



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

화재·폭발 사고 조사 보고서

(부상 3명, * 공장외부 지역에 심각한 사고 영향)



First Chemical Corp.

Pascagoula, Mississippi

2002년 10월 13일

핵심 사안:

- 반응성 화학물질의 위험성 평가
- 사고로부터의 교훈
- 보호장치
- 운전절차
- 설비 부지
- 지역주민 통지

*OSHA 에 기록된 부상자 1명과 구급처치 부상자 2명.

Report No. 2003-01-I-MS

작성일: 2003년 10월

목차

개요

1.0 서론

1.1 사고 배경

1.2 사고조사 과정

1.3 First Chemical Pascagoula 공장

1.3.1 시설 개요

1.3.2 기타 산업단지 및 주택가와의 인접성

1.4 MNT 공정

1.4.1 MNT의 제조 및 정제

1.4.2 #1 MNT 증류탑

2.0 사고 개요

2.1 사고이전 상황

2.2 사고발생

2.2.1 사고발생 당일

2.2.2 피해지역 및 사고영향

2.2.3 비상대응

2.3 사고 재구성

2.3.1 사고지역 수색작업

2.3.2 스팀제어실

2.3.3 열안정성 실험

2.3.4 용기의 건전성 실험

3.0 사고 분석

3.1 반응성 화학물질의 위험관리

3.1.1 모노니트로톨루엔의 배경

3.1.2 회분식 증류공정의 위험성 평가

3.1.3 회분식공정의 계측제어

3.1.4 회분식공정 절차

3.1.5 모범관리기준

3.1.6 교훈 적용

3.2 모니터링 및 계측제어

3.3 안전작업지침

- 3.4 유지보수 계획 및 장치 건전성
 - 3.4.1 스팀 밸브
 - 3.4.2 증류탑
- 3.5 과압 보호
- 3.6 제어실 구조 및 위치
- 3.7 공정정보 및 기록보존
- 3.8 지역주민에 대한 통보
- 3.9 이전 사고/유사사고 검토
 - 3.9.1 Pascagoula 공장의 이전 사고
 - 3.9.2 유사사고 검토
- 3.10 관련기준 분석
 - 3.10.1 공정안전관리 기준
 - 3.10.2 EPA 위험관리계획
 - 3.10.3 기타 관련 기준
 - 3.10.4 OSHA 조사
 - 3.10.5 반응성 화학물질에 관한 이전의 CSB 개선 권고사항
 - 3.10.6 모범관리기준
- 4.0 사고의 근원 및 원인
 - 4.1 사고의 근원
 - 4.2 사고의 원인
- 5.0 개선 권고사항

별첨 A: 인과관계 도표

그림 및 표

그림

1. 공장 전경.
2. #1 MNT 증류탑(C-501) 및 관련 장치
3. 탑 저부 온도, 2002년 9월 21일 - 10월 13일.
4. 사고 후 파편조각이 흩어진 FCC시설의 항공사진
5. 재비기로의 스팀라인
6. 우회밸브의 밸브 시트에 형성된 균열
7. 시스템이 차단되었을 것이라고 생각할 당시 재비기로의 스팀 유입에 대한 DCS 관독 정보
8. 모노니트로톨루엔 유도시간-온도 데이터
9. 파손된 제어실 천장과 문

표

1. 사고연혁 요약, 2002년 9월7일 - 10월 13일

개요

2002년 10월 13일, 미국 미시시피주 Pascagoula에 소재한 First Chemical Corporation(FCC) 공장에서 발생한 화재·폭발사고는 공장부지 밖의 인근지역에 치명적인 영향을 미쳤다. 폭발로 인해 공장외부 지역에 거대한 파편조각들이 방출되었고, 일부는 원유저장탱크 근처에 떨어졌다.

수동밸브를 통한 스팀 누출이 증류탑 내부에 있던 모노니트로톨루엔(mononitrotoluene: MNT)를 가열하여 며칠간에 걸쳐 물질이 분해된 결과, 폭주반응을 일으켜 폭발하였다. 증류탑-가열 시 잠재적으로 고에너지의 반응성 화학물질인 약 1,200갤런의 MNT가 저장된-은 사고발생 당시 가동 중지되어 차단되어 있었다.

폭발로 인한 파편 잔해는 공장 내·외부 지역에 떨어져, 거의 3시간 동안 타오른 MNT저장탱크 화재의 원인이 되었으며, 작은 규모의 화재가 공장 내·외부 지역에서 발생했다. 원유저장탱크에 인접한 시설에 떨어진 일부 파편들 중에는 파편 한 개가 6톤 무게에 달하는 것도 있었다. FCC사의 비상대응팀은 공장내부의 화재를 진압했으며, 이 지역의 소방당국은 도로에 발생한 화재를 진압했다. Jackson County 비상관리청은 이 지역에 대피령을 발동했다. FCC사의 담당자들은 공장시설 주변의 대기오염도를 측정했다. 또한 사고 발생 이후, 미국환경보호청(EPA)이 현장에 도착해 대기오염도를 측정했다.

미국 화학물질 사고 조사국(CSB)의 사고조사 결과, 사고의 근본 원인은 다음과 같이 밝혀졌다:

- FCC사의 Pascagoula 공장은 MNT 공정의 위험성을 평가하기 위한 관리시스템이 부적합 했으며, 공장내의 유사 공정의 위험성 평가를 통한 결과를 적용하지 않았다.
- MNT 증류탑에 경보, 안전 연동장치 및 과압보호장치 등을 포함해 충분한 보호장치(protection layers)를 설치하도록 하는 시스템이 수립되지 않았다.
- 장치가 차단되었을 때, 끊임없이 작업상황을 확인하기 위한 시스템이 비효율적이었다.
- MNT탑에 연결되는 스팀라인의 차단 밸브의 건전성을 확보하기 위한 프로그램이 부적합했다.

CSB는 공정제어실 구조물이나 그 인근시설에서 작업자들을 위험한 사고로부터 보호하기 위한 체계가 수립되어 있지 않았음을 지적했다. 마찬가지로, 화학물질 방출 또는 기타 치명적인 사고를 인근지역에 알리는 체계 역시 지역주민들이 해당 내용을 통보 받고 어떻게 대응해야 하는지에 관해 부적합했다.

CSB는 DuPont 화학회사(2002년 11월 매입한); Pascagoula 공장; Jackson County, Mississippi; 미국화학협회(the American Chemistry Council, ACC); 유기화학합성물제조업체연합회(Synthetic Organic Chemical Manufacturers Association, SOCMA)에 대한 개선 권고사항을 작성했다.

1.0 서론

1.1 사고 배경

2002년 10월 13일, 미시시피주 Pascagoula에 소재한 First Chemical Corporation(FCC)에서 발생한 화재·폭발사고로, 모노니트로톨루엔(mononitrotoluene: MNT)을 정제하는데 사용되는 136피트 높이의 증류탑(C-501)¹⁾이 파열되었다. 다량의 MNT가 저장되었던 것으로 보이는 증류탑은 폭발사고 발생 당시-오후 5:25분 경-차단되어 대기모드 상태에 있었던 것으로 추정된다.

증류탑의 금속 파편과 패킹²⁾을 포함해, 폭발로 발생된 파편 조각들은 공장 도처에 떨어졌으며 공장외부 지역으로까지 날아갔다. 증류탑에서 떨어져 나온 거대한 파편이 para-MNT 저장탱크 인근에 떨어져 점화되어, 거의 3시간여 동안 화재가 지속됐다. 6톤에 달하는 증류탑 파편은 1,100피트 밖으로 날아가 도로 건너편 정유공장의 원유저장탱크 부근에 떨어졌다. 부서진 유리조각으로 3명의 FCC사 직원들이 부상을 입었으며, 나머지 1명은 병원으로 후송되었다.

FCC사의 방재팀은 para-MNT저장탱크 부근의 대형 화재와 증류탑에서 떨어져나간 패킹에서 물질이 연소하면서 점화된 국부적인 화재 현장을 포함해, 진화작업에 나섰다. 이 지역의 비상대응팀은 공장 외부에 있는 수 많은 소규모 화재를 지원하기 위해 소방장비와 인원을 제공했다. 지역 경찰당국은 교통통제를 지원했다. FCC사의 담당자들은 공장 주변의 대기오염도를 측정했다. 사고가 발생한 이후, 미국환경보호청(EPA)이 사고현장에 도착해 대기오염도를 측정했으며, 미국해안경비대는 추가 측정을 시행했다.

본 사고로 인해 공장 외부지역에 심각한 영향을 미쳤고 화학반응 물질이 연관되어 있을 가능성이 있었기 때문에, 미국 화학물질 사고 조사국(CSB)은 사고의 근원 및 원인제공 사안을 파악하여 유사한 사고를 예방하기 위한 권고사항을 발표했다.

1)#1MNT증류기(C-501)는 “증류기(still)” 또는 “탑(column)”으로 불려졌다. 본 보고서에서는 상기 두 용어가 모두 사용되었다.

2)패킹 재료는 증류를 위해 사용되는 탑 내부의 이동식 스테인레스강 격자이다.

1.2 사고조사 과정

독립적인 조사활동을 수행함에 있어, CSB는 물적 증거를 조사하고, 현직 및 전직 FCC직원들을 대상으로 한 탐문조사와, 회사의 문서 및 관련문헌을 조사하는 작업에 착수했다. CSB조사관들은 Chevron과 Mississippi Phosphates Corporation(MPC)등과 같은 인접한 곳에 있는 회사들을 방문하여, 파열로 인한 파편을 수거하기 위해 주변 지역으로 조사했다. CSB는 화학물질 시료 실험과 배관 성분 실험을 의뢰했고, FCC사에서 사용한 공정 및 화학물질 등에 관한 조사를 전문가에게 의뢰했다. 2003년 1월 15일, 지역주민과 이해 당사자들에게 영향을 미친 사고에 관한 정보를 수집하기 위해 지역주민 회의가 열렸다.

1.3 First Chemical Pascagoula 공장

1.3.1 시설 개요

FCC사는 미시시피주, Bayou Cassotte Industrial Park 산업단지 내, Pascagoula동부의 60 에이커 부지에 자리잡고 있다. 사고 당시, Jackson, Mississippi의 ChemFirst Inc.,-SOCMA(유기화학합성물제조업체연합)의 회원사-가 공장을 소유하고 있었다. 공장은 137명의 직원과 8명의 정규계약직원을 고용하고 있었다.

E.I. DuPont Nemours and Company는 사고 당시 FCC 공장을 매입하기 위한 과정을 진행 중에 있었는데, 사고로 인한 피해를 조사하기 위해 매입이 연기되었다. DuPont사는 2002년 11월 6일 ChemFirst Inc.(FCC의 모회사)를 공식 매입했다.

공장의 주요 생산품은 다양한 산업용 물질로 사용되는 아닐린³⁾과 니트로톨루엔의 중간체 및 유도체이다. 이 공장은 아닐린 제조 선업체 중 하나이며, 니트로톨루엔 제조 분야에서는 세계에서 2번째로 규모가 큰, 그리고 미국에서는 유일한 업체이다.

공장부지에는 원료 및 완제품을 저장하기 위한 대형 저장탱크, 창고 및 유지보수 구역, 제어실 및 기타 사무 시설, 그리고 주요 사무실 건물 등이 있다. 파열된 증류탑 인근에 있는 한 건물에는 공정구역 제어실, 탈의실, 사무실, 그리고 품질관리연구소 등이 있었다(그림 1 참조).

3)아닐린은 화학공식 $C_6H_5NH_2$ 인, 방향족 아민계 화학물질에서 추출된 유체(oily liquid)이다.

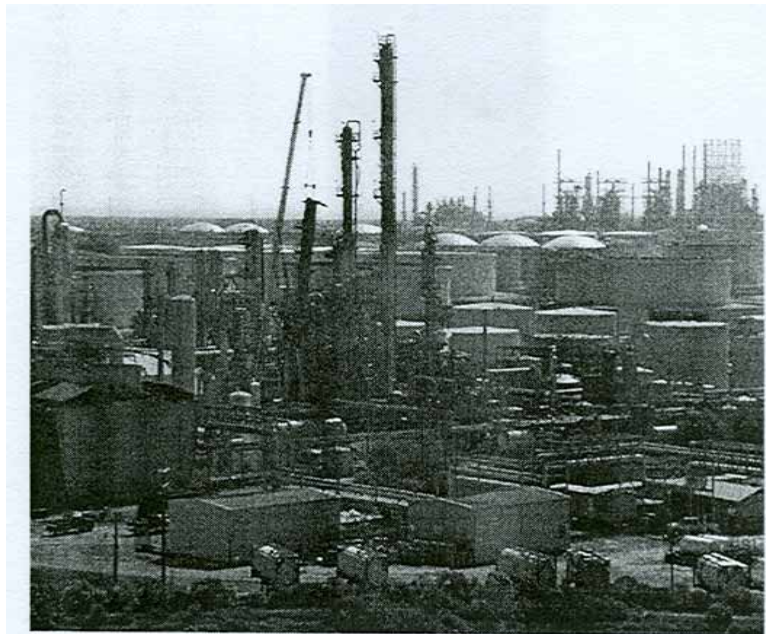


그림 1. 공장 전경. (비고: 크레인이 폭발로 파손된 증류탑에 연결되어 있다)

1.3.2 기타 산업단지 및 주택가와의 인접성

FCC 공장 부근의 경계는 다음과 같다:

- 남쪽 방향: 화학비료제조업체인 Mississippi Phosphates Corporation(MPC)-대형 암모니아 저장탱크가 현장에 설비되어 있으며, MPC는 이외에도 FCC 북쪽의 대형 석고더미를 소유하고 있다.
- 동쪽 방향: Chevron 정유공장 - 여러 개의 원유저장탱크가 FCC소유지역 경계선에서 약 500피트 떨어진 곳에 위치하고 있다. 도로와 지선도로(rail spur) 역시 FCC의 동쪽에 위치하고 있다.
- 서쪽 방향: 산업용 선적통로, Bayou Cassotte 0.25마일 - Bayou의 서쪽에 주택지역이 위치해 있다.

1.4 MNT 공정

1.4.1 MNT의 제조 및 정제

MNT는 염료, 합성고무 화학물질, 그리고 농업용 화학물질 제품에 사용된다. 이는 방향족⁴⁾ 니트로 화합물질로 질산과 황산의 혼합물인 니트로산(nitrating acid)이 톨루엔과 화학반응을 일으켜 생성된다. 질산화 반응의 결과, 생성물질은-이 시점에서 MNT, 잔여 산(residual acid), 톨루엔, 그리고 물(부산물)로 구성된다-분리기로 보내져, 소비된 산이 농축되어 공정으로 재순환된다. 나머지 생성물질은 “세척”단계를 통해 처리되고 난 후 잔여 톨루엔을 제거하기 위해 톨루엔 스트립퍼로 유입된다. 정화된 MNT액체 물질은 MNT의 3개 이성체⁵⁾-ortho-, meta-, 및 para-MNT-를 분리하기 위해 3개의 증류탑으로 흘러 들어간다.

1.4.2 #1 MNT 증류탑

#1 MNT 증류탑(C-501)은 폭발 사고와 관련된 용기로, 공정내의 3개의 증류탑 중 첫 번째 탑이다. 증류탑은 7피트의 직경과 약 135피트 높이로 건조되었다.

정상 작동 시, 증류탑은 분리 공정을 위해 진공상태에서 가동된다. 온도는 증류탑 하단의 화씨(°F)350도에서 상단의 대기온도 범위이다. 2개의 스팀가열 재비기(steam-heated reboiler)⁶⁾가 열을 공급한다. 8개의 온도 지시계가 증류탑에 설치되어 있었지만, 경보기능이 설치되어 있지 않았다. 펌프는 증류탑 하단의 물질(대부분 para- 및 meta-MNT)을 제거하는데, 물질은 이성체 분리를 위해 두 번째 증류탑으로 보내지며, C-501로 재순환된다. 환류 펌프(reflux pump)는 상단의 포집 트레이(collector tray)에서 액체(대부분 ortho-MNT)를 제거하고, 액체는 냉각기를 통해 유입되어 저장을 위해 운반되거나 증류탑 상단으로 되돌아간다. 증류탑은 증류공정을 위해 스테인레스강의 패킹 재료로 채워져 있다.

공장의 중앙 스팀시설은 300 psig(평방인치당 파운드)의 스팀을 재비기로 제공한다. 각 재비기에 연결된 스팀라인은 3인치로, 입출구 수동식 차단밸브와 직렬식 조절밸브가 있다. 조절밸브 부근의 우회라인은 수동식 차단 밸브로 되어있다.

4)방향족 화합물은 상호 연결된 6개의 탄소원자로 구성되어 있는데, “벤젠 링”으로 불려진다.

5)이성체는 동일한 비율에서 동일한 원자를 갖지만 분자구조상의 차이점으로 인하여 각기 특성이 다른 2개 또는 그 이상의 화학적 혼합물이다. MNT는 3개의 이성체를 갖는다.

6)증류탑의 재비기는 열교환기의 하나로, 일반적으로 스팀과 같은 열매체를 한쪽에서 다른 쪽으로 흐르게 한다.

2.0 사고 개요

2.1 사고이전 상황

사고발생 5주 전인 2002년 9월 5일, Pascagoula FCC 공장에서 MNT 공정의 황산농축기 상류에 장애가 발생했다. FCC사는 9월 7일 #1MNT 증류탑(C-501)을 포함해, MNT 증류탑으로의 주입을 중단하기로 결정했다(표 1 참조). 당시, C-501에는 약 1,200갤런의 MNT가 저장되어 있었는데, 증류탑은 전환류(total reflux)⁷⁾된 채로 있었다. 생산수요 감소로 인해, 공장전체 가동중단과 관련된 작업이 완료되기까지(10월 초로 예정된)는 MNT 증류탑을 가동하지 않기로 결정되었다.

표 1

사고연혁 요약, 2002년 9월7일 ~ 10월 13일.

일시(2002년)	사고 내용
9월7일	증류탑 가동중단에 주입; 증류탑 전환류 상태로 됨.
9월22일	수소 공정에서 화재발생; 스팀차단밸브 감겨짐
9월27일	증류탑에서 진공 파열됨
9월29일	유지보수 작업을 위해 전체 설비 가동중단.
10월5일	공장보일러 재가동
10월5일-13일	증류탑 하단의 온도 지속적으로 상승됨.
10월 13일	증류탑 벽체부분 누출발생 이후 오전 5:25분경 증류탑 파열됨.

9월 22일, #2 수소 공정에서 화재가 발생했는데, 이로 인해 공장의 스팀생산에 영향을 미치게 되었다. 작업 관리자들은 환류 증류탑(C-501포함)과 같이 당시 작업의 최우선 사항으로 고려되지 않았던 증류탑으로의 열원 차단을 시도했다. 작업관리자들은 조절밸브의 하류에 있는(그림2의 밸브 “2”) 재비기의 수동밸브를 닫았다. 우회 라인에 있는 수동밸브(그림 2의 밸브 “1”)는 통상 잠긴 상태로 있었다. 분산제어시스템(DCS)⁸⁾은 제어밸브 잠금(그림 2의 밸브 “3”) 신호를 보냈다.

7)“전환류”란 재비기(reboiler)에 지속적으로 스팀이 주입되었지만, 증류탑으로 새로운 원료가 유입된 것이 아님을 의미한다. 증류탑을 통해 물질이 지속적으로 재순환되지만, 물질이 제거되어 저장을 위해 보내진 것이 아니다.

8)분산제어시스템은 화학공정의 제어 및 모니터링을 위해 사용되는 자동화 시스템이다.

이후 5일 동안, 스팀 라인에 있는 밸브들은 잠긴 상태로 있었다. 그러나, 사고 이후 조사된 DCS정보에서는 탭 저부의 온도가 300°F이하로 하강되지 않았다고 지적하고 있다. 온도는 열이 추가되지 않았다면 주변온도 수준으로 내려갔을 것이다.

