

현장 중심의 화학테러·사고 대응을 위한 피해 영향 범위 평가 개선 방안 연구

이덕재¹, 송창근^{2*}

¹강원지방경찰청 경비교통과, ²인천대학교 안전공학과 부교수

A Study on Improvement of Damage Impact Range Assessment for Field-Based Response Against Chemical Terrorism and Accidents

Deok-Jae Lee¹, Chang Geun Song^{2*}

¹Researcher, Security and Transportation Division, Gangwon Provincial Police Agency

²Associate Professor, Dept. of Safety Engineering, Incheon National University

요약 화학물질을 이용한 화학테러·사고는 국내·외에서 지속해서 발생, 시도되는 추세이다. 국내의 경우, 환경부 화학물질안전원에서 CARIS(Ver. 2018)를 화학테러·사고 발생지역의 피해 영향 범위 평가 용도로 제공하여 현장 대응에 활용하고 있다. 하지만 현행 CARIS는 실내, 지하 등과 같은 폐쇄된 공간에 대한 영향을 고려하지 못하여 현장에서 요구하는 정밀한 피해 영향 범위 평가 결과를 제공하는데 어려우며 제공되는 정보도 제한적이다. 본 연구에서는 CARIS(Ver. 2018)를 구동하여 획득한 피해 영향 범위 평가 결과와 국내·외 문헌 자료를 비교, 검토하여 제한사항과 개선 방향을 제시하였다. 또한 지하, 실내 등 특수 지점, 지역에 대한 구동 모델 구축의 필요성과 현장 대응 요원 등 포함한 주민에게 제공되는 정보의 방향성을 제안하였다. CARIS의 보완과 수정에 있어 본 연구에서 제안한 방법이 반영된다면 더욱 진보된 화학테러·사고 현장 대응 역량 체계 구축이 될 것으로 기대한다.

주제어 : 화학테러, 화학사고, 화학사고대응정보시스템(CARIS), 피해 영향 범위 확산평가, 유·누출

Abstract Chemical terrorism and accidents using chemicals are continuously occurring and attempted in and out of the country. In Korea, the National Institute of Chemical Safety affiliated with Ministry of Environment employs the CARIS(Ver. 2018) to assess the damage impact range for field-based response against chemical terrorism and accidents. However, the current version of CARIS can not consider the effects of closed space such as indoor and underground, so it is difficult to provide accurate evaluation results for damage impact range required for field response, on top of the limited information available. The limitations and directions for improvement were studied by comparing and reviewing the evaluation results of the damage impact range obtained by driving CARIS (Ver. 2018) and the domestic and foreign literature. Proposed improvements also included the direction of information provided to residents, including the need to build modeling for special points, such as underground, indoor, etc., and on-site response personnel. It is expected that through the continuous supplementation and correction of CARIS, chemical terrorism and accident response capability system will be advanced further.

Key Words : Chemical Terrorism, Chemical Accident, Chemical Accident Response Information System(CARIS), Damage Impact Range Assessment, Leakage

*This work was supported by Incheon National University Research Grant in 2020.

*Corresponding Author : Chang Geun Song(baybreeze119@inu.ac.kr)

Received July 26, 2020

Revised August 6, 2020

Accepted August 20, 2020

Published August 28, 2020

1. 서론

세계적으로 약 1,500만 여종 이상의 화학물질이 상업적으로 사용되고 있다[1]. 화학물질은 고무, 물감, 계면활성제, 첨가제, 농약 등 각종 제품으로 생산되어 인간의 삶을 더욱 풍요롭고 편리하며, 위생적으로 유지하는데 널리 사용되고 있다. 하지만, 화학물질을 악용하는 경우 화학테러나 사고로 이어질 수 있다. 2007년 2월 22일 이라크 무장 세력이 인명 사상의 목적으로 염소 가스와 폭발물을 적재한 탱크로리 차량을 폭발시켜 민간인 350명, 미군 6명이 염소가스 중독으로 사망하였다. 2017년 2월 13일에는 말레이시아 쿠알라룸푸르 국제공항에서 김정남 살해 목적으로 사린(GB) 신경 독가스보다 100배 강한 독성을 가진 VX 신경 독극물이 이용된 사례도 있다. 앞선 사례와 같이 화학테러란 테러 조직이 계획적으로 화학물질 등을 이용하여 치명적인 살상을 가하는 행위로 정의한다[2]. 화학테러를 예방하기 위하여 국내에서는 「국민 보호와 공공안전을 위한 테러방지법」이 2016년에 제정되어 시행되고 있으며 화학물질 중 화학테러로 전용 가능성이 있는 염화수소, 불화수소, 황산 등 105종을 화학테러 우려 물질로 분류하여 환경부 산하 화학물질안전원에서 관리하고 있다.

국내의 경우, 2018년 연세대 사제 폭발물 사건과 같이 개인이 주변의 지인에 대한 원한, 증오를 표출하기 위해 염산, 황산 등 화학물질과 폭발물을 혼합하여 사제 폭발물에 의한 피해가 발생한 사례도 발생하였다. 국무총리실 산하의 대테러위원회에 따르면 2020년 7월 현재까지 국내에서 발생한 공식적인 화학테러 사건은 없었지만 유튜브, 블로그, 개인 방송 등 통해서 염산, 황산과 같은 화학물질을 이용한 사제 폭발물 제조법, 획득 구매 방법 등 다양한 정보를 손쉽게 얻을 수 있는 환경이며 화학테러로도 전용될 수 있는 환경이다. 국외의 경우, ISIS(이슬람 국가와 아프가니스탄을 주 활동지로 하는 이슬람 무장 극단주의 세력), 알사바브(소말리아에 본거지를 둔 무장 극단주의 세력) 등 이슬람·극단주의 세력은 아시아, 아프리카, 유럽 등지에서 염산을 적재한 탱크로리 차량 탈취 후 민간인을 대상으로 폭발과 같은 화학테러를 시도한 바 있으며, 특정 개인에게 화학물질을 투척하는 등 화학테러 및 유사 화학테러가 지속해서 시도, 발생하고 있다[3].

