

석유화학플랜트에서의 화재방호

- 원전과의 비교 및 착안사항 위주로 -

2015.7.3 울산 한화케미칼 집수조 폭발 6명 사망



전기공학과 학사 공정안전 및 손실예방 석사

한국화재보험협회 : 점검 및 연구
안전보건공단 : PSM업무(1995~)



구미 합동방재센터 산업안전팀
대경권 중방센터 기술지원팀
대구지역본부 구미 기술지원팀
010-5778-8647
paksk@kosha.net

소 개 내 용

- 1 화학사고 및 공정안전관리(PSM)
- 2 화학사고 원인 및 사고사례
- 3 화재 위험성평가 및 피해예측
- 4 화재/폭발 안전기준
- 5 문제점 및 결론

발표 전제사항

- ✓ 화학물질에 의한 화학사고 위주로 함
- ✓ 화재뿐만 아니라 폭발, 누출 사고도 대상
- ✓ 다양한 규모(큰 플랜트부터 소규모 화학공장 까지)
- ✓ 원전과 관련 있는 내용 위주로..

화학적 방법에 따라 인공적으로 만들어진 모든 물질



화학설비(유해위험설비)

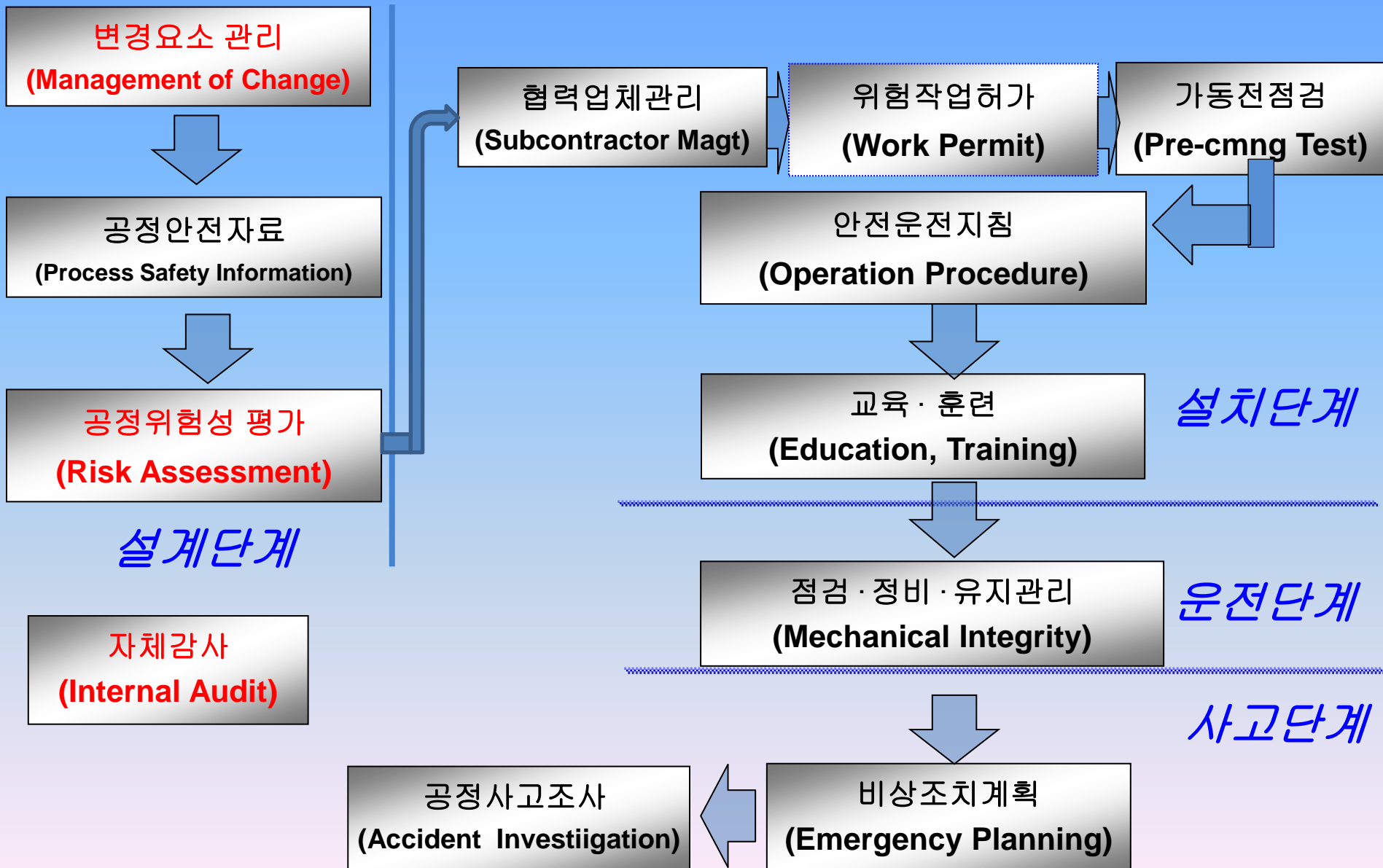


화학 사고(중대산업사고) 화재, 폭발, 누출

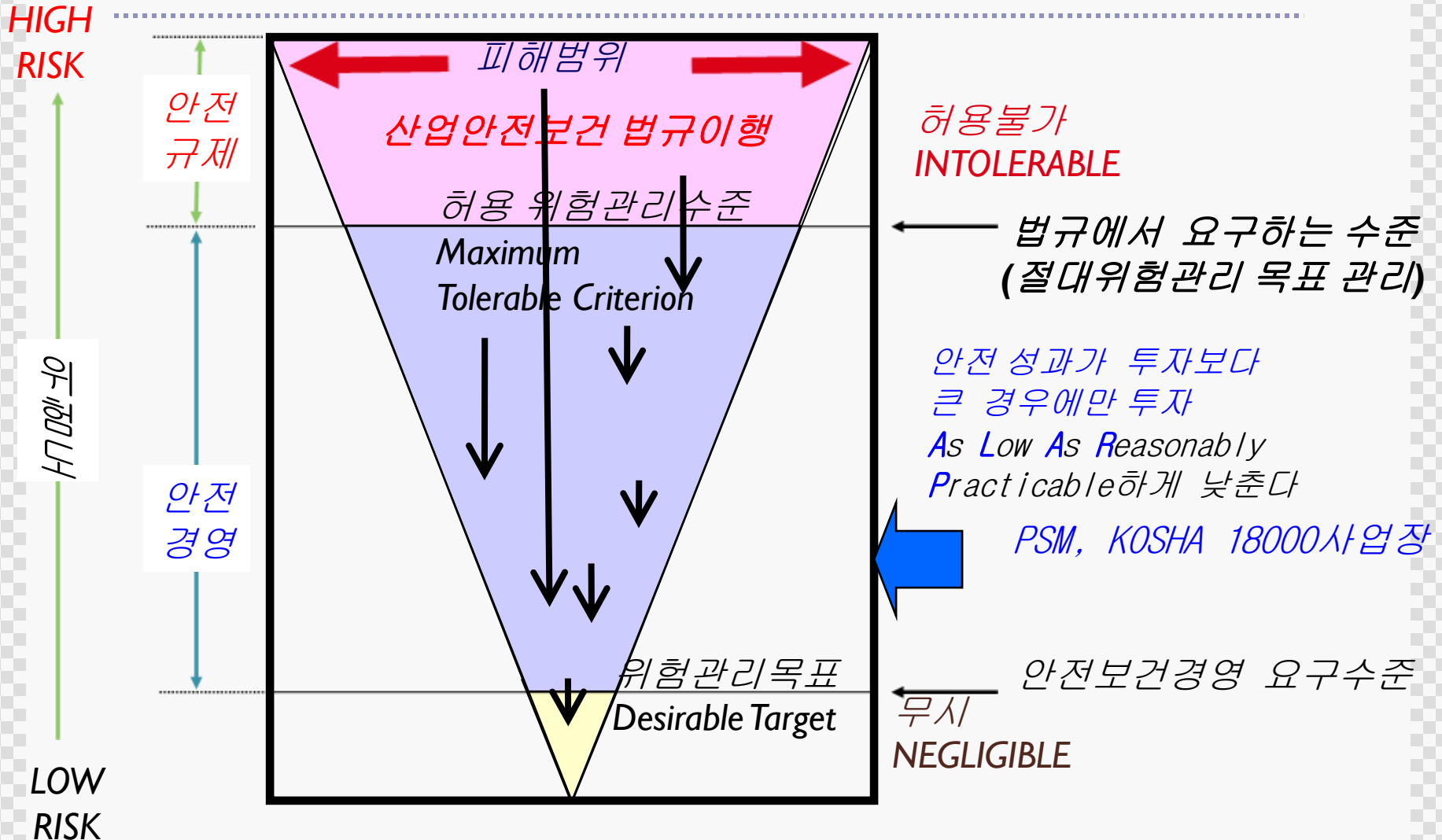


화학설비 Life Cycle과 PSM12개요소

Process Safety Management System



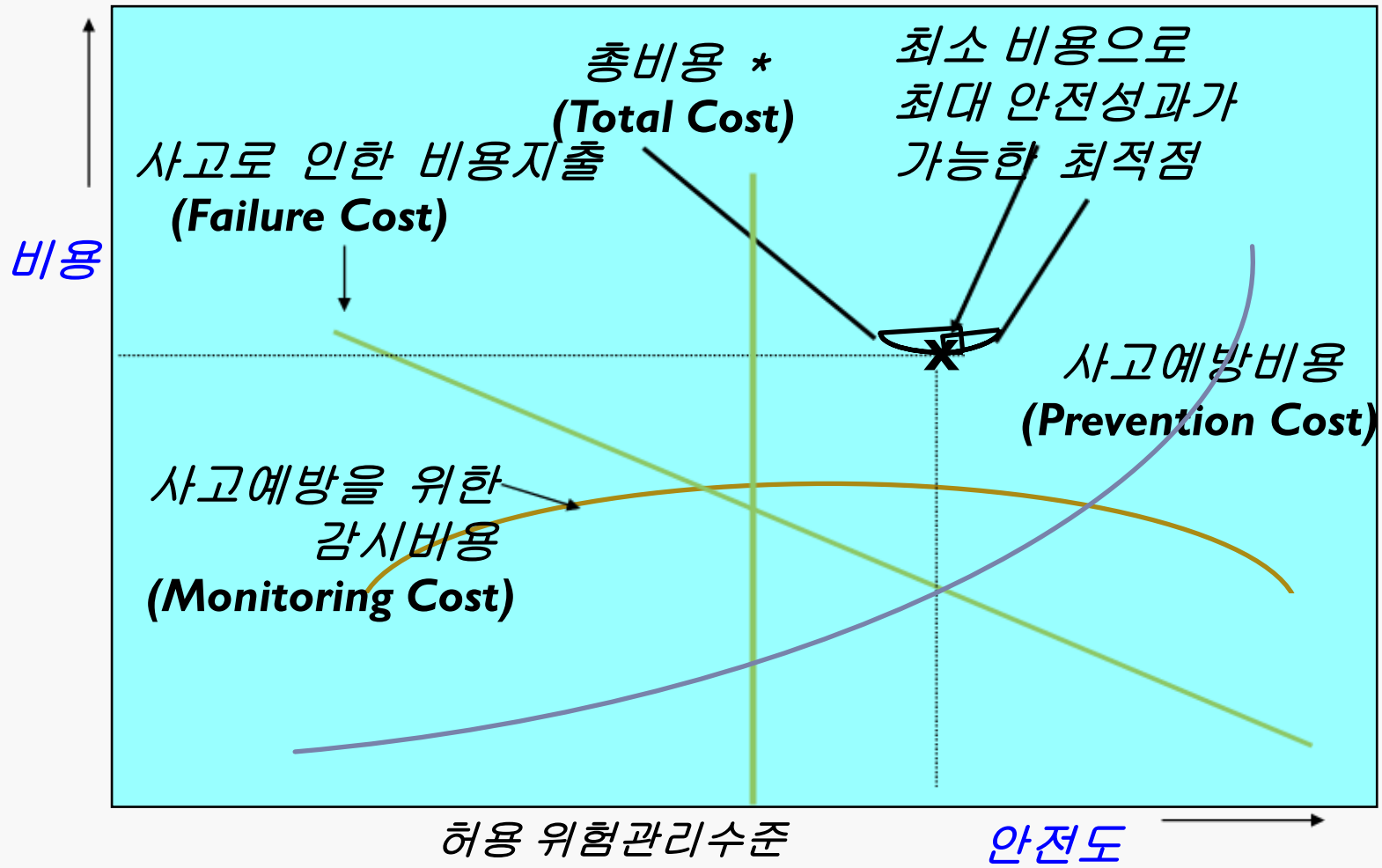
ALARP 부적합 사항 관리 기법



검토: 이 도표가 적용되지 못할 안건이 있는가?

