

석유저장탱크 화재시 복사열과 온도에 관한 연구

허만성, 정기창*, 구동철**
 우송공업대학 소방안전관리과
 호서대학교 안전공학과*
 중앙소방학교 소방연구실**

A Study on the radiation and temperature in petroleum storage tank fires

Man-Sung Hur, Ki-Chang Jung*, Dong-Chul Gu**
Dept. of Fire Safety Eng., Woosong Technical College
*Dept. of Industrial Safety Eng., Hoseo University**
*Fire R&D Center, National Fire Service Academy***

1. 서론

석유는 현대산업에 있어서 가장 기본적인 물질로써 최대의 에너지원이다. 원자력에너지의 이용도 증가하고 있지만 석유의 경제성, 편리성 때문에 석유의 의존도는 줄어들지 않고 있다. 때문에 대규모 탱크가 대도시 주변에 저장·유통되고 있어 그 안전성은 화재연구는 물론 안전공학 측면에서도 큰 문제가 된다. 따라서 탱크 주위에는 일정의 공지가 필요하고 주위 건물까지의 거리에 대한 규정을 두고 있다.

석유탱크 화재는 일반 건물화재에 비하여 건수는 많지 않지만 일단 화재가 일어나면 소화활동이 어렵고, 장시간에 걸쳐 많은 사회활동에 영향을 미치는 경우가 있다. 따라서 외국에서는 액화탄화수소를 연료로하는 석유탱크화재의 연구가 활발히 이루어지고 있다. 또 가스계 연료에 대한 pool-like fire의 연구까지도 많은 정보를 가지고 있다.^{1,2)} 그 내용도 실험을 중심으로 한 것부터 실험결과를 이론적해석을 행한 것, 대규모 화재에 대한 주위의 복사열, 화염높이의 추정 등이 있다. 세계적으로 많은 연구가 이루어지고 있으나 대표적으로 NIST에서 Baum과 McGrattan을 중심으로 oil tank에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.³⁾ 일본은 소방연구소에서 오래전부터 탱크화재를 포함하여 액면연소의 연구가 Akita et al.⁴⁾에 의해 이루어져 왔다. 특히 일본 소방연구소에는 위험물연구실을 설치하여 古積 博을 실장으로 석유탱크 화재에 대한 연구가 지속적으로 활발히 이루어지고 있다.^{5,6)}

그러나 국내에서는 지금까지 석유저장탱크 화재에 관한 연소특성의 연구 및 분석은 이루어진 바가 거의 없다. 따라서 본 연구의 목적은 화재시 소방관의 접근거리 결정, 연소방지 등의 소방활동을 위하여 탱크화재시 발생하는 복사열 및 온도분포 특성을 연구하는데 있다.

2. 실험장치 및 개요

화재 실험을 위한 저장탱크는 250ℓ로 직경 750mm, 높이 610mm로 선정하고 탱크재질은 Steel로 하였으며, 방유제는 콘크리트로 설치하여 실대 화재 실험을 수행하였다. 연구에 적용된 탱크 화재의 시나리오는 화재시 저장탱크의 구조상 일차적으로 상부 지붕이 파손되면서 발생하는 액면화재(pool fire)에 대하여 실시하였다. Fig. 1은 실험에 사용된 저장탱크의 크기와 형상을 보여주고 있으며, Fig. 2는 저장탱크에 설치된 방유제의 크기와 형상을 나타낸다.

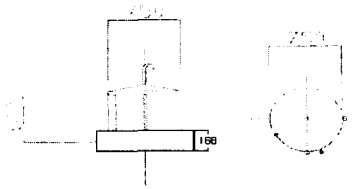


Fig. 1. Schematic diagram of the tank

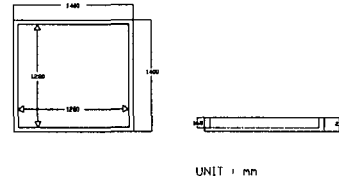


Fig. 2. Schematic diagram of the dyke

실대 화재 실험을 통한 data 수집을 위하여 사용된 실험장치는 Fig. 3과 Fig. 4에 나타난 것과 같이 heat flux meter, multi-channel anemomaster, 온도측정장치, 온도기록장치, 6mm 디지털 캠코더, climomaster를 사용하였다.

