

Hydrogen Fluoride (HF) 누출 사고 시 피해 범위 예측 및 장외영향평가를 위한 모델링 활용 방법

김정환 · 정승호[†]

아주대학교 환경안전공학과
16499 경기 수원시 영통구 월드컵로 206
(2015년 7월 3일 접수, 2016년 3월 11일 수정본 접수, 2016년 3월 15일 채택)

Offsite Consequence Modeling for Evacuation Distances against Accidental Hydrogen Fluoride (HF) Release Scenarios

Jeonghwan Kim and Seungho Jung[†]

Department of Environmental and Safety Engineering, Ajou University, 206 Worldcup-ro, Yeongtong-gu, Suwon, Gyeonggi, 16499, Korea
(Received 3 July 2015; Received in revised form 11 March 2016; accepted 15 March 2016)

요 약

ALOHA, PHAST 등의 사고영향평가 프로그램들을 활용하여 전기·전자 등의 산업 분야에서 많이 쓰이며 인체에 유독한 HF 가 누출되는 사고의 발생 시 대피해야 하는 초기 이격거리에 대한 연구를 수행하였다. 다양한 공정조건과 상태로 저장되어 있는 HF의 사고시나리오를 간단하게 정의하기는 어렵지만 화학물질안전원의 지침대로 10분 내 총 저장량 누출을 최악의 시나리오, 결속된 배관의 일부 파열을 대안의 시나리오로 하여 비상상황을 가정하였다. 그로부터 사고모델링의 시작인 누출속도 산정을 한 후 보수적으로 확산모델링을 적용하여 밤과 낮의 대표적인 기상상태에 따라 일반적인 대피거리로 권고되는 ERPG-2 농도가 도달하는 끝점거리를 구하여 현장에서 신속하게 쓸 수 있는 간단한 그래프와 같은 형태로 제시하였다. 이는 유사시를 대비한 사전적인 성격의 그래프로 화학물질 누출사고 시 신속한 비상 대응계획을 수립하는 데 도움이 될 것이다.

Abstract – This study intends to provide initial evacuation distances for the public in case of accidental releases of hydrogen fluoride (HF). HF is a very toxic chemical that is widely used in the chemical, electrical, and electronics industries. Consequence modeling programs, such as ALOHA and PHAST, were used to help formulate a contingency plan in case of an HF leak. For the purpose of this study, the release of entire quantity of HF in 10 min is defined as a worst-case scenario and the release from a partial line rupture is used as an alternative case scenario as National Institute of Chemical Safety (NICS) guidelines. Once the discharge rates were calculated based on the scenarios, the ERPG-2 endpoint distances have been obtained for representative daytime and nighttime weather conditions. This paper presents graphs that can be used to enact swift evacuation orders and emergency response plans in the case of accidental releases of HF.

Key words: Offsite consequence modeling, ALOHA, PHAST, ERPG-2

1. 서 론

2012년 구미 불산 누출 사고, 2013년 전자사업장의 HF 누출 사고 등 잇따른 사고가 발생하면서 HF와 같은 사고대비물질에 대한 사회적 관심이 증가하였다. 엄밀하게 얘기해서 구미 불산 누출 사고는 액화된 불화수소 가스의 누출 사고이다[1-5]. 이 논문에서는 수용액인 불산과의 차별을 위해서 액화되어있거나 기체 상태인 불화수소를

총칭하여 HF로 표현하였다.

현재 우리나라에 등록되어있는 사고대비물질은 총 69종으로 다양한 규모의 사업체에서 사용되고 있다. 사고대비물질이란 급성독성·폭발성 등이 강하여 사고 발생의 가능성이 크거나 사고가 발생한 경우에 그 피해 규모가 클 것으로 우려되는 화학물질로써 사고 대비·대응계획이 필요하다고 인정되어 대통령령으로 정하는 것을 말한다[6]. 특히, 사고대비 물질 중 하나인 HF는 신체에 닿을 경우 신체의 수분과 수소 결합을 하면서, 땀속까지 침투하여 심하면 신체를 절단해야 하는 상황까지 이르게 할 수 있는 굉장히 유독한 물질이다[7]. 이처럼 독성이 강한 HF를 연간 10 ton 이상 취급하고 있는 우리나라의 등록된 사업장의 수는 약 70여 곳에 이르며, HF는 공정 과정, 탱크 컨테이너 이송과정 중 부주의, 배관 및 부품의 노후화

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: processsafety@ajou.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.

