

선진 기술습득으로 전문기술력 향상을 위한  
**공정안전분야 국외 산업현장 위탁교육 결과**

2019. 8.

선진 기술습득으로 전문기술력 향상을 위한

**공정안전분야 국외 산업현장 위탁교육 결과**

**I 추진 목적**

- 공정기술의 발전으로 신공법 및 신기술 적용이 증가하고, 국제 표준의 개정 등 국제기술수준에 부합한 공정안전분야의 선진 기술 습득이 필요해짐에 따라 공정안전분야의 선진기술 습득을 통한 전문 기술역량 강화 및 국내 사업장에 전파하여 화학사고 예방에 기여하고자 함

**II 교육 개요**

- 위탁교육 기관 : TUV AUSTRIA HOLDING AG

**\* TUV AUSTRIA HOLDING AG**

- 오스트리아 소재
- (개 요) 1872년 설립되어 20개국 이상에 지사를 가진 Global 기업으로 산업기계 안전 인증, 교육, 모니터링, 안전, 환경, 교육 등 다양한 분야에서 서비스를 제공하는 글로벌 인증·검사·교육 전문기관
- (연락처) Stefanie Kirchhof, M.A.
  - \*TEL: +43 (0)5 0454-8174
  - \*FAX: +43 (0)5 0454-8145
  - \*e-mail: stefanie.kirchhof@tuv.at
- (소재지) TUV AUSTRIA-Platz 1, 2345 Brunn am Gebirge Vienna/Austria

- 교육기간 : 2019. 7. 29.(월) ~ 8. 7.(수)

※ 출장기간 : 2019. 7. 28.(일) ~ 8. 9.(금)

○ 교육 대상자 : 5명

소속	직급	성명	비고
전문기술실 전문기술부	5급	이오영	화공전공 (화공기사)
경기지역본부 화학사고예방센터(시흥)	4급	김상령	화공전공 (화공기사)
부산지역본부 화학사고예방센터(울산)	5급	오경석	화공전공 (산업안전기사)
경북지역본부 화학사고예방센터(구미)	4급	최영택	전기전공 (산업안전기사)
전남동부지사 화학사고예방센터(여수)	5급	김우중	전기전공 (전기기사)

※ 공정안전보고서 심사 및 확인 등 전문기술실 업무를 수행하고 있는 자를 선정

○ 출장일정 및 교육과정 시간표

날 짜	회차	주 제	비고
7/28(일)	-	• 인천 출발 및 비엔나 도착	출국
7/29(월)	1일	• Risk Management in Chemical Industry • HAZOP	현지 교육
7/30(화)	2일	• HAZOP Examples • Layer of Protection Analysis	
7/31(수)	3일	• RBI	
8/1(목)	4일	• Functional Safety	
8/2(금)	5일	• The Seveso III directive	
8/5(월)	6일	• Explosion protection(API, IEC 60079 etc.)	
8/6(화)	7일	• Fire, Explosion & Dispersion Analysis	
8/7(수)	8일	• Field Trip-Borealis Plant Schwechat	귀국
8/8(목)	-	• 비엔나 출발	
8/9(금)	-	• 인천 도착	

※ 상기일정은 현지 교육기관 사정에 의해 일부 변경될 수 있음

### III 일정별 수행사항

○ 일정별 수행사항

날짜	수행사항
2019. 7. 28.(일)	○ 이동(인천 → 오스트리아)
2019. 7. 29.(월)	○ <b>Risk Management in Chemical Industry</b> - 공정안전(Process Safety)의 기본 개념 - Process Safety vs Occupational Safety - Elements of Process Safety - Hazard 와 Risk - Risk Management Framework and Methods ○ <b>HAZOP</b> - Hazard Identification and Risk Assessment - HAZOP 기법의 이용과 그 한계 - HAZOP Study 수행 절차 - Roles and responsibilities
2019. 7. 30.(화)	○ <b>HAZOP &amp; Examples</b> - Node Definition 및 Design Intent - Safeguards의 종류 및 Effectiveness ○ <b>Layer of Protection Analysis</b> - LOPA의 기본개념 - Risk Tolerance Criteria and ALARP - LOPA 수행 절차 및 시나리오 선정 - IPL (Independent Layer of Protection) 의 기본 개념 및 종류 - Conditional modifier - LOPA 실습
2019. 7. 31.(수)	○ <b>Risk Based Inspection</b> - RBI Introduction 및 Loss of Integrity - Bow-Tie 와 RBI - RBI 적용범위 및 전제조건 - API 580, 581 vs RBIF EN 16991 - RBI 목적 및 수행 절차 - PoF, CoF 및 Confidence Factor

날짜	수행사항
2019. 8. 1.(목)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ <b>Fire, Explosion &amp; Dispersion Analysis</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Introduction to Safety Analysis</li> <li>- 누출 모델링</li> <li>- 확산 모델링</li> <li>- 화재 모델링</li> <li>- 폭발 모델링</li> <li>- 독성가스 누출</li> </ul> </li> </ul>
2019. 8. 2.(금)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ <b>The Seveso III directive</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- EU 구성 및 적용법 등 소개</li> <li>- Seveso Chemical Classification 및 Lower/Upper Threshold</li> <li>- Seveso Requirements 와 Safety Report</li> <li>- Land-Use Planning</li> <li>- Seveso and Austria</li> </ul> </li> </ul>
2019. 8. 5.(월)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ <b>Explosion protection (API, IEC 60079 etc.)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 방폭의 기본 개념</li> <li>- 방폭지역 구분 (Directive 1999/92/EG)</li> <li>- 방폭기기 구분 (Directive 2014/34/EU)</li> <li>- ATEX-Directive 2014/34/EU 의 목적</li> <li>- Ignition hazard assessment</li> </ul> </li> </ul>
2019. 8. 6.(화)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ <b>Functional Safety</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Functional Safety의 기본 개념 및 관련 Standards</li> <li>- Safety Instrumented Function 과 Safety Lifecycle</li> <li>- Required SIL 선정 방법</li> <li>- Probability of Failure on Demand 계산 방법 소개</li> <li>- IEC 61511 New Ed.에 따른 Hardware Fault Tolerance</li> <li>- SIL Verification 방법 소개</li> </ul> </li> </ul>
2019. 8. 7.(수)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ <b>Field Trip</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 오스트리아 현지 화학공장(Borealis Plant Schwechat) 견학을 통해 국외 공정안전관리 운영 및 적용 사례와 최신 기법 습득</li> </ul> </li> </ul>
2019. 8. 8.(목)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 이동(오스트리아 → 인천)</li> </ul>

## IV 세부 교육내용

### 1. Risk Management in Chemical Industry

#### □ Process Safety

- “공정안전(Process Safety)”과 “산업안전(Occupational Safety)”은 구분하여 관리되어야 하며, “공정안전”이란 공정에서 발생 가능한 사고를 Identification, Prevention and Control 하는 것으로, 아래와 같은 요소들로 구성됨



[그림 1] Elements of Process Safety

- 공정안전의 이행(Commit to Process Safety)
  - 공정안전문화(Process Safety Culture)
  - 기준의 준수(Compliance with Standards)

- 공정안전 수행 역량 및 이해(Process Safety Competency)
- 전 종업원의 참여(Workforce Involvement)
- 이해관계자의 참여 유도(Stakeholder Outreach)

○ 잠재위험과 위험의 이해(Understand Hazard and Risk)

- 공정에 대한 이해(Process Knowledge Management)
- 위험의 인식과 위험성 평가  
(Hazard Identification and Risk Analysis)

