

최적화 기법을 이용한 LNG FPSO 액화 공정 장비의 다층 배치

구남국¹·이준채¹·노명일^{2,†}·황지현¹·이규열³
서울대학교 조선해양공학과 대학원¹
울산대학교 조선해양공학부²
서울대학교 조선해양공학과 및 해양시스템공학연구소³

Multi-floor Layout for the Liquefaction Process Systems of LNG FPSO Using the Optimization Technique

Nam-Kug Ku¹·Joon-Chae Lee¹·Myung-Il Roh^{2,†}·Ji-Hyun Hwang¹·Kyu-Yeul Lee³
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University¹
School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan²
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul National University³

Abstract

A layout of an LNG FPSO should be elaborately determined as compared with that of an onshore plant because many topside process systems are installed on the limited area: the deck of the LNG FPSO. Especially, the layout should be made as multi-deck, not single-deck and have a minimum area. In this study, a multi-floor layout for the liquefaction process, the dual mixed refrigerant(DMR) cycle, of LNG FPSO was determined by using the optimization technique. For this, an optimization problem for the multi-floor layout was mathematically formulated. The problem consists of 589 design variables representing the positions of topside process systems, 125 equality constraints and 2,315 inequality constraints representing limitations on the layout of them, and an objective function representing the total layout cost. To solve the problem, a hybrid optimization method that consists of the genetic algorithm(GA) and sequential quadratic programming(SQP) was used in this study. As a result, we can obtain a multi-floor layout for the liquefaction process of the LNG FPSO which satisfies all constraints related to limitations on the layout.

Keywords : LNG FPSO(부유식 LNG 생산, 저장, 하역 장치), Liquefaction process(액화 공정), Multi-floor layout(다층 배치), Optimization(최적화)

1. 서론

1.1 연구 배경

LNG 수요량의 증가에 따라 새로운 개념의 LNG-FPSO(Liquefied Natural Gas-Floating, Production, Storage, and Off-loading unit)의 수요가 발생하고 있다(Lee, et al., 2010). 이러한 LNG FPSO는 크게 상부 구조(topside)와 선체(hull), 그리고 터렛(turret)으로 나눌 수 있으며, 상부 구조는 프로세스 시스템(process system)과 유틸리티 시스템(utility system)으로 나뉜다. 이 중 프로세스 시스템에는 분리 공정(separation process), 전처리 공정(pre-treatment process), 그리고 액화 공정(liquefaction process)이 있으며, 유틸리티 시스템은 이러한 프로세스 시스템

을 보조하는 역할을 한다(Hwang, et al., 2010). LNG FPSO의 경우, 선체 위에 다양한 상부 구조 시스템들이 배치되어야 하므로, 육상에 비해 면적에 관련된 제약 조건이 보다 중요하게 다루어지고 있다(Li & Ju, 2010). 그러므로 제한된 공간을 효율적으로 사용하기 위해 LNG FPSO 상부 구조 시스템들의 장비 배치는 단일 갑판(single-deck)이 아닌 다층 갑판(multi-deck)으로 설계하여야 하며, 상부 구조에 배치된 장비가 차지하는 면적을 최소화하기 위해 LNG FPSO 설계 단계 중 FEED(Front-End Engineering Design) 단계에서 최적 장비 배치를 수행한다.

상부 구조의 프로세스 시스템 중 액화 공정은 천연 가스(NG: Natural Gas)를 액화하여 부피가 약 1/600 인 액화 천연 가스(LNG: Liquefied Natural Gas)로 저장할 수 있도록 하며, LNG FPSO 상부 구조 프로세스 시스템 건조 비용의 70%, 전체 건조 비용의 30~40%를 차지하는 중요한 공정이다(Lee, et al., 2011;

Cha, et al., 2010; Shukri, 2004). 본 연구에서는 이러한 액화 공정을 위한 장비의 최적 다층 배치를 수행하였으며, 우선 액화 공정을 위해 배치되는 장비에 대해 소개하였다. 그 후 장비의 최적 다층 배치 문제를 수학적 최적화 모델로 정식화하였으며, 최적화 기법을 이용하여 액화 공정을 위한 장비의 최적 다층 배치를 도출 하였다.

1.2 관련 연구 현황

Penteado and Ciric (1996)은 안전성(safety)을 고려하여 단층(single-floor)인 화학 공정 플랜트(chemical process plant)에 대해 장비의 최적 배치를 수행하였다. 설계 변수로서 장비의 위치와 장비 배치 후 최종적으로 요구되는 배치 면적 및 안전성을 고려하기 위해 각각의 장비에 추가적으로 설치되어야 할 안전 장치의 개수를 정의하였다. 또한 제약 조건에 장비 사이의 최소 거리를 규정함으로써 안전성을 고려하였으며, 목적 함수로는 배치 비용(layout cost), 즉 공장의 배치 면적에 따른 비용 및 장비들을 파이프 등으로 연결하는데 드는 비용의 합에 장비에 설치되는 안전 장치 비용과 TNT 등가 방법(Trinitrotoluene equivalency method)(Park, et al., 2011)을 통해 예측한 장비 손상 관련 비용을 더하여 정의함으로써 안전성을 고려하였다. 이를 통해 최종적으로 결정된 수학적 최적화 모델을 MINLP(Mixed Integer Nonlinear Programming)(Lee & Leyffer, 2012)으로 풀어 최적의 layout을 결정하였다.

Patsiatzis and Papageorgiou (2002)는 다층인 화학 공정 플랜트에 대해 장비의 최적 배치를 수행하였다. 설계 변수로서 장비의 위치와 장비 배치 후 최종적으로 요구되는 배치 면적을 정의하였으며, 목적 함수로는 Penteado and Ciric(1996)이 고려한 배치 비용에 층의 개수에 따른 추가 건설 비용을 더한 값으로 정의하였다. 이를 통해 최종적으로 결정된 수학적 최적화 모델을 MILP(Mixed Integer Linear Programming)으로 풀어 최적의 layout을 결정하였다.

Park (2011)는 안전성을 고려하여 다층인 화학 공정 플랜트에 대해 장비의 최적 배치를 수행하였다. 설계 변수는 Patsiatzis and Papageorgiou (2002)와 동일하게 정의하였으며, 목적 함수로는 Patsiazis (2002)에서 다룬 배치 비용에 Penteado and Ciric(1996)와 같이 TNT equivalency method를 통해 장비 손상을 예측하고 이에 관련된 비용을 더하여 정의함으로써 안전성을 고려하였다. 이를 통해 최종적으로 결정된 수학적 최적화 모델을 MILP로 풀어 최적의 layout을 결정하였다.

Georgiadis (1999)은 다층인 화학 공정 플랜트에 대해 장비의 최적 배치를 수행하였다. 이 연구에서는 multi-floor를 다룬 다른 연구들과 다르게 장비가 한층 이상을 차지하는 경우도 포함하여 다루고 있다. 설계 변수로서 장비의 위치와 장비 배치 후 최종적으로 요구되는 배치 면적을 정의하였으며, 목적 함수로는 Patsiazis (2002)에서 다룬 배치 비용에 파이프를 통해 물질이 높이 방향으로 올라갈 경우 펌프(pump) 시설 등을 사용함으로써 발생할 수 있는 추가 비용을 더한 값으로 정의하였다. 이를 통해 최

종적으로 결정된 수학적 최적화 모델을 MILP로 풀어 최적의 layout을 결정하였다.

본 연구에서는 안전성을 고려하여 다중 갑판인 LNG FPSO의 액화 공정을 위한 장비의 최적 배치를 수행하였다. 이 때 갑판간의 높이 보다 큰 열교환기(heat exchanger)와 같이 갑판을 관통하는 장비를 고려하였다. 설계 변수는 Patsiatzis and Papageorgiou (2002)와 동일하게 장비의 위치와 장비 배치 후 최종적으로 요구되는 배치 면적을 정의하였으며, Penteado and Ciric (1996)과 같이 제약 조건에 장비 사이의 최소 거리를 규정함으로써 안전성을 고려하였다. 목적 함수로는 Patsiazis (2002)의 배치 비용과 같이 장비 배치 면적에 따른 비용 및 장비들을 파이프 등으로 연결하는데 드는 비용의 합으로 정의하였다.

