



독성 가스 누출 시 건물 방향이 대피 기준에 미치는 영향에 관한 수치 해석 연구

† 조승범

화학물질안전원 사고예방심사2과
(2023년 7월 31일 접수, 2023년 11월 19일 수정, 2023년 12월 8일 채택)

A Numerical Study of Building Orientation Effects on Evacuation Standard in Case of Toxic Gas Leakage

† Seungbum Jo

Accident prevention and assessment Division 2, National institute of chemical safety
(Received July 31, 2023; Revised November 19, 2023; Accepted December 8, 2023)

요약

독성 가스 누출 사고 발생 시 인명 피해를 최소화하기 위해서는 사고 시나리오에 따른 적절한 대피 방법이 사전에 수립되어야 한다. 본 연구에서는 동일 누출 조건에서 건축물의 방향과 산업단지 위치가 실내 농도 증가와 실외 확산에 미치는 영향을 살펴보고 효과적인 대피 기준을 마련하였다. 또한 이러한 기준을 바탕으로 화학 사고 인명 피해 최소화라는 관점에서 건물을 건설할 때 건물 방향에 대한 기준도 마련하였다. 건물의 방향이 누출 방향에 대해 정면, 측면, 후면인 경우에 대해 전산 수치 해석을 수행하였으며, 그 결과 건물 창문이 누출되어 오는 방향과 마주보고 있을 때의 실내 오염농도가 반대편에 창문이 있을 때의 실내 오염농도와 비교하여 120 배 정도 높게 나왔다. 또한, 급격한 실내 농도 증가율로 동일 시간에 실내 공간이 2배 이상 독성 가스 물질로 가득하게 되었다. 이러한 현상은 건물 창문이 정면에 위치한 경우 창문 주위의 압력 차와 속도 저하로 건물 주위에 독성 가스가 정체하게 되는 것으로 나타났다. 본 연구 결과를 바탕으로 최적 대피를 위한 건축물 방향 기준을 설정한다면 화학사고 발생 시 주민들의 피해를 최소화하는 데 도움이 될 것으로 판단된다.

Abstract - The effective evacuation strategy according to the accident scenario is crucial to minimize human casualties in the event of toxic gas leak accidents. In this study, the effect of the direction of a building and the location of an industrial complex on the increase in indoor concentration and outdoor diffusion was examined under the same leakage conditions, and effective evacuation criteria were established. In addition, the guidelines for building directions were suggested when constructing buildings that would mitigate human damage caused by chemical accidents. Three scenarios where buildings faced the front, side, and rear of the leakage direction were investigated through CFD simulations. The results revealed that when the building faced the industrial complex, both indoor and outdoor average gas concentrations increased significantly, reaching up to 120 times higher than the other two orientations. Moreover, the indoor space was filled with toxic gas substances more than twice in the same time due to the rapid increase of indoor concentration rate. In cases where the building's windows were positioned at the front, toxic gas stagnation occurred around the building due to pressure differences and reduced flow velocities. Based on our findings, the implementation of these guidelines will contribute to safeguarding residents by minimizing exposure to toxic gas during chemical accidents.

Key words : CFD, simulation, evacuation, shelter-in-place, chemical accident, indoor concentration, building

†Corresponding author:sebujo@korea.kr

Copyright © 2023 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

최근 유해화학물질을 취급하는 사업장 인근에 아파트, 주택과 같은 주거 시설들이 많이 들어서고 있고, 천안·아산, 세종·오송, 인천 검단 지역은 산업시설과 주거지역의 경계가 불명확해지고 있다 [1]. 또한, 도시가 확장되면서 익산, 완주, 전주 산업단지의 인접 아파트까지 거리는 각 160 m, 220 m, 700 m로 유해화학물질이 대규모 주거 시설에 직접적으로 노출되어 있다 [2]. 이러한 지역에서 화학사고 발생 시 커다란 인명 피해가 발생할 수 있어, 이에 대한 적절한 대비 체계가 필요하며, 인접한 주민들의 대피 계획도 사전에 수립되어야 한다.

