

공장의 화재 위험 예방 대책

김 원 국*

1. 서 론

현재 방화 공학은 그 어느 때보다 빠른 템포로 발전하고 있다. 지금 이시간에도 선진국에서는 많은 연구 논문과 실험 등이 행해지고 있으며, 특히 컴퓨터를 이용한 화재 및 폭발에 관한 모델링 등은 이미 실용화 되어가고 있는지 오래 되었다. 또한 여러 차례의 중대 재해를 겪은 후, 선진 각국은 이를 방지하기 위하여 화재, 폭발, 독성물질의 유출을 사전에 방지할 수 있는 대책을 마련하여 법제화 하기에 이르렀다. 미국의 경우 1992년 5월 법안이 발효 되었는데 주요 사항은 공장의 근로자 및 인근 주민의 안전을 도모하는 것이다. 우리나라는 국제노동기구(ILO)를 통해서 이와 유사한 지침을 전해 받고 현재 연구 중이다. 이렇듯 화재 방지 활동은 작업장 내의 재산 보호의 측면에서 작업장 내의 근로자 및 인근 주민의 생명까지 보호하는 차원으로 발전하고 있는 실정이다.

우리나라의 방화기술은 열악한 조건하에서도 그동안 동분야에서 헌신적으로 일해 오신 여러 선배님들의 노력으로 많은 발전을 이루어 왔다. 하지만 아직도 전반적으로 화재의 위험에 대한 인식도가 낮을 뿐 아니라, 방화 엔지니어들을 양성하는 교육 기관들도 부족한 실정이다. 또한 국내 소방관련 법규와 국제적으로 통용되는 기준과 불일치하는 경우가 있어서, 소방안전 시설에 투자를 해 놓고서도 외국 재보험사로 부터 인정을 받지 못하여 불이익을 당하는 경우까지 있다. 최근 국

내의 주요 석유화학사들의 반수 이상이 재보험사로 부터 보험 인수 거부의 경고를 받은 것은 좋은 예가 될 것이다.

본 보고서에서는 우리나라에서 일어났던 화재 사례를 몇가지 소개하고 공장화재의 양상 및 화재 위험 예방 대책에 대해서 알아보기로 한다.

2. 화재 사고 사례

공장의 화재 사고에 관한 통계(1984-1986, \$1,000,000.- 이상의 화재)에 의하면 표1에 나타난 바와 같이 가구 및 종이를 취급하는 공장이 화재 빈도수로는 1위를 차지하며, 석유화학계열 공장의 화재가 빈도수로서는 1건이 되지만 피해액으로 볼때는 1위를 차지함을 알 수 있다. 표2에서는 창고 시설에서의 화재를 표1에서와 같은 기간 동안에 집계해 본 것이다. 여기서도 빈도수로 보아서는 목재 및 종이를 보관하는 창고가 화재 빈도수가 가장 높았다. 그러나 석유화학 제품의 경우 낮은 빈도수에도 불구하고 피해액이 상당히 높은 것으로 나타난다. 또한 단위 화재당 피해액은 발전소가 매우 높음을 알 수 있다.

우리는 과거의 화재에 대한 통계자료를 토대로 화재의 빈도수와 화재의 크기를 평균적으로 예측해 볼 수 있다. 또한 이러한 자료는 경영진들로 하여금 공장의 위험관리를 위하여 얼마만한 노력과 자금을 투자해야 하는지를 시사해 주기도 한다. 사실상 절대적인 화재 안전을 확보하는데에는 통계숫자는 무의미하다. 아무리 화재 발생 빈도수가 낮고 평균 피해액이 경미할 지라도 경영진이 화재

* HSB-Professional Loss Control, 한국지사장.

김원국

안전에 많은 비중을 둔다면 이 방면에 많은 투자가 가능할 것이고, 그 반대로 아무리 화재 빈도와 평균 피해액이 높을 지라도 경영진이 화재안전에 둔감하다면 많은 위험을 그대로 방치할 것이다.

다음은 우리나라에서 일어났던 화재 사례를 중심으로 화재의 발생 경위 및 피해상황 등을 알아보기로 한다.

표1. 피해액 백만불 이상 공장시설의 화재
(미국, 1984-1986)

생산 시설	화재발생횟수	피해액(\$1,000,000.-)
목재, 가구, 종이	53	127
화학제품, 플라스틱, 기름	52	303
금속	49	145
식품	32	114
자동차	25	205
섬유	19	67
발전소	10	76
기타	16	27
합계	246	947

표2. 피해액 백만불 이상 창고설비의 화재
(미국, 1984-1986)

생산 시설	화재발생횟수	피해액(\$1,000,000.-)
목재, 가구, 종이	47	81
식품, 농산품	35	72
일반창고	29	113
기계, 공구류	17	31
화학제품, 플라스틱	16	38
자동차	14	32
섬유	12	62
석유화학제품	9	184
기타	5	20
합계	184	633

2.1 LPG저장탱크 화재 폭발

1990년 7월 22일 12시 25분경 에틸렌 공장의 Tank Area에서 LPG Tank의 Drain Pot 용접부위 파손으로 LP가스가 누출되면서 점화 되었다. 다행히 인명 피해는 없었으나 1만 배럴 규모의

LPG 탱크 1기 및 인근배관이 파손 되었고 Naptha탱크 1기 및 LPG탱크 1기가 열손을 입었다.