등 다양한 원인으로 사고가 발생하기 때문에 HF와 같은 독성물질을 취급하는 이러한 사업장은 무엇보다 누출 사고 시 확산에 따른 적절한 비상대응계획(ERPG : Emergency Response Planning Guidelines)을 수립하여야 한다[8].

이에 본 연구에서는 HF 누출로 인한 사고를 Case Study 하여 미국 환경보호청(EPA : Environmental Protection Agency)의 ALOHA (Areal Location of Hazardous Atmospheres), DNV GL PHAST v6.7 (Process Hazard Analysis Software Tools : Multicomponent option 포함) 프로그램을 사용하여 실제 사고와 거리 비교 및 사업장에서 유사 사고 시 쉽게 사용될 수 있는 예측 자료를 도출하였다. 다양한 공정조건과 액체, 기체 등 다른 상태로 저장된 HF의 사고 시나리오를 간단하게 정의하기는 어렵지만 10분 내 총 저장량이 누출되는 최악의 시나리오로 선정하였고 결속배관의 부분 파열을 대안의 시나리오로 선정하여 누출속도 계산을 하였다. 그 후, 확산모델링을 보수적으로 하여 밤과 낮의 대표적인 기상상태에 따라 일반적인 대피거리로 권고되는 ERPG-2 농도가 도달하는 끝점거리를 간단한 그래프와 같은 형태로 제시하였다. 한 편 구미 사고에서의 상황을 가정하여 본 방법을 적용하여 즉각 내릴 수 있었던 대피거리를 구해 보았다.

2. 방법론

2-1. 전체적인 모델링 방법

본 연구에서의 사고 모델링은 Fig. 1와 같이 일반적인 사고모델링의 3단계 과정 중 2단계까지만을 수행한다. 3단계 Effect model은 Probit 식을 적용하여 사람이 흡입시간과 농도에 따라 죽을 수 있는 확률을 계산하는 것으로 본 논문의 목표인 1차적인 대피거리를 도출하는 것과는 맞지 않는다. 1단계에서는 vessel이나 파이프라인에서 액화되어 있는 HF의 누출 속도를 먼저 최대한 정확하게 계산한다. 이 후 확산모델링 툴을 이용하여 어느 정해진 농도의 끝점 거리를 기상조건에 따라 계산하게 된다. 최악의 시나리오와 대안의 시나리오에 대한 누출률을 계산하여 최종적으로 ERPG-2 농도의 끝점거리를 구하는 것이다. 이는 Fig. 2에 자세히 나타내었다. 끝점 거리는 미국 EPA (Environmental Protection Agency)와 우리나라의 장외영향평가에서 이용되는 ERPG-2 농도를 기준으로 하였으며 HF의 ERPG-2 농도는 20 ppm이다[8].

ERPG-2 농도는 다음과 같이 정의된다.

· ERPG-2: 거의 모든 사람이 1시간 동안 노출되어도 보호조치 불능의 증상을 유발하거나 회복 불가능 또는 심각한 건강상의 영향이 나타나지 않는 공기 중의 최대 농도.

2-2. Modeling Software Tools

2-2-1. ALOHA

ALOHA는 화학물질로 인한 누출 사고 시 신속한 비상대응계획을 위한 미국 EPA에서 제공하는 범용프로그램이다. ALOHA는 실제 또는 잠재적인 화학물질의 자료에 대한 세부정보를 입력하고 다양한 유형의 위험에 대한 위험 지역(Threat Zone)을 계산한다. ALOHA에서는

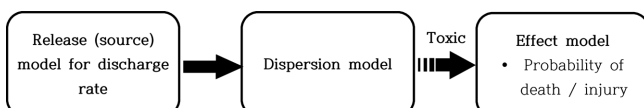


Fig. 1. Schematic diagram of consequence analysis procedure.

