

고압가스 용기의 파열 및 폭발사고 비교 분석에 관한 연구
A Study on the Ruptur and Explosion Accident Comparative Analysis
of High Pressure Gas cylinder

이장우* · 최충석**

Jang-Woo Lee* · Chung-Seog Choi**

한국가스안전공사*, 전주대학교**

1. 서론

가스사용을 위한 충전용기는 압축가스, 액화가스로 분류되며, 압축가스의 경우 압력을 기준으로 충전하고, 액화가스는 중량기준으로 충전 한다. 압축가스는 우리 주위에서 흔히 볼 수 있는 산소, 질소, 알곤용기 등은 이음매없는용기에 충전되는 가스를 말하며, 액화가스는 LP가스용기와 액화암모니아, 액화염소, 액화이산화탄소, 액화아산화질소 등이 있으며, 용접용기와 이음매없는용기등에 충전된다. 가스충전은 가스의 성질, 용기 형태에 따라 충전기준이 다르며, 여기에는 용기에 부착된 용기밸브와 안전장치 등이 포함된다.

따라서 논문에서는 고압가스의 성질 및 용기 등의 형태에 따른 파열과 폭발사고에 대하여 원인을 분석하여 비교하고자 한다.

2 고압가스의 분류 및 관계법령

2.1. 고압가스의 분류

고압가스안전관리법시행규칙제2조제3호와 제4호에서 액화가스란 가압·냉각 등의 방법에 의하여 액화상태로 되어 있는 것으로서 대기압에서의 끓는점이 섭씨40도 이하 또는 상용온도이하인 것으로 정의하고, 압축가스는 압력에 의하여 압축되어 있는 가스로 정의하고 있다. 또한 고압가스안전관리법시행령 제2조 따라 법의 적용을 받는 고압가스의 종류 및 범위는 다음 [표1]과 같다

[표 1] 고압가스의 종류 및 범위

1. 상용(常用)의 온도에서 압력(게이지압력을 말한다. 이하 같다)이 1메가파스칼 이상이 되는 압축가스로서 실제로 그 압력이 1메가파스칼 이상이 되는 것 또는 섭씨 35도의 온도에서 압력이 1메가파스칼 이상이 되는 압축가스(아세틸렌가스는 제외한다)
2. 섭씨 15도의 온도에서 압력이 0파스칼을 초과하는 아세틸렌가스
3. 상용의 온도에서 압력이 0.2메가파스칼 이상이 되는 액화가스로서 실제로 그 압력이 0.2메가파스칼 이상이 되는 것 또는 압력이 0.2메가파스칼이 되는 경우의 온도가 섭씨 35도 이하인 액화가스
4. 섭씨 35도의 온도에서 압력이 0파스칼을 초과하는 액화가스 중 액화시안화수소·액화브롬화메탄 및 액화산화에틸렌가스

2.2 고압가스 저장능력 계산

고압가스의 저장능력은 고압가스안전관리법시행규칙별표1에의거 압축가스와 액화가스의 경우에는 다음 [표 2]와 같다.

[표 2] 저장량 계산식

가스상태	저장(충전)량 계산식	용기 형태
압축가스	$Q=(10P+1)V_1$	저장탱크 및 용기
액화가스	$W=0.9dV_2$	저장탱크
	$W=V/C$	용기

Q : 저장능력(단위 : m^3)

P : 35°C에서의 최고충전압력(단위 : MPa)

V_1 : 내용적(단위 : m^3)

W: 저장능력(단위 : kg)

V_2 : 내용적(단위 : L)

d : 상용온도에서 액화가스의 비중(단위 : kg/L)

C : 고압가스안전관리법시행규칙 별표1에서 정하는 가스의 정수

2.3 고압가스와 안전장치 비교

2.3.1 관계법령

고압가스안전관리법 시행규칙 『별표 10 용기제조 시설기준 및 기술기준』 및 동법 시행규칙 별표10의2 『별표10의2 용기부속품 제조 시설·기술·검사기준과 용기부속품의 재검사기준』 과 『KS B 6214 고압가스용기용 밸브』, 『KS B 6212 액화석유가스 용기용 밸브』 에서 각 고압가스용기에 부착하는 안전장치의 종류는 다음 [표 3]과 같으며, 고압가스안전관리법시행규칙제41조제1항관련한 시행규칙별표24에의거 고압가스용기에 대한 표시기준은 다음 [표 4]와 같이 규정하고 있다.

