

LNG 액화 플랜트 배치 최적화를 통한 투자비 절감에 관한 연구

양진석 · 이창준[†]

부경대학교 안전공학과
48513 부산광역시 남구 용소로 45
(2018년 9월 28일 접수, 2018년 11월 28일 수정본 접수, 2018년 11월 30일 채택)

The Research of Layout Optimization for LNG Liquefaction Plant to Save the Capital Expenditures

Jin Seok Yang and Chang Jun Lee[†]

Department of Safety Engineering, Pukyong National University, 45, Yongso-ro, Nam-Gu, Busan, 48513, Korea
(Received 28 September 2018; Received in revised form 28 November 2018; accepted 30 November 2018)

요 약

LNG 플랜트의 설비 배치는 안전, 환경과 관련된 법규 및 유지 및 보수 공간, 작업자 이동 통로 등 작업자의 근무 환경이나 안전과 관련된 다양한 설계 제약조건을 충족해야 한다. LNG 플랜트 설비 중 가장 중요한 초저온 공정인 액화 공정의 경우, 배관 내 유체와 외부 대기와의 온도 차이에 의한 열 손실과 유체 흐름 시 발생하는 압력 손실이 발생하기 때문에 가능한 설비 간 배관 길이는 짧을수록 유리하다. 따라서, 액화 공정을 건설할 때 다양한 제약조건을 만족하면서 배관의 길이를 최소화 하는 설비 배치가 이루어져야 하며, 이러한 문제는 수학적 모델링으로 배관의 비용을 목적함수를 만들어 이를 최소화하는 최적화 문제로 다룰 수 있다. 이와 관련된 기존 연구들은 대체로 장치 간 유지·보수에 필요한 최소 공간 확보, 사고 예방을 위한 장치 간 이격거리 등 안전 요소를 간과해 왔다. 또한, 기존 연구는 대체로 개념설계를 이용한 배치를 다루어 왔으며, 이미 건설된 실제 배치 결과와 최적화 결과를 비교하여 배치 최적화 문제가 실제 어느 정도 비용 절감 효과가 있는지 검증한 내용은 전무한 실정이다. 본 연구에서는 작업자의 근무나 안전과 관련된 장치 간 이격거리와 유지·보수와 관련된 제약조건 식을 세우고 장치를 연결하는 파이프의 총 비용을 목적함수로 하는 MILP (Mixed Integer Linear Programming) 형태의 문제를 설계하였다. 하지만, 식이 복잡하고 공정 특성에 따라 다양한 제약조건을 추가해야 하는 경우가 있으므로 목적함수의 미분식을 이용하여 푸는 기존의 최적화 방법론으로 풀기에는 많은 어려움이 있다. 따라서, 본 연구에서는 목적함수의 미분식 없이 최적해를 찾을 수 있는 PSO (Particle Swarm Optimization)를 이용하여 최적화를 수행하였다. 실제로 가동 중인 C3MR (Propane precooling Mixed Refrigerant) 공정에 대한 최적화를 수행하여, 본 연구에서 제안한 방법이 어느 정도 효과가 있는지 검증하였다.

Abstract – A plant layout problem has a large impact on the overall construction cost of a plant. When determining a plant layout, various constraints associating with safety, environment, sufficient maintenance area, passages for workers, etc have to be considered together. In general plant layout problems, the main goal is to minimize the length of piping connecting equipments as satisfying various constraints. Since the process may suffer from the heat and friction loss, the piping length between equipments should be shorter. This problem can be represented by the mathematical formulation and the optimal solutions can be investigated by an optimization solver. General researches have overlooked many constraints such as maintenance spaces and safety distances between equipments. And, previous researches have tested benchmark processes. What the lack of general researches is that there is no realistic comparison. In this study, the plant layout of a real industrial C3MR (Propane precooling Mixed Refrigerant) process is studied. A MILP (Mixed Integer Linear Programming) including various constraints is developed. To avoid the violation of constraints, penalty functions are introduced. However, conventional optimization solvers handling the derivatives of an objective functions can not solve this problem due to the complexities of equations. Therefore, the PSO (Particle Swarm Optimization), which

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: changjunlee@pknu.ac.kr

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.

investigate an optimal solutions without differential equations, is selected to solve this problem. The results show that a proposed method contributes to saving the capital expenditures.