○ 위험의 관리(Manage Risk)

- 안전 운전 절차(Operating Procedures)
- 안전 작업 허가(Safe Work Practices)
- 자산/설비의 무결성 및 신뢰도 유지를 위한 검사, 시험, 정비  
(Asset Integrity and Reliability)
- 협력업체 관리(Contractor Management)
- 교육 및 성과 관리(Training and Performance Assurance)
- 변경 관리(Management of Change)
- 운전 준비 및 가동 전 점검(Operational Readiness)
- 체계적인 공정운전 및 관리(Conduct of Operations)
- 비상조치계획(Emergency Management)

○ 경험을 통한 학습(Learn From Experience)

- 사고 조사(Incident Investigation)
- 위험 정보와 등급의 도식화(Measurement and Metrics)

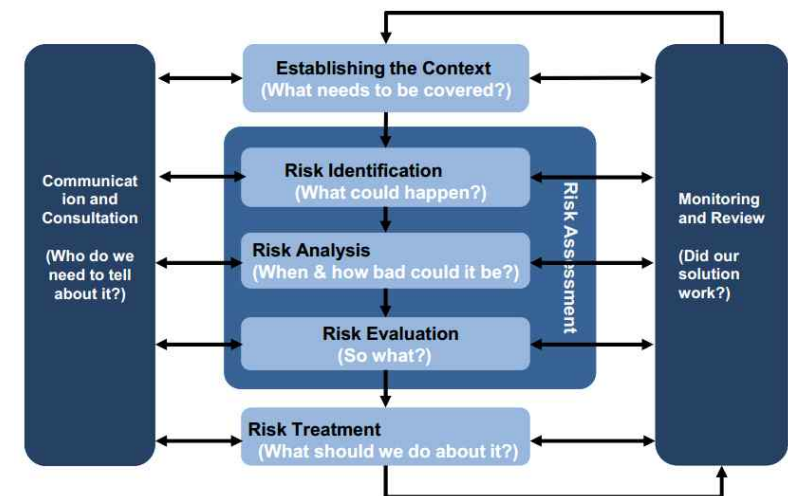
- 공정안전 시스템의 적정성에 대한 감사(Auditing)
- 경영층의 평가 및 지속적인 개선 및 환류  
(Management Review and Continuous Improvement)

□ Hazard 와 Risk

- “Hazard”는 사람, 자산 또는 환경에 잠재적으로 위험을 가할 수 있는 물리화학적인 source를 말하며, “Risk”는 Hazard의 관리 실패로 인해 발생한 사고의 강도 및 빈도를 통해 도출해낸 위험도를 말함

- Hazard가 있는 한 Risk는 항상 존재함

- 위험성평가(Risk Assessment)는 위험성 관리(Risk Management)의 일부에 해당되며, 위험성 관리의 절차는 [그림 2]와 같음



Source: ISO 31000:2009

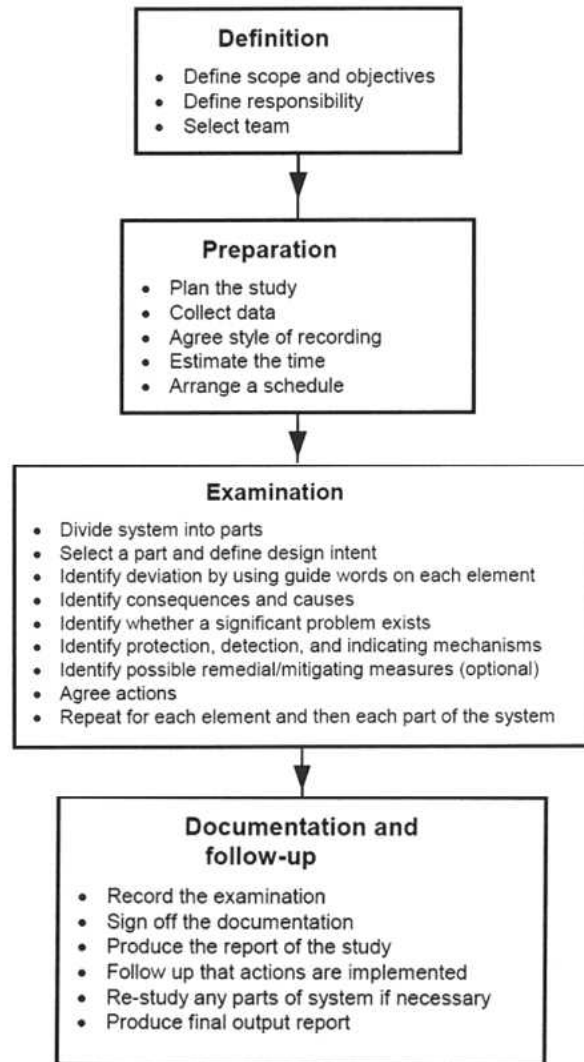
[그림 2] Risk Management Framework

## □ Risk Assessment 기법

- 위험성평가(Risk Assessment) 기법은 아래와 같이 다양하며, 위험성평가 기법에 따라 수행 시기 및 필요한 정보 등이 상이함. 따라서 공정 특성에 따라 적절한 위험성평가 기법을 선정하고, 해당 기법이 수행되기에 적절한 시기를 확인하여 위험성평가를 실시하는 것이 중요함
  - Concept Safety Review(CSR)
  - Relative Risk Ranking
  - Checklist
  - Preliminary Hazard Analysis
  - What-if, Structured What-if called SWIFT
  - FMEA(Failure Mode and Effects Analysis) - IEC 60812
  - HAZOP(HAZard and OPerability Analysis) - IEC 61882
  - Fault-Tree - IEC 61025, Event-Tree
  - Bow-Tie Analysis
  - Quantitative Risk Analysis
  - etc.

## 2. HAZOP(HAZard and OPerability)

- Hazards의 종류(ISO EN17776 for offshore E&P)
  - Hydrocarbons
  - Other flammable materials
  - Pressure hazards
  - Hazards associated with differences in height
  - Environmental hazards
  - Electromagnetic radiation
  - Toxic gas
  - Biological hazards
  - Ergonomic hazards
  - Psychological hazards
  - Security-related hazards
- HAZOP 기법의 이용과 그 한계
  - HAZOP은 Process Industry를 위해 개발되었으며, 최근에는 도로 및 철도, 의학용품 등 다양한 분야에서 사용되고 있음
  - 시스템의 다양한 부분에서 상호작용을 통해 동작하는 것에 대한 검토는 한계가 있으며, Leader의 경험 및 역량, 팀원의 지식과 경험 등에 의해 결과가 상이하게 달라진다는 점 등도 HAZOP Study의 한계라 할 수 있음
- HAZOP Study 수행 절차



[그림 3] HAZOP Study 수행 절차

#### ○ Roles and Responsibilities

- 팀은 작을수록 좋음(4~7인)
- Study leader는 HAZOP Study에 대해 충분한 훈련 및 경험이 필요함
- 또한 팀원 간의 의사소통을 책임지며, 적절히 계획을 세워야 하고, 적절한 가이드워드를 제시함으로써 미팅이 부드럽게 진행될 수 있도록 해야 함
- 각각의 팀원은 정해진 역할이 있어야 하며, 관련 지식과 충분한 운전 경험이 있어야 함

