



실험실 가스 누출 시 피해 영향 분석

장유리 · †정승호 · 박교식*

아주대학교 환경안전공학과, *명지대학교 화학공학과
(2015년 6월 27일 접수, 2015년 8월 25일 수정, 2015년 8월 26일 채택)

Consequence Analysis for Accidental Gas Release in Labs

Yuri Jang · †Seungho Jung · Kyoshik Park*

Dept. of safety environmental, Ajou University,

**Dept. of chemical engineering, Myoungji University*

(Received June 27, 2015; Revised August 25, 2015; Accepted August 26, 2015)

요 약

화학물질을 다루는 실험실의 안전사고는 매년 끊이지 않고 있다. 특히 대학내 실험실은 학생들이 주된 연구자로서 지식과 능력을 쌓아가고 경험을 축적하는 곳이기때문에 실험실의 안전은 더욱 중요하다.

학내 실험실에서 주로 사용하는 5가지의 가스(CO, NH₃, H₂, CH₄, N₂)를 선정하여 이 가스들이 누출 될 경우의 시나리오들로부터 확산 과정을 PHAST v.6.7로 계산, 분석함으로써 피해 정도를 예측하였다. 실험실 내부 확산과정은 Computational Fluid Dynamics(CFD) 프로그램 FLUENT를 통하여 모델링하였다. 가스 누출 시 실험실 창을 통해 외부로 유출 될 경우 실내와 실외의 피해 영향에 대해서도 비교하였다. 각 가스들의 모델링 결과를 보면, 실험실 외부보다는 실험실 내부에서 그 피해 정도가 훨씬 큰데, 학내 실험실에서 일반적으로 사용하는 가스 용기, 즉 실린더의 용량은 47 L(혹은 그 이하)로 ton 단위로 사용하는 사업장에 비하면 그 양이 현저히 적기 때문에 실외의 영향이 플랜트와 비교해서 현저히 작다. 하지만 시뮬레이션 결과 작은 양으로도 실내에서는 큰 피해가 발생할 수 있음을 보여준다.

Abstract - Accidents in laboratory dealing with chemicals have constantly occurred. In the case of a gas explosion or an accident related to leakage of chemical materials, the damage is much greater, thereby leading to a serious accident. Especially, the safety of laboratory in University is important because students build up knowledge and skills and accumulate experience as the main researchers.

In this paper, 5 gases(CO, NH₃, H₂, CH₄, N₂) are selected to model since they are often used in university laboratories. From the scenarios where the gases are released, the diffusion process is estimated and analyzed to predict damage degree by PHAST v.6.7. Internal diffusion process is modeled through FLUENT which is Computational Fluid Dynamics(CFD) tool. Also, we compare indoor damage with outdoor one when discharged to the outside through the laboratory's window. In the modeling results, the outdoor damages for accident scenarios in the results are far less than then of real plants since the vessel usually used in laboratory(i.e. the capacity of the cylinder; 47 L or less) is significantly less than workplace's one(using ton measure). However as shown in the results small amount can have high consequences for indoor accidents.

Key words : Laboratory, Gas release, PHAST v.6.7, FLUENT, Consequence Analysis

†Corresponding author:processsafety@ajou.ac.kr

Copyright © 2015 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

화학물질을 다루는 실험실의 안전사고는 매년 끊이지 않고 있다. 대학 내 연구 활동이 활발하게 진행됨에 따라 사용하는 화학 물질의 종류와 사용량이 증가함에도 불구하고 그 종류나 사용량을 파악하지 못하고 있는 경우가 많아 사고로 연계 될 우려가 크지만, 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.

가스 누출에 의한 피해 영향을 분석한 기존의 연구들은 그 대상이 실험실이 아닌 충전소나 플랜트로, 사용하는 물질의 누출속도나 누출량 등에서 실험실의 것과는 크게 차이가 있다. 때문에 이와 관련하여 학 내 실험실에서 주로 사용하는 독성 물질 CO와 NH₃(암모니아), 가연성물질 H₂와 CH₄(메탄), 불활성 기체인 N₂(질소)를 선정하여, 이 가스들이 누출 될 경우의 시나리오들로부터 확산 과정을 PHAST v.6.7 (multicomponent option 포함)로 분석함으로써 피해 정도를 예측하고, 실험실 내부 확산과정을 CFD (Computational Fluid Dynamics) 프로그램 FLUENT를 통하여 확산거동을 살펴보았다. 가스 누출 시 실험실 창을 통해 누출된 가스들이 외부로 유출 될 경우 실외와 차이 단혔을 경우 실내의 피해 영향에 대해 비교한 위험성 평가 결과를 알아보고자 한다.

