[Research Paper]

환경조건에 따른 유류저장탱크 화재의 복사열 영향 평가 연구

이점동 · 류주열* · 박서원** · 윤명오*** · 이창우****†

서울시립대학교 일반대학원 재난과학과 대학원생, *충실사이버대학교 재난관리연구원 연구원,

방재시험연구원 연구원, *서울시립대학교 재난과학과 교수, ****충실사이버대학교 소방방재학과 교수

Study on the Evaluation of Radiant Heat Effects of Oil Storage Tank Fires Due to Environmental Conditions

Jeomdong Lee · Juyeol Ryu* · Seowon Park** · Myong-O Yoon*** · Changwoo Lee****†

Graduate Student, Dept. of Disaster Science, University of Seoul,

*Researcher, Disaster Management Institute, Korea Soongsil Cyber University,

**Researcher, Fire Insurers Laboratories of Korea,

***Professor, Dept. of Disaster Science, University of Seoul,

****Professor, Department of Fire & Disaster Prevention, Korea Soongsil Cyber University

(Received November 20, 2019; Revised December 2, 2019; Accepted December 2, 2019)

요 약

본 연구에서는 휘발유가 저장되어 있는 탱크의 화재폭발로 인해 인적 및 재산피해의 규모 사례를 통해 화재 위험성을 확인하고, 인접탱크에 미치는 복사열 영향을 평가하여 안전이 확보되는데 필요한 보유공지를 제시하고자 한다. 경기북부지역의 환경조건(풍속, 기온)에 따른 유류저장탱크 화재 시 방출되는 복사열(최대 방출량)이 인접탱크에 미치는 영향을 평가하기 위해 시뮬레이션을 적용하였다. 연구결과, 유류저장탱크 화재 시 방출되는 복사열은 최대풍속에 의해 약 1.9배 증가하고 최대기온에 의해 약 700~800 kW 범위에서 차이가 발생하는 것을 확인하였고, 시설 중 직경 28.4 m, 높이 8.5 m의 유류저장탱크 화재 시 약 34.4 m의 보유공지 확보가 필요하다. 향후 다양한 환경조건을 적용하여 휘발유 저장탱크 화재로 인해 방출되는 복사열을 평가하고 이를 통해 구체적인 정량적인 보유공지 확보에 대한 추가연구가 요구된다.

ABSTRACT

In this paper, the risk of damages to humans and properties due to fire explosions in gasoline storage tanks is identified, and the effects of radiant heat on adjacent tanks are evaluated to present the necessary area to secure safety. A simulation was conducted to evaluate the effect of radiant heat (Maximum emission) on adjacent tanks in an oil storage tank fire due to environmental conditions (Wind speed and temperature) in the Northern Gyeonggi Province. The result indicated that the radiant heat released in the fire of an oil storage tank was increased by approximately 1.9 times by the maximum wind speed and the difference occurred in the range of 700~800 kW by the maximum temperature. If a storage tank fire occurs, securing approximately 34.4 m of holding area is necessary. In the future, evaluating the radiant heat emitted by the fire of gasoline storage tanks will be required by applying various environmental conditions, and through this, research on specific and quantitative holding area is required.

Keywords : Storage tank, Radiant heat, Spacing of aboveground, Environmental condition, Pool fire

†Corresponding Author, E-Mail: lcw119@mail.kcu.ac. TEL: +82-2-708-7857, FAX: +82-2-708-7749

© 2020 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

1. 서 론

최근 들어 위험물질을 취급하는 저장시설 및 취급소를 중심으로 발생하는 각종 화재 폭발사고는 우리나라의 평상시 위험물 안전관리의 문제점과 현 실태를 그대로 드러낸 심각한 당면 과제로서 국가 및 사회적으로 해결해야 할 강력한 경고의 메시지라고 판단된다⁽¹⁾.

