

국가산업단지 화학사고 대비를 위한 우선순위 화학물질과 관리지역 선정

김성준¹ · 권혜옥¹ · 황유식^{2,3} · 최성득^{1,†}

¹울산과학기술원 도시환경공학부, ²안전성평가연구소 미래환경연구센터,

³과학기술연합대학원대학교 인체 및 환경독성학

Selection of Priority Chemicals and Areas for the Response to Chemical Accidents in National Industrial Complexes

Seong-Joon Kim¹, Hye-Ok Kwon¹, Yu Sik Hwang^{2,3}, and Sung-Deuk Choi^{1,†}

¹School of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), Ulsan, 44919, Korea

²Future Environmental Research Center, Korea Institute of Toxicology (KIT), Jinju, 52834, Korea

³Human and Environmental Toxicology Program, University of Science and Technology (UST), Daejeon, 34113, Korea

Received February 25, 2016/Revised March 3, 2016/Accepted March 16, 2016

Recently, hazardous chemical accidents have increased in Korea due to large amounts of chemicals used for industrial purposes and deterioration of individual facilities in national industrial complexes. However, there is no information on which chemicals and areas should be preferentially managed on a local scale. In this study, we developed a systematic method to select priority chemicals and areas for the response to chemical accidents in national industrial complexes. This method was applied to Ulsan as a case study. The priority chemicals (top 10%) in Ulsan were listed as xylenes, ethylbenzene, toluene, ethylene, benzene, methanol, ethylene oxide, and propylene. In addition, local areas of Yecheon, Joenha, and Gosa were expected as vulnerable areas for chemical accidents. The method developed in this study can be applied to other cities and used for chemical accident management systems by national and local authorities.

Key words: Chemical accident, Response system, National industrial complex, Ulsan

1. 서 론

구미산업단지에서 발생한 불산 사고 이후, 유해화학물질 사고에 대한 우려가 증가하고 있다. 2001년부터 2013년까지 위험물 사고·사례집 자료에 의하면, 60여 건의 유해화학물질 사고 중에서 38%가 폭발, 32%가 화재에 의한 것으로 조사되었으며, 주된 사고원인은 작업자 부주의(38%), 노후화와 같은 설비 결함(26%), 안전관리 미흡(25%)으로 나타났다.¹⁻⁹⁾ 사고 발생 유해화학물질은 황산, 염산, 헥산, 벤젠 등 매우 다양했으며, 대부분 인체독성이 있는 물질이었다.

국내에서는 1992년부터 유해화학물질 관리법에 따라

환경부가 유해화학물질을 관리·감독하였으며,¹⁰⁾ 2015년부터는 유해화학물질 관리를 강화하기 위해 화학물질관리법(화관법)과 화학물질평가법(화평법)으로 양분화하여 시행하고 있다. 특히, 화관법에서는 장외영향평가 제도, 영업허가제 신설, 화학사고 발생 시 즉시 신고의무, 특별관리지역 지정 등의 세부내용을 통해 화학사고에 대한 신속한 대응체계를 마련하고자 하였다.¹¹⁾ 이와는 별도로 지역차원의 사전예방이 중요하며 이를 위해 화학사고대비물질과 관리지역을 선정하여 체계적으로 관리하는 것이 필요하다. 또한, 사고 발생 시나리오를 바탕으로 기상자료와 화학물질의 확산범위를 고려하여 초기대응방안을 마련하고 주민 대피경로를 설정해야 한

[†]To whom correspondence should be addressed.

다. 국내에서는 국가재난정보센터에서 안전사고 위협예보를 수행하고 있다. 그러나 이 시스템은 낮은 공간 해상도로 인해 읍/면/동 단위의 사고가 발생하면 적절한 대응·대처 방법을 제공할 수 없다. 환경부 화학물질 안전원에서 운영하는 화학물질 사고대응시스템(CheMical accident response information system: CARIS)은 화학사고로 인한 피해예측범위와 방재정보를 제공한다.¹²⁾ 해당 시스템은 국가재난정보센터 위협예보보다 공간적으로 상세한 위협예보를 제공하지만, 사전협의를 통해 사용승인을 받은 중앙행정기관과 지방자치단체 소속기관만 이용할 수 있는 단점이 있다.

국내에서는 사고대응시스템 개선방안,^{13,14)} 위성영상 정보를 활용한 화학사고 영향범위 산정,¹⁵⁾ 사고영향평가를 통한 폭발 시나리오 설정,¹⁶⁾ 우선순위 화학물질에 대한 분석법 정립¹⁷⁾ 등이 수행되었다. 그러나 화학사고 발생 우려가 있는 물질 선정,¹⁸⁾ 화학사고 취약 지역 선정, 사고 시 대피경로 설정에 관한 연구는 미흡하다. 또한, 화학사고에 효과적으로 대응하려면 기존 국가대응체계에만 의존할 것이 아니라 지역 내 유해화학물질 사용량, 지리적 특성, 기상조건 등을 반영한 지역별 대응체계 마련이 필요하다.

본 연구에서는 국가산업단지에서 발생하는 화학사고에 대한 체계적인 대응체계 마련을 위해, 지역특성을 고려한 화학사고대비물질과 관리지역을 선정하는 방법

을 제안하였다. 이를 토대로 대표 산업도시인 울산시를 시범사례로 선정하여, 지역특성을 반영한 (1) 유해화학물질 데이터베이스(DB) 구축, (2) 화학사고대비물질 선정, (3) 관리지역 선정과 관리방안 제안 순서로 연구를 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구대상지역

울산시에는 2014년 기준으로 총 1,632개 업체(국가산업단: 1,191개, 농공단지: 108개, 일반산업단: 333개)가 입주해 있다.¹⁹⁾ 화학제품과 금속제품을 생산하는 배출업소가 전체 업체수의 40% 이상을 차지하며, 제조업이 69.2%로 가장 큰 비중을 차지한다.¹⁹⁾ 울산·미포국가산업단지 와 온산국가산업단지가 있으며, 자동차, 조선·중공업, 석유화학, 비철금속단지로 구분된다(Fig. 1). 울산의 산업시설은 밀집되어 있으므로 폭발이나 화재로 인한 연쇄사고의 가능성도 크다. 또한, 산업시설 주변에 주거지역이 위치한 경우가 많아 주민피해도 우려된다.

