

## 화학플랜트에서의 화학물질 누출사고에 대한 배상책임 위험도 산정

문정만 · 박달재<sup>\*,†</sup>

서울과학기술대학교 일반대학원 안전공학과  
01811 서울특별시 노원구 공릉로 232  
\*서울과학기술대학교 공과대학 안전공학과  
01811 서울특별시 노원구 공릉로 232

(2020년 4월 28일 접수, 2020년 6월 17일 수정본 접수, 2020년 7월 14일 채택)

## Estimation of the Liability Risk for Release of Chemicals at Chemical Plant

Jung Man Moon and Dal Jae Park<sup>\*,†</sup>

Department of Safety Engineering, Graduate School, Seoul National University of Science and Technology,  
232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul, 01811, Korea

\*Department of Safety Engineering, Faculty of Engineering, Seoul National University of Science and Technology,  
232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul, 01811, Korea

(Received 28 April 2020; Received in revised form 17 June 2020; accepted 14 July 2020)

### 요 약

본 연구는 화학 및 석유화학 플랜트 등의 장치산업에서 사업장 외부로 유해화학물질이 누출·확산되어 발생할 수 있는 배상책임 위험도에 대한 산정 방식을 개선하고자 하였다. 이를 위해 환경부 사고대비 물질(14종)에 대해 누출·확산 시뮬레이션, 화학물질 누출사고 사례 분석, 식물피해 영향 자료 분석 등을 통하여 화학물질 누출사고 배상책임 위험도와의 상관관계인자를 도출하였고, 도출된 결과를 바탕으로 화학물질 배상 책임 위험도 산정 방법을 수정·보완하였다. 14종의 화학물질의 Probit 값과 EURAM 배상책임 위험도의 상관계수는 -0.526로 나타났고, 수정된 화학물질 누출사고 배상책임 위험도와의 상관계수는 0.319로 상관성이 있는 것으로 분석되었다. 수정된 산정 방법론으로 97종에 대한 배상책임 위험도와 ERPG-2 값의 상관계수는 -0.494로 분석되었고, 이는 기존 배상책임 위험도와의 상관관계보다 약 19배 높은 상관관계를 보였고, 부식위험도 값과의 상관계수는 0.91로 분석되었다. 위험도의 증가와 감소에 영향을 미친 상관관계 인자의 표준화 회귀계수( $\beta$ ) 값은 Corrosion Index (0.713), ERPG-2 (0.400), NFPA Health Index (0.068) 크기 순서로 도출되었다. 이러한 연구결과는 기존과 신규 화학물질의 합리적인 배상책임 위험도 산정이 가능하게 하고, 사업장에서 정량적인 배상책임 위험관리 지표로 활용하는데 도움이 되리라 판단된다.

**Abstract** – This study is to improve the method of calculating the risk of liability that arise from release and dispersion of chemicals outside the plant in process industries such as chemical and petrochemical plants. To achieve this goal, the correlation factors with the risk of chemical release accident is derived by simulating release and dispersion of substances (14 types) designated by Ministry of Environment as preparation for accident, analyzing the cases of chemical release and effects of plant life damage. The method of calculating chemical liability risk was modified and supplemented based on the results obtained from the study. The correlation coefficient between the probit value of 14 chemical types and the liability risk by EURAM (European Union Risk Ranking Method) was -0.526, while the correlation coefficient with the modified chemical release accident risk was 0.319. Thus, the value from modified method shows that they appear to be correlated. According to modified calculating methodology, the correlation between ERPG-2 value and liability risk of 97 chemical types was -0.494 which is 19 times higher than existing liability risk correlation as absolute value. And the correlation coefficient of corrosion risk was 0.91. The standardized regression coefficients ( $\beta$ ) value of correlation factors that affected the increase and decrease of risk were derived in order of Corrosion Index(0.713), ERPG-2 (0.400) and NFPA Health Index (0.0680) by values. It is expected that these findings this study result will also enable the calculation of reasonable chemical release liability risk for existing and new chemical, and will help use them as quantitative liability risk management indicators for chemical plant site.

Key words: Chemical liability risk, EURAM (European Union Risk Ranking Method), Corrosion index, ERPG-2, NFPA health index

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.

E-mail: pdj70@seoultech.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서 론

국내 산업현장에서는 약 4만 5천 종의 유해 화학물질이 사용되고 있고, 해마다 300여 종의 신규 유해 화학물질이 유통되고 있는 것으로 보고되고 있다[1]. 화학플랜트, 석유화학플랜트 등 장치산업에서는 공정조건에 따라 인화성, 독성 및 부식성 물질 등 다양한 위험 물질이 사용되고 있다[2]. 이러한 물질을 취급하는 설비에서 누출이 발생할 경우 그동안 사업장 내부뿐만 아니라 인근 지역에도 커다란 인적·물적 피해를 야기시켜 왔다[3]. 대표적인 사고사례로는 구미산단 소재 ㈜휴브글로벌의 불화수소누출 사고[4], 군산시 폴리실리콘 제조사의 사염화규소 누출 사고[5,6] 및 대산산단 석유화학업체의 스티렌 모노머 누출사고[7] 등이 있다.

2012년 구미산단 불화수소 누출사고[4]로 5명 사망, 18명 부상 그리고 농작물 등에 약 380억의 재산피해가 발생하였다. 2015년 군산산단 폴리실리콘 제조사의 사염화규소 누출사고[6]에서는 농작물 고사, 차량 부식, 조경수 고사 및 건강 영향 등의 피해로 약 1.7억 정도의 손해가 있었고, 2019년 대산 산업단지 석유화학업체에서는 약 110톤의 스티렌 모노머가 누출하여 주변 주민과 근로자 약 500 명에게 건강상의 영향을 미쳤다[7]. 앞에서 언급한 사고의 공통점은 사업장 내부뿐 아니라 사업장 외부의 인명 및 환경피해가 발생한 배상책임 사고였다.

이러한 사고로 정부는 화학물질 누출사고 시 3자 배상책임에 대한 예방적 위험관리 측면에서 장외영향평가제도[8]와 사고 후 위험관리 측면에서 환경책임보험을 운용하고 있다[9]. 장외영향평가와 환경책임보험의 피해산정의 공통점은 화학물질이 누출하여 확산되었을 경우, 사업장 밖 3자 피해가 주요 관심 대상이다. 위의 2가지의 피해산정 방식을 살펴보면, 장외영향평가는 독성관점에서 비상대응 계획지침-2 (Emergency Response Planning Guideline-2, 이하 ERPG-2)값을 끝점으로 활용하여 영향 범위를 산출[10,11]하나 환경책임보험에서는 유해화학물질 배상책임 위험도 산출기준으로 유럽의 화학물질 위험도 평가 기준인 EURAM (European Union Risk Ranking Method, 이하 EURAM)을 사용하고 있다[9]. EURAM은 관리대상 유해화학물질의 우선순위를 선정하기 위한 인체와 환경의 위해도 평가방법[12]이며, 이중 인체 위해도 평가방법이 현 배상책임 위험도 산정에 적용되고 있다[9]. 이는 소규모 작업공간에서 유해화학물질이 누출되고, 일정량의 농도에 지속해서 노출되었을 경우 인체 위해도를 평가하는 방법[9,13]으로 사업장 밖 장외영향 위험도산정 기준인 ERPG-2 값과는 차이가 있을 것으로 판단된다. 이러한 차이는 독성영향에 따른 치사율이 높은 물질임에도 EURAM에 의한 배상책임 위험도는 낮게 산출되는 문제점을 야기시킬 것으로 예상된다. 화학물질안전 전문가집단과 화학물질안전관리자 사이에서도 화학플랜트 현장의 물질별 배상책임 위험도 산정이 불합리하다고 판단하고 있으며, 환경책임보험료 관련 민원이 제기되고 있다는 상황이다[15].

화학물질의 노출 및 독성영향 평가방법은 EURAM 이외에도 미국의 ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry), CHEMS-1 (Chemical Hazard Evaluation for Management Strategies), SCRAM (Scoring and Ranking Assessment Model) 및 캐나다의 ARET (Accelerated Reduction/Elimination of Toxics)와 같은 기준[14]이 있다. 여기서, ATSDR은 노출·독성 이외에 빈도를 추가로 고려하며, CHEMS-1은 노출보다 독성에 비중을 두고, SCRAM은 노

출을 독성보다 1.5배 가중치를 두며, ARET은 노출과 독성의 비중을 유사하게 평가한다[14]. 이러한 평가 방법은 대량·다수의 화학물질 취급 시 관리 우선순위 물질과 배출저감 물질을 선정하는 평가기법[13]이나, 환경오염피해구제법 환경오염피해(타인의 생명·신체 및 재산피해)에서 부식 등으로 인한 재산피해 위험을 고려하기에 충분하지 않다. 또한, 화학물질 누출사고 등으로 누출지점을 벗어나 사업장 밖으로 확산되었을 경우의 배상책임위험 상관관계 인자와 위험도 산정방법에 관한 연구는 그동안 미흡하였다.