#### ○ Node Definition 및 Design Intent

- Node는 HAZOP Study를 효율적으로 수행하기 위하여 검토 구간을 구분하는 것을 말하며, 설비군을 기준으로 구분하거나, 운전조건이 변하는 구간을 기준으로 구분하기도 함
- Node를 구분한 후에는 해당 Node에 대한 상세 설명이 필요하며, 이를 Design Intent라고 함
- Design intent에는 해당 Node에 대한 설명 및 운전조건 등이 함께 기입되어야 함
- Deviation을 유발하는 Cause는 해당 Node 내에서 찾지만, 그 결과는 해당 Node에 한정되지 않고 찾아야 함. (Local causes - global consequence approach)

#### ○ Safeguards의 종류 및 Effectiveness

- Cause 및 Consequence 검토 시 Safeguards는 고려하지 않고 결과를 산정함

- Safeguards는 사고의 발생을 막아주는 Preventive safeguard와 사고가 발생하더라도 그 영향 범위를 줄여주는 Mitigative safeguard로 나눌 수 있음
- Operator response를 safeguard로 할 경우, 동시다발적으로 울리는 알람에 대해 정확히 반응할 수 있도록 교육 및 훈련되어 있어야 하며, 비상 시 울리는 알람에 대한 내용이 문서화 되어있어야 하고, 운전원이 반응하기에 충분한 시간적 여유가 보장되어야 함
- Safeguard는 그 효과성이 충분히 검토되어야 하고, 해당 사고 시나리오를 효과적으로 막아줄 수 있는 순서대로 작성되어야 함

### 3. Layer of Protection Analysis

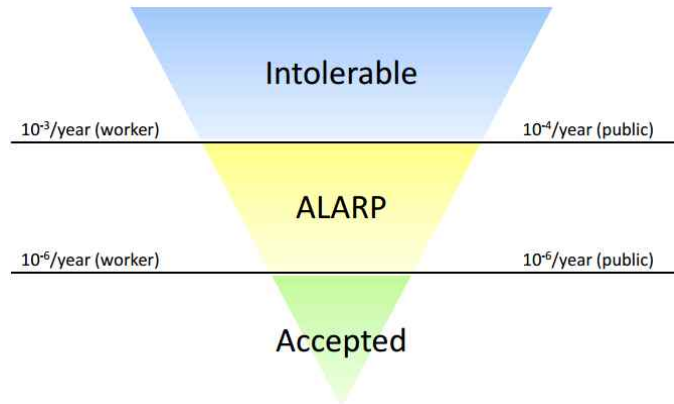
#### □ LOPA의 기본 개념

- LOPA는 특정 사고 시나리오에 대한 Protection layer의 적정성을 확인하기 위한 반정량적인 위험성평가 방법으로, 아래의 항목들에 대한 발생가능성 등을 검토하여 원하지 않는 사고의 target 빈도와 비교하여 Protection layer가 충분한지 여부를 검토하고자 함
  - Initiating Event Frequency
  - Likelihood of Failure of Independent Protection Layer
  - Consequence Severity
- LOPA는 주로 Safety Instrumented System(SIS) Design 시 각각의 Safety Instrumented Function(SIF)에 대해 target SIL(Safety Integrity Level)을 부여하기 위한 SIL determination 기법으로 사용됨

#### □ Risk Tolerance Criteria and ALARP

- 개인은 매일 매일 위험과 마주하지만 아래와 같은 상황에서는 높은 위험도 감수하는 경향이 있음
  - 얻어지는 이득이 큰 경우
  - 일상적인 활동인 경우
  - 지식이 부족한 경우
  - 위험에 직접적으로 영향을 받지 않는 경우

- ALARP (As Low As Reasonably Practicable) 은 합리적으로 실행가능한 범위에서 위험도를 가능한 낮게 가져가고자 하는 개념으로, 비용과 이익을 검토하여 과도한 비용이 들어감에도 불구하고 그에 따른 이익(위험도 감소)이 적을 경우에는 적정 수준의 위험도를 감수할 수 있다는 개념임



[그림 4] ALARP by UK HSE

	UK	Hong Kong	Netherlands	Australia(New South Wales)
Individual Risk de Minimis (Worker)	$1 \times 10^{-6}$	Not Used	Not Used	Not Used
Individual Risk de Minimis (Public)	$1 \times 10^{-6}$	Not Used	$1 \times 10^{-6}$	Not Used
Individual Risk de Manifestus (Worker)	$1 \times 10^{-3}$	Not Used	Not Used	Not Used
Individual Risk de Manifestus (Public)	$1 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$
Societal Risk Anchor	10 persons at $1 \times 10^{-4}$	10 persons at $1 \times 10^{-4}$	10 persons at $1 \times 10^{-5}$	Not Used
Societal Risk Aversion Index	-1	-1	-2	Not Used

[그림 5] 국가 별 Tolerable Risk Criteria Summary

## □ LOPA 수행 절차 및 시나리오 선정

- LOPA 수행 절차
  - Consequence assessment
  - Scenario selection and development
  - identifying the initiating event and determine the frequency
  - Identify the independent protection layers and estimate the probability of failure on demand
  - Estimate the risk of the event
  - Evaluate the risk against the tolerable value

## □ IPL(Independent Layer of Protection)의 기본 개념 및 종류

- IPL은 원하지 않는 사고를 방지할 수 있는 장치 또는 action 등을 말하며, IPL은 반드시 독립적(Independent) 이어야하고, 효과적(Effective) 이어야하며, 검증가능(Auditable) 해야함

### ○ IPL의 종류

- Process design
- Basic process control system
- Critical alarms and human intervention
- Safety instrumented function
- Mechanical protection(Relief valves, Rupture disks, etc.)
- Post release protection  
(Dikes, Blast walls, Automatic deluge, etc.)



## □ Conditional modifier

- Conditional modifier는 공정 외 다른 변수들에 의한 영향을 고려하는 factor로 시나리오마다 적용되는 Conditional modifier의 종류는 다름
- Conditional modifier 선정 시 그 주변 환경이나 조건이 명확할 경우에만 사용할 수 있으며, Conditional modifier 자체가 Safeguard를 대체할 수 는 없음
- Conditional modifier의 종류
  - Probability of ignition of a flammable mass
  - Probability of a person being present
  - Probability of injury to a given conditional exposure (toxic, thermal, pressure, etc.)

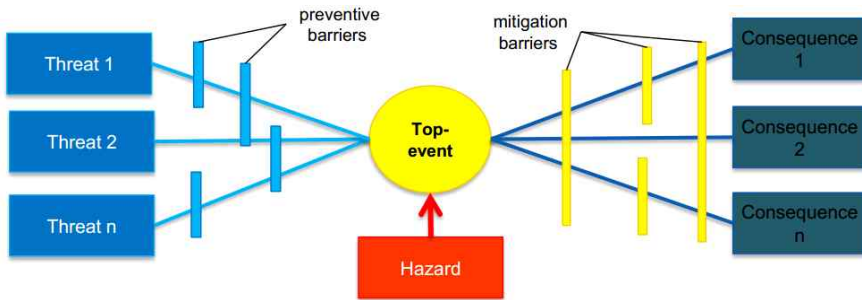
## 4. Risk Based Inspection

### □ RBI Introduction 및 Loss of Integrity

- Risk Based Inspection 은 설비의 운전 및 설계조건, 다루는 유체 등을 체계적으로 검토하여 설비별로 위험도를 정량적으로 산정하고, 위험도의 크기에 따라 검사에 대한 우선순위, 방법, 주기 등을 차등 적용함으로써 종합적이고 체계적인 검사 및 정비 계획을 수립하고자 하는 위험성평가 기법임
- 설비는 부식, 침식 등 다양한 Damage mechanism 에 의해 그 성능이 저하되는데, RBI를 통해 잔여 수명을 계산하고 적절한 시기에 유지·보수함으로써 설비의 건전성을 유지하는데 그 목적이 있음
- Austria에서는 법적으로 설비에 대해 주기적으로 inspection & maintenance를 하게 되어있는데, RBI를 하면 그 주기를 달리 가져갈 수 있음

