KIGAS Vol. 28, No. 1, pp 11~18, 2024
(Journal of the Korean Institute of Gas)
https://doi.org/10.7842/kigas.2024.28.1.11

CFD 기반 인화성 액체 누출 시 최적의 환기구 배치 도출 방안

김은희 · 안승효 · 이준서 · †마병철*
전남대학교 화학공학과 석사과정, *전남대학교 화학공학과 교수
(2023년 9월 1일 접수, 2023년 11월 26일 수정, 2024년 1월 16일 채택)

Method to Derive the Optimal Vent Position when Flammable Liquid Leaks Based on CFD

Eun-Hee Kim · Seung-Hyo An · Jun-Seo Lee · †Byung-Chol Ma
Dept. of Chemicals Engineering, Chonnam National University, Gwangju, Korea
(Received September 1, 2023; Revised November 26, 2023; Accepted January 16, 2024)

요 약

인화성 액체가 누출되면 풀에서 증발된 증기로 인해 근로자들에게 중독이나 질식 등의 피해를 불러올 수 있으며 화재나 폭발 등의 2차 사고로 이어질 수 있다. 이러한 피해를 예방하기 위하여 실내 작업장을 설계할 때 환기설비를 설치해야 한다. 이때, 누출된 화학물질의 특성에 따라 거동이 상이하므로 물질에 따른 적합한 환기구의 위치를 선정할 필요가 있다. 따라서 최적의 환기구 배치를 도출하기 위하여 3D CFD 시뮬레이션을 도입하였고 환기구 배치에 따른 환기효율을 정량적으로 평가하였다. 이때, 실내 작업장에서 인화성 액체가 누출되어 풀을 형성하는 상황을 가정하였고 풀에서 증발된 증기의 농도를 비교하여 최적의 환기구 배치를 도출하였다. 증기밀도가 큰 톨루엔을 대상물질로 하여 연구를 진행한 결과, 상부급기-하부배기일 때 환기효율이 가장 높아 동일한 유지비용으로 약 3.7배의 환기효과를 보이는 것을 확인하였다. 본 연구를 통해 작업장은 시뮬레이션 결과를 적용하여 환기구를 설치함으로써 근로자의 안전성을 확보할 수 있을 것으로 기대한다.

Abstract - If flammable liquid leaks, vapor evaporated from the pool can cause poisoning or suffocation to workers, leading to secondary accidents such as fires and explosions. To prevent such damage, ventilation facilities shall be installed when designing indoor workplaces. At this time, the behavior varies depending on the characteristics of the leaked chemical, so it is necessary to select a suitable vent location according to the material. Therefore, 3D CFD simulations were introduced to derive optimal vent position and ventilation efficiency was quantitatively evaluated by vent position. At this time, assuming a situation in which flammable liquids leak at indoor workplaces to form pools, the concentration of vapor evaporated from pools was compared to derive the optimal vent position. As a result of research on toluene with high vapor density, ventilation efficiency was confirmed to be the highest at the upper supply-lower exhaust, and it is judged that introducing it can achieve about 3.7 times ventilation effect at the same maintenance cost. Through this study, it is expected that the workplace will be able to secure workers' safety by applying simulation results and installing ventilation ports.

Key words : ventilation, optimization, CFD

†Corresponding author:anjeon@jnu.ac.kr
Copyright ⓒ 2024 by The Korean Institute of Gas

I. 서 론

2014년부터 2023년 10월까지 약 10년간 국내에서 화학사고 819건 중 약 79%가 화학물질 누출로 인한 사고이며, 화재나 폭발에 비해 높은 비율을 차지하고 있다[1]. 특히 실내 작업장에서 인화성 액체가 누출되면 풀에서 증발된 증기로 인하여 근로자들의 중독이나 질식 등의 피해를 불러올 수 있다. 또한 Saint-Herblain (France, 1991), Buncefield (UK, 2005), Jaipur (India, 2009) 등의 사고를 보면 풀(pool)에서 증발된 증기가 점화되어 화재나 폭발로 이어지므로[2] 실내에서 증기의 농도를 낮출 수 있도록 적절한 환기 설비를 설치하여 안전성 확보를 해야 한다.

환기설비는 실내의 오염물질을 외부로 방출하고 화재가 발생하였을 때 유독가스의 확산을 막는 중요한 역할을 하므로 정량적인 설계가 필요하다[3]. 하지만 많은 작업장이 환기설비의 중요성에 대한 인식 부족과 주로 경제적인 사유로 적절한 환기설비를 적용하지 않고 있다[4]. 환기는 동력 사용 유무에 따라 자연환기와 강제환기로 분류되며, 일반적으로 자연환기로 증기를 충분히 제거할 수 있으나 자연환기로 증기를 제거하는데 충분하지 않은 경우, 강제 배기 장비를 사용해야 한다. 「건축물의 설비기준 등에 관한 규칙」[별표 1의5]를 보면 기계 환기 체계를 바깥공기를 공급하는 송풍기와 실내공기를 배출하는 송풍기가 결합된 환기 (1종 환기), 바깥공기를 공급하는 송풍기와 실내공기가 배출되는 배기구가 결합된 환기 (2종 환기), 바깥공기가 도입되는 공기흡입구와 실내공기를 배출하는 송풍기가 결합된 환기 (3종 환기)로 정의하고 있다[5]. 1종 환기는 일반적인 건물에서 많이 쓰이고 있으며, 2종 환기는 실내가 정압이 되어 오염공기가 실내로 침입하지 않아 수술실과 같은 클린룸에 적용된다. 반대로 3종 환기는 실내가 부압이 걸려 실내공기가 실외로 유출되지 않는 특성이 있어 유해가스가 발생하는 실험실, 공장 등에 적용된다[6]. 따라서 각 환기 시스템의 특징을 고려하여 환기의 목적에 따른 적절한 환기방법을 선정해야 한다.

