



오하이오 베올리아 화학공장

2009년 5월 4일 0시 07분, 미국 베올리아 공장 쓰레기 재활용 처리 공정에서 생성된 가연성 기체에 의해 화재·폭발 사고가 발생하였다. 이 사고로 인해 직원 2명이 중상을 입고, 2명이 가벼운 부상을 당했다. 연쇄 폭발로 인하여 부지 내 모든 시설물이 심각한 손상을 입었고, 인근 거주지와 사업장에도 상당한 피해가 발생하였다.



사진 1. 베올리아 공장의 폭발사고 후 사진

1. 일반사항

- 소재지: 미국 오하이오주 웨스트 캐롤튼
- 사고일시: 2009년 5월 4일 0시 7분
- 발화장소: 쓰레기 재활용 처리 공정
- 인명피해: 부상4명(중상 2명, 경상 2명)
- 재산피해: 공장 내 8개동 파손, 인근 20여 가구 파손 등
- 발화원인: 가연성 기체 누설 후 화재 · 폭발

2. 건물 및 공정개요

2.1 공장개요

오하이오 주 데이튼(Dayton)으로부터 남서쪽으로 7마일 가량 떨어져있으며, Farmersville West Carrollton 접경지로부터 0.7마일 가량 떨어진 Infirmary Road에 위치한 베올리아 ES 테크니컬 솔루션 유한책임회사(Veolia ES Technical Solutions, LLC. 이하, 베올리아)은 산업 및 지방자치단체의 유해폐기물 처리 서비스를 하는 공장으로, 폐기물 처리를 통해 연료를 추출하고 용매를 회수하였으며, 폐기물 수거 및 수송 등을 수행했다. 인접한 부지는 주거, 산업 그리고 농가로 사용되고 있었다. 부지는 대략 20에이커(약 80,940㎡)에 달했고, 사고 당일에는 약 72명의 직원들이 근무하였고, 사고 당일 밤에는 6명의 직원이 근무하고 있었다.

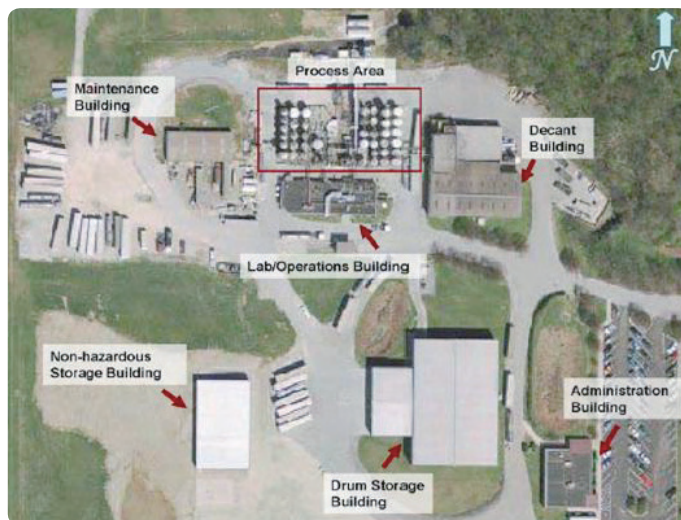


그림 1. 베올리아 공장의 시설 배치도

2.2 시설물 배치

직원들은 사업장의 여러 건물에서 근무했고, 대부분은 실험/운영동과 행정동에서 근무하였다. 실험/운영동은 다용도 구조물로 실험실 테크니션, 실험실 관리인력, 생산관련 사무원, 공장 작업자와 감독자를 위한 주로 사무 용도로 사용되었다. 8개의 사무 공간으로 구성되어 있었고, 조정실, 휴게 및 식당, 실험실, 라커룸도 갖추고 있었다. 건물의 북서쪽에 3개의 보일러가 위치해 있었다. 건물의 북쪽 벽은 가동 중인 유닛으로부터 30 피트도 채 떨어져있지 않았다.

행정동은 가동 중인 공장설비로부터 500피트 가량 떨어져 위치하고 있었으며, 경영진, 기술직, 회계, 환경보건안전부서, 그리고 기타 인사 관련 부서를 위한 사무공간과 회의실이 갖춰져 있었다. 기타 시설물로는 침전동, 드럼 보관동, 비위험 물질처리동 및 유지보수동이 있었다. 비위험 물질처리동은 2개의 탱크 사이트와 3개의 용매회수시설로 구성되어 있었다.