효과적 재해 예방 비용 선정

* 총비용 = 사고로 인한 비용 + 사고예방비용 + 감시비용



사고빈도와 결과에 따른 구분/대응



화학사고예방에 대한 접근

□ 화재안전설계시 심층방어(Defense in Depth)-NFPA 804

- 1) 화재(사고)가 발생하지 않도록 함.
- 2) 화재(사고)발생시 빨리 감지, 신속 진압하여 손상을 제한
- 3) 인명, 재산, 운전, 안전장치의 영향이 제한되도록 설계

석유화학플랜트와 원전의 안전비교

구분	석유화학 플랜트	원전
주 위험원	화학물질	핵 연료
주 사고유형	화재, 폭발, 누출, 중독, 질식	방사선 노출, 암, 화재
주요 화재/폭발 유형	Pool Fire, 반응폭주, 정비보수 중 폭발, 화재, 설비부식 누출 화재	케이블 화재, 변압기 화재, 설비과열 화재
위험관리 접근 방법	안전설계, 위험성평가, 안전운전계획, 비상대응	좌동+ 더 높은 설비 신뢰성, 위험성평가, 비상대응 확보
주요규제	공정안전보고서(Safety Report) 심사→ 현장확인→ 이행점검→이행수준평가, 차등관리. 장외영향평가, 위해관리계획	
관련기준	산안법, 위안법, 화관법, 고압법, NFPA, ASME 등	
점검의 초점	위험 인식여부, 보고서 이해여부, 준수 여부, 설비의 가동가능 여부	
최근 관심 사항	불산 등 부식성물질 누출 폐수처리설비 안전, 대기업 안전강화 정비보수 작업 안전(위험경보제) 협력업체 관리, 안전작업허가 장외영향평가	

화학공정의 화학사고 원인

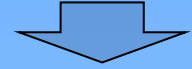
□ 직접적인(기술적) 원인

- 1) 장비의 파손, 계기결함에 의한 화재
- 2) 공정운전실패로 누출 및 반응폭주로 인한 폭발/화재
- 3) 화기작업시 일어나는 화재
- 4) 정전기, 스파크로 인한 화재
- 5) 폐수처리장 인화성물질 유입으로 인한 폭발/화재
- 6) 반응성물질의 반응으로 인한 폭발 화재
- 7) 설비 및 전선의 과부하, 유향 불량으로 인한 화재
- 8) 자연발화
- 9) 설비부식으로 인한 누출, 반응, 확산,

화학공정의 화학사고 원인

□ 간접적인(근원적) 원인 – Root Causes

- 1) 화학물질의 위험성(인화성, 반응성, 독성)에 대한 이해부족
- 2) 공정의 위험성에 대한 정확한 평가부족, 전문기술부족
- 3) 사고발생에 대한 낙관적 자세, 사고 시나리오의 부정, 비상대응결함
- 4) 위험작업에 대한 외주 성향
 - 안전에 대한 면피성 분위기
 - 동등이상 안전관리 확보 미비, 원청의 수준저하
 - 작업안전관리의 사각지대 발생(협력업체간, 원청과 하청간)
- 5) 비 합리적 공기단축을 통한 원가절감 문화
 - 예) 선행작업이 완료되지 않은 상태에서 후속작업



2012.9.27 구미 휴브글로벌 HF 하역작업중 밸브개방, 20톤 누출.
5명사망, 광범위한 인적, 물적, 환경피해.

❖ 불산 TWA:0.5ppm, C:3ppm, ERPG2: 20ppm

사고사례



사고사례

암모니아 가스누출·폭발사고 (2014.2.14)

6톤 누출, 1명 사망, 3명 부상, 공장반파, 인근주민 대피



❖ 사고일 09:20분 암모니아 누출 인지(농도측정?)

❖ 암모니아 공급배관차단,

❖ 설비는 차단하지 않음. 제품이송 작업계속

❖ 배관잔류 암모니아 계속 누출

❖ 12:08분 실내 폭발 발생

착안사항) 누출시 실내농도, 암모니아 폭발범위, 점화에너지, 누출시 비상대응, MSDS?

사고사례

수소 트레일러 충전시 트레일러 폭발

(2010.3.26) 1명 사망, 충전설비 및 수소 튜브 트레일러 반파



- ❖ 수소공급사 정기보수
- ❖ 수소압축기 불량, 보수
- ❖ 수소 내 CO가스 검출
- ❖ 트레일러의 수소 샘플링시도
- ❖ 트레일러 내부 폭발

착안사항) 수소의 특성과 폭발조건(고압에서의 폭발범위, LOC, 점화에너지, 역화기능)

사고사례

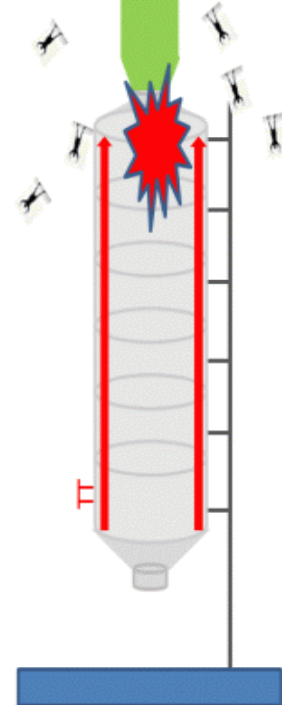
HDPE 사일로 맨홀설치중 폭발 (2010.3.26)

6명 사망, 11명 부상, 사일로 반파



2차 폭발(20시51분21초, 폭발 직후)

- ❖ 작업전 사일로 비움
- ❖ 사고전일부터 N2치환
- ❖ 사고일 아침 공기치환
- ❖ 산소 21%, 가스 0 측정
- ❖ 정오부터 맨홀설치작업개시(용접)
- ❖ 18:30 사일로 하부 슬라이드 잠금
- ❖ 21:51분 사일로 2차례 연속폭발
착안사항) 폭발분위기 형성이유?



사고사례

디스플레이 에칭용 탱크 화재 에칭탱크 전소 (2015.2.19)

