

부천 LPG 충전소 사고 원인에 대한 연구

윤재건

한성대학교 안전과학기술연구소
(2001. 7. 23. 접수 / 2001. 8. 27. 채택)

Discussions on the Cause of Bucheon LPG Station Accident

Jae-Kun Yoon

Hansung University, CSST
(Received July 23, 2001 / Accepted August 27, 2001)

Abstracts : Cause of Bucheon LPG refueling station accident could not be clearly verified because of opposite talkings of men responsible for the accident, the actual damaged by BLEVE and fire, and no systematic fire investigation. After two and half years, recently first judgement has been carried out. But competitive arguement is going on and first leak point of massive LPG will not be clearly identified with evidences acquired by now. This accident gave us many instructions and advices. Specially, massive LPG leak can result in pool fire and safety of underground-installed storage tank is proved by no damage in the strong BLEVE.

Key Words : Bucheon LPG station accident, Butane vaporization, BLEVE

1. 서론

아현동 밸브기지 폭발사고(94. 12. 7), 대구 지하철공사장 폭발사고(95. 4. 28), 부천의 LPG충전소 폭발사고(98. 9. 11)는 세계적으로도 그 유래를 찾아보기 힘든 사고들이다. 특히 부천의 LPG충전소 폭발 사고는 충전소의 저장탱크가 아닌 정차중인 탱크로 리의 BLEVE인데, 이의 발생 가능성이 백만분의 일에 미치지 않는 것에 비하면 참으로 믿기 어려운 사고를 경험한 것이다. 대형사고사례는 사고조사와 분석을 통하여 많은 것을 교훈으로 얻을 수 있다. 그러나 부천사고의 직접적인 원인은 아직도 명확히 규명되지 못하고 있다. 사고 조사기법뿐 아니라 사고조사의 체계와 전문성이 구비되어 있지 못하기 때문이다. 따라서 가스안전관리를 위해서는 우선 사고조사의 선진화가 선행되어야 한다.

부천 LPG 충전소 사고의 원인이 미궁에 빠지게 된 것은 부탄의 최초누출지점에 대하여 관련 당사자들의 진술이 엇갈리고, 강력한 BLEVE와 계속된 화재에 의해 사고현장이 훼손되었고, 어느 전문가도

설득력 있는 명확한 설명을 하지 못하기 때문이다. 많은 가스관련 전문가들이 한국가스안전공사의 사고 시나리오에 동의하였다. 이 시나리오는 로리호스 체결부 커플링이 파손되어 최초의 대량 누출이 시작되었다는 것이다. 이 시나리오의 주요한 가정 중에 하나가 Pool화염의 높이가 20m 이상이었던 것이다. 본 연구에서는 이 가정에 대한 고찰을 통하여 부천 충전소사고 원인을 재조명해 보고, 발생하기 어려운 이 사고를 통하여 얻을 수 있는 교훈을 다시 음미해보고자 한다.

2. 사고개요

- 일시 : 98. 9. 11(금) 14:20경
- 장소 : 경기도 부천시 오정구 내동 70번지 대성에너지 충전소
- 피해현황
 - 인명피해 : 사망 1명, 중상 5명, 경상 78명(계 84명)
 - 재산피해 : 약 120억원 (부천시 확인 피해액)
- 시설현황
 - 시설명 : 용기 및 자동차 충전시설

- 지상3층, 지하1층 양식블럭조(3개동 165평)
- 펌 프 : 연로당펌프 : 7.5 HP*1개
- 액중펌프 : 11Kw 500 ℓ/min * 2개
- 콤프레샤 : 15Hp 759 ℓ/min * 1개
- 저장탱크 : 부 탄 39.9톤(70,606 ℓ),
프로판 29.9톤(82,257 ℓ)
- 충전기
- 프로판용기 충전기 : 16연식 * 1세트
- 부탄용기 충전기 : 8연식 * 1세트
- 자동차 충전기 : 복식 4세트
- 탱크로리

구분	프로판	부 탄
용량	15톤	12톤
차량 번호	경기83가8485	경기 9러1291
제조일	'96.10	'93. 4
번호	DYC-L-96-310	YMC-12-008EX
내용적	35,250 l	28,200 l

■ 사고내용 (한국가스안전공사 발표)