대피 관련 기준은 기상 환경에 따라 실외 대피와 실내 대피로 분류된다. 대량의 누출 사고이거나 빠른 확산 속도 혹은 누출 위치가 가까울 경우 대피 시간이 충분히 확보되지 못하기 때문에 실내 대피가 우선하여 적용된다 [3]. 하지만, 잘못된 대피 명령이 내려지거나, 대피 방법이 반복되는 경우 치명적인 인명 피해가 발생할 수 있다. 실제로 2020년 7월 000 구미사업장에서 발생한 트리클로로실란 누출 사고에서 처음에는 실외 대피 명령 문자가 전송됐다가 26분 후 다시 실내 대피하라고 대피 명령이 반복되어 주민들에게 혼란이 발생하였다 [4].

실내 대피하는 경우에도 실외 농도보다 실내 농도가 높아지게 되면 밖으로 대피해야 하므로 실내 농도 증가는 매우 중요한 인자이다. 하지만, 실내 농도 증가는 외기 조건 (누출량, 누출 속도, 풍향, 풍속)뿐만 아니라, 건물의 나이, 구조, 위치와 창문의 방향에 따라 크게 달라질 수 있다 [5]. 따라서, 건물 방향을 고려하여 대피 관련 비상 대응 계획을 수립해야 하지만 이에 관한 연구는 부족한 실정이다. 무엇보다 화학 사고 피해 최소화를 위해서는 처음 건물을 짓거나 산업단지가 조성될 때 건축물 위치나 방향에 대한 기준 정립이 필요하다. 실내의 농도 계산과 가스 확산 모델링을 위해 Computational Fluid Dynamics (CFD)가 활용되고 있고 [6, 7], 지하철 내 승객 피난 시뮬레이션 [8] 등 대피 분야 연구에도 CFD가 활발히 사용되고 있으며, Ansys사의 Flunet, CFX, Simens사의 Star-ccm+, Gexcon사의 FLACS 프로그램이 주로 사용되고 있다 [9].

본 연구에서는 CFD를 통해 건물 방향이 실내의 농도 증가에 미치는 영향과 확산 현상을 살펴보고, 산업단지 인근 신축 건물 방향에 대한 기준을 제시하고자 한다. 적극적인 비상 대응 대책 수립은 화학 사고 시 대피 시간을 충분히 확보하고, 인명 피해를 최소화하는데 기여하리라 생각된다.

II. 연구내용 및 방법

2.1. 형상 및 격자 모델링

본 연구에서는 창문을 투과하는 현상을 모사하기 위해 Ansys사의 Fluent 2021R2 버전을 사용하였으며, 격자 모델링에는 ICEM-CFD를 사용하였다. Fig. 1과 같이 해석 영역 크기는 10 m x 10 m x 5.5 m이며, 도메인 내 건물과 창문이 위치해 있다. 창문의 크기는 0.6 m와 1.2 m가 가장 많이 사용되고 있으며, 해석에서는 산술평균인 1 m x 1 m로 설정하였다 [10]. 창문의 위치는 정면, 측면, 후면 세 가지 경우로 모델링하였으며, 지면으로부터 1 m 떨어져 있다.

격자 민감도를 살펴보기 위해 거친 격자, 중간 격자, 미세 격자 3가지 경우에 대해 테스트가 진행되었

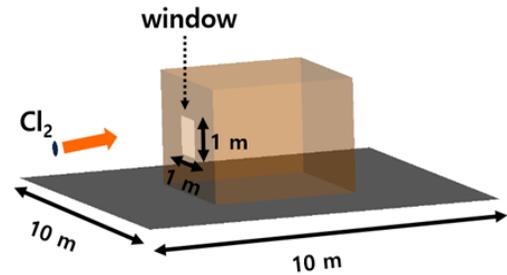


Fig. 1. Geometry of building and windows.

