

옥외위험물탱크의 안전대책

김미경, 박승민, 김운형*
(주)안국 E&C, *경민대학 소방과학과

A Performance-Based Fire Safety Design for Flammable Liquid Storage Tank

Mi Kyung Kim, Seung Min Park, Woon Hyung Kim*
Ankug E&C, *Kyung Min College

1. 배경

인화성액체의 화재시 주위에 인적, 물적인 손실을 주는 가장 큰 요인은 복사열(Thermal Radiation)이다. 이를 근거로 소방법에서는 위험물을 제조·취급·저장하는 시설의 주위는 취급·저장하는 위험물의 수량에 따라 일정한 거리의 보유공지를 확보하도록 되어 있다. 이 보유 공지의 확보목적은 화재 시 발생하는 연소열로 인한 주변기기, 건물 또는 인간에 대한 피해를 최소화하고, 화재의 전파를 막기 위함이다. 또한 위험물의 종류에 따른 지정 수량의 배수에 따라 보유 공지를 일정하게 규정하고 있으나, 이것이 화재 시 실제로 안전할 수 있는 거리가 여부를 가지고 계속된 논란이 되어 왔으며, 이 보유 공지는 물분무설비와 같은 자동식 소화설비 등을 추가함으로 단축이 가능할 것이다. 본 연구는 성능기준 소방 설계 (Performance-Based Fire Safety Design)방법을 적용하여 해외의 선진 Code와 비교함으로써, 인화성물질을 저장·취급·사용하는 탱크의 안전배치, 안전설계, 비상조치계획 등 안전대책을 수립하는데 활용코자 한다.

2. 관련기준

(1) 인화성액체 저장탱크의 보유공지

국가별	보유공지	
한국 (소방기술 기준규칙 제176조)	옥외탱크저장소(위험물을 이송하는 배관 기타 이에 준하는 시설을 제외 한다)의 주위에는 그 저장 또는 취급하는 위험물의 최대수량에 따라 옥외저장탱크의 측면으로부터 다음에 의한 너비의 공지를 보유하여야 한다.	
	저장 또는 취급하는 위험물의 최대저장량	공지의 너비
	지정수량의 500배 미만	3m 이상
	지정수량의 500배 이상 1,000배 미만	5m 이상
	지정수량의 1,000배 이상 2,000배 미만	9m 이상
	지정수량의 2,000배 이상 3,000배 미만	12m 이상
	지정수량의 3,000배 이상 4,000배 미만	15m 이상
	지정수량의 4,000배 이상인 경우 당해 탱크의 최대지름과 탱크의 높이 또는 길이 중 큰 것과 같은 거리 이상이어야 한다. 다만, 30m 초과인 경우에는 30m 이상으로 할 수 있고, 15m 미만의 경우에는 15m 이상으로 하여야 한다.	
한국 (소방기술 기준규칙 제176조)	지정수량의 4,000배 이상을 저장·취급하는 위험물옥외탱크저장소에 다음 기준에 적합한 물분무설비로 방호조치를 한 경우에는 그 보유공지중 ①의 규정에 의한 보유공지의 2분의 1 이상의 너비로 할 수 있다. ① 물분무소화설비의 설치기준에 적합할 것 ② ①의 규정에 불구하고 탱크의 높이(탱크하단에서부터 탱크측판 상부까지의 높이를 말한다. 이하 같다)가 15미터를 초과하는 경우에는 물분무설비의 가압송수장치의 토출량 및 수원이 다음 가,나.의 기준에 적합할 것 가. 가압송수장치의 토출량은 탱크의 높이 15미터마다 원주둘레길이 1미터당 37리터를 공급한 양이상으로 할 것 나. 수원은 가목에 의한 토출량을 20분이상 방수할 수 있는 양으로 할 것 ③ 물분무설비의 헤드는 탱크의 높이를 고려하여 적절하게 설치할 것	

(2) 인화성액체 저장탱크의 물분무설치 기준

국가별	유형 선정 기준
한국	지정수량의 4,000배 이상을 저장·취급하는 위험물옥외탱크저장소에 다음 기준에 적합한 물분무설비로 방호조치를 한 경우에는 그 보유공지를 2분의 1로 감할 수 있다. 가. 가압송수장치의 토출량은 탱크의 높이 15미터마다 원주둘레길이 1미터당 37리터를 공급한 양이상으로 할 것 나. 수원은 가목에 의한 토출량을 20분이상 방수할 수 있는 양으로 할 것

(3) 설계기준

인화성액체란 현재 국내소방법에서 규정하고 있는 제4류 위험물로서 수많은 종류의 화학물질이 존재하고 있다. 이러한 인화성 물 질중 대표적으로 비교적 인화점이 낮은 가솔린 및 벤젠에 대한 저장탱크의 Pool Fire 시 주변에 미치는 복사열의 범위를 검토하기로 한다. 실험결과에 의하면, 방유제 내 탱크 화재시 화재 발생 탱크로부터 발생되는 복사열

로부터 인접대상물이 받는 피해 범위는 아래와 같다.

