

<http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2024.10.6.741>

JCCT 2024-11-91

## 아이소옥테인 누출에 따른 위험물저장탱크의 방유제 적정성 분석

### Analysis of adequacy of oil emulsion for hazardous materials storage tank due to isooctane leak

한상훈\* · 공하성\*\*

Han, Sanghun\* · Kong, Hasung\*\*

**요약** 이 연구는 ALOHA 프로그램을 이용하여 위험물제조소등의 저장탱크 주변의 독성, 과압 및 복사열의 영향을 반영하여 방유제의 개선방안을 제안하는 것을 목적으로 한다. 제4류 제1석유류인 아이소옥테인 누출사고에 따른 영향에 대하여 주변영향을 ALOHA 프로그램을 이용하여 아이소옥테인의 독성, 과압, 복사열에 대한 피해영향을 분석하였다. 그 결과 독성은 PAC-2 농도 이상인 지역이 117m 이하였고 과압은 1psi 이상의 범위가 114m이며 복사열은  $2\text{kW/m}^2$  이상의 범위가 1,900m로 분석되었다. 따라서 아이소옥테인의 저장탱크의 방유제는 탱크 중심부에서 최소 38m 이상의 거리를 두고 설치하여 과압과 복사열의 영향을 최소화하고 아이소옥테인의 저장탱크별로 각각 방유제를 설치하여 방유제 안의 옥탄의 수량을 줄이고 저장하는 위험물의 물리·화학적 특성을 반영한 위험성 평가를 적용하여 성능위주 방유제 설계를 실시할 필요가 있다.

**주요어** : 과압, 복사열, 아이소옥테인, 방유제

**Abstract** The ALOHA program was used to propose an improvement plan for antifouling agents by reflecting the effects of toxicity, overpressure, and radiant heat around the storage tank of dangerous goods manufacturers. The ALOHA program was used to analyze the damage effects of isooctane on the toxicity, overpressure, and radiant heat of isooctane for the surrounding effects of the isooctane leakage accident, which is the first class of petroleum. As a result, it was analyzed that the toxicity was 117m in the area above the PAC-2 concentration, the overpressure was 114m in the range of 1 psi or more, and the radiant heat was 1,900m in the range of  $2\text{kW/m}^2$  or more. Therefore, it is necessary to implement a performance-oriented dike design by applying a risk assessment reflecting the physical and chemical characteristics of dangerous substances that reduce and store the amount of octane in the antifouling agent by installing an dike for each storage tank of isooctane at a minimum distance of 38m from the center of the tank.

**Key words** : Overpressure, Radiant heat, Isooctane, Dike

\*정회원, 우석대학교 일반대학원 박사과정(제1저자)  
\*\*정회원, 우석대학교 소방방재학과 교수(교신저자)  
접수일: 2024년 9월 10일, 수정완료일: 2024년 10월 12일  
게재확정일: 2024년 11월 5일

Received: September 10, 2024 / Revised: October 12, 2024

Accepted: November 5, 2024

\*Corresponding Author: 119wsu@naver.com

Dept. of Fire and Disaster Prevention, Woosuk Univ,  
Korea

## 1. 서 론

방유제란 위험물저장탱크의 주위에 위험물 유출을 방지하기 위하여 인공적으로 설치하는 철근 콘크리트나 흙으로 조성된 독을 말한다[1]. 방유제는 위험물탱크의 유류 누출 시 밖으로 유출되지 않도록 하여 막아 주는 시설이며 용량은 설치하는 최대 저장탱크 용량의 110% 이상으로 규정하고 있다. 용량 1,000만 리터 이상인 위험물저장탱크는 방유제 안에 간막이 독을 설치할 수 있고 최대 10기의 위험물저장탱크를 하나의 방유제 안에 설치할 수 있다. 또한 방유제 면적은 8만㎡까지 설치할 수 있어서 방유제 안의 하나의 위험물저장탱크로부터 누출 등으로 화재가 발생하면 방유제 전체로 화재가 확대되는 위험성이 있다. 최근 5년간 위험물사고는 제조소등 272, 지정수량 미만 59, 기타 4으로 총 335건이 발생하였다[2]. 고양저유소 화재와 같은 대형사건을 방지하기 위해서도 방유제 안의 위험물의 독성, 과압, 복사열에 따른 화재안전을 확보하기 위한 논의가 필요한 실정이다.

선행연구를 분석하면 김봉훈(2015)은 화학설비는 API 및 NFPA Code에서 권고하는 바와 같이 소화, 노출부 방호, 화재제어 및 증기운 회색 등 목적에 따라 고정식 물분무 설비의 설치 여부를 검토하여야 하며 공정 내 위험지역에는 화재 시 연소 확대방지를 위하여 대규모 액체 위험물 저장탱크는 전면화재에 대비하여 대용량 포 모니터 설비와 포 트럭을 비치하고, 포소화약제량은 가장 큰 저장탱크의 액표면적은 물론 방유제의 면적까지 모두 고려하여 확보하는 방향으로 개선이 요구된다. 또한 일정규모 이상의 위험물 옥외탱크저장소는 방유제 및 바닥의 구조, 강도와 기밀성 등에 관한 기술기준을 정하여 위험물이 침투되지 않는 구조로 설치하도록 하고, 방유제 연결 부분 및 배관 관통 부분에 관한 기술기준을 정하여 위험물이 유출되지 않는 구조로 설치하도록 관련 법규의 개선이 필요하다고 제한하였다[3]. 이갑규(2017)는 방유제 내부의 위험물저장탱크 특성을 고려한 화재진압에서 화재 초기에는 소화기 및 고정식포소화설비로 진압할 수 있으나 방유제 전체로 화재가 확대된 경우에는 탱크 열기가 높아