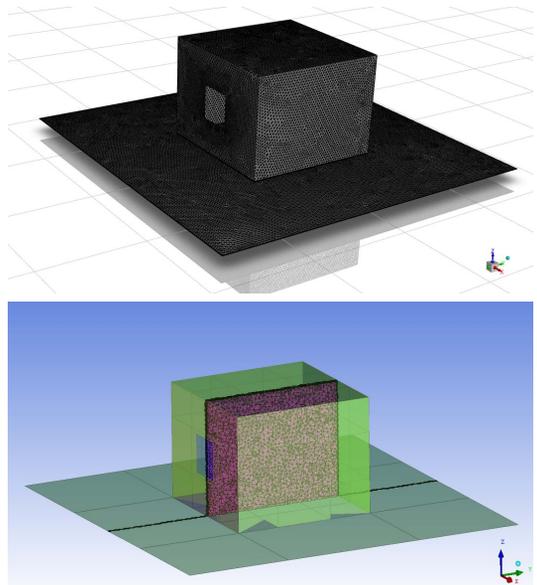


Fig. 2. Surface and volume mesh

으며, 각각의 격자 수는 2,926,824개, 4,094,343개, 5,462,907개로 구성되었다. 미세 격자와 중간 격자 적용 시 실내 농도 해석 결과 차이는 평균 3% 미만이기 때문에 해석 시간 단축을 위해 중간 격자를 선택하였다. Fig. 2에서처럼 벽면에는 프리즘(prism) 격자, 그 외 영역은 사면체(tetrahedron) 격자를 사용하였고, 최소 격자 크기는 0.01 m, 최대 격자 크기는 0.12 m로 설정하였다.

2.2. 시뮬레이션 조건

염소(Cl₂) 가스가 직경이 400 mm인 원통형 파이프를 통해 1.5 m 높이에서 30 m/s의 속도로 누출되어 건물에 확산하도록 모사되었다. 이때 바람은 누출 방향과 동일한 방향으로 1.5 m/s 속도로 설정하였다. 해석 상태는 transient로 진행되었으며, 총 해석 시간은 120 초이다. 해석 수렴성을 높이기 위해 adaptive time stepping 방법을 적용하였으며, 최소 시간 단위는 10⁻⁵ 초, 최대 시간 단위는 0.01 초로 설정하였다. 해석은 건물 창문의 위치(정면, 측면, 후면) 변화에 따라 3가지 경우의 누출 조건으로 진행되었다. 염소가스가 창문 틈을 통과하면서 압력손실이 발생하기 때문에 창문은 porous media jump 모델이 적용되었고, 그 외 건물 외벽은 wall 조건, 해석 영역의 외곽은 pressure outlet 조건으로 설정하였다. 가스가 창문을 통과할 때 압력 변화는 다음식과 같이 정의된다.

$$\Delta P = -\left(\frac{\mu}{\alpha} u + C_2 \frac{1}{2} \rho u^2\right) \Delta m \quad (1)$$

Porous medium의 압력변화(ΔP)는 식(1)처럼 Darcy's 법칙과 추가적인 관성 손실 항의 조합으로 정의되며, porous medium 두께 (Δm)는 10⁻⁵ m로 설정하였다 [10]. 식(1)의 μ는 유체의 동점도, u는 속도를 나타낸다. α는 창문을 지날 때 생기는 점성저항, C₂는 압력 점프 계수를 나타내며, 각 3.11 x 10⁻⁹ m², 0.002334 m⁻¹ 값을 가지고 있다 [11].

