

LPG 주성분에 따른 누출 폭발 피해 영향범위 비교분석

임수희* · 손수연** · 공하성***

*우석대학교 소방방재학과 외래교수 · **전북대학교 산림환경과학과 초빙교수

***우석대학교 소방방재학과 교수

Impact Range Comparative Analysis of BLEVE by Gas Leakage According to LPG Main Components

Soo-Hee Lim* · Su-Yeon Son** · Ha-Sung Kong***

*Adjunct Professor, Dept. of Fire Protection and Disaster Prevention, Woosuk University

**Visiting Professor, Dept. of Forest Environmental Sciences, Jeonbuk National University

***Professor, Dept. of Fire Protection and Disaster Prevention, Woosuk University

Abstract

The purpose of this study is to compare and analyze the impact range of explosion damage due to gas leaks at LPG filling stations, focusing on propane and butane, which are components of vehicle LPG. The scenarios were designed based on the explosion incident at an LPG filling station in Gangwon-do, where an actual gas leak accident occurred, resulting in Scenario I and Scenario II. The ALOHA program, developed by the U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), was used as the tool to analyze the impact range of the explosion damage for both substances. The results of the study indicated that, under identical conditions, propane had a wider impact range of damage than butane. This is presumed to be due to the greater explosion energy of propane, attributable to its physicochemical properties. Therefore, when preparing for LPG leak accidents, measures for propane need to be prioritized. As safety measures for propane, two suggestions were made to minimize human casualties. First, from a preventive perspective, it is suggested to educate workers about propane. Second, from the perspective of response measures and damage minimization, it is suggested to thoroughly prepare emergency evacuation and rescue plans, evacuation routes, designated shelters, and emergency response teams. This study compares and analyzes the impact range of radiative heat damage based on LPG components. However, hazardous accidents are critically influenced by the type of leaking substance, the form of the leak, and meteorological factors affecting the diffusion pattern of the substance. Therefore, for future research, it is proposed to model various leakage scenarios for the same substance to conduct a comprehensive risk assessment.

Keywords : Liquefied Petroleum Gas(LPG), Propane, Butane, Explosion, Risk Assessment

1. 서론

오늘날 가정용 난방 및 공업용 연료, 차량 연료 등 보편적으로 사용하는 액화석유가스(Liquefied Petroleum Gas; LPG)는 [1], 1970년대 LPG 차량이 최초 등장하면

서 LPG 충전소의 수요도 증가하였다. 점차 LPG 차량이 보급되면서 국가 차원에서 LPG 충전소를 안전하게 설치하고 운영하도록 정규화시켰다. 최근에는 환경 이슈가 뜨거워지면서 LPG 충전소를 경제 및 환경적인 이점을 고려해 시설을 구축하고 보다 안전을 확보하기 위한 대책을 강구하고 있다.

†Corresponding Author : Ha-Sung Kong, 443, Samnye-ro, Samnye-eup, Wanju-gun, Jeonbuk, E-mail: 119wsu@naver.com
Received July 15, 2024; Revision September 12, 2024; Accepted September 12, 2024

국내 LPG 충전소는 전국에 1,991개소가 운영 중으로 [2] 석유 에너지의 수급 불안정을 해소하는 대체에너지로서 LPG가 여전히 중심 역할을 하고 있다. 그러나 최근 10년간(2013~2022) 발생한 화재 사고 현황에 따르면 [3], 위험물 가스 제조소 등에서 발생한 화재는 총 281건으로 평균 28건에 이르렀고, 2022년 40건으로 가장 많은 사고가 발생한 것으로 파악되었다.

위험물 제조소 등의 일환인 LPG 충전소 가스누출로 인한 비일상적 화재 및 폭발 사고는 예측이 어렵고, 사고가 발생하면 막대한 경제적 및 사회적 손실, 인적 및 물적 피해가 일어난다[4]. 따라서, 사전에 위험성 평가를 통해 피해 영향범위를 분석하여 안전 강화를 위한 대책을 마련하는 게 중요하다.

