



화학공장의 화재폭발사고 조사

강 미진 (MIJKang@seoultech.ac.kr)

매경안전환경연구원 연구위원

차례

- 화학공장의 화재/폭발사고 위험
- 화재/폭발의 특성
- 사고조사 절차
- 사고원인 및 경로 분석
- Case Study
- 결론

건조공정에서 폭발



사진 1

사고발생 공정동 내부 전경

출처: KOSHA 중대사고 조사보고서 (2011)

건조공정에서 폭발

□ 건조기 폭발

- ✦ 2011년 8월 0일(토)
- ✦ 경북 구미 소재 00 합섬1공장 기술연구소에서 UHMPE를 이용한 초고강력 폴리에틸렌 섬유 제조공정을 시험운전 중 Heptane 건조설비 (Drying chamber)에서 폭발·화재 발생
- ✦ 기술연구소 소속 직원 7명이 사상(사망 5명, 부상 2명),
- ✦ 건물벽체, 추출 및 건조기 관련 설비 전파

개방계 증기운 폭발



출처: KOSHA 중대사고 조사보고서 (2011)

개방계 증기운 폭발

□ 증기운 폭발

- ✦ 2011년 8월 17일
- ✦ 울산광역시 남구 현대00(주) 울산공장 PS(Polystyrene) 제조공정에서 정기보수 후 시운전 중에 2차 중합조의 반응폭주로 인한 압력상승으로 파열판 파열
- ✦ 파열판 토출배관으로 다량의 유증기 분출 → 증기운 형성, 증기운 폭발과 화재 발생
- ✦ 전 공정으로 전파되어 근로자 7명과 원부재료를 납품하기 위해 방문한 탱크로리 기사 1명 부상, PS제조공정 반파

밀폐계 증기운 폭발



출처: CSB 사고 조사보고서 (2006)

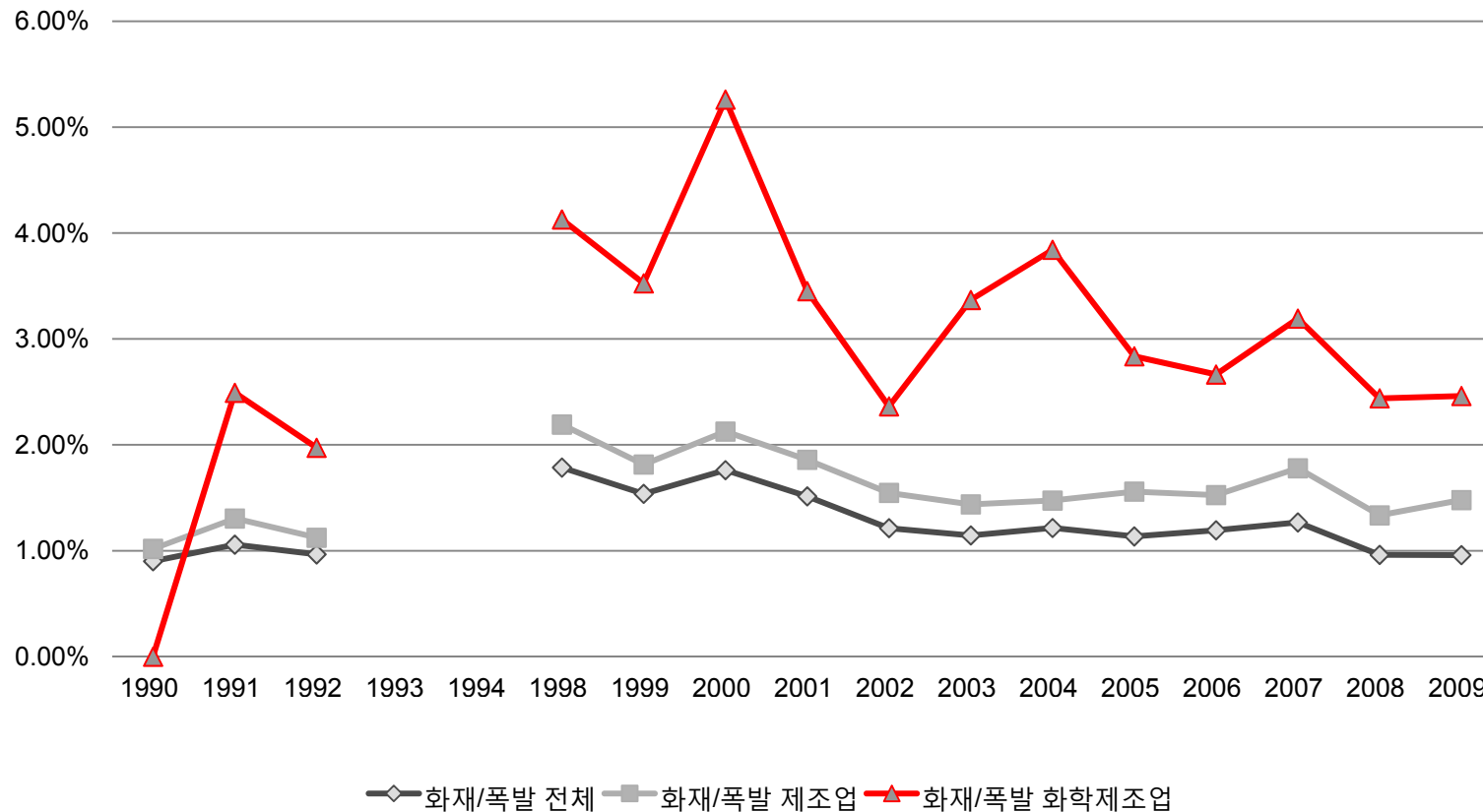
밀폐계 증기운 폭발

□ VCE in Danvers

- ✦ 2006. 11.
- ✦ Massachusetts, Danvers,
- ✦ 잉크 및 페인트 제조회사 구조물 내부에서 폭발
- ✦ 12,000 ft² 파손, 인근 주민 300명 이상 대피
- ✦ 주민 10명 입원, 주택 24채 파손