9월 초, Pascagoula 공장은 9월 29일로 예정된 연차 시설 정비점검을 위한 준비작업을 완료하고 있었다. 약 1,200갤런의 MNT가 C-501에 재고로 남아있었고, 수동밸브들은 잠긴 상태로 있었다. 장기간 가동중단에 들어가는 증류탑 차단이 사후 감사는 없었다.

9월 27일, 환류 냉각기(reflux cooler)의 유지보수를 위한 준비과정 중, 공정 작업자들은 계내로 질소를 투입함으로써 C-501의 진공을 파괴했다(즉, 증류탑을 가압시킴). 질소는 상부 헤드의 방출라인에 연결된 튜브를 통해 주입되었다. 압력계는 증류탑의 진공도만을 측정할 수 있었고, 0에서 200 mmHg 범위로 나타났기 때문에, 진공이 완전히 파괴⁹⁾되었음을 입증할 만한 어떠한 데이터도 없었다. 사고 이후 DCS 데이터를 분석한 바에 의하면, 탭 저부 온도는 지속적으로 상승하여 약 415°F로 나타났다.

작업 담당자는 온도를 모니터링하지 않았다. 그림 3은 증류탑 아래에 있는 2개의 온도계에 대한 DCS의 자료 목록이다.

9월 29일, 공장의 스팀보일러는 예정된 정비작업을 위해 가동이 중단되어 있었다. C-501의 온도는 거의 주변온도로 냉각되었다. 10월 1일 DCS가 정전되었고, 다음날 정상 복구되었다. 제어시스템의 하드 드라이브는 10월 3일 정전되어 다음날 복구되었다. 따라서 DCS의 정전 기간 동안 발생한 데이터는 기록되지 않았다.

보일러의 유지보수작업은 10월 5일 완료되었고, 시스템이 재 가동되었다. 탭 저부에 있는 물질의 온도는 오후 경 약 415°F로 상승했다.

9)증류탑내 완전한 진공파괴의 실패는 아마도 계내로 공기가 유입된 것 같고, 이는 결과적으로 퍼지가 되지 않았던 것이다. 3.0절에 언급된 바와 같이, 공기의 유입은 MNT의 반응속도를 상승시킬 수 있다.

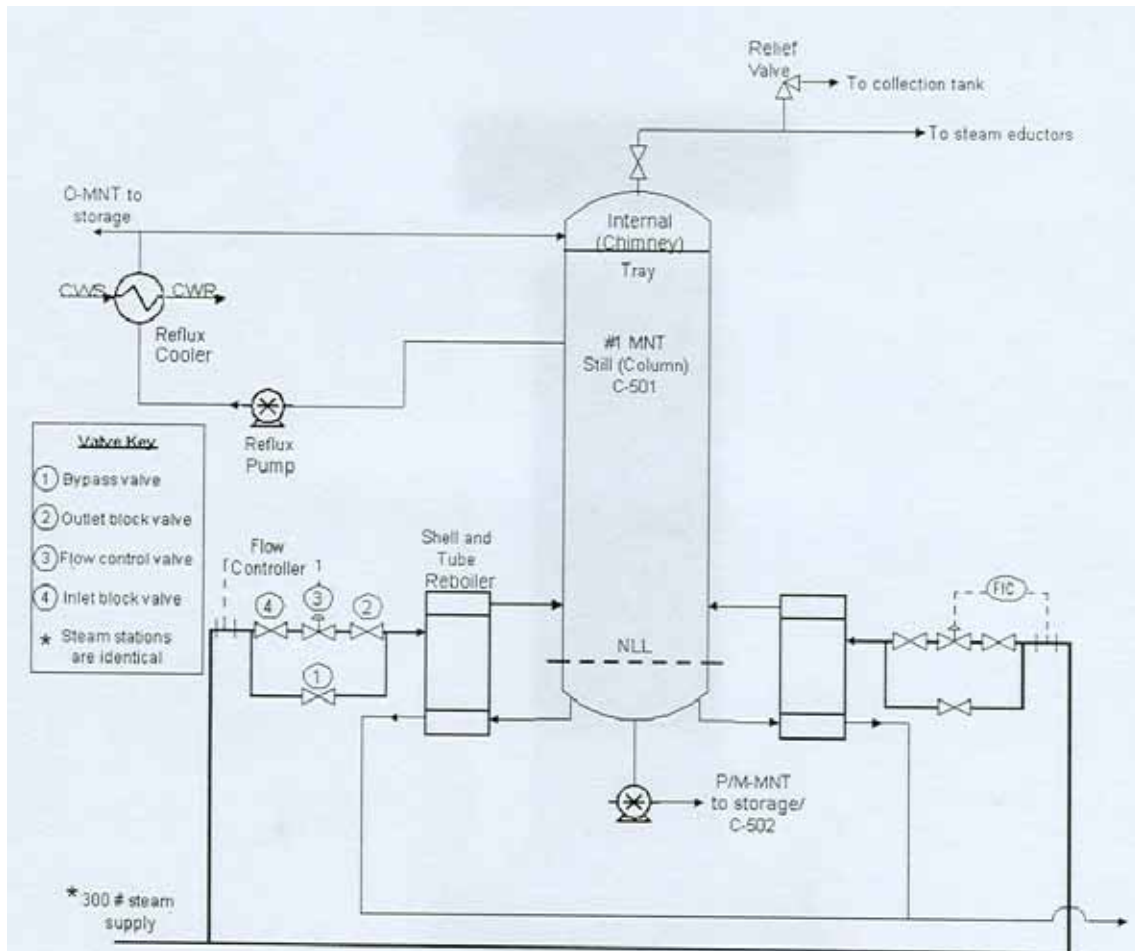


그림 2. #1 MNT 증류탑(C-501) 및 관련 장치

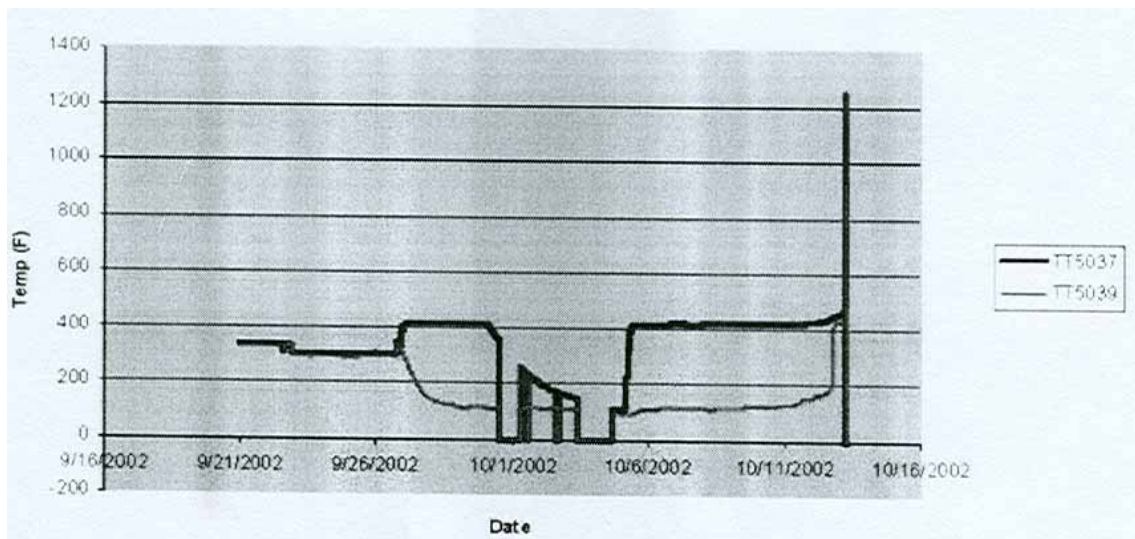


그림 3. 탑 저부 온도, 2002년 9월 21일 ~ 10월 13일.

(비고: 열전대[표의 10/11/2002에서 가장 높은 온도수치]는 용기의 바닥에 있었고, TT-5039는 재비기 입구라인 위에 있었다)

2.2 사고 발생

2.2.1 사고 발생 당일

C-501에 저장된 물질의 온도는 10월 5일 보일러가 가동된 날부터, 10월 13일 오전 온도가 450°F로 상승할 때까지 지속적으로 올라가고 있었다. 온도 모니터링에 관한 증거는 어디에도 없었다.¹⁰⁾ 탭 저부의 높은 온도로 인해 일부 물질이 스팀화 되어, 증류탑으로 유입됨으로써 “굴뚝 트레이”에 축적되었다. 10월 12일 아침, 트레이 액위 상승을 알리는 경보가 작동되었는데, 작업관리자가 이 경보를 정지시켰으나, 이후 아무런 조치도 취하지 않았다.

10월 13일 오전, C-501구역에 있는 한 작업관리자가 방출밸브가 새는 것과 같이 점점 커지는 소음을 들은 이후 크게 울리는 소음을 들었다.¹¹⁾ 해당 구역의 작업관리자들은 증류탑의 상층부 절반 수평선 밑부분에서 빠른 속도로 물질이 연기나 스팀 또는 “눈(snow)”처럼 새어나오면서 방출되고 있음을 감지했다. 당시 현장 목격자에 의하면, 물질은 Chevron 정유공장 방향을 향해 “동쪽으로 향하고 있었다”고 한다. 작업관리자 한 명은 사고 조사를 위해 제어실에 있었는데, 유일한 안전조치는 이를 알리는 것이라는 판단을 내렸다. 그는 다른 2명의 작업관리자들에게 탭 저부면으로부터 불과 50피트 정도 거리에 위치한 제어실 내부에 남아있으라고 지시했다.

사고 당시 목격자의 진술에 따르면, 몇 분 후, 증류탑이 파열되면서 폭발이 발생했다고 한다. 폭발로 발생한 압력은 제어실 문 안쪽에 서 있었던 3명의 작업관리자들을 가격했고, 파편 유리조각으로 찰과상을 입었다. 작업관리자 한 명은 불덩어리가 제어실 문을 지나 날아가는 것을 보았다고 말했다.

폭발압력으로 인해 35피트 높이의 C-501 상층부가-용기의 헤드 부분과 약 30피트 높이의 원통형 동체-공장외부지역으로 밀려나갔다. 증류탑 안에 있는 구조물 패킹재료가 모두 분출되었고, 증류탑 내부의 패킹 재료의 연소 잔류물 또한 외부지역으로 방출되었다. 거대한 증류탑의 측면 벽체 조각이 약 500피트 떨어진 거리에 있는, 200만 파운드 이상의 para-MNT가 저장된 저장탱크를 들이받아, 용기 내부와 그 주변에 화재가 발생했다. 공정의 냉각탑에도 파편조각으로 인한 화재가 발생했다.

10)온도계에는 경보기능이 장착되어 있지 않았다.

11)CSB는 사고 이후 방출밸브와 하류 탱크를 조사한 결과 밸브가 사고 당시 잠겨 있었다는 사실을 밝혀냈다.

폭발 압력으로 인해 제어실을 포함한 공장부지 내의 여러 건물들이 파손되었다. 제어실과 인근 실험실 그리고 전기실(breakrooms)에 있는 음공천장(acoustical drop ceilings) 대부분이 파괴되었다. 지붕은 심하게 파손되었고, 콘크리트 블록 벽체는 균열되어 파손되었고, 바깥문은 휘어져 유리가 깨졌다. 본부건물-C-501에서 400피트 떨어진 곳에 위치한-역시 사무실에 인접한 콘크리트 벽에 파편 조각이 박혀 심각하게 파손되었다. 강철 골조 건물의 문이 휘어졌고, 붕괴된 증류탑 방향 쪽의 건물 외벽 판자가 물결모양으로 변형되었다.

2.2.2 피해지역 및 사고영향

폭발로 인해 증류탑 부근에서 거대한 파편들이 외부로 튀어 나갔다. 파편 조각이 공장 내에 있는 500,000파운드의 무수 암모니아 탱크 바로 위쪽의 배관 선반(rack)을 들이 받았다. 6톤에 달하는 증류탑의 측면벽체는 약 1,100거리에 떨어져 있는 Chevron소유지로 날아가, 250,000배럴의 원유 저장탱크에서 약 50피트 거리에 떨어졌다. 밸브와 배관의 일부 역시 증류탑에서 1,700 피트 거리에 있는 Chevron소유지에서 발견되었다.

피해 지역의 반경 내에는 저장탱크와 배관을 포함해 가연성 및 독성 물질이 포함된 장치의 파편들이 흩어져 있었다. 이전에 언급한 바와 같이, FCC사에 있는 MNT원료 저장탱크(para-MNT가 저장되어 있는)에서는 날아든 파편으로 인해 화재가 발생했다. 염소 실린더와 황산 탱크를 포함한 수 많은 기타 용기들의 파편이 발견된 지역 내에 있었다. 파편 조각이 이러한 장치에 떨어졌다면, 이러한 위험물질의 2차 방출로 이어지는 치명적인 사고를 피할 수 없었을 것이다. (FCC사와 주변 지역의 항공사진 그림 4 참조)

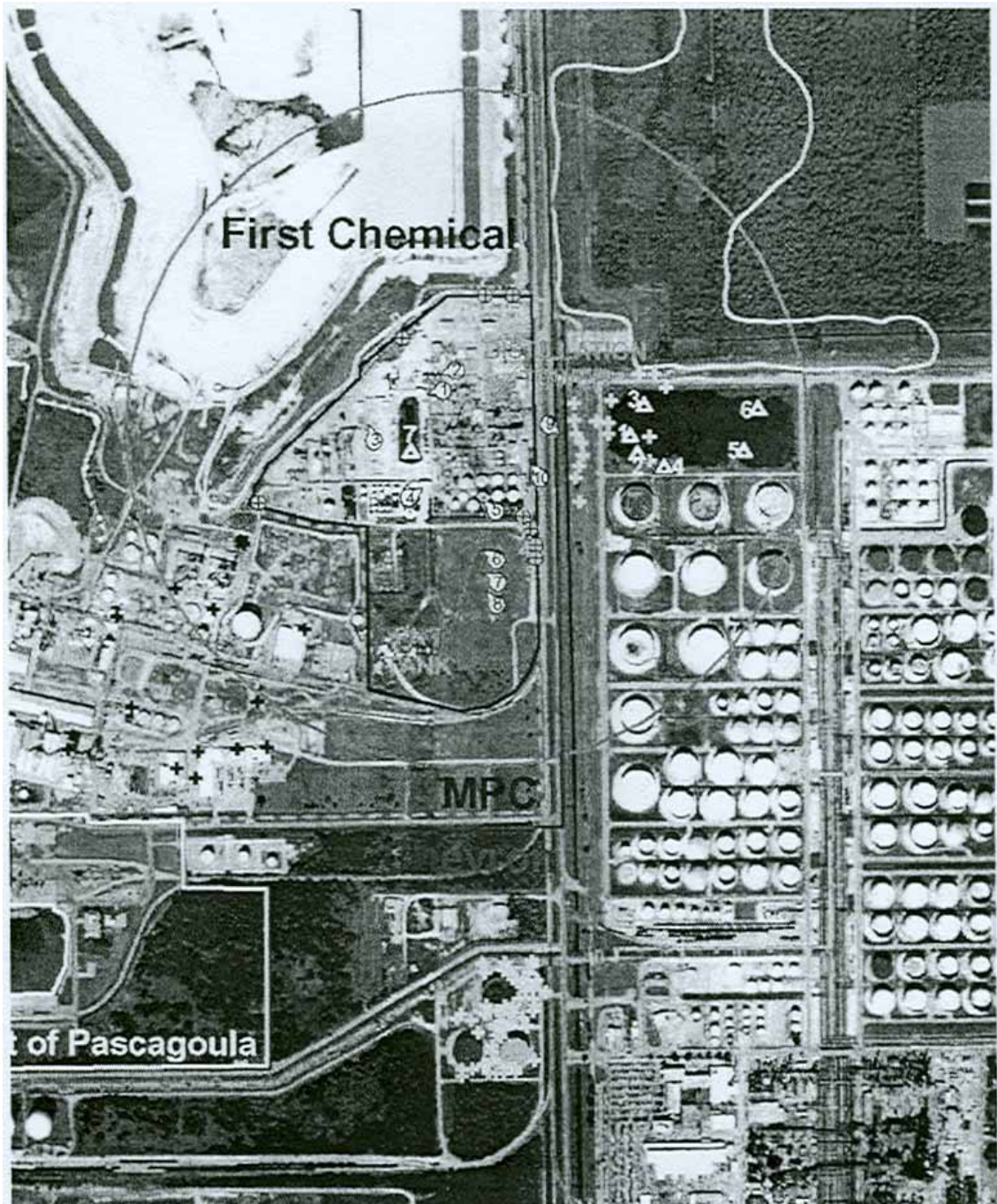


그림 4. 사고 후 파편조각이 흩어진 FCC 시설의 항공사진

(원형 표시는 파편 조각이 발견된 증류탑에서 2,000피트 반경의 지역을 나타낸다; 삼각형은 금속 파편이 떨어진 지역이며, x표시는 FCC 공장 외부 지역에 떨어진 일부 폐킹 재료를 나타낸다)

2.2.3 비상대응

폭발사고 이후, 작업관리자들은 직원을 동원하여 진화작업에 나섰다. 그들은 점화된 파편 조각으로 인해 발생한 작은 불길을 진화하기 위해 소화기 및 기타 진화장비를 사용했다. 지역 소방당국은 도로를 따라 발생한 화재를 진화했다.

검은 연기는 바람을 타고 공장지역에서 동향과 동남방향으로 흘러 Chevron소유지와 멕시 코만 쪽으로 향하고 있었다. Jackson County 비상관리청은 인근 주민들에게 대피령¹²⁾을 발령했고, 공장주변 1마일 상공이 비행금지구역으로 선포되었다. 가장 규모가 큰 화재는 para-MNT저장탱크에서 발생했다. 10월 13일 오전 8:30분 경 모든 화재가 진화되었다.

2.3 사고 재구성

#1 MNT 증류탑(C-501)의 폭발사고 원인을 조사하기 위해, CSB조사팀은 다양한 측면에서 사고의 진상을 규명하기 위한 다양한 분석을 수행했다. CSB는 용기의 파편을 대상으로 지형그리드조사(geographic grid search)를 의뢰했으며, 스팀제어실, 화학물질 시료, 그리고 금속 시료 등에 대한 실험을 수행했다.

2.3.1 사고지역 수색작업

FCC사는 폭발로 발생한 파편을 찾아내기 위해 이를 전문기관에 의뢰했다. 그 결과, 가벼운 파편조각(예, 알루미늄 패킹 및 끈)들은 공장에서 0.7마일 떨어진 남쪽 및 동쪽 방향에서 주로 발견되었는데, 이러한 파편들은 증류탑의 정남향인 Chevron 저장탱크에 떨어졌다.

12)대피령은 화학물질에 대한 노출을 최소화하기 위해 선포된다. 이러한 조치 단계에는 집과 같은 안전한 피난처로 대피하여, 창문과 문을 모두 닫고, 화학물질의 유입을 막기 위해 환기장치의 전원을 끄고, 다음 지시사항을 위해 TV와 라디오에 귀를 기울이는 것 등이 포함된다.

큰 파편조각들은 동쪽의 대규모 옥외저장탱크에서 대부분 발견되었고, 나머지는 Chevron 소유지에서 발견되었다. 가장 큰 파편조각은 증류탑 상단부분으로, 약 13,500파운드에 달하는 것이었다. 이 파편은 C-501로부터 약 1,100피트 거리에서 발견되었다. 7피트 직경의 증류탑 헤드 부분은 수색작업 기간 동안 발견되지 않았다. 11월, FCC사는 Chevron 소유지에 있는 2개의 냉각수 용기 수색을 위해 다시 전문기관에 의뢰했다. 수색 목록에는 쇠격자 부분, 4피트 길이의 1인치 배관, 그리고 2개의 밸브-개 당 50 ~ 60파운드 무게-등이 포함되어 있었다. 크기가 큰 밸브는 증류탑에서 1,425피트 거리에 떨어진 것으로 추정되었다.

