

연구보고서

화학연 93-2-21

화학설비에 대한 정량적 위험도 평가와 재해손실 예측에 관한 연구

1993. 12. 31



한국산업안전공단
KOREA INDUSTRIAL SAFETY CORPORATION
산업안전연구원
INDUSTRIAL SAFETY RESEARCH INSTITUTE

제 출 문

한국산업안전공단 이사장 귀하

본 보고서를 “산업안전연구 개발” 사업의 일환으로 수행한
“화학설비에 대한 정량적 위험도 평가와 재해손실 예측에 관
한 연구”의 최종 보고서로 제출합니다.

1993년 12월 31일

주관연구부서 : 산 업 안 전 연 구 원
화 학 연 구 실

책 임 자 : 화학연구실장 정 동 인

연 구 자 : 선임연구원 조 지 훈

머 리 말

화학공업의 발달로 각종 공정설비의 규모가 커지고 복잡하여 졌으며 시설이 낙후된 것도 많아져서 재해가 일어날 잠재 위험성이 상당히 증가하였다. 다른 업종에 비해 사고의 발생빈도는 낮은 편이지만 설비의 사소한 결함이나 작업자의 실수에도 대형사고가 일어날 위험성이 많으며, 사고가 발생하면 막대한 재산과 인명의 피해를 내며 환경 공해 등으로 사회적 파급효과가 크다.

세계적으로 화학공장에서 대형사고가 발생하면서 여러 나라에서 개별적으로 추진해오던 안정성 평가기법이 점차 전세계적으로 공통된 기법을 연구하는 방향으로 나아가고 있다. ILO는 '93 총회에서 중대산업사고 예방을 위한 협약을 정식으로 채택하였는데, 위험성 평가는 ILO의 핵심사항으로 국내에서도 이에 대한 대책이 이루어져야 하나 아직까지는 산업현장에서 위험성 분석·평가를 실시하지 않거나 체계적으로 실시하지 못하므로 이에 대한 대책이 시급한 실정이다.

따라서 본 연구원 화학연구실에서는 위험성 평가를 체계적으로 연구하고자 하였다. 체계적인 위험성 평가 연구의 일환으로 먼저 화학설비에 대한 사고 결과 영향을평가하는 방법과 모델의 종류, 그리고 사고 발생 빈도를 평가하는 방법과 모델 등에 대하여 조사하고, 이들의 결과로부터 위험도 평가에 대한 방법 등을 일관성있게 실시할 수 있도록 기술하였다.

정량적 위험도 평가 방법이 사업장에 보급되어 사내 교육시 기술자료로서도 사용되고 위험도 평가를 위한 참고자료로서 활용할 수 있게 되기를 바란다.

1993. 12.

산업안전연구원장

목 차

제 1 장 서 론	3
1. 연구목적	3
2. 연구기간	3
3. 연구범위 및 내용	4
제 2 장 개 요	5
1. 정 의	5
2. 위험도 평가 절차 및 범위	6
3. 사고목록의 관리	11
4. 적용방법	12
5. 평가계획의 관리	14
제 3 장 사고결과 예측 및 평가	23
1. 위험물질의 누출과 분산모델	23
2. 폭발과 화재	34
3. 사고결과에의 영향	42
제 4 장 사고 발생빈도 평가	48

1. 과거의 기록을 이용한 사고빈도 평가	48
2. 결함수 분석법	50
3. 사상수 분석법	61
제 5 장 위험도 평가	67
1. 위험도의 표시방법	67
2. 위험도 산출	72
3. 위험도의 불확정성, 민감도, 중요도	77
제 6 장 결 론	80
참고문헌	82
부 록	85

제 1 장 서 론

1. 연구목적

화학공장은 국가의 기간 산업으로서 산업발전의 중추적인 역할을 맡고 있는 반면 설비의 규모가 크고 복잡하며 위험물질의 사용량이 많아 장치나 설비의 사소한 결함이나 작업자의 실수에도 대형사고가 일어날 잠재성이 많으며, 사고가 발생하면 막대한 재산과 인명의 피해를 내게 되며 인근 주민에 대한 피해와 환경 공해 등으로 사회적 파급효과가 크다.

세계적으로 화학공장에서의 대형사고가 발생하면서 개별적으로 추진해오던 안정성 평가기법이 점차 전세계적으로 공통된 기법을 연구하는 방향으로 나아가고 있다. ILO는 '93 총회에서 중대산업사고 예방을 위한 협약을 정식으로 채택하였는데, 위험성 평가가 이 협약의 핵심을 이루고 있다. 또한 미국에서도 공정안전 관리(PSM)를 법률로 제정하여 실시하고 있다. 국내에서도 이러한 요구의 대응책으로 최근 위험성 평가에 대한 기법의 연구가 활발히 진행되고 있으나 체계적인 평가 방법론은 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 체계적인 위험성 평가 연구의 일환으로 먼저 화학설비에 대한 사고 결과 영향을 평가하는 방법과 모델의 종류, 그리고 사고 발생 빈도를 평가하는 방법과 모델 등에 대하여 조사하고, 이들의 결과로부터 위험도 평가에 대한 방법 등을 일관성있게 실시할 수 있도록 조사·기술하여 재해방지와 ILO의 국제협약의 도입에 따른 국내의 기반 조성에 기여하고자 한다.

2. 연구기간

1993년 1월 ~ 1993년 12월

3. 연구범위 및 내용

위험성 평가 중에서 정성적 위험성 평가 부분은 다루지 않았으며, 화학설비에 대한 정량적 위험도 평가에 관하여 평가 절차와 평가 계획의 관리에 대하여 기술하고 위험물질의 누출 형태별로 평가에 필요한 자료의 계산 방법과 누출로 인한 대기분산 모델을 다루었다. 그리고 사고 결과 영향을 산출하는 방법과 모델의 종류, 사고 발생 빈도를 산출하는 방법과 모델의 종류에 대하여 조사하였고, 이들의 결과로부터 위험도 표현방법, 수단 및 정량적 위험도 평가에 대한 방법 등을 기술함으로서 정량적 위험도 평가를 일관성있게 실시하는데에 활용할 수 있도록 하였다.

제 2 장 위험도 평가의 개요

1. 용어의 정의

위험도 평가에서 사용되는 용어들은 일반적으로 쓰이는 것과 달리 특수한 뜻을 나타내는 것이 많고 혼동되는 것도 많으며 쓰는 사람마다 조금씩 차이를 나타내고 있다. 부록에 위험도 평가에 쓰이는 용어를 정리하였다. 부록에 실린 정의는 보편적으로 통용되지 않는 것도 있고 일부는 일부는 서로 다른 의미로 쓰이는 것도 있겠지만 일관성에 중점을 두어 나타내고자 하였다.

가. 위험도(Risk)

- 단일 재해나 복합 재해에 대하여 예상되는 빈도(사건/년)와 사고 결과(영향/사건)의 조합
- 특정 기간 또는 특정 상황에서 발생하여 특정 결과를 일으키는 원하지 않는 사건의 가능성. 상황에 따라서 빈도(특정 사건/단위시간) 또는 확률(이전 사건에 뒤이은 특정 사건의 확률)로 나타낼 수 있다. 일반적으로 위험성, 위험성+가능성 등의 의미와 혼용되고 있다.

나. 위험성(Hazard)

- 인명피해, 물적성질 손상, 환경에의 손상 등이나 이들의 결합된 형태를 일으킬 수 있는 잠재력을 지닌 물리·화학적 상태
- 사람이나 재산 또는 환경에 해를 일으킬 수 있는 잠재성을 지닌 고유의 물리·화학적 특성

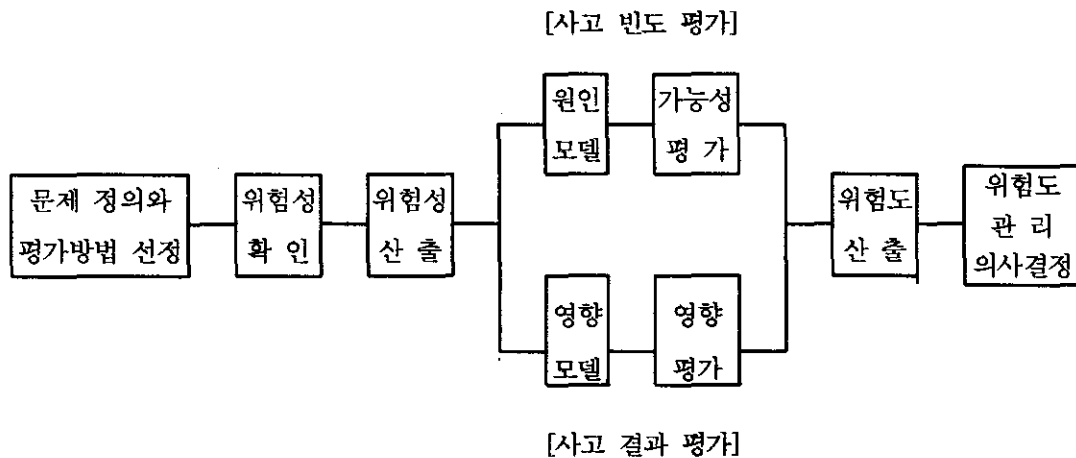
다. 위험도 평가(Risk Assessment)

- 원하지 않는 사건의 가능성 그리고 결과의 중요성에 관련하여 만들어진 가치 판단과 함께 원인으로 되는 해로움이나 손실에 대한 가능성의 정량적인 평가
- 위험도 달성 목표의 비교 또는 위험도 감소 전략의 상대순위를 통하여 위험도 분석의 결과가 판단을 내리는데 사용되도록 하는 프로세스.

2. 위험도 평가 절차 및 범위

가. 위험도 평가 절차

위험도 평가 절차는 평가대상, 목적, 평가자 등에 따라서 변할 수 있으나 전체적인 흐름은 아래 그림과 같이 나타낼 수 있다.



[그림 2-1] 대략적인 위험도 평가 순서도

[그림 2-1]에서 위험성 산출 이후부터 위험도 산정까지가 정량적 위험도 평가

에 해당되는 부분으로서 본 보고서에서 다루는 분야이다.

개략적인 위험도 평가 절차는 다음과 같다.

먼저 평가 대상이 정해지면 적용되는 법, 기준들과 위험도 달성목표, 경제적 기준 등을 고려하여 목표와 목적을 정한다. 위험도 평가 범위를 결정하고 위험도를 측정할 방법과 표현수단에 대한 형식을 결정한다. 목적과 수단을 기초로 하여 연구의 심도를 결정하고 특별히 다루어야 할 부분도 고려한다. 또한 위험도 분석을 하기 위한 자료의 수집과 편집이 필요하다. 이 자료는 PFD, P&ID, 공장 위치, 주위환경, 기후자료, 운전과 유지보수에 관한 사항, 재료의 물성값 등을 포함한다.

위험성 확인 단계에서는 공정에서 건강이나 안전, 환경 또는 자산에 해를 끼칠 우려가 있는지와 잠재적 위험성을 가진 물질, 공정조건과 상황 등과 어떤 사항이 나쁜 상황으로 진행될 수 있는지에 대하여 연구한다.

위험성 산출 단계에서는 알려진 위험성이 나타나는 방법과 그 원인이 무엇인지 알아내고 반대의 영향이 나타날 수 있는지와 이들 잠재 재해의 결과에 대하여 나타내어 문제 영역과 잠재재해 상황에 대한 목록을 작성하고 이러한 문제나 상황의 중요도를 판단하고 안전개선을 위한 제안 등을 나타내어야 한다.

위험성 확인과 산출 단계에서는 경험, 기술규정, 체크리스트, 상세한 공정지식, 장치실패경험, What-if 분석법, HAZOP, FMEA, PHA 등등을 이용하는 것이 유용하다.

사고결과 평가는 특정사건에 대한 손실이나 상해를 일으킬 수 있는 잠재력을 계산하는데에 사용한다. 하나의 사고는 여러개의 사고형태를 갖는다. 이러한 사고 결과들을 위험물의 누출과 분산모델, 폭발과 화재모델 등을 이용하여 분석한다. 그리고 사고결과의 영향에 대한 모델로 사람이나 건축물에 대한 사고결과를 계산할 수 있다. 숨거나 피하는 행동은 사고결과의 크기를 감소시킬 수 있으므로

로 사고결과 평가에 포함시킬 수 있다.

사고빈도평가 단계에서 과거의 사고자료나 FTA, ETA 등과 같은 모델로 부터 사고발생의 빈도나 확률을 산출한다.

위험도산출 단계에서는 일정 위험도를 나타내는 사고와 사고형태의 사고결과와 사고빈도 등을 결합한다. 개별적으로 위험도가 높은 사고를 평가하고 전체 위험도를 나타내기 위하여 더한다. 그리고 제안사항을 개발하고 추후에 연구가 필요한 영역을 나타낸다. 또한 평가된 위험도에 대하여 불확정성, 민감도, 평가에 영향을 준 사고의 중요도 등을 산출한다.

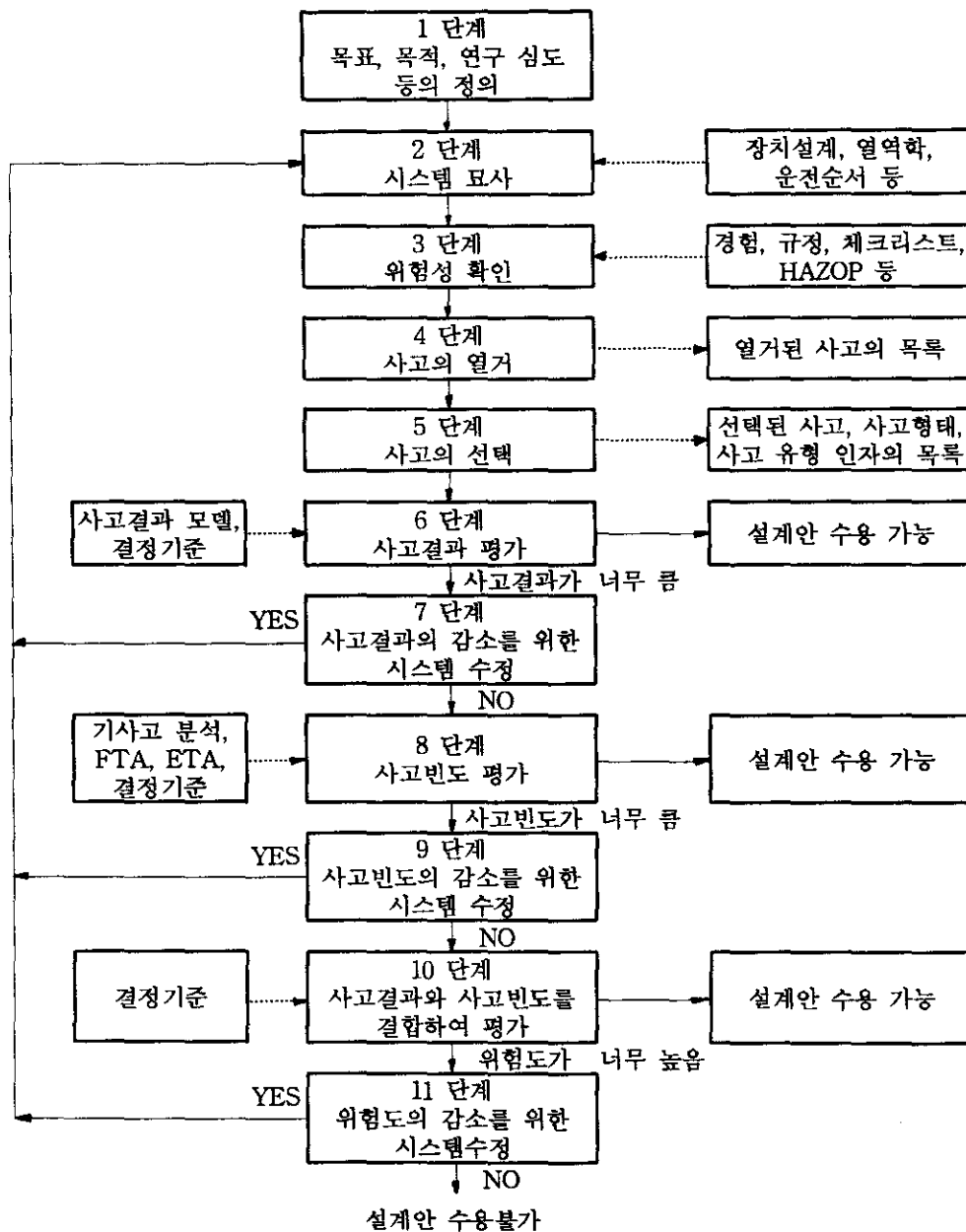
위험도산출에서 나온 결과는 위험도 관리에서 의사결정을 하는데 사용된다. 평가결과로 나온 위험도와 위험도 달성 목표를 비교하여 위험도 감소수단이 추가로 필요한지, 공장을 그대로 운전할 수 있는지 등을 결정한다.

위험도 평가 절차는 상황에 따라 선택적으로 응용될 수 있다. 미국화학공학회 산하단체인 CCPS(Center for Chemical Process Safety)에서 예로 나타낸 간략화된 위험도 평가 절차는 [그림 2-2]와 같다.

나. 평가 범위

시간과 경제상의 이유로 위험도 평가 절차와 함께 평가의 범위를 최적화해야 한다. 위험도 달성 목표를 고려하여 정성적 위험도 평가까지 실행할 수도 있지만 정량적 위험도 평가의 실시가 필요한 경우에도 실행하고자 하는 평가기법과 평가모델의 선택에 따라 작업량과 연구의 질이 달라진다. 또한 연구하고자 하는 사고 수의 증가에 따라 필요한 자료의 양이 많아지고 평가하기가 어려워진다.

평가기법은 사고결과평가, 사고빈도평가, 위험도산출의 순서에 따라 난이도가 증가한다. 사고결과평가는 비교적 폭넓게 연구되었고 위험물 누출에 대한 여러 가지 발생원에 대한 모델, 분산모델 등이 잘 묘사되어 있다. 사고빈도평가는 과



[그림 2-2] CCPS의 간략화된 평가 절차도

거의 자료가 적당하지 않고 상대적으로 빈약한 편이다. FTA, ETA 등이 많이 쓰이고 분석자의 경험과 판단에 크게 의존한다. 한편 위험도산출은 비교적 새로운 방법론으로서 앞으로 연구가 되어야 할 부분이다.

나. 평가 범위

시간과 경제상의 이유로 위험도 평가 절차와 함께 평가의 범위를 최적화해야 한다. 위험도 달성 목표를 고려하여 정성적 위험도 평가까지 실행할 수도 있지만 정량적 위험도 평가의 실시가 필요한 경우에도 실행하고자 하는 평가기법과 평가모델의 선택에 따라 작업량과 연구의 질이 달라진다. 또한 연구하고자 하는 사고 수의 증가에 따라 필요한 자료의 양이 많아지고 평가하기가 어려워진다.

평가기법은 사고결과평가, 사고빈도평가, 위험도산출의 순서에 따라 난이도가 증가한다. 사고결과평가는 비교적 폭넓게 연구되었고 위험물 누출에 대한 여러 가지 발생원에 대한 모델, 분산모델 등이 잘 묘사되어 있다. 사고빈도평가는 과거의 자료가 적당하지 않고 상대적으로 빈약한 편이다. FTA, ETA 등이 많이 쓰이고 분석자의 경험과 판단에 크게 의존한다. 한편 위험도산출은 비교적 새로운 방법론으로서 앞으로 연구가 되어야 할 부분이다.

평가범위를 분석성분과 난이도로 구별하여 정리하면 <표 2-1>과 같다.

<표 2-1> 위험도 평가범위

분석성분 \ 난이도	쉬움	중간	어려움
평가기법	사고결과평가	사고빈도평가	위험도산출(평가)
연구의 복잡성	단순하고 기초적	중간	복잡하고 정교
사고의 수	최소한의 수	유형별	많음

3. 사고목록의 관리

가. 사고의 열거

평가하고자 하는 것에 관련된 모든 사고를 확인하여 목록화 한다. 모든 사고를 전부 목록화하기는 실제로 불가능하지만 중요한 사고가 빠지면 평가결과가 왜곡될 수도 있으므로 여러가지 기법(HAZOP, FMEA, What-If, Check List, PHA, ...)을 이용하여 풍부하게 사고를 찾는다.

나. 연구하려는 사고의 선택

사고의 열거로 만들어진 초기 목록에서 비용, 계획 등을 고려하여 관련이 적거나 중복된 것을 정리하되 중요한 사고는 빠뜨림이 없도록 하여 적절한 사고목록을 만들어야 한다.

먼저 초기목록에서 관련이 매우 작은 것들을 뺀 후 중복된 것과 매우 비슷한 사고를 빼고 정리한다. 그 다음에 비슷한 사고끼리 묶어 소집단화 한 후 각각의 소집단을 단독의 동일한 사고로써 재배치한다. 이때 비슷한 취급물질, 성분, 유출 속도, 유출장소 등이 고려되어야 한다.

