Journal of the Korean Institute of Navigation
Pusan Korea, Vol. 25, No. 1, pp. 23~32, 2001

선석할당 계획문제의 최적화에 관한 연구

김시화* · 김대상**

A Study on the Optimization of Berth Planning Problem

*Si-Hwa Kim** · *Dae-Sang Kim***

〈목 차〉

Abstract
1. 서 론
2. 선행연구개관
3. 선석할당 계획문제(BPP)의 최적화
4. 실험 및 검토
5. 결 론
참고문헌

요 약

이 논문은 공공 컨테이너 터미널에서 직면하는 선석할당 계획문제를 다루고 있다. 선석할당 계획문제의 주된 논점은 ETA가 주어진 컨테이너 선박들을 어떻게 선석에 할당할 것인가를 결정하는 것이다.

선석할당 계획문제의 세 가지 최적화 모형들은 집합 문제 유형으로 정식화시켜 제시하였다. 또한, 제안된 최적화 모형의 의사결정 변수를 생성하기 위한 경험론적 알고리듬은 선박의 대기시간과 선석 점유율을 사용하여 고안하였다.

계산 실험은 실제 공공 컨테이너 터미널의 데이터로 수행하였으며, 그 결과들은 제안된 최적화 모형들과 경험론적 알고리듬들이 공공 컨테이너 터미널의 선석할당 계획문제에 대하여 유용하게 적용될 수 있음을 제시하고 있다.

Abstract

This paper treats the berth planning problem which is encountered at public container terminals. The main issue of the berth planning problem is to decide how to allocate the berths to scheduled calling containerships of which the ETA's are given beforehand.

* 정회원, 한국해양대학교 해사수송과학부 교수
** 정회원, 한국해양대학교 해사수송과학부 대학원 졸업

Three optimization models for the berth planning problem are proposed in the formulation of set problems. Some heuristic algorithms for generating the decision variables of the models are also devised by using the concept of the ship's waiting time and the modified berth occupancy rate.

Computational experiments based on the data arising from the real public container terminal are also carried out and the results are reported to show that the proposed optimization models and the heuristic algorithms for generating the decision variables are applicable and useful for the berth planning problem at public container terminals.

1. 서 론

선석할당 계획문제(Berth Planning Problem)란, 항만에서 발생하는 계획문제 중의 하나로 특정한 접안조건이 주어진 선석에 접안시킬 수 있는 선박을 결정하는 것이다. 여기서 접안 조건은 선석과 선박의 데이터로 주어지는데, 선석의 개수와 길이 및 계획기간과 선박의 척수와 길이, 선박도착예정시각(ETA), 접안시간, 화물의 종류 등을 의미한다.

항만의 체선율을 감소시키기 위한 방법으로는 기존항만의 재개발 및 효율적인 운영계획수립과 신항만의 개발 등이 있을 것이나, 여기에서는 기존항만의 효율적인 운영계획수립이라는 관점에서 선석할당 계획문제(BPP)를 다룬다. 본 연구의 목적은 공공터미널을 대상으로 선석할당 계획문제(BPP)의 최적화모형과 해법을 제시하고 이를 바탕으로 실제 문제에 적용함으로써, 터미널운영자의 의사결정을 보다 합리적으로 지원할 수 있음을 보여주는 것에 있다.

본 연구에서는 집합문제 유형의 해법에 가장 적절하다고 판단되는 LP 완화 기반의 LINDO 프로그램을 사용한다. 또한, 실제 문제에 적용된 신선대컨테이너터미널(PECT)의 데이터로 기초 계산실험과 다양한 계산실험을 행하여 비교 분석한다. 이러한 연구 방법에 따라 제 1장 서론에 이어, 제 2장에서는 선석할당 계획문제(BPP)에 대한 최적화 분석방법 및 관련 최적화 모형의 해법 등에 관한 선행 연구들을 살펴본다. 제 3장에서는 선석할당 계획문제(BPP)의 최적화모형과 최적해를 구하기 위하여 선행되어야 할 선석할당 가능스케줄 생성 알고리듬을 제시하고, 제 4장에서는 실제 사용된 신선대컨테이너터미널(PECT)의 데이터로 기초 계산실험과 다양한 계산실험의 결과를 비교분석하고, 마지막으로, 제 5장은 결론을 다루는 것으로 구성되어 있다.

