

# 유해화학물질 누출사고 발생 시 경제활동과 비 경제활동 시간의 취약성 분석

## Analysis of Vulnerability during Business and Off-business Hours in Case of Hazardous Materials Release Accidents

이재준\*

Lee, Jaejoon\*

### Abstract

Korea has been experiencing human and environmental damage caused by accidental release of toxic chemicals such as the Gumi hydrofluoric acid accident and the Ulsan chemical accident. As the government managers do not know when, where, and how such accidents will occur, they have been trying to reduce the level of damage by recognizing victims in advance. In this study, assuming a chlorine gas release accident occurs in facilities handling hazardous chemicals, the impact range was analyzed considering the worst-case scenario of chemical release. After analyzing social, physical, and place-dependent vulnerabilities by applying the multi-criteria evaluation method, a vulnerability map of chemical release was prepared. The study focused on proposing a method for vulnerability assessment during non-economic and economic activity time by considering dynamic factors when evaluating vulnerability. The results of dynamic vulnerability analysis based on GIS are expected to support decision making that could respond differently to chemical release accidents depending on the time of occurrence, thereby minimizing human casualties.

**Key words** : Chemical Release Accident, Vulnerability Assessment, Vulnerability Map, ALOHA, GIS

### 요 지

한국은 구미불산사고, 울산화학사고와 같이 유해화학물질 누출 사고로 인해 인적·환경적 피해로부터 고통받고 있다. 따라서 정부의 관리자는 언제, 어디서, 어떻게 사고가 발생할지 모르기 때문에 피해를 입는 대상을 사전에 확인하여 피해수준을 경감시키기 위한 노력하고 있다. 본 연구는 일부 유해화학물질 취급장에서 염소가스 누출 사고가 발생할 경우 화학누출 시 최악상황을 가정하여 영향범위를 분석하였다. 이후 사회적, 물리적, 장소의존적 취약성을 다중기준평가 방법을 적용하여 분석한 후 화학누출사고에 의한 취약성맵을 작성하였다. 취약성 평가는 동적 요소를 고려하여 비경제활동 시간과 경제활동 시간에 취약성 평가하는 방법을 제시하는 것에 중점을 두고 있다. GIS를 기반으로 분석한 동적 취약성 분석 결과는 발생 시점에 따라 화학사고 대응을 달리할 수 있는 의사결정을 지원함으로써 국민의 인명피해를 최소화 할 수 있을 것으로 기대한다.

**핵심용어** : 화학누출사고, 취약성평가, 취약성맵, ALOHA, GIS (Geospatial Information System)

## 1. 서 론

국가 경제에 중요한 역할을 하는 화학산업은 1980년대 이후 급속하게 발전하기 시작하였고, 화학공장이 건설되어 20년이 지난 현재 화학공장들의 노후화로 인하여 2012년

구미의 불산누출사고, 2014년의 대구 염소 누출사고와 같은 대형 화학사고가 발생하였다. 산업현장에서의 화학물질의 사용도 증가함에 따라 누출사고는 국가경제 손실 및 환경피해를 야기 시킨다(Jeong and Baik, 2014). 이후 화학물질사고에 대한 관심이 높아지기 시작하여 제도관리적 측면의 개선

\*교신저자, 정회원, 성균관대학교 방재안전공학과 박사후연구원(Tel: +82-31-290-7534, Fax: +82-31-290-5749, E-mail: lunevocal@skku.edu)  
Corresponding Author, Member, Ph.D., Interdisciplinary Program in Crisis, Disaster and Risk Management, SungKyunKwan University

방안에 관한 면밀한 검토를 통하여 법, 제도적 개선에 관한 연구 수행되며, 환경영향평가에 화학누출사고를 반영하는 노력을 하였다(Joo et al., 2013). 화학물질 사용량이 빠르게 증가하고 있으나, 위험물질에 대한 안전 의식이 부족하기 때문에 안전 전문성을 키우기 위한 노력을 하였다(You and Chung, 2014).

또한, 정부차원에서 화학물질의 잠재 위험성에 대한 국민의 의식이 증가됨에 따라 2013년 5월 「화학물질관리법」을 제정하고 2015년에 이르러 시행하여 관리체계를 고도화 노력을 하고 있다. 화학사고를 예방하고자 정부는 화평법과 화관법을 제정하였으며, 2015년 유해화학물질 취급 시설이 제 3자에게 인적피해를 일으키지 않도록 장외영향평제도와 사업장에서 취급하는 잠재적인 위험성을 평가하여 비상대응체계를 마련하는 위해관리계획을 21년 3월까지 수행하였으며, 현재는 화학사고예방관리계획서로 통합되어 제도적 장치마련하여 화학사고에 대한 주변환경과 내부물질의 정보, 기상을 고려하여 위험도 분석을 대비를 하기 시작하였다. 그러나 화학물질안전원에서 제공하는 화학물질종합정보 시스템에 따르면 2014년부터 2021년까지 화학물질 사고사례는 누출사고가 화재(44건)나 폭발(55건)에 비해 10배가량 발생횟수가 많고, 540회의 화학누출사고가 발생하여 연간 평균 67건 이상이 발생하고 있다. 540회중 8건을 제외하고, 532건은 시설의 결함, 안전기준 미준수, 운송중의 사고로 확인되었다. 이처럼 안전 화학사고의 특성상 인적 오류로 인하여 발생하는 경우가 많기 때문에 화학적 위험은 언제 어디서 발생할지 예측하기 어려워 국민의 생명과 재산을 위협할 잠재력을 가지고 있다. 따라서 발생한 후의 최고의 대응능력을 가지기 위해서 취약성 평가를 통해서 대응을 달리 할 수 있는 정보를 취득하여 대비를 하는 것이 중요하다. 한국은 KORA (Korea Off-site Risk Assessment support tool)라는 프로그램을 활용하여 주변 시설물의 중요도를 고려한 위험성 평가를 수행하고 있다. Ko et al. (2020)은 사업장 내부의 고장율을 고려하는 정량적 화학사고 위험성 평가 표준안을 제시하여 발생확률의 정확성을 높이고자 하였다. 그러나 현재 KORA는 인구수가 거주민과 사업장 근로자의 합으로 산출되어 일반주민과 근로자가 구분되지 않기 때문에 이에 대해 고려가 필요하다(J. Kim et al., 2018). 시간대별 상주 인구를 활용한 분석을 통해 주변 인구의 상주여부, 인구의 연령, 주변 대응시설의 근접성 등을 통해 취약성이 높은 지역을 확인하여 대응할 수 있는 능력을 확보하기 위하여 본 연구는 화학누출 시나리오에 따른 피해영향범위를 산정하여 시간대별(비경제활동시간, 경제활동시간) 영향 받는 인구에 대한 취약성 분석을 수행하였다.

## 2. 연구 동향

국내 연구는 화학누출사고에 대한 제도적, 기술적 연구가

이루어 지고 있다. 2012년도 구미 불산사고 이후 국내 화학관리를 법제도의 문제점을 파악하는 연구가 수행되었다. Kim, Lim, and Park (2015)은 국내 화학사고 조사 방법과 전문성을 강조하였으며, Kim, Lim, and Choi (2015) 대응요원에게 대응정보를 제공하는 것 절차, 매뉴얼에 대한 연구를 수행하였다. Lee (2017)는 유해화학물질 10종에 대한 장외영향평가를 수행하여 범위분석을 통해 신속한 대응을 위한 근거가 되는 연구를 수행하였다. 관리체계의 문제를 인식하기 위하여 S. Kim et al. (2018)는 화학사고 저감을 위한 합동방재센터의 기능과 임무의 효과성을 분석하였으며, D. Lee et al. (2018)은 발생초기 화학물질 관리 주체에 대한 문제점을 파악하여 긴급확산방재시스템 연구를 통한 인명, 환경피해 경감할 수 있는 개선방안을 제시하였다. Kim et al. (2019)은 도급신고의 제도적장치를 통한 개선방안을 연구하였다. Lee et al. (2019)은 물질을 선정하여 알고리즘 소프트웨어를 개발을 통해 유해성에 따른 사고예방화학물질 선정 절차를 제시하여 사고관리의 효과성을 높이고자 하였다. Kim et al. (2020)은 유해화학물질 운반차량에 대한 관리제도 실효성을 연구하여 관리제도의 개선이 필요함을 도출하였다.

