

化學工場의 安全性 評價에 관한 考察

박창복 / 위험관리정보센터 과장

— ABSTRACTS —

This objective of safety assessment is to determine the acceptability of risks or hazards, or the coping measures, if not acceptable, by identifying and quantifying the risks potentially involved in incidents, with the information on new technology and the disastrous cases.

목 차

1. 머리말
2. 化學플랜트의 安全上 問題點
3. 災害의 原因 分類와 우리나라에서의 災害現況
4. 安全性 評價의 必要性
5. 危險의 發見技法과 定量化 技法
6. 安全性 評價 技法
7. 安全性 評價를 推進하기 위한 體制
8. 化學플랜트에서의 安全管理
9. 맺는말

급속히 발달된 석유화학공업은 사회구조가 복잡해지고 고도화되면서 관련제품의 수요가 증가됨으로써 수요신장에 대비한 신, 증설 등 시설확충사업이 활발하게 추진되어 왔다.

대규모의 장치산업인 석유화학공업은 과거의 화학공업분야에서 경험하지 못한 새로운 형태의 사고들이 유발됨으로써 이들 공장의 안전에 취약점을 노출시키고 있는 것이 사실이다.

화학공장은 각종의 가연성물질, 폭발성 화합물이나 유해물질 등 다량의 위험물질을 취급하고 있으며, 특히 이들은 고온, 고압에서 취급되는 경우가 대부분이므로 사고발생의 빈도증가와 아울러 인명, 재산 등의 손실규모가 대형화되어 업계의 관계자들은 현장에 잠재해 있는 위험, 다시 말해 불안정한 요소가 어디에 있는가를 발견하고 개선해 나감으로써 사고의 발생을 사전에 방지하기 위하여 많은 노력을 기울이고 있다.

산업의 종별에 관계없이 대형화재나 폭발 등에 의해 초래되는 결과는 기업이나 사회에 매우 큰 고통을 안겨다 주며, 재해를 당한 기업의 측면에서 보면 피해를 입은 플랜트의 복구뿐만이 아니라 수입의 감소, 기업의 이미지 손상 등의 부차적 손실도 입게되

1. 머리말

60년도 후반부터 5차에 걸친 경제개발계획에 의해

어 직, 간접적으로 막대한 손실을 입게 된다.

그러므로 본고에서는 석유화학콤비나트 등 화학공장에서 발생이 예상되는 폭발이나 화재 등의 재해를 미연에 방지하거나 재해발생을 완전히 억제할 수 없는 경우에 피해를 최소화할 수 있도록 석유화학플랜트의 사고사례, 안전상의 문제점과 위험의 발견 기법 및 정량화 기법에 대해 간략하게 알아보고, 마지막으로 안전성 평가기법에 대해서 고찰해 보고자 한다.

2. 化學플랜트의 安全上 問題點

일반적으로 석유화학콤비나트에서 발생하는 재해에 대하여는 다음과 같은 공통적인 문제들이 있다. 그것을 살펴 보면,

가. 기술의 진보에 뒤따르는 대책이 강구되지 않고 있다.

석유화학플랜트는 공정의 대부분이 컴퓨터로 운용되고 있으나 컴퓨터도 만능이 아니라 능력에 한계가 있는 것이다.

그것은 공장가동 직후라든지 가동을 정지하기 직전의 소위 정상운전에 들어가지 않은 단계에서는 메뉴얼의 조작에 의하고 있으며, 또한 설정조건 이외의 현상이 우발적으로 일어나는 경우에는 충분히 대처하지 못하게 된다.

이것은 컴퓨터와 조작자와의 적절한 운용체제가 갖추어진 화학플랜트에서만이 처음부터 그 기능을 완전히 발휘할 수 있는 것이므로 설비의 개선에 투입되는 것과 같은 정도의 노력이 사람의 근대화, 다시 말해 조작자의 교육훈련에도 힘을 기울이지 않으면 안되는 것이다.

이러한 시설과 사람(조작자)과의 조화가 이루어지지 못함으로써 양자간의 불균형이 일어나며, 그것으로 인하여 석유화학콤비나트에 있어서도 크고 작은 재해가 끊이지 않고 발생하고 있다.

나. 災害規模가 大型化하고 있다.

석유화학플랜트는 생산제품에 대한 수요가 급증하

고 있어 근년에 규모가 커지는 경향을 보이고 있으며 계속해서 대용량의 시설이 설치되고 있다.

그와 함께 시설내부의 반응조건은 고온, 고압화하고 있으며 종래보다 훨씬 큰 에너지가 플랜트 내부에 저장되어 있어, 그것에 의한 폭발이나 화재의 위험도 크게 된다.

그러므로 규모의 대형화에 따른 위험성은 어떻게 변화하는가를 사전에 충분히 체크하여 필요한 조치를 강구하는 것이 가장 중요하다.

「종래와 같은 대책의 연장선상에서 생각하면 된다」는 안이한 태도는 재해를 유발하게 하는 동기가 되기 쉬우므로 허용될 수 없는 자세라 할 것이다.

다. 非正常的인 作業에 의한 災害가 많다.

최근의 재해사례를 살펴보면, 수리 등 소위 비정상적인 작업에 의한 것이 적지 않다.

이들의 작업에는 순서가 명확치 않은 것이 많으며, 그 원인은 작업의 대부분이 외부의 전문업자에게 발주시키고 있기 때문이다.

예를 들면, 벤젠제조설비의 일부분인 수소정제장치의 냉각용 열교환기의 수리중 화재가 발생하여 작업자 다수가 화상을 입은 경우에서와 같이 이것은

① 수리작업에 들어가기 전에 장치 내부의 가스를 완전히 제거

② 물, 수증기 등으로 가스를 퍼지

③ 관계계통과의 관통로를 확실하게 차단

한다는 기본원칙이 지켜지지 않음으로써 작업방법이나 순서가 확실하게 결정되지 않은 상태에서 관계 작업자가 지시를 받지 않고 작업에 돌입한 결과라 하겠다.

이런 작업에 대해서는 평상시에 작업순서를 정해 두고, 미리 작업지시자를 선임하여 그 사람의 지휘하에 정확하고 안전한 방법으로 작업을 진행하도록 할 필요가 있는 것이다.

3. 災害의 原因 分類와 우리나라에서의 災害現況

미국보험협회가 화학플랜트에서 발생한 재해의 원

인(1960년에서 67년까지의 8년간의 재해 70건)을 분류, 검토하여 9종에 걸친 항목마다 체크리스트를 작성한 결과는 다음과 같다.

| 년도 | '60 | '61 | '62 | '63 | '64 | '65 | '66 | '67 | 계 |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| 건수 | 3 | 7 | 10 | 9 | 7 | 15 | 15 | 4 | 70 |

이 70건의 원인을 다음의 9항목으로 적용시켜 보았다.

