실험실 가스 누출 시 영향평가

장유리, 정승호†, 박교식*, 신동민*, 구광호*
아주대학교, 명지대학교*

Laboratory Safety - Consequence Analysis for Accidental Gas Release Scenarios in Labs

Yuri Jang, Seungho Jung, Kyoshik Park*, Dongmin Shin*, Kwangho Gu*
Ajou University, Myougji University*

서론

1999년 S대 원자핵공학과 실험실에서 원인 불명의 폭발이 5분 여 동안 7~8차례에 걸쳐 일어남과 동시에 불길이 치솟아 4명이 중화상을 입었으며 그 중 2명은 끝내 숨졌고, 2010년 H대 방폭 실험실에서 실험용기(30L)가 폭발하여 6명의 사상자를 낳은 사건을 비롯하여 화학물질을 다루는 실험실의 안전사고는 매년 끊이지 않고 있다.

대학 내 연구 활동이 활발하게 진행 됨에 따라 사용하는 화학 물질의 종류와 사용량이 증가함에도 불구하고 그 종류나 사용량을 파악하지 못하고 있는 경우가 많아 사고로 연계 될 우려가 크다. 그 동안의 실험실 안전과 관련 된 연구들을 살펴보면 주로 실험실 사고사례를 발생형태·기인물 및 상해 종류 등으로 분석하거나 설문을 통하여 실험실 안전관리의 실태를 파악하고, 제도적인 측면의 화학물질 관리를 위한 사전 안전성 평가(JSA) 등에 관한 연구가 진행 될 뿐 실질적인 화학물질 누출 사고 안전관리에 대한 연구가 부족하다.

취급·사용하는 화학물질의 특성을 잘 이해하고 사용량에 따른 피해가 어느 정도까지 영향을 미치는 지에 대해 인식하고 있으면 사고가 난다 하더라도 빠른 대처를 할 수 있다. 이와 관련하여 지난 해 가연성 물질 H_2(수소)와 독성 물질 CO(일산화탄소)를 가지고 이 가스들이 누출 될 경우의 누출과정을 분석함으로써 피해 정도를 예측하였다.

이어 학 내 실험실에서 주로 사용하는 가연성물질인 CH_4(메탄), 독성 물질 NH_3(암모니아)에 불활성 기체인 N_2(질소)를 추가로 선정하여 위의 두 기체와 마찬가지로 분석하였다. 이 가스들이 누출 될 경우의 시나리오들로부터 확산 과정을 PHAST v.6.7 (multicomponent option 포함)로 분석함으로써 피해 정도를 예측하고, 실험실 내부 확산과정을 FLUENT, FLACS 등의 CFD(Computational Fluid Dynamics) 프로그램을 통하여 모델링 하였다. 가스 누출 시 실험실 창을 통해 누출된 가스들이 외부로 유출 될 경우 실외와 창이 닫혔을 경우 실내의 피해 영향에 대해 비교하여 정량적 위험성 평가 결과를 제공하고자 한다.

본론

Ⅰ. 개요

1. 대상물질 선정

대학교 연구실에서 주로 사용하는 물질들 중에서 그 특성에 따라 독성 가스인 CO(일산화탄소)와 NH_3(암모니아, 가연 성질 무시), 가연성 가스인 H_2(수소)와 CH_4(메탄), 불활성 가스 N_2(질소)를 선택하였다. 각 물질들의 특징은 안전보건공단의 MSDS, PHAST의 물질 data를 참고하였고 다음의 Table 1과 같다.

2. 사고 시나리오

- 실험실 크기 : 가로*세로*높이 = 8 m * 8 m * 2.5 m = 160 m^3
- 용기 크기 : 47 L
- 독성물질 위험 기준 농도 : 독성물질이 누출되어 그 농도가 ERPG-2 수준이 되는 농도

Table 1 분석대상 물질 주요 물성 정보

		CO	NH_3	H_2	CH_4	N_2
CAS no.		630-08-0	7664-41-7	1333-74-0	74-82-8	7727-37-9
분자량		28.01	17.03	2.0	16.04	28.0
연성		독성	독성	가연성	가연성	불활성
폭발 하한~상한(%)		12.5~72.2	15~28	4~76	4.4~15	-
독성 정보 (ppm)	ERPG-2	350	150	-	-	-
	LD_{50} 4hr rat	1805	2000	-	-	-
	IDLH	12000	300	-	-	-