위 사항들을 정리하면 Table 1(a), (b)와 같다.

Table 1(a) Comparison of the formulation of the optimization problem between this study and other past studies

Study	Object	Multi-floor	Design Variables
Penteado & Ciric(1996)	EO plant ¹⁾	X (Single floor)	Position of each equipment, Land area, Safety devices that have to be installed at each equipment
Patsiatzis & Papageorgiou (2002)	Instant coffee process plant, EO plant	O	Floor allocation, position and orientation of each equipment, Land area
Park, et al. (2011)	EO plant, Benzene production process plant	O	Floor allocation, position and orientation of each equipment, Land area
Michael, et al. (1999)	Instant coffee process plant, Industrial multipurpose batch plant	O	Floor allocation, position and orientation of each equipment, Land area
This study	Liquefaction process of the LNG FPSO	O	Floor allocation, position and orientation of each equipment, Land area

1) EO plant: Ethylene Oxide manufacturing plant

2. LNG FPSO 액화 공정에서의 장비 및 배치

액화 공정의 사이클(cycle)은 크게 총계형 액화 사이클(cascade liquefaction cycle), 혼합 냉매 사이클(mixed refrigerant cycle), 터빈 기반 사이클(turbine-based cycle)로 분류할 수 있으며 (Venkatarathnam, 2008), 이 중 혼합 냉매 사이클의 일종인 DMR(Dual Mixed Refrigerant) 사이클이 최근 LNG FPSO 적용에 검토되고 있다.

problem between this study and other past studies

Study	Additional Considerations		Objective Function	Optimization Method
	Safety consideration	Equipment occupying more than one floor		
Penteado & Ciric(1996)	Minimum distance between equipment, Installation of the protection devices ¹⁾ for equipment cost, Financial risk cost ²⁾ predicted by the TNT equivalency method ³⁾	X	Layout cost ⁴⁾ + Protection devices cost + Financial risk cost	MILP ⁵⁾
Patsiatzis & Papageorgiou (2002)	X	X	Layout cost	MILP ⁶⁾
Park, et al. (2011)	Explosion damage cost predicted by the TNT equivalency method	X	Layout cost + Explosion damage cost ⁷⁾	MILP
Michael, et al. (1999)	X	O	Layout cost + Upward and horizontal transportation cost ⁷⁾	MILP
This study	Minimum distance between equipment	O	Layout cost	Hybrid optimization method (SQP+GA)

- 1) Protection devices: Protection systems installed at equipment and physical barriers installed between equipment
- 2) Financial risk: Risk is the expected financial loss associated with an accident. In that study, this value is obtained by the TNT equivalency method.
- 3) TNT equivalency method: A consequence analysis using the energy of explosion to predict the equipment damage realistically (Park, et al., 2011)
- 4) Layout cost = total plant area cost + floor construction cost + Connectivity cost involving cost of piping and other required connection between equipment (Patsiatzis & Papageorgiou, 2002)
- 5) MILNP: Mixed Integer Nonlinear Programming (Lee & Leyffer, 2012)
- 6) MILP: Mixed Integer Linear Programming
- 7) Upward and horizontal transportation cost: The pumping cost for the movement of materials to higher floors through the pipe is considered additionally.

이 DMR cycle은 2 cycle에 해당하는 것으로, 천연 가스를 예냉(precooling)하는 하나의 작동 냉매와 액화(liquefaction)와 과냉(subcooling)을 하는 또 다른 하나의 작동 냉매로 천연 가스를 액화시킨다(Barclay & Shukri, 2007). 두 작동 냉매는 모두 혼합 냉매(mixed refrigerant)로서, 예냉을 하는 작동 냉매는 에탄, 프로판, 부탄, 메탄으로 혼합되어있고, 액화와 과냉을 하는 또 다른 하나의 작동 냉매는 질소, 메탄, 에탄, 프로판으로 혼합되어있다.

이러한 DMR 사이클을 구성하는 주요 장비에는 Fig. 1과 같이 크게 압축기(compressor), 열교환기(heat exchanger), 해수를 이

용한 냉각기(sea water(SW) cooler로 열교환기의 일종), 밸브 및 상분리기(separator)가 있으며(Venkatarathnam, 2008), 그 외 배치 설계 시 추가로 고려하는 장비들이 있다. 우선 압축기와 관련하여 추가 고려되는 장비로는 압축기 흡입 드럼(compressor suction drum), 압축기용 냉각기 및 오버 헤드 크레인(overhead crane)이 있다. 압축기 흡입 드럼은 액체의 냉매가 압축기로 유입되어 고장을 발생시키는 것을 사전에 차단하기 위한 것으로, 압축기 바로 전에 설치되어 기체, 액체 혼합 상태의 냉매 중 액체 상태의 냉매를 걸러준다. 압축기용 냉각기는 주로 압축기 아래쪽에 배치되며 압축기 장비에서 발생하는 열을 식혀주며, 오버 헤드 크레인은 압축기가 설치된 갑판의 바로 위 갑판에 설치되어 장비의 크기가 큰 압축기의 유지 보수에 사용된다. 열교환기와 관련하여 추가 고려되는 장비로는 예냉부(precooling part)에 설치되는 precooling mixed refrigerant(PMR) receiver가 있다. 이는 압축기와 열교환기 사이에 설치되는 것으로 압축기가 갑자기 중단되더라도 2~3분 정도는 계속해서 열교환기에 냉매를 공급해줄 수 있도록 냉매를 보관하는 일종의 버퍼 탱크(buffer tank) 역할을 하는 동시에 파이프라인에 발생할 수 있는 surge 현상을 막는 역할을 한다. 또한 냉매의 유실이 발생할 경우 이곳에서 유실된 만큼의 냉매를 공급받기도 한다.

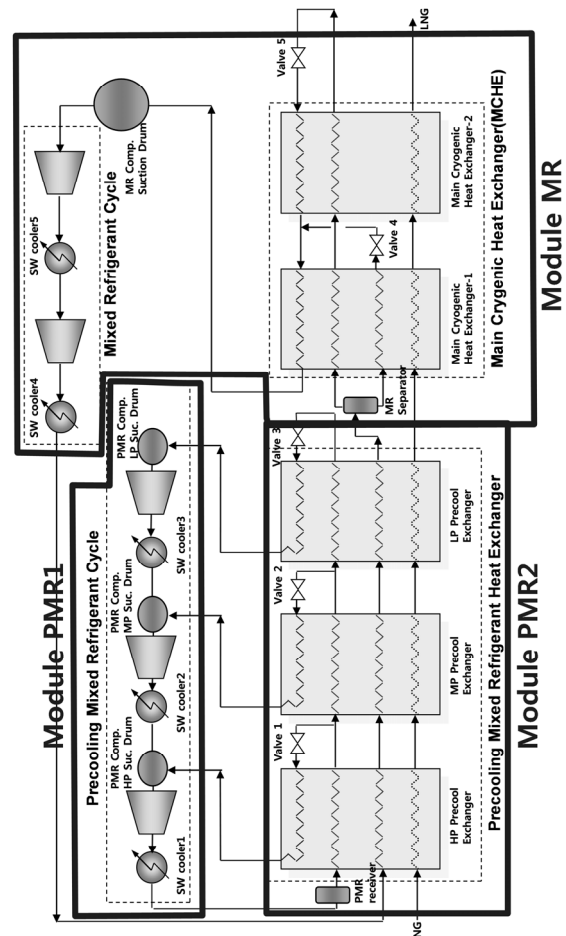


Fig. 1 Dual mixed refrigerant cycle (Venkatarathnam, 2008)

그러므로 최종적으로 DMR 사이클의 장비 배치 최적화를 위해 고려하게 되는 장비로는, 예냉부에 3개의 회전 날개(impeller)로 3번에 나누어 다단 압축하는 압축기 1대, 오버 헤드 크레인 1대, 압축기용 냉각기 1대, 흡입 드럼 3대, 해수를 이용한 냉각기(SW cooler) 3대, PMR receiver 1대, 열교환기 3대, 밸브(valve) 3개가 있으며, 액화부(liquefaction part)와 과냉부(subcooling part)에 2개의 회전 날개로 2번에 나누어 다단 압축하는 압축기 1대, 오버 헤드 크레인 1대, 압축기용 냉각기 1대, 흡입 드럼 2대, 해수를 이용한 냉각기 2대, 열교환기 1대, 밸브 2개 및 MR 분리기(mixed refrigerant separator)가 있다. 이 장비들의 개략적인 크기는 Table 2와 같다.

