韓國港灣學會 第11卷 第2號, pp.191~202. 1997.

論 文

공공 컨테이너 터미널의 효율적인 선석할당을 위한 발견적 알고리즘 개발에 관한 연구

금 종 수*

A Heuristic Algorithm of an Efficient Berth Allocation for a Public Container Terminal

J. S. Keum

Key Words : 선석할당(Berth Allocation), 순서변동허용폭(Maximum Position Shift), 발견적 알고리즘(Heuristic Algorithm), 멤버쉽 함수(Membership Function), 퍼지수(Fuzzy Number), 계류시간(Berthing Time)

Abstract

As the suitability of berth allocation will ultimately have a significant influence on the performance of a berth, a great deal of attention should be given to berth allocation.

Generally, a berth allocation problem has conflicting factors between servers and users. In addition, there is uncertainty in great extent caused by various factors such as departure delay, inclement weather on route, poor handling equipment, a lack of storage space, and other factors contribute to the uncertainty of arrival and berthing time. Thus, it is necessary to establish berth allocation planning which reflects the positions of interested parties and the ambiguity of parameters.

For this, a berth allocation problem is formulated by fuzzy 0-1 integer programming introducing the concept of Maximum Position Shift(MPS). But, the above approach has limitations in terms of computational time and computer memory when the size of problem is increased. It also has limitations with respect to the integration of other sub-systems such as ship planning system and yard planning system.

For solving such problem, this paper focuses particularly on developing an efficient heuristic algorithm as a new technique of getting an effective solution.

And also the suggested algorithm is verified through the illustrative examples and empirical appalication to BCTOC.

---

* 정회원, 목포해양대학교 해상운송시스템학부 교수

Nomenclature

x_{ijk} : 만일 선박 j가 i번 선석에 k번째 계류되면 1, 그렇지 않으면 0 인 0-1 정수변수

$i(=1,2,3,\cdots,B)$ 선석번호 (B : 선석수)

$j(=1,2,3,\cdots,T)$ 선박번호 (도착순으로 부여) (T : 대상선박의 척수)

$k(=1,2,3,\cdots,T)$ 계류순서

A_j : 선박 j의 도착시간

C_{ij} : 선석 i에서의 선박 j의 계류시간

S_i : 계획개시 이전부터 선석 i에 계류되어 있는 선박이 출항하여 계획기간내에 선석 i가 비게 되는 시간

Q_i : 계획개시 시간으로부터 어느 시점에 선석 i에 할당되는 선박의 계류가 끝날 때까지의 시간 ($\min_{1 \le i \le B} \{S_i\}$ 인 선석 i 이외에서는 계획개시시간 이전부터 계류되어 있는 선박의 ST로부터 출항할 때까지의 계류시간을 포함하는 것으로 한다.)

F_i : 선석 i에 할당된 선박의 수

ST : 계획개시시간 ($\min_{1 \le i \le B} \{\widetilde{S_i}\}$)

MPS : 순서변동허용폭(Maximum Position Shift)

$\widetilde{A_j}$: 퍼지수로 표현된 선박 j의 도착시간

$\widetilde{C_{ij}}$: 퍼지수로 표현된 선석 i에서의 선박 j의 계류시간

$\widetilde{S_i}$: 퍼지수로 표현된 계획개시 이전부터 선석 i에 계류되어 있는 선박이 출항하여 계획기간내에 선석 i가 비게 되는 시간

$wid\_\widetilde{c_{ij}}$: 삼각형 퍼지수로 표현된 계류시간의 폭

$wid\_\widetilde{a_{ij}}$: 삼각형 퍼지수로 표현된 대기시간(도착시간-계획개시시간)의 폭

$\widetilde{G_i}$: 선석 i에 있어서 S_i로부터의 계류시간으로 이미 할당된 선박의 하역에 소요되는 시간을 나타내므로서 재항시간을 계산하는 역할을 한다.

L_i : 선석 i의 할당 상황으로 선박의 할당여부를 결정. $L_i \in \{0, 1\}$

1. 서 론

현재 우리나라 컨테이너 터미널들은 부분적으로 운영시스템을 개발하여 사용하고 있으나 터미널 운영의 최적화를 위한 이론적 모형이나 알고리즘을 개발하여 운용하고 있지는 않다. 따라서, 항만 운영 효율성을 제고시키기 위해서는 터미널의 선석할당계획, 장치계획 및 선적계획 등의 기능을 최적화하고, 이들을 상호 유기적으로 결합시킬 수 있는 체계적인 연구가 필요하다.

특히, 만성적인 체선현상으로 부가적인 물류비용의 증가 등 많은 문제점이 야기되고 있는 우리나라의 현실에 비추어 볼 때 급증하는 컨테이너 물동량을 원활히 처리하기 위해서는 기존항만의 재개발과 신항만의 개발 등 하드웨어 측면의 시설보완 뿐만 아니라 항만의 효율적인 운영을 위한 소프트웨어적인 측면의 대책 마련 또한 매우 절실하다. 그러나, 지금까지의 항만개발 방향은 터미널의 시설확충에 역점을 둔 반면 선석운영의 효율성을 증대시키기 위한 대책 마련에 소홀하여 항만운영 효율성 면에서 외국 경쟁항만에 비하여 크게 뒤지는 결과를 초래하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 여러 개의 선석을 가진 공공 터미널에 있어서 이용자와 항만운영자의 입장을 모두 반영할 수 있는 서비스 방식이 통합된 선석할당모델을 제안하고, 선박의 도착시간 및 계류시간에 관한 애매한 정보로부터 합리적인 선석할당계획을 수립하기 위하여 퍼지선석할당모델을 개발한다. 그리고 문제의 규모가 커지면 계산시간이 기하급수적으로 증가하는 등의 문제점을 극복하고, 다른 연계시스템과의 탄력적인 연결을 위하여 합리적이고 실용적으로 선석을 할당할 수 있는 발견적 알고리즘을 제안하기로 한다.

