



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

수학적 모델링과 입자 군집 최적화 기법을
이용한 플랜트 최적화 배치에 관한 연구



2016年 2月

釜慶大學校大學院

安全工學科

朴平宰

工學碩士 學位論文

수학적 모델링과 입자 군집 최적화 기법을
이용한 플랜트 최적화 배치에 관한 연구

指導教授 李 彰 峻

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함

2016年 2月

釜 慶 大 學 校 大 學 院

安 全 工 學 科

朴 平 宰

朴平宰의 工學碩士 學位論文을
認准함

2016年 2月

主 審 工學博士 吳 昌 備 (인)

委 員 工學博士 李 義 周 (인)

委 員 工學博士 李 彰 峻 (인)

A Study of Plant Layout Optimization
based on a Mathematical Modeling and Particle Swarm Optimization

Pyung Jae Park

Department of Safety Engineering, Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

The main goal of chemical plant layout optimization is to minimize the cost of pipe length between equipments. However, previous researches have handled single floor plants and ignored the safety factor about securing maintenance spaces and proper distances between equipments.

In this study, the MILP(Mixed Integer Linear Programming) problem considers maintenance spaces and distances between equipments. And,

the objective function is the summation of piping and pumping cost as considering the issues about securing maintenance spaces and proper distances between equipments.

In general, in order to solve an optimization problem, conventional optimization solvers use the derivatives of constraint and objective functions. However, due to the complexity of case studies, it is not always possible to use them. Therefore, in this study, PSO(Particle Swarm Optimization), which is one of the representative sampling approaches and does not need derivatives of equation, is employed.

EO(Ethylene oxide) plant and LNG-FPSO(Liquefied Natural Gas-Floating Production Storage and Offloading) are tested to verify the efficacy of this study.

목 차

Abstract	i
목차	iii
Table List	vi
Figure List	vii
제 1 장 서 론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 기존의 연구	3
1.3 연구 목적	6
제 2 장 최적화 배치	8
2.1 최적화 배치	8
2.2 최적화 문제 정의	9
2.3 최적화 배치를 위한 모델링	10
2.3.1 장치의 길이 및 방향 제약조건	10
2.3.2 장치의 중첩 방지 제약조건	11
2.3.3 장치 간 연결되는 파이프 길이 제약조건	13

2.3.4 플랜트 면적 제약조건	15
2.3.5 장치 설치 면적 제약조건	16
2.4 최적화 기법	17
2.4.1 입자 군집 최적화 기법 정의	18
2.4.2 입자 군집 최적화 기법 절차	19
 제 3 장 Ethylene Oxide Plant 배치	 21
3.1 Ethylene Oxide Plant	21
3.2 Single Floor 면적 최소화 배치	22
3.2.1 문제 정의	22
3.2.2 목적함수	26
3.2.3 배치 결과	27
3.3 Multi-Floor 최적화 배치	31
3.3.1 문제 정의	31
3.3.2 목적함수	32
3.3.3 배치 결과	33
 제 4 장 LNG-FPSO 배치	 42
4.1 LNG-FPSO	42

4.2 Multi-Floor 최적화 배치	43
4.2.1 문제 정의	43
4.2.2 목적함수	48
4.2.3 배치 결과	49
제 5 장 결론 및 고찰	64
참고문헌	66



Table List

Table 1. Equipment information of EO plant taken from [2]	24
Table 2. Basic cost information of EO plant taken from [2]	25
Table 3. Minimization results of EO plant on a single floor	28
Table 4. Optimal results of EO plant on the multi-floor in case the height of floor is 6m	34
Table 5. Optimal results of EO plant on the multi-floor in case the height of floor is 7m	38
Table 6. Equipment information of LNG-FPSO taken from [11]	46
Table 7. Basic cost information of LNG-FPSO taken from [11]	47
Table 8. Optimal results of LNG-FPSO on the multi-floor in case the floor size is 35m×35m	50
Table 9. Optimal results of LNG-FPSO on the multi-floor in case the floor size is 30m×40m	57

Figure List

Figure 1. Process flow diagram of EO plant taken from [2]	23
Figure 2. Minimization layout of EO plant on a single floor	29
Figure 3. Three dimensional minimization layout of EO plant on a single floor	30
Figure 4. Optimal layout of EO plant on the first floor in case the height of floor is 6m	35
Figure 5. Optimal layout of EO plant on the second floor in case the height of floor is 6m	36
Figure 6. Three dimensional optimal layout of EO plant on the multi-floor in case the height of floor is 6m	37
Figure 7. Optimal layout of EO plant on the first floor in case the height of floor is 7m	39
Figure 8. Optimal layout of EO plant on the second floor in case the height of floor is 7m	40
Figure 9. Three dimensional optimal layout of EO plant on the multi-floor in case the height of floor is 7m	41
Figure 10. Process flow diagram of dual mixed refrigerant cycle	

taken from [5]	45
Figure 11. Optimal layout of LNG-FPSO on the first floor in case the floor size is 35m×35m	51
Figure 12. Optimal layout of LNG-FPSO on the second floor in case the floor size is 35m×35m	52
Figure 13. Optimal layout of LNG-FPSO on the third floor in case the floor size is 35m×35m	53
Figure 14. Optimal layout of LNG-FPSO on the fourth floor in case the floor size is 35m×35m	54
Figure 15. Optimal layout of LNG-FPSO on the fifth floor in case the floor size is 35m×35m	55
Figure 16. Three dimensional optimal layout of LNG-FPSO on the multi-floor in case the floor size is 35m×35m	56
Figure 17. Optimal layout of LNG-FPSO on the first floor in case the floor size is 30m×40m	58
Figure 18. Optimal layout of LNG-FPSO on the second floor in case the floor size is 30m×40m	59
Figure 19. Optimal layout of LNG-FPSO on the third floor in case the floor size is 30m×40m	60

Figure 20. Optimal layout of LNG-FPSO on the fourth floor in case the floor size is 30m×40m	61
Figure 21. Optimal layout of LNG-FPSO on the fifth floor in case the floor size is 30m×40m	62
Figure 22. Three dimensional optimal layout of LNG-FPSO on the multi-floor in case the floor size is 30m×40m	63



제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

다양한 원료를 사용하여 복잡한 일련의 화학적 제조공정을 통해 물품을 생산, 제조하는 화학 산업은 다양한 분야의 수요증가에 따라 기존의 화학 산업의 범위를 확장하여 유기화학, 무기화학, 생화학 그리고 물리화학 등 다양한 분야와 복합을 통해 발전하고 있다. 화학 산업이 발전함에 따라 다양한 종류의 플랜트가 육상 및 해상에 건설되고 있으며, 또한 제품의 생산 및 수요 증대로 과거에 비해 화학 공정이 복잡해지고 위험한 물질을 취급하는 경우가 증가하고 있다. 특히, 해상에 플랜트를 건설하는 경우 플랫폼 위의 좁은 부지 면적 때문에 다층 형태로 건설되고 있다.

플랜트를 건설하는 경우, 어떤 화학 공정을 건설해야 할지 결정하는 공정 설계, 즉 FEED(Front End Engineering Design)도 매우 중요하지만 플랜트가 건설되는 부지의 필요한 면적을 결정하고, 그 부지 위에 플랜트를 구성하는 다양한 장치들을 배치하는 작업은 많은 경험과 독창성 및 창의력을 요구하는 매우 어려운 문제이다. 또한, 플랜트 건설에 안전 및 환경과

관련된 다양한 법규를 충족해야 한다. 그리고 플랜트를 운영할 경우, 유지 및 보수를 위한 충분한 공간 확보가 필요하며 작업자들을 위한 통행로 등 다양한 제약조건을 고려해야 한다. 따라서 다양한 제약조건을 모두 만족하면서 플랜트 총 건설비용을 최소화 하는 방향으로 최적화 배치가 이루어져야 한다.

본 연구에서는 플랜트 건설 시 고려해야 할 다양한 제약조건을 수학적인 모델링으로 설계하고, 플랜트의 총 건설비용을 목적함수로 설정했다. 그리고 최적화 기법을 이용하여 목적함수의 값을 최소로 하는 조건을 탐색하고자 한다.

1.2 기존의 연구

플랜트의 장치 배치 문제를 해결하기 위해 많은 연구들이 이루어져 왔다.

Penteado와 Ciric (1996)은 안전을 고려하여 플랜트의 장치를 단층에 최적화 배치하는 것을 연구하였다. 목적함수로 장치 간 연결되는 파이프 비용, 플랜트가 건설되는 부지의 넓이에 관한 비용, 장치의 방호장치 비용 그리고 장치 손상관련 비용의 합으로 정의하였다. 이를 바탕으로 결정된 수학적 최적화 모델을 MINLP(Mixed Integer Nonlinear Programming) 문제로 정의하여 GAMS를 이용하여 최적의 배치를 탐색하였다[3].

Castell (1998) 등은 장치 간 연결되는 파이프 비용, 플랜트가 건설되는 부지의 넓이에 관한 비용 그리고 Mond safety index를 이용한 거리의 합을 최소화하는 목적함수를 사용하여 수학적 최적화 모델을 정의하였다. 그리고 목적함수의 미분불가능성을 해결할 수 있는 유전 알고리즘을 사용하여 플랜트 배치 문제를 최적화 문제형태로 제안하였다[1].

Patsiatzis와 Parageorgiou (2002)은 장치 간 연결되는 파이프 비용, 플랜

트가 건설되는 부지의 넓이에 관한 비용, 파이프를 통한 유체의 이송에 관한 비용 그리고 층의 개수에 따른 추가 건설비용의 합으로 목적함수를 정의하였다. 이를 바탕으로 결정된 최적화 모델을 MILP(Mixed Integer Linear Programming)문제로 정의하여 최적의 배치를 탐색하였다[2].

Park (2011) 등은 목적함수로 장치 간 연결되는 파이프 비용, 플랜트가 건설되는 부지의 넓이에 관한 비용, 파이프를 통한 유체의 이송에 관한 비용, 층의 개수에 따른 추가 건설비용 그리고 폭발 사고 시 발생할 수 있는 장치의 손상 비용의 합으로 정의하였다. 이를 바탕으로 결정된 최적화 모델을 MILP문제로 설계하고 GAMS를 이용하여 최적의 배치를 제안하였다 [8].

Ku (2012) 등은 목적함수로 장치 간 연결되는 파이프 비용, 플랜트가 건설되는 부지의 넓이에 관한 비용을 고려하였다. 그리고 이 문제를 해결하기 위하여 유전 알고리즘과 SQP(Sequential Quadratic Programming) 방법을 혼합한 hybrid 최적화 방법을 활용하여 LNG-FPSO의 최적의 배치를 탐색하였다[11].

앞서 언급한 연구들은 대체적으로 단층에 배치하는 문제를 다루고 있으

며, 안전을 고려한 장치간의 최소 이격 거리, 작업자들을 위한 충분한 유지 및 보수 공간을 고려하지 않은 경우가 대부분이다. 특히, 해상에 다층 플랫폼을 건설하는 경우 유지 및 보수에 필요한 충분한 작업공간을 확보해야 한다. 즉, 공정 특성에 따라 다양하고 복잡한 제약조건이 존재할 수 있으며, 이러한 부분을 쉽게 고려하여 최적의 배치를 탐색하는 방법론의 개발이 매우 시급하다.



1.3 연구 목적

플랜트 최적화 배치의 주요 목적은 안전을 확보하면서 최소의 부지와 최소의 비용이 발생하는 배치를 탐색하는 것이다. 안전과 관련된 장치 간의 최소 이격 거리, 유지 및 보수를 위한 충분한 공간 그리고 작업자들을 위한 통행로 등 플랜트의 유형에 따라 다양한 제약조건을 고려해야하며 장치 간 연결되는 파이프의 길이, 파이프 길이에 비례하는 유체의 이송비용 그리고 플랜트가 건설되는 부지 면적 최소화를 통해 가장 합리적이고 경제적인 설계를 해야 한다. 이를 통해 플랜트 건설 시 막대한 비용을 절감할 수 있을 것이다.

현재 플랜트 건설 시 육상에 부지를 정하는 경우, 인접한 지역의 주민과 마찰을 최소화하기 위해 주변 지역의 거주 인구가 적으며 수송, 하역, 포장 그리고 보관 등의 기본 인프라가 충분히 갖춘 부지가 가장 최적의 장소이다. 즉, 다양한 입지 조건을 만족하면서 최소의 부지 매입비용이 드는 곳을 선택해야 한다. 하지만 이러한 문제는 매우 어려운 문제이다. 또한, 해상에 플랜트를 설치하는 경우, 좁은 부지와 다양한 장치 배치 시 발생하는 많은 어려움을 해결해야하기 때문에 육상 플랜트를 건설하는 경우보다 더 많은 문제점이 있다. 따라서 충분한 안전을 확보하면서 육상에 건설하는 경우보

다 더 콤팩트한 배치가 이루어져야 한다.

최근 20여 년 동안 학계에서 진행된 연구들의 문제점을 살펴보면 상용 최적화 프로그램을 사용하는 경우가 대부분이기 때문에 정확한 General Equations을 사용해야 한다. 플랜트 종류에 따라 다양한 제약조건이 존재하며, 또한 동일한 플랜트라도 부지 및 장치에 따라 서로 다른 제약조건이 존재하는 경우가 많기 때문에 General Equations으로 제약조건을 표현하는데 많은 문제점을 가질 수 있다. 또한 앞서 언급한 연구들은 대체적으로 단층 문제에 한정되어 있고 안전을 고려한 장치 간 최소 이격 거리, 작업자들을 위한 통행로 그리고 장치의 충분한 유지 및 보수 공간들을 고려하지 않은 경우가 대부분이다. 그리고 안전을 고려하여 최적화 문제를 설계한 경우에 안전과 관련된 파라미터를 결정하는데 많은 주관적인 요소가 존재한다. 게다가, 대부분의 연구에서는 목적함수와 제약조건을 미분을 이용하여 변곡점을 탐색하고 이를 통해 최적해를 찾는 최적화 기법을 사용하였다. 하지만, 다양한 제약조건이 존재하는 경우에 식이 매우 복잡해질 수 있으며 이에 따라 미분을 이용하는 기법을 사용하여 최적해를 탐색하는 것이 불가능한 경우가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구의 목적은 다양한 제약조건이 반영이 가능하며 목적함수 및 제약조건이 복잡하더라도 다양한 종류의 플랜트 최적화 배치 문제를 해결할 수 있는 알고리즘의 개발이다.