LPG 가스누출 등과 관련하여 위험성 평가를 한 선행연구를 분석한 결과, Kim et al.(2003)은 LPG 누출 사례 연구를 바탕으로 가스용기를 이용하여 운반 중인 LPG 사고 시나리오를 설계하여 ETA(Event Tree Analysis) 기법으로 사고 발생 가능성 및 피해 결과를 예측하는 정량적인 기법으로 위험성을 분석하였다. 그 결과, 가스용기에서 누출되어 증발한 LPG는 사고 지점 10m 내에서 심각한 구조적 손상, 150m 이상에서는 유리 파열이 일어날 수 있는 확률이 있다고 발표하였다[5]. Lee(2019)는 LPG 점화원 위치에 따른 폭발 하한계 형성 시간과 농도 조사를 통해 폭발 사고의 실질적인 위력을 검증하였다. 폭발 하한계 및 폭발 상한계를 계산하고, 사고 현장의 기온, 압력 등을 고려하여 LPG 누출량을 산정하여 피해 영향을 분석하였다. 실제 사고가 발생한 트렌치 공사 현장 LPG 누출 피해와 폭발 시뮬레이션으로 산정된 피해를 비교한 결과, 교각 보강공사 트렌치 내부를 용접, 절단하는 과정에서 LPG 누출이 발생하여 폭발범위가 형성되고, 토치 불꽃이 점화원으로 작용해 폭발했음을 밝혔다[6]. Cai and Xu(2004)는 LPG 분출 과정 및 구형 반경 변화를 연구하였다. 구동 압력 0.3 MPa, 연료분사 장치 홀수 2개, 속도 5m/s로 지속 분사한 결과, LPG 분출로 인한 가스 엔진의 불안정함을 해소하기 위해서 구동 압력을 줄이고 연료분사 장치 홀수를 증가시킬 필요가 있다고 발표했다[7]. Michail and Melas(2022)는 액화천연가스(Liquefied Natural Gas; LNG) 및 액화석유가스(LPG)를 운송할 시 지질학적 환경에 피해를 일으킬 잠재하는 위험성을 분석하여 운송 환경을 통제할 필요가 있다고 고려하였다. 그 결과, 사고 발생 시, 지질학적 환경에 미치는 피해 정도에 따라 LNG는 25%, LPG는 18%에 해당하는 운송 요금을 부과해야 한다고 주장하였다[8]. Yang and Kong(2023)은 LPG 충전소 가스누출로 인한 화재 및 폭발에 따른 피해 예측을 분석하여 피해 영향범위를 최소화하는 피해 방지 방안을 제시하였다[9].

선행연구를 종합적으로 분석한 결과, LPG는 다양한 용도로 사용할 수 있어 전 세계적으로 중요한 에너지원으로 활발하게 이용하고 있으나[10] 잠재적인 위험 요인으로 인해 다각적인 관점에서 위험성을 분석하고 피해 방지 및 안전관리 방안을 모색하고 있음을 확인하였다. 그러나 LPG 주성분에 따른 피해 영향범위의 차이를 비교하는 연구는 미비한 실정이다. LPG를 구성하는 주성분 물질의 물리적 및 화학적 성질에 따라서 폭발 시, 피해 영향범위가 달라질 것으로 추정된다. 이에 LPG 주성분에 따른 폭발 피해를 예측하는 연구가 추가적으로 이루어질 필요가 있다고 판단한다.

따라서 이 연구의 목적은 차량용 LPG의 주성분인 프로페인 및 부탄을 대상으로 성분에 따른 LPG 충전소 가스누출에 따른 폭발 피해 영향범위를 비교·분석하는 것이다.

2. LPG 누출 시 폭발 메커니즘

LPG 누출 시 폭발이 발생할 수 있는 시스템적 작동 원리와 구조는 다음과 같다(Figure 1). 메커니즘은 크게 3단계로 구분하면, 1단계 배관이나 저장탱크에서 가스가 누출, 2단계 누출된 가스가 공기와 결합하여 가연성 혼합물을 형성, 3단계 점화원에 의해 가연성 폭발로 이어진다.

