

폭발방지를 고려한 LPG 저장탱크 최적설계

임사환*, 허용정**, 손석우**, 임재기**

*한국기술교육대학교 기계공학과

**한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부

e-mail:leemsahwan@kut.ac.kr

The Optimal Design of Explosion Prevention for LPG Storage Tank

Sa-Hwan Leem*, Yong-Jeong Huh**, Seok-Woo Son**, Jae-Ki Lim**

*Department of Mechanical Engineering, KUT

**School of Mechatronics Engineering, KUT

abstract

The utilization of LPG(Liquefied Petroleum Gas) is increasing as an environmental-friendly fuel in all countries making green growth new paradigm, and use of gas is spread fast as motor fuels to decrease air pollution. Loss of lives by explosion and fire is happening every year as gas use increases, and gas accident in large scale storage property is causing serious problems socially. To minimize this problem, underground containment type storage tank is being presented as an alternative recently.

In this study, to minimize explosion occurrence in underground containment type storage tank, the suitable storage tank is designed to consider explosion prevention that makes exposure surface area minimize in confined contents volume and flame to construct storage tank by the most suitable condition in the underground containment room. As a result of the design of storage tank having the most suitable condition by this research, underground containment space was minimized on diameter 3m, length 4.83m in 20 tons storage tank and its safety was improved as exposure surface area in flame decreased by 89.4%, compared with the existent storage tank.

1. 서론

미국, EU(유럽연합), 일본, 중국 등은 2000년도 이 후부터 자동차의 이산화탄소 배출 허용기준과 연비 기준을 크게 강화하고 있다.[1] 이는 자동차 부문이 국가 에너지소비의 19.3%를 차지하고 있으며, 타 부문보다 감축 여력이 큰 편이기 때문이다.[2]

독일의 경우 2004년 보급된 LPG 차량 수가 3만 여대, LPG 충전소 600여개에 불과했던 것이 2006년에는 각각 7만여대의 LPG 차량 및 1000여개의 충전

소로 확장되었다.[3]

녹색성장을 위한 에너지원으로서 LPG는 자동차 연료로 사용하면서 대도시의 대기환경 개선을 위해 적용되고 있으며 대기 오염물질을 저감시키는데 효과적인 것으로 입증되고 있다.

표 1에서 보듯이 운송용으로 사용되는 LPG량이 점진적으로 년 평균 3.9%씩 증가하고 있다.[4,5]

이를 입증하듯, 국내 LPG 충전소는 최근 10년 동안 3배정도 증가하였으며, LPG충전시설 안전관리자

[표 1] The state of LPG Consumption

units : 1000ton

Section	2004	2005	2006	2007	2008	Rate of increase(%)
Business	2,065	2,184	2,081	1,911	1,679	△5.4
City gas	75	96	69	62	178	2.8
Traffic	3,860	3,968	4,069	4,366	4,379	3.9
Industrial	481	509	504	637	650	4.2
Fuel	1,226	1,236	1,445	1,516	2,045	13.6

양성교육 과정의 이수자도 최근에 들어 급격한 증가세를 보이고 있다.[4] 하지만 가스는 물리적 특성상 무색, 무취로 형태가 없어 검지하기가 어려워 안전관리자가 상주하고 있는 대단위 시설에서도 누출로 인한 화재 및 폭발의 사고가 발생하고 있다.

액화석유가스 자동차는 충전소가 대도시 근교에서 운용되고 있으며, 1998년에 발생한 익산충전소(UVCE)와 부천충전소(BLEVE)는 LPG 충전소에서 발생한 대표적인 안전사고로서 인명피해와 막대한 재산손실을 초래하였다.[6, 7]

박명섭(1999) 등의 연구에 따르면 지상저장탱크의 경우 VCE와 외부 열원에 의한 BLEVE 그리고 Pool fire에 의한 열 영향이 가장 큰 피해 발생요인으로 밝혀졌다. 또한, FTA 방법을 이용한 빈도분석 결과 LPG 누출사고가 발생할 빈도(frequency)는 약 $5.42 \times 10^{-2}/\text{yr}$ 정도로 나타났으며, ETA 결과 LPG 누출사고가 VCE 형태로 폭발사고로 발전될 수 있는 빈도는 약 $2.19 \times 10^{-2}/\text{yr}$ 정도로 나타났다.[8]

