

석유류 저장 탱크에서의 액면 및 유출화재에 대한 복사열의 실험적 연구



김 옹

호서대학교 안전시스템공학과 교수

1. 서론

석유류의 특성상 화재가 발생하면 대형화됨으로써 화재 진화의 어려움과 대규모 재산피해 및 인명피해를 유발할 위험성이 항상 내포되어 있다. 따라서 이러한 위험성을 감소시키기 위해 국내·외적으로 석유류 저장 탱크 화재에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는데, 대표적으로 액면화재시 연소속도, 화염높이, 열적특성 등의 화재 성상에 관한 연구와 수치해석 및 시뮬레이션에 관한 연구를 그 예로 들 수 있다. 또한, 석유류 저장 탱크의 액면화재(Pool Fire)와 유출화재(Spill Fire)시 화염으로부터 방출되는 복사열(Radiation Heat)에 의한 주위 인접 가연물 및 시설에 대한 피해규모가 크기 때문에 각국에서는 석유류 저장 탱크간 설치 거리에 관한 법규정을 마련하여 엄격히 적용하고 있다. 국내의 경우에는 소방법 소방기술기준에 관한 규칙 제176조에 의해 적용되며, 해외의 경우 보험회사에서 보험요율 산정시 적용되는 기준(EN) 및 미국 방화협회 기준

(NFPA 30, Section 2.3) 등이 많이 적용되고 있다.

석유류 저장 탱크 화재의 경우 초기 진화가 이루어지지 않으면 화염으로부터 방출되는 복사열에 의해 인접 석유류 저장 탱크가 가열되고 석유류의 급격한 증발로 인해 안전장치가 작동되더라도 탱크의 일부가 과열되어 대단위 폭발 및 화재가 발생한다. World Bank에 따르면 대형화재시 복사열에 의한 주위 인접 가연물 및 시설에 대한 영향은 복사열 강도가 37.5kW/m^2 일 때 장치 및 설비가 손상되며, 25kW/m^2 에서는 최소한의 에너지에 의해 목재가 발화될 수 있음을 보고하였다. 또한 12.5kW/m^2 의 복사열 강도는 목재 또는 플라스틱 튜브의 착화를 유도하는데 충분한 최소의 에너지이며, 인명피해의 측면에서 고려해 볼 때 9.5kW/m^2 에서는 8초 후에는 심한 고통을 느끼며, 20초 후에는 2도 화상을 입힐 수 있는 충분한 에너지이다.

본 연구에서는 석유류 저장 탱크 화재의 진압시 보다 효과적이고 안전한 진압 활동이 이루어질 수 있도록 하기 위한 탱크 화재의 시뮬레이션 연구, 탱크 화재 모델링 및 진압 모델 구축에 필요한 기초자료로 활용하기 위해 석유류 저장용량이 250, 2500 및 25000ℓ인 철재 저장 탱크를 제작하고, 화재 시나리오를 저장 탱크의 화재시에 일차적으로 상부 지붕이 파손되면서 발생하는 액면화재와 탱크의 하부 또는 드레인 밸브의 손상에 의해 저장된 석유류가 일정한 속도로 유출되면서 발생할 수 있는 유출화재에 대한 실험적 연구를 통해 화염으로부터 방출되는 복사열을 측정하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

본 연구에서 사용된 석유류 저장 탱크의 종류는 철재로 만든 CRT(Cone Roof Type)로 저장용량이 250(Φ 750mm×610mm), 2500(Φ 1680mm×1220mm) 및 25000(Φ 5050mm×300mm)이다. 250 ℓ 와 2500 ℓ 탱크의 경우 유출화재를 실시하기 위해 콘크리트 재질의 방유재를 설치하였다.

액면 화재 및 유출 화재 시 화염으로부터 방출되는 복사열 측정에는 Fig 1에 나타난 것과 같이 Medtherm사의 Digital Heat Flux Meter(Model 5H203-DR1)를 사용하였다.



Fig. 1. A picture of Digital Heat Flux Meter and recorder

2.2 실험방법

석유류 저장 탱크에 연료인 경유를 채운 후 본 연구에서 적용된 탱크 화재의 시나리오인 액면 화재와 유출화재를 실시하였으며, 점화봉으로 점화시킨 후 Digital Heat Flux Meter를 이용하여 매 1분 간격으로 복사열을 측정하였다.

