

# 산업시설 화재폭발시 복사열 위험성 표준프로세스의 분석

박계원<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 방재시험연구원, 25hyun@daum.net

## Analysis on the Standard Process of Thermal Radiation's Estimation in Industrial Fire

Kye-Won Park<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Fire Insurers Laboratories of Korea

(2017-01-31 접수; 2017-03-13 수정; 2017-03-14 채택)

---

### 요 약

최근 용인 유류창고 화재, 울산 LP탱크 화재, 중국 텐진항 물류 화재 등 국내외적으로 위험물 및 가연성 연료를 적재하는 산업시설에서 대규모 화재사고로 인한 인적·물적 피해 및 그로 인한 보험료 등의 복구비용이 급증하고 있다. 공장 등 산업시설에서의 위험물 저장소 또는 가연성 물질 저장소에 수용한계 기준을 설정하고는 있지만, 해당 시설에서 실제 화재시 발생하는 복사열이나 화원의 강도 등을 사전에 추정하거나 화염이 주변에 미치는 영향을 경감시키기 위한 방안을 위험관리자가 파악하기에는 한계가 있는 상황이다. 본 논문은, 액체 가연물등의 위험물이 산재한 산업시설에서 화재시 열복사로 인한 위험성을 간편하게 추정하여 현장에서 사용가능한 표준프로세스를 제안하고, 이를 활용하기 위한 절차들을 탐색 및 분석하고자 한다. 이를 통해 화재의 열복사 위험성 추정 알고리즘 설계방안을 산업체에 보급하여 화재로부터 인명안전을 확보하고 재산손실의 위험성을 경감시키는데 중대한 기여를 할 수 있다.

**키워드:** 화재안전, 복사열, 화재위험성, 표준프로세스

---

\* Correspondence to: Kye-Won Park, Tel.: +82-10-7591-5488 E-mail: 25hyun@daum.net  
본 연구는 (사)표준화회의 연구결과로 수행되었음.

## ABSTRACT

Recently, recovery costs from the industrial fire accidents have been increased in several fire cases (eg. Yong-in oil warehouse, Ul-san LP tank, ThenJin warehouse in China and others). Even if quantitative amount of risky liquids were specified in regulation, however, the easy calculation methods on the assessment of radiation risk at individual industry factory facilities are not yet established. On this paper, the standard process algorithm on the easy decision-making of radiation risk is proposed and the application on using this is reviewed. Finally, this process and application gives the big contribution on decreasing the fire risk from industrial accidents.

**Key words:** Fire safety, Radiation, fire risk, standard process

## 1. 서론

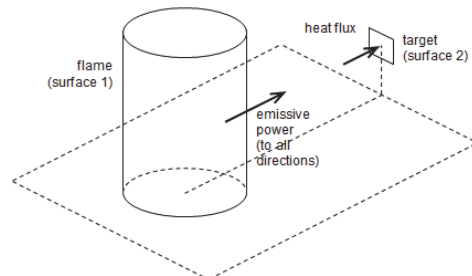
최근 용인 유류창고 화재, 울산 LP탱크 화재, 중국 텐진항 물류 화재 등 국내외적으로 위험물 및 가연성 연료를 적재하는 산업시설에서 대규모 화재사고로 인한 인적·물적 피해 및 그로 인한 복구비용(보험료 등)이 급증하고 있다. 공장 등 산업시설에서의 위험물 저장소 또는 가연성 물질 저장소에 수용 한계 기준을 설정하고는 있지만, 해당 시설에서 실제 화재시 발생하는 복사열이나 화원의 강도 등을 사전에 추정하거나 화염이 주변에 미치는 영향을 경감시키기 위한 설계방안은 고려되지 않고 있다. 본 논문에서는, 가연성 물질이 산재한 산업시설에서 화재시 열복사로 인한 위험성을 간편하게 추정하여 국제적으로 활용 가능한 표준 알고리즘을 구축하고자 한다. 이를 위해 화재시 복사열을 추정하는 알고리즘을 제안하였으며, 이를 바탕으로 복사열 산출 기법들을 실사례에 적용하는 방법을 기술하였으며, 궁극적으로는 누구나 쉽게 산업시설에서의 화재위험성 분석에 활용하기 위한 가이드라인으로 기여하고자 한다.