국내에서는 2018년 고양저유소의 옥외저장탱크(직경 28.4 m)에서 폭발화재가 발생하였다. 고양저유소는 총 14개의 옥외저장탱크에 약 77,384,000 L의 유류가 저장되어 있고 이중 1개의 저장탱크에서 화재가 발생되었다. 고양저유소 화재는 지금까지 경험하지 못한 거대한 화염과 높은 복사열(약 1,500 °C 이상)로 인해 인접탱크로의 연소 확대 우려와 화원에 접근하기조차 어려운 문제로 인해 화재진압에 큰 어려움을 겪었다⁽²⁾. 일반적으로 국내외의 유류저장탱크에 대한 화재예방 및 안전에 관한 기준들이 갖추어져 있고 이를 실행하는 노력들이 이루어지고 있다. 하지만 사고(Accident) 및 재난(Disaster)은 예방과 대비를 철저히 준비하고 수행한다고 해서 100% 방지할 수 있다고 확신할 수 없다. 사고 및 재난은 예상치 못한 크고 작은 인적요인(부주의, 오조작, 조치소홀 등), 물적 요인(부식 및 노후, 설계 불량, 고장 및 파손 등), 기타요인(자연재해, 외부로부터 전이 등)들에 의해 위험에 노출되어 있다. 2017년 위험물통계 자료에 의하면 전국의 위험물 저장소는 87,236개소이고 이중 옥외탱크저장소는 26,876개소로 전체의 30.8%를 차지하고 10년 이상 경과된 옥외탱크저장소가 16,834 (62.6%)개소를 차지하고 있다⁽³⁾. Hwang⁽⁴⁾은 석유 등 제4류 위험물을 연료로 사용함으로써 일으킬 수 있는 유류화재는 화재초기부터 빠르게 확대되어 대형화재로 이어질 가능성이 커 다른 화재에 비해 10%가 넘는 인명피해와 2배 이상의 재산피해가 나타나고 있다고 언급하였다.

본 연구에서는 휘발유가 저장되어 있는 저장탱크의 화재폭발로 인해 인적 및 재산피해의 규모와 인접탱크에 영향을 미치는 복사열에 대한 안전한 보유공지 확보 방안을 검토하고자, 국내외의 유류저장탱크 화재 사례를 통해 피해 규모를 살펴보고 경기북부지역을 대상으로 주위의 환경조건(풍속, 기온 등)에 따른 복사열 영향을 평가하고자 한다.

2. 국내외 주요 유류저장탱크 사고 사례

2.1 국외 유류저장탱크 사고

일반적으로 유류저장탱크 화재의 발생빈도는 적지만 저장탱크의 크기가 증가되고 시설의 노후화에 따라 화재발생의 위험성은 매우 높다. 비록 화재소방기술 및 산업이 발전하고 있어 대형 유류저장탱크에 대한 다양한 소방기술들이 적용되고 있지만, 여전히 유류저장탱크에서 화재폭발 사고로 인한 전면 화재(Pool fire)는 발생하고 있고 큰 피해를 동

반한다⁽⁵⁾. 유류저장탱크의 대형 화재는 영국, 인도, 이탈리아 등에서 발생한 사례들이 있다. 특히, Mannan 등⁽⁶⁾과 Cozzani 등⁽⁷⁾은 여러 개의 대형 유류저장탱크가 모여 있는 유류저장탱크 단지(Tank farm)에서 발생하는 화재는 크게 2가지 특징을 보이고 있다. 우선, 화재가 발생되면 진압이 매우 어렵고 저장물질의 손실이 크게 발생된다. 그리고 높은 복사열에 의해 인접 저장탱크에도 손상을 일으키는 연쇄작용(Domino effect)을 일으켜 초대형 화재로 발전되는 가능성을 가지고 있다고 하였다. 국외의 유류저장탱크에서 발생한 화재사고 사례를 살펴보면, 사고로 인한 인적 및 물적 피해뿐만 아니라 인근 지역의 주민 대피나 학교 휴교 등의 사회적 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