이러한 장비들이 상부 구조에 배치될 때에는 같은 기능을 하는 장비끼리 묶어 모듈(module) 단위로 배치를 하며(Mecklenburgh, 1985), 각각의 모듈이 차지하는 면적을 최소화하기 위해 각각의 모듈 내에서 장비를 최적으로 배치하게 된다. DMR 사이클에서는 Fig. 1과 같이 3가지 모듈로 장비를 나누어 배치를 한다. 첫 번째 모듈은 예냉부에서 냉매를 압축하고 냉각하는 것으로 3개의 회전 날개로 3번에 나누어 다단 압축하는 압축기 1대, 오버 헤드 크레인 1대, 압축기용 냉각기 1대, 흡입 드럼 3대, 해수를 이용한 냉각기 3대가 있으며, 이를 본 연구에서는 PMR1 모듈이라고 칭하였다. 두 번째 모듈은 예냉부에서 또 다른 냉매와 천연 가스를 열교환기를 통해 예냉하는 부분으로 PMR receiver 1대, 열교환기 3대, 밸브 3개가 있으며, 이를 본 연구에서는 PMR2 모듈이라고 칭하였다. 세 번째 모듈은 액화부와 과냉부에서 냉매를 압축, 냉각 및 천연 가스를 액화시키는 부분으로 2개의 회전 날개로 두 번에 나누어 다단 압축하는 압축기 1대, 오버 헤드 크레인 1대, 압축기용 냉각기 1대, 흡입 드럼 2대, 해수를 이용한 냉각기 2대, 열교환기 1대, 밸브 2개 및 MR 분리기가 있으며, 이를 본 연구에서는 MR 모듈이라고 칭하였다.

각각의 모듈은 다중 갑판 상에 배치되며, 본 연구에서는 갑판 간의 높이는 8m로 모두 동일하다고 가정하였다. 여기서 PMR2 모듈과 MR 모듈의 경우 A 갑판에서부터 E 갑판까지 배치되며, PMR1 모듈은 A 갑판에서부터 D 갑판까지 배치된다. 본 연구에서는 위 세 모듈 중 장비의 종류 및 개수가 가장 많은 MR 모듈에 대해 장비의 최적 다층 배치를 시도하였다. 이때, Fig. 2와 같이 각 갑판에서는 장비들의 유지 보수 및 이를 위한 보조 장비들의 배치를 위한 유지 보수 면적(maintenance area)이 y축 방향으로 제일 끝에서 원점 방향으로 9m까지 있으며(빛금 친 부분), 여기에는 장비가 배치될 수 없다고 가정하였다. 또한 최저 갑판인 A 갑판과 MR 압축기가 배치되는 갑판에는 사람들의 작업을 위한 공간(working space)의 확보를 위해 장비 배치 및 유지 보수 면적에 해당되지 않는 공간이 각각 갑판 면적의 50% 이상을 차지해야 한다고 가정하였다(색이 칠해지지 않은 부분).

안전성을 고려하기 위해 최상위 갑판인 E 갑판에는 각종 장비의 내부 압력 증가로 인해 발생할 수 있는 위급 상황을 대비하여 압력을 배출 및 감소시켜주기 위한 안전 시설(safety facilities)이 필요하며 이들의 배치를 위해 다른 장비 배치 및 유지 보수 면적에 해당되지 않는 공간이 최상위 갑판 면적의 60% 이상을 차지해야 한다고 가정하였다. 또한 장비간의 거리는 최소 4m 이상,

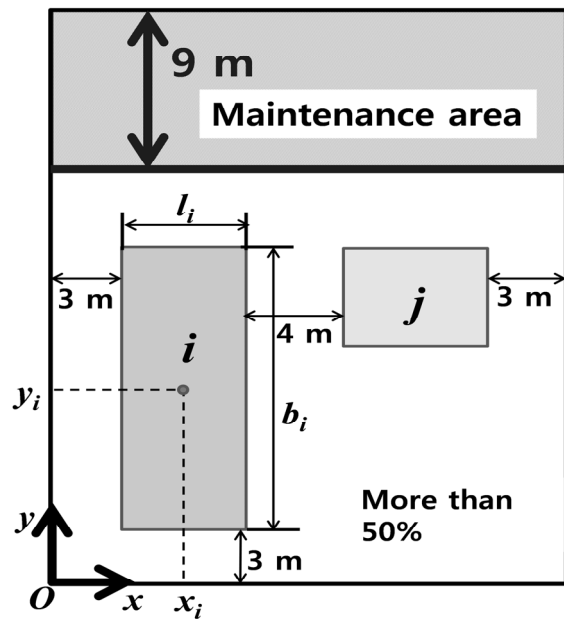


Fig. 2 Plan view of the a deck having equipments i and j

Table 2 Dimensions of the equipment in the MR module of LNG FPSO liquefaction process

Name of equipment	a_i [m]	b_i [m]	h_i [m]
Mixed refrigerant separator (MR separator)	4	4	13
Main cryogenic heat exchanger (MCHE)	5	5	43
Mixed refrigerant compressor suction drum (MR comp. suction drum)	4.5	4.5	13
Mixed refrigerant compressor (MR Comp.)	5	12	6
Cooler for compressor (Cooler for comp.)	5	12	6
Overhead crane	12	19	6
Sea water cooler 4 (SW cooler 4)	4	6	5
Sea water cooler 4 (SW cooler 5)	4	6	5
Valve 4	1	1	1
Valve 5	1	1	1

* a_i : 장비의 길이, b_i : 장비의 폭, h_i : 장비의 높이

장비와 갑판을 이루는 번들 사이의 거리는 최소 3m 이상으로 가 정하였다. 단, 유지 보수 면적과 장비 사이에는 최소 거리를 고려 하지 않는다고 가정하였다.

3. Liquefaction process의 장비 최적 다층 배치를 위한 수학적 최적화 모델

3.1 설계 변수(design variables)

장비의 최적 다층 배치를 결정하기 위해 모듈의 갑판 차지 면 적, 장비의 갑판 별 할당 정보 및 위치 좌표를 설계 변수로 정의 하였으며, 그 내용은 아래와 같다(Patsiatzis & Papageorgiou, 2002).