## 2. 복사열 추정 알고리즘의 제안

### 2.1 복사열(Thermal Radiation)의 일반 전제

복사열은 화염(flame)에 의해서 방출되고 피사체의 표면에 의해 수열되어지는데, 임의의 화염으로부터 복사되어지는 임계열유속  $\dot{q}''$ 은 수식(1)과 같이 일반적으로 정의되어진다. 여기서  $\tau$ 은 대기 투과율(atmospheric transmissivity)로 무차원 변수,  $E$ 는 화염의 복사능(emissive power of flame/ $\text{kWm}^2$ ),  $F$ 는 형상계수(configuration factor/ 무차원 변수)이다.

$$\dot{q}'' = \tau EF_{12} \quad (1)$$



본 논문에서의 복사열은 바람이 없는 환경에서의, 준안정화상태의 pool fire flame으로 인한 복사열을 전제로 하고 있으며, 대기 투과율에 의한 영향은 실제로 미미하기에 고려에서 제외하고 분석하였다.

### 2.2 복사열 추정 알고리즘

Figure 1은 화염으로부터 피사체가 받게되는 복사열을 추정하는 일련의 알고리즘을 제안하고 있는데 우선적으로 특정한 연소체로부터 열방출율과 화염의 면적이 산출되어야 한다. 화염 표면으로부터 발생하는 복사능(emissive power)는 단지 화염 면적으로 인한 함수임을 알 수 있으며, 화염의 형태는 열방출율과 화원의 면적으로부터 산출되어지고 이를 통해 형상계수가 계산된다. 숲이나, 수증기 및 극성가스(dipole gas)와 같은 미립자에 의한 방해 효과는 미미하다고 전제하지만 필요할 경우 대기 투과율( $\tau$ )을 산출하여 반영할 수 있다.

복사열 추정시, 열을 받게되는 피사체는 가상 피사체로서, 극미소면의 작은 요소로 간주하며 실제 화염과 실제 피사체의 사이에 존재한다고 가정한다. 형상계수(복사열이 100% 모두 피사체에 도달할 때

는 형상계수가 1로서 산정하며, 실제로 복사열이 감소되는 비율을 결정짓는 계수임. 최대값 1)는 피사체의 배치 형태에 따라서 달라지기에 피사체로 인해 형상계수는 단위요소 표면의 배치상태가 어떠한지를 고려하여 산출하게 된다. 본 논문에서는 화염을 고체 원기둥 형태의 화염(solid cylindrical flame)으로 가정하였다.

## 3. 복사열 추정 구성인자

### 3.1 화염의 연소면적과 열방출율

기본적으로 복사열 추정을 위해서는 복사능(emissive power)에 대한 산출되어야 하는데, 이를 위해서는 우선적으로 액체 가연물에 대해서 기본적인 물성(유효연소율, 질량감소율, 흡수율 등)의 화학적인 균일 속성을 파악하여야 한다. 또한 무풍환경에서 액체 가연물이 연소하는 초기의 원형 상당 면적을 산출하여 이때의 원형 상당 직경을 산출해 놓아야 한다.

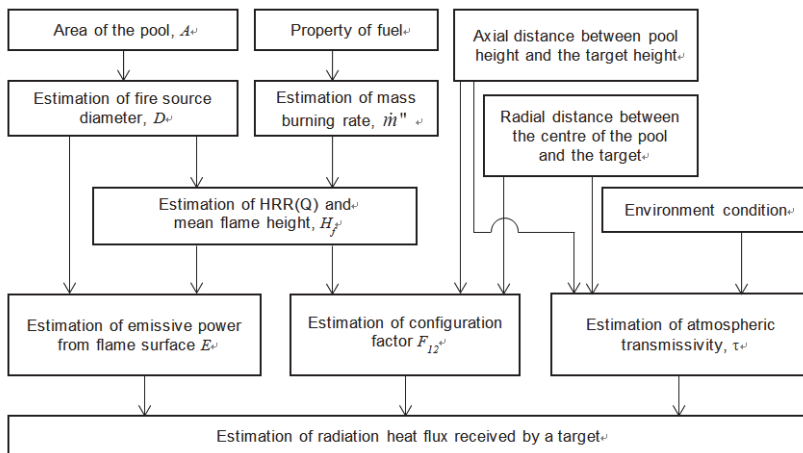


Figure 1. Proposed algorithm on calculation process of radiation heat flux from a pool fire