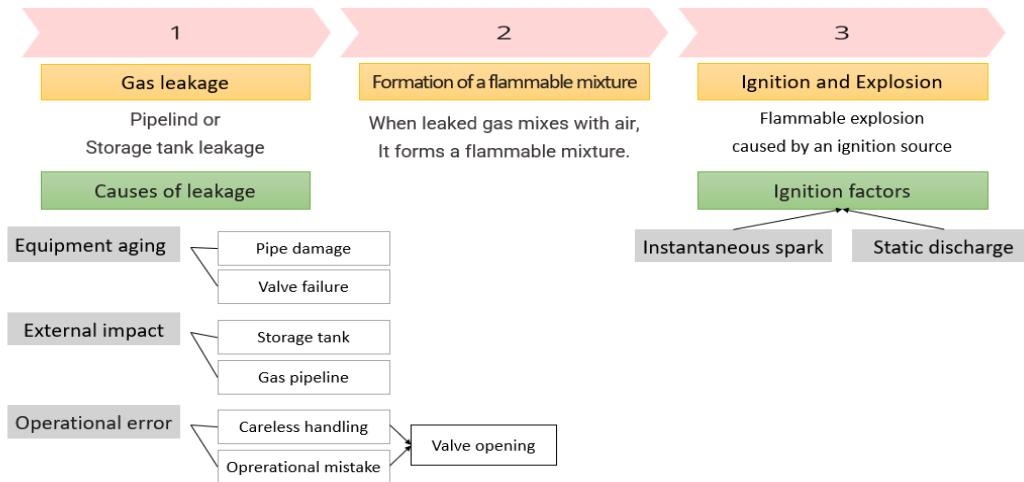
가스누출이 발생하는 원인은 주로 설비 노후화(배관 파손, 밸브 고장), 외부 충격(저장탱크, 가스 배관), 운영상 실수(부주의 취급, 작업 실수로 인한 밸브 개방) 등이 있다. 폭발을 일으키는 점화 요인으로는 작은 불꽃이나 정전기 방전 등이 작용할 수 있다.

3. 위험성 평가 프로그램

ALOHA(Areal Location of Hazardous Atmospheres)는 미국 해양대기국이 개발한 피해 예측 프로그램이다.

ALOHA는 일반적인 경우, Gaussian 대기 확산 누출모델을 사용하여 화학물질별로 피해 영향범위를 자동 산정한다. 그러나 공기보다 무거운 가스 혹은 극저온 가스에 해당하는 물질의 경우, DEGADIS 누출모델을 사용하여 분석한다(Table 1). 이 프로그램은 풍부한 화학 물질 DB를 구축하고 있어 외부에서도 별도로 이용할 수 있고 모델 결과는 Google Earth 프로그램과 호환하여 피해 영향범위를 지도상에 직접 표현함으로써 시각적인 자료를 구축할 수 있다[11].

Explosion Mechanism of LPG Gas Leakage



[Figure 1] Explosion Mechanism of LPG Gas Leakage

<Table 1> Leakage models for different chemical substances

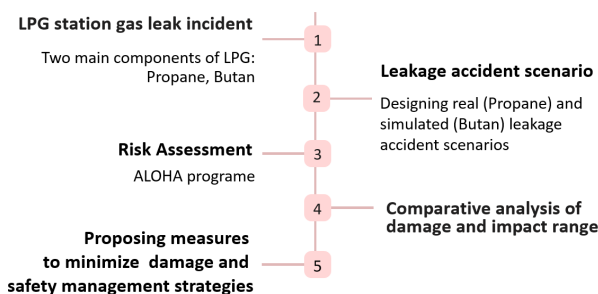
Types	Diffusion Model
In general	Gaussian Diffusion
Diffused Material> Diffused air or Cryogenic gas	DEGADIS Diffusion

그러므로 독성 물질 누출, 화재 및 폭발 등 사고 시나리오를 통해 피해 영향범위를 사전 예측하여 사고 발생 시 비상 대응계획 수립 및 안전관리 대책 마련 등에 ALOHA를 적극 활용할 수 있다.