이에 본 연구에서는 화학플랜트 등에서 화학물질이 누출하여 사업장 외부에 영향을 주어 발생할 수 있는 배상책임 위험도 산정 방식을 개선하여 관련 사업장에서 정량적인 배상책임 위험관리 지표로 활용하는 데 도움을 주고자 하였다. 이를 위해 환경부 사고대비 물질(14종)에 대해 사고결과 피해예측 도구인 PHAST를 이용한 시뮬레이션, 대표적 화학물질 누출사고 사례분석, 식물피해 영향 자료 분석 등을 통하여 화학물질 누출사고 배상책임 위험도와외의 상관관계 인자를 도출하고, 이러한 결과를 토대로 기존 화학물질 배상책임 위험도 산정 방식을 보완하였다.

## 2. 화학물질 사고 배상책임 위험도 산정방법

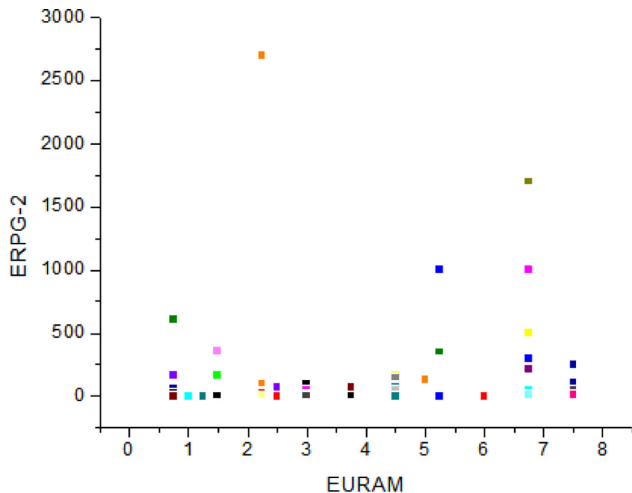
### 2-1. EURAM 기반 화학물질 누출사고 배상책임 위험도 산정 문제점

화학물질 누출사고 배상책임 위험도는 화학플랜트의 공정에서 화학물질이 누출하여 사업장 밖의 인적 및 물적 배상책임 피해를 일으키는 위험이다[9]. 제3자에 대한 피해이므로 화학물질의 종류와 확산 거리가 중요한 지표이다. 화학플랜트에서 화학물질의 누출·확산에 따른 배상책임 위험도와 관련된 국내 안전관리 제도는 환경책임보험제도와 장외영향평가제도가 있으며[9,19], 이 제도들은 사업장 외부 배상책임 피해를 위한 제도이다. 현재 환경책임보험은 유럽기준인 EURAM[9], 장외영향평가제도[19]는 ERPG-2[16]를 사용한다.

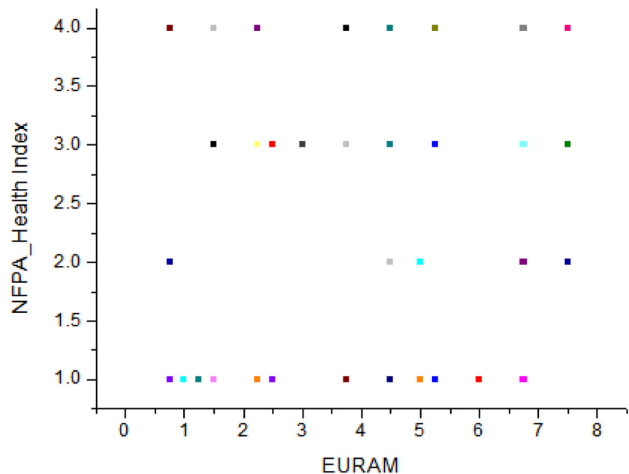
EURAM은 EU내에서 생산용량이 해마다 1,000톤 이상인 화학물질을 대상으로 관리대상 우선순위 유해화학물질을 선정하기 위한 위해성 평가방법으로[12], 관련 국가들이 작성한 IUCLID (International Uniform Chemical Information Database) 내의 내용을 바탕으로 순위가 결정된다[12]. EURAM의 위해도 평가는 환경 위해성과 인체 위해성을 기본으로 산정된다[12,14]. 환경오염배상책임 위험도는 인체 위해성 평가만을 고려하고, 환경 위해성은 고려하지 않는다[9, 17]. EURAM의 인체 위해도 평가방법[12]은 다음과 같다.

$$HS = HEX \times HEF \times a \quad (1)$$

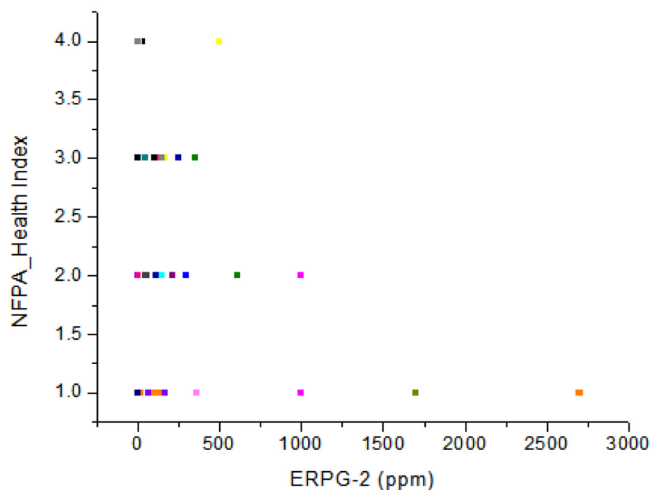
여기서, HS는 인체 위해도, HEX는 노출 위험도, HEF는 영향 위험도, a는 적용계수이다. 노출 위험도는 잠재 위험도를 고려하는 것으로 끓는점, 증기압 및 Log Kow (octanol/water partition coefficients)을 평가한다[12,18]. 영향 위험도는 해당물질의 GHS의 R-phrase에 따른 평가점수를 인용하여 평가한다. 지연구[9] 및 김예신[13]은 EURAM이 대규모 확산공간이 아닌 소규모 공간에서 독성을 평가하는 것을 목적으로 하고 있다고 언급하였다. 즉, EURAM은 소규모 공간에 대한 화학물질 독성영향 위험도[9,13]를 평가한 지표로 대규모 공간에서 화학물질의 확산과 그에 따른 화학물질사고 배상책임 위험도 산정기준으로 사용하기는 어려움이 있다. 이는 EURAM과 ERPG-



(a) Correlation of EURAM with ERPG-2



(b) Correlation of EURAM with NFPA-Health Index



(c) Correlation of ERPG-2 with NFPA-Health Index

Fig. 1. Correlations among EURAM, ERPG-2 and NFPA-Health Index for 97 species.

2의 상관관계 분석을 통해 확인할 수 있다.

Fig. 1은 환경부 사고대비물질 97종에 대해 EURAM, ERPG-2 그리고 NFPA 보건지수 사이의 상관관계에 대한 결과를 나타낸 것

이다. 상관관계 분석은 Pearson Correlations 방식을 사용하였다. EURAM과 ERPG-2값과의 상관관계수 값은 0.020, EURAM과 NFPA 보건지수는 0.212로 상관관계가 낮은 것으로 나타났다. 반면에 ERPG-2와 NFPA 보건지수와의 상관관계는 -0.391으로 상관성이 있는 것으로 나타났다. EURAM과 ERPG-2 값과 상관관계가 거의 없는 것으로 나타난 이유는 EURAM에 기반한 화학물질 사고 배상책임 위험도는 국소작업환경 내 인체 노출 및 독성 영향도를 고려하고, ERPG-2 값은 화학사고 시 대피를 위하여 화학물질의 누출확산에 따른 원거리의 독성영향을 고려했기 때문으로 판단된다. 이에 EURAM은 화학물질 누출에 따른 사업장 밖의 사람과 환경에 대한 배상책임 피해를 평가하는 데 한계가 있기에 수정·보완이 필요하다.

