

PSO 최적화 기법을 이용한 Ethylene Oxide Plant 배치에 관한 연구

박평재 · 이창준[†]

부경대학교 안전공학과

(2015. 2. 17. 접수 / 2015. 4. 29. 수정 / 2015. 5. 19. 채택)

The Research of Optimal Plant Layout Optimization based on Particle Swarm Optimization for Ethylene Oxide Plant

Pyung Jae Park · Chang Jun Lee[†]

Department of Safety Engineering, Pukyong National University

(Received February 17, 2015 / Revised April 29, 2015 / Accepted May 19, 2015)

Abstract : In the fields of plant layout optimization, the main goal is to minimize the construction cost including pipelines as satisfying all constraints such as safety and operating issues. However, what is the lacking of considerations in previous researches is to consider proper safety and maintenance spaces for a complex plant. Based on the mathematical programming, MILP(Mixed Integer Linear Programming) problems including various constraints can be formulated to find the optimal solution which is to achieve the best economic benefits. The objective function of this problem is the sum of piping cost, pumping cost and area cost. In general, many conventional optimization solvers are used to find a MILP problem. However, it is really hard to solve this problem due to complex inequality and equality constraints, since it is impossible to use the derivatives of objective functions and constraints. To resolve this problem, the PSO (Particle Swarm Optimization), which is one of the representative sampling approaches and does not need to use derivatives of equations, is employed to find the optimal solution considering various complex constraints in this study. The EO (Ethylene Oxide) plant is tested to verify the efficacy of the proposed method.

Key Words : plant layout optimization, particle swarm optimization, MILP, ethylene oxide plant

1. 서론

화학 산업은 현재 다양한 제품의 생산 및 수율 증대를 위해 위험한 물질을 다루는 경우가 많아지고 있으며, 플랜트의 구조 또한 복잡해지고 있다. 플랜트를 건설할 때 어떤 공정을 건설해야 할지를 결정하는 설계 부분도 매우 중요하지만, 공정 설계 완성 후 어느 정도의 부지가 필요하며 그리고 어떻게 배치할지를 결정하는 단계도 상당한 경험과 독창성 및 창의력을 요구하는 중요한 문제이다. 안전과 관련된 여러 제약 조건을 만족하면서 되도록 플랜트 건설비용을 최소화 하는 방향으로 배치가 이루어져야 한다. 최적의 플랜트 배치의 최종 목적은 안전과 관련된 장치간의 이격거리, 유지·보수를 위한 공간, 작업자들을 위한 통행로 등 플랜트 유형에 따른 다양한 제약 조건을 모두 만족하면서 장치들 간 연결되는 파이프의 길이, 유체의 이송비

용, 부지 면적을 최소화 하는데 있다.

이러한 플랜트 배치 문제를 해결하기 위해서 전통적으로 플랜트 지식이나 경험 등을 이용하였지만 최근에는 수학적 모델을 이용한 다양한 연구들이 진행되어 왔다. Pentead와 Ciric은 단층의 화학 플랜트에 대한 최적 배치를 연구하였다. 목적함수로 배치비용, 장치 간 파이프 길이에 대한 비용, 안전장치 비용 그리고 장치 손상관련 비용의 합으로 정의하였으며, 이를 MINLP (Mixed Integer Nonlinear Programming) 문제로 정의하였다¹⁾. Castell은 파이프 길이에 대한 비용, 플랜트 부지의 비용 그리고 Mond safety index을 이용한 제약조건 등을 이용하여 수학적 모델을 구성하고 유전 알고리즘을 사용하여 최적의 배치를 제안하였다²⁾. Georgiadis 등과 Patsiatzis와 Parageorgiou은 공정 플랜트에 대해 장치의 최적 배치를 MILP(Mixed Integer Linear Programming) 문제를 활용하여 해결하였다³⁻⁴⁾. Park 등은 플랜트에 대

