

## 화학 생물 위험 대응 시물레이션 및 분석

한상우<sup>†</sup> · 서지윤 · 심우섭

### Simulation and Analysis of Response Plans against Chemical and Biological Hazards

Sangwoo Han<sup>†</sup> · Jiyun Seo · Woosup Shim

#### ABSTRACT

M&S techniques are widely used as scientific means to systematically develop response plans to chemical and biological (CB) hazards. However, while the theoretical area of hazard dispersion modeling has achieved remarkable practical results, the operational analysis area to simulate CB hazard response plans is still in an early stage. This paper presents a model to simulate CB hazard response plans such as detection, protection, and decontamination. First, we present a possible way to display high-fidelity hazard dispersion in a combat simulation model, taking into account weather and terrain conditions. We then develop an improved vulnerability model of the combat simulation model, in order to simulate CB damage of combat simulation entities based on other casualty prediction techniques. In addition, we implement tactical behavior task models that simulate CB hazard response plans such as detection, reconnaissance, protection, and decontamination. Finally, we explore its feasibility by analyzing contamination detection effects by distributed CB detectors and decontamination effects according to the size of the {contaminated, decontamination} unit. We expect that the proposed model will be partially utilized in disaster prevention and simulation training area as well as analysis of combat effectiveness analysis of CB protection system and its operational concepts in the military area.

**Key words** : Response plan against CB hazards, CB protection system, combat simulation and analysis, OneSAF.

#### 요약

화학·생물(화생) 위험을 초기 단계에 효과적으로 대응하기 위해서는 화생 대응 계획을 체계적으로 발전시켜야 하며, 모델링 및 시물레이션은 이를 위한 과학적 수단으로 활용될 수 있다. 그러나 오염 확산 모델링 분야는 많은 발전을 이루고 있으나, 화생 대응 계획을 모의하고 적절성을 분석하는 시물레이션 분야는 여전히 초기 단계에 머무르고 있다. 이에 본 논문에서는 화생 오염 탐지, 보호, 제독 등 대응 계획을 과학적으로 모의하기 위한 모델을 제안한다. 먼저 기상 및 지형 조건을 고려하여 예측된 오염 확산 결과를 교전 모델에 반영하는 방법을 제시한다. 이어서 공개된 사상자 예측 기법을 기반으로 전투 모의 개체의 화생 피해를 모의하는 화생 전투 피해 모의 기법을 설계한다. 그리고 화생 위험 탐지·정찰, 제독, 보호 등 화생 위험 대응 계획을 체계적으로 모의하는 과업을 모델링한다. 끝으로 화생 감시소 운용에 의한 오염 탐지의 신속성을 분석하는 한편, 화생 제독소 운용 시 오염 부대 규모와 제독 부대 규모에 따른 제독 소요 시간을 분석함으로써 화생 전투 모의 실험의 가능성을 확인한다. 제안된 모델을 이용하면 향후 군의 화생 방호 체계 및 운용개념에 대한 효과 분석은 물론 재난 방재 및 모의 훈련 분야에서도 일부 활용이 가능할 것으로 기대된다.

**주요어** : 화생 위험 대응, 화생 방호 체계, 효과분석, 전투 시물레이션 및 분석, OneSAF.

\* 본 논문은 2019년도 한국군사과학기술학회 종합학술대회 (제주국제컨벤션센터, 제주)에서 발표된 논문을 보완하였음.

**Received:** 26 April 2021, **Revised:** 9 June 2021,  
**Accepted:** 10 June 2021

**† Corresponding Author:** Sangwoo Han  
E-mail: swhan22@gmail.com  
Agency for Defense Development

## 1. 서론

화학·생물(이하 ‘화생’) 위험은 독성 화학가스, 세균·바이러스 등을 이용하여 장기간 인체를 무력화시키는 것은 물론, 광범위한 지역과 물자를 오염시켜 이의 활용을 제한하기 때문에 국가 기능을 마비시키는데 상당한 영향

을 주는 것으로 알려져 있다(Cha, 2019). 화생 위험 대응은 화생 오염 확산 및 위험이 미치는 영향을 예측하고 이로 인한 피해를 최소화하는데 집중되어야 한다. 이러한 목표하에 시뮬레이션 모델을 이용하여 화생 위험에 대비한 각종 모의 분석을 수행하고 있으나, 지형·기상 등 주요 영향 인자를 고려한 오염 확산과 피해 예측은 충실도 측면에서 비교적 제한되는 실정이다. 이미 주요 선진국에서는 화생 오염 확산 예측 모델과 각종 시뮬레이션 모델을 연계하여 이러한 제약사항을 극복해왔다. 예를 들면, 도시지역에서의 화생 오염 확산을 신속하고 정교하게 분석할 수 있는 모델을 개발 운용하고 있는 한편, 화생 경보 체계, 오염 예측 모델을 가상 환경하에서 연동하여 화생 위험 방책 수립 및 대비 훈련에 활용하고 있다(Chang, 2005). 우리나라에서도 화생 위험 모의가 부분적으로 가능한 시뮬레이션 모델이 존재하나, 전술한 바와 같이 화생 오염 확산 및 피해 예측 결과 반영이 미흡하여, 화생 위험 관리 및 방책 효과 등을 분석하기 위한 모델로 발전시키는데 한계가 있는 실정이다(Han, 2015). 따라서 화생 오염의 탐지, 제독, 보호 등 각종 대응책의 효과를 사전에 분석하기 위해서는 화생 위험을 고려한 시뮬레이션 모델이 요구된다.

이에 본 논문에서는 화생 위험 상황하에서의 오염 확산과 탐지·정찰·제독 등 대응책을 모의하고, 화생 위험 상황하에서 위험 대응 시뮬레이션을 수행하여 화생 보호 대책의 효과를 분석할 수 있는 기법을 제시한다. 제안된 기법을 미 육군 전투 시뮬레이션 프레임워크인 OneSAF (One Semi-Automated Forces) 위에서 구현함으로써 이의 실행 가능성을 확인한다<sup>1)</sup>. 또한 구현 결과를 이용하여 화생 위험 대응 시뮬레이션을 수행하고, 대안별 효과 분석을 수행한다. 본 논문에서 제안하는 것은 다음과 같이 요약된다.

- 화생 오염 확산 모의 : 화생 오염 확산을 신속히 예측하기 위해 오염 확산 모델을 설계하고, 이를 OneSAF와 연계한다. OneSAF 기반 화생 전투 시나리오상에 정의된 화생 사건 정보는 고충실도 오염 확산 모델에 전달되어, 오염 영역과 농도 분포

를 신속하게 예측하고 그 결과를 OneSAF와 공유하여 가상의 전장 상황도 위에 전시하게 된다. 이는 기존 OneSAF의 저충실도 수준의 오염 확산 모의 능력을 현저하게 개선시키는 효과가 있다. 부연하면 OneSAF에서는 오염운의 반지름과 초기 오염 농도가 주어지면 원형의 오염운을 생성하였는데, 이는 기상 조건과 지형 고저를 고려하지 않은 결과이므로 현실적이지 않다. 이번 논문에서 연구한 화생 오염 확산 모델을 적용하면 풍향, 풍속, 지형 및 시간 흐름에 따른 오염운의 형상과 농도 변화를 전투 모의에 반영하므로, 화생 전투 모의 실험의 충실도를 개선하는데 기여한다.

- 화생 피해 모의 : 다음으로 화생 작용제에 의한 전투 피해를 모의한다. NATO에서 발간한 화생 위험에 의한 사상자 예측 지침서에 수록된 화생 전투 피해 예측기법과 데이터를 기반으로 OneSAF 화생 전투 피해 모의모델을 구현하였다. 상기 사상자 예측 지침서에는 각 작용제의 노출량에 따른 부상 심각도를 수치화하여 수록하였고, 생물 작용제의 경우에는 잠복 기간과 활동 기간을 확률 밀도 함수로 수치화하여 인구 규모에 따른 환자 발생 규모를 확률적으로 예측할 수 있도록 하였다. 이를 개체 단위 모델인 OneSAF 특성에 맞게 보완하여 화생 전투 피해를 모의하도록 하였다. 기존 OneSAF에는 화생 전투 피해 모의논리와 데이터가 포함되어 있었으나, 훈련용으로 사용하는데 적합한 수준의 간략화된 것이다 보니 이를 검증하고 보완해야 할 필요성이 항상 제기되었다. 이에 NATO 지침서에 수록된 검증된 논리와 데이터를 바탕으로 OneSAF 화생 전투 피해 모델의 신뢰성을 높이는데 기여한다.
- 위험 정찰·제독·보호 모의 : 화생 정찰, 제독, 보호와 관련된 우리 군의 교리를 반영하여 각 과업 모델을 개발하였다. 우리 군과 미군은 공통된 작전 개념을 가지고 화생 방호 전력을 운용해오고 있으나, 우리나라의 전장 특성과 자체 개발 화생 방호 체계의 특성에 맞게 교리를 발전시키고 있다. OneSAF 국제판에는 주로 미 육군의 화생 방호 장비와 물자, 교리 중심으로 개체 모델과 과업 모델이 개발되어 있다 보니, 우리 군의 작전 개념과 무기 체계를 그대로 반영하기에는 곤란한 측면이 있었다. 예를 들면, 지역제독 개념 등은 현재 OneSAF에서 모의가 제한되고 있으며, 우리 군의 제독차, 화생방정찰차 등에 대한 모의도 사실상 어려운 실

1) 제안하는 기법을 OneSAF에서 구현한 이유는 모놀리식(monolithic) 구조의 다른 전투 모의 모델과는 달리 OneSAF는 조립식 모델 개발 프레임워크를 제공하고 있어 제안하는 화생방 모의 기법을 컴포넌트 형태로 개발하여 조립하면 OneSAF에서 신속하게 모의할 수 있기 때문이다. 향후 제안하는 기법을 군이 운용하고 있는 분석모델과 훈련모델에 맞게 구현, 통합하여 화생방 전투 모의 분석에 활용하는 것도 가능하다.