2. 선행 연구 개관

선석할당 계획문제(BPP)의 최적화모형에 관한 초기 연구로는 Nagaiwa와 Imai(1994)가 제시한 선박의 도착순서를 고려하지 않고 무작위로 할당하는 Random 방식과, 선박의 도착순서로 할당하는 First In 방식, 그리고 이와 반대로 하역을 끝내고 출항하는 선박의 순서로 할당 First Out 방식 등이 있다. 또한, 이와는 다르게 특수한 목적(해군터미널대상)을 가지고 0-1 정수 계획모형으로 해결한 Brown과 Lawphongpanich(1994)이 있다.

이후 이(1996)는 Nagaiwa 와 Imai(1994)의 모형을 개선하여 공공 터미널에서의 선석할당 계획문제(BPP)를 0-1 정수 계획모형으로 제시하여 해결하였는데, 이것의 목적함수는 선박의 총 재항시간[1]을 최소화시키는 형태로 표현하였으며, 선박과 공공 컨테이너터미널 운영자의 서로 다른 입장을 MPS(Maximum Position Shift)[2] 개념으로 해결하였다. 이후 몇몇 연구에서는 제시된 정수 계획모형의 단점을 보완하여 다른 발견적 알고리듬(Heuris-

1) 총재항시간 = (선박의 접안시간+선박의 대기시간)

2) MPS(Maximum Position Shift): 순서변동폭으로써 선박과 선석의 입장을 반영하기 위하여 도입한 개념임.

tic Algorithm)을 도입하였다. 그러나 이것들은 선석의 계획개시시각을 선박도착예정시각(ETA)보다 늦은 시각으로 가정하여, 제한적인 선석할당 계획문제(BPP)의 모형을 제시한 것이다.

또한, 제시된 모형과는 다르게 Lim(1998)은 선석할당 계획문제(BPP)를 시간(X축)과 길이(Y축)의 2차원그래프에 직사각형 형태의 선박을 할당하는 모습으로 표현하였으며, 선석할당 계획문제(BPP)의 특성상 NP-hard 문제임을 설명하였다. 그리고, 선석의 사용길이를 최소화시키면서, 선박의 척수를 최대화시켜 할당하는 발견적 알고리듬(Heuristic Algorithm)과 싱가포르 항만의 실제 데이터로 실험하여 얻은 결과를 보고하였다.

비교적 최근에 Imai와 Nishimura(1999)의 연구에서는 선석할당 계획문제(BPP)의 최적화모형을 두 가지 형태로 정식화시켜 제시하였는데, 하나는 선석의 계획개시시각이 선박도착예정시각(ETA)보다 늦은 형태의 정식화(Formulation of the static berth allocation)와 선석의 계획개시시각이 선박도착예정시각(ETA)보다 이른 형태의 정식화(Formulation of The Dynamic Berth Allocation)이다. 또한, 이들은 제시한 두 번째 정식화 모형을 라그랑쥬-완화(Lagrangian Relaxation Method) 기법으로 변환시켜 해결하였으며, 제시한 모형을 효율적으로 해결하기 위한 발견적 절차(Heuristic procedure)도 함께 제시하였다.

3. 선석할당 계획문제(BPP)의 최적화

이장에서는 공공 컨테이너터미널에서의 선석할당 계획문제(BPP)를 집합문제 유형의 최적화모형으로 정식화하여 제시한다. 또한, 제안된 최적화모형의 해결을 위해 필요한 선석 할당 가능한 스케줄 생성 알고리듬도 함께 제시한다. 이때 사용된 모형의 가정과 기호 및 관련 데이터는 다음과 같다.

[사용된 기호]

i : 1, 2, ... N (선석), k : 1, 2, 3 ... n (선박)

$j \in J_i$: i에 대한 가능한 스케줄의 집합

S_i: i의 계획개시시각(시간)

B_i : i의 할당계획기간(시간)

D : k의 대기허용시간

C_{ik} : i에 할당된 k의 접안시간

W_{ik} : i에 할당된 k의 대기시간

S_{ik} : i에 할당된 k의 총 재항(접안+대기)시간

m : 1, 2, 3 ... n (i에 할당되는 k의 척수)

α : 가중치

[가정]

① 터미널운영자란, 선석할당 계획문제(BPP)를 최적화시켜 효율적으로 선석할당 계획을 수립하는 자로 가정함.