화학물질 안전원은 화학사고의 유형과 원인별로 2014년도 이후 화학사고의 통계자료가 구축하고 있다. 이후 통계를 기반으로 한 연구가 주로 수행되었다. Ahn et al. (2014) 주요 10대 화학사고에 관하여, You and Chung (2014)과 Yoo (2021)는 유해화학물질의 종합적인 사고 사례에 대하여, Shin et al. (2016) 염산 화학사고사례를, T.-H. Lee et al. (2017)는 인명사고 특성을, Kim et al. (2017)과 Jeong and Lee (2020)은 운반사고 사례를 분석하여 체계, 전문성, 시설 및 장비, 사고원인을 면밀히 검토하여 통계분석을 통해 제도적·기술적 안전관리 강화를 위한 대책을 제시하였다.

한국은 현재 화학사고 예방 관리 계획서로 구)장외영향평가와 구)위해관리계획을 통합하여 관리하고 있다. 구)장외영향평가 제도는 독성물질을 선택하여 영향범위를 예측하게 되며, 범위안의 주변환경의 특성에 따라 위험도를 산정하는 방식으로 이루어진다. 미국의 EPA에서도 OCA (offsite consequence analysis)를 통한 화학 주변의 장외영향평가를 실시하고 있으며(Robert et al., 2013), 현재 국내는 KORA 5.0 프로그램을 통해 화학관리 주체가 평가를 하여 제출하고 있다. 관리 프로그램을 고도화하기 위한 Han et al. (2015)은 GIS기반의 피해예측 기술 연구를 수행하였다. I. Lee et al. (2017)는 위험지도 작성과 안전거리를 확보하기 위한 기술적 분석을 수행기도 하였다. 그러나 취약요인의 속성을 고려하지 않은 구)장외영향평가의 종합위험도를 결정함에 있어 영향범위내 인구수와 발생빈도만을 고려하게 되는 것이 개별 취급 시설에 독성 정도에 따라 평가가 달라질 필요가 있다(Choi et al., 2018). 장외영향평가는 화학사고의 확산 모델을 근거로 피해정도를 예측하게 되는데 확산영향범위를 결정하기 위한 가스확산 수치해석모델로 ALOHA

(Areal Location of Hazardous Atmospheres), PHAST (Process hazard analysis)가 주로 활용되고 있다. Weber (2006)는 2가지 모델을 포함하여 6가지 모델에 대하여 시나리오별 확산 범위와 농도에 대한 비교연구를 수행하여 모델간의 결과를 비교 분석하였다. 화학사고의 범위 산정의 적정성을 확인하기 위하여 여러 화학물질 확산 프로그램을 비교한 연구를 수행되어 왔다. H.E. Lee et al. (2018)과 Seo (2020)는 한국의 KORA와 가장 대중적으로 많이 활용된 ALOHA, PHAST를 활용하여 여러 기상시나리오에 따른 영향범위 결과를 비교 분석하여 리스크를 관리하기 위하여 물질별로 최적화된 프로그램을 제시하였다. Hwang (2021a)은 항만저장물질 누출에 대한 피해범위 예측과 Hwang (2021b)의 위험지역 예측연구를 ALOHA 프로그램을 활용하여 수행하였다. Jeon and Kim (2021)은 KORA를 활용하여 시나리오를 선정하여 회귀분석을 통한 피해영향범위 산정식을 제시하여 다양한 조건에서의 영향범위를 추정하였다. 위 선행연구들과 같이 주로 국내는 법제도적인 측면의 개선방안과 프로그램 구동을 통한 결과 비교 분석 연구가 주를 이루고 있다.

영향범위내 리스크 즉 예상되는 피해의 정도를 결정하기 위하여 취약성 분석을 수행하게 된다. ALCE (American Institute of Chemical Engineers)와 CCPS (Center for Process Safety)는 화학사고로 인한 개인(Individual)의 취약정도를 고려한 리스크와 관련된 연구를 진행하고 있다(Center for Chemical Process Safety, 2010). OCHA (UN Office for Coordination of Humanitarian Affairs)는 인구의 취약성 요소에 대하여 자연적 사회적 경제적 물리적으로 분류하여 맵핑을 실시하고 있다.

기술적인 분석결과를 통해 대응을 위한 계획 수립에 관한 연구도 진행되었다. Ko (2013)는 수치해석과 ALOHA 프로그램을 활용하여 결과영향분석을 수행하여 독성가스의 완충거리를 결정하여 비상대응계획 수립에 근거를 마련하였다. Yoo and Moon (2018) ALOHA를 활용하여 유해화학물질의 도달시간을 확인하여 대피할 수 있는 비상 대응 계획을 수립하였다.

취약성의 개념은 1970년대 사회과학분야에서 단순 재난에 대한 위험인지 연구에서 시작되었다. 이후로 취약성의 개념은 확장되어 재난분야에서 사용되고 있다. 이후 취약성에 대한 패러다임은 지속적으로 변화하고 있으며 취약성에 대한 정의와 개념적인 프레임 워크에 따른 다양한 정의와 개념이 존재하고 있다. 취약성은 물리적 경제적 사회적 환경적 취약성의 4가지 종류로 분류하는 것이 일반적이다. 물리적 취약성이란 건축환경이나 인구에 대한 물리적인 영향에 대한 잠재력을 의미하며 위치와는 관련이 없다. 사회적 취약성이란 빈곤층, 한부모 가정, 장애인, 아동 및 노인들에 대한 그룹별의 역량을 고려한다. 또한 예상되는 피해로부터 영향을 받은 리스크 요인들만의 고유한 특징에 따라 달라지며, 시간에 따른 유동성을 가진다고 정의하고 있다(van Westen

et al., 2011). Léon and Carlos (2006)는 취약성은 시간의 경과에 따라 지속적으로 변화되며, 물리적, 사회적, 경제적, 환경적 요인에 영향을 받는다고 정의하고 있다. 그러나 시간에 따라 유동적으로 변화하는 취약성은 데이터의 한계로 인하여 평가에 어려움이 있다. 특히 인구과 같이 유동성을 가지고 있는 요인은 시간별로 움직이기 때문에 취약성 평가시 동적인 특성을 반영는 한계가 생긴다. 따라서 본 논문에서는 화학 누출사고로 인하여 피해가 예상되는 취약성 평가의 대상을 선정하여 인구의 연령별 민감도와, 시간에 따른 장소의 유동성을 고려하여 취약성 맵 작성 연구를 수행하였다.

### 3. 데이터 수집

본 논문 수집된 데이터는 Fig. 1의 데이터를 수집하여 텍스트를 GIS의 데이터로 전환시키는 지오코딩 프로세스를 거쳐 취약성 평가에 활용 하였다. 00시 A산업시설 지역 주변 연구지역의 화학누출사고에 대한 취약성을 분석은 집계구(Output Area) 단위의 분석을 실시하였다. 집계구란 세분화된 단위로 크기는 읍면동의 약 1/23의 크기이다. 따라서 리스크, 취약성, 위험을 평가함에 있어 최소단위인 집계구 단위의 데이터를 활용한 취약성 평가가 실시하는 것이 적절하여 집계구 단위 분석을 수행하였다(Park et al., 2014). 집계구의 범위는 SGIS에서 폴리곤을 제공하고 있으며 연령별 인구수는 TXT포맷으로 제공하고 있다. 집계구 단위의 연령별 인구수, 사업체 종사자수와 통계청에서 제공하는 연령별 경제활동 비율 자료를 활용하였다. 장외영향평가 분석을 위해 00시의 A산업시설을 Point 데이터로 생성하여 대상지로 선정하였다. 대응시설인 병원과 소방서는 좌표데이터를 획득하여 GIS의 point 데이터로 변환하였다. 화학누출 시나리

