방어 상태, 현재 부대의 피해 상태)와 관련된 이벤트를 주고받는다. 예를 들면 피해 평가 모델이 부대의 화학 작용제 누적 섭취량을 모의하면, 화학 오염 지역 내에 부대가 있을 시 부대의 화학 작용제 누적 섭취량은 그림 6와 같이 시간이 지날수록 연속적으로 점차 증가할 것이다. 화학 작용제 섭취 중 부대가 방독면 착용 등으로 인해 방어태세 상태가 바뀌게 되면 피해 평가 모델은 행동 모델로부터 이벤트를 받아 변환하여 피해 상태 계산에 반영하게 되고, 섭취 증가율은 감소하게 된다. 그리고 섭취량이 치사량과 같은 임의의 값에 도달하게 되면 피해 평가 모델은 이동불능, 혹은 죽음과 같은 이벤트를 발생시켜 행동 모델에 다시 영향을 미친다.

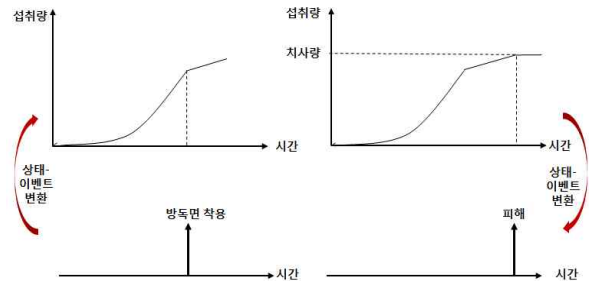


그림 6. State/Event conversion in behavior model

3.2. 공학급 모델

3.2.1 화학운 공학급 모델

적군이 특정 지점에 화학 공격을 하면, 그 지점에서 화학 작용제는 화학 구름을 형성하여 시간이 지남에 따라 확산이 된다. 이러한 화학 작용제 확산 모의는 NTC (Naval Training Center) 등에서는 해석해 (Analytical Solution)를 이용하여 전장의 변화하는 화학 작용제 농도를 모의하였다⁽¹³⁾. 이러한 모의는 이류 및 확산 방정식 (Advection and Diffusion equation)과

같은 관련 방정식으로부터 해석해를 유도하고, 해석해에 시간과 위치 정보를 대입하여 이루어진다. 해석해로부터 얻어지는 화학 작용제 농도 분포는 가우시안 분포와 유사한 형태를 이루게 되고, 바람의 영향을 받아 이동하며 점차 확산한다.

해석해를 이용하면 넓은 지역의 화학 작용제 농도 정보를 빠르게 얻을 수 있는 장점이 있어서 훈련용으로 사용되지만, 건물과 같은 지형 요인을 반영할 수가 없다. 지형 요인을 고려하여 현실성 있는 데이터를 얻기 위해서는 CFD (Computational Fluid Dynamics) 기반의 모의가 필요하다. 따라서 본 논문에서 화학 작용제 확산을 지형 요인을 고려하고, 현실성 있는 데이터를 얻기 위해 CFD를 이용하여 모의하고자 한다⁽¹⁶⁾.

CFD 기반의 확산 모의를 위해서는 전장 환경을 장애물(건물 등)을 고려하여 격자들로 나누고, 격자들에 적용되는 유체의 확산 방정식과 경계 조건을 결정한다. 격자 구조, 방정식, 경계 조건, 수치기법(Numerical Algorithm) 정보들을 바탕으로 CFD 해석기(Solver)가 만들어지고, 이를 이용하여 확산을 모의한다. CFD 해석기 기반의 화학운 모델은 그림 7과 같이 환경 모델로부터의 지형 정보, 바람 정보와 적군 모델로부터 얻는 투하 위치, 투하량 등의 명령을 바탕으로 화학운 확산을 모의한다.

