

수학적 모델과 폭발사고 모델링을 통한 산화에틸렌 공정의 설비 배치 최적화에 관한 연구

차상훈* · 이창준**†

Study for the Plant Layout Optimization for the Ethylene Oxide Process based on Mathematical and Explosion Modeling

Sanghoon Cha* · Chang Jun Lee**†

†Corresponding Author

Chang Jun Lee

Tel : +82-51-629-6465

E-mail : changjunlee@pknu.ac.kr

Received : June 24, 2019

Revised : August 30, 2019

Accepted : November 7, 2019

Abstract : In most plant layout optimization researches, MILP(Mixed Integer Linear Programming) problems, in which the objective function includes the costs of pipelines connecting process equipment and cost associated with safety issues, have been employed. Based on these MILP problems, various optimization solvers have been applied to investigate the optimal solutions. To consider safety issues on the objective function of MILP problems together, the accurate information about the impact and the frequency of potential accidents in a plant should be required to evaluate the safety issues. However, it is really impossible to obtain accurate information about potential accidents and this limitation may reduce the reliability of a plant layout problem. Moreover, in real industries such as plant engineering companies, the plant layout is previously fixed and the considerations of various safety instruments and systems have been performed to guarantee the plant safety. To reflect these situations, the two step optimization problems have been designed in this study. The first MILP model aims to minimize the costs of pipelines and the land size as complying sufficient spaces for the maintenance and safety. After the plant layout is determined by the first MILP model, the optimal locations of blast walls have been investigated to maximize the mitigation impacts of blast walls. The particle swarm optimization technique, which is one of the representative sampling approaches, is employed throughout the consideration of the characteristics of MILP models in this study. The ethylene oxide plant is tested to verify the efficacy of the proposed model.

Key Words : plant layout optimization, particle swarm optimization, mixed integer linear programming, ethylene oxide plant

Copyright©2020 by The Korean Society of Safety All right reserved.

1. 서론

21세기에 들어 화학공정은 전통적인 정유 공정 이외에도 나노, 무기소재, 정밀 유기화학, 전기화학 등 다양한 형태의 공정들이 개발, 운영되고 있으며 이에 따라 공정도 매우 복잡해지고 있다¹⁾. 또한, 기존의 육상 플랜트 이외에도 가스 및 정유 채굴을 위해 해상에서도 플랜트 건설이 활발히 이루어지고 있다. 일반적으로

공정을 건설하기 위해서는 원료의 다양한 반응 및 분리 공정, 최종 생성물을 고려하여 전체적인 공정의 흐름 및 특성에 맞는 공정 설비의 선정, 운전조건 등에 대한 설계, 즉, 피드 설계가 먼저 진행되어야 한다. 그 다음에는 어떠한 형태로 다양한 공정 설비를 배치할지 결정해야 하며, 이 문제는 전문적인 지식과 창의력을 요구하는 매우 어려운 문제이며, 전체 공정의 투자비에 큰 영향을 미치는 큰 요소 중 하나이다¹⁻⁴⁾.

*부경대학교 안전공학과 석사과정 (Department of Safety Engineering, Pukyong National University)

**부경대학교 안전공학과 교수 (Department of Safety Engineering, Pukyong National University)

최근에 많은 연구자가 공정의 배치 문제를 좀 더 논리적으로 접근하기 위해 다양한 수학적 모델링에 기반을 둔 MILP(Mixed Integer Linear Programming) 문제를 이용하여 연구를 진행하고 있다^{2,4)}. 일반적인 MILP 문제에서는 유지·보수 공간, 장치 간 최소 이격거리, 안전과 관련된 다양한 조건 등이 제약조건으로 설정하고, 공정의 장치들을 연결하는 파이프의 길이, 부지 비용 등을 목적함수로 설정한다. 모델에 가장 적합한 최적화 기법을 이용하여 목적함수를 최소로 하는 플랜트 배치를 탐색하게 된다.

또한, 목적함수 내에 파이프 길이뿐만 아니라 안전과 관련된 요소를 비용으로 산출하여 단 한 개의 목적함수를 이용하여 플랜트 배치 비용을 최소화하면서 동시에 안전성을 극대화하려는 연구들이 활발히 진행되고 있다. Pentecado 등(1996)⁵⁾은 방호 장치를 비용으로 계산하여 목적함수에 결합한 방법론을 개발하였다. Castell 등(1998)⁶⁾은 안전 관련된 Mond Index를 도입하여 유전알고리즘으로 배치의 최적화를 탐색하는 방법론을 개발하였다. Patsiatzis 등(2004)⁷⁾은 화재 및 폭발 지수를 산정하기 위해 Dow Index를 도입하여 배치의 최적화를 수행하였다. Han 등(2013)⁸⁾은 작업자의 근무환경 관련 지수를 목적함수에 포함하여, 파이프 설치 길이를 최소화하면서 작업자의 위험도를 최소로 하는 연구를 수행하였다. 또한, 공정의 다양한 안전 관련 제약조건 및 운전조건을 고려하여 PSO를 이용한 연구도 활발히 이루어지고 있다^{1,4,9)}.

앞서 언급한 연구들은 목적함수 내에 안전과 관련된 잠재적인 손실 비용, 방호장치를 포함하는 경우 예상되는 사고 저감 비용 등이 포함되어 있으며, 단 한 번의 최적화 탐색을 통해 파이프의 설치 비용도 최소화하면서 사고로 인한 잠재적인 손실도 동시에 최소화하는 플랜트의 배치를 도출하고자 하였다. 하지만, 안전과 관련된 요인을 수학적 모델로 표현하는 경우, 많은 불확실한 파라미터가 존재한다. 예를 들어, 공정 내에 잠재적인 사고를 이용하여 최적화 배치를 수행하는 경우, 같은 종류의 사고가 발생하더라도 사고의 규모가 매우 다양하며, 사고의 규모에 따른 사고 발생 확률도 달라진다. 또한, 실제 사고 발생 확률을 도출하기 위해서는 실제 사고 데이터를 이용하여 그 값을 추론해야 하지만, 실제 사고는 매우 드물게 발생하기 때문에 정확한 통계치를 얻는 것은 불가능하다. 따라서, 기존 연구들에서 제시한 사고 발생 확률은 사고 발생 건수로 인해 실제 확률과는 큰 차이가 날 수 있다.

