

본질적인 안전 설계를 고려한 공정 설비의 배치에 관한 연구

Study on the Layout of Process Facilities considering Inherent Safety Design

김 영 훈* · 소 원* · 윤 인 섭*
Young-hun Kim* · Won So* · En-Sup Yoon*

초 록

최근 들어 안전관리의 패러다임은 사후분석에서 사전예방으로 바뀌고 있다. 이러한 추세에 맞추어 본질적인 안전관리에 대한 관심이 늘어나고 있다. 공정에 본질적인 안전을 추구하는 방법은 크게 5가지로 나누어 질 수 있으며, 공정의 배치를 통해서 사고를 영향을 최소화하는 방법은 공정의 설계단계에서 적용할 수 있는 좋은 방법이다. 본 연구에서는 공정의 설비가 가지는 위험성을 기반으로 안전거리에 대한 지침을 제시하고 있다. 사고결과와 사고발생빈도를 기반으로 개인적 위험성(Individual Risk: IR)을 계산하였으며, 계산된 값을 기반으로 최적의 안전거리 계산을 수행할 수 있었다. 계산된 IR과 문헌에서 제시된 안전거리를 바탕으로 작업자가 거주하는 건물과 공정경계 까지의 적절한 거리와 설비간의 최적의 거리를 계산하게 된다. Mixed Integer Linear Programming(MILP)를 이용하여 각각설비의 안전거리가 확보된 시설물 배치와 최소 부지 면적 등을 알 수가 있다. 이 연구를 통해 최적화된 부지면적과 파이프라인의 시설물 배치는 물론 공정건설이나 초기 디자인 단계 및 안전성확보측면에서 본질적인 안전을 구현하는데 유용하게 적용될 수 있다.

* 서울대학교 화학생물공학부 자동화연구소

1. 서 론

2005년 3월 BP Products North America의 텍사스 시티 정유공장에서 이성체화 유닛 재가동 준비 중 화재와 폭발이 발생하여 15명이 사망하고 170명이 이상이 부상을 입었다. 사고의 원인은 유닛에서 방출된 탄화수소 증기가 발화이나, 사고로 인한 사상자가 많이 발생한 근본적 원인은 임시트레일러를 사고 현장 부근에 설치하도록 하였기 때문이다. 이처럼 사람이 많이 거주하는 건물이나 지역은 만일에 발생할 수 있는 사고에 대비하여 공정으로부터 어느 정도 이격거리가 필요하다. 하지만 사람들이 작업하는 시설물을 고려한 위험 설비의 배치에 관한 연구는 현재 전무한 상태이다. 본질적인 안전 측면에서 이격거리를 바탕으로 한 적절한 공정의 배치가 사고의 영향을 최소화하기 위해 필요하다. 공정의 안정성확보를 위해 공정의 배치 최적화를 하는데 앞서서 고려되어야 하는 3가지 요소는 아래와 같다.

- ① 장치와 장치간의 거리
- ② 장치와 사람이 거주하는 곳 (컨트롤룸, 작업자거주건물) 간의 거리
- ③ 장치와 공정부지 경계까지의 거리

본 연구에서는 위의 3가지기준을 고려하기위해 첫 번째로 장치간의 거리는 기존의 공정 디자인단계에서 운전조거나 장치종류에 따라 달라지는 설계기준을 적용하였으며, 장치와 컨트롤룸의 거리는 Individual risk의 작업자 허용한도 그리고 장치와 공정 경계까지 거리는 Individual risk의 공공시민 허용한도를 만족하는 안전거리를 적용하였다. 각각의 설계기준과 안전거리 기반의 MILP(mixed integer linear program)모델링을 통하여 안전성이 확보된 최적화된 배치도 및 필요한 부지면적 추산을 본연구의 주목적으로 한다.