증류탑의 헤드 부분을 포함해, 추가적인 물적 증거를 확보하기 위해, CSB의 조사관들은 12월 MPC소유지 지역에서 사용된 장비들에 대한 조사를 수행했다. CSB는 증류탑의 반경 2,000피트 이내 지역에서 이전 수색작업에서 발견되지 않았던 지역을 조사하기 위해 전문기관에 의뢰했다. 전체 수색 지역은 81에이커에 달했다 ¹³⁾

2.3.2 스팀제어소

CSB는 C-501이 가동중단 된 이후 열이 MNT에 남게 된 이유에 대해 조사했다. 분리 공급 라인이 증류탑에 있는 2개의 재비기로 스팀을 유입시켰다. 작업일지, 탐문조사, 그리고 밸브의 상태 등으로 미루어볼 때, 양쪽 라인과 양쪽 우회라인에 있는 조절밸브의 수동밸브 하류가 9월 22일 잠긴 상태로 있었음이 확인되었다. 이외에도, 유량조절밸브는 DCS에서 잠그도록 지시되었었다. CSB는 두 개의 밸브실에서 누출이 발생하여 사고 원인이 되었는지 여부를 조사하기 위해 밸브실을 대상으로 실험을 수행했다. 그림 5에서와 같이, 각 밸브실은 4개의 밸브로 구성되어 있다.

13) 증류탑의 헤드부분과 이와 관련된 파편들은 발견되지 않았다.

CSB는 누출을 조사하기 위해 밸브의 발견 당시 상태에서 스팀제어소를 시험하기 위해 전문기관에 의뢰했다. 실험 결과, 스팀실 중 하나의 우회라인에 있는 수동밸브에서 시간당 180파운드 이상의 심각한 누출이 발견되었다. 부식 및 침식 상태는 밸브를 균열시키는 원인이 되었고, 스팀 유입으로 그림 6에 나타난 바와 같이, 밸브 시트에 구멍이 형성되었다.

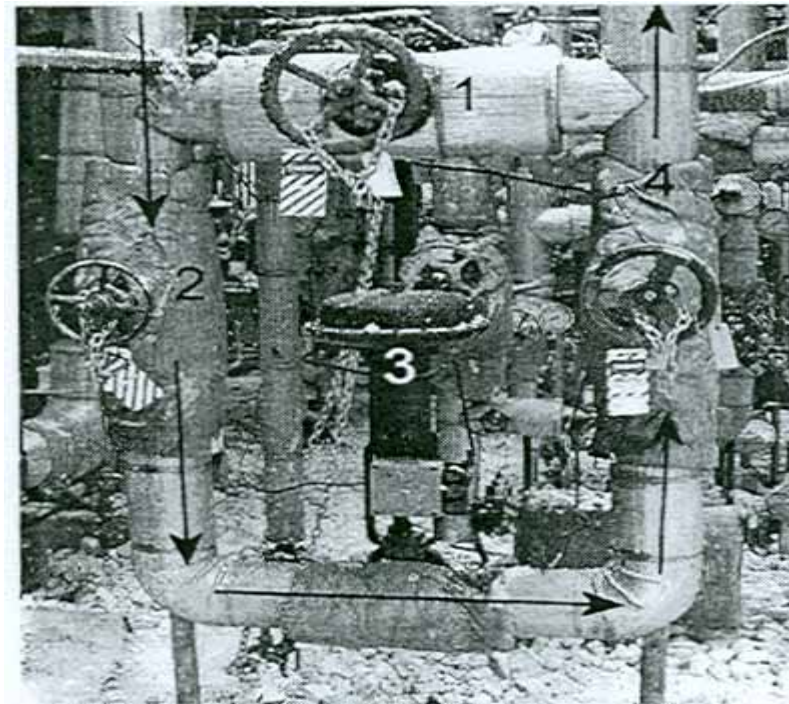


그림 5. 재비기로의 스팀라인

(밸브 번호 표시: (1) 우회라인의 수동밸브, (2)입구차단 밸브, (3)자동 유량조절밸브, (4)출구 차단밸브.)

다른 스팀실의 조사에서도 누출이 발견되었다. 우회라인에 있는 수동밸브(예, 그림 2와 5에 있는 밸브 “1”)에서 외관상 누출이 확인되지는 않았지만, 출구차단 밸브 방향(유량조절밸브의 밸브 하류)는 부식 물질과 시스템의 파편들로 인해 심각한 균열상태를 보이고 있었다. 유량조절밸브가 확실한 잠금장치 밸브가 아니기 때문에, 스팀이 주가지관(main branch)을 통해 누출된 것으로 보인다. 스팀실의 출구차단밸브(그림 2와 5의 밸브 “2”)의 조사 결과, 파편과 미립자들로 인해 밸브가 제대로 작동하지 않은 것으로 나타났다. 스팀시스템은 스팀뿐만 아니라 액체가 포함된 “습한” (moist) 것으로, 이는 배관 시스템의 추가 침식 및 부식의 원인이 되었다.



그림 6. 우회밸브의 밸브 시트에 형성된 균열

이 같은 조사결과로 스팀이 수동밸브를 통해 누출되어, 밸브가 잠긴 상태였음에도, C-501에 저장된 물질을 지속적으로 가열되었다는 사실이 입증되었다. 이러한 결과는 밸브가 잠긴 상태였으므로 MNT 증류탑으로부터 스팀원(steam source)을 차단되었을 당시 라인을 통해 스팀이 유입되었다고 지정한 DCS 자료와 일치한다(그림 7 참조). DCS 자료에는 비정상적인 패턴이기는 하지만, CSB실험에서 발견된 것보다 더 높은 유입량이 나타나 있다. DCS에서 제시한 기록유량이 정확한 것은 아니라 해도, 증류탑이 차단되었을 것이라고 생각했던 당시 시스템 내부로 스팀이 유입되었음을 지적하고 있다.

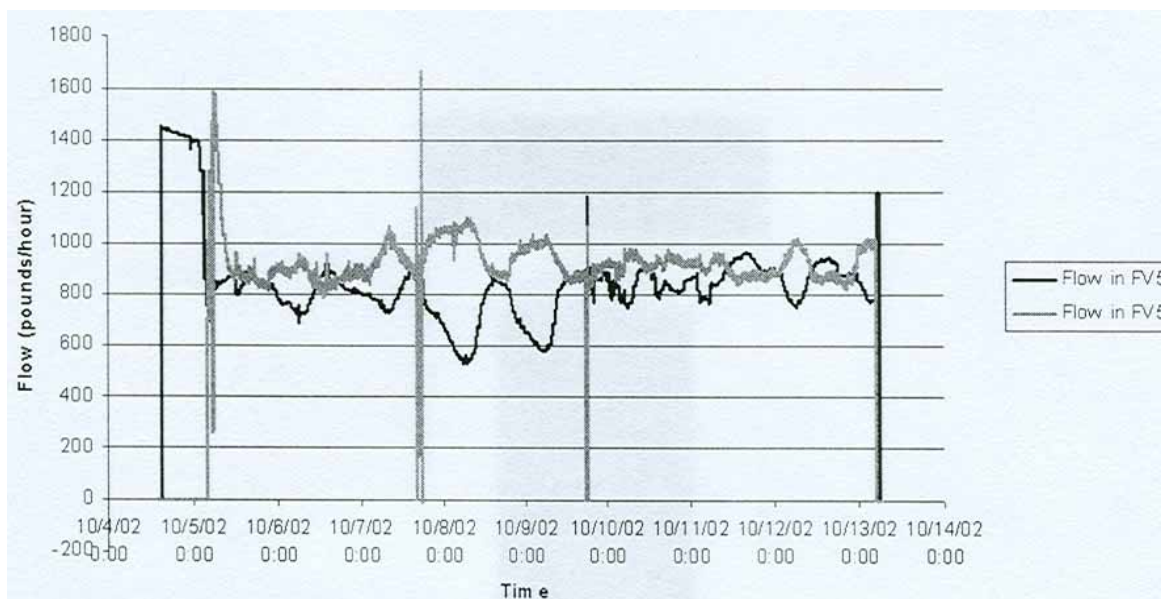


그림 7. 시스템이 차단되었을 것이라고 생각할 당시
재비기로의 스팀 유입에 대한 DCS 판독 정보

2.3.3 열안정성 실험

니트로톨루엔 화학은 수 년간에 걸쳐 연구되어 왔다. 니트로톨루엔은 일시적으로 고온에 노출되었거나 장시간 동안 상승된 온도에 노출될 경우 분해작용을 일으킬 수 있다. 분해과정에서 가스를 생성하게 되는데, 물질이 제한된 조건에 있는 경우 압력을 형성할 수 있다. C-501은 1,200갤런의 내용물질이 저장된 채 가동 중단되었고 장시간 동안 열원에 노출되어 있었다. CSB조사관들은 MNT의 열분해 작용으로 인해 폭발이 발생했다는 가설을 제시했다.

이러한 가설을 입증하기 위해, CSB는 C-501상류에서 수집한 MNT원료 시료에 대한 실험을 전문기관에 의뢰했다(사고로 인해, 증류탑 자체에서 채취할 수 있는 시료는 없었다). 원료 시료에는 MNT의 3개 이성체 모두가 포함되어 있었다. 실험 시료는 C-501에 주입되기 이전에 톨루엔 스트립퍼에 의해 원료에서 제거되었을 약 3%의 톨루엔이 포함된 것을 제외하고는, 증류탑에 있었던 상태로 추정되는 조건으로 준비되었다. 톨루엔의 양이 적었기 때문에, 시료는 입수된 상태대로 실험되었다. 시료와 관련해 이외 제약조건은 발견되지 않았다.

시료 실험을 위해 단열열량측정법(adiabatic calorimetry testing)이 적용되었다¹⁴⁾ 1차 테스트에서는 heat-wait-search방법이 적용되었는데, 발열(exotherm)에 이를 때까지 시료의 온도가 상승되었고, 이후 시료는 단열조건 하에서 자체 가열되었다. MNT시료는 발열온도가 섭씨 273℃에서 나타나기 시작했고, 온도 및 압력이 최고비율은 1,500℃/min과 100bar/min으로 나타났다.

14)단열열량은 근접한 단열조건(단열이란 대기 중에 획득되거나 손실된 열이 없는 변화를 의미한다) 하에서 화학물질의 자체가열 비율과 압력 데이터를 얻기 위한 화학실험 기법이다. 이러한 측정기법은 폭발반응의 조건과 결과를 예측한다.

또한, 단열열량측정법은 240℃와 265℃(464° 및 509°F)간의 유도시간(induction time)¹⁵⁾ 측정을 수행하기 위해 적용되었다. 값은 FCC사에서 있었던 조건과 유사한 상태에서의 유도시간을 측정하기 위해 추정되었다.

415° 와 454°F간에-폭발이 발생하기 며칠 전 기간 동안 MNT 탑 저부의 온도로 추정되는-자체 가열을 위한 유도시간은 그림 8에 제시된 바와 같이, 35일경부터(415°F) 1일 후(454°F)까지 감소되었을 것으로 추정된다. 탑 저부의 온도가 몇 시간 전 454°F에서 측정되었기 때문에, 유도시간은 자체가열 반응과 일치한다.

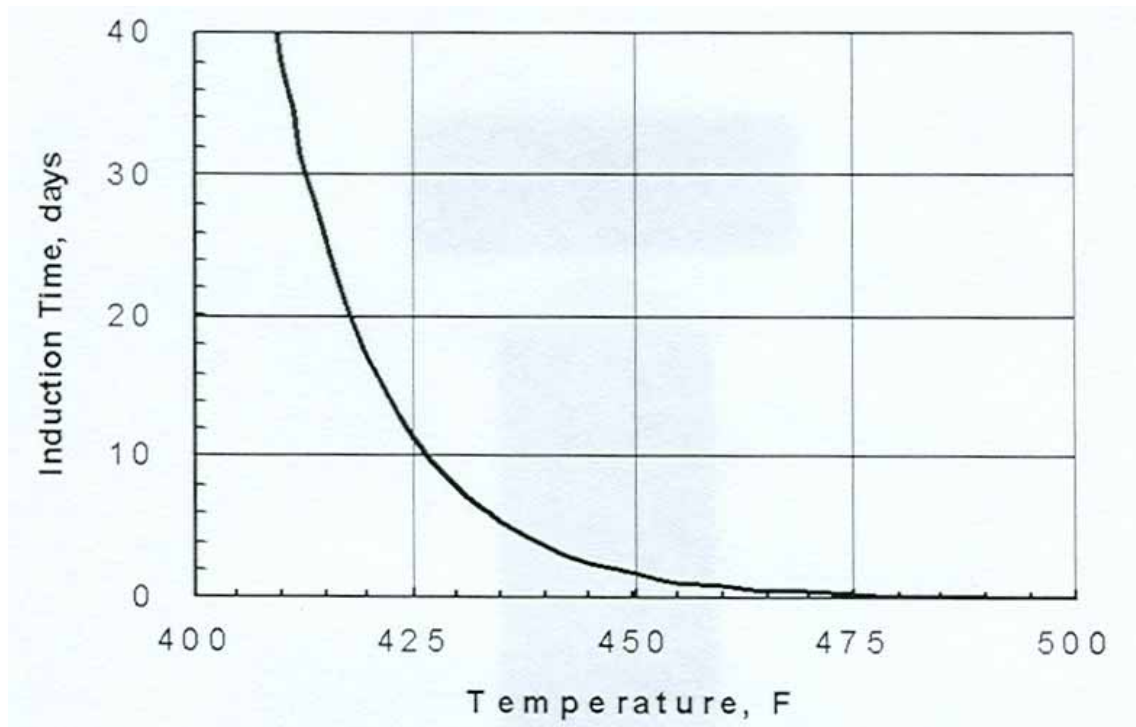


그림 8. 모노니트로톨루엔 유도시간 온도 데이터

이러한 실험결과는 MNT분해작용 관련 문헌에 명시된 정보와 일치한다. 화학공학학회(ICChemE)심포지엄에서 제출된 자료에서, 저작자는 MNT가 지나치게 높은 온도에서 가열되었거나 장시간 동안 적정온도 이상에서 유지된 경우 일련의 사고가 발생했다는 점을 지적하고 있다(Harris, Harrison & McDermott, 1981). 이후 발생한 현상을 “유도효과”(induction effect)라고 한다. 401°와 419°F간 온도에 노출된 다량의 물질 배열(사고 발생이전 C-501에 저장된 양이 많은 순으로)의 경우, 급격한 분해반응이 8일에서 25일 이내 시점에서 발생하게 된다. 이는 사고 발생이전의 FCC사의 조건과 일치한다. *Journal of Loss Prevention Process Industries* 논문에서, Chen과 Chai-Wei (1996)는 MNT의 분해반응이 2단계에 걸쳐 발생했다고 언급되어 있다. 1단계에서는 284°F에서 느린 속도로 자체 가열되며, 2단계에서는 392°F에서 자체 가열이 가속화된다는 것이다.

15)유도시간은 발열온도가 관찰되기 전 화학물질이 특정온도를 유지해야 하는 양을 의미한다. 화학물질은 “시작” 온도(분화작용이 관찰되는 저온)에 노출되었거나 장시간 동안 고온(그러나 낮은)을 유지하는 경우 분해작용을 일으킬 수 있다.

사고조사의 일환으로 DuPont사 역시 증류탑 상층부 쪽의 내부 트레이에서 물질과 연계된 추가 분해반응 가능성을 조사했다. 물질의 대부분이 ortho-MNT일 것으로 추정되는데, 이는 끓는 온도가 낮고 용기 상층부분에 축적된 대부분의 이성체가 이 종류이기 때문이다. DCS 자료에 따르면, 트레이에 있던 물질은 폭발직전 몇 초안에 손실된 것으로 나타났다. DuPont사는 증류탑의 기저(base)에서 발생한 분해작용으로 인한 충격에 의해 물질이 손실된 것으로 결론지었다. Ortho-MNT(유리한 물질)가 패킹 아래에 주입될 때 이물질이 오염 잔류물과 접촉했다. DuPont사는 잔류물에 있는 고형물질인 엔아민, 아조, 그리고 아족시기(azoxy group)에 대한 실험을 수행한 결과, 이 물질들이 시작 분해온도를 현저히 하강시킨다는 사실을 밝혀냈다. 증류탑에 있는 공기는 압력과 마찬가지로 물질의 화학반응을 더욱 가속화시킨다는 결론을 내렸다.

DuPont사는 C-501 상층부에서의 2차 분해작용의 원인이 다음과 같은 요인으로 인해 발생했다는 결론을 내렸다:

- 상층부 트레이에 있는 MNT는 반응성이 더 큰 ortho-MNT였다.
- 패킹의 고형물은 분해 시작온도를 낮추었다.
- 공기가 정비작업 중에 증류탑으로 유입되었다.
- 증류탑은 정비작업 이후 진공을 유지했다기 보다는 압력이 있는 상태를 유지했다.

CSB는 DuPont사의 조사결과를 검토했다. 관련문헌에 제시된 추가 증거자료는 이러한 요인들이 보다 활발한 화학적 반응의 원인이 될 수 있었다는 사실을 뒷받침하고 있다. Kister(1990)의 저서 *Distillation Operation*에는, MNT가 150°F를 유지하고 있었을 때 공기가 유입되었던 이전의 사고에 대해 언급되어있다. 이전에 알려지지 않았던 발열온도가 시작되어, 폭발의 원인이 되었다. Duh et al(1997)은 ortho-MNT가 낮은 시작온도와 높은 화학반응적 열에 해당되는 다른 이성체에 비해 보다 불안정하다는 점을 지적하고 있다. 이는 2차 폭발이 증류탑의 상층 부분에서 발생했다는 결정적인 증거가 될 수는 없지만, 용기를 분리시킨 에너지의 분출에 대한 설득력 있는 근거가 될 수 있다. (별첨 A의 인과요소도표 참조)

2.3.4 용기의 건전성 실험

증류탑 벽의 두께가 얇아진 것이 사고의 인과요소가 될 수 있는지 여부를 검증하기 위해 CSB조사관들은 C-501의 상층 부분을 조사했고, 그 결과 금속 원래 두께의 단 30%정도만이 남아있었다는 사실을 밝혀냈다-절연상태 하에서의 외부 부식에 기인한 것으로 추정됨. 이러한 조사 결과로, 용기 건전성이 사고의 요인이 될 수 있는 가능성이 제기되었다. C-501의 설계도 ¹⁶⁾와 명판에는 15 psi(평방인치당 파운드)의 ¹⁷⁾ 설계 압력이 명시되어 있다. 열안정성 실험이 수행되었을 때, 실험실 내부의 압력은 실험장치가 가동 중단되기 이전에 약 240 psi에 이르렀는데, 이는 용기 내부의 압력이 이 값을 상회하였을 것으로 추정된다.

열안정성 실험을 수행한 전문기관은 분해 작용으로 인해 증류탑 내부에서 생성된 최종 압력이 3,800psi로 높게 나타날 수 있음을 산출했다. 용기의 벽 두께가 얇아지지 않았다고 하더라도, 증류탑은 이러한 압력을 견뎌내지 못했을 것이다. CSB는 용기 벽 두께가 얇아지지 않았다고 해도, 용기는 결국 파열되었을 것이라는 결론을 내렸다.

16)MNT탑(AS-501)아닐린 공장, First Chemical Corp., Pascagoula, Mississippi, Dwg. No. E1552-305A.

17)용기의 설계압력에는 일반적으로 안전 요소가 포함된다는 점에 주목할 필요가 있다. 용기는 파열되기 이전에 설계 압력보다 다소 높은 압력에 견딜 수 있을 것으로 간주되었다.

