

http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2023.9.6.319

JCCT 2023-11-39

## 고속도로 휴게소 소형 LPG 저장탱크 폭발에 따른 영향범위 분석

### Impact Range Analysis of Small LPG Storage Tank Explosions at Highway Rest Areas

전승덕\*, 이순범\*\*, 이재영\*\*\*

Seung duk Jeon\*, Soon Beom Lee\*\*, Jai Young Lee\*\*\*

**요약** 이 연구의 목적은 고속도로 휴게소에 설치된 소형 LPG 저장탱크의 폭발에 따른 영향범위를 분석하는데 있다. 이를 위해 휴게소에 설치된 2,900 kg 소형 LPG 저장탱크의 증기운 폭발(VCE)과 비등액체팽창증기 폭발(BLEVE)로 인한 과압과 복사열의 영향범위를 ALOHA(Areal Location of Hazardous Atmospheres)프로그램을 적용하여 정량적으로 평가하였다. 도출된 폭발 과압과 복사열의 영향범위는 각각 최대 반경 336 m와 423 m로 나타났다. 269 m 이내의 사람들은 3.5 psi이상의 과압으로 중상을 입을 수 있고, 192 m 이내의 사람들은 10 kw/m<sup>2</sup>이상의 복사열로 사망할 수 있는 것으로 예측되었다. 나아가 고속도로 휴게소 부대시설과 피해 영향범위를 고려한 LPG 저장 탱크의 안전관리 방안에 대해 논의하였다. 이러한 연구 결과는 고속도로 휴게소에 설치된 소형 LPG 저장탱크의 안전관리뿐만 아니라 휴게소 환경 및 시설을 고려한 안전사고 예방 규정 개선에 도움을 줄 수 있을 것이다.

**주요어** : 증기운 폭발, 비등액체팽창증기 폭발, 과압, 복사열, 고속도로 휴게소

**Abstract** This study analyzes the risks of explosions of small LPG storage tanks installed at highway rest areas. For this purpose, the ranges of the effect of thermal radiation and overpressure caused by the BLEVE(Boiling Liquid Expansion Vapor Explosion)and VCE(Vapor Cloud Explosion) of a 2900-kg small LPG storage tank installed at highway rest areas were quantitatively evaluated by applying the Areal Location of Hazardous Atmospheres program. The ranges of influence of the derived explosion overpressure and thermal radiation were found to have a maximum radii of 336 m and 423 m, respectively. The study determined that those within 269 m could be severely injured by an explosion overpressure of 3.5 psi, and fatalities from thermal radiation of 10 kw/m<sup>2</sup> could occur within 192 m of the exploded storage tank. The safety management plan for the LPG storage tank was discussed while considering the auxiliary facilities of highway rest areas and the extent of the damage impact. These research results will help improve safety accident prevention regulations considering the environment and facilities of the rest areas as well as the safety management of small LPG storage tanks installed at highway rest areas.

**Key words** : VCE, BLEVE, Overpressure, Thermal Radiation, Highway Rest Areas

\*정회원, 정읍여자고등학교 교장(제1저자)  
(우석대학교 소방안전공학 박사과정)

\*\*정회원, 군산제일고등학교 교사(참여기자)

\*\*\*정회원, 건양사이버대학교 재난안전소방학과 교수(교신저자)

접수일: 2023년 9월 19일, 수정완료일: 2023년 10월 11일

게재확정일: 2023년 11월 1일

Received: September 19, 2023 / Revised: October 11, 2023

Accepted: November 1, 2023

\*\*\*Corresponding Author: jsd0127@jbedu.kr

Jeongeup Girls' High School, Korea

## I. 서 론

### 1. 연구의 필요성

3톤 미만인 소형 LPG 저장탱크가 보급된 지 20년이 넘어서면서 전국적으로 설치된 숫자가 2021년 기준 10만개 안팎에[1] 이르러 가스안전관리에 위협 요인이 되고 있다. 특히 고속도로 휴게소 식당에서 사용하는 소형 LPG탱크는 휴게소 마다 설치되어 있는 주유소와 가까이 위치하는 경우가 많고 휴게소를 이용하는 많은 차량과 사람들로 항상 위험 요소가 내재되어 있다. 2022년 경북 포항시 A 초등학교 급식실[2]과 대구 LPG 충전소 가스 폭발[3]처럼 예측할 수 없는 비일상적인 LPG 사고는 한번 발생하면 엄청난 경제적, 사회적 손실이 크기 때문에 사전에 피해 영향범위를 분석하여 예방과 비상 대응계획을 수립하여 대비하는 것이 안전 문화 조성에 필요하다.

지금까지 소형 LPG 저장 탱크의 위험성 분석에 대한 선행연구를 살펴보면 주로 상가와 주택 및 학교 급식소에 설치되어 있는 1,000 kg 미만의 LPG 저장 탱크로 제한되어 있다. 고속도로 휴게소 식당에 설치된 2,900 kg 소형 LPG 탱크가 폭발했을 때 피해 영향범위를 분석한 연구 사례는 아직 발표되지 않은 상태다.