2. 선석할당모델의 구성

2.1 선석할당모델의 정식화

선박이 도착순서를 가지고 할당을 기다리는 상태에서 계류를 위한 순서를 배정하는 문제는 이용사의 측면에서 보면 먼저 도착한 선박이 우선적으로 배정되기를 원하고, 항만운영자의 입장에서는 도착순서에 관계없이 효율성을 높이는 방향으로 순서열을 구성하기를 원하게 된다. 이러한 양측의 입장을 함께 고려할 수 있도록 선박의 순서열을 구성하는 방안으로서 선박의 도착순번을 기준으로 하여 그 전후로 일정폭을 두어서 그 범위 내에서 순서의 변동이 허용되도록 하는 방안을 생각할 수 있다. 이를 순서변동허용폭(MPS : Maximum Position Shift)이라 정의한다.

MPS개념을 도입한 선석할당모델은 다음과 같은 가정 하에서 구성된다.

i) 대상선박의 계류시간은 선석에 따라 다르며 그 시간은 이미 알고 있는 것으로 한다.

ii) 계획개시 시간까지 항내에 도착하는 선박을 대상으로 하고 해당선박의 도착시간은 알고 있는 것으로 가정한다.

iii) 계획대상이 아닌 선박의 할당은 고려하지 않는다.

(1) 총재항시간 최소화 모델 (모델1)

모델1은 총재항시간 최소화를 목적으로 하는 선석할당모델로서 식(2.1)~식(2.4)로 정식화한다.

minimize

$$\sum_{i=1}^{B}\sum_{j=1}^{T}\sum_{k=1}^{T}\{(T-k+1)\cdot C_{ij}+S_i-A_j\}\cdot x_{ijk} \quad \cdots\cdots (2.1)$$

subject to

$$\sum_{i=1}^{B}\sum_{k=1}^{T}x_{ijk}=1,\quad j=1,2,3,\cdots,T \quad \cdots\cdots (2.2)$$

$$\sum_{j=1}^{T}x_{ijk}\leq 1,\ i=1,2,3,\cdots,B:\ k=1,2,3,\cdots,T \quad \cdots\cdots (2.3)$$

$$\{\sum_{j=1}^{T}\sum_{l=1}^{k}C_{ij}\cdot x_{ijl}-\sum_{j'=1}^{T}\sum_{l=1}^{k'}C_{i'j'}\cdot x_{i'j'l}\}\cdot\sum_{j=1}^{T}x_{ijk+1}$$
$$\cdot\{j+\frac{(\sum_{j=1}^{T}\sum_{l=1}^{k}C_{ij}\cdot x_{ijl}-\sum_{j'=1}^{T}\sum_{l=1}^{k'}C_{i'j'}\cdot x_{i'j'l})}{|(\sum_{j=1}^{T}\sum_{l=1}^{k}C_{ij}\cdot x_{ijl}-\sum_{j'=1}^{T}\sum_{l=1}^{k'}C_{i'j'}\cdot x_{i'j'l})|}(MPS+1)\}$$
$$>\{\sum_{j=1}^{T}\sum_{l=1}^{k}C_{ij}\cdot x_{ijl}-\sum_{j'=1}^{T}\sum_{l=1}^{k'}C_{i'j'}\cdot x_{i'j'l}\}$$
$$\sum_{j'=1}^{T}x_{i'j'k'+1}\cdot j',\quad x_{ijk}\in\{0,1\} \quad \cdots\cdots (2.4)$$

단,

$i, i' = 1,2,3,\cdots, B: k, k' = 1,2,3,\cdots, T-1$

(2) 최종작업종료시간 최소화 모델 (모델2)

모델2은 최종작업종료시간 최소화를 목적으로 하는 선석할당모델로서 식(2.5)~식(2.9)으로 정식화한다.

$$\text{minimize } \ Q_m = \max_{1 \le i \le B} \{Q_i\} \qquad \cdots\cdots (2.5)$$

subject to

$$\sum_{j=1}^{B} \sum_{k=1}^{T} C_{ij} \cdot x_{ijk} \le Q_i, \quad i = 1,2,3,\cdots,B \qquad \cdots\cdots (2.6)$$

$$\sum_{j=1}^{T} x_{ijk} = 1, \qquad j = 1,2,3, \cdots, T \qquad \cdots\cdots (2.7)$$

$$\sum_{j=1}^{T} x_{ijk} = 1 \qquad \cdots\cdots (2.8)$$

$$\{ \sum_{j=1}^{T} \sum_{l=1}^{k} C_{ij} \cdot x_{ijl} - \sum_{j'=1}^{T} \sum_{l=1}^{k'} C_{i'j'} \cdot x_{i'j'l} \} \cdot \sum_{j=1}^{T} x_{ijk+1}$$
$$\cdot \{ j + \frac{(\sum_{j=1}^{T} \sum_{l=1}^{k} C_{ij} \cdot x_{ijl} - \sum_{j'=1}^{T} \sum_{l=1}^{k'} C_{i'j'} \cdot x_{i'j'l})}{|(\sum_{j=1}^{T} \sum_{l=1}^{k} C_{ij} \cdot x_{ijl} - \sum_{j'=1}^{T} \sum_{l=1}^{k'} C_{i'j'} \cdot x_{i'j'l})|} (MPS+1) \}$$
$$> \{ \sum_{j=1}^{T} \sum_{l=1}^{k} C_{ij} \cdot x_{ijl} - \sum_{j'=1}^{T} \sum_{l=1}^{k} C_{i'j'} \cdot x_{i'j'l} \} \sum_{j'=1}^{T} x_{i'j'k'+1}$$
$$\cdot j', \ x_{ijk} \in \{0, 1\} \qquad \cdots\cdots (2.9)$$

단,

$i, i' = 1,2,3,\cdots, B: k, k' = 1,2,3,\cdots, T-1$

2.2 발견적 알고리즘의 개발

발견적 알고리즘 개발의 이론적 배경은 다음과 같다.

