

화학사고 주변 지역 거주자의 보건환경 관리를 위한 건강위해성 평가 방법 개발에 관한 연구

박시현¹ · 박세정 · 박태현 · 윤단기 · 정종현² · 강성규² · 이동수³ · 서영록⁴ · 안연순⁵ · 이철민*

¹서경대학교 나노생명공학과, ²대구한의대학교 보건학부, ³서울대학교 환경대학원,

⁴동국대학교 생명과학과, ⁵동국대학교 일산병원 직업환경의학과

A Study on the Development of a Health Risk Assessment Method for the Management of the Health Environment of Residents Living Around Areas Affected by Chemical Accidents

Sihyun Park¹ · Sejung Park · Taehyun Park · Danki Yoon · Jonghyeon Jung² ·
Sungkyu Gang² · Dongsoo Lee³ · Youngrok Seo⁴ · Yeonsoon An⁵ · Cheolmin Lee*

¹Department of Nano and Biological Engineering

²Faculty of Health Science, Daegu Haany University

³Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University

⁴Department of Life Science, Dongguk University

⁵Department of Occupational Medicine, Dongguk University Ilsan Hospital

ABSTRACT

Objectives: This research is part of a study to be conducted over five years starting from 2017 by the Ministry of Environment on the development of technologies to evaluate the impact of chemical accidents on the human body.

Methods: For this research, a five-stage specific study method was developed.


Results: In brief, the developed health risk assessment method can be summarized as follows. First, a health risk assessment system was built based on the guidelines set forth by the USA NRC/NAS. Second, based on the disease manifestation theory, the health risk assessment method was divided into 1) a carcinogenic health risk assessment method focused on all carcinogens except non-genotoxic carcinogens and 2) a non-carcinogenic health risk assessment method focused on noncarcinogens including non-genotoxic carcinogens. Third, the detailed contents of the health risk assessment method were developed in four stages(hazard identification, dose-response assessment, exposure assessment, and risk determination) through theoretical consideration of the assessment of the level of health risk related to chemical exposure. Finally, a health risk assessment methodology, classified into stages to address acute, subacute/subchronic, and chronic conditions was developed after considering the physicochemical behavior of hazardous chemicals upon implementation of countermeasures after a chemical accident.

Conclusions: A method to evaluate the health risks related to toxic chemicals generated by chemical accidents was developed. This study was performed with the purpose of developing a mathematical health risk assessment method to evaluate the health effects of exposure to hazardous chemicals upon implementation of emergency countermeasures after chemical accidents.

Key words: chemical accident, chronic, risk assessment, subacute/subchronic

*Corresponding author: Cheolmin Lee, Tel: 010-2074-0409, E-mail: cheolmin@skuniv.ac.kr,
Seo Kyeong University, 124, Seogyeon-ro, Seongbuk-gu, Seoul

Received: November 29, 2017, Revised: January 25, 2018, Accepted: February 26, 2018

 Cheolmin Lee <https://orcid.org/0000-0003-2276-2463>

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.

I. 서 론

우리나라의 산업특성상 인화성, 독성 등 유해화학 물질을 다종, 다량 취급하는 시설을 보유한 사업장은 그렇지 않은 시설에 비해 사고발생 잠재위험성이 매우 높은 특성을 가지고 있다. 또한 대부분의 화학물질 취급공장이나 취급공정은 고도의 기술이 집약된 복잡한 공정 등이 상호 연속적이고 일률적인 형태로 구성되어 있어 화학사고와 같은 심각한 환경적 재앙이 발생할 경우에 단 한번의 사고로도 막대한 인적, 물적 손실을 초래할 뿐 아니라 환경을 오염시키거나 지역 주민들에게 피해를 주는 경우가 많다. 특히나 최근 발생하고 있는 화학사고의 경향이 1차 피해로 끝나지 않고 2차적으로 주민과 환경에 영향을 미치는 등 많은 위험을 내포하고 있음에 따라 이에 관련한 연구가 필요한 실정이다(Chun et al., 2013).

국내 보고된 주요 화학사고들의 경우 사고 지점 인근의 사람 및 모든 주변 환경에 단기간 및 장기간 치명적인 피해를 입힐 수 있다는 특징을 가지고 있다. 하지만 현재 유해 화학물질 관리 시스템들 대부분이 단기간의 1차적 피해에 대한 응급대처 및 주민대피 범위 산정과 구조 활동 등에 초점을 두고 구축되어지고 있는 실정으로, 화학사고 처리 후 대피한 지역주민이 생활지역(화학사고 영향지역)공간으로 복귀하였을 때 정화 활동 이후 대기, 수질 및 토양에 잔류하는 유해화학물질의 장기간의 노출로 인한 만성적 건강영향 발현 등의 2차적 피해에 관한 예측 및 관리에 요구되는 시스템 구축은 전무한 실정이다. 또한 현재 화학사고로 인한 유해화학물질의 노출로 인한 2차적 피해에 관한 위해성평가, 위해도 관리 및 위해 의사소통을 위한 지침에 대한 유용한 국내외 합의 또한 없는 실정이다(RIVM, 2013).

환경부는 2005년부터 사고지역에 대한 체계적인 복구 및 사후 모니터링 체계 구축사업을 추진 중에 있으며, 사고 후 영향조사 제도의 조기정착과 보다 신뢰성 높은 사고조사가 가능하도록 노출량 산정을 위한 각종 데이터베이스를 수집·구축하고, 다매체 거동모델 등의 위해성 평가 툴을 개발하는 등 단계적 사고 후 영향조사 관리시스템을 개발·운영하고자 노력하고 있다(Yoon et al., 2007). 이와 같은 노력의 일환으로 환경부에서는 화학사고 대응 환경기술개발사업으로 ‘화

학사고 후 인체영향평가기술 개발’에 관한 연구를 2017년부터 총 5차년에 걸쳐 추진 중에 있다. 본 연구는 ‘화학사고 후 인체영향평가 기술 개발’에 관한 연구의 일환으로 화학사고로 인해 환경매체 중에 잔류하는 유해화학물질의 장기간 노출에 의한 누적 노출량 및 건강위해성 평가 방법을 개발하여 제시함으로써 본 연구의 모체 연구인 ‘화학사고 후 인체영향평가 기술 개발’ 연구의 성공적 수행을 위한 연구 기반을 구축하고자 수행되었다.

II. 연구대상 및 방법

본 연구는 화학사고 발생 시 사고비상대처 이후 환경매체 중에 잔류하는 유해화학물질의 노출에 의한 건강위해 발현 가능성을 정량적으로 평가할 수 있는 방법의 개발을 목적으로 하고 있다. 이에 다음과 같은 단계별 세부연구목표를 설정하고 각 세부연구목표의 성공적 달성을 통해 본 연구의 최종목표가 달성될 수 있도록 연구설계 하였다.

1단계 세부연구 목적은 국내 건강위해성평가 연구의 현황을 분석하고 화학사고 사고비상대책 이후 잔류하는 유해화학물질의 노출에 의한 건강위해평가 기술개발의 필요성을 검토하는 것이다. 이의 목표달성을 위해 국내 유해화학물질의 노출에 의한 건강위해성평가에 관한 연구의 정보수집 및 데이터베이스를 구축하고, 구축된 데이터베이스의 분석을 통한 화학사고 유해화학물질을 대상으로 한 건강위해성평가 방법 개발의 필요성을 검토하였다. 데이터베이스 구축을 위한 정보 수집은 서경대학교 학술정보관에서 지원하는 학술 데이터베이스 중 국내 전자저널 검색을 이용하여 다음과 같은 문헌검색 및 선정조건을 설정하고 이에 적합한 연구논문을 선정하였으며, 선정된 논문의 참고문헌에서 본 연구의 내용에 부합된 자료를 추가적으로 조사하여 본 연구의 연구대상 연구논문으로 선정하였다. 문헌 검색에 있어 검색어로는 ‘위해성’, ‘위험성’, ‘유해화학물질’, ‘화학사고’, ‘건강위해성’, ‘노출평가’ 등으로 건강위해성평가 또는 화학사고의 의미를 포함하는 단어를 이용하였다. 문헌조사 범위로 발표기간은 국내 건강위해성평가에 관한 연구의 도입이 1980년대 중반 이후인 것을 고려하여 1980년대 이후로 하였으며, 국내 환경에 부합되는 건강위해

성평가 방법의 도출을 도모하기 위하여 국내 환경을 대상으로 수행된 건강위해성평가 결과를 제시한 문헌만을 선정하였다.

2단계 세부목표는 국내 유해화학물질 노출에 대하여 적용되어진 건강위해성평가 방법과 선진국의 관련 기관에서 적용되어지고 있는 건강위해성평가방법들의 비교를 통해 화학사고 유해화학물질 건강위해성평가 방법에 가장 적합한 방법을 개발하는 것이다. 이의 목표달성을 위해 우선적으로 구축된 데이테베이스를 활용하여 국내 유해화학물질의 노출에 의한 건강위해성평가를 수행하는데 활용된 평가 모델들의 종류와 각 모델의 활용 빈도수 등을 조사하여 국내에서 가장 많이 활용되어지고 있는 건강위해성평가 모델을 도출하고 또한 선진국에서 활용되어지고 있는 건강위해성평가 방법들의 고찰을 통해 화학사고 유해화학물질 건강위해성평가에 적합한 방법을 개발하였다.

3단계 세부목표는 질병발현 이론에 기초한 유해화학물질 노출에 기인한 발암성 및 비발암성 질환 발현 가능성을 평가할 수 있는 화학사고 유해화학물질 건강위해성평가 방법을 개발하는 것이다. 이를 위해 일차적으로 건강위해성평가에서 적용되어지는 질병발현 모형의 이론을 검토하였으며, 모형의 종류에 따른 구분된 건강위해성평가 방법을 도출하였다. 또한 최근 미국환경보호청(United States Environmental Protection Agency)에서 권장하고 있는 MOE(Margin of Exposure)를 이용한 평가 방법이 고려된 건강위해성평가 방법을 개발하였다.

4단계 세부목표는 개발된 건강위해성평가 방법의 수행에 있어 세부적 수행내용을 구체화하는 것으로 1단계에서 3단계의 세부연구 수행을 통해 개발되어진 건강위해성평가 모델의 이론적 내용의 검토를 통해 건강위해성을 수행하는데 있어 세부적 구체적 내용을 도출하였다. 도출되어진 세부내용들은 범주화를 통해 4개의 세부수행내용(유해성 확인, 용량-반응 평가, 노출 평가 및 위해도 결정)으로 재구성하여 제시하였다.

최종적으로 5단계 세부연구 목표는 화학사고 유해오염물질의 사고 이후 시간에 따른 환경매체간의 이동 및 감소 등의 특성이 고려된 건강위해성평가 모델을 개발하는 것으로 1단계 - 4단계까지 도출된 건강위해성평가 방법과 화학사고 특성이 고려된 노출량과 노출시간의 변화 등을 고려하여 급성, 아급성/만성 및 만성 질환발현이 예측 가능한 건강위해성평가 방법을 개발하였다.