액면 화재의 경우 Heat Flux Sensor의 높이는 지면으로부터 0.5m, 간격은 탱크 외벽으로부터 250 ℓ 의 경우 중심점을 기준으로 매 15° 각도로 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 및 3.0m, 2500 ℓ 의 경우 중심점을 기준으로 매 15° 각도로 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 및 4.0m, 25000 ℓ 의 경우 중심점을 기준으로 매 22.5° 각도로 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 및 5.0m로 총 5개의 Heat Flux Sensor를 설치하였다.

유출 화재는 250 ℓ 와 2500 ℓ 에서 실시하였으며 Heat Flux Sensor의 높이와 간격은 액면 화재와 동일하게 설치하고, 탱크의 드레인 밸브를 통한 경유의 유출속도는 각각 248 ℓ/min , 10.3 ℓ/min 으로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 250 ℓ 탱크 화재 실험

액면의 높이에 따라 4회의 액면 화재와 1회의 유출화재를 실시하여 화염으로부터 방출되는 복사열을 측정하였다. 이때 초기 외부조건은 풍속 1.2m/sec, 기온 18.0 $^{\circ}$ C, 습도 60% 였다.

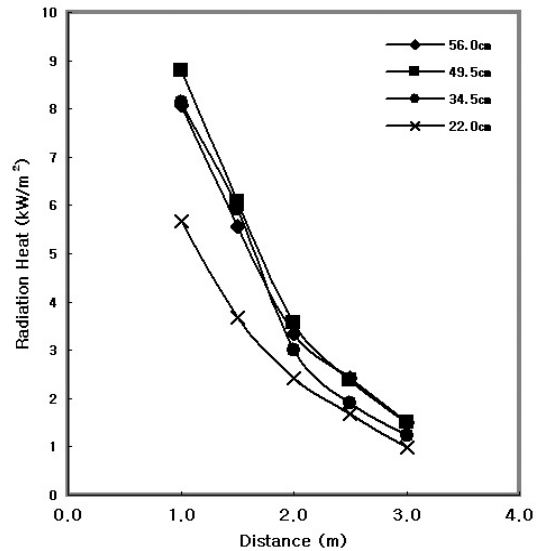


Fig. 2. Radiation heat flux of pool fire in 250 ℓ storage tank

Fig 2는 4회에 걸친 액면 화재의 복사열에 대한 평균값들을 비교한 것으로 탱크의 벽면으로부터 멀어질수록 지수함수적으로 감소함을 알 수 있다. 액면의 높이에 따라서는 49.5cm일 때 가장 높은 값을 나타내고 있으며, 22.0cm일 때 가장 낮은 값을 나타내고 있다. 이는 액면이 가장 높을 때에는 탱크내 경유량이 많아 화염으로부터 발생된 열이 경유를 예열하는데 사용되므로 증발이 작고, 가장 낮을 때에는 탱크 벽면을 통한

열전달이 빨라 경우의 증발은 용이하나 탱크 표면에서 공기와 간헐적인 접촉으로 화염이 불규칙하게 생성되기 때문인 것으로 판단된다. 액면화재시 총 연소량은 약 60ℓ이며, 연소속도는 약 10ℓ/min 액면강하속도는 약 2.20mm/min으로 나타났다.