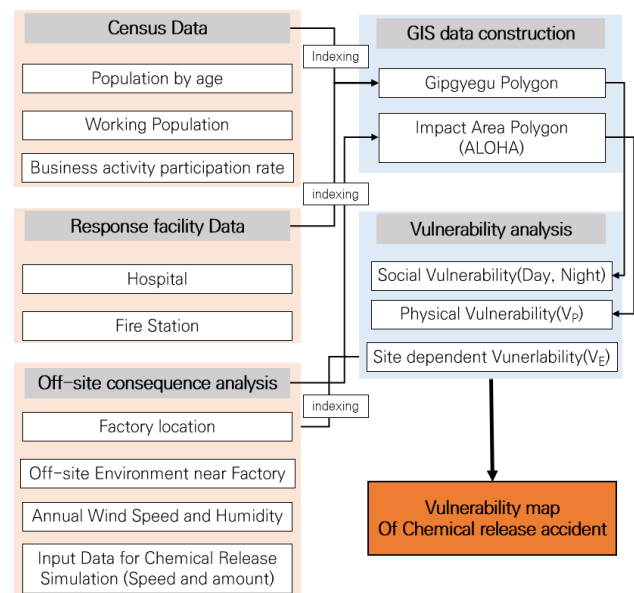


Fig. 1. Research Process

오에 필요한 화학물질관련 입력데이터는 CCPS의 Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis에서 다른 염소 누출에 따른 최악의 시나리오를 사용하였다. 본 연구에서 활용한 최악의 시나리오는 EPA (U.S. Environmental Protection Agency)에서 제공하는 시나리오로써 국외는 물론 국내 장외 영향평가 제도 시행 시 기준으로 활용하였다. 일부 기상학적 인 특성(온도 및 습도)를 제외하고 화학누출 영향범위가 넓게 나타날 수 있는 조건을 사용하였다. 기상데이터는 기상청의 통계데이터의 연평균 기상데이터와 사고지점 주변의 공간적 특성을 고려하여 최악의 상황을 설정하였다.

## 4. 연구방법

### 4.1 연구 프로세스

본 연구는 화학누출 사고에 대한 취약성 분석을 위하여 Fig 1의 프로세스로 통해 연구를 진행하였다. 수집된 인구데이터 3종과 대응시설 데이터 2종은 지수화 과정을 거쳐 지오코딩을 하여 집계구 단위로 폴리곤에 데이터를 구축되어 비경제활동시간의 사회적 취약성( $V_S$ )과 경제활동시간의 사회적 취약성( $V_D$ ) 맵을 작성하게 된다. 최악의 시나리오를 가정한 염소의 화학누출 확산 결과는 ALOHA 프로그램을 활용하여 장외영향 평가 결과를 도출하여 독성등급을 나타내는 AEGL 등급에 따라 물리적 취약성( $V_P$ )를 도출하게 된다. 마지막 장소의존적 취약성( $V_e$ )은 사고지점인 공장으로부터의 이격된 거리에 따라 맵을 작성하게 되며, 각각의 취약성 맵은 중첩을 통해 최종 화학누출 사고에 의한 비경제 활동시간과 경제활동시간의 취약성 맵을 작성하게 된다.

### 4.2 취약 요인 분류 및 가중치

폴리곤에 지오코딩을 위하여 취약성 분석을 위해서는 연령별 피해수준, 거리별 대응능력의 정도, 독성의 강도, 공장과의 이격거리에 따른 취약성 지수인 가중치를 결정해야한다. 사회적 취약성은 비경제활동시간의 취약성  $V_S$ 와 경제활동시간의 취약성  $V_D$ 으로 분류하였으며, 인구의 연령에 따른 피해정도를 지수화 하였다. D. Lee et al. (2018), H.E. Lee et al. (2018), Stojanovic and Jovasevic-Stojanovic (2006)는 인구 연령과 인구 밀도, 대응기관의 접근성을 고려한 취약성 분석을 수행하였다. 본 연구는 인구 연령별 화학사고의 민감도와 대응시설(병원, 소방서)의 접근성을 고려하였다. 대응시설은 거리에 따른 가중치를 적용하였고, 연령별 민감도는 HMSO (1954)가 수행한 연구 결과 재난취약자로 분류되는 어린이와 노약자에게 심각한 영향을 미친 결과로 보아 화학재난시 화학물질의 대한 민감도를 나타내기에 적절하다고 판단하여 대기 오염으로 발생한 사망한 연령별 사람수를 정규화 하여 연령별 가중치를 결정하였다. 집계구마다 면적(A)를 고려하여 연령별 인구밀도 지수를 적용하였다.  $V_P$ 는 물리적 취약성으로 ALOHA 모델링을 통하여

AEGL 단계별로 나타내었으며 인구에 주는 부상정도의 정도수준에 따라 0.1, 0.5, 1로 나타내었다.  $V_e$ 인 장소의존적 취약성은 공장으로부터의 거리에 따른 취약성이다. 발생장소와의 이격거리에 따라 대피시간이 확보가 안되어 인명피

**Table 1.** Vulnerability Index Table (a: Age, b: Distance from Hospital, c: Distance form Reponse Station, d: Criticality, e: Distance from Chemical Accident Point)

Type	Factor	Grade	Index	
$V_S$ & $V_D$	a	0-4	0.28716	
		5-14	0.00388	
		15-24	0.00748	
		25-34	0.01108	
		35-44	0.02508	
		45-54	0.07998	
		55-64	0.22838	
		65-74	0.51114	
		75 <	1	
	b	< 500 m	0.125	
		500-1,000 m	0.25	
		1,000-1,500 m	0.375	
		1,500-2,000 m	0.5	
		2,000-2,500 m	0.625	
		2,500-3,000 m	0.75	
		3,000-3,500 m	0.875	
		3,500-4,000 m	1	
	c	< 500 m	0.25	
		500-1,000 m	0.5	
		1,000 m-1,500 m	0.75	
		1,500 m-2,000 m	1	
	$V_P$	d	AEGL-1	0.1
			AEGL-2	0.5
			AEGL-3	1
	$V_e$	e	300 m	1
			600 m	0.5
			900 m	0.333
			1,200 m	0.25
1,500 m			0.2	
1,800 m			0.166	
2,100 m			0.142	
2,400 m			0.125	
2,700 m			0.111	
3,000 m			0.1	
3,300 m			0.09	
3,600 m			0.083	
3,900 m	0.076			

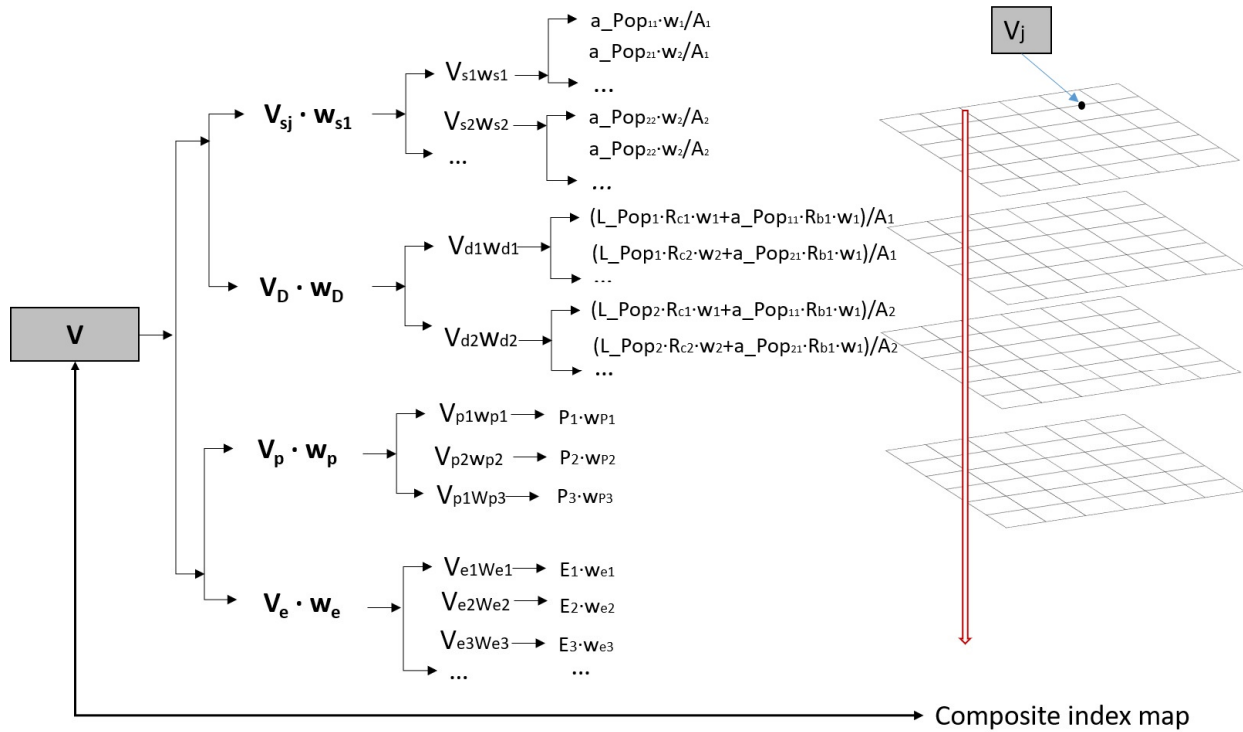


Fig. 2. Schematic Diagram for Drawing Vulnerability Assessment Map of This Study Applying the Multi-Criteria Evaluation Method

해가 커질수 있으므로 거리의 역수를 정규화 시켜 거리에 따른 가중치 적용하였다. Table 1은 취약성 평가의 요인별 등급과 지수를 나타낸 것이다.

