

LPG충전소 사고사례 분석을 통한 문제점 고찰

윤재건, 장우정

한성대학교 기계시스템공학과

Discussions on the risk of LPG refueling station by accidents analysis

Jae-Kun Yoon, Woo Jung Jang

Hansung University, Dept. of Mechanical Systems Engineering

1. 머리말

지난해 LPG충전소 두 곳에서 큰 폭발사고가 발생하여 LPG충전소의 위험에 대하여 일반의 관심이 크게 고조되었고, 사고 이후 LPG충전소의 안전관리에 대한 기준은 계속 강화되고 있다. 특히 부천에서의 사고는 아직도 원인이 규명되지 않은 채 책임과 보상문제를 위한 재판이 계속되고 있다. 발생가능성이 매우 희박하다던 BLEVE(Boiling Liquid Evaporating Vapor Explosion)폭발을 경험한 많은 사람들도 LPG충전소의 안전관리를 위한 많은 규제와 기준을 제한하고 있다.

LPG충전소는 분명 우리생활과 매우 근접한 위험시설임에 틀림없으나, 그 위험성 때문에 우리의 생활권 역에서 자꾸 내몰려고 할 경우, 충전소 자체의 존재이유가 흔들리게 될지도 모른다. 이즈음 경제성원리에 의한 LPG차량의 급격한 증가는 LPG차량의 소유자뿐 아니라 LPG충전사업자의 수익을 증대시키고는 있으나, 우리 생활주변의 위험의 크기는 분명 증가시키고 있다. 위험과 경제성은 항상 상반되는 기준이며, 결국 어느 정도의 위험을 감수하고 얼마의 경제이득을 볼 것인가는 사회구성원 모두의 어떤 공감대가 필요하며, 안전공학의 많은 이론과 계산은 이런 공감대 형성에 결정적인 역할을 한다.

본 원고에서는 LPG충전소의 사고사례중에서 특히 충전설비의 설치, 보수, 수리, 검사, 해체 등과 관련된 사고를 살펴보고, 부천의 LPG충전소사고가 혹시 이러한 범주에 해당되는 것은 아닌지를 다시 한번 생각해보고자 한다. 사고가 많은 시설에 대해서는 일반적으로 안전검사주기와 방법이 강화되는데, 오히려 빈번한 검사가 자칫 매너리즘에 빠지고 나면, 오히려 사고유발요인으로 작용하는 것은 아닌가하는 의구심을 낳게 한다.

2. LPG 충전소의 사고사례분석

용기충전소를 포함한 LPG충전소에서의 사고사례는 1969년부터 1997년까지 45건이 정리되어 있으며 이 사고들을 유형별로 분류할 경우 다음과 같다.

- 1) 탱크로리와 저장탱크와의 이·충전시 가스누설에 의한 사고.
- 2) 충전소설비의 검사, 수리, 유지보수 작업 시에 의한 사고.
- 3) LPG차량 오발진에 의한 충전호스 및 충전기 파손사고.

