



## HTML5 웹 기반 가연성 물질 누출 피해영향평가 시스템 개발

이우귀연·지현민\*·오정석\*·<sup>†</sup>조완수

한국가스안전공사 재난관리처, \*가스안전연구원 시스템연구부  
(2019년 11월 22일 접수, 2019년 12월 20일 수정, 2019년 12월 21일 채택)

## A Development of Consequence Analysis System for Combustible Materials Release Events Based on HTML5 Web

Ugwiyeon Lee·Hyunmin Ji\*·Jeongseok Oh\*·<sup>†</sup>Wansu Cho

Dept. of Disaster Management, Korea Gas Safety Corporation, Korea

\*Dept. of System Research, Institute of Gas Safety R&D, Korea

(Received September 23, 2019; Revised December 14, 2019; Accepted December 15, 2019)

### 요약

한국가스안전공사는 진단 기반기술 국산화와 진단 역량 강화를 위해 자체적인 피해영향평가 시스템을 구축하고 있다. 유사 프로그램인 DNV PHAST나 TNO EFFECTS와 달리, API-581 기준을 근간한 ETA 분석을 통해 최종 피해영역 산출 기법을 구현하였으며, HTML5 기반 차세대 웹 기술을 기반으로 편리한 사용자 인터페이스를 구축하였다. 또한, 혼합물질 분석이 가능하도록 3차 상태방정식(Peng-Robinson, SRK, RK)과 플게시터를 활용한 상평형 모듈이 구현되었고, 공기보다 무거운 가스에 대한 확산 분석을 위해 SLAB Dispersion 알고리즘을 적용하였다. CCPS와 TNO Yellow Book에서 소개된 피해영향평가 알고리즘을 채용하여 누출분석 모듈, Fireball, Pool Fire, Jet Fire, Flash Fire, Vapor Cloud Explosion 영향 평가 모듈을 개발하였다. 그 외 EIGA 기준, PAC 기준 농도, Bevi Reference Book 등에서 제시된 기준 값들을 활용하여 안전거리 산출 조건을 마련하였다. 현재 전체 계산 모듈의 알고리즘 구현은 완료되었으며, 기본적인 사용자인터페이스 구축까지 완료되었다. 향후, 사용자 인터페이스 보완과 더불어, 모듈 각각에 대한 개별적인 검증과 동일한 사고 시나리오에 대한 유사 프로그램 구동 결과를 비교하여 전체 시스템의 정확도를 보완할 예정이다.

**Abstract** - Korea Gas Safety Corporation is developing consequence analysis system for combustible materials release events to enhance risk assessment technology and its efficiency. Unlike general consequence analysis programs, the final consequence area was implemented through ETA analysis based on API-581 standard, and a convenient user interface was constructed based on HTML5-based responsive web technology. In addition, a phase equilibrium module using third-order state equations (such as Peng-Robinson, SRK, and RK) and fugacity was implemented to analyze the mixture quality. Also, using the consequence analysis algorithm introduced in CCPS books and TNO Yellow Book, we developed material leak analysis module, fireball, pool fire, jet fire, flash fire, and vapor cloud explosion consequence assessment module. In addition, the conditions for calculating the safety distance were prepared with using the control values in the EIGA standard, PAC, and Bevi Reference Book.

**Key words** : Consequence analysis, CA, HTML5, SLAB, Risk Analysis, RBI, PHAST, EFFECTS

<sup>†</sup>Corresponding author:punghun@kgs.or.kr

Copyright © 2019 by The Korean Institute of Gas

## I. 서론

피해영향평가시스템이란 산업 설비에서 가연성 물질이나 독성 물질과 같은 유해화학 물질이 누출되어 화재, 폭발, 독성 누출과 같은 사고가 발생하였을 때, 인명 또는 재산상의 손실을 발생시킬수 있는 피해 영향을 분석하는 시스템을 말한다. 사고피해는 누출 물질, 사고 종류 및 형태, 환경 조건 등에 따라 결과가 민감하게 달라지기 때문에 일반적으로 정밀한 계산이 가능한 컴퓨터 시스템을 통해 피해영향 분석을 실시한다[1, 2].

정유산업이나 석유화학산업에 적용 가능한 피해영향평가 시스템은 이미 해외에서 많은 연구 개발이 진행되었으며, 상용화 되고 있다. DNV PHAST나 TNO EFFECTS가 최근 흔히 사용되는 대표적인 제품이다[2]. 또한, 환경부나, 안전보건공단, 한국가스안전공사 같은 국내 공공기관에서도 유사한 시스템이 구축진행된 사례가 있다[3]. 그 외, ALOHA와 같은 무료로 개발된 소프트웨어도 있다[4].

본 연구에서 개발되고 있는 피해영향평가 시스템은 상평형분석 - 누출분석 - 확산분석 - 화재/폭발/독성 분석 - Event Tree 분석이 연속적으로 이어지는 프로그램이다. 기존 상용화된 시스템과 달리 API-581 Consequence Analysis Level 2의 이론을 기반으로 개발이 진행됨에 따라 ETA 분석을 통해 최종피해영향평가 결과를 산출한다. 또한, Fig. 1과 같이 HTML5, JQuery 기반의 차세대 웹 프로그래밍 기술을 접목하여, 인터넷 익스플로러나 크롬과 같은 인터넷 브라우저를 통한 서비스가 제공이 가능하다.

전반적인 시스템 구성과 계산 시스템 흐름은 API-581 기준을 적용하였지만, 누출모듈, 확산모듈, 화재 및 폭발 모듈 등 세부 모듈은 TNO Yellow Book, CCPS Textbook, SLAB Dispersion, BEVI Reference book 등을 참조하여 구축되었다. 추가적으로 상평형 분석 모듈을 구축하여 혼합물질에 대한 피해영향평가 분석도 가능하다. 또한, EIGA doc 075, EIGA doc 189, PAC 등에서 제시된 값을 피해영향범위 산정의 기준점으로 활용하였다.

유사 소프트웨어와 비교하여 개발되는 시스템의 최대 장점은 HTML5를 기반한 차세대 웹 기술을 적용하여 인터페이스가 개발되었다는 것이다. 이 기술은 사용자가 보다 직관적으로 편하게 시스템을 구동할 수 있도록 도와준다.

피해영향평가 시스템은 현재 시점을 기준으로 JSP와 JAVA Script 언어를 기반으로 모든 분석모듈의 엔진 구축이 완료되었으며, HTML5와 JQuery를 기반으로 기본적인 사용자 인터페이스 구축이 완료되었다.

또한, 각각의 모듈들에 대한 세부적인 검증이 진행되고 있으며, 향후 유사 피해영향평가 소프트웨어를 활용하여 2차 검증이 진행될 예정이다.

본 논문에서는 피해영향평가 시스템의 전반적인 구조와 세부 모듈의 수식 모델과 개념을 소개하며, 천연가스 누출에 대한 피해영향평가 구동 결과를 예시로 보여준다. 또한, 개발되는 피해영향평가 시스템의 한계점과 보완점을 분석하였다.

## II. 피해영향평가 시스템 구조 설계

누출에 의한 피해영향평가 시나리오는 문헌별로 조금씩 차이가 있다. 먼저 API-581의 경우 다음과 같은 구조를 갖는다[1].

API-581에 따르면, 기본 시나리오는 순간누출과 지속누출로 나뉜다(Fig. 1, Fig. 2). 그 후, 점화 여부,

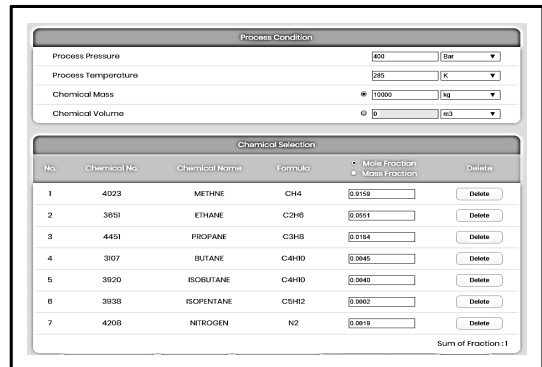


Fig. 1. HTML5 web based user interface of consequence analysis system

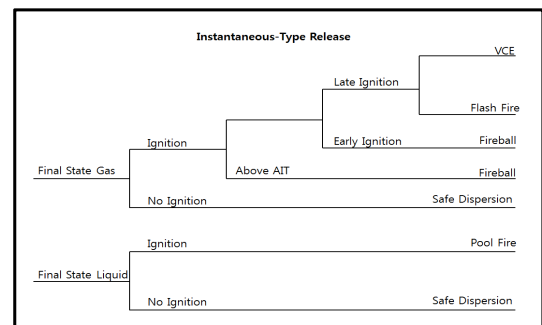


Fig. 2. API-581 Introduced Instantaneous Type Release Event Tree Model [1]

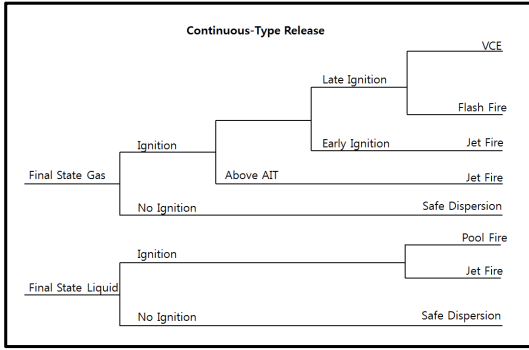


Fig. 3. API-581 Introduced Continuous Type Release Event Tree Model [1]

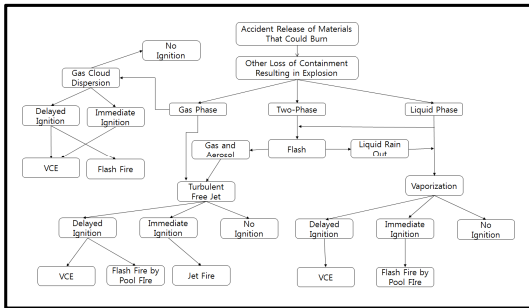


Fig. 4. Consequence Analysis Structure introduced by CCPS[5]

자연발화 여부, 점화 시간 등에 의해 최종적으로 Vapor Cloud Explosion, Flash Fire, Jet Fire, Fireball, Pool Fire의 다섯 가지 위험형태와 Safety Dispersion으로 분류된다. 물질의 독성 유무에 따라서 Safety Dispersion은 Toxic Dispersion으로 대체되기도 한다. API-581 Level I 평가에 따르면, 단순한 지수 함수 모델을 통해 피해영향평가 계산이 가능하며, 누출식 계산은 필요하지만 확산모델을 요구하지는 않는다. 그에 반해, Level II 평가에는 DNV PHAST나 TNO EFFECTS와 같은 소프트웨어를 통해 확산모델 계산을 요구한다[1]. Level I은 산업 현장에 바로바로 적용이 가능하지만, 정확도가 떨어지는 단점이 있는 반면에 Level II은 시간이 더 소요되지만 정확도가 더 높다는 장점이 있다.

Fig. 4는 CCPS의 Guidelines for Consequence Analysis of Chemical Release에서 제시된 피해영향평가 모델 구조이다. API-581 기준과 다른 점 중 하나는 물질 상(Phase) 조건별 누출 메커니즘을 더 구체적으로 제시하였다. 단순히 액체와 기체로 나눌 뿐만 아니라 2상이 공존하는 경우에 대비하여 Flash 계산 모듈을 도입하였다.[5] 그 외 가스 확산, 자연점화, 즉시점화로 분류되어 VCE, Pool Fire, Jet Fire, Flash Fire 등으로 화재/폭발 시나리오가 나누어지는 과정은 API-581과 유사하다.