2.1.1 영국 번스필드(Buncefield) 원유탱크 화재폭발 사고

2005년 영국의 하트포드셔(Hertfordshire)주의 헤멜 햄프스테드(Hemel Hempstead)시에 위치한 번스필드(Buncefield) 원유저장 터미널에서 파이프라인을 통해 탱크에 원유를 충전하는 작업 중에 액위계와 충전 제어시스템의 고장으로 과충전(Overflow)이 되었다. 넘쳐흐른 원유로부터 발생한 증기운이 폭발되어 주변 22기의 탱크에 연소 확대되는 화재가 발생하였다⁽⁸⁾. 이 사고로 화재는 4일간 지속되었고 43명의 부상자와 인근 상업 및 주거시설에 약 1.7조원(15억 달러)의 피해액이 발생되었다.

2.1.2 인도 자이푸르(Jaipur) 원유배관 탱크화재 사고

이 사고는 2009년 인도 국영 석유정제회사(IOC)의 대규모 저장 탱크로 휘발유를 이송하던 중, 배관에서 대량의 휘발유가 누출되어 방류벽의 드레인 밸브(Drain valve)를 통해 휘발유가 유수관을 따라 유출되었다. 이때 대규모로 발생한 증기운에 화재폭발 사고가 일어났다⁽⁹⁾. 이 사고로 첫 번째 사고 탱크 폭발 당시에 리히터 규모 2.3의 진동이 발생되었고, 주변 12개의 탱크로 화재가 확산된 대규모 화재폭발 사고였다. 이 화재폭발사고는 11일 동안 지속되었고 사망자 12명과 부상자 150여명이 발생하였고, 반경 5 km 범위가 위험지역으로 선포되어 지역 내 50만명 이상이 대피하였으며 사업체는 임시 휴업되고 학교에는 휴교령이 발령되는 막대한 피해가 발생한 사고이다.

2.1.3 이탈리아 나폴리(Naples) 휘발유 탱크 폭발사고

이탈리아 나폴리 인근의 산조반니 아테두치오(San Giovanni a Teduccio Agip) 연료저장시설에서는 2012년 항구에 정박한 유조선에서 휘발유를 저장시설로 이송하던 중 약 700 t 가량의 휘발유가 넘쳐 외부로 유출되었고, 이로 인해 발생한 증기운에 점화되어 폭발사고가 발생되었다⁽¹⁰⁾. 이 화재 사고는 6일 동안 계속되었고 약 800여명의 소방관들이 166개의 이동장비를 동원하여 비상 대응하였다. 그리고 약 460 t의 포소화약제가 화재진압을 위해 소모되었다. 이 화재폭발로 인해 5명의 사망자와 170여명의 부상자가 발생되

Figure 1. Deer park fire accident.

Figure 2. Goyang reservoir fire accident.

었고, 약 2,000여명의 주민들이 대피할 정도로 강력한 폭발과 대형 화재로 인해 주변 지역의 대다수 시설물이 파괴되는 대형화재 사고였다.

2.1.4 미국 Deer park 탱크 화재사고

최근 미국 텍사스와 캘리포니아에서 유류저장탱크의 화재가 발생하였다. 2019년 3월 미국의 텍사스 Deer park의 Intercontinental Terminal Co (ITC)에서 Figure 1과 같이 나프타 저장 탱크의 누출로 인해 화재가 발생하였다. 이 사고로 1억 달러의 피해가 발생하였고, 화재가 확산되어 4일 만에 진화되었다. 그리고 2019년 10월 캘리포니아 주의 샌프란시스코에 있는 에탄올 저장탱크에서 화재가 발생하여 화재로 인한 유독물질이 대기 중에 퍼져, 주정부에서는 인근 주민 12,000명에 대해 외출 자제를 권고하였고, 화재현장에 200여명의 소방관과 지원요원이 파견되어 진화작업을 하였다.