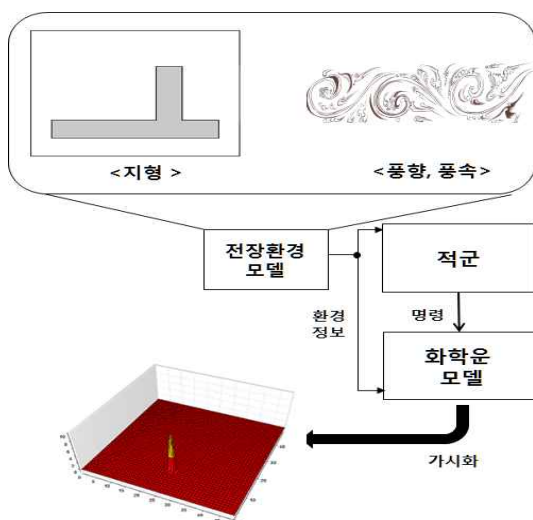


그림 7. Chemical compound model based on CFD

3.2.2 탐지/경보기 공학급 모델

탐지/경보기는 위치한 지역의 화학 작용제 농도가 감지 농도 이상일 때 부대에게 알려주는 장비로, 연속 시간 기반의 공학급 모델로 표현한다. 탐지/경보기 모델은 화학운 모델의 출력인 연속적인 농도 정보와 감지 알고리즘을 이용하여 화학 작용제를 감지한다. 감지를 하게 되면 모델은 그림 8과 같이 감지 이벤트를 발생시켜 아군 모델에게 전달한다.

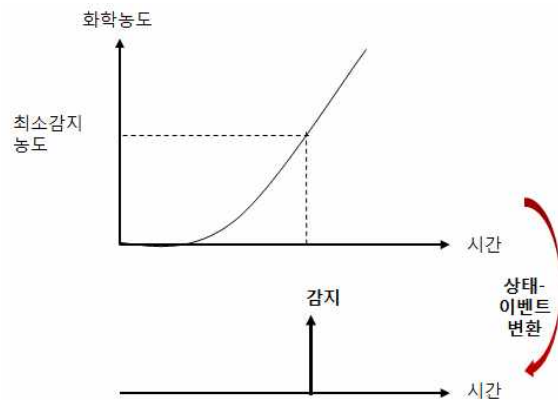


그림 8. State/Event conversion in sensor model

4. 화학전투체계 연동 시뮬레이션 환경

화학전투체계 효과도 분석을 위해 체계를 공학급 모델 (화학운 모델, 탐지/경보기 모델) 들과 교전급 모델(적군과 아군 모델)들, 환경 모델, 무기 체계 파라미터 모델들로 구성하여 표현하였다. 환경 모델/무기 체계 파라미터 모델은 공학급 혹은 교전급 모델로부터 정보 요청을 받으면 관련 정보를 전달한다. 교전급 모델은 교리를 따르는 이산 사건 기반의 행동 모델과 연속 기반의 피해 평가 모델이 결합된 하이브리드 시스템 모델로 표현되고, 공학급 모델은 관련 미분방정식을 바탕으로 연속 모델로 표현된다.

이와 같이 화학전투체계 모델은 연속 시간 모델들과 이산 사건 모델들, 데이터 관리하는 모델들로 구성되어 있고, 이들 모델들을 HLA/RTI를 이용하여 하이브리드 연동 시뮬레이션 하고자 한다. 이와 같은 하이

브리드 연동 시뮬레이션 기술을 이용하면 기존의 이산 사건 모델과 연속 모델들의 재사용이 가능하고, 다수의 컴퓨터를 시뮬레이션 연산에 활용할 수 있다. 화학전투 체계를 구성하는 모델들의 하이브리드 연동 시뮬레이션 구조를 살펴보면 그림 9와 같다. 이산 사건 모델들과 연속 모델이 나뉘어져 HLA/RTI에 참여한다. 연속 모델들 간에는 빈번한 데이터 교환이 이루어지기 때문에 묶여져서 하나의 컴퓨터에서 이루어진다. 이러한 구조로 나누어 모의하게 되면, 이벤트성으로 발생하는 데이터들만 네트워크를 통해 다른 모델에게 전달되기 때문에 네트워크 통신 부담을 줄이는 효율적인 데이터 교환이 가능하다. 또한 CFD 기반의 화학운 모델은 연산량이 많기 때문에^[16], 피해 평가 모델, 탐지/경보기 모델을 제외한 다른 모델은 다른 컴퓨터에서 분산하여 모의되기 때문에 컴퓨팅 자원 관리에 더욱 효과적이다.

