도심지 내 가스충전소 폭발사고에 의한 피해 영향에 대한 연구: 복사열을 중심으로

A Study on the Impact of Damage Caused by an Explosion Accident at a Downtown Gas Station: Focusing on Radiant Heat

황운용*

Hwang, Woonyong*

Abstract

A common accident that can occur at a gas station is a gas explosion. Assuming that a boiling liquid expanded vapor explosion (BLEVE) occurred at a gas station, a total of 117 scenarios were considered at ambient temperatures of -5.9, 20, and 34.8 °C; relative humidities of 58%, 69%, and 84%; and fill rates of 30 to 90% by changing the storage tank volume by 5%. The scenario was compared and analyzed using the ALOHA BLEVE-Fireball Model. The damage prediction involves the formation of a fire ball by BLEVE that emits radiant heat, which can affect the human body. Human damages were classified as second degree burn, pain, and no pain. The damage evaluation confirmed that pain could be felt over a 987 m radius in the worst conditions. In addition, the second-degree burn and pain areas were significantly affected by the exposure time.

Key words : BLEVE, Gas Station, Thermal Radiation, ALOHA

요 지

가스충전소에서 발생 가능한 사고는 가스폭발이다. 가스충전소에서 Boiling Liquid Expanded Vapor Explosion (BLEVE)가 발생되는 것으로 보고 도심지 내 가스충전소에 대해 주위 기온을 -5.9℃, 20℃, 34.8℃의 3가지 경우와 상대습도 58%, 69%, 84%의 3가지 경우 그리고 가스충전소 내 저장탱크의 충전비를 5%씩 변화시켜 30 ~ 90%의 비율을 시나리오로 하여 총 117개의 시나리오를 작성하였다. 작성된 시나리오는 ALOHA BLEVE-Fireball Model을 통해 결과를 비교 분석하였다. 피해의 산정은 BLEVE에 의한 파이어 볼이 형성되어 주위에 복사열을 방출함으로써 인체에 피해를 미치는 결과로 해석하였으며 인체의 피해의 분류는 2도 화상 영역, 통증영역, 통증을 느낄 수 있는 영역으로 분류하였다. 피해 평가결과 최악의 조건에서 반경 987 m 까지 통증을 느낄 수 있는 것으로 확인되었으며, 2도 화상영역과 통증영역의 경우 노출시간에 많은 영향을 받는 것으로 확인되었다.

핵심용어 : BLEVE, 가스충전소, 복사열, ALOHA

1. 서 론

최근 Liquefied Petroleum Gas (LPG) 자동차의 규제가 환경문제로 인해 폐지되면서 LPG 자동차가 더 많이 보급되고 있는 추세이다. 1982년 택시의 연료로 LPG 사용을 허가한

이후 규제로 인하여 보급이 미루어지던 LPG 자동차의 증가로 인하여 가스충전소도 더 많은 수요를 감당하여야 한다. LPG 자동차의 가스충전소는 접근성을 고려하여 도심지에 있는 경우와 도심지 외부에 있는 경우로 구분된다. 그러나, 최근에는 도심지 내 가스충전소는 위험성 등을 이유로 주위

*교신저자, 정회원, 초당대학교 소방행정학과 조교수(Tel: +82-61-450-1288, Fax: +82-61-450-1592, E-mail: wyhwang@cdu.ac.kr)
Corresponding Author, Member, Assistant Professor, Department of Fire Service Administration, Chodang University

의 반대에 부딪혀 허가가 매우 어려운 실정이다.

이에 따라 LPG의 위험성에 대해 분석하여 대책을 마련하기 위한 선행연구가 진행되었다. 선행연구로 Roh et al. (1998)은 LPG 판매업소의 위험성 분석을 위해 PHAST와 IAEA의 위험성 평가, 우선 순위 선정수법, 일본의 LPG 판매업소의 안전규정 등을 통하여 국내 LPG 판매업소의 방폭벽에 대해 추가적인 안전거리가 필요함을 언급하였으며, Ko (2012)는 Jet Fire를 수반한 국내외 LPG 기화기의 화재·폭발사고에 관한 확률론적 분석에 관한 연구에서 14년간 발생한 가스사고사례를 Poisson 분석법을 적용하여 LPG의 사고발생확율을 분석하였다. 또한, Hassani et al. (2018)은 Hassi R'Mel의 석유가스 생산지역의 LPG 저장구역에서 BLEVE 현상을 ALOHA를 이용하여 시뮬레이션 하였다.

따라서 본 연구에서는 도심지 내 가스충전소의 BLEVE에 의한 파이어 볼이 형성 되어 복사열을 방출할 경우 인체에 피해를 미치는 범위를 ALOHA BLEVE-Fireball Model을 통하여 산정하여 가스폭발에 따른 피해영역을 산정하고자 한다.

