폭.발.사.고.

예상하기 힘든 폭발사고에 대비하기 위해
폭발사고의 위험 및 사고사례를 소개하고
이와 관련된 폭발의 특성을 살펴보고자 한다.

글 | 김인태 협회 위험조사부 차장, 공학박사

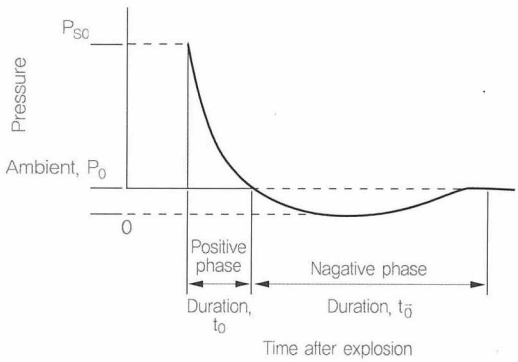
1. 머리말

화재와 달리 폭발로 인한 사고는 순간적으로 피해를 주기 때문에 대피할 여유가 없는 특징이 있다. 또한 폭발에 관여하는 가연성 가스나 증기는 낮은 점화 에너지에 의하여 폭발하기 때문에 일차적으로 위험물질의 누출을 방지하는 것이 중요하다. 가연성 가스나 증기가 누출되어 있는 상태에서 작업을 하는 경우에는 위험물질을 제거하거나 농도를 낮추어 사고를 예방하는 방법이 많이 사용되고 있으며, 전기나 마찰로 인한 스파크와 같은 점화원을 억제하기 위하여 폭발 방지용 기구를 사용한다. 수증기 폭발과 같이 단순히 고압에 의한 물리적 폭발은 화학적 폭발에 비하여 압력 상승속도가 낮은 편이며, 압력 방출을 통하여 피해를 상당 부분 경감시킬 수 있다.

따라서 폭발사고가 발생하는 경우는 이와 같은 기본적인 사항을 벗어나거나 안전수칙을 지키지 않아 발생하고 있으며, 특별한 경우 화학물질의 특성이나 처리 방법을 제대로 알지 못하여 폭발사고가 발생하고 있다. 본 고에서는 예상치 못한 폭발사고를 당하지 않도록 수소가스폭발, 수증기 폭발 및 유증기 폭발 사고 사례를 소개하고 이와 관련된 폭발특성을 살펴보기로 한다.

2. 폭발 위험

폭발은 가압 상태에서 대기 상태와 평형을 이루는 현상으로 굉음과 함께 과압으로 인한 피해를 주게 된다. 또한 압력 용기가 파괴되면서 비산물이 주변 장치나 건물에 부딪혀 피해를 주기도 하며, 폭발에 관여한 물질이 가연성인 경우 화재로 이어져 피해가 확산된다.



■ 그림 1. 시간에 따른 폭발압력 변화

가. 폭발압력파 효과

폭발 압력에 의해 움직인 공기는 폭발압력파를 생성하고, 폭발압력파는 폭발의 발생지점에서 힘의 방향에 따라 [그림 1]과 같이 양압단계(Positive Phase)와 부압단계(Negative Phase)로 나뉘어진다. 양압단계는 팽창가스가 사고 발생장소로부터 멀리 움직이는 폭발압력파 부분이며, 보통 부압단계보다 더 강력하고 압력손상의 대부분을 차지하고 있다. 부압단계는 양압단계의 급속한 팽창이 폭발 발생지점으로부터 바깥으로 움직일 때 주변을 에워싼 공기를 밀어내면 주위 압력에 비해 상대적으로 낮은 압력상태가 발생지점 중심부에 생기는 것을 말하며, 양압단계가 사라질 때 생성된 낮은 공기 압력조건을 평형상태로 만들기 위해 공기는 발생지점으로 역류한다.

나. 비산효과

비산물은 폭발 발생지로부터 먼 곳까지 큰 손상이나 부상자를 발생시킬 수 있으며, 전력선, 연료가스나 기타의 인화성 연료배관 또는 저장 컨테이너를 파괴할 수도 있다. 또한 이로 인해 폭발 후 화재 규모에 영향을 주며, 2차 폭발을 일으킨다.

다. 열효과

연소폭발은 연소 가스와 주변의 공기를 가열하는 많은 양의 열을 방출하며, 이 에너지는 근처의 가연물을 착화하거나 사람에게 화상을 입힐 수 있다. 폭발 후 발생하는 화재는 재산피해나 인명피해를 증가시키며, 조사과정을 복잡하게 만들고 종종 폭발 또는 화재 중 어떤 것이 먼저 발생했는지를 판정하는 데 혼란을 주게 된다.
가연성 증기에 의한 BLEVE의 열 효과로는 화구(fireball)와 파이어 브랜드(firebrand)가 있다. 폭발 시 또는 폭발 후 순간적으로 존재하는 화염 덩어리인 화구는 단기간 복사열을 방사하게 되며, 파이어 브랜드는 폭발 시 고온 또는 연소 중인 파편을 비산하게 된다. 이러한 모든 효과는 폭발 중심에서 멀리 떨어진 곳에 화재를 발생시킬 수 있다.