(1) 화원 연소면적의 원형 상당 지름

수식(2)와 같이, 화원(pool)을 원기둥(cylinder) 형태의 가연물이라고 가정하고 이때 연소면적을 원형에 상당하는 지름을 산출하며, 여기서  $A_s$ 는 화원의 수평면적( $m^2$ )이다.

$$D = \sqrt{\frac{4A_s}{\pi}} \quad (2)$$

(2) 화원으로부터의 열방출율

화원으로부터 발생하는 열방출율(heat release rate)은 수식(3)과 같이 산출하며, 화원의 질량감소율(mass burning rate)과 유효연소율(effective heat of combustion)은 수식(4) 및 Table 1과 같은 물성 DB를 활용하여 산출되어진다.

$$\dot{Q} = \Delta H_c \dot{m}'' A \quad (3)$$

$$\dot{m}'' = \dot{m}''_{\infty} (1 - e^{-k_b D}) \quad (4)$$

**Table 1.** heat of combustion and mass burning rate of various fuels

Fuel	$\Delta H_c$ (MJ/kg)	$\dot{m}''_{\infty}$ (kg/m <sup>2</sup> .s)	$k_b$ (m <sup>-1</sup> )
Liquid H <sub>2</sub>	120	0.017	6.1
LNG,	50.0	0.078	1.1
LP-gas	46.0	0.099	1.4
methanol	20.0	0.017	-
Ethanol	26.8	0.015	-
Butane	42.7	0.078	2.7
Hexane	44.7	0.074	1.9
Heptane	44.6	0.101	1.1
benzene	40.1	0.085	2.7
Xylene	40.8	0.090	1.4
Acetone	25.8	0.041	1.9
dioxane	26.2	0.018	5.4
diethyl ether	34.2	0.085	0.7
benzine	44.7	0.048	3.6
gasoline	43.7	0.055	2.1
kerosene	43.2	0.039	3.5
JP-4	43.5	0.051	3.6
JP-5	43.0	0.054	1.6

### 3.2 표면 복사능의 산출 기법

고체 화염형태를 기반으로 한 여러 모델들이 개발되어져 왔는데 이 중에서 가장 널리 활용되어지는 모델이 '고체 원기둥 화염' 모델로서, 이 모델은 복사열을 방출하는 방사체에 대해서 측면 표면적과 상부 원형 표면적을 동시에 고려하는 대표적인 표면적 모델이다. 고체 화염으로부터 방출되는 복사능(emissive power)은 고체 원기둥 화염과 화염의 높이(flame height)를 동시에 고려하여야 한다.

복사능 산출에는 Mudan과 Shokri의 기법이 대표적이며, 화염의 높이는 Thosmas와 Heskestad에 의해 제안한 실험식이 대표적으로 활용되고 있으나, 본 논문에서 주장하는 바는 다음과 같다.

표면 복사능을 산출하기 위해서는 엄격하게 아래의 조합(복사능 & 화염높이)을 통해서만 고려되어야 하며 교차 선택(가령, Mudan-Heskestad)을 하여 추정하지 말아야 함을 주장한다. 왜냐하면 Mudan은 Thosmas의 화염높이 실험식을 바탕으로 개발되었으며, Shokri는 Heskestad의 화염높이 실험식을 바탕으로 개발되어졌기 때문에 그 유효성을 인정받고 있기 때문이다.

그 외에, 복사능을 산출하는 방법으로는 점열화원을 가정하여 산출하는 복사분율 기법(radiative fraction method)이 있다.