위의 과정으로 작성된 것을 사고의 확장 목록으로 하고 이는 연구할 사고집단의 기본세트 역할을 한다. 사고의 확장목록을 사고시 영향을 미치는 중대사고, 공장주변의 지역에도 영향을 미치는 대형사고(중대산업사고)로 나눌 수 있다. 이들 사고중 한가지 이상을 포함하는 것을 사고의 주세트로 한다. 주세트로 위험도 평가를 하면 확장 목록에 비해 분석정도는 떨어지나 그와 근사한 결과를 얻을 수 있다. 한편 평가결과를 해석할 때 위험도의 상한 경계값을 구하기 위하여 수는 적지만 확실하거나 가능성이 있는 최악의 사고들만을 포함한 사고의 경계군을

취급할 수 있다.

하나의 사고는 몇가지의 사고형태를 나타내고 각각의 사고형태는 사고유형인자에 따라 다시 몇가지씩의 형태로 나누어진다. 결정된 사고목록들은 평가를 위해서 사고형태와 사고유형인자를 결정해야 한다. 이들의 수가 많아지면 계산은 기하급수적으로 증가하게 되므로 평가의 질을 생각하여 적절히 제어되어야 한다.

다. 선택된 사고, 사고형태, 사고유형인자의 추적

위험도 평가에는 유효 수의 계산이 필요하다. 계산과정동안 선택된 사고, 사고형태, 사고유형인자가 누락되는 일이 없도록 추적 관리해야 한다. 사고의 확장목록에서 연구할 사고집단의 개발과 특성화는 추적해야 할 사고의 기본 세트를 형성한다. 이러한 일을 담당할 소프트웨어 프로그램이 여러가지 개발되어 있다.

4. 적용방법

가. 적용분야 선정방법

평가를 가장 효율적으로 적용할 수 있는 기구단계를 결정하는 것이 좋다. 통상 기구의 위(공장)에서 아래(공정장치)로 내려갈수록 분석의 수가 기하급수적으로 증가하게 되므로 평가해야 할 설비를 선택하여야 한다.

먼저 모든 설비를 균일하게 고려하여 구획절단기준을 세운 후에 평가대상의 우선도를 결정한다. 위험도가 높은 곳에 우선적으로 집중하여 타당한 수단을 찾아 보다 심각하지 않은 사고로 갈 수 있도록 한다. 위험도 평가는 어느 단계에도 적용할 수 있지만 기구의 보다 낮은 단계의 특징요소(저장탱크의 파열로 인한 위험성 따위)에 대한 기본적인 초점을 두는 것이 좋다.

다음은 정량적 위험도 평가가 적용될 수 있는지 그 정도는 어디까지 해야하는

지에 대한 결정에 도움이 되는 방법들이다.

(1) 공정위험성 색인

Dow Index : 화재, 폭발 위험성

AICHe/CCPS : 독성 위험성

ICI's Mond Division : 다루는 물질, 운전조건, 운전형태 등의 위험성

(2) 물품목록 검토

공정, 저장, 운반탱크 등에 있는 물질로 포함한 물질의 중요 성질(독성, 가연성, ...), 통상적인 취급량과 최고 취급량, 운전이나 저장 조건 등을 고려하여 항목 별로 나누는 것이 좋다.

독성 위험성이 있는 곳은 간단한 분산모델링을, 화재·폭발 위험성이 있는 곳은 간단한 사고결과연구를 하여 영향지역을 추정하여 잠재취약점을 계산한다.

(3) 화학적 등급

화학물질의 물성치, 환경, 독성, 반응성 등의 특성에 따라 위험등급을 매긴다.

ㄱ. NFPA : 가연성, 반응성, 보건위험성 그외 특수위험성(수용성 등)으로 다이아몬드 모양의 구조로 등급을 구성하였다.

ㄴ. 미국EPA : 화학약품의 물리적, 보건위험성에 미치는 영향을 수치로 표시하였다.

ㄷ. Rosenblum 등(1983) : 여러가지 위험성에 대한 것을 수치로 할당하였다.

(4) 설비선정

화학물질에 대한 위험성을 나타낸 위의 방법들에 부가하여 설비에 초점을 맞추어 위험성을 고려한 것도 필요하다. 화재·폭발과 독성 등을 나타내기 위하여 수학적 모델이 사용되고 있다.

위의 방법들외에 다른 여러가지 방법들이 응용될 수 있으나, 어떤 방법이든 일

관되게 적용하고 다음의 평가를 위한 보조자료와 수정을 위해서 적용한 결과를 문서화하는 것이 중요하다.

나. 기존 설비에의 적용

어떤 설비에, 또는 어떤 공정에 위험도 평가를 할 것인가, 또한 정성적으로 할 것인지 정량적으로 할 것인지 등에 관한 계획을 세우는 것이 필수적이다.

먼저 설비별로 위험성 순위를 매기고, 그들 설비내에 있는 모든 공정단위에 등급을 매긴다. 이들 우선순위목록은 서로 비교되어질 수 있고, 전체 목록은 위험도 평가 계획을 수립하는데에 사용될 수 있도록 한다. 보통 기구의 낮은 곳(예, 장치)에서 계획이 실행될 수 있도록 하는 것이 경제성이 있다.

다. 신설 설비에의 적용

새로운 설비에서도 비슷하게 적용한다. 기존설비와의 주요 차이점은 자료의 타당성에 있다. 신설 설비는 유효 자료가 부족하므로 위험도 평가의 질도 낮을 수 밖에 없으나 이것은 설비 계획이 진행될수록 자료의 한계는 점진적으로 없어진다. 그러나 변경에 따른 조치사항, 고려사항 등을 문서화하지 않는다면 설계정보가 부정확하게 된다.

5. 평가계획의 관리

가. 연구목표

(1) 위험도 범위의 결정

초기의 평가에서 존재하는 위험도의 범위를 결정하고 우선순위를 결정함으로써 다음의 평가시에 시간·경제적으로 효율적인 위험도 평가 방법을 선택할 수 있다.

(2) 위험도 감소수단의 한계추정

위험도에 영향을 많이 주는 중요 공헌자가 확인되고 우선순위가 결정된다. 위험도 감소수단의 한계가 중요 공헌자에 차례로 적용되며, 상대적인 이익도 추정된다. 위험도 달성목표가 정해진다면, 위험도 감소수단이 달성목표에 도달할 수 있을지의 여부와 경제적으로 타당하다면 도달목표를 초과할 수 있을지 등이 고려된다.

(3) 안전투자의 우선순위 결정

자원이 제한되어 있으므로 위험도가 높은 곳은 우선적으로 취급하고, 안전투자가 최대의 위험도가 있는 부분에 이루어지도록 한다.

(4) 재정적 위험성의 추정

사람들에게 상해를 입힐 잠재위험성은 없다 하더라도 재정적 손실이나 사업상의 방해요인이 될 수 있는 잠재적 위험성을 추정한다. 목표에 따라서 다른 부류의 사고가 강조되어질 수도 있다.

(5) 근로자 위험성 추정

많은 회사들이 근로자 위험성에 대한 기준을 가지고 있다. 위험도 평가는 이러한 기준에서 받아들일 수 있는지를 검증하는데 사용된다. 플랜트 근로자에 대한 중요 위험 공여자는 사고와 중요사고로 제한된다. 드물게, 큰 재해사고가 전체 근로자 위험서에 영향을 미친다.

(6) 공공 위험성의 추정

외부에 대한 공공 위험성을 중대재해이거나 대형사고이다. 법률기관의 공공 위험성 기준이나 감수가능 위험성에 대하여 받아들일 수 있는지의 여부를 결정하는데 사용할 수 있다. 그런 기준이 없다면 위험성 감소수단은 위에서 나타낸 것처

럼 진행된다.

(7) 비상계획에의 활용

비상대응계획을 세울 때의 고려사항으로 사고영향지역을 예측하는데 사용할 수 있다. 비상계획이 사업장 내의 사람들을 위한 것이라면 모든 종류의 사고들을 고려하여야 하며 외부의 사람까지 고려한 경우에는 대형사고를 중요시하여야 한다.

나. 연구목적

연구목적은 정확한 용어로 계획의 목표로 정의한 것으로서 계획이 잘 관리되어 만족한 결과를 이끌어낼 수 있어야 한다.

다음은 연구목적에 들어갈 수 있는 것이다.

- ㄱ. 어떤 특정화학물질을 함유하는 운전에서 오는 사회적 위험도의 계산
- ㄴ. 기존의 공정단위를 수정함으로써 나타날 근로자에 대한 위험도의 계산
- ㄷ. 기존의 공정단위에서 달성목표인 위험도 단계를 달성하기 위한 비용적으로 효과적인 위험도 감소 방법의 확인
- ㄹ. 주변의 지역사회에 미치는 충격(영향)을 고려한 경쟁적인 공정전략의 평가와 서열화
- ㅁ. 하나의 장치에서 나타나는 위험도를 감소하기 위한 여러가지 방법중에서 각각의 상대적 효율성을 계산

다. 연구심도

연구목표와 목적의 달성여부, 적합한 자료(자원)의 유무와 비용, 평가일정 등을 고려하여 연구의 심도를 결정한다. 평가기법, 복잡성, 사고의 수에 따라 계산해야 될 양이 기하급수적으로 증가하기 때문에 연구의 심도를 결정하기 전에 이 계산량을 결정하여야 한다. 위험도 분석가나 위험도 평가방법 개발전문가의 도움을

얻는 것이 좋다.

연구의 심도가 결정되면 비용과 일정이 추산되어야 한다. 이때 비용을 감소시키거나 일정을 앞당길 수 있는 여지가 있는지를 알기 위하여 연구목표, 목적과 인증된 작업영역을 다시 검토하는 것이 좋다.

정성적 위험도 평가나 사고결과계산은 단일 장치에 의해 나타나는 위험성의 양이나 설비에서의 위험도를 경계짓기 위하여 첫번째로 수행한다. 계속하여 설비구조의 낮은 단계에서 연구가 필요하게 되면 연구의 심도는 증가한다.

사고빈도계산은 그 다음에 실행하는 것으로서 공정단위, 시스템 그리고 일련의 장치에 대하여 행하는 것이 좋다.

마지막으로 위험도 계산을 공정시스템과 장치에 대하여 실시한다. 이 기법은 계산의 복잡성과 각각의 장치와 관련된 파이핑을 위하여 필요한 사고유형인자의 수 때문에 연구영역 결정이나 중간단계의 연구로서는 부적합하다. 예를 들어 간단한 경우로서 5가지의 사고가 10가지의 사고형태의 결과로서 일어난다고 하고 바람의 방향이 8가지, 바람속도가 3가지, 날씨의 안정성이 3가지이고 각각의 증기운에 따라 2가지의 발화형태가 있다면 $144(8 \times 3 \times 3 \times 2)$ 가지의 사고유형인자가 된다. 또, 위험도 등고선 플롯트를 위한 계산격자(grid)가 100이라면, 이것은 상대적으로 조잡한 결과가 나옴에도 $144,000(10 \times 144 \times 100)$ 개의 계산이 필요하게 된다. 이것은 단지 기본적인 경우의 위험도 계산으로 실제로는 다른 인자에 의하여 기하급수적으로 증가하게 된다. 따라서 평가의 질에 영향이 적은 것은 빼는 것이 좋으며 실질적으로 영향을 많이 주는 것들을 고려하여 연구의 심도를 결정한다. <표 2-2>에 계산의 양에 영향을 미치는 매개변수를 나타내었다.

<표 2-2> 계산의 양에 영향을 주는 매개변수

매 개 변 수	통 상 개 수
사고형태의 수	5 ~ 30
날씨 안정성	2 ~ 6
바람의 방향	8 ~ 16
바람속도	1 ~ 3
낮과 밤의 변화	1 ~ 2
종말지점의 수(치명성, 심각한 상해 등)	1 ~ 5
대기온도(계절변화)	1 ~ 4
발화형태	1 ~ 3
인구형태	1 ~ 3
개인 위험도 등고선의 격자점	100 ~ 1,000
사회 위험도 등고선의 격자면	1 ~ 100
기본형태에 의한 반복횟수	2 ~ 5
위험도 감소 조건의 수	3 ~ 5

라. 평가계획의 수립

(1) 필요한 자원의 산정

평가에 필요한 인원, 시간, 정보, 작업기구, 자금 등을 산출한다. 공정시스템에 적용되는 인력소요량은 요원의 능력, 작업기구의 선택, 훈련기회의 여부 등을 고려하여 산정하고 전체 소요기간에는 계획관리활동을 5~10%정도 가산하여야 한다.

(2) 일정표 작성

소요시간은 투입된 인원의 전문성에 따라 달라진다. 각각의 작업들이 병행하여 행해지는 것인지 중복성이 있는지를 고려하여야 한다. 사고결과분석과 사고빈도 분석은 병행으로 행해질 수 있지만 위험도 분석은 사고결과분석과 사고빈도분석

이 완성되어야 시작할 수 있다. 일의 우선순위 절차를 통하여 병행하여 일을 수행할 수 있는 방법을 찾아야 하며 계획 일정표는 다른 전문가나 집단과 협의하는 것이 좋다.

(3) 평가결과의 보장성

위험도 평가의 상대적으로 새로운 기술이기 때문에 일부 기술영역에서는 지원 직원의 전문성 확보가 어렵게 된다. 외부 전문가에게 위탁할 수도 있다.

계획 팀은 방법선택, 사용된 모델, 가정 등을 논의하고 연구의 초안 보고서의 점검을 첫번째로 수행한다. 플랜트 요원은 플랜트 실행, 존재하는 기계설비와 공정배치, 설비운전자료, 부지특성 등의 잘못된 표현을 찾아낸다. 회사의 요원은 이전의 위험도 평가 형식과의 일치성, 회사내 실행에의 적용성, 문서화의 적당성 등을 점검한다. 그리고 위험도 평가에 참여하지 않았던 전문가에게 점검을 받아야 한다. 전문가의 점검은 평가방법의 적절성, 사용된 데이터의 질과 종합성, 가정과 판단의 타당성과 합리성 등과 다음의 연구를 위한 권고에 집중하여야 한다. 관리자는 보고서가 작업의 동의된 범위와 일치하여 본래 요구된 조건에 일치하는가와 모든 결론과 권고사항이 누구든지 충분히 이해될 수 있도록 하여야 한다. 모든 연구결과는 최종 보고서를 내기전에 분석되어야만 한다. 동료 점검자나 전문가의 보고는 보고서의 신뢰성을 증가하기 위한 수정을 함이 없이 위험도 평가 기록에 더해져야 한다. 평가기법이 엄격하고 잘 정리되어 있어도 자체에 불확정성과 애러가 존재할 가능성이 많이 있으므로 정규 품질보증 프로그램을 이용하는 것이 바람직하다. 이러한 프로그램은 원자력 공업에서 잘 발달되어 있다.

(4) 훈련의 필요성

위험도 평가는 숙련되고 경험있는 요원을 요한다. 간단한 연구는 약간의 위험도 분석훈련을 받은 공정 기술자의 기술로도 할 수 있으나 조금만 복잡해져도 공

정기술자와 위험도 분석가가 모두 필요하게 된다.

위험도 평가 결과는 판단에 크게 의존하고 그 판단은 그것을 적용한 경험으로부터만 올 수 있다. 따라서 안내서적이나 훈련 프로그램 등을 통하여 평가요원의 훈련이 필요하다.

(5) 비용조절

위험도 평가는 실질적인 자원을 소모할 수 있으므로 비용조절에 대한 주의는 필수적이다. 평가를 수행하기 위한 자금의 할당을 문서화하는 것이 중요하다. 이 할당은 다음을 포함한다.

- ㄱ. 인건비
- ㄴ. 사용할 평가 기구의 획득과 초기화
- ㄷ. 자료획득
- ㄹ. 컴퓨터 비용
- ㅁ. 훈련비용
- ㅂ. 출장비
- ㅅ. 출판과 발표
- ㅇ. 외부의 자문비용
- ㅈ. 계획 제경비(간접비)

평가 계획 비용의 추정은 큰 불확정성을 지닌다. 결과적으로 비용을 제한하기 위한 노력이 필요하다. 그리고 계획동안 비용조절에 대한 주의가 필요하고 계획 관리자는 모델개발비, 소프트웨어 획득비, 외부자문과 자료획득비를 추정하는 것을 위험도 분석가에게 의뢰하는 것이 좋다. 불확정성에 대한 잠재력이 있으므로 외부 전문가에게 비용평가에 대한 문서를 받도록 하는 것이 좋다.

마. 평가계획의 필요성

평가계획의 관리자는 계획의 진전사항을 백분율로 표시할 수 있는 수단을 명시한다. 계획의 실행이 원래의 계획대로 이행됐는지를 검사하기 위하여 위험도 분석가와 협의하고 위험도 평가 순서의 논리적 종결 지점을 기준으로 계획의 완성 정도의 평가에 의견 일치할 하는 것이 필요하다.

평가 계획의 관리자는 평가 계획의 실제 진전과 추정 진전을 비교한 상태보고서를 작성하여 보급하여야 한다. 연기를 위한 이유나 비용의 초과에 대한 것은 개선되고 설명되어야 하며, 필요한 곳에 적당한 조치사항이 이루어져야 한다.

바. 평가 결과의 유지

위험도 평가의 결과는 위험도 관리 프로그램의 종합부문으로서 연구가 완성된 후에도 보존되어야 한다. 연구결과 후에 취해진 어떠한 조치도 문서화되어야 한다. 플랜트가 수정되거나 운전절차가 변경되면 평가결과도 갱신되어야 한다.

평가 보고서의 모든 복사본은 분배상태를 조절하고 확인하여야 한다. 이것은 보관인의 경우 모든 수정본을 받을 수 있고, 의사결정에 변경되지 않은 이전의 정보를 사용하지 않기 위하여 필요하다. 주기적으로 모든 보고서의 복사본의 위치를 확인하고 조직을 통하여 갱신하여야 한다.

위험도 평가는 플랜트가 정해진 위험도 단계에서 운전할 수 있는지를 나타내지만, 위험도를 평가하기 위하여 도입된 가정과 일치하여 그 플랜트가 가동된다는 것을 보증할 수는 없으며 실제 운전이 연구가정과 다르다면 산출된 위험도 평가는 재현성이 없는 것이 된다. 연구 가정은 사실성을 반영하는 것이 필요하며 사실성이 변화하므로 가정은 계속 연구되어야 한다. 다음 사항이 일어나면 위험도 평가의 결과를 갱신할 필요가 있다.

7. 공정의 변화(물질, 운전절차 등)

ㄴ. 입력한 정보의 개선(독성학적 자료 등)

ㄷ. 회사의 위험도 목표의 도입

ㄹ. 분석기법의 발달

ㅁ. 회사내의 재산에 대한 변화

ㅂ. 회사 근처에서의 소유지 변화

안전성 평가 결과는 그 자체의 보존과 활용이 중요하지만 계속 유지되어야 그 유효성을 지닐 수 있다. 평가 결과를 유지할 필요성은 계획 초기에 받아들이고 그 방법을 마련하여야 회사의 위험도 관리에 대한 가치를 얻을 수 있을 것이다.

제 3 장 사고결과 예측 및 평가

사고결과 평가는 위험물질의 누출과 분산모델, 폭발과 화재, 사고결과에의 영향 등으로 나눌 수 있다. 휘발성이 있는 위험물질이 누출한다면 그 누출 형태와 그때의 조건 등을 고려하여 매개변수를 산출하고 위험물질의 분산 정도와 상태를 나타내는 분산모델을 적용한다. 누출된 물질이 가연성이면 폭발과 화재 모델을 적용하고 그 결과를 사고 결과의 영향 모델에 적용시킨다. 그러나 누출된 물질이 독성이면 바로 사고 결과의 영향 모델에 적용시킨다. 그리고나서 5장의 위험도 평가에 나타난 방법들을 적용하여 위험도를 계산한다. 이때 사고결과를 완화시킬 요인이 있는지를 고려한다.

1. 위험물질의 누출과 분산모델

화학설비에서의 균열이나 파열로 인한 가연성이나 독성물질의 누출은 매우 심각한 위험성을 지니고 있다. 저장조나 파이프 등에 작은 구멍이 생겨서 누출할 수도 있고, 개방된 용기에서의 증발 등과 용기가 파열되어 넓은 면적에서 일시에 방출될 수도 있다. 이때 유출되는 유체에 대하여 배출속도와 배출상, 증발량 등을 계산하여 누출 각본을 정량적으로 결정하는데에 배출속도모델이 사용된다. 그리고 누출되어 가스운을 형성한 위험물질이 물성치, 환경조건 등에 따라 가스운의 형성상태와 그 영향을 평가하기 위하여 분산모델을 사용한다.

가. 배출속도 모델

배출상은 가스, 액체, 2상 흐름으로 나눌 수 있다.

배출속도와 배출되는 시간 등이 중요 변수가 되며 이것으로 총배출량을 알 수 있다. 배출속도 모델은 사고결과 평가시 대부분 맨 처음 단계에서 실시한다.

(1) 배출상 결정

배출상은 용기의 구멍에서 흐름속도를 계산하는 데에 영향을 미치며, 위험물질의 누출 각본을 지배하는 인자이다. 최종 압력을 대기압으로 보고 단열공정으로 가정하여 주변 압력(상압)에서의 온도와 조성으로 기-액 평형을 이용하여 배출상을 결정한다. 상변화가 있으면 2상 흐름도 고려하여야 한다. 구멍의 크기는 안전밸브와 같은 설계된 배출은 실제 밸브나 파이프의 크기를 사용하고 계획되지 않은 배출은 정성적 위험성 평가 기법 등을 이용하여 추정되어야 한다. 배출을 해석할 때 누출기간을 계산하기 위한 밸브 간격과 응답시간 등을 고려하고 설계된 장치인 경우는 신뢰성을 고려해야 하며, 시간이 경과함에 따른 압력의 감소로 배출속도가 감소된다는 것 등을 고려해야 한다.

