



LNG 생산기지의 사고사례 조사

†마영화 · 이승림* · 윤기봉

중앙대학교 기계공학부, *한국가스안전공사
(2006년 11월 23일 접수, 2006년 12월 22일 채택)

The Investigation of Accidental Case for LNG Terminal

†Y. W. Ma · S. R. Lee* · K. B. Yoon

Department of Mechanical Engineering, Chung Ang University

*Korea Gas Safety Corporation

(Received 23 November 2006, Accepted 22 December 2006)

요 약

LNG 시설은 타 시설에 비해 사용 안전성 측면에서 고려하여야 할 사항이 많다. LNG의 특성상 -160°C 의 초저온 상태에서 생산, 저장되며, 가연성 가스이므로 누설 시에 인근의 점화원에 의해 폭발할 수 있다. 그리고 LNG 생산 및 저장시설은 대량의 연료를 취급하므로 사고의 위험성과 영향력이 크다고 할 수 있다. 따라서 대량의 액화연료를 취급하는 LNG 기지는 엄격한 안전기준과 설계기준을 요구하고 있다. 제정된 기준은 많은 지식과 경험을 근간으로 발전되며, 사고빈도수가 많지 않은 LNG 시설과 관련해서, 건설 또는 운영 시에 발생한 사고사례는 중요한 정보를 제공하고 있다. 많은 인명을 앗아간 사례와 원인에 대한 평가는 소중한 자료임에 분명하다. 이에 본 조사에서는 외국의 LNG 생산기지의 사고사례를 조사하여 경향을 분석해 보았다.

Abstract – Safety issues for LNG(Liquified Natural Gas) terminal or LNG tank involve various concerns such as production/transportation at cryogenic temperature of -160°C , large volume of handling, flammability and explosion risk. Hence, in designing an LNG terminal rigid safety criteria and mandatory requirements are unavoidable. Since known cases of LNG related accident are very few, careful study and root cause analysis of them are very important and provide precious information to increase safety level of the LNG terminal. In this paper most key accident cases were gathered and analysed to understand fundamental safety issues of LNG terminal to prevent further accident.

Key words : LNG(Liquified natural gas) terminal, Explosion, Accidental case

I. 서 론

LNG 저장탱크는 다른 토목구조물과는 달리 초저온성과 안전성을 요구하고 있다. LNG 저장탱크의 저장온도는 -160°C 이하의 초저온이기 때문에 저장탱크의 구조, 저온 액체와 직접 접촉하는 자재, 열수축에 의해 생기는 응력에 대한 대책, 단열재, 건설방법 등에서 이러한 특수한 환경을 고려하여 건설되고 있다. 탱크에 저장된 LNG는 외부로부터의 열 침투, 하역시의 증발, 운전압력의 변화 등으로 인하여 계속하여 가스가 증발되므로 LNG의 취급 및 저장에 특별한 주의가 요구된다. 저장 탱크에 부적절한 재질을 사용하거나 안전 대

비책이 미비할 경우에는 대 용량을 저장하는 LNG 저장탱크의 특성상, 사고 발생시에 사고 영향의 범위가 광범위하게 커지기 때문에 저장 시설의 안전성에 대한 검토가 철실히 요구되고 있다. 본 조사에서는 전세계적으로 LNG 탱크의 건설 및 운영과정에서 발생 하였던 사고 사례들을 살펴보고 그 원인을 분석해 보고자 한다.

II. LNG terminal 관련 주요사고사례

2.1. 1944, CLEVELAND, OHIO, USA(1944) : 방류특, 보냉재 문제[1]

미국에서는 1939년 서부 버지니아에 최초로 상용으로 운전되는 침두부하용 LNG 저장탱크가 최초로 건설

†주저자:roadpilot@wm.cau.ac.kr



Fig. 1. The photograph of LNG tank explosion in Cleveland[2].

되었고 이어서 동부 오하이오 가스회사에 의해 1941년 클리블랜드에 2번째 탱크가 건설되었다.

동부 오하이오 가스회사의 이 플랜트는 1944년 탱크의 용량 증설을 위한 추가건설을 결정하기 전까지는 아무런 사고 없이 운행되었었다. 추가 건설 당시는 2차 세계대전 중이었기 때문에 스테인레스강이 매우 부족한 상태였으므로 새로운 탱크는 3.5% 니켈강으로 건설되었다.