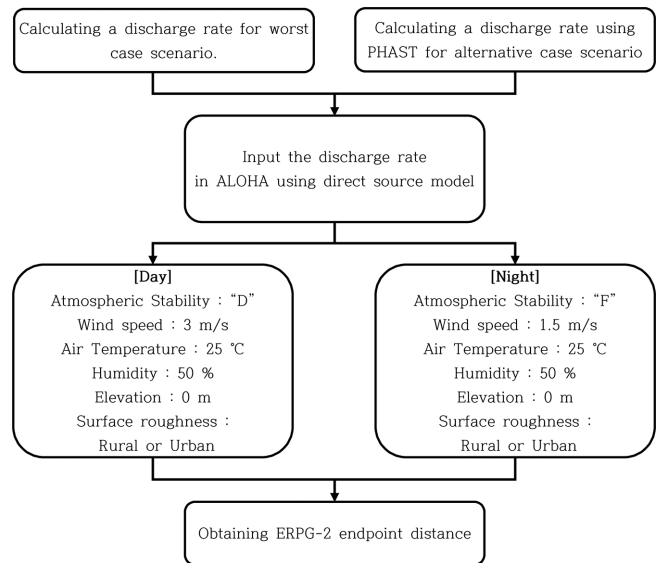


Fig. 2. Consequence modeling flowchart for ERPG-2 endpoint distance.

Toxic Gas Cloud, Flammable Gas Cloud, BLEVEs (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosions), Jet Fire, Pool fire 등 다양한 상황에 대하여 모델링 할 수 있다[9].

2-2-2. PHAST

PHAST는 공정 설계 및 운영의 모든 단계에 대한 포괄적인 위험 분석 모델링 프로그램이다. PHAST는 pool의 확산과 증발, 가연성 및 독성 효과 등을 포함하는 초기 누출부터 원거리 확산까지의 일련의 잠재적인 사고에 대한 위험성을 모델링 한다. PHAST는 누출, 배관 파열, 긴 배관 누출, 압력/비 압력 탱크 파열 등 다양한 시나리오를 시뮬레이션 할 수 있다. PHAST는 UDM (Unified Dispersion Model)이라는 통합 분산 모델을 사용하여 몇 가지 결과들을 계산할 수 있는데 i) 구름 이동 ii) 제트단계, 무거운 단계, 전이 단계 및 수동 확산 단계와 같은 다양한 단계를 통한 변화 iii) 관심 농도에서의 위험 거리 그리고 iv) 주어진 시간 동안의 구름의 footprint 등이 있다. 또한, PHAST 누출 및 확산 모델은 엑셀 인터페이스의 형태로 사용할 수 있기 때문에 입력 매개 변수와 출력 결과 등을 직접 제어하여 민감도 분석을 보다 쉽게 수행할 수 있다[10].

2-3. 시나리오 피해 범위 계산 방법

2-3-1. 최악의 시나리오 대피거리 계산 방법

최악의 시나리오 분석을 위해서 물질의 누출량, 누출률을 계산한다. 누출량은 단일 용기에 저장되는 물질의 최대량으로 산정한다. 누출률은 HF와 같이 대기 온도에서 가스인 물질을 가스 상태로 저장/취급하거나 압력을 가하여 액체 상태로 저장/취급하는 경우 산정한 누출량 즉 저장된 총량이 10분 동안에 전량방출 확산하는 것으로 가정한다. 따라서 다음과 같이 계산한다[11].

$$R_R = \frac{Q_R}{10} \quad (1)$$

R_R : 누출률(kg/min)

Q_R : 누출량 또는 저장 총량(kg)

본 연구에서는 최악의 시나리오에 대한 피해 범위를 계산하기 위하여 식 (1)과 같이 산정된 누출률을 ALOHA의 direct source model 에 입력하여 위험 범위를 계산하였다. ALOHA에는 총 4가지의 source modeling 방법이 있는데 그중 가장 사용이 간편한 direct source model 방식을 이용하고 누출 지속시간은 10분으로 가정하였다. PHAST에서 탱크의 저장량을 입력하고 600s fixed duration model을 이용하여 위험 범위를 산출해 내었다. 이 결과는 ALOHA의 결과 값과 거의 유사한 결과이므로 ALOHA의 결과를 이용하여 차트를 만들었다. 여기서 mitigation system 은 고려하지 않았다.

2-3-2. 대안의 시나리오 대피거리 계산 방법

대안의 시나리오의 누출률 계산을 위해 다음과 같이 가정하였다.