(2) 가스 배출

가스 배출의 발생원은 용기나 그 근처에서의 구멍, 파이프라인, 안전밸브, 공정 벤트 등이며 서로 다른 계산과정을 필요로 한다. 공정플랜트의 누출에서 생기는 대부분의 가스배출은 처음엔 음속일 것이다. 속도식을 이용할 수도 있고 경험식을 이용할 수도 있는데, 경험식에 배출계수의 값은 1.0보다 작으며 통상 사용되는 배출계수, Cd의 값은 0.85이다.

(가) 가스배출식

가스배출식은 배출가스의 속도에 따라 음속 흐름과 이음속 흐름으로 나눈다. 두 흐름의 경계를 구분하기 위한 임계 압력비, r_{crit} 는

$$r_{crit} = \left(\frac{p}{p_a} \right)_{crit} = \left(\frac{\gamma+1}{2} \right)^{\gamma/(\gamma-1)} \dots\dots\dots (3.1)$$

이다. 여기서 p 는 상승흐름 절대압력(N/m²), p_a 는 하강흐름 절대압력(N/m²), γ

는 가스 비열비(C_p/C_v , -)이다.

오리피스형 누출구멍에 의한 가스배출속도, G_v 는

$$G_v = C_d \frac{Ap}{a_o} \Psi \dots\dots\dots (3.2)$$

이고, A 는 구멍면적(m^2), a_o 는 온도, $T = (\gamma RT/M)^{1/2}$ 일 때 가스의 음속이고, M 은 가스분자량(kg-mole), R 은 기체상수(J/kg, mol/ $^{\circ}$ K), T 는 상승흐름 온도($^{\circ}$ K), Ψ 는 흐름인자(-)이다. 흐름영역에 따른 흐름인자, Ψ 는 다음과 같다.

1) 아음속 흐름인 경우

$$\Psi = \left\{ \frac{2\gamma^2}{\gamma-1} \left(\frac{p_a}{p} \right)^{2/\gamma} \left[1 - \left(\frac{p_a}{p} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right] \right\}^{1/2}, \quad \frac{p}{p_a} \leq r_{crit} \dots\dots\dots (3.3)$$

2) 음속 흐름인 경우

$$\Psi = \gamma \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{(\gamma+1)/2(\gamma-1)}, \quad \frac{p}{p_a} \geq r_{crit} \dots\dots\dots (3.4)$$

또는

$$\Psi = \gamma \left(\frac{1}{\gamma_{crit}} \right)^{(\gamma+1)/2\gamma} \dots\dots\dots (3.5)$$

(나) 안전밸브 배출

안전밸브의 안전배출속도 계산은 비반응계에서 경험적 방법으로 API나 NFPA Code 등이 이용된다.

2상 배출시에는 증기배출보다 더 큰 안전면적이 필요하다. NFPA 30은 비압축

탱크에서 젖은 표면적을 기준으로 탱크벽을 통한 4가지 열플럭스 값을, NFPA 58은 분자량이 30~58인 LPG에 대하여 전체 탱크 표면적을 기준으로 열플럭스 값을 나타내었다. NFPA 58에서 열플럭스를 예측하는데에 다음 식이 필요하다.

$$Q_t = 34,500 FA^{0.82} \dots\dots\dots (3.6)$$

여기서 Q_t 는 화재가 용기벽을 통하여 주는 열(Btu/hr), A 는 용기의 전체 표면적(ft^2), F 는 환경인자(-)이다.

가스배출속도, G_{rv} 는

$$G_{rv} = Q_f/h_{fg} \dots\dots\dots (3.7)$$

이다. 여기서 h_{fg} 는 배출압력에서의 증발잠열(kJ/kg)이다.

(다) 액체배출

오리피스형 누출구멍을 통한 순액체의 배출은 다음식으로 나타낸다.

$$G_L = C_d A \rho \left[\frac{2(p-p_a)}{\rho} + 2gh \right]^{1/2} \dots\dots\dots (3.8)$$

여기서 G_L 은 액체질량배출속도(kg/s), C_d 는 배출계수(-), A 는 배출구멍의 면적(m^2), ρ 는 액체밀도(kg/m^3), p 는 액체 저장조의 압력(N/m^2), p_a 는 대기압(N/m^2), g 는 중력가속도(m/s^2), h 는 구멍위로의 액체의 높이(m)이다.

(라) 2상배출

2상배출은 통상 증기만의 배출보다 큰 안전면적이 필요하다.

정비점보다 높은 상태에 있는 가압 액체가 대기중에 누출시 플래시되기 시작하고 2상 흐름이 된다. 휘발성 액체위의 증기 공간의 감압시에 일어나기 쉽다.

DIERS computer program, SAFIRE 등이 사용되기도 하나 물성치에 대한 자료가 많이 있어야 되고 사용하기 복잡한 점이 있다. 실험적 계산방법으로 2상 질량흐름속도, $G_{2p}(\text{kg/m}^2/\text{s})$ 는 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_{2p} = C_d \sqrt{G_{suc}^2 + G_{ERM}^2 / N} \dots\dots\dots (3.9)$$

과냉액체의 배출속도는

$$G_{suc} = \sqrt{2(p - p_v)\rho_f} \dots\dots\dots (3.10)$$

과 같고, 여기서 p 는 저장조의 압력(N/m^2), p_v 는 저장온도에서의 증기압(N/m^2), ρ_f 는 액체밀도(kg/m^3)이다.

포화액체인 경우 배출파이프의 크기가 0.1m보다 크면 평형에 도달하고 배출속도는

$$G_{ERM} = \frac{h_{fg}}{v_{fg}(TC_p)^{1/2}} \dots\dots\dots (3.11)$$

로 나타낼 수 있으며, 여기서 h_{fg} 는 증발잠열(kJ/kg), v_{fg} 는 액체에서 증기로의 비용의 변화(m^3/kg), T 는 저장조 온도($^{\circ}\text{K}$), C_p 는 액체의 비열($\text{kJ/kg}^{\circ}\text{K}$)이다.

배출파이프가 0.1m보다 작으면 플래시 흐름은 길이가 감소할수록 증가한다. 배출파이프 길이가 0에 접근하면 모두 액체흐름으로 된다. 이 비평형 영향은 매개변수 $N(-)$ 에 의하여 추정된다.

$$N = \frac{h_{fg}^2}{2\Delta p \rho_f C_d^2 v_{fg} TC_p} + \frac{L}{L_e} \quad \text{for } 0 \leq L \leq L_e \dots\dots\dots (3.12)$$

여기서 L 은 파이프 길이(m), L_e 는 0.1m이다.

나. 플래시와 증발

과열액체가 대기중에 누출할 때 플래시 된다. 생성된 증기는 상당량의 액체를 비말동반할 것이다. 이들중 일부는 대기 위로 강하하고, 일부는 에어로졸처럼 떠 있을 것이다. 휘발성이나 극저온의 끓는 액체는 옆길러졌을 때 표면증발에 의해 커다란 기체 방출이 이루어질 수 있다. 플래시와 증발모델은 가스운을 형성하는 액체 누출의 분율을 추정하여 분산모델의 입력자료로 사용된다.

과열 액체의 플래시로 생성된 gas와 액체의 양은 열역학으로 계산할 수 있으나 에어로졸 상태로 부유하여 있는 액체가 문제가 된다. 이 에어로졸의 일부는 언젠가는 강하될 것이다. 그러나 남아있는 것은 가스운 안으로 비말동반된 따뜻한 공기에 의하여 기화할 수도 있다. 또한 어떤 조건에서는 강하중의 증발이 너무 빨라서 배출량이 거의 순식간에 가스운안으로 들어갈 수 있다. 한편 액체의 양이 매우 많으면 대지의 온도가 내려가고 표면증발의 양도 감소하게 된다.

과열액체의 플래시인 경우의 기화된 누출액체의 분율, F_v 는 다음과 같다.

$$F_v = C_p \frac{(T - T_b)}{h_{fg}} \dots\dots\dots (3.13)$$

여기서 C_p 는 액체의 열용량(J/kg/°K), T 는 액체의 초기온도(°K), T_b 는 액체의 정비점(°K), h_{fg} 는 T_b 에서 액체의 증발잠열(kJ/kg)이다. 실제 가스운은 기화된 액체의 분율, 에어로졸의 비말동반, 에어로졸의 증발로 인한 온도강하 효과, 그리고 온도가 대기보다 낮을 경우에는 대기의 응축효과 등에 따라 변한다.

대지로부터의 열플럭스, q_G (W/m²)는 다음과 같다.

$$q_G = \frac{k_s(T_g - T)}{(\pi \alpha_s t)^{1/2}} \dots\dots\dots (3.14)$$

여기서 k_s 는 대지의 열전도도($W/m^{\circ}K$), T_g 는 대지의 온도($^{\circ}K$), T 는 액체풀(liquid pool)의 온도($^{\circ}K$), α_s 는 대지의 열확산계수(m^2/s), t 는 엷질러진 후의 경과 시간이다.

다. 분산모델

중기의 대기분산 예측은 위험도 평가의 사고결과평가의 주요부분이다. 가스의 거동은 가스의 농축정도로 구별할 수 있고 배출기간은, 일시적인 배출은 퍼프(puff)를 연속적인 배출은 플룸(plume)을 형성한다. 퍼프모델은 일정량의 단일 배출로 인한 가스의 일시적인 농도를 나타내고, 플룸은 발생원으로부터 연속적으로 배출되는 가스의 정상상태 농도를 나타낸다. 분산에 영향을 미치는 매개변수의 변화에 따른 분산모델을 수립하여 이용하는 것도 좋은 방법이지만 eddy 확산 계수가 시간, 위치, 바람속도, 기상상태 등에 따라 변화하여 이론적으로 계산해야 하는 점이 있으므로 여기서는 실험적으로 얻기 쉬운 분산계수를 이용하여 계산하는 방법을 나타내었다.

Pasquill-Gifford 분산모델에서 사용하는 대기안정도는 <표 3-1>에, 대기안정도에 따른 분산계수식과 데이터를 플룸배출과 퍼프배출로 나누어 각각 <표 3-2>, <표 3-3>에 나타내었다. 여기서 x , y , z 는 각각 바람방향, 직각방향, 수직방향의 거리이고 σ_x , σ_y , σ_z 는 각 방향에서의 분산계수이다.

(1) 플룸배출

(가) 대지에서 정상상태 발생원, x 축으로 일정속도의 바람
평균농도<C>는 다음과 같다.

$$\langle C \rangle (x,y,z) = \frac{G}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2} \right) \right] \dots\dots\dots (3.15)$$

<표 3-1> Pasquill-Gifford 분산 모델에서 사용되는 대기 안정도 분류*

바람속도(m/s) (높이 10m 기준)	주간 복사 강도			야간 흐름 정도	
	강 함	중 간	약 함	4/8 이상	3/8 이하
< 2	A	A~B	B		
2 ~ 3	A~B	B	C	E	F
3 ~ 4	B	B~C	C	D	E
4 ~ 6	C	C~D	D	D	D
> 6					D

* A, 매우 불안정; B, 불안정; C, 약간 불안정; D, 중간; E, 약간 안정; F, 안정

<표 3-2> 대기 안정도에 따른 Pasquill-Gifford 분산 계수식과 데이터(풀럼배출)

안정도	$\sigma_y(m)$	$x(m)$	$\log \sigma_z(m)$
A	$0.493x^{0.88}$	100~300	$\log 0.087x^{1.10}$
		300~3000	$-1.67+0.902\log x+0.181(\log x)^2$
B	$0.337x^{0.88}$	100~500	$\log 0.135x^{0.95}$
		500~ 2×10^4	$-1.25+1.09\log x+0.0018(\log x)^2$
C	$0.195x^{0.90}$	100~ 10^5	$\log 0.112x^{0.91}$
D	$0.128x^{0.90}$	100~500	$\log 0.093x^{0.85}$
		500~ 10^5	$-1.22+1.08\log x-0.061(\log x)^2$
E	$0.091x^{0.91}$	100~500	$\log 0.082x^{0.82}$
		500~ 10^5	$-1.19+1.04\log x-0.070(\log x)^2$
F	$0.067x^{0.90}$	100~500	$\log 0.057x^{0.80}$
		500~ 10^5	$-1.91+1.37\log x-0.119(\log x)^2$

<표 3-3> 대기안정도에 따른 Pasquill-Gifford 분산 계수식과 데이타(퍼프배출)

안정도	x = 100m		x = 4000m	
	$\sigma_y(m)$	$\sigma_z(m)$	$\sigma_y(m)$	$\sigma_y(m)$
A, B	10	15	300	220
C, D	4	3.8	120	50
E, F	1.3	0.75	35	7

(식 3.15)에서 G는 배출속도(kg/s)를 나타낸다.

z=0 일때, 대지에서의 농도를 나타낸다.

$$\langle C \rangle (x, y, 0) = \frac{G}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (3.16)$$

바람방향으로 플룸의 중앙을 따르는 농도는 y=z=0 이다.

$$\langle C \rangle (x, 0, 0) = \frac{G}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \dots\dots\dots (3.17)$$

농도가 같은 지점을 연결한 등량선이 가스운의 농도경계를 구하기 위하여 필요하다. 특정농도를 위한 대지단계에서의 등량선은 중심선 농도식을 일반 대지단계의 농도로 나눔으로서 구할 수 있다.

$$y = \sigma_y \sqrt{2 \ln \frac{\langle C \rangle (x, 0, 0)}{\langle C \rangle (x, y, 0)}} \dots\dots\dots (3.18)$$

등량선을 구하는 절차는 다음과 같다.

- ㄱ. 특정농도<C>*, 바람속도, 경과시간을 정한다.
- ㄴ. x축을 따라 <C>(x, 0, 0)를 구한다. x축을 따라 가스운의 경계를 정한다.

ㄷ. $\langle C \rangle(x, y, 0) = \langle C \rangle^*$ 로 놓고 ㄴ 단계에서 계산된 각각의 중심점에서 y 의 값을 계산한다.

(나) 대지위 높이 H 에서 정상상태 발생원, x 축으로 일정속도의 바람

$$\begin{aligned} \langle C \rangle(x, y, z) = & \frac{G}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \\ & \times \left\{ \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z-H}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z+H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\} \end{aligned} \quad (3.19)$$

대지에서의 평균농도는

$$\langle C \rangle(x, y, 0) = \frac{G}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \quad \dots \quad (3.20)$$

플룸의 중앙을 지나는 농도는

$$\langle C \rangle(x, 0, 0) = \frac{G}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \quad \dots \dots \dots (3.21)$$

x 축을 지나는 대지에서의 최대 농도는

$$\langle C \rangle_{\max} = 2 \frac{G}{e \pi u H^2} \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_y} \right) \quad \dots \dots \dots (3.22)$$

이고, 다음 식이 성립할 때의 거리에서 최대 농도에 도달한다.

$$\sigma_z = \frac{H}{\sqrt{2}} \quad \dots \dots \dots (3.23)$$

(2) 퍼프배출

(가) 대지높이에서 배출, 발생원 고정 좌표계, x 축으로 일정속도의 바람

$$\langle C \rangle (x, y, z, t) = \frac{G^*}{\sqrt{2} \pi^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{x-ut}{\sigma_x} \right)^2 + \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 + \left(\frac{z}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\} \dots\dots\dots (3.24)$$

여기서 G^* 는 배출량(kg)이다. 대지에서의 농도는

$$\langle C \rangle (x, y, 0, t) = \frac{G^*}{\sqrt{2} \pi^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{x-ut}{\sigma_x} \right)^2 + \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \right\} \quad (3.25)$$

x 축을 따르는 대지에서의 농도는

$$\langle C \rangle (x, 0, 0, t) = \frac{G^*}{\sqrt{2} \pi^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{x-ut}{\sigma_x} \right)^2 \right\} \dots\dots\dots (3.26)$$

이고, 이 움직이고 있는 가스운의 중앙에서의 농도는

$$\langle C \rangle (ut, 0, 0, t) = \frac{G^*}{\sqrt{2} \pi^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \dots\dots\dots (3.27)$$

특정농도에서의 등량선을 구하기 위한 식은

$$y = \sigma_y \sqrt{2 \ln \frac{\langle C \rangle (x, 0, 0, t)}{\langle C \rangle (x, y, 0, t)}} \dots\dots\dots (3.28)$$

이다. 등량선을 구하기 위한 절차는 플룸배출의 경우와 같다.

(나) 대지위 높이 H에서 배출. 퍼프의 이동 좌표계

$$\begin{aligned} \langle C \rangle (x, y, z, t) = & \frac{G^*}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \\ & \times \left\{ \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z-H}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z+H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\} \\ & \dots\dots\dots (3.29) \end{aligned}$$

대지에서의 농도는

$$\begin{aligned} \langle C \rangle (x, y, 0, t) = & \frac{G^*}{\sqrt{2\pi}^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \\ & \dots\dots\dots (3.30) \end{aligned}$$

이고, 대지에서 x축을 따르는 농도는 다음과 같다.

$$\langle C \rangle (x, 0, 0, t) = \frac{G^*}{\sqrt{2\pi}^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (3.31)$$

(다) 대지위 높이 H에서 배출. 발생원 고정 좌표계

$$\begin{aligned} \langle C \rangle (x, y, z, t) = & \text{(나)의 이동좌표계의 식} \times \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x-ut}{\sigma_x} \right)^2 \right] \\ & \dots\dots\dots (3.32) \end{aligned}$$

2. 폭발과 화재

폭발은 고압가스가 빠르게 평형에 이르는 것으로, 이 평형에 도달하는 동안 에

너지는 충격파 등으로 전이되는 것을 나타낸다. 폭발은 고압가스 저장조의 급작스런 파열이나 가연성 가스의 연소와 같은 급격한 화학반응 등에서 나타나는 물리적 현상을 말한다. 여기서 폭발로 인한 비산물과 충격파가 위험성을 지니고 있다.

화재는 주요 위험요소이기 보다는 도미노 효과를 일으킬 수 있는 잠재력을 지니고 있으며 열복사에 의한 피해를 고려하여야 한다.

가. UVCE와 플래시 화재

가연성 증기가 누출되어 증기운을 형성하고 점화원이 있는 경우에 연소속도가 빠르면 UVCE(Unconfined Vapor Cloud Explosion)가 일어나고 연소속도가 느리면 플래시 화재가 발생한다. 화염의 전파는 열팽창과 난류가 주요 메카니즘이다. 여러 연구자들이 추론한 결과는 다음과 같다.

ㄱ. 플래시 화재에서 UVCE가 발생하기 위해서는 최소한 약 1~15톤 정도의 가연성물질이 존재하여야 한다. 그러나 수소와 아세틸렌과 같은 반응성이 강한 물질은 100kg이하에서도 UVCE가 발생할 수 있다.

ㄴ. UVCE의 발생에는 어떤 방해(물)의 존재가 필수적이다.

ㄷ. 같은 누출량일 경우 연소속도가 큰 물질은 UVCE가 발생하기 쉽다.

ㄹ. UVCE는 초음속폭발(detonation)이 아니고 폭연(deflagration)이다.

ㅁ. UVCE에 의해 생성된 최대과압은 초음속 폭발보다는 작으며 통상 1기압 이하이다.

연소사고를 분석하는데 중요한 매개변수는 물성치이다. 즉 LFL(Lower Flammable Limit), UFL(Upper Flammable Limit), 인화점, 자동발화온도, 연소열, 분자량, 연소 양론식 등이다. 보다 세밀한 위험도 평가를 위해서는 주변의 발화원에 대한 위치와 확률 등이 고려되어야 한다. UVCE 모델에서 일반적으로 폭발

의 정도를 TNT의 양으로 나타내는 TNT모델이 많이 사용된다.

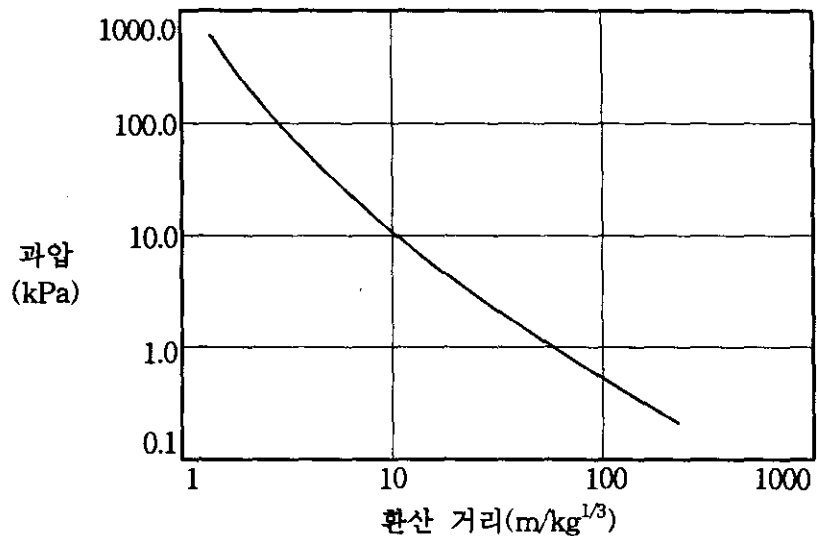
$$W = \frac{\eta M E_c}{E_{C_{TNT}}} \dots\dots\dots (3.33)$$

여기서, W는 TNT상당량(kg), M의 누출된 가연성 물질의 질량(kg), η 는 실험적 폭발수율(0.01~0.10), E_c 는 가연성 가스의 최소 연소열(kJ/kg), $E_{C_{TNT}}$ 는 TNT의 연소열(4437~4765kJ/kg)이다.

