

폭발위험장소 구분도의 3D Modeling을 통한 점화원 및 가연물 안전관리 방안 제안: 실내 혼합공정을 중심으로

Proposal for Ignition Source and Flammable Material Safety Management through 3D Modeling of Hazardous Area: Focus on Indoor Mixing Processes

김학재¹ · 김덕한² · 천영우^{3*}

Hak-Jae Kim¹, Duk-Han Kim², Young-Woo Chon^{3*}

¹Gradute Student, Program in ET&ST Convergence, Inha University, Incheon, Republic of Korea

²Ph.D Candidate, Program in ET&ST Convergence, Inha University, Incheon, Republic of Korea

³Associate Professor, Program in ET&ST Convergence, Inha University, Incheon, Republic of Korea

*Corresponding author: Young-Woo Chon, ponychon@inha.ac.kr

ABSTRACT

Purpose: This study aims to propose measures for the prevention of fire and explosion accidents within manufacturing facilities by improving the existing classification criteria for hazardous locations based on the leakage patterns of flammable liquids. The objective is to suggest ways to safely manage ignition sources and combustible materials. **Method:** The hazardous locations were calculated using "KS C IEC 60079-10-1," and the calculated explosion hazard distances were visualized in 3D. Additionally, the formula for the atmospheric dispersion of flammable vapors, as outlined in "P-91-2023," was utilized to calculate the dispersion rates within the hazardous locations represented in 3D. **Result:** Visualization of hazardous locations in 3D enabled the identification of blind spots in the floor plan, facilitating immediate recognition of ignition sources within these areas. Furthermore, when calculating the time taken for the Lower Explosive Limit (LEL) to reach within the volumetric space of the hazardous locations represented in 3D, it was found that the risk level did not correspond identically with the explosion hazard distances. **Conclusion:** Considering the atmospheric dispersion of flammable liquids, it was concluded that safety management should be conducted. Therefore, a method for calculating the concentration values requiring detection and alert based on realistically achievable ventilation rates within the facility is proposed.

Keywords: Hazardous Area, Inflammable Liquids, Atmospheric Dispersion, LEL, Required Ventilation Volume

요약

연구목적: 인화성 액체의 누출형태에 따라 제조업 사업장 내 화재·폭발사고를 예방하기 위해 기존 폭발 위험장소 구분도를 개선하여 점화원 및 가연물을 안전하게 관리할 수 있는 방안을 제안하고자 한다. **연구방법:** 「KS C IEC 60079-10-1」를 사용하여 폭발위험장소를 계산했으며, 계산된 폭발위험거리를 3D로 폭발위험장소를 구현하였다. 또한, 3D를 통해 구현된 폭발위험장소 내 인화성 증기의 대기확산량을 계산하기 위해 「P-91-2023」 액체의 대기확산량 공식을 활용하였다. **연구결과:** 폭발위험장소를 3D로 표현했을 때 평면도의 사각지대를 확인할 수 있었으며, 폭발위험장소 내 점화원을 즉각적으로 확인 가능하였다. 다음으로 가연물은 3D로 나타난 폭발위험장소 체적 내 LEL 도달시간을 계산했을 때, 폭발위험거리와 동일하게 위험도가 나타나지 않았다. **결론:** 인화성 액체의 대기확산량을 고려하여 안전관리가 이루어져야 할 것으로 판단하였다. 따라서 사업장에서 현실적으로 시행할 수 있는 환기량으로 감지·경보가 필요한 농도값을 계산하는 방법을 제안하였다.

핵심용어: 폭발위험장소 구분도, 인화성 액체, 대기확산량, LEL, 필요환기량

Received | 18 December, 2023

Revised | 19 March, 2024

Accepted | 21 March, 2024

OPEN ACCESS



This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in anymedium, provided the original work is properly cited.

© Society of Disaster Information All rights reserved.

서론

연구배경

매년 화학물질 취급 사업장에서 화학물질로 인한 화재, 누출, 폭발 사고가 지속적으로 발생하고 있다. 이에 동종 재해 예방을 위하여 정부에서는 화학물질안전원 화학물질종합정보시스템을 통해 화학사고 발생건수 및 발생 형태 등 화학 사고에 대한 정보를 공개하고 있다. 화학물질안전원에서 공개한 화학사고 데이터 분석 결과 2020년에 발생한 사고건수는 전년도 대비 500% 증가하였으며 2019년 이후 화학사고 발생 건수는 계속 증가하는 추세를 보인다(NICS, 2023). 또한, 2014년부터 2022년까지 화재·폭발 사고가 3건 이상 발생한 물질 15개를 분석한 결과 11개는 인화성 물질이었으며, 그중 인화성 액체로 발생한 사고가 54.5%로 많은 비중을 차지하고 있다. 이러한 인화성 물질로 인해 발생하는 사고를 예방하고자 별도로 공정안전관리(Process Safety Mangement; PSM) 제도를 시행하고 있으나 효과는 미미한 실정이다. 현재 화학물질로 인한 사고 발생은 줄어들고 있으며 PSM 대상 물질을 취급하고 있는 사업장도 사고가 줄어들고 있다. 하지만 사고 빈도를 보면 의 50.0% 이상을 차지하고 있으며, 줄어들지 않고 유지되고 있는 것을 Fig. 1에서 확인할 수 있다.

