



미국 화학물질 사고 조사국(CSB)
(U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board)

정유공장 사고조사 보고서

(사망1명, 부상 8명, 환경오염)



MOTIVA ENTERPRISES LLC

Delaware City Refinery
Delaware City, Delaware
2001년 7월 17일

핵심 사안:

- 기계적 건전성
 - 공학적 관리
 - 변경관리
 - 화기작업
-

Report No. 2001-05-I-DE

작성일: 2002년 10월

1.0 개요

- 1.1 사고 배경
- 1.2 사고조사 과정
- 1.3 텔라웨어시 정유공장
- 1.4 황산 제조공정
- 1.5 황산 저장탱크

2.0 사고 경위

- 2.1 사고발생 이전 상황
- 2.2 사고 발생
- 2.3 사고영향 및 비상대응

3.0 사고 분석

3.1 부식 및 탱크 검사

- 3.1.1 부식율
- 3.1.2 부식촉진의 잠재적 원리
- 3.1.3 폭발 분위기 형성
- 3.1.4 탱크 결함 분석

3.2 사용전 황산에서 사용된 황산으로의 전환작업

- 3.2.1 공정
- 3.2.2 탱크내의 불활성화
- 3.2.3 보조 시스템

3.3 탱크 전환작업의 변경관리

3.4 탱크393 관리

- 3.4.1 잠재적 유해성에 대한 인식부족
- 3.4.2 검사 연기

3.5 화기작업

3.6 불안정한 작업조건에 관한 보고서

3.7 황산의 등급분류

3.8 동종 사고

- 3.8.1 미국 Rouseville 소재 Pennzoil 정유공장
- 3.8.2 미국 Channelview소재 ARCO사

3.9 규정

- 3.9.1 공정안전관리 규정
 - 3.9.2 Jeffrey Davis 지상식 저장탱크 관련법안
-

4.0 사고의 근원 및 원인 제공

4.1 사고의 근원

4.2 사고의 원인 제공

5.0 권고안

6.0 참고문헌

별첨 A: 탱크393 연혁

A.1 1992년 - 두께 수치

A.2 1994년 - 내부검사

A.3 1998년 - 동체 누출

A.4 1999년 - 동체 누출

A.5 2000년 - 동체 누출

A.6 2001년 - 동체 누출

별첨 B: 구성도

그림

1. 산 저장탱크 및 작업통로 설계도
2. 저장탱크 방유제의 북동쪽으로 붕괴된 탱크393
3. 북쪽 방향에서 본 탱크394의 작업통로 사고현장 잔해
4. 탱크393의 측면
5. 탱크393 지붕 위의 홀
6. 임시 호스가 인입된 탱크393의 지붕에 뚫린 홀
7. 내부 폭연 과정에서 탱크393의 압력 상승 곡선
8. 내부 폭연으로 인해 위로 들어올려진 탱크393의 지표면
(동체와 분리되기 이전)
9. 불활성 시스템 흐름도

표

1. 탱크393의 노후화 및 보수작업 연혁
 2. Motiva사 API 653 탱크 검사관 조사 결과 및 권고안 내역
-

2001년 7월 17일, 미국 텔라웨어주에 소재한 Motiva Enterprises LLC 텔라웨어시 정유공장(DCR)에서의 저장탱크 폭발사고로, 보수공사 하청업체인 Washington Group International, Inc (WGI)소속의 보일러 제작공 1인이 사망하고, 8명의 부상자가 발생했다.

WGI 보수 작업반은 황산(H_2SO_4) 옥외저장탱크(tank farm)의 발판(grating)을 수리하던 중, 화기작업 중에 발생한 불꽃이 인화성 증기에 점화되었다. 이 때, 옆에 있던 탱크에서 저장 물질이 방출되었고, 옥외 저장탱크 지역에 있는 다른 여러 탱크들에서도 저장 물질이 방출되었다. 화재는 약 1시간 반 정도 지속되었으며, H_2SO_4 는 텔라웨어 강으로 흘러 들어가 심각한 수질오염의 결과로 이어졌다.

본 사고의 심각성을 감안하여, 미국 화학물질 사고 조사국(CBS)은 사고의 근원적인 원인을 파악하고, 이와 유사한 사고의 발생을 사전에 방지하기 위한 권고안을 작성하기 위한 조사에 착수했다.

ES.2 사고발생

탱크393은 1979년에 처음 제작된 6개의 415,000갤런의 탄소강 탱크 중 하나로, 공동 방유제 안에 설치되어 있었다. 6개의 탱크에는 정유공장의 황산 알킬레이션 공정에 사용되는 사용전¹⁾ 황산(H_2SO_4)과 사용된²⁾ 황산이 저장되어 있었다. 수년간에 걸쳐, 탱크들은 국부적으로 심각하게 부식되어왔다. 누출 상태는 1998년부터 2001년 5월까지 탱크393의 동체에서 매년 발견되었으며, 2001년 5월 발견된 한 건을 제외하고, 보고된 누출 사례는 모두 보수되었다. 그러나, 사고 당시, 탱크393의 동체와 지붕에서 발견된 몇 개의 추가 누출 홀(leak hole)은 보고되지 않았었다.

탱크에서 누출이 발생하여 이를 보수하는 사례가 발생함에 따라 Motiva사의 탱크 감독관은 탱크393에 대한 내부검사 실시를 수 차례에 걸쳐 권고했었다. 그러나 탱크393이 긴박한 위험상황에 노출되어 있었음에도 애초에 1996년으로 예정된 내부검사를 제차 연기해 오고 있었다.

1)일반적으로 사용전 H_2SO_4 는 산 99%, 수분 1%를 함유.

2)일반적으로 사용된 H_2SO_4 는 증발가능한 경질탄화수소가 포함된 탄화수소로서 88%~95%까지의 산과 최고 5%의 물을 포함하고 있다.

사용된 H_2SO_4 는 일반적으로 소량의 인화 물질을 함유하고 있다. 산에 있는 경질탄화수소는 증발성으로 인해 산소가 충분한 경우 액체 표면에서 쉽게 점화될 수 있는 조건을 갖게 된다.

7월17일

하청업체 작업자가 작업을 수행하고 있었을 때 용접작업중 발생한 불꽃이 탱크393의 증기공간에 유입되었거나, 아니면 탱크에 뚫린 홀에서 방출된 인화성 증기와의 접촉을 통해 인화되어 그 내부로 불꽃이 전파되었다.

탱크에서 누출이 발생하여 이를 보수하는 사례가 발생함에 따라, Motiva사의 탱크 감독관은 탱크393에 대한 내부검사 실시를 수 차례에 걸쳐 권고했었다. 그러나, 탱크393이 긴박한 위험상황에 노출되어 있었음에도, 애초에 1996년으로 예정된 내부검사를 재차 연기해 오고 있었다. 1996년과 2000년 사이, 탱크393은 사용전 황산과 사용후 황산을 전환하기 위해 세 차례에 걸쳐 탱크를 비웠었던 적이 있었으나, Motiva사는 탱크를 지속적으로 사용하기 위해 전환했을 때, 가동을 중단하지 않았었다. 2000년, 미국환경청(U.S. Environmental Protection Agency: EPA)이 18개의 탱크에 대한 내부검사의 필요성을 제기한 이후, Motiva사가 유지보수 예산을 삭감하면서, 탱크393에 대한 검사계획은 2002년 2월로 연기되었다.

탱크393은 최초에는 사용전 H_2SO_4 를 저장하기 위해 설계되었으나, 사용후 황산을 저장하기 위한 용도로 설계된 4개의 탱크들 중 하나였다. 사용후 H_2SO_4 는 일반적으로 소량의 인화성 물질을 함유하고 있다. 산에 함유된 경질탄화수소는 증발성으로 인해 산소가 충분한 경우 액체 표면에서 쉽게 점화될 수 있는 조건을 갖게 된다. 이러한 위험성을 방지하기 위해, Motiva사는 이산화탄소(CO_2) 불활성 시스템(inerting system)³⁾과 대기압력통기구(conservation vent)⁴⁾, 그리고 화염방지장치(flame arrestor)⁵⁾를 설치했다. 하지만, 시스템은 설계가 부적합하고 탱크393의 증기공간(vapor space)에서 인화성 대기 형성을 방지하기에 충분한 CO_2 를 주입하지 못하는 문제점에 노출되어 있었다.

2001년 6월과 7월, Motiva사는 황산저장 탱크의 지붕에서 계기의 관찰을 위해 접근할 수 있는 작업용 통로 보수업체로 WGI사를 선정했다. 작업용 통로는 산의 증발에 의하여 격자가 손상되어 있었다. 하청업체 작업자들은 수일간에 걸쳐 격자의 손상된 부분을 절단하여 새로운 부분으로 교체하기 위하여 용접작업을 수행했다.

3)불활성이란 시스템 내에서 인화 물질이 연소하지 못하도록 하는 비인화성, 비활성화 가스의 사용을 의미.

4)대기압력통기구(PV 밸브)는 탱크 내의 초과 압력 또는 진공상태를 완화시키기 위해 사용되는 무게하중(weight-loaded), 파일럿조작(pilot-operated), 또는 용수철 조작(spring-loaded) 형태의 안전장치.

5)화염방지장치는 열린 통기구를 통해 탱크 안으로 불꽃이 확산되는 것을 방지하기 위한 장치.

7월17일, 하청업체 작업자가 작업을 수행하고 있었을 때, 용접작업중 발생한 불꽃이 탱크393의 증기공간에 유입되었거나, 아니면 탱크에 뚫린 홀에서 방출된 인화성 증기와 접촉을 통해 인화되어 그 내부로 불꽃이 전파되었다. 탱크 증기공간에서의 폭발로 탱크의 동체가 바닥으로부터 분리되었다. 이 때 264,000갤런의 사용후 H_2SO_4 물질이 순간 방출되었다. 이로 인하여 인접한 탱크396에서도 저장 물질이 누출되었으며, 수주일 동안 나머지 저장탱크에서 지속적으로 산이 누출되었다.

사용된 산에 포함된 인화성 및 연소성 물질이 점화되어, 화재는 1시간 반 동안 지속되었다. EPA가 추정한 1.1million 갤런의 사용된 H_2SO_4 의 총 누출량은 방유제 지역을 휩쓸어 공장을 오염시켰으며 폐수 시스템을 무용지물로 만들었다. 약 99,000갤런의 산은 텔라웨어 강으로 유입되어 어류를 비롯한 수자원을 오염 시켰다.

작업용 통로에서 작업 하고 있었던 작업자 1명은 중상을 입었으며, 이외 8명의 작업자들은 산으로 인해 눈과 폐에 화상을 입었다.

*EPA가 추정한 1.1million
갤런의 사용후 H_2SO_4 의
총 누출량은 방유제 지역
을 휩쓸어 공장을 오염시
켰으며 폐수 시스템을 무
용지물로 만들었다.*

ES.3 주요 결과

1. 탱크393의 증기공간에서 발생한 폭발⁶⁾로 인해 탱크의 동체와 지표면 연결부를 분리시키기에 충분한 압력이 발생했다. 폭발은 탱크 지붕과 동체에 뚫린 홀 중 하나에 인접한 인화성 증기와 접촉하여 인화되어 탱크 내부로 불꽃이 전파된 것으로 추정된다.

*탱크393의 증기공간에서
발생한 폭발로 인해 탱크
의 동체와 지표면 연결부
를 분리시키기에 충분한
압력이 발생했다.*

2. Motiva사는 이러한 황산 저장탱크 지역을 미국 산업안전보건청(OSHA)의 공정안전관리제도(PSM) (29CFR 1910.119)에 적용받지 않은 것으로 생각하고 있었다. 이번 사고는 기계적 건전성, 변경관리, 그리고 가동 전 점검 등과 같은 공정안전관리규정을 준수하여 시행되었다면 발생하지 않았을 것이다.

*[OSHA] PSM규정에는
 H_2SO_4 에 관한 내용이
포함되어 있지 않았다*

OSHA의 PSM 규정은 대규모 폭발·화재사고를 예방하고 안전을 도모하기 위한 체계적인 접근방법이다.

6)폭발이란 CSB가 정의한 바에 따르면, 약 1평방인치당 5.0파운드(psig)의 최대 압력을 생성하는 경미한 폭연(deflagration)을 의미함.

1992년 제정된 본 규정에는 안전관리에 관한 14개 항목이 상세히 명시되어있다. 인화성 물질을 포함한 특정 유해물질 목록에 포함된 모든 물질에 대한 공정은 반드시 상기 항목을 준수하여 운전되어야 한다.

그러나:

- PMS 규정에 H_2SO_4 를 포함하고 있지 않았다.
- 규정량 이상의 인화성 물질을 대기압 상태에서 저장하고 있는 저장탱크는 그 탱크가 공정과 연관되어 있더라도 적용받지 않는다는 최종 결론을 내렸다. OSHA는 이러한 결정사안⁷⁾에 대해 이의를 제기하지 않았다.
- OSHA는 7월17일 사고에서 Motiva사의 PSM 규정을 위반 여부에 대하여는 언급하지 않았다.

3. 탱크393과 이외 다른 황산 탱크에서는 전에도 저장물질이 누출되었던 적이 있었다. 탱크393에 대한 주요 보수작업이 1994년 시행되었으나, 이후 1998, 1999, 2000년, 그리고 2001년에 걸쳐 매년 최소한 한 차례의 누출 사례가 발생했었다. 2001년 5월에 보고된 누출사례는 시정되지 않았다. 심각한 누출사례는 다른 H_2SO_4 저장탱크에서도 발생했으며, 이들 탱크 중 2개는 부식으로 인해 폐기 처분되어 교체되었다.

4. 1994년, Motiva사의 탱크 검사관은 탱크393의 두께 측정을 1996년에 시행할 것을 권고했다. 1999년, 2000년, 그리고 2001년에 작성된 보고서에서, 검사관들은 “가능한 조속한 시일 내에” 내부검사를 실시할 것을 권고했다. Motiva사는 이러한 권고안에 대한 해당조치를 취하지 않았다.

5. 탱크393은 사용전 및 사용후 황산을 전환하기 위해 3차례 비워졌었다(2000년 4월과 10월, 2001년 4월). 이러한 전환작업을 수행할 당시 탱크393을 보수하고 내부검사를 실시할 수 있는 기회가 있었다.

*Motiva사의 H_2SO_4 저장
탱크 검사에 대한 계획과
방법은 부적절했다.*

7)OSHA, 자율준수프로그램(Compliance Programs)이사회 이사, John B. Miles, Jr. 의 회보에서부터 1997년 5월 12일, 지역행정관의 “안전관리규정 절차상의 저장 인화성 물질에 대한 해석, 적용범위 규정” 회보에 명시된 결정사안.

6. Motiva사의 H₂ SO₄ 저장탱크 검사에 대한 계획과 방법은 부적절했다. Motiva사의 계획은 미국석유학회(API)의 653 규정⁸⁾ (내부검사 5년, 외부검사 10년)의 시효가 다하는 시점에서 탱크에 대한 검사를 실시하려 했다. 그러나, API 653 규정은 횃수는 반드시 저장물질의 부식성에 기반하여 수정되어야 한다고 명시되어 있다. Motiva사의 검사관은 검사횃수를 재검토할 것을 권고했으나, 검사는 시행되지 않았다.

*외부검사에서 탱크 지붕에
뚫린 홀이 발견되었다면
내부검사의 필요성이 제기
되었을 것이다.*

1994년 내부검사 이후, Motiva사의 검사관들은 탱크393에 대한 두께 측정을 1996년에 시행할 것을 권고했으나, 이는 실행되지 않았다. 뿐만 아니라, 1994년 이후, 전체적인 외부검사 또한 시행되지 않았다(검사관들은 누출 주변부의 동체(shell)두께에 대한 특별검사에 한해 권고).

외부검사에서 탱크 지붕에 뚫린 홀이 발견되었다면 내부검사의 필요성이 제기되었을 것이다. API 653규정은 탱크의 갈라진 틈, 노후화, 또는 탱크의 성능에 영향을 미칠 수 있는 이외 다른 조건들을 평가하여, 가동 상태의 적합성을 판단하는 기준을 제시하고 있다.

7. NACE International (미국부식공업회: National Association of Corrosion Engineers)RP 0294-95⁹⁾은 H₂ SO₄ 저장탱크에 대해 5년마다 1회의 외부검사와 2년마다 1회의 내부검사를 시행할 것을 권고하고 있다. CSB(미국 화학물질 사고 조사국)가 규정한 농축 H₂ SO₄ 재생업체¹⁰⁾는 이러한 NACE 지침을 준수해야 한다.

8. Motiva사의 경영진은 안전성 또는 환경에 심각한 위험을 초래할 수 있는 탱크393의 누출 상태에 대한 대비책을 고려하지 않았다. 누출을 보수하는 것은 일시 방편이며 탱크의 건전성을 확보하기 위해서는 내부검사가 필요하다는 검사관들의 권고가 있었음에도, 경영진은 갈라진 틈을 메우는 것만으로 탱크가 안전할 것이라고 믿고 있었다. 또한 그들은 탱크 내부의 액체저장 수위를 누출 지점 이하의 수준으로 낮추면 위험요인을 제거할 수 있을 것이라고 생각하고 있었다.

*Motiva사의 경영진은 안
전성 또는 환경에 심각한
위험을 초래할 수 있는 탱
크393의 누출 상태에 대
한 대비책을 고려하지 않
았다.....또한 탱크 내부의
액체저장 수위를 누출 지
점 이하의 수준으로 낮추
면 위험요인을 제거할 수
있을 것이라고 생각하고
있었다*

8)API 규정653. 탱크 검사, 보수, 전환, 및 재시공. 1995년 12월

9)NACE권고안(RP)0294-94. 대기온도에서 농축 황산 및 유제 저장탱크에 대한 설계, 제작 및 검사. 1994년.

10)H₂ SO₄ 재생 업체는 정유업체로부터 사용후 황산을 확보하여, 사용전 황산으로 전환시켜 재사용할 수 있도록 함.

9. 탱크393은 2000년 3월, 사용전 황산을 사용된 황산의 사용으로 전환했다. 전환 작업은 CO₂ 불활성 그리고 화염 방지기와 함께 통기구(vent)/vacuum breaker 등을 추가하는 것이었다.

- 전환 작업에 있어, Motiva사는 공학적 공법을 적용하지 않았고, WGI의 공학적 지원을 요청하지도 않았다.
- 일반적이고 예외적인 조건하에서의 불활성 가스사용에 대한 요구사항 평가가 부적합했으며, CO₂ 가스는 탱크의 비인화성 분위기를 유지하기에 불충분했다.
- 탱크는 weak seam roof(얇은 두께의 이음지붕) 또는 이외 비상통기구 설비 등이 갖추어지지 않아, 사고 시, 탱크가 바닥에서 분리되어 저장 물질이 유출되는 참사를 예방하지 못했다.

10. Motiva사는 탱크393을 사용전 황산에서 사용된 황산으로 전환하는 작업에 있어서 다음과 같은 내용을 검토하는 변경관리절차를 준수하지 않았다.

- 관련분야 전문가(예, 부식, 탱크설계 등)에 의한 전환작업 검토 및 승인.
- 위험성 평가
- 가동 전 안전성 평가

11. 탱크393의 증기공간은 적절하게 불활성화 되어 있지 않았다. 내부를 인화성 범위 밖으로 유지하기에 충분한 CO₂ 가 주입되지 않았다.

- CO₂ 는 탱크393에 고정식 배관으로 주입된 것이 아니라, 고무호스를 통해 주입되었다. 호스의 길이가 길고 직경이 작기 때문에, 탱크393에 방출된 CO₂ 양은 불충분할 수 밖에 없었다.
- CO₂ 주입 호스는 탱크393에 부착되어있지 않았다. 호스는 지붕에 뚫려있는 홀로 늘어뜨려져 있었고, 수년간에 걸쳐 사용 되었으며, 다른 황산 탱크들과 마찬가지로, 통상적인 고정식 배관으로 교체되지 않았다.
- 탱크393의 증기공간과 연결된 월류배관(overflow line)은 대기로 개방되어 있었다.

일반적이고 예외적인 조건하에서의 불활성 가스사용에 대한 요구사항 평가가 부적합했으며
CO₂ 가스 방출은 탱크내의 비인화성 분위기를 유지하기에 불충분했다.

Motiva사는 탱크393을 사용전 황산에서 사용된 황산으로 전환하는 작업에 있어서 변경관리절차를 준수하지 않았다.

CO₂ 는 탱크393에 고정식 배관으로 주입된 것이 아니라 임시 고무호스를 통해 주입되었다.

12. 탱크393의 액체표면 상부의 증기공간에는 인화성 증기가 포함되어 있었다. 알킬화 공정에서 사용된 H_2SO_4 은 인화성 분위기를 생성하기에 충분한 탄화수소를 함유하고 있다.

탱크 내용물이 안정화되면서, 탄화수소 중 일부는 증기공간 내부에서 증발하여 인화 가능한 농도에 도달된다.

13. 탱크에 뚫린 홀과 비효율적인 불활성 시스템으로 인하여, 탱크393은 심각한 국부적 부식조건에 노출되어 있었다. 부식의 원인은 홀을 통해 탱크 내부로 빗물과 습기가 들어갔기 때문이다. 수분이 더해지면서 H_2SO_4 의 농도가 저감됨에 따라 부식을 촉진시켰다.

14. 2001년 6월 27일, 현장 작업자 한 명이 인화성 증기농도 수치를 이유로 황산탱크 작업통로에서의 화기작업을 거부한 이후, 불안정한 작업 조건에 대한 보고서¹¹⁾를 제출했다. 보고서에는 탱크393과 396에 탱크 지붕에 뚫린 홀 내부로 인입된 호스가 있었으며, 이 호스로 탱크393에 불활성 가스가 주입되었다는 내용이 언급되어 있었다.

불안전 작업조건 보고서가 제출된 이후 사고가 발생하기 전 3주 동안, Motiva사는 해당 내용을 조사했지만, 언급된 결함 사항을 시정하지 않았으며, 홀이 뚫린 주변에서의 화기작업 금지 등과 같은 임시 안전조치를 취하지도 않았다.

15. Motiva사는 지붕과 동체에 홀이 뚫린 탱크 주변에서의 화기작업을 수행했다. 화기작업은 허가되어서는 안될 사항이었다. Motiva사는 탱크의 현 상태와 인화성 물질이 함유되어 있다는 사실에 대해 이미 알고 있었다. 뿐만 아니라, 화기작업시에, 인화성 증기의 점화를 방지하기 위한 대비책이 부적합했다. 7월 17일, 그리고 사고가 발생하기 이전 며칠 동안 하청업체 작업자들은 황산 저장탱크 위의 작업통로에서 설비를 절삭하여 교체하는 용접작업을 했었다.

