

LNG 저장 탱크의 Pool Fire에 의한 복사열 피해

손정환 · 한윤봉

전북대학교 화학공학부

(1998년 2월 23일 접수, 1998년 3월 23일 채택)

Radiation Damage by the Pool Fire of LNG Storage Tank

Jung-Hwan Sohn and Yoon-Bong Hahn

School of Chemical Engineering and Technology, Chonbuk National University

(Received 23 February 1998; accepted 23 March 1998)

요 약

본 연구에서는 LNG 저장탱크에서 액면화재(pool fire) 발생시 복사열속(radiation flux)의 정량적인 예측과 복사열 피해를 줄이는 방법을 제안하기 위하여 RISC모형을 사용하여 여러 조건에서 복사열속을 계산하였다. 모델 예측결과 LNG 탱크의 액면화재에 의한 복사열 피해에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 풍속임을 알 수 있었다. 화염과 피해 대상물사이의 복사피해 정도는 높은 풍속에서 보다 낮은 풍속에서의 풍속변화에 따라 크게 변화하였다. 또한 액면화재 발생시 복사열 피해는 탱크 또는 공장 주위에 방풍시설을 함으로써 크게 줄일 수 있음을 알 수 있었다. 방풍시설은 다른 방법들 보다 경제적이기 때문에 냉각시설 및 소방시설과 연계하여 가스 저장탱크 주위에 설치하는 것이 바람직하다.

Abstract - In this work, in order to quantitatively predict the radiation flux and propose an idea about how to reduce the radiation damage, the radiation flux caused by pool fire of an LNG storage tank has been calculated using the RISC (Risk and Industrial Safety Consultant) proposed model under various conditions. Model predictions showed that the most important parameter affecting the radiation flux by the LNG pool fire is the wind speed. The extent of radiation damage to a target from fire flame was more significant with variation of wind speed at a low wind speed than with that at a high wind speed. It was found that the radiation damage by the former is substantially reduced with planting windbreak system around the plant. Since the windbreak is most economical than any other method, it is strongly suggested to plant a tree belt in the factory surroundings, especially near by the area of gas storage facilities, linking with water cooling and fire protection systems.

Key words : Pool fire, Radiation flux, RISC model, Windbreak

1. 서 론

정부는 1996년도부터 강제규정으로 종합적인 안전관리체계를 도입하였다. 따라서 도시가스

사업자나 일정규모 이상의 LNG 저장소나 LPG 공장 및 석유화학 공장은 종합적인 안전관리 규정과 안전성 향상 계획서를 정부 관계기관에 제출하여 그 적합성을 심사 받고 이행 실태를

평가받게 되었다. [1] 그러나 실질적인 안전관리 측면에서 볼 때 법적인 규제외에 가스폭발에 대한 종합적인 분석과 함께 발생 가능한 사고의 억제 및 피해 최소화를 위한 방법이 강구되어야 한다.

소규모 화재에서는 불꽃의 접촉에 의한 연소가 대부분이지만, 대규모 화재의 경우에는 점화원이 없더라도 가연물이 대형 화재의 거대한 불꽃에서 발생하는 복사열을 받아 발화하여 연소할 위험이 있다. 가연성 액화 탄화수소가 누출되어 액면포(liquid pool)를 형성하고 점화원에 노출되었을 경우, 화재 및 폭발현상은 강력한 복사열속 및 폭발파(detonation wave)를 발생하여 다른 2차 재해를 유발할 수 있다. 이때 방출된 복사열속은 다른 가연성 물질의 저장탱크에 영향을 미치게 된다. 특히 석유화학 플랜트에 다수 설치되어 있는 액화탄화수소가 누출되었을 경우에 가스의 정제량이 많기 때문에 발생한 화재를 적절하게 진화하지 못하여 저장탱크를 냉각시키지 못하거나 방호 시스템이 충분히 고려되지 않았을 경우, 화염으로부터 발생된 복사열에 의하여 저장탱크가 가열되고 내용물의 급격한 증발로 인해 안전장치가 작동되더라도 탱크가 파열되어 대단위 폭발 및 화재로 이어지게 된다.

