

컨테이너 선적을 위한 겐트리 크레인 작업 스케줄링

신 재 영* · 이 광 인** · 하 태 영***

The Crane Scheduling for Containership Stowage Planning

Shin, Jae-Yeong · Lee, Kwang-In · Ha, Tae-Yeong

Abstract

본 연구에서는 컨테이너 적·양하 계획 수립 시에 본선 하역의 주된 작업을 맡고 있는 겐트리 크레인(Gantry Crane)의 작업 스케줄링 문제를 다루고 있다. 전체 작업 물량을 각 크레인별로 평준화하여 전체 하역 작업 시간을 최소화하는 것을 목적으로 한다. 이 문제가 일반적이 라인밸런싱 문제와 다른 점은 크레인 작업이 서로 교차되지 말아야 하며, 크레인 간섭을 방지하기 위해서 크레인 간의 최소 작업 간격을 유지해야 한다는 점이다. 본 논문에서는 컨테이너 터미널에서 하역 작업시 전체 작업시간을 단축시킬 수 있도록 겐트리 크레인의 작업 계획을 수립하는 계량적 모형과 해법을 제시하였다. 본 모형은 실제 선박 적·양하 계획 모형의 일부로 활용될 수 있다.

1. 서 론

컨테이너 터미널의 하역 작업의 생산성과 관련된 주요 의사결정문제로는 선박의 선석 할당 계획, 컨테이너 장치장 배정 계획, 그리고 선박의 컨테이너 적·양하 계획 등이 있다. 선석 배정 계획은 하역 계획의 첫 단계로서 터미널에 입항하는 선박에 대한 정보를 사전에 입수하여 수집된 입항 정보를 토대로 해당 선박에 적절한 터미널내의 빈 선석을 배정하는 것이다. 장치장 배정 계획은 터미널 장치장 공간의 효율적인 이용과 기타 하역 작업의 신속성을 도모하기 위한 장치장 내의 컨테이너 보관 위치를 결정하는 것을 말한다. 선박에서의 컨테이너 적·양하 계획은 본선에 적재되어 있는 컨테이너의 양하와 적하의 작업순서를 본선의 안정도와 작업 효율을 고려하여 수립하는 것이다. 본 연구에서는 컨테이너 적·양하 계획 수립 시에 본선 하역의 주된 작업을 맡고 있는 겐트리 크레인(Gantry Crane)의 하역 작업 배정 계획을 다루고자 한다.

