

최적화 기법을 이용한 부유식 해양 구조물의 배치 방법

정세용¹ · 노명일^{2†} · 신현경³ · 하솔⁴ · 구남국⁴

¹울산대학교 대학원 조선 및 해양공학과, ²서울대학교 조선해양공학과 및 해양시스템공학연구소,
³울산대학교 조선해양공학부, ⁴서울대학교 공학연구소

Layout Method of a Floating Offshore Structure Using the Optimization Technique

Se-Yong Jeong¹, Myung-Il Roh^{2†}, Hyun-Kyoung Shin³, Sol Ha⁴, and Nam-Kug Ku⁴

¹Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan

²Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, and Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul National University

³School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan

⁴Engineering Research Institute, Seoul National University

Received 20 June, 2013; received in revised form 2 October, 2013; accepted 14 October, 2013

ABSTRACT

In the case of a floating offshore structure such as FPSO(Floating, Production, Storage, and Off-loading unit), many equipment should be installed in the limited space, as compared with an onshore structure. Recently, the requirement for an optimal layout method of the structure has been raised. Thus, a layout method of the floating offshore structure was proposed in this study. First, an optimization problem for layout design was mathematically formulated, and then an optimization algorithm was implemented based on the genetic algorithm in order to solve it. To evaluate the applicability of the proposed method, it was applied to examples of FPSO topsides and an offshore wind turbine. As a result, it was shown that the proposed method can be applied to layout design of the floating offshore structure.

Key Words: Floating offshore structure, Genetic algorithm, Layout method, Optimization technique

1. 서 론

대표적 해상 자원인 원유와 천연 가스의 수요가 꾸준히 증가함에 따라 해양 구조물에 대한 관심도 함께 증가하고 있다. 그 중에서도 FPSO(Floating, Production, Storage, and Off-loading unit)는 심해

에서 석유 및 천연 가스의 생산, 저장, 하역이 가능한 대표적인 해양 구조물로서 이와 관련하여 많은 연구가 진행되고 있다¹⁾.

FPSO는 먼 바다에서 생산에서 하역까지 다양한 작업을 수행하기 때문에 상부(topsides)에 다양한 모듈(module, 유사한 기능을 갖는 장비들의 그룹을 의미하며 Function Group이라고도 일컬어짐)이 복잡하게 배치된다. 이때 모듈의 수가 늘어날수록 배치 안의 개수는 기하 급수적으로 증가하며 제한

[†]Corresponding Author, miroh@snu.ac.kr
©2013 Society of CAD/CAM Engineers

된 시간 내에 모든 경우를 고려하는 것은 현실적으로 매우 어렵다. 하지만 최적화 기법을 이용한다면 짧은 시간 내에 많은 배치 안을 효과적으로 검토해 봄으로써 최적해에 가까운 결과를 얻을 가능성이 매우 높다.

공간 배치 문제(FLP; Facility Layout Problem)는 산업 공학, 건축 등 여러 분야에서 심도 있게 연구되고 있다. 특히, Tam^[2], Chan과 Tansri^[3], Conway와 Venkataramanan^[4], Sulung과 Chan^[5], Kochhar와 Heragu^[6] 등은 다양한 분야에서의 FLP 해결을 위해 유전 알고리즘을 적용한 바 있다.

또한, Penteado와 Ciric^[7], Georgiadis 등^[8], Park 등^[9]은 안전성(safety)을 고려하여 화학 공정 플랜트(chemical process plant)에 대해 장비의 최적 배치를 수행하였다.

조선해양공학 분야의 경우, Han 등^[10]은 격실(facility)간 재화의 이동량과 격실간 인접 관계 등을 고려하여 함정 내 격실들의 최적 위치를 결정하는 알고리즘을 개발하였다. Ku 등^[11]은 LNG FPSO의 액화 공정 장비의 다층 배치에 대해 연구하였다.

본 연구에서는 유전 알고리즘 기반의 메타-휴리스틱 개념을 적용(배치 문제 해결에 적합하도록 기존의 유전 알고리즘을 개선했다는 의미)하여 FPSO 상부의 모듈 배치 문제를 해결할 수 있는 유전 알고리즘을 제안하고 C++를 이용하여 프로그램으로 구현하였다. 또한 실제 FPSO 문제를 동등면적 문제로 이상화하여 제안된 알고리즘을 적용한 후 그 결과를 검토하였다.

2. 모듈의 최적 배치 문제

2.1 모듈의 배치 문제

본 연구에서의 FPSO 상부 모듈 배치 문제는 각 모듈이 배치될 최적 위치를 결정하는 것이다. 목적 함수는 각모듈간 재화(material)의 유동량(각 모듈간 근접도의 합)과 모듈 전체의 무게 중심과 구조물의 중심선(center line)과의 거리를 최소화하는 것이다. 모듈 배치 시 주어지는 입력 정보는 다음과 같다.

(1) 영역간(zone) 정보

- 전체 영역의 수(길이 방향, 폭 방향 zone의 수)
- 각 영역 번호(ID)
- 각 영역의 길이 및 폭

- 각 영역의 중심 좌표
여기서, 영역은 모듈이 배치되는 가상 공간을 말한다.

(2) 모듈 정보

- 전체 모듈의 수
- 각 모듈 번호(ID)
- 각 모듈의 중량
- 모듈간 재화의 근접도 계수(closeness factor)

(3) 기타 정보

- 구조물 상부의 크기(길이 및 폭)

2.2 모듈 배치 문제의 수학적 정식화

본 연구에서는 모듈 배치 문제의 수학적 정식화를 위해 다음과 같은 변수와 기호를 사용하였다.

