

석유저장탱크 화재시 복사열에 의한 영향평가 프로그램 개발에 관한 연구

정기창 · 박형주 · 이정운 · 김 홍* · 강영구* · 구동철** · 함성웅**

호서대학교 안전시스템공학과 · *호서대학교 벤처전문대학원 · **행정자치부 중앙소방학교

I 서 론

국내의 석유화학산업 분야는 1960년대 이후 정부의 중화학 육성 정책에 의해서 더욱 다양해지고 전문화되어 발전을 거듭하여 왔고 이와 더불어 원유 및 제품에 대한 저장 형태 및 저장 기술 또한 크게 진보하여왔다. 현존하는 국내의 옥내·외 저장탱크는 대략 134,000기에 이르는데 이들 탱크의 재질은 대부분이 철재이고 특수한 경우 FRP 또는 콘크리트를 사용하고 있고 이러한 저장시설의 규모가 증대됨에 따라 그 장치시설의 규모 또한 증가하였는데 최초 설계단계에서부터 안전을 고려한 설계가 이루어지고 있어 화재 발생 빈도는 낮은 것으로 나타났다. 그러나 석유류의 특성상 화재가 발생하면 대형화됨으로써 화재 진화의 어려움과 대규모의 재산피해 및 인명피해를 유발할 위험성을 항상 내포 하고 있으며, 여기에 대기 및 수질 오염과 같은 2차적인 환경 문제도 무시할 수 없는 것이 현실이다.

본 연구에서는 원유를 정제하고 이를 이용한 화학제품을 생산하는 각종 Plant의 대형 파괴로 이어질 수 있는 석유류 저장 Tank의 화재 발생시 화재 확대의 주된 원인인 복사열의 영향이 고려된 비용 효과적이고 사전 숙지가 가능한 컴퓨터 프로그램을 개발하여 소방대원들의 보다 안전하고 신속한 진압 활동에 도움이 되고자 하였다.

II 이 론

1. 국내·외 관련연구의 현황

국내에서의 탱크 화재에 관한 화재 모델 예측은 안전 및 화공 분야와 관련하여 크게 정성적 혹은 정량적 접근 방법을 사용하여 연구된 바 있으나 변수 선택조건, 모델링 기법 및 예측 결과 적용범위 등에 있어서 국외 연구동향에 비해 극히 제한된 기초 연구가 수행되어 온 실정이고 이에 반해 국외에서는 매우 구체적이며 적용 스케일 형태 및 방법, 모델 제시 등에 있어서 다양한 연구가 수행되어져 왔다.

1995년 독일의 Bernd Broeckmann과 Hans-Georg Schecker는 다양한 연료를 사용한 열전달 메카니즘 모델을 이론적으로 규명하기 위하여 보일오버 현상이 오일의 열전달 메카니즘과 단일 온도 및 조성 층을 형성하는 성질에 의존한다는 것을 포괄적으로 연구하였고,¹⁾ Canada의 A.M.Birk는 화재시의 파이어볼 직경, 지속시간 및 폭발의 영향에

대한 모델을 제시하였으며 또한 1997년 일본의 Hiroshi Koseki는 대형 탱크 화재와 화염 구조, 외부 복사 특성을 이해하기 위하여 몇 가지 크기별로 화재 실험을 실시하였으며, 이를 통해 복사는 화염 주위의 대형연기 층에 의해 차단되고 대부분의 복사는 화염을 기반으로 방출됨을 규명하였다.²⁾ 1998년 스페인의 Eulàlia Planas-Cuchi & Joaquim Casal는 탱크가 대형액면화재로 포위되었을 때의 성장 화재 발생시 복사 열유속 및 특정 탱크 표면 지점에 도달되는 온도를 계산하기 위한 방법으로 3차원 공식과 높이 및 시간에 따른 온도 변화를 고려한 화재 형상을 수립하기 위해 평면 정의를 사용하였다.³⁾ 미국의 H.R.Baum과 K.B.McGrattan은 실외 환경에서 수 개의 인접 탱크가 위치한 대형오일 저장탱크화재 시 발생하는 화재 시나리오와 관련된 역학을 시뮬레이션하기 위한 방법을 고찰하였다.^{4,5)} 탱크 상부와 탱크를 둘러싸고 있는 방유제 화재에 대한 열전달 모델을 설명하기 위하여 화재 위치 및 주위 바람에 의한 영향을 복사 에너지 방출에 기초하여 탱크로부터 발생하는 복사열을 측정하였다.