화학공장의 화재/폭발 위험

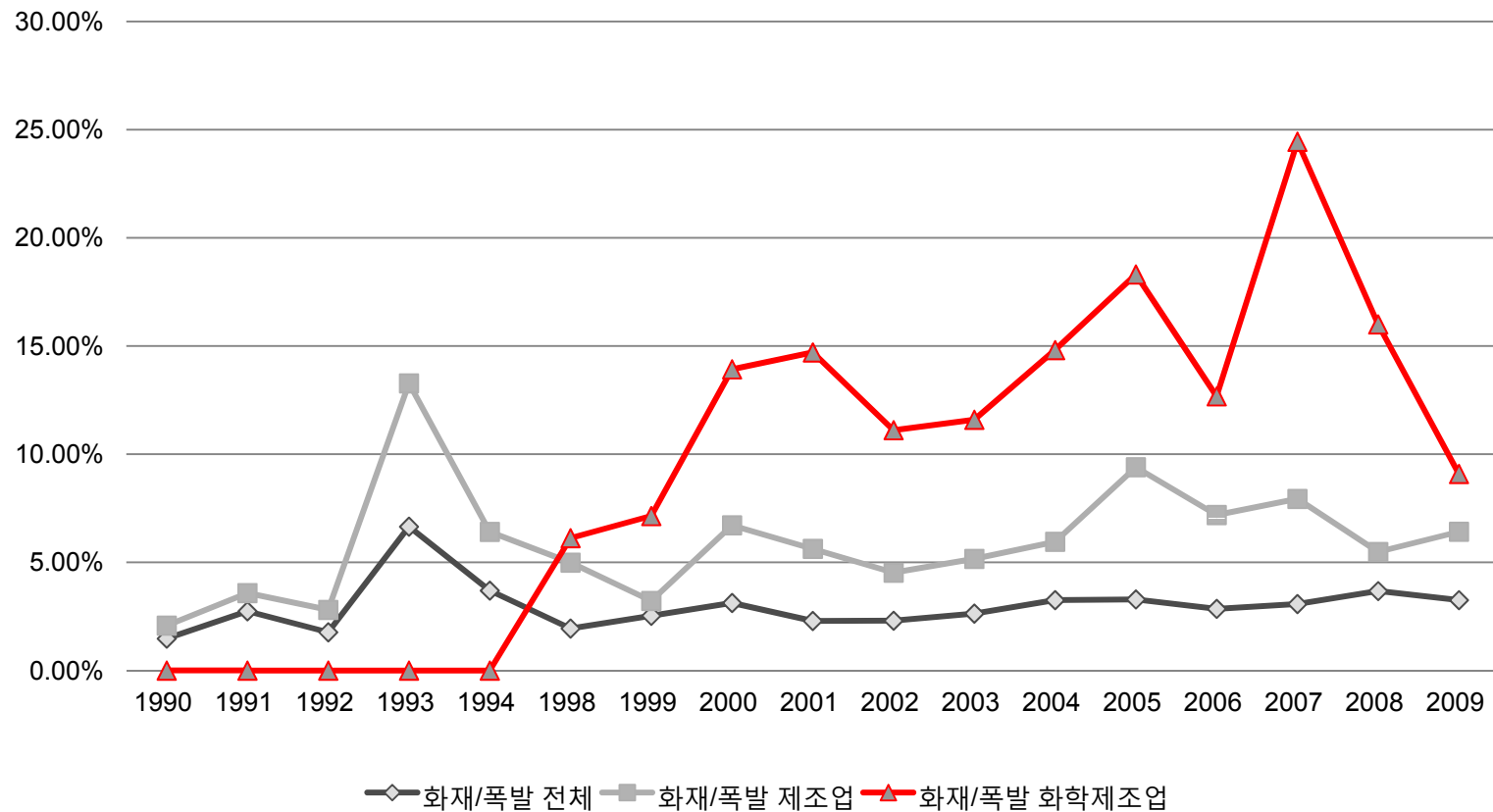
재해 형태별 재해자 비율



자료출처: 산업재해분석, 고용노동부 (2010)

화학공장의 화재/폭발 위험

재해형태별 사망자 비율



자료출처: 산업재해분석, 고용노동부 (2010)

화재/폭발사고 조사의 중요성

□ 화재/폭발사고의 피해규모 및 범위의 심각성

→ 사고 원인을 파악함으로써 재발 방지에 기여

□ 화학공장의 화재/폭발 위험

- ✦ 대부분 인화성 물질 취급

- ✦ 고온/고압의 운전조건 형성

- ✦ → 화재 및 폭발의 위험요인을 모두 내포하고 있음.

화재/폭발이란,

□ 화재란, 열과 빛을 수반하는 산화반응(연소)

✦ 연소 / 화재: 물질이 산소와 결합하여 에너지를 방출하는 화학반응

□ 폭발이란, 순간적으로 에너지를 방출하여 주위 공기의 밀도, 압력, 속도가 불연속적으로 변하는 상태

화재와 폭발의 차이

□ 에너지 방출속도의 차이

- ✦ 화재: 느린 속도로 에너지가 방출
- ✦ 폭발: 10^{-6} 초 단위로 에너지 방출, 충격파를 동반

□ 피해영향의 차이

- ✦ 화재: 복사열에 의한 피해
- ✦ 폭발: 과압 및 파편에 의한 피해, 복사열에 의한 피해(연소반응에 의한 폭발인 경우)

화재의 특징

□ 화재모델의 종류

- ✦ 액면화재 (Pool fire)
- ✦ 제트화재 (Jet fire)
- ✦ 플래쉬화재 (Flash fire)

□ 화재(연소)의 3요소

- ✦ 연료: 인화성 물질
- ✦ 산화제: 공기 또는 산소
- ✦ 점화 에너지: 열 또는 화염 등

폭발의 특징

□ 폭발모델의 종류

- ✦ 가압용기 폭발모델
- ✦ BLEVE: Boiling Liquid Expanded Vapor Explosion
- ✦ VCE: Vapor Cloud Explosion
- ✦ 분진폭발 등

□ 폭발의 요소

- ✦ 용기 내 압력의 상승
- ✦ 용기 취약부위 발생
- ✦ 화재요소의 빠른 조합(반응)