### □ Bow-Tie와 RBI

- Bow-Tie는 사고의 원인, 잠재위험, 결과 간의 관계를 쉽게 볼 수 있도록 전개과정을 도식적으로 표현하여 위험을 분석하는 위험성평가 기법으로, 좌측부터 원인, 예방시스템, 사고, 완화/대응시스템, 사고결과 순으로 전개하여 사고 발생 전·후 방호 계층을 통해 사고를 예방하고 피해를 저감할 수 있음
- RBI는 Bow-Tie 중 Preventive barrier의 하나인 Inspection에 대해 검토하고자 하며, Mitigation barrier는 다루지 않음



[그림 6] Bow-Tie

#### □ RBI 적용범위 및 전제조건

- RBI는 대부분의 Static Equipment(타워, 열교환기, 드럼, 배관 등)들에 대해 적용 가능하며, Rotating Equipment나 전기·계장 시스템들에 대해서는 적용하지 않음

#### ○ RBI의 전제조건

- Plant design according best available technology
- No safety relevant manufacturing defects
- Plant operated inside operating window

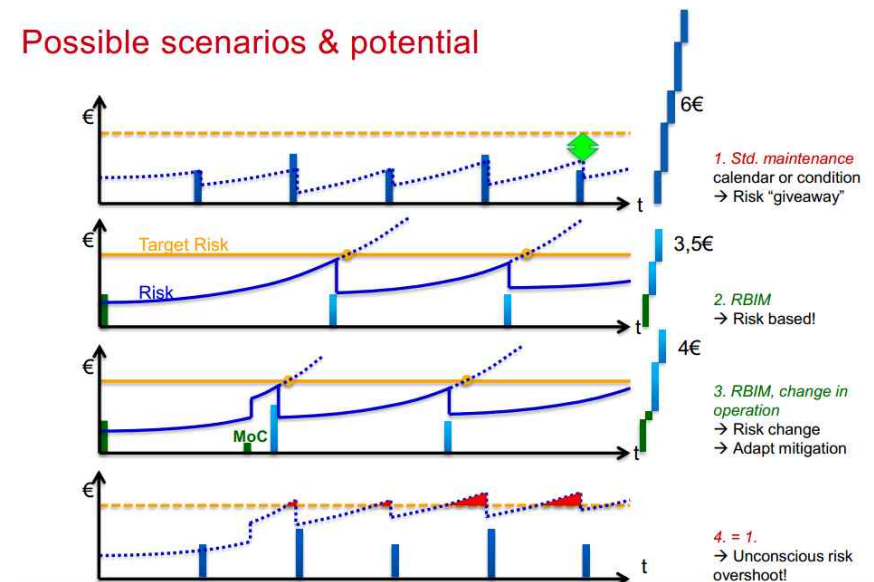
#### □ API 580, 581 vs RBIF EN 16991

- 국내에서 RBI는 API 580 과 581 “Risk-Based Inspection”에 따라 수행되고 있으며, API 580에서는 RBI의 Frame work를 제공하고, API 581에서는 상세 내용들을 제공함. API 580과 581은 Petroleum industry에서 사용될 수 있도록 작성되어 있으며, 다른 field에서 사용하기에는 다소 상이한 면이 있음

- 유럽에서는 RBIF EN 16991 “Risk based inspection framework (RBIF)”에 따라 RBI를 수행하며, 해당 Code는 Nuclear industry에서는 사용할 수 없음

#### □ RBI의 목적 및 수행 절차

- RBI를 수행함으로써 고위험 설비를 구분하여 적절한 점검 주기를 산정하고, 위험도가 Target Risk에 도달하기 전에 적절히 위험도를 낮춰줌으로써 모든 설비에 대해 무분별하게 검사를 수행하던 과거에 비해 비용을 절감하는 데 RBI의 목적이 있음

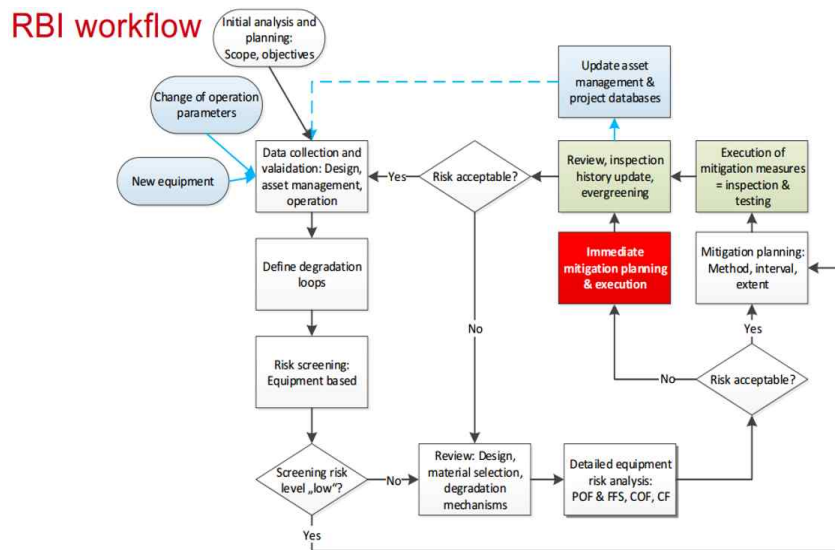


[그림 7] RBI의 목적

- [그림 7]에서 1번은 기존의 방식인 주기적인 검사를 의미하며, 이때는 Risk가 Target risk에 한참 미치지 못하더라도 검사를 수행함으로써 과도한 비용이 드는 상황이 발생함

- 2번의 경우 RBI를 통해서 Risk가 Target risk에 근접할 시점에 적절히 유지·보수를 함으로써 Risk를 낮추는 상황으로, 1번에 비해 많은 비용을 절감할 수 있음
- 3번의 경우 변경이 발생됨에 따라 Risk가 상승하게 되는데, RBI를 적절히 수행하여 검사 주기를 앞당김으로써 Risk가 Target risk에 도달하지 않도록 관리가 가능함
- 4번의 경우 주기적인 검사 중 변경이 발생함에 따라 Risk가 상승하게 되는 경우인데, 이때는 Risk가 간헐적으로 Target risk보다 높아지는 경우가 발생할 수 있으며, 이를 적절히 관리하지 못할 경우 사고로 이어질 수 있음

○ RBI 수행 절차는 [그림 8]과 같음



[그림 8] RBI 수행 절차

## □ PoF, CoF 및 Confidential Factor

### ○ Probability of Failure

- Corrosion Probe 등을 사용하여 잔여두께, 부식률 등을 확인하고, 이를 바탕으로 Remaining Useful Lifetime(RUL)을 구함
- RUL과 RBI assessment time, Confidential Factor를 사용하여 Probability of Failure 를 구함
- Confidential Factor는 비파괴검사 실시 여부 및 시기, 비파괴 검사 point 개수 등을 고려하여 PoF 산정 시 적용하는 Factor로 TUV에서는 자체 기준에 따라 Confidential Factor를 반영하고 있음