연속 변수(continuous variables)

x_i, y_i : 장비 i 중심의 x, y 좌표

z_i : 장비 i 에 대해 장비 i 의 바닥에서부터 파이프와 연결되는 지 점까지의 높이

R_{ij} : x 축 방향으로 장비 i 가 장비 j 의 우측에 있을 때 장비 i 와 j 중심의 x 축 방향 상대적 거리

L_{ij} : x 축 방향으로 장비 i 가 장비 j 의 좌측에 있을 때 장비 i 와 j 중심의 x 축 방향 상대적 거리

A_{ij} : y 축 방향으로 장비 i 가 장비 j 의 위쪽에 있을 때 장비 i 와 j 중심의 y 축 방향 상대적 거리

B_{ij} : y 축 방향으로 장비 i 가 장비 j 의 아래쪽에 있을 때 장비 i 와 j 중심의 y 축 방향 상대적 거리

U_{ij} : 높이 방향으로 장비 i 가 장비 j 의 위쪽에 있을 때 장비 i 와 j 중심의 y 축 방향 상대적 거리

D_{ij} : 높이 방향으로 장비 i 가 장비 j 의 아래쪽에 있을 때 장비 i 와 j 중심의 y 축 방향 상대적 거리

TD_{ij} : 장비 i 로부터 j 까지 총 직교 거리(total rectilinear distance)

FA : 모듈의 한 갑판당 차지하는 면적

X^{max} : 모듈의 x 축 방향 길이

Y^{max} : 모듈의 y 축 방향 폭

이진 변수(binary variables)

V_{ik} : 장비 i 가 k 갑판에 배치되어 있다면 1, 그렇지 않다면 0으 로 함

Z_{ij} : 장비 i 가 장비 j 와 같은 갑판에 배치되어 있다면 1, 그렇지 않다면 0으로 함

O_i : 장비 i 의 크기 a_i 와 b_i 중 a_i 가 x 축과 평행 할 경우(즉, a_i 가 장비의 길이 l_i) 1, 그렇지 않다면 0으로 함

$E1_{ij}, E2_{ij}$: 겹침 배치 방지 관련 제약 조건(non-overlapping constraints)에서 사용되는 이진 변수

여기서 i, j 는 장비 번호이고, k 는 갑판 번호임

위 사항을 MR 모듈에 적용하면 설계 변수를 아래와 같이 정리 할 수 있다.

Table 3 Design variables related with each equipment(128)

Equipment No.	Name	x_i [m]	y_i [m]	O_i	$V_{i,k}$		
					$V_{i,1}$	...	$V_{i,5}$
1	MR separator on lower deck	x_1	y_1	O_1	$V_{1,1}$	...	$V_{1,5}$
2	MR separator on upper deck	x_2	y_2	O_2	$V_{2,1}$	...	$V_{2,5}$
3	MCHE on A deck	x_3	y_3	O_3	$V_{3,1}$	...	$V_{3,5}$
4	MCHE on B deck	x_4	y_4	O_4	$V_{4,1}$	...	$V_{4,5}$
5	MCHE on C deck	x_5	y_5	O_5	$V_{5,1}$	...	$V_{5,5}$
6	MCHE on D deck	x_6	y_6	O_6	$V_{6,1}$	...	$V_{6,5}$
7	MCHE on E deck	x_7	y_7	O_7	$V_{7,1}$	...	$V_{7,5}$
8	MR Comp. suction drum on lower deck	x_8	y_8	O_8	$V_{8,1}$	...	$V_{8,5}$
9	MR Comp. suction drum on upper deck	x_9	y_9	O_9	$V_{9,1}$	...	$V_{9,5}$
10	MR Comp.	x_{10}	y_{10}	O_{10}	$V_{10,1}$	...	$V_{10,5}$
11	Cooler for comp.	x_{11}	y_{11}	O_{11}	$V_{11,1}$	...	$V_{11,5}$
12	Overhead crane	x_{12}	y_{12}	O_{12}	$V_{12,1}$	...	$V_{12,5}$
13	SW water 4	x_{13}	y_{13}	O_{13}	$V_{13,1}$	...	$V_{13,5}$
14	SW water 5	x_{14}	y_{14}	O_{14}	$V_{14,1}$	...	$V_{14,5}$
15	Valve 4	x_{15}	y_{15}	O_{15}	$V_{15,1}$	...	$V_{15,5}$
16	Valve 5	x_{16}	y_{16}	O_{16}	$V_{16,1}$	...	$V_{16,5}$

여기에 모듈의 한 갑판 당 차지하는 면적(FA), 모듈의 x 축 방 향 길이(X^{max}), 그리고 모듈의 y 축 방향 폭(Y^{max})을 고려하면 설계 변수의 개수는 총 589개이다.

3.2 제약 조건(constraints)

3.2.1 등호 제약 조건(equality constraints)

(1) 갑판 관련 제약 조건(deck constraints)

각각의 장비는 한 갑판에 할당되어야 하며, 이러한 조건은

Table 4 Design variables related with the connection between equipments(98)

No.	From equipment i to equipment j	R _{i,j} [m]	L _{i,j} [m]	A _{i,j} [m]	B _{i,j} [m]	U _{i,j} [m]	D _{i,j} [m]	TD _{i,j} [m]
1	1 to 4	R _{1,4}	L _{1,4}	A _{1,4}	B _{1,4}	U _{1,4}	D _{1,4}	TD _{1,4}
2	4 to 15	R _{4,15}	L _{4,15}	A _{4,15}	B _{4,15}	U _{4,15}	D _{4,15}	TD _{4,15}
3	15 to 4	R _{15,4}	L _{15,4}	A _{15,4}	B _{15,4}	U _{15,4}	D _{15,4}	TD _{15,4}
4	2 to 5	R _{2,5}	L _{2,5}	A _{2,5}	B _{2,5}	U _{2,5}	D _{2,5}	TD _{2,5}
5	5 to 6	R _{5,6}	L _{5,6}	A _{5,6}	B _{5,6}	U _{5,6}	D _{5,6}	TD _{5,6}
6	6 to 16	R _{6,16}	L _{6,16}	A _{6,16}	B _{6,16}	U _{6,16}	D _{6,16}	TD _{6,16}
7	16 to 7	R _{16,7}	L _{16,7}	A _{16,7}	B _{16,7}	U _{16,7}	D _{16,7}	TD _{16,7}
8	3 to 8	R _{3,8}	L _{3,8}	A _{3,8}	B _{3,8}	U _{3,8}	D _{3,8}	TD _{3,8}
9	9 to 10	R _{9,10}	L _{9,10}	A _{9,10}	B _{9,10}	U _{9,10}	D _{9,10}	TD _{9,10}
10	10 to 13	R _{10,13}	L _{10,13}	A _{10,13}	B _{10,13}	U _{10,13}	D _{10,13}	TD _{10,13}
11	13 to 10	R _{13,10}	L _{13,10}	A _{13,10}	B _{13,10}	U _{13,10}	D _{13,10}	TD _{13,10}
12	10 to 14	R _{10,14}	L _{10,14}	A _{10,14}	B _{10,14}	U _{10,14}	D _{10,14}	TD _{10,14}
13	10 to 11	R _{10,11}	L _{10,11}	A _{10,11}	B _{10,11}	U _{10,11}	D _{10,11}	TD _{10,11}
14	11 to 10	R _{11,10}	L _{11,10}	A _{11,10}	B _{11,10}	U _{11,10}	D _{11,10}	TD _{11,10}

Table 5 Design variables for the relationship between equipments(360)

Equipment j \ Equipment i	1	2	...	16
1	-	Z _{1,2} , E _{1,2} , E _{2,1}	...	Z _{1,16} , E _{1,16} , E _{2,16}
2	-	-	...	Z _{2,16} , E _{1,2,16} , E _{2,16}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
15	-	-	-	Z _{15,16} , E _{1,15,16} , E _{2,15}
16	-	-	-	-

아래와 같이 나타낼 수 있다(Patsiatzis & Papageorgiou, 2002). 이 조건을 모든 장비에 적용하게 되면 총 16개의 등호 제약 조건을 도출할 수 있다.

$$\sum_{k=1}^{NF} V_{i,k} = 1 \tag{1}$$

여기서, $i = 1, 2, \dots, 16$; NF : Number of deck(=5)

(2) 장비 설치 방향 관련 제약 조건(equipment orientation constraints)