- a. 공장부지 2건
 - b. 플랜트의 레이아웃 3건
 - c. 구조 3건
 - d. 물질의 평가 26건
 - e. 반응의 평가 15건
 - f. 단위조작, 수송, 저장 4건
 - g. 작업자의 조작, 훈련 20건
 - h. 장치 44건
 - i. 관리, 방재계획 5건
- 계 122건
 이 122건이 되는 것은 하나의 재해가 복수의 요

인에 의해서 일어나고 있기 때문이며, 70건중 한 요인에 의한 것을 件數의 順으로는 h(14), g(4), d(3), i(2), c(1)의 24건이었으며, 두 요인에 의한 것은 eh(9), dg(7), gh(7), de(3), bh(2), df(2), fh(2), h(1), cd(1), di(1)의 40개였고, 세 요인에 의한 것은 deh(2), adi(1), cgi(1), dgh(1)의 6건이고, 네 요인 이상은 없었다.

이 건수의 大小는 요인에 따라 변화하지만 약 1/3이 장치와 물질 및 프로세스의 평가와 관련하고, 나머지 1/3의 반수가 작업자에 관계하고 있는 것으로 나타나고 있다.

또한, 아래의 화재·폭발 재해사례를 보면 재해발생원인의 대부분이 설비와 조작자의 운전상의 결함에서 기인하고 있음이 위의 예에서와 같이 공통적으로 알 수 있다. 다음 표는 관련 재해발생사례를 나타낸 것이다.

| 일시 | 회사명 | 사 고 개 요 | 주된 사고 원인 |
|----------|---------------|---|----------------------------------|
| 90.1.28 | (주)유공울산공장 | 에틸렌 저장탱크 파열로 가스누출. 인근지역 교통차단, 주민대피. | 부속설비 고장 작업감독 미흡 |
| 90.1.30 | 상 동 | 메탄 분리탑 상부 후렌지에서 가스누출, 화재발생 | 가스켓 불량 및 공구사용 잘못 |
| 90.3.13 | 영남화학(울산) | 이황산가스 흡수설비에서 가스大氣로 방출, 인근주민 대피 | 부속설비고장, 장비점검 미흡 |
| 90.3.18 | 극동정유(대산) | 유황회수설비의 소각로에서 유독가스가 대기로 방출. 인근주민 소요 | 시운전중 유황회수설비 고장 |
| 90.6.22 | (주)선경 울산공장 | TPA공정내 원료공급 펌프파손으로 초산가스 다량누출, 인근주민 대피, 36명 입원 | Mechanical Seal 파손 |
| 90.7.22 | (주)유공(울산) | Coff spec탱크 화재, 인근주민 대피 | Drain pot누출, 제작결함 |
| 90.9.6 | 대구설업(대구) | PE용해탱크 보수(PE연소)중 가연성가스의 폭발, 근로자 1명 사망 | PE열분해 가스(CO)가 폭발범위 내에서 LPG 불꽃 투입 |
| 90.10.20 | 동부제강(주) 인천제강소 | 아세틸렌 제조공정의 폐수처리장내 액상소석회탱크 용접시 폭발. 사망1명, 부상3명 | 아세틸렌가스 혼입상태에서 Arc 용접 |
| 90.11.9 | (주)금양(온산) | 클로로슬폰산 공정의 염산투입중 head에서 클로로슬폰산 누출 중업원 대피 | 차단밸브를 열지 않은 상태에서 운전 개시. |
| 90.11.24 | (주)유공(울산) | 정제탑 하부 잔사유 공급펌프 주위 elbow파열로 인한 잔사유 누출로 화재발생 | 차단밸브를 열지 않은 상태에서 운전 개시 |
| 91.2.14 | 극동정유(주) (대산) | 중질유 분해시설내 Air Cooler와 고압분리기 사이 고압배관 파열. 급격한 압력방출과 수소폭발 화재, 1명 경상 150억원 피해 | 배관의 파로현상으로 파열 압력방출, 수소폭발 |
| 91.3.22 | 고려석유화학(주)(울산) | CTA산화반응탑의 배관에서 위험물 누출, 보온재내로 침투 자연발화후 확산, 재산손실 수억원 | 배관의 균열 또는 pinhole 발생으로 위험물 누출 |
| 91.5.22 | 두봉화학(주) | 접착제 반응설비의 배관접속부에서 toluene증기누출 화재확산, 근로자 3명 사망 공장전소 | 가연성증기 체류, 전기설비 설치 방법 불량 |
| 91.5.30 | 세진산업(인천) | 도장공정의 세척기의 용제탱크 청소용 TEC에 중독. 근로자 4명 사망, 5명 중경상 | 보호구 미착용, 환기설비 부적절 |
| 91.6.26 | 호남정유(주)(여천) | 정유공정내 열교환기 부근에서 납사누출. 폭발 화재로 확산, 근로자 사망 1명, 중경상 8명 재산피해 수억원 | 접합부 체결상태 불량. 공사용 전기설비 설치위치 불량 |
| 91.9.7 | 동양화학(주) | TDI제조시설의 흡수탑에서 TDI와 Tar누출 공장주위 농산물 피해 | 운전자의 계기조작 미숙 |
| 91.10.19 | 현대중공업(주)(울산) | 아세틸렌 라인에서 아세틸렌 누출. 보수중 화기에 의해 폭발, 3명 중경상 | 국부부식으로 누출, 지하누적 |
| 91.10.25 | 대성화학(양주) | 중합반응중 맨홀이 남아감. 분출된 인화성가스와 전기설비 접촉으로 화재발생, 1명 사망 | 안전밸브 미설치, 비방폭형 전기기구, 충전부 노출 |

4. 安全性 評價의 必要性

화학플랜트에서 발생하는 재해중에는 계획단계에서 안전에 대한 충분한 배려가 결여된 것이 많다.

다시 말하면, 事前에 이러한 것에 대한 검토가 행해진다면 그 단계에서 문제점이 돌출되고 문제점 해결에 노력을 기울이므로써 재해는 일어나지 않을 것이다.

그러나, 재해가 일어난 뒤에 문제점에 주의를 기울이는 것은 이미 때가 늦은 것이다. 그와 같은 死後藥房門式의 관리에서 탈피하여 문제점을 사전에 파악하고, 그 단계에서 문제점을 배제함으로써 안전을 확보한다는 『先取型』으로 履行하는 것이 안전관리의 본연의 자세라 할 것이다.

유럽에서는 “Don't learn Safety by accident!”말이 말이 맞지만 이것은 바로 이것을 강조하는 것이다.