N : 영역 및 모듈의 총 수

$q_{i,j}$: i 번째 모듈과 j 번째 모듈간 근접도 계수

$d_{i,j}$: i 번째 모듈과 j 번째 모듈간 거리

w_i : i 번째 모듈의 중량

x_i : i 번째 모듈의 길이 방향 좌표

y_i : i 번째 모듈의 폭 방향 좌표

이제 2.1절에서 정의한 모듈 배치 문제를 수학적 정식으로 정식화하면 다음과 같다.

Minimize

$$F_1 = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N (q_{i,j} \cdot d_{i,j})$$

; Total closeness rating (1)

and

Minimize

$$F_2 = \left| \sum_{i=1}^N (w_i \cdot y_i) / \sum_{i=1}^N w_i \right|$$

; The center of gravity of total modules in the y direction (2)

식 (1), (2)로 표현된문제는 두 개의 목적 함수(F_1 , F_2)를 가지기 때문에 이는 다목적 최적화 문제(multi-objective optimization)이다.

위 다목적 최적화 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 먼저 고전적인 방법 중의 하나인 가중치법(weighting method)을 이용하였다. 이 방법을 통

해 식 (3)과 같이 다수의 목적 함수 F_i 를 결합하여 하나의 목적 함수로 나타낼 수 있다^[12].

$$F(x) = \sum_{i=1}^N w_i \cdot F_i(x)$$

$$0 \leq w_i \leq 1 \text{ and } \sum_{i=1}^N w_i = 1 \quad (3)$$

위 식을 식 (1), (2)에 적용하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\text{Minimize } F = wF_1 + (1-w)F_2$$

3.1절에서 자세히 설명하겠지만 위 식 (4)의 변환된 단일 목적 함수는 식 (7)에서 모듈 배치를 나타내는 각 해의 적합성 값(fitness value)을 계산하기 위해 사용된다. 즉, 이 적합성값으로부터 각 해들에 대해 최적해로서의 적합 여부가 판단된다.

한편, 가중치법은 목적 함수의 우선 순위에 따라 대응하는 가중치를 변경시킬 수 있다. 따라서 설계자는 각 목적 함수에 대한 철저한 이해가 요구된다. 또한 가중치가 변함에 따라 매번 계산을 다시 해야 할 뿐만 아니라 다목적 최적화 문제의 모든 해를 찾을 수 없다는 단점을 가지고 있다^[13].

본 연구에서는 이 같은 가중치법의 한계점을 보완하기 위해 유전 알고리즘에 지배 순위 기반의 적합도 할당 방법(rank-based fitness assignment method, 이하 순위법)^[14]을 적용하여 다목적 최적화 문제를 해결하였다. 최적화 진행 중 해들이 파레토 최적해 집합(pareto optimal set)에 수렴함을 확인하였고, 그 결과를 가중치법으로 구한 최적해와 비교하였다.

3. 모듈의 배치를 위한 알고리즘 제안

3.1 모듈의 최적 배치 알고리즘

본 연구에서 제안된 메타-휴리스틱 최적화 알고리즘은 공간 배치, 계획 등을 위해 현재 널리 사용되고 있는 유전 알고리즘을 기반으로 한다. 유전 알고리즘은 진화의 법칙인 적자 생존(survival of fittest)과 자연 도태(natural selection)의 원리를 기반으로 하여 정립된 최적화 알고리즘이다. 이 알고리즘에 대한 보다 자세한 사항은 여러 참고 문헌에서 찾아 볼 수 있다^[15,16].

본 연구에서 제안된 알고리즘은 C++ 언어로 구현되었고, 그 흐름도는 Fig. 1과 같다. Fig. 1에 나

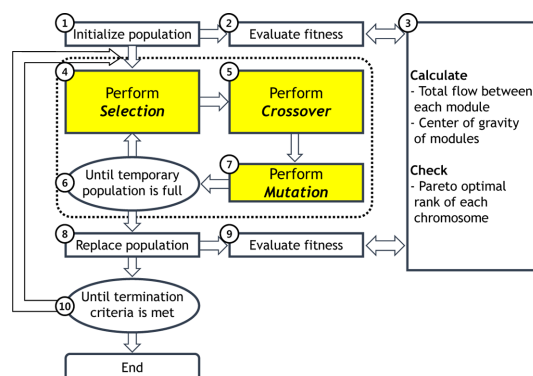


Fig. 1 Flow diagram of the proposed algorithm for module layout

타나 있듯이, 먼저 모듈 배치에 대한 다수의 해들을 포함하는 초기해 집합을 생성하고(Fig. 1의 (1)) 이들의 적합성 값을 계산한다(Fig. 1의 (2)). 적합성 값은 각 해가 얼마나 최적해에 가까운지를 나타내는 지표로서 식 (7)처럼 각 해의 목적 함수 값으로부터 계산이 가능하다. 따라서 초기해 집합에 포함되는 각 해에 대해 모듈간 재화의 유동량의 합 및 모듈 전체의 무게 중심을 계산하고 이로부터 각 해에 대한 목적 함수 값 및 최종적으로는 적합성 값을 구한다(Fig. 1의 (3)). 초기해 집합으로부터 두 개의 부모해를 선택한 후(Fig. 1의 (4)) 교배(crossover) 및 돌연 변이(mutation) 연산을 거쳐 새로운 자식해를 생성하고(Fig. 1의 (5), (6)), 이 과정을 반복하면(Fig. 1의 (7)) 개선된 해의 집합을 얻을 수 있다(Fig. 1의 (8)). 개선된 해의 집합에 대해 다시 적합성 값을 계산하고(Fig. 1의 (9)), 최적화 종료 조건(예, 최대 반복 회수 등)이 만족할 때까지 이상의 과정을 반복하면 주어진 모듈의 배치 문제에 대한 최적해(적합성 값이 가장 큰 해)를 얻을 수 있다(Fig. 1의 (10)).