장비들의 방향과 관련된 변수 O_i 로부터 장비의 길이와 폭을 아래와 같이 결정할 수 있으며(Patsiatzis & Papageorgiou, 2002), 모든 장비들에 적용하게 되면 총 32개의 등호 제약 조건을 도출할 수 있다.

$$l_i = \alpha_i O_i + \beta_i (1 - O_i) \tag{2}$$

$$d_i = \alpha_i + \beta_i - l_i \tag{3}$$

여기서, $i = 1, 2, \dots, 16$

l_i : 장비의 길이(x축 방향 길이)

d_i : 장비의 폭(y축 방향 길이)

(3) 장비간 거리 관련 제약 조건(distance constraints)

장비 i 와 장비 j 가 Table 2에서와 같이 파이프로 연결되어있을 때, 장비 i 에서부터 장비 j 까지의 파이프 길이를 구하기 위해 파이프가 연결되는 지점이 각 장비의 x축과 y축 방향으로 중점에 해당한다고 가정하였다. 그러므로 장비 i 와 장비 j 사이의 x축 및 y축 방향 파이프 길이를 아래와 같이 장비들 중심간의 상대적 거리로 구하였다(Patsiatzis & Papageorgiou, 2002).

$$R_{ij} - L_{ij} = x_i - x_j \tag{4}$$

$$A_{ij} - B_{ij} = y_i - y_j \tag{5}$$

여기서, 장비 i 와 j 사이에 연결 관계가 있을 경우

그리고 MCHE(Main Cryogenic Heat Exchanger)처럼 장비는 하나이지만 파이프가 여러 번 연결되며, 높이 방향으로 서로 다른 지점에 연결된다는 것을 고려하기 위해, 높이 방향에 대해서는 각각의 장비에 파이프가 연결되는 지점인 z_i 를 고려하여 아래와 같이 구하였다.

$$U_{ij} - D_{ij} = H \sum_{k=1}^{NF} k (V_{ik} - V_{jk}) + z_i - z_j \tag{6}$$

여기서, 장비 i 와 j 사이에 연결 관계가 있을 경우

NF : Number of deck(=5)

H : Height between decks(=8m)

Table 6 Value of z_i

z_i	z_1	z_2	z_3	z_4	z_5	z_6	z_7	z_8	z_9	z_{10}	z_{11}	z_{12}	z_{13}	z_{14}	z_{15}	z_{16}
value (m)	1	4	6	1	5	2	4.5	6	4	5	0	0	2.5	2.5	7	4.5

이를 통해 장비 i 와 장비 j 사이의 총 파이프 길이(장비 i 로부터 j 까지 총 직교 거리, total rectilinear distance)를 구하면 아래와 같다.

$$TD_{ij} = R_{ij} + L_{ij} + A_{ij} + B_{ij} + U_{ij} + D_{ij} \tag{7}$$

여기서, 장비 i 와 j 사이에 연결 관계가 있을 경우

이를 모든 장비간의 연결 관계에 적용하게 되면 총 56개의 등호 제약 조건을 도출할 수 있다.

(4) 모듈 설치 면적 관련 제약 조건(land area constraints)

모듈이 한 갑판 당 차지하는 면적(F_A)은 모듈의 x축 방향 길이

(X^{max}) 와 모듈의 y 축 방향 길이(Y^{max})의 곱을 통해 구할 수 있으며, 이들의 값은 '3.2.2 부등호 제약 조건'의 '(4) 부가적인 배치 관련 제약 조건(additional layout design constraints)' 와 관련이 있다. 이때 모듈의 y 축 방향 길이의 경우 Fig. 2에서와 같이 장비들의 유지 보수 및 이를 위한 보조 장비들의 배치를 위한 유지 보수 면적과 y 축 방향으로 갑판의 제일 끝에서 원점 방향으로 9m까지 있음을 고려해야 한다.

$$FA = X^{max}(Y^{max} + 9) \quad (8)$$

(5) 다중 갑판 설치 장비 관련 제약 조건(multi-deck equipment constraints)

갑판간의 높이($H=8m$) 보다 높이 방향으로 긴 장비의 경우 2개 이상의 갑판에 걸쳐 배치된다. MR 모듈에서는 MR 분리기가 2개의 갑판, MCHE가 5개의 갑판, 그리고 압축기 흡입 드럼이 2개의 갑판에 걸쳐 배치된다. 이를 고려해 주기 위해 설계 변수 정의 시 고려하는 장비의 수를 갑판에 걸치는 수만큼 늘려주었으며, 동일한 장비에 대해 아래의 등호 제약 조건과 같이 평면도로 보았을 때 장비의 x 축 및 y 축 중심이 같음을 도출하였다.

MR 분리기는 2개의 갑판에 걸쳐 배치되므로 식 (9), (10)을 만족해야 한다.

$$x_1 = x_2 \quad (9)$$

$$y_1 = y_2 \quad (10)$$

MCHE는 5개의 갑판에 걸쳐 배치되므로 식 (11), (12)를 만족해야 한다.

$$x_i = x_{i+1} \quad (11)$$

$$y_i = y_{i+1} \quad (12)$$

여기서, $i = 3, 4, 5, 6$

압축기 흡입 드럼 역시 2개의 갑판에 걸쳐 배치되므로 식 (13), (14)를 만족해야 한다.

$$x_8 = x_9 \quad (13)$$

$$y_8 = y_9 \quad (14)$$

MR 압축기의 경우 아래 갑판에는 가열된 MR 압축기를 냉각시키기 위한 전용 냉각기가 설치되어야 하며, 위 갑판에는 MR 압축기의 유지 보수를 위한 오버 헤드 크레인이 배치되어야 한다. 이를 고려하기 위해 장비 서로간의 x 축 및 y 축 중심이 같다는 아래의 등호 제약 조건을 도출하였다.

$$x_{10} = x_{11} \quad (15)$$

$$x_{10} = x_{12} \quad (16)$$

$$y_{10} = y_{11} \quad (17)$$

$$y_{10} = y_{12} \quad (18)$$

그리고 동일한 장비에 대해 높이 방향으로 갑판에 연속적으로 할당되어 있음을 고려하기 위해 아래의 등호 제약 조건을 도출하였다.

MR 분리기는 2개의 갑판에 걸쳐 배치되므로 식 (19)를 만족해야 한다.

$$\sum_{k=1}^4 V_{1,k} V_{2,k+1} = 1 \quad (19)$$

MCHE는 5개의 갑판에 걸쳐 배치되므로 식 (20)을 만족해야 한다.

$$V_{3,k} V_{4,k+1} V_{5,k+2} V_{6,k+3} V_{7,k+4} = 1 \quad (20)$$

여기서, $k = 1$

압축기 흡입 드럼 역시 2개의 갑판에 걸쳐 배치되므로 식 (21)을 만족해야 한다.

$$\sum_{k=1}^4 V_{8,k} V_{9,k+1} = 1 \quad (21)$$

MR 압축기, 냉각기, 그리고 오버 헤드 크레인에 대해서도 동일하게 적용하면 식 (22)와 같다.

$$\sum_{k=1}^3 V_{11,k} V_{10,k+1} V_{12,k+2} = 1 \quad (22)$$

이를 통해 총 20개의 등호 제약 조건을 도출할 수 있다.

