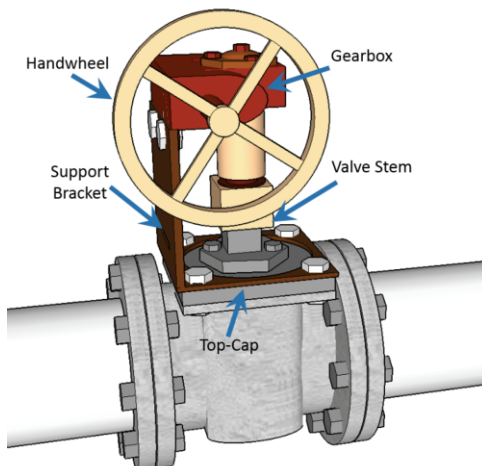


## 미국 배튼루즈 정제공장 폭발화재

2016년 11월 22일 미국 루지애나(Louisiana) 주도인 배튼루즈(Baton Rouge) 소재의 엑손모빌(Exxon Mobil) 정제공장에서 폭발화재가 발생했다. 폭발화재는 유황산 알킬레이션 공정실(sulfuric acid alkylation unit)에서 이소부탄(isobutane)이 누출되면서 일어났으며 이 사고로 작업자 4명이 부상을 입었다.

이소부탄 누출은 플러그밸브(plug valve) 개폐작업 중에 발생했다. 플러그밸브를 개폐하기 위해서는 밸브몸통(valve stem)을 돌려야 한다. 밸브몸통은 기어박스(gearbox)를 구동시키는 핸드휠(handwheel)을 돌리면 움직이게 되어 있다. 하지만 사고 당일, 핸드휠을 통하여 밸브몸통을 돌릴 수 없자 작업자는 플러그밸브에서 기어박스를 제거하고 파이프렌치(pipe wrench)로 밸브몸통을 돌리려고 시도했으며 이런 행위는 업무상 허용되는 관행이었다.

기어박스를 제거하기 위해서는 지지브래킷(support bracket)과 기어박스가 연



결되어 있는 왼쪽의 수평볼트 2개를 풀어 해체할 수 있는데, 이날 작업자는 배관 내 유압을 유지해주는 탑캡(top-cap) 고정용 4개의 수직볼트를 해체하고 파이프렌치로 밸브몸통을 돌렸으며 이후 탑캡이 내부 유압으로 열리면서 배관 내의 이소부탄이 누출되고 폭발사고로 이어졌다.

본 폭발화재사고는 미국 화학사고조사위원회(U.S. Chemical Safety Board)가 발간한 조사보고서를 토대로 정리하였다.

## 미국 배튼루즈 정제공장 폭발화재

### 1 서론

2016년 11월 22일 미국 루지애나 주도인 배튼루즈 소재의 엑손모빌(ExxonMobil) 정제공장 내의 유황산 알킬레이션 공정실(sulfuric acid alkylation unit)에서 이소부탄이 누출되면서 폭발화재가 발생했으며 이 사고로 4명이 부상을 입었다.

유황산 알킬레이션 공정실 작업자는 플러그밸브에서 고장 난 기어박스를 해체하려는 목적으로 배관 내 유압 유지용 구성품인 탑캡(top-cap) 고정 볼트 4개를 제거하여 기어박스과 기어박스 지지브래킷 모두를 해체한 후 파이프렌치로 밸브몸통을 돌리는 순간 탑캡이 열리면서 배관 내 이소부탄이 유황산 알킬레이션 공정실 내로 유출되었고 유출된 이소부탄은 화염이 가능한 증기운을 형성하였다.

누출된 이소부탄은 30초가 지난 후 점화원에 도달했으며 공정실 내의 증기운에도 점화되면서 폭발화재가 발생했고 이로 인해 공정실 내 작업자 네 명이 심각한 화상을 입었다.

미국 화학사고조사위원회(U.S. Chemical Safety Board)는 정제공장 알킬레이션 공정실에서 사용한 플러그밸브의 기어박스가 오랜 시간 동안 신뢰성 쟁점으로 거론되어 왔다는 사실을 알게 되었다. 또한 알킬레이션 공정실 내의 플러그밸브 기어박스 고장 시, 공정실 운영담당자가 기어박스를 해체한 후 파이프렌치로 플러그밸브를 개폐하는 행위는 허용되는 관행이었다는 사실을 알게 되었다. 담당자들은 이런 행위에 불안감을 전혀 느끼지 못했지만 일부 담당자는 자신이 직접 이런 행위를 수행하지 않고 유지관리 담당직원에게 의뢰하여 유지관리 담당직원이 처리할 수 있도록 하였다. 위원회는 또한 이번 사고에 관여된 구형 플러그밸브가 공장 내 500 개의 플러그밸브 중 15개(3%)라는 것을 알게 되었다.

이번 사고에 관여한 구형 플러그밸브 설계는 기어박스 지지브래킷이 유압유지 구성품인 탑캡에 부착되어 있어서 잘못된 방식으로 기어박스를 해체할 수 있는 가능성을 내포하고 있었다. 개선된 신형 플러그밸브는 기어박스 지지브래킷이 유압유지 구성품에 연결되지 않는 방식을 취하고 있다.

### 2 화재발생 상황

2016년 11월 22일 오후 배튼루즈 정제공장 알킬레이션 공정실 내에서 두 명의 담당자가 유지관리를 위해서 이소부탄 장비를 준비하고 있었다. 이 준비과정에서 두 담당자는 밸브 장비를 조절하여

이소부탄 예비펌프(spare pump)를 가동시키려 하였다(그림 1 참조). 펌프 전환을 위하여 두 담당자는 예비펌프 앞단의 흡입 플러그밸브(spare pump suction plug valve)를 개방하고자 하였다.

