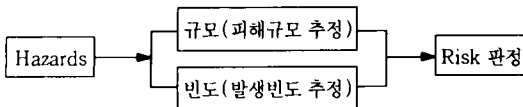


화학공장에서의 폭발리스크 평가기법

본 고에서는 유럽의 3개 화학회사(ICI사, BASF사, Sandoz사)의 위험도 평가기법을 소개한다. ICI사에 대해서는 「6단계 위험성 평가시스템」, 「몬드지수」, BASF사에 대해서는 3단계로 하는 「표준적 안전리뷰」, 미니 HAZOP에 의한 「안전리뷰개량법」, Sandoz사(현 Novartis사)에 대해서는 「Hazards 분석」을 기술한다.

1. 머리말

화학플랜트의 안전성 확보를 위해서는 정성적인 점검시스템뿐만 아니라 보다 정량적인 리스크 해석기법을 이용하고 있는데, 간략하게 말하자면 발생빈도를 구하여 컴퓨터로 영향평가를 수행하는 것이라고 할 수 있다. 본 고에서는 유럽의 화학회사인 ICI사, BASF사, Sandoz사(현 Novartis사) 등을 방문하여 입수한 자료를 바탕으로 유럽의 화학공업에서의 폭발 위험도 평가기법에 대해 설명한다. 이 평가기법은 화학물질에 관련된 3종의 Hazards(물리적 Hazards, 건강 Hazards, 환경 Hazards) 중 물리적 Hazards(화재·폭발 위험성)를 주요 대상으로 하고 있으며, 정량화 과정에서는 그림 1과 같이 Hazards를 파악하고 발생된 사고로 인한 피해규모와 빈도를 구해 리스크를 판정한다.



【그림 1】 리스크 평가의 개요

2. HAZOP과 QRA

공정의 Hazards를 파악하는 기법은 여러 가지가

알려져 있다. HAZOP(Hazards and Operability Studies)은 그 대표적인 것으로 특정 가이드 워드를 사용하여 정상적 공정으로부터의 이탈 상황을 가정하여 가동성 측면에서 설계내용을 그룹토의를 통해 상세히 검토하여 Hazards를 파악한다.

한편, QRA(Quantitative Risk Analysis)는 파악된 Hazards를 정량적 기법으로 고려하는 것으로서 (1) 어느 정도의 빈도로 Hazards가 발생하는지, (2) 발생한 Hazards가 어느 정도의 피해규모(종업원, 인근 주민·환경, 화학플랜트·수익)를 가지는지, (1)과 (2)를 목표치와 비교하여 Hazards의 규모를 작게 하고 빈도를 낮추는 것에 대한 검토의 목적으로 사용한다. QRA는 HAZAN(Hazard Analysis), PRA 등과 유사한 기법으로 상세한 설명은 문헌을 참고하기 바란다.

QRA를 위한 소프트웨어가 시판되고 있기는 하지만, 이 평가기법을 효율적으로 사용하기 위해서는 신뢰성 데이터가 필요하다. 리스크에는 불확실성이 따르는데, 그 내용은 확률적인 것, 우발적인 것, 해명이 안되는 것, 예측불능인 것 등으로 구별된다. QRA기법에서는 이 불확실성을 가급적 줄이기 위해 주로 기고장률 등 확률적인 데이터를 이용하며, 그 이외의 이용가능한 데이터도 포함하여 신뢰성 데이터로서 넓은 의미로 해석된다.

HAZOP과 QRA를 비교하면, 전자는 대상이 광범

위하고 정성적이며, 팀 토론에서 Hazards를 총망라하여 특성화하는데 반하여 후자는 대상이 좁고 선택적·정량적이며, Hazards의 평가를 적은 인원(1명 또는 2명)이 수행하는 것에 차이가 있다(표 1).

【표 1】 HAZOP과 QRA

항 목	HAZOP	QRA
목 적	Hazards의 특징	Hazards의 평가
대상기술	총 망라	선택적
평가방법	정성적	정량적
구성팀원	팀 토론	1명 또는 2명

HAZOP은 구미 화학공업계에 널리 보급되어 있으나, QRA는 영국, 네덜란드, 노르웨이 등에서 적극적으로 이용하고, 독일은 비교적 소극적으로 이용하는 것이 대조적이다. 그 외 다른 나라는 대체로 이 두 그룹의 중간적 위치에 있다고 생각하면 좋을 것이다.