TNT 상당량을 구하면 폭발로 인한 과압(overpressure)을 폭발실험의 결과인 [그림 3-1]과 환산거리를 이용하여 계산할 수 있다.

$$z = \frac{R}{W^{1/3}} \dots\dots\dots (3.34)$$

여기서 z는 환산거리, R은 폭발지점으로 부터의 반경이다.



[그림 3-1] 과압과 환산거리의 관계

나. 물리적 폭발

압축가스가 담긴 용기가 깨지면 에너지가 방출되어 충격파가 생기고 파편들이 날리게 된다. 안의 물질이 가연성이면 누출된 가스는 인화되어 부가적인 영향을 미칠 수 있다. 물리적 폭발은 압축가스로 채워진 용기의 갑작스런 파열에 의한 것으로 이러한 파열은 압력조절장치와 압력완화장치의 결함, 부식, 침식, 화학작용 등에 의한 용기 두께의 감소, 파열이나 균열이 발생할 결함을 가진 물질이나 부식성 균열과 같은 특수한 화학작용 등에 의한 용기 강도의 감소 등으로 인하여 일어날 수 있다.

충격파를 생성하는 에너지는 용기내의 상태에 따라 다르다. 용기에 가스만 들어있는 경우에는 가스의 팽창이, 액체가 들어있는 경우에는 액체의 온도가 끓는점보다 낮으면 가스의 팽창과 액체의 빠져나움이 액체의 온도가 끓는점보다 높으면 가스와 액체의 플래시 증발이 혼합되어 팽창하는 것이 충격파를 생성하는 에너지가 된다.

팽창이 등온과정이고 이상기체법칙을 따른다면 UVCE와 같이 TNT상당량과 환산거리를 이용할 수 있다.

$$W = 1.4 \times 10^{-6} V \frac{p_1}{p_o} \frac{T_o}{T_1} RT_1 \ln \frac{p_1}{p_2} \dots\dots\dots (3.35)$$

여기서, W 는 lb 단위로 나타낸 TNT상당에너지, V는 압축가스의 부피(ft³), p₁은 압축가스의 초기압력(psia), p₂는 팽창가스의 최종압력(psia), p₀는 대기압(14.7psia), T₁은 압축가스의 온도(°R), T₀는 표준온도(492°R), R은 기체상수, 1.4×10⁻⁶은 환산인자(2000Btu ≈ 1 lbTNT)이다.

폭발된 용기의 표면에서의 폭발압은 다음식으로 구한다.

$$P_b = p_s \left\{ 1 - \frac{3.5(\gamma-1)(p_s-1)}{\left[\frac{\gamma T}{M} (1+5.9p_s) \right]^{0.5}} \right\}^{-2\gamma/(\gamma-1)} \dots\dots\dots (3.36)$$

여기서 p_s 는 용기표면에서의 압력(bara), p_b 는 용기의 폭발압(bara), γ 는 비열의 비(C_p/C_v), T 는 절대온도($^{\circ}K$), M 은 가스의 분자량이다.

위의 식은 팽창이 25℃, 대기압하에 있는 공기중에서 일어난 것이라고 가정한 것으로서 시행착오 방법으로 해를 구해야 한다.

다. BLEVE(Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion)

과열액체나 액화가스를 함유한 압력용기의 과열로 인하여 BLEVE가 발생하는 것으로 물리적 폭발의 특수한 경우이다. 일반적인 원인은 용기의 외부에 불꽃이 가해져서 용기가 약해지고, 액체가 증발하여 통상 200배 이상의 부피팽창이 일어나 용기의 갑작스런 파열로 인한 것이다. BLEVE는 통상 순간적으로 구형화염(fireball)이 이루어지면서 폭발이 발생하므로 fireball의 크기를 추정하는 것이 중요하다.

잘 알려진 형태의 BLEVE로 LPG 폭발을 들 수 있다. LPG 사고의 경우 비산물의 80%정도가 300m이내의 범위에 있으며 작은 용기일수록 비산물의 분포범위가 큰 것으로 나타나 있다. 비산물의 전체수는 용기크기의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{비산물의 수} &= -3.77 + 0.0096 [\text{용기용량}(m^3)] \dots\dots\dots (3.37) \\ \text{유효범위} &: 700 \sim 2500m^3 \end{aligned}$$

BLEVE의 충격파와 비산물의 영향은 물리적 폭발의 영향과 같다. 열적영향을

평가하기 위하여 fireball의 계산이 필요하다. 물리적 매개변수에 대한 식은 다음과 같다.

$$\text{fireball의 최대직경}(m), D_{\max} = 6.48M^{0.325} \dots\dots\dots (3.38)$$

$$\text{fireball 지속시간}(s), t_{BLEVE} = 0.825M^{0.26} \dots\dots\dots (3.39)$$

$$\text{fireball의 중심높이}(m), H_{BLEVE} = 0.75D_{\max} \dots\dots\dots (3.40)$$

$$\text{초기의 대지단계 반구체직경}(m), D_{\text{initial}} = 1.3D_{\max} \dots\dots\dots (3.41)$$

여기서 M은 가연성액체의 초기질량(kg)이다. 위의 식에는 연소에 필요한 산소의 부피는 포함되지 않았다. BLEVE 사고 기간동안 목표물이 받는 복사열은 다음과 같다.

$$Q_R = \tau E F_{21} \dots\dots\dots (3.42)$$

여기서, Q_R 은 흑체 목표물이 받는 복사열(kW/m^2), τ 는 투과열(-), E는 표면방출플럭스(kW/m^2), F_{21} 은 관측인자(view factor, -)이다.

대기투과율, τ 는 다음과 같다.

$$\tau = 2.02(P_w X)^{-0.09} \dots\dots\dots (3.43)$$

여기서 P_w 는 물부분압(N/m^2), X는 화염의 표면에서 목표물까지의 경로길이(m)이다. 또한, 표면방출플럭스 E와 관측인자 F_{21} 은 다음식으로 나타낸다.

$$E = \frac{F_{rad} M H_c}{\pi D_{max}^2 t_{BLEVE}} \dots\dots\dots (3.44)$$

$$F_{21} = \frac{D^2}{4x^2} \dots\dots\dots (3.45)$$

여기서 M은 BLEVE에서 LPG의 질량(kg), H_c는 연소열(kJ/kg), F_{rad}는 복사분율(0.25~0.40), D는 구의 지름(m), x는 구의 중심과 목표물과의 거리(m)이다.

라. 용기내 폭발

용기내 폭발은 용기나 건물안에서의 분진폭발, 증기폭발, 연소반응, 열분해, 폭발반응 등으로 일어나는 것을 의미한다. 상대적으로 적은 양의 연료와 에너지를 포함하므로 작은 규모의 폭발이다. 주요위험성은 충격파와 비산물이다.

가연성 가스혼합물인 경우 폭연에 의한 최대 압력상승율은 다음과 같다.

$$\frac{P_{2(max)}}{P_1} = \frac{N_2 T_2}{N_1 T_1} = \frac{M_1 T_2}{M_2 T_1} \dots\dots\dots (3.46)$$

여기서 M은 가스혼합물의 분자량, N은 가스상의 몰수, T는 가스상의 절대온도, P는 절대압, 1과 2는 각각 최초상태와 최종상태를 뜻한다.

마. 액층화재(Pool Fire)

휘발성이 작은 인화성액체가 누출되면 쉽게 증발이 되지 않고 액체상태로 고여 있게 된다. 서서히 증발된 증기농도가 인화한계점에 도달하게 되면 대형화재를 일으킬 수 있다. 액층화재 모델은 연소속도, 형성된 액층의 크기, 화염높이, 화염의 기울기와 화염표면에서 방출되는 열량, 기하학적 관측인자, 대기투과율, 받는

열플럭스 등의 요소로 구성된다.

대형액층화재는 그 물질의 특성에서 최대의 속도로 탄다. 탄화수소인 경우 연소속도의 범위는 $0.05\text{kg/m}^2\text{s}$ (가솔린)~ $0.2\text{kg/m}^2\text{s}$ (LPG)이다. 연소열과 증발잠열을 이용하여 연소속도를 예측할 수도 있다.

액층의 크기는 누출된 양과 지형적인 특성에 따라 다르다. 연속적인 누출이고 무한정으로 편평한 곳에서 최대 직경은 연소속도와 표면적의 곱이 누출속도와 같은 때이다.

화염의 높이와 직경의 관계는 다음식과 같다.

$$\frac{H}{D} = 42 \left[\frac{M_b}{\rho_a \sqrt{gD}} \right]^{0.61} \dots\dots\dots (3.47)$$

여기서, H는 화염의 높이(m), D는 액층의 상당직경(m), M_b 는 연소속도($\text{kg/m}^2\text{s}$), ρ_a 는 공기의 밀도(1.2kg/m^3), g는 중력가속도이다.

목표지역에서 받는 열복사량은 기하학적 관측인자에 의하여 계산된다.

한 지점에서만 열복사가 일어나고 이에 수직한 곳에 있는 목표물이 열복사를 받는 경우의 관측인자는 다음식으로 구한다.

$$F_p = \frac{1}{4\pi x^2} \dots\dots\dots (3.48)$$

여기서 F_p 는 점원 관측인자(m^{-2}), x는 점원과 목표물과의 거리이다.

열복사는 대기중으로 흡수되거나 분산될 수 있는데, 이는 목표물에 도달한 열복사량의 감소원인이 되며 이를 고려하는 인자가 대기투과율, τ 는 BLEVE에서 나 타낸 식을 사용한다.

액층화재로 인하여 x거리만큼 떨어진 곳에서 받는 열복사량, Q_x 는 다음과 같다.

$$Q_x = \tau E F_a \dots\dots\dots (3.49)$$

또는

$$Q_x = \tau Q_R F_p \dots\dots\dots (3.50)$$

여기서 E는 단위면적당의 표면방출플럭스(kW/m²), F_a는 기하학적 관측인자(-), Q_R은 복사된 전체열량(kW)이다. Q_R은 다음식으로 구할 수 있다.

$$Q_R = R_f M_b E_c A \dots\dots\dots (3.51)$$

여기서 R_f는 복사분율(0.15~0.35), M_b는 연소속도(kg/m²s), E_c는 연소열(kJ/kg), A는 액층의 면적(m²)이다.

3. 사고결과의 영향

가. 독성가스 영향

독성가스의 누출은 작업장내에서 뿐만 아니라 인근 주민들에게도 피해를 끼칠 수 있다는 점에서 화재나 폭발보다 더 큰 재해의 가능성을 가지고 있다고 할 수 있다. 독성가스의 누출과 분산에 관한 모델은 앞에서 이미 기술하였다. 일반적으로 연속적인 누출로 인한 플룸모델과 일시적 누출인 퍼프모델이 이용된다. 각각의 모델에 따라 독성가스의 폭로시간이 달라지고 폭로양이 달라지므로 이에 맞게 계산하여야 한다. 분산모델에 따라 폭로시간이 결정되면 다음의 probit 모델식을 이용하여 probit변수를 구하고 <표 3-4>를 이용하여 사람에게 미치는 백분율을 구한다.

$$Pr = a + b \ln(C^n t) \dots\dots\dots (3.52)$$

여기서, C는 농도(ppm), t는 폭로시간(min)이고 a, b, n은 상수로서 <표 3-5>의 값을 이용한다.

<표 3-4> probit의 영향받는 사람에 대한 백분율로의 치환

%	0	2	4	6	8
00	-	2.95	3.25	3.45	3.59
10	3.72	3.82	3.92	4.01	4.08
20	4.16	4.23	4.29	4.36	4.42
30	4.48	4.53	4.59	4.64	4.69
40	4.75	4.80	4.85	4.90	4.95
50	5.00	5.05	5.10	5.15	5.20
60	5.25	5.31	5.36	5.41	5.47
70	5.52	5.58	5.64	5.71	5.77
80	5.84	5.92	5.99	6.08	6.18
90	6.28	6.41	6.55	6.75	7.05
99	7.33	7.41	7.46	7.65	7.88

probit 식에 사용된 매개변수의 값은 동물실험에 의하여 얻어진 것으로서 사람에게 적용할 때 얼마간의 오차가 존재한다.

나. 열적영향

사람에 대한 열복사의 영향은 API 521에 나와있다. 사람이 고통받기 시작하는 열복사 시간에 대한 것은 <표 3-6>에 나타내었다.

독성가스의 영향에서와 같은 방법으로 사람에게 대한 상해정도를 probit 모델로서 나타낼 수 있다.

$$Pr = -14.9 + 2.56 \ln \left(\frac{t I^{4/3}}{10^4} \right) \dots\dots\dots (3.53)$$

<표 3-5> probit식의 상수값

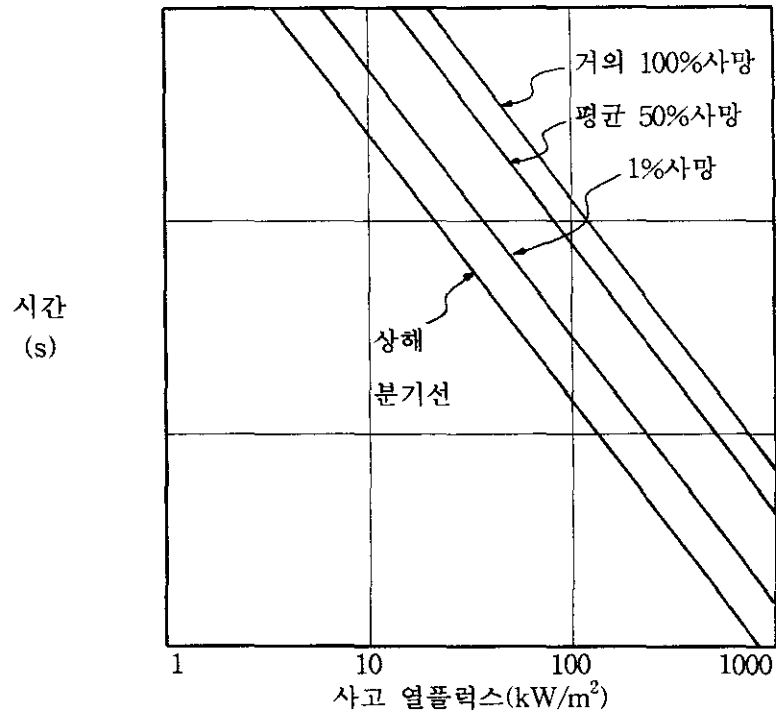
물 질 명	a(ppm)	b(ppm)	n(min)
Acrolein	- 9.931		1
Acrylonitrile	- 29.420	2.049	1.43
Ammonia	- 35.900	3.008	2
Benzene	-109.78	1.85	2
Bromine	- 9.04	5.3	2
Carbon monoxide	- 37.98	0.92	1
Carbon tetrachloride	- 6.29	3.7	2.50
Chlorine	- 8.29	0.408	2
Formaldehyde	- 12.24	0.92	2
Hydrogen chloride	- 16.85	1.3	1.00
Hydrogen cyanide	- 29.42	2.00	1.43
Hydrogen fluoride	- 35.87	3.008	1.00
Hydrogen sulfide	- 31.42	5.27	1.43
Methyl bromide	- 56.81	1.637	1.00
Methyl isocyanate	- 5.642	1.4	0.653
Nitrogen dioxide	- 13.79	3.686	2
Phosgene	- 19.27	0.509	1
Propylene oxide	- 7.415	2.10	2.00
Sulfur dioxide	- 15.67	0.408	1.00
Toluene	- 6.794		2.50

<표 3-6> 최초의 고통에 도달하는데 필요한 폭로시간

복 사 강 도 (Btu/hr/ft ²)	고통받기 시작하는 시간 (s)
500	60
740	40
920	30
1500	16
2200	9
3000	6
3700	4
6300	2

여기서 t 는 폭로시간(s), I 는 열복사강도(W/m^2)이다.

또한 [그림 3-2]를 이용하면 열플럭스와 폭로시간에 따른 상해나 사망율을 근사적으로 구할 수 있다.



[그림 3-2] 열복사에 의한 상해나 치사율 정도

다. 폭발영향

폭발영향모델은 사람과 사물에 대한 폭발과압과 비산물의 영향을 예측하는 것이다. 모델의 기본은 TNT 폭발모델이다. 폭발로 인한 피해정도는 <표 3-7>에 나타내었다.

<표 3-7> 폭발로 인한 피해정도

사람에 대한 영향	압력(psig)
100% 사망	200 ~ 250
50% 사망	130 ~ 180
사망하기 시작	100 ~ 120
폐의 손상	30 ~ 40
50% 고막파열	15
고막이 파열되기 시작	5
건물에 대한 영향	압력(psig)
대부분의 건물 파괴	10
가옥의 완전 파괴	5 ~ 7
저장탱크 파열	3 ~ 4
가옥의 일부 파괴	2
유리창 파괴	0.5 ~ 1.0
얇은 유리창의 파괴	0.1

폭발량, 과압과 피해거리의 관계는 UVCE의 환산거리와 그림을 이용하여 계산할 수도 있다. 과압으로 인한 영향은 앞의 경우와 같이 probit 모델식을 이용할 수도 있다.

$$Pr = a + \ln C \dots\dots\dots (3.54)$$

여기서 a, b, c는 피해의 형태에 따른 상수로서 <표 3-8>에서 구한다.

<표 3-8> 폭발로 인한 피해형태들의 probit 상수값

피해형태	a	b	c
폐출혈에 의한 사망	-77.1	6.91	최대압력(N/m^2)
고막파열	-15.6	1.93	최대압력(N/m^2)
충격에 의한 사망	-46.1	4.82	충격(Ns/m^2)
충격에 의한 상해	-39.1	4.45	충격(Ns/m^2)
비산물에 의한 상해	-27.1	4.26	충격(Ns/m^2)
구조적 피해	-23.8	2.92	최대압력
유리 파괴	-18.1	2.79	최대압력

제 4 장 사고 발생빈도 평가

위험도 달성목표를 고려하여 사고결과 평가로 충분할 경우도 있지만 보다 세밀한 분석이 필요한 분야도 있다. 그러나 사고발생 빈도평가는 과거의 사고자료, 플랜트와 공정자료, 물질 및 환경자료, 장치의 신뢰도 자료 등과 전문적인 경험과 판단이 필요하고, 평가의 난이도가 높으므로 잠재위험성이 큰 부분에 대하여 선택적으로 실시하는 것이 좋다. 과거의 사고기록이 풍부한 경우에는 과거기록을 이용하여 평가하고 과거의 사고기록이 부족한 경우에는 결함수 분석법(Fault Tree Analysis)이나 사상수 분석법(Event Tree Analysis)을 이용하여 평가·예측하는 것이 좋다.

1. 과거의 기록을 이용한 사고빈도 평가

가. 대상자료의 설정

과거의 기록은 설계단계에서 적용할 수도 있고 기존의 설비에도 적용할 수 있다. 평가대상의 물성치, 운전상태, 요구조건 등에 따른 사고유형을 명확히 하여 찾고자 하는 자료의 형태를 정한다.

나. 자료원의 검토

수집된 자료가 평가대상과 목적에 적합한지 판단하기 위하여 사용한 회사나 국가 등을 조사하여 자료가 동일한 조건의 공장에서 얻어진 것인지를 확인하여야 한다. 그리고, 현재 평가하려는 부분에 대한 결함빈도나 세부설명 여부, 그 장치의 사용횟수나 사용기간이 나타나 있어야 하며 통계적으로 처리하기에 충분한 분량인지도 검토하여야 한다.

자료의 수가 적고 불충분하면 많은 불확정성을 지니게 되어 오류를 범할 수 있다. 이때 결합수 분석법이나 사상수 분석법 등을 이용할 수도 있다. 반대로 자료의 수가 많을 경우에는 중복된 자료는 빼도록 한다. 사용기간이 타당하지 않다면 공정한전기간이나 전체의 수로서 추산하는 방법도 있다.

다. 자료의 적합성 검사

과거의 자료는 대부분 오랜기간이 지난 후의 것이므로 그동안 변화된 기술을 고려해야 한다. 설비의 규모나 주변환경이 다르면 기존의 자료에는 고려하지 않은 새로운 위험성이 존재할 수도 있다.

상대적으로 작은 변화가 큰 오차를 내는 요인이 될 수도 있으므로 충분히 고려하는 것이 좋다. 부적합한 자료라고 판단되는 것은 제외한다. 자료가 너무 부족하거나 부적합하면 결합수 분석법이나 사상수 분석법을 실시하도록 한다.

라. 사건가능성 계산

과거 자료에 대한 사고 빈도는 일어난 사고수를 전체 사용기간이나 횟수로 나눈음으로서 얻을 수 있다. 예를 들면 선택된 압축용기가 총 10,000 vessel-year이고 누출사고가 5번 일어났다면 누출사고빈도는 $5 \times 10^{-4}/\text{vessel-year}$ 로 추정된다. 과거의 자료가 설비와 일치하지 않을 경우에는 사고빈도를 증가시키거나 감소시키는 경험적 판단으로의 수정인자가 필요하다. <표 4-1>에 과거의 기록을 이용하여 사고결과 빈도를 평가한 예를 나타내었다.