화재/폭발의 위험요인

□ 인화성 물질 취급

- ✦ 각종 원료, 연료, 제품, 중간생성물로서 존재하는 인화성 물질의 취급

□ 산소 접촉

- ✦ 인화성 물질과 공기의 접촉
 - 설비 외부로 노출, 설비 내부로 공기 유입
- ✦ 산화성 물질(산화제)과 접촉 등

□ 점화원 관리

- ✦ 높은 에너지와 접촉: 화염, 스파크, 고온의 설비 등

□ 설비 내부의 고압 형성

- ✦ 설계오류, 운전오류, 설비의 파손 등

화재/폭발사고 조사

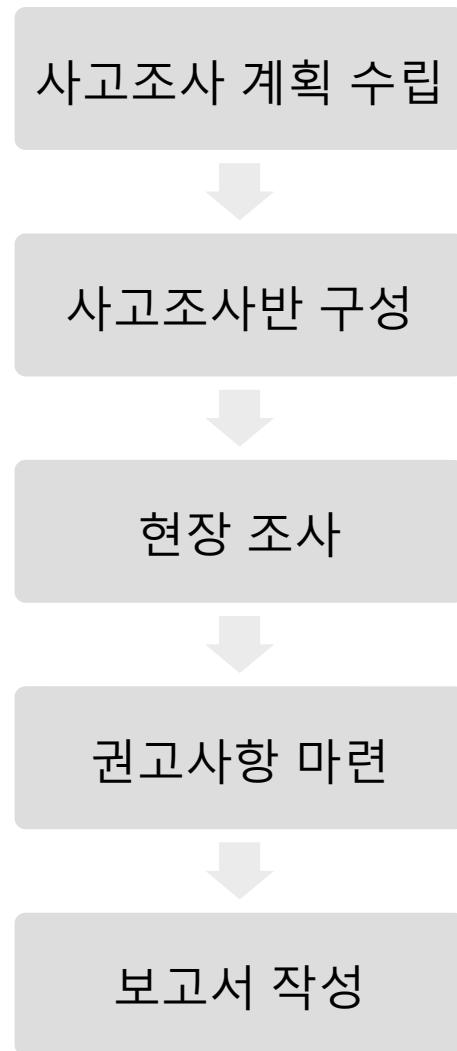
□ 조사의 목적

- ✦ 사고의 원인을 찾아 개선대책을 수립함으로써 유사 혹은 동일한 사고를 예방하고자 함.

□ 사고원인 분석 결과 및 대책의 분류

- ✦ 기술상 개선: 설비 및 운전절차 등에 대한 기술적 합리성 개선
- ✦ 안전교육 향상: 관리자 및 근로자의 안전의식 철저
- ✦ 관리시스템 개선: 운전, 점검, 보수, 안전작업 등에 대한 관리절차 개선
 - 인적 오류, 설비 오류 등 모든 오류에 대한 근원적 대책은 관리시스템의 개선으로 얻어질 수 있음.

조사 절차



□ 현장조사 시 주요 사항

- ✦ 현장 보존 및 빠른 조사 착수
- ✦ 현장 사진 및 동영상 촬영
- ✦ 관련 자료 및 증거의 수집
- ✦ 목격자 확보 및 정보 수집

사고의 형태가 다르더라도
사고조사 절차 및 현장조사는
유사한 절차와 원칙으로 수행

사고 조사

□ 사고조사반 구성

- ✦ 사고 발생 공정을 잘 알고 있는 공정담당자
 - 도급업체가 관련된 설비/공정인 경우, 해당 도급업체의 담당자 포함
- ✦ 사고조사, 분석에 대한 기술과 경험이 있는 기술자
- ✦ 사고조사에 지식과 경험이 있는 외부 전문가

□ 현장 자료 및 정보의 수집

- ✦ 사고원인을 파악하기 위해 필요 시 재현 시험 실시
- ✦ 목격자, 책임자, 피해자 등의 증언
- ✦ 주변 CCTV 등 방범설비를 통한 정보 확보
- ✦ 운전상황 기록물 등 확보

화재/폭발 사고의 현장 조사

□ 발화부(폭심부) 판단

- ✦ 화재/폭발 현장에서 **최초 발생위치**를 파악하여야 함.

□ 화학공장에서 최초 발생위치는 종종 이상상태 발생 설비에서 떨어진 곳에 위치.

✦ BP Texas Explosion

- Trouble 발생 설비 → ISOM tower
- 인화성 물질 누출 설비 → Splitter
- 폭발지점 → 인근 트럭

✦ 국내 울산 VCE

- Trouble 발생설비 → 중합조
- 인화성 물질 누출 설비 → 싸이클론 하부

화재/폭발 사고의 현장 조사

□ 발화부(폭발 중심부) 판단

- ✦ 화재/폭발 현장에서 최초 발생위치를 파악하여야 함.
- ✦ 발화부(폭발 중심부)에서 화재/폭발의 원인 도출
- ✦ 연소의 상승성, 불꽃, 연기, 열에 의한 흔적, 연소확대방향, 최초목격상황, 최근접 소화행적, 자동화재탐지설비, 보안설비 등에 의한 판단

□ 발화원 결정

- ✦ 나화, 고온의 표면, 단열압축, 자연발화, 정전기, 전기, 복사열, 충격마찰 등의 여러 가지 가능한 점화원 중에서 결정

발화부의 판단 (1)

□ 구조물 내부에서의 화재일 경우,

✦ 연소의 상승성

- V-pattern, U-pattern 등 관측 → pattern 하부가 발화부

✦ 불꽃, 연기의 흔적

- 불꽃에 의해 가연물이 깨끗이 연소된 경우 및 연기 등에 포함된 매연 등에 의한 흔적 관찰 → 흔적의 주변이 발화부

✦ 열에 의한 흔적

- 변색, 탄화심도, 용융, 박리, 하소 현상 → 발화부

✦ 연소확대 방향

- 소락, 만곡, 넘어짐, 뒤집힘 등 → 발화부

발화부의 판단 (2)