지기 전에 대용량 포방사 시스템, 대용량 포방사 소방차량을 적극 활용하여 진압하지 않으면 유류의 복사열 때문에 실패할 수밖에 없음을 인정하면서 탱크와 방유제의 복합화재인 경우에는 방유제 화재를 우선 진압하고 탱크화재를 진압하도록 하였다. 또한 방유제 바닥이 콘크리트나 마사토에 비해 모래로 되어 있을 경우 느린 연소속도를 보여주고 있으므로 가능하면 적당한 두께의 모래로 바닥을 구성할 것을 제안하였다[4]. 이점동(2020)은 옥외탱크저장소와 관련된 통기관의 화재 안전성, 인화방지망의 성능, 복사열 영향에 따른 이격 거리에 대하여 연구하고 화염 확산방지를 위한 새로운 형태의 유류저장시설탱크를 제시하였다. 우리나라의 최고온도 환경에 맞춰서 휘발유 증기에 대한 착화 실험 결과 유면에서 높이 2.5m 위치에서 착화현상이 발생되어 통기관의 높이 기준은 지상이 아니라 최고위 유면에서부터 측정하여야 안전하고 인화방지망은 현행 규정에 금속망의 규격이 없기 때문에 여러 겹의 금속망을 통한 열전달 실험을 실시하여 휘발유의 최저발화온도인 280℃의 안전을 고려하면 5겹 이상의 금속망 설치와 방유제 일체형 옥외저장탱크 설치를 연구하였다[5]. 김동우(2021)는 반도체 세정 장비에 방유제가 적용되고 있지만 저장탱크에서 누출된 위험물이 방유제의 바닥으로 침투하여 아래층으로 떨어지는 2차 누출 사고를 예방하기 위해 방유제 소재의 내화학적 및 시공 조건에 따른 성능 차이를 연구하였다. 방유제의 소재로 사용되고 있는 실리콘 수지와 에폭시 수지를 반도체 세정장비에서 사용되는 화학용액중 반응성이 가장 큰 황산을 사용하여 내화학적을 확인하고 실리콘 수지와 에폭시 수지를 사용하여 방유제 및 바닥에 적용할 것을 제안하였다[6].

기존 선행연구는 위험물저장탱크의 방유제 및 바닥의 구조, 강도와 기밀성을 강화하여 위험물이 침투되지 않는 구조로 설치하도록 하고 위험물저장탱크의 화재시 방유제 전체로 화재가 확대되므로 방유제의 화재진압에 대한 연구가 활발하게 이루어졌다. 이 연구는 기존연구와 달리 ALOHA 프로그램을 이용하여 저장하는 위험물의 독성, 과압 및 복사열의 영향을 판단하고 위험물저장탱크를 포함한 방유제의 적정성을 분석하고자 하는

점에서 차별성이 있다. 위험물저장탱크의 누출에 따른 독성, 과압 및 복사열의 영향을 확인하고 그 결과를 방유제에 반영하여 위험물저장탱크의 화재안전성을 향상시키고자 한다.

이 연구에서는 위험물제조소에서 제4류 위험물 제1석유류인 아이소옥테인의 누출에 따른 위험물저장탱크의 주변지역의 독성, 과압 및 복사열 영향에 대하여 시뮬레이션을 실시하고 그 위험성을 반영하여 방유제 규정을 분석하고자 한다. 아이소옥테인 누출사고에 따른 영향에 대하여 장외영향평가 프로그램인 ALOHA를 이용하여 누출, 화재 및 폭발에 대한 영향분석을 정량적으로 평가한다. 이 평가 결과를 반영하여 위험물저장탱크의 방유제에 적용하기 위한 방안을 제안하고자 한다.

## II. 이론적 고찰

「위험물안전관리법」에서는 지하 탱크를 포함하여 옥외저장탱크에 방유제의 설치를 규정하고 있다. 방유제의 크기는 저장 탱크 중에서 가장 큰 저장 탱크 용량의 110% 이상의 용량으로 설치하고, 방유제의 구조는 철근콘크리트 재질로 높이 0.5m 이상 3m 이하, 두께 0.2m 이상으로 규정하고 있으며 방유제의 면적은 80,000m<sup>2</sup> 이하로 규정하고 있다. 저장 탱크의 설치 수량은 10기 이하, 방유제의 간막이 두 높이는 0.3m 이상으로 규정하고 있다. 지하 탱크에 제4류 위험물을 저장 또는 취급하는 옥외탱크저장소는 방유제의 규정을 적용하지 아니하고 부지의 경계선에서 각 탱크까지의 거리는 50m 이상으로 하되 제2석유류는 40m, 제3석유류 및 제4석유류는 30m 이상의 거리를 두도록 규정하고 있다. 그림 1에 방유제의 구조를 나타내었다.

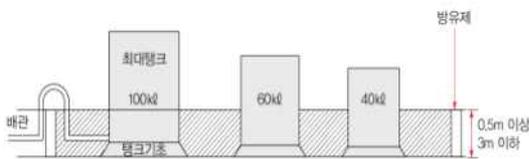


그림 1. 방유제 [7]  
 Figure 1. Dike [7]

위험물이 외부로 누출되는 경우 쾌적은 대기 상태, 누출속도, 대기 안정도 등 다양한 주변 환경에 의해 영향을 받지만, 액체의 경우는 주로 누출 속도에 영향을 받는다. 누출쾌적은 위험물은 수평으로 유출속도를 갖는 자유낙하 운동형태로 누출된다.