또한, 환기는 급기량, 급·배기구의 위치, 근로자의 위치 등에 따라 효율이 달라진다[7]. 특히 화학물질이 누출되면 물질의 휘발성 및 증기밀도 등에 따라 거동이 상이하므로 화학물질에 따른 효율적인 급·배기구 위치를 확인할 필요가 있다[8]. 이와 관련하여 선행된 연구를 분석하였다. Zhang et al.[9]은 수소를 대상물질로 하여 통풍구의 위치나 면적에 따른 농도 변화를 Computational Fluid Dynamics(CFD) 시뮬레이션을 통해 연구한 결과, 천장과 가까운 통풍구가 수소 가스 배출을 원활하게 함을 확인하였다. 이재원 et al.[10] 또한 수소 실험 데이터를 기준으로 CFD 시뮬레이션을 통해 환기구 위치에 따른 환기효율을 분석하였고, 교차배기 구성이 상단, 하단 구성보다 더 효과적인 것을 확인하였다. 오정은[12] 은 실험 및 시뮬레이션을 통해 암모니아를 대상으로 측면의 급·배기구 위치 및 환기량에 따른 환기효율을 평가하였다. 그 결과, 급·배기구 간 거리(유로)가 길 때, 높은 환기 성능을 보이는 것을 확인하였다. 또한, 오정은[11]과 Chung et al.[12]은 추적가스를 이용한 농도감쇠법을 적용한 실험을 통해 환기성능을 평가하였다.

이처럼 환기구 위치에 따른 환기효율을 비교하는 선행연구는 CFD 시뮬레이션을 활용하고 있으며, 시뮬레이션을 적용함으로써 환기 효율과 같은 기류 분포에 대한 분석을 할 수 있다[13]. 하지만 대부분의 선행연구가 가스 상태인 물질로 진행되었으며, 액체 화학물질의 누출에 따른 환기구 위치 최적화에 관한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 CFD 시뮬레이션을 활용하여 실내 사업장에서 발생 가능한 인화성 액체의 누출을 가정한 급·배기구의 위치 조합에 따른 환기효율을 비교하였다.

II. 연구 방법

본 연구는 인화성 액체를 취급하는 작업장에서 누출이 발생하여 풀을 형성하였을 때 작업장 내의 물질의 증기 농도를 신속하게 배출할 수 있는 최적의 급·배기구 위치를 찾는데 목적이 있다. 이를 위하여 화학물질의 누출 등을 정량적으로 평가하는데 특화된 CFD 시뮬레이션을 도입하였다. 시뮬레이션을 구동하기 위하여 인화성 액체가 누출되어 풀을 형성한 상황을 가정하였고, 작업장 크기의 챔버에서 각각의 급·배기구 조합에 따라 강제 환기를 실시하였다. Fig. 1은 시뮬레이션 모델링을 그림으로 나타낸 것이다.

이때 농도감쇠법을 적용하여 챔버 내 화학물질의

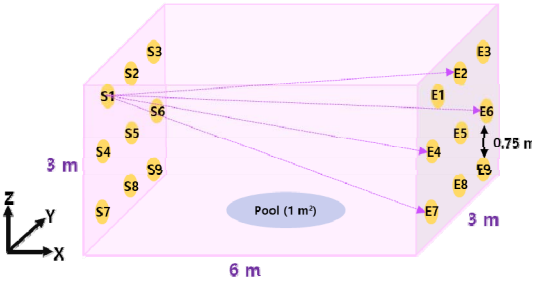


Fig. 1. Simulation modeling.

질량농도 변화를 확인하였고, 각 급·배기구 위치에 따른 농도 감소율을 계산하여 최적의 환기구 배치를 도출하였다.

2.1. 시나리오 선정

대표적인 인화성 액체 물질의 누출사고인 풀 누출 후 증발 상황을 시나리오로 선정하였고 증발 시간은 5분, 누출물질은 작업장에서 널리 사용되는 유기용제인 톨루엔으로 선정하여 시뮬레이션하였다. KOSHA GUIDE 인화성 물질의 누출에 대한 안전조치 기술지침에 따르면 자연환기로 증기를 제거하는 데 충분하지 않는 경우 강제 배기를 사용하도록 명시되어 있으며 이때, 신선한 공기를 공급하기 위하여 개구부를 개방하되 강제로 공기를 주입해서는 안된다[14]. 따라서 관련 지침을 참고하여 실내 작업장에서 누출된 인화성 액체에서 5분간 발생한 증기를 자연 급기, 강제 배기의 방법으로 환기를 할 때, 급·배기구 조합에 따른 환기효율을 비교하였다. 이때 누출된 톨루엔의 온도는 25 ℃로 가정하였고, Fig. 2는 시뮬레이션 시나리오를 나타낸 것이다.