[표 3] 용기밸브의 안전장치 종류

가스상태	가스명	용기의 형태	용기크기	저장능력	안전장치
압축가스	산소 등	이음매없는용기	40.2 L	15MPa	파열판
	의료용산소	이음매없는용기	2.8 L	13.9MPa	가용합금+파열판
액화가스	프로판	용접용기	47 L	20kg	스프링식
	부탄	용접용기	27 L	13kg	스프링식
	프로판	저장탱크	2350 L	1톤	스프링식
	탄산가스	이음매없는용기	2.8 L	1.9kg	파열판
	암모니아	용접용기	105 L	50 kg	가용합금

[표 4] 고압가스용기의 표시 기준

구분	색상표시		구분	색상표시	
	공업용	의료용		공업용	의료용
LP가스	회색	-	아세틸렌	황색	-
산소	녹색	백색	헬륨	회색	갈색
수소	주황색	-	에틸렌	회색	자색
질소	회색	흑색	싸이크로프로판	회색	주황색
액화암모니아	백색	-	액화아산화질소	회색	청색
액화염소	갈색	-	액화이산화탄소	청색	회색

3. 사고사례

3.1 암모니아가스용기 파열 사고사례

3.1.1. 사고개요

2009년 12월 분말야금 열처리 업체에서 암모니아용기가 파열되어 독성가스가 누출되는 사고가 발생하였다. 암모니아 용기는 용기 동판의 중앙부분에서 부풀어 오르면서 길이 방향으로 찢어지는 형상이었다. 사고현장에서 암모니아가스 충전용기의 충전량을 조사한 결과 과충전(표 5)이 되어 있었고, 파열된 형상으로 보아, 가스충전(공급업소)에서 가스를 충전할 때 법적 충전량을 보다 많은 양을 충전시킴으로서 액팽창(液膨脹)을 견디지 못한 암모니아 충전용기가 파열(사진2)되면서 가스가 누출된 사례였다. [표 5]는 사고현장에 사고 발생 후 공급자가 즉시 재 공급한 용기로서 충전 질량을 확인한 결과 과충전(Over Charge)이 확인되었다.

[표 5] 용기 충전량 비교 현장조사(사진1)

- 용기중량 68,8 kg(밸브무게 0,8kg 포함) / 총중량 133,9 kg : 초과충전
 - 용기중량 68,4 kg(밸브무게 0,8kg 포함) / 총중량 132,8 kg : 초과충전
 - 용기중량 70,2 kg(밸브무게 0,8kg 포함) / 총중량 136,9 kg : 초과충전
- ∴ $G = V/C = 105/1,86 = 56,4$ kg이나 충전량은 65,1kg~66,7kg으로서 정상 충전량 보다 약 8,7kg~10,3kg이 초과 충전됨



[사진1] 충전용기



[사진2] 파열용기

3.1.1.2 과충전 사유 및 원인추정

용기무게가 각각 다름에도 불구하고 판수동 저울의 추를 일정하게 한 다음 가스충전량을 일정하게 충전 한 것으로 추정되며, 특히 용기무게가 무거운 것을 기준으로 할 경우 반대로 용기무게가 가벼운 것은 과충전이 자연적으로 이루어진다. 파열용기의 경우 용기 재료에 대한 물성 등을 조사하였을 때 특이점이 발견되지 않았으며, 부식 등이 나타나지 않았다. 따라서 파열용기는 과충전 상태에서 내압을 견디지 못한 압모니아 용기가 파열된 것으로 추정하였으며, 판수동 저울에 대한 교정주기는 [국가교정기관지정제도운영요령 제41조 제2항]에의거 [표 6]과 같으며, 충전소의 경우 저울에 대한 검교정이 잘 이루어지지 않는 것으로 나타났다

[표 6] 저울의 교정주기 기준

[교정기관지정제도운영요령 제41조 제2항에 “측정기를 보유 또는 사용하는 자는 자체적으로 교정주기를 설정하고자 할 때에는 측정기의 정밀정확도, 안정성, 사용목적, 환경 및 사용빈도 등을 감안하여 과학적이고 합리적으로 기준을 설정하여야 한다. 다만, 자체적인 교정주기를 과학적이고 합리적으로 정할 수 없을 경우에는 기술표준원장이 별도로 고시하는 교정주기를 준용한다”고 규정되어 있다]
 ※ 판수동저울 : 검교정 기준(24개월)

3.2 이산화탄소가스용기 파열 사고사례

3.2.1. 사고개요

2010년 1월 승용차량에 내부에서 이산화탄소가스용기가 파열(사진3,4)되어 차량이 파손되고 부상자가 발생하였다. 고압가스용기는 알루미늄합금용기로서 최초 의료용 산소용기로 수입되었으나 충전가스명을 이산화탄소용도로 2007년 6월 변경한 이후 사고가 발생하였다.