### 4.3 다중기준평가 방법

다중기준 평가 방법은 Analytical Hierarchinal Process (AHP)를 기초로 하며 리스크 평가에 적용하기 위한 연구가 수행되었다. Fig. 2는 다중기준평가 방법에 의한 본 논문의 취약성 평가를 과정을 나타낸 그림이다.  $V_{sj}$ 는 연령별 인구에 의한 가중치  $w_i$ 를 적용하여 j집계구의 사회적 취약성 데이터를 구축하였다. 경제활동 시간의 사회적 취약성( $V_D$ )는 j집계구의 종사자 취약성,  $V_{Dj}$ 는 j집계구의 비거주자 취약성,  $L\_Pop_j$ 는 j 집계구 내의 총 종사자수  $R_{bi}$ 는 I연령의 비경제활동 비율,  $R_{ci}$ 는 i연령의 경제활동 비율,  $w_i$ 는 연령별 가중치,  $a\_Pop_{ij}$ 는 j 집계구의 i연령대의 인구수 말한다. 취약성 평가는 집계구 별로 구축된 데이터의 지수화를 거쳐 지오코딩을 통해 레스터로 변환하여 중첩을 통해 취약성 맵이 도출된다.

## 5. 취약성 분석

### 5.1 사회적 취약성 분석

#### 5.1.1 비 경제활동시간 사회적 취약성( $V_s$ )

$V_s$ 는 연령별 통계자료는 주거지를 기준으로 조사한 자료를 활용하였기에 인구가 주거지에 위치할 경우를 나타낸다. 면적이 다른 지역을 동일한 기준으로 평가할 경우 인구의

집중도를 설명하기에는 한계 있으므로 Shape\_Area 이용하여 밀도를 계산하였다. j 집계구의 사회적 취약성(연령별 취약성)을 구하는 Eq. (1)과 같다.

$$V_{sj} = \frac{\sum_{i=1}^{18} a\_Pop_{ij} \times w_i}{A_j} \quad (1)$$

j는 각 집계구의 고유 코드번호를 말한다.  $a\_Pop_{ij}$ 는 j 집계구의 i연령대의 인구수이며( $i = 1\sim 18$ ),  $V_{sj}$ 는 j 집계구의 사회적 취약성,  $A_j$ 는 j집계구의 면적( $j = 1\sim 413$ )을 나타낸다. 연구지역 전체 413개 집계구의 사회적 취약성 결과는 Eq. (2)를 통해 도출되었다.

$$V_s = \prod_{V_{sj}=1}^{413} V_{sj} \quad (2)$$

Table 2는 연구대상 범위 중 ID 1번~16번 집계구의 결과를 일부 나타낸 것이다. Table 2의 결과는 연령별 민감도와 병원과 소방서의 접근성의 지수를 엑셀을 통해 사전 계산되어 사회적 취약성이다. Fig. 3은 비경제활동시간의 사회적 취약성 맵을 나타낸 것으로, 인구밀도와 연령별 민감도가 높은 지역은 다소 높게 나타나고 있으며 소방서로부터 접근이 용이한 지역의 경우 취약성이 낮아짐을 확인할 수 있다. 연구지역의 가운데 영역의 경우 소방서로부터의 접근성

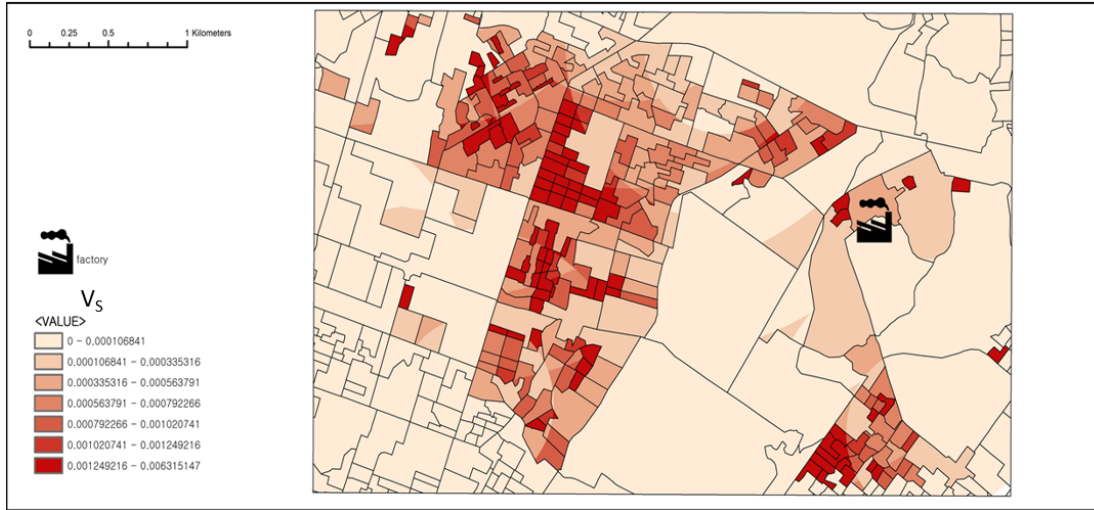


Fig. 3. None Business Activity Hour Vulnerability ( $V_s$ ) Result

Table 2.  $V_s$  (None Business Activity Hour) Result of ID 1~16 (ID: Polygon of Analysis Unit)

ID	$\sum_{i=1}^{18} a\_Pop_{ij} \times w_i$	$\frac{\sum_{i=1}^{18} a\_Pop_{ij} \times w_i}{A_j}$
1	10.62507	0.000524082
2	89.41844	0.005105623
3	55.25467	0.002395696
4	53.31614	0.003372115
5	39.00934	0.003776968
6	45.6197	0.003279504
7	32.50204	0.00219043
8	62.36695	0.002697277
9	78.06321	0.005135016
10	58.12967	0.002528433
11	16.71229	0.002298683
12	53.1351	0.002369776
13	29.53448	0.002675676
14	36.76491	0.002696005
15	32.43893	0.002729941
16	43.93101	0.003308504

이 낮으므로 취약성이 높음을 확인할 수 있다.

### 5.1.2 경제활동시간 사회적 취약성( $V_D$ )

취약성은 시간과 함께 변화하는 동적인 특징을 갖는다 (Léon and Carlos, 2006; van Westen et al., 2011).

