



[요약문]

최근 미국 멕시코만에서의 대형 오일 누출 사고에서 보듯이 에너지플랜트에서의 사고는 막대한 인명피해, 경제적 피해를 유발한다. 최근 플랜트 설계의 주요 관심사는 플랜트의 생애주기에서 사고에 의한 위험도(RISK)를 적정 수준 아래로 제어하는 것이다. 이를 위해 플랜트 설계 단계에서 필요한 정량적 위험도 분석(Qualitative Risk Assessment) 방법론을 개발하였다. 아울러 QRA의 핵심이 되는 플랜트 기기 고장을 DB 구축의 필요성을 논하였다.

1. 플랜트 사고 사례 및 안전 기술의 중요성

1988년 7월 6일 22:00시 북해(North Sea)에 있는 영국 측 해저 원유 생산 플랜트 플랫폼인 Piper Alpha 상부의 가스압축 모듈에서 폭발사고가 발생하였다. 폭발에 의해 오일 분리기 근처에서 대규모의 풀화재(Pool Fire) 발생하였고, 이 풀화재는 하루 갑판으로 확산되어 가스 배관의 일부인 가스라이저(Gas Riser)에 손상을 주어 대량의 가스가 유출되어 분사화재(Jet Fire)로 확대 되었다. 이 결과 플랫폼에 거주하던 167명의 인명이 사망하는 해양 플랜트에서 발생된 최악의 사고로 기록되었다. 유사한 사고의 재발을 방지하기 위하여 해양플랜트의 안전에 관한 기준을 제정하고 강화하였는데, 대표적으로 영국의 HSE(Health and Safety Executive)는 1992년에 Safety Case Regulation을 제정하면서 플랜트에 대한 총체적인 위험도 평가(Risk Evaluation)를 도입하였다. 이는 이후로 해양플랜트에 대한 정량적 위험도 평가의 근거가 되며, 위험도의 정성적 기준인 ALARP(As low as reasonably practicable)이라는 개념이 정립되었다.



그림 1. Piper Alpha 화재사고¹⁾



그림 2. Deepwater Horizon 오일 누출 사고²⁾

세계 2위 석유회사인 BP의 Deepwater Horizon 석유 시추 시설이 멕시코만에서 석유 시추 작업 중 2010년 4월 10일 폭발했다. 비상시 원유 유출을 막는 장치인 원유분출차단장치(BOP, Blowout preventer)가 작동하지 않아, 미



국 역사상 최악의 해상 기름 유출 사고를 일으켰다. 시추시설 폭발로 11명이 사망하였고, 490만 배럴의 원유가 유출된 것으로 추정되며, 환경피해 등을 제외하더라도 유출방지에 들어간 직접 비용만 235억 달러에 달하는 등 막대한 경제적 피해를 유발하였다.

대형 플랜트에서의 사고는 이렇듯 막대한 경제적, 환경적 피해를 유발하기 때문에 플랜트 설계의 목표는 플랜트의 가동률(Availability)을 최대화 하는 것에서 누출, 인명피해, 환경피해를 유발하는 사고 확률을 최소화 하는 것으로 변하고 있다.

2. 플랜트 안전 설계

설계 접근 방법은 크게 규정 기반 설계(Rule-Based Design), 성능 기반 설계(Performance-Based Design), 위험도 기반 설계(Risk-Based Design)로 나누어지는데, 대형사고의 위험도가 높고 복잡한 시스템인 경우, 위험도 기반 설계가 표준으로 자리 잡고 있다. 플랜트에서 위험도 기반 설계 기술이란 ‘플랜트의 공정, 기기배치, 운영 중의 발생 가능한 모든 위험성(Hazards)을 평가, 정량화하여 설계의 적합성을 분석하는 설계 기술’을 의미한다. 위험도 기반 설계에서는 개념설계, 기본설계, 상세설계 등 각 설계 단계에서 그림 3과 같이 위험도를 평가하여 그 위험도가 특정 수준 이하가 될 때까지 위험도의 평가와 설계 변경을 반복하는 과정을 거친다.