### 2. 선행연구 분석 및 연구의 목적

이와 관련하여 이제까지 소형 LPG 저장탱크 폭발에 따른 영향 범위 분석에 관한 선행연구는 다음과 같다.

전운영(2015)[4]은 200 kg, 500 kg 및 1,000 kg 소형 LPG 저장탱크를 지상과 지하에 설치할 경우의 피해 영향범위를 비교하여 지하 설치식의 타당성을 분석하였다. 한태일(2017)[5]은 밀집된 상가 지역 소형 LPG 탱크의 연쇄 폭발 가능성과 안전조치의 필요성을 주장하였다. 서승덕(2019)[6]은 상가 밀집 지역에서 소형 LPG 저장탱크의 비등액체팽창증기 폭발(Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion, BLEVE)에 따른 피해 영향범위를 분석하였다. 이순범과 공하성(2022)[7]은 고등학교 급식소 소형 LPG 저장탱크의 BLEVE와 증기운 폭발(Vapor Cloud Explosion, VCE)에 따른 피해 예측을 분석하고 누출지역의 특성과 그 피해 영향범위를 고려한 LPG 저장 탱크의 안전관리 방안을 제시하였다.

이 연구에서는 고속도로 휴게소에서 사용하는 2,900 kg 소형 LPG 저장탱크 폭발에 따른 피해 영향범위를

분석해 선행연구와 차별화를 두고자 한다. 이를 위해 ALOHA(Areal Location of Hazardous Atmospheres)피해 예측 프로그램을 활용해 고속도로 휴게소 2,900 kg 소형 LPG 저장탱크의 BLEVE와 VCE에 따른 영향범위 분석을 연구 목적으로 설정하였다. 이는 고속도로 휴게소에 설치된 소형 LPG 저장탱크 안전관리뿐만 아니라 휴게소 환경 및 시설을 고려한 안전사고 예방 규정 개선에 도움을 줄 수 있을 것이다.

## II. 소형 LPG 저장탱크 ETA와 ALOHA 피해 예측 프로그램

### 1. 소형 LPG 저장탱크와 ETA

액화석유가스로 LP가스라 불리는 LPG는 상압과 상온에서는 가스로 존재하며 온도를 낮추거나 압력을 가할 경우 쉽게 액화되어 탱크로 저장해 유통된다. 이때 탱크의 크기가 3톤 미만인 경우 소형 LPG탱크로 분류한다.[8] 일반적으로 LPG의 주성분은 크게 프로페인(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)과 부탄(C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>)으로 분류되며 이 연구에서는 프로페인(propane)을 대상으로 소형 LPG 저장탱크의 BLEVE와 VCE 발생에 따른 피해 영향범위를 분석하고자 한다. 프로페인(propane)은 무색기체로 존재하며 700~750℃에서 열분해하여 메탄, 에틸렌, 프로필렌 및 수소로 변하는 화학적 성질을 지니고 있다. 프로페인의 기타 화학적 성질을 표 1에 제시하였다.[9]

표 1. 프로페인의 화학적 성질  
Table 1. Chemical Properties of Propane

화학식	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
끓는점	-42℃
인화점	-105℃
분자량	44.1 g/mol
녹는점	-189.7℃
연소열	50,400,000 J/kg
포화증기압	840 kPa
폭발상한농도(HEL)	9.5%
폭발하한농도(LEL)	2.1%

누출원(source)과 점화원에 따라 LPG 저장탱크의 사고는 비등액체팽창증기 폭발(BLEVE), 증기운 폭발(VCE), 증기운 확산(Vapor Cloud Dispersion, VCD), 제트화재(Jet Fire) 등 여러 가지 형태로 발생한다.[10] 이를 사건 수 분석(Event Tree Analysis, ETA)에 따라