Fig. 5는 가스안전 공사에서 개발 진행되고 있는 피해영향평가 시스템의 구조이다. 이 시스템은 Phase Analysis Module이라는 이름으로 상평형 분석

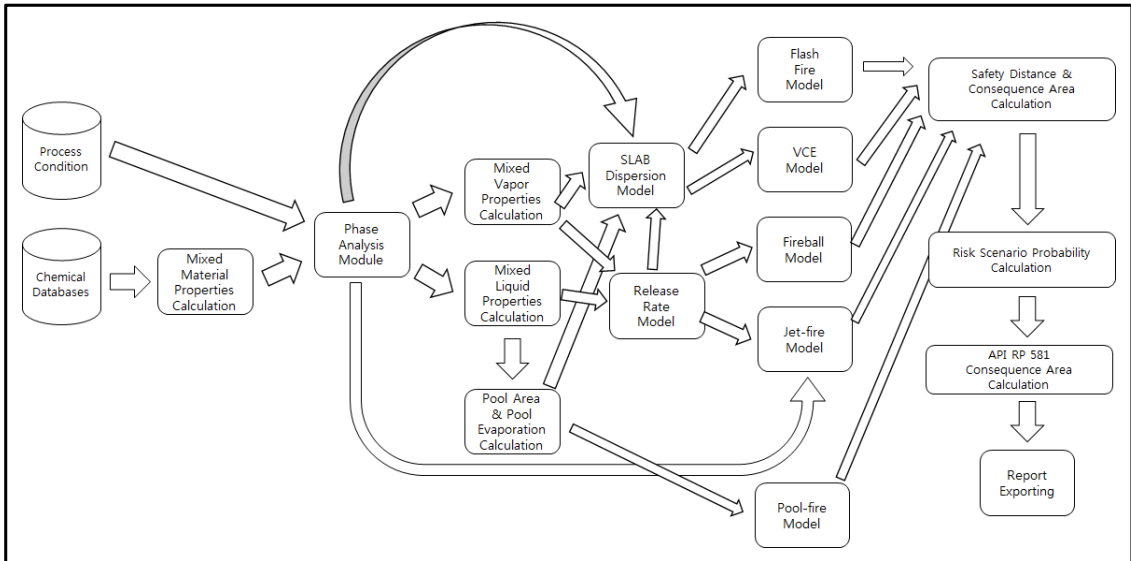


Fig. 5. The Consequence Analysis System Structure

모델이 포함되어 있다. 사용자 인터페이스로부터 공정조건과 인화성 물질이 선택되면, 혼합물질 물성 계산 모듈에서 혼합물질의 물성이 계산된다. 이후 상평형 분석 모델(Peng-Robinson, SRK, or RK)을 통해 기체상태, 액체상태, 또는 2상평형 상태를 분류한다. 기체상 누출의 경우 곧바로 누출량 계산 모듈로 전달되며, 액체상 누출의 경우 액면 크기 계산 및 액면으로부터 기화량 계산을 실시한다. 누출량 계산 결과는 SLAB 확산 모듈로 전달되며, 확산 모듈은 인화성 물질의 확산 농도를 거리에 따라 계산한다. SLAB 확산 모듈과 누출 모듈의 결과는 Flash Fire, VCE, Fireball, Jet-Fire, Pool Fire 모듈로 전달된다. 이 다섯 개의 사고모듈은 사고 지점으로 부터 떨어진 거리에 따라 복사열과 폭발압을 계산한다. 안전거리 및 피해영향범위 산출 모듈은 EIGA 075, API-581, 등에서 제시된 기준 농도, 기준 폭발압, 기준 복사열을 기준점으로 삼아 안전거리와 피해영향범위의 넓이를 산출한다.

일단 사고 유형별 피해영향범위가 산출되면, Event Tree Analysis 분석을 통해 ETA 결과에 따른 사고 빈도를 계산하고, 계산된 빈도는 사고 유형별 피해영향범위의 가중치(Weight)값으로 활용하여, 최종적으로 한 가지 값으로 통합된 API-581에 기반 피해영향범위를 산출한다.

### III. 피해영향평가 시스템 모듈 별 알고리즘

#### 3.1. 혼합물질 물성 계산 모듈

개발 중인 피해영향평가 시스템에서 요구되는 물성데이터 목록은 다음과 같으며, 단일 물질과 혼합물질 모두 동일한 물성을 요구한다. 다만, 단일 물질의 경우 문헌 참조를 통해 물성을 쉽게 구할 수 있지만, 혼합 물질은 복잡한 계산 과정이나, 실험적 분석을 요구한다.

본 시스템의 단일 화학물질 자료는 대체적으로 Yaws의 Chemical Properties Handbook를 참조하였다[6]. 혼합물질의 경우에는 혼합 물질의 물성에 대한 추가적인 계산 작업이 필요하다. 끓는 점(Boiling Point), 기화점(Flash Point), 대기압에서의 기포점(Bubble Temperature at Ambient Pressure), 상온에서의 기포점(Bubble Pressure at 298 K) 등은 3차 상태방정식과 Flash 계산을 통해서 산출이 가능하다. 이 내용은 4.2. 상평형 분석 모듈에서 자세히 다루겠다.

그 외 일반적인 혼합 물질의 물성은 Kay's mixing rule과 Arrhenius mixing rule, Le Chatelier's

**Table 1.** Chemical Properties required from Consequence Analysis System

Molar Mass
Critical Temperature
Critical Pressure
Boiling Point
Liquid Heat Capacity
Gas Heat Capacity
Density
Heat of Combustion
Auto Ignition Temperature
Flash Point
Lower Flammable Limit
Upper Flammable Limit
Temporary Emergency Exposure Limit
Protective Action Criteria
Threshold Limit
Permissible XPS Limit
Recommended XPS Limit
Maximum Workplace Concentration
Viscosity
Vaporization of Heat
Frame Temperature
Fuel Mole Fraction Concentration
Mole Fraction of Reactant per Product
Average Number of Carbon in Molecular
Flammable Number
Bubble Temperature at Ambient Pressure
Bubble Pressure at Temperature 298 K

Mixing Rule을 따랐다. 혼합 물질의 가정 정확한 물성은 실험값을 바탕으로 한 통계적 수치를 통해서 얻는 것이다[9]. 하지만, 모든 혼합물질 경우에 대하여 통계적 수치를 얻을 수 없기 때문에, 다양한 물질을 다루는 시스템에는 Kay's Rule 과 같은 혼합물질 물성 계산 모델 적용이 필요하다.

Kay's Rule은 각 단일 물질의 혼합 물질 내 물질량분율에 비례하는 특성에 따라, 물질량분율을 가중치로 활용한다. 기본 수식은 (식 1)과 같다.

$$\varphi_B = \sum_i^n x_i \phi_i \quad (1)$$

여기서  $x_i$ 는 혼합물질 내 단일물질 i의 질량비이며,  $\varphi_B$ 는 혼합물질의 물성 값,  $\phi_i$ 는 단일 물질의 물성 값을 나타낸다. 물질량, 온도, 압력, 밀도 등 일반적인 혼합 물성 값을 예측할 때 사용한다.

Arrhenius Mixing Rule의 수식은 (식 2)와 같다[7].

$$\ln \mu_B = \sum_i^n x_i \ln \mu_i \quad (2)$$

$x_i$ 는 Kay's rule과 마찬가지로 혼합물질 내 단일 물질  $i$ 의 질량비를 나타내며,  $\mu_B$ 는 혼합물질의 점도,  $\mu_i$ 는 단일물질의 물성을 나타낸다. Arrhenius Mixing Rule은 혼합물질의 점도를 계산할 때 사용된다[7].

마지막으로 Le Chatelier's Mixing Rule은 혼합물의 기준농도를 구할 때 사용된다. 수식은 (식 3)과 같다[8].

$$u_B = \frac{1}{\sum_i^n \frac{x_i}{u_i}} \quad (3)$$

$x_i$ 는 역시 마찬가지로 혼합물질 내 단일물질  $i$ 의 질량비를 나타내며,  $u_B$ 는 혼합물질의 기준 농도,  $u_i$ 는 단일물질의 기준농도이다. Le Chatelier's Mixing Rule은 Flammable Limits 뿐만이 아니라, 독성치 기준 농도인 Temporary Emergency Exposure Limit, Protective Action Criteria 등도 혼합물질 기준농도 산출시 활용된다[8].

### 3.2. 상평형 분석 모듈

피해영향평가 시스템의 상평형분석 모듈은 혼합물질의 부피, 증기압(Bubble Point, Dew Point), 기체상/액체상의 몰분율 등의 계산을 목적으로 한다. Van Der Waals, Redlich Kwong, Soave Redlich Kwong and Redlich Kwong Peng Robinson 총 4가지의 3차 상태방정식을 활용하여 Flash 계산을 수행한다[10]. 단, 3차 상태방정식이 수렴하지 않은 경우는 Raoult 법칙으로 대체하였다. 피해영향평가 시스템의 혼합물질 성분비 계산 구조는 Fig. 6과 같다.

3차 상태방정식을 이용하여 Bubble Point(Fig. 7)와 Dew Point(Fig. 8)를 계산하면, 물질의 상변화를 예측할 수 있다. 혼합물질의 상태(온도 또는 압력)가 Bubble Point 외곽에 위치하면 액상이며 액상 몰분율이 Feed 몰분율(또는 최초 혼합비율)과 같다 [11, 12]. 반대로 Dew Point 외곽에 위치하면 기체상에 해당되며, 기체상 몰분율이 Feed 몰분율(또는 최초 혼합비율)과 같다. 만약 Bubble Point와 Dew Point 사이에 위치하면, 이는 기/액 평형 상태이며, 각 상 별로 몰분율을 계산하기 위해서는 Flash 계산이 추가적으로 필요하다[11, 12].

기포점과 이슬점을 계산하였다면, 압력이 이 두 기준 점 사이에 있는지 확인하고, 플래쉬(Flash, Fig. 9) 계산을 진행한다. 플래쉬 계산의 목적은 상평형상태에서 저장 탱크의 온도와 압력 조건으로

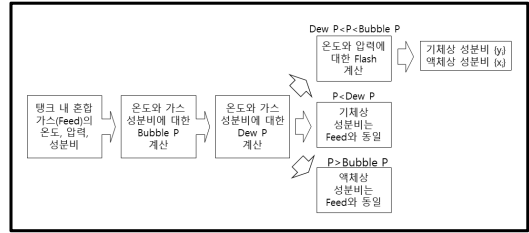


Fig. 6. the process of phase equilibrium module

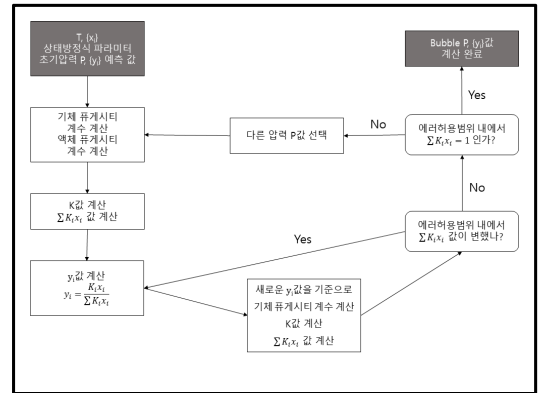


Fig. 7. Bubble point calculation process [12]

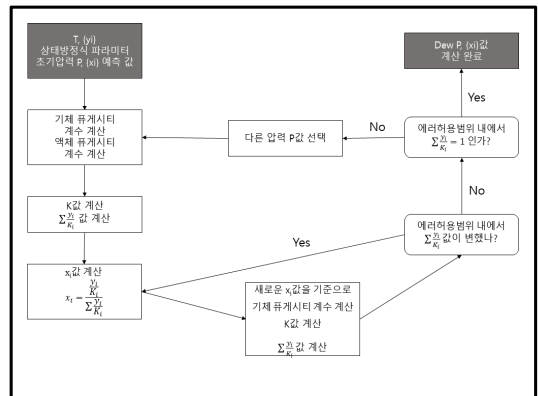


Fig. 8. Dew point calculation process [12]

부터 기체상과 액체상의 조성비를 구하기 위함이다[12]. 기포점 압력 이상의 압력 하에 있는 액체가 압력이 감소되는 경우 플래쉬, 혹은 부분적으로 증발되어 평형상태의 기체와 액체의 2상계를 형성한다는 사실로부터 발전된 계산법이다. 플래쉬 계산

식은 (식 4)과 같다.[11, 12].

$$y_i = \frac{z_i K_i}{1 + \frac{V}{F}(K_i - 1)} \quad (4)$$

여기서 V/F는 탱크 내 이입된 가스(Feed)의 모든 상에 대한 몰수(F)에 대한 가스의 기체상의 몰수(V)의 비이다. F는 현장에서 계측을 통해 쉽게 계산할 수 있으며, V는 아직 알 수 없는 값이다. {zi}는 이입된 가스(Feed)의 몰 분율이다. Ki는 (식 5)와 같다[12].

$$y_i P = x_i P_i^{sat} \Leftrightarrow K_i = \frac{y_i}{x_i} = \frac{P_i^{sat}}{P} \quad (5)$$

yi와 xi를 이용하여 Ki를 구할 수는 없지만 압력 P는 쉽게 알 수 있으며 혼합가스 각 성분의 증기압(Psat)은 Antoine Equation을 통해 구할 수 있다. 위 수식에서 zi값 Ki값을 구할 수 있기 때문에 V/F만 알면 yi를 구할 수 있다. yi는 몰분율로 모든 성분의 yi를 더하면 1이 된다. 이 점을 이용하면 (식 5)는 (식 6)과 같이 변형 시킬 수 있다[12].