Key words: Plant layout optimization, Particle swarm optimization, C3MR Liquefaction process

1. 서 론

천연가스는 가장 관심을 얻고 있는 주요 에너지 자원 중 하나이며, 현재 세계적으로 80여 개의 대형 LNG 플랜트(4 MTPA(Million Ton Per Year) 이상)에서 많은 양의 LNG를 생산하고 있다 [1]. 하지만 대규모 저류층의 부족으로 소용량의 LNG 플랜트(0.3~1.0 MTPA) 개발의 중요성이 주목받고 있다 [2]. 중·소규모 LNG 신규 플랜트의 투자비용 중 약 42%를 액화 공정 및 냉동 공정이 차지하고 있다 [1]. 그러므로 이러한 공정의 설비들을 어떻게 배치하고 운영하는 문제는 LNG 플랜트의 경제성을 결정하는 핵심 요소 중 하나이다. LNG 액화 공정을 건설하는 경우, 플랜트 환경에 맞는 가장 효율적인 공정을 선택하는 것도 매우 중요하지만, 선정된 공정의 안전 및 효율성을 고려하여 장치의 배치를 결정하는 문제도 플랜트의 투자비용과 관련된 매우 중요한 요인 중 하나이다. 공정의 각 설비의 위치가 결정되면 설비 간의 파이프 길이가 결정되는 데 이는 파이프 설치에 들어가는 비용과 공정 운영 시 파이프 내부의 유체온도와 대기 온도의 차이로 인해 발생하는 열 손실, 그리고 유체의 압력 강하로 인한 에너지 손실과 밀접한 관련이 있다. 따라서, 설비 간 안전을 위한 이격거리와 유지·보수에 필요한 공간을 충분히 확보하면서 최대한 파이프의 길이를 최소화하는 장치의 배치를 결정하는 것이 매우 중요하다.

공정의 배치 최적화 연구는 처음에는 공정의 노하우를 이용하여 시작되었다[2]. 하지만, 이러한 방법론은 전문가에 따라 배치가 달라질 수 있으므로 문제를 수학적으로 정의하고 이를 최적화 기법을 이용하여 최적해를 찾는 방법이 개발되어 왔다[3-5]. MILP 문제에서는 일반적으로 공정의 장치들을 직사각형 형태로 설정하고 각 장치 간의 연결에 드는 비용을 목적함수로 정하여 가장 비용을 최소로 하는 최적해를 탐색한다[5].

Penteado와 Ciric은 방호 장치를 고려하여 최적의 배치를 탐색하였으며[6], Castell 등은 Genetic Algorithm을 이용한 배치 최적화 문제를 제안하였다 [7]. Patisiatzis 등은 플랜트 건설 비용과 Dow Index를 활용하여 화재 및 폭발 지수를 반영하는 방법론을 제시하였다[2]. Lee와 Lee는 공정 정보를 활용하여 배관 길이에 따른 공정상의 열 손실과 압력 강하 비용까지 포함하여 배관 길이에 따른 배관설치 비용, 열 손실 비용, 압력 강하로 인한 손실 비용의 합을 목적함수로 정의하여 최적화 문제를 수행하였다[5].

앞서 언급한 연구들은 대체로 기존 연구에서 이용하였던 벤치마크 공정을 활용하여 연구를 진행하고 기존 연구보다 어느 정도 개선 효과가 있었는지 검증하였다. 즉, 이미 설계가 끝나고 가동 중인 실제 공정 정보를 이용하여 배치 최적화를 진행하여 검증한 사례가 없어서 기존의 연구에서 제시한 방법들이 실제 어느 정도 개선 효과가 있는지 확인하기는 불가능한 실정이다. 또한, 기존 연구에서는 대부분 배치와 관련된 공통적인 제약조건과 목적함수를 MILP문제로 설계하고 이를 GAMS와 같은 상용 최적화 프로그램을 이용하여 최적의 해를 탐색한다. 그러나 플랜트의 형태에 따라 각기 다른 제약조건을 고려해야 하는 경우가 발생하고, 같은 공정의 플랜트 일지라도 부지의 크기, 형태 및 장치 종류에 따라 다양한 제약조건이 존재하기 때문에 일반적인 식을 기반으로 최적화 문제를 해결하는 데 한계

가 있다.

본 연구에서는 위에서 언급한 기존 연구의 한계점을 극복하기 위해 안전과 연관된 장치 간의 이격거리와 유지·보수를 위한 공간을 제약조건으로 정의하고 장치 간 파이프의 비용을 목적함수로 정의한 MILP 문제를 설계하였다. 이를 실제 가동 중인 플랜트에 적용하여 그 개선 효과를 검증하고자 한다. 2, 3장에서는 최적화 문제 정의와 최적해를 탐색하는데 활용된 PSO (Particle Swarm Optimization)에 대해 설명하고자 한다. 그리고 4장에서는 실제 공정에 적용하여 어느 정도 개선 효과가 있는지 검증 하고자 한다.

2. 최적화 문제

플랜트 배치 최적화 문제를 수학적으로 모델링하기 위해서는 장치의 종류, 크기 및 장치의 구입 가격 그리고 장치별 안전거리 확보를 위한 이격거리 및 유지·보수에 필요한 공간과 관련된 정보가 필요하다. 이를 바탕으로 공정과 관련된 모든 제약조건을 만족하면서 플랜트 배치에 따른 파이프의 연결 비용을 최소화하는 최적해를 탐색하는 것이 바로 본 연구의 목적이다. 여기서 소개되는 기본적인 식들은 Patisiatzis 등에 의해서 개발한 식을 기반으로 유지·보수에 필요한 거리와 장치 간 안전 확보를 위한 이격거리 확보를 위해 다소 개선된 식이다[5].