* 한국해양대학교 물류시스템공학과 부교수

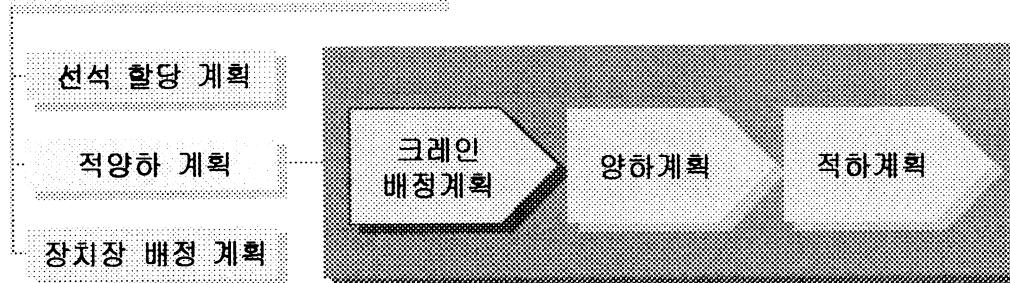
** 한국해양대학교 물류시스템공학과 대학원

*** 한국해양대학교 물류시스템공학과 대학원

일반적으로, 선박의 적·양하 계획을 수립하기 위해서는 먼저 컨테이너를 선박으로부터 적·양하하는 젠트리 크레인의 작업 계획이 선행되어야만 한다. 하역작업에 투입되는 크레인 장비의 대 수와 투입 시각이 미리 정해지고 선사로부터 선박에 대한 적·양하 컨테이너 정보가 입수되면, 효율적인 하역작업을 위한 크레인의 본선 배정 계획이 수립되게 된다. 일반적으로 크레인 작업은 선박의 선창(Hatch) 단위로 이루어지게 되며, 가능하면 작업량을 투입된 크레인별로 평균화하여 전체 하역 작업 시간을 최소화하도록 계획된다. 이 문제가 일반적인 생산관리의 작업평준화(Line Balancing) 문제와 크게 다른 점은 크레인간에 작업 교차가 허용되지 않으며 최소 작업 간격을 유지해야 한다는 점이다. 젠트리 크레인에 의한 하역은 기본적으로 선박의 Hatch 단위로 작업이 진행되며, 현재의 Hatch에서 작업이 완료되면 이웃 Hatch로 옮겨가는 것이 일반적이다. 따라서 각 크레인에 배정되는 작업은 연속된 Hatch의 묶음이 된다고 할 수 있다. 그러므로 계획에 수립되는 작업 할당도 연속된 Hatch로 작업을 할당하되, 다만 Hatch 단위로는 물량분배를 균등하게 하지 못할 경우에 특정 Hatch를 두 대의 크레인이 Deck와 Hold로 나누어 작업할 수 있도록 한다. 그리고 크레인의 작업 도중에 이웃한 크레인간의 간격이 지나치게 가까울 경우에는 크레인간의 간섭이 발생하여 작업이 원활하게 이루어지지 못하게 된다. 따라서 이를 방지하기 위해서는 이웃한 크레인간의 최소 작업 간격을 유지할 수 있도록 크레인 배정 계획을 수립하여 작업의 지연을 최소화해야 한다.

본 논문에서는 컨테이너 터미널에서의 하역 작업시 전체 적·양하 작업시간을 단축시킬 수 있도록 젠트리 크레인의 작업 계획을 수립하는 계량적 모형과 해법을 제시하고자 한다. 제시된 모형과 해법은 실제 선박 적양하 계획 모형의 일부로 활용될 수 있다.

컨테이너 터미널 운영계획



〈그림 1〉 컨테이너 터미널 운영계획에서 크레인 배정계획

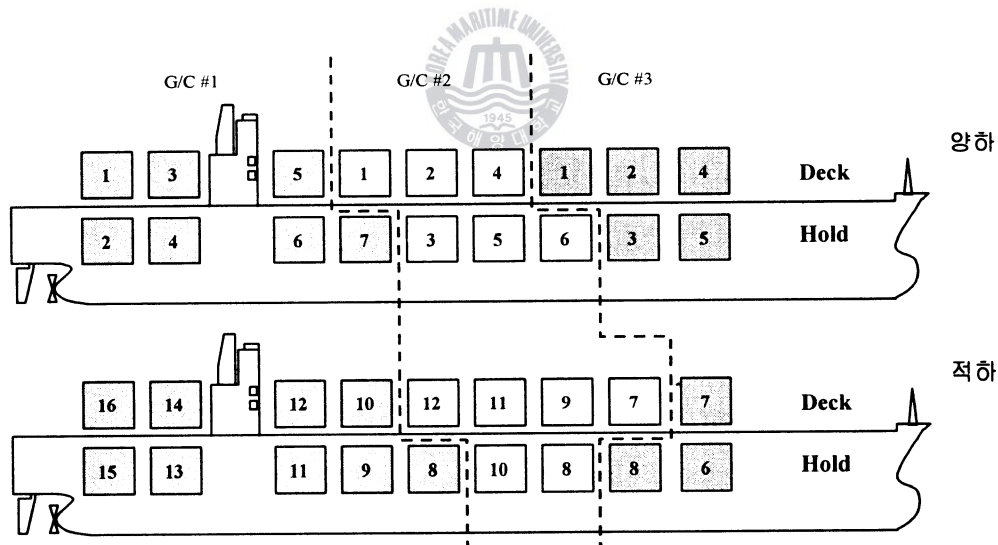
2. 모형화

본 논문에서 고려하는 모형은 선박의 하역 시간을 최소화하는 컨테이너 크레인의 배정 계획을 위한

것이다. 모형에서 고려한 가정 및 제약조건은 다음과 같다.