□ 최초 목격 상황, 최근접 소화행적

- ✦ 냄새, 소리, 불꽃 및 연기 등 최초 목격상황, 화재각지 후 소화기구, 소화전 등을 사용하여 소화하고자 한 행적

□ 자동화재탐지설비

- ✦ 화재감지기, 발신기 등에 의해 최초 화재발생 구역 판단

□ CCTV, 보안설비

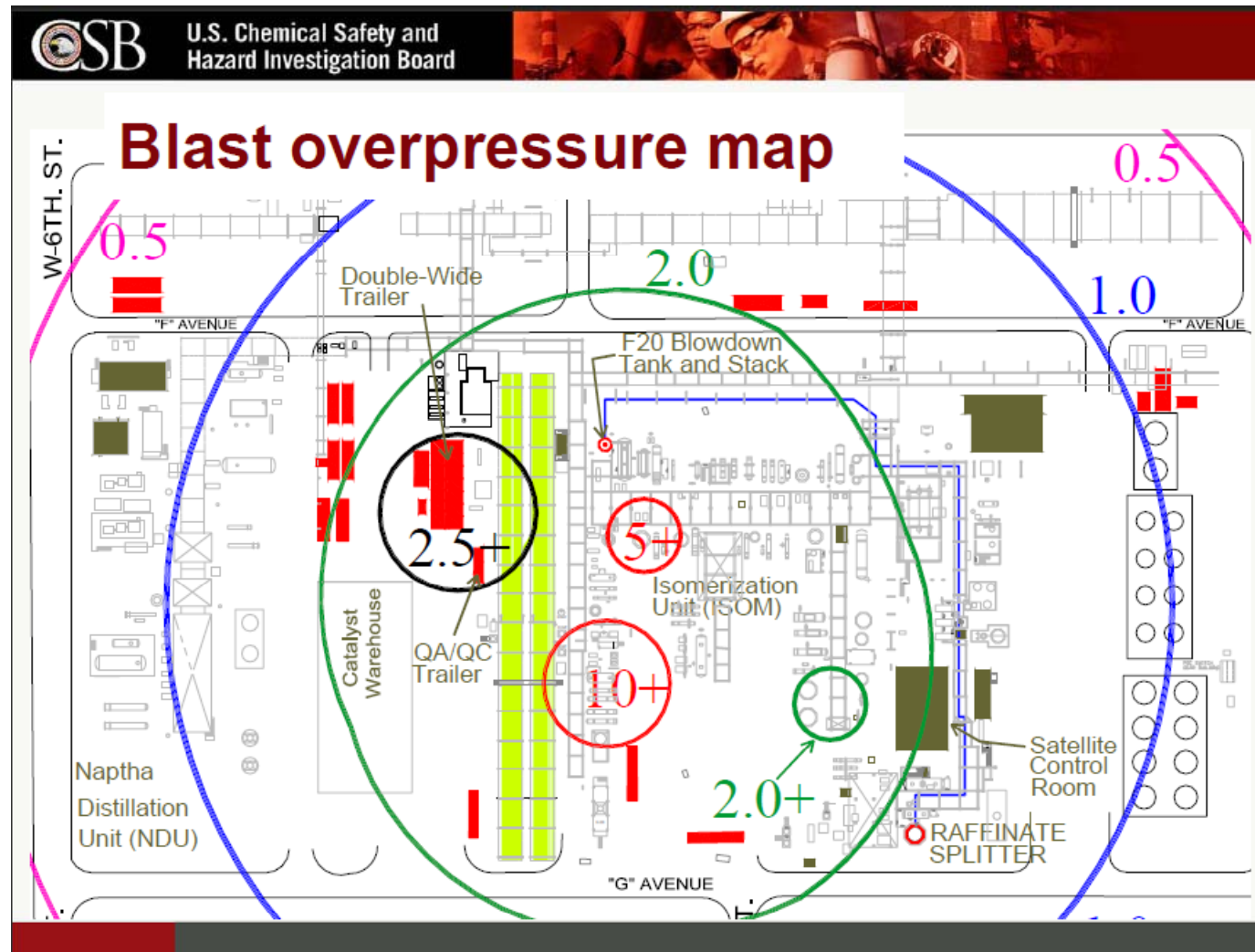
- ✦ 방법 등의 목적으로 설치된 설비로 발화부 판단

폭발 중심부의 판단

□ 폭발 과압에 의한 영향

- ✦ Positive phase : 폭발 중심부에서 바깥으로 충격파 전달
- ✦ Negative phase : 파편 등 증거들이 폭발 중심부를 향함.

BP Texas Explosion



출처: CSB 사고조사 보고서 (2007)



Figure 6. Damaged manway gasket, showing vapor release path

출처: CSB 사고조사보고서 (2006)

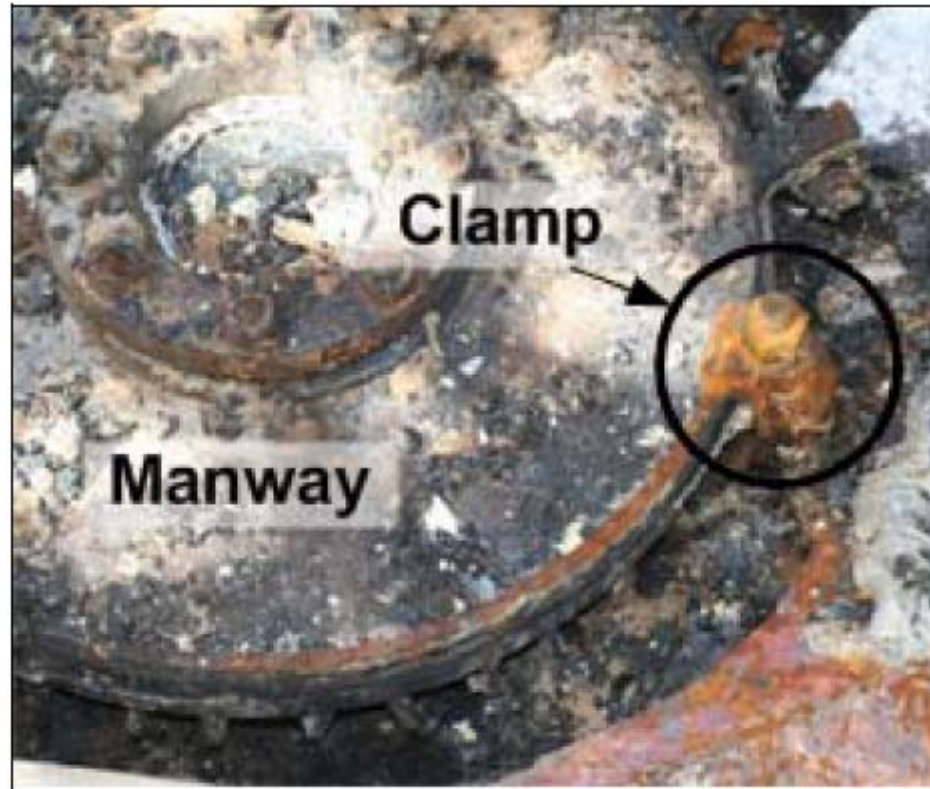


Photo courtesy of Morganton Department of Public Safety

Figure 5. One of four installed manway clamps

출처: CSB 사고조사보고서 (2006)