## 2-2. 화학물질 누출사고 배상책임 위험도 산정 방법

화학물질 누출 사고 시 이에 대한 배상책임 위험도는 현재 EURAM을 기반으로 하고 있고, 앞에서 언급한 바와 같이 장외영향평가의 기준이 되는 ERPG-2값과 상관관계가 0.026으로 상관성이 거의 없기에 화학물질 사고 배상책임 위험도 산정 시 이에 대한 개선이 필요하다. 이에 어떠한 인자가 서로 상관있는지를 도출하기 위하여 사고대비물질 97종 중 14종에 대한 시뮬레이션 분석, 사고 사례[4,6]의 분석 및 화학물질안전원의 화학물질 누출 피해 문헌[20,21]을 분석하였다. 시뮬레이션 분석평가는 정량적 위험성 평가 프로그램인 PHAST Risk (version 6.7)를 이용하여 주요 사고대비 물질인 불화수소, 염소, 황화수소, 일산화탄소, 벤젠, 암모니아 등 14종에 대해 확산 거동을 분석하였다. 이를 통해서 특정 지점 (100 m)에서 농도에 따른 물질별 Probit과 치사율을 분석하고, 화학물질 누출사고 배상책임 위험도와 관련된 인자를 상관관계 분석을 통해서 도출하였다. 사고사례 분석은 대표적인 화학물질 배상책임 사고인 2012년 구미 불화수소누출[4] 및 2015년 군산의 사염화규소 누출[5] 사고를 대상으로 하였고, 사고 피해 금액 분석을 통해서 화학물질 누출사고 배상책임 위험도와 상관관계가 높은 인자를 도출하였다. 또한, 화학물질안전원의 화학물질 누출에 따른 식물피해 영향보고서의 분석을 통하여 식물 관련 화학물질 누출사고 배상책임 위험 상관관계 인자를 도출하였다. 도출된 화학물질 사고 배상책임 위험도 상관관계 인자를 기존의 배상책임 위험도 산정식에 가산하여 화학물질 누출사고 배상책임 위험도 산정식을 수정하고, 이를 사고대비물질 97종에 적용하였다.

## 3. 화학물질 누출사고 배상책임 관계인자 도출 및 배상책임 위험도 산정식 수정

### 3-1. 화학물질 누출사고 배상책임 관계인자 도출

#### 3-1-1. 피해예측 시뮬레이션

화학물질 누출사고로 인한 배상책임위험 관계인자를 도출하기 위해서 노르웨이 DNV사의 사고결과와 피해예측 프로그램인 PHAST (Version 6.7)를 이용하여 Table 1에 나타난 14종 물질에 대한 독성 영향을 평가하였다. 여기서 고려한 14종의 물질은 사고대비물질 97종 중 화학물질 사고 통계자료[22]에서 사고빈도와 중대성이 높은 물질이다. 물질별 확산 농도에 따른 Probit (독성누출 영향도)과 치사율을 산출하고, 이를 비교하기 위하여 14종의 화학물질에 대해서 동일조건인 입력 데이터를 고려하였다. 여기서 적용한 데이터는 2012년 9월 27일 구미 4공단에서 발생한 불화수소(HF) 누출사고

Table 1. 14 chemicals applied for simulation

Chemicals	CAS Number
Hydrogen Fluoride	7664-39-3
Chlorine	7782-50-5
Hydrogen Sulfide	7783-06-04
Carbon Monoxide	630-08-0
Ammonia	7664-41-7
Benzene	71-43-2
Ethylene Oxide	75-21-8
Nitric Oxide	10102-43-9
Toluene	108-88-3
Acrylonitrile	107-13-1
Hydrogen Cyanide	74-90-8
Carbon Disulfide	75-15-0
Methanol	67-56-1
Propylene Oxide	75-56-9

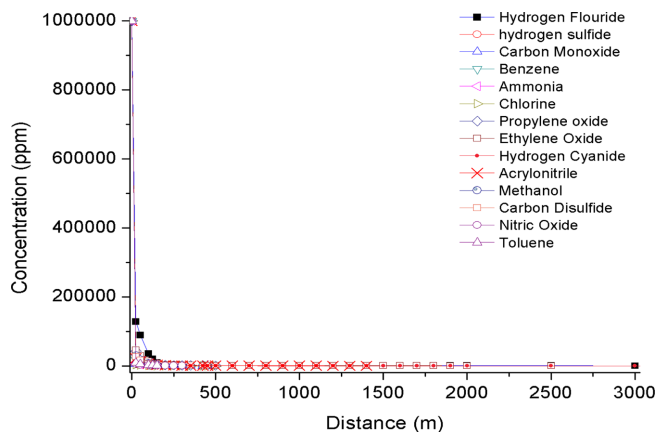


Fig. 2. Variations of dispersion concentration by distance for 14 chemicals.

때 사고조사기관의 추정조건[8]과 유사한 Data를 선별적으로 적용하였다. 적용된 입력 데이터는 저장량 8톤, 누출압력 3.4 atm, 누출공 직경 0.02 m, 기상조건(대기온도 21.8 °C, 풍속 1.6 m/s, 상대습도 64%)[8]이다.

Fig. 2는 Table 1의 14개 화학물질에 대한 거리에 따른 확산 농도 변화를 나타낸 것이다. 누출지점에서 14종 화학물질의 농도는 약 999,998 ppm으로 유사하며, 100 m 지점에서 14개의 물질 중 불화수소의 농도는 약 35,186 ppm으로 다른 물질에 비해 높은 값을 보였다. Fig. 3은 Fig. 2에 표시한 영역을 확대하여 다시 나타낸 것으로 약 100 m에서 산화에틸렌과 산화프로필렌은 각각 약 14,127 ppm 및 11,004 ppm이었다. 동일 지점에서 5,000 ppm에서 10,000 ppm 사이의 물질은 메탄올(약 8,095 ppm), 아크로니트릴(약 6,188 ppm), 이황화탄소(약 5,934 ppm)로 나타났다. 1,000 ppm에서 5,000 ppm 미만의 물질은 암모니아(약 4,021 ppm), 일산화탄소(약 3,378 ppm), 황화수소(약 3,063 ppm), 톨루엔(약 2,166 ppm), 염소(약 2,114 ppm), 산화질소(약 1,858 ppm), 시안화수소(약 1,621 ppm)이었고, 1000 ppm 미만인 물질은 벤젠(0 ppm)이었다.

확산 거리가 가장 짧은 화학물질은 벤젠으로 93 m이며, 암모니아는 125 m까지 확산하는 경향을 보였고, 그다음으로 메탄올과 톨루엔은 150 m까지 확산성을 보였다. 확산 거리가 짧은 벤젠, 암모니아, 메탄올 및 톨루엔 물질은 Probit(독성누출 영향도)이 작고, 이

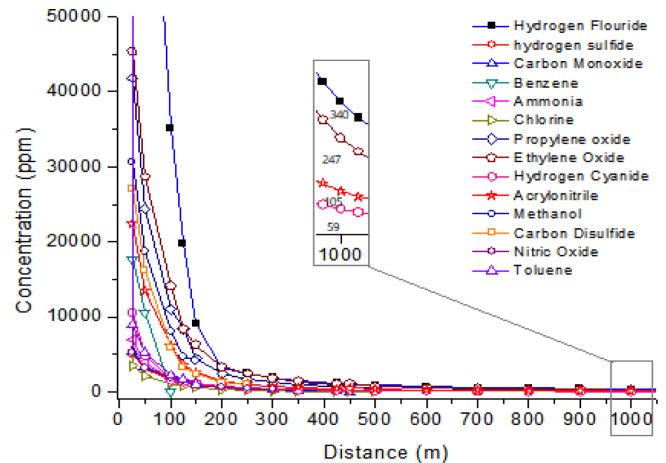


Fig. 3. Variations of dispersion concentration by distance for the region represented at Table 1.

에 따라 배상책임 위험도가 낮을 것으로 추정된다. Fig. 3에 나타난 바와 같이, 1,000 m 거리까지 불화수소, 산화에틸렌, 아크로니트릴 및 시안화수소 물질은 확산이 지속되며, 농도는 ERPG-2 값보다 높은 농도 범위(59 ppm~340 ppm)를 형성하고 있어 독성누출 영향도와 배상책임 위험도가 높을 것으로 예측되었다. ERPG-2 값 이상의 농도로 확산 거리가 먼 물질은 배상책임 위험도가 낮고, ERPG-2 값 농도의 확산 거리가 짧은 물질은 배상책임 위험도가 낮을 것으로 판단된다.