환경부 화학물질 배출·이동량 정보시스템(Pollutant release and transfer registers: PRTR)에서는 사업장 내 제조과정과 사용·저장과정에서 환경(대기, 수계, 토양)으로 배출되는 유해화학물질의 양을 공개하고 있다. 2013년 자료에 의하면, 울산의 유해화학물질 대기배출량

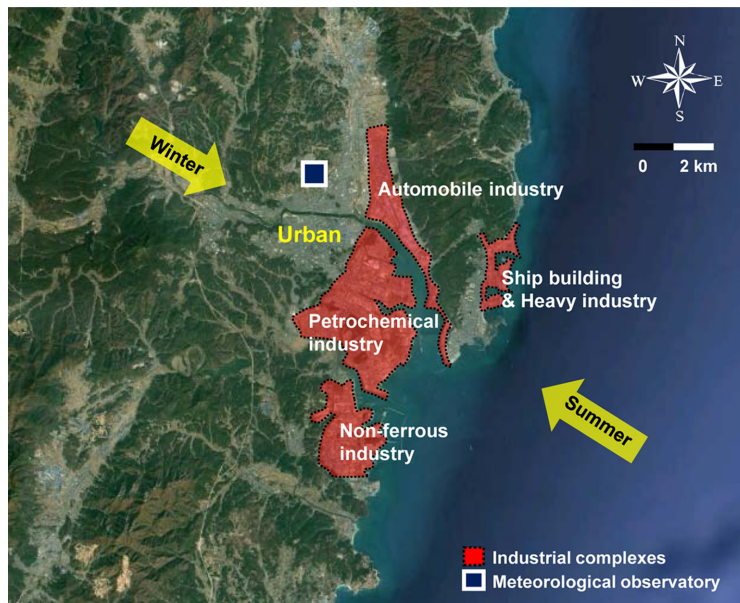


Fig. 1. Locations of four industrial complexes and a meteorological observatory with seasonal wind directions in Ulsan.

(8,116 ton/y)은 경기(9,648 ton/y)와 경남(8,606 ton/y)에 이어 세 번째로 많았으며, 전국 대기배출량의 16%를 차지하였다.²⁰⁾ 울산의 단위면적 당 연간 배출량(7.7 ton/km²)은 전국 광역지자체 중에서 가장 많았다.

2.2. 유해화학물질 데이터베이스 구축

본 연구에서는 유해화학물질 데이터베이스(DB) 구축, 화학사고대비물질 선정, 관리지역 선정방법을 순차적으로 제시하였다. 이러한 결과를 이용하여 최종적으로는 지역특성에 적합한 유해화학물질 관리방안과 화학사고 대응방안을 제안할 수 있다(Fig. 2).

유해화학물질 DB 구축을 위해서 화학물질별 사고빈도, 대기배출량, 독성, 물리·화학적 특성자료를 수집하였다. 소방방재청의 위험물사고 사례집,¹⁻⁴⁾ 환경부의 환경통계연감,^{6,8,9)} 유해화학물질 사고·사례집⁷⁾에서 울산시 화학사고 자료를 수집하였으며, 업체별·물질별 PRTR 대기배출량²⁰⁾을 취합하였다. 화학사고대비물질과 관리지역을 선정하기 위해 가장 필요한 자료는 업체별 유해화학물질 사용량과 저장량이다. 그러나 업체 보안 등의 사유로 이에 대한 정보를 개인 연구자가 수집하기 어려우므로, 배출량이 많으면 사용량이나 저장량도 많을 것으로 가정하였다. 국제암연구소(International agency for research on cancer: IARC)²¹⁾와 미국 산업위생사협회(American conference of governmental industrial hygienists: ACGIH)²²⁾의 발암성 정보와 국립환경과학원 화학물질안전관리 정보시스템²³⁾의 흡입독성 정보를 확

보하였다. 안전보건공단⁵⁾에서 제시하는 유해화학물질의 물리·화학적 특성 중에서 화학사고와 밀접한 관련이 있는 폭발한계와 인화점 자료를 수집하였다.

2.3. 화학사고대비물질 선정

모든 유해화학물질을 동일한 수준에서 종합적으로 관리하기는 현실적으로 불가능하므로, 지역별로 대표적인 화학사고대비물질을 선정하여 집중적이고 체계적으로 관리하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 유해화학물질 사고빈도, 대기배출량, 배출업체 수, 발암성, 흡입독성, 폭발한계, 인화점을 이용하여 세 가지 화학사고 시나리오를 작성하고 화학물질별 점수를 산정하여 화학사고 대비물질을 선정하였다(Fig. 3). 울산시 유해화학물질의 대기배출량, 배출업체 수, 흡입독성, 폭발한계, 인화점에 대한 표준점수(Z-score)를 각각 계산하고, 인자별 표준점수 평균을 중심으로 상위(5개)와 하위(5개) 그룹으로 나누어 배점하였다. 식 1에서 X_i 는 화학물질(i)의 개별인자(X) 수치이며, X_{av} 와 X_{sd} 는 각각 해당 인자의 평균과 표준편차이다. 사고빈도와 발암성에 대해서는 표준점수를 계산하지 않고, 자료 범위에 따라 여섯 그룹으로 나누어 배점하였다.

$$Z\text{-score} = \frac{X_i - X_{av}}{X_{sd}} \quad (1)$$

세 가지 화학사고 시나리오에 대한 구체적인 사항은 다음과 같다. 첫째 시나리오에서는 모든 인자(사고빈도,

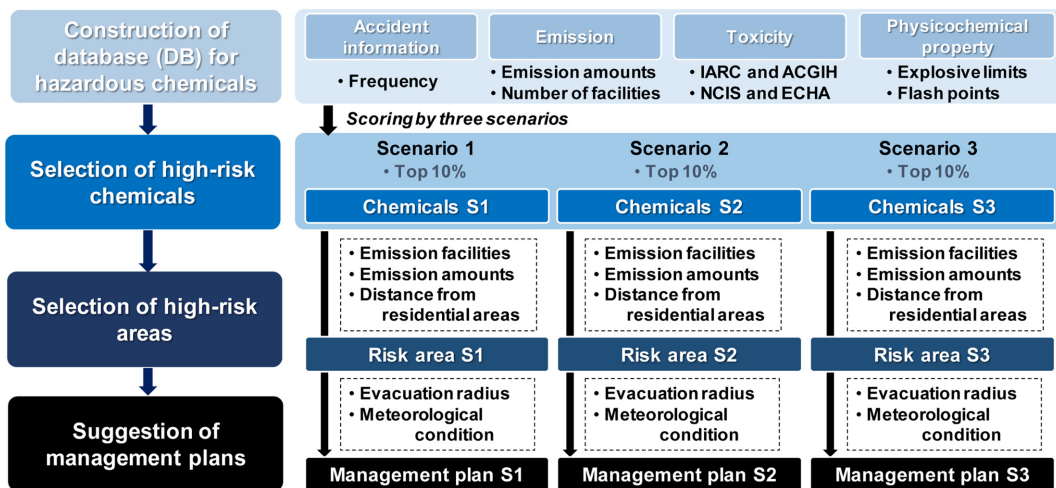


Fig. 2. Overall schematic of this study: (1) construction of DB for hazardous chemicals, (2) selection of high-risk chemicals, (3) selection of high-risk areas, and (4) suggestion of management plans.

