



화재사고사례를 통해서 본 건설현장 지하공간에서의 유기용제의 위험성에 대한 연구

안병준 · 정기혁 · 이정석 · †임종국*

한국산업안전보건공단, *한국교통대학교

(2017년 9월 8일 접수, 2017년 12월 19일 수정, 2017년 12월 20일 채택)

A Study on the Risk of Organic Solvents for Underground Area under Construction Site through a Fire Accident Case

Byung-Joon Ahn · Ki-Hyuk Jung · Jung-Suk Lee · †Jong-Kuk Rhim*

Korea Occupational Safety and Health Agency, 400 Jonggaro, Junggu, Ulsan 44429,
Republic of Korea

*Korea National University of Transportation, 50 Daehakro, Chungju, Chungbuk 27469,
Republic of Korea

(Received September 8, 2017; Revised December 19, 2017; Accepted December 20, 2017)

요약

건설현장은 다른 산업분야와 달리 다양한 형태의 공정을 동시에 진행하는 작업적 특성을 가지고 있어서 사고를 예방하는데 많은 어려움이 있다. 특히 소방설비가 정상적으로 설치되지 않은 상태에서 인화성물질과 화기작업이 동시 다발적으로 진행되는 경우가 많아서 큰 화재사고로 이어지고는 한다. 본 연구에서는 2016년 발생한 김포 화재사고를 통해서 작업자가 물질의 위험성을 인지할 수 있는 유일한 수단인 물질안전보건자료의 신뢰도와 유증기 분석으로 보다 합리적인 재발방지 대책을 제시하고자 하였다.

Abstract - In the consideration of the working conditions, which have several kinds of works operating at the same time, at construction sites, it is difficult to prevent industrial accidents. There are a number of works to employ flammable materials and hot works simultaneously operated without fire protection systems. It causes a huge fire and casualties. In this research to analyze an accident case, the reasonable prevention methods are suggested throughout the property tests for the organic solvents and the analysis of the behavior for vapour cloud in the underground area of the construction site.

Key words : fire and explosion, construction site, solvent fire, hot work

1. 서론

2008년 40명 이상의 사상자가 발생한 이천 냉동창고 화재사고는 건설현장의 화재사고 예방 및 안전관리와 관련하여 많은 점을 시사하였으며, 지난 10년간 이와 관련된 문제점들을 개선하기 위한 노력들이 꾸준히 이루어졌다. 하지만 2013년 서울 구로 복합

건물 화재, 2014년 고양시 고양종합터미널 화재, 2016년 김포 주상복합 현장 화재 등 여전히 건설현장 화재사고를 접하고 있는 것이 현실이다.

목연수 등[2]에 의하면 건설현장의 화재사고는 다른 산업분야와 달리 다양한 형태의 작업을 동시에 진행하는 특성 때문인 것으로 나타났다. 결국 용접·절단 등 점화원으로 작용하는 작업과 도장·세정 등 유기용제를 사용하는 작업이 동시에 진행되는 경우가 많아 건설현장에서 화재사고가 끈임 없이 발생하고 있다는 의미이다. 또한 신운철 등[3]에

†Corresponding author:jkrhim@ut.ac.kr

Copyright © 2017 by The Korean Institute of Gas

의하면 2003년 이후 10년간 발생한 중소규모 건설 현장의 화학물질에 의한 화재폭발사고 사례 중 용접 및 용단작업 시 주변 인화물질에 의한 화재 폭발재해에 의한 재해자수가 전체의 28 %를 차지하는 것으로 나타나 그 심각성을 시사하였다.

따라서 본 연구에서는 2016년도 김포 신축공사 현장에서 발생한 화재사고의 원인에 대한 분석을 통해서 건설현장의 현실에 대해서 점검하고 동종재해 예방을 위한 기술 자료를 제공하고자 한다.

II. 사고개요 및 분석

본 연구의 대상 사고사례는 2016년 경기 김포시 장기동 소재 근린생활시설 신축공사현장에서 발생한 사고로, 지하 1층 작업장에서 근로자 3명이 스프링클러 배관 작업을 하기 위해 강관파이프와 연결 자재를 신너가 1/4정도 채워진 통에 집어넣고 흔들어나사부위를 세척한 후 주변에 적재하던 중, 신너통과 신너가 스며든 나사산 주위에서 발생한 유증기가 주변에서 작업하던 고속절단기에서 날아온 불티에 의해 점화되었을 가능성이 가장 높은 것으로 조사되었으며, 정전기 등 다양한 가능성이 제시 되었다.

Fig. 1은 사고 발생 현장의 모습을 나타낸 것으로 사고 발생 당시의 상황을 추정할 수 있다. 화재 발생 당시 현장에는 지상층 거푸집 작업에 35명, 지하층 스프링클러 배관작업에 4명과 덕트설치 작업에 3명이 동시에 작업 진행하고 있었다. 화재 발생 후 소화기를 사용한 초기 진화가 실패하자 지하 1층 천장에 설치된 110 mm 난연성 경질폴리우레탄보드로 화염이 전파되어 연소하는 과정에서 발생된 유독가스와 화염에 의하여 지하 1층 근로자 2명이 사망하고 1명이 중상을 입었으며, 지하 2층에서 작업하고 있던 덕트 작업자 3명이 화재를 인지하고



Fig. 1. The fire accident site.