정이다. 이에 본 연구에서는 우리 군에서 운용하는 화학 방호 체계와 화학 교리를 반영하여 꼭 필요한 개체 모델과 과업 모델을 신규 개발한다.

- 화학 방호 효과 분석 : 개발된 모델을 이용하여 화학 방호 대안별 효과 분석을 수행하였다. 모의 실험을 통해 화학 감시소 운용 대안에 따른 오염 탐지 소요 시간을 분석하는 한편, 오염 부대 규모와 제독 부대 규모에 따른 제독 소요 시간을 분석한다. 두 가지 모의 분석 사례를 통해, 이 모델을 이용하여 화학 방호 체계 및 운용개념에 대한 대안 및 효과 분석이 가능함을 확인하고, 후속 연구를 통해 지속적인 모델 검증과 보완이 이루어진다면 향후 미래 화학 전력의 소요 분석 및 전력 운용 분석을 위한 전투 모의 실험에도 활용할 수 있을 것으로 예상된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 화학 위험 대응 시뮬레이션을 위한 관련 기법들을 살펴본다. 3절에서는 화학 위험 대응 시뮬레이션에 요구되는 오염 확산 모의, 화학 피해 모의, 위험 탐지·정찰 및 제독 모의 기법을 제안한다. 이어서 4절에서는 화학 위험 대응 시뮬레이션 모델의 구현 결과를 설명하고 5절에서는 화학 위험 상황하에서 대응 정책별 화학 위험 감시 및 제독 운용 효과를 분석한다. 끝으로 6절에서는 연구 내용을 요약하고 향후 연구방향을 제시하면서 본 논문을 맺는다.

## 2. 관련 연구

이 절에서는 화학 위험 예측과 이에 대응하기 위한 국내의 시뮬레이션 기법 연구 사례에 대해 살펴본다.

국외 연구 사례는 다음과 같다. 미국에서 개발한 JOEF (Joint Operational Effect Federation)은 작전적 관점에서 화학방전 효과를 평가하기 위한 M&S(Modeling and Simulation) 분석 모델이다(Kwak, 2003). 이 모델은 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 화학방 위협에 의한 작전 수행 제한 요인을 분석하는 것은 물론 화학방 탐지 자산, 응급 처리 및 의료 자원의 효율적 배치를 도출한다. 또한 화학방 상황하에서 핵심 과업을 수행하는 부대의 화학방 보호 능력과 임무 수행 가능성을 평가하는데 사용된다. JOEF는 Smith(2005)에 나타난 바와 같이 화학방 오염 확산 예측 모델인 JEM(Joint Effects Model)로부터 전달받은 3차원 오염 확산 예측 결과를 공통 상황도에 농도 등고선으로 표현하고, 서로 다른 지점에 위치한 각 부대의 노출

량을 계산하여 화학방 전투 피해 평가를 수행한다. 이때 보호 장비 착용 여부, 집단 보호 시설 운용 여부, 제독 작전 수행 여부 등을 고려하여 작용제가 인원, 장비, 시설에 미치는 영향을 판단한다.

다음으로 미 해군대학원에서 개발한 화학방 오염 수송과 확산을 예측하는 모델인 CT-Analyst가 있다(Boris, 2004). 이 모델은 고해상도 3차원 유체 동역학 계산 모델인 FAST3D-CT을 통해 다양한 화학방 사건에 대한 오염 확산 결과를 계산한 다음(Pullen, 2005), 이를 노모그래프(Dispersion Nomographs)로 변환하여 데이터베이스에 저장해 둔다. 여기서 노모그래프는 특정 수학 함수에 대해 대략적인 계산을 할 수 있도록 설계된 이차원 다이어그램으로, 신속한 계산을 하는데 효과적이다. 따라서 이 방식은 오염 영역과 농도 분포를 재계산할 필요 없이, 화학방 사건에 해당하는 노모그래프 데이터를 선택하여 오염 운만 그리면 되므로, 매우 빠른 결과를 얻을 수 있다. 이 모델은 OneSAF와 연동하여 소규모 도시 환경에서 화학방 오염 확산을 모의하고 소부대 교전 상황하에서 화학방 위협에 의한 전투 피해를 예측하는 데 사용된 바 있다(Obenschain, 2007).

한편, 영국 국방과학기술연구소(DSTL: Defense Science and Technology Laboratory)는 CBR Virtual Battlespace를 개발하였다(Lloyd, 2014). 이 모델은 CT-Analyst와 비슷하게 합성 전장 환경에서 화학방 물질이 방출되었을 때 오염 물질의 수송과 확산을 시간대별로 예측할 수 있으며, 독성 데이터를 참조하여 인원이 작용제를 흡입하거나 피부를 통해 흡수되었을 때 입게 될 피해를 예측한다. 피해 예측을 할 때에는 보호 장비 착용 여부와 응급 처치 여부에 따라 사상자의 수를 달리 계산한다. 이 모델은 작전적 관점에서 화학방 효과 분석이 가능하다. 예를 들면, 탐지기 경보 시 보호 수단을 적용할 수 있는 인원의 비율, 화학방 보호 장비 착용에 의해 보호되는 인원의 비율, 의학적 예방 조치 및 사후 조치에 의해 보호되는 인원의 비율 등을 분석할 수 있다. CBR Virtual Battlespace는 타 모델과 연동하여 사용할 수 있는데, 화학방 위협 및 사상자 예측 결과를 OneSAF와 상용 전투 시뮬레이션 모델인 SWORD와 VBS2 등 전투 시뮬레이션 모델에 반영하면 개체/부대 단위 전투 모의는 물론 3차원 합성 전장 환경하에서의 화학방 훈련 환경 조성도 가능하다. 그뿐만 아니라, 화학방 지휘통제 체계인 CBRN BISA(Battlefield Information System Application)와 연계하면 화학방 상황 인식 및 정책 분석에 사용된다(Robins, 2005).

상용 소프트웨어로는 덴마크 브룬뉴텍사에서 개발한 화

생방 정보 관리 소프트웨어가 있다(Bruhn NewTech, 2018). 이 소프트웨어는 군에서 요구하는 화생방 보고 관리 기능을 제공하는 한편, 다양한 오염 확산 모델을 통해 예측된 오염 영역을 공통 상황도에 도시한다. 이 모델에서 지원하는 주요 오염 확산 모델로는 미국 국방위협감소국에서 개발한 HPAC(Hazard Prediction and Assessment Capability)(Chang, 2005), 네덜란드 TNO에서 개발한 HAPPIE, 덴마크 공대에서 개발한 작전용 지역 규모 퍼프 확산 모델인 RIMPUFF 모델(Thykie-Nielsen, 1999), 그리고 NATO의 화생방 위험 확산 예측 표준인 ATP-45(NATO, 2020)가 있다.

국내에도 유사한 연구 사례가 있다. 사전 연구 차원에서 화생방 전투 모의 개념을 제시하고, 여기에 요구되는 화생방 오염 예측 모델과 OneSAF를 연동하기 위한 인터페이스를 HLA/RTI(High Level Architecture/Run Time Infrastructure)를 기반으로 설계, 구현한 바 있다(Han, 2015). 연동 전에는 오염 영역이 원형으로 표현되면서 단일 농도 분포를 갖도록 모의되었으나, 연동 인터페이스를 사용했을 때에는 오염 영역이 다수의 정점을 갖는 윤곽선 형태로 나타나고 농도 분포도 다양하게 표현할 수 있었다. 다만, 이때 사용된 화생방 오염 예측 모델은 실제 현장에서 사용되는 모델이 아닌 시험용 모델이었다는 점에서, 유의미한 오염 확산 예측 및 전투 피해 평가에는 이르지 못하는 못하였다.

위에서 살펴본 바와 같이, 국외의 경우에는 화생 오염 확산은 물론 피해 예측과 위험 상황하에서 다양한 방책 분석을 시뮬레이션으로 수행하는 단계에 이른 반면, 국내의 경우에는 화생 오염 확산 모델 위주로 개발되어 화생 위험 대응 시뮬레이션 및 분석을 위해서는 추가 연구가 필요한 실정이다. 특히 화생 피해 예측 및 방책 분석과 관련된 기술은 통상 전략 물자로 분류되어 있어, 주요국에서는 기술 반출을 엄격히 통제하고 있는 실정이다. 이와 같은 상황하에서 국내 환경 조건을 반영한 오염 예측 모델과 시뮬레이션 모델을 연계하여 화생 위험 대응 시뮬레이션 모델 및 분석 기술을 확보하는 것이 요구된다.

이를 위해서는 다음과 같은 요구사항이 고려되어야 한다. 첫째, 신속한 오염 확산 모델이 필요하다. 개체 단위 시뮬레이션 모델은 초당 10회에서 100회에 이르는 매우 많은 양의 사건을 처리해야 한다. 따라서 오염운의 확산도 이러한 시간 간격에 맞춰 매우 빠르게 처리해야 한다. 그러나 기존 오염 확산 모델은 전산 유체 역학에 기반을 둔 정밀 분석 모델이 대부분이어서 개체 단위 시뮬레이션 모델에 적용하기가 어렵다. 이에 저충실도 오염 확산

모델을 구현하고 이를 시뮬레이션 모델에 적용해야 한다.

둘째, 화생 위험 대응 시뮬레이션 수행 시 요구되는 각종 장비와 과업 행위가 모의되어야 한다. 현재 위험 대응 시뮬레이션 모델은 정찰차, 제독차 모델을 제공하고 있고 정찰, 보호, 제독 과업을 개략적으로 모의하고 있으나, 우리나라에서 운용하고 있는 화생 위험 대응 장비는 물론 각종 교범에 나와 있는 화생 상황 대응 행동 요령과도 맞지 않는 실정이다. 따라서 우리나라의 상황을 반영하여 적절한 화생 대응 인원·장비 모델 및 정찰·제독 과업 모델을 개발해야 한다.