또한, 방호 혹은 안전 설비의 경우, 설비의 설치를 통해 어느 정도로 사고 발생 빈도가 감소하는지, 그리

고 실제 사고가 발생하는 경우 사고의 피해를 얼마나 완화하는가에 대한 정밀한 모델링이나 실험치도 매우 부족하다. 따라서, 목적함수에 안전과 관련된 비용을 추가하는 것은 불확실한 요인이 많기 때문에 매우 어려운 일이다.

게다가, 엔지니어링 업체의 실제 프로젝트를 살펴보면, 일단 기존의 경험이나 노하우를 활용하여 공정의 배치를 결정한 후, 플랜트의 안전성을 확보하기 위해 다양한 안전성 평가 분석기법을 활용하여 안전 관련 하드웨어나 소프트웨어 설비를 추가로 설치하고 있다.

이러한 현실을 고려하여, 본 연구에서는 두 가지 단계로 공정 배치 최적화를 수행하고자 한다. 첫 번째 단계에서는 장치의 유지, 보수에 필요한 공간과 장치 간의 이격거리를 제약조건으로 설정하고, 장치를 연결하는 파이프의 비용과 부지의 비용의 합을 목적함수로 설정하여 MILP 문제로 구성하고, 그 비용을 최소로 하는 공정 배치의 최적화를 수행하고자 한다. 두 번째 단계에서는 폭발사고 모델링을 통해 가장 대표적인 안전 설비 중 하나인 방폭벽 배치의 최적화를 수행하고자 한다. 두 단계 모두 경험적인 최적화 방법론인 PSO(Particle Swarm Optimization)를 이용하여 최적해를 탐색하였다.

2장에서는 공정 배치 문제의 수학적 모델을 소개하고 3장에서는 방폭벽의 배치 최적화를 위한 모델링을 소개하였다. 4장에서는 본 연구에서 사용한 최적화 기법인 PSO에 관해 기술하였다. 그리고 5장에서는 Ethylene Oxide(EO) 공정을 이용하여 본 연구에서 제안한 최적화 모델을 이용하여 도출한 최적화 결과를 설명하고자 한다.

2. 파이프 비용을 이용한 배치 최적화 문제 정의

플랜트 설비 배치 최적화 문제를 풀기 위해서는 사전에 설비의 종류와 크기, 비용, 공정 흐름도(Process Flow Diagram), 설비별 이격거리 등 각 설비와 관련된 많은 정보의 이용이 가능해야 한다^{1,3)}. 2장에서 소개되는 기본적인 식들은 Patsiatzis 등(2004)⁷⁾에 의해서 개발한 식을 기반으로 개선된 식이며, 위에서 언급한 설비와 관련된 정보의 이용이 가능해야 사용할 수 있는 식이다. 또한, 다층 구조의 플랜트 배치 문제와도 관련된 식이다.

설비는 직사각형으로 이루어져 있고, 설비의 가로와 세로의 폭이 다른 경우, 부지의 x 축 방향과 y 축 방향에 따라 설비가 회전함에 따라 가로와 세로 폭이 달라질 수 있다¹⁾. 장치의 가로와 세로의 길이는 아래의 방정식에 따라 결정된다.

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

$$d_i = a_i + b_i - l_i \quad \forall i$$

O_i 는 장치 i 의 회전을 결정하는 이진변수(Binary Parameter)이며, 장치의 원래 가로와 세로 방향 폭이 각각 가로 a_i , 세로 b_i 이면, O_i (O_i 는 0 아니면 1임)에 따라 x 축 방향 설비 길이 l_i 와 y 축 방향 설비 길이 d_i 가 결정된다.

플랜트 부지에서 각각의 설비는 서로 겹쳐서는 안 되며, 충분한 유지·보수 공간과 다른 설비와의 안전과 관련된 이격거리를 확보해야 한다. i 의 유지·보수 거리를 ES_i 로 정의하고, 각 설비 간 최소 이격거리는 m 으로 가정하였다. 설비 i 와 j 사이의 이격거리와 유지·보수 공간을 비교해 더 긴 거리를 사용해야 한다. 이를 결정하는 식은 아래와 같다.

$$m - (ES_i + ES_j) = C_{ij} \rightarrow \begin{cases} \text{if } C_{ij} \geq 0, S_{ij} = 1 \\ \text{otherwise, } S_{ij} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

C_{ij} 는 설비의 유지·보수 공간과 이격거리를 서로 비교하는 값이며 이 값이 양수인지 음수인지에 따라 다른 이진변수인 S_{ij} 의 값이 정해진다. 이 값을 이용해 두 거리 중에서 더 긴 거리를 선택하게 되며, 두 설비가 겹치지 않도록 하는 제약조건과 관련된 식은 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$|x_i - x_j| \geq \left(\frac{l_i + l_j}{2} + (ES_i + ES_j) \times (1 - S_{ij}) + m \times S_{ij} \right) \quad (3)$$

$$|y_i - y_j| \geq \left(\frac{d_i + d_j}{2} + (ES_i + ES_j) \times (1 - S_{ij}) + m \times S_{ij} \right)$$

$$\text{for } \forall i = 1, \dots, N-1, \quad \forall j = i+1, \dots, N$$

또한, 플랜트 부지의 x 축 방향과 y 축 방향의 최대 길이를 각각 X_{\max} 와 Y_{\max} 인 경우 각 설비는 충분한 유지·보수 공간을 확보하면서 부지 안에 있어야 한다. 이러한 제약조건은 아래의 식으로 표현할 수 있다.

$$x_i + \frac{l_i}{2} + ES_i \leq X_{\max}, \quad x_i - \frac{l_i}{2} - ES_i \geq 0 \quad (4)$$

$$y_i + \frac{d_i}{2} + ES_i \leq Y_{\max}, \quad y_i - \frac{d_i}{2} - ES_i \geq 0$$