먼저 공정 배치와 관련된 모든 장치는 직사각형으로 이루어져 있다고 가정한다. 또한, 장치는 90°회전이 가능하다. 즉, 공정상에서 장치의 가로와 세로의 길이가 뒤바뀔 수 있다고 가정한다. 아래의 식에 의해서 장치의 가로와 세로의 길이가 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 l_i 는 장치 i 의 가로 방향의 길이이며, d_i 는 세로 방향의 길이이다. O_i 는 0 혹은 1인 이진 변수로서 설비의 회전 여부를 나타낸다. 가로 a_i , 세로 b_i 인 장치 i 는 O_i 의 값에 따라 가로와 세로 방향이 결정된다.

장치 i 의 유지·보수를 위해 필요한 거리를 M_i 로 정의하였다. 또한, 장치 i 와 j 간의 안전 확보를 위한 최소 이격거리는 S_{ij} 로 설정하였다. 두 장치 사이의 유지·보수를 위해 필요한 거리와 안전을 위해 필요한 이격거리를 서로 비교하여 더 긴 거리를 두 장치의 이격거리로 정해야 한다. 이러한 이격거리를 판별하는 식은 다음과 같다.

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

여기서, R_{ij} 는 두 거리의 비교를 위해 도입한 이진 변수이며, C_{ij} 가 양수이면 1, 음수이면 0이다. 아래의 식은 두 장치 간의 중첩을 막기 위한 제약조건이다.

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

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

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

식 (4)와 (5)에서 장치 i 의 중심 좌표는 (x_i, y_i) 이다. 장치 i 와 j 의 중심 좌표 거리는 각 장치의 거리의 절반과 두 장치가 서로 이격되어야 하는 거리보다 커야 한다. 그리고, 공정이 배치되는 부지의 크기가 결정되면 모든 장치는 그 부지 안에 아래와 같은 제약조건을 만족하면서 배치되어야 한다. X, Y 는 부지의 가로 방향, 세로 방향 거리이다.

$$x_i + \frac{l_i}{2} + M_i \leq X, x_i - \frac{l_i}{2} - M_i \geq 0 \quad (6)$$

$$y_i + \frac{d_i}{2} + M_i \leq Y, y_i - \frac{d_i}{2} - M_i \geq 0 \quad (7)$$

위의 식들은 모두 안전 및 유지·보수와 관련된 제약조건과 관련된 내용이다. 이제 목적함수 정의를 위해 각 장치 간에 연결해야 할 파이프의 길이를 산정해야 한다. 본 연구에서 다루는 실제 공정은 단층구조이기 때문에 두 장치의 높이차는 고려하지 않는다. 장치, i 와 j 간에 연결해야 할 총 파이프의 길이는 다음과 같다. 여기서 L_{ij} 는 장치 i 와 j 간에 연결해야 할 총 파이프의 길이가 된다.

$$X_{ij} = |x_i - x_j|, Y_{ij} = |y_i - y_j| \quad (8)$$

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

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

목적함수는 총 파이프 길이와 단위 길이당 파이프의 단가를 이용해 정의할 수 있다. 목적함수는 다음의 식으로 주어진다. 여기서 C_{ij} 는 단위 길이 당 파이프 비용을 의미한다. 따라서, C_{ij} 와 L_{ij} 의 곱은 장치 i 와 j 를 연결하는데 드는 총 파이프의 비용이다. 함수 $p(x_i, y_i)$ 는 벌칙함수로서 위에서 언급한 제약조건을 위반하는 경우 페널티를 부여하는 식이다.

$$px_{ij} = |x_i - x_j| - \left(\frac{l_i + l_j}{2} + (M_i + M_j) \times (1 - R_{ij}) + S_{ij} \times R_{ij} \right) \\ \text{if } px_{ij} \geq 0, px_{ij} = 0 \\ \text{otherwise, } px_{ij} = C_x \quad (10)$$

$$py_{ij} = |y_i - y_j| - \left(\frac{d_i + d_j}{2} + (M_i + M_j) \times (1 - R_{ij}) + S_{ij} \times R_{ij} \right) \\ \text{if } py_{ij} \geq 0, py_{ij} = 0 \\ \text{otherwise, } py_{ij} = C_y \quad (11)$$

$$lx_i = x_i + \frac{l_i}{2} + M_i - X, \quad \text{if } lx_i \geq 0, lx_i = 0 \\ \text{otherwise, } lx_i = P_{max} \quad (12)$$

$$kx_i = x_i - \frac{l_i}{2} - M_i, \quad \text{if } kx_i \leq 0, kx_i = P_{min} \\ \text{otherwise, } kx_i = 0 \\ ly_i = y_i + \frac{d_i}{2} + M_i - Y, \quad \text{if } ly_i \geq 0, ly_i = 0 \\ \text{otherwise, } ly_i = P_{max} \quad (13)$$

$$ky_i = y_i - \frac{d_i}{2} - M_i, \quad \text{if } ky_i \leq 0, ky_i = P_{min} \\ \text{otherwise, } ky_i = 0$$

$$p(x, y) = \sum_{i \neq j} (px_{ij} + py_{ij}) + \sum_i (lx_i + ly_i + kx_i + ky_i) \quad (14)$$

