

CFD 시뮬레이션을 활용한 화학물질 누출사고 분석에 관한 연구

안수빈 · 장창봉¹ · 이경수* · 권혜옥²

국립재난안전연구원 재난원인조사실, ¹제이씨비솔루션 주식회사, ²울산화학재난합동방재센터 환경팀

A Study on the Analysis of Chemical Leakage Accidents Using CFD Simulation

Su-Bin An · Chang-Bong Jang¹ · Kyung-Su Lee* · Hye-Ok Kwon²

Disaster Scientific Investigation Division, National Disaster Management Research Institute

¹JCB Solution Co., Ltd

²Environment Team, Joint Inter-Agency Center for Chemical Emergency Preparedness of Ulsan

ABSTRACT

Objectives: Chemical accidents cause extensive human and environmental damage. Therefore, it is important to prepare measures to prevent their recurrence and minimize future damage through accident investigation. To this end, it is necessary to identify the accident occurrence process and analyze the extent of damage. In this study, the development process and damage range of actual chemical leakage accidents were analyzed using CFD.

Methods: For application to actual chemical leakage accidents using FLACS codes specialized for chemical dispersion simulation among CFD codes, release rate calculation and 3D geometry were created, and scenarios for simulation were derived.

Results: The development process of the accident and the dispersion behavior of materials were analyzed considering the influencing factors at the time of the accident. In addition, to confirm the validity of the results, we compared the results of the actual damage impact investigation and the simulation analysis results. As a result, both showed similar damage impact ranges.

Conclusions: The FLACS code allows the detailed analysis of the simulated dispersion process and concentration of substances similar to real ones. Therefore, it is judged that the analysis method using CFD simulation can be usefully applied as a chemical accident investigation technique.

Key words: accident analysis, CFD, chemical accident, consequence analysis, 3D modeling

I. 서 론


대규모 산업단지에서 대량의 화학물질을 취급하거나 많은 종류의 화학물질을 사용할수록 공정과 설비가 복잡하고 적절한 안전관리가 이루어지지 않을 경우 누출, 화재·폭발과 같은 화학사고 발생 위험성은 증가하게 된다(NDMI, 2022). 특히, 시설·설비의 노후화 및 산업단지의 수가 증가함에 따라 화학물질로 인한 잠재적 위험에 대한 우려가 크다. 한국산업단지공단에 의하면

2020년 기준으로 국내 전체 산업단지는 1,238개, 20년 이상 경과한 노후 단지가 총 454개로 전체 산업단지의 36.7%이며, 2025년에는 526개(42.5%)로 증가할 예정이다. 실제로, 화학물질의 취급량이나 사업장이 많은 지역일수록 화학사고의 발생빈도가 높게 나타나고 있다(NDMI, 2022).

화학물질안전원 화학물질종합정보시스템에서 제공하고 있는 화학물질 사고현황 통계정보에 의하면, 2014년 1월 8일부터 2022년 11월 18일까지 8년 11개월

*Corresponding author: Kyung-Su Lee, Tel: 052-928-8430, E-mail: 39lks@korea.kr
National Disaster Management Research Institute, 365, Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan, 44538
Received: July 14, 2023, Revised: August 16, 2023, Accepted: September 22, 2023

 Su-Bin An <http://orcid.org/0000-0003-2901-6791>

 Hye-Ok Kwon <http://orcid.org/0000-0003-2139-5630>

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.

동안 735건의 화학사고가 발생한 것으로 나타났으며, 유형별 발생빈도는 누출 79.9%(587건), 폭발 8.2%(60건), 화재 6.4%(47건), 기타 5.6%(41건) 순으로 누출로 발생하는 화학사고가 가장 많았다(NICS, 2023). 이와 같은 누출사고는 화학물질 자체의 확산성 및 유해성으로 화재·폭발에 비해 피해범위가 광범위하여 인명·환경피해가 커질 수 있으며, 사고 대응 후에도 누출된 화학물질의 완전한 제거가 어려워 사고로 인한 피해영향이 장기적으로 나타날 수 있다(KEI, 2013). 따라서, 누출로 인한 화학사고의 발생 과정에 대한 메커니즘을 분석하여 누출이 발생하게 된 직·간접 요인들 간의 인과관계 규명 등 근본 원인을 파악하는 것은 화학사고의 재발 방지 및 피해 최소화 대책 마련을 위해서 매우 중요하다.

이러한 화학사고 분야에서 정밀분석을 위한 다양한 수치모델이 활용되고 있는데, HEGADIS(HEavy GAs DISpersion)와 DFIFT 모델은 계산시간이 많이 필요하지 않고 사용하기 쉽기 때문에 널리 사용되고 있다(Woodward & Pitbaldo, 2010). 그러나 이러한 모델은 장애물이 없는 자유구역 분산(free-field dispersion)으로 한정되며, 일반적으로 사업장의 실제상황을 재현하기에는 한계가 있다(Dasgotra et al, 2018). 이에, 최근 화학사고 정밀분석을 위해서 지형정보를 반영하여 보다 정확한 위험예측과 결과값 제공이 가능한 전산유체역학(computational fluid dynamics, CFD) 시뮬레이션이 많이 활용되고 있다. CFD는 수치적 방법을 활용하여 복잡한 유체 흐름 등의 문제를 분석하는 유체역학의 한 분야로 광범위한 조건과 복잡한 형상 및 장애물을 고려한 시뮬레이션이 가능하나, 시뮬레이션의 정확성은 격자의 세분화 정도에 의존하게 되어, 격자를 세분화할수록 더 정확한 값을 얻을 수 있으나 많은 계산시간이 소요되므로 최적의 격자 크기를 설정하는 것이 필요하고, 시뮬레이션 결과의 신뢰성을 확보하기 위해서는 많은 실험적 검증이 필요하다(Shamsuddin et al., 2023).