II. 본론

2.1. 개요

(1) 대상물질 선정

대학교 연구실에서 주로 사용하는 물질들 중에서 그 특성에 따라 독성 가스 CO와 NH₃, 가연성 가스 H₂와 CH₄, 불활성 가스 N₂를 선택하였다.

본 논문에서는 CO와 NH₃의 가연 성질은 무시하

고 독성에 관한 성질만을 고려하였으며 가스의 누출로 인한 폭발은 고려하지 않는다. 각 물질들의 특징은 안전보건공단의 MSDS(Material Safety Data Sheet) 및 PHAST의 물질 data를 참고하였고 다음의 Table 1과 같다.

(2) 사고 시나리오

- 실험실 크기: 가로*세로*높이 = 8 m * 8 m * 2.5 m = 160 m³
- 용기 크기: 47 L
- 파일 부위의 위치 : 1 m 로 일반적인 높이
- 독성물질 위험기준농도: 독성물질이 누출되어 그 농도가 ERPG-2 수준이 되는 농도
- 가연성물질 위험기준농도: 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 N₂의 농도로써 6.9%에 해당한다. Fig. 1에 따라 Fatality 확률을 계산하면, 58%의 excess N₂ 농도는 8.8% O₂ 농도에 해당한다. 이는 100% 질식 사망을 유발하는 O₂ 결핍 환경이다. 18% O₂ 농도는 fatality value 계산의 시발점이지만 보수적인 접근을 위하여 CGA(Compressed Gas Association)에서 사용하고 있는 위험농도인 19.5%를 선택하였다(Fig. 1).

(3) 세부 내용

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

Table 1. Material Data

	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
molecular weight	28.01	17.03	2.0	16.04	28.0
properties	toxic	toxic	flammable	flammable	inert
LFL(%)-UFL(%)	12.5-72.2	15-28	4-76	4.4-15	-
ERPG-2(ppm)	350	150	-	-	-
LC ₅₀ 4hr rat(ppm)	1805	2000	-	-	-
IDLH(ppm)	12000	300	-	-	-

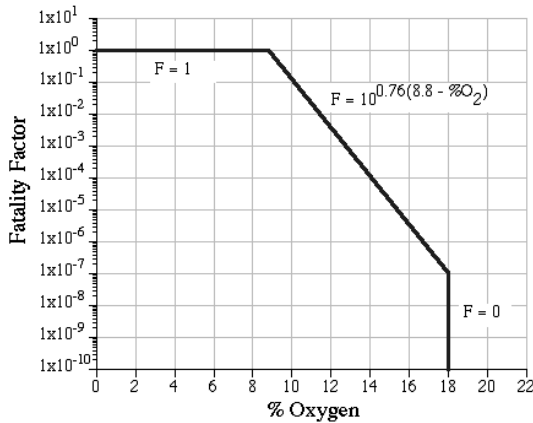


Fig. 1. Fatality factor F_i versus the lowest attainable oxygen concentration which can result from a given event.

Table 2. Typical ventilation rates for buildings

		Air changes /hour
Domestic Buildings	Lounge	1
	Dining Room	2
	Bathroom	2
	Bedroom	1.5
	Water Closet /Power Room	1.5
	Average for domestic building	1-2
Public Building	Classroom	2-4
	Office	4-6
	Theatres, Cinemas	6-10
	Churches	1-2
	Banks	2-4
	Laboratory	4-6
	Cafe	8-12
	Restaurants	10-15

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 균을 선정하여 비교하였다.