건설된 이 탱크는 이후 운전 중에 순식간에 파괴되는 사고가 발생하였고 이때 유출된 LNG는 도로로 넘쳐 나고 하수관을 덮쳐 버렸으며 이 중 점화원에 의해 착화 되어 대형 화재사고가 발생되었다. 이것이 LNG 저장탱크의 최초의 사고 사례라고 할 수 있으며, 미국의 이 사고를 통해서 저장탱크의 외부 방류 독인 다이크(dike)의 필요성과 탱크의 내부저온재료의 중요성이 부각 되었다. Fig. 1은 사고 후 폐허로 변한 사고현장을 보여주고 있다.

이 사고는 부적절한 재질 및 안전 대비책(소화설비, 방류독 등) 미비가 원인이 되어 내조의 취성 파괴와 함께 화재가 발생한 큰 사고로 기록된다. 보냉재는 3년간의 운전기간 중에 냉각과정(cool down)시에 균열이 발생하였고, 내부용기의 파괴 원인으로는 높은 응력부위를 유발할 만큼 구조물이 복잡하였고 초저온 재료로 적합하지 못한 3.5% Ni 강을 내부용기재로 사용 했으며 그리고 보온 재질이 부적절 했던 것으로 판단된다. 또한 방류독이 없는 상태에서 내조 파괴 시 누출된 LNG를 막을 수 있도록 설계되지 않았다.

사고 손실로는 225명의 부상자와 131명의 사망자 이외에도, 79가구의 집과 공장 2채가 파손되었고, 217개의 차량이 손실되었으며 680명의 이재민이 발생하였다.

이 사고로 인해 초저온 저장탱크의 구조설계, 재료의 선정에 관한 문제가 중요하다는 점을 인식시켜준 계기가 되었다.

2.2. LA SPEZIA, ITALY(1971) : 층화 및 롤오버 문제

서로 다른 밀도의 LNG를 저장하고자 탱크에 LNG를 넣었을 때 만약 두 종류의 LNG가 완벽하게 혼합되지 않는다면 층으로 분리되게 된다. 이 과정을 층화(層化, stratification)라 부른다. LNG 층화가 진행하여 두 층의 밀도차(상부는 밀도가 큰 LNG, 하부는 밀도가 작은 LNG)가 5 kg/m^3 이상 48시간동안 지속되면 많은 양의 비등 가스등(boil off gas)를 발생시키는 롤오버(roll-over) 현상이 발생하게 된다. 이는 비중이 서로 다른 LNG를 저장하는 경우에 발생할 수 있는 대표적인 현상으로서 모든 기구는 밝혀져 있으므로 기초적인 운영 절차만 숙지하면 해결 가능한 위험 요소이다.

1971년 이태리 La Spezia에서 발생한 LNG 사고로 거대한 메탄가스구름을 볼 수 있을 만큼 폭발적인 롤오버 현상이 발생하였으나, 다행히 화재로 이어지지는 않았다[3]. La Spezia 사고 뿐만 아니라 세계 여러 곳의 LNG Tank에서 유사한 사고가 다수 발생하여 각 LNG 탱크마다 안전설비(safety devices)를 설치하는 계기가 되었다. 이러한 사고 사례의 원인은 운영상의 미숙 문제로 볼 수 있다.

2.3. STATEM ISLAND, New York, USA(1973) : LNG 잔류가스 제거 미비[4]

LNG 운영과는 무관하게, 텍사스 동부공급회사(TETCO)의 LNG 탱크에서는 루프가 붕괴된 사고가 발생되었다. 이는 Staten Island의 TETCO사에서 LNG 탱크를 운영 중 발생한 사고로, 탱크내부의 점검을 위해 운영을 중단한 상태에서 발생하였다. 탱크는 내부 균열을 보수하기 위해 정비하고 있던 중 탱크내부에 있던 라이너(liner)에 불이 붙었는데, 순간적으로 탱크내부의 온도와 압력이 급격히 상승하였다. 이러한 내부압력의 상승으로 6인치 두께의 콘크리트루프의 지지대가 파손되어, 탱크 내부로 내려앉았다. 이로 인해 탱크내부에서 일하던 40명의 건설인부가 사망한 사고가 발생하였다.