III. 연구결과 및 고찰

1. 국내 건강위해성평가 연구 현황 분석 및 평가 기술 개발 필요성 검토

1980년대 이후 국내 학술지에 건강위해성평가 주제로 보고된 연구는 Table 1에 제시된 것과 같이 총 60편으로, 최초로 보고된 연구는 Shin et al.(1994)에 의해서 서울시 일부지역 대기부유분진 중 중금속의 노출에 의한 발암위해성 평가를 시행한 연구인 것으로 조사되었으며, 이후 현재까지 지속적으로 위해성평가에 관한 연구가 수행되어져 오고 있는 것으로 나타났다. 위해성평가 연구가 수행되어진 분야로는 농약성분 중의 유해화학물질 노출에 의한 농작업자나 일반인을 대상으로 수행된 위해성평가 연구(농업분야), 식품 내 유해화학물질 노출에 의한 위해성평가 연구(식품분야), 건축자재 및 제품 내 유해화학물질 노출에 의한 위해성평가 연구(건자재 및 제품 분야)와 대기, 물, 토양 및 실내공기오염과 폐기물에 의한 위해성평가 연구(환경분야) 및 위해성평가 방법에 대한 전반적인 고찰 분야로 다양한 분야에서 연구가 수행되어져 오고 있는 것으로 나타났으며 국내 화학사고로 기인된 유해화학물질의 노출에 의한 건강위해성평가 연구는 전무한 실정인 것으로 조사되었다.

국내의 경우 최근 화학사고시 방출된 유해화학물질에 의한 주변 지역 거주자들의 건강영향 및 생태계에 대한 피해 방지 및 복원에 대한 국민의 요구가 증대되고 있으며, 환경부 역시 이의 중요성을 인식하여 다양한 연구를 통한 관리방안을 마련하고 있으나 화학사고 시 응급대처에 대한 관리방안 마련에 그치고 있는 실정으로 중장기 화학사고 유해화학물질 노출에 의한 주변 생활지역 거주자들의 건강보호 및 생태계 보호에 관한 관리방안 마련이 이루어지고 있지 않은 실정이다. 국내의 경우 화학사고 발생시 ‘화학물질관리법’ 제45조 및 제46조와 환경부훈령 제2015-1175호 ‘화학사고 조사단 구성·운영 및 영향조사에 관한 지침’에 근거하여 화학사고 조사단을 구성하여 운영하도록 하고 있다. 화학사고 조사단의 화학사고 영향조사의 목적은 화학사고의 원인이 되는 화학물질(사고 물질)이 화학사고 발생지역 인근 주민의 건강 및 주변 환경에 미칠 수 있는 영향을 과학적인 방법으로 사고 원인, 피해확인, 피해규모, 피해금액 등을 규명하는 것으로 조사 방법 중 환경영향조사 및 건강영향조사의 내용이

Table 1. The purpose of the risk assessment study and its evaluation method reported in domestic journals

Authors (year)	Objective	Method of Risk Assessment	Reference
Pyo H.S. & Park S.J. (2000)	Briefly introduce the hazard identification and exposure evaluation stages of the risk assessment, and explain in brief the process and method of conducting the risk assessment using data for chlorination by-products detected in tap water.	The human risk assessment method designed by the USA National Research Council and National Academy of Sciences was used.	Analytical Science & Technology 13(6), 685-692
Lee B.M. (2003)	Examine a human risk management method and perform a comprehensive analysis of the safety of 3-MCPD, which has been a subject of controversy in terms of human health.	Safety and risk evaluation through a review of toxicity-and genotoxicity-related studies	Toxicological Research 18(1), 1-11
Lee J.B. et al. (2005)	Verify the safety of Korean agricultural environments by conducting a risk assessment of workers employed at farms where benzimidazole-based pesticides are used, and use the information as basic data for practical exposure assessment.	The human risk assessment method designed by the USA National Research Council and National Academy of Sciences was used.	The Korean Journal of Pesticide Science 9(4), 347-353
Kim M.K. et al. (2004)	The physicochemical properties and environmental behavior of benzoyl peroxide was verified through modeling prediction using reliable literature data and critical items. Also, an ecotoxicity test was performed based on the OECD test guidelines (OECD TG 201, 202, 203, 2070). This test was used as a basis to perform an initial risk assessment of the environment.	The initial risk assessment recommended by the OECD was performed.	Environmental Health and Toxicology 19(1), 33-40
Choi S. et al. (2002)	The risk of exposure to DEHP was predicted based on pollution level data for dry and liquid milk (agents that flow into the milk through the milking machines used to extract milk from cows) using the carcinogenicity risk assessment method proposed by the EPA in USA, assuming that a person is chronically exposed to such pollution levels from birth and throughout life.	DEHP risks were predicted using the carcinogenicity risk assessment method proposed by the EPA in USA. The human risk assessment method designed by the USA National Research Council and National Academy of Sciences was used.	Toxicological Research 18(1), 99-106
Kim H.Y. (2014)	1) Examine the harmfulness of gasoline, whose usage and toxicity are predicted to be high, which might cause health hazards in workers when handled carelessly owing to insufficient risk assessment data. 2) Contribute to the prevention of health hazards among gasoline-handling workers by verifying the adequacy of the working environment's management level; this was achieved by determining exposure risks by evaluating the gasoline handling conditions and working environment in gasoline handling establishments in Korea.	The human risk assessment method designed by the USA National Research Council and National Academy of Sciences was used.	Journal of the Korean Institute of Gas 18(4), 1-7.
Ryu K.Y. et al. (2009)	1) Verify the total arsenic content in Hizikia fusiformis, whose usage as a raw ingredient in natural and healthy food is increasing: Hizikia fusiformis is known to possess a high nutritional value, physiological activation effects, and health functions. 2) Verifying the risk of exposure to and arsenic contamination level of Hizikia fusiformis by separating and identifying each of the chemical species of arsenic.	Risk assessment performed through comparison with the JECPA provisional tolerable weekly intakes.	Korean Journal of Food Science and Technology 14(1), 1-6.
Kim E. et al. (2012)	The effectiveness of analysis/test methods used to assess the level of exposure during manufacturing stages before pesticide spraying was verified. The level of hand exposure among farm workers when mixing spray chemicals consisting of indoxacarb wettable powders and granular wettable powders was measured using gloves. Personal air monitors were used to measure the level of respiratory exposure, the level and type of exposure when mixing spray chemicals was identified, and the safety of mixing tasks was verified through a risk assessment.	Health risks assessments were performed using the MOS.	The Korean Journal of Pesticide Science 16(4), 343-349.
Jo S.J. et al. (2002)	Verify the degree of reliability that can be secured for methods that measure the degree of environmental, personal, and physical exposure, which are exposure assessment tools for assessing the level of risk for VOC exposure. Examine easy risk assessments using breath, urine, and blood as samples, from among other human exposure assessment methods, to analyze the degree of burden.	Sample collection and analysis were established to measure the exposure to VOCs. Evaluation of exposure analysis methods from among exposure assessments of risk assessments.	Environmental Health and Toxicology 17(2), 147-160.
Kim W.I. et al., (2014)	Establishing risk assessment methods for percutaneous and respiratory exposure to PVC flooring, which is a waste plastic recycling product with a potential for human exposure.	Algorithms were drawn based on a CONSEXPO exposure assessment model upon selection of exposure coefficients based on an exposure scenario.	Analytical Science & Technology 27(5), 261-268
You A.S. et al. (2014)	Propose an assessment method adequate for Korea by comparing the pesticide exposure assessment methods used in the USA, EU, and Korea and the acceptable operator exposure level assessment method.	Acceptable operator exposure levels for the farm worker risk assessment methods employed in the USA, EU, and Korea were established, and the oral absorption rate obtained each country was applied The human risk assessment method designed by the USA National Research Council and National Academy of Sciences was used.	The Korean Journal of Pesticide Science 18(4), 342-349.
Lim T.Y. et al. (2015)	Develop a human body risk assessment model specialized for Korean waste metal mines.	The human risk assessment method designed by the USA National Research Council and National Academy of Sciences was used.	Journal of Korean Society of Environmental Engineers 37(11), 619-630
Shin D. et al. (1996)	Quantify the level of risk associated with the risk assessment methods for composite materials.	The human risk assessment method designed by the USA National Research Council and National Academy of Sciences was used.	Journal of Korean Society for Atmospheric Environment 12(5), 567-576.
Han S. et al. (2015)	A consumer product risk assessment model suitable for Korea was presented; the European assessment model and simulation results for the accident cases were compared.	A risk assessment model for Korean products was developed via comparison between Japan's R-map and Europe's RAG.	Journal of Applied Reliability 15(3), 207-215.