### ○ Consequence of Failure

- CoF는 Safety, Health, Environment 측면과 Business 측면을 모두 고려하여 최악의 결과를 바탕으로 CoF를 산정함
- Large release, Hole, Pinhole or crack 의 3가지 failure mode로 screening 하며, 점화 가능한지, 화상을 유발할 수 있는지, 환경에 영향을 주는지 등 effect를 고려하여 CoF를 산정함

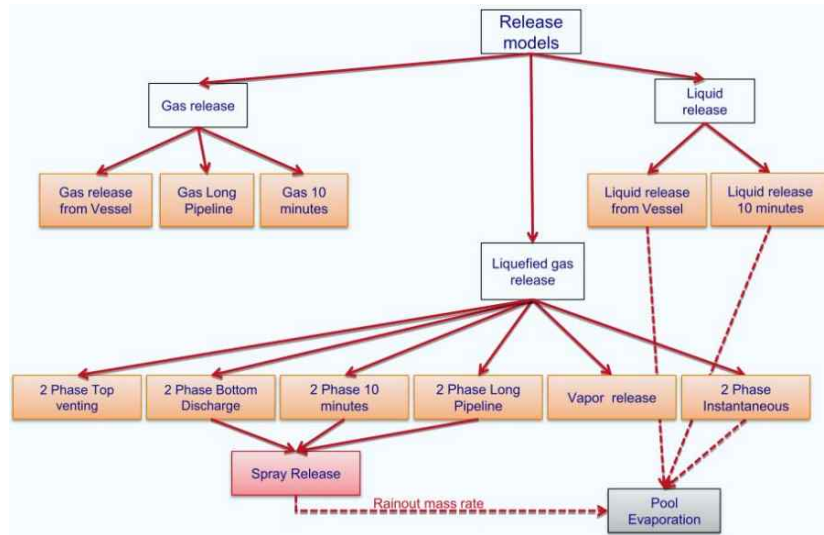
## 5. Fire, Explosion & Dispersion Analysis

### □ Introduction to Safety Analysis

- Consequence Analysis는 정량적 위험성평가 (QRA, Quantitative Risk Assessment)의 한 부분이며, Frequency 는 고려되지 않음
- QRA 수행 시 TUV에서는 TNO에서 제공하는 CRP-12(Red Book), CRP-14(Yellow Book), CRP-16(Green Book), CRP-18(Purple Book)등을 활용하고 있으며, Simulation은 TNO에서 제공하는 EFFECTS-10 프로그램을 사용함

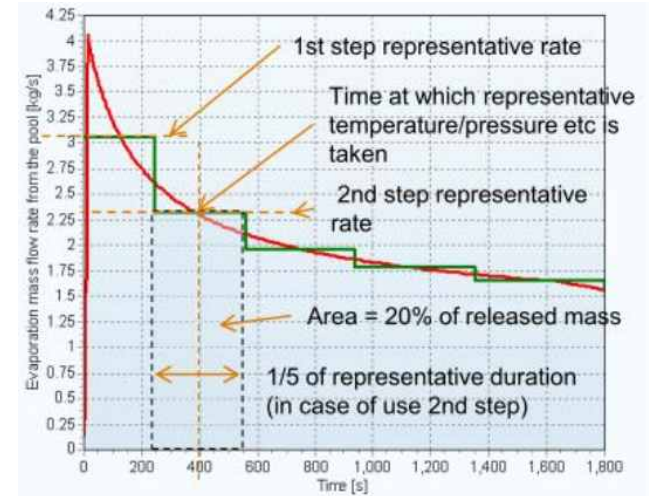
### □ 누출 모델링

- 누출 모델링은 다양한 Factor들에 따라 발생 가능한 사고와 그 영향 범위가 달라지며, 누출 모델링을 도식화 하면 [그림 9]와 같음



[그림 9] 누출 모델링

- 누출 모델링의 경우 Release rate 선정해야 하는데, Yellow Book approximation에 따르면, 누출시간(max 1800s) 동안 같은 면적(누출량)을 갖는 5개의 step으로 나누고, Flammable의 경우 1st step을, Toxic의 경우 2nd Step을 Representative rate 로 선정함

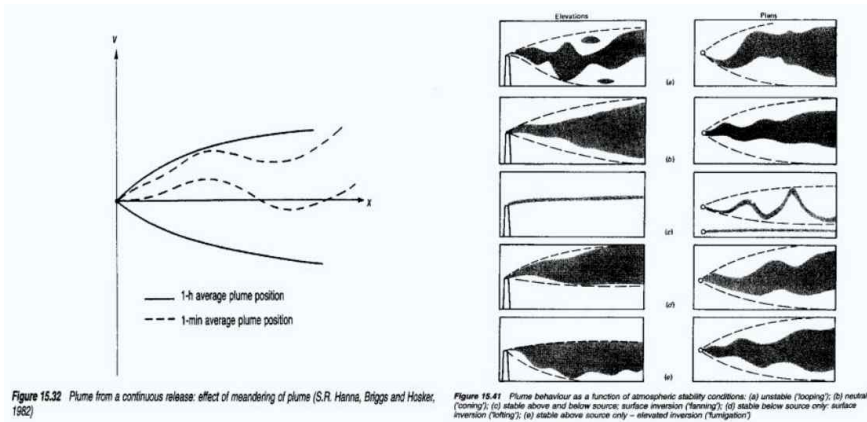


[그림 10] Representative rate

### □ 확산 모델링

- 확산 모델링 시 Averaging Time을 Toxic의 경우 600초, Flammable의 경우 20초를 적용함
- EFFECTS 프로그램에서는 공기보다 가벼운 가스는 가우시안 모델링을 사용하고, 공기보다 무거운 가스에 대해서는 SLAB 모델을 사용함

- 대기확산 모델링 시 Pasquill 대기안정도를 사용하며, 대기 조건에 따른 확산의 모양은 그림 11과 같음



[그림 11] 대기안정도에 따른 확산 모양

## □ 폭발 모델링

- Confined vapor cloud explosion과 Deflagration은 TNO Multi Energy Modeling을 사용하며, Detonation은 TNT 당량 Modeling을 사용함
- Confinement와 장애물의 집적도(Congestion)에 따라 Deflagration 이 Detonation으로 전이될 수 있으며, Detonation으로 전이되면 Blast load는 매우 커짐
  - Low Congestion : one can easily walk through the area (<20% area blockage ratio)
  - Medium Congestion : one can walk through the area but would have some difficulty (20-40% area blockage ratio)
  - High Congestion : walking through the area is very difficult or impossible (>40% area blockage ratio)

## □ 화재 모델링

- 화재로 인한 Probit function 은 아래 식과 같음
  - 사망 :  $Pr = -36.38 + 2.56 * \ln(t * Q^{1.33})$
  - 1도 화상 :  $Pr = -39.83 + 3.0186 * \ln(t * Q^{1.33})$
- 적절한 보호구를 착용했을 경우, 사망 확률에 0.14를 곱함. 즉, 적절한 보호구를 착용했을 경우, 보호구를 착용하지 않았을 경우 사망할 수 있는 숫자의 14%만 사망 가능함
- Austria Regulation에서는 사람이 대피할 수 있는 기준을  $3 \text{ kW/m}^2$ 로 함



[그림 12] Low Congestion





[그림 13] Medium Congestion



[그림 14] High Congestion

## 6. The Seveso III Directive

### □ EU 구성 및 법 체계 등 소개

#### ○ European Union

- 1958년 설비, 28개국 가입, 전체인구 약 5억 명
- Single Market, Common Technical Standards, High Level of Occupational Safety and Environmental Conditions 등을 목표로 함