2. 이 론

2.1 Individual risk

일반적으로 Risk의 계산은 사고빈도 x 결과로서 표현되나, IR(Individual risk)은 좀 더 다양한 요소를 반영하여 주로 사고빈도와 기상, 지형학적 조건 그리고 피폭을 통한 사망률, 사고에 피폭되는 사람에 관한 계산요소 등으로 구성된다. 완성된 형태의 IR(Individual risk)은 보기 쉽게 도식화 되어있는 결과로 표현될 수 있다. 특히 계산된 IR은 그 값의 범위에 따라서 지형학적 요인과 기상적인 요인을 리스크 등고선(Risk Contour)으로 표현 할 수 있다. 관심지역에서의 individual risk 계산방법은 아래와 같다.

$$IR_{i,k} = \theta_k \cdot p_{loc,i,k} \cdot \sum_{j=1}^N \alpha_j \cdot p_{fat,i,j} \cdot p_{weather,i,j} \cdot p_{direction,i,j} \cdot f_{coj}$$

- θ_k = 가상의 인구집단 k 의 존재시간분율(무차원)
- $p_{loc,i,k}$ = 가상의 인구집단 k 가 관심지역에 존재할 확률(무차원)
- $p_{fat,i,j}$ = i 지역에 존재하는 가상의 인구집단 k 가 사고시나리오 j 에 의하여 사망하게 될 확률(무차원)
- $p_{weather,i,j}$ = 사고시나리오 j 가 발생하기 위한 기상확률(무차원)
- $p_{direction,i,j}$ = 사고시나리오 j 가 i 지역에 영향을 미치게 될 확률(무차원)
- f_{eoj} = 사고시나리오 j 가 일어날 빈도(/yr)
- α_j = j 라는 사고시나리오가 사고이력에서 차지하는 비율

individual risk을 계산하기 위해서는 사고영향 및 빈도에 대한 평가가 선행되어야 한다. 사고영향 및 빈도계산을 위한 위험성 평가모델을 요약하면 표1. 과 같이 나타낼 수 있다.

표1. 정량적 위험성평가의 종류 및 구분

종류	구분	비고
사고빈도 평가	FTA(결함수목분석)	장치이상(고장률)이나 운전자의 실수로부터 발생하는 잠재적인 사고원인으로부터 사고가 발생하는 빈도를 평가하는 연역적 기법이다.
	ETA(사건수목분석)	초기사건으로 알려진 특정한 장치의 이상이나 운전자의 실수로부터 발생하는 잠재적인 사고 결과를 평가하는 귀납적 기법이다.
사고영향평가	화재	1. pool fire 2. jet fire 3. flash fire 4. fire ball
	폭발	1. vapor cloud explosion 2. BLEVE (TNO 멀티 에너지, TNT 당량법)
	누출(독성물질)	1. 플룸 모델 2. 퍼프 모델
사망률계산	Probit Model	$Y = a + b \ln V, P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Y-5} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du$ (V:피폭량, Y:확률단위변수, P 확률)

관심지역에서의 각각의 사고시나리오에 따른 총괄적은 Individual risk는 아래와 같은 계산식을 통하여 계산할 수 있다. n개의 사고시나리오에 대하여 i지역에서의 총괄 Individual risk계산을 해주면 아래와 같다.

$$IR_{i,total,k} = \sum_{j=1}^n IR_{i,j,k}$$

본 연구에서는 최악의 시나리오(Worst case scenario)를 가정하여 존재확률($p_{loc,i,k}$),

시간분율(Θ_k)을 1로 놓고 M-IR(Modified-Individual risk)을 계산하였으며, 각각의 사고시나리오에 기상조건과 방향성에 독립적으로 작용한다고 가정하였다.

($p_{weather,i,j}=p_{direction,i,j}=1$) M-IR(Modified-Individual risk)의 리스크 허용한도는 크게 2가지 범위로 구분 할 수 있다. 크게 공정 내에서의 운전자에 해당하는 범위와 공정 외의 시민에게 해당되는 범위이다. 이를 구분하면 아래 표2. 와 같이 구분할 수 있다.

표2. 피폭대상에 따른 M-IR 허용한도

종류	M-IR(Modified-Individual risk) 허용한도
운전자(worker)	10 ⁻³
시민(public)	10 ⁻⁴

계산된 M-IR(Modified-Individual risk)은 거리에 따라 값이 달라지며 이를 도식적으로 보여주면 그림 과 같다. 본 연구에서는 운전자에 미칠 수 있는 M-IR(Modified-Individual risk)의 리스크 허용한도를 장치와 사람이 거주하는 곳까지의 거리로 제한조건을 주었으며, 시민에 대한 허용한도를 장치와 공정경계까지의 제한조건으로 적용하였다.



