KOSHA GUIDE

KOSHA GUIDE

KOSHA GUIDE

KOSHA GUIDE

KOSHA GUIDE
기술지원규정

정량적 위험성평가에 관한 기술지원규정
C-C-7-2026

한국산업안전보건공단

기술지원규정은 산업안전보건기준에 관한 규칙 등 산업안전보건법령의 요구사항을 이행하는데 참고하거나 사업장 안전·보건 수준향상에 필요한 기술적 권고 규정임

기술지원규정의 개요

○ 작성자 : 제이씨비솔루션(주)

○ 제·개정 경과
- 2025년 11월 화학안전분야 전문위원회 심의(개정)
- 2026년 1월 표준제정위원회 본위원회 심의(제정)

○ 관련규격 및 자료
- CCPS, “Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis”
- HSE, “Reducing Risks, Protecting People. HSE’s Decision-Making Process”, Health & Safety Executive, HSE Books, 2001.
- KOSHA GUIDE C-C-43-2026「사고피해영향 평가에 관한 기술지원규정」
- KOSHA GUIDE C-C-58-2026「최악 및 대안의 사고 시나리오 선정에 관한 기술지원규정」
- Khaled S. M. Essa, “Estimation of Seasonal Atmospheric Stability and Mixing Height by Using Different Schemes”, International Journal of Advanced Research(2013), Volume 1, Issue 9, 429-438
- NFPA 59A, “Standard for the Production, Storage, and Handling of Liquefied Natural Gas (LNG),” National Fire Protection Association, 2016.
- RIVM, “Guidelines for Quantitative Risk Assessment(Purple Book)”, 2005.
- SANDIA, “Hydrogen Plus Other Alternative Fuels Risk Assessment Models (HyRAM+) Version 5.1 Technical Reference Manual, 2023

○ 관련법규・규칙・고시 등
- 산업안전보건법 제36조(위험성평가의 실시)
- 고용노동부 고시 제2024-76호(사업장 위험성평가에 관한 지침)

○ 기술지원규정의 적용 및 문의
- 이 기술지원규정에 대한 의견 또는 문의는 산업안전포털 홈페이지(portal.kosha.or.kr)의 기술지원규정(KOSHA GUIDE) 소관 분야별 문의처 안내를 참고하시기 바랍니다.
- 동 규정 내에서 인용된 관련규격 및 자료, 법규 등에 관하여 최근 개정본이 있을 경우에는 해당 개정본의 내용을 참고하시기 바랍니다.

공표일자 : 2026년 1월 30일
제 정 자 : 한국산업안전보건공단 이사장

목 차

1. 목 적 ····· 1

2. 적용 범위 ····· 1

3. 용어의 정의 ····· 1

4. 위험성평가 관련 법적 필수사항 ····· 3

5. 정량적 위험성평가 실시 ····· 4

6. 정량적 위험성평가 수행방법 ····· 5

6.1 사고 위험요인 확인 및 시나리오 선정 ····· 5

6.2 피해결과 분석 ····· 6

6.3 빈도 분석 ····· 12

6.3.1 누출빈도 분석 ····· 12

6.3.2 점화확률 분석 ····· 14

6.3.3 사고결과 빈도 결정 ····· 14

6.4 위험성 분석 ····· 15

6.5 위험성 평가 ····· 16

6.5.1 위험성 계산 ····· 16

6.5.2 위험성 평가 기준 ····· 18

7. 정량적 위험성평가 조건 및 가정 ····· 20

<부록 1> 프로빗과 백분율의 상관관계 ····· 27

<부록 2> ETA 다이아그램을 이용한 사고빈도 결정 사례 ····· 28

<부록 3> 바람장미(Wind rose) 도식화 사례 ····· 29

정량적 위험성평가에 관한 기술지원규정

1. 목 적

이 규정은 화학 및 가스공정 등 위험물질을 취급, 저장, 운송 및 활용하는 전주기 공정에서 정성적 위험성평가 결과, 고위험으로 도출된 대상 또는 정밀한 위험성평가가 필요하다고 고려되는 위험공정을 대상으로 발생 가능한 사고의 빈도와 피해결과를 조합하여 위험성을 정량화할 수 있는 정량적 위험성평가의 기술기준을 제시하며, 이를 통해 공정의 안전성을 확보하기 위해 필요한 대책을 수립하는데 요구되는 사항을 정하는 것을 그 목적으로 한다.

2. 적용 범위

이 규정은 정성적 위험성평가 결과 도출된 고위험 공정 또는 정밀한 위험성평가가 필요하다고 고려되는 공정에 대해 인화성 물질, 가연성 가스 및 독성물질을 사용, 취급, 이송 또는 저장하는 화학 및 가스설비와 그 부속설비에 대해 공정안전 부서가 정량적 위험성평가를 실시하는 경우에 적용한다.

3. 용어의 정의

3.1 이 규정에서 사용하는 용어의 정의는 다음과 같다.

(1) “정량적 위험성평가(Quantitative Risk Assessment, QRA)”라 함은 일반적으로 Full QRA로 명칭하며 공학적 평가와 수학적 기법을 기반으로 공정시설 또는 운전과 관련된 잠재적 사고의 예상 빈도와 피해결과를 조합하여 위험성을 수치로 정량화하여 계산하는 위험성평가 기법을 말한다.

(2) “사고(Incident)”라 함은 하나 또는 그 이상의 원치 않는 결과를 초래하는 사건이나 일련의 사건(Event)을 말하며 이러한 결과는 사람에게 해를 끼치거나, 환경의 손상 또는 물적 자산의 손실을 가져올 수 있다.

(3) “위험요인(Hazard)”이라 함은 사람, 재산 또는 환경에 피해를 줄 가능성이 있는 화학적 또는 물리적 상태를 말한다.

(4) “사고 시나리오(Major Accident Event, MAE)”라 함은 원하지 않는 결과를 가져오는 사건이나 사건의 연속을 말한다.

(5) “사고빈도(Frequency)”라 함은 단위 시간당 사건의 발생 횟수를 말한다.

(6) “확률(Probability)”이라 함은 일정 시간 동안 사건 또는 사건의 연속이 일정 시간동안 발생할 가능성 또는 테스트나 요구 시 사건이 발생 또는 발생하지 않을 가능성으로 0에서 1까지의 숫자로 표현한다.

(7) “사고발생 가능성(Likelihood)”이라 함은 사고가 발생하거나 발생할 것을 예상하여 분석한 결과로 단위 시간당 발생 숫자로 표현한 사고발생 빈도(Frequency)와 0에서 1사이의 숫자로 표현한 사고발생확률(Probability)을 포함한다.

(8) “사고결과(Incident Outcome, IO)”라 함은 사고의 물리적 표현을 말한다(예: 독성 물질의 사고결과는 확산이고, 인화성 물질의 경우 사고결과는 BLEVE, Flash Fire, VCE 등).

(9) “사고결과 사례(Incident Outcome Case, IOC)”라 함은 사고결과의 단일 사례에 대한 양적 정의로 동일한 사고결과에 대해 다른 모든 사고사례와 구분될 수 있도록 충분한 매개 변수를 지정한다.

(10) “피해결과(Consequence)”라 함은 사고결과 사례의 예상되는 피해 효과를 말한다(예: 암모니아가 1kg/s로 누출되고 이때 기상조건은 대기안정 등급이 D, 풍향은 북풍, 풍속은 1.4m/s인 상태에서 주변으로 확산되어 50명에게 부상을 입힘).

(11) “위험성(Risk)”이라 함은 사고의 발생 가능성과 피해결과의 조합에 의해 표시되는 사람, 환경, 또는 경제적 손실의 척도를 말한다.

(12) “개인적 위험성(Individual Risk, IR)”이라 함은 위험원 주변에 위치한 사람의 위험성으로 사고 또는 피해정도의 빈도로 표현하며 사람과 장소를 특정화한다.

(13) “특정위치 개인적 위험성(Location Specific Individual Risk, LSIR)”이라 함은 특정지역에 위치한 사람이 1년 또는 일정 작업기간 동안 노출될 수 있는 개인의 위험성을 말한다.

(14) “연간 개인적 위험성(Individual Risk per Annum, IRPA)”이라 함은 LSIR을 기반으로 플랜트의 특정위치에 있는 사람이 현장에 거주(작업, 이동 등)하는 시간을 고려한 개인의 위험성을 말한다.

(15) “사회적 위험성(Societal Risk, SR)”이라 함은 공정의 위험성을 임의 수의 인명피해를 발생시킬 수 있는 누적빈도(Cumulative Frequency)로 나타낸 것을 말한다.

(16) “FN-곡선(FN-Curve)”이라 함은 로그-로그 그래프에서 X축은 사망자 수 N을 나타내고 Y축은 사망자 수가 N 이상인 사고의 누적 빈도를 나타낸 곡선을 말한다.

(17) “조건부 허용영역(As Low As Reasonably Practicable, ALARP)”이라 함은 위험의 관리영역으로 시설의 설치는 허용되나, 위험관리와 위험을 낮추기 위한 개선조치를 수행해야 할 필요가 있는 위험수준을 말한다.

(18) “프로빗(Probit) 분석”이란 사고의 피해크기와 피해결과의 연관관계를 실험식을 이용하여 분석하는 방법을 말한다.