② $p_{ik} = \frac{C_{ik}}{B_i} \times 100$

: 선석의 점유율(Berth Occupancy Rate, BOR)[3]

③ $h_{ik} = \frac{W_{ik}}{S_{ik}} \times 100$

: 선박 대기시간이 차지하는 비율

④ 접안조건

- 모든 선석과 선박의 데이터는 선석 할당계획 수립이전에 예고됨.
- 하나의 선석에 하나의 선박을 할당할 수 있음
- 선석에 선박을 접안 시 고려되는 길이 요소인 선박간 간격, 선석과 선박의 간격 등은 고려하지 않음.

⑤ 대상선박은 공공 컨테이너터미널에 입항하는 컨테이너 선박임.

[데이터]

$q_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{만약, } i\text{에 } k\text{가 할당되는 } j\text{가 선택될 경우,} \\ 0, & \text{그렇지 않을 경우.} \end{cases}$

[의사결정변수]

$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{만약, } i\text{에 } j\text{가 선택될 경우,} \\ 0, & \text{그렇지 않을 경우.} \end{cases}$

3) BOR : 선석접안율 또는 선석가동률이라고 함.

3.1 집합문제 유형의 최적화모형

공공 컨테이너터미널에서의 선석할당 계획문제(BPP)는 선석과 선박의 입장을 효율적으로 절충하여 해결하여야 하는데, 이러한 입장을 효율적으로 절충하여 해결하기 위하여 다음의 세 가지 집합문제 유형의 최적화모형으로 제시한다. 첫 번째 최적화모형은 선석의 입장에서 선석의 점유율(p_{ik}) 총합을 최소화시키면서, 선박이 할당되도록 하는 모형이며, 두 번째 최적화모형은 선박의 입장에서 선박의 대기시간이 차지하는 비율(h_{ik})의 총합을 최소화시키면서, 할당되도록 하는 모형이다. 마지막으로 세 번째 최적화모형은 이러한 두 가지 입장을 반영하여 선석의 점유율(p_{ik})과 선박의 대기시간이 차지하는 비율(h_{ik})의 총합을 최소화시키면서, 선박이 할당되도록 하는 모형이다.

[Set-Problem Model-1]

[Formulation]

Min $\sum_i \sum_{j=J_i} \sum_k q_{ijk}\, p_{ik}\, X_{ij}$

SUBJECT TO

$\sum_{j \in J_i} X_{ij} \le 1$ 각 i에 대하여

$\sum_i \sum_{j \in J_i} q_{ijk}\, X_{ij} = 1$ 각 k에 대하여

$X_{ij} = \{0, 1\},\ j \in J_i$ 각 i에 대하여

[Set-Problem Model-2]

[Formulation]

Min $\sum_i \sum_{j=J_i} \sum_k h_{ik}\, X_{ij}$

SUBJECT TO

$\sum_{j \in J_i} X_{ij} \le 1$ 각 i에 대하여

$\sum_i \sum_{j \in J_i} q_{ijk}\, X_{ij} = 1$ 각 k에 대하여

$X_{ij} = \{0, 1\},\ j \in J_i$ 각 i에 대하여

[Set-Problem Model-3]

[Formulation]

M i n

$$\sum_i \sum_{j=J_i} \sum_k \alpha(q_{ijk} p_{ik}) X_{ij} + \sum_i \sum_{j=J_i} \sum_k (1-\alpha)\, h_{ik} X_{ij}$$

SUBJECT TO

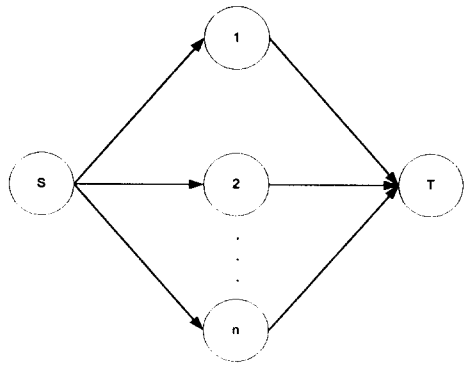
$\sum_{j \in J_i} X_{ij} \le 1$ 각 i에 대하여