가연성 액화 탄화수소의 누출에서 초기에 누출된 액화가스는 주위로부터 열을 흡수하여 누출된 즉시 기화한다. 그러나 누출량이 증가할수록 기화율이 급격히 줄어 액상 상태가 유지되고 설치된 방유제(dike)내에 고여 못을 형성하게 된다. 즉, 초기 누출시 농도 분포는 Gaussian 분포를 가지며 확산, 혼합, 적층 및 형성 단계를 거치게 된다. 탱크로부터 누출된 후 못이 형성되기까지의 단계를 누출 시간에 따른 농도 분포와 함께 Fig. 1에 도식화하였다. 누출후 확산단계를 거쳐 공기와 혼합한 후 연소가능한 농도 이상에 이르면 매우 위험한 상태가 된다. 액화 탄화수소의 연소 특성은 화염의 급격한 확산으로 볼 수 있다. 화염의 확산은 초기 인화단계에서 발생한 열이 연소의 각 단계에 영향을 미치게 되어 액면화재를 더욱 가속시키게 된다. 따라서 짧은 시간 동안에 급격한 화염의 확산에 이르고 매우 큰 규모의 화재를 초래하게 되어 많은 복사열을 방출하게 된다.

본 연구 대상인 액면화재의 경우 이미 누출된 가연물이 설비에 매우 근접한 영역이나 설비 자체에서 발생되기 때문에 위험성은 대단히 높다. 액면화재에 의한 복사열속의 방출량을 측정하는 SFRM(Solid Flame Radiation Model)방법의 각 단계를 고찰하여 기존 시설에

대한 문제점을 찾고 대안을 제시할 수 있다. [2] 또한 안전관리 측면에서도 이에 대한 고찰은 기초지식으로써 그 중요성이 충분하다.

본 연구에서는 방화설비에 대한 설계 및 시설에 대한 현장 경험을 바탕으로 가연성 액화탄화수소의 액면화재로 인한 복사열 피해에 영향을 미치는 변수들을 조사하여 피해를 최소화하는 방법을 제시함으로써 탱크 저장소의 설계 및 기존시설의 안전관리에 활용할 수 있도록 하는데 도움을 주고자 하였다. 대상 액화탄화수소는 LNG로 하였으며, 복사열속을 예측하는 방법은 RISC(Risk and Industrial Safety Consultant)의 보고서 및 복사열속 예측 프로그램인 LNGFIRE3를 사용하였다. [3]

2. 이론적 배경

2.1. 연소와 액면화재

가연물이 연소하려면 가연물, 산소공급원(공기), 착화원의 3가지 요소를 반드시 갖추어야 하며 이들 중 한 가지라도 빠지면 연소는 일어나지 않는다. 가연성 물질이 기체상태일 때 산소(공기)와 혼합하여 일정 농도범위내에 있는 경우에만 연소가 이루어진다. 이 혼합범위를 폭발한계 또는 연소범위라 하며, 가연성 혼합기체의 폭발한계는 상한계(UFL)와 하한계(LFL)로 표시된다. 공기 등 지연성 가스의 양은 많지만 가연성 가스의 양이 적어서 그 이하에서는 연소가 전파되거나 지속될 수 없는 한계치를 폭발상한계라고 하며, 가연성 가스의 양은 많지만 상대적으로 지연성 가스의 양이 적어서 그 이상에서는 연소가 지속될 수 없는 한계치를 폭발상한계라 한다. 산소분위기 하에서 연소시 폭발한계의 하한은 공기중에서의 연소와 비교할 때 거의 변화되지 않지만 상한치는 크게 변화하여 전체적으로 폭발한계의 범위는 넓어진다. 예로서 메탄의 폭발한계는 공기중에서 5.0~15%이지만, 산소 가스중에서는 5.1~61%가 된다. 따라서 산소 가스중에서 위험성은 훨씬 높다. [4]

탄화수소가스를 다단계 압축, 팽창을 통하여 임계온도 이하까지 냉각시키면 가스용적이 줄어들면서 액체 상태의 가스가 되고 수송 및 저장에 편리하게 된다. 액화된 가스는 안전면에서 보면 저장 압력이 낮고 상압에서 임계온도로 저장하므로 압력에 의한 폭발사고 위험성이 적다. 또한 저온 상태로의 저장 및 낮은 가스 인화성으로 인해 다른 가스 저장방식보다 안전하며, 저장중 환로나 탱크의 균열이나 파열로 인하여 가스가경문제도 발생되지 않는다. 그

