

화학사고 장외영향평가 제도의 종합위험도 결정 체계 개선을 위한 고찰

최우수* · 류태권* · 곽솔림* · 임형준* · 정진희* ·
이지은* · 김정곤*[†] · 백종배** · 윤준현* · 류지성*

*화학물질안전원 사고예방심사과, **한국교통대학교 안전공학과

Discussion for Improvement of Decision System of Total Risk in Off-site Risk Assessment

Woosoo Choi*, Taekwon Ryu*, Sollim Kwak*, Hyeongjun Lim**, Jinhee Jung*,
Jieun Lee*, Jungkon Kim*[†], Jongbae Baek**, Junheon Yoon*, and Jisung Ryu*

*Accident Prevention and Assessment Division, National Institute of Chemical Safety

**Department of Safety Engineering, Korea National University of Transportation

ABSTRACT

Objectives: Despite the positive effects of Off-site risk assessment (ORA) system such as prevention of chemical accidents, some problems have been constantly raised. The purpose of this study is to analyze the problems that have occurred through the implementation of the ORA system for the past three years and to suggest reasonable directions for improvement in the future.

Methods: In order to identify the problems with the methodology and procedure of ORA system, we analyzed statutes, administrative rules and documents related to the ORA system. A survey of ORA reviewers in National Institute of Chemical Safety was conducted to investigate the weight of determinants considered when judging the level of total risk in ORA.

Results: In this study, we found out the uncertainty of the estimation of the number of people in the impact range in the procedure of the risk assessment of individual handling facilities, the lack of quantitative risk analysis methods for environmental receptors, and the ambiguity of the criteria for the total risk. In addition to suggesting solutions to the problems mentioned above, we also, suggested a decision tree for total risk in ORA.

Conclusion: We anticipate that the solutions including the systematic decision tree for total risk suggested will contribute to the smooth operation of the ORA system.

Keywords: Off-site risk assessment system, Chemical Control Act, KORA

I. 서 론

인도 보팔의 메틸이소시아네이트 가스 누출사고와 같은 대형 화학사고는 전세계적으로 화학사고에 대한 경각심을 불러 일으켰고 이후 서구를 중심으로 화학사고 예방 및 대비를 위한 다양한 제도가 도입

되었다.¹⁾ 외국의 화학사고 관리제도는 영국의 토지 이용계획(Land Use Planning, LUP)과 미국의 위험 관리계획(Risk Management Plan, RMP)이 대표적이다. LUP는 위험물질을 취급하는 공정이나 설비 등을 신규 설치 혹은 변경하는 경우 사고에 대한 영향을 사전에 평가하여 입지를 제한하는 제도이다. 장

[†]Corresponding author: National Institute of Chemical Safety, 90 Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34111, Republic of Korea, Tel: +82-42-605-7052, E-mail: jungkon@korea.kr

Received: 23 April 2017, Revised: 02 May 2018, Accepted: 08 May 2018

외영향평가가 포함된 미국의 RMP는 사업장 외부 주민과 환경을 화학사고로부터 보호하기 위한 목적으로 위험성평가와 예방프로그램, 비상대응프로그램을 수립하도록 의무화하는 제도이다. 미국의 공정안전관리제도는 미국 노동부 산업안전보건국에 의해 1992년부터 시행되고 있는 제도로서, 설비의 안전성을 유지하도록 설계, 설치, 운전 및 정비 기준을 제도화하고, 비상조치 계획을 수립하도록 규정하고 있다. 이와 유사한 영국의 안전보고서는 중대사고위험관리법령(COMAH, Control of Major Accident Hazards)을 도입하여 안전관리시스템 구축 입증, 위험성평가에 따른 정보제공으로 구성되어 있다. 지정수량 이상 취급하는 사업장의 경우 5년마다 제출하며, 앞서 제시한 LUP에 따라 사전에 입지에 대한 적합성을 승인 받아야 제출이 가능하다.

국내에서도 지속적인 화학사고 발생에 따라 화학사고의 심각성이 대두되었고, 이를 해결하기 위한 다각적인 대응 방안이 요구되어 왔다.^{2,7)} 우리나라 화학사고 예방제도로 고용노동부의 공정안전관리 제도와 산업통상자원부 안전성향상계획 제도, 환경부의 장외영향평가 제도가 있다(Table 1). 공정안전관리 제도는 유해·위험물질을 취급하는 사업장에서 누출,

화재·폭발 등으로 인하여 사업장 내의 근로자 또는 사업장 인근지역에 미치는 피해를 예방하기 위한 제도로 1996년부터 시행되었다. 안전성향상계획 제도는 고압가스로 인한 위해를 방지하고 공공의 안전을 확보하기 위한 제도이다.⁷⁾ 장외영향평가 제도는 화학물질관리법에 따라 유해화학물질을 취급하는 사업장이 유해화학물질의 누출, 화재, 폭발 등으로 인한 사고 영향과 위험성을 파악하여 사전에 안전설비를 마련함으로써 사업장 외부의 주민과 환경을 보호하는 제도로 2015년부터 시행되었다(Table 1).