기술진보의 과정을 회고해 보면, 제임스 왓트가 증기기관의 발명을 시발로 하는 『산업혁명』을 제1시대라고 하면, 제2시대인 『技術革新』(innovation)을 거쳐, 선진국에서는 지금 제3시대라고 말하여지는 『事前評價』(Assessment)의 시대에 돌입한 상태이다.

기술혁신과 사전평가의 차이는 前者가 技術이 갖는 可能性을 더욱 확대하고자 하는 관점에서 새로운 技術의 개발이 행해지는 것에 대해, 後者は 인간이나 사회가 기술에서 무엇인가를 추구한다는 욕구를 기초로하여 技術開發의 검토가 이루어진다는 것이다.

인류의 복지를 증진하고, 풍부한 문화생활을 보장해야 하는 기술이 역으로 인간의 생명을 단축하고, 건강을 해치며, 불행울 초래하여서는 안된다.

이러한 점을 없애기 위해서는 새로운 기술의 개발, 플랜트나 설비의 개선 등에 있어서는 그것에 의한 장점뿐만이 아니라 단점에 대해서도 충분히 검토하여 단점에 대해서는 적절한 代備策을 강구하여야 한다.

이러한 것이 해결되지 않는 한 신기술이나 원료가 생산현장에 반입되어서는 안된다.

新藥은 병에 효과가 있어야 하는 것 중요하긴 하지만 어떤 탁월한 치료효과가 발휘된다해도 만에 하나라도 부작용이 따라서는 안되는 것과 같이 새로운 기술도 그것에 의해서 생산성의 향상이나 신제품

의 생산이 가능하다해도 그 제조과정이나 제품의 사용단계에서 관계자의 생명이나 건강을 위협하는 것은 신기술로써 인정할 수 없는 것이다.

설계, 계획의 단계에서 행해지는 事前評價가 소위 『Safety Assessment』이다.

다시 말해서, 『安全性 評價』는 새로운 工程이나 原材料의 導入에 있어서 安全面에서의 정성적 또는 정량적인 평가를 통하여 신제품의 제조과정이나 사용단계에서 위험이나 유해성을 배제하고자 하는 것이다.

한편, 이와 같은 평가가 확실히 행해지기 위해서는 이것을 중요한 정책으로 확립함과 아울러 관계자의 지혜를 결집, 여러가지 위험의 발견기법이나 정량화 기법을 동원하여 위험이나 유해성을 해명할 수 있도록 체제의 정비가 필요하다.

공장에서의 설비나 건축물의 설치, 이진, 주요부분의 변경을 행하고자 할 때에는 설계 계획의 단계에서 평가를 통하여 문제점을 도출·조치하고 문제점이 없다는 것이 확인된 이후에 실행하도록 하여야 할 것이다.

5. 危險의 發見技法과 定量化 技法

가. 危險의 發見技法

위험의 발견은 위험이 중대한 것인가, 그렇지 않은가의 여부를 결정하는 과정으로 하나의 사고형태를 위험의 측면에서 초점을 맞추는 일종의 정성적 접근 방식이다.

(1) Check-list

工程圖나 計劃圖의 이용이 가능하면, 잠재된 위험을 보다 정확하게 발견할 수 있다. 체크리스트는 공정의 code나 standard에 따르는 안전화수단이며, 화학공장의 화재 위험평가 및 방재에 필요한 사항을 검토할 때 하나의 지침으로 사용되고, 또한 새로운 시설을 계획함에 있어 특정한 목적에 사용될 수도 있다. 그러나 체크리스트도 모든 목적에 부합되는 완전한 것은 아니다.

(2) Hazard지수

이것은 공정시설에 대한 잠재적 손실의 상대적 등급을 정하기 위하여 개발된 것으로 대표적인 것은

Dow Chemical Co.에 의한 것이 있다.

이 과정은 화재와 폭발지수(Fire and Explosion Index)와 최대가능손실(MPL)을 계산하기 위한 것으로, 인화성 또는 가연성 반응물질이 저장되거나 공정 중에 있을 때는 이 방법에 의한 평가가 가능하나 발전소, 사무실 건물, 수처리 및 공급 System에는 이 기법의 적용이 곤란하다.

필요한 data는 공장의 정확한 plot plan에서 확보되어야 하며, 이것은 설비의 設置價格과 공정 흐름, 상태를 완전히 이해해야 하기 때문이다.

이 기법은 화재나 폭발로부터 잠재손실의 관점에서 단위공정의 등급을 정하는 것이라 하겠다.

(3) Hazop기법(Hazard and Operability Study)

Hazop기법은 전체의 시설을 통한 위험의 발견과 그 처리 가능성에 대하여 조직적으로 접근하려는 것으로, 정상적인 공정으로부터 공정 이탈의 영향을 정성적으로 분석하는 기법이라 할 수 있다.

기본원리는, 여러 단계를 거쳐 설계중인 공장 또는 공정에 적용하기 위하여 ①의도된 설계조건을 포함한 공정을 충분히 서술하고, ②설계로부터 공정이탈이 어떻게 발생하는가를 발견하기 위하여 각부분의 공정을 계통적으로 시험하며, ③이들의 이탈된 공정이 위험을 일으킬 수 있는지의 여부와 그 처리가능성을 결정하는 것이다.

Hazop기법을 수행하는 데에는 첫번째로 연구의 목적물과 범위를 정하고, 두번째로 전문지식을 가진 team을 선발하여 공정운영에서 이탈공정의 영향을 평가할 수 있도록 다음의 자료들을 수집한다.

- *공정의 개요
 - *공정의 흐름도
 - *모든 원료나 중간체, 생산품의 화학적, 물리적 독성에 관한 data
 - *배관 및 기계도면(P & ID's)
 - *Logic Diagram을 제어하는 공정
 - *배치도
 - *운영, 진행절차
 - *유지, 관리절차
 - *비상대책과정
 - *안전 및 훈련편람 등
- 그 다음으로는 이탈된 공정의 결과가 위험하다고

인식되면, 이탈을 예방하거나 그것을 감지하기 위한 수단을 Hazop 작업표에 기록하고 위험완화의 명백한 방법을 제시하게 되는 것이다.

나. 危險의 定量化 技法

위험을 정량화하는 목적은 여러가지 사고의 가능성과 사고의 발생을 예측하기 위한 것으로 어떤 system이나 시설에 있어서 전체적인 위험수준이 어떤 곳에 가장 크게 영향을 미치게 하는가를 발견하는데 도움을 주며, 또한 전체 과정이 여러 부분에 영향을 줄 수 있는지의 여부를 결정할 수 있게 한다.

위험의 정량화는 결과의 modeling 및 위험의 평가를 통하여 그 효과가 증대될 수 있으며, 충분한 위험평가가 행해진 부분에 대한 위험의 정량화는 잔류위험의 심도와 위험에 대한 경제적인 완화수단을 결정하게 된다.