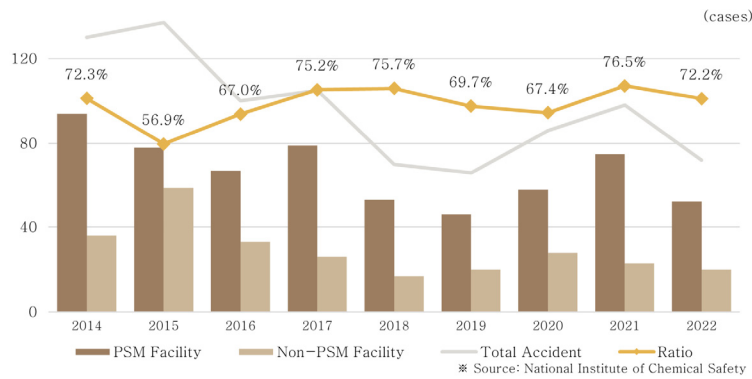


Fig. 1. Accident frequency rate in PSM facility

그리고 PSM 대상 ○○기업에서 같은 해에 2건의 중대재해가 발생하였다. 2022년 4월에 톨루엔 저장탱크 내부 작업 중 화재 사고 발생으로 2명의 작업자가 사망하였으며, 그해 8월엔 밸브 점검 중 사이클로로hex산 유출로 인한 폭발 사고로 6명의 부상자 및 1명의 사망자가 발생한 사고였다. 이에 고용노동부는 PSM 대상 사업장에 사고 원인을 철저히 조사하여 동종 재해 재발 방지를 위한 근본적인 재발 방지 대책을 마련할 것을 촉구하였다(Sim et al., 2022). 또한, 안전보건공단 사고조사 보고서에 따르면 55개 보고서 중 화재·폭발 사고가 68.0%를 차지하며, 그중 44.0%가 실내에서 발생하였다. 실내에서 발생하는 사고의 주요 원인은 적합하지 못한 방폭성능의 기계·기구 설치(Kang, 2022), 폭발위험장소 내 정전기 발생 및 제거 미실시(Lee et al., 2016) 등 적절하지 못한 점화원 관리의 결과이었다. 제조업인 ○○기업에서 발생한 사고와 실내에서의 화재폭발 사고 발생 현황을 미루어 보았을 때, PSM 대상 사업장 내 점화원과 가연물(인화성 물질)을 관리하기 위한 폭발위험장소 구분도와 전기 단선도로는 제대로 관리가 이루어지지 않음을 알 수 있다. 따라서, 제조업 사업장의 실내에서 발생하는 많은 화재·폭발 사고를 예방하기 위해서 화재·폭발 3요소인 점화원, 가연물, 산소 중 제어할 수 있는 인자인 점화원과 가연물에 대한 확실히 관리 및 안전대책 강화가 필요하다고 판단하였다.

현재 점화원에 대한 안전관리는 PSM 제도 내 폭발위험장소 구분도 상에 구현하는 방식으로 수행되어 진다. 그러나, 선행 연구에 의하면 2D 도면을 통해 제공되는 공간 정보는 매우 제한적이다(Moon et al., 2019). Chang (2009)에 따르면 2D 도면은 실제구축물과의 스케일 차이로 인해 공간감 또는 형태에 대한 인지한계가 존재한다. 따라서, 현 2D 도면 상에 표현되는 폭발위험장소 구분도가 확실한 사고예방 대책이 되기에는 제약이 많다고 할 수 있다. 가연물의 경우, 보다 확실한 관리를 하고자 한다면 물질 특성을 고려한 폭발위험장소 계산이 이루어져야 한다. 하지만 기상 누출은 전부 증발로 추정할 수 있지만 액상 누출은 누출된 액체 중 기상으로 증발하는 비율을 고려해야 정확한 폭발위험장소를 산정할 수 있다. 그러나 국내 한국산업표준에서는 이를 고려하지 않고 있다라고 보고하였다(Yu et al., 2020). 또한, Kim은 폭발위험장소의 범위는 간단한 예시만 제시하고 있을 뿐 구체적인 기술적 사항이 규정되어 있지 않아서 현장에서 적용할 경우 다양한 지식과 경험이 필요하다(Kim et al., 2017). Jung는 국제전기표준회의(International Electrotechnical Commission, IEC) 국제 표준이 개정될 경우, 배출계수 산정기준, 증발률 산정방법 등에 대해 보다 많은 연구와 고찰이 필요할 것으로 발표하였다(Jung et al., 2017). 현 제도에서는 물질의 특성을 고려하지 않고 폭발위험장소 구분도가 작성되고 있는 것을 확인하였다. 물질의 특성을 고려하지 않고 폭발위험장소 구분도에 물질 특성과 증기압을 고려하여 물질이 누출되었을 때 폭발위험장소 내에 빠른시간 내에 폭발분위기를 형성할 수 있는 위험이 존재한다.

연구 목적

본 연구에서는 인화성 액체의 누출형태에 따라 제조업 사업장 내 화재·폭발사고를 예방하기 위해 기존 폭발위험장소 구분도를 개선하여 점화원 및 가연물을 안전하게 관리할 수 있는 방안을 제안하고자 한다. 첫째 점화원 관리, 현재 도면으로 관리하고 있는 폭발위험장소 구분도와 실제 구축물 간의 차이를 줄이기 위해 폭발위험장소 구분도를 3D로 표현하여 관리하는 것을 제안하며, 2D 단면도 및 3D로 구현한 도면에서 각각 발생할 수 있는 장·단점을 찾아 비교 분석하고자 한다. 둘째 가연물 관리, 물질의 특성을 고려하여 폭발위험장소를 계산함으로써 실제 사고가 발생했을 때 예측 값과의 차이를 줄이기 위하여 폭발위험장소 내 인화성 액체가 누출되었을 때 증기압과 온도 등 여러 인자를 고려하여 폭발하한계(Lower Explosion Limit, LEL)까지 도달하는 시간을 계산하고자 한다. 또한, 인화성 액체가 누출되었을 때 성상에 따른 안전관리 방안을 제안하고자 한다.

연구 방법

연구대상

물질 선정

본 연구에서는 대상물질을 선정하기 위하여 2014년부터 2020년까지 화학물질안전원의 화학사고 데이터베이스를 분석하였다. 화재·폭발 사고가 가장 많이 발생하는 상위 15개 화학물질 중 11개 물질이 인화성 물질이었으며, 그중 9개 물질이 인화성 액체이었다. 9개 물질 중 LEL 값이 낮은 5개 물질[톨루엔(1%), 자일렌(1.1%), 헥산(1.1%), 메틸에틸케톤(1.4%), 아세트산에틸(2%)]을 대상물질로 선정하였다. 폭발위험도가 아닌 LEL 값이 낮은 물질로 선택한 이유로는 LEL 값이 낮은 물질이 누출될 경우 폭발분위기 형성까지 더 빠른 시간 내에 도달되기 때문에 LEL 값이 낮은 5개 물질로 결정하였다. 폭발위험거리를 계산하기 위해 사용한 5개 인화성 물질의 특성은 Table 1과 같다.