설비 간 연결에 필요한 총 파이프의 길이를 계산한다. 설비 i 의 중심 위치를 x_i, y_i 이고, 설비의 중심 높이

가 z_i 이면, 두 장치, i 와 j 간에 연결해야 할 총 파이프의 길이 T_{ij} 는 다음의 식을 통해 계산할 수 있다.

$$X_{ij} = |x_i - x_j|, \quad Y_{ij} = |y_i - y_j|, \quad Z_{ij} = |z_i - z_j| \quad (5)$$

$$T_{ij} = X_{ij} + Y_{ij} + Z_{ij}$$

$$\text{for } \forall i = 1, \dots, N-1, \quad \forall j = i+1, \dots, N$$

목적함수는 기존 연구와 같게 총 파이프 길이 및 펌프에 드는 비용, 그리고 부지 비용의 합으로 설정하였다³⁾. 목적함수에서 단위 길이 당 파이프 가격은 CC_{ij} , 수직 방향의 유체 이송비용은 CV_{ij} , 수평 방향의 유체 이송비용은 CH_{ij} 이다. L 은 단위면적당 부지의 가격이다. 함수 $p(x_i, y_i)$ 는 벌칙함수로서 식 (3), (4)에서 표현한 제약조건을 만족하지 않는 경우 매우 큰 벌칙을 부과함으로써, 최적화 기법으로 최적해를 찾는 경우 모든 제약조건을 만족하는 최적의 배치를 탐색하도록 하는 역할을 한다. 목적함수를 통해 최적화해야 할 결정변수(Decision Variable)는 장치 한 개에 3개 (O_i, x_i, y_i)이다. 따라서 장치의 개수가 N 개이면 설비 위치와 관련된 결정변수는 $3N$ 이다. 또한, 부지 비용을 최소화하는 최적의 공정 배치를 탐색해야 하므로 추가로 부지의 면적 ($X_{\max} \times Y_{\max}$)도 탐색해야 한다. 따라서 총 결정변수의 개수는 장치의 개수가 N 개이면 $3N+2$ 이다.

$$\text{Min} \left[\sum_{i,j \neq i} (CC_{ij} \times T_{ij} + CV_{ij} \times Z_{ij} + CH_{ij} \times (X_{ij} + Y_{ij}) + p(x_i, y_i)) + L \times X_{\max} \times Y_{\max} \right] \quad (6)$$

3. TNT 당량 모델을 이용한

방폭벽 설치에 따른 목적함수 설계

본 연구에서는 주요 설비 내에 저장된 모든 가연성 물질이 VCE(Vapor Cloud Explosion)을 발생시킨다고 가정하였다. VCE는 가연성 가스가 공기와 혼합하여 증기운을 형성한 후 착화원에 의하여 폭발하는 것을 말한다. BLEVE(Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion)보다 폭발효율이 적으며, 연소 에너지의 약 20%만 폭발파로 전환된다¹⁰⁾. 다양한 연구에서 증기운 폭발사고로 인해 발생하는 과압의 강도는 TNT 폭발과 비교하여 계산할 수 있음을 증명해왔다¹⁰⁾.

폭발 사고시 과압을 예측하는 대표적인 모델로는 TNO multi-energy 모델과 TNT 당량 모델이 있다. 일반적으로, 많은 연구자가 TNO multi-energy 모델이 TNT 당량 모델보다 더 정확하다고 증명해본 바가 있다¹¹⁾.

하지만, TNT 당량 모델도 그 결과가 신뢰할 만하며 TNO multi-energy 모델에 비해 간단하고, 적용하기 쉬운 장점이 있다¹¹⁾. 또한, 본 연구에서 적용해야 할 모델의 경우 기존 경우에서 TNT 당량 모델에 필요한 파라미터들이 이미 알려진 바가 있으므로 본 논문에서는 TNT 당량 모델을 적용하였다.

본 연구에서는 이러한 근거를 바탕으로 TNT 모델을 이용해 주요 설비에서 폭발사고가 났을 때 발생하는 과압을 계산하고자 한다. TNT 당량 모델에서는 먼저 가연성 물질의 양을 아래의 식을 이용하여 TNT의 질량으로 변환한다.

$$W_{TNT} = \frac{\eta \cdot M \cdot E_c}{E_{TNT}} \quad (7)$$

위 식에서 W_{TNT} 는 TNT 상당량 (kg)이며, η 는 폭발 효율, M 은 가연성 물질의 질량 (kg), E_c 는 가연성 물질의 연소열 (kcal/kg), E_{TNT} 는 TNT의 연소열 (1000 kcal/kg)이다. 과압은 환산거리(Z)를 이용하여 계산한다. 여기서 r 은 폭발 발생 지점에서부터 떨어진 실제 관심거리이며, 이 거리를 환산 거리로 변환한 후에 과압을 계산한다¹⁰⁾.

$$Z = \frac{r}{(W_{TNT})^{1/3}} \quad (8)$$

$$P(Z) [kPa] = \exp(0.2518(\log Z)^2 - 2.0225(\log Z) + 5.8095)$$

본 연구에서는 설비 배치가 결정된 후에 방폭벽의 설치에 따른 효과를 평가하는 것이 가장 중요한 목적이다. VCE가 발생하여 과압이 전파될 때, 과압의 강도는 방폭벽의 설치 여부에 영향을 받게 된다. 방폭벽의 완화 효과에 관한 많은 연구가 있지만, 본 연구에서는 Li 등¹¹⁾이 검증한 연구 결과를 이용하였다. 이 연구 결과에서는 스틸로 구성된 방폭벽의 경우 최소 20% 이상 과압이 줄어들음을 확인할 수 있다. 또한, 20 kPa 이상인 과압이 발생하는 경우, 스틸로 이루어진 구조물은 변형되거나 파괴되는 것으로 알려져 있다¹²⁾.

본 연구에서는 20 kPa이하의 과압을 완전히 차단할 수 있는 스틸로 만들어진 방폭벽을 VCE 폭발 가능성이 있는 주요 설비 주변에 설비로부터 2장에서 설명한 유지·보수를 위해 필요한 거리인 ES_i 만큼 떨어진 위치에 설치한다고 가정하였다. 그리고 20 kPa 이상의 과압이 방폭벽을 통과하는 경우 과압이 20% 감소한다

고 가정하였다.

