위험평가

김 동 욱
〈본협회 대구지부 점검 과장〉

본고는 Hydrocarbon Processing(1986년 12월호)에 C.H.Vervalin(Hydrocarbon Processing Staff)가 기고한 Special Report를 번역한 것입니다.〈역자註〉

최근 탄화수소 제조공장에서 발생한 대형 사고는 기존의 위험평가방식을 재조정할 필요성을 제기하고 있다. 기존의 위험평가방식과는 달리 컴퓨터는 재해방지에 대한 정보의 수집과 사용을 단시간에 가능하게 하였다. 그러나, 현재 탄화수소 제조공장에 있어 위험평가의 전산화는 항공우주 산업이나 핵산업에 있어서 보다 훨씬 뒤지고 있다.

컴퓨터 입력자료(data base)와 expert system의 복잡성 때문에 어떤 탄화수소 제조공장들은 전산화를 꺼려하고 있지만, Arabian American Oil Co. (Aramco) 는 확률적 위험분석작업에 컴퓨터 자료를 이용하고 있으며 Westinghouse사는 핵산업 분야에서 얻은 위험분석경험을 탄화수소 제조공장 고객회사를 위한 컴퓨터 프로그램 제작에 응용하고 있으며, 또 Exxon사는 위험평가 정보 시스템의 기본 자료로 방대한 data bank를 가지고 있다. 그러나, 비록 컴퓨터에 의한 위험평가방식에서와 같은 고도의 정확성은 없지만 기존의 위험평가방식 역시 매우 유용한 것이므로 기본적인 위험평가방법의 주요 특성을 살펴보기로 한다.

위험평가의 방법(Evaluation Alternatives)

위험은 여러 방법으로 평가되어 왔는데 원인분석법(Fault Tree Analysis), 사고분석법(Event Tree Analysis), 결과분석법(Consequence Analysis)을 이용하여 분석할 수 있다.

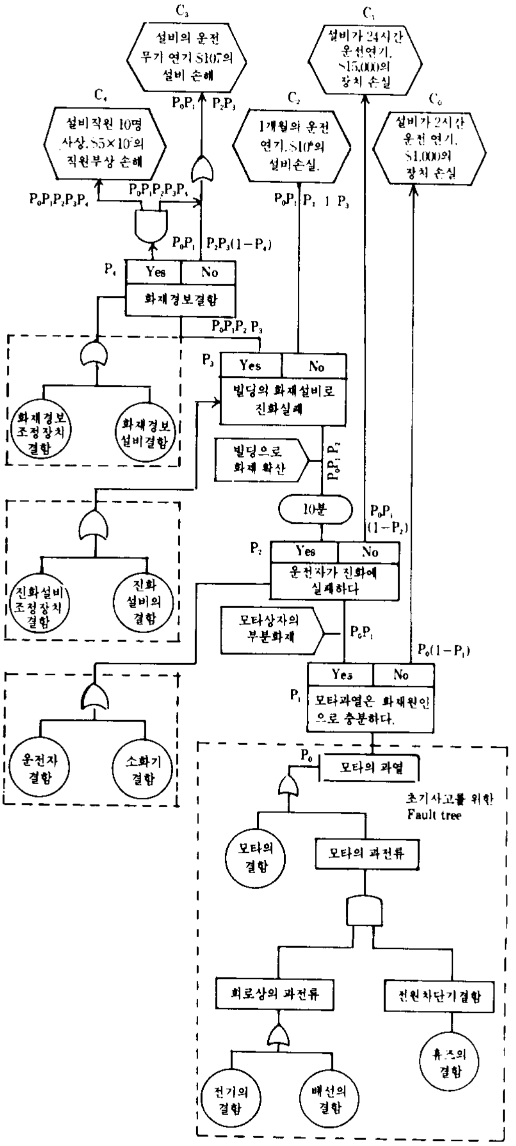
결과분석법은 위험이 설비, 인력, 주위환경, 공공사회에 미치는 영향을 평가하는 것으로 그 주요 데이타는 위험물의 확산, 폭발충격, 인명 및 환경손실, 재정손실 등이다. 이 분석의 결과는 설비의 휴지기간 및 이와 관련된 경비, 장치의 손실, 관리비, 인명피해 등으로 나타낼 수 있다.