Fig. 4는 14개 화학물질에 대한 거리에 따른 Probit 값의 변화를 나타낸 것이다. 약 25 m까지 모든 물질의 Probit 값은 증가하는 경향을 보이다가 약 25 m 이후부터는 감소하는 것으로 나타났다. 약 25 m에서 Probit 값이 최대치를 나타내는 것은 누적 독성농도인 Toxic Dose가 그 지점에서 최대이기 때문이다. Fig. 4에 나타난 것처럼 다양한 물질 중 최대 Probit 값은 Nitric Oxide에서 얻어졌으며 그 값은 약 43이었고, 약 25 m 이후의 거리에서는 급격히 감소하는 경향을 보이다가 약 250 m 지점에서 0으로 나타났다. 약 100 m를 기준으로 Probit 값이 가장 큰 순서대로 나열하면, 산화질소, 시안화수소, 불화수소, 황화수소, 아크로니트릴, 염소, 산화에틸렌, 산화프로필렌, 일산화탄소, 이황화탄소, 암모니아, 톨루엔, 메탄올 및 벤젠 순이다. Probit 값이 5 이상인 물질은 산화프로필렌 등 8종이며,

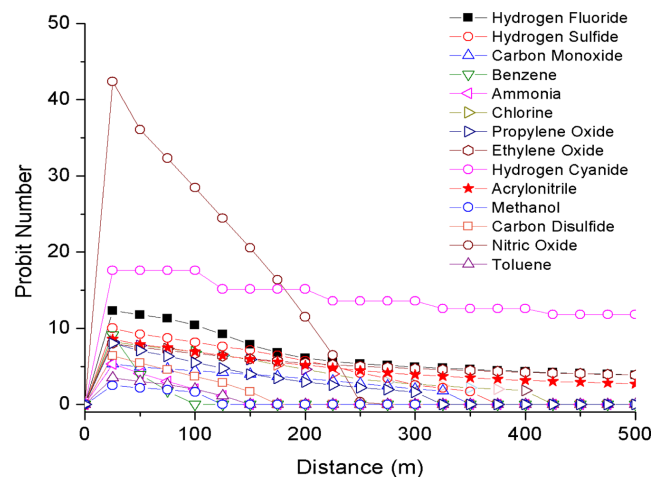


Fig. 4. Variations of Probit number by distance for 14 chemicals.

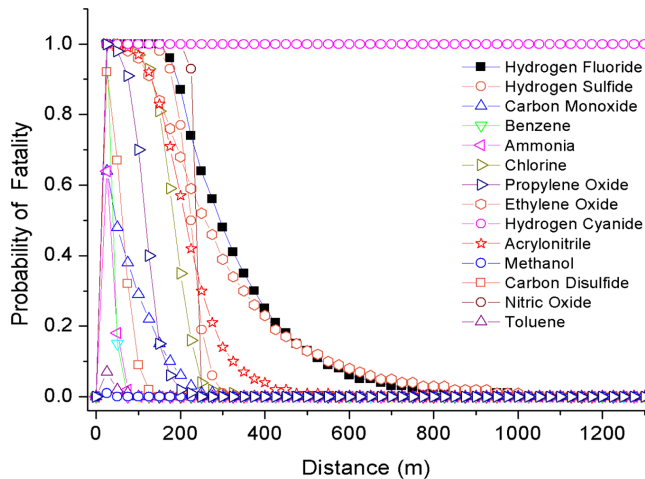


Fig. 5. Variations of probability of fatality by distance for 14 chemicals.

5 미만의 물질은 일산화탄소 등 6종이었다. Probit이 5 이상인 산화프로필렌 등 8종은 치사율이 대부분 1에 근사하며 높고, 치사율이 5 미만의 일산화탄소 등 6종은 치사율이 0에 근사하며 낮다.

Fig. 5는 14개 물질에 대한 거리에 따른 치사율 변화를 나타낸 것이다. 약 100 m 거리에서 시안화수소, 산화질소, 불화수소, 황화수소, 산화에틸렌, 아크로니트릴 및 염소의 치사율이 대부분 1로 나타났다. 산화프로필렌은 0.7, 일산화탄소, 암모니아, 벤젠, 톨루엔, 이황화탄소 및 메탄올은 0에 근접하였다. 시안화수소는 약 1000 m 이상의 거리까지 치사율 1을 유지하였고 산화질소, 불화수소 및 황화수소는 약 200 m 지점까지 0.7 이상 유지하다가 그 이후의 거리에서부터 급격히 감소하는 경향으로 나타났다. 산화에틸렌 및 아크로니트릴은 약 200 m 지점에서 약 0.7 및 0.6의 치사율을 보이면서 급격히 감소하였다. 염소는 약 200 m 지점에서 약 0.35를 보이면서 급격히 치사율이 감소하는 것으로 나타났다. 일산화탄소 외 7개 물질의 약 200 m에서 치사율은 거의 0에 근접하였다. 치사율 관점에서 배상책임 위험도 경향은 시안화수소, 산화질소, 불화수소, 황화수소, 산화에틸렌, 아크로니트릴, 염소, 일산화탄소, 암모니아, 벤젠, 톨루엔, 이황화탄소, 메탄올 순으로 낮은 것으로 판단된다.

Table 2는 약 100 m 지점에서 14종 물질에 대한 누적 독성농도 (Toxic Dose), 거리별 확산 농도, 독성영향도(Probit Number), 치사율(Probability of Fatality)과 ERPG-2 외 5개 항목 (EURAM, 증기비중, 증기밀도, NFPA 보건지수, 부식지수)의 값을 나타낸 것이다. Toxic Dose는 시간 누적 독성농도로써 100 m 기준으로 14종 물질 중 황화수소가  $2.95505 \times 10^{16}$ 로 가장 높고, 벤젠은 0으로 가장 낮다. 벤젠의 경우 100 m 지점에서 농도가 0이며 치사율도 0으로 나타났다. 농도특성, 독성 영향도, 비상대응농도(ERPG-2)가 높을수록 치사율은 높은 경향을 보였지만, EURAM은 낮은 경향을 보였다.

Table 2에 나타난 결과를 바탕으로 Fig. 6은 Probit과 ERPG-2 그리고 Probit과 치사율의 상호관계, Fig. 7은 Probit과 EURAM 그리고 Probit과 치사율의 상호관계를 나타낸 것이다. Fig. 6과 같이, Probit과 치사율의 관계를 보면 Probit 값이 5 이상부터는 전체적으로 치사율은 1, ERPG-2는 0에 근접하는 경향을 보였다. Probit과 EURAM의 관계는 ERPG-2 관계와는 다르게 전체적으로 반대의 경향을 보이는 것으로 나타났다.

Table 3은 14종 화학물질에 대한 Probit과 ERPG-2, EURAM, NFPA 보건지수, 증기밀도, 증기비중 및 부식지수와 상관관계를

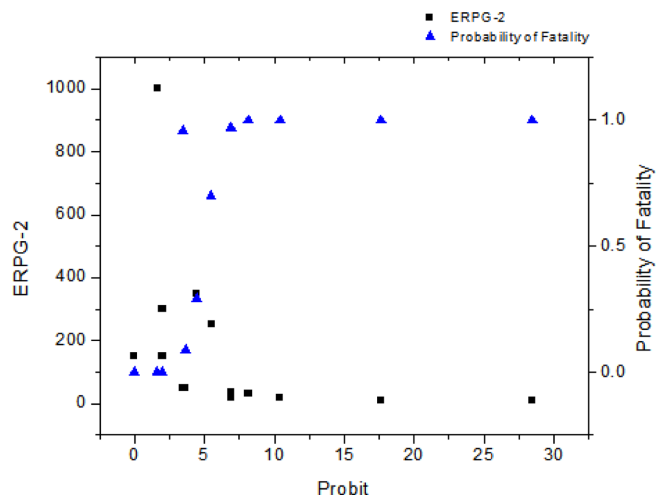


Fig. 6. Variations of ERPG-2 and probability of fatality by varying Probit numbers for 14 chemicals.