11)불안정한 작업조건 보고서(Unsafe Condition Reports)는 적합하게 시정 조치되지 않은 안전보건에 관한 사항을 경영진과 노동조합에 보고하기 위해 작업자가 작성하여 제출할 수 있음.

탱크에 뚫린 홀과 비효율적인 불활성 시스템으로 인하여

탱크393은 심각한 국부적 부식조건에 노출되어 있었다.

불안전 작업조건 보고서가 제출된 이후 사고가 발생하기 전 3주 동안

Motiva사는 해당 내용을 조사했지만

언급된 결함 사항을 시정하지 않았으며

임시 안전조치를 취하지도 않았다.

화기작업은 허가되어서는 안될 사항이었다. Motiva사는 탱크의 현 상태와 인화성 물질이 함유되어 있다는 사실에 대해 이미 알고 있었다.

사고가 발생하기 전 몇 주 동안 최소한 2건의 경우 작업통로 격자에서의 화기 작업 승인은 취소되었는데 그 중 한번은 과도한 이산화황(SO_2)가스 량 때문이었고 두 번째 사례는 인화성 증기의 높은 농도수치 때문이었다.

- 하청업체 근로자들은 모두 탱크393과 396 지붕에 홀이 뚫린 부근에서 화기작업을 하는 것이 심각한 위험에 노출된다는 사실을 인식하지 못하고 있었다.
- 사고가 발생하기 전 몇 주 동안 최소한 2건의 경우, 작업통로 격자에서의 화기작업 승인은 취소되었는데, 그 중 한번은 과도한 이산화황(SO_2)가스 량 때문이었고, 두 번째 사례는 인화성 증기의 높은 농도수치 때문이었다. 그러나, 이러한 전례가 있었음에도, 7월17일의 화기작업 시 작업공간에서 주기적인 확인을 통하여 인화성 분위기에 대한 지속적인 모니터링 등의 필요성에 대해 구체적으로 명시하지 않았었다.

ES.4 사고의 근원

탱크393에 대하여 즉시 가동을 중단하고 “가능한 조속한 시일 내에” 내부검사를 수행해야 한다는 수 차례에 걸친 탱크 검사관의 권고안은 반영되지 않았다.

1. Motiva사는 H_2SO_4 저장탱크의 노후화로 인한 안전성 및 환경적 유해성을 사전에 예방하기 위한 적합한 기계적 건전성에 관한 관리 시스템을 보유하지 않고 있었다.

- 탱크393에 대하여 즉시 가동을 중단하고 “가능한 조속한 시일 내에” 내부검사를 수행해야 한다는 수 차례에 걸친 탱크 검사관의 권고안은 반영되지 않았다.
- 2001년 5월 발견된, 탱크393 동체의 누출된 곳이 보수되지 않았다. 대신, 탱크의 액체저장 수위를 누출 위치보다 낮추어 지속적으로 가동했다.
- 경영진은 탱크393에 뚫린 홀로 인해 심각한 위험에 노출된다는 사실을 인식하지 못했으며, 이에 대한 즉각적인 보수작업 또는 탱크의 가동을 즉시 멈추는 등의 대책을 강구하지 않았다.

2. Motiva사의 공학적 관리 및 변경관리시스템은 탱크를 사용전 황산에서 사용후 황산으로 그 용도를 전환하는 작업을 수행하는 과정에서 부적합하게 적용되었다.

2000년 설치된

탱크393의 CO_2 불활성 가스주입은 비인화성 분위기를 만드는 데는 부적합했다.

- 2000년 설치된, 탱크393의 CO_2 불활성 가스주입은 비인화성 분위기를 만드는 데는 부적합했다.
 - CO_2 는 임시 고무호스를 통해 주입되었으며, 호스는 탱크393의 지붕에 뚫린 홀 안으로 늘어뜨려져 있었다.
-

-
- 불활성 시스템의 적합한 여부를 계산하기 위한 공학적 작업이 이루어지지 않았다.
 - 탱크 전환작업은 변경관리프로그램에서 규정하는 항목인 전문가에 의한 변경 검토, 위험성 평가, 또는 가동 전 안전성 검토 등이 고려되지 않은 상태에서 완료되었다.

3. Motiva사의 화기작업 계획은 부적합했다.

- Motiva사는 탱크393의 동체 누출과 지붕에 홀이 뚫려있는 상태, 그리고 탱크396에도 지붕에 홀이 뚫려있다는 사실을 알고 있었음에도, 인화성 증기가 함유된 탱크 위와 주변에서 화기작업을 수행하기 위한 작업일정을 계획하고 이를 승인했다.
- 화기작업을 승인한 이후, Motiva사의 경영진은 지속적인 모니터링과 같은 작업자의 안전을 확보하기 위한 적절한 예방조치를 취하지 않았다.

Motiva사는 탱크에 홀이 뚫려있다는 사실을 알고 있었음에도 인화성 증기가 함유된 탱크 위와 주변에서 화기작업을 수행하기 위한 작업일정을 계획하고 이를 승인했다.

ES.5 사고의 원인제공

1. 불안정한 작업조건 보고서 관련 사항을 검토하기 위한 Motiva사 정유공장 체계는, 작업자들에게 그러한 보고서에 관한 정보를 제공하고, 문제점을 해결하기 위한 제반 사항을 검토하기에 부적합했다.

- 불안정한 작업조건 보고서가 제출된 6월 27일에서 사고가 발생한 날까지 3주 동안, Motiva사의 경영진은 보고된 결함 내용을 시정하거나 또는 임시 안전조치를 취하지 않았다.
- Motiva사의 현장 작업 관리자들이 화기작업의 위험성을 이해했었다라면, 탱크 주변에서의 화기작업을 승인하지도 않았을 것이고, 그 작업을 수행하기 위해 하청업체 직원들을 고용하지도 않았을 것이다.

2. Motiva Enterprises LLC의 경영진은 정유공장의 기계적 건전성, 공학적 관리, 그리고 변경관리시스템의 결함에 대한 책임과 의무를 다하지 못하여 관리감독을 소홀히 했다.

ES.6 권고안

산업안전보건관리청

인화성 물질 10,000파운드를 처리하는 과정과 관련하여 그 결과 치명적인 방출이 발생할 수 있는 대기압저장탱크에 관한 안전관리규정절차 (29CFR 1910.119) 확인.

델라웨어주 천연자원 및 환경오염관리국

경영진이 사람 또는 환경에 대해 위험을 초래 하는 탱크의 부식상태를 시정하는 즉각적인 조치를 취할 수 있도록 최근 제정된 Jeffrey Davis 지상식 저장탱크 관련법안에 대한 규정 명시.

델라웨어시 Motiva사 정유공장

1. 다음의 특정 항목을 포함해, 기계적 건전성의 의사결정에 대한 신뢰성을 확보하기 위한 체계 수립.

- 결함 사항 및 가동 상태의 적합성에 대한 평가 체계를 확보하기 위해 금속부식 전문가 또는 설비 엔지니어 등과 같은 전문가에 의한 검사 보고서 검토.
- 설비 보수를 위한 계획 체계 수립.

화학공정안전센터가 출판한, *화학공정안전의 기술적 관리를 위한 공장 지침, 제3장, “의무대상 및 목표”*는 이와 같은 체계의 모델을 제시하고 있다.

2. 최소한 다음의 사항을 준수하는 인화성 물질을 포함하고 있거나 또는 포함하게 될 기존 탱크저장의 설계 검토:

- 적합하게 설계, 시공되어 설치된 불활성 시스템
- 비상 통기구 설치.

3. 변경관리 시, 다음과 같은 탱크 설비 및 운영조건에 대한 변경관리 준수.

- 탱크 가동 상태 및 내용물질
 - 불활성 및 통기구 시스템 등과 같은 탱크 주변시설.
-

4. 인화성 물질에 대한 지속적인 또는 정기적인 모니터링을 요하는 특정 상황에 대비하기 위한 정유공장의 화기작업 계획에 대한 검토:

5. 아래 사항을 포함해, 정유공장의 불안전 작업조건 보고 체계 개선.

- 문제 해결을 위한 의사결정권한이 있는 관리자 선임
- 문제 사안이 적시에 해결되지 않은 경우 경영진에게 문제의 심각성을 알리는 체계 수립.
- 잠재적 위험에 노출된 모든 근로자에게 위험성을 알릴 수 있는 의사전달 수단 정립.

국제 화학 및 에너지 산업 노동자 연맹(PACE) 지역노조 2-898과의 협력하에 개선된 시스템 설계 및 구축을 위한 문서작업.

Motiva Enterprises LLC

1. 본 보고서에 언급된 조사 내용에 따라, Motiva사는 저장탱크의 기계적 건전성 및 설계에 대한 정기적인 검사, 불안전 작업조건 보고, 화기 작업, 변경관리 등을 수행하여 Motiva사의 정유공장 안전관리 체계를 수립한다. 또한 조사 결과를 관련 인력과 공유한다.

미국 석유학회(API)

1. 최소한 최근 발행된, 대기온도에서 황산 및 유제 저장탱크의 설계, 제조, 및 검사에 관한 NACE규정 RP 0294-94의 권고안에 명시된 횟수에 준하여 사용전 또는 사용후 H_2SO_4 가 저장된 탱크를 검사하는 API의 지침을 구체화하기 위해 국제 NACE (미국부식공업회)와 공조한다.

2. 인화성 증기를 함유하여 치명적인 위험에 노출될 수 있어, 즉각적인 보수 또는 폐기처분을 요하는 동체나 지붕에 뚫린 홀 또는 최소 허용두께 이하로 얇아진 저장탱크를 관리하기 위한 API의 저장탱크 검사규정을 검토, 개정한다.

3. 아래 명시된 사항을 포함해, API의 권고안이 사용된 H_2SO_4 와 같이 인화성 저장탱크의 불활성에 적용되었는지 여부를 확인한다.

- 불활성 시스템의 권고가 적용될 수 있는 제반 조건.
- 불활성 시스템 설비에 대한 적합한 측정, 그리고 경고를 포함한 설비 장치 등과 같은 불활성 시스템의 설계.

4. 본 보고서에 명시된 조사결과 및 권고안 등에 관한 정보를 관련 근로자에게 전달한다.

국제 NACE (미국부식공업회)

1. 최소한 최근 발행된, 대기온도에서 황산 및 유제 저장탱크의 설계, 제조, 및 검사에 관한 NACE규정 RP 0294-94의 권고안에 명시된 횟수에 준하여 사용전 또는 사용된 H_2SO_4 가 저장된 탱크를 검사하는 API의 지침을 규정하기 위해 미국 석유학회와 공조한다.
2. 본 보고서에 명시된 조사결과 및 권고안 등에 관한 정보를 관련인에게 전달한다.

국제 화학 및 에너지 산업 노동자 연맹(PACE) 지역노조 2-898와의 공동 문서작업.

본 노조는 개선된 시스템 설계 및 구축을 위한 문서작업을 위해 Motiva사의 경영진과 공동 협력한다.

국제 화학 및 에너지 산업 노동자 연맹(PACE) 지역노조 2-898 석유화학 및 정유업체 연맹(NPRA) 건축시공업 위원회(AFL-CIO)와의 공동 문서작업.

본 보고서에 명시된 조사결과 및 권고안 등에 관한 정보를 관련 단체에 전달한다

1.0 개요

1.1 사고 배경

2001년 7월 17일, 미국 델라웨어주, 델라웨어시에 소재한 Motiva사 델라웨어시 정유공장(DCR)에서 발생한 탱크폭발 사고가 발생했다. 이 사고로, 황산(H_2SO_4) 저장탱크가 폭발하여 저장물질이 방출되면서 점화되어, 작업공 1명이 사망하고 8명의 작업자들이 부상을 입었다. 약 1.1갤런의 H_2SO_4 이 방출되었으며, 99,000갤런은 델라웨어 강으로 흘러 들어갔다.

1.2 사고조사 과정

7월 20일, 미국 화학물질 사고 조사국(CSB) 소속의 조사관들이 사고현장인 정유공장에 도착했다. 다량의 H_2SO_4 가 방출되었고, 구조작업이 진행되고 있는 상황이었으므로, 사고지역 일대는 수 주일 동안 비상대응 사태로 혼잡해 있었다. 따라서, 조사관들은 초동 수사 과정에서 물적 증거를 조사하기 위한 접근이 제한되어 있었다. 델라웨어시 소방서 관련인들은 이 기간 동안 사고 현장에 접근을 통제하고 있었다. CSB는 Motiva사와 하청업체 직원들에 대한 탐문수사를 했고, 관련 문서들을 검토했다.

CSB는 아래 나열된 기관들을 포함해 다른 조사기관들과의 협력 하에 조사를 진행했다:

- 산업안전보건관리청(OSHA)
- 미국환경청(EPA)
- 델라웨어 천연자원 및 환경오염관리국(DNREC)
- 미국 해안경비대(U.S. Coast Guard)
- 델라웨어주 소방서
- 델라웨어주 법무담당관실
- 델라웨어주 경찰

1.3 텔라웨어시

정유공장

텔라웨어시 Motiva 정유공장은 Tidewater Oil Company로 1956년 영업을 시작했다. 1967년, Tidewater사는 Getty Oil과 합병하면서 1984년 Texaco에 매각되었다. 정유소는 1989년부터 1998년까지, Star Enterprise로 알려져 있었는데, 이는 Texaco와 Saudi Aramco사 간의 조인트벤처 형태로 구성되었었다. 1998년, 정유소는 Texaco, Saudi Refining Company, 그리고 Shell사의 조인트벤처로 Motiva사에 편입되었다. 2001년, Texaco는 Chevron과 합병하는 조건으로 Motiva사의 파트너십 관계와 결별하게 되었다.

사고발생 당시, 정유공장은 약 650명의 직원과 300명의 현장 하청업체 인력이 근무하고 있었다. 공장은 텔라웨어주의 New Castle County에 있는 텔라웨어 강과 인접한 곳에 위치하고 있었다.

14 황산 제조공정

H_2SO_4 는 정유공장의 알킬화 공정에서 촉매제로 사용되었다. 이 공정에서, 이소부탄과 부틸렌 등과 같은 소립자는 가솔린의 고농도 옥탄 성분인 알킬화물(alkylates)이라고 하는 화합물로 만들기 위해 H_2SO_4 과 혼합되었다.

알킬화 공정에서 사용된 이후, H_2SO_4 는 일반적으로 88%에서 95%의 H_2SO_4 와 5%의 물을 함유하는 사용된 산(spent acid)으로 불려진다. 증기화되는 일부 경질 탄화수소를 포함한 탄화수소이다.

산을 재활용하기 위해, Motiva사는 산을 가열하여 황 이산화물(SO_2)과 물로 분해하는 재생공정에 투입했다. 이 과정을 거치고 나면, SO_2 은 공기와 반응하여 이후, 흡수장치에서 물과의 접촉을 통해 H_2SO_4 로 변화하는 황 3산화물(SO_3)로 화학적 변화를 일으킨다. 사용전 H_2SO_4 는 약 99%의 산 성분으로 구성되어있다.

1.5 황산 저장탱크

391번부터 396번까지의 번호로 표시되는 6개의 저장 탱크들은 사용전 H_2SO_4 를 저장하기 위해 1979년 건조되었다. 운영상, 탱크들은 탄화수소(CO_2) 불활성¹⁾ 그리고 화염 방지장치³⁾ 와 함께 대기압력/통기구²⁾ 를 추가 설치하여, 사용된 H_2SO_4 를 저장하는데 사용되었다. 탱크391과 396은 1997년에 전환되었고, 탱크392와 393은 2000년에 전환되었다.

사고발생 당시, 그리고 사고 이전 몇 차례에 걸쳐, Motiva사의 H_2SO_4 재생 시스템의 성능이 알킬화 공정에 사용된 산의 생성에 대한 전체 부하를 처리하지 못하는 상황이 발생했다. DCR은 외부의 하청업체로 하여금 재생 성능을 보완했다.

1)불활성이란 시스템내에서 인화물질이 연소하지 못하도록 하는 비인화성, 비활성화 가스의 사용을 의미(NFPA 69).

2)대기압력통기구(PV 밸브)는 탱크 내의 초과 압력 또는 진공상태를 완화시키기 위해 사용되는 무게하중(weight-loaded), 파일럿조작(pilot-operated), 또는 용수철 조작(spring-loaded) 형태의 안전장치.

3)화염방지장치는 열린 통기구를 통해 탱크 안으로 불꽃이 확산되는 것을 방지하기 위한 장치.

2.0 사고 경위

2.1 사고발생 이전 상황

2000년 6월 말경, DCR의 유지보수 하청업체인 Washington Group International, Inc. (WGI)소속의 보일러 제작공들은 산 저장탱크에서 노후되고 부식된 작업통로 보수작업을 수행하고 있었다(그림. 1). 저장탱크에서 증발된 SO_2 증기가 공기 중 습도와 결합하여, 작업통로 노후화의 주범이 된 아황산(H_2SO_3)을 형성했다.

저장탱크에서 증발된 SO_2 증기가 공기 중 습도와 결합하여 작업통로 노후화의 주범이 된 아황산(H_2SO_3)을 형성했다.

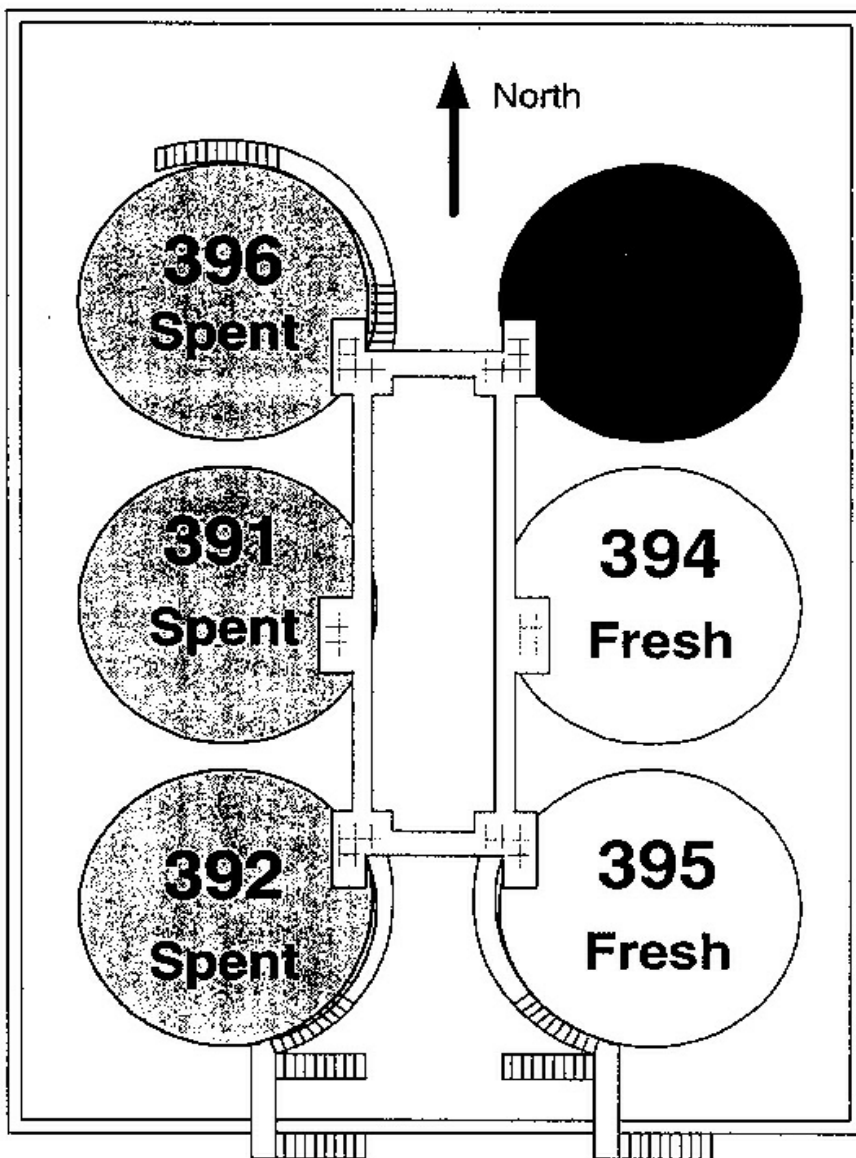


그림 1. 저장탱크 및 작업통로 설계도.

작업통로는 저장탱크의 지붕 높이에 설치되어 있었다. 작업통로는 탱크 레벨과, 불활성 시스템제어를 포함한 다양한 형태의 노즐 및 장치를 물리적으로 측정하기 위해 사용되는 압력계기 뚜껑(gauge hatch)에 접근할 수 있도록 해준다. 탱크393에서, 작업통로는 탱크 지붕과 동체 모두에 발생한 부식으로 인해 몇 개의 홀이 뚫려 있는 탱크의 서남쪽 상단에 위치하고 있었다.

보일러 제작공들은 7월 17일 이전 최소한 4차례에 걸쳐 작업통로 보수작업을 수행했었다. 그러나 이외 최소한 2건의 경우에 있어서는, 제작공들은 해당 공정 관리자가 화기작업을 승인할 수 없는 상황이었기 때문에 작업현장에 도착하기는 했으나 작업을 수행할 수 없었다

보일러 제작공들은 7월 17일 이전 최소한 4차례에 걸쳐 작업통로 보수작업을 수행했었다. 그러나 이외, 최소한 2건의 경우에 있어서는, 제작공들은 해당 공정 관리자가 화기작업을 승인할 수 없는 상황이었기 때문에, 작업현장에 도착하기는 했으나 작업을 수행할 수 없었다:

- 화기작업 승인은 외부 작업관리자가 작업지역의 SO₂ 레벨이 지나치게 높다고 판단했기 때문에 한번 거부 되었었다. 작업관리자는 10(ppm)에 대한 SO₂ 수치가 통로계단의 아래쪽에 밀집되어 작업통로를 따라 올라오고 있고 계단 위쪽에서 작업을 지속하기에는 가스의 수치가 너무 높다고 설명했다.
- 화기작업 승인은 6월 27일에도 거부된 적이 있었다. 작업관리자는 작업이 수행될 예정인 지역에서 휴대용 인화성 가스모니터 ⁴⁾ 계기가 1%수치로 나타났으며 탱크396 지붕에 홀이 뚫려있다는 사실에 근거하여 화기작업을 승인하지 않았다.

6월 27일 화기작업 승인을 거부했던 작업관리자는 당일, 불안전 작업조건 보고서 ⁵⁾를 제출했다. 보고서에는 다음과 같은 내용이 명시되어 있었다:

4) 인화성 가스모니터는 대기압력의 최저 폭발한계(LEL) 비율을 측정한다. LEL은 산소가 있는 상태에서 연소를 하기위해 반드시 필요한 증기의 최저 농도를 나타낸다.