대피하다가 유독가스에 중독되어 2명이 사망하고 1명이 중상을 입는 등, 총 4명이 사망하고 2명이 중상을 입은 것으로 조사되었다[4].

2.1 현장증거 수집

사고 원인 분석을 위해서 우선적으로 사고 직후 현장 조사 결과에 의하여 수집된 현장증거를 Table 1에 나열 하였다[4].

2.2 사고분석 방법 및 결과

SCAT(Systematic cause analysis technique), STEP(Sequential timed events plotting) 등 다양한 사고 조사기법들이 현재까지 제안되고 있다[5]. 이러한 기법들은 대부분 사고전개과정 분석을 통해 안전관리체계, 방호계층의 문제점을 분석 하는데 목적을 두고 있다. 상대적으로 안전관리체계, 자체 작업표준이 확보되어 있지 않은 중소규모 건설 현장특성을 고려했을 때, 이러한 기법을 통해서는 사고발생 원인을 규명하기에는 한계가 있다. 따라서 원인 도출에 상대적으로 용이한 ECFC(Events and causal factors charting)[5]를 이용하여 사고 전개 과정을 도식화하여 사고원인이 될 수 있는 요인을 도출하고 FTA(Fault tree analysis)를 이용하여 연소의 3요소를 기준으로 화재원인을 분석하였다.

Table 1. A list of evidences

구분	현장 증거	코드	비고
인화성 물질	· 신너통(17 L) 3통 - 3통 중 1통은 소분 사용 - 2통은 사용안함.	T1	거래명세서
	· 소분통(5 L) 2통	T2	
가연성 물질	· 경질우레탄보드 (E등급 2종2호, 난연성)	T3	현장 잔존물
환기장치	· 선풍기 - 가동방향 불명확	T4	
소화장치	· 화재로 그을린 소화기 (편이 뿔힌 상태)	T5	
신너세척 완료배관	· 2.2 m 길이 배관 20여개 · 0.4 m 길이 배관 40여개 · 배관피팅류(Elbow 등)30여개	T6	
작업시간	· 5시간 38분 (08시 ~ 13시 38분)	T7	진술
화재특성	· 신너통 상부에 위치한 슬라브 및 보 하부에 폭열혼적 관찰됨	T8	잔존물

화재사고사례를 통해서 본 건설현장 지하공간에서의 유기용제의 위험성에 대한 연구

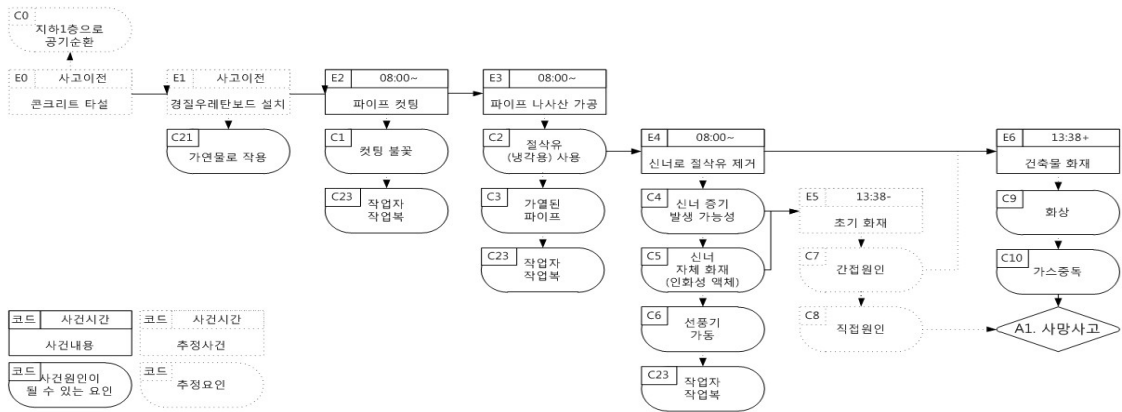


Fig. 2. The result of ECFC.