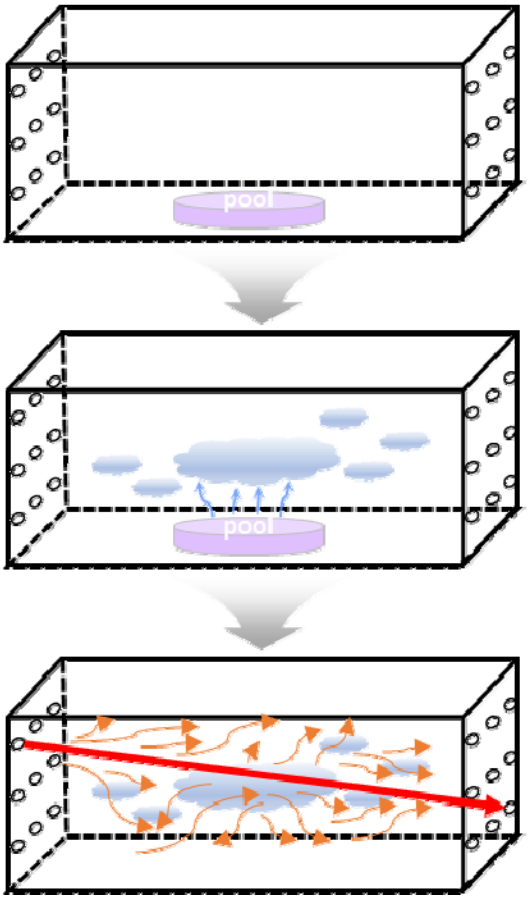


Fig. 2. Simulation scenario.

2.2. 시뮬레이션 조건

챔버 사이즈는 Fig. 1과 같이 작업장 측면의 넓이 비가 1 : 2 가 되도록 6 m × 3 m × 3 m로 설정하였고, 급기구와 배기구는 3 m × 3 m 넓이의 양쪽 벽면에 동일한 크기로 가정하였다. 이때, 급·배기구의 크기는 「화학물질관리법」시행규칙에 명시되어 있는 바닥면적에 따른 급기구 최소 면적인 0.015 m^2의 원형모양으로 설정하였다[15]. 급·배기구의 위치는 각각 0.75 m 간격을 두어 9개로 설정하였고, Table 1과 같이 급기구의 경우 S1~S9, 배기구의 경우 E1~E9로 지정하였다. 또한, 챔버를 중심으로 X(0 m ~ 6 m), Y(0 m ~ 3 m), Z(0 m ~ 3 m)의 영역을 대상 부피로 지정하여 해당 영역에서 물질의 농도를 확인할 수 있도록 설정하였다[16].

챔버 한가운데(3, 1.5, 0.01)에 1 m2의 풀을 형성하여 5분 간 강제환기없이 증발시켰다. 이때, 챔버 내에서 톨루엔이 증발되어 확산되는 거동을 확인할 수 있었고, 증발된 톨루엔의 농도를 확인하였다. 또한, FLACS fan 기능을 통해 강제 배기를 설정하였다. KOSHA GUIDE 인화성 액체의 안전한 사용 및 취급에 관한 기술지침에는 배기설비의 용량이 시간당 6 회 이상이 되도록 명시되어 있다[17]. 본 연구의 환기구 면적을 고려했을 때 fan 속도는 6 m/s 이상이어야 하며, 배출된 공기가 주변지역에 영향을 미치지 않도록 10 m/s로 설정하였다. 이때, 유량을 계산하면 9 m3/min이며, Air Changes per Hour(ACH)를 계산하면 10/h이다. fan 구동시간을 15 분으로 하여 시뮬레이션을 구동하였고

Table 1. Supply and Exhaust coordinates [m]

	X	Y	Z		X	Y	Z
S1	0	0.75	2.25	E1	6	0.75	2.25
S2	0	1.51	2.25	E2	6	1.51	2.25
S3	0	2.25	2.25	E3	6	2.25	2.25
S4	0	0.75	1.51	E4	6	0.75	1.51
S5	0	1.51	1.51	E5	6	1.51	1.51
S6	0	2.25	1.51	E6	6	2.25	1.51
S7	0	0.75	0.75	E7	6	0.75	0.75
S8	0	1.51	0.75	E8	6	1.51	0.75
S9	0	2.25	0.75	E9	6	2.25	0.75

시간 경과에 따른 환기효율을 비교하였다. Table 2는 시뮬레이션 입력조건을 정리한 것이다.

급·배기구는 각각 9 개로 81 가지의 조합으로 구성되지만 S1 조건과 S3 조건이 동일하다고 판단하여 결과값을 동일하게 적용시켰다. 마찬가지로 S6, S9의 시나리오도 S4, S7과 동일하게 적용하였다. 또한, S2-E1과 S2-E3 경우도 동일한 조건으로 판단하였고 같은 이유로 S2-E6, S2-E9, S5-E3, S5-E6, S5-E9, S8-E3, S8-E6, S8-E9의 조건을 제외하여 최종적으로 Fig. 3과 같이 45가지의 급·배기구 조합을 시뮬레이션하였다.