$$\sum_i \frac{z_i K_i}{1 + \frac{V}{F}(K_i - 1)} = 1 \quad (6)$$

이 식을 통해 V/F를 구할 수 있다. 만일 혼합 가스의 성분 개수가 3개 이면 위 식은 (식 7)과 같이 된다.

$$\frac{z_1 K_1}{1 + \frac{V}{F}(K_1 - 1)} + \frac{z_2 K_2}{1 + \frac{V}{F}(K_2 - 1)} + \frac{z_3 K_3}{1 + \frac{V}{F}(K_3 - 1)} = 1 \quad (7)$$

z1, z2, z3은 최초 가스(Feed) 성분비이며, K1, K2, K3은 탱크 내 압력과 각 성분의 증기압의 비로 구할 수 있다. V/F가 구해지면, (식 8)로 yi, xi를 구할 수 있다[11, 12]. Fig. 10은 개발 시스템을 통한 상평형 분석 예시이다.

$$y_i = \frac{z_i K_i}{1 + \frac{V}{F}(K_i - 1)}, \quad x_i = \frac{y_i}{K_i} \quad (8)$$

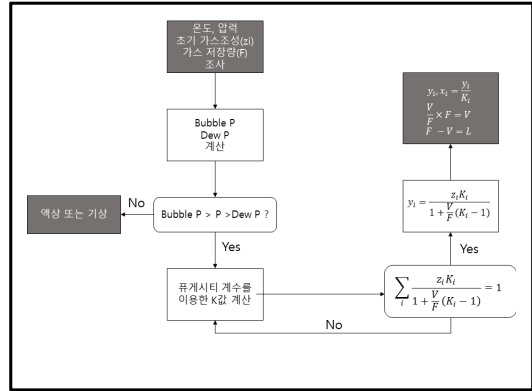


Fig. 9. Flash calculation process [12]

Input Process Condition <small>Show/Hide</small>			
Process Pressure	9.2 [bar]	=	9.2 [bar]
Process Temperature	300 [K]	=	300 [K]
Chemical Mass(Feed)	500 [kg] 10.981 [kg-mole]	=	500 [kg]
Chemical Volume(Feed)	3.4877 [m³] 3.4870623044 [cm³]	=	3.4877 [m³]

Thermodynamic Analysis Results <small>Show/Hide</small>			
Phase: Vapor-Liquid Equilibrio			
Bubble Pressure	9.2817 [bar] at 300 [K]	=	9.2817 [bar] at 300 [K]
Dew Pressure	7.9044 [bar] at 300 [K]	=	7.9044 [bar] at 300 [K]
Vapor Phase Total Mass	53.3305 [kg] 1171 [kg-mole]	=	53.3305 [kg]
Vapor Phase Total Volume	2.6295 [m³] 2.629488977 [cm³]	=	2.6295 [m³]
Liquid Phase Total Mass	446.6695 [kg] 9.817 [kg-mole]	=	446.6695 [kg]
Liquid Phase Total Volume	0.8582 [m³] 858.173274 [cm³]	=	0.8582 [m³]

Phase Composition Analysis Results <small>Show/Hide</small>						
No.	Chemical Name	Feed Mole Fraction (fi)	Vapor Mole Fraction (yi)	Liquid Mole Fraction (xi)	Vapor Mole Mass [kg-mol]	Liquid Mole Mass [kg-mol]
1	propane	0.9	0.9017	0.8927	11273	87636
2	butane	0.1	0.0383	0.1073	0.0448	10534
Total		1.0000	1.0000	1.0000	11721	9.817

Fig. 10. Thermodynamics Analysis Example

기체상의 물 질량(F)과 액체상의 물 질량(L)은 (식 9)로 구한다.

$$\frac{V}{F} \times F = V, \quad F - V = L \quad (9)$$

### 3.3. 누출량 계산 모듈

누출량 모델은 Daniel Crowl and Joseph F. Louvar의 Chemical Process Safety(1990)에서 제시되었으며, TNO, CCPS, API-581 등에서 사용되고 있는 수식을 채택하였다. 모델은 액체상과 기체상 누출 모델로 나누어지고, 기체상 누출 모델은 임계유동 모델과 비임계 유동 모델로 나뉜다. 먼저 액체상 누출 모델은 (식 10)과 같다[5, 14].

$$\dot{m} = -\rho A C_D \sqrt{2 \left( \frac{g_c P}{\rho} + g h_L \right)} \quad (10)$$

액체상 누출의 동력은 압력과 중력이다. 이 때문에, 누출구와 액면의 차이가 모델의 입력 값으로 요구된다[5]. 이에 반해 기체상의 누출의 동력은 압력에만 의존한다. 단지, 압력의 크기에 따라서 임계유동(Choked Flow)의 여부가 결정된다[1, 5, 13]. 일단  $P_{trans}$ (식 11)를 산출 후 시스템 압력과 비교한다.

$$P_{trans} = P_{atm} \left( \frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (11)$$

$P_{trans}$ 가 시스템 압력보다 높으면 임계유동 누출식(식 12)으로 누출량을 계산하고, 시스템 압력보다 낮으면 비임계유동 누출식(식 13)을 이용하여 누출량을 계산한다[1, 5].

$$\dot{m} = C_D A P_1 \sqrt{\frac{2g_c M}{R_y T_1} \frac{k}{k-1} \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{2/k} - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{(k+1)/k} \right]} \quad (12)$$

$$\dot{m}_{choked} = C_D A P_1 \sqrt{\frac{k g_c M}{R_y T_1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{(k+1)/(k-1)}} \quad (13)$$

기체방출에 대한 누출계수  $C_D$ 는 누출부 위치와, 시스템 구조에 따라 다양한 값을 갖는다[5]. 단면적이 연속적으로 서서히 변하는 Venturi Meter/ Nozzle/ Relief Valve의 경우는 분출계수가 거의 1에 접근하지만[16], 단면적이 급격히 변하는 오리피스는 누출속도에 따라 값이 변화한다[5, 15].

누출계수는 실험에 의해 적절한 값을 유추할 수 있으며, 보수적인 접근은 1을 선택한다. 일반적인 값으로는 0.61~0.62을 사용하며[5, 16], 개발되는 피해영향평가 시스템의 기본 값은 0.61을 사용한다.

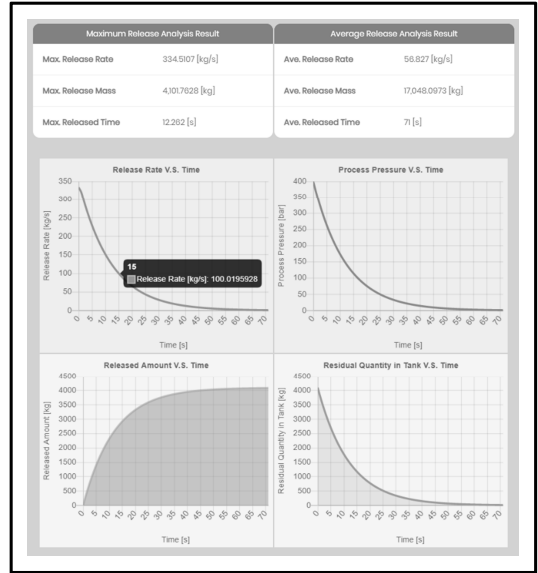


Fig. 11. Gas Release Analysis Example

### 3.4. 액면 분석 모듈

액체상이 누출될 경우 지면에 쏟아져 내리면서 액체 풀(Pool)을 형성할 수 있다. 가연성 물질 액체 풀의 위험성을 분석을 위해서는 우선적으로 액면의 면적 계산이 필요하다.[17] 만일 쏟아져 나온 액체 풀이 넓게 퍼지는 것을 방지하기 위해 둑(Dike)을 설치한 경우에는, 액면의 넓이는 최대 Dike의 넓이가 같아진다. 하지만, Dike가 설치되지 않은 경우에는 최대로 퍼져 형성할 수 있는 액면의 넓이를 예측해야 한다[17]. Wu, J. J and Schroy는 1979년에 액체상 누출에 의해 형성된 액면의 크기를 계산할 수 있는 (식 14)를 도출하였다[5, 18].

$$r = \left[ \frac{t^3}{C^3 \pi^2 / 6g} \times \frac{\rho Q_{AF}^2}{\mu} \times \cos \beta \sin \beta \right]^{1/5} \quad (14)$$

여기서 C는 Reynolds Number가 25보다 크면 2가 되며, 25와 같거나 작으면 5가 된다.  $\beta$  (Pool Surface Angle)의 산출 수식은 다음과 같다[5, 18].

$$\beta = \tan^{-1} \left[ (0.25 + B)^{0.5} - 0.5 \right]^{0.5} \quad (15)$$

$$B = \frac{22.489 r^4 \rho}{Q_{AF} t} \quad (16)$$

형성된 액체 풀에서 기화되는 물질의 양을 계산하는 방법은 물질이 상온에서 끓는 점 위에 있는지 또는 아래에 있는지에 따라 두 가지 수식으로 분류된다[5, 16]. 상온이 끓는 점보다 높을 경우 액체가 누출되자마자 에어로졸(Aerosol) 형태로 분사됨과 동시에 기화 속도도 빠르기 때문에 끓는 점 보다 아래의 경우보다 위험하다. 먼저 끓는 점위의 액체 풀 기화량 수식은 다음과 같다[5, 16].

$$\dot{m}_{vap} = \frac{H}{L_{heat}}, H = q_g = \frac{k_s(T_g - T)}{(\pi\alpha_s t)^{1/2}} \quad (17)$$

끓는 점 아래 액체 풀의 증발량 계산식은 다음과 같다[5, 16].

$$\dot{m}_{vap} = \frac{Mk_g A_{pool} P^{sat}}{R_g T_L} \quad (18)$$

액체가 풀을 형성한 후 증발할 경우 기체 누출보다 더 위험한 이유는 풀의 크기가 누출구 크기와 비교하

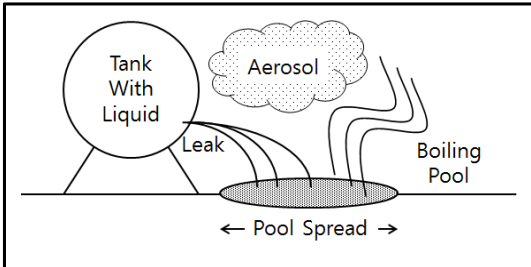


Fig. 12. Pool spread and evaporation at a temperature above its normal boiling point[5]

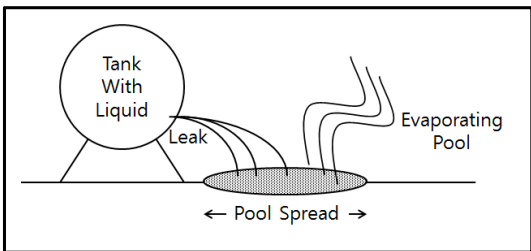


Fig. 13. Pool spread and evaporation at a temperature under its normal boiling point[5]

여 매우 크기 때문이다. 이 때문에 피해영향평가 결과도 기체상에 비해 액체상이 피해면적의 넓이가 일반적으로 더 넓다[1, 5, 16]. Fig. 14는 액체 방출 분석의 예이다.