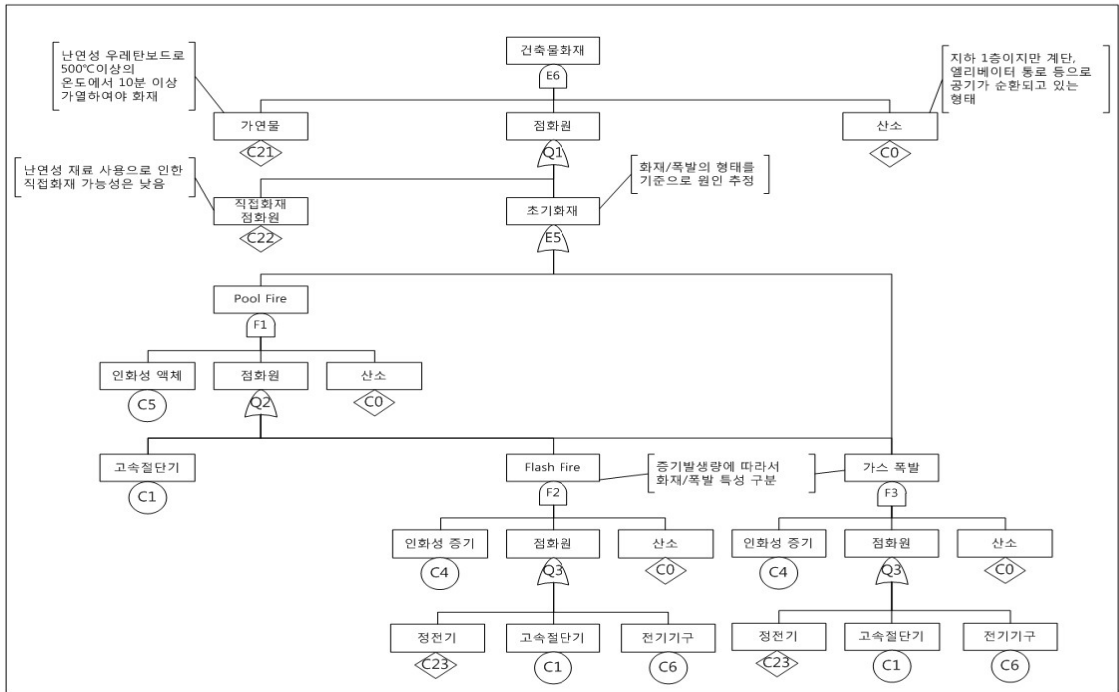


Fig. 3. The result of fault tree analysis.

Fig. 2와 같이 ECFC를 적용하여 사고발생까지의 여러 사건을 순서대로 나열하고 각 사건에서 화재의 3요소로 작용할 수 있는 요인들을 분석한 결과 Table 2와 같이 정리 할 수 있었다.

Table 2. Causal factors

구분	Codes for Causal factor	비고
가연물	C2, C4, C5, C21	-
점화원	C1, C3, C6, C23	
산소	C0	

Fig. 3은 연소의 3요소를 기준으로 FTA 실시 결과이다. 난연성 경질우레탄보드 외에는 특별한 가연물이 없었고, 이런 재질의 보드는 500℃에서 10분 이상 가열해야만 화재로 이어지는 점을 가만했을 때 인위적인 조작 없이 건축물에 직접적으로 착화가 되었다고 판단하기에는 무리가 있다고 결론지었다[6]. 결과적으로 주변에 있던 인화성액체 또는 증기에 의해서 1차 화재가 발생하였고 이로 인해서 건축물 난연재에 2차 화재가 발생하였다고 보는 것이 타당한 것으로 나타났다. 1차 화재는 가스폭발 또는 Pool fire의 형태인 것으로 분석 되었으며, 고속절단기 불꽃에 의해서 점화 되었거나 Flash fire나 가스폭발에 의해서 착화 되었을 것으로 분석되었다. 결과적으로 유증기 형성 여부에 따라서 화재의 형태가 결정되고 보다 명확한 점화원을 찾을 수 있다 것이다.

따라서 우선 사고 당시 사용하였던 유기용제에 대한 물리화학적 물성 분석을 통해서 그 위험성에 대해서 검토하고, 그 결과에 의거하여 유증기 형성 가능성 여부에 대해서 검토하기로 하였다.

III. 유기용제 물성 실험

3.1 대상물질

본 연구에서 평가에 사용한 물질은 배관재료 세척

Table 3. Summary of physical properties

구분	Maker	KOSHA	PETROBRAS	Shell
Name	Solvent	SWEETENE D naphtha	Naphtha sweetened	←
Cont. [%]	100	100	100	100
F.P. [°C]	4	<-40 (C.C)	<-11 (C.C)	< 0
E.L. [%]	0.77~6.7	No data	1~6	1.4 ~7.6
S.G [-]	0.8 @ 25°C	0.68~0.79 @ 15°C	0.709~0.72 @ 20 °C	0.765 @ 15°C
P_vap [kPa]	1.06 @30°C	35 ~ 90 @37.8°C	29 @ 37.8	17~127 @37.8
B.P [°C]	No data	-10~230	53.5~117.2	-10~230
AIT [°C]	No data	280~470 @ 1ATM	No data	280 - 470

용으로 사용된 신너(CAS No. 64741-87-3)로써 제조사 물질안전보건자료에 제공된 CAS No.를 기준으로 웹 및 문헌을 이용하여 해당 물질의 물리화학적 특성 및 화재폭발 특성을 조사하여 Table 3에 나타냈다.