실내 영향평가는 파열의 크기를 1/2" 로 고정하고 환기 횟수(air change)를 1시간에 2회, 5회, 9회로

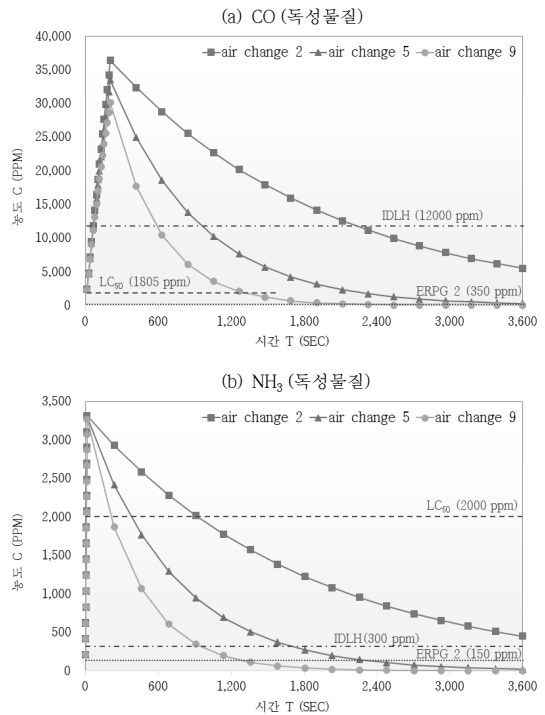


Fig. 2. The concentration of toxic materials in laboratory. (a) CO (b) NH₃

선정하였다. 2회는 일반 집의 환기 정도이고, 5는 실험실, 9는 일반 카페나 영화관의 환기 정도로 상시 환기하는 환경을 나타낸다(Table 2).

2.2. 결과

(1) 실내 영향 I

환기시설을 갖춘 실내에서 물질의 누출 시간에 따른 실험실 내의 농도를 그려보면 독성 물질인 CO와 NH₃는 그 농도가 수 초 이내에 ERPG-2 값을 넘어서는 것은 물론이고 LC₅₀과 IDLH 농도까지 도달하는 것을 확인 할 수 있다(Fig. 2). Fig. 3을 보면 가연성 물질의 경우에도 빠르게 1/2 LFL 값에 도달해 가연성 분위기를 형성하는 것을 알 수 있다.

본 논문에서 말하는 '실험실 내의 농도'란 실험실 전체에 위험물질이 균일하게 확산된 것을 가정한 농도를 의미한다. 때문에 실제로 누출 지점 부근은 위에서 살펴본 결과들보다 더욱 빠르고 강한 위험 분위기를 형성하여 독성물질에 중독되거나 화재나 폭발로 이어질 가능성이 크다. 따라서 빠른 비상대응을 필요로 함을 의미한다.

또한 우리는 Fig. 2와 Fig. 3을 통해 1hr 이내 2번,

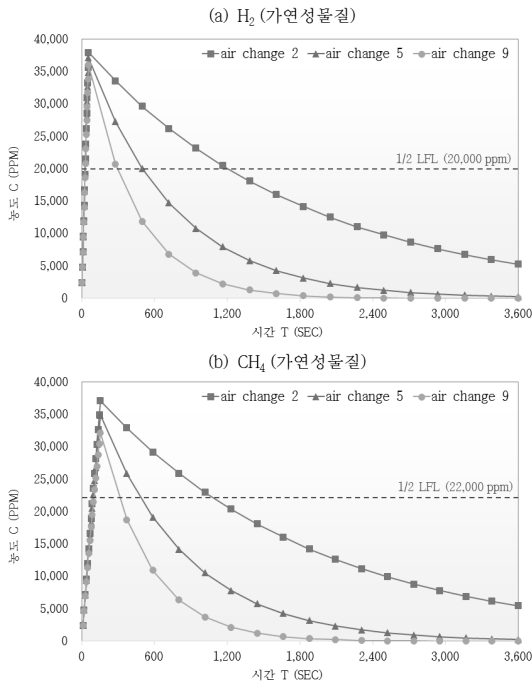


Fig. 3. The concentration of flammable materials in laboratory. (a) H₂ (b) CH₄

5번, 9번의 Air change 결과를 통해 여러 번의 환기가 이루어지는 경우에 실험실 내의 농도가 좀 더 빠르게 위험 수준 이하로 떨어져, 누출된 가스에 노출되는 시간이 줄어드는 것을 확인가능한데 이로써 위험 화학물질을 사용하는 실험실에서 환기의 중요성을 알 수 있다.

CFD 프로그램(FLUENT)을 이용하여 실제 실험실과 유사하게 구현하여 누출된 기체들의 확산거동을 살펴보았다. Fig. 4는 CO와 H₂의 확산 거동을 각각 50초, 30초 간격으로 본 것이다.