마. 빈도의 검증

평가에 쓰인 자료들을 다시 한번 재검토하고 나온 결과의 정확도를 검사해야 한다. 평가에 쓰이지 않은 자료를 찾아 계산된 사고빈도와 비교해 본다.

<표4-1> 과거기록을 이용한 사고빈도평가의 예

결 합 양 식	실패 빈도(per 1000 pipe mile-years)			최종값
	원래의 데이터	수정된 데이터 (부적합한 자료 제거후)	수정 인자 (경험적 판단)	
물질 손상	0.21	0.07	1.0	0.07
부식	0.32	0.05	1.0	0.05
외부 충격	0.50	0.24	2.0	0.48
자연의 위험성	0.35	0.02	0.5	0.01
기타	0.06	0.05	1.0	0.05
전체 결함 빈도	1.44	0.43	-	0.66

2. 결함수 분석법

결함수 분석법(FTA)은 어떤 특정한 사고에 대하여 그 사고를 일으킬 수 있는 장치의 이상이나 운전자의 실수 등을 도식적으로 나타내어 사고가 발생할 수 있는 순서 및 확률을 나타낼 수 있는 연역적 기법이다.

결함수 분석은 설계시에도 적용가능하고 운전중에도 실시할 수 있는 위험도 평가방법으로서 다음과 같은 장점을 지니고 있다.

- ㄱ. 사고가 발생하는데 기여한 모든 원인들의 연관성을 나타내고 사고가 일어나게 된 일련의 절차를 나타내어 비전문가도 쉽게 그 사고의 구조를 파악할 수 있다.
- ㄴ. 사고발생원인을 통계적 및 컴퓨터 처리가 가능하고 정량적인 분석과 예측을 할 수 있다.

- ㄷ. 각각의 중간사고들의 조합에 따른 확률이 정량적으로 비교되므로 시스템 내에서 갖는 중요도를 알 수 있으며 사고예방을 위한 노력과 시간을 절감할 수 있다.
- ㄹ. 시스템이 복잡하더라도 도식적 분석을 통하여 시스템 특성을 파악하기 쉽고 사고발생초기에 예방하거나 극소화시킬 수 있는 방법을 마련할 수 있다.

가. 결함수 분석 절차

위험도 평가를 위한 결함수 분석법의 일반적인 순서는 다음과 같다.

- ㄱ. 해석하려는 시스템의 공정과 작업내용을 파악한다. 이때 PFD, P&ID, 배치도 등을 이용한다.
- ㄴ. 과거의 사고기록이나 경험을 바탕으로 위험도를 검토하여 분석할 사고(정상사상)와 위험도 달성목표를 결정한다. 이때 필요하면 예비위험분석(PHA)을 실시한다.
- ㄷ. 정상사상에 대하여 기계, 재료, 작업대상물의 불량상태나 작업자의 실수, 환경의 결함 등에 대하여 원인과 영향을 가급적 상세히 조사한다. 이때 필요하면 PHA, HAZOP, FMEA를 실시한다.
- ㄹ. 결함수(Fault Tree)를 작성한다.
- ㅁ. 최소 컷 세트와 최소 패스 세트를 구한다.
- ㅂ. 작성한 결함수를 수식화하고 부울대수(Boolean Algebra)를 이용하여 간소화한다.
- ㅅ. 앞의 ㄷ에서 구한 발생확률을 결함수에 표시한다.
- ㅇ. 정상사상의 발생확률을 계산한다.
- ㅈ. 계산결과를 과거의 사고발생 확률이나 중간사고의 발생확률과 비교한다.

- ㄷ. 비교한 결과가 틀리면 ㄷ으로 되돌아가서 재검토한다.
- ㄹ. 분석한 결과가 위험도 달성 목표를 만족하지 못할 때에는 보다 효과적인 안전수단을 검토한다. 위험도 달성 목표를 만족하면 ㅎ으로 넘어간다.
- ㅁ. 기술이나 비용 등 제반조건을 고려하여 최적의 사고 방지 대책을 세우고 ㄷ으로 되돌아 간다.
- ㅎ. 이상의 순서에 따라 결함수 분석의 규모가 커지면 컴퓨터를 사용하는 것이 좋으며, 다음의 평가에 이용할 수 있도록 자료를 정리하도록 한다.

나. 결함수 작성에 사용하는 기호

결함수 작성에 사용하는 기호는 사용하는 사람에 따라 다소 차이가 있지만 사상을 나타내는 기호, 게이트를 나타내는 기호, 게이트의 수정 기호로 나눌 수 있다.

(1) 사상 기호

(가) 장방형 기호

기본사상과 통상 사상을 제외한 모든 결함사상을 다음의 게이트 기호와 수정 게이트에 나타내는 기호이다.([그림 4-1]의 a 참조)

(나) 원형 기호

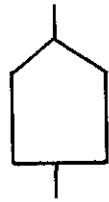
기본사상을 나타내는 기호이다. 때로는 점선의 원으로 사람의 실수를 나타내고 빗금이 쳐진 이중원으로 작업자에 의한 결함이나 시정을 빠뜨리는 것을 나타낸다.([그림 4-1]의 b~d 참조)

(다) 가(家)형 기호

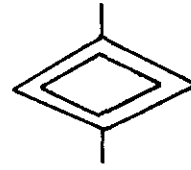
결함사상이 아닌 작업이나 기계의 상태에서부터 재해의 발생원인이 될 요소가 있



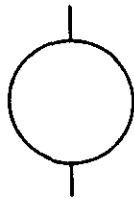
(a) 결합사상



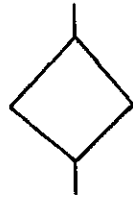
(e) 통상사상



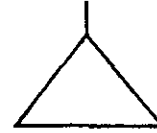
(i) 생략사상
(간소화)



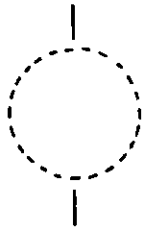
(b) 기본사상



(f) 생략사상



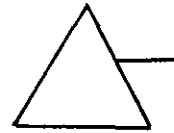
(j) 전이기호
(전출)



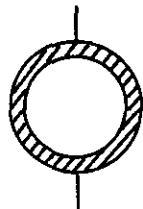
(c) 기본사상
(인간의 실수)



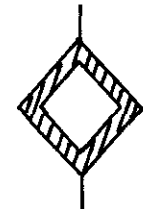
(g) 생략사상
(인간의 실수)



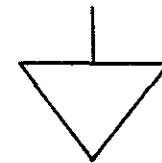
(k) 전이기호
(전입)



(d) 기본사상
(작업자의 간과)



(h) 생략사상
(작업자의 간과)



(l) 전이기호
(수량이 다름)

[그림 4-1] 결합수의 사상 기호

는 것을 나타내는 통상사상(normal event)의 기호이다.([그림 4-1]의 e 참조)

(라) 마름모꼴의 기호

그것보다 앞의 것은 분석할 수 없거나 분석할 필요가 없는 생략사상을 나타내는 기호이다. 때로는 점선 및 빗금친 이중 마름모꼴을 사용하여 사람의 실수 및 작업자에 의한 결함의 간과 또는 시정누락을 나타낸다. 공백 이중 마름모꼴은 그것보다 앞의 것과 관계가 명확하고 수량적 평가에 의해 결함수를 간소화할 수 있는 경우에 사용한다.([그림 4-1]의 f~i 참조)

(마) 삼각형 기호

동일한 결함수 안에서 다른 부분과의 전이를 나타내는 기호로서 삼각형의 위쪽에 선이 나와있는 경우는 다른 부분으로의 전출을 나타내고, 측면에 선이 나와있는 경우는 다른 부분에서의 전입을 나타내고 동일한 번호를 붙여 연결된 것을 표시한다. 전입부분과 전출부분이 내용적으로는 같지만 수량적으로 다른 경우에는 역삼각 기호를 사용한다. ([그림 4-1]의 j~l 참조)

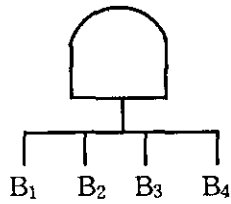
(2) 게이트 기호

(가) AND 게이트와 OR 게이트

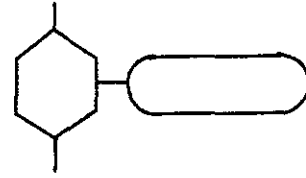
아래 단계에서의 입력이 논리곱이면 AND 게이트를, 논리합이면 OR 게이트로 표시한다.([그림 4-2]의 a, b 참조)

(나) 억제 게이트(Inhibit Gate)

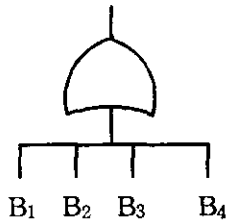
논리적으로는 수정기호의 일종으로 억제수정자(inhibit modifier)라고도 하지만, 실질적으로는 수정기호를 병용하여 게이트의 역할을 한다. 입력사상이 일어나고 특정조건을 만족하면 출력사상이 생기고, 특정조건을 만족하지 않으면 출력이 생기지 않는다. 이때 조건은 수정기호내에 쓴다.([그림 4-2]의 c 참조)



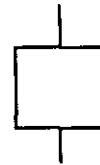
(a) AND 게이트



(c) 억제 게이트



(b) OR 게이트



(d) 부정 게이트

[그림 4-2] 결함수의 게이트 기호

(다) 부정 게이트(Not Gate)

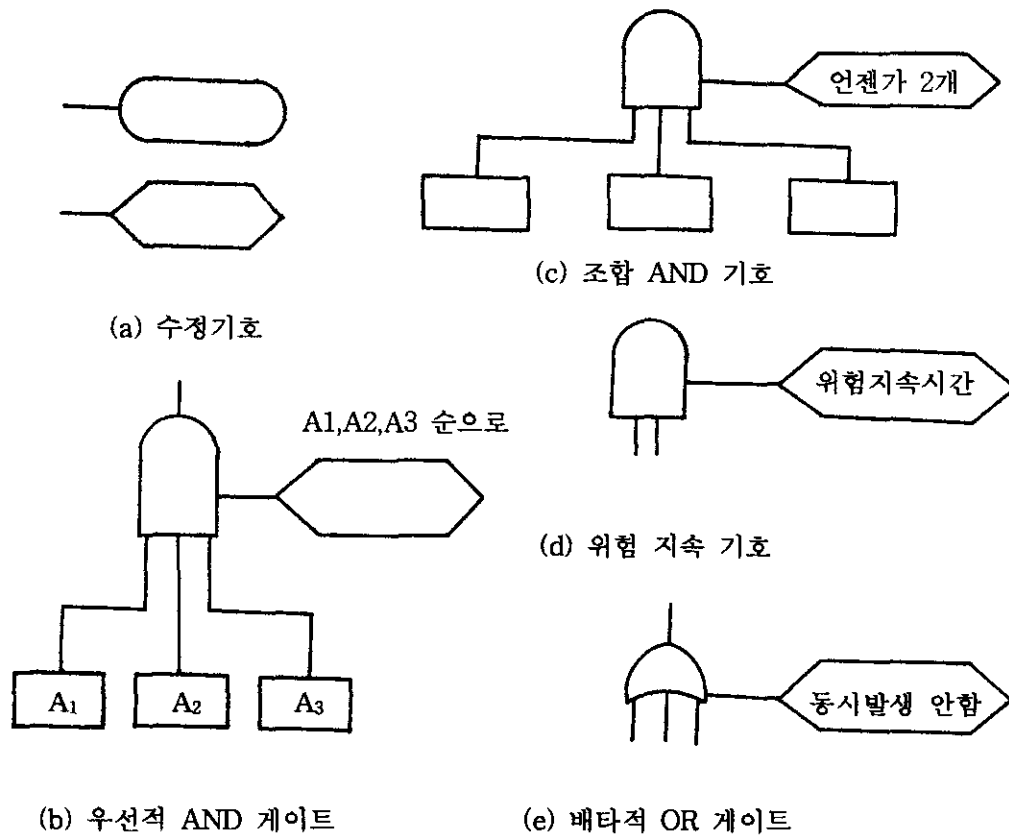
(나)의 경우와 같이 부정수정자(not modifier)라고도 하며 입력사상의 반대사상이 출력된다.([그림 4-2]의 d 참조)

(3) 수정 게이트

AND 게이트 또는 OR 게이트에 병용하여 각종의 조건을 갖는 게이트를 만든다.

(가) 우선적 AND 게이트(Priority AND Gate, Sequential AND Gate)

입력사상중에 어떤 사상이 다른 사상보다 먼저 일어날 경우에 출력사상이 발생한다.([그림 4-3]의 b 참조)



[그림 4-3] 결합수의 수정기호와 수정 게이트

(나) 조합 AND 게이트(Combination AND Gate)

3개 이상의 입력사상중 언젠가 2개가 일어나면 출력이 생긴다.([그림 4-3]의 c 참조)

(다) 위험지속 기호(Hazard Duration Modifier)

입력사상이 일정시간동안 계속되었을 때 출력이 생긴다. 일정시간동안 계속되지 않으면 출력은 생기지 않는다.([그림 4-3]의 d 참조)

(라) 배타적 OR 게이트(Exclusive OR Gate)

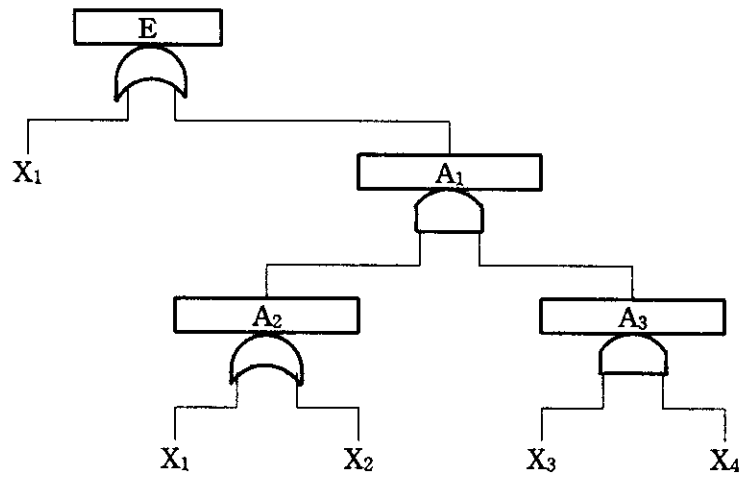
OR 게이트이지만 2개 이상의 입력이 존재하면, 즉 2가지의 고장이 동시에 일어나지 않는 경우에는 출력이 생기지 않을 때 표시하는 기호이다.([그림 4-3]의 e 참조)

다. 최소 컷 세트와 최소 패스 세트

컷이란 그 속에 포함되어 있는 모든 기본사상(통상사상, 생략사상과 결합사상 포함)이 일어났을때 정상사상이 발생하는 기본사상의 집합을 말한다. 이들 중 정상사상을 일으키기 위한 최소한의 것을 최소 컷 세트(minimal cut set)이라 한다. 따라서 최소 컷 세트는 어떤 고장이나 실수가 생겨야 재해가 일어나는지를 알 수 있게 한다. 이와는 반대로 최소 패스 세트(minimal pass set)는 안에 포함된 기본 사상이 모두 일어나지 않으면 정상사상이 발생하지 않는 기본사상의 집합으로서 어느 부분만 고장이 나지 않으면 재해가 일어나지 않는다는 식으로 시스템의 신뢰도를 나타내는 것이다. 정상사상의 발생에 어느 부분이 큰 영향을 미치는지를 최소 컷 세트로 알 수 있게 하여 효율적으로 위험도를 낮출 수 있는 방안을 제시하므로 이를 아는 것은 매우 중요하다.

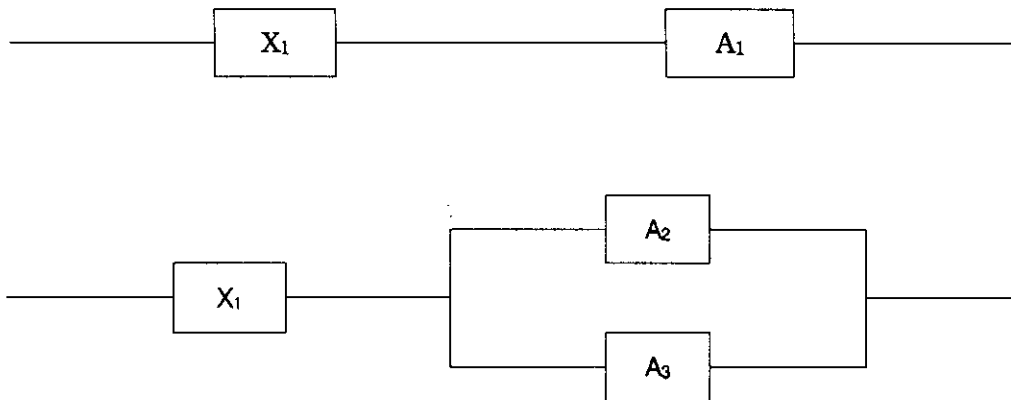
(1) 최소 컷 세트를 구하는 방법

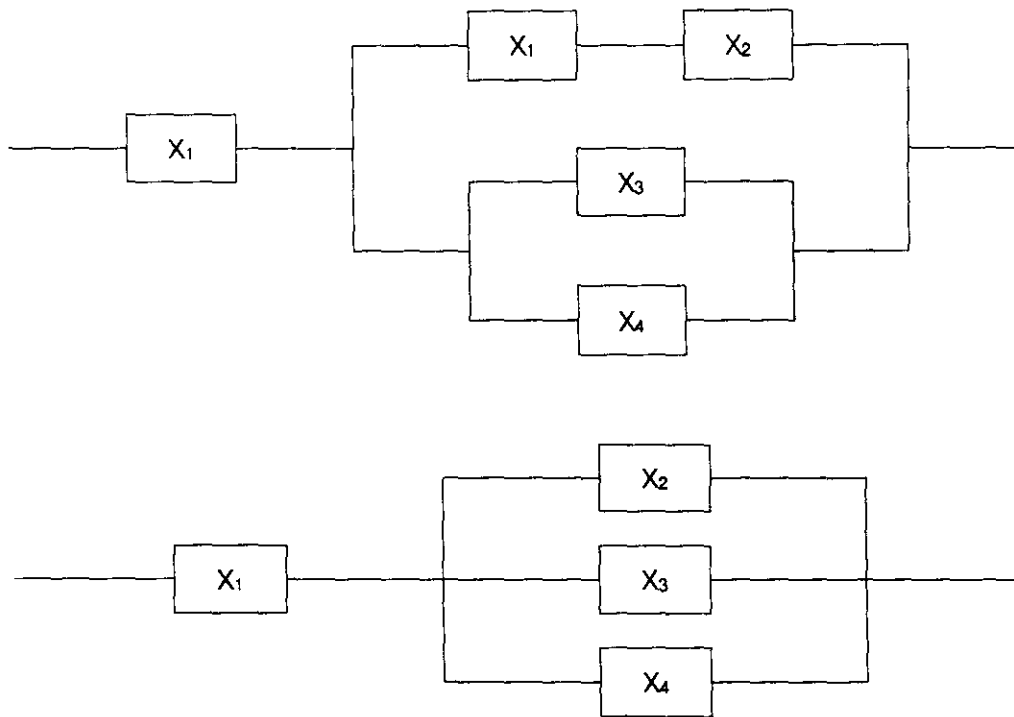
다음은 [그림 4-4]를 예로 하여 신뢰성 Block도의 변형을 통한 방법과 부울대수를 이용하여 최소 컷 세트를 구하는 방법, 그리고 프로그램을 위한 대표적 알고리즘으로 사용되는 Fussell 알고리즘을 이용하여 최소 컷 세트를 구하는 방법에 대하여 설명하였다.



[그림 4-4] 결함수의 예

(가) 신뢰성 Block도의 변형에 의한 방법





Block도의 변형에 의하여 최소 컷 세트는 $(X_1), (X_2, X_3, X_4)$ 의 2가지가 되는 것을 알 수 있다.

(나) 부울대수에 의한 방법

예로 든 결합수를 부울대수의 성질을 이용하면

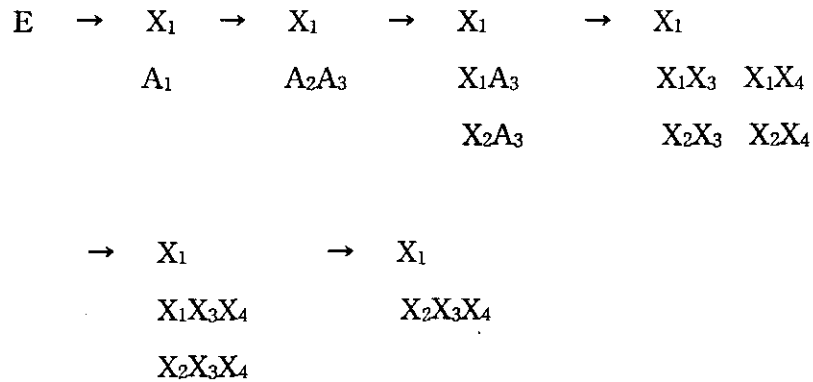
$$\begin{aligned}
 E &= X_1 + A_1 \\
 &= X_1 + A_2 \cdot A_3 \\
 &= X_1 + (X_1 + X_2) \cdot (X_3 + X_4) \\
 &= X_1 + X_1 \cdot X_3 \cdot X_4 + X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \\
 &= X_1 + X_2 \cdot X_3 \cdot X_4
 \end{aligned}$$

와 같이 최소 컷 세트는 $(X_1), (X_2, X_3, X_4)$ 가 된다.