[†] Corresponding Author : Chang Jun Lee, Tel : +82-51-629-6465, E-mail : changjunlee@pknu.ac.kr
Department of Safety Engineering, Pukyong National University, 365, Sinseon-ro, Nam-gu, Busan 608-739, Korea

해 목적함수로 장치 간 파이프 길이에 대한 비용, 파이프 내에서 물질의 이송에 드는 비용, 그리고 폭발 사고 시 발생할 수 있는 장치의 손상 비용, 부지 비용의 합으로 정의하고 이를 MILP로 정의하여 최적의 배치를 제안하였다⁵⁾. Ku 등은 LNG FPSO에 대해 장치의 최적 배치를 유전알고리즘을 이용하여 최적의 배치를 제안하였다⁶⁾.

앞서 언급한 연구들은 대체적으로 안전을 고려한 장치간의 이격 거리, 플랜트의 작업자들을 위한 충분한 유지·보수 공간들을 고려하지 않은 경우가 대부분이다. 또한, 일반적으로 목적함수, 제약조건의 미분을 이용하여 변곡점을 탐색하여 최적 해를 찾는 기법을 사용하였다. 하지만 복잡한 플랜트 건설 시 다양한 제약조건들이 존재하는 경우, 배치 문제의 제약조건, 목적함수의 식이 복잡해지게 되며, 수학적식의 미분 값을 이용하는 기법을 사용하여 최적해를 탐색하는 것이 불가능한 경우가 발생할 수 있다²⁻⁵⁾.

본 연구에서는 위에서 언급한 기존 연구들의 문제점을 해결하기 위해 유지·보수에 필요한 공간 및 충분한 안전거리를 만족하면서 최적의 배치를 탐색하는 효과적인 MILP 문제를 제안하고자 한다. 플랜트의 면적이 정해지지 않은 경우, 플랜트 장치 간의 이격 거리, 유지·보수를 위해 반드시 확보해야 할 거리를 모두 만족하면서 부지 비용, 장치간의 총 펌프 비용과 파이프 비용의 합을 최소로 하는 플랜트 배치 문제를 MILP 문제로 구성하였으며, 경험적인 최적화 방법론중 하나인 PSO(Particle Swarm Optimization)를 적용하여 수학적식의 미분 값을 이용하여 최적점 탐색이 불가능한 복잡한 문제에 활용 가능하도록 하였다.

먼저 2장에서는 본 문제를 수학적식으로 정의하는 개념에 대해 설명하고, 3장에서는 최적화 문제를 해결하기 위해 본 연구에서 적용된 PSO 알고리즘을 소개하고자 한다. 4, 5장에서는 사례연구를 통해 얻어진 결과와 결론에 대하여 서술하고자 한다.

2. 최적화 문제 정의

최적의 플랜트 배치 문제를 해결하기 위해 다음과 같은 사항들이 사전에 결정되어야 한다.

- 1) 설치 장치 종류와 크기
 - 2) 파이프 비용 및 물질 이송 비용
 - 3) PFD (Process Flow Diagram)
 - 4) 장치별 이격 거리와 유지·보수에 필요한 거리
- 사전에 결정된 정보를 활용하여 플랜트를 배치하는데 있어 존재하는 모든 제약조건을 만족하면서 필요한

파이프 비용 및 유체를 이송하기 위한 비용, 부지 비용의 합을 가장 최소화 할 수 있는 최적의 해를 탐색하는 것이 본 연구의 목적이다.

여기서 소개되는 기본적인 식들은 Patisiatzis 등에 의해 개발된 식을 바탕으로 유지 및 보수에 필요한 거리와 장치별 이격거리 확보등 제약조건을 만족할 수 있는 모델로 개선한 식이다⁴⁾.

2.1 장치 배치 및 제약조건

모든 장치는 직사각형이며 90° 회전이 가능하다고 가정한다. 회전에 따른 장치의 길이 및 폭은 다음과 같은 식에 의해 모든 장치에 적용된다⁷⁾.