Table 1. The characteristics of 5 substances with LEL values

Substance name	Molecular mass (kg/kmol)	Liquid density (kg/m ³)	Vapor pressure_25°C (kPa)	Vapor density (kg/m ³)	Biling point (°C)	LEL (%)
Toluene	82.14	867	3.79	3.1	110.6	1
Xylene	106.16	864	1.18	3.7	139	1.1
Hexane	86.18	661	20.40	2.97	68.7	1.1
MEK	72.11	805	12.08	2.41	79.64	1.4
Ethyl acetate	88.11	902	13.09	3.04	77.1	2

공정 선정

안전보건공단 웹사이트에 게시되어 있는 2014년부터 2022년까지 보고된 55개의 화학물질 사고사례를 수집하여 제조업 종에서 발생한 사고 사례를 우선적으로 적용하였다. 그 다음으로 사고사례 중 제조업종 내에서 가장 많은 사고가 발생한 공정을 분석하였으며, 연구대상 물질로 선정된 다섯 가지 인화성 물질에 의해 유발된 사고 및 공정을 파악하고자 하였다.

폭발위험장소 구분도

폭발위험장소 계산

인화성 액체를 사용하는 혼합공정의 폭발위험장소를 계산하기 위하여 「산업안전보건기준에 관한 규칙」 제230조(폭발위험이 있는 장소의 설정 및 관리)에 따라 한국산업표준 「KS C IEC 60079-10-1」을 사용하여 본 연구를 진행하였으며, 인화성 액체의 증발률을 계산하였다(KSA, 2022). 누출등급은 2차 누출로 선정하였으며, 그에 따라 누출공 크기는 2차 누출등급에 서의 누출 구멍 권고 기준에 따라 0.1mm²로 선정하였다. 실내가 밀폐된 장소라고 가정하기 위하여 환기 조건은 미흡, 환기속도는 0.5m/s로 한국산업표준에서 제시하는 환기가 되지 않는 조건으로 입력하였다. 누출계수는 정확히 알 수 없기 때문에 1을 대입하였으며, 안전계수는 「KGS GC101」 실험 결과 또는 문헌자료에 폭발하한이 잘 알려져 있는 물질 1.0, 구성 물질의 구성 물질의 LFL과 구성 비율이 잘 알려져 있어 폭발하한의 계산 가능한 혼합물질 0.8, 그 밖의 경우 0.5 적용에 따라 1.0로 선정하였으며(GTSC, 2022), Table 2와 같다.

Table 2. Factors required for hazardous areas calculation

Factor			
Release conditions	Continuous grade of release	Release hole	<i>Cd</i>
	Secondary grade of release	0.1mm ²	1
Zone Conditions	Availability of ventilation	Ventilation velocities	<i>k</i>
	Poor	0.05m/s	1

폭발위험장소 구현

본 연구에서는 SketchUp Pro를 활용하여 폭발위험장소를 3D로 구현하였다. 혼합공정은 'B' 공장의 평면도를 기반으로 작성하였으며, 입면도와 P&ID (Piping and Instrumentation Diagram)를 확인하면서 혼합공정 라인을 3D로 구현했다. 전기

단선도는 전선을 따라 3D로 표현하는 데 제한점이 있어 콘센트 및 배전반 등 밖으로 나와 있는 전기 기계·기구만 3D 도면에 표현하였다. 또한, 체적은 SketchUp을 사용하여 계산하였으며, 직접 계산한 체적과 SketchUp에서 측정한 체적의 일치 여부를 확인하여 정확성을 검증하였으며, 이를 본 연구에서 폭발위험장소 내 체적을 계산할 때 활용하였다.

LEL 도달시간 계산

누출된 인화성 액체의 LEL를 계산하기 위하여 「화학물질폭로영향지수(CEI) 산정지침」 계산식을 활용하였다(KOSHA, 2023). 인화성 액체의 대기확산량 식으로 계산하였으며, 대안의 시나리오 기준으로 액체의 대기확산량을 계산하였으며, 대기확산량 공식에 사용된 인자들은 Table 3과 같다. 위 가이드의 경우 10분 누출 기준으로 Pool의 크기를 산정하기 때문에 초당 Pool의 크기를 알기 위하여 초당 방출량으로 변경하여 초당 형성되는 Pool의 크기를 나타내었다. 이후 초당 확산량을 누적 계산하여 체적 내 LEL까지 도달하는 시간을 계산하였다. 인화성 액체 Pool에서 발생하는 대기확산량은 kg/s로 나타나기 때문에 이상기체방정식을 활용하여 m³/s 변경하였다. 이후 폭발위험장소 내 체적을 적용하여 % 단위로 계산하면 LEL까지 도달하는 시간을 계산할 수 있다. 다음 방식을 식으로 표현하면 식 (1)과 같다.

Table 3. Accident scenario factors

Accident Scenario			
Pressure	Temperature	Release height	Release hole
350kPa	25°C	1m	5mm

$$EA = \frac{AQ \times R \times T}{P \times R} \div V \times 100 \quad (1)$$

여기서, EA: 폭발분위기 도달 값(%)

R: 기체 상수

T: 온도(K)

P: 압력(atm)

V: 폭발위험장소 체적(m³)

(KOSHA, 2023)

감지 농도에 따른 필요환기량 계산

화재·폭발 사고를 예방하기 위한 감지경보기는 1차 감지(농도 25% 이하)와 2차 감지(농도 50% 이하)에서 경보를 울린다(KOSHA, 2020). 따라서 본 연구에서는 1차, 2차 감지농도에서 필요한 환기량을 계산하였다. 이를 위해 「산업환기설비에 관한 기술지침」에 따라 화재·폭발 방지 필요환기량 공식은 식 (2)을 활용하였으며(KOSHA, 2019), 필요환기량을 계산하기 위해서는 시간당 사용량이 고려되지만, 시간당 사용량의 경우 사용하는 물질이 모두 증발되었다고 가정하기 때문에 본 연구에서는 시간에 따라 발생한 확산량으로 연구를 진행하였다.

$$Q = \frac{24.1 \times S \times G \times fLSUBs \times 100}{M \times LEL \times B} \quad (2)$$

여기서, Q : 필요환기량(m^3/h)

S : 비중

G : 시간당 사용량(L/h)

$fLSUBs$: 안전계수 (연속공정: 4, 회분식 공정: 10~12)

