



화학 공정에서의 폭발 방지 시스템의 기능과 한계



오규형
호서대학교 소방학과

1. 서론

과학과 산업의 발전에 따라 공정안전기술도 새롭게 발전되어 가고 있음에도 불구하고 공정산업에서의 폭발사고가 자주 발생하고 있으며, 사고가 발생할 경우 대규모의 인명 및 재산 손실을 초래하여 왔다. 우리나라의 경우 화학장치 산업이 1960년대 시작되어 많은 부분들이 교체되어야 할 주기를 지났거나 교체해야 할 상태에 있고, 이에 따라 신설 또는 증설공사 등으로 폭발위험성이 높은 것으로 보고되고 있다. 화학공정에는 가연성 위험물이나 폭발성 물질들이 대량으로 취급되고 있기 때문에 비록 적은 공정이라도 화재나 폭발이 발생하면 대규모의 피해를 초래한다. 특히 화학공정산업에서 사고로 발생하는 손실의 2/3 이상이 폭발사고에 의한 것으로 보고되고 있다. 즉 총 손실의 약 75%가 폭발사고에 의한 것이며 약 20%가 화재이고 나머지는 독성과 관련된 것으로 나타나 있다. 화학공정에서의 폭발 사고에 의한 피해 관련정보는 많은 자료에 의해 보고되고 있다. 실제로 막대한 파괴와 인명손실을 가져오는 과압은 일반적으로 폭발에서 발생하는 최대 압력인 6~8kg/cm² 보다도 훨씬 낮다.

다음 표 1은 과압에 의한 피해정도를 보여주고 있으며, 표 2는 과압에 의해 재해가 발생될 확률을

나타내고 있다. 본 논문에서는 그동안 많이 사용되었던 폭발방지 시스템과 방호 시스템에 대한 기능적 소개와 이들의 적용에 대한 한계를 간략히 소개하고

표 1. 과압에 의한 피해정도

피해정도	과압(기압)
유리 창문의 파손(90% 깨짐), 빙음(143dB)	0.007
주택 건물의 작은 손상	0.05
주택의 일부분 파괴	0.08
강 구조 건축물이 약간 변형	0.10
주택의 벽과 지붕 일부분이 무너짐	0.15
주택 벽돌의 50% 파괴	0.18
석유 저장 탱크의 파괴	0.2-0.28
주택의 대부분 파괴	0.35-0.5
탱크를 적재한 자동차의 전복	0.5
보강 안된 벽돌 패널(두께 25~30cm) 응력이나 변형으로 약화	0.5-0.55
짐은 실은 기차가 완전히 파괴	0.6
건물의 파괴	0.7

표 2. 과압과 사고의 가능성

Overpressure [Bar]	Casualty Probability[%]
<0.07	0
0.07-0.21	0.10
0.21-0.34	0.25
0.34-0.48	0.70
>0.48	0.95

자 한다.

2. 시스템의 종류 및 구성요소

화학 공정에서의 폭발을 방지하기 위한 시스템 및 장치는 폭발방지 시스템과 폭발방호 시스템으로 나눌 수 있다. 폭발방지 시스템은 폭발사고의 발생 자체를 제거하기 위한 시스템이고 폭발방호 시스템은 폭발이 발생하는 것을 허용하지만 폭발에 의해 설비들이 파괴되는 것을 보호하기 위한 시스템들이다. 다시 말하면 폭발방지 시스템은 사전에 예방함으로써 시설을 보호하는 것이고 폭발방호 시스템은 사후조치를 위한 시스템들이다.

현재 사용되는 폭발안전 시스템은 가스, 증기, 분진 및 이들 혼합물의 폭발에 적용할 수 있으나 **flame arrester**는 분체가 있는 경우 통기구가 막히므로 분진 폭발안전 시스템에는 적용할 수 없다. 시스템의 종류는 위에서 설명한 것처럼 폭발의 발생시점을 중심으로 폭발방지 시스템과 폭발방호 시스템으로 나눌 수 있으며 시스템의 동작이 전기적 에너지에 의해 작동하는 **acting system**과 폭발의 결과에 의하여 작동되는 **passive system**으로 구분될 수 있다.