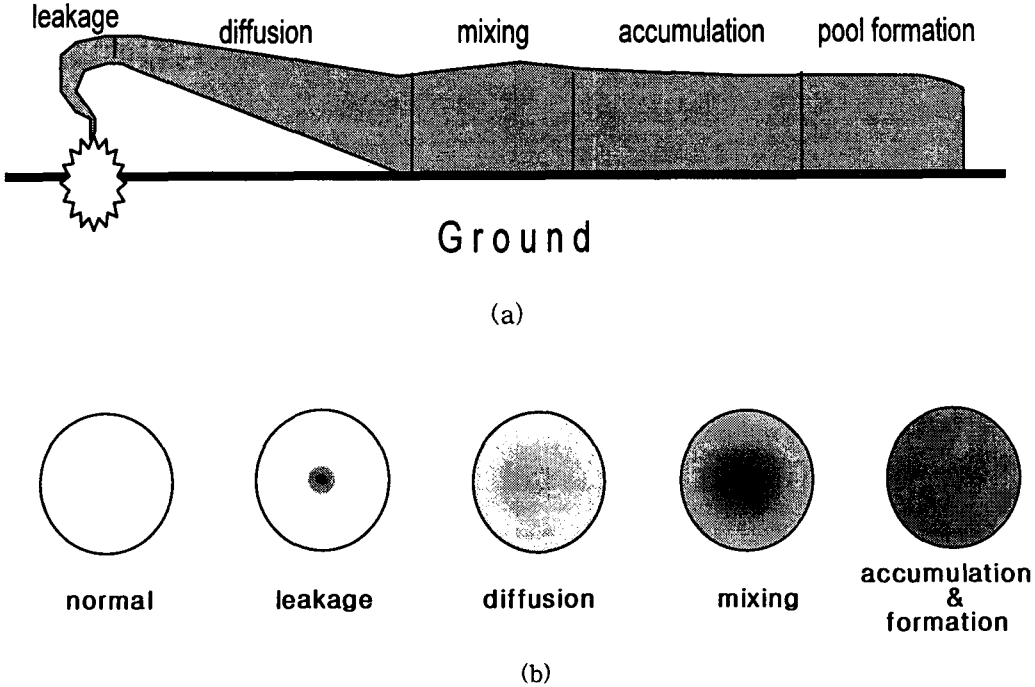


Fig. 1. (a) Stages of the pool formation
(b) Profiles of concentration during the pool formation

러나 탱크의 균열이나 파열로 인하여 가스가 누출되고 공기와 혼합되면 매우 위험한 상황에 처하게 된다. 방유제는 액화 가스가 누출되었을 때를 대비하여 탱크의 최대 저장용량을 가두어둘 수 있는 크기로 설계된다. 즉, 방유제는 누출된 가연물이 외부로 확산되지 못하도록 하기 위하여 설치되는 보조설비이다. 따라서 방유제는 누출된 액화가스를 가두어 두는 역할을 할 뿐이며, 누출되어 방유제내에 고인 액화 가스의 폭발 및 화염 발생으로 인한 폭풍파 및 복사열을 제어하는 역할을 수행할 수 없다. 사고로 인하여 가연성 물질이 유출되고 방유제에 고여 점화하면 방유제 화재가 된다. 인화성 물질이 저장탱크에서 누출되었을 때 액상의 못을 형성하며, 증발된 가연성 물질의 농도가 연소하한(LFL)농도 이상에서 점화원을 만나면 폭발 및 화재가 발생하여 액면화재를 형성한다.

2.2 복사현상

2.2.1 복사열의 정의

복사열이란 태양으로부터 지상에 열을 보내는 것과 같이 열이 전자파형으로 화염면으로부터

방출하여 공간을 이동하는 현상을 말하며, 이 전자파를 복사선이라 한다. 대규모 화재가 발생하였을 경우 화염으로부터의 단위면적당 복사방열속도를 복사열속이라고 한다. 대형화재로 인하여 연소가 확대되고 순간적으로 발생하는 동시화염면적(momentary flame area)이 크게 되면 화염도 크게 되어 피라미드 모양의 불기둥이 올라가게 된다. 이때 복사열속은 매우 크고 원거리에 있는 가연물을 연소시킬 수 있는 충분한 열량을 가지게 된다.

World Bank에서는 대형화재시 복사열속이 37.5 kW/m^2 일때 화학공정 장치에 충분한 피해를 일으키며, 25.0 kW/m^2 에서는 화염이 없는 상태에서도 장시간 노출로 목재가 점화될 수 있음을 보고하였다. 또한 12.5 kW/m^2 의 복사열속은 화염으로 목재를 점화시키거나 플라스틱 관을 녹일 수 있는 최소에너지이다. [4]

2.2.2 복사량 예측 모델

복사량 예측 모델은 대표적으로 Federal Code Model (FCM)[5]과 RISC (Risk and Industrial Safety Consultant) 제안 모델[3]이 있다. 본 연구에서는 RISC 제안 모델을 사용하

Table 1. Comparison between Federal Code Model (FCM) and RISC model

Parameter \ Model	FCM	RISC model
maximum emissive power on flame surface	varied	190 kW/m ²
emissivity	neglect effect of D _f	$\epsilon = 1 - \exp(-\chi D_f)$
flame length	L _f = 3D	$L_f/D = 42 \left(\frac{\dot{m}''}{\rho_a \sqrt{gD}} \right)$
flame tilt	45° (fixed)	floating by wind speed
flame drag	neglected	included
effect of humidity	neglected	included

었다. LNG에 대한 Federal Code Model (FCM)과 RISC 제안모델의 차이점을 Table 1에 요약하였다.