모델1의 경우는 대기행렬 이론으로부터 계류시간을 알고 선박의 도착순서를 고려하지 않을 경우 전체적으로 대기시간을 감소시키기 위해서는 계류시간이 짧은 선박을 우선하면 좋다는 것이 증명되어 있다. 따라서 각 선박의 계류시간이 선석에 따라 다르나 그 중에서 각 선박에 대하여 최소가 되는 선석의 계류시간을 구하고, 각 선박의 최소계류시간의 순서로 선박의 순번을 바꾸어 올림차순으로 정리한 후 각 선석 중에서 재항시간이 최소인 선석에 할당한다. 이 원칙을 최소계류시간 우선 원칙이라 하기로 한다.

모델2의 경우는 각 선석에 있어서 최후에 계류하는 선박의 계류종료시간 중에서 최대인 값을 최소로 하는 것이 목적이므로 결과적으로 각 선석에 있어서 계류시간의 누적합을 균일하게 하면 되므로 계류시간이 비슷한 선박을 각 선석에 균일하게 할당하면 된다. 각 선박의 최대계류시간 순번으로 선박의 순번을 바꾸어 내림차순으로 정렬한 후 각 선석별로 균일하게 할당한다. 이 원칙을 최대계류시간 우선 원칙이라 하기로 한다.

(1) 총재항시간 최소화 모델 (모델1)

최소계류시간 우선원칙에 기초하여 다음과 같은 발견적 알고리즘을 개발한다.

단계 1 : 선박 j의 각 선석에 있어서 최소재항시간($\min_{0 \le i \le B} C_{ij}$)을 구한다.

그리고, 이를 전체 선박에 대하여 계산하며, 선박의 최소계류시간이 동일한 경우 에는 도착시간을 고려하여 재항시간이 긴 쪽을 우선한다. 최소계류시간의 순으 로 선박을 재정렬한다.

단계 2: $F_i = 0, \ G_i = 0 \quad (i = 1,2,3,\cdots,B)$ 로 둔다.

$x_{ijk} = 0$

$(i = 1,2,3,\cdots,B; j, k = 1,2,3,\cdots,T)$

, $j = 1$로 둔다.

단계 3 : $|j-k| <$ MPS를 만족하는 선박 j를 구한다.

단계 4 : $\min_{0 \le i \le B} \{S_i - A_j + G_i + C_{ij}\}$인 i를 구한다.

단계 5 : $G_i = G_i + C_{ij}, \ F_i = F_i + 1,$

$k = F_i, \ x_{ijk} = 1$로 한다.

단계 6 : $j = T$라면 종료하고, $j < T$이면, $j = j + 1$로 두고 단계 3으로 돌아간다.

(2) 최종작업종료시간 최소화 모델 (모델2)

최대계류시간 우선원칙을 기초로 하여 다음과 같은 알고리즘을 개발한다.

단계 1 :

$\sum_{j=1}^{T} \min\{C_{ij}\}/B,\quad \sum_{j=1}^{T} \max\{C_{ij}\}/B \quad i: 1,2,3,\cdots,B$

각 선석의 계류시간 의 최대 및 최소값을 추정한다.

단계 2 : $\underset{1\le i\le B}{L_i = 0}$, $x_{ijk} = 0$ 로 둔다.

단계 3 : $|j-k| <$ MPS를 만족하는 선박 j 를 구한다.

단계 4 : $L_i = 0$ 인 선석 중 계류시간이 최대인 선박 j를 추출하여 i선석에 할당한다. 만약 모든 선박의 계류시간이 0이면 단계 7로 이동한다.

단계 5 : $L_i = 1,\ C_{ij} = 0,\ x_{ijk} = 0$

단계 6 : 만약, $\sum_{i=1}^{B} L_i \ge B$ 이면, 각 선석에 할당된 선박의 계류시간합을 계산, 최소인 선석 i를 구하여 $L_i = 0$로 두고 단계 3으로 돌아간다.

단계 7 : 단계 3으로 돌아간다.

단계 8 : 각 선석별로 할당된 선박의 순번을 역순으로 재정렬한다.

단계 9 : 각 선석별 작업 종료시간을 계산하여, $\sum_{j=1}^{T} C_{ij} + S_i \quad i ; 1,2,3,\cdots,B$ 1)에서 추정된 결과와 비교한다.

단계 10 : 계산결과 작업종료시간의 차가 있을 경우 각 선석의 순번이 첫 번째인 선박을 이동시켜 계류시간의 차를 조절한다.

2.3 수치 적용예

(1) 최적해법의 적용예

선박 40척인 경우의 MPS별 할당형태 및 목적함수치를 정리해 보면 Table 2.1과 같다.