2.2 국내 유류저장탱크 사고 사례

2019년 소방청 국정감사 자료에 따르면 2014년부터 2018년 8월까지 발생한 위험물 화재나 폭발사고는 14건으로 집계되었다⁽²⁾. 국내에서도 크고 작은 유류저장탱크 화재 사고가 있음을 유추할 수 있다. 2008년 인천광역시 남동구의 옥외저장탱크에서 누출된 경유에 산소용접기 불꽃에 의해 발화되어 폭발사고가 발생되었고, 2013년 3월 경북 한국광유의 벙커 C유 옥외 저장탱크(200,000 ℓ)에서 벙커 C

유를 이송시키는 과정에서 유증기가 발생되었고 충격에 의한 스파크가 발생되어 폭발이 이루어져 화재사고가 발생하였다⁽¹¹⁾. 최근에 발생한 가장 대표적인 사고는 Figure 2와 같이 2018년 고양 저유소의 총 14기(저유량 77,384 kℓ) 저장탱크 중에 휘발유 496만 ℓ(지름 28.4 m, 높이 8.5 m)를 저장 중인 1기(T-303C)에서 발생되어, 재산피해 약 77억 원이 발생한 사고이다. 고양저유소 폭발사고는 화염(복사열)이 매우 강하여 포소화약제 약 10만 9천 ℓ를 방수하여도 화점에 도달하기 전에 증발되어 화재진압 효과가 거의 없었다. 대신에 인접탱크(T-303D)로 연소가 확대되지 않도록 주변 탱크 냉각에 주력을 해야 할 정도로 화재 진압에 매우 큰 어려움을 겪은 사고였다⁽²⁾. 만약 고양저유소의 유류저장탱크 총 14기가 모두 폭발할 경우, 현장에서 화재진압 작전을 수행 중인 소방관을 비롯한 현장에 있던 모든 사람들은 물론 화재현장 인근지역의 거주자까지 대피해야 하고 많은 인명피해 뿐만 아니라 수도권 에너지 공급에 큰 차질을 가져와 비상사태 상황으로 발전될 수 있었던 화재사고의 위험을 가지고 있었다.

3. 국내 보유공지 관련 규정

Lee⁽¹²⁾는 유류저장탱크 화재는 초기의 화재진압이 실패할 경우, 피해 범위가 매우 광범위하고 가연물질의 연소특징에 따라 장기간 지속되면서 높은 복사열에 의해 소방활동이 제한적으로 이루어지는 특징을 가지고 있다고 하였

다. 그러므로 위험물질의 저장 및 취급 시 사전적 예방과 사후적 대응조치가 매우 중요하다. 유류저장탱크 화재 시 화재확대 및 소화활동에 영향을 주는 요소는 다양하지만, 그 중에 가장 큰 요소는 복사열(Radiant heat)에 의한 영향이고 복사열에 의한 화재확대를 방지하기 위한 시설물을 이격 설치하여 안전한 공간을 확보하여야 한다.

국내의 위험물안전관리법에 의하면 옥외저장탱크 화재로 인하여 방출되는 복사열이 인접탱크로 2차 화재발생을 방지할 수 있는 최소한의 안전거리 및 보유공지를 확보해야하며, 취급하는 위험물의 최대수량에 따라 탱크 측면으로부터 공지를 보유하도록 기준으로 제시하고 있다. 위험물안전관리법 시행규칙[별표6]에서는 옥외저장탱크에 물분무설비로 방호조치를 하는 경우에는 보유공지의 2분의 1 이상의 너비로 할 수 있다고 규정하고 있는데, 보유공지를 단축하고자 할 경우에는 옥외저장탱크 화재 시 1m²당 20 kW 이상의 복사열에 노출되는 표면을 갖는 인접한 저장탱크의 당해 표면에도 기준에 적합한 물분무설비로 방호조치를 해야 한다. 하지만 국내의 보유공지 기준은 지정수량에 따라 3 m~15 m 이상으로 규정하고 있고, 혹은 당해 탱크의 수평단면 최대지름과 높이 중에 큰 것과 같은 거리 이상일 경우에 30 m 이상으로 규정하고 있다. 그리고 소방청에서는 2004년 이후에는 보유공지 단축에 있어서 복사열의 범위를 고려하여 1 m²당 20 kW 이상을 보유하도록 규정하고 있어, 2004년 이전에 설치된 옥외저장탱크에는 저장물질의 연소특성 및 복사열에 미치는 영향을 고려한 보유공지가 확보되지 않은 저장탱크에 대한 구체적이고 명확한 안전기준의 제시가 요구된다.