본 연구의 목적함수는 식 (15)와 같으며, 이를 가장 최소로 하는 공정의 배치를 최적화 기법을 이용하여 탐색하고자 한다. 목적함수를

통해 최적화해야 할 결정변수(decision variable)는 장치 1개당 3개이며(i 기준으로 O_p, x_p, y_p). 장치의 개수가 n 개이면 총 $3n$ 개의 결정변수가 존재한다.

$$\text{Min} \cdot \sum_{i \neq j} C_{ij} \times L_{ij} + p(x, y) \quad (15)$$

만약에 부지의 면적을 고정하지 않고 부지의 면적을 최소로 하면서 모든 제약조건을 만족하는 공정의 배치를 탐색하고자 한다면 식 (15)의 목적함수는 부지 비용을 목적함수에 추가하여 식 (16)과 같이 변경할 수 있다. 여기서 E 는 단위 면적(m^2) 당 부지의 가격을 의미한다.

$$\text{Min} \cdot \sum_{i \neq j} C_{ij} \times L_{ij} + p(x, y) + EXY \quad (16)$$

3. PSO (Particle Swarm Optimization)

본 연구에서는 PSO(Particle Swarm Optimization) 기법을 사용하여 목적함수를 최소로 하는 결정변수를 탐색하였다. PSO는 새떼와 같은 군집들의 사회적 행동 양식에 대한 규칙성에 착안하여 개발된 경험적 최적화 기법이다[8].

보통의 최적화 기법은 제약조건을 만족하면서 목적함수의 미분값이 0인 결정변수를 탐색한다. 하지만, 공정의 배치 최적화 문제의 경우, 공정에 따라 다양한 제약조건이 존재하기 때문에 미분을 이용하는 최적화 기법을 이용하여 문제를 푸는 데는 한계가 있다. PSO와 같은 경험적 최적화 기법의 경우 많은 결정변수의 후보를 무작위로 생성하고, 일정한 기준을 가지고 지속적으로 업데이트하여 최종적으로 가장 좋은 성능을 보이는 최적의 해를 탐색한다. PSO의 더 자세한 알고리즘은 Schwab의 논문에 자세히 소개되어 있다[8]. PSO는 조절 변수가 많지 않고 초기값에 민감하지 않다는 장점이 있다[9]. 하지만, PSO의 최대 약점은 제시된 최적해가 global solution이 아니라는 점이다. 이 단점을 극복하는 방법은 최대한 시뮬레이션을 많이 수행하여 제시된 여러 해 중에서 가장 좋은 해를 선택하는 것이다. 본 연구에서는 1,000,000개의 결정변수의 집합을 랜덤하게 생성하여 최적화를 진행하였다.

4. C3MR (Propane precooling Mixed Refrigerant) 공정

4-1. 공정 개요 및 문제 정의

본 연구에서는 A사의 C3MR 액화 공정을 벤치마킹 공정으로 선정하였다. C3MR 공정은 냉동 공정의 에너지 효율 측면에서 가장 효율적인 기술로 인정받고 있으며, 전 세계 LNG 플랜트 시장에서 75% 이상을 차지하고 있다[1]. 이 공정은 Gas 상태의 천연가스를 프로판관을 이용하여 먼저 냉각하고 혼합 냉매 사이클을 이용하여 LNG로 액화시키는 두 단계로 이루어져 있다.

프로판을 이용한 Precooling은 천연가스를 프로판 열교환기를 통해 약 $-30 \sim -35^\circ\text{C}$ 로 냉각한다. 원하는 온도를 달성하기 위해 최대 4회의 플래시 단계를 사용할 수 있으며 MCHE (Main Cryogenic Exchanger)는 유입 gas와 냉매 사이의 열교환에 필요한 충분한 표면적을 제공하기 위해 수천 개의 튜브가 있는 번들로 구성된 나선형 열교환기를 사용한다. 최종 냉각 단계는 JT(Joule Thomson) 밸브 또는 유압 팽창기를 통해 액체를 추가 냉각하여 천연가스를 -160°C 로 완전히 액화시킨다[9]. 자세한 C3MR 공정의 원리는 Wang 등의 연구를 참고하면 된다[9].

본 연구의 대상 공정은 Air Cooler 2개와 Propane Compressor 3개, Compressor Cooler 3개, Heat Exchanger 2개 그리고 2개의 Phase Separator로 구성되어 있다. 그리고 Precooling에서 혼합 냉매가 사용되었으며, 그 조성은 질소, 메탄, 에탄, 프로판 및 부탄의 혼합이다. Precooling에서 쓰이는 혼합 냉매는 Precooling Step을 통과하는 천연가스와 다음 단계에서 사용되는 같은 조성의 주 혼합냉매를 냉각시킨다. 그 후 주 혼합 냉매가 액화 및 과냉각 단계에서 천연가스 (NG)를 -160°C 로 완전히 액화시킨다[10].