(19) “대기 안정도 등급(Atmospheric Stability Classes)”이라 함은 풍속과 태양 복사열의 강도에 의해 대기의 상태를 등급으로 구분한 것으로 일반적으로 Pasquill- Gifford에 의해 정의된 대기 안정도 등급을 적용한다.

3.2 그 밖에 이 규정에서 사용하는 용어의 정의는 특별한 규정이 있는 경우를 제외하고는 산업안전보건법, 동법 시행령, 동법 시행규칙, 산업안전보건기준에 관한 규칙 및 관련 고시에서 정하는 바에 따른다.

4. 위험성평가에 관한 법적 필수사항

다음은 위험성평가 실시에 관한 산업안전보건법령에 따른 사항으로써 반드시 준수하여야 한다.

산업안전보건법 제36조(위험성평가의 실시)

① 사업주는 건설물, 기계·기구·설비, 원재료, 가스, 증기, 분진, 근로자의 작업행동 또는 그 밖의 업무로 인한 유해·위험 요인을 찾아내어 부상 및 질병으로 이어질 수 있는 위험성의 크기가 허용 가능한 범위인지를 평가하여야 하고, 그 결과에 따라 이 법과 이 법에 따른 명령에 따른 조치를 하여야 하며, 근로자에 대한 위험 또는 건강장해를 방지하기 위하여 필요한 경우에는 추가적인 조치를 하여야 한다.

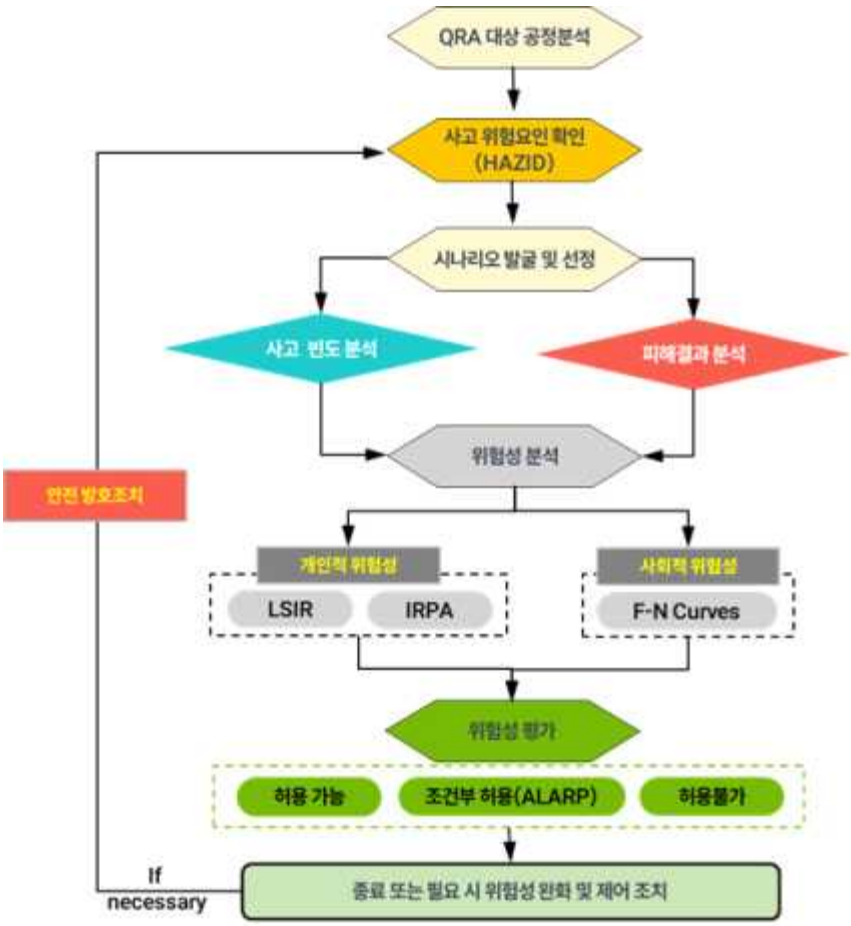
② 사업주는 제1항에 따른 평가 시 고용노동부장관이 정하여 고시하는 바에 따라 해당 작업장의 근로자를 참여시켜야 한다.

③ 사업주는 제1항에 따른 평가의 결과와 조치사항을 고용노동부령으로 정하는 바에 따라 기록하여 보존하여야 한다.

④ 제1항에 따른 평가의 방법, 절차 및 시기, 그 밖에 필요한 사항은 고용노동부장관이 정하여 고시한다.

5. 정량적 위험성평가 절차

(1) 이 지침은 정량적 위험성평가(이하 QRA로 명칭함)의 수행 시 도움을 주기 위한 가이드로 일반적인 QRA 수행 절차는 다음과 같다<그림 1>.



<그림 1> 정량적 위험성평가(QRA) 수행 절차

(가) 사고 위험요인 확인(Hazard Identification, HAZID)

QRA에서 중요한 단계로, 이 과정에서 공정에 내재된 위험요소가 누락될 경우 QRA의 신뢰성이 저하될 수 있으므로 세밀한 검토가 필수적이다. 이를 위해, 플랜트에서 수행된 Checklist, HAZOP, What-if, FMEA 등의 정성적 위험성 평가 결과를 활용하면 공정 내 잠재된 위험요소를 보다 효과적으로 식별하고 분석할 수 있다.

(나) 사고 시나리오(MAE) 발굴 및 선정

위험요인의 확인을 통해 발생 가능한 모든 사고를 열거하고 최종 사고로 발생할 수 있는 위험요인을 분석한다. 확인된 모든 사고 중 하나 이상의 중대한 사고를 시나리오로 선정하고, 이에 대한 사고결과와 사고결과 사례를 확인한다.

(다) 피해결과 분석(Consequence Analysis)

사고피해의 정도를 수치로 확인하는 것으로 누출원 모델과 확산모델 그리고 화재 및 폭발모델을 통해 피해범위를 산출하여 부상이나 사망, 물적 및 환경피해 정도를 확인한다.

(라) 사고빈도 분석(Frequency Analysis)

사고의 발생 가능성을 단위 시간당 발생수와 확률로 분석하는 것으로 결과의 단위시간은 년(/year) 단위를 적용하여 분석한다.

(마) 위험성 분석(Risk Analysis)

사고 시나리오의 빈도와 피해결과를 조합하여 개인적 위험성(IR)과 사회적 위험성(SR)을 계산하고 지도와 도표에 위험성을 표출한다.

(바) 위험성 평가(Risk Assessment)

위험성 분석을 통해 산출된 위험성의 허용 가능성 여부를 결정하는 것으로 이는 위험성 기준과의 비교를 통해 이루어진다. 산출된 결과가 조건부 허용영역(ALARP)에 해당될 경우, 위험의 관리영역으로 시설의 설치는 허용되나, 위험성을 낮추기 위한 개선사항을 수행해야 하며 허용 불가에 해당될 경우, 위험성을 감소시키기 위한 안전 개선조치를 적용하여 QRA를 반복 수행한다.

(2) <그림 1>의 QRA 수행 절차와는 다르게, 분석가의 판단에 따라 다른 QRA 방법을 적용할 수 있다. 이 경우, 해당 QRA 방법에는 사고 위험요인의 확인, 시나리오 선정, 사고빈도 분석, 피해결과 분석이 반드시 포함되어야 하며, 최종적으로 개인적 및 사회적 위험성이 수치로 정량화되어 산출될 수 있도록 구성해야 한다.

6. 정량적 위험성평가 수행방법

6.1 사고 위험요인 확인 및 시나리오 선정

(1) 공정에 내재되어 있는 위험요인을 확인하고 시나리오를 발굴 및 선정하는 것이 목적으로 저장 및 취급하는 위험물질의 특성과 누출 가능한 사건을 확인한다. 사고 위험요인의 확인 및 시나리오 선정을 위한 수행과정은 다음과 같다.

(2) Process Flow Diagram(PFD), Piping and Instrumentation Diagram(P&ID) 및 Heat and Material Balance(H&MB) 등의 공정자료 검토를 통해 위험물질, 물질의 상, 공정온도 및 압력, 저장량 등에 대한 정보를 확인하여 위험공정에 대해 다음과 같이 분석한다.

(가) 동일한 물질, 압력, 온도를 기준으로 공정 스트림(Stream)을 분석하고 공정조건, 비상차단 밸브의 위치, 공정규모에 따라 차단 또는 격리가 가능한 섹션 (Isolatable Section), 구역(Area), 노드(Node) 또는 모듈(Module)로 구분하여 시나리오를 선정한다. 도시가스 배관라인의 경우, 일반적으로 구분 거리는 1km로 단위로 적용한다.

(나) 공정섹션(구역, 노드 또는 모듈)의 저장 및 취급량을 확인한다. 이 경우, 위험물질을 저장하는 저장용기류(탱크, 드럼 등)는 독립된 공정섹션(구역, 노드 또는 모듈)로 구분할 수 있다.

(다) 공정섹션(구역, 노드 또는 모듈)의 장치수량(Parts Count)을 확인한다. 이 경우, 장치 종류와 크기 별로 개별수량 확인을 원칙으로 하나, 장치가 복잡하고 많을 경우, 장치 종류별로 크기를 여러 그룹으로 구분하여 확인한다.