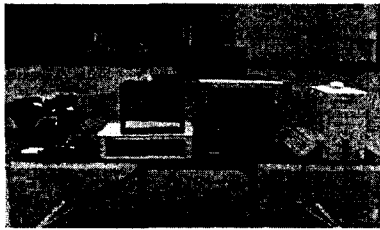


Fig. 3. The multi-channel anemomaster

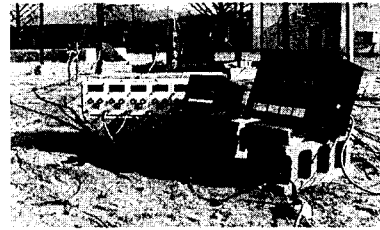


Fig. 4. The digital heat flux meter and recorder

화재 실험하는 동안 탱크 주위 온도변화는 Fig. 5와 같이 탱크의 중심에서 120° 각도로 외벽으로부터 1m 간격으로 3m까지 기둥을 설치하고, 각각의 기둥에 높이 1m, 2m, 3m인 지점에 k-type 온도센서를 27개 설치하여 15초 간격으로 온도를 측정하였다. 또한 주위 유속변화를 측정하기 위하여 탱크 외벽에서 3m 지점에 다채널 유속측정장치의 센서를 부착

시켜 탱크 주위의 공기유속 변화도 15초 간격으로 측정하였다. 화염의 온도변화는 Fig. 6과 같이 탱크 상부표면으로부터 30cm, 60cm, 90cm 위치에 k-type 온도센서를 설치하여 1분 간격으로 측정하였다. 반면에 탱크 내부 온도변화는 Fig. 7과 같이 탱크 바닥면으로부터 8cm 높이마다 6개의 온도센서를 설치하여 1분 간격으로 온도를 측정하였다. 화염으로부터 발생하는 복사열은 Fig. 8과 같이 heat flux sensor를 탱크 외벽으로부터 1m에서 0.5m 간격마다 15° 각도로 설치하여 1분 간격으로 측정하였다.

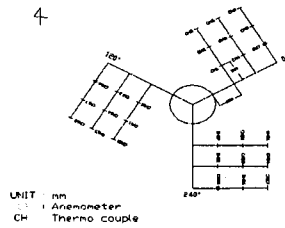


Fig. 5. The locations of thermocouple & multi-channel anemomaster

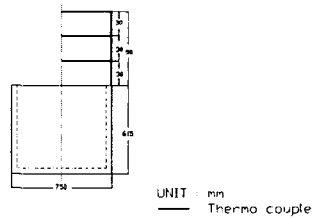


Fig. 6. The locations of thermocouple for flame temperature

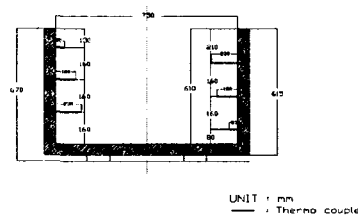


Fig. 7. The locations of thermocouple for liquid temperature measurement

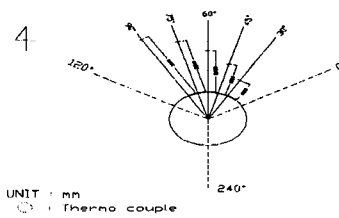


Fig. 8. The locations of heat flux sensors for radiation

3. 실험 결과

3.1 탱크 주위온도 및 공기유속

점화봉을 이용하여 액면 상부에서 점화시킨 후 15초 간격으로 각 channel별 주위온도 및 공기유속변화를 측정하였다.

Fig. 9는 화재시 주위온도 변화로 저장탱크의 중심축으로부터 120° 간격, 탱크 벽면에서 거리 1m~3m, 높이 1m~3m에 위치한 channel들에 대한 주위온도 변화로 CH10, CH11, CH12, CH16, CH17, CH18에서의 온도분포가 상대적으로 높게 나타났다. 이는 화염이 주위의 바람에 의해 영향을 받은 것으로 판단된다.