3.2.2 부등호 제약 조건(inequality constraints)

(1) 겹침 배치 방지 관련 제약 조건(non-overlapping constraints)

우선 장비 i 와 장비 j 가 같은 갑판에 배치되어있는지를 판단하는 변수 Z_{ij} 는 아래와 같은 부등호 제약 조건을 통해서 구할 수 있으며, 이로부터 부등호 제약 조건 1,800개($=\left(\frac{15 \cdot 16}{2} \times 5\right) \times 3$)를 도출할 수 있다.

$$Z_{ij} \geq V_{ik} + V_{jk} - 1 \quad (23)$$

$$Z_{ij} \leq 1 - V_{ik} + V_{jk} \quad (24)$$

$$Z_{ij} \leq 1 + V_{ik} - V_{jk} \quad (25)$$

여기서, $i = 1, 2, \dots, 15, j = i+1, \dots, 16, k = 1, 2, \dots, 5$
 직사각형 모양의 장비 i 와 장비 j 가 같은 갑판에 할당될 경우 ($Z_{ij} = 1$), 두 장비끼리 x 축 방향이나 y 축 방향으로 겹치지 않아야 한다. 그러므로 $Z_{ij} = 1$ 일 때, 아래 4개의 부정 방정식들 중 최소한 하나 이상의 식을 만족해야 함을 알 수 있다.

$$x_i - x_j \geq \frac{l_i + l_j}{2} \quad (26)$$

$$x_j - x_i \geq \frac{l_i + l_j}{2} \quad (27)$$

$$y_i - y_j \geq \frac{d_i + d_j}{2} \quad (28)$$

$$y_j - y_i \geq \frac{d_i + d_j}{2} \quad (29)$$

여기서, $i = 1, 2, \dots, 15, j = i+1, \dots, 16$

위 (26)~(29)의 제약 조건들은 항상 $Z_{ij} = 1$ 일 경우에만 만족해야하는 부등호 제약 조건이며, 최소한 하나 이상의 식을 만족하기만 하면 된다. 이를 수학적으로 표현 하면 아래와 같다 (Patsiatzis & Papageorgiou, 2002).

$$x_i - x_j + M(1 - Z_{ij} + E1_{ij} + E2_{ij}) \geq \frac{l_i + l_j}{2} \quad (30)$$

$$x_j - x_i + M(2 - Z_{ij} + E1_{ij} + E2_{ij}) \geq \frac{l_i + l_j}{2} \quad (31)$$

$$y_i - y_j + M(2 - Z_{ij} + E1_{ij} - E2_{ij}) \geq \frac{d_i + d_j}{2} \quad (32)$$

$$y_j - y_i + M(3 - Z_{ij} - E1_{ij} - E2_{ij}) \geq \frac{d_i + d_j}{2} \quad (33)$$

여기서, $i = 1, 2, \dots, 15, j = i+1, \dots, 16$

이 때, M 은 각 부등호 제약 조건에서 괄호 안의 항이 양수일 경우 부등호 제약 조건이 항상 만족할 정도로 큰 양수이며, 이 경우 부등호 제약 조건은 제약 조건으로서의 작동을 하지 않는다고 생각할 수 있다. 이를 결정해주는 변수가 $E1_{ij}$ 와 $E2_{ij}$ 이며 이는 식 (26)~(29)에 따라 결정된다. 즉, $j > i$ 를 만족하는 모든 i, j 에 대해 식 (26)이 만족할 경우 $E1_{ij} = 0, E2_{ij} = 0$ 로 정의되며, 이는 부등호 제약 조건 (30)을 작동하게 한다. 식 (27)이 만족할 경우, $E1_{ij} = 1, E2_{ij} = 0$ 로 정의되며, 이는 부등호 제약 조건 (31)을 작동하게 한다. 그리고 식 (28)이 만족할 경우, $E1_{ij} = 0, E2_{ij} = 1$ 로 정의되며, 이는 부등호 제약 조건 (32)를 작동하게 한다. 마지막으로 식 (29)가 만족할 경우, $E1_{ij} = 1, E2_{ij} = 1$ 로 정의되며, 이는 부등호 제약 조건 (33)을 작동하게 한다. 여기서 $E1_{ij}$ 와 $E2_{ij}$ 의 값을 결정하는 것은 등호 제약 조건에 해당하며, 총 240개의 등호 제약 조건인 것을 알 수 있다. 이를 'binary variable constraints

for non-overlapping'이라고 부르기로 한다.

식 (30)~(33)에서 안전성을 고려하기 위해 장비간의 거리가 최소 4m 이상이라고 가정을 하면, 식 (30)~(33)은 아래와 같이 수정될 수 있다.

$$x_i - x_j + M(1 - Z_{ij} + E1_{ij} + E2_{ij}) \geq \frac{l_i + l_j}{2} + 4 \quad (34)$$

$$x_j - x_i + M(2 - Z_{ij} + E1_{ij} + E2_{ij}) \geq \frac{l_i + l_j}{2} + 4 \quad (35)$$

$$y_i - y_j + M(2 - Z_{ij} + E1_{ij} - E2_{ij}) \geq \frac{d_i + d_j}{2} + 4 \quad (35)$$

$$y_j - y_i + M(3 - Z_{ij} - E1_{ij} - E2_{ij}) \geq \frac{d_i + d_j}{2} + 4 \quad (37)$$

여기서, $i = 1, 2, \dots, 15, j = i+1, \dots, 16$

이를 통해 480개($=\frac{15 \cdot 16}{2} \times 4$)의 부등호 제약 조건을 얻을 수 있으며, 이상의 겹침 배치 방지 관련 제약 조건으로부터 총 2,280개($=1,800+480$)의 부등호 제약 조건을 도출할 수 있다.

(2) 작업 면적 관련 제약 조건(working space area constraints)

본 연구에서는 최저 갑판인 A 갑판과 MR 압축기가 배치되는 갑판에는 사람들의 작업 및 통행을 위한 공간의 확보를 위해 장비 배치 및 유지 보수 면적에 해당되지 않는 공간이 각각 갑판 면적의 50% 이상을 차지해야 한다고 가정하였으며, 이를 부등호 제약 조건으로 나타내면 아래와 같다.

$$FA - \sum_{i=1}^{16} V_{i,1} a_i b_i \geq \frac{1}{2} FA \quad (38)$$

$$\sum_{k=1}^{NF} V_{10,k} \left(FA - \sum_{i=1}^{16} V_{i,k} a_i b_i \right) \geq \frac{1}{2} FA \quad (39)$$

(3) 안전 시설의 설치 면적 관련 제약 조건(safety facility areaconstraints)

본 연구에서는 안전성을 고려하기 위해 최상위 갑판인 E 갑판에는 각종 장비의 내부 압력 증가로 인해 발생할 수 있는 위급 상황을 대비하여 압력을 배출 및 감소시켜주기 위한 안전 시설이 필요하며 이들의 배치를 위해 다른 장비 배치 및 유지 보수 면적에 해당되지 않는 공간이 최상위 갑판 면적의 60% 이상을 차지해야 한다고 가정하였으며, 이를 부등호 제약 조건으로 나타내면 아래와 같다.

$$FA - \sum_{i=1}^{16} V_{i,5} a_i b_i \geq 0.6FA \quad (40)$$

(4) 부가적인 배치 관련 제약 조건(additional layout design constraints)

Fig. 2에서와 같이 본 연구에서는 각 갑판에 장비를 배치할 때 장비와 갑판을 이루는 변들 사이의 거리는 최소 3m 이상으로 가정하였다. 그러므로 원점 좌표에 대해 아래의 부등호 제약 조건을 만족해야 한다.

$$x_i \geq \frac{l_i}{2} + 3 \quad (41)$$

$$y_i \geq \frac{d_i}{2} + 3 \quad (42)$$

여기서, $i = 1, 2, \dots, 16$

이를 통해 총 32개의 부등호 제약 조건을 도출할 수 있다. 또한 갑판은 모든 장비를 포함하여야 하며, Fig. 2에서와 같이 장비와 갑판을 이루는 변들 사이의 거리는 최소 3m 이상으로 가정하였다. 그러므로 갑판의 x 축 및 y 축에 대한 길이는 아래의 부등호 제약 조건을 만족해야 한다. 단, 유지 보수 면적과 장비 사이에는 최소 거리를 고려하지 않는다고 가정하였다.

$$x_i + \frac{l_i}{2} + 3 \leq X^{\max} \quad (43)$$

$$y_i + \frac{d_i}{2} \leq Y^{\max} \quad (44)$$

여기서, $i = 1, 2, \dots, 16$

이를 통해 총 32개의 부등호 제약 조건을 도출할 수 있다.