M : 밀도(kg/m^3)

(KOSHA, 2020)

본 연구는 기존 평면도로 관리하고 있는 폭발위험장소 구분도로 누출원과 점화원을 확실하게 관리하기에 한계가 있다고 판단하여 3D로 형상화한 폭발위험장소 구분도를 활용한 점화원 및 가연물의 안전 관리 방안을 제안하고자 한다. 먼저, 점화원 안전관리를 위한 연구에서는 SketchUp을 활용하여 공정을 3D로 구현하고, 구현한 3D도면 상에 폭발위험장소를 표현하여 점화원이 쉽게 확인 가능한지 분석하였으며, 기존 2D도면과 비교·분석하여 3D의 장·단점을 도출하였다. 이후 가연물에 대한 안전관리를 위해 SketchUp으로 계산된 폭발위험장소 체적 내 LEL까지 도달되는 시간을 「화학물질폭로영향지수(CEI) 산정지침」의 대기확산량 공식에 따라 계산하였다. 또한, 대안의 시나리오 기준으로 산출된 LEL 도달시간을 활용하여 화재·폭발사고를 예방할 수 있는 감지기 설정 농도와 환기량을 제안하였다.

연구 결과

사고사례 분석

선행연구에 따르면 제조 및 취급설비 중 공정 용기에서 가장 많은 화학사고가 발생하였으며, 혼합 작업이 일상 작업에서 화재·폭발 사고가 가장 많이 발생하는 공정(Seo et al., 2018)이다. 안전보건공단 사고조사 보고서를 분석한 결과 2016년 톨루엔 계량작업 중 화재사고, 드레인 작업 중 화재사고, 접착제 제조공정 폭발사고, 그리고 중·소규모 사업장의 화재·폭발 사고 예방에 나와있는 자일렌 폭발사고를 통해 4가지 물질이 사업장 내에 있는 혼합공정에서 사고가 발생한 것을 확인하였다. 그리고 메틸에틸케톤은 혼합공정에서 발생한 사고사례는 없었지만 혼합공정으로 운영되고 있다는 것을 화학물질 유통·사용 실태조사 결과보고서에서 확인하였다. 따라서 본 연구는 실내에서 혼합공정을 사용하고 있는 사업장을 대상으로 연구를 진행하였다. 혼합공정의 조건은 인화성 액체를 사용하고 있는 사업장으로 가정하여 구현하였다. 화학설비 등 공정설계에 관한 기술지침을 참고하여 최소운전압력은 350kPa로 설정(KOSHA, 2012)하였으며, 상온에서 운전되는 혼합공정으로 가정하여 연구를 수행하였다.

폭발위험장소를 활용한 점화원 관리

3D 폭발위험장소 구분도 작성

혼합공정에서 사고가 발생한 사업장들과 ‘B’사업장의 단면도 및 전기단선도를 참고하여 혼합공정을 3D로 구현하였다.

SketchUp으로 혼합공정을 구현할 때 단면도를 베이스로 혼합공정을 구현했으며, 사업장 내 배전반 및 콘센트 등을 전기기계·기구를 구현하였다. Fig. 2은 혼합공정의 외관을 3D로 구현한 모습이며, 혼합공정 내부에 혼합기와 점화원이 될 가능성이 있는 배전함, 분전반, 콘센트 등을 같이 구현하였다. 혼합기, 배전함 등을 제외한 체적은 800m³이며, 실내에 있는 혼합기만 누출원으로 선정하였다.

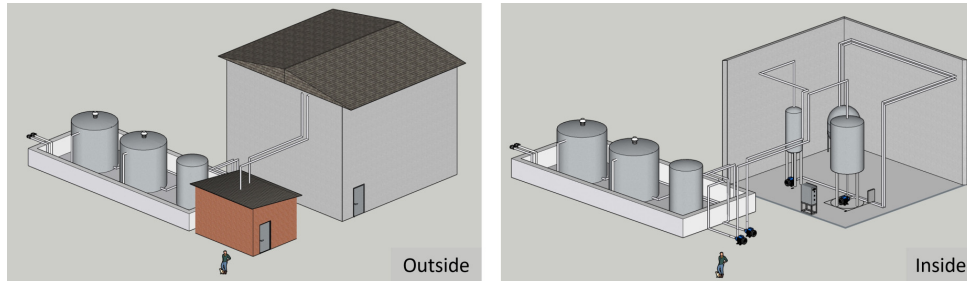


Fig. 2. 3D Mixing process

선정된 5개 물질(톨루엔, 자일렌, 헥산, 아세트산에틸, 메탄에탄케톤, 아세트산에틸)은 액체 누출량 계산산 공식과 증기밀도 활용하여 누출특성을 계산하였다. 누출특성 값은 톨루엔 0.055, 자일렌 0.043, 헥산 0.047, 메틸에틸케틸 0.038, 아세트산에틸 0.029이다. 이후 누출특성과 환기속도 0.05m/s를 희석등급 평가 차트를 활용하여 희석등급을 산출하였다. 산출된 희석등급은 5개 물질 모두 ‘중희석’으로 동일하게 산출되었다. 이후 폭발위험장소를 선정하기 위하여 누출등급(2차 누출등급)과 희석등급(중희석), 환기이용도(미흡)를 대입해서 나타난 장소 또한 5개 물질 모두 ‘2중 장소’로 산출되었다. 각 물질별 폭발 위험거리를 계산하기 위하여 폭발위험장소의 범위 추정 차트에 누출 특성을 활용하여 거리를 산출하였다. 산출된 거리는 톨루엔 159.2m, 자일렌 1.76m, 헥산 1.83m, 메틸에틸케틸 1.64m, 아세트산에틸 1.45m이며, SketchUp을 활용하여 혼합기 주변으로 형성된 체적을 계산한 결과 톨루엔은 159.72m³, 자일렌은 126.82m³, 헥산은 136.74m³, 메틸에틸케틸은 112.09m³, 아세트산에틸은 88.93m³로, 5개 물질 중 톨루엔이 가장 큰 폭발위험장소를 형성하였으며, Table 4와 같다.