비경제활동시간의 사회적 취약성과 동일한 연령별 민감도, 병원, 소방서의 접근성 취약요인을 적용하였으나, 주거시간의 연령별 인구의 수 활용하여 취약성 평가를 수행하였

Table 3. Business Activity Participation Rate by Age

Age	None business activity rate	Business activity rate
< 14	1	0
15-19	0.92	0.08
20-24	0.489	0.511
25-29	0.251	0.749
30-34	0.218	0.782
35-39	0.247	0.753
40-44	0.195	0.805
45-49	0.178	0.822
50-54	0.206	0.794
55-59	0.269	0.731
60-64	0.379	0.621
65-69	0.668	0.332
70 <	1	0

다. 경제활동시간의 인구 데이터는 사업체에 경제활동중인 인구와 주거지에서 경제활동을 하지 않는 인구의 합으로 이루어진다. 경제활동을 하지 않는 인구수 결정을 위하여 연령별 인구수와 연령별 경제활동 비율을 적용하여 집계구 내의 주간 인구를 산출하였다. 경제활동 비율은 Table 3의 통계청에서 제공하는 국내의 연령별 경제활동 참가율을 나타낸 것을 참고하였다. 집계구내 사업체 총사자의 사회적 취약성은 과정은 Eq. (3)에 따르며, 집계구내 비경제활동중인 거주자의 사회적 취약성은 Eq. (4)를 따른다.

$$V_{Lj} = \frac{\sum_{i=1}^{18} L\_Pop_j \times R_{ci} \times w_i}{A_j} \quad (3)$$

$$V_{bj} = \frac{\sum_{i=1}^{18} a\_Pop_{ij} \times R_{bi} \times w_i}{A_i} \quad (4)$$

$V_{Lj}$ 는 j집계구의 종사자 취약성,  $V_{bj}$ 는 j집계구의 비거주자 취약성,  $L\_Pop_j$ 는 j 집계구 내의 총 종사자수  $R_{bi}$ 는 i연령의 비경제활동 비율,  $R_{ci}$ 는 i연령의 경제활동 비율,  $w_i$ 는 연령별 가중치,  $a\_Pop_{ij}$ 는 j 집계구의 i연령대의 인구수( $i = 1\sim 18$ )이다.

Table 4는 종사자만 고려했을 경우의 주간 취약성과 주거지 인구통계중 비경제활동인구수를 포함한 집계구 단위의 인구를 포함할 결과의 일부를 나타낸 것이다.

취약성 결과로 Fig. 4는 GIS를 이용한 동적 취약성의 주간 시간을 나타낸 것이다. 연구지역 집계구 전체의 동적

**Table 4.**  $V_D$  (Business Activity Hour) Result of ID 1~16 (ID: Polygon of Analysis Unit)

ID	$V_{Lj}$	$V_{Lj}+V_{bj}$
1	0	0
2	0.000072	0.003498
3	0.000116	0.001536
4	0.001174	0.003419
5	0.000463	0.002848
6	0.000667	0.002703
7	0.000777	0.002021
8	0.000347	0.002103
9	0.000231	0.003871
10	0.001028	0.00257
11	0.000696	0.001955
12	0.000439	0.001908
13	0.000191	0.001946

취약성을 구하는 식은 Eq. (5)와 같다.

$$V_D = \prod_{j=1}^{413} (V_{Lj} + V_{bj}) \quad (5)$$

주간인구는 Fig. 4처럼 상업지역이 취약함을 나타내며, 대응시설과의 접근성이 떨어질수록 취약성이 높음을 확인할 수 있다. 연구지역의 좌측 00시의 변화가 주변 상권의 취약성이 낮은 이유는 소방서와 병원과의 접근성이 용이하기 때문으로 판단된다. 계층별 가중치를 적용하는 경우, 인구에 대하여 상위단계의 가중치를 적용하지 않았기에 인구의 밀도가 높음에도 불구하고 상대적으로 취약성이 낮게 나타난 것으로 판단된다. Fig 4의 우측의 하단의 산업지역의 경우 소방서와 병원과의 접근성이 떨어지며, 주간에 사업체에 종사하는 종사자 수가 많으므로 취약성이 높음이 나타난다.

## 5.2 물리적취약성( $V_P$ )

물리적 취약성은 화학누출 사고로 인구에 대한 물리적인 영향 대한 잠재력을 의미한다. 물리적 취약성 판단을 위하여, 알로하 프로그램을 이용하여 대상지역에 시뮬레이션을 수행하였다. ALOHA 시뮬레이션은 최악의 시나리오를 기반으로 Table 5에 표기된 입력 데이터를 사용하였으며, 결과는 Figs. 5, 6과 같으며, GIS에 나타낸 결과는 Fig. 7과 같다.

ALOHA는 미국의 해양대기국(NOAA)이 개발하여, 환경보호청(EPA)과 공동으로 활용하는 화학사고 피해예측 프로그램이다. ALOHA는 공기보다 가벼운 일반적인 경우는 Gaussian 대기 확산 모델과 공기보다 무거운 가스 또는 극저온 가스에 적용하는 DEGADIS 누출 모델을 사용하고 있다. ALOHA는 고도와 같은 지형을 반영하지 못하며, 연속누출의 시간제한, 3차원농도분포 계산이 불가능한 한계를 가지고



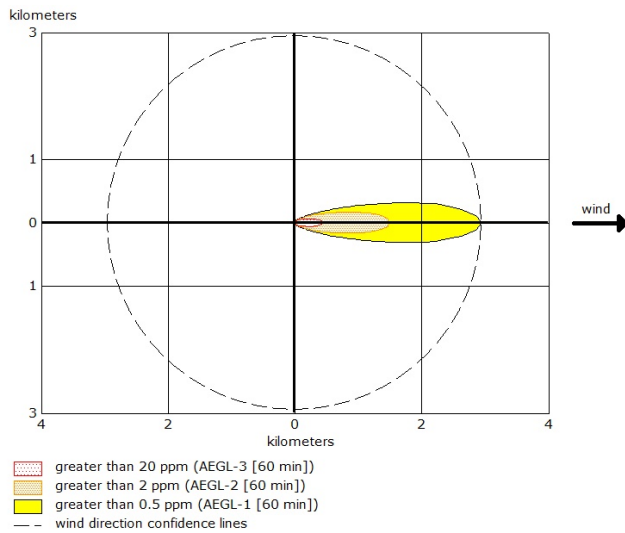
**Fig. 4.** Business Activity Hour Vulnerability ( $V_D$ ) Result

**Table 5.** Worst Case Scenario Input Data for ALOHA Simulation

Input Data	Input Parameter
Buinding Environment	0.32
Factory	Suwon A Factory
Hazardouse Material	Chlorine
Wind Speed	1.7 (annual average)
Wind direction	E (Housing Dense Area)
Roughness	City, Forest
Temp.	12
Atmospheric Stability	B
Huminity	50% (annual average)
Release rate	0.29 kg/s (CCPS)
Release duration	10 min
Calculation Methoe	DEGADIS

있다(Robert et al., 2013). 그러나, ALOHA는 확산모델링을 위하여 풍속, 풍향, 대기안정도, 표면거칠기 및 대기 역전층을 고려한다. 또한 Hanna et al. (2008)이 염소 누출 사고의 영향 범위를 산정하는데에 있어서 ALOHA 프로그램이 기타 5개의 상용프로그램 비교를 통해 성능을 확인한 모델로 염소물질의 비교실험에서는 다른 6개의 프로그램과 비슷한 수치를 나타내고 있다. 더불어 ALOHA는 외부의 DB이용이 가능하며 모델의 결과 GIS와 Google Earth 프로그램과 호환되어 피해영향 범위를 지도상에 직접 표출할 수 있다. ALOHA는 활용하여 사고 시나리오별(독성물질 누출, 화재·폭발 등) 사고영향범위 등을 예측한 후, 그 피해범위를 지도상에 표출하여 비상대응계획 수립 등에 활용할 수 있는 장점이 있다(Kim et al., 2021).