### 3.5. 확산 모듈

가스 확산 모델은 누출 시 대기에서 떠오르거나 가라앉는 현상을 기준으로 무거운 gas와 가벼운 gas 확산 모델로 구분된다. 대표적인 무거운 gas 모델은 BM(Bitter & McQuid), HMP(Hoot, Meroney & Peerka), SLAB, DIGADIS(DENSE GAS DISPersion)이 있으며, 가벼운 gas 모델은 Gaussian Model이 주로 사용된다[5, 20]. 본 피해영향평가 프로그램의 확산 알고리즘은 1990년에 Lawrence Livermore National Lab.의 Ermak, D.L.가 제시한 SLAB 컴퓨터 모델(An atmospheric dispersion model for denser-than-air-releases)[19]을 채용하였다. 천연가스를 제외한 대부분의 가연성 gas는 공기보다 무거운 편에 속하기 때문에 무거운 gas 확산 분석을 위한 알고리즘이 필요하였다. 실제 현장에서 공기보다 무거운 gas의 확산을 다루는 알고리즘은 DNV에서 사용하는 PHAST UDM과 TNO Effects에서 채용한 SLAB 알고리즘이 가장 흔하게 사용된다[21]. 그런데 PHAST UDM은 공개되지 않아서, 본 시스

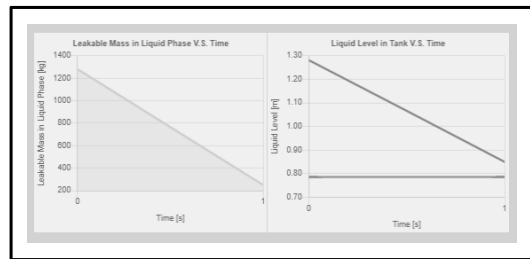


Fig. 14. The example of Liquid Release Analysis

Table 2. The Characteristics of SLAB Algorithm

- 낮은 모멘텀을 가진 지표면 수준, 정상상태에서의 풀에서의 기화
- 지면보다 높은 곳에서 수평으로 분출되는 제트
- 지면보다 높은 곳에서 수직으로 분출되는 제트
- 낮은 모멘텀을 가진 순간누출

Table 3. The limitations of SLAB Algorithm

- 누출 물질이 비반응성이고 침전되지 않는다고 가정



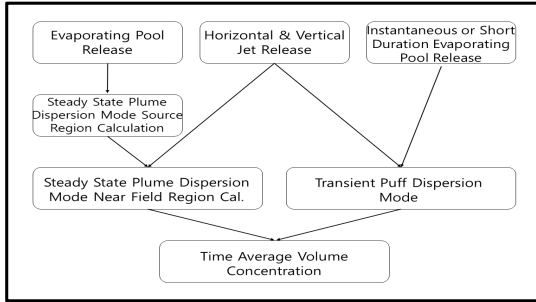


Fig. 15. SLAB Calculation Process

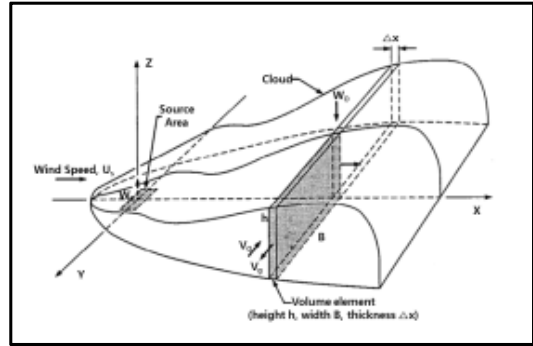


Fig. 16. The Plume Dispersion Model of SLAB Algorithm[19]

템에 채용은 사실상 불가능하였다[21, 22]. 이 때문에, 본 시스템에는 공개된 알고리즘은 SLAB 알고리즘을 채용하였다.

SLAB은 3차원 가스 확산 모델로서, 물질, 에너지 및 모멘텀에 대한 보존식활용하여 증기운의 확산을 예측 한다. 이 모델은 다음 형태들의 dense gas 누출 시나리오에 대한 모사를 할 수가 있다[19, 20]. SLAB 알고리즘의 특성과 한계점은 Table 2와 Table 3를 통해 제시하였다.

1990년에 발표된 SLAB은 단일물질에 대해서만 계산 가능한 모델 이었지만[5], 본 연구에서는 혼합물질 물성 계산 모델과 상평형 모델을 이용하여 혼합물질에 대한 누출 모사가 가능하도록 변형시켰다. 또한, 화재 모델, 폭발 모델, 독성 누출모델과 연계 시키면서, SLAB은 전체 피해영향평가 시스템의 허리 역할을 하게 되었다.

SLAB 모델은 가우시안 모델과 마찬가지로 연속 누출모델인 플럼과 순간누출 모델인 퍼프로 나뉜다. SLAB 플럼 모델은 단지 바람방향에 따라 평균 확산 속성 값을 계산하며 시간과는 독립적이다[19, 20]. SLAB 플럼의 화합물, 전체 질량, 에너지 보존식은 (식 19~21)과 같다.

$$d(m\rho uA)/dx = 0 \quad (19)$$

$$d(\rho uA)/dx = 2\rho_a(b_y w_{e,t} + b_z w_{e,e}) \quad (20)$$

$$d(\rho u A c_p T)/dx = 2\rho_a(b_y w_{e,t} + b_z w_{e,e})c_{p,a}T_a + E_{pc} + E_{gh} \quad (21)$$

이어서 SLAB 플럼 농도 계산 모델은 (식 22~25)와 같다[19, 20].

$$c(x,y,z) = 2b_x b_z c(x) F_y(y,y_b,C_y) F_z(z,h,\sigma_z) \quad (22)$$

$$c(x) = \mu_a m(x) / (\mu_s + (\mu_a - \mu_s) m(x)) \quad (23)$$

$$F_y(y,y_b,C_y) = (\text{erf}((y+y_b)/(\sqrt{2}C_y)) - \text{erf}((y-y_b)/(\sqrt{2}C_y)))/(4y_b) \quad (24)$$

$$F_z(z,h,\sigma_z) = (\exp(-(z-h)^2/(2\sigma_z^2)) + \exp(-(z+h)^2/(2\sigma_z^2)))/\sqrt{(2\pi\sigma_z^2)} \quad (25)$$

$b_y, b_z$ 는 누출된 가스 구름의 크기를 나타내는 지표이다[19, 20].  $\mu_s$ 와  $\mu_a$ 는 각각 화학물질, 주위 공기의 분자량을 나타낸다. erf는 에러 함수를 뜻하며,  $y_b, C_y$ 는 모양 파라미터이다. 모양 파라미터들은 (식 26)을 만족한다[19, 20].

$$C_y^2 = 1/3(b_y^2 - y_b^2) \quad (26)$$

$h$ 는 높이 파라미터이고  $\sigma_z$ 는 수직 폭의 반에 대한 파라미터이다. 수직 프로파일 함수는 (식 27)과 같이 정의된 폭과 함께, 지표면에서의 누출( $h \leq 0.5 b_z$ , Grounded)과 지표면보다 높은 곳에서의 누출( $h > 0.5 b_z$ , lofted) 모두를 고려한 것이다[19, 20].

$$\sigma_z^2 = (b_z - h)/\sqrt{3} \quad (\text{grounded}) \quad (27)$$

$$\sigma_z^2 = 0.5b_z/\sqrt{3} \quad (\text{lofted})$$

SLAB 모델의 최종 단계는 tav시간동안 위치(x,y,z)에서 시간 평균값을 계산한다. 평균 시간 tav는 입력 값이며, 당연한 논리지만 평균 시간 값에 따라 평균 농도 값도 달라진다. 평균 농도 계산 수식은 (식 28)과 같다[19, 20].

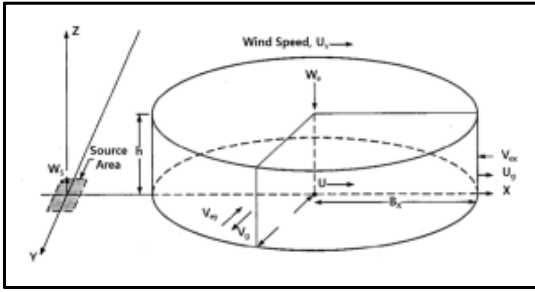


Fig. 17. The Puff Dispersion Model of SLAB Algorithm[19]

$$c_{\text{mean}}(x,y,z) = 1/t_{\text{av}} \int c(x,y,z,t) dt \quad (28)$$

다음은 SLAB의 퍼프(순간누출 모델) 식이다. 지속 누출의 경우 시간에 따른 누출량 q에 의존하지만, 순간누출은 총 질량 Q에 의해서 그 속성이 결정된다. 퍼프의 종류, 질량, 에너지의 증기 운에 대한 보존 식은 (식 29~32)와 같다[19, 20].

$$d(m\rho V)/dt = 0 \quad (29)$$

$$d(\rho V)/dt = \rho_a V_e \quad (30)$$

$$d(\rho V C_p T)/dt = \rho_a V_e C_{pa} T_a + 2b_x (E_{pc} + E_{gh}) \quad (31)$$

$$V_e = 4(b_y b_z w_{e,x} + b_x b_z w_{e,y} + b_x b_y w_{e,t}) \quad (32)$$

이어서 퍼프의 3차원 농도 계산식이다. 플럼과 마찬가지로 입력 받은 평균시간 동안 평균 농도를 산출 한다[19, 20]. 식은 다음(식 33~36)과 같다.

$$c_{\text{av}}(x,y,z) = 4b_x b_y b_z c(t_{pk}) f_{\text{av}}(x_b, C_x, t_{\text{av}}) \times F_y(y, y_b, C_y) F_z(z, h, \sigma_z) \quad (33)$$

$$x_1 = (x_b + \frac{1}{2} ut_{\text{av}}) / (\sqrt{2} C_x) \quad (34)$$

$$x_2 = (x_b - \frac{1}{2} ut_{\text{av}}) / (\sqrt{2} C_x) \quad (35)$$

$$f_{\text{av}}(x_b, C_x, t_{\text{av}}) = \frac{C_x}{\sqrt{2} x_b ut_{\text{av}}} (x_1 \text{erf}(x_1) - x_2 \text{erf}(x_2) + \frac{1}{\sqrt{\pi}} (e_{1^2}^{-x} - e_{2^2}^{-x})) \quad (36)$$

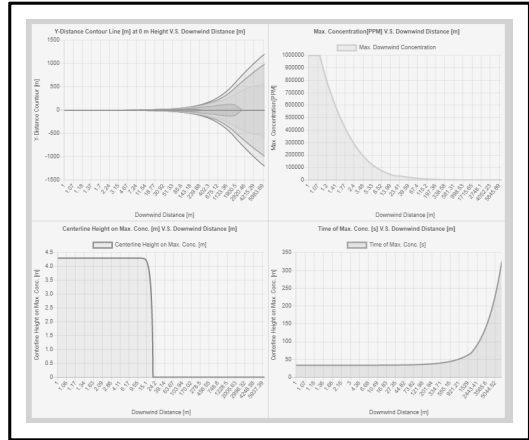


Fig. 18. The example of SLAB Dispersion Results

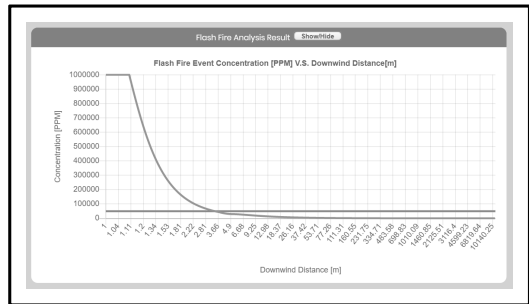


Fig. 19. The example of Flash Fire Consequence Distance

### 3.6. 사고유형 별 피해영향분석 모듈

확산 분석까지 완료되면, 누출 분석 결과와 확산분석 결과를 조합하여, Flash Fire, Pool Fire, Vapor Cloud Explosion, Jet Fire, Fireball 다섯가지 위험 시나리오에 대하여 피해영향 거리를 산출한다[1]. 위험 시나리오는 크게 화재와 폭발 현상으로 나눌 수 있으며, 화재는 기준 복사열과 기준 농도, 폭발은 기준 폭발 압을 기준 점으로 삼고, 피해영향평가 결과로부터 피해영향 거리를 산출한다[1, 5].

#### 3.6.1 Flash Fire와 독성 피해영향 거리

플래시 파이어는 CCPS와 TNO의 제시방법에 따라 물질의 LFL(Lower Flammable Limits) 농도 값을 기준으로 피해영향거리를 산출한다[23]. SLAB에서 산출된 거리별 평균 농도를 기준으로 LFL의 거리를 역산할 수 있으며, 시스템에서는 이 거리를 Flash Fire의 피

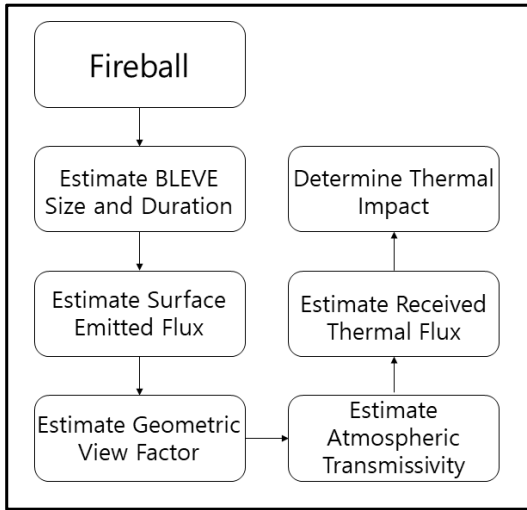


Fig. 20. Fireball Consequence Calculation Process

해영향거리로 사용하였다. 추가적인 입력 값은 없으며, 단지 LFL 값 수정에 따라 피해영향 거리 결과 값도 변화한다.

독성피해거리도 Flash Fire와 마찬가지로 독성 기준농도를 기준점으로 거리를 구하며, 역시 SLAB 확산 모델의 결과를 활용한다. 독성 기준 농도는 TEEL0, PAC-1, PAC-2, PAC-3, TLV, PEL, REL, MAK 중 사용자가 원하는 값을 선택할 수 있다. 이 중 PAC(Protective Action Criteria) 값들은 2012년 미국 에너지부(DOE)에서 AEGL, ERPG, TEEL 값들을 기반으로 제시한 값으로 최근에 독성가스 기준 농도로 활용되고 있다.