장외영향평가는 유해화학물질 취급설비(이하 “취급설비”라 한다)의 설계 단계에서부터 화학사고로부터 안전을 확보하도록 의무화하는 제도이다. 화학물질관리법 제23조제1항에 의해 취급설비를 설치하여 운영하려는 경우 착공 30일 전에 화학사고 발생으로 사업장 주변의 사람이나 환경에 미치는 영향을 평가한 유해화학물질 화학사고 장외영향평가서를 작성하여 제출한 후 적합을 받아야 설치가 가능하다.⁸⁾ 장외영향평가서는 크게 기본평가정보, 장외평가정보, 타 법률과의 관계정보로 구성되어 있다.⁹⁾ 기본평가정보는 사업장의 일반정보, 유해화학물질의 종류 및 취급량, 취급설비의 종류, 공정정보 등으로 구성되어

Table 1. The domestic chemical accident prevent systems

| | Process Safety Management | Safety Management Systems | Off-site Risk Assessment |
|-----------------------|---|---|---|
| Relevant Law | • Occupational Safety and Health Act | • High-pressure Gas Safety Control Act | • Chemical Control Act |
| Relevant organization | • Ministry of Employment and Labor (Safety and Health Agency) | • Ministry of Trade and Industry (Korea Gas Safety Corporation) | • Ministry of Environment (National Institute of Chemical Safety) |
| Major target | • A health hazardous materials handling facility | • Facility handling high pressure gas | • A hazardous chemical handling facility |
| Object to Protect | • Workers | • Workers | • People, environment receptor |

Table 2. Types of protection objects in the impact range of accident scenarios

| | Relevant law | Class | Type |
|-------------------------|--------------------------------------|---|---|
| Public receptors | Building Act | First | Residential, commercial, public buildings, transportation facilities, etc. |
| | | Second | Neighborhood living facilities, Facilities for storage and disposal of hazardous substances, etc. |
| Environmental receptors | Natural Environment Conservation Act | Ecological landscape conservation area (33 locations) | |
| | Natural Parks Law | Natural park (86 locations) | |
| | Wetland Conservation Act | Wetland protection area (44 locations) | |

This table was based on the Notification²⁶⁾ and the contents of environmental receptors were updated in April 2018.

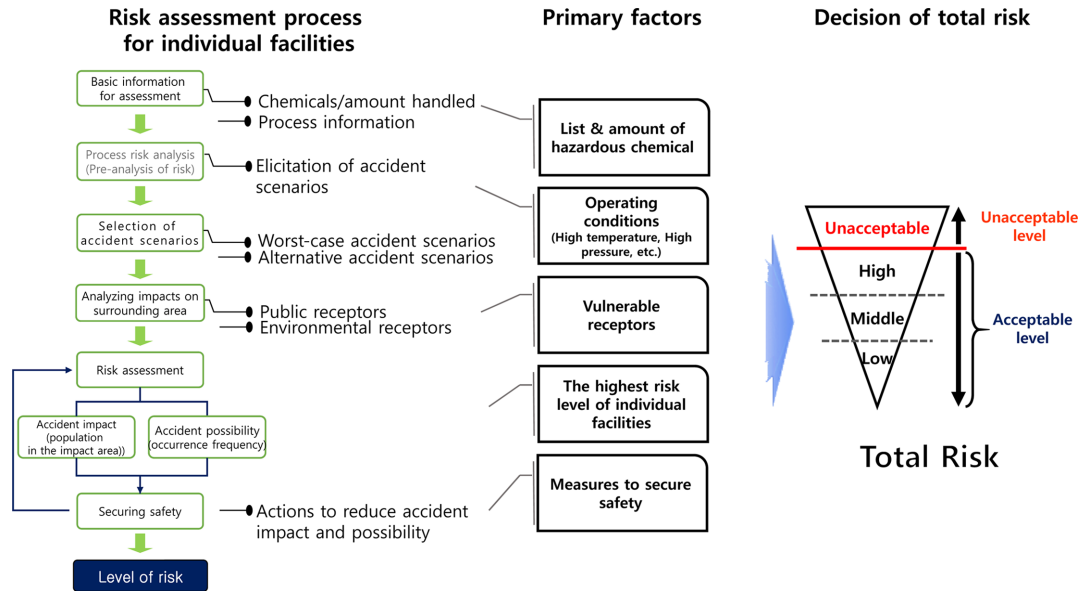


Fig. 1. Process of risk assessment for chemical accidents and decision of total risk.

장외영향평가를 위한 시설평가의 기초 자료로 사용된다. 장외평가정보는 유해화학물질 취급설비의 위험분석을 통해 위험요인을 파악하고 평가조건에 따른 최악 및 대안의 사고시나리오 영향범위를 산출하고 이를 바탕으로 위험도를 도출하는 과정이다. 타 법률과의 관계정보는 유해화학물질 취급시설 입지 제한 여부 등에 영향을 미치는 관계 규정에 대한 인·허가, 신고, 등록 등의 세부내용을 포함하고 있다. 화학물질안전원은 산업계가 장외영향평가를 원활하게 수행할 수 있도록 2014년 장외영향평가서·위해관리계획서 작성지원 프로그램(KORA, Korea off-site Risk Assessment Supporting Tool)를 개발하여 배포하였다.¹⁰⁾ KORA는 취급설비의 화학사고 영향범위를 산정하고 사고발생빈도를 분석하여 위험도를 산출할 수 있을 뿐만 아니라, 장외영향평가 보고서의 작성도 지원한다.

장외영향평가에서는 유해화학물질의 종류와 취급량, 취급설비의 운전조건(고온, 고압 등), 화학사고 영향범위 내 민감보호대상의 포함 여부와 규모, 개별 취급설비의 위험도, 취급설비의 위험도를 감소시키기 위한 안전성 확보방안이 충분한지 여부 등 주요 요인들을 고려하여 종합위험도가 고·중·저로 부여된다(Fig. 1). 이를 바탕으로 취급시설의 안전진단이 각각 4·8·12년 주기로 이루어지며 경우에 따라

부적합 판정이 내려지게 되므로 사업장에서는 취급설비의 화학사고 위험도를 낮추고 안전성을 확보하기 위한 방안을 수립해야 한다. 또한, 사고시나리오 영향범위 내 보호대상인 공공수용체 및 환경수용체의 포함 여부가 허용불가수준의 위험도로 판단되는 주요 요인 중에 하나이다(Table 2).