Table 1. The accident examples of LPG storage facility

일시	피해현황	형태별 등급	사고개요
82.10.07	부상 1명 시설 일부 파손	폭발 C급	정비를 위해 떨어진 자동차 용기에서 잔 가스를 제거하기 위하여 산소를 집어넣다가 용기가 폭발한 사고임.
82.12.30	사망 1명	질식 B급	충전소 저장탱크의 플로트 게이지 수리를 위하여 탱크내 가스를 회수하고 약 3시간동안 맨홀을 개방 후 정제통을 연결하고 탱크 내로 사람이 들어갔으나 탱크내 잔 가스에 질식·사망한 사고임.
88.02.27	부상 4명 한옥 1동 전소 (약1,000만원)	질식 C급	충전소 지하 기계실 액펌프 0명이 손상되어 베어링 커버의 그리스 피팅(Grease Fitting)으로 가스가 분출, 채류되어 진동음 원인을 조사하기 위해 지하실에 내려간 피해자가 질식사한 사고임.
91.01.22	중상 2명 경상 9명 충전시설 전소	화재 B급	탱크로리에서 저장탱크로 이송 중 가스압축기에서 가스누설을 발견 계속 이송작업을 실시하며 수리하던 중 누설된 가스가 공기압축기 전기접점의 스파크에 인화 폭발된 것으로 추정.
91.11.01	화상 3명 차량 2대 전소 탱크로리 1대 분소	폭발 B급	신설 충전기로 연결되는 배관에 설치된 압력계 연결부분에서 누설된 가스가 신규충전기 설치를 위한 드릴 또는 나사 가공 작업 시 발생된 스파크에 점화, 폭발 화재가 발생한 사고임.
93.05.11	사망 1명 부상 1명 재산 30만원	파열 B급	용기 내에 잔 가스를 완전히 제거하지 않은 상태에서 20kg LPG용기의 스킵트 부위를 보강하기 위한 용접작업 시 용기가 파열된 사고임.
94.11.18	부상 1명	누설 C급	충전소 기계실내 배관압력계용 중간밸브에서 가스가 누설되는 것을 발견 안전관리자가 수리를 하던 중 그랜드너트가 이탈되어 10분간 가스가 분출되었으며, 분출압력으로 손에 부상을 입은 사고임.
95.06.24		누설 D급	95.6.23 탱크 개방검사 완료후 가스를 탱크로리에서 저장탱크에 이충전 작업중 탱크노즐박스에 부착된 15A드레인 밸브의 노즐 용접부(탱크본체 부착부)에서 균열과 기밀시험 중 액체질소의 초저온 기체가 드레인 노즐로 주입되어 휘성이 발생하여 균열이 발생한 사고임.
96.04.24	경상 2명 동산 450만원	폭발 C급	LPG자동차 충전시설 보수공사 중 충전소 안전관리자가 차량 충전용 디스펜서에 부착된 호스를 카플링에서 분리하여 호스내 잔 가스를 방출시키는 순간 인근에서 용접작업 중이던 용접불꽃에 인화 폭발한 사고임.
96.06.10		누설 D급	디스펜서 1대가 고장나서 제조업체에 A/S를 의뢰 수리를 하기 위해 전단 액밸브를 잠그고 배관을 분리하던 중 밸브에 이물질이 끼어 완전히 차단되지 않아 가스가 누설된 사고임.
97.12.16	중상 1명 경상 1명 동산 35000만원	화재 B급	용기 재검사장에서 부탄용기의 밸브를 탈착하는 과정에서 누출된 잔 가스가 작업장내로 바람에 의해 확산되면서 용접불꽃에 인화, 화재가 발생한 사고임.

이중에서도 특히 설치, 유지보수, 검사, 해체 등과 관련된 사고는 11건으로 Table 1 에 사고사례를 정리하였다.

인간의 행동결함이나 실패에 의한 사고의 원인을 생각해보면 다음과 같은 여러 가지 요인으로 나누어진다.

- 1) 위험판단과 안전하게 작업하는 방법에 대한 지식부족.
- 2) 안전작업을 추진하기 위한 능력 (기능, 신체의 상태 등) 의 부족.
- 3) 안전작업을 추진하려고 하는 의욕의 부족.
- 4) 인간본래의 특성에 기인하는 실수 (Human Error)로 구분할 수 있다.

인간-기계시스템에서 인간의 역할은 기계의 운전과 유지보수에 있으며, 자동화로 인하여 기계의 신뢰도는 갈수록 높아지고 있다. 그러나 모든 인간-기계시스템에서 인간이 수행해야만 하는 기능들은 존재하기 마련이며, 인간이 가지는 많은 과오요인들에 매일 반복되는 동일한 기계작업으로 긴장감이나 위기감이 희박해지는 것이 더해져서 인간의 신뢰도는 상대적으로 낮아진다. 따라서 실질적으로 모든 사고는 인간의 실수에 의해서 일어난다고 할 수 있으며, 그 결과는 작업자 자신이나 설비의 피해뿐 아니라 대형사고를 유발한다.