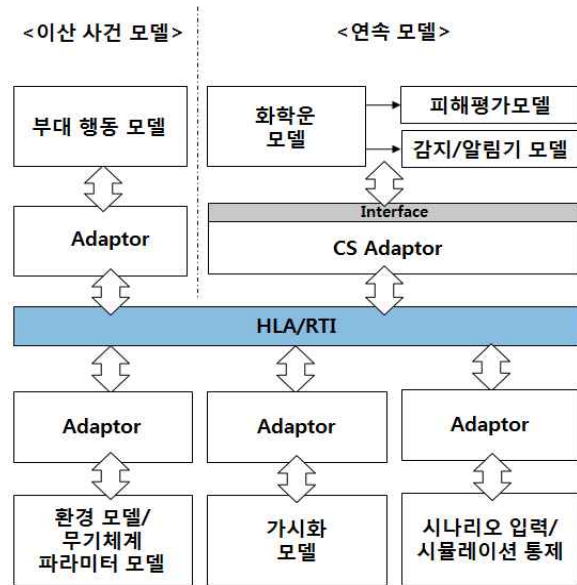


그림 9. Distributed chemical warfare simulation environment

추가적으로 가시화 모델과 시뮬레이션 시작/종료와 관련된 시뮬레이션 통제 도구를 추가하여 가시화를 통해 시뮬레이션 진행 상태를 확인과 제어를 가능하게 한다.

5. 실험 설계 및 결과 분석

제안하는 화학전투체계 모델링 방법과 시뮬레이션 환경을 다음 시나리오에 적용하여 무기/장비 성능, 교리 등과 같은 다양한 인자를 반영하여 화학전 효과도를 분석하고자 한다.(그림 10 참조)

- 아군으로부터 150m 떨어진 지점에 화학탄을 투하한다. 화학탄이 터진 후 화학 작용제는 화학 구름을 형성하여 바람에 의해 아군 쪽으로 점차 확산한다.
- 아군은 4개의 소대로 이루어져 있고, 이중 한 소대는 중대장이 위치하고 있다. 소대마다 동서남북으로 50m 떨어진 지점에 탐지/경보기를 배치한다. 탐지/경보기는 다가오는 화학운을 탐지하여 인접한 소대에 알린다.
- 화학 공격을 감지한 소대는 중대장이 위치한 소대에 보고 후 MOPP (Mission Oriented Protective Posture)⁽¹⁴⁾ 상태로 변환한다.
- 보고를 받은 중대장이 위치한 소대는 회피지역을 결정하여 경보를 받지 않은 다른 소대들에게 MOPP 방어태세를 갖추어 회피하도록 명령을 내린다.
- 소대들은 집결지로 회피하고, 집결지에 도착하면 모의를 종료한다.

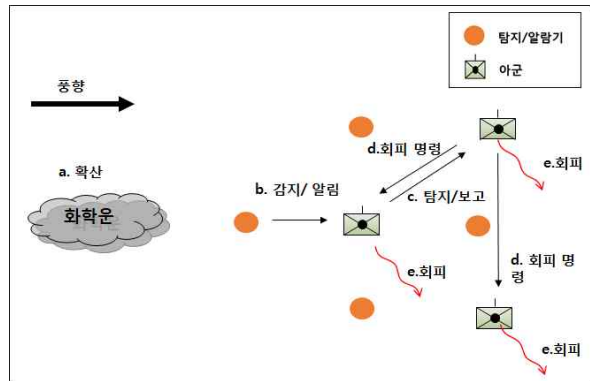


그림 10. Example scenario

부대의 화학 작용제 섭취량을 실험하여 체계 효과도를 분석한다. 부대의 화학 작용제 섭취량은 각 소대의 화학 작용제 섭취량 평균으로 계산한다.

5.1 교전급 모델 설계

시나리오 상의 방어 수칙과 모델링 방법을 고려하여 4개의 소대를 다음과 같은 이산 사건 소대 행동 모델과 연속 시간 피해 평가 모델을 결합하여 나타낸다.

5.1.1. 소대 행동 모델

소대의 행동 모델은 시나리오 상의 방어 절차를 기반으로 이산 사건 시스템 명세에 효과적인 DEVS (Discrete Event System Specification)⁽¹⁵⁾를 이용하여 중대장이 위치한 소대와 그 외의 일반 소대 행동 모델을 DEVS 원자 모델로 그림 11, 12과 같이 모델링하였다.