2. 가스충전소 선정배경 및 가스의 특성

2.1 가스충전소 선정 배경

가스충전소에서 발생 가능한 사고의 결과는 가스폭발이다. 이러한 폭발에는 Vapor Cloud Explosion (VCE)와 Boiling Liquid Expanded Vapor Explosion (BLEVE)가 있으며, 폭발이 발생되면 화염과 과압, 복사열에 의한 피해가 발생될 수 있다(FEMA et al., 1990). 같은 규모의 가스충전소에서 가스폭발이 발생되더라도 도심지 내 가스충전소의 경우 더 큰 피해를 유발할 수 있다고 쉽게 짐작가능하다.

2020년 4월 기준 전국의 광역시 이상 도시에 가스충전소는 383개가 있으며 각 도시별 가스충전소는 Table 1과 같다.

Table 1. Gas Station in Metropolitan

Administrative district	Seoul	Busan	Daegu	Incheon	Gwangju	Deajeon	Ulsan	Total
Number of Gas Stations	76	62	54	59	51	45	36	383

Table 2. Physical Properties of Propane and Butane

Substance	Formula	Boiling Point	Vapor Pressure	Flash Point	Auto Ignition Temperature	Heat of Combustion
Propane	C_3H_8	-42 °C	840 kPa (at 20 °C)	-104 °C	449.85 °C	11,060 kcal/Nm ³
Butane	C_4H_{10}	-0.5 °C	213.7 kPa (at 21.1 °C)	-60 °C	287.85 °C	10,920 kcal/Nm ³

본 연구에서는 이 중 광주광역시 소재의 가스충전소를 대상으로 선정하였다. 선정된 가스충전소의 경우 주변에 초등학교와 중학교 및 공동주택 등 주거단지가 있어 많은 인구가 존재하므로 선정된 가스충전소에서 폭발사고가 발생할 경우 많은 피해가 발생되리라 예상되기 때문이다. 선정된 가스충전소의 위치는 Fig. 1과 같다.

2.2 가스충전소의 구조

선정된 가스충전소의 경우 30 Ton 탱크 2개가 설치되어 있으며 해당 탱크에 부탄가스와 프로판가스를 혼합한 상태로 저장한다. 저장하는 LPG는 액화된 액상의 형태를 액중펌프를 통하여 공급하여 판매하는 방식이다.

2.3 LPG의 물리적 특성

가스 충전소에서 저장 판매하는 가스는 LPG로 주요성분은 부탄과 프로판이다. ILO의 International Chemical Safety Cards, Perry and Green (2008), 에너지연계통보(KEEL, 2018)에 의한 LPG 주요성분인 부탄과 프로판에 대한 물리적 특징을 정리하면 Table 2와 같다.

Location: 35°10'00"N 126°56'02"E

Fig. 1. Selected Gas Station Location

3. 폭발모델링 수행 및 피해예측

3.1 모델의 선정

부탄가스 폭발 시 발생 가능한 BLEVE의 복사열량을 모델링하기 위한 프로그램으로 미국 EPA와 NOAA에서 공동 개발한 Areal Locations of Hazardous Atmospheres (ALOHA, v5.4.7) 모델을 사용하였다. BLEVE 발생에 의한 복사열량에 영향을 주는 화학물질의 물리 화학적 특성, 지형 및 기상조건, 화학물질의 저장탱크의 크기 및 충전비 등의 조건에 따라 다양하게 모델링을 수행 할 수 있다.

3.2 폭발 피해예측

3.2.1 파이어 볼에 의한 복사열량

Hurley (2016)는 전체 BLEVE의 약 80%가 가연성 물질에 의해 발생되며, 외부 화재에 의해 BLEVE가 발생되는 경우 가연성 물질에 의해 파이어 볼(Fire Ball)이 형성된다고 밝히고 있다. 또한, 형성된 파이어 볼 크기와 지속 시간은 파이어 볼 내에서 연소되는 연료의 양에 의존하게 되며 연료의 양에 따른 파이어 볼의 최대 직경은 Eq. (1) 로 계산되며, 파이어 볼의 지속시간은 연료의 양에 의해 Eq. (2)로 계산된다(Jones et al., 2013).

$$D_{\max} = 5.8m^{1/3} \quad (1)$$

$$t_{\text{burn}} = 0.852m^{0.26} \quad (2)$$

Eqs. (1)과 (2)에서 $D_{\max}$ 는 최대직경, m 은 연료의 질량, t_{burn} 은 파이어 볼 지속시간이다

파이어 볼 모델은 파이어 볼 표면의 평균 방출에너지 E 와 직경 D 에 의한 특성이 있는 것으로 본다. 파이어 볼에 의해 외부에 전달되는 복사열량은 Eq. (3)과 같이 계산된다(Mannan and Lees, 2005; Hurley 2016).

$$q_F = \tau EF \quad (3)$$

Eq. (3)에서 q_F 는 파이어 볼의 복사열량, τ 는 파이어 볼과 복사 수열체 사이의 대기투과율, E 는 파이어 볼 표면의 평균 방출에너지, F 는 배치요소인자이다.