원인분석법의 기본 자료는 설비의 결함을 초래하는 인적, 환경적 요인과 기계장치 사이의 인과관계에 대한 논리 구조(Fault Tree)이다(그림1). 각 사고(Event)간의 논리 관계에 대한 설명은 AND, OR와 특수OR Logic gate 등을 사용하여 할 수 있으며 이러한 원인구조(Fault Tree)의 맨 위에는 예기치 못한 Event나 Hazard가 차지하며, 그 아래에는 설비의 결함이나 사람의 과오, 시험 · 점검 및 관리상의 문제점들이 있다. 컴퓨터 프로그램은 이러한 하부구조의 결함이 발생할 수 있는 확률을 밝혀내는 것이다. 이러한 원인분석법은 사고 발생의 원인과 확률을 파악하기 위하여 각각의 위험을 분석할 필요가 있을 때 사용한다.

사고분석법(Event Tree Analysis)

원인분석법(F.T.A)과는 대조적으로 사고분석법(E.T.A)은 각 시스템간의 복잡한 상호관계를 내포하고 있는 연쇄사고를 분석하기 위하여 의사결정과정표(Decision-Tree-Like diagram)에서 전진 논리방식을 이용한다. 이 분석방법은 단순하고 쉬운 것처럼 보이지만 다중시스템의 결함, 보조시스템의 결함과 운전자의 과오 등에 의한 사고를 분석할 수 있는 매우 강력한 방법이다. 이 분석은 먼저 왼쪽 상단에 사고의 최초 원인을 기재하고 그 다음으로 계속적인 설비나 장치상의 결함을 가지 모양으로 분기시켜 나간다. 이렇게 하여 최초 원인으로부터 파생되는 사고의 발생이나 결함 및 과오의 발생을 분석하여 나간다. 이러한 사고분석법(E.T.A)은 원인분석법(F.T.A)과 같이 실질적인 시스템의 "Living" 컴퓨터 논리모형이다. 이것은 디자인이나 운전의 변화에 대한 위험의 감도에 따라 쉽게 변한다. 이러한 사고분석의 자료는 원인분석의 자료나 기타 자료를 이용하여 위험 발생의 빈도를 측정한다.

시스템의 형태에 기인한 우발적인 사고와 결과분석, 원인분석, 사고분석 및 이들 결과의 응용으로 시스템을 나타내는 "Living" 논리모형을 만들어 낼 수 있다. 이러한 평가는 위험관리를 위한 의사결정의 수단이 되는 것이다. 안전과 재정적 손실의 관점에서 위험의 발생 확률을 평가함으로써, 최대의 위험요인을 파악, 위험을 감소시킬 수 있는 방법을 개발, 권장할 수 있는 것이다. 위험평가의 결과에 의한 이러한 권장사항에는 plant 및 시스템의 구조변경 또는 운전과정의 개선 등이 포함되어 있으며 이렇게 하여 위험관리의 목적은 안전성과 경제성이 최대의 효과를 제고할 수 있는 점에서 합리적인 의사결정을 할 수 있도록 하기 위한 것이다.



〈그림1〉 모터과열 경우의 Fault tree

원인 분석법(Fault Trees Analysis)

예비손해분석(Preliminary Hazards Analysis: P.H.A)은 탄화수소 제조공장의 결함 요인을 평가하는 주요 수단이다. 예를 들면 〈그림1〉은 모터 과열의 원인/결과 즉 인과관계를 나타내고 있는데, 아마도 이 사고는 예비위험분석에 의해 평가되었으며 그리고나서 원인분석에 의해 평가되고 있는 것으로 보인다. 여기에서 한가지 주목해야 할 것은 탄화수소 제조공장에는 많은 위험요인이 있으며 따라서 많은 원인분석이 필요하다는 점이다. 〈그림1〉의 원인분석은 중요위험분석(Event Tree)의 결과이다. 만일 과열된 모터로 인하여 화재가 발생하지 않는다면(확률: $P_0(1-P_1)$) 그 결과는 C_0가 된다. 만약, 화재가 발생하여 운전자가 화재를 진압하

