

# 할당기법과 타부서치 알고리즘을 이용한 선박의 안벽배치 계획

이상협<sup>†</sup> · 홍순익 · 하승진

현대중공업 융합기술연구소 공정 IT연구실

## Quay Wall Scheduling of Ships Using Assignment Method and Tabu Search Algorithm

Sang Hyup Lee · Soon Ik Hong · Seung Jin Ha

Production Process and IT Research Department, Convergence Technology Research Institute,  
Hyundai Heavy Industries Co. Ltd., Ulsan 682-792, Korea

In shipbuilding processes, a quay wall is a major resource for additional operations after an erection operation at dock. A quay wall is becoming a new bottleneck instead of docks, while ship types with long operation time at quay wall are increasing recently. We developed a quay wall scheduling algorithm for the quayside operations of ships in this paper. The objective function is to minimize the sum of not assigned days of ships which have to be assigned to any quay wall under limited numbers of quay walls. The scheduling algorithm is based on an assignment method to assign each ship to a quay wall among its alternative quay walls at the time of launching or moving to another quay wall. The scheduling algorithm is also using Tabu Search algorithm to optimize assignment sequence of ships. The experiment shows that the algorithms in this paper are effective to make schedule of the quayside operations of ships.

**Keywords:** Quay Wall Scheduling, Quayside Operation, Tabu Search Algorithm, Assignment Method

### 1. 서론

선박은 <Figure 1>과 같이 계약에서 인도까지 다양한 공정을 거쳐서 건조된다. 이러한 선박 건조 과정에는 공장, 작업장, 크레인, 도크, 안벽 등 다양한 생산자원이 필요하다. 이 중에서 가장 중요한 생산자원은 도크이다. 따라서 선박의 건조일정에 대한 기본계획은 도크에서 수행되는 탑재(Erection) 공정을 기준으로 수립된다.

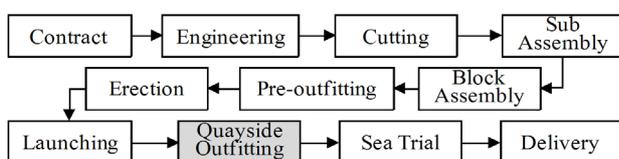


Figure 1. Shipbuilding processes

최근 들어, H사에서는 수주한 선박들 중에서 안벽에서 수행되는 작업공정의 공기가 긴 선박이 많아지면서 안벽이 새로운 병목 자원으로 간주되기 시작하였다. 따라서 선박 건조의 기본 계획 수립 단계에서 선박의 안벽배치 가능성 및 발생할 수 있는 문제점들의 사전검토가 필요하게 되었다.

선박 건조의 기본계획이란 1~2년 이상의 장기 계획으로 수주된 선박들의 인도일에 맞춰 도크 할당과 더불어 자재 발주, 작업 착수, 탑재 시작/완료, 안벽 작업 시작/완료, 건조완료일 등과 같은 수주 선박들에 대한 건조 일정계획을 수립하는 것이다. 선박 건조의 기본계획은 먼저, 각 선박을 탑재할 도크와 탑재공정의 시작과 완료시점을 결정한다. 그리고 <Figure 1>에서와 같이 도크에서 탑재공정이 완료된 선박은 진수(Launching)된 이후에 안벽작업 공정을 거치게 됨으로 선박의 안벽작업들을 어느 안벽에서 언제 할 것인지를 또한 계획한다. 본 논문에서

<sup>†</sup> 연락저자 : 이상협 수석연구원, 682-792 울산광역시 동구 방어진순환도로 1000 현대중공업 융합기술연구소 공정IT연구실, Tel : 052-203-9904, Fax : 052-203-3435, E-mail : sang@hhi.co.kr  
2014년 5월 23일 접수; 2014년 10월 26일 수정본 접수; 2014년 12월 12일 게재 확정.

는 선박건조의 기본계획 중에서 건조할 선박들의 안벽배치 계획 문제를 다루고 있다.

선박의 안벽배치 계획에 대한 기존 연구들을 살펴보면, 본 연구와 같이 선박건조의 안벽작업 공정에서 선박의 안벽배치 계획 문제에 관한 직접적인 연구는 많지 않았다. 그 중 Ahn *et al.*(2007)에서 안벽배치 계획의 최적화에 대한 연구가 수행된 것이 있으나 일 단위의 안벽배치를 최적화하는 모형을 제시하였는데, 본 논문의 제약사항 및 계획 목적과는 상이하다. 다만, 본 논문에서 다루고 있는 안벽배치 계획 문제와 같은 대상의 연구가 진행된 것으로 확인하였다. 본 논문의 문제 특성과 유사한 사례로는 컨테이너 터미널 관련 연구를 들 수 있다. 이는 컨테이너 터미널의 안벽 크레인 배치 계획 문제에 대한 연구와 선석(berth) 배치 계획 문제에 대한 연구로 크게 분류된다. 선석 역시 컨테이너 터미널의 주요 자원으로 본 논문의 안벽과 유사한 특성을 지니고 있다.

우선 안벽 크레인 배치 계획 문제에 관한 연구 중에서 Moccia *et al.*(2006)은 우선순위가 존재하는 것을 차량경로 문제(Vehicle routing problem)에 제약이 추가된 것으로 정의하여 Branch-and-cut 기반의 알고리즘을 제안하였다. Moccia *et al.*(2006)은 선박이 선석에 정박하는 총 시간 최소화를 목적으로 하는 휴리스틱 기법을 제안하였다. 또한 Lee(2011)는 크레인의 이동거리와 화물에 따른 준비시간을 포함한 크레인 서비스 타임을 최소화하기 위해 유전자 알고리즘을 적용하였다. 그리고 Ha and Kim(2012)은 컨테이너 터미널에서 컨테이너 적치장의 배이내, 컨테이너의 재배치 순서를 최적화하는 제정돈 문제를 다루었다.

선석계획 문제에 대한 연구는 Lim(1998), Nishimura *et al.*(2001), 그리고 Kim(2003)에서 다양한 메타 휴리스틱 기법을 제안하였다. 그 밖에 Imai *et al.*(2003)은 기존 선석계획 문제에서 서비스 우선순위를 추가한 연구를 수행하였다.