(다) Fussell의 방법

결함수 분석에 사용되는 현재까지 개발된 프로그램은 MOCUS, WAMCUT, KITT 등이 있고, 결함수 분석에 이용되는 알고리즘으로는 Semanderes 알고리즘, Fussell 알고리즘 등이 있다. 여기서는 Fussell 알고리즘에 대하여 나타내었다.

- ㄱ. 중간사상 각각에 $A_1, A_2, \dots$ 와 같이 번호를 붙인다.
- ㄴ. 기본사상에 $X_1, X_2, \dots$ 와 같이 번호를 붙인다.
- ㄷ. 결함수의 최상부부터 번호가 부여된 기호를 기록해 간다. 이때 OR 게이트인 경우에는 입력사상을 세로 방향으로 기록하고, AND 게이트인 경우에는 가로방향으로 기록해 간다.
- ㄹ. 위의 절차를 진행하여 모든 기본사상이 기록되면 얻어진 컷 세트를 간략화하여 최소 컷 세트를 구한다.



결함수의 기본사상과 게이트의 숫자가 많으면 컷 세트 및 최소 컷 세트와 정상사상의 발생확률을 구하기에 많은 시간과 노력이 필요하게 된다. 이때 컴퓨터 프로그램을 이용하면 보다 쉽게 계산할 수가 있다. '92년도에 본 연구원에서 개발된 프로그램을 이용할 수도 있다.

3. 사상수 분석법

사상수 분석법(ETA)은 재해의 발생 가능성이 결정되었을때 초기 사건에 대한 안전 시스템과 작업자의 반응을 고려하여 초기 사건으로부터 일어날 수 있는 재해의 가능성을 도식한다. 또한 복잡한 공정에서 일어날 수 있는 다양한 재해를 사건의 연속성으로 가능한 결과를 묘사한다. 귀납적인 방법을 사용하며 정량적인 분석 수법이다. 종래에 지나치기 쉬웠던 재해의 확대요인의 분석 등에 적합하지만 재해가 일어나게 되는 결합의 특정 조합에 대한 것은 결합수 분석법을 이용하는 것이 좋다.

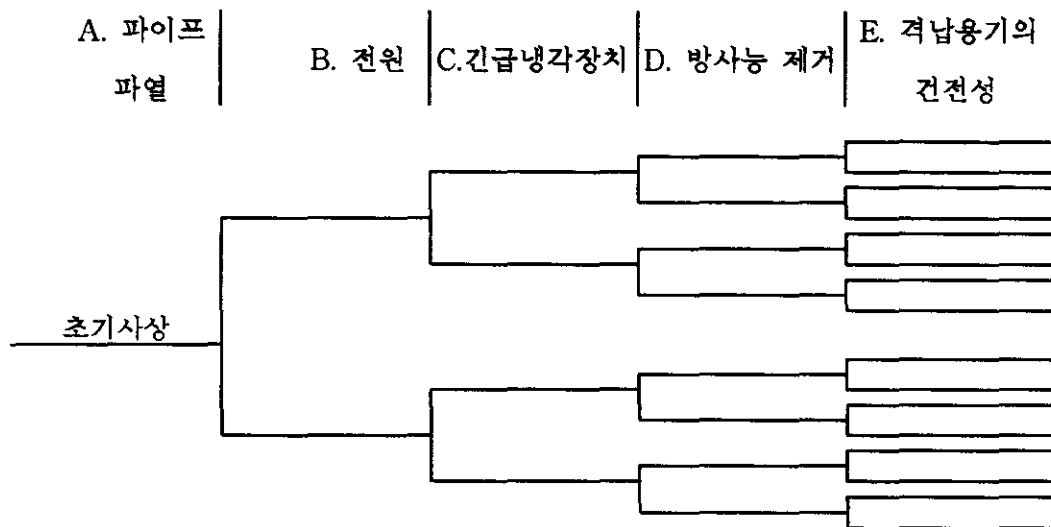
사상수(ET)의 작성은 통상 좌에서 우측으로 진행되며, 요소 또는 사상을 나타내는 부분으로 나누어 성공사상은 상측에, 실패사상은 하측으로 분기한다. 분기마다 발생확률(안전도와 불안전도)을 표시하고 마지막으로는 각각의 제곱의 합으로써 시스템의 안전도를 계산한다. 결합수에서 분기된 각 사상에 대한 확률의 합은 항상 1이다.

사상수 분석법은 작업자를 포함하여 시스템의 각 구성요소의 기능을 정상과 고장으로 구분을 짓는다. 어떤 기능에 고장이 발생한다고 하였을때, 그 뒤의 다른 부분에서 설비의 고장과 작업자의 실수가 중복되면 시스템에 어떠한 결과가 발생하는가를 여러개의 가지로 나눈 논리를 따라서 추적해 간다.

분석할 때 사상수 그래프를 이용하는데 이는 [그림4-5]와 같은 형식을 취하며 왼쪽에 분석의 대상이 되는 시스템의 제요소, 또는 그것들의 기능을 왼쪽부터 적당한 순서로 나열한다. 최초로 고장으로 상정하는 기능을 가장 왼쪽에 놓는다.

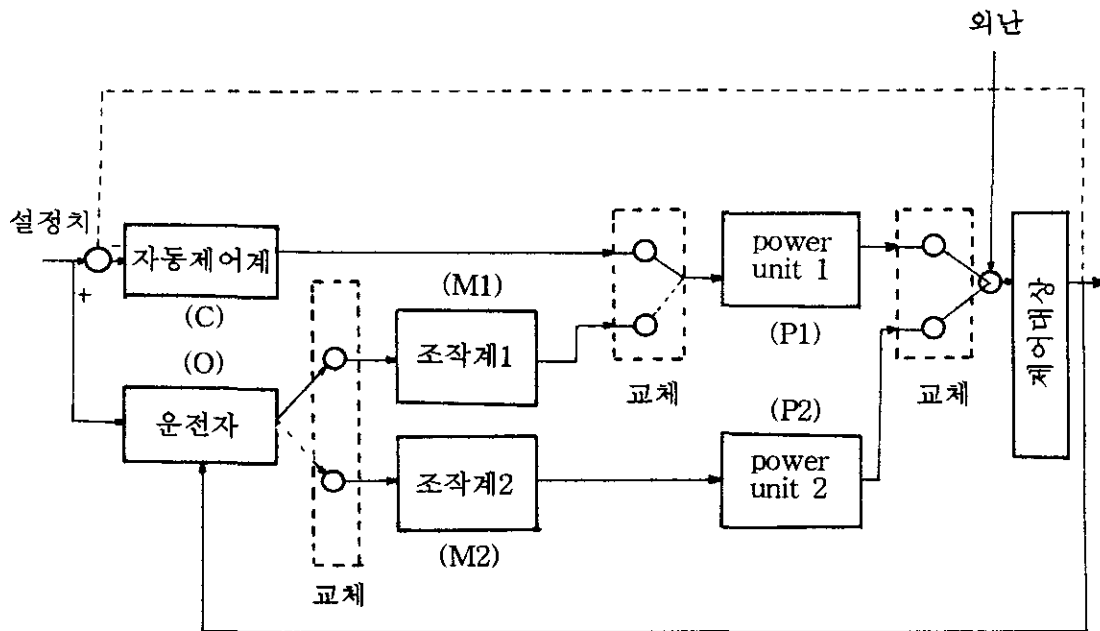
이 기능의 고장은 특히 초기사상(initiating event) N이라고 하며 그래프에서는 왼쪽 끝의 가지가 그 고장을 나타내고, 다음 기능란에서 가지나누기를 한다.

위의 가지는 기능이 정상인 경우를 밑의 가지는 고장인 경우를 나타낸다. 이하



[그림] 원자로 대규모 냉각수 상실사고(LOCA)의 ET

계속하여 가지 나누기를 오른쪽 끝에 도달할 때까지 한다. 그래프를 따라서 왼쪽 끝에서 오른쪽 끝에 이르는 어느 경로도 그것에 포함되는 가지에 대응하는 사상의 조합이 시스템에 초래하는 결과를 의미하지만 이때 물리적으로 있을 수 없는 것, 있을 수도 있어도 분석에 무의미한 것이 경우에 따라서 발생할 수 있다 이와 같은 형식상의 또는 외관만의 조합을 그래프에 나타내어도 소용이 없기 때문에 그것들을 생략하게 된다. 이것은 그래프를 작성하는 과정에서 처음부터 제외하거나 후에 상세히 보고 생략해도 좋지만 잘못 제거하면 분석에 오차를 일으키는 것이 되기 때문에 신중을 요한다. 그러나 이 경우의 조합을 그냥 형식만으로 추적했을 때 n 종류의 기능이 있다면 $2n$ 의 결과로 되고 n 이 증가하면 실제로는 그래프에 그리고 결과를 점점하는 것이 용이하지 않기 때문에 사상수를 만드는 과정에서 어느 정도 생략하는 것이 실질적이다. 이와 같은 방법으로 분석의 대상이 되지 않는 결과(사상의 조합)를 제외한 사상수를 축소형 사상수라고도 한다. 예로서 어떤 장치가 [그림4-6]과 같은 구조로서 제어되고 있다고 한다.



[그림 4-6] 제어구조의 예

평상시는 제어조건계와 power unit 1에 의해서 자동제어를 행하고 있으나 이 계통에 이상이 생겼을 때 갑자기 정지하는 것은 오히려 위험하게 되므로 제어계통을 바꾸어 어느 기간동안 운전자가 수동제어를 할 필요가 있다고 본다.

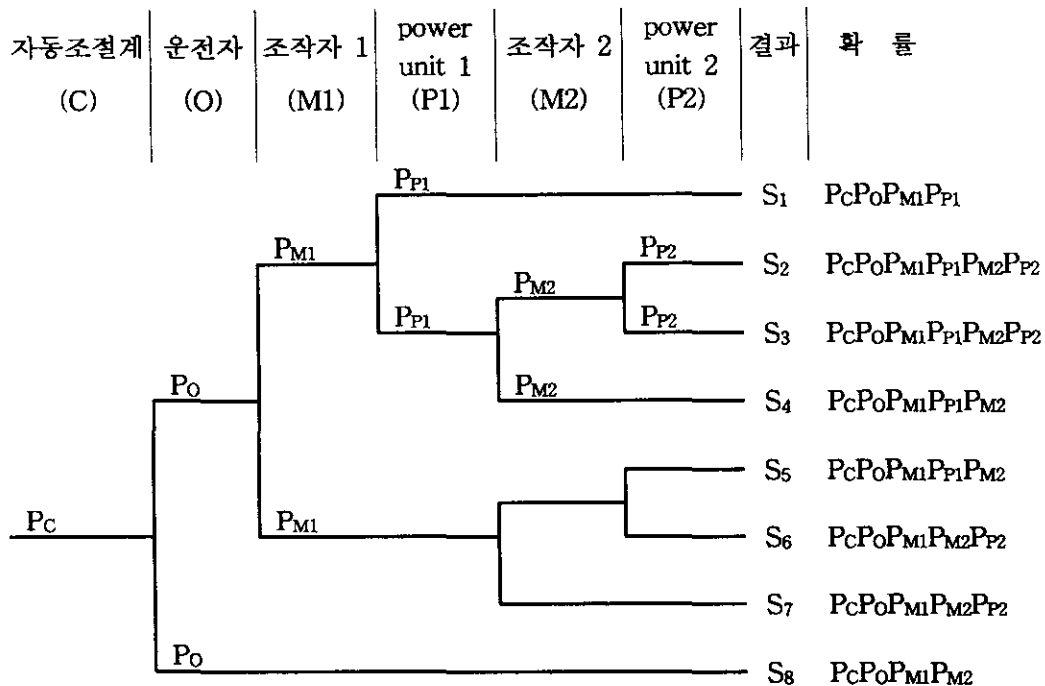
제어에 실패하면 사고가 된다. 자동조절계가 고장난 경우 운전자가 우선 조작계 1에 의해서 수동조작을 하고, power unit 1, 2, 운전자, 조작계 1, 2 만으로 일어난다고 하고, 각 계층의 교체와 신호의 전달 등과 같은 다른 기능들은 신뢰성이 충분하다고 가정하고, 사상수를 작성하면 다음과 같이 할 수 있다.

먼저 초기사상을 결정해야 하는데, 여기서는 자동조절계의 고장과 power unit 1의 고장 중 어느 것이 발생해도 평상시의 자동제어는 불능이 되기 때문에 각각을 초기 사상수로 하였다.

사상수 분석법의 순서를 개략적으로 나타내면 우선 문제가 되는 초기사상에 대해서 사상수를 작성하고, 그 사상에서 파생하는 결과를 조사한다. 다음에 결과의 의미를 생각하고 알맞게 분류를 한다. 결과를 성공인가 또는 실패인가 하는 2종류로만 나눌 수도 있고, 분석의 목적에 맞추어서 나누어도 된다. 규모가 비슷한 사고를 정리하면 그 시스템에서 초기사상에 의해 초래되는 피해의 추정에 유용하고, 동일원인(event)을 가진 결과를 정리하는 방법으로 분류한다면 그 원인의 중요함을 쉽게 알 수 있다. 다음으로 각종 피해가 발생할 가능성을 검토한다. 이 경우 사상수의 각 가지에 따라서 현장경험을 기초로 하여 정성적으로 검토하는 것도 좋지만 사상수상의 각 가지(사상)의 발생빈도를 추정할 수 있고, 또 각 기능의 고장이 독립하여 발생한다고 간주할 수 있다면 정량적 평가를 간단하게 실행할 수 있다. 이것은 사상수를 작성하는 과정에서 각 기능에 관한 사상(정상 혹은 고장)을 배반으로 나누고, 결과는 모두 관계하는 기능의 동시사상으로 나타내고 있기 때문에 초기사상에서 결과에 이르기까지 가지의 확률을 전부 곱하여 분류된 집단내에서 합하면 좋다. 전술한 예에서 필요한 어느 기간동안 제어에 성공할 확률을 구하는 식을 [그림 4-7]에 나타내었다.

다만 여기에서는 각 가지의 확률이 주어진 경우에 형식적인 계산법만을 나타낸 것이다. [그림 4-7]에 있어서 P_s 는 power unit P_s 가 정상일 확률을 의미하고, P_{p2} 는 그것이 고장나는 확률을 나타내는 것으로 제어에 성공하는 결과의 집단을 (S_1 , S_2 , S_3)로 하였다. 자동조절계가 고장이 나고, 제어에 실패할 확률은 $1 - (P_{s1} + P_{s2} + P_{s3})$ 로 계산할 수도 있고, 이외 결과의 확률을 합하여도 된다. 이와 같은 빈도산출이 행하여지면, 사고가 발생할 경우 손해의 정도와 그것이 발생할 가능성의 정도를 비교하여 다음 분석의 방향을 결정하게 된다.

이상이 사상수 분석법의 극히 기본적인 방법이다. 이것은 시스템의 안전성이나, 위험성을 어느 정도 거시적으로 평가하기 위해서 자주 사용되지만 지나치게



자동조절계가 고장난 후 일정기간 제어할 수 있는 확률

$$= P_{S1} + P_{S2} + P_{S5} = P_C P_O (P_{M1} P_{P1} + P_{M1} P_{P1} P_{M2} P_{P2} + P_{M1} P_{M2} P_{P2})$$

[그림 4-7] 자동조절계 고장을 초기사상으로 하는 경우의 사상수

세밀한 분석에는 적합하지 않다. 이것은 좁게 생각하면 시스템을 구성하고 있는 요소라든가 기능의 수가 증가하고, 앞에서 설명한 바와 같이 근본적으로는 2N의 order에서 가지의 조합이 늘어나므로 각 경우를 추구해 나갈 수 없게 되는 것과 동시에 전체에 대한 장래 예측이 어렵기 때문이다.

인간 실수를 고려할 때는 사상수의 작성방법에 약간의 주의를 필요로 한다. 이 경우에는 조작을 세분화하여 생각하지 않고, 가능한 한 대략 파악하여 취급하는 편이 타당한 경우가 많다. 인간에 한정하지 않고, 여러가지 요소를 컨트롤하고

있는 요소에 대해서 발생하는 문제를 분석함에 있어서 신뢰성 블록선도가 미리 준비되어 있는 것은 현실로는 기대할 수 없기 때문에 사상수를 작성하기 이전에 미리 주의할 필요가 있다. 일단 사상수가 작성되면 거기에 따라서 검토와 계산이 행하여진다.

제어되는 측의 고장에 의해서 제어를 하는 측의 기능이 바뀌기도 하고 고장과 실수의 확률이 달라지기도 하는 경우는 제어를 하는 측의 요소를 오른쪽에 배열하는 것이 판단하기 쉽다. 반대로 여러 가지 제어를 하고 있는 측이 고장이라면 제어되는 측의 모든 기능이 소용없게 되므로 제어측을 왼쪽에 두는 것이 좋다. 또한 기계·설비의 고장(초기 인간 실수의 경우는 별도)보다 인간의 기능과 실수의 확률이 주위의 상황에 영향을 미치기 쉬우므로, 인간의 기능을 오른쪽에 두는 것이 다루기 쉬운 사상수로 된다. 이 경우 왼쪽에 위치하는 가지의 조합이 나타내는 상황에서 인간실수의 확률을 산출할 수 있다면 이것은 조건부 확률을 고려한 것이 되므로 독립성의 가정은 고려하지 않아도 된다.

제 5 장 위험도 평가

1. 위험도의 표시 방법

일반적으로 위험도를 표시하는 수단으로서 재해나 손실의 정도와 가능성에 대한 정보를 조합하여 나타낸다. 표시형태는 선택한 방법과 위험도 평가의 목적에 맞게 사용한다.

가. 위험지수

수치나 표로서 간단하게 표현한 형태이다. 이 방법은 일반적으로 분석도가 떨어지므로 위험도를 받아들이거나 배제할 수 있는 절대적 기준은 아니다. 사용 목적에 따라 여러가지 것들이 쓰이고 있으나 다음은 대표적으로 많이 쓰이는 것이다.

ㄱ. 재해치사율(FAR) : 일정 환경에서 10^8 시간의 폭로기간동안 정의된 집단 내에서 일어나거나 일어날 것으로 예상되는 사망자 수로 표시한다. 10^8 시간은 작업자 약 1,000 명의 평생근로시간에 해당한다.

ㄴ. 개인 위험성 지수(IHI) : 개인이 특정 위험성에 대하여 실질적으로 폭로된 시간을 기준으로 한 재해치사율이다.

ㄷ. 평균 사망율 : 모든 가능한 시간에 대하여 단위 시간당의 평균 예상 사망자수로 표시한다.

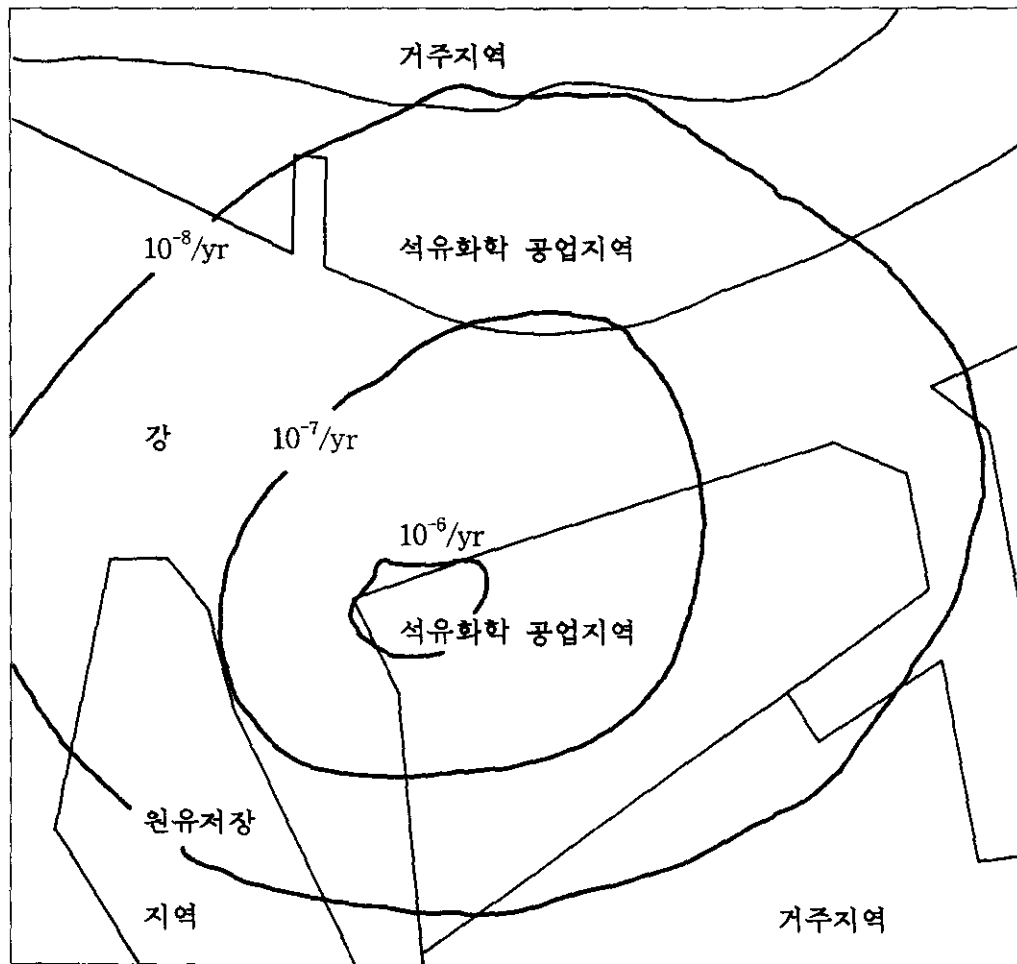
그밖에 독성물질 저장의 잠재위험성을 나타낸 것, 경제적 손실 정도를 나타낸 것 등이 있다. <표 5-1>에 재해치사율의 예를 나타내었다.