일반적으로 화염의 길이와 기울기는 못의 크기와 환경 조건에 따라 변화되며, 보다 정확한 복사량을 예측하기 위해서는 이러한 외부 변화 인자가 고려되어야 한다. FCM은 L_f/D값을 3으로 고정하였으며, 방류둑의 크기와 풍속에 관계없이 화염의 기울기는 45°로 일정하다고 가정하였다. 따라서 FCM 방법에 의한 복사열 예측은 오차가 상대적으로 크을 알 수 있다.

RISC 모델은 방출열이 주변의 대상물에 복사되어 전달되는 열플럭스를 계산하는 SFRM 방법을 사용한다.[2] SFRM 방법은 화염을 실린더와 같은 원주로 가정하여 복사열속을 계산한다. RISC 모델은 FCM 모델의 단점을 수정한 모델로서 화염의 길이와 기울기가 풍속과 방류둑의 크기등에 따라 변화한다. Fig. 2에서 보는 것처럼 화염 기울기와 화염길이가 풍속에 대하여 유동적임을 알 수 있다. 인화성 물질이 저장탱크에서 누출되어 유동적임을 알 수 있다. 본 연구에서는 RISC 모델을 사용하였다.

탄화수소계 물질의 실험결과에 기초를 두고 있는 복사열속(q'')은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$q'' = F_{max} \tau \epsilon \dot{q}_s'' \quad (1)$$

여기서 F_{max}, τ 및 ε q_s'' 는 각각 최대 기하학적 형상계수, 투과율 및 최대 표면복사능을 나타낸다. 기하학적 형상계수는 화염에 노출된 물체의 위치와 방향 및 화염모양의 영향을 고려한 인자를 말한다. 바람이 없을 때 화염을 수직 실린더와 같다고 가정하면, 기하학적 형상계수는 화염의 높이와 화염으로부터 대상물까지의 거리와 관계가 있다. 기하학적 형상계수는 최대값을 기준으로 하기 때문에 다음 식을 사용하여 계산할 수 있다. [6]

$$F_{max} = (F_h^2 + F_v^2)^{1/2} \quad (2)$$

화염의 길이는 바람에 의하여 영향을 받는다. 환형 못에 대하여 화염의 길이는 기울어진 실린더 형태로 가정하여 Thomas가 제안한 다음 식을 사용하여 계산할 수 있다. [7]

$$L_f = 42 D \left\{ \frac{\dot{m}''}{\rho_a \sqrt{gD}} \right\}^{0.61} \quad (3)$$

바람이 불 경우에는 화염의 상태가 수직실린더 형태가 아니고 경사진 모양이 된다. 이런 때에는 바람의 속도를 고려하여 경사각도를 결정하여야 한다. 바람에 영향을 받는 화염기울기는 미국가스협회(American Gas Association, AGA)에서 제안한 다음의 상관 관계식을 사용하여 예측하였다. [8]

$$\cos \theta = 1/U^* \quad \text{for } U^* > 1 \quad (4)$$

$$\cos \theta = 1 \quad \text{for } U^* \leq 1$$

연소속도는 액면화재가 일어나는 동안 액면에서 물질이 증발되는 속도로 정의할 수 있다. 증발속도는 전도와 대류 열전달에 의한 증발과 화염으로부터의 내부 복사열전달에 의한 증발에 의존한다. 일반적으로 후자가 연소속도에 큰 영향을 미치므로 전자는 보통 연소속도 계산에 고려하지 않는다. 화염길이 및 화염기울기에 영향을 미치는 연소속도는 다음 식을 이용하여 구할 수 있다. [8-12]

$$\dot{m}'' = 0.11[1 - \exp(-0.46D)] \quad (5)$$

투과율은 노출된 대상물과 화염 사이에서 대기에 의해 흡수되거나 반사되지 않고 투과하는 복사열이 얼마인가를 분율로 나타낸 것이다. 투과율의 크기는 노출된 물체와 화염 사이의 대기중 수증기량과 탄산 가스량 및 먼지 등에 의존한다. 그러나 먼지에 의한 양은 매우 적으므로 무시된다. 화염과 목표지점 사이의 투과율 계산은 미국가스협회(A.G.A)가 제안한 식을 사용하였다. [8]