이에, Hansen et al.(2010)은 LNG 누출로 인한 증기의 분산 모의를 위해 FLACS를 적용하였으며, 33개의 실험 세트 검증을 통해 모델의 적용성을 검토하였다. Moen et al.(2019)은 CFD 프로그램의 Standard $k-\epsilon$, RNG(Re-Normalization Group) $k-\epsilon$ 모델의 누출 농도를 재현하는 능력, 계산시간, 수치적 안정성을 평가하였으며, 두 모델 모두 복잡한 형상 및 조밀한

(dense-phase) 가스 누출에도 정확한 결과를 보여주는 것을 확인하였다.

이러한 CFD 프로그램은 활용 분야별, 제조사별, 구동 원리별 그 종류가 매우 다양하며, 그중에서 FLACS code가 폭발 및 분산 모델링에 최적화되고 독성화학물질의 확산 예측에 가장 범용적으로 활용되고 있다(Lee et al., 2022). 국내 연구 중에서 OSHRI(2014)는 화학공장의 고위험 공정인 잔사유수첨탈공정을 대상으로 실제공정과 운전조건, 설비 및 장치의 형태와 밀집도, 대기상태, 바람의 영향 등 여러 복합적 변수를 고려하여 FEA(finite element analysis)와 CFD 시뮬레이션을 수행하였으며, 화학안전 분야에서 CFD 및 3D Scanning 기술의 도입 및 활용 가능성을 제시하였다. Min(2017)은 서울지역의 도면을 활용하여 geometry 생성과 바람의 영향을 고려하여 CFD 시뮬레이션을 수행하였으며 도심지역에서 누출된 독성가스가 빌딩 밀집지역과 open space를 지나갈 때 속도와 시간의 차이점을 분석하였다. 국외에서는 Middha & Hansen (2008)이 FLACS를 이용하여 수소와 같은 반응성 가스로 인한 DDT(deflagration to detonation transition) 시나리오를 모의하였으며, 폭연이 폭발로 전환되는 상황에서 폭발압력, 전이시간 및 화염속도 측면에서 실험결과와 비교하여 사업장에서 DDT 가능성을 예측하기 위한 기준을 개발하였다.

이와 같이 기존 연구는 위험성 분석 시 공정의 특성만을 반영한 가상학적 예측 및 FLACS의 적용성 평가와 같은 연구가 주로 수행되어 왔으나, 화학사고가 발생한 실제 사례의 공정과 운전조건, 설비 및 장치의 형태와 밀집도 등 여러 복합적 변수를 고려하여 사고발생 메커니즘과 원인을 규명한 연구가 거의 없는 실정이다. 이에 본 연구에서는 실제 화학사고를 바탕으로 누출량, 사고설비·장치, 장애물, 지형 및 대기 등을 고려한 CFD 시뮬레이션 분석을 통해 실제 사고결과와 비교하여 화학사고 조사에 있어 시뮬레이션 기법의 적용성에 대해 확인하고자 하였다.

이와 같이 기존 연구는 위험성 분석 시 공정의 특성만을 반영한 가상학적 예측 및 FLACS의 적용성 평가와 같은 연구가 주로 수행되어 왔으나, 화학사고가 발생한 실제 사례의 공정과 운전조건, 설비 및 장치의 형태와 밀집도 등 여러 복합적 변수를 고려하여 사고발생 메커니즘과 원인을 규명한 연구가 거의 없는 실정이다. 이에 본 연구에서는 실제 화학사고를 바탕으로 누출량,

사고설비·장치, 장애물, 지형 및 대기 등을 고려한 CFD 시뮬레이션 분석을 통해 실제 사고결과와 비교하여 화학사고 조사에 있어 시뮬레이션 기법의 적용성에 대해 확인하고자 하였다.

II. 대상 사고사례

본 연구에서는 실제 발생한 화학사고의 사례적용을 통해 사고발생 메커니즘을 재현하고 피해 확대 등의 원인을 규명하고자, 2021년 7월경 울산지역에서 발생한 염산 누출사고를 사고사례로 선정하였다. 해당사고는 옥외 염산 저장탱크 하단의 배관 플랜지 연결부 파손으로 인해 5,500 l의 염산이 누출되어 방류벽에 임시 저장된 상태에서 염산 풀(pool)의 기화현상으로 염산 증기(염화수소)가 대기 중으로 확산되어 인근 주민 11명이 병원진료를 받고 주변 환경에 피해가 발생한 사고이다.

사고발생 공정은 염산 저장시설로, 100 m³ 원통형 저장탱크 3기 중 하나의 저장탱크에서 발생하였다. 탱크는 SS400 일반구조용 압연강재로 제작된 재질로, 염산을 저장하는 저장탱크로써 탱크로리를 이용하여 염산을 출하하는 공정으로 연결되어있다. 사고물질인 염산은 무기 비산화성 산류로, 환경부에서 지정한 유독물질 및 사고대비물질이며, NFPA(National Fire Protection Association) 위험성 코드에서도 건강위험성 3으로 구분되는 매우 유해한 물질이다. 이러한 염산(염화수소)의 물리·화학적 특성은 Table 1과 같다.

