



가스 제트 누출의 농도 및 속도에 대한 실험, 이론 및 수치해석 연구

†방부형·김홍민*·김성훈**·이근원***

경기과학기술대학교 건축소방안전학과 교수, *(주)테크에버,
네레이드안전컨설팅, *아주대학교 환경안전공학과 교수
(2021년 11월 15일 접수, 2022년 1월 27일 수정, 2022년 1월 28일 채택)

Experimental, Theoretical and Numerical Studies for Concentrations and Velocities of Gas Jets

†Boo-Hyoung Bang · Hong-Min Kim* · Sung-Hoon Kim** · Keun-Won Lee***

Dept. of Architecture and Fire Safety, Gyeonggi Univ. of Science and Technology,
Siheung-si, Korea

*Techever Inc., Changwon-si, Gyeongsangnam-do, Korea

**Nereid Safety Consulting, Gyeonggi-do, Korea

*** Dept. of Environmental & Safety Engineering, Ajou University, Gyeonggi-do, Korea

(Received November 15, 2021; Revised January 27, 2022; Accepted January 28, 2022)

요약

대기 중으로 가스가 누출될 때, 누출구에서 비교적 가까운 위치에 누출 축을 따라 형성되는 인화성 증기운의 농도 및 속도에 관해 실험, 이론 및 수치해석을 이용한 결과를 비교하였다. 제트기류 확산(Jet dispersion) 과정에 대해 실험을 통해 농도를 측정하였고, 이론적 접근법으로써 자기유사성(Self-similarity) 이론을 적용하여 속도를 계산하였다. 그리고 두 가지 CFD 도구 - 서브그리드모델을 사용하는 FLACS와 범용 CFD 도구인 CFX-를 이용해 속도와 농도를 계산하여 각 결과와 비교하였다. 자기유사성 이론과 CFD의 가장 큰 차이점은 부력에 의한 차이이며, 이는 누출원으로부터 거리가 멀어져 누출 모멘텀이 감소할 수록 영향력이 증가한다. 결과는 누출원 반경에 대한 무차원 거리와 최대 속도에 대한 무차원 속도를 이용하여 비교한다.

Abstract - The results of experimental, theoretical, and numerical analysis were compared regarding the concentrations and velocities of flammable gas jets generated by pressurized leakage of methane gas. The concentration was measured through experiments for the jet dispersion process, and the velocities was calculated by applying the self-similarity theory. And the velocities and concentrations were calculated using CFD tools - FLACS and CFX- compared with the results. The difference between self-similarity model and CFD is due to the buoyancy term, which increases as the distance from a leak source increases. The results are compared with dimensionless parameters using the leak source radius and velocity components along the leak axis.

Key words : jet dispersion, self-similarity, CFD, gas leakage, experiment

1. 서론

국내의 석유화학 플랜트에서의 안전은 설계 시 주된 관심사이며, 특히 가스누출 및 폭발과 같은 큰 사건

들은 그 피해영향으로 인해서 많은 주목을 받는다. 2018년부터 2020년까지 통계청에서 발표한 가스 관련 사고는 각각 121건, 101건, 98건으로 조금씩 낮아지고 있지만 여전히 LNG, LPG 사고가 전체 사고의 70% 가량을 차지하고 있다[1]. 이 중 석유화학공장에서 발생하는 가스 누출 사고는 매년 2~5건 정도이나 피해규모가 다른 사고에 비해 매우 크기 때문에 여전히

†Corresponding author:bhbang@gtec.ac.kr

Copyright © 2022 by The Korean Institute of Gas

히 위험도 크기에 따른 관리가 필요한 상황이다. 특히 국내에서는 선진국에 비해 아직 설계부터 시공 및 운영관리까지 기준이 미흡한 편이며, 향후 석유화학 플랜트 분야에서는 지속적으로 기준이 강화될 것으로 기대된다.