4. 연구 방법

4.1 연구 모델

실제 가스누출 사고가 일어난 2024년 1월 1일, 강원도 평창군 용평면 경강로 1712 사례를 기반으로 시나리오를 설계하였다. 연구 모델은 Figure 2와 같다.



[Figure 2] Experiment models

4.2 입력 데이터 정의

실제 발생한 사고에서 누출된 물질은 LPG를 구성하는 주성분 및 부성분이 혼합된 상태이다. 그러나 ALOHA 프로그램은 혼합물을 분석하는 데 한계가 있다. 따라서 시나리오를 설계할 시, 기록값과 측정값에 대해 따로 구분할 필요가 있다.

첫째, 실제 사고가 발생한 LPG 충전소는 차량용 LPG를 취급하는 곳으로, 프로페인(Propane)을 주성분으로 하여 부탄(Butane), 아이소부탄(Isobutane)을 포함하고 있다. 그러나 ALOHA에 혼합물을 입력하는 한계가 있어 단일 물질인 프로페인을 사고 물질로 정의하여 실제 가스누출에 가장 유사한 조건의 사고 시나리오 I를 설계하였다.

둘째, 차량용 LPG는 주로 프로페인과 부탄의 혼합물로, 다양한 비율로 조성된다. 일반적으로 프로페인을 주성분으로 한 경우, 부탄을 혼합하여 사용한다. 부탄을 주성분으로 한 경우, 주성분은 부탄과 아이소부탄 혼합물로 존재한다. 그러므로 차량용 LPG 주성분이 부탄, 아이소부탄으로 혼합된 경우, ALOHA에 이성질체의 혼합비를 입력하기 어렵다. 따라서, 단일 물질인 부탄을 사고 물질로 정의하여 가상 가스누출 사고 시나리오 II를 설계하였다.

셋째, LPG 주성분인 프로페인, 부탄은 저장탱크 내 액화된 상태로 있으나 상온에 누출할 때 기화된다. 이러한 물질의 특성을 고려하여 시나리오를 구상했다. 끓는 액체가 확장된 증기를 발생시켜 폭발을 일으키는 BLEVE를 분석하였다.

넷째, 실제 누출 사고가 발생한 당일 기상 데이터를 토대로 풍속(m/s), 풍향(NW), 기온(섭씨온도), 상대습도(%), 대기안정도(F)로 하였다.

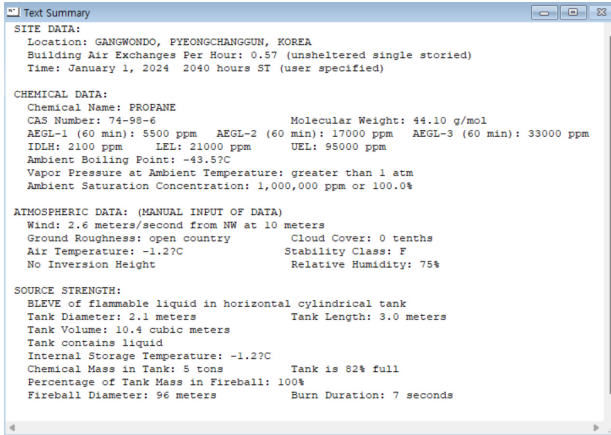
4.3 데이터 입력값

실제 가스누출 사고를 기반으로 누출 물질을 프로페인과 부탄으로 하여 시나리오를 설계하였다.

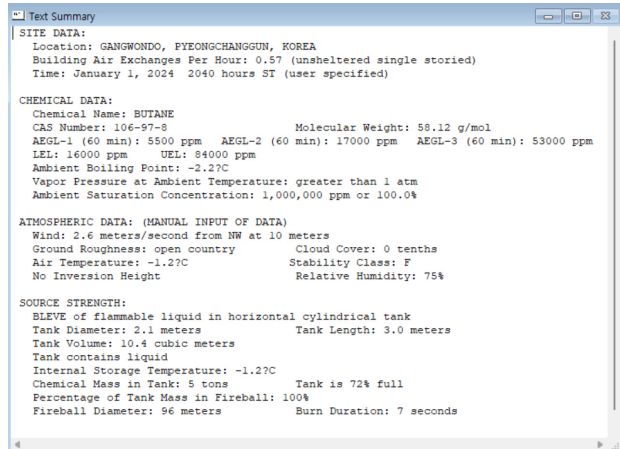
시나리오 I 은 프로페인을 주성분으로 한 LPG 충전소의 폭발 사고 당시를 반영하였다(Table 2), (Figure 3).

