



혼합가스용기폭발 원인에 대한 고찰

†윤재건

한성대학교 기계시스템공학과,
(2011년 10월 11일 접수, 2011년 12월 26일 수정, 2011년 12월 26일 채택)

Discussions on the Cause of Mixed Gas Cylinder Rupture

† Jae-Kun Yoon

Dept. of Mechanical Systems Engineering, HANSUNG University, Seoul 136-792, Korea
(Received October 11, 2011; Revised December 26, 2011; Accepted December 26, 2011)

요 약

울산의 한 실험실에서 3년 전에 혼합가스용기(80% 아르곤 20% 산소)가 파열되었다. 그러나 파열의 원인이 명확하게 규명되지 못하였다. 이 논문은 공인 감정기관의 감정서와 경찰의 수사결과보고서를 토대로 사고시나리오를 제시하여 보았다. 폭발은 혼합가스 용기 내에서의 화학반응에 의하여 발생한 것으로 판단된다. 이는 고압산소용기의 파열사고들과 유사한 것으로 사료된다.

Abstract - Mixed gas cylinder(80% Ar, 20% O₂) exploded three years ago. But the cause of cylinder rupture was not identified and the case was finished. This paper is the discussions on the cause of cylinder explosion with the investigation report by the police and the similar accident cases. The cause of explosion is the chemical reaction in the cylinder. This accident is similar with the explosion of pressurized oxygen cylinder.

Key words : cylinder explosion, chemical explosion

I. 서 론

산업이 발전하고 다양한 종류의 가스가 사용됨에 따라 가스사고의 유형도 다양해지고 있다. 가스사고의 원인이 대부분 밝혀지지만 일부는 가스 및 설비의 물리화학적 특성이 복잡하고 특히 폭발사고 후에는 기존의 설비와 장비들이 크게 훼손되어 원인을 찾아내기 어려운 경우가 종종 있다. 사고원인이 정확히 규명되어야 유사사고의 재발을 막을 수 있고 또한 사고피해의 보상주체를 정할 수 있다.

2008년 7월29일 울산정밀화학센터의 실험실에서 혼합가스용기(산소20%, 아르곤80%)가 폭발하였다. 1명이 사망하고 2명이 부상하였고, 소방서추산 7억 8000만원의 재산피해가 있었다. 2년이 넘는 시간이 흘렀지만 아직도 사고원인에 대한 명확한 설명이 부

족하여 보상에 대한 민사소송이 진행 중이다.

본 논문에서는 현재 남아있는 유일한 증거물인 국립과학수사연구소의 사고감정서[1], 경찰의 수사결과보고서[2], 및 용기폭발의 사고사례를 기반으로 혼합가스 용기의 폭발원인을 고찰해 보고자 한다

II. 사건개요[4]

- 사고일시 : 2008. 7. 29(화) 17:05분경
- 사고장소 : 울산광역시 중구 다운동 산110-4번지 “울산정밀화학센터내” 2층 실험실
- 피해현황
 - 인명 : 사망 1명, 부상 2명
 - 재산 : 7억 8,000만원(동산 7억원, 부동산 8,000만원)(소방서추정)
- 시설현황

†주저자:jkyoon@hansung.ac.kr



Fig. 1. 사고실험실 전경 및 외부 비산물 상태[1]

<사고 실험실>

- 파열 혼합가스용기: 알콘(46.7 l / 산소 20%, 알콘 80%)
(제조자 : 남양, 제조일: 94. 9, 재검일 : 2008.5)
- 비산 혼합가스용기: 산소(46.7 l / 산소 20%, 알콘 80%)
- 비산 혼합가스용기: 알콘(47.5 l / 산소 20%, 알콘 80%)

<1층 고압가스 용기보관실>

- 수소(47.6 l 용기3개), 질소(9개), 알콘(2개), 에어 (2개), 헬륨(1개), 액화질소(2개)
- 5mm 스테인레스 배관으로 연구실 등으로 가스를 공급하는 시설임.

울산정밀화학센터내 실험실에서 유도결합플라즈마 질량분석기를 사용하기 위하여 파열된 혼합가스용기의 가스를 투입하였으나, 실험결과가 정상적으로 나타나지 않고 불안정하여 지하 용기보관실에 다른 혼합가스용기(산소용기/녹색)를 실험실로 이동시킨 상태에서 갑자기 1차 분석용으로 사용한 혼합가스용기가 폭발하면서 1명이 사망하고 2명이 화상을 입었고 실험실 전체가 완파된 사고임(Fig. 1. 참조).