3. 유럽 화학회사의 위험평가 상황

가. ICI사(영국)의 상황

HAZOP은 1960년대에 ICI사에 의하여 개발되었으며, 현재 전 세계의 화학공장에서 매우 광범위하게 사용되고 있는 것에서 알 수 있는 것처럼 ICI사의 공정 안전 기술은 화학공업계에서는 정평이 나있다. 최근, 안전에 관한 ICI그룹의 사내 연수에 외부 기관도 참가할 수 있게 되었는데, 이 연수에는 HAZOP뿐 아니라 QRA 기법과 관련된 테마도 포함되어 있다.

(1) ICI사의 6단계 위험성 평가시스템

ICI사에서는 프로세스 개발단계에 따라 주요 프로젝트를 대상으로 하여 6가지 단계로 위험성 체크를 실시하고 있다. 이 6단계는 ① 기본설계단계, ② 프로세스 설계단계, ③ 상세설계단계, ④ 건설단계(전반), ⑤ 건설단계(후반), ⑥ 조업단계로 표 2에서 프로세스 개발과의 관계를 보여주고 있다.

- ① 기본설계 단계에서는 취급하는 화학물질의 특성치, 안전한 수송방법, 작업자 및 인근 주민에 대한 안전성을 검토한다.
- ② 프로세스 설계단계에서는 통상 개략적인 QRA가 준비된다. 일반적으로 표 2에서 제시된 사업 검토시에 수행되며, 플랜트를 구성하는 반응기, 증류탑,

【표 2】 ICI사의 위험성평가(주요 프로젝트)

프로세스 개발 단계		위험성평가단계
사업 검토	기본설계	①
	프로젝트 초기 Assessment	
사업 심의	프로세스 설계	②
	상세설계 및 조달	③
사업 실시	건설 및 안전 체크	④
		⑤
	제조착수 검토	
	조업	⑥

컴프레서 등의 Top Event(예 : 화재)를 차례로 검토하여 그 원인이 되는 현상의 발생빈도, 안전설비가 작동하지 않을 확률 등에 대하여 논리도를 작성하여 분석(FTA : Fault Tree Analysis)한다. 신뢰성 데이터는 ICI사의 데이터를 이용한다. 프로젝트 초기단계에서는 충분한 Hazards 정보를 이용하지 못할 우려도 있으나, 큰 설계변경을 방지하는데 효과적일 수 있다. 중요한 현상에 대해서는 피해 규모 및 리스크까지 상세히 검토하기도 한다.

- ③ 상세설계단계에서는 HAZOP, 즉 P&ID(배관·계장 계통도)를 이용하여 조직적인 검토를 수행한다. P&ID에서는 배관이나 기기의 구체적인 연결상황 및 그 諸元(재질, 크기, 설정압력, 온도 등)뿐 아니라 제어계통의 상황을 포함하여 프로세스 라인, 긴급차단 등의 모든 라인이 도면상에 그려져 있다. P&ID상에서 하나의 라인, 하나의 기기 등에 대하여 일어날 수 있는 모든 프로세스의 이상을 가정하여, Hazards를 파악한다.

HAZOP은 프로세스설계, 계장설계, 운전부분 등의 전문가로 구성된 4~5명이 팀을 이루어 토의하며, 1회 소요시간은 2시간 30분 정도로 週에 2~3회 실시된다. 따라서, 총액이 수천억원 정도의 프로젝트가 되면 수주간에서 수개월간도 필요하므로, 굉장히 큰 Hazards를 간과했다는 것이 판명되면 기본설계를 변경해야 하는 결론이 나오게 되어 중대문제가 될 수도 있다. 그러나, 보통은 제2단계의 QRA에 의해 상세설계에 들어가기 전 단계에서 큰 Hazards는 충분히 검토가 끝나므로 이러한 사태에까지 이르지 않는다.

- ④ 건설단계(전반)는 설계가 완료하고 플랜트 시운

전 전에 하는 것으로, 규격에 맞도록 건설되어 있는지, 지금까지 지적된 문제점이 해결되어 있는지 등을 검토한다.

- ⑤ 건설단계(후반)는 플랜트의 시운전 후에 하는 것으로 현장 책임자와 설계부문 담당자가 수행한다. 종종 중요한 수정을 할 필요가 생긴다.
- ⑥ 조업단계는 초기단계(6~12개월내)에 규격대로 운전하고 있는지 체크한다.