2. Tank 화재 관련 모델 분석

대형 가스 와 유류 저장 탱크 및 관련 부대설비(정유 및 석유 화학 공장등)등에 있어서 화재 및 폭발관련 모델링에 있어서는 주로 설비 및 시설의 이상이 발생하였을 경우 초래되는 사고의 영향을 그 형태 별로 모사할 수 있는 위험영양평가 모듈 개발에 주안점을 두고 있으며 주로 화재 발생시 복사열에 의한 근접한 탱크 및 주변 시설에 대한 피해 영향에 초점을 맞추어 화재 모델링이 이루어지고 있다. 이러한 화재 모델링에 있어서 복사열 강도를 산정하기 위해서 중요한 Factor가 되는 것은 주로 열복사(Heat Radiation), 화염형태(Flame Shape), 대기투과도(Atmospheric Transmissivity), 기하학적 형상 계수(Geometric View Factor) 및 연소속도(Burning Rate)등이다.

기존의 국외에서 개발되어진 석유 저장 탱크 화재 해석 프로그램들을 Table 1에 나타내었고 이들 외국의 프로그램은 다른 건물 해석프로그램과는 달리 기본 데이터인 원유를 전량 수입하는 관계로 실험data가 일치하며 또 탱크의 재질과 구조, 형태 등이 외국의 경우와 크게 다르지 않은 관계로 국내의 석유탱크 화재 해석에 적용하는데 무리가 없으리라 사료 된다.

Table 1. The Commercial simulation models of oil tank fires

- | |
|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Fire Dynamics Simulator and Smokeview(FDS 3.0) 2. A Large Outdoor Fire plume Trajectory model - Flat Terrain(ALOFT-FT) 3. Arthur D, Little 사의 SuperChems™ |
|--|

3. Tank 화재시 일정 거리에서의 복사열 강도 계산

가. Pool Fire에 의한 복사열 예측

저장탱크 또는 배관에서 인화성 물질이 누출되어 그 물질이 액면을 형성하여 화재가

발생하는 경우를 말하며 본 연구에서는 프로그램에 적용하기 위하여 TNO 액면 화재 모델의 알고리즘 채택을 채택하였는데 본 모델의 전제 조건으로는 충분한 산소의 공급, 액 표면적이 일정, 완전연소로 가정하고 연소 생성물인 이산화탄소 및 검댕이 복사열의 대기 투과도에 미치는 영향은 배제하였다. 다음은 일정거리에서의 복사열량을 계산하기 위한 수식이다.

$$Q = \tau \times F \times E$$

여기서 Q: 화염으로부터 일정거리에서의 복사열량 (W/m^2), τ : 투과율, F: 최대 view factor, E: 표면방출 플럭스량 (W/m^2)

나. Jet Fire 에 의한 복사열 예측

저장탱크 또는 배관에서 일정한 개구부가 발생하여 저장물이 고압으로 분출되어 화재가 발생하는 경우를 말하며 프로그램 개발을 위해 SFPE 고압분출화재 모델의 알고리즘 채택 하였고 본 모델에서는 개구부를 통한 저장물의 분출속도가 일정하고 누출 방향이 수직이며 완전연소로 가정하였으며 역시 연소 생성물인 이산화탄소 및 검댕등이 복사열의 대기 투과도에 미치는 영향을 배제하였다. 다음은 일정거리에서의 복사열량을 계산하기위한 수식이다.