석유화학 플랜트에서의 잠재적 가스누출 위험 및 빈도는 IOGP(International Association of Oil & Gas Producers) 같은 기관들에 의해 지속적으로 수집되고 있으며, 국내 역시 이러한 데이터들을 토대로 위험도를 정량화하는 연구가 보다 심화될 필요가 있다. 가스 누출 사고는 대개 운영관리자의 오작동, 낙하 물체로부터의 충격, 설비 노후화 등으로 인해 발생할 수 있으며, 감지설비나 소방시스템이 미흡하거나 미작동 시에는 화재나 폭발로 이어져 인명피해나 크나큰 경제적 손실을 야기할 수 있다. 이 때문에 대개 설계 수치해석이나 관련 이론들을 통해 성능위주설계 등을 진행하지만 가스 확산에 대한 이론과 수치해석 등의 상호비교를 통해 보다 정확한 이해가 엔지니어 및 관계자에게 필요하다.

초기 가스 확산에 관련된 연구에서는 부력에 의한 효과의 정확성과 Gaussian 모델 및 Lagrangian 모델의 가능성과 한계, 그리고 정확성에 대한 논의가 이어졌다[2-4].

이후 해석성능 향상과 CFD 방법론의 발전으로 새로운 프로그램들이 등장했다. 현재 많이 채택되고 있는 모델 중 구조물을 고려하지 않는 PHAST, ALOHA 같은 해석 모델이 있는 반면 FLACS, KFX와 같이 구조물을 존재를 고려할 수 있는 프로그램들까지 여러 종류의 CFD 모델들이 있다.

그리고 이러한 모델들을 이용하여 저장용기 혹은 배관으로부터 가스누출 후 확산하는 과정에 대한 유동해석은 여러 CFD 프로그램을 통해 연구된 바 있다 [5-7]. 또한 Tauseef et al.[8]은 가스누출 및 확산과 관련하여 앞서 채택되고 있는 프로그램과 CFD simulation에서의 난류모델 중요성에 대해 언급하고 있다.

하지만 이들 수치해석 모델들의 발전은 결국 사용성 저하와 계산량 증가로 인해 실제 설계시간을 늘린다는 단점이 있으며, 간편한 이론적 모델의 장점을 활용한 빠르고 보수적인 설계를 할 수 있는 기회를 놓치게 한다.

따라서 본 연구에서는 가스 확산에 대한 보다 쉽게 접근 가능한 자기유사성 이론(Self-similarity theory)을 가스 제트에 적용하였다.

축대칭 제트 형태의 가스 누출과 같은 문제에 자기유사성 이론을 층류 형태부터 난류 형태까지 넓은 범위에 적용한 많은 연구가 있었다[9-15]. 여기서는 유효성 확인 범위를 넓히고자 CFD 프로그램을 이용한 해석 결과와 축방향 위치별 속도를 비교하고, 실험과 CFD 결과를 비교하여 이론과 CFD의 타당성을 제시한다.

II. 이론 및 수치해석 모델

2.1. Self-similarity

자기유사성(Self-similarity)은 특수한 환경에서의 유체 흐름에 대해 이상적인 특성을 보이는 경우에 한해 적용이 가능한 이론이다. 노즐(pointwise)로 부터 축대칭 제트 형태의 가스 누출은 그러한 유체 흐름을 보이는 사례 중 하나이며, 누출지점에서부터 거리가 있는 영역에서 self-similar solution에 의해 접근 가능하다. Self-similar solution으로부터 운동량보존방식은 다음과 같이 정리될 수 있다[15].

$$\frac{u}{u_m} = \frac{1}{(1+\zeta^2/8)^2}, \quad \zeta = \frac{1}{a} \frac{r}{x}$$

$$u_m = \sqrt{\frac{3}{8\pi}} \frac{J_0}{\rho} \frac{1}{a} \frac{1}{x}, \quad J_0 = 2\pi \int_0^\infty \rho u^2 r dr$$

여기서 u 는 축방향 속도 성분, u_m 은 축방향 최대 속도 성분, r 은 반경, x 는 축방향 위치, J_0 는 모멘텀, ρ 는 밀도를 의미한다. a 는 self-similar solution에서의 표준 실험상수이며, [15]에서 정리되어 있다. 자기유사성 이론이 적용가능한 특수한 환경에서의 실험과 비교하여 결정되었으며, 평판에서 나오는 제트 흐름, 경계 층에서의 유체 흐름, 축대칭 제트 흐름 등에서의 실험 상수 값이 제시되었다. 여기에서는 노즐에서 나오는 축대칭 제트 흐름과 비교하기 때문에 해당 값을 인용하여 $0.045 \leq a \leq 0.055$ 의 값을 사용한다.