Table 2.1 Berth allocation type and objective value for 40 ships by enumeration method

MPS	Berth	Index set	Objective value
15	A	2, 4, 6, 8, 10, 38, 16, 13, 19, 35, 17, 24, 39, 30, 37, 21, 26, 33, 40, 32	9434
	B	1, 3, 5, 7, 9, 11, 12, 28, 14, 15, 18, 34, 29, 25, 20, 36, 22, 23, 27, 31	
39	A	38, 16, 39, 24, 4, 2, 19, 35, 13, 17, 10, 26, 8, 30, 37, 40, 21, 33, 32, 6	9272
	B	28, 34, 29, 12, 7, 9, 25, 19, 20, 3, 11, 27, 14, 36, 1, 15, 23, 31, 5, 22	

Table 2.2 Berth allocation form and objective value for 40 ships by heuristic method

MPS	Berth	Model 1		Model 2	
		Index Set	Objective value	Index Set	Objective value
15	A	16, 17, 19, 13, 24, 4, 2, 1, 3, 5, 35, 38, 10, 39, 15, 37, 26, 21, 40, 33	9465	9, 18, 11, 15, 25, 14, 7, 31, 3, 5, 36, 10, 38, 40, 16, 34, 33, 39, 37, 35	469
	B	12, 18, 9, 7, 25, 27, 28, 29, 20, 34, 6, 8, 11, 36, 14, 31, 30, 23, 22, 32		1, 17, 13, 22, 6, 2, 28, 29, 20, 4, 12, 8, 27, 26, 19, 32, 23, 30, 21, 24	453
39	A	38, 16, 39, 35, 24, 19, 17, 13, 4, 2, 37, 30, 26, 10, 8, 40, 33, 21, 32, 6	9272	31, 18, 38, 25, 9, 11, 40, 14, 7, 36, 32, 23, 5, 34, 33, 21, 3, 39, 37, 35	494
	B	28, 34, 29, 25, 18, 12, 9, 7, 36, 27, 20, 14, 11, 3, 1, 31, 23, 15, 22, 5		1, 17, 28, 13, 29, 22, 15, 6, 2, 20, 12, 27, 26, 19, 4, 16, 10, 30, 8, 24	458

2) 발견적 해법의 적용예

발견적 알고리즘으로 구한 모델1과 모델2의 수치 적용예를 보인다.

Table 2.2는 선박 40척인 경우의 모델1과 모델2의 할당형태 및 목적함수치를 정리한 것이다.

2.4 비교분석 및 고찰

Table 2.3에서와 같이 모델 2의 경우는 발견적 알고리즘에서 선박을 계류시간이 비슷한 크기 순서로 각 선석내에 동일한 순번으로 배치한 경우이므로 선석을 이동하여도 최적성의 변화는 적으며, 동일한 선석내에서 선박의 할당 우선순위를 변경하여도 최종작업종료시간의 변화는 없다.

따라서, 이러한 관점에서 보면 모델2의 할당형태를 동일한 선석내에서 순번의 이동을 행하거나 선석간의 동일한 순번의 선박을 다른 선석으로 이동시키면 모델2와 모델1의 할당형태는 대부분 비슷한 할당형태를 띄게 된다.

Table 2.4에서와 같이 모델1과 모델2의 각 선석별 계류시간의 차는 최소 0시간에서 최대 20시간으로 약 0.7척 정도의 차이를 보이고 있어 현실적으로 모델1을 적용하여도 모델2의 목적에 부합됨을 확인할 수 있다.

Table 2.4 Objective value of model 1 and model 2 by MPS(unit:hour)

Ship	MPS	Berth	Model 1 Obj. value	Model 1 |A-B|	Model 2 Obj. value	Model 2 |A-B|
20 ships	0	A	230	22	244	15
		B	252		229	
	2	A	201	25	306	8
		B	226		298	
	5	A	220	20	296	0
		B	200		296	
40 ships	1	A	418	9	465	5
		B	427		470	
	3	A	429	4	485	4
		B	425		481	
	8	A	420	8	483	1
		B	428		421	

따라서, 본 연구에서는 총재항시간 최소화 모델(모델1)을 중심으로 선박의 도착시간 및 계류시간

Table 2.3 Berth allocation type of model 1 and model 2

Ship	MPS	Berth	Model1	Model 2
20 ships	1	A	1,4,8,10,11,12,13,16,18,19	1,4,[redacted],11,12,13,16,18,19,
		B	2,3,6,5,7,9,14,15,17,20	2,3,6,5,[redacted],14,15,17,20
	19	A	15,18,4,10,11,12,16,8,19,13	15,18,4,[redacted],12,16,8,19,13
		B	6,2,3,14,20,7,1,9,5,17	[redacted],2,3,14,20,7,1,9,5,[redacted]
40ships	15	A	16,17,19,13,24,4,2,1,3,5,35,38,10,39,15,37 ,26,21,40,33	16,17,19,13,[redacted],4,2,1,3,5,35,38, 10,39,15,37,26,[redacted],40,33
		B	12,18,9,7,25,27,28,29,20,34,6,8,11,36,14,3 1,30,23,22,32	12,18,9,7,25,27,28,29,20,[redacted],6,8,11,[redacted],14, 31,30,23,22,32
	39	A	28,16,39,35,24,19,17,13,4,2,37, 30,26,10,8,40,33,21,32,6	38,16,39,35,24,19,17,13,4,2,37, 30,26,10,[redacted],40,33,21,32,6
		B	28,34,39,25,18,12,9,7,36,27,20, 14,11,3,1,31,23,15,22,5	28,34,29,25,18,12,9,7,36,27,20, 14,11,3,1,[redacted],23,15,22,5

에 관한 애매한 정보를 퍼지수로 취급하여 보다 합리적인 선석할당계획을 수립하고자 한다.

3. 퍼지 환경하의 선석할당계획법

3.1 퍼지모델 도입의 필요성

선박의 도착시간 및 계류시간은 기상의 변화, 선박의 기관고장, 스케줄의 변경, 전항(前港)에서의 지연 등 여러 가지 원인으로 인하여 조기입항 또는 도착지연이 발생하므로 확정치로서 표현하기 곤란하고, 계류시간 또한 하역기기의 고장, 보관장소의 부족, 내륙연계수송의 미비 등으로 인하여 항상 어느 정도 시간의 폭을 지니므로 선석할당문제에 있어서 이러한 애매한 정보, 계류시간 및 도착시간의 변경, 다른 시스템과의 연계성 등을 고려하여 어떻게 합리적인 결정을 내리는가가 중요한 과제가 된다. 따라서, 이와 같은 애매함이 있는 선석할당문제는 퍼지개념을 도입하여 해결하는 것이 합리적이라 할 수 있다.