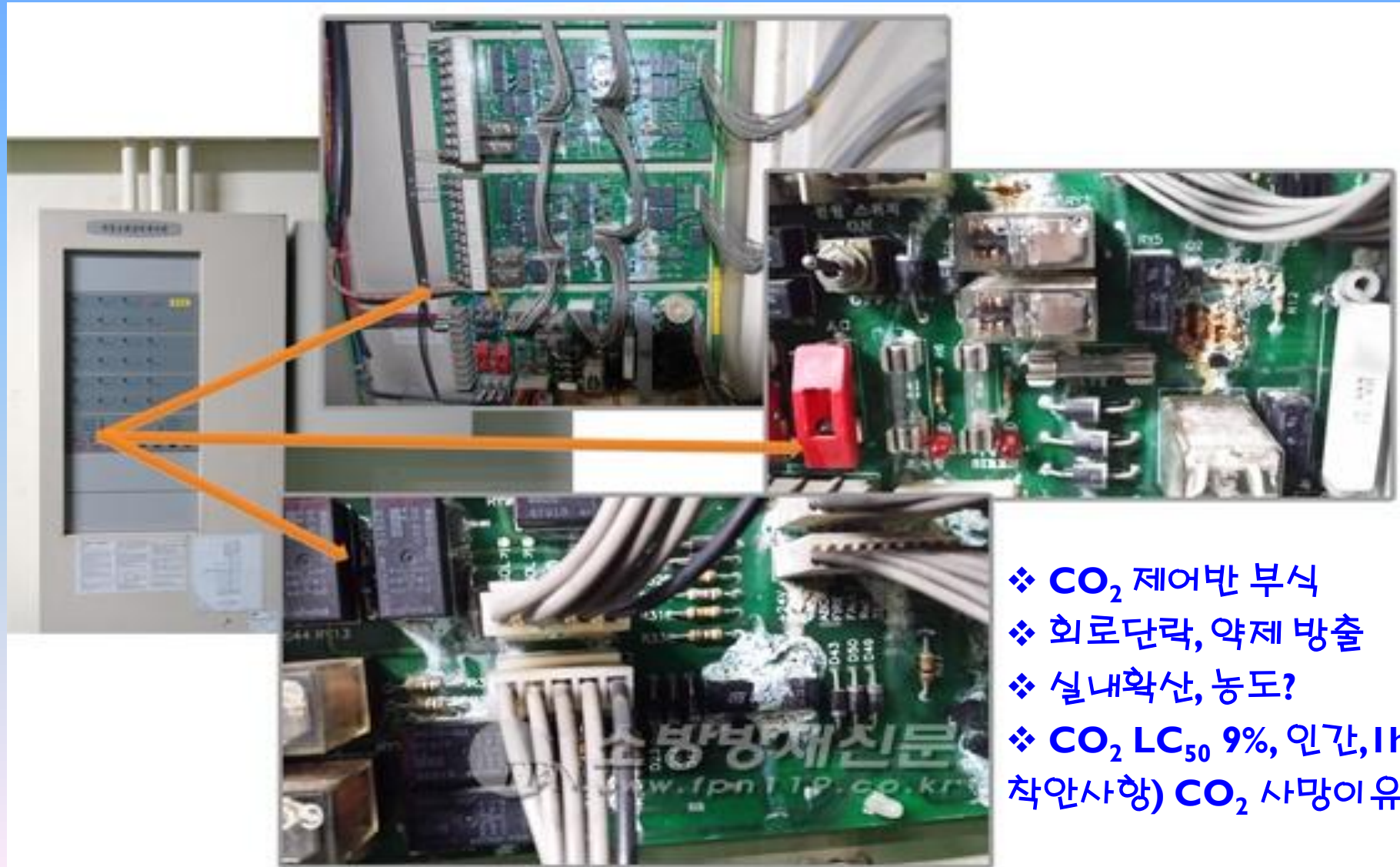


- ❖ 연휴기간중 에칭 서비스탱크 히터 발열
- ❖ 연기발생 (20여분 이상)
- ❖ 화재확산, 연기확산, 에칭설비 1조 완전연소
(착안사항) 화재감지 지연사유,



사고사례

삼성전자 연구동 CO₂소화약제 방출 1명 중독사망 (2014.3.27)



사고사례

헥산누출로 UVCE 폭발

- 2003년. 호남석유화학 -



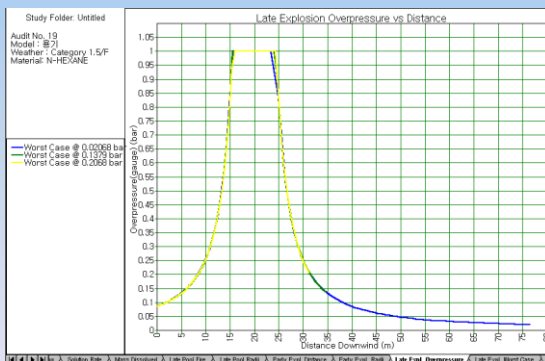
+



스트레이너 청소중 +
연결밸브 개방 오조작

3분후 UVCE 폭발
PE반응공정 화재

복사열로 70미터 이격
사일로 2기 폭발

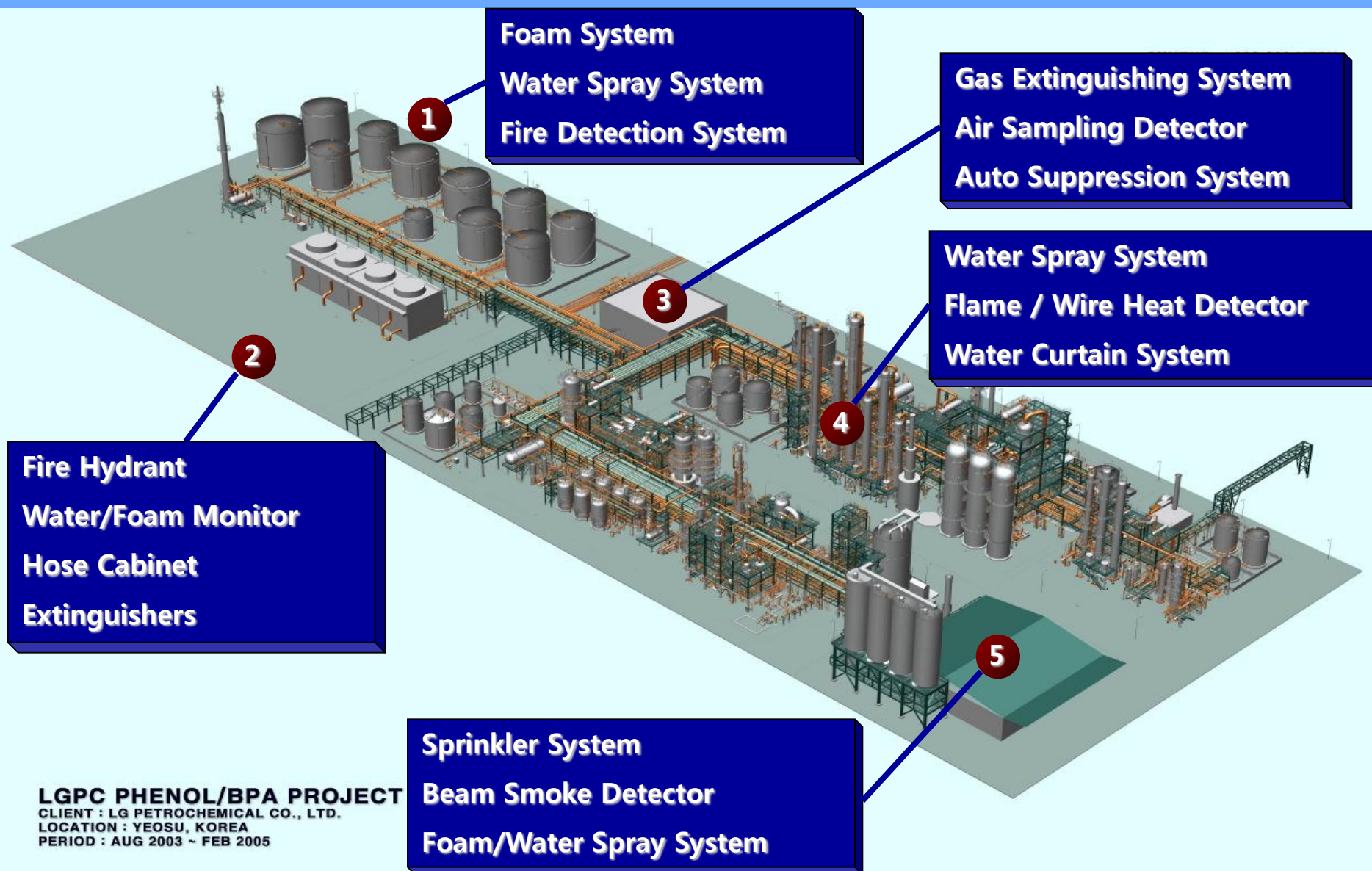


최초 폭발시 거리별
폭발압력(반파 30미터)