5)불안정한 작업조건 보고서(Unsafe Condition Reports)는 적합하게 시정조치하지 않은 안전 및 보건에 관한 사항을 경영진과 노동조합에 알리기 위해 작업자가 작성하여 제출할 수 있음.

393TK는 아직도 396TK에 장착된 압력 조절기(regulator)에서 질소 호스[통상질소에 사용되는 고무 호스]로 불활성가스(CO₂)가 주입되고 있다. 이 호스는 탱크393의 꼭대기에 뚫린 홀에 삽입 설치되어 있다. 홀은 부식 정도가 심해 떨어져 나간 노즐로 인해 생긴 것이다. 396TK역시 노즐이 심하게 부식되어 떨어져 나갔다(1 1/2). 이러한 상태는 현재 대기 중에 노출되어 있다. 비교: 상기 두 개의 탱크는 1개의 가스압력 조절기를 사용하고 있다.

보고서는 우선적으로 작업지역의 관리감독부서, 안전관리부서, 그리고 합동(노조/경영진)보건 및 안전위원회에 배포되었으며, 복사본 1부는 이외 작업관리자들에게 배포하기 위해 제어실(control room)에 비치되었다.

2.2 사고 발생

2001년 7월, 4명의 WGI소속 보일러 제작공들과 감독관은 산 저장탱크의 작업통로에서 격자를 교체하는 작업을 지속하기 위한 작업내용과 작업순서에 대한 지시를 받았다. 오전 7시 45분경, 5명의 보일러 제작공들은 화기작업의 승인을 얻기 위해 제어실의 산(acid) 작업지역으로 향했다.

화기작업 승인으로 작업자들은 “탱크396” (탱크396에서의 작업통로 격자 보수를 의미)에서 격자를 용접하여 연마하는 작업을 수행하게 되었고, 탄화수소가 탐지될 시에는 즉각 화기작업을 중단하라는 지시를 받았다. 화기작업 승인에 대한 지시는 화재 감시(fire watch), 인공호흡장치, 경고 표지, 마스크 등을 준비할 것과, 해당 작업운영에 협조하는 내용 등을 포함하고 있었다. 그러나, 화기작업에서 발생한 불꽃 취급에 대한 요구사항은 없었다.

화기작업 승인의 최종 단계로, 외부 작업관리자는 ⁶⁾ 해당 작업지역으로 가서 산소 및 인화성 증기(LEL), 황화수소(H_2S), 그리고 SO_2 레벨에 대한 대기 모니터링을 수행했다. 휴대용 계기로 측정한 결과, 수치는 “0”으로 나타났다. 외부 작업관리자는 작업승인의 가스 점검란을 작성하여 서명했다.

공정 감독관은 최종 결재자로 작업승인에 서명했고, WGI의 현장 감독역시 승인란에 서명하고 다른 작업을 체크하기 위해 자리를 떠났다. 7월 17일의 작업승인은 오전8시부터 오후 4:30분까지 별다른 문제가 없었다.

부식으로 손상된 격자부분을 절삭하여 새로운 부분으로 용접하여 교체할 예정이었다. 작업계획은 2명의 보일러 제작공들이 부식된 부분을 제거하는 동안, 나머지 2명은 절삭된 부분에 교체될 새로운 조각을 측정하여 준비하는 것이었다.

2명의 보일러 제작공들은 관련설비들을 지상에 배치하고 나서, 용접기의 스위치를 켜고 작업통로로 향했다. 제작공들은 산소-아세틸렌 절단 토오치 사용을 시도했지만, 토오치가 부식된 격자의 녹슨 부분을 절삭하기에 충분히 가열되지 않았기 때문에 탄소 아크에어 가우징을 사용하

화기작업 승인으로 작업자들은 탱크396에서 작업통로 격자를 용접하여 연마할 수 있게 되었고 탄화수소가 탐지될 시에는 즉각 화기작업을 중단하라는 지시를 받았다. 그러나, 화기작업에서 발생한 불꽃 취급에 대한 요구사항은 없었다

부식으로 손상된 격자부분을 절삭하여 새로운 부분으로 용접하여 교체할 예정이었다.

제작공들은 산소-아세틸렌 절단 토오치 사용을 시도했지만, 토오치가 부식된 격자의 녹슨 부분을 절삭하기에 충분히 가열되지 않았기 때문에 탄소 아크에어 가우징을 사용하기로 했다.

기로 했다.

6)외부 작업관리자는 제어실 설비를 모니터링하는 내부 작업관리자의 지시 하에, 일반적으로 공정 제어실 외부에서 현장계기의 수치를 측정하고 밸브와 기타 다른 기기에 대한 조작을 담당한다.

WGI사가 산소-아세틸렌이 아닌 탄소 에어아크 가우징을 사용하기로 계획을 변경했을 당시, WGI사와 Motiva사간에는 이 문제에 관한 어떠한 의사전달 내용도 없었으며, “철저한 불꽃 제어”를 위한 Motiva사의 화기작업 요구사항은 준수되지 않았다.

탄소 아크에어 가우징은 탄소전극과 작업 조각부분의 종단간에 전기적 아크가 발생함으로써 수행된다. 작업 조각부분이 용융되었기 때문에, 고속의 공기(high velocity air streams)는 전극을 하행시키고 용융 금속을 불어 없앤다. 1평방인치당(psig) 80에서 100파운드(psig)의 공기를 사용하는 이러한 공정은 광범위한 지역에 다량의 용융 금속을 분출한다.

WGI사가 산소-아세틸렌이 아닌 탄소 에어아크 가우징을 사용하기로 계획을 변경했을 당시, WGI사와 Motiva사간에는 이 문제에 관한 어떠한 의사전달 내용도 없었으며, “철저한 불꽃 제어”를 위한 Motiva사의 화기작업 요구사항은 준수되지 않았다.

7월 17일 오전, 탱크396 주변의 격자 부분은 제거되어 새로 교체되었다. 작업자들은 점심시간이 시작될 때쯤, 탱크396의 뒤쪽에 있는 탱크 393에서 작업을 시작할 준비가 되어 있었다.⁷⁾

점심시간을 마친 12:30분경, 두 명의 보일러 제작공들은 작업통로를 향해 올라갔고, 나머지 두 명은 앞서 절삭된 부분을 넘겨받기 위해 아래에서 기다리고 있었다. 작업통로로 간 제작공이 탱크396과 393간의 난간에 걸쳐진 호스를 끌어올려야 한다고 말했지만, 격자가 지면으로 내려간 상태에서 호스를 잡을 수가 없었다. 호스는 탱크 393으로 CO₂ 불활성 가스를 주입하는 임시 고무 호스 같은 것이었다.

플랫폼에 있던 다른 한명의 제작공은.... 탱크393의 지반이 위로 들어올려져 작업통로를 아래로 밀어내면서, 북쪽을 향해 무너지자, 고압의 공기가 폭발하는 것 같은 느낌을 받았고 서 있었던 그의 동료들 돌아보았다고 말했다.

오후 1:30분 경, 하청업체 현장 감독이 두 탱크와 제어실 간의 지역으로 오고 있었기 때문에 보일러 제작공 한 명은 방유제의 남쪽 끝 지면에 있었다. 지면에 있던 두 번째 보일러 제작공은 탱크392의 계단으로 올라와 작업통로 지역으로 향하고 있었다. 작업통로에 있었던 2명의 제작공들은 탱크393에서 작업을 시작하여, 탱크396 부근에서 오전에 교체된 격자의 나머지 작업을 마치기로 했다.

그 당시, 에어 가우징 기기 작업을 하고 있었던 보일러 제작공은 무릎을 굽히고 앉아 탱크393 위쪽의 첫 번째 격자 조각을 절삭하고 있었다. 플랫폼에 있던 다른 한명의 제작공은 탱크393의 남쪽 방향에 서서 등을 돌리고 있었다.

7)탱크396과 393과의 거리는 약 25피트 정도이다.

그는 탱크393의 지반이 위로 들어올려져 작업통로를 아래로 밀어내면서, 북쪽을 향해 무너지자, 고압의 공기가 폭발하는 것 같은 느낌을 받았고서 있었던 그의 동료들 돌아보았다고 말했다.(그림 2).



그림 2. 저장탱크 방유제의 북동쪽으로 붕괴된 탱크393.
(탱크 동체의 오른쪽으로 탱크393의 북쪽 바닥)

다른 한 명의 보일러 제작공은 뒤로 돌아 남쪽으로 뛰어갔다. 그는 탱크가 폭발되었을 때 탱크392의 계단을 내려오고 있었는데, 이때, 계단으로

올라오고 있는 다른 동료와 마주쳤다. 이들 두 명의 제작공들은 계단에 서 넘어졌고 방유제에서 나가는 길을 함께 찾기 시작했다(그림 3.). 이와 동시에, 산(acid)은 남쪽과 북쪽의 방유제 벽을 향해 굉음을 내며 터졌고 방유제 외부의 지면에 쏟아졌다. 산이 방유제 내부로 유입되자, 인화성 물질은 점화하여 타기 시작했다. 산은 방유제 배수로를 뒤덮었고 방유제 외부 통로에 있는 격자를 통해 유입되었다.

산이 방유제 내부로 유입되자, 인화성 물질은 점화하여 타기 시작했다. 산은 방유제 배수로를 뒤덮었고 방유제 외부 통로에 있는 격자를 통해 유입되었다...산은 통로를 통해 지속적으로 유출되고 있었다.

보일러 제작공들 중 한 명은 산의 흡으로 뒤덮여 있었는데, 이후 산소 호흡을 위해 제어실로 옮겨졌다. 현장감독 수송 트럭은 산에 휩싸인 채 점화되어 타버렸다. 산은 제어실과 서남쪽 통로를 통해 계속해서 유출되고 있었다.

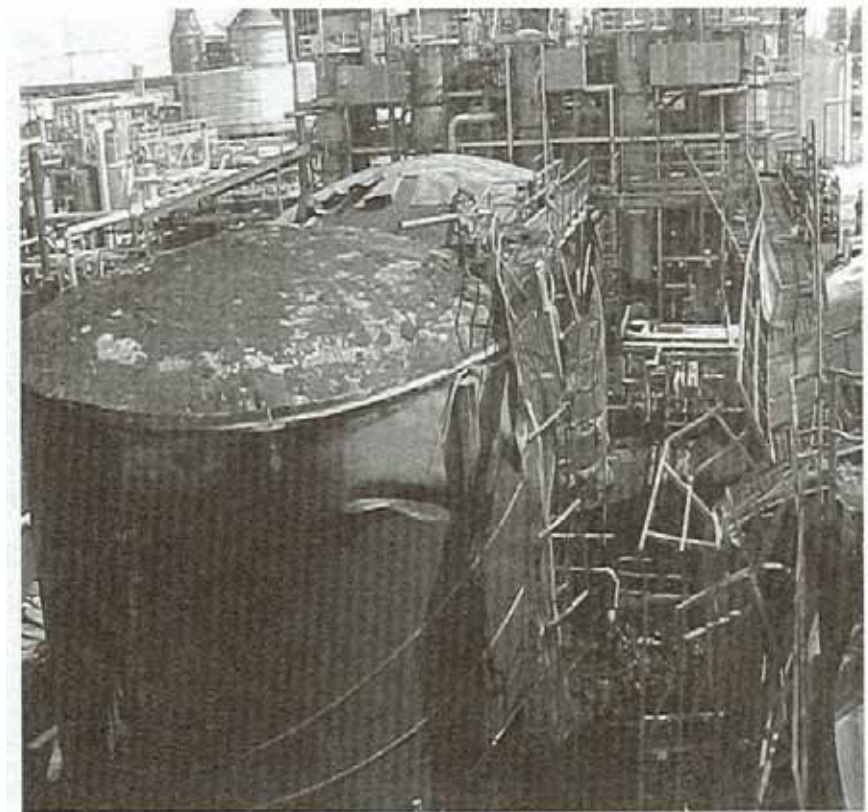


그림 3. 북쪽 방향에서 본 탱크394의 작업통로 사고현장 잔해

2.3 사고 영향 및 비상대응

1명의 작업자가 사망했고, 이외 8명은 부상을 입었다. 부상자의 대부분은 연기에 노출되어 눈과 폐에 화상을 입었으며 마스크를 느끼는 증상을 보였다. 트럭 운전자 한 명은 얼굴과 손, 다리에 산(acid)으로 인한 화상을 입었다. 이외 3명의 작업자들은 산 방출을 저지하는 초동 진압과정에서 부상을 당했다.

1명의 작업자가 사망했고, 이외 8명은 부상을 입었다. 부상자의 대부분은 연기에 노출되어 눈과 폐에 화상을 입었으며 마스크를 느끼는 증상을 보였다.

폭발이 발생하자 5분 이내에 Motiva사의 사고현장에 소방차가 도착해, 저장탱크 지역에 엄청난 양의 물을 뿌렸다. 저장탱크 지역은 공동 헤더(header)로 연결되는 방유제 내부에 누출액포집상자들이 장치되어 있다. 헤더는 산 중화 시스템으로의 흐름을 조절하는 내부 여과조(sump) 시스템으로 유입되는 저장탱크 지역의 남쪽 밸브 박스로 연결된다. 그러나, 7월 17일, 이 시스템은 다량의 산(acid)과 소방차가 뿜어내는 물로 뒤덮여있었고, 산은 방유제 지역 외부 통로에 하수구 격자(sewer gratings)를 통해 흘러 들어갔다.

유출(spill)은 결국 유수(oily water)와 빗물 하수구(stormwater sewers)로 흘러 들었다. 유수 하수구에 있는 물질은 델라웨어 강으로 방출되기 이전에 일부 산(acid)을 억제하거나 또는 처리하는 공장의 폐수 처리시설로 유입되었다. 빗물 하수구에 있는 물질은 Delmarva Power & Light(미국민영전력회사)채널로 유입된 후 델라웨어 강으로 흘러 들어갔다. 산(acid)은 저장탱크 지역의 서북쪽에서 Red Lion Creek지류로 유입되었다. Motiva사는 산(acid)의 일부를 석탄회(fly ash)설치 연못으로 쏟아 부었다.

Motiva사는 99,000갤런의 H_2SO_4 가 델라웨어 강으로 방출된 것으로 추정하고 있다.

Motiva사는 99,000갤런의 H_2SO_4 가 델라웨어 강으로 방출된 것으로 추정하고 있다. 누출사고로 인해, 강에서 서식하는 약 2,500마리의 어류와 250마리의 게가 폐사되었다.

사고 직후, 나머지 산(acid)탱크들이 화재와 산 누출로 인한 영향으로 치명적인 문제점에 노출되어 있다는 사실에 대해 우려하고 있었다. 산 오염과 파손되지 않은 탱크에 잔존하는 산의 양으로 인해, 작업자들은 사고발생 이후 32일간 8월 17일까지 방유제 지역 출입이 통제되었었다. Davis의 시신을 찾기 위한 수색작업은 9월 18일까지 계속 되었다.

산 오염과 파손되지 않은 탱크에 잔존하는 산의 양으로 인해, 작업자들은 사고발생 이후 32일간 8월 17일까지 방유제 지역 출입이 통제되었었다. Davis의 시신을 찾기 위한 수색작업은 9월 18일까지 계속 되었다.

3.0 사고 분석

3.1 부식 및 탱크 검사

본 문서의 3.1.1절에서 3.1.4절까지는 탱크393의 문제점에 관한 내용을 주로 다루게 된다. 그 내용은 다음과 같이 요약될 수 있다:

- 인화성 증기가스가 사용된 H_2SO_4 저장탱크의 증기공간에 잔존하는 것으로 나타났다.
- 탱크393의 불활성 시스템은 근본적으로 증기공간에서 산소농도를 연소 가능한 레벨 이하로 유지할 수 없는 성능적 결함이 있었다.
- 불활성 시스템은 탱크의 지붕과 동체에 뚫려있는 홀로 인해 위험에 노출되어 있었다.
- 탱크393 상층부 근처의 작업통로에서의 화기작업은 용접작업중 불꽃이 탱크로 유입되어 내부의 인화성 증기에 점화되었거나, 또는, 뚫려있는 홀에 인접한, 탱크 외부의 인화성 증기와 접촉하여 안쪽으로 불꽃이 전파되어 화재가 발생했다.
- 탱크 내부의 폭연(deflagration)은 탱크의 동체가 지표면으로부터 분리되기에 충분한 압력(CSB의 추정치에 의하면 5psig)을 발생시켰다

인화성 증기가스가 사용된 H_2SO_4 저장탱크의 증기공간에 잔존하는 것으로 나타났다.

탱크393 상층부 근처의 작업통로에서의 화기작업은 용접작업중 불꽃이 탱크로 유입되어 내부의 인화성 증기에 점화되었거나, 또는, 뚫려있는 홀에 인접한, 탱크 외부의 인화성 증기와 접촉하여 안쪽으로 불꽃이 전파되어 화재가 발생했다.

3.1.1 부식율

DCR의 옥외 산(acid)저장탱크 지역(탱크 391번부터 396번까지)에 있는 6개의 탄소강은 API 650규정⁸⁾에 따라, 1979년 건조되었으며 노즐의 방향을 제외하고 동일하게 설계되었다. 탱크는 직경 47피트, 높이 32피트, 그리고 규격용량 415,000갤런으로 되어있다. 각각의 탱크는 4개의 금속판 열(row) 또는 코스(course)로 구성되어 있으며, 각 코스는 8피트 높이로 되어있다. 밑바닥 코스는 9/16인치, 그 바로 위 코스는 7/16인치로 되어있으며, 상단부 2개의 코스와 지붕 코스는 5/16인치로 되어있다.

8)API규정650. 오일 저장용 용접강 탱크. 1998년

3.1.1.1 탱크393

탱크393은 건조된 이래 최근 8년간 국부 부식과 누출의 사례가 있었다. 검사 보고서에 언급된 자료를 토대로, 표1은 탱크393의 누출 및 보수작업에 관한 내용을 요약한 것이다. 그림 4는 탱크 동체에 패치된(보수상태를 말함) 상태를 나타내고 있다.

표 1
탱크393의 노후화 및 보수작업 연혁

일시	검사 결과
1992년	두께 측정: 부식여유(corrosion allowance)의 약 절반 정도가 전체 노출 부분의 대부분을 차지하고 있다.
1994년	내부검사: 3/4인치 폭으로 동체 주변에서 270도 범위, 바닥판 위로 4인치인 부식 홈(groove), 용접금속으로 보강하여 보수.
1998년 6월	동체 누출: 길이 3/4인치, 폭 3/32인치, 탱크 지표면에서 18피트 높이의 누출, 6인치 직경의 강판으로 보수.
1999년 4월	동체 누출: 1/8인치 직경의 홀, 1998년 보수된 부분에서 1인치 높이, 직경 8인치의 조각을 덧대어 보수
1999년 9월	동체 누출: 3/16인치 폭의 홀x길이 1인치, 이전 누출부분의 바로 위쪽, 두께가 얇아진 부분을 길이3인치x폭11인치의 조각으로 덧대어 보수.
00년 4월	동체 누출: 이전의 누출부위와 동일한 동체벽을 통해 홈이 확장되어 발생한 수평 누출, 12x29길이의 탄소강패치 권고.
2000년 7월	동체 누출: 2000년 4월 발생한 누출은 탄소강패치 권고 대신, 에폭시 패치로 보수되었음, 패치에서 누출 발생하여 탄소강패치로 대체되었음.
2001년 5월	동체 누출: 이전에 덧 이었던 패치 바로 위에 3x1/8인치 폭의 누출 발생, 22x22인치의 패치 권고사항은 적용되지 않았음.



그림 4. 여러 개의 패치를 덧댄 탱크393의 측면.

사고 발생 후 분석작업에서, 사고 이전에 형성된 것으로 추정되는 3개의 추가 홀이 탱크393의 지붕 및 동체에서 발견되었다:

- 월류배관(overflow line) 근처의 지붕-동체 연결부 바로 아래쪽에 5.5인치 길이의 버섯 모양의 홀 1개.
- 탱크 지붕의 버블러(bubbler)시스템 노즐 부근에 14인치의 가늘고 긴 홀 1개. 지붕에 2.5인치 직경의 노즐로 막혀있었던 이 홀은 절연(insulation) 되었는데(그림 5 참조).
- 지붕에 뚫린 1.5인치의 홀은 부식으로 인해 노즐(원래 레벨표시 시스템으로 사용되었음)이 떨어져 나가 생긴 것이다. 임시 CO₂ 불활성 호스는 이 홀을 통해 인입되었다.(그림 6 참조).

사고 발생 후 분석작업에서, 사고 이전에 형성된 것으로 추정되는 3개의 추가 홀이 탱크393의 지붕 및 동체에서 발견되었다.



그림 5. 탱크393 지붕 위의 길고 가는 홀(사고 당시 절연됨).

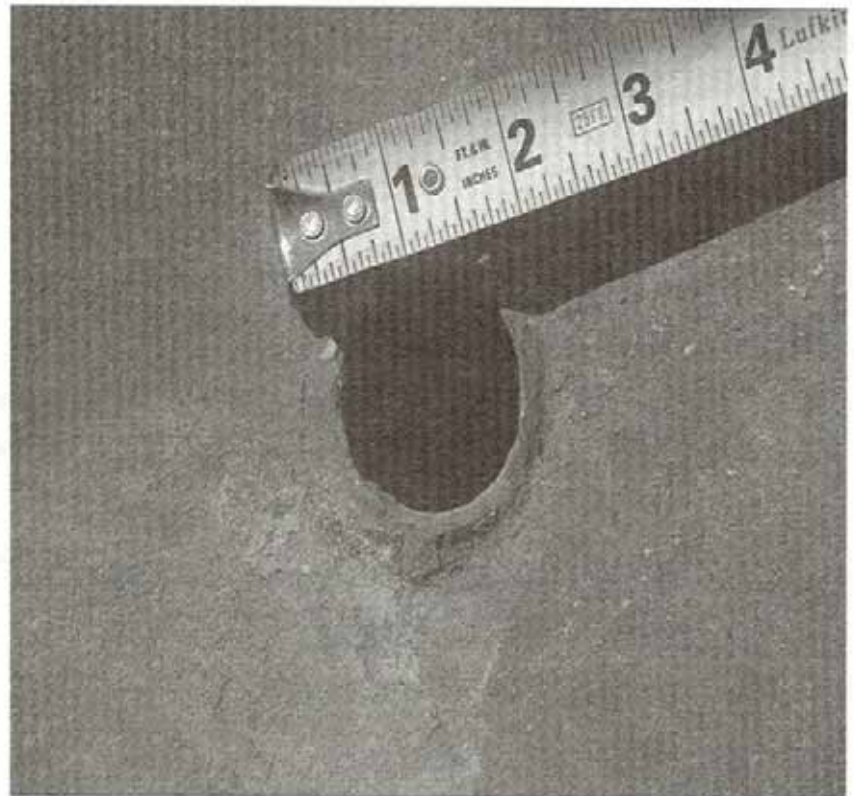


그림 6. 임시 호스가 인입된 탱크393의 지붕에 뚫린 홀.