#### ○ EU의 법 체계

- Primary Law(the Union foundation treaties and amendments)
- 8400 Regulations(regulations are directly binding instruments without need for national transposition)
- 2000 directives(directives need national transposition and leave freedom for stricter conditions)
- Ca. 5,000 harmonized European standards(binding for placing certain products on the EU market)

### □ Seveso Chemical Classification 및 Lower/Upper Threshold

- Seveso Directive의 적용을 받는 그룹에 대해 물질의 사용량에 따라 Lower/Upper tier로 구분하여 관리함
- Seveso Directive에서는 크게 독성물질, 폭발물질/인화성물질, 자기반응성 물질, 환경위험물질로 구분함

### □ 독성가스 누출

- 독성가스 누출로 인한 Probit function 은 아래 식과 같으며 A, B, n 값은 물질에 따라 달라짐
- $Pr = A + B * \ln(Cn * t)$

Seveso Annex I Thresholds (Examples)		
Substance Category	Lower Threshold in tons	Upper Threshold in tons
Acute Toxic Category 1	5	20
• Acute Toxic Category 2 all exposure routes	50	200
• Acute Toxic Category 3 inhalation route		
Explosives, ADR/GHS 1.1, 1.2, 1.3, 1.5, 1.6	10	50
Explosives, ADR/GHS 1.4	50	200
Flammable Gases	10	50
• Flammable Liquids Category 1	10	50
• Flammable Liquids Category 2 or 3 (maintained with temperature above boiling point)		
Other Flammable Liquids	5000	50000
Self-Reactive, Pyrophoric or Oxidising Substances	40	200
Substances Hazardous to the Aquatic Environment, Category Acute or Chronic 1	100	200
Substances Hazardous to the Aquatic Environment, Category Chronic 2	200	500

[그림 15] Seveso Thresholds (examples)

## □ Seveso Requirements 와 Safety Report

- Lower Tier Obligations for Operators
  - General Obligations(“...all necessary measures...”)
  - Notification(tell the authority who/where/what)
  - Major Accident Prevention Policy(generic policy paper)
  - Modification Management
  - Accident Reports
  - Cooperation with Authorities(main issue : inspection)
- Upper Tier Obligations for Operators
  - Lower Tier Obligations and
  - Safety Report(summary of the risk analysis)

- Safety Management System
- Internal Emergency Plan
- Information to Public

### ○ Authority obligations

- Legislation(transposition of the Directive into national law)
- Inspection
- Give opinion on safety reports
- Land-use Planning
- External emergency planning
- Reporting to the European bodies

### ○ Safety Report

- “Safety Report”는 Seveso Directive에 의해 요구되는 documentation으로, Risk analysis 및 기타 prevention and mitigation measures(internal emergency planning, safety management system 등)에 대한 내용을 기술하고 있음
- 특별한 형식(format)은 없으며, key elements를 포함하면 됨. 가장 중요한 부분은 inspection을 위한 정보를 제공하는데 있음

## □ Land-Use Planning

- Seveso Directive가 요구하는 사항으로 주민 및 주요 지역에 대해 일정 거리를 유지함으로써 사고의 영향 범위를 줄이는 데 목적이 있음

- 적절한 거리를 유지하여 Major accident를 방지하고, 그 결과를 제한하고자 함
- 국내 장외영향평가와 유사한 개념으로, 인구밀도 등을 고려한 중요한 요소로 생각하고 관리하고 있음

## 7. Explosion protection [API, IEC 60079 etc.]

### □ 방폭의 기본 개념

- 폭발은 연소의 3요소가 모두 충족될 경우 발생하며, 이 중 하나라도 없다면 폭발은 일어나지 않음
  - Avoidance of combustible substances(Substitute technologies)
  - Inerting(Addition of nitrogen, carbon dioxide, etc.)
  - Limitation of Concentration through natural or technical ventilation

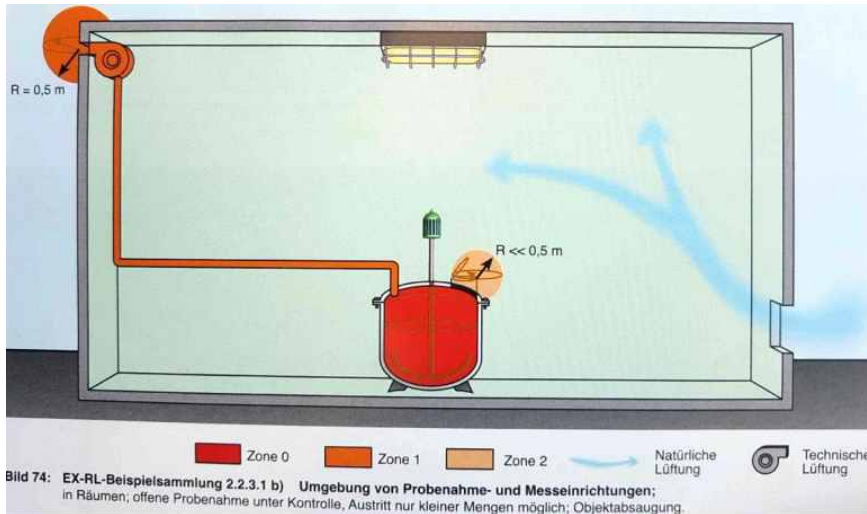
### □ 방폭지역 구분 (Directive 1999/92/EG)

- 유럽에서는 Directive 1999/92/EG 에 따라 폭발위험장소를 구분하며, 그 기준은 [그림 16]과 같음

Gases, vapours and mists	Dusts
<b>Zone 0</b> A place in which an explosive atmosphere consisting of a mixture with air of flammable substances in the form of gas, vapour or mist is present continuously or for <b>long</b> periods or <b>frequently</b> .	<b>Zone 20</b> A place in which an explosive atmosphere in the form of a cloud of combustible dust in air is present continuously, or for <b>long</b> periods or <b>frequently</b> .
<b>Zone 1</b> A place in which an explosive atmosphere consisting of a mixture of flammable substances in the form of gas, vapour or mist with air is likely to occur <b>occasionally</b> in normal operation.	<b>Zone 21</b> A place in which an explosive atmosphere in the form of a cloud of combustible dust in air is likely to occur <b>occasionally</b> in normal operation.
<b>Zone 2</b> A place in which an explosive atmosphere consisting of a mixture of flammable substances in the form of gas, vapour or mist with air is unlikely to occur in normal operation but, if it does occur, it will persist for a <b>short period</b> only.	<b>Zone 22</b> A place in which an explosive atmosphere in the form of a cloud of combustible dust in air is unlikely to occur in normal operation but, if it does occur, it will persist for a <b>short period</b> only.