SPE공장 일부 소실
3시간 후 진화

사일로 상판 이탈, 비행,
사일로 인접 SPE설비강타

화학플랜트 소방설비개요



화학공정의 화재/폭발 예방

□ 적용기준

- 1) 산업안전보건법 안전보건규칙 제 243조(소화설비)
- 2) 안전보건규칙 제 2장 (폭발, 화재 및 위험물 누출에 의한 위험방지)
- 3) KOSHA Guide의 관련내용
- 4) 위험물 안전관리법의 내용
- 5) API, NFPA 의 내용

화학공정의 화재/폭발 예방

□ 설계적 측면 주요내용

- 1) 물질사용 최소화, 물질저장 최소화, 증발최소화, 사용구역 격리
- 2) 누출방지(이중계기, Double Seal, 용접형 배관, 방유제, ESV)
- 3) 과압시 배출 및 누출물의 안전한 처리, 공정간 이격거리
- 4) 설비 과열보호 기능, 환기량 확보,
- 5) 화염감지기, 고감도 샘플링연기감지기, 지능형 CCTV
- 6) **화재유형과 화재크기에 맞는 소화설비 설치, 수량확보**
- 7) 비상발전설비, 비상조명설비, 누출물질 비상배출설비, 처리설비

화학공정의 화재/폭발 예방

□ 관리적 방안

- 1) 화재/폭발 위험성평가
- 2) 사고 시나리오에 따른 피해예측(복사열, 누출확산, 폭발압력 등)
- 3) 피해예측결과에 따른 설비보완, 비상조치계획반영
 - 화재시 복사열 피해, 방호방안, 우선 대응(냉각) 순위결정
 - 공정차단 범위, 대피시점 결정
- 4) 출입 협력업체의 수준관리
- 5) 작업에 대한 위험성평가(JSA), 작업승인 및 작업중 안전조치 확인
- 6) 설비 점검, 정비, 보수로 적정 Mechanical Integrity 유지(소방포함)
- 7) 정상/비상운전정지 수립 및 훈련, 교육

화학공정의 피해예측 위험성평가

□ 화학 물질의 위험성 평가

- 물리화학적 특성(증기압, 공기비중)
- 인화성, 연소성 (인화점 , 발화점, 발화에너지, 폭발범위, 폭발력 등)
- 독성(ERPG 1,2,3, TWA, LD50, LC50 등)
- 반응성 (온도 및 압력, 물, 충격, 화학물질)

□ 화학 공정의 위험성평가

- 공정의 온도, 압력, 유량, 저장량 고려
- 최악의 사고(저장량 10분내 전량방출 등), 대안사고 시나리오의 피해예측
- 기상조건(옥외) 및 환기량(옥내) 반영
- 누출시의 주위농도(실내, 실외), 확산시 시간별, 거리별 농도 평가
- 예측농도에서의 상해위험(독성물질), 폭발분위기 형성(인화성물질) 검토
- 수용여부 결정, 사고 발생가능성, 피해감소방안 검토 및 결정

화학공정의 화재안전 설계 시 고려사항 및 요소

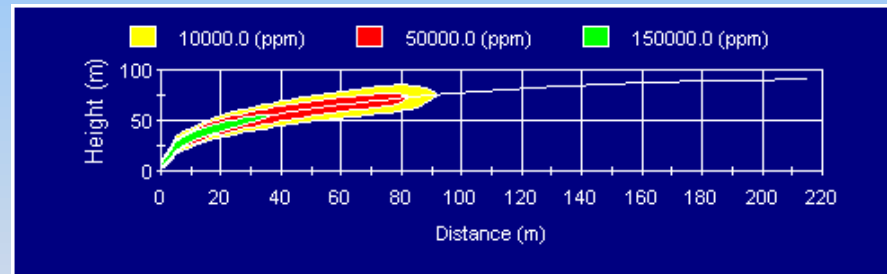
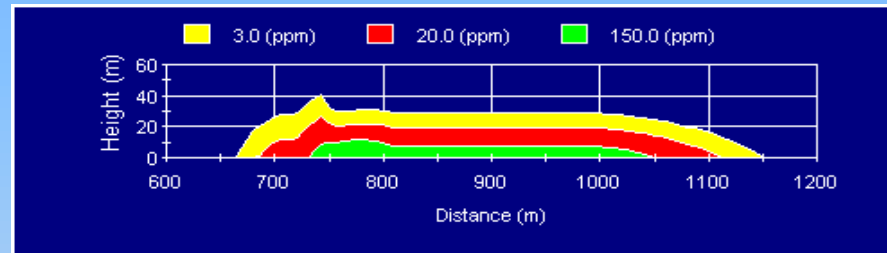
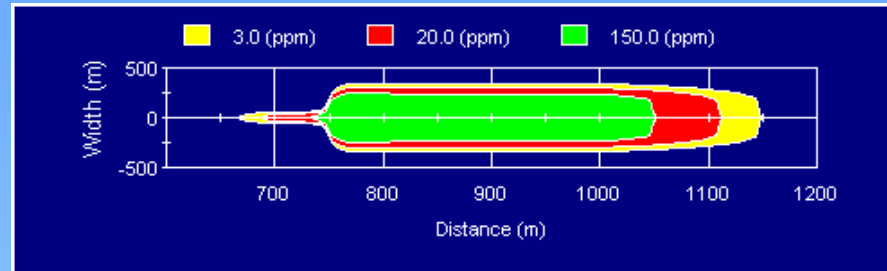
□ 피해예측에 따른 비상대응

- 사고 시나리오에 맞는 비상대응방안 수립
- 화재시 공정비상정지 범위와 방법 설정
- 관련물질의 독성과 복사열을 고려한 대피방향, 대피거리 설정
- 진압대상설비의 BLEVE 폭발, 붕괴 가능성 염두
- 방호 관계자의 적정 안전거리 및 접근 방향 확보
- 방호 관계자가 무조건 대피할 기준 설정(용기변색, 반응기온도 등)

□ 설계보완

- 누출, 화재감지 설비 추가설치
- 추가적인 소화전, 소화설비 설치(물분무)

가스누출시 시간별, 거리 별 확산농도 평가



- ✓인화성 가스 : 폭발범위 형성 농도
- ✓독성 가스 : 사망, 중상, 경상 농도
- ✓인화성/독성 물질: 독성에 준함

- 폭발범위(상한, 하한, 하한의 25%)
- LC 50
- ERPG Level 1,2,3
- IDLH
- TLV – TWA, STEL, C

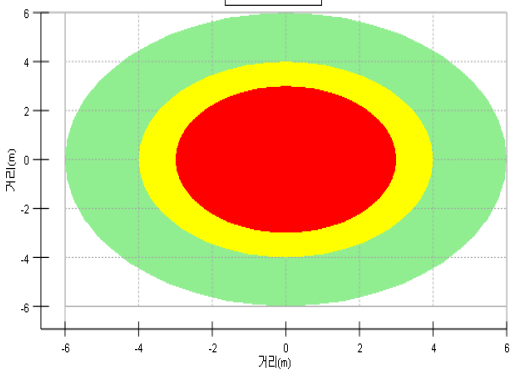
화염에 대한 복사열 피해예측

Jet Fire

(고압배관)