- 25 °C에서 saturated liquid 상태로 저장(기체보다 액화된 상태로 누출 발생 시 누출률이 훨씬 큼)

- 일반적인 탱크 높이 5 m 로부터의 head pressure 고려

- HF 탱크 연결배관의 부분 파열

- 60분간 누출 지속하는 것으로 가정

대안의 시나리오에서 누출률을 계산할 때 누출률 계산 모듈이 따로 있고 보다 정확한 계산을 한다고 알려진 PHAST를 이용하였다[12]. PHAST에서는 누출률 계산과 동시에 확산모델링을 하여 끝점거리를 알 수 있지만 누출공의 크기와 온도, 압력 조건에 따라 2-phase 누출모델이 되어 pool 이 생성되기도 한다. 보수적인 접근을 위하여 이 논문에서는 누출 즉시 전량 기화하여 확산이 되는 것을 가정하였으므로 누출률만을 PHAST 를 이용하여 계산하고 그 누출률을 ALOHA의 direct source 모델에 입력하여 끝점거리를 구하였다. 한 편 누출 지속 시간은 최악의 경우(10분)와는 달리 60분간 누출되는 것으로 가정하였다.

3. 결 과

최악의 시나리오와 대안의 시나리오를 상정하여 간단한 그래프들을 만들어 보았다. 화학물질안전원에서 제시하고 있는 최악의 사고 시나리오의 경우 풍속은 1.5 m/s, 대기안정도는 매우 안정한 “F”로 하였고 대안의 사고 시나리오의 경우 풍속은 3 m/s, 대기안정도는 중립인 “D”로 하였다. HF는 공기 중의 수분과 반응하므로 실제 도달거리 이보다 더 작을 수 있으며, ALOHA는 10 km가 넘는 거리들에 대하여 구현을 하지 못하는 한계가 있다[11].

3-1. 최악의 시나리오(10분 전량 방출)의 ERPG-2 끝점거리

우리나라의 HF 저장 vessel의 크기는 각 사업장마다 상이하다. 따라서, 다양한 크기의 vessel 안에 물질이 저장/보관되어 있고 10분 동안 전량이 방출된다는 가정으로 모델링 프로그램에 변수 값을 입력하였다. Fig. 3과 Fig. 4는 각각 Urban 지형과 Rural 지형의 낮과 밤에 대한 결과 값을 표시한 그래프들이다.

3-2. 대안의 시나리오

본 연구에서의 HF 대안의 시나리오는 화학물질안전원의 누출공 크기 산정 가이드라인에 따라 용기에 결속된 배관의 20%를 누출공 크기로 산정하였다. 예를 들어 Table 1과 같이 2 inch 라인의 누출공 크기는 0.4 inch가 되고 이 값과 표준 가정들을 이용하여 PHAST 에서 누출률을 계산하였다. 최악의 시나리오 때와 마찬가지로 이 논문에

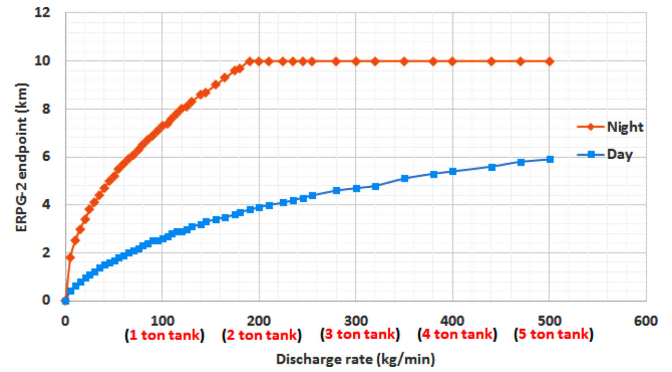


Fig. 3. Endpoint distance for worst case scenario (rural) during Day & Night.

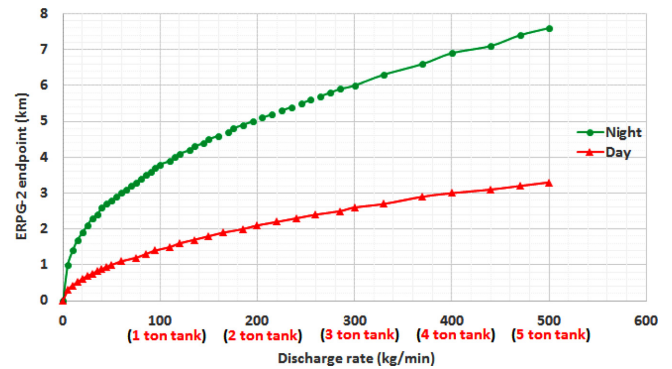


Fig. 4. Endpoint distance for worst case scenario (urban) during Day & Night.