(2) 몬드 지수

1979년 AICHE의 Loss Prevention 심포지움에서 Dow Index(Ver. 3.0)를 개량하여 독성지표가 포함된 몬드 화재폭발·독성지수(The Mond Fire, Explosion & Toxicity Index)가 공표되었는데, 그 후 Manchester 공대의 협력하에 유독성을 고려하는 방식을 도입하여 몬드지수(The Mond Index, Ver 2.0)가 되었으며, 1993년 Mond Index Services사를 통하여 그 수정판이 출판되었다.

몬드지수는 플랜트를 유니트별로 나누어 그것을 물질의 특성, 양 및 조업조건 등을 수치로 평가함으로써 Hazard의 순위를 정하고 Hazard를 감축시키기 위한 방법을 찾는 방법으로 제안되었다. 그러나, 현재 ICI사는 이 몬드 지수를 전면적으로 이용하지는 않고, 플랜트 배치에 따른 Hazard(높이, 작업면적, 구조설계, 도미노효과, 지하층, 배수구 등)를 고려하는 측면에서 이용하고 있다.

(3) ICI 신뢰성데이터 북

ICI사에서는 화학플랜트에 관련된 데이터 베이스를 작성하여, QRA를 수행할 때 이용하고 있다. 신뢰성 데이터로는 사고데이터, Incident data(사고보다 소규모), 시스템을 구성하는 기기고장 데이터, Human error data가 있고, 그 이외에도 환경데이터, 전문가의 의견, 플랜트 및 프로세스 데이터 등이 이용

되며 이 데이터 북에는 주로 기기고장 데이터, Human error data가 기재되어 있다. 이 자료에서는 ICI사 화학플랜트의 현장 데이터뿐만 아니라 문헌에서 인용한 데이터를 포함하여 알파벳 순으로 나열된 약 1,000항목을 찾을 수 있다.

미국의 AIChE/CCPS(미 화학공학회/공정안전센터)에서는 독자적으로 작성한 지침에 기초하여 기기 신뢰성 데이터 베이스의 작성을 96년 6월부터 시작하고 있으며, ICI사(영국)는 약 20개 회사의 일원으로 이 프로그램에 참가하고 있다.

나. BASF사(독일)의 상황

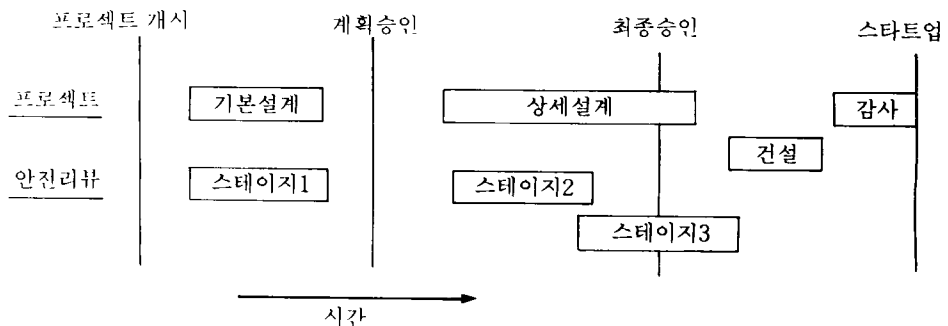
BASF사에는 플랜트의 조업에 3단계의 안전리뷰를 하는 표준적 기법(그림 2)을 채택하고 있고, 개방법으로 미니 HAZOP(그림 3)이 알려져 있다. QRA와는 달리 상당히 세련된 기법으로서, 효율적인 안전성 향상에 기여하고 있다.

(1) 표준적 안전리뷰법

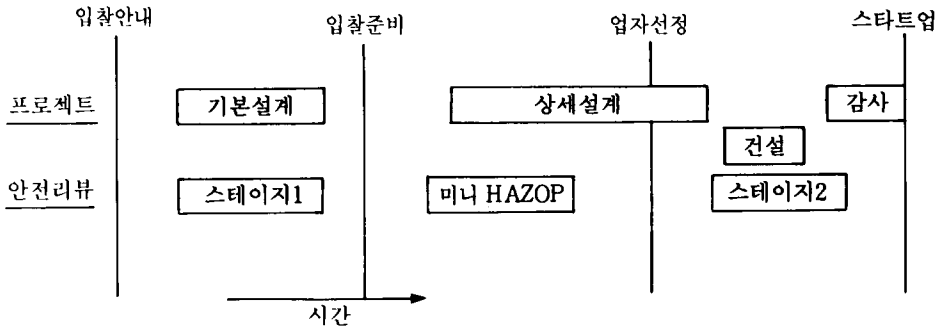
(가) 제1단계는 기본설계 후반에 프로세스 조건이 명확해진 단계에서 수행하며, 플랜트 신설시, 기존 플랜트의 개량시에 대해 실시된다.