복사열의 크기	인접 대상물의 피해	비고
5 kw/m ²	13초 노출시 피부에 견딜 수 없는 아픔을 느낌 40초 노출시 2도 화상	*1
10 kw/m ²	40초 노출시 사망	
20 kw/m ²	노출된 인접탱크의 냉각 필요	*2
37 kw/m ²	철골 등의 구조물 손상, 기계적인 훼손 발생	*3

*1. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 2-84

*2. NFPA 15 A-4-4.3.2 (18.93kw/m²)

*3. DAMAGE THRESHOLD-PLC CONSEQUENCE MODELING Chpt.8

따라서 인화성 액체 저장탱크의 화재시 화재탱크로부터 발생하는 복사열이 20kw/m² 가 되는 범위를 계산하여 현재 국내소방법에서 규정하고 있는 보유 공지와 비교하기로 한다. 보온되지 않은 탱크가 화염에 노출되는 경우, 위험물이 채워져 있는 부분의 외벽에서 흡수하는 열량은 약 63.1kW/m² 이며, 탱크 상부의 위험물이 채워져 있지 않은 빈공간은 더욱 더 큰 열량을 빨리 흡수하여, 과압이나 과열 등으로 손상을 입게 된다. 탱크 외벽에 8.2Lpm/m²의 방사밀도로 물분무 설비를 적용하여 냉각할 경우, 열흡수량은 약 18.93kw/m²로 현저하게 줄어들었으며, 이 기준 (18.93kw/m² 이나 통상 20kw/m²적용)이 현재 화재에 노출된 탱크의 보호 기준으로 채택 적용되고 있다.

예) 직경이 7.5m인 탱크(측벽온도 16℃)에 저장된 위험물이 화염에 노출되는 경우 21℃로부터 38℃까지 가열되는데 약 16분이 소요된 데 비하여, 탱크 외벽에 물분무 냉각설비를 적용할 경우에는 저장된 위험물이 비등점까지 도달하는데 걸린 시간은 55분이었다.(NFPA 15 A-4-4.3.2)

(4) 적용프로그램

현재 국내에서는 Consequence Analysis에 대한 프로그램을 개발 중에 있는 상태이며, 외국 프로그램에 의한 C-A 평가를 수행하여 왔다. 그러나 외국 C-A 프로그램을 현장에 적용한 결과 실제 피해범위와 차이가 있으며, 고가여서 사업장에서 구입하여 적용하기에는 어려움이 있다. 또한 프로그램 훈련받은 전문가에 의해서만 운영가능하다. 따라서 비전문가로 손쉽게 적용할 수 있는 저가의 프로그램 개발이 필요하다. 외국에서 사용하고 있는 다양한 종류의 프로그램이 있으나 본 논문에서 사용한 프로그램은 다음과 같다.

- Super Chems 2.0
- Copyright, Author D. Little, USA
- Level : Professional

3. 복사열 계산

POOL FIRE의 화염은 수직 실린더로 가정한다. 화재가 발생했을 때 화염은 복사열을

방출하는데 이 열은 화재중심으로부터 상당한 거리에 있는 시설물 등에 영향을 미치게 된다. 화염으로부터 임의의 거리에서 받는 복사열을 예측하는데 다음과 같은 식이 이용된다.

$$I_{th} = \tau F E$$

여기서, I_{th} = 거리 X에서 받는 복사열 [w/m²] F = 기하학적 인자
 τ = 대기투과도 (Transmissivity) E = 표면 방출열 [w/m²]

1) 표면방출열의 계산

$$E = \frac{\beta m H_c (\pi b^2)}{2\pi b a + \pi b^2}$$

복사열의 강도(I_{th})를 계산하기 위해서는 τ , F, E 를 알아야 하나 이중에서 가장 중요한 요인은 표면 방출열이다.