아이소옥테인의 물리·화학적 특성은 인화점이 -14℃이고 폭발범위는 9,500 ~ 60,000ppm으로 화재와 폭발의 위험성이 있다. 비중은 0.7이고 증기밀도는 1.06이다. PAC(Protective Action Criteria)-2가 830ppm으로 독성이 있으며 흡입할 경우 호흡기 노출 시 자극, 구역, 호흡곤란, 두통 등을 일으킬 수 있다. 따라서 아이소옥테인은 화재위험성, 폭발위험성 및 독성이 있으며 아이소옥테인의 물리·화학적 특징을 표 1에 표시하였다.

표 1. 아이소옥테인의 물리·화학적 성질  
 Table 1. Physicochemical properties of isooctane

CAS No.	증기압	상태	독성(ppm)	분자량
540-84-1	41mmHg	액상	PAC-2 (830)	114.23g
비중	연소하한계 (ppm)	연소상한계 (ppm)	증기밀도	인화점
0.7	9,500	60,000	3.9	-14℃

## III. 시나리오 구성

### 1. 화재, 폭발, 독성 시뮬레이션 프로그램

미국환경보호청 EPA(United States Environmental Protection Agency)와 국립해양기상청 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 개발한 ALOHA(Areal Locations of Hazardous Atmospheres) 프로그램을 사용하였다. ALOHA는 Gaussian 대기 확산 및 DEGADIS(Dense Gas Dispersion Model) 누출 모델을 사용하여 일반적인 경우와 공기보다 무거운 가스 또는 극저온 가스에 적용하여 화학물질별로 자동으로 영향 범위를 산정한다. 따라서 ALOHA는 사고시나리오별 화재·폭발 및 독성 물질 누출 영향범위를 예측한 후 지도상에 피해 범위를 나타내어 비상 대응 계획 수립 등에 활용된다. ALOHA는 기상 조건으로 풍향, 풍속, 대기 안정도 및 대기 역전층, 표면 거칠기를 고려하며 용기(Tank), 배관(Pipe), 액면

(Pool)에서 액체 또는 고압가스 누출에 적용한다.

## 2. 누출 사고시나리오

아이소옥테인 누출 사고시나리오의 변수는 『화학물질안전원지침(2021-3호)의 사고시나리오 선정 및 위험도분석에 관한 기술지침』을 반영하여 선정하였다. 누출 사고시나리오는 아이소옥테인을 저장하는 탱크가 파열되어 누출하는 것으로 하였다. 아이소옥테인 누출조건은 제조소·일반취급소 4ton, 옥외저장소 40ton, 옥외탱크저장소 400ton의 3종, 대기안정도는 A, D, F 3종으로 선정하였다. 피해영향범위를 평가하기 위한 끝점은 PAC-2 농도에 도달하는 지점으로, 누출공의 직경은 5cm, 대기온도는 25℃, 상대습도는 50%, 풍향은 남동풍, 풍속은 1.5m/s, 3m/s, 5m/s 3종으로 선정하였다. Figure 2에 사고시나리오를 설명하였다. 사고시나리오 1은 풍속 1.5m/s, 대기안정도 F, 기온 25℃, 상대습도 25%, 지표면 저항은 숲 또는 도시 상태에서 4ton이 누출된 최악의 사고시나리오이다. 사고시나리오 2는 풍속 3m/s, 대기안정도 D, 기온 25℃, 상대습도 25%, 지표면은 저항은 숲 또는 도시 상태에서 4ton이 누출된 시나리오이다. 사고시나리오 3은 풍속 3m/s, 대기안정도 A, 기온 25℃, 상대습도 25%, 지표면은 저항은 숲 또는 도시 상태에서 4ton이 누출된 시나리오이다. 사고시나리오 4는 풍속 5m/s, 대기안정도 D, 기온 25℃, 상대습도 25%, 지표면은 저항은 숲 또는 도시 상태에서 4ton이 누출된 시나리오이다. 동일한 방법으로 사고시나리오 5, 6, 7, 8은 누출량이 40ton, 사고시나리오 9, 10, 11, 12는 누출량이 400ton이 누출된 경우이다. 표 2에 사고시나리오 12가지에 따른 조건들을 정리하였다.

표 2. 시나리오 조건  
Table 2. Conditions for scenario

끝점	기상조건		
	기온	습도	대기안정도
독성 농도 PAC-2 (830 ppm)	25℃	50%	A, D, F
지표면 상태	누출공	누출량	풍속
도심 또는 숲	5cm	4ton 40ton 400ton	1.5, 3, 5m/s

## 3. 입력변수 및 입력값

아이소옥테인 누출량은 4ton, 40ton, 400ton의 3종, 대기안정도는 A, D, F 3종을 입력한다. 누출공의 직경은 5cm, 대기온도는 25℃, 습도는 50%, 풍속은 1.5m/s, 3m/s, 5m/s 3종을 각 사고시나리오별로 입력한다. 풍향은 SE, 표면 거칠기는 도시 또는 숲, 끝점은 자동으로 입력된다.