식 (9)에서 설비 i 에서 발생하는 경우, Z_b 는 i 와 방폭벽이 설치된 곳 사이의 환산 거리이며 Z_c 는 설비와 방폭벽 사이의 거리보다 더 긴 거리에 대한 환산거리이다. 방폭벽이 설치되어 있는 경우 방폭벽에 도달하는 과압이 20 kPa 보다 작으면, 방폭벽이 과압을 완벽하게 막는다고 가정하였고, 20 kPa보다 큰 경우는 20% 과압의 감쇄 효과가 있다고 가정하였다. 식 (9)에서 α_i 는 이진변수이며, 설비 i 주변에 방폭벽이 설치되어 있으면 1, 그렇지 않으면 0의 값을 갖게 된다. 이러한 가정을 이용하여 방폭벽 설치 여부를 고려한 과압을 계산한다.

$$Z_b = \frac{ES_i}{W_{TNT,q}^{1/3}}, Z_c = \frac{r_c}{W_{TNT,q}^{1/3}} \quad (9)$$

$$P_b = \exp(0.2518(\log Z_b)^2 - 2.0225(\log Z_b) + 5.8095)$$

$$P^*(Z_c) = P(Z_c), \text{ if } Z_c < Z_b$$

$$P^*(Z_c) = (1 - 0.2 \times \alpha_i) \cdot P(Z_c), \text{ if } P_b \geq 20, Z_b \leq Z_c$$

$$P^*(Z_c) = (1 - \alpha_i) \cdot P(Z_c), \text{ if } P_b \leq 20, Z_b \leq Z_c$$

VCE 폭발로 인한 손실을 산정할 때 대부분 설비가 스틸로 이루어져 있으므로 식 (10)를 이용하여 20 kPa 이상의 과압이 설비에 도달하면 완전히 파괴된다고 가정하였다. 만약 과압이 20 kPa 이하일 때는 과압에 크기에 비례하여 손실이 발생한다고 가정하였다. A_q 는 설비 q 의 가격이며, 최종적으로 설비 i 에서 발생한 VCE로 인해 설비 q 에서 발생하는 손실은 co_{qi} 이다. 아래의 식에서 일단 설비 i 에서 q 까지의 환산 거리를 계산한 후 식 (9)를 이용해 설비 q 지점에서 과압을 계산하여 co_{qi} 를 산정하게 된다.

$$Z_{qi} = \frac{r_{qi}}{W_{TNT,q}^{1/3}} \quad (10)$$

$$co_{qp} = A_p, \text{ if } P^*(Z_{qp}) \geq 20$$

$$co_{qp} = \frac{P^*(Z_{qp})}{20} \times A_p, \text{ if } P^*(Z_{qp}) \leq 20$$

모든 설비마다 방폭벽을 다 설치할 수 없는 투자비의 한계를 고려하기 위해 다음의 식을 이용하였다. 만약에 설치 가능한 방폭벽의 단위 부피당 가격이 B 이

고 설비 i 를 보호하는 데 필요한 방폭벽의 전체 부피가 W_i 이면 전체 방폭벽의 가격은 $\sum_i B \times W_i \times \alpha_i$ 가 된다. 방폭벽에 투자가 가능한 최대 예산이 β 이면, 전체 방폭벽의 가격과 β 의 차이 (q_{wall})를 계산하고 만약에 전체 방폭벽의 가격이 더 높으면 θ_{wall} 의 페널티를 갖게 된다.

여기서, w_{wall} 는 q_{wall} 에 대한 weight parameter이며, 본 연구에서는 매우 큰 값(1×10^8)의 상수로 고정하여, 이 제약조건을 위반하는 경우 매우 큰 벌칙을 부과하여, 궁극적으로 최적화 기법을 이용하여 해를 탐색하는 경우 이 제약조건을 만족하게끔 유도하였다.

$$\sum_q B \times W_q \times \alpha_q - \beta = q_{wall} \quad (11)$$

$$\theta_{wall} = \omega_{wall} \times \max\{0, q_{wall}\}$$

식 (12)는 VCE가 폭발하는 경우를 고려한 목적함수이며, 본 연구에서 최종 목적은 목적함수가 최소값을 갖도록 방폭벽을 설치하는 것이다. 모든 설비가 아닌 주요 설비에만 방폭벽 설치를 고려하기 때문에 식 (12)에서 i 가 고정되어 있다.

$$\min\{(\sum_i \sum_{q \neq i} CO_{qi}) + \theta_{wall}\} \quad (12)$$

for $\forall i = 1, 3, 5, 6$

4. PSO(Particle Swarm Optimization)

2장과 3장에서 설명한 목적함수의 최소값을 갖는 최적해를 탐색하기 위해서 PSO(Particle Swarm Optimization) 기법을 사용하였다. 일반적인 최적화 기법은 목적함수의 미분식을 이용하여 미분식의 값이 0을 갖고 제약조건도 만족하는 결정변수들의 최적해를 탐색한다. 하지만, 본 연구에서는 이진변수인 결정변수도 존재하며, 다양한 공정을 다루는 경우 제약조건도 다양해지므로 일반적인 최적화 기법의 사용이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 함수들의 미분식을 사용하지 않으면서도 결정변수의 최적해 탐색이 가능한 PSO기법을 이용하였다. PSO는 대표적인 경험적 최적화 기법 중 하나이며, 어느 함수에서도 적용이 가능하고, 조절 변수의 개수가 다른 경험적 최적화 기법에 비해 적고 초기값에 민감하지 않기 때문에 적용이 간편하다는 장점이 있다¹³⁾. 기존 우리가 진행해왔던 배치 최적화 관련 연구들에서¹⁻³⁾도 이 기법을 사용했으며, 다양한 제약조건에서도 쉽게 적용할 수 있음을 확인하였다.