- 크레인의 작업은 Hatch 단위로 이루어진다.
- 하나의 Hatch에 대해서 Deck와 Hold의 물량을 각각 상이한 두 대의 크레인이 분리하여 작업할 수 있다.
- 크레인 작업은 양적하 작업을 모두 고려하며, 각 크레인 별로 양하 작업이 적하 작업에 선행된다.
- 양하 작업시에는 Deck의 작업이 Hold의 작업에 선행되며, 적하 작업시에는 그 반대로 작업이 이루어진다.
- 한 대의 크레인이 담당하는 Hatch는 연속되어 있어야 하며, 크레인 간에 작업이 교차되지 않는다.
- 크레인의 본선 작업 투입 시각은 상이할 수 있으며, 종료시간에 관한 제약은 없는 것으로 한다.
- 크레인 간의 간섭을 고려하여 크레인 간에는 최소 작업 거리를 유지한다.
- 크레인의 성능은 동일한 것으로 간주한다.
- 양하는 선미에서 선수방향으로, 적하는 선수에서 선미방향으로 한다.

일반적인 크레인 배정 계획의 결과를 그림으로 도식화하면 <그림 2>와 같다.



<그림 2> 겐트리 크레인 배정 계획

본 모형에서 사용하는 모수와 변수들은 다음과 같이 정의된다.

n = 작업 대상 지점의 수

m = 작업 크레인의 대수

a_i = i 지점의 작업 요구 시간

D = 간섭이 발생하는 작업지점 (i,j)의 집합

$$x_i^k = \begin{cases} 1, & \text{if } i \text{ 지점을 } k \text{ crane에 할당.} \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

t_i = i 지점에서 작업이 시작되는 시간

T = 총 작업 완료 시간

위에서 정의한 모수와 변수를 이용하여 아래와 같은 혼합정수계획 모형을 수립할 수 있다.

$$\text{Minimize } T \tag{1}$$

Subject To

$$x_{i+2}^1 \leq x_i^1, \quad i=1,2,\dots,n-2 \tag{2}$$

$$x_{i+2}^k \leq x_i^{k-1} + x_i^k, \quad i=1,2,\dots,n-2, \quad k=2,3,\dots,m \tag{3}$$

$$x_{i+2}^m \leq x_i^m, \quad i=n+1,n+2,\dots,2n-2 \tag{4}$$

$$x_{i+2}^k \leq x_i^{k+1} + x_i^k, \quad i=n+1,n+2,\dots,2n-2, \quad k=1,2,\dots,m-1 \tag{5}$$

$$\sum_k x_i^k = 1, \quad i=1,2,\dots,2n \tag{6}$$

$$t_i + a_i \leq T, \quad i=1,2,\dots,2n \tag{7}$$

$$t_i + a_i \leq t_{i+1}, \quad i=1,3,\dots,2n-1 \tag{8}$$

$$x_i^k = 1 \text{ and } x_j^k = 1 \rightarrow t_i + a_i \leq t_j, \quad i=1,\dots,2n-1, \quad j=i+1,\dots,2n, \quad \forall k \tag{9}$$

$$x_i^k = 1 \text{ and } x_j^k = 1 \rightarrow t_j + a_j \leq t_i \text{ or } t_i + a_i \leq t_j, \quad \forall (i,j) \in D, \quad \forall k \neq j \tag{10}$$