## 4. 평가기준

독성평가는 미국 DOE(Department of Energy)에서 정한 가이드라인인 PAC-2 농도를 사용한다. PAC-1은 불쾌감, 자극을 동반하지 않는 최고 농도로 장해를 초래하지 않고 노출이 중단되면 가역적으로 회복되는 농도이다. PAC-2는 비가역적, 지속적으로 건강에 악영향 또는 대피 능력에 장애를 경험할 수 있는 농도이다. PAC-3는 생명의 위협 또는 사망을 경험할 수 있는 농도이다. 복사열 평가는 「KOSHA GUIDE P-102 - 2021」 별표 1에 따라 2kW/m<sup>2</sup>를 사용한다. 60초 노출시 통증을 유발하는 2kW/m<sup>2</sup>, 2도 화상을 발생시키는 5kW/m<sup>2</sup>, 사망할 수 있는 복사열 강도가 10kW/m<sup>2</sup>이다. 과압 평가는 「KOSHA GUIDE P - 102 - 2021」 별표 2에 따라 1psi(6.9kPa)를 적용한다. 1psi(6.9kPa)는 복구 불가능한 주택의 일부 파손되는 강도, 3.5psi(24.2kPa)는 지지대가 없는 철재 건축물 또는 기름저장 탱크가 파손되는 강도, 8psi(55.2kPa)는 두께 20~30cm의 벽돌벽이 파괴되는 강도이다.

## IV. 실험 결과 및 분석

### 1. 실험결과

제4류 제1석유류 아이소옥테인의 12가지 사고시나리오에 대한 독성, 과압 및 복사열 영향범위의 실험결과를 표 3 내지 표 7에 나타내었다.

표 3. 독성 영향범위  
Table 3. Toxic output to Simulation

시나리오	PAC-3 (m)	PAC-2 (m)	PAC-1 (m)
1	41	105	213
2	14	57	135
3	14	14	36

4	13	22	55
5	45	117	234
6	15	61	146
7	16	16	39
8	14	24	58
9	45	116	234
10	15	61	146
11	16	16	39
12	14	24	58

표 3은 아이소옥테인의 누출량, 풍속, 대기안정도, 대기습도 50% 및 대기온도 25℃에서 12가지 사고시나리오에 대한 독성을 PAC-1, 2, 3의 농도별 영향범위를 측정된 결과이다.

표 4. 과압 영향범위

Table 4. Over-pressure output to Simulation

시나리오	8psi(55.2kPa) (m)	3.5psi(24.2kPa) (m)	1psi(6.9kPa) (m)
1	35	47	103
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	38	52	114
6	0	0	0
7	0	0	0
8	0	0	0
9	38	52	112
10	0	0	0
11	0	0	0
12	0	0	0

표 4는 아이소옥테인의 누출량, 풍속, 대기안정도, 대기습도 50% 및 대기온도 25℃에서 12가지 사고시나리오에 대한 과압을 8psi(55.2kPa), 3.5psi(24.2kPa), 1psi(6.9kPa)의 압력별로 영향범위를 측정된 결과이다.

표 5. 액면화재의 복사열 영향 범위

Table 5. Radiation(Pool fire) output to Simulation

시나리오	10kW/m <sup>2</sup> (m)	5kW/m <sup>2</sup> (m)	2kW/m <sup>2</sup> (m)
1	10	15	25
2	10	15	25
3	10	15	25
4	14	19	29
5	10	15	25
6	10	15	25
7	10	15	25
8	14	19	29
9	10	15	25

10	10	15	25
11	10	15	25
12	14	19	29

표 5는 아이소옥테인이 누출되어 액면화재가 발생한 경우 아이소옥테인의 누출량, 풍속, 대기안정도, 대기습도 50% 및 대기온도 25℃에서 12가지 시나리오에 대한 10kW/m<sup>2</sup>, 5kW/m<sup>2</sup>, 2kW/m<sup>2</sup>의 복사열에 따른 영향범위를 측정된 결과이다.

표 6. BLEVE의 복사열 영향범위

Table 6. Radiation(BLEVE) output to Simulation

시나리오	10kW/m <sup>2</sup> (m)	5kW/m <sup>2</sup> (m)	2kW/m <sup>2</sup> (m)
1	202	286	446
2	202	286	446
3	202	286	446
4	202	286	446
5	420	593	925
6	420	593	925
7	420	593	925
8	420	593	925
9	871	1,200	1,900
10	871	1,200	1,900
11	871	1,200	1,900
12	871	1,200	1,900

표 6은 비등액체증기폭발이 발생한 경우 아이소옥테인의 누출량, 풍속, 대기안정도, 대기습도 50% 및 대기온도 25℃에서 12가지 사고시나리오에 대한 10kW/m<sup>2</sup>, 5kW/m<sup>2</sup>, 2kW/m<sup>2</sup>의 복사열에 따른 영향범위를 측정된 결과이다.

표 7. 화구의 직경

Table 7. Diameters of Fire Ball to Simulation

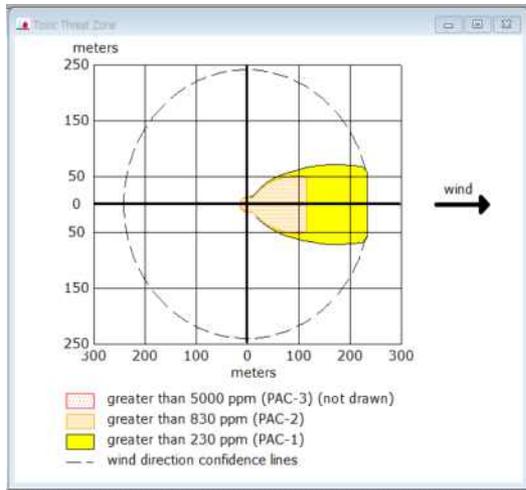
시나리오	직경(m)	지속시간(s)
1	89	7
2	89	7
3	89	7
4	89	7
5	192	12
6	192	12
7	192	12
8	192	12
9	414	22
10	414	22
11	414	22
12	414	22

표 7은 비등액체증기폭발이 발생한 경우 아이소옥테인의 누출량, 풍속, 대기안정도, 대기습도 50% 및 대기온도 25°C에서 12가지 사고시나리오에 대한 화구의 복사열의 영향범위를 측정된 결과이다.