3.1.1.2 이외 탱크에서 발견된 부식

탱크393이외에도, 다른 DCR 산 탱크들은 수 년 동안 심각한 부식상태에 노출되어 있었다.

- **탱크391** - 1993년 시행된 내부검사에서 탱크의 지표면에서 약 8피트 높이에 위치한 몇개의 수평부식링(horizontal corrosion ring)이 발견되었다. 그 중 하나의 부식 밴드(band)는 폭 6.5인치로 탱크 원주에서 270도 범위에 있었다. 부식된 부분은 제거되어 새로운 금속으로 교체되었다.
- **탱크394** - 1992년 초음파 두께측정기(UTM)로 측정한 결과 버블러 장치가 위치한 곳에 수직패턴의 부식이 발견되었다. 탱크 측면의 24피트 높이에 3~6피트 폭의 패치가 설치되었다.
- **탱크395** - 1992년, UTM 측정 결과, 부식여유분 이상으로 부식된 것으로 나타났으며, 최대 액체수위 높이 허용치(maximum liquid height restriction)가 25인치로 정해졌다. 1995년, 내부검사에서 탱크의 동체와 지붕에서 심각한 부식상태가 발견되었다. 탱크는 폐기처분 되었으며, 동체의 탱크 지표면과 바닥 부분이 6인치인 기존에 사용된 탱크로 대체하여 설치되었다.
- **탱크320** - 이 탱크는 H_2SO_4 알킬화 공정에 있던 4개의 산 탱크(320, 321, 322, 398)중 하나였다. 촉진부식 상태는 1996년 내부검사에 의해 관찰되었는데, 동체는 API 653 ⁹⁾에 따라 폐기 명령된 두께로 노후화 되어 있었다. 탱크는 폐기 처분되어 대체되었다.
- **탱크398** - 1998년 내부검사에서 지붕과 동체의 “여러 곳”에 홀이 뚫려 있다는 사실이 밝혀졌다. 홀은 수직 벨트 모양으로 지붕에서 동체의 지표면에 이르는 범위에 광범위하게 나타났다. 부식 패턴은 탱크 393과 유사한 형태였다. 탱크의 동체와 지붕에 8x8크기의 판으로 교체 설치되었으며, 부식 정도가 심각한 지붕 노즐은 대체되었다.

9)API규정653. 탱크 검사, 보수, 변경 및 재건조. 1995년 12월.

3.1.1.3 탱크 검사

3.4절에서 언급된 바와 같이, 탱크393의 검사는 수 차례 연기되었다. Motiva사의 직원들은 CSB의 조사관들에게 탱크검사 계획은 API 653규정의 요구사항에 의한 것이라고 말했지만, 이러한 규정에서 요구하는 몇몇 검사들은 하기 명시된 바와 같이 수행되지 않았다:

- 1999년 내부검사 일정
- 탱크393의 노후화 조건에 관한 주요 정보를 제공할 수 있었던 전체 외부검사 및 UTM검사. 검사는 누출 주변부에 한정되어 있었다.

API653규정에는 탱크 동체의 성능 또는 구조적 통합성에 부정적인 영향을 미칠 수 있는 “결함, 노후화, 또는 기타 조건”은 계획된 용도에 대한 적합성을 판명하기 위해 평가되어야 한다고 명시되어 있다.

API653규정에는 탱크 동체의 성능 또는 구조상 부정적인 영향을 미칠 수 있는 “결함, 노후화, 또는 기타 조건”(예, 서비스 교체작업, 위치 변경, 본래의 부식여유를 상회하는 부식 정도)은 계획된 용도에 대한 적합성을 판명하기 위해 평가되어야 한다고 명시되어 있다. 또한 탱크 검사 시기 간격은 “검사가 반드시 예정일에 앞서 수행되어야 하는 특별한 사유”가 없는 한, 탱크의 서비스 내역에 따라 결정되어야 한다고 권고하고 있다.

서비스 내역에는 이전 검사에서 측정되었거나 또는 서비스 종류가 유사한 탱크를 기준으로 예측된 부식율이 포함된다. API653은 검사 시기 간격은 바닥판의 두께가 적합한 때에 설정되어야 하며, 그렇지 않은 경우 내부검사의 간격은 20년 이상으로 한다고 명시하고 있다.

위험기반 검사(RBI)는 서비스 기간에 의한 검사의 대안적 선택이다. API에 의하면 RBI는 20년 간격을 증가 또는 감소 시키는 효과가 있다고 언급하고 있다. 이미 전례가 있는 탱크 누출 및 결함 관련 자료들은 RBI평가에 필수적인 사항이다.

무역 기관이 발간한 출판물과 공개 문헌들은 탱크 검사의 횟수에 대한 지침을 제공하고 있다. 국제 부식공업회(NACE)는 H₂ SO₄ 농축 저장 탱크에 대한 “최소한”의 검사 횟수를 권고하고 있다. NACE는 RP 0294-94¹⁰⁾에서, 모든 탱크가 3가지 형태의 정기 검사를 받을 것을 권고하고 있다.

10)NACE규정 RP 0294-94. 대기온도에서의 농축 황산 및 유제 저장용 탱크의 설계, 제작, 및 검사. 1994년.

- 정기적 육안 외관 검사
- 2년 마다 외부검사.
- 5년 마다 내부검사.

NACE RP 0294-94는 검사 일정과 상관없이, 손상 정도가 심한 저장 탱크의 경우, “가동을 중단하고 세부적인 검사를 받아야 한다” 라고 명시하고 있다. 검사 횟수는 “운영 조건, 노하우, 검사 결과, 가동상태 평가 및 위험 분석에 대한 적합성” 등을 기준으로 하여 결정되어야 한다. 이러한 NACE의 지침을 준수했다면, 탱크393의 검사 시기 간격은 단축되었을 것이다.

NACE RP 0294-94는 검사 일정과 상관없이, 손상 정도가 심한 저장탱크의 경우, “가동을 중단하고 세부적인 검사를 받아야 한다” 라고 명시하고 있다.

Dillon의 저서 *Materials Selector for Hazardous Chemicals*(1977)(유해성 화학물질 선택기)에서는 내부검사는 농축 H₂ SO₄ 저장탱크의 부식 형태를 판별하고 평가하기 위해 필요한 것이라고 언급되어 있다. 그는 외부검사는 부식을 속도에 상응하는 지속적인 모니터링이 수행되는 경우에 한해 효과적이라고 명시하고 있다.

검사 횟수를 결정하는 한 가지 요인은 유지보수 내역이다. 출판된 기술 문서를 토대로 한 검사 횟수 지침을 보면, 1,000톤 이상의 용량인 탱크는 5년마다 내부검사를 시행할 것을 권고하고 있다.

Motiva사는 1994년 탱크393에 대한 내부검사를 실행했다. 검사 보고서에는 부식여유는 약 4년 이내에 탱크 동체의 바닥 부분까지 적용될 수 있다고 언급되어 있으며, 1996년 두께 또는 “sonoray”¹¹⁾를 측정할 것을 권고 받았다. 그러나 본 검사는 수행되지 않았다.

1999년, 검사부는 탱크가 “가능한 조속한 시일 내에” 내부검사를 받아야 한다고 권고했다. 그러나, 특정 누출 부분에 인접한 곳의 두께를 측정하는 특별검사 이외에, 1994년 이후 내부 또는 외부검사는 수행되지 않았다.

1998년부터 2001년까지 매년 탱크393 동체의 누출은 가속화되고 있었다. 1999년, 검사부는 탱크가 “가능한 조속한 시일 내에” 내부검사를 받아야 한다고 권고했다. 그러나, 특정 누출 부분에 인접한 곳의 두께를 측정하는 특별검사 이외에, 1994년 이후 내부 또는 외부검사는 수행되지 않았다. 표2에는 검사 권고안의 내역에 관한 상세한 내용을 담고 있다.

11) Sonoray는 고주파수 대역 진동을 사용한 탱크의 벽체와 지붕에 대한 초음파 두께(UT)테스트와 동의어임.

표 2

Motiva사 API 653 탱크 검사관 조사 결과 및 권고안 내역

일시	검사 보고서에 관한 의견
1992년	부식여유의 약 절반 정도가 전체 노출 부분의 광범위한 부분에 적용되었다.
1994년	현재 부식율을 감안하면, 이 탱크는 앞으로 4년 이내에 두 개의 동체 코스 바닥부분 전체에 부식여유를 모두 사용하게 될 것이다. 검사부는 부식 상태를 모니터링하고 지속된 가동률을 산정하기 위해 2년 이내에 sonoray를 실시 할 것.
1998년 6월	이 탱크는 [1995]년 권고에 따라 외부 sonoray검사 실시 필요.
1998년 7월	검사부가 동체 sonoray를 실시하기 위해 2년 이내 절연체(insulation)를 다시 제거.
1999년 9월	최근의 탱크 결함으로 인하여, 이 탱크는 내부검사 및 sonoray검사를 위해 가능한 조속한 시일 내에 가동을 중단할 것을 권고함.
2000년 4월	이 탱크에서 최근 발생한 누출로 인하여, 가능한 조속한 시일 내에 내부검사를 위해 가동을 중단할 것을 권고함.
2000년 7월	이 탱크는 동체 부식으로 인하여 내부검사를 위해 가능한 조속한 시일 내에 가동을 중단해야 함.
2001년 5월	이 탱크는 누출 및 내부 부식의 전례가 있음. 따라서 내부검사 및 영구적 보수를 위해 가능한 조속한 시일 내에 가동을 중단해야 함.

엔지니어링 부서 직원들이나 금속재질 전문가들이 결함을 식별하거나 가동 상태의 적합성을 판단할 수 있는 시스템이 전무한 상태였다.

검사 보고서는 산 저장 탱크의 책임자인 경영진, Motiva사와 WGI사의 유지보수 담당부서, 엔지니어링 부서, 그리고 안전관리 부서 등을 포함해 대다수의 DCR 경영자들과 직원에게 배포되었다. 탱크393과 기타 다른 산 저장탱크에서 누출 상태는 검증되지 않았다. 엔지니어링 부서 직원들이나 금속재질 전문가들이 결함을 식별하거나 가동 상태의 적합성을 판단할 수 있는 시스템이 전무한 상태였다.

Motiva사는 탱크393에 대한 전반적인 외부검사를 시행했어야 했다. API 653규정은 최소한 5년 마다 전체 외부검사를 권고하고 있는 반면, 국제 부식공업회(NACE)는 2년 마다 외부검사를 시행할 것을 권고하고 있다. 외부검사를 위해서는 “탱크 또는 지붕의 외부 벽체의 상태를 파악하는데 필요한 범위까지” 절연체(insulation)를 제거해야 한다. 절연체가 제거된 상태의 탱크에 대한 철저한 검사는 동체의 상층부와 지붕의 부식에 기인한 심각한 부식상태와 침투성 상태를 적나라하게 드러내는 것과 같다.

Motiva사는 모범사례 지침을 준수하지 않았고 탱크 외부의 누출 패턴은 내부의 촉진부식 징후라는 것을 알게 되었다. H_2SO_4 가 저장된 다른 탱크의 누출 사례와 교체상황 역시 부식상태가 심각하게 진전되고 있음을 의미하는 것이었다. Motiva사의 탱크 검사관이 권고한 검사를 수행했다면 탱크393의 심각한 부식 상태를 검증할 수 있었을 것이다. Motiva사가 외부검사를 수행했다면, 탱크에 뚫린 여러 개의 홀은 사전에 식별되어 보수 되었을 것이다.

Motiva사의 탱크 검사관이 권고한 검사를 수행했다면 탱크393의 심각한 부식 상태를 검증할 수 있었을 것이다.

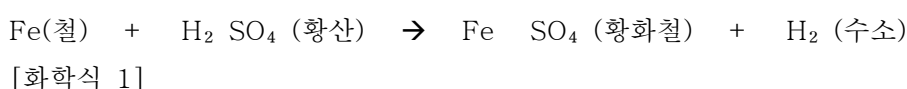
3.1.2 부식촉진의 잠재적 원리

1992년과 1998년 사이에 시행된 탱크393 검사에서는 일반 부식율이 농축 H_2SO_4 저장 탱크에 대한 추정치와 일치된 것으로 나타났다(연간 약 5에서 20 밀(1/1000인치) [연간 0.005에서 0.020인치(in./yr)]. 그러나, 사고가 발생하기 이전 3년 간 수평 홈(grooving) 자국을 따라 탱크에서 진전된 누출 상태는 국부 부식이 촉진되고 있음을 보여주는 것이었다. 사고 이후 발견된 탱크 동체의 갈라진 틈들은 문제의 심각성이 이전에 알려진 것보다 훨씬 더 광범위하게 전개되고 있음을 입증하고 있다. 출판된 관련 문헌들은 H_2SO_4 저장 탱크의 경우 고려해야 하는 주요 부식 원리에 대한 상세한 내용을 소개하고 있다.

사고가 발생하기 이전 3년간 수평 홈 자국을 따라 탱크에서 진전된 누출 상태는 국부적 부식이 촉진되고 있음을 보여주는 것이었다.

3.1.2.1 탱크 내부에서의 황산 회석

탄소강탱크에 저장된 H_2SO_4 는 반응에 따라 황산철과 수소를 형성하기 위해 동체 내부에서 철과 반응한다:



저농도 H_2SO_4 의 경우...[보호/황화철 층은 산 용액으로 흡수된다.]

촉진부식은 산이 물로 희석된 경우, 물이 축적된 곳의 전반적 또는-앞서 언급된 탱크393의 메커니즘과 마찬가지로-국부적으로 농축 H_2SO_4 저장 탱크에서 발생한다.

탱크의 상층부와 지붕에 뚫린 홀은 빗물이 유입되는 통로 역할을 했고, 이후 빗물은 측면으로 흘러 들어가 산 용액의 표면에 닿게 되었다.

사고 발생 이후 탱크 동체에서 발견된 여러 개의 큰 수평 홈들은 물과 산 용액이 희석됨에 따라 액체 표면에서 부식되었음을 나타낸다.

$FeSO_4$ 는 탱크 벽면과 산(acid)간에 보호막을 형성한다. 그러나, 산을 물과 희석시키거나, 고온, 또는 휘저어 섞는 등 보호막을 약화시키는 조건하에서는 국부적 부식이 촉진된다. 저농도 H_2SO_4 의 경우(예, 물을 다량 함유하는 경우), $FeSO_4$ 층은 산 용액에 흡수되어, 보호막에 악영향을 미치게 되어, 결국 촉진부식 상태로 이어진다. 이러한 가능성으로 인해, 산 농도가 70% 이하인 경우, 탄소강은 H_2SO_4 저장용으로 부적합하다.

부식촉진은 산이 물로 희석된 경우, 물이 축적된 곳의 전반적 또는-앞서 언급된 탱크393의 메커니즘과 마찬가지로-국부적으로 농축 H_2SO_4 저장 탱크에서 발생한다. 물이 유입된 탱크내부에서는, 산 혼합물의 농도가 국부적으로 낮아지게 된다(예, 액체 표면에서).

- 탱크의 상층부와 지붕에 뚫린 홀은 빗물이 유입되는 통로 역할을 했고, 이후 빗물은 측면으로 흘러 들어가 산 용액의 표면에 닿게 되었다.
- 이외에도, 탱크에 뚫린 홀은 습기로 채워진 대기가 탱크 안으로 유입되게 하여, 그 결과 지붕과 동체의 내부 표면을 응축 시킴으로써, 이미 성능에 문제가 있는 CO_2 불활성 시스템(3.3.2절 참조)을 약화시켰다.
- 빗물과 대기 습기로 희석된 산 용액은 부식을 가속화시켜 동체와 지붕에 뚫린 홀을 약화시켰고, 그 이후에는 더 많은 습기가 탱크 내부로 스며들었을 것이다.

사고 발생 이후 탱크 동체에서 발견된 여러 개의 큰 수평 홈들은 물과 산 용액이 희석됨에 따라 액체 표면에서 부식되었음을 나타낸다.

“버블러 시스템”으로 통칭되는 탱크레벨 측정장치는 계기용 공기(instrument air)를 매개체로 사용했다. 소량의 계기공기(예, 기포)가 레벨 탐침을 통해 바닥면 근처의 탱크에 유입되었다. 이러한 공기(air)는 탱크 벽체 부근에서 $FeSO_4$ 보호막을 방해함으로써 부식을 상승에 미약하나마 가중시키는 형태로 산 용액에 교란을 일으킨다. 또한 계기공기는 습기를 함유하고 있어, 산 용액과 접촉 하자마자 곧바로 상당부분 흡수된다, 그러나, 버블러 마개가 벽에 인접해 있기 때문에 습기는 H_2SO_4 의 희석에 다소 영향을 미치게 된다. 또한, 버블러 시스템은 탱크 내부로 소량의 산소를 유입시킨다.

H_2SO_4 에 의한 탄소강 부식은 산의 온도가 상승함에 따라 더욱 빠른 속도로 진행된다. 탱크393에 뚫린 대부분의 홀은 서쪽 과 서남쪽 방향에서 나타난다. 이 지역에 있는 탱크의 누출 및 보수 전례로 인해 절연체(Insulation)는 동체의 광범위한 부분에서 제거되었고, 이후 햇빛으로부터 직접가열에 노출되었다.

H_2SO_4 에 의한 탄소강 부식은 산의 온도가 상승함에 따라 더욱 빠른 속도로 진행된다... 절연체(Insulation)는 동체의 광범위한 부분에서 제거되었고, 이후 햇빛으로부터 직접가열에 노출되었다.

3.1.2.2 탄산

탄크393은 CO_2 로 불활성화 되었다. 이러한 가스가 불활성 매개체로 사용되는 경우, 이는 탄산을 형성하기 위해 물과 반응하게 될 가능성이 높다. 탄산이 희석된 H_2SO_4 에 비해 부식율이 훨씬 낮기는 하지만, 촉진 부식을 가속시키기에는 충분하며, 특히 탱크의 증기공간에서는 더욱더 그러하다.

3.1.2.3 수소가스 생성

강철(Steel)부식은 국부적으로 $FeSO_4$ 보호막을 약화시킬 수 있어, 높은 부식율의 원인이 되는 수소 기포(화학식 1 참조)를 발생시킨다. 또한, 수소가스는 인화성이 상당히 높아 탱크393의 증기공간에 잔존하는 인화성 증기를 발생시킬 수 있다. 그러나, H_2 는 매우 가벼운 가스로 탱크 지붕에 뚫린 홀을 통해 빠져나갈 수 있다.

3.1.3 폭발 분위기 형성

탄화수소는 산 보다 가볍고 탱크 내부의 액체 상층부로 떠오르기 때문에 인화성 분위기를 형성한다.

Encyclopedia of Chemical Processing and Design(화학공정 및 설계 백과사전)에는 사용된 산 용액 내에서의 탄화수소 층 형성이 가능하기 때문에, “[사용된 황산]저장 탱크는 마치 휘발성 탄화수소가 함유된 것처럼 설계되고 운영되어야 한다” (McKetta, 1995)라고 명시되어 있다.

일반적으로, H_2SO_4 알킬화 과정을 벗어난 사용된 황산은 1% 이하의 탄화수소를 함유하게 된다. 그러나, 탄화수소는 산 보다 가볍고 탱크 내부의 액체 상층부로 떠오르기 때문에 인화성 분위기를 형성한다. 이러한 층(layer)은 이소부탄과 알킬화물(화학식 번호가 높은 옥탄 값을 갖는 C5-C16 이소파라핀, 알킬화 공정 반응장치에서와 유사한 화학구조)을 포함하게 된다.

이소부탄의 휘발성은 인화성 증기를 탱크 내부의 액체 위 공간으로 옮긴다(Albright, 2002).

3.2.2절에 언급한 바와 같이, 부적합한 불활성화는 인화성 혼합물을 생성하기 위해 탱크393으로 다량의 대기가 유입되는 원인을 제공한다.

3.1.4 탱크 결함 분석

증기가 점화된 약 1초 후에 탱크 내부는 최고 압력-5.0 psig-에 도달했다.

CSB는 탱크393의 기계적 결함을 조사하기 위해 미국 일리노이즈 주 Aurora의 Engineering Systems Inc. (ESI)와 계약을 체결했다. ESI는 미국 캔사스 주립대학이 개발한 모델링 툴을 사용하여 유한요소분석(FEA)을 수행했다. 이 모델은 증기가 점화된 약 1초 후에 탱크 내부는 최고 압력-5.0 psig-에 도달했을 것이라고 예측했다.

동체와 바닥의 용접부분이 구부러지기 시작한 것은 약 4.0 psig 시점부터였다고 추정했다. 또한, 5.0 psig 의 최고 압력에 도달했을 당시, 모서리 용접부의 응력은 탱크의 장력강도를 초과했다(ESI, 2002; 그림 7 참조).

그림 8은 탱크393의 바닥부분을 나타낸다. 곡선모양의 테두리는 지표면에서 동체가 분리되기 이전에 들어올려진 흔적을 명확히 나타내고 있다.