2.3 용매 회수공정

위험/비위험 폐기물을 처리하기 위해 대용량 탱크 트럭과 드럼에 담겨진 용매 폐기물이 시설물로 옮겨졌다. 회수를 위해 모여진 폐기물질은 대부분 산업용 발전기에서 사용된 용매였다. 전형적인 용매의 구성 물질은 지방족 탄화수소, 염소계 유기화합물, 에스테르, 케톤, 그리고 알코올 혼합물이었으며, 종류 후 잔여물, 또는 “침전물”은 가소제, 합성소제, 착색제, 그리고 용매 잔여물로 구성되어 있었다.

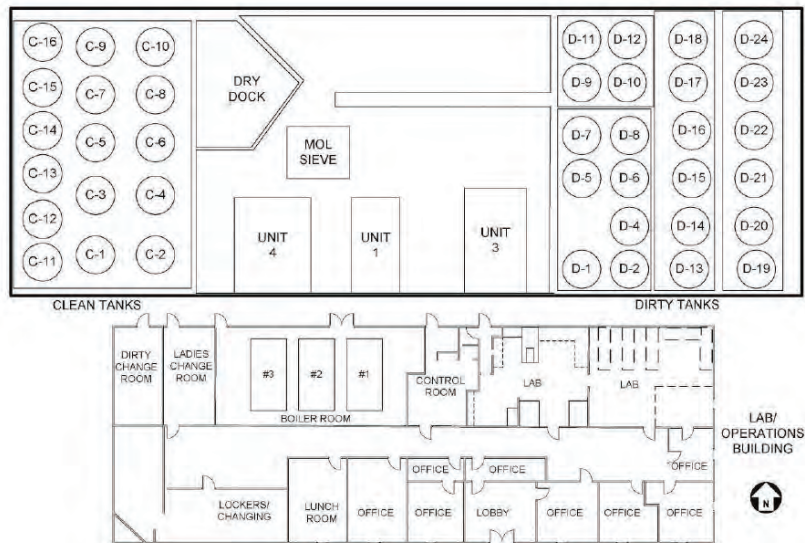


그림 2. 1, 3, 4번 단위설비와 정화전/후 탱크의 배치도 및 실험/운영동 건물의 배치도

탱크 트럭은 트레일러 적재 구역에서 대용량 저장 탱크(정화 전 탱크)로 직접 하역한다. 드럼통은 일시적으로 하역장소에 보관된다. 폐기물은 대용량 저장 탱크에서 침전과정을 거치거나 적하되기 위해

다시 포장된다. 베올리아는 깨끗한 용매물질을 발전기에서 다시 사용할 수 있도록 회송하거나 증류과정을 통해 정화하여 다른 공업용으로 제품화하여 판매하였다. 연소용 보조 연료로 사용하거나 유해폐기물 소각로에서 안전하게 폐기하기 위하여, 증류를 거치지 않아도 되는 폐기물을 유해폐기물 처리가 허가된 시설 외부로 운반하였다.

95% 내지 99%의 농도로 폐용매 물질을 회수하거나 재생시켰다. 23개의 탄소강 소재의 “정화 전”탱크와 16개의 스테인리스강 소재의 “정화 후”탱크는 8,000갤런에서 20,000갤런을 수용할 수 있는 용량으로 1번, 3번 그리고 4번 단위설비까지 동쪽에서 서쪽으로 나란히 배열되어 있었다(그림 2. 참고). 용매는 정화 전 탱크 구역의 탱크에 부어졌다. 정화 전 탱크는 용매회수 처리를 위해 공급하는 역할을 하였고, 정화 후 탱크로 재생된 용매를 옮겼다.

3인치 지름의 증기 파이프 매니폴드는 “증기 균형유지 장치”라고 불리는데, 이는 액체 물질이 탱크에 담기거나 옮겨 나갈 때, 일정한 수준의 기체 압력을 유지시켜 준다. 정화 전 탱크 구역과 정화 후 탱크 구역은 독립된 증기 균형유지 장치를 갖추고 있었지만, 정화 전 탱크에 장착되어 있는 증기 균형유지 장치는 분자여과기와 침전동의 드럼 폐기물 처리 시설과 연결되어 있다.

3개의 증류 시설인 1번, 3번 그리고 4번 단위설비와 분자여과기는 정화되기 전 용매를 처리한다. 분자여과기는 특정 용매물질에서 수분을 제거하는데, 이는 정화 전 탱크의 증기 균형유지 장치로 연결된다. 처리된 용매물질은 정화 후 탱크 구역의 스테인리스 강 탱크에 저장된다.