Table 2 관심 기준 농도까지의 거리

	농도 (ppm)	Distance(m)		
		1/2"	1/4"	1/8"
CO	350	112.35	35.30	6.60
NH3	150	64.95	30.71	8.84
H2	20,000	6.54	3.28	1.58
CH4	22,000	3.28	1.62	0.80
N2	69,000	0.90	0.44	0.22

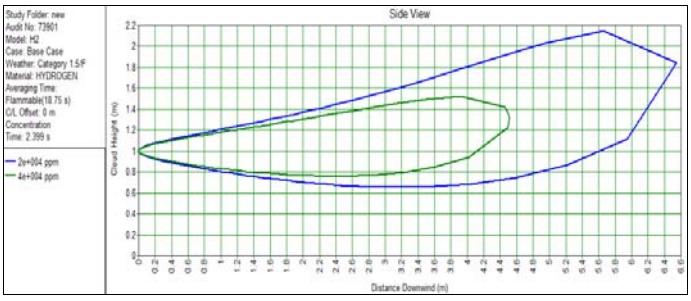

Figure 1 H_2의 실외 누출 거동 (1atm, 1/2")

• 가연성물질 위험 기준 농도: 가연성물질이 누출되어 그 농도가 1/2 LFL 수준이 되는 농도

• 불활성 기체에 의한 질식 위험 기준 농도 : 산소 농도를 19.5% 이하가 되게 만드는 excess 질소의 농도. (6.9%)

3. 세부 내용

47 L 용기에 충천온도와 압력의 조건을 이용하여 최대 충전량(kg)을 산출하였고, 일상적인 사용 환경에서 용기 및 배관의 파열 부위로 가스가 전량 누출 된다고 가정했다. 사용 환경은 사고시나리오 선정에 관한 기술지침에 따라 최악의 시나리오에 맞춰 실내·실외 모두 풍속 1.5 m/s, 대기안정도 F, 대기온도 25℃, 대기습도 50%로 가정 하였다.

실외의 영향평가는 실험실의 창이 열려있어 누출된 가스가 건물 밖으로 아무 방해 없이 퍼져나간다고 가정 후, 파열의 크기를 각각 1/2", 1/4", 1/8"로 비교 군을 선정하여 비교하였다.

실내 영향평가는 파열의 크기를 1/2"로 고정하고 환기 횟수(air change)를 1시간에 2회, 5회, 9회로 선정하였다. 2회는 일반 집이나 사무실의 환기 정도이고, 5는 실험실, 9는 일반 레스토랑의 환기 정도로 상시 환기하는 환경을 나타낸다.

Ⅱ. 결과

1. 실외 영향

각 물질 별로 관심 기준 농도까지의 거리를 살펴보면 Table 2와 같고, Figure 1과 같은 양상을 보인다. H_2, CH_4, N_2의 전 경우와 CO, NH_3의 1/8" 경우는 물질의 확산거리가 짧아 실외에는 영향을 미치지 않거나 그 영향이 매우 작다. CO와 NH_3 1/2", 1/4"의 경우, 누출된 가스가 실외로 멀리 퍼져나가 인체에 큰 영향을 미치는 것처럼 보