여기서 **acting system**의 경우 구성요소는 이상 상태를 감지하는 감지기(**detector**)와 감지기의 신호를 받아 분석 판단하여 동작기기를 작동시키는 제어기(**control unit**)와 제어기의 명령을 받아 폭발 방지 또는 방호를 하는 동작기기(**acting devices**)로 구성되어 있다.

폭발을 감지하는 감지기로는 폭발반응에서 발생하는 빛을 감지하는 광학적 감지기, 압력 감지기 및 열감지기 등이 사용되고 있다. 광학적 감지기는 UV, IR, UV/IR등이 있고 압력 감지기로는 **piezoelectric**과 **piezoresistive**가 있으며 고온 연소영역의 열에 의해 감지되는 **thermoelectric detector**등이 사용되고 있다. 우수한 센서의 형태를 갖추기 위해서는 공정이 운전되는 환경에 견딜 수 있어야 하고, 전기적 안정성이 있어야 하며 일반공정조건과 연소반응의 문제를 초기에 구별할 수 있어야 한다. 제어기 (**control unit**)는 2가지의 기본적인 기능을 하는데 하나는 동작신호를 전달하여 수행 되도록 하는 전자회로의 감독과 분석을 하며 또 하나의 기능은 필요한 장치의 작동을 위해 필요한 전력을 준비하는 것이다. 제어기가 갖추어야 할 다른 사항들은 전기적인 안전등급과 일치해야 하며 폭발이나 사고 발생시 안전하게

장치를 멈출 수 있어야 하고 예비전원을 갖추고, 비전문가의 조작을 금지하기 위한 시스템화가 되어 있어야 한다. 일반적으로 이러한 제어기들은 여러 개의 감지기와 여러 개의 동작기기를 중앙통제소에서 제어하고 있다.

화재나 폭발을 방지하거나 방호하기 위해 필요한 적절한 동작을 하게 되는 동작기기의 설계와 동작의 특성은 공정시스템 및 폭발방지, 방호 시스템에 따라 달라진다.

3. 수동적 시스템

수동적 시스템은 감지거나 제어기가 없기 때문에 전기적 신호에 의해 작동되지 않으며 폭발이 발생하면 그에 대응하여 작동하게 된다. 따라서 수동적 시스템은 폭발이 발생했을 경우 그 공정의 조건과 특성에 적합하게 동작되도록 설계되고 있다. 수동적 시스템은 대부분 폭발압력에 의해 동작이 되어지도록 설계되었으므로 사전 예방대책보다는 폭발사고 발생후 기기와 설비들은 보호하기 위한 폭발방호 시스템에 적용되고 있다. 또 이러한 시스템의 동작을 위해 작동 압력을 설정하거나 그 공정의 특성에 맞추어 설계 차이가 되면, 이 초기 값의 변경이 불가능하다. 수동적 폭발방호 시스템에 사용되는 장치의 예로는 역화방지기(**flame arrester**), 바리케이드, **barrier**, **quenching tube**, 가용합금 밸브(**fused metal valve**), **rupture disk**, **bursting diaphragm**, **venting cover**, **venting door**, **ventex valve**, **rotary lock**, **screw conveyor** 등이 있다.

3.1. Venting

Venting은 폭발압력을 외부로 방출하거나 완화시키므로 설비와 기기들을 폭발에 의한 파괴로부터 보호하기 위한 시스템이다. 이러한 **venting** 시스템 중에는 **vent cover**, **vent door**, **rupture disk bursting diaphragm**들이 있으며 공정의 형태나 특성에 따라서 이들을 선택하여 적용할 수 있다.

venting system의 특징은 작동 압력을 미리 설정해야 하며 이 설정압력은 공정내 설비들에 피해가 발생하지 않는 낮은 압력으로 설정해야 하는데 이 설정된 압력은 초기 설계단계에 결정되어 중간에 변경이 곤란한 것이다. 또 이 시스템 중에 **vent cover**나 **vent door** 등은 한번 작동 후 재사용이 가능하나 **rupture disk**나 **bursting diaphragm**은 1회사용 후 교환해야 한다. 화학공정에서 폭발이나 과압의 발생에 의해 **vent**

되는 경우 vent되는 물질은 대부분 가연성이거나 폭발성이며 또는 고온의 물질이기 때문에 vent되는 물질이 안전한 장소로 배출되지 않으면 안 된다. 또한 과압 배출을 duct를 통해 이루어질 경우 vent되는 압력에 duct가 견딜 수 있도록 유로를 설계하거나 강도를 고려해야 한다. 가연성 물질일 경우는 가능하면 flare stack 등의 공정을 거쳐 처리되어야 한다. 또한 고온의 물질이 vent되는 경우 외부에 가연성물질이 없어야 한다. fused metal valve이 경우는 짧은 시간에 용융하여 개방되어야 하기 때문에 폭발압력의 방출에 적합하지 못할 수도 있다.