2. 실험분석

2.1 독성

A 저장소에서 PAC-2 이상의 영향범위는 14m 이상 117m 이하로 나타났다. 아이소옥테인의 독성영향은 위험물을 취급하는 제조소등의 내부에 한정되고 제조소등의 범위를 초과하지 않는 것으로 분석된다. 방유제의 지경을 117m 이상으로 설치하면 아이소옥테인의 독성영향을 방유제 안으로 제한할 수 있다. 또한, 아이소옥테인 시설의 안전점검이나 대응활동을 할 때는 PAC-2 이상의 영향범위를 고려하고 전시설비는 방폭형으로 설치하여 폭발에 대비할 필요가 있다. 영향범위가 가장 큰 사고시나리오 9에 따른 독성 영향범위를 그림 2에 나타내었다.



(a) 독성 영향범위  
(a) Toxic distance



(b) 지도상 독성 영향범위

(b) Toxic distance in the earth

그림 2. 시나리오 9의 독성 영향범위

Figure 2. Toxic output according to scenario 9

그림 2 (a)는 누출량 400ton, 풍속 1.5m/s, 대기안정도 F, 대기습도 50% 및 대기온도 25°C인 사고시나리오 9에 대한 독성을 PAC-1,2,3의 농도별 영향범위를 표시한 것이다. 그림 2 (b)는 누출량 400ton, 풍속 1.5m/s, 대기안정도 F, 대기습도 50% 및 대기온도 25°C인 사고시나리오 9에 대한 독성을 PAC-1,2,3의 농도별 영향범위를 지도 위에 표출한 것이다.

2.2 과압

표 4의 과압 실험결과는 최악 사고시나리오 경우에 과압 영향의 범위가 누출지점에서 수평거리로 35m 이상 114m 이하로 위험물제장소등 내부로 한정되었다. 과압은 저장하는 위험물 수량과 대기의 안정도의 크기에 비례하는 것으로 분석되었다. 복구할 수 없을 정도로 주택의 일부가 파손되는 1psi 범위가 103~114m, 지지대가 없는 철제 건축물 또는 기름 저장탱크가 파손되는 3.5psi 범위가 47~52m, 두께 20~30cm의 벽돌 벽이 파괴되는 8psi의 범위가 35~38m로 평가되었다. 사고시나리오 9의 폭발에 따른 과압 분포를 나타내면 그림 3과 같다. 38m 이하의 8psi 범위의 압력분포를 살펴보면 수평거리 25m까지는 압력이 292psi,

30m에서는 41.9psi 및 35m에서는 11.4psi로 나타났다. 따라서 방유제는 아이소옥테인 저장탱크로부터 8psi 이상의 압력분포를 나타내는 38m 이하에 방유제를 설치하면 아이소옥테인의 과압으로 방유제가 파괴되어 방유제의 설치 목적을 달성할 수 없게 된다.

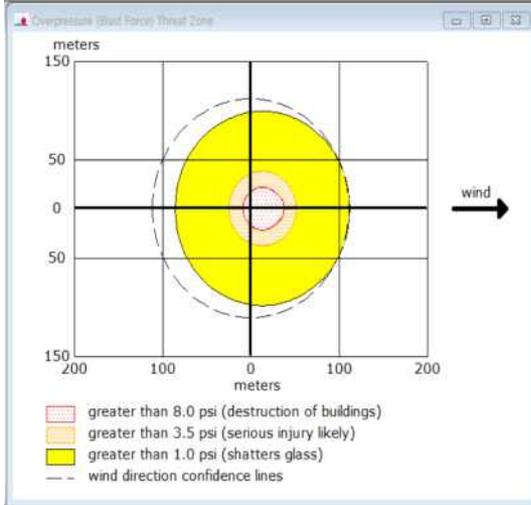
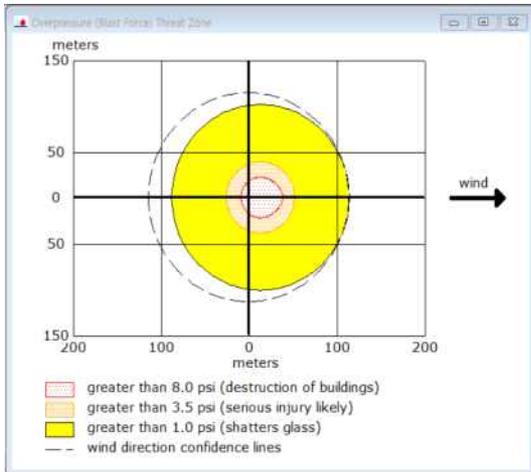
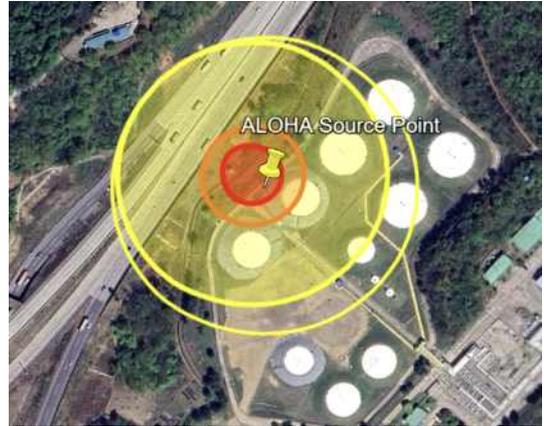