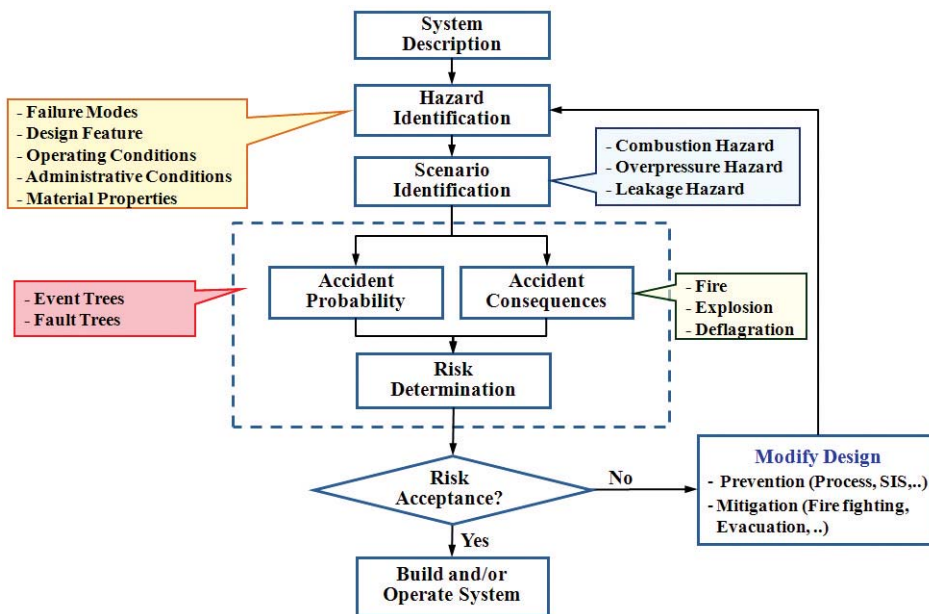


그림 3. 정량적 위험도 평가를 통한 플랜트 안전설계 개념도

3. 플랜트 위험도의 정량적 평가(Quantitative Risk Assessment) 기술

위험성(Hazards)은 인명, 재산, 환경 등에 피해를 입히는 정도로 정의되는데, 위험도는 위험성의 정량화된 척도로 위험성이 발생할 확률(Probability)과 위험성의 잠재적인 크기의 조합으로 정의된다.

$$Risk = Frequency(Probability) \times Consequence(Severity)$$

정량적 위험도 평가는 발생 가능성이 있는 사고의 빈도(Frequency)와 결과(Consequence)의 조합된 영향에 초점을 맞추고 있다. 그림 3은 정량적 위험도 평가의 절차를 나타내고 있다.

3.1 System desc

System description은 위험도를 정량화하기위한 첫 번째 단계로, 평가하고자하는 시스템을 정의하고 기술하는 단계이다. 이를 위해 플랜트의 공정도, 작동조건, 장치종류 등의 시스템의 정보들이 요구된다.

3.2 Hazard identification

정량적 위험도 평가의 두번째 단계는 위험성의 정의이다. 즉, "What can go wrong?"의 질문에 대한 해답을 찾는 단계이다. 정의되지 않은 위험성은 정량화시킬 수 없기 때문에 이 단계는 정량적 위험도 평가에서 매우 중요한 단계라 할 수 있다.

위험성 정의를 위해서는 다음과 같은 다양한 기법들이 사용된다.

- HAZID(HAZard IDentification) : 공정, 장비 및 시스템의 잠재위험을 파악하는 단계로 사고가 유발할 수 있는 잠재적인 위험요소 및 우발적 사고 가능성을 확인
- HAZOP(HAZard and OPerability) : 주로 공정변수(온도, 압력 등)를 중심으로, 시스템이 원래 설계된 운전 목적으로부터 이탈하는 원인을 도출하고 그로 인한 위험과 운전성에 야기되는 문제 가능성을 분석하는 것으로 위험성 평가 전문가, 공정 및 시스템 전문가 등 관련된 여러 전문가들이 참여. PFD(Process flow diagram), P&ID(Piping and instrumentation diagram), 등 많은 설계 자료를 바탕으로 분석함.
- FMEA(고장형태 및 영향 분석, Fail mode and effect analysis) : 시스템, 설계 및 공정(process)에서 발생할 수 있는 잠재 고장 형태와 그 영향을 평가하는 방법