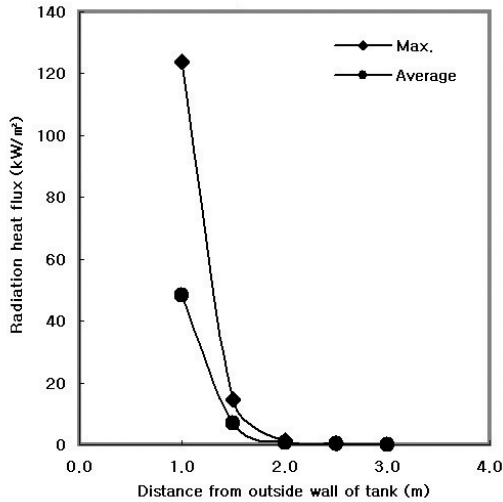


Fig. 3. Radiation heat flux of spill fire in 250ℓ storage tank

Fig 3은 드레인 밸브를 통한 유출화재로 유출속도는 248ℓ/min이고, 총 유출량이 약 40ℓ 일 때 화염으로부터 방출되는 복사열의 평균값과 최대값을 나타낸 것으로 액면화재의 양상과 비슷하지만 탱크의 벽면으로부터 멀어질수록 그 기울기가 급격함을 알 수 있으며, 1.0m의 동일한 간격에서 상당히 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 드레인 밸브를 통해 유출된 경우의 연소 표면적이 탱크내의 연소표면적보다 약 27배 정도 크기 때문인 것으로 판단된다.

Fig 4는 250ℓ 저장 탱크의 액면화재와 유출화재 실험에서의 화염형성을 나타낸 것이다.



(a) pool fire (b) spill fire

Fig. 4. A picture of pool and spill fire in 250ℓ storage tank

3.2 2500ℓ 탱크 화재 실험

액면화재 및 유출화재에 대해 1회 실시하여 화염으로부터 방출되는 복사열을 측정하였다. 이때 초기 외 부조건은 풍속 0.7m/sec, 기온 20.0℃, 습도 55% 였다.

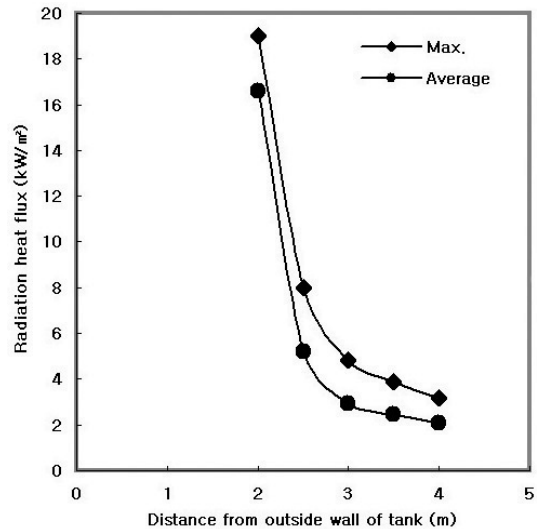


Fig. 5. Radiation heat flux of pool fire in 2500ℓ storage tank

Fig 5는 액면화재시 화염으로부터 방출되는 복사열에 대한 평균값과 최대값을 나타낸 것으로 탱크의 벽면으로부터 멀어질수록 지수함수적으로 감소함을 알 수 있다. 액면화재시 총 연소량은 약 300ℓ이며, 연소속도는 약 6.79ℓ/min 액면강하속도는 약 250mm/min으로 나타났다.

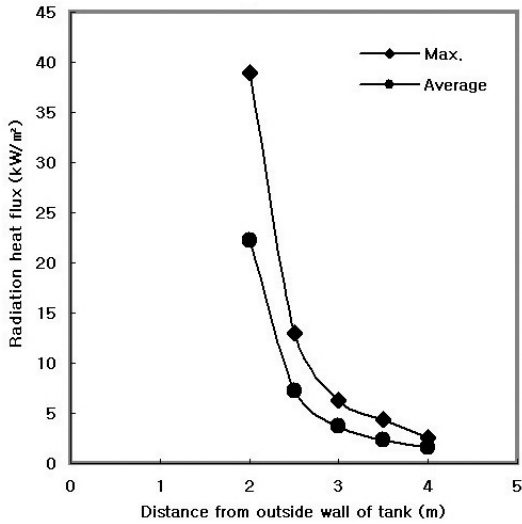


Fig. 6. Radiation heat flux of spill fire in 2500L storage tank

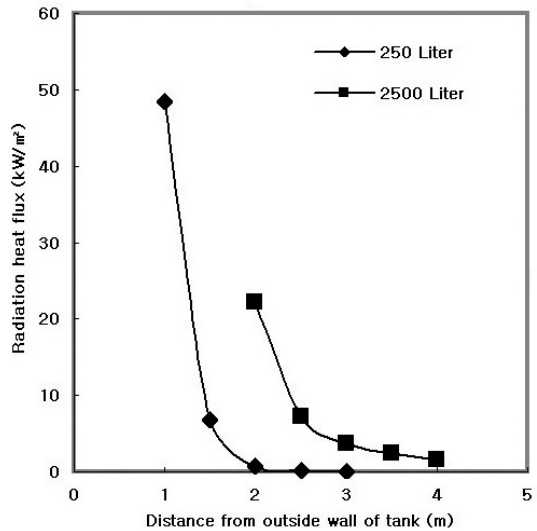


Fig. 7. Radiation heat flux of spill fire in 250L and 2500L storage tank.