제 2 장 최적화 배치

2.1 최적화 배치

최적화 배치는 다양한 장치를 주어진 제약조건을 고려하여 플랜트가 건설 될 부지에 효율적으로 배치하는 작업이다. 플랜트의 장치 배치 문제를 해결하기 위해 휴리스틱과 그래프 이론에 의한 접근법으로 연구가 진행되었고, 최근에는 MILP 및 MINLP와 같은 수학적 프로그래밍에 의한 방법으로 연구가 진행되었다.

일반적으로 최적화 배치 문제의 목적함수는 플랜트 건설 시 발생하는 총 비용을 최소화하는 것이다. 그리고 장치의 생산성, 유연성, 신뢰성, 안전성 및 환경 등 다양한 제약조건을 목적함수에 추가하여 고려해야 한다[6].

2.2 최적화 문제 정의

플랜트의 장치 배치 문제를 해결하기 위해 다음과 같은 사항들이 사전에 결정되어야 한다[2].

- 1) PFD(Process Flow Diagram)
- 2) 장치 종류와 크기
- 3) 장치별 이격 거리
- 4) 비용에 관한 정보
- 5) 층의 수와 높이
- 6) 연결 방향

공정에 들어가는 모든 장치의 종류와 크기, 가격 등 위의 요소들이 다 정해져 있는 상태에서 최적화가 진행된다. 본 논문에서 소개되는 기본적인 식들은 Patsiatzis(2002) 등에 의해 개발된 식을 바탕으로 다양한 제약조건을 반영할 수 있도록 개선한 식이다[2].

2.3 최적화 배치를 위한 모델링

2.3.1 장치의 길이 및 방향 제약조건

본 연구에서 사용되는 모든 장치의 모양은 사각형이며, 방향은 90° 회전이 가능하다고 가정한다. 그리고 방향 회전에 따른 장치의 길이 및 폭은 다음과 같은 제약조건에 의해 정의된다[2].

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

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

위 식에서 a_i 는 가로, b_i 는 세로이고 O_i 는 장치 i 의 회전 여부를 나타내는 이진 변수이다. O_i 는 값이 1인 경우, 장치는 회전하지 않고 그대로 설치되며, 반대로 O_i 값이 0인 경우, 장치는 90° 회전하여 설치된다. 따라서 l_i 는 x 축 방향으로의 장치의 길이, d_i 는 y 축 방향으로의 장치의 폭이다.

2.3.2 장치의 중첩 방지 제약조건

서로 연결되는 두 장치가 같은 층에 위치하는 경우, 두 장치가 서로 겹치지 않게 배치해야 한다. 이러한 점을 고려하기 위해 이진 변수인 V_{ik} 를 설정하였다. 장치 i 가 k 층에 설치되는 경우, V_{ik} 의 값은 1이고 반대로 장치 i 가 k 층에 설치되지 않는 경우, V_{ik} 의 값은 0을 가지게 된다. 두 장치가 같은 층에 위치하면 $F_{ij} = V_{ik} \times V_{jk}$ 의 값은 1을 갖게 된다. 만약에 장치 j 가 k 층이 아닌 다른 층에 위치한다면 V_{jk} 가 0을 갖게 되며 결국 F_{ij} 는 0이 된다[12].

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

장치 i 의 유지 및 보수를 위한 공간 그리고 작업자들의 통행을 위해 반드시 확보해야 할 거리는 ES_i 로 정의하였다. 그리고 각 장치 간 안전을 위해 반드시 떨어져야 하는 최소 이격 거리는 m 으로 정의하였다. 장치 i 와 장치 j 의 유지 및 보수를 위한 거리와 장치 간 최소 이격 거리를 비교하여 판별하는 식은 다음과 같다[12].

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

C_{ij} 는 유지 및 보수를 위한 거리와 장치 간 최소 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. 이 식은 유지 및 보수를 위한 거리와 장치 간 최소 이격 거리의 크기를 비교를 통해 두 장치 간 긴 거리를 확보하는 값을 최종적으로 장치 간의 떨어져야 할 거리로 설정하기 위해서다[12].

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 장치 간의 이격 거리의 합보다 크거나 같음으로 정의했다[12].

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

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

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

2.3.3 장치 간 연결되는 파이프 길이 제약조건

두 장치 i, j 의 중심좌표는 $(x_i, y_i), (x_j, y_j)$ 이고 장치 높이의 절반을 z_i, z_j 로 정하여 두 장치 i 와 j 를 연결하는 총 파이프 길이는 다음과 같이 정의하였다[12].

$$X_{ij} = |x_i - x_j| \quad (7)$$

$$Y_{ij} = |y_i - y_j| \quad (8)$$

$$Z_{ij} = |z_i - z_j| + H \times \left| \sum_{k=1}^F k \times (V_{ik} - V_{jk}) \right| \text{ where } z_j < z_i \quad (9)$$

$$Z_{ij} = |z_j - z_i| + H \times \left| \sum_{k=1}^F k \times (V_{ik} - V_{jk}) \right| \text{ where } z_i < z_j \quad (10)$$

$$Z_{ij} = |z_j - z_i| \text{ where } z_i = z_j \quad (11)$$

$$TD_{ij} = X_{ij} + Y_{ij} + Z_{ij} \quad (12)$$

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

여기서 F 는 층의 수이고 X_{ij} 는 장치 간의 x 축 방향으로 연결하는데 필요한 파이프의 길이이며, Y_{ij} 는 장치 간의 y 축 방향으로 연결하는데 필요한 파이프의 길이이다. 그리고 Z_{ij} 는 두 장치 간의 중심 좌표에서의 z 축 방향으로의 차이를 통해 연결하는데 필요한 파이프의 길이로 정의한다. 결국 두 장치 i 와 j 간에 연결해야 할 총 파이프 길이는 TD_{ij} 로 정의하였다[12].



2.3.4 플랜트 면적 제약조건

다음의 식을 통해 플랜트 부지 면적의 가로와 세로 최대 길이에 관한 제약조건을 정의하였다. 그리고 각 장치는 유지 및 보수를 위한 공간을 확보하고 다음의 제약조건을 만족하면서 설치해야 한다[12].

$$Max(x_i + \frac{l_i}{2} + ES_i) \leq X_{\max} \quad (13)$$

$$Min(x_i - \frac{l_i}{2} - ES_i) \geq 0 \quad (14)$$

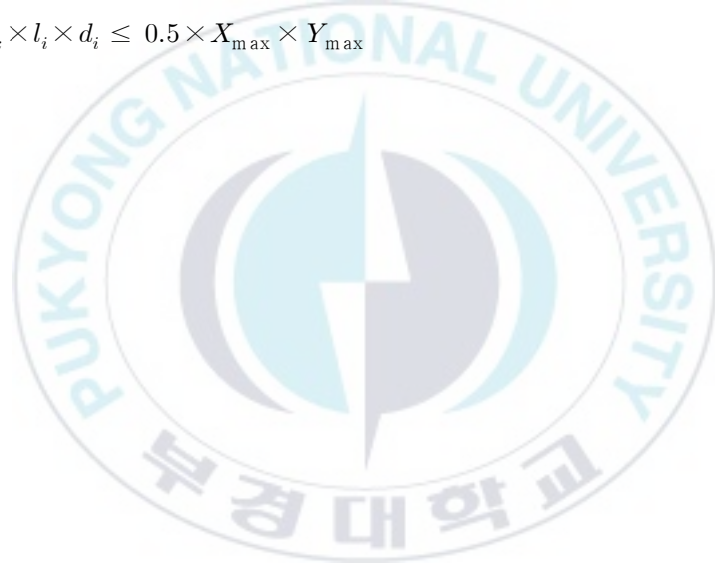
$$Max(y_i + \frac{l_i}{2} + ES_i) \leq Y_{\max} \quad (15)$$

$$Min(y_i - \frac{d_i}{2} - ES_i) \geq 0 \quad (16)$$

2.3.5 장치 설치 면적 제약조건

원활한 작업을 위해 충분한 작업환경과 추가적인 장치 배치를 고려해야 한다. 따라서 장치들의 면적이 부지 면적의 50%이하로 배치되게 하는 제약조건은 아래의 식으로 정의하였다.

$$\sum_i \sum_k V_{ik} \times l_i \times d_i \leq 0.5 \times X_{\max} \times Y_{\max} \quad (17)$$



2.4 최적화 기법

최적화 기법은 주어진 제약조건을 만족하면서 구하고자 하는 목적함수의 최댓값 또는 최솟값을 구하는 방법이다. 일반적으로 최적화 문제를 해결하기 위해 미분을 이용하여 변곡점을 탐색을 통해 최적해를 찾는다. 하지만 복잡하고 다양한 최적화 문제를 효율적으로 해결할 수 있는 유일한 방법은 존재하지 않는다. 따라서 다양한 최적화 문제들을 해결하기 위해 많은 최적화 기법들이 연구되어 왔다.

최근에 복잡하고 다양한 최적화 문제를 해결하기 위해 샘플링에 기반을 둔 최적화 기법들이 개발되었다. 생물의 진화과정과 유전 법칙을 모방한 확률적 탐색기법인 유전 알고리즘, 금속 재료를 적당한 온도로 가열한 다음 서서히 상온으로 냉각시키는 조작과정을 기초한 기법인 Simulated Annealing, 개미집단의 움직임을 모방하여 개발된 기법인 Ant Colony Optimization 그리고 개미와 벌과 같은 곤충의 떼, 새의 무리 그리고 물고기 집단과 같은 사회적 무리의 움직임을 모방한 입자 군집 최적화 기법 등이 개발되었다[13].

2.4.1 입자 군집 최적화 기법 정의

입자 군집 최적화 기법은 벌이나 개미와 같은 곤충 집단, 조류 및 어류 등 무리의 행동에서 영감을 얻어 개발된 진화 연산 기법으로 1995년에 J.Kennedy와 R. Eberhart에 의해 제안되었다.

입자 군집 최적화 기법은 각 개체들이 군집을 이루며 다차원 탐색공간을 이동하며 각 개체가 가진 현재의 속도와 경험에 대해 평가한다. 그리고 각 개체의 정보와 군집의 전체에 공유되어 있는 정보를 참조하여 최적의 해가 존재하는 위치로 진화하며 최적의 값을 찾는다. 예를 들어, 개체는 무리에서 한 마리의 벌 또는 한 마리의 새를 나타낸다. 각 개체가 먹이까지의 좋은 경로를 발견하면 무리 내 다른 나머지도 최적의 경로를 따라 먹이로 이동하는 것이다[7].

입자 군집 최적화 기법은 이론의 간결성, 구현의 용이성, 연산의 효율성의 특징을 가진다. 또한 개체를 기반으로 하는 기법으로 지역극소에 빠질 위험성이 적으며, 복잡하고 불확실한 영역에서의 탐색이 가능하기 때문에 기존의 다른 방법들보다 유연하다. 그리고 입자 군집 최적화 기법은 미분 불가능한 함수들을 쉽게 다룰 수 있다[7].

2.4.2 입자 군집 최적화 기법 절차

탐색 공간에서 최적의 위치를 찾기 위해, 각 개체는 임의의 초기 위치 및 속도를 가지고 생성한다. 초기에 생성된 각 개체의 최적의 위치는 x^{ind} 로 정의하고 개체가 이루는 군집의 최적의 위치는 x^{glo} 로 정의하였다. 개체의 속도와 위치는 아래의 식을 통하여 계산한다[12].

$$v_{p,d}^{k+1} = wv_{p,d}^k + c_1r_1(x_{p,d}^{ind} - x_{p,d}^k) + c_2r_2(x_d^{glo} - x_{p,d}^k) \quad (18)$$

$$x_{p,d}^{k+1} = x_{p,d}^k + v_{p,d}^{k+1} \quad (19)$$

여기서 v 는 개체의 속도, x 는 개체의 위치이다. 그리고 아래첨자인 p 는 개체, d 는 탐색방향, k 는 반복횟수이다. 그리고 r_1 과 r_2 는 0과 1사이의 범위에서 균등분포를 갖는 임의의 값을 가진다. 계수 w , c_1 과 c_2 는 입자 군집 최적화 기법의 탐색 매개변수로 w 는 가중치, c_1 과 c_2 는 각각 지식계수와 사회계수이다[9]. 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 18에서 군집의 최적 위치와 각 개체의 최적 위치로 움직이게 하는 가중치이다[9].

본 연구에서는 1,000,000개의 개체들을 임의로 흩어놓은 후 입자 군집 최적화 기법을 1,000번의 반복과정을 통해 최적의 위치를 탐색하였다.



제 3 장 Ethylene Oxide Plant 배치

3.1 Ethylene Oxide Plant

EO는 1920년 이후 화학 산업에서 사용되는 중요한 원료로 상온 및 상압에서 무색이고 투명한 액체이며 달콤한 냄새가 나고 가열시 427℃ 이상의 온도에서 폭발하는 특성이 있다. EO의 주 용도는 의료기기의 멸균가스, 유기화합물의 유도체 합성반응, 살균 및 살충제 원료, 계면활성제, 세제 원료 등 다방면에서 널리 사용되고 있다[16].

그러나 EO는 매우 높은 반응성 및 독성을 가진 위험한 화학물질이다. 따라서 산업안전보건법상 관리대상유해물질로 작업환경측정 및 특수건강진단 대상물질로 지정되었고, NFPA(National Fire Protection Agency)규정에서도 가장 위험한 물질 중 하나로 분류된다[10]. 따라서 본 연구에서는 위험한 물질인 EO 생산을 위한 장치의 최적배치를 도출하였다.

3.2 Single Floor 면적 최소화 배치

3.2.1 문제 정의

본 연구에서 이용한 EO Plant는 총 7개의 장치로 구성되어있다. Fig 1에서 보는 바와 같이 반응기, 열 교환 장치 2개, 흡수기 2개, 플래시 탱크, 펌프로 구성되어 있다[2]. Table 1은 각 장치의 가로 및 세로의 길이, 높이 그리고 장치 간 파이프의 연결 방향을 나타내고 있다[2]. Table 2는 파이프 길이 당 비용 및 물질을 수직과 수평방향으로 이송할 때 발생하는 비용에 관한 내용을 나타내고 있다[2]. 그리고 각 장치별 유지 및 보수에 필요한 거리로 정의한 ES 는 각 장치 가로 및 세로 길이의 30%를 반드시 확보하도록 설정하고 장치 간 최소 이격 거리는 4m로 정하였다.