3.0 사고 분석

FCC사의 폭발사고에 원인이 된 요소들은 다음과 같다:

- 연속 공정장치에서의 열분해 작용에 따른 잠재적 위험성에 대한 이해 부족
- 치명적인 누출사고를 방지하기 위한 공정 모니터링 및 관리에 부적합한 계기
- 효과적인 열원 차단 시스템 부재
- 차단 밸브의 누출을 일으킬 수 있었던 부적절한 예방정비

본 사고의 영향은 제어실의 위치 및 구조에 대한 부적합한 평가, 그리고 지역주민에 대한 통보의 부재 등으로 인해 더 많은 피해가 발생했다.

3.1 반응성 화학물질의 위험관리

3.1.1 모노니트로톨루엔의 배경

10월 13일의 사고와 관련된 증류탑(C-501)은 3종류의 서로 다른 MNT 이성체로 구분되어 있다. Bretherick(1999)은 폭발은 혼합된 니트로톨루엔 이성체를 분리하기 위한 분별증류가 수행되는 동안, 이들 물질이 과도하게 가열되었거나 장시간 동안 적정온도 이상을 유지했을 때 발생했다고 지적하고 있다. MNT는 190℃(374°F; Lewis, 1996)이상 온도에서 가열되는 경우 폭발적으로 분해하게 된다.

3.1.2 회분식 증류(batch distillation) 공정의 위험성 평가

MNT의 이성체는 회분식 또는 연속 증류 방법 중 하나를 사용하여 분리될 수 있다. #1MNT 증류탑(C-501)은 연속공정식 이었다. (예, MNT원료가 연속적으로 주입되면, 다른 이성체에서 끓는점이 낮은 물질을 분리하기 위해 연속적으로 가열된다). FCC사의 담당자들은 MNT가 연속작동 증류기 내부에서 분리될 때 MNT가 안정적일 것으로 생각했다. 그들은 온도 또는 압력이 MNT증류기에서 급속하게 상승되었던 이전의 사고를 생각지 못했다.

1996년, Pascagoula 공장은 이미 현장에 설치된 증류탑을 사용하여 MNT 이성체의 추가 분리작업을 수행하기로 결정했다. 분리작업은 특정 양의 물질을 “회분식” 증류탑으로 주입한 다음 적당량의 ortho-MNT가 증류될 때까지 예정된 온도에서 가열하는 회분식 기법을 적용하여 수행되었다. 회분식 증류공정은 연속공정에 비해 더 많은 양의 재고 물질을 필요로 하는 방법으로, 공장에서는 이전에 수행된 적이 없었다.

연속증류와는 대조적으로-사고발생 이전에 공정 위험성 평가(PHA)가 수행되지 않았던-FCC사는 1996년 3월, 회분식 공정설비에 대한 PHA를 수행했다. PHA에는 MNT의 열안정성과 관련된 참조문헌 조사와 이전 사고와 관련된 물질에 대한 자료조사가 포함되었다. 이러한 노력의 결과로, 절차서에 운전한계가 추가되었고, 개선 권고사항이 작성·적용되어 회분식 용기에 안전조치가 추가되었다.

이메일과 부서간 공지사항에 문서화된 최소한 한 개의 자료출처에 따르면, 안전한 증류온도는 374°F(190°C)이하로 되어 있었다. 이 자료에는 회분식 증류기에 주입되는 자료에 대한 발열온도(exotherm)¹⁹⁾ 시작 값이 약 365°F에서 감지되었던, FCC사가 의뢰하여 수행된 실험에서 시작 값이 열량계(ARC)¹⁸⁾가속율과 일치되었다고 명시되어 있었다. 증류기가 운전되는 안전 조건은 <370°F에서, 고온 경보는 400°F로 설정되어 있었으며, “발열온도 발생가능성은 항상 존재하지만, 열이 지속적으로 물질에서 제거되는 경우, 자체 가열은 확산되지 않는다” 라고 명시되어 있었다.

FCC사는 추가 열안정성 실험을 수행하기 위해 2개의 연구소에 실험을 의뢰했다. 상기 연구결과가 요약된 문서에는, 니트로톨루엔 이성체는 250°C(482°F)이상에서 가열되지 않는 한 열안정성이 확보될 수 있으며, 370°C의 사용온도에서는 “100°F의 안전 여유분”이 가능하다고 제시되어 있었다. 그러나, 2 연구소 중 한 곳은 실험보고서에서 다음과 같은 사항에 주의할 것을 지적하고 있었다:

...고온에서의 장시간 노출은, 발열 감지 시점이 낮다고 하더라도, 화학반응에 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 이러한 화학물질은 이전에 유지된 온도에 좌우되어 본 실험에서 나타난 온도보다 낮은 온도에서 분해작용을 일으키게 된다.
(이탈릭체는 강조문구임)

18)ARC는 화학적 분해반응의 온도-시간 및 압력-시간을 제공하기 위한 측정기법이다.

19)발열반응은 에너지의 방출에 의한 것이다.

3.1.3 회분식공정의 계측제어

1996년 4월, 회분식 증류탑을 가동하기 이전에 PHA 개선 권고사항이 적용되었는지 여부를 확인하기 위한 목록이 작성되었다. 개선 권고사항 중 하나는 증류탑의 온도가 지나치게 높은 경우, 재비기로 유입되는 열매체(예, 고온유)의 흐름을 중지시키기 위한 연동장치(interlock) 추가였다. 증류탑에는 용기의 내부 압력이 지나치게 높은 경우(예, 진공파괴로 대표되는) 재비기로 유입되는 고온유의 흐름을 중단시키는 연동장치가 역시 포함되었다.

3.1.4 회분식공정 절차

회분식 증류탑(AS-310)에서 증류작업을 수행하기 위한 절차에는 “안전 항목”이 붙은 주석이 포함되어 있었다. 주석 내용 중 하나는; “증류탑 바닥 온도가 화씨 400도를 초과할 시에는, 고온유 주입 가동을 중단하고 바닥면 온도를 면밀히 관찰할 것”이라고 명시되어 있었다. 두 번째 주석은 “물질이 파괴”될 수 있으므로 작업담당자는 증류탑의 온도가 1시간 이상 395°F를 초과하지 않도록 각별한 주의를 기울이라는 내용이 기재되어 있었다. 다른 주석 내용에는 작업관리자들은 “원하는 진공조건이 적용 불가능한 경우 증류탑에서 열이 남아있지 않도록 특히 주의!” 하라는 내용이 언급되어 있었다.

3.1.5 모범관리기준

화학반응성 관리의 핵심 경쟁력이다. 화학공정안전센터는 최근 *Essential Practices for Managing Chemical Reactivity Hazards*(화학반응 위험성 관리 필수 사항)(CCPS, 2003)를 발간했다. FCC사에 있는 MNT회분식 및 연속공정의 설계 및 운전이 상기 발간물이 출간되기 이전에 시작되었지만, MNT 회분식 증류와 연관된 대부분의 공정단계는 CCPS지침과 일치한다.

CCPS가 권고하는 공정단계에는 화학반응성 위험에 대한 수집, 식별 및 실험; 반응성 위험도 평가; 통제 및 관리 수립; 계획 검토 및 감사 등이 포함되어 있다. FCC의 관련 참고문헌 조사는 열안정성; 안정성 확인을 위한 추가 실험; 위험성 평가를 위한 PHA수행; 고온에 기반한 열 유입 중단 연동장치 추가를 포함한 권고사항 적용; 그리고 운전절차상의 명확한 경고표시 등 효율적이 계획을 수행하기 위한 모든 필수 항목들에 초점을 맞추고 있었다.

회분식증류와 관련되어 취해진 조치는 공정이 개발되었을 때의 안전성을 제시하고 있다. 그러나, 회분식공정의 평가 결과를 연속공정 장치에 적용할 수 있는 체계가 없었다. MNT 연속 공정장치를 위한 위험성 평가체계가 없었던 것은-이 경우, 진행중인 생산 공정-잠재

적 위험성이 제대로 인식되지 않았거나 적합하게 관리되지 않았기 때문이었다.

사고 발생 당시, 이전에 AS-310에 적용된 것과 유사한, MNT연속공정 증류탑(C-501)으로 전달되는 열원을 차단하기 위한 고온 연동장치가 없었다. 또한, C-501의 운전절차에는 AS-310절차에 명시되었던 주의사항이 강조되지 않았다.

회분식 증류탑에서는 C-501에 비해 훨씬 많은 양의 물질이 처리되었다. 뿐만 아니라, C-501은 성공적으로 운전되어 왔었다. 이러한 요인으로 인하여, FCC사는 두 종류의 공정에 대한 위험성 평가의 접근방식을 달리 하였고 C-501에 대한 사전 위험성 평가를 수행하지 않았다. 그러나, C-501과 관련된 작동에 있어-공정이 가동 중지될 시, 증류탑 내부에 물질을 남겨두고 열원의 차단 여부를 검증하지 않은 것-사고 당시 용기 내부의 조건은 회분식 증류탑과 유사한 상태로 있었다.

3.1.6 교훈 적용

CCPS (2003)에는 다음과 같은 내용이 명시되어 있다:

조직내의 다양한 공장시설에는 유사한 화학반응 위험성이 내재되어있거나...
관련 위험성을 제어하기 위한 유사한 기술을 사용한다. 이러한 경우, 개선된 업무
활동의 임무를 수행하기 위한 사내 부서 또는 담당자의 효율성이 높아지게 된다...
이로써 사고관련 정보를 전달하고 공장시설간의 업무를 효율성을 높일 수 있다.

상기 언급된 내용이 서로 다른 시설간에 모범사례를 교환하여 공유하는 것을 목적으로 하지만, 이는 동일한 시설에서 서로 다른 공정에 적용될 수도 있다.

MNT 연속공정은 회분식 공정에서 사용하는 것과 동일한 물질을 처리했다. FCC사가 연속 공정에서의 위험성을 사전에 식별하기 위한 계획을 수립하거나, 회분식 공정의 위험성 평가를 통해 확보한 정보를 광범위하게 적용했었다면, 추가적인 하드웨어 및 관리적 안전지침이 수립되었을 것이다. 새로운 정보를 확보했을 때 평가수행의 사전적 접근방법은 기존 장치 또는 절차가 변경된 경우에 한하여 수행되는 것이 바람직하다.

3.2 모니터링 및 제측제어

#1 MNT 증류탑(C-501)은 분해작용을 일으킬 수 있는 물질을 처리하고 있었다. 그러한 물질을 안전하게 처리하기 위한 주요 요건은 표시기, 경보, 그리고 운전제어 등의 적합한 장치를 장착하는 것이다. 표시기와 경보는 장애 발생을 작업관리자에게 알려준다. 기타 보호장치로, 운전제어는-안전 연동장치 및 비상가동중지(ESD)시스템 등과 같은-문제점을 자

동적으로 시정하기 위한 표시기에서 출력된 정보를 사용한다. 이러한 장치들은 장치가 가동중지상태 연장 등과 같은 비정상적인 운전조건 하에서도, 항상 작동 가능한 상태로 되어야 한다.

Guidelines for Engineering Design for Process Safety(공정안전의 공학설계 지침), CCPS (1993a)에는 보호장치 개념은 제어 시스템의 설계에 적용되며: “ 유해한 물질을 처리하는 설비는 다중안전망으로 설계되어야 한다” 라고 명시되어 있다. CCPS는 동일한 사건에 적용되는 다중보호장치는 필요 시 적용 가능한 확실한 보호수단을 확보하기 위해 필수적이라는 점을 재차 강조하고 있다. 자동 안전연동장치시스템(SIS)이나 ESD시스템은 1차 보호장치가 장애를 일으켜-경고경보, 작업자 감독 및 수동식 조정 등과 같은-변경내용을 시정하지 않는 경우 보호장치 역할을 한다. 일부 공정에서는, 온도가 급상승하는 경우 열을 제거하기 위한 급냉시스템(quench system)을 필요로 하게 된다. 1996년, 상온에서 재비기로 유입되는 고온유를 차단하기 위해 MNT회분식 증류탑(A-310)에 설치된 연동장치는 운전 제어의 한 예이다(3.1절 참조).

앞서 언급한 바와 같이, FCC사는 C-501에 계측제어설비의 부족에서 알 수 있듯이, 연속 공정을 통한 MNT 취급의 잠재 위험성을 평가하지 않았거나, 충분히 이해하지 못했다. 증류탑 하부에서 상단에 설치된 6개의 온도계는 사고 당시 작동하고 있었다. 온도계는 DCS 신호를 작업관리자의 컴퓨터 스크린으로 전송했다. 그러나, 회분식 증류공정과는 달리, 온도계에는 경보기능이 없었고, 온도가 지나치게 상승된 경우 증류탑으로의 열 유입을 차단할 수 있었던 연동장치가 증류탑에 설치되어 있지 않았었다.

Practices for Managing Chemical Reactivity Hazards(화학반응 위험성관리 필수 사항)에는 기본공정 제어 시스템과 예방적 안전조치는 반드시 고차원적으로 설계, 작동 및 운영되어야 한다고 강조하고 있다(CCPS, 2003). 기본공정 제어 시스템과 SIS 모두를 평가하기 위한 분석기법은 새로운 시공 사안에서만 국한된 것이 아니라, 실제 운전에도 적용된다(CCPS, 1993).

ANSI/ISA-84.01²⁰⁾에는 계장(감지기, 경보 및 가동중지 등을 포함하여)을 위한 적합한 안전시스템 단계를 결정하는데 필요한 다음과 같은 단계가 명시되어있다:

- PHA 수행
- 위험성 평가
- 보호장치 적용
- 추가 안전조치가 요구되는지의 여부 결정.

ANSI/ISA-84.01은 상기 단계에 대한 특정 지침을 제공하지 않기 때문에, 각 업체는 위험성 평가를 위해 적합한 도구를 선정해야 한다.

1996년 회분식 증류탑이 재가동 되었을 당시, FCC사는 PHA를 수행하였고, 용기 내부의 온도가 지나치게 높은 경우 재비기로 열매체가 유입되는 것을 차단하기 위한 추가 연동장치에 필요하다는 결론을 내렸다. 그러나, C-501을 대상으로 PHA를 수행하거나 수행결과 수준의 계측제어설비를 제고하였다는 어떠한 증거도 없었다. 증류탑을 보호하기 위한 마지막 방어선은 종종 방출장치이다(3.5절 참조).

FCC사는 공정 모니터링 및 공정관리를 위한 장치 감사를 통해, ANSI/ISA-84.01에 명시되어 있는 사항과 유사한, 장치 및 관리를 위해 요구되는 레벨을 결정하기 위한 평가시스템을 확보할 수 있는 기회가 있었다. 그러한 감사를 통해 필수 안전장치가 공장설비 전체에 일관적으로 설치되었었다면, C-501에 대한 추가 안전조치가 수립되었을 것이고 따라서, 10월 13일의 사고를 사전에 예방할 수 있었을 것이다.

3.3 안전작업 지침

안전작업에 대한 효과적인 교육훈련, 표준화된 절차, 그리고 의사소통은 공장설비 전체를 통해 완벽하고 일관된 작업을 수행하기 위한 필수 요소이다. 3.1절에서 언급된 바와 같이, FCC사는 안전작업지침을 확보하기 위한 효율적인 시스템 부재로 가시화된 연속공정을 통한 MNT 취급의 잠재적 위험성을 평가하지 않았거나 완전히 이해하지 않았다.

효율적인 운전절차서에는 다음의 사항이 포함되어야 한다:

20)미국표준협회(ANSI)와 미국장치학회(ISA)가 공동 출판한, *Application of Safety Instrumented System for the Process Industries*(공정 산업의 계장 시스템 적용)는 고온 연동장치 등과 같은 안정장치 시스템의 설계, 작동 및 관리 방법에 대한 지침을 제공하고 있다. 기타 업계 표준으로는 국제전기표준회의(IEC, 2003)에 명시된 기준들이 있다.

- 모든 예측 가능한 원인과 가동중지 이후 가동에 대한 연장된 정지가동 등과 같은 비정상 적인 상황을 포함한 모든 작동모드에 대한 검토.
- 증류탑이 가동 중지된 경우에도, 모니터링을 위한 필수적 공정변수 명시(온도 등과 같은).
- 공정내 처리되는 물질의 위험성, 운전한계, 그리고 한계를 초과한 경우 취해야 하는 조치 등과 관련된 정보 제공.
- 차단 등과 같은 주요 과제를 완수하기 위한 방법 명시.

FCC사의 C-501에 대한 운전지침 절차는 “ #1 MNT 증류기/#2 MNT 증류기 및 톨루엔 스트립퍼” ²¹⁾라는 제목으로 되어있다. 이 지침에는 MNT 특성, 물질의 잠재적 불안정성, 또는 안전운전 한계 및 이상운전 결과 등에 관한 주의사항이 포함되어 있지 않았다. 이와는 대조적으로 MNT 회분식 공정 ²²⁾ 운전절차에는 온도가 400°F를 초과할 경우 열원을 차단하기 위해 요구되는 운전 및 주의사항 등이 포함되어 있었다. 회분식 공정 절차에는 자체 가열 시 취해야 하는 조치에 관해서도 언급되어 있었다.

비상가동정지 절차가 명시된 항목에는 스팀 장애(오버헤드 추출물인 것으로 추정됨)또는 냉각수 장애 등이 발생하는 경우 C-501의 가동중지 방법을 작업관리자들에게 제시하고 있다. 그러나 이외의 다른 상황-9월 22일, 작업관리자들이 다른 공정의 업무를 지원하기 위해 증류탑을 차단했던 것과 같은-에 대해서는 언급되어 있지 않았다. 스팀 장애의 경우, 작업관리자들에게 “ 수동으로 스팀을 재비기 제어밸브로 전환하여 잠긴 상태로 놓고” “ 각 재비기에서 응축물이 되돌아오지 못하도록 차단” 할 것을 지시하고 있었다.

유량밸브는 차단용 밸브로 설계되지 않았다. 지시 내용은 작업담당자가 라인을 차단하기 위해 필요한 조치라는 사실을 인지하고 있다고 해도, 재비기에 연결된 스팀 라인이 이중차단 및 유출(double-blocked-and-bled: DBB) ²³⁾되어야 하는지에 관해서는 명시되어 있지 않았다. 또한, 사고 당시 작업에서는, 보다 효과적으로 차단될 수 있었던 맹판이 스팀라인에 설치되지 않았었다.

21) #1MNT증류기/ #2 MNT증류기 및 톨루엔 스트립퍼, 문서번호. 1201.003-1003, 개정안 11, FCC.

22)AS-310 MNT증류, 문서번호, 1201.003-1702, 개정안 6, FCC

23)이중차단 및 유출(DBB)과 맹판은 물질을 차단하기 위한 두 가지 방법이다. DBB의 경우, 2개의 밸브가 잠기고 이들 밸브 사이에 배수(drain)가 열린 상태로 있기 때문에 축적된 물질은 밸브가 아닌 배수를 통해 흐르게 된다. “ 맹판” 은 물질유입을 차단하기 위해 배관에 설치된 고정판이다.

통상적으로, 가동중지 시 증류탑 내부의 물질을 남겨두기는 하지만(정비작업에 들어가지 않는 한), 운전절차는 가동 중지 기간 동안 증류탑 내부의 조건(온도를 포함해)을 모니터링 하는 어떠한 지침도 제시되지 않았다. 10월 5일부터-보일러가 재가동된 시기-사고가 발생한 날까지, 증류탑 내부의 온도는 지속적으로 상승되었고 회분식 증류 절차에 명시된 400°F를 이미 초과하고 있었다.