3.6.2 Fireball 피해영향 거리

파이어볼은 배관이나 탱크에서 누출된 인화성 물질이 순간적으로 점화되었을 때 발생한다. 파이어볼은 항상 물리적 폭발이나 BLEVE와 함께 발생한다[24].

블레비(BLEVE)란 배관이나 저장탱크 주변에 장시간 화재가 발생하였을 때, 재질의 인장력이 낮아지고, 내부 인화성 액체의 비등으로 인해 압력상승으로 파열되는 현상을 나타낸다[24, 25]. 저장탱크 파열 후 탱크 내부 압력은 급격히 감소하지만 파열된 가연성 가스가 급속히 증발하면서 발생한 힘은 탱크의 조각을 고속으로 비산시킨다. 이때까지의 현상을 블레비라 부른다[24, 25].

블레비 현상에 의해 순간 방출된 가연성 액체가

Table 4. The formula for fireball consequence calculation

Objective	Formula
Fireball Diameter	$D_{max} = 5.8 \times M_0^{1/3}$
Combustion Duration	$t_{BLEVE} = 0.45 \times M_0^{1/3}$ $t_{BLEVE} = 2.6 \times M_0^{1/6}$
Center Height of Fireball from Bottom	$H_{BLEVE} = 0.75 \times D_{max}$
Initial Diameter of Fireball	$D_{initial} = 1.3 \times D_{max}$
Heat Flux of Fireball Surface	$E = \tau_a Q_r F_p = \frac{RDH_c}{\pi D_{max}^2 t_{BLEVE}}$
Distance Target Point from Fireball	$Path \leq ngth = \sqrt{H_{BLEVE}^2 + L^2} - \frac{D_{max}}{2}$
View Factor	$F_{21} = \frac{L(D/2)^2}{(L^2 + H_{BLEVE}^2)^{3/2}}$
Transmission Factor	$\tau_a = 2.02(P_{WS} X_S)^{-0.09}$
Heat Flux of Target Received	$E_r = \tau_a E F_{21}$

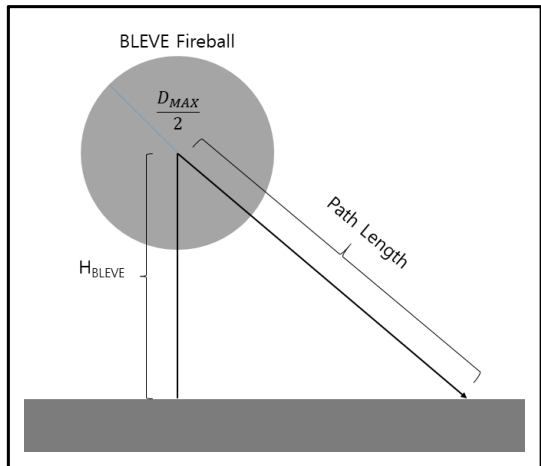


Fig. 21. Fireball Consequence Model

주변 공기와 혼합하여 연소 조건을 만족하게 되면, 구체형태의 대형 화염이 발생하면서 상승하게 되

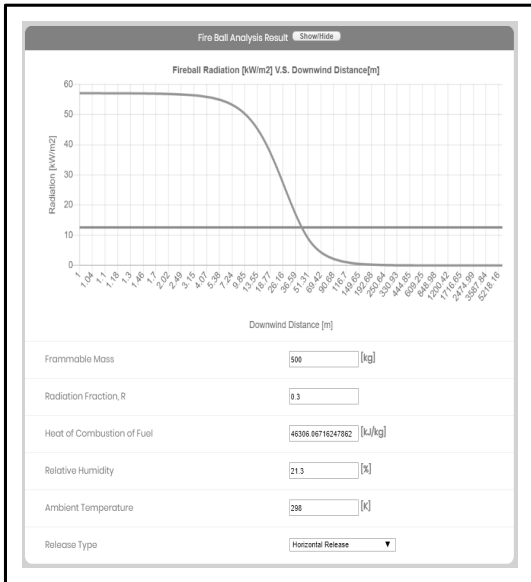


Fig. 22. The example of Fireball Consequence Distance

Table 5. The formula for pool fire consequence calculation

Objective	Formula
Vertical rate of liquid Burning Level	$\dot{y}_{max} = 1.27 \times 10^{-6} \frac{\Delta H_c}{\Delta H^*}$ $\Delta H^* = \Delta H_v + \int_{T_o}^{T_{vp}} C_p dT$
Mass Burning Rate	$m_b = 1 \times 10^{-3} \frac{\Delta H_c}{\Delta H^*}$
Pool diameter	$D_{max} = 2 \sqrt{\frac{\dot{V}_L}{\pi \dot{y}}}$
Geometric View Factor	$F_p = \frac{1}{4\pi x^2}$
total Energy Rate	$E_t = \tau_a Q_r F_p = \tau_a \eta m_B \Delta H_c A F_p$
Ave. Emissive Power	$E_{av} = E_m e^{-SD} + E_s (1 - e^{-SD})$

는데 이때 형상을 파이어볼(Fireball)이라 부른다. 다음은 파이어볼을 계산하는 메커니즘이다[25].

먼저 파이어볼 구직경, 연소시간을 구하고 이를 바

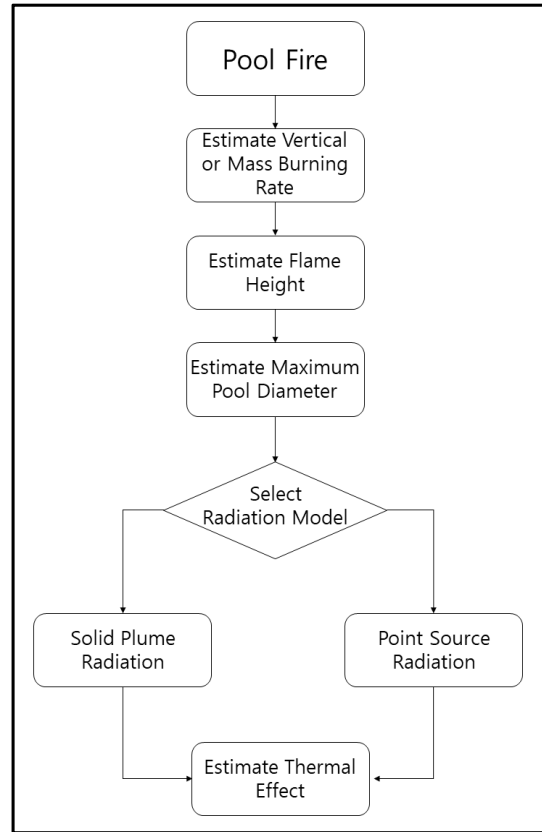


Fig. 23. Pool Fire Consequence Calculation Process

탕으로 파이어볼이 방출하는 복사열을 계산한다[5]. 이후 목표점과의 거리, 시각요소(View Factor), 공기 투과율을 이용하여, 목표점에 닿는 복사열을 계산한다[6]. 시각요소란 공간에 있는 점 1(또는 면)에서 발생하는 방사에너지에서 점2(또는 면)으로 전달되는 에너지 비율을 뜻한다[26].

위 메커니즘에 따른 파이어볼 피해영향 수식은 다음 표와 같다.[5]

### 3.6.3 Pool Fire 피해영향 범위

풀 화재(Pool Fire)는 인화물질 이송 배관이나 저장 탱크에서 액상형태의 인화물질이 누출되어 액상 풀이 형성된 후 발화되어 발생한 화재이다. 액면 누출은 제방(Dike)가 존재 할 경우 제방의 넓이와 깊이에 따라 인화성 액체물질의 확산이 제한될 수 있다[27]. 그런데 비록 확산이 제한되었다 하더라도, 제한된 액체 인화성 물질에 발화되고 화재가 발생한다면, 화재의

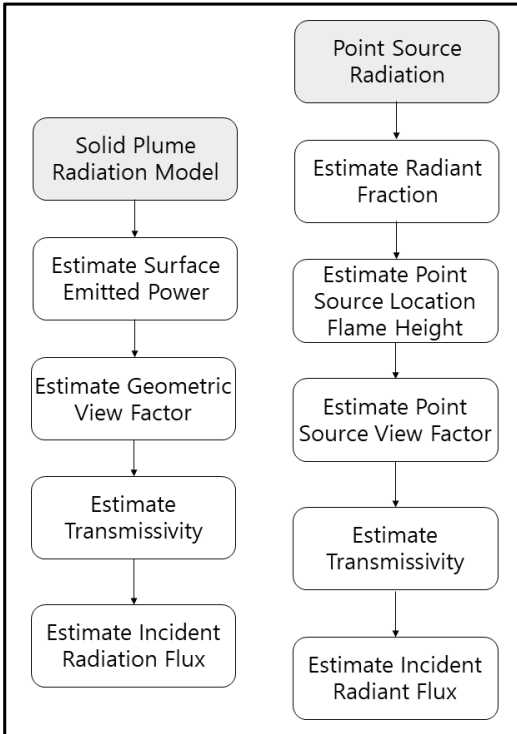
영향권에 있는 다른 정상상태의 저장탱크에 큰 위험을 유발 시킬 수 있다[28].

액면화재의 영향에 있는 저장탱크는 내부압력이 높아지고, 탱크 재료의 인장력이 낮아지기 때문에, BLEVE 현상을 야기할 수 있다[28].

이러한 이유 때문에 액면화재의 복사열 영향 크기와 범위 예측은 위험관리에 있어서 매우 중요하다. Fig. 23은 풀 화재 영향범위 계산 과정이다[5, 29]. Solid Plume View Factor는 파이어볼의 시각요소(View Factor)계산 방법과 동일하다.

**Table 6.** Radiation Factor for Hydrogens[5]

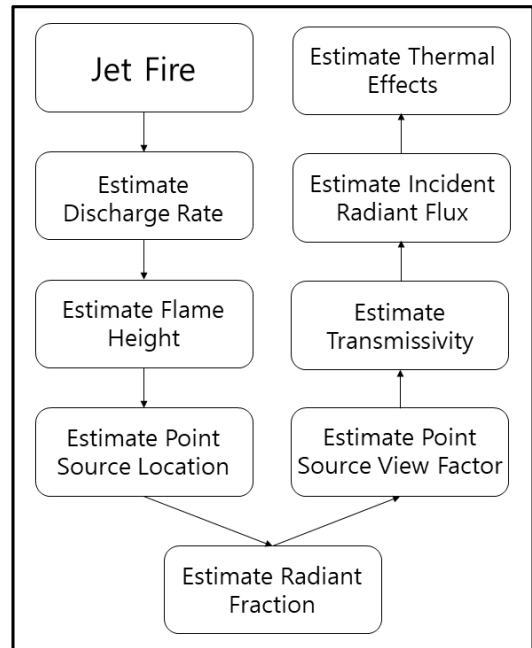
Fuel	Radiation Factor
Hydrogen	0.20
Methane	0.20
Ethylene	0.25
Propane	0.30
Butane	0.30
C5 and higher	0.40



**Fig. 24.** Consequence Calculation for Solid Plume and Point Source Radiation[5, 29]

Solid Plume Radiation 모델은 화염의 전체 부피에서 가시적으로 볼수 있는 화염만 복사열을 방출하며, 비가시적인 화염은 복사열을 방출하지 않는다고 가정하는 모델이다[5, 29]. Point Source Radiation 모델은 한 점에서 방출되는 총 열에너지가 복사열 에너지와 동일하다고 가정하는 모델이다. Point Source Radiation 모델은 방출속도를 기반으로 계산이 진행되며, 이에 반해 Solid Plume Radiation 모델은 재료 자체가 가지는 연소하면서 생기는 열 플럭스를 기본 값으로 계산을 진행한다[5, 29]. (Fig. 24 참조)

Solid Plume View 모델은 Point Source Radiation 모델 결과보다 더 작은 경향이 있다. 물리적 차이를 고려하면 Point Source Radiation 모델은 그늘음에 의한 복사열 차단 등을 고려하지 않는 반면, Solid Plume View 모델은 고려하기 때문이다[5]. 이 차이는 풀 화재의 크기가 클수록 차이가 많이 난다. 본 시스템의 경우 두 가지 모두 구현완료 하였지만, Point Source Model에 비해 Solid Plume View 모델이 거리에 비례하여, 이상적인 복사열 계산이 가능하였고, TNO에서 Solid Plume View 모델을 주도적으로 제시하였기 때문에 최종적으로 Solid Plume View 모델을 선택하였다. 탄화수소의 종류별 Radiation Factor는 Table 6에 제시하였다.