3.3 목적 함수(objective function)

일반적으로 장비의 최적 다층 배치 문제에서는 장비를 배치하는데 드는 총 배치 비용(layout cost)을 최소화하는 것을 목적함수로 사용한다(Patsiatzis & Papageorgiou, 2002; Park, et al., 2011). 장비를 배치하는데 드는 비용에는 장비 사이의 총 파이프 길이에 대한 비용, 파이프 내에서 위로 흐르는 물질을 위한 펌프 사용 비용, 파이프 내에서 수평으로 흐르는 물질을 위한 펌프 사용 비용, 층수에 따른 비용 및 한 층이 차지하는 총 면적에 대한 비용이 있으며(Patsiatzis & Papageorgiou, 2002), 그 합은 아래와 같다.

$$W = \sum_i \sum_{j \neq i / f_{ij}=1} [C_{ij}^c TD_{ij} + C_{ij}^v D_{ij} + C_{ij}^h (R_{ij} + L_{ij} + A_{ij} + B_{ij})] + FC \cdot NF + LC \cdot FA \quad (45)$$

여기서, $i = 1, 2, \dots, 16, j = 1, 2, \dots, 16$

f_{ij} : 파이프 내 물질이 장비 i 에서 장비 j 로 흐를 경우 1, 그렇지 않을 경우 0

C_{ij}^c : 장비 i 와 장비 j 를 파이프로 연결할 때 드는 비용 계수

C_{ij}^v : 장비 i 와 장비 j 사이의 파이프에서 물질의 수직 이동을 위한 펌프 사용 비용 계수

C_{ij}^h : 장비 i 와 장비 j 사이의 파이프에서 물질의 수평 이동을 위한 펌프 사용 비용 계수

FC : 플랜트의 층수와 관련된 비용 계수

LC : 한 층이 차지하는 총 면적에 대한 비용 계수

MR 모듈의 경우 압축기가 설치되어 물질이 고압의 상태로 흐르기 때문에 파이프 내 물질 이동 시 펌프와 같은 장비가 사용되지 않는다. 또한 층수가 고정되어 있으므로, 층수와 관련된 항도 목적 함수에서 제외할 수 있다. 이를 고려하여 본 연구의 배치 대상 장비에 적용시키면 목적 함수는 아래와 같다. 이때 한 층이 차지하는 총 면적에 관련된 비용 계수가 파이프로 연결 시 드는 비용 계수의 10배가 된다고 가정하였다.

$$W = \sum_i \sum_{j \neq i / f_{ij}=1} [C_{ij}^c TD_{ij}] + LC \cdot FA \quad (46)$$

3.4 액화 공정의 장비 최적 다층 배치를 위한 수학적 최적화 모델 요약

이상과 같이 액화 공정의 장비 최적 다층 배치를 위한 수학적 최적화 모델을 요약하면 다음과 같다([] 안의 숫자는 해당 조건의 개수).

목적 함수: Minimize $W(X)$

제약 조건:

(등호 제약 조건) [125]

- 갑판 관련 제약 조건 [16]
- 장비 설치 방향 관련 제약 조건 [32]
- 장비간 거리 관련 제약 조건 [56]
- 모듈 설치 면적 관련 제약 조건 [1]
- 다중 갑판 설치 장비 관련 제약 조건 [20]

(부등호 제약 조건) [2,315]

- 겹침 배치 방지 관련 제약 조건[2,280]
- 작업 면적 관련 제약 조건 [2]
- 안전 시설의 설치 면적 관련 제약 조건 [1]
- 부가적인 배치 관련 제약 조건 [32]

여기서, 설계 변수 $X = \{x_i, y_i, z_i, R_{ij}, L_{ij}, A_{ij}, B_{ij}, U_{ij}, D_{ij}, TD_{ij}, FA, X^{\max}, Y^{\max}, V_{ik}, Z_j, O_i, EI_{ij}, E2_{ij}\}$.

즉, LNG FPSO 액화 공정에서 MR 모듈의 장비 배치를 결정하는 문제는 589개의 설계 변수, 125개의 등호 제약 조건 및 2,315개의 부등호 제약 조건을 가진 최적화 문제임을 알 수 있다.

4. 액화 공정을 위한 장비의 최적 다층 배치 결정 및 분석

본 연구에서는 앞서 정식화 된 수학적 최적화 모델을 이용하여 LNG FPSO 액화 공정을 위한 장비의 최적 다층 배치를 결정하였다. 최적화 문제를 풀기 위해 본 연구에서는 GA(Genetic Algorithm) 방법과 SQP(Sequential Quadratic Programming) 방법을 혼합한 hybrid 최적화 방법을 활용하였으며, 본 저자들이 기존에 개발한 최적화 프로그램인 EzOptimizer(Lee, et al., 2002)를 이용하였다. 이때 설계 변수들의 초기값은 각 설계 변수의 상하한값 내에서 임의로 선택되었다. 아래의 Table 7은 최적화 수행 결과 얻어진 설계 변수들의 값이며, 이를 도면에 표현하면 Fig. 3과 같다.

Table 7 Result of the optimal multi-floor plant layout for the liquefaction process of LNG FPSO

Equipment No.	Equipment Name	x_i [m]	y_i [m]	Q_i	$V_{i,k}$				
					$V_{i,1}$	$V_{i,2}$	$V_{i,3}$	$V_{i,4}$	$V_{i,5}$
1	MR separator on lower deck	20	12	1	0	1	0	0	0
2	MR separator on upper deck	20	12	1	0	0	1	0	0
3	MCHE on A deck	20	6	1	1	0	0	0	0
4	MCHE on B deck	20	6	1	0	1	0	0	0
5	MCHE on C deck	20	6	1	0	0	1	0	0
6	MCHE on D deck	20	6	1	0	0	0	1	0
7	MCHE on E deck	20	6	1	0	0	0	0	1
8	MR Comp. suction drum on lower deck	20	20	1	0	1	0	0	0
9	MR Comp. suction drum on upper deck	20	20	1	0	0	1	0	0
10	MR Comp. Cooler for comp.	10	11	1	0	0	1	0	0
11	Overhead crane	10	11	1	0	1	0	0	0
12	SW water 4	21	11	0	0	0	0	0	1
13	SW water 5	6	11	0	0	0	0	0	1
14	Valve 4	15	7	0	0	1	0	0	0
15	Valve 5	14	7	0	0	0	0	0	1
x^{\max}		26.0 m	y^{\max}	31.8 m	FA		826.8 m ²		

$R_{ij}, L_{ij}, A_{ij}, B_{ij}, U_{ij}, D_{ij}, TD_{ij}, Z_{ij}, EI_{ij}, E2_{ij}$ 의 값은 Table 7의 값들 부터 구할 수 있기 때문에, 여기서는 언급하지 않도록 한다. 얻어진 최적 장비 배치 결과가 3.2절의 모든 부등호 제약 조건을 만족하는지 살펴보았다. 우선 Table 7의 결과를 도면으로 Fig. 3과 같이 표현한 결과 3.2.2절의 “(1) 겹침 배치 방지 관련 제약 조건”을 모두 만족함을 알 수 있다.