사고는 탱크 및바닥에 연결되어 있던 드레인 포트 용접 부위가 절단되어 탱크안에 저장된 LP가스가 급격히 누출, 기화되면서 발생하였다. 증기운폭발현상이 UVCE(Unconfined Vapor Cloud Explosion) 일어나지 않은 것으로 보아 누출된 가스는 바로 점화되었던 것으로 보인다. 점화원은 정전기나 물리적 마찰 스파크로 여겨진다. 탱크 밑부분에서 액화가스가 누출되면서 발생한 화재는 탱크 내부의 가스가 계속적으로 분출되면서 검붉은 화염을 내뿜으며 사고 탱크를 가열 시키는 한편 인근 탱크를 열로 손상시켰다.

화재가 나자 자체 소방차, 소방서 소방차 등 38대가 출동하여 진화 작업에 나섰으나 폭발 위험 및 고열로 인하여 사고 탱크로의 접근이 어려웠고 고압으로 분출되는 탱크화재에 적절히 대응하지 못하였다. 연소중 한차례 탱크 상단부가 파열되면서 가벼운 폭발이 있었고 이로 인하여 압력이 급격히 감소되어 화재가 약화 되었다. 화재는 탱크 내의 가스를 모두 연소 시킨후 2시간 25분후인 14시 50분에 진화 되었다. 화재당시 탱크에는 1,500 배럴 정도만 저장되어 있었다.

용접부위의 파손 원인은 용접불량, 탱크의 지지기반 약화, 드레인포트의 자체 중량, 물리적 충격, 탱크의 내부압력 증가 등을 들 수가 있다. 본 탱크에는 물분무 설비가 되어 있었고 화재시 설비가 작동하여 BLEVE(Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion)가 방지 될 수 있었다. 만약 BLEVE가 일어 났다면 많은 피해를 초래했을 것이다. 또한 점화가 지연되면서 감지되지 않는 상태에서 가스가 누출되었다면, 바람의 방향에 따라 점화원을 찾을 때까지 확산된 후 폭발하여 피해범위가 확대 되었을 것이다.

2.2 플라스틱 분진 폭발

1989년 10월 4일 20시 55분 저남 여천 석유화학공단의 플라스틱 공장에서 ABS분말 수지가 누출되어 압출기의 전기가열기와 접촉하여 폭발하였다. 화재는 ABS공장 1층에 설치된 19개의 압출기 중 16호기에서 불길의 솟으면서 발생하였고 분말

수지가 폭발하면서 확대되었다. 화재 초기 작업자들은 분말 소화기를 사용해서 소화 작업을 시도하였으나 실패하였고, 자체 소방대가 출동하였으나 폭발로 소실되었다. 소방서에서는 화재신고 접수후 32분 만에 출동하였으나 유독 가스와 검은 연기로 진화 작업이 곤란하였다.

이 화재폭발사고로 인하여 연면적 9,289.5sq.m의 4층 건물중 1/2정도가 화재폭발로 파손 또는 소실 되었고 건물 내부의 기계 및 제품등이 소실되었다. 근로자 17명이 사망하고 19명이 중경상을 입었다.

조사된 발화 원인 및 폭발 과정은 다음과 같다:

입출기 상단의 Canvas 위급 부주의로 분말 수지 다량 누출(사고발생 수시간전)
누출 되면서 동시에 다량의 분말이 입출기 덮개와 전열기 사이로 혼입
열기 내부에 혼입된 분말 수지 청소를 실시하지 않아 분말 수지는 수시간 동안 전기 기열기에 의해 가열분해, 가연성가스 발생
전기 기열기는 온도 감지 불량으로 표면 온도가 섭씨 450도 내외로 가열, 가연성 가스에 발화
입출기 상단의 Canvas가 고열에 의해 파손 되면서 다량의 분말수지 아무로 분출
가연성 가스가 고열에 의해 계속 발생, 1층과 2층에서 차례로 화재 폭발

2.3 전선 화재

화재가 발생한 곳은 부산시 금정구 금지동 공장 지대 내에 위치한 신발 생산업체로 철근 콘크리트 구조를 하고 있다. 1990년 6월 25일 07시 01분 화재 발생 당시 공장 내에는 야간 경비조 2명, 보일러 기사 1명 및 여자 작업원 2명이 있었으며 여자 작업원이 작업 준비를 위하여 07:00시경 전원을 투입한 잠시 후 정전이 되었으며 그 후 화재가 발생하였다고 한다.

보일러 기사의 진술에 의하면 출근하여 보일러를 가동시킨 후 조명등이 정전되어 확인차 작업장에 들어와 보니 상부 전선에서 마치 불꽃놀이 하듯 폭발적으로 불꽃이 발생하면서 순식간에 타들어 갔다하며 정확한 화재 장소 및 시간은 알 수 없었다고 한다. 화재를 발견한 보일러 기사는 부근의 소화기로 진화 작업을 실시하였으나 소화가 안되어 옥외로 피신하였으며, 여종업원 2명은 화재

발생 상황을 경비실에 알리기 위하여 뛰어나왔고 경비원은 바로 소방서에 연락을 취하였다.

소방차 출동은 연락을 취한뒤 약 5분후에 이루어졌으며 정오 쯤에야 겨우 진화 되었고 그후 2-3일간 불씨가 잔존하였으므로 소방차가 대기하여 수시진화 작업이 행하여졌다.

다행히 출근 시간전에 화재가 발생하였으므로 화재 인지후 1차 진화작업을 마치고 나서 공장내 인원이 전부 옥외로 피난하였으므로 인명 피해는 없었으나 내부는 전소에 가까우며 1층, 2층의 약 40%와 3층 트러스 건물이 붕괴되었다.

전기화재에 대한 인식 부족으로 전원 차단이 행하여 지지 않았던 것이 가장 큰 문제점으로 지적되었으며 소방설비, 소방용수, 방화구획등이 미진함과 동시에 과량의 가연성 물질이 작업장 안에 방치되어 있었던 점도 화재의 발전을 도운 결과가 되었다.