Table 4. Hazardous areas analysis by substance

	Toluene	Xylene	Hexane	MEK	Ethyl acetate
W	0.0021kg/s	0.0021kg/s	0.0018kg/s	0.0020kg/s	0.0021kg/s
Continuous grade of release	Secondary grade of release	Secondary grade of release	Secondary grade of release	Secondary grade of release	Secondary grade of release
Q_c	0.055	0.029	0.047	0.038	0.043
Degree of dilution	Dilution high	Dilution high	Dilution high	Dilution high	Dilution high
Effectiveness of ventilation	Poor	Poor	Poor	Poor	Poor
Zone	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2	Zone 2
Distance	1.99m	1.45m	1.83m	1.64m	1.76m
Volume	159.72m ³	88.93m ³	136.74m ³	112.03m ³	126.82m ³

폭발위험거리가 가장 큰 톨루엔과 가장 작은 아세트산에틸을 기준으로 형성된 폭발위험장소를 평면도에 표현했을 때 Fig. 3과 같이 표현되며, 3D로 표현할 경우 혼합기 아래에 있는 펌프, 콘센트 등이 확인이 되지 않는다. 특히, 톨루엔 폭발위험장소는 왼쪽에 위치한 배전함의 폭발위험장소 내에 들어오지만 기존 폭발위험장소만으로 숨겨진 점화원을 확인할 수 없다. 그래서 3D로 폭발위험장소를 구현하였으며, 기존 종별 폭발위험장소를 구분하는 방식은 3D로 나타내었을 경우 쉽게 구분하기에는 한계가 존재하기 때문에 Fig. 4과 같이 색으로 구분하여 빨간색은 0종 장소를 의미하며, 주황색은 1종 장소, 노란색은 2종 장소를 표현하였다. Fig. 5와 같이 폭발위험장소 구분도를 3D로 표현할 경우 점화원이 직관적으로 확인이 가능했으며, 기존 방식으로 표현했을 때 보이지 않았던 전기기계·기구(펌프, 콘센트, 배전함, 분전반 등)를 확인할 수 있다. 특히, 3D의 경우 내가 원하는 시점에 따라 보는 방법을 변경할 수 있어 2D에서 보이지 않는 사각지대를 보다 효과적으로 확인할 수 있었다.

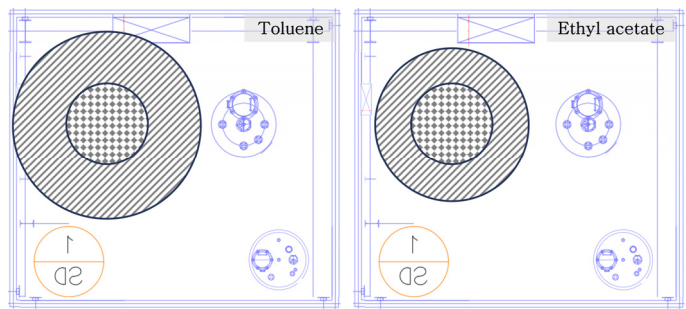


Fig. 3. Existing hazardous areas

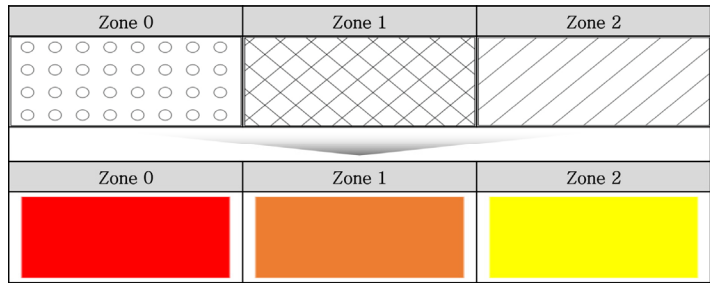


Fig. 4. Change in symbol for zone

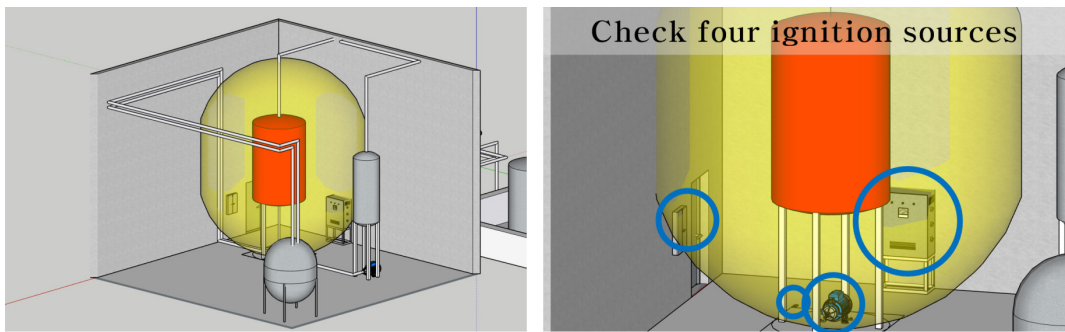


Fig. 5. 3D hazardous area classification chart layout: verification of 4 ignition sources

폭발위험장소 내 누출된 가연물 관리

3D로 형성된 폭발위험장소 내 LEL 도달시간 계산

폭발위험장소 내 LEL까지 도달하는 시간을 계산하기 위하여 「화학물질폭로영향지수(CEI) 산정지침」 중 액체의 대기확산량공식을 활용하여 누출된 물질의 증발량을 계산하였으며, 5개 물질을 동일한 조건에서 비교하기 위하여 100m³ 내에서 LEL까지 도달하는 시간으로 계산하였다. 우선 폭발위험장소가 가장 넓게 나타난 톨루엔을 기준으로 증발량을 계산한 결과 톨루엔은 467s에 LEL에 도달하였으며, 폭발분위기를 형성했을 때, 누출된 양은 194.30kg으로 형성된 Pool(22.36m³)에서 초당 0.0157kg씩 확산되는 것으로 나타났다. 톨루엔의 LEL 값은 1%로 5개 물질 중 가장 낮지만, 증기압이 3.79kPa로 높지 않아 대기확산량이 적게 나타났다고 판단된다. 이후 5개 물질 모두 LEL 도달시간을 분석한 결과 Fig. 6과 Table 5와 같이 도출되었다. 5개 물질 중 가장 빠른시간 내에 LEL값에 도달한 물질은 헥산으로, 195s에 10.69m³의 Pool을 형성했으며, 메틸에틸케톤은 326s(16.22m²), 아세트산에틸은 366s(17.28m²)에 LEL 값에 도달하였다. 자일렌의 경우 증발압력이 5개 물질 중 가장 낮아 600s 내에 폭발분위기를 형성하지 못한 것을 확인하였다.