제약조건을 벗어난 경우 목적함수 내 벌칙함수에 매우 큰 상수를 부여하여 제약조건을 위반하지 않으면서 비용이 최소가 되는 최적의 플랜트 배치를 제안하고자 한다.

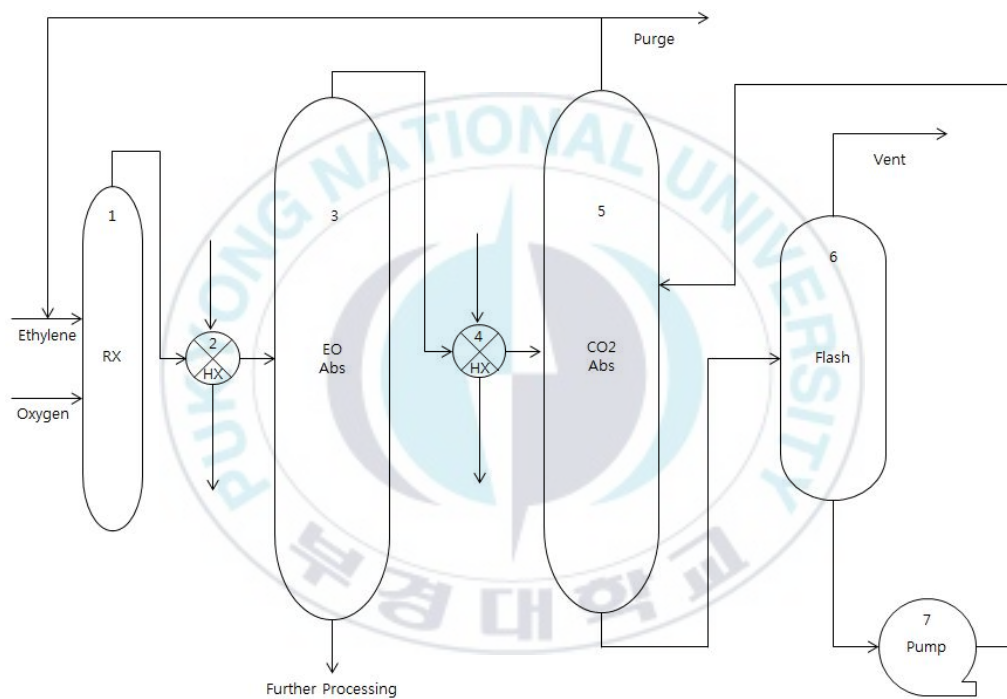


Figure 1. Process flow diagram of EO plant taken from [2]

Table 1. Equipment information of EO plant taken from [2]

Equipment	Width [m]	Depth [m]	Height [m]	Connection
Reactor	5.22	5.22	2.61	(1,2)
Heat Exchanger	11.42	11.42	4.50	(2,3)
EO Absorber	7.68	7.68	3.84	(3,4)
Heat Exchanger	8.48	8.48	4.24	(4,5)
CO ₂ Absorber	7.68	7.68	3.84	(5,1) (5,6)
Flash drum	2.6	2.6	1.3	(6,7)
Pump	2.4	2.4	1.2	(7,5)

Table 2. Basic cost information of EO plant taken from [2]

Equipment	CC_{ij} (per m)	CH_{ij} (per m)	CV_{ij} (per m)
Reactor	200	400	4000
Heat Exchanger	200	400	4000
EO Absorber	200	300	3000
Heat Exchanger	200	300	3000
CO ₂ Absorber	200	100	1000
	200	200	2000
Flash drum	200	150	1500
Pump	200	150	500

3.2.2 목적함수

목적함수는 각 장치 간 연결되는 파이프 비용 및 파이프 내 유체 이송 비용, 부지 비용 그리고 벌칙함수의 합을 고려하여 아래의 식으로 주어진다.

$$\text{Min.} \sum_i \sum_{j \neq i} [CC_{ij} \times TD_{ij} + CV_{ij} \times Z_{ij} + CH_{ij} \times (X_{ij} + Y_{ij}) + A \times X_{\max} \times Y_{\max} + p(x_i, y_i)] \quad (20)$$

위 식에서 CC_{ij} 는 단위 길이 당 파이프비용, CV_{ij} 와 CH_{ij} 는 각각 수직 방향 및 수평 방향으로 물질을 이송할 때 발생하는 단위길이 당 비용을 의미한다. 그리고 A 는 부지의 단위면적 당 비용으로 26.6의 값을 가지며, $X_{\max}$ 와 $Y_{\max}$ 는 부지의 가로 및 세로의 길이를 의미한다[8].

$p(x_i, y_i)$ 는 작업이나 통행을 위해 반드시 확보해야 하는 공간을 배치하기 위해 정의한 벌칙함수이다. 벌칙함수에 매우 큰 상수를 부여하여 각각의 장치가 필요 공간 이상으로 배치가 되지 않도록 설정하였다. 목적함수를 통해 최적화해야 할 결정변수는 장치 i 기준으로 O_i , x_i , y_i 이다. 장치의 개수가 n 개이면 총 결정변수의 수는 $3 \times n$ 개다.

3.2.3 배치 결과

EO Plant의 배치 문제를 입자 군집 최적화 기법을 이용하여 단층 플랜트 부지의 면적을 최소화하는 배치를 탐색하였다. 1,000번 계산을 반복하여 목적함수의 최솟값이 1.1852×10^5 이다. 그리고 플랜트 부지 면적의 크기는 x 축으로 31.8m, y 축으로 39.2m으로 총면적은 1246.6m^2 이다.

Table 3은 각 장치의 x , y 중심좌표를 나타내고 있다. Fig 2 ~ 3은 EO Plant 장치의 최적 배치를 보여주고 있다. 각 장치별 유지 및 보수를 위해 반드시 확보해야하는 거리 ES 와 장치 간 최소 이격 거리를 모두 만족하고 있다.

Table 3. Minimization results of EO plant on a single floor

Number	Equipment	x [m]	y [m]
1	Reactor	10.67	22.58
2	Heat Exchanger	9.75	9.25
3	EO Absorber	25.12	10.65
4	Heat Exchanger	25.02	30.39
5	CO ₂ Absorber	11.41	33.05
6	Flash drum	2.21	36.95
7	Pump	2.32	30.42

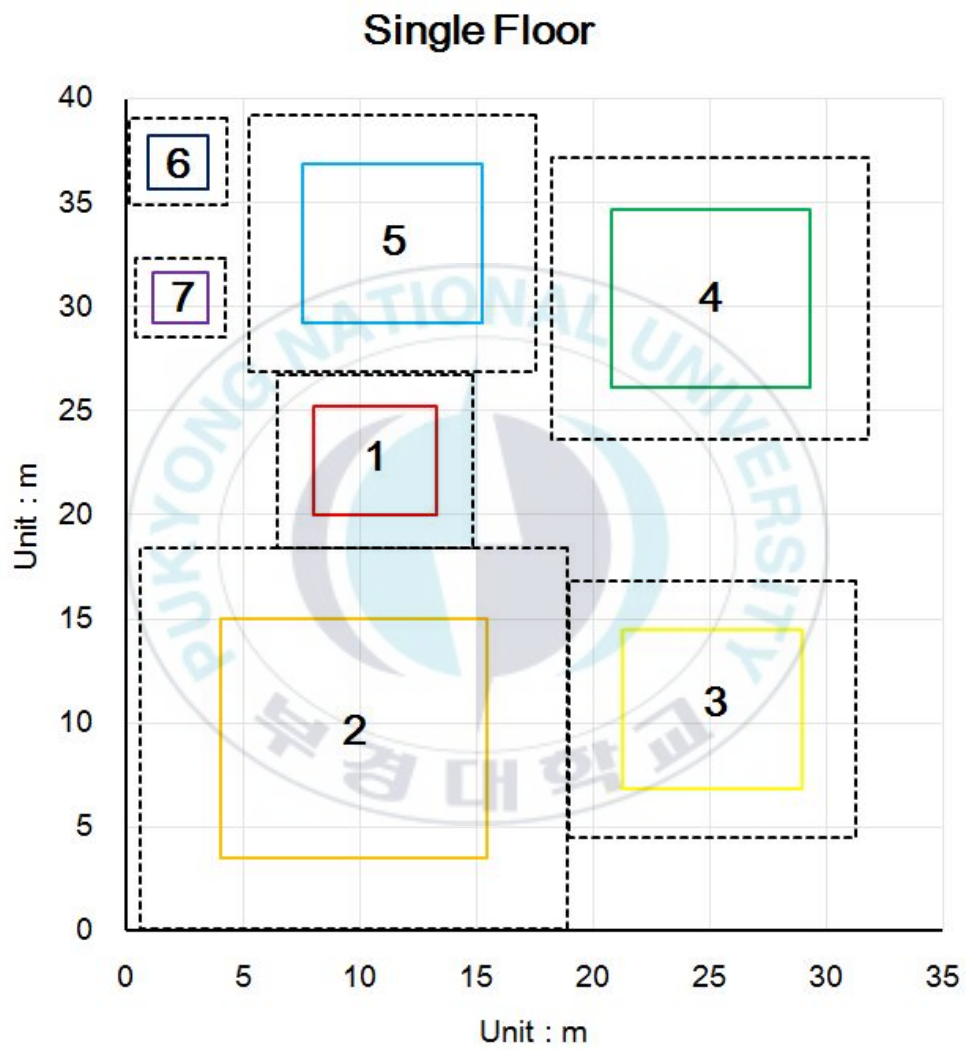


Figure 2. Minimization layout of EO plant on a single floor

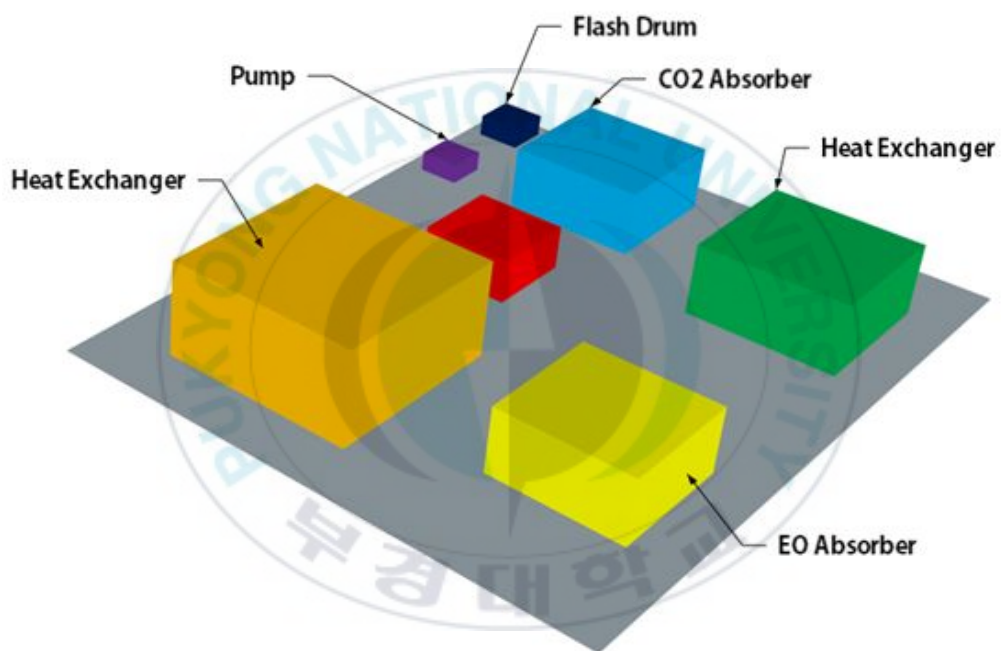


Figure 3. Three dimensional minimization layout of EO plant on a single floor

3.3 Multi-Floor 최적화 배치

3.3.1 문제 정의

앞에서 소개한 EO Plant의 장치가 배치 될 부지는 2층이고 가로 및 세로는 $35\text{m} \times 35\text{m}$ 로 사전에 정하였다. 그리고 각 장치별 유지 및 보수에 필요한 거리로 정의한 *ES*는 각 장치 가로 및 세로 길이의 30%를 반드시 확보하도록 설정하고 장치 간 최소 이격 거리는 4m로 정하였다. 그리고 층의 높이가 6m, 7m 2가지 경우에 대해서 제약조건을 위반하지 않는 최적의 플랜트 배치를 탐색하고자 한다.

3.3.2 목적함수

목적함수는 각 장치 간 연결되는 파이프 비용 및 파이프 내 유체 이송 비용 그리고 벌칙함수의 합을 고려하여 아래의 식으로 주어진다.

$$Min. \sum_i \sum_{j \neq i} [CC_{ij} \times TD_{ij} + CV_{ij} \times Z_{ij} + CH_{ij}(X_{ij} + Y_{ij}) + p(x_i, y_i)] \quad (21)$$

목적함수를 통해 최적화해야 할 결정변수는 장치 i 기준으로 O_i , V_{ik} , x_i , y_i 이다. 장치의 개수가 n 개이면 총 결정변수의 수는 $4 \times n$ 개다.

3.3.3 배치 결과

층의 높이가 다른 두 가지 경우를 설정하여, EO Plant 배치 문제를 입자 군집 최적화 기법을 이용하여 최적화하였다. 첫 번째 경우는 층의 높이가 6m일 때, 다른 경우는 층의 높이가 7m로 설정하였다. 각각의 경우에 목적 함수의 최솟값은 각각 1.3139×10^5 , 1.4163×10^5 이다.

층의 높이가 6m일 때에 비해 층의 높이가 7m일 때 목적함수의 값 즉, 배치 비용이 약 7% 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 파이프를 통한 유체 이송 시 가장 비용이 많이 발생하는 수직 방향 이송이 공정 배치 문제에 영향을 주는 것으로 추론할 수 있다.

Table 4와 Table 5는 각각의 경우에 장치가 배치되는 층과 중심좌표 x , y 좌표를 나타내고 있다. Fig 4 ~ 9는 각각의 경우에 EO Plant 장치의 최적 배치를 보여주고 있다. 각 장치별 유지 및 보수를 위한 거리 ES 와 장치 간 최소 이격 거리를 모두 만족하고 있다.