하지만, PSO를 포함한 경험적 최적화 기법의 최대

단점은 제시된 최적해가 Global solution이 아니라는 점이다. 이를 극복하기 위해서는 많은 계산을 통해 최대한 Global solution에 근접한 해를 탐색해야 한다.

PSO는 원래 동물 군집의 행동양식을 모사한 방법이며, 각 결정변수가 Iteration마다 그 위치와 속도가 가장 좋은 해의 정보를 바탕으로 업데이트하여 최적의 해 방향으로 이동하게 된다. 그리고, Iteration의 회수가 커질수록 값 결정변수의 조합은 최적의 해로 수렴하게 된다. PSO 알고리즘은 Schwaab 등¹³⁾의 연구를 참고하면 된다.

5. 사례 연구

5.1 Ethylene Oxide 공정

Ethylene Oxide(EO)는 화학산업에서 사용되는 중요한 원료 중 하나이다. Diethylene glycol 및 Triethylene glycol과 같은 Ethylene glycols 합성의 재료 사용되며, 부동액이나 항공유의 첨가물인 Ethylene glycol ethers의 원료이다. 증기는 불안정하여 폭발적으로 분해될 위험성이 높으며, 개방계 증기인 폭발 위험이 높은 대표적인 물질이다¹⁴⁾. Ethylene Oxide는 촉매 존재 하에 Ethylene을 산화시켜 얻어진다. 순수한 Ethylene은 NFPA(National Fire Protection Agency)규정에서 가장 위험한 물질 중 하나로 분류하고 있으며¹⁵⁾, 반응성이 매우 높으며, 가연성, 폭발

Table 1. Facilities information of EO plant³⁾

| Number | Equipment | Width(a_i) [m] | Depth(b_i) [m] | Height(z_i) [m] | Connection |
|--------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|--------------|
| 1 | Reactor | 5.22 | 5.22 | 2.61 | (1,2) |
| 2 | Heat Exchanger | 11.42 | 11.42 | 5.71 | (2,3) |
| 3 | EO Absorber | 7.68 | 7.68 | 3.84 | (3,4) |
| 4 | Heat Exchanger | 8.48 | 8.48 | 4.24 | (4,5) |
| 5 | CO ₂ Absorber | 7.68 | 7.68 | 3.84 | (5,1), (5,6) |
| 6 | Flash drum | 2.6 | 2.6 | 1.3 | (6,7) |
| 7 | Pump | 2.4 | 2.4 | 1.2 | (7,5) |

Table 2. The information of connection and flow cost between facilities³⁾

| Connection | CC _{ij} (\$/m) | CH _{ij} (\$/m) | CV _{ij} (\$/m) |
|------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| (1,2) | 200 | 400 | 4000 |
| (2,3) | 200 | 400 | 4000 |
| (3,4) | 200 | 300 | 3000 |
| (4,5) | 200 | 300 | 3000 |
| (5,1) | 200 | 100 | 1000 |
| (5,6) | 200 | 200 | 2000 |
| (6,7) | 200 | 150 | 1500 |
| (7,5) | 200 | 150 | 500 |

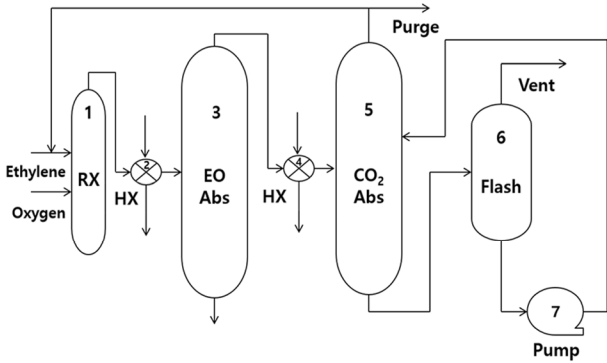


Fig. 1. Process flow diagram of ethylene oxide plant³⁾.

성도 높기 때문에 EO 공정 설계 및 설비의 배치 시 안전에 각별한 신경과 관심을 가져야 한다.

산화에틸렌 취급설비의 안전에 관한 기술지침에 따르면, 반응기, 저장탱크 및 공정 용기에는 압력방출장치를 반드시 설치해야 하며, 배출용량에 따라 안전밸브 혹은 파열판을 설치하게 되어 있다. 또한, 저장탱크 주위에는 자동 살수설비를 설치해야 하며, 폭발위험등급에 따라 방폭전기설비를 설치하도록 규정되어 있다. 기화기의 경우 다른 설비와 15 m 이상의 안전거리를 두게 되어 있지만, 방폭벽을 설치하는 경우 15 (12) 이상의 안전거리를 확보하지 않아도 된다고 규정되어 있다¹⁴⁾.

본 연구에서 이용한 Ethylene Oxide 플랜트는 Park과 Lee³⁾의 연구에서 제시된 공정의 설비를 이용하였다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 총 7개의 설비로 구성되어 있으며, 열교환 장치와 흡수기 각각 2개 및 펌프, 반응기, 플래시 드럼으로 구성되어 있다³⁾. 설비별 정보 및 파이프 정보는 Table 1과 2에서 확인할 수 있다. 단층 구조로서, 각 설비의 이격거리는 4 (12)로 설정하였으며, 작업자의 유지·보수에 필요한 거리(ES)는 장치 길이의 20%로 가정하였다. 이를 통해 두 단계의 최적화를 수행하였다. 또한, 부지의 비용은 1제곱미터 당 300\$로 가정하였다.