Lee M.G. & Lee S.R. (1997)	The dietary intake was calculated after calculating the theoretical maximum intake and estimated intake of organophosphorus pesticide ingredients, and the level of risk imposed by organophosphorus pesticides on the health of Koreans was evaluated.	Various magazines (journals) were used to acquire pesticide removal rate data. The 23 types of pesticide ingredients used in Korea and the 8 types of pesticide ingredients not used in Korea were selected as targets.	Korean Society of Food Science and Technology 29(2), 240-248.
Park J.S. et al. (2003)	Uncertainties/variations observed in result analyses and measurements conducted in various environments and individual exposures and detectable symptoms and biomarkers listed in Korean environmental epidemiology surveys and risk assessment studies were classified via a literature review. By examining the response to each uncertainty classification item and presenting the necessary response method, basic data that accounted for uncertainties/variations at the design stage of the environmental epidemiology field surveys were provided.	Some environmental epidemiology and risk assessment literature released in Korea was collected to determine literature selection criteria and organize the selected literature contents by item accordingly.	Korean Society of Environmental Health 29(5), 101-109.
Chae H. et al. (2009)	Analysis results from 1998 to 2007 were compared by water system and season, and the level of non-carcinogenic risk on the human body imposed by drinking tap water was evaluated based on this data.	The human risk assessment method designed by the USA National Research Council and National Academy of Sciences was used.	Analytical Science & Technology 22(5), 386-394.
Kong J.S. & Kim Y. (2016)	A risk assessment of the application of exposure time and measurement data on the indoor concentration of radon within military bases and underground shopping malls was performed.	The E-PERM, which is a charging membrane ionization chamber-type measurement device, was used on underground shopping malls located around major subway stations in the area of Seoul (August-September 2016) and military facilities (measurement was performed on 2015) that were part of the radon reduction program in 2014	Korean Journal of Environmental Health 42(5), 345-351.
Lim Y.W. et al. (2008)	PCB concentration changes in the environment was predicted for two situations: where the regulatory concentration was 2 ppm as it is currently, and where the regulatory concentration was mitigated to 50 ppm. Also, the validity of current regulatory standards was verified via human and ecological risk assessments for each situation.	The human risk assessment method designed by the USA National Research Council and National Academy of Sciences was used.	Environmental Health and Toxicology 23(1), 53-62.
Hong J.E. et al., (2003)	The concentration of 1, 4-dioxane in actual water samples was examined, and a risk assessment was performed on drinking water according to the detected quantities.	The human risk assessment method designed by the USA National Research Council and National Academy of Sciences was used.	Environmental Health and Toxicology 18(3), 219-224.
Lee J.Y. et al. (2008)	12 water filtration plants and 4 water intake stations were selected from the water system of the Nakdong River, where 1,4 dioxane is mainly detected. Then, purified and raw water was collected from each site and the concentration of 1,4-dioxane was measured (2000 to 2007). Also, a risk assessment of potable water was performed.	The human risk assessment method designed by the USA National Research Council and National Academy of Sciences was used.	Analytical Science & Technology 21(5), 383-391.
Chung Y. et al. (1999)	Identify the complete lead exposure route via which the human body can come in contact with the outside environment and provide basic data on health risk assessment and risk management by evaluating the total exposure and risks of lead exposure on the human body through multiple routes by measuring the degree of pollution in the environment according to the exposure route.	The human risk assessment method designed by the USA National Research Council and National Academy of Sciences was used.	Environmental Health and Toxicology 14(4), 203-216.
Kim M.S. et al. (2007)	Examine the potential hazards of nano-materials and consider a risk assessment plan for human and environmental risks	Organized into the need for research on the risks of nano-technology, potential exposure, toxicity research cases, required research fields, and future research direction.	Clean Technology 13(3), 161-172.
Lee J.B. et al. (2004)	Report the dietary intake risk assessment results of the estrogenic effects of pesticides known to be endocrine disruptors by calculating the estimated maximum daily intake.	A luciferase assay was performed using human ovarian cancer cells (BG1luc4E2) to evaluate the estrogenic effects of 17 types of pesticides such as benomyl, carbaryl, and endosulfan, which are classified as endocrine disruptors.	The Korean Society of Pesticide Science 8(2), 95-102.
Choi B.W. et al. (2006)	The characteristics of the distribution of heavy metals in the air was examined in the area of Ulsan, and carcinogenic risks were evaluated after including the recommendation criteria of the WHO, with the level of 10^{-5} set as the guideline value concentration for 4 trace heavy metals rated above bin the USEPA carcinogenesis rating. This was based on the characteristics of pollutant sources in Ulsan Metropolitan City.	The human risk assessment method designed by the USA National Research Council and National Academy of Sciences was used.	Korean Journal of Environmental Health 32(5) 522-531
Lee B.M. (1999)	Consider the possibilities of utilization of biomarkers during environmental and human risk assessments.	Theoretical consideration	Environmental Mutagens and Carcinogens 19(2), 95-101.
Choi H. et al. (2012)	The risks of exposure to heavy metals via mushroom ingestion in Koreans was evaluated through a factual survey on the content of heavy metals in mushrooms to identify the level of risk.	The average level of exposure of all Koreans to heavy metals when ingesting mushrooms distributed in Korea as food was evaluated and compared with the human exposure safety standards of the JECFA.	Korean Journal of Food Science and Technology 44(6), 666-672.
Hong S. et al. (2013)	The level of pesticide exposure among pesticide sprayers was calculated using the model currently used for pesticides used in gardens in Korea, and a risk assessment was performed using the acceptable operator exposure levels of each country.	The human risk assessment method designed by the USA National Research Council and National Academy of Sciences was used.	The Korean Journal of Pesticide Science 17(1), 50-59.
Choi J.Y. & Kim K. (2015)	The distribution of trace metals inside fish collected near the Yongho Pier during the marine pollution sediment purification program was identified and used as part of the basic monitoring data used to evaluate environmental changes before and after the program. Based on these data, the level of exposure to trace metals by ingestion of fish from adjacent sea areas and the potential risks to human health were evaluated to present basic data for the marine environment management of target areas in the future.	The human risk assessment method designed by the USA National Research Council and National Academy of Sciences was used.	Journal of Korean Society of Environmental Engineers 37(6), 349-356.

Choi J.Y. et al. (2012)	The characteristics of the distribution of organochlorine pesticides and PCGs inside fish and seabed sediments within a radius of 1.5 km around the Yongho Pier were identified. Based on these data, the level of exposure of residents to PCB when ingesting the researched fish was evaluated, and the potential human risks were predicted.	The human risk assessment method designed by the USA National Research Council and National Academy of Sciences was used.	Journal of Korean Society of Environmental Engineers 34(12), 810-820
Choi J.H. et al. (2013)	As result of analyzing residual amounts by performing packaging tests on the representative agricultural products, the source data of the national health and nutrition survey (MHW, 2009) and the food intake of vulnerable classes (infants) were calculated to perform an assessment of the risks of exposure to rotenone when ingesting the representative agricultural products and present basic data for studies on securing the safety of eco-friendly organic materials.	The human risk assessment method designed by the USA National Research Council and National Academy of Sciences was used.	The Korean Journal of Pesticide Science 17(4), 302-306.
Park E.J. et al. (2005)	The distribution of PM10 and PM2.5 in the air, as well as the components and content of heavy metals inside them was identified to evaluate human risks in case of ingestion. Also, the potential toxicity to cardiac cells when the respiratory organs are exposed to each heavy metal component was evaluated and compared through experimental research.	The human risk assessment method designed by the USA National Research Council and National Academy of Sciences was used.	Environmental Health and Toxicology 20(2), 179-186.
Shin D.C. et al. (1994)	A carcinogenesis risk assessment was performed on heavy metals contained in airborne dust in some areas of Seoul to calculate the excess rates of carcinogenesis by exposure and present basic data for the preparation of recommended standard values for these materials.	The human risk assessment method designed by the USA National Research Council and National Academy of Sciences was used.	Jornal of Korean Society for Atmospheric Environment 10(2), 105-115.
Jang M. et al. (2010)	The components of residual pesticides were analyzed and its presence was identified on vegetables distributed in markets, supermarkets, and department stores of the area of Kangnam, Seoul in 2009. The Monte-Carlo simulation was used to evaluate the level of human risk imposed by ingesting vegetables that contained residual pesticides that exceeded the tolerance limit.	The human risk assessment method designed by the USA National Research Council and National Academy of Sciences was used.	The Korean Journal of Nutrition 43(4), 404-412.
Chung Y. et al. (1997)	A qualitative human health risk assessment was performed through a literature review of the long-term toxicity and carcinogenicity of THMs and HANs. An exposure assessment was performed after accounting for ingestion, dermal and respiratory exposure, and level of generation of THMs and HANs when treating water disinfected with chlorine. The level of human health risk was calculated by evaluating the dose-response of target materials.	The human risk assessment method designed by the USA National Research Council and National Academy of Sciences was used.	Environmental Health and Toxicology 12(2), 1997.
Lee J.B. et al. (2005)	A risk assessment was conducted on farm workers that spray benzimidazole-type pesticides to verify the safety of Korean agricultural environments and present basic data to be used in practical exposure assessments.	The human risk assessment method designed by the USA National Research Council and National Academy of Sciences was used.	The Korean journal of Pesticide Science 9(4), 347-353.
Kim Y. et al. (2005)	Pollution data of some indoor air pollutants that are harmful to the human body was collected and used to calculate the level of human risk and the amount of economic losses generated by it. Finally, information on initial assessment means to manage the quality of indoor air in the area of Seoul was provided.	The human risk assessment method designed by the USA National Research Council and National Academy of Sciences was used.	Korean Society for Indoor Environment 1(2), 2005, 196-209
Yang J.Y. et al. (2011)	Identifying the main exposure routes and calculating the total level of risk for nursery facilities and indoor playgrounds, which are the main activity spaces for children, by performing a health risk evaluation of multi-route exposures to harmful metals.	The human risk assessment method designed by the USA National Research Council and National Academy of Sciences was used.	Journal of Korean Society for Indoor Environment 8(1), 20-38
Kim H.Y. et al. (2011)	To utilize basic data on indoor air quality policies on the legal use of multi-use facilities in the future by identifying priority materials and facilities in unapplied multi-use facilities through the estimation of health risk effects caused by VOCs such as HCHO and toluene, which can be present in multi-use facilities, based on national survey results on the non-application of facilities such as hotels, fitness centers, goshiwons, reading rooms, and video rooms.	The human risk assessment method designed by the USA National Research Council and National Academy of Sciences was used.	Journal of Korean Society for Indoor Environment 8(3), 157-169
Kim H.Y. et al. (2011)	Calculate the level of health risks by configuring scenarios that reflect exposure characteristics and concentration distribution of VOCs on main activity spaces for children (outside home), such as elementary schools, which are mainly frequented by infants 7-12 years of age, and various types of educational institutes, and provide basic data for the management of risks in children facilities	The human risk assessment method designed by the USA National Research Council and National Academy of Sciences was used.	Journal of Korean Society for Indoor Environment 8(4), 263-274.
Kim H.Y. et al. (2011)	The long-term management of risks in children facilities by performing health risk assessments by configuring scenarios that reflect the exposure characteristics and concentration distribution of aldehydes in main activity spaces for children (outside home), such as elementary schools, which are mainly frequented by infants 7-12 years of age, and various types of educational institutes.	The human risk assessment method designed by the USA National Research Council and National Academy of Sciences was used.	Journal of Korean Society for Indoor Environment 9(1), 19-31
Kim H.Y. et al. (2012)	Identify main exposure routes caused by inhalation, ingestion, and dermal contact through a health risk assessment of multi-route exposure to metals in main activity spaces for children (aged 7-12 years), such as in the representative elementary schools and various types of educational institutes mainly used by elementary students, and identify the level of risk.	The human risk assessment method designed by the USA National Research Council and National Academy of Sciences was used.	Journal of Korean Society for Indoor Environment 9(3), 213-228.
Kim H.Y. et al. (2012)	Calculate the total level of risks and identify the main exposure routes by performing a health risk assessment on the multi-route exposure to representative phthalate groups among children in educational institutes and elementary schools, which are main activity spaces for children aged 7-12 years.	The human risk assessment method designed by the USA National Research Council and National Academy of Sciences was used.	Journal of Korean Society for Indoor Environment 9(4), 367-381.
Choi I.W. et al. (2013)	Examine the characteristics of indoor air pollutants among medical facilities used widely by health sensitive groups, and provide basic data on the management of the quality of indoor air inside medical facilities by performing a quantitative risk assessment that accounts for exposure characteristics and evaluates the potential health risk effects.	The human risk assessment method designed by the USA National Research Council and National Academy of Sciences was used.	Journal of Korean Society for Indoor Environment 10(2), 115-128.