사고 원인 분석

□ 사고 발생장소 파악

- ✦ 구조물 내부, 각종 설비의 밀집지역, 장애물이 거의 없는 외부 등

□ 사고 형태 파악

- ✦ 액면화재, 제트화재, 플래쉬화재, VCE, 가압용기 폭발 등
- ✦ 주요 피해형태: 복사열, 과압, 파편 등

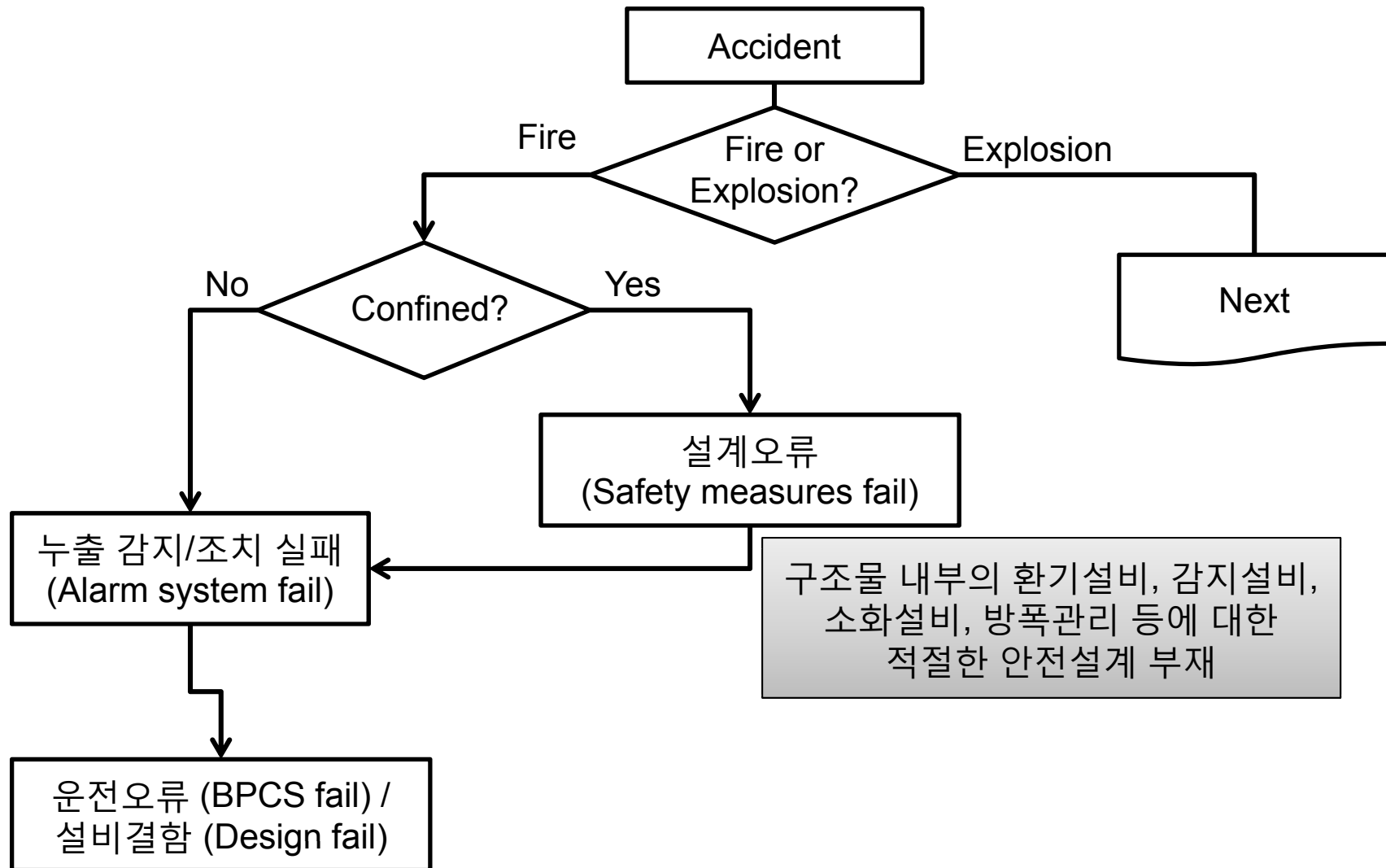
□ 사고 시기 및 기인 물질/설비 파악

- ✦ 정상운전, 비상운전, S/D, S/U, 위험작업 등
- ✦ 물질의 특성과 설비의 사양(운전/설계 압력/온도 등)