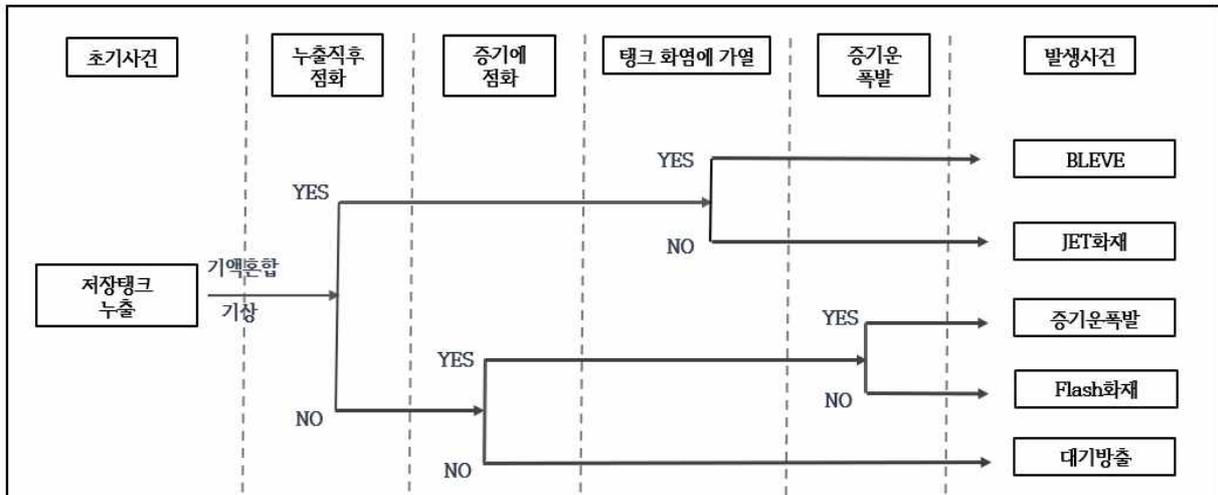


그림 1. 소형 LPG 저장탱크 ETA  
 Figure 1. Small LPG Storage Tank ETA

그림 1처럼 사고 시나리오로 전개할 수 있다.[11]  
 누출상(phase)의 관점에서 LPG의 누출은 기상(vapor phase)과 기/액상(2상) 누출로 분류할 수 있다. 2상의 가스가 누출되어 즉시 점화가 되는 경우 중간현상으로 제트화재(Jet Fire)가 발생하게 된다, 이로 인한 저장탱크 가열 여부에 따라 BLEVE가 발생하거나 제트화재(Jet Fire)가 지속될 수 있다. BLEVE는 열화로 탱크 구조물이 파열되어 일시에 많은 양의 LPG가 화구(Fireball)를 이루며 폭발하는 현상이다. 비등액체팽창증기 폭발(BLEVE)은 폭발 과압에 의한 피해뿐만 아니라 복사열에 의한 피해를 가중시킬 수 있다[12-13]. LPG 저장탱크 플레이트(plate) 온도가 600℃로 가열되고, 탱크 내부 온도가 53℃이고 액 충전량이 43.68% 이상일 경우에 BLEVE의 발생이 가능하다.[14] 누출된 기상 가스 점화 여부에 따라 VCE가 발생하거나 기상 성분이 대기 중으로 확산(VCD)되어 가스 손실로 이어질 수 있다.

2. ALOHA 피해 예측 시뮬레이션 프로그램

미국의 해양대기국(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)이 개발해, 환경보호청(Environmental Protection Agency, EPA)과 공동으로 활용하는 ALOHA는 기존에 저장된 화학물질 데이터에 따라 사고 시나리오별 피해 영향 범위를 예측하고 사용자의 입력자료에 따라 피해를 예측할 수 있는 범용성과 편리성을 가진 프로그램이다. Google Earth와

호환되어 그 피해 영향범위를 지도상에 표기하여 비상 대응계획 수립 등에 활용할 수 있다. ALOHA는 기상 조건으로 지형변화는 고려치 않고 풍속, 풍향, 표면 거칠기, 대기안정도 및 대기 역전층을 반영한다. 용기(Tank)와 액면(Pool) 및 배관(Pipe) 누출조건에 따라 화재, 폭발, 누출에 따른 유해 화학물질의 피해 영향범위를 3단계 범위로 표시한다.

화재는 60초 이내 영향을 주는 복사열로 표현하고 그 피해 영향범위는 3단계 기준값[15]에 따라 표 2에 제시하였다. 즉 1분 동안 노출된 복사열이 2 kw/m<sup>2</sup> 이상이면 고통을 느끼며, 5 kw/m<sup>2</sup> 이상이면 2도 화상을 입고, 10 kw/m<sup>2</sup> 이상이면 사망할 수도 있다.

표 2. 복사열의 피해 영향범위  
 Table 2. Thermal Radiation Burn Injury Criteria

사망	2도 화상	고통 느낌
10 kw/m <sup>2</sup>	5 kw/m <sup>2</sup>	2 kw/m <sup>2</sup>

폭발에 의한 피해 영향범위는 과압(psi)으로 표현한다. 그 피해 영향범위는 ALOHA의 3단계 기준값[16]에 따라 표 3에 제시하였다. 즉 폭발 과압(overpressure)이 1.0 psi 이상일 경우 유리창이 깨질 수 있으며, 3.5 psi 이상일 경우 중상을 입을 수 있고, 8.0 psi 이상일 경우에는 건물에 파괴될 수 있다.