2.2. Numerical modeling

폭발성 가스 확산 및 폭발압을 수치해석적으로 접근하는 FLACS의 지배방정식은 아래와 같다. 각각 질량, 운동량, 엔탈피 그리고 연료에 대한 보존방정식이며, 난류 운동에너지와 소산율을 계산하기 위해 k-ε 모델을 이용한다. FLACS에서는 계산비용적인 측면에서의 경제성을 위해 CFD 상용 프로그램에서 사용되는 지배방정식에서 체적률(β_v , volume porosity) 혹은 면적률(β_j , area porosity)을 포함하여 사용하는데, 이러한 형태의 방정식은 CFD의 최대 변수 중 하나인 사용자에 따른 격자 의존도를 줄이며, 동시에 구조물 구현을 위한 격자 집중도를 줄일 수 있는 장점이 있다[16].

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\beta_v \rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \rho u_i u_j) = -\beta_v \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \sigma_{ij})$$

$$+ F_{o,i} + \beta_v F_{w,i} + \beta_v (\rho - \rho_0) g_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\beta_v \rho h) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\beta_j \rho h u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\beta_j \frac{\mu_{eff}}{\sigma_h} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right] + \beta_v \frac{DP}{Dt} + \frac{\dot{Q}}{V} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\beta_v \rho Y_{fuel}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\beta_j \rho u_j Y_{fuel}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\beta_j \frac{\mu_{eff}}{\sigma_{fuel}} \frac{\partial Y_{fuel}}{\partial x_j} \right] + R_{fuel} \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\beta_v \rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\beta_j \rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\beta_j \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \beta_v P_k - \beta_v \rho \epsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\beta_v \rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\beta_j \rho u_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\beta_j \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \beta_v P_\epsilon - C_{2d} \beta_v \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

여기서 $F_{o,i}$ 는 서브그리드(sub-grid)에 존재하는 구조물 체적에 의해 방해받는 유동의 운동량, $F_{w,i}$ 는 벽에 의한 것을 의미한다. ρ 는 밀도, \dot{m} 은 질량유량, V 는 체적, g 는 중력가속도, P 는 압력, σ_{ij} 는 스트레스텐서이다. 그리고 \dot{Q} 은 연소반응에서의 열방출율, R_{fuel} 은 연료의 반응율이지만 여기서는 가스 확산이므로 계산에 포함되지 않는다.

Fig. 1과 같이 FLACS-CFD에서는 계산속도 향상을 위한 방법으로 구조물의 형태에 관계없이 전체 관심영역에 사용자가 정한 격자수를 x, y, z 방향으로 직육면체 형태로 만들 수 있도록 하였다. 그래서 지배방정식 (1)~(6)에서 보는 것처럼 격자 내에 존재하는 구조물의 비율만큼 체적률(β_v) 혹은 면적률(β_j)을 반영하고, 유동을 저해시키는 운동량을 포함시키고 있다. 하지만 여기서는 구조물이 없을 때의 가스 확산을 논의하고 있으므로 그들의 값은 1이며, 따라서 상용 CFD 프로그램에서의 지배방정식과 동일하다고 할 수 있다. 다만 계산과정이나 난류모델에서의 실험계수값과 같은 solver의 iteration과정에서의 차이는 여

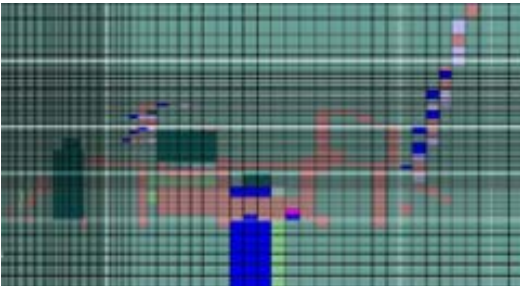


Fig. 1. Rectangular grids in FLACS-CFD

전히 존재한다[16].

