

LCNG 충전소의 위험요인 분석

이수경 · 송동우 · 전보연
서울산업대학교 안전공학과

Risk Factors in LCNG Refueling Station

Sukyung Lee, Dongwoo Song, Boyeon Jeon
Seoul National University of Technology

1. 서론

21세기가 도래함으로 환경에 대한 관심이 깊어지고 산업도 그에 발 맞춰 적절한 기준과 법에 맞추어서 함께 발전하고 있다. 에너지도 이전의 환경오염의 주범이라는 불명예를 받기 위해 여러 각도에서 대체 에너지 연구가 진척 되어왔다. 최근 들어 대체 에너지의 이용이라는 측면에서 선진국을 포함하는 세계의 여러 국가에서는 청정연료로서 천연가스를 가장 폭 넓게 이용하고 있고 우리나라도 최근에 사용이 급증하여 새로운 에너지원의 하나로 자리 잡고 있다. 특히 자동차 연료로서 천연가스는 배기가스에 광학 스모그를 유발시키는 탄화수소의 함량이 적고, CO, CO₂, SOx, NOx도 적어 지구 온난화 방지대책으로도 기대되는 연료로 각광 받고 있다. 허나 저장효율이 낮아 고압의 가스 상태로 이용되어야 하는 단점을 남기고 있다.

천연가스자동차의 연료는 압축된 압축천연가스(Compressed Natural Gas, CNG)를 사용하고 있으며, 이를 위해서는 연료의 공급시설, 즉 충전소의 설치가 동시에 진행되어야 하며, CNG의 경우 천연가스를 고압으로 압축, 저장한 후 자동차에 충전하므로 압축에 따른 압축일, 고압가스 저장용기와 충전소의 설치 및 유지에 많은 비용이 든다. 최근 들어 그에 대한 해결책으로 저온, 저압의 LNG를 액체펌프로 가압한 후, 기화기에서 상온, 고압(25MPa)의 CNG로 기화시켜 디스펜서를 통해 천연가스 자동차(NGV)에 탑재된 연료 용기에 충전하는 LCNG시스템 개발이 진행중이다. 이러한 충전시스템은 보다 많은 지역에 충전소 건설을 가능하게 해주고 또한 설치 진행중인 CNG충전소의 문제점을 해결해 줄 수 있어 향후 압축천연가스 충전시스템의 보급에 큰 힘이 될 것이다. LCNG 충전시스템은 LNG 와 CNG를 동시에 취급하는 설비이므로 기존의 CNG충전설비와는 다른 새로운 위험요인이 추가된다.

2. LCNG충전소의 구성과 위험요인

2-1 LNG 저장탱크 및 LNG 탱크로리

LNG는 2개의 지상수평형탱크(above ground horizontal storage tank)에 저장되어 있고, 28,500gallon의 같은 용량이 각각 저장되어 있다. 경계벽으로부터 125피트 떨어져 있다.

LNG 저장탱크는 이중벽이고 이중벽 사이에는 진공상태로 1피트의 두께로 펄라이트(Perlite)단열재가 충전되어 있다. 내벽은 1/2인치 스테인레스강 이고 외벽은 1/4인치 탄소강으로 만들어졌다. 90psi의 압력이 양 저장탱크의 집합관(header)에 걸린다. 압력방출밸브는 100 psi, 파열판은 110psi로 설정되고, 레벨 센서가 각각의 탱크에 설치된다. 8인치 두께의 콘크리트 방유제(62.2 × 24.25 × 5 ft)를 3면에 조그만 개구부를 가지는 8피트 높이 까지 쌓았다. 오수 웅덩이는 3x4x3ft이고 6인치 두께의 콘크리트 방폭벽을 두 탱크 사이에 설치했다. 방유제의 바닥은 9인치 두께 콘크리트로 했고 오수 웅덩이 펌프는 방폭형 모터를 사용했다.

Praxair가스회사는 LNG를 6psi 압력하의 10,700gallon의 탱크로리로 Metro에 공급한다. 3인치 액체 충전라인과 2인치 증기 회수라인이 LNG를 충전하는데 사용된다.

