석유탱크간의 연소현상

□ 머리말

연소하고 있는 석유탱크의 불꽃이 인접한 다른 탱크에 접촉하지 않았을 경우의 탱크간 연소현상에 관하여 살펴보았다.

이 글은 영국 로이드의 주간재해보고 사고사례 가운데에서 최근 10년간 발생한 2기 이상의 석유탱크 화재를 바탕으로 분석한 것이다.

로이드 주간재해보고는 세계 각지의 로이드 대리점을 중심으로 하여 세계적인 통신사인 AP, UPI, 로이터의 기자 및 각지의 신문기자 등이 작성한 재해속보이다.

속보의 형태를 분석한 것이기 때문에 구체적인 사항이 누락되는 경우도 있지만, 전 세계의 사고를 총망라 하였기 때문에 재해의 정보를 얻는 데에는 충분한 효과가 있을 것으로 생각된다.

〈표 1〉 2기 이상의 탱크화재(1979. 1~1988. 6)

일 자	국 명	폭발 화재 탱크 및 내용물	연소시간	원 인 등
1979. 1. 4	독일	7기(중유)		배관공사중 용접불꽃
1. 5	독일	3기(중유)		용접기로 서리 제거중
2. 12	미국	2기	2일간	가솔린 플랜트에서
10. 2	독일	17기(원유, 가솔린)		소화설비 공사중 용접
1980. 7. 28	브라질	1기(가솔린), 4기(연료유)		
9. 7	미국	2기(가솔린)	약 7시간	정기청소, 기름빼기작업
1981. 1. 10	쟈마이카	5기(등유, 가솔린)	2일간	
3. 14	프랑스	4기(가솔린, 디젤유, 등유)	22시간	
8. 20	쿠웨이트	5기(납사), 3기(중간제품)	6일간	탱크에 급유중
1982. 5. 20	미국	15기(가솔린, 경유, 등유 등)	18시간	
12. 13	콜롬비아	3기(가솔린, 등유)	2일간	
12. 19	베네즈웰라	4기(연료유)	3일간	가열장치의 결함
12. 22	케냐	2기(가솔린)	2일간	파이프라인, 하역중
1983. 1. 7	미국	3기(가솔린)	1일간	탱크에 과잉 급유
4. 25	미국	8기(원유)		급유 후
1984. 3. 8	독일	2기(항공연료유), 2기(납사)	30시간	
12. 24	미국	2기		
1985. 5. 7	미국	2기		
12. 21	이탈리아	29기(가솔린, 디젤유 등)	2일간	탱크에 급유중, 누설
1986. 2. 24	그리이스	12기(연료유, 원유 등)	7일간	탱크에서 누설, 용단
7. 9	미국	4기(가솔린)	6시간	
1987. 5. 15	이탈리아	1기(가솔린), 2기(메타놀)	8시간	이송중
6. 2	프랑스	3기(가솔린), 11기(경유 등)	24시간	탱크급유, 방유제 공사
1988. 6. 8	미국	4기(가솔린)	약 20시간	봄베스테이션
6. 23	멕시코	1기(가솔린), 3기	20시간	탱크급유, 용단

* 연소시간 : 최초의 탱크가 발화하고 나서 최후의 탱크가 진화 완료되었을 때 까지의 시간

□ 쿠웨이트의 납사탱크화재

표 1 가운데에서 탱크간의 연소 과정이 비교적 잘 나타나 있는 쿠웨이트 납사탱크화재(1981년 8월 20일 발생)를 예로하여, 탱크의 연소화재 현상을 살펴보기로 한다. 이 화재사례는 安全工學 Vol. 21, No. 2를 참고하였다.

그림 1은 사고발생 장소의 개략도이다. 그림에서 1호부터 6호까지는 납사 저장탱크로써 용량이 25,600kℓ의 플로팅루프탱크이고, 7호부터 10호 까지는 중간제품을 저장하는 11,500kℓ 용량의 플로팅루프탱크이며, 11호는 용량 5,100kℓ의 폐기물 저장용 콘루프탱크이다.