2.3. 평가방법

급·배기구 조합을 다르게 하여 시뮬레이션한 결과를 바탕으로 환기효율을 비교하기 위하여 추적가스법을 적용하였다. 따라서 관측 영역에서 환기 전, 후의 톨루엔의 농도를 확인하여 농도 감소율을 계산하였다. 농도 감소율을 계산하는 식은 식 (1)로 정리하였으며, 화학물질의 농도 분포는 챔버 내부의 기류와 물질의 상호작용으로 발생하므로 환기효율의 기준으로 활용할 수 있다[12].

Table 2. FLACS simulation conditions.

Pool position	(3, 1.5, 0.01)
Pool area	1 m^2
Fan position	E1~E9 (Fig. 1, Table 1)
Fan flow rate	9 m^3/min
Fan duration	900 s
Ambient temperature	293 K
ACH	10

		Supply								
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
Exhaust	E1	(S1,E1)	(S2,E1)	(S3,E1) =(S1,E3)	(S4,E1)	(S5,E1)	(S6,E1) =(S4,E3)	(S7,E1)	(S8,E1)	(S9,E1) =(S7,E3)
	E2	(S1,E2)	(S2,E2)	(S3,E2) =(S1,E2)	(S4,E2)	(S5,E2)	(S6,E2) =(S4,E2)	(S7,E2)	(S8,E2)	(S9,E2) =(S7,E2)
	E3	(S1,E3)	(S2,E3) =(S2,E1)	(S3,E3) =(S1,E1)	(S4,E3)	(S5,E3) =(S5,E1)	(S6,E3) =(S4,E1)	(S7,E3)	(S8,E3) =(S8,E1)	(S9,E3) =(S7,E1)
	E4	(S1,E4)	(S2,E4)	(S3,E4) =(S1,E5)	(S4,E4)	(S5,E4)	(S6,E4) =(S4,E5)	(S7,E4)	(S8,E4)	(S9,E4) =(S7,E6)
	E5	(S1,E5)	(S2,E5)	(S3,E5) =(S1,E5)	(S4,E5)	(S5,E5)	(S6,E5) =(S4,E5)	(S7,E5)	(S8,E5)	(S9,E5) =(S7,E5)
	E6	(S1,E6)	(S2,E6) =(S2,E4)	(S3,E6) =(S1,E4)	(S4,E6)	(S5,E6) =(S5,E4)	(S6,E6) =(S4,E4)	(S7,E6)	(S8,E6) =(S8,E4)	(S9,E6) =(S7,E4)
	E7	(S1,E7)	(S2,E7)	(S3,E7) =(S1,E9)	(S4,E7)	(S5,E7)	(S6,E7) =(S4,E9)	(S7,E7)	(S8,E7)	(S9,E7) =(S7,E9)
	E8	(S1,E8)	(S2,E8)	(S3,E8) =(S1,E8)	(S4,E8)	(S5,E8)	(S6,E8) =(S4,E8)	(S7,E8)	(S8,E8)	(S9,E8) =(S7,E8)
	E9	(S1,E9)	(S2,E9) =(S2,E7)	(S3,E9) =(S1,E7)	(S4,E9)	(S5,E9) =(S5,E7)	(S6,E9) =(S4,E7)	(S7,E9)	(S8,E9) =(S8,E7)	(S9,E9) =(S7,E7)

Fig. 3. Scenarios according to the combination of supply and exhaust.

$$Reduction\,rate(\%) = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

여기서, C_0는 톨루엔의 초기 농도 , C_t는 t 초에서의 톨루엔 농도를 의미한다.

따라서 환기 시작 후 50초, 100초, 150초, 200초, 250초, 300초, 600초, 900초를 기준으로 배기구 조합별 농도 감소율을 비교하였고, 모든 조합이 목표 농도에 도달하는 시간을 확인하여 환기효율 상위그룹과 하위그룹으로 분류하여 비교하였다. 이때, 목표 농도는 톨루엔의 Threshold Limit Value(TLV)인 50 ppm으로 설정하였다.

Ⅲ. 연구결과

3.1. 강제환기 전 톨루엔 거동 분석

Fig. 4와 같이 챔버 내 한가운데에 톨루엔 풀 1 m^2를 형성하여 5 분 간 시뮬레이션을 구동하였다. 이때 챔버 내부는 풍속이나 fan 조건이 없어 외부 요인 없는 순수한 톨루엔의 확산 경향을 확인할 수 있다[18]. 5분 경과 시 챔버 내에 증발된 톨루엔의 질량은 약 20.4 g으로 챔버 내부 전체에 98.71 ppm을 형성하였다. 톨루엔의 경우 증기 밀도가 공기보다 크기 때문에 Pool 증발 시 챔버 하부에 증기가 머무는 것을 확인하였다. 이때, 가장 낮은 급·배기구 높이인 0.75 m 이하로 대상 부피를 조정하여 농도를 확인한 결과 톨루엔 증기의 약 98%가 0.75 m 이하에 형성된 것을 확인하였다.