3.2 모듈 배치의 표현 방법

모듈의 배치, 즉 각 모듈이 놓여질 위치는 유전 알고리즘의 인코딩(encoding) 과정에 의해 염색체로 표현될 수 있다. 그리고 그 염색체는 디코딩(decoding) 과정에 의해 다시 모듈의 배치로 표현될 수 있다. 본 연구에서는 각 모듈의 배치 결과를 포함하는 1차원 배열 형태의 염색체를 이용하였다. 즉, 염색체 내 유전자의 개수는 배치 대상이 되는 모듈의 개수와 같다. Fig. 2는 FPSO 상부의 모듈 배치 결과와 이에 대한 염색체 표현의 예를 나

Table 4 Example of the closeness factors matrix for all modules of FPSO topsides

FUNCTION GROUP		W	D	SS	GP	GC	R	F	LQ	C	WS	MH	U	SU	EL	TS	WI
WELL HEAD	W	-	6	6	3	0	0	0	3	3	3	3	0	0	0	0	3
DRILLING	D		-	3	3	0	0	0	3	3	3	3	0	0	0	0	3
SEP./STABILIZATION	SS			-	6	3	0	0	3	3	4	4	1	0	0	0	4
GAS PROCESSING	GP				-	3	0	0	3	3	4	4	1	0	0	0	4
GAS COMPRESSION	GC					-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RISERS	R						-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FLARE SYSTEM	F							-	0	0	1	1	1	0	0	0	1
LIVING QUARTER	LQ								-	8	5	4	1	4	0	0	5
CONTROL	C									-	5	4	1	4	0	0	5
WORKSHOP/STORES	WS										-	8	2	2	1	1	5
MATERIAL HANDLING	MH											-	2	1	1	1	5
UTILITIES	U												-	1	1	1	2
SAFETY UTILITIES	SU													-	0	0	2
ELEC.POWER GEN.	EL														-	0	4
TRANSMISSION SYSTEMS	TS															-	1
WATER INJECTION	WI																-

(engineering affinities)이며, 둘째는 작업자의 플랫폼 주위 이동 거리를 최소화하는 것(manning affinities)이다. FPSO 상부 모듈 배치 시, 이 두 가지 관점에서의 모듈간 친밀성을 수치로 나타낸 행렬은 각각 Table 2와 Table 3과 같다.

3.3.3 모듈간 근접도 행렬

앞서 설명한 모듈간 적대성 및 친밀성을 동시에 고려하기 위해 Table 1, Table 2, Table 3과 같이 구성된 행렬을 이용하여 하나의 모듈간 근접도 행렬을 구성하였다.

이때 모듈간 적대성 행렬은 수치가 클수록 두 모듈이 인접했을 때 사고 위험도가 높음을 뜻하는 반면, 모듈간 친밀성 행렬은 수치가 클수록 두 모듈이 인접하면 유리함을 나타낸다. 모듈간 근접도 행렬의 구성에서는 수치가 클수록 인접 관계가 높은 것으로 통일하기 위하여 적대성 행렬 요소 중에서 최대값인 3을 각 요소에서 뺀 뒤 절대값을 취한 값과 두 친밀성 행렬을 더하였다. 이 같은 방법으로 구성된 근접도 행렬의 각 요소는 i 번째 모듈과 j 번째 모듈간 근접도 계수($q_{i,j}$)로 정의되며 결과는 Table 4와 같다.

3.4 모듈의 전체 무게 중심 계산

일반적으로 FPSO의 선체(hull)는 중심선을 기준으로 좌현(port)과 우현(starboard)이 대칭이라

고 볼 수 있다. 이때 상부에 모듈이 배치됨에 따라 무게 중심이 중심선에서 벗어나게 되면 선체에 횡경사(heel, 폭 방향으로 중심선을 벗어날 경우) 또는 종경사(trim, 길이 방향으로 중심선을 벗어날 경우)가 발생하게 된다. 따라서 선체와의 연관성(interface)을 고려했을 때, 모듈의 전체 무게 중심 위치가 중심에 가까울수록 조선 공학적으로 좋은 배치라 할 수 있을 것이다. 다만, 모듈의 길이 방향 무게 중심의 위치는 선체의 무게 중심 위치와 연관되기 때문에, 본 연구에서는 문제를 간단히 하기 위해 선체와 관련되어 있는 모듈의 길이 방향 무게 중심의 위치는 고려하지 않고 폭 방향 무게 중심의 위치만 고려하여, 모듈 전체의 무게 중심의 위치가 중심선에 가까운 배치를 좋은 배치라고 가정하였다. 본 연구에서 모듈 전체의 폭 방향 무게 중심 위치는 식 (2)와 같이 간단히 계산하였다.