운전절차와 함께, 현행 조건 및 훈련교육에 관한 의사소통은 공정설비를 안전하고 효율적으로 운전하기 위한 핵심 사안이다. 효율적인 교육훈련은 직원들에게 정상 및 비정상 상황에서 안전하게 작업을 수행하는 방법을 가르치게 된다. CCPS(2003)는 의사소통과 교육훈련은 화학반응 위험성을 관리하는 프로그램을 개발하는 경우 간과해서는 안된다고 지적하고 있다: “ 모든 작업담당자들은 공정이 비정상적인 범위에서 작동하는 경우 어떠한 결과가 발생하는지에 대해 숙지하고 있어야 한다” . C-501 상층부 트레이의 축적레벨이 분해작용의 원인은 아니었지만, 액위경보는 공정이 작동불능 상태에 있을 때 전송되었다. 경보는 컴퓨터 스크린에 전송되었지만, 이후 어떠한 조치도 취해지지 않았다. 모범 운전사례에는 경보내용을 평가하고 왜 작동하였는지를 결정하는 내용이 포함되어야 한다.

3.1절에 언급된 바와 같이, 연속공정 MNT와 관련된 위험성을 식별하는 체계의 부적합성은 물질이 열에 민감하게 반응하는 것에 대해 제대로 이해하지 못하는 결과를 가져왔다. 장치가 작동하지 않을 때-그리고 열이 제거되지 않을 때-MNT는 온도 상승을 막기 위해 열원으로부터 반드시 차단되었어야 했다. 포괄적인 교육훈련 프로그램이 시행되었다면, 위험성을 평가하고 해당 결과가 작업 담당자들에게 전달되었을 것이다.

효율적인 체계가 수립되었었다면, 장치를 차단하기 위한 작업에 필요한 모든 단계가 적용되어 일관되게 시행되고, 물질의 위험성 정보가 전달되며, 운전절차는 관련정보를 체계화하여 적용되었을 것이다. 스팀 공급이 증류탑에서 효과적으로 차단되었다면, C-501에 물질이 저장되어 있었다고 해도, 치명적인 사고의 결과로 이어진 일련의 사고는 발생하지 않았을 것이다. 또한, 증류탑 내부에 저장된 물질이 가열되는 시간 동안 증류탑의 온도가 모니터링 되었었다면, 작업관리자들은 즉각 시정조치를 취했을 것이다.

3.4 유지보수 계획 및 장치 건전성

유지보수는 설비작동을 보완하며 장치의 기계적 건전성을 확보함으로써 공정안전에 기여한다. 유지보수계획 및 이행은 공정 시스템의 안전 및 효율적인 작동에 필수요소이다. 부식, 침식, 그리고 성능약화는 장치의 장애 원인이 되어, 공정 물질이 장치로 유입되거나 방출되는 결과를 야기시킬 수 있다.

공정안전관리를 위한 예방정비작업의 중요성은 지나치게 중요시될 필요는 없다(CCPS, 1995c). 효과적인 예방정비계획은 부식, 침식 및 성능약화 등과 같은 조건에 취약한 공정 장치의 감사 횟수를 정하는 것이다.

3.4.1 스팀 밸브

FCC사의 MNT시스템 유지보수작업은 덜 적합한 수준이었다. 재비기 스팀공급밸브가 제 기능을 다하기 위해 요구되는 유지보수 작업이 무엇인지를 결정하기 위해 검토되었었다는 증거가 없다. 주요 스팀차단밸브에 대한 사고 이후 실험 결과, 밸브 시트는 “잠긴” 상태에서 다량의 스팀이 누출되었다는 사실이 밝혀졌다. 이렇듯 통제되지 않은 그리고 인지되지 않은 스팀 유입은 #1 MNT 증류탑(C-501)의 장애발생 원인을 제공하게 된 것이다.

3.4.2 증류탑

FCC사의 공장 담당자들을 대상으로 한 탐문조사에서, 그들은 C-501의 작동온도가 외부 절연 및 탄소강 표면의 부식 조건 하에서 습기 축적을 방지할 만큼 충분히 높다고 생각했었다고 말했다. 이러한 추측을 토대로, FCC사는 강관의 상태를 모니터링 하지 않았다. 그러나, C-501 운전절차²⁴⁾에는 중간층(mid-bed)의 운전온도는 “약 300°F”로, 그리고 증류탑 상층부의 운전온도는 “약 140°F”로 명시되어 있었다.

CSB는 C-501의 한 지점에서 벽 두께가 초기보다 30% 감소하고 상층부에서 외부표면 부식을 확인하였는데, 이는 압력한계를 저감시키는 것이다. 얇아진 벽 두께가 사고의 원인을 제공한 것은 아니지만, 이는 당시 FCC사의 감사 및 유지보수계획이 부적합했다는 사실을 입증하고 있다.

3.5 과압 보호

#1 MNT 증류탑(C-501)은 미국기계공학회(ASME)의 압력용기 코드에 의거하여 설계, 제조 및 시험되었는데, 명판 정격에는 15 psig로 명시되어 있다. 3인치의 공칭압력 안전밸브(PSV-502)는 15psig의 설정 압력으로 탑상부의 스팀라인에 설치되었는데, 이는 과압으로부터 용기를 보호하고자 하는 것이다.

24)FCC 문서번호. 1201-003-1003, 개정안 11.

관련문헌과 시험자료에서는 MNT가 고온에 노출될 경우, 급격한 분해를 일으켜 다량의 스팀을 발생시키며 이는 탭 내부를 가압시킬 수 있다고 언급되어 있다. PSV는 반응폭주(runaway reaction)로 야기된 증류탑 내부의 최대압력에 충분한 용량을 갖추어야 한다.

화학반응 시스템에서 방출밸브 크기를 결정하는 것은 단순한 작업이 아니며 반응열역학(reaction kinetic)과 유량 특성에 관한 물리실험 자료를 필요로 한다. 연구실 실험 결과, MNT는 방출된 내용물질이 순수한 가스인지, 순수한 액체인지 또는 이 두 종류의 조합인지 여부를-일반적으로 2단계 유량으로 알려져 있음- 결정할 필요가 있음이 제시되었다. 순수한 액체 흐름과 2단계 흐름에는 대규모 용량의 방출밸브가 필요하다.

안전 연동장치 및 안전작업지침(앞서 언급된) 등과 같은 폭주반응을 예방하기 위한 효과적인 안전지침이 수립되어 있지 않은 상태에서, FCC사는 열분해 반응 시 C-501을 보호하기 위한 수단으로 PSV에 전적으로 의지했다. CSB는 PSV의 용량이 증류탑의 과압 및 치명적인 장애를 예방하는데 부적합했다는 결론을 내렸다.

열안정성 실험의 일환으로, CSB가 의뢰한 시험기관에서는 설계압력이 15psi인 C-501 용기에는-탑상부의 스팀 라인에 설치한 경우-직경 58인치의 방출밸브가 있어야 한다고 산출했다. 지나치게 용기 크기가 클 경우에는 방출장치의 개수를 증가시키거나 위치를 변경시키는 등 다른 방법이 필요하다.²⁵⁾

FCC사가 C-501에 설치된 PSV의 설계기준 관련 문서를 비치하지 않았기 때문에, CSB는 당시 상황을 확인할 수 없었다. 미국석유협회(API) 권고사항(RP)-521, *Guide for Pressure-Relieving and Depressuring Systems*(압력방출 및 감압 시스템) 기준에는 화학반응을 포함해 안전밸브에 요구되는 용량을 결정하는데 있어 몇 개의 시나리오가 반드시 고려되어야 한다고 명시되어 있다. API는 압력방출 관련 사안에는 정상 및 비정상 조건 모두에서 산출된 스팀 생성량이 포함되어야 한다고 언급하고 있다. 압력방출 장치가 실제로 압력을 조절할 수 없는 경우, 자동 가동중지 시스템을 포함해 장치의 파손을 예방하기 위한 기타 설계 전략이 적용되어야 한다.

25)방출장치의 위치와 크기는 용기의 과압 보호 검토 시 반드시 고려되어야 한다. Kister(1990)는 패킹 지지대 바로 아래에 있는 탭 저부의 스팀공간이 압력방출장치가 설치되는 장소로 적합할 것이라고 언급하고 있다. 증류탑 상층부의 장치가 작동 불능 상태에 있었을 때, 낮은 곳에 장착된 방출장치가 과압을 방지했던 경우가 한 건 있었다.

FCC사가 C-501에 대한 과압 보호를 평가하기 위한 효율적인 시스템을 수립했었다면, 방출밸브의 부적합성이 제시되었을 것이다. 그렇게 되었다면, 과압 보호계획에 대한 포괄적인 검토(예, 위치, 크기, 및 방출밸브 수)와 분해반응을 방지하기 위한 추가 안전지침이 도출되었을 것이다.

3.6 제어실 구조 및 위치

사고발생 당시(5:25 am) 제어실에 있었던 3명의 직원은 제어실 문의 깨진 유리조각 파편으로 인해 부상을 당했다(그림 10참조).

아닐린 공정(MNT 증류탑을 포함해) 제어실은 천장과 벽면이 금속판으로 된 사무실 블록으로 시공되었다. 건물은 #1 MNT 증류탑(C-501)으로부터 약 50피트 정도 떨어진 곳에 위치하고 있었다. 폭발사고로 인해 건물의 벽체와 천장의 구조물이 파손되었다(그림 9 참조)



그림 9. 파손된 제어실 천장과 문

시설부지 지침서-특히 CCPS와 API에서 발간한-에는 화학 및 석유화학관련 업계에서의 제어실 위치 및 구조에 관한 내용이 명시되어 있다. API RP-752(1995)는 화학제조사협회(현행 미국화학위원회[ACC])의 공정안전코드에 명시된 내용을 제공하기 위해 작성되었다. FCC사는 사고 발생 당시 CMA의 이전 회원사였고 SOCMA(공정안전코드를 채택한)의 회원사였다

API RP-752에는 이용률(occupancy) 스크리닝을 시작으로 위험성 식별, 건물 평가, 및 위험관리 등으로 이어지는 단계별 분석이 포함되어 있다. 상기 내용은 신축 또는 기존 건물 모두에 적용된다. 지침서에는 일부 업체들은 제어실 이용률이 높은 레벨의 분석을 필요로 하는 경우 이를 산출하기 위해 주당 200에서 400인력 시간의 범위를 적용하고 있다고 언급되어 있다. FCC사의 아닐린 공정 제어실은 이러한 범위의 이용률을 초과했다. 최대 이용률-또는 일정한 기간 이내에 수용되는 인원 수(예, 생산 및 안전 회의 등과 같은)-또한 고

려되어야 하는 사안이다. 이용률에 감안되어야 하는 기타 사안으로는 건물 대피능력인데, 이와 관련하여 API RP-752에는 다음과 같이 명시되어 있다:

폭주반응 또는 화학 및 열분해반응을 일으킬 수 있는 공정물질은 독성, 화재, 또는 경고 정도가 미약하거나 없는 폭발 등을 일으킬 수 있는데... 건물 대피는 실행 가능하지 않은 옵션이다.

API RP-752에는 관련물질로 화학적 분해반응을 일으켜 폭발할 수 있는 성분 목록이 나열되어 있다. CCPS(1996)은 관련 공정에는 통제불능의 화학반응을 일으킬 수 있는 것들이 포함되어 있다고 명시하고 있다. 위험물질 방출의 잠재적 결과를 산출하기 위한 방법에는 TNT-equivalency, multi-energy, 그리고 Baker-Strehlow 등이 포함된다. Dow Fire, 폭발지수 그리고 Mond Index 등과 같은 위험성 평가 도구들이 건물의 우선순위 설정에 사용될 수 있다.

지침서의 마지막 단계는 위험성 평가 그리고 예방 또는 완화 조치의 필요성 여부를 결정하는 것이다. 예방조치에는 추가된 과잉 장치와 비상가동정지 또는 폭주반응의 발생가능성을 저감시키기 위한 공정조건 또는 물질 변경 등이 포함된다. 완화 조치에는 건물의 창문을 없애거나 다른 재질로 바꾸는 것, 또는 압력에 대한 저항성을 강화하거나 구조를 바꾸는 것 등이 포함된다.

FCC사가 그러한 분석을 수행했었다면, 제어실의 위치 및 구조가 직원들에게 위험할 수 있다는 결론을 내렸을 것이다. 이러한 결론이 도출되었다면, 고에너지 물질이 흐르는 증류탑에 장치를 추가 설치하는 예방적 조치나, 또는 제어실의 창문을 없애고 고정식 문을 설치하고, 벽체를 보강하거나 제어실의 위치를 옮기는 것 등과 같은 완화적 조치를 취했을 것이다.

3.7 공정정보 및 기록보존

CSB는 조사 기간 중 절차, 실험자료, 및 장비 파일 등을 검사했다. 그러나, FCC사가 작성한 일부 정보는 불충분했거나 잘못되어 있었다. 예를 들어, #1 증류탑(C-501)에 장착된 방출밸브의 배치 관련 내용이 기록된 정보는 없었다. 따라서, CSB는 MNT에 대한 이후 실험에서 이러한 물질을 취급하는데 있어 충분히 고려하여야 할 열분해 반응을 대비한 밸브 크기를 결정하지 않았더라는 것을 제외하고는, 설계 단계에서 발생한 문제점이라는 결론을 도출할 수 없었다.

CSB는 제어실의 위치 및 구조와 관련하여 이전에 평가된 자료를 FCC사에 요청했다. FCC사의 담당자는 그러한 평가가 수행되었으나, 문서화 되어있지 않았다고 말했다. CSB는 직업안전 및 보건관리청(OSHA)의 공정안전관리(PSM) 기준, 29, CFR 1910.119 의 요구사항에서 MNT증류공정 부분이 제외되어 있는 문서를 찾아냈다. FCC사의 담당자는 평가가 수행되었지만, 문서화 되어있지 않았다고 반복했다(관련기준 분석과 관련된 3.10절 참조).

CSB의 요청 하에, FCC사는 MNT와 관련된 2종류의 물질안전자료(MSDS)를 제공했다. 1992년, MSDS에는 MNT와 관련하여, “ 392°F에서 서서히 분해 반응” 이라고 기록되어 있었다. 이러한 주의 사항이 실험 및 관련문헌 조사에서 MNT의 열분해 반응이 제기되었을 때, 1996년 MNT회분식 공정 이후 작성된 것임에도, 1998년 MSDS에는 포함되어있지 않았다.

MNT연속공정은 정보가 전산화되기 이전인 1960년대 말에 가동되었다. FCC사의 담당자는 그러한 정보는 회사 직원들이 퇴사 했을 때(감원, 퇴사 또는 퇴직 등으로 인한) 일부 유실되었고, 공장설비의 일부분이 Albermarle에 매각된 기간 중에 일부 문서가 외부로 유출되었는데 이후 회사로 반환되지 않았다고 말했다. 담당자는 태풍으로 인해 일부 문서가 유실되었다고 말했다.

포괄적인 정보관리시스템은 안전작업을 수행하기 위한 필수 요소이다. 작업 담당자들은 공정 물질 및 장치의 안전관련 정보에 반드시 접근할 수 있어야 한다. MSDS나 FCC사의 운전절차 어디에도 MNT와 관련된 주의사항이 포함되어 있지 않았다. 3.1절에서 언급한 바와 같이, 위험성 평가를 수행할 수 있는 체계가 없었고 다른 공정에서 얻은 교훈이 적용되지도 않았다. 정보관리 및 배포를 위한 포괄적인 체계가 수립되어 있지 않다는 것은, 설령 위험요인이 평가되어 잠재적인 위험성의 결과가 알려졌다고 해도, 이와 관련된 정보는 효과적으로 전달되지 않았을 것이라는 것을 의미한다.

3.8 지역주민에 대한 통보

효율적인 통보체계는 사고가 발생했음을 지역주민에게 알리고 상황이 종료될 시점에 관한 정보를 주민에게 제공한다. 경보체계나 공고 사항 이외에도, 이는 지역주민들이 자신들을 보호하기 위한 적합한 조치를 취할 수 있도록 해당 지시사항을 알려준다.

CSB는 비상대응 및 지역주민에 대한 통보 체계를 조사했다. 이 과정에서 지역 비상계획위원회(LEPC)와 지역주민을 위한 회의를 열었다. 또한 지역주민에 대한 통보 및 비상대응 모범 사례를 확인하기 위해 주택가에 인접한 여러 개의 산업 지역을 조사했다. 이 조사에서 사이렌 및 911긴급전화 시스템을 포함해 화학 사고와 관련된 정보를 전달하는 다양한

방법이 조사되었다. 사고 지역 주민들은 대피령 절차를 훈련 받아오고 있었다.

CSB는 Jackson County의 공공정보 시스템이 비효율적이라고 결론지었다. 대피령이 발동되었지만, 이러한 내용을 매체를 통해 지역 주민에게 효과적으로 전달되지 않았다. 이는 지역주민과 인근 업체들이 적절한 조치를 취하도록 하기 위한 필수적인 단계로 간주되어야 했다. 또한, 대피령이 발동된 경우 어떠한 행동을 취해야 하는지를 알려주는 지역공동체의 교육·훈련 프로그램을 개선할 필요가 있었다. 사고발생 이후 연기가 주택지역을 벗어나게 됨을 알리는 풍향의 모니터링 및 분석이 있었지만, 주민에게 적시에 정보가 전달되었다면 불안감이 확산되지 않았을 것이다.

지역 소방 및 경찰 당국, Chevron 정유공장 소방부서, 미국해안경비대, 그리고 County 보안당국을 포함해, 여러 County, 주, 및 연방정부기관들, 그리고 인근업체들이 사고 진압에 동원되었다. 경찰과 소방당국은 신속히 Bayou Cassotte 산업도로를 봉쇄했고, 보안당국은 대피령을 선포했다. 미연방항공국은 항공기 안전을 위해 공장시설과 주변 지역에 “비행금지구역”을 선포했다. 주 및 연방 EPA는 사고 현장에 도착해 공장 외국지역에 임시 환경감시국을 설치했다.

FCC사의 야간 근무교대 감독관은 현장 사고 총지휘관 임무를 맡았다. 그는 공장의 소방부서와 협력하여 직원들의 도움을 받았고, 3명의 부상자를 병원으로 후송했다.

FCC사의 작업관리자들은 모든 공정과 공장시설을 신속히 가동 중지하고 차단시켰다. 사고 초동 진압반과 공정의 작업관리자들은 초기 폭발·화재에 신속히 대처했다.

3.9 이전 사고/유사사고 검토

3.9.1 Pascagoula 공장의 이전 사고

1986년 FCC사에서는 제3자에 의해 개발되고 있는 회분식공정에서 폭발·화재 사고가 있었다. 메타-클로로아닐린을 증류하기 위해 사용된 공정에서의 자체가열 폭주반응으로 방출장치 장비가 전복되었다. 이 사고는 증류탑에서 반응폭주가 진행되어 장치내 과압으로 발생하였으나, 반응폭주를 완화하기 위한 기준이 없었다. 증류탑이 파손되었고, 파편들은 공장 외부 지역으로 날아갔다.

개선 권고사항 중 한 개 항목이 기존 공정의 위험성 평가에서 수행되었다. FCC사는 이 사고에서 얻은 교훈을 MNT 증류시스템에 적용하지 않았다. 당시, 증류탑에 대한 안전시스템과 과압 보호 등에 관한 감사가 시행되었다면, 증류탑 설계와 작동상 문제점들이 식별되어

10월 13일과 같은 사고에 적합한 조치가 취해졌을 것이다.

3.9.2 유사 사고 검토

CSB는 유사한 물질 또는 유사한 인과요소를 갖는 사고들을 검토했다. 하기 명시된 각각의 사고는 유지된 온도가 안전하다고는 하나, 열적으로 불안정한 상태에 있는 물질과 연관되어 있다.

Hickson & Welch Ltd, 1992

1992년 9월 21일, 영국 Castleford에 위치한 Hickson & Welch Ltd사에서 발생한 사고로 5명(보건안전청[HSE], 1994)이 사망했다. 이 사고는 유사한 물질과 관련되어 폭발적인 열 분해반응으로 이어졌다. 작업자들은 다량의 디니트로톨루엔과 니트로 크레졸이 함유된 축적된 슬러지를 부드럽게 하기 위해, 3시간 동안 MNT증류공정에 적용된 증류기 스팀에서 사용된 증류기 청소작업을 하고 있었다.