**Fig. 25.** Jet Fire Consequence Calculation Process[5, 30]

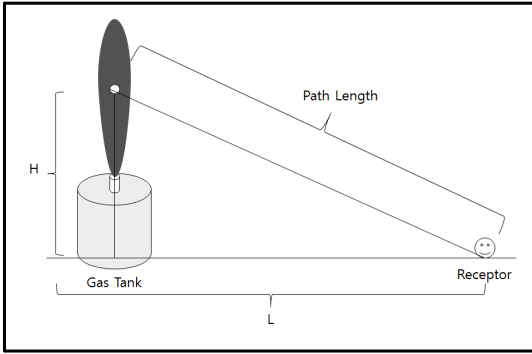


Fig. 26. Fireball Consequence Model[30]

**3.6.4 Jet-Fire 피해영향 거리**

인화성 물질이 배간이나 저장탱크로부터 고압의 상태로 누출되고, 이어 점화가 되어 누출되는 물질에 발화가 일어나는 현상을 제트화재(Jet Fire)라 부른다 [5].(Fig 26 참조) 제트화재는 인화성 물질이 누출되어 확산되기 전에 발생하는 사고이기 때문에 SLAB 결과와 같은 확산 해석은 제트화재 피해영향범위 산출에 영향을 미치지 않는다[1]. 그 후, 화염의 길이를 예측하고, 화염에서 발생하는 복사열의 크기를 기준을 피해영향거리를 산출한다[30].(Fig 25 참조) 제트화재의 피해영향산출 과정은 다음과 같다[5].

(식 37)은 제트화염의 길이를 예측하는 수식이다. 이 외, 시각요소(View Factor), Transmissivity, Radiant Flux 등은 파이어볼 수식과 동일하다[5]. 복사열비(Radiant Fraction)는 풀 파이어 계산 방법(Table 5)과 동일하다.

$$\frac{L_{frame}}{d_j} = \frac{5.3}{C_T} \sqrt{\frac{T_f/T_j}{\alpha_T} \left[ C_T + (1 - C_T) \frac{M_a}{M_f} \right]} \quad (37)$$

**3.6.5 Vapor Cloud Explosion 피해영향 거리**

가연성 물질이 급작스럽게 방출되면 구름이 형성되고 주변 공기와 섞이면서 빠르게 확산된다. 이때, 만일 구름의 가연성 물질 농도가 인화 범위인 LFL(Lower Flammable Limits)과 UFL(Upper Flammable Limits) 사이에 위치해 있을 때 점화되면 VCE(Vapor Cloud Explosion)이라는 형상의 폭발이 발생하게 된다[16]. 이는 플래시 화재와 동일한 형상이다. 다만, 플래시 화재는 사고의 결과를 화재라 판단하고 복사열을 계산하는 반면, 사고의 결과를 폭발로 결정하고, 폭발 압을 계산한다[5, 16].

폭발 압을 계산하는 모델은 주로 TNT equivalency model, TNO multi-energy model, Modified Baker mod-

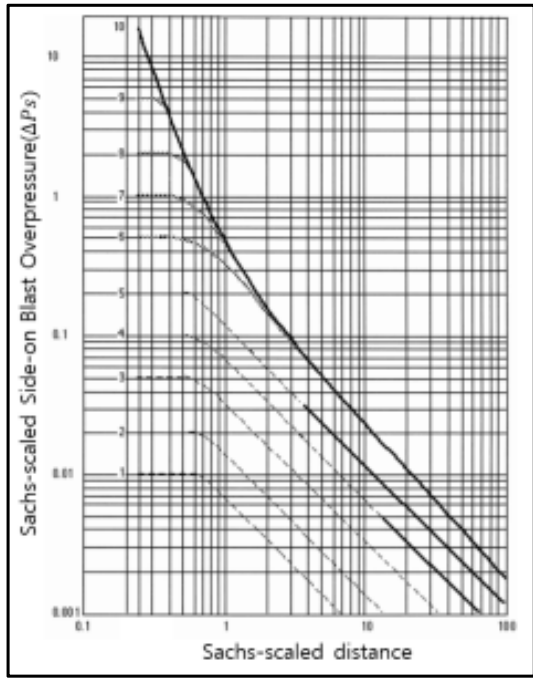


Fig. 27. Sachs-scaled distance v.s. side-on Overpressure

el이 사용된다. 본 시스템에서는 가연성 구름의 부피와 연소열을 기준으로 계산되는 TNO 모델을 적용하였다[31]. TNO모델은 가스 구름의 부피를 고려하기 때문에, 단순 질량만 고려하는 TNT 당량 모델보다 정확도가 높은 장점이 있다. 또한, 이 모델은 가스 확산 구름의 부피와 공기 대비 가연성 물질의 부피 비율을 계산하는 SLAB 확산 모델과도 연계가 가능하다[31].

TNO 모델을 적용하기 위해, 인화성 물질과 공기 혼합물의 연소열(Heat of Combustion)을 계산해야 한다. 바로 전에 언급하였다시피, SLAB 확산 결과를 바탕으로 혼합물의 연소열을 계산 할 수 있다. TNO에서 요구하는 연소열 단위는 [Energy/Volume]이기 때문에 가연성 구름의 부피를 알면 연소열과의 곱을 통해 전체 방출 에너지를 계산 할 수 있다.

전체 방출 연소열이 결정되면 거리에 따른 폭발 압을 계산하기 위해 Sachs-scaled distance라는 파라미터를 계산해야 한다[16]. 계산식은 (식 38)과 같다.

$$\bar{R} = \frac{R}{(E/P_0)^{1/3}} \quad (38)$$

또한, 폭발 강도를 결정해야 한다. 가장 보수적인 접근은 폭발 강도를 10으로 하는 것이다. 일반적으로 이 강도는 위험물 관리자가 자체적으로 결정한다. CCPS에서는 겨 폭발강도 7이 경험적으로 정확하다고 제시하였으며[5], 폭발 압이 0.5bar 미만의 경우 폭발 강도 7에서 10까지의 강도 차이가 미비하다고 설명하

였다[16]. 본 시스템에서는 폭발강도 7을 선택하였다. 폭발강도와 Sachs-scaled distance가 결정되면 다음 도표와 수식을 통해 side-on blast overpressure를 예측할 수 있다[16].

$$P_s = \Delta P_s \cdot P_0 \tag{39}$$

**Table 7.** Standard Points for Consequence Distans and Area Decision

분류	기준점
인화성 기준 농도	LFL LFL 50% UFL
독성 기준 농도	TEELO PAC-1 PAC-2 PAC-3 TLV PEL REL MAK
복사열 기준 농도	API-581: Personnel Injury Criteria API-581: Component Damage Criteria EIGA 075: Harm to People EIGA 075: No harm to People EIGA 075 - Harm to Equipment
폭발 압 기준 농도	API-581: Personnel Injury Criteria API-581: Component Damage Criteria EIGA 075: Harm to People EIGA 075: No harm to People EIGA 075 - Harm to Equipment

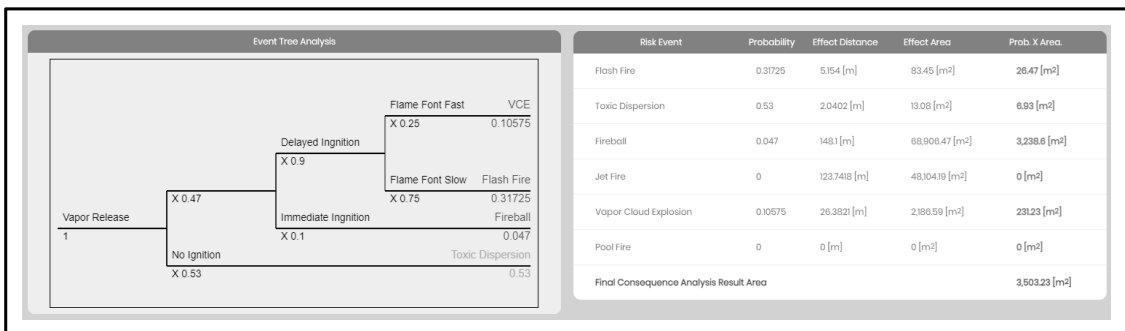
### 3.7 피해영향거리 산출

사고영향분석 모듈의 결과는 사고 지점으로부터 거리에 따라 달라진다. 일반적인 거리가 멀면 멀수록 그 영향이 약해진다[33]. 피해영향거리를 산정하기 위해서는 사고영향의 특점 지점을 결정해야 한다. 폭발의 경우 특정 폭발 압을 기준으로 산정하며, 화재의 경우 복사열을 기준으로 산정한다[5, 16, 34]. Table 7 은 사고영향분석 결과에 따른 피해영향거리 지점을 산출 하는 기준점을 제시한다.

특히, 안전거리에 대한 기준점을 제공하기 위해 유럽의 안전거리 설정 기준인 EIGA Doc 075기준을 채용하였다. 이 기준의 가장 큰 장점은 위해빈도에 따라 안전거리 설정 기준점을 제공한다는 것이다. 두 가지

**Table 8.** Safety Distance Standard Points of EIGA Doc 075

	Harm	No Harm
Fire	9.5 kW/m <sup>2</sup>	1.6 kW/m <sup>2</sup>
Explosion	7 kPa	2 kPa
Toxic	LD01	LD001
LEL	100% of LEL	50% of LEL



**Fig. 28.** The example of Event Tree Analysis Results(Left) & Total Consequence Area Results(Right)

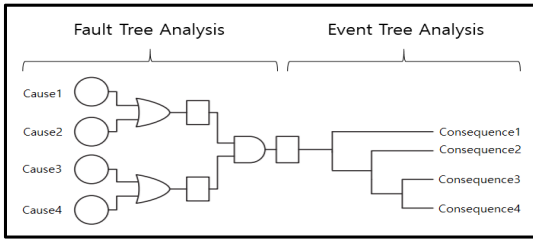


Fig. 29. Fault Tree & Event Tree Connection

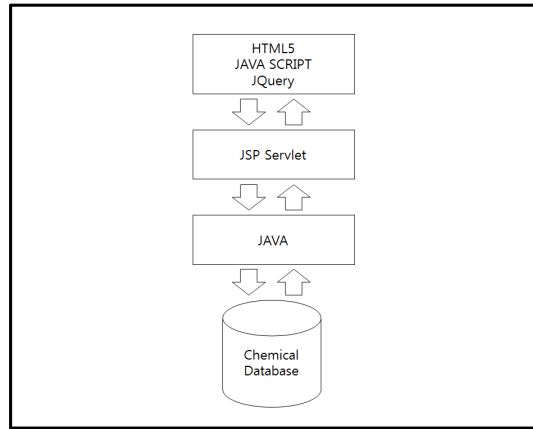


Fig. 31. Development structure of consequence analysis system

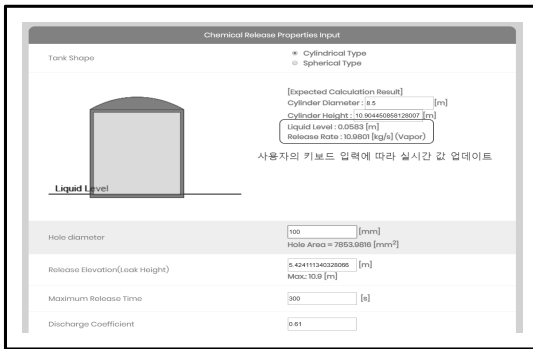


Fig. 30. HTML5 based user interface

종류의 위해빈도에 따른 기준을 제시하는데 Harm과 No Harm이다. Harm은 위해빈도 0.1%의 기준 값이며, No Harm은 위해빈도 0.01%의 기준 값이다. Table 8은 EIGA 075의 안전거리 산출 기준 값을 제시한다.

이와 더불어 API-581에서 제공하는 기준점도 함께 채택하였다. 그런데 독성의 경우 일반적으로 프로빗 함수를 기반으로 한 LC50이나 LD01 값의 도입을 시도하였지만, 이 정보는 일부 물질에만 국한되어 있고, 다양한 물질에 대하여 제공이 되지 않았기 때문에, AEGL, ERPG, TEEL 값을 통합하여 구축한 PAC 데이터 셋을 채용하였다. 이는 60분 평균 독성 농도 값을 제공하며, 약 500여종의 화학물질에 대하여 독성 기준 농도를 제시한다. ALOHA 시스템의 경우도 PAC 데이터 셋을 채용하였다[35].