2012년 9월 27일 경북 구미에 있는 HF(불화수소) 화학제품 생산 업체인 (주)휴브글로벌 구미 공장에서 근

로자의 밸브 조작 실수로 회사 내 불산 탱크로리에서 불산 가스가 유·누출되어 공장 근로자 5명이 사망하고 18명이 부상을 당한 사건이 발생하였다[4]. 화학사고란 시설의 교체 등의 작업 시 작업자의 과실, 시설 결함·노후화, 자연재해, 운반사고 등으로 인하여 화학물질이 사람이나 환경에 유·누출되어 발생하는 일체의 상황으로 정의된다[5]. 화학사고 예방을 위해서 2015년부터 「화학물질관리법」의 시행에 따른 점검과 지도가 이루어지고 있다. 이와 같은 노력에도 불구하고 화학사고는 2015년 113건, 2016년 78건, 2017년 87건, 2018년 66건으로 매년 지속해서 발생하고 있다. 2019년 기준으로 국내에는 52,500 여종의 화학물질이 유통되고 있으며 지역사회와 환경에 위험 요인으로 간주하고 있다[4].

정부의 위기대응매뉴얼에 따르면 화학테러는 경찰청, 화학사고는 소방청을 중심으로 현장 대응이 이루어지며 세부적인 기술 조연과 현장 대응에 필요한 화학물질의 정보 제공, 환경상에 유·누출될 경우의 피해 영향 범위 확산평가 등은 환경부 화학물질안전원에서 수행하고 있다. 환경부 화학물질안전원은 화학물질사고대응정보시스템(CARIS)을 통해 화학테러·사고 발생 시 현장 대응 요원에게 화학물질에 대한 물리·화학적 특성, 인체 노출 유해성 및 독성정보, 방재대처요령 등의 필수 대응 정보와 인명·환경 피해 최소화를 위한 피해 영향 범위 확산평가를 제공하고 있다. 피해 영향 범위 확산평가 결과는 경찰, 소방, 지자체 등 현장 대응 요원의 안전성 확보와 대기 확산에 의한 피해 영향 확대 시 근로자와 주민 대피 범위 선정 기준으로 활용되는 중요한 정보이다. 하지만 현재 운용되고 있는 CARIS(Ver. 2018)[CARIS(Ver. 2018)는 이하 'CARIS'라 한다] 피해 영향 범위 산정 프로그램은 피해 영향 범위 확산평가 산정에 대한 명확한 한계점이 발생하고 있으며 화학테러·사고 현장에서 즉각 적용하기에는 보완·개선 사항이 발견되어 이에 대한 개선이 필요하다.

화학테러·사고와 관련한 기존의 국내·외 연구 동향은 다음과 같다. Y. S. Oak[6]은 지자체 차원의 효율적인 안전관리 정책 수립을 위해서 지역별 특성, 현장여건 등 고려한 화학물질 대응시스템의 구축 필요성을 제기하였다. J. H. Kim[7]은 미국 EPA의 ALOHA(Areal Locations of Hazardous Atmospheres), DNVGL사의 PHAST(Process Hazard Analysis Software Tools: Multi component option 포함) Ver. 6.7 등

확산 모델링 및 영향평가 프로그램들을 활용하여 불화 수소(HF) 누출과 같은 화학 사고에 대응하기 위해 활용할 수 있는 자료 획득과 비상대응계획 수립에 필요한 기초자료 구축 방안에 관해서 연구하였다. B. E. Sandström[8]은 화학, 생물학, 방사능, 핵물질의 유출에 대비 다양한 상황별 시나리오 카드에 대한 위험성 평가 결과를 바탕으로 현장 응급 대응 계획 및 평가 방안에 관해서 연구하였다. 국내·외에서 진행된 선행 연구들은 Gaussian 모델 등 확산 프로그램을 이용한 현장 기초자료 구축, GIS를 결합한 시스템 개선 방안 등 주제가 활발하게 연구되었다. 하지만 국내의 화학테러 사고의 현장에서 적용되는 CARIS 피해 영향 범위 산정 프로그램과 관련한 한계점, 개선 방안 등 시스템 발전 연구에 대해서는 아직까진 미진한 실정이다.

따라서 본 연구는 현행 CARIS 피해 영향 범위 산정 프로그램의 한계점을 도출하고 이를 통해서 확인된 제한사항과 개선 방향을 제시하는 데 목적을 두었다. 화학테러 사고의 현장대응이나 사후관리에 개선 방향이 적용될 경우, 현장 대응 요원과 주민의 피해 지원계획 수립, 대피 방향 설정, 지휘소·제독소 위치 선정 등에 즉각 활용될 수 있어 현장 대응 역량 강화에 일조할 것이다.

본 연구와 융합 가능한 분야로 증강현실을 이용한 훈련체계 개발[9, 10], 적응형 학습 분석모형을 통한 CARIS 성능개선[11] 등을 꼽을 수 있다. 다양한 조건의 화학테러 사고 시나리오를 개발·구축하여 교육·훈련에 활용하는 경우 실제상황 모의훈련 경험이 누적되어 현장대응력 향상에 크게 기여할 수 있다. 또한 훈련 및 실제 사고에서 발생하는 다양한 변수와 조건을 축적하여 데이터화 하는 경우 CARIS 운용에 최적화된 적응형 학습 분석모형 구축 연구가 가능하다.

2. 현행 피해 영향 범위 설정 방향

국내·외 피해 영향 범위와 관련한 문헌 연구에 대해서 정리하였다. 국내에서 화학·생물학·방사능 테러 사고가 발생하면 현장 대응 업무를 담당하는 소방청, 질병관리본부, 원자력안전위원회의 피해 영향 범위에 대한 적용기준을 살펴보았다. 국외는 EU(유럽연합), AIHA(미국산업위생학회), OPCW(화학무기금지기구) 등에서 적용하고 있는 방향에 대해서 정리하였다. 국내의 피해 영향 범위와 관련한 문헌 연구를 참고하여 현행 CARIS 피해 영향 범위 산정 프로그램의 제한사항을 찾아내고

이를 개선하기 위한 방향을 도출하는데, 참고자료로 활용하였다.