2.3. 지배 방정식

해석 모델은 시간에 따른 실내 농도 변화를 계산하기 위해 비정상상태로 설정되었고, 염소와 공기 두 가지 가스상 물질이 사용되었으므로 species transport와 realizable k-ε 난류 모델을 적용하였다. 수치계산을 위해서 사용된 질량, 운동량, 에너지 보존식은 다음과 같다 [12].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i' u_j'} \right) + S_i \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho h u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(k + k_t) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right] + S_h \quad (4)$$

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha} u_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |u_i| u_i \right) \quad (5)$$

ρ는 기체의 밀도, u_i는 수평, 수직, 횡방향의 속도, p는 압력, h는 엔탈피, k는 물 전도도, k_t는 난류 전도도를 나타낸다. 식(3)의 우측항 -ρu_i'u_j', S_i와 식(4)의 우측항인 S_h는 각 레이놀즈 응력항, porous media 공급항, 열원이며, S_i는 식(5)와 같은 관계를 가지고 있다.

III. 연구 결과 및 고찰

3.1. 건물 창문 위치에 따른 실내 농도 변화

염소가스 누출 120초 후 가스 확산 방향과 창문 위치에 따른 건물 실내 염소 농도 확산 현상을 살펴보고, 최대 및 평균 농도와 농도 증가율을 비교해 보았다.

Table 1은 창문이 정면, 측면, 후면 위치에 설치되어 있는 세 가지의 경우에 대한 120초에서의 해석 결과를 보여준다. 정면의 경우 건물 내 모든 공간이 염소가스로 가득 찼으며, 최고 농도는 94%, 평균 농도 84.4%로 실외 농도와 크게 차이가 없다. 이 경우 0.5 ACH(Air exchange rate per hour)의 최소 환기율 [13]을 고려했을 때 실내에 머무르는 것이 더 위험할 수 있으므로, 확산 속도와 바람 방향을 고려하여 빠르게 실외 대피하는 것이 피해를 줄일 수 있다. 창문이 측면과 후면에 있는 경우 최고 농도는 각 15.4%와 4.4%로 정면 대비 약 6배와 21배 낮으며, 평균 농도는 각 2.2%와 0.7%로 정면 대비 약 39배와 120배 낮은 농도를 나타낸다.

Table 1. Summary of simulation results in building

Window location	Front	Side	Rear
Volume above 1% of Cl ₂ in building	48 m ³	25.5 m ³	19.7 m ³
Cl ₂ occupied space over total volume	100%	53%	41%
Maximum concentration in building	94%	15.4%	4.4%
Average concentration in building	84.4%	2.2%	0.7%

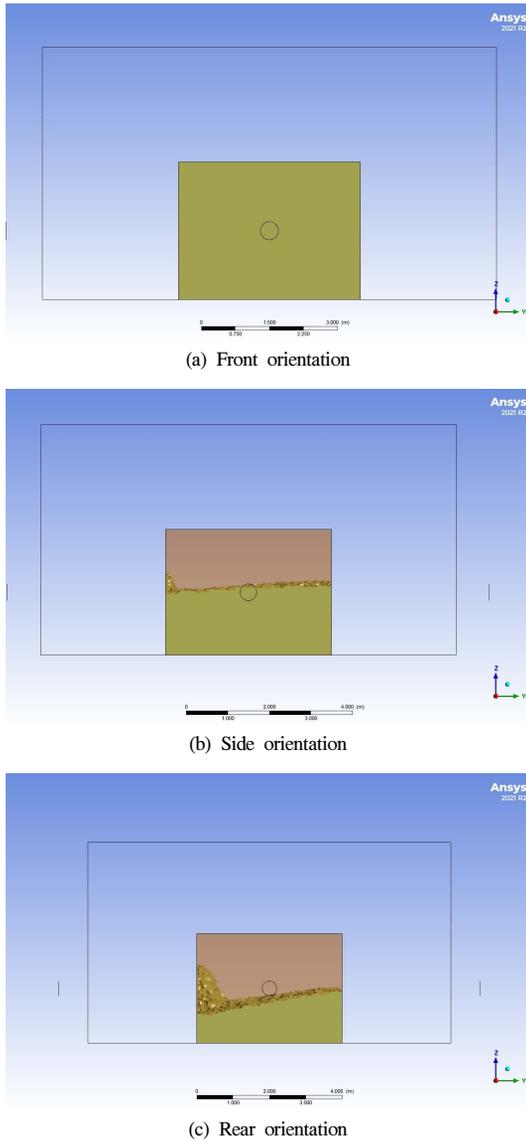


Fig. 3. The front view of Cl_2 volume fraction in the building.