(3) 위험요인이 공정에 어떤 영향을 미치는지 정성적으로 확인하여 인명 및 재산에 경미하거나 피해를 발생시키지 않는 경우 그리고 법적으로 문제가 되지 않는 경우 등, 시나리오로써 적정하지 않다고 분석되는 위험요인은 시나리오에서 제외하고 다른 중요 위험요인을 발굴 및 검토한다.

(4) 발굴 및 검토된 위험요인의 목록을 열거하고 적정한 사고 시나리오를 선정한다.

(5) 선정된 모든 시나리오의 사고결과를 확인하기 위해 물질의 상과 점화원을 고려하여 사고결과에 대해 정의한다. 이때 사고의 전개 과정을 분석하기 위해 일반적으로 사건수분석(Event Tree Analysis, ETA) 기법을 적용할 수 있다.

6.2 피해결과 분석

(1) 시나리오의 사고결과에 대해 피해결과를 예측 및 분석하는 것이 목적으로 KOSHA GUIDE C-C-47-2026 「누출원 모델링에 관한 기술지원규정」, KOSHA GUIDE C-C-56-2026 「사고피해예측 기법에 관한 기술지원규정」, KOSHA GUIDE C-C-43-2026 「사고피해영향평가에 관한 기술지원규정」에서 제시한 이론이나 현상학적 피해예측 프로그램 또는 전산유체역학(CFD, Computational Fluid Dynamics)을 활용하여 피해결과를 분석 할 수 있다. 전산유체역학(CFD)을 이용할 경우, 장애물(Obstacles)과 난류거동을 고려한 정밀한 피해결과를 분석할 수 있다. 피해결과의 분석 범위는 다음과 같다.

(2) 누출 모델링(Source Term Modeling)

시나리오의 누출량을 계산하기 위해 위험물질의 상(Phase)과 누출장치를 고려하여 적합한 누출 모델을 선정하여 계산한다. 사니리오의 피해결과는 기본적으로 누출량에 의해 결정됨에 따라 누출량이 많을 경우, 확산, 화재, 폭발의 강도가 크며 누출량이 적으면 피해결과를 무시할 수 있음에 따라 정확한 누출량의 계산이 요구된다.

(3) 확산 모델링(Dispersion Modeling)

시나리오의 누출에 따른 확산범위를 계산하기 위해 위험물질의 부력상태와 분산형태를 고려하여 적합한 확산 모델을 선정하여 계산한다. 위험물질이 독성위험 만을 가질 경우 피해범위는 확산범위가 되며 가연성일 경우 화재, 폭발과 연동하여 해석한다.

(4) 화재 모델링(Fire Modeling)

시나리오의 누출물질이 가연성일 경우, 발생 가능한 화재 사고결과는 다음과 같으며 여기에 적합한 수치 모델을 선정하여 피해범위를 계산 할 수 있다

(가) 플래시 화재(Flash fire)

(나) 제트화재(Jet fire)

(다) 풀 화재(Pool fire)

(라) 화구(Fireball)

(5) 폭발 모델링(Explosion Modeling)

누출물질이 가연성일 경우, 화재 이외에 발생 가능한 사고결과는 다음과 같으며 여기에 적합한 수치 모델을 선정하여 피해범위를 계산한다. 일반적으로 QRA 수행 시 물리적 폭발은 주변지역에 폭발 과압과 파편의 비산으로 피해를 발생시킬 수 있으나 먼 거리의 피해영향에 있어서는 독성 확산이나 증기운 폭발과 비교할 때 피해결과가 낮고 파편의 비산에 따른 사고 확률 또한, 낮음에 따라 QRA에서는 고려하지 않는다.

(가) 증기운 폭발(Vapor Coud Explosion, VCE)

(나) 비등액 팽창 증기운 폭발(Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion, BLEVE)

(6) 피해 취약성 기준

(가) 피해 기준

시나리오의 사고결과로 인해 주변에 미칠 수 있는 인적, 물적, 환경적 피해의 정도를 분석하기 위해 다음의 피해영향 기준을 위험성평가의 목적에 따라 다음의 피해영향 기준 중에서 분석가가 적정한 기준을 선택하여 적용하며 다음의 피해영향 기준 이외에 명확한 근거가 있는 다른 피해기준을 활용할 수 있다. 선택된 피해기준에 따른 피해영향 범위 결과는 비상조치계획 등 공정의 안전조치 활동에 활용할 수 있으며 각 표에서 제시하는 권고 기준은 피해영향 분석 시 일반적으로 사용되는 기준 값으로 현장상황과 분석가의 판단에 따라 적정하다고 판단되는 다른 피해수준 값을 적용할 수 있다.

① 화재에 의한 피해영향 기준은 <표 1>, <표 2>와 같으며 실내의 경우, 제트화재와 플래시 화재의 취약성 분석은 적용하지 않는다.

<표 1> 제트화재에 의한 복사열 피해영향 기준

복사열 (kW/m^2)	피해 수준	권고
37.5	장치 및 설비가 손상됨	∨
25	오랫동안 노출되면 최소한의 에너지에 의해 목재가 발화됨	
12.5	목재 또는 플라스틱 튜브의 착화를 유도하는데 충분한 최소의 에너지	∨
9.5	8초 후에는 심한 고통을 느끼며, 20초 후에는 2도 화상을 입음	
4	20초 내에 보호되지 않으면 통증을 느끼며 피부가 부풀어 오름	∨
1.6	장기간 노출되면 불편함을 느낌	

<표 2> 플래시 화재에 의한 화염 피해영향 기준

화염 영역	피해 수준	권고
LFL-UFL	증기운의 해당범위에 존재할 경우 심각한 부상 또는 사망	
1/2 LFL	증기운의 해당범위에 존재할 경우 사망이 발생하지 않음	∨

② 폭발에 의한 피해영향 기준은 <표 3>과 같다.

<표 3> 폭발 피해영향 기준

폭발과압		폭발과압 피해 수준	권고
bar	psi		
0.0015	0.022	소음 발생	
0.002	0.029	유리창 일부 파손	
0.003	0.044	큰 소음 발생	
0.01	0.145	유리파열 압력	
0.02	0.290	집의 지붕과 유리창의 10% 파손	V
0.03	0.435	구조물의 가벼운 손상	
0.035-0.07	0.51 - 1.02	유리창이 부서지며 일부 창틀이 파손	
0.05	0.725	주택의 구조물 파손	
0.09	1.31	철구조물이 약간 손상	
0.14	2.03	주택의 벽과 지붕이 약간 파손	V
0.15-0.20	2.18 - 2.90	비강화콘트리트 벽 파손	
0.16	2.32	구조물이 심하게 손상되기 시작	
0.18	2.61	주택의 블록이 50%정도 파손	
0.20	2.90	건축물의 철 구조물이 손상되며 기초에서 이탈	V
0.20-0.28	2.90 - 4.06	지지대가 없는 철제 건축물 또는 기름 저장 탱크 파손	
0.30	4.35	공장건물의 파손	
0.35	5.08	나무 기둥이 부러짐	
0.35-0.50	5.08 - 7.25	주택의 완파	

③ 독성확산에 의한 피해영향 기준은 <표 4>와 같다. 화학물질의 독성정보가 없을 경우, 분석가는 이에 동등한 다른 독성기준 값을 적용하고 관련근거를 제시한다.

<표 4> 독성 피해영향 기준

농도 기준	독성 피해 수준	권고
ERPG 2	거의 모든 사람이 한시간 동안 노출되어도 보호조치 불능의 중상을 유발하거나 회복 불가능 또는 심각한 건강상의 영향이 나타나지 않는 공기 중의 최대 농도	
IDLH	건강한 근로자가 보호장비 없이 노출되었을 때, 최대 30분간 생명에 위협을 받지 않고 자력으로 탈출할 수 있는 대기 중 유해물질의 최대 농도	∨
TLV STEL	근로자가 15분간 노출되어도 참을 수 없는 자극이나 만성적 조직변화, 사고를 일으킬 수 있을 정도의 혼수상태, 자위력 손상 등의 증상이 나타나지 않는 최고 농도, TLV-TWA값을 초과하지 않아야 함	
AGEL 2	대부분의 사람들이 대피 능력 상실하거나 비가역적 또는 장기적인 건강상에 영향을 입을 수 있는 농도	
PAC 2	비가역적 또는 심각한 건강손상이나 대피 능력에 영향을 미치는 노출 수준의 농도	

(나) 사망 피해기준

개인적 위험성과 사회적 위험성 분석을 위한 피해정도를 예측하기 위해 다음과 같이 사망피해 기준의 프로빗(Probit) 분석 모델을 적용하며 사망요인별로 제시된 다음의 분석 모델식 중 분석가는 적정한 모델을 선정하여 적용할 수 있다. 계산된 프로빗 값은 <부록 1>을 통해 백분율로 환산할 수 있으며 다음의 모델식 이외에 명확한 근거가 있는 다른 모델식을 활용할 수 있다.

① 복사열에 의한 사망확률 계산 프로빗 모델은 다음과 같다.