여기서, E = 표면 방출열 [w/m²] m = 연소 속도 [kg/m² · sec]
 β = 복사 분율 Hc = 액체의 순연소열 [J/kg]
b = 액면 반경 [m] a = 화염 길이 [m]

2) 연소속도 계산

연소속도는 액면화재가 진행되는 동안 액면에서 가연성물질이 증발되는 속도이다. 증발 속도는 화재시 발생하는 화염으로부터의 전도와 복사에 의하여 액체 Pool에 전달된 열에 의하여 결정된다.

$$m = \frac{0.001 \Delta H_c}{C_p(T_b - T_a) + \Delta H_v}$$

여기서, m = 연소 속도 [kg/m² · sec] Hc = 유출물질의 연소열 [J/kg]
Cp = Pool을 형성하는 액체의 비열 [J/kg · K]
 ΔH_v = 액체의 증발잠열 [J/kg], Ta = 대기온도 [K], Tb = 액체의 비등점 [K]

3) 화염높이 산정

화염의 높이는 다음식으로 계산한다.

$$H = 84b \frac{m}{[\rho_a(2gb)^{0.5}]^{0.61}}$$

여기서, b = Pool의 반경 [m], ρ_a = 공기 밀도 [kg/m³]
g = 중력 가속도 [9.8 m/s²]

4) 열의 대기투과도

대기투과도는 화재와 노출된 대상물 사이에서 대기에 의해 얼마나 많은 양의 복사열이 흡수 및 반사되지 않는가의 척도이다.

대기투과도 계수의 크기는 화재와 노출된 대상물 사이에 존재하는 공기중 수분량에 따라 결정된다.

$$\tau = 2.02 (P_{pw} \cdot X)^{-0.09}$$

여기서 P_{pw} = 수증기 분압 (포화수증기압 × 상대습도) [N/m²]

X = 화염표면으로부터 대상체까지의 거리 [m]

▶ 화재 시나리오

가솔린/ 벤젠 POOL FIRE의 복사열을 계산하기 위하여 다음과 같이 시나리오를 설정하여 컴퓨터 시뮬레이션 하였다.

1) 가솔린시나리오 (SCEN 1,1-1,3, 3-1,5, 5-1,7,7-1, 9,9-1,11,11-1)

POOL 면적 (m ²)	: 10.179	16.619	27.340	35.257	40.715	132.733
주위온도 (°C)	: 25	25	25	25	25	25
주위압력(atm)	: 1	1	1	1	1	1
상대습도(%)	: 50	50	50	50	50	50
가시거리(km)	: 5	5	5	5	5	5
풍속 (m/sec)	: 3.7, 103.7, 103.7, 103.7, 103.7, 103.7, 10					
대기안정도	: 3	3	3	3	3	3
복사열 (KW/m ²)	: 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50					
내용물	: GASOLINE					
용기 길이 (m)	: 4.9	6.1	7.3	8.5	9.8	12.2
용기 직경 (m)	: 3.6	4.6	5.9	6.7	7.2	13
액면 (%)	: 90	90	90	90	90	90
탱크 증기압(atm)	: 1	1	1	1	1	1

2) 벤젠 시나리오 (SCEN2, 2-1,4, 4-1,6, 6-1,8, 8-1,10,10-1,12, 12-1)

POOL 면적 (m ²)	: 10.179	16.619	27.340	35.257	40.715	132.733
주위온도 (°C)	: 25	25	25	25	25	25
주위압력 (atm)	: 1	1	1	1	1	1
상대습도 (%)	: 50	50	50	50	50	50
가시거리 (km)	: 5	5	5	5	5	5
풍속 (m/sec)	: 3.7, 103.7, 103.7, 103.7, 103.7, 103.7, 10					

대기안정도	: 3	3	3	3	3	3
복사열 (KW/m ²)	: 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50					
내용물	: BENZENE					
용기 길이 (m)	: 4.9	6.1	7.3	8.5	9.8	12.2
용기 직경 (m)	: 3.6	4.6	5.9	6.7	7.2	13
액면 (%)	: 90	90	90	90	90	90
탱크 증기압 (atm):	1	1	1	1	1	1