Lee W.Y. et al. (2014)	Perform a health risk assessment on the main carcinogenic substances among VOCs in day care centers to provide basic data for the establishment of plans for the management of substances that might be hazardous for the human body.	The human risk assessment method designed by the USA National Research Council and National Academy of Sciences was used.	Journal of Odor and Indoor Environment 12(4), 297-305
Heo J. et al. (2016)	The level of exposure to chemical substances by inhalation was estimated and its level of risk was evaluated in terms of the use of bleaching agents by bathroom-cleaning workers at universities.	The human risk assessment method designed by the USA National Research Council and National Academy of Sciences was used.	Journal of Odor and Indoor Environment 15(4), 296-302
Park M.K. et al. (2016)	Provide basic data on the promotion of the public health of all citizens by identifying the exposure to heavy metals in living environments by evaluating risks and measuring the concentration of heavy metals (cadmium and arsenic) in fine dust inside and outside houses.	The human risk assessment method designed by the USA National Research Council and National Academy of Sciences was used.	Journal of Odor and Indoor Environment 15(4), 392-400
Heo E.H., et al. (2017)	Prevent health risks generated by asbestos among residents and prepare management plans for slate-roofed houses by evaluating the level of health risks imposed on residents of slate-roofed houses, and identify factors that increase the concentration of asbestos fiber by measuring the indoor/outdoor concentration of airborne asbestos fiber emitted from slate roofs.	The human risk assessment method designed by the USA National Research Council and National Academy of Sciences was used.	Journal of Odor and Indoor Environment 16(1), 81-90
Jeong G. et al. (2016)	A bisphenol-A survey was performed on the tap water of the epoxy rechargeable indoor water supply pipes, and a risk assessment was performed to quantitatively evaluate the impact of the concentration of bisphenol-A in tap water on the human body and propose an alternative for the safe supply and management of tap water.	The human risk assessment method designed by the USA National Research Council and National Academy of Sciences was used.	Journal of Korean Society of Environmental Engineers 38(7), 371-376
Hong S. et al. (2010)	Examine the risks associated with highly toxic garden pesticide sprays currently used in Korea, after developing a scenario that corresponds to the level of pesticide exposure in Korea, using pesticide spray assessment techniques employed in developed countries.	The acceptable operator exposure level, acceptable daily intake, acute reference dose, and chronic reference dose, which are toxicity reference values established by international evaluation agencies such as the JMPR, EFSA, US/EPA, and the risk assessment agencies of Korea and Japan, were examined to evaluate the level of risk of pesticides. The human risk assessment method designed by the USA National Research Council and National Academy of Sciences was used.	The Korean Journal of Pesticide Science 14(2), 116-122
Jung S.W. et al., (2007)	The concentration of NO ₂ , which is generated via indoor combustion, and VOCs, which can be generated in new buildings, was continuously monitored for a certain period of time in apartments. The Monte-Carlo simulation was used to perform an exposure and risk assessment and predict the harmful effects of exposure to NO ₂ and VOCs on the human body.	The human risk assessment method designed by the USA National Research Council and National Academy of Sciences was used.	Korean Journal of Environmental Health 33(4), 242-249
Kim M.H. & Yang W.H. (2007)	This research focused on determining the air pollution caused by agricultural waste incineration during the month of October (fall) carried out by the local government of Gyeongsangbuk-do 'A', and generate a political plan for the effective treatment of rural waste in the future.	The human risk assessment method designed by the USA National Research Council and National Academy of Sciences was used.	Korean Journal of Environmental Health 33(1), 30-35.
Seo J. et al. (2014)	Perform an exposure assessment of multiple sources such as air and water, based on exposure scenarios to perform a human risk assessment for PCE, and secure more precise data for the establishment of PCE management measures for the human body, such as calculating the level of exposure contributed by each source.	The human risk assessment method designed by the USA National Research Council and National Academy of Sciences was used.	Korean Journal of Environmental Health 40(5), 397-406
Lee D.S. et al. (1997)	The degree of pollution caused by airborne dust, and the neutral fraction concentration and mutagenicity of organic extracts, which are in the form of composite materials and in which most carcinogens and toxic substances exist, were evaluated.	The mutagenicity of organic extracts of dust was evaluated by using Yahaagi's pre-incubation method, which is a variation of the Ames test, and the metabolic substance addition method, using the <i>Salmonella typhimurium</i> TA98 strain.	Journal Korea Society of Environmental Administration 3, 142-153.
Yoon H. et al. (2016)	The distribution and accumulation of microcystin inside water and fish was examined, and the human risks caused by the exposure of the body to aquatic ecosystems contaminated by microcystin was evaluated.	The concentration of microcystin inside water and fish was examined to determine its conformance with the drinking water quality standard (1 ug/L) established by the WHO to evaluate the human risks of ingesting water or fish contaminated by microcystin inside eutrophic reservoirs.	Korean Journal of Environmental Health 42(1), 10-18.
Lee G.H. (2001)	Examining the general background of the challenges of risk analyses, and examining how microbial risk assessments can be utilized in the process of troubleshooting	Theoretical consideration on risk assessments	Korean Journal of Microbiology 37(2), 101-108.
Lee C.M. & Kim Y.S. (2004)	Research results published in environmental journals after 1990 regarding the quality of indoor air in Korea was collected and reanalyzed to present the trends of indoor air quality studies in Korea. Also, regarding health risk assessments on the quality of indoor air in target facilities per the indoor air quality management law for multi-use facilities, which is being implemented by the Ministry of Environment, safety coefficients of the maintenance criteria for pollutants and the recommended standards for pollutants were examined and presented through prior investigation to present the possibility of occurrence of adverse health effects among residents of multi-use facilities.	The risk assessment was performed using safety factors obtained via a literature review and meta-analysis	Korean Society for Indoor Environment 1(1), 2004, 39-60.
Kim Y.S. et al. (2006)	Average concentrations of pollutants in indoor air inside houses were obtained via meta-analysis after collecting research results on the quality of indoor air inside Korean houses after 1990. Also, a health risk assessment on the inhalation of indoor air pollutants by housing residents was performed.	The human risk assessment method designed by the USA National Research Council and National Academy of Sciences was used.	Korean Society for Indoor Environment 1(2), 180-198

Lim Y.W. et al. (2006)	A health risk assessment was performed based on national indoor survey results on new apartment houses before the entrance of residents to predict the harmful effects of formaldehyde and VOCs on the human body.	The human risk assessment method designed by the USA National Research Council and National Academy of Sciences was used.	Korean Society for Indoor Environment 3(3), 211-223
Kim H.Y. et al. (2007)	Evaluating the risk factors of target multi-use facilities harboring formaldehyde and volatile organic compounds based on the 2006-2007 national survey results on wedding halls, indoor gymnasiums, exhibition halls, and representative social welfare facilities to provide basic data on the future management of the quality of indoor air in multi-use facilities not contemplated by the current management laws.	The human risk assessment method designed by the USA National Research Council and National Academy of Sciences was used.	Korean Society for Indoor Environment 4(1), 42-52

포함되어는 있으나 모두 화학사고 발생 시의 화학물질 노출에 의한 급성 영향을 평가하는 내용으로 구성되어 있어 화학사고 비상대책 이후 환경 매체 등에 잔류하는 유해화학물질에 장기간 지속적인 노출로 인한 건강위해 평가와 위해기반 관리 구축 및 복원 활동은 전무한 실정이다. 이와 같은 현황을 고려할 때 화학사고 발생 시 비상대책에 의한 단기간 대책이 아닌 비상대책 이후 잔류하는 유해화학물질에 의한 피해발생의 장기적 복원 전략과 주변 생활지역 거주자를 대상으로 한 환경보건 정책 수립을 목적으로 한 화학사고 비상대책 이후 잔류하는 유해화학물질의 노출에 의한 건강위해성평가 기법 개발 및 이를 기반으로 한 복원전략 수립이 요구된다.

Table 2는 국내 위해성 평가 연구의 경향을 분석하기 위해 수집된 자료를 1990년 이후 5년 단위로 연구 주제별로 구분(농업분야, 식품분야, 전자재 및 제품 분야, 환경분야, 고찰분야)하여 보고된 연구의 빈도수를 나타낸 것이다. 가장 우선적으로 위해성평가가 적용된 분야는 환경분야로 Shin et al.(1994)를 비롯하여 Shin et al.(1996), Lee et al.(1997a), Chung et al.(1997), Chung et al.(1999) 등에 의해 1990년대 중반부터 환경매체 중 유해화학물질 노출에 따른 위해성평가 연구가 수행되어졌음을 확인할 수 있다. 환경분야 다음으로 다수의 연구가 수행된 연구로는 농업분야인 것으로 조사되었는데 대부분의 연구가 농약 중의 유해화학물질 노출에 따른 농작업자 또는 일반인들을 대상

으로 위해도를 평가하는 연구가 수행되어져 오고 있는 것으로 나타났다. 환경분야 중 실내환경분야의 위해성평가 연구의 경우 Lee & Kim(2004)의 연구를 기점으로 현재까지 활발히 이루어지고 있는 것으로 조사되었는데 이는 2004년 환경부의 ‘다중이용시설 등의 실내공기질 관리법’의 공포 이후 실내환경에 관한 연구가 활발히 이루어짐에 따른 결과로 사료된다.

위해성평가 방법에 관한 고찰의 내용을 다루고 있는 연구로는 Lee(1999)이 환경 및 인체 위해성 평가에 있어서의 Biomarker의 활용 가능성을 고찰한 논문을 시작으로 위해성 평가에 있어서의 노출 평가의 중요성(Jo, 2002), 유해성 논란이 있는 물질에 대한 위해성 평가 방법 및 종합적 해석 방법(Lee, 2001; Kim et al, 2007), 위해성 평가에서의 불확실성의 저감 방안(Park et al., 2003)의 주제로 1999년 말부터 2000년 초에 걸쳐 대부분의 연구가 수행되어진 것으로 조사되었다. 이들 논문의 주요 내용의 경우 첫째, 신뢰성 있는 위해성 평가 결과를 도출하기 위한 방안에 대한 고찰과 둘째, 새로운 유해화학물질의 등장과 이에 대한 위해성 평가 방법 적용 가능성에 관한 고찰로 구분할 수 있다. 이는 1990년대 중반에 국내 처음 소개되어진 이후 현재까지 꾸준히 수행되어져 오고 있는 위해성평가 연구의 경우 도입 초기에 국내 위해성평가의 적용 및 활용성 증대를 위한 위해성평가 방법의 고찰을 내용으로 한 연구들이 수행되어졌으며 또한 새로운 환

Table 2. Trends and characteristics of domestic risk assessment studies

Research field		Year					
		1990-1994	1995-1999	2000-2004	2005-2009	2010-2014	2015-
Agriculture			1	1	2	4	
Food division				1	1	3	1
Building materials and products						1	1
Environmental field	air, Water quality, Soil, waste	1	4	2	6	1	3
	Indoor environment (Including industrial health)			1	5	10	4
Field of study			1	4	1		

경문제 발생 시 이들 문제 해결을 위한 적절한 위해성 평가 방법을 도출하기 위한 연구들이 추진되어져 왔음을 보여주는 결과로 화학사고에 관한 국민의 관심 증대 및 화학사고 유해화학물질의 노출에 의한 국민 건강보호에 적합한 복원전략 및 관리방안 도출을 목적으로 한 위해성평가 방법 개발에 관한 연구가 시급적으로 필요함을 확인할 수 있는 결과이다.