3.2. Flame Arrester(역화 방지기)

역화방지기는 평상시 유체는 통과할 수 있으나 가스폭발 화염은 통과할 수 없도록 차단시킴으로써 가연성 가스와 증기의 배관 또는 저장 시설 등에서의 화재 폭발을 방지하기 위한 안전장치이다. 역화방지기의 화염차단 원리는 외부 또는 어느 한 방향에서 역화 방지기에 화염이 도달하여 내부의 소염소자(element)를 통과 하려할 때 소염소자의 좁은 틈새에 의해 화염이 작게 나누어지고 이 작은 화염은 소염소자의 차가운 벽면과의 접촉에 의해 열과 활성분자를 빼앗기므로 화염이 소멸되는 것으로 소염의 여러 가지 원리 중 주로 냉벽에 의한 소염(quenching)의 원리를 응용한 것이다.

역화 방지기는 폭발화염을 차단하기 위해 2가지의 중요한 기능이 요구된다. 그 첫째는 앞에 설명한 것 같이 열역학적으로 열전달을 저지하기 위한 소염 능력이고, 또 하나는 폭연이나 폭굉시 발생하는 높은 압력에 견딜 수 있는 기계적 특성을 갖추어야 하며 또 배관내 유체의 압력손실을 최소화해야 한다. 소염소자의 종류는 그 형태에 따라 약 8종 정도가 있으나 주로 이용되는 것은 작은 눈금을 갖는 철망과 소결금속 및 crimped ribbon형태가 있다.

철망이 소염소자로 이용되는 경우는 주로 판말단에 설치되는 flame screen 형태로 40mesh 이하의 sus 철망이 사용된다. 소결금속 소자를 이용하는 경우는 유량이 작고 관의 직경이 작은 경우에 이용되고 crimped ribbon형의 소염소자는 sus박판을 이용하여 만든 것으로 유량이 많고 배관직경이 큰 경우와 충격과 등이 발생할 수 있는 폭굉 차단장치에 사용된다. crimped ribbon을 이용한 역화방지기는 격렬한 폭연과 폭굉에 견딜 수 있는 기계적 강도를 가지고 있으며 소염 성능은 삼각형 모양의 주름 높이와 틈새 길이에 따

라 달라지게 되는데 금속철망이나 소결금속에 비해 유체의 흐름에 대한 저항이 매우 적고 기계적 강도 및 소염성능이 우수하여 대형의 역화 방지기에 적용된다. 그러나 역화 방지기는 가스 중에 분진 같은 입자들이 있는 경우 작은 틈새가 막히게 되어 평상시 압력손실이 커지기 때문에 사용이 곤란한 단점이 있다.

3.3. Quenching tube

Flame arrester의 기능을 이용하여 분진 폭발 방호 장치에 이용하는 안전장치로 flame arrester의 소염소자가 단면 형태를 갖는 것에 비해 소염소자가 tube 형태로 되어 화염의 냉각 효과를 높이도록 만들어 졌다. quenching tube를 통해 폭발압력이 방출될 때 화염 과 연소입자는 차단되지만 폭발압력과 미연소 연소생성물이 방출되므로 이 방출 압력에 의해 외부의 설비나 인체에 피해를 입지 않도록 배치를 하거나 duct를 통해 외부로 방출되는 구조로 해야 한다.

4. 자동 시스템

폭발을 방지하기 위한 자동시스템은 앞에서 설명한 시스템의 구성요소에서 설명된 것처럼 폭발을 감지하는 detector부분과 신호를 분석하고 동작 장치에 동작신호를 주는 제어반(control unit) 그리고 폭발을 억제 또는 차단하기 위한 동작을 실행하는 작동기기(acting device)로 구성된다. 이러한 자동시스템은 1910년대 독일에서 분말약제 자동화산 시스템이 개발된 후 2차 대전중 항공기 화재방지를 위한 기술로 크게 발달하였으며 그 후 분진 및 가스 폭발의 방호를 위한 시스템에도 도입하게 되었다.