〈표1〉 위험 연구 방법론

방 법	특 징	장 점	단 점
· 예비위험 분석	· 시스템위험의 정의 · FMEA와 Fault tree 분석을 위한 요소 확인 : FMEA와 중요분석의 중복	· 필수의 첫단계	· 없음
· 실패모형과 결과의 분석(FMEA)	· hardware 위주의 각 부분의 모든 실패모형을 검사	· 이해하기 쉽다 · 잘 인정되었다 · 연구방법의 표준화 · 비토론적 · 비수학적	· 위험하지 않은 실패의 조사 · 장시간 소요 · 종종 실패의 결합이 고려되지 않음
· 중요분석	· 시스템 향상을 위한 부분의 확인과 구분	· 잘 표준화된 기술 · 적용 및 이해하기 쉽다 · 비수학적	· FMEA에 따른다 · 종종 인적요소, 실패의 보통원인, 시스템의 상호작용을 고려하지 않음
· Fault tree 분석	· "top event"로 출발하고 이의 원인이 되는 실패의 결합을 발견	· 잘 인정된 기술 · 실패와 관련사항 발견하기 좋음 · 결점위주로 시스템 실패할 수 있는 방법 찾음	· 큰 Fault tree는 이해하기 어렵고, 시스템 계통도의 공통점을 제시할 수 없고, 수학적 기술이 아니다 · 복잡한 논리가 포함되어 있음
· Event tree 분석	· 초기사고로 출발하고 사고결과 대안을 조사	· (전체) 사고결과(손해)와 실패에 대한 대안을 확인할 수 있음	· 유사한 결과의 경우 빠뜨린다 · 상세한 분석에는 적당하지 않다
· 원인-결과 분석	· 중요사고에서 시작하고 결과 tree를 사용하는 방향으로 추진한다 · Fault tree 사용을 않음	· 대단히 유연성이 있음 · 전체 포함 · 잘(서류로) 입증됨 · 결과에 대한 경로를 분명히 나타냄	· 원인-결과 도표가 너무 크고 대단히 빨리된다 · Fault tree의 불리한 점이 많다
· 위험과 영향력 연구(HAZOP)	· 중요설비변수에서 변화의 원인과 영향이 포함된 광범위한 FMEA	· 대형 화학설비에 적당	· 기술이 잘 표준화되지 않음

였을 경우에는(확률: $P_0P_1(1-P_2)$) 그 결과인 C_1은 C_0보다 크게 된다. 여기에서 운전자가 화재를 진압할 수 있는 확률은 〈그림1〉의 왼쪽 하부구조의 분석에 의해 결정되며 이러한 작업은 매우 중요하다.

〈표1〉을 보면 위험평가의 마지막 단계인 "위험 및 조업 가능성 분석"의 경우 단점에 대한 항목에는 충분한 설명이 되어있지 않는데 이 분석은 조업자, 설계자, 공정 기술자 등이 모두 모여 충분한 협의를 하여야 하는 것이기 때문이다. 분석시에는 보통 인과관계 분석기법이 이용된다. 여기에서 중요한 것은 조업가능성, 즉 조업기간과 조업중단기간 동안에 발생하는 화학공장의 일정하지 않은 사고이다.

Exxon사의 위험-손실 시스템

얼마전 Exxon사는 투자 수준을 결정하기 위한 R&D 위험분석연구를 시작하였다.

첫 단계로, Exxon사의 위험 손실 정보 시스템(Hazard Loss Information System)의 자료를 분석했다. 이 data bank는 사고당 피해액 \$1,000 이상의 화재 및 폭발에 관한 자료이며, 현재는 \$2,500 을 기준액으로 하고 있다. 이 정보 시스템은 35년 동안의 자료를 가진 것으로 탄화수소 제조공정에 있어 특히 유용하다. 또 그 데이타는 전산 부호화(code화) 되었고, 검색할 수 있도록 정보를 선별해 놓았다.

Exxon사는 이 data bank로부터 17가지의 장치 유형과 19가지의 공정 유형을 도출할 수 있었다(표2).

두번째 단계로, 이 위험 손실 정보 시스템으로부터 검색된 정유공장 및 화학공장의 손실 통계를 분석하는 것으로, 〈그림2〉의 곡선은 〈표2〉에 있는 장치와 공정 분석을 위해 작성된 것이다. 주곡선의 위와 아래에 있는 곡선은 90%의 신뢰 한계를 나타낸 것이다. X축은 재산손실액을, Y축은 연간 사고 발생 확률을 나타낸다.