III. 국립과학수사연구소 감정서[1]

울산정밀화학센터에서의 폭발사고 후 7개월 뒤에 정리된 국립과학수사연구소의 감정보고서는 현존하는 유일한 증거물이다. 방대한 사진자료들이 사고당시의 상황을 비교적 자세히 보여주고 있으며 감정의 수준 역시 국내에서는 가장 권위 있는 기관의 면모를 보여주고 있다. 여기서는 감정서의 주요 내용들을 발췌하여 가능한 사고 시나리오를 살펴보고자 한다.

센터 2층의 무기재료분석실의 ICP-MS 및 알콘, 산소 혼합가스통이 놓여있는 부분이 폭발의 중심임. 동 무기재료분석실 내부 및 천장, 분석실의 천장 및 구조물 등의 연소 특성 등으로 보아 동 건물은 화염이 동반된 폭발 특성이다. 무기재료분석실의 ICP-MS와 연결된 혼합가스통의 폭발에 의한 국부적 탄화 및 연소, 압력과 전달에 의한 변형 등으로 보는 것이 타당하다.

무기재료분석실의 ICP-MS 장비가 폭발 및 연소 등으로 인해 파손, 변형되어 구체적인 사고 직전 상태를 명확히 파악하기 곤란한 상태이지만, ICP-MS 기기 내부에 국부적인 탄화흔 등이 발견되는 상태로 동 화염 접근 방향이 기기 외부로부터 접근한 것인지 기기 내부 자체로부터 생성된 화염에 의한 것인지 판단하기 어렵지만, 기기 외부로부터 접근한 것일 경우 화염이 접근하는 경로에 놓여있던 가연물질 등이 균일하게 탄화되고 연소되었을 것이나 동 부분은 국부적인 일부에만 탄화흔이 식별되는 것으로 보아 기기 내부로부터의 화염에 의한 탄화흔 일 수 있다.

혼합가스용기의 폭발 잔해가 폭발 이후 생성된 화염 등에 노출되어 폭발 잔해에서 일부 보이는 그을음 잔해가 반드시 화염이 동반된 폭발시의 화염에 의해 그을은 것이라고 단정하기는 어렵다.

혼합가스 용기의 폭발의 경우는 다음과 같이 두 가지 경우를 생각할 수 있음. 첫째, 혼합가스 용기 내부의 내압증가에 의한 물리적 폭발(예를 들어 단순한 고무풍선의 터짐 현상과 같음), 둘째, 혼합가스 용기 내부에서 화염이 동반된 화학적 폭발의 경우(예를 들어 특정 공간에서의 LP 가스 등의 폭발 현상과 유사)로 나눌 수 있을 것임. 그러나, 상기 첫 번째 가능성인 물리적 폭발의 경우는 혼합가스 용기 내부의 물질이 이상 화학반응을 일으켜 용기 내부의 압력증가가 급격히 진행되어 용기 자체가 내압을 이겨내지 못하는 경우로서 이의 경우는 용기의 안전밸브 등이 작동되어 용기 내부의 압을 퍼지시켜 빠져나가는 내압보다 더 발생한 압력 증가가 더 클 경우 나타날 수 있는 상태이지만 현재로서는 동 혼합가스 용기에 장착되었던 용기용 밸브 내의 안전밸브 자체를 발견할 수 없어 안전밸브 자체의 작동 여부를 확인하기 어렵고, 또한 용기용 밸브의 안전밸브 작동(파열판 파열 등)이 있었다 할지라도 단순내압 증가에 의한 파열인지 아니면 용기 내부에 화염이 동반된 폭발이 발생하면서 생성된 압력에 의한 파열인지를 구별 할만한 기준이 없을 것이므로 단순 내압 증가에 의한 물리적 폭발인지의 여부를 확인하기는 어려움. 또 다른 하나의 물리적 폭발의 경우는 용기 자체



Fig. 3. 폭발용기가 놓여있던 바닥의 압입흔[1]

의 결합에 의해 혼합가스 용기가 터지는 경우이지만 이의 경우 현재와 같이 여러 개의 파편 상태로 존재하는 혼합가스 용기 잔해로 이를 확인하기는 불가능하다. 또한, 두 번째의 폭발 개연성은 혼합가스 용기 내부에서의 연소가 진행되는 화학적 폭발로서 이의 가능한 경우로는 용기 내부로의 불꽃 유입인 역화에 의한 폭발의 경우와 내부 물질에서의 화학반응이 있어 동 화학반응에 의한 발열, 발화에 의한 연소로 진행되는 폭발의 경우, 혼합가스 용기 내부 등의 관로에 유지류 등이 있어서 이들 유지류와 산소의 반응에 의한 급격한 연소의 경우로 나눌 수 있다.