(2) 실내 영향 II - 불활성 기체 N₂

불활성 기체인 질소는 창문이 열려있어 실외로 누출되는 경우 큰 문제가 되지 않지만, 밀폐된 공간에서는 산소의 농도를 낮춰 질식의 위험이 있다. 실험실 내를 단한계로 가정하고 설계된 시나리오대로 평가를 수행한 결과는 Fig. 5와 같다. Excess 질소의 농도가 6.9%에 도달하지 않으므로 질소 47 L의 양의 누출로는 160 m³ 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 질

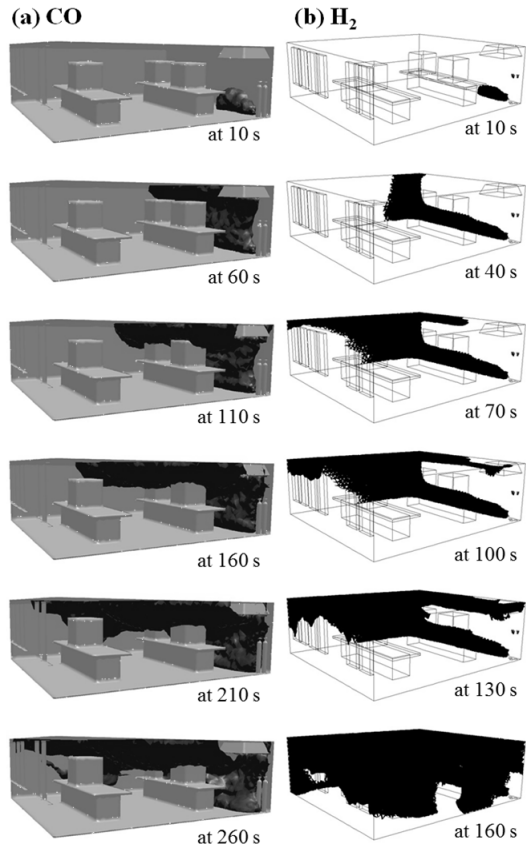


Fig. 4. The dispersion behavior of the leaked material in laboratory. (a) CO (b) H₂

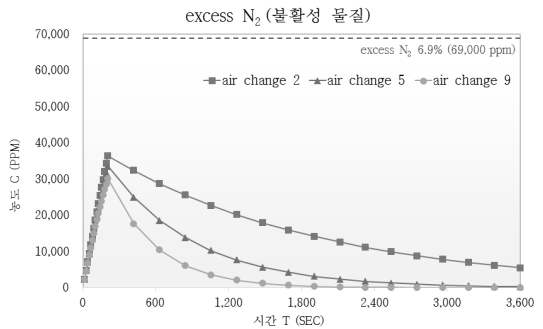


Fig. 5. The concentration of inert gas(N₂) in laboratory.

식의 위험이 있으므로 유의해야 한다.

최근 서너차례 이어진 질소 누출로 인한 질식 사

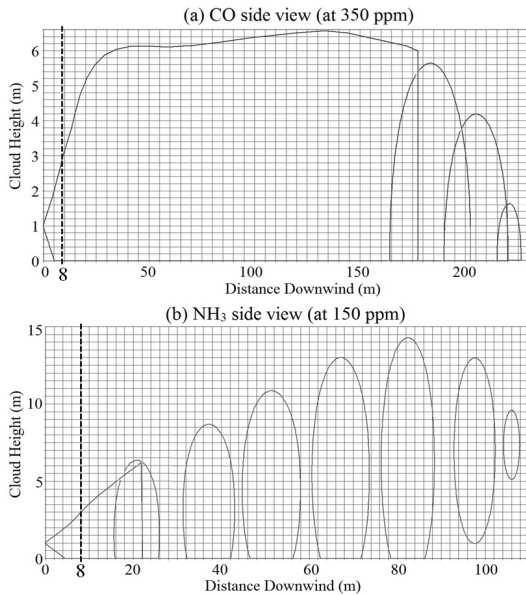


Fig. 6. The outdoor leak behavior of toxic materials at the concerning concentration. (a) CO (b) NH₃

고들로부터도 관리가 안 된 작업장에서의 질소 누출은 독성가스가 누출 되었을 때보다 더 큰 위험이 있을 수 있음을 알 수 있다.