㉮ Eisenberg 모델

$$Y = -38.48 + 2.56 \times \ln(V) \quad (1)$$

㉯ Tsao & Perry 모델

$$Y = -36.38 + 2.56 \times \ln(V) \quad (2)$$

㉰ TNO 모델

$$Y = -37.23 + 2.56 \times \ln(V) \quad (3)$$

㉱ Lee 모델

$$Y = -29.02 + 1.99 \times \ln(0.5V) \quad (4)$$

여기서, $V = I^{(4/3)} \times t$

I: 복사열 [W/㎡)

t: 노출 시간 [s]

② 폭발 과압에 의한 사망확률 계산 프로빗 모델은 다음과 같다.

㉮ Eisenberg 모델(폐출혈)

$$Y = -77.1 + 6.91\ln(P_S) \quad (5)$$

㉯ HSE 모델(폐출혈)

$$Y = 5.13 + 1.37\ln(P_S \times 10^{-5}) \quad (6)$$

㉰ TNO 모델(머리충격)

$$Y = 5 - 8.49\ln\left[(2430/P_S) + 4.0 \times 10^8/(P_S \times i_S)\right] \quad (7)$$

㉱ TNO 모델(구조물 붕괴)

$$Y = 5 - 0.22\ln\left[(40000/P_S)^{7.4} + (460/i_S)^{11.3}\right] \quad (8)$$

여기서, P_S: 과압 [Pa]

i_S: 충격파 임펄스 [Pa · s]

③ 독성에 의한 사망확률 계산을 위한 프로빗 모델은 다음과 같으며 수식의 상수 값은 <표 5>에서 확인할 수 있다.

$$Y = K_1 + K_2\ln(C^n \times t_e) \quad (9)$$

여기서, K_1, K_1, n: 독성물질 상수<표 6 참조>

C: 노출시간 동안의 독성 농도 [ppm]

t_e: 노출시간 [min]

<표 5> 독성물질에 대한 프로빗 상수

독성 물질	미국 해안경비대(1980)			월드뱅크(1988)		
	K_1(ppm)	K_2(ppm)	n	K_1(ppm)	K_2(ppm)	n
아크롤레인	-9.931	2.49	1	-9.93	2.05	1.0
아크릴로니트릴	-29.42	3.008	1.43	-	-	-
암모니아	-35.9	1.85	2	-9.82	0.71	2.00
벤젠	-109.78	5.3	2	-	-	-
브롬	-9.04	0.92	2	-	-	-
일산화탄소	-37.98	3.7	1	-	-	-
사염화탄소	-6.29	0.408	2.50	0.54	1.01	0.5
염소	-8.29	0.92	2	-5.3	0.5	2.75

<표 5> 독성물질에 대한 프로빗 상수(계속)

독성 물질	미국 해안경비대(1980)			월드뱅크(1988)		
	K_1(ppm)	K_2(ppm)	n	K_1(ppm)	K_2(ppm)	n
포름알데하히드	-12.24	1.3	2	-	-	-
염화수소	-16.85	2.00	1.00	-21.76	2.65	1.00
시안화수소	-29.42	3.008	1.43	-	-	-
불화수소	-25.87	3.354	1.00	-26.3	3.35	1.0
황화수소	-31.42	3.008	1.43	-	-	-
메틸브로민화물	-56.81	5.27	1.00	-19.92	5.16	1.0
메틸이소시아네이트	-5.642	1.637	0.653	-	-	-
이산화질소	-13.79	1.4	2	-	-	-
포스겐	-19.27	3.686	1	-19.27	3.69	1.0
산화프로필렌	-7.415	0.509	2.00	-	-	-
아황산가스	-15.67	2.10	1.00	-	-	-
톨루엔	-6.764	0.408	2.50	-	-	-

6.3 빈도 분석

시나리오의 누출빈도(Frequency)와 확률(Probability)을 연계하여 사고결과의 빈도를 결정하는 것으로 적용방법은 다음과 같다.

6.3.1 누출빈도 분석

(1) 시나리오의 누출 장치에 대해 <표 7>과 <표 8>의 누출공 밴드 및 수량 확인(Parts count)을 기반으로 누출빈도를 계산하며, 이때 장치의 크기에 따라 다음과 방법은 적용할 수 있다.

(가) 공정섹션, 노드 또는 모듈에 설치된 장치의 수량이 많고 동일한 장치류의 크기가 각기 다를 경우, 누출 가능 장치를 일정 크기 그룹으로 구분하여 누출빈도를 계산할 수 있다. 특히, 장치의 크기 범위가 폭넓게 분포되어 있을 경우, 전체 규격크기를 하나의 그룹으로 결정하지 않고 여러 그룹으로 구분할 수 있으며 이 경우, 장치그룹의 중간 크기를 해당그룹의 장치 크기로 적용하여 누출그룹을 적용할 수 있다.

(나) 누출빈도를 장치의 크기 그룹으로 구분한 후 누출그룹을 적용하여 빈도를 산정할 경우, 보다 원활하게 QRA를 수행할 수 있으나 정확도는 낮을 수 있다. 이에 장치 수량이 적을 경우, 복잡하고 어려운 과정을 수반하지만, 각 장치에 대해 크기 별로 누출공 밴드를 적용하여 누출빈도를 계산하면 정밀한 누출빈도 결과를 얻을 수 있다.

(2) 플랜트 특정 빈도 데이터(Plant-specific Frequency Data)

(가) 플랜트에서 설비 및 장치의 사고(고장) 관련 데이터를 체계적으로 수집하고 정립하여 작성된 자료를 우선적으로 적용할 수 있으며 이에 대한 근거가 명확해야 한다.

(나) 설비 및 장치 제조자가 제공하는 빈도 데이터를 적용할 수 있으며 데이터에 대한 근거가 명확해야 한다.

(다) 플랜트에서 결함수분석(Fault Tree Analysis, FTA) 기법을 이용하여 누출빈도를 산출할 경우, 고장빈도와 확률에 대해 다음 문헌의 데이터를 적용할 수 있으며 이외에 명확한 근거가 있는 다른 자료 또한, 활용할 수 있다.

① Offshore Reliability Data Handbook 5th Edition(OREDA)

② Reliability Data for Pumps and Drives, Valve Actuators and Valves(IEEE)

③ Guidelines for Process Equipment Reliability Data(CCPS)

(3) 일반 누출빈도 데이터(Generic Frequency Data)

(가) 플랜트의 자체 빈도 데이터를 활용하는 것과 비교하여 일반 누출빈도 데이터를 적용하면 빈도 데이터에 대한 기술적 쟁점을 최소화할 수 있으며 이를 통해 QRA 평가 결과의 신뢰성을 높여 주는 장점이 있다.

(나) QRA에 적용 가능한 일반 누출빈도 데이터는 다음과 같으며 이외에 명확한 근거가 있는 다른 자료의 데이터를 사용할 수 있다.

① OGP 빈도 데이터

② DNV 빈도 데이터

③ Sandia 빈도 데이터(단, 구간별(0.01%, 0.1%, 1%, 10%, 100%) 누출빈도 데이터를 누적빈도로 변환한 후 적용)

④ EGIG 빈도 데이터(도시가스)

(4) 위 빈도 데이터 중 어떤 데이터를 사용할지는 분석가에 의해 선택 및 결정되며 분석가는 적용된 데이터의 적용근거에 대해 제시하여야 한다.

6.3.2 점화확률 분석

(1) QRA 수행 시 점화확률 데이터는 사고의 누출빈도를 시작으로 연속적으로 전개되는 사고결과의 최종 빈도를 산정하기 위한 데이터로 다음의 데이터를 적용할 수 있으며 이외에 다른 데이터를 적용할 경우, 그 근거를 명확히 제시하여야 한다.

① UKOOA 모델 데이터

② BEVI 모델 데이터

③ CCPS 모델 데이터

④ Cox & Lee 데이터

⑤ Sandia(A. V. Tchouvelev) 데이터

⑥ 관련 문헌 또는 근거가 명확히 제시된 데이터

(2) 위 데이터 중 Cox & Lee 점화확률 데이터는 즉시점화 30%, 지연점화 70%의 비율을 적용할 수 있으며 위의 각 점화확률 데이터는 혼재하여 사용하지 않도록 한다.

6.3.3 사고결과 빈도 결정

(1) 초기의 누출사고에 의해 전개되는 사고결과와 빈도를 결정하기 위해 공정장치의 방호시스템과 안전조치 그리고 작업자의 관여 등을 고려하여 시간에 따른 점화 가능 시퀀스(Sequence)를 분석하여 ETA 다이어그램(Diagram)을 작성하고 사고결과의 빈도를 결정한다.