자동 폭발방지 및 방호시스템은 분진 폭발이나 가스의 경우 아주 느린 속도의 폭연에 적용이 가능하며 격렬한 폭연이나 폭굉의 경우는 적용하기 곤란하다. 자동시스템의 구성요소 중 중요한 부분은 가능한 폭발의 발생을 초기에 감지하여야 하며 이 감지된 신호가 폭발을 구분할 수 있는 정확한 신뢰성을 가질 수 있어야 한다. 최근 전자기술의 발달로 상당한 진보를 가져왔으나 아직도 감지속도와 신뢰성에는 해결해야 할 문제가 남아있다. 또한 폭발을 억제하거나 차단하기 위한 작동기기의 작동시간을 ms 이하로 낮추는데도 어려움이 있다.

4.1. Automatic suppression system

이 시스템은 폭발을 감지하면 폭발 억제체를 분

사람으로서 폭발을 억제하는 것으로 폭발을 감지하는 감지기는 압력이나 열 또는 빛을 감지하며 신뢰성을 높이기 위해 2가지 이상의 센서를 병용하는 경우도 있다. 이 시스템에서 억제제는 불활성분진, 분말 소화약제 또는 불활성 가스등이 사용된다. 이 자동 억제 시스템은 앞에서 설명한 것과 같은 요소들로 구성되어 있는데 동작기 내부에는 폭발 억제제를 분사하기 위해서 고압의 기체와 함께 소화약제가 충전되어 있다. 따라서 폭발을 방지하고자 하는 설비는 억제제 분사시에 발생하는 압력에 견딜 수 있는 구조가 되어야 한다. 약제의 분사속도가 빠르지 않으면 이러한 문제는 없지만 폭발억제의 기능이 약해지므로 가능한 고속으로 분사되도록 시스템을 만들고 있으며 이에 따라 설비 자체가 억제제 분사압력에 충분히 견딜 수 있는 구조가 되어야 한다.

4.2. Fast closing valve

Fast closing valve는 배관 계통에서 폭발이 발생했을 경우 폭발화염의 전파를 차단하기 위한 긴급차단 기능을 갖는 장치이다. automatic suppression system 이 화학적인 폭발방지 장치라고 한다면 fast closing valve는 기계적인 작동에 의해 폭발을 억제하는 장치이다. 따라서 전자는 광범위한 범위에 억제제를 확산시켜 폭발을 억제하고 후자는 화염의 이동통로를 봉쇄하여 폭발을 억제한다. 이런 기능은 barrier 또는 barricade 역할과도 같으며 이 valve 시스템에서도 폭발을 감지하는 감지기는 앞에서 설명한 것과 같은 기능으로 이해할 수 있으며 제어반의 기능도 유사하다.

다만 마지막 동작 부분이 기계적으로 동작하게 되는데 이 기계적 동작은 역시 고압의 유체에 의해서 이루어지게 된다. 따라서 suppression system보다 동작은 더욱 느려지게 된다. 이런 기능을 하는 valve 중에는 flap valve와 sliding valve 형태가 있다.

이 valve system의 경우 고압 고속의 폭발화염을 valve로 차단할 경우 valve와 valve 전단에 걸리는 압력과 충격을 견딜 만큼의 강도를 갖는 구조로 설비가 설치되어야 한다. 따라서 이 valve system의 경우도 폭발이나 격렬한 폭연의 경우는 적용이 곤란하며 압력이 낮고 화염전파속도가 느린 분진 및 가스폭발의 경우에 적용이 가능하다. 지금까지 설명한 자동 시스템의 경우 폭발압력이 설비의 허용압력에 도달하는데 까지 걸리는 시간이 40ms 이하인 격렬한 폭

발에는 자동시스템의 적용이 곤란하다.