- (1) Mudan - Thomas 기법[1]
- (2) Shokri - Heskestad 기법[2]
- (3) Radiative fraction 기법

(1) Mudan - Thomas 기법에 의한 복사능 산출  
Mudan의 복사능은 gasoline, kerosene, JP-4의 화염실험식으로부터 산출된 임계열유속을 활용하고 있으며 LNG에는 적합하지 않은 추정식이다. 특히 Mudan은 바람이 없는 환경에서 Thosmas의 목재시편을 이용한 화염높이간에 높은 상관성을 보

여주고 있으며, Mudan - Thomas 기법은 그 적용 범위가 직경 (1 ~ 60)m에서 유효하다. Thomas의 화염높이는 수식(5)와 같다.

$$\frac{H_f}{D} = 42 \left( \frac{\dot{m}''}{\rho_a \sqrt{gD}} \right)^{0.61} \quad (5)$$

Thomas의 화염높이  $H_f$ 는 주로 야외에서 발생하는 큰 화원 반경의 화재시 화염높이 산정에 적합하다. Mudan의 복사능( $E$ )은 화원에서 발생하는 화염표면의 평균적이며 균일한 복사능을 전제로 하며 수식(6)과 같이 이는 전적으로 화염 연소면적의 원형 상당 직경에 의한 함수로 작용되어진다.

$$E = E_{\max} e^{-\beta D} + E_s (1 - e^{-\beta D}) \quad (6)$$

이때 최대 복사능  $E_{\max}$ 는  $140 \text{ kW/m}^2$ , 연기의 복사능  $E_s$ 는  $20 \text{ kW/m}^2$ , 흡수율  $\beta$ 는  $0.12 \text{ m}^{-1}$ 로 상수화 하였다. 따라서 연소단면적에 대한 직경  $D$ 만 산출하면 간략하게 복사능을 추정할 수 있게 된다.

(2) Shokri - Heskestad 기법에 의한 복사능 산출

Shokri에 의한 복사능에 대한 추정은 수식(7)과 같이, 화염이 원기둥의 형태로 표면이 흑체에 가깝고 평균적으로 균질한 복사체로 가정하고 있으며 Heskestad의 화염 높이 실험 DB를 바탕으로하고 있다. Shokri의 기법은 임계열유속이  $5 \text{ kW/m}^2$ 보다 클 경우에 잘 적용되어지며 주로 LNG와 JP-5의 연료를 근간으로 하고 통상적으로 (1 ~ 50)m의 연소직경을 대상으로 하고 있다.

수식(8)과 같이Heskestad의 화염높이는 상대적으로 작은 불꽃 화염에 사용되는데 ISO 16734에 상세히 규정되어져 있다.

$$E = 58(10^{-0.00823D}) \quad (7)$$

$$H_f = -1.02D + 0.235Q^{2/5} \quad (8)$$

(3) Radiative fraction method

피사체를 점열화원(point source model)로 가정하고, 방사체를 원기둥표면으로 전제하여 원기둥의 측표면과 상부 원단면적에서 복사됨을 바탕으로 복사능이 산출되어진다. 이때 화염의 높이는 수식 (5) 및 수식(8)과 같이 Thomas나 Heskestad의 화염 높이 수식을 둘다 적용가능하다. Radiative fraction method에 따른 복사능은 수식(9)와 같다.

$$E = \frac{\chi_r \dot{Q}}{\pi D H_f + \frac{\pi D^2}{4}} \quad (9)$$

**Table 2.** Formulas for radiative fraction of energy release

$\chi_r = 0.21 - 0.0034D$	$D \leq 50m$
$\chi_r = 0.35 \exp(-0.05D)$ [4]	$D < 5m$
$\chi_r = \chi_{r,\max} D^{-0.6}$	$D > 1.0m$

수식(9)에서 알 수 있듯이, 복사능  $E$ 는 열방출율 과 연소직경, 그리고 복사상수  $\chi_r$  (radiant energy release factor)의 함수인데,  $\chi_r$ 는 복사체의 연소 면적을 원형으로 상당한 직경에 따라서 Table 2와 같이 세분화하여 취사선택할 수 있다.