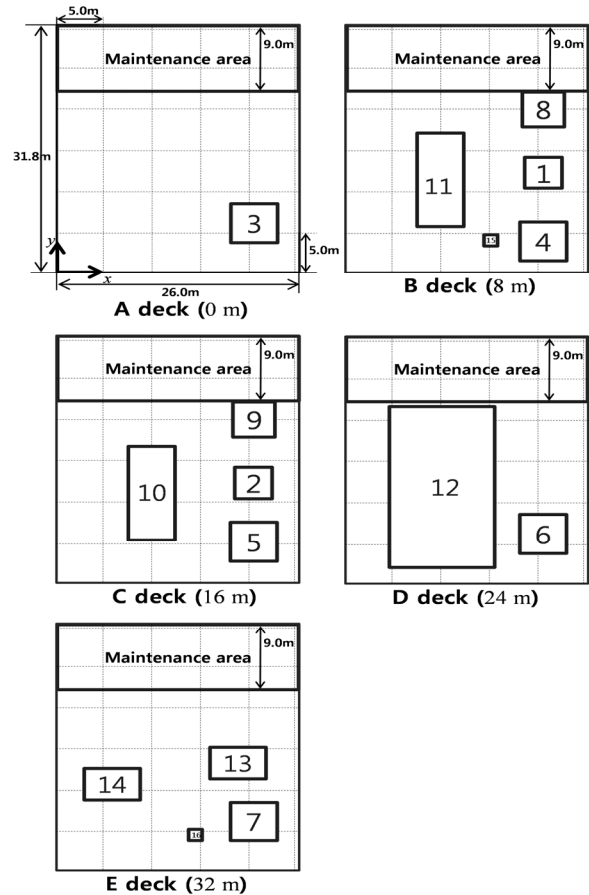


Fig. 3 Result of the optimal multi-floor plant layout for the liquefaction process of LNG FPSO(plan view)

“(2) 작업 면적 관련 제약 조건”의 경우 A 갑판에서는 장비 배치 및 유지 보수 면적에 해당되지 않는 공간이 68%이며, MR 압축기가 설치된 C 갑판에서는 57%로 두 공간 모두 50% 이상의 요구 조건을 만족하고 있다. “(3) 안전 시설의 설치 면적 관련 제약 조건”의 경우 E 갑판에서 장비 배치 및 유지 보수 면적에 해당되지 않는 공간의 비율을 구해본 결과 62%로 요구 값인 60% 이상을 만족함을 알 수 있다. 마지막 “(4) 부가적인 배치 관련 제약 조건” 역시 모든 장비들과 갑판을 이루는 변들 사이의 거리가 3m 이상으로 요구 조건을 만족하고 있음을 알 수 있다.

결론적으로 모든 제약 조건들이 요구 기준을 만족하는 것을 알 수 있으며, 이를 통해 본 연구에서 구한 배치 결과가 최적의 값에 가까운 것을 예상할 수 있었다.

5. 결론 및 향후 연구 계획

본 연구에서는 안전성을 고려하여 다중 갑판인 LNG FPSO의

액화 공정 중 DMR 사이클의 MR 모듈에 대해 장비의 최적 다층 배치를 수행하였다. 이를 위해, 설계 변수로서 장비의 위치와 장비 배치 후 최종적으로 요구되는 배치 면적을 정의하였으며, 안전성 관련 제약 조건 및 갑판간의 높이 보다 높이 방향으로 더 큰 장비가 갑판을 관통하는 것을 고려하여 총 배치 비용을 최소화(목적 함수)하기 위한 수학적 최적화 모델을 정식화 하였다. 그 후 GA 방법과 SQP 방법을 혼합한 hybrid 최적화 방법을 활용하여 최적의 해를 구하였으며, 구한 해의 값이 제약 조건들을 만족하는지에 대해 검토해 보았다. 그 결과 모든 제약 조건들이 요구 기준을 만족하는 것을 알 수 있으며, 이를 통해 본 연구에서 구한 배치 결과가 최적의 값에 가까운 것을 예상할 수 있었다. 그 외 현재 LNG FPSO는 설계 검토 단계에 있으므로, 얻어진 장비의 최적 다층 배치 결과에 대한 비교 분석은 추후 진행할 예정이다.

향후에는 현재 정식화 된 부분에서 TNT 등가 방법과 같은 위험도 관련 실험 데이터를 추가 고려하여 안전성 측면에서 보다 현실적인 고려가 되는 방향으로 발전시킬 예정이며, 또한 장비간 파이프 연결 시 배관의 크기 및 경로를 추가 고려하여 보다 현실적인 파이프 설치 비용이 반영될 수 있도록 개선할 예정이다.

후 기

본 연구는 (a) 한국연구재단(KRF-2008-314-D00494, KRF-2009-0086033, R33-2008-000-10150-0) (b) 국방과학연구소 수중운동체 기술특화센터 SM-11과제 “수중운동체의 체계/부체계 기능 및 성능 시뮬레이션을 위한 네트워크 기반의 가상(Virtual) 복합 시스템 모델 구조(Architecture) 연구” (c) 지식경제부 산업원천기술개발사업(10035331) “시뮬레이션 기반의 선박 및 해양플랜트 생산기술 개발” (d) 서울대학교 BK21 해양기술인력양성 사업단 (e) 서울대학교 해양시스템 공학연구소 (f) 한국에너지기술연구원 에너지인력양성사업 미래형 해상 풍력 발전 시스템 GET-Future 연구실(No. 20114030200050)의 지원을 받아 연구되었음을 밝히며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

Barclay, M. & Shukri, T., 2007. Enhanced Single Mixed Refrigerant Process for Stranded Gas Liquefaction. *LNG 15 Conference*, Barcelona, Spain, 24-27 April 2007.

Cha, J.H. Lee, J.C. Roh, M.I. & Lee, K.Y., 2010. Determination of the Optimal Operating Condition of the Harmworthy Mark I Cycle for LNG-FPSO. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(5), pp. 733-742.

Georgiadis, M.C. Schilling, G. Rotstein, G.E. & Macchietto, S., 1999. A General Mathematical Programming Approach for Process Plant Layout, *Computers and Chemical Engineering*, 23, pp.823-840.

Hwang, J.H. Roh, M.I. Cha, J.H. & Lee, K.Y., 2010. Offshore Process FEED(Front End Engineering Design) Method for Integrated Process Engineering. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(2), pp. 265-277.

Lee, K.Y. Cho, S.H. & Roh, M.I., 2002. An Efficient Global-Local Hybrid Optimization Method Using Design Sensitivity Analysis. *International Journal of Vehicle Design*, 28(4), pp.300-317.

Li, Q.Y. & Ju, Y.L., 2010. Design and Analysis of Liquefaction Process for Offshore Associated Gas Resources. *Applied Thermal Engineering*, 30, pp. 2518-2525.

Lee, J.Y. Kim, W.B. Kim, H.J. & Park, C.K., 2010. Comparison of a Ship LNG Liquefaction Plant and a Large Size LNG Liquefaction Plant. *Proceedings of the Annual Spring Meeting*, The Society of Naval Architects of Korea, Jeju, Korea, 3-4 June 2010.

Lee, J. & Leyffer, S., 2012. *Mixed Integer Nonlinear Programming*, Springer.

Lee, J.C. et al., 2011. Determination of the Optimal Operating Condition of Dual Mixed Refrigerant Cycle of LNG FPSO Topside Liquefaction Process. *accepted for publication in Journal of the Society of Naval Architects of Korea*.

Mecklenburgh, J.C., 1985. *Process Plant Layout*, George Godwin London and New York.

Penteado, F.D. & Ciric, A.R., 1996. An MINLP Approach for Safe Process Plant Layout, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 35, pp.1354-1361.

Patsiatzis, D.I. & Papageorgiou, L.G., 2002. Optimal Multi-floor Process Plant Layout, *Computer and Chemical Engineering*, 26, pp.575-583.

Park, K.T. et al., 2011. Optimal Multi-floor Plant Layout with Consideration of Safety Distance based on Mathematical Programming and Modified Consequence Analysis, *Korean Journal of Chemical Engineering*, 28(4), pp.1009-1018.

Shukri, T., 2004. LNG Technology Selection. *Hydrocarbon Engineering*, 9(2), pp.71-74.

Venkatarathnam, G., 2008. *Cryogenic Mixed Refrigerant Processes*, Springer.



구 남 국



이 준 채



노 명 일



황 지 현



이 규 열