$$\tau = 1 - a_w - a_c + a_w a_c \quad (7)$$

항력비(drag ratio)는 지면 화재(ground fire)에서 복사열을 예측하는데 중요한 인자이다. 화염의 Drag는 화염을 복사열속을 예측하고자 하는 위치로 근접시킨다. 항력비는 기하학적 형상계수값을 증가시키며, 다음 식을 사용하여 계산한다. [12]

$$DR = 1.5(N_{Fr})^{0.069} \quad (8)$$

화염표면 복사능을 계산하는 방법으로는 Stefan-Boltzmann식 등 여러 가지가 있는데 여기서는 RISC에서 제안한 식을 사용하였다. 화염은 흑체가 아니므로 화염표면 복사능의 계산에는 방사율이 필요하며 다음 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\epsilon = [1 - \exp(-\kappa D_f)] \quad (9)$$

RISC모델에서는 LNG인 경우 \dot{q}'' 의 최대값 및 κ 값이 190 [kW/m²] 및 0.3이므로 화염표면 복사능은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\epsilon \dot{q}_s'' = 190[1 - \exp(-0.3 D_f)] \quad (10)$$

식(10)을 식(1)에 대입함으로써 화염에서의 복사열속을 구할 수 있다.

3. 결 과

3.1. Radiation flux 예측

RISC 모델에 의한 복사열속의 값은 표면방사능, 화염기울기, 화염길이, 항력비, 연소속도 등의 영향을 받는다. 이들 변수가 LNG의 액면 화재 발생시 복사열속에 미치는 영향을 알아보기 위하여 사용된 조건들과 각 조건들에 따라 계산된 매개변수(parameter) 값들을 Table 2에 요약하였다. 조건 I, II 및 III은 각각 대기의 온도, 상대습도 및 풍속을 변화시킨 것이고, 조건 IV와 V는 각각 겨울과 여름의 대기조건을 고려하여 풍속을 변화시킨 것이다. 모델 예측에 사용된 LNG는 분자량을 17g, 밀도를 432kg/m³, 끓는점을 112K로 설정하였으며, 예측 결과들을 Fig. 3~7에 나타내었다.

Table 2에서 보는 것처럼 온도를 변화시킨 조건 I에서는 화염의 길이가 변화되었고, 상대습도를 변화시킨 조건 II에서는 매개변수 값들이 일정하였다. 풍속을 변화시킨 조건 III~V에서는 화염의 기울기, 화염 표면 방사능 및 화염의 기울어진 각(angle)이 변화되었다.

대기온도, 상대습도 및 풍속변화에 따른 액면 화재의 복사열속 예측값들을 Fig. 3~5에 각각 나타내었다. 대기온도가 낮은 경우의 복사열 피해가 온도가 높은 경우 보다 크며(Fig. 3), 상대습도의 영향은 무시할 정도로 적음을 알 수 있었다(Fig. 4). 그러나 복사열 피해는 Fig. 5에서 보는 것처럼 풍속에 따라 크게 변함을 알 수 있었는데, 풍속이 1에서 2 m/s로 변화될 때 복사열속의 증가폭이 컸으며 3, 4 및 5 m/s로 증가될 때 풍속에 의한 효과는 점차 감소하였다. 즉, 피해 대상지점에서 받는 복사열속은 낮은 풍속에서 크게 영향을 받음을 알 수 있다.

Table 2의 겨울철 및 여름철 대기조건인 IV와 V에서 예측한 복사열속값들을 각각 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다. 겨울철 대기조건인 경우는 풍속을 0에서 8 m/s까지 변화를 주면서 복사열속을 예측하였다(Fig. 6). 그림에서 볼 수 있듯이 0에서 4 m/s까지의 풍속변화에서 복사열속의 증가폭이 가장 크게 나타났다. Fig. 7은 여름철에 강풍을 동반하는 태풍이 있을 때의 대기조건을 가정하여 풍속 변화에 따른 복사열속을 계산한 결과를 나타낸 것이다. 마찬가지로 낮은 풍속에서의 풍속변화가 대상지점