장외영향평가 제도가 가지는 화학사고 예방효과에도 불구하고, 기존 화학사고 관리제도와와의 중복 가능성,^{5,11,12)} 장외영향평가 방법론의 구체성 미흡,^{13,14)} 심사의 객관성 확보 필요⁵⁾ 등의 문제점이 제기되고 있다. 본 연구에서는 지난 3년간 장외영향평가 제도 시행을 통해 나타난 문제점을 분석하고 향후 합리적인 개선 방향을 제시하기 위해 수행되었으며, 특히, 체계적인 종합위험도 결정방안을 제안하고자 한다.

II. 연구 방법

장외영향평가의 방법과 절차의 문제점을 파악하기 위해 화학물질관리법¹⁵⁾과 관련 고시⁹⁾ 및 문헌을 분석하였다. 또한, 장외영향평가 종합위험도를 부여할 때 고려해야 할 것으로 판단되는 요인의 가중치를 조사하기 위해 설문조사를 수행하였다. 조사를 위해 화학물질안전원의 장외영향평가서 검토자(관리자 포함) 11명을 선정하였다. 설문 조사에 사용된 설문지

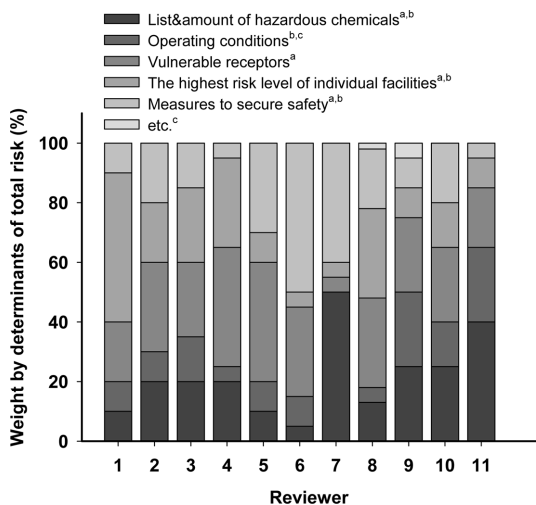


Fig. 2. Survey for reviewers on weight by determinants of total risk. The alphabet superscripts (a, b, c) in the legend indicate a significant difference ($p < 0.05$) relative to other determinants based on Tukey's multiple comparison.

의 내용은 장외영향평가서의 종합위험도 결정 시 고려해야 할 주요 요인의 가중치(%)이며, 무기명으로 설문지를 배포하고 응답자가 직접 가중치를 기입하는 방식으로 수행되었다. 고려해야 할 주요 요인의 항목은 취급하는 유해화학물질의 종류와 취급량, 취급설비의 운전조건(고온, 고압 등), 화학사고 영향범위 내 민감보호대상 포함 여부, 개별 취급설비의 위험도, 취급설비의 위험도를 감소시키기 위한 안전성 확보방안이 충분한지 여부 등의 5가지이며, 필요하다면 고려해야 할 주요 요인을 추가할 수 있도록 하였다. 응답자의 설문결과는 전부 도표로 제시하였다 (Fig. 2). 통계분석을 위해 일원분산분석을 수행하였으며 유의성이 인정($p < 0.05$)된 경우 Turkey test를 사용하여 다중비교를 실시하였다.

III. 연구 결과 및 고찰

1. 개별 취급설비 위험도 산정 방법의 문제점

현재 장외영향평가 종합위험도를 결정할 때 고려해야 할 주요 요인 중 하나인 개별 취급설비의 위험도는 다음의 수식과 같이 영향범위 내 인구수와 사고발생빈도로 결정된다.

$$\begin{aligned} \text{위험도} &= \text{영향 범위 내 인구수} \times \text{사고발생빈도} \\ \text{사고발생빈도} &= \sum(\text{고장빈도} \times \text{위험도 감소율}) \end{aligned}$$

위 수식에 알 수 있듯이 개별 취급설비의 위험도를 결정하는 주요한 요인 중 하나는 사고영향범위 내 인구수이다. 즉, 화학사고의 영향범위보다 영향을 받는 수용체가 결정변수로 작용하므로 유해화학물질을 취급하는 사업장의 입지 및 주변에 주거지 유무에 따라 동일 조건의 취급설비라도 그 위험도가 달라진다. 이와 같은 위험도 수치화 방법은 기존의 확률론적 위험성 평가법과 유사하지만, 장외영향평가에서는 대상설비가 개별 취급설비에 국한되고 안전장치 설치여부를 위험도에 근거하여 결정한다는 점에서 설비별 위험도로 노후화된 장치의 보수나 대체를 결정하는 위험기반검사^{16,17)}와 유사하다고 할 수 있다. 즉, 설비별로 화학사고 발생 시 위험도를 산정하고 이를 근거로 안전성을 확보하기 위한 조치를 취해야 하므로, 사업장 담당자가 스스로 위험도를 평가할 수 있도록 고려되는 변수를 줄이고 산정방식을 단순화하였다.