ICP-MS 내부에 사용되는 수소가스에 의한 역화의 경우 및 혼합가스 용기 내부에서 충전된 가스 물질 또는 또 다른 이물질간의 화학반응 등에 의한 폭발의 개연성 자체를 배제할 수는 없으나 이를 명확히 구체적으로 이를 입증하기는 곤란하고, 한편, 울산정밀화학센터 관계자들이 제시한 자료를 볼 경우 폭발한 혼합가스용기를 입고한 이후 ICP-MS 장비에 처음 연결하여 사용하는 도중 폭발하였다는 내용 등을 참고할 경우 동 실험 이전에 다른 기기 등에 연결하여 사용한 사실이 없는 상태인 점은, 동 폭발한 혼합가스용기의 유통과정 및 보관 상태 등이 확인되지 않고, 또한 혼합가스 용기 보관상 어떤 이물질이 용기 내부로 들어갔었는지에 대한 확인 등이 되지 않는 상태이고, 또한 충전가스의 종류에 대한 명확한 자료가 없는 상태인 점 등은 혼합가스 용기에 충전한 충전가스의 불분명, 이물질 개입 개연성 등을 완전배제 할 수 없고, 또한 혼합가스 용기충전 작업 지시서에 의하면 제품생산 지시 없이도 충전 가능한 것 등은 혼합가스의 것으로 보아 혼합가스의 각 혼합비율의 오류 등의 개연성이 있으나 이를 확인할 수는 없다. 한편, 혼합가스 용기 보관 자체의 불량으로 인해 관로 등에 미세한 유지류 등이 있을 경우 이들 유지류와 혼합가스 용기 자체 내부의 산소와의

지속적인 접촉(혼합가스를 사용함에 따라 동 유지류와 접촉하는 산소가 계속적으로 공급되는 등의 접촉)에 의해 산소농도가 많은 부분에 유지류가 노출될 경우 유지류의 발화점이 낮아져 이들 유지류에 착화되면서 급격한 폭발이 발생하였을 개연성 등 또한 모두 배제할 수 없다.

하지만, 앞에서 언급한 폭발 개연성들 중에서 어느 것에 의한 폭발인지 단정적으로 언급하기는 곤란하고 상기와 같이 개연성을 언급할 수 있는 정도이다. 참고로, 알곤가스는 불활성기체이므로 알곤/산소 혼합가스는 자체 연소하지 않으며, 또한 산소는 조연성 가스로서 자체로서는 연소하지 않으며, 다른 가연성물질이 같이 존재할 때 연소를 일으키는 물질로서 짙은 산소농도에 가연성물질이 노출될 경우 평상시의 공기 중에서의 자연발화점보다 온도가 낮아져 미세한 불꽃이나 마찰 등에 의해 가연성물질이 급격히 연소되는 물질 특성이며, 또한 수소는 대표적인 인화성물질로 분류되는 위험물질이다. 감정결과 상기 개연성들 중에서 어느 것에 의한 것인지 단정적으로 언급하기는 곤란하다.

IV. 사고원인에 대한 고찰

폭발은 용기내부에서의 화학반응에 의한 폭발로 판단된다. 용기의 과열압력이 매우 높아 용기의 잔해(Fig. 2. 참조)가 산산조각이 난 것과 건물 외부 벽면에 남아 있는 그을음(Fig. 1. 참조)이 용기 내부의 화학적 폭발임을 뜻한다. 그을음은 산소와의 혼합부족으로 반응하지 못한 유리탄소이다. 용기의 바닥면을 자세히 보면 검정색의 이물질이 남아 있음을 확인할 수 있다. 일반적으로 용기가 상시 세워져 있음으로 인하여 용기 내부에 액체 상태의 이물질이 침



Fig. 2. 용기 잔해물 수거 사진[1]