4번 설비에서는 배치 공정이 사용되는 반면, 1번과 3번 단위설비에서는 계속해서 연속 공정이 가동되었다. 1번 설비는 박막 증발기와 냉각기로 구성되어 있었다.¹⁾ 3번 단위설비는 넓게 필름 처리된 증발기와 분별 증류관, 냉각기로 구성되어 있었다.²⁾ 4번 단위설비는 12,000 갤런을 수용할 수 있는 가열장치, 분별 증류 컬럼 그리고 냉각기로 구성되어 있었다.³⁾ 한명의 작업자는 관리자의 감독 하에 모든 설비의 처리 과정을 담당하였다. 각 설비는 제품의 수요에 맞추기 위해 하루에 24시간씩, 일주일에는 7일간 연일 가동되었다.

세 개의 천연가스 연소 튜브 보일러는 120-psig 스팀을 생산해 냈는데, 이는 처리과정에 사용되거나 건물 난방에 사용되었다. 뜨거운 Therminol 55 오일로 가동되는 장비는 1번과 3번 단위설비의 증발기에 열을 가한다. 장비는 분자 여과기를 재가동시키고, 뜨거운 오일 장치의 열기를 유지하며, 드럼 폐기 시설을 퍼지하기 위해 질소를 사용하였다.

1) 낮은 끓는점을 가진 구성성분이 증류하기 시작할 때까지 박막 증발기는 가열된 관의 내부 표면에서 원료 물질을 가열한다.

2) 넓게 필름 처리된 증발기는 증류나 열에 민감한 액체의 분리를 증가시킨다. 회전하는 와이퍼 블레이드는 벽을 통과하여 물질을 확산시키고, 물질이 균일한 필름을 유지하는 동안, 공급물질은 원통형의 용기 벽의 내부를 흐르게 된다.

3) OSHA의 공정안전관리(PSM) 지침이 전 과정에 적용된다.

3. 화재 및 피해상황

3.1 화재상황 및 인명피해

사고는 2009년 5월 4일 0시 07분에 정화 전 탱크구역의 폐기물 재생과정에서 가연성 증기가 격렬하게 폭발하면서 발생하였고, 두 명의 직원이 심각한 부상을 당했다. 한명은 1도 화상을 입었고, 골반에 2차 골절상을 당했다.

사고 당시 가장 심각한 부상을 당한 두 명의 직원은 모두 실험/운영동에 있었다. 분출된 증기가 점화될 때, 한 직원은 가동중인 설비에서 25피트 떨어져있는 조정실에 있었다. 그 직원은 “건물 내부에 불덩이가 뿜어져 나오자마자 꺼지는 것처럼 보였다”고 보고했다. 첫 번째 연쇄 폭발이 멈추자마자 이 직원은 중앙출입문에 위치한 조립준비구역으로 탈출한 것으로 보인다.

심각한 부상을 입은 다른 한 직원은 폭발이 일어나기 약 3분 전, 실험/운영동 건물 남측에서 식사를 하던 중, 증기가 배출되는 소리와 함께 매우 강한 냄새를 감지했다고 진술하였다. 그는 실험/운영동 건물 앞쪽에 위치한 정화 전 탱크에서 하얀 증기 구름이 피어나는 것을 목격하였으며, 관리자와 다른 직원들에게 알리고 호흡기를 챙기기 위해 실험/운영동으로 돌아왔다. 그때, 증기가 점화되며 넘어진 개인용 라커에 골반이 찢려 골절상을 입었다. 걸을 수 없었던 직원은 몸을 질질 끌면서 실험/운영동의 남서쪽 문으로 나와서 트랙터 밑에 몸을 숨길 곳을 찾았다. 앞으로 다가오는 불길을 보면서 난간을 따라 시설물의 남서쪽으로 이동하였고, 사고가 발생한 두 시간 가량 지나서 관리동 건물에서 발견되었다.

실험/운영동 건물의 북서쪽 모퉁이에 서 있던 직원은 첫 번째 폭발이 발생하기 전에 증기가 배출되는 소리가 확실히 들렸다고 진술하였다. 이어서 세 개의 천연가스 연소 보일러가 위치해있는 실의 이중문이 열리는 것을 목격하였다.(그 당시, 보일러 두 개가 가동 중이었다.) 첫 번째 폭발 후 몇 초 동안, 정화 전 탱크 구역에서 추가로 더 큰 규모의 폭발이 발생하는 것을 보았다. 드럼 저장 건물의 북측 벽면을 따라 불길이 번져오는 것을 목격하였는데, 사고조사 결과에 따르면 이것이 손상을 확대시킨 것으로 보인다. 최초 폭발 후 이어진 복합적인 폭발이 인접 건물의 CCTV에 녹화되었고, 이에 따르면 최초 폭발 후 대략 45분가량 추가 폭발이 진행되었음을 알 수 있다.

보통 50만 갤런의 물을 저장하는 소화용 저수조가 있었는데, 파이프가 파손되어 작동이 불가능하였기 때문에 시스템은 화재를 진압하는 데 사용되지 못했다.