표 3. 과압의 피해 영향범위

Table 3. Explosion Overpressure Damage Estimates

건물파괴	중상	유리창 깨짐
8.0 psi	3.5 psi	1.0 psi

누출 사고에 의한 피해 영향 범위는 화학물질별 AEGL(Acute Exposure Guideline Levels), IDLH(Immediately Dangerous to Life or Health) 및 ERPG( Emergency Response Planning Guideline)농도 값[17-18]으로 구분한다. AEGL은 미국의 환경보호청(Environmental Protection Agency, EPA)에서 제시한 급성노출에 대한 지침으로 시간대별(10분, 30분, 1시간, 4시간, 8시간)로 노출기준을 AEGL-1(자극), AEGL-2(장애), AEGL-3(사망) 3단계로 구분한다. IDLH는 미국 국립산업안전보건연구원(American Industrial Hygiene Association, NIOSH)에서 제시한 인체에 즉시 위험한 농도 수준으로 건강한 근로자가 위험지역에서 어떤 피해도 없이 피할 수 있는 공기 중의 최대 농도를 나타낸 것이다. ERPG는 미국 산업위생학회(American Industrial Hygiene Association, AIHA)에서 개발한 비상 대응계획 수립 시 농도 지침으로 1시간 노출에 따른 개인에게 미치는 영향을 공기 중의 농도에 따라 3단계(ERPG1, ERPG2, ERPG3)로 구분한다. ERPG-3의 경우 거의 모든 사람이 한 시간까지 노출되어도 생명의 위험을 느끼지 않는 공기 중 최대 농도를 의미한다.

### III. 연구 방법

#### 1. 분석 대상

분석 대상은 고속도로 휴게소 식당에서 사용하고 있는 2,900 kg 소형 LPG 저장탱크다. 탱크는 수직 실린더 형태로 높이는 2.9 m, 직경은 2.0 m, 탱크 용량은 2,900 kg이다. 그림 2처럼 LPG 저장탱크는 실외에 설치되어 있고 탱크로부터 50 m와 150 m 떨어진 곳에 각각 주차장과 주유소가 있다.

또한 LPG 저장탱크로부터 100 m 떨어진 곳엔 고속도로 휴게소 식당이 위치해 있다.



그림 2. 고속도로 휴게소 식당 소형 LPG 저장탱크  
Figure 2. Small LPG Storage Tank for School Cafeteria

#### 2. 시나리오 설정 및 ALOHA 분석

고속도로 휴게소 식당에 설치된 2,900 kg 용량의 소형 LPG 저장탱크로부터 VCE와 BLEVE가 발생했을 때 그에 따른 과압과 복사열 피해 영향범위 분석을 시나리오로 설정하고 ALOHA 프로그램을 적용하였다. 2 kw/m<sup>2</sup>, 5 kw/m<sup>2</sup>, 10 kw/m<sup>2</sup> 및 사용자 지정 값(User Specified)에 따라 복사열을 보다 세분화해 분석할 수 있는 ALOHA의 장점을 활용하였다.

ALOHA 사고 시나리오 분석에 따른 고속도로 휴게소 위치 정보 입력변수는 그림 3과 같이 구글어스(Google Earth) 자료를 활용하였다.



그림 3. 분석 대상 위치  
Figure 3. Research Target Location

평가 지역은 경상북도 군위군 부계면 치산효령로 고속도로 △△ 휴게소 식당이며, 평가대상 화학물질은 현재 휴게소 식당 LPG 탱크에 공급되는 프로페인(Propane)을 적용하였다. Direct, Puddle, Tank, Gas Pipeline 등 총 4가지의 ALOHA 시나리오 누출원(source) 모델에서 고속도로 휴게소 식당에서 사용하는 소형 LPG 저장탱크의 특성과 최악의 상황을 고려해 탱크(Tank) 누출원 모델을 적용하였다.

표 4에 ALOHA 탱크 누출원 시나리오에 따른 VCE와 BLEVE 최종현상[19]을 제시하였다. 열화로 인한 탱

크 구조물의 파열 여부에 따라 증기운 폭발(VCE)과 비등액체팽창증기 폭발(BLEVE)이 발생한다. VCE와 BLEVE에 따라 각각 과압과 복사열을 분석하였다.

표 4. ALOHA 누출원과 위험요인 별 시나리오  
 Table 4. ALOHA Scenarios by Source and Risk Factor

Source	Toxic Scenarios	Fire Scenarios	Explosion Scenarios
<b>Tank</b>			
Not Burning	Toxic Vapor Cloud	Flammable Area (Flash Fire)	Vapor Cloud Explosion
Burning		Jet Fire or Pool Fire	
BLEVE		BLEVE (Fireball and Pool Fire)	

시나리오별 기상정보 입력 변수는 「최악 및 대안의 사고 시나리오 선정에 관한 기술 지침」의 기준값[20]에 따라 표 5에 제시하였다.

표 5. 기상정보 입력 변수  
 Table 5. Input Elements of Weather Information

구분	대기습도 (%)	대기온도 (°C)	풍속 (m/s)	풍향	대기 안정도	누출시간 (min)
최악 및 대안의 시나리오	50	25	1.5	W	F	10

최악의 시나리오 분석에 따라 탱크 저장상태에서 운전온도는 25°C 조건으로 설정하였다. 초당 1.5 m의 풍속과 대기안정도는 F등급, 습도는 대안의 사고 시나리오 분석에 따라 50%를 준수하고 누출 시간은 10분으로 적용하였다.