2. 화학사고 유해화학물질 노출에 적합한 건강위해성평가 방법 도출

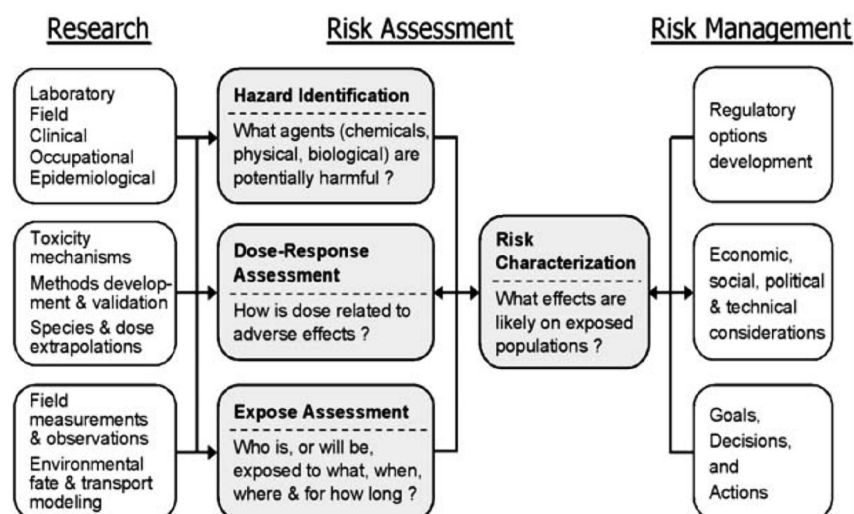
국내 화학사고 발생 시 화학사고 조사단의 구성 및 운영에 따른 비상대책 이후 주변 생활지역에 잔류하는 화학사고 유해화학물질의 장기 노출에 의한 건강위해성 평가 연구는 전무한 실정인 것으로 조사되었으며, 위해성을 기반으로 한 복원 전략 수립에 관한 내용 역시 전무한 실정이다. 국내에서 활용된 위해성평가 연구에 있어 가장 많이 적용된 위해성평가 방법은 조사된 전체 60편의 연구 중 40편의 연구가 미국 국가연구위원회(National Research Council, NRC)와 국립과학원(National Academy of Sciences, NAS)에서 제안된 위해성평가 방법을 적용한 것으로 나타났다(Table 1). 이에 장기간 누적 노출에 의한 건강영향평가 방법의 개발을 위해 국내에서 보편적으로 사용되어지고 있는 건강위해성평가 방법을 기반으로 한 화학사고 유해화학물질 건강위해성평가 방법의 개발 및 적용은 추후 정책결정자 및 관계 연구자들에 있어 평가방법 및 평가 결과의 적용성 및 활용성을 증대시킬 수 있을 것으로 여겨진다.

US EPA, EU, OECD 및 WHO에서 제공하고 있는 물질별 위해성 평가 방법에 대해 비교하면 US EPA와 EU의 위해성평가는 효과적인 환경 관리 정책 결정에 활용하기 위하여 정성적인 유해 영향 평가뿐만 아니라 미국 또는 유럽에서 대상물질에 대한 현재의 환경 및 인체 노출 수준에 의한 정량적인 위해성평가를 수행하고 있다. US EPA와 EU에서는 모두 위해성평가 과정에서 정량적 위해성평가를 제공하고는 있으나 정량적 위해도를 산출하는 과정에 다소 차이를 나타낸다. US EPA 경우에는 발암물질과 비발암물질에 따라 인체 유해 영향(용량-반응 평가) 및 인체 위해도를 산출하는 방법을 다르게 적용하고 있는 것으로 조사되었다. US EPA에서는 발암물질의 경우에는 역치(threshold)가 존재하지 않다고 가정하여 산출된 발암 잠재력을 이용하

여 현재 노출 수준으로 인한 초과발암위해도를 예측하고 있으며, 비발암물질의 경우에는 역치가 존재한다고 가정하여 결정된 유해영향에 대한 참고치를 현재의 노출 농도와 비교하여 위해도를 결정하고 있다. 이에 비해 EU에서는 발암물질과 비발암물질 모두 역치가 존재한다고 가정하여 대상물질에 대한 무영향관찰치(No Observed Adverse Effect Level, NOAEL)을 결정하고, 이를 현재의 노출 수준과 비교함으로써 인체영향의 안전역(Margin of Safety, MoS)을 산출하고 있다. OECD의 경우는 SIDS(Screening Information Data Set) 사업의 일환으로 HPV(High Production Volume) 화학물질(연간 1,000톤 생산 화학물질)을 대상으로 유해성 확인 및 용량-반응 평가와 사용량(노출량)을 평가하는 위주의 초기위해성평가를 행하고 있는 것으로 조사되었다. WHO에서는 평균 위해도평가 방법의 위해성 평가를 수행하고 있다. 즉, 기존의 역학 연구의 결과를 연구대상 인구의 인구통계학적 자료를 이용하여 표준화를 통한 위험도를 비교하고 있으며, 유해화학물질의 유해영향 평가의 기초자료 제공을 주목적으로 하는 정성적 위해성 평가를 수행하고 있는 것으로 나타났다. 다음의 Table 3은 대표적 4개 기관에서 정하고 있는 평가방법을 현재 전 세계적으로 가장 선호하는 NRC/NAS에서 정하는 4단계 위해성 평가 절차에 따라 각 단계별 내용을 요약하여 정리한 것이다. 1단계인 유해성 확인의 경우 4기관 모두 자료의 수집을 통한 유해화학물질의 건강영향에 대한 자료를 수집하고 수집된 자료로부터 대상 유해화학물질의 건강영향을 정성적으로 평가하고 있는 것으로 조사되었다. 2단계인 용량-반응 평가의 경우 US EPA, EU, OECD의 경우 모두 동일하게 독성 자료로부터 정량적 용량-반응 평가 결과를 검토하고 있으며, WHO만 3기관과 달리 정성적인 평가를 수행하고 있는 것으로 조사되었다. US EPA에서는 용량-반응 평가에서 독성값을 용량 스케일링 및 외삽 등의 절차를 통해 최종적으로 비발암물질의 경우 참고치(Reference Dose, RfD)를, 발암물질의 경우 발암잠재력(Cancer Potency Factor, CPF)을 산출하는 정량적 평가를 수행하고 있다. EU와 OECD 역시 US EPA와 같이 정량적인 용량-반응 평가를 수행하고 있으나, US EPA와의 차이점으로는 비발암물질에 대해서만 독성값을 평가하는 것으로 조사되었다. 3단계인 노출평가의 경우 4개 기관 모두 각 기관에서 정하는 방법에 따라 환경 노출평가 및 유해오염물질의 인체 노출량을 평가하는 인체

Table 3. Risk assessment by organization major step-by-step comparison

Risk assessment major step	USEPA	EU	OECD	WHO
Hazard identification	· Collecting data · Determination of harmful grade by considering weight of harmful effect	· Collecting data · Qualitative Impact Assessment	· Collecting data	· Collecting data
Harmful effect assessment	· Perform quantitative dose-response assessment · Non-carcinogenicity substance : Reference · Carcinogenicity substance : carcinogenic potential force	· Perform quantitative dose-response assessment · Human : NOAEL, LOAEL	· Perform quantitative dose-response assessment · Human : NOAEL, LOAEL	· Qualitative data evaluation
exposure assessment	· Environmental exposure assessment · Human exposure assessment · Human loading dose assessment · Determine human exposure level for risk determination	· Environmental and human exposure assessment · Human : public, consumer · Employee	· Qualitative exposure data collection · Environmental behavior due to discharge · Evaluation-oriented	· Global environmental exposure · Collecting data · Daily dose for human · Prediction
Risk characterization	· Determine the level for human · Non-carcinogenicity substance : Human Toxic Risk Value · Carcinogenicity substance : Excess of human · Carcinogenicity hazard	· Determine the level for human · Human : Margin of Safety(MoS)	· Failure to determine risk level	· Failure to determine risk level
Note	· Use quantitative risk assessment in the United States as a major data for future management policy decisions	· Use quantitative risk assessment in Europe as a major data for future management policy decisions	· Collecting the minimum baseline data to perform a risk assessment of the HPV material is the main objective	· Providing basic data for an harmful effect assessment

**Figure 1.** Risk assessment and management model(NRC, 1983)

노출평가를 수행하는 것으로 조사되었다. 최종 단계인 위험도 결정은 US EPA의 경우 용량-반응 평가에서와 같이 발암물질과 비발암물질로 구분하여 각각에 대한 인체 위해수준을 정량적으로 평가하고 있으며, EU 역시 유해오염물질에 대해 정량적 위해수준을 평가하고 있으나 US EPA와는 달리 비발암물질에 대해서 MoS의 값을 산출하여 제시하고 있다.

국내외 적으로 적용되어지고 있는 위해성평가 방법들의 장단점 및 활용성의 비교·분석을 통해 국내 화학사고 비상대책이후 화학사고 유해화학물질 노출에 의한 건강위해성평가 방법으로 국내 적용 가능성 및 활용성을 고려하여 미국 국가 연구위원회(NRC)와 국립과학원(NAS)에서 고안된 위해성 평가 방법(NRC, 1993)을 기초로 한 유해성 확인(hazard identification), 용량-반응 평가(dose-response assessment), 노출평가(exposure assessment) 및 위험도 결정(risk characterization)의 주요 4단계로 구성된 건강위해성평가 방법(Figure 1)의 개발이 이루어지는 것이 적합한 것으로 판단된다.

3. 질병 발현 이론을 기초로 한 화학사고 유해화학물질 건강위해성평가 방법 도출

건강위해성평가 방법에 적용되는 건강 영향(질병) 발현의 모형은 크게 발암성 질환의 발현과 비발암성 질환의 발현으로 구분할 수 있다. Figure 2는 두 질병 발현의 특성에 관계되는 용량과 반응의 관계를 나타낸 것으로 발암성 물질의 경우 용량과 반응 간에 비례의 관계를 보인다는 이론 즉, 비역치(Non-threshold)이론을 따르고 있다. 비발암물질의 경우는 발암성 물질과는 달리 일정 용량 또는 노출 조건 이하에서 어떠한

유해한 영향이 발생하지 않으나 이 이상의 용량 또는 노출조건 이상에서 질병이 발생된다는 역치(Threshold)이론을 따르고 있다(US EPA, 1986; NRC, 1993). 이와 같은 유해화학물질의 노출에 따른 질병 발현의 특성으로 고려할 때 화학사고 유해화학물질 노출에 의한 건강위해성평가 방법은 발암성 유해화학물질의 건강위해성평가 방법과 비발암성 유해화학물질의 건강위해성평가 방법으로 구분된 평가 방법의 개발이 이루어져야 할 것으로 여겨진다.

최근 US EPA는 발암위해성 평가 시 각 물질의 용량-반응평가에 근거한 발암력을 활용하는 비역치 발암위해도 예측방법의 사용을 권장하여 왔으나, 최근 들어 기존의 비역치 발암위해도예측방법론과 함께 발암영향이 나타나는 독성기전에 근거하여 다르게 접근하는 MOE를 활용한 평가방법론을 제안하고 있다(US EPA, 1999). 이 방법은 발암을 이차영향으로 하는 유해영향의 경우에 그 용량-반응이 선형모델가정에 적합하지 않은 경우 즉, 발암영향에 앞서 일어나는 그 일차적인 영향의 용량-반응관계에서 역치가 존재하는 경우, 비발암영향평가와 유사한 방법론인 역치개념을 활용한 MOE 방법을 적용하는 방법으로 MOE 분석에서 활용되어지는 'point of departure' 개념은 기존의 비발암물질의 위해성평가방법에서 수행되어 오던 무영향관찰치의 개념과 동일하다고 할 수 있다(US EPA, 1999).