일반 소대의 행동 모델은 처음에는 경비(GUARD) 상태에 머물러 있다가, 탐지/정보기로부터 감지 이벤트가 오면 보고(BRIEF)를 거쳐 MOPP 상태로 천이한다. 혹은 회피 명령(Order) 이벤트를 받게 되어도 MOPP 상태 전환한다. 중대장이 위치한 소대는 일반 소대의 보고 상태 대신, 다른 소대의 보고를 처리하고 회피 집결지를 결정하여 명령을 내리는 결정(DECIDE) 상태가 있다. 모든 소대 모델은 MOPP 전환 후 집결지를 향해 이동한다. 소대의 연속 피해평가 모델은 소대가 위치한 격자 정보와 방어 상태 등을 참고하여 피해 평가하기 때문에, 소대가 이동하면서 부대가 위치한 격자가 바뀔 때 마다, 피해 평가 모델에게 소대가 위치한 격자 정보(Pos)를 알려준다. 모든 소대가 집결지에 도착하면 시뮬레이션은 종료하게 된다.

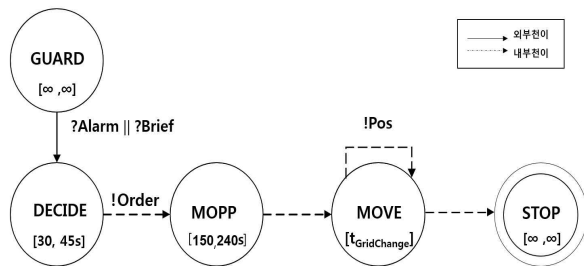


그림 11. Discrete event main platoon model

5.1.2 피해 평가 모델

피해 평가 모델은 부대의 누적 화학 작용제 섭취량을 평가하며, 시간 당 부대의 화학 작용제 섭취량 변화는 다음 식과 같이 부대가 위치한 지역의 농도 정보,

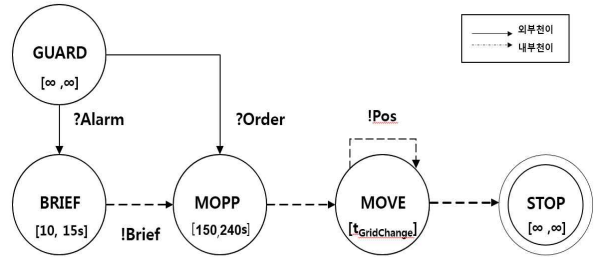


그림 12. Discrete event platoon model

시간 당 공기 흡입량, MOPP 상태로 변환하여 방독면 착용 했을 시 방독면 성능 (화학 작용제 여과율)을 바탕으로 결정된다.

$$\frac{d}{dt} S_{acc}(t) = \rho(x, y, t) \times C_{Inh} \times (1 - C_{Def}(t))$$

t : 시간(s)

x, y : 부대의 x,y 격자 좌표

S_{Acc} : 유닛의 화학 작용제 섭취량(kg)

ρ : 대기의 화학 작용제 농도(kg/m³)

C_{Inh} : 평균 공기 섭취량(m³/s)

C_{Def} : 화학 작용제 여과율(0~1)

화학작용제 여과율 1: 화학작용제로부터 완벽히 보호됨을 의미(투과율 0%)

화학작용제 여과율 0: 화학 작용제를 그대로 다 마신다는 것을 의미(투과율 100%)

C_{Inh} 는 사람이 초당 0.13리터, 0.00013m³을 마신다고 가정하였고, MOPP 상태 변환 전이면 C_{Def} 는 0의 값을 가지고, MOPP 상태 변환 후면 방독면 성능을 고려하여 특정 여과율(예: 0.7, 0.8)을 결정한다.

5.2. 공학급 모델 설계

5.2.1 화학운 모델

화학운 모델은 요구 정확도 수준에 따라 다양한 유체 모델을 사용할 수 있다. 높은 정확도가 요구되면 3차원 점성을 고려한 확산 모델로 모의하는 것이 요구된다. 그렇지만 본 논문의 실험은 정확한 확산 모델 모의가 아닌 효과도 측정을 위한 화학전 공학급/교전급

모델 연계가 목적이기 때문에, 예시에서는 2차원 압축성, 비점성의 오일러 방정식(기본 확산 방정식) 기반의 화학운 모델을 활용한다. 확산은 가로/세로 5m의 격자로 나뉘어진 유동장에서 이루어지며, Roe Scheme 방식으로 연산한다⁽¹⁶⁾.