2.1 소방청

소방청은 화재방테러 사고 발생 시 풍상 방향(바람 부는 반대 방향으로 바람 윗바람 지역)에 가상의 안전 통제선을 설정하여 현장에 피해 영향 범위를 적용한다. Table 1은 소방청에서 적용하고 있는 피해 영향 범위 기준을 정리한 것이다[12]. Hot zone(위험지역)은 화학방 사고 원점으로부터 30 m ~ 100 m 구간으로 TWA(시간 가중평균 노출 기준, 1일 8시간, 주당 40시간)를 초과하는 구간으로 Level A 보호복(양압식 공기 호흡기 + 전신 캡슐형 내 화학용 보호복 Set)을 착용하는 구간에 해당한다. Warm zone(준 위험지역)은 사고 발생 지점으로부터 200 m 초과한 구간으로 TWA 이하의 농도가 측정되며, Level A 또는 C(공기 정화식 마스크 + 후드 형 내 화학용 보호복 Set)를 적용하는 구간이다. Cold zone(완충 지역)은 비교적 안전한 구간으로 지휘소 등이 위치하며 Level C 보호복 수준의 착용을 해야 하는 지역이다.

Table 1. Definition of boundary zone(NFA)

Index	Definition
Dangerous area (Hot zone)	- 30 to 100 m from the origin of the accident - A region where the concentration of pollutants exceeds TWA* - Level A(Rescue team etc.)
Semi-dangerous area (Warm zone)	- Over 200 m from the origin of the accident - A region where the concentration of pollutants below TWA - Level A/C(Decontamination station etc.)
Buffer area (Cold zone)	- Clean area - Minimum area necessary for accident site command and management - Level C(on-site command post etc.)

* Time weighted average concentration of 8 hours per day, 40 hours per week

2.2 질병관리본부

생물테러 및 전염병 발생 시 질병관리본부(KCDC)에서 초기 피해 영향 범위 구간을 산정하기 위해서는 가상의 통제선을 선정하고 미지의 물질분석에 최소 20분 이상의 시간이 소요되기 때문에 화학, 방사능 테러(사고)와는 다르게 실시간 탐지에 따른 정확한 피해 영향 범위 구간 선정이 어렵다. 하지만 피해 영향 범위 적

용에 제시되는 기준은 Hot zone, Warm Zone, Cold Zone으로 구분된다. Fig. 1은 질병관리본부에서 적용하고 있는 각 구역에 대한 개념도이다. Hot zone은 병원체에 오염된 구간으로 인명구조와 환경 제독 등이 집중되어 실시되는 구간이다. 진단 검사에 필요한 병원체 검사 대상물이 채취되는 공간이다. 폐쇄공간일 때 해당 건물 전체를 지정하고 개방 공간이면 통상 사고 원점에서 50 m ~ 100 m 떨어지지만 1차 오염구역이 확정될 시 떨어진 거리를 10배로 확대한다. Warm zone은 병원체가 감지될 수 있는 범위(300 ~ 500m)이며 제독시설과 현장 응급진료소가 설치되는 구간이다. Cold zone은 사고 원점에서 500 m 이상 떨어진 거리에 설치되며, 현장 지휘소가 위치하고 구급 등 지원 활동이 이루어진다[13].

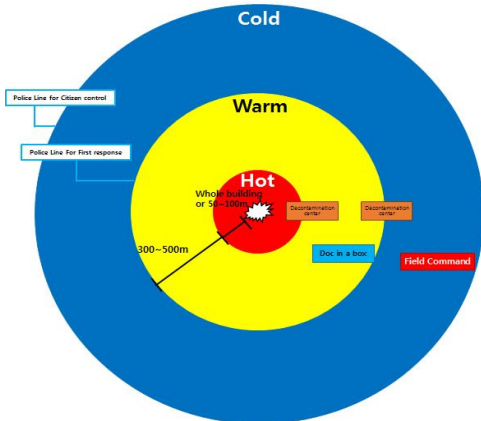


Fig. 1. Schematic diagram of bio-terrorism boundary zone(KCDC)

2.3 원자력안전위원회

방사능 테러 혹은 방사성물질이 환경에 누출 사고 발생 시 재난관리 주관기관인 원자력안전위원회에서는 사고 현장 상황을 파악하여 Fig. 2와 같이 피해 영향 범위를 설정한다. 사고 발생 지점과 가장 근접한 Hot zone은 2개의 방사선 관리구역으로 구분된다. Hot zone 내 공간 방사선량이 20 ~ 100 $\mu\text{Sv/hr}$ 구간은 소방에서 환경 방사선을 측정 후 설정한다. 공간 방사선량 100 $\mu\text{Sv/hr}$ 이상의 구간은 원자력통제기술원, U-REST(방사선 사고지원단, 민간인으로 구성된 자원 봉사단) 등 방사선 테러·사고와 관련되는 전문 지식을 갖춘 현장 대응 요원이 활동하는 구간으로 설정된다. Warm zone은 소방·구조대원 등의 필수 비상 대응 요

원만 출입이 가능한 지역으로 방사선량률이 자연방사선 준위(0.1 ~ 0.2 $\mu\text{Sv/hr}$)와 유사한 구간으로 방사선 관리구역과 통제구역 사이에 비상대응조치가 필요한 공간이다. Cold zone은 경찰통제선 외곽지역으로 통제구역이라 지칭되며 통상 현장지휘본부가 위치하며 현장 대응을 위해 필요한 지휘를 담당한다[14].

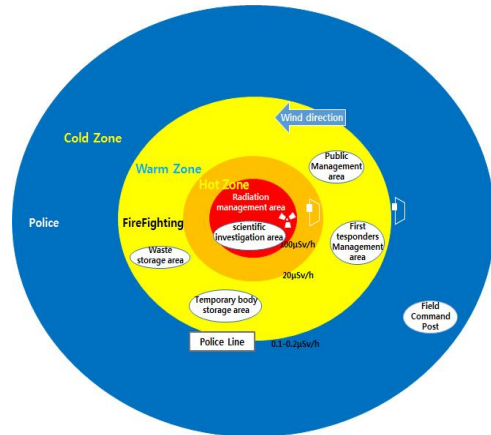


Fig. 2. Schematic Diagram of Radiation Terrorism Boundary Zone(NSSC)

2.4 국외 적용기준

2.4.1 EU와 AIHA

국외에서는 현장 피해 영향 범위를 Hot zone, Warm zone, Cold zone으로 구분하고 있으며 통일된 적용기준은 없는 것으로 조사되었다. Table 2는 EU(유럽연합 집행위원회)와 AIHA(미국산업위생학회)의 피해 영향 범위 적용기준을 정리한 것이다. EU에서는 10분 기준의 AEGL(급성노출가이드라인 레벨)값을 사용하는 반면에 AIHA에서는 IDLH(생명 및 건강에 즉각적인 위험 농도), ERPG(비상 대응 지침), TWA 값을 혼용하여 활용하고 있다[15,16].