복사열과 과압에 의한 피해 영향범위는 2장 3절에서 제시한 ALOHA의 복사열과 과압에 의한 피해 영향범위 기준을 적용하였다.

#### IV. 결과 및 분석

시나리오에 따라 ALOHA 프로그램에 의해 산정된 표 6의 분석결과(Text Summary)를 통해 복사열의 영향범위를 예측할 수 있다. 지역정보(Site Data)와 화학물질정보(Chemical Data)를 포함한 5가지의 입력변수에 따라 도출된 화구(Fireball) 복사열의 위험지역

(Threat Zone)은 노랑, 오렌지, 빨강의 3가지 색깔로 구분하였다. 그리고 각각에 대해 2 kw/m<sup>2</sup> 이상, 5 kw/m<sup>2</sup> 이상, 10 kw/m<sup>2</sup> 이상 복사열 강도로 구분해 그 피해 영향 및 반경 범위를 제시하였다.

표 6. 복사열 분석 결과  
 Table 6. Thermal Radiation Text Summary

INPUT ITEM	INFORMATION
SITE DATA	· Location: SAMGUG HUGESO, KOREA
	· Building Air Exchanges Per Hour: 2(user specified)
	· Time: November 11, 2022 1736 hours ST (using computer's clock)
CHEMICAL DATA	· Chemical Name: PROPANE
	· CAS Number: 74-98-6,
	· Molecular Weight: 44.10 g/mol
	· AEGL-1 (60 min): 5500 ppm,
	· AEGL-2 (60 min): 17000 ppm
	· AEGL-3 (60 min): 33000 ppm
	· IDLH: 2100 ppm,
· LEL: 21000 ppm,	
· UEL: 95000 ppm	
ATMOSPHERIC DATA	· Ambient Boiling Point: -43.7°F
	· Vapor Pressure at Ambient Temperature: greater than 1 atm
	· Ambient Saturation Concentration: 1,000,000 ppm or 100.0%
	· Wind: 1.5 meters/second from 120° true at 3 meters
	· Ground Roughness: open country,
SOURCE STRENGTH	· Cloud Cover: 5 tenths
	· Air Temperature: 25°C,
	· Stability Class: F
	· No Inversion Height,
THREAT ZONE	· Relative Humidity: 50%
	· BLEVE of flammable liquid in vertical cylindrical tank
	· Tank Diameter: 2 meters,
	· Tank Length: 2.9 meters
	· Tank Volume: 9,111 liters,
	· Tank contains liquid
	· Tank contains liquid,
	· Internal Storage Temperature: 25°C
	· Chemical Mass in Tank: 2,899 kilograms,
	· Tank is 63% full
· Percentage of Tank Mass in Fireball: 100%	
THREAT ZONE	· Fireball Diameter: 90 yards,
	· Burn Duration: 7 seconds
	· Threat Modeled: Thermal radiation from fireball
THREAT ZONE	· Red: 210 yards---(10.0 kW/(sq m)=potentially lethal within 60 sec)
	· Orange: 297 yards---(5.0 kW/(sq m)=2nd degree burns within 60 sec)
	· Yellow: 463 yards---(2.0 kW/(sq m)=pain within 60 sec)

그림 4에 2 kw/m<sup>2</sup> 이상, 5 kw/m<sup>2</sup> 이상, 10 kw/m<sup>2</sup> 이상의 복사열 강도에 따라 그 피해 영향범위를 노랑색, 오렌지색, 빨강색으로 구분하였다. 복사열의 강도는

거리가 짧을수록 증가하는 것으로 나타났다.

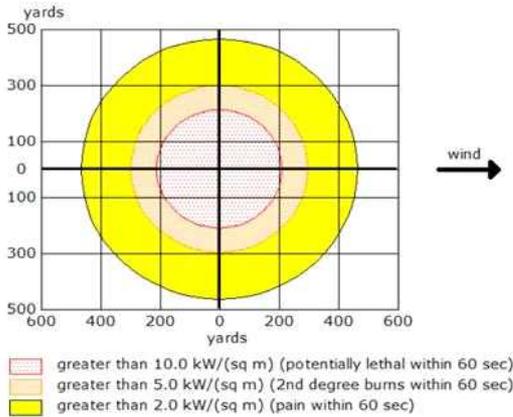


그림 4. 복사열 영향 및 반경 범위  
Figure 4. Effects and Radius Range of Thermal Radiation

복사열이  $2 \text{ kW/m}^2$  이상인 경우 LPG 탱크로부터 반경 463 yards(423 m) 이내의 사람들은 통증을 느끼고,  $5 \text{ kW/m}^2$  이상의 복사열로 반경 297 yards(272 m) 이내에 있는 사람들은 2도 화상을 입을 수 있다. 210 yards(192 m) 범위 내에 있는 사람들은  $10 \text{ kW/m}^2$  이상의 복사열로 치명적인 영향을 받는 것으로 분석되었다.

이러한 복사열에 의한 피해 영향범위를 그림 5와 같이 구글 지도상에서 직관적으로 확인할 수 있다.