5. 폭발방지 시스템

폭발의 3요소는 가연성가스, 공기(산화제), 점화원으로 이 세 가지가 적절한 조건이 되면 폭발을 일으킨다. 따라서 폭발을 근원적으로 방지하기 위해서는 이들 3요소 중 어느 하나를 확실하게 제어해야한다. 이들 3요소를 제어하기 위한 시스템은 크게 점화원의 제거, 가연농도의 조절 및 불활성화가 있으며 이들 3가지 방법을 간략하게 설명하면 다음과 같다.

5.1. 점화원의 제거

폭발을 방지하기 위하여 점화원을 제거하려면 무엇이 점화원이 될 것인지를 정확히 파악하여야 한다. 공정과정에서 점화원이 될 수 있는 것들로는 나화, 연소물질 고온표면, 스파크, 용접이나 절단작업의 불똥, 자연발화, 전기스파크 등이 있다. 최소점화에너지가 10mj 이하인 경우는 점화원의 예방만으로는 폭발을 방지하기 어렵다고 보고되고 있다. 다음 표 3은 가연성 물질의 최소점화에너지에 따라 폭발을 방지하기 위해 어떤 조치를 취해야 하는지를 보여주고 있다. 용접작업이나 충격마찰이 발생하는 기계공정, 고온작업 등에서는 점화원을 제거하는 것은 근본적으로 곤란한 일이다. 따라서 전기적 점화원의 가능성이 있는 것은 방폭형 전기 기기를 사용하도록 해야하며, 충격·마찰 등에 의해 불꽃이 발생할 수 있는 곳이나 공정중에서 스파크가 발생할 수 있는 곳에 스파크 감지기와 소화제를 분사할 수 있는 시스템을 설치하여 초기에 폭발을 방지할 수 있도록 해야한다. 공정 중에 점화원이 될 수 있는 전기나 고온 열면 등을 완전히 제거하기는 불가능하므로 이러한 요소들이 가연성 분위기에 노출되지 않도록 고립시킬 수 있는 구조나 본질적으로 점화에너지 이하에서 동작될 수 있는 구조로 하고, 점화원의 제거나 제어에 의해 폭발 방지가 곤란한 경우는 표 3의 방법을 고려해야 할 것이다.

표 3. 최소점화 에너지에 따른 안전조치

점화강도	최소점화 에너지(mj)	안전조치
보통	MIE > 10	점화원 방지
민감	10 > MIE >	전문가의 결정을 요함
매우민감	3 > MIE	점화원 방지 및 폭발 방호 시스템

5.2. 농도제어

일반적으로 가연성 가스는 대기중에서 폭발범위가 있으며 이 범위를 벗어나면 폭발이 방지될 수 있다. 폭발 방지를 위해 가연성 기체의 농도를 상한계 이상으로 유지시키는 경우 시간이 지나면서 폭발범위로 낮아질 수 있으므로 이 방법에서는 가스의 농도를 폭발 하한계 이하로 유지시키도록 해야 한다. 가연성 기체의 경우는 가스 농도계등에 의해 농도측정이 비교적 용이하고 상한계의 결정에 대한 계산적 방법이나 실험적 결정이 비교적 쉬우나 분진의 경우는 농도측정이 곤란한 문제가 있다. 밀폐공간에서 가스와 분진의 농도를 폭발하한계 이하로 낮추는 방법은 신선한 공기 등을 공급함으로써 가연성 기체의 농도를 낮추거나 가연성 가스의 발생억제 및 누설방지 방법 등이 사용되며 가스농도 경보기를 통해서 계속적으로 분위기의 가스농도를 감시하여 농도를 제어하여야한다. 퍼지나 치환 등도 농도 제어를 위한 좋은 방법이 된다. 그러나 이 방법은 다음의 불활성화와 마찬가지로 거의 밀폐된 공간에 대해서 적용 가능하다.

5.3. 불활성화

불활성화 방법은 불활성기체를 첨가하여 공기중의 산소농도를 한계산소농도(L.O.C.) 이하로 만들어 폭발을 방지하는 시스템이다. 이 방법은 산소의 농도를 낮출 뿐 아니라 가연성 기체의 농도도 상대적으로 낮아지게 되며 최소점화에너지는 높아지기 때문에 폭발이 일어나기 어렵다. 불활성화하는 방법은 용기 내부를 불활성 기체로 완전히 퍼지시킨 후 공정을 가능하여도 안전이 보장될 수 있도록 불활성 기체를 계산된 유량으로 첨가하는 방법과 용기의 내부에 불활성가스를 첨가하여 압력을 대기압보다 높게 유지하므로 용기내부로 공기가 확산되지 못하도록 하는 방법이 있다. 이때는 산소의 농도를 검사하는 대신 용기내부의 압력을 계속으로 감시해야 하고, 일정압력 이하가 되면 경보를 발하도록 해야한다. 또한 불활성 분위기를 유지하기 위해 산소농도를 지속적으로 측정하여 한계 산소농도값(LOC)에 가까운 산소농도가 되면 불활성가스를 공급하는 시스템도 있다.