Table 1. Discharge rate for alternative case scenarios

| Pipe diameter (inch) | Leak hole size using 20% rule (inch) | Discharge rate (kg/s) |
|----------------------|--------------------------------------|-----------------------|
| 1 | 0.2 | 0.12 |
| 2 | 0.4 | 0.48 |
| 3 | 0.6 | 1.09 |
| 4 | 0.8 | 1.94 |
| 5 | 1 | 3.02 |

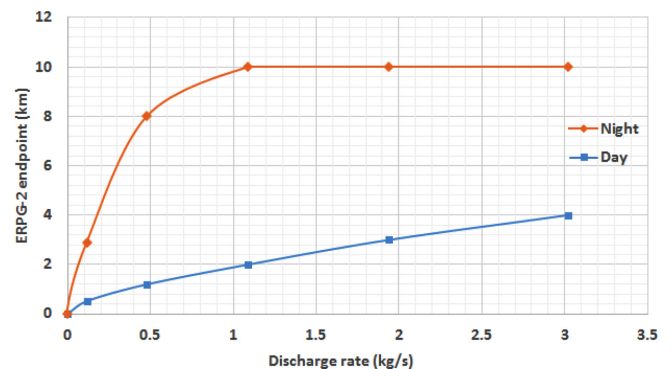


Fig. 5. Endpoint distance for alternative case scenario (rural) during Day & Night.

서는 누출 즉시 전량 기화하여 확산이 되는 것을 가정하였으므로 누출률만을 PHAST를 이용하여 계산하고 그 누출률을 ALOHA의 direct source 모델(기체만을 상정)에 입력하여 끝점거리를 구하였다. Urban 지형조건의 낮과 밤, 그리고 Rural 지형조건의 낮과 밤의

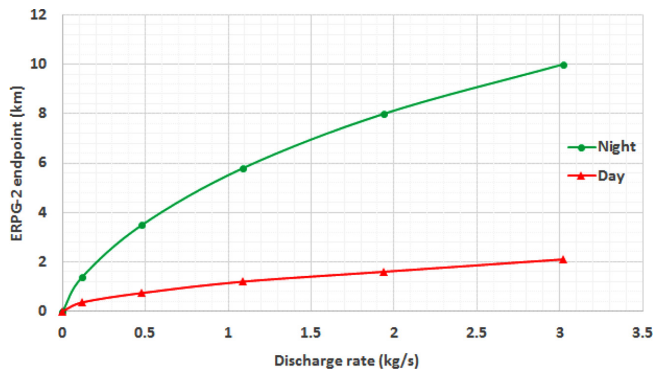


Fig. 6. Endpoint distance for alternative case scenario (rural) during Day & Night.

ERP-G2 끝점거리에 대한 그래프를 Fig. 5과 Fig. 6에 각각 나타내었다.

4. 고 찰

2012년 구미에서 낮에 발생한 HF 누출 사고로 인한 피해지역의 지역적 범위는 당시의 기상조건, 즉각적인 대기오염 모니터링 등에 대한 조사가 적절히 수행되지 않았기 때문에 문헌마다 차이가 있다. 그 중 누출물에 대한 정보가 설명 되어있는 사고 보고서에는 20 ton의 vessel에서 10 ton의 HF가 3시간 동안 누출된 것으로 보고되어 있다[4]. 이는 0.93 kg/s의 누출률에 해당하는 것으로 Fig. 5(rural, day)에서 끝점거리를 읽어보면 낮에는 1.8 km 까지 확산됨을 알 수 있다. 하지만 이런 누출률을 모르는 상태로 구미에서의 사고 전에 20 ton HF 탱크의 대피거리를 위한 ERP-G2 끝점거리들을 구해보면 먼저 최악의 시나리오로 저장량이 10분간 전부 방출되었음을 가정하였을 때 누출률은 2,000 kg/min이 되어 끝점거리는 rural, day 조건에서 10 km를 초과한다. 한 편 대안의 시나리오로 결속배관이었던 2 inch 라인의 20% 누출공 크기에서의 누출률은 0.48 kg/s 이고 끝점거리는 rural, day 조건에서 1.2 km가 되었을 것이다. 실제 사고 상황에서 저장된 총량 외 아무 사전 정보가 없었다고 가정하여 최악의 시나리오를 상정하면 10 km가 대피거리였다고 할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 HF 가 누출될 경우 우리나라의 장외영향평가 기준을 토대로 최악의 시나리오, 대안의 시나리오를 ALOHA, PHAST 두 가지 모델링 프로그램을 활용하여 대피거리의 기준이 되는 ERP-G2 농도의 끝점 거리들을 구한 간단한 그래프들을 만들어 보았다[13]. 이 그래프들은 urban 지형과 rural 지형, 낮의 대표적인 기상상황과 밤의 대표적인 기상상황, 누출률이 작을 때와 클 때의 상황들에 다양하게 이용이 가능하다. 누출공의 크기를 정확하게 알면 훨씬 정확한 누출률과 대피 거리를 구할 수 있지만 실제로 누출이 발생하는 비상 상황 시에 누출공의 크기를 정확하게 파악하는 것은 매우 어렵다. 따라서 이 논문에서 표준으로 제시한 상황과 방법을 이용하여 만든 그래프를 이용하면 별도의 자세한 정보 없이도 빠르게 초기 대피거리 산정이 가능하다. 예를 들어 rural 지역에 있는 HF 10 ton 탱크(연결된 최대 배관 크기 2 inch)를 가진 사업장에서 낮에 사고가 발생한다면 대피거리는 탱크에서 직접 누출이 일어나는 최악의 시나리오에서 10 km, 연결된 배관 일부분이 파손된 대안의 시나리오에서