1981년 8월 20일 오전 2시 15분경, 국영 슈아이바 제유소의 6호탱크와 납사 이송배관 및 다기관의 중간 지점에서 화재가 발생하였다. 이 화재는 6호탱크 북동쪽에서 탱크의 지붕 높이까지 확대하였고, 출화 30분 후에는 탱크의 실(Seal) 부분에 착화, 링화재가 되어 지상 65m 이상의 높이까지 타올랐다.

그 후의 화재 확대는 탱크와 탱크간의 복사열에 의한 것으로써, 그 경과는 다음과 같다.

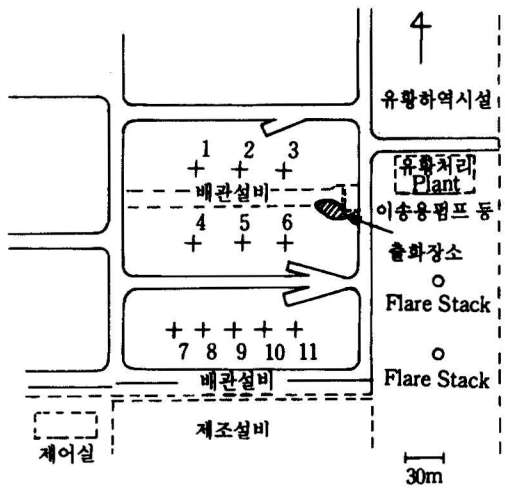
3호탱크 및 5호탱크는 냉각 조치를 계속하였음에도 불구하고 발화 후 약 9시간 뒤인 20일 오전 11시 30분 경에 출화하였다. 8호탱크에도 착화하였으나 곧 소화되었다. 그 후 8호탱크 및 10호 탱크에서 연기가 나오는 것이 목격되었으나 출화에 이르지는 않았다.

출화 2일 후인 22일 오후 6시경에 8호, 9호 및 10호탱크에서 출화하였고, 23일 오후 1시에는 2호탱크, 24일 오전 9시15분에는 1호탱크에서 출화하였다.

끝까지 연소를 계속하고 있던 1호탱크에 25일 아침부터 포에 의한 소화를 시도하여 그날 오후 10시 30분에 진화되었다. 한편, 4호탱크는 화재시 비어있는 상태였다. 또 8호, 9호 및 10호탱크는 소화활동 중 약간의 기름을 제외하고 모두 비상배출 시켰다. 이 화재 사례에 탱크의 용량은 나타나 있었으나 직경이나 높이는 미상이었다.

화재의 분석을 위하여 탱크의 용량을 근거로 직경을 추정해 보기로 한다.

1호에서 10호 까지 모든 탱크의 높이를 20m로 가정하면, 1호에서 6호탱크는 직경이 40m, 7호부터 10호탱크는 직경이 27m가 된다. 따라서 1호와 2호탱크, 2호와 3호, 4호와 5호, 5호와 6호와의 탱크간 거리는 각각 13m(약 0.33D)이고, 8호와 9호, 9호와 10호의 탱크간 거리는 각각 8m(약 030D)가 된다. 또 1호와 4호, 2호와 5호, 호와 6호의 탱크간 거리는 각각 15m(약 0.38D), 5호와 9호탱크간의 거리는 약 40m가 된다.



〈그림 1〉 사고발생장소 개략도

□ 복사열

탱크화재시에 주위의 임의 위치에서 받을 수 있는 복사열은 연료에 의하여 정해지는 복사발산도와 형태계수를 이용하여 구한다.