셋째, 시뮬레이션 모델이 오염 확산 모델의 예측 결과를 반영하여 화생 작용제에 의한 오염 확산과 농도 변화를 묘사하도록 하고, 화생 취약성 데이터를 반영하여 인원·장비의 오염·피해를 판정해야 한다. 이를 위해서는 시뮬레이션 모델에서는 다중 윤곽선 방식으로 오염 확산 및 농도 변화를 시간 단위로 묘사하며, 인원·장비의 취약성 데이터는 검증된 실험데이터 및 군의 위계급 무기 효과 데이터를 참고하여 구축해야 한다.

### 3. 화생 위험 대응 모의

이 절에서는 화생 위험 발생 시 피해 평가 및 대응책을 모의할 수 있는 기법을 제시한다. 이를 위해 오염 확산, 화생 피해 평가, 화생 탐지·정찰 및 보고, 제독, 보호 장비의 수명과 작용제에 의한 인명 피해를 모의하는 방법을 설명한다. 제안하는 기법은 오염 확산에 따른 피해 예측을 위해 별도의 오염 확산 모델과 시뮬레이션 모델을 연동하도록 설계된다. 화생 위험 대응 시뮬레이션 모델의 실행 순서는 다음과 같다. 사용자는 시뮬레이션 모델에 화생 사건을 포함하는 위험 시나리오를 입력한 후, 시뮬레이션을 시작한다. 시뮬레이션 실행 중 화생 사건이 발생하면 사건 정보를 오염 확산 모델로 전송한다. 오염 확산 모델은 오염 확산을 예측하고, 오염 영역과 농도 분포 계산 결과를 시뮬레이션 모델에 다시 전달한다. 시뮬레이션 모델은 오염 영역과 농도 분포를 화면에 전시한다. 또한 오염 확산에 따른 피해 평가를 실시하는 한편, 정찰, 보호, 제독 등 화생 위험 대책 실시를 모의한다. 이와 같은 절차를 반복 수행하고, 시나리오 수행이 모두 완료되면 시뮬레이션을 마친다.

#### 3.1 오염원 모의

화생 사건은 시뮬레이션 모델의 시나리오 편집 창에서 정의된다. 사용자는 특정 시간과 특정 위치에 화생 오염



운을 생성하도록 입력하고, 이의 세부 인자로 작용제 종류, 초기 농도, 초기 위치 등을 함께 입력한다. 기온, 풍향, 풍속 등은 시나리오 입력 초기에 주어진다. 시뮬레이션이 실행되면 계획된 시간에 오염운이 생성된다. 시간이 흐름에 따라 기온, 풍향, 풍속에 따른 오염운이 확산되는데, 고층실도 화재 오염 확산 모델은 오염 영역과 농도 분포의 변화를 예측해야 한다. 이를 위해 시뮬레이션 모델은 작용제 종류, 초기 농도, 초기 위치와 같은 화재 사건 정보를 연동 인터페이스를 통해 고층실도 화재 오염 확산 모델에게 통보한다. 연동 인터페이스는 고층실도 화재 오염 확산 모델과 시뮬레이션 모델을 연동하여 상호간에 데이터를 주고받을 수 있도록 공통 데이터 포맷과 데이터 송수신 규약을 구현한다. 전달되는 화재 사건 정보는 Table 1과 같다.

**Table 1.** Data representation of a CBRN strike event

	Variable	Unit
Threat	Speed of the Spray Device	meters/second
	Altitude of the Spray Device	meter
	Agent Mass	gram
	Initial Size of CBRN Cloud	meter
	Mean Diameter of Particles	$\mu\text{m}$
	Variance of Particles	$\mu\text{m}^2$
	Agent Name	-
	Start Time	sec
	End Time	sec
	NBC Strike Longitude	-
	NBC Strike Latitude	-
Weather Condition	Wind Speed	meters/second
	Wind Direction	degree
	Temperature	$^{\circ}\text{C}$

### 3.2 화재 오염 확산 모의

고층실도 화재 오염 확산 모델은 연동 인터페이스를 통해 시뮬레이션 모델로부터 화재 사건을 통보받고, 작용제 물성 및 지형과 기상 요인을 고려하여 오염운의 형상과 농도 변화를 계산한다.

시뮬레이션 모델과 달리 고층실도 화재 오염 확산 모델은 다중 물리 지배 방정식을 전산 모의하여 화재 사건 발생지역의 난류, 유동장, 오염 확산 분포를 계산하는 공학 모델로서 다음과 같은 지배 방정식을 수치 해석한다.

평탄한 지형에서 기상 변수의 연직 분포를 Monin-Obukohov 상사이론을 가정하여 평균 풍속의 연직 분포

는 다음 식으로 주어진다(Foken, 2016).

$$\begin{aligned}
 u(z) &= U_c(z) & (z \leq H_c) \\
 u(z) &= \frac{u_*}{k} [\ln(z/z_0) - \psi_m(z/L) + \psi_m(z_0/L)] \\
 & & (H_c \leq z \leq z_i) \\
 u(z) &= u(z_i) & (z \geq z_i)
 \end{aligned}$$

여기서  $z$ 와  $z_0$ 는 각각 연직 고도, 표면 거칠기 길이이며,  $H_c$ 와  $z_i$ 는 각각 수목 또는 건물과 같은 캐노피 높이와 대기 혼합고이다.  $u_*$ 와  $L$ 은 각각 마찰속도와 Monin-Obukohov 길이이다.  $\psi_m$ 은 대기 안정도에 의한 풍속 분포 변화를 반영하기 위한 함수이다.

이를 바탕으로 대기 안정도에 따른 평탄 지형에서의 풍속 연직 분포를 계산하고 지형에 따른 연직 풍속 변화를 아래의 식을 이용하여 계산한다. 복잡한 지형에 대해서는 지형을 따라 굽은 연직 좌표의 모델 좌표계를 사용한다.

$$z = z_p - h_T$$

여기서  $z$ 는 지형을 따라 굽은 연직 좌표의 모델 좌표계(m),  $z_p$ 는 직교 좌표계(m),  $h_T$ 는 지형 해발 고도(m)이다. 모델 좌표계에서 연직 풍속  $w$ 은 다음과 같다.

$$w = w_p - u \frac{\partial h_T}{\partial x} - v \frac{\partial h_T}{\partial y}$$

$w_p$ 는 직교 좌표계에서의 연직 풍속(m/s),  $u$ ,  $v$ 는 속도 벡터의 동서 및 남북방향 수평 성분이다.

지형에 의한 3차원 유동장을 모의하기 위해 고층실도 화재 오염 확산 모델은 운동학적 효과, 산곡풍, 지형에 의한 차단 효과를 계산하고 지형 효과가 반영된 바람장의 발산이 0에 가깝도록 발산을 최소화한다.

초기 오염운은 위의 과정으로 시간에 따라 모의된 평균 속도장에 의해서 이동하고 오염운의 크기는 난류 속도장과 시간의 함수로 성장한다. 펄(puff)의 크기는 다음 식으로 표현된다.

$$\frac{d\sigma_y^2}{dt} = 2\sigma_y^2 T_{Lu} [1 - \exp(-t/T_{Lu})]$$

$\sigma_y^2$ 는 펄의 크기( $\text{m}^2$ ),  $T_{Lu}$ 는 수평방향 라그랑지안 시

간 척도이다. 오염원의 농도 및 분포는 시간에 따라 이동, 확산, 증발, 침적 수치모의 과정을 거쳐 변화하게 된다.

시뮬레이션 모델로부터 화재 사건을 전달받은 고층실도 화재 오염 확산 모델은 시뮬레이션 모델이 요구하는 연산 마감 시간을 충족시키기 위해 화재 사건 발생 지역의 오염 영역 및 농도 분포를 빠르게 계산하여야 한다. 따라서 고속연산을 위해 고층실도 오염 확산 모델의 연산 시간을 결정하는 주요 파라미터인 전체 계산영역, 격자 간격, 펌 입자 개수 등을 전달받은 화재 사건에 맞도록 자동 설정한다. 모델링 파라미터가 결정되면 통보 받은 화재 사건에 가장 부합되는 지배 방정식 파라미터 및 필요 데이터의 기본 값을 생성하고 이를 토대로 고층실도 화재 오염 확산 모델은 3차원 기상장과 오염 영역 및 농도 분포를 산출한다. 이때 오염원이 복잡 구조 건물 지형인 시가지 내에 위치하면 시가지 CFD(Computational Fluid Dynamics) 모델이나 MPM(Morphological Method) 기상모델을 적용하고 그렇지 않으면 광역 기상모델을 적용하여 시간에 따른 3차원 평균 풍속 및 난류장 및 기온장과 오염원의 위치 및 크기 변화를 계산하여 그 결과를 전투 시뮬레이션 모델에 최적화된 다중 윤곽선 형태로 전달한다.

위의 과정을 거쳐 산출된 오염 확산 예측 결과는 시간 흐름에 따라 달라진다. 자세히 설명하면, 오염원은 일정한 오염농도를 갖는 다중 윤곽선들의 집합으로 정의된다. 다중 윤곽선은 오염 영역을 이루는 복수의 점으로 구성되기 때문에 복잡한 형상을 갖는 오염 영역을 표현할 수 있다. 오염원은 기상 조건의 영향에 따라 확산되기 때문에, 화재 사건 발생 시점으로부터 경과 시간에 따라 그 형상과 농도가 달라진다. 따라서 오염은 시간흐름에 따라 달리 정의된다. 여기에서는 이와 같은 오염 확산 예측 결과를 오염 영역 및 농도 분포라고 부른다.

시뮬레이션 모델은 연동 인터페이스를 통해 고층실도 화재 오염 확산 모델로부터 시간흐름에 따른 오염 영역 및 농도 분포 데이터를 수신한다. 시뮬레이션 모델은 수신된 데이터를 적용하여 오염원을 전시하고, 오염원의 영향을 받는 개체를 오염 노출 판단 알고리즘을 활용하여 식별한 후, 오염에 노출된 개체에 대해 화재 피해모의를 실시한다.

오염 노출 판정 알고리즘은 다음과 같다. 오염원은 복수의 오염 영역의 집합  $A$ 로 정의된다. 오염원 안에 위치한 인원과 차량 개체들을 집합  $E$ 로 정의한다. 집합  $A$ 에 속한 농도가 가장 높은 오염 영역을  $a^{(max)}$ 라고 정의한다.