HSE(보건안전청)는 잔류물이 폭주반응을 일으켜 폭연과 치명적인 화재가 일어났다는 결론을 내렸다. HSE의 조사결과에서 슬러지에 유기질소 화합물이 함유되어 있다는 사실이 발견되었는데, 이러한 물질이 장시간 동안 고온 또는 적정온도 이상에서 노출될 경우 열분해 반응을 일으킬 수 있는 것으로 알려졌다. 또한, HSE는 사고조사 결과에서 고위 경영진이 이전에 공장에서 발생했던 사고에서 이러한 위험물질이 있다는 것을 이미 알고 있었다는 사실이 드러났다. 회사는 경영진들에게 증류공장의 안전한 작업에 필요한 정보를 제공하기 위한 목적으로 열안정성 실험을 수행했었다. 그러나, Hickson & Welch사의 경영진은 특히, 잠재적인 열 불안정성을 감안하여 슬러지 물질의 특성을 규정하거나 위험물질을 제거하려는 시도를 하지 않았다.

Union Carbide, 1972

1972년 8월 7일, West Virginia에 소재한 Union Carbide 공장에서 디니트로톨루엔(DNT)²⁶⁾이 함유된 이송라인이 폭발했다(Bateman, Small, and Snyder, 1974). 이 사고는 몇 건의 다른 폭발과 규모가 작은 2차 화재에 이어 발생했고, 1명의 경상 부상자가 발생했다. 이송라인은 300피트 길이, 2인치의 수송관으로 지표면의 위와 아래에 위치하고 있었다. 이는 15에서 20psi의 압력을 유지하기 위해 스팀자켓에 장착되어 있었다.

26)디니트로톨루엔은 분자식에 하나의 니트로기가 추가된 모노니트로톨루엔이다.

당시, 이 물질은 안전하게 이송되거나 운전조건 하에서 물질이 흐르지 않는 정체 상태에 있을 것이라고 생각되었다. 사고 발생 이전, 이 물질은 약 10일 동안 배관내에 있었다.

내부 조사결과, 추가 열을 조절하는 스팀감압실(steam reduction station)중 하나가 오작동을 일으켜, 과열스팀이 약 210℃에서 물질을 가열시켰다고 결론지었다. Union Carbide의 담당자들은 DNT가 270℃ 이상의 온도에서 급격한 분해반응을 일으킬 것이라는 사실을 인지하고 있었으나, 스팀 온도가 210℃를 초과하지는 않을 것이라고 믿고 있었다. 시간-온도 관계를 조사하기 위한 수 차례의 실험이 수행되었다. 그 결과, 일정 시간 동안 다소 상승된 온도가 DNT의 안정성에 영향을 미친다는 사실이 밝혀졌다. 조사결과에 따라 최대작동온도가 낮춰졌고, DNT유지 시간이 축소되었으며, 이송라인의 연속온도 측정이 추가되었다.

American Cyanamid Co., 1969

1969년 10월, American Cyanamid사의 농약 생산에 사용되는 para-nitrometacresol (PNMC) 생산공정설비에서 폭발사고가 발생했다(Dartnell & Ventrone, 1971). 폭발사고로 1명의 작업자가 사망했으며, 3,000갤런의 스테인레스강 저장탱크가 5조각으로 갈라져, 탱크에서 25피트 거리 내에 있는 장비를 전복시켰고 작은 화재가 발생했다. 탱크에는 약 1,500갤런의 PNMC가 저장되어 있었다.

PNMC의 끓는점은 127℃로, 탱크의 온도는 물질을 유지하기 위해 135℃로 유지되었었다. 설계 시, 순수한 PNMC물질을 실험한 결과 200℃온도에서 안정성을 보였었다. 사고조사에서 탱크 내부의 PNMC온도가 폭발사고 이전 3일 동안 154℃의 상승된 온도로 유지되고 있었음이 밝혀졌다.

사고발생 이후 시행된 열안정성 실험에서 PNMC는 끓는점 이상의 온도에서 불안정한 것으로 나타났다. 온도 및 시간의 항목으로, 그 물질의 불안정성은 열과 직접적인 관련이 있는 것으로 나타났다. 조사결과와 핵심은 새로운 공정 흐름은 반드시 실제 공정작동 조건 하에서 실험되어야 한다는 것이었다.

상기 사고들은 방향족 니트로 화합물이 열분해반응을 일으킬 수 있으며 장시간 동안 상승된 온도에 노출될 경우, 예측된 “시작 온도”²⁷⁾보다 낮은 온도에서 반응한다는 사실을 입증하고 있다.

27)시작온도는 순간적이고, 일반적으로 급격히 분해될 수 있는 온도이다.

3.10 관련기준 분석

3.10.1 공정안전관리 기준

OSHA PSM 기준, 치명적인 유해 위험물질의 공정안전관리(29CFR 1910.119)는 독성, 반응성, 가연성, 폭발성 물질의 치명적인 방출을 예방하거나 피해를 최소화하기 위한 목적으로 제정되었다. 이러한 기준들은 137 OSHA의 “ 치명적인 유해·화학물질 ” 항목에 포함된 기준수량 이상을 갖고 있는 공정 ²⁸⁾에 적용된다. 화학물질은 독성 또는 반응성에 따라 분류되어있으며, 가연성 물질 또한 분류항목에 포함되어 있다.

137종의 화학물질 중 38종은 미국화재예방협회(NFPA)가 규정한 불안정성 등급 “ 3 ” 또는 “ 4 ” 에 해당하는 치명적인 화학반응 물질로 분류되어 있다. PSM 기준에는 MNT 이성체가 치명적으로 유해한 화학물질에 포함되어있지 않다. MNT는 인화점이 100°F이상이기 때문에, 가연성 물질에도 포함되어있지 않다. MNT는 NFPA의 가연성 및 반응성 등급 “ 1 ” ²⁹⁾에 해당된다(NFPA, 1996; pp 704-707).

PSM 기준에는 “ 공정 ” 을 상호 연결하는 용기들의 그룹으로 정의하고 있다. MNT는 톨루엔을 황산과 질산을 반응시켜 만들어진 다. 이 물질은 상압저장탱크로 주입되어 톨루엔 스트립퍼에서 분리되고 난 후 이성체 분리를 위해 증류탑에 보내진다. 톨루엔은 PSM 기준에 따라 가연성 물질로 분류된다. 그러나 FCC사는 MNT 공정을 PSM 기준에 적용시키지 않았는데, 이는 이전 평가에서 10,000파운드 이하의 톨루엔이 규정되었기 때문이다. 상압저장탱크의 하류의 톨루엔양은 10,000파운드 기준 수량 ³⁰⁾을 초과하지 않았다.

28)OSHA는 공정을 치명적인 화학물질의 사용, 저장, 제조, 취급 또는 그러한 물질의 현장 이송과 관련된 모든 활동, 또는 이러한 활동의 조합으로 정의하고 있다. 이러한 정의와 관련하여, 잠재적 방출과 관련될 수 있는 치명적인 화학물질이 저장된 상호 연계된 그리고 개별적인 모든 용기는 단일 공정으로 고려되어야 한다고 규정하고 있다.

29)NFPA의 위험등급체계는 소방당국과 비상대응팀에게 기본적인 정보를 제공하기 위한 목적으로 작성되었다. 여기에는 화재, 보건, 반응성 등급이 “ 0 ” 에서 “ 4 ” 까지의 범위로 분류되어있다.

30)이 같은 결론은 PSM의 적용범위는 가연성 물질이 공정과 연관되었다고 해도, 상압저장탱크에 저장된 가연성 물질 범위에 속하지 않는다고 판결한 행정재판관의 판결에 근거한 것이다. OSHA는 이러한 판결에 이의를 제기하지 않았다. 미국 노동부. v. Meer Corporation, OSHRC Docket No. 95-0341. 1995.

3.10.2 EPA 위험관리계획

EPA는 1996년, 위험관리계획(RMP), 사고방출예방 요구사항(40 CFR 68)을 발표했다. 이는 공장설비의 위험관리계획을 EPA에 제출하도록 하고 있다. RMP 기준에는 OSHA PSM 기준과 유사한 몇 개의 공정안전 요소가 포함되어있다. 그러나, 이들 기준간 차이점은 RMP 기준이 특정 가연성물질 목록을 명시 한데 반해, PSM 기준은 이들 물질을 가연성 물질로 포함시키고 있다. FCC사는 지정수량(예, 암모니아, 발연황산(oleum), 그리고 포름알데히드)을 갖는 “적용” 물질에 관한 위험관리계획을 제출했다. MNT는 RMP 적용범위의 화학물질 목록에 명시되지 않았다.

3.10.3 기타 관련 기준

OSHA는 업계전방에 걸쳐 모든 작업장에 적용되는 위험 에너지(잠금장치/꼬리표)³¹⁾ 관리에 관한 기준을 제정했다. 이는 담당자가 기계 또는 장치를 작동, 운전 또는 유지 관리할 때 의도하지 않은 에너지화, 가동 또는 에너지 방출을 예방하는 것을 목적으로 한다. 본 기준은 사업주가 에너지관리 계획을 수립하고 잠금장치/꼬리표³²⁾ 또는 에너지 차단 장치를 적용하며, 이를 적용하지 않는 경우 해당 장치의 운전을 하지 못하도록 하고 있다. Pascagoula 공장이 OSHA의 잠금장치/꼬리표 요구사항에 의거한 계획을 수립하기는 했지만, #1 MNT 증류탑(C-501)이 내부에 물질이 저장된 채 유희상태에 있었을 때 스팀라인이 차단되어있지 않았었다.

31)29 CFR 1910, 147, 위험에너지 관리(잠금장치/꼬리표)

32)OSHA는 “잠금장치”(lockout)를 에너지 차단 장치 및 설비가 관리되어 잠금장치가 제거될 때까지 작동되지 못하도록 하는 규정된 절차에 따라 에너지 차단 장치에 잠금장치를 부착하는 것으로 정의하고 있다. OSHA는 “꼬리표”(tagout)란 에너지 차단 장치 및 설비가 관리되어 꼬리표 장치가 제거될 때까지 작동되지 못하도록 하는 규정된 절차에 따라, 에너지 차단장치에 꼬리표 장치를 부착하는 것으로 정의하고 있다(29CFR 1910. 147).

3.10. 4 OSHA 조사

OSHA는 10월 13일 폭발사고 이후 Pascagoula 공장을 조사했고, MNT 공정 근처에 위치한 무수 암모니아 공정의 PHA관련 자료를 제출할 것을 FCC사에 요청했다. OSHA는 PHA에서 “ 치명적인 결과가 될 수 있는 이전의 사고”에 대해 식별되지 않았기 때문에 부적합한 것으로 결론지었다. OSHA는 이 사안과 관련하여 암모니아 공정의 밸브는 가동 중지 시 열린 상태에 있었고 가동 전 검사의 필요성을 확인하지 않았기 때문에 암모니아가 방출된 것이라고 언급했다. 또한 OSHA는 PHA에는 방출의 초기 경보를 위한 적합한 탐지 방법이 적용되지 않았으며, 공학적 및 관리적 안전조치 소홀로 인한 결과를 고려하지도 않았다고 지적했다. 뿐만 아니라, FCC사는 증류탑과 무수 암모니아 저장탱크의 인입 및 배출 배관에 대한 기계적 건전성을 위한 절차의 “ 수립 및 이행”을 하지 않았다는 사실 역시 언급되었다.

OSHA는 29CFR 1910. 147 규정에 포함된 잠금장치/꼬리표의 경우, 회사의 가동중지 절차에 요구되는 DBB 에너지 차단 장치가 스팀 에너지를 조절하기 위해 물리적으로 설치되어 있지 않다는 점을 지적했다.

3.10.5 반응성 화학물질에 관한 이전의 CSB 개선 권고사항

1998년 4월, CSB는 미국 뉴저지주의 Paterson에 소재한 Morton International, Inc.,사의 공장에서 폭주반응으로 인해 발생한 폭발화재 사고를 조사했었다. CSB는 이 사고의 핵심 사안으로 반응성 유해·화학물질의 위험 관리시스템의 부적합성을 지정한 바 있었다. CSB가 Morton사에 제시한 권고사항들 중에는 PHA 재검토, 압력방출장치 평가, 경보 및 안전장치 필요성 검토 그리고 사내 관련 공정과 공정안전정보의 공유 등이 포함되어 있었다.

CSB는 또한, 반응성 화학물질의 공정 위험성에 관한 공동지침을 제시하고, 그러한 위험성과 관련된 CSB의 조사에 참여하기 위해 OSHA와 EPA모두에 대한 권고사항을 작성했다. 반응성 화학물질의 위험관리라는 제목으로 작성된 상기 위험성 조사 보고서는, 2002년 9월 이사회 회의에서 발표되었다(USCSB, 2002). 이사회는 반응성 화학물질 안전을 개선하기 위한 권고사항을 만장일치로 통과시켰다. 권고사항의 내용 중에는 “ OSHA는 공정안전정보를 수집하고, 반응성 화학물질의 위험성의 평가를 명시적으로 요구하기 위한 PHA 구성항목을 추가하는 경우 협의되어야 하는 다양한 자원을 규정함으로써, PSM의 적용범위를 확대하여 보다 포괄적인 반응성 화학물질 위험성 관리를 확보하기 위해 공정안전관리(PSM) 기준을 개정한다(USCSB, 2002; p. 101) 라고 명시되어 있다.

또한 CSB는 공공환경에 영향을 미칠 수 있는 치명적인 반응성 화학물질의 위험성을 명시

적으로 규정하기 위해 EPA가 RMP 기준(40CFR 제68부)을 재검토할 것을 권고했다. 기타 다른 권고사항들은 공정안전코드(Responsible Care Process Safety Code)를 확대하고, 반응성 화학물질 사고를 위한 보고 체계를 개발하는 지침을 공포하기 위해 CCPS, ACC, 그리고 SOCMA에게 권고사항을 제시했다(USCSB, 2002; pp. 102-104).

FCC사의 사고는 반응성 화학물질의 위험성 조사에 명시된 CSB의 권고사항을 적용해야 할 필요성을 재강조하는 계기가 되었다. 이 사고는 적합하게 평가되지 않았던 공정에서 발생한 열분해작용과 연관되어 있었다. 3.1절에서 언급된 바와 같이, 1996년, 동일한 물질을 처리하는 서로 다른 공정에 대한 평가에서, FCC사는 안전 권고사항에 포함되어 있는 물질의 안정성 및 위험성 평가를 위한 실험 및 관련문헌 조사 등과 같은 포괄적인 반응성 화학물질 계획을 위한 필수적인 항목들을 적용했다. 그러나, FCC사는 이러한 위험성 평가 방법론을 일괄적으로 적용하지 않았고, 중요한 위험성 정보가 여러 공정들 간에 공유되었는지의 여부를 확인할 수 있는 체계가 수립되어 있지 않았다.

3.1절에 명시된 바와 같이, 모범사례지침은 공장설비가 고에너지 공정에서의 위험성을 평가하도록 하고 있다. FCC사가 연속MNT증류공정(MNT회분식 공정에서처럼)에 대해 그러한 평가를 수행했었다면, 잠재적 위험성에 관해 더 잘 이해했었을 것이고 작업장과 유지보수작업에 우선적으로 조치가 취해졌을 것이다.

3.10.6 모범관리기준

FCC사는 사고 당시 SOCMA의 현행 회원사였다. 1990년, SOCMA는 화학산업의 사회적 책임(Responsible Care) 계획을 초기 성과개선계획으로 채택했다. 규정적 요구사항이 아니기는 하지만, RC는 화학업계의 지속적인 환경, 보건 및 안전성 개선을 의미하는 것이었다. 모든 정회원사들은 사회적 책임 지침 원칙에 서명하고 각 회원사는 공정안전 및 직원의 안전보건 내용이 포함되어 있는 각 기준의 진행상황을 연간 보고서로 제출하도록 되어 있었다.³³⁾

33)여기에서 언급된 사회적 책임요소들이란 2001년 수행된 감사시 제기된 요소들이다. 이 요소들

은 최근에 개정되었다.

공정안전코드는 화재·폭발 및 화학물질의 누출사고 등을 방지하기 위해 작성되었다. 이러한 기준을 적용하기 위해, SOCMA의 정회원사들은 성과측정, 적합한 감사, 그리고 서면으로 작성된 안전 정책 등이 포함되어 추진 중인 안전계획을 수립하도록 하고 있다. 또한 회원사들은 가동 이전 모든 신설 및 변경된 공장설비에 대한 안전성 검토를 수행하고, 유지 보수 및 점검계획을 수립하며, 공정설계 및 절차에 관한 안전정보를 반드시 문서화하여 개정하도록 되어 있었다.

CSB는 사고 발생 이전 FCC사가 가장 최근에 수행한 RC 감사 보고서를 요청하였는데, 이것은 공정안전코드의 자체 감사를 만족하기 위해 2001년 2월에 시행된 것이다. 상기 기준에는 회원사들이 공정 위험성에 대한 주기적인 평가 및 문서화, 유해·화학물질의 완전한 문서화, 그리고 중대 사고를 야기시킬 수 있는 장애를 예방하기 위한 충분한 보호장치 설치를 위한 관리업무를 수행하는 내용이 포함되어 있다. 기준의 요소들 중에서 관리업무를 수행한다고 명시된 내용이 수정되기는 했지만,³⁴⁾ CSB조사에서는 이전에 언급된 바와 같이, 이부분에 대해서는 별다른 차이점을 발견하지 못했다.

반응성 화학물질의 위험성 조사의 일환으로, CSB는 ACC에게 반응성 화학물질의 안전관리 필요성을 재강조하기 위해 사회적 책임 공정안전코드를 확대 적용하도록 권고했다(USCSB, 2002; pp. 103-104).

34) 공공의 의견이 설계 및 안전에 있어 감안되도록 하기 위한 지역사회의 인식 및 비상대응과 관련된 기준 요소는 “실제 이행의 재평가 관리”로 명시되었다.

4.0 사고의 근원 및 원인

4.1 사고의 근원

1. FCC사의 Pascagoula 공장은 연속공정에서 모노니트로톨루엔(MNT)을 처리하는 데 따르는 위험성을 평가하기 위한 적합한 체계를 갖추고 있지 않았으며 공장에서 이와 유사한 공정에 대해 수행된 위험성 평가의 결과를 이에 적용하지 않았다.

- 니트로톨루엔은 불안정하며 고온상태에서는 열분해를 일으키는 물질이다. 공장은 이러한 물질의 가공에 대한 열적 불안정성을 평가하기 위한 사전 체계를 수립하지 않았기 때문에 잠재적 위험성에 대한 이해가 부족했다. FCC사는 가동중지 시 장시간 동안 MNT를 장치에 저장하는 것, 단기 및 장기 가동정지 절차, 그리고 비정상작동 조건 하에서의 대응방법 등을 포함해, MNT를 취급하는데 따르는 특정 위험성을 평가하기 위해 MNT 연속 공정에 대한 위험성 평가를 완벽히 실시한 적이 없었다.
- 공장은 1996년, 회분식 공정 중 MNT가 장시간 동안 고온에 노출되는 경우 발생할 수 있는 위험성을 인지하였지만, 이러한 결과(작동상 문제점 및 추가 안전 연동장치를 포함하여)는 기존 MNT 증류탑에 적용되지 않았다.
- 위험성 평가가 수행되지 않았고 잠재적 위험성이 식별되지 않았기 때문에, 공정안전정보-MSDS와 표준운전절차서를 포함해-는 MNT의 잠재적인 열적 불안정성에 대한 적합한 주의 조치가 수립되지 않았다.