3.5 모듈 배치를 위한 개선된 유전자 연산

앞서 언급하였듯이, 본 연구에서는 FPSO 모듈 배치를 위하여 메타-휴리스틱 최적화 알고리즘인 유전 알고리즘이 제안되었다. 유전 알고리즘에서는 새로운 개체(individual, 자손 child)를 생성하기 위해 선택(selection), 교배, 그리고 돌연 변이라는 세 개의 유전자 연산이 일반적으로 사용된다. 본 연구에서는 모듈 배치 문제를 효율적으로 풀기 위

해 이들 연산을 개선한 후 제안된 알고리즘에 통합하였다.

3.5.1 선택 연산

선택 연산은 새로운 개체 생성에 필요한 다른 유전자 연산을 위해 모집단(population)으로부터 두 개의 부모 개체를 선택하는 과정으로 제안된 알고리즘에서는 비례 선택(proportionate selection, roulette wheel selection) 방법이 사용된다. 비례 선택 방법에서 각 개체가 부모 개체로서 선택될 확률 $P_{selection}(i)$ 는 식 (6)과 같이 결정된다.

$$P_{selection}(i) = \frac{Ff(i)}{\sum_i Ff(i)} \quad (6)$$

여기서, $Ff(i)$ 는 i 번째 개체의 적합성 값을 나타낸다. 위 식으로부터 각 개체의 선택 확률은 적합성 값의 함수임을 알 수 있으며, 일반적으로 목적함수의 값을 최소화 하는 최적화 문제의 경우 적합성 함수는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Ff = -F' \text{ or } Ff = \frac{1}{F'} \text{ (if } F' > 0) \quad (7)$$

본 연구에서 사용된 비례 선택 방법은 적합성 값이 양수이어야 하기 때문에 식 (7)의 두 번째 방법이 이용되었다. 이러한 선택 방법에 의해 적합성 값이 높은 개체일수록 부모로서 선택되어 다음의 유전자 연산에 이용될 확률이 높아지게 된다. 식 (7)에 따라 각 개체의 적합성 값을 계산할 때 식 (3)으로 표현된 목적 함수가 이용된다.

3.5.2 교배 연산

교배 연산은 선택 연산을 통해 선택된 두 개의 부모 개체로부터 새로운 자손 개체를 생성하는 과정으로서 본 연구에서는 Partially Mapped Crossover (PMX)^[20]를 이용하였다.

일반적인 2점 교배 연산(2-point crossover)을 통해 자손 개체를 생성하는 예는 Fig. 3과 같다. Fig. 3에서 확인할 수 있듯이, 일반적인 2점 교배 연산을 수행할 경우 자손 세대에 유전자의 중복이 발생한다. 이 같은 문제를 피하기 위해 본 연구에서 고안된 PMX는 염색체가 순열로 표시되는 경우의 교배 연산에 사용된다. PMX는 우선 일반적인 2점 교배 연산과 같이 두 부모 개체 P_1 , P_2 에 임의로 두개의 자름선(cutting line)을 정한 다음 P_1 에서 자

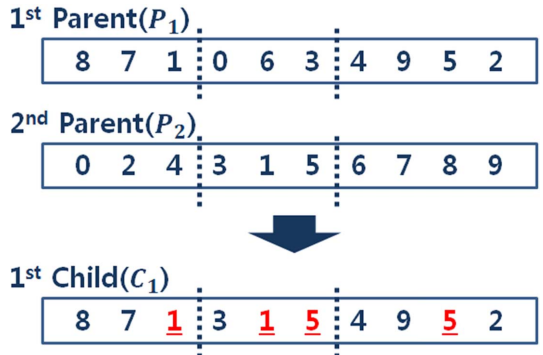


Fig. 3 Example of the ordinary 2-point crossover

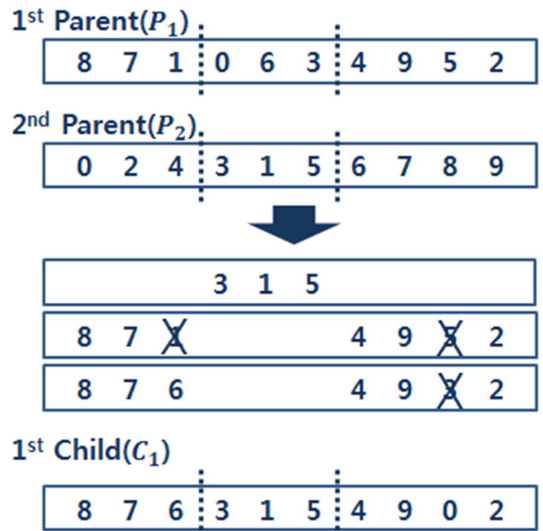


Fig. 4 Example of the modified crossover operation for generating the first children

름선 사이에 있는 유전자를 자손 개체에 그대로 전달한다. 나머지 유전자는 P_2 로부터 복제하되 만일 해당 값이 이미 사용되었으면 같은 값을 가진 P_1 의 위치를 찾아 같은 위치의 P_2 로부터 복제한다. Fig. 3의 부모 개체에 PMX를 적용한 결과가 Fig. 4에 나타나 있다.

3.5.3 돌연 변이 연산

돌연 변위 연산은 교배 연산을 통해 얻어진 각 자손 개체에 대해 염색체 내 인자들 중에서 각각 두 개의 인자를 임의로 선택하여 상호 교환함으로써 새로운 자손 개체를 생성하게 된다. 제안된 모듈 배치 계획 알고리즘에 이용된 돌연 변위 연산이 Fig. 5에 나타나 있다.