Fig 6은 드레인 밸브를 통한 유출화재로 유출속도가 10.3l/min이고, 총 유출량이 약 155l 일 때 화염으로부터 방출되는 복사열의 평균값과 최대값을 나타낸 것으로 액면화재의 양상과 비슷하지만 20m의 동일한 간격에서 2배 정도의 차이가 남을 알 수 있다. 이는 250L의 액면화재와 유출화재시 화염으로부터 방출되는 복사열의 차이에 비해 매우 작은 것으로 연소표면적이 탱크 내의 연소표면적보다 약 3배 정도 크고, 화염의 형성이 탱크의 뒷부분에서 형성되었기 때문인 것으로 판단된다.

Fig 7은 유출화재에 대한 250L와 2500L의 평균 복사열을 비교한 것으로 2500L에서 상대적으로 높은 복사열이 방출됨을 알 수 있었다. 이는 연소표면적이 약 56배 정도 크고, 연소량에 있어서도 약 39배 정도 많기 때문인 것으로 판단된다. 이로서 탱크 및 방유제의 크기가 증가할수록 외부로 전달되는 복사열이 증가하고, 그에 따른 주위 인접 시설 및 가연물에 피해를 줄 수 있는 위험성이 높아진다는 것을 알 수 있다.

Fig 8은 2500L 저장 탱크의 액면화재와 유출화재 실험에서의 화염 형성을 나타낸 것이다.



(a) pool fire

(b) spill fire

Fig. 8. A picture of pool and spill fire in 2500L storage tank

3.3 25000L 탱크 화재 실험

액면화재에 대해 1회 실시하여 화염으로부터 방출되는 복사열을 측정하였다. 이때 초기 외부조건은 풍속 0.55m/sec, 기온 21°C, 습도 65% 였다.

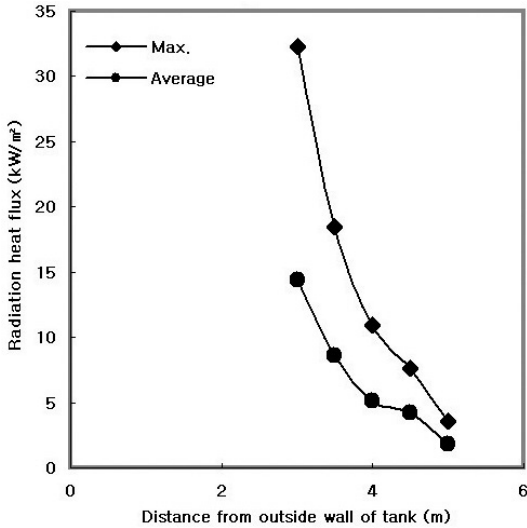


Fig. 9. Radiation heat flux of pool fire in 25000L storage tank

Fig 9는 액면화재시 화염으로부터 방출되는 복사열에 대한 평균값과 최대값을 나타낸 것으로 탱크의 벽면으로부터 멀어질수록 지수함수적으로 감소함을 알 수 있다. 액면화재시 총 연소량은 약 960ℓ이며, 연소 속도는 약 56.52ℓ/min 액면강하속도는 약 2.70mm/min으로 나타났다.

Fig 10은 250, 2500 및 25000ℓ에 대한 액면화재시 화염으로부터 방출되는 복사열을 탱크 외벽으로부터 규정 거리에서 측정된 것으로 탱크 외벽으로부터 멀어질수록 지수함수적으로 급격히 감소함을 알 수 있었다. 또한, 저장 탱크의 직경이 커짐에 따라 화염으로부터 방출되는 복사열 또한 급격히 증가함을 알 수 있었다. 이는 저장 탱크의 직경이 커짐에 따라 연소 표면적이 넓어지고, 화염형성이 잘 이루어져 연소량이 많고 연소속도가 빠르기 때문인 것으로 판단된다.