위험의 정량화에 사용되는 방법으로는 다음과 같은 것이 있다.

- *Preliminary Hazard Analysis(PHA)
- *Failure Mode and Effect Analysis(FMEA)
- *Failure Mode and Criticality Analysis(FMECA)
- *Part Count Method
- *Fault Hazard Analysis(FHA)
- *Event Tree Analysis(ETA)
- *Simulation
- *Cause—Consequence Diagrams
- *Double Failure Matrix(DFM)
- *Rapid Ranking
- *Epidemiological Approach
- *Reliability Analysis

위의 방법중에서 이용도가 높은 것을 약술하면 다음 내용과 같다.

(1) Failure Mode Analysis

① Failure Mode and Effect Analysis(故障의 形態와 影響評價)

이것은 전체 system이나 다른 구성성분의 영향에 대하여 설비에 주어진 항목들을 모든 『고장형태』를 분석하기 위해 사용되며, 설비의 각 부분을 차례로 분석한다.

접근방식으로는 설비의 방향에 맞추어 아래에서 위로 접근하는 방식을 취하며, 모든 사례의 『고장형태』가 발견되고 정량화됨으로써 완전히 수정된다.

모든 구성성분의 고장이나 역기능의 결과를 결정하는데 고려하는 실제 단계에서는 다음의 것들을 행한다.

㉑ 모든 구성성분을 확인하고 List up한다.

㉒ 가급적 모든 운전형태를 고려하여 그에 대한 『고장형태』를 확인한다.

㉓ 전체 system과 다른 구성분에 대한 고장의 영향을 결정한다.

㉔ 각 고장형태의 확율을 계산한다.

㉕ 각 고장형태의 심도를 평가한다.

② Event Tree Analysis

Event Tree는 고장을 일으키는 구성요소에서 시작하고, 그 후에 system에 대한 잠재된 모든 사고의 결과를 찾는 것으로 성공과 실패를 경로로 하여 분석한다. 분석은 초기의 event를 정의함으로써 시작하고, 그 다음에 위험을 찾아내는 안전 system을 정립하여 작업에 들어간다. 즉, event를 정리하고 그 후 system을 기술한 뒤 최종적으로 그에 따르는 위험을 찾아내어 인식치 못한 분야를 제거함으로써 수행된다.

이 방법은 잠재된 불완전함을 분석하기 곤란한 점이 있긴 하나, **利點**을 살펴보면 다음과 같다.

* 시나리오를 체계화하여 정의를 내린다.

* 발생이 예상되는 사건을 시간적으로 연속 정리한다.

* Fault tree분석을 위한 top event를 찾아낸다.

* 안전 system의 역할이나 고장과 최종 사고 사이의 상관관계를 입증한다.

* 초기 사례로부터 얻은 결과에 따라 여러가지 사고들을 나타낸다.

③ Fault Tree Analysis(缺陷關連樹法)

고장을 일으키는 구성요소로부터 시작하여 결과를 찾아낸다는 것은 ETA와 같으나 FTA에서는 역으로 접근하여 찾아내거나 위-아래로 접근하는 방식이다.

FTA는 명시된 결과를 나타내는 고장이나 사고사례를 결합하여 연속적인 그림으로 나타내지만 system실패의 모든 원인이나 가능성을 포용하는 것은 아니며, 발생할지도 모를 사고 가능성에 초점을 맞추

는 것이다.

Fault Tree는 Top event(발생확율이 가장 높은 사고)가 경험, 예상, 체크리스트나 발생경력에 근거하여 선택되었는지의 여부를 확인하는 데에 이용되며, 각각의 결과를 나타내는 사고의 경로는 그 다음에 확인한다.

FTA는 일반적으로 위험을 발견하고 정량화하는 부분적 수단으로 사용되며, F.T의 구성을 위해서는 system의 상태나 발생 가능성이 있는 사고상태를 가정하여, 그것이 어떻게 발생할 것인가를 반복질문하고 이를 기본적 원인이나 세부사항이 가장 낮은 실제 수준에 이를 때까지 행한다. F.T의 구성은 FTA에서 가장 중요한 단계이며, 기술과 과학의 요소를 두루 포함하고 있다.

FTA는 운전과 유지 과정뿐만 아니라 인간의 실수나 기계적 고장 등의 영향을 폭넓게 고려할 수 있어 거의 모든 단계의 project에서 사용될 수 있으며, 특정 설비를 분석, 설계단계에서나 진행과정중의 어느 것도 평가할 수 있다.

FTA를 실시하는 경우에 그 순서는 解析의 目的이나 精度 등에 따라 차이는 있으나, 보통은 아래의 도표와 같은 순서에 의해 진행되며, 구체적인 내용을 살펴보면 다음과 같다.

(1) 해석하고자 하는 system의 공정 및 작업내용을 확실하게 파악한다. 필요하다면 system의 정상적인 운영을 나타내는 그래프나 배치도 등을 준비한다.

(2) 예상되는 재해를 과거의 재해사례, 재해통계를 토대로 가급적 폭넓게 조사한다.

(3) 재해의 위험도를 검토하여 해석해야 할 재해를 결정한다. 필요하다면 예비사고해석(PHA)를 실시한다.

(4) 재해의 위험도를 고려하여 재해발생 확율의 목표치를 정한다.

(5) 재해와 관련이 있는 기계의 불량상태나 작업자의 error에 대해서 그 원인과 영향을 가급적 상세하게 조사한다. 필요하다면 PHA나 FMEA를 실시한다.

(6) FT(Fault Tree)를 작성한다.

(7) 작성된 FT를 數式化하고, Boolean代數(論

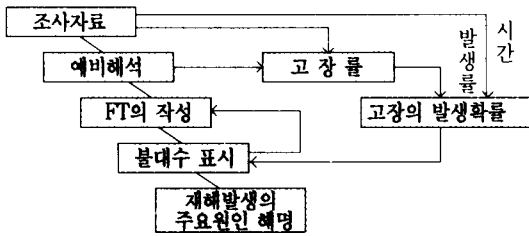


그림 1. FTA의 순서(Malasky)

理를 記號化하여 그 結合을 代數演算으로서 나타낸 體系)를 이용하여 간소화한다.

(8) 기계 불량상태나 작업자의 error의 발생 확율을 자료조사에 의해서 정하고, FT에 표시한다.

(9) 해석하는 재해의 발생확율을 계산한다.

(10) (9)의 결과를 과거의 재해 또는 재해에 이르는 중간사고의 발생확률과 비교한다.

(11) 그 결과에 편차가 있으면 (5)로 되돌아가 재검토한다.

(12) 완성한 FT를 해석하여 재해 발생율이 목표치를 넘는 경우에는 가장 유효한 안전수단을 검토한다.