관련 기관들은 시설물 화재진압 과정에서 인근 개울과 주변 시설과의 근접성을 고려하여 환경오염이 우려되므로 물을 사용하지 않고 그대로 타도록 두었다. 소방관들은 다음날 오전 10시 경에 정화 전 탱크 구역에 있는 잔화(殘火)를 끄기 위하여 포 소화설비를 적용하였다.⁴⁾ EPA는 공장의 주변에 공기를 샘플링하기 위하여 트레일러를 배치하였고, 분석 결과 유해물질이 검출되지 않았다.

4) 오하이오 주 소방국 보고서

3.2 공장 내 재산피해

대부분의 건물은 금속 사이딩이 되어 있는 강철 프레임으로 건설되었다. 이 건물들의 과압에 의한 손상은 광범위한데, 물질 배출원으로부터 약 75피트 동쪽에 위치하고 있는 침전동에서 가장 두드러지게 나타났다. 과압의 힘은 건물의 서쪽 부분에 있는 강철 프레임에 집중 되었는데, 이러한 힘에 의해 앵커가 찢어져서 기초로부터 느슨해지고, 오른쪽으로 꺾이게 되었다.

폭발과 화재로 인하여 모든 건물과 가동 중인 단위설비가 손상되었는데, 관리동, 드럼 저장동, 침전물 저장동, 유지보수동, 그리고 비유해성 폐기물 처리동과 몇몇 정화 전 탱크가 파괴된 1번, 3번, 4번 단위설비가 포함된다. 또한 두 개의 스테인리스 강철로 된 정화 후 탱크의 뚜껑은 사고 시 날아갔다.



사진 2. 보일러실과 라커룸 손상 피해



사진 3. 지붕 및 실험/운영동 북쪽 벽 손상 피해



사진 4. 주변 사무실 손상 피해



사진 5. 주변 주거시설 손상 피해

용매 혼합물은 손상된 탱크에서 유출되어 정화 전 탱크의 아래쪽에 고였다. 3번 단위설비의 바로 동쪽 지역에 있는 탱크 지지대는 가연성 증기가 점화된 후에 발생한 화재에 의한 엄청난 열에 의하여 변형되어 가운데가 휘어졌다. 몇몇 탱크는 고열로 인해 무너진 것으로 보인다. 화재 풀에 배출된 물질이 더해지면서, 불의 연소 시간을 연장시킨 것으로 보인다.

가연성 기체가 최초로 점화한 지점으로 보이는 실험/운영동의 피해는 심각했다. 벽돌 블록, 건식벽체, 그리고 보일러실에 있는 문이 뒤틀려서 방의 중심으로부터 바깥쪽 방향으로 휘어졌다. 전체적으로 벽도 바깥쪽으로 휘어졌는데, 대부분의 남쪽 외벽을 포함하고 있다. 보일러가 위치한 곳의 지붕 패널은 상부로

날아갔다. 가동 중인 공장을 정면으로 마주보는 건물의 북쪽은 북동쪽 부분을 제외하고는 그대로 유지되어 있었는데, 이것으로 미루어볼 때 배출된 물질의 시작부분이 남쪽에서 이루어졌을 것이라고 추측된다.

3.3 공장 부지 외부 재산피해

웨스트 캐롤튼 코드 집행관(West Carrollton Code Enforcement Officer)와 회사 기록에 따르면 약 20가구 가량이 폭발사고로 인해 피해를 입었다. 주민들은 유리창이 깨지고, 차고 문이 휘어지고 굴뚝이 떨어져 나갔다고 신고했다. 인근 사업장도 또한 영구적인 손상을 입었다. 0.25마일 가량 떨어져 있는 사업장은 벽돌 담장에 금이 가고 유리창이 깨지며 문이 틀어지고 천장 조명이 파손되고 기반이 틀어지며 철재들이 휘어지고 덕트가 떨어지는 피해를 입었다. 일부 사무실은 파손 상태와 폭발사고 당시 부상당한 직원들을 공개하였다.

손실금액은 생산 손실, 재산 피해, 상실 손해액 등을 포함했을 때, 약 2천7백만 달러 추정된다.