LNG저장탱크의 증기는 CNG압축기에 공급되어 4,000psig로 압축되고 이 고압의 가스는 캐스캐이드 저장시스템으로 저장된다.

2-2 LNG 충전시스템

LNG 충전시스템은 4대의 버스를 4개의 충전기(dispensers)로 동시에 30gpm으로 충전할 수 있다. 각각의 충전 펌프의 용량이 300gpm 인데도 불구하고 Metro펌프는 30-60gpm로 주입한다. on-board탱크가 완전히 차면 자동적으로 주입이 멈춘다. 2개는 LNG 저장탱크에 연결되어 있는 4대의 펌프는 LNG를 디스펜서에 보내는데 사용되고 초저온용 액체질소펌프를 개조하여 사용하고 있다.

LNG버스는 밤에 충전하고 각각의 버스는 125gallon의 용기를 가지고 있다. LNG버스 충전시스템은 1인치 충전 파이프라인과 1인치 증기 회수 파이프라인으로 구성되어 있다. LNG는 용기의 밑 부분으로 인입된다.

2-3 LNG 충전 시스템에 위험요인

- 자동차 충전 중의 누출
- 압축 천연가스 시스템

LNG 충전소에는 증기운 폭발을 포함하여 아래와 같은 잠재위험성을 가지고 있다.

① Flash Fire

누설되었을때 LNG의 일부분은 공기보다 무거운 메탄 구름과 LNG 에어로졸 서스펜션(aerosol suspension) pool을 형성하고 주위 온도하에서 천천히 증발한다. LNG 증기와 에어로졸 구름은 바람속도와 같은 공기, 태양, 지면으로부터 열을 얻는다. 점화되지 않으면 메탄 농도는 가연범위의 하한계 이하가 되고 피해 없이 대기중으로 확산된다. 그러나 점화되면 Flash 화재가 발생하고 화염면(flame front)은 누출원으로 거슬러가게 된다.

flash 화재는 개방공간에서 LNG의 돌발적인 누출, 액체의 증발, 구름 확산과 점화에 의해서 발생한다. 미국 환경청 규정에서 개방 누설은 flash 화재에 대해서 1cm 깊이가 되고, 증기는 하한계로 확산되어야 한다.

EPA은 대부분 기후 조건이 3m/s이며, 0안정등급이 ARS을 모델링하는데 사용되는 것을 요구하고 있다.

② 액면화재 (Pool Fire)

LNG 누출후 점화되면 액면화재(Pool Fire)가 발생한다. 액면화재로부터 복사 에너지는 Pool크기, 연소속도, 화염높이, 투과율, 표면 방사율 및 기하 보기인자(geometric view factor)에 의해서 좌우된다. 미국 환경청(EPA)는 열유속(thermal flux)가 5kw/m² 되는 거리를 요구한다.

③ Jet 화재

안전밸브, 가압 배관 등과 같이 가압된 가연성 증기가 점화되면 Jet화재가 발생한다. 제트화재의 복사에너지는 연소속도, 표면 방사율, 대기 투과율, 기하학적 보기인자(view factor) 및 화염높이 등에 의존한 미국 환경청은 5kw/m²의 열 유속(thermal flux)가 도달하는 거리를 요구한다.

④ 비등액체 팽창 증기폭발 (BLEVE)

BLEVE는 그의 비점이상의 온도에서 액체인 상태로 들어있는 용기가 파열될 때 일어난

다. 결국 BLEVE는 용기 내용물의 폭발적인 증발 현상이다. 만약 이 물질이 가연성 물질일 때에는 연소가 뒤따르거나 증발된 증기운의 폭발이 따른다. 이런 유형의 폭발은 외부에서 화재가 발생하여 휘발성물질이 들어 있는 탱크의 내용물을 가열할 때 일어난다. 탱크가 가열될 때 탱크안에 들어있는 액체의 증기압이 증가되고, 탱크의 구조적 안정성(integrity)은 가열에 의하여 감소된다. 탱크가 파열되면 뜨거운 액체는 폭발적으로 증발한다.

LNG 저장탱크는 냉각 액체 용기이므로, 외부화재의 노출에 인하여 탱크가 가압되지 않는다면 BLEVE의 가능성은 없다.