집합  $E$ 에 속한 임의의 개체  $e$ 의 좌표를  $P_e$ 로 정의한다. 좌표  $P_e$ 가  $a^{(max)}$ 에 포함되고 섭취량이 임계치보다 크거나 같으면 오염된 개체로 판정한다. 오염된 개체는 집합  $E$ 에서 삭제된다. 위와 같은 순서를 반복하면 가장 높은 오염 영역 내에 있는 개체들을 오염 여부를 판정받고 집합  $E$ 에서 모두 삭제된다. 집합  $E$ 가 공집합이 되면 집합  $A$ 에서  $a^{(max)}$ 를 삭제한 후 다음 오염 영역으로 넘어간다. 이와 같은 방법으로 모든 오염 영역을 조사하여 오염 개체를 판정한다.

### 3.3 화학 피해 모의

다음으로 화학 작용제에 의한 인원 피해를 모의한다. 화학 위협에 인원이 노출되었을 때 흡입량이 작용제 종류와 임무형 보호 태세를 고려한 치사량보다 클 경우, 해당 인원은 무력화되도록 모의한다. 화학 작용제 흡입에 의한 인원 무력화 모의는 나토 표준 AMedP-7.5-1에 기술된 화학 작용제에 의한 사상자 예측 기법을 참고하여, 개체단위 전투 피해를 모의할 수 있도록 개선한다(Oxford, 2018). 현 단계에서는 화학 작용제를 흡입했을 때 발생하는 인원의 불능화 및 사망 여부를 판단하며, 피부 접촉에 의한 화학 작용제 노출로 발생하는 피해는 모의하지 않는다. 세부적인 방법은 다음과 같다.

매분마다 각 인원의 노출량  $X^{eff}$ 를 계산한다. 시간  $t_k$ 부터 시간  $t_{k-1}$ 까지의 구간 동안 증가된 노출량을 계산하고, 이를 전체 노출 기간으로 합산하여 노출량을 계산한다. 여기서  $t_k$ 는 매분으로 한다.  $X^{eff}$ 의 단위는  $mg\cdot min/m^3$ 이다.

$$X^{eff} = \sum_{k=1}^f \frac{(X_{t_k} - X_{t_{k-1}})Z_{t_{k-1}}}{APF_{t_{k-1}}}$$

여기서  $Z_{t_{k-1}}$ 는 시간  $t_{k-1}$ 일 때 분당 호흡량이다. 이 값은 활동량이 적을 때는 1을 적용하고, 보통인 경우에는 2를, 매우 높은 경우에는 5를 적용한다. 기본값은 1이다.

$APF_{t_{k-1}}$ 는 보호계수이다. 예를 들어 방독면과 보호의를 착용하거나 양압 장치가 가동되는 쉘터 안에 있는 경우에는 이 값을 100,000으로 적용하며, 그렇지 않은 경우에는 1을 적용한다.

각 인원의 노출량  $X^{eff}$ 이 산출되면, 부상 확률을 계산해야 한다. 부상 확률은 부상 정도(ISL: Injury Severity

Level)로 구분하여 계산한다. 이때 부상 정도에 따른 독성 특성값 자료를 참조한다. 예를 들어, 특정 화학 작용제의 독성 특성값은 Table 2와 같다. 부상 1단계는 경미한 부상이며, 단계가 높아질수록 심각한 부상이 된다. 제안하는 모델에서는 부상 정도가 3단계 이상일 때, 해당 인원은 불능화된 것으로 가정한다. 만약 부상 정도가 4단계에 이를 경우, 치료를 받지 못한 상태에서 사망에 이르는 시간은 15분으로 가정한다.

**Table 2.** An example of toxic parameters and symptom (Oxford, 2018)

Injury Severity Level	ECt50 [mg-min/m <sup>3</sup> ]	Probit Slope [probits/log <sub>10</sub> (dose)]
1	0.04	4.5
2	0.36	12.0
3	9.00	12.0
4	12.00	12.0

해당 작용제로 인하여 인원이 증상을 보일 확률  $p$ 는 다음과 같이 계산한다.

$$p = \Phi\left( ps \log_{10} \frac{X^{\text{eff}}}{\text{ECt}_{50}} \right) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \text{erf} \left( \frac{ps}{\sqrt{2}} \log_{10} \frac{X^{\text{eff}}}{\text{ECt}_{50}} \right)$$

여기서  $\Phi$ 는 대수 정규 누적 분포 함수이고,  $ps$ 는 부상 정도에 따른 유효 중간 노출 시간(50% effective concentration time)에 대한 프로비트 기울기(probit slope)이다.

예를 들어 특정 인원이 같은 화학 작용제에 11.0mg-min/m<sup>3</sup>만큼 노출되었을 때, 부상 정도를 계산해보자. 먼저 1단계에 해당하는 경미한 부상 또는 그보다 심각한 부상을 입을 확률  $p_{vx}^{(1)}$ 는 다음과 같다.

$$p_{vx}^{(1)} = \Phi\left( 4.5 \log_{10} \frac{11.00}{0.04} \right) = 1.00$$

같은 방식으로 2~4단계에 해당하는 부상을 입거나 그보다 심각한 부상을 입을 확률을 각각 계산하면,  $p_{vx}^{(2)} = 1.00$ ,  $p_{vx}^{(3)} \approx 0.85$ ,  $p_{vx}^{(4)} \approx 0.33$ 이 산출된다. 최종적으로 계산된  $p_{vx}^{(1)}$ 부터  $p_{vx}^{(4)}$ 에 이르는 확률값을 이용하

여, 1~4단계에 해당하는 부상 확률  $p_{vx}^{ISL_1}$ ,  $p_{vx}^{ISL_2}$ ,  $p_{vx}^{ISL_3}$ ,  $p_{vx}^{ISL_4}$ 을 구하면 다음과 같다.

$$p_{vx}^{ISL_1} = p_{vx}^{(1)} - p_{vx}^{(2)} = 0.00$$

$$p_{vx}^{ISL_2} = p_{vx}^{(2)} - p_{vx}^{(3)} \approx 0.15$$

$$p_{vx}^{ISL_3} = p_{vx}^{(3)} - p_{vx}^{(4)} \approx 0.53$$

$$p_{vx}^{ISL_4} = p_{vx}^{(4)} \approx 0.33$$

결과적으로 해당 인원은 부상 확률이 가장 높은 3단계 부상에 해당된다. 따라서 해당 인원은 불능화 상태에 빠진다. 다만, Table 3과 같이 1,000분이 지난 후에는 2단계 부상으로 경감되어 임무 수행이 가능한 상태로 회복된다.

위와 같은 방법으로 해당 인원이 같은 작용제에 24.0 mg-min/m<sup>3</sup>만큼 노출되었을 때, 1단계 부상 확률은 0%, 2단계 부상 확률은 0%, 3단계 부상 확률은 0.02%, 4단계 부상 확률은 99.98%이다. 결론적으로 이 해당 인원은 4단계 부상에 해당되며 15분 뒤에 사망한다.

**Table 3.** Injury severity levels over time exposed to a certain chemical agent(Oxford, 2018)

Time Point (minutes)	ISL 1	ISL 2	ISL 3	ISL 4
1	0	2	3	4
3	1	2	3	4
15	1	2	3	4
150	0	2	3	-
1000	0	2	2	-
1940	0	1	2	-
8640	0	1	1	-

### 3.4 생물 피해 모의

이 절에서는 생물 위험에 의한 개체의 피해를 모의한다. 나토 표준 AMedP-7.5-1의 생물 작용제에 의한 사상자 예측 기법을 반영하여 전투 모의 모델에서 생물 작용제에 의해 발생하는 인원의 불능화 및 사망 여부를 판단한다. 이 표준 문서에 따르면 제시된 방법은 인구 통계 자료를 기반으로 집단 사상자를 예측하기 위한 것이므로 개별 인원에 대한 피해 예측 시에는 적용이 제한된다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 개별 인원에 대한 생물

피해를 제한적인 범위 내에서 예측할 수 있는 OneSAF 국제판의 생물 피해 논리(Wittman, 2001; Thomas, 2004)와 AMedP-7.5-1의 데이터를 결합하여 다음과 같은 제한 조건하에서 피해 평가를 수행한다. 첫째, 전염은 고려하지 않고, 오직 비전염성 피해만 모의한다. 둘째, 의학적 치료에 의한 생물 피해 완화는 모델링하지 않는다. 셋째, 감염된 모든 사람은 증상이 나타난다고 간주하며 무증상 감염은 무시한다.

기본적으로 OneSAF 국제판의 생물 위협에 의한 인원 참조하여 개별 인원의 피해를 판단한다. 다만, 여기에 사용되는 데이터가 정교하지 않아, 이 부분을 AMedP-7.5-1 표준 문서에서 제공하는 잠복 기간과 활동 기간의 확률 분포, 환자 사망률 데이터를 반영할 수 있도록 모의논리를 아래와 같이 개선한다.

전투원이 작용제에 감염되었다는 전제하에 전투원의 피해 상태를 결정한다. 전투원의 생물학 작용제에 대한 최초 접촉 시간  $t$ 를 0으로 정한다. 첫째, 작용제의 2)잠복 기간을 예측한다. 둘째, 작용제의 3)활동 기간을 예측한다. 마지막으로, 환자 사망률과 0과 1 사이의 범위를 갖는 균일 분포 함수를 따르는 난수를 비교하여 전투원의 사망 여부를 판단한다.