이 형식의 탱크는 외조가 강화 콘크리트(reinforced concrete)와 프리스트레스 콘크리트(pre-stressed concrete)로 이루어져 있었으며 내조는 폴리우레탄 단열재(polyurethane insulation)와 Mylar, Aluminum, Dacron으로 이루어진 판상의 라이너를 보호하기 위한 1" 두께의 또 다른 폴리우레탄 단열재, 알루미늄 격자 층으로

이루어져 있었다. 점검 시 Mylar 층에서 균열이 발견되어 보수를 위해 탱크 사용을 중지하고 탱크 내부를 보수하던 중 보온재에 포함되어 있던 LNG 기체(vapor)의 점화로 화재가 발생하여 콘크리트 지붕이 탱크내부로 붕괴되어 작업 중이던 작업자 40명이 사망한 사고였다. 이는 인화성 가스제거 작업이 완전히 이루어지지 않아 발생한 사고로, 이 사고는 LNG 운영 중 사고가 아닌 건설사고로 기록되어 있다.

2.4. COVE POINT, USA(1979. 10) LNG 펌프의 가스 누설 문제[5]

1979년 10월 6일 AM 3시경 Cove Point 변전소에서 폭발이 발생하였다. LNG 펌프의 기밀부(electrical penetration seal)가 제대로 유지되지 않아 유출된 천연가스가 지하 전기배관을 통하여 인근의 변전소 건물까지 확산하였다. 이 건물은 천연가스가 침투되는 것을 고려하지 못하였기 때문에 가스누설 검출기가 없었고 모든 설비가 방폭형이 아닌 일반형으로 시공되어 운영되고 있었다. LNG 누설 후 변전소 건물 내부에 있는 점화원에 의해 천연가스가 폭발하였다. 이 사고로 1명이 사망하고 1명이 중상을 입는 인명사고가 발생하였고, 경제적으로는 3백만 달러의 손실을 가져왔다. 다행스럽게도 변전소 주변의 특수한 주변 환경으로 인하여 폭발이 다른 기기에 영향을 미치지 않아 대형사고를 방지할 수 있었다.

Cove Point 터미널은 Staten Island 사고가 있었을 시기에 건설되었고 TETCO사의 탱크와 동일하게 건설된 탱크였다. 1979년 10월 6일 발생한 이 사고로 인해 LNG기지 규격 상에 중대한 변화를 초래하게 되었다. 즉 이 사고 조사를 수행한 National Transmission Safety Board의 조사 결과, 이 기지는 당시의 요구규격에는 적합하도록 건설되었지만, 모든 장비가 가스 누설이 발생하지 않도록 설계되지 못한 상태에서 발생한 사고였음을 인식하게 되었다. 따라서 펌프의 가스누설에 대한 고려와 규격의 변화를 유도한 사례가 되었다.

2.5. SKIKDA, Algeria(2001. 1) : 주요 설비간 최소 이격 거리의 문제

2001년 1월 19일 오후 6시 40분경, 알제리 동부 스킨다(Skikda)시 근처의 LNG 플랜트에서 대형 폭발사고가 발생했다. 플랜트 인근의 거주 아파트의 창문도 거대한 폭발로 날아가 버렸다. 화재는 거의 8시간 동안 지속된 후 다음날 새벽에야 완전 진화되었다[6]. Fig. 2는 폭발사고 후 현장 모습을 보여주고 있다.

이 사고는 특히 인명피해가 컸으며, 전체 6기 Train



Fig. 2. The photographs of Algeria LNG terminal after explosion[7].

중 4번 Train과 연계된 발전기용 스팀보일러의 폭발로 인하여 27명이 사망, 74명이 부상당하였다. 스킨다(Skikda)기지는 알제리에서 가동 중인 3개 LNG 액화기지중의 하나이다.

현재까지 알려진 사고 원인은 증기보일러 내에서의 1차 폭발로 밝혀지고 있는데, 구체적인 원인은 보일러 주위의 누설가스로 인한 것으로 추정된다. 누설가스가 공기 주입구를 통해 보일러 연소실 내부로 유입되었고, 일단 보일러의 연소실 안에서 가스가 공기와 혼합되어 1차 폭발되었으며, 보일러 폭발은 점차 주변지역으로 확산되었고, 주위의 LNG 액화 설비공정에 영향을 주어 대형폭발 사고를 발생시켰다. 이 사고로 보일러의 폭발이 인접한 액화공정설비에 해를 입혔다는 사실은 공정 설비의 이격 거리에 대한 의문을 일으켰다.