$$t_i + a_i \leq t_{2n-i+1}, \quad i=1,2,\dots,n \tag{11}$$

$$t_i \geq 0, \quad i=1,2,\dots,2n \tag{12}$$

$$x_i^k \in \{0,1\}, \quad i=1,2,\dots,2n, \quad k=1,2,\dots,m \tag{13}$$

본 모형의 제약식 (7) 은 투입된 크레인들의 작업량을 평준화하여 선박의 전체 적양하 작업에 소요 되는 시간을 최소화하는 것이다. 제약식 (2) 와 (3) 은 양하 작업시에 크레인의 위치를 고려하여 작업 지점을 블록으로 할당하는 제약이며, 이와 유사하게 제약식 (4) 와 (5) 는 적하 작업에 적용된다. 제약식 (6) 은 선박의 모든 컨테이너 적양하 작업이 한 대의 크레인에 의하여 반드시 처리되어야 한다는 제약이다. 제약식 (8) 은 동일한 hatch 내에서 deck와 hold 순서로 양하 작업이 진행되며, 적하 작업은 hold와 deck 순서로 이루어진다는 제약이다. 제약식 (9) 는 각 크레인별로 양하는 선미에서 선수 방향으로, 적하는 선수에서 선미 방향으로 이루어진다는 제약이다. 아울러 각 크레인별로 할당된 양하 작업이 모두 처리된 이후에 적하 작업을 시작할 수 있다는 제약도 포함한다. 제약식 (10)

은 각 크레인간의 간섭을 방지하기 위한 제약이며, 제약식 (11)은 동일한 작업 지점에 대하여 양하 이후에 적하 작업이 이루어질 수 있다는 제약이다.

위에서 제시한 모형은 약간의 변형에 의해 쉽게 일반화할 수 있다. 먼저 작업의 순서가 양하의 경우 항상 선미에서 선수 방향으로, 그리고 적하의 경우는 그 반대 방향으로만 이루어지는 것이 아니라면 제약식 (9)를 제약식 (10)과 같은 OR 제약식의 형태로 변경하면 된다. 작업 순서가 한 방향으로만 이루어지는 것이 아니라면 Hatch 간의 이동에 따른 시간이 필히 고려되어야 하는데, 이는 a_i 에 이동시간 (m_{ij})을 더하여 $a_i + m_{ij}$ 로 하면 된다. 각 크레인 별로 작업 효율이 다른 경우라면 t_i, a_i, m_{ij} 를 t_i^k, a_i^k, m_{ij}^k 로 수정하면 된다.

3. 모형의 검증

본 논문에서 수립한 모형의 타당성을 검증하기 위하여 실제 자료를 이용하여 결과를 분석하였다. 적용된 자료에서 선박은 총 10개의 Hatch로 구성되어 있으며, 7개 Hatch에서 적하와 양하 작업이 이루어진다. 적양하 작업은 항만에 설치된 두 대의 겐트리 크레인이 작업을 진행한다. 적양하 작업 물량과 전체 자료를 도식화하면 아래의 <표 1>과 같다.

<표 1> 대상 선박의 구조와 적양하 작업 자료

Hatch No.	10		9		8		7		6		5		4		3		2		1	
양하(D)/적하(L)	D	L	D	L	D	L	D	L	D	L	D	L	D	L	D	L	D	L	D	L
Deck	0	0	0	0	23	13	19	9	11	11	6	16	39	39	12	12	12	12	0	0
Hold	0	0	0	0	16	16	32	32	10	14	33	33	40	40	34	34	40	40	0	0

→ 선수 방향

제안된 모형을 실제로 적용하기 위하여 대상 선박의 구조와 적양하 작업에 관한 자료를 변환하는 과정이 요구된다. 양하의 경우는 선미에서 선수 방향으로 Deck와 Hold순으로 1번부터 일련 번호를 부여한다. 적하의 양하와 반대로 선수에서 선미 방향으로 Hold와 Deck순으로 번호가 부여되며, 양하 시의 마지막 번호부터 시작한다. 변환 과정 이후에 모형에 적용된 자료는 <표 2>와 같다.

<표 2> 모형 적용을 위해 변환된 자료

Hatch	양 하														적 하													
	8		7		6		5		4		3		2		2		3		4		5		6		7		8	
D/H	D	H	D	H	D	H	D	H	D	H	D	H	D	H	H	D	H	D	H	D	H	D	H	D	H	D	H	D
i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
ai	23	16	19	32	11	10	6	33	39	40	12	34	12	40	40	12	34	12	40	39	33	16	14	11	32	9	16	13