작용제에 따른 잠복 기간  $t_{inc}$ , 활동 기간  $t_{act}^{stg_1}$ ,  $t_{act}^{stg_2}$ , 환자 사망률(CFR: Case Fatality Rate)을 정한다. 여기서  $t_{act}^{stg_1}$ 은 부상 정도가 낮고 임무 수행이 가능한 기간이고,  $t_{act}^{stg_2}$ 는 부상 정도가 높고 불능화 상태에 빠지는 기간이다. 잠복 기간  $t_{inc}$ 는 아래 공식을 이용하여 계산한다. 여기서  $\mu$ 는 평균 잠복 기간(단위: 일),  $\sigma$ 는 표준편차(단위: 일)이다. 잠복기는  $t=0$ 부터  $t_{inc}$ 까지이다.

$$t_{inc} = \ln N(\mu, \sigma^2)$$

Stage 1에 해당하는 활동기는  $t_{inc}$ 부터  $t_{act}^{stg_1}$ 까지이다. Stage 1에서 개인은 작용제에 의한 징후만 느낄 뿐 임무 수행에는 영향을 받지 않는다고 가정한다.  $t_{act}^{stg_1}$ 은 로그 정규 분포 공식을 이용하여 계산한다. 여기서  $\mu$ 는 Stage 1의 평균 활동 기간(일),  $\sigma$ 는 표준편차(일)이다. 다음으로 Stage 2에 해당하는 활동기는  $t_{act}^{stg_1}$ 부터  $t_{act}^{stg_2}$ 까지이다. Stage 2에서 개인은 불능화 상태에 빠진다고 가정한다.  $t_{act}^{stg_2}$ 는 로그 정규 분포 공식을 이용하여 계산한다. Stage

- 2) 전투원이 작용제에 감염되었으나, 감염된 것으로 인식하지 못하는 기간
- 3) 전투원이 작용제로 인한 증상을 느끼는 기간

2가 끝나면, 균일 분포를 따르는 난수  $x$ 가 환자 사망률보다 작다면 Stage 2 단계에 머물고, 그렇지 않다면 사망하도록 모의한다. 예를 들어 인원이 특정 생물 작용제에 노출되었다고 가정한다. 어떠한 의학적 치료도 받지 못한 상태에서 해당 인원의 상태 변화는 Fig. 1과 같이 모의된다.

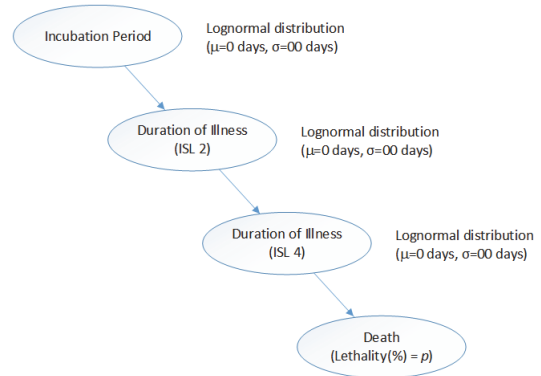


Fig. 1. An example of state transition diagram of untreated non-survivors

이 작용제에 노출되었을 때 활동 기간은 Table 4와 같이 흡입량의 범위에 따라 활동 기간의 분포가 달라진다. 잠복 기간  $t_{inc}$ 는 로그 정규 분포를 따르는 임의의 수로 결정되며, 흡입량에 따라  $\mu$ 와  $\sigma$ 가 달리 정해진다.

Table 4. An example of incubation period when exposed to specific biological agent(Oxford, 2018)

Dose Range (spores)	Mean (days)	Standard Deviation (days)
$X^{eff} \leq 10^2$	9.36	6.74
$10^2 < X^{eff} \leq 10^3$	7.34	4.52
$10^3 < X^{eff} \leq 10^4$	5.52	2.86
$10^4 < X^{eff} \leq 10^5$	3.86	1.65
$10^5 < X^{eff} \leq 10^6$	2.32	0.79
$10^6 < X^{eff} \leq 10^7$	0.88	0.22
$10^7 < X^{eff} \leq 10^8$	0.46	0.10

Table 5. An example of duration of illness by injury severity level when exposed to specific biological agent(Oxford, 2018)

Stage	Mean (days)	Standard Deviation (days)
Stage 1	4.2	2.3
Stage 2	0.70	0.74



**Table 6.** Characteristics data of chemical sensors

Sensor	Detection FOV (deg)	Detection Range (km)	Agent Name	Airborne		Ground	
				Sensor Response Time (sec)	Detection Threshold (mg/m <sup>3</sup> )	Sensor Response Time (sec)	Detection Threshold (mg/m <sup>2</sup> )
Sensor Type-I	-	-	Chemical Agent-1	-	-	00	0
	-	-	Chemical Agent-2	-	-	00	0
Sensor Type-II	-	-	Chemical Agent-1	000	0.0	-	-
	-	-	Chemical Agent-2	-	-	00	0
Sensor Type-III	00	0.0	Chemical Agent-1	00	0.0	-	-
	00	0.0	Chemical Agent-2	00	0.0	-	-

같은 방법으로 Stage 1 활동 기간  $t_{act}^{stg_1}$  와 Stage 2 활동 기간  $t_{act}^{stg_2}$  는 로그 정규 분포를 따르는 난수를 발생시켜 정한다. 로그 정규 분포에서 고려하는 매개변수의 예시는 Table 5와 같다. 여기서 Stage 1과 Stage 2가 의미하는 것은 작용제마다 달리 정의된다. 이 작용제의 경우에는 Stage 1을 ISL 2로 정의하고 Stage 2를 ISL 4로 정한다. ISL 4 상태, 다시 말해 4단계 부상에 이르면, 해당 인원은 15분 후에 주어진 환자 사망률에 따라 사망하며 환자 사망률은 100%라고 가정한다.

### 3.5 화학 오염 탐지 및 정찰 모의

화학 탐지는 탐지기를 이용하여 오염 여부를 확인하는 행위로서, 탐지기를 이용하여 오염을 탐지하면 그 즉시 탐지 보고를 수행하도록 모의한다.

화학 탐지기는 접촉식 탐지기와 비접촉식 탐지기로 구분하여 모의한다. 비접촉식 탐지기의 경우에는 탐지기 제원값을 참조하여 탐지 각도를 설정하고, 접촉식 탐지기의 경우에는 탐지 각도를 360도로 설정한다. 탐지 각도 내에 오염이 존재하면 Table 6에 제시된 바와 같이 작용제별 최소 탐지 농도를 고려하여 경보 여부를 판단하고, 작용제별 탐지기 반응시간을 고려하고 경보 시간을 계산한다. 만약 오염을 탐지하였다면, 인원은 탐지 보고를 한다.

화학 오염 탐지를 모의하기 위해, 탐지기의 작용제 탐지 여부 및 경보할 때까지의 소요 시간을 반영한다. 탐지 보고를 수신하면, 화학 위험 대응 요원을 투입하여 정찰을 실시한다. 대응 요원은 차량 또는 도보로 예상 오염 지점 또는 경로를 따라 이동하고 최초 오염 발견 시 통신 수단을 통해 정찰 보고를 한다. 정찰 과정 중에 계속 정찰 보고를 실시하고, 정찰을 종료하면 최종적으로 정찰 완료 보고를 실시한다.

화학 정찰은 탐지기를 이용하여 오염 여부를 확인하는 행위로서, 탐지기를 이용하여 오염을 탐지하면 그 즉시 탐지 보고를 수행하도록 모의한다. 여러 가지 정찰 기법 중에서 상자형 정찰 모의 방안을 설명한다. 상자형 정찰은 지상에서 오염 지점을 탐색하고, 오염이 발견되면 상자 형태로 이동하면서 오염의 경계를 파악하고 측정하는 행위이다. 이 과정은 하나의 지점, 통로, 지역을 정찰하여 오염에 대한 정보를 찾기 위해 수행된다. 또한 최초 오염 탐지 시 오염 영역의 경계를 파악한다. 정찰 목표의 종점에 도달한 후 정찰 임무 시작 원점으로 복귀했을 때 과정이 종료된다.

정찰 부대 또는 개체는 현 위치에서 지정된 통로의 시작점으로 이동하며, 만약 초기 경로가 지정된다면 지정된 초기 경로를 통해 이동한다. 만약 초기 경로가 주어지지 않는다면, 수행 부대 또는 개체는 현 위치에서 지정된 정찰 통로의 시작점까지 최단 거리 도로를 따라 이동한다.

정찰 영역은 일반적으로 부정형으로 지정된다. 빈틈없이 정찰하기 위해 정찰 영역을 둘러싸는 가장 작은 크기의 2차원 도형을 만들고, 도형의 경계선 인근 지역에서 부대 또는 개체가 정찰을 실시하도록 한다. 세부 절차는 다음과 같다.

- ① 초기 오염 지점에서 지정된 주기마다 샘플링하면서 기존 방향을 따라 이동한다. 즉 예상 오염 지역 방향으로 직진하면서 정찰을 하며 탐지하지 못할 때에는 탐지할 때까지 직진한다. 직진하다가 작용제가 탐지되면 오염 표지판을 설치한다.
- ② 90도 우회전하여 일정 구간을 직진한다. 만약 오염을 탐지하지 않으면 90도 좌회전하여 일정 구간을 직진한다.
- ③ ②번 과정을 오염 지역 면적이 결정되는 마지막 정찰기점까지 반복한다.

- ④ 이 결과로 산출되는 오염 샘플 지도는 오염의 크기를 나타낸다.
- ⑤ 최초 정찰 위치로 돌아오면 오염 외곽 지역의 좌표 및 탐지시간, 작용제 종류 등을 보고한다.

### 3.6 화생 보호 모의

화생 보호 과업은 오염 발생 또는 오염이 예상될 때, 인원의 생존성을 보장하기 위해 임무형 보호 태세(MOPP: Mission-oriented Protection Posture)를 취하도록 모의하는 행위이다. 화생 보고가 접수되면 인원의 생존성 보장을 위해 임무형 보호 태세를 취하도록 지시한다. MOPP 메시지를 무전기를 통해 인원들에게 전달한다. 이 메시지에는 MOPP 단계가 수록된다. MOPP 메시지를 수신하면, 해당 인원은 MOPP 단계에 따른 보호 장비를 착용하는데, 보호 장비 착용 시간은 주어진 데이터를 참조하여 모의한다. 만약 보호 장비를 휴대하지 않았다면 MOPP 단계는 변경하지 않는다. 만약 보호 장비 교체시기가 도래했다면, 방독면에 장착하는 정화통 등 보호 장비를 자동 교체하도록 모의한다.