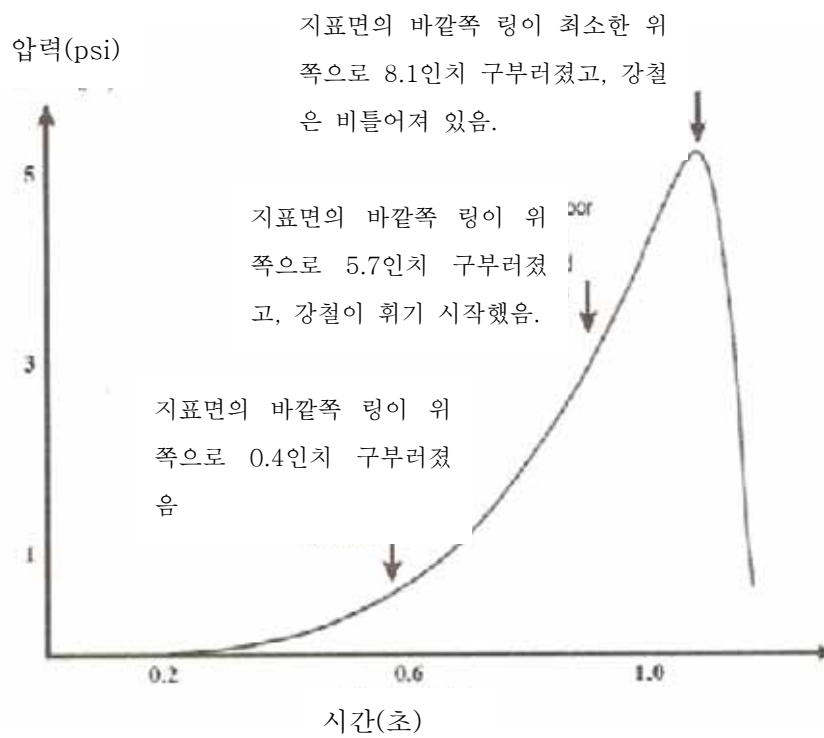


그림 7. 내부 폭연 과정에서 탱크393의 압력 상승 곡선



그림 8. 내부 폭연으로 인해 위로 들어올려진 탱크393의 지표면
(동체와 분리되기 이전)

3.2 사용전 황산에서 사용된 황산으로의 전환작업

2000년 3월, 탱크393은 사용전 H_2SO_4 에서 사용된 H_2SO_4 로 전환하는 작업을 수행했다. 이 같은 교체 작업은 불활성 가스 시스템¹²⁾, 대기압력통기구¹³⁾, 그리고 화염방지기¹⁴⁾ 설치와 연계되어 시행되었다. 이 같은 변경사항 추가는 사용전 황산과 달리, 사용된 황산은 일반적으로 증기화되어 액체 수면위로 인화성 혼합물을 형성하는 가벼운 탄화수소를 소량 함유하고 있기 때문에 불가피한 것이었다. 변경사항 추가의 목적은 탱크의 증기공간 내에서의 연료/공기 폭발을 방지하기 위한 것이었다.

3.2.1 공정

사고 조사관들은 저장탱크를 사용전 황산에서 사용된 황산으로 전환하는 작업에 지원된 공정에 대한 극히 일부의 증거만을 발견했다. 불활성 시스템의 공학 작업에 대한 문서는 발견되지 않았다. 공학 분석을 시행했었다면, 계획된 시스템이-탱크396에서 탱크393으로 CO_2 주입을 연결하는-탱크 내부의 대기압을 인화성 증기의 점화를 방지하기에 충분한 수준으로 유지하기 위해 적합한 CO_2 양을 주입할 수 없다는 결론을 내렸을 것이다(3.3.3절 참조).

공학 분석을 시행했었다면, 계획된 시스템이-탱크396에서 탱크393으로 CO_2 주입을 연결하는-탱크 내부의 대기압을 인화성 증기의 점화를 방지하기에 충분한 수준으로 유지하기 위해 적합한 CO_2 양을 주입할 수 없다는 결론을 내렸을 것이다.

Motiva사는 WGI사에게 탱크393을 사용된 황산 저장탱크로 전환하는 작업에 착수하라는 작업 지시를 내렸다. 작업 지시서에는 다음과 같이 언급되어 있었다: “화염방지기과 진공차단기를 구입하여 설치 할 것. 또한 CO_2 주입 호스를 탱크에 연결 할 것”. 이러한 계획에 대한 공학적 공정을 수행하기 위해, Motiva사의 감독관은 공학 지원 요청서를 작성했지만, 탱크393에는 공학적 지원이 적용되지 않았다. WGI사는 탱크 391과 396를 동일한 수치로 산정하여 통기구와 화염방지기를 설치했고, 작업 지시서에 명시된 바에 따라 CO_2 주입을 위한 임시 호스를 연결했다.

12) 불활성이란 시스템내에서 인화물질이 연소하지 못하도록 하는 비인화성, 비활성화 가스의 사용을 의미(NFPA 69).

13) 대기압력통기구(PV 밸브)는 탱크 내의 초과 압력 또는 진공상태를 완화시키기 위해 사용되는 무게하중(weight-loaded), 파일럿조작(pilot-operated), 또는 용수철 조작(spring-loaded) 형태의 안전장치. (API, 2000)

14) 화염방지장치는 열린 통기구를 통해 탱크 안으로 불꽃이 확산되는 것을 방지하기 위한 장치.

1997년, 옥외 황산저장탱크 지역에 있는 2개의 다른 탱크(391과 396)에서 초기 전환작업을 수행하는 과정에서, 엔지니어들은 계획된 전환 통기구 수치가 탱크의 내외부로 액체를 정상적으로 유동시키는데 있어, 적합한 환기 상태를 제공하기에 충분함을 입증했다.¹⁵⁾ 그러나, 열호흡(thermal breathing)¹⁶⁾용 통기구의 적합성을 판명할 수 있는 문서자료는 어디에도 없었다.

2000년, 탱크393의 전환작업이 완료될 당시, 작업관련 산정수치는 문서화 되지 않았다. 하청업체는 1997년 시행된 탱크 전환작업에서 사용되었던 통기구 수치를 그대로 사용했다. Motiva사가 비정상적인 결과를 초래했던 이외 다른 사안에 대한 공학분석을 수행했거나 또는 불활성 시스템 장애(탱크 내부로 과도한 불활성 가스가 유입된) 또는 탱크 내부에서 탄화수소 액체를 증발시킨 외부 화염 등과 같은 탱크의 비상 통기구 관련 내용은 그 어디에서도 찾아볼 수 없었다. API 2000은 이러한 특정 사안에 적합한 공학 설계의 필요성에 관해 언급하고 있다¹⁷⁾.

15)대기압력통기구의 정량 기준은 액체가 분출할 때 충분한 양의 공기 또는 불활성 가스를 탱크 안으로 주입하거나, 또는 액체를 내부로 주입할 때 탱크로 유입 유출되는 액체의 양을 치환하기 위해 공기 또는 불활성 가스를 탱크 밖으로 끌어내야 한다는 것이다. 만약 탱크에서 유출된 액체의 양을 대체하는데 있어 불충분한 양의 증기가 더해지게 되면, 압력은 떨어지고 그 결과 진공 상태가 탱크를 손상시킬 수 있다. 이와는 반대로, 탱크 안으로 액체를 주입할 때, 통풍구가 적합치 않은 경우 과도한 압력으로 탱크가 손상될 수 있다.

16)열호흡이란 탱크 내부의 증기가 기후변화로 인하여(예, 대기 온도의 상승 또는 하강)팽창 또는 수축하는 경우, 탱크 안으로 주입, 유출되는 상태를 의미한다.

17)API규정 2000, 대기압통기구 및 저압력 저장 탱크, 1998년.

사용전 H_2SO_4 저장용인 탱크393을 처음 설계할 당시에는 가용성 지붕 (frangible roof)¹⁸⁾ 과 같은 비상 압력완화 시스템이 필요하지 않았다. 그러나, 사용된 황산으로의 전환작업에는 반드시 필요한 사항이었다.¹⁹⁾

18)가용성 지붕은 과도한 압력을 받을 때, 다른 용접 이음부에 닿지 않도록 지붕과 동체를 연결하는 유연한 장치이다. 이는 지붕과 동체의 이음부에 닿지 않음으로써 과도한 압력을 완화시킬 수 있으며, 탱크의 치명적인 사고와 저장물질 손실 등을 방지할 수 있다.

19)최초 설계 시, 비상 통기구가 설치되지 않은 것은, 사용전 H_2SO_4 의 비상 통기구 로딩이 외부 화염 상황에서 조차 산(acid)의 극히 낮은 휘발성에 비해 상대적으로 낮기 때문이었다. 또한 탱크393에는 초기에 압력제어가 설치되어 있지 않았다. 사용된 H_2SO_4 는 훨씬 더 높은 휘발성을 갖는 탄화수소를 다소 함유하고 있는데, 여기에는 API 2000규정에 따라 비상 통기구 성능이 장착되어야 한다. API 2000규정은 불활성 시스템 이외에도, 탱크 내부로 과도한 양의 불활성 가스가 유입되는 결과를 초래하는 압력조절밸브가 열린 상태에 대비하여 비상 압력완화장치를 설계할 것을 권고하고 있다.

3.2.2 탱크내의 불활성화

1997년, 탱크391과 396이 사용된 황산으로 전환되었을 당시, 각 탱크에는 CO₂ 유입량을 조절하기 위한 압력조절밸브와 2개의 압력계가 장착되어 있었다. 그러나, 2000년 3월, 탱크393에 불활성 시스템이 장착되었을 당시, 이러한 장치들은 상이한 방법으로 설치되었다(그림 9 참조).

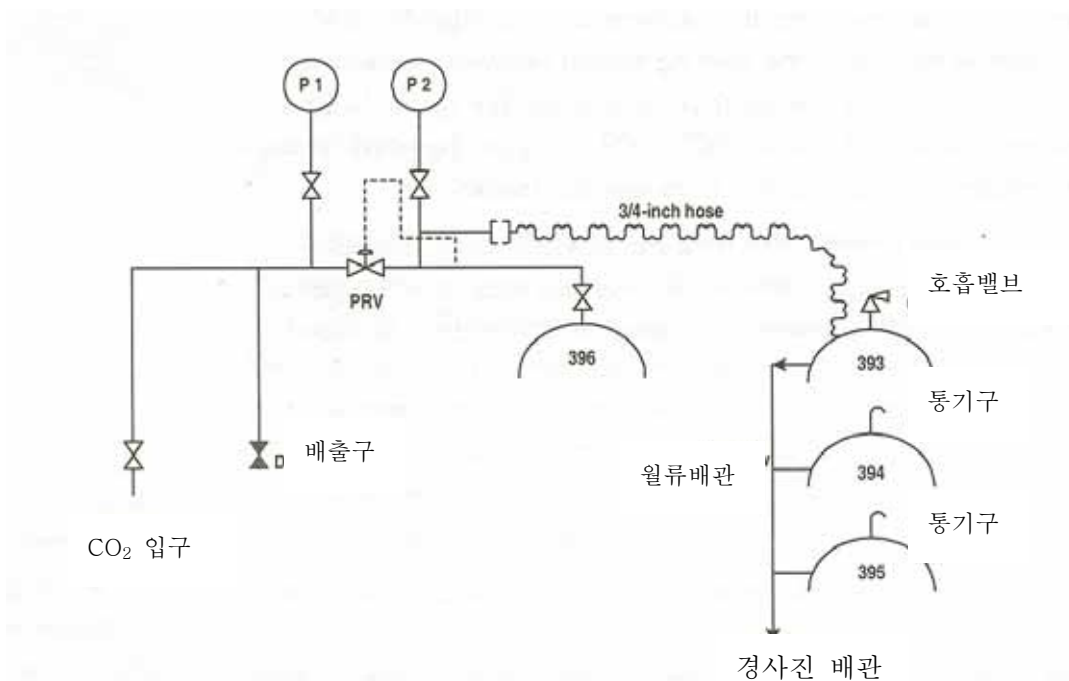


그림 9. 불활성 시스템 흐름도(탱크393으로의 CO₂ 유입 및 탱크394/395와의 유출연결)

탱크393은 지정된 압력조절밸브를 설치하는 대신, 탱크396의 배관에 연결된 3/4인치의 연성고무 호스를 통해 CO₂를 주입했다.

탱크393은 지정된 압력조절밸브를 설치하는 대신, 탱크396의 배관에 연결된 3/4인치의 연성고무 호스를 통해 CO₂를 주입했다. 호스는 두 탱크 사이에 있는 작업통로를 따라 연결되어 부식된 노즐이 떨어져 나가면서 생성된 지붕에 뚫린 홀(그림 8 참조)을 통해 탱크393에 주입되었다. 호스 설치의 임시방편적인 것이었으나, 다른 사용된 황산 저장탱크에서와 마찬가지로 견고한 파이프 배관으로 대체되지 않은 채, 수년간 그대로 방치되었다.

Motiva사는 기존의 CO₂ 배관 시스템 대신 직경이 작은 호스를 연결하는 것이 탱크393에 CO₂ 를 주입하기에 적합한지 여부를 입증할 만한 공학적인 분석 문서를 갖고 있지 않았다. 사실상, 가스 주입이 어떠한 탱크에 적합하게 불활성화 되어야 한다는 내용을 제시하는 문서는 없었다.

탱크393에는 필요로 하는 불활성 가스의 일부분만이 주입되었는데, 이는 호스의 길이와 작은 직경으로 인해 극히 제한된 양만이 유입되었기 때문이다²⁰⁾. 더욱이, 시스템에 추가 장착된 조절밸브는 두 개의 탱크에 대한 CO₂ 유입을 동시에 조절하도록 설계되어있지 않았다.

유입가스는 탱크396으로 우선적으로 유입되었다. 조절밸브의 압력 신호는 탱크393이나 396의 압력 모두를 실제로 감지하지는 못했지만, 이후 탱크393에 유입되는 CO₂ 양을 감소시켰던 조절밸브 하류 파이프에서의 CO₂ 압력을 측정했다.

WGI소속의 설비 기술자는 불활성 시스템에 설치된 기기들에 대한 유지보수를 담당하고 있었다. 담당자는 압력 조절기를 2" 수두기준 양압에 맞춰놓았다²¹⁾. 4개의 사용된 황산 저장탱크 중 3개 탱크의 압력계는 CO₂ 불활성 시스템이 제대로 작동하고 있는지 여부를 나타내는 것에 불과했다. 그러나, 작업 관리자들이 작업통로에 가는 것은 드문 일이었고, 압력계 체크는 일상업무에 포함되어 있지도 않았다. 탱크393로 유입되는 CO₂ 에 대한 압력계가 없었으므로, 임시 호스를 통해 탱크에 CO₂ 가 주입되었는지 여부를 확인할 방법이 없었다.

탱크393에는 필요로 하는 불활성 가스의 일부분만이 주입되었는데, 이는 호스의 길이와 작은 직경으로 인해 극히 제한된 양만이 유입되었기 때문이다

탱크393으로 유입되는 CO₂ 에 대한 압력계가 없었으므로, 임시 호스를 통해 탱크에 CO₂ 가 주입되었는지 여부를 확인할 방법이 없었다.

20)밸브 자체는 1인치 Fisher Rosemount형 1190 가스 블랭킷팅(blanketing)조절기로, 80 psig의 유입압력에서 57,700 시간당 표준 입방피트 (scfh) 질소, 또는 45,300 scfh CO₂ 비율이 정해진다. 여기에는 하류(downstream)배관, 밸브, 밴드, 또는 확장(expansion)으로 인한 한정치를 감안하지 않는다. CSB가 측정한 바에 따르면, 탱크393으로 유입되는 CO₂ 양은 시간당 표준 입방피트(scfh)가 110으로, 불활성 대기압을 유지하기에 필요한 수치보다 현저히 낮은 것으로 나타났다. 이 같은 CSB의 유입량 측정은 탱크가 인화성 가스의 연소를 유지하기에 충분한 수치 이상인 약 16%의 산소를 함유하고 있었음을 의미한다.

21)압력은 2인치 높이의 물기둥에 의해 가해지는 하향압력에 상응한다.

미국 화재예방협회(NFPA)에 의하면, 정화가스(purge gas)²²⁾는 보호 시스템²⁴⁾을 통해 적합한 산화제 농도감소²³⁾를 효과적으로 배분하고 유지하도록 하기 위해 유입, 배출되어야 한다고 규정하고 있다.

탱크393이 지붕과 동체에 뚫린 홀을 통해 대기 중에 지속적으로 노출되어 있었기 때문에(3.1절 참조), 탱크의 증기공간을 통한 불활성 매개체의 효과적인 분포상태를 확인할 방법이 없었다. 게다가, 탱크393 배출 파이프는 대기로 통풍구가 나 있고 불활성 시스템이 갖추어지지 않은 사용전 황산이 저장된 탱크394와 395에 인접한 증기공간에 연결되어 있었다.

적합한 성능의 불활성시스템이 결함이 없는 탱크에 설치되어 있었다면, 탱크393 내에서의 인화성 연료/공기의 화합반응은 일어나지 않았을 것이다.

3.2.3 보조 시스템

7월 17일의 사고는 탱크393에 저장된 총 264,000갤런이 순간 방출되어 발생했다. 이 같은 엄청난 방출사고의 강도로 인해 탱크396의 저장물 회수 라인(product withdrawal line)이 파손되었고, 그로 인해 352,000갤런의 저장물질이 방출되었다.

6개의 대기압 저장탱크가 있는 DCR의 옥외 황산저장탱크들은 각각 415,000갤런의 용량을 갖추고 있다. 사고발생 이전, 이 탱크들에는 총 1.7million갤런으로 추정되는 사용전 및 사용된 H₂ SO₄ 가 저장되어 있었다. 탱크 각각에는 개별적인 방유제가 설치되어 있지 않았고, 단 한 개의 보조 방유제(길이180피트, 폭130피트, 높이 5피트)는 저장탱크들로 둘러싸여 있었다. 방유제 내부의 배출구는 유출물을 모아 산(acid)플랜트 중화시스템으로 보내도록 설계되어 있었다.

7월 17일의 사고는 탱크393에 저장된 총 264,000갤런이 순간 방출되어 발생했다. 이 같은 엄청난 방출사고의 강도로 인해 탱크396의 저장물 회수 라인(product withdrawal line)이 파손되었고, 그로 인해 352,000갤런의 저장물질이 방출되었다. 화재 진압 이후, 몇 주 동안 탱크394에서 산(acid)이 지속적으로 누출되었다.

22)정화가스는 비인화성 분위기를 조성하기 위해 지속적 또는 간헐적으로 추가되는 가스를 의미한다 (NFPA69).

23)산화제 농도축소는 밀폐된 공간에서 점화 발생 기준수치 이하로 산화제 농도를 유지하는 기법을 말한다.

24)NFPA69, 폭발방지시스템에 대한 규정, 1997년

저장물질이 처음 방출되었을 때, 거대한 물결을 이룬 검은 액체가 방유제 벽을 무너뜨렸다. 산은 보조 방유제 내부에 있는 유출물 회수 시스템(spill collection system)을 휩쓸고 지나가 유수(oily water) 및 빗물 하수구로 흘러 들어갔다. 사고 당시와 그 직후에 총 1.1million갤런의 산이 방출되었다.

유수 하수구에 있는 물질은, 델라웨어 강으로 방출되기 이전에 산(acid)이 일부 저장 또는 처리되었던 폐수처리장으로 유입되었다. 빗물 하수구에서, 산은 Delmarva Power & Light 채널을 통해 처리되지 않은 채 유입되었고 이후 델라웨어 강으로 흘러 들어갔다. 옥외 저장탱크의 서북쪽으로 흐르던 산 용액은 Red Lion Creek지류로 유입되었다. 유출된 산 용액의 일부는 석탄회 연못으로 흘러 들어갔다. Motiva사는 약 99,000갤런의 산 용액이 델라웨어 강으로 유입되어, 어류 및 다른 수자원을 오염시킨 것으로 추정하고 있다.

보조 방유제는 탱크 저장물질에서 순간 방출된 물질을 수용하도록 설계되어 있지 않았다. 방유제가 약 480,000갤런 용량의 정력학(hydrostatic)설계²⁵⁾로 되어있었지만, 순간 다량 방출된 동적 조석파(dynamic tidal wave)를 견뎌낼 수 있도록 건조되지 않았다. 공정안전 전문가인 Frank Lees(1996)는 “일반적으로 탱크에 저장된 액체의 정력학 로드를 감안해 방유제를 설계한다” 라고 지적하고 있다.

일부 첨단공학 기법을 동적 로딩에 관한 사안에 적용가능하기는 하지만, 미국석유학회(API), NFPA, 또는 화학공정안전센터(CCPS)의 모범사례 지침은 그러한 정교한 용기 시스템을 유체유량(liquid flow)의 “조석파”(tidal wave)를 저장하기 위해 설계하는 것은 권고하지 않고 있다.

3.3 탱크 전환작업의

변경관리

2000년, 탱크393이 사용전 황산에서 사용후 황산으로 전환되었을 때, 다음과 같은 변경사항이 추가되었다:

- 저장물질의 합성
- 탱크의 통풍조절기 및 화염확산방지기 추가
- 불활성 가스 블랭킷팅 시스템 추가.

25)이 용량은 단일 탱크에 추가 안전한계를 더한 저장물에 해당한다.

탱크391과 396은 가장 먼저 사용된 황산으로 전환된 두 개의 사용전 황산 저장탱크였으며(1997년 11월), 각각의 탱크는 화염확산방지기 추가에 대한 문서화된 변경관리 심사를 받았다. 그러나, 추가 설치된 불활성 시스템과 같은 이외 다른 전환작업 관련 작업에 대한 변경관리 문서는 작성되지 않았었다.

API 750은 기술 또는 설비 변경은 새로운 위험요소를 발생시킬 수 있으며 최초 설계 시 이미 구축된 안전성을 위협할 수 있다고 지적하고 있다²⁶⁾. 본 규정은 또한 정유업체들이 설비 및 운영 조건 변경으로 인해 발생할 수 있는 위험요소를 검토할 것을 권고하고 있다. 이러한 절차가 바로 “변경관리”이다²⁷⁾.

탱크393의 전환작업관련 변경 사항에 대한 변경관리위원회 심사는 문서화되지 않았다.

Motiva사의 변경관리시스템은 공정안전관리상의²⁸⁾ 한 부분이였다. Motiva사가 옥외 황산저장탱크 지역에 OSHA 공정안전관리(PSM)규정의 요구사항을 적용하지 않았음에도, 변경관리 심사는 일부 저장탱크의 설비(예, 상기 언급된 탱크391과 396)를 변경했을 때 수행되었다. 그러나, 탱크393 전환작업관련 변경사항에 대한 변경관리 심사는 문서화되지 않았다.

변경관리 공정에서 중요한 단계 중 하나는 관리 권한 및 승인이다. 이는 OSHA PSM규정, API 750규정, 그리고 화학제조협회(CMA; 현행 미국화학위원회[ACC]의 전신)규정에 명시되어 있다. ACC는 권한심사는 “위험요소 검사 단계를 토대로 하여, 변경이 이루어지기 이전에 수행되는 조치가 완전히 그리고 적합하게 문서화되도록 해야 한다” 라고 명시하고 있다(CMA, 1993). 탱크391과 396의 전환작업과 연관된 변경관리 심사과정을 거치지 않았으며, 프로젝트 엔지니어링, 유지보수, 그리고 검사 등과 같은 정유공장의 다른 부서가 서명한 것으로 되어있다.

26)API RP 750. 공정 위험요소 관리, 1990년 1월

27) 변경관리는 공정설비, 공정물질, 구조, 그리고 표준 운영규정의 수정사항에 대한 안전성 적용을 검토하는 체계적인 방법이다. API 750규정이 발생 가능한 치명적인 위험요소의 제한적 범위에 적용되는 반면, 상기 규정은 변경관리시스템의 모범 사례 및 장점에 관한 상세한 내용을 포함하고 있다.