[표 7] 파열용기 사양

제조사	제조국	내용적	내압시험압력	최고충전압력	검사기준
LUXFER	미국	2.8L	23.2M	13.9M	DOT-3AL 2015

3.2.2 사고원인 추정

사고당시 용기밸브는 의료용산소용기에 부착하는 용기밸브가 설치되어 있었고, 이산화탄소용기에 적합한 용기밸브는 아닌 것으로 판명되었다. 의료용 산소용기의 경우 용기밸브의 안전장치는 파열판과 가용합금의 이중안전장치가 설치되고, 이산화탄소용기 밸브에는 파열판 안전장치(사진6)가 설치된다. 그러나 파열된 이산화탄소용기의 경우 용기밸브에 설치된 안전밸브는 압력이 높아 질 경우 가스를 방출하는 안전장치가 아닌 온도에 의해 안전장치가 작동하도록 설계된 안전장치(사진6)가 설치되어 있었다. 이산화탄소는 액화상태로 충전되고 [그림 1]과 같이 증기압이 40℃에서 7.52 MPa가 되는 등 압력이 높아 안전장치가 파열판식으로 설치되며 가스명도 "LG"로 표기(사진 5)된 것으로 사용하여야 한다. 사고가 발생한 이산화탄소용기는 용기밸브가 잘못 장착된 것과 과충전 원인으로 추정하였다.



[사진3] 사고 용기 파열



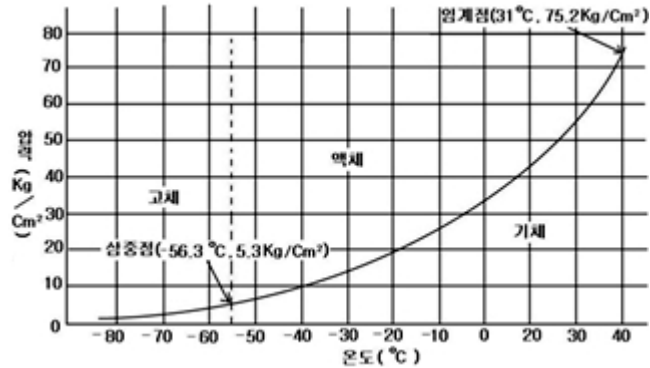
[사진4]



[사진5] 이산화탄소 용기밸브



[사진6] 산소 용기밸브



[그림 1] 이산화탄소 증기압 그래프

3.3 수소가스용기 폭발 사고사례

3.3.1. 사고개요

2010년 3월 수소제조소에서 보수작업후 수소가스충전소에서 수소가스 충전 등의 과정에서 수소가스용기가 폭발 하는 등 대형사고가 발생(사진7,8)하였다. 수소가스용기를 적재한 수소튜브트레일러 20개(2620m³)중 8개가 폭발하고 모두 비산되었으며 약 300m 비산된 용기도 있었고 용기에 대한 사양은 다음 [표8]와 같으며, 용기밸브에는 안전장치가 작동하지 않았고, 안전장치는 가용합금 및 파열판이설치되었다. 수소가스의 경우에는 발화위험도가 높고, 연소범위가 공기중에 4~75%로 크기 때문에 가스의 혼합을 금지하고 있으며, 그 기준은 [표9]와 같다.

[표 8] 파열용기 사양

내용적	충전량	충전압력	용기두께(최소)	제조일
13100리터	총 2620m³	20MPa	10mm(9.07mm)	92.8

[표 9] 수소가스의 압축 금지 및 품질검사 관련 규정

- 고압가스안전관리법시행규칙별표4제1호 나목 2)라)③
아세틸렌·에틸렌 또는 수소중의 산소용량이 전체용량의 2%이상인 것은 압축하지 않을 것
- 고압가스안전관리법시행규칙별표4제1호 나목 2)사)
산소,아세틸렌 및 수소를 제조하는 자는 일정한 순도 이상의 품질유지를 위하여 1일 1회 이상 적절한 방법으로 품질검사를 실시하여 그 순도가 수소의 경우 98.5%이상이어야 하고 기록할 것.