$\sum_i \sum_{j \in J_i} q_{ijk}\, X_{ij} = 1$ 각 k에 대하여

$X_{ij} = \{0, 1\},\ j \in J_i$ 각 i에 대하여

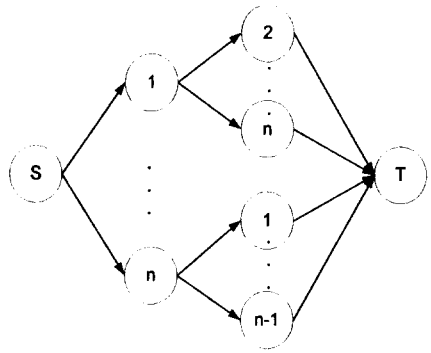
3.2 선석할당 가능스케줄 생성 알고리듬

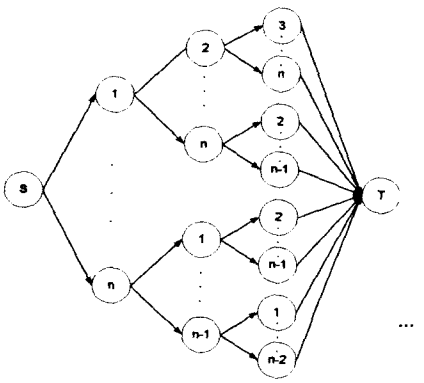
제시한 세 가지 모형에서 사용되는 의사결정 변수는 선석의 모든 가능한 스케줄이 된다. 따라서 선행되어야 하는 문제가 바로 최적화모형의 의사결정변수를 생성하는 것인데, 여기서는 다음과 같이 다 단계 그래프로 표현하여 제시한다.



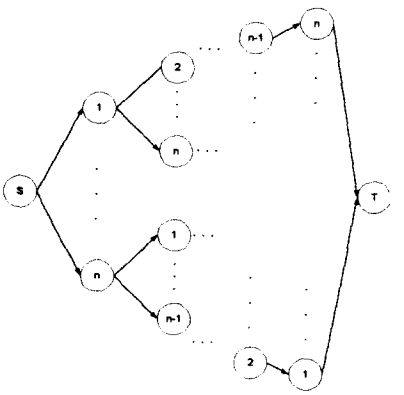
m = 1경우

m = 2 경우





m = 3 경우



m = n 경우

Fig. 3.1 i 에 m = 1~n 경우의 스케줄생성 모습

Fig 3.1는 m=1…n 경우의 스케줄이 생성되는 모습을 단계별 그래프로 나타내었다. 여기서 m은 선석에 할당되는 선박의 척수를 나타낸 것이다. 이 때 모든 그래프의 연결되는 선이 선석에 할당 가능한 스케줄이 되므로, 선박 n이 증가할수록 스케줄의 개수는 기하급수적으로 늘어나 $n!$이 됨을 알 수 있다. 따라서 본 연구의 선석할당 계획문제(BPP)가 NP-Complete 문제임을 쉽게 알 수 있다. 선석할당 계획문제(BPP)에 있어서 선행되어야 하는 스케줄생성을 위하여 여기서는 다음과 같은 두 가지 알고리듬을 사용한다.

3.2.1 선석할당 가능스케줄 생성 알고리듬-1

이것은 제시한 단계별 그래프 내에 각 선박의 대기시간을 제한조건으로 마디를 감소시켜 결과적으로 스케줄의 개수를 감소시키는 알고리듬이다. 즉, 각 선박의 대기허용시간 조건을 만족하지 않는 그래프의 마디를 삭제시켜 스케줄의 개수를 감소시키는 알고리듬이다.

[Heuristic Algorithm]

단계1. [Sort]: i와 k의 데이터를 시간적으로 오름차순 정렬시킴.

$ex) i=\{1,2,\ldots N\}, k=\{1,2,\ldots n\}$

단계2. [Select] For each in i: i 값을 선택함.

단계3. [Select] For each in k: k를 $m=k$로 선택하여 단계3-1로 감.

단계3-1. [Do...Loop]: 모든 k의 데이터를 사용하여 $m=k$ 경우의 각 마디를 생성한 후, 각 마디를 연결한 스케줄생성 그래프를 만듦. IF (스케줄에 따른 k의 대기시간) ≥ (각 선박의 대기허용 시간) Then 마디 및 그래프를 삭제함.

단계4. Next k

단계5. Next i

단계6. End

3.2.2 선석할당 가능스케줄 생성 알고리듬-2

이전 절에서 제시한 방법으로도 스케줄의 개수를 크게 감소시킬 수 없으므로, 다음의 세 가지 Heuristic Algorithm 할당계획을 수립하여 스케줄 개수가 $n!$에서 크게 감소되도록 다음과 같이 제시한다.

[Heuristic Algorithm-1]

단계1. [Sort]: i와 k의 데이터를 시간적으로 오름차순 정렬시킴.