Fig. 3은 건물 내부에서 1% 이상의 염소가스 농도 분포도를 나타내는 그림이다. 정면 누출의 경우 실내가 염소가스로 가득 차게 되지만, 측면과 후면의 경우 건물 절반 정도만 가스가 분포하게 된다. 특히, 염소와 같이 공기보다 무거운 물질이 누출되면 실내 유입 시 Fig. 3의 (b)와 (c)처럼 공간 아래쪽에 분포하게 되므로 몸을 숙이고 대피하는 게 아니라 서서 대피하는 게 더욱 효과적일 수 있다.

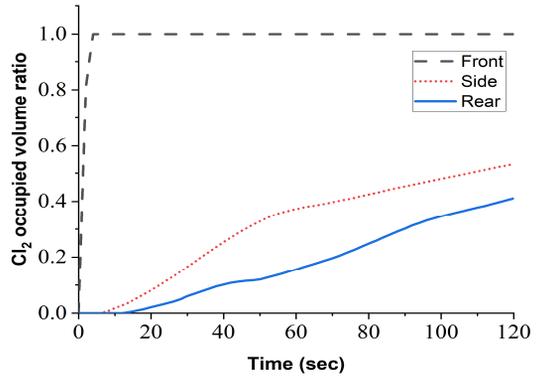


Fig. 4. Cl_2 occupied volume over total building volume.

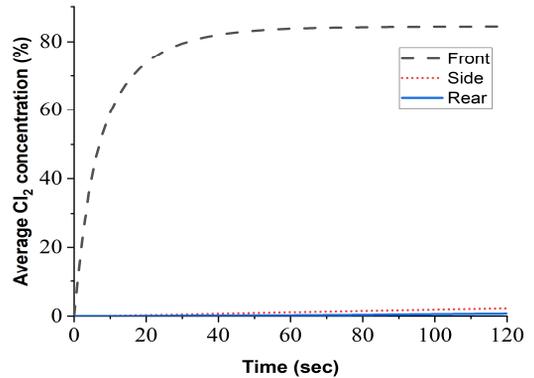


Fig. 5. Average Cl_2 concentration in the building.

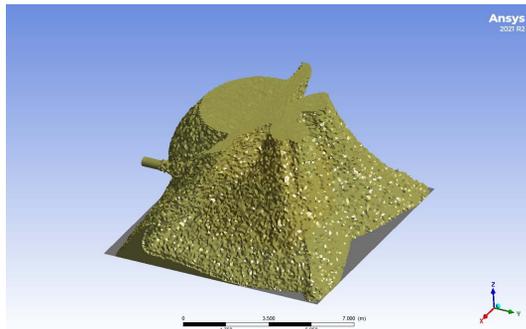
Fig. 4에서처럼 건물 내 염소가스가 1% 이상인 공간의 비를 살펴보면, 창문의 위치가 정면일 때 2초 만에 염소가스가 100% 채워진 반면, 측면과 후면에 있는 경우 120초 후에도 각 53%와 41%만이 염소가스가 유입되었다. Fig. 5는 건물 내 유입되는 염소가스의 평균 농도를 나타낸 그래프이며, 창문 위치가 정면일 때 84.4%, 측면일 때 2.2%, 후면일 때 0.7%로 정면과 측·후면 차이가 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 산업단지 인근에 건물을 지을 때 산업단지와 마주 보는 건물 방향은 피해야 하며, 산업단지 정면에 위치해 있는 기존 건축물의 경우 사고 발생 시 실내 대피보다는 실외 소산을 먼저 고려하는 것이 피해를 최소화하는 방법일 수 있다.