한편, FLACS-CFD 계산과의 상호비교를 위한 상용 CFD 프로그램으로써 ANSYS CFX를 이용하였다. 격자에 따른 결과 의존도를 줄이기 위해 CFX에서는 FLACS-CFD와 같은 직육면체(Hexahedral) 격자를 사용하여 그 영향을 최소화하였으며, solver에 따른 차이를 보고자 하였다. CFX에서는 주변 공기와 누출되는 CH_4 에 대한 지배방정식을 각각 계산하는 이상유동으로 계산했으며, FLACS-CFD와 동일한 k-ε 모델을 사용하였다. 대류항은 Upwind scheme, Convergence criteria는 RMS 기준으로 10^{-5} 로 하였다. 격자는 ICEM-CFD를 통해 생성하였으며, Node 수는 970만개, Element 수는 955만개를 사용하였다.

III. 가스누출 실험

3.1. 실험 개요

가스누출 후 농도 변화를 확인하기 위해 Fig. 2와 같이 가스공급유닛을 제작하고, 농도센서를 이용하여 실험을 진행하였다. 반복적인 실험을 통해 가스누출 지점부터 측방향으로 제일 마지막에 위치한 센서에서 0%의 농도가 나오는 지점(L_{max} , 가스 확산 최대 거리)까지의 거리를 확인하고, 누출지점부터 0.4m의 등간격으로 농도센서($L_1 \sim L_5$ 지점)를 분포시켰다.

누출되는 가스로는 메탄이 이용되었다. 메탄은 LNG 터미널과 같은 주요 시설에 기체상으로 존재하는

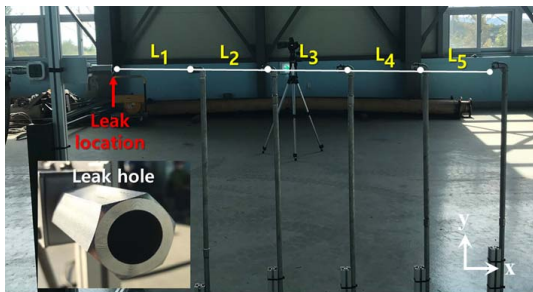
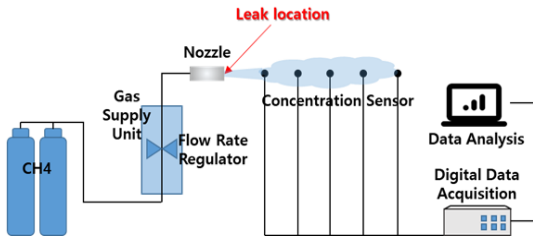


Fig. 2. Schematic diagram and experimental setup for concentration measurement.

Table 1. Characteristics of test equipment.

Equipment	Characteristics
Methane supply system (MFC)	- Company: MKP - Model: VIC-D145 - Flow rate: 680 [lpm] (Methane) - Working pressure: 5 [bar]
Data logger	- Company: GRAPHTEC - Model: GL840-M - Chanel: 20 [CH](Multi-input-model) - Sampling interval: 10 [ms] ~ 2 [s]
Oxygen concentration sensors	- Company: LuminOxTM - Model: LOX-02 - Oxygen range: 0~25%
Gas Leak Detection using Infrared Cameras	- Company: FLIR - Model: GF300 - Gas detection: Methane, Propane etc. - Accuracy ± 1 [°C], 15 [mK]

Table 2. Gas leak test scenario.

Gas type	Methane
Volumetric Flow rate	600 [lpm]
Nozzle radius	12.5 [mm]
Ambient temperature	15 [°C]
Sensing locations	0.4m, 0.8m, 1.2m, 1.6m, 2.0m

구간에서의 사고를 모사하기 위해 적합한 물질이며, 현재 가장 널리 쓰이는 LNG의 80% 이상을 차지하는 주요 성분이기도 하다. 또한 공기보다 가벼워서 상대적으로 실험실 안전을 위해서도 적합하다.

