

석유저장탱크 화재시 탱크주위 온도분포 및 복사열의 영향에 관한 실험적 연구

제진주 (중앙소방학교 학교장)

구동철 (중앙소방학교 소방연구실1담당)

1. 서론

국내의 석유화학산업분야는 1960년대 이후 정부의 중화학 육성 정책에 의해서 더욱 다양해지고 발전을 거듭하여 왔으며 이러한 발전과 더불어 원유 및 석유제품에 대한 저장 형태 및 기술 또한 발전되어 왔다고 할 수 있다.

오늘날 대형 정유공장에서는 하루에 40,000톤 이상의 원유를 정유하고 있는데 이들 공장 및 석유화학 공장에서 운전되는 시설들은 대부분이 고온 고압이라는 운전조건을 포함하고 있으며 이러한 장소에서 취급되는 물질이 화재 및 폭발을 유발하는 가연성 물질이라는 점에서 항상 위험성이 따르고 있다.

또한 위험물의 화재는 다른 화재에 비하여 발생 빈도는 낮으나 위험물의 특성상 화재가 발생하면 대형 화됨으로써 화재 진화의 어려움과 대규모 재산피해 및 인명피해를 유발할 위험성을 항상 내포하고 있다.

따라서 이러한 위험성들을 감소시키기 위해 국외에서는 석유저장탱크에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는데, 대표적으로 위험물탱크에 관한 화재 성상에 관한 연구^{1), 2), 3)}와 수치해석 및 시뮬레이션 연구^{4), 5), 6)}를 그 예로 들 수 있으나 국내에서의 연구는 거의 찾아 볼 수 없었다.

한편, 석유저장탱크에서의 화재발생시 화염으로부터 방출되는 복사열에 의해 주위인접 가연물 및 시설에 대한 피해규모가 크기 때문에 각국에서는 석유저장탱크 간 설치 거리에 관한 법 규정을 마련하여 엄격히 적용하고 있는데, 국내의 경우 일반적으로 소방법

소방기술기준에 관한 규칙 제176조에 의해 적용되고 있는 반면, 해외의 경우 보험회사에서 보험요율 산정 시 적용하는 기준(IRI) 및 미국방화협회 기준(NFPA 30, Section 2-3)이 많이 적용되고 있다.

복사열에 의한 주위인접 가연물 및 시설에 대한 영향은 Table 1.에 나타난 바와 같이 37.5kW/m²의 복사열 강도에서 인근 장치 및 설비가 손상되는 위험성이 있다.

따라서 본 연구에서는 저장용량이 250ℓ, 2,500ℓ, 25,000ℓ 인 규모의 Steel 재질의 석유저장탱크를 제작하여 액면화재(Pool Fire)와 유출화재(Spill Fire)에 대한 실태화재 연구를 수행하여, 주위온도의 변화와 화염으로부터 방출되는 복사열을 측정하고 온도와 복사열 강도에 따른 탱크 인접가연물 및 시설에 대한 영향을 실험적으로 평가하여 석유저장탱크화재 시 연소 면적에 따른 위험성을 예측하는데 그 목적을 두었다.

2. 실험장치 및 실험방법

2-1 실험장치

본 실험에 사용된 저장 탱크는 저장 용량이 각각 250ℓ (Φ750mm×610mm), 2,500ℓ (Φ1,680mm×1,220mm), 25,000ℓ (Φ5,050mm×300mm)로 재질은 강철로 하였으며, 250ℓ, 2,500ℓ 탱크의 경우 콘크리트 재질의 방유제를 설치하였다.