이외에도 조선산업과 관련된 본 논문과 유사한 연구들도 진행되어왔다. 다만 이러한 연구들은 주로 선박건조의 기본 단위인 조립블록의 면적 할당과 관련된 것들이 많았으며, 문제의 해결 방법으로 메타 휴리스틱 기법을 활용하였다. Koh *et al.*(2011)은 외주 및 작업공기를 최소화하는 블록의 공간계획 문제에서 작은 사이즈 문제에 대한 수리모형과 이를 바탕으로 유전자 알고리즘을 적용하는 방안을 제시하였다. Lee *et al.*(2011)은 블록 적치장에서 블록을 운반할 때 간섭블록의 수를 최소화하는 블록 반출계획을 수립하기 위해 타부서치 기법을 활용하였으며, Park *et al.*(2009) 역시 유사한 주제를 가지고 기존의 발견적 휴리스틱 기법을 보완하여 수리모형과의 결과 비교를 통해 해법을 제시하였다. 그 밖에도 Kim(2009)은 조선산업에서 건조 도크의 최소화 및 건조 도크에 투입되는 자원 활용률의 평준화를 위해 정수계획모형을 수립한 후, Column generation 기법을 활용하여 LP-relaxtion하는 방안을 제시하였다. Lee and Bac(2013)는 조선 야드에서 블록 운반실적 자료로부터 프로세스 마이닝을 이용하여 블록 이동을 분석하는 연구를 수행하였

다. 이와 같이 조선산업 분야에 대한 연구는 다양하게 수행되어 왔으나, 본 논문의 주제인 선박의 안벽배치 문제를 다룬 연구는 많지 않다.

일반적으로 선박건조는 도크에서 탑재공정을 완료한 다음에 안벽작업이 수행되기 때문에 안벽작업의 시작시점은 선박의 진수시점이 된다. 따라서 본 논문에서는 각 선박의 안벽작업의 시작시점을 선박의 도크배치 작업계획에서 결정된 진수일로 한다. 그리고 선박건조 회사는 선박을 수주할 때 결정된 인도일을 어길 경우 많은 인도지연금을 물게 된다. 따라서 선박건조의 기본계획에서는 선박의 인도일을 넘기는 건조계획은 고려하지 않는다. 즉, 선박건조의 기본계획에서는 모든 선박을 인도일전에 건조를 완료하는 계획을 수립한다. 따라서 선박은 인도(Delivery)전까지 건조를 완료하였다 하더라도 안벽에서 대기해야 하기 때문에 안벽배치의 완료시점은 인도일로 간주한다.

이와 같은 상황에서 선박건조의 기본계획을 수립할 때, 건조할 선박 수가 많으면 특정 시점에서는 안벽 부족으로 안벽작업이 불가능한 선박이 있을 수 있다. 이런 경우, 선박건조의 기본계획에서는 해당 시점에서 안벽에 배치하지는 않지만 해당기간도 안벽작업이 진행되는 것으로 간주한다. 그리고 이후에 가용한 안벽이 발생하는 시점에 안벽에 배치하여 작업이 계속 진행되는 것으로 계획한다.

본 논문에서는 선박의 안벽배치 계획 문제에서 안벽작업의 시작과 완료시점이 고정된 상황 즉, 작업기간이 고정된 상황에서 작업수행에 필요한 안벽이 할당되지 못하는 기간을 최소화하는 것을 목적으로 한다. 이는 선박의 안벽배치 계획을 수립할 때, 특정 기간에 선박의 안벽작업을 위한 안벽이 부족하다는 것을 보여주고 계획 담당자가 조치를 취할 수 있도록 하기 위함이다. 그리고 이에 대한 조치 방안으로는 안벽작업기간 조정, 안벽 추가, 선박 종류별 후보안벽 조정 및 선박의 진수일자 수정 등의 조치를 한 후에 안벽배치 계획을 다시 수립한다. 건조 선박의 안벽배치 문제에 대해 이와 같은 조치 방안들을 고려하여 선박의 안벽작업 계획을 수립하게 된다. 따라서 안벽배치 계획에서는 선박들이 안벽에 미배치되는 것의 최소화 즉, 안벽배치 문제의 대상과 범위를 최소화하여 안벽작업 문제를 신속히 해결할 수 있도록 하는 목적을 포함하고 있다.

본 논문에서는 선박의 배치 우선순위 및 배치 가능한 안벽 정보와 함께 건조 선박들이 주어졌을 때, 각 선박을 후보안벽 중의 하나에 할당하는 안벽배치 알고리즘을 제안한다. 또한 선박의 안벽배치 알고리즘을 바탕으로 목적하는 안벽배치 계획을 수립하기 위해 선박의 배치 우선순위를 최적화하는 타부서치 알고리즘을 제안한다.

본 연구는 5장으로 구성되어 있으며 각 장의 연구내용은 다음과 같다. 제 2장에서는 선박의 안벽배치 문제에 대한 특징과 기술적 제약조건을 기술하고, 제 3장에서는 안벽배치 문제에 대한 해결 모형을 제시한다. 제 4장에서는 본 논문에서 제안된 알고리즘의 구현과 성능에 대한 실험 결과를 제시하고, 마지막으로 제 5장에서 결론 및 향후 연구를 제시한다.

2. 문제 정의

<Figure 1>과 같이 선박은 도크로부터 진수된 다음에 안벽작업 공정을 거치게 된다. 안벽작업 공정은 여러 가지 작업으로 구성되어 있고, 모든 작업은 안벽에서 수행된다. 그리고 선박 종류별로 차례로 수행할 안벽작업은 사전에 정의되어 있다.

선박 종류별로 안벽작업의 공기와 선호하는 안벽순위를 포함하여 배치 가능한 후보 안벽들은 <Table 1>과 같이 주어져 있다. 안벽작업의 안벽 선호순위는 안벽 수심 및 설비 등을 반영한 것으로 안벽작업의 효율과 직접적으로 연관되므로 선박의 안벽배치 계획에서 반영되어야 할 요소 중의 하나이다. <Table 1>과 같이 선박 종류를 기준으로 안벽작업이 정의되어 있고 임의의 선박 진수(Launch)일과 인도(Delivery)일이 주어지면, <Table 1>의 선박 종류에 맞춰 해당 선박의 안벽작업 시작일과 완료일 및 후보 안벽들을 정의할 수 있다.