이와 같은 질병발현 이론을 고려하였을 때 화학사고 유해화학물질 건강위해성평가 방법 개발은 크게 두 가지로 구분된 평가 방법의 개발로 이루어져야 할 것으로 사료된다. 즉, 비유전독성 발암물질을 제외한 발암물질의 경우 NRC(1993)와 US EPA(1983)에서 제

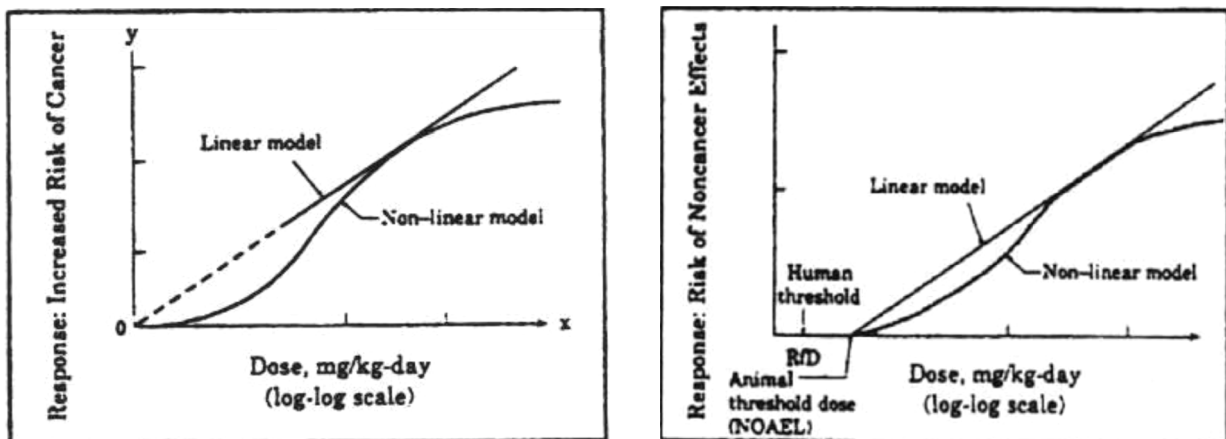


Figure 2. Dose-response curve for (a)cancer zero-threshold and (b)noncancer zero-threshold

시하고 있는 발암성 유해화학물질 건강위해성 평가 방법에 준한 4단계(유해성 확인, 용량-반응 평가, 노출 평가, 위험도 결정)에 따르는 평가 방법이 개발되어져야 할 것이며, 비유전독성 발암물질을 포함한 비발암 물질의 경우 NRC(1993)에서 제시하고 있는 비발암성 유해화학물질 건강위해성평가 방법에 준한 4단계(유해성 확인, 용량-반응 평가, 노출 평가, 위험도 결정)에 따르는 평가 방법이 개발되어져야 할 것이다.

4. 화학사고 유해화학물질 건강위해성 평가의 4단계별 주요 수행 내용 도출

화학사고 유해화학물질 건강위해성평가 주요 수행 방법을 도출함에 있어 전반적인 건강위해성평가 수행의 이론적 내용을 검토하고 이로부터 건강위해성평가 내용의 특성에 따라 단계별로 세부평가방법을 분류하였다. 이를 토대로 각 단계별로 수행되어져야 할 주요 내용을 도출하였다.

건강위해성 평가는 동물실험과 사람에 대한 역학조사 결과로부터 도출된 독성 자료를 평가하고 낮은 용량에서의 반응을 예측하기 위해 수학적인 식을 적용하는 평가모델로 노출 정도에 대한 정보를 사용하는 특정한 인구집단에서 특정한 건강 이상 반응(adverse reaction)을 정량적으로 예측하는 평가 방법으로(MoE,

2001), 질병 발현 이론에 따라 크게 발암성 건강위해성 평가방법과 비발암성 건강위해성평가 방법으로 구분되며, 발암성 건강위해성평가에서는 최종적으로 초과발암위해도(Exceed Cancer Risk, ECR)를, 비발암 건강위해성평가에서는 최종적으로 위험도 지수(Hazard Quotient, HQ)를 산출하게 된다(NRC, 1993). 발암성 및 비발암성 건강위해성평가 수행에 있어서의 기본 내용을 기반으로 화학사고 유해화학물질에 대한 건강위해성평가에 있어 세부 단계별 수행되어져야 할 내용을 도출하면 다음과 같다(Table 4). 유해성 확인의 단계는 사람이 유해화학물질에 노출되었을 경우 과연 유해한 영향을 유발시키는가를 결정하는 정성적 평가를 수행하는 단계로 대상유해화학물질의 물리·화학적 성질을 조사하고 이의 성질에 따른 대상유해화학물질의 환경 중 이동기구 및 인체 내 영향 기구 등을 파악하며, 대상 물질의 독성 자료 및 인체독성자료(역학자료 등) 수집 및 분석을 통한 물질이 가지고 있는 유해성을 규명하는 것을 주 내용으로 구성하였다. 용량-반응 평가는 유해화학물질의 용량과 노출된 인구집단에서의 유해건강영향 발생간의 관계를 규명하고 노출로 인한 유해건강영향의 발생수준을 예측하는 과정으로 유해오염물질에 대한 인체 영향을 역치의 존재 유무에 기본 가정을 두고 발암물질과 비발암물질로 나누

Table 4. Chemical accident hazardous chemical substance risk assessment step by step research contents

Health risk assessment step	Major Perform Research content
Hazard identification	Qualitative health risk assessment research - Physical and chemical properties investigation - Toxicity data(Acute toxicity, Chronic toxicity, Carcinogenicity, Institutional Toxicity, Immunotoxicity, Mutagenicity etc) collection and analysis Human toxicity data(epidemiology data etc) collection and analysis Reliability assessment of collected data
Dose - response assessment	Qualitative-quantitative health risk assessment research Toxic end point determination(Select toxicity test data) Perform dose-response assessment through analysis of toxicity test data Selection of mathematical models and calculation of toxicity values Selection of applied uncertainty factors
Exposure assessment	Quantitative health risk assessment research Identify exposure pathways Data collection of pollution degree distribution of hazardous chemical by route of exposure Conduct monitoring of environmental media and human exposure Inhalation rate of hazardous chemical by route(Volume, Intake, Soil intake etc) Calculation Construct exposure scenarios and path-specific exposure algorithms Calculate total human body exposure Calculate exposure Contribution by Medium
Risk characterization	Quantitative health risk assessment research Risk calculation(Excess cancer risk, Risk Index)

어 평가를 수행하는 정성적 평가를 주 내용으로 필요 시 독성 실험을 수행하여 독성 종말점을 결정하는 정량적 평가 수행에 관한 내용으로 구성하였다. 노출평가는 노출된 인구집단의 크기, 노출강도, 노출발생과 관련된 상황을 설정하는 노출시나리오를 구성하고 대상화학유해물질의 인체 유입 노출경로별 노출알고리즘의 작성을 통한 내부 용량을 산출하는 정량적 평가를 주 내용으로 구성하였다. 위해도 결정은 건강위해성평가의 최종단계로 발암성 건강위해성 평가를 통한 초과발암위해도를 비발암성 건강위해성 평가를 통한 위해도 지수를 산출하여 제시함으로써 화학사고 유해화학물질 노출에 의한 주민의 건강 수준을 평가하고 나아가 위해관리를 위한 유해화학물질 저감 관리 목표치를 설정하여 제시하는 것을 주요 내용으로 구성하였다.

5. 화학사고 특성을 고려한 노출시간에 따른 급성 및 만성 건강위해성 평가 방법 개발

화학사고의 경우 사고 발생 시 환경매체 중으로 고농도의 유해화학물질이 배출되어지고 시간이 지남에 따라 확산, 희석 및 반응에 의한 화학물질의 농도 감소 및 소멸이 이루어지는 특징을 가지고 있다. 이와 같은 화학사고의 특성을 고려하여 건강위해성평가 역시 화학사고 발생 시의 고농도 노출에 의한 급성 건강위해성평가 방법과 사고비상대책 이후 잔류하는 저 농도의 유해화학물질의 장기간 누적 노출에 의한 만성 건강위해성평가 방법의 개발이 이루어져야 할 것으로 사료된다. 화학사고 유해화학물질의 노출에 대해 본 연구진에서 제안하고 있는 건강위해성을 평가하는 방법은 크게 발암성 건강위해성 평가와 비발암성 건강위해성 평가로 구분할 수 있다. 이중 발암의 경우 만성질환의 대표적 질환으로 유해화학물질의 장기 누적 노출에 의한 평가가 이루어져야 할 것이다. 그러나 비발암성 건강위해성 평가는 역치와 누적노출량의 비교를 통해 질환 발현 가능성을 검토하는 평가 방법으로 궁극적으로 유해화학물질의 노출 시간별 독성 특성 즉, 단기, 급성 및 만성적 노출시간에 따른 질환 발현 가능 독성 농도(역치)를 활용한 평가의 수행이 가능할 것으로 판단된다.

국내 식품의약품안전처는 위해분석 용어 해설집(2011)에서 기간에 따른 독성분류를 급성독성(acute toxicity), 아급성독성(subacute toxicity), 아만성독성(subchronic toxicity) 및 만성독성(chronic toxicity)로 구분하여 제시하고 있

다. 급성독성은 1회 투여(노출) 또는 단기간(하루 종일 - 2주간 정도)의 여러 차례의 투여로 인해 단기간에 발생하는 독성으로 아급성독성은 비교적 단기간(보통 1개월 - 3개월 정도)의 연속 또는 반복 투여로 발생하는 독성으로 아만성독성은 비교적 단기간(보통 1개월-4개월 정도)의 연속 또는 반복 투여로 발생하는 독성으로 만성독성은 만성노출(365일 이상) 기간의 연속 또는 반복 투여로 인해 발생하는 독성으로 정의하고 있다. 또한 노출기간에 따른 노출분류를 급성노출(acute exposure), 아급성/아만성노출(subacute/subchronic exposure) 및 만성노출(chronic exposure)로 구분하여 제시하고 있다. 급성노출은 심각한 생물학적 위해를 유발하거나 사망에 이를 수도 있는 독성물질에 대한 단회 노출 또는 24시간 이내 노출로 아급성/아만성노출은 실험동물(설치류)의 일생 가운데 약 10%, 일반적으로 3개월 정도의 기간에 여러 차례 발생하거나 또는 연속되는 노출로 만성노출은 동물 또는 사람의 일생 가운데 상당한 기간 또는 장기간에 걸친 여러 차례의 노출로 정의하고 있다.