2.4 내부압력의 급격한 상승으로 인한 합성탐의 폭발

1988년 5월 2일 17시 5분경 경남 울산시 남구에 소재한 종합화학 공장의 말로네이트(DIPM) 제조 플랜트에서 과압으로 인하여 반응조가 폭발하여 사망 6명, 중상 4명, 재산피해 5억여원을 발생시켰다. DIPM은 모노클로로초산(MCA)을 기본 원료로하고, 여기에 수소, ...일산화탄소 및 이소프로필알콜(IPA)등과 촉매를 가하여 고압 상태를 유지, 반응(발열반응)시켜 만들며, 다시 톨루엔 등의 솔벤트를 투입, 증아류하고 고순도의 제품을 얻게 된다.

폭발을 일으킨 말로네이트 합성담은 높이 2.7m, 직경 1.9m, 두께는 윗면이 22mm, 밑면 19mm, 측면 17mm의 강철판 재질로서 설계압력 cm(시험압력 30kg /sq.cm) 및 설계온도 150℃로 제작되었으며 그 밖의 안전 장치로서 수동 조작에 의한 반응온도 조절장치가 설치된 입상탐 형태의 설비이다. 말로네이트 공장의 동, 서, 남쪽에는 다른 생산 시설과 설비, 배관들이 근접하여 복잡하게 얽혀 있으며 그 주위에는 위험물 탱크 등이 몇기 설치되어 있다. 다만, 북쪽은 50여미터 떨어진 곳에 냉각수 탐만 있을 뿐 공지로 되어 있어 폭발

김원국

당시 각종 배관 등의 파편이 주로 이쪽으로 날아 갔기 때문에 파편 충격으로 인한 인접시설의 2차 폭발은 없었다.

이날 사고가 나기 전 현장에는 설비의 재가동 (START-UP)을 위하여 개발 책임연구원 등 본 설비의 개발에 참여했거나 핵심 운전요원인 엔지니어 6명이 작업하고 있었으며, 관계자의 말에 의하면 당일 작업은 순서에 따라서 질소봉입 및 기밀시험, 반응조 내의 산소 유무 확인까지는 순조롭게 진행되었던 것으로 알려지고 있다. 그러나 그 이후의 상황은 현장 근무자 모두가 사망함에 따라 알 길이 없다.

따라서 본 사고의 원인을 확정짓기는 어려우나 장치의 재질, 성능 및 반응 mechanism과 관계자로 부터 입수한 자료에 따르면 폭발은 발열반응에 의하여 반응조 내부의 온도가 상승하는 것을 제어하지 못함으로써 내부 압력이 급격히 상승하여 일어난 것으로, 또한 화재는 폭발 충격으로 발생한 스파크가 반응조 내의 가연성 물질에 인화되어 일어난 것으로 추정하고 있다. 폭발 당시 인근에 있던 종업원들은 갑자기 “짱”하는 굉음과 폭발 풍압에 의한 심한 진동을 경험했으며 곧 이어 말로네이트 공장 쪽에서 화염이 치솟는 것을 목격할 수 있었다 한다.

사고가 나자 현장 상황을 확인한 안전 관리실 요원들은 즉시 소방차에 유선 통보하는 동시에 경보 설비를 작동시켜 공장 내부에 긴급 상황을 알리고, 공장에서 보유하고 있는 화학소방차 2대를 출동시켜 소화작업에 착수하였으며 화재의 진행을 막기위한 근원적 조치로서 원료공급 배관의 주 밸브를 차단했다. 소화작업이 시작될 당시에는 다른 반응탱크들의 연쇄폭발 위험과 화학물질이 타면서 내뿜는 유독가스 때문에 화점으로의 접근에 어려움을 겪었으나 화재상황이 점차 파악되면서 소화작업이 적극 전개되었다.

여러가지 정황으로 미루어 본 화재는 반응조의 설계, 제작, 조작 및 관리상의 문제점 등이 지적될 수 있다.

이상의 화재사례는 한국화재보험협회에서 발간된 화재사례(1991년, 제6집)에서 발췌한 내용이다.

3. 공장의 화재 예방대책

위에서 언급된 화재사례를 통해서 알 수 있는 점은, 공장에서의 화재 발생 가능성 및 화재 발전 양상이 일반 건축물(주택 및 사무실 빌딩 등)에 비교해 볼때에 매우 다양한 특징을 갖고 있다. 실질적으로 어느 공장이던간에 그 공장 특유의 공정과 다량의 위험물을 갖고 있다. 다시 말해서 공장에서는 화재의 발생 및 발전이 매우 예측하기 힘들다는 점이다. 더우기 우리는 각 공장의 특색을 고려한 소방 관련법규 및 기준이 자세히 개발되어 있지도 아니하다. 따라서 우리는 화재로 인한 기업의 손실과 인명의 희생을 줄이려면, 지금까지 행해왔던 소방법규 만족의 수동적인 태도를 지양하고, 현재 소방 선진국에서 시행하고 있는 방법을 적극적으로 검토하고 발전시켜서 소중한 우리의 생명과 일터를 화재로 부터 지켜야 할 것이다. 사실상 지난 여름 외국 재보험사들이 국내의 석유 화학공장들에 대한 재보험 인수의 거부는 단편적으로 이를 증명해 주고 있다. 허가 기준이나 지키고, 연중행사식으로 행해지는 불조심 캠페인 등으로는 우리가 원하는 수준의 화재안전을 이룩할 수 없다고 본다.