Table 3에서 볼 수 있는 바와 같이 조사대상 별로 그 값에 다양한 차이를 나타냈는데, 특히 유증기 발생 및 화재폭발과 밀접한 관련성이 있는 증기압 및 인화점에서 그 차이는 크게 나타났다. 따라서 해당 물질에 의한 유증기 발생 거동을 평가 하기 위하여 관련 특성에 대한 정확한 평가의 필요성을 확인할 수 있다.

3.2. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 Table 3에서 살펴본 대상물질의 특성 중에서 유증기 발생 가능성 및 화재폭발과 관련이 깊은 증기압, 인화점, 폭발한계 및 자연발화점에 대해서 평가하였으며, 다음에 각 시험에서 사용한 장치 및 시험방법을 요약하였다.

(1) 증기압 측정장치(MINIVAP VPXpert, Grabner instruments Co.)를 사용하여 ASTM D 6378[7]에서 규정된 실험방법을 준용하여 시료의 증기압을 측정하였다. 이는 37.8 °C에서 일정량의 시료가 투입된 챔버의 부피를 변화시키는 방법으로 측정된 증기압을 통상 Reid 증기압이라 한다. 인화점은 측정방식에 따라서 개방식과 밀폐식으로 나눌수 있으며 본 연구에서는 태그밀폐식 인화점시험기(TAG4, Petrotest Co.)를 사용하였다. 측정 방법은 KS M 2010[8]에서 규정된 실험방법을 준용하였다.

(2) 폭발한계측정장치(Chilworth Technology Co.)를 사용하여 ASTM E 681-09[9]에서 규정된 실험방법

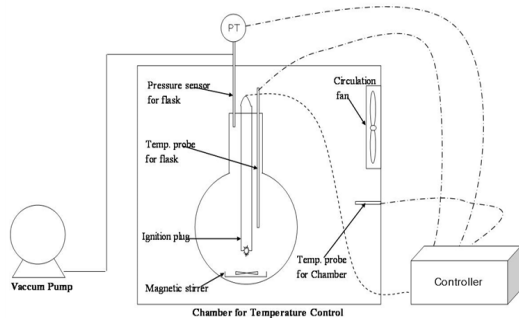


Fig. 4. Schematic diagram of explosion limit tester.

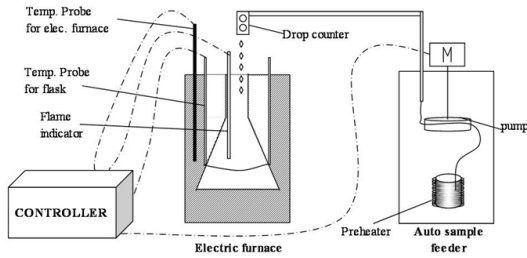


Fig. 5. Schematic diagram of autoignition temperature tester.

을 준용하였다. 본 실험에서 사용된 폭발한계 실험 장치를 Fig. 4에 나타내었다.

(3) 자연발화점은 측정방법에 따라서 승온법과 정온법으로 구분할 수 있으며 본 실험에서는 자연 발화점 측정장치(ZPA-3, Petrotest Co.)를 이용하여 DIN 51794[10]에서 규정된 실험방법을 준용하였다. 이는 일정온도의 물체 표면에 시료를 접촉시켜서 발화여부를 평가하는 정온법 중에서 접촉법에 의한 실험 방법으로 Fig. 5에 모식도를 나타내었다.

IV. 화재의 형태 추정 방법

4.1 사고 시나리오

화재 형태를 추정하기 위해서 앞의 실험을 통해 물질특성을 분석하였고 이 결과를 기반으로 사고 시나리오를 가정하고 유증기 발생량, 유증기 거동에 대해서 분석하여 어떠한 종류의 1차 화재로 인하여 사고가 발생하였는지 분석해보기로 한다. 정확한 신너 사용량, 작업 상황을 확인 할 수 없는 사고로써 최악의 상황을 고려하기 위하여 사고 파이프 및 피팅류에는 지속적으로 신너 증기가 발생하는 상황을 가정하였다. 그리고 이때의 풀(Pool) 면적은 적재된 파이프 및 피팅류의 끝단 10 cm에 신너가 묻어 있다고 가정하고 소분통 2개, 신너통 1개의 단면적을 포함하여 산출하기로 한다.

증기 발생량 산출은 실험적 결과에 의해서 도출된 방식과 전산유체역학을 이용한 방식을 적용하여 비교 검증하기로 한다.

4.2 실험적 결과에 의거한 증기발생량 산출

증기발생량 산출은 물질의 끓는점에 따라서 Boiling과 Non-Boiling으로 구분되어 발전되어 오고 있다. 신너에 가열과 같은 별도의 조작을 하지 않았고 태양복사열이 거의 영향을 미치지 않는 지하 1층에

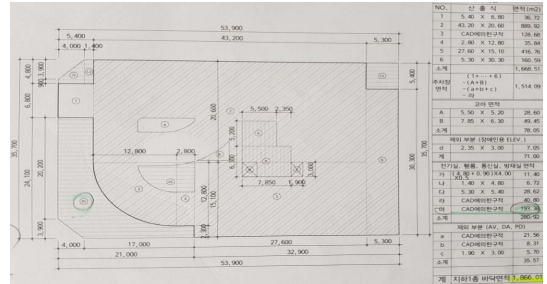


Fig. 6. The drawing for the underground area.