Table 1. Working time and Alternative quay walls of operations according to ship type

Op.		Op.1	Op. 2	...	Op. k
Type					
CNTR	Time	LC~LC+20	LC+21~LC+60		DL-40~DL
	Alt.	Q1(1), Q2(2)	Q3(1), Q4(2), Q5(3)	...	Q4(2), Q5(3)
DRLL	Time	LC~LC+30	LC+31~LC+100		DL-30~DL
	Alt.	Q3(1), Q2(2)	Q1(1), Q3(2), Q4(3)		Q1(1), Q2(2)
...					
LNG	Time	LC~LC+40	LC+41~ C+80		DL-50~DL
	Alt.	Q1(1), Q2(2)	Q3(1), Q1(2)		Q4(1), Q3(2)

LC : Launch, DL : Delivery, ( ) : Preference priority of quays.

일반적으로 작업 일정계획에서는 <Figure 2>와 같이 임의의 작업을 수행하려는 기계에서 현재 다른 작업을 수행하고 있으면 수행 중인 작업이 완료될 때까지 대기하였다가 해당 작업을 착수한다. 그리고 이때, 잠정적으로 작업이 대기할 장소 또는 공간은 충분하다고 가정한다. 또한 특정 작업에 대한 작업 우선권을 고려하지 않는다(No Preemption).

이와는 달리, 선박의 안벽배치 계획에서는 임의의 선박을 배치할 안벽이 없으면, 해당 선박에 대한 배치 가능한 안벽이 있을 때까지 대기하였다가 작업을 착수하는 계획은 고려하지 않는다(<Figure 3(a)> 참조). 왜냐하면, 선박은 안벽작업을 수행하는 동안 안벽이 아닌 다른 장소에서 임시로 대기할 수 없으며 작업지연으로 인해 해당 선박의 인도일을 위반할 수 있기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 선박의 안벽배치 계획에서 선박을 배치할 안벽이 없으면 동시에 여러 선박을 충분히 배치하여 작업할 수 있는 가장안벽에서 작업이 진행되는 것으로 간주한다(<Figure 3(b)> 참조).

한편, 선박은 정해진 기간 동안에 필요한 모든 안벽작업을 완료하기 위해서 필요하면 여러 안벽으로 이동될 수 있다. 하지만, 선박의 안벽이동에는 비용이 발생하므로 선박의 안벽이

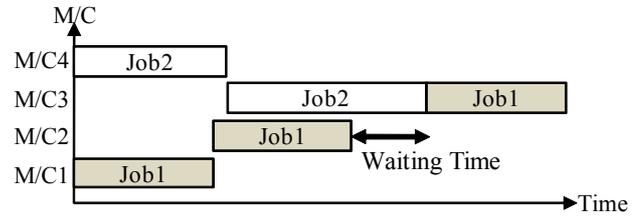
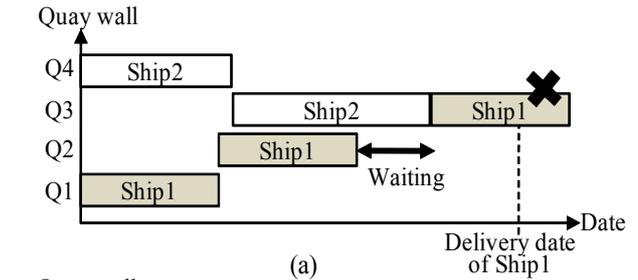
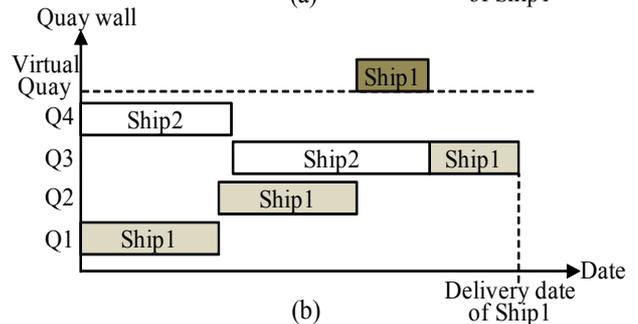


Figure 2. General scheduling case without preemption



(a)



(b)

Figure 3. No waiting time for quay wall scheduling

동 횟수 또한 안벽배치에서 고려해야 할 사항이다.

따라서 본 논문에서는 선박의 안벽배치 계획에서 선박이 실제로 작업 가능한 안벽에 배치되지 못하고 가장안벽에 배치되는 경우를 최소화하기 위해 <Figure 4>와 같이 임의의 안벽에 작업중인 선박을 다른 안벽으로 이동하고, 해당 안벽에 다른 선박을 배치하는 것을 허용한다. 즉, 본 논문에서는 선박의 안벽배치 계획에서 특정 안벽에 작업중인 선박이 있더라도 임의의 선박에 작업우선권(Preemption)을 반영하여 해당 선박이 안벽에 배치할 수 있도록 한다. 이때, 안벽에서 작업 중인 선박을 이동시켜야 하는데, 선박의 이동시간은 <Table 1>에서 주어진 것과 같이 안벽 작업시간에 비해 매우 적으므로 안벽배치 계획에서는 선박의 안벽간 이동시간은 고려하여 않는다.

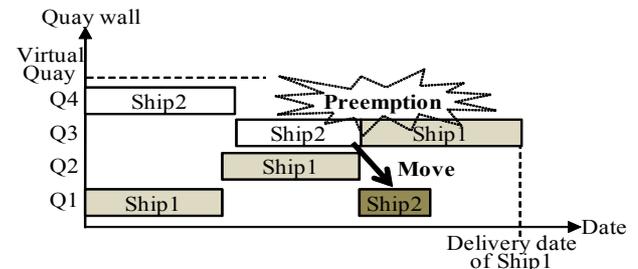


Figure 4. Quay wall assignment with preemption

한편, 안벽은 선박을 정박할 수 있는 물리적 장소이므로 선박을 안벽에 배치하기 위한 여러 기술적인 제약조건들이 있다.

먼저, 건조할 선박 수에 비해 안벽 수가 제한되어 있으므로 <Figure 5>의 Q1안벽처럼 하나의 안벽에 선박 2척을 이중으로 배치하는 것을 허용한다. 따라서 본 논문에서는 물리적인 하나의 안벽을 안쪽(Inner)과 바깥쪽(Outer) 구분되는 두 개의 논리적인 안벽으로 간주한다. 그리고 바깥쪽에 배치 가능한 선박 종류는 안쪽에 먼저 배치된 선박 종류에 따라 배치 가능한지 여부가 결정된다. 예를 들어 LNG타입의 선박이 안벽 안쪽에 배치되면, 안벽 바깥쪽에는 LNG와 DRLL 타입의 선박만 배치가 가능하다.