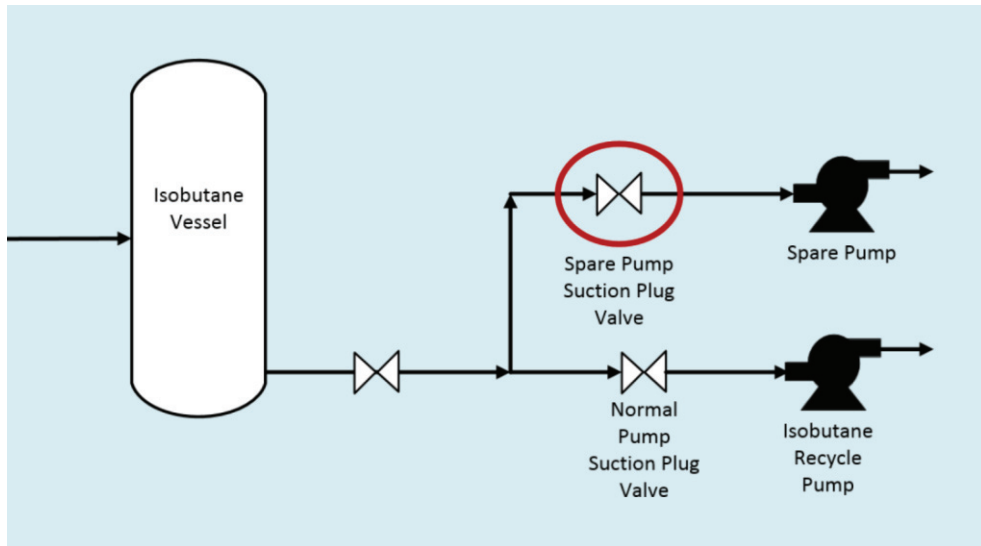


그림 1. 누출사고가 발생한 알킬레이션 공정실 장비 단순 배치도

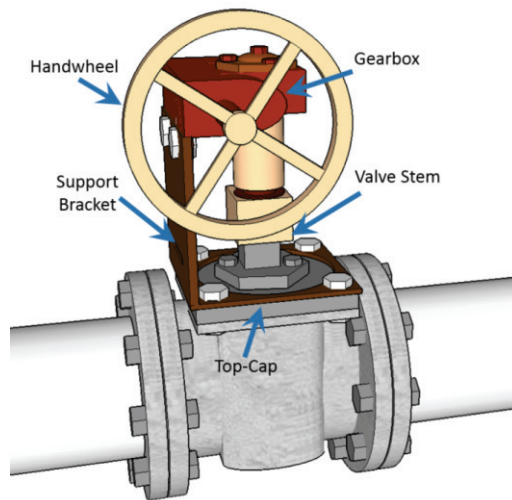


그림 2. 이번 사고에 관여된 알킬레이션 공정실 내 플러그밸브 구성도: 기어박스(gearbox), 밸브몸통(valve stem), 탑캡(top-cap), 지지브래킷(support bracket),

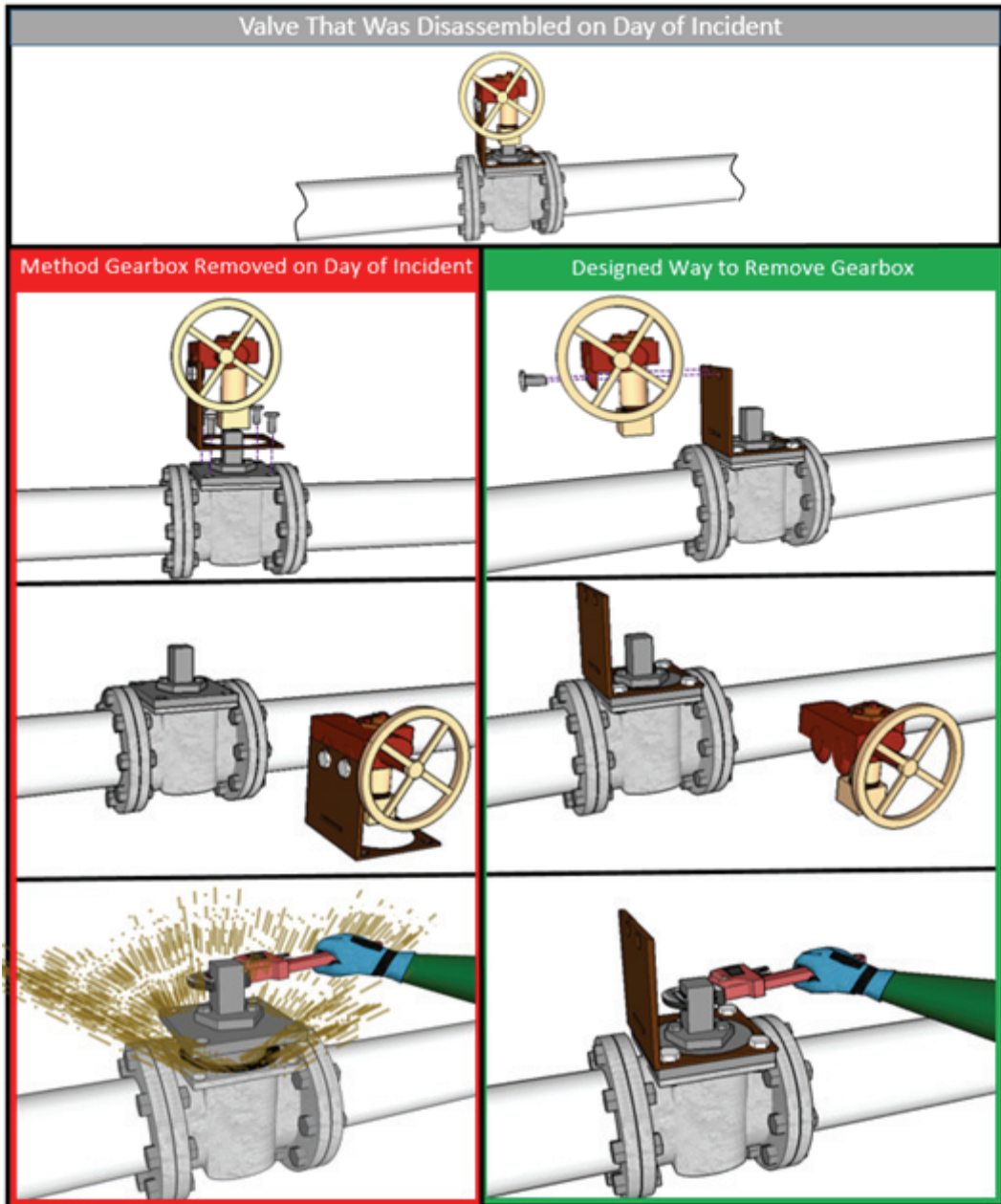


그림 3. 사고당일 해체된 밸브(왼쪽은 사고당일 기어박스 해체법 / 오른쪽은 올바른 기어박스 해체법)

이번 사고 정제공장에서는 직각회전 플러그밸브(quarter-turn plug valve)로 알려진 밸브가 이소부탄 펌프의 유입 밸브를 포함하여 알킬레이션 공정실 내 여러 곳에서 사용되고 있었다. 이런 유형의 밸브는 대부분 수동으로 작동하는데 기어박스에 연결된 핸드휠을 돌려 밸브를 개폐할 수 있다(그림 2 참조). 핸드휠은 기어를 돌려서 밸브몸통(valve stem)이 열림 또는 닫힘 위치로 변경되도록 하며

지지브래킷(support bracket)은 기어박스과 밸브몸체(valve body)를 연결시켜 주는 역할을 한다.