$$Q = \frac{\beta \times Tr \times Hc \times m}{4 \times \pi \times Dis \tan ce^2}$$

여기서 Q: 일정거리에 복사열량 (w/m^2), β : 복사열의 비율 (%), Tr: 복사열의 공기 중의 투과도 (%), Hc: 연료가스의 연소열 (J/kg), m: 연료가스의 방출속도 (kg/s), Distance: 점원 모델 중 제트 불꽃의 중심점으로부터의 영향거리(m)

다. Fire Ball에 의한 복사열 예측

저장탱크 또는 배관이 갑자기 파손되어 액화가스 또는 과열 액체의 내용물이 일시에 누출되어 폭발 및 화재가 발생한 경우(BLEVE)를 말하며 프로그램 개발을 위해서 SFPE 의 알고리즘 채택하였고 전제 조건은 Pool Fire에서와 동일하다.

III. 화재 종류에 따른 거리별 복사강도 예측 프로그램 개발

1. 프로그램의 구성

본 연구에서는 저장 탱크의 화재 및 폭발 시 발생 가능한 시나리오 중 액면 화재, Jet Fire 및 Fire Ball로 인해 발생하는 복사열로 인한 주위 가연물 및 진압에 투입되는 소방관 및 대원들의 인체에 미치는 영향 등을 바로 파악할 수 있도록 실험 결과 및 문헌적 고찰을 통하여 채택된 상기한 계산식을 바탕으로 프로그램 사용자의 접근이 용이

하도록 Programing하였고 또한 국내외에서 수집된 탱크화재 사고 사례를 사고 명, 발생일, 발생 장소, 사고 개요, 사고 원인 분석, 대책 분석, 자료의 출처별로 체계화하여 사고사례 Data Base 구축하였으며 Data Base 프로그램은 data의 수정, 입력, 삭제, 검색, 정렬, 인쇄 등의 명령을 수행할 수 있도록 하였고 Visual C++를 개발 Tool로 사용하여 화재 시 복사열에 의한 영향평가 프로그램에 포함 시켰다. 다음의 그림 1은 액면화재의 프로그램 순서도이고 그림 2와 3에 Jet Fire 및 Fire Ball의 프로그램 순서도를 나타내었다. 그림 4는 개발 되어진 프로그램의 메인 화면으로써 각각의 화재 모델별, 사고사례 DB 및 연소 물질 DB등으로 Pop-Up 메뉴가 구성되었고 그림 5는 각각의 화재 모델별 변수들의 입력창이며 그림 6은 최종적으로 탱크화재별 화염에 의한 복사열 계산에 따른 결과 화면으로 일정 거리에서 예측되어지는 복사열량의 값이 계산되어지며 좌측면에 거리에 따른 복사열의 그래프가 그려지고 출력이 가능하며 화면 하단에 어떤 거리에서 계산되어지는 복사열의 값에 따라 주변 가연물 및 시설에 미치는 영향을 나타내었고 하단 좌측에 주지사항 메뉴를 별도로 두어 화재 진압대원들로 하여금 탱크 화재로부터 발생되는 복사열에 의한 인체의 영향을 거리별로 표시하여 진압시 안전거리를 유지하는데 참고 자료가 되도록 하였다.