4. 사고원인 및 설비상황

4.1 사고 순간의 설비 가동상황

공장의 작업자들은 12시간 교대근무를 하였다. 주간 작업자는 새벽 5시에 근무를 시작하고, 야간 작업자는 오후 5시에 근무를 시작했다. 사고가 발생하기 전에 근무 교대를 할 때, 주간 근무자는 야간 근무자에게 3번 단위설비의 증발기에서 무엇인가가 떨어져 나와서, 주간 근무시간 동안 슬러지 펌프에서 간헐적으로 딸랑거리는 소리가 나게 하는 원인이 되었다고 구두로 전달해 주었다.⁵⁾ 주간 근무자가 이상한 소리를 인지하고 공장 관리자에게 전화로 연락하였지만, 펌프가 공장 가동을 방해하지 않는 한 공장 가동계획에 나와 있는 대로 3번 단위설비의 가동을 계속하도록 지시받았다. 야간 근무자에게 딸랑거리는 소리가 나는 것을 보여주기 위하여, 주간 근무자는 펌프 흡입을 함으로써 펌프로 들어가는 용기로 질소를 역으로 주입하여 가압하였다.

폭발의 원인이 되는 방출이 일어나기 바로 직전에, 설비 작업자는 물질이 원하는 공비(共沸)⁶⁾ 상태에 도달하였음을 보여주는 시험 결과를 확인하고 3번 단위설비의 테트라하이드로퓨란(Tetrahydrofuran, 이하, THF)의 용매 회수 공정을 멈추는 작업을 시작하였다.

3번 단위설비에서는 정화 전 탱크 14번(D-14)에 보관되어 있던 THF와 물의 혼합물을 처리하고 있었다.

5) CSB의 조사관은 딸랑거리는 소리의 원인이 증발기에서 블레이드를 고정하는 데에 사용되는 볼트가 부러져서 발생한 것이라는 사실을 발견해냈다.

6) 공비 증류(azeotrope)는 둘이나 그 이상의 액체(화합물)가 혼합되어 있는 물질에서 단순 증류를 통해서도 그 성분의 비를 더 이상 변화시킬 수 없을 때의 물질 구성 성분의 임계량 비를 말한다. 두 개의 물질이 공비 증류상태에 도달하면, 끓는 증기는 원래 혼합물 성분과 동일한 성분비를 갖게 된다.

목적은 고객을 위하여 혼합물로부터 THF를 회수하기 위한 것이었다. THF는 정화 후 탱크들이 모여있는 곳에 있는 혼합 탱크로 옮겨져서 물을 첨가하고 재희석하여 20% THF와 80% 물의 혼합물을 만들었다. THF와 물의 혼합물은 3번 단위설비에서 처리하기 위하여 D-14로 다시 부어졌다. THF와 물의 혼합물이 THF 내에 5.3%의 물이 존재하는 공비상태에 도달하게 되면, 3번 단위설비에서의 추가 증류는 더 이상 효과가 없게 되고, 회수 공정은 공비 상태를 깨뜨리기 위하여 분자 여과기로 이송되어 THF를 물의 함량이 0.03%가 될 때까지 건조한다.

가동을 완료한 후에, 3번 단위설비의 가동중단을 위해서는 파이프에 묻어 있는 프로세스 잔여 물질을 청소하는 과정이 필요하다. 이 과정은 가동되는 단위설비로부터 탱크를 분리하기 위하여 밸브를 폐쇄하기 전에 순환 파이프를 통해 정화 전 탱크로 질소를 역으로 불어넣음으로써 수행된다. 설비 작업자가 질소를 정화 전 탱크로 흘리기 시작한 직후에 증기 배출이 시작된다.

사고 당시에 현장에 있었던 작업자는 폭발이 일어나기 약 2분 전에 거대한 증기 방출 소리를 들었다고 보고하였다. 몇몇 작업자는 아주 강한 THF 냄새가 났다고 회상하였으며, 악취 물질 근원의 방출이 정화 전 탱크 지역에서 나타났는데, 이 정화 전 탱크 지역은 실험/운영동에 있는 3개의 천연가스 보일러에서 약 80피트 북동쪽에 위치하고 있었다. 또한, 그들은 정상적인 호흡이 어려운 수준의 증기가 지상에 떠돌고 있다는 사실을 보고하였다. 매우 강한 악취로 인해 몇몇 작업자들이 그 자리에서 쓰러졌다.

4.2 THF의 성질 관련

THF는 범용 인화성 유기용매로서, 무색이고 극성을 띠, 안정한 액체이다. THF는 산소(예, 공기와와의 접촉)와 반응하여 불안정한 과산화물(하이드로퍼옥시드 류가 주종)을 형성한다. 특정 안정화제를 첨가하면 과산화물의 형성을 억제할 수 있다.

THF는 NFPA 704에 따른 인화성 3등급이며, 클래스 1B 인화성 액체이다. THF 수용액은 단지 0.3% 농도에서도 가연성을 띤다. 유출된 증기가 원거리의 발화원을 따라 증기가 흐르면 플래시백 화재의 원인이 될 수 있다. THF 증기는 섭씨 20도(화씨 68도)에서 2.3%에서 11.8% 농도 사이에서 폭발 한계범위를 형성한다. 액체로서, THF는 물보다 밀도가 작고, THF 증기는 공기보다 더 무겁다.