만약 MOPP가 적용된다면, 과업 수행 간 능률 저하를 모의해야 한다. MOPP 4단계가 적용되면, 방독면과 보호의 등을 착용해야 하는데, 이로 인해 이동 속도와 방재 작업 속도 등 임무 수행 능률이 낮아지게 된다. 이를 모의하기 위해, MOPP 4단계 적용 시 이동 속도와 작업 속도를 제한하도록 모의한다. 이동 속도  $v$ 는 최대 이동 속도  $v_{max}$ 에 능률 저하 계수  $r$ 를 곱하여 산출하고, 작업 속도  $w$ 는 최대 작업 속도  $w_{max}$ 에 능률 저하 계수  $r$ 를 곱하여 산출한다. 능률 저하 계수는 사전에 주어진다.

### 3.7 화생 제독 모의

화생 제독 과업은 오염된 인원과 장비를 제독하기 위한 행위이다. 제독 물자를 배치하는 제독소 설치 과업과 오염된 개체를 제독하는 제독 과업으로 나뉜다. 제독소 설치과업은 주어진 구역에 인체 제독소와 장비 제독소를 설치하고 각 제독소에 배치되어야 할 제독 물자를 적재하도록 모의된다. 제독 요원은 미리 계획된 인체 제독소와 장비 제독소 구역으로 이동한 후, 인체 제독소와 장비 제독소의 경계선으로 전개한다. 제독 차량은 인체 제독소와 장비 제독소에 제독 물자를 적재한 다음, 제독소 설치 완료 보고를 수행한다.

다음으로 제독과업은 제독 요원들이 오염 인원·장비 집결지, 인체 제독소, 장비 제독소, 제독 인원·장비 집결지로 전개한 후, 제독 준비 완료 보고를 수행함으로써 시

작된다. 오염 인원·장비가 오염 인원·장비 집결지에 도착하면, 오염 차량은 장비 제독소로 이동하고, 오염 인원은 인체 제독소로 이동한다. 오염된 차량과 인원은 각각 세척과 보호 물자 교환을 실시하는데, 오염 인원·장비별 제독 및 세척 소요 시간표를 참조하여 오염 인원과 장비의 제독시간을 계산하고, Table 7을 참조하여 물, 제독제, 보호 장비 소요량을 계산한다. 제독이 완료된 인원과 장비는 제독 인원·장비 집결지로 이동하여 상황 보고를 한다. 제독 요원들은 제독 임무 완료 후 완료 보고를 한다.

**Table 7.** Chemical protective suite, water, and decontaminant requirements

	Personnel	Vehicle Type-I	Vehicle Type-II	Vehicle Type-III
Chemical Protective Suite	0	-	-	-
Water (l)	00	00	000	000
Decontaminant (l)	-	0.0	0.0	0.0

## 4. 구현 결과

앞서 설계한 모델링 요소를 리눅스에서 자바 코드로 구현하고, OneSAF 국제판에 구현된 코드를 적용하여 실행 가능성을 탐색한다.

### 4.1 오염 확산 모의 결과

이 절에서는 고층실도 화생 오염 확산 모델과 연동했을 때, 그리고 연동하지 않았을 때 전투 모의 모델상에서 오염 확산 모의 결과가 어떻게 달라지는지 비교하여 충실도 측면에서 얼마나 개선되었는지 살펴본다.

비교 실험을 위한 시나리오는 다음과 같다. 먼저 풍향과 풍속을 각각  $180^\circ$ ,  $10.0m/s$ 로 입력한다. 이 모델은 기온에 따른 오염 확산 효과는 모의하지 않는다. 사용자가 임의의 지점에 특정 작용제  $500kg$ 을 방출시킨다. 이와 같은 시나리오에서 OneSAF를 단독 운용했을 때 Fig. 2와 같은 결과를 얻었으며, OneSAF와 화생 오염 확산 모델을 연동하였을 때에는 Fig. 3과 같은 오염운 형상과 농도 분포를 얻었다. OneSAF를 단독 운용했을 때에는 오염운이 원형으로 발생되며 시간이 경과해도 그 형상과 농도는 변화하지 않았다. 반면, OneSAF와 화생 오염 확산 모델이 연동되었을 때는 오염운 내부에 서로 다른 농도를 갖는 복수의 다중 경계선이 불규칙하게 형성되었다. 또한

최초 원형으로 형성되었던 오염운은 바람에 의해 남쪽으로 이동하면서 오염 영역의 경계선도 함께 변화하였다. 이를 통해 OneSAF와 화재 오염 확산 모델이 연동되면 바람과 시간 경과에 따라 오염운의 형상과 농도가 변화함을 확인하였다.

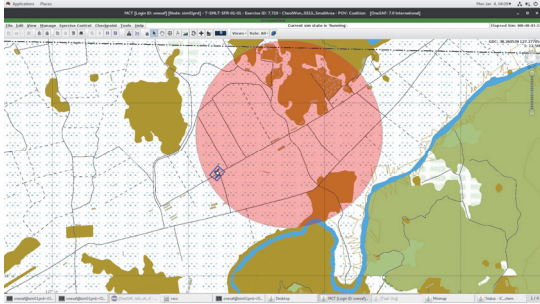


Fig. 2. The simulated results of NBC hazard dispersion when OneSAF is operated in stand-alone mode

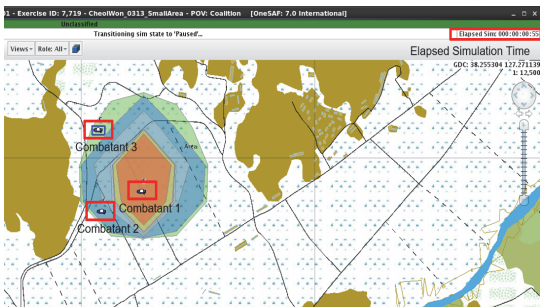


Fig. 3. The simulated results of NBC hazard dispersion when OneSAF and NBC-RAMS are inter-operated

#### 4.2 화학·생물 피해 모의 결과

다음은 화학 피해 모의 결과를 설명한다. Fig. 3에 보면, 인원이 화학 작용제에 의해 생성된 오염운에 노출된 것을 볼 수 있다. 이 인원의 속성 정보를 보면 Fig. 4에서 보이는 바와 같이, 이 인원의 속성 정보를 보면 Fig. 4에서 보이는 바와 같이, 오염 여부를 뜻하는 ‘Contaminated’와 부상 정도를 뜻하는 ‘Level 1’이 표시된다. 여기서 부상 정보를 나타내는 ‘Level 1’은 Table 2에 제시된 ISL 1과 같다.

화학 작용제에 인원이 노출되었을 때 각 부상 심각도에 이르는 시간은 Table 3에 수록된 시간을 참조하도록 되어 있다. 실험을 통해 확인한 결과, Table 8과 같이 특정 화학 작용제에 대해서 노출 시간과 노출량에 따라 단계별 부상 심각도가 정상적으로 나타남을 확인하였다.

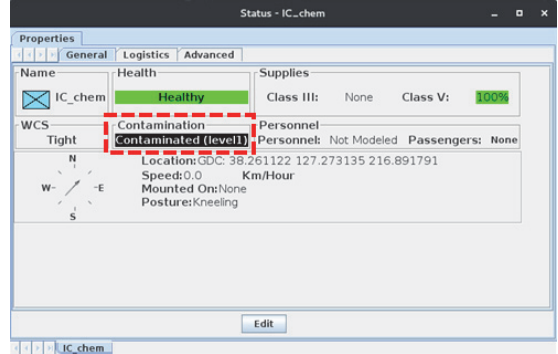


Fig. 4. The injury severity level of a personnel by the chemical agent

Table 8. A simulation result on the injury severity level by a chemical agent

Target	1 minute later		2 minutes later	
	Dose (mg-min/m <sup>3</sup> )	Injury Severity Level	Dose (mg-min/m <sup>3</sup> )	Injury Severity Level
Combatant 1	20.0	4	40.0	4
Combatant 2	0.5	2	1.0	2
Combatant 3	0.2	1	0.7	2

다음은 생물 피해 모의 결과를 설명한다. 화학 작용제와 마찬가지로, 생물 작용제에 오염된 인원은 오염 여부를 뜻하는 ‘Contaminated’, 부상 정도를 뜻하는 ‘Level’로 표시된다. 특정 생물 작용제에 인원이 노출되었을 때 각 부상 심각도에 이르는 시간을 실험을 통해 얻은 결과는 Table 9와 같이 정상적으로 나타남을 확인하였다.

Table 9. A simulation result on the time required to injure by a biological agent

Target	Incubation Period	Duration of Illness	Killed in Action
Combatant 1	9.36 days	4.2 days	Yes
Combatant 2	7.34 days	4.2 days	No
Combatant 3	5.52 days	4.2 days	Yes

#### 4.3 화재 정찰제독 모의 결과

다음으로 정찰 모의 결과를 설명한다. Fig. 5는 화재 정찰차가 오염 지역을 정찰하는 모습을 보여준다. 화재 정찰차가 지나간 자리에 ‘▽’ 표기가 된 것을 볼 수 있는데, 이는 오염 지역임을 표시한 깃발이다. 정찰 임무를 수

행하면서 표기된 연속된 깃발들은 오염원의 윤곽을 특정하는데 참고할 수 있다. 이와 같은 모의 실험을 통해 도로 정찰과 상자형 정찰을 수행하는 소요된 시간을 시물레이션 경과 시간을 통해 확인할 수 있다.