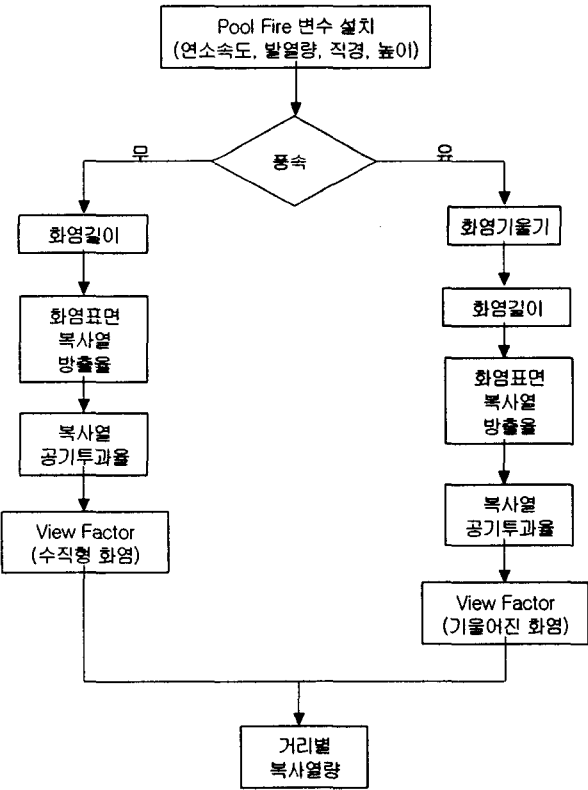


그림 1. 액면화재 프로그램 순서도

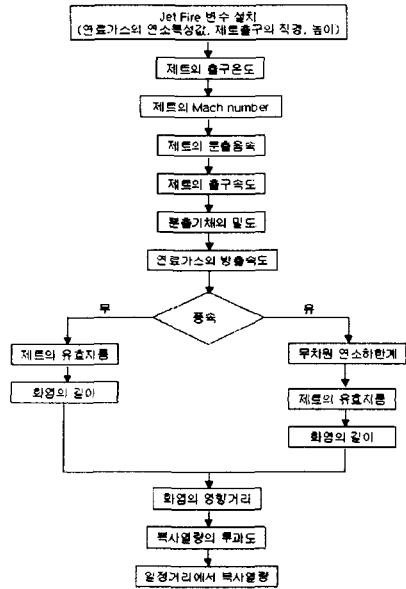


그림 2. Jet Fire 프로그램 순서도

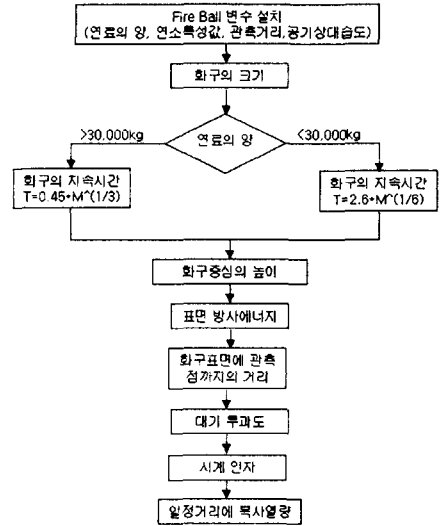


그림 3. Fire Ball 프로그램 순서도

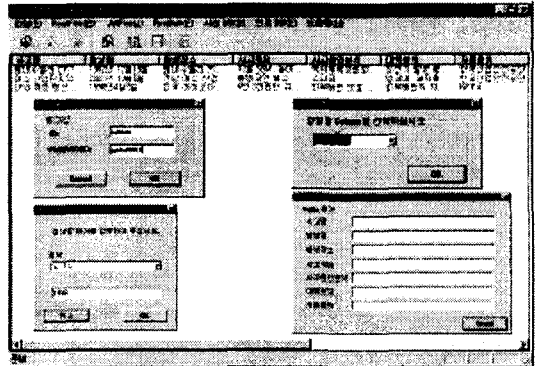
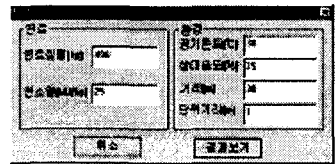
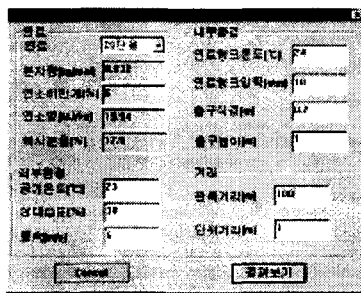
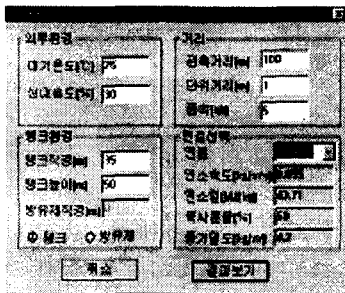