Eq. (3)에서 F 는 기하학적인 요소이다. Eq. (3)의 각 요소인 τ , E , F 는 ALOHA에서는 각각 Eqs. (4), (5), (6)과 같이 계산된다(Jones et al., 2013).

$$\tau = 1.389 - 0.135 \log_{10}(P_w x) \quad (4)$$

$$E = 350,000 \frac{\Delta h_c}{\Delta h_{c, \text{propane}}} \quad (5)$$

$$x > \frac{D_{\max}}{2} \text{에서 } F = \frac{x \left(\frac{D_{\max}}{2} \right)^2}{\left[x^2 + \left(\frac{D_{\max}}{2} \right)^2 \right]^{3/2}} \quad (6)$$

Eqs. (4), (5), (6)에서 P_w 는 대기 중 수증기압, x 는 파이어볼 중심과 수열체 간의 수평거리, Δh_c 는 물질의 연소열, $\Delta h_{c, \text{propane}}$ 은 프로판의 연소열이다.

Eq. (4)의 τ 는 대기 중 비, 연기, 이산화탄소, 수증기 등에 대한 부분으로 ALOHA에서는 대기 중 수증기에 한하여 계산한다. Eq. (4)의 수증기압은 Eq. (7)과 같이 계산된다(Jones et al., 2013).

$$P_w = 99.89 \frac{R_H}{100} \exp \left(21.66 - \frac{5431.3}{T_a} \right) \quad (7)$$

Eq. (7)에서 R_H 는 상대습도이며 T_a 는 대기온도이다.

3.2.2 복사열량에 의한 인체영향

복사열량이 인체에 영향을 미치는 요소는 매우 다양하다. 열원과 수열체 간의 배치요소에 의해 동일한 복사열량이 수열되더라도 피해의 정도는 다를 수 있으며 복사열량에 의한 사망과 관련하여서는 화상범위와 연령에 따라 사망되는 비율조차 다르다(Rew, 1997; O'Sullivan and Jagger, 2004). 특히, 같은 복사열이 수열되더라도 복사열에 노출되는 시간에 의해 피해의 정도는 달라진다(Moritz and Henriques, 1947; O'Sullivan and Jagger, 2004). 복사열과 시간의 관계는 Eq. (8)과 같이 표현된다(Mannan and Lees, 2005; Hurley, 2016).

$$tI^n = \text{Const} \quad (8)$$

Eq. (8)에서 t 는 노출시간으로 단위는 sec이며, I 는 복사열, n 은 상수이다.

Eq. (8)에서 일반적으로 n 은 상해의 정도와 관계없이 4/3의 값을 갖는다. Eq. (8)을 통해 통증을 유발하는데 걸리는 시간과 2도 화상에 도달하는데 걸리는 시간을 열유속 관계식으로 표현하면 Eqs. (9), (10)과 같이 표현된다(Hurley, 2016).

$$t_p = 125(\dot{q}'')^{-1.9} \quad (9)$$

$$t_{2b} = 260(\dot{q}'')^{-1.56} \quad (10)$$

Eqs. (9)와 (10)에서 t_p 는 통증을 느끼는데 걸리는 시간이며, t_{2b} 는 2도 화상을 입는데 걸리는 시간, $\dot{q}''$ 는 열유속이다.

3.3 기상데이터

ALOHA 모델을 적용하기 위해서는 해당지역의 기상 조건에 대한 분석이 필요하다. 기상조건은 ALOHA 모델에서 화학물질의 누출, 폭발 등에 중요한 변수로 작용하기 때문이다. 따라서 기상청의 2019년도 광주지역의 월별 기후조건을 확인하였으며 정리하면 Table 3과 같다.

3.4 ALOHA 시뮬레이션 조건

BLEVE에 의한 복사열의 해석을 위한 ALOHA 시뮬레이션 조건은 다음과 같다.

3.4.1 대기온도

대기온도는 상온인 20 °C를 기준으로 하였으며 년 중 최고온도인 34.8 °C, 최저온도인 -5.9 °C와 비교하였다.

3.4.2 상대습도

상대습도는 상대습도의 평균치인 69%를 기준으로 동일 조건에서 최저습도 58%와 최고습도 84%를 비교하였다.

3.4.3 기타조건

풍향은 가장 많이 나타나는 서남서(WSW)향을 적용하였으며, 풍속은 평균치인 1.46 m/s, 대기의 안정도는 중간인 D를 적용하였다.