따라서 환기 전 챔버 내부 농도인 98.71 ppm을 초기 농도로 하여 급·배기구 조합에 따른 농도 감소율을 비교하였다.

3.2. 환기 시 챔버 내부 기류

Fig. 5는 하부에 톨루엔이 형성된 상황에서 fan을

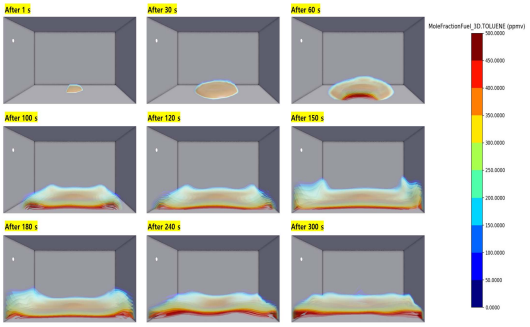


Fig. 4. Simulation result of toluene pool evaporation (3D-Isosurface).

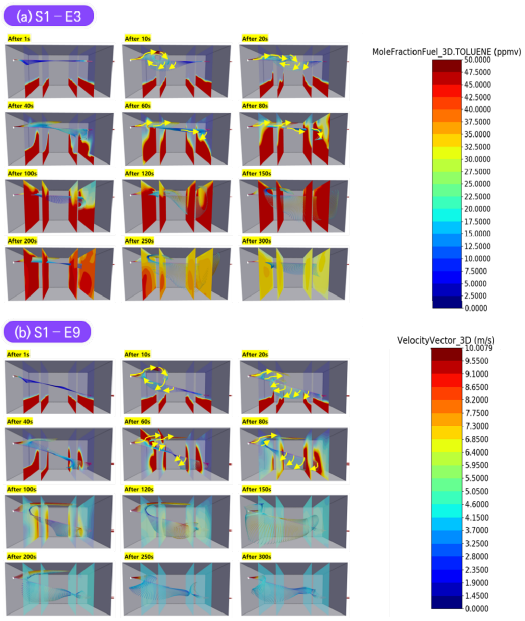


Fig. 5. Airflow velocity vector field and concentration distribution (a)S1-E3, (b) S1-E9.

통해 강제 배기를 할 때 챔버 내부의 기류와 톨루엔 농도 변화를 나타내었다. 챔버 내부의 톨루엔이 희석되고 배기구를 통해 빠져나가 농도가 점차 낮아지는 것을 확인할 수 있으며, 동일한 급기구 위치에서 배기구의 위치에 따라 질량 감소율이 달라지는 것을 확인할 수 있다.

3.3. 급·배기구 위치에 따른 환기효율 평가

Table 3은 앞에서 선정한 45 가지 시나리오를 시뮬레이션한 결과로 챔버 내 톨루엔의 농도 감소율을 계산하여 정리한 것이다. 환기 후 시간이 경과함에 따라 톨루엔의 농도가 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 농도 감소율을 통해 환기효율을 비교할 수 있다. Table 3의 시간에 따른 농도 감소율을 보면 환기 시작 후 100초에서는 급·배기구 위치에 따른 감소율이 최대 약 5.97 배 차이가 나지만 시간이 흐를수록 일정 감소량 이상이 되면 그 차이가 줄어들어 900 초가 경과되었을 때 최대 1.12 배 차이가 나는 것을 확인하였다.

또한, 화학물질이 누출되었을 때 근로자에게 노출로 인한 피해를 최소화하기 위해서는 빠른 환기가 필요하므로 목표 농도를 톨루엔의 TLV 농도인 50 ppm으로 설정하고, 목표 농도에 도달하는데 소요된 시간을 확인하여 Fig. 6으로 정리하였다.

그 결과, 목표 농도에 가장 빠르게 도달한 조합은

		Supply								
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
Exhaust	E1	170.96	173.01	191.11	166.75	168.49	178.54	166.55	167.16	186.43
	E2	173.74	173.56	173.74	167.62	171.06	167.62	173.39	173.76	173.39
	E3	191.11	173.01	170.96	178.54	168.49	166.75	186.43	167.16	166.55
	E4	162.26	163.65	96.67	159.63	154.72	100.32	150.83	158.51	98.81
	E5	171.39	172.16	171.39	169.36	161.79	169.36	159.41	168.87	159.41
	E6	96.67	163.65	162.26	100.32	154.72	159.63	98.81	158.51	150.83
	E7	95.67	90.28	52.94	94.92	96.51	53.16	102.29	110.22	55.05
	E8	68.62	70.27	68.62	70.36	70.23	70.36	75.26	75.84	75.26
	E9	52.94	90.28	95.67	53.16	96.51	94.92	55.05	110.22	102.29

Fig. 6. Time to target concentration (50 ppm).