3.3 형상계수의 산출

복사체에 방출된 복사열이 피사체에 도달하는 정도를 결정하는 상수로서 적용되어지는 형상계수 (Configuration factor)는, 화염의 geometry와 피사체의 배치상태(수직 또는 수평으로 기울어진 정도, 피사되는 위치 등)에 의해서 결정되어진다.

형상계수는 복사체로부터의 거리, 각도, 배치 형태 등의 함수로서 수식(10)과 같은 함수로 간략히 표현되어질 수 있다.

$$F = f(l, x, \theta, \text{orientation of target}) \quad (10)$$

### 3.4 대기 흡수율의 산출

대부분의 경우에, 복사능에 미치는 대기 흡수율은 균질하다고 가정하지만, 수증기에 의한 수율과 이산화탄소에 의한 수율 등과 같이 수증기 및 이산화탄소에 의한 흡수율을 고려하여 대기 흡수율을 산정해야만 하는 경우도 발생할 수 있다. 본 논문에서는 대기 흡수율의 의한 효과는 균질하다고 전제하고 고려하지 않았다.

## 4. 복사열 알고리즘에 따른 기법 분석

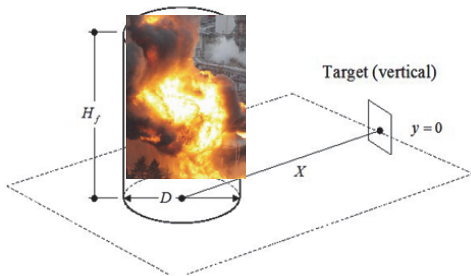


Figure 2. Example of radiation heat flux to a vertical target

직경 10 m의 kerosene 연료 탱크로부터 약 20 m 이격되어진 지상에 위치한 수직 피사체에 미치는 입계열유속(incident radiation heat flux)를 추정하기 위해, 상기 '3.2 표면 복사능의 산출 기법' 세 가지 기법을 적용하여 분석하였다.

### 4.1 질량 감소율 및 열방출율

수식(4)의 액체 연료에 대한 질량 감소율을 적용하면 수식(11)과 같으며,

$$\begin{aligned} \dot{m}'' &= \dot{m}''_{\infty} (1 - e^{-k_0 D}) \\ &= 0.039 \times 1 - \exp(-3.5 \times 10) \\ &= 0.0390 \text{ (kg/m}^2\text{s)} \end{aligned} \quad (11)$$

kerosene의 유효연소율과 연소 표면 직경 및 수식(11)을 적용하여, 수식(3)의 열방출율을 산정하면 수식(12)와 같다.

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= \Delta H_c \dot{m}'' A \\ &= 43.2 \times 0.039 \times (3.14 \times 10^2) / 4 \\ &= 132.3 \text{ (MW)} \end{aligned} \quad (12)$$

### 4.2 Mudan-Thomas 기법에 의한 복사열 산출

Thomas[3]의 화염높이를 산정하기 위해 수식(5) 및 수식(11)을 적용하면,

$$\begin{aligned} \frac{H_f}{D} &= 42 \left( \frac{\dot{m}''}{\rho_a \sqrt{gD}} \right)^{0.61} \\ &= 42 (0.039 / (1.205 \times \sqrt{9.81 \times 10.0}))^{0.61} \times 10.0 \\ &= 12.8 \text{ (m)} \end{aligned} \quad (13)$$

Mudan의 최대복사능을 적용하기 위해, 직경 10m의 kerosene에 대한 복사능을 수식(6)으로 산출하면,

$$\begin{aligned} E &= E_{\max} e^{-\beta D} + E_s (1 - e^{-\beta D}) \\ &= 140 \exp(-0.12 \times 10) + 201 - \exp(-0.21 \times 10) \\ &= 52.7 \text{ (kW/m}^2\text{)} \end{aligned} \quad (14)$$