<표 5-1> 재해치사율의 예

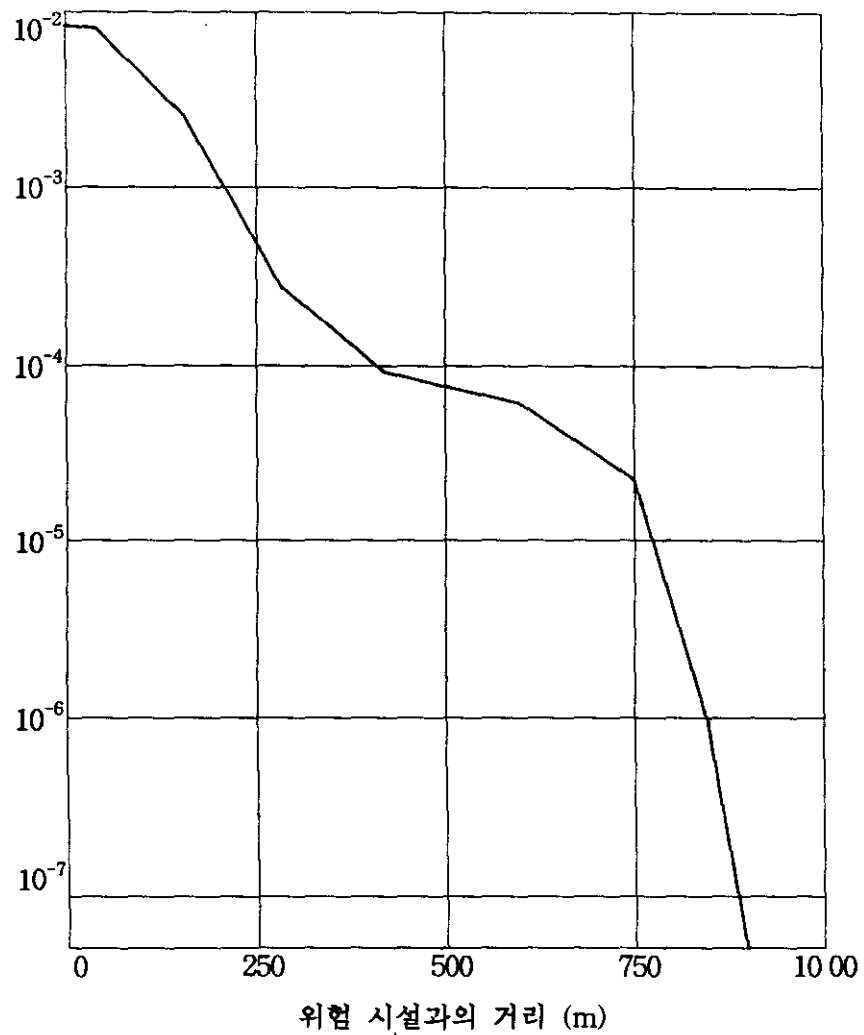
활 동 분 야	치명적 재해율
영국산업(전체)	4
직물제조업	0~15
운수제조업	1~ 3
목재, 가구 관련업종	3
금속제조, 선박 건조	8
농업	10
석탄광업	12
전철원(轉轍員)	45
건설인부	67
실내거주	1
기차 여행	5
자동차 여행	57

나. 개인 위험도(Individual Risk)

위험에 근접해 있는 개인에 대한 위험도를 나타낸다. 표시하는 방법으로는 같은 위험도를 갖는 지점을 연결하여 등고선 모양으로 나타낸 개인 위험도 등고선([그림 5-1] 참조)과 위험설비로부터의 거리와 위험도에 대한 함수로서 개인 위험도 등고선의 단순화한 형태를 취하는 개인 위험도 프로필([그림 5-2] 참조)이 있다. 그리고 폭로 집단중 가장 높은 위험도에 폭로되는 사람에 대한 위험도로서 최대 개인 위험도가 사용되고, 평균 개인 위험도는 특정 설비에 대한 위험성에 폭로되는 집단을 기준으로한 위험도, 대상 집단 전부를 위험성의 폭로 여부에 관계없이 계산하는 위험도, 작업시간당의 폭로 시간을 기준으로 한 위험도가 사용된다.



[그림 5-1] 개인 위험도 등고선의 예

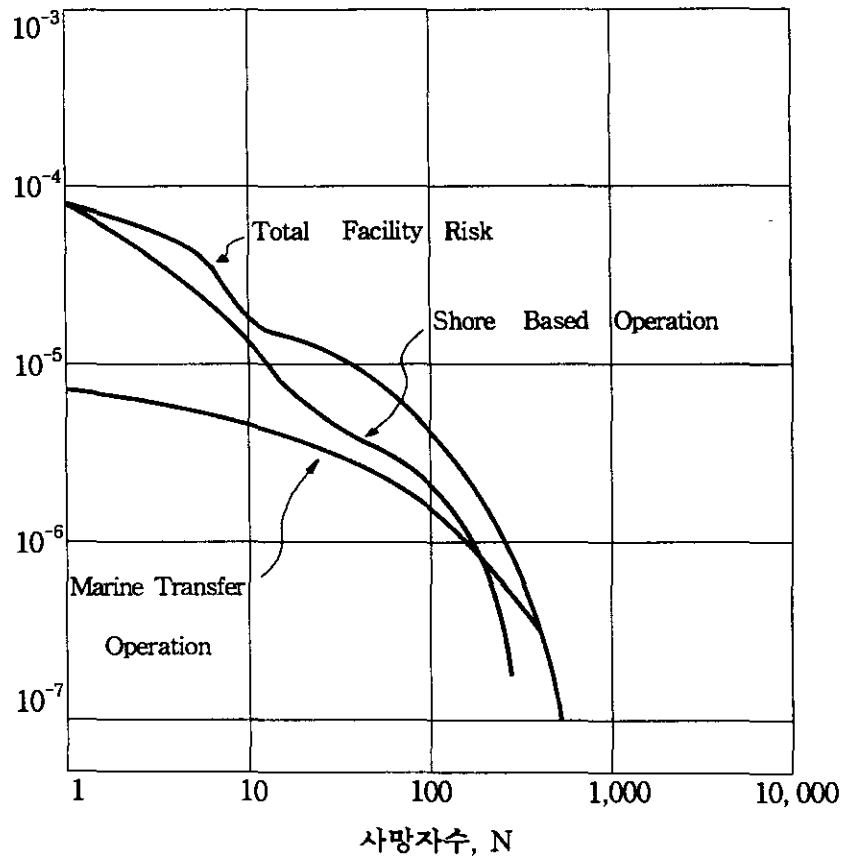


[그림 5-2] 개인 위험도 프로파일의 예

다. 사회(적) 위험도(Societal Risk)

개인 위험도에 주변의 집단형태(주거, 공업, 학교, ...), 사람이 있을 가능성, 완화인자 등을 고려한 위험도로서 위험 설비 주변에 있는 인구집단의 정의가 필요

하다. 보통 설비, 상해, 폭로 등의 수(N)에 대한 그 수보다 많은 수의 사고의 누적된 확률이나 빈도의 그래프(F-N 선도)로서 나타내며 그 예는 [그림 5-3]과 같다.



[그림 5-3] 사회적 위험도 F-N 선도의 예

2. 위험도 산출

가. 위험 지수

(1) 재해치사율(FAR)

$$FAR = 1.14 \times 10^4 \times \frac{\sum_{x,y} IR_{x,y} P_{x,y}}{\sum_{x,y} P_{x,y}} \dots\dots\dots (5.1)$$

여기서, $IR_{x,y}$ 는 x,y 지점에서의 개인 위험도(yr^{-1}), $P_{x,y}$ 는 x,y 지점에서의 사람의 수를 나타낸다.

(2) 개인 위험성 지수(IHI)

개인 위험성 지수는 한 사람이 영향지역에서 폭로되는 최대 재해치사율로 나타낸다. 보통 개인 위험성 지수는 근접한 외부인에 대한 최대 위험도를 근사적으로 계산하기 위하여 사용된다.

(3) 평균 사망율

$$\text{평균사망율} = \sum_{i=1}^n f_i N_i \dots\dots\dots (5.2)$$

여기서, f_i 는 사고 유형 인자 i 의 빈도(yr^{-1}), N_i 는 사고 유형 인자 i 에 기인한 사망자의 수, n 은 평가에 사용된 사고 유형 인자의 수이다.

나. 개인 위험도

(1) 개인 위험도 등고선

개인 위험도의 산출 절차는 3장과 4장에서 다루었던 사고결과 분석과 사고빈도 분석을 이용한다. 먼저 2장에서 다루었던 사고, 사고형태, 사고유형인자를 선택하고 지리화적인 위치를 정의한 후 모든 사고 유형인자에 대하여 영향지역 및 모든 지점에서의 영향지역내에서의 치사확률을 계산하여 사고결과 분석을 한다. 그리고 모든 사고유형 인자에 대하여 다음 식을 이용하여 사고빈도 계산을 한다.

$$f_i = F I p_{o,i} p_{oc,i} \dots\dots\dots (5.3)$$

여기서, f_i 는 사고빈도 분석으로부터 계산한 사고유형 인자의 빈도(yr^{-1}), F_i 는 위의 사고유형 인자를 포함하는 사고 I의 빈도(yr^{-1}), $p_{o,i}$ 는 사고유형 인자 i가 일어날 때의 사고 형태의 확률, $p_{oc,i}$ 는 해당 사고유형 인자의 확률을 나타낸다. 이들 사이의 관계는 사상수(ET)가 일반적으로 이용된다.

다음에 지리학적 위치를 선택하고 선택된 위치에서의 개인 위험도를 다음의 식을 이용하여 계산한다.

$$IR_{x,y} = \sum_{i=1}^n f_i p_{fi} \dots\dots\dots (5.4)$$

여기서 p_{fi} 는 사고결과 분석으로부터 얻어진 값으로 사고유형 인자 i가 x,y 지점에서 사망재해를 일으킬 확률을 나타내고 $IR_{x,y}$ 는 x,y 지점에서 일어날 것으로 예측되는 사망재해의 전체 개인 위험도(yr^{-1})를 나타내는데 식에서 오른쪽 항은 각각의 개인 위험도의 합을 나타낸 것이다.

위의 방법을 되풀이하여 모든 지점에서 개인 위험도를 계산하고, 산출한 개인 위험도의 값을 지역 지도에 표시한다. 그리고 개인 위험도의 수치가 같은 점들을 연결하여 등고선을 그리면 개인 위험도 등고선이 완성된다.

위의 방법은 복잡하고 계산이 어려우므로 간략화 시킨 방법이 이용되기도 한다. 이 방법은 다음의 가정하에서 개인 위험도를 계산한다.

- ㄱ. 모든 위험성은 발생원(point source)에서 생성된다.
- ㄴ. 바람의 분포가 일정하여 모든 방향에서 일정한 바람이 분다.
- ㄷ. 바람속도와 대기 안정도는 하나만 사용한다.
- ㄹ. 점화원은 균일하게 분포되어 있다.
- ㅁ. 사고결과의 영향은 분리하여 처리할 수 있어서 특정 영향 지역내에서는 영향이 같다고 본다.

개인 위험도 산출 과정의 처음은 앞의 과정과 같으나 영향 영역을 반경으로 처리한다. 먼저 가장 큰 영향 영역을 갖는 사고유형 인자를 선택한다. 선택된 사고유형 인자가 풍향의 영향을 받으면 (식 5.5)와 같이 풍향인자를 고려하고 영향을 받지 않으면 사고유형 인자의 빈도를 그대로 사용한다. 그리고 발생원 주위에 원(위험도 등고선)을 그리고 개인 위험도 수치를 기입한다. 위의 과정을 영향영역이 큰 순서대로 모든 사고유형 인자에 대하여 실시하여 개인 위험도 등고선을 완성한다.

$$f_{i,d} = f_i(\theta_i/360) \dots\dots\dots (5.5)$$

여기서, $f_{i,d}$ 는 풍향의 분포가 일정하다고 가정하였을 때의 특정위치에서 받게되는 사고유형 인자 i 의 빈도(yr^{-1}), f_i 는 사고유형 인자 i 의 발생예상빈도(yr^{-1}), θ_i 는 사고유형 인자 i 의 영향 각도(degrees)를 나타낸다. 영향의 정도에 따라 사고유형 인자의 빈도가 결정되면 개인 위험도는 (식 5.6)과 같이 이들을 합한 것이 된다.

$$IRC_i = f_i(or f_{i,d}) + IRC_{i-1} \dots\dots\dots (5.6)$$

여기서 IRC_i 는 고려하고 있는 사고유형 인자 i 의 위험도 등고선에서의 개인 위험도의 값(yr^{-1}), IRC_{i-1} 은 다음에 위험도 등고선에서의 개인 위험도 값(yr^{-1})을 나

타낸다.

(2) 최대 개인 위험도

최대 개인 위험도는 사람이 실질적으로 존재하는 모든 위치에서 계산한 개인 위험도중에서 개인 위험도의 최대값을 나타내는 수치를 찾아서 산출한다.

(3) 평균 개인 위험도

평균 개인 위험도는 어느 집단을 기준으로 하느냐에 따라 달라지지만 한 기준으로 계산이 되면 다른 것은 기준이 되는 집단만 정확히 나타내면 위험도를 산출할 수 있다. 다음식은 전체 집단을 기준으로 한 평균 개인 위험도를 나타내는 식이다.

$$IR_{AV} = \sum_{x,y} IR_{x,y} P_{x,y} / P_T \dots\dots\dots (5.7)$$

여기서, P_T 는 평균 위험도를 위하여 미리 결정된 전체 집단(사람수)을 나타낸다.

다. 사회 위험도

사회 위험도는 개인 위험도 등고선 산출에 쓰인 모든 정보가 필요하고 시설 주변의 인구집단에 대한 정보도 필요하다. 세밀한 분석을 하기 위해서는 다음의 정보가 필요하다.

ㄱ. 인구집단의 형태(거주지역, 사무실, 공장, 학교, ...)

ㄴ. 하루중 시간별 영향

ㄷ. 일주일중 요일별 영향

ㄹ. 실내에 있는 사람들의 백분율

사회 위험도의 산출 절차도 개인 위험도의 산출 절차와 비슷하다. 사고유형 인

자가 선택되었으면 선택된 모든 인자에 대하여 전체 사망자수를 다음 식에 의하여 계산한다.

$$N_i = \sum_{x,y} P_{x,y} p_{fi} \dots\dots\dots (5.8)$$

여기서, N_i 는 사고유형 인자 i 에 기인한 사망자수, $P_{x,y}$ 는 x,y 지점에 있는 사람수를 나타낸다.

모든 사고유형 인자에 대하여 사고빈도와 사망자수가 결정되었으면 다음 식으로 누적빈도를 계산하여 F-N선도를 그려서 사회 위험도 산출을 완성한다.

$$F_N = \sum_i F_i \quad N_i \geq N \text{인 모든 사고유형 인자에 대하여} \dots\dots\dots (5.9)$$

여기서, F_N 은 N 또는 그 이상의 사람에게 영향을 주는 모든 사고유형 인자의 빈도, F_i 는 사고유형 인자 i 의 빈도를 나타내며 F-N선도는 사고로 인한 사망자수, N 에 대한 모든 사고유형 인자의 빈도, F_N 으로서 표시한다.

사회 위험도의 산출도 간략화시켜 계산할 수 있다. 기후조건, 풍향, 인구형태 등을 실제 조건에 근접한 것들만으로 제한하여 위험도를 산출하면 보다 쉽게 계산할 수 있다. 다른 방법으로 사망확률, p_{fi} 를 영향 영역내에 위치하지 않으면 0으로 가정하고, 영향 영역내에 위치하면 모두 일정한 값을 갖는다고 가정하면 사고유형 인자 i 에 기인한 사망자수는 다음 식과 같이 간단한 형태로 계산할 수 있다.

$$N_i = P_i p_{fi} \dots\dots\dots (5.10)$$

여기서, P_i 는 사고유형 인자 i 에 기인한 분리된 영향 영역내에 있는 전체 사람수, p_{fi} 는 분리된 영향 영역내에서의 사고유형 인자 i 에 의한 사망확률을 나타내며 위와 같은 방법을 되풀이 하여 F-N선도를 그린다.

3. 위험도의 불확정성, 민감도, 중요도

가. 불확정성

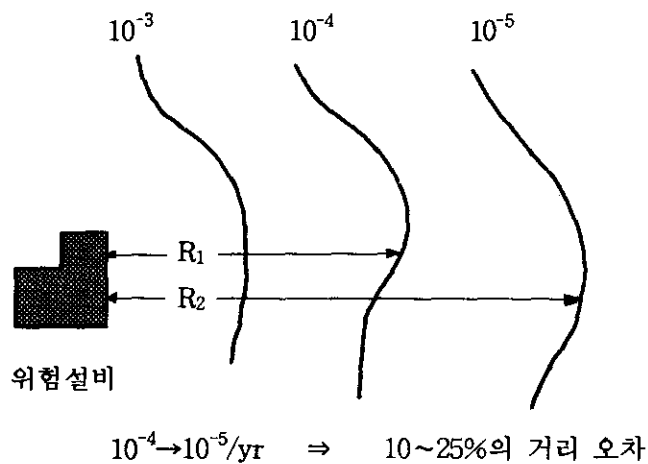
위험도 평가에서 불확정성은 사용된 모델과 데이터, 평가의 정도, 평가 과정 등에서 나타난다. 모델에서 발생하는 불확정성은 평가 대상에 대한 부적합한 모델의 사용, 수학적 또는 수치해석상의 근사가 큰 경우, 모델의 적용 영역이 적합하지 않을 경우에 발생한다. 모델에 사용된 자료에서는 사용된 자료가 불완전하거나 편기된 경우, 또는 특정 사례에 대한 자료의 결핍 등에 의하여 나타난다. 그리고 평가 중에 충분히 깊게 분석하지 않은 경우나 인간의 실수나 고장, 공정, 사건의 연속성에 대한 충분한 처리가 이루어지지 않았을 경우에도 발생하게 된다.

정량적 위험도 평가에서 발생하는 불확정성은 다음의 요인에 의한다.

- ㄱ. 시스템 묘사 : 공정의 묘사나 도면이 틀린 경우, 운전절차 등이 실제와 다른 경우, 부지 지도나 인구, 날씨에 대한 자료에 대한 자료가 맞지 않은 경우
- ㄴ. 위험성의 확인 : 주요 위험성에 대한 인지 미비, 평가를 위하여 자료를 선택하는 과정에서 중요한 사례가 빠진 경우
- ㄷ. 사고 결과 산출 : 부적합한 모델의 선택, 모델 자체의 불완전함, 모델 매개변수의 부정확함, 입력 자료의 결핍, 누출 상태 적용의 상이함, 동물에 대한 자료를 인간에게 적용, 사고 완화인자가 고려되지 않음.
- ㄹ. 사고 빈도 산출 : 기존 자료의 외삽에 의한 오류, 시스템의 단순화로 의한 제한, 결합수 분석법과 사상수 분석법 자체의 불완전함, 입력 자료가 부정확하거나 미비 또는 부적합함, 전문가의 판단에서 비롯되는 오류
- ㅁ. 풍향 분포, 점화원의 비균일성, 사고의 발생 지점을 단일 점으로 처리함

로서 생기는 오류, 평가 절차의 간략화로 인한 정밀성의 감소(바람 속도, 안정도, 발화의 경우의 수의 제한 등)

개인 위험도 등고선에 미치는 불확정성의 영향을 [그림 5-4]에 나타내었다. 위험도가 10만큼 오차가 나게 되면 등고선의 위치가 변하게 되어 위험 설비로부터의 거리는 10~20% 정도의 차이가 나게 된다.



[그림 5-4] 개인 위험도 등고선의 위치에 대한 불확정성의 영향

나. 모델 매개변수의 민감도

모델에 사용된 매개변수에 대한 민감도는 (식 5.11)과 같이 그 매개변수의 단위 변화당 위험정도의 변화로서 정의된다. 많은 사고 목록, 모델, 가정, 자료에서 전체 불확정성에 미치는 잠재적인 중요 기여자는 어느 것인지를 민감도로서 확인할 수 있다.

$$S_i = \frac{\Delta R_i}{\Delta P_i} \dots\dots\dots (5.11)$$

여기서, S_i 는 매개변수 i 에 대한 민감도, ΔR_i 는 모델 매개변수 i 의 변화에 기인하는 위험 정도의 변화, ΔP_i 는 모델 매개변수 i 의 변화를 나타낸다.