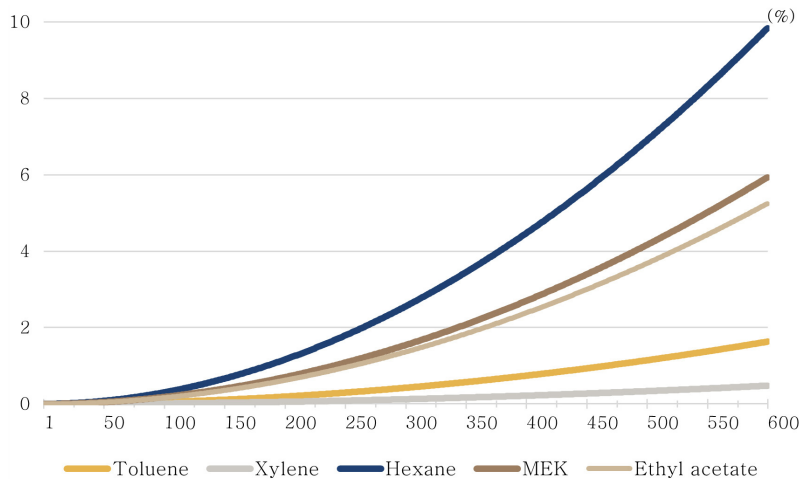


Fig. 6. Comparison of air dispersion quantities for 5 substances

Table 5. Comparison of air dispersion quantities for 5 substances

	Toluene	Xylene	Hexane	MEK	Ethyl acetate
Volume	159.72m ³	88.93m ³	136.74m ³	112.03m ³	126.82m ³
Time	423s	600s <	195s	326s	366s
Pool size	22.41m ²	28.84m ²	10.69m ²	16.22m ²	17.28m ²

LEL 도달시간이 가장 짧았던 헥산으로 온도 조건에 따른 LEL 도달시간을 계산하였으며, 증기압의 경우 해당 온도에 맞는 증기압을 대입하여 계산하였다. 운전 온도를 25℃ 높인 50℃에서 헥산의 증기압이 약 3배 증가하였으며, 같은 면적 대비 Pool에서 발생하는 대기확산량 또한 약 3배 차이를 보였다. 결과는 Fig. 7과 같다.

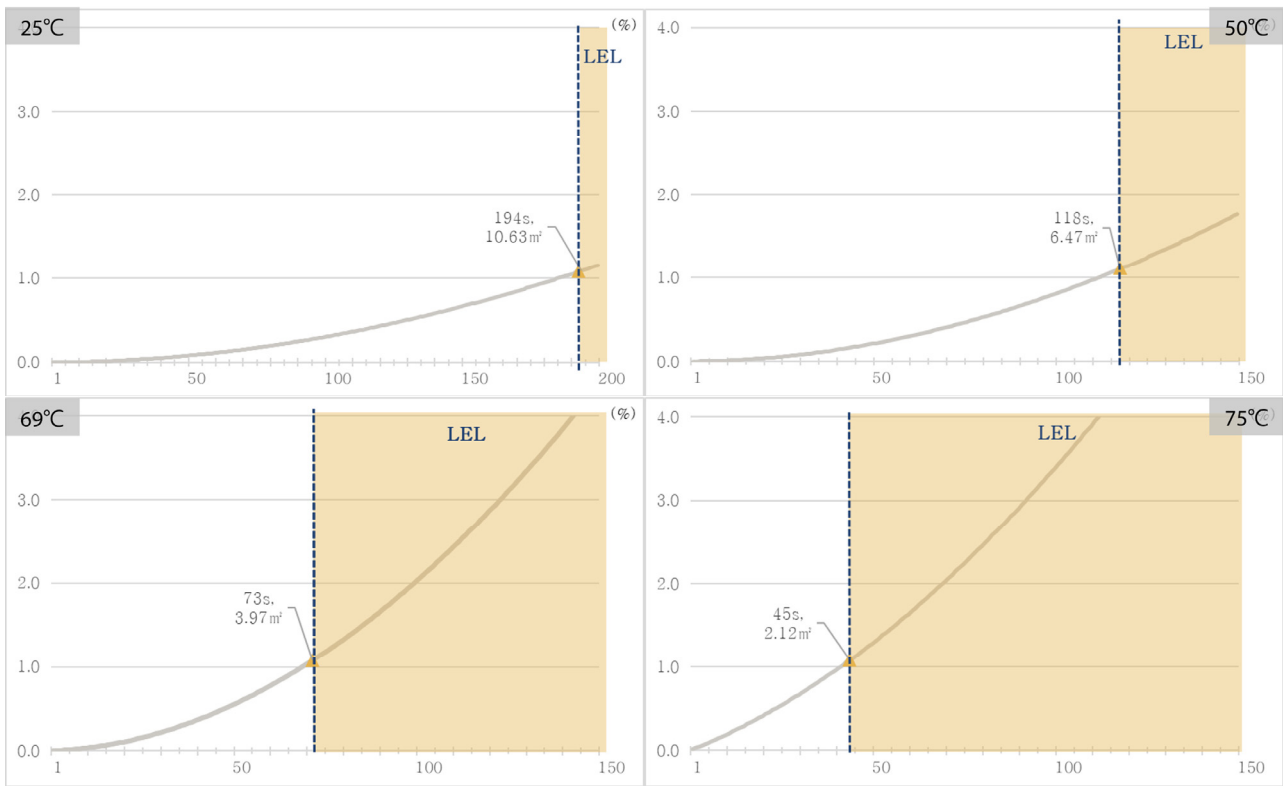


Fig. 7. Time to reach LEL of hexane under temperature conditions

다음으로는 운전온도가 끓는점을 넘었을 때, LEL 도달시간은 73s이며 Pool 면적은 3.97m³을 형성했으며, 이때부터 Flash 되면서 발생하는 대기확산량도 같이 계산하였다. 운전 온도를 끓는점보다 약 6°C 높은 75°C에서부터는 Flash 되면서 나오는 확산량이 Pool에서 나오는 확산량보다 약 40배 많은 2.26kg/m³ 발생되면서 LEL 도달시간은 60s 내로 형성되는 확인 할 수 있었다.