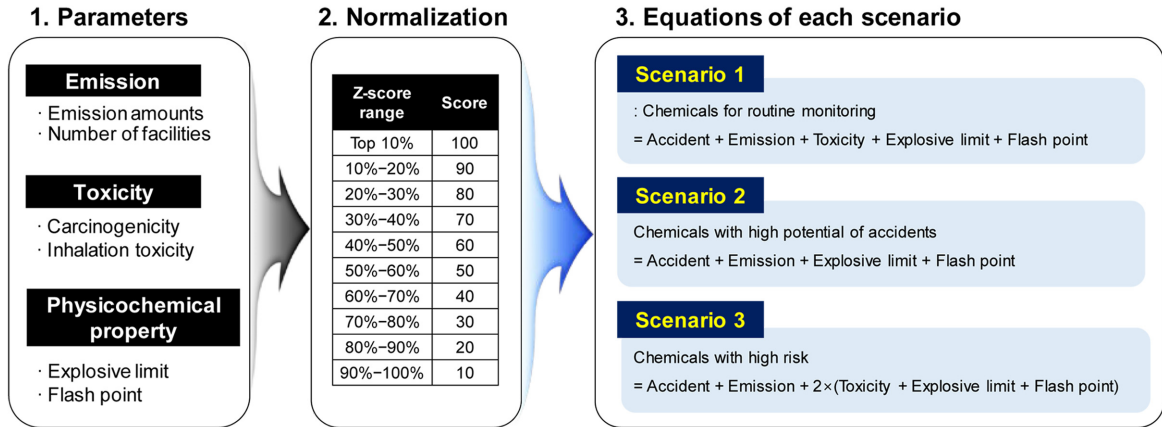


Fig. 3. Method for the selection of high-risk chemicals: (1) parameters, (2) normalization, and (3) equations of each scenario.

대기배출량, 배출업체 수, 발암성, 흡입독성, 폭발한계, 인화점을 고려하여 상시 모니터링이 필요한 물질을 선정하였다. 둘째 시나리오에서는 화학사고 가능성이 큰 물질을 선정하기 위해 발암성과 흡입독성을 제외한 인자들을 이용하여 관리대상물질을 선정하였다. 셋째 시나리오에서는 화학사고 발생 시 심각한 위해성을 유발할 수 있는 물질을 선정하기 위해, 모든 인자를 사용하되 독성(발암성과 흡입독성), 폭발한계(폭발사고 규모), 인화점(화재발생 가능성)에 두 배의 가중치를 주었다.

개별 인자에 대한 자세한 설명은 다음과 같다. 사고빈도의 경우, 울산에서 발생한 화학물질별 사고 횟수에 따라 배점(1~5회: 20~100점)하였으며, 지금까지 사고가 발생하지 않은 물질에 대해서는 향후 사고 가능성을 고려하여 일괄적으로 10점을 부여하였다. 대기 배출량에 대한 배점을 위해, 표준점수에 따라 배출량 상위 5개 구간(244~17 ton/y) 물질에 대해 10점 간격으로 100~60점, 하위 5개 구간(16~0.001 ton/y) 물질에는 50~10점을 부여하였다. 단, 자일렌(4,701 ton/y), 에틸벤젠(976 ton/y), 톨루엔(471 ton/y)은 다른 물질에 비해 배출량이 월등히 많으므로(네 번째로 많이 배출된 2-프로판올(244 ton/y)보다 최대 20배 이상), 각각 200, 170, 150점을 부여하였다. 배출업체 수의 경우, 상위 다섯 구간(62~8개) 물질에 100~60점, 하위 다섯 구간(7~1개) 물질에 50~10을 배점하였다. 독성인자에 대한 배점을 위해서 흡입독성과 발암성을 함께 고려하였다(식 2). 흡입독성은 증기, 분진, 기체의 LC₅₀ (네 시간 노출, 래트(rat))를 사용하였다. LC₅₀는 래트가 독성 물질에 네 시간 동안 노출되었을 때 50%가 사망하는 농도를 의미하므로,²⁴⁾

작은 값을 가질수록 흡입독성이 강한 물질이다. 그러므로 화학물질별 LC₅₀의 역수를 표준화하고 100~60점(0.045~0.584 mg/L)과 50~10점(0.619~659 mg/L)을 부여하였다. 카드뮴의 흡입독성(0.0031 mg/L)이 다른 물질에 비해 상당히 높은 수준이므로, 예외적으로 150점을 부여하였다. 발암성은 IARC (1, 2A, 2B, 3, 4)와 ACGIH (A1, A2, A3, A4, A5) 발암등급에 차등적으로 100, 80, 60, 40, 20점을 부여했으며(사고빈도의 경우와 동일), 독성정보가 알려지지 않은 물질에 대해서는 모두 무해하다고 간주할 수 없으므로 10점을 부여하였다.

$$\text{Inhalation toxicity} \times 0.5 + \left(\frac{\text{IARC} + \text{ACGIH}}{2} \right) \times 0.5 \quad (2)$$

일반적으로 가연성 기체와 증기는 특정 농도 범위에서만 연소가 일어나므로,²⁵⁾ 화학물질의 농도(혼합비)가 특정 범위보다 낮거나 높으면 연소되지 않는다. 이러한 범위가 넓을수록 폭발 가능성이 크다고 가정하고, 상한값과 하한값의 차이를 폭발한계값으로 이용하였다. 예를 들어, 4,4'-디이소시아산 디페닐메탄의 폭발한계는 0.6~100% 범위이므로 상한값과 하한값의 차이인 99.4%를 이용하였다. 이러한 과정을 통해, 폭발한계가 존재하는 모든 물질에 대해 표준점수를 계산하고 10점 단위로 배점하였다. 인화점은 화학물질 증기와 공기가 혼합되어 불꽃과 반응하여 연소가 발생하는 최저온도이므로,²⁶⁾ 인화점이 낮을수록 연소 가능성이 크다. 따라서 조사대상 화학물질 중에서 가장 높은 인화점을 가진 트리(2-클로로에틸) 포스페이트(216°C)와 개별 물질의 인화점 차이를 계산한 후, 폭발한계와 동일한 방법

으로 배점하였다.

2.4. 관리지역 선정

화학사고 관리지역을 선정하기 위해, 본 연구에서 선정한 화학사고대비물질 배출업체 밀집도, 업체별 대기배출량, 주거지역과의 거리를 기본 인자로 사용하였다. 관리지역 선정과정은 대상지역의 격자 생성, 격자별 배점(배출업체 밀집도, 대기배출량, 주거지역으로부터의 거리), 관리지역 선정 순이었으며, 이러한 과정을 수행하기 위해 지리정보시스템(Geographic information system: GIS)을 이용하였다(Fig. 4).