다. 중요도

일반적으로 전체 위험도는 (식 5.12)와 같이 사고 유형인자별 위험도의 합으로 나타낸다.

$$R = \sum_{i=1}^n R_i \quad \dots\dots\dots (5.12)$$

여기서, R 은 전체 위험도를 나타내고, R_i 는 사고 유형인자별 위험도를 나타낸다. 이때 각각의 위험도는 전체 위험도에 기여한 중요도에 따라 다음 식과 같이 순서지워진다.

$$[R_1, R_2, \dots, R_n] \quad \text{단, } R_i \geq R_{i+1} \quad \dots\dots\dots (5.13)$$

일반적으로 개인 위험도는 등고선의 형태를 나타내어 유효한 정보를 얻을 수 있고 중요도를 나타내기 쉽다. 그러나 강한 방호벽이 존재하거나 점화원이 비균일하게 분포되어 있는 경우 등은 적절한 정보를 얻기가 힘들고 중요 위험도 기여자가 잘 구분되지 않는다. 사회 위험도 평가의 경우에는 보통 설비가 많은 것부터 나열하는 식으로 중요도를 나타내나, 실제 순서는 분석자의 판단에 의존하고 일반적으로 중요 위험도 기여자를 판별하기에는 적당하지 않다. 위험지수인 경우는 수치로서 나타내기 때문에 각각의 사고에 대한 중요도 순서를 나타낼 수 있다.

제 6 장 결 론

화학공장에서의 사고 형태는 위험물질의 누출과 이로 인한 화재와 폭발, 독성 영향 등이 있으며 사고가 발생하면 재해의 규모가 타업종에 비해 매우 크다. 또한 이들 공장은 거의 공업단지에 밀집되어 있어서 사고가 나면 주변 공장이나 주거지역으로 재해가 확산될 위험성이 매우 크며 국가 기간산업에도 막대한 영향을 미칠 수도 있다.

따라서 본 연구에서는 정량적 위험도 평가를 실시하여 사고의 발생 가능성을 줄이고 사고 발생시 비상 계획을 마련하여 재해를 완화하는데 활용될수 있도록 정량적 위험도 평가에 대한 방법을 조사·기술하였는데 이에 대한 중요 사항과 향후 추진되어야 할 사항은 다음과 같다.

1. 정량적 위험도 평가 절차, 사고 목록의 관리방법과 평가계획의 관리 방법에 대하여 기술함으로써 각 사업장의 실태와 평가 대상에 맞추어 위험도 평가 방법을 선택할 수 있도록 하였다.

2. 위험물질의 누출 형태별 계산 방법을 기술하였고, 폭발·화재의 원인별 발생 형태와 평가 모델을 나타내었으며 독성, 열 및 폭발 영향을 기술함으로써 사고 결과 영향 산출과 재해손실을 산출하고자 할 때 활용할 수 있도록 하였다.

3. 사고 발생 빈도의 평가는 고장율 등의 자료가 충분한 경우에는 어려운 모델을 사용하지 않아도 위험도 평가를 할 수 있음을 알 수 있었다. 결합수 분석법(FTA), 사상수 분석법(ETA) 등은 설비에 대한 위험도를 평가하는 것이나 모델이 복잡하고 어려우므로 위험성이 낮은 설비보다 위험성이 높은 설비에 대하여 실시하는 것이 효과적이다.

4. 정량적 위험도평가의 신뢰성은 모델의 올바른 선택과 적절하고 풍부한 자료

의 선택에 좌우된다. 모델의 적절한 선택성을 높이기 위하여 향후 더욱 깊은 연구가 필요하며, 평가에 필요한 자료는 단기일내에 만들 수 있는 것이 아니고 그 효율성도 문제가 되므로 자료 작성 및 관리에 대한 연구도 추후 진행되어야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. Baker, W. E., P. A. Cox, P. S. Westine, J. I. Kulesz, and R. A. Strehlow, "Explosion Hazards and Evalustion", New York(1983).
2. Baybutt, P., "Uncertainty in Risk Analysis", Conference on Mathematics in Major Accident Risk Assessment, University of Oxford, UK(1986).
3. CCPS, "Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis", CCPS of the AIChE, New York(1989).
4. CCPS, "Guidelines for Hazard Evaluation Procedures", CCPS of the AIChE, New York(1992).
5. "Dow's Fine and Explosion Index Hazard Classification Guide", 6th ed., AIChE, New York(1987).
6. Du Pont, "Du Pont Safety and Occupation Health Guidelines", Du Pont (1985).
7. CCPS, "Guidelines for Technical Management of Chemical Process Safety", CCPS of the AIChE, New York(1993).
8. Crowl, D. A. and J. F. Louvar, "Chemical Process Safety : Fundamentals with Application", Prentice-Hall, New Jersey(1990).
9. David, J., "Nomenclature for Hazard and Risk Assessment in the Process Industried", Institution of Chemical Engineers(1992).
10. Decker, D. A., "An Analytical Method for Estimating Overpressure from Theoretical Atmospheric Explosion", Annual Meeting of the NFPA & SFPE

(1974) .

11. Gulan, K., "Unconfined Vapor Cloud Explosion", Gulf Publishing C., Book Division, Houston(1979).
12. Hanna and Drivas/CCPS, "Guidlines for Use of Vapor Cloud Dispersion Models", CCPS of the AIChE, New York(1987).
13. Harris R., Greenberg, "Risk Assessment and Risk Management for the Chemical Process Industry", New York(1991).
14. Helmers, E. N. and Schuller, L. C., "Calculated Process Risks and Hazards Management", Plant Operations Progress, 1(3), 190(1982).
15. JBF Inc., "Hazard Evalustion - Quantitative Methods", AIChE(1993).
16. Lynn Martin, "Major Hazard Control and Practical Manual", ILO, Genova (1988).
17. Marshall, " Major Chemical Hazards Ellis-Horwood Series in Chemical Engineering", John Wiley and Sons(1987).
18. Mudan, K. S., "Thermal Radiation Hazards from Hydrocarbon Pool Fires", Proc. Energy Combust, Sci., 10(1984).
19. Withers, R. M. J. and F. P. Lees, "The Assessment of Major Hazards : The Lethal Toxicith of Chlorine", J. of Hazardous Material, 12, 231-302 (1985).
20. "공정위험평가", 산국산업안전공단(1993).
21. 한국산업안전학회, "화학설비의 위험성 평가기법 개발", 노동부(1993)

여 백

부 록

여 백

○ 용어의 정의

Aerosol fraction, 에어로졸 분율 : 대기중에 플래시되었을 때 에어로졸처럼 부유되어 남아있는 액체상의 분율

Atmospheric dispersion, 대기 분산 : 공기에 가스나 증기의 낮은 운동량 혼합. 혼합은 난류 에너지 교환의 결과이다. 난류 에너지 교환은 바람과 대기의 온도 분포의 함수이다

Atmospheric stability, 대기 안정도 : 보통 수직 온도 구배의 향으로 정의되는 대기 난류의 정도.

Average Individual Risk, 평균 개인(적) 위험도 : 정의된 인구내의 어떤 개인이 그 인구에 제한된 사고로부터 특정 단계의 해를 받게되는 평균 기회

Basic event, 기본 사상, 기본 사건 : 더 이상 전개할 필요가 없는 충분히 기본적인 결합수 사상

BLEVE(Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion) : 가압 액화된 인화성 가스를 함유한 용기/시스템에의 화재충격에 의한 갑작스런 파열을 묘사하기 위하여 사용됨. 가압 파열과 증기화를 위한 액체의 플래시는 폭발과 잠재적인 파편 피해, 그리고 구형화염을 만들어내는 격렬한 연소가 만들어치는 팽창 연료-공기 혼합물의 즉시적인 발화를 만들어낸다. 끓는 액체의 팽창에 의해 생긴 증기의 폭발

Blast Wave, 폭풍파, 폭발압력파 : 폭발에 의해 형성되는 압력파동

Bounding Group, 경계 집단 : 가능성있는 사고의 범주로 묶기 위하여 선택된 작은 수의 사고들.

Buoyant Gas Cloud, 저밀도 가스운, 부력 가스운 : 주변 공기보다 가벼운 가스운.

Burning Rate, 연소 속도 : 화재동안 액층으로부터의 물질의 증발선형속도, 또는 기체나 고체의 연소질량속도. 이 용어가 사용되는 문맥은 자세히 설명되어야 한다.

Chemical Hazard, 화학적 위험성 : 화재, 폭발, 독성 또는 부식성 효과와 같은 기능(작용)을 통하여 그것의 잠재력을 현실화 할지 모르는 화학물질이나 공정을 포함하는 위험(hazard)

Consequence Analysis, 사고 결과 분석

Continuous Release, 연속 누출 : 오랫동안 상처 받아서 흐름속도로(흐르는) 위험물질의 누출

Deflagration, (폭발적) 폭연 : 음속이하의 속도로 미반응 물질쪽으로 반응이 진행되는(곳에서의) 물질의 화학반응 상해를 일으킬 잠재력을 가진 폭풍(blast wave)이 발생하는 곳에서 용어 폭발적 폭연(explosive deflagration)이 통상 사용된다.

Dense (or negatively buoyant) Gas, 농축 기체, 고밀도 기체 : 같은 온도에서 공기의 밀도를 넘는 기체.

Dense Gas Cloud, 농축 가스운, 고밀도 가스운 : 누출과정 후에 일시적으로 주변공기보다 무거운 가스운. 그 이유는 그 기체가 밀도가 높은 기체이던가 그 혼합물이 대기온도(ambient)보다 충분히 낮은 온도를 갖기 때문.

Detonation, (급속) 폭발, 초음속 폭발 : 음속이상의 속도로 미반응 물질로 반응이 진행되어지는 물질의 극히 빠른 화학반응에 의하여 일어나는 폭발

Discharge, 배출, 방출

Dispersion, 분산 : 주변 유체에 의한 위험물질의 회석과정

Event Tree Analysis, 사상수 분석, 사상수 분석 :

Expansive List, 사고의 확장 목록 : 위험도 평가를 위하여 초기에 선택된 사고 목록을 나타낸다. 이를 정리하여 사고의 주세트를 만든다

Explosion Efficiency, 폭발 효율 : 연소열로부터 이론적으로 얻을 수 있는 에너지에 대한 blast wave에 있는 에너지의 비율, 통상 퍼센트로 나타낸다. 이론적 폭발에너지에 대한 실제 방출된 에너지의 비

Exposure, 폭로(량), 노출(량) : 한 개인이 쏘게되는 독성물질의 양. 이것은 섭취하거나 흡수하거나 흡입된 양으로 나타내어진다. 또는 당면한 상황에서 시간에 따라 농도의 축적으로도 나타낸다. exposure를 정의하는데 사용되는 기본(기저)에서 일어날지 모르는 애매모호함(多義)은 명시되어야 한다.

F-N Curve, F-N 선도 : 특정위험에 대하여, N에 대한 N이상의 사람에게 지정된 정도의 해를 일으키는 모든 사건들의 빈도를 보여주는 도식(plot).

Fatal Accident Rate(FAR), 재해 치사율 : 주어진 환경에서 전체 10⁸시간의 폭로기간동안 정의된 집단내에서 일어나거나 일어날 것으로 예상되는 사망수이다.

Fault Event, 결함 사건, 결함 사상

Fault Tree Analysis, 결함수 분석법 : 특정 결과(정상사상)를 이끌어내는 여러가지 시스템 상태의 논리적 조합을 표현하는 방법.

Fireball, 구형 화염 : 연소물질이 구름이나 공처럼 공기속으로 일어나기 위하여 충분히 빠르게 연소하고 있는 불

Flame Front, 불꽃 전선 : 인화성 증기와 공기혼합물 또는 다른 연소시스템의 연소지역과 미연소 지역사이의 경계

Flash Fire, 플래시 화재 : 음속이하의 속도로 화염이 혼합물을 통과하는 인화성 증기와 공기혼합물의 연소로서 무시할만한 피해를 주는 overpressure가 생성된다.

Flash Fraction, 플래시 분율 : 대기압으로 감압에 의하여 단열조건하에서 증기화될 과열액체의 분율

Flashing Flow, 플래시 흐름 : 과열액체의 누출(release)의 누설경로에의 2상 흐름

Frequency, (사고)빈도 : 단위시간당 사고(발생)수.

Frequency Assessment, 사고 빈도 평가

Gas, 가스 : 일반적인 말로 쓰이며 적절히 이해됨. 증기가 가끔 대신 쓰임. 특별히 엮여진 액체의 증발을 위하여 사용됨.

Gas Cloud, 가스운 : 농도한계의 특별한 뭉치내에 있는 기체-공기혼합물질

Gate, 게이트 : 전개(전파)되어지는 출력을 위하여 요구되는 입력의 논리적 조합을 명시한 논리도표 안의 (상징)기호.

Hazard, 위험성 : 인명피해, 물적성질 손상, 환경에의 손상 등이나 이들의 결합된 형태를 일으킬 수 있는 잠재력을 지닌 물리·화학적 상태. 사람이나 재산 또는 환경에 해를 일으킬 수 있는 잠재성을 지닌 고유의 물리·화학적 특성

Hazard Analysis, 위험성 분석 : 위험의 구체화를 이끌어내는 원하지 않는 사건의 확인(identification), 원하지 않는 사건이 일어날 수 있는 메카니즘의

분석, 그리고 보통 어떤 해로운 영향의 내용, 양과 가능성의 평가.

Hazard Indices, 위험성 지수 : 특정 설계조건에 의하여 부과되는 위험의 정도에 대한 비교순위를 나타내는 위험확인의 한 checklist 방법.

Hazard Range, 위험범위, 위험영역 : 위험 근원으로부터의 거리와 손상사이의 관계.

Hazard Survey, 위험성 조사 : 설비(장치)에의 위험과 그들의 제어수단의 평가에 수반된 모든 노력.

Hazard and Operability Study(HAZOP) : 안전 또는 조작성에 대한 원하지 않는 영향과 함께 설계의도에서 벗어난 모든 것을 확인(identify)하기 위하여 안내어(guideword)의 응용에 의하여 수행되는 연구.

Hazardous Substance, 위험(성) 물질 : 화학적 성질때문에 위험(성)을 만들어내는 물질

Individual Hazard Index(IHI), 개인 위험성 지수 : 개인이 특정 위험성에 대하여 실질적으로 폭로된 시간을 기준으로 한 재해치사율이다.

Individual Risk, 개인(적) 위험도, 단독 위험도 : 개인의 특정위험의 사건으로 주어진 단계의 해를 받을 것으로 예상되어지는 빈도

Individual Risk Criteria, 개인 위험도 기준, 임계 개인 위험도 : 한 개인이 특정위험의 실현으로 주어진 단계의 해를 받을 것으로 기대될 수 있는 가능성에 관계되는 기준.

Initiating Event, 초기 사상, 초기 사건 : 위험의 실현화를 선도할(이끌) 수 있는 가정된 사건의 발생.

Isopleth, 등량선 : 같은 농도지점을 연결한 면(surface). 즉, 3차원 등고선, 가

스운에서 사용된다.

Jet Flame, 분사 물꽃 : 구멍으로부터 의미있는 운동량과 같이 나오는 물질의 연소

Missiles, 비산물, 파편 : 에너지의 방출에 의하여 발사되어지는 조각(파편)이나 시스템

Momentum Turbulence, 운동량 난류 : 물질이 주변 유체로 분사되는 속도에 의하여 야기되는 난류

Neutral Density Gas Cloud, 중성 밀도 가스운 : 주변 공기의 밀도와 같은 밀도를 지닌 가스운.

Overpressure, 과압 : 압력 진동(pulse)를 위한 것으로서 어떤 단계나 장소에서 대기압보다 높게 발달된 압력을 과압(overpressure)이라 부른다. 과압(overpressure)는 종종 설계압을 초과한 압력하에의 장치의 폭로를 묘사하기 위하여 사용되곤 하지만, 이 목적으로는 overpressurization이 좋다.

Passive Dispersion, 수동 분산 : 분산물질의 성질이 지역난류에 영향받지 않고 단지 대기조건에만 의존하는 분산과정(process).

Peak Positive Overpressure, 최대 과압 : 생성된 최대 과압을 peak positive overpressure라 부른다.

Plume, 플룸 : 연속누출로부터 생기는 가스운.

Pool Fire, 액층 화재 : 화재의 바닥에서 액체의 한 층으로부터 증발하는 물질의 연소.

Pressure Burst, 가압 파열 : 피해를 일으키는 잠재력을 지닌 blast wave와 파편의 형성에 귀착하는 압력하에서의 시스템의 파열.

Puff, 펄프 : 일시적 누출로 인하여 생성된 가스운.

Release, 누출 : 저장시스템으로부터 위험물질이나 에너지의 유출

Representative Set, (사고의)주세트, 대표세트 : 위험도 평가를 위하여 선택된 사고 목록.

Residual Risk, 잔여 위험도 : 위험도 평가가 실시되어 제안된 모든 설비의 개선후에 존재하는 위험도(risk)

Risk Analysis, 위험도 분석 : 그것들의 적절성에 대한 어떤 판단을 가짐이 없이 확률과 위험도(risk)의 정량적 계산을 추리하는(나타내는) 부정확한 용어.

(Quantitative)Risk Assessment, (정량적)위험도 평가 : 원하지 않는 사건의 가능성 그리고 결과의 중요성에 관현하여 만들어진 가치판단과 함께 원인으로 되는 해로움이나 손실의 가능성의 정량적인 평가(계산). 위험도 달성 목표의 비교 또는 위험도 감소 전략의 상대순위를 통하여 위험도 분석의 결과가 판단을 내리는데 사용되도록 하는 프로세스.

Risk, 위험도 : 특정기간 또는 특정상황에서 일어나는 특정의 원하지 않는 사건의 가능성. 이것은 빈도(단위시간당 일어나는 특정사건의 수)나 확률(최초사건을 따르는 특정사건의 확률)로 나타내며 상황에 의존한다. 또는 단일 재해나 복합 재해에 대하여 예상되는 빈도(사건/년)와 사고 결과(영향/사건)의 조합

Sensitivity, 민감도 : 위험도 평가 모델에 사용된 매개변수의 단위 변화당의 위험정도의 변화를 나타낸다

Shock Wave, (폭발)충격파 : 폭발에 의하여 파(wave)가 매개유체를 통하여

음속보다 크게 전해질때 생성되어지는 예리한 불연속 압력하에서 형성되는 압력파동

Societal Risk Criteria, 사회(적) 위험도 기준, 임계 사회 위험도 : 주어진 인구가 특정위험의 실현으로 특정단계의 해를 당하는 많은(수의) 사람들의 가능성에 관계된 표준(기준).

Societal Risk, 사회(적) 위험도 : 특정위험의 실현화로 주어진 인구(모집단)에서 특정단계의 해를 받는(겪는) 인구의 수와 빈도사이의 관계. 통상 F-N 선도로 정량화한다

Source Term, 발생원 항 : 사고결과 모델에 입력할 때 요구되는 누출(release)의 정량적 기재사항. 즉, 양 또는 속도, 농도, 온도, 밀도 등

Surface Flux, 표면 플럭스 : 화염이나 다른 자원(source)의 단위면적당의 복사능(력), 또한 표면 방출능(SEP)으로도 알려져 있다.

Surface Roughness, 표면 거칠도 : 완전한 평탄함(반반함)으로부터 대지 윤곽의 이탈에 의하여 촉진되어지는 대기의 난류성분에 관계되는 양.

TNT Equivalent, TNT 상당량, TNT 당량 : 고려하는 폭발의 피해효과와 같은 효과를 나타내는 TNT의 양. 비농축상 폭발에서, 상당량은 단지 blast wave가 일어나는 성질(본성)이 TNT의 그것과 비교되는 상당한 거리에서만 의미를 갖는다.

Top Event, 정상 사상, 정상 사건 : 가능성 있는 원인이 결함수(fault tree)로 분석되어지는 선택된 결과.

Uncertainty, 불확정성 : 위험도 평가에서 사용된 모델과 데이터, 평가의 정도, 평가 과정 등에서 생성되는 오류(오차)

Unconfined Vapour Cloud Explosion(UVCE), (실외) 증기운 폭발 : 인화성 증기나 가스와 공기의 혼합물로 만들어진 구름의 옥외(open air)에서의 폭발을 나타낸다. VCE라고도 한다.

Weather Category, 기상 분류 : 열적 안전성에 의하여 특별히 결정되어지는 대기의 고유의 난류의 성분에 관련된 양.

Wind Speed, 풍속, 바람 속도 : 특정높이(예, 10m)에서 정지된(고정된) 지점을 지나는 공기의 평균 속도

화학설비에 대한 정량적 위험도 평가와
재해손실 예측에 관한 연구
연구보고서(화학연 93-2-21)

발행일 : 1993. 12

발행인 : 원 장 서 상 학

연구자 : 선임연구원 조 지 훈

발행처 : 한국산업안전공단

산업안전연구원

화 학 연 구 실

주 소 : 인천직할시 북구 구산동 34-4

전 화 : (032) 518-6484/6, 502-0031