사고 당일 오후 한 담당자가 예비펌프 앞단의 플러그밸브를 개방하고자 플러그밸브에 부착된 핸드휠을 돌렸다. 핸드휠은 돌아갔지만 기어박스가 적절하게 작동하지 않아 밸브몸통이 움직이지 않았다. 담당자는 기어박스를 해체하고 파이프렌치로 밸브몸통을 돌려 밸브를 개방하고자 했다. 플러그밸브에서 고장 난 기어박스를 해체하는 것은 알킬레이션 공정실 담당자에게 허용되는 행위였다. 담당자는 기어박스 뿐 아니라 지지브래킷까지 모두를 해체하기 위해서 지지브래킷을 밸브 몸체에 연결시켰던 수직 볼트 네 개를 제거했다. 그러나 이 네 개의 볼트는 관내 유압유지 구성품인 탑캡(top-cap)을 고정시키는 역할 또한 담당했다. 탑캡을 건드리지 않고 기어박스를 안전하게 해체하기 위해서는 그림 3의 오른쪽과 같이 지지브래킷과 기어박스를 연결해주는 두 개의 수평 볼트를 제거함으로써 가능하지만 담당자는 이 방법을 택하지 않았다. 한 담당자가 파이프렌치로 밸브몸통을 돌리려했고 다른 한 담당자는 이를 지켜보고 있었다. 밸브몸통을 돌리는 순간 플러그밸브는 떨어져 나갔으며 압축 이소부탄은 밸브 몸체에서 유출되어 화염이 가능한 백색의 증기운을 형성했다.

이소부탄 누출 후, 담당자는 그 지역의 다른 사람들에게 큰 소리로 대피를 명령했다. 다른 한 명의 담당자는 비상대응관에게 무전으로 통보하여 해당 공정실 폐쇄를 요청했다. 당시 사고에서 엑손모빌은 이소부탄 907 킬로그램(2,000 파운드)을 대기로 누출시켰던 것으로 추정된다.

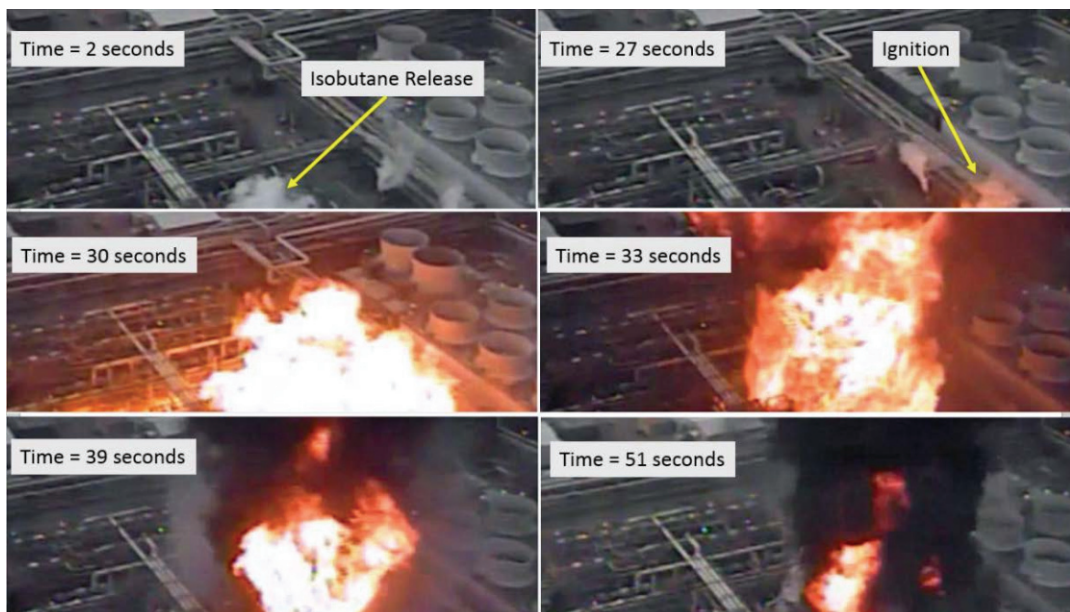


그림 4. 배톤루즈 정제공장 CCTV 영상에 의한 이소부탄 누출과 화재



그림 4와 같이 구내 CCTV 영상에 따르면 사고지점에서 21 미터(70 피트) 떨어진 지점에서 동력구동 용접 기계에 의해서 이소부탄 증기운이 점화되었다. 이 번 사고로 엑손모빌 직원 한 명과 협력업체 직원 3명이 부상을 당했다. 비상대응관은 누출을 차단시키고 초기 점화 후 약 25분 만에 화재를 진압했다.

### 3 화재현장의 문제점

이번 이소부탄 누출과 화재를 야기한 플러그밸브 기어박스 제거 작업에서 의도치 않은 유압유지 탭캡의 해체는 배튼루즈 정제공장 안전관리체계의 여러 허점에 기인한 것이었다. 이번 사고와 관련된 안전관리체계 허점은 다음과 같다.