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

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

여기서 O_i 는 장치 i 의 회전 여부를 결정하는 이진 변수이다. 장치의 크기가 길이 a_i , 폭 b_i 로 주어지고 O_i 의 값이 1인 경우 장치는 회전하지 않고 설치되며, 반대로 O_i 값이 0인 경우는 장치는 90° 회전하여 설치된다. 따라서, l_i 는 x 축 방향으로의 장치의 길이, d_i 는 y 축 방향으로의 장치의 폭으로 정의할 수 있다.

장치 i 의 유지 및 보수 그리고 작업자들의 통행을 위해 반드시 확보해야 할 거리는 ES_i 로 정의하였다. 그리고 각 장치 간 안전을 위해 이격 거리는 반드시 m 이상 떨어져야 한다고 정의하였다. 장치 i 와 장치 j 의 유지 및 보수를 위해 반드시 확보해야 할 거리와 안전을 이유로 충분히 확보해야 하는 최소 이격 거리를 차이를 통해 검증하는 식은 다음과 같다⁷⁾.

$$C_{ij} = m - (ES_i + ES_j) \rightarrow \begin{cases} \text{if } C_{ij} \geq 0, S_{ij} = 1 \\ \text{otherwise, } S_{ij} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

C_{ij} 는 유지 및 보수를 위해 반드시 필요한 최소거리와 장치 간 이격 거리를 비교하는 값으로 정의되며 C_{ij} 가 0보다 크거나 같은 경우는 S_{ij} 는 1의 값을 부여하고, 반대로 C_{ij} 가 0 미만인 경우는 0을 부여한다. 이는 유지 및 보수를 위해 필요한 거리와 장치 간 안전을 위한 이유로 떨어져야 하는 최소 이격 거리의 크기를 비교하여 두 장치 간 더 많은 거리를 확보하는 값을 최종적으로 장치간의 이격 거리로 설정하기 위해서다.

두 장치 간의 겹치는 현상 즉, 중첩을 방지하기 위한 식은 아래와 같다. 장치의 중심 좌표는 (x_i, y_i) 이며, 두 장치의 중심 좌표간의 거리는 각 장치 길이의 절반과 두 장치간의 이격 거리의 합보다 크거나 같음으로 정

의했다.

$$|x_i - x_j| \geq \left(\frac{l_i + l_j}{2} + (ES_i + ES_j) \times (1 - S_{ij}) + m \times S_{ij} \right) \quad (4)$$

$$|y_i - y_j| \geq \left(\frac{d_i + d_j}{2} + (ES_i + ES_j) \times (1 - S_{ij}) + m \times S_{ij} \right) \quad (5)$$

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

2.2 파이프 길이 계산

각 장치 간에 연결해야 할 총 파이프의 길이를 계산해야 한다. 장치 i 의 높이를 z_i 로 설정하면 두 장치 i 와 j 간에 연결해야 할 총 파이프의 길이는 다음과 같이 정의할 수 있다⁷⁾.

$$X_{ij} = |x_i - x_j| \quad (6)$$

$$Y_{ij} = |y_i - y_j| \quad (7)$$

$$Z_{ij} = |z_i - z_j| \quad (8)$$

$$TD_{ij} = X_{ij} + Y_{ij} + Z_{ij} \quad (9)$$

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

여기서 X_{ij} 는 장치 간의 x 축 방향으로 연결하는데 필요한 파이프의 길이이며, Y_{ij} 는 장치 간의 y 축 방향으로 연결하는데 필요한 파이프의 길이이다. Z_{ij} 는 두 장치 간의 중심 좌표에서의 z 축 방향으로의 차이를 통해 필요한 파이프의 길이로 정의한다. 결국 두 장치, i 와 j 간에 연결해야 할 총 파이프의 길이는 TD_{ij} 로 정의할 수 있다.