Table 2. Pool fire parameters obtained for various conditions

Conditions		Parameters								
Condition	Variation	Emissive Power (kW/m ²)	Flame Tilt (degree)	Flame Length (m)	Drag Ratio	Burning Rate (kg/m ² s)				
I	U _w = 2 m/s D = 5 m h _r = 60 % T _∞ (Varied)	161.37	33.88	-40 °C	1.26	0.09897				
				-20 °C			12.15			
				0 °C			12.77			
				20 °C			13.38			
				40 °C			13.97			
				50 °C			14.54			
II	U _w = 2 m/s D = 5 m T _∞ = 15 °C h _r (Varied)	161.37	33.88	13.82	1.26					
III	U _w (Varied) D = 5 m h _r = 65 % T _∞ = 15 °C	147.61	0	13.82	1.15	0.09897				
							1 m/s	155.98	0	1.15
							2 m/s	161.37	33.88	1.26
							3 m/s	164.33	47.32	1.33
							4 m/s	166.33	54.05	1.39
							5 m/s	167.82	58.33	1.43
IV	U _w (Varied) D = 5 m h _r = 35 % T _∞ = 0 °C	147.61	0	13.38	1	0.09897				
							2 m/s	161.37	33.88	1.26
							4 m/s	166.33	54.05	1.39
							6 m/s	169.00	61.36	1.47
							8 m/s	170.79	65.47	1.53
V	U _w (Varied) D = 5 m h _r = 85 % T _∞ = 30 °C	155.98	0	14.26	1.15	0.09897				
							5 m/s	167.82	58.33	1.43
							10 m/s	172.12	68.21	1.58
							15 m/s	174.39	72.35	1.67
							20 m/s	175.90	74.78	1.73
							25 m/s	177.00	76.42	1.79

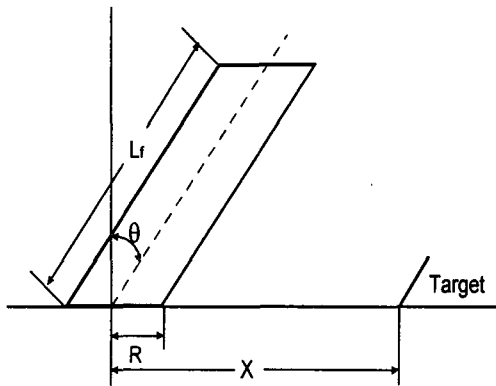
에서 받는 복사열속에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

이상의 결과에서 검토한 바와 같이 RISC 모델을 이용하여 복사량을 예측해 볼 때 LNG 탱크의 액면화재에 의한 복사열 피해에 변화를 미치는 가장 큰 인자는 풍속임을 알 수 있다. 이것은 Table 2의 조건 III, IV 및 V에서 보는 것처럼 화염의 표면 방출 복사열의 변화는 작지만 풍속이 변화되는 과정에서 화염 기울기가 변화되어 피해 대상지점에서 받는 복사열속이 커지기 때문이다.

매우 큰 풍속에서 풍속을 줄이는 것은 어렵지만 5 m/s 이하의 풍속을 1 m/s 이하로 제어하는 것은 어려운 문제가 아니다. 따라서 풍속을 줄이는 시설은 충분히 고려할 만하고 그 비용은 폭발에 의한 위험성과 피해액에 비추어 볼 때 매우 적다. 결론적으로 저장탱크의 주위에 풍속을 완화시키는 시설이 필요하며, 방풍시설은 화재 및 폭발로 인한 복사열로부터 저장탱크의 안전성 확보에 많은 영향을 미치게 됨을 알 수 있다.

Table 3. The proposal to solve present problems related to safety and security facilities against LNG pool fire

항목 \ 비교	현재 문제점	해결 방안
이격 거리	국내 지가가 높음	방풍 및 냉각시설로 공장부지를 줄일 수 있음
이격 시설	방호벽 및 방화벽	폭풍과 및 복사열에 대한 안전성 확보 규제화 필요
방류 독	화재시 방열효과가 없음	복사열 피해를 줄이기 위한 방풍시설에 대한 법규화 필요
타시설과 연계	효과적 배치가 안됨	방풍 및 방화·냉각시스템의 상호 연계성으로 경제성 확보가 가능



L_r : flame length X : distance from flame to target
 R : pool radius θ : tilted angle of flame

Fig. 2. Target and flame geometry for the tilted cylindrical flame.

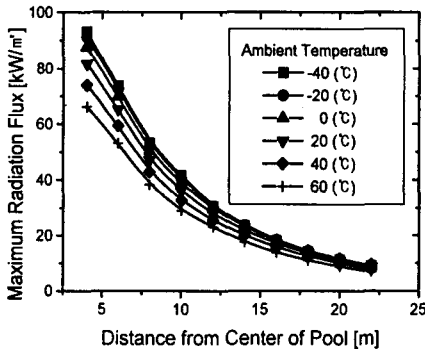


Fig. 3. Effect of ambient temperature on the radiation flux of pool fire for condition I in Table 2.