◦ 안전관리책임자가 작업 현장을 이석한 사이 탱크로리 운전자가 부탄탱크로리(12톤)에서 지하 매몰형 부탄저장탱크(39.9톤)의 액인입배관의 주밸브가 잠긴 것을 인지하지 못한 상태에서 이충전 작업을 하기 위하여 액체라인과 기체라인의 로리호스 커플링을 체결한 후 이충전 작업을 실시하고 사무실 입구에 설치된 전기 배전판의 압축기 가동스위치를 작동시킨 후 휴게실에서 휴식을 취하던 중 탱크로리내의 압력이 상승하여 체결이 불량한 커플링이 이탈되면서 가스가 누출되어 미상의 점화원에 인화 화재가 발생하였고, 화염이 탱크로리를 집중 가열하여 BLEVE(Boiling Liquid Evaporating Vapor Explosion)현상으로 탱크로리가 폭발된 것으로 추정되어진다. BLEVE는 액체가연물질을 저장하는 탱크 외부의 화재로 인하여 탱크내부의 증기압력이 상승하여 탱크의 인장강도(가열되어 약해진)보다 커질 경우에 순간적으로 탱크가 과열하면서 큰 화구(Fire Ball)를 형성하는 폭발을 의미한다.

Photo 1은 BLEVE에 의한 Fire Ball을 나타낸다. Fire Ball의 크기와 지속시간으로 폭발한 LPG의 양을 추정할 수 있는데, CPQRA(Chemical Process Quantitative Risk Analysis)의 fire ball 모델식과 ICI(Imperial Chemical Industries)의 fire ball 모델식을 이용하였다.⁹⁾

화구(Fire Ball)의 최대직경 = 100m

화구의 지속시간 = 6sec



Photo 1. Fire Ball

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 계산 결과로부터 BLEVE를 일으킨 LPG 탱크로리내 저장된 양이 2,000~5,500kg으로 예상할 수 있다.

3. 사고원인에 대한 고찰

검찰측 공소내용을 살펴보면 한국가스안전공사 직원은 충전소의 기계실에서 전기방식, 접지저항측정, 경보기작동, 안전밸브작동시험, 긴급차단작동시험, 로리호스, 배관기밀시험(액체라인배관) 등 정기검사를 함에 있어 검사준비, 검사과정 및 검사 완료시까지 충전소 직원은 입회만 시키고 직접 완전하게 하여야 함에도 안전검사 전문가로서 업무상 주의의무에 반하여, 충전소 안전관리자에게 밴트밸브를 통하여 질소가스를 배출하라는 지시만 하고 검사가 완료되지 아니한 상태에서 현장을 이탈한 업무상 과실이 있다는 것과 최초누출지점은 부탄하역라인 밴트밸브라는 것이다.

한국가스안전공사측의 견해는 이와 다른데, 만약 부탄탱크측 밴트밸브가 열렸다면 부탄탱크 로리호스 연결장치에 연결하여 탱크로리 액체밸브를 여는 즉시 밴트밸브에서 가스누출과 동시에 백색의 연무가 대기중으로 4~5m 치솟고 누출소음 또한 100dB 이상 되므로 그 즉시 탱크로리 밸브를 차단하면 누출

이 중단될 수 있으므로 일시적인 누출은 있을 수 있으나 지속적인 누출은 없다는 것이다. 따라서 밸브에서의 누출이 아니고 로리호스에서 누출이라는 것이다. 그러나 로리호스의 커플링이 빠질 경우에도 액상의 가스 누출과 동시에 백색의 분무가 수평으로 10m 이상 분출되며 누출소음이 100dB 이상 되므로 누출 순간은 누군가에 의해서 목격되지 않을 수 없다.

결국 밸브나 로리호스의 연결부에서의 대량의 액상가스 누출가능성은 마찬가지로 판단되며, 따라서 분무의 확실한 목격자가 없다면, 애초의 상황설정, 즉 액상가스의 대량분무누출이 없었을 수도 있다고 사료된다.