Table 2. Simulation results and concerned data of 14 materials at about 100 m

Materials	Simulation Data (100 m)				Concerned Data					
	Toxic Dose	Concentration	Probit Number	Probability of Fatality	ERPG-2	EURAM Data	Vapor Specific Gravity	Vapor Density	NFPA Health Index	Corrosion Index
Hydrogen Fluoride	1.83072E+008	35,186.14	10.41	1	20	4.5	0.69	0.89	4	5
Chlorine	1.47694E+010	1,120.97	6.90	0.97	20	3.75	2.45	3.17	3	4
Hydrogen Sulfide	2.95505E+016	1,689.44	8.16	1	30	2.25	1.18	1.52	4	1
Carbon Monoxide	1.16468E+005	1,956.44	4.46	0.29	350	5.25	0.97	1.25	3	1
Ammonia	8.14631E+007	1,720.28	2.01	0	150	4.5	0.59	0.76	3	4
Benzene	0	0	0	0	150	5	2.69	3.23	2	1
Ethylene Oxide	3.86824E+005	14,127.12	6.72	0.96	50	7.5	1.52	1.82	3	1
Nitric Oxide	1.11153E+005	1,858.37	28.46	1	10	3	1.03	1.24	3	2
Toluene	2.29990E+009	2,166.51	2	0	300	6.75	2.69	3.23	2	1
Acrylonitrile	1.86339E+006	6,188.8	6.92	0.97	35	7.5	1.83	2.20	4	2
Hydrogen Cyanide	2.59292E+009	1,621.24	17.61	1	10	2.25	0.93	1.12	4	1
Carbon Disulfide	1.74505E+005	5,934.22	3.68	0.09	50	6.75	2.63	3.15	3	1
Methanol	1.68739E+005	8,095.3	1.64	0	1000	5.25	1.10	1.33	1	1
Propylene Oxide	2.77065E+005	11,004.31	5.52	0.7	250	7.5	2.00	2.40	3	1



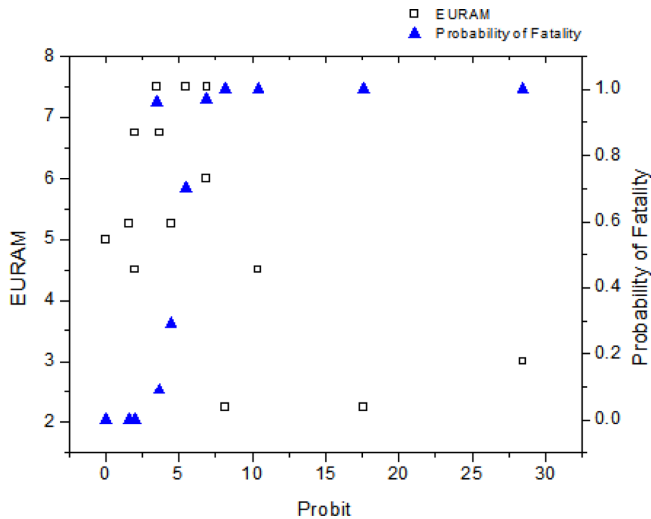


Fig. 7. Variations of EURAM and probability of fatality by varying Probit numbers for 14 chemicals.

분석한 결과이다. 상관관계 분석은 Pearson Correlations 방식을 사용하였다. 배상책임 위험도 지표인 Probit과 상관관계 분석결과 ERPG-2와는  $-0.419$ , NFPA 지수와는  $0.442$ , EURAM과는  $-0.526$ , 증기밀도는  $-0.410$ , 증기비중은  $-0.407$ , 부식지수는  $0.104$ 로 나타났다. Probit과 EURAM과의 상관관계는  $-0.526$ 이었고, 이러한 결과는 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 EURAM이 화학물질 누출사고 배상책임 위험도를 표현하는데 설명력이 부족함을 의미한다. Probit과 상관관계 분석결과, 0.4 이상의 상관관계가 있는 인자는 ERPG-2, 증기비중, 증기밀도, 및 NFPA 보건지수이다.

### 3-1-2. 화학물질 누출 사고사례 분석

사고로 인한 피해 금액 구성비 분석을 통하여 배상책임위험 상관관계 인자를 도출하고자 국내에서 발생한 1억 이상의 사고대비물질 배상책임사고인 구미 불화수소 누출사고[4]와 군산 염화수소 누출사고[6]를 선정하여 분석하였다. Table 4는 불화수소 및 염화수소 누출사고에 대한 개략적인 사고결과를 나타낸 것이고, Table 5

및 Table 6은 앞에서 언급한 2가지 사고에서 피해 금액 구성비를 분석한 결과이다.

Table 5에 보여지는 바와 같이, 2012년 구미 불화수소 누출사고 피해보상금 구성비[4]를 보면 직접적인 인적피해는 약 2%, 물적피해는 98%이다. 인적피해 중에서 사망자는 4명으로 집계되었다. 여기서, 사망자는 구내의 작업자로 배상책임에 포함되지 않았고 대부분의 손실은 직접적인 재물손실이다. 구미 불화수소사고 피해 금액 및 구성비를 분석해보면 대부분 기업피해이며, 사고가 일어난 지점 주변 회사의 시설과 동산의 피해가 주를 이룬다. 그 외에 피해 금액의 구성비에 있어 농작물 고사가 약 13.9%, 산림 고사가 약 10.9%, 나뭇잎 등의 조경수 고사가 약 4.6%, 차량 도장 손상이 약 3.2%, 건축물 부식이 약 2.1%이다. 이는 불화수소의 H290, H314 및 DOT 부식성 성질이 재물의 표면에 영향을 미친 결과라 할 수 있다. 건강검진 비용, 소상공인 휴업 및 생계지원비는 인체에 유해한 독성성질에 기인한 직접적인 인적 피해(약 2%)라 할 수 있으며, 가축 피해 약 9.8%는 인체 독성영향과 상관성이 있는 피해로 볼 수 있다.

Table 6은 군산 폴리실리콘 제조업체의 사염화규소 혼합물 누출 사례[6]를 분석한 것이다. 사염화규소 혼합물 중 피해에 가장 영향을 미친 물질은 염화수소다. 염화수소는 불화수소와 같이 ERPG-2값이 20 ppm으로 위해도가 동일하다. 구미 불화수소 사고와 유사하게 염화규소 누출 사례도 피해 금액 구성비가 인적피해는 약 2%, 그 외 물적피해는 약 98%이었으며, 약 98% 구성비 내에 가축 피해는 없었다. 사염화규소 누출에 따른 피해는 구미 불화수소 누출 사고와 같이 대부분 재물손상이다. 인명피해는 피해 확진자 6명과 예상 피해자 61명으로 집계되었다. 영향조사보고서[6]에 따르면 총 건강검진 대상자는 179명이었고, 구미 불화수소사고와 같이 검진 비용과 치료비가 전체 피해 금액 중 약 2%이었다. 재물피해 중 구성비가 가장 큰 것은 농작물 고사 피해와 차량 도장 손상이었다. 피해 유형이 불화수소와 비슷하고 두 물질이 동일하게 가진 성질은 H314의 피부 부식성과 DOT의 재물 부식성이다.

구미 불화수소와 군산 사염화규소 누출사고 분석결과 2가지의 큰 특징이 나타났다. 첫 번째는 인적 관련 피해(11.8%)보다 물적 피해(88.2%)가 컸고, 생물군(사람, 가축 및 식물)과 무생물군(건물,

Table 3. Correlation coefficient Analysis of 14 chemicals by Pearson method

Contents	Probit	ERPG-2	Corrosion Index	NFPA_Health Index	Vapor Specific Gravity	Vapor Density	EURAM
Probit	1.000						
ERPG-2	-0.419	1.000					
Corrosion Index	0.104	-0.299	1.000				
NFPA_Health Index	0.442	-0.782	0.312	1.000			
Vapor Specific Gravity	-0.407	-0.088	-0.308	-0.334	1.000		
Vapor Density	-0.410	-0.100	-0.271	-0.319	0.998	1.000	
EURAM	-0.526	0.193	-0.240	-0.268	0.467	0.436	1.000

Table 4. Results from the accidents both HF and HCl

Contents	HF	HCl	Remark
Release Amount	8,262 kg	87.23 kg	
Release Duration	30 min	32 min	
ERPG-2	20	20	
Release Distance	1,000 m	336 m	
Number of the deceased	5 persons	0 person	
Loss Amounts	38,012,483 Thousands KRW	172,790 Thousands KRW	
Damage Percentage (Personal: Physical)	100% (2% : 98%)	100% (2% : 98%)	Excluding of health impact tracking expense

**Table 5. A detail for damage of the release accident of hydrogen fluoride occurred at Gumi**

	Contents	Loss Amount (Thousands KRW) based on compensation provided	Composition Cost	Remark
Physical Damage	Corporate Damage	17,839,460	46.8%	Building, Stock, Facility
	A Small Merchant	164,017	0.4%	Closed Loss
	Vichle Damage	1,204,632	3.2%	Painting Damage (1,958 vehicles)
	Building Corrosion	779,761	2.1%	Corrosion
	Landscape Damage	1,740,961	4.6%	Leaf Damage
	Agricultural Damage	5,286,050	13.9%	Agricultural Damage
	Livestock Damage	3,720,329	9.8%	Livestock Damage
	Forest Damage	4,139,032	10.9%	Forest Damage
	Waste Disposal	2,505,884	6.6%	Waste Treatment
	Disinfection Fee	24,233	0.1%	Disinfection
Personal Injury	Health Examination	235,874	0.6%	12,243 persons
	Support for Living Expense	372,250	1.0%	
	Sum	38,012,483	100%	