이 사고는 1973년 미국 Staten 섬에서 배관 가스 누출로 인한 LNG 저장탱크 폭발로 인해 저장탱크 안에서 보수 작업 중이던 근로자 40명이 사망한 사고 이후 기록된 최악의 LNG 관련 사고로 보고되고 있다. 스킨다 재해는 알제리 독립이후 최악의 산업 사고이고, 과거 30년 동안 LNG 산업이 겪은 최악의 안전사고이며, 액화공장이 겪은 최초의 사고이기도 하다.

동 사고와 관련 플랜트 안전관리 담당자는 알제리 국영 라디오와 가진 인터뷰에서 폭발이 있기 전 보일러로부터 이상한 소음이 있었으며, 전문가들이 1년 이상 전부터 보고서를 통해 보일러 시스템에 결함이 있다는 것을 지적하였음에도 불구하고 형식적인 보수만이 이루어져 왔다고 얘기하였다. 증발가스 폭발은 보일러에서 제공한 점화원이 원인이기도 하지만, 본 사고와 관련하여 제기되는 문제점으로는 유지보수/운영상의 문제 및 설비의 이격거리 적정성 여부가 논란에 올랐다.

6기 트레인 전체에 필요한 공용 설비인 증기보일러가 LNG 액화설비에 근접하여 설치, 운영되었으며, 이 결과 폭발이 일어났을 시, 주위 설비에 쉽게 연속적인 폭발의 영향을 줄 수 있었던 것으로 판명되었다. 이 때문에 최근의 LNG 기지는 문제가 된 증기 보일러/터빈 대신 보일러를 사용하지 않는 고효율 가스터빈을 사용하는 추세이다.

파괴된 LNG 설비는 대체 설비를 건설하는데 필요한 비용이 약 8억 달러에 이를 정도의 손실을 가져왔다. 이 알제리 사고는 40년간 이어온 LNG의 안전성에 치명적인 타격을 주게 되었다.

2.6. 기타 LNG 관련 사고사례

기타 LNG 관련 사고사례를 Table 1에 정리하였다. 사고 원인을 살펴보면 Bongtang 사고(1983)와 Portland, Oregon 사고(1969)의 경우 작업 및 운전 부주의로 인한 사고였다. 따라서 설비 운전자와 작업자들을 위한 설비안전 전 점검사항과 작업안전 수칙에 관한 교육이 필요하다. 또한, Arzew(1964) 사고를 제외한 기타 사고 사례의 경우를 통해 알 수 있듯이 체계적인 안전진단만이 사고를 미연에 방지하고 위험을 최소화할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 1. Minor accidental case[8].

일시	장소	사례
1964	Arzew, (Algeria)	LNG를 선적하던 도중에 낙뢰에 의해 누설가스 점화가 점화, 점화된 화염은 배출구를 통해 신속히 배출.
1969	Portland, Oregon (USA)	탱크건설작업 시, 작업미숙으로 천연가스가 탱크내부로 유입되어 폭발.
1972	Montreal, (Canada)	기화된 천연가스가 질소라인을 역류하여 조종실로 유입되어 폭발
1978	Arab Emirates	LNG 탱크의 하부 배관 연결부위가 파손되어 LNG 누출, 메탄구를 형성. Top penetration 기술의 계기.
1983	Bontang, (Indonesia)	열교환기 밸브가 잠겨져 압력이 상승하여 열교환기 파손되고, 폭발
2004	Trinidad, (Tobago)	가스터어빈의 폭발로 인해 LNG train 3기가 파손됨

III. 사고원인 분석

LNG 저장탱크의 사고 사례를 보면 전체적인 사고빈도가 많지 않은 관계로 통계적인 방법이 아닌 수치적

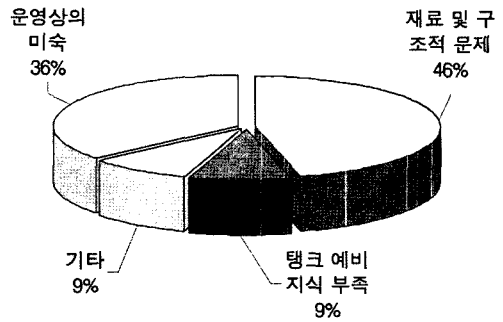


Fig. 3. The classification of accidental case in LNG terminal.