그림 1. Risk Contour

2.2 장치간의 거리

장치간의 배치도 구성에 있어서의 장치간의 거리는 안전성뿐만 아니라 유지보수, 공정의 운전성이 동시에 고려되어야 하며, 파이프와 같은 부수설비가 들어갈 공간을 확

보해야 한다. 장치사이간의 공간 및 이격거리에 대한 연구로는 주로 Prugh (1982), Bausbacher and Hunt(1993), Industrial Risk Insurers (1991), Institut Francais du Petrole등에 의해 제안되어 있으며, 본 연구에서는 Prugh (1982)가 제안한 장치간의 이격거리를 적용하였다. 장치간의 거리에 따른 구분은 크게 2가지로 나뉘어 볼 수 있으며, 각시설별 거리는 표3.에 나타내었다.

- 1) OSBL(Out Side Battery Limit): 부대시설,
주 공정 시설과는 달리 생산에 직접 관여하지는 않으나 주 공정 시설의 운전을 위하여 필요한 Control Room, 저장시설, 입출하 시설, Utility 시설 등의 부대설비를 말한다.
- 2) ISBL(In Side Battery Limit): 주공정 시설
공장의 설비 중 실지로 생산에 관여되는 설비를 말하며 부대시설(Control Room, 저장시설, 입출하 시설, Utility 시설 등)과 구별된다.

표3. 장치간의 거리(Prugh (1982))

ISBL(In Side Battery Limit)		OSBL(Out Side Battery Limit)	
장치명	이격거리(m)	장치명	이격거리(m)
압축기	9.6	냉각탑	78
반응기	8.9	플레어스택	60~120
열교환기	7.5/6.6	가압저장탱크(대용량)	74
펌프	8.8	압축기	59
드럼, 베슬	7.7/7.2	환기설비	75
비인화성물질취급	1.7	보일러	75

2.3 MILP 모델링

혼합정수 선형계획법(MILP)은 선형계획법과 정수계획법을 혼합한 방법으로 주어진 제한조건 내에서 성능지수를 최대 또는 최소로 하는 실수 및 정수조건의 해를 구하는 방법이다. 이 방법은 정수인 조건의 해를 포함하기 때문에 계산의 복잡도가증가하게 되는데, 이를 효과적으로 풀기 위해 분기 한정법(Branch and Bound)을 사용한다. 본 연구에서는 GAMS 에 내장되어 있는 CPLEX Solver를 이용하여 최적화된 해를 찾아내었다. 최적화를 하기 위해서는 각각 설비마다의 좌표구성이 필요하다. 배치도상 설비가 모두 직사각형의 모양을 가지며, 회전이 가능하다고 한다면 장치마다의 방향성 및 모양에 대하여 표현하는 식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$l_i = a_i O_i + b_i (1 - O_i) \quad \forall i = 1, \dots, N$$

$$d_i = a_i + b_i - d_i$$

여기서 O_i 는 장치의 가로세로를 결정하는 이원변수(1 혹은 0을 값으로 가지는 변수)

이다. 만약에 O_i 가 1이면, 장치의 길이 lei 는 a_i 와 같게 되며, 자연스럽게 d_i 의 길이는 b_i 가 된다. 반대로 O_i 가 0이면, 장치의 길이 li 는 b_i 와 같게 되며, 자연스럽게 d_i 의 길이는 a_i 로 결정된다. 장치의 기하학적인 중심은 x,y 이원 좌표계에서 표시하면 x_i,y_i 로 정의한다. 장치마다의 중복을 방지하기 위하여 동일한 높이 혹은 층에 존재하는 장치끼리는 서로 겹치게 되는 것을 방지하는 제한조건이 필요하다. 본 연구에서는 이원변수 $E1_{ij}, E2_{ij}$ 를 적용해준다. 이원변수를 적용한 장치 i 와 j 사이의 제한조건에 관한 식은 Papageorgiou 와 Rotstein 이 제시하였다.

$$\begin{aligned}
 x_i - x_j + M(E1_{ij} + E2_{ij}) &\geq \frac{l_i + l_j}{2} \\
 x_j - x_1 + M(1 - E1_{ij} + E2_{ij}) &\geq \frac{l_i + l_j}{2} \\
 y_i - y_j + M(1 + E1_{ij} - E2_{ij}) &\geq \frac{d_i + d_j}{2} \\
 y_j - y_i + M(2 - E1_{ij} - E2_{ij}) &\geq \frac{d_i + d_j}{2} \\
 \forall i = 1, \dots, N-1, j = i+1, \dots, N
 \end{aligned}$$