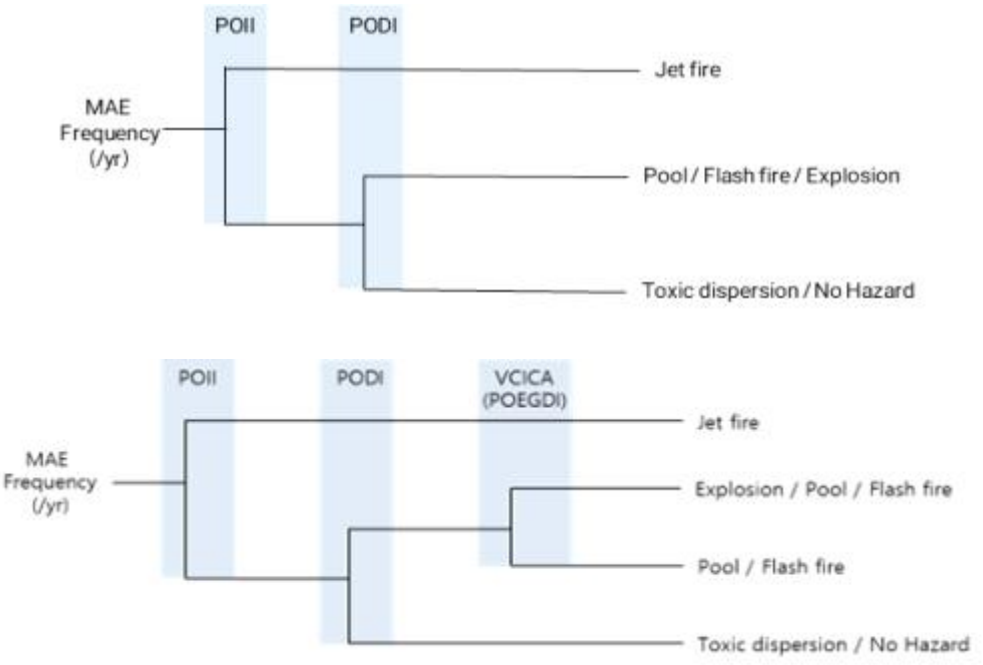
(2) ETA 다이어그램을 이용한 사고결과 빈도 결정방법은 <그림 2>와 같으며 적용된 시퀀스는 다음과 같다.

(가) POII(Probability of Immediate Ignition): 즉시점화 확률

(나) PODI(Probability of Delayed Ignition): 지연점화 확률

(다) POEGDI(Probability of Explosion Given Delayed Ignition): 지연점화 시 폭발확률

(라) VCICA(Vapor Cloud in Congestion Area): 증기운의 폭발 가능지역(Potential Explosive Site) 체류 확률



<그림 2> ETA의 2-시퀀스(위)와 3-시퀀스(아래) 적용 다이어그램 사례

(마) 사고결과에 대한 ETA 다이어그램은 다양하게 도식화 될 수 있으며 작성 사례를 <부록 2>에 제시하였다. 위 다이어그램 이외에 분석가의 판단에 따라 공정위험의 조건을 고려하여 시퀀스를 다르게 적용할 수 있으며 이 경우, 판단근거가 명확해야 한다.

6.4 위험성 분석

(1) QRA의 위험성은 피해결과와 빈도의 조합을 통해 개인적 위험과 사회적 위험으로 구분하여 계산한다.

(2) 개인적 위험성은 모든 사고결과 사례의 개별 위험성의 합계로 계산하며 다음과 같이 LSIR(Location Specific Individual Risk)과 IRPA(Individual Risk per Annum)로 구분하여 계산할 수 있다.

(가) LSIR(Location Specific Individual Risk)은 등고선과 프로파일 형태로 계산하여 표출하며 <표 6>의 기준을 통해 주변시설 허용가능 시설과 토지이용 계획에 적용할 수 있다.

① 위험성 등고선(Risk contour plot)은 주변의 같은 크기 위험성을 갖는 지점을 연결하여 지도위에 등고선으로 표출한 결과로 표출한다.

② 개인적 위험성 프로파일(Individual risk profile)은 위험시설 주변으로부터 거리에 따른 위험성을 2차원적 형태로 나타낸 것으로 표출한다.

(나) IRPA(Individual Risk per Annum)는 LSIR을 기반으로 플랜트의 특정위치에 있는 사람(작업자 또는 일반인)이 현장에 거주(작업, 이동 등)하는 시간을 고려한 지수(Indices)형태의 개인적 위험성으로 <그림 3>의 기준과 비교하여 플랜트의 위험성을 결정할 수 있다.

(3) 사회적 위험성은 사고로 인해 피해를 입을 수 있는 사람의 수로 F-N곡선(누적된 빈도와 사망자 수)으로 나타내며 개인적 위험성을 계산하는데 필요한 정보뿐만 아니라 시설물 및 주변 인구에 대한 다음의 정보가 요구된다.

(가) 인구 형태에 대한 정보: 주거지, 사무실, 공장, 학교, 병원 등

(나) 영향을 받을 수 있는 시간에 대한 주변 정보: 학교

(다) 영향을 받을 수 있는 요일에 대한 정보: 산업체, 교육기관, 휴양 시설물 등

(라) 실내 거주하는 인구의 시간대별 비율에 대한 정보

(4) 사회적 위험성의 허용가능 여부는 <그림 4>의 F-N 곡선을 적용해 산출된 위험성을 도식하여 결정할 수 있다.

(5) 위험성 분석 시 전체 또는 일부 시나리오를 전산유체역학(CFD)에 의한 방법으로 피해결과를 분석하여 빈도를 조합할 경우, 보다 정밀한 개인적 및 사회적 위험성을 결정할 수 있으며 이러한 접근방법은 가장 정밀한 QRA 결과를 도출할 수 있다.

6.5. 위험성 평가

6.5.1 위험성 계산

(1) 개인적 위험성(Individual Risk, IR)

(가) 개인적 위험성은 해당 지점에서 플랜트와 관련된 모든 사고결과 사례의 개별 위험성의 합계로 다음 식을 통해 계산이 이루어진다.

$$IR_{x,y} = \sum_{i=1}^{n} IR_{x,y,i} \qquad (10)$$

여기서, $IR_{x,y}$: 지리적 위치 x, y에서 사망할 수 있는 총 개인적 위험(yr^{-1})

$IR_{x,y,i}$: 사고결과사례 i의 지리적 위치 x, y에서 사망할 수 있는 개인적 위험(yr^{-1})

n : 전체 사고결과사례 수

(나) 위 식 (10)의 $IR_{x,y,i}$은 다음 식을 통해 계산한다.

$$IR_{x,y,i} = f_i \times p_{f,i} \quad (11)$$

여기서, f_i : 사고결과 사례 i의 빈도(yr^{-1})

$p_{f,i}$: 사고결과 사례 i에 의한 지리적 위치 x, y에서 사망이 발생할 확률

(다) 위 식 (11)의 f_i는 다음 식을 통해 계산한다.

$$f_i = F_I \times p_{o,i} \times p_{oc,i} \quad (12)$$

여기서, F_I : 사고결과 사례 중 사고결과 사례 i를 포함하는 사고 I의 빈도(y^{-1})

$P_{o,i}$: 사고 I가 발생한 경우, 사고결과 사례 i 하나가 포함된 사고결과가 발생할 확률

$P_{oc,i}$: 선행사고 I가 발생되고 사고결과 사례 i에 해당하는 사고결과가 발생한 경우, 사고결과 사례 i의 발생확률

(2) 사회적 위험성(Societal Risk, SR)

(가) 사고로 인해 피해를 입을 수 있는 사람의 수로 피해결과는 사망자수로 표현하는 사회적 위험성은 다음 식을 통해 계산이 이루어진다.

$$N_i = \sum_{x,y} p_i \times p_{f,i} \quad (13)$$

여기서, N_i : 사고결과 사례 i에 의한 사망자수

P_i : 사고결과 사례 i에 의해 영향을 받는 지역의 총 사람 수

$P_{f,i}$: 사고결과 사례 i에 의해 영향을 받는 지역에서 사망할 확률

(나) 위 식을 통해 F-N 곡선을 도식화 하기 위한 누적빈도는 다음 식을 통해 계산한다.

$$F_N = \sum_i F_i \text{ for } N_i \geq N\text{의 모든 사고결과 사례 i} \quad (14)$$

여기서, F_N : N 또는 그 이상의 사람에게 영향을 미치는 모든 사고결과 사례 i의 빈도(yr^{-1})

F_i: 사고결과 사례 i의 빈도(yr^{-1})

N_i: 사고결과 사례 i의 영향을 받는 사람 수

6.5.2 위험성 평가 기준

QRA를 통해 분석된 위험성은 개인적 위험성과 사회적 위험성으로 구분하여 다음의 기준에 따라 평가한다. 다만, 공정의 특성이나 내부·외부 환경 등 평가 대상의 여건을 고려하여 분석가의 판단에 따라 다른 기준을 적용할 수 있으며 그 근거를 명확히 제시해야 한다.

(1) 개인적 위험성(Individual Risk, IR)

(가) Location Specific Individual Risk (LSIR)

등고선(Contour) 형태로 표현되는 LSIR은 플랜트의 특정지역에 위치한 작업자(1인 기준)가 1년 또는 일정작업 수행기간 동안 노출될 수 있는 위험성으로 기준은 <표 6>과 같다.