- (1) 구형 플러그밸브 설계와 기어박스 신뢰성 쟁점을 파악하고 처리하는데 실패
- (2) 구형 플러그밸브 운영 및 유지관리 시 잠재적 위태 뿐 아니라 구형 플러그밸브의 설계 및 신뢰성 쟁점을 파악하기 위한 인적요인(human factors) 평가 부재
- (3) 플러그밸브를 수동으로 안전하게 열거나 닫기 위한 기어박스 해체 단계를 상세히 설명하는 문서화된 절차서 부재
- (4) 알킬레이션 공정실 내 플러그밸브에서 기어박스를 안전하게 해체하는 훈련 부재
- (5) 문서화된 절차서와 훈련 없이도 담당자가 플러그밸브에서 기어박스를 해체하는 것이 허용되는 조직 문화

#### 3.1 플러그밸브 기어박스 신뢰성

화학사고조사위원회와 배튼루즈 정제공장 알킬레이션 공정실 담당자들과의 인터뷰에서 플러그밸브 기어박스 오작동으로 인한 기어박스 해체는 이전에도 여러 번 직면했던 경험이 있다고 했다. 또한 기어박스 신뢰성 쟁점을 거론하면서 이와 같은 기어박스의 문제는 자주 발생하여 기어박스가 오작동하는 것은 대수롭지 않은 일로 여겼다고 담당자들은 전했다.

#### 3.2 장비설계와 인적요인 분석

##### 3.2.1 플러그밸브 설계

배튼루즈 정제공장 알킬레이션 공정실에 설치되어 있던 15개의 구형 플러그밸브의 기어박스 지지 브래킷은 네 개의 수직 볼트로 밸브몸체에 연결되어 있는데 이 볼트는 유압유지 탭캡을 고정시키는 역할도 한다(그림 2 참조). 그러나 네 개의 탭캡 볼트를 건드리지 않고 두 개의 수평 볼트를 해체하여 기어박스를 제거할 수 있도록 설계되어 있었다.

API(American Petroleum Institute) 표준 599 (*Metal Plug Valves - Flanged, Threaded and Welding Ends*)에 아래 조항이 있다.

Valves supplied with the capability of mounting actuators or gear operators shall be capable of doing so without removal of any [pressureretaining] parts (e.g. body bolts, bonnet bolts, flange bolts, packing gland bolts, packing retaining stem nut, etc.). 밸브에 부착된 기어 구동기로 작동하는 밸브는 유압유지 구성품 (예, 몸체 볼트, 본넬트 볼트, 플렌지 볼트, 패킹 압착 볼트, 패킹 고정 너트)의 어떤 것에 대한 제거 없이도 동일한 기능을 수행할 수 있어야 한다.

이번 사고와 관련된 플러그밸브는 유압유지 부품 제거 없이 기어박스를 제거할 수 있기 때문에 위 API 표준 599 조항을 준수했다. 담당자는 유압유지 탑캡과 지지브래킷을 밸브몸체에 고정하는 네 개의 수직 볼트가 아닌 기어박스과 지지브래킷을 연결하는 두 개의 수평 볼트를 제거할 수 있었다. 그러나 담당자는 그림 5가 말해주듯 두 개의 수평 볼트가 아닌 네 개의 수직 볼트를 제거하면 기어박스를 해체할 수 있을 것이라고 생각했었다.



그림 5. 사고에 관련된 기어박스 지지브래킷 사진

화학사고조사위원회는 플러그밸브 제조사(Durco)가 1984년 신형 플러그밸브를 출시했으며 신형 설계에서는 기어박스 지지브래킷을 유압유지 탑캡 고정 볼트가 아닌 별도의 볼트를 이용하여 밸브몸체에 연결하도록 되어 있다는 것을 알게 되었다(그림 6 참조).

배튼루즈 정제공장 알킬레이션 공정실 내에 설치된 97%의 플러그밸브는 Durco 사의 신형 플러그밸브인 것으로 조사되었다. 신형 플러그밸브는 기어박스 지지브래킷이 유압유지 탭캡이 아닌 밸브몸체에 연결되도록 되어 있어 향후 동일사고 재발 방지에 도움이 될 것으로 전망된다.

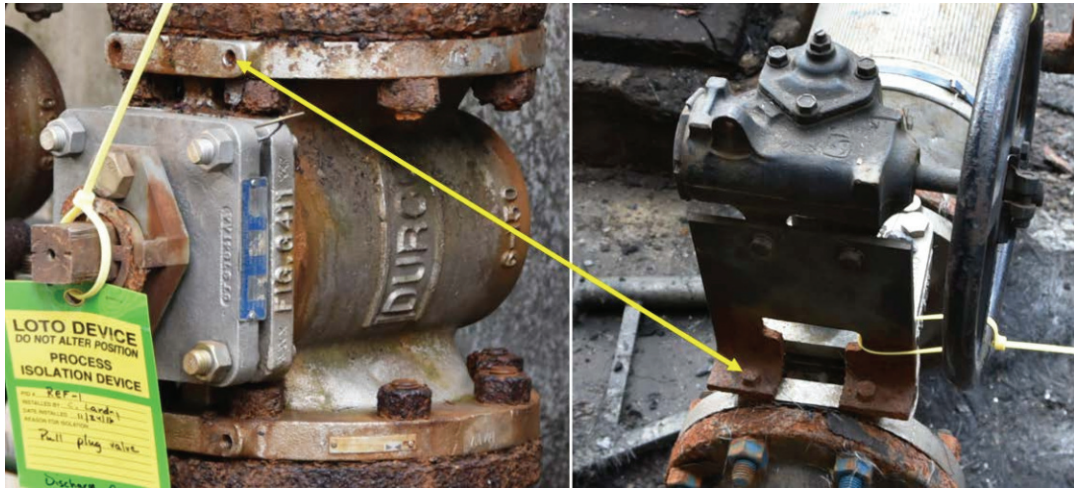


그림 6. 신형 플러그밸브의 기어박스 지지브래킷과 밸브몸체와의 연결 방식 개선 현황

위험을 줄이고 대형 사고를 예방하기 위해서는 위태통제위계(hierarchy of controls)의 효과적 실천이 중요하다. 위태통제위계는 위해 경감 안전조치의 효과를 평가하는 방법이다. 배튼루즈 정제공장의 구형 플러그밸브 설계가 API 표준 599을 충족시킨다는 점은 사실이지만, 해당 구형 밸브를 신형으로 교체하는 안전조치는 위태통제위계에서 상위에 해당하며 이번 사고를 예방할 수 있었을 것이다. 구형 설계는 API의 인적 성능(human performance) 개선을 위한 안전지침 격인 “적법한 행위는 용이하게 잘못된 행위는 어렵게 되도록 설계”를 무시하고 있다.

### 3.2.2 장비 설계 모범 실천

장비 설계에 있어서 중요한 서적인 Don Norman 박사의 저서 ‘일상사물 설계(The Design of Everyday Things)’는 CCPS (Center for Chemical Process Safety)에서 출간해온 아래 저서에서 인용되어 왔다.