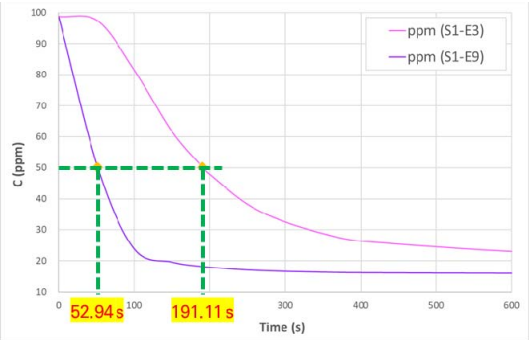


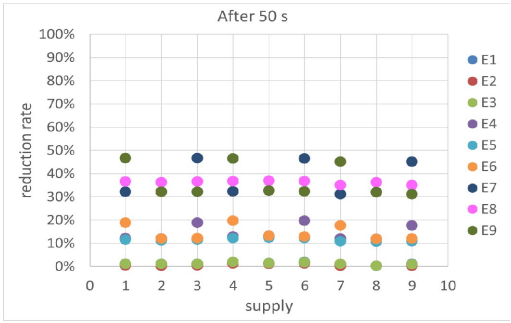
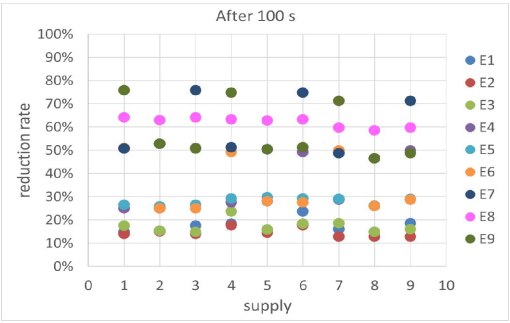
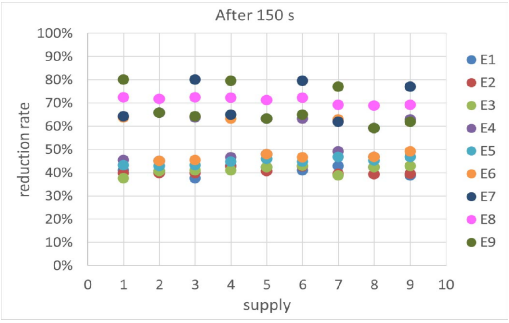
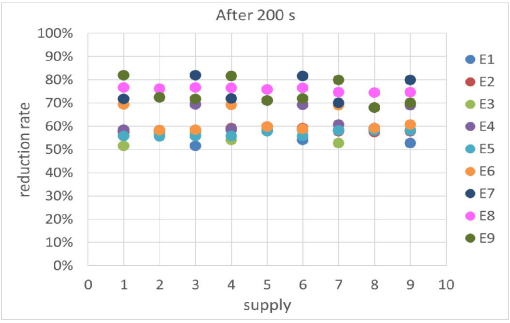
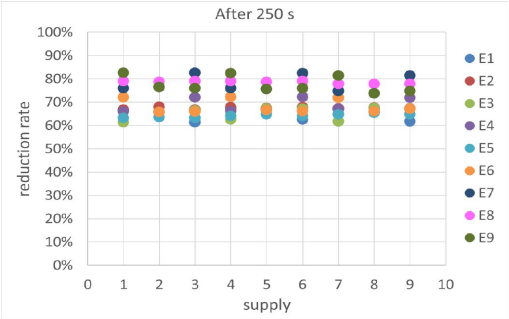
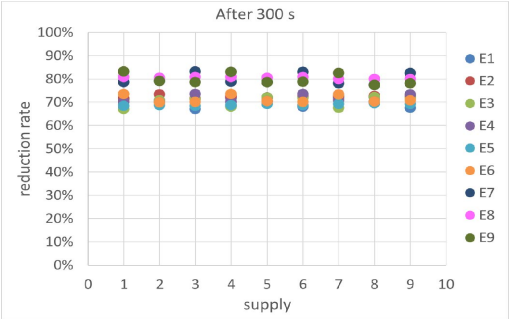
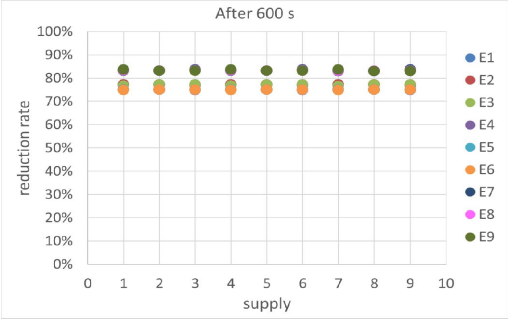
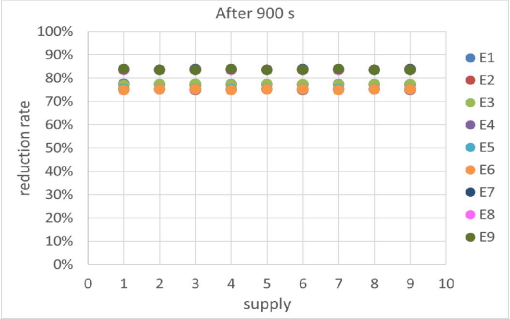
Fig. 7. Variation of toluene concentration with time (S1-E3, S1-E9).