4. 화재에 의한 복사열 평가 및 결과

4.1 시뮬레이션 환경조건 및 해석 방법

유류저장탱크 화재사고는 저장되어 있는 저장물질의 종류 및 양에 따라 발생하는 복사열의 범위가 매우 다양하다. 특히 대용량의 저장탱크에서 발생하는 복사열을 평가하기에는 실제 규모의 화재실험은 불가능하고 시뮬레이션을 통해 평가가 가능하다. Lee⁽¹²⁾는 일반적으로 화재 시뮬레이션으로 사용되는 미국기술표준연구소(NIST)에서 개발한 Fire dynamic simulation (FDS) 열과 연기의 유동상황을 확인할 수 있지만, 3차원을 구성하여 시뮬레이션을 수행할 경우 입력하는 데이터가 다양하여 수행하는데 어려움이 있다. 그리고 일반 화재 시 화재유동은 음속에 비해 매우 느린 속도인데 FDS는 고속유동(음속)에 따른 압력변화를 고려하지 않아 위험물화재에 적용하기에는 해석상 오차가 발생할 수 있어 보정이 요구된다고 언급하였다. 즉 저장탱크의 액면 화재 발생에 따른 화재피해 영향을 분석하는데 적용되는 시뮬레이션 프로그램의 종류에는 여러 가지가 있지만, 각 프로그램마다 입력하는 데이터의 종류와 입력값이 다르고 예측되는 결과물도 다양하게 산출된다.

본 연구에서는 휘발유 액면 화재로 인해 인접탱크가 받는 복사열의 영향을 예측하기 위해 ANSYS Fluent R16.2를 사용하여 해석하였다. 일반적으로 액면 화재에서 화염의 형태는 선화 유동 및 단류 등 매우 복잡한 난류반응 유동 특성을 가지고 있다. 따라서 직접 화염의 형태를 모사하기 보다는 액면 화재 모델식을 사용하여 화염의 형태를 단순화하여 해석하였다. 화염의 형태는 원통의 형상으로 단순화하였으며, 여기에 Thomas⁽¹³⁾가 제시한 화염의 길이와 바람에 의한 화염의 기울기에 기하학적 인자를 고려한 화염 길이(식 1)와 화염 기울기(식 2)를 적용하여 화염의 형상을 모델링하였다. 식 1에서 a는 화염의 길이, U*는 차원이 없는(Non-dimensional) 풍속, U_w는 1.6 m 높이에서의 풍속(m/s), ρ_v는 정상 비점 온도에서 액면 증기의 밀도(kg/m³)이다.

$$a = 110b \left[\frac{m}{\rho_a (2gb)^{1/2}} \right]^{0.67} U^{*-0.21} \quad (1, a)$$

$$U^* = \frac{U_w}{\left[\frac{2gmb}{\rho_v} \right]^{1/3}} \text{ for } U_w \geq \left[\frac{2gmb}{\rho_v} \right]^{1/3} \quad (1, b)$$

$$U^* = 1 \text{ for } U_w < \left[\frac{2gmb}{\rho_v} \right]^{1/3} \quad (1, c)$$