유해화학물질의 확산경로를 예측하기 위해 2010년부터 2014년까지의 울산지역 풍향과 풍속자료²⁷⁾를 분석하였다. 겨울철에는 북서풍이 우세하여 도심에서 해안가(공단지역)로 바람이 불어나가고, 여름철에는 남동풍으로 인해 해안가에서 도심으로 바람이 이동한다(Fig. 1). 그러므로 겨울철보다는 여름철에 공단지역에서 화학사고가 발생하면 주거지역에서 피해가 클 것으로 예상된다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 울산지역 유해화학물질 DB 구축

유해화학물질 사고빈도 조사결과, 황산 사고가 전체 사고 중 14%로 가장 빈번했으며, 다음으로는 벤젠(8%), 자일렌(5%), 암모니아(5%) 사고가 그 뒤를 따랐다. 2013년 유해화학물질 배출업체는 195개였으며, 이들 업체에서 배출한 화학물질은 122종이었다. 대기배출량은 자일렌(4,701 ton/y), 에틸벤젠(976 ton/y), 톨루엔(471 ton/y), 2-프로판올(244 ton/y), 메틸 알코올(158 ton/y) 순이었다. 배출업체 기준으로는 자일렌(62개), 톨루엔(52개), 염화수소(51개), 메틸 알코올(43개), 암모니아(32개) 순이었다. 자일렌의 배출량과 배출업체가 가장 많았으며, 다른 물질의 배출량과 배출업체 순위는 다소 다른 양상이었다. 예를 들어, 에틸벤젠의 대기배출량은 두 번째로 많았으나 배출업체는 28개로서 많은 편이 아니었다. 반면에 염화수소의 대기배출량(66 ton/y)은 비교적 적지만 많은 업체(53개)에서 사용되었다.

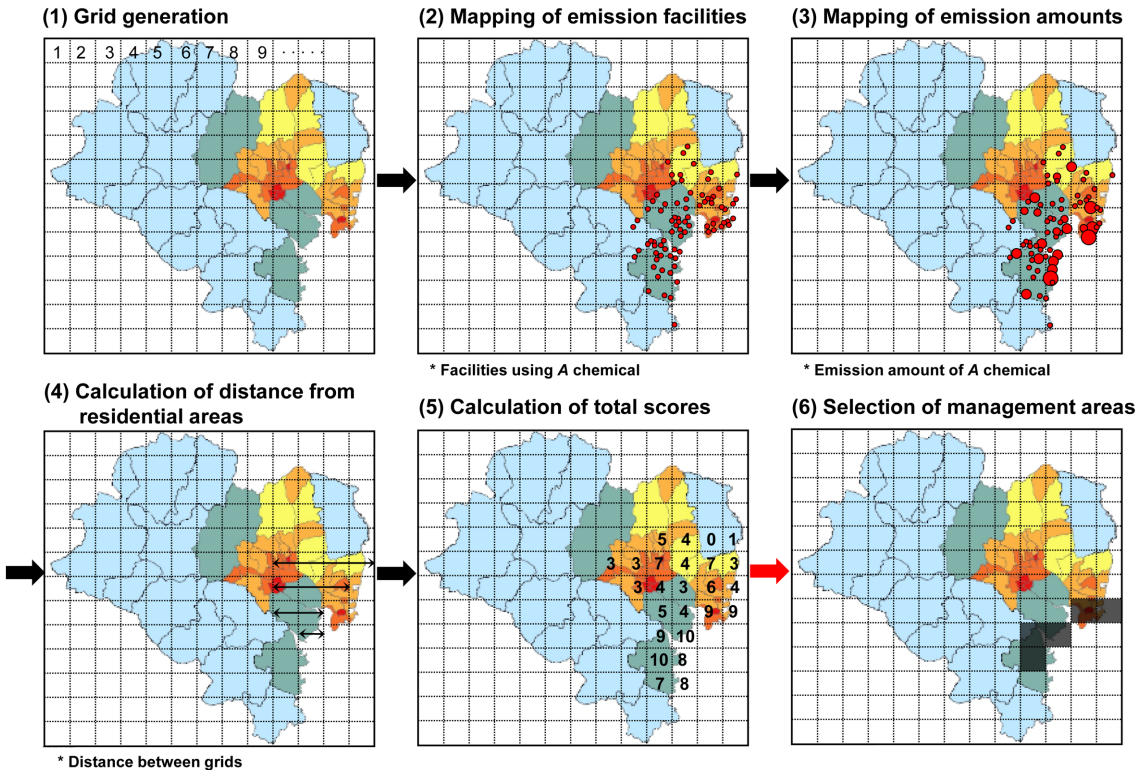


Fig. 4. Procedure for the selection of high-risk areas: (1) grid generation, (2) mapping of emission facilities, (3) mapping of emission amounts, (4) calculation of distance from residential areas, (5) calculation of total scores, and (6) selection of management areas.

유해화학물질의 발암등급을 조사한 결과, IARC에서 벤젠은 1등급(발암물질)으로 분류되었으며, 톨루엔은 3등급으로 분류되었다. 흡입독성은 카드뮴(0.0031 mg/L), 황(0.0450 mg/L), 황산 디메틸(0.0600 mg/L), 디이소시아산 헥사메틸렌(0.0670 mg/L) 순이었다. 폭발한계의 상한값과 하한값의 차이는 4,4'-다이소시아산 디페닐메탄(99.4%), 산화 에틸렌(97.0%), 아세틸렌(78.5%), 포름알데히드(66.0%), 일산화탄소(61.7%) 순으로 나타났다. 폭발한계가 가장 높은 4,4'-다이소시아산 디페닐메탄은 사고빈도, 배출량, 인화점 등의 점수는 매우 낮았으므로, 폭발 자체로 인한 물리적 위험성을 주로 고려해야 한다. 인화점은 에틸렌(-136°C), 프로필렌(-107°C), 염화비닐(-78°C), 1,3-부타디엔(-76°C), 염화메틸(-66°C) 순으로 나타났으며, 폭발한계와는 다른 의미를 가진다. 예를 들어, 에틸렌은 독성과 관련된 피해는 적지만 쉽게 발화되므로 화재발생 가능성이 큰 물질이다.

울산시 업체별 유해화학물질 대기배출량 지도를 작성하였다(Fig. 5). 지도상에서 단위면적당 인구를 확인한 결과, 울산의 중심지인 남구와 중구의 인구밀도가 높았으며, 자동차산업단지가 위치한 동구와 북구의 일부 지역도 인구밀도가 높았다. 업체 밀집도는 석유화학단지 및 비철금속단지에서 높게 나타났다. 업체별 대기배출량은 자동차단지와 조선·중공업단지가 위치한 동구에

서 매우 높았다. 울주군 일대에도 배출업체가 위치하는 것을 확인하였으나, 주변지역 인구밀도를 고려할 때 중요한 고려대상이 아닌 것으로 판단된다.