Table 2. Definition of boundary zone(EU and AIHA)

Index	Hot zone	Warm zone	Cold zone
EU	Over ERPG [*] -3	ERPG-2 and ERPG-1	Other regions
AIHA	IDLH ^{**} 1/2 or Over ERPG-3	Over TWA and IDLH 1/2 or Less than ERPG-3	Less than TWA

* Exposure guidelines designed to anticipate health effects from exposure to certain airborne chemical concentrations
 ** Concentration value of life threatening danger or health

2.4.2 OPCW

OPCW(화학무기금지기구는) 화학 작용제 노출에 따른 오염 확산을 방지하기 위하여 미 환경청(EPA)의 권고에 따라 피해 영향 범위의 각 구간에 대한 대응체계를 Fig. 3과 같이 적용하고 있다. Hot zone은 화학 작용제가 폭발 등에 의해 노출된 지역으로 오염 농도가 가장 높은 구간이다. Warm zone은 제독소가 설치되는 구간으로 바람 부는 반대 방향에 지정된다. Cold zone은 화학 작용제 노출이 없는 청정지역으로 현장 대응에 필요한 지원시설이 위치하는 구간이다[16].

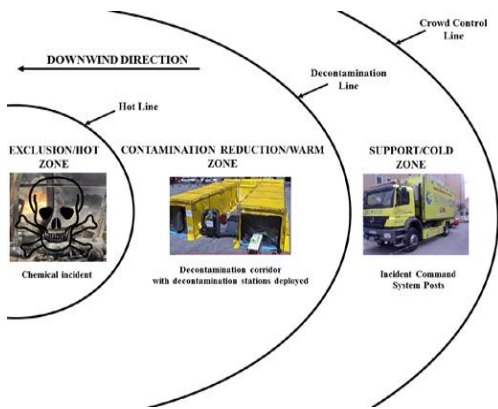


Fig. 3. Schematic Diagram of Field Response System(OPCW)

2.5 국내·외 문헌에서 제시하는 개선 방향

화학, 생물학, 방사능 테러·사고의 경우 피해 영향 범위 적용과 관련한 국내·외 문헌에서 확인할 수 있는 공통 사항을 다음과 같이 정리하였다.

- 1) 각 경제구역에 대한 설명을 도표와 그림, 이격 거리 등을 제시하여 현장 대응 요원 등이 쉽게 알 수 있도록 도식화하였다.
- 2) 현장 지휘소, 제독소 등 필수 시설을 도식화하여 필요한 정보가 제공되었다.

위의 내용을 바탕으로 본 연구에서 제안하는 'CARIS 피해 영향 범위 산정 프로그램' 개선 방향을 도출하는데 참고하였다.

3. 연구방법

본 연구에서는 'CARIS 피해 영향 범위 산정 프로그램' 구동 조건으로 장외영향평가의 최악의 시나리오 조건을 선정하였다. 이와 같은 과정을 통해 선정된 피해

영향 범위 확산평가를 바탕으로 현행 CARIS의 한계점과 개선 방향에 대해서 정리하였다. 또한, 국내·외 피해 영향 범위 산정과 관련된 문헌 자료를 정리하여 본 연구에서 제안하고자 하는 개선안 도출에 참고하였다. Fig. 4는 연구방법을 도식화한 것이다.

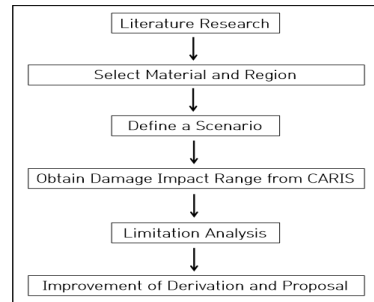


Fig. 4. Flow chart for research procedure

3.1 화학물질 및 적용대상지 선정 조건

화학테러에 활용될 우려가 있거나 유·누출될 경우 인체, 환경상에 큰 손해를 끼칠 우려가 있는 105종의 화학물질을 화학테러 우려 물질로 지정하여 관리하고 있다(2019년 12월 기준). 지정·관리되고 있는 화학테러 우려 물질 중 염화수소는 식품업, 전자업, 도류·도장업 등 산업 전반에서 광범위하게 사용되고 있으며 연간 유통량과 배출량이 상당하다. 또한 화학물질종합정보시스템(ICIS)에 따르면 2014년 1월부터 2020년 2월까지 화학사고는 총 511건이 발생했으며 그 중 염화수소(염산 포함)와 관련된 화학사고는 66건으로 전체 대비 약 12.9%로 발생빈도가 높았다[4]. 본 연구에서는 CARIS 피해 영향 범위 산정 프로그램에서 다루는 화학물질 중 염화수소를 대상 물질로 선정하였다.

CARIS 피해 영향 범위 산정 프로그램을 구동하기 위해서는 풍속, 구름양, 누출량, 지역 등이 입력되어야 한다. 연구 대상지는 일 평균 유동인구가 많고 관광사와 같이 주요 업무단지가 상주하며 지하철 등 대중교통이 발달되어 있어 화학테러·사고 발생 시 극심한 혼란을 초래하고 인명피해가 다수 발생할 수 있는 지역으로 판단하였다. 이에 부합된 연구 대상지로 서울시청과 서울광장이 자리 잡은 서울 시청역 주변으로 판단하였다.

3.2 사고 시나리오 선정과 구동 조건

CARIS 피해 영향 범위 산정 프로그램을 구동하기 위해서는 다양한 조건이 필요하며 본 연구에서는 환경

부에서 제시하고 있는 화학사고 발생 시 최악의 조건을 활용하였다. 환경부의 최악의 시나리오 조건은 화학 사고로 인하여 공장 외로 유·누출되었을 시 최악의 조건으로 선정하여 장외영향평가에 활용된다. 최악의 시나리오 조건은 풍속(1.5 m/s), 대기안정도(F), 온도(25 ℃), 거칠기(도시), 상대습도(50 %)로 제시되어 있다. 추가로 CARIS 시스템을 구동하기 위해 입력해야 하는 조건으로 풍향(N, 90°), 구름 상태(맑음), 대기압력(1 atm), 누출량(100 kg), 누출시간(10 min.) 등 선정하여 입력하였다. 앞의 조건들을 Table 3에 정리하였다.