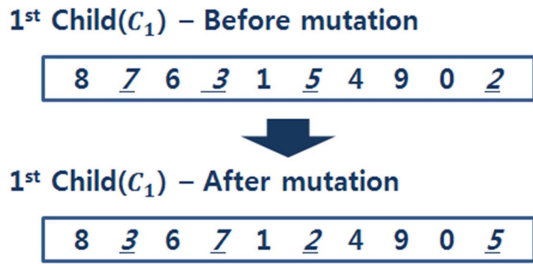


Fig. 5 Example of the mutation operation applied to the first children

4. 제안된 최적 배치 방법의 적용 예

4.1 FPSO 상부 모듈의 최적 배치 예

본 연구에서 제안된 방법의 효용성을 검토하기 위해, 이를 실제 FPSO의 상부 구조를 문제에 맞게 이상화한 모델에 적용해 보았다. Table 5는 모듈의 종류를 나타내고 Fig. 6은 모듈이 배치될 영역을 나타낸다. 또한 Table 1~3에 해당하는 모듈간 적대성, 친밀성 행렬은 수집된 자료와 전문가의 조언에 따라 적절한 값을 가정하여 사용하였다.

모집단의 개체 수와 최적화의 종료 조건인 세대 수를 다양하게 바꿔가며 제안된 방법을 반복 수행한 결과, Fig. 9와 같이 모집단 개체들이 파레토 최적해 집합을 구성하는 것을 확인하였다.

Table 6은 기존의 FPSO 상부 구조 모듈 배치 안과 본 연구에서 제안된 방법에 의해 수행한 결과를 비교한 표이다. 표에 나타나 있듯이, 기존의 배

Table 5. Modules on FPSO topsides to be considered in this study

Module ID	Module name	Module weight [ton]
1	Electrical BLD'G	910
2	Power generation	2,270
3	Water injection	2,240
4	Utilities area	1,700
5	Separation Train 1	1,810
6	Separation Train 2	2,050
7	Injection comp.	2,800
8	I/M metering	960
9	SDV platform	780
10	Recompressor	1,590
11	M/F dep. tower	1,710
12	Laydown area	105

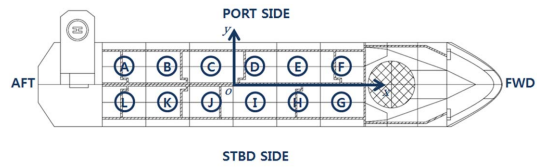


Fig. 6 Zone ID of FPSO topsides in this example (plan view)

Table 6. Comparison of the performance results of the existing layout and the optimized layout by the proposed method

	Result of the existing layout	Result of the developed program
Total flow volume	463,010	393,050 (-15.1%)
The center of gravity in the y direction	2.7814(m)	0.4395(m) (-84.2%)

치에 의하면 재화의 총 유동량이 463,010이고, 폭 방향 무게 중심의 좌표가 2.7814 m였다. 이에 반해 본 연구에서 제안된 방법을 이용했을 경우, 재화의 총 유동량이 393,050(약 15% 감소)이고, 폭 방향 무게중심의 좌표가 0.4395 m(약 84% 감소)였다.

4.1.1 가중치 방법을 활용한 파레토 최적해

FPSO 모듈 배치 문제를 해결할 때 다양한 설계 환경에서 구해지는 최적해를 평가하기 위해서 목적 함수식 (3)의 weighting factor(w)를 0부터 1까지 변화시켜가면서 여러 차례 반복 수행하였다. Weighting factor는 모듈간 재화의 유동량의 합(식 (1)의 F_1)과 전체 모듈의 무게 중심(식 (2)의 F_2) 사이의 일종의 트레이드오프에 해당한다. 따라서 weighting factor에 따라서 최적화 결과가 달라질 수 있다. 또한 임의의 weighting factor에 대해 충분한 세대를 거쳐 최적해를 구했다면 그 해는 다 목적 최적화 문제에서 파레토 최적해 집합의 원소라고 볼 수 있다^[21]. 본 연구에서는 4.1절에서 소개한 예제에 대해 앞서 언급한 테스트를 수행하였다. Fig. 7은 이로부터 얻어진 파레토 최적해 집합을 나타낸다.

4.1.2 순위법을 활용한 파레토 최적해

앞서 4.1.1에서 제안한 가중치법은 weighting

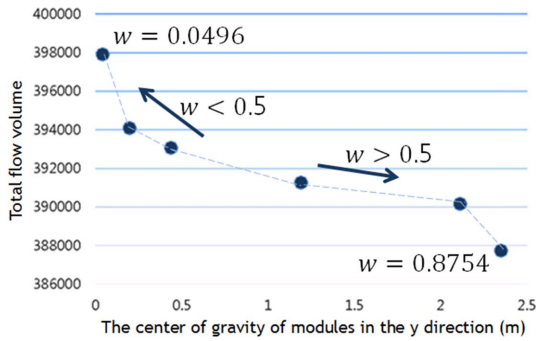


Fig. 7 Pareto optimal set obtained from the parametric study for the weighting factor