Fig. 1에서 보는 바와 같이 현재 운영되고 있는 A사의 C3MR 액화 공정은 단층으로 구성되어 있으며, 부지의 크기는 가로 120 m, 세로 90 m이다. 장치 수에 비해 부지가 넓은 이유는 사막에 건설되어 있어서 부지의 비용에 제약이 없기 때문이다. 장치별 유지·보수에 필요한 공간은 장치 크기의 30%이고, 최대 3 m로 가정하였다. 장치 간의 안전을 고려한 최소 이격거리는 4 m이다. 각 장치에 관한 기본

정보를 Table 1에 정리하였다.

또한, 서로 연결되는 장치와 유체 종류 및 유량에 따라 달라져야 하는 배관의 종류를 본 연구에 반영하였다. 배관의 종류는 천연가스 이송에 주로 사용되는 API 5L X65를 만족해야 하며[10], 파이프 내를 흐르는 유체의 최대 압력보다 2배 이상인 압력 기준으로 배관의 내경과 외경의 Size를 4가지로 정리하였다. 장치 간의 연결에 따른 배관의 종류와 가격 그리고 장치간 배관의 연결 정보는 Table 2와 3

Table 2. Pipeline information according to types

Type	Diameter	Price
A	8"	450\$/m
B	3"	400\$/m
C	2½"	350\$/m
D	2"	250\$/m

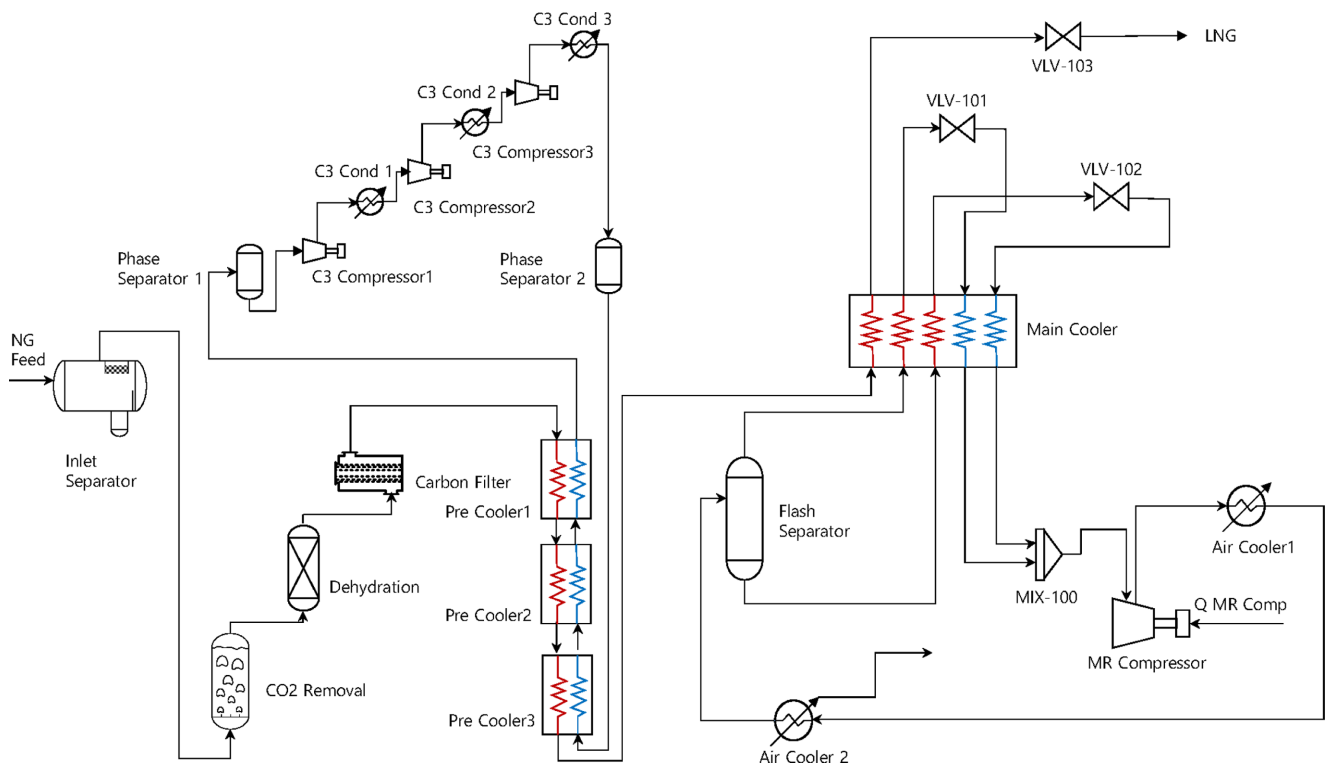


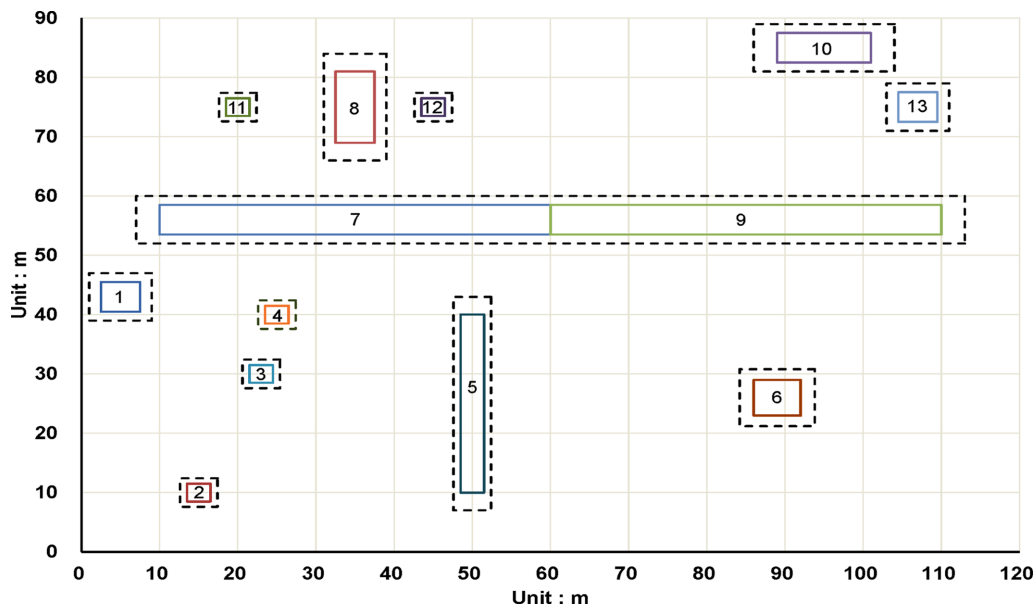
Fig. 1. The process flow diagram of C3MR liquefaction process.

Table 1. Basic information and positions of all equipments when a land size is also optimized

Number	Equipment	Width (m)	Depth (m)	Height (m)	Position (X,Y)
1	Inlet Separator	5	5	3	(5,43)
2	CO ₂ Removal	3	3	10	(15,10)
3	Dehydration	3	3	10	(23,30)
4	Carbon Filter	3	3	10	(25,40)
5	Pre Cooler	3	30	1	(50,25)
6	Main Cooler	6	6	15	(89,26)