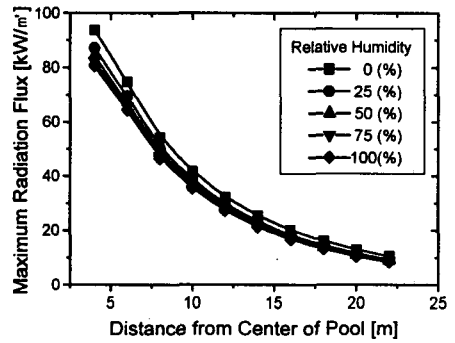


Fig. 4. Effect of relative humidity on the radiation flux of pool fire for condition II in Table 2.

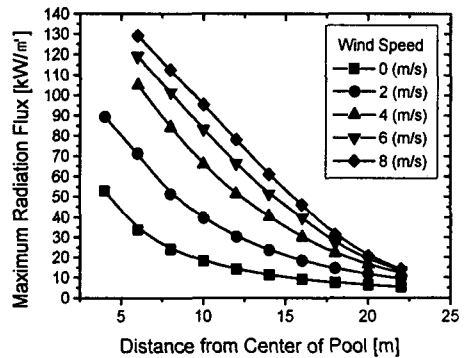


Fig. 5. Effect of wind speed on the radiation flux of pool fire for condition III in Table 2.

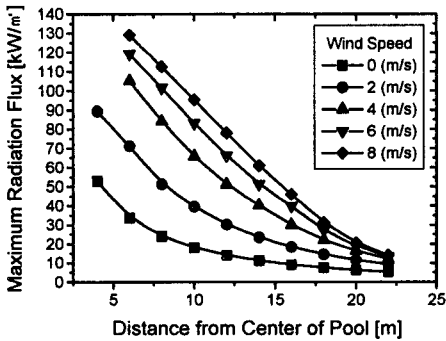


Fig. 6. Effect of wind speed on the radiation flux of pool fire for condition IV in Table 2.

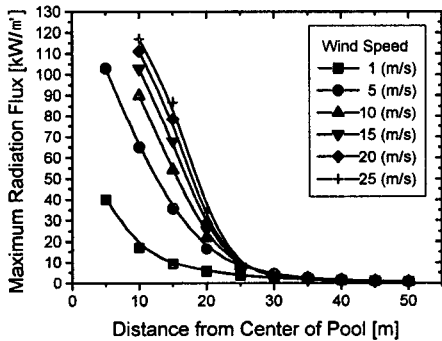


Fig. 7. Effect of wind speed on the radiation flux of pool fire for condition V in Table 2.

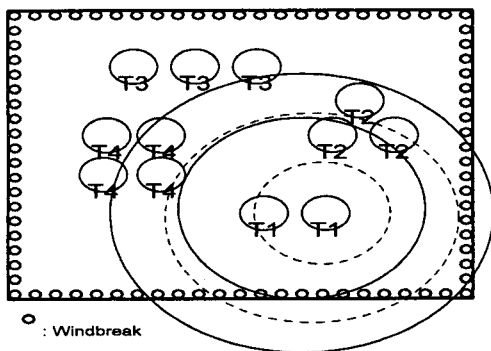


Fig. 8. Schematic illustrations of the damage area by pool fire radiation and the damage-reduced area by windbreak.

3.2 Pool fire에서 복사열 피해 최소화를 위한 제안

국내의 LNG 저장탱크 시설에 대한 안전성 확보는 현재 많은 문제점을 가지고 있다. 화재로 인한 안전성을 확보하기 위한 방화시설은 소방법에 의한 최소한의 기준에 따라 설치되고 있다. 그리고 소방관서, 산업안전공단 및 가스안전협회 등 서로 다른 정부관련 기관에 의하여 관리되어지고 있다. 따라서 사업체는 각 기관의 기준을 만족시키기 위하여 2중의 부담을 가지고 있는 실정이다. 방풍효과로 인한 LNG 저장탱크와 타시설과의 이격거리 축소는 높은 지가의 국내 실정을 고려해 볼 때 매우 가치 있는 방법이다. Table 3은 LNG 저장탱크에서 인한의 액면화재로 안전성 확보에 대한 문제점과 해결방안 및 방풍효과로 인한 LNG 저장탱크의 이격거리 축소 등을 정리한 것이다. 방풍시설을 하였을 때 복사열에 의한 피해를 줄일 수 있는데 그 예를 Fig. 8에 나타냈다. 그림에서 실선으로 표시된 큰 원과 작은 원은 각각 2개의 탱크 T1에서 화재가 발생하였을 때의 위험범위와 방풍시설로 풍속을 줄였을 때 줄어든 위험범위를 예시한 것이다. 점선으로 표시된 원들은 T1 탱크 1개에서 화재가 발생한 경우 피해를 입을 수 있는 위험범위를 나타낸 것이다. 2개의 T1 탱크에서 화재가 발생할 경우 큰 실선원의 범위에 있는 T2, T3 및 T4 탱크도 피해를 받는다. 그러나 방풍시설을 설치하여 풍속을 줄였을 경우에는 작은 실선원의 범위로 피해 반경이 줄어들어 T2 탱크만이 위험범위에 들게 된다. 여기서 방풍시설을 탱크주위 또는 공장 주위에 설치함으로써 풍속을 줄일 수 있고, 결과적으로 복사열 피해를 감소시킬 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 LNG 저장 탱크의 액면화재에 의한 복사열 피해를 RISC모델을 이용하여 종합적으로 해석하고 안전성 확보를 위한 방안을 제안하였다. 얻어진 결과들을 요약하면 다음과 같다.