2.3 벌칙함수

만약 장치를 배치하는데 있어 유지 및 보수를 위한 공간, 장치 간 이격거리 등 장치를 배치할 시 필요한 공간을 반드시 설정해야 한다. 이러한 공간을 반드시 확보하기 위해 벌칙함수를 두어 최대한 필요공간으로 배치가 들어오지 않도록 제약조건을 설정하였다⁷⁾. 본 연구에서는 각 장치가 제약조건을 위반할 경우 각 장치마다 1×10^9 에 해당하는 벌칙을 부여함으로써 최대한 각 장치의 배치가 제약조건을 위반하지 않도록 설정하였다.

2.4 부지면적

플랜트 부지 면적을 구하기 위해 아래의 정의된 식을 통하여 부지 면적의 가로와 세로의 최대 길이를 계산할 수 있다. 그리고 장치는 다음의 제약조건을 통해 충분히 유지, 보수 공간을 확보하도록 부지 안쪽에 위치해야 한다⁴⁾.

$$X_{\max} = \text{Max} \left(x_i + \frac{l_i}{2} + ES_i \right) \quad (10)$$

$$x_i - \frac{l_i}{2} - ES_i \geq 0 \quad (11)$$

$$Y_{\max} = \text{Max} \left(y_i + \frac{l_i}{2} + ES_i \right) \quad (12)$$

$$y_i - \frac{d_i}{2} - ES_i \geq 0 \quad (13)$$

2.5 목적함수

목적함수는 장치들 사이에 연결되는 총 파이프 길이 및 물질을 이송에 드는 비용을 고려하여 아래의 식으로 주어진다. 여기서 CC_{ij} 는 단위 길이 당 파이프비용, CV_{ij} 와 CH_{ij} 는 각각 수직 방향 및 수평 방향으로 물질을 이송할 때 드는 단위길이 기준으로의 비용을 의미한다. A 는 부지의 단위면적당 비용을 의미하여 X_{\max} 와 Y_{\max} 는 부지의 길이, 폭을 의미한다. 마지막으로 함수 $p(x_i, y_i)$ 는 벌칙함수로서 작업이나 통행을 위해 반드시 확보해야 하는 공간을 고려하여 정의한 벌칙함수이다. 벌칙함수에 매우 큰 상수를 부여하여 장치가 필요 공간 이상으로 배치가 되지 않도록 설정할 수 있다. 목적함수를 통해 최적화해야 할 결정변수(decision variable)는 장치 i 기준으로 O_i, x_i, y_i 이다. 장치의 개수가 n 개이면 총 결정변수의 수는 $3 \times n$ 개이며 이 중 O_i 는 0 혹은 1의 값을 갖는 이진변수이다⁴⁾.

$$\text{Min.} \sum_i \sum_{j \neq i} \left[\begin{array}{l} CC_{ij} \times TD_{ij} + CV_{ij} \times Z_{ij} \\ + CH_{ij} \times (X_{ij} + Y_{ij}) \\ + A \times X_{\max} \times Y_{\max} + p(x_i, y_i) \end{array} \right] \quad (14)$$

3. PSO (Particle Swarm Optimization)

본 연구에서는 최적의 배치를 찾기 위해서 정의된 목적함수의 최솟값을 구하기 위해 1995년에 Kennedy와 Eberhart에 의해 제안된 PSO (Particle Swarm Optimization) 기법을 적용하였다. PSO는 새 떼 또는 물고기 떼들의 먹이를 찾는 움직임을 모방하여 개발된 방법이다⁸⁾. 군집(swarm)의 각 개체(particle)는 다차원 탐색공간을 옮겨 다니며 다른 개체들과 정보를 교환하며, 자신과 이웃의 경험에 의한 정보를 이용하여 최적의 해로 이동해 간다. 이를 바탕으로 개체는 이전에 경험했던 최적의 위치정보를 기억한다.