Table 3. Scenario conditions

The Worst-case scenario conditions		Additional conditions	
Wind velocity(m/s)	1.5	Wind direction	N(90°)
Atmosphere stability	F	Cloud state	Clearness
Temperature (°C)	25	Atmospheric pressure(atm)	1
Roughness	Urban	Leakage amount(kg)	100
Relative humidity(%)	50	Leakage time(mim.)	10

4. 피해 영향 범위 확산평가

CARIS(Cheical Accident Response Information System)는 화학테러·사고 관련하여 현장 기상정보, 유·누출된 화학물질 독성 및 인체 유해성을 기초로 피해 영향 범위 확산평가를 산정하여 현장 대응에 활용하기 위한 예측 프로그램이다. 피해 영향 범위 확산평가는 화학테러·사고가 발생한 현장의 화학물질(염화수소, 불화수소 등), 주변 지형(도시, 농촌), 공정조건(누출량, 누출시간, 용기 온도 등), 기상정보(풍향, 온도, 대기안정도 등) 등의 유·유출 정보를 화재·폭발모델 또는 대기 확산모델에 입력하여 확산 영향평가를 수행하게 된다. 화재·폭발모델에는 폭발, 화구화재, Pool 화재(액체 표면 화재) 모델이 있으며, 독성 확산모델 유형에는 용기 유출, Puddle(액상 물질이 지표면에 1 cm 깊이로 퍼진 형태) 증발, 누출시간 등에 따라 독성 확산으로 구분되어 피해 영향 범위 확산평가 결과를 표출한다[17]. 앞에서 나열한 구동 조건과 화학물질(염화수소), 지역(서울시청 일대), 장외영향평가 조건(최악의 시나리오 항목) 등을 입력하여 피해 영향 범위 확산평가를 수행하였으

며, 특히 실내(서울시청), 실외(서울광장), 지하 공간(서울시청 지하철역)에 따른 결과를 상호 비교하였다.

4.1 실내 피해 영향 범위 확산평가

서울시청 내 염화수소 100 kg이 유·누출된 조건으로 CARIS 구동한 결과를 Fig. 5에 도시하였다. 피해 영향 범위는 Hot zone(원점으로부터 반경 3 m 이내), Warm zone(원점에서 바람 부는 방향으로 3 m ~ 64 m), Cold zone(원점에서 바람 부는 방향으로 64 m ~ 465 m)를 기준으로 분류하였다. 확산평가 결과를 살펴보면, 대기 확산 속도에 따라 염화수소가 특정 위치(예, 50 m, 100 m 지점)에 도달하는 예상 시간과 도달 시 예상 농도 등 결과가 제공되지 않는다. 이와 같은 정보는 경찰, 소방, 지자체 등의 현장 대응 요원이 대기 확산 속도를 고려하여 인근 주민들을 특정 지점, 지역까지 대피시켜야 하는지에 관한 화학물질 대기 확산 대책을 수립하는데 필수적인 정보이므로 향후 개선, 연구될 피해 확산평가 시스템에서 반영되어 추가적인 정보 제공이 필요할 것으로 판단된다.

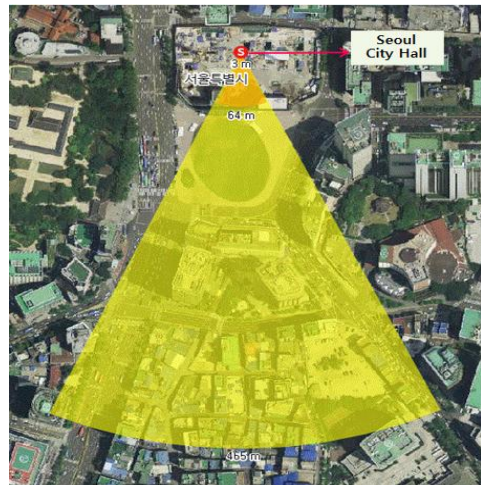


Fig. 5. Result of CARIS (HCl 100kg, Indoor)

4.2 실외·지하 공간 피해 영향 범위 확산평가

서울시청 주변 지역인 실외(a. 서울광장)·지하 공간(b. 서울시청 지하철역)에서 염화수소 100 kg이 유·누출되었을 경우를 가정하여 CARIS로 피해 영향 범위를 산정하였으며 확산평가는 Fig. 6과 같다. 실내(a. 서울시청 내 HCl 100 kg, 유·누출)와 지하 공간(b. 서울시청 지하철역)의 피해 영향 범위 결과를 비교하면 유·누

출된 대상 지역만 바뀌었을 뿐 동일한 결과가 산출되었다. 일반적으로 같은 화학물질을 동일한 확산모델에 같은 구동 조건으로 모델링하였을 때 확산 거리는 일반적으로 지하 공간, 실내, 실외가 다르게 확산하는 결과가 도출되어야 하지만 현행 CARIS 피해 영향 범위 산정 프로그램은 동일한 확산평가 결과가 획득되었다. 현행 CARIS는 각 구역(실내, 지하 공간 등)에 대한 확산평가가 제대로 구현하지 못하고 있으며 각 특정 구역에 대한 구동 모델 프로그램이 구축되어 있지 않기 때문에 같은 결과가 표출된다. 따라서 현행 CARIS가 실내, 지하 공간, 도로상의 터널 내 유·누출 등 특정지점, 지역에 대한 구동 모델이 별도로 구축되어 있지 않은 한계점을 가지고 있으므로 이에 대한 개선의 필요성이 제기된다.