일례로 가스 액화 플랜트에 대한 위험성은 공정도에서 Feed, Liquefaction, Storage&Loading의 크게 3가지 공정으로 나누어 표 1과 같이 정의할 수 있다.^[3]

표 1. Hazard identification for liquefaction plants

Process	Hazards
Feed	- Uncertainty of feed stock properties - Insufficient separation of gas and liquid - Fouling
Liquefaction	- High temperature around gas turbine - Large bore piping and piping support - Vibration of large rotating machine - Cracking of cryogenic components
Storage&Loading	- Connection and disconnection operation - Spillage - Leakage from storage tank

3.3 Scenario identification

정량적 위험도 평가의 세번째 단계는 정의된 위험성을 기반으로 어떤 형태로 사고가 발생할 것인가에 대한 사고 시나리오의 정의이다. 사고 시나리오 정의 단계에서는 먼저 가능한 사고 시나리오들을 나열하고 그 중 발생할 확률



이 높은 시나리오에 대한 우선순위를 정하여 Screening하는 작업이 필요하다. 모든 사고 시나리오에 대해 위험도를 평가하면 가장 좋지만, 이를 위해 많은 시간과 비용이 추가되므로 효과적인 평가를 위해 우선순위가 높은 시나리오 위주의 위험도 평가가 요구 된다. 표 2는 가스 액화 플랜트에 대한 Scenario identification의 예를 나타내고 있다.

표 2. Scenario identification for liquefaction plants

Hazards	Accident Scenarios
Combustion hazard	- 산화제와 섞여 가연성 혼합물 (Combustible Mixture) 형성 - 점화 에너지원 (Electrical, Mechanical, Thermal Ignition)
Overpressure hazard	- 열교환기 또는 외부열에 의한 액체의 부피 팽창 - 장치의 과도한 변형으로 인한 가스 누출 - 압력 용기, 배관망 등의 파열로 인한 파편 발생
Leakage hazard	- 저온 액체 누출 시 기온 급락에 의한 저체온증 - 누출된 가스가 공기 중의 산소와 치환되면서 발생할 수 있는 질식 - 가스 누출로 인한 Secondary effects (화재, 폭발, 폭연 등)

3.4 Risk estimation

Risk estimation 단계는 Screening을 통해 결정된 사고 시나리오를 토대로 사고 확률 및 사고 결과를 정량화하는 단계이다. 정량화 된 위험도(Risk)는 사고발생 빈도(Frequency)와 사고 결과(Consequences)의 곱으로 표시된다.

3.4.1 사고 빈도(Frequency)

사고 빈도는 기자재들의 고장률을 근거로 플랜트의 고장률을 추정하는 FTA(Fault Tree Analysis)와 고장이 화재와 폭발 등 물리적인 피해를 야기하는 경로를 추적하는 ETA(Event Tree Analysis)등의 기법을 통하여 이루어진다.

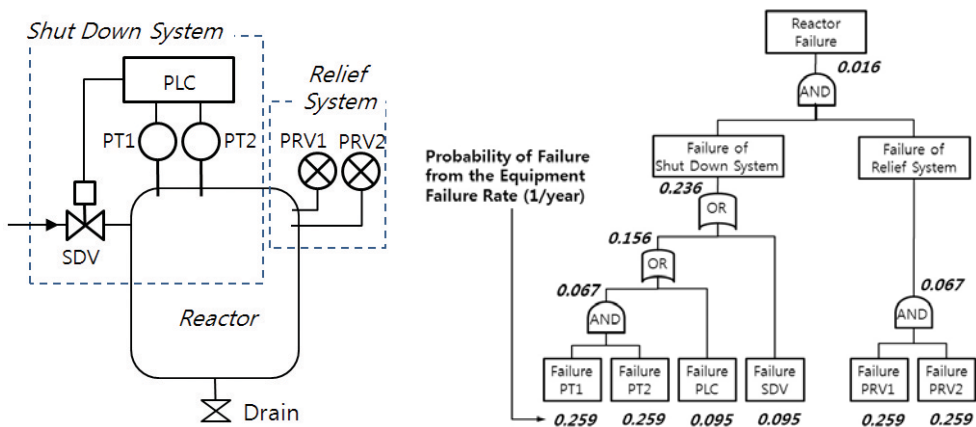


그림 4. 고장률 data와 FTA(Fault Tree Analysis)의 예

고장률(Failure Rate)은 각 공정기기, 즉, 밸브, 센서, 전자부품(저항, 콘덴서) 등 더 이상 나누어지지 않은 기본 기기 수준에서의 고장빈도를 의미한다. 플랜트는 이러한 기본 기기들의 집합체인 시스템이다. 기자재의 고장률은 플랜트 고장 빈도 계산을 위한 필수적이고 유일한 자료이다. 신뢰성 있는 고장률 자료만이 의미 있는 사고 빈도를 계산할