$E = \phi \times Rf$

E : 복사조도

ϕ : 형태계수

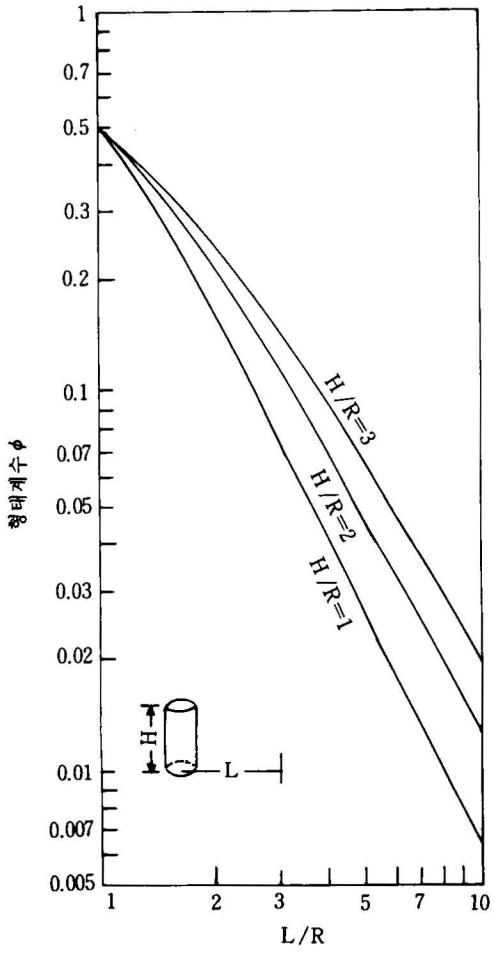
Rf : 복사발산도

ϕ 는 화염의 형태, 화염의 수열면 사이의 상대배치에 의하여 결정되는 무차원수이다.

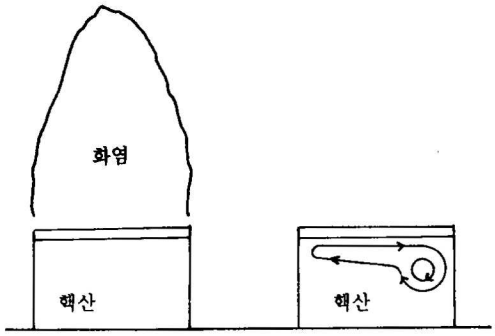
그림 2는, 화염이 원통이고 수열면이 화재의 바닥부와 평면상에 있다고 보았을 때, 형태계수 ϕ 와 무차원거리 L/R과의 관계를 나타낸 것이다. 여기에서 L은 탱크의 중심에서 수열면 까지의 거리, R은 탱크의 반경, H는 화염의 높이이다.

3호탱크 혹은 5호탱크 지붕면과 가장 가까이에 있는 8호탱크에서의 복사열을, 그림 3에서의 H/R=3인 곡선과, 납사의 복사발산도 50,000kcal/m²h를 사용하여 구하면 약 15,000kcal/m²h가 된다.

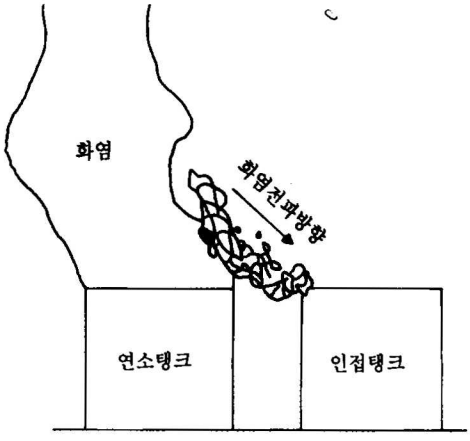
한편, 건조한 상태의 낡은 레이온 커텐 또는 면 커텐이 15분 이내에 발화하는 한계복사조도는 18,000kcal/m²h이다. 폭로시간을 보다 길게하면 레이온이나 면은 15,000kcal/m²h에서도 발화할지 모른다. 그러나 액체연료의 경우는 연소중인 탱크에서의 복사열 만으로는 발화하지 않는다.