$$\partial_t \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ E \end{bmatrix} + \partial_x \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ u(E+p) \end{bmatrix} + \partial_y \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ v(E+p) \end{bmatrix} = 0,$$

$$p = (\gamma - 1) \cdot [E - \frac{\rho}{2}(u^2 + v^2)]$$

ρ : 밀도(kg/m³) , u, v : x, y 방향의 속도(m/s),

E : 에너지(J/m²), p : 압력(N/m²), γ : 비열

화학운 기체의 물리적 특성은 공기와 동일하다고 가정하였고, 이에 따라 비열은 1.4, 공기 밀도는 1.3kg/m³으로 설정하였다. 각 격자의 상태는 오일러 방정식 첫 번째 항을 이용하여 $[\rho, u, v, p]$ 벡터로 보고, 격자들의 초기 상태는 [1.3, 0, 0, 100000]으로 설정한다. 화학탄이 특정 격자에 폭발하면, 탑재된 화학가스의 질량과 생성되는 기압에 의해 해당 격자 상태가 바뀌게 된다. 화학탄에 의해 생성되는 기압은 8기압(800,000N/m²)으로 가정하였고, 생성되는 화학 작용제 농도는 입력파라미터에 의해 달라진다. 경계 조건은 풍향, 풍속을 고려하여 유입구/출구 경계조건(Inlet/Outlet boundary condition)⁽¹⁶⁾을 이용하였다.

5.2.2 탐지/경보기 모델

탐지/경보기 모델은 장비가 위치한 지역의 화학 작용제 농도를 연속 시간으로 확인하면서, 위치의 농도가 최소 감지 농도보다 클 때, 감지 이벤트를 발생하여 아군 교전급 모델에 전달한다.

$$S_{Dens}(t) = \rho(x, y, t)$$

t : 시간(s)

x, y : 부대의 x,y 격자 좌표

S_{Dens} : 장비가 위치한 지역의 화학 작용제 농도(kg/m³)

ρ : 대기의 화학 작용제 농도(kg/m³)

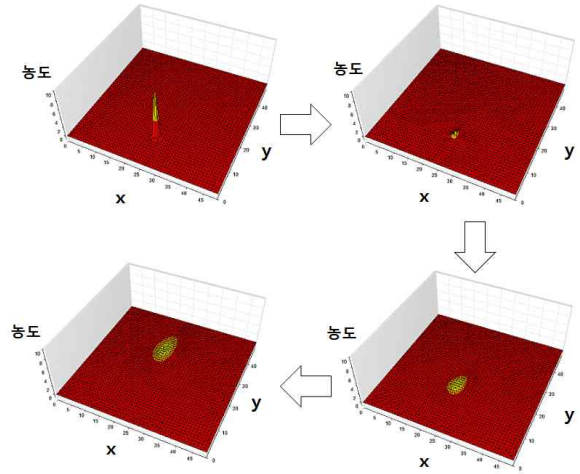


그림 13. Visualization of chemical compound propagation

5.3 실험 설계

설계한 시나리오를 기반으로 공학급 모델과 관련된 화학 무기와 감지 장비 성능 변수와 교전급 모델과 관련된 부대의 훈련도 및 회피 경로와 환경 정보와 관련된 풍속을 표 3과 같이 바꾸가며 아군 부대의 평균 화학 작용제 누적 섭취량 측정하였다.

표 3. 실험에 사용한 변수 값

변수 타입	변수 이름	변수 값
무기/장비 성능	초기 농도 (kg/m ³)	16, 24(기본값), 32, 40
	감지 농도 (kg/m ³)	0.01, 0.05, 0.1, 0.5
훈련도/교리	MOPP 전환 시간(s)	60, 90, 120, 150
	회피 경로	풍향 수직 풍향 수평
환경 정보	풍속 (m/s)	0.5, 1, 2, 4