여기서 M 은 적절한 최대거리 한도이다. 각각의 장치의 기하학적인 중심을 만족시키기 위한 제한조건은 아래와 같이 표현한다.

$$x_i \geq \frac{l_i}{2} \quad y_i \geq \frac{d_i}{2} \quad \forall i = 1, \dots, N$$

장치위치에 관한 거리의 제한조건을 정의하면 아래 식과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 R_{ij} - L_{ij} &= x_i - x_j \quad A_{ij} - B_{ij} = y_i - y_j \\
 R_{ij} &\leq M \cdot W_{ij}^x \quad L_{ij} \leq M \cdot (1 - W_{ij}^x) \\
 A_{ij} &\leq M \cdot W_{ij}^y \quad B_{ij} \leq M \cdot (1 - W_{ij}^y) \\
 \forall i = 1, \dots, N-1, j = i+1, \dots, N
 \end{aligned}$$

이원변수 WX_{ij} 와 WY_{ij} 가 장치 i 와 j 사이의 x, y 좌표상의 거리를 결정하기 위해 적용되었다. 각각의 짝을 이루는 변수 (R_{ij}, L_{ij}) 그리고 (A_{ij}, B_{ij})중에서 한가지 변수는 무조건적으로 0이 되어야 한다. 예를 들어서 만약에 $x_i - x_j > 0$ 이면 WX_{ij} 은 1이 된다. 결과적으로 L_{ij} 는 제한조건에 따라서 0이 되게 된다. 반대로 $x_i - x_j < 0$ 이게 되면 WX_{ij} 은 0의 값을 가지게 되며 조건에 따라서 R_{ij} 는 0이된다. 이것은 y 축 좌표에서도 동일하게 적용된다.

장치간의 모든 연결이 각 장치의 기하학적인 중심 사이에서의 거리가 아닌 각 중심에서의 직교거리로 가정하면 장치 i 와 j 사이의 거리는 아래 식을 통해 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 RD_{ij} &= R_{ij} + L_{ij} + A_{ij} + B_{ij} \\
 (\text{for } i = 1, \dots, N-1, j = i+1, \dots, N)
 \end{aligned}$$

***장치와 장치간의 거리**

Prugh가 제안한 엔지니어링 배치도기준에서 각 장치가 가져야 하는 최소 이격거리

를 Ed_i 로 놓으면 장치간의 상호간의 거리는 아래와 같은 조건을 만족하여야 한다.

$$R_{ij} + L_{ij} \geq Ed_i + Ed_j + \left(\frac{l_i + l_j}{2}\right)$$

$$A_{ij} + B_{ij} \geq Ed_i + Ed_j + \left(\frac{d_i + d_j}{2}\right)$$

$$\forall i = 1, \dots, N \quad j = i + 1, \dots, N - 1$$

***장치와 사람(작업자)이 거주하는 곳 (컨트롤룸, 작업자거주건물) 간의 거리**

M-IR(Modified-Individual risk)의 계산을 통해 나온 거리는 각 장치마다 고유의 값을 가지게 된다. M-IR(Modified-Individual risk)의 경우에는 각각의 장치가 장치*i*와 *j*의 중심간의 거리에 리스크 경계조건을 적용하여 수식화 하면 각 장치로부터 컨트롤룸 이나 작업자 거주건물간의 거리는 아래 식을 만족하여야만 한다.

$$R_{ij} + L_{ij} \geq Rd_i + Rd_j + \left(\frac{l_i + l_j}{2}\right)$$

$$A_{ij} + B_{ij} \geq Rd_i + Rd_j + \left(\frac{d_i + d_j}{2}\right)$$

$i = controlroom (workerresidence area) (1 \leq i \leq N)$
 $j = 1, \dots, N (i를 제외한 나머지 장치)$

*** 장치와 공정부지 경계까지의 거리**

가로길이를 l_{total} 세로길이를 d_{total} 로 가지는 공정부지를 직사각형으로 가정하면 가장 큰값을 가지는 x, y 좌표 값으로부터 장치간의 거리는 M-IR(Modified-Individual risk)의 시민(public)피폭 허용한도조건을 만족하여야 한다.

x, y 좌표값의 최대와 최소값으로부터(공정중심으로 부터의 거리가 리스크 경계조건을 만족하기 위해서는 아래와 같은 식이 필요하다.

