

## PSO 최적화 기법을 이용한 다층 구조의 플랜트 배치에 관한 연구

박평재 · 이창준<sup>†</sup>

부경대학교 안전공학과  
608-739 부산시 남구 신전로 365  
(2014년 2월 18일 접수, 2014년 4월 7일 수정본 접수, 2014년 4월 12일 채택)

## Study of Multi Floor Plant Layout Optimization Based on Particle Swarm Optimization

Pyung Jae Park and Chang Jun Lee<sup>†</sup>

Department of Safety Engineering, Pukyong National University, 365 Sinseon-ro, Nam-gu, Busan 608-739, Korea  
(Received 18 February 2014; Received in revised form 7 April 2014; accepted 12 April 2014)

### 요 약

플랜트 배치 최적화 문제의 목적은 장치를 연결하는 파이프의 길이를 최소화 하는데 있다. 하지만, 기존 연구들은 대체적으로 단일 층의 배치 문제를 다루고 있으며, 또한 장치 간 유지·보수에 필요한 최소 공간 확보, 사고 예방을 위한 장치 간 이격 거리 등 안전 요소를 간과해 왔다. 본 연구에서는 장치 간 유지·보수에 필요한 최소 거리 확보 및 안전 이격 거리를 고려하여 플랜트 배치 문제를 MILP(Mixed Integer Linear Programming) 형태의 문제로 정의하였다. 본 문제의 목적함수는 장치 간 연결하는 파이프 비용이며 제약조건은 안전을 위한 장치 간 최소 이격 거리, 유지·보수에 필요한 공간으로 설정하였다. 하지만, 공정 특성에 따라 필요한 공간 및 작업자의 통행 등 다양한 제약조건을 수반하게 된다. 이에 따라 플랜트 배치 문제를 일반적인 수학적식으로 표현하는 데 많은 제약이 있으며, 따라서 함수의 미분식을 이용하는 기존 최적화 방법론을 이용하여 문제를 해결하는 데 많은 어려움이 있다. 본 연구에서는 함수의 미분식을 적용하지 않고 이용이 가능한 경험적 최적화 기법 중 하나인 PSO(Particle Swarm Optimization)를 이용하여 최적화를 수행하였다. 본 연구에서 개발한 모델의 검증을 위해 Ethylene Oxide 공정을 2층으로 배치하는 최적화를 수행하였다.

**Abstract** – In the fields of researches associated with plant layout optimization, the main goal is to minimize the costs of pipelines for connecting equipment. However, what is the lacking of considerations in previous researches is to handle the multi floor processes considering the safety distances for domino impacts on a complex plant. The mathematical programming formulation can be transformed into MILP (Mixed Integer Linear Programming) problems as considering safety distances, maintenance spaces, and economic benefits for solving the multi-floor plant layout problem. The objective function of this problem is to minimize piping costs connecting facilities in the process. However, it is really hard to solve this problem due to complex inequality or equality constraints such as sufficient spaces for the maintenance and passages, meaning that there are many conditional statements in the objective function. Thus, it is impossible to solve this problem with conventional optimization solvers using the derivatives of objective function. In this study, the PSO (Particle Swarm Optimization) technique, which is one of the representative sampling approaches, is employed to find the optimal solution considering various constraints. The EO (Ethylene Oxide) plant is illustrated to verify the efficacy of the proposed method.

**Key words:** Plant Layout Optimization, Particle Swarm Optimization, MILP, Ethylene Oxide Plant

### 1. 서 론

화학 산업은 고도의 정밀 기술이 요구되는 장치산업이 주를 이루고 있다. 21세기에 들어 에너지·화학 산업이라는 기존의 틀에서 벗어나 나노·무기소재, 정밀 유기화학, 전기화학 등 다양한 형태의 공

정들이 개발되고 있으며 이에 따라 공정도 매우 복잡해지고 있다[1]. 또한, 에너지 수요량의 증가에 따라 많은 공장들이 전 세계 각지에서 건설되고 있다. 이러한 공정을 건설하기 전 어떤 형태의 공정을 선택할지도 매우 중요한 문제이지만, 선정된 공정을 잠재적인 위험 요소 및 공정의 효율성을 고려하여 어떠한 형태로 배치할지에 대한 문제도 상당한 경험과 창의력을 요구하는 문제이다.

배치를 효율적으로 할수록 막대한 플랜트 건설비용을 줄일 수 있다. 또한 유지·보수에 제약사항이 없도록 플랜트를 배치하면서도 최대한 파이프 설치에 들어가는 비용도 줄여야 한다. 또한 각 설비 간 안전을 위한 이격 거리도 정해진 규정에 맞게 확보해야 한다[2]. 따

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.

E-mail: changjunlee@pknu.ac.kr

\*이 논문은 서울대학교 윤인섭 교수의 정년을 기념하여 투고되었습니다. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

라서 플랜트 배치를 위해서는 위에서 언급된 사항들을 모두 고려해야 한다.