라. 지진효과

폭발압력파나 큰 구조물이 지면에 떨어질 때 발생하는 진동이 대지를 통해 전달될 수 있으며, 이러한 효과는 구조물과 지하에 매설된 지원시설, 파이프 라인, 탱크 또는 케이블에 추가적인 손상을 주게 된다.

3. 사고사례

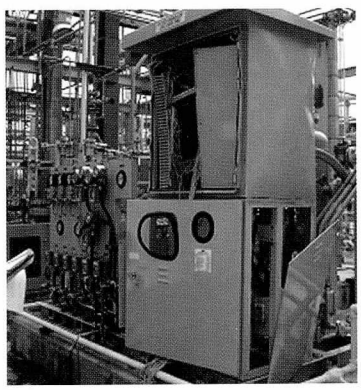
수 소 가 스 누 출 폭 발 사 고

가. 일반사항

사고일자 : 2004년 9월 20일
사고장소 : 울산시
인명피해 : 사망 2명

나. 사고현황

폴리프로필렌 공정 내 수소 컴프레서용 압력방폭 구조의 패널 앞에서 컴프레서를 가동하던 중 컴프레서 인입 측에 설치된 질소 퍼지 배관을 통해 수소가 전기 패널로 유입되어 전기 스파크로 인해 폭발이 발생하였다. 이 사고로 패널 앞에서 작업하던 작업자 2명이 패널 덮개에 맞아 현장에서 사망하



■ 사진 1. 폭발사고가 발생한 전기 패널

였다. 사고 발생 5일 전에 수소 컴프레서(A)를 보수하기 위해, 수소 컴프레서(B)로 변경하였다. 수소 컴프레서(A)는 정비계획에 따라 내부 밸브 2개를 교체하기 위해 컴프레서 실린더 블록과 연결된 플레어 배관에 블라인드를 삽입하고, 역류방지를 위해 실린더 블록 부위에 연결된 퍼지 배관은 차단, 컴프레서 인입측의 퍼지 라인을 통해 질소(7kg/㎠)로 가압하여 퍼지를 실시하였다. 따라서 퍼지를 완료한 후 퍼지 배관의 차단밸브(3개소)를 모두 개방상태로 두었거나, 누설되는 밸브 1개를 차단하지 않았을 가능성이 있다.

다. 문제점 및 대책

- 변경요소 관리에 해당되는 작업에 대해서는 변경요소 관리, 위험성 평가, 자료 갱신, 안전운전 절차서 작성, 근로자 교육, 가동 전 점검 등을 철저히 수행하여야 한다.
- 컴프레서 인입측 퍼지용 질소 배관상의 블라인드는 차단밸브 후단에 설치하여 블라인드를 운전 중에 설치되도록 하고, 조작 패널의 양압유지용 질소 배관과 분리하여 설치하는 것이 필요하다.
- 컴프레서 등 설비를 수리 · 보수 후 가동 전에 컴프레서 및 각종 밸브 개방 또는 잠긴 상태, 각종 계기 관련 부속설비에 대해서 이상 유무를 확인하고 주기적인 누설여부 등에 대한 점검을 철저하게 이행하여야 한다.

수 증 기　폭 발 사 고

가. 일반사항

사고일자 : 2005년 3월
사고장소 : 충북 청원
인명피해 : 사망 2명, 부상 2명

나. 사고현황

소각로의 열원을 이용하여 폐지 재생에 필요한 스팀을 공급하기 위해 사용 중인 노통연관 보일러의 폭발사고로 보일러 경판 및 연관튜브 등이 최대 100m까지 비산하였으며, 주변 작업자를 포함하여 4명의 인명피해가 발생하였다.

보일러 청소 후 보일러에 재급수를 하지 않은 상태에서 보일러 배수 시에 정지시킨 저수위 경보기를 가동시키지 않았으며, 보일러 스팀 배출배관 밸브를 개방하지 않은 상태에서 2시간가량 보일러를 운전하였다. 소각로를 계속하여 가동함에 따라 보일러 내부의 온도는 500℃ 이상으로 가열되었으며, 보일러 스팀 배출배관 밸브가 차단되어 증기가 스팀 Header 및 현장으로 공급되지 못하였다. 보일러 내부의 압력이 상승하자 8kg/cm²로 설정된 안전밸브(25A)가 작동되어 소량의 증기가 배출되었으며, 이때 보일러 운전자가 증기를 빨리 배출시키기 위해 사이렌서를 개방하였다. 급수펌프의 가동 스위치가 가동상태로 되어

있는 상황에서 운전자가 급수펌프의 공기배출밸브를 개방하여 공기를 빼자 급수펌프는 자동으로 급수를 시작하였으며, 보일러 내에 물을 공급한지 20초 후 가열된 보일러에 의해 증기폭발이 발생한 것으로 추정된다.