5.2 파이프 비용을 이용한 배치 최적화 결과

PSO를 이용하여 2장에서 설명한 파이프 비용을 이용한 배치 최적화 모델에서 목적함수를 최소로 갖는 결정변수의 최적해를 탐색하였다. 본 연구에서는 PSO와 관련된 포함된 파라미터는 Park과 Lee³⁾의 연구에서 제시된 값을 이용했으며, 경험적 최적화 기법의 단점을 극복하기 위해 100,000개의 결정변수 조합을 랜덤으로 생성한 후 AMD 3.7 GHz CPU에서 최대 50번 최적화를 수행하여 가장 좋은 값을 갖는 결정변수의 조합을 최적해로 선택하였다. 최적화 수행과정에서 목적함수 내에 벌칙함수가 제약조건을 위반하는 경우 매번

Table 3. The optimal locations of facilities

| Number | Equipment | x [m] | y [m] |
|--------|--------------------------|-------|-------|
| 1 | Reactor | 20.05 | 6.65 |
| 2 | Heat exchanger | 8.37 | 8.93 |
| 3 | EO Absorber | 8.98 | 22.44 |
| 4 | Heat exchanger | 21.67 | 27.35 |
| 5 | CO ₂ Absorber | 21.78 | 15.96 |
| 6 | Flash drum | 27.26 | 2.68 |
| 7 | Pump | 27.11 | 8.01 |

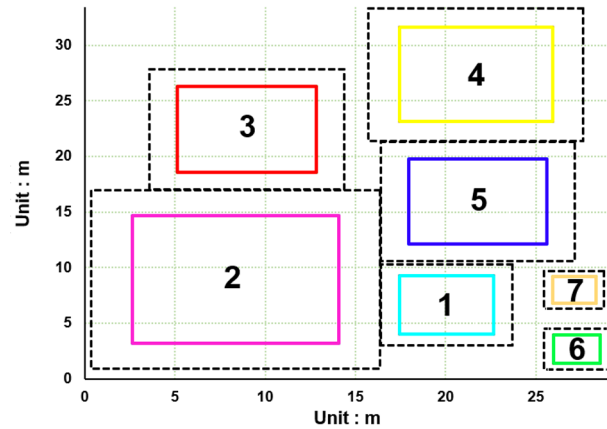


Fig. 2. The optimal layout of ethylene oxide plant.

1.00×10^8 \$의 벌칙을 할당하여, 최적화 과정에서 결정변수의 조합이 모두 제약조건을 만족하도록 하였다. 본 연구에서 설비는 총 7개이며, 부지의 면적도 결정해야 하므로, 최적화를 통해 탐색해야 하는 결정변수의 개수는 총 23개이다.

Table 3은 PSO로 탐색한 최적의 EO 공정의 설비별 중심좌표(x, y)를 보여주고 있다. 이 경우에 목적함수의 최소값은 1.1764×10^5 \$이며, 부지의 면적은 가로(X축 방향)와 세로(Y축 방향)로 각각 29.20 m와 33.44 m이다. Fig. 2는 이를 그림으로 표현한 것이며, 설비간 이격거리와 유지·보수 공간 관련 제약조건(Fig 2에서 점선으로 표시)을 모두 만족함을 확인할 수 있다. 목적함수의 값 중에서 부지 비용은 총 1.1013×10^4 \$이며, 전체 비용 중 9.36%를 차지한다.

5.3 TNT 당량 모델을 이용한 최적 방폭벽 위치 탐색 결과

3장에서 설명한 모델의 목적함수를 이용하여 최적 방폭벽 위치를 탐색하였다. 본 연구에서는, 총 4개의 주요 설비(반응기, 플래시 드럼, 2개의 흡수탑)에 저장된 물질이 모두 기화되어 VCE가 발생한다고 가정하였다. 방폭벽은 설비로부터 유지·보수에 필요한 공간인 ES,만큼 떨어진 위치에 설치한다고 가정하였다. 결

정 변수는 α_i (이진변수)이며, 총 4개 설비에 대해서 고려해야 하므로, 방폭벽 투자비에 대한 제약조건이 없는 경우 총 $15(=2^4-1)$ 의 경우의 수가 존재한다. 경우의 수가 많은 경우에는 PSO를 이용하여 최적화를 수행하여 가장 최적의 값을 도출해야 하지만, 본 연구의 경우에는 그 수가 적기 때문에, 4개의 설비에서 각각 VCE가 발생하는 경우 15가지 경우에 대한 피해 감소 효과를 분석하였다. 방폭벽이 없는 경우 4건의

VCE 발생에 따른 총 설비의 피해액은 1.2247×10^6 \$이다.

Fig. 3은 15가지 방폭벽을 설치하는 경우 예상되는 총 피해액을 보여주고 있으며, Y좌표는 방폭벽이 설치된 설비의 번호(Table 1 참조)를 나타낸다. Fig. 4는 총 설치된 방폭벽의 부피 (모든 방폭벽의 두께는 같다고 가정하였기 때문에 단면적 기준과 동일) 당 감소하는 피해 저감 비용을 보여주고 있으며, 이 분석을 통해 반

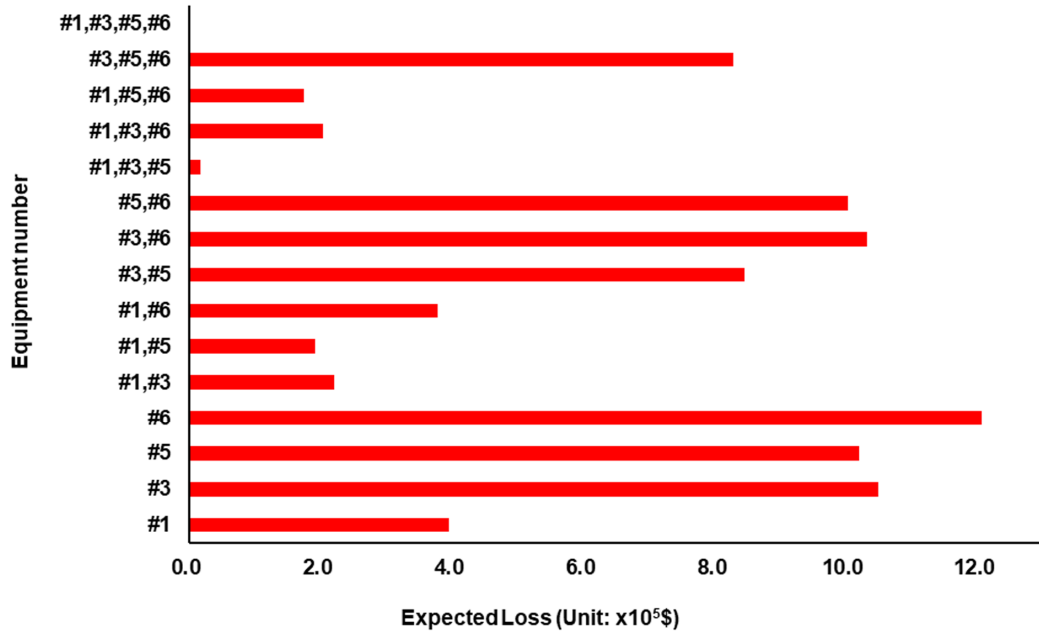


Fig. 3. The expected loss according to the locations of blast walls.