3.2. 화학사고대비물질 선정

세 가지 시나리오에 따라 화학사고대비물질의 순위를 정하고, 시나리오별 상위 12개(10%) 물질을 선정하였다(Table 1). 평상시 지속적인 모니터링이 필요한 물질(시나리오 1)은 자일렌, 에틸벤젠, 에틸렌, 톨루엔, 벤젠, 메틸 알코올, 산화 에틸렌, 산화 프로필렌, 메틸에틸케톤, 프로필렌, 2-프로판올, n-헥산 순으로 나타났다. 특히, 울산시에는 자일렌을 배출하는 업체들이 많았으며, 전체 화학물질 배출량의 약 60%와 사고빈도의 5%를 자일렌이 차지하였다. 자일렌의 IARC 발암등급은 3(발암 미확인), 흡입독성은 29.1 mg/L, 폭발한계는 1.1~7%, 인화점은 32°C이다. 자일렌은 독성, 폭발한계, 인화점 기준은 낮지만 다른 물질에 비해 배출업체와 배출량이 많으므로, 평상시 대기오염과 대형사고 가능성이 크므로 꾸준히 관리해야 하는 물질이다.

화학사고 가능성이 큰 물질(시나리오 2)로는 자일렌, 에틸렌, 에틸벤젠, 톨루엔, 메틸 알코올, 메틸에틸케톤, 벤젠, n-헥산, 프로필렌, 2-프로판올, 아세트산, 산화 에틸렌이 선정되었다. 시나리오 1의 선정결과와 비슷했으

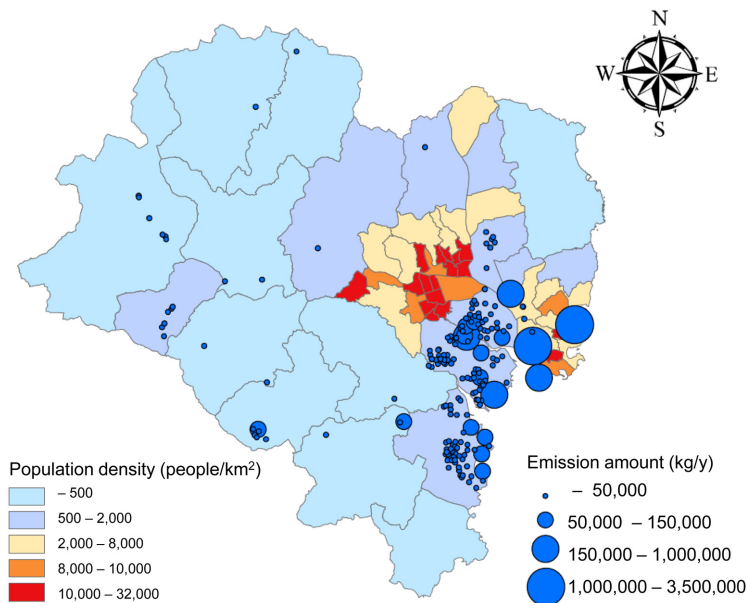


Fig. 5. Atmospheric emissions of hazardous chemicals (n=122) from 195 industrial facilities and the population density of Ulsan.

Table 1. Top 10% of hazardous chemicals selected by Scenarios 1, 2, and 3

Chemicals	Emission			Toxicity	Physical property		Total scores	Groups
	Accident frequency	Emission amounts	Number of facilities	Inhalation + carcinogenicity	Explosive limits	Flash point		
Xylene	40	200	100	10 + 20	20	60	445	Scenario 1
Ethylbenzene	20	170	90	20 + 30	20	60	400	
Ethylene	10	100	90	0 + 20	70	100	390	
Toluene	20	150	100	20 + 20	20	70	390	
Benzene	60	90	80	10 + 50	20	80	385	
Methyl alcohol	10	100	100	10 + 5	80	70	370	
Ethylene oxide	10	40	50	40 + 45	100	100	365	
Propylene oxide	10	70	50	50 + 30	80	90	355	
Methyl ethyl ketone	40	90	90	10 + 5	40	80	350	
Propylene	10	100	80	10 + 20	30	100	345	
2-Propanol	10	100	100	10 + 20	40	70	345	
n-Hexane	40	90	90	10 + 5	20	90	340	
Xylene	40	200	100	10 + 20	20	60	420	
Ethylene	10	100	90	0 + 20	70	100	370	
Ethylbenzene	20	170	90	20 + 30	20	60	360	
Toluene	20	150	100	20 + 20	20	70	360	
Methyl alcohol	10	100	100	10 + 5	80	70	360	
Methyl ethyl ketone	40	90	90	10 + 5	40	80	340	
Benzene	60	90	80	10 + 50	20	80	330	
n-Hexane	40	90	90	10 + 5	20	90	330	
Propylene	10	100	80	10 + 20	30	100	320	
2-Propanol	10	100	100	10 + 20	40	70	320	
Acetic acid	20	90	100	10 + 5	40	60	310	
Ethylene oxide	10	40	50	40 + 45	100	100	300	
Ethylene oxide	10	40	50	40 + 45	100	100	630	
Ethylene	10	100	90	0 + 20	70	100	580	Scenario 3
Propylene oxide	10	70	50	50 + 30	80	90	580	
Xylene	40	200	100	10 + 20	20	60	550	
Vinyl chloride	10	70	20	10 + 50	70	100	550	
Benzene	60	90	80	10 + 50	20	80	540	
Methyl alcohol	10	100	100	10 + 5	80	70	530	
1,3-Butadiene	10	50	70	10 + 45	50	100	530	
Ethylbenzene	20	170	90	20 + 30	20	60	520	
Acrylonitrile	10	70	80	60 + 30	50	70	520	
Toluene	20	150	100	20 + 20	20	70	510	
Propylene	10	100	80	10 + 20	30	100	500	

Bold: Accident preparedness substances by the Ministry of Environment.

며, 시나리오 2에서 추가로 선정된 물질은 아세트산이었다. 아세트산은 자일렌에 비해 배출량과 배출업체는 다소 적었으며, 독성정보 부재, 폭발한계 5.4~16%, 인화점은 39°C로 나타났다.

화학사고 시 위해성이 큰 물질(시나리오 3)은 산화 에틸렌, 에틸렌, 산화 프로필렌, 자일렌, 염화 비닐, 벤젠, 메틸 알코올, 1,3-부타디엔, 에틸벤젠, 아크릴로니트

릴, 톨루엔, 프로필렌이었다. 시나리오 1, 2에서 선정된 물질과 비교하면, 산화 에틸렌, 에틸렌, 산화 프로필렌 등이 중복되었으며, 염화비닐, 아크릴로니트릴, 1,3-부타디엔은 시나리오 3에서만 선정되었다. 이러한 물질의 배출량과 배출업체는 적더라도 독성, 폭발한계, 인화점을 고려하면 소규모 사고로도 큰 피해가 예상된다.