2015년 구미 불화수소 누출사고 이후, 화학사고와 관련된 많은 관련법과 제도가 정비되어 사고발생으로 인한 환경영향 및 인명피해의 발생은 대부분 사업장 내에서 수습되는 경우가 대부분이다(운반·운송차량으로 인한 사고 제외). 그러나 해당 사고는 사고물질의 특성으로 인해, 누출이 발생한 후 빠르게 기화되면서 주변 지역의 환경과 인근 주거지역의 주민에게 영향을 주었으므로, 사고 전개의 메커니즘과 피해 확대 원인을 정확하게 분석하여 재발방지를 위한 많은 고민이 필요한

사고이다. 따라서, 이처럼 인명·환경피해를 발생시킨 사고에 대해 시뮬레이션 기법을 적용하여 사고물질의 확산 과정과 피해 확대 요인을 과학적으로 분석하고자 한다.

III. 모델링 절차 및 방법

FLACS는 가연성 가스에 의한 화재·폭발과 독성물질 누출에 의한 확산 거동 및 피해결과를 공학적으로 정밀하게 분석할 수 있는 CFD code로, 3차원 공간 내 구조물과 지형, 난류, 대기상태 및 바람의 영향 등 여러 변수가 고려되어 실제와 매우 유사하게 분석된다(Middha & Hansen, 2009; NDMI, 2018).

전체적인 CFD 모델링 절차는 Figure 1과 같으며, 이를 위해서는 사용자가 누출량, 대기조건과 같은 별도의 경계 조건과 초기 조건 등의 입력정보를 주어야 하고 3차원 공간 기반 분석을 위해서는 기하학적 구조 작성이 필요하다. 이때, 적합한 경계·초기 조건을 설정하지 않으면 실제와 부합하지 않는 결과가 나타날 수 있으며, 배관, 설비를 비롯한 주변 지형과 같은 다양한 구조물과 장애물이 포함되는 대규모 화학공장의 시뮬레이션은 이러한 형상을 정확하게 표현하는 것이 어려우므로 각 모델링 단계별 전문성을 확보하고 입력정보들의 신뢰성을 확보하는 것이 중요하다. FLACS는 이러한 사용자 입력정보를 바탕으로 수치해석 모델을 통해 계산을 수행하며, 해석모델과 시뮬레이션을 위한 상세한 모델링 방법은 다음과 같다.

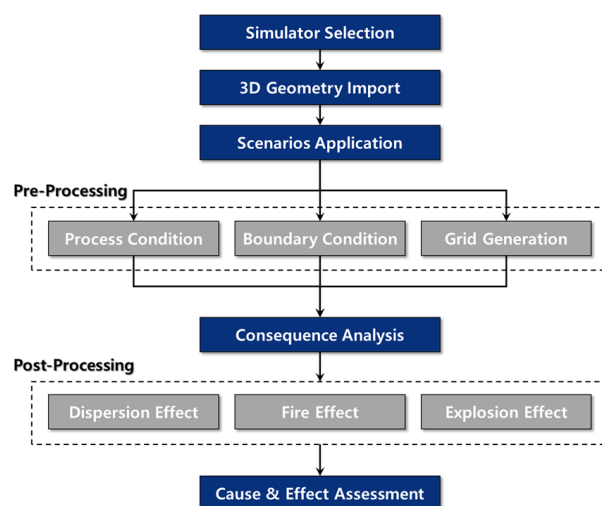


Figure 1. Procedure for CFD simulation

Table 1. Physicochemical properties of HCl

Properties	Value
CAS No.	7647-01-0
Molecular weight (g)	36.46
Boiling Point (°C)	-85
Vapor Pressure (mmHg)	35.424 (25°C)
Vapor density	1.268

1. 수치해석 모델

FLACS는 RANS(Reynolds averaged navier stokes) 방식의 CFD 해석기법으로 3차원의 공간에 데카르트격자(cartesian grid)를 생성하고 유한체적법을 사용하여 Navier-Stokes 방정식 풀이를 통해 결과를 도출하는 논리구조를 갖고 있으며, 난류 계산은 k-ε 모델을 활용한다. 압축성 유체 거동에 대한 주요 지배방정식은 conservation of mass(3-1), navier-stokes momentum (3-2), transport equation for enthalpy(3-3), fuel mass fraction(3-4)로서 각 유체 및 공간특성이 주어지면 이 방정식을 통해 계산한다(Qiao & Zhang, 2010; Gexcon, 2019).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\beta_v \rho) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \rho u_j) = \frac{\dot{m}}{V} \quad (3-1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\beta_v \rho_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \rho u_j u_i) \\ = -\beta_v \frac{\partial}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \sigma_{ij}) + F_{o,i} + \beta_v F_{w,i} + \beta_v (\rho - \rho_0) g_i \end{aligned} \quad (3-2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\beta_v \rho h) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \rho u_j h) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \frac{\mu_{eff}}{\sigma_h} \frac{\partial h}{\partial x_j}) + \beta_v \frac{Dp}{Dt} + \frac{Q}{V} \end{aligned} \quad (3-3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\beta_v \rho Y_{fuel}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \rho u_j Y_{fuel}) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \frac{\mu_{eff}}{\sigma_h} \frac{\partial Y_{fuel}}{\partial x_j}) + R_{fuel} \end{aligned} \quad (3-4)$$

난류 거동을 해석하기 위해 k-ε 모델(3-5)을 활용하고 있으며 난류 운동 에너지의 소실비율을 위한 ε은 식 (3-6)으로 계산이 이루어진다(Gexcon, 2019).