가압 가스배관에서 단지 일어나는 제트화재도 LNG 충전소에 대한 가능한 다른 누출 시나리오(ARS)의 가능성은 없다. 따라서 flash 화재와 액면화재(pool fire)가 LNG충전소의 다른 누출 시나리오(ARS)이다.

3. 충전소의 피해 예측 분석

이 장에서는 앞에서 제시한 휴스톤에 있는 Metro's Fallbrook LNG 버스충전소를 대상으로 피해예측분석(Consequence Analysis)을 하고자 한다.

미국의 환경청(EPA, Environment Protection Agency)은 가연성 물질을 포함하는 공정에 대해서 적어도 한개의 최악의 시나리오(WCS, worst case scenario)에 대하여 피해예측 평가를 하고, WCS에 대한 피해거리(Impact Distance)가 주택가, 학교, 병원, 업무용 빌딩 등의 Public Receptor 또는 국립 또는 주립 공원, 숲, 산과 같은 자연지역의 Environment Receptor에 영향을 미치면, 적어도 하나의 다른누출시나리오(ARS, Alternative Release Scenario)에 대해 반드시 피해예측평가를 하도록 하고 있다.

가연성 화학물질에 대한 최악의 시나리오(WCS)는 증기운폭발(Vapor Cloud Explosion)이다. 다른누출시나리오(ARS)는 Flash Fire, 액면화재(pool fire), 개방증기운폭발(Unconfined Vapor Cloud Explosion, UVCE), 비등액체팽창증기폭발(BLEVE, Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) 등이 고려된다.

가연성 물질을 모델링에 대한 endpoint는 연구된 시나리오에 좌우된다. EPA는 다양한 시나리오에 대하여 아래의 값들을 endpoint로 사용한다. endpoint는 위험성 물질의 돌발적인 누출로 인한 위험지역을 정의하는 오염물질의 농도 또는 위험영향(Hazard Effect)를 의미한다.

3.1 최악의 경우 시나리오(Worst Case Scenarios, WCS) 분석

상당한 거리(수백 피트)떨어져 있는 하나 이상의 LNG 누출원을 가지는 설비에 대해서, 미국의 환경청(EPA)은 많은 최악의 경우 시나리오(WCS)를 모델링하기를 요구한다. 만약에 추가된 최악의 경우 시나리오(WCS)가 첫 번째 WCS에 의한 영향보다 더 Public Receptor 또는 Environmental Receptor에 더 영향을 미치면 추가된 WCS도 보고해야 한다고 규정하고 있다.

LNG와 같은 가연성물질의 WCS는 커다란 용기 또는 배관에서 LNG가 누출되어 증기운폭발(Vapor Cloud Explosion)이다. 어떠한 수동적인 대책도 고려되지 않는다.

그런데 이와같은 시나리오는 LNG 충전설비에서는 발생할 가능성이 거의 없다. 그 이유는 첫 번째로 LNG 에 대한 실험적 또는 우발적인 개방증기운폭발(UVCE, Unconfined Vapor Cloud Explosion)이 일어난 사례가 없다. 공기중에 메탄을 양론혼합기체로 만들어 개방상

태에서 폭발을 시도했으나 실패했다. 더욱이 1944년 오하이오의 크리버랜드(Cleveland)에서 발생한 대규모 LNG누출 때에도 증기운폭발은 일어나지 않았다. LNG가 점화전에 거리와 하수구로 유입되어 소규모이고 밀폐된 하수구 폭발이 일어난 적이 있다. LNG는 낮은 온도 상태로 저장되기 때문에 즉시 증기운을 형성하지 못한다. 냉동 손실을 시나리오에 고려해야한다고 EPA는 제안하고 있다. 그러나 LNG를 기체상태로 공기중에 누출시키는데 많은 에너지를 필요하고 탱크의 단열과 방유제 바닥의 냉각으로 인하여 긴 시간을 필요로 한다. 기체상태가 된후에 단지 증기운의 일부만이 가연범위 농도 안에 있게 된다. 첨가해서 냉동손실의 경우 저장탱크의 방출밸브는 탱크안의 압력보다 낮아지고, 그 결과 남아 있는 액체는 증발에 의해서 냉각된다. 따라서 LNG 충전소에 대한 증기운폭발은 최악의 경우 시나리오가 될 수 가 없으므로 보다 가능성이 높은 다른시나리오(ARS)의 피해영향을 평가하여야 한다.