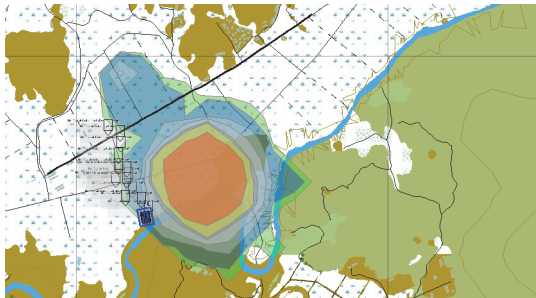


Fig. 5. A simulation result on NBC reconnaissance

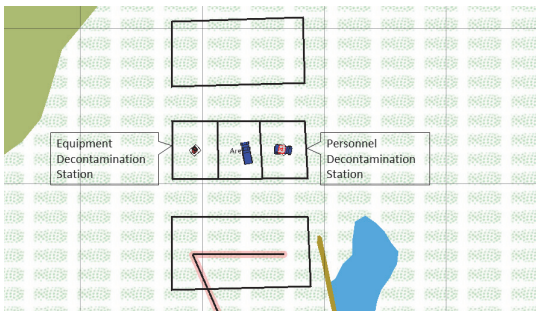


Fig. 6. A simulation result on NBC decontamination

다음으로 제독 모의 결과를 설명한다. Fig. 6은 제독소가 설치된 모습을 보여준다. 그림 하단의 직사각형은 제독 전 집결지이고, 상단의 직사각형은 제독 후 집결지이다. 그림 가운데 좌측의 직사각형은 장비 제독소이고 우측은 인체 제독소이다. 장비 제독소와 인체 제독소에는 제독 물자가 적하된 모습을 볼 수 있는데, 제독을 수행함에 따라 제독 물자를 사용하여 그 수량이 감소하도록 모의됨을 확인하였다. Table 10은 상기 제독소 설치 및 운용 과업 모의를 통해 장비 제독과 인원 제독에 소요된 시간을 측정하는 것이다.

다음으로 제독 물자 소요량을 확인할 수 있다. Table 11에 제시된 바와 같이, 모의 결과로부터 장비 제독에 필요한 물 소요량과 수용성 제독제 소요량을 계산할 수 있으며, 인원 제독에 필요한 보호의, 물, 화학 치료 장비, 개인제독제 등 제독 물자 소요량을 계산할 수 있음을 확인하였다.

Table 10. A simulation result on the decontamination time

Decontamination type	Starting time (HH:MM)	Completion time (HH:MM)	Response time to decontamination (MM)
Vehicles decontamination	01:23	01:46	23
Personnel decontamination	01:27	01:44	17

Table 11. The required amount of decontaminant

Entity	Decontaminant	Initial quantity	Consumed quantity	Residual quantity
Vehicles	Water (l)	5460	1540	3920
	Water-soluble decontaminant (l)	3600	187	3413
Personnel	Chemical suits (EA)	1500	8	1492
	Water (l)	5940	280	5660
	Chimerical treatment equipment (EA)	1500	8	1492
	Self-decontamination kit (EA)	1500	8	1492

끝으로 지역 제독은 오염원이 지나간 자리에 침적된 액체 작용제를 제독하는 행위이다. Fig. 7에 표시된 바와 같이 오염된 도로를 따라 제독차가 지역 제독을 실시하면 침적된 작용제를 제거할 수 있음을 확인하였다.

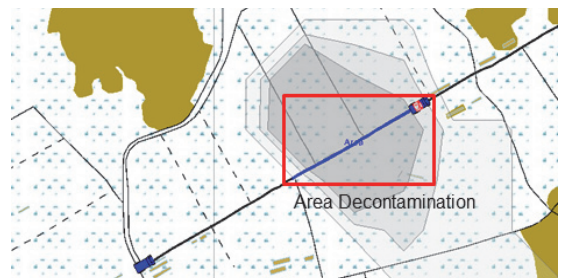


Fig. 7. A simulation result on area decontamination

## 5. 모의 실험 및 분석

이 절에서는 개발된 모델을 이용하여 화생 감시소 운용 효과와 화생 제독 효과를 분석한다.

### 5.1 화생 감시소 운용 모의 실험 및 결과

첫 번째 실험에서는 화생 감시소 운용 효과를 분석한



다. 이 실험에서는 화재 감시소의 배치에 따른 화재 오염의 탐지 반응 시간을 비교한다. 화재 감시소 운용 시나리오에는 다음과 같다. 화재 감시소 운용 과업 조직은 화학 위험이 있을 것으로 예상되는 지역에 화재 정찰차를 운용하는 상황이다. 화재 감시소는 화재 정찰차를 배치하여 운용하는데, 화재 정찰차는 원거리화학자동경보기와 접촉식 화재검용자동탐지기를 운용한다. 지형은 ○○지역을 100km×100km로 모델링한다. 풍향 0°, 풍속 3.15m/s의 기상 조건하에서 특정 화학 작용제를 투하하는 시나리오를 작성한다.

그리고 Table 12에 나와 있는 것처럼 화재 감시소 운용 과업 수행 조직을 대안 1~3으로 나누어 편성한다. 대안을 3개로 구분한 사유는 다음과 같다. 오염원의 확산은 지점별 최대 풍향과 평균 풍속의 영향을 크게 받는다. 최대 풍향과 평균 풍속은 계절과 지점에 따라 상이하므로, 임무를 수행해야 하는 계절과 감시 지점에 대한 풍향 빈도와 평균 풍속을 고려하여 화재 감시소 개수와 위치 방안을 결정해야 한다. 이에 본 모의실험에서는 오염 발생 지점을 중심으로 화재 감시소의 개수와 위치를 서로 달리하는 3개의 대안을 다음과 같이 선정한다. 대안 1에서는 화재 감시소 1개소를 오염 발생 지점의 남서쪽 1,400미터 지점에 배치하기로 한다. 다음으로 대안 2에서는 화재 감시소 2개소를 오염 발생 지점의 남쪽 1,100미터 지점과 북서쪽 2,600미터 지점에 배치하기로 하며, 끝으로 대안 3에서는 화재 감시소 3개소를 오염 발생 지점의 남서쪽 2400미터 지점, 동쪽 2,000미터 지점, 북서쪽 2,750미터 지점에 배치하기로 한다. 각 화재 감시소 과업 수행 조직에 ‘화재 감시소 운용’ 과업을 부여한 후, 모의 실험을 실시하며 메시지 창에 전시될 화재 감시소의 최초 NBC1 보고 시간을 관찰한다.

**Table 12.** System alternatives for CB surveillance

Alternatives	Task organization
R-ALT-1	One NBC Reconnaissance Vehicle
R-ALT-2	Two NBC Reconnaissance Vehicles
R-ALT-3	Three NBC Reconnaissance Vehicles

이 임무와 관련된 효과도는 화재 위험 탐지 반응 시간(Response time to NBC hazard detection)  $rt_{detect}$ 를 사용한다. 이 효과도는 실제 오염 발생 시간  $t_{release}$ 로부터 경보 시간  $t_{warning}$  사이의 시간으로 정의된다. 여기서 경보 시간은 화재 감시소를 구성하는 복수의 화재 정찰차

중에서 어느 한 대가 최초로 오염을 탐지한 시간이다. 화재 오염 발생 시간 계산 결과는 시(HH), 분(MM)으로 기술된다.

$$rt_{detect} = t_{warning} - t_{release}$$

전투 모의 실험을 수행한 결과, 화재 위험 탐지 반응 시간은 Table 13과 같이 관찰되었다. 각 대안별 탐지 시간이 상이함을 알 수 있다. 결과적으로 화재 위험 탐지 반응 시간은 대안 R-ALT-2, R-ALT-3이 유사하게 나타났고, 대안 R-ALT-1이 길게 나왔다. 다만 이 결과는 주어진 풍향에 대하여 한정된 모의 실험을 수행한 결과이므로, 화재 감시소 모의 분석 가능성을 확인했다는 것으로 그 의미를 한정해야 한다. 해당 지역의 계절별, 시간대별 풍향과 풍속을 반영하여 모의 실험을 수행한다면 의미 있는 분석결과를 얻을 수 있을 것이며, 이를 통해 화재 감시소의 적정 배치 및 적정 수량을 판단하는데 활용할 수 있다.

**Table 13.** Average time to NBC hazard detection

Response time to NBC hazard detection		
R-ALT-1	R-ALT-2	R-ALT-3
29'	21'	22'

## 5.2 화재 제독 모의 실험 및 결과

두 번째 실험에서는 화재 제독 효과 분석을 수행한다. 이 실험에서는 제독 부대의 규모에 따라 주어진 오염 부대의 제독 소요 시간을 산출한다. 시나리오는 다음과 같다. 제독 부대는 근처에 저수지가 있는 개활지에 제독소를 설치한다. 오염 부대는 제독 전 집결지로 이동하여 순서에 따라 장비 및 인체 제독을 실시한다. 이 임무를 수행하기 위한 대안을 Table 14와 같이 수립한다. 대안 D-ALT-1에서는 {장비, 차량} 제독소가 각각 1개씩 설치되며, 오염된 차량 4대와 오염된 인원 8명을 제독한다. 이어서 대안 D-ALT-2에서는 {장비, 차량} 제독소가 각 2개씩 설치되며, 오염된 차량 8대와 오염된 인원 16명을 제독한다. 끝으로 대안 D-ALT-3에서는 {장비, 차량} 제독소가 각 3개씩 설치되며, 오염된 차량 12대와 오염된 인원 24명을 제독한다. 여기서 제독소를 설치 운용하기 위해 제독차 1대와 제독 요원 8명으로 구성된 제독부대를 투입한다고 가정한다.