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\beta_v \rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \rho u_j k) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j}) + \beta_v P_k - \beta_v \rho \varepsilon \end{aligned} \quad (3-5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\beta_v \rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \rho u_j \varepsilon) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}) + \beta_v P_\varepsilon - C_{2\varepsilon} \beta_v \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (3-6)$$

2. 누출량 산정

FLACS는 누출량 등의 누출정보를 사용자 입력정보로 구분하고 있어 별도의 계산이 필요하며, 누출정보는 시뮬레이션에서 가장 중요한 입력정보이기 때문에 과하거나 적게 추산할 경우 실제 사고결과와 다르게 나타날 수 있다. 일반적인 누출형태 및 공정 유체특성에 따른 누출량 산정 절차는 Figure 2와 같으며, 누출량을 산정함에 있어 적용되는 이론과 수치 계산방법은 주로 TNO의 Yellow book과 CCPS의 가이드라인을 따른다.

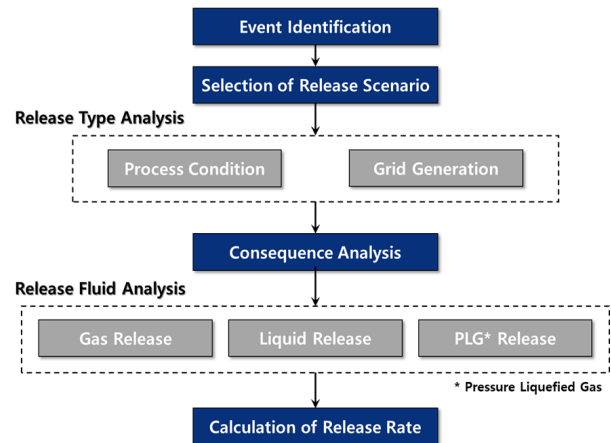


Figure 2. Procedure for calculating of release rate

본 연구의 대상사고는 배관에서의 액체 누출에 따른 산정 절차를 적용할 수 있으며, 먼저 마찰계수 산정 (3-7) 후 층류 또는 난류에 따라 해당 누출량 산정식 (3-8, 9)을 통해 계산한다(TNO, 2005; CCPS, 2000).

$$Re \sqrt{f} = \frac{D \times \rho_L}{\mu_L} \times \sqrt{\frac{D}{2 \times L_p} \left[\frac{g_c \times (P_1 - P_a)}{\rho_L} + g \times h \right]} \quad (3-7)$$

- 층류(Laminar flow)인 경우($Re \sqrt{f} \leq 180$)

$$Q = \frac{A \times \rho_L \times (Re \sqrt{f}) \times \sqrt{\frac{D}{2 \times L_p} \left[\frac{g_c \times (P_1 - P_a)}{\rho_L} + g \times h \right]}}{16} \quad (3-8)$$

- 난류(Turbulent flow)인 경우($Re \sqrt{f} \geq 525$)

$$\begin{aligned} Q = & -4 \times A \times \rho_L \\ & \times \log_{10} \left[\frac{1}{3.7} \times \left(\frac{\epsilon}{D} \right) + \frac{1.255}{Re \sqrt{f}} \right] \sqrt{\frac{D}{2 \times L_p} \left[\frac{g_c \times (P_1 - P_a)}{\rho_L} + g \times h \right]} \end{aligned} \quad (3-9)$$

이때 액체 누출일 경우에는 풀(pool)을 형성하게 되고, 이 풀의 표면적을 통해 증발이 발생된다. 방류벽과 같은 확산방지 조치가 있을 경우에는 그 내부에서 풀을 형성하므로 증발되는 표면적은 확산방지 조치의 내부면적이 되고, 없을 경우에는 풀은 시간에 따라 퍼져나가게 된다. 이 경우에는 풀의 두께가 1 cm 깊이로 형성되는 것으로 가정하여 표면적을 계산하거나 표면 거칠기에 따른 최소 두께를 적용하여 계산할 수 있다(TNO, 2005; KOSHA, 2020).

본 연구의 대상사고는 저장탱크 하부 플랜지를 통해 염산이 약 5,500 l가 누출되었고, 순수한 염산의 누출량은 약 2,285 kg으로 분석되었다. 이때, 방류벽 내에 누출되어 액체 풀의 면적은 방류벽 면적으로 적용하였다.

3. 3D 역설계

3차원 공간 기반의 시뮬레이션을 통해 실제 사고와 유사하게 분석하기 위해서는 사고의 실제 형상을 시뮬레이션에 반영하는 것이 중요하며, 이를 위해서는 실제와 동일한 3D 형상을 만들고 FLACS에 적용할 수 있도록 별도의 후처리 과정을 거쳐야 한다. 이와 같은 기 구축된 플랜트의 설비나 장치를 스캔하여 3D 형상으

로 모델링하는 작업을 3D 역설계라고 하며(OSHRI, 2014), 역설계 모델링을 위한 전체 프로세스는 Figure 3과 같다.

3D 역설계를 위해, 먼저 LiDAR 스캐너를 이용하여 사고현장을 스캐닝하였으며, point cloud 및 AutoCAD 소프트웨어를 활용하여 데이터 후처리 과정을 진행하였다. 또한 누출사고 특성상 피해범위가 광범위하므로 수치지도를 활용하여 등고선 모델링을 통해 사고공정을 비롯한 인근 산림지역까지 모델링을 실시하였다. 이러한 3D 모델링 데이터는 FLACS에서 호환될 수 있도록 최적화 작업을 통해 Figure 4와 같이 적용하였다.

4. 시뮬레이션 시나리오 및 해석조건

본 연구의 대상인 염산 누출사고는 저장탱크 하부에 연결된 플랜지 부위의 파손으로 인해 약 5,500 l의 염산이 누출된 후 일정시간 방류벽에 임시 저장된 상태에서 풀의 표면으로부터 급격한 기화현상으로 염산가스(염화수소)가 대기로 확산되는 시나리오를 적용하여 시뮬레이션을 진행하였으며, 염산 풀의 기화 유효시간(effective duration)은 보수적으로 1시간 동안 발생된 것으로 가정하여 진행하였다.