4. 결과 분석

(1) 가솔린화재의 경우

지정수량	500	1000	2000	3000	4000	16200	REMARKS
유체명	가솔린	←	←	←	←	←	
TANK SIZE (ID×H) (m)	3.6×4.9	4.6×6.1	5.9×7.3	6.7×8.5	7.2×9.8	13×12.2	
소방법상 보유공지	3	5	9	12	15	15	
20 kw/m ² 거리 (m)	10.64	12.35	15.08	16.87	17.89	27.94	화재중심으로 부터의 거리 풍속 : 3.7 m/s
20 kw/m ² 거리 (m)	16.03	18.33	22.39	25.32	26.96	42.87	화재중심으로 부터의 거리 풍속 : 10 m/s
20 kw/m ² 거리 (m)	8.84	10.05	12.13	13.52	14.29	21.44	탱크측면으로 부터의 거리 풍속 : 3.7 m/s
20 kw/m ² 거리 (m)	14.23	16.03	19.44	21.97	23.36	36.37	탱크측면으로 부터의 거리 풍속 : 10 m/s

(2) 벤젠화재의 경우

지정수량	500	1000	2000	3000	4000	16200	REMARKS
유체명	벤젠	←	←	←	←	←	
Tank Size (ID×H) (m)	3.6×4.9	4.6×6.1	5.9×7.3	6.7×8.5	7.2×9.8	13×12.2	
소방법상 보유공지	3	5	9	12	15	15	
20 kw/m ² 거리 (m)	7.216	8.474	10.420	11.700	12.440	19.870	화재중심으로 부터의 거리 풍속 : 3.7 m/s
20 kw/m ² 거리 (m)	10.460	12.250	14.930	16.640	17.650	27.930	화재중심으로 부터의 거리 풍속 : 10 m/s
20 kw/m ² 거리 (m)	5.461	6.174	7.470	8.350	8.840	13.370	탱크측면으로 부터의 거리 풍속 : 3.7 m/s
20 kw/m ² 거리 (m)	8.660	9.950	11.980	13.290	14.050	21.430	탱크측면으로 부터의 거리 풍속 : 10 m/s

5. 결론

현재는 위험물저장탱크의 배치 계획시 소방법 및 Code에 의한 보유 공지를 기준으로 설계되고 있으나, 향후에는 실제복사열에 의한 계산을 실시하여 실행위주의 소방설계를 적용하고, 이때 복사열에 의한 인접탱크의 화재위험을 감소시키기 위해 화재탱크로부터 20 kw/m²이하의 복사열을 받는 범위에 인접탱크를 설치하는 것이 바람직하다고 볼 수 있다. 미국 NFPA 15 Para. A-4-5.2에 의하면 인접탱크의 노출표면적에서 허용되는 복사열의 범위는 6000 Btu/hr/ft²(18.93 kw/m²)이하로 제시되고 있다. Super Chems Program을 이용한 결과, BENZENE 탱크 화재 시 20 kw/m²의 복사열이 미치는 범위는 국내소방기술기준규칙에 의한 옥외탱크저장소의 보유공지와 유사한 결과를 보여주었다. 그러나 풍속 및 위험물의 종류에 따라 복사열의 범위가 상당한 차이를 가져 올 수 있다.

만일 인접탱크에 물분무 설비를 적용할 경우 인접탱크가 받는 복사열을 감소시켜 화재탱크와 인접탱크간의 거리를 단축시켜 줄 수 있다.

한편 성능기준 설계를 통하여 사업주는 합리적인 위험관리가 가능하며 투자기관은 투자 여부를 결정함에 있어서 사업장의 화재 안전을 확인할 수 있다. 보험회사는 합리적인 보험 요율을 결정하거나, 보험 가입자의 위험관리지도가 가능하게 된다. 대단위 위험물을 취급·저장하는 장소의 경우, 해당 지방자치단체에서는 주민의 생명을 보호하기 위해서 전문가에 의한 화재안전 진단을 의뢰할 수 있고 화재 안전 진단은 법규의 준수 및 안전도를 진단 할 수 있다.

참고문헌

1. NAPA 15 Standard for Water Spray Fixed Systems for Fire Protection Para a-4-5.2
2. API 203 Guidelines for Application of Water Spray Systems for Fire Protection in the Petroleum Industry Para. 4.2
3. Mr. R.A.Yong "Automatic Sprinkler Systems for Fire Protection" Chapter 14/water spray system for special risk
4. Advanced Consequence Analysis G.A.Melhem,Ph.D August 20, (1995)
5. Fire Protection Manual Volume 1/Third Edition 1985 BY Gulf Publishing Company, Houston.
6. 소방법시행령 및 기술기준규칙