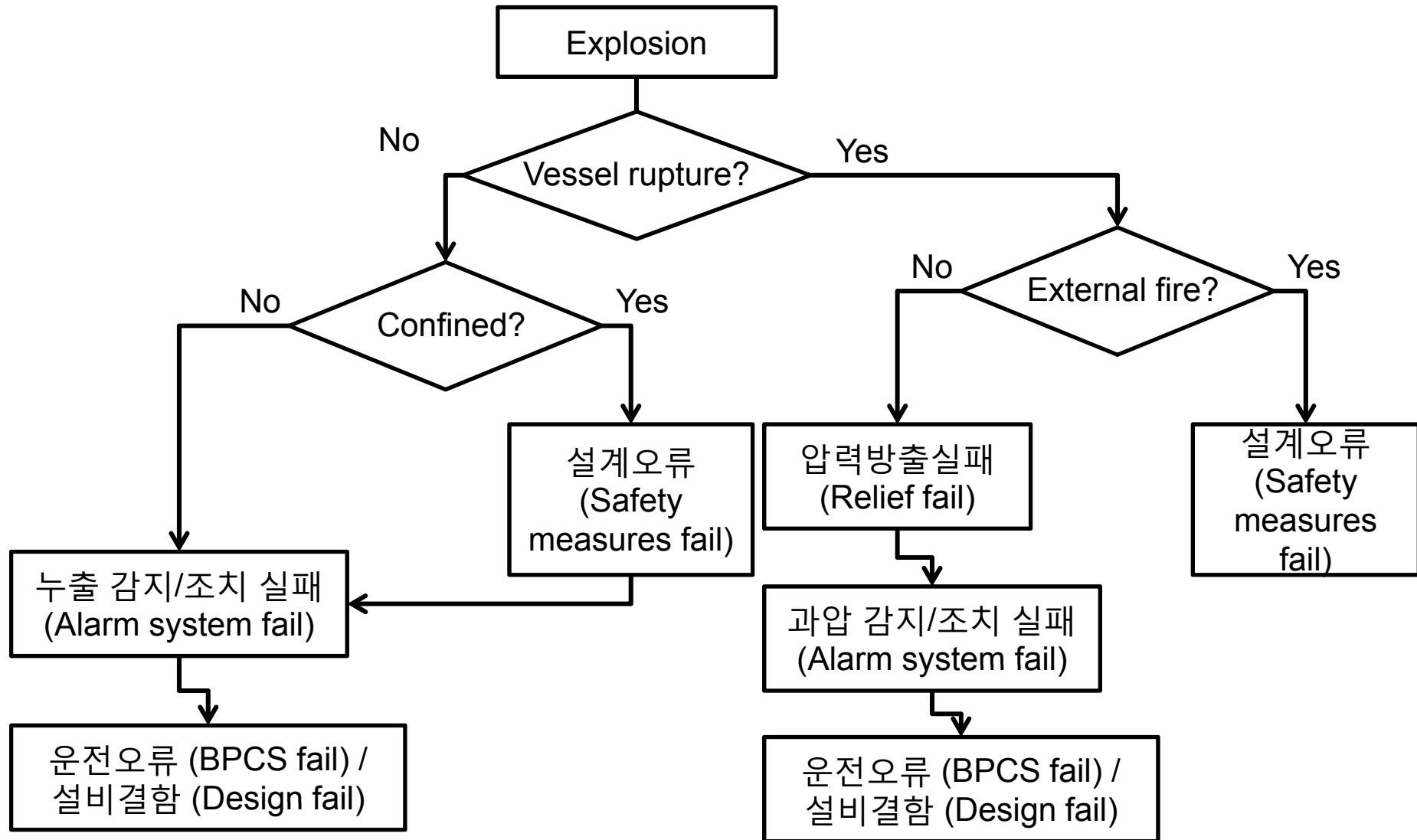
사고 경로의 파악

- 잠재위험요인이 사고로 전개되는 경로의 역순으로 파악
 - ✦ 사고설비에 관련된 위험성평가서 활용
 - ✦ Deviation의 발생원인, Safeguards의 실패 여부 등
- 사고형태에 따라 FTA를 통한 사고원인 분석
 - ✦ 화재/폭발사고가 발생한 장소에 따라 분류
 - ✦ 점화원 및 점화시기 파악
 - ✦ 설비의 이상현상이 발생하였을 것으로 예측되는 시점과 상황 파악
- 사고와 관련된 방호계층 파악
 - ✦ 방호계층의 (보호)단계 역순으로 파악

화재의 경로 - 예시



폭발의 경로 - 예시



사고 경로의 파악

□ 화재/폭발의 특징을 고려할 때,

- ✦ 인화성 물질의 누출 → 공기와 접촉 → 점화원과 접촉
- ✦ 점화시기에 따라, 누출공간에 따라 화재/폭발 분류
- ✦ 설비 내부 과압 형성 → 압력방출 실패 → 용기 파열

□ 사고발생경로를 차단하기 위한 기존의 안전조치

- ✦ 공정제어시스템, 이상 경보시스템, 조치시스템 등
- ✦ 안전조치의 실패인가, 안전조치의 부재인가?

Case Study - Korea

- 2011. 8. 울산 증기운 폭발
- 폭발위치(폭발의 중심부)는?
- 폭발 기인물질은?
- 점화원은?
- 폭발 기인물질의 누출시나리오는?

VCE in Korea

□ 폭발위치 : 싸이클론 하부

□ 폭발 기인 물질 : 유증기

✦ 폭발기인물질(SM/EB?)이 밝혀지면, 누출지점(설비)은?

□ 점화원

✦ 점화원이 밝혀지면, 점화원 관리/폭발위험지역 관리가 적절했는가?