PSO는 Genetic Algorithm과 Simulated Annealing과 같이 경험적 최적화기법이다. 경험적 최적화기법은 모델식이 매우 복잡하여 함수의 미분식을 사용하지 못하

는 경우에 활용성이 우수하다. 일반적으로 최적화 기법에서는 목적함수 및 제약조건에 미분을 사용하여 변곡점 탐색을 통하여 최적 해를 찾는다⁸⁾. 하지만 본 연구에서는 정수로 표현되는 결정변수가 존재하며 또한 공정에 따라 제약조건이 매우 복잡하기 때문에 목적함수 및 제약조건에 미분을 이용하는 것이 불가능하기 때문에 본 연구에서는 미분을 사용하지 않고 최적의 해를 구하기 위해 PSO를 이용하였다.

식 15의 첫 번째 항은 개체의 과거 속도이고 두 번째, 세 번째 항은 군집의 최적 위치 및 각 개체의 최적 위치와 개체의 현재 위치와의 거리를 비교하여 입자의 새로운 속도를 반영한다. 반영된 속도를 바탕으로 식 16을 통해서 새로운 위치로 이동하게 된다⁸⁾.

$$v_{p,d}^{k+1} = wv_{p,d}^k + c_1r_1(x_{p,d}^{ind} - x_{p,d}^k) + c_2r_2(x_d^{glo} - x_{p,d}^k) \quad (15)$$

$$x_{p,d}^{k+1} = x_{p,d}^k + v_{p,d}^{k+1} \quad (16)$$

여기서 v 는 개체의 속도, x 는 입자의 위치이고, x^{glo} 와 x^{ind} 는 최적화를 진행하는 동안 목적함수가 최솟값을 가지는 최적의 입자 위치와 현재 단계에서 입자들 중 목적함수가 가장 낮은 입자의 위치를 보여준다. 아래첨자인 p 는 개체, d 는 탐색방향, k 는 반복횟수를 나타낸다. r_1 과 r_2 는 $[0, 1]$ 의 범위에서 균등분포를 갖는 난수이며 계수 w , c_1 과 c_2 는 PSO의 탐색 매개변수이고 w 는 가중치, c_1 과 c_2 는 각각 지식계수와 사회계수라 정의한다⁹⁾. w 를 큰 값을 가지게 하면 전역탐색에 상당한 비중을 두게 되고 w 가 작은 값을 가지게 되면 국부적인 탐색에 많은 비중을 두게 된다. c_1 과 c_2 는 각각 식 15에서 군집의 최적 위치와 각 개체의 최적 위치로 움직이게 하는 가중치이다. 본 연구에서는 100,000개의 결정 변수 입자들을 풀어놓은 후 PSO 알고리즘을 사용하여 결정 변수중 최적의 조합을 탐색하였다. w 는 1, c_1 과 c_2 는 2를 사용하였다⁸⁾.

4. Ethylene Oxide Process

1920년 이후 화학산업에서 사용되는 중요한 원료 중 하나인 Ethylene Oxide (EO)는 산업안전보건법상 관리대상유해물질로 작업환경측정 및 특수건강진단 대상 물질이다. EO는 상온 및 상압에서 무색·투명한 액체로 달콤한 냄새가 나며 가열시 427℃ 이상의 온도에서 폭발하는 특성이 있다. EO의 주 용도는 의료기기의 멸균가스, 유기화합물의 유도체 합성반응, 살균·살충제 원료, 계면활성제, 세제 원료 등 다방면에서 널리 사용되고 있다¹⁰⁾. EO는 공기 또는 정제된 산소에 의해 Ethylene을 직접 산화하여 얻어진다. EO는 매우 높은 반응성 및 독성을 지니고 있기 때문에 플랜트 설계 시 안전에 대한 요소를 충분히 고려하여 배치를 결정해야 한다. 따라서 본 연구에서는 이러한 EO 공정 배치 시 안전 및 유지·보수에 필요한 공간을 제약조건으로 설정하여 최적 배치를 도출하였다.