시뮬레이션을 위해 FLACS에서 요구되는 입력값들은

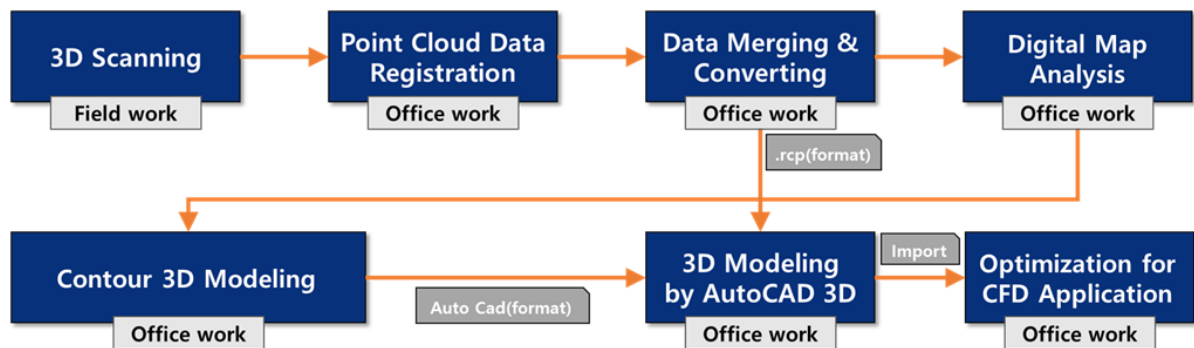


Figure 3. Process of 3D reverse engineering

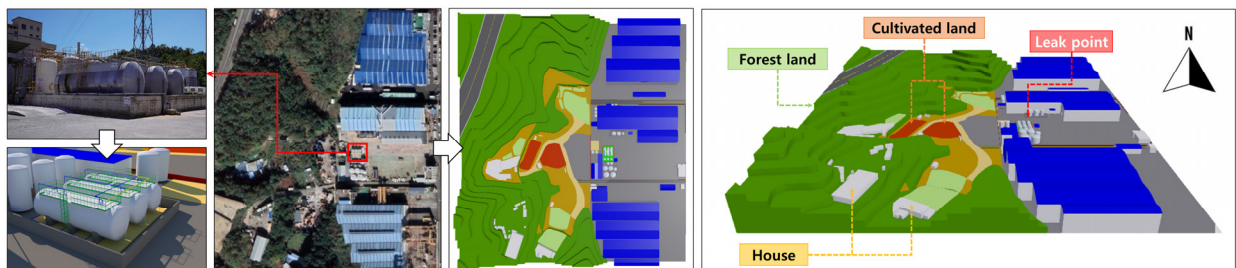


Figure 4. 3D modeling of accident scene and importing to FLACS

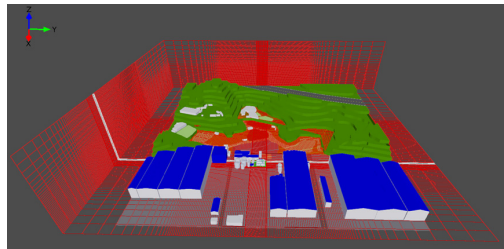
Table 2. Input data for FLACS analysis

Input Items	Value
Simulation and output control	Maximum time: 3600 sec
	CFLC: 20
	CFLV: 1
	NPLOT: -1 DTPLOT: 10
Boundary conditions	XHI: Wind
	XLO: Nozzle
	YHI: Wind
	YLO: Nozzle
	ZHI: Wind ZLO: Nozzle
Initial conditions	Characteristic velocity: 1.6 m/s
	Temperature: 25°C
	Pasquill class: D
	Ground roughness condition: Rural

Table 2와 같으며, 대기조건은 기상청 데이터를 이용하였다. 다만, 풍향의 경우에는 주변에 위치한 산업단지와 산 등의 지형구조에 따라 기상청 데이터와 상이한 부분이 있을 수 있기 때문에, 사고 당시 CCTV에서 확인된 가스 확산 방향과 피해가 발생한 형상을 기반으로 90°를 적용하였다.

격자는 시뮬레이션 결과에 가장 큰 영향을 미치는 요소 중 하나로, FLACS에서는 독성물질의 확산영역에 대해 격자를 균일하고 조밀하게 생성하도록 권장하고 있다(Gexcon, 2019). 이러한 권장 격자 생성 방법에 따라 3D 형상을 고려한 시뮬레이션 영역은 X축 400 m, Y축 450 m, Z축 100 m로 총 체적은 18,000,000 m³이며, 이 공간에 생성된 격자를 균일화(smooth)와 확장(stretch) 기능을 적용하여 Table 3과 같이 최종적으로 608,580개의 셀을 생성하였다.