[그림 16] Definition of zones according to Directive 1999/92/EG





[그림 17] Example: Agitator with technical ventilation

## □ 방폭기기 구분 (Directive 2014/34/EU)

- 유럽에서는 Directive 2014/34/EU 에 따라 Device Categories 를 구분하며, Device Category 는 1, 2, 3으로 구분함

### - Category 1

- Equipment in this category is intended for use in areas where there is an explosive atmosphere, consisting of a mixture of air and gases, vapours or mists, or of dust/air mixtures, permanently or long-term or frequent.
- Equipment in this category must guarantee the required level of safety even in the event of rare equipment malfunctions and must therefore be explosion-protected so that

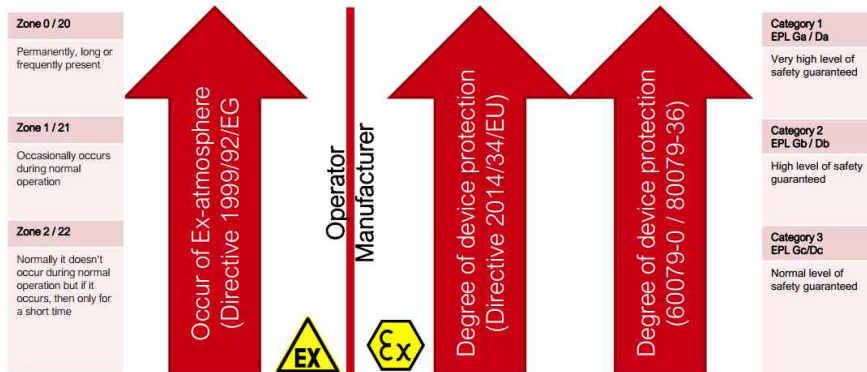
- In the event of the failure of one protective device, at least one second independent protective device ensures the necessary safety, or
- The necessary security is ensured when two independent faults occur.

### - Category 2

- Equipment in this category is intended for use in areas where it can be expected that an explosive atmosphere consisting of gases, vapours, mists or dust/air mixtures occasionally occurs.
- The explosion protection measures for devices in this category ensure the required level of safety even in the event of frequent equipment malfunctions or fault conditions, which are usually to be expected.

### - Category 3

- Equipment in this category is intended for use in areas where it's not expected that a potentially explosive atmosphere is created by gases, vapours, mists or swirled dust, but if it occurs nevertheless, then in all probability only rarely and for a short period of time.
- Devices in this category ensure the required level of safety during normal operation.



[그림 18] Comparison of zones and device categories

## □ Ignition hazard assessment

- 모든 Equipment와 그 부속품은 문서화된 hazard assessment를 거쳐야 하며, 해당 equipment가 잠재적인 점화원이 될 수 있는지 여부를 확인하기 위해서 수행됨
- 제조사에서 Ignition hazard assessment를 수행하며 그 후에 testing company에서 확인하는 과정을 거침
- Protective measures는 아래의 순서에 따라 반드시 고려되어야 함
  - ensure that no ignition sources can become effective;
  - ensure that no ignition sources can occur;
  - prevent an explosive atmosphere from reaching the ignition source;
  - suppress explosion and prevent flame propagation.

## □ ATEX-Directive 2014/34/EU의 목적

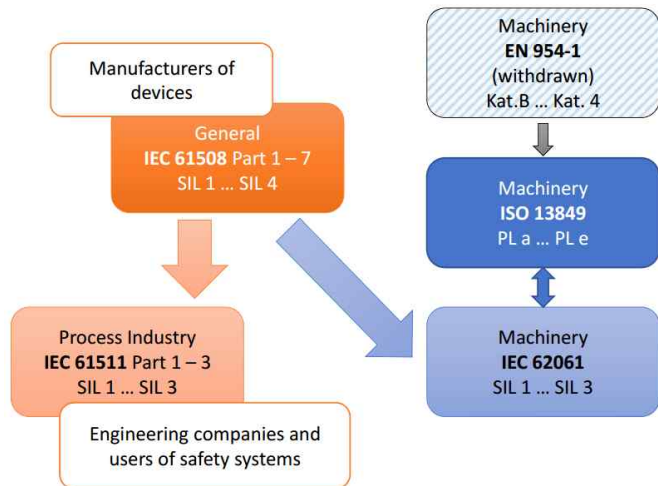
- ATEX-Directive 2014/34/EU의 목적은 EU 내에서의 자유로운 무역을 위함이며, Directive 2014/34/EU Annex II에서 요구하는 필수적인 Health and Safety Requirements는 아래와 같음
  - Potential ignition sources of equipment intended for use in potentially explosive atmospheres
  - Autonomous protective systems whose essential task is to stop an explosion immediately after it has started and/or limit the effects of the flames and pressures of the explosion.
  - Safety devices intended to contribute to the safe operation of such equipment with regard to its ignition sources and to the safe operation of autonomous protective systems
  - Components without autonomous function which are essential for the safe operation of the above equipment or autonomous protective systems.

## 8. Functional Safety

### □ Functional Safety의 기본 개념 및 관련 Standards

- Flixborough(1975년, LOC of 30t Cyclohexane), Seveso(1976년, LOC of 2kg Tetrachloro-dibenzo-p-dioxine), Bhopal(1984년, LOC of 40t Methyl-Iso-Cyanate) 등 다양한 사고에 의해 제조자 및 사용자에게 대한 법적 규제가 강화되어 옴

- Functional Safety 와 관련된 Standards는 [그림 19]와 같음

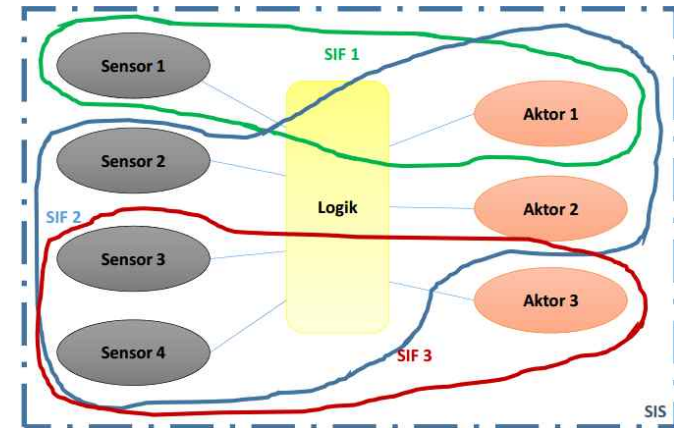


[그림 19] Relevant Standards

### □ Safety Instrumented Function과 Safety Lifecycle

- Safety Instrumented Function은 기능안전을 얻기 위해 꾸며진 loop 로서, sensor, logic solver, final element 로 구성되며, 특정 Safety Integrity Level (SIL)을 가짐

- SIF가 모인 전체 시스템을 SIS(Safety Instrumented System)이라고 하며 ESD(Emergency Shut-Down) System이라고 부르기도 함



[그림 20] SIF and SIS

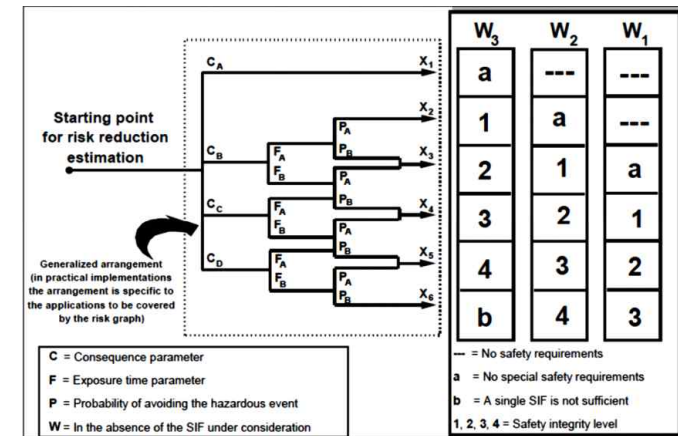
- Safety Lifecycle이란 기능안전을 얻기 위한 framework로, 아래의 단계를 거침

- Analysis
  - Risk Analysis
  - Define required SIL
  - Safety Requirement Specification
- Realization
  - Design & Engineering
  - Factory Acceptance Test
  - Installation & Commissioning
  - Site Acceptance Test