5.4 실험 결과 분석

5.4.1 화학 무기 초기 농도

화학탄에 의해 생성되는 화학 작용제 초기 농도를

변화시키며 부대의 화학 섭취량 변화를 실험하였다. 그림 14를 살펴보면, 화학탄이 터지고 화학운은 부대를 향해 점차 확산이 되고, 120초 이후에 부대는 화학운에 영향을 받고 섭취량이 증가한다. 부대는 화학운 영향을 받기 이전 탐지/경보기로부터 경보를 받거나, 중대장 부대로부터 회피 명령을 받게 되면 MOPP(화학 방어태세)를 갖추게 된다. MOPP가 증가할수록(MOPP1->MOPP2->MOPP3) 화학 작용제 여과율 C_{Def} 또한 증가한다(0.7->0.8->0.9). 화학 작용제 여과율이 증가하면서 섭취 증가율은 줄어들게 되고, 집결지로 회

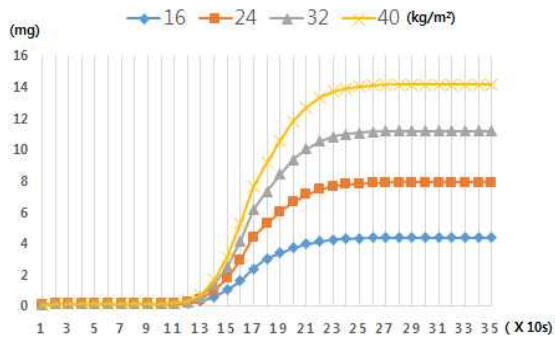


그림 14. Chemical compound mass vs. Amount of inhaled chemical compound

피 중 화학운의 피해에 벗어나게 된다. 초기 화학 농도가 높게 되면, 탐지/경보기에 의해 일찍 경보가 되지만(초기 농도가 40kg/m^2 일 때 경보 시간: 75초, 16kg/m^2 일 때 경보 시간: 84초), 방어태세를 갖추고 집결지로 이동하는 시간동안 화학 작용제 섭취 증가폭이 커져 결과적으로 농도가 높을수록 섭취량이 증가함을 볼 수 있다.

5.4.2 탐지/경보기의 감지 농도

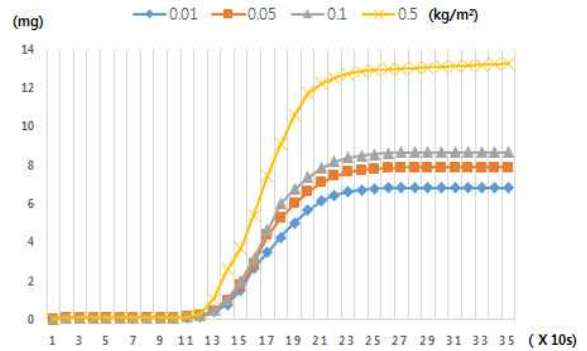


그림 15. Sensor detecting performance vs. Amount of inhaled chemical compounds

탐지/경보기의 감지 가능한 최소 농도 변화에 따른 부대의 섭취량 변화를 실험하였다. 그림 15과 같이 최소 감지 농도가 줄어들수록 부대는 화학운을 일찍 감지하여 방어태세를 갖추기 때문에 화학 작용제에 무방비로 노출되는 시간이 줄어든다. 시나리오 상황에서 화학 작용제 치사량이 10mg 이라 가정하면, 생존을 위해서는 적어도 0.1kg/m^2 농도 화학 작용제 감지가 가능한 장비가 필요하다고 볼 수 있다. 다양한 사례에 대해 최소 감지 농도 실험을 하여 화학전에 요구되는 탐지/경보기 장비 성능을 도출할 수 있다.

5.4.3 MOPP 전환 시간

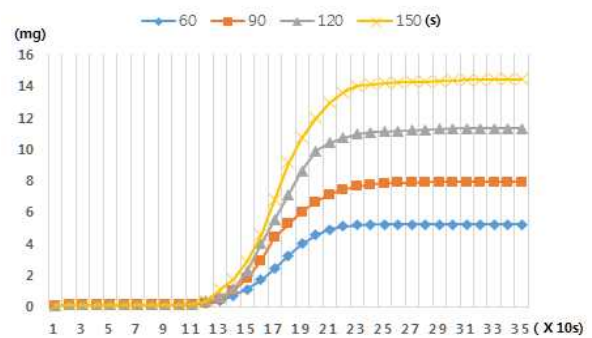


그림 16. MOPP transition time vs. Amount of inhaled chemical compounds

부대의 MOPP 변환 시간, 즉 방어태세 변환 훈련도 정도에 따라 아군의 섭취량 변화를 실험하였고 결과는

그림 16과 같다. MOPP 전환 시간이 빠를수록 화학 작용제에 노출되어 섭취량이 급격한 증가율을 보이는 구간이 줄어들고, 누적 섭취량 또한 감소한다. 이러한 실험을 통해 MOPP 전환 훈련자에게 전환 시간 단축 훈련의 중요성 자료로 제시할 수 있다.