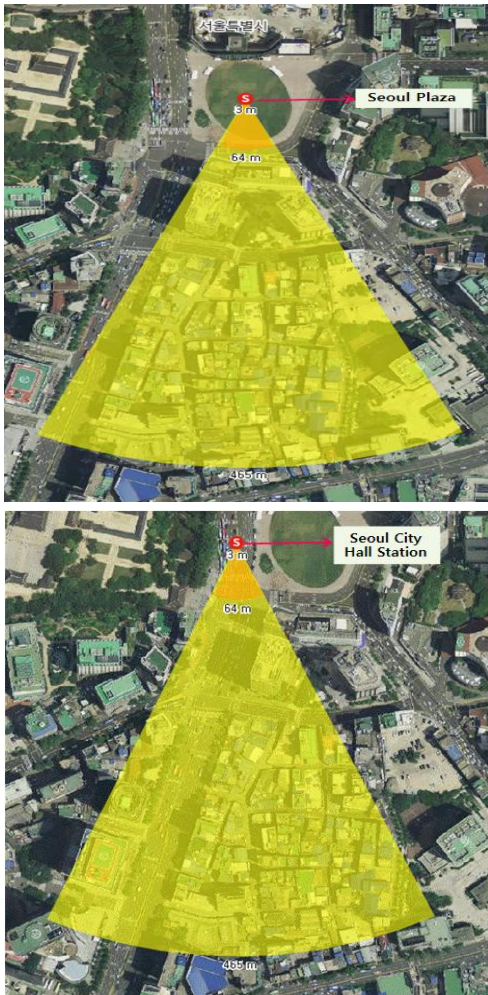


Fig. 6. Result of Ver. 2018 CARIS (HCI 100kg, a. Outdoor, Up / b. Basement, Down)

5. 피해 영향 범위 확산평가에 대한 개선 방향

현행 CARIS의 한계점을 개선 방향은 실내, 지하 공간, 도로 위 터널 내 화학물질 등 현행 CARIS가 구현하지 못하는 환경에 대해서도 구동 모델이 구축되어야 한다. 현재 제공되는 피해 영향 범위 확산평가에는 현장 대응 요원과 주민에게 즉각적으로 필요한 대기 확산에 따른 예상 도달 시간, 예상 농도 등의 세부 정보가 제공되지 않아 이에 대한 보완도 필요하다. 본 연구에서는 현행 CARIS의 피해 영향 범위 확산평가에 따른 제한사항과 피해 영향 범위 현장 적용과 관련한 국내·외 문헌 자료를 참고하여 피해 영향 범위 산정에 대한 개선 방향을 다음과 같이 제안하였다.

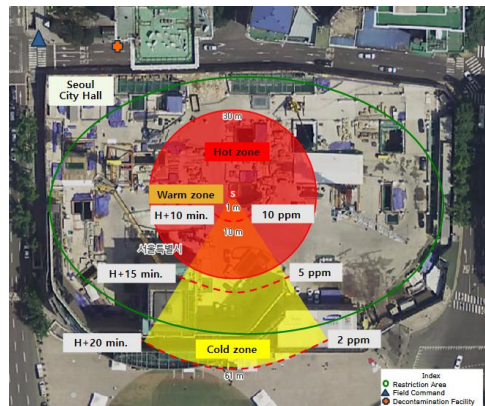


Fig. 7. Proposed improvement of damage impact range assessment for indoor chemical accident

5.1 실내 확산평가 개선 제안

실내(서울시청)에서 염화수소가 유·누출될 경우의 확산영향평가 개선 방향을 Fig. 7에 개념도로 도시화하였다. 본 연구에서 제안하는 피해 영향 범위 확산평가는 Hot zone, Warm zone, Cold zone을 표시하고 각 경계선까지 예상되는 확산 시간과 농도 등을 제공하는 것이다. 이와 같은 세부 정보는 현장 대응 요원과 주민이 도보, 차량 등 이용하여 피해 최소화를 위한 대피계획 수립과 대피 방향 등 현장 대응, 사후관리에 판단근거로 활용될 수 있다.

실내 유·누출 시 실내 또는 일부 실외 확산이 예측되는 구간을 통제구역으로 설정하여 인명피해를 방지하고 오염 제독계획 등 피해 지원계획 수립, 시행에 활용될 수 있다. 나아가 소방, 지자체 등 관계기관과 같은 정보를 공유함으로써 시간과 자원의 낭비를 방지할 수 있

며, 피해 영향 범위 확산평가에 따라 예측되는 현장 지휘소와 제독소 위치 등을 표시함으로써 효율적으로 방역역량과 제원을 공급할 수 있을 것으로 기대한다.

실내 유·누출 시에도 실외 확산과 실내에서 오염된 인원, 장비, 환경에 대한 통제와 제독이 필요하며 이를 통제할 수 있는 현장 지휘소 위치와 제독소 등 필수 시설에 대해서도 산출된 피해 영향 범위 평가 결과에 제시가 필요하다.

5.2 실외 확산평가 개선 제안

실외의 피해 영향 범위 확산평가를 제안하기 위해서 서울광장에 염화수소가 유·누출된 경우를 가정하였다. 본 연구에서 제안하는 개선 방향을 Fig. 8에 도시하였다. 제안하는 개선 방향은 실내 유·누출의 경우와 유사한 개선 방향으로 각 zone의 경계선에 대한 도달 예상 시간과 농도, 현장 지휘소와 제독소 설치 위치 등 제공하여 현장 대응 요원과 주민에게 현장 대응에 필요한 최소한의 정보를 제공되는 것이다.

실외의 누출의 경우에는 사건(사고) 현장 주변으로 빠른 속도로 대기 확산이 발생할 가능성이 높기 때문에 신속하고 정밀한 CARIS 피해 영향 범위 평가 결과를 현장 대응 요원과 주민에게 제공되어야 한다. 신속하게 제공되는 방법으로 지자체의 긴급재난문자, YTN·KBS 등 공중파 방송의 긴급 속보, 유튜브와 트위터 등 SNS를 통해서 동시다발적으로 제공하는 방법도 필요하며 전달방법, 내용 등 다각적인 방향에서 병행 연구되어야 한다.

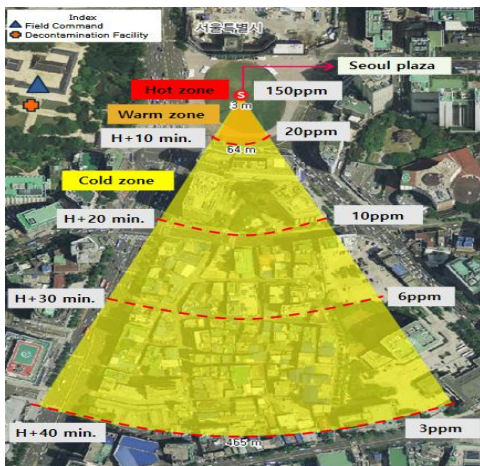


Fig. 8. Proposed improvement of damage impact range assessment for outdoor chemical accident

5.3 지하 공간 확산평가 개선 제안

지하 공간(서울시청 지하철역)에서 염화수소가 유·누출될 경우 실외 확산량은 최소가 될 것으로 예상된다. 예상되는 피해 영향 범위의 대부분은 지하 공간으로 추정되지만 유·누출된 일부 화학물질은 승강 엘리베이터, 환풍기, 이동통로 등 통해서 실외 확산이 병행될 것으로 예측된다.