$ex) i=\{1,2,\ldots N\}, k=\{1,2,\ldots n\}$

단계2. [Select] For each in k: k 값을 선택하여 다음으로 감.

단계3. [Plan] : 선택한 k를 모든 i에 할당할 경우 발생될 선석의 점유율을 계산하여 최소 값의 i에 k를 할당. IF i의 선석의 점유율이 동일 Then 계획가능시작이 빠른 i에 k를 할당.

단계4. Next k

단계5. End

이것은 선석 할당계획기간 중에 선박이 할당될 경우 발생될 선석의 점유율을 미리 계산하여 값이 가장 작게 예상될 선석에 FCFS(First Come First Start)방식으로 선박을 할당하는 알고리듬이다.

[Heuristic Algorithm-2]

단계1. [Sort]: i와 k의 데이터를 시간적으로 오름차순 정렬시킴.
$ex) i=\{1,2,\ldots N\}, k=\{1,2,\ldots n\}$

단계2. [Select] For each in k: k 값을 선택하여 다음으로 감.

단계3. [Plan] : 선택한 k를 모든 i에 할당할 경우 발생될 k의 대기시간이 차지하는 비율을 계산하여 최소 값의 i에 k를 할당함. IF k의 대기시간이 차지하는 비율이 동일 Then 계획가능시각이 빠른 i에 k를 할당.

단계4. Next k

단계5. End

이것은 선석 할당계획기간 중에 선박이 할당되어 발생될 선박의 대기시간이 차지하는 비율의 값이 가장 작은 선석에 FCFS(First Come First Start)방식으로 선박을 할당하는 알고리듬이다.

[Heuristic Algorithm-3]

단계1. [Sort]: i와 k의 데이터를 시간적으로 오름차순 정렬시킴.
$ex) i=\{1,2,\ldots N\}, k=\{1,2,\ldots n\}$

단계2. [Select] For each in i : i에 $k=1$의 선박을 할당.

단계3. [Select] $k=2$: $k=2$를 선택.

단계4. [Plan] For each in k : 선택한 k를 모든 i에 할당할 경우 발생될 k의 대기시간이 차지하는 비율을 계산하여 최소 값의 i에 k를 할당.

IF k의 대기시간이 차지하는 비율이 동일 Then 선택한 k를 모든 i에 할당할 경우 발생될 선석의 점유율을 계산하여 최소값을 가지는 i에 k를 할당.

IF i의 점유율이 동일 Then 계획가능시각이 빠른 i에 k를 할당

단계5. Next k

단계6. Next i

단계7. End

이것은 선석의 할당계획기간 중에 선박이 할당되어 발생하는 선박의 대기시간을 먼저 계산한 후, 선석의 점유율을 계산하여 FCFS(First Come First Start) 방식으로 모든 선박을 할당하는 알고리듬이다. 만약, 선석의 개수를 N으로 가정할 경우 생성될 스케줄의 개수는 N^2개로 표현된다. 따라서 이 알고리듬으로 생성된 최적화모형의 의사결정변수는 N^2개로 크게 감소되었음을 알 수 있다.

결과적으로 제시한 Heuristic Algorithm(-1,-2,-3)들로 생성될 스케줄의 개수는 총 $(2N+N^2)$개로 줄일 수 있음을 알 수 있다. 이것은 선박과 선석의 입장을 최대한 고려하면서, 최적화모형의 의사결정변수를 앞에서 제시한 선석할당 가능스케줄 생성 알고리듬-1의 의사결정변수 개수보다 크게 감소되도록 구성한 것이다.

4. 계산실험

4.1 기초 계산실험 결과의 비교분석

기초 계산실험의 데이터는 실제 신선대컨테이너터미널(PECT)에서 사용된 자료를 바탕으로 구성하였다. 이때 구성된 선석할당 계획문제(BPP)의 데이터(선석:4개, 선박:5척)는 다음과 같으며, 선박의 대기시간이 크게 발생하는 경우가 없다고 가정하여 [SPM-2]을 사용하지 않았다.