실험장비는 Table 1, 실험 내용은 Table 2와 같이 정리하였다. 실험은 바람과 같은 대기상태에 따른 영향을 최소화하기 위해 실내에서 진행되었으며, 실험의 재현성을 확인하기 위해 동일한 조건에서 2회 이상 반복 진행한 후 같은 결과를 나타내는지 확인하였다. 각 실험 후에는 충분한 환기를 통해 연속적인 실험에서 사전 영향이 최소화되도록 하였으며, 2회 시험 모두 동일한 가스농도분포 결과를 나타내었다.

3.2. 실험 결과

반복적인 가스확산 실험 결과 600L/min의 누출이 발생했을 때 최대거리(L_{max})는 초기 누출 반경(R_0)의 160배에 이를 것으로 확인($L_{max} = 160 \cdot R_0$)되었고, 등간격으로 분포된 센서에서 Fig. 3과 같은 거리별 센서의 농도저하를 확인하였다. 가스 누출은 500초동안

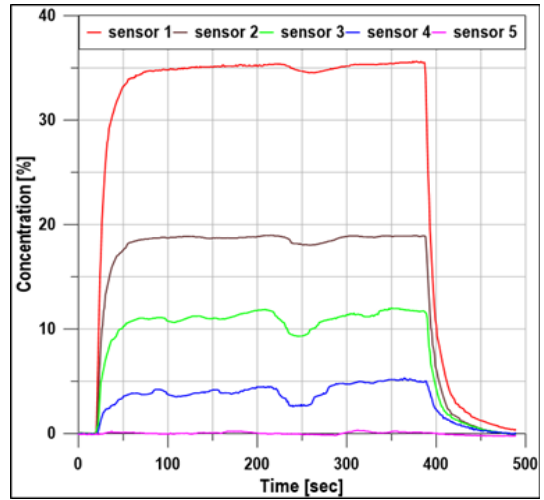


Fig. 3. Experimental data measured by concentration sensors.

지속했으며, 난류에 의한 간섭으로 인해 일시적인 농도 변화가 있었지만 전체적으로 질량 유량은 특정한 값에 잘 수렴하는 정상류 흐름을 보였다. 센서 1~5까지 농도값은 각각 35.5%, 18.5%, 12%, 4.9%, 0%인 것으로 측정되었다.

IV. 결과 비교

이론과 수치해석 모델링에서 무차원 속도크기, 즉 축방향 특정위치에서의 속도와 최대속도의 비를 비교하고, 수치해석과 실험 결과에 대해 농도값을 비교하였다. Fig. 3에서는 농도가 일정한 값을 보이는 정상상태(Steady-state)에서의 값을 Fig. 4와 직접적으로 비교할 수 있다. Fig. 3은 센서 1부터 5까지의 위치가 누출지점으로부터 최소 $L_1=0.4m$ 에서 $L_5=2.0m$ 까지 0.4m 마다 등간격으로 위치하고 있다. 이를 Fig. 4와 Fig. 6과 비교하기 위해서는 가로방향으로 센서가 위치한다는 것을 참고해야 한다. 그리고 실험, 수치해석, 이론의 정량적인 값에 대한 비교 결과는 Fig. 5와 Fig. 7에서 노즐의 크기를 이용해 무차원화된 값으로 표현하였다.

4.1. 거리별 농도 변화

앞서 실험을 통해 위치별 농도를 확인하였고, 수치해석과 비교하여 CFD 프로그램의 경향을 확인하였다. 누출되는 가스인 메탄의 농도분포에 대해 FLACS 결과는 Fig. 4(a)에서 보여주고 있고, CFX의 결과는 Fig. 4(b)와 같이 나타내었다. FLACS-CFD와 CFX 모

두 수식 (2)에서와 같이 부력에 의한 효과를 반영하고 있지만 밀도 및 모멘텀 계산에 따른 차이로 결과적으로 부력효과의 영향은 약간의 차이가 있었다. CFX에서는 상향하는 흐름이 FLACS-CFD보다 더 집중적으로 나타났으며, 반경 방향으로의 확산은 활발하지않다. FLACS-CFD에서는 축 방향 모멘텀이 빠르게 반경 방향 모멘텀으로 변화하고, 그 결과로 반경 방향으로 농도가 더 넓게 분포하는 결과를 보여준다.