그림 4. 프로그램 실행 시 메인 화면 및 사고사례 DB 화면



가) Pool Fire 변수 입력창 나) Jet Fire 변수 입력창 다) Fire Ball 변수 입력창

그림 5. 각 화재 모델별 변수 입력 화면

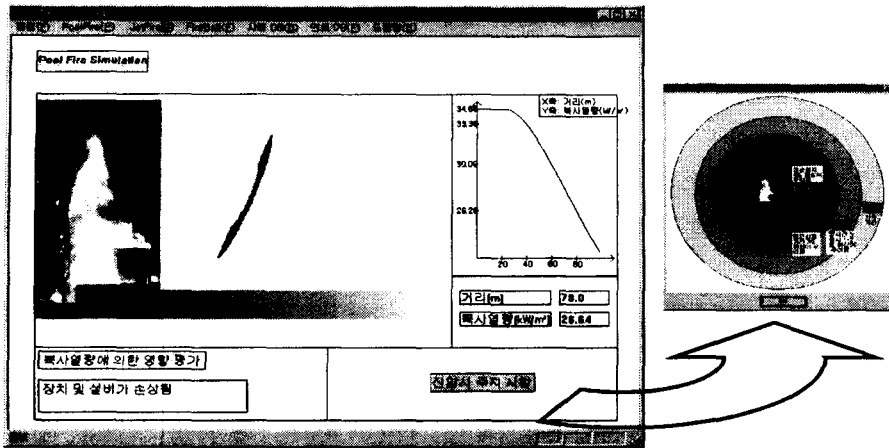


그림 6. 프로그램에 의해 계산되어진 결과 화면

IV. 결론

본 연구의 결과 국내외 Tank 화재 사고 사례의 수집 및 분석을 통한 사고사례 분석 DB의 구축이 완료 되었으며 탱크 화재 중 Pool Fire, Jet Fire 및 Fire Ball 의 발생시 화염으로부터 발생하는 복사열을 거리에 따라 예측할 수 있고 그 결과를 화재 진압 대원들이 효과적으로 활용할 수 있는 프로그램 구축이 완료되었으며 특히, 일정 거리에서 계산되어지는 복사열의 값에 따라 주변 가연물 및 시설에 미치는 영향을 나타내고 별도로 복사열에 의한 인체의 영향을 거리별로 표시함으로써 화재진압대원들이 진압시 안전거리를 유지하고 효과적인 진압활동에 참고자료가 되도록 하였다.

참고문헌

- [1] Bernd Broeckmann and Hans-Georg Schecker, "Heat Transfer Mechanisms and Boilover in Burning Oil-Water Systems", J.Loss Prev. Process Ind., Vol.8, No. 3, pp. 137-147, 1995.
- [2] Hiroshi Koseki, "Radiation Properties and Flame Structure of Large Hydrocarbon Pool Fires", Thirteen Meeting of the UJNR Panel on Fire Research and Safety, March 13-20, Vol.2., pp 41-50, 1997.
- [3] Eulàlia Planas-Cuchi & Joaquim Casal, "Modelling Temperature Evolution in Equipment Engulfed in a Pool-fire"
- [4] Howard R.Baum and Kevin B.McGrattan, "Simulation of Large Industrial Outdoor Fires", Fire Detection, Fire Extinguishment and Fire Safety Engineering, N RIFD 50th Anniversary Symposium Proceedings, Tokyo, Japan, pp 23-30, 1998
- [5] Howar R.Baun and Kevin B.McGrattan, "Simulation of Oil Tank Fires", International Interflam Conference 8th Proceedings, Vol.2, pp. 1117-1128, June 29-July 1, 1999.