시나리오별 화학사고대비물질 선정결과와 환경부 지

정 사고대비물질(69종) 목록을 비교하였다. 환경부 지정 사고대비물질은 급성독성이나 폭발성이 강하여 사고발생 가능성이나 피해규모가 클 것으로 우려되는 물질로서 화학물질관리법으로 특별히 관리된다.²⁸⁾ 본 연구의 세 가지 시나리오에서 선정된 상위 10% 물질 중에서 8종(메틸 알코올, 메틸에틸케톤, 벤젠, 산화 에틸렌, 산화프로필렌, 아크릴로니트릴, 염화 비닐, 톨루엔)이 환경부 지정 사고대비물질에 포함되었다. 상위 20%로 확대할 경우, 4종(아세트산 에틸, 암모니아, 포름알데히드, 황산)이 더 포함되었으므로, 본 연구에서 제시한 화학사고대비물질 선정방법에 신뢰성이 있는 것으로 판단된다.

3.3. 화학사고 관리지역 선정

화학사고 관리지역을 선정하기 위해, 대상지역에 일정 크기의 격자를 생성하여 번호를 부여하였다(Fig. 6). 지역 면적에 따라 격자 크기를 조절할 수 있으며, 본 연구에서는 3 km × 3 km 간격으로 총 225개의 격자를 생성하였다(울산시 규모: 45 km × 45 km). 두 번째 단계에서는 배출업체의 위치를 지도에 나타내어, 배출업체 개수를 격자별로 계산하였다. 예를 들어, 131번 격자

에 업체가 5개면 5점, 177번 격자에 업체가 10개가 존재하면 10점으로 계산하였다. 세 번째 단계에서는 배출량을 격자별로 나타내었다. 업체별 밀집도와 동일하게 한 격자 안에 포함된 업체별 배출량을 합산하였다. 주거지역으로부터의 거리는 단위면적당 인구밀도가 가장 높은 격자(99, 101, 102, 116, 134)의 중심으로부터 개별 격자의 중심까지의 직선거리를 계산하였다. 인자별로 가장 큰 값을 10점으로 표준화하여, 격자별 30점(세 가지 인자의 총합) 만점으로 최종 점수를 계산하였다. 이를 통해, 총점 기준으로 물질별로 상위 세 개 격자를 일차적으로 선정하였다(Table 2). 한편, 염화비닐의 배출업체는 두 곳에 불과하여 두 개 격자만으로 위의 과정을 진행하였다.

시나리오별 상위 10% 물질(중복제외 16개)에 대해 각각 세 개 격자를 할당하여 총 47개 격자(염화비닐 제외)를 선정하였으며, 이 중에서 가장 중복성이 높은 격자를 관리지역으로 제안하였다. 이러한 과정을 통해 시나리오 1, 2에서는 여천동(117), 전하동(120), 고사동(132)이, 시나리오 3에서는 여천동(117), 상개동(131), 고사동(132)이 선정되었다. 세 시나리오에서 중복되는 여천동(117)

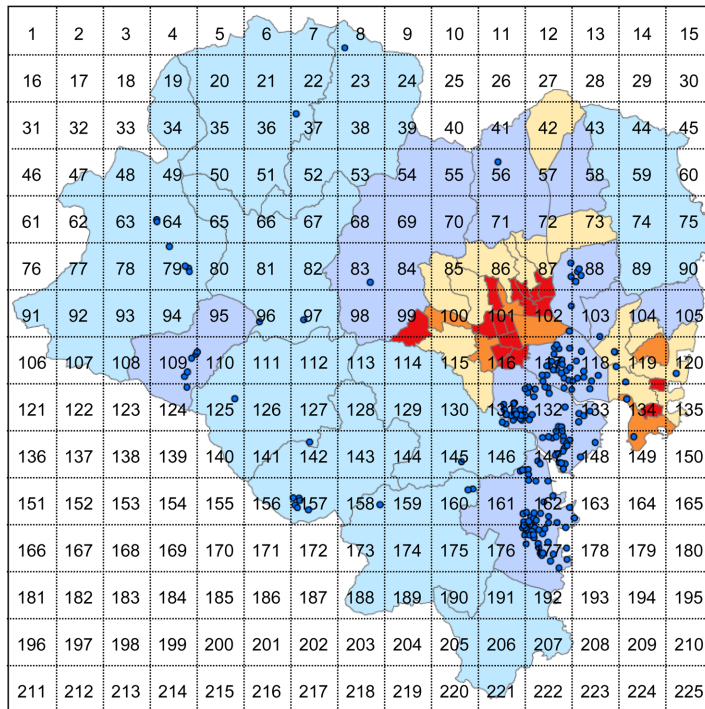


Fig. 6. Total grids of Ulsan for predicting areas of hazardous chemical accidents (one grid: 3 km x 3 km, the number of total grids: 225).

Table 2. Scores of each chemical for individual grids to suggest as high-risk areas

Chemicals	Grid No.	Number of facilities	Emission amounts	Distance from residential areas	Total Scores	Groups
Methyl alcohol	117	7.8	4.5	9.0	21.2	Scenario 1, 2, 3
	132	4.4	4.9	8.0	17.4	
	147	10.0	10.0	6.0	26.0	
Benzene	131	8.0	1.2	3.0	12.2	
	132	10.0	10.0	7.0	27.0	
	162	10.0	5.4	10.0	25.4	
Ethylene oxide	117	10.0	10.0	10.0	30.0	
	131	3.3	6.2	10.0	19.5	
	132	6.7	6.3	5.0	18.0	
Ethylene	120	3.3	10.0	9.0	22.3	
	132	10.0	4.4	6.0	20.4	
	134	3.3	5.7	10.0	19.0	
Ethylbenzene	118	8.0	0.7	7.0	15.7	
	120	2.0	10.0	7.0	19.0	
	132	8.0	0.4	7.0	15.4	
Xylenes	117	8.0	0.3	9.0	17.3	
	120	1.0	10.0	8.0	19.0	
	134	1.0	4.9	10.0	15.9	
Toluene	117	8.6	4.7	9.0	22.3	
	118	8.6	10.0	7.0	25.6	
	120	1.4	8.7	8.0	18.1	
Propylene	117	3.3	0.4	10.0	13.7	
	131	1.7	0.3	10.0	12.0	
	132	10.0	10.0	8.0	28.0	
2-Propanol	118	8.0	3.0	7.0	18.0	
	120	2.0	10.0	8.0	20.0	
	134	2.0	4.7	10.0	16.7	
n-Hexane	132	8.0	10.0	8.0	26.0	
	133	4.0	1.9	10.0	15.9	
	162	10.0	1.5	3.0	14.5	
Methyl ethyl ketone	117	2.5	10.0	10.0	22.5	
	118	5.0	0.1	9.0	14.1	
	162	10.0	0.3	6.0	16.3	
Propylene oxide	117	10.0	0.5	10.0	20.5	
	131	3.3	0.5	10.0	13.8	
	132	6.7	10.0	5.0	21.7	
Acetic acid	131	10.0	7.9	10.0	27.9	
	132	10.0	0.2	9.0	19.2	
	147	6.0	10.0	6.0	22.0	
1,3-Butadiene	131	10.0	4.1	10.0	24.1	
	132	10.0	10.0	7.0	27.0	
	133	2.5	0.7	10.0	13.2	
Acrylonitrile	131	10.0	0.4	3.0	13.4	
	132	10.0	4.4	7.0	21.4	
	162	5.0	10.0	3.0	18.0	
Vinyl chloride	117	10.0	10.0	10.0	30.0	
	131	10.0	0.7	10.0	20.7	