5.4.4 부대 회피 경로



그림 17. Evasion direction vs. Amount of inhaled chemical compounds

집결지에 도달하기 위해 풍향에 수직으로 이동하여 회피할 때와 풍향에 수평으로 이동하며 회피할 때 화학 작용제 섭취량 변화를 실험하였다. 수직으로 회피할 때에는 230초에 화학 작용제의 영향을 완전히 벗어나지만, 풍향에 수평으로 회피 시에는 회피 중 다가오는 화학운 중심점에 더욱 가까워지며 지속적으로 섭취량이 증가하게 된다. 실험 결과를 통해 회피 경로 선정과 같은 지위자의 판단 및 교리의 중요성을 확인할 수 있다.

5.4.5 풍속의 변화

풍속의 변화에 따른 아군의 화학 작용제 섭취량 변화를 실험하였다. 풍속이 느릴수록(4m/s→1m/s) 화학운의 확산 속도가 감소하여 그림 18과 같이 화학 경보와 일련의 회피 과정이 늦게 이루어진다. 누적 섭취량은 풍속이 느릴수록 타원형의 화학운의 풍향 방향의 장축이 줄어들고, 단축이 길어지게 되어 수직 회피 하는 동안 화학 작용제에 오래 영향을 받게 되어 섭취량이 증가한다. 또한 풍속이 0.5m/s 일 경우, 화학 작용제

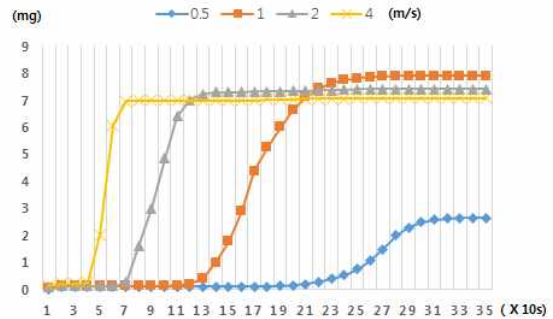


그림 18. Wind velocity vs. Amount of inhaled chemical compounds

에 심각한 피해를 입기 전 화학 방어태세를 갖출 수 있어서 도리어 화학 작용제에 의한 피해가 줄어들었다. 기상 상태에 따라 효과도가 달라짐을 실험을 통해 확인할 수 있었다.

6. 결론

기존의 화학전 관련 연구는 무기/장비와 같은 화학전 효과도에 영향을 미치는 공학 레벨의 요인을 중점적으로 연구해왔고, 교리, 방어 수칙, 환경 요인들과 함께 연계하여 다양한 요인을 고려하여 화학전투체계 효과도를 분석한 사례가 없었다. 본 논문은 화학전투체계를 모의하기 위해 화학전투체계를 구성하는 화학 무기, 탐지/경보기들 장비뿐만 아니라 교리와 환경 정보를 함께 고려할 수 있는 모델링 방법과 이들을 연동 시뮬레이션 하는 환경을 제안한다.

모델링 방법 측면에서는 기존의 공학/교전급 모델 연계 사례와 동일하게 무기 및 장비 체계는 연속 시간 기반의 공학급 모델로 표현한다. 그렇지만 기존과 달리 부대를 교리를 따르는 하나의 이산 사건 모델로 표현하는 것이 아니라, 화학 공격이 연속적인 점을 고려하여 부대를 교리를 기반으로 이산 사건 행동 모델과 연속 피해 평가 모델이 결합된 하이브리드 시스템 모델로 표현한다. 이렇게 모델링 된 화학전투체계 모델들을 제안하는 환경을 통해 HLA/RTI 기반의 하는 하이브리드 연동 시뮬레이션 한다. 제안하는 환경은 연속 모델들이 결합하여 이산 사건 모델과 연동하는 구조를 가지기 때문에 연속 모델들 간 빈번한 데이터는 하나의

컴퓨터 내에서 교환이 이루어지고, 이벤트 형식의 데이터만 HLA/RTI에 의해 네트워크 통신을 하게 되므로 효율적인 구조를 가진다. 또한 제한한 환경을 이용하여 맵터와 RTI를 그대로 두고, 기 개발된 혹은 확장된 교전급 모델/공학급 확산 모델들을 모의 시나리오/요구정밀도에 따라 모델을 바꾸며 실험이 가능해진다.