Jet Fire 평면도

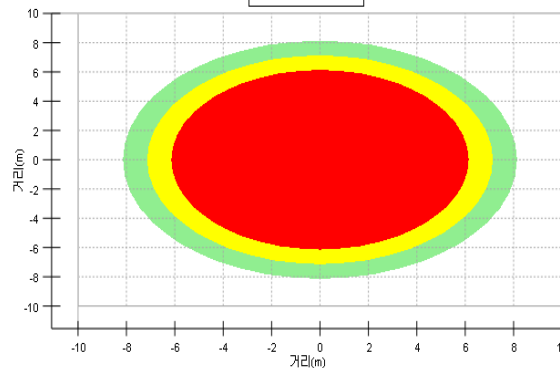


Pool Fire

(인화성 액체)

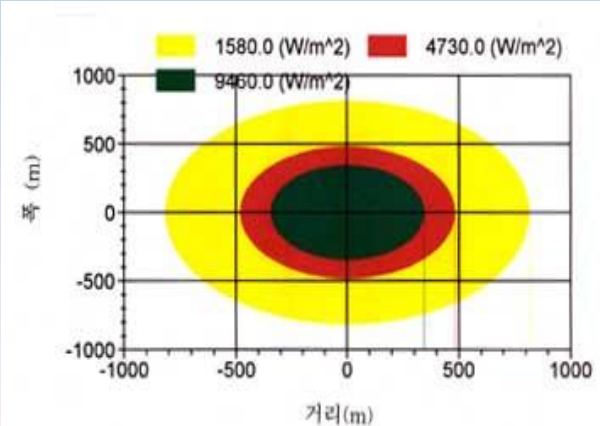


Pool Fire 평면도



BLEVE

(고압 인화성 탱크)



피해예측 평가 후 보고서 작성

◆ 누출로 인한 확산범위 표시

- 1) 독성가스의 인한 상해범위(가스 종류 및 관심농도에 따라 다름)
- 2) 인화성가스로 인한 폭발[점화]가능 범위(가스마다 다름)

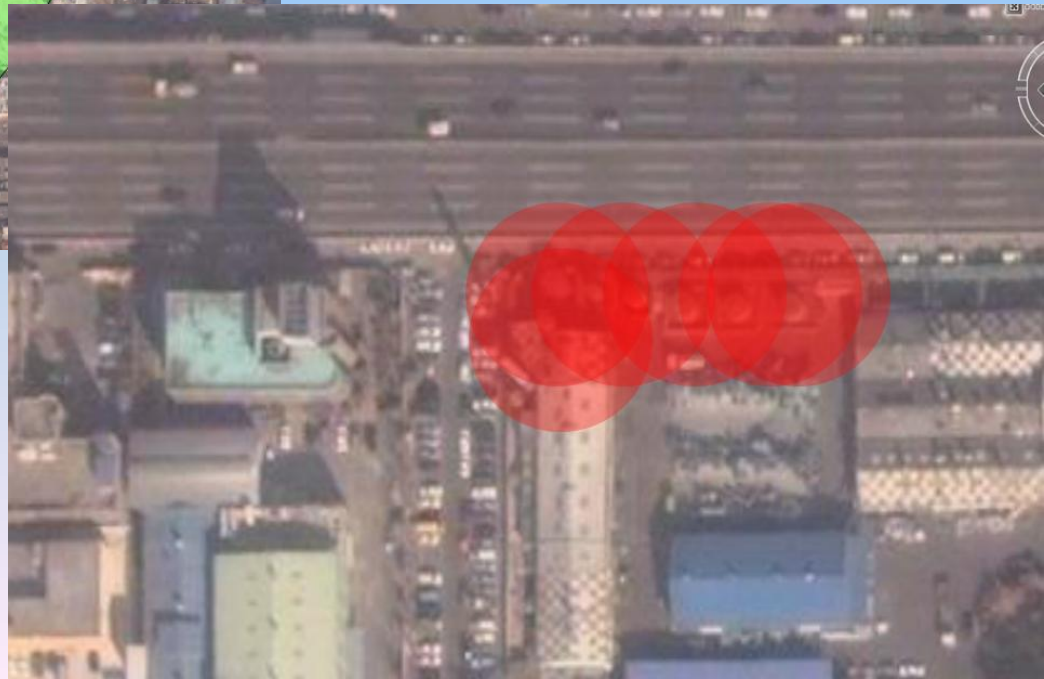
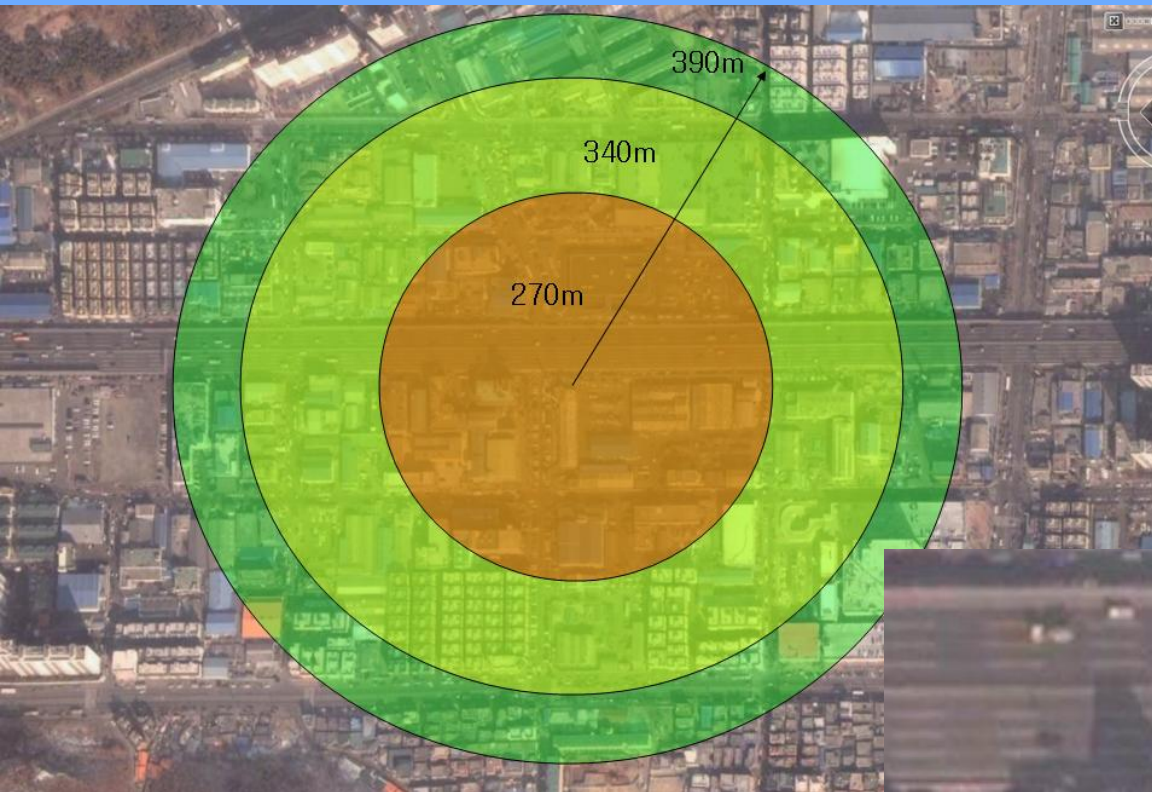
◆ 화재로 인한 복사열 피해범위 표시