입할 경우 바닥면에 모아지게 된다. 사고 직후에 이 검정색의 이물질의 성분을 분석하여 확인하였다면 폭발원이 된 가연물질의 존재를 규명할 수 있었을 것이다. 또한 폭발한 용기가 놓여있던 바닥면에 만들어진 압입흔(Fig. 3. 참조)은 용기가 세워져 있는 상태에서 매우 높은 압력으로 폭발했음을 반증한다. 용기내의 압력이 이렇게 높아질 수 있는 가능성은 내부에서의 화학반응이 발생하는 경우이다. 폭발과 동시에 주황색의 섬광이 동영상에 찍힌 것[3]과 폭발한 실험실 바로 옆방에 있던 연구원이 목격한 불길[2]은 용기 내에서의 연소반응에 의한 화학적 폭발임을 증거한다. 이러한 반응에 의한 압력의 급격한 증가는 용기에 장착된 안전밸브의 역할을 무의미하게 만든다. 왜냐하면 안전밸브의 구경이 수 mm에 지나지 않아 내부의 급격한 압력상승을 낮출 수 없기 때문이다.

고압산소용기의 경우 산소충전작업 전에 내부세척이 완벽하게 이루어지지 않을 경우 용기 내부의 가연성 성분과 산소가 반응하여 용기의 파열을 일으킬 수 있다. Table 1은 국내에서 발생한 산소용기 폭발사고를 정리한 것이다[5,6]. 순수한 산소의 높은 반응성이 유지류와 같은 가연성분과 반응하여 용기를 파열시킬 수 있다는 것이 국내에서 인식된 것이 오래되지 않아 많은 사고사례들이 단순히 용기가 압력을 견디지 못하였다고 기술되었으나 현재의 관점에서 보면 용기내부관리가 소홀하여 용기내부에 있던 유지류와 반응하여 폭발한 것으로 판단된다. 용기 내부의 유지류의 존재가능성은 산소를 제외한 일반 가스의 압축일 경우 압축기의 윤활유로 가연성을 사용하는 것이 일반적이기 때문이다. 반응의 점화는 충격, 정전기 등으로도 충분히 가능하기 때문에 점화원을 확인하는 것은 별 의미가 없다.

Table 1의 2번 사고는 메탄과 산소의 혼합가스를 제조하려다 발생한 사고이다. 메탄은 가연성이고 산소는 산화제이므로 폭발을 제조하다가 폭발한 사고이다. 혼합가스충전사업자가 제조할 수 있는 가스의 조성에 대한 정보가 필요함을 보여주는 사고이다. 3번 사고는 혼합가스의 조성이 명시되어 있지 않으나 용기를 충전소 내에서 단순히 운반 중에 폭발하였다는 것이 매우 특별한 관심을 갖게 하는 사고이다. 특히 60년대와 70년대의 산소용기사고는 대부분 용기 내부의 청정도관리가 거의 이루어지지 않던 시절이라 용기 내부의 유지류와의 반응에 의한 폭발사고로 추정된다.

Fig. 4는 41ℓ 산소용기에 고압산소가 150기압으로 충전되어 있을 경우 만약 가연성 메탄이 혼입되어 연소될 경우 용기내부의 압력과 온도를 chemkin

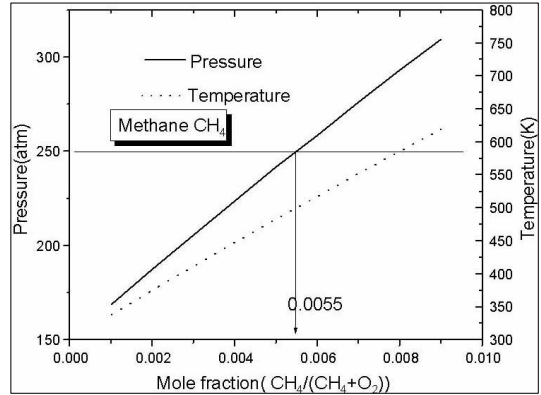
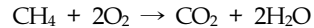


Fig. 4. Pressure & Temperature VS. Mole fr.(CH₄/(CH₄+O₂)) @ const. vol.

code[4]로 계산한 것이다. 용기가 250기압에서 파열된다고 가정하면 메탄의 mole fraction이 0.0055이면 이 압력에 도달하여 용기가 폭발할 수 있다. mole fraction 0.0055는 41ℓ × 150 × 0.0055 = 33.8ℓ = 0.034 Nm³ 이고, 이는 1.51mole이고 중량으로는 24g이다. 즉 메탄 1.51mole이 산소용기에 혼입되면 용기를 파열시킬 수 있다. 앞에서 살펴본 것과 같이 고압의 산소를 사용하는 곳에 소량의 가연성 성분이 유입될 경우 연소폭발이 발생하여 큰 사고를 야기할 수 있다[4].



methane 1.51 mole 이 연소하는데 필요한 산소는 3.02mole이고 중량으로는 96.6g 부피로는 22.4ℓ × 3.02 = 67.65ℓ = 0.068Nm³이 소요된다.