<Figure 5>의 Q1과 Q2안벽처럼 서로 인접한 두 안벽의 경우, 안벽에서 선박의 배치 가능공간은 이웃한 안벽에 이미 배치된 선박의 길이에 영향을 받는다. 즉, 안벽의 배치 가능공간의 크기는 이웃한 안벽에 배치된 선박의 길이와 안전거리를 반영하여 결정된다.

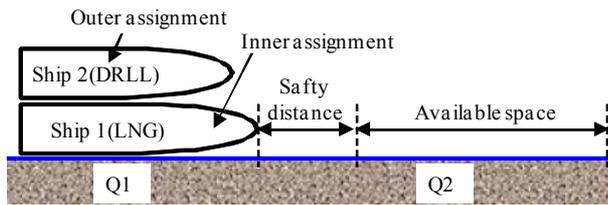


Figure 5. Constraints of quay wall assignment

본 논문에서 선박의 안벽배치 계획에 대한 가정사항들은 다음과 같다.

- 1) 안벽작업은 순차적으로 진행된다.
- 2) 임의 선박의 작업에 대해 배치할 안벽이 없을 경우, 해당 작업은 가상안벽에서 수행된다.
- 3) 선박의 안벽간 이동시간은 고려하지 않는다.
- 4) 선박의 안벽배치에서 배치우선권(Preemption)을 허용한다.

그리고 선박의 안벽배치에서 고려하는 기술적인 제약조건을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 선박의 바깥쪽 안벽배치는 안쪽에 배치된 선박이 있어야 가능하다.
- 2) 선박의 바깥쪽 안벽배치는 사전에 정의된 가능한 선박 종류 조합이어야 한다.
- 3) 안벽의 가용공간이 선박 길이와 안전거리를 합한 것 이상일 경우에만 선박을 안벽에 배치할 수 있다.

### 3. 문제 해결 모형

#### 3.1 선박의 안벽배치 계획 수립 절차

선박의 진수일과 인도일 및 안벽에 배치할 선박들이 주어지

면, 기본 정보인 <Table 1>에서 주어진 선박 종류에 맞춰 각 선박의 안벽작업들에 대한 시작일과 완료일 및 배치 후보 안벽을 <Table 2>와 같이 결정할 수 있다.

Table 2. Example of definition quay operations of ships

Ship No.	Op.	Op.1	Op.2	...	Op.k
1	Time	1.1~2.2	2.21~2.28		4.5~5.2
	Alt.	Q1(1), Q1^(2)	Q3(1), Q4(2)	...	Q1(1), Q3^(2)
2	Time	1.1~1.31	2.1~2.15		5.1~5.30
	Alt.	Q3(1), Q6(2)	Q1(1), Q4(3)		Q1(1), Q2(2)
...					
T	Time	6.1~6.30	7.1~7.20		10.1~11.30
	Alt.	Q1(1), Q2(1)	Q3(1), Q4(1)		Q2(1), Q3(2)

^ : Outer assignment, ( ) : Preference priority of quays.

본 논문에서는 선박의 안벽배치 계획을 수립하기 위해 두 가지 알고리즘을 순차적으로 적용한다. <Figure 6>은 계획수립 모형의 논리적 절차를 나타낸 것이다.

먼저, <Table 2>와 같이 선박들의 안벽작업이 정해지면, <Figure 6>-①단계에서는 안벽배치 계획을 수립하기 위해 선박들의 각 안벽작업 시작일을 기준으로 동일한 안벽작업 시작일인 선박들을 묶어 하나의 집합을 생성한다. 이렇게 모든 선박의 안벽작업 시작일들을 기준으로 N개의 선박집합을 생성한다(<Figure 7> 참조). 이 때, 선박 집합이 생성된 각 안벽작업 시작일자는 안벽배치 계획기간 동안에 선박의 안벽배치를 실시하는 시점이 된다. 따라서 선박의 안벽배치 계획 기간은 <Figure 7>에서와 같이 안벽작업이 가장 빠른 일자부터 가장 늦은 일자까지 이다.

다음으로, 목적하는 안벽배치 계획을 수립하기 위해 안벽배치의 기술적 제약조건 만족과 함께 선박의 배치 우선순위를 최적화하는 타부서치 알고리즘을 수행한다(<Figure 6>-②). 여기에서는 안벽배치의 기술적 제약조건을 만족하는 계획을 수립하기 위해 선박의 배치 우선순위를 미리 정하여 놓고 선박을 하나씩 차례로 배치하면서 기술적 제약조건 만족여부를 확인한다. 따라서 선박의 배치 우선순위에 따라 안벽배치 결과가 달라질 수 있으므로 선박의 배치 우선순위를 최적화하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 선박의 배치 우선순위를 최적화하기 위해 타부서치 알고리즘을 활용한다.

마지막으로, <Figure 6>-③단계에서는 타부서치 알고리즘 수행 단계에서는 생성된 각 선박의 배치 우선순위를 기준으로 선박의 안벽배치를 실시한다. 즉, 임의의 선박의 배치 우선순위를 정해 놓고 <Figure 6>-①단계에서 정해진 안벽작업 시작일이 가장 빠른 일자부터 가장 늦은 일자까지 생성한 일자별 선박 집합에 대해 차례로 선박들의 안벽배치를 실시하면서 모든 선박의 안벽배치 계획을 수립한다. 이 때, 안벽배치 계획 수립기간에서 안벽배치 시점마다 배치 문제를 해결하여야 하는

데, 본 논문에서는 이를 위해 헝가리안 기법을 프로그램으로 구현하여 선박의 안벽배치 결과를 얻는다.

안벽배치 계획 기간 동안의 모든 선박의 안벽작업들에 대한 안벽배치가 완료되면, 주어진 선박의 배치 우선순위에 대한 적합도를 평가한다. 그리고 타부서치 알고리즘의 종료 조건을 만족하게 되면 선박의 안벽배치에 대한 전체 절차를 종료한다.