**Table 6. A detail damage of the release accident of silicon tetrachloride occurred at Gunsan**

	Contents	Loss Amount (Thousands KRW) based on compensation provided	Composition Cost	Remark
Physical Damage	Corporate Damage	0	0%	Building, Stock, Facility
	A Small Merchant	0	0%	Closed Loss
	Vichle Damage	68,906	39.9%	Painting Damage (12 vehicles)
	Building Corrosion	0	0%	Corrosion
	Landscape Damage	9,882	5.7%	Leaf Damage
	Agricultural Damage	90,553	52.4%	Agricultural Damage
	Livestock Damage	0	0%	Livestock Damage
	Forest Damage	0	0%	Forest Damage
	Waste Disposal	0	6.6%	Waste Treatment
	Disinfection Fee	0	0%	Disinfection
Personal Injury	Health Examination	3,449	2.0%	179 persons
	Support for Living Expense	0	0%	
	Sum	172,790	100%	

채고동산, 시설 및 차량)의 피해금액은 각 40%와 60% 이었다. 두 번째는 부식 등으로 재물과 식물 고사 피해가 컸다. 인적 피해보다 물적 피해 구성비가 현저히 높게 나타난 부분은 현재의 화학물질 누출사고 배상책임 위험도가 주로 사람에 대한 피해에 초점이 맞추어 졌다는 것에 문제점을 드러내고 있다. 부식의 피해가 크게 나타난 부분은 현재의 배상책임 위험도에 부식성 인자의 적용이 필요하다는 것을 의미한다.

### 3-1-3. 식물피해 영향분석

화학물질의 부식성과 화학물질 누출사고 배상책임 위험인자와

상관관계 분석을 위해서 화학물질안전원에서 발표한 식물피해 보고서[20]를 분석하였다. Table 7은 화학물질안전원의 특정 유해 화학물질(7종)의 누출에 따른 식물 영향도를 분석한 것이다. 여기서, 식물 영향도는 화학물질 누출농도, 누출일수 및 누출 결과를 바탕으로 산정하였고, 도출된 부식성지표와 식물 영향도를 통해서 회귀방정식을 산정하였다. GHS (290, 314, 315, 318 및 319) 및 DOT 부식성 정보를 바탕으로 산정한 부식성 지표와 회귀방정식을 통해서 산정된 부식 영향도의 상관관계 분석결과, 상관성은 0.628로 나타났다.

**Table 7. Plant life damage from exposure of chemicals**

Chemicals	Exposure Criteria (Concentration, Day, Receptor)	Plant Impact Degree/ Corrosion Index	Exposure Result (dried up ratio)	Remark
Hydrogen flouride	2.5%, 14 days, Bean Leaf	5.60/5	100%	The hole bean leaf is dried up
Hydrogen Chloride	2.5%, 14 days, Bean Leaf	5.60/4	100%	The hole bean leaf is dried up
Ammonia	28%, 30 days, Bean Leaf	0.25/4	50%	The 50 percentage of bean leaf is dried up
Nitric Acid	3%, 14 days, Bean Leaf	4.67/4	100%	The hole bean leaf is dried up
Sulfuric Acid	1%, 14 days, Bean Leaf	14.00/5	100%	The hole bean leaf is dried up
Toluene	75%, 14일, Bean Leaf	0.19/1	100%	The hole bean leaf is dried up
Formaldehyde	5%, 14일, Bean Leaf	2.80/4	100%	The hole bean leaf is dried up

### 3-2. 화학물질 누출사고 배상책임 위험도 산정식 수정

앞에서 기술한 14종의 화학물질 누출·확산 시뮬레이션, 화학물질 누출사고 사례분석 및 식물피해보고서 분석을 통해 배상책임위험 상관인자를 도출하였다. 시뮬레이션 결과, 배상책임위험 지표인 Probit과 상관관계가 높은 것은 ERPG, 증기 밀도 및 보건지수이며, EURAM은 상관성이 거의 없는 것으로 나타났다. EURAM 이용한 배상책임 위험도 산정은 설명력이 부족하기에 상관인자의 추가가 필요하다. 화학물질 누출사고 사례에서 재물피해와 인적관련 피해 구성비가 약 88.2%와 11.8%로 재물피해가 인적관련 피해보다 7.5 배 큰 것으로 분석되었고, 주요 상관 인자는 부식성이었다. 화학물질 안전원의 식물피해 영향도 자료 분석에서도 식물의 고사와 상관성이 높은 것은 부식성으로 분석되었다.

현재의 화학물질 누출사고 배상책임 위험도는 환경 노출 위험도 평가와 인체 건강 영향도 평가로 구성된 EURAM 평가방법에서 환경 노출 위험도 평가는 제외하고 인체 건강 영향도 평가만 고려하고 있는 문제점이 있다. 이에 현재의 배상책임 위험도 평가방법에 앞에서 언급한 ERPG-2, NFPA Health Index를 추가하고, Corrosion Index를 재물피해 상관인자로 고려하여 배상책임 위험도를 다음과 같이 수정하였다.

수정된 화학물질 누출사고 배상책임 위험도(Y) = 인체피해 영향도(X1) + 재물피해 영향도(X2)

X1 = EURAM, ERPG-2, NFPA-Health Index, X2 = Corrosion Index  
(2)

Table 8은 수정된 화학물질 누출사고 배상책임 위험도를 반응변수(Y), 상관관계 인자를 예측변수(X)로 하여 SPSS Statistics (Version 26)을 이용하여 선형 회귀분석을 통해 회귀방정식을 도출하였다. 회귀분석에서 종속변수의 표준화 계수(베타) 분석결과, 환경오염 배상책임 위험도의 영향 인자는 Corrosion Index가 0.713으로 영향도가 가장 높고, 다음으로 ERPG-2가 0.400, EURAM이 0.142, NFPA Health Index가 0.068로 나타났다. 상수와 종속변수 모두 P-value는 0.000으로 신뢰도는 유의하였다.

Table 9는 본 연구에서 고려한 14종 물질에 대한 기존의 배상책임 위험도(EURAM)와 수정된 배상책임 위험도(Modified Liability Rate)의 상관분석 결과로 Probit과의 상관계수는 -0.526에서 0.319로 변화되었으며, ERPG-2와의 상관계수는 0.193에서 -0.602로 변화되었다. 부식지수와의 상관계수는 -0.240에서 0.892로 높은 상관성을 보였으며, NFPA 보건지수와의 상관관계는 -0.268에서 0.573로 적절하게 변화되었다.

Table 8. Regression analysis of dependent variable (correlation factor)

Model	Nonstandard Coefficient (B)	Standard Coefficient (β)	P-Value
Constant	-0.369		0.000
EURAM	0.122	0.142	0.000
NFPA_Health Index	0.122	0.068	0.000
ERPG-2	0.489	0.400	0.000
Corrosion Index	1.000	0.713	0.000

Table 9. Correlation coefficient analysis of 14 chemicals with Modified Liability Rate by Pearson method

Models	Probit	ERPG-2	Corrosion Index	NFPA_Health Index	Vapor Specific Gravity	Vapor Density	EURAM	Modified Liability Rate
EURAM	-0.526	0.193	-0.240	-0.268	0.467	0.436	1.000	
Modified Liability Rate	0.319	-0.602	0.892	0.573	-0.233	-0.200	-0.243	1

### 4. 화학물질 누출사고에 대한 수정된 배상책임 위험도 산정식 적용

Table 10은 환경부 사고대비물질 97종에 대해 수정된 화학물질 사고 배상책임 위험도 산정식을 적용한 결과를 나타낸 것이다. 배상책임 위험도가 증가한 물질은 61종이며, 감소한 물질은 36종으로, 위험도 증가의 원인은 부식성과 위해성이 높아진 경우이며, 감소 원인은 부식성과 위해성이 낮아진 물질이었다.

부식성(5)과 위해도 지표인 Probit 값(10.41)이 높은 불화수소는 배상책임 위험도가 4.5000에서 7.7255로 3.23 만큼 증가하였으며, 부식성(1)과 Probit 값(2 이하)이 낮은 물질인 톨루엔(2)은 6.7500에서 1.9904로 4.76만큼 감소, 메탄올(1.64)은 5.25에서 1.3973으로 3.85 만큼 감소 및 벤젠(0)은 5에서 2.3141으로 2.69 만큼 감소되었다. 배상책임 위험도가 가장 높게 증가(+4.99)한 물질은 메틸 디클로로실란과 사불화규소로 부식성(4)과 ERPG-2 상응값이 각각 메틸디클로로실란 11 ppm(AEGL-2), 사불화규소 3.3 ppm(AEGL-2)으로 배상책임 위험도가 높은 물질이었다. 배상책임 위험도가 가장 많이 감소(-5.17)한 물질은 산화프로필렌과 에틸아세테이트로 부식성(1)과 ERPG-2 상응값이 각각 산화프로필렌 250 ppm, 에틸아세테이트 1700 ppm(PAC-2)으로 배상책임 위험도가 낮은 물질이었다.