이진한(2006) 등의 연구에서 LPG 충전소가 법적 최소기준을 만족할 경우 BLEVE 발생빈도는 약 $2.4 \times 10^{-5}/\text{yr}$ 로 예측되었다. 이는 국내 1,000개의 충전소가 있다고 가정할 때 25년에 1회 꼴로 탱크로리 BLEVE 사고가 발생할 수 있음을 나타낸다.[9]

이승림(2002)은 지상에 설치되어 있는 저장탱크는 외부화염에 의해 용기표면 온도가 873K 정도에서 BLEVE가 발생한다고 하였다.[10]

이러한 연구를 바탕으로 안전사고를 예방하기 위하여 액화석유가스의 안전관리 및 사업법 시행규칙 제10조(액화석유가스의 충전사업 등의 시설기준 및 기술기준)제1항의 규정에 의한 저장탱크의 설치는 지상형 및 지하형으로 규정하고 있다.[11]

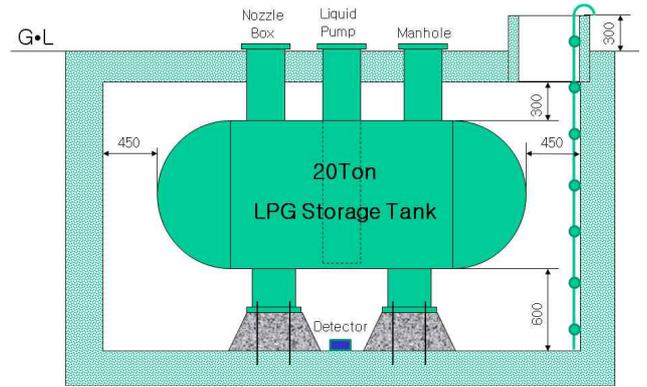
현재 LPG 충전시설에 설치되어 있는 저장탱크의 65%정도가 자동차 충전소에 설치되어 있으며, 대부분이 지하매몰형으로 설치되어 있어 저장탱크의 구조적 결함을 수시로 점검하기 어려운 실정이다.[4]

법·규정에 의해 설치된 지상형 저장탱크는 가스 누출로 인한 UVCE와 BLEVE를 유발할 수 있으며, 지하매몰형은 부식 등에 의한 위험성과 경제성이 취약하다.[8,12,13]

이를 해결하기 위한 방안으로 최근 지상형과 지하매몰형의 위험성과 경제성에 대한 모순문제를 해결하기 위하여 그림 1과 같은 지하격납형 저장탱크를 TRIZ 기법을 활용하여 제안하였다.[14]

따라서 본 연구에서는 지하격납실에 저장탱크를

최적으로 시공하기 위하여 한정된 내용적과 화염에 노출되는 표면적을 최소화 하는 폭발방지를 고려한 최적의 저장탱크를 설계하여 안전성 향상에 기여하고자 한다.

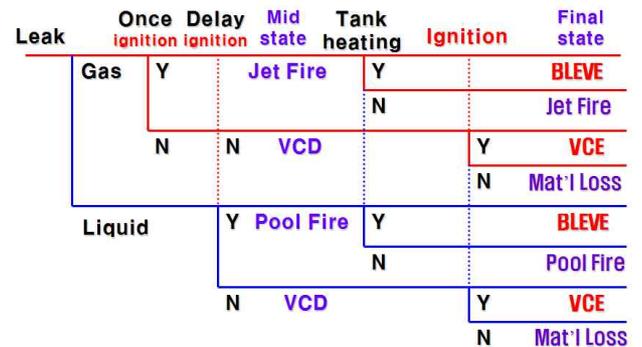


[그림 1] Underground containment storage tank.

2. 이론

LPG충전소에서 발생한 폭발 사고형태는 증기운폭발(VCE)과 비등액체팽창증기폭발(BLEVE)이 대표적이다.

액화석유가스를 대량으로 저장·취급하고 있는 충전·집단·저장시설에서 발생하는 대표적인 사고의 형태는 그림 2와 같은 누출원과 점화원 등에 의하여 여러 가지 형태로 발생한다.



[그림 2] Event Tree Analysis of LP Gas Filling System.