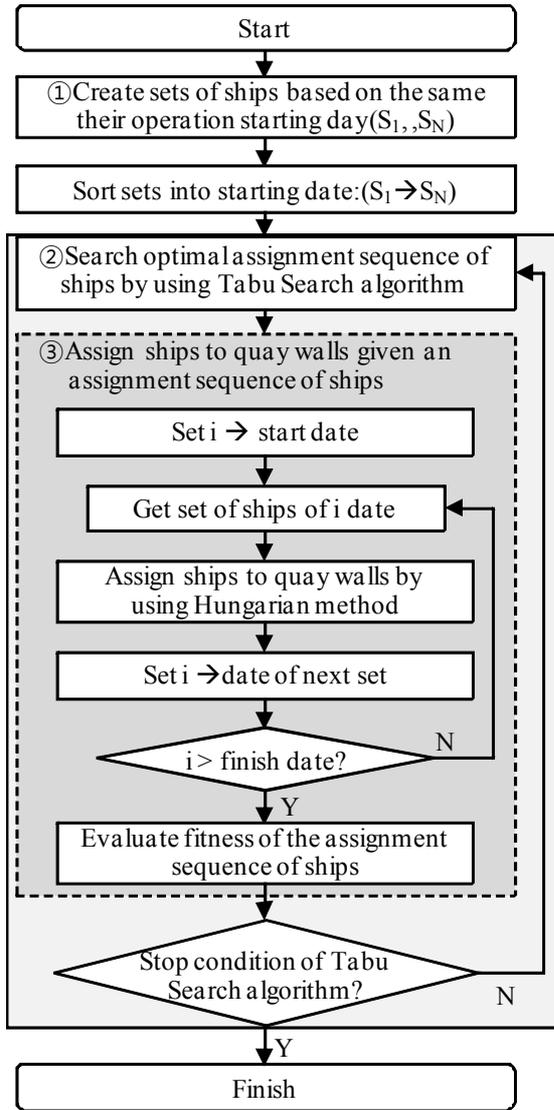


Figure 6. Procedure of quay wall scheduling of ships

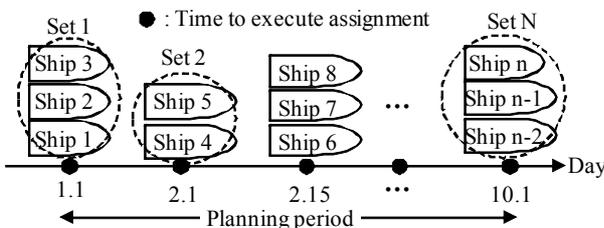


Figure 7. Ship sets based on the operation start date

### 3.2 최적의 선박 배치 우선순위 탐색을 위한 타부서치 알고리즘

본 논문에서 목적하는 선박의 안벽배치 계획 수립에 필요한 최적의 선박 안벽배치 순서를 찾기 위해 타부서치 알고리즘을 적용하는데 이에 대한 절차는 <Figure 8>과 같다.

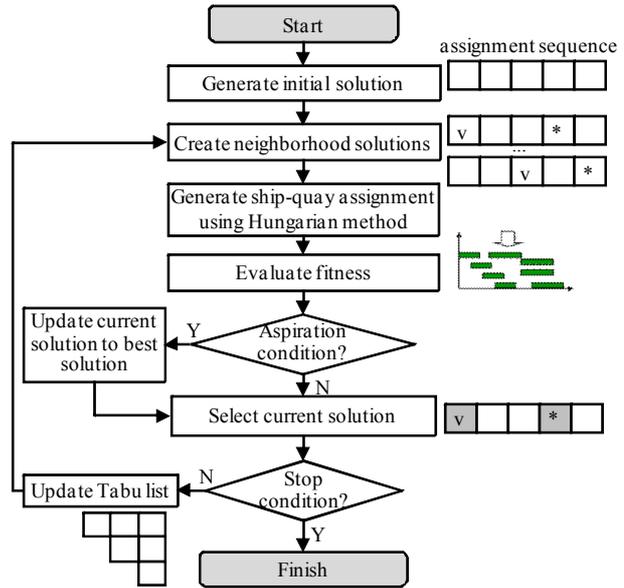
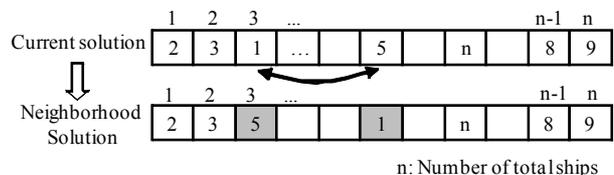


Figure 8. Structure of Tabu Search algorithm

그리고 <Figure 8>과 같이 본 논문에서 적용된 타부서치 알고리즘의 각 단계별 상세 내용은 다음과 같다.

- 1) 개체표현(Individual representation) : 개체는 전체 배치 대상인 선박들의 안벽배치 우선순위를 나타낸다.
- 2) 초기 현재해(Initial current solution) : 초기 현재해는 정수 값의 범위를 1~전체 선박 수로 정하고, 선박의 안벽배치 순위인 인자 값은 중복되지 않게 구성한다.
- 3) 이웃해 생성(Neighborhood) : 이웃해 생성은 <Figure 9>와 같이 개체에서 임의의 두 선박을 선택하여 이들의 값을 서로 바꾸어 하나의 이웃해를 생성한다.



n: Number of total ships

Figure 9. Searching neighborhood solution by swapping two ships sequence

- 4) 타부 속성 및 리스트(Tabu attribute and list) : 이웃해의 두 인자를 선택하여 인자의 값을 서로 바꾸어 생성하므로 <Figure 10>과 같이 타부 리스트에 선택된 두 선박을 기록한다. 임의의 이웃해가 현재해로 선택되었을지라도 타부

기간(Tabu tenure) 중인 두 선박의 안벽배치 우선순위 값을 바꾼 것이라면 선정된 이웃해를 현재해로 설정하지 않는다.

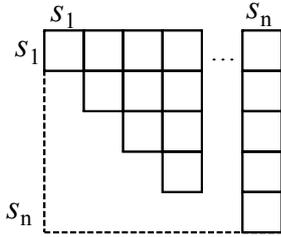


Figure 10. Tabu list structure

- 5) 적합도 평가(Fitness evaluation) : 임의의 선박의 안벽배치 우선순위를 가지고 헝가리언 기법으로 선박들의 안벽배치 실시하여 모든 선박에 대한 안벽배치 계획을 수립한다. 그리고 수립된 계획을 분석하여 선박들이 안벽에 배치되지 못한 전체 작업일 수의 합을 적합도 값으로 사용한다.
- 6) 열망조건(Aspiration condition) : 임의의 이웃해가 현재까지의 가장 좋은 해보다 개선되면, 해당 이웃해가 타부기간 중인 두 선박의 인자 값을 바꾼 것일지라도 새로운 현재해로 선정한다.
- 7) 종료 조건(Stop condition) : 반복실행 횟수 등 사용자 미리 정해 놓은 조건을 만족하면 알고리즘 수행을 종료한다.