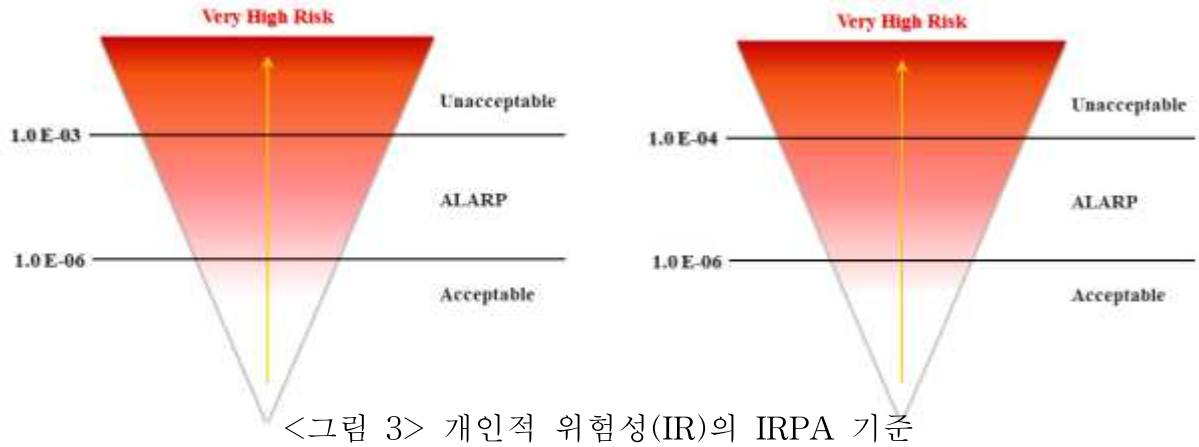
<표 6> 개인적 위험성의 LSIR 기준

LSIR 기준	허용 조건 설명
LSIR > 1.0E-05	허용불가: 주거지, 사무실, 소매점 허용가능: 사람이 드물게 거주하는 장소
1.0E-06 ≤ LSIR ≤ 1.0E-05	허용불가: 쇼핑센터, 대형 소매점, 식당 등 허용가능: 작업장, 소매 및 보조 서비스, 28~90명/헥타르 면적의 거주지
3.0E-07 ≤ LSIR ≤ 1.0E-06	허용불가: 교회, 학교, 병원, 주요 공공회의장, 기타 민감시설 허용가능: 위의 대상 이외에 모든 구조물 또는 활동

(나) Individual Risk Per Annum (IRPA)

특정 위치에서 사람(작업자 또는 일반인)이 상주하여 작업하거나 이동하는 등의 활동에 따른 체류시간을 고려하여 위험성을 평가하는 IRPA의 기준은 <그림 3>과 같다. 다만, QRA 대상이 일반 대중에게 민감한 공용시설(예: 수소충전소 등)로 인식되는 경우, 일반적으로 보수적인 평가를 적용하며 위험성 기준은 일반대중의 IRPA 기준을 단일로 적용하는 것이 적정하다.

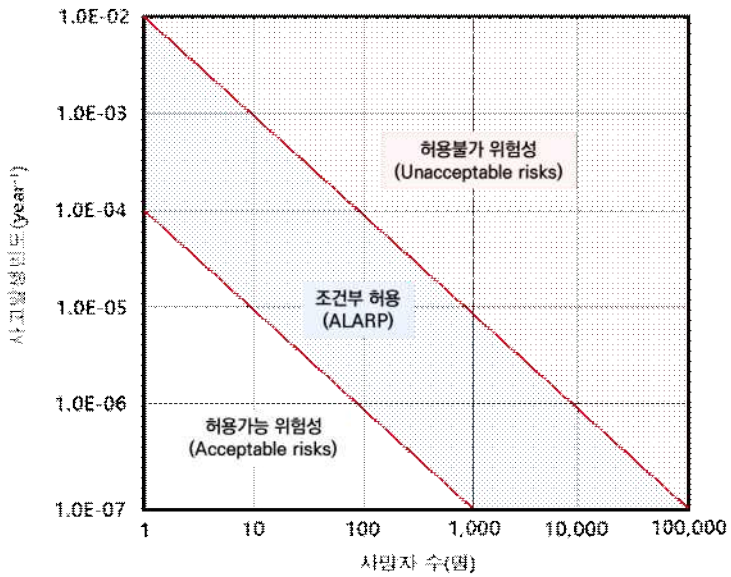
[IRPA: 작업자] [IRPA: 일반 대중]



<그림 3> 개인적 위험성(IR)의 IRPA 기준

(2) 사회적 위험성(Societal Risk, SR)

정량적 위험성평가를 통해 산출된 공정의 사회적 위험성에 대해 허용 가능 여부를 결정하기 위해 빈도와 사망자 수에 의한 F-N (Frequency-Number) 곡선을 적용하며 기준은 <그림 4>와 같다.



<그림 4> 사회적 위험성(SR) 기준

(3) 위험성평가 결과의 판정

(가) 위험성 평가 결과, 개인적 및 사회적 위험이 허용가능 영역에 해당하는 경우 위험성을 감소하기 위한 별도의 안전조치를 필요로 하지 않는다.

(나) 위험성 평가 결과 또는 위험성 감소를 위한 개선조치를 하였음에도 개인적 또는 사회적 위험성이 조건부 허용영역(ALARP)에 해당하는 경우 위험성을 감소하기 위한 안전개선 사항을 제시하고 이행한다.

(다) 위험성 평가 결과 또는 위험성 감소를 위한 개선조치를 하였음에도 개인적 또는 사회적 위험성이 허용불가 영역에 해당하는 경우 위험성은 허용되지 않는다.

7. 정량적 위험성평가 조건 및 가정

QRA를 수행하기 위해서는 다양한 가정과 조건의 설정이 필수적이다. 이러한 가정 및 조건은 공정의 실제 정보를 바탕으로 설정하는 것이 원칙이며, 공정 정보 외에 QRA 방법론상 요구되는 일부 항목은 분석가의 전문성과 경험에 따라 결정되는 경우가 많다. 일반적으로 적용되는 QRA의 주요 가정 및 조건은 다음과 같으며, 각 항목에 대해서는 그 타당성을 입증할 수 있는 관련 근거를 제시하여야 한다. 또한, 필요에 따라 해당 항목을 추가하거나 수정하여 적용할 수 있으며, 이 경우에도 그 근거를 명확히 제시해야 한다.

(1) 누출원 및 누출공 크기

시나리오 선정을 통해 결정된 공정섹션, 노드 또는 모듈의 누출원 및 누출공 크기는 다음과 같이 결정할 수 있으며 이는 피해결과 분석 시 누출량 산정에 직접적인 영향을 미치므로 신중하게 결정되어야 한다.

(가) 누출원

① 공정섹션, 노드 또는 모듈을 구성하는 장치 중 누출위험이 높은 가장 큰 장치류의 연결부 또는 노즐을 누출원으로 결정한다.

② 플랜트 배관의 경우, 시나리오의 적정여부를 고려하여 ①의 누출원 외에 누출원으로 결정할 수 있다.

(나) 누출공 크기

누출공을 크기별 그룹으로 구분하여 누출공 밴드를 결정하며 일반적으로 <표 7>과 같이 적용할 수 있으나 현장상황 및 적용 설비의 특성을 고려하여 분석가의 결정에 따라 다르게 결정할 수 있다.

<표 7> 시나리오(MAE) 누출공 크기 결정 방법

누출공 밴드	누출공 형태	누출공 크기 비율(%)	
		일반(직경)	수소(면적)
소누출(Small)	Pinhole/Crack	10	0.1
중누출(Medium)	Hole	50	1
대누출(Large)	Hole	94	10
파열(Rupture)	FBR (Full Bore Rupture)	100	100

비고 1. 일반적으로 누출공 결정 기준은 본 지침의 적용을 원칙으로 한다. 다만, 장치의 규모나 운전 조건을 고려하여 분석가의 전문적 판단에 기인해 누출공 크기를 변경하여 적용할 수 있다.
또한, 도시가스 배관라인의 경우 통상적으로 EGIG 또는 PIPESAFE 방법에 따른 누출공 크기를 적용한다.
비고 2. 누출공 밴드의 대표 누출원 크기는 각 누출원 크기의 기하평균을 이용하여 결정한다. 다만, 보수적인 누출유량 해석이 필요한 경우에는 산술평균값 또는 최댓값을 적용할 수 있다.
비고 3. 수소의 누출공 크기 비율은 누출 면적을 기준으로 하며 누출공 밴드의 비율 구간이 작다. 이는 수소의 물리적 특성에 기인하여 대부분의 누출이 작은 누출공에서 발생하기 때문이다.

(2) 누출 높이

누출 높이는 실제 누출이 발생할 수 있는 설비 또는 장치를 고려하여 결정하는 것을 원칙으로 한다. 다만, 정보가 부족하여 누출 높이를 명확히 판단하기 어려운 경우에는 지상으로부터 1 m~2 m 범위를 기준으로 가정하여 적용할 수 있다.

(3) 누출 방향

누출 방향은 하나의 수평 방향 또는 수직 및 수평 두 방향으로 구분하여 적용할 수 있다. 누출 방향에 대한 비율은 수평 방향만을 적용하는 경우 100%를 적용하며, 두 방향을 모두 적용하는 경우 수직과 수평 방향에 각각 50%를 적용한다. 일반적으로 QRA를 수행할 때 수직 및 수평 두 방향을 모두 고려하는 방식이 보다 정밀한 결과 도출에 유리하며, 이때 기하학적 인자(Geometry Factor)는 고려하지 않는다.

(4) 누출 시간

(가) 일반적으로 누출 시간은 피해결과에 영향을 미치는 중요한 인자로, 설비 및 장치의 조건과 누출 유형에 따라 결정된다. 누출 후 아무런 조치가 취해지지 않는 경우, 누출 시간은 수 초에서 수 시간까지 다양할 수 있다. 그러나 실제 공정에서는 누출 발생 시 감지 시스템을 통해 누출을 차단할 수 있는 조치가 마련되어 있으므로, 누출 시간은 다음에 제시하는 공정 차단 시스템(Blocking System)을 고려하여 결정할 수 있다.