결국 41ℓ 용기의 파열을 가져올 수 있는 가연성 성분의 양은 메탄으로 환산할 경우 24g 전후이고, 이때 필요한 산소의 중량으로는 100g 미만이고 부피로는 68ℓ 정도이다. 따라서 Chemkin Code에서 계산된 것과 같이 작은 양의 가연성 성분으로도 용기의 파열을 가져올 수 있다.

산소 20%, 알곤 80%의 혼합가스 조성은 반응성 면에서는 거의 공기와 유사하다. 그렇다면 고압으로 압축된 공기에서도 이와 같은 반응이 일어날 수 있는 것이 의문으로 남는데, 일반적으로 고압산소의 반응성에 대해서는 많은 사고사례가 입증하고 있으나, 고압공기에서는 사고사례를 찾기 어려우나 이러한 반응성이 없다고 판단할 수는 없다. 사고 용기는 입고 후 최초 사용 중에 파열하였기 때문에 혼합가스의 조성이 용기에 유성펜으로 찍힌 것과 같다는 것이 확인되지 않는다. 또한 혼합가스가 사용된 분

혼합가스용기폭발 원인에 대한 고찰

Table 1. 국내의 산소용기 파열사고 사례[5,6]

번호	사고일시	장소	피해	사고개요
1	2009.06.21(일) 10:40	경북 칠곡군 대리점	사망:1명 부상:1명	대리점에서 작업자가 산소용기를 소형용기로 이송하던 중 산소용기가 파열된 사고임.
2	2001.12.20(목) 15:25	경기 안산시 원시동	사망:1명 재산피해: 500만원	혼합가스 충전장에서 용기에 가연성가스인 메탄가스가 충전되어 있는 상태에서 산소가 충전될 때 단열압축 및 이물질등 마찰(볼티)에너지의 점화원에 의해 혼합가스 용기가 폭발한 것으로 추정됨.
3	1999.09.10(금) 12:50	부산 사상구 일반가스충전소	사망:2명	고압가스판매시설 보관실에 보관되어 있던 혼합가스 용기를 가스시험 분석을 위해 이동하던 중 충전된 용기가 갑자기 폭발한 사고임.
4	1992.02.22(토) 09:10	부산시 북구 감전동 산소공업사	사망:1명 재산피해: 100만원	충전중인 유지성분이 들어있었던 것으로 추정되며 충전원이 이 사실을 모르고 산소충전중 용기내의 유지가 산소와 발열반응을 일으켜 고열 및 고압에 의하여 용기가 여러조각으로 폭발한 사고임.
5	1991.05.21(화) 09:30	서울 영등포 대림3동	경상:4명	차량 상차하기 위하여 도로에 적재된 산소용기의 저면이 원인미상의 결함으로 압력을 견디지 못하고 파열.
6	1991.02.08(금) 14:52	서울 양천구 목1동 고물상	사망:1명	1톤 화물차에 판매소에서 운반된 산소용기를 하차하던 중 사고 용기 및 부분에서 흰 연기가 나며 용기가 파열되어 그 충격에 의하여 사망자가 발생한 사고임.
7	1974.10.24(목) 16:20	전남 광주시 산소공업사	사망:1명 중상:2명	검사를 받지않고 노후된 용기에 산소를 충전하던중 내부압력을 견디지 못하고 용기가 파열된 사고임.
8	1972.05.08(월) 14:00	전남 순천시 동외동 산소취급소	사망:4명 중상:3명	트럭에서 산소용기 하차시 취급부주의에 의한 충격으로 용기가 파열된 사고임.
9	1970.07.20(월) 14:30	인천 소사 산소공업회사	없음	산소공장내 건조기에 검사를 받지 않은 노후된 용기를 사용 중 용기가 내부압을 견디지 못하고 파열된 사고임.
10	1969.08.11(월) 10:00	부산 가야 가스상회	사망:1명 중상:1명	산소용기 취급중 충격으로 용기가 파열된 사고임.
11	1969.08.05(화) 20:00	서울 오류동 가스상회	사망:3명 중경상:8명	산소용기를 차에서 하차하다 취급부주의에 의한 충격으로 용기가 파열된 사고임.
12	1965.07.15(목) 13:20	서울 영등포구 문래동 공업회사	재산피해: 스레이트 및 유리창 30매파손	부식이 심한 용기에 산소충전(100kg/cm ²)하던 중 용기가 파열된 사고임.
13	1964.08.05(수) 13:30	대전역 수하물 취급소	사망:1명	사고장소에서 산소용기를 하차하던 중 취급부주의로 충격을 주어 산소용기가 파열된 사고임.
14	1961.04.03(월) 08:30	서울 성동구 왕십리	사망:2명	미검산산소용기(150kg/cm ²)를 트럭에서 하차하던 중 부주의로 용기에 충격을 주어 파열된 사고임.