이때, 형상계수는 복사체로부터 20 m 이격되어 수직면으로 세워진 피사체로 가정하게 되는데,

$$\begin{aligned} F_{12v} &= f_{cyl-v} \left( \frac{H_f}{D/2}, \frac{X}{D/2} \right) \\ &= f_{cyl-v} \left( \frac{12.8}{10.0/2}, \frac{20.0}{10.0/2} \right) \\ &= 0.093 \end{aligned} \quad (15)$$

따라서,  $H_f$ ,  $E$ ,  $F_{12v}$ 를 수식(1)에 적용하면 수식(16)과 같이 피사체가 수열하게 되는 복사열을 산출하게 된다.

$$\begin{aligned} \dot{q}'' &= \tau EF_{12} & (16) \\ &= 1.0 \times 52.7 \times 0.093 \\ &= 4.90 \text{ (kW/m}^2\text{)} \end{aligned}$$

### 4.3 Shokri-Heskestad 기법에 의한 복사열 산출

Heskestad의 화염높이인 수식(8)을 적용하기 위해서, 추정된 열방출률 수식(12)와 직경 10 m을 이용하여 산출하면 수식(17)과 같다.

$$\begin{aligned} H_f &= -1.02D + 0.235Q^{2/5} & (17) \\ &= -1.02 \times 10 + 0.235 \times 132.300^{2/5} \\ &= 16.1 \text{ (m)} \end{aligned}$$

연소 직경에 따른 Shokri의 수식(7)을 이용하여 복사능을 산출하면 수식(18)과 같다.

$$\begin{aligned} E &= 58(10^{-0.00823D}) & (18) \\ &= 58(10^{-0.00823 \times 10.0}) \\ &= 48.0 \text{ (kW/m}^2\text{)} \end{aligned}$$

Heskestad의 화염높이와 Shokri의 복사능을 적용한 형상계수를 산출하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F_{12v} &= f_{cyl-v} \left( \frac{H_f}{D/2}, \frac{X}{D/2} \right) & (19) \\ &= f_{cyl-v} \left( \frac{16.1}{10.0/2}, \frac{20.0}{10.0/2} \right) \\ &= 0.103 \end{aligned}$$

따라서,  $H_f$ ,  $E$ ,  $F_{12v}$ 를 수식(1)에 적용하면 수식(20)과 같이 피사체가 수열하게 되는 복사열을 산출하게 된다.

$$\begin{aligned} \dot{q}'' &= \tau EF_{12} & (20) \\ &= 1.0 \times 48.0 \times 0.103 \\ &= 4.93 \text{ (kW/m}^2\text{)} \end{aligned}$$

### 4.4 Radiative fraction 기법에 의한 복사열 산출

우선, 복사상수  $\chi_r$ 를 산출하기 위해, Table 2에 의거, 직경이 50m이하이므로,  $0.21 - 0.0034D$  커브를 적용하면 수식(21)과 같다.

$$\begin{aligned} \chi_r &= 0.21 - 0.0034D & (21) \\ &= 0.21 - 0.0034 \times 10.0 \\ &= 0.176 \text{ (kW/m}^2\text{)} \end{aligned}$$

복사능을 산출하기 위해서 4.4.1 및 4.4.2와 같이 Thomas의 화염높이와 Heskestad의 화염높이에 의한 두가지 화염높이를 산출하여 적용할 수 있다.

#### 4.4.1 Thomas 화염높이에 의한 Radiative fraction

Thomas 화염높이 결과(12.8 m) 수식(13)과, 이때의 형상계수 결과 수식(15)를 적용하여, 복사능을 산출하면, 수식(22)와 같으며,

$$\begin{aligned} E &= \frac{\chi_r \dot{Q}}{\frac{\pi D^2}{4} + \pi D H_f} & (22) \\ &= \frac{0.176 \times 132,300}{\frac{3.14 \times 10^2}{4} + 3.14 \times 10 \times 12.8} \\ &= 48.4 \text{ (kW/m}^2\text{)} \end{aligned}$$

이때 수식(15)의  $F_{12v} = 0.093$ 에 대응되는 임계열 유속(복사열)은 수식(23)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{q}'' &= \tau EF_{12} & (23) \\ &= 1.0 \times 48.4 \times 0.093 \\ &= 4.50 \text{ (kW/m}^2\text{)} \end{aligned}$$