□ 누출시나리오

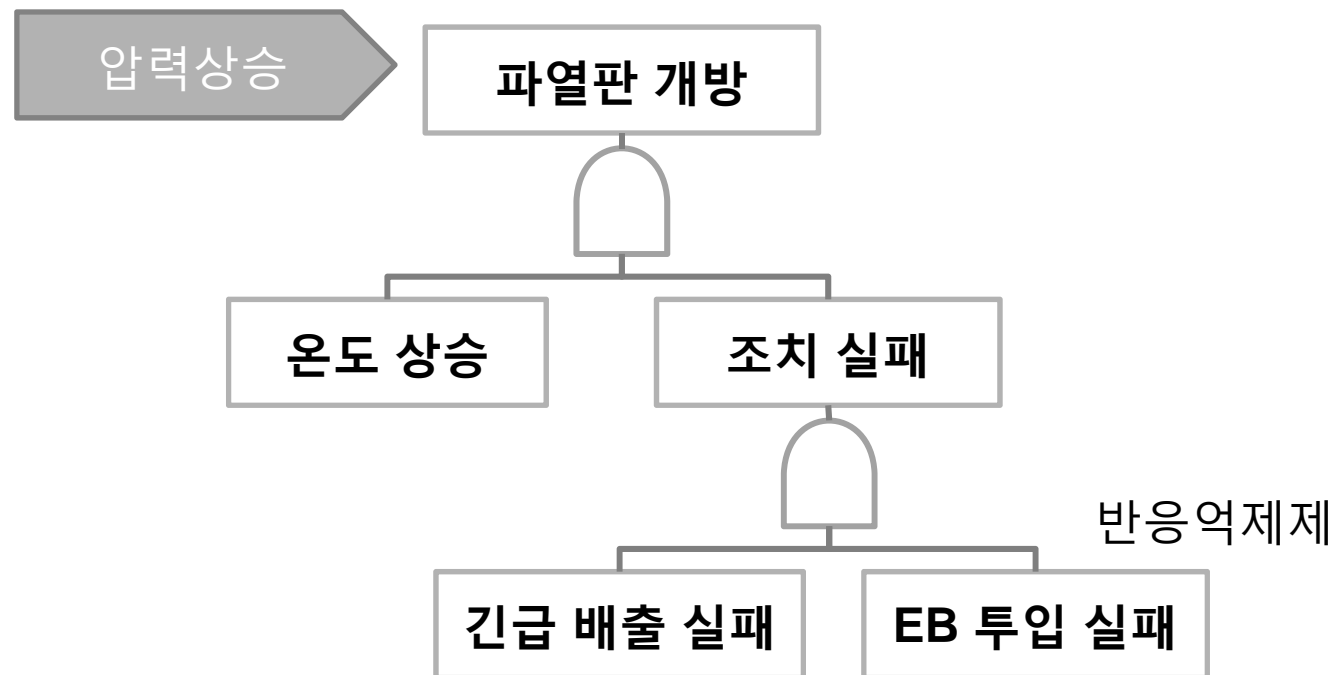
✦ 누출지점과 누출물질을 조합하여 누출시나리오 구성

✦ 폭발에너지를 통해 누출시나리오 확인

VCE in Korea - 누출시나리오

□ 중합조 파열판 파열

- ✦ 파열판 토출배관이 싸이클론으로 연결 → 설계의 문제점
- ✦ 파열판은 왜 열렸나?



VCE in Korea - 누출시나리오

□ 온도상승의 원인은?

- ✦ 반응폭주, 응축기 failure
- ✦ 이상반응(부반응)

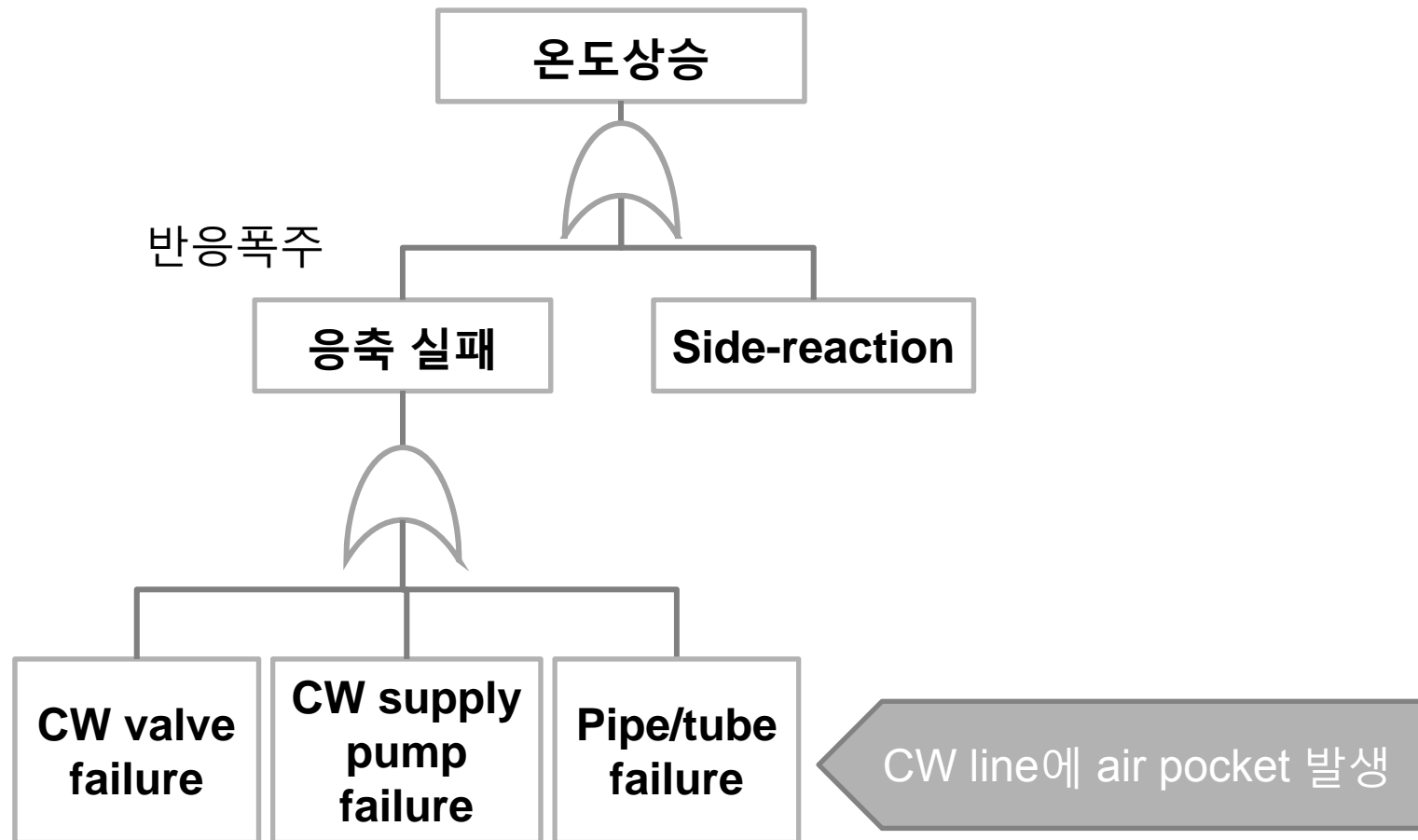
□ 응축기 실패의 원인은?