그림 5. Google Earth의 복사열 영향범위  
Figure 5. Google Earth Display-Thermal Radiation Area

연구 대상 휴게소를 이용하는 사람들은 1일 평균 4,000명으로 사고 발생 시 심대한 인명 및 재산 피해가 예상된다. 또한 LPG 저장탱크로부터 50 m와 150 m 떨어진 곳에 각각 주차장과 주유소가 있고, 150 m 떨어진 곳에 기숙사와 식당이 위치해 주변 시설이 복사열로부

터 적합한 이격거리를 유지하지 못하는 것으로 밝혀졌다. 특히 강한 복사열은 LPG 탱크 주변 가까이에 주차해 있는 차량과 주유소에 영향을 주어 연쇄 폭발로 이어질 수 있어 철저한 LPG 저장탱크 안전관리가 필요하다.

표 7에 제시된 화학물질정보(Chemical Data)와 기상정보(Atmospheric Data)등 5가지 입력 변수에 따라 VCE의 과압 영향범위를 예측할 수 있다. 오렌지와 노랑의 색깔로 각각 3.5 psi 이상과 1.0 psi 이상의 과압에 따른 피해 영향범위를 분석하였다. 2,900 kg 소형 LPG의 증기운 폭발(VCE)에 따른 8.0 psi 이상의 과압은 발생하지 않는 것으로 나타났다. 폭발원으로 부터 거리가 멀수록 과압은 상대적으로 감소하였다.

3.5 psi 이상과 1.0 psi 이상의 과압에 따른 각각의 피해 영향과 반경 범위를 그림 6에 제시하였다.

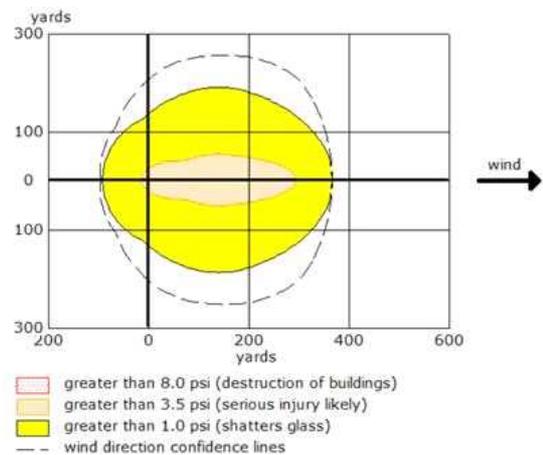


그림 6. 과압 영향 및 반경 범위  
Figure 6. Overpressure Damage and Area of Effect

과압이 3.5 psi 이상인 경우 294 yards(269 m) 이내의 사람은 중상을 입을 수 있다. 1.0 psi 이상의 과압으로 368 yards(336 m) 이내의 건물 유리창이 파손될 수 있다. LPG 저장탱크와의 이격거리를 고려해볼 때 VCE 사고 발생 시 대부분의 휴게소 부대시설과 휴게소를 이용하는 사람들은 과압의 영향범위에 노출되어 심각한 재산 및 인명피해가 예상된다.

표 7. 과압 분석 결과

Table 7. Overpressure Text Summary

INPUT ITEM	INFORMATION	
SITE DATA	· Location: SAMGUG HUGESO, KOREA	
	· Building Air Exchanges Per Hour: 2 (user specified)	
	· Time: November 11, 2022 1736 hours ST (using computer's clock)	
CHEMICAL DATA	· Chemical Name: PROPANE	
	· CAS Number: 74-98-6,	
	· Molecular Weight: 44.10 g/mol	
	· AEGL-1 (60 min): 5500 ppm,	
	· AEGL-2 (60 min): 17000 ppm	
	· AEGL-3 (60 min): 33000 ppm	
	· IDLH: 2100 ppm,	
	· LEL: 21000 ppm,	
	· UEL: 95000 ppm	
	· Ambient Boiling Point: -43.7°F	
ATMOSPHERIC DATA	· Vapor Pressure at Ambient Temperature: greater than 1 atm	
	· Ambient Saturation Concentration: 1,000,000 ppm or 100.0%	
	· Wind: 1.5 meters/second from 120° true at 3 meters	
	· Ground Roughness: open country, · Cloud Cover: 5 tenths	
	· Air Temperature: 25°C, · Stability Class: F · No Inversion Height, · Relative Humidity: 50%	
SOURCE STRENGTH	· Leak from hole in vertical cylindrical tank	
	· Flammable chemical escaping from tank (not burning)	
	· Tank Diameter: 2 meters, · Tank Length: 2.9 meters	
	· Tank Volume: 9,111 cubic meters, · Tank contains liquid	
	· Internal Temperature: 25°C, · Chemical Mass in Tank: 2,899 kilograms	
	· Tank is 63% full, · Circular Opening Diameter: 10 inches	
	· Opening is 1.60 meters from tank bottom, · Release Duration: 1 minute	
	· Max Average Sustained Release Rate: 98.7 pounds/sec (averaged over a minute or more)	
	· Total Amount Released: 5,923 pounds	
	· Note: The chemical escaped as a mixture of gas and aerosol (two phase flow).	
	THREAT ZONE	· Threat Modeled: Overpressure (blast force) from vapor cloud explosion
		· Type of Ignition: ignited by spark or flame
· Level of Congestion: congested, Model Run: Heavy Gas		
· Red: LOC was never exceeded---(8.0 psi=destruction of buildings)		
· Orange: 294 yards---(3.5 psi=serious injury likely)		
· Yellow: 368 yards---(1.0 psi=shatters glass)		