기존 배상책임 위험도 산정방법을 적용 시 불화수소는 4.5000,

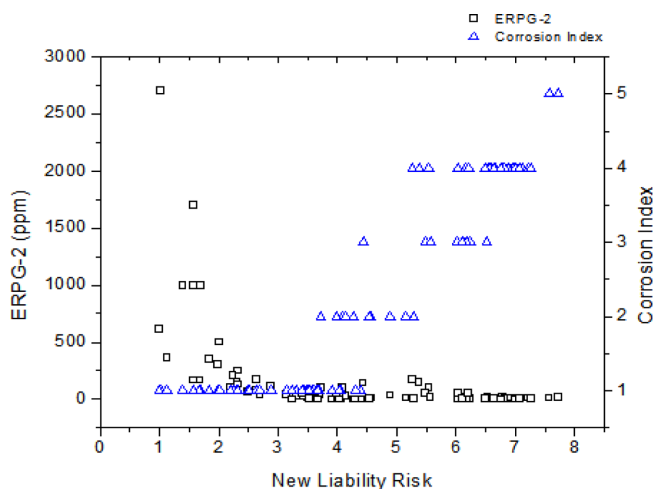


Fig. 8. Correlation of modified liability rate with ERPG-2 and NFPA health index.



Table 10. Results of application of Modified Liability Rate to hazardous materials (97 species)

Number	Hazardous materials (97 species)	EURAM Rate*	Modified Liability Rate
1	Hydrogen fluoride; Hydrofluoric acid	4.5000	7.7255
2	Sulfuric acid	3.0000	7.5687
3	Titanium tetrachloride	7.5000	7.2625
4	Methyltrichlorosilane	6.7500	7.2604
5	Dichlorosilane	7.5000	7.2261
6	Formaldehyde; Formalin	7.5000	7.1191
7	Trichloroethylsilane	6.7500	7.0694
8	Methyl vinyl ketone	4.5000	7.0145
9	Bromine	5.2500	6.9998
10	Phosphorus trichloride	4.5000	6.9852
11	Fluorine	4.5000	6.9530
12	Chlorine	3.7500	6.8934
13	Nitric acid; Aqua fortis	4.5000	6.8745
14	Chlorosulfuric acid	4.5000	6.8745
15	Boron trichloride	6.0000	6.8163
16	Hydrogen chloride; Hydrochloric acid	6.0000	6.7866
17	Bromine pentafluoride	2.2500	6.7562
18	Cyanogen chloride	4.5000	6.6665
19	Silicon Tetrachloride	3.0000	6.6392
20	Trichlorosilane	2.2500	6.5876
21	Trichlorovinylsilane	2.2500	6.5554
22	Formic acid	4.5000	6.5325
23	2-Propenal; Acrolein	4.5000	6.5211
24	Methyldichlorosilane	1.5000	6.4921
25	Silicon tetrafluoride	1.4999	6.4910
26	Ethylenimine	6.7500	6.2346
27	Acrylic acid	4.5000	6.2139
28	Hydrogen peroxide	4.5000	6.2139
29	2,4-Diisocyanatotoluene; 2,4-Toluene diisocyanate, 2,4-TDI	6.7500	6.1847
30	3-Methylphenol; m-Cresol	1.5000	6.1655
31	(Chloromethyl)benzene; Benzyl chloride	7.5000	6.1191
32	Diborane	5.2500	6.1095
33	n-Butylamine	3.0000	6.0304
34	Phosgene	4.5000	6.0260
35	Phosphine; Phosphorus hydride	4.5000	6.0260
36	Potassium permanganate	4.5000	5.5689
37	Ethylenediamine	3.0000	5.5384
38	Phenol; Hydroxybenzene	6.7500	5.4891
39	Ammonia	4.5000	5.3752
40	Methylhydrazine	6.7500	5.2947
41	Triethylamine	4.5000	5.2672
42	Phosphoryl trichloride	6.7500	5.1559
43	2-Propenenitrile; Acrylonitrile, Cyanoethylene	7.5000	4.8876
44	Nitric oxide	3.0000	4.5687
45	Thionyl chloride	0.7500	4.5427
46	Sodium	4.5000	4.4352
47	Nickel carbonyl	7.5000	4.4007
48	Arsenic hydride; Arsine	7.5000	4.3930
49	Germanium tetrahydride	6.7500	4.3067
50	Acrylyl chloride	1.2500	4.2658
51	Trifluoroborane	0.7500	4.1413
52	Methylamine	7.5000	4.0889
53	3-Isocyanatomethyl-3,5,5-trimethylcyclohexylisocyanate; Isophorone diisocyanate	6.7500	4.0626
54	Sodium cyanide	7.5000	4.0583
55	Chloropicrin	4.5000	4.0318

Table 10. Continued

Number	Hazardous materials (97 species)	EURAM Rate*	Modified Liability Rate
56	Methyl ethyl ketone peroxide	1.5000	3.9915
57	Chlorine dioxide	4.5000	3.9037
58	Trimethylamine	4.5000	3.7219
59	Vinyl chloride	7.5000	3.7016
60	O-Isopropyl methyl phosphonofluoridate	1.5000	3.6672
61	Pentacarbonyl iron	4.5000	3.6663
62	2-Propen-1-ol; Allyl alcohol, Vinylcarbinol	2.5000	3.6393
63	Allyl chloride	6.7500	3.6099
64	Hydrogen cyanide	2.2500	3.5992
65	Oxirane; Ethylene oxide	7.5000	3.5808
66	Zinc phosphide (Zn3P2); Trizinc diphosphide	1.5000	3.5285
67	Nitrobenzene	3.7500	3.5114
68	Carbon sulfide; Carbon disulfide	6.7500	3.4891
69	1-Methyl-4-nitrobenzene; p-Nitrotoluene	4.5000	3.4244
70	Tetrafluoroethylene	7.5000	3.4012
71	Hydrogen sulfide	2.2500	3.3113
72	Hydrogen selenide	1.0000	3.2373
73	Sodium nitrate	4.5000	3.1509
74	Vinyl ethyl ether	7.5000	2.8872
75	Sodium chlorate	0.2500	2.6924
76	Methyl acrylate	7.5000	2.6342
77	Ammonium nitrate	3.7500	2.6297
78	Potassium perchlorate	2.5000	2.5171
79	Potassium chlorate	0.7500	2.4986
80	Methyl oxirane; Propylene oxide	7.5000	2.3258
81	Silane	5.0000	2.3161
82	Benzene	5.0000	2.3141
83	Nitromethane	6.7500	2.2444
84	Potassium nitrat	2.2500	2.2020
85	1,1-Dichloroethylene	6.7500	2.0170
86	Toluene	6.7500	1.9904
87	Carbon monoxide	5.2500	1.8437
88	Chloromethane	6.7500	1.7031
89	Hexafluoro-1,3-butadiene	1.4999	1.6708
90	Isoprene	6.7500	1.5807
91	Hexamethyl disiloxane	0.7500	1.5790
92	Disilane	0.7500	1.5790
93	Acetic acid ethyl ester; Ethyl acetate	6.7500	1.5786
94	Methanol; Methyl alcohol	5.2500	1.3973
95	Tetramethylsilane	1.5000	1.1266
96	Methyl ethyl ketone; MEK, 2-Butanone	2.2500	1.0281
97	Hexamine	0.7500	1.0000

\*EURAM Rate =  $HEX \times HEF \times a$  (where 'a' is a coefficient of application and applied as '1')

벤젠은 5.0000, 톨루엔은 6.7500으로 부식성과 위해성을 고려했을 경우 상대적 위험도 수준이 비합리적이었으나, 수정된 산정방법을 적용했을 경우 불화수소는 7.7255, 벤젠은 2.3141, 톨루엔은 1.9904로 도출되어 부식성과 위해성을 고려한 상대적 위험도 수준이 합리적으로 변화되었다.