일반적으로 가연물에 대한 LOC값은 14~16%이지만, 가연성가스나 분진운의 경우는 이보다 낮은 농도이며 또 불활성 가스의 종류에 따라 LOC값이 달라지므로 가연성가스나 분진의 종류와 불활성가

스와의 LOC값을 정확히 알아야 한다.

불활성화의 방법을 사용하기 위해서는 시스템이 거의 밀폐된 공간이 되어야 하며 LOC의 값이 사람의 호흡에 필요한 최소 산소농도보다 낮기 때문에 질식의 위험이 있으며 계속적으로 양압을 유지하는 설비의 경우에도 퍼지되는 불활성가스에 의해 질식의 위험이 있기 때문에 불활성화를 하는 설비의 외부에도 산소농도를 감지하여 산소 농도가 19% 이하가 되면 경보를 울릴 수 있는 설비도 갖추어야 한다.

6. 결론

산업의 발달과 함께 폭발 위험성도 점점 증가하고 있으며 실제로 사고의 빈도도 증가하고 있다. 폭발사고에 의한 피해의 경우 타 재해에 비해 치명적인 손실을 초래하기 때문에 폭발을 방지하기 위한 대책은 공정 설계단계부터 수립되어야하며 공정의 운전 중에 설비의 추가와 변경 등이 있는 경우는 이에 대비한 안전조치를 확실하게 해두어야 한다. 아직까지도 우리나라에서는 안전에 대한 의식이 부족하며 사고의 위험성을 간과하는 경우가 많다.

우리나라의 화학 공장의 경우 설비가 노후된 것이나 교체·증설 등이 많아 폭발방지를 위한 대책에 더욱 관심을 기울여야 할 시기에 이른 것으로 평가되고 있다.

공정 장치에서의 폭발 방지 장치들은 여기 설명된 것들 외에도 많은 종류들이 있으나 그동안 많이 사용되어 왔던 것들을 중심으로 간략하게 그 기능과 함께 사용상의 문제점들을 살펴보았다. 폭발방지장치나 방호장치를 설치하는 것으로 모든 문제가 해결되는 것이 아니라 계속적으로 유지·보완하여 폭발 사고 없는 공정이 되도록 해야 한다.

참고문헌

- 1) AIChE (American Institute of Chemical Engineers). Guidelines for Engineering Design for Process Safety. New York: AIChE (1993).
- 2) Bartknecht W. Explosions. Course Prevention, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. 1981.
- 3) BMHB (British Materials Handling Board), Dust Explosion, protecting people equipment, buildings and environment, London, UK. 1995.
- 4) Chatrati K. DeGood. Explosion Isolation systems Used in Conjunction with Explosion Vents. Plant/

- Operation Progress. 1991, 10(3):159.
- 5) Eckhoff R K. Dust Explosions in the Process Industries. 1st edition, Butterworth-Heinemann. 1991.
 - 6) Health and Safety Executive. COSHH assessments, London HM Stationery Office. 1998.
 - 7) Khan F I, Abbasi S A. Major accidents in the process industries and analysis of causes and consequences. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 1999, 12:361~378.
 - 8) NFPA68 (National Fire Protection Association). Venting of Deflagrations, 1988.
 - 9) Roussakins, Nicolas and Lapp. A comprehensive Test Method for In-line Flame Arresters, Westech Industries Ltd. 1989.
 - 10) Schofield C. Guide to Dust Explosion Prevention and Prevention and Protection. 1988.
 - 11) Wrenn Ch. Inerting for Safety. Plant/Operations Progress. 1986, 5(4):225.
 - 12) 防暴工學 (1997년) : 安全工學協會 編, 김 흥, 신창섭, 인세진, 추병길 共譯.