(3) 실외 영향

각 물질 별로 관심 기준 농도까지의 거리를 살펴 보면 Table 3.과 같다. 1/2" 파열부위에서의 누출 거동을 관심농도 기준으로 살펴보면 Fig. 6과 Fig. 7 같은 양상을 보인다.

PHAST의 동적 시뮬레이션 결과에 따르면 CO와 NH₃는 일정거리 까지 plum 모델로 확산되다가 puff 모델로 변화 한 후 대기 중에 희석되어 사라지고, H₂의 경우는 그 질량이 작아 확산이 위쪽으로 진행 되어 가는 것을 확인할 수 있다. Fig. 7의 (a), (b)에서 실선은 관심농도인 1/2 LFL 값과 LFL 값을 나타낸다.

실험실 내의 공간인 8 m를 점선으로 표현(Fig. 6 과 Fig. 7)하여보면 CH₄의 경우는 물질의 확산거리가 짧아 실외에는 영향을 미치지않고, H₂는 실외에 미치는 영향이 매우 작다. CO와 NH₃의 경우 앞의 세 가지 물질 보다 누출 된 가스가 실외로 멀리 퍼져 나가 인체에 큰 영향을 미치는 것처럼 보인다. 하지만 이 두 독성물질의 관심농도는 ERPG-2값으로 1시간을 기준으로하기 때문에, 실제로 인체에 노출

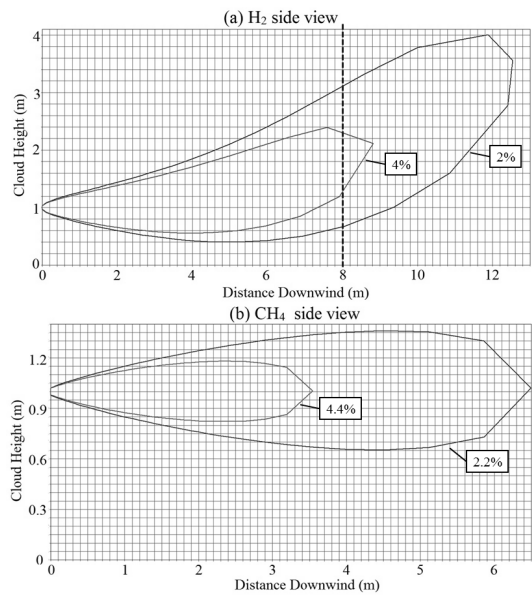


Fig. 7. The outdoor leak behavior of flammable materials at the concerning concentration. (a) H₂ (b) CH₄

Table 3. The distance to the concerning concentration

	concerning concentration(ppm)	Distance (m)		
		1/2"	1/4"	1/8"
CO	350	112.35	35.30	6.60
NH ₃	150	64.95	30.71	8.84
H ₂	20,000	6.54	3.28	1.58
CH ₄	22,000	3.28	1.62	0.80

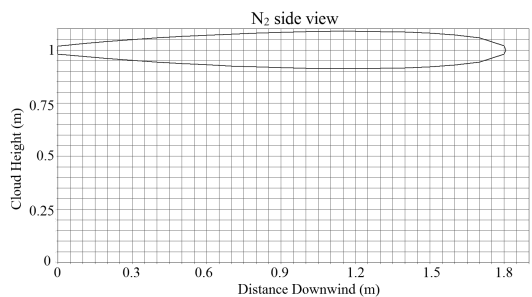


Fig. 8. The outdoor leak behavior of inert gas(N₂) at the concerning concentration.

되는 시간을 살펴보면 그 용량이 작고, 누출되는 시간이 짧으므로(CO: 205.42 sec, NH₃: 13.77 sec) 멀리 퍼져나가는 하지만 인체에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 예상된다.

N₂는 excess N₂ 농도 기준으로 살펴보았으나 누출된 N₂의 양으로는 실험실 내를 가득 메우지는 못하는 것을 확인할 수 있다. (Fig. 8)

III. 결론 및 고찰

실험실 가스 누출 영향 평가 결과를 보면, 사업장에서 발생하는 가스 누출 사고 시 실외의 영향이 큰 것과는 다른 결과를 나타낸다.