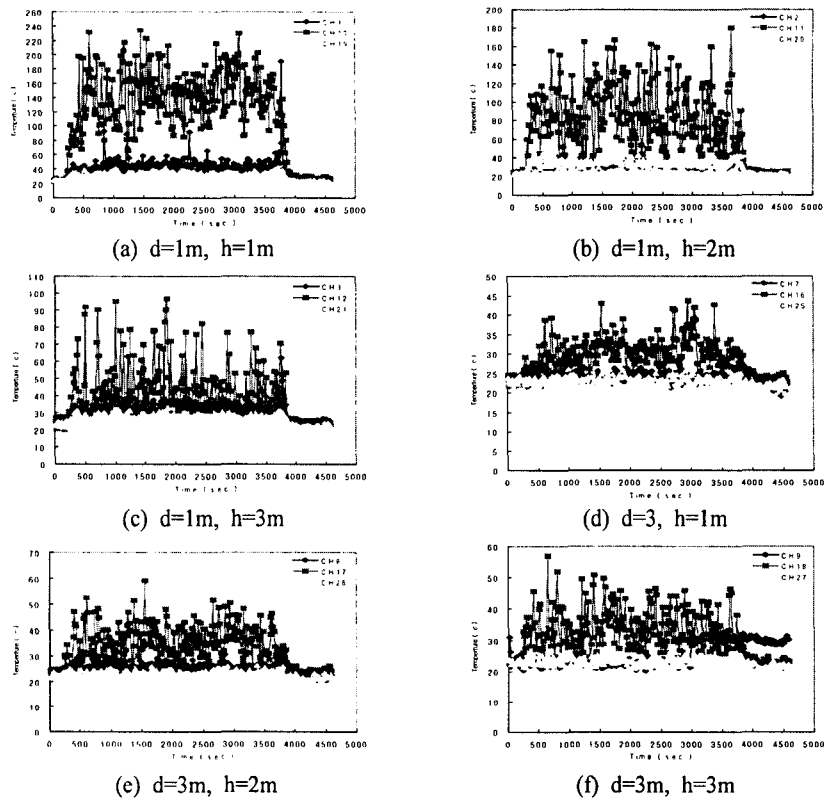


Fig. 9. The atmospheric temperature variations

Fig. 10은 액면화재시 저장탱크의 중심축으로부터 120° 간격, 탱크 벽면에서 거리 3m, 높이 1m에 위치한 channel들에 대한 공기 유속을 나타내는 것으로 1~3m/sec 정도를 나타내고 있으며, 연소 중반으로 갈수록 3~4m/sec로 약간 유속이 증가하는 이유는 연소시 주위의 공기를 빨아들이는 것으로 판단된다.

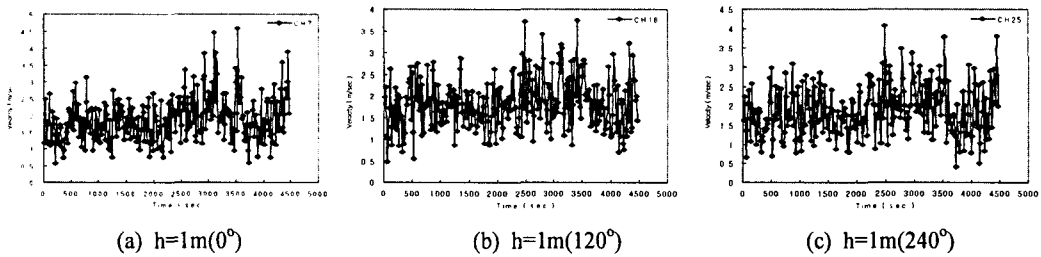


Fig. 10. The variations of air velocity at 3m distance

3.2 화염 및 온도변화

Fig. 11은 액면 상부에서 점화봉으로 점화시킨 후 1분 간격으로 탱크 표면으로부터 30cm, 60cm, 90cm 높이에서 화염온도를 측정된 것으로 화재시 온도변화는 30cm 높이에

서 400~700°C로 가장 높게 나타냈으며, 90cm 높이에서는 100°C 전후를 나타내었다.

Fig. 12는 탱크 내부의 온도 변화를 나타낸 것으로 a, b, d의 경우에는 액면의 높이가 낮아 Thermocouple이 화염에 직접적으로 접촉되면서 온도가 급격하게 증가하였으나, c, e, f의 경우에는 액온의 변화가 일정한 속도로 증가하고 있음을 알 수 있다.