서의 사고인 점을 고려하여 가장 일반적인 Matthiessen이 제안한 형태를 이용하여 증기 발생량을 산출하였다[11].

$$m_{mass} = \frac{Mk_g AP^{sat}}{R_g T_L} \quad (1)$$

이때의 물질전달계수는 다음과 같은 상관관계 식으로 도출하였다.

$$k_g = k_g^0 \left(\frac{M_0}{M} \right)^{1/3} \quad (2)$$

실제 신너의 온도를 정확하게 추정할 수 없겠지만 사고 당시 기상청 기온이 26.3 °C였고 증발이 계속 일어나고 있는 상황을 가정하여 25.0 °C를 적용하여 산출하였다. 포화증기압은 Extended Antoine Equation[12]을 이용하여 환산하였다.

가장 일반적이고 보수적인 결과를 산출하기 위해서 풀의 크기는 다음과 같이 Shaw[13]가 제안한 방법을 이용하였다.

$$r = \left[\left(\frac{8gV_0}{\pi} \right)^{1/2} t + r_0^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

4.3 FLACS CODE를 이용한 증기발생량

증기발생량의 비교검증을 위해서 FLACS CODE를 이용하였다. FLACS CODE는 그리드 기반의 유한체적법을 이용하여 가스확산, 화재·폭발 해석을 위해 널리 이용되고 있는 수치해석 방법이다.

FLACS CODE에서 물질특성은 LISTSPECIE라는 내부 모듈에 의해서 산출된다. LISTSPECIE는 1차 선형식에 파라메타를 변경해가며 산출해가는 방식으로 구성되어 있다[14].

풀의 거동은 누출위치의 영향을 우선적으로 산

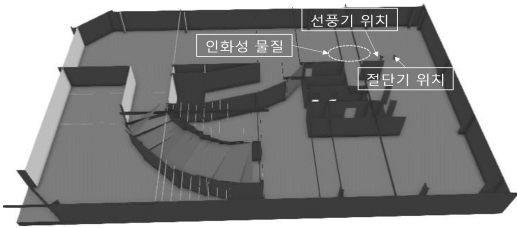


Fig. 7. 3-dim. model for underground area.

정하고 모멘텀 방정식을 기본 방정식으로 수치해석을 통해서 산출하는 방식으로 구성되어 있으며, 이때의 마찰손실은 유체운동 특성을 고려하여 무디차트(Moody chart) 또는 매닝팩터(Manning Factor)를 이용하여 산출되도록 되어있다[14].

증기 발생 현상은 대기, 태양복사열, 바닥과의 열전달 현상, 증기발생으로 인한 증발잠열문제에 대해서 다루고 있으며, 이러한 해석과정은 Hanse[15-16]에 의해 검증된바 있다.

4.4 현장 Geometry

증기발생량, 발생형태에 대해서 검토하기 위해서 사고현장인 지하 1층, 그리고 지하 1층과 연결된 통로에 대해 Fig. 7과 같이 3차원 모델링을 실시하였다. 유한체적법 적용을 위한 그리드는 증기발생 부위에 대해서는 0.02 m단위로 설정하였으며 그 외 부분에 대해서는 최대 1.00 m 단위로 설정하였다.

V. 결과 및 고찰

5.1. 물질 특성 분석 결과

시료에 대한 증기압 등의 특성에 대한 평가결과를 문헌값들과 비교하여 Table 4에 나타내었으며, 각 항목에 대한 상세결과 및 특이사항을 다음에 순차적으로 기술하였다.

(1) 증기압 측정 결과

시료에 대한 증기압 평가결과를 Table 5에 나타내었다. 총 3번의 시험결과, 해당 규격에서 규정하고 있는 반복허용 오차(± 1.1 kPa)를 만족하였으며 평균 46.49 kPa의 증기압을 나타냈다.

이는 제조사에서 제공하는 결과(1.067 kPa)와 비교하여 측정된 온도의 차이(7.8 °C)에서 오는 상이성을 고려해도 상당한 차이를 보이는 것으로 시료에 의한 가연성분위기 형성의 잠재적 위험성을 과소평가할 수 있는 원인을 제공 할 수 있는 것으로 평가되었다.

Table 4. A comparison table

구분	Maker	KOSHA	Experi. Result
P_vap [kPa]	1.067 @ 30°C	35-90 @ 37.8 °C	46.5 @ 37.8 °C
F.P [°C]	4	<-40 °C (C.C)	Not available
LEL [%]	0.77~6.7	No data	44.13 mg/L @ 30 °C
AIT [°C]	No data	(280~470) °C @ 101.3 kPa	260 °C @ 101.3 kPa

Table 5. The results of reid vapor pressure test

	1	2	3	Ave.
P-vap [kPa]	46.62	46.42	46.42	46.49

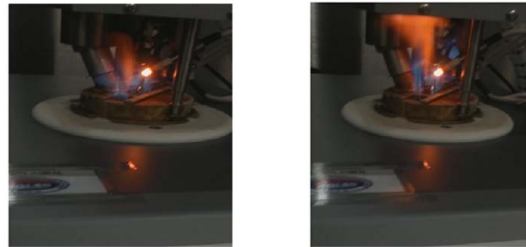


Fig. 8. Flash point tests.