1.8 km 이다. 이처럼 각각의 사업장에서 HF의 최대저장량과 연결된 최대 배관의 크기만 미리 파악하고 있다면 이 논문에서 제시한 그래프들을 이용하여 유사 시 바로 주변 지역의 피해 범위 및 영향을 예측하고 사고 대응 기관이 신속하게 대응할 수 있는 자료로서 도움이 될 것이다.

나아가 현재 지정되어 있는 사고대비물질 69종의 잠재적인 누출에 따른 사전적인 대비 성격의 시뮬레이션 계산을 하여 간단한 그래프들을 만들어 놓는 것도 비상대응계획 수립에 도움이 될 것이다.

감 사

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구임(NRF-2015R1C1A1A02037491).

References

- Park, K. S., Kim, T. O., Kim, J. Y., Yoo, B. H. and Park, D. J., "A Study on Consequence Analysis of Hydrofluoric Acid Release Accident in Gumi Industrial Area," *Korean Journal of Hazardous Materials.*, **1**(1), 15-21(2013).
- Lee, Y. G., Gu, S. G., Choi, I. J., Kim, W., Sun, O. N. and Kim, S. B., "Study on the Distribution of Fluorides in Plants and the Estimation of Ambient Concentration of Hydrogen Fluoride Around the Area of the Accidental Release of Hydrogen Fluoride in Gumi," *J. Environ. Health Sci.*, **39**(4), 346-353(2013).
- Ko, J. S., "Study on the Consequence Effect Analysis & Process Hazard Review at Gas Release from Hydrogen Fluoride Storage Tank," *Journal of the Korea Society of Disaster Information.*, **9**(4), 449-461(2013).
- Joo, H. S., Lee, Y. S., Lim, O. J. and Yoo, J. M., "A Study on the Improvement of Environmental Impact Assessment of Industrial Complexes Based on Risk Assessment of Chemical Leakage Accidents," *Business Report, Korea Environment Institute.*, 2439-2709 (2013).
- Kim, J. H., Yang, J. M., Yong, J. W., Ko, B. S., Yoo, B. T. and Ko, J. W., "Development of Hazardous Work Mapping Methodology Based on Layout of Workplace Handling The Accident Preparedness Substances," *Korean Chem. Eng. Res.*, **52**(6), 736-742(2014).
- Nics, "Key info Guide for Accident Preparedness Substances", NICS(2014).
- <https://ko.wikipedia.org/wiki/>.
- AIHA Guideline Foundation, "2013 ERP-G/WEEL Handbook," AIHA(2013).
- <http://www.epa.gov/cameo/aloha-software>.
- <https://www.dnvgl.com/services/hazard-analysis-phast-1675>.
- NICS, "Technical Guideline on the Selection of the Accident Scenarios," NICS(2014).
- Hanna, S., Dharmavaram, S., Zhang, J., Sykes, I., Witlox, H., Khajehnajafi, S. and Koslan, K., "Comparison of Six Widely-used Dense Gas Dispersion Models for Three Recent Chlorine Railcar Accidents," *Process Safety Progress*, **27**(3), 248-259(2008).
- Kim, K. H., Shin, D. I. and Yoon, E. S., "Risk Analysis Using Automatically Synthesized Robust Accident Scenarios and Consequence Assessment for Chemical Processes: Process Partition and Consequence Analysis Approach," *Korean J. Chem. Eng.*, **20**(6), 992-999(2003).