더욱이 많은 량의 가연성 혹은 독성 액상, 기상 화학물질을 취급하고 있는 공장에서는 공장내의 안전 뿐만 아니라 인근 주민 및 타공장의 인명까지도 위협하고 있는 것이다. 실질적으로 근간에 세계적으로 일어난 대형 화재, 폭발 및 독성 가스 누출 사고는 많은 무고한 인명을 앗아 갔고, 일터를 빼앗아 갔다. 서론에서 소개한대로 미국에서는 이미 작년 부터 새로운 법규를 만들어서 이들 공장의 안전 운전을 도모하고 있고, 우리 나라도 UN의 국제노동기구를 통하여 화재, 폭발, 독성 물질의 유출에 관련 안전 운전에 대한 종합적인 지침서를 전달 받고 이를 국내에서도 적용하기 위하여 연구, 검토 중이다.

앞서 말한 바와 같이 각 공장은 서로 상이한 공정을 갖고있으며, 화재위험 물질의 종류 및 양도 천차만별이다. 아무리 유사한 제품을 생산하고 있는 공장들이라고 할지라도 공장의 배치, 건축방법, 건축자재, 공장의 운영방법 등은 서로 상이할

수 밖에 없다. 따라서 소방법규에서 규정하는 사항을 일률적으로 적용한 후 안심할 수는 없게 된다. 우선적으로 화재가 일어날 수 있는 상황을 가정해 보는 것(Scenario Identification)으로 화재 예방 첫 단계를 시작할 수 있을 것이다. 이 가정 단계가 끝나면 작성된 각각의 시나리오로부터 화재 및 폭발의 결과로 인한 피해 예상을 하게 된다. 이 과정이 끝나면 방화 시설에 대한 개선 및 기타 안전치를 높일 수 있는 종합적인 방법을 강구하게 되는 것이다. 그러면 각각의 단계에 대해서 좀 더 자세하게 알아 보기로 하자.

3.1 화재, 폭발 각본의 작성(Scenario Identification)

이 단계에서는 화재 및 폭발이 일어날 수 있는 가능성에 대한 연구를 해야 한다. 화재를 일으키는 요소는 연료, 점화원, 산소 및 연쇄반응으로서, 이들에 대한 분포 상태 및 조합형태 및 조건들을 살펴 봄으로써, 화재 및 폭발의 가능성을 예측해 볼 수 있다. 예를 들어서 먼지가 많이 나는 공장의 경우 분진의 입자 크기 및 종류에 따라 폭발 하한 농도가 결정되며, 폭발을 일으킬 수 있는 점화 에너지의 크기도 정해 진다. 이 경우 먼지 자체는 연료에 해당되며, 정전기, 전기스파크 등은 점화 에너지가 되는 것이다. 다른 예로 통풍 시설이 충분치 않은 지하 창고나 설마의 경우를 들면, 연료(가연성물질)의 종류 및 점화원과 함께 산소의 공급도 시나리오를 바꿀 수 있는 요소가 된다. 또한 증기운 폭발(Vapor Cloud Explosion)의 경우에도 공기와 희석된 농도(폭발하한농도, 폭발상한농도)에 따라서 점화원에 노출된 상태에서도 폭발할 수도 있고 폭발하지 않을 수도 있는 것이다.

가연성 물질 및 점화원의 존재가 확인되면 이들의 배열 상태 및 건축물에 대한 상태를 점검하게 된다. 연료가 연속적으로 배열되어 있는 경우 화재는 인위적으로 진압하기 전까지 계속될 것이다. 또한 천정의 높이, 창문의 크기 및 위치, 건축 자재의 종류 등에 따라서 화재의 양상이 달라 질 수 있다. 이러한 정보가 입수되면 화재의 발전을 예측할 수 있게 되는데, 이때 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램을 사용하면 많은 시간을 절약할 수 있다.

경우에 따라서는 점화원이 이웃한 건물이 될 수도 있다. 상식적인 이야기가 되겠지만 화재시 발생하는 열은 전도, 대류, 복사에너지 형태로 이동한다. 따라서 이웃한 공장이나 시설물로 부터 화재가 전파할 수 있는 점도 고려하여야 한다.

공장의 화재는 크게 건물내의 화재와 건물 외부의 화재로 구분하게 되는데 건물 내부의 경우 공장 화재나 일반 건물 화재나 크게 다를 것이 없고, 단지 공장 외부 화재의 경우 가연성물질의 종류 및 상태에 따라서 다음과 같은 화재가 예상된다.

* 액상화재(Pool Fire); 액상 연료가 점화되면서 일어나는 화재로써 탱크의 내부에서도 일어날 수 있고 다이크(dike)내부나 아니면 지면에 퍼져가면서 점화될 수도 있다. 주위의 경계가 있는 액상화재를 갇힌액상화재(Confined Pool Fire), 주위에 막히는 것이 없이 번져나가는 액상화재를 열린액상화재(Unconfined Pool Fire)라고 한다. 액상화재의 경우 복사열에 의한 열에너지의 전파가 가장 문제시 되는데, 화염의 직경, 높이, 연소열, 화염으로부터의 거리, 습도 등이 복사열의 크기를 판단하는 요소가 된다.

* 불꽃 방출(Flame Jet); 저장 혹은 반응 용기 내에 압력이 존재하고 분출 즉시 점화되면 방사 방향을 따라서 불꽃이 형성되는데 이 경우 소화가 극히 어려우므로 용기 주변의 시설물에 열 피해를 주고 가연성물질을 점화시키게 된다. 만약 누출시 점화가 지연되면 액상연료의 경우 액상화재를 동반하게 되고, 기상연료의 경우에는 폭발을 동반할 수가 있다.