Fig. 5는 CFD 결과와 실험결과를 정량적으로 비교하였다. 실험에서는 누출 후 초기부터 빠른 희석이 나타났다으며, 누출지점 축방향으로 거리가 멀어질수록 완만한 기울기의 농도 변화를 보인다. 한편 FLACS-CFD에서는 누출 후 초기에 희석되는 정도를 나타내는 기울기가 실험보다 가파를 것으로 예측했으며, 거리가 멀어질수록 실험과 유사한 기울기를 가질 것으로 계산되었다. 전반적으로 FLACS-CFD에서는 누출량이 크지 않은 경우 초기에 급격한 확산 및 소산 과정으로 인해 농도변화율을 과대평가하는 경향이 발생할 수 있는 것으로 나타났다. 이는 격자 크기와 무관하였으며, 누출량은 600 L/min 이하를 의미한다. 한편, CFX에서는 누출된 방향으로의 모멘텀이 초기에는 반경 방향으로의 확산, 회전 등으로의 전이가 낮아서 누출지점과 가까운 지점($L < 20 \cdot R_0$)까지는 운동량이 부력항이나 소산율에 비해 매우 지배적이며, 따라서 초기 농도가 거의 유지되었다. 그 이후 급격하게 축방향 가스농도값이 감소하면서 $L_1(L = 32 \cdot R_0)$ 에서 측정된 농도와 유사한 농도값을 보이는 것으로 해석되었다. $L > 35 \cdot R_0$ 부터는 실험보다 저평가하는 경향을 보였는데 이는 부력에 따른 효과를 실제보다 다소 높게 평가하기 때문인 것으로 확인된다.

4.2 거리별 속도 변화

수치해석 모델에서의 속도 분포를 Fig. 6에서 나타내었다. 전체적으로Fig. 4와 비교해볼 때 축방향 농도 변화와 유사성이 있는 것을 알 수 있다.

가스가 누출되는 축방향 중심점($L=0, r=0$)을 기준으로 L 이 커질 때의 속도값을 CFD 프로그램(FLACS, ANSYS CFX)과 Self-similar 이론을 적용하여 Fig. 7과 같이 비교하였다.

자기유사성 이론을 이용한 가스누출 축방향 속도 변화 결과는 모멘텀의 영향력이 큰 누출 초기 영역에서 농도변화기울기와 가장 유사함을 알 수 있다. 그리고 누출 지점과 거리가 멀어질수록 속도변화율은 점점 낮아지는데 CFD가 부력항에 의해 유체 흐름 방향이 바뀌는데 비해 self-similar solution에서는 이 부분이 반영이 되지 않으며, 이는 공기보다 가벼운 물질에 대해서는 축방향 속도를 높게 예측하는 해석 결과를

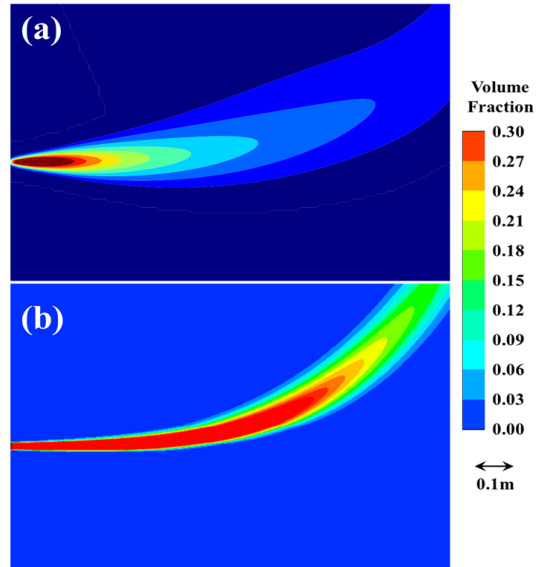


Fig. 4. Contour plots for CH₄ volume fractions. (a)FLACS-CFD, (b)CFX

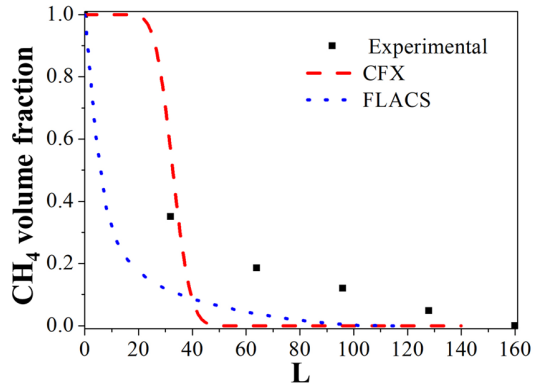


Fig. 5. Concentration level comparison of the experimental data with CFD results.