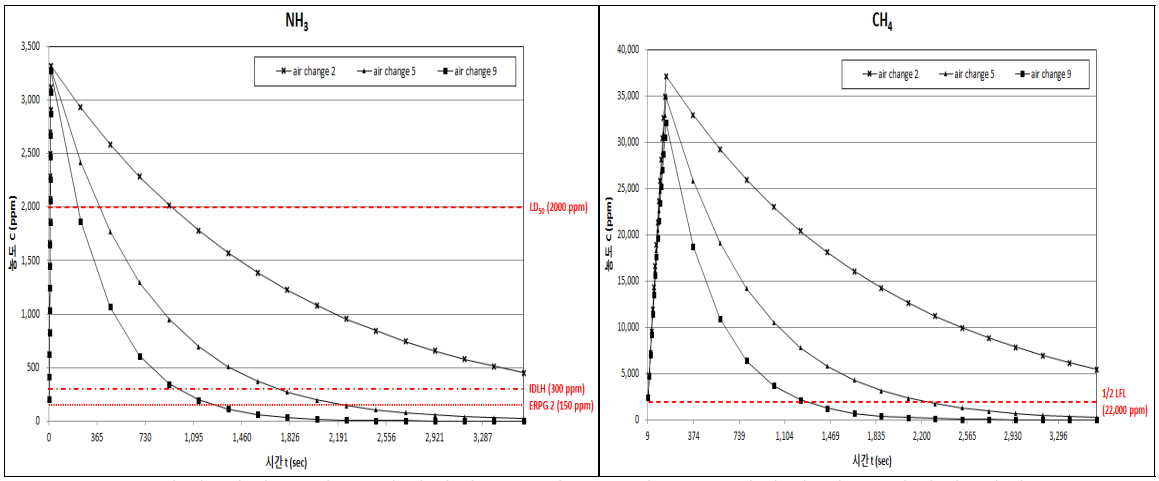

Figure 2 환기 시설을 갖춘 실내에서 NH_3와 CH_4의 누출 시간에 따른 실험실 내의 농도

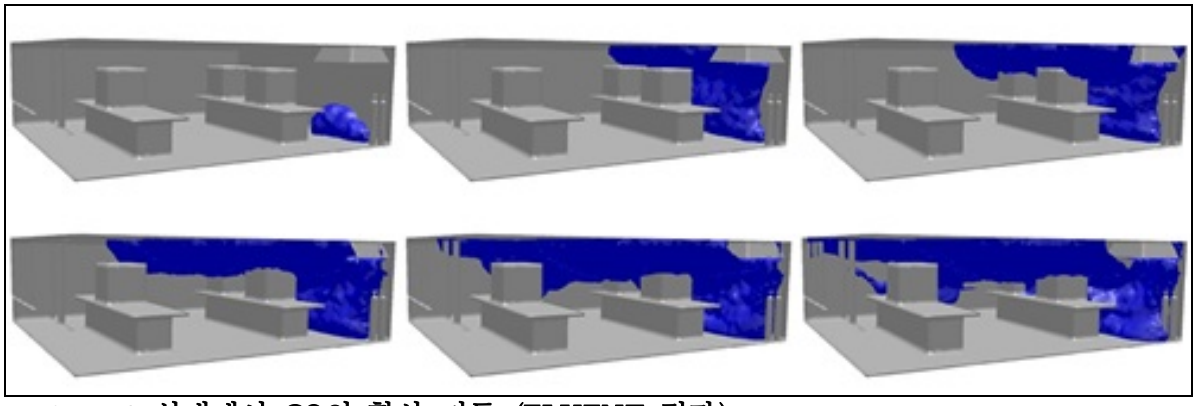

Figure 3 실내에서 CO의 확산 거동 (FLUENT 결과)

이지만, 이 두 독성물질의 기준농도 결과는 ERPG-2값으로 1시간을 기준으로 한다. 따라서 인체에 노출 되는 시간을 살펴보면 용량이 작아 누출되는 시간이 짧기 때문에(CO : 205.42 sec, NH_3 : 13.77 sec) 멀리 퍼져나가기는 하지만 인체에 큰 영향을 미치지는 않을 것으로 예상된다.

2. 실내 영향 (창문이 닫혀 있을 시)

NH_3와 CH_4에 대해서 시간에 따른 실험실 내의 농도를 그려보면 Figure 2과 같다. 독성 물질인 CO와 NH_3는 실험실 내의 물질 농도가 수 초 이내에 ERPG-2 값을 넘어서는 것은 물론이고 LD_{50}과 IDLH 농도까지 도달하는 것을 확인 할 수 있다. 가연성 물질 CH_4의 경우에도 20초 이내에 1/2 LFL 값에 도달해 폭발 분위기를 형성한다. 실험실 내의 농도란 실험실 전체에 위험물질이 균일하게 환산 된 것을 가정한 농도를 의미하므로 실제로 누출 지점 부근은 이보다 더욱 빠르고 강한 위험 분위기를 형성하여, 독성물질에 중독되거나 화재나 폭발로 이어질 가능성이 크다. 따라서 빠른 비상대응을 필요로 함을 의미한다. 또한 우리는 Figure 2을 통해 1hr 이내에 여러 번의 환기가 이루어 지는 경우, 실험실 내의 농도가 좀 더 빠르게 위험 수준 이하로 떨어지는 것을 확인함으로써 위험 화학물질을 사용하는 환기의 중요성을 알 수 있다.

또한, FLUENT 등의 CFD 프로그램을 이용하여 실제 실험실과 유사하게 구현하여 누출된 기체들의 확산거동을 살펴보았다. Figure 3은 CO의 확산 거동을 50초 간격으로 본 것이다.