이에 본 연구진은 화학사고 유해오염물질 건강위해성평가 방법 개발에 있어 노출시간 즉 독성노출에서 제시하는 노출기간을 중심으로 화학사고 유해오염물질에 대한 건강위해성평가 방법을 세분화하여 개발하였다. 노출기간에 따른 화학사고 유해오염물질 건강위해성평가 방법은 급성 건강위해성평가, 아급성/아만성 건강위해성 평가 및 만성 건강위해성 평가로 구분한 3개의 건강위해성 평가 방법을 도출하였다(Table 5). 급성 건강위해성 평가 방법(acute Health Risk Assessment, aHRA)은 화학사고 발생 시부터 24시간 내 유해화학물질의 노출로 인한 건강위해도를 평가하는 것을 목적으로 하며, 평가방법은 개발된 비발암성 건강위해성 평가 방법을 활용하여 위해도 지수를 산출 한다. 위해도 지수 산출에 사용되는 독성값은 급성독성값인 acuteNOEL, acuteRfD 등의 24시간 이내 노출에 의한 급성독성값을 활용한다. 아급성 및 아만성 건강위해성 평가 방법(subacute/subchronic Health risk Assessment, sub-a/sub-bHRA)은 화학사고 발생이후 사고비상대책 등 화학사고 처리 이후 즉, 유해화학물질에 대한 저감 활동 이후부터 화학사고 발생 1년 이내의 기간 동안 유해화학물질의 노출로 인한 건강위해도를 평가하는 것을 목적으로 하며, 평가방법은 개발된 비발암성 건강위해성 평가 방법을 활용하여 위해도 지수를 산출하는 것으로 한다. 위해도 지수 산출에 사용되는 독성값은 평가 노출기간에

Table 5. Purpose and contents of acute and chronic health risk assessment method according to exposure time

Health risk assessment by exposure time	Assessment Purpose	Assessment Methods	Assessment contents
Acute health risk assessment (aHRA)	Assessment of health risk by exposure to hazardous chemicals within 24 hours from the occurrence of a chemical accident	· Non-carcinogenicity health risk assessment method	· Use acute toxicity values (aNOEL, aRfD etc) · Risk Index(The ratio of exposure dose to acute toxicity value) calculation
Subacute/subchronic health risk assessment (sub-a/sub-cHRA)	Assessment of the possibility of the occurrence of health hazard by exposure to hazardous chemical substances within 1 year after the accident	· Non-carcinogenicity health risk assessment method	· Use subacute / sub-chronic toxicity values(subacute NOEL, subacute RfD, subchronic NOEL, subchronic RfD etc) · Risk Index(The ratio of exposure to subacute / sub-chronic toxicity value) calculation
Chronic health risk assessment (cHRA)	Assessment of the possibility of health hazard due to long-term exposure of harmful chemical substances for more than one year after the chemical accident	· Non-carcinogenicity health risk assessment method · Carcinogenicity health risk assessment method	· Use chronic toxicity values (cNOEL, cRfD, cNOAEL) · Risk Index(The ratio of exposure to chronic toxicity) calculation · Use carcinogenic potential force (CPF) · Calculate excess risk by multiplying cumulative exposure to carcinogenic potential force

부합되는 subacuteNOEL, subacuteRfD, subchronicNOEL, subchronicRfD 등의 아급성/아만성 독성값을 활용한다. 만성건강위해성 평가(chronic Health Risk Assessment, cHRA)는 화학사고 발생 1년 이상의 장기간 지속적인 유해화학물질의 노출로 인한 건강위해도를 평가하는 것을 목적으로 평가기법은 개발된 발암성 건강위해성 평가 방법이나 비발암성평가 방법을 활용하며, 물질의 질병 발현 특성을 고려하여 적합한 방법을 선택한다. 비발암성평가에서 위해도 지수의 산출에 활용되는 독성값은 chronicNOEL, chronicRfD 등의 만성 독성값을 활용하며, 발암성평가에서는 발암잠재력을 활용하여 초과발암위해도를 산출한다.

IV. 결 론

최근 마스크 등을 통해 화학사고로 인한 인명 및 재산상의 피해발생에 관한 내용이 보고된 이후 국민들의 화학사고에 대한 관심 및 막연한 불안감이 증대되고 있으며, 또한 화학사고 시 방출된 유해화학물질의 노출에 의한 주변 생활지역 거주자들의 건강영향 및 생태계 피해 방지 및 복원에 대한 국민의 요구가 증대되고 있다. 이에 환경부에서는 화학사고 대응 환경기술개발사업의 일환으로 ‘화학사고 후 인체영향평가기술 개발’에 관한 연구를 2017년부터 총 5차년에 걸쳐

추진 중에 있다. 본 연구는 이 연구의 일환으로 화학사고 사고비상대책이후 유해화학물질의 장기간 노출에 의한 건강영향 평가 및 위해성평가 기반 복원전략 수립을 위한 건강위해성평가 방법을 개발하여 제시함으로써 궁극적으로 본 연구의 모체연구인 ‘화학사고 후 인체영향평가기술 개발’ 연구의 성공적 수행을 위한 연구 기반을 구축하고자 수행되었다.

화학사고 후 인체영향을 평가하는데 있어 평가 내용의 적합성 및 국내 관련 연구자와 정책결정자들의 활용성 등이 고려된 건강위해성평가방법의 개발을 위해 국내에 적용되어지고 있는 건강위해성평가 방법들의 종류와 적용 학문분야 및 대상 오염물질 등을 선행적으로 고찰하였다. 이의 고찰을 위해 국내 건강위해성평가에 관한 연구의 도입이 1980년대 중반임을 고려하여 1980년대 이후 국내 관련 학술지에 보고된 건강위해성평가 관련 연구들의 정보를 수집하여 데이터 베이스를 구축하였으며, 이 구축된 데이터베이스를 활용하여 국내 활용성 및 적용 가능성을 고려한 화학사고 유해화학물질 건강위해성평가방법의 체계를 구축하였다. 또한 질병발현 이론과 건강위해성평가 방법의 이론의 고찰 및 화학사고 유해화학물질의 물리화학적 특성 등의 다각적 측면을 고려하여 화학사고 후 인체영향평가기술에 적합한 건강위해성평가 방법을 개발하여 제시하였다. 본 연구를 통해 개발된 건강

위해성평가방법 체계를 요약하여 제시하면 다음과 같다. 첫째, 국내 관계 연구자 및 정책결정자의 활용성을 고려하여 미국의 NRC/NAS에서 권장하고 있는 건강위해성평가방법을 기초로 하였다. 둘째, 질병발현 이론을 기초로 하여 발암성 및 비발암 발현 이론으로 구분하여 비유전독성 발암물질을 제외한 모든 발암물질을 대상으로 한 발암성 건강위해성평가방법과 비유전독성 발암물질을 포함한 비발암물질을 대상으로 한 비발암성 건강위해성평가방법으로 이분화된 건강위해성평가방법을 개발하였다. 셋째, 화학물질 노출에 의한 건강위해 수준의 평가에 관한 이론적 고찰을 통해 개발된 이분화된 건강위해성평가방법별로 평가방법의 구체적 내용을 4단계(유해성 확인, 용량-반응 평가, 노출 평가 및 위험도 결정)로 구분하여 개발하였으며, 최종적으로 화학사고 유해화학물질의 사고비상대책 이후 생활지역에서의 물리화학적 거동특성을 고려하여 급성, 아급성/아만성 및 만성으로 구분된 건강위해성평가방법론을 개발하였다.

본 연구는 2017년 초부터 전체 5차년의 계획으로 수행되어지고 있는 ‘화학사고 후 인체영향평가기술 개발’ 연구의 성공적 수행을 위한 연구 기반 구축을 목적으로 연구 초기에 화학사고 사고비상대책 이후 유해화학물질 노출에 기인한 건강영향을 평가하기 위한 수학적 건강위해성평가방법을 개발하는 것을 목적으로 문헌고찰을 통해 수행되어진 연구이다. 추후 화학사고 주변 생활지역 거주자들의 건강영향 자료(건강검진, 상병 자료 등)와 본 연구를 통해 개발된 건강위해성평가 방법의 수행 결과 자료와의 비교를 통한 건강위해성평가 방법 세부 4단계 내용의 고도화 및 구체화를 통해 개발된 평가방법의 활용 가능성의 증대가 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 화학사고 대응 환경기술개발사업에서 지원받았으며 이에 감사드립니다.(과제번호 : 2017001970002)

References

Chae H, Kim HK, Kim S, Pyo H, Hong J. Analysis and risk assessment of formaldehyde in water purification plant in

- Korea. *Aanl Sci Technol* 2009; 22(5):386-394
- Choi BW, Jung JH, Choi WJ, Jeon CJ, Shon BH. Distribution characteristics of ambient heavy metals based on the emission sources and their carcinogenic risk assessment in Ulsan, Korea. *J Environ Health Sci* 2006;32(5):522-531
- Choi H, Park SK, Lee BN, Kim M. Risk assessment of lead and cadmium through mushrooms. *KOREAN J FOOD SCI TECHNOL* 2012;44(6):666-672
- Choi IW, Lee JS, Lim DG, Ryu HR, Kim TH et al. A study characteristic on indoor air quality and health risk assessment in medical facility. *J Korean Soc Indoor Environ* 2013;10(2):115-128
- Choi JY, Kim K. Distribution and potential human risk assessment of trace metals in benthic fish collected from the offshore of Busan, Korea. *Journal of J Korean Soc Environ Eng* 2015;37(6):349-356
- Choi JH, Woo HI, Jeong YJ, Noh HH, Kyung KS et al. Risk assessment of the exposure to Rotenone in Lettuce and Cucumber. *Korean J Pestic Sci* 2013;17(4):302-306
- Choi JY, Yang DB, Hong GH, Chung CS, Kim KR et al. Potential human risk assessment of PCBs and OCPs in edible fish collected from the offshore of Busan. *J Korean Soc Environ Eng* 2012;34(12):810-820
- Choi SN, Lee HM, Yoon EK, Suh KW, Kim HJ et al. A cancer risk assessment of Di(2-ethylhexyl)-phthalate- application of MOE(Margin of Exposure) approach. *J Toxicol Pub Health* 2002;18(1):99-106
- Chun KS, Kim SB, Ahn SR, Park YS, Park CH. Chemical accident response information systems improvement risk assessment research. *Korean Journal of Hazardous Materials* 2013;1(1):69-74
- Chung Y, Hwang MS, Yang GY, Jo S. Health risk assessment of lead exposure through multi-pathways in Korea. *EHT* 1999;14(4):203-216
- Chung Y, Shin DC, Yang JY, Park YS, Kim JS. Health risk assessment of disinfection by-products by chlorination in tap water ingestion. *EHT* 1997;12(2):31-41
- Han S, Lee J, Kim H, Seo K. Prior research and case study on overseas assessment models for developing risk assessment model on domestic customer products. *Journal of Applied Reliability* 2015;15(3):207-215
- Heo EH, Jang BK, Park HG, Won JS, Ryu JW et al. Concentration of airborne asbestos fiber in indoor and outdoor environment of a slate roofing house, and health risk assessment. *J Odor Indoor Environ* 2017;16(1):80-90
- Heo J, Lee BJ, Jung DY, Kim SS, Shai J et al. Risk assessment and influence factors of VOCs (Volatile Organic Compounds) exposures associated with the use of the cleaning bleach by university cleaning workers. *J Odor Indoor Environ* 2016;15(4):296-302