실태 화재 실험을 통한 Data 수집을 위하여 사용

Table 1. The effects of Radiation Heat(World Bank)

복사열 강도		영 향
(Btu/hr/ft ²)	(kW/m ²)	
11,900	37.5	장치 및 설비가 손상됨
7,900	25	오랫동안 노출되면 최소한의 에너지에 의해 목재가 발화됨
4,000	12.5	목재 또는 플라스틱 튜브의 착화를 유도하는데 충분한 최소의 에너지
3,000	9.5	8초 후에는 심한 고통을 느끼며, 20초 후에는 2도화상을 입음
1,300	4	20초 내에 보호되지 않으면 통증을 느끼며 피부가 부푸러오름
500	1.6	장기간 노출되면 불편함을 느낌

Table 2. A summary of Experimental Apparatuses

측정기기명	모델 및 사양	용 도
Digital Heat Flux Meter	Medtherm 사 Model 5H203-DR1 10, 50, 100, 500, 1,000 W/cm ²	액면화재 및 유출화재 시 화원으로부터 방출되는 복사열(Heat Flux)을 측정
Multi-channel Anemomaster	KANOMAX사, Model 6242	석유 탱크 화재시 주위의 공기유속, 온도 측정, 및 대류 현상 분석
화재 온도 측정장치	주) 삼부시스템 MultiScan/1200™ K-type의 열전대 (총 30 Channel)	액면 화재시 탱크 주위의 거리별 온도 분포 및 화염의 온도 측정
Climomaster	KANOMAX사, Model 6531	주위의 습도 측정
온도기록계	K-type의 열전대	액면 화재시 탱크내 온도분포 측정

된 실험 장치는 Table 2.와 같다.

2-2 실험 방법

제작된 탱크에 연료인 경유를 채운 후 액면화재와 유출화재를 실시하였으며, 점화 봉으로 점화 시킨 후 Table 2에 나타난 실험 장치를 사용하여 실시간으로 Data를 측정하였다. 화염으로부터 방출되는 복사열과 탱크내 연료의 온도 분포, 주위의 습도 및 풍향을 매 1분 간격으로 측정하였으며, 액면화재 시 화염의 온도와 석유 탱크 주위의 공기유속, 온도 측정은 매 15초 간격으로 측정하였다. 또한, 비디오 캠코더를 사용하여 화염의 크기와 바람에 의한 화염의 변화를 측정하였다.

석유류 저장탱크의 각각 용량별 공통된 실험 순서는 다음과 같다.

- 1) 각 실험장치의 Setting
- 2) 탱크 내 연료 충전 (Drain Valve를 통한 연료의 유출, 25000ℓ 제외)
- 3) 각 실험장치의 초기값 측정
- 4) 점 화
- 5) 화염의 크기 및 바람에 의한 화염의 변화를 측정
- 6) Heat Flux, 탱크 내 온도분포(25000ℓ 제외), 화염의 온도분포 (25000ℓ 제외), 탱크 주위의 온도 분포 및 유속, 풍향, 습도의 실시간 측정
- 7) 연소완료(소화)
- 8) 측정 Data의 분석

3. 실험결과

3-1 주위온도 변화

액면화재 및 유출화재시 주위온도 변화를 측정하기 위해 각 저장 탱크의 중심점을 기준으로 120°의 각도로 외벽으로부터 매 1m간격으로 3m까지 K-type의 온도 센서를 부착할 수 있는 기둥을 설치하고, 각각의 기둥에는 지상으로부터 1m, 2m, 3m의 지점에 온도 센서를 부착하여(총 27channel) 매 15초 간격으로 온도를 측정하였다.

유출 화재시 유출속도는 250ℓ의 경우 2.48ℓ/min., 2,500ℓ의 경우 10.3ℓ/min.로 하였고 경유의 총유출량을 각각 40ℓ, 155ℓ로 하여 온도를 측정하였다.

Fig. 1~Fig. 3은 액면화재 시 저장 탱크의 중심점으로부터 120°간격, 탱크 벽면에서 거리 1m, 높이 2m에 위치한 Channel들에 대한 주위온도 변화로 외부바람의 영향에 의해 큰 편차가 나타남을 알수 있었으며, 25,000ℓ에서의 최고온도가 2,500ℓ에 비해 낮게 나타났는데 그 이유는 화염의 열기가 주위의 공기를 흡입하는 과정에서 냉각된 것으로 판단된다.