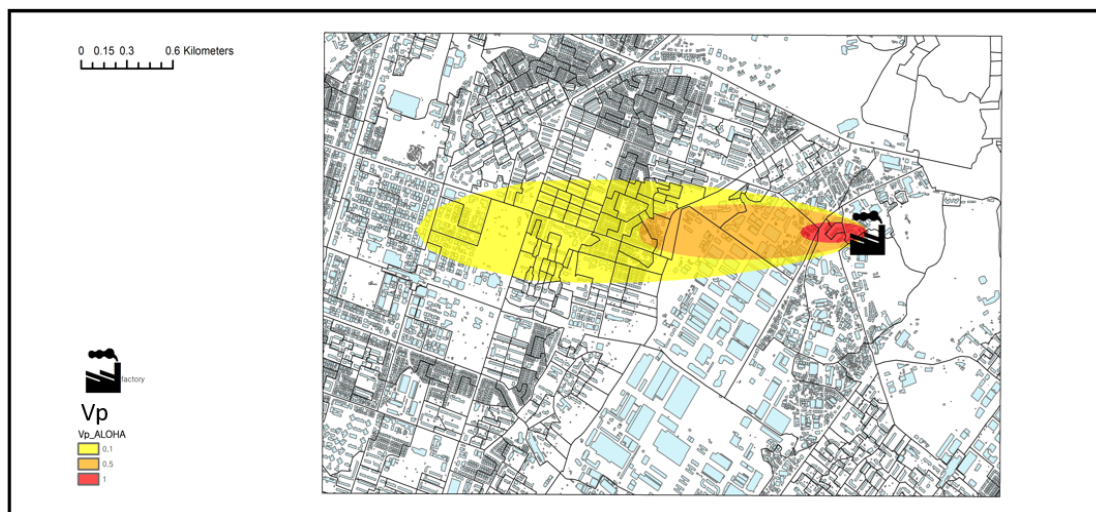
화학 누출사고로 인한 물리적 취약성은 AEGL (Acute Exposure Guideline Level) 1, 2, 3등급은 NAC (National Advisory Committee)에 의하여 만들어지 지표로서 피해수준으로 나누어진다. 민감정도에 따라 사망 부상 경상에 1, 0.5, 0.1의 가중치를 사용하였다.



**Fig. 5.** Treat Zone Analysis



**Fig. 6.** ALOHA Result on Google Earth



**Fig. 7.** Physical Vulnerability ( $V_p$ ) Result



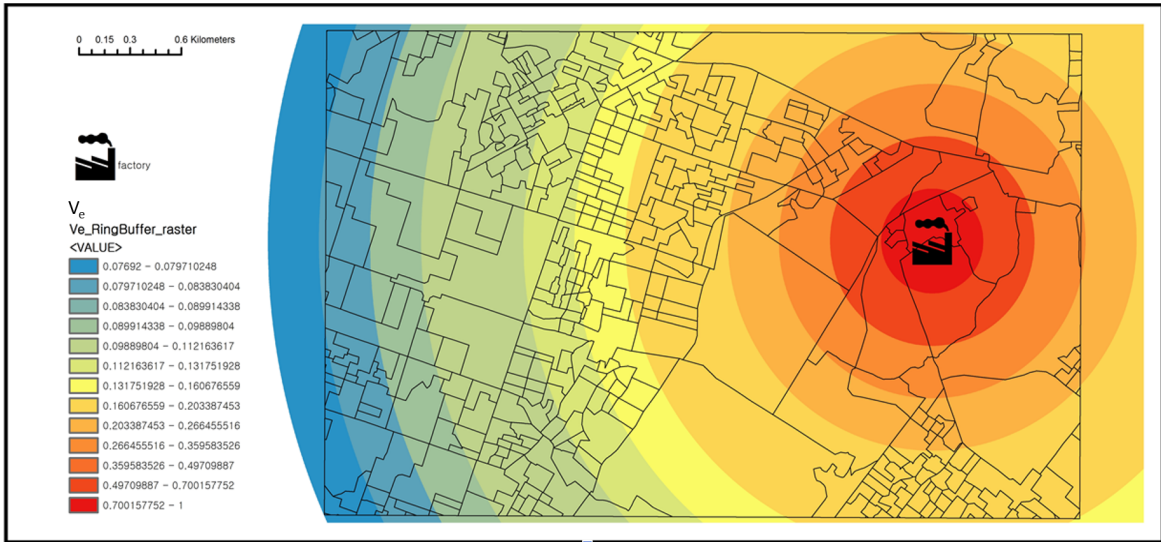


Fig. 8. Site Dependent Vulnerability ( $V_e$ ) Result

### 5.3 장소의존적 취약성( $V_e$ )

장소, 위치에 따라 취약성의 접근 방식이 다르다는 점을 착안하여 공장과의 거리, 위험으로부터의 거리에 따른 취약성을 장소의존적 취약성이라 정의하도록 한다. 본 논문에서는 00시의 A산업시설과의 거리에 따라 Table 1과 같이 취약성의 범위를 정규화 하였다. RingBuffer를 이용하여 Polygon을 생성한 후 Raster로 변환하였다. Fig. 8은 Raster로 변환된 그림을 나타낸 것이다.

## 6. 연구결과

00시의 A산업시설에서 연소 유해화학 물질 누출에 따른 취약성 평가를 수행하였다. 취약성 평가를 위하여 GIS 기반의 사회적취약성( $V_s$ ,  $V_D$ ), 물리적 취약성( $V_p$ ), 장소의존적 취약성( $V_e$ )을 종합하여 Figs. 9, 10, 11의 취약성 맵 결과를 도출하였다. 취약성 맵 결과는 Table 6에 따라 상대적 취약수준을 결정한다.

Fig. 9는 연령을 고려하지 않고 인구밀도만을 반영하여 화학 누출 사고 발생으로 인한 인구 취약성을 나타낸 취약성 맵이다. 인구밀도만을 고려할 경우 Fig. 10의 비경제활동 시간의 취약성( $V_s$ ) 맵과 대체로 비슷한 경향을 보이지만, 연구지역 중심부의 취약성 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. Fig. 10은 인구연령, 병원과 소방서와의 접근성을 종합적으로 적용하여 나타낸 결과로서 연구 지역 중 중심부는 화학물질 누출 사고로 인하여 취약성의 7단계인 매우 높음을 확인할 수 있다. 비경제활동 시간의 사회적 취약성인 가운데 지역의 취약성이 상당히 높음이 확인 되었다. 단순히 인구 밀도가 아닌 대응, 응급시설과의 접근성이 다른 지역에 비해 떨어지며 인구의 밀도 또한 높은 이유라고 판단된다. Fig. 11은 경제활동 시간 즉, 주간 인구를 측정하여 동적 특성을

Table 6. Vulnerability Level

Vulnerability Level		Definition
1		minor
2		very small
3		small
4		moderate
5		significant
6		serious
7		extreme

반영한 경제활동 시간의 사회적 취약성( $V_D$ )이다. Fig. 11은 Fig. 10에 비해 주간시간대에 인구들이 밀집한 산업지역의 취약성이 높게 평가 되었다. 주간 시간의 경우 주거지에 비해 인구가 집중된 산업지역과 상업지역의 취약성이 5-7단계 지역이 존재함을 확인할 수 있었다. 비경제활동인구(주거지 주변에 머물러 있는 어린이나, 노약자)가 많은 집계구도 취약성이 다소 높음이 확인된다. Figs. 9, 10, 11은 공통적으로 화학 누출 사고 발생 시 공장으로부터 7단계가 가까운 수준을 가지며, 공장으로부터 먼 지역이거나 병원과 소방서와의 접근성이 높을수록 1단계의 취약성을 보여준다. 본 결과는 가정된 시나리오를 통한 화학물질 누출사고 발생 시 취약한 지역 인지를 통하여 취약성이 높은 지역에 대한 구조적, 비구조적인 대책 수립을 위한 위치적 정보를 제공한다. 또한 주간과 야간에서 화학물질 누출 사고 발생 시 취약성이 높은 지역에 대한 대응대책을 마련하는데 정보를 제공할 것으로 판단된다.