Table 4. Optimal results of EO plant on the multi-floor in case the height of floor is 6m

Number	Equipment	Floor	x [m]	y [m]
1	Reactor	2nd	8.29	8.07
2	Heat Exchanger	1st	19.19	22.82
3	EO Absorber	2nd	18.01	27.31
4	Heat Exchanger	2nd	19.71	9.98
5	CO ₂ Absorber	1st	20.49	7.50
6	Flash drum	2nd	27.82	21.55
7	Pump	2nd	8.52	24.75

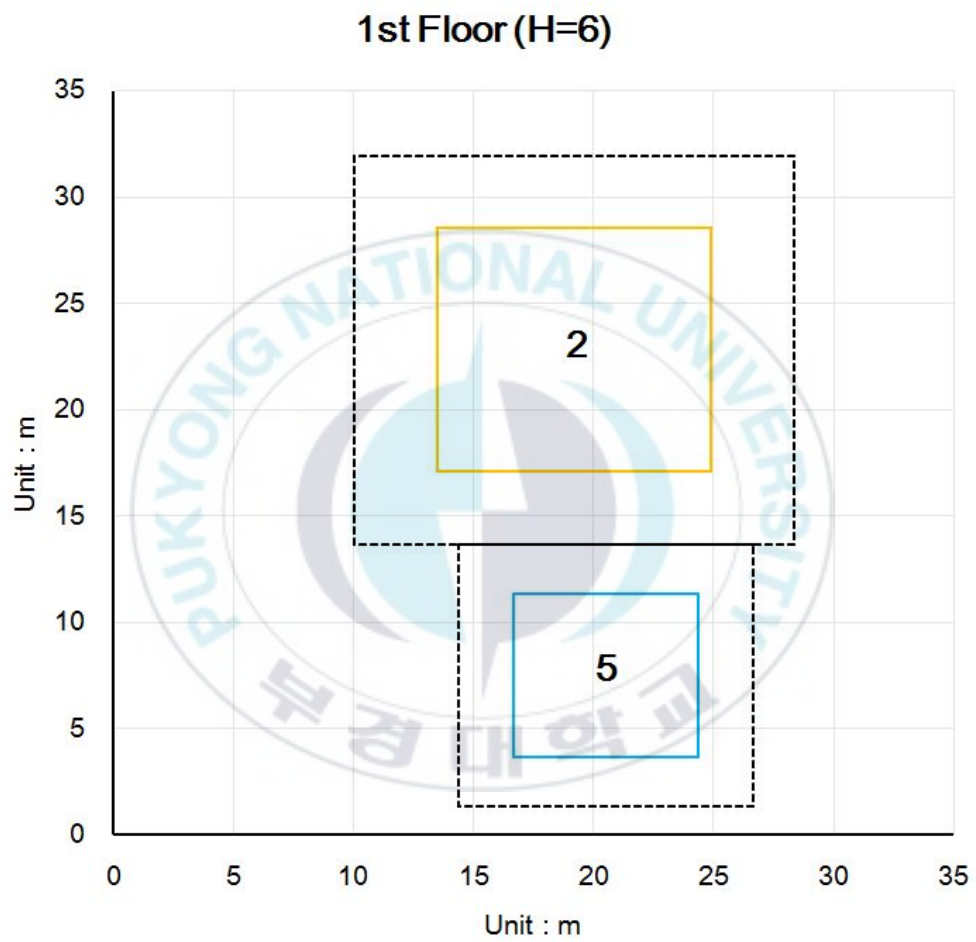


Figure 4. Optimal layout of EO plant on the first floor in case the height of floor is 6m

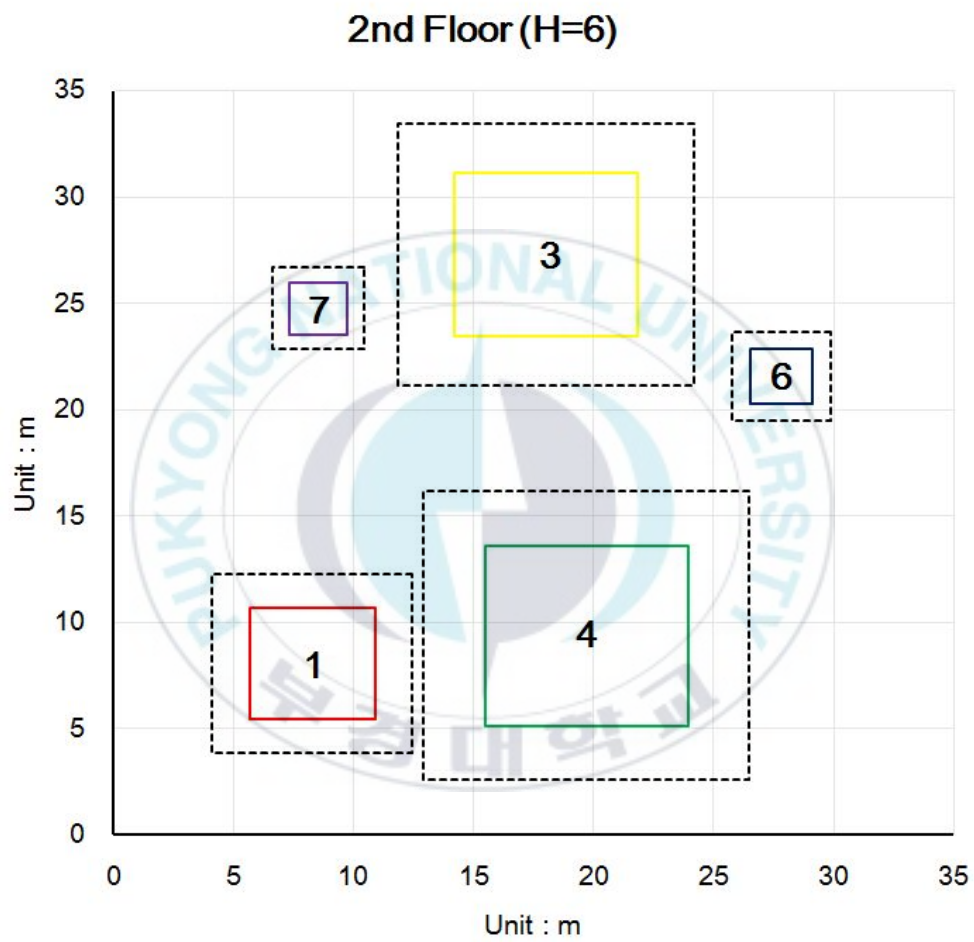


Figure 5. Optimal layout of EO plant on the second floor in case the height of floor is 6m

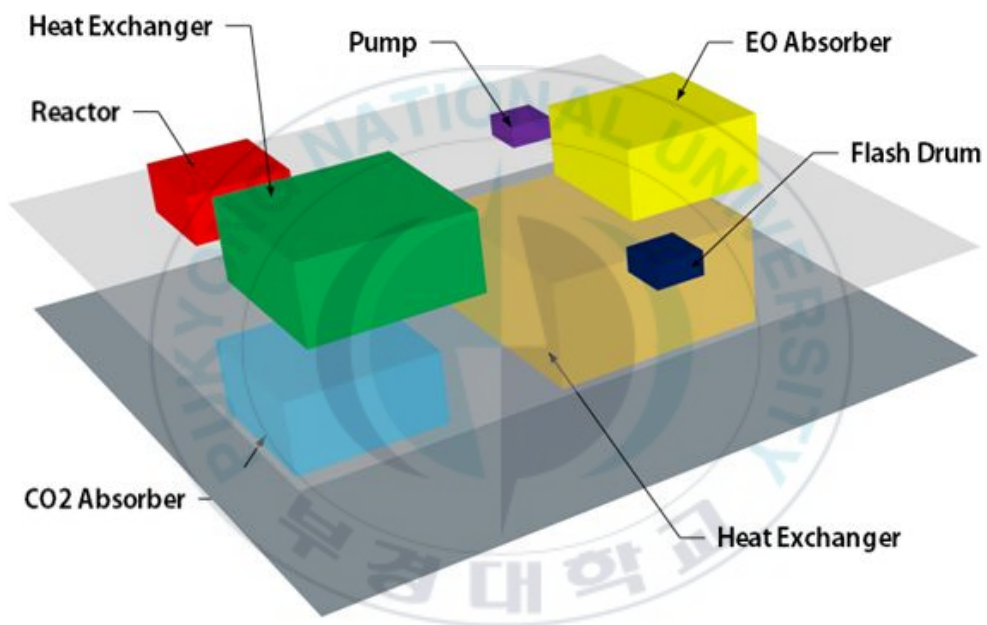


Figure 6. Three dimensional optimal layout of EO plant on the multi-floor in case the height of floor is 6m

Table 5. Optimal results of EO plant on the multi-floor in case the height of floor is 7m

Number	Equipment	Floor	x [m]	y [m]
1	Reactor	1st	5.66	28.75
2	Heat Exchanger	1st	24.66	13.40
3	EO Absorber	2nd	20.63	9.53
4	Heat Exchanger	2nd	27.98	27.33
5	CO ₂ Absorber	2nd	14.05	24.25
6	Flash drum	2nd	29.61	9.38
7	Pump	2nd	4.47	12.71

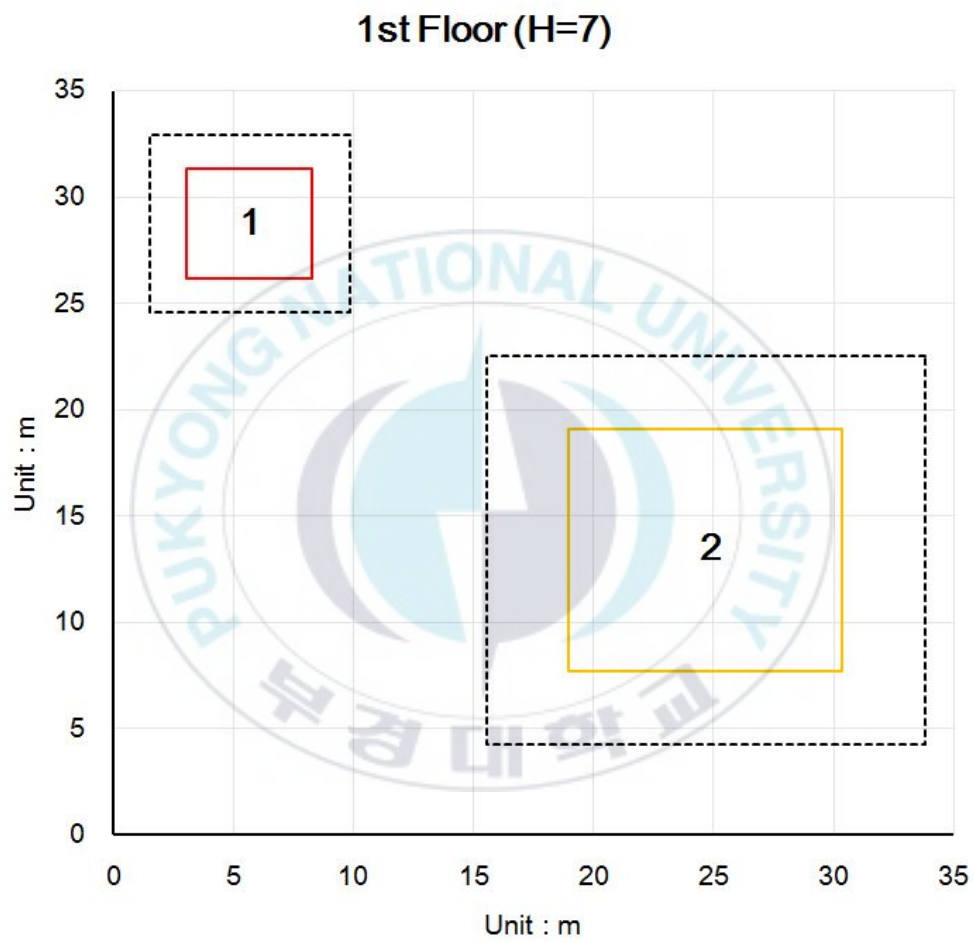


Figure 7. Optimal layout of EO plant on the first floor in case the height of floor is 7m

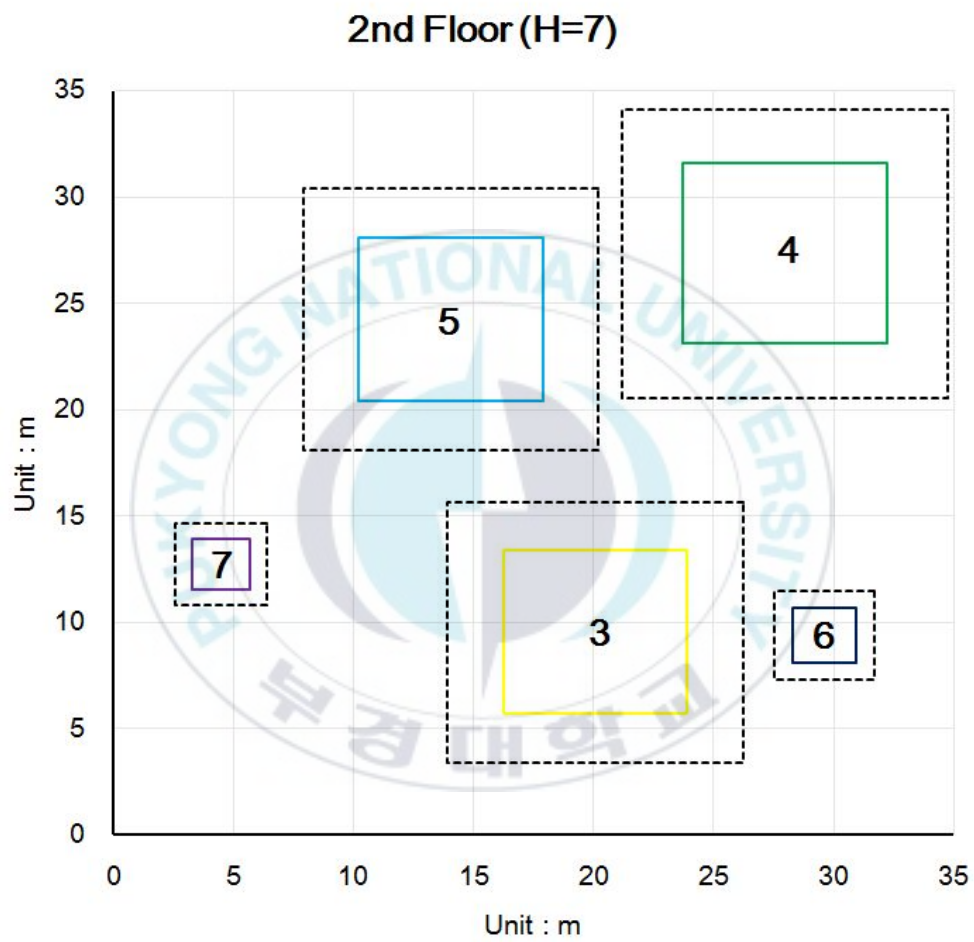


Figure 8. Optimal layout of EO plant on the second floor in case the height of floor is 7m