이러한 문제를 해결하기 위해서 많은 연구들이 이루어져 왔다. Patisiatzis 등은 경험에 기반을 둔 이차원적인 배치문제를 제안하였다[3]. 하지만, 경험에 의한 방법론은 언제나 최적의 결과를 낸다고 보장할 수 없다. MILP에 의한 연구도 활발하게 이뤄지고 있다[4,5]. MILP 문제에서는 공정의 장치들을 직사각형 형태로 설정하고 각 장치간의 연결을 직선 형태로 고려하여 총 건설비용을 목적함수로 설정한다. 그리고 가장 건설 비용이 적게 드는 최적점을 찾는 방법이다. 또한, 방호 장치를 고려한 MINLP를 이용한 방법론이 Pentead와 Ciric에 의해서 1996년에 개발되었다[6]. 그리고 1998년에 Castell 등은 Mond Index와 함께 유전 알고리즘을 사용하여 배치 문제를 최적화 문제 형태로 설계하였다[7]. 게다가, Patisiatzis 등은 2004년에 Dow Index를 활용하여 화재 및 폭발 지수를 산정하여 이를 single-floor 배치 문제에 활용하는 방법론을 제시하였다[8].

앞서 언급한 연구들은 single-floor 문제에 집중되어 있다. 하지만 현재 많은 에너지 공정들이 해상에 건설되고 있으며 제한적인 공간 활용을 위해 multi-floor 형태로 건설되고 있다. 따라서 multi-floor 상에서 공정을 효율적으로 배치하는지에 대한 연구는 매우 중요하다. 2011년에 Park 등은 GAMS를 이용하여 multi-floor에 관한 방법론을 제시하였다[9]. 하지만 유지·보수에 필요한 충분한 안전거리를 고려하지 않았다. 본 연구에서는 유지·보수에 필요한 충분한 안전거리를 고려한 효과적인 multi-floor MILP 문제를 제안하고자 한다. 플랜트의 면적이 제한되어 있고 안전을 고려한 이격 거리, 유지·보수를 위해 반드시 확보해야 할 거리가 존재할 때 제약 조건을 모두 만족하는 위치 선정 및 그에 따라 드는 총 펌프 비용과 파이프 비용들을 고려하여 최적화에 이용할 목적 함수 및 제약조건들을 MILP 문제로 구성하였다. 이를 경험적인 최적화 방법론인 PSO(Particle Swarm Optimization)를 이용하여 최적 설계 해를 탐색하였다. 제안된 방법은 공정의 기초 설계 단계에서 PFD 및 장비의 크기가 정해졌을 때 플랜트 디자인에 적용이 가능하다. 2장에서는 본 문제를 수학적으로 정의하는 개념에 대해 소개하고 3장에서는 최적화를 수행하기 위한 PSO에 대한 개념을 소개하였다. 그리고 4장에서는 사례연구를 통해 얻어진 결과를 설명하고자 한다.

## 2. 최적화 문제 정의

플랜트 배치 최적화 문제를 풀기 위해서는 아래와 같은 조건들이 사전에 정해져야 한다. 공정에 들어가는 모든 설비의 종류와 크기, 장치 가격 등 아래와 같은 요소들이 다 정해져 있는 상태에서 최적화가 진행된다. 2장에서 소개되는 기본적인 식들은 Patisiatzis 등에 의해서 개발한 식을 기반으로 multi floor 배치 및 유지·보수에 필요한 거리, 이격거리 확보를 위해 다소 개선된 식이다[3,8].

- 1) 장치 종류와 그 크기
- 2) 장치를 설치할 구조물의 총 floor 개수 및 그 높이
- 3) 비용에 관한 정보
- 4) PFD(Process flow diagram)
- 5) 장치별 이격거리

결국 플랜트 배치하는데 필요한 파이프의 비용 및 펌프 이송 비용을 최소화하도록 multi-floor 배치를 결정하는 것이 본 연구의 목적이다.

### 2-1. 장치 배치 및 제약조건

모든 장치는 직사각형으로 이루어져 있고 90° 회전이 가능하다고 가정한다. 회전에 따른 장치의 가로 및 세로 길이는 아래의 식에 의해 결정된다.

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

$$d_i = a_i + b_i - l_i \quad \forall i \quad (2)$$

여기서  $O_i$ 는 장치  $i$ 의 회전 여부를 결정하는 이진 변수이다. 장치의 크기가 가로  $a_i$ , 세로  $b_i$ 로 주어지고  $O_i$ 의 값이 1이면 설비는 회전 없이 그대로 플랜트에 설치된다.  $O_i$ 값이 0이면 장치는 90° 회전하여 설치됨을 의미한다. 여기서  $O_i$ 는 장치의 설치 방향을 결정하는 이진변수이다. 따라서,  $l_i$ 는 x축 방향의 장치의 길이,  $d_i$ 는 y축 방향의 장치의 폭이 된다.