보여준다고 할 수 있다.

CFX의 해석 결과에서는 실험과 비교한 거리별 농도변화율보다 완만하지만 비슷한 패턴을 보여주고 있다. 누출 후 모멘텀 지속된 후 속도 구배가 시작되는 지점($L = 20 \cdot R_0$)부터는 self-similar solution의 속도 구배와 유사하며, $L > 50 \cdot R_0$ 부터 self-similar solution의 속도 구배는 점점 완만해지는데 CFX에서는 $L = 80 \cdot R_0$ 까지 급격한 속도 감소를 보여주고 있다. 두

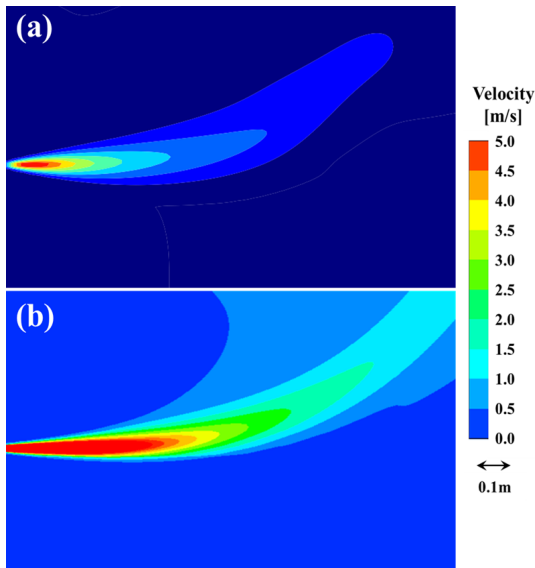


Fig. 6. Velocity plot. (a)FLACS-CFD, (b)CFX

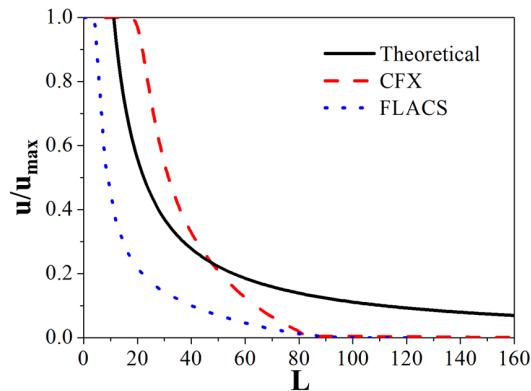


Fig. 7. Axial velocities comparison of the experimental data with CFD results along the centerline of the leak hole

CFD의 결과에서 $L > 80 \cdot R_0$ 부터 속도가 0에 가까운 것은 부력으로 인해 더 이상 축방향 흐름이 없기 때문이다.

FLACS-CFD에서 속도변화율과 농도변화율의 유사성이 CFX에서 계산된 두 값의 유사성보다 높다. FLACS-CFD에서는 누출 초기부터 축 방향으로의 운동량 전달이 낮고, 반경방향으로의 모멘텀 전이가 많다. 속도변화율 패턴에서는 Self-similarity 이론과, CFX보다 더 유사하게 나타났다.

V. 결론

본 연구에서는 메탄 누출 사고에 대한 누출 위치 근처에서의 접근방법별 유동 특징을 비교하기 위해 이론, 수치해석, 그리고 실험으로부터의 결과를 비교하였다.