3.2 퍼지 선석할당모델의 정식화

<기본가정>

i) 대상 선박의 하역시간은 선석에 따라 다르며 그 시간은 이미 알고 있는 것으로 한다.

ii) 계획개시까지 항내에 도착하는 선박을 대상으로 하고, 해당 선박의 도착예정시간(E.T.A.)은 이미 알고 있는 것으로 가정한다.

iii) 계획 대상이 아닌 선박의 할당은 고려하지 않는 것으로 한다.

(1) 총재항시간 최소화 모델 (모델1)

모델1은 퍼지 환경하에서의 총재항시간 최소화를 목적으로 하는 선석할당모델로서 식(3.1)~식(3.4)로 정식화한다.

minimize

$$\sum_{i=1}^{B}\sum_{j=1}^{T}\sum_{k=1}^{T}\{(T-k+1)\cdot\widetilde{C}_{ij}+\widetilde{S}_i-\widetilde{A}_j\}\cdot x_{ijk} \qquad \cdots\cdots (3.1)$$

subject to

$$\sum_{i=1}^{B}\sum_{k=1}^{T}x_{ijk}=1,\quad j=1,2,3,\cdots,T \qquad \cdots\cdots (3.2)$$

$$\sum_{j=1}^{T}x_{ijk}\le 1,\ i=1,2,3,\cdots,B:\ k=1,2,3,\cdots,T \qquad \cdots\cdots (3.3)$$

$$\left(\sum_{j=1}^{T}\sum_{l=1}^{k}\widetilde{C}_{ij}\cdot x_{ijl}-\sum_{j'=1}^{T}\sum_{l=1}^{k'}\widetilde{C}_{i'j'}\cdot x_{i'j'l}\right)\cdot\sum_{j=1}^{T}x_{ijk+1}\cdot\left(j+\frac{\left(\sum_{j=1}^{T}\sum_{l=1}^{k}\widetilde{C}_{ij}\cdot x_{ijl}-\sum_{j'=1}^{T}\sum_{l=1}^{k'}\widetilde{C}_{i'j'}\cdot x_{i'j'l}\right)}{\left|\left(\sum_{j=1}^{T}\sum_{l=1}^{k}\widetilde{C}_{ij}\cdot x_{ijl}-\sum_{j'=1}^{T}\sum_{l=1}^{k'}\widetilde{C}_{i'j'}\cdot x_{i'j'l}\right)\right|}(MPS+1)\right)$$
$$>\left(\sum_{j=1}^{T}\sum_{l=1}^{k}\widetilde{C}_{ij}\cdot x_{ijl}-\sum_{j'=1}^{T}\sum_{l=1}^{k'}\widetilde{C}_{i'j'}\cdot x_{i'j'l}\right)\sum_{j'=1}^{T}x_{i'j'k'+1}\cdot j',\quad x_{ijk}\in\{0,1\} \qquad \cdots\cdots (3.4)$$

단,

$i, i' = 1,2,3,\cdots, B$: $k, k' = 1,2,3,\cdots, T-1$

2) 최종작업종료시간 최소화 모델 (모델2)

모델2는 퍼지 환경 하에서의 최종작업종료시간 최소화를 목적으로 하는 선석배정모델로서 식(3.5)~식(3.9)으로 정식화한다.

$$\text{minimize}\quad Q_m=\max_{1\le i\le B}\{\widetilde{Q}_i\} \qquad \cdots\cdots (3.5)$$

subject to

$$\sum_{i=1}^{B}\sum_{k=1}^{T}\widetilde{C}_{ij}\cdot x_{ijk}\le\widetilde{Q}_i,\quad i=1,2,3,\cdots,B \qquad \cdots\cdots (3.6)$$

$$\sum_{j=1}^{T}x_{ijk}=1,\quad j=1,2,3,\cdots,T \qquad \cdots\cdots (3.7)$$

$$\sum_{j=1}^{T}x_{ijk}=1 \qquad \cdots\cdots (3.8)$$

$$\left(\sum_{j=1}^{T}\sum_{l=1}^{k}\widetilde{C}_{ij}\cdot x_{ijl}-\sum_{j'=1}^{T}\sum_{l=1}^{k'}\widetilde{C}_{i'j'}\cdot x_{i'j'l}\right)\cdot\sum_{j=1}^{T}x_{ijk+1}\cdot\left(j+\frac{\left(\sum_{j=1}^{T}\sum_{l=1}^{k}\widetilde{C}_{ij}\cdot x_{ijl}-\sum_{j'=1}^{T}\sum_{l=1}^{k'}\widetilde{C}_{i'j'}\cdot x_{i'j'l}\right)}{\left|\left(\sum_{j=1}^{T}\sum_{l=1}^{k}\widetilde{C}_{ij}\cdot x_{ijl}-\sum_{j'=1}^{T}\sum_{l=1}^{k'}\widetilde{C}_{i'j'}\cdot x_{i'j'l}\right)\right|}(MPS+1)\right)$$
$$>\left(\sum_{j=1}^{T}\sum_{l=1}^{k}\widetilde{C}_{ij}\cdot x_{ijl}-\sum_{j'=1}^{T}\sum_{l=1}^{k'}\widetilde{C}_{i'j'}\cdot x_{i'j'l}\right)\sum_{j'=1}^{T}x_{i'j'k'+1}\cdot j',\quad x_{ijk}\in\{0,1\} \qquad \cdots\cdots (3.9)$$

단,

$i, i' = 1,2,3,\cdots, B$: $k, k' = 1,2,3,\cdots, T-1$

모델2는 $\min_{1 \le i \le B}\{\widetilde{S}_i\}$ 로부터 계획대상 전체의 선박이 하역을 끝낼 때까지의 시간을 최소화하는 문제이다. 모델2은 선형계획법의 형태를 취하고 있지 않으며, 최적해는 비다항식 차원의 계산량이 필요하다.