① 자동차단 시스템(Automatic blocking system)

② 원격 제어차단 시스템(Remote-controlled blocking system)

③ 수동차단 시스템(Hand-operated blocking system)

(나) 위에서 제시한 공정 차단 시스템 이외에도, 위험설비의 설치 및 운영과 관련된 인·허가 기술기준에서 규정한 누출 감지 및 차단 조건을 적용할 수 있다. 이 경우에는 해당 조건의 적용 타당성을 입증할 수 있는 관련 근거를 명확히 제시하여야 한다.

(다) QRA에서 누출 시간은 최대 30분으로 만약 30분 이내에 저장된 물질이 모두 누출되는 경우, 누출된 양 또는 누출된 양과 누출된 시간을 고려한 누출유량을 사고결과에 적용할 수 있다.

(5) 기상 조건

(가) 가스의 누출과 액체 풀 증발에 따른 증기운의 확산은 풍속과 대기 안정도에 크게 좌우된다. 이에, 기상정보는 실제와 근접한 정보를 적용하여 피해결과의 신뢰성을 높일 수 있다.

(나) 기상 정보는 인근 기상 관측소에서 제공하는 자료를 활용하여, 1년 이상의 평균 기상 조건 또는 주·야간을 기준으로 적용할 수 있다. 단, 비가 오는 조건은 일반적으로 고려하지 않는다.

(다) 기상 관측소로부터 수집하는 정보는 다음과 같다.

① 기본적으로 온도, 습도, 풍속, 풍향, 지면온도, 태양 복사 플럭스(Solar radiation flux)의 데이터를 수집한다.

② 위 정보를 이용해 바람장미(Wind rose)를 도식화 할 경우, 기상조건의 분석이 용이하며 기상조건의 세밀한 분석을 위해 분석가가 추가적인 기상정보를 수집 및 분석하고 이를 기상조건에 반영 할 수 있다<부록 3 참조>. 또한, 풍향은 동일한 방향 또는 실제 기상정보를 반영한 방향의 분율로 일반적으로 8방을 적용할 수 있으며 실제기상 정보와 여러 방향(8방 이상)의 풍향 적용 시 보다 정밀한 QRA 결과를 얻을 수 있다.

③ 기타 기상정보는 피해결과 수치해석 기술기준에 따라 적용한다.

(라) 대기 안정도는 <표 8> 또는 <표 9>를 적용하여 결정할 수 있으며 명확한 근거가 있는 다른 등급기준을 적용할 수 있다.

(마) 위의 기상정보를 적용하기 어려울 경우, KOSHA Guide C-C-58-2026, “최악 및 대안의 사고 시나리오 선정에 관한 기술지원규정” 중 최악 시나리오에 해당하는 기상정보(풍속, 대기안정도, 대기온도, 습도)를 적용할 수 있다.

<표 8> PG 안정도 등급(Pasquill-Gifford stability classes)

표면풍속 @10m (m/s)	낮 시간 태양 복사 강도(W/m^2) (SR: Solar Radiation)			밤 시간 구름 운의 정도 (%)	
	강 (SR>600)	중 (300≤SR≤600)	약 (SR<300)	흐림 (Cloud ≥ 50%)	맑음 (Cloud < 50%)
< 2	A	A-B	B	E	F
2 - 3	A-B	B	C	E	F
3 - 5	B	B-C	C	D	E
5 - 6	C	C-D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D
비고 1. A: 매우 불안정(Very unstable), B: 불안정(Unstable), C: 약간 불안정(Slightly unstable), D: 중간(Neutral), E: 약간 안정(Slightly stable), F: 안정(Moderately stable)					

<표 9> 개선된 PG 안정도 등급(Pasquill-Gifford stability classes)

표면풍속(WS) @10m (m/s)	낮 시간 태양 복사 강도(W/m^2) (SR: Solar Radiation)			밤 시간 구름 운의 정도 (Oktas)		
	강 SR>600	중 300≤SR≤600	약 SR<300	0 - 3	4 - 7	≤ 8
WS ≤ 2	A	B	B	F	F	D
2 < WS ≤ 3	B	B	C	F	E	D
3 < WS ≤ 5	B	C	C	E	D	D
5 < WS ≤ 6	C	C	D	D	D	D
WS > 6	C	D	D	D	D	D

(6) 지면 거칠기

지면 거칠기는 확산 거동에 큰 영향을 주는 중요한 요소로, 주변 지형과 구조물의 특성을 반영하여 적정한 값을 설정해야 보다 신뢰성 있는 확산 모델 결과를 얻을 수 있다. 지면 거칠기는 <표 10>을 기준으로 결정할 수 있으며, 명확한 근거가 있는 경우 다른 기준을 적용할 수도 있다.

<표 10> 지면 거칠기 정보

No.	지역 형태	표면 거칠기 길이 (m)
1	개방된 수면	0.0002
2	진흙, 눈 덮인 표면	0.005
3	개방된 지역, 잔디 표면	0.03
4	저밀도 작물 경작지	0.1
5	고밀도 작물 경작지	0.25
6	공원, 대형 장애물 지역	0.5
7	도심근교, 숲	1.0
8	대형건물의 도심지역	3.0

(7) 인구 정보

(가) 주변 인구정보

① 인구정보는 사회적 위험성을 계산하는데 있어서 중요한 정보로 가능한 정확하게 수집되어야 한다. 인구정보를 수집하는데 어려움이 있을 수 있으나 정부기관에서 제공하는 통계 정보 시스템을 이용할 경우 보다 쉽고 정확하게 수집할 수 있다.

② 인구정보는 현재 상황을 기준으로 적용하며 결정된 미래의 주거지역 인구에 대해서도 고려한다. 이 경우, 미래 거주지역의 인구정보는 개발계획에 근거하여 계산하며 정보가 없을 경우, 유사한 주거지역의 기본 인구 밀도 값을 사용한다.

③ 또한, 휴식, 오락, 운동, 피크닉, 캠핑 등의 활동을 즐기는 여가활동 공간의 인구에 대해서도 고려한다. 이 경우, 여가 활동 유형이 계절과 시간에 따라 달라질 수 있어 이를 고려하여 인구밀도를 적용하며 대형 스타디움(축구장, 야구장 등) 같이 일년 중 많은 인구가 거주하는 시간이 짧은 경우에는 제외할 수 있다.

④ 주거지역의 경우, 낮과 밤에 거주하는 인구비율이 다름에 따라 사회적 위험성을 계산할 경우, 인구의 일부는 실내에 머물고 옷을 착용하여 보호될 수 있다고 가정한다. 따라서, 사람이 실내와 실외에서 사망할 수 있는 비율이 다름에 따라 <표 11>의 각기 다른 인구거주 비율을 적용한다.

<표 11> 주거 및 산업지역의 인구거주 비율

시간 기준	주거 지역			상업/공업지역 상주 비율(-)
	국내 가구당 인구 수	실내거주 비율(-)	실외거주 비율(-)	
주간(08:00~18:30)	인구주택 조사 자료	0.93	0.07	1.0
야간(18:30~08:00)		0.99	0.01	0.2
비고 1. 일반적으로 낮 시간 기준은 8:00-18:30 이고 밤 시간은 18:30-8:00이나 계절 또는 상황에 따라 적용한다. 비고 2. 위 기준은 분석가의 판단에 의해 관련 통계자료 등을 검토하여 변경 적용할 수 있으며 국내 가구 당 인구 수는 인구주택 총조사 기준으로 해당 통계의 최신화를 통해 적용한다.				

(나) 플랜트 작업자 인구정보

① 개인적 위험성의 허용가능 여부를 결정하기 위해 요구되는 정보로 플랜트의 공정작업자에 대한 인원정보를 확인하여 적용한다.

② 또한, 확인된 작업자의 근무 및 이동시간을 적용하며 1년을 기준으로 한다.

(8) 폭발 위험지역(Potential Explosive Site, PES)

(가) 사고결과 중 개방된 공간에서의 증기운 폭발은 장애물(설비, 장치류)의 밀집도와 밀접한 관련이 있으며 이는 화염의 속도를 증가시켜 높은 압력을 발생시키는 난류연소(Turbulence Combustion)가 주요 원인이 된다.

(나) 만약, 폭발 가능성이 있는 가연성 증기운이 장애물의 밀집도가 낮은 곳에서 형성될 경우, 난류 연소가 발생되지 않아 증기운 폭발 보다 플래시 화재로 이어질 가능성이 지배적이다.

(다) 이에, 증기운 폭발이 사고결과로 발생할 수 있는 조건을 설정하기 위해 플랜트 도면과 현장 정보를 바탕으로 설비 및 장치 등의 밀집도가 높은 구역을 분석하고, 해당 결과를 바탕으로 시나리오의 사고결과 유형에 적용 할 수 있다.

(9) 안전 방호조치

(가) 안전 방호조치(Safety Barriers)는 사고의 발생 가능성과 피해결과를 저감시켜 공정의 안전수준을 향상시키는 요소로, QRA 수행 시 해당 방호조치의 존재 여부 및 적용 가능성을 고려하여 반영할 수 있다. 또한, QRA 수행 결과를 바탕으로 추가적인 위험성을 감소시키고자 할 경우, 안전 방호조치가 반영된 위험성을 평가한 후 적정한 방호조치를 제안할 수 있다.