그러나, 사고영향범위 내 인구수 산정과정은 해결해야 할 문제가 있다. 동일한 노출이라 하더라도 연령, 성별, 체질 등에 따라 그 민감도는 달라질 수 있다. 현재 화학사고 발생 시 독성영향의 범위를 결정하는 기준농도로 ERPG (Emergency Response Planning Guidelines)-2 등을 적용하지만 이 과정에서 인구집단에 대한 노출 민감도는 전혀 고려되지 않는다. ERPGs는 미국 산업위생학회의 비상대응계획에서 사고 및 고의적인 화학물질 누출 시 지역주민의 노출을 최소화 하고, 공기 중 급성독성 화학물질에 대하여 일생의 1회 및 단기간(1시간) 노출에 대한 지침을 제시하는 것을 목적으로 개발되었으며,¹⁸⁾ ERPG-2 값은 1시간 동안 노출되어도 비가역적이거나 기타 심각한 건강장해 또는 정상적인 대피가 이루어지지 못 할 정도의 건강영향을 주지 않는 공기 중 최대 농도로 정의된다. 하지만, ERPGs는 노약자나 병자와 같은 취약층은 고려되지 않는다. 산업장의 근로자를 보호하기 위한 노출기준을 설정^{19,20)}하는 과정과 유사하게 ERPGs 역시, 해당 물질별로 이용 가능한 자료의 검토를 통해 증거력을 확보하고, 수집된 독성과 노출 자료의 광범위한 검토를 통해 결정된다. 인간의 노출 자료가 중요하지만, 자료 수집이

어려우므로 일반적으로 동물실험의 결과로부터 통해 ERPGs 값을 도출한다. 동물실험자료를 인간에게 직접 적용할 수 없으므로 일반적으로 안전계수를 고려하여야 하는데 미국 식품의약청은 이를 위해 불확실성 계수를 이용한 접근방법을 개발하였다.²¹⁾ 외삽법에 대한 지식이 부족할 때는 일반적으로 100배의 불확실성 계수를 권고 하고 있다. 이 수치는 동물에서 인간으로 외삽 할 때의 안전계수 10과 인간 집단 내의 민감도 차이를 설명하기 위한 부가계수 10을 통합한 것이다. 여기서, 주목할 점은 인간 집단 내 민감도 차이에 따른 불확실성 계수이며, ERPGs에서는 인간 집단 내 민감도 차이로 인한 불확실성이 반영되지 않는다. 국내와 같은 산업시설과 주거지가 인접한 지역이 많은 입지구조에서는 장외영향평가 시 화학사고 독성영향범위를 결정하는 기준농도의 불확실성이 높을수록 위험도 산정 결과의 신뢰도가 낮을 수 밖에 없다.

또 다른 문제는 지역 거주민과 인근 사업장의 근로자를 동일하게 인구수로 적용한다는 점이다. 장외영향평가는 해당 사업장 경계 밖의 영향을 고려하므로 인근 사업장의 근로자도 주민수로 산정한다. 하지만, 일반 인구나 비교할 때, 고용되는 단계에서 건강한 사람들이 뽑힐 확률이 더 높음으로 인해 같은 노출에 대해서도 유의하게 질병 발생률이 낮아지는 효과가 나타난다.²²⁾ 유럽화학물질청에서는 화학물질의 노출기준을 정할 때, 산업장 근로자(안전계수=5)와 소비자를 포함한 일반인(안전계수=10)을 구분하여 안전계수를 적용한다.²³⁾ 즉, 근로자의 노출기준이 일반인에 비해 2배 높다고 볼 수 있다. 장외영향평가에서는 이러한 노출 민감도에 대한 고려가 반영되어 있지 않아, 사업장이 밀집된 산업단지에서는 화학사고 독성영향범위가 약간만 늘어나도 인근 사업장의 근로자로 인한 영향범위 내 주민수가 급격히 증가하는 결과를 초래하여 동일한 취급시설이라도 산업단지에 위치한 경우 상대적으로 위험도가 높아질 수 있다. 이것은 토지의 집약적 활용과 환경보전 등의 국토의 효율적 관리를 위해 사업장의 산업단지로의 입주를 장려하는 산업입지정책과도 배치된다. 따라서, 현재 개별 취급설비의 위험도 산정방식에서 영향범위 내 주민수에 노출 민감군과 인근 사업장 근로자에 대해서는 차등된 가중치를 부여하는 방안

을 모색하여야 한다. 노약자나 병자와 같은 취약층은 가중치를 높이고, 근로자에 대해서는 낮은 가중치를 부여한다면 해당 사업장의 입지와 주변 거주민의 인구 계층의 특징이 반영되어 개별 취급설비의 화학사고 위험도에 대한 합리성을 높일 수 있을 것이다.

2. 환경수용체에 대한 정량적 고려 미흡

환경부고시 「유해화학물질 취급시설 외벽으로부터 보호대상까지의 안전거리」 별표 2와 3에서 규정하는 갑종 및 을종 보호대상이 개별 취급설비의 사고시나리오 영향범위 내에 포함되어 있는지 여부도 종합위험도를 결정하는 주요한 요인 중에 하나이다. 위 고시에서 규정하는 갑종 보호대상은 300명 이상 수용할 수 있는 문화집회시설, 종교시설, 판매시설, 운수시설, 20명 이상 수용할 수 있는 노유자 시설 등 사람이 상주하는 건물이나 구역을 의미한다(Table 2). 즉, 주민 및 공공수용체에 대해서는 인구 수의 개념이 포함되어 정량적 위험도 분석이 반영되었다고 볼 수 있다. 하지만, 환경수용체 측에서는 피해를 정량적으로 산정하지 못한다는 지적이 내외부적으로 제기되어 왔다.^{11,12)} Suh 등¹¹⁾은 해외 화학사고 사전 환경피해평가 방법론을 국내에 시범 적용하고 국내 도입 및 적용 가능성을 검토하여 향후 추진방향을 제안한 보고서를 발표하였다. 이 보고서에는 해외 사전 환경피해평가 방법론으로 체코의 위험 및 취약성 지수(Hazard and Vulnerability Index), 스웨덴의 환경사고 지수(Environmental-Accident Index), 영국의 환경위해성평가(Environmental Risk Assessment), 스페인의 환경위험도분석(Environmental Risk Analysis) 등을 검토하여 주변 생물환경의 독성지수, 지표수의 독성지수, 주변 생물환경의 화재지수 조합으로 화학사고 심각성을 등급화하는 방법을 제안하였다. 해당 보고서에서 언급된 바와 같이 해외 사전 환경피해평가 방법론은 각각 장단점을 가지고 있으므로, 국내 적용가능성을 고려하여 제안한 국내 화학사고 사전 환경피해평가 방법론(안)을 개선하여 환경수용체에 대한 정량적 위험성평가 결과를 종합위험도 결정항목으로 반영해 볼 만 하다. 단, 이 경우 인체영향만 고려한 위험성 평가보다 보수적인 결론에 도달할 수 있으므로 사회경제적인 요인의 분석도 함께 이루어져야 한다.