석기가 정상 작동하지 않아 용기교환을 고려하고 있었다는 것이 조성을 의심하게 한다. 어떤 조성의 가스가 어떤 가연성분과 반응하였는지를 알 수 없으나 사고의 형태는 용기 내부의 가연성분과 고압산소가 반응하여 폭발한 것으로 판단된다.

사고가 용기 교환을 위해 지하저장고에 보관중이던 용기를 실험실에 들여놓은 상태에서 발생하였고,

특히 사망자의 시신이 절단된 점[2]으로 미루어 사고 발생순간은 용기교체를 위하여 사용 중이던 용기의 용기밸브를 사망자가 잠그는 과정 중에 발생한 것으로 판단된다. 이러한 작업을 하기 위해서는 용기에 바짝 다가설 수 밖에 없기 때문에 시신의 심한 훼손이 설명될 수 있다. 또한 과거의 산소배관 및 산소용기의 사고사례를 통해보면 밸브를 잠그는 과정이 급속간

의 접촉을 야기함으로써 점화원이 된 경우가 많다.

청정도관리를 고압순수 산소용기에 준하여 하는 것이 필요하다.

V. 결 론

폭발은 용기내부에서의 화학반응에 의한 폭발로 판단된다. 초고압에 의해 산산조각난 파편, 용기 바닥면의 검은색 이물질, 폭발 시에 발생한 검은 연기, 폭발 시에 목격된 화염 등이 화학적 폭발의 증거이다. 조각난 용기파편 중에서 특히 바닥면의 내면에 검은색 이물질의 존재가 확인되므로 폭발한 혼합가스용기는 가연성의 유지류가 바닥면에 존재하였다고 판단된다. 순수한 Ar 80%, 산소 20% 의 혼합가스 조성은 그 자체만으로는 폭발성이 없으나 유지류와 반응할 산소농도는 충분하였다고 판단된다. 사망자의 시신이 절단될 정도로 크게 훼손된 것으로 미루어 폭발은 용기교체를 위하여 폭발한 용기의 용기밸브를 직접 손으로 잠그는 과정 중에 발생하였다고 판단된다.

이러한 후진국형 사고를 예방하기 위해서는 용기의 충전이력관리를 포함한 용기의 관리와 소유에 대한 책임이 법령에 명시되어야 한다. 혼합가스의 경우 제조 후에 가스성분분석기를 통하여 혼합가스의 조성을 확인하고 검사성적서를 용기에 부착하는 것이 필수적이다. 특히 혼합가스조성에 산소가 포함될 경우 가연성분의 존재여부에 대한 정밀한 확인이 요구된다. 또한 산소를 포함하는 혼합가스용기 내부의

후 기

본 연구는 한성대학교 교내연구장려금 지원과제임.

참고문헌

- [1] 국립과학수사연구소 감정서, 2008-S-12629, 울산 정밀화학지원센터 화재원인(폭발원인) 감정서, 2009.3.5
- [2] 수사결과보고서, 울산중부경찰서, 2009.6.26
- [3] CCTV영상, 울산정밀화학센터
- [4] 한국가스안전공사 울산정밀화학센터내 혼합가스 용기 폭발사고 보고, 2008.8.1.
- [5] 가스사고년감, 한국가스안전공사, 2008, 2007, 2006, 2005, 2004, 2003, 2002, 2001, 2000, 1999, 1998.
- [6] 가스사고편람, 한국가스안전공사, 1997.
- [7] 윤재건, 고신영 “고압산소설비의 안전성 향상을 위한 연구”, 2002추계학술발표회 논문집, 한국 산업안전학회, pp. 40-45
- [8] <http://www.chemkin.com/index.html>
- [9] 가스기술사, 구민사, pp. 231, 2001