- (1) 공정 안전에서의 인적 과실 예방을 위한 안내서(Guidelines for Preventing Human Error in Process Safety)
- (2) 화학공정사고 조사를 위한 안내서(Guidelines for Investigating Chemical Process Incidents)
- (3) 플랜트 화학공정안전의 기술 관리를 위한 안내서(Plant Guidelines for Technical Management of Chemical Process Safety)



Norman 박사의 저서 ‘일상사물 설계’에서 사용성 공학과 인지 분야의 과학자인 Norman 박사는 Three Mile Island 원자력발전소 사고를 분석했다. Norman 박사는 단순기계고장이라는 오진이 어떻게 원자로 파괴와 미국 원자력산업의 제동을 야기했는가를 설명했다. Norman 박사는 또한 사고조사위원회가 찾은 설계결함이 아닌 운영자에게 비난이 집중되는 방식에 대해서도 다음과 같이 설명했다.

인적 과실”은 표면으로 드러나는 것이기 때문에 담당자는 사고에 대한 비난을 받았다. 그러나 위원회는 플랜트 제어실 설계에 결함이 있어서 인적 과실은 필수불가결이었다는 사실을 알게 되었다. 즉 운영자 과실이 아닌 설계 결함이 원인이었다는 것이다. 여기서 교훈은 간단하다. 사람이 사용하는 사물을 설계하는 것이기 때문에 기술과 사람 모두를 이해할 필요가 있다는 것이다.

‘일상사물 설계’에서 Norman 박사는 사람들이 장비를 다룰 때 의도하지 않았던 문제와 결과가 나타날 수 있는 이유를 설명했다. “설계는 사물이 작동하는 방법, 사물을 제어하는 방법 및 사람과 기술 간의 교류작용과 연관된다.”라고 Norman 박사는 언급했다. 사람-기계 교류작용에서 문제가 발생하는 데는 인간 행위에 대한 장비 설계자의 불충분한 이해를 포함하여 여러 이유가 있다고 한다. Norman 박사는 특히 장비 사용법을 완벽하게 고려하지 못한 장비 설계로 도출되는 잠재적 문제와 위협에 대해서 우려했는데 “일상물건에서 이런 일이 발생한다면, 그 결과는 처참할 것이며, 산업공정에서 발생한다면, 사고, 부상, 심지어 사망까지 초래할 것이다”라고 했다. Norman 박사는 (배튼루즈 정제공장에서 발생한 것과 같은) 장비 설계 사고는 사람에 대한 요구조건에 초점이 맞춰진 것이 아닌 시스템 요구조건에 초점이 맞춰진 설계 때문에 발생한다고 하였다.

‘공정산업에서의 성능 개선을 위한 인적요인 방법(Human Factors Methods for Improving Performance in the Process Industries) 저서에서 CCPS는 사고조사팀에게 사고원인을 개인의 책임으로 돌리려 하지 말고 그 행위가 일어난 근원적인 사유, 특히 아래 사항을 포함하여 설계 결함과 관련된 사유를 찾으려는데 치중할 것을 당부했다.

- 장비 설계(Design of equipment)
- 작업 설계(Design of the task)
- 업무 환경 설계(Design of the work environment)

Kletz는 그의 저서 ‘인적과실에 대한 엔지니어의 시각(An Engineer’s View of Human Error)’에서 다음과 같이 언급했다.

인적과실 때문에 사고가 발생한다고 말하는 것은 아무런 도움이 되지 않는다. 이는 건설적인 조치를 이끌어내지 못한다. 우리가 할 수 있는 것은 단지 조금 더 조심하세요라고 말하는 것뿐이다. 반대로 더 나은 설계로 사고를 막을 수 있다고 말한다면 재발을 방지할 수 있는 조치를 취할 수 있다.

Sidney Dekker는 그의 저서 ‘인적과실 이해를 위한 필드 가이드(The Field Guide to Understanding Human Error)’에서 인적과실로 사고가 발생한다는 인식에 정면으로 맞섰다.

나는 “인적과실”이라는 단어가 편리하지만 오해를 야기하는 설명적 단어, 또는 우리가 과거를 체계화하여 이해하는데 돕는 역사에서의 중재자 정도 이상의 의미를 갖는다고 생각하지 않지만 인적과실에 대한 책을 쓰고 있다. 처음에는 “인적과실”이라는 이런 개념이 우리 이해를 도왔을 것이다. 하지만 이런 개념은 우리가 속한 조직에서의 안전과 위험의 근원을 현실적으로 이해하는 우리의 사고능력을 빠르게 어지럽힌다.

최근에, 사물이 잘 못 되서(things go wrong) 사고가 일어나는 이유에 대해서 토론하는 영상에서 Dekker는 다음과 같이 말했다.

그런데 사물이 잘 못 되는 이유가 뭐죠? 우리는 인적과실 때문에 또는 부속품 뭔가가 망가져서 사물이 잘 못 된다고 생각했었습니다. 그러나 오늘날 우리는 절차서(procedures), 조직문화(culture), 장비설계(design of equipment), 감독(supervision), 업무 관행(work practices)과 같은 조직 내의 많은 것들이 잘 못 되어 있거나 오랜 기간 동안 잘 못 되어 있었기 때문에 사물이 잘 못 된다고 생각합니다.

Dekker와 같이 Norman 박사도 인적과실이 산업사고의 주된 원인이라는 고정관념을 타파하고자 노력했으며 Norman 박사는 또한 다음과 같이 언급하며 모범 설계(good design)의 중요성을 더욱 강조했다. “대부분의 산업사고(약 75~95%)는 인적과실이 원인이라고 합니다. 어떻게 이렇게 많은 사람들이 이렇게 무능할 수 있을까요? 나의 대답은 그들은 무능하지 않다는 겁니다. 이는 설계 문제(design problem)인 겁니다.” “제 경험에 비춰볼 때, 인적과실은 보통 설계 결함(poor design)의 산물입니다. 즉 인적과실이 아닌 시스템오류(system error)라 해야 합니다. 인적과실은 우리 본성에 내제되어 있는 한 부분인 것입니다. 시스템 설계는 인적과실을 고려해야 할 것입니다. 개인의 책임으로 돌리는 것은 일처리 상 편할 수 있겠지만, 한 사람의 단일 행위로 재앙을 야기하도록 시스템이 설계된 이유는 뭐죠?”