각각의 장치는 multi-floor 상의 정해진 층에 배치가 된다. 서로 연결되는 2개의 장치가 만약 서로 같은 층에 위치하게 된다면 두 장치의 가로와 세로 좌표는 서로 겹치지 않게 배치해야 한다. 이러한 점을 고려하기 위해 이진 변수인  $V_{ik}$ 를 설정하였다. 장치  $i$ 가  $k$ 층에 설치되는 경우  $V_{ik}$ 는 1의 값을 갖게 된다. 다른 장치  $j$ 가 같은 층에 위치하게 된다면  $F_{ij} = V_{ik} \times V_{jk}$  값은 1을 갖게 되며 이는 두 장치가 같은 층에 있음을 의미한다. 만약에 장치  $j$ 가  $k$ 층이 아닌 다른 층에 위치한다면  $V_{jk}$ 가 0을 갖게 되며 결국  $F_{ij}$ 는 0이 된다.

$$F_{ij} = V_{ik} \times V_{jk} \quad \forall i \quad (3)$$

장치  $i$ 의 유지·보수를 위해 반드시 확보해야 할 거리는  $ES_i$ 로 정의하였다. 그리고 각 장치 간 이격거리는 안전을 이유로 반드시  $m$ 이상 떨어져야 한다고 가정하였다. 장치  $i$ 와  $j$ 의 유지·보수를 위해 필요한 거리와 안전을 이유로 떨어져야 하는 최소 이격 거리를 비교하여 판별하는 식은 아래와 같다.

$$C_{ij} = m - (ES_i + ES_j) \rightarrow \begin{cases} \text{if } C_{ij} \geq 0, S_{ij} = 1 \\ \text{otherwise, } S_{ij} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$C_{ij}$ 는 유지·보수를 위해 필요한 최소거리와 장치 간 이격 거리를 비교하는 값이며  $C_{ij}$ 가 양수이면  $S_{ij}$ 는 1의 값을, 반대인 경우에는 0을 부여한다. 이는 유지·보수를 위해 필요한 거리와 안전을 이유로 떨어져야 하는 최소 이격 거리의 크기를 비교하여 더 많은 거리를 필요로 하는 값을 장치 간의 이격 거리로 설정하기 위해서다.

두 장치 간의 중첩을 막기 위한 식은 아래와 같다. 장치의 중심 좌표는  $(x_i, y_i)$ 이며, 각 장치의 중심 좌표 간의 거리는 설비길이의 절반 및 이격 거리보다 커야 한다.

$$|x_i - x_j| \geq \left( \frac{l_i + l_j}{2} + (ES_i + ES_j) \times (1 - S_{ij}) + m \times S_{ij} \right) \times F_{ij} \quad (5)$$

$$|y_i - y_j| \geq \left( \frac{d_i + d_j}{2} + (ES_i + ES_j) \times (1 - S_{ij}) + m \times S_{ij} \right) \times F_{ij} \quad (6)$$

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

또한 플랜트의 총 면적이 정해진 경우 아래와 같은 제약조건을 만족해야 한다.

$$x_i + \frac{l_i}{2} + ES_i \leq X_{\max}, x_i - \frac{l_i}{2} - ES_i \geq 0 \quad (7)$$

$$y_i + \frac{d_i}{2} + ES_i \leq Y_{\max}, y_i - \frac{d_i}{2} - ES_i \geq 0 \quad (8)$$

여기서,  $X_{\max}$ ,  $Y_{\max}$ 는 플랜트의 가로, 세로 최대 길이를 의미한다.

## 2-2. 파이프 길이 계산

각 장치 간에 설치해야 할 파이프의 길이를 계산해야 한다. 앞에서 설명한 바와 같이 연결되는 두 장치가 서로 같은 층에 설치되는지의 여부에 따라 연결할 파이프의 길이가 크게 달라진다. 장치  $i$ 의 높이를  $z_i$ 로 설정하면 두 장치,  $i$ 와  $j$ 간에 연결해야 할 총 파이프의 길이는 다음과 같다.

$$X_{ij} = |x_i - x_j|, Y_{ij} = |y_i - y_j| \quad (9)$$

$$H_{ij} = H \times \left\lfloor \sum_{k=1}^F k \times (V_{ik} - V_{jk}) \right\rfloor, U_{ij} = H_{ij} + z_j - z_i \quad \text{where } i \leq j \quad (10)$$

$$TD_{ij} = X_{ij} + Y_{ij} + U_{ij} \quad (11)$$

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

여기서  $X_{ij}$ 는 장치 간의  $x$ 축 방향으로 필요한 파이프의 길이이며,  $Y_{ij}$ 는 장치 간의  $y$ 축 방향으로 필요한 파이프의 길이이다.  $H_{ij}$ 는 두 장치 간의 설치되는 층간 높이이며  $U_{ij}$ 는 장치가 설치되는 층과 각 장치의 높이를 고려해서 계산한  $z$ 축 방향으로 필요한 파이프의 길이를 의미한다. 결국 두 장치,  $i$ 와  $j$ 간에 연결해야 할 총 파이프의 길이는  $TD_{ij}$ 가 된다.

만약 floor에 유지·보수를 위해 통행로 공간이 필요하다면 미리 그 영역을 설정할 수 있다.  $x_p$ 는 통행로의 중간 지점 좌표이며  $p$ 는 통행로의 폭으로 설정하였다.  $x$ 축을 기준으로  $x_p \pm p/2$ 는 통행로의 최소, 최대 좌표 값을 의미한다. 다음의 식  $x_i - l_i/2 - ES_i \leq x_p \pm p/2 \leq x_i + l_i/2 + ES_i$ 를 충족하면 이는 통행로에 장치  $i$ 의 배치 및 유지·보수를 위해 필요한 영역이 통행로와의 간섭을 유발함을 의미한다. 이러한 경우를 방지하기 위해 벌칙함수를 두어 최대한 필요공간으로 배치가 들어오지 않도록 제약조건을 부여할 수 있다. 본 연구에서는 각 장치가 제약조건을 위반할 경우 각 장치마다  $1 \times 10^9$ 에 해당하는 벌칙을 줌으로서 최대한 각 설비의 배치가 제약조건을 벗어나지 않도록 유도하였다.