4.1 문제 정의

본 연구에서 이용한 EO 플랜트는 아래의 그림과 같이 7개의 장치로 구성되어있다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 반응기, 2개의 열 교환 장치, 2개의 흡수기, 플래

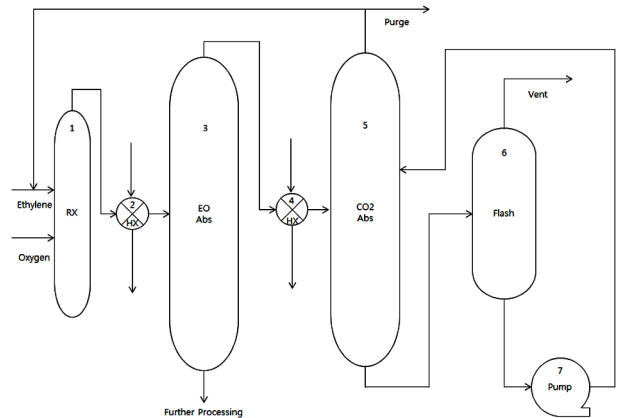


Fig. 1. Ethylene Oxide plant.

Table 1. Equipment information of EO plant¹⁾

Equipment	No.	Width (a_i) [m]	Depth (b_i) [m]	Height (z_i) [m]	Connection
Reactor	1	5.22	5.22	2.61	(1,2)
Heat Exchanger	2	11.42	11.42	4.50	(2,3)
EO Absorber	3	7.68	7.68	3.84	(3,4)
Heat Exchanger	4	8.48	8.48	4.24	(4,5)
CO ₂ Absorber	5	7.68	7.68	3.84	(5,1), (5,6)
Flash Tank	6	2.6	2.6	1.3	(6,7)
Pump	7	2.4	2.4	1.2	(7,5)

Table 2. Basic cost information of EO plant¹⁾

Connection	CC_{ij} (per m)	CH_{ij} (per m)	CV_{ij} (per 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

시 탱크, 펌프로 나열할 수 있다¹⁻⁵⁾. Table 1은 각 장치 별 길이, 폭, 바닥에서부터의 높이 및 장치 간의 연결 방향을 나타내고 있다. 각 장치 별로 유지 및 보수에 필요한 거리로 정의한 ES 는 각 장치의 폭과 길이의 30%를 반드시 확보하도록 설정하였고, 장치 간 최소 이격 거리는 4 m로 정하였다. Table 2는 파이프 길이 당 비용 및 물질을 수직과 수평방향으로 이송할 때 드는 비용 등 모든 비용에 관한 내용을 보여주고 있다¹⁾. 장치의 배치가 유지, 보수에 필요한 거리 및 장치 간 이격 거리와 관련된 제약조건을 위반한 경우 목적함수 내에서 벌칙 함수에 상당히 큰 상수를 부여하여 제약 조건을 위반하지 않으면서 다른 비용을 최소로 하는 최적의 플랜트 배치를 제안하고자 한다.

4.2 결과

EO 플랜트의 배치 문제를 PSO 기법을 이용하여 부지의 면적을 최소화하는 배치를 탐색하였다. 수렴하는 조건을 1×10^{-6} 으로 두어, 바로 직전 결과와 현재 결과의 비율이 1×10^{-6} 보다 적어지면 탐색을 멈추도록 하였다. 그 결과 200번 계산을 반복하여 목적함수의 최솟값이 3.8835×10^5 결과를 얻었다. 부지 크기는 x 축으로 90 m, y 축으로 94 m으로 총면적은 8460 m^2 이다. 실제 공정에 비해 배치 결과가 좀 여유가 있는 것은 장치 간 이격 거리 및 유지, 보수거리를 넓게 정의해서이며, 거리를 좀 더 작게 설정하면 보다 더 콤팩트한 공정 배치를 얻을 수 있다.

Table 3은 장치의 x, y 중심좌표를 나타내고 있다. Fig. 2와 3은 최적의 장치 배치를 보여주고 있다. 각 장치 별로 유지 및 보수를 위해 반드시 확보해야하는 거리 ES 와 4 m로 설정한 장치 간 최소 이격 거리를 모두 만족하고 있다. Fig. 4는 PSO를 이용하여 최적의 값을 탐색하는 동안 목적함수의 값이 줄어드는 것을 보여주고 있다.