(13) cost나 기술 등의 제 조건을 고려하여 가장 유효한 재해방지대책을 세운다.

(14) 이들 각 순서에 대해서 FTA의 규모가 클 때에는 컴퓨터를 사용할 수 있도록 data를 정리한다.

보통 FTA에는 그 목적, 투입하는 인력, cost 등에 대해서 ①정성적으로 간단한 FT를 작성한다. ②정량적으로 재해 발생확율을 구한다. ③컴퓨터처리를 한다. 등의 단계가 있고, 각각은 가치가 있는 것이다. 그러므로 앞의 (1)-(14)의 전부가 실행되지 않을 때는 FT를 작성하는 것만으로도 재해의 전체 내용을 파악한다거나 재해의 원인을 규명할 수 있는 경우가 많다.

6. 安全性 評價 技法

화학물질을 제조, 저장, 취급하는 화학설비(건조설비 포함)를 신설, 변경, 이전하는 경우에 설계단계에서 화학설비의 안전성 확보를 위한 사전평가방법에

대해서는 우리나라에서는 노동부 고시 제85-82호에 「化學設備의 安全審査를 위한 技術上의 指針」에 5개의 Step으로 나누어 규정하고 있으며, 일본에서는 「勞働安全衛生法」에 우리나라의 5단계 스텝에 덧붙여 앞에서 설명한 FTA(Fault Tree Analysis)技法에 의한 재평가를 포함시킨 6개의 스텝으로 실시하도록 규정하고 있다.

일본에서 시행하고 있는 6단계의 事前評價方法에 대한 내용을 살펴보면 다음과 같다.

가. 제1단계(關係資料의 整備)

화학플랜트의 안전성을 평가하는 전제로서 관련자료를 정비하는 단계이며, 자료를 정비하고 검토한다. 이 경우에 공정 계통도, 공정기기 목록, 안전장치의 종류와 설치장소 등에 대한 자료작성은 다음에 의한다.

(1) 誤操作의 방지대책

(2) 이상시 확실하게 안전한 방향으로 작동하는 방식의 채택

등 기본적인 안전설계가 이루어지도록 배려하고, 운전요령, 안전교육 program 등도 동시에 작성한다.

정비, 검토되어야 할 자료는 다음과 같다.

*입지조건(입지에 관한 도표를 포함)과 관련된 地質圖, 風配圖

*플랜트 배치도

*구조를 나타내는 도면(평면, 입면, 단면)

*기계실 및 전기실의 평면도, 입면도, 단면도

*원재료, 중간체, 제품 등의 물리적, 화학적 성질 및 인체에 미치는 영향

*제조공정상 일어날 수 있는 반응

*제조공정의 개요

*공정 계통도

*공정기기 목록

*배관, 계장 계통도(P & ID's)

*안전장치의 종류와 설치장소

*운전요령

*요원 배치계획

*안전교육 훈련계획

나. 제2단계(定性的 評價)

진단항목에 의해서 화학플랜트의 신설, 변경에 따르는 위험, 유해성을 정성적으로 평가하는 단계이다.

진단항목을 충분히 고려하여 플랜트의 설계나 운전조건을 결정하지 않으면 안되며, 정성적 평가의 결과 플랜트의 안전성에 문제점이 발견되면, 설계변경을 통하여 필요한 조치를 취한다.

진단항목의 예를 들면 다음과 같다.

① 설계관계

- * 입지조건
- * 공장내의 배치
- * 건축물
- * 소방용 설비 등

② 운전관계

- * 원재료, 중간체, 제품 등
- * 공정
- * 수송, 저장 등
- * 공정기기

예를 들어 건조물, 공정기기에 대한 평가는 다음과 같은 요령으로 한다.

■ 건축물

- * 내진설계가 되어 있는가
- * 기초 및 지반은 전하중에 대하여 충분한 내력을 갖고 있는가
- * 구조물의 부재 및 지주의 강도는 충분한가
- * 바닥, 벽 등의 재료는 불연성으로 되었는가
- * 엘리베이터, 공조설비 및 환기덕트의 개구부와 같은 화재시 연소확대요인에 대한 적절한 조치가 되어 있는가
- * 위험 공정은 방화벽 또는 방폭벽으로 구획되어 있는가
- * 옥내에 위험, 유해물질이 누설할 위험이 있는 경우에 환기는 충분히 되어 있는가
- * 명료하고 충분히 표시된 피난구 및 비상용 통로가 있는가
- * 건축물내의 배수설비는 충분한가

■ 공정기기

- * 공정기기의 선정시 안전면에서의 검토는 되었는가
- * 공정기기는 조작자가 감시 또는 조치하기 쉽게 설치되었는가
- * 공정기기 등에 대해서 오조작방지를 위해 인간공학적 배려가 되었는가
- * 공정기기에 대해서 각각 상세한 진단항목이 정해졌는가
- * 공정기기는 충분한 안전제어가 되도록 설계되었는가
- * 공정기기의 설계 및 배치는 검사 및 유지관리가 쉽도록 배려되었는가
- * 공정기기는 이상시 안전하게 작동되도록 되었는가
- * 검사 및 유지관리를 위한 계획은 충분하고 적정한가
- * 예비품 및 수리를 위한 요원은 확보되어 있는가
- * 안전장치는 위험으로부터 충분히 보호되고 있는가
- * 중요설비의 조명은 충분한가, 정전시의 예비조명은 확보되어 있는가

다. 제3단계(定量的 評價)

이 단계는 물질, 장치용량, 온도, 압력 및 조작의 5항목에 대해서 화학플랜트의 신설, 변경 등에 따라 안전성에 관한 종합적, 정량적인 평가를 한다.

이 평가에 있어서는 재해발생 가능성과 재해가 발생한 경우, 그 크기를 동시에 평가하는 것으로 前記한 5항목에 균등한 비중을 두고, 정량화를 행한다.

정량적인 평가를 실시함에 있어서는 플랜트를 몇 개의 요소를 포함하는 블록으로 분할하여 각 블록의 모든 요소에 대해서 정량화를 실시하고, 이들 요소의 위험 도중에서 가장 큰 것을 그 블록의 위험도로 한다.

정량화 방법으로는 『표 1』에 의해 前記한 5항목에 대해서 A, B, C 및 D의 4단계로 구분하여, 각각에 점

수를 주고, 이것에 의해 위험도를 나타내는 것이다.
 즉 A(10점), B(5점), C(2점), D(0점)의 각 점수를 주어 그들의 합을 구해 위험도 等級을 부여한다.