그림 3. 시나리오 9의 과압 영향범위  
 Figure 3. Over-pressure distance in Scenario 9

과압의 영향범위가 가장 큰 사고시나리오 5에 따른 과압 영향범위를 그림 4에 나타내었다.



(a) 과압 영향범위  
 (a) Over-pressure distance



(b) 지도상 과압 영향범위  
 (b) Over-pressure distance in the earth

그림 4. 시나리오 5의 과압 영향범위  
 Figure 4. Over-pressure output according to scenario 5

그림 4 (a)는 누출량 40ton, 풍속 1.5m/s, 대기안정도 F, 대기습도 50% 및 대기온도 25°C인 사고시나리오 5에 대한 8psi(55.2kPa), 3.5psi(24.2kPa), 1psi(6.9kPa)의 과압 영향범위를 표시한 것이다. 그림 4 (b)는 누출량 40ton, 풍속 3m/s, 대기안정도 F, 대기습도 50% 및 대기온도 25°C인 사고시나리오 5에 대한 8psi(55.2kPa), 3.5psi(24.2kPa), 1psi(6.9kPa)의 과압 영향범위를 지도에 표출한 것이다.

### 2.3 복사열

비등액체폭발(BLEVE)에 의한 복사열 위험성이 광범위한 지역에 영향을 주었지만 위험성 지속시간은 액면화재(Pool fire)에 비해 작았다. 복사열 영향범위는 액면화재가 누출지점에서 수평거리로 25m 이상 29m 이하, 비등액체폭발은 누출지점에서 수평거리로 446m 이상 1,900m 이하 나타났다. 액면화재는 영향범위가 위험물제조소 등 내부에 한정되었지만 비등액체폭발은 위험물 제조소 등 외부에도 복사열의 영향이 미치고 있음을 확인할 수 있었다. 아이소옥테인의 액면화재는 위험물제조소 등에서 취급하는 위험물의 수량과 대기안정도에 영향을 받지 않았고 풍속에 비례하는 것으로 분석된다. 비등액체폭발은 통증을 유발

하는  $2\text{kW}/\text{m}^2(60\text{s})$ 의 범위가  $1,900\text{m}$  이하, 2도 화상을 발생시키는  $5\text{kW}/\text{m}^2(60\text{s})$ 의 범위가  $1,200\text{m}$  이하, 사망할 수 있는  $10\text{kW}/\text{m}^2(60\text{s})$ 의 범위가  $971\text{m}$  이하로 평가되었다. 비등액체폭발에 따른 복사열은 아이소옥테인의 저장량에 비례하였고 저장소 외부까지 영향을 미치므로 위험물저장소 내부 및 외부에 위험성평가에 기반한 비상대응계획의 수립이 요구된다. 비등액체폭발에 따른 화구의 크기는 직경  $89\text{m}$  이상  $414\text{m}$  이하로 나타났고 위험물제조소등에서 저장하는 아이소옥테인의 수량에 비례하는 것으로 분석 되었다. 그림 5에 액면화재 사고시나리오 12의 복사열 분포와 그림 6에 비등액체폭발 사고시나리오 12의 복사열 분포를 표시하였다. SS275 강재는 고온일수록 기계적 강도가 낮아지고 강재의 연신율은  $800^\circ\text{C}$  이상에서 급격히 증가하며  $400^\circ\text{C}$ 에서  $600^\circ\text{C}$ 에서 강재의 강도가 급격히 줄어들어 항복강도감소계수의 평균값으로 산정하였을 때 응력비 0.5에 도달하는 온도는  $558.71^\circ\text{C}$ 로 나타났다[8]. 화구로 인한 2도 화상의 복사열 기준은  $11.6\text{kW}/\text{m}^2(10\text{s})$  이지만 실제 폭발사고에서는 화염 지속시간이 10초 이상도 많으므로 누출량 및 지속시간을 고려하여  $5\sim 10\text{kW}/\text{m}^2(10\text{s})$  정도를 기준값으로 정할 필요가 있다[9]. 스테판-볼츠만 법칙을 이용하여 온도를 산정하면 액면화재인 그림 5에서  $7\text{m}$  지점의 온도가  $565^\circ\text{C}$ 로 응력비 0.5 미만으로 저하되고 비등액체폭발인 그림 6에서  $450\text{m}$  지점이 응력비 0.5 미만으로 저하되므로 변형으로 인하여 아이소옥테인의 저장탱크 기능을 유지할 수 없게 된다. 또한, 비등액체폭발에서 2도 화상의 발생범위가  $750\text{m}$ 에 이르게 된다. 따라서 복사열로 인한 아이소옥테인의 저장탱크의 방유제는 탱크 외면으로부터 수평거리  $7\text{m}$  이상의 거리가 필요하다.