1) 실험에서 가스는 축방향으로 누출반경의 최대 160배 지점까지 확산되는 것으로 나타났다. 그리고 실험으로부터 측정된 농도 데이터와 수치해석 결과를 비교했을 때 FLACS-CFD는 누출지점에서부터 가까운 거리에서는 농도변화율이 실험보다 다소 높지만, 일정 거리 이후에는 실험과 유사하게 나타났다. CFX에서는 누출 후 농도저하가 반경 20배 이후의 위치에서부터 시작되었으며, 그 이후 부력으로 인해 흐름이 상승하여 축의 높이에서는 농도가 낮게 계산되었다.

2) 가스누출 지점으로부터 축방향으로의 거리별 속도변화율을 난류 제트 Self-similarity 이론과 수치해석을 이용하여 비교 정리하였다. 수치해석에서의 속도분포는 농도분포와 높은 유사성을 보였다. 누출지점으로부터 거리가 멀어질수록 Self-similarity 이론에서 수치해석보다 속도변화율이 작은 것으로 계산되었다.

3) FLACS 결과와 실험과의 농도변화율은 위치면에서 차이가 있지만 변화기울기는 매우 유사하다. 따라서 위치에 따른 보정값을 이용한다면 FLACS-CFD의 결과가 신뢰도가 더 높으며, 실험값을 잘 예측할 수 있을 것으로 기대된다. 속도변화율 패턴에서는 Self-similarity 이론과 유사하게 나타났다.

향후 부력과 누출 모멘텀의 상호작용을 추가적으로 수치해석 및 실험을 통해 연구할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 22RMPP-C163162-02).

REFERENCES

- [1] 통계청 홈페이지, “가스별 가스사고 현황(수록기간: 2018~2020)”, <https://kosis.kr/>
- [2] Ohmstede, W. D., and Stenmark, E. B., “Parameterization of the dispersion of battlefield obscurants”,

- In Proc. Smoke/Obscurants Symposium V*, 517-525, (1981)
- [3] Cogan, J. L., “Monte Carlo simulation of buoyant dispersion”, *Atmospheric Environment*, 19(6), 867-878, (1985)
- [4] Gopalakrishnan, S. G., and Sharan, M., “A Lagrangian particle model for marginally heavy gas dispersion”, *Atmospheric environment*, 31(20), 3369-3382, (1997)
- [5] Ha, T.W., Ha, J.M., Kim, E.J., “The Diffusion Behavior Analysis Caused by High Pressure Natural Gas Leak in Enclosure with and without Ventilation System (I)”, *KIGAS*, 16(4), 23-31, (2012)
- [6] Jang, C.B., Lee, H.J., Lee, M.H., Min D.C., Back, J.B., Ko, J.W., Kwon, H.M., “CFD Simulation Study to analyze the Dispersion and Explosion of Combustible Gas”, *KIGAS*, 16(5), (2012)
- [7] Jung, I.G., Yoo, S.B., Lee, S.K., Kim, L.H., “Assessment of Gas Release Dispersion and Explosion in Pipeline”, *KIGAS*, 2(2), 61-69, (1998)
- [8] Tauseef, S. M., Rashtchian, D., & Abbasi, S. A. “CFD-based simulation of dense gas dispersion in presence of obstacles”, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 24(4), 371-376, (2011)
- [9] Schlichting, H., *Boundary Layer Theory*, 8th edn., Springer, Heidelberg, (2000)
- [10] Sedov, L. I., *Similarity and Dimensional Methods in Mechanics*, 10th edn., CRC, Boca Raton, (1993)
- [11] Stewartson, K., *The Theory of Laminar Boundary Layers in Compressible Fluids*, Clarendon, Oxford, (1965)
- [12] Pai, S.I., *Fluid Dynamics of Jets*, van Nostrand, Toronto, New York, (1954)
- [13] Vulis, L. A., Kashkarov, V. P., *Theory of Viscous Liquid Jets*, Nauka, Moscow, (1965)
- [14] Abramovich, G. N., *The Theory of Turbulent Jets*, MIT, Cambridge, (1963)
- [15] Yarin, A. L., Self-similarity, *Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics*, (Editors C. Tropea, A.L. Yarin, J. Foss), 57-82, Springer, Heidelberg, (2007)
- [16] Gexcon, “FLACS-CFD v20.1 Users Manual”, (2020)