### 3.3 선박의 배치 우선순위와 할당기법을 활용한 선박의 안벽배치 알고리즘

본 논문에서는 선박의 안벽배치 계획을 수립하기 위해 <Figure 7>에서와 같이 안벽작업을 새롭게 시작하는 선박들을 일자 기준으로 집합을 생성하고 일자가 빠른 순서로 각 일자의 집합에 속한 선박들에 대해 안벽배치를 실시한다.

이 때, 안벽배치를 실시하는 일자에서 배치 대상이 되는 선박은 안벽작업을 새롭게 시작하는 선박과 현재 ‘미배치’ 안벽을 포함한 모든 안벽에 배치되어 있는 선박들이다. 예를 들어 <Figure 7>에서 2.1일자에 배치 대상인 선박은 새로이 배치할 선박 4, 5와 1.1일에 이미 배치하여 현재 안벽에 배치되어 있는 선박 1, 2, 3이 된다.

임의 선박의 배치 가능한 안벽이 다수이기 때문에 본 논문에서는 다음과 같은 사항을 고려하여 선박의 안벽배치를 실시한다.

- 1) 선박의 이동을 최대한 줄이기 위해 현재의 안벽배치 상황을 유지한다.
- 2) 각 선박은 선호순위가 높은 안벽에 배치한다.
- 3) 2척 이상의 선박을 동시에 하나의 안벽에 배치를 고려(경쟁)할 경우, 선박의 중요도가 더 높은 선박(ex, 고가 선박)을 배치한다.

본 논문에서는 위와 같은 사항을 반영하여 선박의 안벽배치 문제에 대한 기회비용 행렬(Opportunity cost matrix)은 다음과 같이 구성한다.

- 1) 안벽배치 문제의 기회비용 행렬 크기는  $Max = \{배치 대상 선박 수, 안벽 수\}$ 로 설정한다. 그리고 행렬의 각 첫 행과 첫 열에 실제 선박과 안벽뿐만 아니라 임시선박(또는 임시안벽)을 기입한다.
- 2) 각 선박의 배치 후보 안벽에 선호순위 값을 설정한다(1이 가장 높은 선호순위 값). 그리고 사전에 정의된 선박 종류의 중요도 순위로부터 해당 선박의 중요도 값을 더한다.
- 3) 선박이 임의의 안벽에 배치되어 있으면 해당 안벽의 기회비용(cost element)값을 1로 재설정한다. 그리고 임시선박을 포함하여 각 선박 대해 후보안벽 또는 임시안벽의 기회비용 값은 임의의 큰 수(Big-M)으로 설정한다.

예를 들어, 임의의 일자에 새로운 작업을 시작하는 선박과 현재 안벽에 배치되어 있는 선박이 <Table 3>과 같은 경우에 기회비용 행렬의 크기를  $5 [= \max\{선박 수(4), 안벽 수(5)\}]$ 로 설정한다. 그리고 선박들을 안벽에 배치하기 위한 기회비용 행렬 요소 값은 <Table 4>와 <Table 5>와 같은 순서로 설정한다.

Table 3. Information of ships to be assigned quay walls at the same date

Ship	Ship priority	Current position of ship	Alternative quay walls { ( ) : quay wall priority }
S <sub>1</sub>	2	- (New start)	Q <sub>1</sub> (1), Q <sub>3</sub> (2), Q <sub>4</sub> (3)
S <sub>2</sub>	3	Q <sub>1</sub>	Q <sub>1</sub> (1), Q <sub>3</sub> (2), Q <sub>5</sub> (3)
S <sub>3</sub>	1	Q <sub>3</sub>	Q <sub>2</sub> (1), Q <sub>3</sub> (2), Q <sub>4</sub> (2)
S <sub>4</sub>	2	Q <sub>4</sub>	Q <sub>2</sub> (1), Q <sub>3</sub> (2), Q <sub>5</sub> (3)

Table 4. Example of opportunity cost matrix at step 2

Ship \ Quay	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	Q <sub>5</sub>
S <sub>1</sub>	1+2		2+2	3+2	
S <sub>2</sub>	1+3		2+3		3+3
S <sub>3</sub>		1+1	2+1	2+1	
S <sub>4</sub>		1+2	2+2		3+2
TS <sub>5</sub>					

TS : Temporary Ship.

Table 5. Example of opportunity cost matrix at step 3

Ship \ Quay	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	Q <sub>5</sub>
S <sub>1</sub>	3	M	4	5	M
S <sub>2</sub>	(4 →)1	M	5	M	6
S <sub>3</sub>	M	2	(3 →) 1	3	M
S <sub>4</sub>	M	3	4	M	(5 →)1
TS <sub>5</sub>	M	M	M	M	M

본 논문에서는 <Table 5>와 같은 할당 문제의 기회비용 행렬이 주어지면, 헝가리언 기법으로 각 선박이 배치될 안벽을 결정한다. 그리고 이렇게 결정된 선박의 안벽배치 결과에 대해 제 2절에서 언급한 기술적인 제약조건을 만족하는지를 주어진 선박의 배치 우선순위에 따라 선박을 하나씩 차례대로 정해진 안벽에 배치하면서 확인한다. 이 때, 임의의 선박이 헝가리언 기법으로 결정된 안벽에 배치되는데 필요한 기술적인 제약 조건들은 만족하지 못하면 해당 선박의 후보 안벽에서 해당 안벽을 제외시킨다. 그리고 다시 할당 문제의 기회비용 행렬을 재구성하여 헝가리언 기법으로 선박의 안벽배치 결과를 다시 구한다. 그리고 헝가리언 기법에 의한 선박의 안벽배치 결과 그 결과에 대한 기술적인 제약조건의 검사를 반복적으로 수행하면서 임의의 선박에 대해 배치 가능한 안벽이 없어지게 되면, 해당 선박은 주어진 안벽배치 시점에서 배치가 불가능하다고 판단하고 '미배치' 안벽에 배치한다. 선박의 배치 우선순위가 주어진 상황에서 선박의 안벽배치를 결정하는 절차는 <Figure 11>과 같다.