* 대기중증기운폭발(Unconfined Vapor Cloud Explosion); 가연성 연료가 증기 상태로 대기중으로 방출될 경우, 만약 누출 가스가 공기보다 무겁다면 바람방향을 따라 증기운을 형성하다가 점화원에 노출되면 증기운 전체가 폭발을 일으키는 현상으로써, 대규모 인명피해 및 시설피해를 야기시킬 수 있다.

* 비등연료의 증기운 폭발(Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion); 고압하에서 액화된

연료를 저장하고 있는 압력용기가 외부 화염에 노출되면서 첩판 온도가 상승, 용기가 설계 압력을 견디지 못하고 파손하여 순식간에 많은 량의 증기운이 상승하면서 점화되어 버섯구름 형태의 구형 화염을 형성하게 되는데 이때 기계적 폭발에서 오는 폭발 압력과 많은 량의 복사열이 발생하여 주위에 피해를 주게 된다.

이들 연료가 지상에서 누출되었을 경우 화재 및 폭발의 형태를 결정하는 방법은 표3의 논리도표를 참고하기 바란다.

화재, 폭발 시나리오의 작성은 가능한한 현장에 잠재해 있는 모든 부분의 위험을 발견을 요구한다. 따라서 시나리오 작성 자체가 위험에 대한 인식도를 높여 주는 결과가 되므로 안전 교육 효과도 얻을 수 있게 된다. 일반적으로 시나리오는 상식적인 선에서 앞서 언급한대로 연료와 점화원 건물의 구조 등을 참고로하여 작성할 수가 있으나,

위험물을 포함하는 공정의 경우 좀더 전문적이고 체계적인 방법이 요구된다. 현재 사용되고 있는 위험요소의 발견방법에는 다음과 같은 것들이 있다.

- * What-If
- * 대조표 (Check List)
- * What-if/Checklist
- * Hazard and Operability Study (HAZOP)
- * Fault Tree Analysis (FTA)
- * Failure Modes and Effects Analysis (FMEA)

이들 방법은 각기 특색을 갖고 있으므로, 방법의 채택시 전문가와 상의해 보는 것이 바람직하다. 앞서 이야기한 PSM에서도 위에 열거된 방법 중 하나를 택하여 공정에 잠재한 위험을 발견하도록 권유하고 있다. 석유화학 공정의 경우에는 대

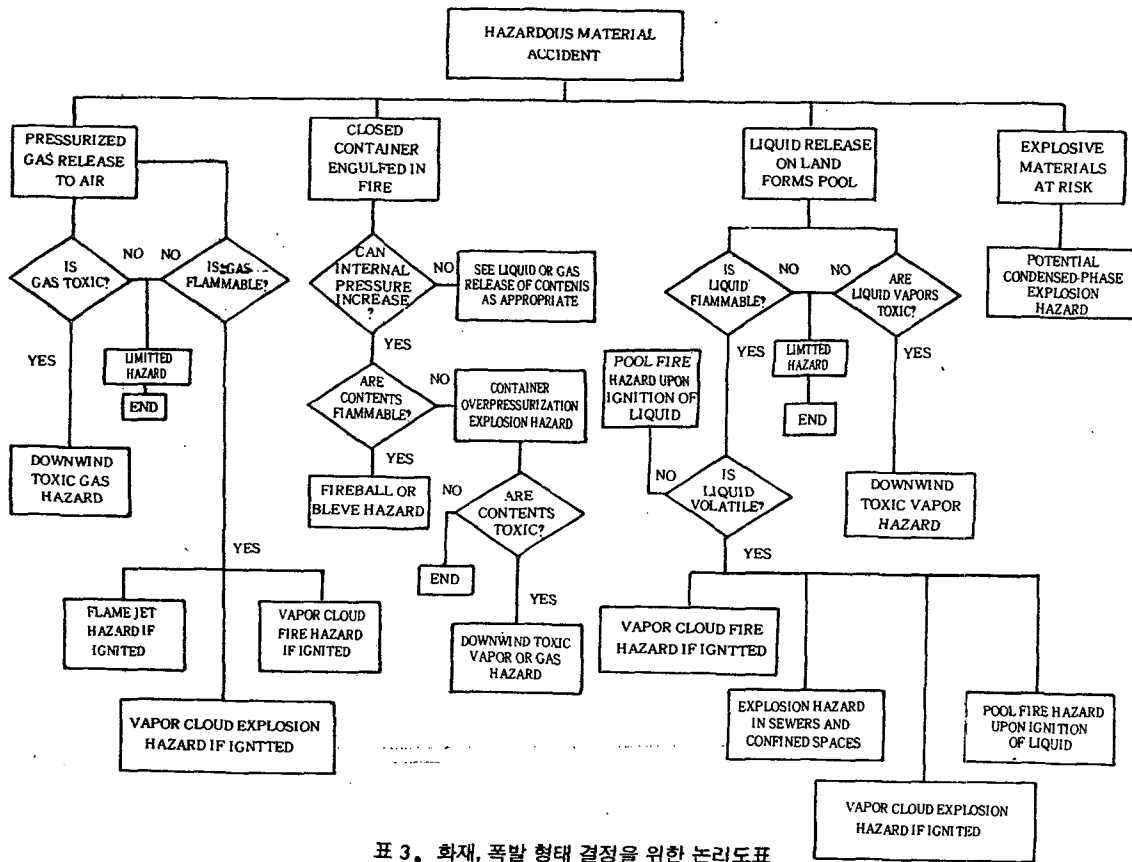


표 3. 화재, 폭발 형태 결정을 위한 논리도표

부분이 HAZOP을 선호하는 경향이 있다. 시나리오 작성에 필요한 중요사항을 정리해 보면 다음과 같다 :

1) 화재전 상황 : 화재나 폭발이 일어나기 전의 상황으로써 공정, 운전, 조업자, 건물의 구조, 소방시설, 공장의 운영 등을 자세히 분석, 종합하여 화재의 시작, 화재의 발전, 화재로 인한 피해, 및 진화 등에 대한 가능성을 예측한다.