#### 4.4.2 Heskestad 화염높이에 의한 Radiative fraction

Heskestad 화염높이 결과(16.1 m) 수식(17)

과, 이때의 형상계수 결과 수식(19)를 적용하여, 복사능을 산출하면, 수식(24)와 같으며,

$$E = \frac{\chi_r \dot{Q}}{\frac{\pi D^2}{4} + \pi DH_f} \quad (24)$$

$$= \frac{0.176 \times 132,300}{\frac{3.14 \times 10^2}{4} + 3.14 \times 10 \times 16.1}$$

$$= 39.9 (kW/m^2)$$

이때 수식(19)의  $F_{12v} = 0.103$ 에 대응되는 임계열 유속(복사열)은 수식(25)와 같다.

$$\dot{q}'' = \tau E F_{12} \quad (25)$$

$$= 1.0 \times 39.9 \times 0.103$$

$$= 4.12 (kW/m^2)$$

## 5. 복사열 기법에 따른 상호 분석

직경 10 m의 kerosene 액체 연료가 20m 떨어진 피사체에 미치는 복사열을, 복사능 산출(Mudan 기법, Shokri 기법, Radiative fraction 기법) 및 화염높이(Thomas 화염높이, Heskestad의 화염높이) 산출에 따른 복사열 추정 기법에 의해 분석한 결과를 상호 분석하면 Table 3과 같다.

**Table 3.** Comparison on various emissive power and flame height

Method	Flame Height	Emissive Power [ $kW/m^2$ ]	Heat flux [ $kW/m^2$ ]
4.2 Mudan 기법	Thomas 화염높이	52.7	4.90
4.3 Shokri 기법	Heskestad 화염높이	48.0	4.93
4.4.1 Radiative fraction 기법	Thomas 화염높이	48.4	4.50
4.4.2 Radiative fraction 기법	Heskestad 화염높이	39.9	4.12

4가지 기법(Mudan-Thomas 기법, Shokri-Heskestad 기법, Radiative fraction-Thomas 기법, Radiative fraction-Heskestad 기법)을 적용하여, 직경 10 m의 kerosene에 복사능과 복사열을 추정한 결과, Emissive power는 최소값인 Radiative fraction-Heskestad 기법을 사용했을 때  $39.9 kW/m^2$ , 최대값은 Mudan-Thomas 기법을 사용했을 때  $52.7 kW/m^2$ 으로 추정되었다. 이때 표준편차는  $5.34 kW/m^2$ 로서 4가지 방법 모두 큰 편차를 보이지 않는 것으로 판단되었다.

Table 3의 추정 결과들을, 기존의 문헌 DB (Mudan, Shokri, Alger 등이 수행한 Emissive power에 대한 DB)에 대입하면, Figure 3과 같은데, Muddan과 Shokri가 제안했던 회귀선의 교차 영역에 분포되었으며 이를 근거로 판단할 때, Figure 1에서 제안한 복사열 추정 알고리즘을 준수하여 복사열 위험성을 산출하는 것이 타당성이 있음을 알 수 있다.

## 6. 토의 및 결과 활용성에 대한 검토

- (1) 화재시 액체 가연물로부터의 복사열 위험성을 추정하기 위한 여러 기법들이 존재하지만, 이를 실제적으로 적용하기 위해서는 질량감소율, 유효연소율, 열방출율, 연소면적 상당 직경들을 산출한 후, Figure 1에서 제안 및 정립된 복사열 추정 절차에 적합하게 산정하여야 한다.
- (2) 복사능 및 복사열의 산정시, 4장에서 적용된 크게 4가지 기법으로 액체 가연물의 화재시 복사열 위험성을 산출할 수 있으며, 특히 Mudan-Thomas 및 Shokri-Heskestad과 같은 조합은 필히 준수하여야 한다.