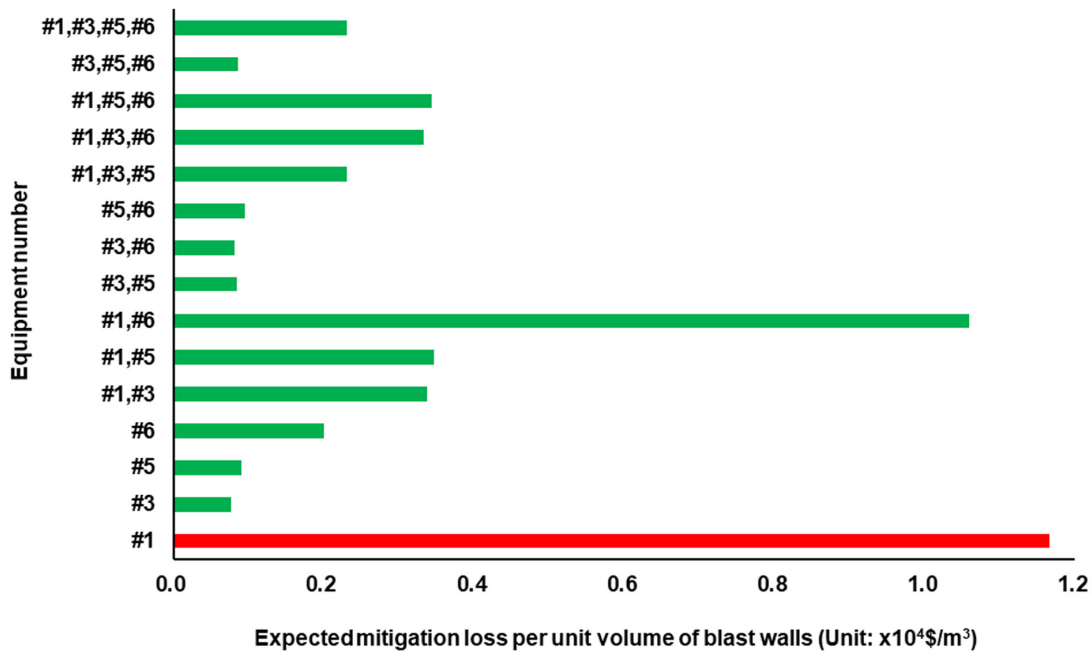


Fig. 4. The expected mitigation costs per unit volume of blast walls.

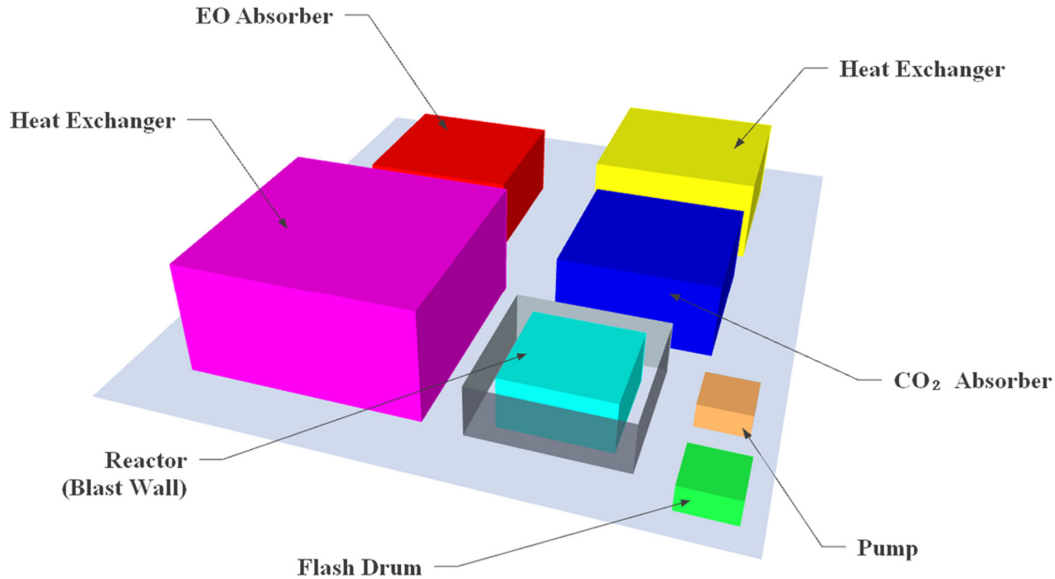


Fig. 5. The optimal layout of facilities and blast walls suggested by the proposed research.

응기인 1번 설비에 방폭벽을 설치하는 경우 가장 큰 효과가 있는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 방폭벽을 1개 설치하는 것보다 더 많이 설치할수록 피해액은 줄어들며, 이러한 자료를 이용하여 방폭벽 설치 문제를 결정하는데 가이드라인으로 이용할 수 있다. 또한, 모든 방폭벽을 설치하는 경우에는 VCE가 발생하는 경우, 사고가 발생한 해당 설비 이외의 모든 설비는 모두 사고로부터 보호됨을 확인할 수 있었다. Fig. 5는 1번 설비에 방폭벽이 설치된 경우를 보여주고 있다.