1. 화염으로부터 발생하는 복사열로부터 대상물에 가장 큰 영향을 주는 인자는 풍속이었다.
2. 피해 대상지점에 대한 복사열 피해는 높은 풍속에서의 풍속변화에서 보다 낮은 풍속에서의 풍속변화에 민감하였다.
3. LNG 저장탱크 화재의 화염으로부터 받는 복사열 피해를 줄이기 위해서는 풍속을 완

화시키는 시설이 저장시설내의 냉각 및 방화시스템과 상호 연계되어 저장탱크의 주위에 설치되어야 한다.

사용기호

α_c : absorptivity of carbon dioxide
 α_w : absorptivity of water vapor
 ϵ : emissivity
 κ : attenuation coefficient
 ρ_a : air density
 ρ_v : LNG vapor density
 τ : atmospheric transmissivity
 θ : tilted angle of flame
 d_c : distance from the source of target
 d : distance from flame to target
 D_f : flame thickness
 D : pool diameter
 DR : drag ratio
 F : geometric view factor
 F_{max} : maximum geometric view factor
 F_v : vertical view factor
 F_h : horizontal view factor
 g : gravity acceleration
 L_f : flame length
 N_{Fr} : Froude number = U^2/gD
 U_c : characteristic velocity =
 $(\dot{m}' gD/\rho_v)^{1/3}$
 U^* : normalized wind speed = U/U_c
 U : wind speed
 \dot{q}_s'' : maximum radiation flux on target
 \dot{q}'' : maximum surface emissive power
 \dot{m}'' : burning rate

감 사

본 연구는 포항공과대학교 지능자동화 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의하여 일부 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김연중, 안상현, 조현춘, "가스시설의 위험성 평가 기법 및 적절한 기법의 선택을 위한 고려사항", 화학공업과 기술, 14, P351 (1996).

2. 이영순, "화학공장 사고결과 영향분석(I)", 월간 화공기술, 1,, 68 (1997).

3. Sami Atallah, Jatin N. Shah, "A Thermal Radiation Model for LNG Fires." RISC & Industrial Safety Consultants, Inc. (June 1990).

4. 유철진, "연소·화재 및 폭발이론", 화공안전공학(상), 427 (1996).

5. Code of Federal Regulations, Title 49-Transportation, Subchapter D:U.S. Government Printing (1986).

6. Mudan,K.S., "Geometric View Factors for Thermal Radiation Hazard Assessment," Fire Safety Journal, 12, 89 (1987).

7. Thomas,P.H., "The Size of Flames from Natural Fires," 9th International Combustion Symposium, 844 (1963).

8. American Gas Association, "LNG Safety Program, Interim Report on Phase II Work," IS-3-1, American Gas Association, Arlington, VA, (July 1974).

9. Bugress, D., and Zabetakis, M. G., "Fire and Explosion Hazards Associated with Liquefied Natural Gas," U.S. Department of the Interior, Bereau of Mines Report 6099, (1962).

10. Maezawa, M., "Experiments on Fire Hazards of Liquefied Flammable Gases," Japan Society of Safety Engineering, (May 1973).

11. Mizner, G. A., and Eyre, J. A., "Large-Scale Land-Based LNG and LPG Pool Fire Tests At Spadeadam, "TNER.81.034, Shell Research Ltd., Thornton Research Center, England (June 1981).

12. Moorhouse, J., "Scaling Criteria for Pool Fires Derived from Large Scale Experiments," I. Chem. E. Symposium Series No. 71, 165 (1982).

13. Mudan,K.S., "Thermal Radiation Hazards for Hydrocarbon Pool Fires," Prog, Energy Comb. Sci., 10, 59 (1984).