2. FCC사는 #1MNT 증류탑(C-150)이 치명적인 누출사고를 예방하기에 충분한 보호장치를 설치하도록 하는 체계를 갖추지 않았다.

- C-501에는 고온 경보, 비정상적인 작동 시 경보 등과 같은 필수 경보장치가 설치되어 있지 않았다.
- C-501에는 고온 상태 그리고 기능상 안전한 상태로 공정을 전환하는 경우 증류탑으로 유입되는 열원을 차단하기 위한 안전 연동장치가 설치되어 있지 않았다.
- C-501는 MNT의 열분해 작용 시 과압을 보호할 수 있도록 적합하게 설계되어 있지 않았다.

3. Pascagoula 공장은 장치 차단 시 작업 연속성을 확보할 수 있는 효과적인 시스템을 갖추고 있지 않았다.

- 이러한 시스템은 적합한 운전절차를 규정하고 모든 필요한 조치를 적용하기 위한 것이다.

비록 담당자가 C-501로 가는 스팀라인을 이중 차단하는 등 적절히 조치하였다고 말했지만, 이러한 조치는 운전절차에 명시적으로 포함된 것이 아니며 사고 이전에 적용되지도 않았다.

- C-501의 운전절차에는 공정 물질과 운전범위 초과에 따른 결과와 관련된 경보 또는 주의 조치들이 포함되어 있지 않았다.
- 운전절차에는 적합하게 차단하기 위한, 또는 증류탑이 가동 중지 된 동안 주요 변수에 대한 지속적인 모니터링 등, 예측 가능한 모든 원인에 대한 비상가동정지를 수행하는 방법에 관한 지시 내용이 포함되어 있지 않았다.
- 사고 당시 작업 절차서에서는 증류탑에서 라인을 차단 시킬 수 있었던 스팀 라인에 밸브가 포함되어 있지 않았다.
- 작업담당자의 교육·훈련에는, 열원이 제거되지 않은 경우 증류탑으로 열원이 유입되는 것을 적절하게 차단해야 하는 필요성에 대해 강조했을 수 있었던, 고온에서 장시간 동안 MNT를 방치하는데 따르는 위험성 관련 정보가 포함되어 있지 않았다.

4. FCC사는 #1MNT 증류탑(C-501)에 연결된 스팀라인에 설치되어 있는 차단 밸브의 누출을 방지하기 위한 적합한 계획이 수립되어 있지 않았다.

- 스팀공급밸브는 정상 작동에 필요한 유지보수작업이 무엇인지를 결정하기 위한 평가작업이 이루어지지 않았다.
- 사고 이후 분석결과 부식 및 침식이 재비기에 연결된 스팀라인에 설치된 2개의 수동밸브에서의 누출이 원인이었음이 밝혀졌다.

4.2 사고의 원인

1. FCC사는 제어실의 구조적 건전성 또는 공정설비와의 인접성³⁵⁾을 평가하기 위한 체계를 갖추지 않았다.

MNT 공정의 제어실은-창문이 있었고 과압에 저항 할 수 있도록 구조물이 보강되어있지 않은-C-501에서 약 40피트 떨어진 거리에 위치해 있었다. 사고 당시 제어실에서 대피하고 있었던 3명의 직원은 깨진 유리조각으로 부상을 입었다.

2. Jackson County는 발생 가능한 치명적인 사고와 이러한 사고 발생시 대응 요령 등을 지역주민들에게 알리는 효율적인 체계를 갖추고 있지 않았다.

폭발·화재 사고는 주변 지역에 거주하는 주민들에게 불안감을 조성하기에 충분했다. 폭발 충격으로 인한 피해가 공장 외부지역에서 발생했으며, 증류탑에서 떨어져 나간 파편조각이 공장 외부지역에 흩어져 있었다. 지역주민에 대한 통보 체계는 대피 요령, 또는 비상상황이 해제되는 시기 등에 관한 정보를 사고가 진행되는 동안 지역주민에게 효과적으로 전달되지 못했다.

35)제어실의 위치와 지역주민에 대한 비효율적인 사고 통보 체계 등이 사고의 원인은 아니었지만, 이러한 요인들은 현장 부상자 발생 그리고 지역사회 불안감 확산 등을 포함해 사고에 원인을 제공했다는 점에 주목할 필요가 있다.

5.0 개선 권고사항

DuPont 사

하기 명시된 “ DuPont-First Chemical Pascagoula Facility” 항목에 나열된 사안을 First Chemical Pascagoula 공장이 적합하게 적용하는지 여부에 관한 감사를 실시한다. 감사결과 정보를 직원들에게 제공한다. (2003—1-I-MS-R1)

DuPont-First Chemical Pascagoula Facility

1. 반응성 화학물질을 포함한 공정 위험성 평가를 수행하기 위한 계획을 수립한다. (2003—1-I-MS-R2)
2. 폭발반응 및 화학물질의 치명적인 누출 등을 방지하기 위해 경보 및 연동장치 등과 같은 보호장치 설치 필요성을 검토하고 적합한 안전장치를 설치한다. (2003—1-I-MS-R3)
3. 고에너지 화학물질을 처리하는 공정에 필요한 절차를 검토 및 개정하고, 업데이트된 절차를 효과적으로 전달하며, 직원들에게 적합한 훈련교육을 실시한다. 절차 개정에는 다음과 같은 사항이 포함된다: (2003—1-I-MS-R4)
 - 에너지원 차단을 위한 특정 조치단계
 - 공정 화학물질 및 공정한계를 초과한 경우 이에 따르는 결과와 관련된 경보 및 주의 조치.
 - 운전범위를 벗어날 경우 허용운전한계 및 지침
 - 효과적인 차단을 하기 위해, 그리고 증류탑이 가동 중지된 동안 주요 변수(온도 등과 같은)를 지속적으로 모니터링 하며, 이외에도, 물질이 반드시 제거되어야 하는 조건 (장기간 가동정지 되는 경우와 같은)을 검토하기 위해, 모든 예측 가능한 경우 가동정지를 수행하는 방법에 대한 지시사항.
4. 반응성 화학물질을 처리하는 모든 장치에 적절한 과압 보호가 적용되도록 하기 위해 공장내 광범위한 압력용기의 검사를 시행한다. (2003—1-I-MS-R5)

5. 반응성 화학물질이 포함된 공정을 안전하게 운전하기 위한 필수장비 확인, 유지보수 계획 재검토 및 그러한 장치의 건전성을 확보하기 위한 정비점검 일정을 수립한다.

(2003—1-I-MS-R6)

6. 공장직원들이 사용하는 건물의 구조와 위치가 적합한지 여부를 검토함으로써 반응성 화학물질 처리 장치에서 발생하는 폭발 사고 시 건물 내부의 직원들을 보호할 수 있는 적합한 조

치를 검토하여 수립한다. (2003—1-I-MS-R7)

Jackson County 감독자 회의

Jackson County 비상관리청

Jackson County 지역비상계획위원회

1. 하기 명시된 내용에 대한 지역주민에 대한 통보 체계 업데이트:

(2003—1-I-MS-R8)

- 사고로 인해 지역주민의 건강 및 안전에 영향을 미치는 경우 Moss Pint 지역사회에 긴급경보 발령
- 지역주민이 사고에 대응해야 하는 시기 결정
- 사고 상황관련 정보와 지역주민의 대응요령 전달
- 지역주민에게 사고 종료 시점 알림(예, 비상 해제 사이렌 등과 같은)

2. 대피령 발령 시, 질서정연한 대피를 위해 필요한 조치에 대해 지역주민을 훈련하고 이에 대한 인식을 고취시킴. (2003—1-I-MS-R9)

미국화학위원회(ACC)

1. 공장시설에 대해 공정 위험성 평가의 결과 및 교훈을 명시적으로 식별하고 단일 공정에서의 사고조사를 유사한 물질을 처리하는 다른 장치에 적용하도록 하기 위한 사회적 책임 관리시스템의 기술 명세서를 개정한다. (2003—1-I-MS-R10)

2. ACC 회원사가 책임관리의 감사 규정을 이해하여 공장설비의 공정안전 계획에 이를 정확히 식별하여 반영하도록 한다. (2003—1-I-MS-R11)

3. 본 보고서 결과를 회원사와 공유한다. (2003—1-I-MS-R12)

Organic Chemical Manufacturers Association (SOCMA)
(유기화학합성물제조업체연합)

1. 공장시설에 대해 공정 위험성 평가의 결과 및 교훈을 명시적으로 식별하고 단일 공정에서의 사고조사를 유사한 물질을 처리하는 다른 장치에 적용하도록 하기 위한 사회적 책임 관리시스템의 기술 명세서를 개정한다. (2003—1-I-MS-R13)

2. SOCMA 회원사가 사회적 책임관리의 감사 규정을 이해하여 공장설비의 공정안전 계획에 이를 정확히 식별하여 반영하도록 한다. (2003—1-I-MS-R14)

3. 본 보고서 결과를 회원사와 공유한다. (2003—1-I-MS-R15)

작성자:

미국 화학물질 사고 조사국(CSB)

Carolyn W. Merritt 의장

John S. Bresland 위원

Gerald V. Poje, Ph.D.위원

Isadore Rosenthal, Ph. D. 위원

Andrea Kidd Taylor, Dr. P.H. 위원

작성일: 2003년 10월 15일.

6.0 참고문헌

- American National Standards Institute/Instrument Society of America (ANSI/ISA), 1997. *Application of Safety Instrumented Systems for the Process Industries*, ANSI/ISA-84.01-1996, March 15, 1997.
- American Petroleum Institute (API), 1997. *Guide for Pressure-Relieving and Depressuring Systems*, API RP-521, Fourth Edition.
- API, 1995. *Management of Hazards Associated With Location of Process Plant Buildings*, API RP-752, First Edition, May 1995.
- Bateman, T. L., F. H. Small, and G. E. Snyder, 1974. "Dinitrotoluene Pipeline Explosion," *Proceedings of the 8th Annual Loss Prevention Symposium*, American Institute of Chemical Engineers (AIChE), Vol. 8, pp. 117-122.
- Bretherick, Leslie, P. G. Urben, and Martin J. Pitt, 1999. *Bretherick's Handbook of Reactive Chemical Hazards*, Sixth Edition, Vol. 1, Butterworth-Heinemann.
- Center for Chemical Process Safety (CCPS), 2003. *Essential Practices for Managing Chemical Reactivity Hazards*, AIChE.
- CCPS, 1996. *Evaluating Process Plant Buildings for External Explosions and Fires*, AIChE.
- CCPS, 1995a. *Chemical Reactivity Evaluation and Application to Process Design*, AIChE.
- CCPS, 1995b. *Guidelines for Evaluating Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires, and BLEVEs*, AIChE.
- CCPS, 1995c. *Guidelines for Safe Process Operations and Maintenance*, AIChE.

CCPS, 1993a. *Guidelines for Engineering Design for Process Safety*, AIChE.

CCPS, 1993b. *Safe Automation of Chemical Processes*, AIChE.

Chen, Wu, and Chai-Wei Wu, 1996. "Thermal Hazard Assessment and Macrokinetics Analysis of Toluene Mononitration in a Batch Reactor," *Journal of Loss Prevention Process Industries*, Vol. 9, No. 5.

Dartnell, R. C., and T. A. Ventrone, 1971. "Explosion of a Para-Nitro-Meta-Cresol Unit," *Proceedings of the 5th Annual Loss Prevention Symposium*, AIChE, Vol. 5, pp. 53–56.

Duh, Yih-Shing, C. Lee, C. C. Hsu, D. R. Hwang, and C. S. Kao, 1997. "Chemical Incompatibility of Nitrocompounds," *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 53, pp. 183–194.

Harris, G. F. P., N. Harrison, and P. E. MacDermott, 1981. "Hazards of the Distillation of Mono Nitrotoluenes," *Institution of Chemical Engineers Symposium Series*, Vol. 68.

Health and Safety Executive (HSE), 2000. *Designing and Operating Safe Chemical Reaction Processes*, Norwich, United Kingdom: HSE Books.

HSE, 1994. *The Fire at Hickson & Welch Ltd*, Norwich, United Kingdom: HSE Books.

International Electrotechnical Commission (IEC), 2003. *Functional Safety—Safety Instrumented Systems for the Process Industry Sector*, IEC 61511-3, Geneva, Switzerland.

Kister, Henry Z., 1990. *Distillation Operation*, McGraw-Hill.

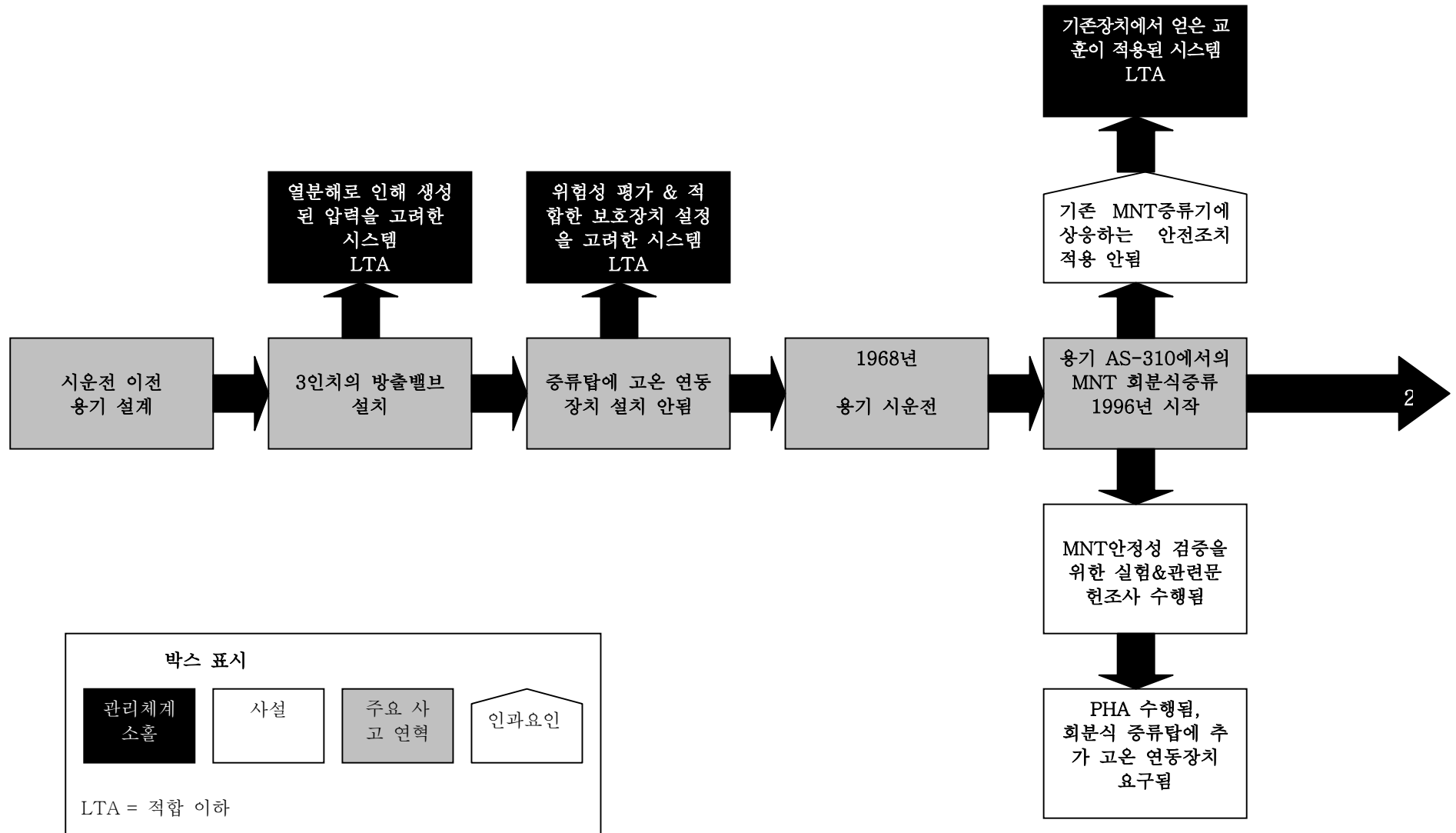
Lewis, Richard J. Sr., 1996. *SAX's Dangerous Properties of Industrial Materials*, Ninth Edition, Van Nostrand Reinhold.

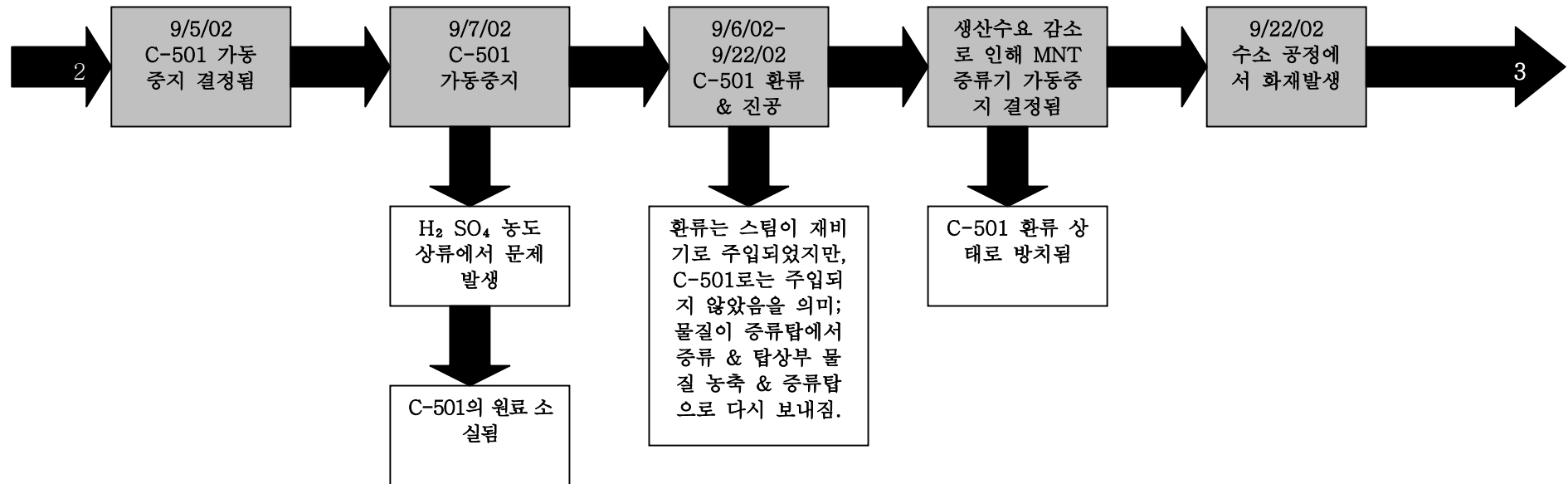
U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board (USCSB), 2002. *Hazard Investigation, Improving Reactive Hazard Management*, Report No. 2002-01-H, December 2002.