〈Table 4.1〉 기초 계산실험의 선석데이터

ID	Name	계획개시시각(S_i)
1	#1	99-07-31 03:00
2	#2	99-08-01 07:00
3	#3	99-07-31 02:00
4	#4	99-07-31 21:00

〈Table 4.2〉 기초 계산실험의 선박데이터

ID	Name	ETA	접안시간
1	NAAS-2	99-07-31 10:00	21
2	OOHP	99-08-01 04:00	22
3	MOSA-3	99-08-01 10:00	17
4	NPSG-1	99-08-01 13:00	14
5	NAGA-4	99-08-01 16:00	23

〈Table 4.3〉 [SPM-1] 적용한 해 비교

구분	선박	스케줄생성 알고리듬 적용	
		1	2
선박할당 형태	NAAS-2	#3	#3
	OOHP	#1	#1
	MOSA-3	#4	#4
	NPSG-1	#2	#2
	NAGA-4	#3	#3
총선박대기시간		0	0
선석 점유율 (%)	#1	26.19	26.19
	#2	25	25
	#3	51.16	51.16
	#4	25.76	25.76
선석의 평균점유율(%)		32.17	32.17
최적해		25.74	128.1

〈Table 4.4〉 [SPM-3] 적용한 해 비교

구분	선박	스케줄생성 알고리듬 적용	
		1	2
선박할당 형태	NAAS-2	#3	#3
	OOHP	#1	#1
	MOSA-3	#4	#4
	NPSG-1	#2	#2
	NAGA-4	#3	#3
총선박대기시간		0	0
선석 점유율 (%)	#1	26.19	26.19
	#2	25	25
	#3	51.16	51.16
	#4	25.76	25.76
선석의 평균점유율(%)		32.17	32.17
최적해		25.74	25.61

기초계산의 데이터처럼 비교적 작은 문제인 경우에는 위에서 제시하는 Table들처럼 동일하게 값을 구할 수 있었다.

4.2 다양한 계산실험 결과의 비교분석

전 절과 같이 신선대컨테이너터미널(PECT)의 선석 할당계획 수립을 위한 입력자료로 계산 실험하였는데, 여기에서는 기초실험에 선박 척수를 증가시켜 실험하여 얻은 결과를 비교분석하였다.

4.2.1 선석할당 가능스케줄 생성 알고리듬-1 적용예

신선대컨테이너터미널(PECT)의 데이터에서 선박의 총 척수를 10척으로 확장하여 계산 실험한 경우, 실제 생성되는 변수의 개수는 418개였다. 또한 선박의 총 척수를 15척 확장하여 계산 실험한 결과 실제 생성되는 변수의 개수는 무려 2000여 개가 넘었다. 따라서 이와 같이 선박의 척수가 증가하는 경우, 제한조건인 선박의 대기시간만으로는 스케줄

의 개수를 줄이는데 한계가 있음을 알 수 있었다.

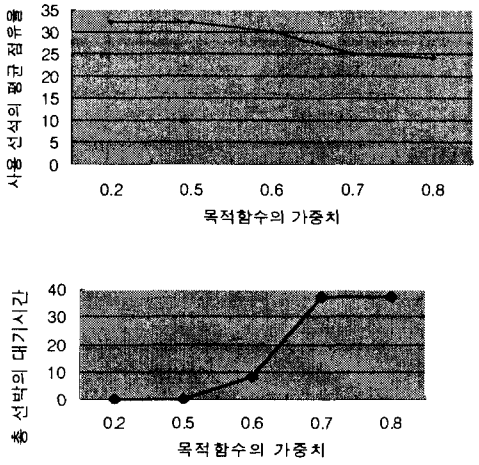


Fig. 4.1 목적함수의 가중치 값에 따른 변화차트

Fig. 4.1는 기초 계산실험의 데이터를 사용하여 [SPM-3] 모형의 가중치에 따른 선박의 대기시간과 사용 선석의 평균점유율의 변화를 나타내는 차트이다. 목적함수의 가중치가 0.5이하인 경우, 발생하는 선박의 대기시간은 작은 값을 가지게되는 반면에, 사용 선석의 평균점유율은 큰 값을 가지게됨을 알 수 있었다. 따라서 목적함수의 가중치를 어떻게 정하냐에 따라 선석할당 계획문제(BPP)의 최적해와 스케줄 상 발생하는 선박의 대기시간과 선석의 점유율이 다르게됨을 알 수 있다. 또한, 선석과 선박 그리고 터미널의 특성을 고려하지 않고, 터미널운영자가 스케줄생성 알고리듬-1의 제한조건인 선박의 대기허용시간을 임의로 정한다면, 경우에 따라 해가 불가능(infeasible)하게 나올 수도 있음을 확인하였다.