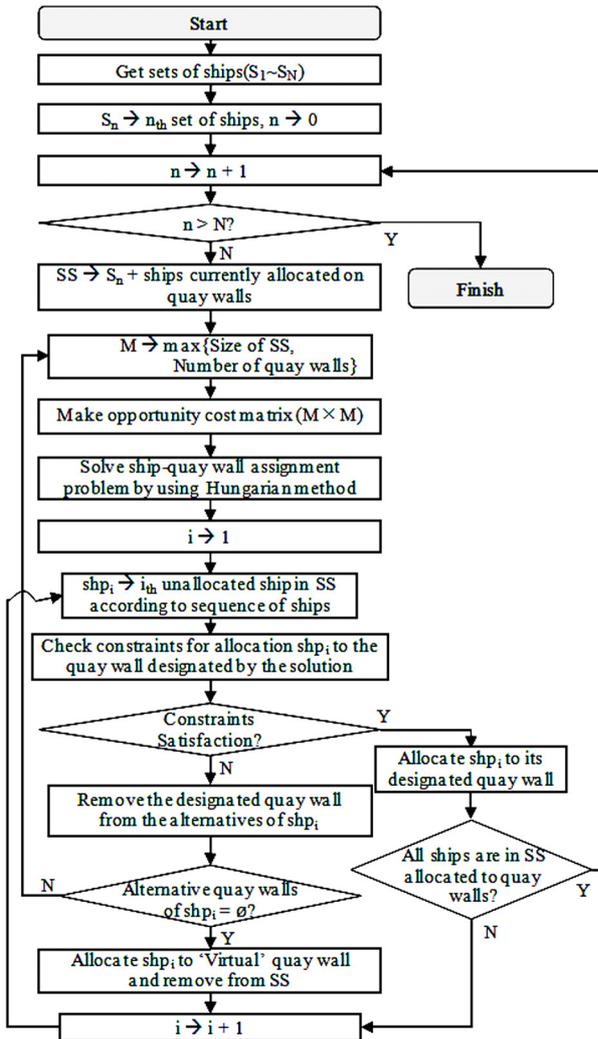


Figure 11. Procedure of ship-quay wall assignment using Hungarian method

#### 4. 선박의 안벽배치 알고리즘 구현

본 논문에서 제안된 알고리즘은 안벽배치 계획 시스템으로 구현되어 'H'사의 선박건조에 대한 기본계획 수립에 적용되고 있다. 1년치 이상의 기간에 해당하는 안벽배치 계획을 수립 및 검토하는데 기존에는 몇 주 이상의 기간이 소요되었지만 시스템 도입을 통해 하루 이내에 안벽배치 계획을 수립하고 확정할 수 있게 되었다.

<Figure 12>는 본 논문에서 개발한 모형을 통해 수립한 선박의 안벽배치 계획 결과를 보여준다. 계획기간 동안에 선박이 안벽에 배치되지 않는 기간을 최소화하도록 하였으며, 안벽에 배치되지 않은 선박은 최하단에 별도로 배치하여 계획 담당자가 신속한 대안을 수립할 수 있도록 하였다. <Figure 13>은 선박들이 안벽에 미배치되는 일수의 합을 최소화하는 타부서치 알고리즘의 개선 과정을 보여준다.

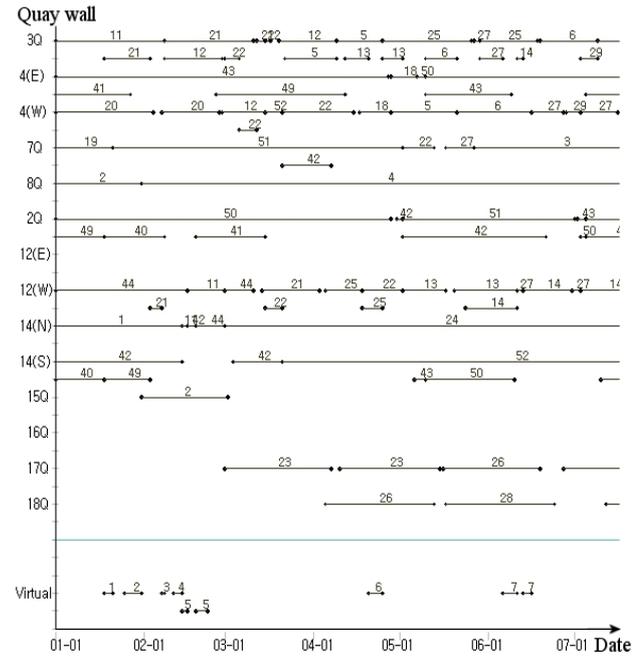


Figure 12. Gantt chart of Quayside operations schedule

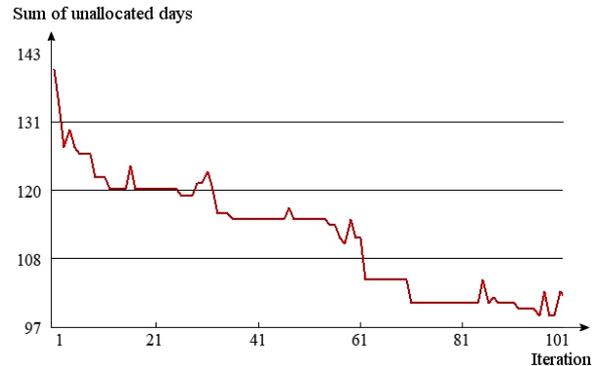


Figure 13. Graph of the improvement process of the tabu search algorithm (sum of unallocated days)

한편, 본 논문에서 개발한 선박의 배치 우선순위 최적화에 대한 타부서치 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 다음과 같은 규칙으로 선박의 배치 우선순위를 정한 경우와 비교하였다.

- 1) Earliest Launching Date first(ELD) :  
선박 배치우선 순위를 진수일이 빠른 순으로 결정
- 2) Earliest Delivery Date first(EDD) :  
선박 배치우선 순위를 인도일이 빠른 순으로 결정

본 논문에서 실험은 Intel(R)-Xeon(R) CPU 2.33GHz 컴퓨터에서 각 비교대상 방법을 Visual Basic 6.0으로 구현하여 실시하였다. 실험 조건은 다음과 같다.

- 1) 계획수립 기간 : 1년
- 2) 안벽 수 : 30개
- 3) 선박 수 : 60~70
- 4) 선박별 안벽작업 수 : 4~6
- 5) 안벽작업별 공기 : 20~50일
- 6) 선박별 대안 안벽 수 : 2~20
- 7) 선박타입 수 : 10~20

선박의 안벽배치 우선순위를 최적화하기 위한 타부서치 알고리즘의 파라미터 설정은 다음과 같다.