(2) 인화점 측정 결과

시료에 대한 인화점 시험결과, 해당 장비의 측정 범위인 (-30 ~ 110)°C에서 인화점 측정이 불가능한 것으로 평가되었다. 시료의 인화점 측정과정에서 관측된 현상을 Fig. 8에 나타내었다.

일반적으로 KS M 2010에 의한 인화점은 예상 인화점보다 5 °C 낮은 온도부터 0.5 °C마다 시험염을 인가하면서 측정한다. 그러나 해당 시료는 -30 °C까지 사전 냉각하여 -25 °C에서 처음 시험염을 인가하였지만 Fig. 8에서 볼 수 있는 바와 같이 시료컵 밖에서 시험염이 확장되는 현상과 함께 자동으로 중단되었다. 이는 시료가 해당 온도에서 폭발 범위를 형성할 정도의 휘발특성을 갖음을 의미하는 것으로써 해당 시료의 인화점이 최소 -25 °C보다 낮음을 의미한다고 할 수 있다.

(3) 폭발하한계 측정결과

시료에 대한 폭발하한계 측정결과를 Table 6에 나타내었다.

제조사 물질안전보건자료에 의하면 시료는 여러 성분으로 이루어진 혼합물질로써 시험규격인 ASTM E 681-09에서 규정한 바에 의하면 분자량을 모르는 시료는 폭발하한계를 “%”가 아닌 “mg/L”로 표현하게 규정되어 있으며, 해당 시료는 44.13 mg/L의 폭발하한농도를 갖는 것으로 평가되었다.

(4) 자연발화점 측정 결과

시료에 대한 자연발화점 측정결과를 Table 7에 나타내었다. 총 3번의 시험결과, 해당 규격에서 규정하고 있는 반복허용 오차(± 5 °C)를 만족하였으며 자연발화점은 260 °C로 평가되었다.

DIN 51794에 의한 자연발화점은 시료량과 온도를 변경하면서 자연발화가 발생하는 최저온도를 구하는 것으로 최종 결과를 5 °C 단위로 절하여 표현하도록 규정되어 있다. Fig. 9는 자연발화점 측정과정에서 수행된 시료 및 온도변화에 따른 발화여부를 나타낸 것으로 시험 간에 관측된 최저발화온도

는 257 °C 로 평가되었다.

5.2 화재 형태의 추정

화재 형태에 대해서 검토하기 위해서 실험적 결과에 의한 방법과 FLACS CODE를 이용하여 유증기 발생여부에 대해서 검토하였다.

(1) 실험적 결과에 의한 방법으로 검토한 결과 증기발생량에 대해서 검토해본 결과 1.56 m²의 풀(Pool) 면적에서 발생하는 증기는 0.012 kg/s 수준으로 극소량 발생하는 것으로 나타났다.

(2) 증기 발생상태 분석 결과

FLACS CODE를 이용하여 해석한 결과 Fig. 10과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

실험결과에 의하면 44.13 mg/L이라는 LEL을 도출할 수 있었고, 보수적 관점에서 보다 큰 유증기 형성에 대해서 검토하기 위해서 LEL이 1.0 vol% 가정(증기 비중 2.0 ~ 3.0 수준임을 고려)하고 LEL 이하에 대한 증기운 형성여부에 대해서 검토한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 초기(풀 형성 0~18 초까지)에는 7.0 m × 5.0 m × 0.5 m 수준의 증기운이 형성됨.
- 120초 이 후 부터는 평형상태(Steady State)가 형성되면서 증기운 3.0 m × 2.0 m × 0.1 m 크기로 지속적으로 유지됨.
- 신너 증기가 공기보다 무거우므로 상방향 확산은 30 cm 정도 미약하게 발생.

LEL이상 증기의 거동을 살펴보기 위해서 1.0~1.5 vol% 증기의 거동에 대해서 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 초기 3.0 m × 2.0 m × 0.1 m 수준의 증기운이 관찰됨.

Table 6. Results of lower explosion limit test

	1	2	3	Ave.
LEL [mg/L]	44.16	43.98	44.25	44.13

Table 7. The results of AIT test

	1	2	3	Ave.
AIT [°C]	257.1	262.1	261.1	260.1

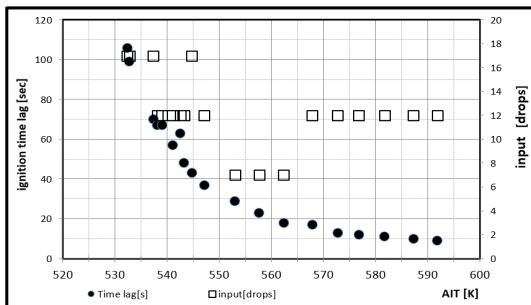


Fig. 9. The graph of AIT test results.