7	Propane Condenser	50	5	6	(35,56)
8	Propane Compressor (3 step)	5	12	6	(35,75)
9	Air Cooler for Compressor 2	50	5	6	(85,56)
10	Mixed Refrigerant Compressor (3 Step)	5	12	6	(95,80)
11	Phase Separator 1	3	3	3	(20,75)
12	Phase Separator 2	3	3	3	(45,75)
13	Flash Separator	5	5	5	(107,75)

Table 3. Pipeline connections and types of C3MR process. Equipment numbers are listed in Table 1

Connection	(1,2)	(2,3)	(3,4)	(4,5)	(5,6)	(7,5)	(5,7)	(8,12)	(11,8)	(7,11)	(12,7)	(9,13)	(6,9)	(9,6)	(10,9)	(13,10)
Pipe Type	A	A	A	A	B	D	D	D	D	D	D	C	D	D	D	C

**Fig. 2. The Real plant Layout of C3MR liquefaction process. Dash lines indicate the maintenance area. Numbers are listed in Table 1.**

에 정리하였다.

실제 공정의 사진이나 도면은 저작권 문제로 공개할 수 없어서, 대략적인 위치를 보여주는 공정 실제 배치를 Fig. 2에 제시하였다. Propane Condenser와 Air Cooler는 하나의 블록 형태로 건설되어 있어서 본 문제에서는 한 개의 블록으로 합쳐서 다루었다.

4.2. 최적화 수행 결과

본 연구의 모든 모델링 및 최적화는 MATLAB을 이용하였다. 두 가지 경우에 대하여 공정 배치 최적화를 수행하였다. 첫 번째는 부지의 크기는 가로 120 m, 세로 90 m로 부지의 크기가 고정된 경우, 두 번째는 모든 제약조건도 만족하면서 부지의 면적도 최소화하는 경우이다. 이때 부지 비용을 단위 면적(m^2)당 5,000 \$로 설정하였다.

프로세스는 AMD Athlon 2.9 GHz를 사용했으며, 총 계산 시간은 각각 37,224초 및 44,445초가 걸렸다.