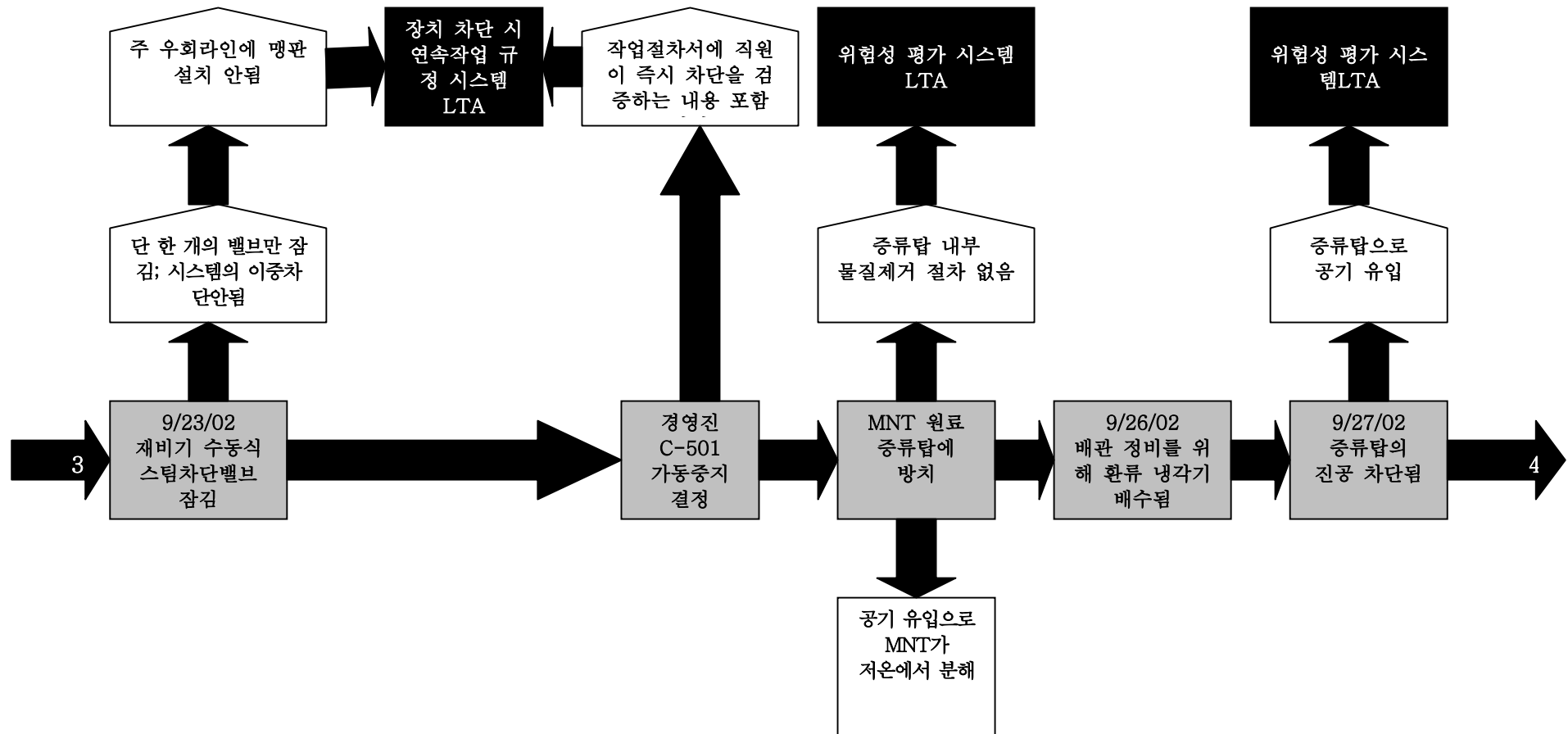
USCSB, 2000. *Investigation Report, Chemical Manufacturing Incident, Morton International, Inc., Paterson, New Jersey, April 8, 1998*, No. 1998-06-I-NJ.

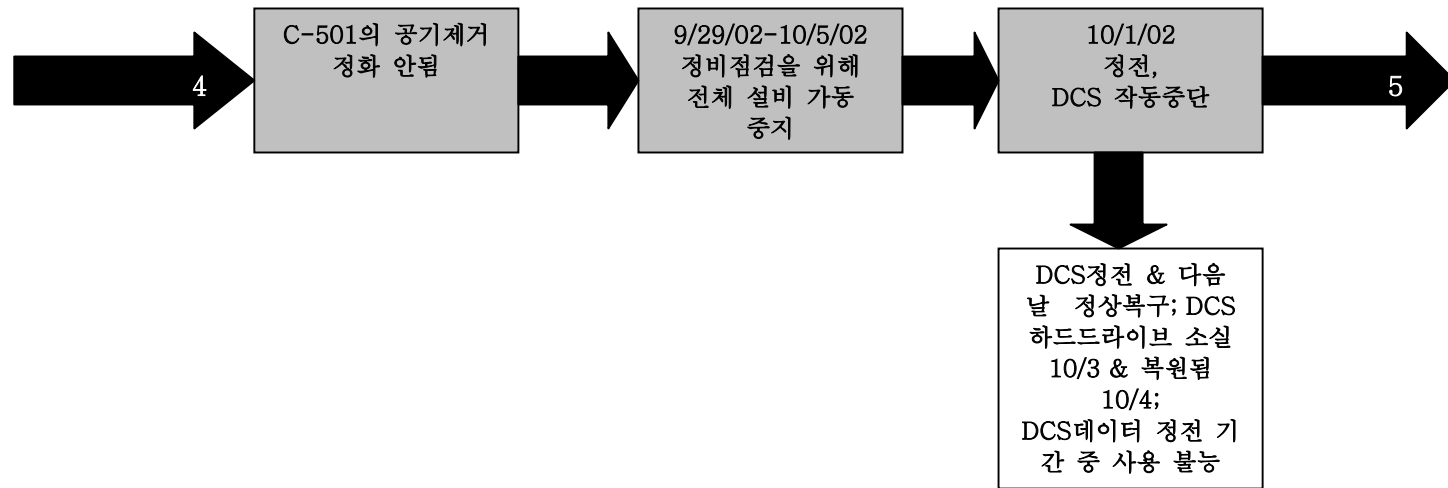
별첨A: 인과관계 도표

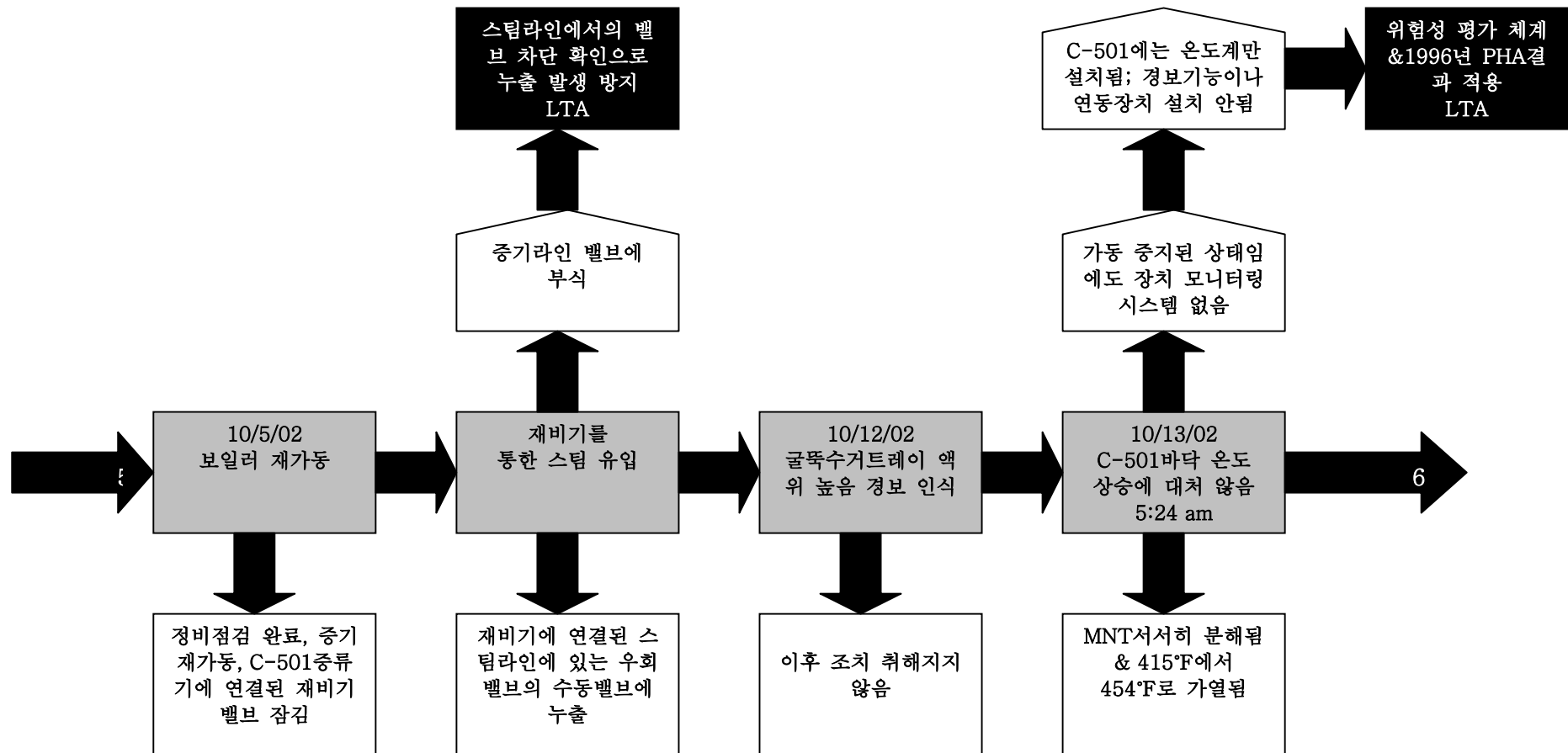
별첨A: 인과관계 도표

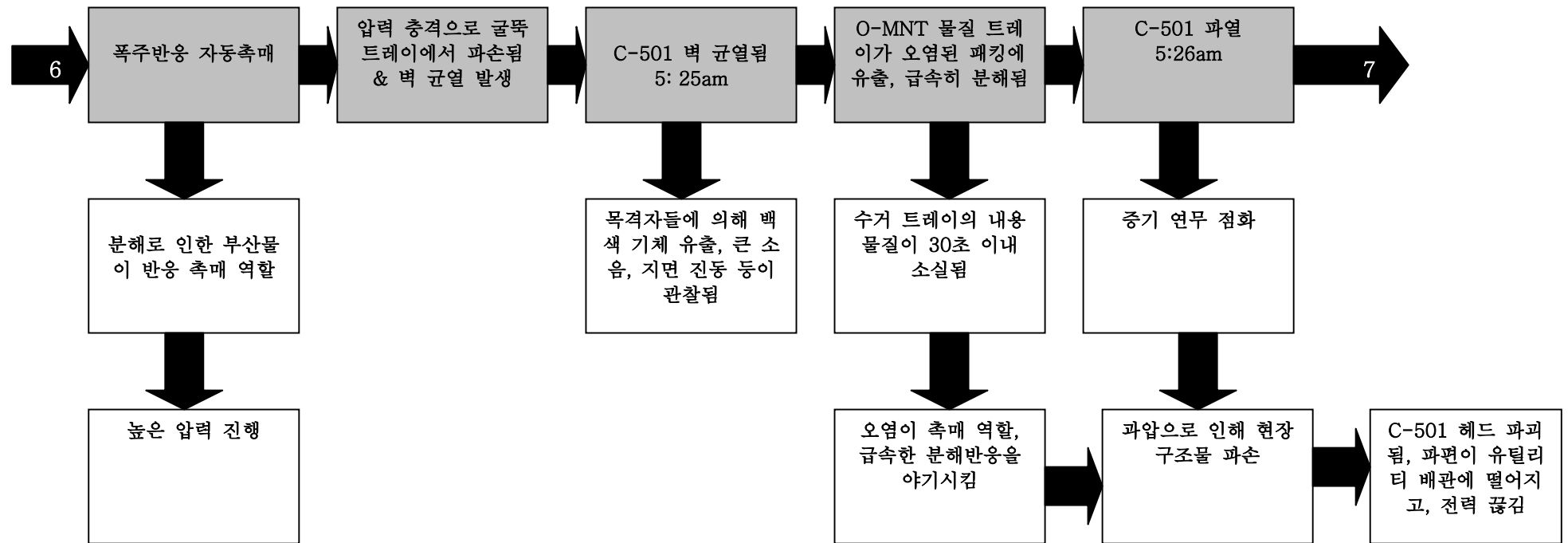


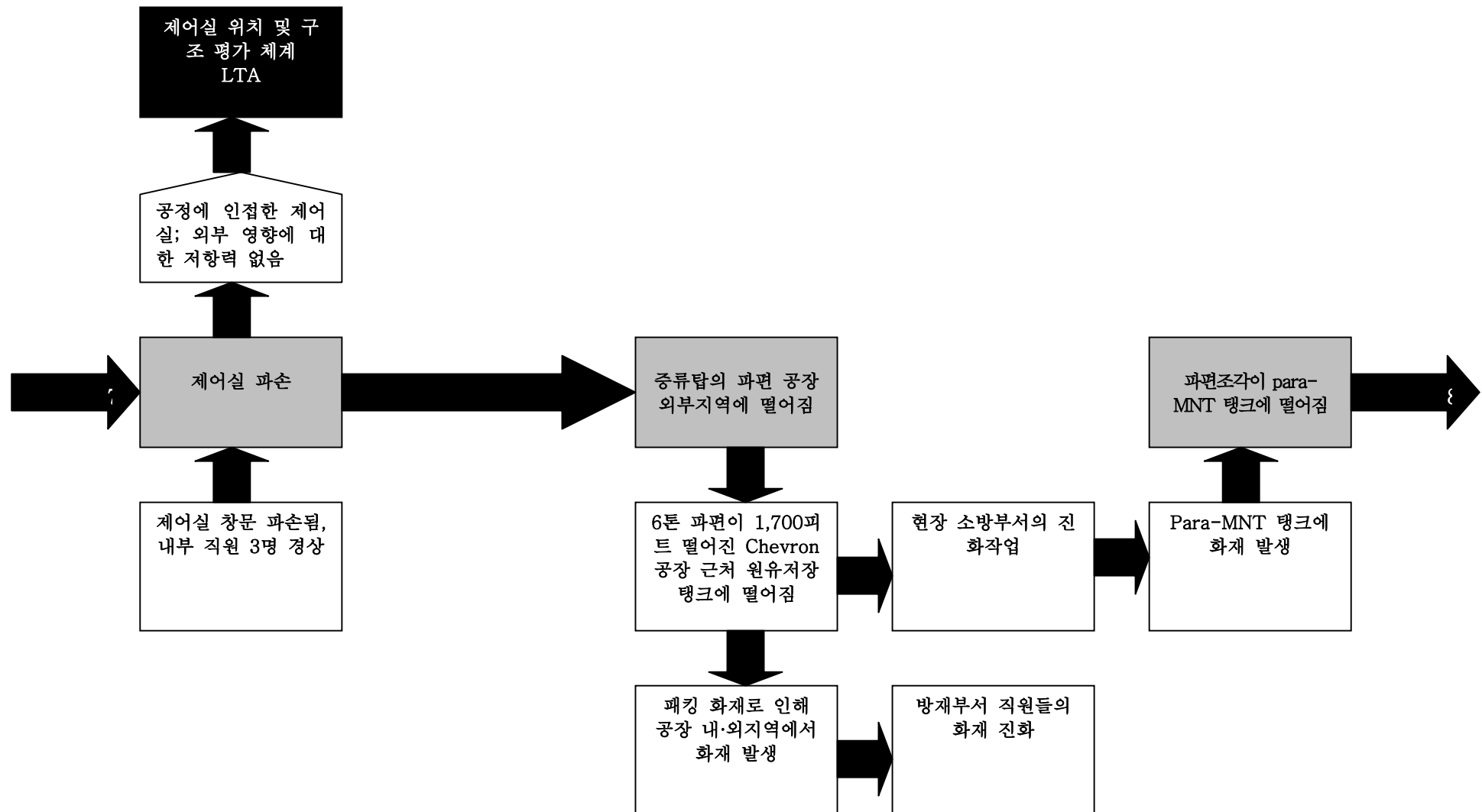


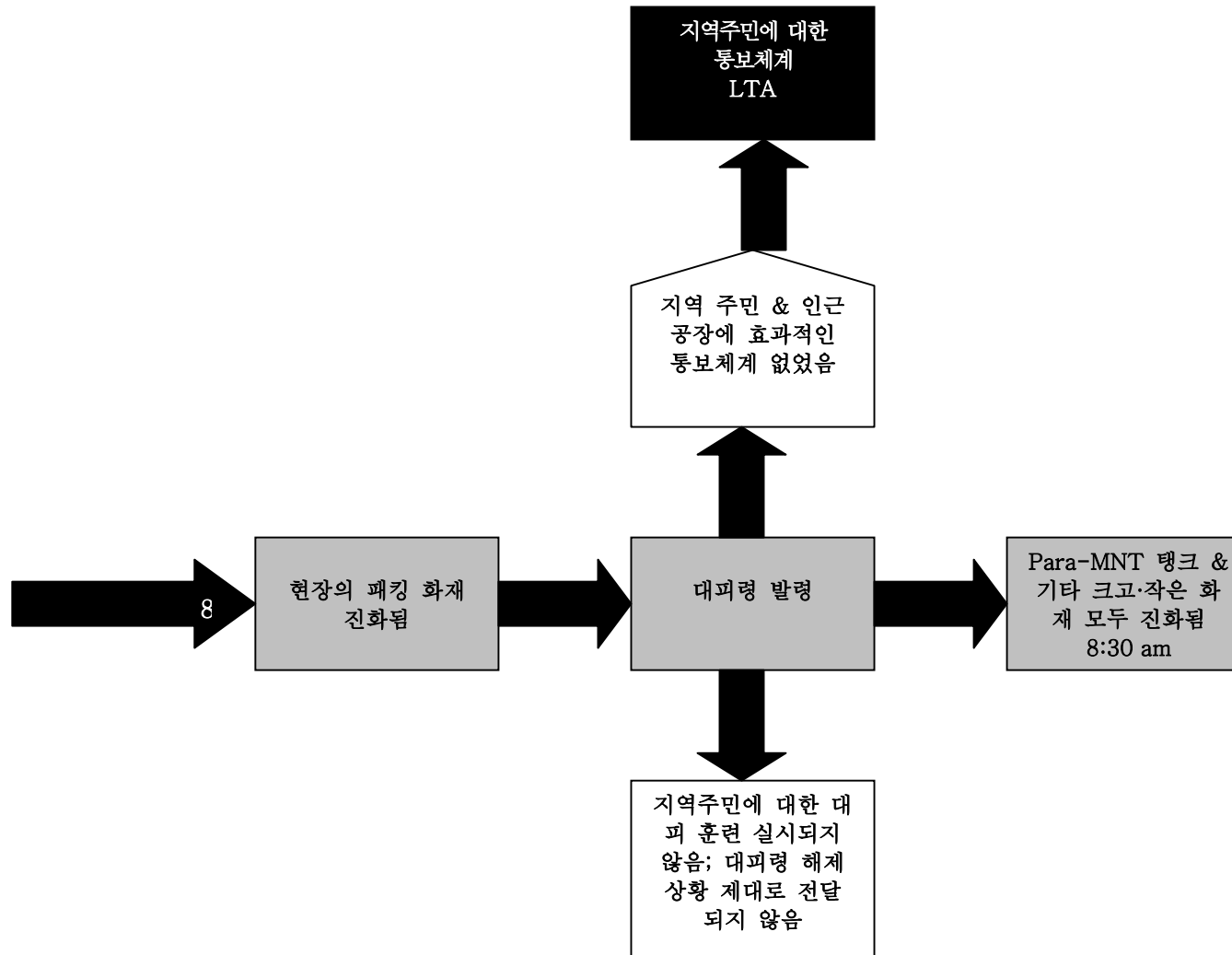












자료 활용에 따른 참고사항

이 번역 기술자료는 한국산업안전공단 내부에서만
활용하고 외부대여, 유출 또는 복제를 절대 금합니다.

- ▶ 원제명 : investigation Report – Thermal decomposition
incident / Explosion and fire
- ▶ 발행처 : 미국 화학물질 사고 조사국(CSB)
- ▶ 번역자 : 가나번역
- ▶ 검토자 :

열분해 사고조사/화재폭발 사고조사 보고서

발행일 : 2004. 월 초판발행

발행인 : 김 용 달

발행처 : 한국산업안전공단 교육정보국 정보운영팀
인천광역시 부평구 구산동 34-4

Tel : 032) 510-0749(대표)

Fax : 032) 502-1656

인쇄처 :

<비매품>



한국산업안전공단
KOREA OCCUPATIONAL SAFETY & HEALTH AGENCY