$$x_h - x_l = l_{total}, \quad y_h - y_l = d_{total}$$

$$x_i - x_l \geq RD_{public, i} + \frac{l_i}{2}$$

$$x_h - x_i \geq RD_{public, i} + \frac{l_i}{2}$$

$$y_i - y_l \geq RD_{public, i} + \frac{d_i}{2}$$

$$y_h - y_i \geq RD_{public, i} + \frac{d_i}{2}$$

$$\forall i = 1, \dots, N$$

*** 목적함수 설정**

공정에서의 안전거리가 확보된 상태에서 공정배치의 비용을 최소화하기 위해서 본 연구에서는 파이프라인비용과 부지면적 비용의 최소화를 도모하였다. 이를 수식화 하면 아래와 같다.

$$\min \sum_{i=1} \sum_{j \neq i} [C_{ij}RD_{ij} \cdot C_{\pi pipeline} + L_{cost} \cdot A_{area}]$$

위식에서 부지면적의 경우에는 비선형성이 존재하므로 MILP로 풀기 위해서는 부지면적의 k 개의 후보군을 주는 형식으로 수식을 바꿔주어야 한다. 이원변수 Qk를 적용하면 목적함수는 아래와 같이 달라질 수 있다.

$$\min \sum_{i=1} \sum_{j \neq i} [C_{ij}RD_{ij} \cdot C_{\pi pipeline} + L_{cost} \cdot \sum_{k=1}^N AR_k \cdot Q_k]$$

$$A_{area} = \sum_{k=1}^N AR_k \cdot Q_k \quad \sum_{k=1}^N Q_k = 1$$

위의 목적함수를 풀면 안전성이 확보된 최소비용의 공정 배치도를 얻을 수 있다.

3. 연구수행 및 모델링

3.1 알고리즘

본 연구수행에 있어서는 해당공정의 사고사례분석과 적절한 사고 시나리오 선정과 더불어 사고영향평가의 모델이 필요하다. 모델을 바탕으로 한 사고영향평가모델과 사고빈도 계산을 통하여 리스크 경계조건을 파악한다. 계산된 리스크 경계조건을 제한조건으로 설정하며, 이를 절차화하면 아래와 같은 순서로 평가되며, 이를 간단히 도식화하면 그림2. 와 같다.

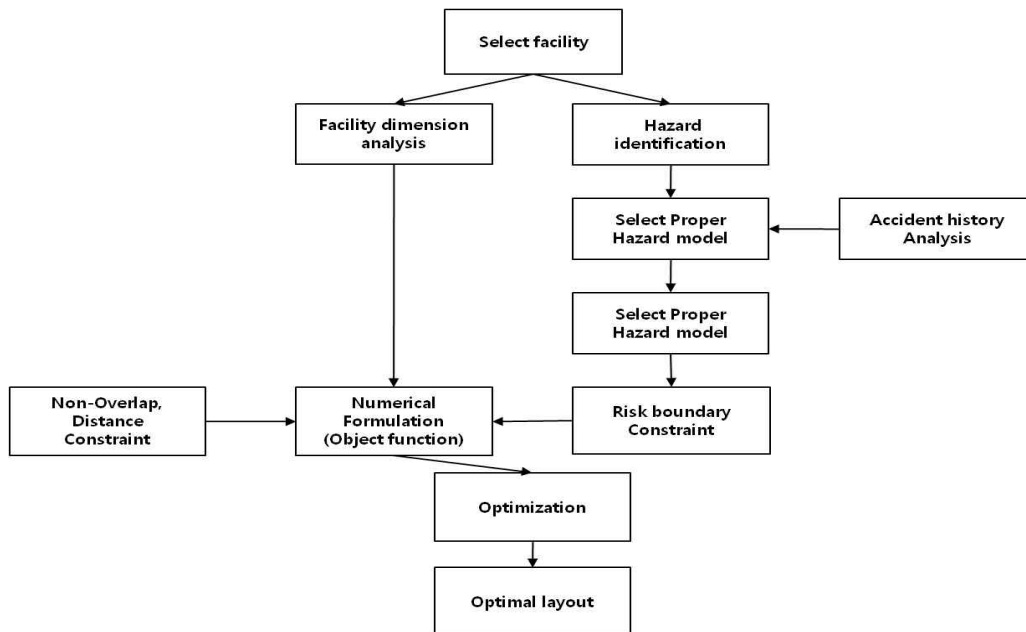


그림2. 배치도 구성 알고리즘

1) 공정설비 파악

공정에서 Risk 경계조건 파악을 위한 공정설비를 결정하며, 공정운전정보 및 장치 크기분석.