## 2-2. 목적함수

목적함수는 총 파이프 길이 및 펌프에 드는 비용을 고려하여 정할 수 있다. 목적함수는 다음의 식으로 주어진다. 여기서  $CC_{ij}$ 는 단위 길이 당 파이프비용,  $CV_{ij}$ 와  $CH_{ij}$ 는 각각 수직 방향 및 수평 방향으로 유체를 이송할 때 단위길이 기준으로 드는 비용을 의미한다. 또한 함수  $p(x_i, y_i)$ 는 벌칙함수로서 작업이나 통행을 위해 반드시 확보해야 하는 공간을 배치하기 위해 설정한 벌칙함수이다. 벌칙함수에 상당히 큰 상수를 부여하여 장치가 필요 공간으로 배치가 되지 않도록 유도할 수 있다. 목적함수를 통해 최적화해야 할 결정변수(decision variable)는 장치  $i$  기준으로  $O_p, V_{ik}, x_p, y_i$ 이다. 장치의 개수가  $n$ 개이면 총 결정변수의 수는  $4 \times n$ 개이며 이중  $O_p, V_{ik}$ 는 0 혹은 1의 값을 갖는 정수이다.

$$\text{Min.} \sum_{i \neq j} [CC_{ij} \times TD_{ij} + CV_{ij} \times U_{ij} + CH_{ij}(X_{ij} + Y_{ij}) + p(x_i, y_i)] \quad (12)$$

## 3. PSO(Particle Swarm Optimization)

본 연구에서는 정의된 목적함수의 최적화를 수행하기 위해 PSO(Particle Swarm Optimization) 기법을 사용하였다. 일반적으로 최적화 기법에서는 목적함수, 제약조건의 미분을 이용하여 변곡점을 탐색하여 최적 해를 찾는 것이 일반적이다. 하지만 본 연구에서는 정수로 표현되는 결정변수가 존재하며 또한 공정에 따라 제약조건이 매우 복잡해질 수 있기 때문에 목적함수, 제약조건의 미분을 이용하는 것이 항상 가능하지 않다. 따라서 본 연구에서는 이러한 미분 식을 이용하지 않고도 최적 해를 찾기 위해 PSO를 사용하였다. PSO는 GA(Generic Algorithm), SA(Simulated Annealing)와 더불어 대표적인 경험적 최적화 기법 중 하나이다. 경험적 최적화 기법은 모델식이 매우 복잡하여 함수의 미분식을 활용하기 어려운 경우에 활용이 가능하다. PSO는 조절 변수가 많지 않고 초기 값에 민감하지 않다는 장점을 가지고 있다[10]. 이런 장점에도 불구하고 경험적 최적화 기법이 매우 많은 목적함수 계산횟수를 요구한다는 것은 잘 알려진 단점이다. 하지만 본 연구와 같이 제약조건이 공정 특성이나 작업자들을 위한 영역 확보 등 수식으로 표현하기 어려운 경우, 그리고 공정 상세 설계와 같이 최적 해를 찾는 데 많은 시간적 여유를 가지고 있는 경우 PSO는 뛰어난 적응성을 가지고 있다.

PSO는 원래 동물 군집의 사회적 행동양식을 바탕으로 개발된 방법이다[10]. 군집(swarm)의 각 개체(particle)는 다차원 탐색공간을 옮겨 다니며 다른 개체들과 정보를 교환하게 되는데, 그들 자신과 이웃의 경험에 의한 정보를 이용하여 최적의 해로 이동해 간다. 이를 위해 개체는 이전에 경험했던 최적의 위치정보를 기억한다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다. 식 13의 첫 번째 부분은 개체의 과거 속도이고 두 번째, 세 번째 부분은 군집의 최적 위치 및 각 개체의 최적 위치와 개체의 현재 위치와의 거리를 통하여 입자의 새로운 속도를 계산한다. 계산된 속도를 바탕으로 식 14를 통해서 새로운 위치로 이동하게 된다.

$$v_{p,d}^{k+1} = w v_{p,d}^k + c_1 r_1 (x_{p,d}^{ind} - x_{p,d}^k) + c_2 r_2 (x_d^{glo} - x_{p,d}^k) \quad (13)$$

$$x_{p,d}^{k+1} = x_{p,d}^k + v_{p,d}^{k+1} \quad (14)$$

여기서  $v$ 는 개체의 속도,  $x$ 는 입자의 위치이고,  $x^{glo}$ 와  $x^{ind}$ 는 최적화를 수행하는 동안 가장 목적함수가 낮은 값을 가진 최적의 입자 위치와 현재 단계에서 입자들 중 가장 목적함수가 낮은 입자의 위치를 나타낸다. 아래첨자인  $p$ 는 개체,  $d$ 는 탐색방향,  $k$ 는 반복횟수이다.  $r_1$ 과  $r_2$ 는  $[0, 1]$ 의 범위에서 균등분포된 난수이다. 계수  $w$ ,  $c_1$ 과  $c_2$ 는 PSO의 탐색 매개변수이며  $w$ 는 가중치,  $c_1$ 과  $c_2$ 는 각각 지식계수와 사회계수라 한다[10].  $w$ 를 크게 하면 전역탐색에 많은 비중을 두게 되고 작게 하면 국부적인 탐색에 많은 비중을 두게 된다.  $c_1$ 과  $c_2$ 는 각각 식 13에서 군집의 최적 위치와 각 개체의 최적 위치로 움직이게 하는 가중치이며, 본 연구에서는 다른 연구들과 같이  $w$ 는 1,  $c_1$ 과  $c_2$ 는 2를 사용하였다[10].