$$\cos\theta = 1 \text{ for } \leq 1 \quad (2, a)$$

$$\cos\theta = \frac{1}{\sqrt{U^*}} \text{ for } U^* \leq 1 \quad (2, b)$$

So⁽¹⁴⁾는 인접탱크에 영향을 미치는 표면 복사열 플럭스(Radiant heat flux)를 예측하기 위해, 구분종좌법(Discrete ordinates method) 복사열 모델을 사용하였다. 구분종좌법 복사열 모델은 결과값의 정확도가 높고 계산시간의 효율성 측면에서 우수하고, 비교적 개념이 간단하여 계산하고자 하는 형상에 대한 큰 제약 없이 적용할 수 있다는 장점이 있다. 휘발유 저장탱크에서 화재가 발생할 경우, 화염의 높이(Flame height)는 88.1 m이고, 화염의 각도(Flame degree)는 평균풍속 2.5 m/s일 때 25.7°로, 최대풍속 8.6 m/s일 때 54.9°로 산정하였다. 시뮬레이션 해석영역은 Figure 3과 같이 가로 100 m × 세로 150 m × 높이 100 m인 공간에서 휘발유(제1석유류 비수용성액체)가 가득 찬 저장탱크(직경 28.4 m × 높이 8.5 m, 체적 5,381 m³)에 화재가 발생되어 인접탱크 4기(10 m, 30 m, 50 m, 70 m)에 미치는 복사열의 영향을 산정하였다.

Jea 등⁽¹⁵⁾은 유류저장탱크 화재 시 화염으로부터 방출되는 복사열은 거리가 증가함에 따라 지수함수적으로 감소하고 탱크 주변의 온도가 풍향, 풍속에 의해 영향을 받는다고 하였다. 본 시뮬레이션에서는 Table 1의 주위 환경조건(기

Figure 3. Grid system.

온, 풍속 등)에 따른 복사열의 영향을 평가하고자, 임의로 대상지역을 선정하여 환경조건에 따른 영향평가를 수행하였다. 대상 지역은 경기북부 지역으로 과거 10년간의 기상청 자료를 바탕으로 평균습도 59.8%, 최저기온 -17.8°C , 평균기온 12.5°C , 최고기온 39.5°C 의 환경조건에서 평균 풍속(2.5 m/s)와 최대 풍속(8.6 m/s)일 때를 가정하여 Table 1의 조건을 적용하여 수행하였다. 그리고 유류저장탱크의 액면 화재 해석에 대한 가정 및 제한 사항으로는, 액면의 표면적은 일정하고 완전 연소가 이루어지고 있으며, 사고탱크에 소화약제(포소화약제, 물 등)에 의한 화재진압에 따른 화염 크기의 감소는 고려하지 않았다.

4.2 유류저장탱크 화재의 시뮬레이션 결과

경기북부지역을 대상으로 환경조건(기온 및 풍속)에 따른 휘발유 저장탱크(직경 $28.4\text{ m} \times$ 높이 8.5 m)에서 액면 화재 발생 시 복사열 영향을 평가하기 위해 인접탱크 4기에 거리별 10 m , 30 m , 50 m , 70 m 에 대해서 Figure 4와 같이 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 프로그램은 ANSYS Fluent R16.2를 사용하였고, 인접탱크 거리별로 최대발열량(kW/m^2)을 평가하였다.

인접탱크 거리별로 최대발열량(복사열)의 시뮬레이션 결과, Figure 5와 같이 전반적으로 최대풍속 8.6 m/s 일 때가 평균풍속 2.5 m/s 보다 1.9배 높은 복사열이 인접탱크에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그리고 사고탱크와 거리가 10 m 일 때, 최고기온과 최저기온에서 복사열이 약 $700 \sim 800\text{ kW/m}^2$ 차이를 보이다가, 거리가 30 m 로 멀어질수록 최고 및 최저기온 간 복사열의 영향은 급격하게 저하되고 완만하게 복사열이 저감되어, 30 m 이상의 거리에서는 최대기온과 최저기온에 따른 복사열은 큰 차이 없이 거의 비슷한 추세를 보였다. 하지만 최대풍속 8.6 m/s 일 경우, 인접탱크와 거리가 50 m 이내에서는 최고기온과 최저기온의 복사열이 차이를 보이다가 50 m 이상의 거리에서는 거의 동일한 수준으로 나타났다. 화재 사고탱크에서 발생하는 복사열의 영향이 인접탱크가 위치한 거리뿐만 아니라 화재 당시의 환경조건(풍속, 최고 및 최저기온)의 영향을 받는 것으로 나타났다. 특히 풍속은 동일한 유종의 탱크 직경에서 발생하는 복사열에 가장 큰 영향을 미치는 인자로 확인