4.2.2 선석할당 가능스케줄 생성 알고리듬-2 적용예

이 절에서는 문제를 확장하여 신선대컨테이너터미널(PECT)의 자료 1999. 12. 1일~1999. 12. 7일까지 입항되는 선박을 대상으로 계산실험을 하였다. 이때 사용된 선석의 개수는 4, 선박의 척수는 24척이었다.

〈Table 4.5〉 문제를 확장한 계산실험 비교

구분	선석번호	최적화모형 적용	
		[SPM-1]	[SPM-3]
선석 점유율 (%)	#1	47.39	47.39
	#2	49.74	48.74
	#3	49.18	49.18
	#4	50.27	45.94
사용 선석의 평균 점유율(%)		49.14	57.81
총 선박 대기시간		4	2

<Table 4.5>는 신선대컨테이너터미널(PECT)의 자료로 계산 실험하여 얻은 결과를 비교 정리한 것인데, [SPM-3] 모형은 가중치를 0.2로 가정하고 구한 값이다. 이때 선박의 대기시간이 최소화되도록 할당된 것은 [SPM-3] 모형이었고, 사용 선석의 평균점유율이 최소화되도록 할당된 것은 [SPM-1] 모형이었다. 따라서 터미널운영자는 각각의 데이터 특성에 적합한 모형을 선택하여야 함을 알 수 있었다.

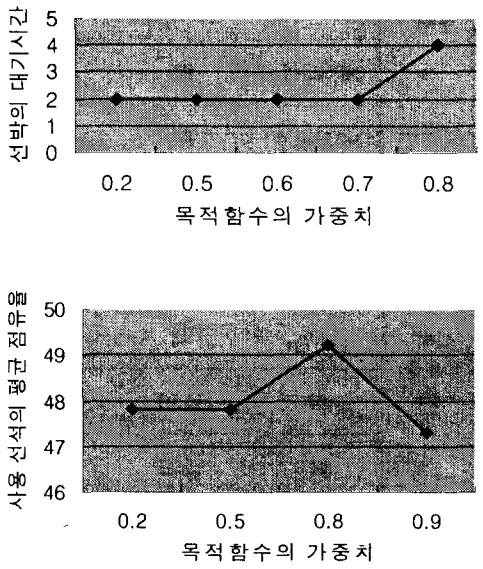


Fig. 4.2 목적함수의 가중치 값에 따른 변화 차트

Fig. 4.2는 [SPM-3] 모형을 사용할 경우, 목적함수의 가중치에 따른 선박의 대기시간과 평균 선석 점유율의 변화를 나타낸 차트이다. 또한, 문제를 좀 더 확장하여 [SPM-3] 모형에 대한 다수 계산실험에서 가중치가 해에 대하여 크게 영향을 끼치지 않는 것을 확인하였다. 이때는 접안조건의 특성상 대기시간이 발생하지 않거나 또는 데이터의 특성상 최적화모형의 해가 가중치에 영향을 받지 않는 경우였다. 예를 들면, 신선대컨테이너터미널(PECT)의 자료 1999. 12. 1일~1999. 12. 28일까지 입항되는 선박을 대상으로 계산 실험하였는데, 이때 사용된 선석의 개수는 4, 선박의 척수는 82척이었다. 이때 [SPM-1] 모형과 [SPM-3] 모형으로 구한 해를 비교하여 보면, 발생하는 선박의 총 대기시간은 16시간으로 동일한 반면에, 사용 선석의 평균 점유율은 [SPM-3] 모형으로 구한 해가 낮게 나타났다. 그리고 다수 계산실험(선박척수: 30척, 50척 등)을 통하여 제시한 알고리듬-2를 적용한 경우, 문제의 크기와 상관없이 효율적으로 해를 구하여 선석 할당계획을 수립 할 수 있었다.

4.2.3 최적화모형의 제약식 수정

선석과 선박의 특수성 또는 터미널의 특수성을 고려하여 최적화모형의 제약식을 수정하여 보면 다음과 같다. 먼저, 터미널운영자가 모든 선석을 사용하여 선박을 할당하고자 한다면, 기존 모형의 선석 제약식을 다음과 같이 $\sum_{j\in J_i} X_{ij}=1$로 수정하여 해를 구한다. 또한 터미널운영자가 특정한 선석에 특정한 선박을 할당하고자 한다면, 기존 모형의 제약식에 해당 선석의 제약식을 추가하여 해를 구한다. 이것을 선박에 관하여 나타내면 다음과 같다. 만약, 기초 계산실험의 [SPM-3] 모형에서 선박1 화물의 특성상 선석 #2에 할당하여야한다면, 다음과 같은 제약식을 추가한다.