본 연구에서는 100000개의 입자들을 흩어놓은 후 PSO 알고리즘을 이용하여 매개변수를 결정하였다.

## 4. Ethylene Oxide 공정

Ethylene Oxide(EO)는 화학산업에서 사용되는 중요한 원료 중 하나

나이다. Ethylene Oxide를 이용하여 Diethylene glycol 및 Triethylene glycol과 같은 Ethylene glycols의 합성이 가능하다. 또한, Ethylene glycol ethers, Ethanolamines 그리고 Ethoxylates은 Ethylene Oxide를 이용하여 합성이 가능하다[11-14]. Ethylene Oxide는 공기 또는 정제된 산소에 의해 Ethylene을 직접 산화하여 얻어진다. 순수한 Ethylene은 촉매 관류 흐름 반응 장치에서 산소에 의해 산화된다. 온도가 높은 기체 생성물은 냉각되고 Ethylene Oxide는 물을 사용하는 흡수기에 의해 분리된다. 남은 가스들은 더 냉각되고 부산물(이산화탄소)은 두 번째 흡수기에 의해 제거된다. 이 공정의 나머지 부분은 재순환이다[9]. Ethylene Oxide는 매우 높은 반응성 및 독성을 가진 위험한 화학물질이다. NFPA(National Fire Protection Agency) 규정에서 Ethylene Oxide는 가장 위험한 물질 중 하나로 분류되고 있다[15,16]. 따라서 Ethylene Oxide의 생산을 위해 공정의 장치 배치 시 안전에 각별히 신경을 써야 한다.

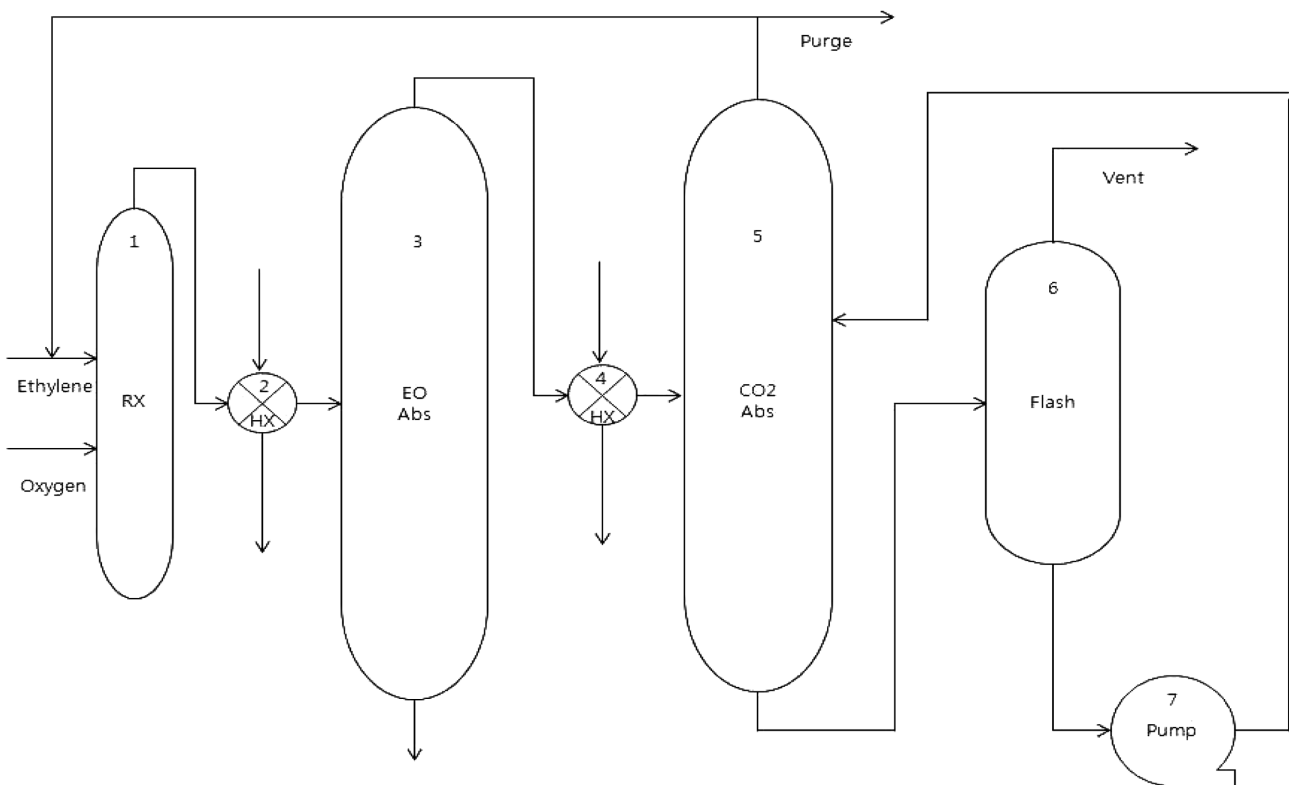
#### 4-1. 문제 정의

본 연구에서 이용한 Ethylene Oxide 플랜트는 주로 7개의 장치로 구성되어있다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 반응기, 2개의 열 교환 장