본 연구에서 제시한 2가지 모델에 있어서 모델1의 경우는 퍼지 0-1 정수계획법의 형태를 취하고 있으나, MPS제약식에 의해 해를 구하기 곤란한 형태를 취하고 있다. 모델2는 선형계획법 형태로 전환이 가능하나 MPS 제약으로 인하여 최적해를 도출하기 곤란한 형태를 지니고 있다.

3.3 퍼지 0-1 선석할당계획법

선석할당문제는 목표를 가능적으로 만족시키는 정도가 최대인 해를 구하는 문제라고 해석할 수 있다. 이 해석에 기초하여 선형의 퍼지목표 b_i와 허용변동폭 d_i에서 선형적으로 감소하는 멤버쉽함수를 가정하여 새로운 변수 h를 도입하면 식(3.10)는 다음과 같이 h의 최대화 문제로 정식화 할 수 있다.

maximize h

subject to

$$\sum_{j=1}^{n} a_{ij}x_j - (1-h)\sum_{j=1}^{n} c_{ij}x_j \le b_i + (1-h)d_i$$

$$\sum_{i=1}^{B}\sum_{k=1}^{T} x_{ijk} = 1, \quad j = 1,2,3,\cdots,T$$

$$\sum_{j=1}^{T} x_{ijk} \le 1, \; i = 1,2,3,\cdots,B : k = 1,2,3,\cdots,T$$

$$\{\sum_{j=1}^{T}\sum_{l=1}^{k}\widetilde{C}_{ij}\cdot x_{ijl} - \sum_{j'=1}^{T}\sum_{l=1}^{k'}\widetilde{C}_{i'j'}\cdot x_{i'j'l}\}\cdot\sum_{j=1}^{T}x_{ijk+1}$$

$$\cdot\{j + \frac{(\sum_{j=1}^{T}\sum_{l=1}^{k}\widetilde{C}_{ij}\cdot x_{ijl} - \sum_{j'=1}^{T}\sum_{l=1}^{k'}\widetilde{C}_{i'j'}\cdot x_{i'j'l})}{|(\sum_{j=1}^{T}\sum_{l=1}^{k}\widetilde{C}_{ij}\cdot x_{ijl} - \sum_{j'=1}^{T}\sum_{l=1}^{k'}\widetilde{C}_{i'j'}\cdot x_{i'j'l})|}(MPS+1)\}$$

$$> \{\sum_{j=1}^{T}\sum_{l=1}^{k}\widetilde{C}_{ij}\cdot x_{ijl} - \sum_{j'=1}^{T}\sum_{l=1}^{k'}\widetilde{C}_{i'j'}\cdot x_{i'j'l}\}\sum_{j'=1}^{T}x_{i'j'k'+1}\cdot j', \; x_{ijk}\in\{0,1\} \qquad \cdots\cdots (3.10)$$

단,

$i, i' = 1,2,3,\cdots, B : k, k' = 1,2,3,\cdots, T-1$

새로운 변수 h를 도입하므로서 h의 최대화 문제로 되어 혼합정수계획문제로 귀착됨을 알 수 있다. 이 최대화 문제는 비선형계획문제이나 h에 값을 주면 선형계획문제로 되어 분지한계법에 따라 해를 구할 수 있다.

3.4 발견적 알고리즘의 개발

퍼지 환경하에서 계류시간을 알고 있고, 선박의 도착순서를 고려하지 않을 경우에 계류시간이 짧은 선박을 우선적으로 할당하는 것이 유리하다. 이 원칙을 기초로 하여 발견적 알고리즘을 개발하였다.

단계 1 : 의사결정자의 희망수준과 허용변동폭을 결정한다. h-level을 정한다.

단계 2 : 퍼지수로 주어진 계류시간 및 계류시간의 폭을 고려하여 선박 j의 각 선석에 있 어서 퍼지수로 표현된 최소계류시간을 구한다.

$$\min_{0 \le i \le B}\{\widetilde{C}_{ij} - (1-h) * wid\_\widetilde{c}_{ij}\}$$

그리고, 이를 전체 선박에 대하여 계산하며, 선박의 최소계류시간이 동일한 경우에는 도착시간을 고려하여 재항시간이 긴 쪽 을 우선한다. 최소계류시간의 순으로 선박을 재정렬한다.

단계 3 : $F_i = 0$, $\widetilde{G}_i = 0$ $(i = 1,2,3,\cdots,B)$ 로 둔다.

$x_{ijk} = 0$

$(i = 1,2,3,\cdots,B; j, k = 1,2,3,\cdots,T)$

. $j = 1$로 둔다.

단계 4 : $|j-k| <$ MPS를 만족하는 선박 j를 구한다.

단계 5 : $\min_{0 \le i \le B}\{\widetilde{S}_i - \widetilde{A}_j + \widetilde{G}_i + \widetilde{C}_{ij}\}$인 I를 구한다. 단, $\widetilde{A}_j$의 경우 퍼지수로 주 어진 대기시간 및 대기시간의 폭을 고려하여 계산한다.

$\{\widetilde{A}_{ij} - (1-h) * wid\_\widetilde{a}_{ij}\}$

단계 6 : $\widetilde{G}_i = \widetilde{G}_i + \widetilde{C}_{ij}$, $F_i = F_i + 1$, $k = F_i$, $x_{ijk} = 1$로 한다.

단계 7 : $j = T$라면 단계 8로, $j < T$이면, $j = j + 1$로 두고 단계 5로 돌아간다.

단계 8 : b_i, d_i에서의 최대만족도를 구한다.