Table 3. Grid information for FLACS analysis

Grid Items	Simulation Volume Sizes			Configuration of grid generation for 3D geometry
	X	Y	Z	
Simulation Length (m)	400	450	100	
No. of Control Volumes	126	138	35	
Min. Control Volumes, Sizes (m)	0.5	0.5	2.0	
Max. Control Volumes, Sizes (m)	25.36	24.90	9.74	
Total No. of Control Volumes	608,580			

IV. 분석 결과 및 고찰

염산은 비가연성이지만 강한 독성물질로써 누출된 액체 풀의 급격한 기화현상에 의해 가스 형태로 확산됨에 따라, 독성에 의한 피해가 대규모로 발생하는 것이 특징이다. 특히, 염산(염화수소)의 물리·화학적 특성을 통해서도 알 수 있듯이 공기보다 무거운 증기밀도로, 대기 확산 시 무거운 가스 거동으로 가벼운 가스에 비해 인체 및 환경피해가 클 수 있다. 실제로, 해당 사고로 인해 인근 마을 주민 11명이 병원 진료를 받았고, 약 6,864 m² 면적의 사업장에 인접한 농작물·식생 일부에서 변색, 잎 마름, 갈변 현상 등이 나타났으며, 환경시료 채취·분석 결과 염소이온이 검출되어 염산 누출로 인한 피해로 확인되었다(NICS, 2021; Lim et al., 2022). 이에 본 연구에서는 물질 누출에 따른 피해 기준에 대한 농도 분포 시뮬레이션을 통해 피해 발생 과정을 분석하였으며, 실제 피해 영향조사 결과와 시뮬레이션 결과를 다음과 같이 비교·분석하였다.

1. 인체 피해 가능 농도의 확산 거동 및 결과 분석

화학물질의 급성누출에 따른 피해기준은 대표적으로 미국환경청의 AEGL(acute exposure guideline level)을 적용할 수 있으며, 이 기준은 화학물질 누출로 인한 일반 시민의 노출에 대한 가이드라인으로 공기 중의 농도에 따라 AEGL-1, AEGL-2 및 AEGL-3으로 구분한다(Yoon, 2016). AEGL-1은 일반 사람들이 상당한 불편함, 자극 등을 경험할 수 있고 노출 중단 시 가역적으로 회복되는 농도, AEGL-2는 대피 능력 상실 또는 비가역적이거나 장기적인 건강영향을 입을 농도, AEGL-3은 생명의 위협 또는 사망이 발생할 수 있는 농도로 정의되며(NRC, 2004), 염화수소에 대한 AEGL 기준농도는 Table

Table 4. AEGL levels of hydrogen chloride

Exposure time Concentration	10 min	30 min	60 min	4 hr	8 hr
AEGL-1 (ppm)	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
AEGL-2 (ppm)	100	43	22	11	11
AEGL-3 (ppm)	620	210	100	26	26

4와 같다. 실제 사고조사 결과, 인명피해는 경미한 정도 (인근 주민들의 단순 진료)로 조사되어, 본 연구에서는 AEGL-1에 해당하는 1.8 ppm을 적용하였다.

시뮬레이션 분석 결과, Figure 5와 같이 바람의 영향을 받아 가스가 대기 중으로 확산되지만 지표면 부근에 낮게 깔리는 거동을 보이며, 평평하고 낮은 지형을 따라 빠르게 확산되는 경향을 보이고 있다. 시간대별로 보면, 270초 시점부터 사고지점과 가장 인근에 위치한 주거시설이 피해범위에 포함되기 시작하여 1,840초 시점까지 약 26분 동안 노출될 수 있음을 확인할 수 있다. 이때, 사고지점 남쪽에 위치한 건물과 낮은 지형 등의 영향으로 시간이 지날수록 증기운이 남쪽으로 확산되어, 염화수소가 상대적으로 오랜 시간 동안 확산 및 증기운이 체류하고 있음을 확인할 수 있다. 따라서, 실제 해당 위치 인근에 거주 중인 주민이 실내 창문 등 개구부를 열어 놓았을 경우, 독성에 의한 피해를 받을 수 있을 것으로 판단된다. 사업장 내부에도 일부 지역에 증기운이 형성됨을 확인할 수 있으나, 사고발생 시간이 23시 50분경으로 근무자가 현장에 없었고, 당시 풍향을 따라 인접 산림지역으로 확산이 진행됨에 따라 사업장 내 근로자의 인명피해가 발생하지 않은 것으로 판단된다.

2. 환경 피해 가능 농도의 확산 거동 및 결과 분석

염화수소 노출에 따른 환경피해 영향에 대한 연구에

따르면, 염화수소는 심각한 산림의 손상을 유발하는 것으로 알려져 있지만 고농도로 존재할 경우에만 발생하는데 특히, 우리나라 산지에 많은 수종인 낙엽송의 경우 5 - 20 ppm의 염화수소 농도에 48시간 이내 노출된 경우 괴사할 수 있으며, 더 높은 농도인 1,000 - 2,000 ppm의 농도에서는 다른 수종의 부작용도 관찰되었음을 제시하였다(Sergejchik & Nikolajchuk, 2008). 이러한 연구 결과를 바탕으로, 본 연구에서는 환경피해 기준을 20 ppm으로 적용하였다.

그 결과, Figure 6과 같이 염화수소의 농도가 경제조건과 주변 형상의 영향에 의해 확산 거동이 시간별로 변하는 것을 확인할 수 있으며, 420초 시점에서 최대 확산범위를 보였다. 인체피해 확산 분포 결과와 비교하면, 기준농도가 더 높음에 따라 상대적으로 주변 지역에 작은 폭의 피해 범위가 형성되었음을 확인할 수 있다. 또한, 풍향을 따라 주로 낮은 지형에 위치한 농지와 그 주변 산림지역 일부에 집중적으로 증기운이 형성됨을 확인할 수 있다. 앞에서 제시한 피해 기준농도인 20 ppm은 노출 시간이 48시간 이내로 시뮬레이션 상의 시간과 차이가 있으나, 이는 사고가 대기가 안정적인 야간에 발생하였고 주변이 산림으로 둘러싸여 있는 조건에서 낮은 풍속과 공기보다 무거운 염화수소의 증기운이 농지·산림지역에 정체되어 장시간 영향을 미친 것으로 분석된다.