### 3.8. Event Tree 분석 및 통합 피해영향범위 계산 모듈

본 시스템에 ETA(Event Tree Analysis)를 포함한 이유는 모든 사고 시나리오에 대한 피해영향평가 결과를 통합하기 위해서다. 일반적으로 Risk Matrix를 이용하여 사고발생빈도와 피해영향결과를 통합하지만, 개발되는 시스템은 API-581기준을 따라가는 것을

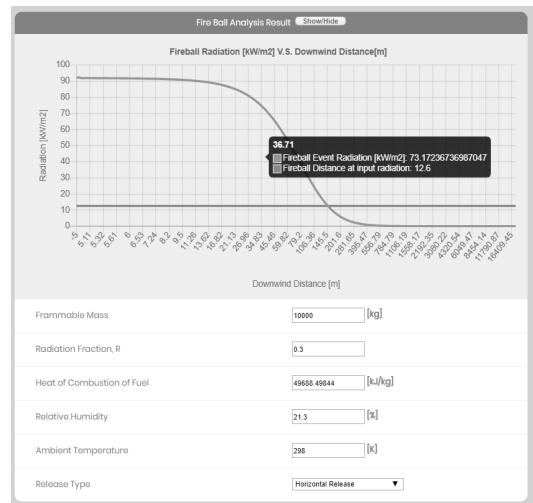


Fig. 32. Real-time reaction plotting system to user mouse or keyboard input

개발 기준으로 정했기 때문에, 그 기준에서 제시한 ETA 통합 방법을 선택하였다[1].

ETA에 의한 통합방법은 매우 간단하다. 수식은 (식 40)과 같다. 우선 5개의 시나리오(플래시 화재, 제트 화재, 파이어볼, 풀 화재, VCE)에 대하여, 내부 기준에 따라 인화성 물질 누출시 발생 빈도를 계산하고, 피해영향평가 결과와 곱한다. 이후 곱해진 모든 값들을 더하게 되면 최종 피해영향평가 결과를 얻을 수 있다[1].



$$\begin{aligned}
 \text{Consequence Area}_{Total} = & \\
 & \text{Consequence Area}_{Poolfire} \times \text{Probability}_{Poolfire} \\
 & + \text{Consequence Area}_{Fireball} \times \text{Probability}_{Fireball} \\
 & + \text{Consequence Area}_{Jetfire} \times \text{Probability}_{Jetfire} \\
 & + \text{Consequence Area}_{Flashfire} \times \text{Probability}_{Flashfire} \\
 & + \text{Consequence Area}_{VCE} \times \text{Probability}_{VCE}
 \end{aligned}
 \tag{40}$$

Event Tree 분석을 통한 통합된 피해영향범위 산출 결과는 Fig. 28과 같다. 이 분석 방법의 장점은 모든 피해영향 시나리오 결과를 하나로 통합하기 때문에 하나의 위험도를 제시할 수 있다. 이를 통해 서로 다른 설비간의 위험도 비교도 가능하다. 다만, 이 경우는 누출 이벤트가 발생하였다고 가정을 한 것이기 때문에 누출 이벤트 빈도가 1로 기본 설정된다. 만일, 누출 이벤트 발생 빈도 계산을 위한 Fault Tree 분석이 추가적으로 수행된다면, 더 정확한 위험도 계산이 가능하다 [36].

#### IV. 차세대 웹 기술 기반 피해영향평가 시스템 구현

HTML5 기술은 ActiveX와 같은 별도의 프로그램 설치 필요 없이 웹상에서 다양한 콘텐츠와 앱을 이용 가능하게 하는 기술이다. 이 기술은 기존 웹 기술보다 더 사용자 친화적인 인터페이스 구축이 가능하며, 피해영향평가 시스템에 적용하면, 사용자 입장에서 복잡한 절차 없이 손쉽게 시스템 사용이 가능하다는 장점이 있다. 또한, 사용자의 키보드 입력과 마우스 입력에 실시간으로 반응하여 결과를 제시하기 때문에 다른 시스템에 비해 빠른 결과 확인이 가능하다[37, 38].

본 연구에서 개발한 피해영향평가 시스템은 기본적으로 자바 기반으로 구축되었다. JAVA, JSP, JAVA Script를 중심으로 공학계산 엔진이 개발되었다. 데이터베이스는 JSP 시스템과 연계가 쉽고, 무료로 개방된 MY-SQL 시스템을 적용하였다. 이와 더불어 사용자 인터페이스는 사용자가 계산 결과를 빠르게 확인이 가능하도록 차세대 웹 기술(HTML5)과 최신 자바스크립트 기술인 JQuery가 적용되었다.(Fig. 31 참조)

단위 변환, 누출량 계산, 화재/폭발 영향 계산, ETA 계산은 차세대 웹 기술이 적용되었기 때문에, 사용자가 키보드를 입력할 때마다 즉각적으로 반응하여 값을 실시간으로 계산한다.(Fig. 32 참조) 상대적으로 많은 계산량을 요구하는 상평형 분석 계산, 확산 계산 등은 실시간 계산 기술이 적용되지 않았다.

대부분의 계산모듈은 자바스크립트 언어를 기반으로 프로그래밍이 진행되었기 때문에 실제 계산은 사용자의 컴퓨터에서 진행된다. 이 때문에 시스템 계

Table 9. Feed mole fraction

물질	몰분율
메탄	91.59%
에탄	55.51%
프로판	1.84%
부탄	0.45%
이소부탄	0.4%
이소펜탄	0.02%
질소	0.19%

Table 10. Release conditions for chemical leakage accident scenario

누출가스	LNG
설비형태	저장탱크
저장용량	10톤
공정 온도	12℃
공정 압력	400bar
누출구 지경	100mm
누출 높이	3.254 m
누출 시간	5분
외부 온도	25℃
습도	21.3%
풍속	4.5m/s
대기안정도	D
주변 환경	평평한 지형

Table 11. Natural Gas Release Analysis Results

구분	최대	평균
누출률	334.5 kg/s	56.8 kg/s
누출량	4,101 kg	4,101 kg
누출 시간	12초	71초

Table 12. Consequence Distance Analysis Results

Risk Event	Distance
Flash Fire	5.15m
Toxic Dispersion	2.04m
Fireball	148.1m
Jet Fire	123.74m
Vapor Cloud Explosion	26.38m

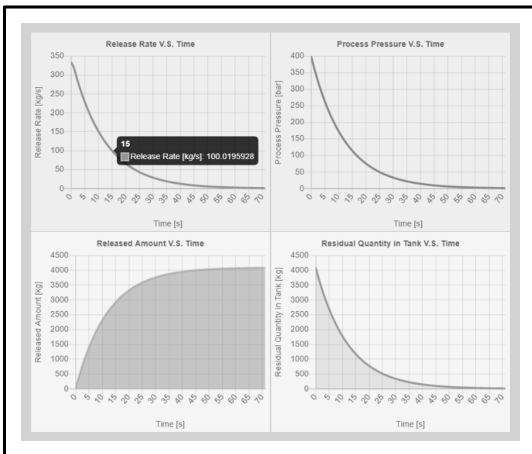


Fig. 33. The release analysis result over time

산 속도는 사용자의 컴퓨터 환경에 의존한다. 서버측은 데이터베이스 연동, 사용자 인터페이스 제공, 계산 데이터 수집 등만 관여한다.

## V. 사고시나리오 적용

### 5.1 시나리오 구성

피해영향평가 시스템의 시범 운용을 위해 10톤 용량의 LNG 저장탱크 기체상부 누출을 가정하였다. 물질은 메탄, 에탄, 프로판, 부탄, 이소부탄, 이소펜탄, 질소의 혼합물을 선택하였으며 Feed의 물 분율은 Table 9와 같다.

공정 압력은 혼합물의 12°C 온도 기준 기포점(431bar)과 이슬점(88bar) 사이의 한 점으로 기액상평형을 이루는 400bar를 선택하였다. 전체 저장용량이 10톤이며, 저장탱크의 바닥 직경이 3.2m, 높이 4.1m로 가정하였을 때, 액면 높이는 약 2.4m이다. 누출 높

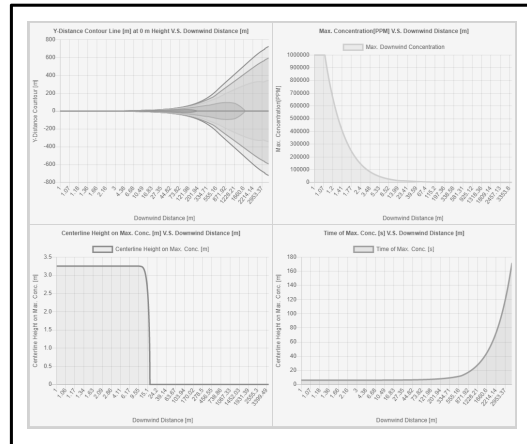


Fig. 34. The Natural Gas Dispersion Analysis Results

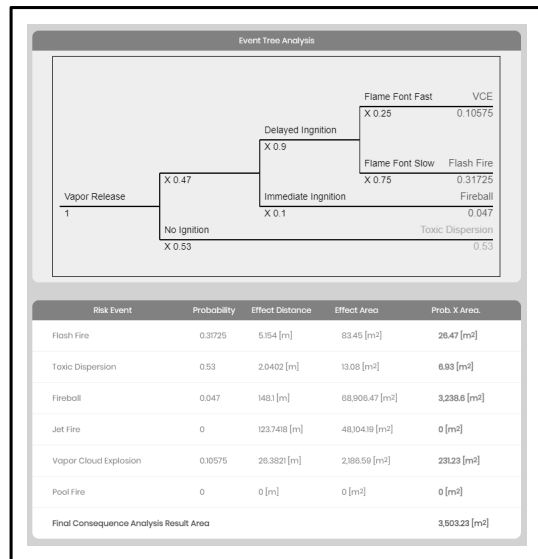


Fig. 35. Final Consequence Analysis Results from Event Tree Analysis Results

이를 약 3.3m로 가정하였기 때문에, 기상이 누출된다. 그 외 사고 시나리오 조건은 Table 10과 같다.

### 5.2 피해영향평가 시스템 적용 결과

천연가스 누출 사고 시나리오에 대한 누출량 계산 결과는 Table 11과 같다.

최대 누출량은 누출량 계산 수식을 그대로 반영한 값이며, 평균 누출량은 내부압력 감소에 따른

누출률 감소를 계산한 후, 전체 누출 시간에 대한 평균 누출률을 계산한 것이다. 사용자는 원하는 값을 선택할 수 있다. Fig. 33은 피해영향평가 시스템에서 제공되는 누출 시간에 따른 누출량 변화 정보이다. Fig. 34는 누출량 계산 결과에 따른 확산분석 결과이다. 거리별 누출농도 분포, 최대 농도, 최대 누출농도 높이, 최대 누출농도 시각에 대한 정보를 제공한다.

피해영향거리 산출의 기준점은 플래시화재의 경우 LEL, 독성기준 PAC-3, 복사열 및 폭발 압 기준은 API-581 제시 값을 사용하였다. 결과는 Table 10과 같다. Fig 35는 Event Tree 분석결과이다. 10톤, 400bar의 LPG 저장탱크 누출 시나리오의 최종 피해영향면적은 3,503m<sup>2</sup>이다.

## VI. 결론

가연성 물질 누출 피해영향평가 시스템은 상평형 분석, 누출 분석, 확산 분석, 화재 및 폭발 분석, 피해영향거리 분석, 마지막으로 Event Tree에 기반을 둔 피해영향범위 분석까지 이어지는 시스템이다. 상당히 많은 수식과 알고리즘이 복잡적으로 구현되고, 서로 연계되었다. 이러한 연계성 덕분에 계산 모듈에 대한 개별적인 검증도 필요하지만, 연계된 전체 시스템에 대한 검증도 필수적으로 요구된다. 현재까지 각각의 모듈에 대한 계산 알고리즘은 다양한 예제의 적용을 통해 상당히 많은 검증이 진행되어 왔지만, 전체 시스템 연계적인 면에서의 검증은 아직 계속 진행되고 있다.

상평형분석 모듈도 약점이 존재한다. Peng-robins, SRK를 포함한 3차 상태방정식만 적용되었기 때문에 기체상에 대한 정확도는 확보되었지만, wilson, UNIQUAC 등 활성화계수 계산 함수가 내장되어 있지 않기 때문에, 액상 거동에 대한 계산 정확도가 떨어지는 편이다. 누출분석은 압력변화에 따른 누출량 분석은 가능하지만, 상평형 계산이 함께 연동되지 않기 때문에, 순간 기화량이 순간 누출량보다 많을 경우 정확도가 떨어질 수도 있다. 이러한 약점은 향후 활성화 계수 계산 모듈 도입을 추진하면서 보완해 나갈 예정이다.

확산모듈이나 피해영향범위 분석 모듈 등도 CCPS, TNO 등에서 제시되는 함수와 예제를 계속적으로 분석해 나가면서 보완을 진행해 나가고 있다. Chemical 확산 모델 중 오픈된 알고리즘은 SLAB과 함께 DIGADIS도 많이 사용되고 있다. DIGADIS 또한 향후 채용될 예정이다.