Fig. 8은 사고대비물질 97종에 대해서 수정된 화학물질 누출사고 배상책임 위험도, ERPG-2 및 Corrosion Index의 상관관계를 분석한 것이다. 수정된 화학물질 누출사고 배상책임 위험도 산정

방법론에 따라 산정된 값과 ERPG-2와의 상관관계 분석결과, 상관계수는 -0.494로 산정되었다. 이는 기존 배상책임 위험도인 EURAM과의 상관계수(0.026)보다 약 19배 높은 상관관계이다. 수정된 누출사고 배상책임 위험도 값과 부식위험도 값과의 상관계수는 0.91로 산정되었다. 또한, 기존의 배상책임 위험도는 NFPA 건강지수와의 상관계수는 0.187로 약한 상관성을 보였으나, 수정된 누출사고 배상책임 위험도와의 상관계수는 0.58로 다소 높은 상관성 보였다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 화학플랜트 등의 장치산업에서 화학물질의 누출 사고로 인한 배상책임 위험도를 합리적으로 산정할 수 있는 상관관계 인자를 도출하고 기존의 배상책임 위험도 평가법을 개선하여 화학물질별 누출 배상책임 위험도를 산정하고자 하였다. 이를 위해 환경부 사고대비 물질(14종)에 대해 누출·확산 시뮬레이션, 화학물질 누출사고 사례 분석, 식물피해 영향도 자료에 대한 분석 등을 통하여 화학물질 누출사고 배상책임 위험도와 상관관계인자를 도출하였다. 도출된 결과를 바탕으로 화학물질 누출사고 배상책임 위험도 산정 방법을 수정하였고, 수정된 방법을 사고대비물질 97종에 적용하였다. 이에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 본 연구에서 고려한 14종 물질에 대한 누출·확산 시뮬레이션 결과, 배상책임 위험 지표인 Probit과 상관성이 높은 인자는 ERPG-2, 증기밀도(=증기비중), NFPA 보건지수로 도출되었다. 화학물질 누출사고 및 화학물질안전원 식물피해 영향도 분석을 통해서 피해 금액의 대부분(88.2%)인 재물피해에 영향을 미치는 상관인자는 부식지표로 분석되었다. 화학물질 14종 물질의 Probit 값과 EURAM 배상책임 위험도의 상관계수는 -0.526으로 모순된 비합리적인 상관관계를 보였으나, 수정된 화학물질 누출사고 배상책임 위험도와 상관계수는 0.319로 상관성이 있는 것으로 분석되었다.

(2) 수정된 산정방법론에 따른 97종의 배상책임 위험도와 ERPG-2 값의 상관계수 분석결과 -0.494로 기존 배상책임 위험도와 상관관계보다 약 19배 높은 상관관계를 보였고, 부식위험도 값과의 상관계수는 0.91로 높은 것으로 분석되었다. 위험도의 증가와 감소에 영향을 미친 상관관계 인자의 표준화 회귀계수( $\beta$ ) 값은 Corrosion Index가 0.713, ERPG-2는 0.400, NFPA\_Health Index는 0.068 크기 순서로 도출되었다. 배상책임 위험도 산정에 Corrosion Index와 ERPG-2의 영향도가 높은 것으로 나타났다.

본 연구에서는 수정된 화학물질 누출사고 배상책임 위험도 산정 방법론을 통해서 기존과 신규 화학물질의 합리적인 배상책임 위험도 산정이 가능하게 하고, 사업장에서 정량적인 배상책임 위험관리 지표로 활용될 수 있도록 하였다. 이를 통해 화학플랜트 등의 장치산업에서 화학물질 누출사고 시 배상책임 위험도를 사전에 인지하고, 피해 최소화 대책에 유용하게 활용되리라 판단된다. 화학물질 누출사고 배상책임 위험도는 화학물질의 누출·확산특성(거리영향 등), 실제 현장 적용 시 배상원의 종류 및 피해경감 요소, 본 연구에서 중심으로 한 사고대비물질 이외에도 유독, 허가, 금지물질 등에 따라 달라질 수 있기에 향후 추가연구에서는 이러한 요소를 보다 고려하는 것이 필요하다.

## 감 사

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다(과제번호: 2020-0562).

## References

1. Park, E. W., Park, J. Ho., Lee, K. S., Hong, M. K., Ahn, B. J.,

and Lee, E. J., "A Study on the Establishment of the Criteria for Selection of Hazardous Substances Requiring Management in Occupational Safety and Health Act," *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene*, **24**(4), 425-435 (2014).

2. Kim, K. T., Koo, K. H. and Park, J. S., "Toxicological Evaluations of Rare Earths and Their Health Impacts to Workers: Literature Review," *Safety and Health at Work*, **4**(1), 12-26(2013).

3. Park, K. S., "Offsite Risk Assessment on Chloric Acid Release," *Korean Chem Eng. Res.*, **54**(6), 781-785(2016).

4. Nam, Y. J., "Hydrogen Fluoride, Change Gumi (Accident paper of Hydrogen Fluoride Release in Gumi)", Gumi City Hall Safety Disaster Department (2013).

5. Kim, S. Y., Cho, C. H. and Lee, E. K., "Studies on the Chemical Accidents of Korea by the Statistics and Case Review," *Korea Institute of Hazardous Materials*, **5**(1), 50-58(2017).

6. National Institute of Chemical Safety, "Report of impact investigation of accident of Tetrachlorosilane chemical release at OCI plant in Gunsan City," (2015).

7. ChosunBiz, [http://biz.chosun.com/site/data/html\\_dir/2019/05/20/2019052002697.html](http://biz.chosun.com/site/data/html_dir/2019/05/20/2019052002697.html) (Access date 2020, 02, 05)

8. Kim, J. H., Jeong, C. M., Kang, S. M., Yong, J. W., Yoo, B. T. and Seo, J. M., "Comparison Study for Impact Range of Prediction Models Through Case Study about Gumi Hydrogen Fluoride Accident," *Korean Chem. Eng. Res.*, **55**(1), 48-53(2017).

9. Korea Insurance Development Institute, "A Study on the Establishment of Environmental Damage Assessment Criteria," 26-94 (2014).

10. Kim, J. H. and Jung, S. H., "Offsite Consequence Modeling for Evacuation Distances against Accidental Hydrogen Fluoride (HF) Release Scenarios," *Korean Chem Eng. Res.*, **54**(4), 582-585(2016).

11. Kwon, H. M., "KOSHA Guide P-107, Technical Specification for Selecting Worst-case and Alternative Leakage Scenarios," Korea Occupational Safety & Health Agency, 10-11(2016).

12. Hansen, B. G., Van Haelst, A. G., Van Leeuwen, K. and Van Der Zandt, P., "Priority Setting for Existing Chemicals: EU Roepen Union Risk Ranking Method," *Environmental Toxicology and Chemistry*, **18**(4), 772-779(1999).

13. Kim, Y. S., Park, H. S., Lee, D. S. and Shin, D. C., "Comparisons of Chemical Ranking and Scoring Methods," *Environmental Health and Toxicology*, **18**(3), 183-191(2003).

14. An, Y. J., Jeong, S. W., Kim T. S., Lee, W. M., Nam, S. H. and Baek Y. W., "Assessment factors for the Selection of Priority Soil Contaminants based on the Comparative Analysis of Chemical Ranking and Scoring Systems," *Soil & Groundwater Environment*, **13**(6), 62-71(2008).

15. Environmental Media, <https://www.ecomedia.co.kr/news/news-view.php?ncode=1065572168945843> (Access date 2020, 02, 10)

16. CCPS, "Guidelines for Consequence Analysis of Chemical Releases," AICHE, John Wiley & Sons, 241-261(1999).

17. Park, M. N., Kim, C. W. and Shin, D. I., "Necessity of Standardization and Standardized Method for Substances Accounting of Environmental Liability Insurance," *Journal of the Korean Institute of Gas*, **22**(5), 1-17(2018).

18. Chah, S. W., Joo, C. K., Park, H. S., Park, S. J., Kim, P. J., Lee, S.M., Choi, K. H. and Yi, J. H., "Methodology to Determine the

- Order of Priority for Environmental Pollutants and Selection of Major Pollutants for Metropolitan and Industrial Areas," *Korean Chem Eng. Res.*, **41**(3), 357-367(2003).
19. Yoon, Y., "A Study on the Improvement of Off-site Consequence Analysis of Korean version Risk Management of Chemical Accidents," Ph D. Dissertation, Inje University, Kimhae, 1-14(2018).
20. National Institute of Chemical Safety, "Plant Damage Reduction by Exposure of substances (14 species) in preparation for accidents," Daejeon, 4-128(2016).
21. National Institute of Chemical Safety, "Plant Damage Reduction by Exposure of substances (14 species) in preparation for accidents," Daejeon, 6-44(2017).
22. National Institute of Chemical Safety, <https://icis.me.go.kr/page-Link.do>(Access date 2020, 02, 15).