2) 공정의 위험성분석

공정에서 발생할 수 있는 사고 시나리오를 파악한다. (화재, 폭발)

3) 사고사례분석

사고이력을 바탕으로 적절한 위험성 평가 모델을 찾는다. 계산된 위험성평가모델을 바탕으로 인명피해를 유발 할 수 있는 피폭인자를 확인하고, 계산된 피폭인자를 사고결과 분석에 반영한다. 사고이력에서 각각의 사고종류별 비율을 분석하여 리스크 계산에서 가중치로 반영한다. 동시에 공정특성에 맞는 적절한 누출모델을 선정하여 연소하한농도를 계산한다.

4) 사고빈도, 사고결과 분석**① 사고빈도분석**

위험성분석을 바탕으로 한 사고시나리오를 바탕으로 정상사상(Top event)을 결정하여, 결함수목분석(Fault Tree Analysis)을 실시하여, 공정정보를 기반으로 정상사상에 기반이 되는 초기사건과 요인을 분석하여 사고빈도를 계산한다.

② 사고결과 분석

사고이력을 바탕으로 계산된 사고피폭인자를 기반으로 프로빗 분석을 통하여 사망률을 계산한다.

5) M-IR(Modified-Individual risk) 계산 및 LFL 분석

계산된 사고빈도와 사망률을 바탕으로 M-IR(Modified-Individual risk)을 계산한다. 계산된 M-IR값은 거리에 따라 변하며, 계산된 M-IR값의 IR(Individual risk) 허용한도에 만족하는 거리를 구한다.

6) 거리 경계조건 결정

M-IR(Modified-Individual risk)의 허용한도 만족거리를 안전거리 경계조건으로 결정하고, 장치간의 최소이격거리를 설계기준을 참조하여 지정해준다.

7) MILP 모델링 및 최적화

계산된 M-IR(Modified-Individual risk)의 허용한도와 설계조건을 거리의 제한조건으로 지정한다. (2D로 구성)

8) 목적함수 구성

제한조건으로 리스크 허용한도를 만족하는 상태에서 부지면적에 따른 비용과 장치간의 연결비용을 최소화 하기위한 목적함수를 구성한다.

9) 최적화된 배치 구성

목적함수를 기반으로 안전성이 확보된 최적화된 배치도를 얻을 수 있다.

3.2 사례적용*** DME-충전 공정**

본 연구에서는 실제 5ton규모 DME-LPG 혼합연료 충전시설의 공정자료를 바탕으로 가상의 DME 충전시설을 가정하여 안전거리분석을 진행하였다. DME 충전소는 크게 디스펜서, 콤프레샤, 펌프, 탱크 네 가지 부분으로 나뉘어서 살펴볼 수 있다. 각각 설비가 가지는 크기 및 연결경로와 파이프라인 비용은 표와 같다. 부지면적은

표4. DME 충전 공정정보

장치번호	장치명	가로 길이(m)	세로 길이(m)	연결	파이프라인비용 (104KRW/m)	장치간의 최소이격거리(m)
1	Tank	1.8	2.6	(1,2)	1.5	7.7
2	Pump	0.8	0.6	(2,4)	1.5	8.8
3	Compressor	0.8	0.6	(3,1)	1.5	9.6
4	Dispenser	0.83	0.43			16
5	Control room	15	20			none

(* 부지비용 = 1512500 KRW/m²)

3.3 결과

* DME 충전 공정 사고사례 분석 및 위험성 평가

사고이력상 DME 충전공정에서 일어나는 사고는 크게 3가지로 분류로 Flash fire, BLEVE(fire ball), VCE(Vapor cloud explosion)이다. 충전공정에서 자주 일어나는 사고시나리오에 따른 Individual risk를 장치별로 계산하면 표 5와 같다.