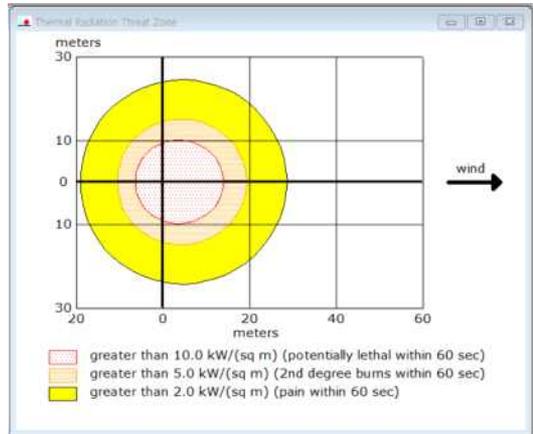


그림 5. 시나리오 12의 액면화재 영향범위  
Figure 5. Radiation(Pool fire) to Scenario 12

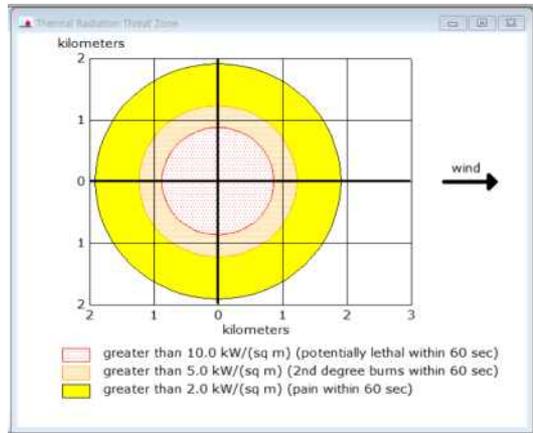
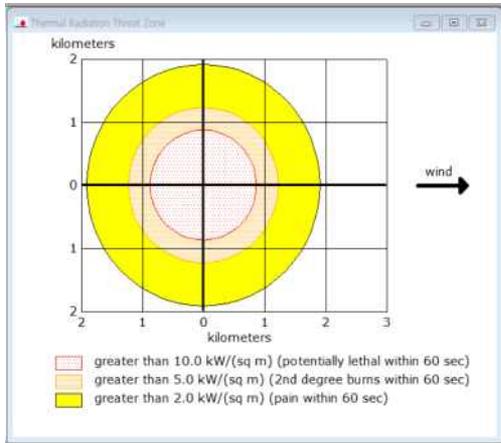
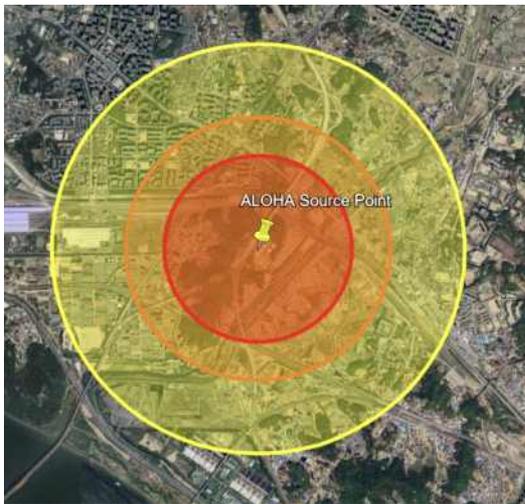


그림 6. 시나리오 12의 BLEVE의 복사열 영향범위  
Figure 6. Radiation(BLEVE) to Scenario 12

비등액체폭발 영향범위가 가장 큰 사고시나리오 9에 따른 복사열 영향범위를 그림 7에 나타내었다.



(a) 복사열 영향범위  
 (a) Radiation distance



(b) 지도상 복사열 영향범위  
 (b) Radiation distance in the earth

그림 7. 시나리오 9의 BLEVE 영향범위

Figure 7. Radiation(BLEVE) output according to scenario 9

그림 7 (a)는 누출량 400ton, 풍속 1.5m/s, 대기 안정도 F, 대기습도 50% 및 대기온도 25℃인 사고시나리오 9에 대한 비등액체증기폭발의 복사열 영향을 10kW/m<sup>2</sup>, 5kW/m<sup>2</sup>, 2kW/m<sup>2</sup>의 복사열에 따른 영향범위를 표시한 것이다. 그림 7 (b)는 누출량 400ton, 풍속 1.5m/s, 대기안정도 F, 대기습도 50% 및 대기온도 25℃인 사고시나리오 9에 대한 비등액체증기폭발의 복사열 영향을 10kW/m<sup>2</sup>, 5kW/m<sup>2</sup>, 2kW/m<sup>2</sup>의 복사열에 따른 영향범위를 지도에 표출한 것이다.

### 3. 실험분석에 따른 개선방안

제4류 제1석유류 아이소옥테인 위험물의 독성, 과압 및 복사열에 대한 실험분석에 따른 개선방안은 다음과 같다.

첫째, 이점동(2020)은 고양저유소 화재사례와 위험물의 증발량을 줄이기 위해 저장탱크 철판에 콘크리트를 부착한 방유제 일체형 저장탱크를 제안하였다[10]. 또한, 방유제의 면적이 작을수록 방유제 내의 위험물의 증발량이 적어 복사열 및 과압의 피해를 줄일 수 있다. 그러나 건축물이 파괴되는 8psi 이상의 압력분포를 살펴보면 수평거리 25m까지는 압력이 292psi, 30m에서는 41.9psi 및 35m에서는 11.4psi로 나타났다. 복사열에 따른 영향은 저장탱크 철판의 응력비가 0.5 미만으로 저하되는 온도는 558.71℃ 이상의 영역이 탱크 외면으로부터 7m 이상으로 분석되었다. 따라서 방유제는 아이소옥테인 저장탱크로부터 8psi 이상의 압력분포를 나타내는 38m 이하에 방유제를 설치하면 아이소옥테인의 과압 및 복사열에 의한 파괴를 방지할 수 있으므로 아이소옥테인의 방유제는 탱크 중심부에서 최소 38m 이상의 거리를 두고 설치할 필요가 있다.