28)또한, 변경관리는 OSHA PSM규정, 29CFR 1910.119 그리고 EPA 위험관리계획(RMP)규정, 40CFR

168에 명시된 요구사항이다.

Motiva사가 적용한 변경관리 절차에는 변경작업과 연관된 발생 가능한 위험요소를 식별하기 위한 20개의 질문이 기재된 체크리스트가 포함되어 있었다.

그러나, CSB의 조사관들은 대기 저장탱크를 사용전 황산에서 사용된 황산용으로 전환함에 있어 이러한 체크리스트가 적합하게 적용되지 않았기 때문에, 탱크 내부로 인화성 물질이 유입된 것이라는 결론을 내렸다.

체크리스트에는 불활성 가스 블랭킷팅 시스템과 같은 탱크의 과도한 압력과 결함에 내재된 위험요소에 관한 몇 가지 질문들이 포함되어 있었다. 탱크391과 396에 대한 변경관리 체크리스트에 기재된 내용은 다음과 같다:

- 검사관은 “설계 압력보다 훨씬 높거나 또는 낮아질 수 있는 원인은 무엇인가?”라는 질문에, “외부 온도”라고 기재했다.
- 검사관은 기기를 보호하기 위한 압력완화밸브가 설치되어 있지 않다고 지적했다.
- “PSV의 용량이 시스템을 완화하기에 적합한가?” 라는 질문에는 답변이 기재되어 있지 않았다.²⁹⁾
- 검사관은 “조절설비가 장애를 일으키는 경우 발생할 수 있는 결과는 무엇인가?”라는 질문에 “없다”라고 기재했다.

외부 화재와 같은 예외적인 경우 발생 할 수 있는 탱크의 과도한 압력에 관한 사안은 문서화되지 않았다. 체크리스트에는 탄화수소를 함유한 탱크의 불충분한 불활성화 상태에 대한 위험요소가 기재되어 있지 않았다.

1993년, CMA(화학물질제조협회)는 공정변경 관리(Managing Process Changes)에 명시된 다음과 같은 모범사례 지침을 제시했다. “특정 변경 형태에 관한한, 공장 관리는 공식적인 위험요소 평가 필요성을 결정해야 한다. 변경관리시스템은 이러한 분석작업을 착수하기 위한 공식기준을 갖고 있어야 한다”(CMA, 1993).

...CSB의 조사관들은 대기 저장탱크를 사용전 황산에서 사용된 황산용으로 전환함에 있어 이러한 체크리스트가 적합하게 적용되지 않았다는 결론을 내렸다...

Motiva사의 변경관리 절차는 변경작업 책임자가 PSM(공정안전관리제도)현장 책임자로부터 공정위험분석(PHA)를 요청하도록 하고 있었다. 그러나, 이는 위험성 및 운영성(HAZOP)평가와 같은 보다 광범위한 위험분석을 요청하는 경우, 해당 지침이 마련되어 있지 않았다.

29)PSV는 안전밸브의 약어로, 압력완화밸브와 같은 의미이다.

...가동전 안전검사... 탱크 393에 지붕에 뚫린 홀 안으로 삽입된 임시호스가 불활성 가스를 주입하기에 부적합한 수단이라는 것을 입증할 수 있었을 것이다.

Motiva사의 변경관리 절차는 변경작업 책임자가 PSM(공정안전관리제도)현장 책임자로부터 공정위험분석(PHA)를 요청하도록 하고 있었다. 그러나, 이는 위험성 및 운영성(HAZOP)평가와 같은 보다 광범위한 위험분석을 요청하는 경우, 해당 지침이 마련되어있지 않았다. 탱크 전환 작업에 대해 변경관리는 공정위험분석을 통해 그 이상의 요청을 하지 않았다.

이외에도 변경관리에는 검사된 장치가 사용되기 이전이 아닌, 물리적 변경이 수행된 이후의 가동전(prestarpup) 안전 검사에 대한 요구사항이 포함되어 있다. 이러한 안전검사는 탱크393에 지붕에 뚫린 홀 안으로 삽입된 임시호스가 불활성 가스를 주입하기에 부적합한 수단이라는 것을 입증할 수 있었을 것이다.

탱크393의 전환작업-정유공장 인력으로 구성된 다지술전문가팀(multidisciplinary team)에 의한 검사를 포함- 착수 이전에 적용되는 보다 광범위한 변경관리시스템으로, Motiva사는 계획된 불활성 시스템의 부적합성, 비상 압력완화 성능 결함, 그리고 공학적 접근방법 필요성 등에 대해 검증할 수 있었을 것이다.

3.4 탱크393 관리

3.4.1 잠재적 유해성에 대한 인식 부족

Motiva사의 경영진은 다음과 같은 전례가 있었음에도, 탱크393이 인명과 환경에 미칠 수 있는 긴급 위험 상황에 대해 인식하지 못했다:

작업반 관리자들은 특정 누출 부분을 보수하면 탱크의 초기 상태만큼 또는 그 이상의 상태를 유지하는데 문제가 없을 것으로 생각했다.

- 탱크393의 누출사고 전례
- 다른 산 저장 탱크의 결함에서 나타난 부식 형태.
- Motiva사의 검사관이 제기한 수 차례의 내부검사 필요성
- 탱크393과 396에 뚫린 홀이 언급된, 2000년 6월 27일 작업반장이 제출한 불안전 작업조건 보고서
- 지붕에 뚫린 홀에 늘어뜨려져 있는 임시 고무 호스를 통해 탱크393

에 주입된 불활성 가스.

작업반 관리자들은 특정 누출 부분을 보수하면 탱크의 초기 상태만큼 또는 그 이상의 상태를 유지하는데 문제가 없을 것으로 생각했다. 사고 후, 인터뷰 내용에서, Motiva사의 관리자들은 CSB에게 즉시 발생할 수 있는 안전상 위협을 감지하지 못했다고 재차 강조했다. 관리자들은 최악의 상황이라고 해야, 탱크의 저장물 누출로 인한 환경오염 위험이라고 생각하고 있었다. 누출 시점 이하로 탱크의 액체 레벨을 낮춘 관리감독 상태에 대해, 경영진들은 이러한 조치는 불활성 시스템과 함께 위험요소를 제거할 수 있을 것으로 생각하고 있었다.

탱크의 불활성 시스템은 정상 작동하고 있었기 때문에, 탱크의 증기공간 내부에 축적된 인화성 대기를 방지할 수 있을 것이라고 믿고 있었다. 관리자들은 이러한 정보를 전달하지 않은 채 이러한 전제를 그대로 믿었다:

- 시스템을 적합하게 설계하기 위해 적절한 공학 자원을 적용하지 않았다.
- 2000년 탱크393에 전환작업이 수행되었을 때 변경관리 절차를 준수하지 않았다.
- 불활성 시스템의 정상 가동 여부를 확인하기 위한 공학상 또는 관리감독 (예, 압력 또는 산소 정보, 또는 유입량 또는 압력 수치) 이 수행되지 않았다.

탱크의 불활성 시스템은 정상 작동하고 있었기 때문에, 탱크의 증기공간 내부에 축적된 인화성 분위기를 방지할 수 있을 것이라고 믿고 있었다.

3.4.2 검사 연기

3.4.2.1 운전가동 및 저장물질의 제한 조건

Motiva사는 2000년과 2002년 탱크393이 비워져 있었을 때 검사를 수행할 수 있는 여러 번의 기회를 놓쳤다. 경영진들은 산(acid)설비에 채워진 저장물질을 처리하기 위해 탱크393을 지속적으로 가동해야 했으며, 이는 산 재생 유닛이 설계된 비율만큼 생산하지 못하는 운전가동상의 문제점이 있었기 때문이라고 말했다. 사용된 황산의 초과량은 하청업체로 운송되었

Motiva사는 2000년과 2002년 탱크393이 비워져 있었을 때 검사를 수행할 수 있는 여러 번의 기회를 놓쳤다.

는데, 그 업체 또한 작동상 문제점을 경험하고 있었다.

결국, 저장물질(inventory)이 충분한 상황임에도, Motiva사는 탱크393을 사용전 황산에서 사용된 황산으로 전환하는 작업을 수 차례 진행했다:

- 2000년 4월, 사용전 황산에서 사용된 황산으로 전환.
 - 2000년 10월, 사용된 황산에서 사용전 황산으로 전환.
 - 2001년 4월, 사용전 황산에서 사용된 황산으로 전환(사고 당일인 7월17일까지).
-

탱크는 전환작업을 위해 비워졌다. 전환작업은 탱크 청소 또는 배수작업을 할 필요 없이, 단순히 펌프를 이용해 가능한 양만큼의 물질을 배출해 내는 것이었다. 각 전환작업 시, Motiva사는 탱크393에 대한 검사를 시행할 수 있도록 물량 및 산 재생 일정을 계획할 수 있었던 기회가 있었다.

각 전환작업 시, Motiva사는 탱크393에 대한 검사를 시행할 수 있도록 물량 및 산 재생 일정을 계획할 수 있었던 기회가 있었다.

Motiva사는 사용된 황산이 저장된 탱크들 중 하나에 대해 배수 및 청소 작업, 가동이 중단된 상태에서 필요한 모든 보수 작업을 포함한 전체 내부검사를 실시하는데 3개월이 소요될 것이라고 추정했다. 이 기간 동안 Motiva사의 경영진은 다음과 같은 사항을 고려했어야 했다:

- 이외 다른 사용전 황산탱크를 사용된 황산으로 전환.
- 산 재생 하청업체로 보내는 산의 양을 증가시키면서 탱크393에 저장된 물질을 서서히 축소.
- 사용된 황산이 현저히 감소된 경우, 겨울철에 탱크를 비우고 검사를 시행.

Motiva사의 경영진은 상기 대안 중 어떠한 것도 실행하지 않았다.

3.4.2.2 EPA 검사 및 예산 제약.

2000년 5월, EPA는 1990년 기름오염법안을 개정한 미연방 수질오염관리법안에 따라 DCR에 대한 유출방지, 통제 및 대안(SPCC)검사를 실시했다. 검사 결과와 EPA의 의견은 하기 명시된 바와 같이, 2000년 6월 22일 작성된 위험감소를 위한 행정명령에 상세히 명시되어 있다:

- EPA는 “환경에 대해 당면한 그리고 치명적인 위협”이 될 수 있는 3개의 기름 저장탱크를 지목했다. 부식상태가 심각한 이 탱크들은 1950년대 말 건조된 이래 내부검사를 받은 적이 없다. Motiva사는 10일 이내 탱크의 가동을 중단할 것을 명령 받았다.
- EPA는 이외에도 검사의 대상이 되는 또는 외부 조건이 검사를 요하는 15개의 기름저장탱크를 지목했다.

EPA는 Motiva사에게 상기 18개의 탱크에 대한 검사계획을 진행할 것을 명령했다.

Motiva사는 상기 명령에 대해 2003년 9월까지 18개 탱크 모두를 검사하는 계획의 세부 내용이 포함된, 2000년 7월 18일 작성된 실행계획을 제시했다.

실행계획을 진행하는 동안, Motiva사는 26개의 다른 저장탱크들도 검사 계획에 포함시켰다. 이러한 노력은 2005년까지 Motiva사의 모든 저장탱크들에 대한 검사를 수행하는 계획에 포함되었다. 이러한 초기 계획 시, 탱크393의 검사시기는 2001년으로 예정되었었다.

2000년 중반에, 탱크검사 일정이 준비됨에 따라, Motiva사와 Equilon정유업체(Equiva “연합”으로 공동 운영)로 구성된 대표단은 탱크의 유지보수 업무를 조사하고 있었다. 대표단은 탱크와 탱크 청소 주기의 효율적 관리를 통해 상당부분의 경비를 절감할 수 있다는 것을 발견했다. Motiva사는 회계연도 2001년 예산안 편성작업을 시작하고 있었으므로, 이러한 경비절감 액수는 정유업체들 각각에게 배분되었고, 그로 인해 DCR 탱크 유지보수 예산안은 삭감되었다.

2001년 1월, 이러한 예산 삭감의 결과, DC의 관리자들은 탱크검사 계획

을 재검토했다:

- 환경에 치명적 위협이 될 수 있는 2개의 탱크를 최우선 대상으로 한다. 첫 번째 탱크는 바닥면과 동체 용접 부분, 또는 테두리 부분에 누출현상이 있으며, 다른 하나는 대기오염 규정에 명시된 허용치보다 높은 봉인 부분이 있는 부유(floating) 지붕탱크였다.
- 두 번째 우선순위는 EPA의 행정명령에 의해 지목된 탱크들을 대상으로 한다.

추가 탱크들은 예산이 하락하는 한 검사계획 일정에 포함될 예정이었다.

삭감된 예산에 맞추기 위해, 경영진들은 그들이 안전상 또는 환경상 문제점이 있음을 감지하지 못한 탱크393을 포함한 9개의 탱크에 대한 검사를 연기하기로 결정했다. 탱크393의 검사일정은 2001년 2월부터 2002년1월까지로 재조정됐다.

삭감된 예산에 맞추기 위해, 경영진들은 그들이 안전상 또는 환경상 문제점이 있음을 감지하지 못한 탱크393을 포함한 9개의 탱크에 대한 검사를 연기하기로 결정했다. 탱크393의 검사일정은 2001년 2월부터 2002년1월까지로 재조정됐다. Motiva사의 경영진은 2001년 4월, DCR회의에서 9개 탱크에 대한 검사연기를 발표했다.

3.5 화기작업

Motiva사는 불꽃 또는 슬래그(slag)가 탱크 내부의 인화성 증기와 접촉하여 점화될 수 있는 좁은 통로가 있는, 홀이 뚫려있는 탱크 부근에서 화기작업을 수행하도록 허락했다.

Motiva사는 불꽃 또는 슬래그(slag)가 탱크 내부의 인화성 증기와 접촉하여 점화될 수 있는 좁은 통로가 있는, 홀이 뚫려있는 탱크 부근에서 화기작업을 수행하도록 허락했다.

하청업체 직원들은 7월 17일 이전인, 2001년 6월과 7월 동안 4차례의 작업통로 보수작업을 수행했다. 이외에도 최소한 두 번의 경우에서, 작업자들은 현장에 도착했으나, 작업관리자가 화기작업을 승인할 수 없어 더 이상 작업을 할 수 없었다:

- 1번은 작업 지역의 높은 SO₂ 레벨로 인하여,
- 2번째 경우는(6월27일) 작업관리자가 작업 예정 지역에서 휴대용 폭발

감지기로 측정한 결과 1% 수치가 나타났기 때문이었다.

6월 27일 화기작업 승인이 거부된 이후, 작업관리자는 앞서 언급된, 탱크 393과 396에 뚫린 홀이 기재된 불안전한 작업조건 보고서를 제출했다.

게다가, 하청업체 직원들은 CSB에게 사용된 H_2 SO_4 가 인화성 탄화수소를 함유하고 있다거나 또는 사용된 황산 저장탱크의 증기공간에서 인화성 분위기가 형성될 수 있으리라고 생각지 않았다고 말했다.

사고가 발생한 날, 화기작업을 승인한 작업관리자나 감독관, 그리고 작업을 수행하고 있었던 하청업체 직원들 중 어느 누구도 황산 저장탱크의 지붕에 뚫려있는 홀로 인해 위험에 노출되어있다는 사실을 인지하지 못했다. 게다가, 하청업체 직원들은 CSB에게 사용된 H_2 SO_4 가 인화성 탄화수소를 함유하고 있다거나 또는 사용된 황산 저장탱크의 증기공간에서 인화성 분위기가 형성될 수 있으리라고 생각지 않았다고 말했다.

일반적으로 점심 시간이나 또는 작업조건이 변경되는 등 장시간 동안 작업자들이 현장을 비우고 난 후에는 화기작업 부근 지역을 정리하는 것이 통상적인 작업수칙이다. API 2009에는 다음과 같이 언급되어 있다:

이전에 분명히 가스가 방출되었던 지역에서 작업이 지연 또는 중되는 경우, 승인체계는 산소 및 인화성 탐지 테스트가 반드시 반복 행 되거나 또는 재승인이 필요한 시간에 대해 명시해야 한다....
정적인 인화성 가스 및 산소의 재시험(또는 지속적인 모니터링)은 화기작업이 수행되는 동안 실시되어야 한다..... 작업 승인은 모니터 횟수를 명시해야 한다.³⁰⁾

30)API RP 2009. 석유 및 석유화학 산업에서의 안전 용접, 절삭 및 화기작업 사례. 2002년 2월

사고가 발생하던 날, 재시험 또는 지속적인 모니터링을 수행했어야 했던 몇 가지 변경 상황이 발생했다.

- 오전8시, 대기온도는 화씨(°F) 71도 였으며, 사고 발생시간 얼마 전인 오후 1:00시 경 1차 테스트가 수행되었을 때, 온도는 85°F로 상승했다. 온도가 상승함에 따라, 탱크 내부의 액체에서 탄화수소가 증기화되어 증기공간으로 유입되었다. 증기의 양이 증가함에 따라, 온도 상승으로 인해 탱크에서 인화성 증기가 방출되어 화기작업에서 발생한 불꽃에 접촉될 수 있는 가능성이 높아졌다.

오전8시, 대기온도는 화씨(°F) 71도 였으며, 사고 발생시간 얼마 전인 오후 1:00시 경 1 차 테스트가 수행되었을 때, 온도는 85°F로 상승했다... 온도가 상승함에 따라, 탱크에서 방출된 인화성 증기 또한 증가했다...

-
- 하청업체 작업자들은 부식된 격자의 녹슨 부분을 절삭하기에는 산소-아세틸렌 절단 토오치가 충분히 가열되지 않았기 때문에 탄소 아크에어 가우징을 사용하기로 했다. 탄소 아크에어 가우징은 산소-아세틸렌 절단 토오치에 비해 훨씬 더 많은 불꽃이 발생한다.

Motiva 양식 제 R-214H, 화기작업 승인을 위한 지시사항에는 아크에어 가우징 작동에 대해 언급하고 있다:

아크에어는 약 80psi 공기압에서 가열하기 위해 동(copper)전극을 사용하게 된다. 공기를 통해 생성된 온도를 이용해 스테인레스강과 이외 다른 강금속처럼 흠을 파거나, 절단 또는 광재(flush)를 배출하게 된다. 공기가 용융된 금속을 붙어 날리게 됨으로써, 불꽃과 다량의 용융된 금속 부분은 광범위한 화기엄금 통제구역으로 퍼지게 된다.... 저장용기 외부에서 수행되는 이러한 종류의 화기작업을 수행 하는 경우, 모든 작업은 불꽃을 철저히 통제하는 적합한 물질로 안전 차단되어야 한다.

- 보수작업은 한 장소에서만 수행된 것이 아니라, 탱크396 부근의 작업 통로 지역에서 탱크 393에 이르는 지역에서 실시되었다.

Motiva사의 “안전작업, 화기작업 및 출입통제에 대한 일반규정”에는 다음과 같이 명시되어 있다. “가스 시험은 허가된 시간 안에 수행되어야 한다. 작업상황 변경 시, 운영은 안전을 고려해 고정 장착된 가스 모니터 또는 개인용 모니터를 사용할 것을 권고한다”. Motiva사의 작업자들은 작업지역의 재시험(retest)은 직원이 해당작업을 요청하지 않는 한 일반적으로 수행하지 않는 다고 말했다.

하청업체 작업자들이 산소-아세틸렌 절단 토오치 대신 탄소 아크에어 가우징을 사용했을 때, WGI사와 Motiva사 간에는 이러한 내용이 전달되지 않았으며, 화기통제에 대한 Motiva사의 요구사항은 지켜지지 않았다. 그럼에도, 탱크393의 인화성 대기와 탱크에 뚫린 홀의 상태를 감안할 때, 어떠한 형태의 화기작업을 수행하든 이는 곧바로 사고로 이어질 수 있는 상황임이 분명했다.

하청업체 작업자들이 산소-아세틸렌 절단 토오치 대신 탄소 아크에어 가우징을 사용했을 때, WGI사와 Motiva사 간에는 이러한 내용이 전달되지 않았으며, 화기통제에 대한 Motiva사의 요구사항은 지켜지지 않았다. 그럼에도, 탱크393의 인화성 대기와 탱크에 뚫린 홀의 상태를 감안할 때, 어떠한 형태의 화기작업을 수행하든 이는 곧바로 사고로 이어질 수 있는 상황이었다.

3.6 불안정한 작업조건에 관한 보고서

2001년 6월 27일, 높은 인화성 증기 농도수치를 사유로 화기작업 승인을 거부했던 작업관리자는 불안전 작업조건 보고서를 작성했다. 보고서는 작업자의 즉각적인 관리감독으로 문제점을 적절하게 시정 조치되지 않은 안전보건에 관한 사항을 경영진과 노동조합에 보고할 수 있는 수단이었다.

불안전 작업조건 보고서는 통상적으로 작성되는 것이 아니라, 심각한 사안에 대한 문제점을 제기하는 보고서로 간주된다. 보고서에는 다음과 같은 내용이 언급되어있었다:

393탱크는 아직도 396탱크에 장착된 가스압력조절기(regulator)에서 질소 호스[통상 질소에 사용되는 고무 호스]로 불활성 가스(CO_2)가 주입되고 있다. 이 호스는 탱크393의 꼭대기에 뚫린 홀에 삽입 설치되어 있다. 홀은 부식 정도가 심해 떨어져 나간 노즐로 인해 생긴 것이다. 396탱크 역시 노즐이 심하게 부식되어 떨어져 나갔다(1 1/2). 이러한 상태는 현재 대기 중에 노출되어 있다. 비고: 상기 두 개의 탱크는 1개의 가스압력조절기를 사용하고 있다.

보고서는 황산 플랜트 관리감독부서, 정유공장 안전관리부서, 그리고 합동(노조/경영진)보건 및 안전위원회에 배포되었으며, 복사본 1부는 황산 플랜트의 제어실(control room)에 비치되었다.

안전관리 부서 담당자는 보고서를 받은 후 해당 지역을 시찰하고 다음과 같이 언급했다: “플랫폼 상단의 작업통로는 SO_2 와 산 연기로 인해 위험에 노출되어 있다. 해당지역 출입 시 산소마스크를 착용해야 한다”. 작업 관리자와 안전담당 부서의 조사결과는 작업감독부서에서 산 저장 탱크 지역의 안전 및 보건 사안 담당 팀에게 회부되었다.

그러나, 불안전 작업조건 보고서가 제출된 이후 사고 발생일까지 3주일간의 기간 동안, Motiva사는 언급된 결함사항을 시정하거나 임시 안전조치를 취하지 않았다.

불안전 작업조건 보고서는 합동안전 위원회 월례회의에서 검토되었다. 그러나, 6월 27일 작성된 리포트는 6월 월례회의 이후에 접수되었으며 사고 발생시기에는 논의되지 않았다.