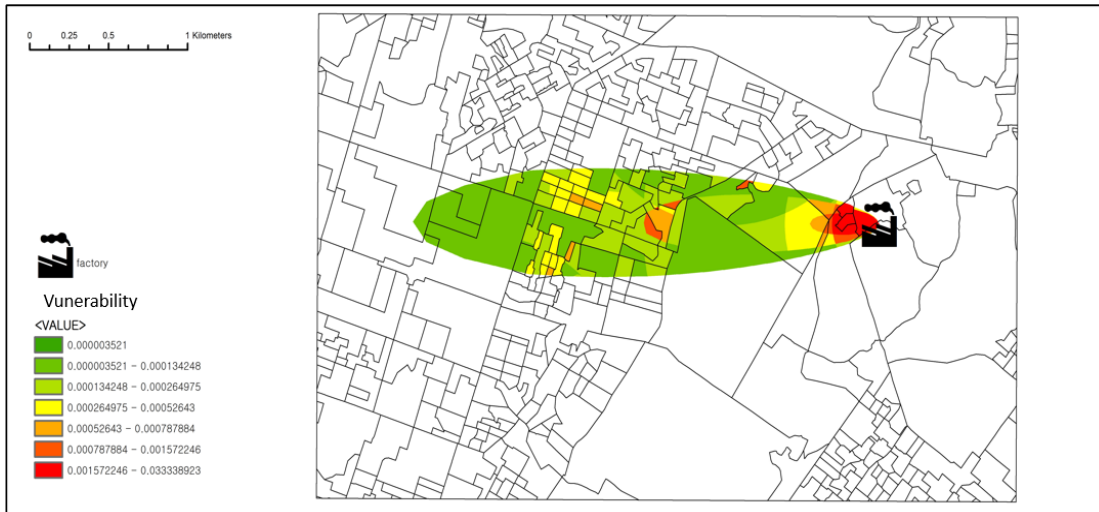


Fig. 9. Vulnerability Assessment Map Considering Only Population Density for Chemical Release Accidents

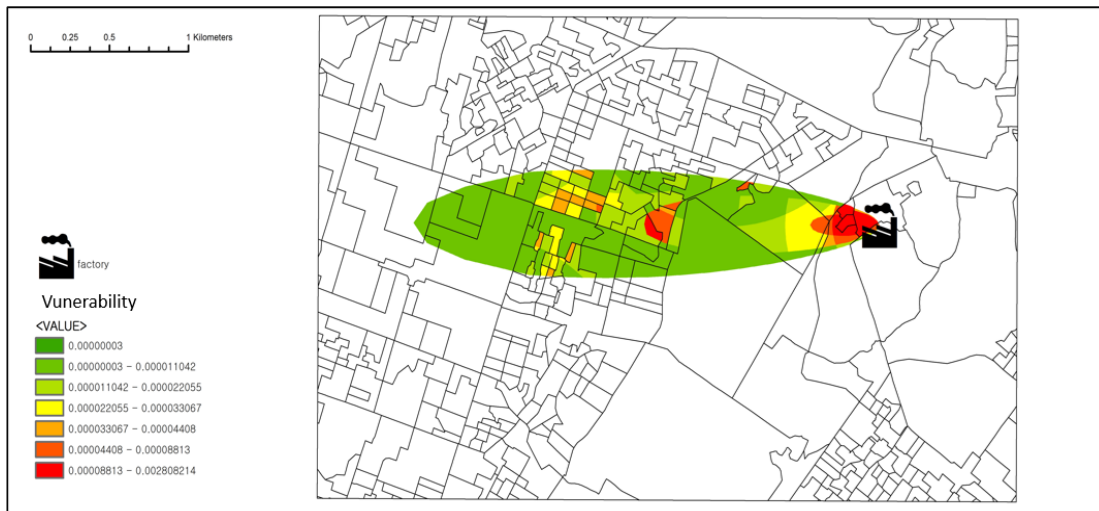


Fig. 10. Vulnerability Assessment Map During None Business Activity Hour for Chemical Release Accidents

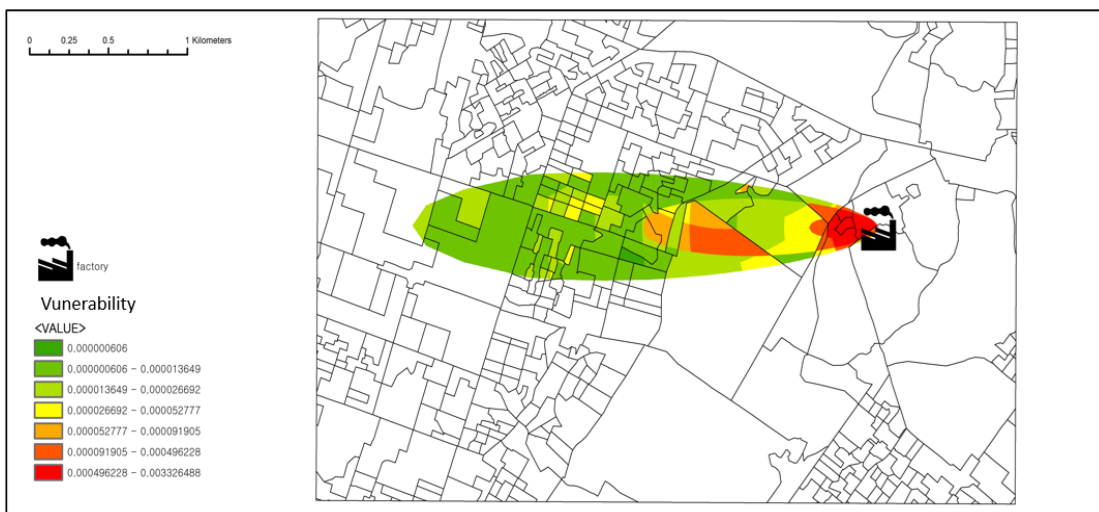


Fig. 11. Vulnerability Assessment Map During Business Activity Hour for Chemical Release Accidents

## 7. 결론

현재 국내의 화학사고 위험도 평가 프로그램인 KORA 5.0은 통계지리서비스에서 제공하는 인구데이터를 획득한다. 통계청에서 구축된 인구통계 자료는 주거지만을 중심으로 조사되어 있다. 따라서 비경제활동시간의 인구수를 고려하게 되는 한계가 존재한다. 피해예상 범위의 노출된 인구 수만을 고려할 뿐 취약성 분류를 통한 연령별, 대응시설의 접근성, 시간별, 위험장도(거리, 농도)에 의한 평가는 이루어지지 않고 있다.

따라서 첫째로, 본 논문은 화학재난에 대하여 취약성을 4가지로 분류하고, GIS 기반의 분석을 수행하였다. 공간적 다중 기준 평가 방법을 활용하였으며, 최악의 시나리오를 기반으로 화학물질 누출 사고 발생에 따른 취약성평가를 수행하였다. 둘째로, 사회적 취약성 평가는 인구의 유동성을 가지는 동적인 특성을 고려하여 경제활동시간과 비경제활동시간으로 분류하여 연령민감도, 대응시설(병원, 소방서)의 접근성을 고려한 취약성 분석을 수행하였다. 셋째로, ALOHA 화학누출 시뮬레이션을 통해 독성수준별 영향범위를 결정하여, 연령별 취약정도를 고려한 물리적 취약성 평가를 수행하였다. 넷째로, 장소 의존적 취약성은 공장과의 근접성을 반영하였다. 사고지점으로 부터의 거리는 유해화학물질의 시간에 따라 확산되는 범위가 차이가 발생한다. 따라서 인구가 위험에 노출되기 전의 대피가능한 시간을 고려하여 시간적 분석을 포함한 것에 의의가 있다. 또한 노출된 인구의 수만을 고려하는 연구와 달리 취약요인을 다양화하고, 시간적 개념을 적용한 본 논문은 차별성을 가진다고 판단된다. 그 결과 구간 및 야간에 사고발생시 취약성이 높은 지역을 사전에 확인하여 효율적으로 재난관리가 이루어질 것으로 기대한다.

향후 공간을 분석할 경우 역거리가중분석(IDW), Hotspot 분석을 활용한 가중치 분석을 수행한다면, 향상된 연구 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 취약성 평가는 위험에 노출된 피해정도를 정량화 하기 위한 중요한 연구분야이며, 이에 따른 회복력을 판단할 수 있도록 확장성을 갖는 연구가 필요할 것이다. 취약성을 낮추기 위한 역량 부분은 병원의 가용인원, 소방서의 대응 능력, 자재, 출동인원, 지자체 관리인원 등 화학사고를 관리하는 유관기관의 역량을 파악을 통해 좀더 정확한 위치별 취약성을 파악할 수 있을 것이며, 경제적 피해 분석을 통하여 리스크 평가가 이루어진다면, 예방을 위한 경감계획을 수립하는데 효과적인 의사결정 지원 방안을 제시할 수 있을 것으로 판단된다. 기술적 분석과 더불어 화학 재난에 준비, 대비, 대응, 복구 단계에서의 고려해야하는 부분에 대하여 지속적인 연구를 통해 제도적 측면의 보완이 이루어진다면, 현재 연평균 사고건수와 피해정도가 감소될 것으로 기대된다.

## 감사의 글

This work was supported by the National Research Foundation, Korea (NRF) under Grant [2021R1C1C2010999].