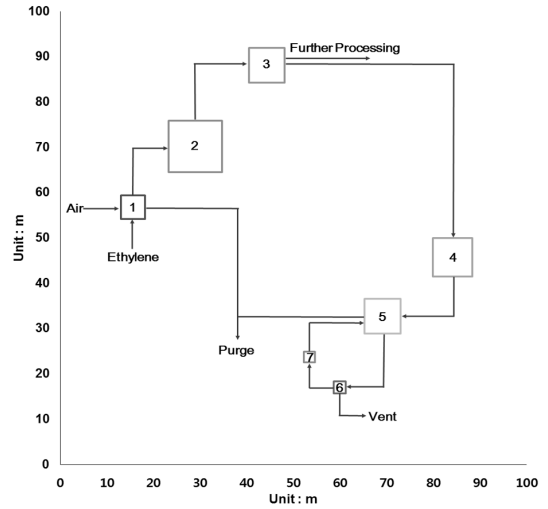


Fig. 2. The optimal results of the EO plant layout.

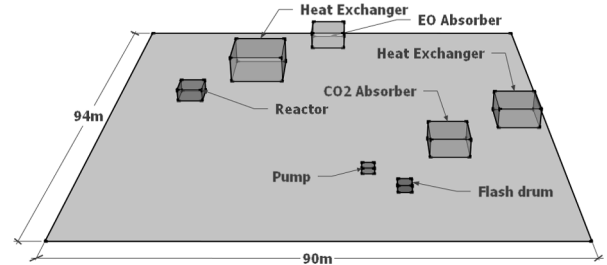


Fig. 3. The 3-D plot of optimal results.

Table 3. The optimal solution in case the only one floor is available and the land size is not fixed

No.	x [m]	y [m]
1	15.56	56.81
2	28.93	70.16
3	44.28	88.09
4	84.13	45.70
5	69.11	32.77
6	59.95	17.03
7	53.41	23.71

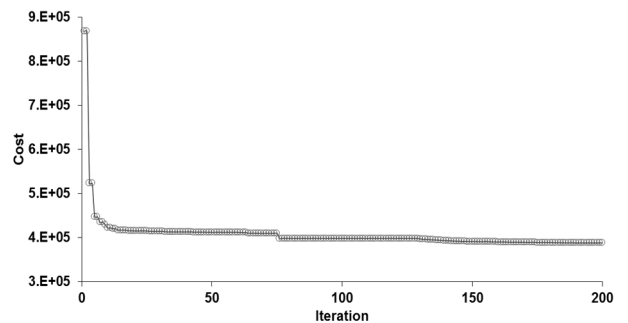


Fig. 4. The changes of minimum cost during PSO iterations.

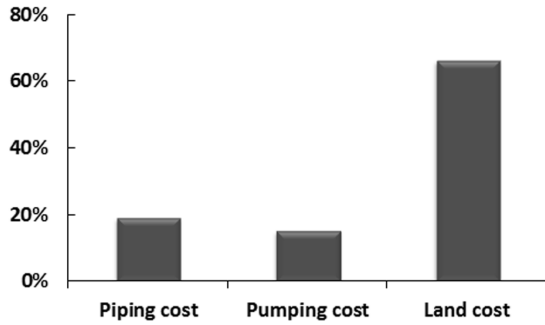


Fig. 5. The cost ratios according to piping, pumping and land.