3.2. 건물 창문 위치에 따른 실외 농도 변화

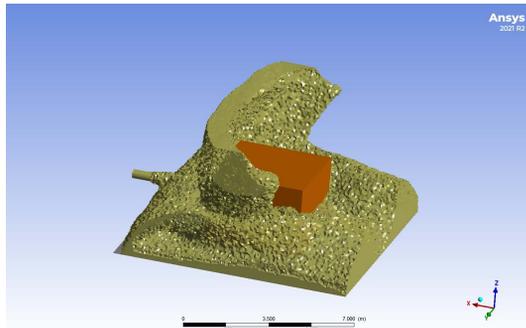
Table 2는 창문이 정면, 측면, 후면 위치에 설치되어 있는 세 가지의 경우에 대한 건물 외부 농도 해석 결과

Table 2. Summary of simulation results outside building

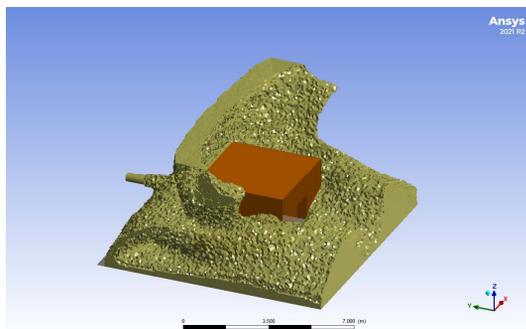
Window location	Front	Side	Rear
Volume above 5% of Cl ₂ outside building	203 m ³	160 m ³	164 m ³
Average concentration outside building in domain	26.9%	14.5%	14.4%



(a) Front orientation



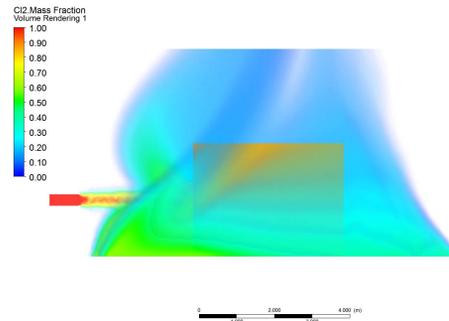
(b) Side orientation



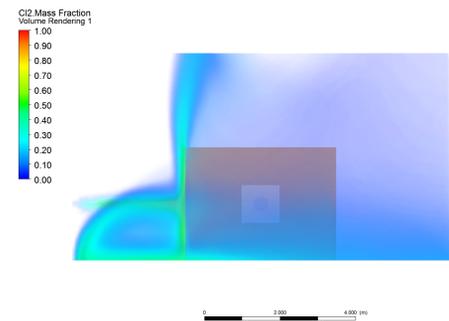
(c) Rear orientation

Fig. 6. The isometric view of Cl₂ volume fraction outside the building.

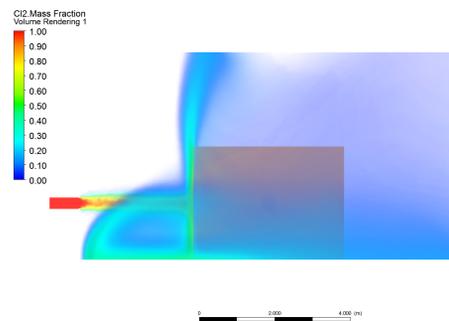
를 보여준다. 정면 누출의 경우 도메인 내 203 m³ 영역이 5% 이상의 염소가스로 채워졌으며, 측면과 후면 누출의 경우 정면보다 약 20% 정도 적은 160 m³과 164 m³ 공간에 염소가스가 분포하고 있다. 이때 정면, 측면, 후면 누출의 평균 염소가스 외부 농도는 각 26.9%, 14.5%, 14.4%로 창문이 누출 지점과 마주하는 경우 다른 두 경우보다 10% 이상 외부 농도가 높은 것으로



(a) Front orientation



(b) Side orientation



(c) Rear orientation

Fig. 7. The volume rendering side view of Cl₂ mass fraction.