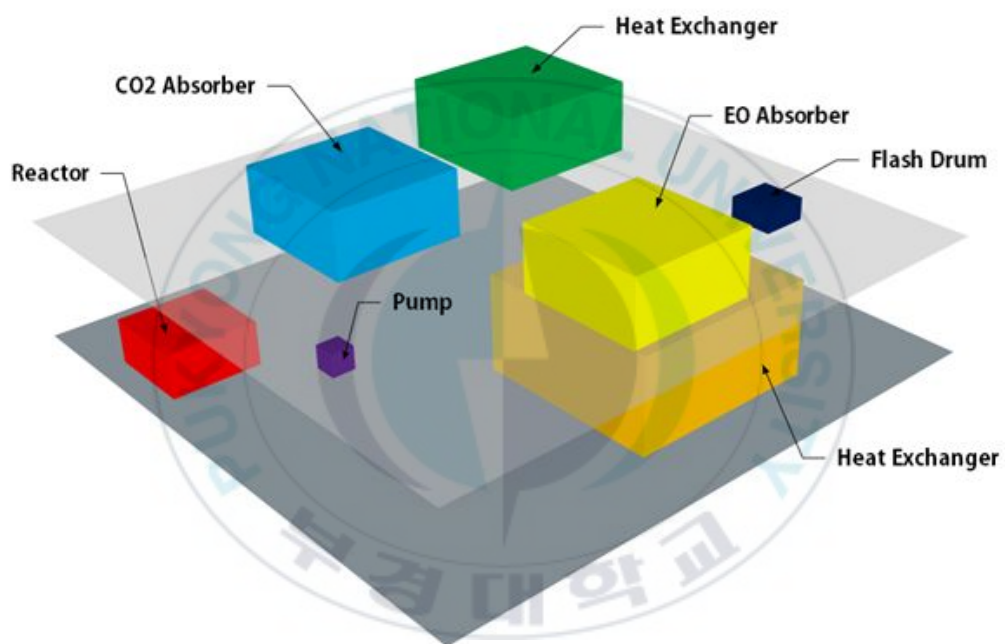


Figure 9. Three dimensional optimal layout of EO plant on the multi-floor in case the height of floor is 7m

제 4 장 LNG-FPSO 배치

4.1 LNG-FPSO

가스전에서 채취한 천연가스를 정제하여 얻은 메탄을 냉각하여 액화시킨 LNG는 최근 수요량의 증가에 따라 LNG-FPSO에 대한 관심이 높아지고 있다. 하지만 천연가스가 생산되지 않는 우리나라는 LNG 생산시설 보다 LNG 이송 및 저장시설에 한정되어 있어 LNG 생산시설에 대한 관심이 다른 나라에 비해 떨어진다고[15].

LNG-FPSO는 해상에 있는 가스전으로 이동하여 해상에서 부유하며 LNG를 생산, 저장, 출하할 수 있는 해상 이동식 복합기능 플랜트이다. 이전의 천연가스 생산방식에 비해 생산절차가 간략하고 생산비용이 저렴하며 가스전 생산 완료 후 이동이 가능한 장점을 가지고 있다[15].

LNG-FPSO의 액화 공정은 LNG-FPSO 전체 건조비용의 30~40%에 해당하는 중요한 공정이다[14]. 따라서 LNG-FPSO의 액화 공정을 위한 장치의 최적 배치를 도출하였다.

4.2 Multi-Floor 최적화 배치

4.2.1 문제 정의

본 연구에서는 액화 공정의 혼합 냉매 사이클 중 DMR(Dual Mixed Refrigerant)사이클을 선정하였다. 액화 공정을 구성하는 장치들을 배치하는 경우, 같은 역할을 수행하는 장치끼리 모듈단위로 배치한다[6]. DMR 사이클은 Fig 10과 같이 3종류의 모듈로 구성되어있다[5]. 본 연구에서는 3종류의 모듈 중 장치의 종류가 다양하고 개수가 가장 많은 MR 모듈을 구성하는 장치들의 최적배치를 탐색하고자한다.

MR모듈은 압축기 1대, 오버 헤드 크레인 1대, 압축기용 냉각기 1대, 흡입 드럼 2대, 해수를 이용한 냉각기 2대, 열교환기 1대, 밸브 2개 및 MR 분리기로 구성되어있다. Table 6은 각 장치별 가로 및 세로의 길이 그리고 높이 및 장치 간의 파이프의 연결 방향을 나타내고 있다[11]. Table 7은 파이프 길이 당 비용 및 물질을 수직과 수평방향으로 이송할 때 발생하는 비용에 관한 내용을 나타내고 있다.

LNG-FPSO가 건설 될 부지는 5층으로 가로 및 세로는 35m×35m,

30m×40m이고 층의 높이는 8m로 사전에 정하였다. 그리고 각 장치별 *ES*는 장치 가로 및 세로 길이의 30%이고 장치 간 최소 이격 거리는 4m로 정하였다.

1층부터 4층까지의 층에는 원활한 작업을 위해 충분한 작업환경을 고려하여 장치가 차지하는 면적이 각각 해당 층 면적의 50% 이하를 차지하도록 설정하였다. 그리고 5층에는 충분한 작업 환경과 추가적인 안전시설의 설치를 위하여 장치가 배치되는 면적이 해당 층 면적의 40% 이하로 설정하였다. 제약조건을 벗어난 경우 목적함수 내 벌칙함수에 매우 큰 상수를 부여하여 제약조건을 위반하지 않으면서 비용이 최소가 되는 최적의 플랜트 배치를 제안하고자 한다.

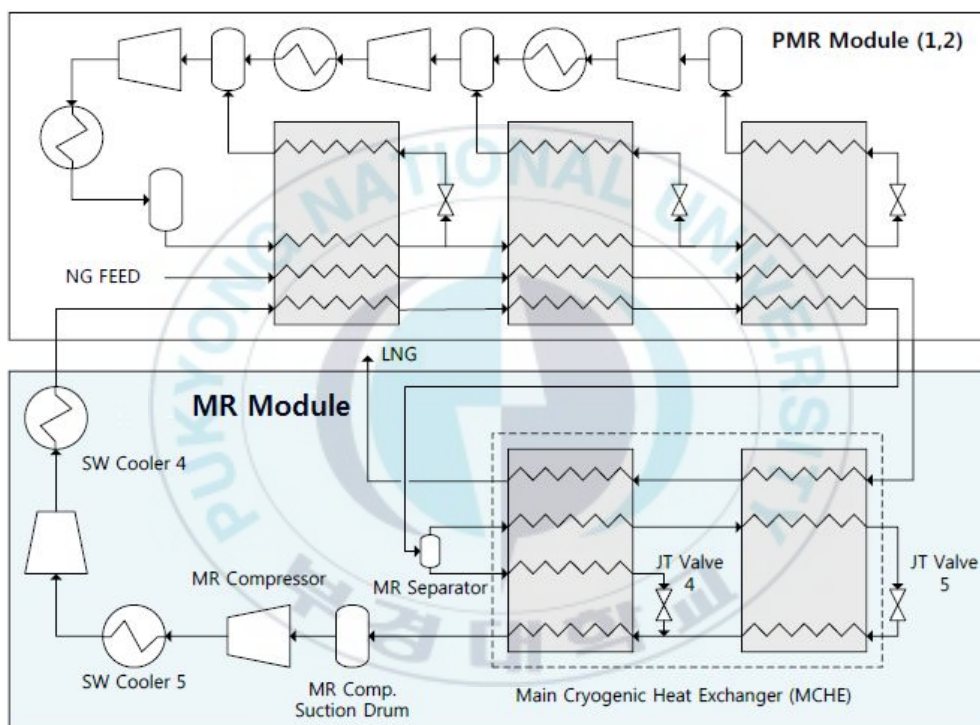


Figure 10. Process flow diagram of dual mixed refrigerant cycle taken from [5]

Table 6. Equipment information of LNG-FPSO taken from [11]

Equipment	Width [m]	Depth [m]	Height [m]	Connection
Mixed Refrigerant Separator	4	4	13	(1,4) (2,5) (3,8)
Main Cryogenic Heat Exchanger	5	5	43	(4,15) (5,6) (6,16)
Main Refrigerant Compressor Suction Drum	4.5	4.5	13	(9,10) (10,13)
Cooler for Compressor	5	12	6	(10,14) (10,11)
Mixed Refrigerant Compressor	5	12	6	(11,10)
Overhead Crane	12	19	6	
Sea Water Cooler 4	4	6	5	(13,10)
Sea Water Cooler 5	4	6	5	
Valve 4	1	1	1	(15,4)
Valve 5	1	1	1	(16,7)

Table 7. Basic cost information of LNG-FPSO taken from [11]

Equipment	CC_{ij} (per m)	CH_{ij} (per m)	CV_{ij} (per m)
Mixed Refrigerant Separator	200	200	2000
Main Cryogenic Heat Exchanger	200	200	2000
Main Refrigerant Compressor Suction Drum	200	200	2000
Cooler for Compressor	200	200	2000
Mixed Refrigerant Compressor	200	200	2000
Overhead Crane	200	200	2000
Sea Water Cooler 4	200	200	2000
Sea Water Cooler 5	200	200	2000
Valve 4	200	200	2000
Valve 5	200	200	2000

4.2.2 목적함수

목적함수는 총 파이프 길이 및 유체 이송 비용 그리고 벌칙함수의 합을 고려하여 다음의 식으로 정의하였다.

$$\text{Min.} \sum_i \sum_{j \neq i} [CC_{ij} \times TD_{ij} + CV_{ij} \times U_{ij} + CH_{ij}(X_{ij} + Y_{ij}) + p(x_i, y_i)] \quad (22)$$

목적함수를 통해 최적화해야 할 결정변수는 장치 i 기준으로 O_i , V_{ik} , x_i , y_i 이다. 장치의 개수가 n 개이면 총 결정변수의 수는 $4 \times n$ 개다.

4.2.3 배치 결과

본 연구에서 LNG-FPSO 액화 공정을 위한 장치의 배치 문제를 입자 군집 최적화 기법을 이용하여 최적화하였다. 가로 및 세로의 길이가 35m×35m와 30m×40m인 경우 목적함수의 최솟값은 각각 1.13454×10^5 와 1.1817×10^5 이다.

Table 8 ~ 9는 배치되는 장치의 층과 중심좌표 x , y 좌표를 나타낸다. Fig11 ~ 22는 1층부터 5층까지 LNG-FPSO 액화 공정 장치의 최적 배치를 나타낸다. 각 장치별 유지 및 보수를 위한 거리 ES 와 장치 간 최소 이격 거리 제약조건 모두 만족하고 있다.

Table 8. Optimal results of LNG-FPSO on the multi-floor in case the floor size is 35m×35m

Number	Equipment	Floor	x [m]	y [m]
1 ~ 2	Mixed Refrigerant Separator	2 ~ 3	16.78	6.43
3 ~ 7	Main Cryogenic Heat Exchanger	1 ~ 5	25.31	6.69
8 ~ 9	Main Refrigerant Compressor Suction Drum	1 ~ 2	15.75	17.20
10	Cooler for Compressor	3	11.67	19.23
11	Mixed Refrigerant Compressor	4	11.67	19.23
12	Overhead Crane	5	11.67	19.23
13	Sea Water Cooler 4	4	20.21	19.19
14	Sea Water Cooler 5	4	28.31	19.04
15	Valve 4	2	25.55	13.71
16	Valve 5	4	32.43	6.72

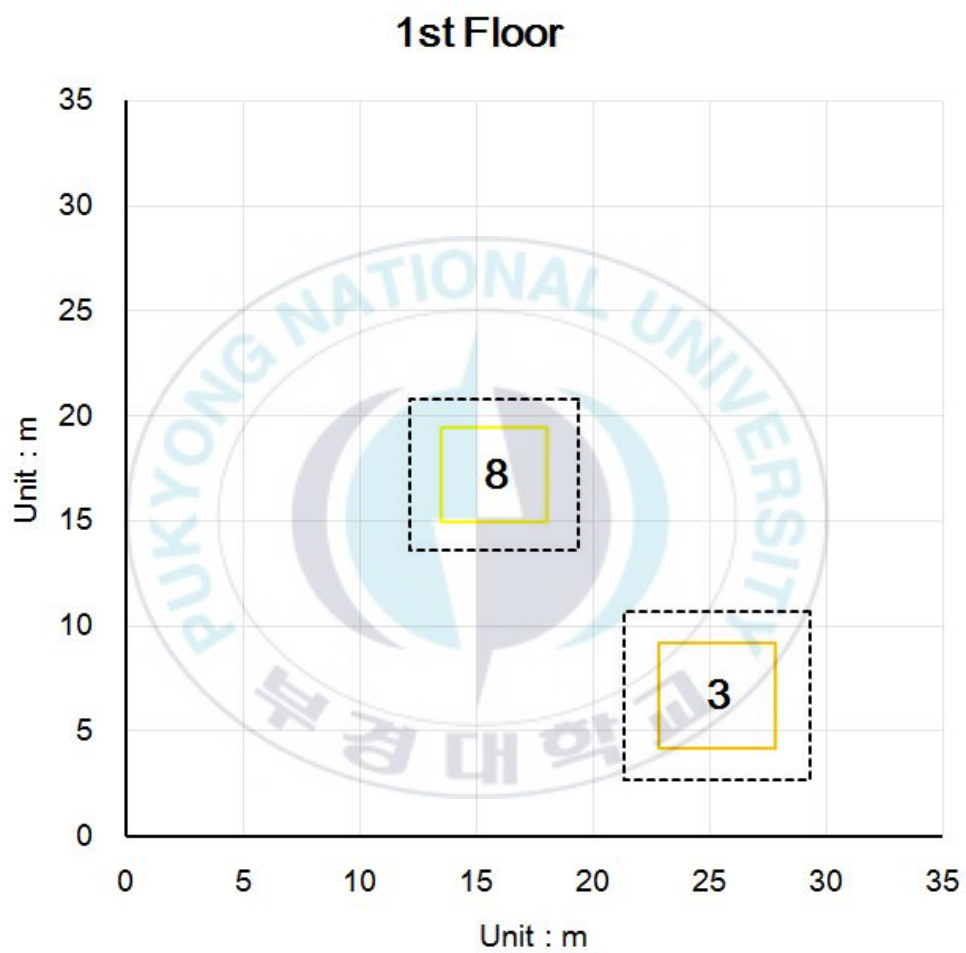


Figure 11. Optimal layout of LNG-FPSO on the first floor in case the floor size is 35m×35m