3.3.2. 사고원인추정

피해자의 의복과 가연물의 탄화, 용기내부의 그을음, 용기 내부폭발의 찢어짐 형상 및 용기밸브 내부의 용융탄화와 3.24(수)05:05부터3.26(금)10:30까지 수소가스제조조의 보수 이후 수소가스의 생산과 공급이 정상적으로 가동되지 않은 상태에서 수소가스 제조과정의 문제점 또는 배관내부 퍼지(Purge)작업(염소, 산소, 공기 등 불순물 혼입)의 과정이 부적절하게 되면서 용기내부에서 연소 폭발(사진9,10)한 것으로 추정하였다.



[사진7] 충전장 튜브트레일러



[사진8] 충전소 경계 담 비산



[사진9] 수소용기 폭발



[사진10] 폭발 비산

3.4 LP가스용기 폭발 사고사례

3.4.1. 사고개요

2008. 11. 9(일) 19:35분경 공장에서 LP가스와 산소를 이용한 가스절단토치를 사용 하던 중 LP가스용기가 폭발(사진11,12)하는 사고가 있었다. 가스호스내부, LP가스압력

조정기의 다이어프램 및 LP가스용기 내부에서 화염흔적이 나타난 사례였으며, LP가스 용기는 다음 [표 10]과 같다

[표 10] 파열용기 사양

내용적	총전량	증기압	용기두께(최소)	용기밸브안전장치
47리터	20kg	15℃ 0.74MPa	3.2 mm	스프링식

3.4.2. 사고원인 추정

작업 현장 관계자에 의하면 LP가스용기를 교체하려고 하던 중에 폭발하였다고 진술 하고, 산소용기 내부에는 가스압력이 약1.6MPa이 남아 있었던 점과, 가스토치 (사진 13)내부의 LP가스 노즐이 파단된 (노후추정)것으로 보아, LP가스 압력이 저하되고 산 소압력이 높은 상태에서 가스토치 내부에서 산소가 LP가스용기로 역류할 때 마찰 등의 점화원으로 인해 LP가스용기가 폭발하면서 화염을 방출(사진14)한 것으로 추정하였다.



[사진11] LP가스용기 폭발



[사진12] 내부 탄화흔적



[사진13] 가스절단용 토치



[사진14] 가연물 화재흔적

4. 결 론

고압가스용기는 화염에 노출된 상태이거나 일반적인 용기보관 장소 및 사용 장소에서 파열이나 폭발현상으로 인한 물리화학적 파열 및 폭발 사고가 발생한다. 사고형태상으로 분석할 때 사고원인규명을 위하여 사고 현장이나 감정에서 사고원인을 규명하기 위한 조사사항으로 다음과 같은 결론을 얻었다

- (1) 파열사고의 경우에는 압력상승에 의한 파열형태가 나타남으로써 충전량, 충전시스템, 용기밸브 등 부속품 적성사용 및 용기부식 등에 물리적 변형의 확인조사
- (2) 폭발사고의 경우에는 가스제조소의 가스성분, 충전시스템, 폭발장소의 연소흔적, 역류 및 역화, 용기밸브 등 부속품의 용융형상과 혼합가스의 상태 등에 대한 연소에 의한 탄화 등 확인조사
- (3) 제품감정에서 탄화성분의 조사를 통한 화재의 흔적이나 물리적인 파열의 흔적 확인조사

참고문헌

1. 한국가스안전공사, “가스사고 통계, <http://www.kgs.or.kr>”, (2010)
2. 한국가스안전공사, “가스용어사전”(1999)
3. 최상복 역, 한국산업안전공단, “장치산업에서의 손실방지공학”(1995)
4. Wilfred E. BAKER(USA), Ming Jun Tang(China), “GAS, DUST AND HYBRID EXPLOSION”(1991)
5. Frank T. Bodurtha, “Industrial Explosion Prevention and Protection”(1979)
6. 한국가스안전공사, “고압가스안전관리법”, (2009.11)
7. 한국가스안전공사, “가스사고연감”, (2008)