또한 당시 폭발 장면으로 보아 대형화재가 발생하려면 이론적으로 10분 동안 3톤 이상의 LPG가 연소되어야 하나 내경 12.7mm의 밸브에서 누출되는 최대량은 972 kg이므로 대형화재가 일어날 수 없다는 것이다. 따라서 사고 당시 여러 가지 상황을 고려하여 한국가스안전공사측은 탱크로리호스의 연결부위의 완전한 체결 및 이탈 등에 의한 누출 가능성에 중점을 두고 있다. 로리호스 커플러가 이탈되어 누출되는 이론적인 부탄량은 2,880 kg으로 대형화재의 발생이 가능하다. 커플러의 상부 및 잠금 고리가 파손된 상태로 발견되었으며 이는 불완전하게 체결된 상태에서 고압을 견디지 못한 커플링이 어긋나 이탈될 때 깨어진 현상과 유사하다는 것이다. 또한 기계실내의 누출 가능성으로 본다면 배관의 플랜지 연결부 또는 밸브 등의 소손으로 인하여 지하저장탱크로부터 가스가 누출 될 경우에는 지하저장탱크 인입배관 탱크입구에 역류방지밸브가 부착되어 있고 긴급차단장치작동 및 전원공급차단으로 누출량은 배관내에 잔류하는 극소량이 되므로 대형사고가 발생될 수 없다는 것이다.

사고시 촬영된 영상에 20m 높이의 대형화재가 일어나고 있었고, 이 높이의 화재는 LPG의 화재 바닥 직경이 7~8m정도 되어야 한다는 것의 근거는 다음과 같다.⁹⁾

$$\frac{H}{D} = 42 \left[\frac{b_r}{\rho_a} \sqrt{gD} \right]^{0.61}$$

- H : 화재의 가시적 높이(m)
- D : 화염의 바닥 직경(m)
- b_r : LPG의 연소속도 ($kg/m^2 \cdot sec$)
- ρ_a : 대기의 밀도 (kg/m^3)
- g : 중력가속도 (m/sec^2)

$$\text{시간에 따른 연소 부탄량} : W = \frac{\pi D^2}{4} b_r \times s$$

- W : 연소량 (kg)
- D : 화염의 바닥 직경 (m)
- s : 연소 시간 (sec)

높이 20m 이상 직경 7~8m의 대형화재를 10분 동안 유지하기 위해서는 연소에 필요한 부탄량은 약 3톤이 필요하다. 여기서 사용된 부탄의 연소속도 $b_r=0.1040 kg/m^2s$ 이다. 만약 Pool화염의 높이가 15m와 10m로 가정하고 윗 식을 사용할 경우의 결과는 다음과 같다.

육안으로 관측되는 화염의 높이를 20m로 가정하면 초당 연소되는 양은 약 5kg이다. 만약 15m로 가정할 경우 초당 연소되는 양은 약 2kg이 조금 넘는다. 화염의 높이가 10m라면 1kg도 되지 않는다.

Table 2는 LPG의 질량누출속도를 계산한 것이다. 누출의 직경을 달리함에 따라 누출되는 양은 달라지는데 액상인 경우와 기상인 경우 큰 차이가 있다.

누출경이 12.5mm일 경우 액상 부탄의 양은 1kg을 상회한다. 이는 액상으로 비교적 작은 누출경에서 점화되지 않은 상태로 수분의 시간이 경과하면 pool fire의 발생과 10m 이상의 화염크기를 갖는 화재의 지속이 가능하다는 것을 보여준다. 또한 Table

Table 1. 화염높이, 직경의 변화와 연소시간에 따른 부탄의 연소량

화염의 높이	화재의 직경	연소시간	연소량 (kg)
20m	8.00m	5분 (300초)	1,570
		10분 (600초)	3,140
15m	5.29m	5분 (300초)	690
		10분 (600초)	1,370
10m	2.95m	5분 (300초)	210
		10분 (600초)	430

Table 2. LPG의 질량누출속도 계산결과 [5]

누출경	누출속도 (kg/s)					
	프로판			부탄		
	액상	2상	기상	액상	2상	기상
S(12.5mm)	2.31	0.91	0.21	1.37	0.99	0.09
M(25mm)	9.23	3.63	0.86	5.50	3.96	0.35
L(50mm)	36.93	14.53	3.43	21.98	15.86	1.42

1과 2를 종합해 보면, 20m 높이의 pool fire를 만들기 위해서는 누출경이 25mm이면 충분한 화재의 지속이 가능하다는 것이다.

참고로 용기충전소를 포함한 LPG충전소의 사고 중 1969년부터 1999년까지의 49건을 분석해보면 크게 3가지의 사고 유형으로 분류된다.⁸⁾

- 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.