수 있게 해준다. 이와같은 고장률은 실제 플랜트의 운용에 따른 결과로서 얻어지게 된다.

외국에서는 30여년전부터 고장률 데이터를 원자력, 해양플랜트 분야 등에서 구축해오고 있으며, 특히 해양플랜트 분야에서는 노르웨이의 주도로 OREDA(Offshore Reliability Data) 프로젝트가 진행되고 있다. OREDA 프로젝트는 노르웨이의 국책연구소인 SINTEF의 주도하에 세계적인 석유 메이저사가 참여하여 그들이 소유 또는 운영중인 해양플랜트에 사용되고 있는 각종 기자재를 Topside와 해저 기자재로 나누어 구축하고 있다. 구축내용은 기자재별 고장 빈도, 고장 형태 및 수리 시간 등이며 해양플랜트뿐만 아니라 육상 플랜트에도 적용 가능하다.

현재 세계적으로 활용가능한 고장률 DB는 다음과 같은 것들이 있다.

ERDS(European Reliability Data System)

FACTS(Failure and Accident Technical Information System); Accidents with hazardous materials, TNO

Lees' Loss Prevention in The Process Industries, Handbook

Purple Book; Event Rate, TNO

EIReDA(European Industry Reliability Data Bank); French Nuclear Power Plants

NUREG/CR-6928; US NRC

DNV/Leak; UK sectors of the North Sea

Relax/Prediction; US Navy

3.4.2 사고 결과(Consequency)

사고 결과는 고장으로 인한 화재 나 폭발등의 물리적 현상(Physical Effects)을 파악하여 인체나 기기 등에 어떤 충격을 미치는지 탐구하는 손상 모델링(Damage Modelling) 연구로 이루어진다.

Consequence analysis를 위해서 다양한 모델링 기법들을 적용하여 사고 시나리오에 대한 부정적인 효과(화재, 폭발, 피해범위, 인명피해, 환경피해 등)을 측정 가능한 값들로 정량화한다.

사고결과분석 (Consequence Analysis)을 위한 대표적인 프로그램은 다음과 같다.

- FLACS⁴⁴⁾

Oil, gas등의 화학 Plant에서 가스폭발의 위험성을 최소화하기 위하여 설계에 필요한 tool의 개발이 필요함을 인식한 BP, Conoco, Elf, Exxon, Gasunie, Gaz de France, Mobil, Norsk Hydro, Phillips, Statoil 등 10개의 다국적 Oil & Gas 회사들과 Health & Safety Executive, Norwegian Petroleum Directorate and BMFT(Germany)등 3개의 정부기관은 필요한 위원회를 구성하고 16년간의 공동연구를 수행하여 FLACS(FLame ACceleration Simulator) CODE를 개발하였다. 세계적으로 300여개의 플랫폼과 화학플랜트에 적용되어 설계와 기존설비평가에 활용되었다. 현재도 북해에서 BP, Mobil, Norsk Hydro and Statoil등은 새로운 platform의 설계와 기존설비의 평가에 활용하고 있다. 또한 사고후 사고조사 평가에도 활용되어 Piper Alpha 와 West Vanguard 해상사고의 조사분석과 네덜란드 육상 화학플랜트에서의 증기운 폭발사고의 조사평가등에 활용되었다.

- PHAST⁴⁵⁾

DNV(DET NORSKE VERITAS)사의 제품으로 화학플랜트에서 인화성 물질의 누출에 의한 위험성 평가를 수행하는데 활용되고 있으며, 주로 리론 및 실험 식을 기반으로 가연물질의 누출, 확산, 화재, 폭발을 해석한다.