2.1. 증기운폭발(VCE)

LPG저장시설에서의 폭발 사고형태는 증기운폭발(VCE : Vapor Cloud Explosion)과 비등액체팽창증기폭발로 대별되며, 증기운폭발은 가연성 가스가 유출되어 대기중의 공기와 혼합하여 폭발성 증기운(Vapor Cloud)을 형성하고 이때 착화원에 의하여 화구(Fire Ball)형태로 착화 폭발하는 것을 말한

다.[15]

2.2. 비등액체팽창증기폭발(BLEVE)

BLEVE(Boiling liquid expanding vapor explosion : 沸騰液體膨脹蒸氣爆發)[16]는 용기폭발의 대표적인 사고로서 액체 혹은 가압하에서 액화된 다량의 물질이 순간적으로 방출되면서 2차 피해를 발생시키게 되는데, 용기 파열시 용기내 다량의 물질이 폭발적으로 증발하여 과압을 형성하고 파편이 비산하게 된다.[17]

2.3. 내용적

저장탱크가 차지하는 용적은 식(1)로 계산하고, 내용적은 식(2)로 계산할 수 있다.

$$V = \frac{\pi D^2}{4} \times L + \frac{\pi D^3}{24} \times 2 \tag{1}$$

여기서, V는 용적[m³], D는 탱크지름[m], L은 탱크동체길이(Tangent Line) 포함[m]이다.

$$W = 0.9 \times d \times V \tag{2}$$

여기서, W는 저장탱크 저장능력[ton], d는 40℃에서의 액밀도[ton/m³ or kg/l], V는 저장탱크의 내용적[m³]이다.

2.4. 표면적

저장탱크 표면적은 식(3)로 계산할 수 있다.

$$A = (\pi \times D \times L) + (0.69 \times \pi \times D^2) \tag{3}$$

여기서, A는 저장탱크 표면적[m²], D는 저장탱크 외경[m], L은 탱크동체길이(Tangent Line) 포함[m]이다.

3. 결과

지하격납실에서의 폭발을 방지하기 위해서는 격납용적 대비 저장탱크 용량을 최대로 하여 공간을 최소화하는 것이 가장 효과적이다.

국내 LPG충전소에 설치되어 있는 저장탱크는 1788기이며, 내용적 계산은 식(1)을 이용하여 계산할 수 있으며, 식(1)을 식(2)에 대입하여 풀면, 저장량을 구할 수 있다.

또한, 외부화염에 의한 폭발가능성을 줄이기 위한 표면적 계산은 식(3)을 이용하여 계산할 수 있다.

표 2는 저장탱크의 요목표이며, 식(1), (2), (3)에 의해 계산된 값이다.

기존에 설치되어 있는 946기의 20ton 저장탱크는 지름 2.5m이며, 지하격납실의 공간에 대한 값은 그림 1에서와 같은 작업공간을 합산한 것이다.

3.1. 내용적

충전소에서 운용하는 저장탱크에서 가장 많이 설치되어 있는 20ton에 대하여 설계하면 다음과 같다.

[표 2] Optimal design data for 20ton LPG storage tank.

D	L	V	W _{liquid}	t	A	V _{outside}	W _{tank}	V _{containment}	Space	L/D
2.0	12.44	41.18	20.01	9.28	87.72	41.96	6.210	122.23	80.26	6.22
2.1	11.19	41.18	20.01	9.75	84.25	41.97	6.225	119.89	77.92	5.33
2.2	10.1	41.18	20.01	10.21	81.14	41.97	6.252	117.92	75.94	4.59
2.3	9.14	41.16	20.00	10.67	78.34	41.96	6.278	116.23	74.27	3.97
2.4	8.3	41.17	20.00	11.14	75.88	41.97	6.312	114.91	72.94	3.46
2.5	7.55	41.15	20.00	11.60	73.65	41.96	6.345	113.80	71.85	3.02
2.6	6.89	41.18	20.01	12.07	71.73	42.00	6.387	113.04	71.05	2.65
2.7	6.29	41.17	20.01	12.53	69.95	41.98	6.426	112.39	70.41	2.33
2.8	5.75	41.15	20.00	12.99	68.36	41.97	6.468	111.94	69.96	2.05
2.9	5.27	41.19	20.02	13.46	67.03	42.02	6.522	111.79	69.77	1.82
3.0	4.83	41.21	20.03	13.92	65.82	42.05	6.575	111.76	69.71	1.61
3.1	4.42	41.16	20.00	14.39	64.67	42.00	6.622	111.74	69.74	1.43
3.2	4.05	41.15	20.00	14.85	63.70	42.00	6.678	111.96	69.96	1.27
3.3	3.72	41.23	20.04	15.32	62.97	42.08	6.751	112.49	70.41	1.13
3.4	3.4	41.16	20.00	15.78	62.18	42.02	6.807	112.87	70.85	1.00

$$V = \frac{\pi \cdot 3^2}{4} \times 4.83 + \frac{\pi \cdot 3^3}{24} \times 2 = 41.15 \text{ m}^3$$

$$W = 0.9 \times 0.54 \times 41.15 = 20 \text{ ton}$$

3.2. 표면적

국내 가장 많은 저장탱크 20ton에 대하여 외부화염에 의한 폭발사고를 효과적으로 줄이기 위한 저장탱크의 표면적 설계는 다음과 같다.