(나) 제2단계는 주로 P&ID에 기초하는 것으로, 상세설계의 초기단계에서 우선적으로 수행된다. 그룹에서 새로운 설계도면을 단계마다 검토하여 기존 플랜트에서의 경험을 살려 리스크를 추정한다.

(다) 제3단계는 신 프로세스, 독성 물질·위험물질을 취급하는 등 일반적으로 리스크가 높은 경우에만 적용된다. 이 단계에서는 ICI사에서 개발된 HAZOP의 유사 기법을 이용하는데 프로세스의 중요부분에 대하여는 단계별 검토를 부가한 것이다.



【그림 2】 BASF사의 표준 안전리뷰시스템



【그림 3】 BASF사의 안전리뷰시스템 개량법

(2) 안전리뷰개량법(미니 HAZOP)

표준적 HAZOP을 사용하여 안전성을 검토하면 상당한 시간이 소요된다. 잘 알려진 완성도가 높은 프로세스에서는 검토사항의 대부분은 생략할 수 있으므로 취지를 충분히 살리면서도 그 결점을 제거하기 위하여 미니 HAZOP을 개발했다.

이 기법에서는 HAZOP의 가이드 워드를 의미있는 것만으로 압축하고 있다.

표 3에서 보는 바와 같이 미니 HAZOP에서는 사용되는 질문사항을 5개 그룹으로 나누어 나타낸다. 그룹1은 기계적 측면에서 고장의 원인이 되는 것으로, 과압, 진동, 부식, 누설 등을 대상으로 한다. 그룹2는 프로세스 Hazards를 대상으로 설계한 기능이 충분치 않을 경우, 그것이 안전성의 측면에 어떠한 영향이 미치는지를, 그룹3은 밸브, 보조펌프, 유틸리티 등 시스템의 문제를, 그룹4는 비정상적 조업에 따른 문제를, 그룹5는 프로세스와 직접 관련이 없는 문제를 대상으로 한다.

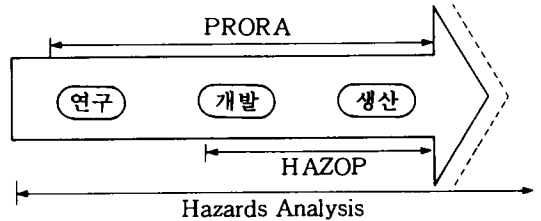
【표 3】 미니 HAZOP의 체크리스트

No.	항 목	질문수	질 문 례
1	기계적 문제가 없다	11	압력, 온도, 재료 등
2	프로세스의 문제	5	설계기능 불충분, 역류 등
3	보조장치	6	계기, 제어밸브, 펌프
4	비정상 조업	8	스타트업, 유지
5	프로세스 외의 문제	5	용접결함, 물의 동결

다. Sandoz사(현 Novartis사)의 상황

Sandoz사(스위스)는 '96년 12월 Novartis사에 합

병되었다. 합병 직전의 Sandoz 테크놀로지사의 CSE 부문은 안전 Lab(실험실)을 Sandoz 퍼머사, 크라이 언트사(화학품을 취급하는 별도 회사)로 분리하게 되었는데, 안전관리기법에 대해서 상기 “CSE 워킹 페이퍼”를 입수할 수 있었다. 이 자료는 그룹내에서 기법을 소개할 목적으로 작성된 것으로, 그림 4에서 보는 바와 같이 일반적인 문제에 대해서는 「Hazards 분석」, 설비에 대해서는 「HAZOP」, 제조공정에 대해서는 「PRORA」가 이용되고 있는 것을 알 수 있었다.

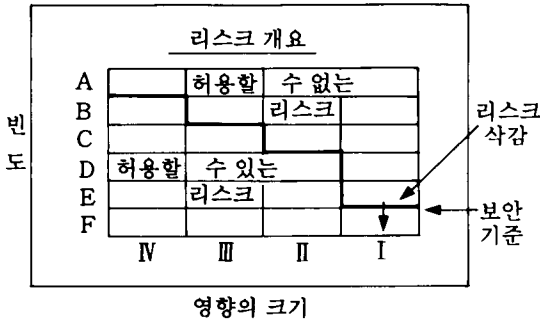


【그림 4】 연구·개발·생산단계의 위험성 평가기법

(1) Hazards 분석

이 기법은 스위스 취리히보험회사(세계 3위의 손해보험회사)의 리스크 엔지니어링 부문에서 개발한 ZHA(Zurich Hazard Analysis)를 동사와 계약하여 도입한 것이다. 1987년(라인강 오염사고의 다음해)부터 Sandoz그룹 내에서 사용하고 있다. 그 기본적인 기술은 미·국방성의 군사기준 MIL-STD 882A(1997) 및 882B(1987)에 따르고, Hazards 분석은 다음 순서로 행한다.