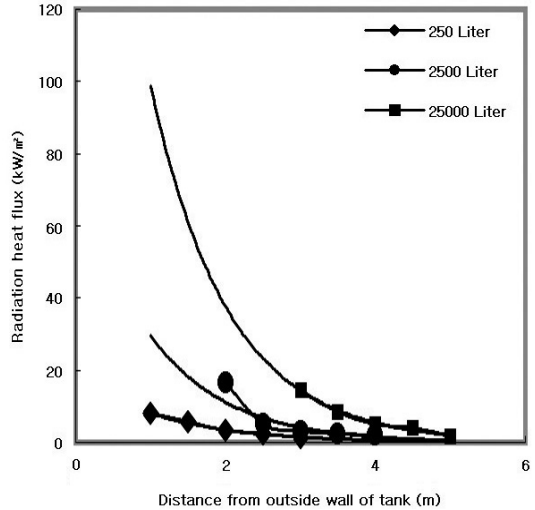


Fig. 10. Radiation heat flux of pool fire in each storage tank

Fig 11은 25000ℓ 저장 탱크의 액면화재 실험에서의 화염형성을 나타낸 것이다.



Fig. 11. A picture of pool fire in 25000L storage tank

Table 1은 액면화재시 화염으로부터 방출되는 복사열을 측정된 결과를 이용, 추세를 그리고 다음의 방정식을 이용하여 계산한 것으로 탱크 외벽으로부터 동일한 거리에서 용기의 직경에 따라 복사열의 편차

또한 지수함수적으로 감소함을 알 수 있었다.

$$250\ell : y = 18.885 e^{-0.836x} \quad (1)$$

$$2500\ell : y = 79.049 e^{-0.9784x} \quad (2)$$

$$25000\ell : y = 259.45 e^{-0.9645x} \quad (3)$$

y: 복사열

x: 탱크 외벽으로부터의 거리

Table 1. Radiation heat flux of pool fire on distance from outside wall of tank

Capacity of tank (ℓ)	Radiation heat flux (kw/m ²)								
	1.0 (m)	1.5 (m)	2.0 (m)	2.5 (m)	3.0 (m)	3.5 (m)	4.0 (m)	4.5 (m)	5.0 (m)

Table 2은 방정식 (1)~(3)을 이용하여 World Bank에 의해 보고된 복사열 125kw/m²에 대한 것. 이 복사열에 의해 목재 또는 플라스틱의 착화를 유도하는데 충분한 최소에너지인 125kW/m²에 해당하는 거리가 저장 용량이 25000ℓ 인 경우 탱크 외벽으로부터 약 3.14m 지점임을 예측할 수 있다.

Table 2. The effects of radiation heat flux

Radiation heat flux(kW/m ²)	Distance from outside wall of tank (m)		
	250ℓ	2500ℓ	25000ℓ
37.5	-	0.76	2.01
25.0	-	1.18	2.43
12.5	0.49	1.89	3.14
9.5	0.82	2.17	3.43
4.0	1.85	3.05	4.33
1.6	2.94	3.99	5.28

4. 결론

석유류 저장 탱크에 대한 액면 화재와 유출 화재시 화염으로부터 방출되는 복사열을 측정 한 결과 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

- 1) 석유류 저장 탱크 화재시 화염으로부터 방출되는 복사열은 탱크 외벽으로부터 거리가 증가함에 따라 지수함수적으로 감소함을 알 수 있었다.
- 2) 화염으로부터 방출되는 복사열은 저장 탱크 및 방유제의 표면적 증가에 따라 급격히 증가함을 알 수 있었으며, 저장 용량이 25000ℓ 인 경우 탱크 외벽으로부터 1m의 거리에서 최대 약 98.9kw/m²임을 예측할 수 있었다.
- 3) 복사열에 의해 목재 또는 플라스틱의 착화를 유도하는데 충분한 최소에너지인 125kw/m²에 해당하는 거리가 저장 용량이 25000ℓ 인 경우 탱크 외벽으로부터 약 3.14m 지점임을 예측할 수 있었다.