Table 1. Simulation Condition for Environment Factor and Analysis Condition

Wind Speed	Environment Condition		Type	Adjacent Tank Distance	Tank Size
Average (2.5 m/s)	Max	39.5°C	Gasoline	$10, 30, 50, 70\text{ m}$	D: $28.4\text{ m} \times$ H: 8.5 m (Volume $5,381\text{ m}^3$)
	Min	-17.8°C			
Max (8.6 m/s)	Max	39.5°C			
	Min	-17.8°C

Figure 4. Fire simulation of environmental conditions by distance of adjacent tanks.

(a) Average (2.5 m/s)

(b) Maximum (8.6 m/s)

Figure 5. Radiant heat on adjacent tanks.

Figure 6. Water spray equipment cooling heat and short distance of holding area.

되었다. 그러므로 유류저장탱크에서 화재 발생에 따른 소화설비의 종류 및 용량을 고려할 때는 최대풍속에 의한 복사열의 영향을 반드시 고려하여 설계 및 안전관리에 포함시켜야 할 것이다.

위험물안전관리법 규정 중 옥외탱크저장소의 위치·구조 및 설비의 기준(제30조 관련)에 의하면 사고탱크의 복사열에 의해 인접탱크가 영향을 받지 않도록 하기 위해 위험물의 지정수량에 따라 보유공지를 확보하도록 하고 있다. 보유공지를 단축하기 위해서 기준에 적합한 물분무설비로 방호조치를 하는 경우에는 보유공지의 2분의 1이상의 너비(최소 3 m 이상)로 할 수 있는데, 화재 시 1 m²당 20 kW 이상의 복사열에 노출되는 표면을 갖는 인접한 옥외저장탱크에는 탱크의 원주길이 1 m에 대해 분당 37 ℓ 이상 물분무설비를 갖추어서 노출된 인접탱크의 표면 온도를 냉각시키면 공지단축이 가능하도록 규정하고 있다⁽¹⁶⁾. 미국석유허협회(API)의 자료에 의하면, 물분무설비에 분무되는 물 1 갤런(3.8 ℓ)이 증발할 때, 약 9,000 Btu (28.4 kW)가 냉각된다⁽¹⁷⁾. 즉, 보유공지 단축을 위해서는 37 ℓ/min · m²로 1,463.5 kW/m²의 열을 흡수시켜서 냉각시키는 용량을 가진 물분무설비를 갖추어야 하는데, 예를 들어 최대풍속 8.6 m/s와 최대기온 39.5 °C인 극심한 조건이고 물분무설비를 갖춘 유류

저장탱크의 보유공지 기준에 적합한 거리를 환산하면, 아래의 Figure 6과 같이 약 34.4 m로 산출되었다.

5. 결 론

휘발유가 저장되어 있는 저장탱크의 화재폭발로 인해 인적 및 재산피해의 규모와 인접탱크에 영향을 미치는 복사열에 대한 안전한 보유공지 확보 방안을 검토하고자, 국내외의 유류저장탱크 화재 사례를 통해 피해 규모를 살펴보고 경기북부지역을 대상으로 주위의 환경조건(풍속, 기온 등)에 따른 복사열 영향 평가를 하였다.

일반적으로 유류저장탱크의 화재는 다른 화재에 비해 발생 빈도는 낮지만 저장물질의 위험 특성에 따라 대형화되므로 화재 진화의 어려움과 대규모의 인명 및 재산피해를 유발하는 위험성을 내포하고 있다. 그리고 유류저장탱크 화재 발생 시 화염으로부터 방출되는 복사열에 의해 주위의 가연물 및 시설에 연쇄적으로 연소가 확대될 위험성을 항상 내포하고 있다. 화재폭발 사고가 발생된 휘발유가 저장된 탱크(직경 28.4 m, 높이 8.5 m)에서 방출하는 복사열이 인접탱크에 미치는 영향을 최대 및 평균 풍속과 최대 및 최저 기온의 환경조건을 변화하여 평가한 결과, 주위의 기온에 따라 약 700~800 kW/m²의 차이가 발생하였고, 최대풍속일 경우에는 평균풍속보다 약 1.9배의 높은 복사열이 인접탱크에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그리고 최대풍속과 최대기온일 경우, 물분무설비를 통하여 37 ℓ/min · m²로 냉각할 경우 탱크 주변에 요구되는 보유공지의 길이는 약 34.4 m로 확인되었다. 그러나 공지단축에 관한 규정에서는 옥외저장탱크저장소의 지정수량 배수에 따라 단순히 12 m 이상 공지의 너비를 확보하도록 되어 있어, 구체적이고 객관적인 기준 마련이 요구된다.