3.5 사고시나리오 및 평가조건

3.5.1 화학물질의 선정

LPG의 성분별 비율은 지역별, 시기별로 혼합비의 차이를 보이며 자동차용과 연료용 용기의 충전용 가스의 성분도 상이하나 공통적인 사항은 겨울철의 경우 주변온도가 낮음에 따라 연료의 기화문제로 프로판가스의 비율을 높이고 여름철의 경우 부탄가스의 비율을 높이는 특성이 있다. 다만, LPG 성분의 대부분은 부탄이며, 자동차용 LPG의 경우 부탄 가스 비율을 최소 65%에서 최대 100%까지 하고 있다. 또한 Table 2에서 프로판과 부탄의 연소열의 차이가 크지 않음을 보여주고 있다. 따라서 가스충전소에서의 폭발사고 물질을 부탄가스로 하였다.

3.5.2 저장물질의 양

가스충전소의 경우 탱크로리에 의해 연료충전을 하는 방식이다. 탱크로리를 통한 충전이 이루어지는 시기는 가스 충전소마다 상이하나 해당충전소의 경우 충전비가 30%에서 충전이 이루어지고 있다. 또한 충전 시 최대 충전비는 모든 가스충전소에서 공통적으로 90%를 기준으로 하므로 30 Ton 탱크 2기의 충전비를 30~90%의 범위로 하였다.

3.5.3 사고조건

사고의 발생의 조건은 충전비가 30 ~ 90%의 범위 내에서 5%씩 변화시켜 비교하였으며 저장량의 20%가 누출되어 화재가 발생하여 BLEVE를 유발하고 나머지 80%의 부탄가스가 BLEVE를 발생한 것으로 가정하였다.

3.5.4 사고시나리오

화학물질관리법에 의한 장외영향평가에서는 사고시나리오를 작성토록 하고 있다. 사고시나리오는 사업장 내 화학물질로 인한 화재, 폭발, 누출 등의 사고가 발생하여 사업장 외부에 영향을 주거나 사업장 내 근로자에게 영향을 주는 사고를 의미한다. 사고시나리오는 최악의 시나리오와 대안 시나리오로 구분되며 최악의 시나리오는 화학물질 저장량이 최대인 상태에서 사고가 발생하는 것이며 대안 시나리오는 현실적으로 발생 가능한 시나리오 중 영향범위가 최대인 시나리오를 의미한다. 충전비와 기온, 습도에 의한 각 시나리오의 조건을 요약하면 Table 4와 같다.

3.5.5 피해범위 산정기준

BLEVE에 의한 폭발 중 복사열에 대한 평가기준은 ALOHA 모델에서 제시하고 있으며 제시된 기준을 정리하면 Table 5와 같다(U.S. EPA and NOAA, 2007).

Table 5의 경우 평가기준의 공통적인 사항은 복사열 노출에 의해 피해가 나타나는 시간이 최대 60초이다. 그러나 앞서 설정한 저장물질의 양이 BLEVE를 발생시키고 이로 인한 파이어 볼 지속시간을 확인하기 위해 Eq. (2)를 통해 확인한 결과 파이어 볼이 지속되는 시간은 10초 전후이므로 Table 5의 적용이 불가능하였다. 따라서 피해범위의 측정기준은 Eq. (2)를 통해 얻은 파이어 볼 지속시간을 Eqs. (9), (10)에 대입하여 얻은 열유속 값으로 하였다. 충전비가 시나

Table 3. Average Meteorological in Gwangju in 2019

Element	Month											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Average Temperature (°C)	1.8	3.6	8.4	13	19.2	22	25.3	27	22.9	17.1	10.8	4.8
Maximum Temperature (°C)	10.5	15.6	20.7	27.9	30.7	31.7	32.9	34.8	30.6	28.4	22.9	16.3
Minimum Temperature (°C)	-5.9	-4.9	-0.6	0.9	6.8	13.5	19.1	20.1	13.7	6.7	0.1	-5
Relative Humidity (%)	59	58	61	67	58	79	84	80	82	74	66	62