표5. M-IR 의 장치별 허용한도 거리

장치명	worker		public	
	거리(m)	IR	거리(m)	IR
Tank	18	0.00075	44	0.000085
Dispenser	16	0.00098	33	0.000075
Pump	8	0.00088	13	0.000091
Compressor	30	0.00087	37	0.00075

장치와 장치간의 거리, 장치와 사람이 거주하는 곳 (컨트롤룸, 작업자거주건물) 간의 거리, 장치와 공정부지 경계까지의 거리가 확보된 상태에서 GAMS의 CPLEX solver를 이용하여 MILP로 구성된 목적함수를 풀면 아래와 같은 충전공정 배치도를 얻을 수 있다. <그림3. 참조>

충전 공정에 필요한 부지면적은 약 5천 평 정도(4726.5625평) 인걸 확인 할 수 있다.

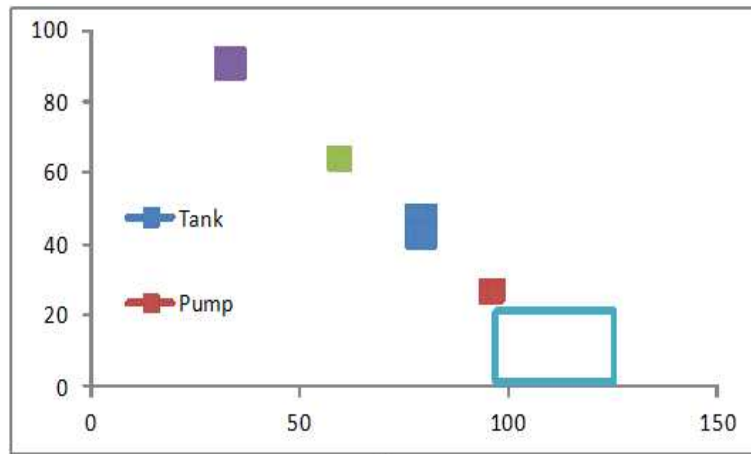


그림 3. 최적화된 충전공정 배치도

4. 결 론

엔지니어링 설계기준과 사고이력에 기초한 사고시나리오에 따른 통합된 리스크 분석을 통하여, 이격거리산출근거를 확보하였다. 리스크 분석은 결과적 분석(CA)과 작동실패를 고려한 individual risk계산을 통하여 risk contour를 알 수 있었으며, 리스크 허용한도를 만족하는 작업자 건물과 장치간의 안전거리를 알 수 있었다. 또한 공정경계로부터 장치가 얼마만큼 떨어져야 된다는 지표를 얻을 수 있었다. 계산된 장치간의 이격거리를 바탕으로 부지비용과 파이프라인 비용이 최소화된 배치도를 구성 할 수 있었다. 구성된 배치도는 공정초기 디자인 및 방호설비 설치에 있어서 좋은 지표가 될 수 있다. 본 연구의 내용에서 정확한 사고빈도가 기반인 individual risk 를 계산하기위해서는 HAZOP STUDY 기반의 FTA 분석과 보다 풍부한 설비 고장률에 대한 정보와, 사고이력에 대한 상세한 분석이 동시에 요구되며, 이를 충족할 경우 공정 배치도의 안전신뢰도는 더 높아질 것으로 예상된다.

5. 참 고 문 헌

- [1] AnnaMari Heikkilä Inherent safety in process plant design An indexbased approach V T T 1999
- [2] Seungho Jung An approach for risk reduction (methodology) based on optimizing
- [3] the facility layout and siting in toxic gas release scenarios Loss Prevantion 2010
- [4] Christian Díaz-Ovalle An approach to solve the facility layout problem based on the worst-case scenario Loss Prevantion 2010
- [5] D. I. PATSIATZIS, AN MILP APPROACH TO SAFE PROCESS PLANT LAYOUT IChem 2004

- [6] Flavio D. An MINLP Approach for Safe Process Plant Layout Ind. Eng. Chem 1996
- [7] CCPS Guidelines for Hazard Evaluation Procedure 3rd p142~157 WILEY (2008)
- [8] Daniel A. Crowl, Joseph F. Louvar Chemical process safety 2nd p225~283 Prentice Hall (2002)
- [9] Hans K Fauske Flashing Flows or: Some Pratical Guidelines for Emergency Releases Plant/Operation Progress (1985)
- [10] A.J.C.M Matthijsen E.S. Kooi Safety distance for hydrogen filling station Loss Prevantion 2006
- [11] Y. D. Jo, B.J.Ahn Analysis of hazard areas associated with high-pressure natural-gas pipelines Loss Prevantion 2002
- [12] A. R. Franks, T. Maddison A Simplified method for the estimation of individual risk IChem 2006