표 1. 위험도의 구분

| 점 수 | 위험도의 구분 | 위험도의 정도 |
|--------|---------|----------------------|
| 16점 이상 | 등급 I | 위험도가 높다 |
| 11~15점 | 등급 II | 주변의 상황 타설비와의 관련으로 평가 |
| 10점 이하 | 등급 III | 위험도가 낮다 |

평가방법은 다음과 같다.

- ① 물질 : 폭발성물질은 등급 A로 한다. 발화성 물질은 종류에 따라 각 등급으로 나눈다. 가연성가스중 압력 $2\text{kg}/\text{cm}^2 \cdot \text{g}$ 이상의 아세틸렌은 A, 그 외에는 B로 한다.
 인화성물질중 인화점이 -30°C 미만인 것은 B, 인화점이 -30°C 이상 30°C 미만의 것은 C로 한다.
- ② 장치용량 : 기체로 취급되는 경우와 액체로 취급되는 경우로 대별하여 『표 2』와 같이 등급을 나눈다.

표 2. 장치용량에 의한 등급

| 구 분 | A | B | C | D |
|-------------|----------------------|---|---------------------------------------|--------------------|
| 기체로 취급하는 경우 | $1,000\text{m}^3$ 이상 | 500m^3 이상 $1,000\text{m}^3$ 미만 | 100m^3 이상 500m^3 미만 | 100m^3 미만 |
| 액체로 취급하는 경우 | 100m^3 이상 | 50m^3 이상 100m^3 미만 | 10m^3 ~ 50m^3 미만 | 10m^3 미만 |

- ③ 온도 : 취급온도와 그 물질의 발화온도를 감안하여 4등급으로 나눈다.
 예를 들면, $1,000^\circ\text{C}$ 이상에서 취급하는 경우에 취급온도가 그 물질의 발화온도 이상일때 등급 A, $1,000^\circ\text{C}$ 이상에서 취급하는 경우에 그 취급온도가 물질의 발화온도 미만일 때 등급 B.
- ④ 압력 : 크기에 따라 4등급으로 나눈다.
 예 : $1,000\text{kg}/\text{cm}^2 \cdot \text{g}$ 이상 A
 $200\text{kg}/\text{cm}^2 \cdot \text{g}$ 이상 $1,000\text{kg}/\text{cm}^2 \cdot \text{g}$

미만 B
 $10\text{kg}/\text{cm}^2 \cdot \text{g}$ 이상 $200\text{kg}/\text{cm}^2 \cdot \text{g}$ 미만...C
 $10\text{kg}/\text{cm}^2 \cdot \text{g}$ 미만 D

- ⑤ 조작 : 폭발범위 또는 그 부근에서의 조작을 등급 A로 하고, 그 외는 Q의 값에 따라 등급을 나눈다. 또한, 운전조건이 통상의 조건에서 25% 변화한 경우 Q의 값이 어떤 등급에 속하는지를 보고 구분한다.

더욱이 조작방식(Batch방식 또는 programming을 병용하고 있는가), 조작이 화학반응을 수반하는가 않는가 등에 의해서도 등급을 나눈다.

$$Q = Q_r / C_p \rho V$$

Q_r = 반응에 의한 발열속도(kcal/min)

C_p = 요소내의 물질의 비열(kcal/kg $^\circ\text{C}$)

ρ = 요소내의 물질의 밀도(kg/ m^3)

V = 요소의 용량(m^3)

라. 제4단계(安全對策의 檢討)

제2단계의 평가결과에 따라 설비면과 관리면에서 대책을 고려해야 할 단계이다.

설비면의 대책(hard面의 措置)은 제3단계에서 행한 위험도의 등급부여에 따라 설비 등을 개선한다. 관리면의 대책(soft面의 措置)은 교육훈련에 의해 조작자의 지식, 기술의 향상을 도모함과 아울러 적절한 인원 배치에 의해 팀으로써 종합력을 높이는 것을 목표로 하는 것이다.

또한, 시운전시, 정기수리시 등 비정상작업 및 이상사태 발생시에 적절한 대응조치도 관리적인 대책으로서 빠뜨려서는 안되는 것이다.

설비면의 대책은 다음의 항목에 대해서 행한다.

- * 소화용수 및 살수설비
- * 건축물 등의 내화구조
- * 특수한 계기 또는 설비(긴급차단장치, 역류방지 장치 등)
- * 폐기설비, blow-down설비, 급냉설비
- * 용기내의 폭발방지설비
- * 원격조사

- *경보장치
- *가스검지설비
- *폭풍으로부터의 보호대책
- *환기설비
- *비상용전원

예를 들면, 건축물 등의 내화구조, 폭풍에서의 보호대책, 특수한 계기 또는 설비, 용기내의 폭발방지설비 등에 대해서는 다음 기준에 의해 조치한다.

★ 건축물 등의 내화구조

등급 I : 가연물을 제조 또는 취급하는 기기, 장치 등 지지부의 가열등급은 2시간으로 할 것. 가연물이 7kℓ 이상 존재하는 건물에서는 2시간 이상의 가열등급으로 한다. 다만, 스프링클러가 설치되고 지주를 내화구조로 한 경우에는 예외로 한다.

등급 II : 가연물을 제조 또는 취급하는 기기, 장치 등의 지지부의 가열등급은 1시간 이상으로 한다. 가연물이 7kℓ 이상 존재하는 건물에서는 30분 이상의 가열등급으로 한다. 다만, 스프링클러가 설치되고 지주를 내화구조로 한 경우는 예외로 함.

등급 III : 가연물을 제조 또는 취급하는 기기, 장치 및 가연물이 존재하는 건물은 불연성 구조로 할 것.

★ 폭풍에서의 보호대책

등급 I : 폭풍에 의한 피해에서 방, 소화용수 주관 및 주관에 부착된 조작밸브를 보호하기 위해서는 이격, 매설 또는 방폭벽을 설치할 것. 이격할 경우의 거리는 30m 이상으로 한다.

등급 II : 폭풍에 의한 피해에서 방, 소화용수 주관 및 주관에 부착된 조작밸브를 보호하기 위해서 이격, 매설 또는 방폭벽을 설치할 것. 이격할 경우의 거리는 15m

이상으로 한다.

등급 III : 생략

★ 특수한 계기 또는 설비

등급 I : 화재시 가연물의 유출을 막거나 최소화하는 방법을 취할 것.

반응기, 탭, 그 종류에 있어서는 이상반응에 의한 위험을 방지하거나 최소화하는 방법을 취할 것

이것은 이중방식 또는 보강방식의 계기설비로 할 것

계기용 공기, 전원은 30분간의 back up 원을 가질 것. 특히 긴급정지회로에는 독립전원을 준비할 것

등급 II : 화재시 가연물의 유출을 막거나 최소화하는 방법을 취할 것. 반응기, 탭, 그 종류는 이상반응에 의한 위험을 방지하거나 최소로 하는 방법을 취할 것.