- 1) 4 kW/m^2 : 화상으로 접근 곤란
- 2) 12.5 kW/m^2 : 목재 및 플라스틱의 화재유발
- 3) 37.5 kW/m^2 : 시설물의 전파

◆ 폭발로 인한 폭풍압 피해 범위 표시

- 1) $0.07 \text{ bar}(1 \text{ psi})$: 압력파에 의해 시설물의 초기 타격
- 2) $0.21 \text{ bar}(3 \text{ psi})$: 근로자에게 상해를 가할 수 있는 범위
- 3) $0.84 \text{ bar}(812 \text{ psi})$: 시설물의 전파를 유발할 수 있는 범위

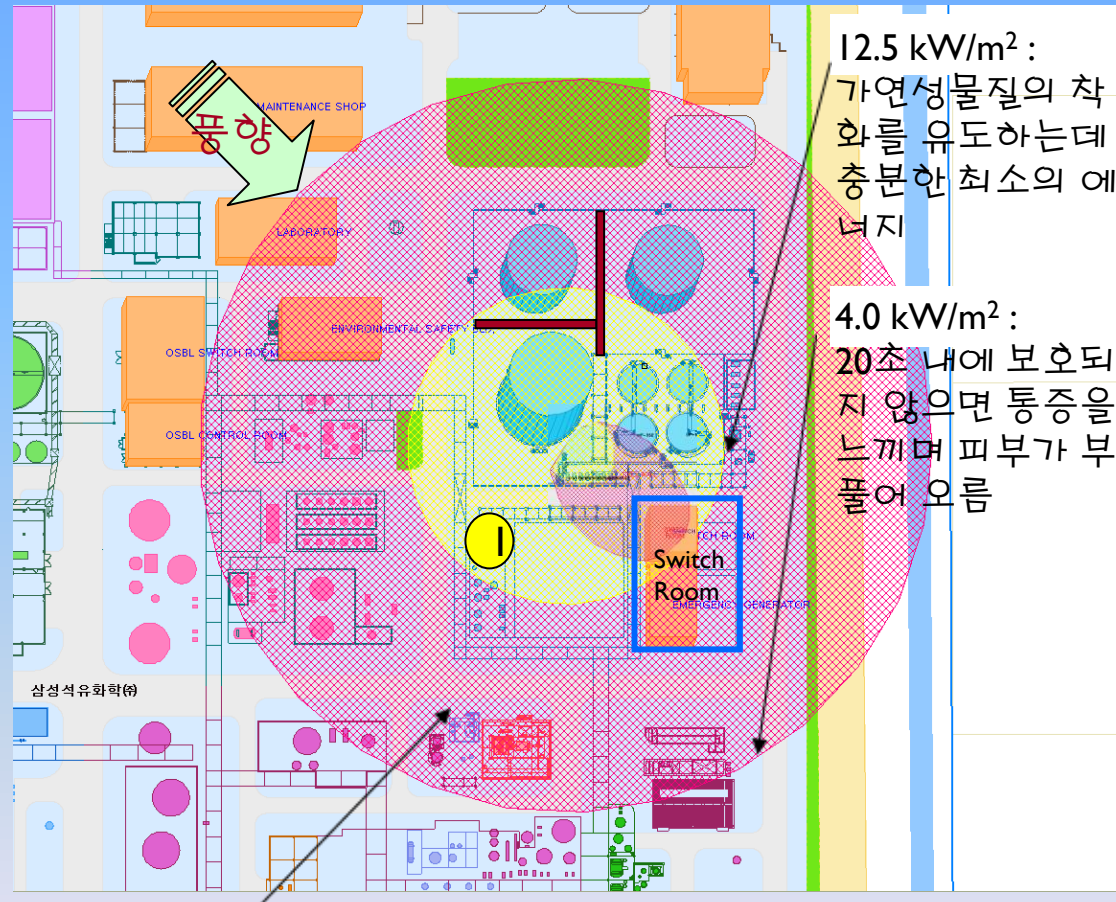
피해예측 결과를 평면도에 도시



피해예측 : Fire Fighting 전략 및 피해감소대책 검토

- 1 12.5 kW/m² 지역
- 복사열에 의하여 2차 화재 가능지역
 - 화재로 인한 공정전력 공급 불가능
 - S/R 이전이 불가능 할 경우 Physical Protection 검토
 - 대형화재를 대비한 Remote Monitor 설치 검토
 - DIKE 분할 검토

- 2 4.0 kW/m² 지역
- 복사열에 의하여 사람 접근 불가능 지역
 - 소방대원에 지급 가능한 방열복 지급
 - 소방차 최적 위치 검토



2 소방차 10kW/m² 지역 까지 배치 가능



화학공정의 화재안전 설계 시 고려사항 및 요소

□ 취급, 저장설비의 안전 설계고려 항목

- 운전운도, 운전압력, 취급물질에 대한 내식성
- 릴리프/ 벤팅, 방출물질의 최소화 및 안전한 처리
- 공정이상시 경보 및 인터록
- 화학설비 폭발위험지역 내 구조물의 내화(가스는 제외)
- 폭발위험지역 설정 및 전기설비의 방폭화

화학공정의 화재안전 설계 시 고려사항 및 요소

□ 반응조 설계

- 반응폭주 가능성 확인
- 반응조의 온도, 압력 감시, 경보 기능확보
- 냉각수의 용량 확보 및 예비펌프 확보, 비상전원 확보(특수화학설비)
- Full 냉각시점, 반응억제제 투입시점, 비상대피시점 설정
- 물질위험과 반응위험, 적정조치내용이 반영된 운전절차 확보.