인 방법을 사용하여 유형별로 구분하였다. 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3에 보인 바와 같이, 사고 원인으로 보면 재료 및 구조적인 문제에서 기인되는 경우가 전체 사고의 46%를 차지하여 가장 높은 비율을 차지하고 있고, 운영상의 문제가 36%를 차지하고 있다. LNG 탱크의 건설, 유지관리기술이 확립되어 오면서 사고를 경험한 것이므로 원인에 대한 분석만 철저히 이루어지고 현장에서 주의한다면 이러한 사고가 반복되는 일은 없을 것이다. 따라서 현재의 LNG 탱크의 설계, 운영, 관련 지식수준으로 볼 때 운영상의 노하우가 축적되어 있고, 관련 지식수준의 향상으로 사고 확률은 줄어든다고 볼 수 있다. 또한 최근의 개선된 재료를 사용하고, 적합한 구조 해석에 의한 합리적인 설계가 적용된 상태에서 운영된다면, 사고 확률을 크게 줄일 수 있다고 볼 수 있다.

이와는 반대로 새로 적용되는 설계나 재료 등에서 발생할 수 있는 사고 가능성을 사전에 충분히 제거할 수 있도록 고려하는 것은 매우 중요한 문제임을 알 수 있다. 현재 국내에 적용되고 있는 완전방호식 LNG 저장 탱크 또는 지상식 멤브레인 탱크 등의 개선된 설계에도 사고의 60%를 차지하는 재료 및 구조적 문제가 없는 지 철저히 검토하여야 할 것이다.

IV. 결 론

LNG 저장 및 생산기지에서의 사고의 확률(probability) 또는 사고 빈도(likelihood)는 제시한 사례와 같이 크지 않으나, 파손에 따른 인적 경제적 손실(consequence)은 매우 크다.

지금까지 LNG 에너지는 안전한 에너지라는 인식 하에 LNG의 안전하고 사용이 편리한 점을 부각시켜 관

런 산업을 확장하고 있지만 알제리 사고에서와 같이 사고가 발생하면 주변 영향 및 사고 손실도 대단함인 알려져, 천연가스사업이 주장하는 안전 에너지의 이미지에 의문을 품는 의견도 상당하다. 따라서 LNG 산업계에서는 이러한 사실을 염두에 두고 LNG 저장 탱크 등의 설비에 철저한 운영 매뉴얼 숙지하여 운영상의 사고를 미연에 방지하도록 하여야 하며, 건설 시에 앞서 분석한 사고원인을 방지할 수 있는 대책을 충분히 마련하여야 할 것이다. LNG 저장 설비의 운영 뿐만 아니라, 건설, 보수 시에도 적절한 기준 및 절차를 마련하여 시행하여야 하며, 사고영향 범위 평가에 따른 안전거리 확립 및 사고 시 확산 방지를 위한 충분한 안전 장치의 설치 등에 대한 세심한 배려가 필요하다. LNG 설비의 안전에 관련된 투자는 경제성, 편리성 등을 핑계로 소홀히 하는 우를 범해서는 안될 것이다. 따라서 개선된 멤브레인식 LNG 탱크 등을 설계함에 있어서 펌프 낙하 등 가능한 사고 요인을 철저히 분석하여 대비할 필요성이 있으며, 사고 발생시 확산 방지를 위한 설비의 보완도 철저히 고려하여야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 조사는 (주)에젤의 자문조사 연구 결과입니다. 지

원에 감사드리며 조사연구에 참여해주신 김용-웅님께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Foss, M.M., "LNG Security and Safety", CEE Report, (2003)
- [2] <http://timriley.com/LNG.htm>
- [3] West, H.H. and M.S. Mannan, "LNG Safety Practice and Regulation : From the 1944 East Ohio Tragedy to Today's Safety Record" (2001)
- [4] Fire Department of the City of New York, "Report of Texas Eastern LNG Tank Fatal Fire and Roof Collapse", (1973)
- [5] National Transportation Safety Board Report, "Columbia LNG Corporation Explosion and Fire ; Cove Point", NTSB-PAR-80-2, (1980)
- [6] GAS MATTERS (2004. 1. 14)
- [7] SONATRACH Co. presentation, "The Incident at the Skikda Plant : Description and Preliminary Conclusions", LNG14, DOHA-Qatar, (2004)
- [8] www.energy.ca.gov/lng/safety.html