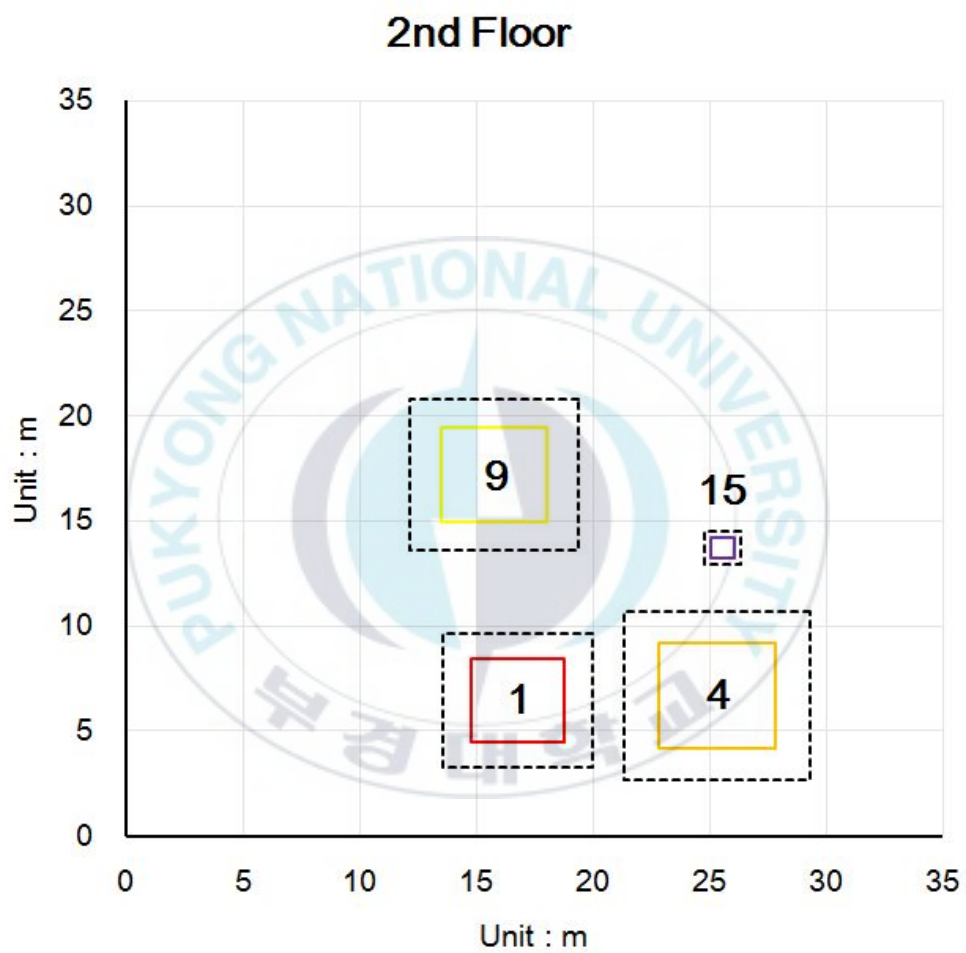


Figure 12. Optimal layout of LNG-FPSO on the second floor in case the floor size is 35m×35m

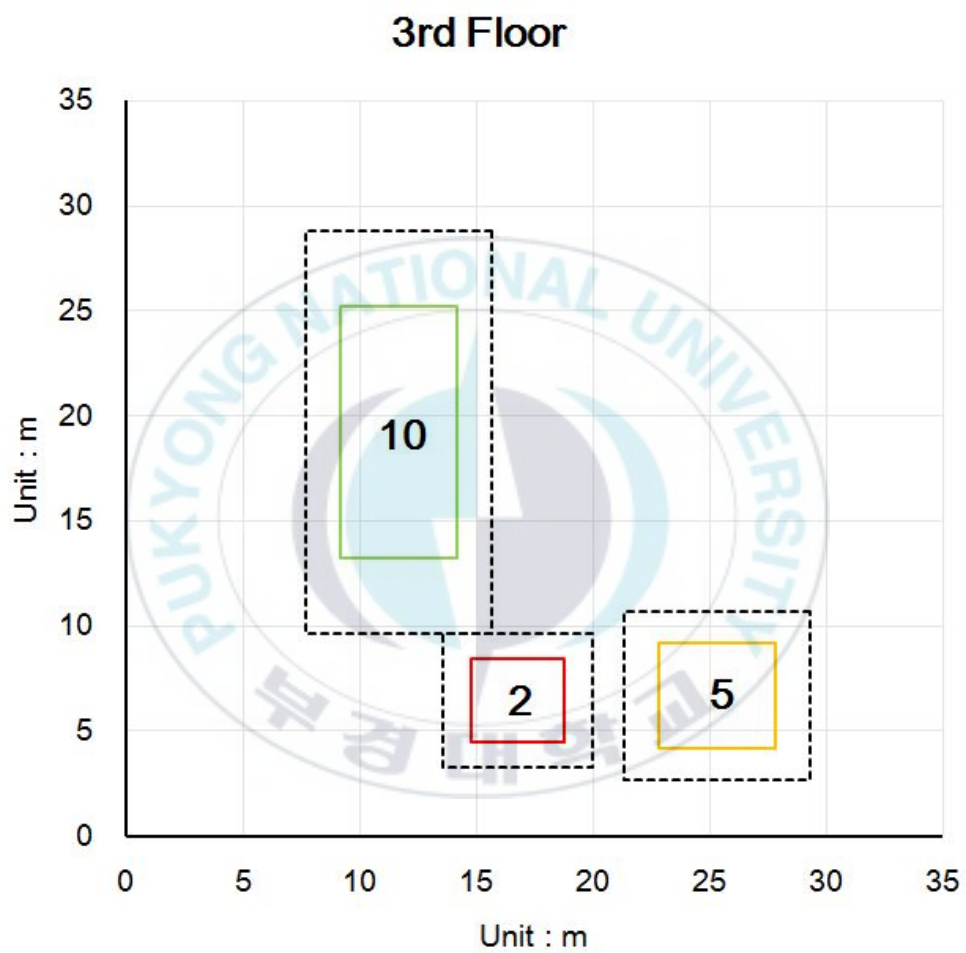


Figure 13. Optimal layout of LNG-FPSO on the third floor in case the floor size is 35m×35m

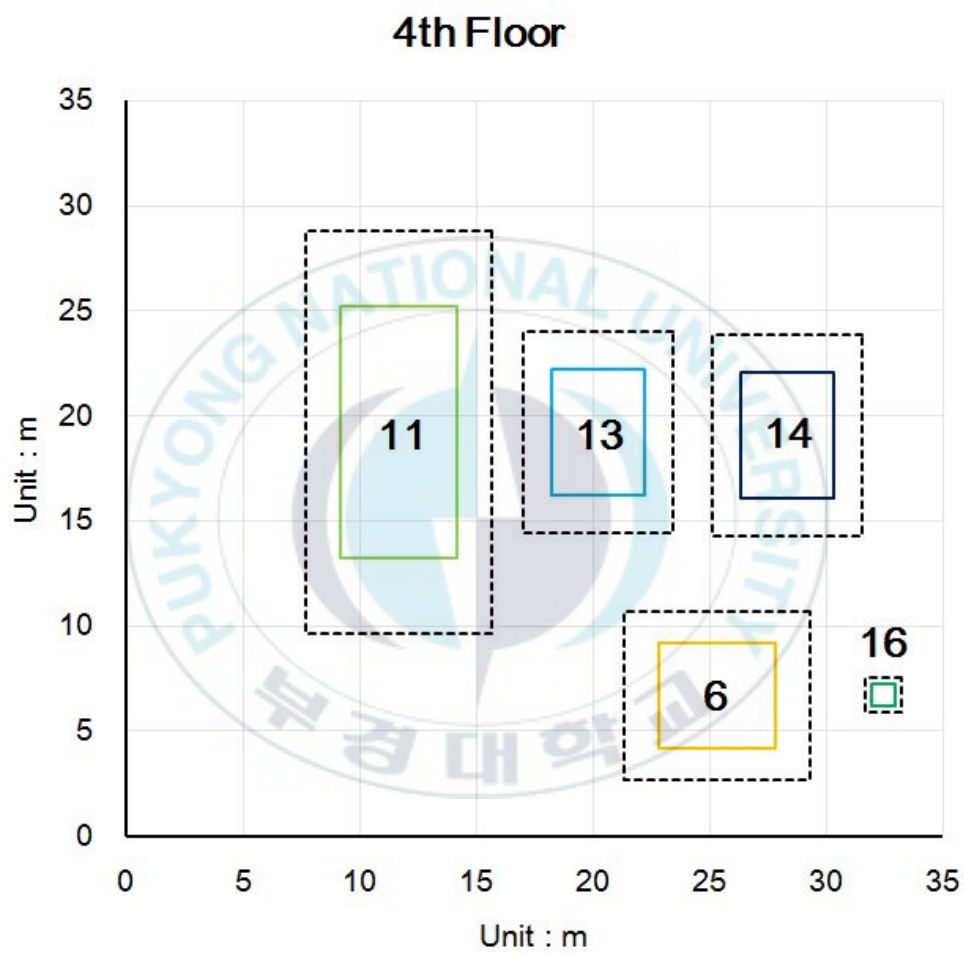


Figure 14. Optimal layout of LNG-FPSO on the fourth floor in case the floor size is 35m×35m

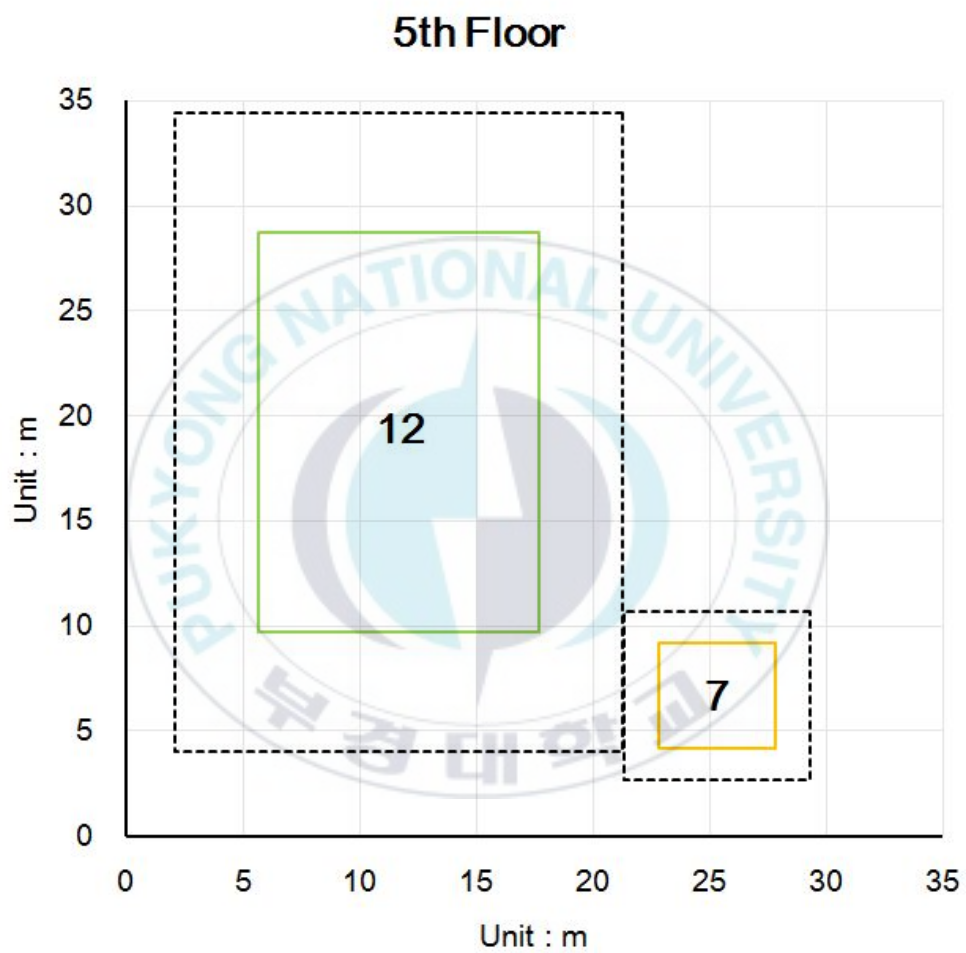


Figure 15. Optimal layout of LNG-FPSO on the fifth floor in case the floor size is 35m×35m