등급 III : 생략

★ 용기내의 폭발방지설비

등급 I : 특별한 計裝設備(조절밸브의 fail safe 기구, 긴급차단밸브 설치 등)을 설치하거나 용기내의 불활성가스 주입에 대한 보강방식 등을 채용한다.

등급 II : 특수한 計裝設備 또는 불활성가스 seal 설비 등을 설치할 것. 옥내에 있어서는 폭발압력을 건물밖으로 나가도록 설비를 설치할 것

등급 III : 화염방지기(flame arrester)의 설치 또는 정전기 방지대책을 강구할 것.

★ 관리면의 대책은 다음 3가지를 고려한다.

- ① 위험도의 등급부여에 따른 적정한 인원배치를 행한다. 한편, 그 자격조건을 구비시킨다.
- ② 각 조작자의 책임분담을 명확하게 하고 그것을 수행하도록 필요한 지식을 부여한다. 즉,

적정한 과목에 의한 교육, 훈련을 일정한 기간마다에 반복, 실시하고 “On the job training(現場教育)”을 통하여 기능향상을 도모한다.

③ 시운전시, 정기 수리시 등 비정상작업에 있어 안전을 확보하기 위해 이들의 작업에 대해서 manual을 정함과 아울러 종전의 보전기록, 운전시의 문제점 기록을 유효하게 활용한다.

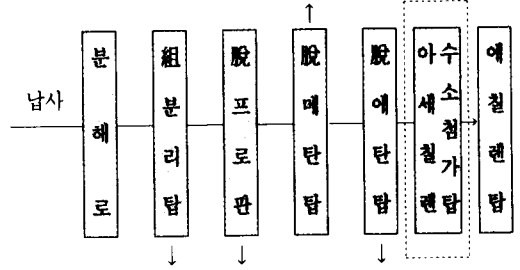


그림 2 에틸렌 제조공정의 flow sheet

마. 제5단계(災害情報를 통한 再評價)

이 단계에서는 제4단계에 있어서 강구된 안전대책에 대해 동종 플랜트 또는 동종 장치에 관련이 있는 재해정보를 적용하여 이것을 재평가한다.

그 결과, 개선되어야 할 것은 제4단계로 되돌아가 대책을 검토한다.

위험도의 등급이 I 또는 II인 화학플랜트에 대해서는 이상과 같이 평가를 마치고 파이롯트 플랜트(pilot plant) 또는 플랜트의 건설에 착수한다.

바. 제6단계(Fault Tree Analysis 技法에 의한 再評價)

위험도 등급이 I인 화학플랜트에 대해서는 더욱이 FTA기법에 의한 재평가를 해본다. 이 평가를 통하여 시정되어야 할 문제점이 발견되면, 설계내용에 필요한 수정을 가한 뒤 Pilot Plant 등의 건설을 추진한다.

다음에 fault tree analysis의 방법에 의한 재평가의 예를 나타내면 다음과 같다.

■ 재해예상

에틸렌에 수소를 첨가할 때 수소를 과도하게 주입하였기 때문에 이상반응이 생겼다고 한다. 이것은 과잉수소에 의해 아세틸렌 대신에 에틸렌이 수소첨가됨으로써 고온이 되어 이 반응이 가속화되고, 또한 국부적으로는 에틸렌의 접속분해를 생기게 하는 것이다.

에틸렌 제조과정의 flow Sheet는 그림2와 같다.

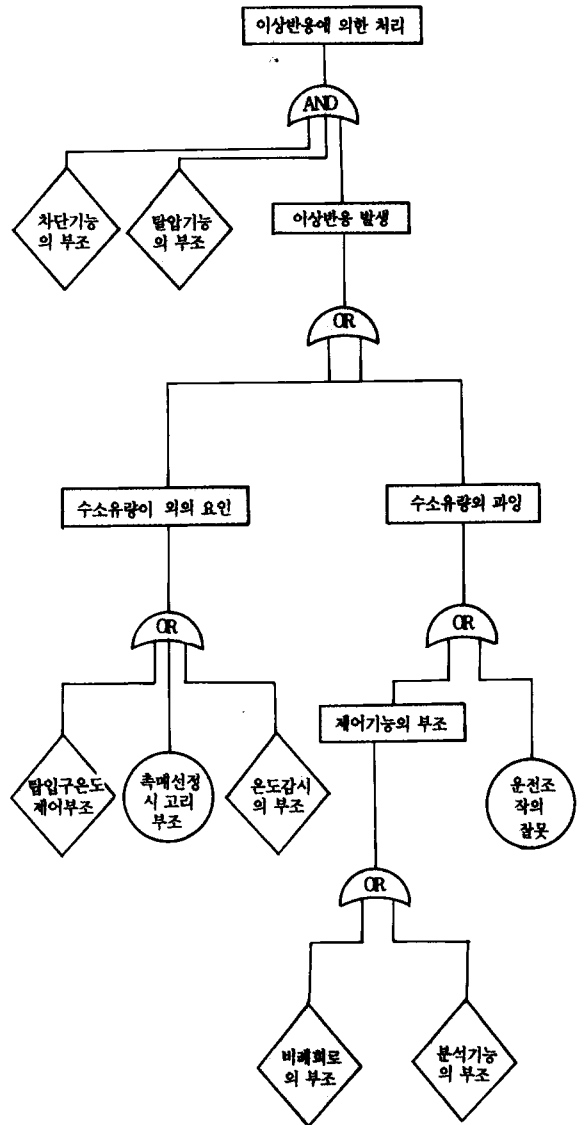


그림 3 이상반응에 의한 재해의 fault tree

■ fault tree 이상반응에 대한 fault tree는 각각 다음을 의미한다.




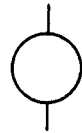
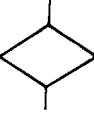
- out put
- ①  ① out put의 event가 일어나기 때문에 모든 in put가 일어나지 않으면 안 된다는 이론조작을 나타냄.
- ②  ② in put의 event중 어느 하나가 발생해도 out put가 일어난다는 이론조작을 나타냄.
- ③  ③ 이론 gate를 통한 후 in put된 고장의 조합에 의해 생긴 event를 나타냄.
- ④  ④ 더 이상 늘어날 필요가 없는 기본적인 고장을 표시
- ⑤  ⑤ 주어진 fault tree에 있어 기본적으로 생각되는 고장 event를 나타낸다. 그 고장원인과의 인과관계를 충분히 알지 못하거나 필요한 정보가 얻어지지 않기 때문에 더 이상 늘어날 필요가 없는 event에 대해 이용.

그림 4.

F.T를 만드는 데는 바람직하지 않은 event를 써 내려가고, 따라서 이 event는 system 요소의 상태를 고려하여 다음 질문을 할 필요가 있다.