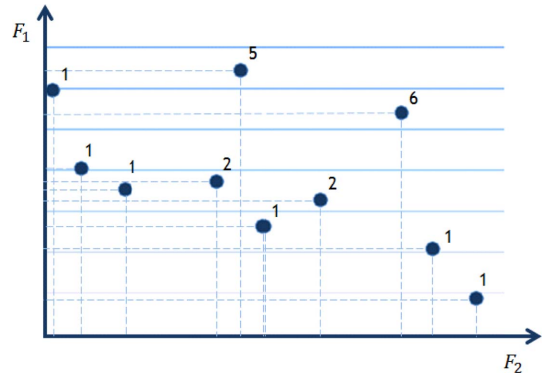


Fig. 8 Multi-objective ranking for the individuals

factor가 한 번 정해지면 두 목적 함수의 우선 순위가 결정되어 두 조건이 상호 독립적이지 않다는 점과 단 하나의 최적해만 얻을 수 있다는 한계점이 있다. 이 절에서는 유전 알고리즘 내에서 유전 개체를 평가할 때, 두 목적 함수에 대해 독립적으로 판단함으로써 탐색체가 진화하면서 파레토 최적해 집합에 수렴할 수 있도록 순위법을 고려하였다.

유전 알고리즘은 적합도 값에 따라 개체를 선택한다. 하지만 다목적 최적화 문제의 경우 다양한 조건이 고려되기 때문에 탐색체의 적합도 평가를 위해서 특별한 적합도 값이 필요하다. 순위법에서는 파레토 지배 관계에 기초하여 식 (8)과 같이 개체의 적합도 값을 결정한다.

$$Ft = \begin{cases} 1/r & \text{in case of a minimization} \\ r & \text{in case of a maximization} \end{cases} \quad (8)$$

여기서, r 은 각 개체의 순위를 나타내며, t 세대의 r 이 p 개의 개체에 의해 지배될 때 식 (9)처럼 계산한다.

$$r^{(i)} = 1 + p^{(i)} \quad (9)$$

Fig. 8은 식 (9)로 계산된 각 개체의 순위(r)을 보여준다.

4.1.1절과 마찬가지로 4.1절에 소개한 예제를 순위법 기반 유전 알고리즘으로 해결한 결과는 다음과 같다.

Fig. 9는 파레토 기반 유전 알고리즘이 10, 20, 50, 100 세대를 거듭함에 따라 해집합이 파레토 프론트(pareto front)에 빠르게 수렴하는 것을 보여준다. Fig. 10은 Fig. 9의 100 세대 해집합을 Fig. 7과 같은 범위에 나타낸 것이다. Fig. 9의 파레토 프론트는 Fig. 7과 거의 일치하는데 Fig. 10의 삼각

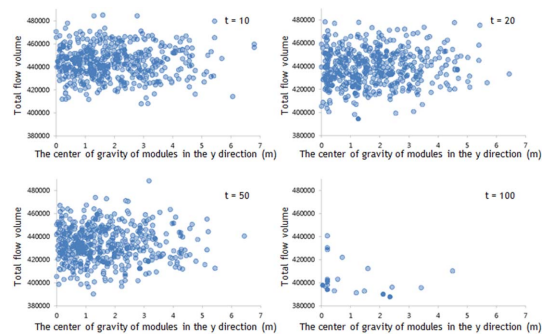


Fig. 9 Evolution of the individuals in the objective plane

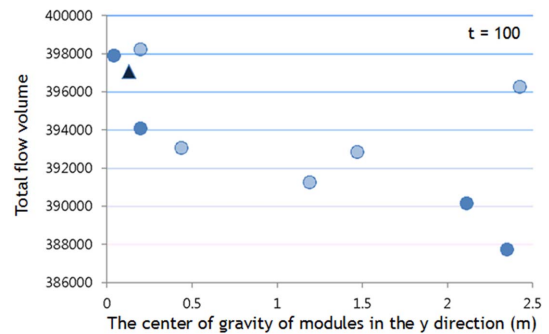


Fig. 10 The individuals in the objective plane at the 100th generation

형 표식으로 나타나는 개체는 4.1.1절의 가중치법으로 구할 때는 나타나지 않았던 새로운 파레토 최적해이다. 즉, 가중치법에서 파레토 최적해를 유도해 낼 weighting factor가 누락되면 발견할 수 없는 파레토 최적해 집합의 요소도, 순위법을 통한 유전 알고리즘을 충분한 수의 세대와 평가(evaluations)를 거쳐 적용하면 발견할 수 있음을 알 수 있다.

4.2 해상 풍력 발전기의 너셀 내부의 최적 배치 예

대해상 풍력 발전기의 너셀(nacelle) 내부에는 전기, 기계, 제어 시스템과 관련된 부품(이하 모듈)들이 설치된다^[22]. 앞서 본 연구에서 제안한 알고리즘을 적용해 너셀 내부의 모듈 배치를 수행하였다. 4.1절의 FPSO 모듈 배치와 유사하게 너셀 바닥을 모듈이 설치될 몇 개의 영역으로 나누고 본 연구에서 제안한 방법을 이용해 모듈이 배치될 최적의 위치를 찾았다. 배치 고려 대상이 된 너셀 내부의 모듈들은 Table 7과 같다.

위 문제는 두 개의 목적 함수(F_3, F_4)를 가지는 다목적 최적화 문제로 정식화 하였다.