6. 결론

본 연구에서는 공정 배치 최적화 관련한 식을 설계한 후 PSO를 이용하여 비용이 적게 드는 플랜트의 배치를 탐색하였다. 그리고, VCE의 발생을 TNT 당량 모델을 이용하여 모델링하고 다양한 방폭벽 설치에 따른 피해 저감 비용을 계산하였다. 본 연구에서는 방폭벽 설치의 경우의 수가 작아서 모든 경우의 수를 시뮬레이션 했지만, 본 연구에서 제안한 식을 통해 방폭벽 설치 경우의 수가 많고, 설치와 관련된 비용의 제약조건이 있는 경우 최적화 기법을 이용하여 방폭벽의 최적 위치를 결정하는 방법론을 제안하였다. 근래 많은 플랜트가 육상과 해상에 건설되고 있으며, 부지의 위치와 공정 특성에 따라 제약조건은 달라진다. 육상에 경우 부지의 가격이 전체 플랜트 건설에 큰 비중을 차지하는 요소 중 하나이며, 인접 지역 주민의 안전도 고려해야 할 중요한 요소이다. 해상에 건설하는 경우 사전에 정해진 사이트 크기 내에 최대의 안전성을 갖는 형

태로 플랜트를 건설해야 한다.

본 연구에서 제안한 내용은 기존의 연구와는 다르게 두 단계의 최적화를 수행하였다. 이는 실제 엔지니어링 업계의 의사 결정 순서와 같으며, 기존에 단순히 체크리스트나 정량적 안전성 평가 기법과는 다르게, 수학적 모델링에 기반을 두어 안전 설비의 피해 감소 효과를 계산함으로써 최적의 안전 설비의 위치를 도출할 수 있다. 첫 번째 단계에서는 파이프의 비용과 유체 이송비용, 그리고 부지 비용의 합을 최소로 하는 설비 배치 최적화를 수행하였으며, 두 번째 최적화 단계에서는 EO 플랜트에서 단 한 개의 방폭벽이 설치되는 경우, 1번 설비에 배치하면 최대 67.19%의 피해 감소 효과가 있는 것으로 계산되었다. 제시된 결과는 유지·보수 공간 및 설비 간 이격거리를 모두 만족하고 있으며, 방폭벽 설치에 배정된 예산에 따라 가장 큰 효과가 있는 방폭벽의 설치 위치를 선택할 수 있다.

본 연구에서는 단 한 개의 안전 설비인 방폭벽만을 이용하였다. 방폭벽 이외에도 다른 안전 설비의 피해 감소 효과가 과학적으로 분석된다면, 본 연구에 더 추가되어 이용할 수 있다. 하지만, 사고 완화 장치와 관련된 연구는 실제 매우 부족한 상황이다. 앞으로 이러한 설비에 대한 피해 감소 효과가 이루어진다면, 본 연구에서 제안한 문제를 기반으로 피해 감소 효과를 극대화할 수 있는 배치 최적화가 가능하며, 이는 실제 엔지니어링 업계에도 사용이 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글 : 이 논문은 2019학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임 (PK-C-D-2019-0746).

References

- 1) J. S. Yang and C. J. Lee, "The Research of Layout Optimization for LNG Liquefaction Plant to Save the Capital Expenditures", *Korean Chemical Engineering Research*, Vol. 57, No. 1, pp. 51-57, 2019.
- 2) D. H. Lee and C. J. Lee, "The Plant Layout Optimization Considering the Operating Conditions", *Journal of Chemical Engineering of Japan*, Vol. 50, No. 7, pp. 568-576, 2017.
- 3) P. J. Park and C. J. Lee, "The Research of Optimal Plant Layout Optimization based on Particle Swarm Optimization for Ethylene Oxide Plant", *J. Korean Soc. Saf.*, Vol. 30, No. 3, pp. 32-37, 2015.
- 4) L. G. Papageorgious and G. E. Rotstein, "Continuous-domain Mathematical Models for Optimal Process Plant Layout", *Industrial and Engineering Chemistry Research*, Vol. 37, No. 9, pp. 3631-3639, 1998.
- 5) F. D. Penteado, A. T. Ciric, "An MINLP Approach for Safe Process Plant Layout," *Industrial and Engineering Chemistry Research*, Vol. 35, No. 4, pp. 1354-1361, 1996.
- 6) C. M. L. Castell, R. Lakshmanan, J. M. Skilling and R. Baiiares-Alcdntara, "Optimisation of Process Plant Layout using Genetic Algorithms", *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 22, pp. 993-996, 1998.
- 7) D. I. Patsiatzis, G. Knight and L. G. Papageorgiou, "An MILP Approach to Safe Process Plant Layout", *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 82, No. 5, pp. 579-586, 2004.
- 8) K. Han, S. Cho and E. S. Yoon, "Optimal Layout of a Chemical Process Plant to Minimize the Risk to Humans", *Procedia Computer Science*, Vol. 22, pp. 1146-1155, 2013.
- 9) K. T. Park, J. M. Koo, D. I. Shin, C. J. Lee and E. S. Yoon, "Optimal Multi-floor Plant Layout with Consideration of Safety Distance based on Mathematical Programming and Modified Consequence Analysis", *Korean Journal of Chemical Engineering*, Vol. 28, No. 4, pp. 1009-1018, 2011.
- 10) S. -H. Leem, J. -R. Lee and Y. -J. Huh, "A Study on Estimation of Structure Damage caused by VCE", *J. Korean Soc. Saf.*, Vol. 22, No. 5, pp. 65-70, 2007.
- 11) S. Høiset, B. H. Hjertager, T. Solberg and K. A. Malo, "Flixborough Revisited - An Explosion Simulation Approach", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 77, pp. 1-9, 2000.
- 12) J. Li, G. Ma, H. Hao and Y. Huang, "Optimal Blast Wall Layout Design to Mitigate Gas Dispersion and Explosion on a Cylindrical FLNG Platform", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 49, pp. 481-492, 2017.
- 13) M. Schwaab, E. C. Biscaia, J. L. Monteiro and J. C. Pinto, "Nonlinear Parameter Estimation through Particle Swarm Optimization", *Chemical Engineering Science*, Vol. 63 No. 6, pp. 1542-1552, 2008.
- 14) KOSHA, *Technical Guidelines for the Safety of Ethylene Oxide Handling*, 2018.
- 15) U.S. Government Printing Office, *Protection of Environment*, 2008.