LPG충전소에서의 LPG 이송작업은 대량의 위험물을 이동시키는 작업으로 위험요인이 크고 통상적으로 매일 2회 이상의 작업이 반복된다. 더욱이 충전소의 저장탱크용량이 탱크로리용량보다 작을 경우, 이송에 소요되는 시간은 측정하기 어렵고, 저장탱크와 탱크로리가 장시간 연결되어 있으므로 탱크로리도 지상저장탱크로 간주해야 한다. 충전소설비의 유지보수나 검사와 관련된 사고의 유형도 전체 충전소사고의 24 % 정도를 차지하는데, 일년에 몇 번 이루어지는 유지보수와 검사작업의 빈도와 매일 2회 이상 이루어지는 이송작업의 빈도를 비교해 볼 때 24 %는 매우 높은 사고발생율이다. 이는 매우 드문 작업빈도로 인하여 작업절차의 표준화가 이루어질 수 없고, 작업자 자신도 작업에 익숙하지 못함으로 인하여 사고발생의 가능성이 높은 것이다.

3. 부천 LPG충전소 사고

부천사고는 98년 9. 11일 14:00경 탱크로리에서 지하저장탱크로 부탄을 이·충전작업중 탱크로리내의 가스가 대량 누출되어 미상의 점화원에 인화하여 화재가 발생하고, 탱크로리가 폭발한 것이다. 화재가 발생하기 직전에 기계실의 배관과 밸브에 대한 정기검사(검사주기 1년)가 이루어 졌다.

대량의 액상의 가스누출이 어느 지점에서 이루어 졌는지가 아직 밝혀지지 않고 있어 직접적인 사고원인은 미궁에 빠져 있다.

사고당시의 모든 기록을 종합하여 한국가스안전공사가 제시한 사고발생시간은 다음과 같다.

14:06 가스누출

14:10 점화원에 의한 화재발생

14:11 소방차 현장도착

14:20 KBS녹화시작

14:25 탱크로리 폭발

화재발생후 탱크로리의 BLEVE폭발까지는 약15분 정도 소요되었다. 소방차에 의한 탱크로리살수가 계속되었음에도 BLEVE폭발을 일으켜 부상자의 대부분은 진화작업중이던 소방대원들이다. 초기누출에 대한 대응이나 화재진압이 불가능했던 것은 초기에 많은 양의 LPG가 누출되어 누출지점의 확인이 불가능했고 따라서 적절한 대응조치가 이루어지지 못한 것이다. 그렇게 많은 양의 LPG 누출지점에 대해서는 밴트밸브나 로리호스부위나로 논의가 압축되었으나 확인을 위한 뚜렷한 증거가 어느 쪽도 제시되지 못하고 있다.

3-1 BLEVE 폭발시의 크기에측

부천의 LPG 충전소 사고에서 탱크로리에 얼마만큼의 양이 BLEVE 현상을 일으켰는지 fire ball의 지름과 fire ball의 지속시간의 측정으로 탱크로리내 LPG의 양을 추정할 수 있다. CPQRA (Chemical Process Quantitative Risk Analysis)의 fire ball 모델식과 ICI(Imperial Chemical Industries)의 fire ball 모델식을 이용하여 산출하였다.

화구(Fire Ball)의 최대직경 = 100m

화구의 지속시간 = 6 sec

I) 화구(Fire Ball)의 최대직경 $D_{max}(m) = 6.48 M^{0.325}$

화구의 지속시간 $t_{BLEVE}(s) = 0.825 M^{0.26}$

M : 액화 저장된 가연성 물질의 양(kg)

II) 화구(Fire Ball)의 최대직경 $D_{max}(m) = 5.8M^{0.33}$

화구의 지속시간 $t_{BLEVE}(s) = 0.45 M^{0.33}$

M : 액화 저장된 가연성 물질의 양(kg)

I)식과 II)식의 계산된 결과를 가지고 부천의 LPG 탱크로리내 저장된 양이 2,000 ~ 5,500 kg 이라는 것을 예상할 수 있다.