4. 적용예 및 종합적인 고찰

4.1 최적해법의 적용예

Table 4.1은 계류시간 및 대기시간에 관한 퍼지 정보를 사용하여 MPS별로 할당형태 및 목적함수치를 정리해 보인다.

4.2 발견적 알고리즘의 적용예

선박 40척 경우의 발견적 알고리즘으로 구한 할당형태 및 목적함수치를 Table 4.2에 보인다.

4.3 BCTOC 적용실예

본 연구에서 제안한 발견적 알고리즘으로 실제 계획기간을 96년도 01월 01일 00시부터 01월 15일 24시까지 BCTOC에 입항한 선박 62척을 대상으로 BCTOC에서 실제로 선석할당이 이루어진 상황과 제안한 알고리즘으로 선석할당계획을 수립하였을 때의 결과를 비교분석해 보고자 한다.

실제 BCTOC에서 이루어진 선석할당형태와 총재항시간은 Table 4.3과 같이 21,140시간으로 나타났다.

Table 4.1 Berth allocation type and objective value for 40 ships by enumeration method

(b_i: 9000, d_i: 500)

MPS	Berth	Index set	Objective value	Degree of Satisfaction
15	A	2, 4, 6, 8, 10, 38, 16, 13, 19, 35, 17, 24, 39, 30, 37, 21, 26, 33, 40, 32	[8513, 9434, 10355]	0.69
	B	1, 3, 5, 7, 9, 11, 12, 28, 14, 15, 18, 34, 29, 25, 20, 36, 22, 23, 27, 31		
39	A	38, 16, 39, 24, 4, 2, 19, 35, 13, 17, 10, 26, 8, 30, 37, 40, 21, 33, 32, 6,	[8331, 9272, 10213]	0.811
	B	28, 34, 29, 12, 7, 9, 25, 19, 20, 3, 11, 27, 14, 36, 1, 15, 23, 31, 5, 22		

Table 4-2 Berth allocation type and objective value for 40 ships by heuristic method

(b_i: 9000, d_i: 500)

MPS	Berth	Index Set	Objective value	Degree of satisfaction
15	A	16, 17, 19, 13, 24, 4, 2, 1, 3, 5, 35, 38, 10, 39, 15, 37, 26, 21, 40, 33	[8482, 9465, 10448]	0.686
	B	12, 18, 9, 7, 25, 27, 28, 29, 20, 34, 6, 8, 11, 36, 14, 31, 30, 23, 22, 32		
39	A	38, 16, 39, 35, 24, 19, 17, 13, 4, 2, 37, 30, 26, 10, 8, 40, 33, 21, 32, 6	[8331, 9272, 10213]	0.811
	B	28, 34, 29, 25, 18, 12, 9, 7, 36, 27, 20, 14, 11, 3, 1, 31, 23, 15, 22, 5		

Table 4.3 Berth allocation type and objective value for BCTOC

Berth	Index set	Objective values
1	2, 10, 19, 23, 29, 31, 1, 33, 40, 45, 49, 46, 59, 53	[19763, 21140, 22517]
2	4, 8, 13, 12, 7, 22, 27, 18, 34, 37, 47, 41, 51, 54, 57, 60, 62,	
3	3, 11, 9, 17, 20, 26, 30, 25, 48, 35, 43, 44, 56, 58, 61	
4	6, 14, 5, 15, 16, 21, 28, 24, 32, 36, 39, 42, 38, 50, 52, 55	

Table 4.4 Objective value of the proposed algorithm by MPS for BCTOC (b_i : 19500, d_i : 1500)

MPS	Objective values	Degree of Satisfaction
0	[19623, 20939, 22255]	0.489
1	[19572, 20884, 22196]	0.508
8	[19176, 20447, 21718]	0.658
9	[19102, 20366, 21630]	0.687
14	[18892, 20132, 21372]	0.769
15	[18868, 20105, 21342]	0.779

Table 4.5 Objective value of enumeration and heuristic method

Ship	MPS	Enumeration method (A)	Heuristic method (B)	$\frac{\{(B)-(A)\}}{(A)} \times 100$
20ships	1	[1973, 2408, 2843]	[2007, 2447, 2887]	1.7(39 hrs)
	5	[1921, 2219, 2517]	[1926, 2257, 2588]	1.7(38 hrs)
	19	[1714, 2104, 2493]	[1714, 2104, 2494]	0.0(00 hrs)
40ships	15	[6945, 7730, 8515]	[8482, 9465, 10448]	0.3(31 hrs)
	30	[8339, 9280, 10221]	[8339, 9285, 10231]	0.1(05 hrs)
	39	[8331, 9272, 10213]	[8331, 9272, 10213]	0.0(00 hrs)

한편, 제안한 발견적 알고리즘으로 선석할당계획을 수립하였을 경우 Table 4.4에서와 같이 총재항시간이 20,939시간 이하로 나타나고 있어 계획기간동안 BCTOC에서 이루어진 선석할당계획보다 총재항시간 측면에서 상당히 효율적인 선석할당계획을 수립할 수 있음을 알 수 있다.

4.4 선석할당계획에 관한 종합적인 고찰

Table 4.5와 같이 발견적 알고리즘으로 구한 해와 최적해법으로 구한 목적함수치의 오차의 계산은 계산의 복잡성을 고려하여 퍼지수를 통상대표수로 변환하여 실수간의 연산으로 계산하였다. 그 결과 본 연구에서 채택한 예제를 중심으로 살펴보면 약 2%정도의 오차를 보이고 있어 상당히 정밀도가 높다는 것을 알 수 있다.