3. 영향범위 산정 불가물질

화학사고 발생으로 인한 장외영향평가는 기존의 수학적 모델을 활용하여 그 피해범위를 산정한다. KORA에서도 취급설비에서 발생할 수 있는 화재, 폭발, 독성확산에 의한 사고 영향범위를 산정할 수 있도록 누출모델과 영향모델이 탑재되어 있다. 누출모델은 용기에서 액상누출, 용기에서 기상누출, 용기에서 이상(two phase)누출, 배관에서 액상누출, 배관에서 기상누출, 이상누출 시 플래쉬현상에 의한 대기 누출, 액상풀에서의 증발에 의한 대기 누출 등을 지원한다. 영향모델은 독성 확산, 복사열(비등액체폭발, 액면화재, 고압분출화재), 과압(증기운 폭발) 등의 피해를 산정할 수 있다. 각 취급설비의 운전조건과 취급량 등의 매개변수값을 입력하여 독성 또는 화재폭발의 피해 영향범위를 산정하는 방식이지만, 이를 위해서는 물성정보의 수집이 선행되어야 한다. 현재 KORA는 미국화학공학회에서 제공하는 DIPPR (Design Institute for Physical Properties) 데이터를 사용하며 약 2,100여종의 물질에 대한 물성치를 확보하고 있으나 이 중 유해화학물질에 해당하는 것은 일부에 지나지 않는다. 현재 영향범위 산정이 가능한 물질은 전체 유해화학물질 877종 중 수용액 18종을 포함하여 총 175종에 불과하다. 영향범위 산정이 불가능한 물질에 대해서는 화학사고 시 비상대응 이격거리²⁴⁾를 응용하여 적용하고 있으며 KORA의 활용성과 평가의 신뢰도를 높이기 위해서는 점진적으로 물성치를 확보해 나가야 한다.¹⁰⁾ 물성치가 확보되지 않은 유해화학물질 중에서 극도로 증기압이 낮아 대기 확산 범위를 추정하는 것이 무의미한 물질 혹은 화재 및 폭발 위험이 매우 낮은 물질도 포함되어 있으므로 물성치 확보를 위한 우선순위 선정이 선행되어야 할 것이다. 또한, 단기적으로는 현재 적용하고 있는 이격거리를 화학사고 발생 시 누출량으로 형성된 액체풀 면적으로 대체하는 것을 고려해 볼 수 있다. 액체풀 면적을 산정하기 위해서도 액체밀도 자료가 필요하지만, 액체밀도 자료는 대기확산과 화재 및 폭발 모델을 구동하기 위해 필요한 물성치에 비해 쉽게 확보할 수 있다. 물성치가 확보되지 않은 유해화학물질은 대기확산이 가능성이 낮은 물질이 다수 포함되어 있으므로 이들에 대한 물성치의 확보 여부와 무관하게 영향범위 값으로 활용할 수 있으므로 평가의 일관성 측면에서도 장점이 있다.

4. 종합위험도 정성적 판단 기준의 구체성 미흡

장외영향평가의 결과는 앞서 언급한 바와 같이 5가지 요인이 종합위험도 결정시 일부 반영되는 정성적 판단 요인으로 적용된다. 장외영향평가 제도 도입을 위한 준비단계에서는 화학시설의 입지를 제한하는 영국의 LUP를 벤치마킹하였으나 의사결정의 근거가 되는 화학시설의 위험도는 위험 등고선 산정²⁵⁾의 높은 난이도로 인해 장외영향평가 제도의 도입단계에서 단순화된 형태로 변형되었다. 이와 같은 선택을 할 수 밖에 없었던 근본적인 이유는 개인적 위험도의 위험 등고선은 특정 위치에서의 인체 사망 위험도를 근거로 작성되지만, 필수 자료인 확률사망자 수 곡선이 설정된 화학물질의 수가 매우 제한적이어서 활용도가 낮다는 사실이다. 장외영향평가의 종합위험도를 판단할 때 고려해야 할 주요 요인인 개별 취급설비의 위험도 산정방식의 선택 당위성에도 불구하고 장외영향평가 제도가 위험도에 근거한 관리제도임을 표방하기에는 근거가 다소 부족할 수 있다. 종합위험도 주요 요인 중에서는 개별 취급설비 위험도 수치와 영향범위내 인구수를 제외한 나머지는 정성적 기준이기 때문이다. 따라서 정성적 기준이 주된 평가 지표가 된다면, 평가자의 주관적 판단에 따라 종합위험도가 달리 부여될 여지가 있으며, 실제 화학물질안전원의 장외영향평가서 검토자를 대상으로 실시한 종합위험도 주요 요인별 가중치 부여에 관한 설문조사 결과에서도 이와 같은 경향이 확인되고 있다(Fig. 2). 본 설문은 전수를 대상으로 이루어졌지만 모집단의 수가 적어 결과를 해석하는데 한계가 있으나, 조사 결과 종합위험도 정성적 요인 중에서 화학사고 영향범위 내 민간보호대상 포함 여부와 취급설비의 운전조건에 대해서는 검토자간에서 다른 가중치를 부여할 가능성이 있는 것으로 나타났다($p < 0.05$). 이 문제는 검토자 간의 합일점을 도출하고 점차 정성적 판단요인을 정량화하여 적용하는 시도으로써 해결할 수 있으나 근본적인 해결을 위해 Fig. 3과 같은 의사결정 체계를 적용하는 등 별도의 방안마련이 필요할 것으로 판단된다. 여기서 제안하는 의사결정 체계도는 왼쪽에서 오른쪽으로, 위에서 아래쪽으로 진행되도록 구성되었으며 5가지 종합위험도 주요 요인 중에서 취급설비의 운전조건은 개별 취급설비의 위험도를 산정하는 과정 중 사고시나리오별 영향범위 산정에 반영되는 요인이므로