장비 설계 문제를 설명하기 위해서 Norman 박사는 매일 사용하는 문을 예로 들었다. 푸싱도어(pushing door)는 문이 밖으로 젖혀져서 열리는 것을 말하며 풀링도어(pulling door)는 안으로 밀쳐져서 열리는 문을 말한다고 Norman 박사가 설명했다. 문은 단순한 장치지만, 이렇게 설계된 문은 종종 사람에게 혼란을 주며 대부분의 사람들이 한 번 짚은 당황한 경험을 했었을 것이다. Norman 박사는 말한다. “문 설계는 시행착오 없이 어떤 설명도 없이 어떻게 열리는지를 알 수 있게 해야 한다.” Norman 박사는 채광선, 틀, 힌지가 없어서 세련되고 매력적인 문, 그렇지만 그 문에 익숙하지 않은 사람들은 그 문이 어떻게 작동하는지 알기 힘든 문을 걸치레용 문(a door built for appearance)이라고 설명했다. Norman 박사는 이런 일상적인 사례를 바탕으로 발견가능성(discoverability)

과 이해(understanding)라는 두 가지 중요한 특성을 가지고 모범 설계를 설명하였다.

- 발견가능성: 가능한 조치(actions)와 그 조치 장소 및 방법을 잘 찾아낼 수 있는가?
- 이해: 의도가 무엇인가? 장치의 본래 사용 용도가 어떻게 되는가?

Norman 박사의 걸치레용 문 사례와 유사하게 이번 사고에 연루된 구형 플러그밸브는 모범설계 특성이 결여되어 있다. 지지브래킷이 기어박스의 일부로 보일 수 있도록 설계되어 있어서 기어박스 제거가 지지브래킷 제거를 요하지 않는다는 것이 담당자에게 충분히 명확하지 않았다. 배튼루즈 정제 공장의 구형 플러그밸브 설계는 기어박스 부착만을 위한 전용 연결 지점이 없었다. 밸브 설계자는 탐캡 연결 지점만을 제공했으며 이 연결 지점은 기어박스 지지브래킷을 부착하는데 사용되었다. 그러나 이번 사고에서 보여준 것과 같이 지지브래킷 제거는 고도로 위험한 화학물질의 누출을 초래할 수 있다. 의도치 않은 해체를 피하기 위해서 밸브설계자는 논리적 설계 접근법을 취했던 것으로 보인다. 즉 지지브래킷을 탐캡에 고정시켰으며 기어박스를 지지브래킷에 부착하기 위한 별도의 연결 지점을 설계했다. 밸브 설계자는 이 설계방식이 완벽하다고 여겼을지 모르지만, 고장 난 기어박스를 제거해야 하는 담당자에게는 지지브래킷 또한 기어박스의 일부라고 판단할 가능성이 있었다.

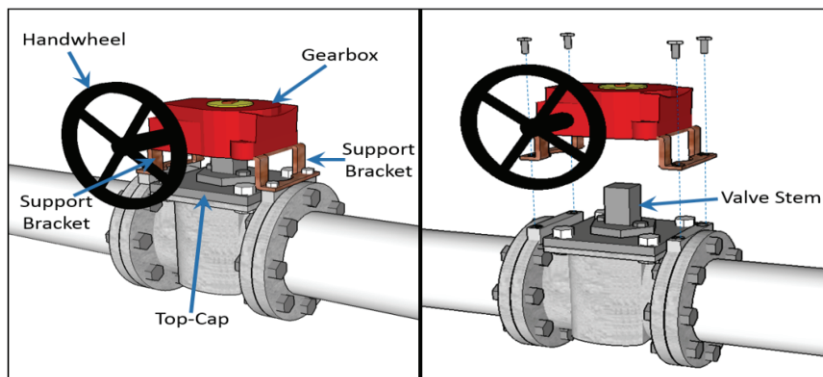


그림 7. 신형 플러그밸브 설계에서의 기어박스 어셈블리 제거 방식

알킬레이션 공정실 내에 설치된 구형 플러그밸브 수가 적다는 점, 고장 난 기어박스 제거를 수행하는 직원에게 안내하는 문서화된 절차 및 훈련이 없었다는 점 등의 여러 쟁점이 복잡하게 얽히면서 사고 위험은 더 크게 증가했다. 알킬레이션 공정실 내에서 많이 사용되는 신형 플러그밸브는 개선된 설계 방식을 취하고 있다. 신형 설계는 기어박스와 지지브래킷의 어셈블리 일체 제거시에도 화학 누출이 일어날 가능성을 배제시켰다. 밸브 설계자는 기어박스 지지브래킷을 고정하는 별도의 연결 지점을 제공했으며 부착 위치는 유압유지 구성품이 아니었다. 신형 밸브 설계에서는 작업자가 기어박스와 지지브래킷 모두를 제거해도 화학 누출이 일어날 수 없는 형태다.

### 3.2.3 인적요인

OSHA(Occupational Safety and Health Administration)의 PSM(Process Safety Management) 표준은 공정과 관련된 위태를 식별·평가·통제하는 절차를 다루는 29 C.F.R. § 1910.119(e)(1) 조항에 따라 회사가 상세한 PHA(Process Hazard Analysis)를 수행할 것을 요하고 있다. 인적요인 평가는 PHA 단계에서 수행된다.

API는 PHA를 통한 인적요인 해결 방법을 개선시킬 목적으로 인적요인 평가도구(tool)를 공개했다. API 인적요인 평가도구의 범위에는 고장 난 플러그밸브 기어박스의 반복적인 제거와 같은 현행 운영 방식과 인적 작업이 포함된다. 인적요인 평가도구는 기어박스 제거를 위한 절차서와 훈련 부재를 포함한 배튼루즈 정제공장에서 플러그밸브 기어박스와 관련된 신뢰성 쟁점에 대한 논의를 촉발시킬 수 있었던 몇 가지 질문을 제공한다. API의 인적요인과 관련한 질문 몇 가지는 다음과 같다.

- (1) 설계 결함으로써 빈번히 작동하지 않는 장비가 있는가?
- (2) 어떻게 하면 인적과실이 사고를 야기하거나 불안한 상태를 초래할 수 있는가?
- (3) 일상적 업무에 대한 정의는 잘 되어 있는가?
- (4) 훈련을 포함한 업무 지원은 적절한가?