감지경보기 농도에 따른 환기량 계산

사업장에서 화재·폭발 사고를 예방하기 위해서는 누출을 감지하고 누출된 물질이 폭발분위기가 형성되지 않도록 관리하는 것이 가장 중요한 요인이라고 판단된다. 따라서 1차 감지경보 농도와 2차 감지경보 농도의 도달시간을 계산하고 해당 감지·경보에 따른 누출량을 계산하였다. 핵산은 2차 감지농도(50% 이하)에서 1.93kg이 확산되었으며, 136s가 소요되었다. 그리고 1차 감지농도(25% 이하)까지는 95s가 소요되었으며, 0.96kg의 핵산이 확산되었다. 25°C기준으로 핵산의 감지시간을 계산한 결과, 1차 감지시간과 2차 감지시간은 41s 차이를 보였으며, 2차 감지시간과 LEL 도달시간 간은 58s로 1차 감지시간 차이보다 줄어든 것을 확인할 수 있었다. 따라서 5개 물질의 감지·경보 시간(1차, 2차)에 따라 필요환기량을 계산하였으며, Table 6와 같은 결과가 도출되었다. 5개 물질 모두 LEL, 2차 감지 농도, 1차 감지농도에서 환기를 할 경우 현실적으로 불가능한 환기량이라고 판단하였다. 이에 사업장 실정에 맞는 환기량을 기준으로 감지농도와 감지시간 계산이 필요하다고 판단하여 0.9×0.9m² 환기팬으로 가정하여 감지농도와 시간을 계산하였다.

Table 6. Ventilation rate based on detection time for different substances

	Toluene	Xylene	Hexane	MEK	Ethyl acetate
LEL	423s	600s <	195s	326s	366s
Ventilation rate	226,691.92	85,260.20	183,187.54	268,691.87	245,698.31
2nd Detection concentration	467s	600s <	137s	228s	257s
Ventilation rate	113,720.36	85,260.20	91,836.67	133,627.42	123,166.76
1st Detection concentration	230s	452s	96s	160s	180s
Ventilation rate	56,846.56	48,891.01	45,763.96	66,860.36	61,404.71

0.9×0.9m² 환기팬이 허용 가능한 환기량은 22,000~27,000m³/h로 설정하였으며, 이는 시중에서 유통되고 있는 환기량을 기준으로 하였다. 먼저, 가장 빠른시간 내에 환기가 필요했던 계산은 0.13~0.16% 감지가 이루어져야 했으며, 감지시간은 66~77s 사이로 도출되었다. 그리고 폭발분위기가 10분 내에 형성되지 않았던 자일렌의 경우 0.12~0.15%에서 감지가 필요하며, 300~335s 사이에 감지되어야 화재·폭발 사고를 예방할 수 있다고 도출되었다. 나머지 3개 물질은 Table 7과 같이 나타났다.

Table 7. Concentration and time required for detection based on 0.9×0.9m² ventilation standard

	Toluene	Xylene	Hexane	MEK	Ethyl acetate
Ventilation rate(m ³ /h)	22,000~27,000m ³ /h				
Detection concentration(%)	0.10~0.12	0.12~0.15	0.13~0.16	0.14~0.18	0.18~0.22
Detection time(s)	143~153	300~335	66~73	90~100	106~118

본 연구에서 활용된 누출 시간에 따른 필요환기량을 계산하는 방법을 활용하면 감지경보기의 설정 농도에 따라 감지·경보 시간을 예측할 수 있으며, 감지 이후 화재·폭발 사고를 예방하기 위해 필요한 환기량도 계산할 수 있다. 그러나 현재 시행되고 있는 감지농도에서 환기를 시행할 경우 사고를 예방하기 위해 필요한 환기량이 현실적으로 실현 불가능하다. 따라서, 사업장 실정에 맞게 환기량을 적용이 필요하며, 사업장에서 설치한 환기구가 환기가능한 농도를 산출하여 감지경보기 설정값도 조절하는 것이 필요하다. 화재·폭발 사고를 예방하기 위해서는 폭발분위기가 형성되지 않도록 관리하는 것이 가장 중요하다. 본 연구에서 사용된 LEL 도달 시간 계산과 환기 가능한 농도를 계산하여 사업장을 안전하게 관리하는 것이 필요하다.

결론

본 연구는 현재 진행되고 있는 폭발위험장소 구분도의 문제점을 도출하였으며, 현 폭발위험장소 구분도 문제점을 보완하고 활용하여 화재·폭발 사고에 대한 2개의 예방 방안을 제안하였다.

3D를 활용한 점화원 관리

기존 폭발위험장소 구분도의 경우 단면도로 점화원 및 누출원을 확인하고 관리하는데 어려움이 있다. 그러나, 폭발위험장

소를 3D로 표현할 경우 2D 형태에서 확인이 불가능하였던 누출원에서부터의 거리를 확인할 수 있으며, 더 나아가 점화원이 될 가능성이 있는 주변 시설들의 폭발위험장소 내 존재 여부를 한눈에 확인 가능하다. 또한, 증기 형태 별로 폭발위험장소 범위 내 감지경보기 설치 위치를 추정할 수 있을 것이다. 한 개의 실내 공간에 여러 장치를 설치하여 사용하는 사업장의 경우, 3D로 폭발위험장소를 구현하는 것이 유용할 것으로 판단된다. 그러나 기존 폭발위험장소 구분도 작성에 비해 많은 예산이 요구되기 때문에 실외의 단순 공정 등 시설에 대한 효용성을 잘 판단하는 것이 중요하다.