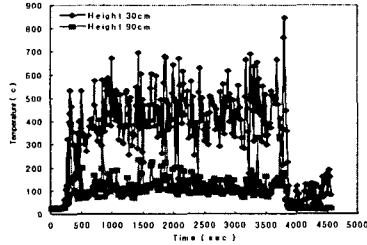


Fig. 11. Flame temperature of the fire

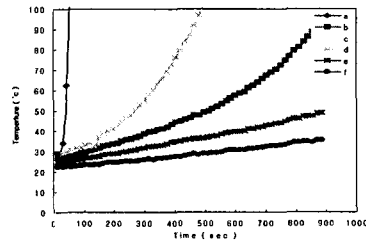


Fig. 12. Liquid temperature of the fire

3.3 복사열변화

화염으로부터 발생되는 복사열은 radiation heat flux sensor를 설치한 후 매 1분 간격으로 측정하였으며, 액면의 높이에 따라 4회 실험을 실시하였다.

Fig. 13은 액면의 높이에 따른 heat flux의 평균값과 최대값의 변화를 나타낸 것으로 (a)는 액면높이 56cm, 연소량 28.7ℓ 일 때를 보여준다. 탱크에서 1m 떨어졌을 때 22kw/m², 1.5m일 때 15kw/m², 2m일 때 5kw/m², 2.5m일 때 3kw/m², 3m일 때 2kw/m² 정도를 나타내었다. 평균값은 2kw/m²에서 7kw/m² 정도를 나타내었다. (b)는 액면높이 49.5cm, 연소량 59.6ℓ 일 때를 나타내는 것으로 탱크에서 1m 떨어졌을 때 25kw/m², 1.5m일 때 20kw/m², 2m일 때 12kw/m², 2.5m일 때 5kw/m², 3m일 때 3kw/m² 정도를 나타내었다. 평균값은 2kw/m²에서 9kw/m² 정도를 나타내었다. (c)는 액면높이 34.5cm, 연소량 55.2ℓ 일 때를 나타내는 것으로 최대값은 2kw/m²에서 14kw/m² 정도를 보여준다. 평균값은 1kw/m²에서 8kw/m² 정도를 나타내었다. (d)는 액면높이 22cm, 연소량 57.4ℓ 일 때를 나타내는 것으로 최대값은 2kw/m²에서 9kw/m² 정도를 보여준다. 평균값은 1kw/m²에서 6kw/m² 정도를 나타내었다. 탱크의 벽면으로부터 멀어질수록 heat flux가 지수함수적으로 감소함을 알 수 있다.

Fig. 14는 4회에 걸친 액면의 높이에 따른 실험의 평균값들을 비교한 것이다. 이때 1m 거리에서는 대략 8~9kw/m²를 나타내고, 1.5m 거리에서는 6kw/m², 2m 거리에서는 3kw/m², 2.5m 거리에서는 2.5kw/m², 3m 거리에서는 1.5kw/m² 정도를 나타내어 복사열량은 $q=32/(L/D)^2$ 의 관계식에 의해 변화되었다. 액면의 높이가 49.5cm(2nd)일 때 가장 높은 heat flux 값을 나타내고 있으며, 22cm(4th)일 때 가장 낮은 heat flux 값을 나타내었다. 이는 액면이 가장 높을 때에는 경유의 증발이 늦고, 가장 낮을 때에는 경유의 증발은 용이하나 탱크 표면에서의 공기와 간헐적인 접촉에 따른 화염이 불규칙하기 때문인 것으로 사료된다.