Table 4와 5는 두 가지 경우에 관한 최적화 결과를 나타내고 있다. 본 연구에서 최적화를 통해 결정해야 할 변수의 개수는 총 39개이다. Fig. 3과 Fig. 4는 각각의 경우에 배치 최적화 결과를 보여주고 있다. 두 그림에서 점선은 각 장치에 필요한 유지·보수 공간을 나타낸다. 그림에서 확인해 보면, 각 장치별로 유지·보수에 필요한 거리와 최소 이격거리를 충분히 확보하고 있음을 알 수 있다. 실제 공정 배치에 대한 파이프의 비용을 본 연구의 목적함수로 계산하면 7.4273×10^4 \$이다. 최적 해를 적용하였을 때 목적함수의 값은 2.9352×10^4 \$이며, 최적화를 통해 배관 설치비용을 60.48% 절감할 수 있다. 두 번째 문제의 경우 최적해의 목적함수 값은 3.7575×10^7 \$이다. 부지는 가로

Table 4. The positions of equipments optimized by a proposed research

Number	Equipment	O	X	Y
1	Inlet Separator	1	32.74	12.38
2	CO ₂ Removal	0	32.72	3.37
3	Dehydration	0	32.37	35.68
4	Carbon Filter	0	34.14	49.59
5	Pre Cooler	1	35.64	71.30
6	Main Cooler	0	86.57	70.56
7	Propane Condenser	1	36.73	27.55
8	Propane Compressor (3 step)	1	43.95	62.06
9	Air Cooler for Compressor 2	1	86.73	27.55
10	Mixed Refrigerant Compressor (3 Step)	0	86.72	55.75
11	Phase Separator 1	1	41.30	38.91
12	Phase Separator 2	0	43.09	3.27
13	Flash Separator	1	86.45	40.20

Table 5. The positions of equipments optimized by a proposed resear

Number	Equipment	O	X	Y
1	Inlet Separator	1	6.67	43.65
2	CO2 Removal	0	12.01	2.82
3	Dehydration	0	19.55	2.40
4	Carbon Filter	0	41.99	20.36
5	Pre Cooler	1	71.74	26.29
6	Main Cooler	0	101.75	38.95
7	Propane Condenser	1	29.84	65.25
8	Propane Compressor (3 step)	1	12.36	26.92
9	Air Cooler for Compressor 2	1	79.84	65.25
10	Mixed Refrigerant Compressor (3 Step)	0	37.92	48.43
11	Phase Separator 1	1	10.10	53.07
12	Phase Separator 2	0	36.70	6.35
13	Flash Separator	1	32.60	32.60

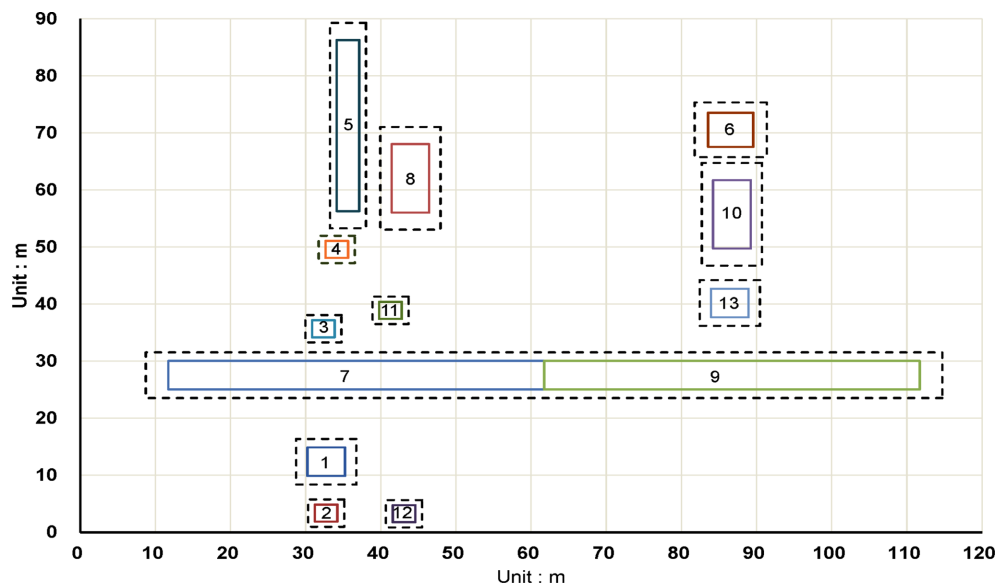


Fig. 3. The Plant layout of C3MR liquefaction process optimized by PSO. Dash lines indicate the maintenance area.