지하 공간 내 고농도로 확산하는 zone을 구분하고 통제구역을 제시하는 것으로 개선 방향을 제안한다. 이를 통해서 지하 공간 내에 있는 인원이 실외로 대피하는데 대피계획 등 판단할 수 있을 것으로 예상된다. 지하공간에서 발생하는 화학테러·사고의 경우에는 고농도로 포집되어 있는 zone이 발생할 수 가능성이 있기 때문에 해당 시설의 건축설계도면 등과 비교하여 보다 정밀한 CSRIS 피해 확산 평가 결과 도출이 필요하다. Fig. 9는 지하 공간에서 염화수소가 유·누출될 경우를 가정하여 본 연구에서 제안하는 피해 영향 범위 확산평가 개선 방향을 도식하였다.

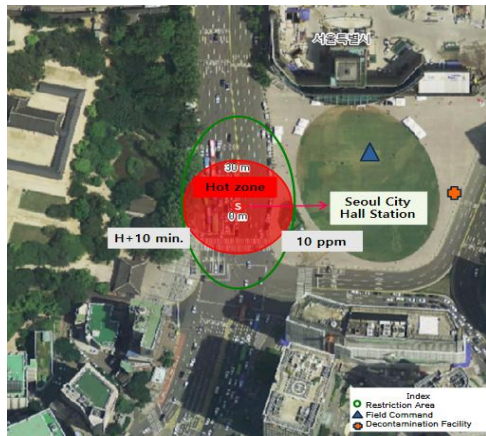


Fig. 9. Proposed improvement of damage impact range assessment for underground chemical accident

6. 결론 및 고찰

염산, 황산 등과 같은 화학물질은 일상에서 일반적으로 질산암모늄과 같은 폭발성 화학물질에 비해 쉽게 접하고 획득할 수 있는 경로가 다양하다. 인터넷을 기반으로 사제 폭발물 제조 방법 등 획득할 수 있는 환경과 ISIS와 같은 무장 테러 단체의 인터넷을 통한 조직원 모집 활동이 성행하고 있는 환경이다. 더불어 국외에서 종종 발생하고 있는 염산 탱크로리 폭발, 개인 원한에 의한

염산 투척 등 다양한 방법으로 화학물질을 이용한 화학테러가 발생한 사례를 확인할 수 있다. 국내에서는 화학테러가 발생한 사례는 없지만, 국가산업단지 등에서 수만 종의 화학물질 취급과 유·누출 등 화학 사고가 발생하고 있는 환경으로 화학물질 취급과 관리, 화학테러(사고) 발생 시 가정한 종합적인 접근이 필요한 시점이다.

화학물질 취급자의 과실, 취급시설의 노후화, 운반 중 사고에 의해 유·누출될 때도 막대한 피해가 발생함을 여러 국내·외 사례를 통해 확인할 수 있다. 이와 같은 화학테러·사고 시 소방, 경찰, 지자체 등 현장 대응 요원에게 제공되는 피해 영향 범위 확산평가 결과 제공은 환경부 화학물질안전원의 CARIS 구동을 통해서 얻을 수 있다.

현행 CARIS 확산평가 결과는 실내, 지하 공간, 도로 위 터널 내 화학물질이 확산할 경우, 각 공간의 특성을 반영한 구동 모델이 구축되어 있지 않아 실내, 실외, 지하 공간에 대한 피해 영향 범위 확산평가가 같이 산정되는 한계가 있다.

현행 CARIS의 피해 영향 범위 확산평가에서는 현장 대응 요원과 주민 대피 등 현장 대응에 필요한 대기 확산에 따른 일정 거리 도달 예상 시간, 예상 농도 등 정보가 부족하여 확산 방지를 위한 종합계획을 추진하기 위한 판단근거를 신속하게 제공되지 못하여 현장 대응에 어려움이 예상된다. 이에 본 연구에서는 국내·외 피해 영향 범위 적용과 관련한 문헌 자료를 참고하여 현행 CARIS의 피해 영향 범위 확산평가의 제한사항 도출하고 본 연구에서 제안하는 개선 방향과 제안내용을 다음과 같이 정리하였다.

1) 현행 CARIS는 실내, 지하 공간, 도로상의 터널 내 화학테러 사고를 모의할 수 있는 구동 모델이 구축되어 있지 않으므로 각 공간의 특성을 고려한 구동 모델이 구축되어야 한다. 실내, 지하 공간 등에 대한 구동 모델이 구축될 경우 현장 대응에서 더욱 정밀한 대응 전략 마련과 지원계획을 수립, 시행하는 데 도움이 될 것으로 예상된다.

2) 실내, 실외, 지하 공간에서 염화수소와 같은 화학물질이 유·누출될 경우를 가정한 피해 영향 범위 확산평가를 수행하였다. 그 결과를 비교해 보면 실내, 실외, 지하 공간에서 유·누출된 화학물질의 피해 영향 범위가 동일하게 산정되었으며 현장 요원, 주민 등의 대응 및 대피에 예상 지점까지 도달 시간, 농도 등 필요한 정보가 표출되지 않았다. 이와 같은 제한사항을 통하여 본 연구에 제안하는 개선 방향은 Hot zone, Warm zone, Cold zone의 각 경계선까지 확산하는 예상 시간과 예상 농도를

제시하는 것을 제안하였다. 이 정보는 소방, 경찰, 지자체 등이 현장 대응에 필요한 피해 방지 대책 등과 지원계획을 구체적으로 수립, 시행하는데, 핵심적으로 필요하다.

3) 피해 영향 범위 확산평가에 대한 개선 방향으로 현장 지휘소, 오염 제독소 등 현장에서 운용되는 주요 지휘·지원시설 등 예상 설치 위치 도식을 제안한다. 피해 영향 범위 확산평가를 바탕으로 소방, 경찰, 지자체 등 현장 대응 요원이 바람 등 기상 현상, 비 오염 지역 등 종합적으로 판단하여 제한된 정보를 바탕으로 현장에서 지휘·지원시설 등 설치 위치를 판단하는데 어려움이 따른다. 본 연구에서 제안하는 개선 방향은 제공되는 피해 영향 범위 확산평가에 현장의 주요 지휘·지원시설 등이 설치 가능한 예상 지점 표시를 제안한다.