상기의 자료를 이용하여 모형을 적용한 결과는 아래의 <표 3>과 같으며, 결과의 타당성 여부를 살펴보면 다음과 같다. 두 대의 젠트리 크레인이 대상 선박의 전체 컨테이너를 적양하 하기 위하여 총 328 시간이 요구된다. 각 크레인의 양하 작업은 선미에서 선수 방향으로 진행되었고, 적하 작업은 반대로 이루어진다. 동일 hatch 내에서 양하 작업은 deck와 hold 순서로 진행되었으며, 적하 작업은 이와 반대이다. 또한, 선박의 동일한 작업 위치에 대하여 양하 작업이 이루어진 이후에 적하 작업이 이루어진다. 두 대의 크레인간 최소 작업거리를 1 hatch로 적용하였을 때, 각 크레인이 적양하 작업을 진행하는 동안에 간섭이 발생하지 않았다.

<표 3> 크레인 작업 계획의 결과

적/양하	Deck/Hold	Hatch No.	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
양 하	Deck	G/C	-	-	1	1	1	2	2	2	2	-
		Seq.	-	-	1	3	5	1	3	5	7	-
		ti	-	-	0	39	90	0	14	93	139	-
	Hold	G/C	-	-	1	1	1	1	2	2	2	-
		Seq.	-	-	2	4	6	7	2	4	6	-
		ti	-	-	23	58	101	111	53	105	151	-
적 하	Deck	G/C	-	-	1	1	1	1	2	2	2	-
		Seq.	-	-	16	14	12	10	12	11	9	-
		ti	-	-	315	290	247	217	289	277	231	-
	Hold	G/C	-	-	1	1	1	1	1	2	2	-
		Seq.	-	-	15	13	11	9	8	10	8	-
		ti	-	-	299	258	233	184	144	243	191	-

4. 해 법

앞에서 제시한 크레인 배정계획 수립을 위한 혼합정수계획 모형은 실제 업무에 적용할 경우에 변수의 수가 급증하게 되어, 해를 구할 수 없거나 매우 오랜 계산시간을 요구하게 된다. 이에 본 논문에서는 의미 있는 시간 내에 효율적인 계획을 수립할 수 있는 탐색적 해법을 개발하였으며, 해법의 전반적인 과정들을 Pseudo Code로 표현하면 다음과 같다.

<해법에 대한 Pseudo Code>

{ Calculate bound $b(0)$, $b(1)$ }

for $I := 0$ to 1 do

begin

{ Initialize k and s }

```

for j := 1 to n do
begin
  s := s + a[i, j];
  if { s exceed the bound b(i) } then
    { Assign s to crane k }
    s := 0;
  else
    { Assign s - a[i, j] to crane k }
    a := a[i, j];
  end if
  { Increase k }
end;
end;
while { exist exchangeable job } do
begin
  T1 := T;
  repeat
    { Select exchangeable job i }
    { Exchange selected job i }
    { Calculate ending time T2 }
    if T2 < T1 then
      T1 := T2;
      j := i;
    end if
  until {All exchangeable job checked};
  if T1 < T then
    { Exchange job j }
    T := T1;
  end if
end;
end;

```



본 연구에서 제시한 해법은 크게 두 단계로 구성되어 있으며, 각 단계를 대략적으로 살펴보면 다음과 같다. 첫 번째 단계에서는 투입한 G/C별로 적양하 작업이 되도록 균등하게 이루어지도록 적양하 물량에 대한 한계치를 계산하며, 이를 기초로 하여 초기해를 도출한다. 두 번째 단계에서는 제약조건을 만족하는 범위 내에서 인접한 두 G/C간에 작업들을 교환하여 초기해를 개선한다.

〈표 4〉 탐색적 해법의 적용 사례 및 결과 비교

a. 최적해법 결과

적/양하	Deck/Hold	Hatch No.	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
양 하	Deck	Seq.	-	-	1	3	5	1	2	4	6	-
		ti	-	-	0	39	90	0	14	93	139	-
	Hold	Seq.	-	-	2	4	6	7	3	5	7	-
		ti	-	-	23	58	101	111	53	105	151	-
적 하	Deck	Seq.	-	-	16	14	12	10	12	11	9	-
		ti	-	-	315	290	247	217	289	277	231	-
	Hold	Seq.	-	-	15	13	11	9	8	10	8	-
		ti	-	-	299	258	233	184	144	243	191	-