가장 최근의 알킬레이션 공정실에 대한 PHA에서 배튼루즈 정제공장은 밸브의 운영적 쟁점과 관련된 인적요인에 대한 어떤 논의도 문서로 남아있지 않았다. PHA 단계의 인적요인분석이 작업자들로 하여금 기어박스 제거에 대해 토론토록 촉발시켰었다면 회사는 의도치 않은 기어박스 제거방식의 잠재적 위태를 식별했었을 것이다. 이것이 가능했다면 잠재적 위태가 있는 밸브는 PHA의 적법 조치에 따라 교체되거나 적절한 수정보완이 이루어졌을 것이며 이로 사고를 피할 수 있었을 것이다.

배튼루즈 정제공장 담당자들은 화학사고조사위원회에 핸드휠로 밸브를 돌리지 못하는 상황에 직면했었다고 알렸다. 기어박스 해체 작업이 빈번하다 보니 세 개 밸브의 기어박스는 늘상 제거되어 있었다고 했다. 알킬레이션 공정실 기어박스와 관련한 쟁점 이력이 있었다면, 배튼루즈 정제공장은 구형 밸브 설계가 대재앙 결과를 야기할 수 있는 의도치 않은 유압유지 구성품의 해체를 초래할 수 있다는 것을 인지하는 운영적 난제를 평가했어야만 했었다.

### 3.3 문서화된 절차서

인적요인 평가 일환으로 배튼루즈 정제공장의 플러그밸브 기어박스 제거를 위한 문서화된 절차서 부재에 대한 전반적인 조사를 실시했다. 회사가 작업 전용 절차서 없이 작업 수행을 허용하면 예기치 못한 사고 발생가능성이 커진다. 화학사고조사위원회는 과거 몇 차례의 조사에서 절차서 부재 사안을 다루었다. 예를 들면, 2013년 6월 윌리엄스 올레핀스(Williams Olefins) 플랜트 폭발화재 조사에서 밸브를 개폐하는 것과 같은 현장 담당자의 행위가 공정에 반드시 필요할 때 이런 행위가 작업자에게 위태로 나타날 수 있다는 것을 거론했다. 이와 같은 현장 운영을 시작하기 전에 회사의 공정안전관리 시스템은 절차서를 개발하고 완벽한 위태평가를 통한 위태 식별·통제를 선행해야 한다. 화학사고조사

위원회 조사에서 언급하였듯이, 상세히 문서화된 절차서는 운영활동이 안전하며 위태가 효과적으로 통제되고 있다는 것을 보장하는데 도움이 될 수 있다. ‘효과적 운영과 유지관리 절차서 작성 지침 (Guidelines for Writing Effective Operating and Maintenance Procedures)’ 저서에서 CCPS는 아래와 같이 ‘절차서는 공정별로 나타나는 위태를 식별해야 한다’고 언급하고 있다.

절차서는 또한 사고로 인한 화학 누출, 노출 및 부상을 예방하는데 필요한 사전주의사항을 언급해야 한다. 이런 공정안전정보는 절차서 개발에서 중대한 요소이다. 이 정보를 이용하는 것은 파악된 위태가 적절하게 처리되어 있다는 것을 보장해 준다.

윌리엄스 올레핀스 사고 조사에서 화학사고조사위원회가 알게 된 것은 한 운영감독관이 재가열로를 통과하는 수량의 감소 원인을 파악하기 위한 현장 고장수리 운영(field troubleshooting operation)을 수행했다는 것이다. 이런 고장수리 운영은 게이스머(Geismar) 시설에서 허용되는 관행이었으며 위태분석 수행 또는 활동을 위한 절차서 개발 없이도 수행할 수 있었다. 여러 사고요인들 가운데, 이런 관행으로 인해 운영자와 운영감독관이 사망하는 재앙적 파괴를 초래했다. 화학사고조사위원회는 윌리엄스 올레핀스 사고에 대해서 다음과 같이 언급했다.

운영 절차서는 충분히 상세하게 작성하되 순서상 올바른 단계를 포함하여 중대한 단계의 효과적 수행 보장을 담보할 수 있어야 한다. 담당자와 관련 직원은 절차에 대한 훈련을 이수하여야 한다. 경영진은 정확한 절차서를 위한 설명서를 발간해야 한다.

두 사건 모두에서 중요한 안전 교훈을 일러주는데, 공정안전관리 프로그램 결함은 재앙적 사고를 야기할 수 있다는 사실이다.

### 3.4 훈련

OSHA는 29 C.F.R. § 1910.119(g)(1)(i)에 따라 공정 담당 직원들이 공정 전반과 운영 절차에 대한 훈련을 이수할 것을 요구하고 있다. 해당 훈련에는 특수 안전 및 보건 위태 필수사항, 정지를 포함한 비상 가동 및 근무자 업무에 적용 가능한 안전작업 실무가 포함되어야 한다. 또한 엑손모빌과 금속연대노조 간의 협정서에는 작업자 훈련에 대한 약속을 포함하고 있는데 “필요시 담당운영자는 강의실 실습을 포함한 현장 기계 훈련을 받는다”라고 언급하고 있다. 배튼루즈 정제공장은 상당한 직원훈련 기록을 화학사고조사위원회에 제시하였다. 하지만 어떤 훈련에도 플러그밸브에서 고장 난 기억박스를 해체하는 내용을 담고 있지 않았다. 위원회는 배튼루즈 정제공장 훈련 프로그램의 효과성에 대한 이해를 얻기 위해서 다수의 운영담당자와의 인터뷰를 가졌다.

사고 플러그밸브의 사용 설명서에는 다음과 같이 유압 유지용 탭캡 볼트를 운영담당자가 제거하지 말도록 경고하고 있다.



경고: 기어박스나 부속품 해체시 탑캡 볼트를 이완시키거나 제거하지 마시오. 지지브래킷에서 기어박스를 해체하여 기어박스를 제거하시오.