S1-E9로 약 53 초가 소요되었으며, 가장 느리게 도달한 조합은 S1-E3으로 191 초가 소요되었다. Fig. 7은 S1-E9과 S1-E3의 농도 감소 그래프를 나타낸 것이다.

환기 시작 후 챔버 내 톨루엔의 온도가 목표 농도(50 ppm) 이하로 떨어지는 시간을 기준으로 환기효율 상위 그룹(S1-E9, S4-E9, S7-E9)과 하위 그룹(S1-E3, S7-E3, S4-E3)으로 분류하여 Fig. 8로 나타내었다.

그 결과, 전체적으로 배기구의 높이가 낮을 경우, 목표 농도로 빠르게 환기되었으며, 배기구의 높이가 높아질수록 목표 농도에 도달하는 시간이 긴 것을 확인하였다. 또한, 하부 배기구(E9)일 경우, 급기구의 높이가 높을수록 목표 농도에 빠르게 도달하는 것을 확인하였고, 급기구와 배기구가 같은 높이에 있을 때 직선 배치보다 대각 배치가 더 효과적인 것을 확인하였다.

Table 3. Concentration reduction rate according to the location of the supply and exhaust

After 50 s	After 100 s
	
After 150 s	**After 200 s**
	
After 250 s	**After 300 s**
	
After 600 s	**After 900 s**
	

	Ranking	Combination	Time to reach target concentration
Top Ranking	1	(S1,E9), (S3,E7)	52.94 s
	2	(S4,E9), (S6,E7)	53.16 s
	3	(S7,E9), (S9,E7)	55.05 s

	Ranking	Combination	Time to reach target concentration
Bottom Ranking	1	(S1,E3), (S3,E1)	191.11 s
	2	(S7,E3), (S9,E1)	186.43 s
	3	(S4,E3), (S6,E1)	178.54 s

Fig. 8. Ranking for time to reach target concentration.

이는 급기구와 배기구가 다른 높이에 있을 때 공기의 순환이 길어져 톨루엔의 혼합이 더 활발해지고 [19], 배기구가 오염원과 가까운 하부에 있을수록 톨루엔의 배출이 빠르게 이루어지기 때문이다.

이로써 동일한 환기조건에서 급·배기구 위치만으로 환기 효율을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 따라서 물질의 특성에 따라 환기구의 위치를 최적화함으로써 환기효율을 극대화할 수 있을 것으로 판단된다.

Ⅳ. 결 론

본 연구에는 인화성 액체를 취급하는 작업장에서 환기설비를 설치할 때 환기효율이 최대가 되는 급·배기구 위치를 CFD 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 먼저 챔버 한가운데에 누출된 톨루엔 풀 1 m^2에서 증발된 톨루엔의 거동을 확인하였다. 시뮬레이션은 풀 형성 후, 강제환기에 의한 흐름이 없는 상태로 300 초간 구동하였고 그 결과, 톨루엔의 증기가 챔버 하부에 형성되는 것을 확인하였다. 또한, 급·배기구 위치에 따른 45 가지 시나리오를 시뮬레이션한 결과를 바탕으로 챔버 내 톨루엔의 감소율을 계산하였다. 또한, 목표 농도(50 ppm)에 도달하는 시간을 기준으로 환기효율 상위 그룹과 하위 그룹으로 분류하여 비교분석하였다. 가장 빠른 환기를 보이는 조합(S1-E9)과 가장 느린 환기를 보이는 조합(S1-E3)을 비교하였을 때, 약 3.7배 차이가 나는 것을 확인하였다. 이러한 시뮬레이션 결과를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 톨루엔의 증기밀도가 공기보다 커 바닥에 체류하면서 상부로 확산되는 거동을 확인하였다. 이렇듯 물질의 고유한 특성에 따라 누출 시 거동이 상이하게 나타나므로 작업장은 취급하는 물질에 따라 급·배기구의 위치를 최적화할 필요가 있다.

2. 톨루엔을 대상 물질로 45 가지의 급·배기구 조합의 경우를 시뮬레이션한 결과, 환기 효율 상위 그룹(S1-E9, S4-E9, S7-E9)은 전체적으로 배기구의 높이가 낮게 위치하고 있으며, 환기 효율 하위 그룹(S1-E3, S7-E3, S4-E3)의 경우 전체적으로 배기구의 높이가 높은 것을 확인하였다. 또한, 하부 배기(E9)의 경우, 급기구의 높이가 높을수록 목표 농도에 빠르게 도달하는 것을 확인하였고, 급기구와 배기구가 같은 높이에 있을 때 직선 배치보다 대각 배치가 더 효과적인 것을 확인하였다. 이는 톨루엔의 증기가 챔버 하부에 형성되어 하부 배기에서 빠르게 배출되고, 급기구와 배기구가 다른 위치에 있을 때 공기의 혼합을 촉진시키기 때문이다. 따라서 인화성 액체를 취급하는 작업장의 경우, 상부 급기-하부 배기를 하는 것이 환기 효율을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