치, 2개의 흡수기, 플래시 드럼, 펌프로 이루어져 있다[6,9]. Table 1은 각 장치별 크기 및 연결 방향을 보여주고 있다. 각 장치 별로 유지·보수에 필요한 거리 ES는 장치 길이의 30%를 반드시 확보하도록 설정하였고, 장치 간 최소 이격 거리는 4 m로 정하였다. 부지의 넓이는 가로, 세로 60 m이며 floor는 2층으로 설정하였다. Table 2는 파이프 길이 당 비용 및 펌프 이송 비용 등 모든 비용에 관한 내용을 보여주고 있다[6]. 앞에서 설명한 제약조건을 벗어난 경우 목적함수 내에서

**Table 2. Basic cost information of EO plant (Taken from [6])**

Number	Equipment	Connecti on	CC <sub>ij</sub> (per m)	CH <sub>ij</sub> (per m)	CV <sub>ij</sub> (per m)
1	Reactor	(1,2)	200	400	4000
2	Heat Exchanger	(2,3)	200	400	4000
3	EO Absorber	(3,4)	200	300	3000
4	Heat Exchanger	(4,5)	200	300	3000
5	CO <sub>2</sub> Absorber	(5,1)	200	100	1000
		(5,6)	200	200	2000
6	Flash drum	(6,7)	200	150	1500
7	Pump	(7,5)	200	150	500



**Fig. 1. Ethylene Oxide plant.**

**Table 1. Equipment information of EO plant (Taken from [6])**

Number	Equipment	Width (a <sub>i</sub> ) [m]	Depth (b <sub>i</sub> ) [m]	Height (z <sub>i</sub> ) [m]	Connection
1	Reactor	5.22	5.22	2.61	(1,2)
2	Heat Exchanger	11.42	11.42	4.50	(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 <sub>2</sub> 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 3. The optimal solution in case the height of floor is 5 m**

Number	Equipment	floor	x [m]	y [m]
1	Reactor	2nd	24.40	29.70
2	Heat Exchanger	2nd	11.09	43.02
3	EO Absorber	1st	11.10	42.99
4	Heat Exchanger	1st	24.91	29.74
5	CO <sub>2</sub> Absorber	2nd	34.85	19.25
6	Flash drum	1st	41.28	19.91
7	Pump	1st	34.77	13.41

**Table 4. The optimal solution in case the height of floor is 7 m**

Number	Equipment	floor	x [m]	y [m]
1	Reactor	2nd	38.32	14.70
2	Heat Exchanger	1st	29.90	14.68
3	EO Absorber	1st	45.18	29.96
4	Heat Exchanger	2nd	27.35	29.96
5	CO <sub>2</sub> Absorber	2nd	14.42	42.91
6	Flash drum	1st	9.083	42.92
7	Pump	1st	15.59	49.43

벌칙 함수에 매우 큰 벌칙을 부여하여 ( $p(x_i, y_i)=10^9$ ) 제약 조건을 벗어나지 않는 최적의 플랜트 배치 조건을 탐색하도록 하였다.