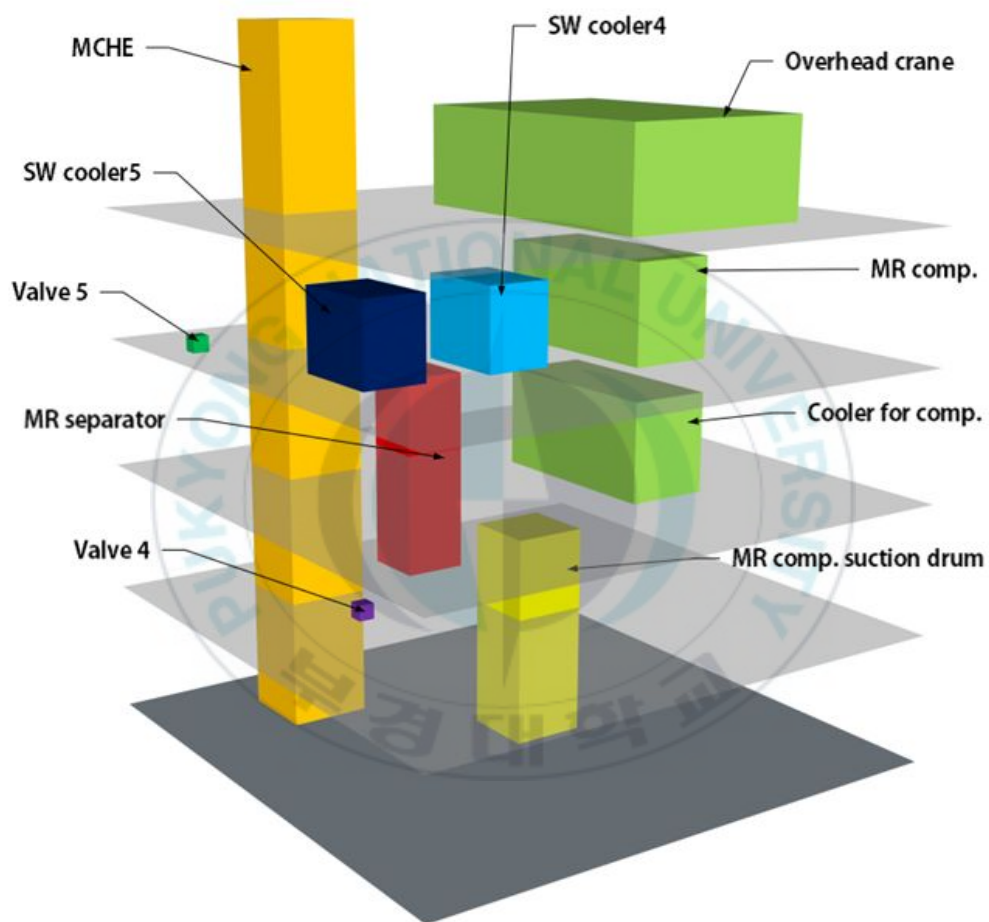


Figure 16. Three dimensional optimal layout of LNG-FPSO on the multi-floor in case the floor size is 35m×35m

Table 9. Optimal results of LNG-FPSO on the multi-floor in case the floor size is 30m×40m

Number	Equipment	Floor	x [m]	y [m]
1 ~ 2	Mixed Refrigerant Separator	2 ~ 3	5.02	4.52
3 ~ 7	Main Cryogenic Heat Exchanger	1 ~ 5	5.02	13.10
8 ~ 9	Main Refrigerant Compressor Suction Drum	1 ~ 2	8.92	22.13
10	Cooler for Compressor	1	19.41	22.12
11	Mixed Refrigerant Compressor	2	19.41	22.12
12	Overhead Crane	3	19.41	22.12
13	Sea Water Cooler 4	2	19.46	7.71
14	Sea Water Cooler 5	1	19.48	7.72
15	Valve 4	2	12.04	13.07
16	Valve 5	4	5.01	5.97

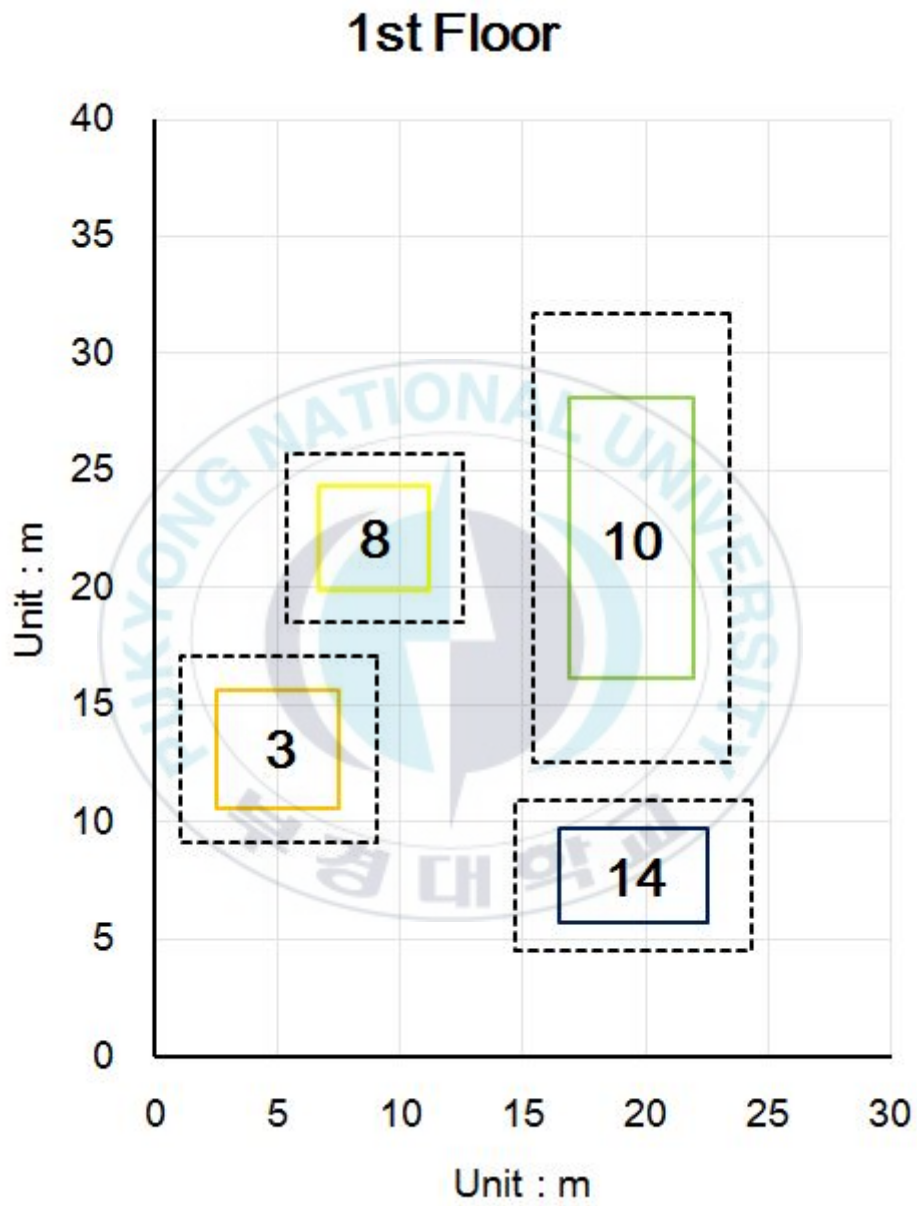


Figure 17. Optimal layout of LNG-FPSO on the first floor in case the floor size is 30m×40m

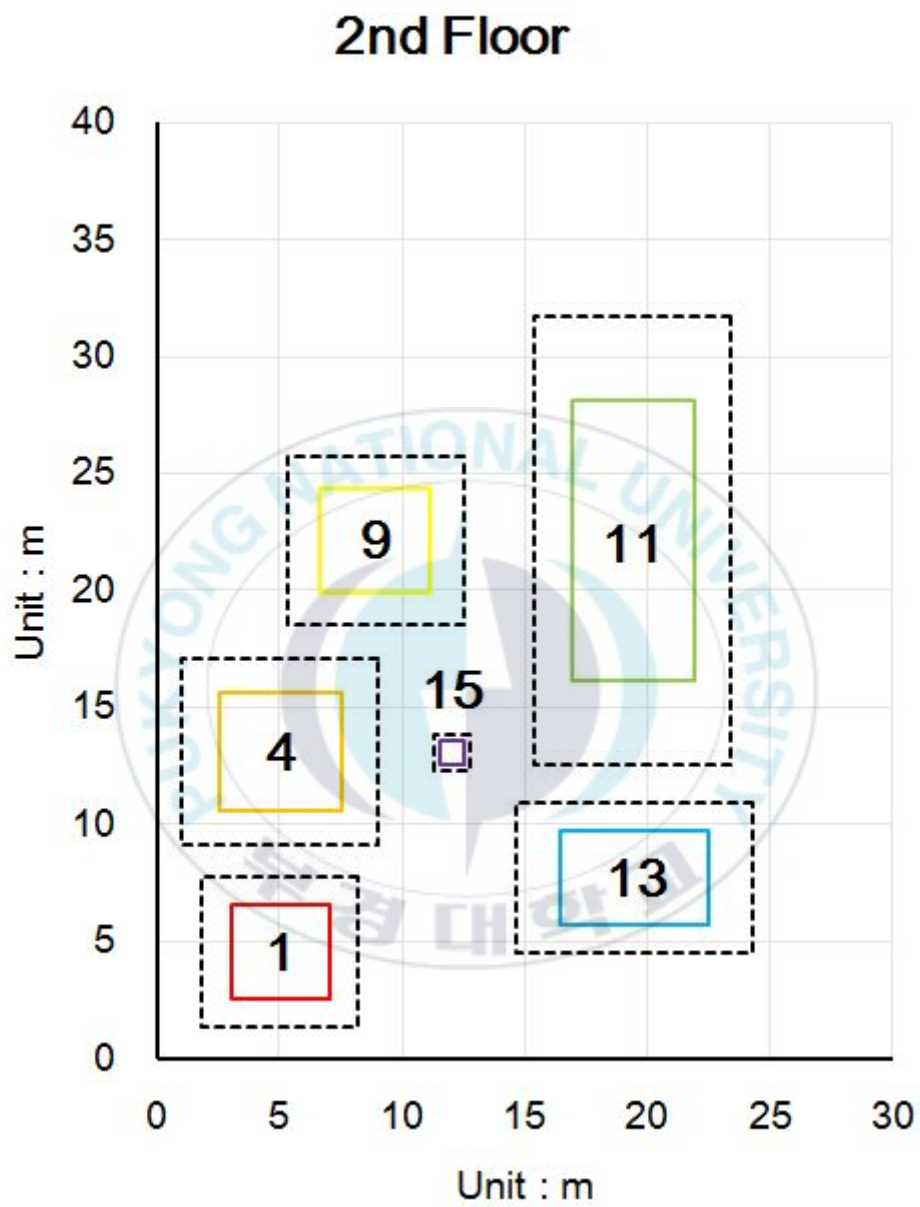


Figure 18. Optimal layout of LNG-FPSO on the second floor
in case the floor size is 30m×40m

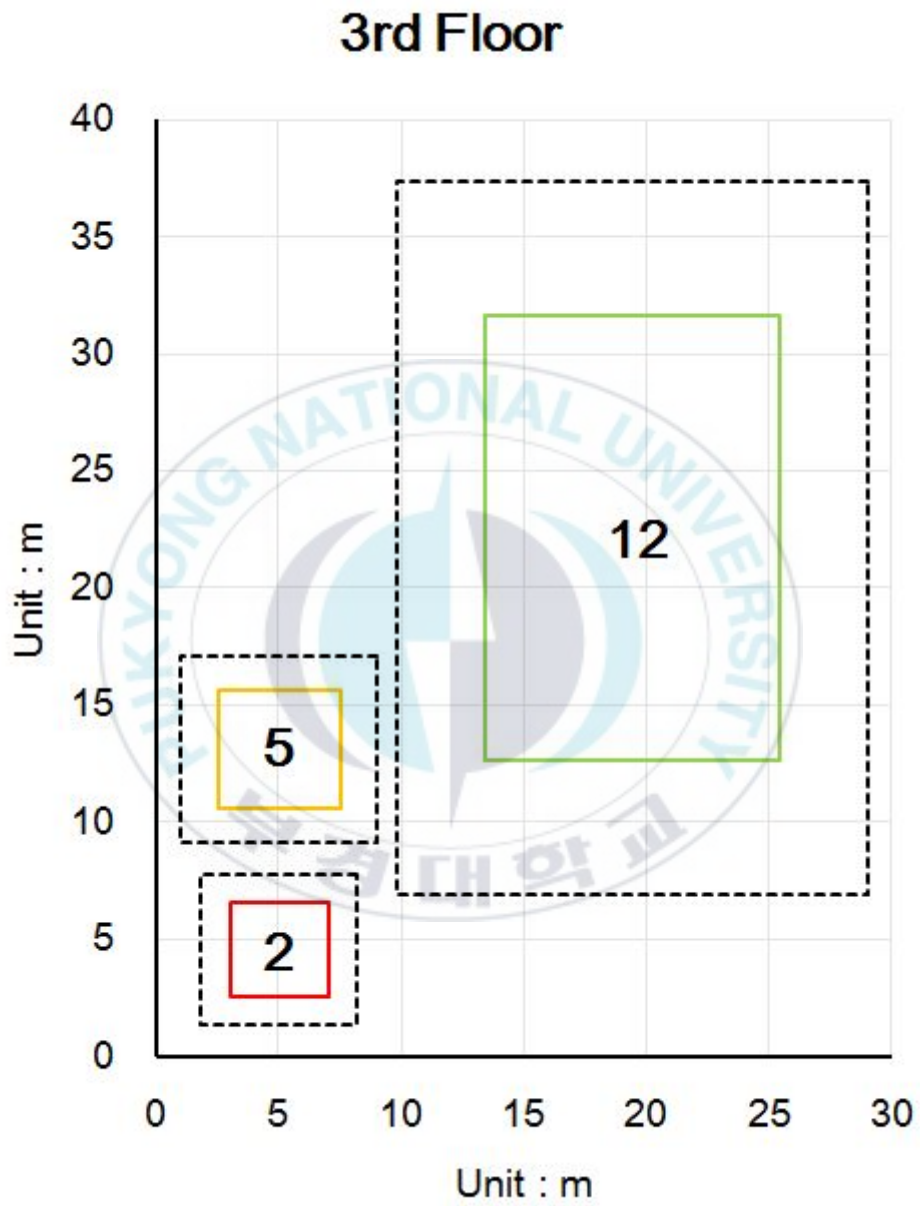


Figure 19. Optimal layout of LNG-FPSO on the third floor in case the floor size is 30m×40m