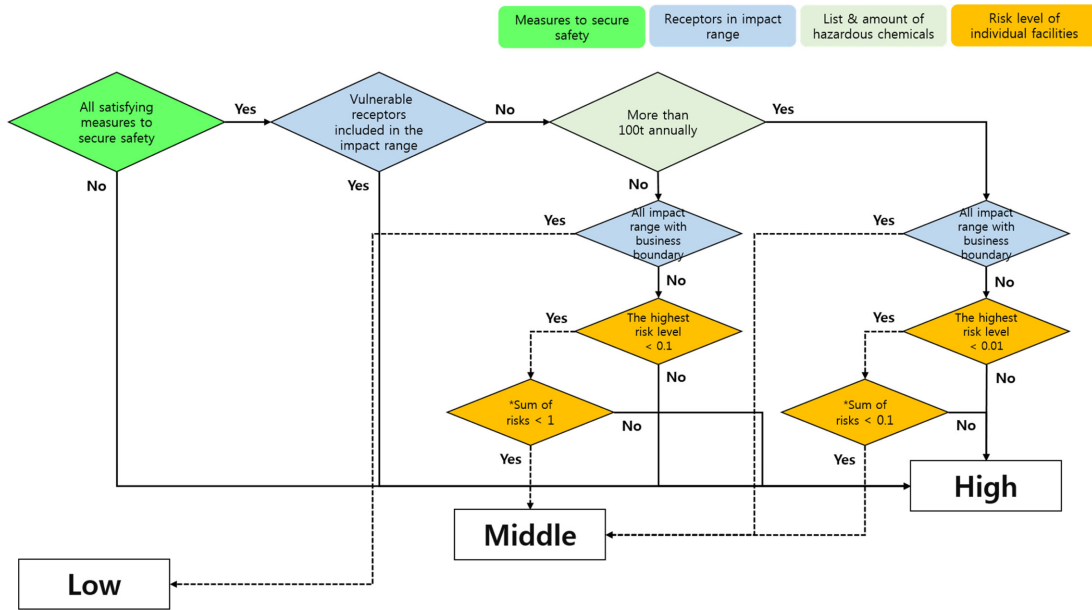


Fig. 3. Decision tree for determining total risk levels. The asterisks (*) mean the sum of risk values of all facilities in business.

의사결정 체계에서 제외되었다. 취급설비의 위험도를 감소시키기 위한 안전성 확보방안이 모두 충족되지 못할 경우 “고” 수준의 종합위험도가 부여된다. 취급시설 운영자는 취급설비 위험도 분석결과를 바탕으로 시설 및 설비·장치에 대한 안전성 확보방안을 기술적 대책과 관리적 대책으로 구분하여 마련하도록 규정되어 있다.⁹⁾ 관리적 대책으로는 설비·장치의 유지보수 계획과 자체 점검계획, 기타 안전성 확보방안이 있으며 설비·장치의 유지보수 계획과 자체 점검계획은 장외영향평가 제도에서 인간의 행위에 의한 완화방안이며 대부분의 사업장에서 잘 갖추고 있는 부분이다. 기타 안전성 확보방안은 소화설비, 유해감지시설, 방재자원 등이며 이 항목은 관련 법규에 따라 갖춰야 한다. 따라서, 안전성 확보방안의 충족 여부는 기술적 대책의 수준으로 결정되게 된다. 기술적 대책은 영향정도 또는 사고 발생 빈도를 줄이기 위해 안전장치(또는 완화장치)를 추가로 보강하는 것을 의미한다. 안전성 확보방안이 모두 충족되면 화학사고 영향범위 내 민감보호대상이 포함되어 있는지 여부로 “고” 수준의 종합위험도가 부여된다. 화학물질관리법에 따라 취급시설은 유해화학물질 화재·폭발, 유출·누출사고에 따른 피해확산을

방지할 수 있도록 보호대상과 안전거리를 유지하여야 한다.²⁶⁾ 하지만, 여기서 의미하는 보호대상과의 안전거리는 화학사고가 발생했을 때 대규모 피해를 방지하기 위한 최소한의 입지 제한이며, 보호대상의 범위도 주거용, 상업용, 공공건물, 공공휴양지, 학교, 병원, 운송시설, 위험시설 등의 공공수용체부터 생태·경관보호지역과 상수·취수원, 국립공원 등의 환경수용체가 광범위하게 포함되므로 종합위험도를 부여하기 위한 주요 요인에 적용하기 위해서는 대상을 한정할 필요가 있다. 따라서, 공공수용체의 경우 “건축법”에 따른 보호대상 중에서 학교, 병원, 아동복지시설, 노인복지시설 등과 같이 노약자가 이용하거나 대규모 인원을 수용할 수 있는 다중이용시설 등의 갑종 보호대상과 “자연환경보전법”에 따른 생태·경관보호지역 및 상수·취수원, 국립공원 등의 주요 환경수용체를 대상으로 하였으며, 갑종보호대상과 주요 환경수용체를 합쳐 민감보호대상으로 명명하였다. 다음으로 연간 유해화학물질 취급량으로 사업장을 구분하였으며 연간 취급량의 기준은 100톤으로 설정하였다. 연간 취급량 100톤은 화학물질관리법의 시행 전에 설치된 기존 취급사업장의 장외영향평가서 제출유예의 기준을 차용하였다. 장외영향