2) 점화원 : 점화원은 크게 두가지로 분류할 수 있다. 그 하나는 개개의 점화원이 될 것이고, 다른 하나는 화재에의 노출이 될 것이다. 개개의 점화원의 경우 대형화재의 통계를 보면 표4에 나와 있는 것과 같은 순위로 나타나며, 화재에의 노출의 경우 불꽃이 직접 닿는 경우를 제외하면 거의 대부분이 복사열에 의한 점화가 보편적이다. 전도나 대류에 의한 점화도 지나칠 수 없음은 물론이다. 점화원으로써의 복사열이 인접한 물질을 점화시킬 수 있는 크기는 노출된 물질의 종류에 따라서 다르다(표5 참조).

표4. 대형화재의 점화원(by Redding & O'brien, 1985)

점화원	기계류	생산공장	창고설비
전기장치의 방전 및 단전	36%	25%	19%
불꽃 및 방화	33	12	30
가열된 표면	-	14	5
산소절단 및 전기용접	-	8	6
연소형 난로	9	10	7
자연발화	-	6	5
담배불	4	3	4

표5. 점화 에너지 (FM Ref.Report-01836.20)

노출연료종류	kw/sq.m
종이	20.4
나무	32
포리우레탄	18
포리에틸렌	20
나일론	29
포리스타일렌	18
포리프로필렌	20
PMMA	18
PVC	21

3) 점화되는 물질 : 점화에너지와 더불어 연료 자체의 연소도(Flammability), 크기, 배열상태, 점화원과의 거리 등을 고려하여야 한다. 가연성증기운의 경우 폭발하한선과 폭발상한선 이내에서만 폭발이 일어난다. 연료의 배열상태 또한 화재 발전속도 및 전파에 큰 영향을 미치게 된다. 실제로 종이롤을 보관할 때 세워서 보관하는 것과 누워서 보관하는 것과 화재시 연소속도에 큰 차이를 보인다. 또한 연료가 연속해서 놓여 있으면 화재가 쉽게 전파될 것이다.

표5에서 보여주는 것과 같이 각 물질은 각각의 점화 에너지를 갖고 있는데 복사열에 의해서 화재가 전파되는 경우 연소열 자체도 중요하지만 이격 거리가 복사열의 크기를 변화시키는 매우 중요한 변수가 되므로 화재안전거리의 확보는 매우 중요한 방화수단이 될 수 있다.

4) 지연연소(Smoldering Combustion) : 지연연소라 함은 연소가 매우 서서히 진행되는 것으로서 열전도율이 낮은 고체에서 일어나는 연소 형태이다. 이러한 물질에는 플라스틱, 고무, 케이블 절연물질, 쌓인먼지층 등이 이에 속한다.

지연연소하는 동안 발열량은 매우 작다. 또한 연기의 성분, 입자의 크기, 감지도 등이 불꽃연소와 다르다. 따라서 지연연소는 열감지거나 기존의 연감지기로도 감지해내기 어려울 때가 많으므로 지연연소 가능한 물질을 갖고있는 장소에서는 특별한 주의를 요하게 된다. 실질적으로 작업인원이 상주하는 장소에서 지연연소가 몇일 동안 진행되었는데도 최종적으로 불꽃연소로 확대될 때까지 발견되지 않은 예가 있다.

5) 최초 점화된 가연물의 화재발전 과 발열량 : 점화된 가연물질의 화재발전속도 및 발열량은 화재의 심각도를 예측하는 중요한 요인이 된다. 일반적으로 화재발전 속도 및 발열량은 가연성물질의 종류에 따라 다르나, 같은 종류라 할지라도 그 물질의 배열 상태, 그물질이 놓여져 있는 방의 구조, 창문의 크기, 건축자재의 종류 등에 따라서 달라질 수 있다.

6) 2차 물질로의 화재 전파 : 1차 물질에 점화된

화재는 이웃한 물질로 여러가지 경로를 통하여 전파될 수 있다. 우선 복사열이나 대류열의 형태로 전파될 수 있고, 경우에 따라서는 불꽃에 의한 직접 전파, 전도체를 통한 전파도 가능하다. 적합한 다이크(dike)설비를 해놓지 않은 경우 용융된 물질이 점화된 상태로 흘러가면서 화재를 전파시킬 수도 있다. 이외에도 구조체가 무너지면서 화재가 전파되는 경우도 있을 수 있고, 불뚱이 튀어서 혹은 부적합한 소화 약제에 의한 화재의 확산도 가능하다.

7) 폭발 시나리오 : 가스 및 분진 등은 폭발에 대한 가능성을 갖고 있다. 우선 대상 물질의 폭발 가능 농도를 알아보는 것이 우선이고, 다음으로는 점화원을 확인 하는 일이다. 폭발물질별로 폭발 가능 점화 에너지가 다르므로 이것을 확인 하는 일도 중요하다. 또한 분진 폭발의 경우 공기중에 분포된 분진의 양과 더불어 분진의 크기를 재어보는 일도 중요하다. 다음 단계는 점화 후 단계로써 불꽃전파속도 및 에너지방출을 계산함으로써 폭발의 형태 및 위력을 예측하게 되는데 이에 관한 사항은 다음 장에서 언급하기로 하겠다.