(1) 실내: 가연성, 독성, 불활성 물질 모두 수초 이내에 누출되어 실험실을 가득 메운다. 환기가 제대로 이루어지지 않은 air change 2의 경우에 수 십분 동안 위험 농도 수준으로 머물러 있으므로 환기가 중요하다.

(2) 실외: 실험실에서 사용하는 물질의 양으로 실험실 외부까지 영향을 미치지 않는다.

실험실의 외부보다는 실험실 내부에서 그 피해 정도가 큰데, 이는 학 내 실험실에서 일반적으로 사용하는 가스의 용량은 47 L 정도로 ton 단위로 사용하는 사업장에 비하면 그 양이 현저히 적기 때문이다. 시뮬레이션으로 알아본 실내 영향 결과를 통해 빠른 시간 내에 적절한 비상대응을 하는 것이 중요하고 판단된다. 하지만 매우 빨리 ERPG-2값에 도달하고, 심지어 30분 이내에 구호를 요하는 IDLH 값도 수 초안에 도달하여 수십 분이 지속된다. 게다가 점화원이 존재한다면 폭발이 일어날 수도 있는 위험 분위기를 조성하기 때문에 빠른 시간 내에 이를 대응하는 것은 매우 어려울 것이다.

또한 대규모의 사업장에서 근무하는 작업자들에 비해 학내의 소규모 실험실을 사용하는 학생들은 안전 교육이 제대로 이루어지지 않은 경우를 비롯하여 처음 연구를 시작하는 단계로 여러 상황들에 미숙하기 때문에 사고대응이 어려우며, 학생들이 밀집되어 있어 더 많은 사상자들을 유발할 수 있다.

그러므로 시설적인 측면에서 본질적인 안전(Inherent Safety)을 고려하여 처음 실험실을 설계할 때, 가스 용기를 외부에 배치하고 라인을 연결하여 끌어온다던가, 충분한 환기 조건을 형성 하고, 원격 remote로 작동하는 방법, 'gas detector'를 설치하여 알아차리지 못한 가스의 누출을 알리는 방법 등의 구조적, 시설적인 측면에서 접근하는 것이 필요하다.

감사의 글

이 연구는 산업부의 “고압 독성가스 사고피해 기반 안전관리 기술개발”과제의 연구비 지원으로 수행될 결과물로서 이에 저자는 감사의 말씀을 드립니다.

REFERENCES

- [1] Jin A Choi, Jae Eun Lee, An Analysis on the Safety Management Condition and the R&D Researchers' Safety Perception in National University, Korean Review of Crisis & Emergency Management, 8(6), 107-127, (2012)
- [2] 교육시설재난공제회 공제보상팀, “연구실 안전 사고 경향분석”, (2014)
- [3] 송영호, 이종호, “연구실안전사고 사례집”, 교육과학기술부, 한국연구재단, 한국엔지니어링협회, (2011)
- [4] Chung Yoon Sub, “A study on Improvement of Laboratory Safety in Universities”, (2011)
- [5] Daniel A. Crowl and Joseph F. Louvar, "Chemical Process Safety", 2nd
- [6] 화학물질안전원 지침 제 2014-1호, “시나리오 선정에 관한 기술지침”
- [7] Dr D. Webber, “HSL/2007/30 On Defining a Safety Criterion for Flammable Clouds”
- [8] 고압가스 안전 관리법 [시행2015.7.29] [법률 제 13089호, 2015.1.28., 타법개정]
- [9] Cryogenic and Oxygen Deficiency Hazard Safety: ODH Risk Assessment Procedures
- [10] air change (ventilation rate : http://diydata.com/planning/ch_design/sizing.php, <http://www.tombling.com/cooling/ventilation-fan.htm>, <http://www.wind-driven-ventilation.co.uk/selection.htm>)
- [11] League table of various gases (<http://blog.naver.com/hsu30207>)
- [12] MSDS(Material Safety Data Sheet), KOSHA (Korea Occupational Safety & Health Agency)
- [13] Filippo Gavelli, Edward Bullister, Harri Kytömaa, “Application of CFD (Fluent) to LNG spills into geometrically complex environments”, Hazardous Materials, (2008)
- [14] Sang Heon Han, In Hwan Choi, Jong Soo Kim, “Numerical Analysis of Leakage of Highly Compressed Hydrogen Gas without Buoyancy Effects”, KOSCO SYMPOSIUM, (2008)