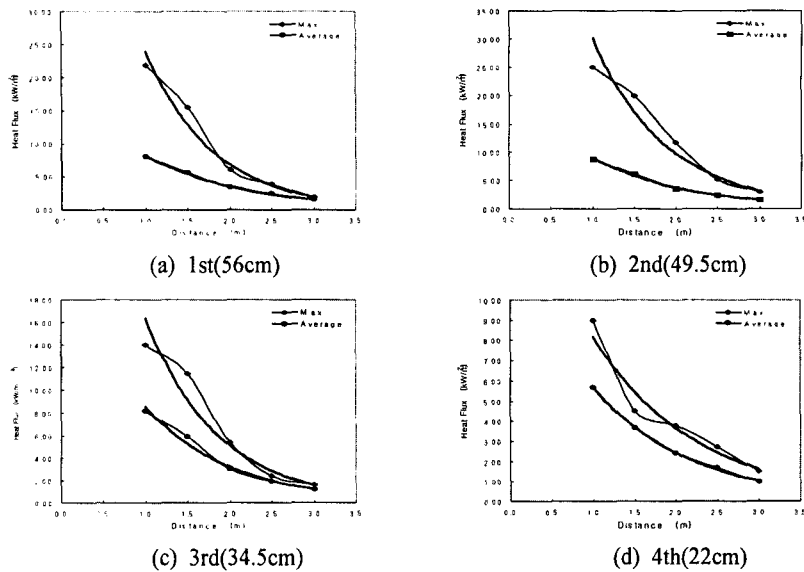


Fig. 13. Heat flux from the tank outside wall

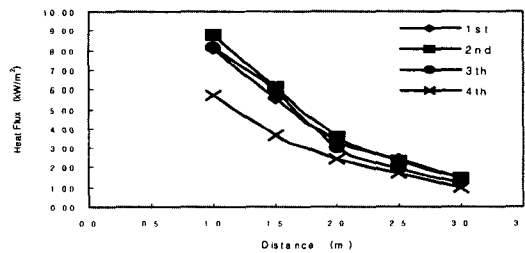


Fig. 14. Heat flux on distance from tank outside wall

4. 결론

본 실험은 250ℓ의 석유 저장 탱크를 제작하여 일정한 거리와 높이에 측정센서를 설치하고 연소중 화염으로부터 발생하는 온도, 복사열 및 주위 공기의 영향을 측정 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 화재 초기에는 주위의 공기 흐름이 1~3m/sec로 안정적이고, 연소 중반으로 갈수록 주위의 공기를 빨아들이므로 공기의 유속이 3~4m/sec로 초기보다 약간 증가하였다.

2) 탱크의 중심에서 120°각도로 3방향에서 측정된 온도는 각기 다른 분포를 나타냄으로써 탱크 주변의 온도가 풍향, 풍속에 의해 영향을 받았으며 탱크 중심에서 거리가 멀어질수록 측정된 온도의 최대값과 최소값은 감소하였다.

3) 탱크 중앙 화염 상부의 온도는 30cm 높이에서 400~700°C를 나타내고, 90cm 높이에서는 100°C 전후를 나타내었다.

4) 탱크화재시 화염으로부터 방출되는 복사열은 탱크의 벽으로부터 1m의 거리에서 최

대 9kw/m^2 임을 알 수 있었다. 또 거리가 증가함에 따라 지수함수적으로 복사열량이 감소하여, 복사열량은 $q=32/(L/D)^2$ 의 관계식에 따라 변화함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Hasemi, Y., Tokunaga, T., "Some Experimental Aspects of Turbulent Diffusion Flames and Buoyant Plumes from Fire Sources against a Wall and in a Corner of Walls", Combustion Science and Technology, Vol. 40, p.1(1984).
2. Corlett, R. C., "Gas Fires with Pool-like Boundary Conditions", Combustion and Flame", Vol. 12, p.19(1968).
3. Howard R. Baum, Kevin B. McGrattan, "Simulation of Oil Tank Fires", International Interflam Conference 8th Proceedings", Vol. 2, pp.1117-1128(1999).
4. Akita, K., Yumot, T., "Heat Transfer in Small Pools and Rates of Burning of Liquid Methanol", 10th Symposium on Combustion, p.943(1965).
5. 古積 博, "Research on Oil Tank Fire", Feb.(1996).
6. 自治省消防廳研究所, "大規模石油タンクの 燃焼に 關する 研究報告書", 消防研究所 研究資料 第46号(平成 11年).
7. D. Y. Lee, "Thermal Effects in the Pool Fire of Petroleum", M.S. Thesis, pp.1-9(1994).
8. D. E. Lee, "Numerical Simulation of a Pool Fire", M. S. Thesis, pp.1-7(1995).
9. Hiroshi Koseki, "Radiation Properties and Flame Structure of Large Hydrocarbon Pool Fires", Thirteen Meeting of the UJNR Panel on Fire Research and Safety, Vol. 2, pp.41-50(1997).
10. Howard R. Baum, Kevin B. McGrattan, "Simulation of Large Industrial Outdoor Fires", Fire Detection, Fire Extinguishment and Fire Safety Engineering, NRIFD 50th Anniversary Symposium Proceedings, pp.23-30(1998).
11. Mudan K. S., "Thermal Radiation Hazards from Hydrocarbon Pool Fires", Prog. Energy Combustion Science, Vol. 10, p.59(1984).
12. Quintiere, J., "Pool Fires-a Review", University of Maryland(1991).
13. 한국소방검정공사, "위험물탱크의 시험·점검관련 조사연구 논문집", Vol. 1, NO. 6(1998).