[#2 선석의 추가 제약식]

$X_{21}+X_{26}+X_{27}+X_{28}+X_{29}=1$를 기초 계산실험에 반영하여 최적해를 구하여보면, 최적해는 64.04이었으며, 이때의 의사결정변수는

$X_{12}=X_{21}=X_{317}=X_{43}=1$이었다. 또한, 발생된 선박의 총 대기시간은 29시간이었다. 이와 같이 공공 컨테이너 터미널운영자는 제시한 최적화모형의 제약식을 수정함으로써, 선석과 선박의 특수성 또는 터미널의 특수성을 반영할 수 있음을 확인하였다.

5. 결 론

선석할당 계획문제(BPP)는 터미널의 특성에 따라 다르게 표현될 것이나, 최적화모형과 기준분석에 관한 연구 사례가 적은 것이 현실이다. 본 연구는 공공 터미널에서 발생하는 선석할당 계획문제(BPP)를 집합문제 유형의 최적화모형으로 정식화하여 해결하고자 한 연구이며, 제안된 집합문제 유형의 최적화모형의 해결을 위해 필요한 선석할당 가능스케줄 생성 알고리듬도 함께 제시하였다. 그리고 이러한 제시된 모형과 알고리듬으로 신선대 컨테이너터미널(PECT)의 데이터를 사용하여 기초 및 다양한 계산실험을 실시하여 제시하였다. 결과적으로 제시한 최적화모형들은 각 터미널의 특성에 따라 다르게 선택되어져야 함을 알 수 있었으며, 특히, [SPM-3] 모형에서의 가중치는 선박과 선석의 입장을 반영하는 값으로서 각 터미널의 특성에 적합한 값을 선택하여야 함을 알 수 있었다. 또한, 최적화모형을 적용하기 이전에 선행되어야 할 의사결정변수 결정문제는 제시한 선석할당 가능스케줄 생성 알고리듬-1로 구할 수 있었다. 그러나, 선박과 선석의 증가에 따른 의사결정변수의 개수는 크게 증가하므로 선석과 선박의 입장을 최대한 반영하여 생성해주는 선석할당 가능스케줄 생성 알고리듬-2를 제시하였으며, 기초 및 다양한 계산실험을 통하여 비교적 적합한 값을 쉽게 의사결정자에게 전달 할 수 있음을 살펴보았다.

향후의 연구과제로는 제시한 선석할당 가능스케줄 생성 알고리듬들에 대한 그래프이론 및 관련된 수리적인 연구와 의사결정지원시스템으로 구현이 필요하며 또한, 다양한 터미널에서 발생하는 선석할당 계획문제(BPP)의 최적화 연구들이 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

1) 김세헌, 「현대 경영과학」, 무역경영사, 1994.
2) 김철언, 「그래프론과 알고리듬」, POSTECH PRESS, 1997.10.
3) 백인흠, 「선박 재항 시간에 대한 분석연구」, 한국해양대학교석사학위논문, 1998.
4) 이철영, 「항만물류시스템」, 효성출판사, 1998.
5) 이홍걸, 「발견적 알고리즘에 의한 컨테이너 터미널의 선석 배정에 관한 연구」, 한국해양대학교 석사학위논문, 1996.
6) Brown, G.G, Lawphongpanich, S. and Thurman, K.P., "Optimizing ship berthing", Naval Research Logistic, Vol.41, 1994, pp.1-15.
7) Kim, Si-Hwa and Lee, Kyung-Keun, "An Optimization-based decision support system for ship scheduling", Computers & I.E An Intl. Journal, Vol. 33, 1997, pp.689-692.
8) Kim, Si-Hwa, Optimization-based Decision Support System for Some Maritime Transportation Problems, Ph.D. Thesis, Dept. of Industrial Engineering, Pusan National University, 1999.
9) Lim, A., "The berth planning problem", Operations Research Letters, Vol.22, 1998, pp.105-110.
10) Nishimura, E. and Imai, A., "The Dynamic Berth Allocation Problem for Container Port", Journal of Transportation Research, forthcoming.
11) Nagaiwa, K. and Imai, A., "A Berth Assignment Planning for a Public Container Terminal, Journal of Navigation, Vol.90, 1994.