**Table 14.** System alternatives for decontamination

Alternatives	Decontamination Site		Contaminated Entities	
	The Number of Vehicle Decontamination Areas	The Number of Personnel Decontamination Area	The Number of Contaminated Vehicles	The Number of Contaminated Personnel
D-ALT-1	1	1	4	8
D-ALT-2	2	2	8	16
D-ALT-3	3	3	12	24

이와 같은 조건에서 제독 부대의 규모에 따른 제독 소요 시간을 산출한다. 이 임무와 관련된 효과 척도는 다음과 같이 정의된다. 제독소 설치 소요 시간(Response time to establish a decontamination site)  $rt_{prep}$ 은 {차량, 인체} 제독소를 설치 완료하는데 거리는 시간으로 정의되며, 시, 분으로 기술한다. 제독 소요 시간 (Response time to decontamination)  $rt_{decon}$ 은 아래 식과 같이 오염 부대가 제독 전 집결지에서 도착하는 시간  $t_{decon}^{(begin)}$ 과 제독을 완료한 후 오염 후 집결지에 모이는 시간  $t_{decon}^{(end)}$  사이의 간격으로 정의된다. 계산 결과는 시, 분으로 기술된다.

$$rt_{decon} = t_{decon}^{(end)} - t_{decon}^{(begin)}$$

**Table 15.** Response time to establish a decontamination site and to decontamination

Response Time	D-ALT-1	D-ALT-2	D-ALT-3
$rt_{prep}$	00°57'	01°56'	02°37'
$rt_{decon}$	03°37'	03°32'	03°38'

전투 모의 실험을 수행한 결과, Table 15와 같은 결과가 관찰되었다. 제독소 설치 소요 시간은 {장비, 인체} 제독소를 각각 1개씩 설치하는 대안 D-ALT-1이 가장 짧게 분석되었고, {장비, 인체} 제독소를 각각 3개씩 설치하는 대안 D-ALT-3가 가장 길게 분석되었다. 동일한 인원과 장비로 편성된 제독 부대가 수행한 과업인 만큼, {장비, 인체} 제독소의 수에 따라 설치 소요 시간이 달리 나온 것은 예상한 바와 같다. 한편 제독 소요 시간은 모든 대안에서 유사하게 분석되었다. 이는 {장비, 인체} 제독소의 수와 오염 부대의 규모가 비례하도록 설계한 실험 시나리오에서 기인된 결과이다. 다만, 모든 대안에서 장비

제독 소요 시간이 인체 제독 소요 시간에 비해 더 많이 길게 관찰되었다. 이 결과를 통해 인체 제독소의 수는 감소시키고 장비 제독소의 수를 증가시킨다면  $rt_{decon}$ 도 줄일 수 있다는 결론을 얻게 된다.

## 6. 결론

화생 위협에 대한 효율적 대응은 작전 수행에 미치는 영향이 크다. 군은 NATO의 ATP-45 위협예측도를 이용하여 화생 오염 확산을 예측해 왔으나, 예측 범위가 실제 위협에 비해 상당히 넓어서 필요 이상의 전투원이 MOPP 단계를 높여야 했고 이로 인한 전투 효율 저하가 야기될 가능성이 존재해 왔다. 이러한 관점에서 위협예측도 외에 기상과 지형 조건을 고려한 오염 확산과 화생 전투 피해를 교전급 전투 모의 모델에 반영하여 구현 가능성을 확인한 것은 의미가 있다. 또한 화생 {정찰, 보호, 제독} 과업 등 대응방안을 모델링하여 화생방 부대 운용 방안애 따른 효과 분석이 가능함을 확인하였다. 이러한 성과는 군의 화생방 분석 모델과 훈련 모델의 능력을 개선하는데 활용될 수 있음은 물론, 화생 위협 상황에 대비하기 위한 평시·전시 대응 매뉴얼 작성 시에도 활용이 가능하다. 예를 들면, 5절에서 보여준 모의 실험 사례와 같이 화생 위협 상황 발생 시 예상되는 오염 면적과 전투 피해 예측, 그리고 이를 사전에 탐지·예방하기 위한 탐지기의 소요량 분석은 물론, 오염 규모에 따른 제독 소요를 산출하는데 활용할 수 있다.

향후에는 화생 위협 대응 시뮬레이션 기법을 임무급 분석 모델에 적용하기 위한 후속 연구가 필요하다. 대부분의 임무 수행에 화생 위협이 미치는 영향이 상당히 크다는 점을 고려할 때, 임무급 분석 모델에 맞는 화생 {위험, 대응, 전투피해} 모의 기법이 필요하다. 우선, 임무급 분석 모델과 화생 오염 확산 모델 간의 해상도 차이를 어떻게 극복할 것인가에 대한 문제가 남아 있다. 화생 위협을 모의하기 위한 초기 파라미터는 공학급 모델일수록 구체적이고 임무급 모델일수록 추상적이어서 초기 파라미터의 상당 부분은 전문가 토의를 통해 가정한 값을 할당하는 것이 필요하다. 다음으로 임무급 분석 모델과 화생 오염 확산의 계산 속도 차이를 해결해야 한다. 임무급 분석 모델의 실행 배속을 높였을 때, 화생 오염 확산의 계산 속도가 임무급 분석 모델의 실행 속도를 따라가지 못하면, 전체적인 모의 실행 속도를 제한시킬 가능성이 있기 때문이다. 오염 확산 모델의 계산 속도를 단축하기 위한 추가 연구가 필요하다. 끝으로 분석적 관점에서 화

생방 전투 모의 결과를 검토할 수 있는 사후 분석 기법이 요구된다. 화재방 방호 체계의 작전 요구 능력 대비 효과도 분석은 물론, 현재 안과 미래 안의 비교, 미래 안에 대한 다양한 대안 실험을 지원할 수 있는 사후 분석 능력이 요구된다. 위에서 언급한 화재방 모의 분석 능력이 확보된다면, 대부대를 위한 임무급 분석 모델은 화재 위험 상황에 따른 작전 간 부대 전투력 손실을 최소화하고, 효과적인 대응 조치로 위험 상황을 신속히 수습하여 임무 달성 가능성을 높일 수 있는 보완적 수단으로 활용될 수 있을 것이다.

## References

1. Boris, J. Fulton Jr, J. E., Obenschain, K. Patnaik, G., and Young Jr, T., "CT-Analyst: fast and accurate CBR emergency assessment," *Chemical and Biological Sensing V*, SPIE 5416, pp. 1-13, 2004.
2. Bruhn NewTech, "Product Overview Fact Sheet", Available via: <https://bruhn-newtech.com/wp-content/uploads/2018/08/bruhn-newtech-product-overview.pdf>, 2018.
3. Cha, J., Kang, T., Kim, D., and Lee, H., "Study on Police-led National Response against CBRN Terror by Strengthening the Standing Cooperation System of the Interagencies", *Korean Security Journal*, No. 59, pp. 217-242, 2019.
4. Chang, J. C., Hanna, S. R., Boybeyi, Z., and Franzese P., "Use of Salt Lake City URBAN 2000 field data to evaluate the urban hazard prediction assessment capability (HPAC) dispersion model", *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 44, No. 4, pp. 485-501, 2005.
5. Foken, T., "50 years of the Monin-Obukhov similarity theory", *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 119, No. 3, pp. 431-447, 2006.
6. Han, S., Pyun, J., Shim, W., and Jung, H., "Design of a HLA/RTI-based Federation Architecture Between OneSAF and NBC Contamination Prediction Models", *Journal of the KIMST*, Vol. 18, No. 5, pp. 582-593, 2015.
7. NATO, "Warning and Reporting and Hazard Prediction of Chemical, Biological, Radiological and Nuclear Incidents (Operators Manual)," 2020.
8. Kwak, S. D., and Eugene L. B., "JOEF (Joint Operational Effects Federation) Architecture", MITRE Technical Paper, The Mitre Corp., Bedford, MA, USA, 2003.
9. Lloyd, J., Newton, N., and Perkins, R., "A Chemical, Biological and Radiological Modelling Capability to Support Acquisition Advice and Re-use as a Common Cross-Domain Capability", NATO STO-MP-MSG-126, pp. 1-10, 2014.
10. Obenschain K. and Moses A., "HPC Enhancement of Plume Modeling for Use by Military Simulators", DoD High Performance Computing Modernization Program Users Group Conference, Pittsburg, PA, USA, pp. 48-51, 2007.
11. Oxford, S. M. LaViolet, L. L., Bishop, K. A., Burr, J. K., Curling, C. A., Danakian, et al., "Technical Reference Manual NATO Planning Guide for the Estimation of CBRN Casualties", NATO STD AMedP-7.5-1, 2018.
12. Pullen, J., Boris, J. P., Young, T., Patnaik, G., and Iselin, J., "A comparison of contaminant plume statistics from a Gaussian puff and urban CFD model for two large cities", *Atmospheric Environment*, Vol. 39, No. 6, pp. 1049-1068, 2005.
13. Robins, P., and Thomas, P., "Non-linear Bayesian CBRN source term estimation", *Proc. of IEEE 7-th International Conference on Information Fusion*, pp. 1101-1108, 2005.
14. Smith, T. R., "Joint Effects Model (JEM) Briefing to CBIS, Joint Project Manager Information Systems", Available via: [http://www.dtic.mil/ndia/2005st\\_cbis/tuesday/smith.pdf](http://www.dtic.mil/ndia/2005st_cbis/tuesday/smith.pdf), 2005.
15. Thomas, J., "Nuclear, Biological, Chemical (NBC) Contamination", OneSAF Physical Knowledge Acquisition Document, AMSAA, USA, 2004.
16. Thykier-Nielsen, S., Deme, S., and Mikkelsen, T., "Description of the atmospheric dispersion module RIMPUFF", Riso National Laboratory, 1999.
17. Wittman, R., and Harrison, C., "OneSAF: A product line approach to simulation development", The MITRE Corporation, USA, 2001.



**한 상 우** (ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-9529-9505> / [swghan22@gmail.com](mailto:swghan22@gmail.com))

2003 중앙대학교 컴퓨터공학과 공학사  
2005 광주과학기술원 정보통신공학부 공학석사  
2011 광주과학기술원 정보기전공학부 공학박사  
2012~ 현재 국방과학연구소 선임연구원

관심분야 : 지상무기체계 효과분석, 전투시물레이션, 국방 M&S



**서 지 윤** (ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-9847-4313> / [seojiyun337@gmail.com](mailto:seojiyun337@gmail.com))

2004 부산대학교 대기환경과학과 이학사  
2006 부산대학교 대기과학과 이학석사  
2015~ 현재 국방과학연구소 선임연구원

관심분야 : 화생방 기상진단 및 오염확산 예측 모델링, 지능형 화생방 전장관리



**심 우 섭** (ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-6519-5035> / [shimpro60@gmail.com](mailto:shimpro60@gmail.com))

1983 한양대학교 기계공학과 공학사  
1993 충남대학교 기계공학과 공학석사  
2005 충남대학교 기계설계공학과 공학박사  
1984~ 현재 국방과학연구소 수석연구원

관심분야 : 화생방 확산 모델링, 화생방 M&S