향후의 연구계획은 저장탱크 직경별로 다양한 유종(에탄올, 원유, 경유 등)에 대한 최대발열량을 평가하여 사고탱크의 복사열에 의한 영향을 최소화하는 방안을 검토할 예정이다.

References

1. Korea Institute of Fire Science & Engineering, "A Study on the Introduction of Safety Diagnosis Service to Strengthen the Safety of Dangerous Goods: Final Report" (2012).
2. National Fire Agency, "Goyang Reservoir Fire Accident Response Paper" (2019).
3. National Fire Agency, "2017 Dangerous Goods Statistics", pp. 7-18 (2017).
4. T. Y. Hwang, "A Study on the Fire Investigation Techniques of Flammable Liquids", Major in Fire & Disaster Protection Engineering, Graduate School of Environmental Kyungwon University (2011).
5. C. H. Shelley, "Storage Tank Fires : Is Your Department Prepared?", Continuing Education Course, Fire Engineering University (2007).
6. S. Mannan and F. Lees, "Lees' Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment, and Control, Third Edition", Elsevier Butter worth-Heinemann (2012).
7. V. Cozzani and S. Zanelli, "T9-4-An Approach to the Assessment of Domino Accident Hazards in Quantitative Area Risk Analysis", Proceedings of the 10th International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, Proceedings of the 10th International Symposium, 19-21 June 2001, Stockholm, pp. 1263-1274 (2001).
8. G. Atkinson, S. Coldrick, S. and Gant, L. Cusco, "Flammable Vapor Cloud Generation from Over Filling Tanks: Learning the lessons from Buncefield Journal of Loss Prevention in the Process Industries", Vol. 35, pp. 329-338 (2015).
9. Asif Vindhani of QP Refinery of Qatar, "A Brief Report on Huge Fire at IOC Oil Depot", Jaipur, India on 29 Oct. Asif Vindhani of QP Refinery of Qatar. India (2009).
10. Mukta Girdhar of Indian Red Cross Society, "Jaipur Fire and its Environmental Effect, 12th Esri India User Conference", Mukta Girdhar of Indian Red Cross Society, India (2011).
11. Fire and Disaster Prevention Agency, "2009 Dangerous Goods Case Collection" (2009).
12. Y. H. Lee, "A Study on the Evaluation of Radiant Heat Effects in the Event of Fire in Dangerous Storage Facilities and Selection of Fire Fighting Facilities Installation Site", Major of Safety and Environmental System Engineering, Graduate School of Engineering, Incheon National University (2019).
13. P. H. Thomas, "The size of Flames from Natural Fires, Ninth International Combustion Symposium", pp. 844-859 (1963).
14. S. So, "Validation and Application of DOM for Radiative Heat Transfer Analysis in 150kW Arc Heater", School of Mechanical and Aerospace Engineering, The Graduate School Seoul National University (2012).
15. J. J. Jea and D. C. Gu, "Experimental Study on the Effect of Temperature Distribution and Radiant Heat around the Tank in the Oil Storage Tank Fire", The Magazine of the Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 4, No. 1, pp. 68-72 (2005).
16. National Fire Agency, "Act on Enforcement Rules of the Dangerous Goods Safety Management" (2017).
17. API, "API RP 2030 Application of Fixed Water Spray System for Fire Protection in the Petroleum Industry", 4th Edition. USA (2014).