Table 4. The Condition of Each Scenario

Scenario No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fill Rate (%)	90	90	90	90	90	90	90	90	90
Ambient Temperature (°C)	-5.9	-5.9	-5.9	20	20	20	34.8	34.8	34.8
Ambient Humidity (%)	58	69	84	58	69	84	58	69	84
Scenario No.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Fill Rate (%)	85	85	85	85	85	85	85	85	85
Ambient Temperature (°C)	-5.9	-5.9	-5.9	20	20	20	34.8	34.8	34.8
Ambient Humidity (%)	58	69	84	58	69	84	58	69	84
Scenario No.	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Fill Rate (%)	80	80	80	80	80	80	80	80	80
Ambient Temperature (°C)	-5.9	-5.9	-5.9	20	20	20	34.8	34.8	34.8
Ambient Humidity (%)	58	69	84	58	69	84	58	69	84
Scenario No.	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Fill Rate (%)	75	75	75	75	75	75	75	75	75
Ambient Temperature (°C)	-5.9	-5.9	-5.9	20	20	20	34.8	34.8	34.8
Ambient Humidity (%)	58	69	84	58	69	84	58	69	84
Scenario No.	37	38	39	40	41	42	43	44	45
Fill Rate (%)	70	70	70	70	70	70	70	70	70
Ambient Temperature (°C)	-5.9	-5.9	-5.9	20	20	20	34.8	34.8	34.8
Ambient Humidity (%)	58	69	84	58	69	84	58	69	84
Scenario No.	46	47	48	49	50	51	52	53	54
Fill Rate (%)	65	65	65	65	65	65	65	65	65
Ambient Temperature (°C)	-5.9	-5.9	-5.9	20	20	20	34.8	34.8	34.8
Ambient Humidity (%)	58	69	84	58	69	84	58	69	84
Scenario No.	55	56	57	58	59	60	61	62	63
Fill Rate (%)	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Ambient Temperature (°C)	-5.9	-5.9	-5.9	20	20	20	34.8	34.8	34.8
Ambient Humidity (%)	58	69	84	58	69	84	58	69	84
Scenario No.	64	65	66	67	68	69	70	71	72
Fill Rate (%)	55	55	55	55	55	55	55	55	55
Ambient Temperature (°C)	-5.9	-5.9	-5.9	20	20	20	34.8	34.8	34.8
Ambient Humidity (%)	58	69	84	58	69	84	58	69	84
Scenario No.	73	74	75	76	77	78	79	80	81
Fill Rate (%)	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Ambient Temperature (°C)	-5.9	-5.9	-5.9	20	20	20	34.8	34.8	34.8
Ambient Humidity (%)	58	69	84	58	69	84	58	69	84
Scenario No.	82	83	84	85	86	87	88	89	90
Fill Rate (%)	45	45	45	45	45	45	45	45	45
Ambient Temperature (°C)	-5.9	-5.9	-5.9	20	20	20	34.8	34.8	34.8
Ambient Humidity (%)	58	69	84	58	69	84	58	69	84
Scenario No.	91	92	93	94	95	96	97	98	99
Fill Rate (%)	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Ambient Temperature (°C)	-5.9	-5.9	-5.9	20	20	20	34.8	34.8	34.8
Ambient Humidity (%)	58	69	84	58	69	84	58	69	84
Scenario No.	100	101	102	103	104	105	106	107	108
Fill Rate (%)	35	35	35	35	35	35	35	35	35
Ambient Temperature (°C)	-5.9	-5.9	-5.9	20	20	20	34.8	34.8	34.8
Ambient Humidity (%)	58	69	84	58	69	84	58	69	84
Scenario No.	109	110	111	112	113	114	115	116	117
Fill Rate (%)	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Ambient Temperature (°C)	-5.9	-5.9	-5.9	20	20	20	34.8	34.8	34.8
Ambient Humidity (%)	58	69	84	58	69	84	58	69	84

리오에 따라 30~90%의 비율로 변화하므로 연료량의 변화에 따라 파이어 볼의 지속시간이 변화되어 2도 화상을 발생시키는 열유속은 파이어 볼 지속시간에 따라 각각 8.63 kW/m², 8.07 kW/m², 7.59 kW/m²이며, 통증을 느낄 수 있는 열유속은 각각 3.99 kW/m², 3.78 kW/m², 3.59 kW/m²로 계산된다.

Table 5. Stage of Thermal Radiation

Thermal Radiation (kW/m ²)	Effect
10	Potentially Lethal within 60 sec
5	2nd Degree Burns within 60 sec
2	Pain within 60 sec

또한, 복사열이 너무 작은 경우 노출시간과 관계없이 인간에 영향을 주지 않는 특성이 있다. 인간에 영향을 주지 않는 열유속은 1.7 kW/m²다. 따라서 아무런 영향이 없게 되는 구간을 추가로 확인하였다. 적용된 측정기준에 대한 내용은 Table 6과 같다.

Table 6. Stage of Thermal Radiation at This Study

Effect at Human	Exposure Time (sec)	Thermal Radiation (kW/m ²)
2nd Degree Burns	11	7.59
	10	8.07
	9	8.63
Pain	11	3.59
	10	3.78
	9	3.99
No Pain	Irrelevant	1.7

4. 시나리오의 사고피해예측 및 결과분석

4.1 시나리오 별 사고피해예측

시나리오 별 사고에 따른 피해를 예측하기 위해 ALOHA BLEVE-Fireball 모델을 구동하였으며 시나리오 별 결과를 요약하면 Table 7과 같다.