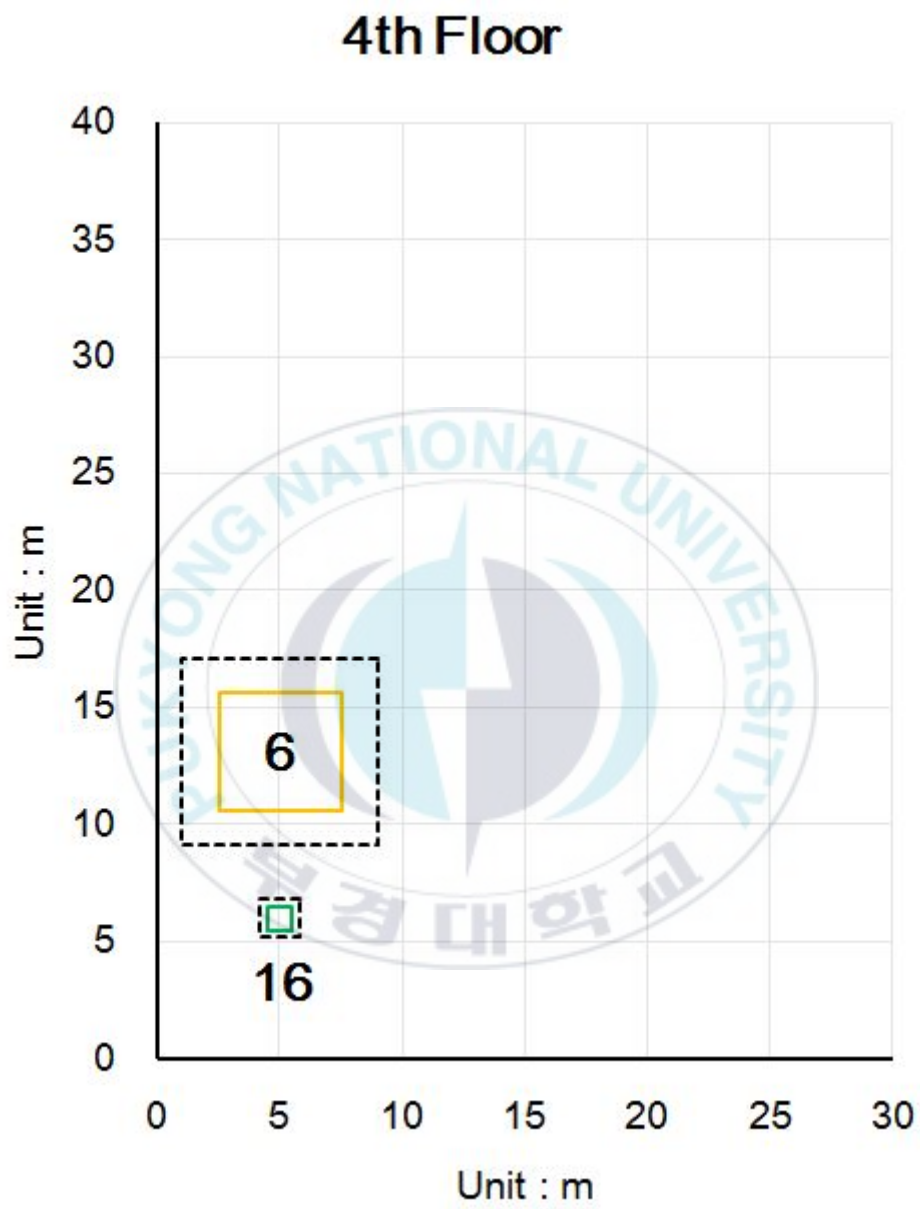


Figure 20. Optimal layout of LNG-FPSO on the fourth floor in case the floor size is 30m×40m

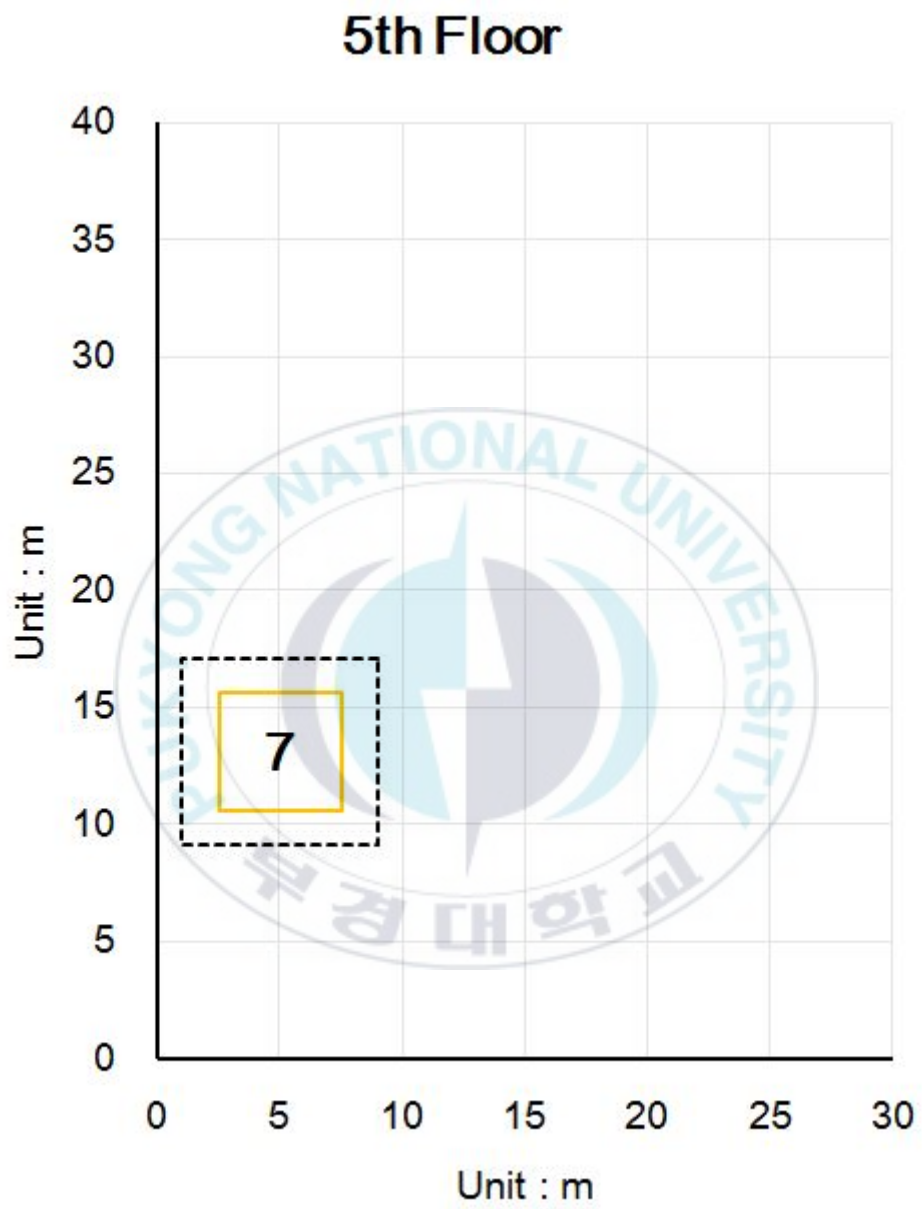


Figure 21. Optimal layout of LNG-FPSO on the fifth floor in case the floor size is 30m×40m

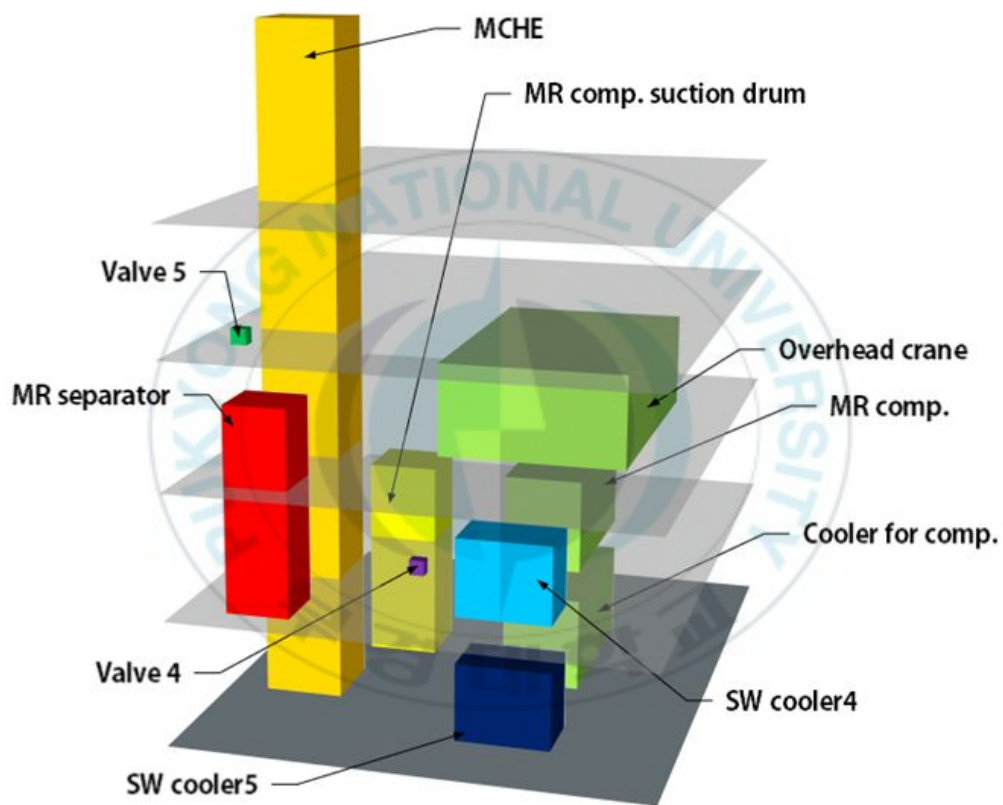


Figure 22. Three dimensional optimal layout of LNG-FPSO on the multi-floor in case the floor size is 30m×40m

제 5 장 결론 및 고찰

본 연구에서는 각 장치들을 유지 및 보수를 위한 공간, 최소 이격 거리를 확보를 통해 안전성을 고려하여 EO Plant와 LNG-FPSO의 액화 공정의 장치를 최적의 배치 탐색하는데 입자 군집 최적화 기법을 이용하여 가장 비용이 적게 드는 결과를 찾는 방법을 제안하였다.

현재 다양한 플랜트들이 건설 시 육상에 부지를 정하는 경우 인접 지역의 주민과의 마찰을 피하는 문제가 존재한다. 그리고 해상에 플랜트가 건설되는 경우에는 부지의 면적 및 다양한 장치 설치의 한계를 고려해야하기 때문에 많은 어려움 및 문제점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 플랜트 건설 시 고려해야 할 장치에 따른 유지 및 보수를 위한 공간, 최소 이격 거리 확보 등 다양한 제약조건의 반영이 가능한 수학적 모델을 설계하였다. 제약조건 및 목적함수 식이 복잡한 경우 일반적으로 미분식을 이용하는 최적화 기법의 사용에 많은 어려움이 존재한다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 입자 군집 최적화 기법을 이용한 최적화 방법을 제시하였다.

제안한 모델의 검증을 위해 EO Plant와 LNG-FPSO 배치 문제를 다루

었다. EO Plant의 부지 면적이 정해지지 않은 경우, 다층에 장치들이 차지하는 면적을 최소화하는 배치와 부지 면적이 정해진 경우, 다층에 장치들을 최적화하는 배치를 제시하였다. 그리고 LNG-FPSO의 액화 공정을 구성하는 장치들을 다층에 최적화 배치를 탐색하였다. 본 연구를 통해 얻어진 최적 값은 사전에 설정한 제약조건 즉, 유지 및 보수를 위한 최소거리와 각 장치 간 최소 이격 거리를 모두 만족하고 있으며, 파이프 가격, 부지 가격, 유체 이송 비용의 합이 최소인 배치결과를 통해 플랜트 총 건설비용 절감에 큰 기여가 가능하다.

본 연구에서 개발한 방법은 향후에 다양한 형태의 공정 배치를 위한 문제에 쉽게 적용이 가능하며 더 복잡한 문제로의 확장도 가능하다. 또한 목적 함수에 안전을 고려한 문제를 추가한다면, 다양한 사고 시나리오를 포함한 통계적 최적화 문제로 확장이 가능하다.

참 고 문 헌

- 1) C. M. L. Castell, R. Lakshmanan, J. M. Skilling, R. Baiiares-Alcdntara, "Optimisation of Process Plant Layout Using Genetic Algorithms," Computers & Chemical Engineering, Vol. 22, pp. 993-996, 1998.
- 2) D. I. Patsiatzis, L. G. Papageorgiou, "Optimal Multi-Floor Process Plant Layout" Computers & Chemical Engineering, Vol 26, No. 4-5, pp. 575-583, 2002.
- 3) F. D. Penteado, A. R. Ciric, "An MINLP Approach for Safe Process Plant Layout" Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol. 35, No. 4, pp. 1354-1361, 1996.
- 4) Gadhiraju, Venkatarathnam, "Cryogenic Mixed Refrigerant Processes", Springer Verlag, 2008.
- 5) K. S. Han, "A Study on Risk-based Layout Optimization for

Sustainable Chemical Process Design”, Ph.D. Thesis, Seoul National University, 2014.

6) J. C. Mecklenburgh, “Process plant layout”, John Wiley and Sons Inc, 1985.

7) J. Kennedy, R. Eberhart, Particle swarm optimization, Proc. IEEE Int. Conf. Neural Networks, pp. 1942–1948, 1995.

8) K. T. Park, J. M. Koo, D. I. Shin, C. J. Lee, 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.

9) 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.

- 10) National Fire Protection Association, NFPA 30 : Flammable and Combustible Liquids Code. National Fire Protection Association, 2012.
- 11) N. K. Ku, J. C. Lee, M. I. Roh, J. H. Hwang, 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.
- 12) P. J. Park, 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.
- 13) S. S. Rao, "Engineering Optimization : Theory and Practice", WILEY, 2009.
- 14) T. Shukri, "LNG Technology Selection", Hydrocarbon Engineering, Vol. 9, No. 2, pp.71-74, 2004.
- 15) Y. M. Yang, "Research and development report of LNG-FPSO",

Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, 2010.

15) 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.