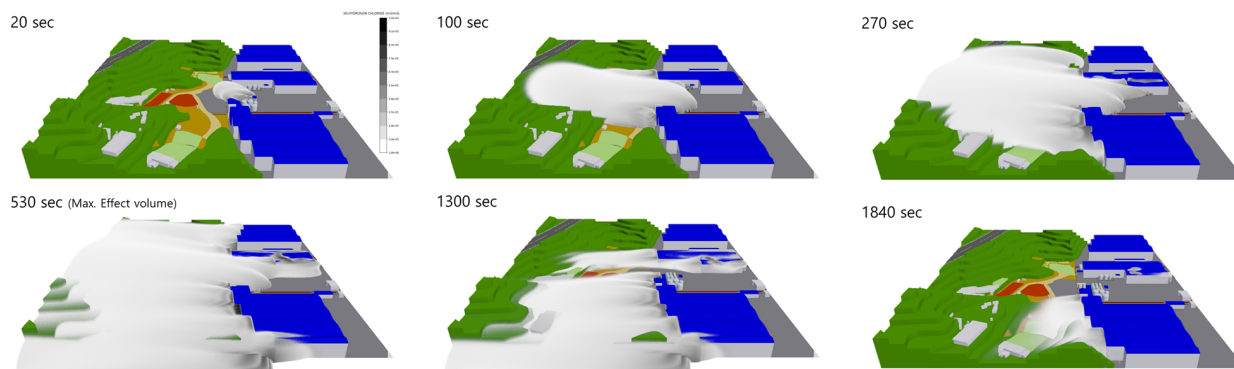


Figure 5. Results of dispersion simulation based on human damage

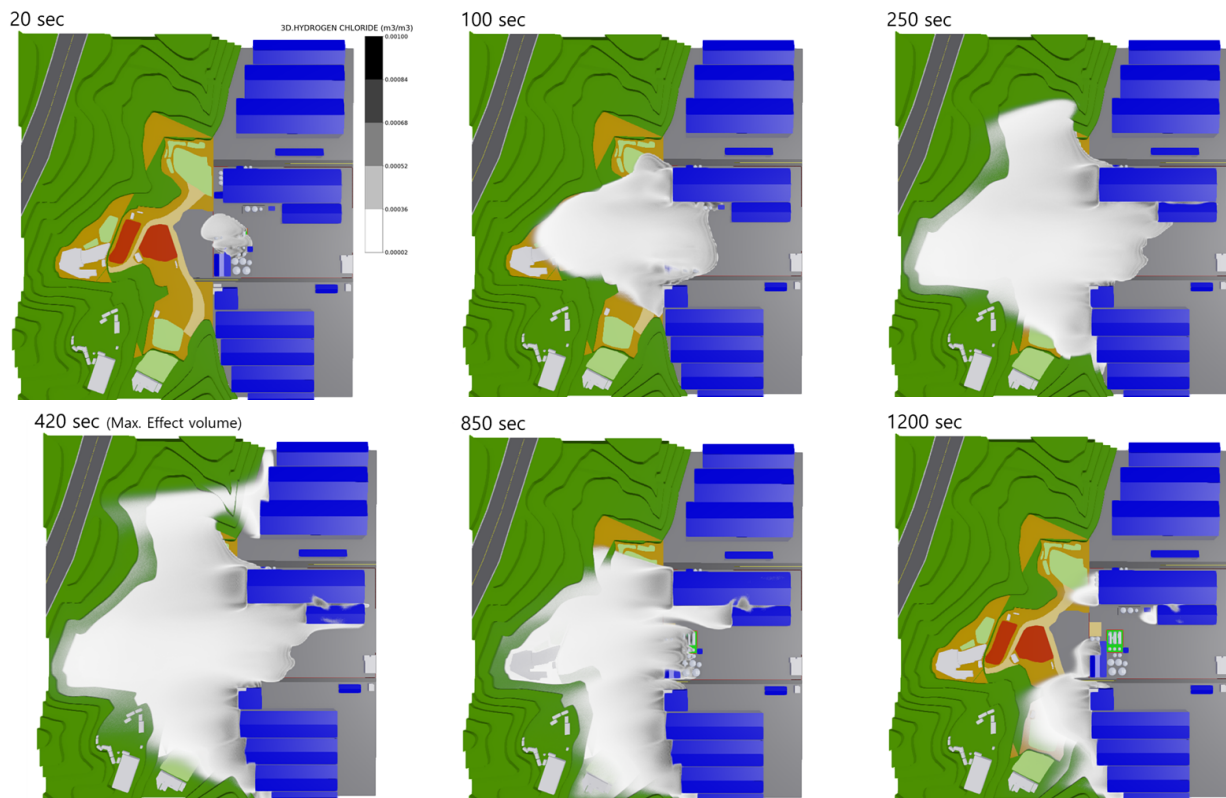


Figure 6. Results of dispersion simulation based on environmental damage

V. 결 론

본 연구에서는 화학사고 조사·분석에 있어서 CFD 시뮬레이션 기법의 적용성을 확인하기 위하여, 실제 화학물질 누출사고를 대상으로 고려할 수 있는 모든 변수를 적용하여 실제 사고와 가장 유사한 사고의 전개 과정을 과학적으로 분석하였다. 이를 위해, 누출량, 대기 조건 등을 분석하고 3D 역설계를 통해 실제 사고현장 및 주변 지형을 3D 모델링 데이터로 구축하여 FLACS에 적용하였다. 이후 물질 노출에 따른 피해 기준에 대한 농도 분포 시뮬레이션 분석을 하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) FLACS 모델은 다른 모델들과는 달리, 3차원 공간 내에 구조물, 지형, 장애물 및 대기조건 등의 여러 변수가 고려되어, 실제와 유사한 누출물질의 확산 과정과 농도 분포 형태 등을 상세하게 분석할 수 있다.
- 2) 이에, 화학물질 누출사고와 같이 시간이 지남에 따라 물질이 확산되어 열어져 사고 후 피해조사가 원활하지 않을 경우 등과 같이, 사고와 이로 인한 피해와의 인과 요인을 밝혀내기 어려운 사고조사·분석에 적절한

도구로 활용할 수 있을 것이다.