3. 불활성 기체 N_2

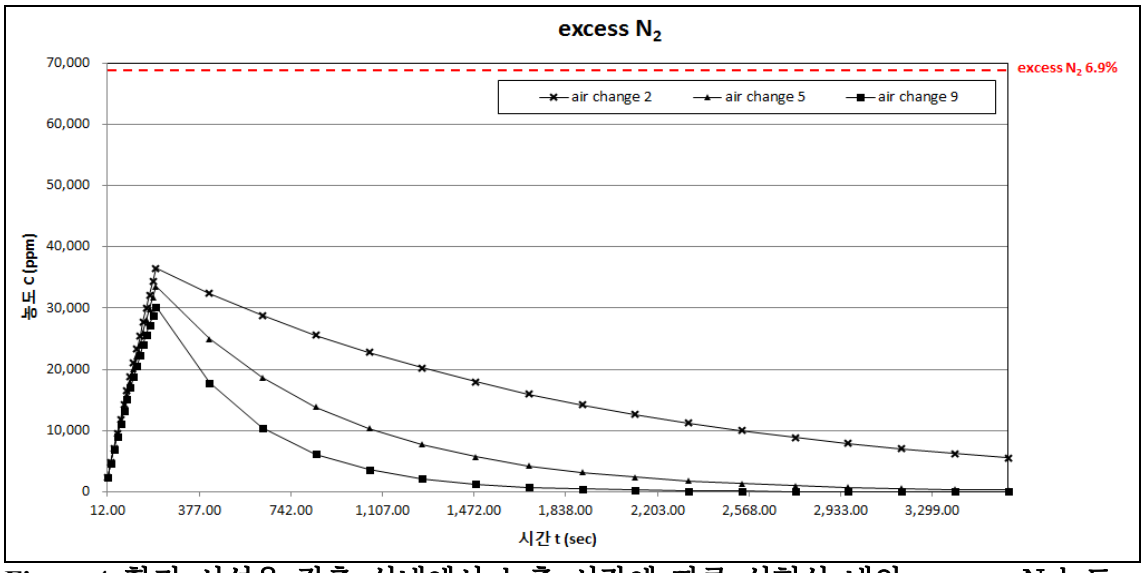

Figure 4 환기 시설을 갖춘 실내에서 누출 시간에 따른 실험실 내의 excess N_2농도

불활성 기체인 질소는 창문이 열려있어 실외로 누출되는 경우 큰 문제가 되지 않지만, 밀폐된 공간에서는 산소의 농도를 낮춰 질식의 염려가 있다. 실험실 내를 닫힌 계로 가정하 고 설계 된 시나리오 대로 평가를 수행한 결과는 Figure 4와 같다. Excess 질소의 농도가 6.9%에 도달하지 않으므로 질소 47 L의 양의 누출로는 160 m^3 크기의 실험실 실내 및 실외 두 경우 모두 위험을 미치지 못한다. 만약 본 연구실에서 80 L 이상의 질소가 누출되었다면 산소가 질식 위험 기준 농도인 19.5% 까지 떨어지게 되어 실내에서 질식의 위험이 있으므로 유의해야 한다.

결론

실험실 가스 누출 영향 평가 결과를 보면, 사업장에서 발생하는 가스 누출 사고 시 실외의 영향이 큰 것과는 다른 결과를 나타낸다. 실험실의 외부보다는 실험실 내부에서 그 피해 정도가 큰데, 이는 학 내 실험실에서 일반적으로 사용하는 가스의 용량은 47 L 정도로 ton단위로 사용하는 사업장에 비하면 그 양이 현저히 적기 때문이다. 실내 영향 결과를 통해 빠른 시간 내에 적절한 비상대응을 하는 것은 중요하다. 하지만 매우 빨리 ERPG-2값에 도달하고, 심지어 30분 이내에 구호를 요하는 IDHL 값도 수 초안에 도달하여 수십 분이 지속된다. 게다가 점화원이 존재한다면 폭발이 일어날수도 있기 때문에 빠른 시간 내에 이를 대응하는 것은 매우 어렵다. 그러므로 시설적인 측면에서 본질적인 안전(Inherent Safety)을 고려하여 처음 실험실을 설계할 때, 가스 용기를 외부에 배치하고 라인을 연결하여 끌어온다던가, 충분한 환기 조건을 형성 하는 등 구조적· 시설적인 측면에서 접근하는 것이 필요하다.

참고문헌

1. Daniel A. Crowl and Joseph F. Louvar, "Chemical Process Safety", 2nd Ed
2. 화학물질안전원 지침 제 2014-1호, “시나리오 선정에 관한 기술지침 ”
3. D. Webber, “HSL/2007/30 On Defining a Safety Criterion for Flammable Clouds”
4. 고압가스 안전 관리법