이러한 과압에 의한 피해 영향범위를 그림 7과 같이 구글 지도상에서 직관적으로 확인할 수 있다.



그림 7. Google Earth의 과압 영향범위  
 Figure 7. Google Earth Display-Overpressure Area

## V. 결론 및 시사점

경제적이고 편리한 장점으로 소형 LPG 저장탱크의 보급이 급격하게 증가함에 따라 LPG 가스 사고 또한 빈번히 일어나고 있다. 대형 사고는 우연히 또는 어느 순간 갑작스럽게 발생하지 않고 그 이전에 반드시 경미한 사고들이 반복되는 과정에서 발생한다. 고속도로 휴게소처럼 주변에 주유소가 있고 이동인구가 많은 지역에서 LPG 폭발 사고는 대형 사고로 이어질 수 있다. 고속도로 개별 휴게소의 고유한 위험 상황을 규명하고 사고 발생 시 영향범위를 미리 파악하여 효과적인 위험 관리 방안을 수립하는 것이 필요하다. 이러한 관점에서 이 연구에서는 ALOHA 피해 예측 프로그램을 활용하여 고속도로 휴게소에 설치된 2,900 kg 소형 LPG 저장탱크의 VCE와 BLEVE 발생에 따른 피해 영향범위를 분석하였다. 도출된 과압과 복사열의 영향범위는 각각 최대 반경 336 m와 423 m로 나타났다. 192 m 이내의 사람들은 10 kw/m<sup>2</sup> 이상의 복사열로 사망할 수 있고, 3.5 psi이상의 과압에 노출된 269 m 이내의 사람들은 중상을 입을 수 있는 것으로 예측되었다. 특히 강한 복사열은 LPG 탱크 주변 가까이 주차해 있는 차량과 주유소에 영향을 주어 연쇄 폭발로 이어질 수 있어 보다 실효성 있는 LPG 저장탱크 안전관리가 필요하다.

이러한 피해 예측분석 결과를 바탕으로 고속도로 휴게소 주변 시설의 조건에 적합한 소형 LPG 저장탱크 안전관리를 위해 다음과 같은 몇 가지 제언을 하고자

한다.

먼저 3톤 이상의 저장탱크에 적용하는 정부의 관련 규제를 고속도로 휴게소 소형 LPG 탱크에도 적용하는 방안을 검토할 수 있다. 주변에 주유소가 있고 이동인구가 많은 고속도로 휴게소 식당의 특성을 고려해 3톤 이상의 저장탱크에 의무적으로 폭발 방지 장치나 물 분무 장치(살수장치) 및 소화전을 설치하는 것을 고속도로 휴게소 식당 소형 LPG 탱크에도 적용하는 유연성을 발휘할 수 있다. 대부분 고속도로 휴게소에서 3톤 미만인 2,900 kg 소형저장탱크를 선호하는 이유는 3톤 이상의 저장탱크와는 달리 안전밸브 외에는 특별한 안전조치를 규정하고 있지 않기 때문인 것으로 파악되었다. 경제성보다 안전을 우선시하는 인식이 제고되어야 할 시점이다.

두 번째는 일본, 미국, 영국, 호주처럼 소형 저장탱크의 BLEVE 예방을 위해 지하 매몰 설치를 검토할 필요성이 있다. 지하 저장탱크로부터 누출이 있을지라도 집화원 접촉이 어려운 구조이므로 상대적으로 안전할 수 있다. 전운영(2015)[4]은 지상 및 지하에 설치된 소형저장탱크의 각각의 피해 영향범위에 대한 비교 연구에서 복사열의 최대 피해 영향 거리는 저장탱크 용량에 상관없이 지상에 설치할 경우 지하에 설치할 경우보다 약 6 배 차이가 나타나는 것으로 보고하였다.

세 번째는 소형 LPG 저장탱크 안전관리에 대한 보다 실효성있는 안전점검 기준 마련이 필요하다. 3장 1 절 그림 2에서 확인할 수 있듯이 연구 대상 LPG 저장탱크는 주변에 쓰레기장이 설치되어 있어 화재로 인한 BLEVE 위험에 노출되어 있다. 주변 환경을 고려한 소형 LPG 탱크의 위험성 평가를 실시하고 그 결과를 예방 안전관리 규정에 반영하여 보다 실효성 있는 소형 LPG 저장 탱크 안전관리가 필요하다.