〈표2〉 분석된 장치요소와 설비공정

장치요소	설비공정
· 탑	· 공기 배관 증류 설비
· 냉각 열 교환기	· 진공 배관 증류 설비
· 가열 열교환기 > 600°F	· Cyclic Powerformers
· 로 / 히터	· Semi－regen Powerformers
· 냉각탑	· 수소화분해 공정
· 드럼(현장)	· 수소처리 정제공정
· Hot cone roof tanks	· 수소화 탈황 공정
· Low flash cone roof tanks	· F.C.C 분해 공정
· High flash cone roof tanks	· 액체 촉매 분해 분류공정
· Floating roof tanks	· 코크스화 지연 공정
· 분리기(API)	· 코크스 유동화 공정
· 보일러	· 열분해기 / Visbreakers
· Hot pumps > 600°F	· 알킬화 반응공정
· Low flash pumps	· 황화 공정
· High flash pumps	· 증기 분해공정
· 반응기	· 에칠렌 정제공정
· 왕복동식 압축기	· 암모니아 제조공정
	· 부틸 / 크로로부틸 제조공정
	· 포리에칠렌 제조공정

이들 곡선은 2가지 방법으로 사용될 수 있는데, 첫째로 이들 곡선은 과거의 사고 내력을 나타내 주고 있어 앞으로의 사고 발생 확률을 추정할 수 있도록 한다. 예를들면, 이런 장치에서 $1,000,000이상의 손실사고가 발생할 수 있는 확률은 10,000 년에 4번 정도이며 $1,000이상의 사고가 발생할 확률은 100년에 1번 정도이다.

이들 곡선은 정량 위험평가의 사용 가능성을 평가할 수 있는 방법을 제시해 주며 주로 자료를 스크린 상에 나타나게 한다. 이들 곡선은 의사 결정과정에서의 한 요인에 불과하므로 대외관계나 홍보, 법규, 인명위험 등과 같은 요인도 고려하여야 한다고 Exxon사는 덧 붙인다.

결국, 위험분석을 위한 방법을 개발하는 것으로, 첫단계는 재물손실과 기업휴지 손실위험을 평가하는 것이며 이러한 자료는 각 회원사에서 제공하여야 한다.

두번째로 손실곡선과 Y축이 만나는 점을 찾아 발생확률을 구한다. 이 발생확률에 총손실을 곱하면 연간 손실액을 구할 수 있는데, 이것은 노출위험의 손실총액을 나타낸다.

위험분석에 있어서 중요한 점은 위험을 제거하기 위한 투자에 소요되는 비용과 이러한 투자에 대한 잠재적인 이윤과의 비교로 이것은 반드시 고려하여야 한다.

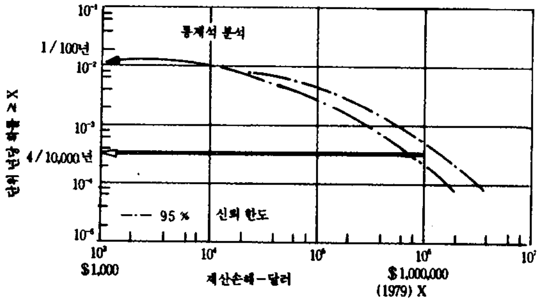


그림2. Exxon사의 위험 손실 정보 시스템에 따른 HPI 설비에서 1961～1975에 발생한 화재 / 폭발

기타 용도

지금까지 위험분석의 주용도는 안전투자평가 수단이었지만, Exxon사는 다른 방법을 개발하였다. 한가지 용도는 정부기관에 대해 plant가 적절하게 설계되었고, 조업이 안전하게 진행된다는 것을 납득시키는데 사용하였다.

손실통계의 분석은 또한 올바른 훈련방법과 작동방법의 수립에 도움을 주며 또한 이 정보는 구조를 개선할 수 있는 곳과 연구 개발이 필요한 분야를 파악할 수 있도록 한다.

Exxon사는 위험분석의 핵심은 통계분석이며 개발된 위험평가방법은 안전을 위한 투자 판단의 합리적인 자료를 제공해 줄 것이라고 결론을 내렸다.

확률위험분석법(Probabilistic Risk Analysis)

확률위험분석법은 과거의 통계자료를 기초로 한다. 예를 들면, 과거의 손실통계자료 등이며, 이러한 자료는 보통 확률위험분석할 수 있도록 분류, 정리되어 있지 않기 때문에 자료의 분류, 정리가 필요하다. Aramco사는 최근 공정설비에 대한 데이타를 정리할 수 있는 컴퓨터 시스템을 도입하였으며 확률위험분석에 사용할 수 있도록 인적인 실수나 결함에 대한 자료분류방법을 연구하고 있다.

확률위험분석은 관련 자료가 부족하면 발생의 확률 및 결과를 평가하기가 곤란하므로, 데이타를 광범위하게 수집하여 수학적 모형으로 분류 정리하는데 노력해야 한다.

다음호 계속