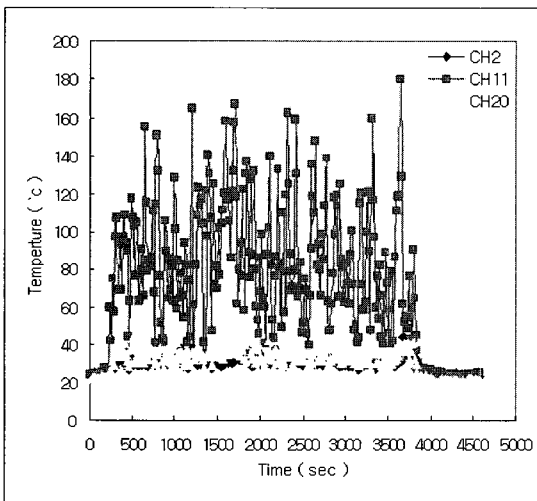


Fig. 1 The Atmospheric Temperature Variations depending on the fire time(250ℓ, pool fire)

Fig. 4은 액면화재 시와 동일한 위치에서 250ℓ의 유출화재에 대한 Channel들의 온도변화로 CH20에서 온도가 높게 나타났는데 이는 외부바람의 영향과 경유의 유출과정상에서 한곳으로의 정체 현상에 의해 높은 온도를 나타낸 것으로 판단된다.

3-2 화염으로부터의 복사열 측정

탱크 화재시 화염으로부터 발생하는 복사열을 측정하기 위한 Heat Flux sensor의 위치는 250ℓ의 경우 탱크 외벽으로부터 1m, 1.5m, 2.0m, 2.5m, 3.0m의 거리, 중심점을 기준으로 매 15° 각도로, 2500ℓ의 경우 2m, 2.5m, 3.0m, 3.5m, 4.0m의 거리, 중심점을 기준으로 매 15° 각도로, 25000ℓ의 경우 3m, 3.5m, 4.0m, 4.5m, 5.0m의 거리, 중심점을 기준으로 매 22.5° 각도로 설치하여 매 1분 간격으로 측정하였다.

Fig. 5는 250ℓ, 2500ℓ, 25000ℓ에 대한 액면화재시 화염으로부터 방출되는 복사열을 탱크 외벽으로부터 규정 거리에서 측정한 것으로 탱크 외벽으로부터 멀어질수록 복사열은 지수함수적으로 급격히 감소함을 알수 있었다. 또한, 저장탱크의 직경이 커짐

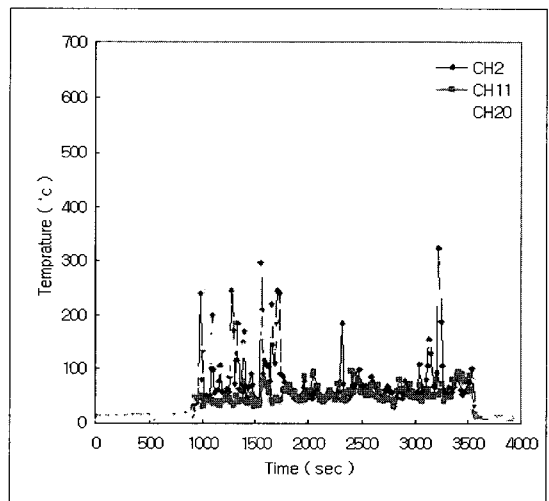


Fig. 2 The Atmospheric Temperature Variations depending on the fire time(2500ℓ, pool fire)