다. 문제점 및 대책

- 보일러의 운전 중단 또는 운전 재개 시의 작업절차와 이상상태 발생 시 응급조치요령 및 작업 절차서를 작성하고, 이에 따라 작업을 하여야 하나 이러한 조치가 이루어지지 않았다.
- 보일러는 유효기간 내 정기검사를 받아야 하나 정기검사를 하지 않았다.
- 압력방출장치는 1년에 1회 이상 국가 교정기관으로부터 교정을 받은 압력계를 이용하여 토출 압력을 시험하여야 하나 토출압력시험을 실시하지 않았다.
- 보일러를 과열시킬 수 있는 열 흐름을 완전히 제어할 수 있는 시스템이 미흡하였다. 사고발생 보일러는 소각로의 열을 이용하는 폐열 보일러로써 F.D Fan과 I.D Fan을 정지시키더라도 굴뚝의 연돌효과로 인해 열 흐름을 완전하게 차단하지 못하였다. 따라서 보일러에 저수위가 발생하거나 과압이 발생하여 열원을 차단할 필요가 있을 때는 열 흐름을 우회(By-Pass)하여 보일러 내에 열원이 공급되지 않도록 시스템을 개선하는 것이 필요하다.

폭 발 형 태

가. 기계적 폭발

용기 안에 저장된 물질이 화학적 성질의 변화 없이 고압가스가 물리적 작용에 의해서만 생성되는 폭발이다. 순수한 기계적 폭발로는 가스 저장용기나 탱크가 고압 때문에 파열되어 이산화탄소, 산소 등의 저장된 고압가스를 방출하는 것과 과열된 수증기가 폭발하는 것 등이 있다.

나. 화학적 폭발

화학적 폭발에서 고압가스의 생성은 연료의 기본적인 화학적 특성이 변하는 발열반응의 결과로 연료와 산화제의 폭발성 혼합기나 고체 가연성 물질이 사용되지만, 공기에 혼합된 가스, 증기, 분진이 관련된 반응을 전파하는 것이 더 일반적이다. 이 연소반응은 반응연료 및 미 반응연료를 분리하는 화염전면과 함께 반응연료를 통해 점진적으로 발생하기 때문에 전파반응이라 한다.

유 증 기 폭 발 사 고

가. 일반사항

사고일자 : 2004년 9월
사고장소 : 경북 경주
인명피해 : 사망 1명

나. 사고현황

고철 야적장에서 폐보일러 기름탱크(420ℓ)를 산소 절단기로 절단작업을 하던 중 기름 탱크

내부에 잔류하던 유증기가 폭발하여 작업자가 전신에 3도 화상을 입고 치료 중 사망하였다. 작업자는 인화성 물질의 잔류 상태를 확인하지 않았거나 위험성을 간과한 채 산소 절단기로 절단작업을 실시한 것으로 판단된다.

다. 문제점 및 대책

비교적 인화점이 높은 등유라 하더라도 인화성 증기가 존재할 수 있으므로 충분히 환기를 시켜 폭발한계 범위 이하로 낮추고, 절단 부위에 국소적으로 물을 뿌려 온도를 낮추는 등의 안전조치가 필요하나 일상적인 작업으로 실시하였다.

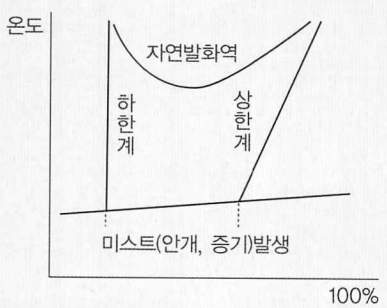
폭 발 범 위

가연성 가스나 증기가 폭발하거나 연소할 때는 공기와 적당한 비율로 혼합되어야 한다. 즉, 혼합기의 조성이 일정한 범위 내에 있어야 폭발이 일어날 수 있으며, 가연성 가스나 증기농도의 비율이 가장 낮은 한계를 폭발 하한계(LEL), 가장 높은 한계를 폭발 상한계(UEL)라고 하며, 이 한계 범위를 폭발 범위라고 한다.

일반적으로 농도는 혼합기체중의 가연성 기체의 용적(%)으로 표시하며, 폭발 또는 연소한계를 측정하는 기준으로 미국 광산국의 표준법을 사용한다. 이 표준법에 따른 장치는 내경 5cm, 길이 1.5m의 유리관 내에 혼합가스를 넣고 하부에서 전기불꽃으로 점화 시킨 후 화염이 상단부까지 번지는가의 여부에 따라 한계를 측정한다.

[그림 2]는 폭발한계와 온도의 관계를 모형적으로 나타낸 것으로 일반적으로 상한계 쪽이 온도상승에 따른 확대가 크다. 어느 정도의 고온에 달하면 자연발화하며 온도가 낮으면 응축이 시작되고 미립자로 되어 한계의 개념이 확실치 않다. 이것은 미립자의 입도와 공간의 분포가 균일하지 못하여 온도측정이 곤란하기 때문이다.

여러 종류의 가연성 가스가 혼합되어 있을 때 폭발한계를 계산하기 위해서는 르샤트리에 법칙을 이용할 수 있다. 서로 유사한 특성을 갖는 가스가 혼합된 경우에는 정밀도가 좋으나 H_2와 H_2S, CH_4와 H_2S 등은 실측값과의 차이가 크다.



■ 그림 2. 온도에 따른 폭발한계