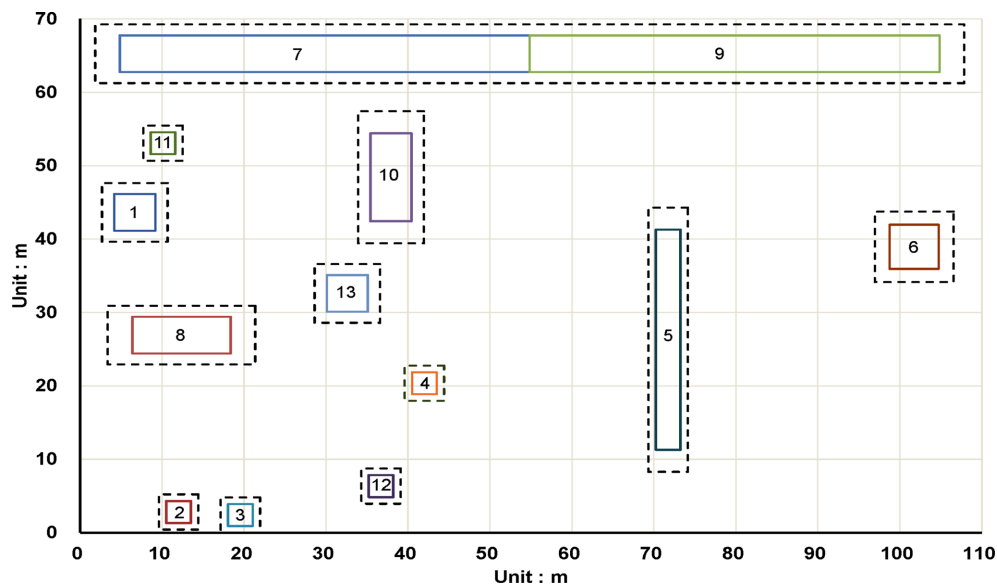


Fig. 4. The Plant layout of C3MR liquefaction process as considering land optimization.

120 m, 세로 90 m에서 가로 110.02 m, 세로 68.22 m로 축소되었으며, 부지의 비용이 차지하는 비중은 총 99.87%이다. 부지가 차지하는 비용은 단위 면적당 가격에 따라 크게 달라질 수 있다. 두 번째 문제의 경우 부지를 모든 제약조건을 만족하면서 최대 22.88%의 부지를 절약할 수 있다. 두 문제를 비교해 보면, 부지의 값이 전체 목적함수의 값의 99.92%를 차지한다. 단위면적당 부지의 가격이 본 연구에서 다소 높게 설정되었다고 볼 수 있지만, 본 연구를 통해 부지를 축소하는 것이 전체 투자비 절감에 매우 중요한 사항이라고 결론 낼 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 장치 간 안전을 위한 이격거리와 유지·보수를 위한 공간을 제약조건 식을 세우고 장치 간 파이프의 총비용을 목적함수로 하여 MILP 문제로 정의하고 실제 공정을 이용하여 배치 최적화를 수행하였다. 다양한 벌칙함수를 이용해 최적의 해가 모두 제약조건을 만족하도록 유도하였다. 이를 통해 본 연구에서 제안한 방법이 어느 정도 비용 절감의 효과가 있는지 현재 가동 중인 실제 공정을 통해 검증하였다. 검증을 통해 공정의 배관설치 시 실제 공정 배치와 비교하면 최대 60.48%까지 비용 절감의 효과가 있음을 확인하였다. 또한, 부지의 면적도 기존 면적보다 30.51% 줄일 수 있음을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 제안한 방법은 공정의 기초 설계 단계에서 적용되어야 가장 효과가 크다. 최근에는 다양한 플랜트들이 multi floor에 설치되고 있다. 본 연구에서 제안한 방법은 multi floor 상의 공정 배치 최적화 문제로 확장할 수 있다. 또한, PSO를 적용하였기 때문에, 복잡한 제약조건이 추가되는 경우에도 쉽게 문제 해결이 가능하다. 본 연구에서는 장치 간의 안전을 위한 최소 이격거리를 상수로 가정하였지만, 안전과 관련된 사고 발생 확률 및 사고의 크기 등의 요소를 수식화하여 사고 발생과 관련된 비용에 대한 기대값을 목적함수에 추가한다면, 안전과 관련된 손실 비용과 배관 배치 비용을 함께 최소화 하는 문제로 확장할 수 있다.

감 사

이 논문은 2015년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2015R1C1A1A02036567).

Reference

1. International Gas Union, World LNG Report 2017(2017).
2. 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).
3. 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).
4. Khan, F. I. and Haddara, M. R., "Risk-based Maintenance of Ethylene Oxide Production Facilities," *J. Hazard. Mater.*, **108**(3), 147-159(2004).
5. Lee, D. H. and Lee, C. J., "The Plant Layout Optimization Considering the Operating Conditions," *J. Chem. Eng. Japan*, **50**(7), 568-576(2017).
6. Penteado, F. D. and Ciric, A. T., "An MINLP Approach for Safe Process Plant Layout," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **35**(4), 1354-1361 (1996).
7. 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).
8. 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).
9. Wang, M., Khalilpour, R., and Abbas, A., "Operation Optimization of Propane Precooled Mixed Refrigerant Processes," *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, **15**, 93-105(2013).
10. American Petroleum Institute, API 5L: Specification for Line Pipe, 43rd Edition, *API Publishing Services*, Washington(2004).