THF에 대한 운송, 취급, 저장과 관련된 주의사항에 따르면 공기 중에서 산소를 배제할 것을 요구한다. THF 가이드 또한 THF로부터 수분 함량을 줄이거나 THF를 혼합하면 고비 억제제와 고농도의 과산화물을 생성할 수 있으며, 격렬한 폭발의 가능성을 높일 수 있다고 제시하고 있다. 과산화물이 되기 쉬운 물질들을 증류하는 것과 연관되어 많은 사고들이 과산화물이 증류 잔류물에 농축될 때 발생한다. 그러나 희석을 하거나 과산화물 검사를 자주 하고, 질소 세척을 하면 이러한 위험은 줄어들게 된다.⁷⁾

4번 단위설비에서 수행되는 THF 회수를 위한 베올리아 社의 절차에는 질소 퍼지, 매 2시간마다 과산화물을 검사하고, 필요한 경우 억제제를 첨가하는 것과 같은 과산화물의 형성을 방지하기 위한 안전장치가 포함되어 있었다. 순수하게 처리된 THF는 정화 후 탱크에 보관되고, 증기 밸런스 라인과는

7) BASF. "테트라하이드로퓨란의 저장과 취급" BASF 社 화학물질부, 1998

밸브로 분리될 수 있었다. 정상적인 동작 하에서는, 3번 단위설비의 물의 농도는 공비 상태인 물 5.3% 이하로 떨어질 수 없었다. 그러나 THF가 증류 단계에서 공비상태 이상으로 농축되지 않았음을 감안할 때, 3번 단위설비에는 과산화물 형성 방지를 위한 처리를 하지 않았던 것으로 보인다.

4.3 릴리프 시스템과 제어실패

미국 화학안전위원회(U.S. Chemical Safety Board, CSB)는 제어되지 않은 배출로 인하여 공정 장비의 외부에 증기가 폭발 농도까지 축적되게 하는 원인이 되었다고 결론을 내렸다. 릴리프 밸브와 파열판은 1번, 3번, 4번 단위설비를 보호하였고, 고압이 걸리는 것을 해소하는 역할을 하였다. 각 탱크의 압력이 0.5psig를 초과하거나 진공이 1.55mmHg을 초과할 때에는 장비가 “정상적인 작동”을 하기 위한 보호 장치인 2인치의 압력/진공 배출 릴리프 시스템이 있었다. 이 장비는 불균형한 전송이 발생할 때에는 언제든지 압력을 해소시킬 수 있고, 음압이 걸렸을 때에는 탱크의 붕괴를 방지하기 위하여 주변 공기를 흡수할 수 있었다. 정화 전 탱크에서 18인치의 긴 볼트 맨웨이⁸⁾는 비상 배출을 할 수 있게 해준다. 맨웨이 뚜껑이 무게가 있기 때문에 개스킷에 대하여 개구부를 밀봉상태로 유지할 수 있었다. 압력이 뚜껑을 밀어 올리면, 볼트는 뚜껑을 들어 올릴 수 있게 된다. 이들 릴리프 장치 모두 대기로 직접 배출한다.

압력 용기를 위한 모든 릴리프 밸브와 파열판은 대기로 직접적으로 압력을 해소한다. 릴리프 밸브가 동쪽이나 북쪽으로 과압을 배출하는 반면, 3번과 4번 단위설비의 파열판은 위쪽 방향으로 배치되어 있어서 북쪽으로 향해 있었다. 가장 심각한 피해를 입은 탱크와 용기는 3번 단위설비로 물질을 공급하는 근원으로 작용했던 D-14 탱크 근처에 위치하고 있었다. 단위설비 작업자는 배출 직전에 이 탱크로 질소를 불어넣었으며, 이것이 피해의 원인이 된 것으로 보인다.

5. 사고 결론

- 환기 장치는 유해한 증기 또는 독성 증기를 포함하거나 제어하기 위하여 설계되지 않았다.
- 두 개의 천연가스 보일러는 사고당시 실험/운영동에서 작동 중이었으며, 아마도 발화원인으로 작용하였을 것이다.
- 실험/운영동은 작업 중인 공장으로부터 30 피트 남쪽에 위치하고 있었으며 다용도 구조물로 되어 있었고 발화원이 있었다. 또한 주간 근무시간에는 대부분 비전문적인 작업자들이 상주하고 있었다.
- 작업중인 공장은 전기적인 분류상 클래스 1, 디비전 1⁹⁾이었으며, 전기적인 코드 요구사항을 준수하였다. 그러나 실험/운영동은 NFPA 70에 따라 분류되어 있지 않았다.