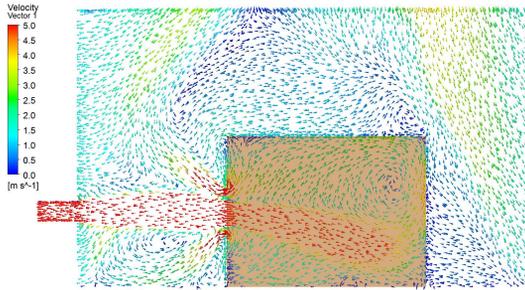


Fig. 8. The velocity vector field for front orientation

나타났다. 이는 정면에서 창문을 통해 서서히 염소가스가 유입되면서 기류 정체가 발생하여 가스가 건물 주위에 머무르면서 외부 농도가 높은 현상이 발생하였다.

Fig. 6은 건물 외부에서 5% 이상의 염소가스 농도 분포도를 나타내는 그림이다. 정면 누출의 경우 염소가스가 건물을 뒤덮으며 건물 주위를 둘러싸게 되지만, 측면과 후면의 경우 누출 위치와 마주 보는 방향에 가스가 분포하고 반대 방향에는 염소가스가 없는 것을 확인할 수 있다. 이는 창문 위치에 따라 건물 주위의 확산 속도 변화로 실내뿐만 아니라 외부 농도에도 영향을 미치게 된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 염소가스의 분포를 volume rendering으로 가시화해주고 있으며, Fig. 8은 속도 벡터장을 보여준다. Fig. 7의 (a)처럼 건물 위치가 정면인 경우 창문에서 압력 차이가 발생하여 오목한 형태의 농도 분포를 보인다. 또한, Fig. 8처럼 염소가스가 창문으로 유입되고, 실내 공기가 외부로 빠져나가면서 창문 주위의 유체 속도가 느려지게 된다. 따라서, 건물 주위의 염소가스가 정체하게 되고, 건물 뒤편은 상대적으로 가스가 덜 분포해 있는 것을 알 수 있다. 그리고 건물 내부로 유입된 염소가스는 바닥으로 하강하며 이에 따라 실내에는 유동 순환이 발생하게 된다. 이 경우 대피 방법은 건축물 뒤편으로 실외 대피한 후 바람 방향을 고려하여 대피장소로 이동하는 것이 노출 농도를 최소화하는 방안일 수 있다. 건물 위치가 측면과 후면인 경우 Fig. 7의 (b)와 (c)처럼 염소가스가 건물 외벽과 부딪힌 후 수평 방향에서 수직 방향으로 확산이 전환되면서 방호벽처럼 수평 방향 확산을 경감시키는 효과를 가져다준다.

IV. 결론

유해화학물질 누출 사고 발생 시, 효과적인 실내 대피 방법을 마련하기 위해 건축물의 방향과 산업단지 위치가 실내외 농도 증가에 미치는 영향을 살펴보았다. 건물 창문의 위치가 유해화학물질 누출 위치와 정면으로 마주 보고 있는 경우 실내뿐만 아니라 실외 모두 측면, 후면 보다 평균 농도가 높았다. 또한, 정면 누출의 경우 실내 농도가 급격하게 증가하였으며, 실내 최고 농도도 후면의 경우보다 21배 높게 나타났다. 따라서, 건물의 위치가 누출 방향 정면에 있는 경우 실외 대피를 먼저 고려하는 것이 필요하고, 측면이나 후면에 있는 경우 실내 대피를 우선하는 것이 피해를 최소화할 수 있다.