과 고사동(132)을 우선순위 관리지역으로 제안하였다. 또한, 물질별로 가장 점수가 높은 하나의 격자만 고려하면, 시나리오 3에서는 여전히 고사동(132)이 높았고, 시나리오 1, 2에서는 전하동(120)이 가장 높았으므로, 전하동(120)을 우선순위 관리지역으로 추가하였다. 여천동과 고사동은 석유화학산업단지 내에 위치해 있으며, 전하동에는 조선중공업단지가 있다.

대형화학사고에 대비하여 주민 대피경로를 설정하는 것은 매우 중요하며, 이 과정에서 화학물질의 특성과 지역현황이 반영되어야 한다. 본 연구에서는 울산 여천동, 전하동, 고사동 세 지역 인근 공단에서 화학사고가 발생했다는 가정하에 지리적 조건과 주풍향의 영향을 살펴 보았다(Fig. 7). 환경부에서 제시한 물질별 대피반경은 0.8 km 또는 1.6 km로 나뉜다.²⁸⁾ 고사동 인근 2 km 이내에는 주거밀집지역이 없으므로, 해당업체에서 적절히 대응하면 인명피해를 최소화할 수 있을 것이다. 반면, 전하동은 공단과 주거지역을 모두 포함하고 있으며, 공단 지역을 중심으로 서쪽으로 대피반경 2 km 이내에 주거지역이 형성되어있다. 그러므로 겨울철 북서풍이 우세할 때를 제외하면 화학물질이 주거지역으로 쉽게 확산될 수

있다. 또한, 화학사고가 주간에 발생하면 해풍²⁹⁾으로 인해 화학물질이 주거지역으로 더 많이 유입될 것으로 예상된다. 여천동의 경우, 전하동과 마찬가지로 계절풍이 화학사고 피해범위와 정도에 크게 영향을 미칠 것으로 추정된다. 여천동의 북서쪽은 주거·상업지역으로서 울산에서 유동인구가 가장 많은 곳이므로, 여름철에 화학사고가 발생하면 가장 큰 인명피해가 예상된다. 또한, 주간에는 해풍의 영향으로 유해화학물질에 대한 인체노출이 증가할 것이다.

이와 같은 계절풍, 해륙풍, 지리적 조건을 고려한 피해범위 예측과 주민 대피경로 설정을 위해서는 다양한 사고 시나리오에 따른 대기확산모델 결과가 필요하다. 환경부에서 개발하여 현업에 사용하고 있는 CARIS는 사후대응을 위한 확산모델 시스템이므로, 사전대비를 위한 모델링 연구가 수행되어야 한다. 또한, 사고를 방지하기 위한 관리감독도 중요하다. 유해화학물질을 다량 보유하거나 사고발생 가능성이 큰 업체를 지정하여 유해화학물질 사용과 안전관리에 대한 주기적인 현장점검과 대기환경 모니터링이 필요하다.

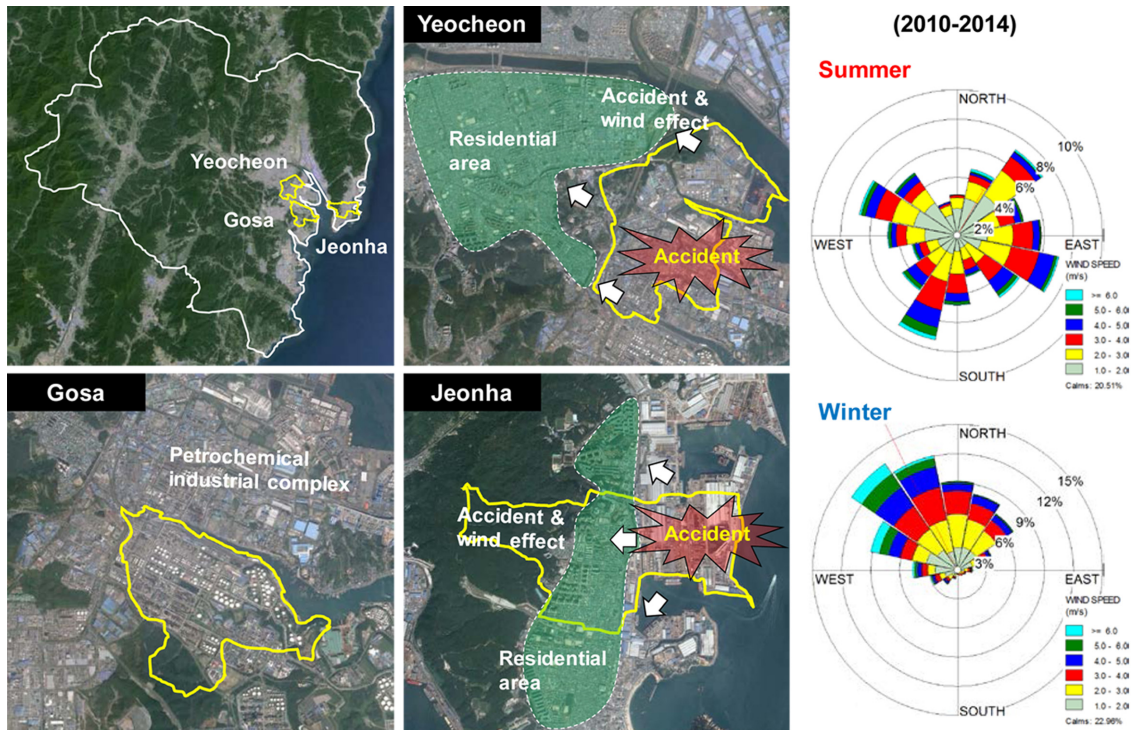


Fig. 7. High-risk areas predicted by the three criteria (density of industrial facilities, emissions, and distance between residential areas and industrial facilities) and seasonal winds.