8) 맨웨이(manway)란, 탱크에의 접근을 위하여 탱크의 정상부에 설치된 큰 개구부를 말한다.

9) NFPA 70은 인화성 물질이 존재할 가능성이 있는 지역에서 전기장비의 위치와 필요한 보호를 위해 지정한 미국 방화협회의 국가 전기 코드이다.

- 실험실이나 운영 건물이 작업 중인 유닛과 너무 가까이 위치해있는지를 평가하기 위한 공정 위험 분석(process hazard analysis, PHA)에 대한 기록이 존재하지 않았다.
- 가장 심각한 부상을 입은 두 명의 직원은 사고 시에 실험/운영동에 상주하고 있었다. 한 명의 직원이 공장에서 증기 방출을 완화하기 위하여 시도하는 동안, 다른 한 명의 직원은 이러한 시도를 돕기 위하여 개인 보호장구를 착용하는 중이었다.

6. 화재사고 분석

6.1 과압 이벤트

CSB는 공정이 이루어지고 있었던 영역에서의 광범위한 손상으로 인하여 결론적으로 과압 이벤트의 원인을 판별할 수 없었다. 직원들의 진술과 처리되는 물질들의 특성에 기초하여, 질소가 역류하는 과정 동안 가연성 기체가 방출되기 위해서는 두 가지 가능한 시나리오를 생각해볼 수 있다.

- 과산화물을 포함하고 있는 누적된 THF 잔류물이 진공차단기 또는 긴 볼트 맨웨이를 통하여 산소에 노출될 때 갑자기 활성화되었다.
- 정화 전 탱크로 이어지는 배관이 질소를 불어넣기 전에 의도하지 않게 잘못 매니폴드 되어 있었고, 처리되지 않은 가연성 액체 또는 과산화물을 포함한 액체를 포함하는 주변의 정화 전 탱크를 가압하는 결과를 낳게 되었다.

6.2 미국 NFPA 코드상 분석

NFPA 기준 중 TSDF¹⁰⁾에 딱 맞는 것은 없지만, 가연성 액체관련 기준인 NFPA 30이 인화성 및 가연성 액체의 저장, 처리, 사용에 적용될 수 있다. Section 3.3.6.1에 정의된 바와 같이, 베올리아는 실험실과 운영구조를 “중요한 건물”이라고 간주하였다. 중요한 건물이란 2분 내에 탈출하는 것이 합리적으로 예상되지 않거나, 중요하거나 위험한 프로세스를 순서대로 차단하기 위하여 숙련된 인력을 필요로 하는 공정 제어 건물을 말한다.

단위설비 작업자가 유해물질의 누설을 발견하였을 때, 그는 공장 내에 위치하고 있는 차단 밸브에 접근함으로써 누설을 막기 위하여 시도하였으나 누설된 물질의 심한 냄새 때문에 불가능하였다. 만약 실험/운영동에 중앙처리 가능한 차단 능력이 있고, 건물이 가동 중인 공장으로부터 훨씬 이격되어 있었다면 단위설비의 작업자는 공정의 흐름을 안전하게 순차적으로 차단할 수 있었을 것이다.

NFPA 30 Section 22.4.1.1 제어실의 위치에 대한 지침에서는 “안정한 가연성 액체”를 처리하는 가동중인 단위설비로부터 10피트 내에 위치하는 것을 허용한다. 베올리아는 가동중인 단위설비에 대해서는 클래스

10) [약어] treatment, storage, and disposal facilities, 처리(處理)□저장(貯藏)□처분시설(處分施設)

1, 디비전 1의 지침을 사용한 안정한 가연성 액체에 대한 NFPA 지침을 준수하는 것으로 나타났지만, 전기적으로 미분류된 실험/운영동의 위치는 여러 잠재적인 발화원(3개의 불이 켜진 보일러 포함)으로부터 누출된 물질이 30 피트 내에 위치하도록 설계되어 있었다.

6.3 화학공정안전센터의 분석

화학공정안전센터의 간행물 “외부 폭발과 화재에 대한 공정 플랜트 건물 평가를 위한 가이드라인”은 클래스 1B 액체를 처리하는 지역에서의 건물부지 선정에 대한 지침을 제공한다. 클래스 1B 액체의 예에 명시되어 있는 모든 기준에 따르면, 폭발이 다음과 같은 이유에서 거의 일어나지 않을 것이라고 하였으나 베올리아 공장에서는 달랐다.