유사 소프트웨어와의 비교 분석도 필수적이다. 동일한 사고 시나리오에 한하여 DNV PHAST와 TNO EFFECTS 계산 결과와의 비교 분석을 통해 차이점을

분석하고, 알고리즘 보완이 진행될 것이다.

개발되는 시스템의 최대 장점은 사용자 인터페이스이다. HTML5 기반의 차세대 웹 기술이 적용하여, 유사 프로그램에 비해 쉽게 구동이 가능하도록 유도 개발되고 있다. 또한, 현재는 데스크톱이나 랩탑에 의한 구동에 최적화 되어 있지만, 향후 반응형 웹 기술 도입을 통해 스마트폰이나 태블릿PC로도 편리하게 구동 가능하도록 인터페이스 시스템을 진화시켜나갈 예정이다.

## 감사의 글

본 연구는 2017년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.(No. 20172210100110, 도시가스 사용시설 스마트 안전관리 장치 및 서비스 플랫폼 기술개발)

## 사용기호

$A$	: the area of the hole
$A_{pool}$	: the area of the pool
$C$	: a constant developed from experimental data
$C_D$	: the discharge coefficient
$C_T$	: the fuel mole fraction concentration in a stoichiometric fuel: air mixture
$D$	: the diameter of the pool
$D_{max}$	: Maximum diameter of the fireball
$d_j$	: the diameter of the jet, that is, the physical diameter of the nozzle
$E$	: the charge combustion energy
$E_{av}$	: Average Emissive Power
$E_m$	: the maximum emissive power of the luminous spots(approximately 140kW/m <sup>2</sup> )
$E_r$	: radiative flux received by the receptor
$E_s$	: the emissive power of smoke (approximately 20kW/m <sup>2</sup> )
$F$	: the molecular weight of feed
$F_p$	: the point view factor
$g_c$	: the gravitational constant
$H$	: the heat flux to the pool
$H_c$	: the net heat of combustion per unit mass
$\Delta H_c$	: the net heat of combustion
$h_L$	: the height of liquid above the hole
$K$	: Kvalue
$k$	: the heat capacity ratio, $C_p/C_v$

$k_g$  : the mass transfer coefficient  
 $L$  : the molecular weight of liquid phase  
 $L_{frame}$  : the length of the visible turbulent flame measured from the break point  
 $L_{heat}$  : the heat of vaporization of the pool  
 $M$  : the molecular weight of the gas, the evaporating material  
 $M_0$  : initial mass of fuel in the fireball  
 $\dot{m}$  : mass flow rate of gas thorough the hole  
 $\dot{m}_{vap}$  : vaporization rate  
 $m_b$  : the mass burning rate  
 $P_0$  : the ambient pressure  
 $P_1$  : the pressure upstream of the hole  
 $P_g$  : the gauge pressure at the top of tank  
 $P_s$  : Side-on overpressure  
 $P^{sat}$  : saturation vapor pressure of the liquid  
 $\Delta P_s$  : Sachs-scaled side-on overpressure  
 $Q_{AF}$  : the volumetric spill rate after flashing  
 $Q_r$  : the total energy rate from the combustion  
 $q_g$  : the heat flux from the ground  
 $R$  : the distance from the charge or radiative fraction of the heat of combustion  
 $R_g$  : the ideal gas constant  
 $\bar{R}$  : the Sachs-scaled distance from the charge  
 $S$  : an experimental parameter(0.12m-1)  
 $T$  : temperature of liquid pool  
 $T_{Fb}$  : the adiabatic flame temperature  
 $T_j$  : jet fluid temperature, respectively  
 $T_L$  : **the temperature of the liquid**  
 $T_s$  : **temperature of the soil**  
 $t$  : the time after the spill  
 $t_{BLEVE}$  : the duration of the fireball  
 $V$  : the molecular weight of vapor phase  
 $\dot{V}_L$  : the volumetric liquid spill rate  
 $x_i$  : i th component mole fraction in liquid phase  
 $\dot{y}_{max}$  : the vertical rate of liquid level  
 $y_i$  : i th component mole fraction in vapor phase  
 $z_i$  : I th component mole fraction of feed  
 $\alpha_s$  : **the thermal diffusivity of the soil**  
 $\beta$  : angle between the pool surface and the vertical axis perpendicular to the ground  
 $r$  : the pool radius

$\eta$  : the fraction of the combustion energy radiated, typically 0.14 to 0.35  
 $\mu$  : viscosity of the liquid  
 $\rho$  : **the liquid density**  
 $\tau_a$  : the atmospheric transmissivity  
 $\varphi_B$  : a chemical property of the mixture

## REFERENCES

- [1] American Petroleum Institute, *Risk-based Inspection Technology, API Recommended Practice 581 2<sup>nd</sup> Edition*, (2008)
- [2] Koos Ham, Alessia Marangon, Prankul Middha et al, "Benchmark exercise on risk assessment methods applied to a virtual hydrogen refuelling station", *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume **36**(3), 2666-2677, (2011)
- [3] Ga-Young Jo, Ik-Mo Lee, Yong-Woo Hwang, Jin-Young Moon, A Study on the Simulation of Damage Distance for Toxic Substances Leakage, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, **18**(4), 599-607, (2017)
- [4] D.C.Thoman, K.R O'Kula, J.C. Laul et al, "Comparison of ALOHA and EPIcode for Safety Analysis Applications", *Journal of Chemical Health and Safety*, **13**(6), 20-33, (2006)
- [5] American Institute of Chemical Engineers, *Guidelines for Consequence Analysis of Chemical Releases*, Center for chemical process safety, ISBN 0-8169-0786-2, (1999)
- [6] Carl L. Yaws, *Yaws' Handbook of Thermodynamic and Physical Properties of Chemical Compounds*, McGraw-Hill, (2003)
- [7] Shah A. A. K., Zainuddin A. M., Haslenda H., Sharifah R. W. A., "Design of green diesel from biofuels using computer aided technique", *Computers and Chemical Engineering*, **41**, 88-92, (2012)
- [8] Louis S., Jeroen V., Joachim D., Jonas G., and Sebastian V., "Alternative Fuels for Spark-Ignition Engines: Mixing Rules for the Laminar Burning Velocity of Gasoline-Alcohol Blends", *American Chemical Society, Energy Fuels*, **26**(8), 4721-4727, (2012)
- [9] Mukund R. Patel and Philip T.Eubank, "Experimental densities and derived thermodynamic properties for carbon dioxide-water mixtures",

- Journal chemical & engineering data*, **33**(2), 185-193, (1988)
- [10] Jean-Noël Jaubert, Romain Privat, "Relationship between the binary interaction parameters (kij) of the Peng-Robinson and those of the Soave-Redlich-Kwong equations of state: Application to the definition of the PR2SRK model", *Fluid Phase Equilibria*, **295**(1), 26-37, (2010)
- [11] K. S. Pedersen, P. Thomassen, AA. Fredenslund, "SRK-EOS Calculation for Crude Oils", *Fluid Phase Equilibria*, **14**, 209-218, (1983)
- [12] Hendrick C Van Ness, Michael Abbott, Mark Swihart et al., *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics*, McGraw-Hill Education, Technology & Engineering, ISBN:1259696529, (2017)
- [13] Dong Yuhua, Gao Huilin, Zhou Jing'en et al., "Evaluation of gas release rate through holes in pipelines", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* **15**(6), 423-428, (2002)
- [14] Kingsley E. Abhulimen, Alfred A. Susu, "Liquid pipeline leak detection system: model development and numerical simulation", *Chemical Engineering Journal*, **97**(1), 47-67, (2004)
- [15] C.L. Hollingshead, M.C. Johnson, S.L. Barfuss, "Discharge coefficient performance of Venturi, standard concentric orifice plate, V-cone and wedge flow meters at low Reynolds numbers", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **78**(3-4), 559-566, (2011)
- [16] TNO(The Netherlands Organization of Applied Scientific Research), *Methods for the calculation of physical effects - due to releases of hazardous materials(liquid and gases 3<sup>rd</sup> edition*, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, (2005)
- [17] Zhang Miao, Song Wenhua, Wang Ji et al., "Accident consequences simulation analysis of pool fire in fire dike", *International Symposium on Safety Science and Technology(ISSST)*, *Procedia Engineering* **84**, 565-577, (2014)
- [18] Renato Benintendi, *Process Safety Calculation*, ELSEVIER, Book Aid International, ISBN: 9780081012284, (2018)
- [19] Donald L. Ermak, *User's Manual for SLAB: An atmospheric dispersion model for denser-than-air releases*, Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-MA-105607, (1990)
- [20] Morgan, D.L. Jr., Morris, L.K., Ermak, D.L., *SLAB: a time-dependent computer model for the dispersion of heavy gases released in the atmosphere*, Lawrence Livermore National Lab., CA (USA), (1983)
- [21] Eivind Netland Ekerold, "Interpretation of geometrical effects in consequence modelling. Comparison study between the commercial consequence assessment tools FLACS and PHAST for flammable gas dispersion", *Department of Physics and Technology*, University of Bergen, Bergen Norway, (2014)
- [22] Robin Pitblado, John Baik, Vijay Raghunathan, "LNG decision making approaches compared", *Journal of Hazardous Materials* **130**(1-2), 148-154, (2006)
- [23] R. Pula, F.I.Khan, B. Veitch et al., "A Grid Based Approach For Fire and Explosion Consequence Analysis", *Process Safety and Environmental Protection*, **84**(2), 79-91, (2006)
- [24] A. M. Birk, "Hazards from propane BLEVEs: An update and proposal for emergency responders", *J. Loss Prev. Process Ind.*, **9**(2), 173-181, (1996)
- [25] Behrouz Hemmatian, Eulàlia Planas, Joaquim Casal, "Fire as a primary event of accident domino sequences: The case of BLEVE", *Reliability Engineering and System Safety*, **139**, 141-148, (2015)
- [26] "View Factor" Definition, *WIKIPEDIA*, [https://en.wikipedia.org/wiki/View\\_factor](https://en.wikipedia.org/wiki/View_factor), last edited on (2019)
- [27] Biao Sun, Kaihua Guo, Vishnu K. Pareek, "Computational fluid dynamics simulation of LNG pool fire radiation for hazard analysis", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* **29**, 92-102, (2014)
- [28] Muhammad Masum Jujuly, Aziz Rahman, Salim Ahmed et al., "LNG pool fire simulation for domino effect analysis", *Reliability Engineering and System Safety*, **143**, 19-29, (2015)
- [29] P. J. Rew and W. G. Hulbert, *Development of Pool Fire Thermal Radiation Model*, W S Atkins Safety and Reliability, Woodcote Grove, Ashley, Epsom, Surrey KT18 5BW, RoadHSE Contract Research Report No. 96/1996, (1996)

- [30] A. Palacios, M. Munoz, R.M. Darbra at el, "Thermal Radiation from Vertical Jet Fires", *Fire Safety Journal*, **51**, 93-101, (2012)
- [31] Quentin A. B., Ming J.T., Ephraim A. S. at el, "Vapor Cloud Explosion Analysis", *Process Safety Process*, **15**(2), <https://doi.org/10.1002/prs.680150211>, (1996)
- [32] Sengho Jung, "Facility siting and plant layout optimization for chemical process safety", *Kore J. Chem. Eng.*, **33**, 1-7, (2016)
- [33] J.M Tseng, T.S. Su, C.Y.Kuo, "Consequence evaluation of toxic chemical releases by ALOHA", *Procedia Engineering*, **45**, 384-389, (2012)
- [34] EIGA IGC Doc 75/07/E, "Determination of Safety Distances", *European Industrial Gases Association Aisbl*, <http://www.eiga.org>, (2007)
- [35] EPA 745-B-19-019, "Toxic Release Inventory - Guidance for Reporting the Polycyclic Aromatic Compounds Category", *United States Environmental Protection Agency*, (2019 revised)
- [36] Nima Khakzad, Faisal Khan, Paul Amyotte, "Dynamic risk analysis using bow-tie approach", *Reliability Engineering and System Safety*, **104**, 36-44, (2012)
- [37] Hyun Lock Choo, Sanghwan Oh, Jonghun Jung at el, "The Behavior-Based Analysis Techniques for HTML5 Malicious Features", *International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing (IMIS)*, <https://doi.org/10.1109/IMIS.2015.67>, (2015)
- [38] Luc Patiny, Alain Borel, "ChemCalc: A Building Block for Tomorrow's Chemical Infrastructure", *Journal of Chemical Information and Modeling*, **53**(5), 1223-1228, (2013)