WCS분석에 대하여 1.5m/s의 바람속도, F 대기안정등급(atmospheric stability class), 평균습도 50%, 대기온도는 섭씨25도, 휴스톤의 최고 건구온도(dry-bulb temperature)는 화씨 104도이다.

움직이지 않는 가연성물질의 발생원에 대하여 증기운폭발의 피해예측평가는 TNT 상당방법(TNT-Equivalent Method)과 다 에너지원 방법(Multi-Energy Source Method)이 사용된다.

3-2. 다른 누출 시나리오 (Alternative release scenarios)

① 이송(unloading) 지역에서 직경 3인치이고 20피트 길이인 호스의 파열에 인한 Flash 화재. - 이 누설은 이송지역에서 발생하고 밀폐된 공간이 아니다. 펌프는 LNG를 300gal/min로 이송하고 적어도 그 사람이 이송지역에 있다. 호스의 파열을 감지하는 즉시 이송을 중지시키는 과잉흐름 방지 밸브가 있다. 5분의 누출을 가정하면 개방공간의 pool로부터 증발한 LNG 증기는 하한계가 되고 점화되면 flash 화재가 발생한다. LNG 총 누출량은 5,310 lb (호스에 있는 LNG 양도 포함)이다.

② 28,500gal 저장 탱크의 파열로 인한 밀폐 액면화재 (confined pool fire)
저장탱크 주위의 콘크리트 방유제는 LNG pool의 확산을 제한한다. 방유제는 62.17 × 24.25 × 5ft의 dimension 이다.

방유제에 위치한 LNG와 화재 감지기는 경고를 올린다. 그러나 탱크의 전 LNG가 방유제 안으로 누출되는 것으로 가정한다.

ARS를 분석하기 위하여 전형적인 기후 조건이 사용된다. Metro Fallbrook 충전소가 설치된 곳의 날씨를 1944-1997 수집한 Data는 표 3-4 와 같다.

표 3-4 WEATHER DATA FOR HOUSTON

	1994	1995	1996	1997	30yr. avg. (1961-90)
Average Temperature (°F)	70.1	70.3	69.5	67.3	67.9
Average Wind speed (mph)	8.3	7.6	7.2	5.8	7.9
Predominant Wind direction	SE(105°)	E(92°)	SE(150°)	-	S-SE(150°)
Average Relative humidity (%)					
@ 12 AM	87	85	86	-	85
@ 6 AM	92	90	71	-	90
@ 12 PM	62	59	64	-	60
@ 6 PM	67	64	76	-	63

1994-1996년 까지의 평균 상대습도는 75.25%, 1994-1996년 사이의 평균 바람의 방향은 115.7°(E-SE)

1995-1997동안 평균 온도 20.15°C(69°F) 바람속도 3.07m/s(6.87mph)

표 3-5는 1994-1997까지의 휴스톤의 대기안정도 자료이다.

표 3-5 FREQUENCY OF ATMOSPHERIC STABILITY CLASSES

	A	B	C	D	E	F
Number of Occurrences	304	1752	3171	11856	3399	5798
Frequency of occurrences (%)	1.2	6.7	12.1	45.1	12.9	22.1

Metro ARS에 대한, 아래의 평균주위 조건이 모델이 사용된다.

- 평균 주위 온도 = 20.6 °C
- 습도 = 75%
- 바람속도 = 3.07 m/s
- 바람방향 = 115.7°
- 대기안정도 등급 = D

이 충전설비가 도시에 위치하기 때문에 표면조도인자(Surface Roughness Parameter)는 0.33을 사용한다. 이 인자는 PHST s/w에 사용되고 다른 소프트웨어는 도시주위를 나타내는 다른 인자를 사용한다.

LNG 탱크, 탱크로리 이송지역, 버스 충전지역은 서쪽 담장(fence)로 125피트, 서쪽 담장으로부터 100 피트와 남쪽 담장으로부터 70피트 각각 떨어져 있다.