- ✦ 응축기 용량 부족
- ✦ CW valve 개방여부
- ✦ CW pump 성공여부
- ✦ 배관 이상(막힘) 여부

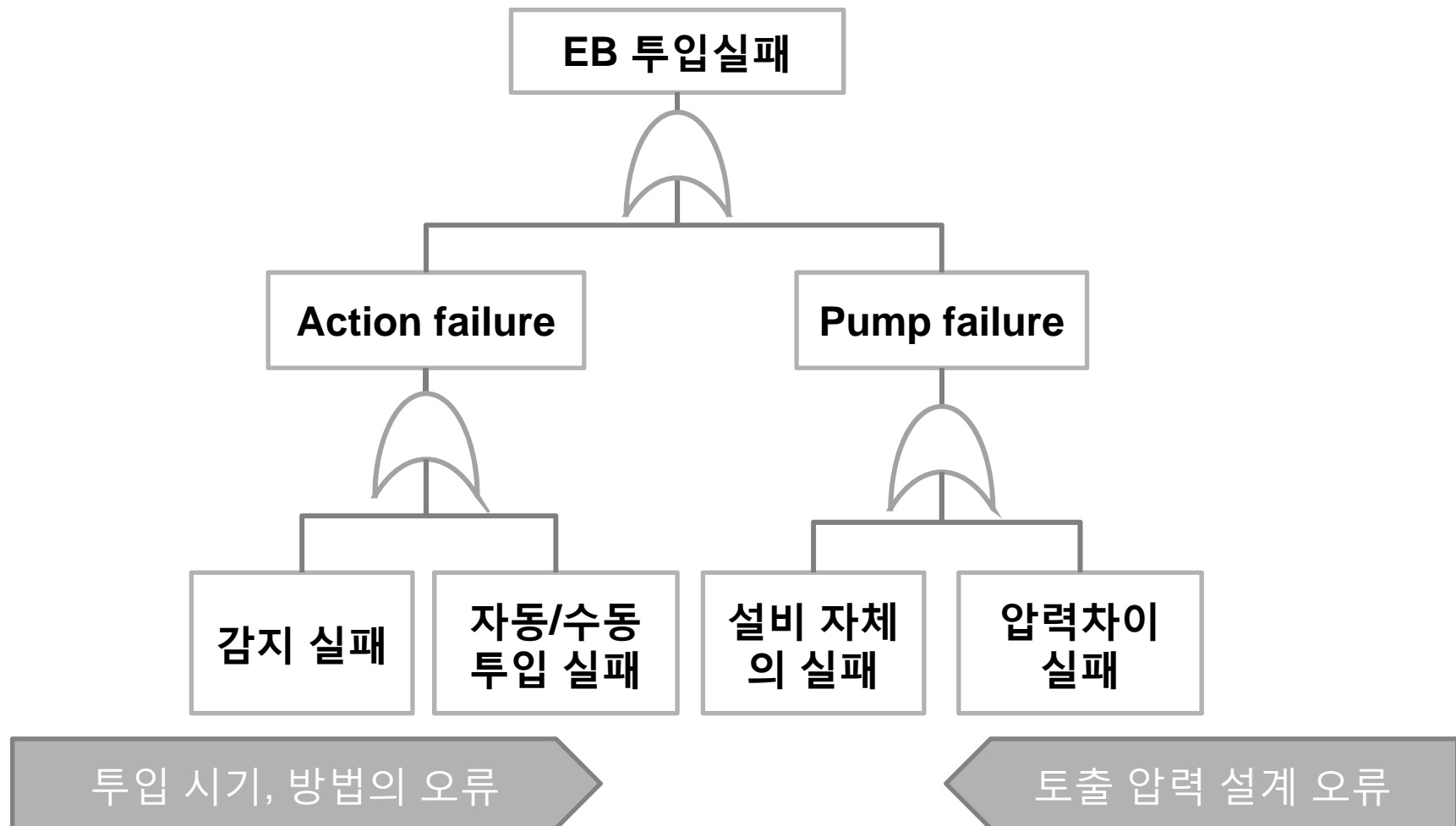
□ EB 투입실패 원인은?

- ✦ Pump failure
- ✦ Valve failure
- ✦ 투입시기 설계 오류

VCE in Korea - 누출시나리오



VCE in Korea - 누출시나리오



VCE in Korea

□ 사고원인 분석 결과

- ✦ 응축기에 대한 시운전 전 점검 불충분
 - CW line에 air pocket
- ✦ 중합조 온도 상승 시 EB 투입
 - 투입 시기 늦음
 - 투입 pump 설계 오류 ← 토출압력은 중합조 이상상태(압력상승) 시 투입이 가능하도록 설계되었어야 함.
- ✦ 점화원 관리 불충분
 - 폭발위험지역 파악과 관리가 불충분

Case Study – Danvers VCE

- 사고조사를 통한 원인 파악

- 폭발 재구성

 - ✦ 피해규모 파악 활용: 피해형태로부터 과압을 예측하고, 거리와 과압으로부터 기인물질에 따른 폭발에너지 산출

- 누출 시나리오 재구성

 - ✦ 구역별로 설비마다 예상할 수 있는 누출시나리오 구성

Case Study – Danvers VCE

□ 설비의 특징에 따라 누출 시나리오 구성

- ✦ 저장탱크에서 인화성증기(heptane) 누출
- ✦ 제품탱크에서 인화성증기 누출
 - 증기발생 시나리오 구성, 증기의 구조물 내부 축적 시나리오 구성
- ✦ 구조물 내부로 인화성가스(NG) 유입
 - 가스배관 배치도 평가, 가스공급시스템 평가 등
- ✦ 폭발에너지를 기준으로 가장 근접한 인화성물질 파악 → Heptane

Case Study – Danvers VCE

□ 점화원 파악

- ✦ Interview, 파편 등의 증거물에 근거하여 파악
- ✦ 온도에 따라 가동/중지하는 fan으로 추정



Figure 22. Box fan, a possible ignition source recovered from the debris near area E.

출처: CSB 사고조사보고서 (2006)

결론 – 사고시나리오의 재구성

- 사고원인과 발생경로를 파악하기 위해
- 사고피해의 범위, 형태, 작업상황 등을 분석
 - ✦ 복사열이나 과압, 파편의 피해규모와 거리 → 화재/폭발 에너지 산출
 - ✦ 기인물질로 추정할 수 있는 물질에 대한 누출량 산출
- 누출 시나리오 재구성
 - ✦ 사고의 시작지점 인근의 설비에서 누출 시나리오 구성
- 점화원 파악
 - ✦ 증거/Interview 등을 통해 가능한 점화원 파악
- 최종 시나리오 구성
 - ✦ 사고결과와 비교하여 구성

결론 – 사고조사 결과의 활용

- 사고조사의 목적은 재발 방지이므로,
- 사고시나리오를 재구성함으로써, 사고원인과 발생경로를 명확히 파악하여,
- 원인을 제거하거나, 발생경로를 차단할 수 있는 적절한 수준의 안전조치를 수립, 관리하여야 함.
- 원인이나 발생경로에 공통점을 가질 수 있는 모든 요소에 대한 위험성평가 재검토가 실시되어야 함.

감사합니다.

Q & A