사고는 용기에서 물질이 누출된 것으로 가정하고, 물질 양은 5 tons를 입력하였다.

시나리오 II는 다른 데이터 입력값은 시나리오 I 과 동일하고, LPG 주성분만 부탄으로 설정했다(Table 3), (Figure 4).



[Figure 3] Scenario I (Propane) Input Data



[Figure 4] Scenario II (Butane) Input Data

<Table 2> Scenario I (Propane) Input Data

Accident Site					
Accident location		1712, Gyeonggang Road, Pyeongchang-gun, Gangwon-do			
Incident date & time		January 1, 2024 (20:40)			
Leaked substance		PROPANE			
Meteorological factors		Analysis factors related to leakage incidents			
Wind speed and Wind direction	2.6m/s, NW	Explosion type	BLEVE	Tank capacity	82%
Cloudy	0	Storage vessel	Horizontal cylinder	Quantity of substance	5 tons
Temperature	-1.2 °C	Tank diameter	2.1 m	Formation of a fireball	100%
Atmospheric stability	F	Tank volume	10.4 m ³	Fireball diameter	96 m
Relative humidity	75%	Physical state inside tank	Liquid	Ignition timing	7 s

<Table 3> Scenario II (Butane) Input Data

Accident Site					
Accident location		1712, Gyeonggang Road, Pyeongchang-gun, Gangwon-do			
Incident date & time		January 1, 2024 (20:40)			
Leaked substance		BUTANE			
Meteorological factors		Analysis factors related to leakage incidents			
Wind speed and Wind direction	2.6m/s, NW	Explosion type	BLEVE	Tank capacity	72%
Cloudy	0	Storage vessel	Horizontal cylinder	Quantity of substance	5 tons
Temperature	-1.2 °C	Tank diameter	2.1 m	Formation of a fireball	100%
Atmospheric stability	F	Tank volume	10.4 m ³	fireball diameter	96 m
Relative humidity	75%	Physical state inside tank	Liquid	Ignition timing	7 s

5. 연구 결과

LPG 주성분에 따라 발생한 BLEVE 사고에 대한 위험을 시뮬레이션 한 결과, 피해 영향범위는 복사열 강도를 기준으로 3단계로 분석되었다. 60초 이내 사망 혹은 생명 위협에 이르는 10.0kW/m²인 위험지역, 60초 이내 2도 화상 혹은 중상에 이르는 심한 고통을 느끼는 5.0kW/m²인 준-위험지역, 60초 이내 통증을 인지하는 2.0kW/m²인 경계 지역으로 분류된다.

5.1 시나리오 I (프로페인)

프로페인으로 인한 BLEVE 사고 피해 영향범위는, 위험지역은 235m(257 yards), 준-위험지역은 332m(363 yards), 경계 지역은 519m(567 yards)로 나타났다 (Table 4), (Figure 5).

<Table 4> Scenario I (Propane) Impact Range

Types	Risking Area	Semi-risk	Boundary
Range	235m	332m	519m
	257 yards	363 yards	567 yards



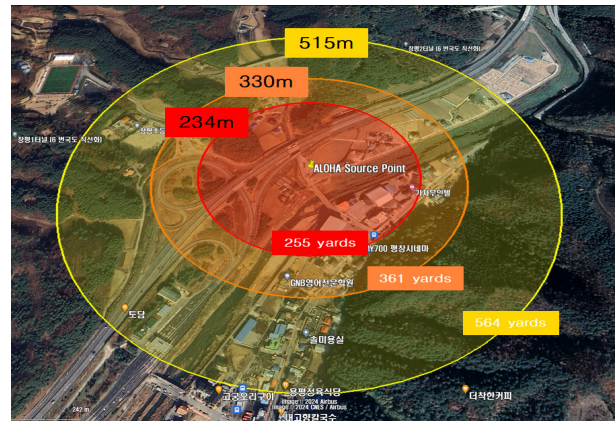
[Figure 5] Scenario I (Propane) Impact Range (Google Earth linked data)

5.2 시나리오 II (부탄)

부탄으로 인한 BLEVE 사고 피해 영향범위는, 위험지역은 234m(255 yards), 준-위험지역은 330m(361 yards), 경계 지역은 515m(564 yards)로 나타났다 (Table 5), (Figure 6).