3.4. 연구 한계와 개선사항

본 연구에서 가장 중요한 자료는 울산시 업체별 유해 화학물질 저장량, 사용량, 배출량이다. 기업체에서는 이러한 자료를 공개하지 않으며 울산시 당국도 관련자료를 확보할 법적 근거가 없다. 그러므로 본 연구에서는 환경부에서 제공하는 PRTR 배출량 자료를 이용하였으나, 이는 개별업체 자체적으로 보고한 자료를 취합한 것이므로 배출량이 과소평가되었거나 일부 누락되었을 가능성이 충분하다. 향후, 주요 산업단지가 위치한 지역별로 PRTR 배출량 자료를 검증하고 화학물질 저장량을 조사하면 더욱 신뢰성 있는 대응방안을 마련할 수 있을 것이다.

본 연구에서 제시한 울산시 화학사고대비 우선순위를 결정하고 관리지역 선정결과는 체계적 절차와 객관적 자료를 사용하여 도출되었다는 의의가 있다. 세부적인 연구 절차와 방법은 연구목적과 지역특성에 따라 충분히 수정될 수 있다. 인자 선택, 가중치, 표준화 방법, 시나리오 수식 등의 세부조건을 변경하면 새로운 물질과 지역이 선정될 것이다. 향후, 전문가들과 관계기관의 협의를 통해 인자 선택과 수식 등의 최적화를 거쳐 표준화된 연구방법을 제안할 필요가 있다.

4. 결 론

환경부는 사고대비물질(69종)을 지정하여 해당물질에 대한 측정·분석기법을 확립하고, 사고발생 시 물질별 대응방안을 마련하였다. 그러나 현실적으로 이러한 모든 물질을 집중관리하기 어려우므로, 주요 도시별로 우선순위를 결정하고 관리지역을 선정할 필요가 있다. 본 연구에서는 이러한 목적을 달성하기 위한 체계적인 방법을 제안하였다. 울산시를 시범사례로 선택하여 이 방법을 적용한 결과, 자일렌, 에틸벤젠, 톨루엔, 에틸렌, 벤젠, 메틸알코올, 산화 에틸렌, 프로필렌이 우선관리되어야 하며, 여천동, 전하동, 고사동에서 화학사고가 발생할 가능성이 큰 것으로 나타났다. 특히, 여천동은 대피반경 2 km 이내에 울산도심(삼산동)이 위치하므로, 화학사고로 인한 인명피해가 우려된다. 또한, 기상조건(계절풍과 해륙풍)과 지리적 특성을 고려한 대피경로 설정 필요성을 제시하였다.

본 연구방법은 울산뿐만 아니라 어느 지역이라도 그대로 적용될 수 있다. 이를 통해, 지역특성을 반영한 화학사고 대응방안 마련, 모니터링 지점 선정, 대기확산 모델링 지역 선정, 인체노출 위험지역 추정 등 다양한 후

속연구가 가능하다.

감사의 글

본 연구는 소방방재청에서 지원하는 자연피해예측 및 저감연구개발사업인 “HNS 유출사고 현장 대응기술 및 장비 개발(NEMA-자연-2015-01)” 과제와 한국화학연구원에서 지원하는 “유해화학물질사고 예방 및 대응기술 개발” 과제의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 소방방재청, “위험물사고 사례집”, 2006.
2. 소방방재청, “위험물사고 사례집”, 2007.
3. 소방방재청, “위험물사고 사례집”, 2008.
4. 소방방재청, “위험물사고 사례집”, 2009.
5. 안전보건공단, <http://www.kosha.or.kr>, 2016년 1월.
6. 환경부, “환경통계연감”, 2005.
7. 환경부, “유해화학물질 사고사례집”, 2007.
8. 환경부, “환경통계연감”, 2010.
9. 환경부, “환경통계연감”, 2013.
10. 환경부, “유해화학물질 관리법”, 2008.
11. 화학안전산업계지원단, “화학물질관리법 해설서”, 2015.
12. 김철희, 박철진, 박진호, 임치순, 김민섭, 박춘화, 천광수, 나진균, “유해화학물질 관련 대기오염사고 대응을 위한 화학물질사고대응정보시스템(CARIS)”, *환경영향평가지*, 2003, 12, 23-34.
13. 이상훈, “화학사고시 인체 피해 예방을 위한 급성 위해 관리 제안 연구”, 2013, 연세대학교 석사학위논문.
14. 이재석, “국가재난관리체계관점의 화학사고 대응체계 개선방안에 관한 연구”, 2015, 가천대학교 석사학위논문.
15. 김형석, “위성영상 정보를 활용한 화학사고 영향범위 산정에 관한 연구”, 2012, 건국대학교 박사학위논문.
16. 정병근, “화학사고 초기대응에 관한 연구”, 2015, 부경대학교 석사학위논문.
17. 이진선, “화학사고 누출물질 분석방법 및 표준시료 안정성에 관한 연구”, 2012, 인하대학교 석사학위논문.
18. 박화성, 김예신, 이동수, 신용승, 최승필, 박성은, 김명현, 양지연, 신동천, “화학물질 우선순위 선정 기법(CRS-Korea)의 개발과 적용”, *환경독성학회지*, 2005, 20, 109-121.
19. 울산광역시, “환경백서”, 2015.
20. 환경부, <http://www.me.go.kr>, 2016년 1월.
21. 국제암연구소, <http://www.iarc.fr>, 2016년 1월.
22. 미국 산업위생사협회, <http://www.acgih.org>, 2016년 1월.
23. 국립환경과학원 화학물질안전관리 정보시스템, <http://www.kischem.nier.go.kr>, 2016년 1월.
24. 김선주, 윤충식, 함승현, 박지훈, 김송하, 김유나, 이지은,

- 이상아, 박동욱, 이권섭, 하권철, “환경부와 고용노동부의 관리 화학물질의 구분, 노출기준 및 독성 지표 등의 특성 비교”, *한국산업보건학회지*, **2015**, 25, 58-71.
25. 허동명, “연소열 및 화학양론계수를 이용한 알데히드류의 폭발한계의 예측”, *한국가스학회지*, **2015**, 19, 5-11.
26. 허동명, 이성진, “Cleveland 개방식 장치를 이용한 Acetic acid+Formic acid 계의 인화점 측정과 예측”, *한국가스학회지*, **2013**, 17, 67-72.
27. 기상청, <http://www.kma.go.kr>, 2016년 1월.
28. 환경부, “사고대비물질 키인포가이드”, **2014**.
29. 양미선, 윤성효, “해륙풍 원리 이해를 위한 대류상자 재설계와 활용에 관한 연구”, *한국지구과학회지*, **2010**, 31, 246-258.