화학사고 피해를 최소화하기 위해서는 근본적으로 국가산업단지 인근에 신축 건물을 건설할 때 건물의 위치나 창문의 방향이 산업단지를 등지거나, 측면에 위치하도록 짓는 것이 필요하다. 반대로 기존에 이미 주거 시설이 자리 잡고 있고 산업단지가 나중에 들어선다면, 환경 영향 평가 시 기존 건물의 위치나 창문의 방향을 고려하여 산업단지 위치를 선정할 필요가 있다. 마지막으로 본 연구는 CFD의 분석적 한계로 창문에 근접한 위치에서 노즐 형태로 가스가 누출된 것으로 모사했지만, 실제 산업단지에서 누출된 가스는 바람을 타고 확산 후 구름은 형태로 건물에 도달하기에 실내 농도 증가율은 실제와 차이가 있을 수 있다. 향후 슈퍼컴퓨터를 이용하여 실제 크기와 동일한 해석 영역을 설정하여 연구를 진행한다면 정확한 농도 증가 시간과 이에 따른 실외 대피 시간을 사전에 파악할 수 있을 것이라 기대된다.

사용기호

- ΔP : pressure change [Pa]
- u : flow velocity [m/s]
- u' : flow velocity fluctuation [m/s]
- C_2 : pressure jump coefficient [m^{-1}]
- Δm : thickness of the medium [m]

그리스 문자

- μ : dynamic viscosity [kg/m·s]
- α : face permeability of the medium [m^2]
- ρ : fluid density [kg/m³]

REFERENCES

- [1] Korea Environment Institute, “Environmental impact analysis and evaluation plan according to the concentration of industrial complexes”, *EIA Review*, Vol 2, (2022)
- [2] Go, J., and Shim, S., “Environmental risk issues in residential areas close to environmental polluting facilities in the city center – Focusing on Jeonbuk Wanju, Iksan, and Jeonju”, (2022)
- [3] Yoo, B., and Moon, M., “Development of Emergency Response Plan for Chemical Accident Using ALOHA Program: Focusing on Evacuation Plan”, *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, 18(3), 311-319, (2018)
- [4] National Disaster Management Research Institute, “A Model Development for Large-scale Disaster Evacuation Situation”, (2020)
- [5] Sorensen, J. H., Shumpert, B. L., and Vogt, B. M., “Planning for protective action decision making: evacuate or shelter-in-place”, *Journal of Hazardous Materials*, 109(1-3), 1-11, (2004)
- [6] Jang, C. B., Lee, H. J., Lee, M. H., Min, D. C., Baek, J. B., Ko, J. W., and Kwon, H. M., “CFD Simulation Study to analyze the Dispersion and Explosion of Combustible Gas”, *KIGAS*, 16(5), 58-65, (2012)
- [7] Kim, J., Kim, J., and Kim, E., “A Seasonal Risk Analysis and Damage Effects Assessment by Gas Leakage of Chemical Plant using 3D Scan and FLACS”, *KIGAS*, 25(4), 1-9, (2021)
- [8] Jang, Y. J., Lee, C. H., Park, W. H., and Jung, W. S., “The Passenger Evacuation Simulation Using Fluent and EXODUS”, *Journal of the Korean Society for Railway*, 11(1), 95-100, (2008)
- [9] Kim, J. R., “CFD Analysis of EFD-CFD Workshop Case 3 using Commercial and Open Source CFD code”, *J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, 45(3), 241-251, (2017)
- [10] Anunobi, A. I., Adedayo, O. F., Oyetola, S. A., Siman, E. A., and Audu, H. I., “The Passenger Evacuation Simulation Using Fluent and EXODUS”, *Journal of Environment and Earth Science*, 5(2), 117-124, (2015)
- [11] Deng, X., Cooper, P., Ma, Z., and Kokogiannakis, G., “Numerical analysis of indoor thermal comfort in a cross-ventilated space with top-hing windows”, *Energy Procedia*, 121, 222-229, (2017)
- [12] Ansys, Inc., “Fluent user’s guide”, 2021R2 help system, (2021)
- [13] Hong, G. and Kim, B., “Field measurements of infiltration rate in high rise residential buildings using the constant concentration method”, *Building and Environment*, 97, 48-54, (2016)