Minimize

$$F_3 = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N (q_{i,j} \cdot d_{i,j})$$

; Total flow volume

and

Minimize

$$F_4 = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N (n_{i,j} \cdot d_{i,j})$$

; The closeness among modules (10)

F_3 은 2.1절의 식 (1)과 같으며 이때 재화의 유동량은 로터(rotor)로부터 전달되는 출력(power)으로 정의했다. 식 (10)의 F_4 는 i 번째 모듈이 연결될 수 있는 다른 모듈과의 근접도를 나타낸다. Table 7의 main shaft bearing이나 mechanical brake와 같이 재화를 직접 교환하지 않는 모듈은 근접도를 고려하여 최적의 위치에 배치될 수 있도록 하였다. 또한 식 (11)과 같이 단일 목적 함수 최적화 문제로 계산할 경우 $q_{i,j}$ 의 값이 $n_{i,j}$ 의 값보다 상대적으로 크

Table 7 Modules of wind turbine nacelle to be considered in this study

Module ID	Module name
1	Hub
2	Low speed shaft(main shaft)
3	Main shaft bearing
4	Gear box
5	High speed shaft
6	Mechanical brake
7	Generator

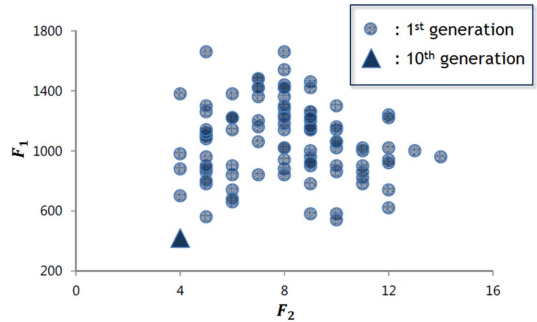


Fig. 11 The individuals in the objective plane at the 1st and 10th generation

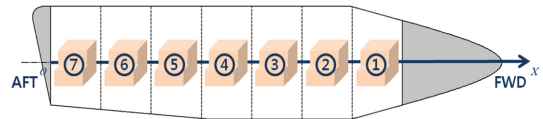


Fig. 12 Result of an optimal layout for the inside of nacelle of offshore floating turbine (plan view)

기 때문에 F_3 에 의해 F_4 가 지배되어 근접도를 적절하게 고려하지 못한다. 따라서 본 연구에서는 F_3 과 F_4 를 독립적으로 판단할 수 있는 다목적 함수 최적화 문제로 정식화했다.

$$\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \{(q_{i,j} + n_{i,j}) \cdot d_{i,j}\} \tag{11}$$

위의 최적화 문제에 대해 본 연구에서 제안한 방법을 이용해 파레토 최적해를 찾았고 그 결과는 다음과 같다.

10세대의 진화 과정을 거친 후 개체들은 Fig. 11에서 삼각형으로 표시된 하나의 해로 수렴했다. Fig. 12에 나타나 있듯이, 이 최적 배치 안은 기존의 너셀 내부의 배치와 같음을 확인할 수 있었고, 이로부터 기존의 너셀 내부의 배치가 주어진 조건에서 최적의 배치 안인 것을 알 수 있다.

5. 결론 및 향후 연구 계획

본 연구에서는 FPSO 상부의 모듈 배치를 위해 최적 배치 방법을 제안하고 이를 기반으로 한 프로그램을 개발하였다. 이를 위해, 먼저 모듈간 재화의 유동량과 모듈의 폭 방향 무게 중심을 고려하여 모듈 배치 문제를 다목적 최적화 문제로 정식화하였고, 이를 해결하기 위한 유전 알고리즘 기

반의 메타-휴리스틱 최적화 알고리즘을 개발하였다. 특히, 모듈의 무게 중심의 치우침을 최소화하는 목적 함수를 설정하여 선체와의 연관성을 고려하고자 노력하였다. 마지막으로 본 연구에서 제안된 방법의 효율성과 효용성을 검증하기 위해 실제 FPSO의 상부를 이상화한 문제에 제안된 방법을 적용해 보았다. 그 결과, 본 연구에서 개발한 방법을 이용할 경우, 재화의 유동량과 모듈의 무게 중심과 중심선과의 거리를 상당 부분 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 따라서 실제 정보를 입력하면 본 프로그램이 FPSO 상부 모듈 배치 업무에 충분히 활용될 수 있을 것이다.

본 연구에서는 FPSO 모듈 배치와 관련된 초기의 연구로서 이상화된 환경에 대한 문제를 우선 고려하였다. 하지만 실제 해양 구조물의 모듈 배치에서는 모듈의 배치 위치 제약이나 모듈이 여러 개의 영역에 걸쳐 배치되는 경우가 존재한다. 향후에는 이와 같은 다양한 문제에도 범용적으로 적용될 수 있도록 제안된 방법의 개선 작업을 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 (a) 지식경제부 / 지식경제 R&D 전략기획단의 미래산업선도기술개발사업(No. 10042556-2012-11) (b) 지식경제부의 산업원천기술개발사업(10035331, 시뮬레이션 기반의 선박 및 해양플랜트 생산기술 개발)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