Fig. 5는 목적함수에 포함되어 있는 파이프 비용, 펌프 비용, 부지 면적 비용의 비율을 보여주고 있으며, 결과에서 확인할 수 있는 것과 같이 부지 비용이 EO 플랜트 건설 시 가장 많은 부분을 차지하고 있다. 따라서 제약 조건을 만족하면서 부지 면적을 최소화 하는 것이 플랜트 건설비용의 핵심 요소임을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 PSO 최적화기법을 이용하여 최소 면적에 가장 비용이 적게 드는 플랜트 배치를 결정하는 방법론을 제안하였다. 현재 다양한 플랜트를 건설 시 육상에 부지를 정하는 경우 인접 지역의 주민과의 마찰을 피하는 문제, 그리고 해상에 설치하는 경우에는 부지 및 설치의 한계를 해결해야 하기 때문에 많은 어려움 및 문제점을 가지고 있다. 본 연구에서 제안한 방법론은 플랜트 건설 시 고려해야 할 다양한 제약 조건들을 반영할 수 있으며, 각 플랜트 장치마다 유지·보수를 위한 공간, 최소 이격 거리를 확보하는 문제도 제약조건으로 포함할 수 있다. 복잡한 플랜트 배치 문제를 수학적 모델로 접근하는 경우 최적화 기법을 이용하여 문제 해결이 가능하지만, 모델이 복잡한 경우 일반적으로 최적화 기법이 이용하는 미분식을 이용하는데 많은 어려움이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 PSO를 이용한 최적화 방법을 제시하였다. 제안한 모델의 검증에 위해 부지 면적이 정해지지 않은 경우 EO 플랜트를 설치하는 문제를 다루었다. 얻어진 결과는 미리 가정한 유지·보수를 위한 최소거리 및 각 장치간 최소 이격 거리를 모두 만족하고 있으며, 파이프 가격, 부지 가격, 유체 이송 비용의 합이 최소인 경우를 제시하였다. 본 연구에서 개발한 방법은 향후에 다양한 형태의 공정 배치를 위한 문제에 쉽게 적용이 가능하며 다층 구조와 같이 보다 더 복잡한 문제로의 확장도 가능하다. 또한 목적 함수에 안전을 고려한 문제를

추가한다면, 다양한사고 시나리오를 포함한 통계적 최적화 문제로 확장이 가능하다.

감사의 글: 이 논문은 2014학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임 (PK-2014-C-D-2014-0231).

References

- 1) F. D. Penteado and A. R. Ciric, "An MINLP Approach for Safe Process Plant Layout" *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 35, No. 4, pp. 1354-1361, 1996.
- 2) C. M. L. Castell, R. Lakshmanan, J. M. Skilling and R. Baires-Alcántara, "Optimisation of Process Plant Layout using Genetic Algorithms," *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 22, pp. 993-996, 1998.
- 3) M. C. Georgiadis, G. Schilling, G. E. Rotstein and S. Macchietto, "A General Mathematical Programming Approach for Process Plant Layout" *Computers & Chemical Engineering*, Vol 23, No. 7, pp. 823-840, 1999.
- 4) D. I. Patsiatzis and L. G. Papageorgiou, "Optimal Multi-Floor Process Plant Layout" *Computers & Chemical Engineering*, Vol 26, No. 4-5, pp. 575-583, 2002.
- 5) 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.
- 6) N. K. Ku, J. C. Lee, M. I. Roh, J. H. Hwang and K. Y. Lee, "Multi-floor Layout for the Liquefaction Process Systems of LNG FPSO using the Optimization Technique", *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 49, No. 1, pp. 68-78, 2012.
- 7) P. J. Park and C. J. Lee, "Study of Multi Floor Plant Layout Optimization Based on Particle Swarm Optimization", *Korean Chemical Engineering Research*, Vol. 52, No. 4, pp. 475-480, 2014.
- 8) M. Schwab, E.C. Biscaia, J.L. Monteiro, J.C. Pinto, "Nonlinear Parameter Estimation through Particle Swarm Optimization", *Chemical Engineering Science*, Vol. 63, No. 6, pp. 1542-1552, 2008.
- 9) C. J. Lee, V. Prasad and J. M. Lee, "Stochastic Nonlinear Optimization for Robust Design of Catalysts", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 50, No. 7, pp. 3938-3946, 2011.
- 10) Y. G. Kim, G. S. Go, D. H. An, E. M. Bin, "Chemical Substances Circulation · Use Research - Ethylene Oxide", *Korea Occupational Safety Health Agency*, 2010.