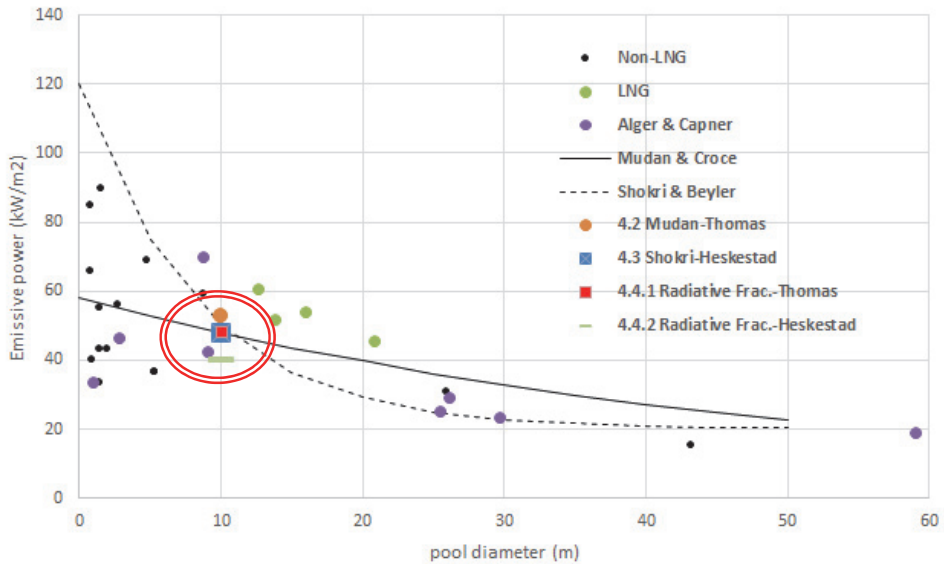


Figure 3. Applied correlation on the emissive power and diameter

- (3) 액체 가연물의 연소면적 상당 직경, 유효연소율에 대한 2가지 property DB를 보유하고 있다면 손쉽게 화재시 복사열을 추정할 수 있으며, 이를 산업시설의 복사위험성을 산출하는 quick-calculation method로 활용한다면 안전점검이나 화재위험성 진단시에 복잡한 시뮬레이션 및 수치해석을 하지 않더라도 건축물 위험관리 담당자(방화관리자 등)에게 화재로 인한 복사열 위험성에 대한 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.
- (4) 기존 문헌에서 복사열 추정을 위한 복잡한 절차들과 적용을 위한 전제들이 혼재하고 있어 사실상, 복사열 추정의 수계산이 난립하였으나, 본 논문에서 정립된 Figure 1의 알고리즘 절차와 Table 2의 radiative fraction 선별기준 및 '3.2'의 표면 복사열 산출기법 등을 참조한다면 간편하게 산업시설에서 복사열을 1차적으로 탐색하기에 충분하다고 판단된다.
- (5) 향후, 바람의 영향을 받는 피사체의 형상계수 및 대기흡수율의 정밀도를 반영한 수계산 알고리즘의 절차가 정립예정이며 이를 검증하기 위한 복사열 필드 실험이 계획되고 있다.
- (6) 현재 국제표준화 기구 화재안전 분야(ISO TC92 SC4 WG9)에서 액체가연물에서의 복사열을 추정하는 국제표준을 개발(국제프로젝트 리더: 박계원)하고 있으며, 본 논문의 알고리즘 및 추정절차들이 반영되어 향후 복사열 추정 국제표준으로 수립될 예정이다.

### 참고문헌

[1] Mudan., K, Croce, P.A., "A Thermal Radiation Model for LNG Trench Fires," ASME Paper 84-WA/HT-75 (1984)

- 
- [2] Shokri, M., and Beyler, C.L., "Radiation from Large Pool Fires," *Journal of Fire Protection Engineers*, 1 (4), pp. 141-150 (1989)
- [3] Thomas, P.H., Baldwin, R. and Heselden, A.J.M., "Buoyant Diffusion Flames: Some Measurements of Air Entrainment, Heat Transfer and Flame Merging" Tenth Symp. (Int.) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, USA, pp. 983-996 (1965)
- [4] Kevin B. McGrattan, Howard R. Baum, Anthony Hamins, "Thermal Radiation from Large Pool Fires," NISTIR 6546 (2000)