(가) 검토 범위를 정해 전문가팀이 Hazards를 리스트업하고, 번호, 원인, 빈도, 예상되는 결과, 영향 크기의 일람표를 작성하므로써 Hazards를 정한다.



【그림 5】 Hazard 분석의 리스크 개요

- (나) Hazards의 평가는 빈도를 A에서 F의 6단계로 영향의 크기에 대해서는 I에서 IV의 4단계로 분류하는 것부터 시작한다. 다음으로 종축을 빈도, 횡축을 영향의 크기로 하여 6×4의 격자에 Hazards 번호를 기입하여 리스크 프로파일(그림 5)을 작성한다.
- (다) 이 리스크 프로파일 상에 허용할 수 있는 리스크와 허용할 수 없는 리스크를 구분하는 선(보안기준)을 긋는다.
- (라) 리스크 프로파일과 보안기준을 참고로 하여 리스크삭감을 검토하고, 대책 및 얻을 수 있는 성과를 표로 기록한다. 리스크삭감의 우선순위는 영향이 가장 큰 I의 빈도를 낮추는 것에서 시작하여 II, III, IV로 나아간다.

그림 4에서 보는 바와 같이 생산활동 전반을 대상으로 할 수 있으며, 잠재하는 위험성이 높은 제조공정에 대해서는 제한된 범위에서 HAZOP을 수행하여 안전성을 향상시키고 있다.

(2) HAZOP, PRORA

HAZOP으로 플랜트의 주요기기(반응기, 열교환기 등)를 체크하고 있다. 3~5명의 팀에서 P&ID에 의거 Hazards를 파악하며, 검토 결과를 손쉽게 기록하기 위해 Prematech의 소프트웨어 HAZOP-PC를 사용하고 있다. 팀멤버는 수행과 동시에 결과를 디스플레이해보고 팀리더를 보조할 수 있으므로 효율이 높아진다.

한편, PRORA(Process Risk Analysis)는 실험실용으로 Scaled Process Plant에서 사용되고 있다. Sandoz Technology사의 CSE부문에서 개발된 것으로 누구라도 매뉴얼을 보고 간단히 이용할 수 있다는 점에 특성이 있으며, 안전, 환경, 보건, 사고정보로 이루어진 체크리스트를 컴퓨터로 처리한 것이 이용되고 있다.

4. 맺음말

이상으로 QRA 평가기법을 주제로 하여 유럽의 3개 화학회사의 폭발리스크 평가기법을 소개하였다.

QRA 평가기법은 장점이 많은 반면, 제한적 측면도 있으므로 이 점을 고려하여 운용하는 것이 바람직하다. 장점으로는 1) 이용가능한 데이터가 불충분한 상태라도 리스크에 대처하는 기법을 도출할 수 있어 방침의 결정에 도움이 되며, 2) 논리도를 작성하는 과정에서 좀더 상세한 검토가 부가되어 고장 메커니즘을 이해할 수 있으므로 플랜트의 중요 부분에 대한 이해가 깊어질 수 있다. 한편, 제한적 측면으로는 1) 데이터에 의존해야 하고, 2) 수학적인 고찰이 요구되며, 3) 부가적 비용이 소요되는 것 등이 지적되고 있다.

또, 한 가지는 신뢰성 데이터의 한계성이다. 하나의 플랜트를 고려할 경우, 과거의 데이터가 있다 하더라도 전제가 되는 각종 조건은 현재의 플랜트와 다른 것이 보통이다. 전제가 다른 데이터로는 결코 정확한 결과를 얻을 수 없다는 주장에 대해 아직 적절한 반론이 없다. 따라서, 과거의 데이터를 축적하였다 하더라도 복잡한 화학공장에서는 부정확하다는 문제점 때문에 시간적 낭비요소가 많다.

영국·네덜란드 및 독일의 리스크 평가기법에는 큰 차이가 있으나, 모든 대기업 화학회사에서는 QRA 평가용 소프트웨어를 입수하고 있다. 다른 방법이 없을 경우에 위험성을 정량적으로 고찰할 수 있다는 것은 매력적인 것임이 분명하다.

“안전공학” Vol.36 No.5 (97.10)에서 발췌