4.2 결과분석

4.2.1 개별 시나리오 분석

시나리오에 따른 피해의 정도로 보았을 때 최악의 시나리오 온도와 습도가 낮은 환경에서 발생하는 것으로 나타났다. 충전비 90%, 기온 -5.9 °C, 습도 58%의 환경에서 BLEVE로 인한 파이어 볼에 따른 복사열의 피해는 반경 987 m까지 나타나는 것으로 확인되었다. 특히 반경 475 m 이내는 2도 화상의 위험이 있으며, 반경 687 m까지 인간이 복사열에 의한 통증을 유발하는 것으로 분석되었다. 또한, 충전비 30%, 기온 34.8 °C, 습도 84%에서 최소 피해가 발생하였으며, 반경 275 m까지는 2도 화상의 위험이 있고, 반경 402 m내에서는 통증을 느끼며, 반경 606 m내에 존재하는 사람의 경우 통증을 느낄 수 있는 피해가 발생 가능한 것으로 확인되었다. 최소의 피해가 발생하는 경우와 최악의 시나리오에 의한 피해를 ALOHA BLEVE-Fireball 모델로 표현하면 Fig. 2와 같다.

Fig. 2에서 적색영역은 2도 화상영역이고, 주황색 영역은 통증영역이며, 노란색 영역은 통증을 느낄 수 있는 영역이다.

해당 가스충전소의 경우 최소의 피해가 발생하더라도 가스충전소 인근의 학교와 아파트 단지까지 고통을 유발하거나 2도 화상 이상의 피해가 발생됨이 확인되었다.

(a) Minimum Damage Area

(b) Maximum Damage Area

Fig. 2. ALOHA BLEVE-Fireball Model

4.2.2 시나리오에 따른 영향 분석

20 °C에서 습도 별 가스저장소 탱크의 충전비 변화에 따른 측정지점의 변화를 표현하면 Fig. 3과 같다.

Fig. 3에서 저장탱크의 충전비가 40~45% 구간과 65~70% 구간에서는 인체에 영향을 미치는 거리의 변화가 다른 부분의 변화보다 큰 차이를 보여준다.

(a) at 20 °C, Humidity 58%

(b) at 20 °C, Humidity 69%

(c) at 20 °C, Humidity 84%

Fig. 3. Fill Rate According to Measuring Point at 20 °C

Table 7에서 저장탱크의 충전비가 1% 변화될 경우 2도 화상영역의 반경 변화는 저장탱크의 충전비가 30~40%에서 평균 1.37 m, 45~65%에서 0.53 m, 70~90%에서 0.42 m인 것에 비해 40~45%에서 4.67 m, 65~70%에서 4.29 m로 다른 구간보다 더 큰 차이를 보여준다.

또한, 통증영역의 반경 변화는 충전비가 1% 변화될 경우 저장탱크의 충전비가 30~40%에서 평균 2 m, 45~65%에서 0.76 m, 70~90%에서 0.6 m인 것에 비해 40~45%에서 6.13 m, 65~70%에서 5.53 m로 차이를 보여준다.

통증을 느낄 수 있는 영역의 반경 변화는 충전비가 1% 당 저장탱크의 충전비가 30~40%에서 평균 3.02 m, 45~65%에서 1.12 m, 70~90%에서 0.87 m인 것에 비해 40~45%에서 5.29 m, 65~70%에서 3.91 m로 차이를 보여준다. 이를 정리하면 Table 8과 같다.

충전비의 변화에 의해 피해거리가 큰 차이를 보여주는 부분은 공통적으로 노출시간의 변화가 있는 부분이다. 노출시간의 변화로 인한 피해기준 복사열량의 변화가 이러한 결과를 가져온 것으로 분석된다.

다만, 통증을 느낄 수 있는 영역의 반경 변화는 피해기준 복사열량의 변화가 없음에도 2도 화상영역, 통증영역과 유사하게 노출시간의 변화가 있는 구간에서 변화가 크게 나타났다. 이는 노출시간이 피해에 많은 영향을 주기 때문인 것으로 분석된다.

5. 결 론

도심지 내 가스충전소의 BLEVE로 인한 파이어 볼에 의한 복사열의 피해를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 최악의 시나리오는 온도와 상대습도가 낮은 환경에서 발생되었다. 이러한 원인은 앞서 언급한 Eqs. (3), (4), (7)에 의해서인 것으로 파악되며, 시나리오에서는 기온 -5.9 °C, 상대습도 58%의 환경에서 가스충전소 내 저장탱크의 충전비 90%의 경우 가스충전소를 중심으로 반경 475 m 이내까지 2도 화상의 위험이 있으며, 반경 687 m까지 인간이 복사열에 의한 통증을 느끼며, 반경 987 m까지 통증을 느낄 수 있을 우려가 있었다.
- (2) 최소의 피해가 발생하는 조건으로는 기온 34.8 °C, 상대습도 84%의 환경에서 가스충전소 내 저장탱크의 충전비 30%의 경우로 BLEVE가 발생 시 가스충전소를 중심으로 반경 275 m까지 2도 화상의 위험이 있으며, 반경 402 m까지 인간이 복사열에 의한 통증을 느끼며, 반경 606 m까지 통증을 유발 할 수 있었다. 또한 이 경우에도 주위의 초등학교와 중학교도 2도 화상영역에 들어가는 것으로 확인되었다.