3. 급·배기구의 위치를 최적화하기 위하여 시뮬레이션을 도입하여 환기효율을 정량적으로 평가하는 방법을 제시하였다. 작업장에서 최적화된 위치에 환기구를 설치한다면 환기효율을 극대화하여 동일한 유지비용으로 최대 3.7배의 환기효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구는 톨루엔 취급 설비를 대상으로 환기효율을 극대화 할 수 있는 급·배기구의 위치를 CFD를 통해 도출하였다. 다만, 작업장의 측면으로 국한하여 천장, 바닥 등 다양한 급·배기구의 위치에 대해 고려되지 않았고, 실제 작업장의 환기 조건이 아닌 특정 조건을 가정하여 진행되었다는 점이 본 연구의 한계점이다. 추후 다른 조건으로의 시뮬레이션을 통해 보다 범용적으로 활용할 수 있는 방안을 제시하고자 하며, 추가적인 실증실험을 통해 연구 결과의 정확성과 신뢰성을 높이고자 한다.

본 연구결과를 통해 작업장에서 환기효율을 최대화하여 근로자의 안전을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 2023년도 환경부(한국화학물질관리협회)의 재원으로 화학물질 안전관리 특성화대학원 사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

REFERENCES

[1] 화학물질안전원 화학물질종합정보시스템, 화학물질 사고현황 및 사례, https://icis.me.go.kr:443/pageLink.do?menuNo=2020000&searchWord=&link=forward:/search/searchType2.do&upperMenuNo=2000000 (2023.11.21)

[2] Thibauld, P., Véronique, D., Benjamin, T., Christophe, W., Ludovic, D., Lechaudel, J.F., "Pool evaporation: Experimental tests at medium-scale with gasoline", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 65, (2020)

[3] Hong, G.P., "Analysis on the Air Exchange Rate in the Arcade Type Traditional Market Places Using Wind Tunnel Test and CFD", Dept. of Architectural Engneering The Graduate School Yonsei University, (2005)

[4] Yoo, S.J., Kang, J.W., Yang, J.H., "A Study on Evaluation of Ventilation Efficiency from Ventilation System and Volume in the Small Printing Facilities Using CFD", *JAIK*, 29(6), 263-270, (2013)

[5] 건축법 건축물의 설비기준 등에 관한 규칙 [별표 1의 5] 신축공동주택등의 기계환기설비의 설치기준(제11조제3항 관련)

[6] Ku, J.H., "An Experimental Study on the Ventilation Performance to Enhance Removal Efficiency of Indoor Hamful Gases", *Fire Sci. Eng.*, 23(5), 117-124, (2009)

[7] Ku, J.H., "A Study on Characteristic Analysis for Indoor Ventilation Performance of Mechanical Ventilation System", *KIGAS*, 16(2), 31-37, (2012)

[8] M. Siddiqui, S. Jayanti, T. Swaminathan, "CFD analysis of dense gas dispersion in indoor environment for risk assessment and risk mitigation", J. Hazard. Mater., 209, 177-185, (2012)

[9] Xiaolu, Z., Qiubo, W., Xulei, H., Yuejuan, L., Yang, M., Kun, L., Li, Z., "Effect of the position and the area of the vent on the hydrogen dispersion in a naturally ventilated cubiod space with one vent on the side wall", *Int. J. Hydrog. Energy.*, 47(14), 9071-9081, (2022)

[10] Lee, J.W., Cho, S.S., Park, C.H., Cho, H.T., Moon, I., "Numerical analysis of hydrogen ventilation in a confined facility with various opening sizes, positions and leak quantities", *Computer Aided Chemical Engineering, Elsevier*, 40, 559-564, (2017)

[11] Oh, J.E., "A study on the appropriate location of supply and exhaust for efficient ventilation in case of indoor accident by hazardous chemicals", *Dept. of Environmental Engneering The Graduate School of Urban Sciences*, (2016)

[12] Chung, K.C., Hsu, S.P., "Effect of ventilation pattern on room air and contaminant distribution", *Building and Environment*, 36(9), 989-998, (2001)

[13] An, J.S., "Evaluation of Airborne Infection Risk according to Operation of Mechanical Ventilation and Recirculation Airflow System", *Dept. of Architectural Engineering The Graduate School University of Seoul*, (2023)

[14] 한국산업안전보건공단, KOSHA GUIDE P-18-2012 인화성 물질의 누출에 대한 안전조치 기술지침, (2012)

[15] 화학물질관리법 시행규칙 [별표 5] 유해화학물질 취급시설 설치 및 관리 기준 세부기준

[16] Gexcon, A.S., "FLACS-CFD v22.1r2 User Manual", Technical Report, Gexcon AS, Bergen, Norway, (2022)

[17] 한국산업안전보건공단, KOSHA GUIDE P-75-2011 인화성 액체의 안전한 사용 및 취급에 관한 기술지침, (2011)

[18] Mohammad, D., Arshad, A., Faisal, K., "Dispersion modelling and analysis of hydrogen fuel gas released in an enclosed area: A CFD-based approach", *Fuel*, 184, 192-201, (2016)

[19] Khan, J.A., Feigley, C.E., Lee, E., Ahmed, M.R., Tamanna, S., "Effects of inlet and exhaust locations and emitted gas density on indoor air contaminant concentrations", *Building and Environment*, 41(7), 851-863, (2006)