$$A = (\pi \times 3 \times 4.83) + (0.69 \times \pi \times 3^2) = 65.82 \text{ m}^2$$

4. 결론

본 연구는 LPG충전소에서 발생하는 VCE와 BLEVE에 의한 피해를 최소화하기 위한 방안으로 국내 가장 많이 설치되어 있는 20ton에 대한 저장탱크의 최적화에 관한 것이다.

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 20ton 저장탱크의 지름은 3m, 길이는 4.83m일 때, 표면적이 65.82m²로 계산되었다. 이는 기존에 시공되어 있고 현재 생산되고 있는 지름 2.5m, 길이 7.55m에 비하여 화염이 노출되는 표면적이 89.4%로 줄어들어 안전성이 향상되었다.

2. 폭발방지를 위하여 지하격납실의 공간에 대하여 계산하면, 본 연구에서 도출한 저장탱크가 가장 적은 공간을 나타내고 있다.

참고문헌

- [1] <http://www.keei.re.kr>
- [2] OECD, Integrating Environment and Economy, Progress in the 1990s, 1996.
- [3] So-Young Park, "German gas market trends - LPG gas increasing popularity of alternative fuels", The Gas Safety Journal, Vol.35, March, pp.77-80, 2009.
- [4] Korea Gas Safety Corporation, Technical Inspection & Advisory Service Division, "High-pressure Gas Statistics", 2009.
- [5] Korea Statistical Information System Consumption data of Energy source. <http://kosis.nso.go.kr>
- [6] In-Tae Kim, In-Won Kim, Hee-Oeul Song, "A Study on the Overpressure Estimation of BLEVE", Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 4, No. 1, March, pp.69-76, 2000.
- [7] Seung-Lim Lee and Young-Soon Lee, "A Study on the Probability of BLEVE of Above-ground LP Gas Storage Tanks Exposed to External Fire", KIGAS, Vol. 7, No. 1, March, pp.19-23, 2003.
- [8] Myung-Seop Park, Jae-Min Seo, Jung-Woo Lee, Ky-Soo Kim, Sung-Bin Kim, Jae-Wook Ko and Dong-Il Shin, "A Study for Risk Assessment of LPG Storage Facilities", KIGAS, Vol.3, No.3, December, pp.9-16, 1999.
- [9] Jin Han Lee, Kwang Soo Yu, Kyo Shik Park, "Availability Analysis of Safety Devices installed for Preventing Accidental Events in the LPG Refueling Station", Journal of the Korean Institute of Gas, Vol.10, No.1, March, pp.26-31, 2006.
- [10] Seung-Lim Lee, "A Study on the Probability of BLEVE of Aboveground LP Gas Storage Tanks Exposed to External Fire", Seoul National University of Technology, Thesis for Master's Degree, 2001.
- [11] Korea Gas Safety Corporation, "Liquefied Petroleum Gas Safety Control and Business Law", 2007.
- [12] Sa-Hwan Leem, Yong-Jeong Huh and Jong-Rark Lee, "A Study on the Possibility of BLEVE and UVCE for LPG Storage Tank of Underground Containment Type", 2008 Proceedings of The KASI Spring Conference, 9(1), 313-315, 2008.
- [13] Sa-Hwan Leem and Yong-Jeong Huh, "A Study on the Quantitative Analysis and Estimation for Surround Building caused by Vapor Cloud Explosion(VCE) in LPG Filling Station", KOSOS, Vol.25, No.1, pp.44-49, 2010.
- [14] Sa-Hwan Leem and Yong-Jeong Huh, "Improvement for installation technology of LPG storage tank using TRIZ", Proceedings of Global TRIZ Conference 2010, 2010.
- [15] CCPS, "Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosion, Flash Fire and BLEVE", AIChE, New York, 1994.
- [16] Reid, R. C., "Some Theories on Boiling Liquid Expanding Vapor Explosions", Fire, March, pp.525-526, 1980
- [17] A. M. Bisk and M. H. Cunningham, "The boiling Liquid Expanding Vapor Explosion", J. Loss Prev. Process Ind., 7(6), 474-480, 1994.