Table 7. Results of Each Scenario

Scenario	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Exposure Time (s)	11	11	11	11	11	11	11	11	11
2nd Degree Burns (m)	475	471	468	439	435	431	420	417	412
Pain (m)	687	682	676	634	629	623	607	601	595
No Pain (m)	987	980	971	910	902	893	869	861	852
Scenario	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Exposure Time (s)	11	11	11	11	11	11	11	11	11
2nd Degree Burns (m)	466	463	459	431	428	424	413	409	405
Pain (m)	674	670	664	623	618	612	596	591	585
No Pain (m)	969	962	954	894	886	877	854	846	837
Scenario	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Exposure Time (s)	11	11	11	11	11	11	11	11	11
2nd Degree Burns (m)	457	454	451	423	420	416	405	401	397
Pain (m)	662	657	652	611	606	600	585	580	574
No Pain (m)	951	944	936	877	869	861	838	830	821
Scenario	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Exposure Time (s)	11	11	11	11	11	11	11	11	11
2nd Degree Burns (m)	448	445	441	415	411	407	397	393	389
Pain (m)	648	644	638	599	594	588	573	568	562
No Pain (m)	932	925	917	859	852	843	821	813	805
Scenario	37	38	39	40	41	42	43	44	45
Exposure Time (s)	11	11	11	11	11	11	11	11	11
2nd Degree Burns (m)	439	435	432	406	402	399	388	385	381
Pain (m)	634	630	625	586	581	576	561	556	550
No Pain (m)	911	905	897	841	834	825	804	796	788
Scenario	46	47	48	49	50	51	52	53	54
Exposure Time (s)	10	10	10	10	10	10	10	10	10
2nd Degree Burns (m)	415	413	409	384	381	378	368	365	361
Pain (m)	604	600	595	559	554	549	535	530	524
No Pain (m)	890	884	877	821	814	806	785	778	770
Scenario	55	56	57	58	59	60	61	62	63
Exposure Time (s)	10	10	10	10	10	10	10	10	10
2nd Degree Burns (m)	405	402	399	375	372	368	359	356	352
Pain (m)	589	585	580	545	540	535	521	517	511
No Pain (m)	868	862	855	801	794	787	766	759	751
Scenario	64	65	66	67	68	69	70	71	72
Exposure Time (s)	10	10	10	10	10	10	10	10	10
2nd Degree Burns (m)	394	391	388	365	362	358	349	346	343
Pain (m)	573	569	565	530	526	521	507	503	498
No Pain (m)	845	839	832	780	773	765	745	739	731
Scenario	73	74	75	76	77	78	79	80	81
Exposure Time (s)	10	10	10	10	10	10	10	10	10
2nd Degree Burns (m)	382	380	377	354	351	348	339	336	333
Pain (m)	556	552	548	514	510	505	493	488	483
No Pain (m)	820	814	807	757	750	743	724	717	709
Scenario	82	83	84	85	86	87	88	89	90
Exposure Time (s)	10	10	10	10	10	10	10	10	10
2nd Degree Burns (m)	370	367	364	343	340	337	328	325	322
Pain (m)	538	534	530	498	494	489	477	472	468
No Pain (m)	793	787	781	732	726	719	700	694	687
Scenario	91	92	93	94	95	96	97	98	99
Exposure Time (s)	9	9	9	9	9	9	9	9	9
2nd Degree Burns (m)	345	342	340	319	317	314	306	303	300
Pain (m)	505	501	497	467	464	459	448	444	439
No Pain (m)	764	759	753	706	700	693	675	669	662
Scenario	100	101	102	103	104	105	106	107	108
Exposure Time (s)	9	9	9	9	9	9	9	9	9
2nd Degree Burns (m)	331	329	326	306	304	301	294	291	288
Pain (m)	484	481	477	448	445	441	429	426	421
No Pain (m)	733	728	722	677	671	665	648	642	635
Scenario	109	110	111	112	113	114	115	116	117
Exposure Time (s)	9	9	9	9	9	9	9	9	9
2nd Degree Burns (m)	315	313	310	292	290	287	280	277	275
Pain (m)	462	458	455	427	424	420	410	406	402
No Pain (m)	699	694	688	646	640	634	618	612	606