제안하는 모델링 방법 및 시뮬레이션 환경을 이용하여 특정 시나리오에 적용해 실험하여 무기 및 장비 성능, 부대의 훈련도, 환경 정보 등 다양한 요인을 고려하여 화학전 효과도 분석이 가능함을 확인할 수 있었다. 또한 교전/공학급 모델을 확장하여 다양한 화학전 시나리오 효과도 분석에 활용할 수 있다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다(UD110006MD).

Reference

- [1] Squassoni, S. A. (2006, October). Weapons of mass destruction: Trade between North Korea and Pakistan. LIBRARY OF CONGRESS WASHINGTON DC CONGRESSIONAL RESEARCH SERVICE.
- [2] J. H. Hong, K. M. Seo, M. G. Seok, and T. G. Kim, "Interoperation between Engagement-and Engineering-level Models for Effectiveness Analyses," *The Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology*, Vol. 8, No. 3, pp. 143 - 155, July 2011.
- [3] K. M. Seo, H. S. Song, S. J. Kwon and T. G. 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.
- [4] T. G. Kim, D. S. Kim, and C. H. Sung, "Joint Analysis of Combat Power and Communication System via Interoperation of War Game Simulator with Communication Network Simulator," *The Journal of Korea Information and Communications Society*, Vol. 37C, No. 10, pp. 993 - 1003, Oct, 2012.
- [5] C.H. Sung and T. G. Kim, "Framework for Simulation of Hybrid Systems: Interoperation of Discrete Event and Continuous Simulators Using HLA/RTI," *25th ACM/IEEE/SCS Workshop on Principles of Advanced and Distributed Simulation (PADS 2011)*, Nice, France, June 14-17, 2011.
- [6] S. Y. Lim and T. G. Kim, "Hybrid Systems Modeling and Simulation-Part II: Interoperable Simulation Environment," *The Journal of the Korea Society For Simulation*, Vol. 10, No. 3, pp. 15 - 29, Sep, 2001.
- [7] Dacre, J. C, and Goldman, M. (1996). Toxicology and pharmacology of the chemical warfare agent sulfur mustard. *Pharmacological reviews*, 48(2), 289-326.
- [8] Novak, J. P., Snow, E. S., Houser, E. J., Park, D., Stepanowski, J. L., & McGill, R. A. (2003). Nerve agent detection using networks of single-walled carbon nanotubes. *Applied physics letters*, 83(19), 4026-4028.
- [9] S. Y. Lim and T. G. Kim, "Hybrid Systems Modeling and Simulation-Part I: Modeling and Simulation Methodology," *The Journal of the Korea Society For Simulation*, Vol. 10, No. 3, pp. 1 - 14, Sep. 2001.
- [10] "IEEE standard for modeling and simulation (M&S) high level architecture (HLA) - framework and rules," *IEEE Std 1516-2000*, pp. i - 22, Sep. 2000.
- [11] "IEEE Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA) - Federate Interface Specification," *IEEE Std 1516.1-2000*, pp. i - 467, 2001.
- [12] T, G, Kim, C. H. Sung, S. Y. Hong, J. H. Hong, C. B. Choi, J. H. Kim, K. M. Seo, and J. W. 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 - 142, July 2011.

- [13] McRae, G. J., Goodin, W. R., and Seinfeld, J. H. (1982). Numerical solution of the atmospheric diffusion equation for chemically reacting flows. *Journal of Computational Physics*, 45(1), 1-42.
- [14] "Multiservice Tactics, Techniques, and Procedure for NBC Defense of Theater Fixed Sites, Ports, and Airfields (FM 3-11.34/MCRP 3-37.5/NWP 3-11.23/AFTTP(I) 3-2.33)", GlobalSecurity.org, retrieved 2007-10-22
- [15] B. P. Zeigler, T. G. Kim, and H. Praehofer, *Theory of Modeling and Simulation*, Orlando, FL: Academic, 2000
- [16] Blazek, J. (2001). *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications: Principles and Applications*. Elsevier Science.