(1) system의 상태를 나타내자면, 계속하여 「記述된 상태를 발생시키기 위해서는 적어도 event나 event의 조합이 필요하고 한편, 충분한 요건이 되는 가」를 고려한다.

(2) 요소의 상태를 나타내자면, 계속하여 아래의 것을 밝힌다.

- ① 중요한 원인은 무엇인가
- ② 2차적인 원인은 무엇인가
- ③ 명명상의 원인은 없는가(그 상태를 초래한 바람직하지 않거나 잘못된 신호는 없는지를 검토)

7. 安全性 評價를 推進하기 위한 體制

가. 정보의 수집

안전성 평가를 추진하기 위해서는 최근의 기술, 재해사례 등에 관한 정보가 필요하다.

이들의 정보는 어디에나 있지만, 즉시 이용되지 못하는 경우가 많다.

이를 방지하기 위해서는 이런 종류의 정보를 한국에 집약하고 항목별로 구분하여 보관하는 것, 소위 안전에 관련한 data-bank가 필요하다.

이 data-bank에는 연구기관, 행정기관, 관계단체, 국제기관 등 국내, 외의 기관에서도 input되도록 합과 동시에 장래에는 이것을 on-line화하여 전국 어디에서도 자유로이 out put되게 할 필요가 있을 것이다.

나. 기업내의 체제정비

안전성 평가는 한 두명의 노력만으로 얻어지는 것은 아니며, 설계담당자, 생산기술자, 안전 staff 등 여러 분야의 사람들의 지혜를 결집하여야 얻을 수 있다.

이것을 실현하기 위해서는 관계자를 회원으로 하는 project team을 만드는 등 기업내에 있어서 체제정비를 도모하는 것이 무엇보다 중요하다.

그와 동시에 이 체제를 움직이는 중심으로서 본사에 안전담당자를 선임하는 것에 대한 검토가 필요하다.

8. 化學플랜트에서의 安全管理

가. 설비 안전화의 방향

재해는 시설과 사람의 관계에서 발생하므로 그 방지대책도 이 양자에 대해 생각하지 않으면 안되지만, 특히 잊어서는 안되는 것은 「인간은 부주의를 범하기 쉬운 동물이다.」라는 것이다.

이 부주의를 최소화하도록 시설면에서의 조치가 이루어져야 할 것이다.

밸브에 대해서 예를 들면, inter lock방식의 채용, 밸브조작부의 형상, 위치, 조명 등에 대해서 더욱 인간공학적 배려가 이루어져야 할 것이다.

이와 같은 조치를 강구한다해도 오조작을 “0”으로 하는 것은 불가능하므로 다음에 고려되어야 할 것은 오조작에 의해 異常現象이 일어난 경우, 이것을 자동적으로 해소하는 방법으로써 안전밸브나 긴급차단장치를 설치하는 등의 조치가 있을 수 있다.

이상과 같은 조치를 완벽하게 행하였다면, 안전을 확보할 수 있게 될 것이다. 그러나, 가장 바람직한 것은 이와 같은 조치를 요하지 않는 플랜트나 화학설비 자체를 안전화하는 것이다. 이것이 『본질안전화』(intrinsic safety)이며, 이것이야말로 지금부터 설비개선에서 지향해야 할 방향이라 할 수 있으며, 工程 등도 『본질안전화』의 대상이라 할 수 있다.

나. 안전교육의 추진

사람에 대한 대책은 무엇보다도 교육이 중요하다. 교육은 단순히 어떤 개개의 사물을 가르치는 것만이 목적이 아니며, 가르친 것을 일상의 작업과정에서 실천시키는 것을 목적으로 한다. 그러므로 교육사항은 구체적인 내용을 선택하지 않으면 안된다.

안전은 작업중에 渾然一體의 형태로 이루어져야 하는 것이다. 즉, 「작업은 어떻게 해야 하는가」를 가르치는 과정에서 안전상의 포인트를 강조하는 것이 본래의 방식인 것이다.

이와 같은 교육을 완성하기 위해서는 우선 개개의 작업(비정상작업 포함)에 대한 작업표준을 작성하는 것이 중요하며, 작성된 작업표준에 대해서는 기술의 진보, 재해나 문제점의 예를 참고하여, 적절한 수정을 가하는 것이 바람직하다.

앞서 기술한 바와 같이 개개의 사물만을 가르치는 것은 교육의 전부가 아니라 오히려 그 교육의 제1보에 지나지 않는다.

가르친 후 확인하고, 필요하면 지도를 실시한다. 소위 follow up이야말로 교육의 본질이라 할 수 있다.

9. 맺는말

화학공장의 설계. 계획단계에서 행해지는 안전성 평가는 Human-error나 장치의 결함에서 기인하는 폭발이나 화재 등의 재해를 미연에 방지하거나, 재해

발생시 그 규모를 최소화하기 위하여 새로운 공장이나 원재료의 도입시에 안전의 측면에서 정성적 또는 정량적인 평가를 통하여 신제품의 제조과정이나 사용단계에서 위험이나 유해성을 배제하려는 것이다.

안전성 평가를 위해서는 해당 공장에 관계하는 제반 정보의 수집, 다시말해 최근의 기술이나 재해사례에 대한 정보를 이용하여 해당 system에서의 사고발생에 관계하는 위험을 적절하게 파악하고 이들 위험을 정량화하여 위험이나 유해성을 수용할 수 있는 정도의 것인지의 여부와 수용할 수 없는 경우에 어떻게 대처할 것인가를 결정하지 않으면 안된다.

이를 위해서는 on line화된 data-bank를 이용하여 정보수집을 하고, HAZOP, FTA 등의 보다 과학적인 정량화기법을 적극적으로 활용하여 위험을 해명함으로써 궁극적으로 『본질안전화』에 접근하는 사전평가가 이루어질 수 있는 것이며, 이것은 재해발생방지에 크게 이바지할 것으로 여겨진다.

〈參考文獻〉

1. “化學工場 大型事故의 問題點과 對策”(1988. 6. 17) 중
“化學工場 設計時的 安全對策”(尹振萬)
2. “化學設備의 安全審査를 爲한 技術上의 指針”(勞動部 告示 第85-82號：85. 9. 16)
3. “化學プラントに對するセーフティ アセスメント”(安全工學) 野原石松
4. “化學工場의 安全事故 實態와 그 對策”(陳成益)
5. 화재. 폭발재해 사례집 - 한국산업안전공단(1991. 11)
6. FTA 安全工學 (井上威恭：1979. 2)
7. 日本 安全工學協會：化學工場における 危險性の 評價：難波桂芳. 1990
8. hazard Identification and Quantification (Chemical Engineering Progress 87. 4)