불안전 작업조건 보고서가 산 저장탱크 공정의 제어실에 비치되어 있었지만, 작업관리자들에게 보고서를 읽도록 하거나 또는 보고서에 언급된 사항을 숙지하도록 하는 조치는 없었다. 사고 당일, 작업관리자들과 감독관은 탱크393과 396 지붕에 뚫린 홀에 대해 아는 바가 없었다.

불안전 작업조건 보고서는 Motiva사의 경영진들에게 탱크393이 현재 위험한 상황에 노출되어 있음을 시사하는 것이었다. 보고서에 언급된 사안에 주의를 기울였다면, 황산 저장탱크 부근에서의 작업을 승인하지 않았을 것이고, 따라서 7월 17일의 사고를 예방할 수 있었을 것이다.

불안전 작업조건 보고서는 Motiva사의 경영진들에게 탱크393이 현재 위험한 상황에 노출되어 있음을 시사하는 것이었다. 보고서에 언급된 사안에 주의를 기울였다면, 황산 저장탱크 부근에서의 작업을 승인하지 않았을 것이고, 따라서 7월 17일의 사고를 예방할 수 있었을 것이다.

3.7 황산의 등급 분류

정유산업 물질안전 보건자료(MSDS)에 제시된, 사용된 H_2SO_4 의 특징은 광범위하게 다양하게 나타나있다; 예를 들어, 사용된 산에 대한 NFPA의 인화성 등급은 0에서 3으로 분류되어있다. 그러나, 정유업체의 몇몇 MSDSs에는 인화성과 관련하여 다음과 같이 명시되어 있다:

- “산에 있는 탄화수소는 연소되며 인화성 탄화수소 가스는 탱크의 상층부 공간, 트럭 트레일러, 궤도차(railcar)에 축적된다”.
- “OSHA 인화성 등급-인화성 액체”.

실제로 사고 당시 사용된 H_2SO_4 에 대한 Motiva사의 MSDS에서 NFPA 화재 등급이 “0”으로 나타났다. “소방당국의 측정”에서 MSDS “비연소성 물질”로 언급되어 있다.

사용후 H_2SO_4 에 대한 Motiva사의 MSDS에서는 NFPA 화재 등급이 “0”으로 나타났다. “소방당국의 측정”에서 MSDS는 “비연소성 물질”로 언급되어 있다.

인화성 분위기를 형성하기 위해 증기화된 것 이외에도, 사용된 황산에는 이미 한 시간 반 동안 연소하기에 충분한 양의 탄화수소가 포함되어

하청업체 작업자들은 저장탱크에서 방출되는 산 연기의 특성을 알고 있었으므로 산-가스통 호흡기를 착용했다. 그러나, 탱크 내부의 저장물질에 대한 인화성 발생 가능성에 대해서는 인식하지 못하고 있었다.

있었다. 사고 목격자들은 사용된 황산이 방유제 지역 부근과 외부로 흘러 들어감에 따라 액체 표면에 불이 붙어 타고 있었다고 말했다. Motiva사가 사용전 황산에서 사용된 황산으로 전환하는 작업을 수행하면서, H₂ SO₄ 저장 탱크에 불활성 시스템과 화염방지기를 설치했다는 사실은 인화성 증기의 발생가능성과 이를 위한 예방조치가 필요했음을 이미 인지하고 있었다는 점을 시사하고 있다.

작업통로 보수작업을 하고 있었던 하청업체 작업자들은 저장탱크에서 방출되는 산 연기의 특성을 알고 있었으므로 산-가스통 호흡기를 착용했다. 그러나, 탱크 내부의 저장물질에 대한 인화성 발생 가능성에 대해서는 인식하지 못하고 있었다.

하청업체 직원을 대상으로 한 CSB의 탐문수사를 토대로 할 때, 작업자들은-그들이 위험상황을 인지했었다면-화기작업에서 발생하는 불꽃을 차단하기 위해 소화포(fire blanket)를 사용하는 등, 별도의 예방조치를 취했을 수도 있었을 것이다. 그러나, 탱크393에 이미 몇 개의 홀이 뚫려있고, 소화포가 탱크에 있는 인화성 증기를 차단하는 막의 역할을 하지 못한다는 점을 감안할 때, 어떠한 예방조치-탱크 주변의 화기작업 엄금-를 취했다고 해도 7월17일의 사고를 예방할 수 있었을 지는 확실치 않다.

3.8 동종 사고

3.8.1 미국 Rouseville 소재 Pennzoil 정유공장

1995년 10월 16일, 미국 펜실바니아주, Rouseville에 소재한 Pennzoil 정유공장에서 일어난 사고는 Motiva사 사고와 매우 흡사하다(USEPA, 1998). 사고 당시, 인화성 액체층이 함유된 폐수탱크 근처에서 용접작업이 수행되고 있었다. 용접작업에서 발생한 불꽃이 탱크의 개구부(opening)에서 인화성 증기와 접촉했다. 내부 폭연(deflagration)으로 인해 탱크의 바닥 이음부가 갈라져 저장물질이 공중으로 튀어 오르면서 불이 붙었다. 이 사고로 5명의 작업자가 사망했다.

본 사고에 대한 조사에서, EPA는 다음과 같은 결론을 내렸다:

-
- 오전에 실시된 인화성 가스체크 이후, 대기온도가 상승함에 따라 화기 작업이 지속적으로 수행되었다. 오전 작업 휴식시간 이후 인화성 가스에 대한 체크를 재실시하지 않았으며 지속적으로 모니터링 할 수 있는 장비는 사용되지 않았다.
 - 사고 탱크는 화기작업으로부터 적합하게 보호 조치되지 않았었다. 탱크의 개구부는 점화성 물질이 인화성 증기와 접촉할 수 있는 상태로 방치되었다.
 - 탱크에는 가용성 지붕(frangible roof) 또는 이와 다른 비상 통기구 등이 설치되어있지 않았다.

3.8.2 미국 Channelview 소재 ARCO사

1990년 7월 5일, 미국 텍사스주의 Channelview에 소재한 ARCO화학공장에서 900,000갤런의 폐수와 탄화수소가 저장된 탱크가 폭발하여 17명이 사망했다. 탱크에는 질소정화시스템과 산소 측정기가 설치되어 있었지만, 조사에 의하면 질소정화기 유입량은 탱크 내부의 비인화성 분위기를 형성하기에 부족했던 것으로 밝혀졌다.

사고 당일, 인화성 혼합물에 대한 경고 표시가 있어야 했던 산소 측정기는 오작동을 일으켰다. 더욱이, 탱크는 설계 문서에 명시된 것보다 월등히 많은 양의 탄화수소를 함유하고 있었다. 점화발생 가능 물질 여부가 입증된 것이다.

3.9.1 공정안전관리 규정

DCR H₂ SO₄ 저장탱크들은 OSHA PSM, EPA RMP, 또는 텔라웨어주 누출사고방지 규정 등을 준수하지 않았다.

3.9.1.1 OSHA 공정안전관리

OSHA PSM규정(29CFR 1910.119)은 위험 사고의 안전 및 예방에 관한 체계적인 접근 방법이다. 본 규정은 10,000파운드 이상의 특정 화학물질 또는 인화성 물질을 포함하는 공정에 대한 14개 항의 안전관리규정을 제시하고 있다. PSM규정에는 H₂ SO₄ 가 포함되어 있지 않다.

3.9 규정

사용된 황산 저장탱크에 있는 인화성 물질의 양을 정확히 산정할 수는 없었지만, Motiva사는 “냉각이나 냉동과정 없이 끓는점(boiling point) 이하로 유지된... 대기 저장 탱크에 저장된 인화성 액체”(29 CFR 1910.119[a][1][b])는 규정 항목에 해당되지 않는다는 점에서 PSM규정에서도 역시 제외된다고 생각했다.

DCR의 황산 저장탱크는 PSM 규정이 적용된 알킬화 공정과 상호 연관되어 있었다.

사용된 황산 저장탱크에 있는 인화성 물질의 양을 정확히 산정할 수는 없었지만, Motiva사는 “냉각이나 냉동과정 없이 끓는점(boiling point) 이하로 유지된... 대기 저장 탱크에 저장된 인화성 액체”(29 CFR 1910.119[a][1][b])는 규정 항목에 해당되지 않는다는 점에서 PSM규정에서도 역시 제외된다고 생각했다. Motiva사는 이러한 사실을 근거로, 사용된 황산 저장탱크에 PSM규정을 적용하지 않았다.

1995년, 행정법 판사는 PSM규정은 공정과 관련된 경우라고 해도 대기 탱크에 저장된 인화성물질에 적용되지 않는다는 판결을 내렸다³¹⁾. OSHA는 이러한 판결에 이의를 제기하지 않았고, 사고발생 이후 PSM 규정을 위반한 혐의로 Motiva사를 소환하지 않았다.

그러나, DCR의 황산 저장탱크는 PSM규정이 적용된 알킬화 공정과 상호 연관되어 있었다. 규정에서는 “공정”에 대한 정의를 다음과 같이 명시하고 있다:

...치명적인 유해성 화학물질, 또는 그러한 화학물질의 사용, 저장, 제조, 처리, 또는 현장 운송의 활동을 수행하는 것과 연관된 모든 활동. 이러한 정의 하에, 누출 가능성과 연관될 수 있는 치명적인 유해성 화학물질이 저장된 상호 연결된 그리고 분리된 모든 용기들은 단일 프로세스로 간주되어야 한다(29 CFR 1910.110[b]).

또한, 사용된 황산이 일부 가벼운 인화성 탄화수소-규정이 적용되는-를 함유하고 있기 때문에, 치명적인 유해성 화학물질과 관련된 누출 발생 가능성이 있었다.

3.9.1.2 EPA 위험관리계획

EPA RMP규정은 OSHA PSM규정과 유사한 공정안전관리규정을 포함하고 있지만, RMP리스트에 포함된 화학물질은 보다 제한적이다. 특정 독성물질에 관해서는 PSM규정에는 포함되어 있지만, RMP규정에는 치명적인 인화성 물질에 대한 특정 리스트 만이 포함되어 있다.

31)미국 노동부v. Meer Corporation. OSHRC Docket No. 95-0341. 1995

3.9.1.3 델라웨어주 누출사고방지규정

델라웨어주는 OSHA PSM규정이 공표되기 이전인, 1990-2년부터 치명적인 유해성 물질관리에 관한 주 법안을 갖고 있었다. 델라웨어주는 1999년 EPA RMP계획을 적용했다. 그러나, 주 법에는 RMP에 명시되어 있지 않은 일부 화학물질이 포함되어 있었으며, 일부 물질의 경우, 업체들이 반드시 준수해야 하는 것 이상의 낮은 임계질량을 명시하고 있다.

델라웨어주는 OSHA PSM규정이 공표되기 이전인, 1990-2년부터 치명적인 유해성 물질관리에 관한 [주 법안을 갖고 있었지만]...이는 DCR의 사용된 황산 저장 탱크에 [적용되지 않았다].

3.9.1.4 Motiva사의 옥외 황산 저장탱크 PSM 적용범위.

Motiva사는 옥외 황산 저장탱크 및 화기작업 승인 현장에 대한 PHA규정을 포함해, OSHA PSM규정의 항목을 토대로 일부 안전관리규정 모범 사례를 적용했다. 그러나, Motiva사는 다음과 같은 이외 규정들을 이행하지 않거나, 또는 부적합하게 이행했다:

- **설비의 기계적 건전성 확보** - OSHA PSM규정은 안전 및 적합성 허용

Motiva사가 OSHA PSM규정에 명시된 안전관리규정 모범 사례를 적합하게 이행했다면, 7월 17일의 사고는 발생하지 않았을 것이다.

기준 이하인 설비의 결함을 시정하도록 하고 있다. Motiva사의 경영진은 내부검사의 필요성을 재차 강조한 검사관의 요구를 받아들이지도 않았고, 2001년 5월 발생한 누출을 보수하지도 않았다.

- **변경관리 절차의 일관적인 적용** - 탱크391과 396을 사용전 황산에서 사용된 황산으로 전환작업(3.3절 참조)을 시행했을 당시, Motiva사는 변경관리 절차를 적합하게 이행하지 않았으며, 변경관리는 2000년 탱크393의 전환작업 시 변경관리는 적용되지 않았다.

Motiva사가 OSHA PSM규정에 명시된 안전관리규정 모범 사례를 적합하게 이행했다면, 7월 17일의 사고는 발생하지 않았을 것이다.

3.9.2 Jeffrey Davis 지상식 저장탱크 관련법안

Motiva사에서 발생한 사고 그리고 이외 주 또는 미연방 공정안전규정을 이행하지 않았던 일련의 사고로 인해, 텔라웨어주는 지상식 (aboveground) 저장탱크의 설치, 운영, 유지관리 및 보수를 규정하기 위해 2002년 7월 관련법안을 제정했다.

Jeffrey Davis 지상식 저장탱크 관련법안은 12,499갤런 용량 이상의 지상식 저장탱크에 석유 및 기타 규정된 물질을 안전하게 저장하는 지침을 제공하고 있다.	Motiva사의 사고로 사망한 WGI사 직원을 추모하기 위해 명명된 Jeffrey Davis 지상식 저장탱크 관련법안은 12,499갤런 용량 이상의 지상식 저장탱크에 석유 및 기타 규정된 물질을 안전하게 저장하는 지침을 제공하고 있다. 이 법안은 유출 또는 방출로 인한 환경오염 방지 규정에 따라, 저장 용기의 유지보수, 관리감독, 성능 향상 및 폐기에 관한 규정을 구체화하도록 DNREC에 위임되었다.
--	---

상기 법안은 포괄적 환경처리, 보상, 책임법(CERCLA, 42 USC 103) 규정 하에 적용되는 물질, 액체석유제품, 발암물질, 그리고 DNREC가 규칙제정 과정 중 추가하게 되는 이외 다른 물질에 적용된다. H_2SO_4 는 40CFR 302에 적용되는 CERCLA의 유해성 물질이다. 텔라웨어주 유해 물질 위험관리법안 요구사항의 대상이 되는 탱크들은 상기 법안에서 제외된다.

Jeffrey Davis 지상식 저장탱크 관련법안은 하기 요약된 바와 같이, 유출 방지 및 통제를 위한 규정 조건을 제정하기 위해 DNREC가 관장하고 있다:

- 탱크 방출 상태를 적합하게 식별하기 위한 제품목록 또는 이와 유사한 관리 시스템.
 - 시스템이 유출, 온도변화, 또는 기타 알려진 원인으로 검증할 수 없는 비정상적인 손실 또는 이득을 나타낼 때 적용되는 절차.
 - 탱크 방출에 대응하는 시정조치
 - 상기 항목에 따라 조치된 내용 기록.
 - 실행계획
 - 가동 중단 또는 재가동이 예정된 탱크의 저장물 방출을 확인하기 위한 규정
-

또한, “지상식 저장탱크에 대한 적합한 관리감독, 유지보수, 모니터링 및 보수...”에 관한 규정의 요구사항 역시 포함된다. 본 법안은 최소한, 검사 보고서는 탱크가 유지관리, 보수를 위해 비워지거나 또는 폐기 처분되는 모든 경우에 작성 되어야 한다고 명시하고 있다.

검사 보고서에는 탱크의 두께와 요구되는 보수작업에 관해 반드시 상세히 기재되어야 하며, 경과보고서 역시 포함되어야 한다. 새로 건조된 탱크들에 관해서는 탱크를 가동하기 이전에 용접 인증과 비파괴시험(NDT)을 거쳐야 한다. 보고서의 복사본을 DNREC에 제출하는 것 이외에도, 모든 보고서는 탱크가 가동되는 기간 동안 파일로 비치되어야 한다.

DNREC은 법안 지시에 따라 추가 규정사항을 공표할 수 있는 권한을 위임 받았다. 입법기관은 NFPA, API, 국제부식공업회(NACE), 미국 재료기술표준 연구소(ASTM), 보증연구소(UL), 미국석유협회(PEI), 그리고 강관탱크연구소(STD)의 규정 및 권고안을 “고려”하도록 DNREC에게 위임했다. 지하저장탱크에 대한 현행 델라웨어주 규정은 상기 언급된 몇몇 기관들로부터 “참조문 삽입”을 통한 검사 및 유지보수 요구사항을 제정하고 있다.

탱크검사, 유지관리 및 보수와 관련하여, 본 법안은 상기 언급된 일반 요구사항만을 제시하고 있다. 이는 API 653규정³²⁾에 포함된 것처럼, 정기적 내부 및 외부 탱크검사의 시기 결정을 위한 새로운 요구사항을 규정하지 않으며, 보수완료 일정을 명시하지도 않는다.

기존 탱크의 경우, 탱크가 폐기 처분 되거나 또는 유지관리 및 보수를 위해 비워지는 경우에 한해 검사 시행을 요하고 있다. 그러나, 본 법안은 DNREC이 API및 국제NACE의 요구사항을 포함해, 보다 상세한 내용을 공표할 수 있도록 하고 있다.

본 법안은 DNREC에게 합당한 시기에 탱크를 검사, 모니터링하며 대상 탱크와 관련된 모든 기록의 사본을 확보할 수 있는 권한을 부여하고 있다. 2002년 7월, DNREC는 특정 규정 요건의 내용을 구체화하기 위해 기술자문 워크그룹을 소집하는 초기 단계에 있다. 워크그룹은 24개월 이내 규정을 완성하는 것을 목표로 하고 있다.

32)API규정 653. 탱크검사, 보수, 변경, 및 재건조. 1995년 12월.

4.0 사고의 근원 및 원인 제공

4.1 사고의 근원

1. Motiva사는 H_2SO_4 저장탱크의 노후화로 인한 안전 및 환경상 위험요인을 예방하고 시정하는 적합한 기계적 건전성 관리 시스템을 갖추고 있지 않았다.

- 탱크393의 내부검사를 위해 “가능한 조속한 시일 내에” 가동을 중단해야 한다는 수 차례에 걸친 검사관은 권고는 받아들여지지 않았다.
- 2001년 5월 발견된, 탱크393의 동체 누출은 보수되지 않았다. 그 대신, 탱크의 액체 레벨을 누출지점보다 낮게 유지하여 지속적으로 가동되었다.
- 경영진은 탱크393에 뚫린 홀로 위험한 상황에 노출되어있다는 사실을 인지하지 못했으며 탱크를 조속히 수리하거나 또는 가동을 중단하는 등의 조치를 취하지 않았다.

2. Motiva사의 변경관리 체계는 사용전 황산에서 사용후 황산으로 탱크를 전환하는 작업에 적합하게 적용되지 않았다.

- 2000년에 시행된 탱크393으로의 CO_2 불활성 주입은 비인화성 분위기를 유지하는데 역부족이었다.
- CO_2 는 인근 탱크의 불활성 시스템이 유입되는 임시호스를 통해 탱크393으로 주입되었다. 호스는 탱크393 지붕에 뚫린 홀을 통해 삽입되었다.
- 적합한 불활성 시스템을 검토하기 위한 공학적 측정이 적용되지 않았다.
- 탱크 전환작업은 기술 전문가의 변경 검토, 공정위험분석, 또는 가동전 안전검사 등 변경관리 계획에 포함된 모든 요소들을 적용하지 않은 채 완료되었다.

3. Motiva사의 화기작업 계획은 부적절했다.

- Motiva사는 인화성 증기가 함유되어 있고, 이미 홀이 뚫려있는 탱크의 상층부 및 주변에서 화기작업을 계획했으며 해당 작업을 지속적으로 수행하도록 승인했다. 탱크393는 동체에 누출발생, 지붕에 홀이 뚫려있었으며, 탱크396 역시 지붕에 홀이 뚫려있었다.
- 화기작업을 승인한 이후, Motiva사의 경영진은 지속적인 모니터링과 같은 작업자의 안전을 확보하기 위한 적합한 예방조치를 취하지 않았다.

4.2 사고의 원인제공

1. 불안전한 작업조건 보고서 조사를 위한 Motiva사의 정유시스템은, 그러한 보고서에 관해 작업자들에게 관련 정보를 전달하고 문제점에 대한 합당한 해결책을 제시하기에 부적합했다.

- 불안전 작업조건 보고서가 제출된 이후 사고가 발생한 6월 27일까지 3주 동안, 경영진은 보고서에 제시된 결함 사항을 시정하거나 또는 임시 안전조치를 취하지 않았다.
- Motiva사의 작업 관리자들은 만약 그들이 위험한 상황에 노출되어 있다는 사실을 인지했었다면 탱크 주변에서의 화기작업을 승인하지도 않았을 것이고, 화기작업을 수행하기 위해 하청업체 직원을 고용하지도 않았을 것이다.

2. Motiva Enterprises LLC의 관리감독 체계는 정유공장 경영진의 책임인 기계적 건전성, 공학적 관리, 그리고 변경관리 체계 등을 감시하고 관리하는 역할을 하지 못했다.

5.0 권고안

산업안전보건청(OSHA)

10,000파운드의 인화성 물질 적용공정과 관련된 결과 치명적인 방출 가능성과 연계될 수 있는 대기 저장탱크의 공정안전관리규정(29CFR 1910.119)시행(2001-05-1-DE-R1).

최근 제정된 Jeffrey Davis 지상식 저장탱크 관련법안의 규정에 따라 설비관리에 있어, 인명 또는 환경에 유해한 탱크의 부식상태를 즉각 조치하도록 권고(2001-05-1-DE-R2).

델라웨어주 천연자원 및 환경관리청

델라웨어시 정유공장 Motiva 사

1. 다음의 특정 항목을 포함해, 기계적 건전성관련 의사결정을 의무화하기 위한 체계 수립 (2001-05-I-DE-R3).

- 결함 상태를 효율적으로 분석하고 계획된 서비스의 적합성을 확보하기 위해, 재질 기술자 또는 장비설계 엔지니어 등과 같은 관련분야 전문가에 의한 검사보고서 검토.
- 설비의 적시 보수를 위한 계획 체계 수립.

화학공정안전센터(CCPS)가 출판한, 화학공정안전의 기술적 관리를 위한 공장지침, 제3장, “의무대상 및 목표”는 이와 같은 체계의 모델을 제시하고 있다.

2. 최소한 하기 사항을 준수하도록 하기 위해 기존 탱크에 저장된 또는 저장될 예정인 인화성 물질 용량에 대한 설계 검토(2001-05-I-DE-R4):

- 불활성 시스템은 적합한 위치와 장소에 설치되어야 하며 정확한 측정치를 토대로 구성되어야 한다.
- 비상 통기구 설치.

3. 변경관리 검토는 다음과 같은 탱크설비 및 운영조건 변경 시, 수행되어야 한다(2001-05-I-DE-R5).