b. 탐색적 해법의 결과

적/양하	Deck/Hold	Hatch No.	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
양 하	Deck	Seq.	-	-	1	3	5	1	2	3	5	-
		ti	-	-	0	39	90	0	6	45	91	-
	Hold	Seq.	-	-	2	4	6	7	8	4	6	-
		ti	-	-	23	58	101	111	144	57	103	-
적 하	Deck	Seq.	-	-	16	14	12	10	12	10	8	-
		ti	-	-	315	290	247	217	281	229	183	-
	Hold	Seq.	-	-	15	13	11	9	11	9	7	-
		ti	-	-	299	258	233	184	241	195	143	-

3장에서 모형의 검증에 사용된 자료에 탐색적 해법을 적용하여 결과를 분석하고 최적해와 비교하여 보았으며, 그 내용은 〈표 4〉와 같다. 또한, 다양한 형태의 문제를 임의로 생성하여 해법을 적용하여 해를 도출하였으며, 그 결과는 〈표 5〉와 같다.

〈표 5〉 탐색적 해법의 계산 결과

Case	G/C 수	Hatch 수	총물량	G/C 1	G/C 2	G/C 3	G/C 4	근사해	최적해
1	2	7	648	328/0	320/0	-	-	328	328
2	3	7	648	253/14	266/7	223/199	-	266	266
3	4	7	648	160/0	239/25	253/3	223/199	253	248
4	2	10	933	459/0	747/0	-	-	474	474
5	3	10	933	328/11	328/11	288/0	-	328	328
6	4	10	933	253/14	254/7	250/23	242/22	254	248
7	2	14	1330	664/0	666/0	-	-	666	666
8	3	14	1330	452/0	430/0	448/0	-	452	452
9	4	14	1330	373/0	363/0	369/0	273/48	373	354
10	2	16	1460	736/0	724/0	-	-	736	736
11	3	16	1460	498/0	494/0	468/0	-	498	494
12	4	16	1460	407/0	401/0	404/0	332/84	407	407
13	2	20	1874	933/0	941/0	-	-	941	941
14	3	20	1874	636/0	632/0	606/0	-	636	636
15	4	20	1874	486/0	480/0	485/0	423/0	486	479

5. 결 론

컨테이너 하역작업의 주요한 역할을 하는 젠트리 크레인의 작업 개선은 선박의 재항 시간을 단축시키고 항만의 생산성을 높이기 위한 효율적인 수단이라 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서 다루어진 컨테이너 적·양하를 위한 크레인 배정계획은 실제 적용에 있어서도 선박의 하역작업을 신속하게 하고 작업의 안전성을 위해 효율적인 방안으로 볼 수 있다. 선박의 대형화가 계속되고 적·양하 컨테이너 물량이 증가함에 따라 본 모형의 유용성이 증가할 것으로 생각된다. 모형의 특성을 고려한 최적 해법에 관해서 추후 연구되어야 할 것으로 본다.

참 고 문 헌

1. Daganzo, C.F.(1989), "The Crane Scheduling Problem", Transportation Research B, Vol.23B, No.3, pp.159-175.
2. Daganzo, C.F. and R.I. Peterkofsky(1990), "A Branch and Bound Solution Method for the Crane Scheduling Problem", Transportation Research B, Vol.24B, pp.159-172.
3. 광규석, 신재영, 남기찬(1996), 효율적인 컨테이너 터미널 계획 및 운영을 위한 모형개발, 건설교통부.
4. 신재영(1996), "컨테이너 크레인 최적 운전시간의 시뮬레이션을 위한 의사결정지원시스템", 한국항만학회, 제10권, 제2호, pp.43-50.
5. 신재영, 광규석, 남기찬(1996), "컨테이너 터미널 선적계획 의사결정지원시스템", 한국항만학회 96년도 학술발표회 강연논문초록집, pp.36-41.
6. 신재영, 이광인, 하태영(1998), "컨테이너 적·양하를 위한 크레인 배정 계획", 한국항만학회 98년도 학술발표회 강연논문집, pp.14-17.