- 저장과 방출 조건에서 클래스 1B 액체의 고유한 특성으로 인하여 증기운폭발(VCE)에 대한 가능성이 매우 낮다. (밀폐의 부족, 정체 그리고 낮은 압력 하에서의 물질의 방출)
 - ☞ 본 사고에서는 상당한 양이 정체되고 밀폐되는 현상이 탱크, 펌프 등에서 발생하였다.
- 누출된 물질은 화학 반응 또는 응축된 상의 폭발에 대한 가능성이 없다.
 - ☞ 본 사고에서는 처리된 물질에서 화학 반응이 일어날 가능성이 존재하였다.
- 폭발에 대한 잠재력이 완전히 제거될 수 없다는 사실에서, 잠재적인 발화원을 최소화하기 위한 방법과 함께 경보설비와 및 공장 운영 매뉴얼은 충분하다고 평가되었다.
 - ☞ 그러나 전기적으로 미분류된 실험/운영동은 폭발 사건에 대한 초기 발화원이 될 만큼 공장과 근접해 있었다.

6.4 OSHA 공정안전관리 표준 위반

사후조사과정에서, 美 노동안전위생관리국(Occupational Safety and Health Administration, OSHA)은 공정안전관리 표준의 수많은 위반사례를 언급하였다. OSHA의 공정안전관리¹¹⁾ 표준(29 CFR 1910.119)에서는, 가연성 액체와 가스뿐만 아니라 매우 위험한 화학 물질의 치명적인 누출의 결과를 방지하거나 최소화할 것을 고용주에게 요구하고 있다. 헥산과 아세톤은 명시된 화학물질이며, 4번 단위설비는 한계량 이상을 처리하였으므로 공정안전관리 표준이 적용되었다.

인용문에 따르면, 회사는 가연성 액체의 취급을 위한 정책과 절차가 잘 시행되고 있는지를 확인하기 위하여 매 3년마다 수행하여야 하는 준수성 감사를 이행하지 않았다고 주장하고 있다. 또한 OSHA는 작업자의 훈련부족, 배관과 공정에 대한 불충분한 시험 및 검사, 공정 운영 절차에 대해 작성된 기준의 부재, 장비의 기계적 무결성 유지 부족, 그리고 공정 안전과 관련된 다른 항목들을 언급하고 있다.

11) 공정안전관리는 美 노동안전위생관리국에 의해 발표된 규정이다. 공정은 노동안전위생관리국(OSHA)과 환경보호국(EPA)에 의해 정의된 고도의 유해 화학물질의 사용, 저장, 제조, 취급 또는 현장 이동을 포함하는 일련의 활동 또는 활동의 조합을 의미한다.

7. 교훈 및 권고사항

- 공장을 재가동하기 위해서는, 운영 플랜트의 근접 건물에 비필수인력의 출입을 제한하는 정책을 보완하여야 한다.
- 공장을 재가동하기 위해서는, 폐쇄식 릴리프 시스템을 고안하여 적용하고, 릴리프 시스템이 대기 중으로 안전한 벤팅(예를 들면, 플레어의 사용)을 할 수 있도록 설계하여야 한다.
- 베올리아 공장에 있는 OSHA 공정 안전 관리가 적용된 모든 공정에 대해, NFPA 70에 정의된 전기적인 분류와 시설간 거리 기준에 맞게 위치하고 설계되어 있는지를 확인하기 위한 공정 위험 분석을 수행하여야 한다.
- NFPA 30 17장에 주거용 건물, 제어실, 공정영역 간의 안전이격거리 결정을 위한 문서화된 기술 분석을 요구하는 Section을 추가하고, 분석은 관할 기관의 인정을 받아야 한다.
- 클래스 1B 인화성 액체에서 나타날 수 있는 특징(예를 들면, 무거운 증기, 정체와 밀폐가 일어나는 공장 영역)의 다양성을 반영하도록 제어실 부지 선정 지침을 개정하여야 한다.
- 유해 폐기물 처리, 저장 및 폐기 시설에 특화된 해당 점유 표준이 개발되고 공포되어야 한다. 표준 개발의 목적은 화재, 폭발 그리고 누출로부터 생명과 재산의 안전을 위한 기술적인 요구사항을 규정하기 위한 것이며, 화재, 폭발, 누출로부터 발생하는 손실을 최소화하는 데에 목적이 있다.
 - 유해성 확인
 - 화학물질에 의한 화재와 배출로부터 보호 및 예방
 - 시설 및 시스템 설계
 - 직원 교육 및 절차
 - 검사 및 유지보수
- 유해 폐기물 처리 및 저장시설에서 화재, 폭발 그리고 누출사고를 줄이기 위하여 유해 폐기물에 대한 처리, 공정, 보관과 관련된 표준화된 지침이 개발되고 수립되어야 한다.