실제 선석할당계획 수립시 항만의 이용자와 운영자가 어느 정도 만족할 수 있는 순서변동허용폭을 MPS=5로 가정하여 FIFO방식과 비교하기 위해 대상선박의 평균재항시간으로 나누어 선박척수로 환산한 결과 그 효과는 약 2척의 선박을 추가 할당할 수 있으므로 항만운영 효율성에 지대한 영향을 미치며, 이로 인한 경제적인 효과도 클 것으로 사료된다.

한편, 퍼지 모델에 있어서 멤버쉽함수치 h=1.0인

경우에는 h-level 집합의 폭은 0이 되어 비퍼지 모델로 구한 목적함수치가 되므로 비퍼지 모델의 목적함수치는 퍼지집합의 멤버쉽함수가 취할 수 있는 값의 일부분이다. 따라서, 퍼지 모델의 경우는 h-level의 값을 주는 방법에 따라 애매성을 조정할 수 있으므로 현실문제에 적용시 보다 합리적인 해를 구할 수 있다.

5. 결 론

선석배정문제에 관한 기존의 연구들은 모든 파라메타들을 명확히 알 수 있고, 확정치로 나타낼 수 있다는 가정하에서 일반적인 수리계획법으로 그 해를 구하여 왔다. 그러나, 현실문제에 있어서 선박의 계류시간 및 도착시간 등은 기상의 변화, 선박의 고장, 하역기기의 고장, 보관장소의 부족 및 내륙연계수송의 미비 등의 여러 가지 요인으로 인하여 확정치로서 나타내기 어렵다. 즉, 선박의 도착시간 및 계류시간에 관한 정보에 애매성(fuzziness)이 개재되어 있으므로 확정영역을 가지고 있는 문제에 적용하는 일반적인 수리계획법으로 그 해를 구한다는 것은 비합리적이다. 따라서, 본 연구에서는 선박의 도착시간 및 계류시간을 퍼지수로 간주하여 보다 합리적인 선석배정계획을 수립하기 위하여 퍼지 선석배정모델로 확장하였다.

또한, 퍼지 선석배정문제의 성격상 문제 그 자체가 애매한 것이고, 최적해법의 경우 문제의 규모가 커지면 계산량이 기하급수적으로 증가하고, 계류시간 및 도착시간의 변경 등의 현실적인 문제에 효율적으로 대응하기 어렵다. 따라서 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 보다 효율적이고 현실적인 발견적 알고리즘을 개발하였다.

본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. MPS개념을 도입하여 이용자와 항만관리자의 입장을 함께 반영할 수 있는 선석할당모델을 구성하였다.
2. 선석할당모델을 실용적인 측면에서 분석한 결과, 총재항시간 최소화 모델이 대표적인 선석할당모델임을 확인하였다.
3. 선박의 도착시간 및 계류시간에 관한 정보에 애매성(fuzziness)이 개재되어 있을 수가 있기 때문에 확정영역을 가지고 있는 문제에 적용하는 일반적인 수리계획법으로 그 해를 구한다는 것은 비합리적이므로 퍼지 선석할당모델로 확장하였다.
4. 퍼지 환경 하에서의 최적해법과 함께 실용적이고 효율적인 발견적 알고리즘을 개발하였다.
5. 실제 15일간 BCTOC에 입항한 62척의 선박을 대상으로 제안한 알고리즘을 적용한 결과 MPS=5인 경우 선박 1.5척, MPS=8인 경우 선박 2척, MPS=15인 경우 선박 3척정도를 추가 할당할 수 있다는 것을 확인하였다.

특히, 우리나라와 같이 선석부족으로 인한 만성적인 체증현상으로 물류비용의 부가적인 비용증가 등을 감소시키 위하여 항만기반시설의 확충 뿐만 아니라 본 연구에서 제안한 알고리즘에 의해 합리적인 선석할당계획을 수립하므로써 이러한 체증현상을 상당히 해소할 수 있을 것이다. 제안한 발견적 알고리즘은 비교적 단시간에 대규모 할당계획을 행하는 경우나 개인용 컴퓨터밖에 사용할 수 없는 경우도 유효하고, 특히 다른 연계시스템과의 연결을 고려할 때 탄력적으로 대응할 수 있으며, 현실문제에 있어서 정보의 애매성 및 불확실성을 함께 고려할 수 있는 보다 실용적이고 현실적인 방법이라 사료된다.

참고문헌

1) 李哲榮·李弘杰, "發見的 알고리즘에 의한 컨테이너 터미널의 船席配定에 關한 硏究", 韓國港灣學會誌, 第9卷, 第2號, 1995, pp.1-8.
2) 李哲榮·尹明五, "海上交通量의 效率的 管理方案에 關한 硏究 2)一般水路의 境遇", 韓國航海學會誌, 第15卷, 第2號, 1991, pp.1-11.
3) 李哲榮·禹柄久, "港灣荷役 勞動力의 最適配分에 關한 硏究 1)船舶群의 境遇", 韓國航海學會誌, 第13卷, 第3號, 1989.
4) 淺居喜代治·田中英夫, ファジィOR, 日刊工業新聞社, 1993.
5) 本多中二·大里有生, ファジィ工學入門, 海文堂,

1989.

6) 岡田眞幸·玄光男, "ファジィ多次元 0-1 ナップサック問題의 解法", 日本ファジィ學會誌, Vol.6, No.6, 1994, pp.1171-1181.

7) Nagaiwa, K. and Imai, A., "A Berth Assignment Planning for a Public Container Terminal", Journal of Navigation, Vol.90, 1994.

8) Zimmerman, H.J. and Pollatschek, M.A., "Fuzzy 0-1 Linear Programs", Management Science, Vol.20, 1984, pp.133-145.

9) Okada, S. and Gen, M., "Fuzzy Multiple Choice Knapsack Problem", Fuzzy Sets and Systems, Vol.67, 1994, pp.71-80.

10) Frankel, E.G., Port Planning and Development, A Wiley Interscience Publication, 1987, pp.362-371.