<Table 5> Scenario II (Butane) Impact Range

Types	Risking Area	Semi-risk	Boundary
Range	234m	330m	515m
	255 yards	361 yards	564 yards



[Figure 6] Scenario II (Butane) Impact Range (Google Earth linked data)

5.3 시나리오별 결과 비교분석

시나리오별 가스누출 사고 피해 영향범위를 비교 분석한 결과, 위험지역의 경우에는 1m, 준-위험지역은 2m, 경계 지역은 4m의 편차로 프로페인이 상대적으로 부탄보다 피해 영향범위가 큰 것으로 확인되었다 (Table 6).

<Table 6> Impact range by scenario

Types	Risking Area	Semi-risk	Boundary
Scenario I (Propane)	235m	332m	519m
	257 yards	363 yards	567 yards
Scenario II (Butane)	234m	330m	515m
	255 yards	361 yards	564 yards
Deviation	1m	2m	4m
	2 yards	2 yards	2 yards

가스누출로 인해 BLEVE 폭발로 인한 복사열 피해 영향 분석에서, 복사열은 거리의 제곱에 반비례하여 감소할 뿐만 아니라 복사열의 강도는 1m 거리 차이에서도 미세한 변화를 초래할 수 있다. 따라서, 1m 단위 차이로 피해 영향범위의 거리 편차를 분석하는 것은 위험성 예측 결과의 정밀도를 높일 뿐만 아니라 사고 피해를 최소화하는 효과적인 대응계획을 사전에 수립하는 데 중요한 역할로 작용한다.

6. 결론

이 연구의 목적은 LPG 누출 물질의 성분에 따른 화재, 폭발 등으로 인한 피해 영향범위를 분석하고, 잠재적인 위험을 최소화할 수 있는 효과적인 대응 조치를 제안하는 데 있다.

LPG 성분에 따른 BLEVE 폭발 시, 부탄보다 프로페인으로 인한 복사열 피해 영향범위가 더 큰 것으로 나타났다. 이는 프로페인과 부탄의 물리적 성질이 다르기 때문으로 보인다.

프로페인은 끓는점 -42.1°C , 포화증기압이 상온에서 840kPa로, 액체 상태에서 기체 상태로 물질 성상이 전환되는 속도가 빠르다. 이에 반해, 부탄은 끓는점 -0.50°C , 포화증기압이 상온에서 213.7kPa로, 다른 조건이 동일할 경우에 프로페인보다 상대적으로 액체에서 기체로 물질 성상이 전환되는 속도가 느리다. 즉, 연소할 때, 프로페인이 단위 질량당 방출하는 열량이 높아 더 큰 복사열을 발생할 수 있다.

또한 물질의 연소 가능 범위를 보면, 프로페인은 2.2~9.5%, 부탄은 1.9~8.5%로 물질 누출로 인한 폭발 발생 범위가 넓다. 이는 누출된 가스가 넓은 범위에 퍼져 폭발 위험이 크다는 것을 의미한다.

이 연구는 BLEVE 폭발을 가정하여 시나리오를 설계 후 LPG 위험성 평가를 하였다. 동일 조건에서 프로페인이 부탄보다 위험성이 큰 것으로 나타났다. 높은 증기압, 낮은 끓는 점을 가진 프로페인이 부탄보다 폭발 에너지가 크므로, 더 강력한 폭발을 일으켜 복사열로 인한 피해 영향 범위가 더 넓은 것으로 나타났다. 따라서, LPG 누출 사고를 대비할 때 프로페인에 대한 안전 대책 마련이 우선되어야 한다.