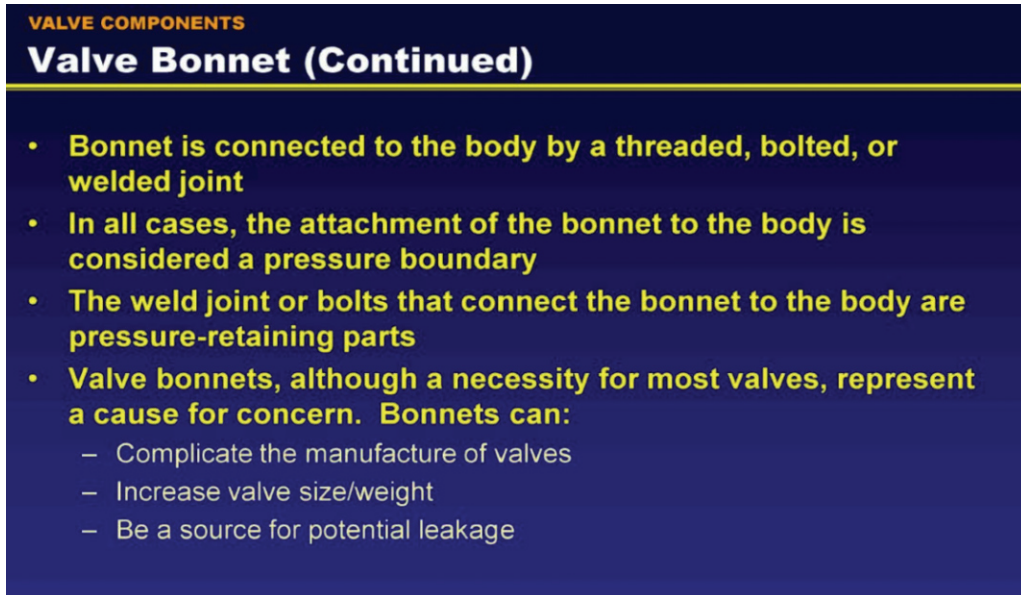


그림 8. 배튼루즈 정제공장의 “수동밸브기초” 훈련 교재 중 한 슬라이드

그러나 이 경고는 배튼루즈 정제공장 작업자들에게 전파되지 못했다. 또한 배튼루즈 정제공장 운영담당자 훈련 내용에는 플러그밸브에서 고장 난 기억박스 제거시 잠재적 대재앙에 대한 정보가 들어있지 않았다. “수동밸브기초(Manual Valve Basics)”라는 정제공장의 운영담당자 훈련 교재는 150장 이상의 슬라이드로 구성되어 있으며 플러그밸브를 포함한 9종 수동 밸브에 대해서 다루고 있었다. 이 중 한 슬라이드가 유압 경계로써의 탑캡(bonnet)을 설명하면서 탑캡 볼트를 유압유지 파트로 인식하고 있었다(그림 8 참조).

반복되는 플러그밸브 기억박스 신뢰성 쟁점에도 불구하고 운영담당자들은 플러그밸브에서 기어박스를 제거하는 방법에 대한 공식적 훈련을 받지 못했다고 위원회와의 인터뷰에서 말했다. 이런 상황에서 플러그밸브의 고장 난 기억박스 해체법은 운영담당자별로 달라질 수밖에 없었다.

### 3.5 조직문화

배튼루즈 정제공장 조직문화에서는 상세한 절차서와 훈련 부재에도 불구하고 알킬레이션 공정실내의 고장 난 플러그밸브 기어박스를 운영담당자가 제거하는 것이 허락되어 있었다. 엑손모빌 사측도 담당운영자가 플러그밸브에서 고장 난 기억박스를 제거하는 것이 “허용되는 실무”라는 것을 알고 있었다.

2016년 11월 22일 사고와 관련하여 위원회가 파악한 배튼루즈 정제공장 조직문화의 문제점은

다음과 같다.

- (1) 장기 사용된 기어박스 신뢰성 쟁점이 단 한 번도 조사되지 않았으며 수정되지 못했다.
- (2) 운영담당자는 플러그밸브 기어박스의 고장을 직면하면 문서화된 절차서와 이와 관련한 훈련 이수 없이도 기어박스 제거를 실시했다.
- (3) 정제공장의 인적요인분석은 사전에 이런 위태를 식별하고 통제하지 못했다.

화학사고조사위원회는 엑손모빌 토랜스 정제공장(ExxonMobil Torrance refinery)에서 있었던 FCCU(Fluid Catalytic Cracking Unit) 내에서의 폭발사고를 조사하면서 조직문화를 거론하였다. 토랜스 정제공장의 잦은 공정안전사고 때문에 위원회는 토랜스 정제공장에서의 공정안전사고 예방을 돕기 위해서 정제공장 경영진이 공정안전지속개선프로그램 이행을 고려할 것을 권고했다. 위원회는 배튼루즈 정제공장에도 조직문화에서의 공정안전 강화를 위하여 동일한 권고사항을 제안하다.

## 4 재발 방지대책

화학사고조사위원회는 정제공장을 포함하여 화학 제조 시설이 있는 공장에 아래의 핵심 교훈을 전파한다.

- (1) 기계와 여타 장비에서 운영담당자가 느끼는 애로사항과 관련된 인적요인을 조사하고 파악된 위태를 완화시키기 위한 위태통제위계를 적용해야 한다. 이번 사고의 경우 배튼루즈 정제공장은 알킬레이션 공정실 내의 대략 3%의 플러그밸브가 유압유지 구성품의 의도치 않은 해체를 야기할 수 있는 기어박스 부착 설계로 되어 있다는 사실을 평가했어야만 했었다. 또한 이런 사실을 파악했다면 정제공장은 위태통제위계를 적용하여 취약한 플러그밸브에 대한 완화 전략을 수립했어야 했다.
- (2) 잠재적으로 위태로운 작업을 수행하는 작업자를 위한 상세하고 정밀한 절차서를 수립해야한다. 이번 사고의 경우 플러그밸브에서 고장 난 기어박스를 제거하는 전용 절차서를 수립했어야 했다. 특히 절차서에서 혼란을 야기할 수 있는 다른 종류의 장비나 형상이 있을 시에는 더더욱 중요하다.
- (3) 예정된 작업 업무를 안전하게 수행할 수 있도록 보장하는 훈련을 작업자에게 제공해야 한다. 이와 같은 훈련에서는 위태 인식을 개선하고 화학 사고를 예방하는데 돕도록 공정과 장비에 집중되어야 한다.

## 5 참고문헌

- USCSB (2017) Key Lessons from the ExxonMobil Baton Rouge Refinery Isobutane Release and Fire (Incident Date: November 22, 2016), U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board, p.32.