평가서는 취급시설을 설치하는 착공일 30일 전에 제출하여야 하지만 제도가 시행되기 전에 이미 설치된 기존 취급사업장은 규모에 따라 5년간 순차적으로 제출하도록 유예기간을 지정하였다. 기존 취급사업장 중에서 연간 유해화학물질을 100톤 이상 취급할 경우 2018년까지 100톤 미만으로 취급할 경우 2019년까지 장외영향평가를 제출하도록 규정하고 있어 연간 취급량 100톤은 취급사업장의 규모를 나누는 기준으로 볼 수 있다. 개별 취급설비의 영향범위가 사업장 경계 외부로 미치지 않을 경우 취급사업장의 규모에 따라 “저(연간 취급량 100톤 미만)”와 “중(연간 취급량 100톤 이상)” 수준의 종합위험도가 부여된다. 단, 소량으로 유해화학물질을 취급하더라도 극독성물질 등은 예외로 한다는 별도 규정은 필요하다. 개별 취급설비의 사고시나리오별 최고 위험도가 “0.1 (연간 취급량 100톤 미만)”과 “0.01 (연간 취급량 100톤 이상)” 미만인 반면 모든 사고시나리오 위험도의 합이 “1 (연간 취급량 100톤 미만)”과 “0.1 (연간 취급량 100톤 이상)” 미만일 경우 “중” 수준의 종합위험도가 부여된다. 연간 취급량 100톤 미만인 취급사업장 보다는 연간 취급량 100톤 이상인 취급사업장에 개별 취급설비의 사고시나리오별 최고 위험도와 위험도 총합의 기준을 보수적으로 적용한 이유는 규모가 큰 취급사업장이 일반적으로 부지가 넓어 동일한 규모의 사고라도 영향범위 내 주민수가 적게 포함될 개연성이 높기 때문이다. 그 이외의 조합들은 모두 “고” 수준의 종합위험도가 부여된다. 위에서 제안한 위험도 결정체계는 적용가능한 하나의 사례이며 정책적으로 반영하기 위해서는 보다 면밀한 검토와 전문가들의 의견 수렴이 필요할 것으로 판단된다.

향후 장외영향평가제도의 완성도를 높이기 위해서는 다음과 같은 사안에 대한 연구가 필요하다. 먼저, 사고영향범위 내 인구수 산정방법의 개선을 위해 일반주민과 인근 사업장 근로자 또는 일반인과 노약자에 대해 차등화 방안을 마련해야 한다. 예를 들어 유해화학물질별 독성영향 기준농도를 근로자, 일반인, 노약자에 대한 값으로 세분하는 방법을 고려해 볼 수 있다. 다음으로 환경수용체에 대한 위험도평가 방법 개발이 필요하다. 유럽의 여러 국가에서 환경수용체 영향평가 혹은 위험도평가를 시행하고 있으므로 이를 벤치마킹하여 국내 환경에 적용가능한

형태로 방법론을 변형하고 평가에 필요한 각 지수들을 현지화하여야 한다. 물성치 자료 부재로 인해 평가가 불가능한 물질에 대한 대책은 중장기적인 계획이 필요한 사안이다. 영향범위 산정을 위해 필요한 물성치 확보는 많은 인력과 예산이 소요되며 신뢰도가 높은 자료를 확보하여야 정확한 장외영향 평가가 담보되므로 학계와 정부의 협력이 필요할 것이다.

본 연구에서는 언급되지 않았지만, 유해화학물질 운송수단에서 발생하는 화학사고 영향평가 방안을 마련할 필요가 있다. 원칙적으로 고정식 취급설비가 장외영향평가의 대상이 되며, 예외적으로 사업장내 유해화학물질을 입·출하하기 위해 지정된 장소에 정착한 탱크로리만 저장설비로 간주되어 평가에 포함된다. 즉, 사업장 밖의 탱크로리를 포함한 철도, 선박 및 항공기 등의 유해화학물질 운송수단은 장외영향평가 시 고려되지 않는다. 그러나, 국내 화학사고는 시설관리 미흡 및 취급 부주의와 더불어 운송 차량 사고가 주요한 발생 원인으로 분석되고 있다.^{4,6)} 따라서, 장외영향평가 제도로 관리하지 못한다면 운송수단에 대한 대책이 마련되어야 할 것이다.

다음으로는 고체상 물질에 대한 위험도 평가 방안 마련이다. 질산염류, 무기과산화물, 브롬산염류, 과망간산염류 등의 산화성 고체는 유해화학물질이면서 화재·폭발 잠재성²⁷⁾을 지니고 있음에도 현재 장외영향평가 체제에서 영향범위를 산정할 수 없다. 이와 유사한 사례로 분진 폭발도 이에 포함되는데 분진 폭발은 식료품, 목재, 금속, 플라스틱, 석탄, 곡물 등 다양한 재질의 입자를 취급할 때 발생할 수 있으며,²⁸⁾ 일반적으로 50 μm 이하의 크기로 공기 중에 떠있는 분진이 가연성 분위기에서 발화원에 노출되면 폭발을 일으키고 화재나 접촉 및 호흡 독성을 유발하기도 한다.²⁹⁾ 장외영향평가에서는 수학적 모델을 이용한 영향범위를 추정하므로 이를 위한 자료 수집이 선행되어야 할 것이다.