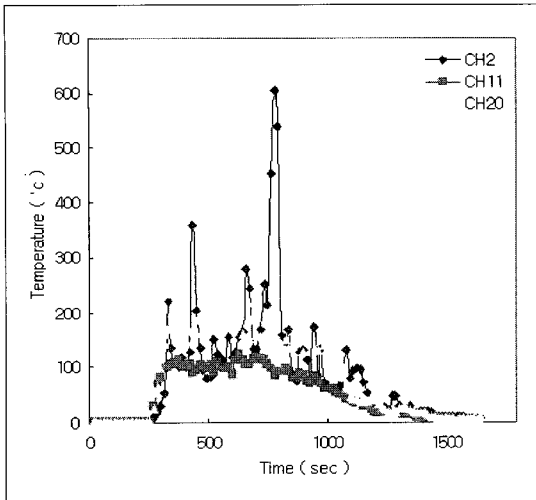


Fig. 3 The Atmospheric Temperature Variations depending on the fire time(25000ℓ , pool fire)

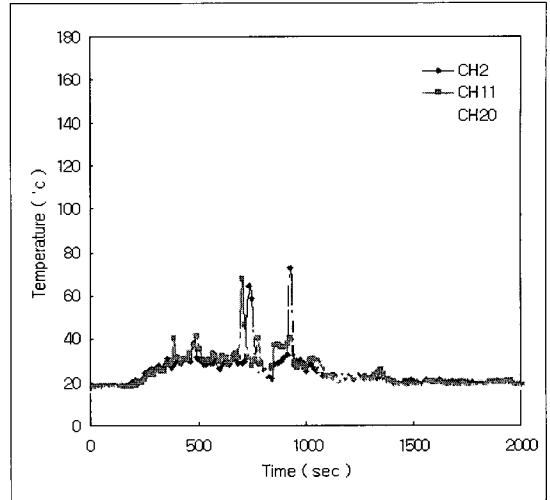


Fig. 4 The Atmospheric Temperature Variations depending on the fire time(250ℓ , spill fire)

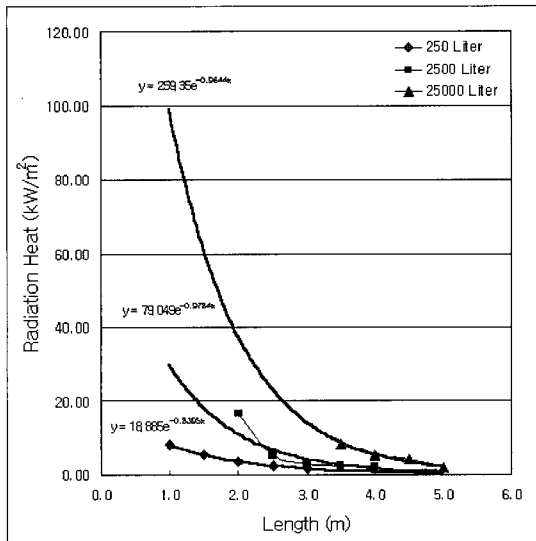


Fig. 5 Radiation Heat on Distance from Tank outside wall(pool fire)

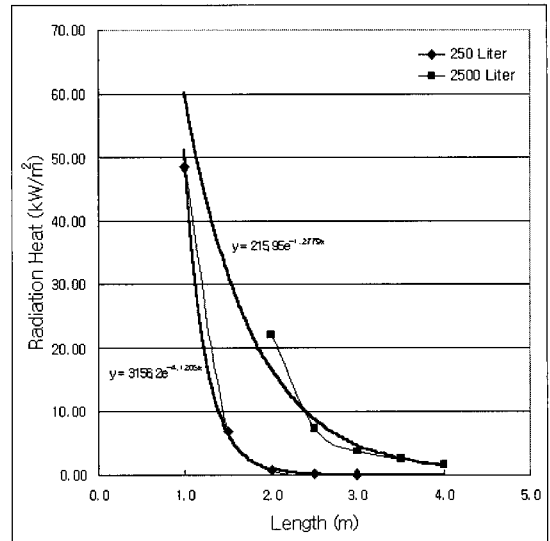


Fig. 6 Radiation Heat on Distance from Tank outside wall(spill fire)

에 따라 화염으로부터 방출되는 복사열 또한 급격히 증가함을 알 수 있었다.