References

1. Jung, H.C., Lim, S.W. and Kim, Y.H., 2006, An Demand Outlook of Offshore Oil Production Structures, *Transactions of the Society of Naval Architects of Korea*, 43(1), pp.49-57.
2. Tam, K., 1992, Genetic Algorithms, Function Optimization, and Facility Layout Design, *European Journal of Operations Research*, 63, pp.322-346.
3. Chan, K. and Tansri, H., 1994, A Study of Genetic Crossover Operations on the Facility Layout Problem, *Computers and Industrial Engineering*, 26(3), pp.537-550.
4. Conway, D.G. and Venkataramanan, M.A., 1994, Genetic Search and the Dynamic Facility Layout Problem, *Computers and Operation Research*, 21(8), pp.955-960.
5. Sulung and Chan, K.C., 1996, Design of 2-Dimensional Crossover Operators for the Facilities Layout Problem, *Proceedings of Artificial Neural Networks in Engineering*, 6, pp.373-378.
6. Kochhar, J.S. and Heragu, S.S., 1998, MULTI-HOPE: A Tool for Multiple Floor Layout Problems, *International Journal of Production Research*, 36(12), pp.3421-3435.
7. Penteado, F.D. and Ciric, A.R., 1996, An MINLP Approach for Safe Process Plant Layout, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 35, pp.1354-1361.
8. Georgiadis, M.C., Schilling, G., Rotstein, G.E. and Macchietto, S., 1999, A General Mathematical Programming Approach for Process Plant Layout, *Computers and Chemical Engineering*, 23, pp.823-840.
9. Park, K.T., Koo, J.M., Shin, D.I., Lee, C.J. and Yoon, E.S., 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.
10. Han, S.N., Lee, K.Y. and Roh, M.I., 2001, A Study on the Optimal Facility Layout Design Using an Improved Genetic Algorithm, *Transactions of the Society of CAD/CAM Engineers*, 6(3), pp.174-183.
11. Ku, N.K., Lee, J.C., Roh, M.I., Hwang, J.H. and Lee, K.Y., 2012, Multi-floor Layout for the Liquefaction Process Systems of LNG FPSO Using the Optimization Technique, *Transactions of the Society of Naval Architects of Korea*, 49(1), pp.68-78.
12. Cohon, J.L., 1978, *Multiobjective Programming and Planning*, Academic Press, New York.
13. Srinivas, N. and Deb, K., 1994, Multiobjective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms, *Journal of Evolutionary Computation*, 2(3), pp.221-248.
14. Fonesca, C.H. and Fleming P.J., 1993, Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization, *Proceedings of the 5th International Conference on Genetic Algorithms*, Urbana-Champaign, USA, pp.416-423.
15. Goldberg, D.E., 1989, *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Reading, MA, Addison Wesley.
16. Davis, L., 1991, *Handbook of Genetic Algorithms*, New York, Van Nostrand-Reinhold.
17. Kado, K., 1995, *An Investigation of Genetic*

Algorithms for Facility Layout Problems, M.Sc. Thesis, University of Edinburgh.

18. Liggett, R.S., 2000, Automated Facilities Layout: Past, Present and Future, *Automation in Construction*, 9, pp.197-215.
19. PETRONAS, 1990, *Layout Considerations for Offshore Topsides Facilities*, PETRONAS TECHNICAL STANDARDS PTS 20.179.
20. Goldberg, D.E. and Lingle, R., 1985, Alleles, Loci and the Traveling Salesman Problem, *Proceedings of the First International Conference*

on Genetic Algorithms, San Francisco, USA, pp.154-159.

21. Marco, N., Desideri, J.A., and Lanteri, S., 1999, *Multi-Objective Optimization in CFD by Genetic Algorithm*, INRIA Report No 3686.
22. ABS, 2013, *Guide for Building and Classing Floating Offshore Wind Turbine Installations*, American Bureau of Shipping.



정 세 용

2010년 울산대학교 조선해양공학부 학사
 2010년~현재 울산대학교 조선해양공학부 석사과정
 관심분야: 해양 플랜트 설계, 최적 설계



노 명 일

1998년 서울대학교 조선해양공학과 학사
 2000년 서울대학교 조선해양공학과 석사
 2005년 서울대학교 조선해양공학과 박사
 2005년~2007년 서울대학교 공학연구소/해양시스템공학연구소 선임연구원
 2007년~2013년 울산대학교 조선해양공학부 전임강사, 조교수
 2013년~현재 서울대학교 조선해양공학과 부교수
 관심분야: 전산선박설계 및 생산, 시뮬레이션 기반 설계 및 생산, 최적 설계, 해양 플랜트 설계, CAD/CAM/CAE, CAGD



신 현 경

1979년 서울대학교 조선공학과 학사
 1981년 서울대학교 조선공학과 석사
 1983년 미국 MIT 해양공학과 Ocean Engineer
 1987년 미국 MIT 해양공학과 박사
 1981년~현재 울산대학교 조선해양공학부 교수
 관심분야: 해양 구조물 동역학



하 솔

2003년 서울대학교 조선해양공학과 학사
 2013년 서울대학교 조선해양공학과 박사
 2013년~현재 서울대학교 공학연구소 선임연구원
 관심분야: 해양 플랜트 설계 최적화, 모델링 및 시뮬레이션, 수중 운동체(잠수함, 어뢰) 교전 시뮬레이션, 격자 기반 시뮬레이션 (Cellular Automata, Lattice Gas Automata, Lattice Boltzmann Method)



구 남 국

2004년 서울대학교 조선해양공학과 학사
 2012년 서울대학교 조선해양공학과 박사
 2012년~2013년 서울대학교 해양기술인력양성사업단 연수연구원
 2013년~현재 서울대학교 공학연구소 선임연구원
 관심분야: 해양 플랜트, 다물체계 동역학 및 제어, 용접/전처리 로봇