- 1) Number of iterations : 100
- 2) Neighborhood operator : swapping
- 3) Neighborhood size : 10
- 4) Tabu tenure : 15

본 논문에서는 H사의 3년간의 선박 도크계획 10개를 실험 대상으로 정하였다. 그리고 각 선박 도크계획을 연도별 구분하여 3개의 실험 데이터를 만들어 하나의 실험군을 구성하여 실험을 실시하였다.

<Table 6>은 앞서 언급한 ELD, EDD 모형과 본 논문에서 개발한 모형과의 결과를 비교한 것이다. <Table 6>의 각 규칙에 대한 결과 데이터는 3년간의 안벽배치 계획기간 동안 발생한 총 미배치 일수를 나타낸다. 그리고 <Table 6>의 [Improvement rates] 열은 ELD와 EDD 모형과 대비하여 타부서치 모형의 개선 비율을 나타낸 것이다. 개선 비율은 식 (1)과 같이 계산된다.

$$\frac{\text{Min}\{ELD, EDD\} - \text{Tabu}}{\text{Min}\{ELD, EDD\}} \times 100\% \quad (1)$$

10개의 실험군에 대한 실험 결과는 개발 모형이 나머지 두 방법보다 평균 14.8% 정도의 우수한 결과를 보였다. 이를 통해 개발한 모형이 선박의 안벽배치 계획수립 단계에서 문제였던 선박의 안벽 미배치 현상을 최소화하는데 효과적인 결과를 제시한다고 볼 수 있다.

**Table 6.** Comparison of results from models

No.	ELD	EDD	Tabu	Improvement rates(%)
1	95	119	80	15.8
2	118	144	102	13.6
3	47	68	41	12.8
4	32	48	24	25.0
5	88	101	79	10.2
6	163	135	120	11.1
7	167	188	151	9.6
8	102	98	87	11.2
9	98	83	63	24.1
10	91	111	78	14.3

## 5. 결론 및 향후 연구

지금까지 선박건조와 관련하여 선박의 안벽배치 문제에 대한 연구는 많지 않았다. 하지만, 건조할 선박의 종류가 달라짐에 따라 안벽이 부족하게 되어 선박의 안벽배치는 선박건조의 기본계획 수립과정에서 반드시 검토되어야 하는 문제가 되었다.

본 논문에서는 선박의 건조 과정 중의 안벽공정에서 필요한 선박의 안벽배치 문제를 다루었다. 안벽작업 공정에서 선박을 안벽에 배치하는 문제를 해결하기 위해 기회비용 행렬을 구성하는 방법을 제시하였다. 그리고 배치 문제를 활용하여 선박을 안벽에 배치하는 알고리즘을 제안하였다. 또한 안벽배치에 따른 제약조건들을 반영하면서 개선된 안벽배치 계획을 도출하기 위해 타부서치 알고리즘을 적용하였다.

본 논문에서 제안한 알고리즘은 선박선조의 기본계획 단계에서 안벽배치 계획수립에 효과적으로 적용할 수 있을 것으로 기대한다.

향후 연구로는 안벽배치 계획의 다양한 목적을 반영한 휴리스틱 알고리즘 개발이 추가적으로 필요하다. 그리고 선박의 최적 배치 우선순위의 효과적인 탐색을 위한 다양한 메타 휴리스틱 방법과 이를 응용한 하이브리드 기법에 대한 개발이 필요하다. 또한 선박의 도크배치 계획과 안벽배치 계획을 연계한 선박건조의 기본계획 수립 방법에 대한 연구가 필요하다.

## 참고문헌

- Ahn, N.-S., Kang, J.-Y., Hong, S.-I., Choi, H.-Y., and Park, S.-S. (2007), An Algorithm for the Quay Assignment Scheduling Problem in Shipbuilding Industry, Proceedings of 2007 KIIE Fall Conference.
- Imai, A., Nishimura, E., and Papadimitriou, S. (2003), Berth Allocation with Service Priority, *Transportation Research, Part B* 37, 437-457.
- Jung, I., Yeo, S., Wang, G., Han, K., and Lee, J. (2008), Generating Heuristic Rule for Efficient Quay Assignment of Ships. *International Conferences on Computational Intelligence for Modeling, Control*

- and Automation; Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce; and Innovation in Software Engineering, 726-731.
- Ha, B.-H. and Kim, S.-S. (2012), A\* Algorithm for Optimal Intra-bay Container Pre-marshalling Plan, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, **38**(2), 157-172.
- Kim, K.-H. and Moon, K.-C. (2003), Berth Scheduling by Simulated Annealing, *Transportation Research, Part B* **37**, 541-560.
- Kim, Y.-M. (2009), An Optimization of Ship Building Mix under N Different Docks, *IE Interfaces*, **22**(1), 38-43.
- Koh, S.-G., Jang, J.-H., Choi, D.-W., and Woo, S.-B. (2011), Spatial Scheduling for Mega-block Assembly Yard in Shipbuilding Company, *IE Interfaces*, **24**(1), 78-86.
- Lee, D.-H. and Bae, H.-R. (2013), Analysis Framework using Process Mining for Block Movement Process in Shipyards, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, **39**(6), 577-586.
- Lee, S.-H., Kim, J.-O., and Moon, I.-K. (2011), Deployment Planning of Blocks from Storage Yards Using a Tabu Search Algorithm, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, **37**(3), 198-208.
- Lee, S.-W. (2011), A Genetic Algorithm for the Container Pick-Up Problem, *IE Interfaces*, **24**(4), 362-372.
- Lim, A. (1998), The Berth Planning Problem, *Operation Research Letters*, **22**, 105-110.
- Moccia, L., Cordeau, J. F., Gaudioso, M., and Laporte, G. (2006), A Branch-and-Cut Algorithm for the Quay Crane Scheduling Problem in a Container Terminal, *Naval Research Logistics*, **53**, 45-59.
- Nishimura, E., Imai, A., and Papadimitriou, S. (2001), Berth Allocation Planning in the Public Berth System by Genetic Algorithms, *European Journal of Operational Research*, **131**, 282-292.
- Park, C.-G. and Seo, J.-Y. (2009), On the Assembly Block Storage Location Assignment Problem, *IE Interfaces*, **22**(2), 116-125.
- Park, Y.-M. and Kim, K.-H. (2003), A Scheduling Method for Berth and Quay Cranes, *OR Spectrum*, **25**, 1-23.