〈그림 2〉 형태계수



〈그림 3〉 연소중인 탱크에 인접한 탱크의 액내유동



〈그림 4〉 탱크간의 화염전파 형태

□ 인화

액체의 경우, 액면 혹은 액내에 온도차가 있으면 액내의 유동(대류)이 일어난다. 예를들어 액면에 온도차가 생기면 표면장력의 온도 의존에 의하여 따뜻한 쪽에서 차가운 쪽으로 유동하여, 열은 액내에 운반된다. 따라서 어느 특정한 부분의 온도만을 발화온도까지 올린다는 것은 불가능하다. 그림 3은 연소하는 탱크에 인접하는 탱크의 액내 유동을 나타내는 것이다. 그에 따라 쿠웨이트의 탱크화재에 있어서 "화재의 확대는 탱크에서 탱크로의 복사열에 의한 것이다"라고 설명할 수 있을 것이다.

6호탱크의 화재가 3호와 5호탱크에 직접 접촉되지 않은 점, 또 6호탱크에서 보면 90도나 다른 3호와 5호탱크가 거의 동시에 화재가 발생하였다고 하는 것은 연소 상황에서 보아도 "복사열에 의한 것"임에 틀림 없다. 그러나 복사열 만으로 액체연료가 발화한 것은 아니다. 연소중인 탱크로부터의 복사열에 의하여 인접탱크의 온도가 상승하고, 연료증기의 발생이 촉진되었으며 그 증기가 탱크간의 화재 기류를 타고 연소중인 탱크 쪽으로 흘러가서 화염에 접하여 발화하였다. 불꽃이 뒤에서 흘러오는 증기를 전파하여 인접탱크 까지 전해진 결과 인접탱크가 화재가 된 것이다. 즉, 이 화재에 있어서 탱크간의 연소는 연소중인 탱크의 불꽃에서의 복사가열에 의한 것만이 아니라 인접탱크에서 유출된 "연료증기에 인화"하여 발생한 것이라고 말할 수 있다. 물론 이 경우 인접탱크의 연료증기를 발생시킨 원동력은 연소하던 탱크의 불길에 의한 복사열이다.

그림 4는 거의 무풍인 경우 탱크간의 화염전파 형태를 나타낸 것이다. 이 그림에서는 화염 전파의 궤적을 얻을 수 있다. 가솔린이 들어있는 직경 1m의 오픈탱크 2기를 사용한 실험에서 탱크간의 거리를 변화시켜 연소 가능한 거리를 구하였다.

이 실험에서 탱크간의 연소 가능 거리는, 연소중인 탱크가 인접탱크의 바람맞이 쪽에 있을 때 가장 길고, 다음으로 무풍일 때, 연소하는 탱크가 바람 부는 쪽에 있을 때 가장 짧게 나타났다.

□ 맺는 말

석유탱크간의 연소는 여러 형태가 있을 수 있지만 본고에서는 연소중인 탱크의 불꽃이 인접탱크에 접촉하지 않는 경우에 대하여 살펴보았다.

(KHK たより, 1990. 3 참조)

Boil-Over

- 원유 등과 같은 액체위험물화재에서는, 표면에서 장시간 연소하다가 갑자기 화염이 높아지고 유류가 유면에서 비산하게 된다. 이를 Boil-Over라고 한다.
- 이 현상이 일어나는 것은, 유류 표면부의 저비점 성분이 먼저 연소를 시작하여 경질성분이 소진되고, 중질 고비점 성분은 고온상태로 표면하에 전달하여 고온층을 형성한다. 이 고온층이 표면하의 저온유를 가열하여 경질 저비점 성분을 표면으로 떠오르게 함으로써 표면이 쉽게 연소할 수 있는 상태로 되는 것이다.
- 화재가 계속되면 열파의 크기와 액밀도가 커져 내부 액체가 가열되며, 이 때의 온도는 약 300℃ 정도가 된다.

*** 고온층을 형성하는 액체와 형성하지 않는 액체**

- 고온층을 형성하는 액체 : 휘발유, 중유, 원유
- 고온층을 형성하지 않는 액체 : 벤젠, 등유, 경유, 휘발유, 윤활유, 산박용디젤, 변압기유