- Operation
- Operation & Maintenance
- Modification (MoC)
- Decommissioning

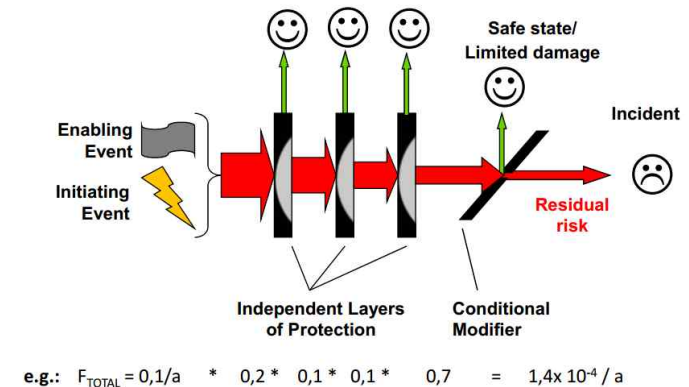
## □ Required SIL 선정 방법

- 각각의 SIF는 요구되는 Risk Reduction Factor 에 따라 SIL-Level 이 결정됨. SIF는 운전 mode에 따라 Low demand mode, High demand mode, Continuous mode로 나뉨
- **Low demand mode:** mode of operation where the SIF is only performed on demand, in order to transfer the process into a specified safe state, and where the frequency of demands is no greater than one per year.
- **High demand mode:** mode of operation where the SIF, is only performed on demand, in order to transfer the process into a specified safe state, and where the frequency of demands is greater than one per year.
- **Continuous mode:** mode of operation where the SIF retains the process in a safe state as part of normal operation.
- Required SIL을 구하는 방법은 Risk Graph, Risk Matrix, LOPA 등 세 가지 방법이 있음
- Risk Graph : IEC와 EN에서 정의하는 Graph가 다소 차이가 있으나, 방법은 비슷함



[그림 21] Risk Graph

- LOPA : 사고를 방지하는 Protection Layer에 대해 검토한 후, 부족한 만큼을 Required SIL로 부여하는 방법으로 [그림 22]와 같이 구함



[그림 22] LOPA

## □ Probability of Failure on Demand (PFD) 계산 방법 소개

- Probability of Failure on Demand 는 요구 시 실패 확률로, Low Demand Mode로 운전되는 System에 해당되며, Continuous Demand Mode 및 High Demand Mode의 경우에는 PFH (Probability of Failure per Hour) 로 표현함
- IEC 61508-6에서는 설비의 구성 및 Architecture(M out of N)에 따라 다양한 계산식을 제공하고 있으며, Failure rate, Common Cause Failure 등 다양한 factor 들이 계산에 포함됨

## □ IEC 61511 New Ed.에 따른 Hardware Fault Tolerance

- Hardware Fault Tolerance는 설비의 Redundancy를 나타내는 것으로, HFT가 1이라는 것은 하나의 설비가 고장 나더라도 그 기능이 정상적으로 유지될 수 있는 정도를 의미함
- IEC 61511 New Ed.2(2016) 에서는 Ed.1(2003)과 달리 Hardware Fault Tolerance가 다소 완화되었으며, 그 값은 아래와 같음

**Table 6 – Minimum hardware fault tolerance of sensors and final elements and non-PE logic solvers**

SIL	Minimum hardware fault tolerance (see 11.4.3 and 11.4.4)
1	0
2	1
3	2
4	Special requirements apply (see IEC 61508)

[그림 23] HFT 비교 (Ed.1(위) vs Ed.2(아래))

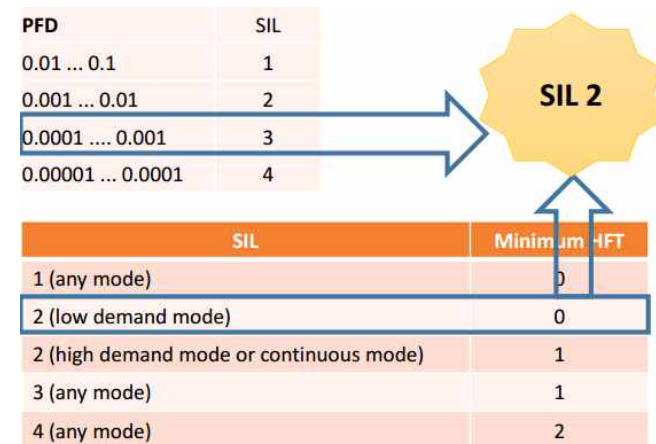
**Table 6 – Minimum HFT requirements according to SIL**

SIL	Minimum required HFT
1 (any mode)	0
2 (low demand mode)	0
2 (high demand or continuous mode)	1
3 (any mode)	1
4 (any mode)	2

[그림 23] HFT 비교 (Ed.1(위) vs Ed.2(아래))

## □ SIL Verification 방법 소개

- SIL Verification은 개별 SIF에 대한 Target SIL 값을 만족하는 지 검토하는 과정으로, 얻어진 SIL 값이 Target SIL보다 같거나 커야하며, Probability of Failure on Demand 계산으로 얻어진 SIL 값과 HFT를 적용하여 얻어진 SIL 값 중 작은 값이 최종적으로 얻어진 SIL 값이 됨



[그림 24] 최종 SIL 값을 구하는 과정

## V 시사점 및 의견

- 국내 대형 화학공장에서 SIS를 도입하여 위험성평가의 한 기법으로 활용하고 있으므로, 향후 공정안전보고서 심사 및 사고예방대책 등에 이용될 수 있도록 Functional Safety 관련 과목을 개설하여 직원교육을 할 필요가 있을 것으로 보임
- 공정안전관리분야 국외 위탁교육 기관과의 지속적인 교류를 통해, 다양하고 전문적인 분야의 신지식을 접할 수 있는 기회를 제공함으로써 전문기술력을 강화하고 전문인력 Pool을 확대하여 화학사고 예방에 기여할 수 있을 것으로 판단됨
- 국내에서도 쉽게 제공받을 수 있는 개념 및 정의 · 개요 · 사고 사례 등의 교육시간을 축소하고, RBI, SIL, QRA, RAM 등 국내에서 잘 활용되지 않고 있는 기법에 대한 교육시간을 확대함으로써 국내에서의 활용방안, 시책에 반영할 사항 등에 대해 좀 더 면밀히 모색할 수 있을 것으로 보임
- 현재 이슈가 되고 있는 노후화학설비 안전성 향상을 위해 RBI (Risk Based Inspection), RAM(Reliability, Availability and Maintainability), Safety Critical Elements(SCE) & Performance Standards(PS) 등 공정안전관리 기법을 국내 PSM 대상 사업장에 전파할 필요가 있음. 이를 통해 시스템 효율 및 공정안전성을 향상시키고 성능기준(Performance Standards)을 유지함으로써 공정사고 위험도를 감소 할 수 있다고 사료됨

## VI 수집자료

- Risk Management in the Chemical Industries
- Application of HAZOP in process industry
- Basics of Layer of Protection Analysis
- Risk Based Inspection, introduction
- Fire, Explosion & Dispersion Analysis
- The European Directive on the Control of Major Accident Hazards involving Dangerous Substances
- Basics of Explosion Protection
- Basics of Functional Safety for Process Plants
- CPR 16E - Methods for the determination of possible damage (Green Book)
- CPR 14E - Methods for the calculation of physical effects (Yellow Book)
- ATEX 2014/34/EU Guidelines

## VII 선물 수령 및 신고 여부

- 선물 미수령

수령 여부	신고 여부	비고
X	X	-