3.5 Risk evaluation

Risk evaluation은 정량적 위험도 평가의 마지막 단계로 Risk criteria를 기준으로 Risk estimation에서 얻어진 정량적인 위험도를 평가는 단계이다. 이 단계에서 위험도가 Risk criteria를 만족하지 못할 경우는 시스템의 설계를 수정하거나 안전장치를 추가하거나 시스템의 유지/보수 기간을 단축시키는 방법 등을 적용하여 위험도를 저감시켜야 한다.

플랜트 위험도의 정량적 판단 기준은 인명 안전(Life safety), 환경 피해, 재산 손실 등 3가지로 대별된다. 이 중에



서 인명 안전 과 환경 피해는 국가의 의무와 연관이 되므로 국가 나 유사 단체에서 그 기준을 정하지만, 재산 손실은 민간 업체의 피해이므로 별도의 규제 기준이 없다.

인명 피해에 위험도는 일반적으로 다음 두 가지로 표현된다.

- IR (Individual Risk) : 사고지점을 중심으로 반경별 사망확률(1/year)를 수치화
- Group Risk : 군중이 사고결과에 동시에 노출될 수 있는 위험도이며 일반적으로 F-N 커브로 표현

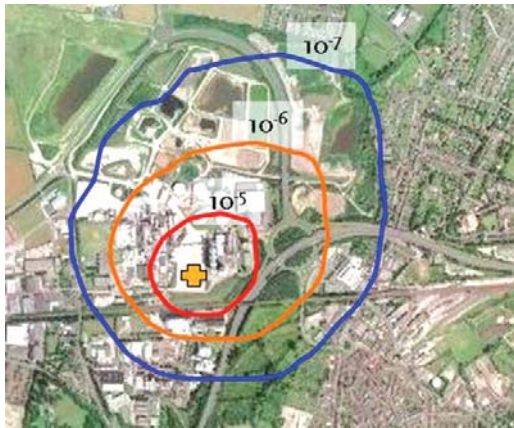


그림 5. Individual Risk 개념

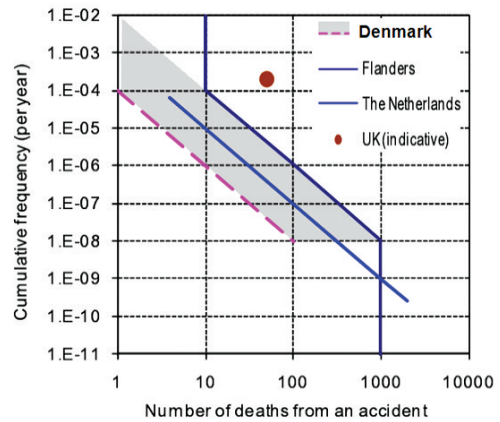


그림 6. Group Risk 기준

플랜트 설계에 있어 인명 피해에 대한 세계 각국의 평가 기준^[6]은 각기 다르지만 IR의 경우 $10^{-6}/\text{year} \sim 10^{-8}/\text{year}$ 수준이며 Group Risk의 경우 그림 6과 같다.

4. 국내외 현황 및 제언

플랜트에서는 여러 가지 다양한 종류의 인화성, 발화성, 폭발성, 반응성, 부식성, 유독성, 산화성을 보유한 화학물질을 원료, 중간체, 첨가제, 용제, 반제품 및 생산품의 형태로 사용, 취급, 운전, 저장하고 있으며, 그 보유량이 방대하고, 물질들은 고온, 고압 하에서 기체나 증기상태로 존재하거나 상변화를 일으키는 공정시스템으로 구성되어 있어 사고위험이 상존하고 있으며, 플랜트 설계의 Neck Point는 이러한 위험도를 낮추는데 있으며, 기계설비의 안전설계를 통해 이루어진다.

플랜트의 안전설계 부분은 플랜트 설계 단계 중 FEED 분야에 포함되어 진행되고 있다. 세계 수준의 엔지니어링 업체(Doris, Technip 등)들이 플랜트 Process Licensor들과 연합하여 플랜트 시스템의 FEED 패키지 설계를 독점하고 있으며, 대부분의 안전설계를 직간접적으로 수행한다. 안전설계의 핵심기술인 정량적 위험도 분석 및 신뢰도 분석의 경우에는 일반적으로 Scandpower, Gexcon, DNV Consulting 등의 전문 컨설팅사가 수행하고 있다.