화학공장 소화설비의 설계기준

□ 단일지역 단일화재 발생기준 [Single Fire at Single Risk Area]

- 건 축 물 : 방화구획으로 구획된 하나의 구획
- 공정지역 : 도로 등으로 구획된 하나의 단위공정
- 위험물 옥외탱크저장소 : 하나의 방유제

□ 예상가능한 최대화재 발생 [Maximum Credible Fire]

- 부지내 발생 가능한 화재 중 최악의 경우 가정

최대소화유량의 산정(1)

□정의

화재 발생시 소화를 위해 동시에 방사할 수 있는 유량
(소화설비 설계시 가장 중요하게 고려될 사항임)

□ 산정시 고려될 사항

- 소방대상물의 위험등급
- 저장 상품의 내용 및 저장 높이 인접 소방대상물에 미치는 영향
- 인접소방대상물에 미치는 영향

최대 소화유량의 산정(2)

□ 소화수의 확보수원

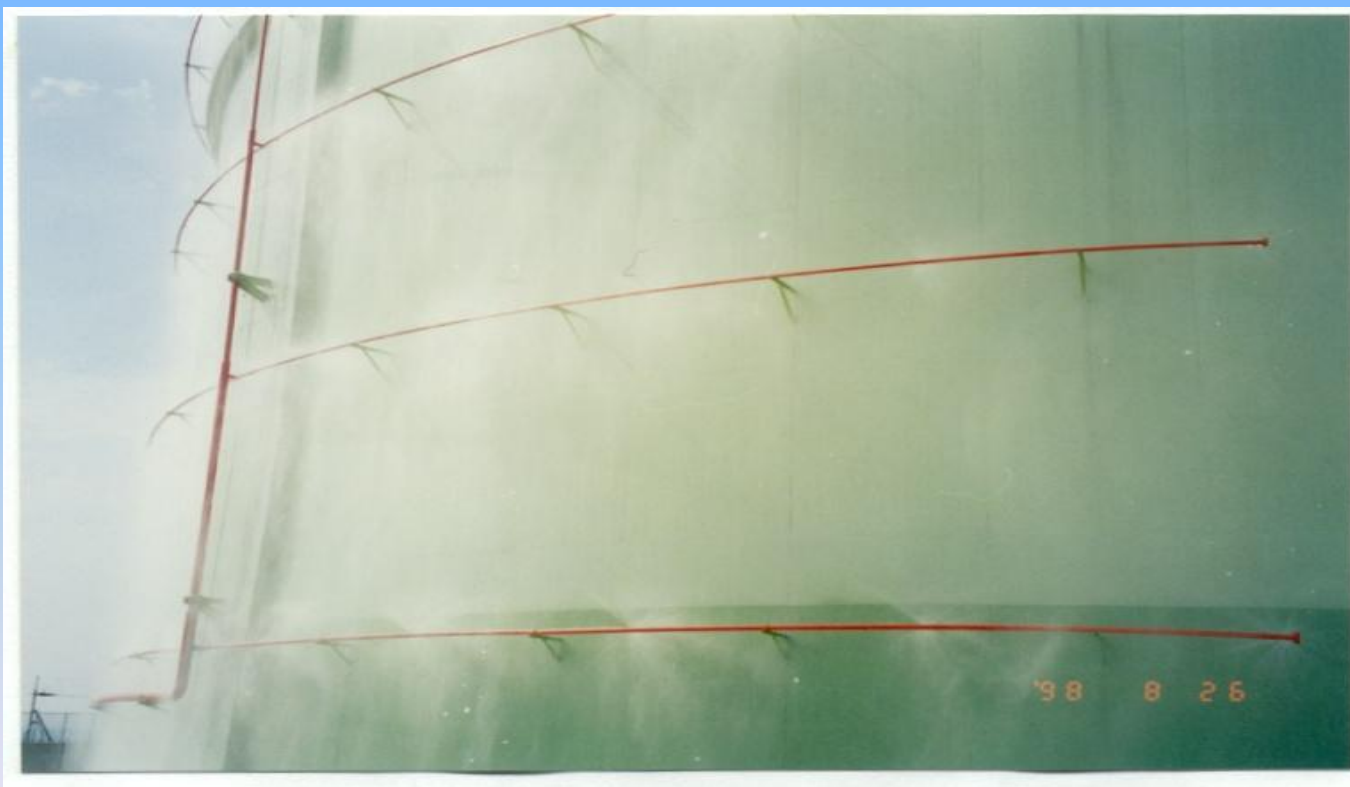
- 국내 : 일반적으로 20분 사용량
- NFPA 13
 - Light Hazard : 30분
 - Ordinary Hazard : 60~90분
 - Extra Hazard : 90~120분
- 재보험사
 - Light Hazard / Ordinary Hazard Group 1 : 2시간
 - Ordinary Hazard Group 2 & 3 : 3시간
 - Extra Hazard : 4시간
- API Code = 4시간 ~6시간
- 재보험사(FM/IRI)에서는 보험금액에 따라 100% 예비수원요구

☞ 방수후 안전하게 회수할 방안도 병행되어야 함(폐놀누출 사례)

물분무소화설비의 살수밀도(국내소방법)

- 특수가연물의 저장 취급 소방대상물 : $10\text{lpm}/\text{m}^2$
- 차고, 주차장 (바닥면적) : $20\text{lpm}/\text{m}^2$
- 절연유 봉입 변압기 (표면적) : $10\text{lpm}/\text{m}^2$
- 케이블트레이 (투영면적) : $12\text{lpm}/\text{m}^2$
- 위험물저장탱크 (원주길이) : $37\text{lpm}/\text{m}$
- 컨베이어 벨트 (바닥면적) : $10\text{lpm}/\text{m}^2$

LNG 저장탱크(TK-205) 외벽 물분무설비 방사시험



현 안 및 문 제 점

- 1) 화학물질의 위험(인화성, 독성, 반응성)에 대한 기본적인 이해부족
- 2) 정비, 보수 중 사고발생율이 높음.
- 3) 협력업체의 사용으로 인한 안전수준저하
- 4) 작업위험성 평가능력의 취약, 작업허가의 결함
 - 예 1) 밀폐공간 작업허가시 산소농도만을 측정
 - 예 2) 산소와 가스농도를 작업 전, 주기적으로 측정?
 - 예 3) 환기를 작업 전에 완료?
 - 예 4) 작업중 CO2 방출로 질식?
- 5) 과거의 무사고로 미래의 무사고를 주장
- 6) 단일최대사고에 부족한 수원, 펌프용량
- 7) 소방설비 점검 부실, 사용훈련 부족

사고와 비상조치

'14.4.4 S오일 납사 누출

- 누출량 최소화, 폭발분위기 지속측정, 점화원 통제 등 -



사고와 비상조치

변압기 화재사례 (방화벽, 물분무 역할)



결 언

- 1) 정확한 화재위험성평가와 가상 사고 시나리오 설정이 중요
- 2) 설계는 기본, 운전 중 관리·정비·보수·관리가 중요
- 3) 협력업체 인원의 발주자 동등이상 안전수준 확보
- 4) 그것이 어렵다면 외주화를 재검토
- 5) 작업위험성평가 능력 향상(JSA)
- 6) 정비보수 작업의 안전확보
- 7) 소방설비의 실질적인 기능 확보
- 8) 원전 화재안전과 화학공장 공정안전과의 기술교류