- Hong JE, Pyo H, Park SJ. The analysis of 1,4-dioxane in water sample by gas chromatograph/mass spectrometer and risk assessment. *EHT* 2003;18(3):219-224
- Hong S, Jeong M, Park KH, You AS, Park YK et al. (2010) The preliminary operator risk assessment of high toxicological pesticides in Korea. *Korean J Pestic Sci* 2010;14(2):116-122
- Hong S, You AS, Jeong M, Park KH, Park JY et al. (2013) Risk assessment of pesticide operator using modified UK-POEM in Korean orchard. *Korean J Pestic Sci* 2013;17(1):50-59
- Jang MR, Moon HK, Kim TR, Yuk DH, Kim JH et al. Dietary risk assessment for pesticide residues of vegetables in Seoul, Korea. *Korean J Nutr* 2010;43(4):404-412
- Jeong GJ, Son BY, Lee IJ, Ahn CH, Kim JI et al. Distribution and risk assessment of Bisphenol-A in tap water from rehabilitated indoor water service pipe. *J Korean Soc Environ Eng* 2016;38(7):371-376
- Jo SJ, Shin DC, Chung Y, Lee DH, Breyse PN. The development of exposure assessment tools for risk assessment of volatile organic compounds. *Korean J Environ Toxicol* 2002;17(2):147-160
- Jung SW, Yang WH, Son BS. Health risk assessment by potential exposure of NO₂ and VOCs in apartments. *J Environ Health Sci* 2007;33(4):242-249
- Kim EH, Hwang YJ, Kim SH, Lee HR, Hong SS et al. Operator exposure to Indoxacarb wettable powder and water dispersible granule during mixing/loading and risk assessment. *Korean J Pestic Sci* 2012;16(4):343-349
- Kim HY, Lim YW, Lee CS, Kim TH, Park JH et al. Health risk assessment of VOCs in the activities space of children : Focused on elementary-schools and academies. *J Korean Soc Indoor Environ* 2011;8(4):263-274
- Kim HY, Lim YW, Lee CS, Park JH, Hong SH et al. Health risk assessment of trace elements exposure through multi-pathways in children's facilities : focused on elementary-schools and academies. *J Korean Soc Indoor Environ* 2012;9(3):213-228
- Kim HY. Working environment and risk assessment of gasoline in workplace. *KIGAS* 2014;18(4):1-7
- Kim HY, Yang JY, Park CS, Park JH, Sohn JR et al. Health risk assessment of VOCs and HCHO in the public facilities under uncontrolled Korean-IAQ regulation : focused on hotel, fitness center, gosiwon, reading-room and video-room. *J Korean Soc Indoor Environ* 2011;8(3):157-169
- Kim HY, Yang JY, Park CS, Shin DC, Sohn JY et al. Health risk assessment of VOCs in the public facilities under uncontrolled Korean-IAQ regulation. *J Korean Soc Indoor Environ* 2007;4(1):42-52
- Kim HY, Yang JY, Lee CS, Park JH, Shin DC et al. Health risk assessment for aldehydes exposure associated with elementary-schools and academies. *J Korean Soc Indoor Environ* 2012;9(1):19-31
- Kim HY, Yang JY, Lee YJ, Lee CS, Lee GW et al. Health risk assessment of phthalate exposure in children's facilities : focused on elementary-schools and institutes. *J Korean Soc Indoor Environ* 2012;9(4):367-381
- Kim MH, Yang WH. Risk assessment and air pollution by the open burning of agricultural waste and residues. *J Environ Health Sci* 2007;33(1):30-35
- Kim MK, Bae HK, Kim SH, Song SH, Koo HJ et al. Initial risk assessment of benzoyl peroxide in environment. *J* 2004;19(1):33-40
- Kim MS, Choi K, Kim Y, Yi J. Risk assessment for health and environmental hazards of nanomaterials. *Clean Technolgy* 2007;13(3):161-172
- Kim WI, Cho YA, Kim MS, Lee JY, Kang YY et al. Study on the methods of risk assessment of human exposure by using of PVC flooring. *Aanl Sci Technol* 2014;27(5):261-268
- Kim YS, Park HS, Lee YJ, Kim YS, Yang JY et al. Excess cancer risk and its damage cost due to indoor air pollution in Seoul. *J Korean Soc Indoor Environ* 2005;1(2):196-209
- Kim YS, Roh YM, Lee CM, Jang BK. Health risk assessment of exposure to indoor air pollutants in house. *J Korean Soc Indoor Environ* 2006;3(2):180-198
- Kong JS, Kim Y. Indoor radon risk assessment by applying measurement concentrations and exposure times for military facilities and underground shopping malls near subway stations. *J Environ Health Sci* 2016;42(5):345-351
- Lee BM. Application of biomarkers for the assessment of carcinogen exposure and cancer risk. *Environmental Mutagens and Carcinogens* 1999;19(2):95-101
- Lee BM. Safety and risk assessment of 3 - Monochloro - 1,2 - Propanediol(3-MCPD). *J Toxicol Pub Health* 2002;18(1):1-11
- Lee CM, Kim YS. Analysis of research trend for indoor air pollutants and health risk assessment in public facilities. *J Korean Soc Indoor Environ* 2004;1(1):39-60
- Lee DS, Lim YW. A study on air quality and risk assessment of total. *J Korea Society of Environmental Adminstration* 1997a;3:142-153
- Lee GH. Microbial risk assessment. *Korean Journal of Microbiology* 2001;37(2):101-108
- Lee JB, Shin JS, Jeong MH, Park YK, Im GJ et al. Operator exposure risk assessment of Benzimidazole fungicides on Korean agricultural condition. *Korean J Pestic Sci* 2005;9(4):347-353
- Lee JB, Shin JS, Lee HD, Jeong M, You A et al. Risk assessment for estrogenic effect of the suspected endocrine disrupting pesticides. *Korean J Pestic Sci* 2004;8(2):95-102
- Lee JY, Kim JH, Kim HK, Choi JH, Kim SK et al. Monitoring and risk assessment of 1,4-Dioxane in Nakdong river. *Aanl Sci*

- Technol, 2008;21(5):383-391
- Lee MG, Lee SR. (1997b) Reduction factors and risk assessment of organophosphorus pesticides in Korean foods. KOREAN J FOOD TECHNOL 1997b;29(2):240-248
- Lee WY, Jeon EM, Rho YK, Yoo SS, Yun JS et al. A study on health risk assessment of volatile organic compounds in child-care center. J Odor Indoor Environ 2014;13(4):297-305
- Lim YW, Yang JY, Jung JS, Lee YJ, Kim JY et al. Health and ecological risk assessment of PCBs-exposure by regulation guideline change. EHT 2008;23(1):53-62
- Lim YW, Yang JY, Kim HY, Lee YG, Kim YS et al. Health risk assessment in terms of VOCs at newly-built apartment house. J Korean Soc Indoor Environ 2006;3(2):211-223
- Lim TY, Lee SW, Park MJ, Lee SH, Kim SO. Comparative study on the human risk assessment of heavy metal contamination between two abandoned metal mines in Korea. J Korean Soc Environ Eng 2015;37(11):619-630
- MFDS (Ministry of Food and Drug Safety). Medical analysis term explanation Second Edition. 2011.
- MoE (Ministry of Environment). Exposure assessment guidelines. 2001.
- NRC (National Research Council) Risk assessment in the Federal Government : Management the process. National Academy Press, Washington; 1993.
- Park EJ, Kang M, You DE, Kim DS, Yu SD et al. Health risk assessment of heavy metals in fine particles collected in Seoul metropolitan area. Environmental Health and Toxicology 2005;20(2):179-186
- Park JS, Kim DS, Chung HW. Analysis of uncertainty and variability in environmental epidemiology and health risk assessment studies in Korea. Korean Journal of Environmental Health 2003;29(5):101-109
- Park MK, Choi JH, Park MK, Son BS. Health risk assessment for heavy metal exposure in the living environment. Journal of Odor and Indoor Environment 2016;15(4):392-400
- Pyo HS, Park SJ. Environmental analysis & human health risk assessment (I) - analysis & risk assessment of chlorinated disinfection by-products in drinking water -. Anal Sci Technol 2000;13(6):89-96
- RIVM (National Institute for Public Health and the Environment) Human risk assessment of single exposure in chemical incidents: Present situation and emerging chemical incident scenarios. RIVM Report 320300001; 2013.
- Ryu KY, Shim SL, Hwang IM, Jung MS, Jun SN et al. Arsenic speciation and risk assessment of Hijiki (Hizikia Fusiforme) by HPLC-ICP-MS. Korean J Food Sci & Tech 2009;41(1):1-6
- Seo JK, Kim TS, Jo AR, Kim PJ, Choi KH. Human Risk Assessment of Perchloroethylene Considering Multi-media Exposure. J Environ Health Sci 2014;40(5):397-406
- Shin DC, Lim YW, Park SE, Chung Y. Assessment of Health Risk Posed by Organic Substances of Suspended Particulate Matters in a Heavy Traffic Area of Seoul. J KAPRA 1996;12(5):567-576
- Shin DC, Chung Y, Kim JM, Lim YW. Carcinogenic risk assessment of heavy metals in suspended particulates of Seoul. J Korean Soc Atmos Environ 1994;10(2):105-115
- US EPA (United State Environmental Protection Agency). Guidelines for the health risk assessment of chemical mixtures. Federal Register 34014; 1986.
- US EPA (United State Environmental Protection Agency). Risk Assessment guidance for superfund(RAGS) : volume I, human health evaluation manual(HHEM). Office of emergency and remedial response, EPA/540/1-89-002; 1989.
- US EPA (United State Environmental Protection Agency). Volume I - General factors handbook, Exposure factors handbook, updated to 1989 Exposure factors handbook. National Center for Environmental Assessment, EPA/600/P-95/002Fa, Chapter I and V; 1997.
- US EPA (United State Environmental Protection Agency). Proposed guidelines for carcinogen risk assessment. Federal Register 1999;61(79):17960-18011
- Washburn, ST, Edelmann, KG. Development of risk-based remediation strategies. J hazard toxic radioact waste 1999;3(2):77-82
- Yang JY, Kim HY, Yang SH, Kim SD, Lee CS et al. Health risk assessment of trace elements exposure through multi pathways in children's facilities. J Korean Soc Indoor Environ 2011;8(1):20-38
- Yoon E, Yang HS, Park CH, Jo MS, Kim SB et al. Major policies and current status of Ministry of Environment(MoE) for the response to chemical accidents. Crisisonomy 2007;3(2):18-29
- Yoon HJ, Seo JK, Kim TS, Jo AR, Kim JG et al. Accumulation of microcystins in fish and evaluation of potential human health risks : A case study on a eutrophic reservoir in Korea. J Environ Health Sci 2016;42(1):10-18
- You AS, Hong SS, Lee JB, Lee SD, Ihm YB. Application of oral absorption in establishment of AOEL for pesticides and occupational risk assessment for farm worker. KJPS 2014;18(4):342-349
- You JS, Chung YJ. Case Analysis of the Harmful Chemical substances's Spill. Fire Sci Eng 2014;28(6):90-98