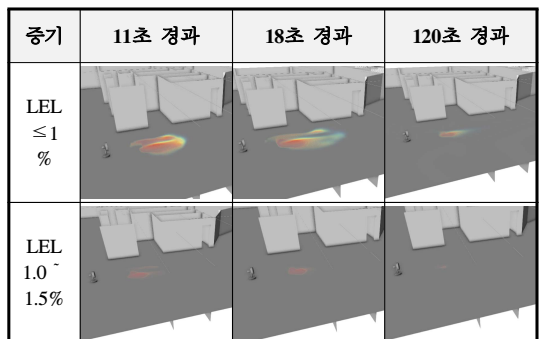


Fig. 10. The analysis results using FLACS CODE.

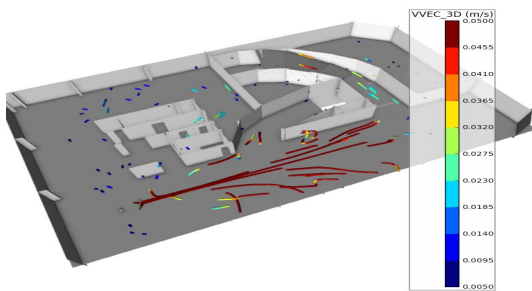


Fig. 12. The result of ventilation study for the underground area.

- 평형상태(Steady State)로 접어 들면서 증기운의 크기는 풀의 크기 1.56 m^2 과 거의 동일한 크기로 형성됨.
- 신너 증기가 공기보다 무거우므로 상방향(약 5cm 수준) 확산은 거의 발생하지 않음.

(3) 공기 순환상태 검토

Fig. 12와 같이 엘리베이터 통로, 계단, 차량 출입구 등을 통해서 0.027 m/s 이하로 미약하지만 공기가 순환되는 구조여서 유증기 발생이 정상상태로 접어든 이후로 더 이상 누적되는 현상은 나타나지 않았다.

(4) 증기 거동 분석 결론

풀(Pool) 형성 초기에만 약간의 증기운이 발생하는 형태를 보였고 이후에는 풀 크기 정도의 증기운을 나타내고 있으므로 사고 현장은 증기가 체류하지 않는 조건이었다고 할 수 있다. 따라서 Flash fire, 가스폭발 등이 발생할 수 있는 조건은 아니었다고 할 수 있다.

결과적으로 가스폭발, Flash Fire, 정전기, 전기기구 등이 점화원이 될 수 있는 것으로 초기 검토되었으나, 고속절단기의 불꽃에 의해서 Pool fire 형태로 1차 화재가 발생되었고 이로 인해서 난연성 경질 우레탄보드로 화재가 이어 졌다고 추정하는 것이 타당한 것으로 나타났다.

5.3 화재 시 난연성 재질의 영향

난연성 재질은 그 의미로 인해서 화재에 안전한 물질로 간주되는 경우가 있다. 하지만 난연성 재질은 다른 플라스틱 재질에 비해서 상대적으로 착화온도가 높다는 의미 일뿐, 화재가 발생할 경우 여러 종류의 급성독성가스를 발생하게 된다. 특히 이번 사고의 가연물인 난연성 경질우레탄보드의 경우에

는 일산화탄소, 황산가스, 염화수소, 뿐만 아니라 시안화수소와 같이 급성독성 물질 중에서도 LC₅₀ 300 ppm 이하[17]로 보고되고 있는 독성이 높은 물질이 발생하는 특성이 있다[18]. 이번 사고 역시 전문장비 없이 소화기만으로 1차 화재를 진화하려던 작업자들이 이런 급성독성가스에 그대로 노출 되었고, 공기보다 가벼운 연소가스 특성상 1층으로 연결된 계단, 차량 통행로와 같은 대피로가 차단되어 미처 대피하지 못하였던 것으로 추정되었다.

VI. 결론

2016년 김포 건설현장 지하에서 발생한 화재사고의 원인 조사 결과 사고 당시에 사용하던 유기용제에 고속절단기에서 발생한 불꽃이 직접 점화원으로 작용하여 1차 화재가 발생하였고 난연성 경질 우레탄보드로 화재가 전파 되어 2차 화재로 이어진 것으로 검토되었다.

사고조사 과정에서 1차 화재의 형태에 대해서 분석하기 위해서 유기용제의 물성과 유증기 형성 여부에 대해서 검토하였다. 그 결과 유기용제 몇 통 사용하는 것으로는 지하공간이라고 할지라도 유증기가 형성되지 않는 것으로 나타났다. 따라서 고속절단기에서 발생하는 점화원을 적절하게 관리하지 못한 것이 가장 큰 원인으로 분석되었다. 이는 목연수 등[2]이 이야기한 것과 같이 건설현장의 화재사고 예방을 위해서는 점화원을 관리하는 것이 가장 효율적이라는 내용과 일치하는 것으로 나타났다.