3-2 밴트밸브에서의 액상누출량의 계산

액체 배관에서의 누출량은 Bernoulli 및 Torricelli의 식에 의해서 구해질 수 있다.

$$G_L = C_d A \rho \sqrt{\frac{2(P - P_a)}{\rho} + 2gh}$$

G_L = 액체 질량 방사율 (kg/s)

C_d = 방출 계수 (0.61)

A = 방출 구멍 면적 = $\frac{\pi}{4} \times 0.0127^2$ (m^2)

ρ = 액체 밀도 (30°C) = 550 (kg/m^3)

P = 액체 저장 압력 = 5×10^5 (N/m^2)

$$P_a = \text{대기 압력} = 1 \times 10^5 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

$$g = \text{중력 가속도} = 9.81 \text{ (m/s}^2\text{)}$$

$$h = \text{구멍 위의 액체 높이} = 3 \text{ (m)}$$

$$G_L = 0.61 \times \frac{\pi}{4} \times 0.0127^2 \times 550 \times \sqrt{\frac{2(5-1) \times 10^5}{550} + 2 \times 9.81 \times 3} = 1.65 \text{ kg/s}$$

5분 동안의 누출량은 $1.65 \times 5 \times 60 = 495 \text{ kg}$ 이다. 누출량은 대략 500 kg 정도이고 이 정도의 양이 기계실에서 증기로 변할 경우 누출부의 식별이 불가능하다.

4. 맺음말

부천사고는 충전소 폭발사고가 아니라 탱크로리 폭발사고이다. 왜냐하면 충전소내의 지하저장탱크는 폭발하지 않았기 때문이다. BLEVE 폭발과 같은 대형 폭발속에서도 지하저장탱크가 온전한 것으로 미루어 보면 지하저장탱크의 안전성은 좀더 높게 평가해야 한다고 생각한다.

충전소의 위험요인은 지하저장탱크의 용량이 충전소가 취급하는 용량에 비해 작다는 것이고, 그로 인하여 탱크로리가 지상저장탱크 역할을 하고 있다는 것이다. 그러나 충전소의 시설이나 설치기준은 저장탱크의 용량에 의해서만 결정되며, 얼마나 크고 많은 탱크로리가 충전소를 출입하고 정차하느냐는 설치기준에서 고려되지 않는다.

대형 LPG 충전소사고로 인하여 충전소에 대한 안전관리가 크게 강화되고 있다. 안전거리가 증대되었고, 충전용 로딩암설치와 탱크로리 이·충전시 정차 위치에 살수장치 및 물분무장치의 설치를 의무화함으로써 탱크로리를 저장탱크 개념으로 보기 시작하였다.

대량의 액상의 LPG 누출지점이 어디인가가 부천사고의 원인을 밝히는 가장 결정적인 단서가 된다. 이것은 체계적인 사고조사 방법을 도입하여 실제 LPG 충전소에서 simulation을 통하여 밝혀질 수 있다.

참고문헌

1. AIChE-CCPS, "Guideline for Chemical Process Quantitative Risk Analysis", New York, 1987.
2. 김호영, 김성영, "LPG 충전소의 이송작업에 대한 인적과오의 정량적 분석과 효과적 안전작업지도 방안", 사고예방논문집, 삼성화재 위험관리연구소, pp 533~576, 1998.
3. 장우정, 윤재건, "LPG 탱크로리 위험분석", '98추계학술발표회 논문집, 한국산업안전학회, pp 53~58, 1998.
4. "가스시설의 정량적 위험평가", 한국가스안전공사, 1998.
5. 이경덕, 황원준, "LPG 누출시 확산모델을 이용한 화재·폭발영향평가", 사고예

방논문집, 삼성화재 위험관리연구소, pp 175~205, 1998.

6. 김대수, 김홍영, 윤재건, “사고사례분석을 통한 LPG자동차 충전소의 위험요인 도출”, ‘97춘계학술발표회 논문집, 한국산업안전학회, pp 139~144, 1997.
7. “가스사고연감”, 한국가스안전공사, 1996, 1997