폭발위험장소 내 누출된 가연물 관리

폭발위험장소 내 LEL도달 시간 계산

폭발위험장소 내 누출된 가연물을 관리하기 위해서는 폭발위험장소 내 폭발분위기를 형성하는 시간을 계산하였으며, 화재·폭발 사고가 많이 발생한 인화성 물질 중 LEL 농도가 낮은 5개 물질을 선정하여 연구를 진행하였다. 5개 물질 중 사고가 가장 많이 발생한 톨루엔의 폭발위험거리 크게 형성되었으나 증기압을 고려한 대기확산량 계산 결과, 폭발위험거리가 가장 넓게 나온 톨루엔보다 헥산의 LEL 농도 도달 시간이 더 짧게 나타났다. 이와 같이 물질에 따른 대기확산량을 계산한다면 물질의 특성을 고려하지 않은 액체 누출률 공식을 사용하는 현 방식보다 더욱 안전한 관리가 가능할 것으로 판단된다.

감지경보농도에 따른 필요환기량 계산

화재·폭발 사고 예방을 위해 인화성 물질이 누출되었을 때 사업장 내 폭발분위기가 형성되지 않도록 관리해야 한다. 따라서 본 연구에서는 감지경보기 설정값에 따라 물질의 확산량과 시간을 계산하고, 감지·경보 이후 환기를 통해 폭발분위기를 형성하지 않도록 필요환기량을 계산을 하였다. 그러나 5개 물질의 1차 감지농도에서 환기할 경우 시간당 56,000m³ 환기를 요구하였다. 56,000m³/hr 환기량을 충족하는 환기팬을 설치하는 것은 현실적으로 불가능하다고 판단하였기 때문에 환기팬 기준으로 환기 가능 농도를 계산하여 물질별 화재·폭발 사고의 예방 가능 농도를 산출하였다. 본 연구는 환기팬으로 가정했기 때문에, 각 사업장 내 환기팬의 용량 값으로 환산한다면 환기 가능 농도를 계산하여 사업장에 적용할 수 있다.

연구의 한계점 향후 연구과제

본 연구의 연구대상 업종 및 공정은 제조업의 혼합공정으로 한정되어 있다. 연구대상 물질 또한 많은 사고를 유발하는 인화성 액체 중 LEL 값이 가장 낮은 5가지 물질을 선정하여 연구를 진행하였으며 기타 화학물질에 대한 연구는 수행하지 않았다. 따라서, 향후 타 산업 내 다양한 공정의 화학물질에 대한 추가 연구를 수행하고 본 연구와 비교·분석한다면 보다 의미 있는 연구가 될 것으로 예상된다. 또한, 해당 연구 내용을 3D 폭발위험장소 구분도에 적용하여 작성한다면, 각 물질의 특성이 고려된 결과를 3차원의 입체적인 도면으로 확인할 수 있기에 보다 정확한 폭발위험장소 구분이 가능할 것이다.

Acknowledgement

본 연구는 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- [1] Chang B.-K. (2009). "A study on the difference between drawings and realized structure." *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 25, No. 12, pp. 3-11.
- [2] GTSC (2022). Classification Code for Explosive Hazardous Area on Gas Facility (KGS GC101 2022). https://cyber.kgs.or.kr/codesrc/kgscodes_pdf/2022/GC101_220830.pdf.
- [3] Jung, Y.-J., Lee, C.-J. (2018). "A study on the estimation model of liquid evaporation rate for classification of flammable liquid explosion hazardous area." *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 33, No. 4, pp. 21-29.
- [4] Kang, G.-Y. (2023). State of Major Disasters in 2022. Current Status and Tasks for One Year of Enforcement of the Serious Disaster Punishment Act, MoEL, Sejong, Republic of Korea.
- [5] Kim, D.-Y., Chon, Y.-W., Lee, I.-M., Hwang, Y.-W. (2017). "A study on the improvement of classification of explosion hazardous area using hypothetic volume through release characteristic." *Journal of the Korea Safety Management & Science*, Vol. 19, No. 2, pp. 31-39.
- [6] KOSHA (2012). Technical Guidelines for Chemical Plant and Process Design (KOSHA GUIDE D-37-2012). <https://www.kosha.or.kr/kosha/info/searchTechnicalGuidelines.do>.
- [7] KOSHA (2019). Technical Guidelines for Industrial Ventilation Systems (KOSHA GUIDE W-1-2019). <https://www.kosha.or.kr/kosha/info/searchTechnicalGuidelines.do>.
- [8] KOSHA (2020). Technical Guidelines for Gas Leak Detection and Alarm Equipment Installation and Maintenance (KOSHA GUIDE P-166-2020). <https://www.kosha.or.kr/kosha/info/searchTechnicalGuidelines.do>.
- [9] KOSHA (2023). Guidelines for Calculation of Chemical Exposure Index (CEI)(KOSHA GUIDE P-91-2023). <https://www.kosha.or.kr/kosha/info/searchTechnicalGuidelines.do>.
- [10] KSA (2022). Explosive atmospheres - Part 10-1 : Classification of areas - Explosive gas atmospheres (KS C IEC60079-10-1). <https://e-ks.kr/streamdocs/view/sd;streamdocsId=72059252330962804>.
- [11] Lee, J.-Y., Cho, K.-S., Yoon, H.-C., Son, D.-S. (2016). Case Study on Fire (Explosion) Incident at Raw Pharmaceutical Manufacturing Plant. KOSHA, Ulsan, Republic of Korea.
- [12] Moon, J.-S., Lee, J.-H. (2019). "Development of walk-down performance procedures for fire modeling of nuclear power plants based on deterministic fire protection requirements." *Fire Science and Engineering*, Vol. 33, No. 6, pp. 43-52.
- [13] NICS (2023). NCIS [Available from: https://icis.me.go.kr/pageLink.do;jsessionid=mBsq9lporrR0DPXAkxj89Bss.icis_ipotal11.]
- [14] Seo D.-H., Lee K.-W., Han O.-S., CHol Y.-R. (2018). Investigation on the Causes of Fire and Explosion Accidents during Usual and Unusual Work, Utilizing Accident Cases at Chemical Plants. OSHRI, Dajeon, Republic of Korea.
- [15] Sim, W.-S. (2022). Minister of Employment and Labor Issues Urgent Directive Regarding Explosion Incident at SK GeoCentric Co., Ltd. MoEL, Press Releases, Sejong, Republic of Korea.
- [16] Yu, W.-J., Kim, B.-J., Lee, J.-w., Cho, K.-S., Park, K.-S. (2020). "A study on the optimum estimation of flammable liquid release rate for the classification of hazardous area." *Korean Journal of Hazardous Materials*, Vol. 8, No. 2, pp. 9-18.