## References

- Ahn, S.R., Kim, S.B., Lee, J.H., and Chun, K.S. (2014). Study on chemical incident response plan identified as a chemical accident statistics. *Korean Journal of Hazardous Materials*, Vol. 2, No. 1, pp. 50-54.
- Center for Chemical Process Safety. (2010). Chemical process quantitative risk analysis. In *Guidelines for chemical process quantitative risk analysis* (pp. 1-55). John Wiley & Sons, Ltd.
- Choi, W., Ryu, T., Kwak, S., Lim, H., Jung, J., Lee, J., et al. (2018). Discussion for improvement of decision system of total risk in off-site risk assessment. *J Environ Health Sci*, Vol. 44, No. 3, pp. 217-226.
- Han, Y.S., Do, K.H., Lee, Y.H., and Oh, C.B. (2015). *Development of the Accident Prediction and Response Technology for Hazardous Chemicals*. Korea Institute of Machinery and Materials.
- Hanna, S., Dharmavaram, S., Zhang, J., Sykes, I., Witlox, H., Khajehnajafi, S., and Koslan, K. (2008). *Comparison of six widely-used dense gas dispersion models for three actual railcar accidents*. In NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security (Issue January).
- His/Her Majesty's Stationery Office (HMSO). (1954). *Mortality and morbidity during the london fog of december, public health and medical subject, No. 95*.
- Hwang, W. (2021a). A study on the prediction of damage ranges by releaseages of seaport-stored substances. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 21, No. 2, pp. 23-31.
- Hwang, W. (2021b). A study on the prediction of hazardous areas of sulfuric acid releaseage. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 21, No. 5, pp. 89-97.
- Jeon, B., and Kim, H. (2021). A study on the derivation method of damage range to determine reaction in trichlorosilane release accidents. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 21, No. 1, pp. 291-300.
- Jeong, G.-S., and Baik, E. (2014). A study on the improvement of safety management of hazardous chemicals handling in the workplace gyeong-sam. *Fire Sci. Eng.*

- Vol. 28, No. 1, pp. 12-19.
- Jeong, J., and Lee, S. (2020). Analysis on the characteristics of hazardous chemical transport vehicle accidents in Korea. *Journal of the Society of Disaster Information*, Vol. 16, No. 2, pp. 310-317.
- Joo, H., Lee, Y., Im, O., and Yu, J. (2013). *A study on the improvement of environmental impact assessment of industrial complexes based on risk assessment of chemical release accidents*. Korea Environment Institute.
- Kim, J., Ryu, J., Ryu, T., Kwak, S., and Lim, H. (2018). Suggestions for increasing utilization of KORA for supporting the off-site risk assessment system. *J Environ Health Sci*, Vol. 44, No. 2, pp. 124-132.
- Kim, K., Lee, J., and Yun, H. (2021). Risk assessment based on highway hydrogen chloride gas release scenario using GIS. *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 37, No. 3, pp. 591-601.
- Kim, S., Kwak, D., and Jeon, J. (2018). A study on the contribution to reducing chemical accident of joint inter-agency chemical emergency preparedness center. *Journal of the Korea Society of Disaster Information*, Vol. 14, No. 3, pp. 360-366.
- Kim, S., Kwak, D., Jeong, S., and Kim, H. (2019). A study on contribution to reducing chemical accidents of reporting for awarding a contract of hazardous chemicals. *Journal of the Korea Society of Disaster Information*, Vol. 15, No. 3, pp. 409-417.
- Kim, S., Lee, H., and Jeong, S. (2020). A study on the effectiveness of performance management system. *Academic Medicine*, Vol. 51, No. 1, pp. 62-63.
- Kim, S., Lee, S., Jeong, S., Lim, M., Song, Y., Ahn, E., et al. (2017). A study on investigation procedure of chemical spill by vehicle transporting chemicals. *Journal of The Korean Society of Disaster Information*, Vol. 13, No. 1, pp. 1-5.
- Kim, S., Lim, M., and Choi, S. (2015). Comparison of domestic chemical accident investigation system. *Journal of The Korean Society of Disaster Information*, Vol. 11, No. 4, pp. 515-519.
- Kim, S., Lim, M., and Park, J. (2015). Investigation study of information improvement in chemical accident by extraordinary chemical reaction. *Journal of the Korea Society of Disaster Information*, Vol. 11, No. 2, pp. 219-225.
- Ko, J., Kwon, H., Jeong, C., Lee, H., and Jeong, S. (2020). *A study on introduction plan of chemical process quantitative risk assessment*. Korea Occupational Safety and Health Agency.
- Ko, J.S. (2013). Study on the consequence effect analysis & process hazard review at gas release from hydrogen fluoride storage tank. *Journal of the Korea Society of Disaster Information*, Vol. 9, No. 4, pp. 449-461.
- Lee, D., Hyeon, Y., and You, B.-T. (2018). A study on the improvement of emergency block and diffusion prevention system for hazardous chemicals release. *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 22, No. 5, pp. 89-99.
- Lee, G. (2017). *A study on off-site risk assessment of 10 representative chemicals in chemical industry*. Department of Environmental & Safety Engineering Graduate School, Ajou University: Suwon, Korea.
- Lee, H.E., Sohn, J.R., Byeon, S.H., Yoon, S.J., and Moon, K.W. (2018). Alternative risk assessment for dangerous chemicals in South Korea regulation: Comparing three modeling programs. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 15, No. 8, pp. 1-12.
- Lee, I., Hwang, M., Shin, Y., and Woo, I.S. (2017). A study on off-site consequence analysis of optimal operation by risk management of petroleum chemical plant. *The Journal of Risk Management*, Vol. 28, No. 1, pp. 1-45.
- Lee, K., Lyu, B., Cho, H., Park, C., Cho, S., Park, S., and Moon, I. (2019). Development of a hazardous material selection procedure for the chemical accident response manual. *Korean Journal of Chemical Engineering*, Vol. 36, No. 3, pp. 333-344.
- Lee, T.-H., Lee, D.-J., and Shin, C.-H. (2017). Characteristic analysis of casualty accidents in chemical accidents. *Fire Science and Engineering*, Vol. 31, No. 1, pp. 81-88.
- Léon, V., and Carlos, J. (2006). *Vulnerability a conceptual and methodological review (No. 4)*. UNU- EHS.
- Park, Y., Jeong, S., and Kim, S. (2014). Natural disaster vulnerability assessment at boroughs and census output areas in seoul focusing on socio-economic perspective. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 14, No. 6, pp. 439-449.
- Robert, J., William, L., Debra, S.-B., and Michael, R. (2013). *ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) 5.4.4. November*. NOAA.
- Seo, C.M. (2020). *Comparative analysis on the estimation performance of chemical release models based on*

- accident scenarios*. Master's degree, Hanyang University.
- Shin, C.-H., Lee, H.-S., Kim, T.-H., and Park, J.H. (2016). Analysis on chemical accident characteristics of facilities handling hydrochloric acid. *Fire Science and Engineering*, Vol. 30, No. 6, pp. 14-22.
- Stojanovic, B., and Jovasevic-Stojanovic, M. (2006). Chemical and radiological vulnerability assessment in urban areas. *Spatium*, Vol. 433, No. 13-14, pp. 21-26.
- van Westen, C.J., Alkema, D., Kerle, N., and Kingma, N.C. (2011). *Multi-hazard risk assessment*. ITC of University of Twente.
- Weber, M. (2006). Some safety aspects on the design of sparger systems for the. *Process Safety Progress*, Vol. 25 No. 4, pp. 326-330.
- Yoo, B. (2021). A study on improvement safety management through chemical accident investigations. *Journal of the Korea Society of Disaster Information*, Vol. 17, No. 3, pp. 403-414.
- Yoo, B., and Moon, M. (2018). Development of emergency response plan for chemical accident using ALOHA program: Focusing on evacuation plan. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 18, No. 3, pp. 311-319.
- You, J., and Chung, Y.-J. (2014). Case analysis of the harmful chemical substances' spill. *Fire Science and Engineering*, Vol. 28, No. 6, pp. 90-98.

---

<b>Received</b>	May 27, 2022
<b>Revised</b>	May 27, 2022
<b>Accepted</b>	June 7, 2022