Table 8. Average Damage Distance According to Fill Rate

Fill Rate (%)	Exposure Time (sec)	2nd Degree Burns (m / %)	Pain (m / %)	No Pain (m / %)
70 ~ 90	11	0.42	0.6	0.87
65 ~ 70	10 ~ 11	4.29	5.53	3.91
45 ~ 65	10	0.53	0.76	1.12
40 ~ 45	9 ~ 10	4.67	6.13	5.29
30 ~ 40	9	1.37	2	3.02

(3) 저장탱크의 충전비 변화에 따른 피해범위 예측결과 충전비가 1% 변화 될 경우 2도 화상의 우려가 있는 영역은 충전비 30~40%에서 평균 1.37 m, 40~45%에서 평균 4.67 m, 45~65%에서 평균 0.53 m, 65~70%에서 평균 4.29 m, 70~90%에서 평균 0.42 m의 피해반경 변화를 보여주었다.

또한, 충전비가 1% 변화 될 경우 통증영역은 충전비 30~40%에서 평균 2 m, 40~45%에서 평균 6.13 m, 45~65%에서 평균 0.76 m, 65~70%에서 평균 5.53 m, 70~90%에서 평균 0.6 m의 피해반경 변화를 보여주었으며, 충전비가 1% 변화 될 경우 통증을 느낄 수 있는 영역은 충전비 30~40%에서 평균 3.02 m, 40~45%에서 평균 5.29 m, 45~65%에서 평균 1.12 m, 65~70%에서 평균 3.91 m, 70~90%에서 평균 0.87 m의 피해반경 변화를 보여주었다.

이러한 변화는 2도 화상영역과 통증영역의 경우 BLEVE로 인한 파이어 볼 지속시간에 의한 피해기준 복사열량의 변화로 인한 차이가 주요 변수로 작용되었으며, 통증을 느낄 수 있는 영역은 피해기준 복사열량의 차이가 없음에도 복사열 노출시간의 변화부분에서 큰 차이가 발생됨을 보여준다.

도심지의 경우 주위에 건축물과 유동인구가 많다는 특성이 있다. 따라서, 도심지 내 가스충전소에서 폭발사고가 발생할 경우 주변에 많은 피해를 유발할 수 있다. 이에 대비하여 액화석유가스의 안전관리 및 사업법 시행규칙에서 명시하고 있는 안전거리가 24~39 m이므로 충분한 안전거리가 확보되도록 재검토하여야 하며 특히 피해영향거리는 해당 지역의 기후에도 영향을 받으므로 지역별 기후에 의한 안전거리 기준을 새롭게 정립함이 필요하다.

References

Federal Emergency Management Agency (FEMA), U.S. Department of Transportation (DOT), and U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (1990). *Handbook of chemical hazard analysis procedures*. pp. 5-8.

Hassani, M., Chaib, R., and Bouzerara, R. (2018). Reduction of the vulnerability zone of a major industrial risk. Case of BLEVE in LPG storage sphere Hassi R'Mel,

Algeria. *RECENT J.*, Vol. 55, pp. 97-107.

Hurley, M.J. (2016). *SFPE handbook of fire protection engineering* (5th ed.). Springer.

Jones, R., Lehr, W., Simecek-Beatty D., and Reynolds R.M. (2013). *ALOHA technical documentation*. NOAA Technical Memorandum NOS OR&R 43, pp. 65-69.

Ko, J.S. (2012). Study on probabilistic analysis for fire · explosion accidents of LPG vaporizer with jet fire. *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 26, No. 4, pp. 31-41.

Korea Energy Economics Institute (KEEI). (2018). *Year book of energy statistics 2018*.

Mannan, S., and Lees, F.P. (2005). *Lees' loss prevention in the process industries* (3rd ed.). Elsevier.

Moritz, A.R., and Henriques, F.C. (1947). Studies of thermal injury: II. The relative importance of time and surface temperature in the causation of cutaneous burns. *The American Journal of Pathology*, Vol. 23, No.5, pp.695-720.

O'Sullivan, S., and Jagger, S. (2004). *Human vulnerability to thermal radiation offshore*. Health & Safety Laboratory, pp. 2-23.

Perry, R.H., and Green, D.W. (2008). *Perry's chemical engineers handbook* (8th ed.). New York, NY, USA: McGraw-Hill.

Rew, P.J. (1997). *LD₅₀ equivalent for the effect of thermal radiation on humans*. Sudbury, UK: HSE Books.

Roh, S.K., Jun, S.W, Kang, T.H., and Seo, Y.M. (1998). Planning for safety control on LPG distribution depot. *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 12, No. 4, pp. 21-30.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA), and National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2007). *ALOHA user's manual*.

Received	June 2, 2020
Revised	June 3, 2020
Accepted	June 25, 2020