3) 또한, 본 연구에서 실제 사고를 대상으로 시뮬레이션 분석한 결과가 실제 피해조사 결과와 유사하게 나타남에 따라 CFD 시뮬레이션 분석기법을 현재 사고조사 시 사용되고 있는 기법(건강·환경영향조사 등)과 함께 활용한다면, 보다 정확하고 과학적으로 사고 및 피해 발생의 원인을 규명할 수 있을 것이라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국립재난안전연구원 연구과제(NDMI-주요-2022-06-01, NDMI-주요-2023-06-01)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- AShamsuddin DS, Fekeri AF, Muchtar A, Khan F, Khor BC et al. Computational fluid dynamics modelling approaches of gas explosion in the chemical process industry: A review. *Process Saf Environ Prot* 2023;

- 170:112-138(<https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.11.090>)
- Center for Chemical Process Safety(CCPS). Guidelines for chemical process quantitative risk analysis, 2nd Edition. US: American Institute of Chemical Engineers; 2000. p. 57-296
- Dasgotra A, Varun Teja GV, Sharma A, Mishra KB. CFD modeling large-scale flammable cloud dispersion using FLACS. *J Loss Prev Process Ind* 2018;56: 531-536(<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.01.001>)
- Gexcon. FLACS v10.9 user's manual.; 2019. p. 85-454
- Hansen OR, Gavelli F, Ichard, M, Davis SG. Validation of FLACS against experimental data sets from the model evaluation database for LNG vapor dispersion. *J Loss Prev Process Ind* 2010;23(6):857-877(<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2010.08.005>)
- Korea Environment Institute(KEI). A study on the improvement of environmental impact assessment of industrial complexes based on risk assessment of chemical leakage accidents. KEI.; 2013
- Korea Occupational Safety and Health Agency(KOSHA). Technical Guideline for Selection of Worst and Alternative Accident Scenarios, P-107-2020. KOSHA.; 2020. p. 5-6
- Lee JH, Cho DH, Cha JH. A Study on the use of CFD for risk prediction of chemical terrorism in urban areas. *J Police Sci.*; 2022;22(1):59-77
- Lim JY, Jo AR, Nam GW, Kim BH, Park CH et al. Case study of chemical accident in the leakage of hydrochloric acid. *Proceedings of Korean Society of Environmental Health(KSEH)*, KR. 2022. p. 184
- Middha P, Hansen OR. CFD simulation study to investigate the risk from hydrogen vehicles in tunnels, *J Hydrogen Energy* 2009;34(14):5875-588(<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.02.004>)
- Middha P, Hansen OR. Predicting deflagration to detonation transition in hydrogen explosions. *Process Saf Prog* 2008;27(3):192-204(<https://doi.org/10.1002/prs.10242>)
- Min MM. New approach to using 3-D dispersion modeling for accidental toxic gas releases in the metropolitan area. Master's Thesis, Ajou University of Korea, Suwon. 2017
- Moen A, Mauri L, Narasimhamurthy VD. Comparison of k- ϵ models in gaseous release and dispersion simulations using the CFD code FLACS. *Process Saf Environ Prot* 2019;130:306-316(<https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.08.016>)
- National Disaster Management Research Institute (NDMI). Development of Accurate Analysis Techniques for Environmental and Chemical Accidents(I). NDMI.; 2022
- National Disaster Management Research Institute (NDMI). Development of field investigation and ensemble simulation technology for chemical accident. NDMI.; 2018. p. 37-40
- National Institute of Chemical Safety(NICS). Hydrochloric acid storage tank leakage accident case, NICS-GP2021-12. NICS.; 2021. p. 6-13
- National Institute of Chemical Safety(NICS) [Internet]. c2021. Intergrated chemical information system; [2023.1.31.]. Available from: <http://icis.me.go.kr/pageLink.do>
- National Research Council of the National Academies (NRC). Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals, Volume 4. The National Academies Press.; 2004. p. 100-108
- Occupational Safety & Health Research Institute(OSHRI). A Research on Prevention of Chemical Accident utilizing Simulation Techniques. OSHRI.; 2014.
- Qiao A, Zhang S. Advanced CFD modeling on vapor dispersion and vapor cloud explosion. *J Loss Prev Process Ind* 2010;23(6):843-848(<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2010.06.006>)
- Sergejchik SA, Nikolajchuk AM. Absorption of hydrogen chloride by leaves of trees and shrubs of different species. *National Academy of Sciences of Belarus. Vestsi Natsyynal'naj Akadehmii Navuk Belarusi. Seryya Biyalagichnykh Navuk.*; 2008. p.10-14
- The Netherlands Organization of Applied Scientific Research(TNO). Methods for the calculation of physical effects, 3th Edition. TNO.; 2005. p. 3-26-28
- Woodward JL, Pitbaldo R. LNG risk-based safety; modeling and consequence analysis. John Wiley and Sons Inc.; 2010. p. 374
- Yoon CS. Criteria for chemical emergency(leak, accident), *Monthly Occupational&Health* 339. Korea Industrial Health Association.; 2016. p. 22-31

<저자정보>

안수빈(연구관), 장창봉(대표), 이경수(시설연구사), 권혜옥(환경연구관)