(나) 안전 방호조치는 사고 시나리오에 독립적으로 작동하여 위험을 저감하는 장치 또는 조치로서, QRA에서는 그 효과를 완화 계수(Mitigation Factor, MF) 형태로 적용할 수 있다. 특히, 완화 계수는 누출빈도에 직접 적용되어 사고결과의 빈도 산정에 영향을 미치므로 QRA 결과의 신뢰성을 훼손하지 않기 위해서는 적용 여부를 신중히 판단하고 근거를 명확히 제시하여야 한다.

(다) QRA에서 활용되는 일반 누출빈도 데이터(Generic Frequency Data)는 인·허가에 요구되는 규제와 공정 설계기준에 따라 안전 방호조치가 이미 반영된 상태에서 도출된 빈도 데이터로 완화계수를 적용하는 경우, 동일한 안전 방호조치가 중복 반영되어 QRA 결과의 신뢰성이 저하될 수 있다. 이에, 완화 계수는 명확히 확인된 차별화된 신기술이나 안전조치가 아닌 경우에는 적용하지 않도록 한다. 일반적으로 QRA 수행 시 안전 방호조치를 적용하는 것 보다 QRA 결과에 대해 안전 조치계획을 수립하여 리스크를 감소시킬 수 있는 방안을 권고하여 안전 수준을 높이는 것을 원칙으로 한다.

(라) 완화 계수를 수치로 평가하기 어려운 정성적 완화계수는 분석가의 검토 및 평가에 의해 결정하되, 명확한 결정 근거를 제시하여야 한다.

(10) 이 지침에서 제시한 가정 및 조건 이외에 추가적인 가정 및 조건은 관련된 내용의 근거가 있는 다른 자료 또는 분석가의 판단에 따라 적용할 수 있으며 이 경우, 명확한 근거를 제시하여야 한다.

<부록 1>

프로빗과 백분율의 상관관계

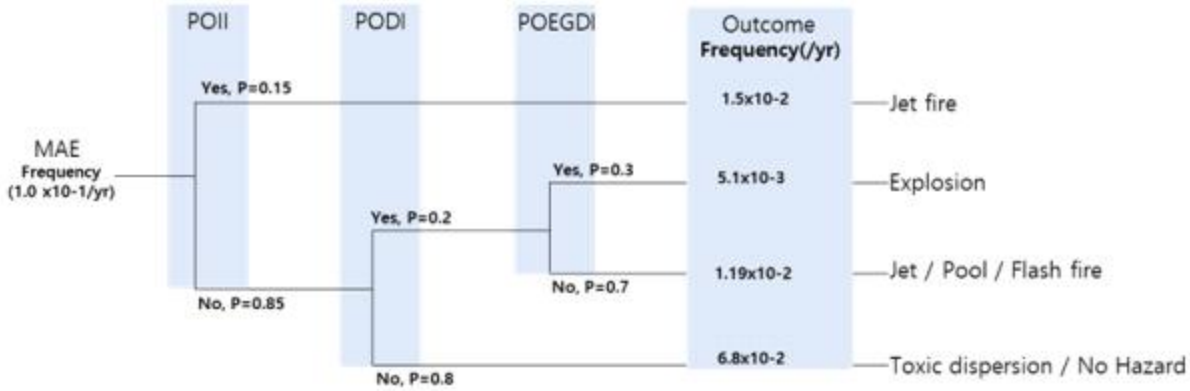
(Conversion from Probit to Percentages)

%	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-	2.67	2.95	3.12	3.25	3.36	3.45	3.52	3.59	3.66
10	3.72	3.77	3.82	3.87	3.92	3.96	4.01	4.05	4.08	4.12
20	4.16	4.19	4.23	4.26	4.29	4.33	4.36	4.39	4.42	4.45
30	4.48	4.50	4.53	4.56	4.59	4.61	4.64	4.67	4.69	4.72
40	4.75	4.77	4.80	4.82	4.85	4.87	4.90	4.92	4.95	4.97
50	5.00	5.03	5.05	5.08	5.10	5.13	5.15	5.18	5.20	5.23
60	5.25	5.28	5.31	5.33	5.36	5.39	5.41	5.44	5.47	5.50
70	5.52	5.55	5.58	5.61	5.64	5.67	5.71	5.74	5.77	5.81
80	5.84	5.88	5.92	5.95	5.99	6.04	6.08	6.13	6.18	6.23
90	6.28	6.34	6.41	6.48	6.55	6.64	6.75	6.88	7.05	7.33
%	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
99	7.33	7.37	7.41	7.46	7.51	7.58	7.65	7.65	7.88	8.09

<부록 2>

ETA 다이어그램을 이용한 사고결과 빈도 결정 사례

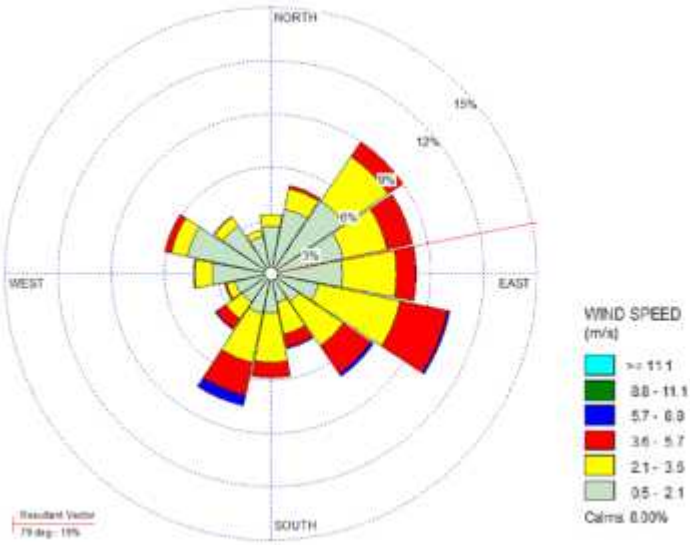
1. 시나리오의 ETA 분석을 위한 시퀀스 가정 및 빈도 결과



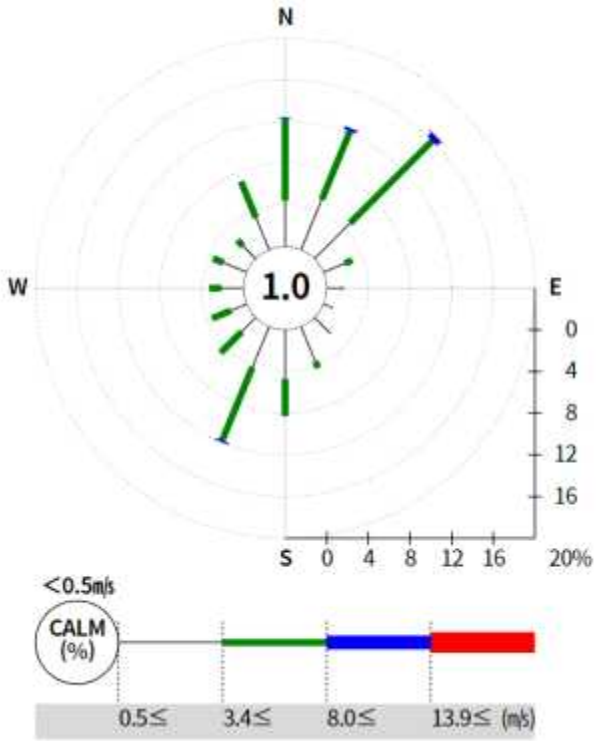
시퀀스 항목 및 가정		사고 결과 빈도	
항목	빈도 및 확률	사고결과	빈도
시나리오 빈도	1.0×10^{-1} /yr	Jet fire	1.5×10^{-2}/yr
즉시점화(POII)	1.5×10^{-1} (-)	Explosion	5.1×10^{-3}/yr
지연점화(PODI)	2.0×10^{-1} (-)	Jet/Pool/Flash fire	1.19×10^{-2}/yr
지연점화 시 폭발확률(POEGDI)	3.0×10^{-1} (-)	Toxic dispersion/ No hazard	6.8×10^{-2}/yr

<부록 3>

바람장미(Wind rose) 도식화 사례



바람장미(Wind Rose) 작성 사례 1



바람장미(Wind Rose) 작성 사례 2

기술지원규정 개정 이력

□ 제정일 : 2026. 1. 30.

○ 제정자 : 제이씨비솔루션(주)

○ 제정사유 :

- 화학공장 등 위험물질을 취급, 저장, 보관, 운송 및 활용하는 전주기 공정에서 발생 가능한 사고의 빈도와 피해결과를 조합하여 위험성을 수치로 정량화할 수 있는 정량적 위험성평가의 기술기준을 제시하고 이를 통해, 위험성으로부터 안전을 확보하기 위한 의사결정과 안전활동에 최적화된 계량적 지표로 활용할 수 있도록 하기 위함

○ 주요 제정내용

- 4번 항목 법적 필수사항 추가
- 정량적 위험성평가 절차
- 정량적 위험성평가 수행 방법
- 정량적 위험성평가 가정 및 조건

KOSHA GUIDE
기술지원규정

·규정번호 : C-C-7-2026
·심　　의 : 산업안전보건표준제정위원회
·공 표 일 : 2026. 1. 30.