또한 이번 사고조사과정에서 건설현장의 많은 취약점이 드러났다. 특히 유기용제 물질안전보건자료상의 증기압이 30°C 에서 1.06 kPa 로 측정치 37.8°C 에서의 46.5 kPa 대비 약 45 kPa 낮게 표기되어 있었고, 인화점은 최소 -25°C 로 측정되어 30°C 이상 높게 표기 되어 있었다. 물질 위험성에 대한 기초자료인 물질안전보건자료의 오류는 작업자 및 관리자가 유기용제의 위험성을 명확하게 제시 또는 인지할 수 없는 문제가 있으므로 정확한 물질안전보건자료 작성을 위한 제도 및 문화의 정착이 필요한 것으로 나타났다.

또한 화기 및 유기용제 취급 작업임을 고려해 소화기 1기는 비치가 되어 있었으나, 사실상 1차 화재를 진압하기에는 역부족이었다. 무엇보다 유기용제 취급량에 따른 소화기 비치기준이 없는 현실을 고려했을 때, 이 부분에 있어서는 추가적인 연구가 필요한 실정이다.

결론적으로 이번 건설현장에서 발생한 화재 사고를 통해서 물질안전보건자료 문제, 소화기 용량

문제가 제시 되었으며, 건설현장에서 화재사고를 예방하기 위한 가장 효율적인 방법은 사전 연구 결과와 같이 점화원을 제어하는 것이 효율적인 것이 확인되었다.

사용기호

m_{mass}	: evaporation rate [kg/s]
M	: molecular weight [kg/gmole]
k_g	: mass transfer coefficient [m/s]
A	: area of pools or puddles [m ²]
P^{sat}	: saturated vapour pressure [atm]
R_g	: gas constant [m ³ · atm/gmole · K]
T_L	: temperature [K]
r	: radius of pools [m]
g	: gravitational acceleration [m/s ²]
V_0	: leak rate [m ³]
t	: leak duration [s]
r_0	: initial radius [m]

REFERENCES

- [1] KOSHA, "the statistics database for industrial accidents in Korea", KOSHA, Korea, (2015)
- [2] Mok, Y. S., Chang, S. R., Lee, Y. S., and Go, S. S., "A study on the fire prevention of the construction sites", *Jol. KIIS*, Vol.17, No. 2, pp. 69-75, (2002)
- [3] Shin, W. C., and Kwon, J. H., Lee, Y. S., "Case study on prevention of fire/explosion accidents caused by chemical substances in small/medium sized construction sites", *Jol. Korea saf. Manag. Sci.*, Vol. 16, No. 3, pp. 63-70, (2014)
- [4] KOSHA, "Industrial accident investigation report No. - 2016 - 25 - 21 - 006", KOSHA, Korea, (2016)
- [5] Sklet, S., "Method for accident investigation", NTNU, Norway, (2002)
- [6] Lee, K. W., Park, C. S., Lee, D. H., "Thermal characteristics of form plastics for insulating materials by using cone calorimeter", *Jol. KIIS*, Vol.16, No. 1, pp. 48-52, (2001)
- [7] ASTM D 6378, "Standard Test Method for Determination of vapor Pressure(VPx) of Petroleum Products, Hydrocarbons, and Hydrocarbon-Oxygenate Mixtures(Triple Expansion Method)", ASTM, USA, (2010)
- [8] KS M 2010, "Test methods for flash point of crude oil and petroleum products - determination of flash point - tag closed cup method", Korean standards association, Korea, (2008)
- [9] ASTM E 681-09, "Standard Test Method for Concentration limits of flammability of chemicals (Vapors and Gases)", ASTM, USA, (2015)
- [10] DIN 51794, "Determining the ignition temperature of petroleum products", DIN, German, (2003)
- [11] Matthissen, R. C., "Estimating chemical exposure levels in the workplace", *Chem. Eng. Prog.*, April, p30, (1986)
- [12] Yaws, C. L., "Chemical properties handbook", McGraw-Hill handbook, USA, (1999)
- [13] Shaw. P., and Briscoe, F., "Spread and evaporation of liquid", *Progress in energy and combustion science*, 6(2), p127-140,(1978)
- [14] Gexcon, "FLACS v10.5 user's manual", Gexcon As, Norway, (2016)
- [15] Hansen, O.R., Melheim, J.A., Storvik, I. E., "CFD-modelling of LNG dispersion experiments", *AICHE spring national meeting*, April 7th tropical conference on natural gas utilization, USA, (2007)
- [16] Hansen, O.R., Melheim, J.A., "Validating the data", *LNG industry magazine*, spring, USA, (2008)
- [17] NIOSH, "Immediately dangerous to life or health (IDLH) values", NIOSH, USA, (1994)
- [18] Lee, D. H., and Kong, Y. K., "A study on combustion gas toxicity of polymeric materials using FTIR gas analysis", *Jol. disaster management*, Vol. 5, No. 4, pp. 79-84, (2005)