부천충전소사고는 탱크로리와 지하저장탱크와의 이충전시 가스누설에 의한 사고이나 1년 주기의 정기검사 직후에 발생한 사고로 최초 가스누출지점이 어느 곳이나에 따라서 위의 유형 2에도 포함될 수 있다. 계속 반복되는 위험작업중에 끼어 드는 일회성 작업은 반복성 위험작업의 점검기회가 될 수도 있으나 주의 소홀히 발생할 경우 예상치 못한 사고를 야기할 수 있다. 아현동 벨브기지의 사고 역시 계량기 교정이란 일회성 작업중에 발생한 사고이고 충전소 시설의 수리 보수중에 발생한 크고 작은 많은 사고가 그 좋은 예이다.

4. 결론

일반적으로 LPG누출화재사고는 Pool화재의 형태로 발전하지 않는다고 알려져 있다. 그것은 LPG가 대기중에 누출할 경우 급속한 증발로 인하여 액상의 유지시간이 짧다고 보기 때문이다. 그러나 부탄의 경우 부탄 LPG 충전소 사고와 같은 Pool화염이 발생한다. 이는 부탄의 잠열이 커서 일반의 추측과 달리 급격한 기화가 일어나지 않기 때문이다.

사고 순간에 촬영된 동영상을 통하여 Pool화염의 높이를 20m로 간주하였는데, 이 높이를 보다 낮게 간주할 경우 화염을 유지하는데 필요한 누출량은 급격히 감소된다. 따라서 육안으로 관측된 측정치에 의한 누출량 계산은 한계가 있다. 또한 부탄액체의 연소속도 변화와 Pool의 실제 크기의 영향에 대한 면밀한 고찰이 요구된다.

오랜기간 최초 누출에 대한 공방이 계속된 이유는 최초 누출지점에 대한 확실한 추정이 불가능하

기 때문인데, 현재의 자료만으로는 최초의 누출지점에 대한 설명은 불충분하여 납득하기 어렵다. 더 이상의 추가 증거확보가 불가능한 현재, 최초누출지점에 대한 확인은 불가능하다.

부천충전소사고를 통하여 얻을 수 있는 중요한 교훈은 지하저장탱크의 안전성이다. 실제 충전소에서 폭발한 것은 지상에 정차 중이던 2기의 탱크로리이지 충전소 자체의 지하 저장탱크가 아니다. 지상에서 발생한 대형 BLEVE에도 불구하고 지하저장탱크는 전혀 손상을 입지 않았다. 저장탱크를 지하에 설치할 경우 안전거리를 완화해주던 조항이 본 사고를 계기로 오히려 강화되었는데(1/2에서 2/3으로), 이는 사고의 본질에 대한 충분한 이해없이 이루어진 조치라고 생각한다.

감사의 글 : 본 연구는 2000년도 한성대학교 교내연구비 지원과제이며, 자료 정리를 위한 한성대학교 안전과학기술연구소의 지원에 감사합니다.

참고문헌

- 1) 윤재건, 고신영, “부천 LPG충전소 사고에 대한 고찰”, 2000년도 춘계학술발표회 논문집, 한국산업안전학회 pp. 48~51, 2000.
- 2) 윤재건, “부천 LPG충전소의 사고원인의 쟁점에 대한 고찰”, 한국가스학회 '추계학술발표회논문집, pp. 228~231, 2000.
- 3) 윤재건, 장우정, “LPG탱크로리 위험분석”, '98추계학술논문발표회 논문집, 한국산업안전학회, pp. 53~58, 1998.
- 4) 노삼규 “Study for the Survey of Major accident at Buchenon LPG refueling Station”, Proceedings of the 1st Conference of the Association of Korean-Japanese Safety Engineering Society, pp. 249~251, 1999.
- 5) 박교식, “가스안전공학”, 청문각, pp. 586~590, 1999.
- 6) 한국가스안전공사 “가스시설의 정량적 위험평가”, 1998.
- 7) 윤재건, “액화석유가스(butane)의 대기중 누출현상에 대한 고찰”, 한국산업안전학회지, Vol. 15, No. 2, pp. 59~62, 2000.
- 8) 윤재건, “LPG 충전소의 사고사례 분석”, 한성대학교 안전과학기술연구소 논문집 Vol. 1, No. 1, 2000. (<http://webmail.hansung.ac.kr/~csst>).
- 9) 한국가스안전공사, “대성에너지 LPG충전소 가스폭발사고 관련 진행보고서”, KGS 2000-053, 2000.