#### 4.2. 결과

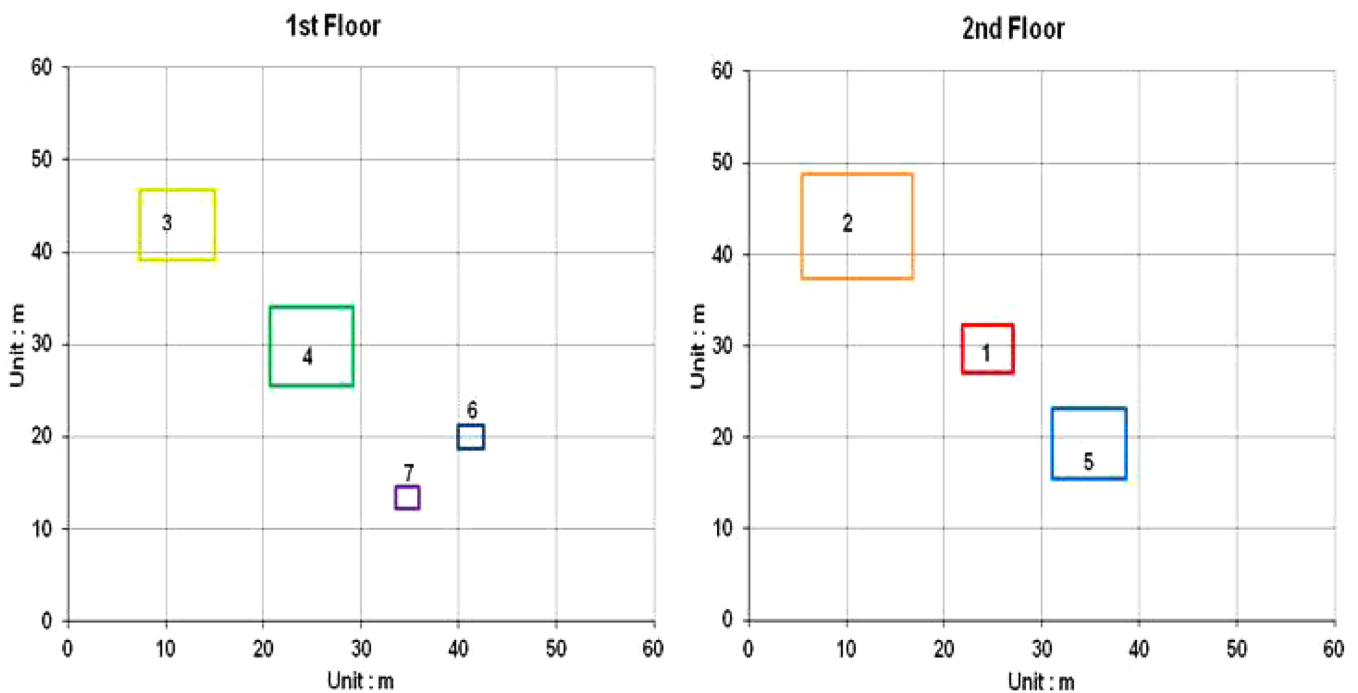
두 가지 경우를 가정하여 공정의 배치 문제를 PSO를 이용하여 최적화하였다. 첫 번째는 floor의 높이가 5 m일 때, 다른 하나는 7 m로 설정하였다. 각각의 경우에 목적함수의 최소값은 각각  $1.42208 \times 10^5$ ,  $1.80894 \times 10^5$ 이다.

Table 3과 Table 4는 각각의 경우에 장치의 층의 배치 및 x, y 좌표를 보여주고 있다. Fig. 2와 Fig. 3은 각각의 경우에 각 장치의 배

치를 보여주고 있다. 각 장치 별로 유지·보수에 필요한 거리 ES와 4 m로 정한 장치 간 최소 이격 거리를 모두 만족하고 있다. Floor의 높이가 5 m일 때에 비해 7 m일 때 설치비용이 27% 증가하는 것을 확인할 수 있었으며 이는 물질 이송 시 가장 비용이 많이 드는 수직 방향 이송이 가장 공정 배치 문제에 큰 영향을 주는 것으로 추론할 수 있다.

## 5. 결 론

이 연구에서는 플랜트 배치 모델을 수립하고 경험적 최적화기법을 이용하여 가장 비용이 적게 드는 배치를 탐색하는 방법을 제안하였다. 최근에 많은 플랜트들이 부지 및 설치의 제약 조건을 해결하기 위해 multi floor 형태로 건설되고 있다. 이러한 형태를 고려한 수학적 모델을 수립하였다. 그리고 각 플랜트 설비마다 유지·보수를 위한 공간, 최소 이격 거리, 통로 그리고 해양 플랜트의 경우 해상에서 balance를 유지하는 문제 등 많은 제약조건이 있다. 또한 각 층마다 작업 공간을 포함한 공정 운영을 위한 공간을 식으로 표현하기 어려운 경우도 존재한다. 이러한 경우 수학적으로 모델을 수립하기 매우 어려우며 미분식을 이용하여 최적화를 수행하는데 많은 한계가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 PSO를 이용한 최적화 방법을 제시하였다. 제안한 모델의 검증을 위해 넓이가 가로, 세로 60 m이고 2층으로 가정한 부지에 Ethylene Oxide 플랜트를 설치하는 문제를 다루었다. Floor의 높이가 각각 5 m, 7 m인 두 가지 경우에 대해 최적화를 수행하였으며, 얻어진 결과는 미리 가정한 유지·보수를 위한 최소 거리 및 각 장치 간 최소 이격 거리를 모두 만족하고 있다. 본 연구에서 개발한 방법은 향후에 다양한 multi floor 형태의 공정 배치를 위한 문제에 쉽게 적용이 가능하며 좀 더 복잡한 문제로의 확장도 가능하다. 또한 목적 함수에 안전을 고려한 문제를 추가한다면, 다양한 사고 시나리오를 포함한 통계적 최적화 문제로 확장이 가능하다.