이로써 우리는 화재, 폭발 각본 작성의 방법 및 과정에 대해서 알아보았다. 다시 한번 정리 해보면, 화재 및 폭발에 관한 각본의 작성은 공장의 화재 위험 예방을 공학적으로 접근하는 첫번째 단계로써, 공장내에 존재하는 잠재적인 위험을 구체화 해봄으로써 피해크기 및 범위를 예측할 수 있게 하고, 마지막단계로 이를 예방할 수 있는 방법을 강구할 수 있게 하는 것이다. 따라서 시나리오는 세분화 할수록 유리하다. 사실상 시나리오만 정확히 작성하고 이것을 모든 종업원들에게 교육시킨다면 이보다 더 효과적인 화재 안전 교육이 없을 것이다.

3.2 화재, 폭발 결과분석(Fire & Explosion Consequence Analysis)

화재, 폭발 방지의 두번째 단계로써 1단계에서 확인된 시나리오를 기본으로 화재 및 폭발의 결과를 분석하는 과정이다. 분석작업시 초점을 맞추어야 하는 사항들은 아래와 같다 :

- 1) 자산의 손실 (열피해, 연기피해, 물피해, 화학물질에 의한 피해 등)
- 2) 인명의 손실
- 3) 사업의 중단 (Business Interruption)
- 4) 환경 피해
- 5) 폭발로 인한 피해

화재, 폭발에 관한 결과분석을 수행하려면 방화 공학에 대한 기초 지식을 필요로한다. 그 중에서도 특히 화재역학(Fire Dynamics)은 좋은 참고 도서가 될것이다. 피해 결과를 예측하려면, 화재 및 폭발의 범위, 세기, 지속시간 등을 계산하여야 하고, 이 결과로 인하여 인접한 시설물 및 작업자와 인근 주민들에게 노출되는 열에너지와 폭발압력의 크기를 계산하여야 한다. 폭발성 증기운의 경우 농도별로 3단계로 구분해서 확산 범위를 표시하게 되고, 독성가스 역시 같은 방법으로 확산 예상도를 작성한다.

열에너지의 크기에 따른 피해정도는 표6과 같다.

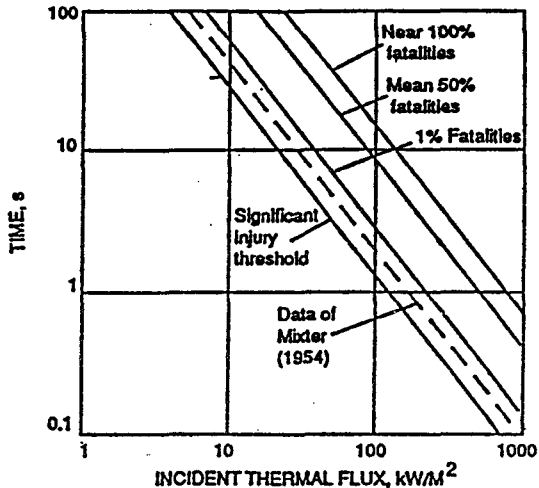
표6. 복사에너지/ 피해정도

35	장치 훼손
30	
25	목재의 지속적인 연소
20	전선피복물질이 분해되기 시작함
15	
10	목재가 점화됨 프라스틱이 녹기 시작함 #2 연료가 점화됨 (140초 이상 노출될 때)
5	피부화상 피부에 통증을 느끼기 시작함 #2 연료가 점화됨 (1000초 이상 노출될 때)
0	

kw/sq.m

에너지 크기가 작더라도 노출시간이 길어지면 피해 정도는 심하게 된다. 노출 시간 및 에너지 크기에 따른 피해 정도는 표7에 나와 있다.

표7. 노출시간 및 복사에너지에 따른 피해정도



다음은 폭발압력에 따른 피해 예상정도인데, 이것은 표8에 상세히 나와있다.

표8. 폭발압력에 따른 피해 (AIChE Handbook)

폭발압력 (psig)	예상피해
0.03	압력하의 큰 유리창이 파손되는 경우가 있다
0.04	143dB의 소음을 발생 ; 유리파손
0.10	압력하의 조그만 유리창의 파손
0.15	유리창의 파손
0.30	천정재의 손상, 10%의 유리창 파손
0.40	구조물의 경미한 파손
0.50-1.0	유리창의 완파, 창문틀의 변형
1.0	건물의 부분적 파괴, 거주불가능상태
1.3	철구조 건물의 부분적 변형
2.0	건물의 지붕 및 벽체의 부분적 붕괴
2.0-3.0	콘크리트(철근없는)의 파괴
2.3	심각한 구조적 파괴의 시작
2.4-12.2	1-90% 고막 파괴
2.5	벽돌집의 경우 50% 붕괴
3.0-4.0	철판건물의 붕괴
4.0	경구조의 공장건물 파괴
5.0	목재 기둥이 부러짐
7.0	짐 실은 상태의 화물열차 전복
7.0-8.0	8-12in 두께의 벽돌이 파괴됨
9.0	짐 실은 상태의 화물열차 파괴
10	빌딩의 완전 파괴
14.5-29.0	직접폭발효과에 의해서 1-99%의 사망자 발생

마지막으로 화재 및 폭발이 환경에 미치는 영향을 생각해 보자. 1984년 여름 영국 런던에 위치한 창고에는 350톤의 코코아버터가 보관되고 있었는데, 여기서 화재가 일어났다. 그 결과로 전량의 버터가 녹아서 강물로 흘러 들어가 순식간에 수로에 있는 모든 물고기를 죽였다. 1986년 스위스의 화학창고 화재는 독성 물질을 라인강으로 유출시켰다. 이 사고로 인한 피해액은 6천만불에 달하고 이 사건 이후 창고 근처에는 폐소화용수 수집 탱크가 건설되었다. 이 외에도 화재로 인한 환경오염 사례는 무수하다. 만약 원자력발전소에서 화재가 난다면 방사능으로 인한 환경오염의 그 피해는 실로 엄청날 것이다. 체르노빌 원자력발전소 사고의 경우가 이를 입증한다.