- 탱크 가동 및 저장 물질
- 불활성 시스템과 통기구 등과 같은 탱크 주변설비.

4. 인화성 물질에 대한 지속적인 또는 정기적인 모니터링이 요구되는 상황에 대처하기 위한

정유공장의 화기작업 계획 수정(2001-05-I-DE-R6).

5. 아래 사항을 포함해 정유공장의 불안전 작업조건 보고 체계를 개선 (2001-05-I-DE-R7):

- 문제 사안을 해결하기 위한 의사결정 권한이 있는 특정 관리자 선임.
- 문제 사안이 적시에 해결되지 않을 경우, 고위급 경영자에게 해당사안을 제시하기 위한 체계 정립.
- 모든 직원에게 잠재적으로 영향을 미칠 수 있는 유해 요소관련 정보를 전달하기 위한 방법 수립.

국제 화학 및 에너지 산업 노동자 연맹(PACE) 지역노조 2-898 과의 협력 하에 개선된 시스템 설계 및 구축을 위한 문서작업.

Motiva Enterprises LLC

1. 본 보고서의 결과에 근거하여, 저장탱크의 기계적 건전성 및 설계, 불안전 작업조건 보고, 화기작업, 변경관리, 그리고 Motiva사의 정유시스템 의무화 등에 대한 정기적 검사를 수행한다. 검사 권고안의 내용에 따라 해당 사안을 이행한다. 결과에 대한 정보를 직원과 공유한다 (2001-05-1-DE-R9).

2. 본 보고서의 결과 및 권고안에 관한 정보를 Motiva사 전체 직원과 하청업체 직원에게 전달한다(2001-05-I-DE-R9).

미국석유학회(API)

1. 대기 온도에서의 농축황산 및 유제 저장탱크의 설계, 제조, 및 검사에 관한 NACE규정 RP 0294-94 최신 개정안에서 권고하는 최소한의 횟수에 따라, 사용전 또는 사용후 H₂ SO₄ 저장탱크를 검사하기 위한 API지침을 제정하기 위해 국제NACE와 공동 협력한다(2001-05-I-DE-R10).

2. 위험한 상태에 노출되어 즉각적인 수리 또는 가동 중단을 요하는, 인화성 증기를 함유하고 있는 최소 허용 두께 이상으로 얇아져 있거나 또는 벽체나 지붕에 홀이 뚫린 저장탱크에 중점을 둔 API 탱크검사 규정의 개정(2001-05-I-DE-R11).

3. 하기 명시된 사항을 포함해, API의 권고규정에 따라 사용된 H_2SO_4 저장탱크들과 같은 인화성 저장탱크의 불활성화 규정 준수:

- 불활성 시스템을 요하는 제반 조건.
- 불활성 설비의 정확한 수치, 불활성 매개체, 그리고 경보를 포함한 부대설비 등과 같은 불활성 시스템 설계.

4. 본 보고서의 결과 및 권고안에 관한 정보를 상호 공유(2001-05-I-DE-R13)

1. 대기 온도에서의 농축황산 및 유제 저장탱크의 설계, 제조, 및 검사에 관한 NACE규정 RP 0294-94 최신 개정안에서 권고하는 최소한의 횟수에 따라, 사용전 또는 사용후 H_2SO_4 저장탱크를 검사하기 위한 API지침을 제정하기 위해 미국석유학회와 공동 협력한다(2001-05-I-DE-R14).

국제부식공업회(NACE)

2. 본 보고서의 결과 및 권고안에 관한 정보를 상호 공유(2001-05-I-DE-R15).

개선된 불안전한 작업조건 보고의 기획 및 수립에 있어 Motiva사의 경영진과 공동협력(2001-05-I-DE-R16).

국제 화학 및 에너지 산업
노동자 연맹(PACE) 지역노
조 2-898 문서작업

본 보고서의 결과 및 권고안에 관한 정보를 상호 공유(2001-05-I-DE-R17).

국제 화학 & 에너지 산업 노
동자 연맹(PACE) 문서작업

본 보고서의 결과 및 권고안에 관한 정보를 상호 공유(2001-05-I-DE-R18).

미국석유화학 및 정유업체 연맹
(NPRA)

본 보고서의 결과 및 권고안에 관한 정보를 상호 공유(2001-05-I-DE-R19).

건축시공업 위원회(AFL-CIO)

작성자:

미국 화학물질 사고 조사국(CSB)

Carolyn W. Merritt 위원장

John S. Bresland 위원

Gerald V. Poje, Ph.D. 위원

Isadore Rosenthal, Ph. D. 위원

Andrea Kidd Taylor, Dr. P.H. 위원

작성일: 2002년 8월 28일.

- Albright, Lyle F., 2002. *Report to U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board*.
- American Petroleum Institute (API), 2002. *Safe Welding, Cutting, and Hot Work Practices in the Petroleum and Petrochemical Industries*, API Publication 2009, Seventh Edition, February 2002.
- API, 1998. *Venting Atmospheric and Low-Pressure Storage Tanks*, API Standard 2000, Fifth Edition, April 1998.
- API, 1998. *Welded Steel Tanks for Oil Storage*, API Standard 650, Tenth Edition.
- API, 1995. *Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction*, API Standard 653, Second Edition, December 1995.
- API, 1990. *Management of Process Hazards*, API RP 750, January 1990.
- American Welding Society (AWS), 2000. *Recommended Practices for Air Carbon Arc Gouging and Cutting*, AWS C5.3:2000.
- Center for Chemical Process Safety (CCPS), 1995. *Plant Guidelines for Technical Management of Chemical Process Safety*, American Institute of Chemical Engineers (AIChE).
- Chemical Manufacturers Association (CMA), 1993. *Managing Process Changes: A Manager's Guide to Implementing and Improving Management of Change Systems*.
- Dean, S., and G. Grab, 1986. "Corrosion of Carbon Steel Tanks in Concentrated Sulfuric Acid Service," *Materials Performance*, July 1986, pp. 48-52.
- Dillon, C. P., 1977. *Materials Selector for Hazardous Chemicals, Vol. 1: Concentrated Sulfuric Acid and Oleum*, Materials Technology Institute of Chemical Process Industries, Inc.
- Engineering Systems Inc., 2002. *Motiva Refinery Sulfuric Acid Tank Collapse Consulting*, prepared for U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board.
- Fyfe, D., R. Vanderland, and J. Rodda, 1977. "Corrosion in Sulfuric Acid Storage Tanks," *Chemical Engineering Progress*, March 1977 pp. 65-69.
-

Lees, Frank P., 1966. *Loss Prevention in the Process Industries*.
Oxford: Butterworth-Heinemann, pp. 22-63.

McKetta, John J., ed., 1995. *Encyclopedia of Chemical Processing
and Design*, Marcel Dekker, Inc., p. 459.

NACE International (National Association of Corrosion Engineers),
1994. *Design, Fabrication, and Inspection of Tanks for the
Storage of Concentrated Sulfuric Acid and Oleum at Ambient
Temperatures*, NACE Standard RP 0294-94.

NACE International, 1991. *Materials for the Handling and Storage
of Commercial Concentrated (90 to 100%) Sulfuric Acid at
Ambient Temperatures*, NACE Standard RP 0391-01.

National Fire Protection Association, (NFPA), 1997. *Standard on
Explosion Prevention Systems*, NFPA 69.

U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), 1998. *EPA Chemi-
cal Accident Investigation Report, Pennzoil Product Company
Refinery, Rouseville, Pennsylvania*.

별첨A: 탱크393 연혁

A.1 1992년 - 두께 수 치

1992년, 부식상태가 발견된 탱크394와 395에 대한 검사를 시행하기 위해, 탱크393 동체 부분에서 두께가 측정되었다. 본 검사에 관해 언급된 내용은 다음과 같다: “약 절반 정도의 부식여유가 노출된 전체 부분의 광범위한 부분에 적용되었다”. 검사관은 당시 2년 이내 탱크393의 내부 검사를 시행할 것을 권고했다.¹⁾

A.2 1994년 - 내부검사

1994년, Star Enterprise 검사부는 탱크393에 대한 전체적인 내/외부검사를 시행했다. 주요 결과는 다음과 같다:

- 동체의 두께 수치는 일반적으로 부식이 진전되고 있음을 나타냈다, 그러나, 탱크 지붕의 두께 수치는 심각한 부식량(metal loss)을 나타내지 않았다.
- 검사관은 다음과 같이 언급했다:
...동체 바닥코스 내부에 패인 심각한 부식 홈은 바닥판 위로 약 4[인치]에 걸쳐 있다. 홈(groove)의 폭은 약 3/4[인치], 깊이 7/16[인치], 그리고 탱크 직경부에서 약270도 위치에 있다.²⁾

부식 홈은 용접 금속으로 보강되어 보수되었다. 보수된 부분은 2001년 7월 17일, 사고가 발생한 이후에도 그대로 남아있었으며 사고에 원인제공을 하지 않았다는 점에 주목할 필요가 있다.

1995년, 1994년 시행된 검사결과에 따라 수행된 보수작업의 최종 보고서에서, 검사부는 다음과 같이 언급했다: “현재 부식율을 감안할 때, 이 탱크는 앞으로 4년 이내에 하부의 2개 동체 코스의 부식여유를 모두 잠식하게 될 것이다”. 따라서, 부식 상태를 모니터링하고 지속된 가동상태를 측정하기 위해, 2년 이내에 검사부의 sonoray³⁾ 테스트를 받을 것을 권고했다.⁴⁾

1)Star Enterprise 검사부., 텔라웨어시 공장, No. 92-662, 393-TC-9(황산 99%), 1992년 9월 23일.

2)Star Enterprise 검사부., 텔라웨어시 공장, No. 94-485, 393-TC-9(황산 99%), 1992년 9월 23일.

3)Sonoray는 고주파수 대역 진동을 사용한 탱크의 벽체와 지붕에 대한 초음파 두께(UT)테스트와 동의어임.

4)Star Enterprise 검사부., 텔라웨어시 공장, No. 95-031, 393-TC-9 황산저장

탱크, 최종 보고서, 1995년 1월 16일.

A.3 1998년 - 동체 누출

1998년 6월, 탱크393의 누출 상태가 보고되었다. 누출 홀은 길이 3/4인치, 폭 3/32인치로 코스2와 코스3 용접 이음부 위쪽으로 24인치, 또는 탱크 바닥면에서 위로 18피트에 위치하고 있었다. 검사보고서에는 다음과 같이 언급되어 있었다: ⁵⁾

- 초음파두께측정(UTM)은 1992년 측정된 수치와 비교하여 진행중인 일반적인 부식율을 나타낸다.
 - 코스2와3의 노출된 부분은 업데이트된 1997년 수식으로 산정했을 때, 1/8인치의 부식여유 범위 이내에 있으며 API 653규정에서 명시하
-

는 최소 두께 이상인 것으로 측정되었다.

- 탱크는 IR 95-031에서 권고하는 바에 따라 외부 sonoray검사 대상이 된다.

1개월 후, 검사부는 보수작업에 대한 후속 검사를 실시하지 않았다. 검사 보고서에는 다음과 같이 언급되었다:⁶⁾

- 탱크 동체의 보수된 부분은 IR 98-416[상기 언급부분 참조]규정에 따라 전동와이어브러쉬로 마감처리 되었다. UTMs수치는 낮게 나타났다. 따라서, 최종 보수는 임시 플러그 보수 부분을 가리기 위해 2" 6000# 탄소강 금속판(plate)에 절반 결합 용접된(half-coupling welded) 동체에 6인치 직경, 3/8인치 두께의 탄소강판이 용접되었다. 나사로 고정된 플러그는 최종 덮개(closure)로 결합 부분(coupling)에 설치되었다.
- 코스(course)1과 2의 5피트 폭 부분은 별도 sonoray검사를 위해 절연체가 제거되어 [있었다]. 이는 IR 92-662[상기 언급된 부분 참조] 규정에 따라 1992년에 제거된 탱크의 서쪽 방향에 있는 동일한 부분이다. 1992년 측정된 수치와 비교할 때, 이 부분의 지속 부식율은 평균 0.02에서 0.03인치로 나타났다.

5)Star Enterprise 검사부., 텔라웨어시 공장, No. 98-416, 393-TC-9 황산 저장탱크, 동체 누출, 1998년 6월 23일

6)Star Enterprise 검사부., 텔라웨어시 공장, No. 98-454, 393-TC-9 황산 저장탱크, IR 98-416규정에 의거, 최종 동체 보수 및 별도 Sonoray검사, 1998년 7월2일.

A.4 1999년 - 동체 누출

1999년 4월, 탱크393에서 또 다른 누출이 발생했다. 이번 누출은 1/8인치 직경의 홀로, 1998년 보수된 부분의 위쪽 18인치에 위치하고 있었다. 홀은 플러그 되어 있었으며(plugged), 누출 부분은 12인치 직경의 탄소강 금속 판으로 용접되었다. 두께 수치는 누출 부근에서 측정되었다. 0.13인치의 수치가 나타난 지점은 누출구가 금속판으로 덮이게 되는 누출구와 가까운 곳에 있었다. 두께 수치가 낮게 나타난 또 다른 부분은 홀이 뚫린 부분의 바로 위였으며, 8인치 직경의 패치가 얇은 부분을 덮기 위해 동체에 용접되었다. 상기 두 번째 부분에서 측정된 수치는 0.24에서 0.15인치 범위였다. 3번째 코스에서의 기준 두께는 0.312인치였다⁷⁾.

1999년 9월 발생한 또 다른 누출이 발생했다. 이번 누출은 길이 1인치, 폭 3/16인치의 홀로, 코스3과 3의 용접 이음부 아래 12인치 그리고 이전 누출구의 바로 위에 위치하고 있었다. 홀 주변의 두께 수치는 탱크 내부의 30인치 길이 수평 홈으로 나타났다. 이러한 누출과 발견된 홈(groove)에는 길이 35인치, 폭 11인치, 두께 5/16인치의 탄소강 패치가 설치되었다.

본 검사보고서의 권고안에는 다음과 같이 명시되어 있다: “최근에 발생한 탱크 결함으로 인해 내부검사 및 sonar검사를 위해 가능한 조속한 시일 내에 탱크 가동을 중단할 것을 권고한다”⁸⁾.

2000년 4월, 탱크393에서 수평 누출구가 발견되었다. 누출구는 동체 벽을 따라 형성된 수평 홈의 결과인 것으로 추정되었다. 검사보고서에는 다음과 같이 명시되었다:

A.5 2000년 - 동체 누출

UT[초음파 두께]수치는 동체 ID에 약 1/8[인치] 폭, 20[인치] 길이의 얇은 수평 홈이 있다는 것을 탐지했다. 홈이 패인 부분에서의 수치는 [0].10-[0].16 [인치]두께 범위로 나타났다. 홈이 패인 곳에 인접한 부분의 수치는 [0].23-[0].27사이였다. 이 동체 코스의 기준 두께는 [0].312 [인치]이다.

7)Motiva Enterprises LLC, 393-TC-9, 황산 저장탱크, 서쪽 방향 누출, No. 99-352, 1999년 4월 29일.

8)Motiva Enterprises LLC, 텔라웨어시 정유공장 검사부, 393-TC-9, 황산 저장 탱크, 동체 누출, No. 99-819. 1999년 9월 14일.

권고 보수작업은 폭 12인치, 길이 29인치의 패치를 설치하는 것이었다. 또한, 검사 보고서는 이전부터 강조했던 탱크 검사를 재차 권고했다: “이 탱크에서 최근 발생한 누출로 인하여 가능한 조속한 시일 내에 탱크 가동을 중단하고 내부검사를 실시할 것을 권고한다”⁹⁾.

2000년 7월, 4월에 권고된 탄소강 패치 대신 탱크393에 설치된 에폭시 패치에서는 누출이 발견되었다. 이번 경우에는, 애초에 권고되었던 탄소강 패치가 결국 설치되었다. 검사 보고서는 다음과 같은 사항을 재차 권고했다: “이 탱크는 동체의 부식으로 인해 가능한 조속한 시일 내에 탱크 가동을 중단하고 내부검사를 실시해야 한다”¹⁰⁾.

A.6 2001년 - 동체 누출

사고 발생 이전 최종 누출은 2001년 5월 5일 작업 관리자의 로그북 (logbook)에 처음 언급되었다. 이러한 누출에 대한 대책으로, 해당 지역 감독관은 황산의 방출을 막기 위해 작업 관리자에게 탱크 레벨을 21피트, 또는 누출 점 이하 약 1피트로 유지할 것을 지시했다.

이러한 누출에 대한 검사 보고서는 2001년 6월 26일 작성되었으며 ¹¹⁾, 검사관은 다음과 같이 언급했다:

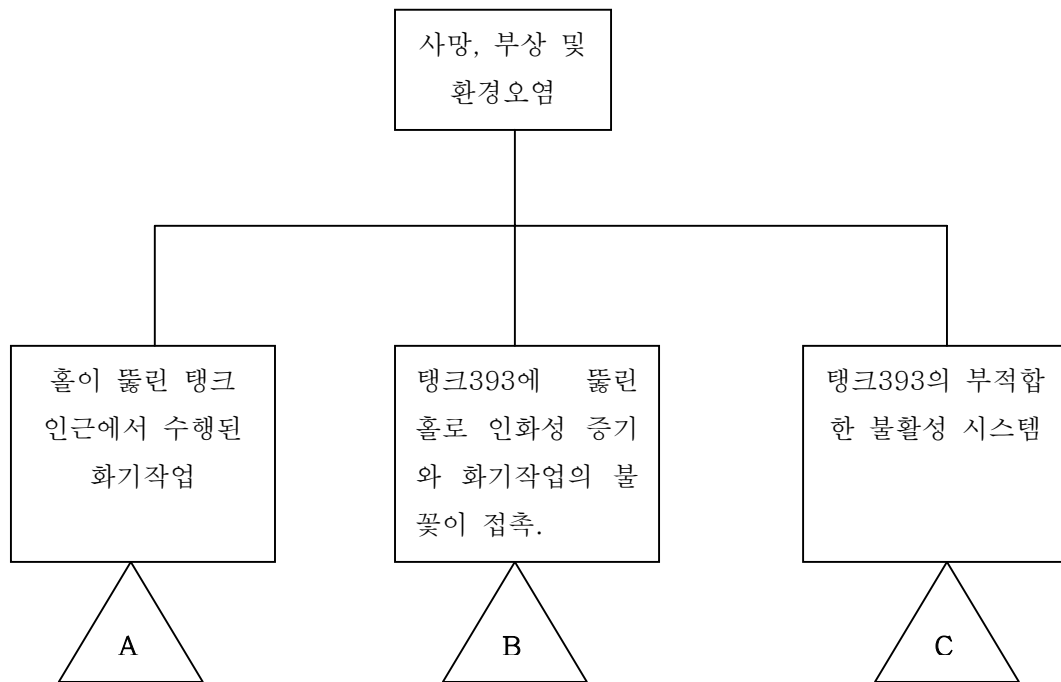
- 육안 및 UT검사에서 탱크에 뚫린 길이 3인치, 폭 1/8인치의 수평 홀이 발견 되었다. 이홀은 이전에 겹쳐서 패치된 부분에서 약1인치 위쪽에 뚫려있다.
- 이 탱크는 누출 및 내부 부식의 전례가 있다.

이미 권고된 22x22인치의 보수 패치는 설치되지 않았다. 검사관은 “이 탱크는 내부검사와 지속적인 보수를 위해 [가능한 조속한 시일 내에] 가동을 중단해야 한다” 고 언급했다.

9)Motiva Enterprises LLC, 393-TC-9, 황산 저장탱크, IR#99-819참조, No. 00-326. 2000년 4월 6일.

10)Motiva Enterprises LLC, 393-TC-9, 황산 저장탱크, IR#99-818 & IR#00-325참조, No. 00-508, 2000년 7월 3일.

11)Motiva Enterprises LLC, 393-TC-9, 황산 저장탱크, No. 01-450, 2001년 6월 26일.



A

홀이 뚫린 탱크 인근에서 수행된 화기작업

화기작업 승인의 부적합성

인화성 물질 또는 탱크에 뚫린 홀에 대해 모르고 있는 유지보수 작업자 고용

탱크393에 뚫린 홀에 대해 모르고 있는 작업 관리자

작업 중단 이후 인화성물질 또는 재시험을 위한 지속적인 모니터링 없었음.

산소-아세틸렌 대신 탄소 아크에어 가우징을 사용한 것으로 불꽃을 차단할 수 없

소화포는 불꽃을 차단할 수 없음

경영자의 탱크에 뚫린 홀에 대한 정보전달 미흡

작업 관리자는 황산 저장 지역의 여러 공정을 관할하면서도 상황을 파악하지 못했음.

불안전 작업조건 보고 체계의 부적합성

경영진은 보고 내용을 즉시 시정 조치하지 않음

작업 관리자는 해당 상황을 제대로 보고 받지 못함

B

탱크393에 뚫린 홀로 인화성 증
기와 화기작업의 불꽃이 접촉.

H₂ SO₄ 로 인한 탄소
강의 국부부식 촉진

검사관의 내부검사 및 보수
작업 요청 반영되지 않음.

탱크에 뚫
린 홀과
부적합한
불활성 시
스템으로
인해 빗물
과 습기의
수분이 탱
크 내부로
유입됨.

CO₂ 불활
성으로 탄
산 부식.

물의 유입
으로 산의
강도 저감/
산 자체보
다 더 높
은 부식율.

경영자는 당면
한 위험 상황
을 인지하지 못함

경영진의 의사
결정이나 방
침 수립에 대
한 의무 불이
행

부적합한 기
계 적 안전성
계획

탱크검사, 2001
년에서 2002
년으로 연기됨.

외부검사는 고
려되지 않음.

부적합한 기
계 적 안전성
계획

유지보수 예산 삭감

EPA, 조속한 시일 내 검사를
요하는 18개 탱크에 대해 지시.

탱크 검사 시기에 물량 및 가동
상 문제점을 제기.

C

탱크393의 부적합한
불활성 시스템

불활성 시스템의 공
학적 설계 부적합성

부적합한 변경관리 계획

불활성 흐름
또는 비상
통기구를 계
량하는 공학
적 접근 부
재

탱크393의 증
기공간은 대기
로 노출된
탱크394/395
와 연결되어
있었음.

부식으로 인
해 탱크에
뚫린 홀을
통해 공기가
유입되었고
인화성 증기
가 배출됨.

탱크393의
불활성이 탱
크396시스
템에서 나온
호스를 통해
흐름.

DCR 절차에 따라 승
인되지 않은 변경관리

변경관리 검토는
위험요소를 적합
하게 평가하지 않

- 인화성 액체
- 비상 통기구
- 소방 설비
- 방유제

가동전 안전 검사
부재