**Fig. 2. The results of optimal solution calculated by PSO in case the height of floor is 5 m.**

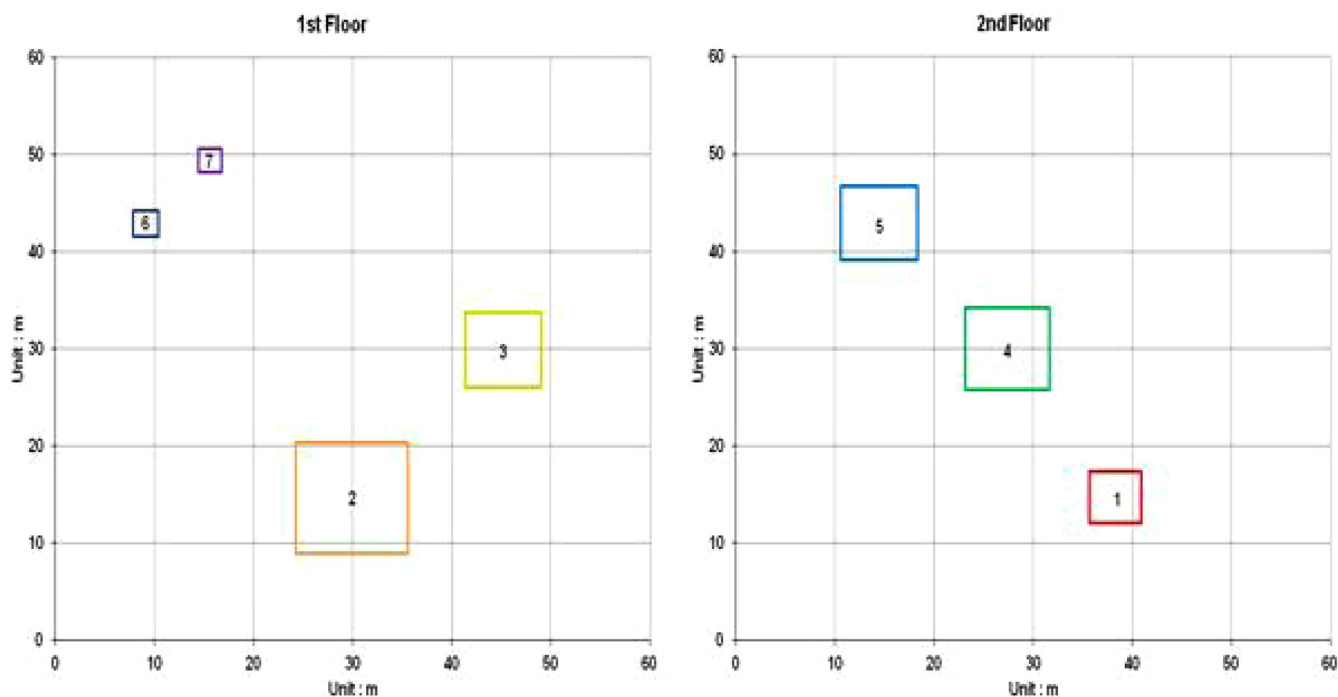


Fig. 3. The results of optimal solution calculated by PSO in case the height of floor is 7 m.

## 감 사

이 논문은 2012학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구입니다(PK-2012-C-D-20120983).

## References

- Lee, C. J., Ko, J. W. and Lee, G., "Operation Modes Classification of Chemical Processes for History Data-Based," *Korean Chem. Eng. Res.*, **46**(2), 383-388(2008).
- Center for Chemical Process Safety Staff, Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, 153-203(2000).
- Patsiatzis, D. I. and Papageorgiou, L. G., "Optimal Multi-Floor Process Plant Layout," *Com. Chem. Eng.*, **26**(4-5), 575-583(2002).
- Georgiadis, M. C., Schilling, G., Rotstein, G. E. and Macchietto, S., "A General Mathematical Programming Approach for Process Plant Layout," *Com. Chem. Eng.*, **23**, 823-840(1999).
- Lee, H. K., Kim, S. B., Lee, E. S. and Lee, I. B., "MILP Scheduling Model for Multipurpose Batch Processes Considering Various Intermediate Storage Policies," *Korean J. Chem. Eng.*, **18**(4), 422-427(2001).
- Penteado, F. D. and Ciric, A. T., "An MINLP Approach for Safe Process Plant Layout," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **35**(4), 1354-1361 (1996).
- Castell, C. M. L., Lakshmanan, R., Skilling, J. M. and Baiiares-Alcdntara, R., "Optimisation of Process Plant Layout Using Genetic Algorithms," *Com. Chem. Eng.*, **22**, 993-996(1998).
- Patsiatzis, D. I., Knight, G. and Papageorgiou, L. G., "An MILP Approach to Safe Process Plant Layout," *Chem. Eng. Res. Des.*, **82**(5), 579-586 (2004).
- K. Park, J. Koo, D. 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 J. Chem. Eng.*, **28**(4), 1009-1018(2011).
- Schwab, M., Biscaia, E. C., Monteiro, J. L. and Pinto, J. C., "Nonlinear Parameter Estimation through Particle Swarm Optimization," *Chem. Eng. Sci.*, **63**(6), 1542-1552(2008).
- Khan, F. I. and Haddara, M. R., "Risk-based Maintenance of Ethylene Oxide Production Facilities," *J. Hazard. Mater.*, **108**(3), 147-159(2004).
- Piccinini, N. and Levy, G., "Ethylene Oxide Reactor: Safety According to Operability Analysis," *Can. J. Chem. Eng.*, **62**(4), 547-558(1984).
- Prugh, R. W., *Quantitative evaluation of BLEVE hazards*, Loss Prevention Symposium(1988).
- Rebsdatt, S. and Mayer, D., "Ethylene Oxide," in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA(2000).
- National Fire Protection Association, NFPA 30 : Flammable and Combustible Liquids Code. National Fire Protection Association(2012).
- U.S. Government Printing Office, Protection of Environment (2008).