(1) 사고 예방 차원으로 LPG 충전소 저장탱크 등 정기 점검 및 유지보수를 강화, 누출 감지기 설치 의무화 이행 및 정상 작동 여부 주기적 관리 및 보고, 작업자를 대상으로 한 프로페인에 대한 교육을 철저히 진행할 것을 제안한다.

2) 대응 조치 및 피해 최소화에서 가장 우선해야 할 것은 인명 피해를 줄이는 것이다. 사고 시, 긴급 대피 및 구조 계획 마련, 대피 경로, 안전이 보장된 대피처 지정, 사고 대응을 위한 응급조치 팀 구성, 필요한 장비 및 자원을 사전에 준비해야 한다. 프로페인 저장탱크 및 시설 주변에 화재방지 장치 설치, 소화 장비 마련, 사고 예방 및 대처를 위한 주기적인 교육과정 마련할 것을 제안한다.

이 연구는 LPG 성분인 프로페인, 부탄을 대상으로 동일 조건에서 BLEVE 폭발 발생 시, 복사열 피해 영향범위를 비교 분석한 것이다. 가스누출로 인한 사고는 기상적인 요소, 누출 물질 및 형태에 대한 요소 등 물질의 확산 패턴

에 결정적인 영향을 미친다. 그러므로 향후 연구과제로, 다양한 조건으로 누출 시나리오를 설계하여 위험성 평가를 분석할 것을 제안한다.

7. References

- [1] National Institute of Korean Language(2024), Standard Language Dictionary. <https://stdict.korean.go.kr/search/searchView.do>. (Accessed: June 23, 2024).
- [2] Korea Gas Safety Corporation(2023), National Status of LPG Filling Stations in Korea. Korea Gas Safety Corporation ESG Management Department.
- [3] National Fire Agency(2023), 2023 National Fire Agency Statistical Yearbook (Final). Information and Communication Department, Fire Safety and Maintenance Technology Division.
- [4] S. D. Jeon, S. B. Lee, J. Y. Lee(2023), "Impact Range Analysis of Small LPG Storage Tank Explosions at Highway Rest Areas." The Journal of the Convergence on Culture Technology (JCCT), 9(2):319-327.
- [5] K. C. Park, B. J. Kim, K. W. Lee(2023), "A Quantitative Risk Analysis of LPG Leaked During Cylinder Delivery." Journal of the Korean Institute of Gas, 7(2):33-41.
- [6] J. H. Lee(2019), A study on the impact assessment of explosion damage due to leakage of LPG in trench construction site. Graduate School of Safety Engineering, Seoul University of Science and Technology. Doctoral dissertation in Engineering.
- [7] S. Cai, B. Xu(2004), "Characteristics of LPG jet in MPI System." 內燃機學報(Internal Combustion Engine Journal) Transactions of Csice, 22(1):63-69.
- [8] N. A. Michail, K. D. Melas(2022), "Geopolitical Risk and the LNG-LPG Trade." Peace Economics, Peace Science, and Public Policy, 28(3):243-265.
- [9] Y. H. Yang, H. S. Kong(2023), "Predicting and Preventing Damages from Gas Leaks at LPG Stations." Journal of the Convergence on Culture Technology: JCCT, 9(4):577-585.
- [10] A. D. Firoj(2023), "Exceptional fuel (LPG)." International Journal of Advanced Research, 11(10):158-159.

[11] National Institute of Chemical Safety(2015),
ALOHA User Guide. National Institute of Chemical
Safety.

저자 소개



임수희

학위 : 공학박사
관심분야 : 방염성능기준, 소방안전, 산림화재 등
근무지 : 우석대학교 소방방재학과 외래교수



손수연

학위 : 농학박사
관심분야 : 산림병해, 산림환경보호, 산림화재 등
근무지 : 전북대학교 산림환경과학과 초빙교수



공하성

학위 : 공학 박사, 행정학 박사
경력 : 대한안전경영과학회 편집위원, 한국화재
소방학회 평의원 역임
관심분야 : 소방전기, 소방기계, 소방방재정책 등
근무지 : 우석대학교 소방방재학과 부교수