국내 기업의 경우 플랜트 위험도 분석을 통한 안전설계 능력은 표 3에서 매우 부족한 실정이다.

안전 관련 기술의 부족은 플랜트 시장에서 우리나라 업체의 기술 경쟁력 신장에 걸림돌로 작용하였으므로, 개념설계 및 FEED(Front End Engineering & Design) 패키지 설계 능력을 확보하기 위해서는 안전설계 및 신뢰성 공학 기술 등을 포함한 안전기반기술의 확보가 필수적이다.

특히 모든 안전 설계의 기본이 되는 플랜트 기자재의 고장률 DB 구축이 시급하다. 이러한 고장률 자료는 안전설계 뿐만 아니라 플랜트 기자재가 플랜트에 적용되기 위하여 필수적으로 확보되어야 하는 자료로 국내 플랜트 기자재

표 3. 국가별 안전기술 경쟁력 분석 [7]

회사명	주요기술	국가	기술력 평가	비고
ABS Baker engineering and risk consultant, inc.	안전 인증 및 진단 전반적 화재 및 위험 해석	미국	●	
Technip	전반적 안전설계 가능	프랑스	●	EPC
Saipem	전반적 안전설계 가능	이탈리아	●	EPC
DNV	안전 인증 및 진단	노르웨이	●	
LR HSE	안전 인증 및 진단 위험 및 안전에 관한 규정 제정	영국	●	보건안전청(HSE)
TUV GL	장비 안전등급 인증(SIL) 안전 인증 및 진단	독일	●	
MODEC	FEED, 상세, 생산설계	일본	◐	EPC
중국선박중공집단(CSIC) 중국선박공업집단(CSSC)	지원(Support) 수준	중국	◑	FEED 및 상세설계 부족
대우조선해양 삼성중공업 현대중공업 STX 조선해양	지원(Support) 수준	한국	◒	

● (최상경쟁력) ◐ (경쟁력 우수) ◑ (경쟁력 보통) ◒ (경쟁력 열등) ○ (경쟁력 없음)

업체의 성장에도 장애 요소로 작용한다. 국내에도 동해 가스전, 원자력발전소, 가스공사의 여러 플랜트가 있기 때문에 국내에서 개발된 기기들의 고장률 데이터를 구축하는 것은 불가능 하지 않다. 이를 위해서는 고장이거나 사고에 대한 열린 시각이 필요하며, 해당 플랜트의 공공적인 성격으로 보아 정부가 적극적으로 추진해야 될 사항이다.

❁ 참고 문헌

- [1] http://www.exponent.com/piper_alpha_disaster/
- [2] http://en.wikipedia.org/wiki/File:Deepwater_Horizon_offshore_drilling_unit_on_fire_2010.jpg
- [3] “합성가스 액화시스템 설계기술 개발”, 기계연구원 주요사업 최종보고서, 2011
- [4] <http://www.gexcon.com/flacssoftware>
- [5] <http://www.dnv.com/services/software/products/safeti/safetiqr/phastr.asp>
- [6] Claudia Basta, Michael Struckl and Michalis Christou, "Overview of Roadmaps For Land-Use Planning In Selected Member States", JRC 47504, EUR 23519EN, 2008
- [7] 해양플랜트 산업 경쟁력 분석 및 장단기 발전 전략, 2011. 11, 지식경제부



최 병 일

- 한국기계연구원 환경·에너지기계연구본부
에너지플랜트안전연구실 책임연구원
- 관심분야 : 플랜트 안전, 플랜트 IT 융합
- E-mail : cbsey@kimm.re.kr



김 명 배

- 한국기계연구원 환경·에너지기계연구본부
에너지플랜트안전연구실 책임연구원
- 관심분야 : 플랜트 안전, 플랜트 위험도 평가
- E-mail : cbsey@kimm.re.kr



한 용 식

- 한국기계연구원 환경·에너지기계연구본부
에너지플랜트안전연구실 책임연구원/연구실장
- 관심분야 : 플랜트/화재 안전기술, 소화설비 개발
- E-mail : yshan@kimm.re.kr