Fig. 6은 250ℓ, 2500ℓ 에 대한 유출화재시 화염으로부터 방출되는 복사열을 액면화재시의 Heat Flux sensor 위치와 동일하게 하여 측정 한 것으로 액면화재시와 비교해서 탱크 외벽으로부터 멀어질수

록 복사열이 지수함수적으로 급격히 감소하고 탱크로부터 동일한 1m 거리에서의 복사열을 비교해 볼때 상당한 차이가 나타남을 알 수 있었다. 이는 유출된 경우의 양이 액면화재시의 연소량보다 작고, 연소면적이 커짐에 따라 일정한 화염 형성이 이루어지지 않았기 때문인 것으로 판단된다.

Table 3. Radiation Heat on Distance from Tank outside wall(pool fire)

용기직경 (mm)	Heat Flux sensor의 위치에 따른 복사열(kW/m ²)								
	1.0m	1.5m	2.0m	2.5m	3.0m	3.5m	4.0m	4.5m	5.0m
750	8.2	5.4	3.5	2.3	1.5	1.0	0.7	0.4	0.3
1,680	29.7	18.2	11.7	6.8	4.2	2.6	1.6	1.0	0.6
5,050	98.9	61.0	37.7	23.3	14.4	8.9	5.5	3.4	2.1

Table 3은 액면화재시 화염으로부터 방출되는 복사열을 측정된 Data를 이용, 추세를 그리고 그에 따른 방정식을 이용하여 계산한 것으로 탱크 외벽으로부터 동일한 거리에서 용기의 직경에 따라 복사열의 편차 또한 지수함수적으로 감소함을 알 수 있었다.

4. 결론

석유저장탱크를 제작하여 액면화재(Pool Fire)와 유출화재(Spill Fire)에 대한 실대화재 연구를 통한 주위온도의 변화와 화염으로부터 방출되는 복사열을 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

- 1) 석유저장탱크 화재 시 화염으로부터 방출되는 복사열은 거리가 증가함에 따라 지수함수적으로 감소함을 알 수 있었다.

- 2) 화염으로부터 방출되는 복사열은 저장탱크의 표면에 따라 급격히 증가함을 알 수 있었으며, 특히, 탱크 직경이 5,050mm인 경우 탱크 외벽으로부터 1m의 거리에서 최대 약 98.9kW/m²임을 예측할 수 있었다.
- 3) 복사열에 의해 목재 또는 플라스틱의 착화를 유도하는데 충분한 최소 에너지인 12.5kW/m²에 해당하는 거리가 탱크 직경이 5,050mm인 경우 탱크 외벽으로부터 약 3.15m 지점임을 예측할 수 있었다.
- 4) 석유저장탱크를 중심으로 하여 120° 각도의 3방향으로 설치된 온도 측정기의 측정결과 각기 다른 온도분포를 나타냄으로써 탱크 주변의 온도가 풍향, 풍속에 의해 영향을 받는다는 것을 확인하였다.

참고문헌

A.M.Birk, "Scale Effects with Fire Exposure of Pressure-Liquefied Gas Tanks", J.Loss Prev. Process Ind., Vol.8, No,5, pp. 275-290, 1995

Corlett, R. C., "Gas fires with pool-like boundary conditions", Combustion and flame", 12p. 19, 1968

Hiroshi Koseki, "Radiation Properties and Flame Structure of Large Hydro-carbon Pool Fires", Thirteen Meeting of the UJNR Panel on Fire Research and Safety, March 13-20, Vol.2., pp 41-50, 1997.

Howard R.Baum, Kevin B.McGrattan, "Simulation of oil tank fires", International interflam conference, 8th Proceedings", Vol.2, June 29, 1999

Bernd Broeckmann and Hans-Georg Schecker, "Heat Transfer Mechanisms and Boilover in Burning Oil-Water Systems", J.Loss Prev. Process Ind., Vol. 8, No3, pp137-147, 1995

Marcia L. Huber, Jiann C. Yang, "A Thermodynamic Analysis of Fuel Vapor Characteristics in an Aircraft Fuel Tank Ullage", Fire Safety Journal 37, pp. 517-524, 2002