둘째, 비등액체폭발에 따른 복사열은 아이소옥테인의 저장량에 비례하는 것으로 분석되었다. 온도가 1500℃ 이상의 화구의 범위가 직경 89m 이상 414m 이하, 화구로 인한 2도 화상발생 범위는 800m 이상 및 화염 지속시간은 7초 이상 22초 이하로 나타났다. 따라서 「위험물안전관리법 시행규칙 별표 4 IX」에서 하나의 방유제 안의 저장탱크의 설치 수량은 10기 이하로 규정하고 있지만 각 저장탱크별로 각 방유제를 설치하여 방유제 안의 아이소옥테인의 수량을 줄일 필요가 있다.

마지막으로 위험물안전관리법에 정한 위험물의 물리·화학적 특성에 따라 독성, 과압 및 복사열의 영향범위가 각각 다르므로 제조·취급하는 위험물의 특성을 반영할 필요가 있다. 따라서 「위험물안전관리법 시행규칙 별표 4 IX」에서 규정하고 있는 방유제의 높이, 너비, 간격 등은 저장하는 위험물의 물리·화학적 특성과 위험성 평가를 실시하여 그 결과를 반영한 방유제의 설치가 요

청된다.

## V. 결 론

이 연구에서는 제4류 제1석유류인 아이소옥테인 저장탱크의 방유제 설치를 위하여 누출에 따른 위험물저장탱크의 주변의 독성, 과압 및 복사열 영향에 대하여 실험한 것이다. 아이소옥테인 누출에 따른 영향에 대하여는 장외영향평가 프로그램인 ALOHA를 이용하여 독성, 화재, 폭발의 결과를 분석하였다. 그 결과 독성은 PAC-2 농도 이상인 지역이 14m 이상 117m 이하, 과압은 3.5psi 이상의 범위가 47m 이상 52m 이하 및 8psi 이상 범위가 35m 이상 38m 이하, 복사열은 2kW/m<sup>2</sup> 이상의 범위가 1,900m, 화구의 직경은 89m 이상 414m 이하로 분석되었다. 따라서 아이소옥테인의 저장탱크의 방유제는 첫째, 탱크 중심부에서 최소 38m 이상의 거리를 두고 설치하여 과압과 복사열의 영향을 최소화하고 둘째, 아이소옥테인의 저장탱크별로 각각 방유제를 설치하여 방유제 안의 옥탄의 수량을 줄이고 마지막으로 저장하는 위험물의 물리·화학적 특성을 반영한 위험성 평가를 적용하여 성능위주 방유제 설계를 실시할 필요가 있다. 이 연구에서는 위험물제조소에서 독성, 과압 및 복사열에 따른 방유제 주변에 영향을 반영하였으나 산업안전보건법령의 방유제의 성능설계와 중복되는 영역의 조정 등에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

Countermeasure Plans about Leakage, Explosion and Fire of Atmospheric Storage Tank”, Doctor degree paper, Graduate school of Construction Engineering Dongyang University, (2015), pp. 94-95.

- [5] Jeom Dong Lee, “A Case Analysis and Experimental Study for Optimization of Flame Spread Prevention Design in Oil Storage Facilities”, Doctor degree paper, Department of Disaster Sciences, General Graduate School of University of Seoul, (2020), pp. 95-98.
- [6] Dong Woo Kim, “A Study on the Improvement of Dike for Semiconductor Wet Station”, Master’s thesis, Graduate School of Industrial Engineering, Chungbuk National University, (2021), pp. 46-47.
- [7] Korea Fire and Safety Agency, 17th Edition Dangerous Goods Practice Manual 1, (2022), p.274.
- [8] Jeom Dong Lee, “A Case Analysis and Experimental Study for Optimization of Flame Spread Prevention Design in Oil Storage Facilities”, Doctor degree paper, Department of Disaster Sciences, General Graduate School of University of Seoul, (2020), pp. 79-80.
- [9] Woo. Seob. Han, Mun Son, Hyo Jin Park, “Research on fire explosion impact and accident analysis model(Ⅱ)”, KOSA, (2017), pp 69-70.
- [10] Jeom Dong Lee, “A Case Analysis and Experimental Study for Optimization of Flame Spread Prevention Design in Oil Storage Facilities”, Doctor degree paper, Department of Disaster Sciences, General Graduate School of University of Seoul, (2020), pp. 103-104.

## References

- [1] Korean Law Information Center, Article 28 of Enforcement Decree of the Dangerous Materials Safety Management Act. (<https://law.go.kr/lsSc.do?menuId=1&subMenuId=15&tabMenuId=81&eventGubun=060114#AJAX>)
- [2] National Fire Agency, 2022 Dangerous Goods Statistics, p 143.
- [3] Bong Hoon Kim, “A Study on Firefighting Facilities in Petrochemical Plants”, Doctor degree paper, Department of Safety Engineering Graduate School Pukyong National University, (2015), pp. 126 - 127.
- [4] Gab Kyoo Lee, “The Study on the