4) 코로나19, 아프리카돼지열병, 호주주의보(경보) 등 인명·환경피해가 발생할 우려가 있을 경우에는 중앙재난안전대책본부, 지자체 등 긴급재난문자를 통해 발생지역의 인근 주민에게 관련 정보가 제공된다. 화학테러·사고의 경우에도 긴급재난문자, YTN, KBS 등 언론과 유튜브, 트위터와 같은 SNS를 통해서도 동시다발적으로 CARIS의 피해 영향 범위 확산평가가 제공이 필요하다. 추가로 청력, 시력 등 장애인을 위한 별도의 자막, 수화 등 제공도 제안한다.

5) 적용 가능할 것으로 판단되는 융합 연구 분야는 CARIS 피해 영향 범위 확산평가 결과로 증강현실을 이용한 모의훈련 분야, 축적된 실시간 데이터 분석을 이용한 적응형 학습 모델 구축 연구 등 다양한 분야와 융합 연구가 진행될 수 있을 것으로 예측된다.

국내·외 문헌을 통해서 현행 CARIS의 개선 방향을 도출하는 연구를 진행하였다. 하지만 본 연구에서 제안하는 개선 방향을 실제 구동 모델로 구현하여 예상결과와 실 결과를 비교하는 연구가 미진하다. 차후에 CARIS의 개선 사업이 진행될 경우 적극적으로 현행 한계점을 제시하여 보완될 수 있도록 추진하며 개선된 차기 CARIS에 대한 평가 참여와 의견 개진으로 현재 보다 완성도 있는 CARIS 피해 영향 범위 산정 프로그램이 개발될 수 있도록 기여하겠다.

본 연구에서 제시한 피해 영향 범위 확산평가에 대한 개선 방향을 통해서 화학테러·사고 대응체계가 더욱 진일보하게 발전할 수 있을 것으로 기대한다.

REFERENCES

- [1] Y. S. Oak & Y. S. Lee. (2017). A Study on Improvement of Legal System for Harmful Chemical Substance Response Management System. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 18(4), 216-223. DOI : 10.5762/KAIS.2017.18.4.216
- [2] National Counter Terrorism Center. (2019). *Counter Terrorism Terms*. <http://www.nctc.go.kr>
- [3] J. H. Cha, T. H. Kang, D. S. Lee & H. C. Lee. (2019). Study on Police-led National Response against CBRN Terror by Strengthening the Standing Cooperation System of the Interagencies. *Korean Security Journal*. 59, 217-242. DOI : 10.36623/KSSA.2019.59.9
- [4] National Institute of Chemical Safety. (2019). *Chemistry Safety Clearing-house(CSC)*. <http://icsc.me.go.kr>.
- [5] Ministry of Environment. (2018). *Chemical Control Act*. www.law.go.kr
- [6] Y. S. Oak & Y. S. Lee. (2017). A Study on Improvement of Legal System for Harmful Chemical Substance Response Management System. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 18(4), 216-223. DOI : 10.5762/KAIS.2017.18.4.216
- [7] J. H. Kim & S. H. Jung. (2016) Off-site consequence modeling for HF accidental release scenarios. *Korean Chemical Engineering Research*, 54(4), 582-585. DOI : 10.9713/kcer.2016.54.4.582
- [8] B. E. Sandström, H. Eriksson, L. Norlander, M. Thorstensson & G. Cassel. (2014). Training of public health personnel in handling CBRN emergencies: A table-top exercise card concept. *Environment International*. 72, 164-169. DOI : 10.1016/j.envint.2014.03.009
- [9] Y. S. Jeong, Y. T. Kim & G. C. Park. (2017). A Design of Service Improvement Model for Emergency Medical System using Augmented Reality. *Journal of Convergence for Information Technology*. 7(1), 17-24. DOI : 10.22156/CS4SMB.2017.7.1.017
- [10] D. H. Kim, S. S. Kim & E. J. Choi. (2019). Design of Home Furnishing Simulation System using Real Space Information. *Journal of Convergence for Information Technology* 9(1), 151-157. DOI : 10.22156/CS4SMB.2019.9.1.151
- [11] J. H. Ku. (2018). A Study on Adaptive Learning Model for Performance Improvement of Stream Analytics. *Journal of Convergence for Information Technology*. 8(1), 201-206. DOI : 10.22156/CS4SMB.2018.8.1.201
- [12] National Fire Agency. (2016). NBC and terrorism accidents corresponding standard textbook. Sejong : *National Fire Agency Publishing*.
- [13] Korea Centers for Disease Control & Prevention. (2016). Bio-terrorism Preparedness & Response guideline. Cheongju : *KCDC Publishing*.
- [14] Nuclear Safety and Security Commission. (2016). Nuclear Safety Crisis Response Manual. Seoul : *NSSC Publishing*.
- [15] European Communités. (2015) A Framework for Major Emergency Management(Guidance Document 10). Dublin : *EU Publishing*.
- [16] W. Lili, X. Jianbing & S. Zujian & L. Xiaoyong. (2012). The personal protection of emergency rescuers in dangerous chemical accidents. *Procedia Engineering*. 45, 755-762. DOI : 10.1016/j.proeng.2012.08.235
- [17] NICS. (2018). Ver. 2018 Chemical Accident Response Information System User Manual. Daejeon : *NICSC Publishing*.

이 덕 재(Deok-Jae Lee)

[정회원]



- 2007년 2월 : 서울대학교 지구환경시스템공학부(공학석사)
- 2019년 2월 : 인천대학교 안전공학(공학박사)
- 2019년 4월 ~ 현재 : 강원지방경찰청 경비교통과 공업연구사

- 관심분야 : 화생방테러, 환경공학, 안전공학
- E-Mail : snu2580@snu.ac.kr

송 창 근(Chang Geun Song)

[정회원]



- 2001년 2월 : KAIST 건설환경공학(공학사)
- 2011년 8월 : 서울대학교 건설환경공학부(공학박사)
- 2013년 8월 ~ 현재 : 인천대학교 안전공학과 교수

- 관심분야 : 재난안전관리, 위험성평가, 수자원재해
- E-Mail : baybreeze119@inu.ac.kr