이렇듯 화재, 폭발 결과 분석 작업은 화재에 대한 기본 이론을 가지고서 화재, 폭발 발생시 주위의 장치 및 사람들이 받는 피해를 예측함으로써 피해를 최소화 하는 방법을 강구함과 아울러 비상시 이에 신속히 대처할 수 있는 계획을 수립할 수 있게 하여 준다. 강조할 점은 합리적인 화재, 폭발 시나리오의 작성이 매우 중요하다.

3.3 방화, 방폭 안전 시스템의 검토

화재, 폭발의 결과에 대한 분석이 끝나면 끝으로 다각적인 안전 시스템의 검토를 해야한다. 1차 검토가 끝나면 다시 변경부분에 대한 타당성 검토로써 시나리오 작성 및 결과 분석을 실시한다.

일반적으로 방화, 방폭 시스템은 다음과 같이 분류할 수 있다 :

- * 감지 설비(Detection System)
- * 소화 설비(Suppression System)
- * 배연 설비(Smoke Control System)
- * 내화 설비(Fire Proofing System)
- * 지유제 및 배수 설비(Dike & Drainage System)
- * 폭발 압력 배출창 설비(Explosion Relief System)
- * 비상 배기 설비

우선적으로 이들 설비들이 적용 기준(소방법, NFPA, FM, API 등에서 정하는 기준)에 맞게 설계되었나를 검토하여야 하고, 설비의 용량, 작동성

및 작성된 시나리오 및 결과 분석에 합당한가를 검토 하여야 한다. 앞서 이야기 한대로 현재 방화 설비는 법규나 기준보다도 앞서가는 느낌이다. 위험분석작업(Hazard Analysis)을 통하여, 잠재 위험을 발견하고 이를 방지할 수 있는 설비를 보강하고 있는 추세이다. 예를 들면 석유화학공장의 경우 노출된 시스템케이블 등을 내화재로 보호하고 벨브류 및 중요 콘트롤 장비들 역시 살수 설비나 내화재로 보호한다. 또 기존의 가스 감지기 수를 대폭 증가 시켜서 잠재적인 가스누출 위험에 대비 하고 있다. 따라서 예전 보다 더욱 기능이 보강된 설비들이 개발되고 있으며, 설치 갯수의 증가로 인하여 이들의 관리 유지에도 더 많은 시간과 노력을 경주 하여야 한다.

유사시 각종 시스템의 작동의 성패는 시스템의 합리적인 유지 관리 및 주기적인 시험일 것이다. 각 공장별로 유지 관리 및 시험 등에 관한 매뉴얼, 체크리스트 및 보고서 등을 마련하여 비치하고 매년 혹은 격년으로 이의 운용을 감사해 보는 것도 좋은 관리 방법이라 할 수 있을 것이다.

공장에 따라 조금씩 틀릴 수 있겠으나, 일반적으로 방화 설비중 가장 큰 비중을 차지하는 것이 소화 용수설비가 될 수 있다. 특히 지하에 묻힌 소화용수관은 그 보전 상태를 눈으로 확인 할 수 없으므로, 이것 역시 주기적으로 시험(Flow Test)을 행하여 공장 어느 곳에서도 필요한 압력의 소화용수를 확보해야 한다. 일반적으로 우리나라의 경우 공장 증설시 소화용수 라인이 기존라인에서 갈라져 나가게 되므로 매우 복잡한 형태를 취하게 되며, 심한 경우에는 도면에 표시가 안된 부분도 생긴다. 소화 용수에 관한 사항중 최대소화용수량을 결정하는 일도 역시 시나리오와 결과분석을 통

해서 접근할 수 있다. 관련법규는 보편적인 양을 지정해 놓은 것이므로, 실제 필요량보다 클 수도 있고 작을 수도 있다.

우리나라의 경우 공장에서 비상 배연, 배기 설비 및 폭발 압력배출창 등을 보지 못한것 같은데 이러한 설비들은 경제적으로 화재 및 폭발을 효과적으로 예방하거나 그 피해를 줄일 수 있는 설비로써 해당 공장에 설치를 고려해 보는 것이 유리할 것으로 여겨진다.

최종적으로 안전 시스템의 검토가 끝나면 채택된 시스템이 100% 작동한다는 가정으로 다시 시나리오를 작성하고 결과 분석을 하여서 그 결과치가 자체적으로 설정된 기준에 들어와야 한다.

4. 결 론

본 보고서에서는 공장화재의 통계와 화재사례를 통하여 화재의 양상과 피해액등을 살펴 보았고, 다른 나라에서 행하고 있는 공장화재예방을 위한 접근 방법을 소개 하였다. 공정이 점점 더 복잡해져 가고, 생산 시설이 대형화되어 가면서, 화재 및 폭발의 위험도 같이 복잡해지고 대형화되어 왔다. 이제는 공정을 이해하지 못하고는 올바른 화재예방 대책을 세울 수 없게 되었다. 또한 컴퓨터에 의한 화재 및 폭발의 시뮬레이션 기법의 발전은 방화 시스템을 설계할 때나 기존 공장의 위험성을 평가 할 때, 그 공장에서 일어날 수 있는 화재나 폭발의 양상 및 피해범위 등을 미리 예측하게 하였다. 우리도 이제 일상적인 소방설비의 진단이나 불조심 캠페인 등의 방법에서 방향을 수정하여, 남들이 효율적으로 사용하고 있는 방법을 적용해 볼 때가 된 것 같다.