IV. 결 론

본 연구에서는 장외영향평가 제도의 종합위험도 부여 체계를 분석하여 개별 취급설비의 위험도 산정 시 인구수 산정의 불확실성, 환경수용체에 대한 정량적 위험도 분석 방법 부재, 영향범위를 산정 불가능한 유해화학물질, 종합위험도 판단 기준의 구체성 미

흡 등의 문제점을 확인하였고 이를 해결하거나 개선할 수 있는 방안을 제안하였다. 특히, 본 연구에서 제안한 종합위험도 의사결정 체계는 지난 3년간 장외영향평가를 평가하면서 축적된 취급사업장별 종합위험도 주요 요인들의 조합에 대한 경험치가 반영되어 현실성 있는 대안이라 할 수 있다. 하지만, 연간 취급량(100톤), 개별 취급설비 위험도(0.1 또는 0.01), 위험도 총합(1 또는 0.1)의 기준들을 국내 취급사업장의 장외영향평가가서가 모두 제출되는 2019년 이후 수집된 자료를 바탕으로 수정한다면 보다 정확한 의사결정 체계가 완성될 것으로 기대한다.

References

1. Drogaris G. Learning from major accidents involving dangerous substances. *Safety Sci.* 1993; 16(2): 89-113.
2. Lee J, Choi D. A study on the improvement of chemical accident response system in view of the national disaster management system. *Fire Sci Eng.* 2015; 29(5): 73-78.
3. Lee D, Lee T, Shin C. Study on improvement measures for prevention and countermeasure of chemical accident. *Fire Sci Eng.* 2016; 30(5): 137-143.
4. Lee D, Kim S, Yun J, Shin G, Yoo B. A study on the improvement plan of transportation plan for safety management of hazardous chemical vehicles. *J Korean Soc Hazard Mitig.* 2017; 17(6): 151-157.
5. Lee I, Hwang M, Shin Y, Woo I. A study on off-site consequence analysis of optimal operation by risk management of petroleum chemical plant. *J Risk Manage.* 2017; 28(1): 1-45.
6. Lee D, Lee T, Shin C. Study of the improvement of hazardous chemical management for chemical accident prevention. *Fire Sci Eng.* 2017; 31(1): 74-80.
7. Lee D, Lee T, Shin C. Study on improvement measures for prevention and countermeasure of chemical Accident. *Fire Sci Eng.* 2016; 30(5): 137-143.
8. Chungsik Y, Seunghon H, Jihoon P, Sunju K, Sangah L, Kwonseob L, et al. Comparison between the chemical management contents of laws pertaining to the Ministry of Environment and the Ministry of the Employment and Labor. *J Environ Health Sci.* 2014; 40(5): 331-345.
9. Ministry of Environment. Regulation on preparation of off-site risk assessment report. Notification 2018-7 2018.
10. Kim J, Ryu J, Ryu T, Kwak S, Lim H, Choi W, et al. Suggestions for increasing utilization of KORA for supporting off-site risk assessment system. *J Environ Health Sci.* 2018; 44(2).
11. Suh Y, Park J, Gan S, Cho S, Han S. Improvement measures for chemical accident policies in the Chemicals Control Act and measures to support the industry (II). Korea Environment Institute; 2017.
12. Park J, Suh Y, Gan S, Lee S. Improvement measures for chemical accident policies in the Chemicals Control Act and measures to support the industry (I). Korea Environment Institute; 2016.
13. Kim K, Chun Y, Hwang Y, Lee I, Kwak I. Establishment of the appropriate risk standard through the risk assessment of accident scenario. *J Korean Soc Environ Eng.* 2017; 39(2): 74-81.
14. Lee J, Kim S, Yang W, Yoon J, Ryu J, Kim J, et al. Investigation of the guidance levels for protecting populations from chemical exposure and the estimation of the level of concern using acute toxicity data. *J Environ Health Sci.* 2018; 44(1): 44-54.
15. Ministry of Environment. Chemical Control Act. 2017.
16. American Petroleum Institute. Based resource document of risk based inspection: API-580. New York: 2001.
17. American Petroleum Institute. Risk-based inspection-Basic resource document: API-581. New York: 2000.
18. American Industrial Hygiene Association. Available: <https://www.aiha.org/get-involved/AIHAGuidelineFoundation/EmergencyResponsePlanningGuidelines/Pages/default.aspx>].
19. Cook WA. A compendium of world-wide occupational exposure limits. Akron, Ohio: American Industrial Hygiene Association; 1987.
20. Paustenbach DJ. Occupational exposure limits, pharmacokinetics, and unusual work schedules. In Cralley LJ, Cralley LV, (Eds). *Patty's Industrial Hygiene and Toxicology*. New York, NY: John Wiley & Sons; 1985. p. 111-277.
21. Dourson ML, Stara JF. Regulatory history and experimental support of uncertainty (safety) factors. *Regulatory Toxicology and Pharmacology.* 1983; 3(3): 224-238.
22. McMichael AJ, Spirtas R, Kupper LL. An epidemiologic study of mortality within a cohort of rubber workers, 1964-72. *J Occup Environ Med.* 1974; 16(7): 458-464.
23. ECHA. Guidance on information requirements and chemical safety assessment. Helsinki, Finland: European Chemicals Agency; ECHA-2010-G-19-

- EN 2012.
24. National Institute of Chemical Safety. Emergency response guidebook. 2017.
25. Health and Safety Executive. Reducing risks, protecting people. 2010.
26. National Institute of Chemical Safety. Notification of safe distance from outside wall of hazardous chemical handling facility to protection object. Notification 2014-251 2014.
27. Lee B, Park C, Song H. A study on the assessment of hazardous properties of the oxidizing solids. *Fire Sci Eng.* 2009; 23(5): 9-16.
28. Eckhoff RK. Dust explosions in the process industries Burlington: Gulf Professional Publishing; 2003.
29. Kang S. Protection of dust explosion. *Fire Sci Eng.* 1991; 5(2): 43-49.