마지막으로 국민 안전이란 사회적 책임감을 발휘해 소형 LPG 저장탱크를 전력으로 대체해 폭발의 위험을 줄일 수도 있다.

이 연구는 특정한 고속도로 휴게소 식당에 설치된 2,900 kg 소형 LPG 탱크와 ALOHA 프로그램 적용 제한의 한계점이 있다. 소형 LPG 저장탱크가 설치된 장소와 탱크 제원 변수를 고려한 다양한 시나리오를 반영한 추가적인 연구가 필요하다. 이 연구 결과가 소형 LPG 저장탱크 설치 시 사전에 주변환경과 피해 영향범위를 파악하여 화재 및 폭발 사고를 예방할 수 있는 기

초자료로 활용될 수 있기를 기대한다.

## References

- [1] Today Energy. (2022). A Full Inspection of LPG bulk crane Tank Lorry by June Next Year. (<https://blog.naver.com/bang6687/222953225663>)
- [2] Dong-A Ilbo (2022). Pohang Elementary School Cafeteria Gas Explosion... 3 Cooks Injured. (<https://www.donga.com/news/article/all/20220104/111077733/1>)
- [3] B. C. Go. (2023), Disaster in Daegu, Explosion at an LPG Station. Korean Institute of Fire Investigation. pp. 117-130. URL: <https://www.earticle.net/Article/A428243>
- [4] U. Y. Jeon. (2015). A Study on the Consequence Analysis of LPG Small Storage Tank in Underground. Seoul National University of Science and Technology. Master's Thesis. p. 44.
- [5] T. I. Han. (2017). A Study of the Possibility of Chain Explosion in a Small LPG Storage Tank Assembly. Master's Thesis. p. 2.
- [6] S. D. Seo (2019). Analysis of impact range from BLEVE of small LPG storage tank, Korea National University of Transportation. Master's Thesis. Seoul. p. 2,
- [7] S. B. Lee, & H. S. Kong. (2022). Predictive Analysis of Ranges of Damage Impact to High School Cafeterias Caused by Boiling Liquid Expansion Vapor Explosion and Vapor Cloud Explosion of Small LPG Storage Tanks. Fire & Safety Research. Vol. 3. pp. 119-135. .
- [8] S. B. Lee, & H. S. Kong. (2022). Predictive Analysis of Ranges of Damage Impact to High School Cafeterias Caused by Boiling Liquid Expansion Vapor Explosion and Vapor Cloud Explosion of Small LPG Storage Tanks. Fire & Safety Research. Vol. 3. p. 120.
- [9] J. P. Yim, B. C. Ma, & C. B. Chung. (2015). A Study on the Safety of Small LPG Storage Tanks at External Fires", Journal of the Korean Society of Safety. Vol. 30. No. 4. pp.64-72. DOI: 10.14346/JKOSOS.2015.30.4.64
- [10] Y. M. Jung. (2000). (A) Study on the Improvement of Safety for LPG Filling Station. Yonsei University. Master's Thesis. P. 18.
- [11] S. B. Lee, & H. S. Kong. (2022). Predictive Analysis of Ranges of Damage Impact to High School Cafeterias Caused by Boiling Liquid

- Expansion Vapor Explosion and Vapor Cloud Explosion of Small LPG Storage Tanks. Fire & Safety Research. Vol. 3. p. 122.
- [12]I. T. Kim, I. W. Kim, & H. O. (2000). A Study on the Overpressure Estimation of BLEVE. Journal of the Korean Institution of Gas. Vol. 4. No. 1. p. 70.
- [13]S. H. Leem, J. R. Lee, & Y. J. Huh. (2008). A Study on Estimation of Human Damage for Overpressure by Vapor Cloud Explosion in Enclosure Using Probit Model. Journal of the Korean Institution of Gas. Vol. 12, No. 1, p. 43.
- [14]S. L. Lee, & Y. S. Lee. (2003). A Study on the Probability of BLEVE of Above-ground LP GAS Storage Tanks Exposed to External Fire. Journal of the Korean Institution of Gas. Vol. 7. No. 1. p. 19.
- [15]EPA AND NOAA. (2007). ALOHA(USER'S MANUAL). p. 20.
- [16]EPA AND NOAA. (2007). ALOHA(USER'S MANUAL). p. 22.
- [17]Korea Occupational Safety and Health Agency. (2012). Guidelines for Calculation of Chemical Exposure Impact Index (CEI). (<https://www.kosha.or.kr/kosha/index.do>)
- [18]H. J. Lee, T. J. Jeong, & J. W. Ko. (2017). Apply AEGL for Short Time Exposure Using Regression Curve. Journal of the Korean Institution of Gas. Vol. 21. No. 5. p. 79.
- [19]EPA AND NOAA. (2007). ALOHA USER'S MANUAL. p. 128.
- [20]National Institute of Chemical Safety (2015), ALOHA User's Manual. p.15.